

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ**

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΘΟΔΟΥ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ  
ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ**

**ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**

**ΣΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
«ΓΕΩΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ»**

**ΜΑΡΚΟΣ ΝΤΟΥΚΑΚΗΣ**

**ΦΥΣΙΚΟΣ ΚΑΙ ΣΥΝΤΗΡΗΤΗΣ ΑΡΧΑΙΟΤΗΤΩΝ**

**ΧΑΝΙΑ  
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2019**

| ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ |       |   | Σελίδα |
|-------------|-------|---|--------|
|             |       | Εισαγωγή  | 1      |
| 1           |       | Εντοπισμός του μαγνητικού πεδίου θραυσμάτων κεραμικής και σερπεντινίτη και διερεύνηση της κατευθυντικότητάς του με τη χρήση ενός αισθητήρα fluxgate                               | 2      |
|             | 1.1   | Οργανολογία   | 3      |
|             | 1.2   | Εντοπισμός του μαγνητικού πεδίου θραυσμάτων αγγείων και σερπεντινίτη  | 4      |
|             | 1.3   | Διερεύνηση της κατευθυντικότητας του μαγνητικού πεδίου θραυσμάτων αγγείων και σερπεντινίτη  | 7      |
| 2           |       | Υπολογισμός της θερμοπαραμένουσας μαγνήτισης από μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου θραυσμάτων αγγείων με 3 αισθητήρες fluxgate σε τρισσορθογώνια διάταξη                            | 17     |
|             | 2.1   | Πειραματικές διατάξεις/οργανολογία  | 17     |
|             | 2.2   | Διερεύνηση της εξάρτησης του μετρούμενου μαγνητικού πεδίου από την παραμένουσα θερμομαγνήτιση του κεραμικού υλικού, σε θραύσματα και δοκίμια από τις βάσεις των αγγείων 4,5 και 6 | 19     |
|             | 2.2.1 | Διερεύνηση του εύρους και του βαθμού ανισοτροπίας της περιοχής του κεραμικού υλικού που διεγείρει τους αισθητήρες   | 20     |
|             | 2.2.2 | Διερεύνηση της συνεισφοράς της επαγόμενης μαγνήτισης του κεραμικού υλικού στις μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου  | 23     |
|             | 2.2.3 | Διερεύνηση της εξάρτησης της περιοχής του κεραμικού υλικού που διεγείρει τους αισθητήρες από το πάχος των οστράκων.   | 25     |
|             | 2.2.4 | Διερεύνηση της εξάρτησης της περιοχής του κεραμικού υλικού που διεγείρει τους αισθητήρες από τη θέση τους στην επιφάνεια των οστράκων   | 29     |
|             | 2.2.5 | Διερεύνηση της εξάρτησης του μετρούμενου μαγνητικού πεδίου από την διαφορετική τοποθέτηση των αισθητήρων στην επιφάνεια των δοκιμίων  | 31     |
|             | 2.3   | Θεώρηση της περιοχής του κεραμικού υλικού που διεγείρει τους αισθητήρες για τον υπολογισμό της μαγνήτισης από τις μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου                                 | 36     |
|             | 2.4   | Υπολογισμός της μαγνήτισης σε ακανόνιστα θραύσματα της βάσης των αγγείων 1,2 & 3  | 44     |
|             | 2.5   | Σύνοψη των πειραματικών αποτελεσμάτων του υπολογισμού της παραμένουσας μαγνήτισης σε δοκίμια και θραύσματα της βάσης των αγγείων 1-6  | 47     |
|             | 2.6   | Υπολογισμός της μαγνήτισης σε όστρακα του σώματος των αγγείων 1-6   | 50     |
| 3           |       | Εντοπισμός της θέσης των οστράκων στο σώμα του αγγείου από την κατευθυντικότητα της παραμένουσας μαγνήτισης   | 59     |
|             | 3.1   | Διαμόρφωση της παραμένουσας μαγνήτισης σε αγγεία με κυλινδρική συμμετρία  | 60     |
|             | 3.2   | Διαμόρφωση της παραμένουσας μαγνήτισης σε αγγεία με τυχούσα περιστροφική συμμετρία  | 61     |
|             | 3.3   | Εύρεση των συνανηγόντων οστράκων και της θέσης τους στα σώματα των αγγείων από τη θερμοπαραμένουσα μαγνήτισή τους   | 62     |
|             | 3.4   | Συμπεράσματα και προτάσεις μελλοντικής έρευνας  | 78     |

| Παράρτημα Α |      | Μαγνητική συμπεριφορά των υλικών                            |    |
|-------------|------|---|----|
|             |      | Εισαγωγή  | 1  |
| A1          |      | Διαμαγνητισμός  | 5  |
| A2          |      | Παραμαγνητισμός   | 9  |
|             | A2.1 | Κλασική προσέγγιση του παραμαγνητισμού                      | 9  |
|             | A2.2 | Κβαντική προσέγγιση του παραμαγνητισμού                     | 12 |
| A3          |      | Σιδηρομαγνητισμός   | 19 |
|             | A3.1 | Κλασική προσέγγιση του σιδηρομαγνητισμού                    | 20 |
|             | A3.2 | Κβαντική προσέγγιση του σιδηρομαγνητισμού                   | 23 |
|             | A3.3 | Προέλευση του «μοριακού» πεδίου του Weiss                   | 27 |
|             | A3.4 | Μορφολογία και συμπεριφορά των σιδηρομαγνητικών περιοχών    | 41 |
|             | A3.5 | Κατηγορίες φυσικών μαγνητίσεων                              | 51 |
|             | A3.6 | Μαγνητικές ιδιότητες του σερπεντινίτη και του ψημένου πηλού | 52 |
| Παράρτημα Β |      | Συμπληρωματικά πειραματικά αποτελέσματα                     |    |

**ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ**

**Α. Βαφείδης**  
**Γ. Αλεβίζος**  
**Π. Παρτσινέβελος**  
**Α. Φιλιππίδης**  
**Ε. Μανούτσογλου**  
**Α. Σαρρής**  
**Η. Hamdan**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ**

**Θ. Μαρκόπουλος**

**Ευχαριστήρια**

Ευχαριστώ τον καθηγητή κ. Απόστολο Παντινάκη για τη συνδρομή του και την ανεκτίμητη βοήθειά του για την εκπόνηση της διατριβής. Τους καθηγητές κ. Θεόδωρο Μαρκόπουλο και κ. Αντώνη Βαφείδη για την καθοδήγηση και τις πολύτιμες συμβουλές τους. Τους ζωγράφους και συντηρητές κ. Νίκο Κάιλα και κ. Σταύρο Μπαλτογιάννη για τη στήριξη τους σε δύσκολες στιγμές και κυρίως την αγαπημένη μου κ. Σπυριδούλα Κοτσώνα.

## Εισαγωγή

Παρότι η συναρμολόγηση των ανασκαφικών θραυσμάτων από τη θερμοπαραμένουσα μαγνήτισή τους προτείνεται ως θεωρητικά δόκιμη μέθοδος στη διεθνή βιβλιογραφία [1], ελάχιστες παλαιότερες (1975) αναφορές [2] υπάρχουν και μόνο σε επίπεδο ερευνητικής προσέγγισης.

Από τη δεκαετία του 80, η διερεύνηση της θερμομαγνήτισης στον τομέα της αρχαιομετρίας, επικεντρώνεται στη χρονολόγηση κεραμικών πλακιδίων από κλιβάνους, ενώ σε πολυάριθμες δημοσιεύσεις [3-33] η ανασυγκρότηση των αγγείων επιχειρείται σχεδόν αποκλειστικά με αλγόριθμους επεξεργασίας οπτικών δεδομένων που βασίζονται σε δεδομένα της μορφολογίας των οστράκων. Παρά το έντονο επιστημονικό ενδιαφέρον της επίλυσης του ζητήματος με τη διερεύνηση των δυνατοτήτων της νέας ψηφιακής τεχνολογίας, εξακολουθεί να παραμένει μια αποκλειστικά εμπειρική διεργασία, λόγω του χρόνου, της πληθώρας και της πολυπλοκότητας των δεδομένων που απαιτούν οι προτεινόμενες μέθοδοι για να τεθούν σε πρακτική εφαρμογή. Βασικό ζητούμενο και προαπαιτούμενο της συναρμογής των θραυσμάτων (οστράκων), δεν αποτελεί η εύρεση της θέσης τους, αλλά η διαλογή των συνανηγόντων οστράκων από τα πολυάριθμα κεραμικά θραύσματα των αρχαιολογικών ανασκαφών, που εκτελείται εμπειρικά και με δυσκολία, ιδιαίτερα στις περιπτώσεις ευρημάτων από χρονίζουσες ανασκαφές ή από ανασκαφές με διαταραγμένα ανασκαφικά στρώματα.

Στην παρούσα μελέτη εξετάζεται το μέτρο και η κατευθυντικότητα της θερμοπαραμένουσας μαγνήτισης των θραυσμάτων που προσανατολίζεται στην κατεύθυνση του γεωμαγνητικού πεδίου κατά την όπτηση των αγγείων και διαμορφώνεται από την περιστροφική συμμετρία τους, ως κριτήρια για την εύρεση των συνανηγόντων ανασκαφικών οστράκων και της θέσης τους στα σώματα των αγγείων.

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο πειραματικής φυσικής της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πολυτεχνείου Κρήτης. Χρησιμοποιήθηκαν αισθητήρες τύπου fluxgate για μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου σε θραύσματα σερπεντινίτη και σε όστρακα από 6 αγγεία των προηγούμενων 2 αιώνων που ψήθηκαν σε παραδοσιακούς ξυλόφουρνους.

Στην ενότητα 1 περιγράφεται η μεθοδολογία εντοπισμού του ασθενούς μαγνητικού πεδίου θραυσμάτων σερπεντινίτη και κεραμικών θραυσμάτων. Ο απροσδόκητα εύκολος προσανατολισμός των γειτονικών θραυσμάτων κατά τον τρόπο συναρμογής τους από την κατευθυντικότητα του μαγνητικού τους πεδίου με τη χρήση του ενός αισθητήρα fluxgate, παρά το ακανόνιστο σχήμα τους και την αναμενόμενη μαγνητική ανισοτροπία του υλικού, αποτέλεσε το κίνητρο για περαιτέρω έρευνα.

Στην ενότητα 2 περιγράφεται η τρισσορθογώνια διάταξη αισθητήρων/μαγνητών που κατασκευάστηκε για τη μέτρηση του ασθενούς (nT) μαγνητικού πεδίου των θραυσμάτων, εντός του κατά 1000 φορές μεγαλύτερου γήινου μαγνητικού πεδίου. Με μια σειρά πειραμάτων σε δοκίμια από τις βάσεις των αγγείων, διερευνήθηκε ο τρόπος διέγερσης των αισθητήρων και προσδιορίστηκε η περιοχή του κεραμικού υλικού που διεγείρει τους αισθητήρες για τον υπολογισμό της θερμοπαραμένουσας μαγνήτισης από τις μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου. Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα και συμπεράσματα, χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της μαγνήτισης σε θραύσματα ακανόνιστου σχήματος της βάσης και του σώματος των αγγείων.

Στην ενότητα 3 οι τιμές της μαγνήτισης στα θραύσματα του σώματος των αγγείων συσχετίζονται με την περιστροφική συμμετρία των αγγείων και υπολογίζεται μέσω μετασχηματισμών στροφής η θέση των οστράκων στα σώματα των αγγείων.

Για τη συστηματική διερεύνηση της μαγνήτισης των οστράκων και τη συσχέτιση των αποτελεσμάτων από κάθε πείραμα, όλες οι μετρήσεις λήφθηκαν με συγκεκριμένο προσανατολισμό των αισθητήρων και στις ίδιες θέσεις της βάσης και του σώματος των αγγείων.

Η μαγνητική συμπεριφορά των υλικών και τα συστατικά των θραυσμάτων κεραμικής και σερπεντινίτη στα οποία οφείλεται η θερμοπαραμένουσα μαγνήτισή τους, περιγράφονται στο Παράρτημα Α, με ποιοτικό και απλουστευμένο μαθηματικό τρόπο.

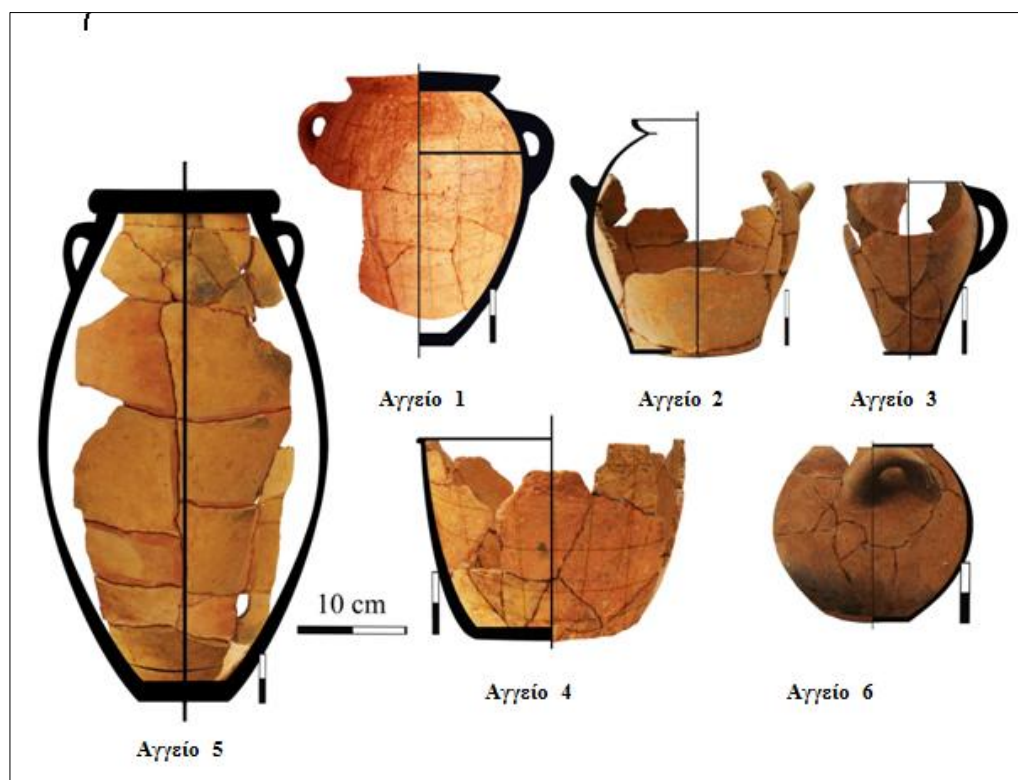
Συμπληρωματικές μετρήσεις των θραυσμάτων που δεν συμπεριλαμβάνονται στο κυρίως κείμενο, παρατίθενται στο παράρτημα Β.



## 1. Εντοπισμός του μαγνητικού πεδίου θραυσμάτων κεραμικής και σερπεντινίτη και διερεύνηση της κατευθυντικότητάς του με τη χρήση ενός αισθητήρα fluxgate

Το ασθενές μαγνητικό σήμα ( $nT$ ) περιστρεφόμενων θραυσμάτων κεραμικής και σερπεντινίτη εντοπίζεται [34–36] από τον έναν αισθητήρα του μαγνητόμετρου fluxgate<sup>1</sup> [37] που προσανατολίζεται κάθετα στην κατακόρυφη συνιστώσα και την οριζόντια συνισταμένη του γήινου μαγνητικού πεδίου, έτσι ώστε η ένδειξή του να είναι μηδενική πριν από την έναρξη των μετρήσεων. Για τον αποκλεισμό των πιθανών μαγνητικών παρεμβολών από τον εργαστηριακό χώρο, τα θραύσματα περιστρέφονται με συγκεκριμένη συχνότητα σε οριζόντια βάση, έτσι ώστε το μαγνητικό πεδίο τους να ανιχνεύεται ως περιοδικό σήμα στη συχνότητα περιστροφής του ηλεκτροκίνητου δίσκου, μέσω της τεχνικής [38] PSD (Phase Sensitive Detection).

Στη συνέχεια διερευνάται η κατευθυντικότητα του μαγνητικού πεδίου των συνανηγόντων θραυσμάτων με τη χρήση γωνιομετρικής διάταξης και του ενός αισθητήρα του μαγνητόμετρου, στην ίδια σταθερή θέση ως προς το μαγνητικό πεδίο της γης. Οι μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου λαμβάνονται (σχήμα 1) σε όστρακα των 6 αγγείων.

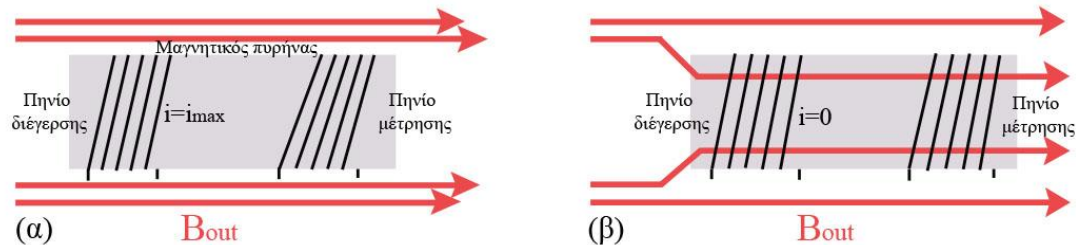


**Σχήμα 1.** Οι μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου λαμβάνονται σε όστρακα των 6 αγγείων των προηγούμενων 2 αιώνων, που είναι ψημένα σε παραδοσιακό ξυλόφουρνο.

<sup>1</sup> Model MAG 03 IE three independent axes fluxgate magnetometer, Bartington, Witney, Oxon, U. K.

## 1.1 Οργανολογία

Ο αισθητήρες fluxgate μετρούν τις διανυσματικές συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου. Τα κύρια μέρη κάθε αισθητήρα, αποτελούν ο μαγνητικός πυρήνας (**σχήμα 2**) που περιβάλλεται από το πηνίο μέτρησης και το πηνίο διέγερσης. Η μαγνητική κατάσταση του πυρήνα ελέγχεται με την επιβολή ενός αρμονικά μεταβαλλόμενου ηλεκτρικού ρεύματος στο πηνίο διέγερσης.



**Σχήμα 2.** Σχηματική απεικόνιση των καταστάσεων λειτουργίας του μαγνητόμετρου fluxgate.

Όταν το ρεύμα στο πηνίο διέγερσης γίνεται μέγιστο ( $i=i_{\max}$ ), ο μαγνητικός πυρήνας βρίσκεται σε κατάσταση κορεσμού (**σχήμα 2α**) και οι δυναμικές γραμμές του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου  $\vec{B}_{\text{out}}$  δεν εισέρχονται στον μεταλλικό πυρήνα. Όταν το ρεύμα στο πηνίο διέγερσης μηδενίζεται στιγμιαία ( $i=0$ ), οι δυναμικές γραμμές του πεδίου  $\vec{B}_{\text{out}}$  (**σχήμα 2β**) εισέρχονται στον μαγνητικό πυρήνα. Η μεταβολή της μαγνητικής ροής μεταξύ των δυο προηγούμενων καταστάσεων είναι ανάλογη του εξωτερικού πεδίου  $\vec{B}_{\text{out}}$  και καταγράφεται από το πηνίο μέτρησης.

Το συνολικό μαγνητικό πεδίο  $\vec{B}$  εντός του μαγνητικού πυρήνα με μαγνήτιση  $\vec{M}$ , προσδιορίζεται από τη σχέση (Παράρτημα Α/Εισαγωγή):  $\vec{B} = \mu_0 \cdot (\vec{H} + \vec{M})$

Αν  $\chi$  η μαγνητική επιδεκτικότητα όγκου του πυρήνα και  $\vec{M} = \chi \cdot \vec{H}$ , η προηγούμενη σχέση γράφεται:  $\vec{B} = \mu_0 \cdot (1 + \chi) \cdot \vec{H}$ . Αν  $\mu_r = 1 + \chi$ , η σχετική μαγνητική διαπερατότητα του πυρήνα, η παραπάνω σχέση γράφεται:

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \vec{H} \quad (1)$$

Αν  $N$  ο συντελεστής απομαγνήτισης (Παράρτημα Α/Α3.3) και  $\vec{H}_d = N \cdot \vec{M} = N \cdot \chi \cdot \vec{H}$  το πεδίο απομαγνήτισης, τότε το συνολικό πεδίο  $\vec{H}$  εντός του πυρήνα, υπολογίζεται:

$$\vec{H} = \vec{H}_{\text{out}} + \vec{H}_d \Rightarrow H = \frac{B_{\text{out}}}{\mu_0} - N \cdot \chi \cdot H \Leftrightarrow H = \frac{B_{\text{out}}}{\mu_0 \cdot (1 + \chi \cdot N)} \quad (2)$$

Με αντικατάσταση της σχέσης (2) στη σχέση (1), το συνολικό μαγνητικό πεδίο  $B$  υπολογίζεται:

$$B = \frac{\mu_r}{1 + \chi \cdot N} \cdot B_{\text{out}} = \frac{\mu_r}{1 + N \cdot (\mu_r - 1)} \cdot B_{\text{out}} \quad (3)$$

Αν  $A$  το εμβαδόν της διατομής και  $n$  ο αριθμός των σπειρών του πηνίου μέτρησης, η τάση  $V$  στα άκρα του είναι ανάλογη της χρονικής μεταβολής της μαγνητικής ροής, σύμφωνα με τη σχέση:

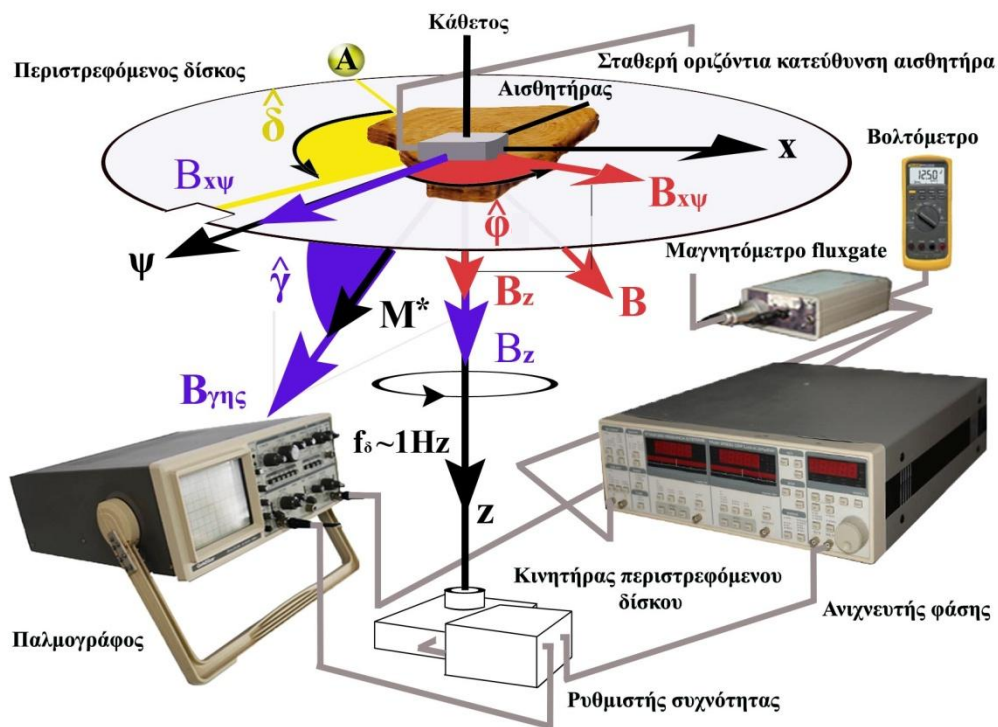
$$V = \frac{d\Phi}{dt} = n \cdot A \cdot \frac{dB}{dt} = n \cdot A \cdot \frac{(1 - N) \cdot \frac{d\mu_r}{dt}}{[1 + N \cdot (\mu_r - 1)]^2} \cdot B_{\text{out}} \quad (4)$$

Σύμφωνα με την παραπάνω σχέση, η συνιστώσα του πεδίου  $B_{\text{out}}$  στην κατεύθυνση του αισθητήρα είναι ανάλογη της μετρούμενης τάσης  $V$  στα άκρα του πηνίου και μπορεί να προσδιοριστεί εφόσον οι υπόλοιπες ποσότητες είναι γνωστές.

Το σημαντικότερο πρόβλημα στον εντοπισμό του ασθενούς (nT) μαγνητικού πεδίου των θραυσμάτων, αποτελεί η επικάλυψή του από το κατά 1000 περίπου φορές μεγαλύτερο σε ένταση μαγνητικό πεδίο της γης ( $B^{γης} \approx 42\mu T$ ), καθώς και οι πιθανές μαγνητικές παρεμβολές από τον εργαστηριακό χώρο.

### 1.2 Εντοπισμός του μαγνητικού πεδίου θραυσμάτων αγγείων και σερπεντινίτη

Για τον αποκλεισμό της μέτρησης του γήινου μαγνητικού πεδίου (σχήμα 3), ο οριζόντιος αισθητήρας προσανατολίζεται επί του θεωρούμενου x-άξονα, κάθετα στην κατακόρυφη συνιστώσα  $\vec{B}_z^{γης}$  και στην οριζόντια συνισταμένη  $\vec{B}_{x\psi}^{γης}$  του γήινου μαγνητικού πεδίου  $\vec{B}^{γης}$ , έτσι ώστε η ένδειξη του να είναι μηδενική πριν από την τοποθέτηση των θραυσμάτων. Αν  $\varphi_B$  η γωνία μεταξύ της οριζόντιας συνισταμένης  $\vec{B}_{x\psi}$  του μαγνητικού πεδίου  $\vec{B}$  του θραύσματος και του ψ-άξονα στο θεωρούμενο τρισσορθογώνιο σύστημα αναφοράς, ο αισθητήρας μετρά την x-συνιστώσα  $B_x = B_{x\psi} \cdot \eta \mu \varphi_B$  του πεδίου  $\vec{B}$ .



**Σχήμα 3.** Απεικόνιση του μαγνητικού πεδίου της γης ( $B_{γης}$ ) και του εντοπιζόμενου μαγνητικού πεδίου  $B_x = B_{x\psi} \cdot \eta \mu \varphi_B$  του θραύσματος από τον οριζόντιο x-αισθητήρα, κατά τη διάρκεια της περιστροφής του στη συχνότητα  $f_\delta \approx 1\text{Hz}$  του ηλεκτροκίνητου δίσκου. Η αρχική γωνία φάσης  $\delta$  του δίσκου εντοπίζεται μεταξύ του σταθερού σημείου A της περιστροφικής διάταξης και της εγχοπής του δίσκου. Η αρχική γωνία φάσης  $\varphi_B$  του μαγνητικού πεδίου  $\vec{B}$  εντοπίζεται μεταξύ της κάθετης διεύθυνσης του αισθητήρα στην κατεύθυνση του ψ-άξονα και της τυχούσας κατεύθυνσης της  $B_{x\psi}$  κατά την τοποθέτηση του θραύσματος στον δίσκο.

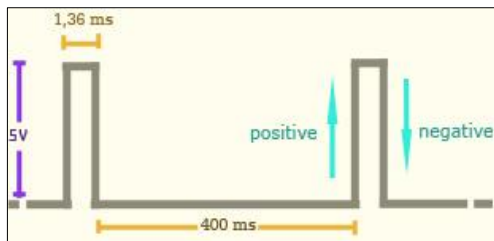
Για τον εντοπισμό του ασθενούς μαγνητικού σήματος και τον αποκλεισμό των πιθανών μαγνητικών παρεμβολών από τον εργαστηριακό χώρο, τα θραύσματα περιστρέφονται με καθορισμένη συχνότητα  $\omega_{\text{οστράκου}} = \omega$ , επί του οριζόντιου ηλεκτροκίνητου δίσκου. Εφόσον το μαγνητικό πεδίο  $\vec{B}$  των θραυσμάτων εμφανίζει σταθερή κατευθυντικότητα, μετατρέπεται σε περιοδικό σήμα και ανιχνεύεται στη συγκεκριμένη συχνότητα

περιστροφής του ηλεκτροκίνητου δίσκου, μέσω της τεχνικής [39] *Phase Sensitive Detection (PSD)*. Το μαγνητικό σήμα των θραυσμάτων που μετατρέπεται σε ηλεκτρικό ( $1\text{mV}/7\text{nT}$ ), εισάγεται σε ενισχυτή φάσης [40] (*Lock In Amplifier*) με όριο ανοχής τάσης/συχνότητας  $1\text{V}/100\text{KHz}$  και παρατηρείται σε παλμογράφο ( $1\text{mV}/\text{div}$  ή  $7\text{nT}/\text{div}$ ).

Στον ενισχυτή φάσης, εισάγονται ως σήμα αναφοράς, οι παραγόμενοι ασύμμετροι τετραγωνικοί ηλεκτρικοί παλμοί από την περιστροφή του δίσκου, συχνότητας  $f_\delta = \omega_\delta/2\pi \approx 1,3548 \pm 0,0001\text{Hz}$  που ανιχνεύονται μέσω εγκοπής στην περιφέρειά του, από σταθερό σημείο της περιστροφικής διάταξης.

Πρόκειται για επαναλαμβανόμενους (σχήμα 4) τετραγωνικούς παλμούς ανά  $400\text{ms}$  (περίοδος ανοικτού παλμού-space), πλάτους  $5\text{V}$  και διάρκειας (mark)  $1,36\text{ms}$ , που ο ανιχνευτής φάσης μετατρέπει μέσω ανάλυσης *fourier* σε ημιτονοειδή κυματομορφή συχνότητας  $f_\delta = 1\text{Hz}$  με ρυθμιζόμενο πλάτος  $V_\delta = 1\text{mV}$ .

Ο ανιχνευτής φάσης που παρέχει τη δυνατότητα επιλογής της περιόδου του ανοικτού παλμού, μεταξύ των θέσεων positive(p)-negative(n) και p-p ή n-n, ρυθμίζεται στη θέση p-p, παρότι το σφάλμα είναι μικρό, της τάξης  $1/400$  στη μέτρηση της διάρκειάς του. Η διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή φάσης ρυθμίζεται στα  $16\text{db}$  για την αποκοπή των υψηλότερων συχνοτήτων, μέσω της αύξησης της κλίσης ανόδου και καθόδου των παλμών.



**Σχήμα 4.** Σχηματική απεικόνιση του εισαγόμενου παλμού αναφοράς του περιστρεφόμενου δίσκου στον ανιχνευτή φάσης.

Αν  $\delta$  η αρχική γωνία φάσης μεταξύ της εγκοπής του περιστρεφόμενου δίσκου και του σταθερού σημείου εντοπισμού της συχνότητας περιστροφής του (σχήμα 3), το εισερχόμενο σήμα αναφοράς στον ανιχνευτή φάσης περιγράφεται από τη σχέση:  $V_\delta(t) = \eta \mu(\omega_\delta \cdot t + \delta)$

Αν  $\phi_B$  η αρχική γωνία μεταξύ της οριζόντιας συνισταμένης  $\vec{B}_{x\psi}$  του μαγνητικού πεδίου  $\vec{B}$  του θραύσματος και του  $\psi$ -άξονα κατά την τοποθέτησή του στον δίσκο, τότε το μαγνητικό σήμα απόκρισης του αισθητήρα κατά την περιστροφή του θραύσματος με συχνότητα  $\omega_o$ , περιγράφεται από τη σχέση:

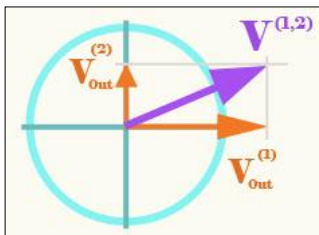
$$B_x(t) = B_{x\psi} \cdot \eta \mu(\omega_o \cdot t + \phi_B)$$

Ο παραγόμενος ηλεκτρικός παλμός  $V_o(t) = V \cdot \eta \mu(\omega_o \cdot t + \phi_B)$  από το περιστρεφόμενο θραύσμα, πολλαπλασιάζεται με το σήμα αναφοράς  $V_\delta(t) = \eta \mu(\omega_\delta \cdot t + \delta)$  του περιστρεφόμενου δίσκου και το πλάτος του γινομένου των σημάτων διπλασιάζεται, για τη δημιουργία ενός νέου σήματος  $V'(t)$  της μορφής:

$$V'(t) = V \cdot \eta \mu(\omega_\delta \cdot t + \delta) \cdot \eta \mu(\omega_o \cdot t + \phi_B) = V \cdot \left\{ \sin[(\omega_\delta - \omega_o) \cdot t + (\delta - \phi_B)] - \sin[(\omega_\delta + \omega_o) \cdot t + (\delta + \phi_B)] \right\}$$

Το σήμα  $V'(t)$  διέρχεται από φίλτρο χαμηλών συχνοτήτων (*Low-Pass*), για την αποκοπή των υψηλών συχνοτήτων ( $f_o + f_\delta$ ) και εφόσον η συχνότητα περιστροφής  $\omega_\delta$  του δίσκου είναι ίση με τη συχνότητα περιστροφής  $\omega_o$  του μαγνητικού πεδίου του θραύσματος, το παραγόμενο σήμα  $V_{LP}$  καθίσταται ανεξάρτητο του χρόνου  $t$ :

$$V_{LP} = V \cdot \sin(\delta - \phi_B)$$



**Σχήμα 5.** Σχηματική απεικόνιση του πλάτους  $V \equiv V^{(1,2)} = V_{out}^{(1)} + V_{out}^{(2)}$  του μετρούμενου ηλεκτρικού σήματος, από τις ενδείξεις στις οθόνες του ανιχνευτή φάσης.

Στο χρονοανεξάρτητο σήμα  $V_{LP} \equiv V_1^{out}$ , εισάγεται αυτόματα πρόσθετη φάση  $90^\circ$  ( $V_2^{out}$ ) και τα πλάτη των σημάτων  $V_1^{out} = V \cdot \sin(\delta - \phi_B)$  και  $V_2^{out} = V \cdot \sin(\delta - \phi_B + 90^\circ)$  απεικονίζονται στις δυο οθόνες (**σχήμα 5**) του ανιχνευτή φάσης. Στη διαφορά αρχικής φάσης  $\delta - \phi_B$  που ανιχνεύεται, γίνεται χειροκίνητα εισαγωγή πρόσθετης φάσης  $\theta = \phi_B - \delta$  και το πλάτος του σήματος  $V_{out}^{(1)} = V \cdot \sin(0^\circ) = V$  μεγιστοποιείται, όταν το σήμα  $V_{out}^{(2)} = V \cdot \sin(90^\circ) = 0$  μηδενίζεται στη δεύτερη οθόνη του ανιχνευτή φάσης.

Με τον αποκλεισμό της επίδρασης του μαγνητικού πεδίου της γης και των πιθανών μαγνητικών παρεμβολών του εργαστηριακού χώρου, μέσω της τεχνικής PSD διαπιστώνεται η παρουσία μόνιμου μαγνητικού πεδίου  $\vec{B}$ , από την καταγραφή σταθερών διαφορών φάσης  $\hat{\delta} - \hat{\phi}_B$ , μεταξύ του μαγνητικού σήματος των θραυσμάτων και του ηλεκτρικού σήματος αναφοράς από την περιστροφή του ηλεκτροκίνητου δίσκου.



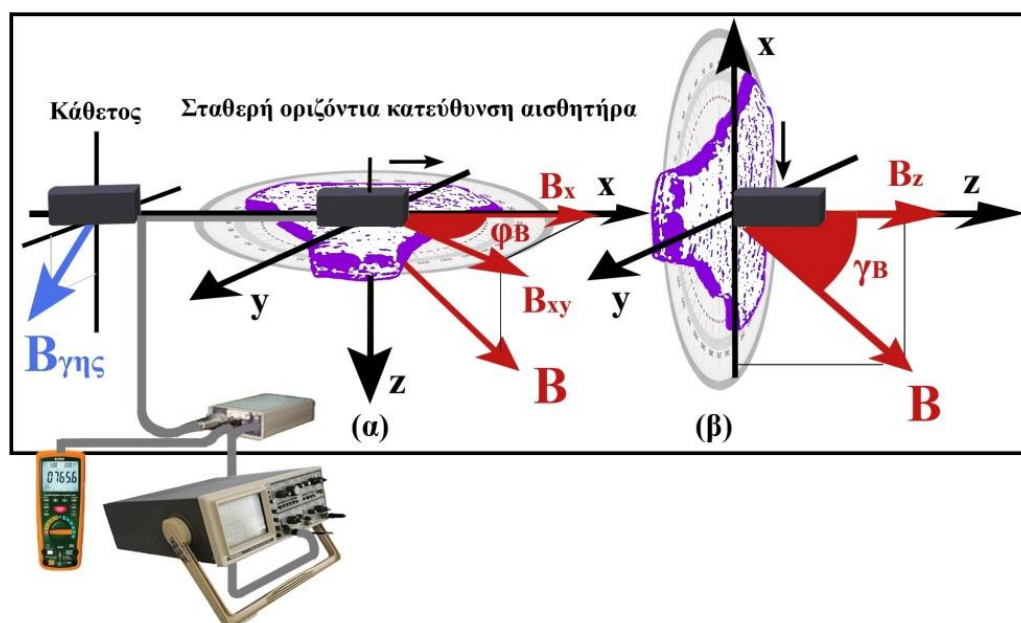
### 1.3 Διερεύνηση της κατευθυντικότητας του μαγνητικού πεδίου θραυσμάτων αγγείων και σερπεντινίτη

Εφόσον εντοπίζεται το ασθενές μαγνητικό πεδίο των θραυσμάτων, διερευνάται η κατευθυντικότητα του πεδίου των συνανηκόντων οστράκων, με τη χρήση του ενός αισθητήρα στην ίδια σταθερή θέση ως προς το γήινο μαγνητικό πεδίο. Με την ίδια πειραματική διάταξη λαμβάνονται 2 σειρές (Α και Β) μετρήσεων.

**Α.** Ο αισθητήρας προσανατολίζεται κάθετα στην οριζόντια συνισταμένη και στην κατακόρυφη συνιστώσα του γήινου μαγνητικού πεδίου (σχήματα 6,9), έτσι ώστε η ένδειξή του να είναι μηδενική. Η πιθανή επαγόμενη μαγνήτιση του κεραμικού υλικού από το μαγνητικό πεδίο της γης, προσανατολίζεται στην κατεύθυνση του  $\vec{B}^{γης}$ , καθέτως προς τον άξονα του x-αισθητήρα και δεν επηρεάζει τις ενδείξεις του.

Τα θραύσματα στηρίζονται σε κυκλική βάση γωνιομετρικής διάταξης, που στρέφεται χειροκίνητα επί του οριζόντιου επιπέδου γύρω από τον άξονα του αισθητήρα, λαμβάνοντας μετρήσεις από την περιοχή του θραύσματος που βρίσκεται στο κέντρο της. Το διαμορφωμένο ηλεκτρικό σήμα (1mV/7nT) του μαγνητικού πεδίου κατά την στροφή των θραυσμάτων, παρατηρείται στον παλμογράφο (1mV/div ή 7 nT/div) και μετριέται από βολτόμετρο με ακρίβεια  $\pm 0,1\text{mV}$  ή  $\pm 1\text{ nT}$ .

• Στην περίπτωση των θραυσμάτων από βάσεις αγγείων και σερπεντινίτη, οι μετρήσεις περιγράφονται με τη θεώρηση δεξιόστροφου τρισσορθογώνιου συστήματος αναφοράς<sup>2</sup> (σχήμα 6), όπου ο z-άξονας είναι κάθετος στα όστρακα, με φορά προς την εξωτερική επιφάνεια των θραυσμάτων.

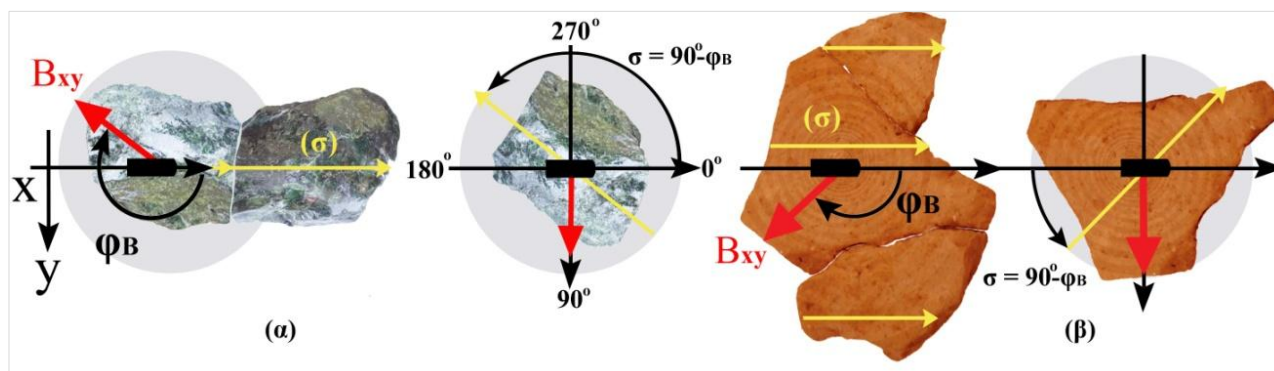


**Σχήμα 6.** Σχηματική απεικόνιση της διάταξης διερεύνησης της μεταβολής της παράλληλης  $\vec{B}_{xy}$  και τη κάθετης συνιστώσας  $\vec{B}_z$  στην επιφάνεια θραυσμάτων από βάσεις αγγείων κατά την στροφή τους (α) επί του οριζόντιου και (β) επί του κάθετου επιπέδου γύρω από τον αισθητήρα, με τον άξονά του κάθετο στην κατακόρυφη συνιστώσα και την οριζόντια συνισταμένη του γήινου μαγνητικού πεδίου.

<sup>2</sup> Η θεώρηση τρισσορθογώνιου συστήματος αναφοράς σε μετρήσεις με έναν αισθητήρα δεν είναι απαραίτητη. Γίνεται μόνο για τη διευκόλυνση της περιγραφής και της συσχέτισης των μετρήσεων μεταξύ διαφορετικών πειραμάτων.

Σε κάθε θέση στροφής της βάσης στήριξης του θραύσματος (σχήμα 6α), ο αισθητήρας καταγράφει το μέτρο της προβολής  $B_x = B_{xy} \cdot \sin \varphi_B$  της  $\vec{B}_{xy}$  συνιστώσας του πεδίου επί του x-άξονα.

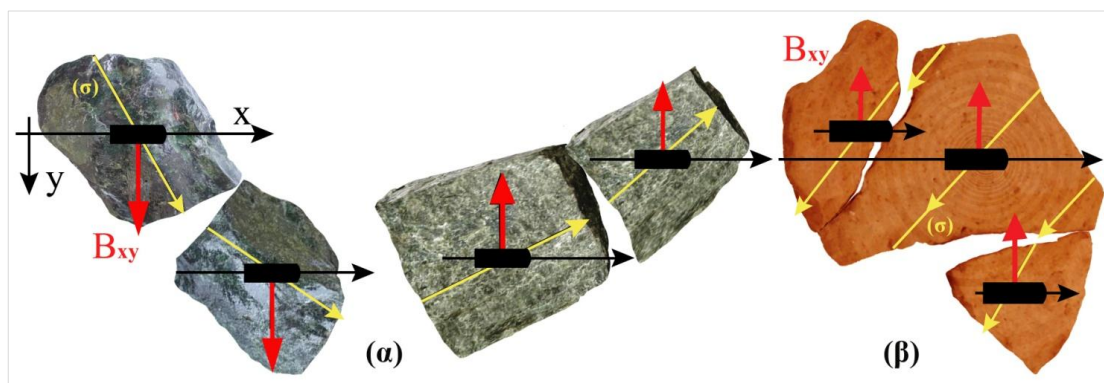
Σε κάθε ομάδα συγκολλημένων θραυσμάτων σερπεντινίτη (σχήμα 7α) και οστράκων από βάσεις αγγείων (σχήμα 7β), σημειώνονται συνεχόμενες παράλληλες ευθείες γραμμές, που ορίζουν μια τυχαία κοινή κατεύθυνση συναρμογής ( $\sigma$ ) στην οποία προσανατολίζονται τα θραύσματα κατά τον τρόπο που επαφίονται.



**Σχήμα 7.** Σχηματική απεικόνιση επί του οριζοντίου  $x\psi$ -επιπέδου, της μεθοδολογίας διερεύνησης της κατευθυντικότητας της  $\vec{B}_{xy}$  συνιστώσας του μαγνητικού πεδίου (α) συνανηκόντων θραυσμάτων σερπεντινίτη και (β) οστράκων της βάσης αγγείου.

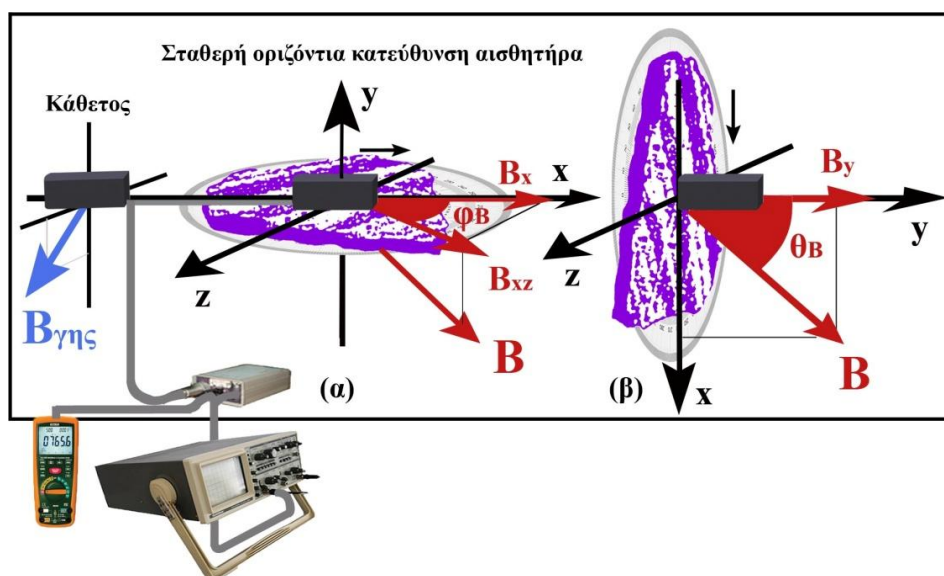
Κάθε θραύσμα στηρίζεται στην κυκλική οριζοντιωμένη βάση επί του επιπέδου  $x\psi$  και προσανατολίζεται στη θέση όπου η κατεύθυνση συναρμογής ( $\sigma$ ) συμπίπτει με την  $x$ -κατεύθυνση του αισθητήρα. Η κυκλική βάση στρέφεται περί του αισθητήρα, μέχρι η ένδειξη του αισθητήρα επί του  $x$ -άξονα μηδενιστεί, όταν  $\varphi_B = 90^\circ$ . Στη συγκεκριμένη θέση στροφής της κυκλικής βάσης, σημειώνεται επί της επιφάνειας του θραύσματος η κατεύθυνση όπου η  $\vec{B}_{xy}$  είναι κάθετη στην  $x$ -κατεύθυνση του αισθητήρα και μετριέται η προσανατολισμένη γωνία  $\sigma = 90^\circ - \varphi_B$  μεταξύ της κατεύθυνσης μηδενισμού της  $B_{xy}$  και της σημειωμένης κατεύθυνσης συναρμογής στην κυκλική βάση, με ακρίβεια  $\pm 1^\circ$ .

Από τα πειραματικά αποτελέσματα διαπιστώνεται ότι οι γωνίες  $\varphi_B = 90^\circ - \sigma$  μεταξύ της  $\vec{B}_{xy}$  κατά την αρχική τοποθέτηση των θραυσμάτων από βάσεις αγγείων και σερπεντινίτη στην κυκλική βάση και της  $x$ -κατεύθυνσης του αισθητήρα, εμφανίζουν παραπλήσιες τιμές. Κατά αντίστροφο τρόπο, αν τα γειτονικά θραύσματα τοποθετηθούν έτσι ώστε οι σημειωμένες οριζόντιες συνισταμένες  $\vec{B}_{xy}$  στην επιφάνειά τους λάβουν παράλληλες κατευθύνσεις (σχήμα 8), τότε τα θραύσματα προσανατολίζονται κατά τον τρόπο που συναρμόζουν.



**Σχήμα 8.** Απεικόνιση της οριζόντιας συνισταμένης  $\vec{B}_{xy}$  του μαγνητικού πεδίου γειτονικών θραυσμάτων (α) από 2 ομάδες σερπεντινίτη και (β) οστράκων βάσης του αγγείου 1 που εμφανίζουν παραπλήσια κατευθυντικότητα. Αν οι οριζόντιες συνισταμένες  $\vec{B}_{xy}$  των γειτονικών θραυσμάτων κάθε ομάδας τοποθετηθούν σε παράλληλες κατευθύνσεις, τα θραύσματα προσανατολίζονται στην κατεύθυνση που συναρμόζουν.

• Για τη διερεύνηση της κατευθυντικότητας του μαγνητικού πεδίου σε όστρακα από σώματα αγγείων, ακολουθείται η ίδια μεθοδολογία. Οι μετρήσεις στην περίπτωση αυτή περιγράφονται με τη θεώρηση διαφορετικού συστήματος αναφοράς<sup>3</sup> (σχήμα 9), όπου ο ψ-άξονας είναι κάθετος στα όστρακα, με φορά προς την εσωτερική επιφάνεια των θραυσμάτων.



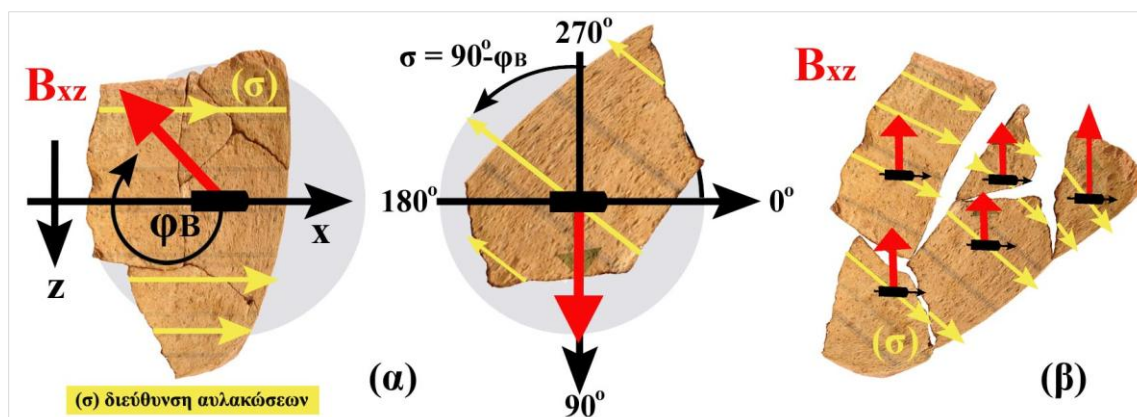
**Σχήμα 9.** Σχηματική απεικόνιση της διάταξης διερεύνησης της μεταβολής των  $\vec{B}_\psi$  και  $\vec{B}_{xz}$  σε όστρακα από σώματα αγγείων κατά την στροφή τους (α) επί του οριζόντιου και (β) επί του κατακόρυφου επιπέδου γύρω από τον αισθητήρα, με τον άξονά του κάθετο στην κατακόρυφη συνιστώσα και την οριζόντια συνισταμένη του γήινου μαγνητικού πεδίου.

Ο αισθητήρας (σχήμα 9α), καταγράφει το μέτρο της προβολής  $B_x = B_{xz} \cdot \sin \phi_B$  της  $\vec{B}_{xz}$  συνιστώσας του πεδίου επί του x-άξονα. Στα θραύσματα από σώματα αγγείων (σχήμα 10), την x-κατεύθυνση συναρμολογής (σ) ορίζουν οι εσωτερικές αυλακώσεις στην επιφάνεια των οστράκων. Με τον ίδιο τρόπο, υπολογίζεται η γωνία

<sup>3</sup> Η χρήση διαφορετικού συστήματος αναφοράς και άλλων συμβολισμών, γίνεται για τη διευκόλυνση της συσχέτισης των μετρήσεων μεταξύ διαφορετικών πειραμάτων.

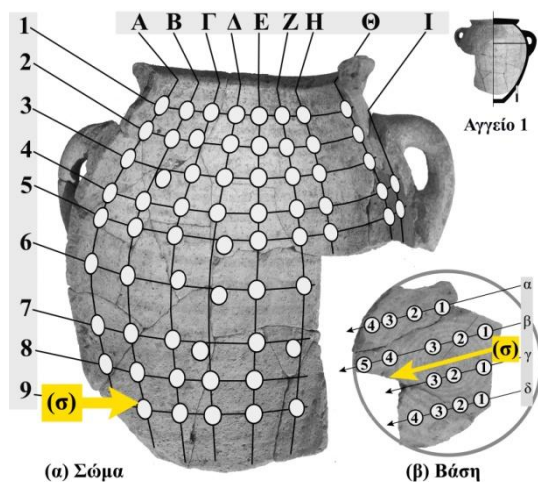


$\varphi_B = 90^\circ - \sigma$  μεταξύ της  $\vec{B}_{xz}$  και της x-κατεύθυνσης του αισθητήρα κατά την αρχική τοποθέτηση των θραυσμάτων στην κυκλική βάση.



**Σχήμα 10. (α)** Σχηματική απεικόνιση επί του xz-οριζοντίου επιπέδου, της μεθοδολογίας διερεύνησης της κατευθυντικότητας του μαγνητικού πεδίου συνανηγόντων θραυσμάτων από σώμα αγγείου. **(β)** Αν οι οριζόντιες συνισταμένες  $\vec{B}_{xz}$  των γειτονικών θραυσμάτων τοποθετηθούν σε παράλληλες κατευθύνσεις, τα θραύσματα προσανατολίζονται στις κατευθύνσεις που συναρμόζουν. Όμως αυτό ισχύει μόνο για γειτονικά όστρακα του σώματος, γιατί η κατευθυντικότητα του μαγνητικού τους πεδίου μεταβάλλεται όσο οι θέσεις λήψης των μετρήσεων είναι περισσότερο απομακρυσμένες.

Στην περίπτωση των οστράκων από σώματα αγγείων, η κατευθυντικότητα του μαγνητικού πεδίου (**σχήμα 10β**) είναι παραπλήσια μόνο σε γειτονικά θραύσματα. Οι υπολογιζόμενες γωνίες  $\varphi_B = 90^\circ - \sigma$  μεταξύ της  $\vec{B}_{xz}$  και της x-κατεύθυνσης του αισθητήρα μεταβάλλονται, όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση μεταξύ των θέσεων λήψης των μετρήσεων.

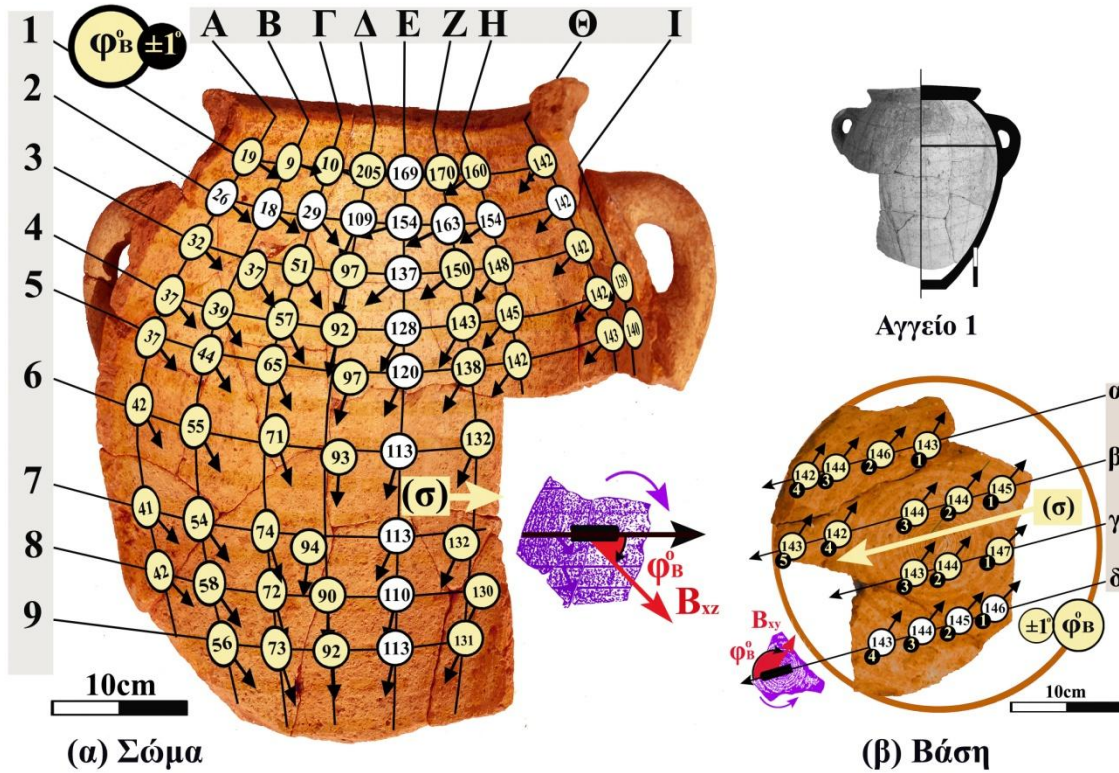


Για τη συστηματική διερεύνηση της κατευθυντικότητας του μαγνητικού πεδίου στο σώμα των 6 αγγείων, σημειώνονται κάθετες γραμμές (στήλες) σε επιλεγμένες αυλακώσεις (γραμμές) των συγκολλημένων αγγείων.

**Σχήμα 12. (α)** Στα θραύσματα του σώματος οι αυλακώσεις προσανατολίζονται στην κατεύθυνση του αισθητήρα και οι μετρήσεις λαμβάνονται στις ακμές του σχηματιζόμενου πλέγματος. **(β)** Στις βάσεις των αγγείων, οι θέσεις μέτρησης λαμβάνονται επί των παράλληλων ευθειών σε μια τυχαία κατεύθυνση συναρμογής ( $\sigma$ ), που προσανατολίζεται ο x-αισθητήρας, κατά την αρχική τοποθέτηση κάθε θραύσματος στη βάση της γωνιομετρικής διάταξης.

Για τη σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων μεταξύ των θέσεων μέτρησης στη βάση και στο σώμα, οι γωνίες  $\varphi_B$  παρατίθενται ενδεικτικά σε φωτογραφική απεικόνιση (**σχήμα 13**) του αγγείου 1. Τα πειραματικά αποτελέσματα των υπολοίπων αγγείων (2-6) παρατίθενται στα **σχήματα B1,B3,B5,B7 και B9** που περιέχονται στο Παράρτημα Β.

## ΑΓΓΕΙΟ 1



Σχήμα 13. Απεικόνιση των μετρούμενων γωνιών  $\varphi_B$  μεταξύ της  $\vec{B}_{xz}$  και των εγκάρσιων αυλακώσεων του σώματος

(α) και των γωνιών  $\varphi_B$  μεταξύ της  $\vec{B}_{xy}$  και της σημειωμένης κατεύθυνσης συναρμογής στα θραύσματα της βάσης (β) του αγγείου 1 στα θεωρούμενα συστήματα αναφοράς για τα όστρακα του σώματος και της βάσης των αγγείων. Οι μετρήσεις γίνονται από έναν αισθητήρα σε σταθερή οριζόντια θέση, καθέτως προς την κατακόρυφη συνιστώσα και την οριζόντια συνισταμένη του γήινου μαγνητικού πεδίου.

**B.** Με την ίδια πειραματική διάταξη υπολογίζεται η γωνία  $\gamma_B = \arcsin^{-1} \frac{B_z}{B}$  του μαγνητικού πεδίου

$B = \sqrt{B_{xy}^2 + B_z^2}$  και τα σφάλματα<sup>4</sup>  $\delta B, \delta \gamma_B$ , στις θέσεις μέτρησης της βάσης των αγγείων, από μετρήσεις της

<sup>4</sup> Το σφάλμα  $\delta B$  του πεδίου υπολογίζεται σε κάθε θέση μέτρησης, σύμφωνα με τη θεωρία μετάδοσης σφαλμάτων:

$$\delta B = \sqrt{\left(\frac{\partial B}{\partial B_{xy}}\right)^2 (\Delta B_{xy})^2 + \left(\frac{\partial B}{\partial B_z}\right)^2 (\Delta B_z)^2}, \text{ όπου:}$$

$$\frac{\partial B}{\partial B_{xy}} = (B_{xy}^2 + B_z^2)^{1/2} \cdot B_{xy}, \quad \frac{\partial B}{\partial B_z} = (B_{xy}^2 + B_z^2)^{1/2} \cdot B_z \quad \text{και} \quad \Delta B_z = \Delta B_{xy} = 1 \text{ nT} \quad (5a)$$

Το σφάλμα  $\delta \gamma_B$ , υπολογίζεται σύμφωνα με τη θεωρία μετάδοσης των σφαλμάτων από τη σχέση:

$$\delta \gamma_B = \sqrt{\left(\frac{\partial \gamma_B}{\partial B_z}\right)^2 (\Delta B_z)^2 + \left(\frac{\partial \gamma_B}{\partial B_{xy}}\right)^2 (\Delta B_{xy})^2} = \sqrt{\left[1 - \left(\frac{B_z}{B_{xy}}\right)^2\right]^{-1} \left[B_{xy}^{-2} (\Delta B_z)^2 + B_{xy}^{-4} B_z^2 (\delta B_{xy})^2\right]}, \quad (5b)$$

Τα σφάλματα των μετρούμενων μεγεθών  $G$  συμβολίζονται  $\Delta G$ . Τα σφάλματα των υπολογιζόμενων μεγεθών  $F$  με τη θεωρία μετάδοσης σφαλμάτων από τις πειραματικές μετρήσεις των μεγεθών  $G$ , συμβολίζονται  $\delta F$ .





Στις μετρήσεις των θραυσμάτων της βάσης των αγγείων, οι γραμμές κάθε υποπίνακα ( $\beta$ ) που επισημαίνονται με γράμματα, αντιστοιχούν σε παράλληλες ευθείες στην τυχαία κατεύθυνση συναρμογής των συνανηκόντων θραυσμάτων όπου προσανατολίζεται ο αισθητήρας, επί της οποίας επιλέγονται οι θέσεις μέτρησης που επισημαίνονται με αριθμούς.

Τα πειραματικά αποτελέσματα των υπολοίπων αγγείων (2-6) παρατίθενται στα **σχήματα B2,B4,B6,B8 και B10** και στους **πίνακες B1-B5** που περιέχονται στο Παράρτημα Β.

Όπως διαπιστώνεται από τα πειραματικά αποτελέσματα (σχήματα 13β, B1β,B3β,B5β,B7β,B9β και πίνακες 1β, B1β-B5β), οι γωνίες  $\phi_B$  μεταξύ της  $\vec{B}_{xy}$  και της x-κατεύθυνσης του αισθητήρα επί των τυχαίων διευθύνσεων συναρμογής των θραυσμάτων της βάσης διατηρούν σε κάθε αγγείο παραπλήσιες τιμές. Η εύρεση του προσανατολισμού συναρμογής των θραυσμάτων της βάσης, με τον εντοπισμό της κατεύθυνσης μηδενισμού της  $\vec{B}_{xy}$  συνιστώσας του μαγνητικού τους πεδίου από έναν κάθετο αισθητήρα στην κατακόρυφη συνιστώσα και την οριζόντια συνισταμένη του γήινου μαγνητικού πεδίου, μπορεί να γίνει εύκολα με τη γωνιομετρική διάταξη του σχήματος 6α, χωρίς να απαιτούνται μετρήσεις του μέτρου της  $\vec{B}_{xy}$ . Η μεθοδολογία θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την εύρεση του προσανατολισμού συναρμογής ανευρεθέντων οστράκων από βάσεις αγγείων σε αρχαιολογικές ανασκαφές. Αυτό δε θα ήταν ιδιαίτερα χρήσιμο για τα όστρακα βάσεων που η συναρμογή για τη συγκόλλησή τους μπορεί να γίνει ευκολότερα με εμπειρικό τρόπο, σε σύγκριση με τα συνανήκοντα όστρακα από σώματα αγγείων που εμφανίζουν ποικιλία σχημάτων και σώζονται σε μεγάλο αριθμό θραυσμάτων.

Όμως στην περίπτωση των οστράκων από σώματα αγγείων (σχήματα 13α, B1α,B3α,B5α,B7α,B9α και πίνακες 1α, B1α-B5α), οι μετρούμενες γωνίες  $\phi_B$  μεταξύ της  $\vec{B}_{xz}$  και της x-κατεύθυνσης του αισθητήρα στη διεύθυνση των αυλακώσεων είναι παραπλήσιες μόνο σε γειτονικά θραύσματα. Η γωνία  $\phi_B$  εμφανίζει πλησιέστερες τιμές σε κάθε στήλη και μεγαλύτερες αποκλίσεις κατά μήκος κάθε αυλάκωσης, όσο αυξάνεται η απόσταση μεταξύ των θέσεων λήψης των μετρήσεων. Παρότι η γωνία  $\phi_B$  δεν καθορίζει τις κατευθύνσεις συναρμογής απομακρυσμένων οστράκων, από τις μετρήσεις διαπιστώνεται ότι οι τιμές της αυξάνονται συστηματικά προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση σε κάθε στήλη και σε κάθε αυλάκωση του σώματος του αγγείου.

Από τα πειραματικά αποτελέσματα (σχήμα 6β,9β) διαπιστώνεται ότι το μέτρο (πίνακες 1β, B1β-B5β) και η κατευθυντικότητα (σχήματα 14β, B2β,B4β,B6β,B8β και B10β) του μαγνητικού πεδίου ( $\hat{\gamma}_B$ ) των συνανηκόντων θραυσμάτων της βάσης εμφανίζουν παραπλήσιες τιμές. Σε αντίθεση με τα όστρακα της βάσης, το μέτρο (πίνακες 1α, B1α-B5α) και η κατευθυντικότητα (σχήματα 14α, B2α,B4α,B6α,B8α και B10α) του πεδίου ( $\hat{\theta}_B$ ) σε συνανήκοντα όστρακα του σώματος μεταβάλλονται, όσο αυξάνεται η απόσταση μεταξύ των θέσεων λήψης των μετρήσεων στα σώματα των αγγείων.

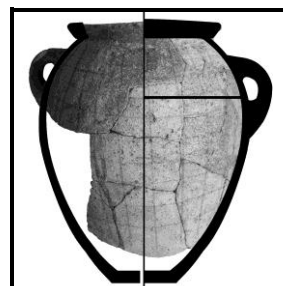
Όπως οι τιμές της γωνίας  $\phi_B$ , έτσι και οι τιμές της γωνίας  $\theta_B$  μεταβάλλονται κατά συστηματικό τρόπο κατά μήκος μιας συγκεκριμένης κατεύθυνσης σε κάθε αυλάκωση και σε κάθε στήλη του σώματος των αγγείων.

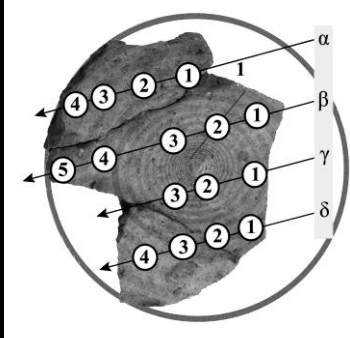
Πίνακας 1α-ΑΓΓΕΙΟ 1 (α-Σώμα)

| Αγγείο 1<br>α. Σώμα |                                    | Μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου στην κατεύθυνση της Bxz |      |      |      |      |      |      |       |       |
|---------------------|------------------------------------|---|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
|                     |                                    | A   | B    | Γ    | Δ    | E    | Z    | H    | Θ     | I     |
| 1                   | B <sub>xz</sub> (±1) nT            | 50  | 33   | 18   | 2    | 15   | 40   | 55   | 80    |       |
|                     | B <sub>ψ</sub> (±1) nT             | 25  | 33   | 33   | 36   | 31   | 30   | 25   | 7     |       |
|                     | B (δB=1 nT)                        | 55  | 47   | 38   | 36   | 34   | 50   | 60   | 80    |       |
|                     | θ <sub>B</sub> ° ± δθ <sub>B</sub> | 65±1  | 47±1 | 30±2 | 5±2  | 32±2 | 55±1 | 68±1 | 85±1  |       |
|                     | φ <sub>B</sub> °(±1°)              | 19  | 9    | 10   | 205  | 169  | 170  | 160  | 142   |       |
| 2                   | B <sub>xz</sub> (±1) nT            | 67  | 33   | 20   | 9    | 25   | 38   | 64   | 83    |       |
|                     | B <sub>ψ</sub> (±1) nT             | 22  | 31   | 35   | 35   | 33   | 31   | 24   | 5     |       |
|                     | B (δB=1 nT)                        | 71  | 45   | 40   | 36   | 41   | 49   | 68   | 83    |       |
|                     | θ <sub>B</sub> ° ± δθ <sub>B</sub> | 72±1  | 45±1 | 32±1 | 16±1 | 36±1 | 54±1 | 70±1 | 86±1  |       |
|                     | φ <sub>B</sub> °(±1°)              | 26  | 18   | 29   | 109  | 154  | 163  | 154  | 142   |       |
| 3                   | B <sub>xz</sub> (±1) nT            | 71  | 37   | 22   | 16   | 31   | 48   | 73   | 81    |       |
|                     | B <sub>ψ</sub> (±1) nT             | 20  | 32   | 35   | 34   | 31   | 28   | 18   | 2     |       |
|                     | B (δB=1 nT)                        | 74  | 49   | 41   | 38   | 44   | 56   | 75   | 81    |       |
|                     | θ <sub>B</sub> ° ± δθ <sub>B</sub> | 75±1  | 51±1 | 31±1 | 26±1 | 42±1 | 63±1 | 77±1 | 88±1  |       |
|                     | φ <sub>B</sub> °(±1°)              | 32  | 37   | 51   | 97   | 137  | 150  | 148  | 142   |       |
| 4                   | B <sub>xz</sub> (±1) nT            | 75  | 55   | 37   | 32   | 33   | 54   | 70   | 83    | 82    |
|                     | B <sub>ψ</sub> (±1) nT             | 17  | 25   | 31   | 31   | 33   | 26   | 19   | -5    | -8    |
|                     | B (δB=1 nT)                        | 77  | 60   | 48   | 45   | 47   | 60   | 73   | 83    | 81    |
|                     | θ <sub>B</sub> ° ± δθ <sub>B</sub> | 77±1  | 67±1 | 48±1 | 46±1 | 47±1 | 64±1 | 75±1 | -86±1 | -83±1 |
|                     | φ <sub>B</sub> °(±1°)              | 37  | 39   | 57   | 92   | 128  | 143  | 145  | 142   | 139   |
| 5                   | B <sub>xz</sub> (±1) nT            | 78  | 63   | 44   | 37   | 44   | 66   | 75   | 81    | 79    |
|                     | B <sub>ψ</sub> (±1) nT             | 15  | 24   | 32   | 32   | 32   | 33   | 15   | -6    | -9    |
|                     | B (δB=1 nT)                        | 79  | 67   | 54   | 49   | 54   | 70   | 76   | 81    | 80    |
|                     | θ <sub>B</sub> ° ± δθ <sub>B</sub> | 78±1  | 71±1 | 55±1 | 48±1 | 55±1 | 71±1 | 79±1 | -86±1 | -83±1 |
|                     | φ <sub>B</sub> °(±1°)              | 37  | 44   | 65   | 97   | 120  | 138  | 142  | 143   | 140   |
| 6                   | B <sub>xz</sub> (±1) nT            | 76  | 70   | 63   | 58   | 68   | 79   |      |       |       |
|                     | B <sub>ψ</sub> (±1) nT             | 12  | 17   | 27   | 27   | 21   | 13   |      |       |       |
|                     | B (δB=1 nT)                        | 77  | 72   | 69   | 64   | 71   | 80   |      |       |       |
|                     | θ <sub>B</sub> ° ± δθ <sub>B</sub> | 82±1  | 76±1 | 66±1 | 64±1 | 72±1 | 79±1 |      |       |       |
|                     | φ <sub>B</sub> °(±1°)              | 42  | 55   | 71   | 93   | 113  | 132  |      |       |       |
| 7                   | B <sub>xz</sub> (±1) nT            | 85  | 78   | 73   | 66   | 71   | 81   |      |       |       |
|                     | B <sub>ψ</sub> (±1) nT             | 2   | 12   | 19   | 22   | 20   | 8    |      |       |       |
|                     | B (δB=1 nT)                        | 85  | 79   | 75   | 70   | 74   | 81   |      |       |       |
|                     | θ <sub>B</sub> ° ± δθ <sub>B</sub> | 89±1  | 81±1 | 75±1 | 71±1 | 73±1 | 84±1 |      |       |       |
|                     | φ <sub>B</sub> °(±1°)              | 41  | 54   | 74   | 94   | 113  | 132  |      |       |       |
| 8                   | B <sub>xz</sub> (±1) nT            | 86  | 76   | 76   | 69   | 73   | 80   |      |       |       |
|                     | B <sub>ψ</sub> (±1) nT             | 1   | 13   | 17   | 18   | 19   | 8    |      |       |       |
|                     | B (δB=1 nT)                        | 86  | 77   | 78   | 71   | 75   | 80   |      |       |       |
|                     | θ <sub>B</sub> ° ± δθ <sub>B</sub> | 89±1  | 82±1 | 77±1 | 76±1 | 77±1 | 84±1 |      |       |       |
|                     | φ <sub>B</sub> °(±1°)              | 42  | 58   | 72   | 90   | 110  | 130  |      |       |       |
| 9                   | B <sub>xz</sub> (±1) nT            |   | 79   | 79   | 76   | 78   | 82   |      |       |       |
|                     | B <sub>ψ</sub> (±1) nT             |   | 5    | 14   | 16   | 14   | 4    |      |       |       |
|                     | B (δB=1 nT)                        |   | 79   | 80   | 78   | 79   | 82   |      |       |       |
|                     | θ <sub>B</sub> ° ± δθ <sub>B</sub> |   | 86±1 | 80±1 | 78±1 | 79±1 | 87±1 |      |       |       |
|                     | φ <sub>B</sub> °(±1°)              |   | 56   | 73   | 92   | 113  | 131  |      |       |       |

Πίνακας 1α. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μετρήσεων του μαγνητικού πεδίου με τον αισθητήρα στην κατεύθυνση της  $\vec{B}_{xz}$  σε όστρακα του σώματος του αγγείου 1.

Πίνακας 1-ΑΓΓΕΙΟ 1 (β-Βάση)



|   | Αγγείο 1<br>β.Βάση | Μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου στην κατεύθυνση της B <sub>xψ</sub> |     |     |     |
|---|--------------------|---|-----|-----|-----|
|   |                    | α   | β   | γ   | δ   |
|  | 1                  | B <sub>xψ</sub> (±1) nT   | 62  | 64  | 63  |
|   |                    | B <sub>z</sub> (±1) nT  | 24  | 23  | 23  |
|   |                    | B (δB=1 nT)   | 69  | 68  | 67  |
|   |                    | γ <sub>B</sub> <sup>o</sup> (δγ <sub>B</sub> =1°)                   | 70  | 70  | 70  |
|   |                    | φ <sub>B</sub> <sup>o</sup> (±1°)                                   | 143 | 145 | 147 |
|   |                    |   |     |     | 146 |
|   | 2                  | B <sub>xψ</sub> (±1) nT   | 63  | 65  | 67  |
|   |                    | B <sub>z</sub> (±1) nT  | 23  | 23  | 25  |
|   |                    | B (δB=1 nT)   | 67  | 69  | 72  |
|   |                    | γ <sub>B</sub> <sup>o</sup> (δγ <sub>B</sub> =1°)                   | 70  | 71  | 70  |
|   |                    | φ <sub>B</sub> <sup>o</sup> (±1°)                                   | 146 | 144 | 144 |
|   |                    |   |     |     | 145 |
|   | 3                  | B <sub>xψ</sub> (±1) nT   | 64  | 65  | 68  |
|   |                    | B <sub>z</sub> (±1) nT  | 25  | 25  | 24  |
|   |                    | B (δB=1 nT)   | 69  | 70  | 72  |
|   |                    | γ <sub>B</sub> <sup>o</sup> (δγ <sub>B</sub> =1°)                   | 69  | 69  | 71  |
|   |                    | φ <sub>B</sub> <sup>o</sup> (±1°)                                   | 144 | 144 | 143 |
|   |                    |   |     |     | 144 |
|   | 4                  | B <sub>xψ</sub> (±1) nT   | 66  | 64  |     |
|   |                    | B <sub>z</sub> (±1) nT  | 24  | 24  |     |
|   |                    | B (δB=1 nT)   | 70  | 68  |     |
|   |                    | γ <sub>B</sub> <sup>o</sup> (δγ <sub>B</sub> =1°)                   | 70  | 69  |     |
|   |                    | φ <sub>B</sub> <sup>o</sup> (±1°)                                   | 142 | 142 |     |
|   |                    |   |     |     | 143 |
|   | 5                  | B <sub>xψ</sub> (±1) nT   |     | 63  |     |
|   |                    | B <sub>z</sub> (±1) nT  |     | 22  |     |
|   |                    | B (δB=1 nT)   |     | 67  |     |
|   |                    | γ <sub>B</sub> <sup>o</sup> (δγ <sub>B</sub> =1°)                   |     | 71  |     |
|   |                    | φ <sub>B</sub> <sup>o</sup> (±1°)                                   |     | 143 |     |
|   |                    |   |     |     |     |

**Πίνακας 1β.** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μετρήσεων του μαγνητικού πεδίου με τον αισθητήρα στην κατεύθυνση της  $\vec{B}_{x\psi}$  σε όστρακα της βάσης του αγγείου 1.

Σε κάθε περίπτωση, ο εντοπισμός ασθενούς μαγνητικού πεδίου με σταθερή κατευθυντικότητα που προσανατολίζει γειτονικά θραύσματα σερπεντινίτη και όστρακα κεραμικής κατά τον τρόπο που συναρμολογούν, είναι αποτέλεσμα παραμένουσας μαγνήτισης από την έκθεση του πετρώματος και των αγγείων στο μαγνητικό πεδίο της γης πριν από τη θραύση τους. Η απόκτηση παραμένουσας μαγνήτισης είναι αποτέλεσμα της θέρμανσης και του προσανατολισμού των μαγνητικών κόκκων κατά την ψύξη των υλικών (παράρτημα Α) στην κατεύθυνση του γήινου μαγνητικού πεδίου.

Η θερμοπαραμένουσα μαγνήτιση του κεραμικού υλικού, αναμένεται να διατηρεί παραπλήσιο μέτρο σε συνανήκοντα όστρακα αγγείων που συνίστανται από την ίδια πρώτη ύλη και ψήθηκαν στον ίδιο τόπο, κατά τον ίδιο χρόνο και υπό τις ίδιες συνθήκες. Στα θραύσματα της βάσης αναμένεται να διατηρεί παραπλήσια κατευθυντικότητα στη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου της γης κατά την όπτηση, ενώ στα τοιχώματα να διαμορφώνεται κατά τον τρόπο που υπαγορεύει η περιστροφική συμμετρία των αγγείων, χωρίς να

αποκλείονται τοπικές διαφοροποιήσεις, που μπορεί να οφείλονται σε ελλιπή ομογενοποίηση του μίγματος των πηλών ή των ευτηκτικών υλών, σε διακυμάνσεις της θερμοκρασίας ή του αερισμού στον κλίβανο όπτησης και σε μεταγενέστερες μαγνήτισεις.

Παρά τη μαγνητική ανισοτροπία του κεραμικού υλικού, η συναρμογή των γειτονικών θραυσμάτων από το μαγνητικό τους πεδίο και οι παραπλήσιες τιμές του μέτρου και της κατευθυντικότητας σε θραύσματα της βάσης των αγγείων ακανόνιστου σχήματος, προϋποθέτουν τον προσανατολισμό του στην κατεύθυνση της θερμοπαραμένουσας μαγνήτισης.

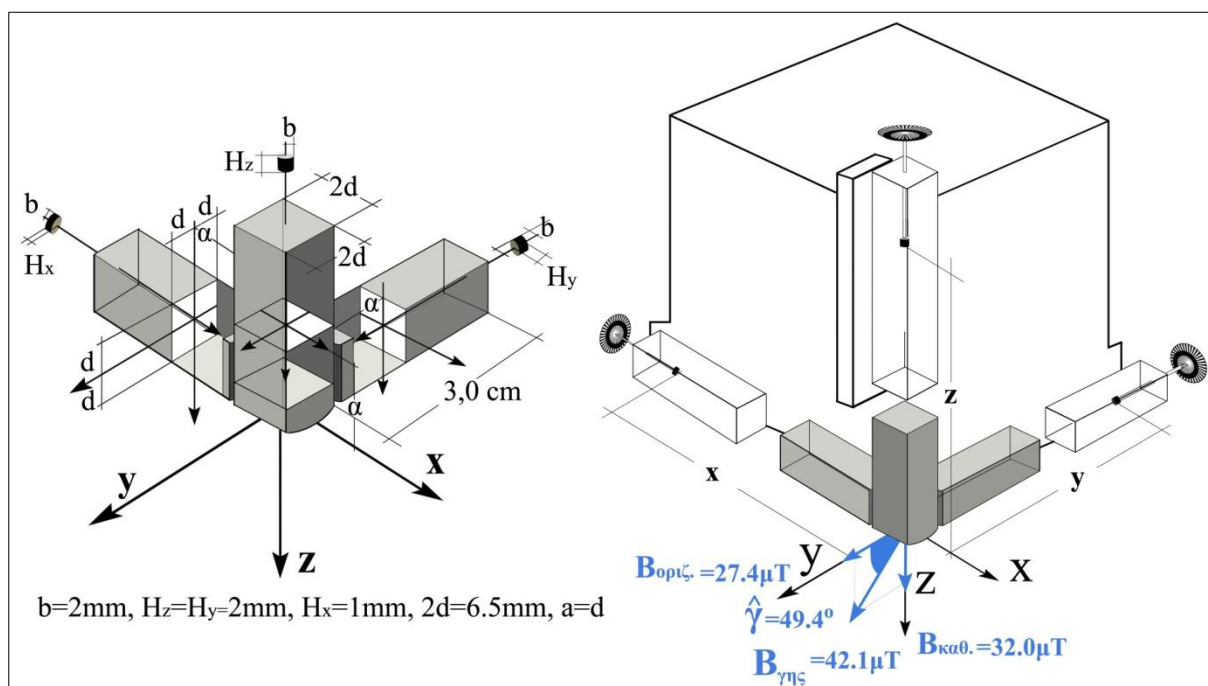
Ο έλεγχος της παραπάνω διαπίστωσης γίνεται με μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου, με εξέταση των γεωμετρικών παραμέτρων των θραυσμάτων που καθορίζουν τον τρόπο που ευαισθητοποιείται ο μαγνητικός αισθητήρας για τον υπολογισμό της θερμοπαραμένουσας μαγνήτισης.

## 2. Υπολογισμός της θερμοπαραμένουσας μαγνήτισης από μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου θραυσμάτων αγγείων με 3 αισθητήρες fluxgate σε τρισσορθογώνια διάταξη

Οι μετρήσεις των συνιστωσών του μαγνητικού πεδίου πραγματοποιούνται από τους 3 αισθητήρες του μαγνητόμετρου fluxgate σε τρισσορθογώνια διάταξη. Οι δύο αισθητήρες προσανατολίζονται στις διευθύνσεις της οριζόντιας συνισταμένης και της κατακόρυφης συνιστώσας του μαγνητικού πεδίου της γης, ενώ ο τρίτος αισθητήρας εμφανίζει μηδενική ένδειξη. Το πεδίο της γης στους δύο αισθητήρες αντισταθμίζεται από δύο κυλινδρικούς μαγνήτες, ενώ το μη αξονικό πεδίο των δύο μαγνητών στον τρίτο αισθητήρα εξουδετερώνεται από τρίτο μαγνήτη κατά μήκος του άξονά του. Με μια σειρά πειραμάτων προσδιορίζεται η περιοχή του κεραμικού υλικού της οποίας το μαγνητικό πεδίο εντοπίζεται από τους αισθητήρες, για τον υπολογισμό της θερμοπαραμένουσας μαγνήτισης σε θραύσματα και δοκίμια της βάσης των αγγείων.

### 2.1 Πειραματικές διατάξεις/οργανολογία

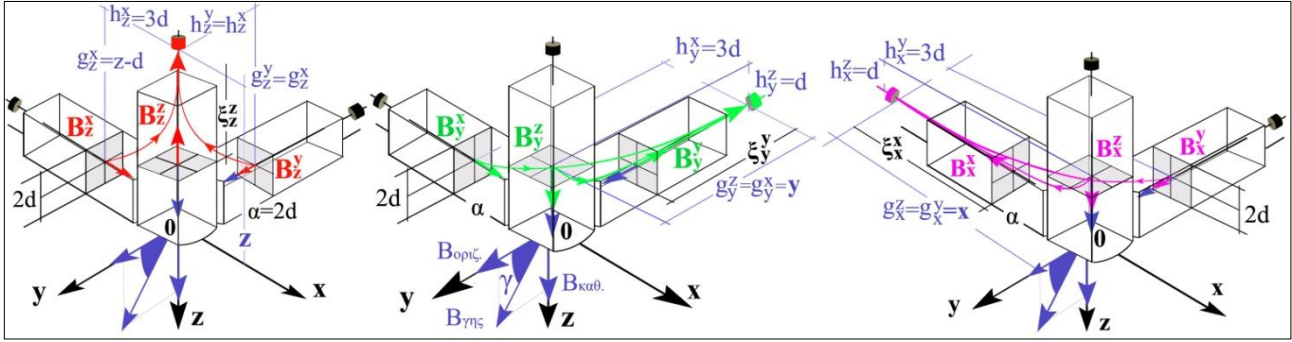
Ο οριζόντιος x-αισθητήρας προσανατολίζεται κάθετα στην οριζόντια συνισταμένη και την κατακόρυφη συνιστώσα του γήινου μαγνητικού πεδίου (σχήμα 15), που μετριοούνται από τους y και z-αισθητήρες αντίστοιχα. Οι ενδείξεις των αισθητήρων ( $1\text{mV}/7\text{nT}$ ) μηδενίζονται με μέγιστη ακρίβεια  $0,01\text{ mV}$  ή  $0,1\text{nT}$  με ρύθμιση της αξονικής απόστασής τους από κυλινδρικούς μαγνήτες ( $M = 400\text{ KA/m}$ ) τύπου Al-Ni-Co, με στροφή των κοχλιών στήριξής τους. Η περιοχή διέγερσης κάθε αισθητήρα, εντοπίζεται επί του άξονα που διέρχεται από το κέντρο της τετραγωνικής διατομής του πλευράς  $2d=6,5\text{cm}$  και σε απόσταση  $a=6,5\text{cm}$  από το καμπύλο άκρο τους.



**Σχήμα 15.** Απεικόνιση της τρισσορθογώνιας διάταξης αισθητήρων/μαγνητών για την αντιστάθμιση του μαγνητικού πεδίου της γης και τον μηδενισμό των ενδείξεών τους.

Κάθε μαγνήτης παράγει εκτός από το αξονικό του πεδίο στη διεύθυνση του αισθητήρα και πλευρικά πεδία που διεγείρουν τους κάθετους αισθητήρες.





**Σχήμα 16.** Απεικόνιση του πεδίου της γης  $B_{\gamma\eta\varsigma}$  και των πεδίων  $B_{\mu}^{\alpha}$  των  $\mu=x, \psi, z$  μαγνητών στους  $\alpha=x, \psi, z$  αισθητήρες.

Τα μετρούμενα αξονικά πεδία  $B_z^z, B_{\psi}^{\psi}, B_x^x$  (σχήμα 16) των κυλινδρικών μαγνητών με μαγνήτιση  $M$ , ακτίνα  $b$  και ύψος  $H_{\mu}$ , με διπολικές ροπές  $m = M \cdot \pi \cdot b^2 \cdot H_{\mu}$  και σε αξονικές αποστάσεις  $\xi_{\mu}^{\alpha}$  από τους αισθητήρες,

προσεγγίζονται (πίνακας 2) από τη σχέση [41] (pp. 394–399): 
$$B_{\mu}^{\alpha=\mu} = \frac{\mu_0 \cdot M \cdot b^2 \cdot H_{\mu}}{2\xi_{\mu}^3}, (\mu=x, \psi, z) \quad (6)$$

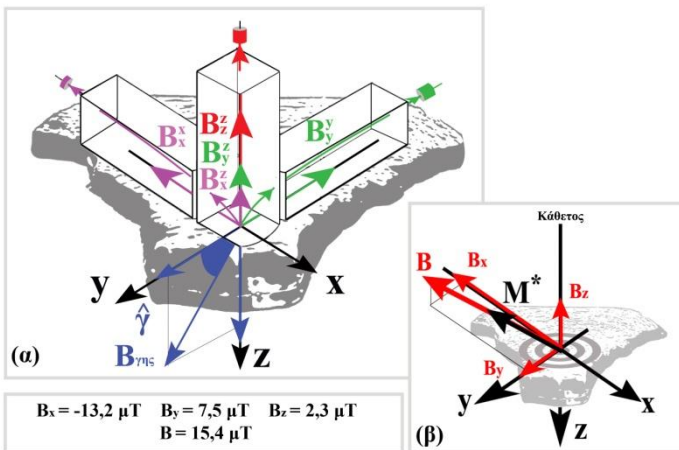
Τα πλευρικά πεδία  $B_{\mu}^{\alpha \neq \mu}$  των μαγνητών σε αξονικές αποστάσεις  $g_{\mu}^{\alpha \neq \mu}$  και πλευρικές αποστάσεις  $h_{\mu}^{\alpha \neq \mu}$  από τους αισθητήρες προσεγγίζονται από τη σχέση:

$$B_{\mu}^{\alpha \neq \mu} = \frac{3\mu_0 \cdot M \cdot b^2 \cdot H_{\mu}}{4} \cdot \frac{g_{\mu}^{\alpha} \cdot h_{\mu}^{\alpha}}{[(g_{\mu}^{\alpha})^2 + (h_{\mu}^{\alpha})^2]^{5/2}}, (\mu, \alpha=x, y, z) \quad (7)$$

Το συνολικό μαγνητικό πεδίο σε κάθε αισθητήρα προσεγγίζεται από τις σχέσεις:

$$B_z = B_{\mu=z}^{\alpha=z} + B_{\mu=\psi}^{\alpha=z} + B_{\mu=x}^{\alpha=z} + B_z^{\gamma\eta\varsigma}, \quad B_{\psi} = B_{\mu=z}^{\alpha=\psi} + B_{\mu=\psi}^{\alpha=\psi} + B_{\mu=x}^{\alpha=\psi} + B_{\psi}^{\gamma\eta\varsigma}, \quad B_x = B_{\mu=z}^{\alpha=x} + B_{\mu=\psi}^{\alpha=x} + B_{\mu=x}^{\alpha=x} \quad (8)$$

Μετά τον μηδενισμό των αισθητήρων, τα όστρακα στηρίζονται σε οριζοντιωμένη περιστρεφόμενη βάση γωνιομετρικής διάταξης που ανυψώνεται με μηχανισμό ακριβείας μέχρι την επαφή των οστράκων με την τρισσορθογώνια διάταξη των αισθητήρων που διατηρεί σταθερό προσανατολισμό σε σχέση με το γήινο μαγνητικό πεδίο.



**Σχήμα 17.** Απεικόνιση των επιμέρους πεδίων  $B_{\mu}^{\delta}$  των  $\mu=x, \psi, z$  μαγνητών και της γης (α) και του συνολικού πεδίου (β) στην περιοχή λήψης των μετρήσεων, στην κατεύθυνση της οποίας προσανατολίζεται η επαγόμενη μαγνήτιση  $M^*$  του κεραμικού υλικού.

Το συνολικό μαγνητικό πεδίο σε κάθε διεύθυνση στην περιοχή λήψης των μετρήσεων, προσεγγίζεται από τις σχέσεις:

$$B_z = B_{\mu=z}^{\delta=z} + B_{\mu=\psi}^{\delta=z} + B_{\mu=x}^{\delta=z} + B_z^{\gamma\eta\varsigma}, \quad B_{\psi} = B_{\mu=z}^{\delta=\psi} + B_{\psi}^{\gamma\eta\varsigma}, \quad B_x = B_{\mu=x}^{\delta=x} \quad (10)$$

Οι συνιστώσες του πεδίου  $B_{\mu}^{\delta}$  των  $\mu=x, \psi, z$  μαγνητών και του πεδίου της γης στις  $\delta=x, \psi, z$  αξονικές αποστάσεις (πίνακας 2) από τους αισθητήρες στις οποίες μηδενίζονται οι ενδείξεις τους (σχήμα 17), προσεγγίζονται [41] στην περιοχή λήψης των μετρήσεων από τις σχέσεις:

$$B_z^z = -\frac{\mu_0 \cdot M \cdot b^2 \cdot H_z}{2z^3} \quad (9\alpha)$$

$$B_{\mu=x, \psi}^{\delta=\mu} = -\frac{\mu_0 \cdot M \cdot b^2 \cdot H_{\mu}}{4} \cdot \frac{2\delta^2 - d^2}{(\delta^2 + d^2)^{5/2}} \quad (9\beta)$$

$$B_{\mu=x, \psi}^{\delta=z} = -\frac{3\mu_0 \cdot M \cdot b^2 \cdot H_{\mu}}{4} \cdot \frac{\mu \cdot d}{(\mu^2 + d^2)^{5/2}} \quad (9\gamma)$$

| Μαγνήτες       | Αποστάσεις<br>μαγνητών<br>αισθητήρων<br>(mm) | Πεδία(nT) στους z,y,z αισθητήρες |            |           | Πεδία(μΤ) στην περιοχή λήψης των<br>μετρήσεων στις z,y,x διευθύνσεις |       |       |       |
|----------------|--|----------------------------------|------------|-----------|--|-------|-------|-------|
|                |  | z                                | y          | x         | Μαγνήτες   | z     | y     | x     |
| z              | 44,91841                                     | -61830,98                        |            |           | z  | -22,2 |       |       |
|                |  |                                  | 60880,61   |           |  |       |       |       |
|                |  |                                  |            | 60880,61  |  |       |       |       |
| y              | 45,63295                                     | 17197,76                         |            |           | y  | -4,3  | -19,9 |       |
|                |  |                                  | -112658,65 |           |  |       |       |       |
|                |  |                                  |            | 35669,95  |  |       |       |       |
| x              | 41,33643                                     | 12633,18                         |            |           | x  | -3,2  |       | -13,2 |
|                |  |                                  | 24378,01   |           |  |       |       |       |
|                |  |                                  |            | -95550,59 |  |       |       |       |
| Πεδίο γης      |  | 32000                            |            |           |  | 32,0  | 27,4  |       |
|                |  |                                  | 27400      |           |  |       |       |       |
| Συνολικά πεδία |  | 0,0                              | 0,0        | 0,0       |  |       |       |       |
|                |  |                                  |            |           |  | 2,3   | 7,5   | -13,2 |

**Πίνακας 2.** Υπολογισμός των πεδίων στους αισθητήρες, στις αποστάσεις x,y,z των μηδενισμού των ενδείξεων τους. Στις αποστάσεις αυτές υπολογίζεται το μαγνητικό πεδίο στην περιοχή λήψης των μετρήσεων.

Οι επόμενες μετρήσεις λαμβάνονται από την τρισσορθογώνια διάταξη των αισθητήρων/μαγνητών στην ίδια σταθερή θέση ως προς το γεωμαγνητικό πεδίο. Η συνεισφορά της επαγόμενης μαγνήτισης του κεραμικού υλικού στις μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου, ελέγχεται σε επόμενο πείραμα, με τη σύγκριση μετρήσεων που λαμβάνονται εντός μηδενικού μαγνητικού πεδίου.

## 2.2 Διερεύνηση της εξάρτησης του μετρούμενου μαγνητικού πεδίου από την παραμένουσα θερμομαγνήτιση του κεραμικού υλικού, σε θραύσματα και δοκίμια από τις βάσεις των αγγείων 4,5 και 6

Η εξάρτηση και ο υπολογισμός της παραμένουσας μαγνήτισης  $M$  από τις μετρήσεις των συνιστωσών του μαγνητικού πεδίου  $B$ , διερευνάται με σειρά πειραμάτων, με σκοπό τη διερεύνηση:

**2.2.1** Του εύρους και του βαθμού ανισοτροπίας της περιοχής του κεραμικού υλικού που διεγείρει τους αισθητήρες.

**2.2.2** Της συνεισφοράς της επαγόμενης μαγνήτισης του κεραμικού υλικού από το μαγνητικό πεδίο ( $<15,4 \mu T$ ) της τρισσορθογώνιας διάταξης αισθητήρων/μαγνητών στις μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου των οστράκων.

**2.2.3** Την διερεύνηση της εξάρτησης της περιοχής του κεραμικού υλικού που διεγείρει τους αισθητήρες από το πάχος των οστράκων.

**2.2.4** Την διερεύνηση της εξάρτησης της περιοχής του κεραμικού υλικού που διεγείρει τους αισθητήρες από τη θέση λήψης των μετρήσεων στην επιφάνεια των οστράκων.

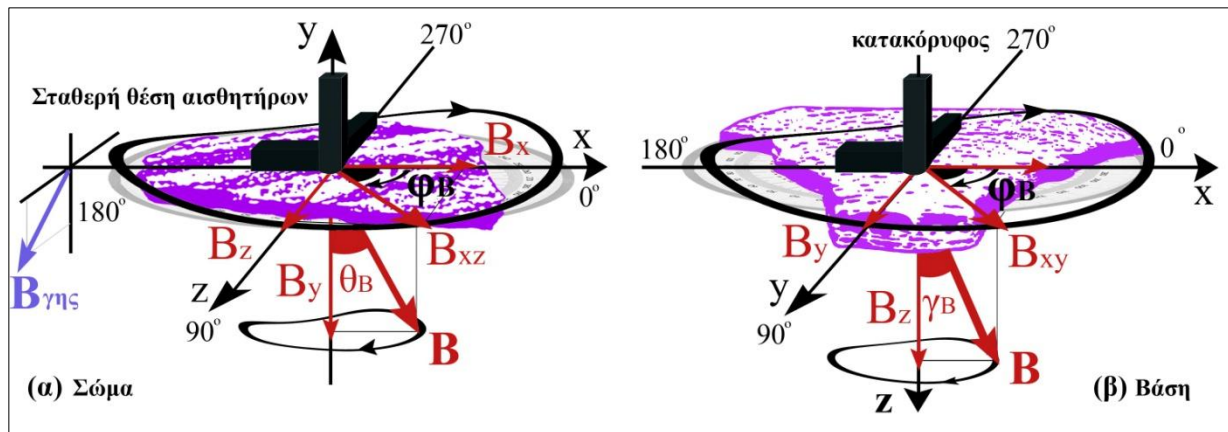
**2.2.5** Την διερεύνηση του βαθμού ευαισθητοποίησης του κάθετου και των παράλληλων αισθητήρων, λόγω της διαφορετικής τοποθέτησής τους στην επιφάνεια των οστράκων.

Από τα αποτελέσματα των πειραμάτων διαπιστώνεται ότι οι αισθητήρες διεγείρονται από μια κυλινδρική περιοχή του κεραμικού υλικού και υπολογίζονται οι διαστάσεις της, που εξαρτώνται από το μέτρο, την κατευθυντικότητα της παραμένουσας μαγνήτισης, το πάχος των οστράκων και τη θέση λήψης των μετρήσεων. Για τον υπολογισμό της παραμένουσας μαγνήτισης από τις μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου, διορθώνονται οι

ενδείξεις του κάθετου αισθητήρα λόγω του μικρότερου βαθμού διέγερσής του σε σχέση με τους παράλληλους αισθητήρες.

### 2.2.1 Διερεύνηση του εύρους και του βαθμού ανισοτροπίας της περιοχής του κεραμικού υλικού που διεγείρει τους αισθητήρες

Η τρισσορθογώνια διάταξη των αισθητήρων/μαγνητών (σχήμα 18) παραμένει στην ίδια θέση ως προς το γεωμαγνητικό πεδίο, με τον x-αισθητήρα ( $B_x=0$ ) κάθετο στην οριζόντια και την κατακόρυφη συνιστώσα του γεωμαγνητικού πεδίου, πριν από την τοποθέτηση των θραυσμάτων.



**Σχήμα 18.** Απεικόνιση του μαγνητικού πεδίου που ανιχνεύεται από τη διάταξη του σταθερού τρισσορθογώνιου συστήματος των αισθητήρων κατά την περιστροφή οστράκων του (α) σώματος και της (β) βάσης των αγγείων στα θεωρούμενα συστήματα αναφοράς.

Τα θραύσματα στηρίζονται επί του οριζοντιωμένου δίσκου της γωνιομετρικής διάταξης και οι μετρήσεις λαμβάνονται ανά  $30^\circ$ , από τη θέση στροφής του δίσκου όπου η ένδειξη του κάθετου z-αισθητήρα στον x-άξονα εμφανίζει μηδενική τιμή και  $B_x > 0$ . Οι μετρήσεις παρατίθενται στα θεωρούμενα συστήματα αναφοράς για τα θραύσματα του σώματος (σχήμα 18α) και της βάσης (σχήμα 18β) των αγγείων.

Από τις  $n=12$  μετρήσεις των συνιστωσών  $B_i$  ( $i=x,y,z$ ) με ακρίβεια  $\Delta B_i = 1\text{nT}$ , σε κάθε θέση στροφής  $\phi_\delta$  ανά  $30^\circ$  του δίσκου στήριξης των θραυσμάτων της βάσης με ακρίβεια  $\Delta \phi_\delta = 1^\circ$ , υπολογίζεται η συνισταμένη

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \text{ του μαγνητικού πεδίου και το σφάλμα}^5 \delta B = 1\text{nT}.$$

<sup>5</sup> Το σφάλμα  $\delta B$  του πεδίου  $B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}$  υπολογίζεται σε κάθε θέση μέτρησης, σύμφωνα με τη θεωρία μετάδοσης σφαλμάτων

από τη σχέση:  $\delta B = \sqrt{\left(\frac{\partial B}{\partial B_x}\right)^2 (\Delta B_x)^2 + \left(\frac{\partial B}{\partial B_y}\right)^2 (\Delta B_y)^2 + \left(\frac{\partial B}{\partial B_z}\right)^2 (\Delta B_z)^2}$ , όπου:

$$\frac{\partial B}{\partial B_x} = (B_x^2 + B_y^2 + B_z^2)^{1/2} \cdot B_x, \quad \frac{\partial B}{\partial B_y} = (B_x^2 + B_y^2 + B_z^2)^{1/2} \cdot B_y \quad \text{και} \quad \frac{\partial B}{\partial B_z} = (B_x^2 + B_y^2 + B_z^2)^{1/2} \cdot B_z \quad (11)$$

Στις παραπάνω σχέσεις,  $\Delta B_x = \Delta B_y = \Delta B_z = 1\text{nT}$

Σε κάθε θέση μέτρησης υπολογίζονται η γωνία  $\gamma_B = \sin^{-1} \frac{B_z}{B}$ , το σφάλμα<sup>6</sup>  $\delta\hat{\gamma}_B$ , η γωνία  $\varphi_B = \arctan^{-1} \frac{B_y}{B_x}$  και το σφάλμα<sup>7</sup>  $\delta\hat{\varphi}_B$  στα ακανόνιστα θραύσματα της βάσης. Με τον ίδιο τρόπο, σε κάθε θέση στροφής  $\phi_\delta$  των θραυσμάτων του σώματος υπολογίζεται η συνισταμένη  $B$  του μαγνητικού πεδίου, οι αντίστοιχες γωνίες  $\theta_B = \sin^{-1} \frac{B_y}{B}$ ,  $\varphi_B = \arctan^{-1} \frac{B_z}{B_x}$  και τα σφάλματα  $\delta\hat{\theta}_B$ ,  $\delta\hat{\varphi}_B$  στο θεωρούμενο σύστημα αναφοράς για τα όστρακα του σώματος των αγγείων.

Οι μετρήσεις λαμβάνονται σε 2 θραύσματα της βάσης και σε 2 θραύσματα του σώματος ακανόνιστου σχήματος, για καθένα από τα 6 αγγεία, στις ίδιες θέσεις με αυτές του πειράματος στην παράγραφο 1.3 για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων. Τα πειραματικά αποτελέσματα παρατίθενται στους **πίνακες B6-B11** του παραρτήματος Β. Ενδεικτικά αποτελέσματα από τις μετρήσεις των θραυσμάτων του σώματος και της βάσης του αγγείου 1, παρατίθενται παρακάτω.

---

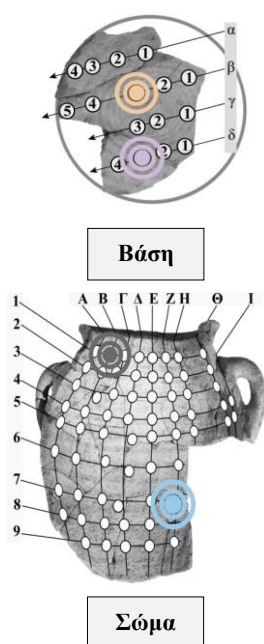
<sup>6</sup> Το σφάλμα  $\delta\hat{\gamma}_B$  της γωνίας  $\gamma_B = \sin^{-1} \frac{B_z}{B}$ , υπολογίζεται σε κάθε θέση μέτρησης σύμφωνα με τη θεωρία μετάδοσης σφαλμάτων

$$\text{από τη σχέση: } \delta\hat{\gamma}_B = \sqrt{\left(\frac{\partial \gamma_B}{\partial B_z}\right)^2 (\Delta B_z)^2 + \left(\frac{\partial \gamma_B}{\partial B}\right)^2 (\delta B)^2} = \sqrt{\left[1 - \left(\frac{B_z}{B}\right)^2\right]^{-1} \cdot \left[B^{-2} \cdot (\Delta B_z)^2 + B^{-4} \cdot B_z^2 \cdot (\delta B)^2\right]} \quad (12)$$

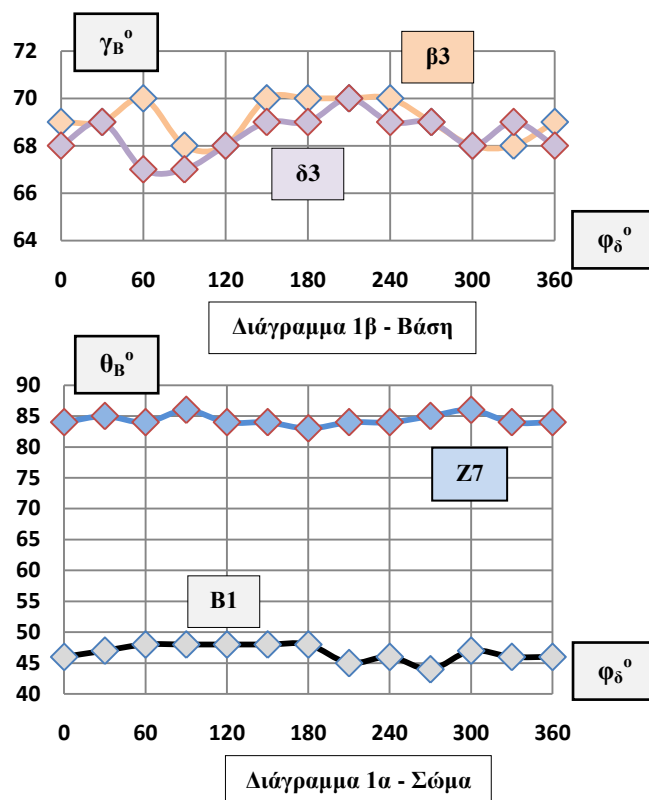
<sup>7</sup> Το σφάλμα  $\delta\hat{\varphi}_B$  της γωνίας  $\varphi_B = \arctan^{-1} \frac{B_y}{B_x}$ , υπολογίζεται σε κάθε θέση μέτρησης σύμφωνα με τη θεωρία μετάδοσης σφαλμάτων από

$$\text{τη σχέση: } \delta\hat{\varphi}_B = \sqrt{\left(\frac{\partial \varphi_B}{\partial B_y}\right)^2 (\Delta B_z)^2 + \left(\frac{\partial \varphi_B}{\partial B_x}\right)^2 (\Delta B_x)^2} = \sqrt{\left[1 + \left(\frac{B_y}{B_x}\right)^2\right]^{-2} \cdot \left[B_x^{-2} \cdot (\Delta B_y)^2 + B_x^{-4} \cdot B_y^2 \cdot (\Delta B_x)^2\right]} \quad (13)$$

Στις παραπάνω σχέσεις,  $\Delta B_x = \Delta B_y = \Delta B_z = \Delta B = 1 \text{ nT}$

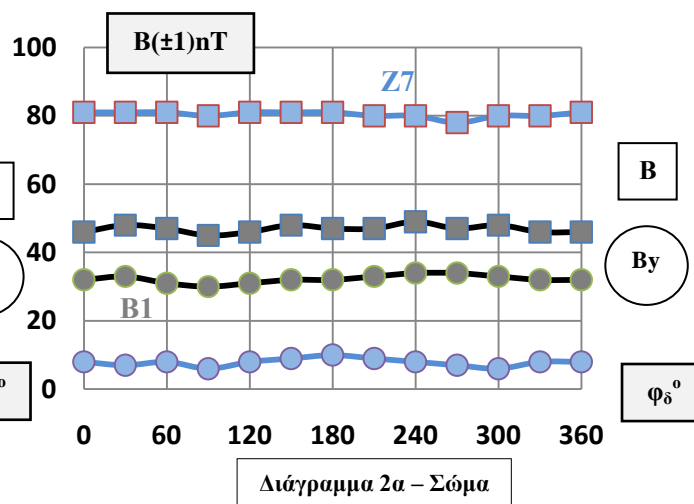
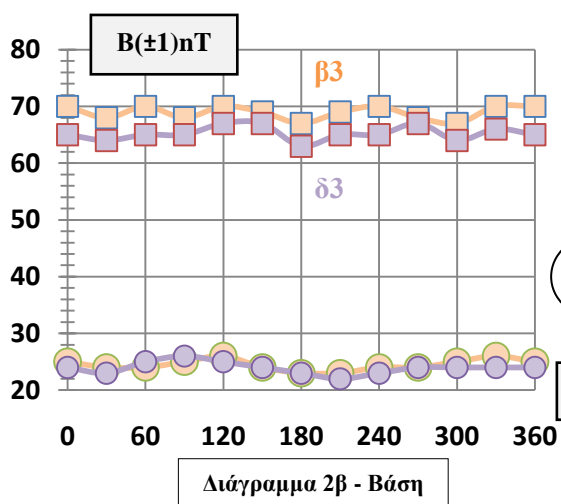


| ΑΓΓΕΙΟ 1                                  |                                 |            |                 |                 |
|---|---------------------------------|------------|-----------------|-----------------|
| ΒΑΣΗ                                      |                                 |            | ΣΩΜΑ            |                 |
| $\varphi_{\delta}$<br>( $\pm 1^{\circ}$ ) | $\beta 3$                       | $\delta 3$ | B1              | Z7              |
|   | $\varphi_B$ ( $\pm 1^{\circ}$ ) |            | $\varphi_B$     |                 |
|   |                                 |            | $\pm 2^{\circ}$ | $\pm 1^{\circ}$ |
| 0   | 0                               | 0          | 0               | 0               |
| 30  | 31                              | 33         | 25              | 32              |
| 60  | 63                              | 60         | 63              | 63              |
| 90  | 89                              | 88         | 92              | 91              |
| 120                                       | 121                             | 117        | 122             | 117             |
| 150                                       | 148                             | 152        | 155             | 150             |
| 180                                       | 178                             | 179        | 180             | 181             |
| 210                                       | 209                             | 213        | 215             | 212             |
| 240                                       | 241                             | 243        | 245             | 243             |
| 270                                       | 271                             | 271        | 272             | 271             |
| 300                                       | 299                             | 301        | 299             | 300             |
| 330                                       | 329                             | 334        | 330             | 329             |



**Πίνακας 3.** Μεταβολή της υπολογιζόμενης γωνίας  $\varphi_B$  από τις ενδείξεις των αισθητήρων, σε σχέση με τη γωνία στροφής  $\varphi_{\delta}$  του δίσκου σε 2 όστρακα της βάσης ( $\beta 3, \delta 3$ ) και 2 όστρακα του σώματος (B1, Z7) του αγγείου 1.

**Διάγραμμα 1.** Μεταβολή των υπολογιζόμενων γωνιών  $\theta_B, \gamma_B$ , στις γωνίες στροφής  $\varphi_{\delta}$  του δίσκου, σε 2 όστρακα του σώματος (α) και 2 όστρακα της βάσης (β) του αγγείου 1.



**Διάγραμμα 2.** Μεταβολή των μετρούμενων συνιστωσών  $B_y, B_z$  και του υπολογιζόμενου μέτρου  $B$  του μαγνητικού πεδίου στις γωνίες στροφής  $\varphi_{\delta}$  του δίσκου, σε 2 όστρακα (B1, Z7) του σώματος (α) και 2 όστρακα ( $\beta 3, \delta 3$ ) της βάσης (β) του αγγείου 1.

Από τα πειραματικά αποτελέσματα διαπιστώνεται:

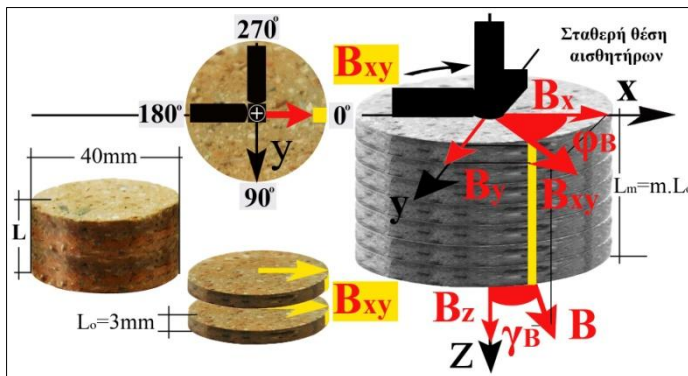
- Το μαγνητικό πεδίο των θρανισμάτων που μετρίεται στις ίδιες θέσεις από την τρισσορθογώνια διάταξη των αισθητήρων/μαγνητών (πίνακες B6-B11) και από τον έναν αισθητήρα (πίνακες 1, B1-B5) εμφανίζουν

παραπλήσιες τιμές, κοντά στα όρια του πειραματικού σφάλματος. Στις μετρήσεις με έναν αισθητήρα, η επαγόμενη μαγνήτιση στο κεραμικό υλικό από το μαγνητικό πεδίο της γης προσανατολίζεται στην κατεύθυνσή του, καθέτως προς τον άξονα του αισθητήρα και δε συνεισφέρει στις μετρήσεις του μόνιμου μαγνητικού πεδίου των θραυσμάτων. Επομένως, η επαγόμενη μαγνήτιση του κεραμικού υλικού στη θέση λήψης των μετρήσεων, που προσανατολίζεται στην κατεύθυνση της συνισταμένης των πεδίων της γης και της τρισορθογώνιας διάταξης των μαγνητών (σχήμα 17), δεν αλλοιώνει τις μετρήσεις του πεδίου που οφείλεται στην θερμοπαραμένουσα μαγνήτιση του κεραμικού υλικού, πέραν των ορίων (1 nT) του πειραματικού σφάλματος. Αυτό επιβεβαιώνεται στο επόμενο (παρ. 2.2.2) πείραμα.

- Στις θέσεις στροφής των θραυσμάτων της βάσης και του σώματος (**πίνακας 3**) η υπολογιζόμενη γωνία  $\phi_B$  του μαγνητικού πεδίου είναι παραπλήσια της μετρούμενης γωνίας  $\phi_s$  στροφής του δίσκου. Οι αισθητήρες δε λαμβάνουν μετρήσεις από όλη την έκταση του οστράκου, αλλά από μια περιορισμένη, περιστροφικά συμμετρική περιοχή γύρω από τον άξονα του κάθετου αισθητήρα στην επιφάνεια των θραυσμάτων, που μπορεί να θεωρηθεί μαγνητικά ισότροπη. Για τον λόγο αυτόν, ακανόνιστα θραύσματα της βάσης και γειτονικά θραύσματα του σώματος των αγγείων προσανατολίζονται από το μαγνητικό τους πεδίο κατά τον τρόπο που συναρμόζουν. Το μετρούμενο ασθενές μαγνητικό πεδίο ( $B < 100$  nT) των οστράκων μηδενίζεται σε απόσταση μεγαλύτερη από ~1,5 cm των αισθητήρων από την επιφάνεια των θραυσμάτων, όταν η διάταξη μέτρησης επιτρέπει την ανίχνευση πεδίων μεγαλύτερα από 0,1 nT.

- Σε αντίθεση με τις υπολογιζόμενες τιμές  $B_z$ ,  $B$ ,  $\gamma_B$  στα συνανήκοντα και παραπλήσιου πάχους θραύσματα της βάσης κάθε αγγείου (**διαγράμματα 1,2**), οι αντίστοιχες τιμές των  $B_y$ ,  $B$ ,  $\theta_B$  διαφοροποιούνται στο σώμα των αγγείων. Οι μεγάλες αποκλίσεις στο μέτρο του μαγνητικού πεδίου στα συνανήκοντα όστρακα του σώματος δεν μπορούν να δικαιολογηθούν από τις διαφορές στο πάχος και στο σχήμα τους ή στη μαγνητική ανισοτροπία του κεραμικού υλικού, εφόσον στα θραύσματα της βάσης από το ίδιο υλικό εμφανίζεις παραπλήσιες τιμές σε όστρακα ακανόνιστου σχήματος.

### 2.2.2 Διερεύνηση της συνεισφοράς της επαγόμενης μαγνήτισης του κεραμικού υλικού στις μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου



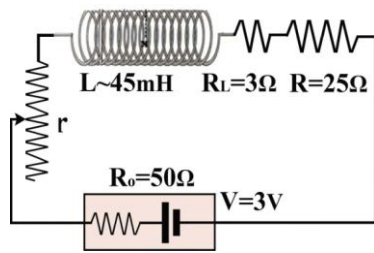
Από όστρακα της βάσης που εμφανίζουν παραπλήσιο μαγνητικό πεδίο, κατασκευάζονται κυλινδρικά δοκίμια (**σχήμα 19**) που τεμαχίζονται σε ισομεγέθη πλακίδια. Με προσανατολισμό της  $B_{xy}$  στην ίδια κατεύθυνση συναρμολογείται στήλη πλακιδίων με μαγνητικό πεδίο παραπλήσιου μέτρου και κατευθυντικότητας με το μητρικό δοκίμιο, από τις βάσεις των αγγείων **4,5 & 6**.

**Σχήμα 19.** Απεικόνιση της πειραματικής μεθοδολογίας και των μετρούμενων συνιστωσών του πεδίου  $B$  στο θεωρούμενο σύστημα αναφοράς.

Οι μετρήσεις λαμβάνονται από τη τρισορθογώνια διάταξη των αισθητήρων στο μέσον προσανατολισμένου σωληνοειδούς (**σχήμα 21**) στη διεύθυνση του γεωμαγνητικού πεδίου, όπου αντισταθμίζεται από το μαγνητικό πεδίο του πηνίου. Το αξονικό μαγνητικό πεδίο στο μέσον του πηνίου (**πίνακας 4**) ρυθμίζεται από μεταβλητή αντίσταση  $r$  σε κύκλωμα  $RL$  (**σχήμα 20**), που προσεγγίζεται [41] (pp. 223–226) από τη σχέση:

$$B = \frac{\mu_o \cdot n \cdot V}{R_o + R + R_L + r} \cdot \left(1 + \frac{4b^2}{l^2}\right)^{-\frac{1}{2}} \quad (14)$$



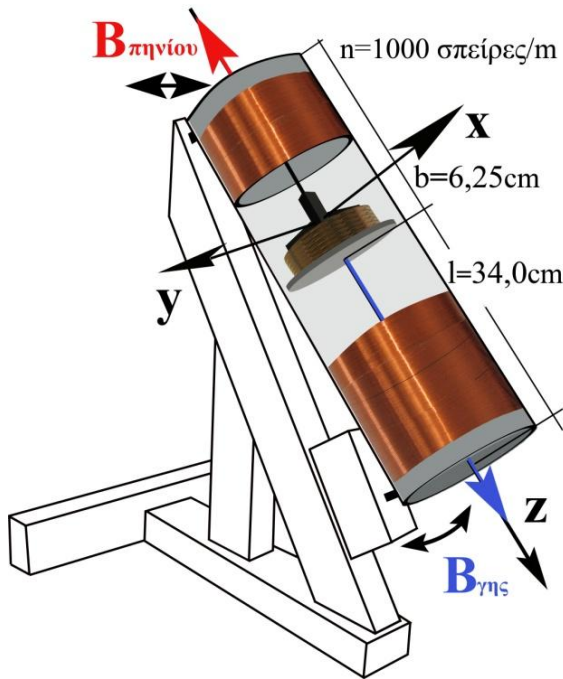


| $r(\Omega)$ | $R_{ολ.}(\Omega)$ | $B_{\pi\eta\nu\acute{\iota}\upsilon} \text{ (nT)}$ | $B_{\gamma\eta\varsigma} \text{ (nT)}$ | Ολικό αξονικό πεδίο στο μέσον του πηνίου (nT) |
|-------------|-------------------|--|--|---|
| 5,924       | 83,924            | 42161,4  | 42160,7                                | 0,7   |
| 5,925       | 83,925            | 42160,9  |  | 0,2   |
| 5,926       | 83,926            | 42160,4  |  | -0,3  |
| 5,927       | 83,927            | 42159,9  |  | -0,8  |

**Σχήμα 20.** Στοιχεία κυκλώματος RL με μεταβλητή αντίσταση  $r$  σε ρόλο ροοστάτη.

**Πίνακας 4.** Αντιστάθμιση ( $\pm 1\text{nT}$ ) του γεωμαγνητικού πεδίου από το αξονικό πεδίο του σωληνοειδούς με ρύθμιση της αντίστασης  $r$  ( $\pm 1\text{ m}\Omega$ ), γύρω από την τιμή μηδενισμού του ολικού πεδίου στο μέσον του σωληνοειδούς.

Οι μετρήσεις λαμβάνονται, στο δοκίμιο της βάσης και στις θέσεις στροφής ανά  $30^\circ$  της στήλης των θυγατρικών πλακιδίων, από τη θέση όπου η  $B_{xy}$  είναι προσανατολισμένη ( $B_{xy}>0$ ,  $B_y=0$ ) στην κατεύθυνση του x-αισθητήρα. Οι μετρήσεις επαναλαμβάνονται κάθε φορά που το πάχος  $L_m=m \cdot L_o$  της στήλης της αυξάνεται κατά ένα πλακίδιο. Από τις μετρήσεις στα δοκίμια της βάσης των αγγείων 4,5 και 6 που παρατίθενται στους πίνακες B12β-B14β του παραρτήματος B, διαπιστώνεται ότι:



- Το μετρούμενο μαγνητικό πεδίο οφείλεται μόνο στην παραμένουσα μαγνήτιση του κεραμικού υλικού και δεν αλλοιώνεται από την επαγόμενη μαγνήτισή του.

Οι μετρήσεις (πίνακες B12β-B14β) σε μηδενικό πεδίο είναι παραπλήσιες με αυτές του επόμενου πειράματος (πίνακες B12α-B14α), που λαμβάνονται στα ίδια δοκίμια από την τρισσορθογώνια διάταξη αισθητήρων/μαγνητών, στις οποίες η επαγόμενη μαγνήτιση  $M^*$  του κεραμικού υλικού στην περιοχή λήψης των μετρήσεων (σχήμα 17) προσανατολίζεται στην κατεύθυνση του εναπομένου πεδίου ( $15,4\text{ }\mu\text{T}$ ) της γης και των μαγνητών.

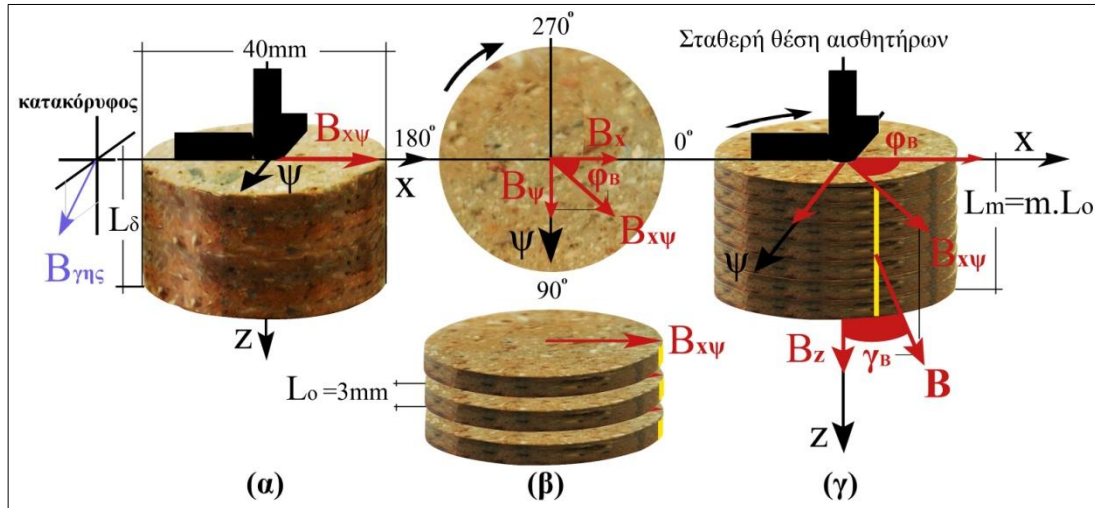
- Καθώς αυξάνεται το ύψος της στήλης το μαγνητικό πεδίο αυξάνεται και αποκτά σταθερή τιμή (πίνακες B12β-B14β), μετά την πρόσθεση διαφορετικού αριθμού πλακιδίων σε κάθε στήλη πλακιδίων από τη βάση των αγγείων 4,5 & 6.

Τα πειραματικά συμπεράσματα της εξάρτησης του μετρούμενου μαγνητικού πεδίου από το πάχος των οστράκων παρατίθενται στο επόμενο (παρ. 2.2.3) πείραμα.

**Σχήμα 21 .** Απεικόνιση της μεθοδολογίας μέτρησης του μαγνητικού πεδίου κυλινδρικών δοκιμίων εντός μηδενικού πεδίου, στο μέσον προσανατολισμένου σωληνοειδούς στο μαγνητικό πεδίο της γης.

### 2.2.3 Διερεύνηση της εξάρτησης της περιοχής του κεραμικού υλικού που διεγείρει τους αισθητήρες από το πάχος των οστράκων.

Οι μετρήσεις εντός του σωληνοειδούς σε θέσεις στροφής ανά  $30^\circ$  της στήλης των πλακιδίων από τη βάση των αγγείων 4,5&6, κάθε φορά που το πάχος της αυξάνεται κατά ένα πλακίδιο, επαναλαμβάνονται από την τρισσορθογώνια διάταξη των αισθητήρων/μαγνητών (σχήμα 22), με τον x-αισθητήρα κάθετο στην κατακόρυφη και την οριζόντια συνιστώσα του γεωμαγνητικού πεδίου.



**Σχήμα 22.** Απεικόνιση της μεθοδολογίας μέτρησης του μαγνητικού πεδίου από τη διάταξη του τρισσορθογώνιου συστήματος των αισθητήρων/μαγνητών, κατά την περιστροφή κυλινδρικών δοκιμίων από τη βάση (α) των αγγείων. Με τον ίδιο τρόπο μετριέται το μαγνητικό πεδίο στήλης μεταβλητού πάχους από λεπτότερα πλακίδια (γ), που κατασκευάζονται από τα ίδια δοκίμια και τοποθετούνται κατά τη διάταξη κοπής τους (β), με προσανατολισμό της  $\vec{B}_{x\psi}$  στην ίδια κατεύθυνση.

Στις  $n = 12$  θέσεις στροφής του δοκιμίου πάχους  $L_\delta$  (σχήμα 22α), λαμβάνονται μετρήσεις των συνιστωσών  $B_i$  ( $i = x, y, z$ ) με ακρίβεια  $\Delta B_i = 0,2nT$  και υπολογίζεται η συνισταμένη  $B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}$  του μαγνητικού πεδίου με σφάλμα  $\delta B = 0,2nT$  (11), οι γωνίες  $\gamma_B = \sin^{-1} \frac{B_z}{B}$ ,  $\phi_B = \cos^{-1} \frac{B_x}{B}$  και τα σφάλματα  $\delta \gamma_B$  (12) και  $\delta \phi_B$  (13).

Από τις  $n = 12$  τιμές των μεγεθών  $i_n = B_{z(n)}, B_n, \gamma_{B_n}$  σε κάθε γωνία στροφής ανά  $30^\circ$  των κυλινδρικών δοκιμίων και της στήλης των πλακιδίων κάθε αγγείου (σχήμα 22β,γ), υπολογίζεται η μέση τιμή  $\bar{i} = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^{n=12} i_n$

(B.15α) και ο μέσος όρος των απόλυτων αποκλίσεων από τη μέση τιμή από τη σχέση:  $\delta \bar{i} = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^{n=12} |i_n - \bar{i}|$  (B.15β)

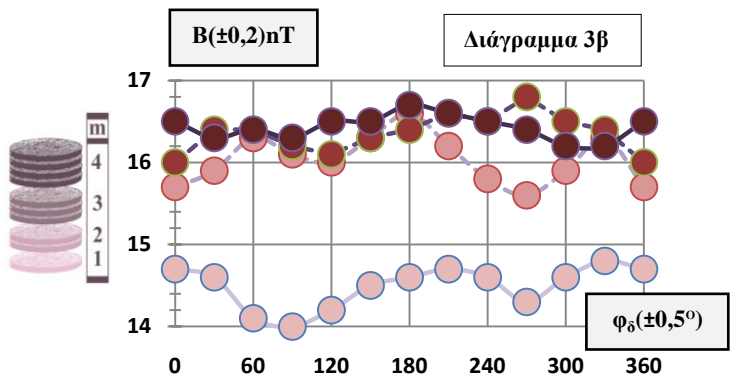
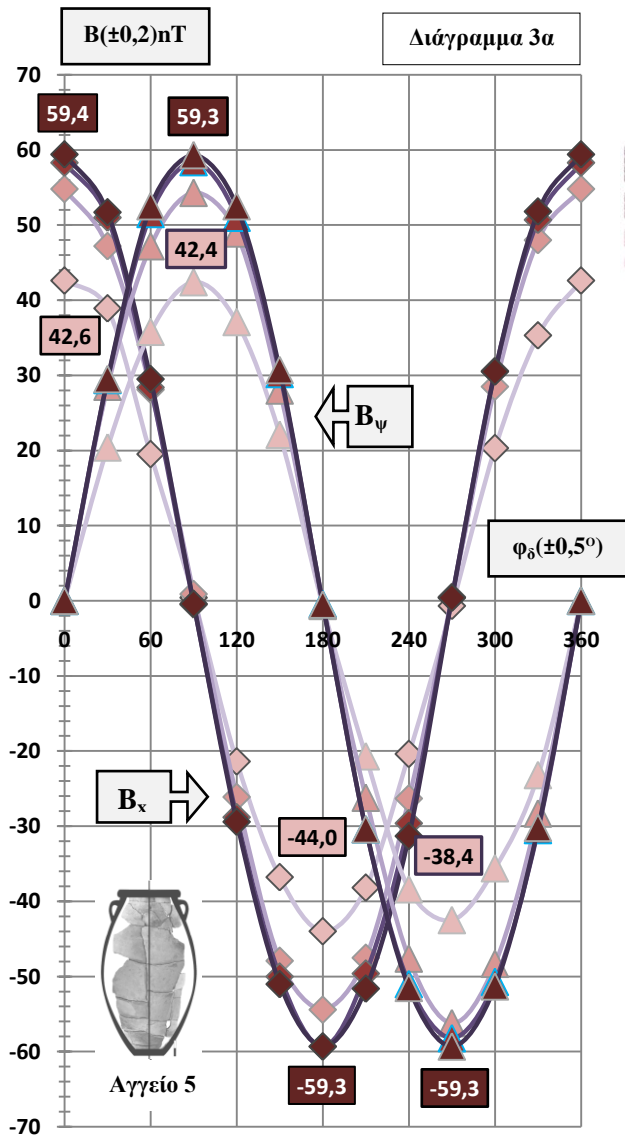
Η ίδια διαδικασία ακολουθείται για τη στήλη των κυλινδρικών δοκιμίων μεταβλητού πάχους  $L_m = m \cdot L_0$ , κάθε φορά που το ύψος της αυξάνεται κατά  $L_0 = 3mm$  κατά την τοποθέτηση των  $m = 8$  πλακιδίων.

Από τα πειραματικά αποτελέσματα που παρατίθενται στους πίνακες B12α-B14α του παραρτήματος Β, διαπιστώνεται:

- Από τις παραπλήσιες μέσες τιμές του μέτρου  $\bar{B}$  και της κατευθυντικότητας  $\bar{\gamma}_B$  του μαγνητικού πεδίου (πίνακες B12- B14) που διαπιστώνονται στις θέσεις στροφής των δοκιμίων, σε σύγκριση με τις μετρήσεις από έναν αισθητήρα (πίνακες B3β-B5β) και από τους 3 αισθητήρες σε τρισσορθογώνια διάταξη



(πίνακες B9-B11) σε ακανόνιστα θραύσματα της βάσης των αγγείων 4,5 και 6, επιβεβαιώνεται η ευαισθητοποίηση των αισθητήρων από μια περιορισμένη και περιστροφικά συμμετρική περιοχή γύρω τον κάθετο αισθητήρα στην επιφάνεια των οστράκων.



- Η υπολογιζόμενη γωνία  $\varphi_B = \varepsilon \varphi^{-1} \frac{B_\psi}{B_x}$  της  $\vec{B}_{x\psi}$  με

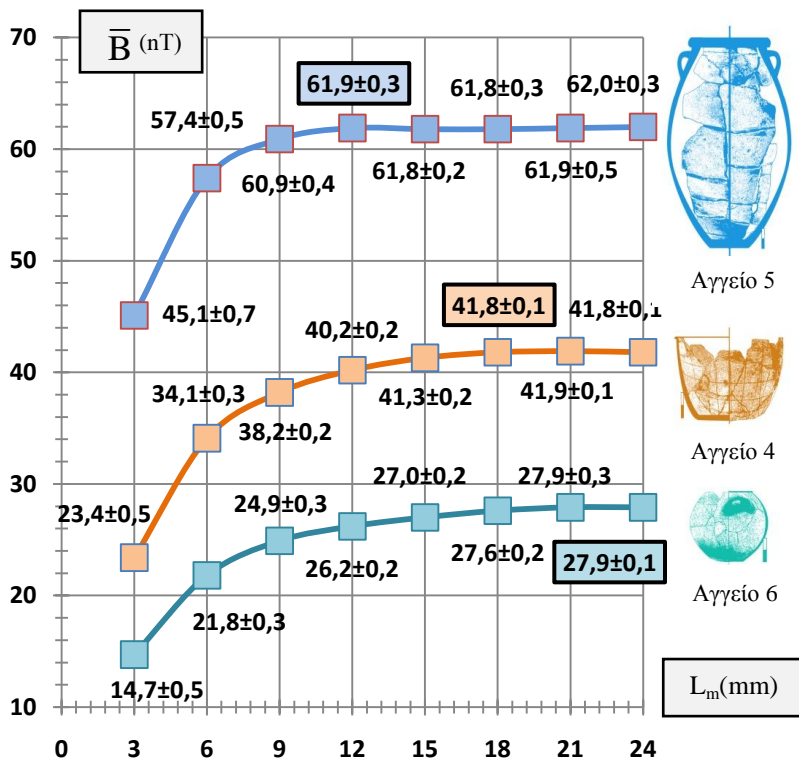
τον x-άξονα (διάγραμμα 3α), είναι παραπλήσια της μετρούμενης γωνίας στροφής  $\varphi_\delta$  του δίσκου στήριξης των στηλών από τα πλακίδια κάθε αγγείου. Αυτό σημαίνει ότι η περιοχή ευαισθησίας των x,ψ-αισθητήρων διατηρεί την περιστροφική συμμετρία περί του z-άξονα κατά την αύξηση του ύψους κάθε στήλης.

• Από τη σύγκριση των μετρήσεων στις στήλες αυξανόμενου πάχους από διαφορετικά αγγεία, διαπιστώνεται ότι παρά το διαφορετικό μέτρο  $\bar{B}$  και τη διαφορετική κατευθυντικότητα  $\bar{\gamma}_B$  του μαγνητικού τους πεδίου, τα μέτρα των  $B_x$ ,  $B_y$  αυξάνονται με μειούμενο ρυθμό μέχρι τη μεγιστοποίηση των τιμών τους με την τοποθέτηση των τελευταίων πλακιδίων.

**Διάγραμμα 3.** Ενδεικτικές μετρήσεις των  $B_x, B_y$  (α) και της  $B_z$  (β) στις γωνίες  $\varphi_\delta$  στροφής της στήλης από πλακίδια της βάσης του αγγείου 5. Η αύξηση του πάχους  $L_m = m \cdot L_0$  ( $m=1-4$ ) της στήλης με την προσθήκη επιπλέον πλακιδίων δε μεταβάλλει τις ενδείξεις των αισθητήρων.

Με την πρόσθεση των πλακιδίων, το μέτρο του μαγνητικού πεδίου  $B$  αυξάνεται με μειούμενο ρυθμό και σταθεροποιείται σε ένα συγκεκριμένο πάχος της στήλης (διάγραμμα 3β), διαφορετικό για κάθε αγγείο. Η αύξηση της μέσης τιμής  $\bar{B}$  του μαγνητικού πεδίου, με την αύξηση του πάχους της στήλης των κυλινδρικών πλακιδίων από κάθε αγγείο (διάγραμμα 4), είναι αποτέλεσμα της αύξησης του αριθμού των μαγνητικών κόκκων του υλικού εντός του χώρου όπου ευαισθητοποιούνται οι αισθητήρες. Η μέση τιμή  $\bar{B}$  του μέτρου του μαγνητικού πεδίου σε κάθε στήλη υλικού από τα 3 αγγεία αυξάνεται με μειούμενο ρυθμό με την αύξηση του πάχους  $L_m = m \cdot L_0$  της κάθε στήλης και φαίνεται να προσεγγίζει μια οριακή τιμή. Όμως με προσεκτική σύγκριση των μετρήσεων μεταξύ των στηλών από τα 3 αγγεία, διαπιστώνεται ότι το μέτρο  $\bar{B}$  του μαγνητικού

πεδίου δεν προσεγγίζει μια οριακή τιμή, αλλά σταθεροποιείται σε μια τιμή παραπλήσια της οριακής. Αυτό σημαίνει ότι το κεραμικό υλικό των πλακιδίων που αυξάνουν το ύψος της στήλης περισσότερο από ένα κρίσιμο πάχος  $L$ , βρίσκεται εκτός του χώρου ευαισθητοποίησης των αισθητήρων.



**Διάγραμμα 4.** Μεταβολή της μέσης τιμής  $\bar{B}$  του μέτρου του μαγνητικού πεδίου σε σχέση με την αύξηση του πάχους  $L_m=m.L_o$  ( $m=1-8$ ) της στήλης των πλακιδίων από τις βάσεις των αγγείων 4,5&6. Η μέση τιμή  $\bar{B}$  υπολογίζεται από τις ενδείξεις των αισθητήρων στις 12 θέσεις στροφής της στήλης των πλακιδίων.

Στις τιμές εντός των χρωματισμένων πλαισίων, η μέση τιμή  $\bar{B}$  σταθεροποιείται και δε μεταβάλλεται με την προσθήκη επιπλέον πλακιδίων σε κάθε στήλη.

Με τη συσχέτιση της διαμέτρου  $\delta = 40\text{mm}$  των δοκιμών, των μέσων τιμών της  $\bar{B}_z$  και της  $B_x = B_{xy}$  ( $\varphi_\delta = 0^\circ$ ), που υπολογίζονται στο πάχος της στήλης για το οποίο το μαγνητικό πεδίο αποκτά σταθερή τιμή και επισημαίνεται στους πίνακες B12-B14 με γκριζό χρώμα, διαπιστώνεται ότι σε κάθε αγγείο (**πίνακας 5**) το μετρούμενο πάχος  $L$  προσεγγίζεται<sup>8</sup> από τη σχέση:

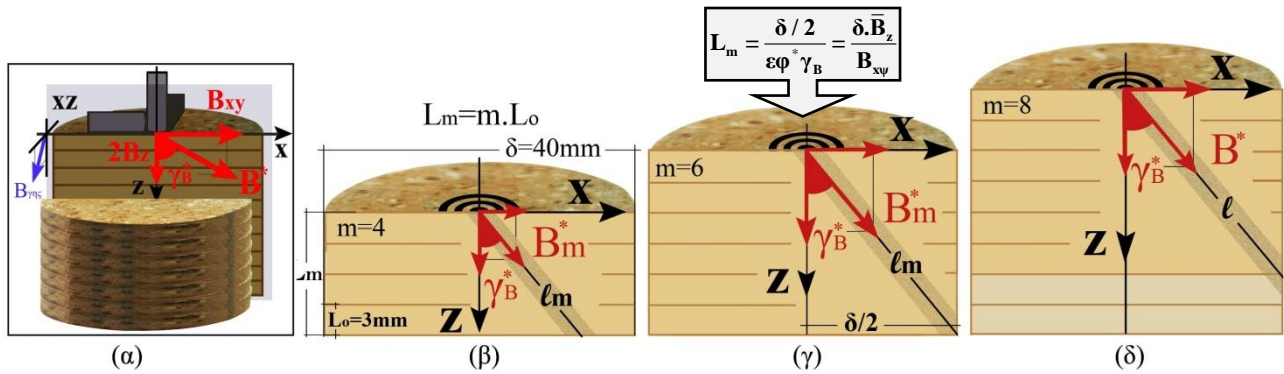
$$L = \frac{\frac{\delta}{2} \cdot (\lambda \cdot \bar{B}_z)}{B_{x\psi}} = \frac{\frac{\delta}{2}}{\varepsilon \varphi^* \gamma_B}, \quad \text{όπου} \quad \varepsilon \varphi^* \gamma_B = \frac{B_{x\psi}}{\lambda \bar{B}_z} \quad \text{και} \quad \lambda \approx 2 \quad (16)$$

| Αγγείο | Διάμετρος πλακιδίων $\delta(\pm 0,5)\text{mm}$ | m | Μετρούμενο πάχος $L=m.L_o$ (mm) | $\Delta L$ (mm) | $B_{x\psi}$ (nT) | $\Delta B_{x\psi}$ (nT) | $\bar{B}_z$ (nT) | $\delta \bar{B}_z$ (nT) | Υπολογιζόμενο πάχος $L$ (mm) | $\delta L$ (mm) |
|--------|--|---|---------------------------------|-----------------|------------------|-------------------------|------------------|-------------------------|------------------------------|-----------------|
| 4      | 40   | 6 | 18,0                            | 0,5             | 38,0             | 0,2                     | 17,6             | 0,1                     | 18,5                         | 0,2             |
| 5      | 40   | 4 | 12,0                            | 0,5             | 59,8             | 0,2                     | 16,4             | 0,1                     | 11,1                         | 0,2             |
| 6      | 40   | 8 | 24,0                            | 0,5             | 24,2             | 0,2                     | 13,8             | 0,2                     | 23,1                         | 0,1             |

**Πίνακας 5.** Σύγκριση του μετρούμενου πάχους της στήλης κάθε αγγείου, πέραν του οποίου το μετρούμενο μαγνητικό πεδίο  $\bar{B}$  με τη διάταξη των αισθητήρων/μαγνητών αποκτά σταθερή τιμή και του υπολογιζόμενου από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της στήλης και τις μετρήσεις των αισθητήρων.

<sup>8</sup> Στο θεωρούμενο σύστημα αναφοράς για τα θραύσματα ή τα δοκίμια της βάσης των αγγείων, όπου ο κατακόρυφος z-άξονας κατευθύνεται προς την γη, από τις μετρήσεις διαπιστώνεται ότι  $B_z > 0$ . Επειδή η  $\bar{B}_{x\psi}$  προσανατολίζεται στην κατεύθυνση του x-άξονα όταν  $B_{x\psi} > 0$  η προσανατολισμένη γωνία  $\gamma_B = \varepsilon \varphi^{-1}(B_{x\psi}/2B_z)$  λαμβάνει πάντα θετική τιμή. Για τον λόγο αυτόν στο συγκεκριμένο πείραμα και στα επόμενα πειράματα, όπου χρησιμοποιούνται οι τριγωνομετρικοί αριθμοί της γωνίας  $\gamma_B$  για τον υπολογισμό αποστάσεων, δε χρησιμοποιούνται οι απόλυτες τιμές τους.

Η υπολογιζόμενη τιμή  $L$  του πάχους της στήλης από κάθε αγγείο προσεγγίζει τη μετρούμενη, εντός των ορίων του σφάλματος<sup>9</sup>  $\delta L$ , με διπλασιασμό  $(2\bar{B}_z)$  της ένδειξης του κάθετου  $z$ -αισθητήρα και την ανάλογη διόρθωση της γωνίας απόκλισης  $(\gamma_B = \varepsilon\varphi^{-1} \frac{B_{x\psi}}{\lambda B_z})$  του μαγνητικού πεδίου από τον  $z$ -άξονα. Από τη σχέση υπολογισμού (16) του πάχους και τη γεωμετρία του πειράματος (σχήμα 23α), μπορεί να θεωρηθεί ότι οι αισθητήρες ευαισθητοποιούνται από μια κυλινδρική περιοχή επί της διεύθυνσης του πεδίου  ${}^* \vec{B}$ , που εκτείνεται από τη θέση λήψης των μετρήσεων έως το άκρο της στήλης.



**Σχήμα 23.** Για τη γεωμετρική ερμηνεία (β-δ) των αποτελεσμάτων, η  $B_{xy}$  σχεδιάζεται (α) στην κατεύθυνση του  $x$ -αισθητήρα.

Με τη θεώρηση αυτή, η ποσότητα του κεραμικού υλικού που βρίσκεται εντός του μήκους  $\ell_m = \frac{L_m}{\sin \gamma_B}$  της κυλινδρικής περιοχής ευαισθητοποίησης των αισθητήρων (σχήμα 23β), αυξάνεται μέχρι το κάτω άκρο της να συμπίπτει στην περιφέρεια της κυκλικής βάσης (σχήμα 23γ), όταν το πάχος  $L_m$  της στήλης γίνει  $L = \frac{\delta}{2\varepsilon\varphi \gamma_B}$ .

Το μέτρο του μαγνητικού πεδίου  ${}^* B$  σταθεροποιείται (σχήμα 23δ) όταν η πρόσθεση επιπλέον πλακιδίων δε μεταβάλλει πλέον το ύψος  $\ell_m$  της κυλινδρικής περιοχής διέγερσης των αισθητήρων.

• Η παραπάνω θεώρηση, έγινε με την παραδοχή ότι το μέτρο της  $z$ -συνιστώσας του πεδίου είναι περίπου διπλάσιο από το μετρούμενο. Από τη σύγκριση της πρώτης και της τελευταίας μέτρησης του μαγνητικού πεδίου κατά την αύξηση του πάχους κάθε στήλης, διαπιστώνεται ότι ο ρυθμός και η συνολική αύξηση του μέτρου της  $B_z$  συνιστώσας του πεδίου είναι εμφανώς μικρότερες από αυτές των  $B_x$  και  $B_y$  συνιστωσών. Όπως διαπιστώνεται παρακάτω (παρ. 2.2.5) η περιοχή ευαισθητοποίησης του κεραμικού υλικού και η διέγερση του κάθετου  $z$ -αισθητήρα σε σχέση με τους παράλληλους  $x, y$ -αισθητήρες δεν είναι ίδιες, λόγω της διαφορετικής τοποθέτησή τους στην επιφάνεια των θραυσμάτων.

<sup>9</sup> Το σφάλμα  $\delta L$  στον υπολογισμό του πάχους  $L$  της στήλης στο οποίο το μαγνητικό πεδίο  $(\bar{B})$  αποκτά σταθερή τιμή, υπολογίζεται από τη σχέση (16), σύμφωνα με τη θεωρία μετάδοσης σφαλμάτων:

$$\delta L = \sqrt{\left(\frac{\partial L}{\partial \delta}\right)^2 (\Delta \delta)^2 + \left(\frac{\partial L}{\partial \bar{B}_z}\right)^2 (\delta \bar{B}_z)^2 + \left(\frac{\partial L}{\partial B_{x\psi}}\right)^2 (\Delta B_{x\psi})^2}, \text{ όπου:}$$

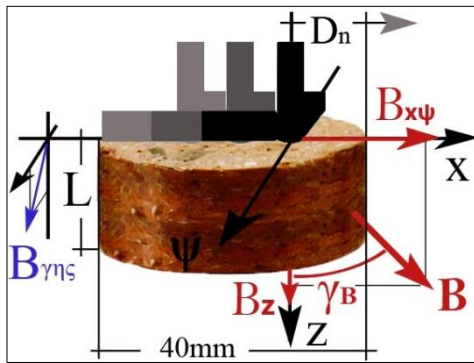
$$\frac{\partial L}{\partial \delta} = \bar{B}_z \cdot (B_{x\psi})^{-1}, \quad \frac{\partial L}{\partial \bar{B}_z} = \delta \cdot (B_{x\psi})^{-1}, \quad \frac{\partial L}{\partial B_{x\psi}} = -\delta \cdot (B_{x\psi})^{-2} \cdot \bar{B}_z \quad \text{και} \quad \Delta \delta = 0,5\text{mm}, \quad \Delta B_{x\psi} = 0,2\text{nT} \quad (16\beta)$$

Η μέση τιμή  $\bar{B}_z$  και η μέσος όρος  $\delta \bar{B}_z$  των απόλυτων αποκλίσεων από τη μέση τιμή υπολογίζεται από τις σχέσεις (15).

Με την παραπάνω θεώρηση, οι μετρήσεις των αισθητήρων δεν εξαρτώνται μόνο από το πάχος των θραυσμάτων, αλλά και από τη θέση των αισθητήρων στην επιφάνεια των οστράκων, όπως επιβεβαιώνεται στο επόμενο πείραμα.

#### 2.2.4 Διερεύνηση της εξάρτησης της περιοχής του κεραμικού υλικού που διεγείρει τους αισθητήρες από τη θέση τους στην επιφάνεια των οστράκων

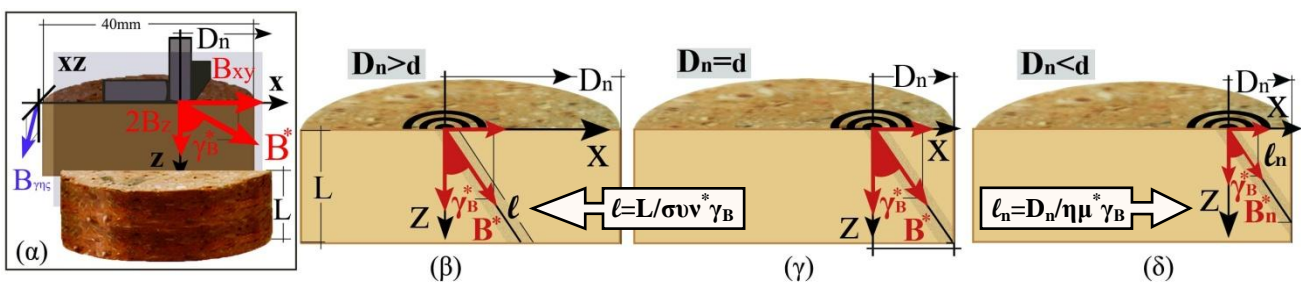
Από την τρισσορθογώνια διάταξη αισθητήρων/μαγνητών (σχήμα 24) στην ίδια θέση ως προς το γεωμαγνητικό πεδίο, λαμβάνονται μετρήσεις σε κυλινδρικά δοκίμια από θραύσματα της βάσης αγγείων 4,5 & 6, διαμέτρου  $40,0 \pm 0,5$  mm και διαφορετικού πάχους  $L$ .



Στη βάση κάθε κυλινδρικού δοκιμίου λαμβάνονται  $n = 14$  μετρήσεις σε ισαπέχουσες θέσεις επί της  $\vec{B}_{x\psi}$  που προσανατολίζεται στην κατεύθυνση του x-αισθητήρα, όταν  $B_x = B_{xy} > 0$  και  $B_y = 0$ .

**Σχήμα 24.** Απεικόνιση του τρόπου διερεύνησης της εξάρτησης της περιοχής ευαισθητοποίησης των αισθητήρων από τη θέση τους στην επιφάνεια του δοκιμίου, με μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου κατά μήκος της  $\vec{B}_{xy}$ .

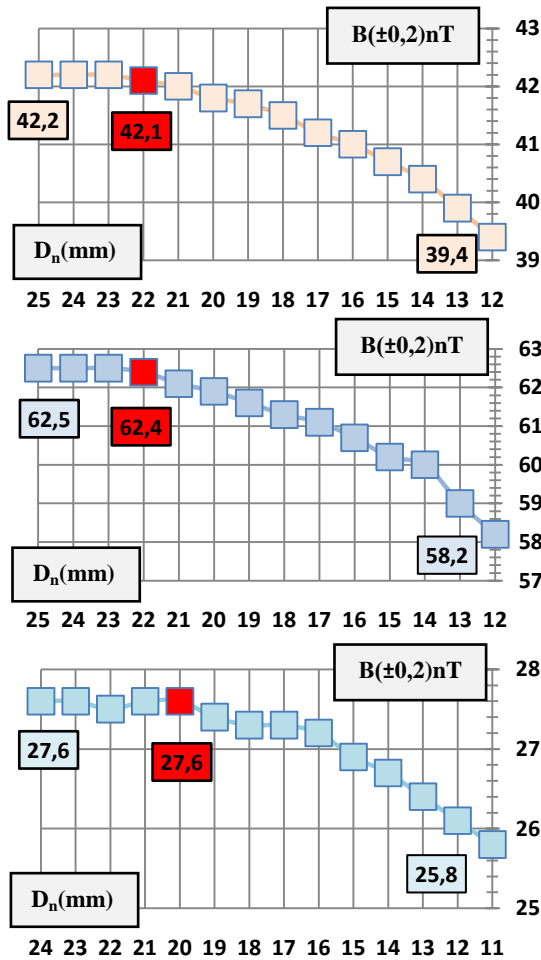
Η απόσταση  $D_n$  ( $\pm 0,2$ )mm της κάθε θέσης, μετριέται από το άκρο του δοκιμίου που βρίσκεται στην κατεύθυνση της  $\vec{B}_{x\psi}$ . Από τις μετρήσεις των  $B_{xy}$  και  $B_z$  σε κάθε θέση μέτρησης με ακρίβεια 0,2 nT, υπολογίζεται η συνισταμένη  $B = \sqrt{B_{x\psi}^2 + B_z^2}$  του μαγνητικού πεδίου με σφάλμα  $\delta B = 0,2$  nT (11), η γωνία  $\gamma_B = \arcsin^{-1} \frac{B_z}{B}$  και το σφάλμα  $\delta \gamma_B$  (12).



**Σχήμα 25.** Γεωμετρική ερμηνεία των πειραματικών αποτελεσμάτων.

Από τα πειραματικά αποτελέσματα που παρατίθενται στους πίνακες B15-B17 του παραρτήματος B, διαπιστώνεται:

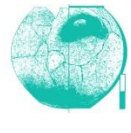
- Το μέτρο του μαγνητικού πεδίου  $B$  σε κάθε κυλινδρικό δοκίμιο εμφανίζει παραπλήσια τιμή στις πρώτες μετρήσεις περίπου στο μέσο της βάσης και ελαττώνεται με αυξανόμενο ρυθμό (διάγραμμα 6), όσο μειώνεται η απόσταση  $D_n$  των θέσεων λήψης των μετρήσεων από το άκρο του δοκιμίου.



Αγγείο 4



Αγγείο 5



Αγγείο 6

Στη θέση  $D_n = d = L \cdot \epsilon \cdot \gamma_B^*$  (σχήμα 25γ), η μετρούμενη απόσταση  $D_n$  για κάθε δοκίμιο της βάσης των αγγείων 4, 5 και 6 προσεγγίζεται από το πάχος του  $L$ , και τις ενδείξεις του μαγνητικού πεδίου (πίνακας 6), όταν η ένδειξη του κάθετου z-αισθητήρα διπλασιαστεί και γίνει η ανάλογη

διόρθωση της γωνίας απόκλισης ( $\gamma_B^* = \epsilon \phi^{-1} \frac{B_{xy}}{\lambda B_z}$ )

του μαγνητικού πεδίου από τον z-άξονα. Το ύψος  $\ell_n$  της κυλινδρικής περιοχής των αισθητήρων, εξαρτάται από την κατευθυντικότητα ( $\gamma_B$ ) του μαγνητικού πεδίου  $\vec{B}$  και από τη θέση τους στην επιφάνεια.

**Διάγραμμα 6.** Μεταβολή του μέτρου  $B$  συναρτήσει της απόστασης  $D_n$  σε δοκίμια από τις βάσεις των αγγείων 4,5 & 6. Από τις τιμές σε κόκκινο πλαίσιο το  $B$  ελαττώνεται όσο μειώνεται η απόσταση  $D_n$ .

- Όταν  $D_n > d$  (σχήμα 25β), το μέτρο  $B$  δε μεταβάλλεται, γιατί το ύψος  $\ell = L / \sin \gamma_B$  της κυλινδρικής περιοχής του κεραμικού υλικού που διεγείρει τους αισθητήρες εξαρτάται από το πάχος  $L$  του δοκιμίου, που παραμένει σταθερό.

- Όταν  $D_n < d$  (σχήμα 25δ), το ύψος  $\ell_n = D_n / \sin \gamma_B$  εξαρτάται από την απόσταση  $D_n$  και το πεδίο  $B$  μειώνεται, όσο οι αισθητήρες μετακινούνται προς το άκρο του δοκιμίου γιατί ελαττώνεται το ύψος της περιοχής του κεραμικού υλικού που διεγείρει τους αισθητήρες.

| Αγγεία | $L(\pm 0,2)\text{mm}$ | $D_n=d(\pm 0,2)\text{mm}$<br>μετρούμενη | $B_{xy}$<br>( $\pm 0,2$ )nT | $B_z$<br>( $\pm 0,2$ )nT | $B$<br>( $\pm 0,2$ )nT | $\gamma_B^{\circ}$ | $d(\text{mm})$<br>υπολογιζόμενη |
|--------|-----------------------|---|-----------------------------|--------------------------|------------------------|--------------------|---------------------------------|
| 4      | 20,0                  | 22,0                                    | 38,2                        | 17,7                     | 42,1                   | $65,1 \pm 0,3$     | $21,6 \pm 0,3$                  |
| 5      | 12,0                  | 22,0                                    | 60,1                        | 16,6                     | 62,4                   | $74,6 \pm 0,2$     | $21,7 \pm 0,3$                  |
| 6      | 21,0                  | 20,0                                    | 24,2                        | 13,2                     | 27,6                   | $61,4 \pm 0,5$     | $19,3 \pm 0,3$                  |

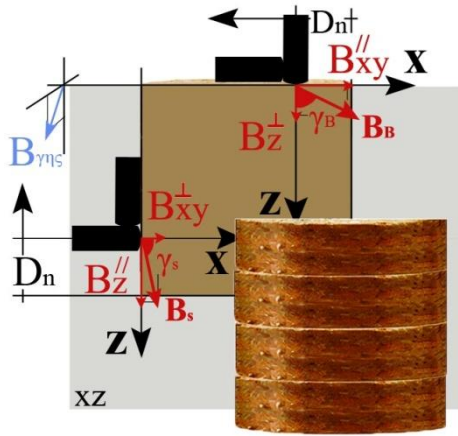
**Πίνακας 6.** Σύγκριση της μετρούμενης και της υπολογιζόμενης απόστασης  $D_n=d$  από τη γεωμετρία του δοκιμίου και τις μετρήσεις των αισθητήρων.

Η μετρούμενη απόσταση  $d$  προσεγγίζεται από το πάχος  $L$  των δοκιμίων και τις μετρήσεις των  $B_{xy}$ ,  $B_z$  στη θέση μέτρησης που αρχίζει η μείωση των τιμών του μαγνητικού πεδίου, η οποία στους πίνακες B15-B17

επισημαίνεται με γκρίζο χρώμα, από τη σχέση:  $d = L \cdot \epsilon \cdot \gamma_B^*$ , όπου:  $\epsilon \phi^* \gamma_B^* = \frac{B_{xy}}{\lambda B_z}$ , για  $\lambda \approx 2$  (17α)







**Σχήμα 27.** Σχηματική απεικόνιση του μετρούμενου πεδίου στη βάση και στα πλευρικά τοιχώματα των δοκιμίων από τις βάσεις των αγγείων 4,5 και 6 από την τρισσορθογώνια διάταξη των αισθητήρων.

Από τις μετρήσεις των  $B_{x\psi}^{\parallel}$  και  $B_z^{\perp}$  (σχήμα 27) σε κάθε θέση της βάσης των δοκιμίων υπολογίζεται (πίνακες 7α, B18α, B20α), η συνισταμένη  $B_B \equiv B_{\text{βάση}} = \sqrt{(B_{x\psi}^{\parallel})^2 + (B_z^{\perp})^2}$  του μαγνητικού πεδίου με σφάλμα  $\delta B_B = 0,2 \text{ nT}$  (11), η γωνία  $\gamma_B = \arctan \frac{B_{x\psi}^{\parallel}}{B_z^{\perp}}$  και το σφάλμα  $\delta \gamma_B$  (13). Από τις μετρήσεις των  $B_{x\psi}^{\perp}$  και  $B_z^{\parallel}$  στην κυρτή επιφάνεια των δοκιμίων, υπολογίζεται σε κάθε θέση η συνισταμένη  $B_s \equiv B_{\text{πλευρά}} = \sqrt{(B_{x\psi}^{\perp})^2 + (B_z^{\parallel})^2}$  του μαγνητικού πεδίου με σφάλμα  $\delta B_s = 0,2 \text{ nT}$ , η γωνία  $\gamma_s = \arctan \frac{B_z^{\parallel}}{B_{x\psi}^{\perp}}$  και το σφάλμα  $\delta \gamma_s$ .

Με τον ίδιο τρόπο (πίνακες 7β, B18β, B20β), υπολογίζονται τα μέτρα  $B^{\perp}, B^{\parallel}$  και οι γωνίες  $\gamma^{\perp}, \gamma^{\parallel}$  του μαγνητικού πεδίου, από τις ενδείξεις μόνο των κάθετων ( $B_{x\psi}^{\perp}, B_z^{\perp}$ ) και μόνο των παράλληλων αισθητήρων ( $B_{x\psi}^{\parallel}, B_z^{\parallel}$ ), στις αντίστοιχες ισαπέχουσες θέσεις μέτρησης στη βάση και στα πλευρικά τοιχώματα των δοκιμίων, σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$B^{\perp} = \sqrt{(B_{x\psi}^{\perp})^2 + (B_z^{\perp})^2}, \quad B^{\parallel} = \sqrt{(B_{x\psi}^{\parallel})^2 + (B_z^{\parallel})^2} \quad \text{και} \quad \gamma^{\perp} = \arctan \frac{B_{x\psi}^{\perp}}{B_z^{\perp}}, \quad \gamma^{\parallel} = \arctan \frac{B_{x\psi}^{\parallel}}{B_z^{\parallel}}$$

Επειδή  $D_n < d = L \cdot \varepsilon \mu \gamma_{B,s}$ , τα ύψη  $\ell_B = \frac{D_n}{\varepsilon \mu \gamma_B} \neq \ell_s = \frac{D_n}{\varepsilon \mu \gamma_s}$  των κυλινδρικών περιοχών διέγερσης των αισθητήρων και το μετρούμενο πεδίο  $B_B, B_s$  (παρ.2.2.4), αυξάνονται στις ισαπέχουσες θέσεις μέτρησης στη βάση και στην πλευρά κάθε δοκιμίου, με την αύξηση της απόστασης  $D_n$ .

-Αν η κατευθυντικότητα του πεδίου είναι σταθερή στο κεραμικό υλικό, ως αποτέλεσμα της ομοιόμορφης μαγνήτισής του, τότε οι υπολογιζόμενες γωνίες στις θέσεις μέτρησης της βάσης ( $\gamma_B$ ) πρέπει να εμφανίζουν παραπλήσιες τιμές. Το ίδιο πρέπει να ισχύει και για τις γωνίες ( $\gamma_s$ ) στην πλευρά των δοκιμίων.

-Αν επιπλέον οι διαφορετικά προσανατολισμένοι αισθητήρες στην επιφάνεια των δοκιμίων διεγείρονται στον ίδιο βαθμό, τότε επειδή στις ισαπέχουσες θέσεις κατά  $D_n$  στη βάση και στην πλευρά των δοκιμίων μετριέται η ίδια συνιστώσα του πεδίου από τον κάθετο και τον παράλληλο αισθητήρα, οι υπολογιζόμενες γωνίες  $\gamma_B, \gamma_s$  πρέπει να είναι συμπληρωματικές. Στην περίπτωση αυτή, οι αποκλίσεις στην τιμή του αθροίσματος  $\gamma_B + \gamma_s \approx 90^\circ$  μπορούν να προσδιοριστούν, γιατί οφείλονται αποκλειστικά στο διαφορετικό ύψος  $\ell_B \neq \ell_s$  των κυλινδρικών περιοχών διέγερσης των αισθητήρων που μεταβάλλονται κατά υπολογίσιμο τρόπο.

Υπό τις παραπάνω προϋποθέσεις, ελέγχεται η κατευθυντικότητα του μαγνητικού πεδίου στη μάζα του κεραμικού υλικού και συγκρίνεται ο βαθμός διέγερσης του κάθετου και του παράλληλου αισθητήρα από μετρήσεις της ίδιας συνιστώσας του πεδίου, σε θέσεις μέτρησης που απέχουν την ίδια απόσταση από τα άκρα του δοκιμίου για την κανονικοποίηση των ενδείξεών τους.

| ΑΓΓΕΙΟ 5   |                            | ΑΓΓΕΙΟ 5   |  |                                       |  |  |   |  |   |                            |                            |                           |                            |
|--|----------------------------|--|--|---------------------------------------|--|--|---|--|---|----------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|
| Πίνακας α  |                            | Μετρήσεις από τον κάθετο και τον παράλληλο αισθητήρα στην ίδια θέση μέτρησης |  |                                       |  |  |   |  |   |                            |                            |                           |                            |
| L=40,4±0,2 (mm)  |                            | Βάση(B)  |  |                                       |  |  | Πλευρές(s)                                |  |   |                            |                            |                           |                            |
| n  | D <sub>n</sub> (mm) (±0,2) | B <sub>xψ</sub> <sup>//</sup> (nT) (±0,2)                                    | B <sub>z</sub> <sup>⊥</sup> (nT) (±0,2)  | B <sub>B</sub> (nT) (±0,2)            | γ <sub>B</sub> (±0,2°)                   | B <sub>xψ</sub> <sup>⊥</sup> (nT) (±0,2) | B <sub>z</sub> <sup>//</sup> (nT) (±0,2)  | B <sub>s</sub> (nT) (±0,2)               | γ <sub>s</sub> (±0,3°)                  | λ <sub>xψ</sub>            | <λ <sub>xψ</sub> > (±0,01) | λ <sub>z</sub>            | <λ <sub>z</sub> > (±0,01)  |
| 1  | 14,0                       | 56,9   | 15,9                                     | 59,1                                  | 74,4                                     | 29,2                                     | 31,4                                      | 42,9                                     | 47,1                                    | 1,95                       |                            | 1,97                      |                            |
| 2  | 15,4                       | 58,1   | 16,1                                     | 60,3                                  | 74,5                                     | 29,5                                     | 31,7                                      | 43,3                                     | 47,1                                    | 1,97                       |                            | 1,97                      |                            |
| 3  | 16,8                       | 58,6   | 16,2                                     | 60,8                                  | 74,5                                     | 29,7                                     | 32,0                                      | 43,7                                     | 47,1                                    | 1,97                       |                            | 1,98                      |                            |
| 4  | 18,2                       | 59,1   | 16,2                                     | 61,3                                  | 74,7                                     | 29,8                                     | 32,4                                      | 44,0                                     | 47,4                                    | 1,98                       |                            | 2,00                      |                            |
| 5  | 19,6                       | 59,2   | 16,3                                     | 61,4                                  | 74,6                                     | 29,9                                     | 32,5                                      | 44,2                                     | 47,4                                    | 1,98                       |                            | 1,99                      |                            |
| 6  | 21,0                       | 59,7   | 16,3                                     | 61,9                                  | 74,7                                     | 30,0                                     | 32,6                                      | 44,3                                     | 47,4                                    | 1,99                       |                            | 2,00                      |                            |
| 7  | 22,4                       | 59,9   | 16,4                                     | 62,1                                  | 74,7                                     | 30,0                                     | 32,8                                      | 44,5                                     | 47,6                                    | 2,00                       |                            | 2,00                      |                            |
| 8  | 23,8                       | 60,2   | 16,4                                     | 62,4                                  | 74,8                                     | 30,1                                     | 32,9                                      | 44,6                                     | 47,5                                    | 2,00                       |                            | 2,01                      |                            |
| 9  | 25,2                       | 60,4   | 16,5                                     | 62,6                                  | 74,7                                     | 30,2                                     | 33,2                                      | 44,9                                     | 47,7                                    | 2,00                       |                            | 2,01                      |                            |
| 10   | 26,6                       | 60,6   | 16,5                                     | 62,8                                  | 74,8                                     | 30,2                                     | 33,3                                      | 45,0                                     | 47,8                                    | 2,01                       |                            | 2,02                      |                            |
| Μετρήσεις με την ίδια τοποθέτηση του αισθητήρα στη βάση (B) και στις πλευρές (s) |                            |  |  |                                       |  |  |   |  |   |                            |                            |                           |                            |
| Πίνακας β  |                            | (b)  | (s)                                      |                                       |  |  |   | (s)                                      | (b)                                     |                            |                            |                           |                            |
| n  | D <sub>n</sub> (mm) (±0,2) | B <sub>xψ</sub> <sup>//</sup> (nT) (±0,2)                                    | B <sub>z</sub> <sup>//</sup> (nT) (±0,2) | B <sup>//</sup> (nT) (±0,2)           | γ <sup>//</sup> (±0,2°)                  | <γ <sup>//</sup> > (±0,1°)               | d <sup>//</sup> (mm) (±0,4)               | B <sub>xψ</sub> <sup>⊥</sup> (nT) (±0,2) | B <sub>z</sub> <sup>⊥</sup> (nT) (±0,2) | B <sup>⊥</sup> (nT) (±0,2) | γ <sup>⊥</sup> (±0,3°)     | <γ <sup>⊥</sup> > (±0,0°) | d <sup>⊥</sup> (mm) (±0,4) |
| 1  | 14,0                       | 56,9   | 31,4                                     | 65,0                                  | 61,1                                     |  |   | 29,2                                     | 15,9                                    | 33,2                       | 61,4                       |                           |                            |
| 2  | 15,4                       | 58,1   | 31,7                                     | 66,2                                  | 61,4                                     |  |   | 29,5                                     | 16,1                                    | 33,6                       | 61,4                       |                           |                            |
| 3  | 16,8                       | 58,6   | 32,0                                     | 66,8                                  | 61,4                                     |  |   | 29,7                                     | 16,2                                    | 33,8                       | 61,4                       |                           |                            |
| 4  | 18,2                       | 59,1   | 32,4                                     | 67,4                                  | 61,3                                     |  |   | 29,8                                     | 16,2                                    | 33,9                       | 61,5                       |                           |                            |
| 5  | 19,6                       | 59,2   | 32,5                                     | 67,5                                  | 61,2                                     |  |   | 29,9                                     | 16,3                                    | 34,1                       | 61,4                       |                           |                            |
| 6  | 21,0                       | 59,7   | 32,6                                     | 68,0                                  | 61,4                                     |  |   | 30,0                                     | 16,3                                    | 34,1                       | 61,5                       |                           |                            |
| 7  | 22,4                       | 59,9   | 32,8                                     | 68,3                                  | 61,3                                     |  |   | 30,0                                     | 16,4                                    | 34,2                       | 61,3                       |                           |                            |
| 8  | 23,8                       | 60,2   | 32,9                                     | 68,6                                  | 61,3                                     |  |   | 30,1                                     | 16,4                                    | 34,3                       | 61,4                       |                           |                            |
| 9  | 25,2                       | 60,4   | 33,2                                     | 68,9                                  | 61,2                                     |  |   | 30,2                                     | 16,5                                    | 34,4                       | 61,3                       |                           |                            |
| 10   | 26,6                       | 60,6   | 33,3                                     | 69,1                                  | 61,2                                     |  |   | 30,2                                     | 16,5                                    | 34,4                       | 61,3                       |                           |                            |
| Διορθωμένες μετρήσεις  |                            |  |  |                                       |  |  |   |  |   |                            |                            |                           |                            |
| Πίνακας γ  |                            | Βάση(B)  |  |                                       |  |  | Πλευρές(s)                                |  |   |                            |                            |                           |                            |
| n  | D <sub>n</sub> (mm) (±0,2) | B <sub>xψ</sub> <sup>//</sup> (nT) (±0,2)                                    | *B <sub>z</sub> <sup>⊥</sup> (nT) (±0,6) | *B <sub>B</sub> (nT) (±0,3)           | *γ <sub>B</sub>                          | ℓ <sub>B</sub> (mm)                      | *B <sub>xψ</sub> <sup>⊥</sup> (nT) (±0,9) | B <sub>z</sub> <sup>//</sup> (nT)        | *B <sub>s</sub> (nT) (±0,8)             | *γ <sub>s</sub> (±0,2°)    | ℓ <sub>s</sub> (mm)        |                           |                            |
| 1  | 14,0                       | 56,9   | 31,7                                     | 65,1                                  | 60,9±0,5                                 | 16,0±0,2                                 | 58,0                                      | 31,4                                     | 65,9                                    | 28,4                       | 29,4±0,5                   |                           |                            |
| 2  | 15,4                       | 58,1   | 32,1                                     | 66,4                                  | 61,1±0,5                                 | 17,6±0,2                                 | 58,6                                      | 31,7                                     | 66,6                                    | 28,4                       | 32,3±0,5                   |                           |                            |
| 3  | 16,8                       | 58,6   | 32,3                                     | 66,9                                  | 61,1±0,4                                 | 19,2±0,2                                 | 58,9                                      | 32,0                                     | 67,1                                    | 28,5                       | 35,2±0,5                   |                           |                            |
| 4  | 18,2                       | 59,1   | 32,3                                     | 67,4                                  | 61,3±0,4                                 | 20,7±0,2                                 | 59,1                                      | 32,4                                     | 67,4                                    | 28,7                       | 37,9±0,5                   |                           |                            |
| 5  | 19,6                       | 59,2   | 32,5                                     | 67,5                                  | 61,2±0,4                                 | 22,4±0,2                                 | 59,3                                      | 32,5                                     | 67,7                                    | 28,7                       | 40,8±0,5                   |                           |                            |
| 6  | 21,0                       | 59,7   | 32,5                                     | 68,0                                  | 61,4±0,4                                 | 23,9±0,2                                 | 59,5                                      | 32,6                                     | 67,9                                    | 28,7                       | 43,7±0,5                   |                           |                            |
| 7  | 22,4                       | 59,9   | 32,7                                     | 68,3                                  | 61,4±0,4                                 | 25,5±0,3                                 | 59,5                                      | 32,8                                     | 68,0                                    | 28,8                       | 46,4±0,5                   |                           |                            |
| 8  | 23,8                       | 60,2   | 32,7                                     | 68,5                                  | 61,5±0,4                                 | 27,1±0,3                                 | 59,7                                      | 32,9                                     | 68,2                                    | 28,8                       | 49,3±0,5                   |                           |                            |
| 9  | 25,2                       | 60,4   | 32,9                                     | 68,8                                  | 61,4±0,4                                 | 28,7±0,3                                 | 59,9                                      | 33,2                                     | 68,5                                    | 29,0                       | 52,0±0,5                   |                           |                            |
| 10   | 26,6                       | 60,6   | 32,9                                     | 69,0                                  | 61,5±0,4                                 | 30,3±0,3                                 | 59,9                                      | 33,3                                     | 68,6                                    | 29,1                       | 54,8±0,5                   |                           |                            |
| Πίνακας δ  |                            | n  | D <sub>n</sub> (mm)                      | B <sub>xψ</sub> <sup>⊥</sup> (±0,2nT) | B <sub>z</sub> <sup>⊥</sup> (nT)(±0,2nT) | M <sub>z</sub> (mA/m)                    | M <sub>xψ</sub> (mA/m)                    | γ <sup>⊥</sup>                           |   |                            |                            |                           |                            |
|  |                            | 10   | 26,6±0,2                                 | 30,2                                  | 16,5                                     | 26,3±0,3                                 | 48,1±0,3                                  | 61,3±0,3°                                |   |                            |                            |                           |                            |

**Πίνακας 7.** Ενδεικτικές μετρήσεις της ίδιας συνιστώσας (B<sub>xψ</sub>, B<sub>z</sub>) του πεδίου από τον κάθετο (⊥) και τον παράλληλο (//) αισθητήρα σε ισαπέχουσες θέσεις κατά D<sub>n</sub> από τα άκρα, στη βάση (B) και στην πλευρά (s) του δοκιμίου από τη βάση του αγγείου 5.

Από τα πειραματικά αποτελέσματα (πίνακες 7, B18 ,B20) των μετρήσεων σε δοκίμια της βάσης των αγγείων 5,4 και 6 διαπιστώνεται:



• Η κατευθυντικότητα του μαγνητικού πεδίου (πίνακες 7α, B18α, B21α) στη βάση ( $\gamma_B$ ) και στις πλευρές ( $\gamma_s$ ) όλων των δοκιμών εμφανίζει μικρή αύξηση με την αύξηση της απόστασης  $D_n$  που δεν οφείλεται στη μαγνητική ανισοτροπία του κεραμικού υλικού. Η κατευθυντικότητα του πεδίου στις ισαπέχουσες θέσεις μέτρησης της βάσης και των πλευρών σε όλα τα δοκίμια ( $\gamma_s \neq \gamma_B$ ) είναι διαφορετική. Επειδή  $\gamma_B + \gamma_s \neq 90^\circ$ , ο κάθετος και ο παράλληλος αισθητήρας δεν διεγείρονται κατά τον ίδιο βαθμό από το μαγνητικό πεδίο του κεραμικού υλικού.

Οι τιμές του μέτρου του μαγνητικού πεδίου αυξάνονται με την απόσταση  $D_n$  και στις ισαπέχουσες θέσεις στη βάση ( $B_B$ ) και στις πλευρές ( $B_s$ ) κάθε δοκιμίου εμφανίζουν διαφορετικές ( $B_s \neq B_B$ ) μεταξύ τους τιμές.

Οι ενδείξεις του κάθετου αισθητήρα ( $B_{x\psi}^\perp, B_z^\perp$ ) εμφανίζουν σε κάθε δοκίμιο μικρότερο ρυθμό αύξησης και εύρος τιμών και είναι περίπου διπλάσιες από αυτές ( $B_{x\psi}^{\parallel}, B_z^{\parallel}$ ) του παράλληλου αισθητήρα ( $B_{x\psi}^{\parallel}, B_z^{\parallel}$ ). Για τη διόρθωση των ενδείξεων, υπολογίζονται σε κάθε απόσταση  $D_n$  οι λόγοι  $\lambda_{x\psi} = B_{x\psi}^{\parallel}/B_{x\psi}^\perp$ ,  $\lambda_z = B_z^{\parallel}/B_z^\perp$  και οι μέσες τιμές  $\langle \lambda_{x\psi} \rangle \approx \langle \lambda_z \rangle \approx \lambda = 2$

• Όταν στις ισαπέχουσες θέσεις μέτρησης στη βάση και στην πλευρά (πίνακες 7β, B18β, B20β) κάθε δοκιμίου υπολογιστούν το μέτρο ( $B^{\parallel}, B^\perp$ ) και η κατευθυντικότητα ( $\gamma^{\parallel}, \gamma^\perp$ ) του πεδίου, μόνο από τις ενδείξεις του παράλληλου ( $\parallel$ ) και μόνο του κάθετου ( $\perp$ ) αισθητήρα, διαπιστώνεται ότι  $B^{\parallel} \neq B^\perp$ ,  $\gamma^{\parallel} \approx \gamma^\perp$  και  $B_i^{\parallel} \neq B_i^\perp$  ( $i = x, y, z$ ). Οι ενδείξεις του παράλληλου και του κάθετου αισθητήρα για τη μέτρηση της ίδιας συνιστώσας του

πεδίου, διαφοροποιούνται κατά τον ίδιο παράγοντα  $\lambda$ , έτσι ώστε:  $\epsilon\phi^{-1} \frac{B_{x\psi}^{\parallel}}{B_z^{\parallel}} = \gamma^{\parallel} \approx \gamma^\perp = \epsilon\phi^{-1} \frac{\lambda \cdot B_{x\psi}^\perp}{\lambda \cdot B_z^\perp}$

Από τις μέσες τιμές  $\langle \gamma^{\parallel} \rangle$ ,  $\langle \gamma^\perp \rangle$  προσδιορίζονται οι μέγιστες αποστάσεις  $d^{\parallel} = L \cdot \epsilon\phi \langle \gamma^{\parallel} \rangle$ ,  $d^\perp = L \cdot \epsilon\phi \langle \gamma^\perp \rangle$  και τα αντίστοιχα σφάλματα<sup>11</sup>  $\delta d^{\parallel}$ ,  $\delta d^\perp$  της θέσης των αισθητήρων από το άκρο του οστράκου, έτσι ώστε η περιοχή διέγερσης να εκτείνεται σε όλο το πάχος των δοκιμών. Από τους παραπάνω υπολογισμούς και τον προσδιορισμό των σφαλμάτων  $\delta \langle \gamma^{\parallel} \rangle$ ,  $\delta \langle \gamma^\perp \rangle$  και  $\delta d^{\parallel}$ ,  $\delta d^\perp$  διαπιστώνεται ότι  $\langle \gamma^{\parallel} \rangle \approx \langle \gamma^\perp \rangle$  και  $d^{\parallel} \approx d^\perp$ . Επειδή  $D_n < d^{\parallel}$  και  $D_n < d^\perp$  το μέτρο του μαγνητικού πεδίου (παρ.2.2.4) αυξάνεται με την απόσταση  $D_n$ .

• Μετά την διόρθωση  $B_z^\perp = \langle \lambda_z \rangle \cdot B_z^\perp$ ,  $B_{x\psi}^\perp = \langle \lambda_{x\psi} \rangle \cdot B_{x\psi}^\perp$  (19α) των ενδείξεων  $B_z^\perp$ ,  $B_{x\psi}^\perp$  του κάθετου αισθητήρα (σχήμα 28), τον υπολογισμό των σφαλμάτων<sup>12</sup>  $\delta^* B_z^\perp$ ,  $\delta^* B_{x\psi}^\perp$  και τον επαναπροσδιορισμό των

μέτρων  $B_B = \sqrt{(B_{x\psi}^{\parallel})^2 + (B_z^{\parallel})^2}$ ,  $B_s = \sqrt{(B_z^{\parallel})^2 + (B_{x\psi}^\perp)^2}$ , των γωνιών  $\gamma_B = \epsilon\phi^{-1} \frac{B_{x\psi}^{\parallel}}{B_z^\perp}$ ,  $\gamma_s = \epsilon\phi^{-1} \frac{B_z^{\parallel}}{B_{x\psi}^\perp}$  και των

σφαλμάτων  $\delta^* B_B$ ,  $\delta^* B_s$ ,  $\delta^* \gamma_B$ ,  $\delta^* \gamma_s$  (πίνακες 7γ, B18γ, B20γ), σε κάθε ισαπέχουσα θέση μέτρησης κατά  $D_n$  από τα άκρα κάθε δοκιμίου στη βάση και στα πλευρικά τοιχώματα, διαπιστώνεται ότι  $B_B \approx B_s$  και  $\gamma_B + \gamma_s \approx 90^\circ$ .

<sup>11</sup> Το σφάλμα  $\delta d^j$  της απόστασης  $d^j = L \cdot \epsilon\phi \bar{\gamma}^j$  από τις μετρήσεις των αισθητήρων με τον άξονά τους κάθετο ( $j = \perp$ ) ή παράλληλο ( $j = \parallel$ ) στην επιφάνεια των δοκιμών, υπολογίζεται σύμφωνα με τη θεωρία μετάδοσης σφαλμάτων από τη σχέση:

$$\delta d^j = \sqrt{\left(\frac{\partial d^j}{\partial L}\right)^2 (\Delta L)^2 + \left(\frac{\partial d^j}{\partial \bar{\gamma}^j}\right)^2 (\delta \bar{\gamma}^j)^2} = \sqrt{(\epsilon\phi \bar{\gamma}^j)^2 \cdot (\Delta L)^2 + (L \cdot \sin^{-2} \bar{\gamma}^j)^2 (\delta \bar{\gamma}^j)^2}, \text{ για } \Delta L = 0,2 \text{ mm} \quad (18)$$

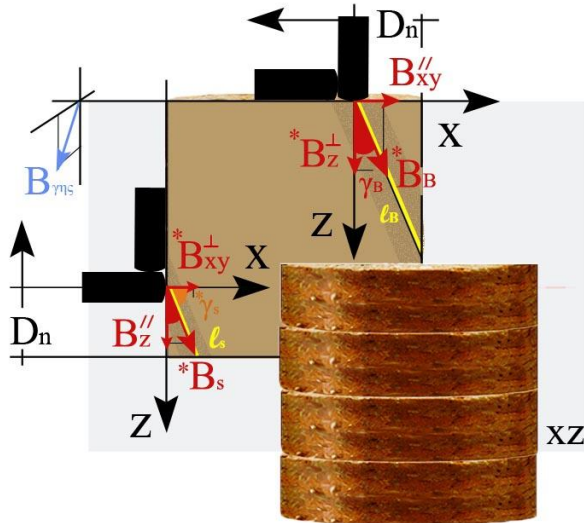
Οι μέσες τιμές  $\bar{\gamma}^j$  και οι μέσοι όροι  $\delta \bar{\gamma}^j$  των απόλυτων αποκλίσεων από τη μέση τιμή, υπολογίζονται από τις σχέσεις (15α,β).

<sup>12</sup> Το σφάλμα υπολογισμού  $\delta^* B_z^\perp$  της κανονικοποιημένης τιμής  $B_z^\perp = \langle \lambda_z \rangle \cdot B_z^\perp$  του κάθετου αισθητήρα στις θέσεις μέτρησης στη βάση των δοκιμών, υπολογίζεται σύμφωνα με τη θεωρία μετάδοσης σφαλμάτων από τη σχέση:

$$\delta^* B_z^\perp = \sqrt{\left(\frac{\partial^* B_z^\perp}{\partial \langle \lambda_z \rangle}\right)^2 (\delta \langle \lambda_z \rangle)^2 + \left(\frac{\partial^* B_z^\perp}{\partial B_z^\perp}\right)^2 (\Delta B_z^\perp)^2} = \sqrt{(B_z^\perp)^2 (\delta \langle \lambda_z \rangle)^2 + (\langle \lambda_z \rangle)^2 (\Delta B_z^\perp)^2}, \text{ για } \Delta B_z^\perp = 0,2 \text{ nT} \quad (19\beta)$$

Η μέση τιμή  $\langle \lambda_z \rangle$  και ο μέσος όρος  $\delta \langle \lambda_z \rangle$  των απόλυτων αποκλίσεων από τη μέση τιμή, υπολογίζονται από τις σχέσεις (15α,β).

Με τον ίδιο τρόπο από τις παραπάνω σχέσεις, υπολογίζεται το σφάλμα  $\delta^* B_{x\psi}^\perp$  της κανονικοποιημένης τιμής  $B_{x\psi}^\perp = \langle \lambda_{x\psi} \rangle \cdot B_{x\psi}^\perp$  του κάθετου αισθητήρα στις θέσεις μέτρησης στα πλευρικά τοιχώματα των δοκιμών.



**Σχήμα 28.** Σχηματική απεικόνιση του μετρούμενου πεδίου στη βάση και στα πλευρικά τοιχώματα των δοκιμών από τις βάσεις των αγγείων 4,5 και 6 και των περιοχών του κεραμικού υλικού που διεγείρουν τους αισθητήρες, μετά από τη διόρθωση των ενδείξεων του κάθετου αισθητήρα.

Εφόσον στις ισαπέχουσες θέσεις μέτρησης από τα άκρα στη βάση και στα πλευρικά τοιχώματα των δοκιμών, το μαγνητικό πεδίο εμφανίζει παραπλήσιο μέτρο και παρόμοια κατευθυντικότητα ( $\gamma_s \approx 90^\circ - \gamma_B$ ), σύμφωνα με την παραπάνω θεώρηση, τα μήκη  $l_B = \frac{D_n}{\eta\mu^* \gamma_B}$ ,  $l_s = \frac{D_n}{\eta\mu^* \gamma_s}$  (20α) των κυλινδρικών περιοχών του κεραμικού υλικού που διεγείρουν τους αισθητήρες θα έπρεπε να έχουν παραπλήσιο μήκος. Παρά τις μικρές υπολογιζόμενες διαφορές (λίγων mm) στα δοκίμια των αγγείων 4,6 (πίνακες B18,B20) τα μήκη  $l_B$ ,  $l_s$  είναι διαφορετικά, όπως διαπιστώνεται από τη συνεκτίμηση των σφαλμάτων<sup>13</sup>  $\delta l_B$  και  $\delta l_s$ . Οι μικρές διαφορές στα μήκη  $l_B$ ,  $l_s$  οφείλονται στην τιμή της γωνίας απόκλισης  $\gamma_B$  του μαγνητικού πεδίου από την κάθετο στην επιφάνεια, η οποία είναι περίπου  $45^\circ$ , παραπλήσια της έγκλισης του γήινου μαγνητικού πεδίου στον τόπο και κατά το χρόνο κατασκευής των αγγείων.

• Οι ακτίνες  $r_B$ ,  $r_s$  των κυλινδρικών περιοχών που διεγείρουν τους αισθητήρες, με μήκη  $l_B = \frac{D_n}{\eta\mu^* \gamma_B}$  και  $l_s = \frac{D_n}{\eta\mu^* \gamma_s}$  (20α), στην κατεύθυνση που ορίζουν οι συμπληρωματικές γωνίες απόκλισης  $\gamma_B$ ,  $\gamma_s \approx 90^\circ - \gamma_B$  του μαγνητικού πεδίου από την κάθετο στην επιφάνεια στις ισαπέχουσες θέσεις μέτρησης από τα άκρα κατά

<sup>13</sup> Το σφάλμα  $\delta l_B$  του μήκους  $l_B = \frac{D_n}{\eta\mu^* \gamma_B}$  της θεωρούμενης κυλινδρικής περιοχής του κεραμικού υλικού που διεγείρει τους αισθητήρες, υπολογίζεται σε κάθε θέση μέτρησης στη βάση των δοκιμών σύμφωνα με τη θεωρία μετάδοσης σφαλμάτων από τη σχέση:  $\delta l_B = \sqrt{\left(\frac{\partial l_B}{\partial D_n}\right)^2 \cdot (\Delta D_n)^2 + \left(\frac{\partial l_B}{\partial \gamma_B}\right)^2 \cdot (\delta \gamma_B)^2}$ , όπου:

$$\frac{\partial l_B}{\partial D_n} = \eta\mu^{-1} \gamma_B \text{ και } \frac{\partial l_B}{\partial \gamma_B} = -D_n \cdot \eta\mu^{-2} \gamma_B \cdot \sin \gamma_B, \text{ για } \Delta D_n = 0,2\text{mm} \quad (20\beta)$$

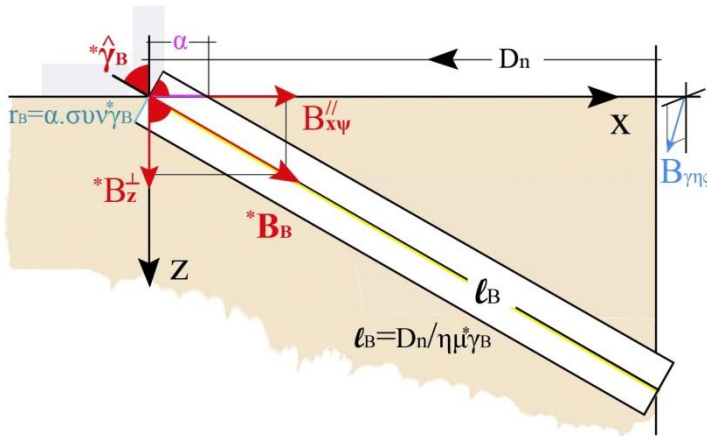
Το σφάλμα  $\delta \gamma_B$  της γωνίας  $\gamma_B = \arctan \frac{B_{x\psi}}{B_z}$  υπολογίζεται σε κάθε θέση μέτρησης από τη σχέση (13).

Με τον ίδιο τρόπο, από τις παραπάνω σχέσεις, υπολογίζεται το σφάλμα  $\delta l_s$  του μήκους  $l_s = \frac{D_n}{\eta\mu^* \gamma_s}$ , σε κάθε θέση μέτρησης στα πλευρικά τοιχώματα των δοκιμών.

$D_n$  στη βάση και στα πλευρικά τοιχώματα των δοκιμίων, πρέπει να μεταβάλλονται κατά τέτοιον τρόπο, ώστε τα μέτρα  $^*B_B$ ,  $^*B_s$  του μαγνητικού πεδίου να διατηρούν σταθερή τιμή.

Αν θεωρηθεί ότι οι ακτίνες εξαρτώνται από την κατευθυντικότητα του μαγνητικού πεδίου, σύμφωνα με τις σχέσεις  $r_B = a \cdot \sin \gamma_B$  και  $r_s = a \cdot \sin \gamma_s$  (21) τότε  $^*B_B = ^*B_s$  και οι λόγοι  $r_B/\ell_B$  και  $r_s/\ell_s$  παραμένουν σταθεροί, εφόσον  $\eta\mu^* \gamma_B \approx \sin^* \gamma_s$  και  $\sin^* \gamma_B \approx \eta\mu^* \gamma_s$ , σύμφωνα με τις σχέσεις (20α, 21):

$$\frac{r_B}{\ell_B} = \frac{a \cdot \sin^* \gamma_B}{\frac{D_n}{\eta\mu^* \gamma_B}} = \frac{a \cdot \eta\mu^* \gamma_B \cdot \sin^* \gamma_B}{D_n}, \quad \frac{r_s}{\ell_s} = \frac{a \cdot \sin^* \gamma_s}{\frac{D_n}{\eta\mu^* \gamma_s}} = \frac{a \cdot \eta\mu^* \gamma_s \cdot \sin^* \gamma_s}{D_n} \quad (22)$$



**Σχήμα 29.** Απεικόνιση του κυλινδρικού χώρου που διεγείρει τους αισθητήρες στις θέσεις μέτρησης στη βάση των κυλινδρικών δοκιμίων, κατά μήκος της  $B_{x\psi}$  που προσανατολίζεται στην κατεύθυνση του x-αισθητήρα. Οι διαστάσεις του  $\ell_B$ ,  $r_B$  εξαρτώνται από την απόσταση  $D_n$  της θέσης λήψης των μετρήσεων από το άκρο του δοκιμίου και από την κατευθυντικότητα  $\gamma_B$  του πεδίου  $^*B_B$  και από την παράμετρο  $\alpha$ , που γεωμετρικά αποτελεί την ακτίνα ευαισθησίας των αισθητήρων γύρω από τη θέση λήψης των μετρήσεων.

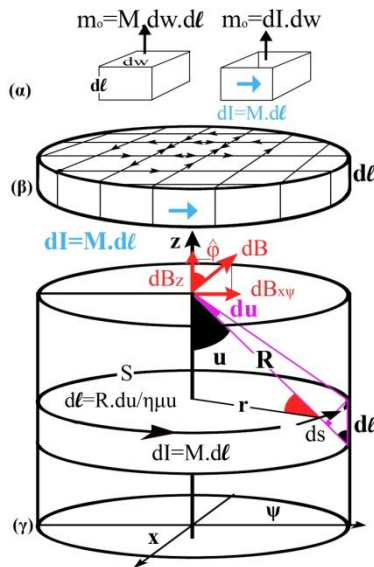
Η ακτίνα  $r_B = 2a \cdot \sin^* \gamma_B$  του κυλινδρικού χώρου που διεγείρει τους αισθητήρες (σχήμα 29), εξαρτάται από την κατευθυντικότητα  $\gamma_B$  του πεδίου  $^*B_B$  και από την παράμετρο  $\alpha$ , που γεωμετρικά αποτελεί την ακτίνα ευαισθησίας των αισθητήρων γύρω από τη θέση λήψης των μετρήσεων.

### 2.3 Θεώρηση της περιοχής του κεραμικού υλικού που διεγείρει τους αισθητήρες για τον υπολογισμό της μαγνήτισης από τις μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου

Με την παραπάνω θεώρηση, το μαγνητικό πεδίο εμφανίζει την ίδια τιμή ( $^*B_B = ^*B_s$ ) στις ισαπέχουσες θέσεις από τα άκρα στη βάση και τα πλευρικά τοιχώματα, γιατί οι λόγοι  $r_B/\ell_B$ ,  $r_s/\ell_s$  των κυλινδρικών περιοχών ευαισθητοποίησης των αισθητήρων δε μεταβάλλονται καθώς αυξάνεται η απόσταση  $D_n$ , όπως το αξονικό πεδίο δύο σωληνοειδών διαφορετικού μεγέθους με τον ίδιο αριθμό σπειρών  $n(m^{-1})$ , όταν διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα  $I$  και οι λόγοι της ακτίνας  $r$  προς το μήκος  $\ell$  διατηρούνται σταθεροί, σύμφωνα με τη σχέση [41]

(pp.223-226): 
$$B = \frac{\mu_o \cdot n \cdot I}{2 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{r}{\ell}\right)^2}} \quad (23)$$

Η κυλινδρική περιοχή διέγερσης των αισθητήρων ακτίνας  $r$  και ύψους  $\ell \equiv \ell_B$ , μπορεί να διαιρεθεί σε στοιχειώδη τεμάχια εμβαδού  $dw$  και πάχους  $d\ell$  ή ισοδύναμους βρόχους (σχήμα 30α) με μαγνητικές διπολικές ροπές  $m_o = M \cdot dw \cdot d\ell = dI \cdot dw$  κατά την αξονική διεύθυνση [41] (pp.413-418), με ομοιόμορφη μαγνήτιση  $M = dI/d\ell$ .



Λόγω της αλληλεξουδετέρωσης των αντίθετων ρευμάτων από τα γειτονικά πλακίδια (σχήμα 30β), κάθε λεπτός δίσκος ακτίνας  $r$  και ύψους  $dl$  με μαγνητική διπολική ροπή  $m = dI \cdot (\pi \cdot r^2) = M \cdot (\pi \cdot r^2) \cdot dl$ , είναι ισοδύναμος με βρόχο ρεύματος  $dI = M \cdot dl$ , με αξονικό μαγνητικό πεδίο που προσεγγίζεται [41] (pp. 223–226) από τον νόμο των *Biot-Savart*.

**Σχήμα 30.** Το μετρούμενο μαγνητικό πεδίο  $B$  της κυλινδρικής περιοχής του κεραμικού υλικού που διεγείρει τους αισθητήρες, προσεγγίζεται με το μαγνητικό πεδίο ενός σωληνοειδούς ίδιων διαστάσεων.

Σε κάθε σημείο του  $z$ -άξονα οι συνιστώσες  $dB_{xy}$  αλληλοεξουδετερώνονται λόγω της περιστροφικής συμμετρίας και το πεδίο  $B \equiv B_B$  έχει μόνο αξονική  $z$ -συνιστώσα (σχήμα 30γ) που προσεγγίζεται από τις επιμέρους συνεισφορές  $dB_z$  των στοιχειωδών επικαμπύλιων τμημάτων  $ds$  σε κάθε πλακίδιο πάχους  $dl$ :

$$dB_z = dB \cdot \sin\varphi = \frac{\mu_0 \cdot dI \cdot d\vec{s} \times \hat{R}}{4\pi R^3} \cdot \frac{r}{R} = \frac{\mu_0 \cdot (M \cdot dl) \cdot r}{4\pi R^3} \cdot ds \quad (24)$$

Το αξονικό μαγνητικό πεδίο  $B$  στο άκρο του κυλίνδρου, ακτίνας  $r = R \cdot \eta\mu\mu$  και ύψους  $\ell$ , είναι αποτέλεσμα της συνεισφοράς των επιμέρους πλακιδίων πάχους  $dl = R \cdot du / \eta\mu\mu$  και προσεγγίζεται από το ολοκλήρωμα:

$$B = B_z = \frac{\mu_0 \cdot M \cdot r}{4\pi R^3} \cdot \int_{s=2\pi r} ds \int dl = \frac{\mu_0 \cdot M \cdot r^2}{2R^3} \cdot \int \frac{R \cdot du}{\eta\mu\mu} = \frac{\mu_0 \cdot M}{2} \int_{u=\arcsin^{-1} \frac{\ell}{r}}^{u=90^\circ} \eta\mu\mu \cdot du = \frac{\mu_0 \cdot M}{2 \sqrt{1 + \left(\frac{r}{\ell}\right)^2}} \quad (25)$$

όπου  $r = \alpha \cdot \text{συν}\gamma$  και  $\ell = D_n / \eta\mu\gamma$ .

Οι διαστάσεις  $r, \ell$  της κυλινδρικής περιοχής του κεραμικού υλικού που διεγείρει τους αισθητήρες (σχήμα 30) εξαρτώνται από τη γωνία απόκλισης  $\gamma$  της μαγνήτισης  $\vec{M}$  από την κάθετο στη θέση λήψης των μετρήσεων και από το πάχος  $L$  του θραύσματος ή από την απόσταση  $D$  μεταξύ της θέσης μέτρησης και του άκρου του θραύσματος στη διεύθυνση της προβολής της μαγνήτισης  $\vec{M}$  στην επιφάνεια του οστράκου.

Σύμφωνα με την παραπάνω θεώρηση:

- Όταν  $D \geq d = L \cdot \epsilon\phi\gamma$  (παρ.2.2.4), τότε οι αισθητήρες (σχήμα 31α,β), λαμβάνουν μετρήσεις από όλο το πάχος  $L$  του οστράκου. Η ακτίνα  $r = \alpha \cdot \text{συν}\gamma$  και το μήκος  $\ell = L / \text{συν}\gamma$  της κυλινδρικής περιοχής του κεραμικού υλικού που διεγείρει τους αισθητήρες εξαρτώνται από τη γωνία  $\gamma$  και από το πάχος  $L$  του θραύσματος.

Το αξονικό μαγνητικό πεδίο προσεγγίζεται από τη σχέση επαρκούς μήκους:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot M}{2 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\alpha \cdot \text{συν}\gamma^2}{L}\right)^2}}$$

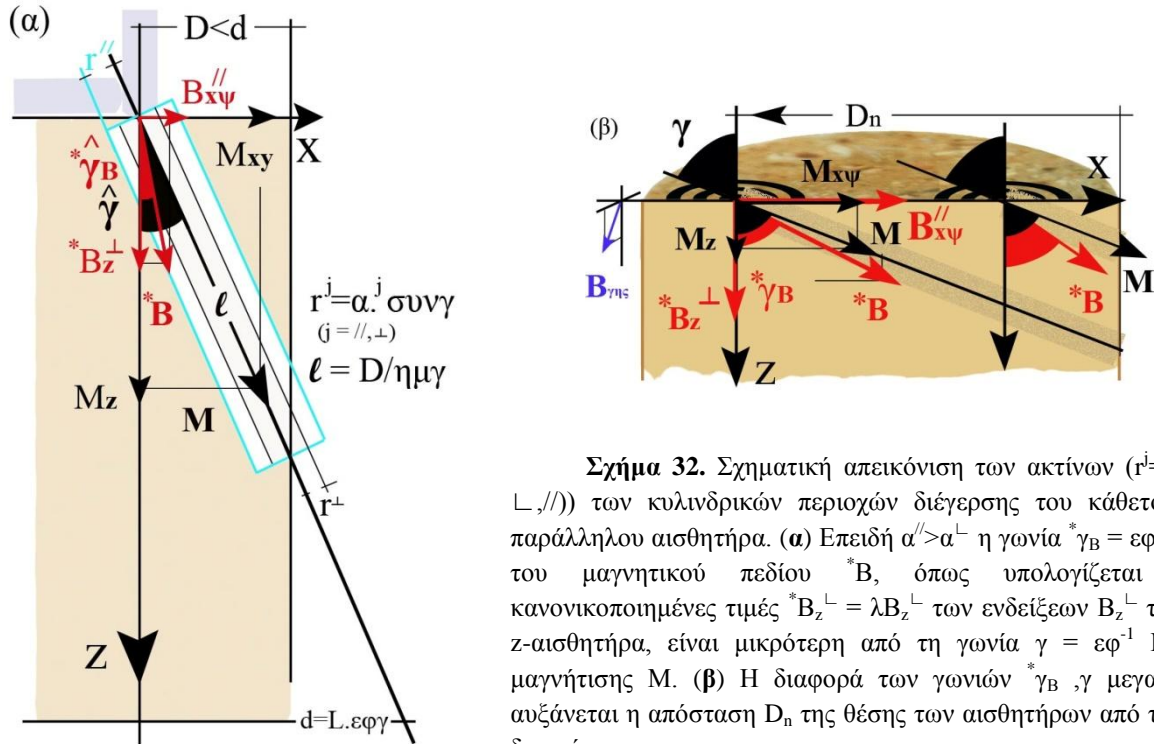
Οι συνιστώσες  $M_i$  ( $i=x, y, z$ ) της μαγνήτισης προσεγγίζονται από τη σχέση:

$$M_i = \frac{2B_i}{\mu_0} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\alpha \cdot \text{συν}\gamma^2}{L}\right)^2} \quad (26a)$$

- Όταν  $D \leq d$  (παρ.2.2.5), τότε οι αισθητήρες (σχήμα 31γ), δε λαμβάνουν μετρήσεις από όλο το πάχος του οστράκου. Η ακτίνα  $r = \alpha \cdot \text{συν}\gamma$  και το μήκος  $\ell = D / \eta\mu\gamma$  της κυλινδρικής περιοχής του κεραμικού υλικού που διεγείρει τους αισθητήρες εξαρτώνται από τη γωνία  $\gamma$  και την απόσταση  $D$  μεταξύ της θέσης μέτρησης



Οι ενδείξεις  $B_{x\psi}^\perp, B_z^\perp$  (πίνακες 7β, B18β, B20β) και οι διορθωμένες τιμές  $^*B_{xy}^\perp = \lambda B_{xy}^\perp, ^*B_z^\perp = \lambda B_z^\perp$  (πίνακες 7γ, B18γ, B20γ) του κάθετου αισθητήρα εμφανίζουν μικρότερη συνολική μεταβολή και αυξάνονται με αργότερο ρυθμό σε σχέση με τις μετρήσεις ( $B_{x\psi}^{\prime\prime}, B_z^{\prime\prime}$ ) του παράλληλου αισθητήρα, γιατί η ακτίνα ευαισθησίας του κάθετου αισθητήρα ( $\alpha^\perp$ ) είναι μικρότερη από αυτήν ( $\alpha^{\prime\prime}$ ) του παράλληλου αισθητήρα.



**Σχήμα 32.** Σχηματική απεικόνιση των ακτίνων ( $r^j = \alpha^j \cdot \text{συν}\gamma$ ,  $j = \perp, //$ ) των κυλινδρικών περιοχών διέγερσης του κάθετου και του παράλληλου αισθητήρα. (α) Επειδή  $\alpha^{\prime\prime} > \alpha^\perp$  η γωνία  $\gamma_B = \epsilon\phi^{-1} B_{xy}^{\prime\prime} / ^*B_z^\perp$  του μαγνητικού πεδίου  $^*B$ , όπως υπολογίζεται από τις κανονικοποιημένες τιμές  $^*B_z^\perp = \lambda B_z^\perp$  των ενδείξεων  $B_z^\perp$  του κάθετου z-αισθητήρα, είναι μικρότερη από τη γωνία  $\gamma = \epsilon\phi^{-1} M_{xy} / M_z$  της μαγνήτισης  $M$ . (β) Η διαφορά των γωνιών  $\gamma_B, \gamma$  μεγαλώνει, όσο αυξάνεται η απόσταση  $D_n$  της θέσης μέτρησης από τα άκρα του δοκιμίου.

Σύμφωνα με τις προηγούμενες σχέσεις (26α,β), οι γωνίες  $\gamma_B, \gamma_s \approx 90^\circ - \gamma_B$  του μετρούμενου μαγνητικού πεδίου  $^*B_B, ^*B_s$  στη βάση και στις πλευρές των δοκιμίων, είναι μικρότερες (**σχήμα 32α**) από τις αντίστοιχες γωνίες  $\gamma = \epsilon\phi^{-1} M_{xy} / M_z$  και  $90^\circ - \gamma = \epsilon\phi^{-1} M_z / M_{xy}$  της μαγνήτισης του κεραμικού υλικού και η διαφορά τους αυξάνεται (**σχήμα 32β**) με την απόσταση  $D_n$  της θέσης μέτρησης από τα άκρα των δοκιμίων:

$$\text{Βάση (B): } \epsilon\phi \gamma_B = \frac{B_{x\psi}^{\prime\prime}}{\lambda B_z^\perp} < \epsilon\phi \gamma, \text{ Πλευρά (s): } \epsilon\phi \gamma_s = \frac{B_z^{\prime\prime}}{\lambda B_{x\psi}^\perp} < \epsilon\phi (90^\circ - \gamma). \quad (27)$$

Λόγω των διαφορετικών ακτίνων ευαισθησίας του κάθετου ( $\alpha^\perp$ ) και του παράλληλου ( $\alpha^{\prime\prime}$ ) αισθητήρα, οι εξισώσεις επαρκούς (26α) και ανεπαρκούς μήκους (26β) για τον υπολογισμό των συνιστωσών της μαγνήτισης, τροποποιούνται σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$\text{-Όταν } D \geq d = L \cdot \epsilon\phi \gamma: \quad M_i = \frac{2^* B_i}{\mu_o} \cdot \sqrt{1 + \left( \frac{\alpha_i \cdot \text{συν}^2 \gamma}{L} \right)^2} \quad (28\alpha)$$

$$\text{-Όταν } D \leq d: \quad M_i = \frac{2^* B_i}{\mu_o} \cdot \sqrt{1 + \left( \frac{\alpha_i \cdot \eta \mu^2 2\gamma}{2D} \right)^2} \quad (28\beta) \quad \text{όπου } i = x, y, z \text{ και } \alpha_x^{\prime\prime} = \alpha_y^{\prime\prime} > \alpha_z^\perp$$



Για τον υπολογισμό των συνιστωσών της μαγνήτισης σύμφωνα με τις προηγούμενες σχέσεις (28α,β), είναι απαραίτητη η μέτρηση του πάχους  $L$  και της απόστασης  $D_n$ , ο προσδιορισμός της απόκλισης  $\gamma$  της μαγνήτισης  $M$  από τον  $z$ -άξονα, των ακτίνων ευαισθησίας  $\alpha^\perp, \alpha''$  και του συντελεστή διόρθωσης  $\lambda$  των ενδείξεων του κάθετου αισθητήρα.

Η γωνία  $\gamma$  της μαγνήτισης  $\vec{M}$  σύμφωνα με την παραπάνω θεώρηση και τα πειραματικά αποτελέσματα, (πίνακες 7β, B18β, B20β) μπορεί να προσδιοριστεί από τη γωνία  $\gamma^\perp = \arctan(B_{xy}^\perp/B_z^\perp)$  που υπολογίζεται από τις ενδείξεις μόνο του κάθετου αισθητήρα, οι οποίες προσεγγίζουν ταχύτερα μια οριακή τιμή στις μεγαλύτερες αποστάσεις  $D_{n \rightarrow 10}$  των θέσεων μέτρησης από τα άκρα των δοκιμίων. Αυτό συμβαίνει γιατί το μήκος  $\ell = D/\eta\mu\gamma$  είναι πολύ μεγαλύτερο από την ακτίνα  $r = a \cdot \eta\mu\gamma$  του ισοδύναμου σωληνοειδούς και σύμφωνα με τη σχέση

$$\text{ανεπαρκούς μήκους (26β) επειδή } \lim_{n \rightarrow 10} \frac{a \cdot \eta\mu\gamma \cdot \eta\mu\gamma}{D_n} \approx 0 \text{ και ισχύει: } B_{xy}^\perp \approx \frac{\mu_o \cdot M_{xy}}{2} \text{ και } B_z^\perp \approx \frac{\mu_o \cdot M_z}{2}$$

Επομένως, στις θέσεις που βρίσκονται στη μέγιστη απόσταση ( $D_{n=10}$ ) από τα άκρα των δοκιμίων, οι συνιστώσες και η γωνία  $\gamma$  της μαγνήτισης προσεγγίζονται από τις σχέσεις:

$$M_{xy} \approx \frac{2B_{xy(n=10)}^\perp}{\mu_o}, M_z \approx \frac{2B_{z(n=10)}^\perp}{\mu_o} \text{ και } \gamma^\perp = \arctan \frac{B_{xy(n=10)}^\perp}{B_{z(n=10)}^\perp} \approx \gamma = \arctan \frac{M_{xy}}{M_z}$$

Οι τιμές της γωνίας  $\gamma$  που υπολογίζονται από την παραπάνω σχέση (πίνακες 7δ, B18δ, B20δ) σε καθένα από τα δοκίμια των αγγείων 4,5&6, χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της παραπάνω θεώρησης με τον υπολογισμό των συνιστωσών της μαγνήτισης  $M_z, M_{xy}$ , του παράγοντα διόρθωσης  $\lambda$  των ενδείξεων του κάθετου αισθητήρα και των ακτίνων ευαισθησίας  $\alpha^\perp, \alpha''$  του κάθετου και του παράλληλου αισθητήρα με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Στη μέθοδο χρησιμοποιείται η σχέση ανεπαρκούς μήκους (28β) που εφαρμόζεται ξεχωριστά για τις ενδείξεις του κάθετου αισθητήρα ( $B_{xy}^\perp, B_z^\perp$ ) και για τις ενδείξεις ( $B_{xy}'', B_z''$ ) του παράλληλου αισθητήρα.

Ενδεικτικά αποτελέσματα της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων από μετρήσεις στο δοκίμιο από τη βάση του αγγείου 5 παρατίθενται στον **πίνακα 8**. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα από τις μετρήσεις των δοκιμίων από τις βάσεις των αγγείων 4 και 6 παρατίθενται στους **πίνακες B19** και **B21** του παραρτήματος Β.

- Η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων εφαρμόζεται για τις ενδείξεις του κάθετου αισθητήρα

$$(B_{xy}^\perp, B_z^\perp) \text{ από την εξίσωση: } \left( \frac{\mu_o}{2B_i^\perp} \right)^2 = \frac{(\alpha_i^\perp)^2 \cdot \eta\mu^2 2\gamma}{4 \cdot (M_i^\perp)^2} \cdot \frac{1}{D_n^2} + \frac{1}{(M_i^\perp)^2} \Leftrightarrow \psi_i^\perp = b_i^\perp \cdot x + w_i^\perp, \text{ για } i = z, xy \quad (29)$$

Από την προηγούμενη εξίσωση υπολογίζονται σε κάθε δοκίμιο οι συνιστώσες  $M_i^\perp$  ( $i = z, xy$ ), οι ακτίνες ευαισθησίας  $\alpha_i^\perp$  και τα σφάλματα<sup>14</sup>  $\delta M_i^\perp, \delta \alpha_i^\perp$  από τις σχέσεις:

<sup>14</sup> Τα σφάλματα  $\delta M_i$  των συνιστωσών της μαγνήτισης από τις ενδείξεις του κάθετου ( $B_{xy}^\perp, B_z^\perp$ ) και του παράλληλου ( $B_{xy}'', B_z''$ ) αισθητήρα που προσδιορίζονται με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων (29), (34), υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$\delta M_i = \frac{1}{2} \cdot w_i^{-\frac{3}{2}} \cdot \delta w_i \text{ για } i = z, xy \quad (30)$$

Τα σφάλματα  $\delta \alpha_i$  ( $i = z, xy$ ) των ακτίνων ευαισθησίας του κάθετου και του παράλληλου αισθητήρα, υπολογίζονται σύμφωνα με τη

θεωρία μετάδοσης σφαλμάτων από τη σχέση:  $\delta \alpha_i = \sqrt{\left( \frac{\partial \alpha_i}{\partial b_i} \right)^2 \cdot (\delta b_i)^2 + \left( \frac{\partial \alpha_i}{\partial w_i} \right)^2 \cdot (\delta w_i)^2 + \left( \frac{\partial \alpha_i}{\partial \gamma} \right)^2 \cdot (\delta \gamma)^2}$  όπου:

$$\frac{\partial \alpha_i}{\partial b_i} = b_i^{-\frac{1}{2}} \cdot w_i^{-\frac{1}{2}} \cdot \eta\mu^{-1} 2\gamma \cdot \delta b_i, \quad \frac{\partial \alpha_i}{\partial w_i} = b_i^{-\frac{1}{2}} \cdot w_i^{-\frac{3}{2}} \cdot \eta\mu^{-1} 2\gamma \cdot \delta w_i, \quad \frac{\partial \alpha_i}{\partial \gamma} = -4 \cdot b_i^{\frac{1}{2}} \cdot w_i^{\frac{1}{2}} \cdot \eta\mu^{-2} 2\gamma \cdot \delta \gamma, \quad (31)$$

$$M_i^\perp = (w_i^\perp)^{-\frac{1}{2}}, \quad a_i^\perp = 2 \cdot (b_i^\perp)^{\frac{1}{2}} \cdot (w_i^\perp)^{-\frac{1}{2}} \cdot \eta \mu^{-1} 2\gamma, \quad \text{για } i=z, xy \quad (32)$$

Από τα πειραματικά αποτελέσματα διαπιστώνεται ότι τα υπολογιζόμενα μέτρα των συνιστωσών  $M_z^\perp$ ,  $M_{xy}^\perp$  από τις τεταγμένες επί την αρχή  $w_z^\perp$ ,  $w_{xy}^\perp$  (πίνακες 8, B19, B21) προσεγγίζουν τις οριακές τιμές  $M_z$ ,  $M_{xy}$  της μαγνήτισης (πίνακες 7δ, B18δ, B20), στις θέσεις που απέχουν την μεγαλύτερη απόσταση από τα άκρα των δοκιμίων.

Σε κάθε δοκίμιο, οι ακτίνες ευαισθησίας  $a_z^\perp$ ,  $a_{xy}^\perp$  του κάθετου αισθητήρα που υπολογίζονται από τις κλίσεις  $b_z^\perp$ ,  $b_{xy}^\perp$  εμφανίζουν παραπλήσιες τιμές, κοντά στα όρια του υπολογιζόμενου σφάλματος.

Η ακτίνα ευαισθησίας  $a^\perp$  του κάθετου z-αισθητήρα και το σφάλμα  $\delta a^\perp$ , υπολογίζεται (πίνακας 9) σε κάθε δοκίμιο της βάσης των αγγείων 4,5 και 6 από τις μέσες τιμές<sup>15</sup> των  $a_z^\perp$ ,  $a_{xy}^\perp$  και  $\delta a_z^\perp$ ,  $\delta a_{xy}^\perp$ .

• Η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων εφαρμόζεται για τις ενδείξεις του παράλληλου αισθητήρα

$$(B_z'', B_{xy}'') \text{ από την εξίσωση: } \left( \frac{\mu_o}{2B_i''} \right)^2 = \frac{(a_i'')^2 \cdot \eta \mu^2 2\gamma}{4 \cdot (M_i'')^2} \cdot \frac{1}{D_n^2} + \frac{1}{(M_i'')^2} \Leftrightarrow \psi_i'' = b_i'' \cdot x + w_i'', \text{ για } i=z, xy \quad (34)$$

Με την εφαρμογή της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων (πίνακες 8, B19, B21), υπολογίζονται σε κάθε δοκίμιο οι συνιστώσες  $M_i''$  ( $i=z, xy$ ) οι ακτίνες ευαισθησίας  $a_i''$  και τα σφάλματα  $\delta M_i''$ ,  $\delta a_i''$  (30, 31) από τη

$$\text{σχέση: } M_i'' = (w_i'')^{-\frac{1}{2}}, \quad a_i'' = 2 \cdot (b_i'')^{\frac{1}{2}} \cdot (w_i'')^{-\frac{1}{2}} \cdot \eta \mu^{-1} 2\gamma, \quad \text{για } i=z, xy \quad (35)$$

Τα προσδιοριζόμενα μέτρα των συνιστωσών  $M_z''$ ,  $M_{xy}''$  από τις τεταγμένες επί την αρχή  $w_z''$ ,  $w_{xy}''$  είναι πολλαπλάσια των αντίστοιχων τιμών  $M_z^\perp$ ,  $M_{xy}^\perp$  που υπολογίζονται από τις ενδείξεις των κάθετων

$$\text{αισθητήρων, κατά τον ίδιο}^{16} \text{ παράγοντα } \lambda = \lambda_z \approx \lambda_{xy}, \text{ όπου: } \lambda_z = \frac{M_z''}{M_z^\perp}, \quad \lambda_{xy} = \frac{M_{xy}''}{M_{xy}^\perp} \quad (36a)$$

Ο συντελεστής διόρθωσης  $\lambda$  των ενδείξεων του κάθετου αισθητήρα και το σφάλμα  $\delta \lambda$ , υπολογίζονται<sup>17</sup> (πίνακας 9) από τη μέση τιμή των  $\lambda_z$ ,  $\lambda_{xy}$  για τα δοκίμια από τη βάση κάθε αγγείου.

Οι ακτίνες ευαισθησίας  $a_z''$ ,  $a_{xy}''$  που υπολογίζονται από τις κλίσεις  $b_z''$ ,  $b_{xy}''$ , εμφανίζουν σε κάθε δοκίμιο παραπλήσιες τιμές στα όρια του πειραματικού σφάλματος. Η ακτίνα ευαισθησίας  $a''$ , από τις ενδείξεις του παράλληλου αισθητήρα και το σφάλμα  $\delta a''$ , υπολογίζονται σε κάθε δοκίμιο, με τον ίδιο τρόπο (33) από τις μέσες τιμές των  $a_z''$ ,  $a_{xy}''$  και  $\delta a_z''$ ,  $\delta a_{xy}''$ .

Οι συνιστώσες της μαγνήτισης  $M_z$ ,  $M_{xy}$  και τα σφάλματα<sup>18</sup>  $\delta M_z$ ,  $\delta M_{xy}$  (πίνακας 9), υπολογίζονται σε κάθε δοκίμιο από τις σχέσεις:

$$M_z = \lambda \cdot M_z^\perp, \quad M_{xy} = \lambda \cdot M_{xy}^\perp \quad (38a)$$

Από τις  $M_z$ ,  $M_{xy}$  υπολογίζεται σε κάθε δοκίμιο, το μέτρο της συνισταμένης  $M = \sqrt{(M_z)^2 + (M_{xy})^2}$  και το σφάλμα  $\delta M$  από τη σχέση (11).

Οι τυπικές αποκλίσεις  $\delta b_i$ ,  $\delta w_i$  στις παραπάνω σχέσεις, υπολογίζονται στη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων.

<sup>15</sup> Η ακτίνα ευαισθησίας  $a^\perp$  και το σφάλμα  $\delta a^\perp$  του κάθετου z-αισθητήρα υπολογίζεται για κάθε δοκίμιο, από τις μέσες τιμές:

$$a^\perp = \frac{a_z^\perp + a_{xy}^\perp}{2}, \quad \delta a^\perp = \frac{\delta a_z^\perp + \delta a_{xy}^\perp}{2} \quad (33)$$

<sup>16</sup> Τα σφάλματα  $\delta \lambda_i$  για  $i=z, xy$  υπολογίζονται σύμφωνα με τη θεωρία μετάδοσης σφαλμάτων από τη σχέση:

$$\delta \lambda_i = \sqrt{[(M_i^\perp)^{-1} \cdot M_i'' \cdot \delta M_i'']^2 + [M_i'' \cdot (M_i^\perp)^{-2} \cdot \delta M_i^\perp]^2} \quad (36b)$$

Τα σφάλματα  $\delta M_i''$ ,  $\delta M_i^\perp$  υπολογίζονται από τη σχέση (30).

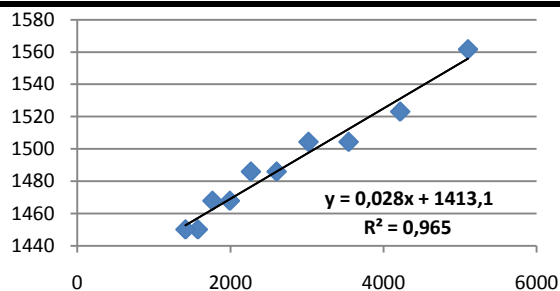
<sup>17</sup> Ο συντελεστής κανονικοποίησης των ενδείξεων του κάθετου αισθητήρα με τις ενδείξεις των παράλληλων αισθητήρων,

$$\text{υπολογίζεται για κάθε δοκίμιο, από τις μέσες τιμές: } \lambda = \frac{\lambda_z + \lambda_{xy}}{2}, \quad \delta \lambda = \frac{\delta \lambda_z + \delta \lambda_{xy}}{2} \quad (37)$$

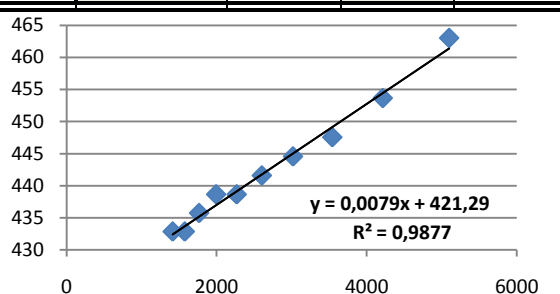
<sup>18</sup> Το σφάλμα των συνιστωσών  $M_i = \lambda \cdot M_i^\perp$  ( $i = z, xy$ ) υπολογίζεται σύμφωνα με τη θεωρία μετάδοσης σφαλμάτων από τη σχέση:

$$\delta M_i = \sqrt{\left( \frac{\partial M_i}{\partial \lambda} \right)^2 \cdot (\delta \lambda)^2 + \left( \frac{\partial M_i}{\partial M_i^\perp} \right)^2 \cdot (\delta M_i^\perp)^2} = \sqrt{(\lambda \cdot \delta M_i^\perp)^2 + (\delta \lambda \cdot M_i^\perp)^2} \quad (38b)$$

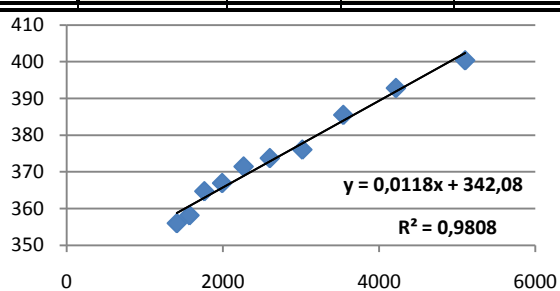
| ΑΓΓΕΙΟ 5  |                         |   |           |              |                           |                                |                                 |                |  |
|-----------|-------------------------|---|-----------|--------------|---------------------------|--------------------------------|---------------------------------|----------------|--|
| Πίνακας 8 |                         | Μετρήσεις της $B_z$ από τους κάθετους αισθητήρες          |           |              |                           |                                |                                 |                |  |
| n         | $B_z^\perp$             | $D_n$   | $x_n$     | $\psi_n$     | $(x_n - \bar{x})^2$       | $\psi_n (x_n - \bar{x})$       | $(\psi_n - \bar{\psi})^2$       |                |  |
| 1         | 15,9                    | 14,0  | 5102,0    | 1561,6       | 5533173,0                 | 3673268,0                      | 5113,8                          |                |  |
| 2         | 16,1                    | 15,4  | 4216,6    | 1523,0       | 2151477,6                 | 2233965,2                      | 1086,0                          |                |  |
| 3         | 16,2                    | 16,8  | 3543,1    | 1504,3       | 629345,3                  | 1193367,5                      | 201,9                           |                |  |
| 4         | 16,2                    | 18,2  | 3019,0    | 1504,3       | 72462,2                   | 404935,1                       | 201,9                           |                |  |
| 5         | 16,3                    | 19,6  | 2603,1    | 1485,9       | 21517,7                   | -217962,7                      | 17,6                            |                |  |
| 6         | 16,3                    | 21,0  | 2267,6    | 1485,9       | 232514,3                  | -716488,7                      | 17,6                            |                |  |
| 7         | 16,4                    | 22,4  | 1993,0    | 1467,8       | 572725,6                  | -1110824,2                     | 495,4                           |                |  |
| 8         | 16,4                    | 23,8  | 1765,4    | 1467,8       | 968962,7                  | -1444859,3                     | 495,4                           |                |  |
| 9         | 16,5                    | 25,2  | 1574,7    | 1450,1       | 1380782,7                 | -1703940,9                     | 1599,5                          |                |  |
| 10        | 16,5                    | 26,6  | 1413,3    | 1450,1       | 1786134,3                 | -1937978,3                     | 1599,5                          |                |  |
|           | $\pm 0,2nT$             | $\pm 0,2mm$   | $\bar{x}$ | $\bar{\psi}$ | $\Sigma(x_n - \bar{x})^2$ | $\Sigma\psi_n (x_n - \bar{x})$ | $\Sigma(\psi_n - \bar{\psi})^2$ | $\Sigma R_i^2$ |  |
|           |                         |   | 2749,8    | 1490,1       | 13349095,3                | 373481,7                       | 10828,5                         | 379,2          |  |
| Αγγείο 5  |                         | Μετρήσεις της $B_z$ από τους κάθετους αισθητήρες          |           |              |                           |                                |                                 |                |  |
| n         | $B_{x\psi}^\perp$       | $D_n$   | $x_n$     | $\psi_n$     | $(x_n - \bar{x})^2$       | $\psi_n (x_n - \bar{x})$       | $(\psi_n - \bar{\psi})^2$       |                |  |
| 1         | 29,2                    | 14,0  | 5102,0    | 463,0        | 5533173,0                 | 1089133,6                      | 404,1                           |                |  |
| 2         | 29,5                    | 15,4  | 4216,6    | 453,6        | 2151477,6                 | 665402,0                       | 115,2                           |                |  |
| 3         | 29,7                    | 16,8  | 3543,1    | 447,6        | 629345,3                  | 355051,5                       | 21,6                            |                |  |
| 4         | 29,8                    | 18,2  | 3019,0    | 444,6        | 72462,2                   | 119669,3                       | 2,7                             |                |  |
| 5         | 29,9                    | 19,6  | 2603,1    | 441,6        | 21517,7                   | -64776,1                       | 1,8                             |                |  |
| 6         | 30,0                    | 21,0  | 2267,6    | 438,6        | 232514,3                  | -211515,4                      | 18,2                            |                |  |
| 7         | 30,0                    | 22,4  | 1993,0    | 438,6        | 572725,6                  | -331963,6                      | 18,2                            |                |  |
| 8         | 30,1                    | 23,8  | 1765,4    | 435,7        | 968962,7                  | -428923,9                      | 51,4                            |                |  |
| 9         | 30,2                    | 25,2  | 1574,7    | 432,9        | 1380782,7                 | -508637,7                      | 101,1                           |                |  |
| 10        | 30,2                    | 26,6  | 1413,3    | 432,9        | 1786134,3                 | -578499,4                      | 101,1                           |                |  |
|           | $\pm 0,2nT$             | $\pm 0,2mm$   | $\bar{x}$ | $\bar{\psi}$ | $\Sigma(x_n - \bar{x})^2$ | $\Sigma\psi_n (x_n - \bar{x})$ | $\Sigma(\psi_n - \bar{\psi})^2$ | $\Sigma R_i^2$ |  |
|           |                         |   | 2749,8    | 442,9        | 13349095,3                | 104940,3                       | 835,2                           | 10,3           |  |
| Αγγείο 5  |                         | Μετρήσεις της $B_z$ από τους παράλληλους αισθητήρες       |           |              |                           |                                |                                 |                |  |
| n         | $B_z^{\parallel}$       | $D_n$   | $x_n$     | $\psi_n$     | $(x_n - \bar{x})^2$       | $\psi_n (x_n - \bar{x})$       | $(\psi_n - \bar{\psi})^2$       |                |  |
| 1         | 31,4                    | 14,0  | 5102,0    | 400,4        | 5533173,0                 | 941862,6                       | 666,12                          |                |  |
| 2         | 31,7                    | 15,4  | 4216,6    | 392,9        | 2151477,6                 | 576248,3                       | 333,66                          |                |  |
| 3         | 32,0                    | 16,8  | 3543,1    | 385,5        | 629345,3                  | 305847,0                       | 119,57                          |                |  |
| 4         | 32,4                    | 18,2  | 3019,0    | 376,1        | 72462,2                   | 101233,8                       | 2,17                            |                |  |
| 5         | 32,5                    | 19,6  | 2603,1    | 373,8        | 21517,7                   | -54826,5                       | 0,70                            |                |  |
| 6         | 32,6                    | 21,0  | 2267,6    | 371,5        | 232514,3                  | -179122,2                      | 9,77                            |                |  |
| 7         | 32,8                    | 22,4  | 1993,0    | 367,0        | 572725,6                  | -277706,1                      | 58,40                           |                |  |
| 8         | 32,9                    | 23,8  | 1765,4    | 364,7        | 968962,7                  | -359022,3                      | 97,41                           |                |  |
| 9         | 33,2                    | 25,2  | 1574,7    | 358,2        | 1380782,7                 | -420868,3                      | 269,99                          |                |  |
| 10        | 33,3                    | 26,6  | 1413,3    | 356,0        | 1786134,3                 | -475804,3                      | 345,19                          |                |  |
|           | $\pm 0,2nT$             | $\pm 0,2mm$   | $\bar{x}$ | $\bar{\psi}$ | $\Sigma(x_n - \bar{x})^2$ | $\Sigma\psi_n (x_n - \bar{x})$ | $\Sigma(\psi_n - \bar{\psi})^2$ | $\Sigma R_i^2$ |  |
|           |                         |   | 2749,8    | 374,6        | 13349095,3                | 157842,0                       | 1903,0                          | 36,6           |  |
| Αγγείο 5  |                         | Μετρήσεις της $B_{x\psi}$ από τους παράλληλους αισθητήρες |           |              |                           |                                |                                 |                |  |
| n         | $B_{x\psi}^{\parallel}$ | $D_n$   | $x_n$     | $\psi_n$     | $(x_n - \bar{x})^2$       | $\psi_n (x_n - \bar{x})$       | $(\psi_n - \bar{\psi})^2$       |                |  |
| 1         | 56,9                    | 14,0  | 5102,0    | 121,9        | 5533173,0                 | 286828,5                       | 89,1                            |                |  |
| 2         | 58,1                    | 15,4  | 4216,6    | 117,0        | 2151477,6                 | 171544,1                       | 19,8                            |                |  |
| 3         | 58,6                    | 16,8  | 3543,1    | 115,0        | 629345,3                  | 91203,0                        | 6,1                             |                |  |
| 4         | 59,1                    | 18,2  | 3019,0    | 113,0        | 72462,2                   | 30425,7                        | 0,3                             |                |  |
| 5         | 59,2                    | 19,6  | 2603,1    | 112,6        | 21517,7                   | -16524,0                       | 0,0                             |                |  |
| 6         | 59,7                    | 21,0  | 2267,6    | 110,8        | 232514,3                  | -53411,6                       | 3,0                             |                |  |
| 7         | 59,9                    | 22,4  | 1993,0    | 110,0        | 572725,6                  | -83268,2                       | 6,1                             |                |  |
| 8         | 60,2                    | 23,8  | 1765,4    | 108,9        | 968962,7                  | -107231,0                      | 12,7                            |                |  |
| 9         | 60,4                    | 25,2  | 1574,7    | 108,2        | 1380782,7                 | -127159,4                      | 18,3                            |                |  |
| 10        | 60,6                    | 26,6  | 1413,3    | 107,5        | 1786134,3                 | -143671,8                      | 25,0                            |                |  |
|           | $\pm 0,2nT$             | $\pm 0,2mm$   | $\bar{x}$ | $\bar{\psi}$ | $\Sigma(x_n - \bar{x})^2$ | $\Sigma\psi_n (x_n - \bar{x})$ | $\Sigma(\psi_n - \bar{\psi})^2$ | $\Sigma R_i^2$ |  |
|           |                         |   | 2749,8    | 112,5        | 13349095,3                | 48735,3                        | 180,4                           | 2,5            |  |



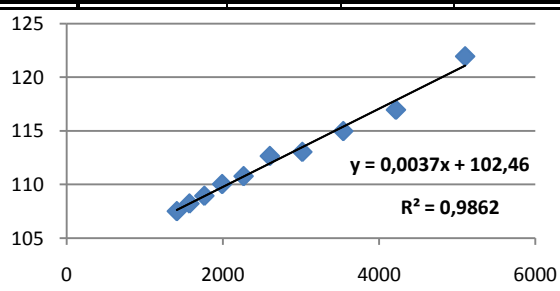
| $b_z^\perp$       | $\delta b_z^\perp$ | $w_z^\perp$          | $\delta w_z^\perp$      |
|-------------------|--------------------|----------------------|-------------------------|
| 0,028             | 0,002              | 1413,1               | 5,6                     |
| $M_z^\perp$ (A/m) | $\delta M_z^\perp$ | $\alpha_z^\perp$ (m) | $\delta \alpha_z^\perp$ |
| 0,0266            | 0,0001             | 0,0106               | 0,0004                  |



| $b_{x\psi}^\perp$       | $\delta b_{x\psi}^\perp$ | $w_{x\psi}^\perp$          | $\delta w_{x\psi}^\perp$      |
|-------------------------|--------------------------|----------------------------|-------------------------------|
| 0,0079                  | 0,0003                   | 421,3                      | 0,9                           |
| $M_{x\psi}^\perp$ (A/m) | $\delta M_{x\psi}^\perp$ | $\alpha_{x\psi}^\perp$ (m) | $\delta \alpha_{x\psi}^\perp$ |
| 0,0487                  | 0,0001                   | 0,0103                     | 0,0002                        |

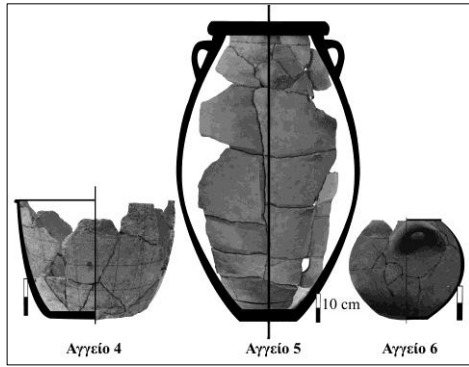


| $b_z^\parallel$       | $\delta b_z^\parallel$ | $w_z^\parallel$          | $\delta w_z^\parallel$      |
|-----------------------|------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| 0,012                 | 0,001                  | 342,1                    | 1,7                         |
| $M_z^\parallel$ (A/m) | $\delta M_z^\parallel$ | $\alpha_z^\parallel$ (m) | $\delta \alpha_z^\parallel$ |
| 0,0541                | 0,0001                 | 0,0140                   | 0,0004                      |



| $b_{x\psi}^\parallel$       | $\delta b_{x\psi}^\parallel$ | $w_{x\psi}^\parallel$          | $\delta w_{x\psi}^\parallel$      |
|-----------------------------|------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| 0,0037                      | 0,0002                       | 102,5                          | 0,5                               |
| $M_{x\psi}^\parallel$ (A/m) | $\delta M_{x\psi}^\parallel$ | $\alpha_{x\psi}^\parallel$ (m) | $\delta \alpha_{x\psi}^\parallel$ |
| 0,0988                      | 0,0002                       | 0,0142                         | 0,0002                            |

Πίνακας 8. Υπολογισμός της μαγνήτισης και των ακτίνων ευαισθησίας με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων.



Η παραπάνω θεώρηση επιβεβαιώνεται από τη γραμμικότητα των σχέσεων (πίνακες 8, B19, B21) από τις οποίες υπολογίζονται με αξιοσημείωτη ακρίβεια οι σταθερές ευαισθησίας  $\alpha^{\perp}$ ,  $\alpha^{\parallel}$ , οι συνιστώσες της μαγνήτισης  $M_i$  ( $i=x,y,z$ ) και ο συντελεστής κανονικοποίησης  $\lambda$  των αισθητήρων.

**Σχήμα 33.** Απεικόνιση των αγγείων 4,5 και 6.

Τα συγκεντρωτικά πειραματικά αποτελέσματα από τις μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου σε κυλινδρικά δοκίμια της βάσης των αγγείων 4,5 και 6 (σχήμα 33) παρατίθενται στον **πίνακα 9**.

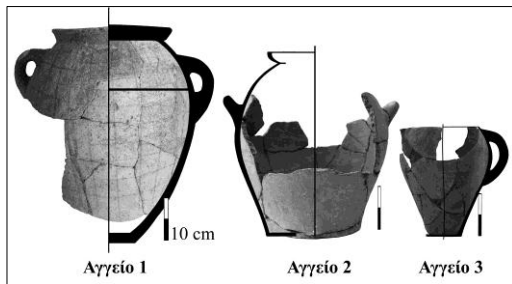
|                               |            |                |                 |               |                |                               |           |                      |           |
|-------------------------------|------------|----------------|-----------------|---------------|----------------|-------------------------------|-----------|----------------------|-----------|
| Αγγείο 4                      | mA/m       | M <sub>z</sub> | M <sub>xy</sub> | M             | γ <sup>0</sup> | α <sub>z</sub> <sup>⊥</sup>   | 0,66±0,02 | α <sup>⊥</sup> (cm)  | 0,67±0,03 |
| M <sub>z</sub> <sup>//</sup>  | 55,8±0,1   | 55,9<br>±0,2   | 62,9<br>±0,2    | 84,1<br>±0,2  | 48,5<br>±0,3   | α <sub>xy</sub> <sup>⊥</sup>  | 0,68±0,04 |                      |           |
| M <sub>z</sub> <sup>⊥</sup>   | 28,41±0,03 |                |                 |               |                | α <sub>z</sub> <sup>//</sup>  | 1,13±0,03 | α <sup>//</sup> (cm) | 1,15±0,02 |
| M <sub>xy</sub> <sup>//</sup> | 63,0±0,1   |                |                 |               |                | α <sub>xy</sub> <sup>//</sup> | 1,17±0,01 |                      |           |
| M <sub>xy</sub> <sup>⊥</sup>  | 32,0±0,1   |                |                 |               |                | λ                             | 1,97±0,01 |                      |           |
| Αγγείο 5                      | mA/m       | M <sub>z</sub> | M <sub>xy</sub> | M             | γ <sup>0</sup> | α <sub>z</sub> <sup>⊥</sup>   | 1,06±0,04 | α <sup>⊥</sup> (cm)  | 1,04±0,03 |
| M <sub>z</sub> <sup>//</sup>  | 54,1±0,1   | 54,0<br>±0,2   | 98,9<br>±0,3    | 112,7<br>±0,3 | 61,3<br>±0,3   | α <sub>xy</sub> <sup>⊥</sup>  | 1,03±0,02 |                      |           |
| M <sub>z</sub> <sup>⊥</sup>   | 26,6±0,01  |                |                 |               |                | α <sub>z</sub> <sup>//</sup>  | 1,40±0,04 | α <sup>//</sup> (cm) | 1,41±0,03 |
| M <sub>xy</sub> <sup>//</sup> | 98,8±0,2   |                |                 |               |                | α <sub>xy</sub> <sup>//</sup> | 1,42±0,04 |                      |           |
| M <sub>xy</sub> <sup>⊥</sup>  | 48,7±0,1   |                |                 |               |                | λ                             | 2,03±0,01 |                      |           |
| Αγγείο 6                      | mA/m       | M <sub>z</sub> | M <sub>xy</sub> | M             | γ <sup>0</sup> | α <sub>z</sub> <sup>⊥</sup>   | 0,75±0,03 | α <sup>⊥</sup> (cm)  | 0,71±0,03 |
| M <sub>z</sub> <sup>//</sup>  | 42,5±0,2   | 42,5<br>±0,2   | 39,8<br>±0,2    | 58,3<br>±0,2  | 43,3<br>±0,3   | α <sub>xy</sub> <sup>⊥</sup>  | 0,67±0,04 |                      |           |
| M <sub>z</sub> <sup>⊥</sup>   | 22,41±0,05 |                |                 |               |                | α <sub>z</sub> <sup>//</sup>  | 1,13±0,03 | α <sup>//</sup> (cm) | 1,07±0,02 |
| M <sub>xy</sub> <sup>//</sup> | 39,8±0,1   |                |                 |               |                | α <sub>xy</sub> <sup>//</sup> | 1,00±0,01 |                      |           |
| M <sub>xy</sub> <sup>⊥</sup>  | 21,0±0,1   |                |                 |               |                | λ                             | 1,90±0,01 |                      |           |

**Πίνακας 9.** Υπολογισμός των συνιστωσών  $M_{xy}$ ,  $M_z$ , του μέτρου  $M$  της παραμένουσας θερμομαγνήτισης, της σταθεράς κανονικοποίησης  $\lambda$  και των ακτίνων ευαισθησίας  $\alpha^{\perp}$ ,  $\alpha^{\parallel}$ , με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, από μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου σε δοκίμια από τη βάση των αγγείων 4,5 και 6.

Από τα πειραματικά αποτελέσματα διαπιστώνεται ότι ο συντελεστής κανονικοποίησης των μετρήσεων του κάθετου αισθητήρα με τις μετρήσεις των παράλληλων αισθητήρων, εμφανίζει παραπλήσια τιμή  $\lambda \approx 2$ , με σφάλμα  $\delta \lambda < 3\%$ .

Η ακτίνα ευαισθησίας  $\alpha^{\parallel}$  του παράλληλου x-αισθητήρα υπολογίζεται σε κάθε δοκίμιο μεγαλύτερη από την ακτίνα ευαισθησίας  $\alpha^{\perp}$  του κάθετου z-αισθητήρα, ενώ οι τιμές τους αυξάνονται με την αύξηση του μέτρου της μαγνήτισης  $M$ .

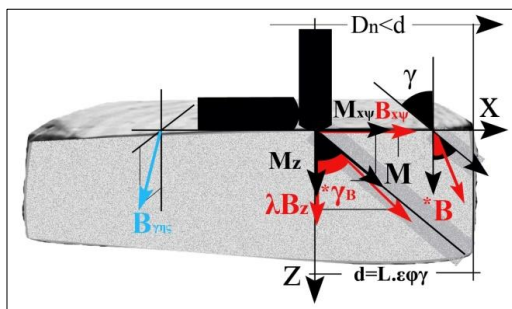
## 2.4 Υπολογισμός της μαγνήτισης σε ακανόνιστα θραύσματα της βάσης των αγγείων 1,2 & 3



Με τον ίδιο τρόπο υπολογίζονται οι συνιστώσες  $M_z, M_{x\psi}$ , η γωνία  $\gamma$  της μαγνήτισης  $M$  και οι ακτίνες ευαισθησίας των αισθητήρων  $\alpha_z^\perp, \alpha_{x\psi}^\parallel$  σε θραύσματα από τις βάσεις των αγγείων 1,2 και 3 (σχήμα 34) χωρίς να απαιτείται κοπή δοκιμίων.

Σχήμα 34. Απεικόνιση των αγγείων 1,2 και 3.

Η τρισορθογώνια διάταξη των αισθητήρων/μαγνητών παραμένει στην ίδια θέση ως προς το γήινο μαγνητικό πεδίο, με τον x-αισθητήρα προσανατολισμένο κάθετα ( $B_\psi=0, B_x=B_{x\psi}>0$ ) στην οριζόντια και στην κάθετη συνιστώσα του γεωμαγνητικού πεδίου.



Σχήμα 35. Σχηματική απεικόνιση της μεθοδολογίας μέτρησης των συνιστωσών  $M_i$  ( $i=x,y,z$ ) της μαγνήτισης και των ακτίνων ευαισθησίας του κάθετου  $\alpha_z^\perp$  και του παράλληλου  $\alpha_{x\psi}^\parallel$  αισθητήρα, σε θραύσματα ακανόνιστου σχήματος της βάσης των αγγείων.

Με στροφή του δίσκου στήριξης των θραυσμάτων στη γωνιομετρική διάταξη, η  $\bar{B}_{xy}$  προσανατολίζεται στην κατεύθυνση του x-αισθητήρα που λαμβάνει θετική τιμή όταν η ένδειξη του y-αισθητήρα μηδενίζεται.

Η μεταβολή των ενδείξεων της τρισορθογώνιας διάταξης των αισθητήρων στο μεγαλύτερο μέρος της διαδρομής κατά τη μετακίνηση κάθε θραύσματος επί της διεύθυνσης του x-αισθητήρα οφείλεται σε τοπικές διαφορές του πάχους  $L$ , που δε μπορεί να μετρηθεί με ακρίβεια στις θέσεις που λαμβάνονται οι μετρήσεις ( $B_z, B_{xy}$ ) του μαγνητικού πεδίου του οστράκου.

Για τον λόγο αυτόν, όπως και στην περίπτωση των δοκιμίων (παρ.2.4), οι μετρήσεις λαμβάνονται με μεγαλύτερη ακρίβεια και πιο ελεγχόμενο τρόπο, από τη θέση μέτρησης που αρχίζει η συστηματική μείωση των ενδείξεων του μαγνητικού πεδίου (σχήμα 35), προς το άκρο του θραύσματος που βρίσκεται στην κατεύθυνση του θετικού x-ημιάξονα.

Σε όλα τα θραύσματα από τις βάσεις των αγγείων (σχήμα 32), η αρχική θέση μέτρησης εντοπίζεται περίπου σε απόσταση  $d = L \cdot \epsilon \cdot \phi \approx 2-4 \text{ cm}$  από τα άκρα των οστράκων, επειδή  $40^\circ < \gamma < 60^\circ$  και  $L \approx 2 \text{ cm}$ .

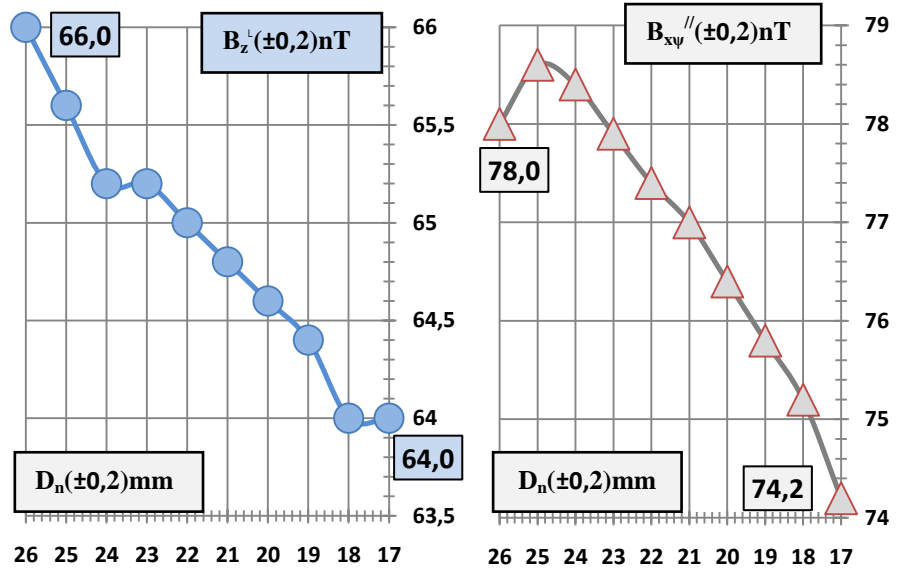
Ενδεικτικές μετρήσεις σε θραύσματα από τη βάση του αγγείου 2, παρατίθενται στον **πίνακα 10** και στο **διάγραμμα 5**.

Ο υπολογισμός των συνιστωσών  $M_i$  ( $i=x,y,z$ ) της μαγνήτισης και των ακτίνων ευαισθησίας  $\alpha_z^\perp, \alpha_{x\psi}^\parallel$  των αισθητήρων από τις μετρήσεις  $B_i$  ( $i=x\psi,z$ ) του πεδίου γίνεται με την εφαρμογή της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων από τη σχέση:

$$\left( \frac{\mu_o}{2B_i} \right)^2 = \frac{a_i^2 \cdot \eta \mu^2 2\gamma}{4 \cdot M_i^2} \cdot \frac{1}{D_n^2} + \frac{1}{M_i^2} \Leftrightarrow \psi_i = b_i \cdot x + w_i, \quad (i=z, xy) \quad (39)$$

Στην παραπάνω εξίσωση ( $i=z$ ) οι ενδείξεις του κάθετου z-αισθητήρα πολλαπλασιάζονται με τον συντελεστή  $\lambda = 2,0$  κανονικοποίησης των μετρήσεων με τις μετρήσεις του παράλληλου x-αισθητήρα στην επιφάνεια των οστράκων.

| Αγγείο 2 |                        |                           |                      |
|----------|------------------------|---------------------------|----------------------|
|          | $D_n$                  | $\lambda \cdot B_z^\perp$ | $B_{xy}^{\parallel}$ |
| n        | ( $\pm 0,2\text{mm}$ ) | ( $\pm 0,2\text{nT}$ )    |                      |
| 1        | 26,0                   | 66,0                      | 78,0                 |
| 2        | 25,0                   | 65,6                      | 78,6                 |
| 3        | 24,0                   | 65,2                      | 78,4                 |
| 4        | 23,0                   | 65,2                      | 77,9                 |
| 5        | 22,0                   | 65,0                      | 77,4                 |
| 6        | 21,0                   | 64,8                      | 77,0                 |
| 7        | 20,0                   | 64,6                      | 76,4                 |
| 8        | 19,0                   | 64,4                      | 75,8                 |
| 9        | 18,0                   | 64,0                      | 75,2                 |
| 10       | 17,0                   | 64,0                      | 74,2                 |



**Πίνακας 11.** Ενδεικτικές μετρήσεις των συνιστωσών  $B_{xy}$ ,  $B_z$  του μαγνητικού πεδίου σε αποστάσεις  $D_n < d = L \cdot \epsilon \phi \gamma$  από το άκρο του, κατά μήκος της  $B_{xy}$  σε θραύσματα της βάσης του αγγείου 2.

**Διάγραμμα 5.** Οι ενδείξεις  $B_{xy}$ ,  $B_z$  των αισθητήρων μειώνονται όσο ελαττώνεται η απόσταση  $D_n$ .

Τα πειραματικά αποτελέσματα από μετρήσεις σε ακανόνιστα θραύσματα της βάσης του αγγείου 2 παρατίθενται στον **πίνακα 11**. Οι αντίστοιχες μετρήσεις στα θραύσματα των αγγείων 1 και 3 παρατίθενται στους **πίνακες B22 και B23** του παραρτήματος Β.

Οι συνιστώσες της μαγνήτισης  $M_i$  και τα σφάλματα  $\delta M_i$  (30) υπολογίζονται από τις τεταγμένες επί την αρχή  $w_i$  από τη σχέση:  $M_i = w_i^{\frac{1}{2}} \quad (i=z, xy) \quad (40)$

Από τις συνιστώσες  $M_z$ ,  $M_{xy}$ , υπολογίζονται το μέτρο  $M = \sqrt{M_z^2 + M_{xy}^2}$ , η γωνία  $\gamma = \arctan \frac{M_{xy}}{M_z}$  της μαγνήτισης και τα σφάλματα  $\delta M$  (11) και  $\delta \gamma$  (13).

Από την τιμή της γωνίας  $\gamma$  υπολογίζονται οι ακτίνες ευαισθησίας του κάθετου ( $\alpha_z \equiv \alpha^\perp$ ) και του παράλληλου ( $\alpha_{xy} \equiv \alpha^\parallel$ ) αισθητήρα και τα σφάλματα<sup>19</sup>  $\delta \alpha^\perp$ ,  $\delta \alpha^\parallel$  από τη σχέση:  $\alpha_i = 2 \cdot b_i^{\frac{1}{2}} \cdot w_i^{\frac{1}{2}} \cdot \eta \mu^{-1} 2\gamma \quad (41\alpha)$

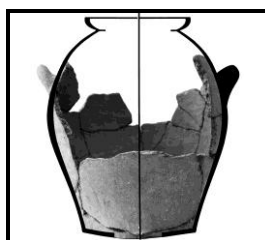
<sup>19</sup> Τα σφάλματα  $\delta \alpha_i$  των ακτίνων ευαισθησίας του κάθετου ( $i=z$ ) και του παράλληλου αισθητήρα ( $i=xy$ ), υπολογίζονται σύμφωνα με τη θεωρία μετάδοσης σφαλμάτων από τη σχέση:

$$\delta \alpha_i = \sqrt{\left(\frac{\partial \alpha_i}{\partial b_i}\right)^2 \cdot (\delta b_i)^2 + \left(\frac{\partial \alpha_i}{\partial w_i}\right)^2 \cdot (\delta w_i)^2 + \left(\frac{\partial \alpha_i}{\partial \gamma}\right)^2 \cdot (\delta \gamma)^2}, \quad \text{όπου:}$$

$$\frac{\partial \alpha_i}{\partial b_i} = b_i^{-\frac{1}{2}} \cdot w_i^{\frac{1}{2}} \cdot \eta \mu^{-1} 2\gamma, \quad \frac{\partial \alpha_i}{\partial w_i} = -b_i^{\frac{1}{2}} \cdot w_i^{-\frac{3}{2}} \cdot \eta \mu^{-1} 2\gamma, \quad \frac{\partial \alpha_i}{\partial \gamma} = -4 \cdot b_i^{\frac{1}{2}} \cdot w_i^{\frac{1}{2}} \cdot \eta \mu^{-2} 2\gamma \cdot \sin 2\gamma \quad (41\beta)$$

Οι τυπικές αποκλίσεις  $\delta b_i$ ,  $\delta w_i$  στις παραπάνω σχέσεις, υπολογίζονται στη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων.





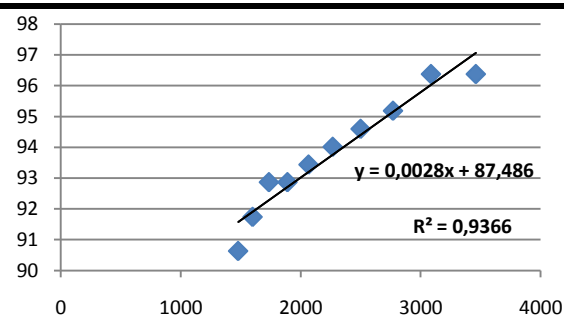
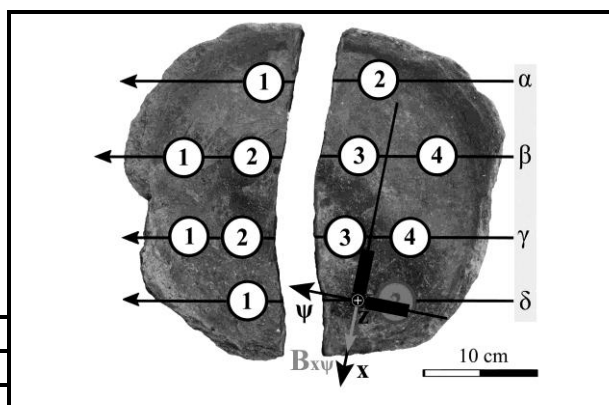
ΑΓΓΕΙΟ 2

Πίνακας 11

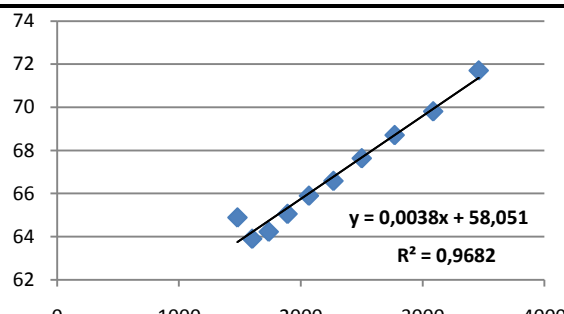
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΕ ΟΣΤΡΑΚΟ ΤΗΣ ΒΑΣΗΣ ΤΟΥ ΑΓΓΕΙΟΥ 2

 $L \pm \Delta L (mm)$ Μετρήσεις με την τρισσορθογώνια διάταξη των αισθητήρων στη διεύθυνση της  $B_{x\psi}$  $21,0 \pm 0,5$ Μετρήσεις της  $B_z$  από τον κάθετο z-αισθητήρα

| $n$ | $\lambda \cdot B_z$ | $D_n$        | $x_n$     | $\psi_n$     | $(x_n - \bar{x})^2$        | $\psi_n (x_n - \bar{x})$        | $(\psi_n - \bar{\psi})^2$        |                | $b_z$         | $\delta b_z$ | $w_z$                | $\delta w_z$            |
|-----|---------------------|--------------|-----------|--------------|----------------------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------|---------------|--------------|----------------------|-------------------------|
| 1   | 66,0                | 26,0         | 1479,3    | 90,6         | 650161,7                   | -73077,3                        | 10,12                            |                |               |              |                      |                         |
| 2   | 65,6                | 25,0         | 1600,0    | 91,7         | 470069,3                   | -62897,4                        | 4,30                             |                |               |              |                      |                         |
| 3   | 65,2                | 24,0         | 1736,1    | 92,9         | 301955,6                   | -51031,2                        | 0,89                             |                |               |              |                      |                         |
| 4   | 65,2                | 23,0         | 1890,4    | 92,9         | 156228,0                   | -36706,6                        | 0,89                             |                |               |              |                      |                         |
| 5   | 65,0                | 22,0         | 2066,1    | 93,4         | 48180,4                    | -20510,1                        | 0,14                             |                |               |              |                      |                         |
| 6   | 64,8                | 21,0         | 2267,6    | 94,0         | 325,5                      | -1696,3                         | 0,04                             |                |               |              |                      |                         |
| 7   | 64,6                | 20,0         | 2500,0    | 94,6         | 45960,5                    | 20280,9                         | 0,62                             |                |               |              |                      |                         |
| 8   | 64,4                | 19,0         | 2770,1    | 95,2         | 234708,4                   | 46116,1                         | 1,90                             |                |               |              |                      |                         |
| 9   | 64,0                | 18,0         | 3086,4    | 96,4         | 641286,6                   | 77183,8                         | 6,61                             |                |               |              |                      |                         |
| 10  | 64,0                | 17,0         | 3460,2    | 96,4         | 1379665,4                  | 113210,5                        | 6,61                             |                |               |              |                      |                         |
|     | $\pm 0,2 nT$        | $\pm 0,2 mm$ | $\bar{x}$ | $\bar{\psi}$ | $\Sigma (x_n - \bar{x})^2$ | $\Sigma \psi_n (x_n - \bar{x})$ | $\Sigma (\psi_n - \bar{\psi})^2$ | $\Sigma R_i^2$ | $M_z (A/m)$   | $\delta M_z$ | $\alpha_z^\perp (m)$ | $\delta \alpha_z^\perp$ |
|     |                     |              | 2285,6    | 93,8         | 3928541,5                  | 10872,2                         | 32,1                             | 2,04           | 0,00277       | 0,00025      | 87,5                 | 0,6                     |
|     |                     |              |           |              |                            |                                 |                                  |                | <b>0,1069</b> | 0,0004       | <b>0,0115</b>        | 0,0005                  |



| Αγγείο 2 |              | Μετρήσεις της $B_{x\psi}$ από τον παράλληλο x-αισθητήρα |           |              |                            |                                 |                                  |                |                   |                    |                           |                              |
|----------|--------------|---|-----------|--------------|----------------------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------|-------------------|--------------------|---------------------------|------------------------------|
| $n$      | $B_{x\psi}$  | $D_n$   | $x_n$     | $\psi_n$     | $(x_n - \bar{x})^2$        | $\psi_n (x_n - \bar{x})$        | $(\psi_n - \bar{\psi})^2$        |                | $b_{x\psi}$       | $\delta b_{x\psi}$ | $w_{x\psi}$               | $\delta w_{x\psi}$           |
| 1        | 78,0         | 26  | 1479,3    | 64,9         | 650161,7                   | -52321,6                        | 3,81                             |                |                   |                    |                           |                              |
| 2        | 78,6         | 25  | 1600,0    | 63,9         | 470069,3                   | -43812,3                        | 8,64                             |                |                   |                    |                           |                              |
| 3        | 78,4         | 24  | 1736,1    | 64,2         | 301955,6                   | -35293,9                        | 6,83                             |                |                   |                    |                           |                              |
| 4        | 77,9         | 23  | 1890,4    | 65,1         | 156228,0                   | -25713,7                        | 3,19                             |                |                   |                    |                           |                              |
| 5        | 77,4         | 22  | 2066,1    | 65,9         | 48180,4                    | -14464,8                        | 0,89                             |                |                   |                    |                           |                              |
| 6        | 77,0         | 21  | 2267,6    | 66,6         | 325,5                      | -1201,4                         | 0,07                             |                |                   |                    |                           |                              |
| 7        | 76,4         | 20  | 2500,0    | 67,6         | 45960,5                    | 14499,9                         | 0,63                             |                |                   |                    |                           |                              |
| 8        | 75,8         | 19  | 2770,1    | 68,7         | 234708,4                   | 33287,8                         | 3,49                             |                |                   |                    |                           |                              |
| 9        | 75,2         | 18  | 3086,4    | 69,8         | 641286,6                   | 55904,9                         | 8,81                             |                |                   |                    |                           |                              |
| 10       | 74,2         | 17  | 3460,2    | 71,7         | 1379665,4                  | 84224,6                         | 23,65                            |                |                   |                    |                           |                              |
|          | $\pm 0,2 nT$ | $\pm 0,2 mm$  | $\bar{x}$ | $\bar{\psi}$ | $\Sigma (x_n - \bar{x})^2$ | $\Sigma \psi_n (x_n - \bar{x})$ | $\Sigma (\psi_n - \bar{\psi})^2$ | $\Sigma R_i^2$ | $M_{x\psi} (A/m)$ | $\delta M_{x\psi}$ | $\alpha_{x\psi}^{//} (m)$ | $\delta \alpha_{x\psi}^{//}$ |
|          |              |   | 2285,6    | 66,8         | 3928541,5                  | 15109,7                         | 60,02                            | 1,91           | 0,00385           | 0,00025            | 58,1                      | 0,58                         |
|          |              |   |           |              |                            |                                 |                                  |                | <b>0,1312</b>     | 0,0007             | <b>0,0166</b>             | 0,0005                       |



**Πίνακας 11.** Υπολογισμός της μαγνήτισης και της ακτίνας ευαισθησίας των αισθητήρων με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, από μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου σε όστρακο της βάσης του αγγείου 2.

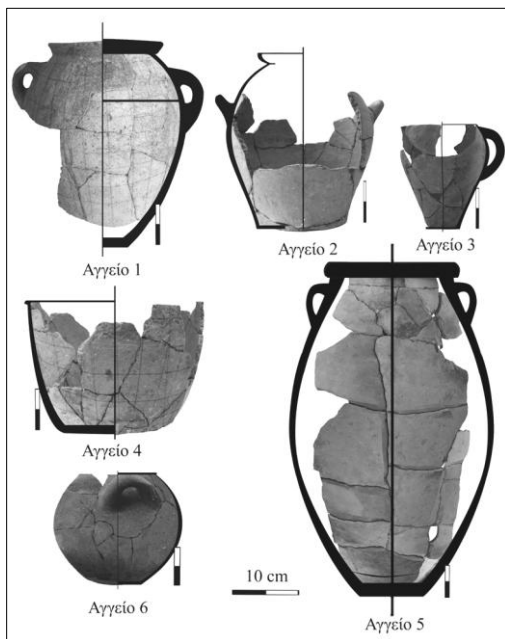
Η παραπάνω θεώρηση επιβεβαιώνεται από τη γραμμικότητα των σχέσεων (πίνακες 11, B22, B23) από τις οποίες υπολογίζονται με αξιοσημείωτη ακρίβεια (πίνακας 12) οι σταθερές ευαισθησίας  $\alpha'$ ,  $\alpha''$  και οι συνιστώσες της μαγνήτισης  $M_{xy}$  και  $M_z$ .

| Αγγεία | $M_z'$ (mA/m) | $M_{xy}''$ (mA/m) | $M$ (mA/m) | $\gamma^\circ$ | $\alpha'$ (cm) | $\alpha''$ (cm) | $\lambda$ |
|--------|---------------|-------------------|------------|----------------|----------------|-----------------|-----------|
| 1      | 75,0±0,2      | 106,0±0,2         | 131,3±0,2  | 53,8±0,1       | 0,82±0,04      | 1,42±0,02       | 2,0±0,1   |
| 2      | 106,9±0,4     | 131,2±0,7         | 169,3±0,6  | 50,8±0,2       | 1,15±0,05      | 1,66±0,05       |           |
| 3      | 112,7±0,4     | 119,3±0,5         | 164,1±0,4  | 46,6±0,2       | 1,07±0,05      | 1,61±0,03       |           |

**Πίνακας 12.** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα του υπολογισμού της μαγνήτισης και των σταθερών ευαισθησίας  $\alpha'$ ,  $\alpha''$  με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων σε ακανόνιστα θραύσματα της βάσης των αγγείων 1,2 και 3.

Η παραπάνω θεώρηση επιβεβαιώνεται από τη γραμμικότητα των σχέσεων (πίνακες 11, B22, B23) από τις οποίες υπολογίζονται με αξιοσημείωτη ακρίβεια (πίνακας 12) οι σταθερές ευαισθησίας  $\alpha'$ ,  $\alpha''$  και οι συνιστώσες της μαγνήτισης  $M_{xy}$  και  $M_z$ .

## 2.5 Σύνοψη των πειραματικών αποτελεσμάτων του υπολογισμού της παραμένουσας μαγνήτισης σε δοκίμια και θραύσματα της βάσης των αγγείων 1-6



**Σχήμα 36.** Απεικόνιση των αγγείων 1-6

Από τα πειραματικά αποτελέσματα των μετρήσεων σε δοκίμια και θραύσματα από τη βάση των 6 αγγείων, (σχήμα 36) διαπιστώνεται ότι:

- Οι αισθητήρες διεγείρονται από το αξονικό πεδίο  $B$  στο άκρο μιας κυλινδρικής περιοχής κεραμικού υλικού (σχήμα 37) στη διεύθυνση της παραμένουσας μαγνήτισης  $M$ .
- Η ροή του πεδίου στο πηνίο διέγερσης του κάθετου ( $B_i^{\perp}$ ) αισθητήρα είναι μικρότερη από αυτήν του παράλληλου ( $B_i^{\parallel} \approx \lambda \cdot B_i^{\perp}$ ) αισθητήρα για τη μέτρηση της ίδιας συνιστώσας  $B_i$  του πεδίου. Ο παράγοντας κανονικοποίησης  $\lambda \approx 2$  εμφανίζει παραπλήσια τιμή σε όστρακα της βάσης διαφορετικών αγγείων και δεν εξαρτάται από τη μαγνήτιση  $M$  του κεραμικού υλικού (σχήμα 38), αλλά μόνο από τον διαφορετικό προσανατολισμό των πηνίων διέγερσης των αισθητήρων παραλλήλως και καθέτως στην επιφάνεια των θραυσμάτων.

• Η διάμετρος  $\delta = 2a_i \cdot \sin \gamma$  ( $i=\perp, \parallel$ ) των περιοχών διέγερσης εξαρτάται από την κατευθυντικότητα ( $\gamma$ ) της μαγνήτισης. Η ακτίνα ευαισθησίας του κάθετου αισθητήρα ( $\alpha'$ ) είναι μικρότερη του παράλληλου ( $\alpha''$ ) αισθητήρα στην επιφάνεια των οστράκων. Οι ακτίνες ευαισθησίας  $\alpha'$ ,  $\alpha''$  αυξάνονται με την αύξηση του μέτρου της μαγνήτισης (διάγραμμα 6) και διαφέρουν (πίνακας 12) σε όστρακα της βάσης διαφορετικών αγγείων.

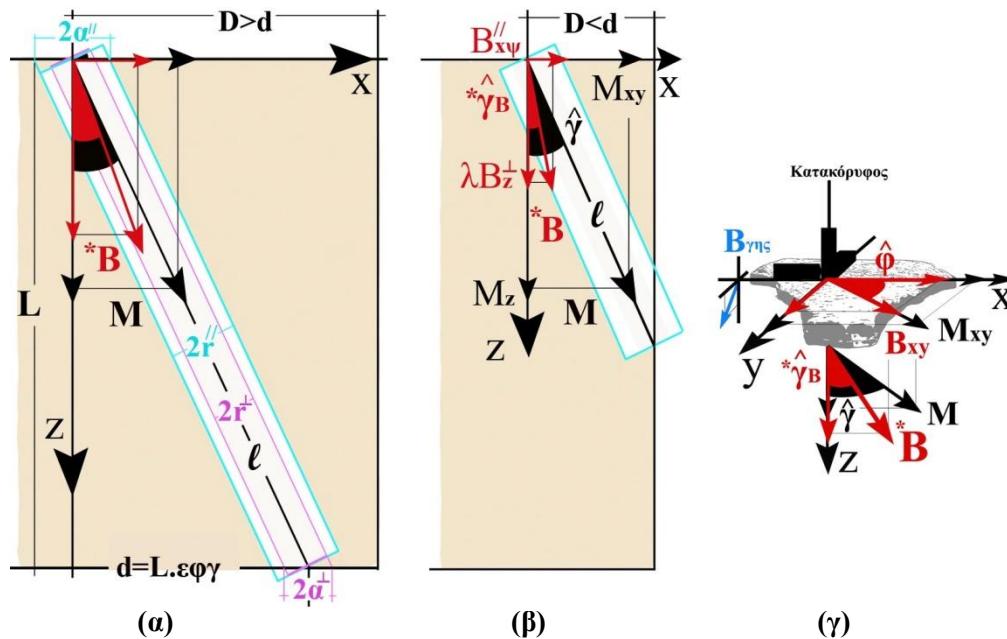
• Το μήκος  $\ell$  κυλινδρικής της περιοχής διέγερσης εξαρτάται από τη γωνία  $\gamma$  της μαγνήτισης  $M$  και το πάχος  $L$  των θραυσμάτων ή από τη θέση των αισθητήρων στην επιφάνεια των οστράκων:

- Αν  $D \geq d = L \cdot \epsilon \phi \gamma$  (σχήμα 37α), το ύψος  $\ell = L / \sin \gamma$  εξαρτάται από το πάχος  $L$  του οστράκου και οι

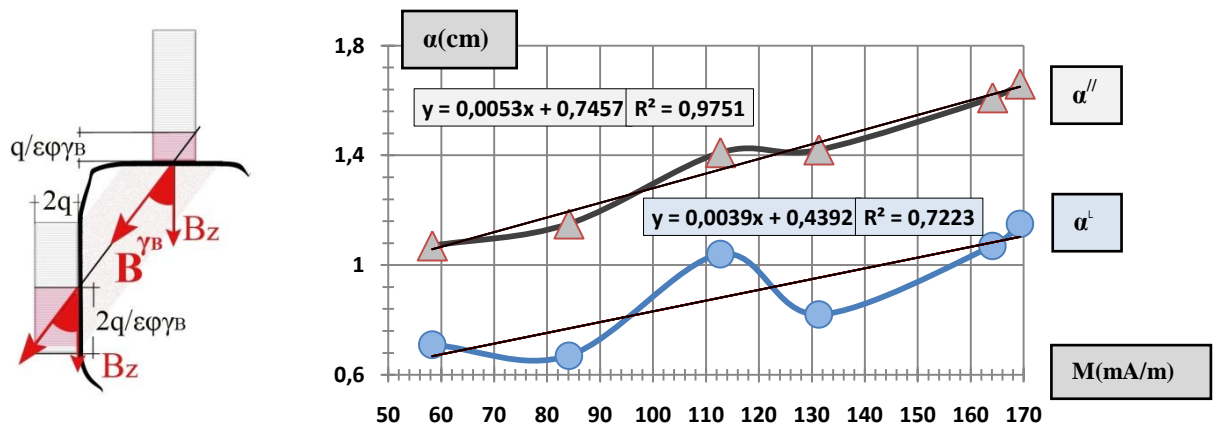
συνιστώσες  $M_i$  ( $i=x, y, z$ ) προσεγγίζονται από τις σχέσεις επαρκούς μήκους (28α):  $M_i = \frac{2B_i}{\mu_0} \cdot \sqrt{1 + \left( \frac{\alpha_i \cdot \sin^2 \gamma}{L} \right)^2}$

- Αν  $D \leq d$  (σχήμα 37β), το ύψος  $\ell = D / \eta \mu \theta$  εξαρτάται από την απόσταση  $D$  της θέσης μέτρησης από το άκρο του οστράκου ( $B_y > 0$ ) στη διεύθυνση της μαγνήτισης  $M$ . Οι συνιστώσες  $M_i$  ( $i=x, y, z$ ) προσεγγίζονται από

τις σχέσεις ανεπαρκούς μήκους (28β):  $M_i = \frac{2B_i}{\mu_0} \cdot \sqrt{1 + \left( \frac{\alpha_i \cdot \eta \mu^2 2\gamma}{2D} \right)^2}$



**Σχήμα 37.** Απεικόνιση των διαστάσεων της κυλινδρικής περιοχής διέγερσης του κάθετου και του παράλληλου αισθητήρα σε όστρακο της βάσης (σχήμα α,β), αναλόγως της θέσης λήψης των μετρήσεων κατά μήκος της  $B_{xy}$ , που προσανατολίζεται στην κατεύθυνση του x-αισθητήρα. Η μαγνήτιση  $M$  και το μαγνητικό πεδίο  $B$  αποκλίνουν κατά την ίδια γωνία  $\phi$  από τον οριζόντιο x-άξονα (σχήμα γ), ενώ οι γωνίες  $\gamma_B, \gamma_M > \gamma_B$  μεταξύ του πεδίου  $B$  και της μαγνήτισης  $M$  αποκλίνουν όσο μειώνεται η απόσταση  $D$  της θέσης λήψης των μετρήσεων από το άκρο του θραύσματος.



**Σχήμα 38.** Η ροή του μετρούμενου αξονικού πεδίου  $B$  από την κυλινδρική περιοχή διέγερσης είναι διπλάσια στον παράλληλο αισθητήρα, για τη μέτρηση της ίδιας συνιστώσας του πεδίου.

**Διάγραμμα 6.** Μεταβολή των ακτίνων ευαισθησίας του κάθετου  $\alpha'$  και του παράλληλου αισθητήρα, συναρτήσει του υπολογιζόμενου μέτρου της μαγνήτισης  $M$  στα όστρακα των βάσεων από τα αγγεία 1-6. Παρότι ο αριθμός των σημείων στο γράφημα είναι ανεπαρκής, η μεταβολή τους φαίνεται γραμμική με παραπλήσια κλίση.

• Επειδή  $\alpha_{x\psi}'' > \alpha_z^L$ , η υπολογιζόμενη απόκλιση  $\gamma_B$  του πεδίου από την κατακόρυφο (σχήμα 37γ) στη θέση λήψης των μετρήσεων είναι μικρότερη της γωνίας  $\gamma$  της μαγνήτισης M.

Επειδή  $\alpha_x'' = \alpha_\psi''$ , η οριζόντιες συνιστώσες  $B_{x\psi}$ ,  $M_{x\psi}$  του μετρούμενου πεδίου B και της μαγνήτισης M αποκλίνουν κατά την ίδια γωνία  $\varphi$  από την οριζόντια κατεύθυνση του x-αισθητήρα. Για τον λόγο αυτόν τα συνανήκοντα όστρακα της βάσης ή τα γειτονικά όστρακα του σώματος των αγγείων προσανατολίζονται κατά τον τρόπο που συναρμόζουν (παρ. 1.3), όταν οι  $B_{x\psi}$  τοποθετηθούν σε παράλληλες κατευθύνσεις.

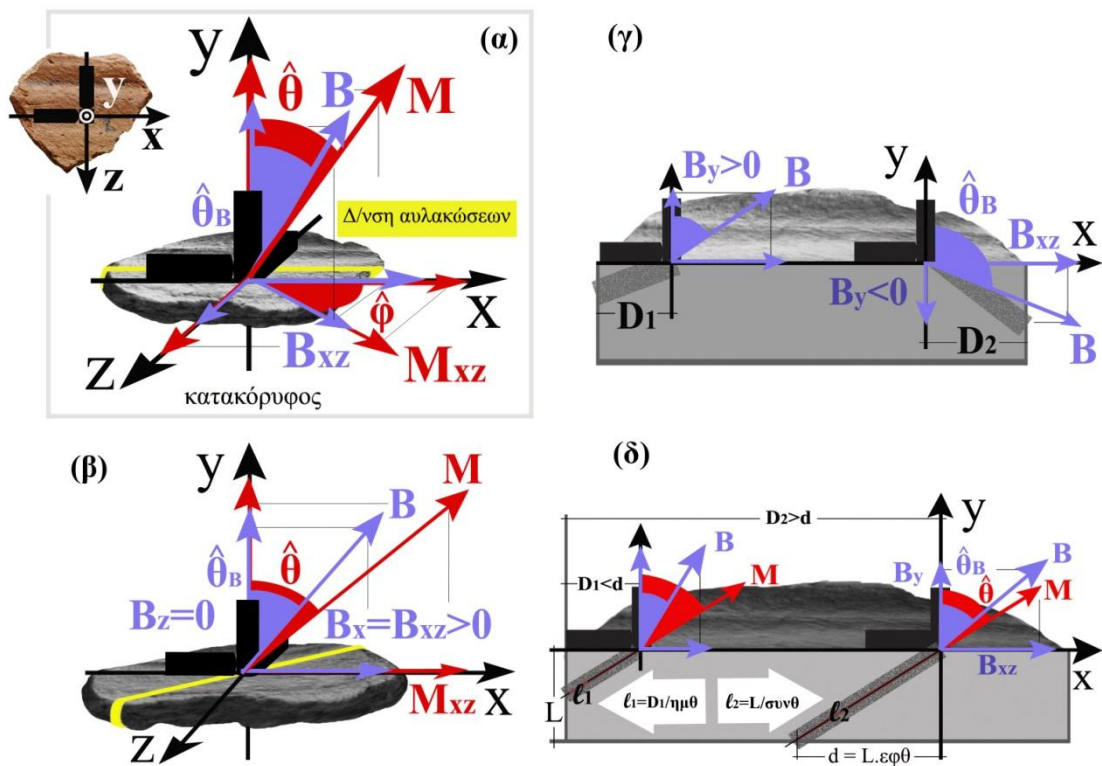
| Αγγεία | M(mA/m)   | $\gamma^\circ$ | $\alpha^L(\text{cm})$ | $\alpha''(\text{cm})$ | $\lambda$ |
|--------|-----------|----------------|-----------------------|-----------------------|-----------|
| 6      | 58,3±0,2  | 43,3±0,3       | 0,71±0,03             | 1,07±0,02             | 1,90±0,01 |
| 4      | 84,1±0,2  | 48,5±0,3       | 0,67±0,03             | 1,15±0,02             | 1,97±0,01 |
| 5      | 112,7±0,3 | 61,3±0,3       | 1,04±0,03             | 1,41±0,03             | 2,03±0,01 |
| 1      | 131,3±0,2 | 53,8±0,1       | 0,82±0,04             | 1,42±0,02             | 2,0±0,1   |
| 3      | 164,1±0,4 | 46,6±0,2       | 1,07±0,05             | 1,61±0,03             | 2,0±0,1   |
| 2      | 169,3±0,6 | 50,8±0,2       | 1,15±0,05             | 1,66±0,05             | 2,0±0,1   |

**Πίνακας 12.** Υπολογισμός του μέτρου M της κατευθυντικότητας ( $\gamma$ ) της μαγνήτισης και των σταθερών κανονικοποίησης  $\lambda$ ,  $\alpha^L$ ,  $\alpha''$  των ενδείξεων των αισθητήρων, σε ακανόνιστα θραύσματα της βάσης των αγγείων 1,2 &3 και σε δοκίμια της βάσης των αγγείων 4,5 &6.

Με τη θεώρηση του τρόπου, της περιοχής διέγερσης των αισθητήρων και των σταθερών κανονικοποίησης των ενδείξεών τους ( $\lambda$ ,  $\alpha^L$ ,  $\alpha''$ ) από μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου σε θραύσματα της βάσης των αγγείων, υπολογίζεται η μαγνήτιση σε συνανήκοντα όστρακα του σώματος των αγγείων 1-6.

## 2.6 Υπολογισμός της μαγνήτισης σε όστρακα του σώματος των αγγείων 1-6

Οι μετρήσεις λαμβάνονται από την τρισσορθογώνια διάταξη αισθητήρων/μαγνητών στη ίδια θέση, με τον x-αισθητήρα προσανατολισμένο κάθετα στην οριζόντια και την κατακόρυφη συνιστώσα του γεωμαγνητικού πεδίου. Οι μετρήσεις λαμβάνονται στα ίδια σημεία τομής σημειωμένων εγκάρσιων αυλακώσεων και διαμηκών τομών (σχήμα 12α) του σώματος των 6 αγγείων που λήφθηκαν όλες οι προηγούμενες μετρήσεις. Οι θέσεις μέτρησης λαμβάνονται στις ακμές πλέγματος από κάθετες γραμμές στα ίχνη των αυλακώσεων από την μορφοποίηση των 6 αγγείων σε τροχό αγγειοπλαστικής. Για την εκμετάλλευση της περιστροφικής συμμετρίας των αγγείων (σχήμα 39) οι μετρήσεις λαμβάνονται ως προς δεξιόστροφο σύστημα αναφοράς, με τον x-άξονα στη διεύθυνση των αυλακώσεων, τον y-άξονα κάθετο στην επιφάνεια με φορά προς το εσωτερικό των οστράκων και τον z-άξονα με φορά προς τη βάση των αγγείων. Οι συνιστώσες  $M_i$  ( $i=x,y,z$ ) υπολογίζονται από τις μετρήσεις  $B_i$  του πεδίου, στη θέση στροφής όπου οι αυλακώσεις προσανατολίζονται στην κατεύθυνση του x-αισθητήρα.



**Σχήμα 39.** Μεθοδολογία υπολογισμού των συνιστωσών της μαγνήτισης  $M$  από τις μετρούμενες συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου  $B$  στο θεωρούμενο σύστημα αναφοράς.

Οι συνιστώσες του μετρούμενου πεδίου  $B$  και της μαγνήτισης  $M$  στο θεωρούμενο σύστημα αναφοράς (σχήμα 39α) υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$B_x = B \cdot \eta\mu\theta_B \cdot \sigma\upsilon\nu\varphi, B_y = B \cdot \eta\mu\theta_B \cdot \eta\mu\varphi, B_z = B \cdot \sigma\upsilon\nu\theta_B, M_x = M \cdot \eta\mu\theta \cdot \sigma\upsilon\nu\varphi, M_y = M \cdot \eta\mu\theta \cdot \eta\mu\varphi, M_z = M \cdot \sigma\upsilon\nu\theta \quad (42)$$

Επειδή οι συνιστώσες  $B_x, B_z$  του μαγνητικού πεδίου μετριοούνται από τους παράλληλους αισθητήρες επί της επιφάνειας των οστράκων (παρ. 2.5) που έχουν την ίδια ακτίνα ευαισθησίας ( $\alpha''$ ), η  $\vec{B}_{xz}$  και η  $\vec{M}_{xz}$  αποκλίνουν κατά την ίδια γωνία  $\varphi$  από τον προσανατολισμένο x-άξονα στη διεύθυνση των αυλακώσεων.

Επειδή η  $\lambda B_y$  υπολογίζεται<sup>20</sup> από τις ενδείξεις του κάθετου  $y$ -αισθητήρα στην επιφάνεια των οστράκων που έχει διαφορετική ακτίνα ευαισθησίας ( $\alpha^\perp$ ) από τους  $x, z$  αισθητήρες, οι υπολογιζόμενες γωνίες<sup>21</sup>  $\theta_B$  του πεδίου<sup>22</sup>  $\vec{B}$  και  $\theta$  της μαγνήτισης  $\vec{M}$  εμφανίζουν διαφορετικές τιμές.

Ο υπολογισμός των συνιστωσών της μαγνήτισης με τις σχέσεις επαρκούς (28α) ή ανεπαρκούς (28β) μήκους από τις ενδείξεις των αισθητήρων, προϋποθέτει τον προσδιορισμό της γωνίας  $\theta$  της μαγνήτισης  $\vec{M}$  με τον  $y$ -άξονα και τη σύγκριση του μήκους  $d = L \cdot |\epsilon\phi\theta|$  σε σχέση με την απόσταση  $D$  της κάθε θέσης μέτρησης από το άκρο του οστράκου στη διεύθυνση της  $\vec{B}_{xz}$ .

Για τον προσδιορισμό της απόκλισης  $\theta$  της μαγνήτισης από την κατακόρυφο (σχήμα 39β), λαμβάνονται μετρήσεις των  $B_{xz}$ ,  $B_y$  με στροφή των οστράκων κατά τη γωνία  $\phi$ , για τον προσανατολισμό της  $B_{xz}$  στην  $x$ -κατεύθυνση, στη θέση όπου  $B_y=0$  και  $B_{xz}>0$ . Η απόσταση  $D$  μεταξύ της θέσης μέτρησης και του άκρου του οστράκου στην κοινή διεύθυνση των  $M_{xz}, B_{xz}$  (σχήμα 39γ) μετριέται στον αρνητικό ή στον θετικό  $x$ -ημιάξονα, όταν  $B_y > 0$  ή  $B_y < 0$ , που μπορεί να είναι (σχήμα 39δ) μπορεί να είναι επαρκής ( $D > d = L \cdot |\epsilon\phi\theta|$ ) ή ανεπαρκής ( $D < d$ ), για το μετρούμενο πάχος  $L$  των οστράκων στη θέση λήψης των μετρήσεων.

Σε κάθε περίπτωση, οι γωνίες  $\theta = \theta_D$  ή  $\theta = \theta_L$  της μαγνήτισης προσεγγίζονται<sup>23</sup> από την επίλυση (μέθοδος Newton-Raphson<sup>24</sup>) των τριβάθμιων εξισώσεων:

<sup>20</sup> Το σφάλμα  $\delta B_y$  των διορθωμένων τιμών  $B_y = \lambda \cdot \beta_y$  από τις ενδείξεις  $\beta_y$  του κάθετου  $y$ -αισθητήρα υπολογίζεται σε κάθε θέση μέτρησης, σύμφωνα με τη θεωρία μετάδοσης σφαλμάτων από τη σχέση:

$$\delta B_y = \sqrt{\left(\frac{\partial B_y}{\partial \beta_y}\right)^2 \cdot (\Delta \beta_y)^2 + \left(\frac{\partial B_y}{\partial \lambda}\right)^2 \cdot (\delta \lambda)^2} = \sqrt{\lambda^2 \cdot (\Delta \beta_y)^2 + (\beta_y)^2 \cdot (\delta \lambda)^2}, \text{ όπου: } \Delta \beta_y = 1 \text{ nT} \quad (43)$$

Οι μετρήσεις των συνιστωσών του μαγνητικού πεδίου  $B_x, B_z$  και  $\beta_y$ , λαμβάνονται με σφάλμα  $\Delta B_x = \Delta B_z = \beta_y = 1 \text{ nT}$ , λόγω του ανάγλυφου της επιφάνειας των οστράκων. Ο συντελεστής κανονικοποίησης  $\lambda$  και τα σφάλματα  $\delta \lambda$  υπολογίζονται από τις μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου (πίνακας 12) στα δοκίμια των αγγείων 4,5 και 6. Για τα αγγεία 1,2 και 3, χρησιμοποιείται η τιμή  $\lambda = 2,0$  με σφάλμα  $\delta \lambda = 0,1$ .

<sup>21</sup> Το σφάλμα  $\delta \theta_B$  της γωνίας  $\theta_B = \epsilon\phi^{-1}(B_{xz}/B_y)$  υπολογίζεται σε κάθε θέση μέτρησης σύμφωνα με τη θεωρία μετάδοσης σφαλμάτων

$$\text{από τη σχέση: } \delta \hat{\theta}_B = \sqrt{\left(\frac{\partial \theta_B}{\partial B_{xz}}\right)^2 \cdot (\Delta B_{xz})^2 + \left(\frac{\partial \theta_B}{\partial B_y}\right)^2 \cdot (\delta B_y)^2} = \sqrt{\left[1 + \left(\frac{B_{xz}}{B_y}\right)^2\right]^2 \cdot \left[B_y^{-2} \cdot (\Delta B_{xz})^2 + B_y^{-4} \cdot B_{xz}^2 \cdot (\delta B_y)^2\right]} \quad (44)$$

Στην παραπάνω σχέση  $\Delta B_{xz} = 1 \text{ nT}$ , ενώ το σφάλμα  $\delta B_y$  υπολογίζεται από τη σχέση (43).

<sup>22</sup> Το σφάλμα  $\delta B$  του πεδίου  $B = \sqrt{B_{xz}^2 + B_y^2}$  υπολογίζεται σε κάθε θέση μέτρησης σύμφωνα με τη θεωρία μετάδοσης σφαλμάτων από

$$\text{τη σχέση: } \delta B = \sqrt{\left(\frac{\partial B}{\partial B_{xz}}\right)^2 \cdot (\Delta B_{xz})^2 + \left(\frac{\partial B}{\partial B_y}\right)^2 \cdot (\delta B_y)^2} = \sqrt{(B_{xz}^2 + B_y^2) \cdot (B_{xz}^2 \cdot \Delta B_{xz}^2 + B_y^2 \cdot \delta B_y^2)} \quad (45)$$

Στην παραπάνω σχέση  $\Delta B_{xz} = 1 \text{ nT}$ , ενώ το σφάλμα  $\delta B_y$  υπολογίζεται από τη σχέση (43).

<sup>23</sup> Οι τιμές της γωνίας  $\theta_L, \theta_D$  υπολογίζονται από τις ρίζες  $x_L = \sin^2 \theta_L, x_D = \sin^2 \theta_D$  των τριβάθμιων εξισώσεων (43):

$$f_i(x_i) = A_i \cdot x_i^3 + B_i \cdot x_i^2 + \Gamma_i \cdot x_i + \Delta_i = 0, \text{ για } i = L, D \quad (46) \quad \text{όπου:}$$

$$\text{για } i = L: \quad A_L = g^2 \cdot \alpha_{xz}^2 + \alpha_y^2, \quad B_L = -\alpha_y^2, \quad \Gamma_L = L^2 \cdot (g^2 + 1) \quad \text{και} \quad \Delta_L = -L^2,$$

$$\text{για } i = D: \quad A_D = g^2 \cdot \alpha_{xz}^2 + \alpha_y^2, \quad B_D = -(g^2 \cdot \alpha_{xz}^2 + 2\alpha_y^2), \quad \Gamma_D = -(g^2 \cdot D^2 + D^2 - \alpha_y^2) \quad \text{και} \quad \Delta_D = D^2$$

Οι ρίζες  $x_L = x_{L,n+1}^L$  και  $x_D = x_{D,n+1}^D$  προσεγγίζονται με τη μέθοδο *Newton-Raphson*, από τις συναρτήσεις  $f_L(x_L)$  και  $f_D(x_D)$  και τις παραγώγους τους  $f'_L(x_L)$  και  $f'_D(x_D)$  μετά από  $n = 5$  επαναλήψεις με πρώτη προσέγγιση την τιμή  $x_0^i = 0,5$ , από την αναδρομική

$$\text{σχέση: } x_{n+1}^i = x_n^i - \frac{f_i(x_n^i)}{f'_i(x_n^i)} = x_n^i - \frac{A_i \cdot x_n^3 + B_i \cdot x_n^2 + \Gamma_i \cdot x_n + \Delta_i}{3A_i \cdot x_n^2 + 2B_i \cdot x_n + \Gamma_i}, \text{ για } i = L, D \quad (47)$$

Οι γωνίες  $\theta_L^0$  και  $\theta_D^0$  υπολογίζονται από τις τιμές των  $x_L$  και  $x_D$  από τη σχέση:  $\theta_i = \sin^{-1} \sqrt{x_i}$ , για  $i = L, D$ .

<sup>24</sup> Available online: <https://www.math.ubc.ca/~ansteem/math104/104newtonmethod.pdf> (accessed on 29-7-2019).



$$D > d: \frac{B_{xz}}{B_\psi} = \varepsilon \varphi \theta_L \cdot \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{\alpha_\psi \cdot \sin^2 \theta_L}{L}\right)^2}{1 + \left(\frac{\alpha_{xz} \cdot \sin^2 \theta_L}{L}\right)^2}} \quad D < d: \frac{B_{xz}}{B_\psi} = \varepsilon \varphi \theta_D \cdot \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{\alpha_\psi \cdot \eta \mu 2\theta_D}{2D}\right)^2}{1 + \left(\frac{\alpha_{xz} \cdot \eta \mu 2\theta_D}{2D}\right)^2}} \quad (48)$$

Οι σταθερές  $\alpha_{xz}^{\prime\prime}, \alpha_\psi^{\prime\prime}, \lambda$ , υπολογίζονται από τις μετρήσεις του πεδίου (πίνακας 12) σε συνανήκοντα όστρακα της βάσης των αγγείων.

-Αν  $\theta_L > \theta_D$ , τότε  $D > d = L \cdot |\varepsilon \varphi \theta_L|$  και  $\theta = \theta_L$ . Για τον υπολογισμό των συνιστωσών της μαγνήτισης<sup>25</sup>  $M_y, M_{xz}$  χρησιμοποιούνται οι σχέσεις επαρκούς μήκους (28α).

-Αν  $\theta_L < \theta_D$ , τότε  $D < d = L \cdot |\varepsilon \varphi \theta_D|$  και  $\theta = \theta_D$ . Για τον υπολογισμό των συνιστωσών της μαγνήτισης<sup>26</sup>  $M_y, M_{xz}$  χρησιμοποιούνται οι σχέσεις ανεπαρκούς μήκους (28β).

Σε κάθε περίπτωση ( $\theta = \theta_L$  ή  $\theta = \theta_D$ ) υπολογίζεται η συνισταμένη της μαγνήτισης  $M = \sqrt{M_{xz}^2 + M_y^2}$  και το σφάλμα<sup>27</sup>  $\delta M$ . Από τις τιμές των  $M_y, M_{xz}$  που υπολογίζονται σε κάθε περίπτωση, προσδιορίζεται το σφάλμα<sup>28</sup>  $\delta \hat{\theta}$  και υπολογίζεται το μέγιστο επαρκές μήκος  $d = L \cdot \varepsilon \varphi \theta$  του κυλινδρικού χώρου που διεγείρει τους

<sup>25</sup> Για τις σχέσεις επαρκούς μήκους, τα σφάλματα  $\delta M_i$  των συνιστωσών της μαγνήτισης  $M_i = \frac{2B_i}{\mu_o} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\alpha_i \cdot \sin^2 \theta}{L}\right)^2} = \frac{2B_i}{\mu_o} \cdot G_i^{\frac{1}{2}}$ , για  $i = y, xz$  υπολογίζονται σύμφωνα με τη θεωρία μετάδοσης σφαλμάτων από τη σχέση:

$$\delta M_i = \sqrt{\left(\frac{\partial M_i}{\partial B_i}\right)^2 (\Delta B_i)^2 + \left(\frac{\partial M_i}{\partial L}\right)^2 (\Delta L)^2 + \left(\frac{\partial M_i}{\partial \alpha_i}\right)^2 (\delta \alpha_i)^2}, \text{ όπου:}$$

$$\frac{\partial M_i}{\partial B_i} = \frac{2G_i^{\frac{1}{2}}}{\mu_o}, \quad \frac{\partial M_i}{\partial L} = -\frac{2B_i}{\mu_o} G_i^{\frac{1}{2}} \cdot \alpha_i^2 \cdot \sin^4 \theta \cdot L^{-3} \quad \text{και} \quad \frac{\partial M_i}{\partial \alpha_i} = \frac{2B_i}{\mu_o} G_i^{\frac{1}{2}} \cdot \alpha_i \cdot \sin^4 \theta \cdot L^{-2} \quad (49\alpha)$$

<sup>26</sup> Για τις σχέσεις επαρκούς μήκους, τα σφάλματα  $\delta M_i$  των συνιστωσών της μαγνήτισης  $M_i = \frac{2B_i}{\mu_o} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\alpha_i \cdot \eta \mu 2\theta}{2D}\right)^2} = \frac{2B_i}{\mu_o} \cdot Q_i^{\frac{1}{2}}$ , για  $i = y, xz$  υπολογίζονται σύμφωνα με τη θεωρία μετάδοσης σφαλμάτων από τη σχέση:

$$\delta M_i = \sqrt{\left(\frac{\partial M_i}{\partial B_i}\right)^2 (\Delta B_i)^2 + \left(\frac{\partial M_i}{\partial D}\right)^2 (\Delta D)^2 + \left(\frac{\partial M_i}{\partial \alpha_i}\right)^2 (\delta \alpha_i)^2}, \text{ όπου:}$$

$$\frac{\partial M_i}{\partial B_i} = \frac{2Q_i^{\frac{1}{2}}}{\mu_o}, \quad \frac{\partial M_i}{\partial D} = -\frac{B_i}{2\mu_o} Q_i^{\frac{1}{2}} \cdot \alpha_i^2 \cdot \eta \mu^2 2\theta \cdot D^{-3} \quad \text{και} \quad \frac{\partial M_i}{\partial \alpha_i} = \frac{B_i}{2\mu_o} Q_i^{\frac{1}{2}} \cdot \alpha_i \cdot \eta \mu^2 2\theta \cdot D^{-2} \quad (49\beta)$$

Στις παραπάνω σχέσεις  $\Delta B_{xz} = 1 \text{ nT}$ ,  $\Delta L = 1 \text{ mm}$ ,  $\Delta D = 3 \text{ mm}$ , ενώ το σφάλμα  $\delta B_y$  υπολογίζεται από τη σχέση (43). Οι τιμές  $\alpha_x = \alpha_z = \alpha^{\prime\prime}$ ,  $\alpha_y = \alpha^{\prime}$  και τα σφάλματα  $\delta \alpha^{\prime\prime}, \delta \alpha^{\prime}$  υπολογίζονται (πίνακας 12) από τις μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου σε συνανήκοντα όστρακα της βάσης των αγγείων.

<sup>27</sup> Το σφάλμα  $\delta M$  της μαγνήτισης υπολογίζεται σε κάθε θέση μέτρησης σύμφωνα με τη θεωρία μετάδοσης σφαλμάτων από τη σχέση:

$$\delta M = \sqrt{\left(\frac{\partial M}{\partial M_{xz}}\right)^2 (\delta M_{xz})^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial M_y}\right)^2 (\delta M_y)^2} = \sqrt{(M_{xz}^2 + M_y^2) \cdot (M_{xz}^2 \cdot \delta M_{xz}^2 + M_y^2 \cdot \delta M_y^2)} \quad (50)$$

Τα σφάλματα  $\delta M_i$  ( $i = xz, y$ ), για  $\theta = \theta_L$  ή  $\theta = \theta_D$  υπολογίζονται από τις αντίστοιχες σχέσεις (49α,β).

<sup>28</sup> Το σφάλμα  $\delta \theta$  της γωνίας  $\theta = \varepsilon \varphi^{-1} (M_{xz}/M_y)$ , υπολογίζεται σύμφωνα με τη θεωρία μετάδοσης σφαλμάτων από τη σχέση:

$$\delta \theta = \sqrt{\left(\frac{\partial \theta}{\partial M_{xz}}\right)^2 (\delta M_{xz})^2 + \left(\frac{\partial \theta}{\partial M_y}\right)^2 (\delta M_y)^2}, \text{ όπου:}$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial M_{xz}} = \left[1 + \left(\frac{M_{xz}}{M_y}\right)^2\right]^{-1} \cdot (M_y)^{-1} \quad \text{και} \quad \frac{\partial \theta}{\partial M_y} = -\left[1 + \left(\frac{M_{xz}}{M_y}\right)^2\right]^{-1} \cdot (M_y)^{-2} \cdot M_{xz} \quad (51)$$

Τα σφάλματα  $\delta M_i$  ( $i = xz, y$ ), για  $\theta = \theta_L$  ή  $\theta = \theta_D$  υπολογίζονται από τις αντίστοιχες σχέσεις (49α,β).

αισθητήρες και το σφάλμα<sup>29</sup> δδ για τη σύγκρισή τους με τη μετρούμενη απόσταση D από τη θέση μέτρησης έως το άκρο του οστράκου, στη διεύθυνση της  $\vec{B}_{xz}$ .

Με στροφή των θραυσμάτων στη θέση όπου οι αυλακώσεις προσανατολίζονται στη διεύθυνση του x-αισθητήρα λαμβάνονται μετρήσεις των συνιστωσών  $B_i$  ( $i=x,y,z$ ) του πεδίου και υπολογίζεται η συνισταμένη του πεδίου  $B=\sqrt{B_x^2+B_y^2+B_z^2}$ , οι γωνίες  $\theta_B = \sin^{-1}(B_y/B)$ ,  $\varphi_B = \cos^{-1}(B_z/B_x)$  και τα σφάλματα<sup>30</sup>  $\delta\theta_B$  και  $\delta\varphi_B$ <sup>31</sup>.

Από τις μετρήσεις των συνιστωσών  $B_i$  ( $i=x,y,z$ ) του μαγνητικού πεδίου και την τιμή της γωνίας  $\theta = \theta_L$  ή  $\theta = \theta_D$  υπολογίζονται σε κάθε περίπτωση, οι συνιστώσες  $M_i$  ( $i=x,y,z$ ) της μαγνήτισης και τα σφάλματα  $\delta M_i$ , από τις αντίστοιχες σχέσεις (28α,β) επαρκούς<sup>32</sup> ( $D>d$ ) ή ανεπαρκούς<sup>33</sup> ( $D<d$ ) μήκους.

<sup>29</sup> Το σφάλμα δδ του μέγιστου επαρκούς μήκους  $d = L \cdot |\cos\theta|$  που καταλαμβάνει ο κυλινδρικός χώρος που διεγείρει τους αισθητήρες στη διεύθυνση της  $\vec{B}_{xz}$  υπολογίζεται σύμφωνα με τη θεωρία μετάδοσης σφαλμάτων από τη σχέση:

$$\delta d = \sqrt{\left(\frac{\partial d}{\partial L}\right)^2 \cdot (\Delta L)^2 + \left(\frac{\partial d}{\partial \theta}\right)^2 \cdot (\delta\theta)^2} = \sqrt{\varepsilon \varphi^2 \theta \cdot (\Delta L)^2 + L^2 \cdot \sin^4 \theta \cdot (\delta\theta)^2} \quad (52)$$

Στην παραπάνω σχέση  $\Delta L = 1 \text{ mm}$ , ενώ το σφάλμα  $\delta\theta$  υπολογίζεται από τη σχέση (51).

<sup>30</sup> Το σφάλμα  $\delta\theta_B$  της γωνίας,  $\theta_B = \sin^{-1} B_y/B$  υπολογίζεται σύμφωνα με τη θεωρία μετάδοσης σφαλμάτων από τη σχέση:

$$\delta\theta_B = \sqrt{\left(\frac{\partial \theta_B}{\partial B_y}\right)^2 (\Delta B_y)^2 + \left(\frac{\partial \theta_B}{\partial B}\right)^2 (\delta B)^2} = \sqrt{\left[1 + \left(\frac{B_y}{B}\right)^2\right]^{-1} \left[B^2 (\Delta B_y)^2 + B_y^2 B^4 (\delta B)^2\right]} \quad (53)$$

Το σφάλμα της διορθωμένης τιμής της  $B_y$  συνιστώσας, υπολογίζεται από τη σχέση (43).

<sup>31</sup> Το σφάλμα  $\delta\varphi_B$  της γωνίας  $\varphi_B = \cos^{-1}(B_z/B_x)$ , υπολογίζεται σύμφωνα με τη θεωρία μετάδοσης σφαλμάτων από τη σχέση:

$$\delta\varphi_B = \sqrt{\left(\frac{\partial \varphi_B}{\partial B_z}\right)^2 (\Delta B_z)^2 + \left(\frac{\partial \varphi_B}{\partial B_x}\right)^2 (\Delta B_x)^2} = \sqrt{\left[1 + \left(\frac{B_z}{B_x}\right)^2\right]^{-2} \cdot [B_x^2 (\Delta B_z)^2 + B_z^2 \cdot B_x^4 \cdot (\Delta B_x)^2]} \quad (54)$$

Στην παραπάνω σχέση  $\Delta B_x = \Delta B_z = 1 \text{ nT}$ .

<sup>32</sup> Στην περίπτωση όπου  $D>d$  και  $\theta = \theta_L$  τα σφάλματα  $\delta M_i$  των συνιστωσών της μαγνήτισης  $M_i = \frac{2 \cdot B_i}{\mu_0} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\alpha_i \cdot \sin^2 \theta}{L}\right)^2} = \frac{2 \cdot B_i}{\mu_0} \cdot G_i^{\frac{1}{2}}$ ,  $i=x,y,z$  υπολογίζονται από τις σχέσεις επαρκούς μήκους σύμφωνα με τη θεωρία μετάδοσης σφαλμάτων:

$$\delta M_i = \sqrt{\left(\frac{\partial M_i}{\partial B_i}\right)^2 (\Delta B_i)^2 + \left(\frac{\partial M_i}{\partial L}\right)^2 (\Delta L)^2 + \left(\frac{\partial M_i}{\partial \alpha_i}\right)^2 (\delta \alpha_i)^2}, \text{ όπου:}$$

$$\frac{\partial M_i}{\partial B_i} = \frac{2 G_i^{\frac{1}{2}}}{\mu_0}, \quad \frac{\partial M_i}{\partial L} = -\frac{2 B_i}{\mu_0} G_i^{\frac{1}{2}} \cdot \alpha_i^2 \cdot \sin^4 \theta \cdot L^{-3} \quad \text{και} \quad \frac{\partial M_i}{\partial \alpha_i} = \frac{2 B_i}{\mu_0} G_i^{\frac{1}{2}} \cdot \alpha_i \cdot \sin^4 \theta \cdot L^{-2} \quad (55a)$$

<sup>33</sup> Στην περίπτωση όπου  $D<d$  και  $\theta = \theta_D$  τα σφάλματα  $\delta M_i$  των συνιστωσών της μαγνήτισης  $M_i = \frac{2 \cdot B_i}{\mu_0} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\alpha_i \cdot \eta \mu 2 \theta}{2D}\right)^2} = \frac{2 \cdot B_i}{\mu_0} \cdot Q_i^{\frac{1}{2}}$ ,  $i=x,y,z$  υπολογίζονται από τις σχέσεις ανεπαρκούς μήκους σύμφωνα με τη θεωρία μετάδοσης σφαλμάτων:

$$\delta M_i = \sqrt{\left(\frac{\partial M_i}{\partial B_i}\right)^2 (\Delta B_i)^2 + \left(\frac{\partial M_i}{\partial D}\right)^2 (\Delta D)^2 + \left(\frac{\partial M_i}{\partial \alpha_i}\right)^2 (\delta \alpha_i)^2}, \text{ όπου:}$$

$$\frac{\partial M_i}{\partial B_i} = \frac{2 Q_i^{\frac{1}{2}}}{\mu_0}, \quad \frac{\partial M_i}{\partial D} = -\frac{B_i}{2 \mu_0} Q_i^{\frac{1}{2}} \cdot \alpha_i^2 \cdot \eta \mu^2 2 \theta \cdot D^{-3} \quad \text{και} \quad \frac{\partial M_i}{\partial \alpha_i} = \frac{B_i}{2 \mu_0} Q_i^{\frac{1}{2}} \cdot \alpha_i \cdot \eta \mu^2 2 \theta \cdot D^{-2} \quad (55b)$$

Στις παραπάνω σχέσεις  $\Delta B_x = \Delta B_z = 1 \text{ nT}$ ,  $\Delta L = 1 \text{ mm}$ ,  $\Delta D = 3 \text{ mm}$ , ενώ το σφάλμα  $\delta B_y$  υπολογίζεται από τη σχέση (43). Οι τιμές  $\alpha_x = \alpha_z = \alpha''$ ,  $\alpha_y = \alpha^{\perp}$  και τα σφάλματα  $\delta \alpha''$ ,  $\delta \alpha^{\perp}$  υπολογίζονται (πίνακας 12) από τις μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου σε συνανήκοντα όστρακα της βάσης των αγγείων.

Από τις τιμές των συνιστωσών  $M_i$  ( $i=x,y,z$ ) της μαγνήτισης υπολογίζεται σε κάθε θέση μέτρησης, η συνισταμένη  $M=\sqrt{M_y^2+M_x^2+M_z^2}$ , το σφάλμα<sup>34</sup>  $\delta M$ , η γωνία  $\theta = \sin^{-1}(M_y/M)$ , το σφάλμα<sup>35</sup>  $\delta\theta$ , η γωνία  $\varphi = \arctan(M_z/M_x)$  και το σφάλμα<sup>36</sup>  $\delta\varphi$ .

Ενδεικτικά πειραματικά αποτελέσματα, παρατίθενται **στον πίνακα 13α,β,γ,δ** από μετρήσεις οστράκων από το σώμα του **αγγείου 6**. Τα πειραματικά αποτελέσματα από τις μετρήσεις στα όστρακα του σώματος των αγγείων 1-5 παρατίθενται στους **πίνακες 24-28** του παραρτήματος Β.

Η θερμοπαραμένουσα μαγνήτιση του κεραμικού υλικού προσανατολίζεται στην κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου της γης κατά τη διάρκεια της ψύξης του αγγείου στον κλίβανο όπτησης.

Οι παραπλήσιες τιμές του μαγνητικού πεδίου των συνανηγόντων οστράκων είναι αποτέλεσμα της ομοιόμορφης μαγνήτισης του κεραμικού υλικού κάθε αγγείου, που συνίσταται από την ίδια πρώτη ύλη και ψήθηκε στις ίδιες συνθήκες.

Η διαπίστωση της μαγνητικής ανισοτροπίας του κεραμικού υλικού, στο βαθμό που τα γειτονικά όστρακα προσανατολίζονται κατά τον τρόπο που συναρμόζουν από το μαγνητικό τους πεδίο, οδηγεί στη διερεύνηση της παραμένουσας θερμομαγνήτισης, όπως διαμορφώθηκε κατά τη διάρκεια της όπτησης στην κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου της γης, από την περιστροφική συμμετρία του σώματος των αγγείων.

<sup>34</sup> Το σφάλμα  $\delta M$  της μαγνήτισης υπολογίζεται από τη θεωρία μετάδοσης σφαλμάτων:

$$\delta M = \sqrt{(M_y^2 + M_x^2 + M_z^2)^{-1} \cdot [M_y^2 \cdot (\delta M_y)^2 + M_x^2 \cdot (\delta M_x)^2 + M_z^2 \cdot (\delta M_z)^2]} \quad (56)$$

Τα σφάλματα  $\delta M_y$ ,  $\delta M_x$ ,  $\delta M_z$  υπολογίζονται από τις σχέσεις (55α,β) στις αντίστοιχες περιπτώσεις επαρκούς ( $\theta = \theta_L$ ) ή ανεπαρκούς ( $\theta = \theta_D$ ) μήκους.

<sup>35</sup> Το σφάλμα  $\delta\theta$  της γωνίας  $\theta = \sin^{-1}(M_y/M)$ , υπολογίζεται σε κάθε θέση μέτρησης σύμφωνα με τη θεωρία μετάδοσης σφαλμάτων:

$$\delta\theta = \sqrt{\left(\frac{\partial\theta}{\partial M_y}\right)^2 (\delta M_y)^2 + \left(\frac{\partial\theta}{\partial M}\right)^2 (\delta M)^2} = \sqrt{\left[1 + \left(\frac{M_y}{M}\right)^2\right]^{-1} \left[M^{-2} (\delta M_y)^2 + M_y^2 M^{-4} (\delta M)^2\right]} \quad (57)$$

Τα σφάλματα  $\delta M_y$  και  $\delta M$  υπολογίζονται από τις σχέσεις (55α,β) και (57) στις αντίστοιχες περιπτώσεις επαρκούς ( $\theta = \theta_L$ ) ή ανεπαρκούς ( $\theta = \theta_D$ ) μήκους.

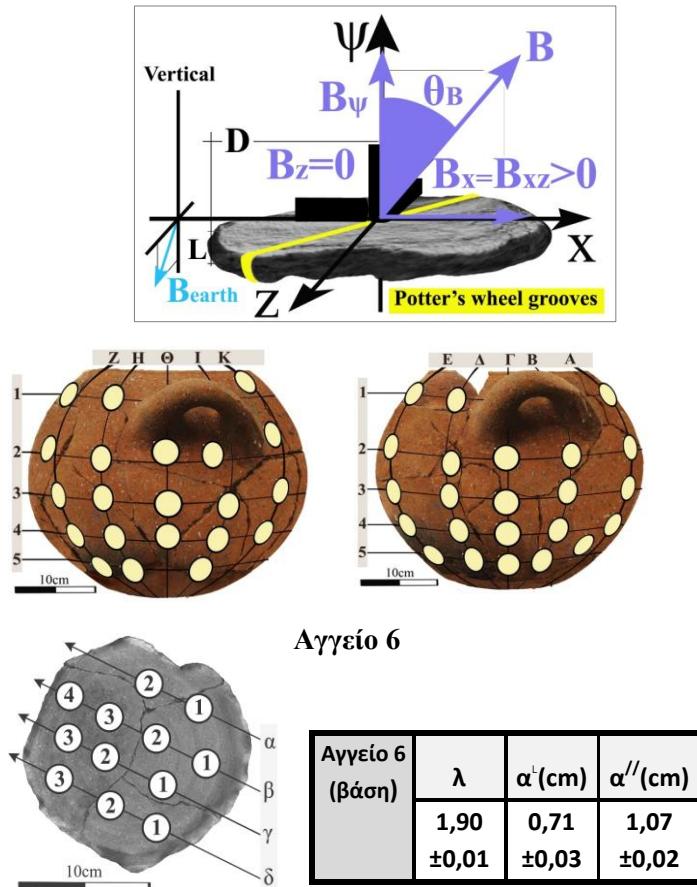
<sup>36</sup> Το σφάλμα  $\delta\varphi$  της γωνίας  $\varphi = \arctan(M_z/M_x)$  υπολογίζεται σύμφωνα με τη θεωρία μετάδοσης σφαλμάτων:

$$\delta\varphi = \sqrt{\left(\frac{\partial\varphi}{\partial M_z}\right)^2 (\delta M_z)^2 + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial M_x}\right)^2 (\delta M_x)^2}, \quad \text{όπου:}$$

$$\frac{\partial\varphi}{\partial M_z} = \left[1 + \left(\frac{M_z}{M_x}\right)^2\right]^{-1} \cdot (M_x)^{-1}, \quad \frac{\partial\varphi}{\partial M_x} = -\left[1 + \left(\frac{M_z}{M_x}\right)^2\right]^{-1} \cdot (M_x)^{-2} \cdot M_z \quad (58)$$

Τα σφάλματα  $\delta M_x$  και  $\delta M_z$  υπολογίζονται από τις σχέσεις (55α,β) στις αντίστοιχες περιπτώσεις επαρκούς ( $\theta = \theta_L$ ) ή ανεπαρκούς ( $\theta = \theta_D$ ) μήκους.

Ενδεικτικές μετρήσεις του πεδίου B με τον x-αισθητήρα στην κοινή κατεύθυνση των B<sub>xz</sub>, M<sub>xz</sub> σε όστρακα του σώματος από το αγγείο 6

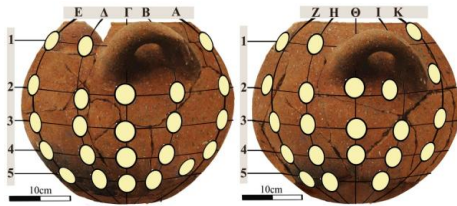
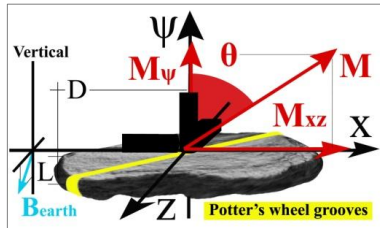


Μετά την κανονικοποίηση των μετρήσεων, το μέτρο B εμφανίζει παραπλήσιες τιμές, ενώ η γωνία  $\theta_B$  μεταβάλλεται κατά συστηματικό τρόπο.

**Πίνακας 13α.** Ενδεικτικές μετρήσεις των συνιστωσών  $B_i$  ( $i=\psi, xz$ ) του πεδίου B με τον x-αισθητήρα στην κοινή κατεύθυνση των B<sub>xz</sub>, M<sub>xz</sub>, μετά την κανονικοποίηση των ενδείξεων του κάθετου y-αισθητήρα σε όστρακα από το σώμα του αγγείου 6.

| Αγγείο 6 |                         | A     | B     | Γ     | Δ     | E     | Z     | H     | Θ     | I     | K     |
|----------|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1        | D (±0,3) cm             | 4,2   |       |       | 3,4   | 6,2   | 2,2   | 6,2   |       |       | 10,6  |
|          | L (±0,1) cm             | 0,9   |       |       | 0,8   | 0,7   | 0,7   | 0,7   |       |       | 0,9   |
|          | B <sub>xz</sub> (±1) nT | 32    |       |       | 6     | 6     | 29    | 38    |       |       | 37    |
|          | λ.B <sub>ψ</sub> (nT)   | 8±2   |       |       | 32±2  | 26±2  | 14±2  | 6±2   |       |       | -6±2  |
|          | B (nT)                  | 33±1  |       |       | 33±2  | 27±2  | 32±1  | 38±1  |       |       | 37±1  |
|          | Θ <sub>B</sub> °        | 76±3  |       |       | 11±2  | 13±2  | 64±3  | 81±3  |       |       | -81±3 |
| 2        | D (±0,3) cm             | 2,4   | 14,8  | 10,7  | 1,2   | 6,3   | 4,8   | 3,2   | 2,1   | 3,4   | 2,5   |
|          | L (±0,1) cm             | 1,6   | 1,6   | 1,7   | 1,9   | 1,5   | 1,6   | 1,8   | 1,8   | 1,9   | 1,9   |
|          | B <sub>xz</sub> (±1) nT | 39    | 35    | 24    | 20    | 17    | 37    | 34    | 35    | 35    | 27    |
|          | λ.B <sub>ψ</sub> (nT)   | 4±2   | 12±2  | 26±2  | 30±2  | 28±2  | 4±2   | -6±2  | -14±2 | -14±2 | -24±2 |
|          | B (nT)                  | 39±1  | 37±1  | 35±2  | 36±2  | 33±2  | 37±1  | 35±1  | 38±1  | 38±1  | 36±1  |
|          | Θ <sub>B</sub> °        | 84±3  | 71±3  | 43±2  | 34±2  | 31±2  | 84±3  | -80±3 | -68±3 | -68±3 | -48±2 |
| 3        | D (±0,3) cm             | 17,2  | 2,0   | 1,6   | 2,9   | 1,9   | 2,6   | 6,2   | 4,9   | 10,0  | 7,5   |
|          | L (±0,1) cm             | 1,5   | 1,7   | 1,7   | 1,5   | 1,4   | 1,5   | 1,7   | 1,9   | 1,8   | 1,8   |
|          | B <sub>xz</sub> (±1) nT | 35    | 37    | 37    | 34    | 31    | 34    | 32    | 25    | 18    | 18    |
|          | λ.B <sub>ψ</sub> (nT)   | -10±2 | 2±2   | 8±2   | 14±2  | 14±2  | -62   | -16±2 | -24±2 | -30±2 | -32±2 |
|          | B (nT)                  | 36±1  | 37±1  | 38±1  | 37±1  | 34±1  | 35±1  | 36±1  | 35±2  | 35±2  | 37±2  |
|          | Θ <sub>B</sub> °        | -74±4 | 87±3  | 78±3  | 68±3  | 66±3  | -80±3 | -63±3 | -46±3 | -31±2 | -29±2 |
| 4        | D (±0,3) cm             | 7,5   | 5,5   | 5,9   | 8,7   | 6,8   | 1,8   | 5,1   | 2,5   | 6,4   | 5,1   |
|          | L (±0,1) cm             | 1,4   | 1,3   | 1,4   | 1,5   | 1,3   | 1,2   | 1,4   | 1,5   | 1,5   | 1,6   |
|          | B <sub>xz</sub> (±1) nT | 31    | 33    | 39    | 37    | 38    | 32    | 26    | 24    | 7     | 5     |
|          | λ.B <sub>ψ</sub> (nT)   | -16±2 | -10±2 | 42    | 6±2   | 4±2   | -14±2 | -22±2 | -28±2 | -36±2 | -34±2 |
|          | B (nT)                  | 35±1  | 34±1  | 39±1  | 37±1  | 38±1  | 35±1  | 34±1  | 37±2  | 37±2  | 34±2  |
|          | Θ <sub>B</sub> °        | -63±3 | -73±3 | 84±3  | 81±3  | 84±3  | -66±3 | -50±3 | -41±2 | -11±2 | -8±2  |
| 5        | D (±0,3) cm             | 1,9   | 2,3   | 9,7   | 4,1   | 3,6   | 2,0   | 4,5   |       | 3,8   |       |
|          | L (±0,1) cm             | 1,0   | 1,2   | 1,1   | 1,2   | 1,2   | 1,1   | 1,0   |       | 1,1   |       |
|          | B <sub>xz</sub> (±1) nT | 25    | 34    | 33    | 34    | 34    | 27    | 23    |       | 4     |       |
|          | λ.B <sub>ψ</sub> (nT)   | -20±2 | -14±2 | -12±2 | -4±2  | -6±2  | -22±2 | -24±2 |       | -32±2 |       |
|          | B (nT)                  | 32±1  | 37±1  | 35±1  | 34±1  | 35±1  | 35±1  | 33±2  |       | 32±2  |       |
|          | Θ <sub>B</sub> °        | -51±3 | -68±3 | -70±3 | -83±3 | -80±3 | -51±3 | -44±3 |       | -7±2  |       |

Υπολογισμός της μαγνήτισης  $M$  από μετρήσεις του πεδίου  $B$ , με τον  $x$ -αισθητήρα στην κοινή κατεύθυνση των  $B_{xz}$ ,  $M_{xz}$  (αγγείο 6)



Αγγείο 6

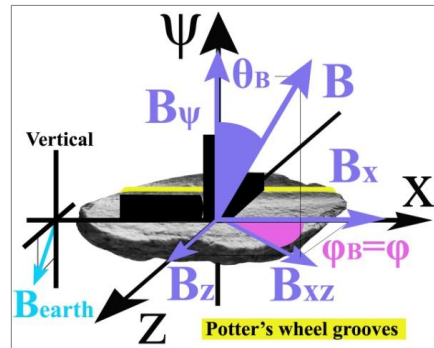
Τα όστρακα του σώματος και της βάσης εμφανίζουν παραπλήσιο μέτρο  $M$ . Η γωνία  $\theta$  μεταβάλλεται κατά συστηματικό τρόπο.

| Αγγείο 6<br>(βάση) | $M^+$             | $M^{//}$          | $M$               | $\gamma^\circ$    |
|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|                    | (mA/m)            |                   |                   |                   |
|                    | 42,5<br>$\pm 0,2$ | 39,8<br>$\pm 0,2$ | 58,3<br>$\pm 0,2$ | 43,3<br>$\pm 0,3$ |

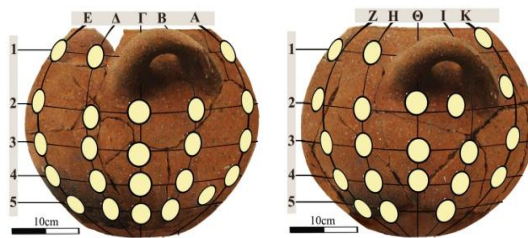
Πίνακας 13β. Υπολογισμός της γωνίας  $\theta$  και συνιστωσών  $M_i$  ( $i=xz, \psi$ ), από μετρήσεις του πεδίου  $B_i$  με τον  $x$ -αισθητήρα στην κοινή κατεύθυνση των  $B_{xz}$ ,  $M_{xz}$  σε όστρακα του σώματος από το αγγείο 6. Στις χρωματισμένες περιοχές χρησιμοποιούνται οι σχέσεις (28β) ανεπαρκούς μήκους ( $D < d = L \cdot \epsilon \phi \theta$ ).

| Αγγείο 6 |                    | A             | B             | Γ              | Δ              | Ε              | Ζ              | Η              | Θ             | Ι             | Κ             |
|----------|--------------------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------|---------------|---------------|
| 1        | D ( $\pm 0,3$ ) cm | 4,2           |               |                | 3,4            | 6,2            | 2,2            | 6,2            |               |               | 10,6          |
|          | d(cm)              | 3,6 $\pm 1$   |               |                | 0,2 $\pm 0,0$  | 0,2 $\pm 0,0$  | 1,5 $\pm 0,2$  | 4,4 $\pm 1,4$  |               |               | 5,6 $\pm 1,8$ |
|          | $\theta^\circ$     | 76 $\pm 3$    |               |                | 14 $\pm 2$     | 17 $\pm 3$     | 65 $\pm 3$     | 81 $\pm 3$     |               |               | -81 $\pm 3$   |
|          | $M_{xz}$ (mA/m)    | 51 $\pm 2$    |               |                | 15 $\pm 3$     | 16 $\pm 3$     | 48 $\pm 2$     | 61 $\pm 2$     |               |               | 59 $\pm 2$    |
|          | $M\psi$ (mA/m)     | 13 $\pm 3$    |               |                | 64 $\pm 4$     | 54 $\pm 4$     | 23 $\pm 3$     | 10 $\pm 3$     |               |               | -10 $\pm 3$   |
|          | $M$ (mA/m)         | 53 $\pm 2$    |               |                | 66 $\pm 4$     | 56 $\pm 4$     | 53 $\pm 2$     | 61 $\pm 2$     |               |               | 60 $\pm 2$    |
| 2        | D ( $\pm 0,3$ ) cm | 2,4           | 14,8          | 10,7           | 1,2            | 6,3            | 4,8            | 3,2            | 2,1           | 3,4           | 2,5           |
|          | d(cm)              | 15,6 $\pm 7$  | 4,7 $\pm 0,8$ | 1,6 $\pm 0,1$  | 1,3 $\pm 0,1$  | 1,0 $\pm 0,1$  | 14,8 $\pm 7,1$ | 10,2 $\pm 3,3$ | 4,5 $\pm 0,6$ | 4,8 $\pm 0,7$ | 2,2 $\pm 0,2$ |
|          | $\theta^\circ$     | 84 $\pm 3$    | 71 $\pm 3$    | 44 $\pm 2$     | 35 $\pm 2$     | 33 $\pm 2$     | 84 $\pm 3$     | -80 $\pm 3$    | -68 $\pm 3$   | -68 $\pm 3$   | -49 $\pm 2$   |
|          | $M_{xz}$ (mA/m)    | 62 $\pm 2$    | 56 $\pm 2$    | 40 $\pm 2$     | 35 $\pm 2$     | 30 $\pm 2$     | 59 $\pm 2$     | 54 $\pm 2$     | 57 $\pm 2$    | 56 $\pm 2$    | 44 $\pm 2$    |
|          | $M\psi$ (mA/m)     | 6 $\pm 3$     | 19 $\pm 3$    | 42 $\pm 3$     | 49 $\pm 3$     | 47 $\pm 3$     | 6 $\pm 3$      | -10 $\pm 3$    | -22 $\pm 3$   | -22 $\pm 3$   | -39 $\pm 3$   |
|          | $M$ (mA/m)         | 62 $\pm 2$    | 59 $\pm 2$    | 58 $\pm 3$     | 60 $\pm 3$     | 56 $\pm 3$     | 59 $\pm 2$     | 55 $\pm 2$     | 61 $\pm 2$    | 60 $\pm 2$    | 59 $\pm 2$    |
| 3        | D ( $\pm 0,3$ ) cm | 17,2          | 2,0           | 1,6            | 2,9            | 1,9            | 2,6            | 6,2            | 4,9           | 10,0          | 7,5           |
|          | d(cm)              | 5,3 $\pm 1$   | 32 $\pm 30$   | 7,9 $\pm 1,9$  | 3,7 $\pm 0,5$  | 3,1 $\pm 0,5$  | 8,5 $\pm 2,7$  | 3,4 $\pm 0,4$  | 2,0 $\pm 0,2$ | 1,1 $\pm 0,1$ | 1,1 $\pm 0,1$ |
|          | $\theta^\circ$     | -74 $\pm 3$   | 87 $\pm 3$    | 78 $\pm 3$     | 68 $\pm 3$     | 66 $\pm 3$     | -80 $\pm 3$    | -64 $\pm 3$    | -47 $\pm 3$   | -32 $\pm 2$   | -31 $\pm 2$   |
|          | $M_{xz}$ (mA/m)    | 56 $\pm 2$    | 59 $\pm 2$    | 59 $\pm 2$     | 55 $\pm 2$     | 50 $\pm 2$     | 54 $\pm 2$     | 51 $\pm 2$     | 41 $\pm 2$    | 31 $\pm 2$    | 31 $\pm 2$    |
|          | $M\psi$ (mA/m)     | -16 $\pm 3$   | 3 $\pm 3$     | 13 $\pm 3$     | 22 $\pm 3$     | 22 $\pm 3$     | -10 $\pm 3$    | -26 $\pm 3$    | -39 $\pm 3$   | -49 $\pm 3$   | -53 $\pm 3$   |
|          | $M$ (mA/m)         | 58 $\pm 2$    | 59 $\pm 2$    | 61 $\pm 2$     | 59 $\pm 2$     | 55 $\pm 2$     | 55 $\pm 2$     | 57 $\pm 2$     | 56 $\pm 2$    | 58 $\pm 3$    | 61 $\pm 3$    |
| 4        | D ( $\pm 0,3$ ) cm | 7,5           | 5,5           | 5,9            | 8,7            | 6,8            | 1,8            | 5,1            | 2,5           | 6,4           | 5,1           |
|          | d(cm)              | 2,7 $\pm 0,4$ | 4,3 $\pm 0,8$ | 13,7 $\pm 6,5$ | 9,3 $\pm 3,0$  | 12,4 $\pm 5,9$ | 2,8 $\pm 0,4$  | 1,7 $\pm 0,2$  | 1,3 $\pm 0,1$ | 0,3 $\pm 0,1$ | 0,3 $\pm 0,1$ |
|          | $\theta^\circ$     | -63 $\pm 3$   | -73 $\pm 3$   | 84 $\pm 3$     | 81 $\pm 3$     | 84 $\pm 3$     | -67 $\pm 3$    | -51 $\pm 3$    | -42 $\pm 2$   | -12 $\pm 2$   | -9 $\pm 2$    |
|          | $M_{xz}$ (mA/m)    | 50 $\pm 2$    | 53 $\pm 2$    | 62 $\pm 2$     | 59 $\pm 2$     | 60 $\pm 2$     | 52 $\pm 2$     | 43 $\pm 2$     | 41 $\pm 2$    | 13 $\pm 2$    | 9 $\pm 2$     |
|          | $M\psi$ (mA/m)     | -26 $\pm 3$   | -16 $\pm 3$   | 6 $\pm 3$      | 10 $\pm 3$     | 6 $\pm 3$      | -22 $\pm 3$    | -36 $\pm 3$    | -46 $\pm 3$   | -62 $\pm 3$   | -58 $\pm 3$   |
|          | $M$ (mA/m)         | 56 $\pm 2$    | 55 $\pm 2$    | 62 $\pm 2$     | 60 $\pm 2$     | 61 $\pm 2$     | 57 $\pm 2$     | 56 $\pm 2$     | 62 $\pm 3$    | 63 $\pm 3$    | 59 $\pm 3$    |
| 5        | D ( $\pm 0,3$ ) cm | 1,9           | 2,3           | 9,7            | 4,1            | 3,6            | 2,0            | 4,5            |               | 3,8           |               |
|          | d(cm)              | 1,3 $\pm 0,2$ | 2,9 $\pm 0,4$ | 3,0 $\pm 0,5$  | 10,2 $\pm 4,9$ | 6,8 $\pm 2,2$  | 1,4 $\pm 0,1$  | 1,0 $\pm 0,5$  |               | 0,2 $\pm 0,0$ |               |
|          | $\theta^\circ$     | -53 $\pm 3$   | -68 $\pm 3$   | -70 $\pm 3$    | -83 $\pm 3$    | -80 $\pm 3$    | -52 $\pm 3$    | -46 $\pm 3$    |               | -9 $\pm 2$    |               |
|          | $M_{xz}$ (mA/m)    | 43 $\pm 2$    | 55 $\pm 2$    | 53 $\pm 2$     | 54 $\pm 2$     | 54 $\pm 2$     | 46 $\pm 2$     | 41 $\pm 2$     |               | 9 $\pm 2$     |               |
|          | $M\psi$ (mA/m)     | -33 $\pm 3$   | -22 $\pm 3$   | -19 $\pm 3$    | -6 $\pm 3$     | -10 $\pm 3$    | -36 $\pm 3$    | -40 $\pm 3$    |               | -59 $\pm 4$   |               |
|          | $M$ (mA/m)         | 54 $\pm 2$    | 59 $\pm 2$    | 56 $\pm 2$     | 55 $\pm 2$     | 55 $\pm 2$     | 58 $\pm 2$     | 57 $\pm 3$     |               | 59 $\pm 4$    |               |

Ενδείξεις των αισθητήρων με τον x-αισθητήρα στην διεύθυνση των αυλακώσεων (αγγείο 6)



Αγγείο 6



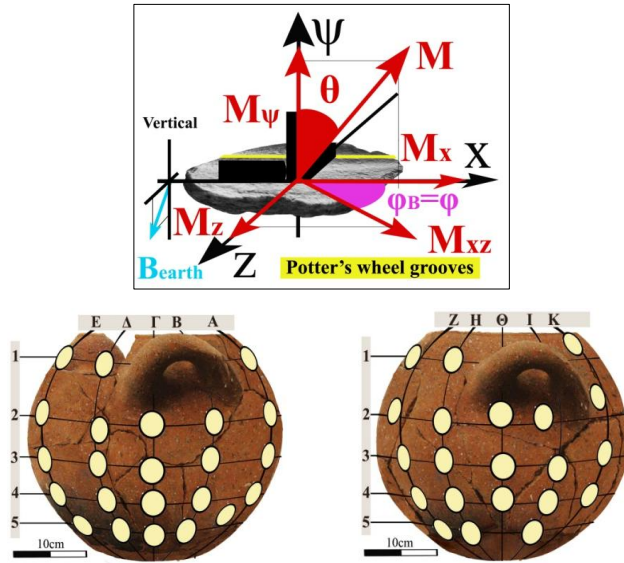
Το μέτρο του πεδίου B δεν διατηρεί σταθερή τιμή, ενώ οι γωνίες  $\theta_B$ ,  $\phi_B$  μεταβάλλονται κατά συστηματικό τρόπο.

**Πίνακας 13γ.** Ενδεικτικές μετρήσεις των 3 αισθητήρων  $B_i$  ( $i=x, y, z$ ) με τον x-άξονα στη διεύθυνση των αυλακώσεων, σε όστρακα του σώματος από το αγγείο 6.

| Αγγείο 6 |                    | A     | B     | Γ     | Δ     | E     | Z     | H     | Θ     | I      | K      |
|----------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| 1        | $B_\psi (\pm 1nT)$ | 5     |       |       | 17    | 13    | 8     | 3     |       |        | -4     |
|          | $B_x (\pm 1nT)$    | -21   |       |       | -3    | 3     | 23    | 23    |       |        | 1      |
|          | $B_z (\pm 1nT)$    | 22    |       |       | 7     | 6     | 21    | 28    |       |        | 34     |
|          | $B (\pm 1nT)$      | 31    |       |       | 18    | 14    | 32    | 36    |       |        | 34     |
|          | $\theta_B^\circ$   | 80±2  |       |       | 24±10 | 28±11 | 75±2  | 85±2  |       |        | -83±2  |
|          | $\phi_B^\circ$     | 134±2 |       |       | 113±8 | 63±9  | 42±2  | 51±2  |       |        | 88±2   |
| 2        | $B_\psi (\pm 1nT)$ | 1     | 7     | 14    | 17    | 15    | 2     | -2    | -7    | -7     | -13    |
|          | $B_x (\pm 1nT)$    | -26   | -22   | -17   | -5    | 5     | 25    | 24    | 15    | 6      | -1     |
|          | $B_z (\pm 1nT)$    | 29    | 21    | 23    | 20    | 23    | 27    | 32    | 29    | 28     | 31     |
|          | $B (\pm 1nT)$      | 39    | 31    | 32    | 27    | 28    | 37    | 40    | 33    | 30     | 33     |
|          | $\theta_B^\circ$   | 88±1  | 76±2  | 64±2  | 51±3  | 58±3  | 87±2  | -87±1 | -77±2 | -76±2  | -68±2  |
|          | $\phi_B^\circ$     | 132±1 | 136±2 | 126±2 | 104±3 | 78±2  | 47±2  | 53±1  | 63±2  | 78±2   | 92±2   |
| 3        | $B_\psi (\pm 1nT)$ | -5    | 2     | 4     | 8     | 7     | -4    | -7    | -12   | -17    | -17    |
|          | $B_x (\pm 1nT)$    | -27   | -20   | -13   | -3    | 2     | 26    | 25    | 15    | 5      | -5     |
|          | $B_z (\pm 1nT)$    | 27    | 25    | 26    | 33    | 34    | 27    | 25    | 18    | 20     | 17     |
|          | $B (\pm 1nT)$      | 39    | 32    | 29    | 34    | 35    | 38    | 36    | 26    | 27     | 24     |
|          | $\theta_B^\circ$   | -82±2 | 86±2  | 82±2  | 76±2  | 78±2  | -84±2 | -78±2 | -64±3 | -51±3  | -46±4  |
|          | $\phi_B^\circ$     | 135±2 | 129±2 | 117±2 | 95±2  | 87±2  | 46±2  | 45±2  | 50±2  | 76±3   | 106±3  |
| 4        | $B_\psi (\pm 1nT)$ | -7    | -5    | 2     | 4     | 1     | -7    | -12   | -14   | -19    | -18    |
|          | $B_x (\pm 1nT)$    | -25   | -26   | -11   | -1    | 5     | 23    | 21    | 19    | 1      | -2     |
|          | $B_z (\pm 1nT)$    | 24    | 28    | 31    | 38    | 38    | 22    | 14    | 14    | 3      | 5      |
|          | $B (\pm 1nT)$      | 35    | 39    | 33    | 38    | 38    | 33    | 28    | 27    | 19     | 19     |
|          | $\theta_B^\circ$   | -78±2 | -82±2 | 86±2  | 84±2  | 88±1  | -77±2 | -65±2 | -60±3 | -9±25  | -17±15 |
|          | $\phi_B^\circ$     | 136±2 | 133±1 | 110±2 | 92±2  | 83±1  | 44±2  | 34±2  | 36±2  | 72±18  | 112±11 |
| 5        | $B_\psi (\pm 1nT)$ | -12   | -7    | -5    | -2    | -3    | -11   | -13   |       | -16    |        |
|          | $B_x (\pm 1nT)$    | -22   | -19   | -11   | -8    | 7     | 23    | 18    |       | 3      |        |
|          | $B_z (\pm 1nT)$    | 14    | 20    | 28    | 39    | 33    | 16    | 10    |       | -1     |        |
|          | $B (\pm 1nT)$      | 29    | 29    | 31    | 40    | 34    | 30    | 24    |       | 16     |        |
|          | $\theta_B^\circ$   | -66±2 | -75±2 | -80±2 | -87±1 | -85±2 | -69±2 | -58±3 |       | -11±25 |        |
|          | $\phi_B^\circ$     | 148±2 | 134±2 | 111±2 | 102±1 | 78±2  | 35±2  | 29±3  |       | 342±18 |        |



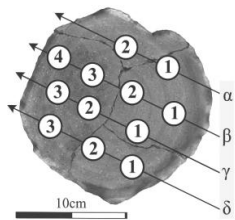
### Υπολογισμός της μαγνήτισης $M$ με τον x-αισθητήρα στην διεύθυνση των αυλακώσεων (αγγείο 6)



Αγγείο 6

Τα όστρακα του σώματος και της βάσης εμφανίζουν παραπλήσιο μέτρο  $M$ . Η διαλογή των συνανηγόντων ανασκαφικών οστράκων μπορεί να γίνει με κριτήριο την παραπλήσια τιμή του μέτρου της μαγνήτισής τους.

Οι γωνίες  $\phi$ ,  $\theta$  μεταβάλλονται κατά συστηματικό τρόπο.



| Αγγείο 6 | $M^I$     | $M^{II}$  | $M$       | $\gamma^\circ$ |
|----------|-----------|-----------|-----------|----------------|
| (βάση)   | 42,5      | 39,8      | 58,3      | 43,3           |
| (mA/m)   | $\pm 0,2$ | $\pm 0,2$ | $\pm 0,2$ | $\pm 0,3$      |

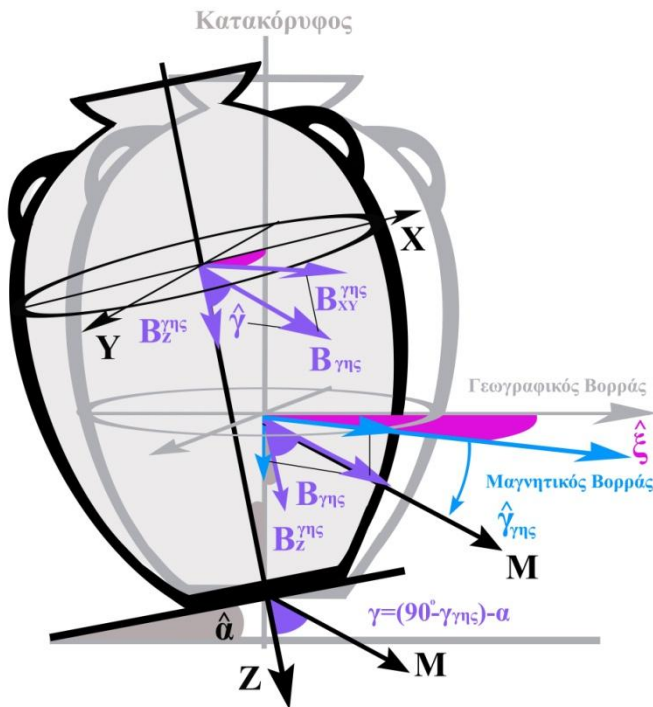
**Πίνακας 13δ.** Υπολογισμός της μαγνήτισης από μετρήσεις των συνιστωσών του πεδίου, με τον x-αισθητήρα στη διεύθυνση των αυλακώσεων, σε όστρακα του σώματος από το αγγείο 6.

| Αγγείο 6 | A               | B           | Γ           | Δ           | E           | Z           | H           | Θ           | I           | K            |
|----------|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| 1        | $M_\psi$ (mA/m) | 16 $\pm$ 3  |             |             | 64 $\pm$ 4  | 50 $\pm$ 4  | 26 $\pm$ 3  | 10 $\pm$ 3  |             | -13 $\pm$ 3  |
|          | $M_x$ (mA/m)    | -34 $\pm$ 2 |             |             | -8 $\pm$ 3  | 8 $\pm$ 3   | 38 $\pm$ 2  | 37 $\pm$ 2  |             | 2 $\pm$ 2    |
|          | $M_z$ (mA/m)    | 35 $\pm$ 2  |             |             | 18 $\pm$ 3  | 16 $\pm$ 3  | 35 $\pm$ 2  | 45 $\pm$ 2  |             | 54 $\pm$ 2   |
|          | $M$ (mA/m)      | 51 $\pm$ 2  |             |             | 67 $\pm$ 4  | 53 $\pm$ 4  | 58 $\pm$ 2  | 58 $\pm$ 2  |             | 56 $\pm$ 2   |
|          | $\theta^\circ$  | 72 $\pm$ 4  |             |             | 17 $\pm$ 17 | 20 $\pm$ 18 | 63 $\pm$ 4  | 81 $\pm$ 3  |             | -77 $\pm$ 3  |
|          | $\phi^\circ$    | 134 $\pm$ 2 |             |             | 113 $\pm$ 8 | 63 $\pm$ 9  | 42 $\pm$ 2  | 51 $\pm$ 2  |             | 88 $\pm$ 2   |
| 2        | $M_\psi$ (mA/m) | 3 $\pm$ 4   | 22 $\pm$ 3  | 42 $\pm$ 3  | 53 $\pm$ 4  | 47 $\pm$ 3  | 6 $\pm$ 4   | -6 $\pm$ 4  | -22 $\pm$ 4 | -39 $\pm$ 3  |
|          | $M_x$ (mA/m)    | -41 $\pm$ 2 | -35 $\pm$ 2 | -28 $\pm$ 2 | -9 $\pm$ 2  | 9 $\pm$ 2   | 40 $\pm$ 2  | 38 $\pm$ 2  | 24 $\pm$ 2  | 10 $\pm$ 2   |
|          | $M_z$ (mA/m)    | 46 $\pm$ 2  | 34 $\pm$ 2  | 39 $\pm$ 2  | 35 $\pm$ 2  | 41 $\pm$ 2  | 43 $\pm$ 2  | 51 $\pm$ 2  | 47 $\pm$ 2  | 45 $\pm$ 2   |
|          | $M$ (mA/m)      | 62          | 53 $\pm$ 2  | 64 $\pm$ 2  | 63 $\pm$ 4  | 63 $\pm$ 3  | 59 $\pm$ 2  | 64 $\pm$ 2  | 57 $\pm$ 2  | 51 $\pm$ 2   |
|          | $\theta^\circ$  | 87 $\pm$ 4  | 65 $\pm$ 4  | 49 $\pm$ 4  | 34 $\pm$ 8  | 42 $\pm$ 5  | 84 $\pm$ 4  | -84 $\pm$ 4 | -67 $\pm$ 5 | -64 $\pm$ 6  |
|          | $\phi^\circ$    | 132 $\pm$ 1 | 136 $\pm$ 2 | 126 $\pm$ 2 | 104 $\pm$ 3 | 78 $\pm$ 2  | 47 $\pm$ 2  | 53 $\pm$ 1  | 63 $\pm$ 2  | 78 $\pm$ 2   |
| 3        | $M_\psi$ (mA/m) | -16 $\pm$ 3 | 6 $\pm$ 4   | 13 $\pm$ 4  | 26 $\pm$ 4  | 22 $\pm$ 4  | -13 $\pm$ 4 | -22 $\pm$ 3 | -35 $\pm$ 3 | -53 $\pm$ 3  |
|          | $M_x$ (mA/m)    | -43 $\pm$ 2 | -32 $\pm$ 2 | -21 $\pm$ 2 | -5 $\pm$ 2  | 3 $\pm$ 2   | 41 $\pm$ 2  | 40 $\pm$ 2  | 25 $\pm$ 2  | 9 $\pm$ 2    |
|          | $M_z$ (mA/m)    | 43 $\pm$ 2  | 40 $\pm$ 2  | 42 $\pm$ 2  | 53 $\pm$ 2  | 55 $\pm$ 2  | 43 $\pm$ 2  | 40 $\pm$ 2  | 30 $\pm$ 2  | 35 $\pm$ 2   |
|          | $M$ (mA/m)      | 63 $\pm$ 2  | 51 $\pm$ 2  | 48 $\pm$ 2  | 59 $\pm$ 2  | 60 $\pm$ 2  | 61 $\pm$ 2  | 61 $\pm$ 2  | 52 $\pm$ 2  | 63 $\pm$ 3   |
|          | $\theta^\circ$  | -75 $\pm$ 3 | 83 $\pm$ 5  | 75 $\pm$ 5  | 64 $\pm$ 5  | 68 $\pm$ 4  | -78 $\pm$ 4 | -68 $\pm$ 3 | -47 $\pm$ 5 | -34 $\pm$ 6  |
|          | $\phi^\circ$    | 135 $\pm$ 2 | 129 $\pm$ 2 | 117 $\pm$ 2 | 95 $\pm$ 2  | 87 $\pm$ 2  | 46 $\pm$ 2  | 45 $\pm$ 2  | 50 $\pm$ 2  | 76 $\pm$ 3   |
| 4        | $M_\psi$ (mA/m) | -22 $\pm$ 3 | -16 $\pm$ 3 | 6 $\pm$ 4   | 13 $\pm$ 4  | 3 $\pm$ 4   | -22 $\pm$ 4 | -36 $\pm$ 3 | -43 $\pm$ 3 | -62 $\pm$ 3  |
|          | $M_x$ (mA/m)    | -40 $\pm$ 2 | -41 $\pm$ 2 | -18 $\pm$ 2 | -2 $\pm$ 2  | 8 $\pm$ 2   | 37 $\pm$ 2  | 35 $\pm$ 2  | 33 $\pm$ 3  | 2 $\pm$ 2    |
|          | $M_z$ (mA/m)    | 39 $\pm$ 2  | 45 $\pm$ 2  | 49 $\pm$ 2  | 60 $\pm$ 2  | 60 $\pm$ 2  | 36 $\pm$ 2  | 23 $\pm$ 2  | 24 $\pm$ 2  | 6 $\pm$ 2    |
|          | $M$ (mA/m)      | 60 $\pm$ 2  | 63 $\pm$ 2  | 53 $\pm$ 2  | 62 $\pm$ 2  | 61 $\pm$ 2  | 56 $\pm$ 2  | 55 $\pm$ 2  | 59 $\pm$ 3  | 62 $\pm$ 3   |
|          | $\theta^\circ$  | -68 $\pm$ 3 | -75 $\pm$ 3 | 83 $\pm$ 5  | 78 $\pm$ 4  | 87 $\pm$ 4  | -67 $\pm$ 5 | -50 $\pm$ 5 | -44 $\pm$ 5 | -6 $\pm$ 44  |
|          | $\phi^\circ$    | 136 $\pm$ 2 | 133 $\pm$ 2 | 110 $\pm$ 2 | 92 $\pm$ 2  | 83 $\pm$ 1  | 44 $\pm$ 2  | 34 $\pm$ 2  | 36 $\pm$ 2  | 72 $\pm$ 18  |
| 5        | $M_\psi$ (mA/m) | -36 $\pm$ 3 | -22 $\pm$ 4 | -16 $\pm$ 3 | -6 $\pm$ 4  | -10 $\pm$ 4 | -33 $\pm$ 3 | -40 $\pm$ 3 |             | -55 $\pm$ 4  |
|          | $M_x$ (mA/m)    | -38 $\pm$ 2 | -31 $\pm$ 2 | -18 $\pm$ 2 | -13 $\pm$ 2 | 11 $\pm$ 2  | 39 $\pm$ 2  | 32 $\pm$ 2  |             | 7 $\pm$ 2    |
|          | $M_z$ (mA/m)    | 24 $\pm$ 2  | 32 $\pm$ 2  | 45 $\pm$ 2  | 62 $\pm$ 2  | 53 $\pm$ 2  | 27 $\pm$ 2  | 18 $\pm$ 2  |             | -2 $\pm$ 2   |
|          | $M$ (mA/m)      | 57 $\pm$ 2  | 50 $\pm$ 2  | 51 $\pm$ 2  | 64 $\pm$ 2  | 55 $\pm$ 2  | 58 $\pm$ 2  | 54 $\pm$ 3  |             | 55 $\pm$ 4   |
|          | $\theta^\circ$  | -51 $\pm$ 4 | 27 $\pm$ 6  | -72 $\pm$ 4 | -84 $\pm$ 4 | -80 $\pm$ 5 | -56 $\pm$ 4 | -43 $\pm$ 6 |             | -7 $\pm$ 42  |
|          | $\phi^\circ$    | 148 $\pm$ 2 | 134 $\pm$ 2 | 111 $\pm$ 2 | 102 $\pm$ 1 | 78 $\pm$ 2  | 35 $\pm$ 2  | 29 $\pm$ 3  |             | 342 $\pm$ 18 |

### 3. Εντοπισμός της θέσης των οστράκων στο σώμα του αγγείου από την κατευθυντικότητα της παραμένουσα μαγνήτισης

Αν  $\gamma_{\eta\varsigma}$  η έγκλιση και  $\xi$  η απόκλιση του τοπικού μαγνητικού πεδίου της γης ( $B_{\eta\varsigma}$ ) κατά τη διάρκεια της όπτησης (σχήμα 40), τότε οι συνιστώσες του ως προς το δεξιόστροφο αξονικό σύστημα αναφοράς  $X\Psi Z$  του αγγείου, όπου ο  $Z$ -άξονας συμμετρίας εκ περιστροφής του αγγείου αποκλίνει από την κατακόρυφο κατά τη γωνία  $\alpha$  απόκλισης του δαπέδου τοποθέτησης του αγγείου στον κλίβανο και κατευθύνεται προς τη βάση του, υπολογίζεται από τις σχέσεις:

$$B_X^{\gamma\eta\varsigma} = B^{\gamma\eta\varsigma} \cdot \eta\mu\gamma \cdot \sigma\upsilon\nu\xi, \quad B_\Psi^{\gamma\eta\varsigma} = B^{\gamma\eta\varsigma} \cdot \eta\mu\gamma \cdot \eta\mu\xi, \quad B_Z^{\gamma\eta\varsigma} = B^{\gamma\eta\varsigma} \cdot \sigma\upsilon\nu\gamma, \quad \gamma = (90^\circ - \gamma^{\eta\varsigma}) \pm \alpha \quad (59)$$



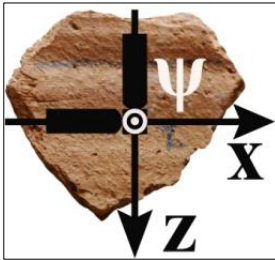
Η απόκλιση  $\xi$  του γεωμαγνητικού πεδίου δεν μπορεί να υπολογιστεί χωρίς τη γνώση του προσανατολισμού του αγγείου στον κλίβανο.

Η έγκλιση  $\gamma_{\eta\varsigma}$  του γεωμαγνητικού πεδίου δε μπορεί να υπολογιστεί χωρίς τη γνώση της απόκλισης  $\alpha$  του κλιβάνου από το οριζόντιο επίπεδο. Κατά την ίδια γωνία  $\alpha$  αποκλίνουν από το οριζόντιο επίπεδο, οι κυκλικές αυλακώσεις στο σώμα που είναι παράλληλες στη βάση, λόγω της περιστροφικής συμμετρίας του αγγείου. Σε οποιοδήποτε αγγείο με περιστροφική συμμετρία, για κάθε θεωρούμενο αξονικό σύστημα αναφοράς όπου ο  $Z$ -άξονας συμπίπτει με τον άξονα συμμετρίας εκ περιστροφής, οι  $X, \Psi$  άξονες ορίζονται επί του επιπέδου της ίδιας εγκάρσιας αυλάκωσης στο σώμα του αγγείου.

**Σχήμα 40.** Απεικόνιση του γεωμαγνητικού πεδίου  $B_{\eta\varsigma}$  κατά τη διάρκεια της όπτησης αγγείου με περιστροφική συμμετρία, ως προς το δεξιόστροφο αξονικό σύστημα αναφοράς  $X\Psi Z$ , όπου ο  $Z$ -άξονας συμπίπτει με τον άξονα συμμετρίας εκ περιστροφής και κατευθύνεται προς τη βάση του αγγείου.

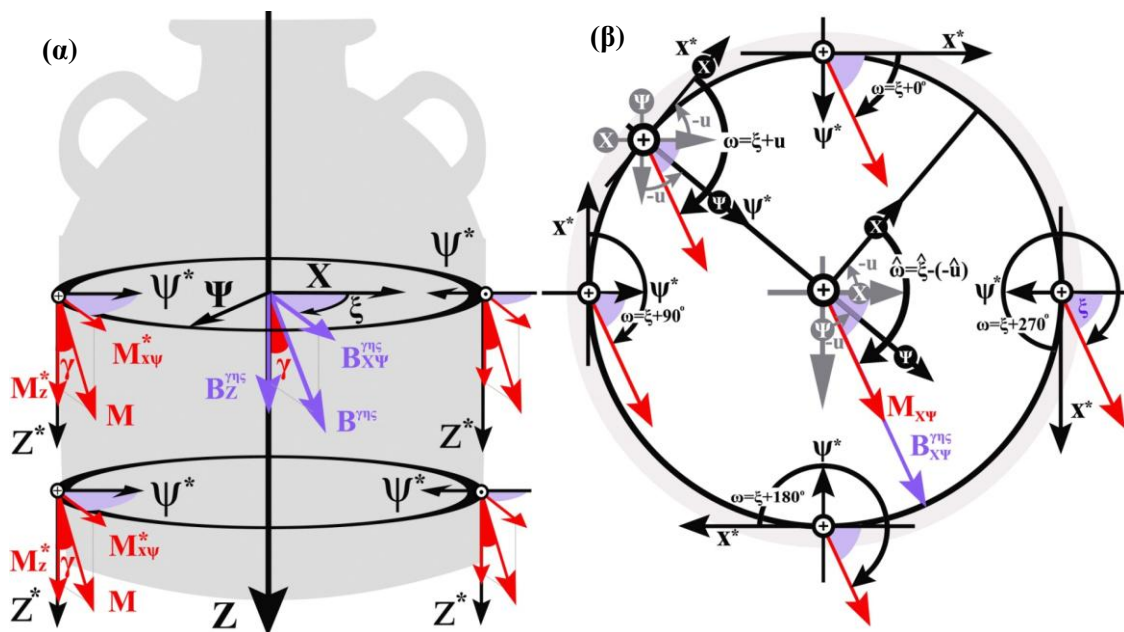
Η γωνία  $\gamma$  απόκλισης του γεωμαγνητικού πεδίου από τον άξονα συμμετρίας του αγγείου είναι ίση με τη γωνία απόκλισης της μαγνήτισης  $M$  που υπολογίζεται από τις μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου των οστράκων της βάσης (πίνακας 12), εφόσον η μαγνήτιση του κεραμικού υλικού αποκτά την κατευθυντικότητα του γεωμαγνητικού πεδίου κατά τη διάρκεια της όπτησης.

### 3.1 Διαμόρφωση της παραμένουσας μαγνήτισης σε αγγεία με κυλινδρική συμμετρία



Οι μετρήσεις του πεδίου  $B$ , λαμβάνονται σε δεξιόστροφα συστήματα αναφοράς  $(x\psi z)^*$ , όπου ο  $x^*$ -άξονας έχει τη διεύθυνση των εγκάρσιων αυλακώσεων, ο  $\psi^*$ -άξονας διέρχεται από τον άξονα συμμετρίας εκ περιστροφής και ο  $z^*$ -άξονας είναι εφαπτόμενος στα πλευρικά τοιχώματα, κατευθυνόμενος προς τη βάση του αγγείου.

Στην ειδική περίπτωση των αγγείων με κυλινδρική συμμετρία, επειδή ο  $z^*$ -άξονας στο σύστημα λήψης των μετρήσεων του πεδίου  $B$  είναι παράλληλος στον άξονα συμμετρίας  $Z$ , (σχήμα 41α) η θέση της κάθε διαμήκουσ αξονικής τομής ορίζεται από τη γωνία στροφής  $u$  του δεξιόστροφου αξονικού συστήματος αναφοράς  $X\psi Z$  του κυλινδρικού αγγείου (σχήμα 41β), περί του  $Z$ -άξονα συμμετρίας εκ περιστροφής.



**Σχήμα 41.** Απεικόνιση της μαγνήτισης  $M$  του κεραμικού υλικού στην κατεύθυνση του γεωμαγνητικού πεδίου  $B_{\gamma\eta\varsigma}$  κατά την διάρκεια της όπτησης αγγείου με κυλινδρική συμμετρία, σε δεξιόστροφα συστήματα αναφοράς  $(x\psi z)^*$  (α) κατά μήκος διαμήκων και (β) εγκάρσιων τομών του σώματος του αγγείου.

Εφόσον η μαγνήτιση  $M$  αποκτά την κατευθυντικότητα του  $B_{\gamma\eta\varsigma}$  στον κλίβανο όπτησης, για κάθε γωνία περιστροφής  $u$  του αξονικού συστήματος αναφοράς  $X\psi Z$ , οι συνιστώσες της μαγνήτισης  $M$  στην περιφέρεια κάθε εγκάρσιας αυλάκωσης προσδιορίζονται από τον μετασχηματισμό στροφής των περιφερειακών συστημάτων αναφοράς  $(x\psi z)^*$  κατά τη γωνία  $\omega = \xi - u$  περί των  $z^*$ -αξόνων:

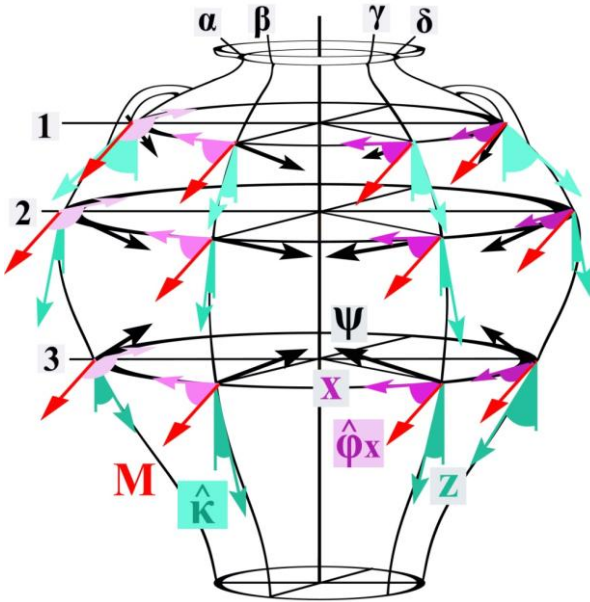
$$M_x^* = M \cdot \eta\mu\gamma \cdot \sigma\upsilon\nu\omega = M_{x\psi}^* \cdot \sigma\upsilon\nu\omega, \quad M_y^* = M \cdot \eta\mu\gamma \cdot \eta\mu\omega = M_{x\psi}^* \cdot \eta\mu\omega, \quad M_z^* = M \cdot \sigma\upsilon\nu\gamma \quad (60)$$

όπου:  $\omega = \xi - u$ ,  $\gamma = (90^\circ - \gamma^{\eta\eta\varsigma}) \pm \alpha$

Παρότι οι γωνίες  $u$ ,  $\xi$  δεν προσδιορίζονται χωρίς τη γνώση του προσανατολισμού του αγγείου στον κλίβανο όπτησης, η γωνία  $\omega = \xi - u$  υπολογίζεται από τον υπολογισμό της μαγνήτισης των οστράκων του σώματος του αγγείου.

### 3.2 Διαμόρφωση της παραμένουσας μαγνήτισης σε αγγεία με τυχούσα περιστροφική συμμετρία

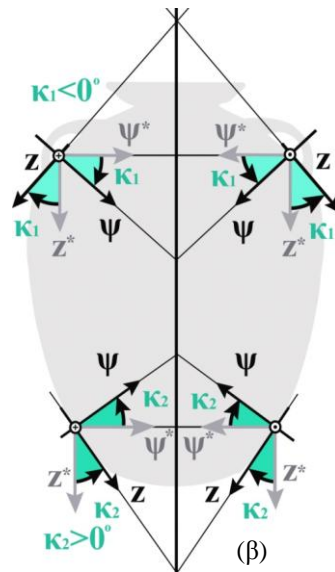
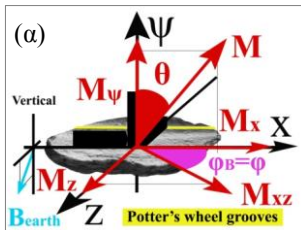
Στη γενικότερη περίπτωση αγγείων με τυχούσα περιστροφική συμμετρία (σχήμα 42), τα πλευρικά τοιχώματα αποκλίνουν κατά διαφορετικές γωνίες  $\kappa$  από τη διεύθυνση του άξονα συμμετρίας σε κάθε διαμήκη τομή ( $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ ) του αγγείου και κατά την ίδια γωνία  $\kappa$  σε κάθε εγκάρσια (1,2,3) αυλάκωση.



**Σχήμα 42.** Απεικόνιση των συστημάτων αναφοράς ( $x\psi z$ ) όπου λαμβάνονται οι μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου, σε εγκάρσιες και διαμήκεις τομές του σώματος αγγείου με τυχούσα περιστροφική συμμετρία.

Οι γωνίες  $\varphi_x$  της μαγνήτισης  $M$  με τους προσανατολισμένους  $x$ -άξονες στη διεύθυνση των αυλακώσεων διατηρούν σταθερή τιμή σε κάθε διαμήκη τομή (1,2,3) και μεταβάλλονται σε κάθε εγκάρσια τομή ( $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ ) του αγγείου.

Οι γωνίες  $\kappa$  μεταξύ των κάθετων  $z$ -αξόνων στις αυλακώσεις και της διεύθυνσης του άξονα συμμετρίας εκ περιστροφής, διατηρούν σταθερή τιμή σε κάθε εγκάρσια αυλάκωση και μεταβάλλονται σε κάθε διαμήκη τομή του αγγείου. Οι κάθετοι  $\psi$ -άξονες στην επιφάνεια των οστράκων διέρχονται από τον άξονα συμμετρίας εκ περιστροφής του αγγείου.



**Σχήμα 43α.** Απεικόνιση των συνιστωσών της μαγνήτισης στο σύστημα αναφοράς των οστράκων του σώματος του αγγείου όπου λαμβάνονται οι μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου και υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$M_x=M.\eta\mu\theta.\sigma\upsilon\nu\varphi, M_\psi=M.\eta\mu\theta.\eta\mu\varphi, M_z= M.\sigma\upsilon\nu\theta.$$

**Σχήμα 43β.** Οι συνιστώσες της μαγνήτισης στα συστήματα αναφοράς ( $x\psi z$ ) που λαμβάνονται οι μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου σε όστρακα αγγείων με τυχούσα περιστροφική συμμετρία, προέρχονται από μετασχηματισμό στροφής των συστημάτων αναφοράς ( $x\psi z$ )\* του κυλινδρικού αγγείου, κατά την γωνία κλίσης  $\kappa$  περί των  $x^*$ -αξόνων.

Οι συνιστώσες  $M_i$  ( $i=x, \psi, z$ ) στα συστήματα ( $x\psi z$ ) λήψης των μετρήσεων του πεδίου  $B_i$  (σχήμα 43α) προέρχονται από μετασχηματισμό στροφής (σχήμα 43β) των συστημάτων αναφοράς ( $x\psi z$ )\* του κυλινδρικού αγγείου κατά τη γωνία κλίσης  $\kappa$  περί των  $x^*$ -αξόνων:

$$\begin{aligned} M_x &= M_x^* = M. \eta\mu\gamma. \sigma\upsilon\nu\omega = M. \eta\mu\theta. \sigma\upsilon\nu\varphi = M. \sigma\upsilon\nu\varphi_x \\ M_\psi &= M_\psi^* . \sigma\upsilon\nu\kappa - M_z^* . \eta\mu\kappa = M. \eta\mu\gamma. \eta\mu\omega. \sigma\upsilon\nu\kappa - M. \sigma\upsilon\nu\gamma. \eta\mu\kappa = M. \sigma\upsilon\nu\theta \\ M_z &= M_\psi^* . \eta\mu\kappa + M_z^* . \sigma\upsilon\nu\kappa = M. \eta\mu\gamma. \eta\mu\omega. \eta\mu\kappa + M. \sigma\upsilon\nu\gamma. \sigma\upsilon\nu\kappa = M. \eta\mu\theta. \sigma\upsilon\nu\varphi, \end{aligned} \quad (61)$$

όπου  $\omega = \xi - u$  και  $\gamma = (90^\circ - \gamma^{\text{m}}) \pm \alpha$

### 3.3 Εύρεση των συνανηκόντων οστράκων και της θέσης τους στα σώματα των αγγείων από τη θερμοπαραμένονσα μαγνήτισή τους

Σύμφωνα με την πρώτη από τις προηγούμενες σχέσεις, στις θέσεις μέτρησης κάθε διαμήκους τομής του σώματος (σχήμα 41β) που ορίζεται από τη γωνία στροφής  $\omega = \xi - u$  στο αξονικό σύστημα αναφοράς  $X\psi Z$  του αγγείου, τα συνημίτονα κατεύθυνσης  $\sin\varphi_x = \eta\mu\theta$ ,  $\sin\varphi$  της μαγνήτισης  $\vec{M}$  με τους παράλληλους x-άξονες των συστημάτων αναφοράς  $x\psi z$  εμφανίζουν την ίδια τιμή (σχήμα 42), ανεξαρτήτως των διαφορετικών κλίσεων  $\hat{k}$  των τοιχωμάτων με τη διεύθυνση του άξονα συμμετρίας εκ περιστροφής του αγγείου. Η τιμή της  $M_x$  συνιστώσας, μεταβάλλεται μόνο σε θέσεις μέτρησης κατά μήκος κάθε εγκάρσιας αυλάκωσης, λόγω της στροφής του x-άξονα κατά τη γωνία  $\omega$  που προσδιορίζει τις θέσεις των οστράκων στην περιφέρεια του σώματος γύρω από τον άξονα συμμετρίας εκ περιστροφής του αγγείου.

Η κλίση  $\hat{k}$  έχει σταθερή τιμή στις θέσεις μέτρησης σε κάθε εγκάρσια αυλάκωση λόγω της περιστροφικής συμμετρίας του αγγείου και μεταβάλλεται στις θέσεις μέτρησης κάθε διαμήκους τομής του σώματος, προσδιορίζοντας την κατ' ύψος θέση των οστράκων στο σώμα του αγγείου.

Εφόσον η γωνία  $\gamma = (90^\circ - \gamma^{m5}) \pm \alpha$  (60) είναι γνωστή από τις μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου των θραυσμάτων της βάσης των αγγείων (πίνακας 12), όπως και οι γωνίες  $\theta$ ,  $\varphi$  της μαγνήτισης  $\vec{M}$  με τους άξονες των αισθητήρων (πίνακας 13δ) που υπολογίζονται σε κάθε θέση από τις μετρήσεις του πεδίου (πίνακες 13γ, B24β-B28β), η γωνία<sup>37</sup>  $\omega$  που καθορίζει την εγκάρσια θέση κάθε οστράκου στο σώμα του αγγείου, μπορεί να προσδιοριστεί από την επίλυση της πρώτης εξίσωσης του παραπάνω (61) συστήματος:

$$\omega = \sin^{-1} \frac{\eta\mu\theta \cdot \sin\varphi}{\eta\mu\gamma} \quad (62a), \quad \text{όπου} \quad \varphi = \varepsilon\varphi^{-1} \frac{M_z}{M_x} = \varepsilon\varphi^{-1} \frac{B_z}{B_x}$$

Η κλίση<sup>38</sup>  $\hat{k}$  που καθορίζει την κατ' ύψος θέση των οστράκων σε κάθε διαμήκη τομή του αγγείου, υπολογίζεται για κάθε τιμή της γωνίας  $\omega$  από τις εξισώσεις του παραπάνω (61) συστήματος:

$$\kappa = \varepsilon\varphi^{-1} \frac{M_z \cdot \eta\mu\gamma \cdot \eta\mu\omega - M_\psi \cdot \sin\gamma}{M_\psi \cdot \eta\mu\gamma \cdot \eta\mu\omega + M_z \cdot \sin\gamma} \quad (63a)$$

<sup>37</sup> Το σφάλμα  $\delta\omega$  της γωνίας υπολογίζεται σε κάθε θέση μέτρησης σύμφωνα με τη θεωρία μετάδοσης σφαλμάτων:

$$\delta\omega = \sqrt{\left(\frac{\partial\omega}{\partial\theta}\right)^2 \cdot (\delta\theta)^2 + \left(\frac{\partial\omega}{\partial\varphi}\right)^2 \cdot (\delta\varphi)^2 + \left(\frac{\partial\omega}{\partial\gamma}\right)^2 \cdot (\delta\gamma)^2}, \quad \text{όπου:} \quad \frac{\partial\omega}{\partial\theta} = \left[1 - \left(\frac{\eta\mu\theta \cdot \sin\varphi}{\eta\mu\gamma}\right)^2\right]^{-\frac{1}{2}} \cdot \eta\mu^{-1}\gamma \cdot \sin\theta \cdot \sin\varphi$$

$$\frac{\partial\omega}{\partial\varphi} = \left[1 - \left(\frac{\eta\mu\theta \cdot \sin\varphi}{\eta\mu\gamma}\right)^2\right]^{-\frac{1}{2}} \cdot \eta\mu^{-1}\gamma \cdot \eta\mu\theta \cdot \eta\mu\varphi \quad \frac{\partial\omega}{\partial\gamma} = \left[1 - \left(\frac{\eta\mu\theta \cdot \sin\varphi}{\eta\mu\gamma}\right)^2\right]^{-\frac{1}{2}} \cdot \eta\mu^{-2}\gamma \cdot \sin\gamma \cdot \eta\mu\theta \cdot \sin\varphi \quad (62\beta)$$

Η γωνία  $\gamma$  και το σφάλμα  $\delta\gamma$  υπολογίζεται από μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου (πίνακας 12) σε θραύσματα της βάσης των αγγείων. Τα σφάλματα  $\delta\theta$  και  $\delta\varphi$  υπολογίζονται από τις σχέσεις (57) και (58).

<sup>38</sup> Το σφάλμα  $\delta\kappa$  της κλίσης  $\kappa = \varepsilon\varphi^{-1}G$  υπολογίζεται σε κάθε θέση μέτρησης σύμφωνα με τη θεωρία μετάδοσης σφαλμάτων:

$$\delta\kappa = \sqrt{\left(\frac{\partial\kappa}{\partial M_z}\right)^2 \cdot (\delta M_z)^2 + \left(\frac{\partial\kappa}{\partial M_y}\right)^2 \cdot (\delta M_y)^2 + \left(\frac{\partial\kappa}{\partial\gamma}\right)^2 \cdot (\delta\gamma)^2 + \left(\frac{\partial\kappa}{\partial\omega}\right)^2 \cdot (\delta\omega)^2}, \quad \text{όπου:}$$

$$\frac{\partial\kappa}{\partial M_z} = (1+G^2)^{-1} \frac{M_y (\eta\mu^2\gamma \cdot \eta\mu^2\omega + \sin^2\gamma)}{(M_y \eta\mu\gamma \cdot \eta\mu\omega + M_z \sin\gamma)^2}, \quad \frac{\partial\kappa}{\partial M_y} = (1+G^2)^{-1} \frac{M_z (\eta\mu^2\gamma \cdot \eta\mu^2\omega + \sin^2\gamma)}{(M_y \eta\mu\gamma \cdot \eta\mu\omega + M_z \sin\gamma)^2}$$

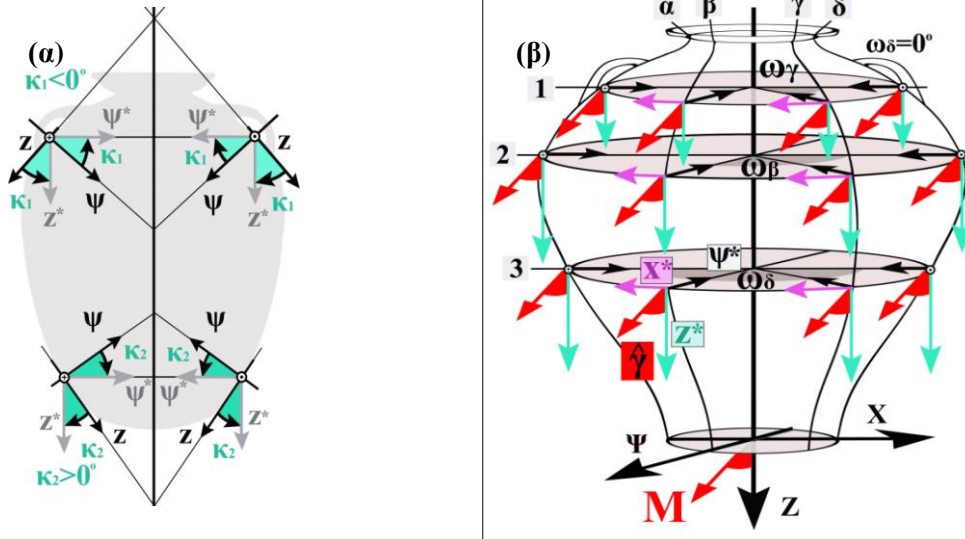
$$\frac{\partial\kappa}{\partial\gamma} = (1+G^2)^{-1} \frac{\eta\mu\omega \cdot (M_z^2 + M_y^2)}{(M_y \eta\mu\gamma \cdot \eta\mu\omega + M_z \sin\gamma)^2}, \quad \frac{\partial\kappa}{\partial\omega} = (1+G^2)^{-1} \frac{\eta\mu\gamma \cdot \sin\gamma \cdot \sin\omega \cdot (M_z^2 + M_y^2)}{(M_y \eta\mu\gamma \cdot \eta\mu\omega + M_z \sin\gamma)^2} \quad (63\beta)$$

Τα σφάλματα  $\delta M_y$  και  $\delta M_z$  υπολογίζονται από τις σχέσεις (55α,β) στις αντίστοιχες περιπτώσεις επαρκούς ( $\theta = \theta_L$ ) ή ανεπαρκούς ( $\theta = \theta_D$ ) μήκους. Η γωνία  $\gamma$  και το σφάλμα  $\delta\gamma$  υπολογίζεται από μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου (πίνακας 12) σε θραύσματα της βάσης των αγγείων. Το σφάλμα  $\delta\omega$  υπολογίζεται από τη σχέση (62β).



Ο έλεγχος της παραπάνω θεώρησης γίνεται με τον αντίστροφο μετασχηματισμό στροφής των υπολογιζόμενων συνιστωσών της μαγνήτισης  $M_i$  ( $i=x,y,z$ ) κατά τη γωνία  $-\kappa$  περί του  $x$ -άξονα (σχήμα 44α), από το σύστημα αναφοράς  $(x\psi z)$  που λαμβάνονται οι μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου, στο σύστημα  $(x\psi z)^*$  αναφοράς (σχήμα 44β) του κυλινδρικού αγγείου:

$$M_x^* = M_x = M \cdot \eta\mu\gamma \cdot \sigma\upsilon\nu\omega, \quad M_y^* = M_y \cdot \sigma\upsilon\nu\kappa + M_z \cdot \eta\mu\kappa = M \cdot \eta\mu\gamma \cdot \eta\mu\omega, \quad M_z^* = M_z \cdot \sigma\upsilon\nu\kappa - M_y \cdot \eta\mu\kappa = M \cdot \sigma\upsilon\nu\gamma \quad (64\alpha)$$



**Σχήμα 44.** (α) Απεικόνιση του αντίστροφου μετασχηματισμού κατά τη γωνία  $-\kappa$  περί των  $x$ -αξόνων από τα συστήματα αναφοράς  $(x\psi z)$  που λαμβάνονται οι μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου, στα συστήματα αναφοράς  $(x\psi z)^*$  αναφοράς (σχήμα 41) του κυλινδρικού αγγείου. (β) Απεικόνιση των συστημάτων αναφοράς  $(x\psi z)^*$  του κυλινδρικού αγγείου, σε αγγείο με τυχούσα περιστροφική συμμετρία.

Σύμφωνα με τις προηγούμενες σχέσεις υπολογισμού<sup>39</sup> των  $M_x^*, M_y^*, M_z^*$ , κατά τον αντίστροφο μετασχηματισμό (σχήμα 44β) οι συνιστώσες  $M_x^*, M_y^*$  που εξαρτώνται από τη γωνία  $\omega$  πρέπει να εμφανίζουν παραπλήσια τιμή σε κάθε διαμήκη τομή του σώματος, ενώ η  $M_z^*$  που εξαρτάται μόνο από τη γωνία  $\gamma$ , πρέπει να εμφανίζει παραπλήσια τιμή σε κάθε θέση μέτρησης.

Ενδεικτικά αποτελέσματα του αντίστροφου μετασχηματισμού, παρατίθενται για τα όστρακα του σώματος του αγγείου 6, στον **πίνακα 14**.

Οι υπολογιζόμενες τιμές της κλίσης  $\kappa$  και της γωνίας  $\omega$  απεικονίζονται (σχήματα 45-50) στις θέσεις μέτρησης του σώματος των 6 αγγείων, όπου υπολογίζεται (πίνακες 15-20) το μέτρο της θερμοπαραμένουσας μαγνήτισης  $M$ .

<sup>39</sup> Το σφάλμα  $\delta M_y^*$  υπολογίζεται σε κάθε θέση μέτρησης, σύμφωνα με τη θεωρία μετάδοσης σφαλμάτων:

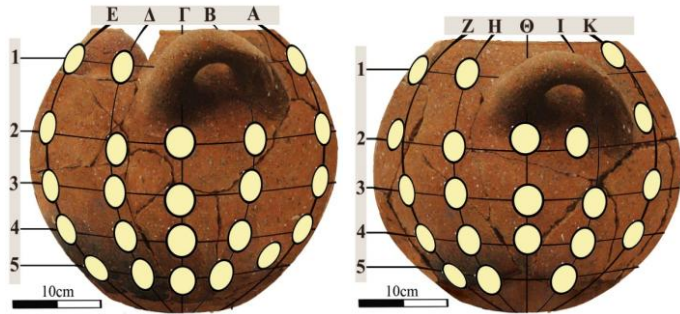
$$\delta M_y^* = \sqrt{\sigma\upsilon\nu^2\kappa \cdot (\delta M_y)^2 + \eta\mu^2\kappa \cdot (\delta M_z)^2 + (M_z \cdot \sigma\upsilon\nu\kappa - M_y \cdot \eta\mu\kappa)^2 \cdot (\delta\kappa)^2} \quad (64\beta)$$

Το σφάλμα  $\delta M_z^*$  υπολογίζεται σε κάθε θέση μέτρησης, σύμφωνα με τη θεωρία μετάδοσης σφαλμάτων:

$$\delta M_z^* = \sqrt{\sigma\upsilon\nu^2\kappa \cdot (\delta M_z)^2 + \eta\mu^2\kappa \cdot (\delta M_y)^2 + (M_z \cdot \eta\mu\kappa + M_y \cdot \sigma\upsilon\nu\kappa)^2 \cdot (\delta\kappa)^2} \quad (64\gamma)$$

Στις παραπάνω σχέσεις, τα σφάλματα  $\delta M_y, \delta M_z$  υπολογίζονται από τις σχέσεις (55α,β) στις αντίστοιχες περιπτώσεις επαρκούς ( $\theta = \theta_L$ ) ή ανεπαρκούς ( $\theta = \theta_D$ ) μήκους. Το σφάλμα  $\delta\kappa$  υπολογίζεται από τη σχέση (63β).

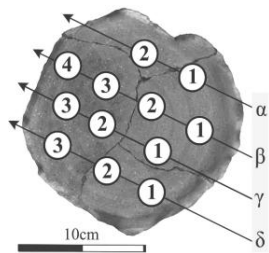




Οι συνιστώσες  $M_x^*$ ,  $M_y^*$  και η γωνία  $\omega$  εμφανίζουν παραπλήσιες τιμές σε κάθε διαμήκη τομή του σώματος.

Η  $M_z^*$  εμφανίζει παραπλήσιες τιμές σε κάθε θέση μέτρησης του σώματος και με αυτήν που υπολογίζεται στα θραύσματα της βάσης του αγγείου.

Η κλίση  $\kappa$  εμφανίζει παραπλήσιες τιμές σε κάθε εγκάρσια αυλάκωση του αγγείου.

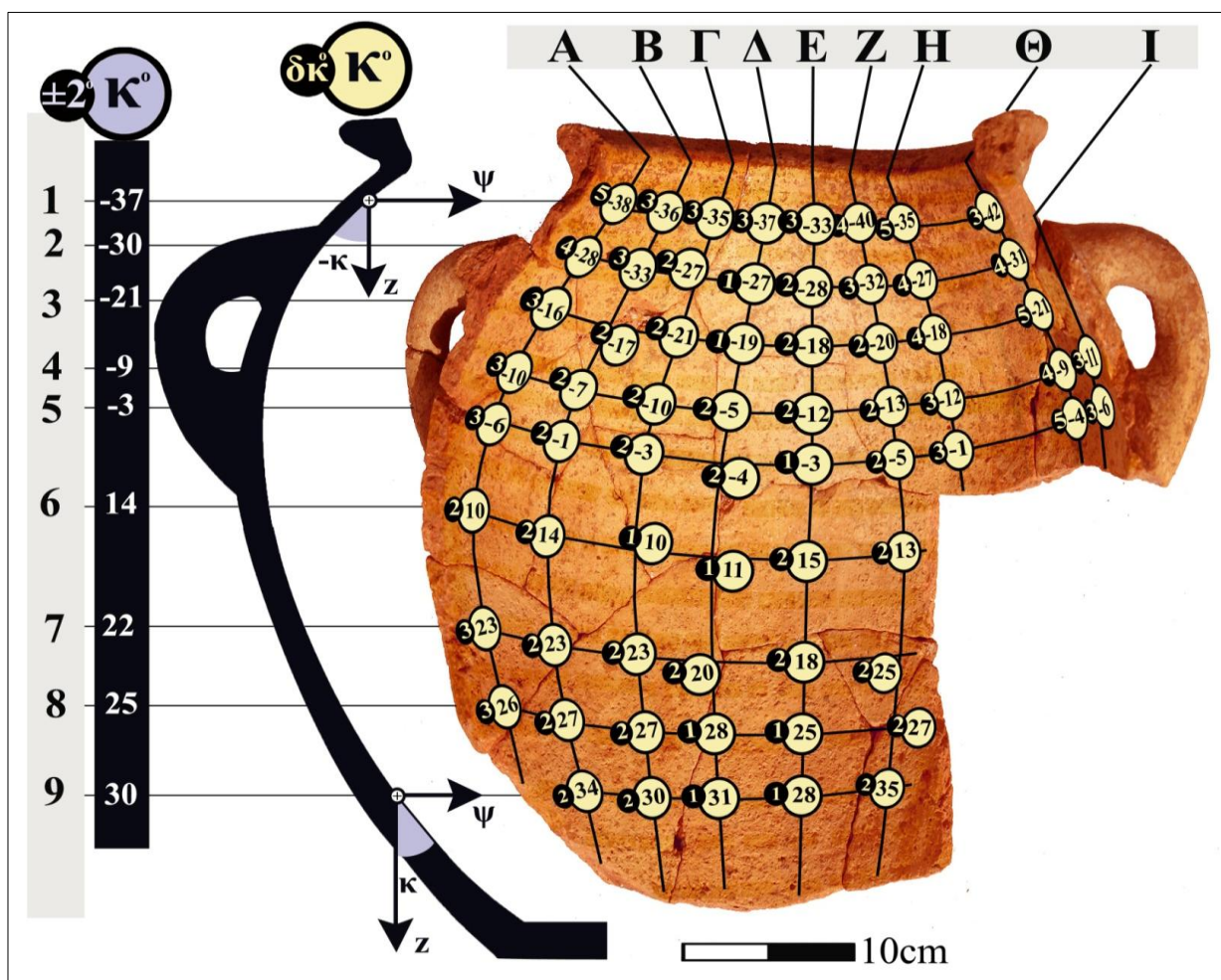


| Αγγείο 6 | $M_z$     | $M_{x\psi}$ | M         | $\gamma^\circ$ |
|----------|-----------|-------------|-----------|----------------|
| (βάση)   | 42,5      | 39,8        | 58,3      | 43,3           |
| (mA/m)   | $\pm 0,2$ | $\pm 0,2$   | $\pm 0,2$ | $\pm 0,3$      |

**Πίνακας 14.** Ενδεικτικές τιμές των μετασχηματισμένων συνιστωσών  $M_i^*$  ( $i=x\psi z$ ) της μαγνήτισης στα συστήματα αναφοράς ( $x\psi z$ ) του κυλινδρικού αγγείου, σε όστρακα του σώματος από το αγγείο 6.

| Αγγείο 6 | A                       | B      | Γ     | Δ      | E     | Z     | H      | Θ      | I     | K      |
|----------|-------------------------|--------|-------|--------|-------|-------|--------|--------|-------|--------|
| 1        | $M_\psi^*(\text{mA/m})$ | -10±6  |       | 45±4   | 35±5  | 11±7  | -16±5  |        |       | -38±3  |
|          | $M_x^*(\text{mA/m})$    | -34±2  |       | -8±3   | 8±3   | 38±2  | 37±2   |        |       | 2±2    |
|          | $M_z^*(\text{mA/m})$    | 37±3   |       | 49±4   | 39±4  | 42±3  | 43±3   |        |       | 40±3   |
|          | $\omega^\circ$          | 197±8  |       | 100±10 | 77±12 | 16±9  | 336±5  |        |       | 272±2  |
|          | $\kappa^\circ$          | -40±8  |       | -31±3  | -29±4 | -22±9 | -33±5  |        |       | -30±3  |
| 2        | $M_\psi^*(\text{mA/m})$ | -10±8  | 10±6  | 33±4   | 43±5  | 42±4  | -7±9   | -22±6  | -31±6 | -34±5  |
|          | $M_x^*(\text{mA/m})$    | -41±2  | -35±2 | -28±2  | -9±2  | 9±2   | 40±2   | 38±2   | 24±2  | 10±2   |
|          | $M_z^*(\text{mA/m})$    | 45±2   | 39±2  | 46±2   | 46±3  | 46±3  | 43±2   | 47±3   | 42±3  | 37±3   |
|          | $\omega^\circ$          | 194±7  | 163±8 | 131±4  | 101±3 | 78±3  | 350±10 | 331±3  | 308±3 | 286±3  |
|          | $\kappa^\circ$          | -16±8  | -19±8 | -12±3  | -14±3 | -6±2  | -18±11 | -18±5  | -11±5 | -16±5  |
| 3        | $M_\psi^*(\text{mA/m})$ | 3±18   | 15±6  | 26±5   | 40±5  | 41±5  | -6±11  | -12±6  | -26±4 | -43±4  |
|          | $M_x^*(\text{mA/m})$    | -43±2  | -32±2 | -21±2  | -5±2  | 3±2   | 41±2   | 40±2   | 25±2  | 9±2    |
|          | $M_z^*(\text{mA/m})$    | 46±2   | 37±3  | 35±3   | 43±3  | 43±3  | 45±2   | 44±2   | 38±2  | 46±2   |
|          | $\omega^\circ$          | 176±2  | 155±5 | 129±3  | 97±2  | 85±2  | 352±12 | 344±7  | 313±5 | 281±3  |
|          | $\kappa^\circ$          | 24±23  | 13±7  | 19±5   | 17±4  | 21±4  | 9±13   | 14±7   | 16±4  | 14±2   |
| 4        | $M_\psi^*(\text{mA/m})$ | 9±7    | 12±6  | 32±5   | 42±5  | 41±5  | -10±9  | -14±7  | -24±5 | -43±3  |
|          | $M_x^*(\text{mA/m})$    | -40±2  | -41±2 | -18±2  | -2±2  | 8±2   | 37±2   | 35±2   | 33±2  | 2±2    |
|          | $M_z^*(\text{mA/m})$    | 44±3   | 46±3  | 38±4   | 45±4  | 44±4  | 41±3   | 40±3   | 43±3  | 45±3   |
|          | $\omega^\circ$          | 168±9  | 164±6 | 119±3  | 92±2  | 79±2  | 345±11 | 338±10 | 324±8 | 273±20 |
|          | $\kappa^\circ$          | 42±9   | 34±6  | 32±5   | 31±4  | 40±4  | 19±11  | 37±9   | 32±5  | 41±2   |
| 5        | $M_\psi^*(\text{mA/m})$ | -11±9  | 15±6  | 30±3   | 42±4  | 36±4  | 6±13   | -19±6  |       | -37±5  |
|          | $M_x^*(\text{mA/m})$    | -38±2  | -31±2 | -18±2  | -13±2 | 11±2  | 39±2   | 32±2   |       | 7±2    |
|          | $M_z^*(\text{mA/m})$    | 42±3   | 36±4  | 37±3   | 46±4  | 40±5  | 42±3   | 40±4   |       | 40±5   |
|          | $\omega^\circ$          | 197±13 | 154±8 | 120±3  | 107±2 | 73±3  | 9±20   | 330±11 |       | 280±58 |
|          | $\kappa^\circ$          | 41±11  | 57±8  | 59±4   | 48±4  | 52±5  | 59±18  | 41±8   |       | 49±6   |

ΑΓΓΕΙΟ 1

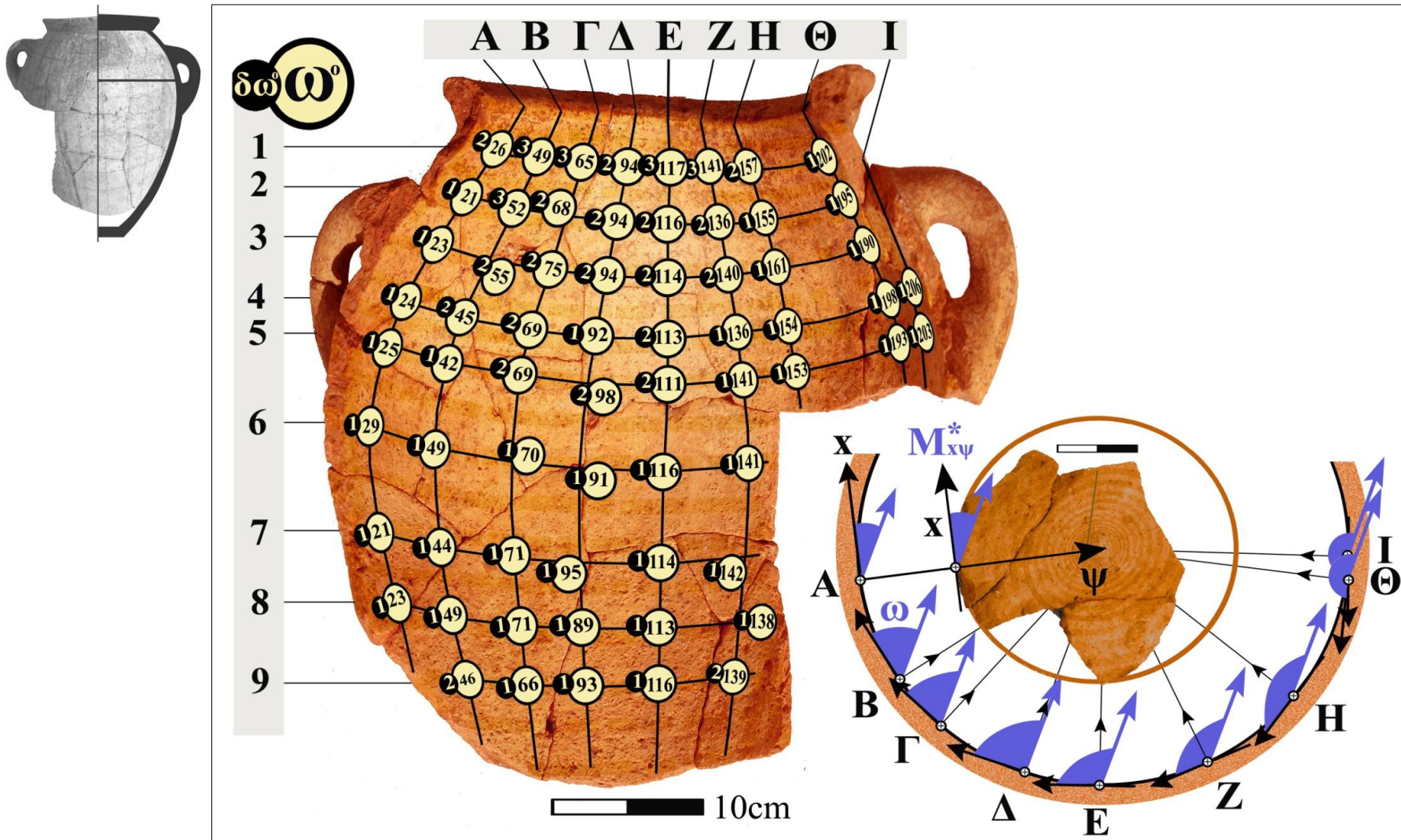


| Αγγείο<br>1 | M(Σώμα) mA/m |       |                 |       |       |       |       |       |       |
|-------------|--------------|-------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|             | A            | B     | Γ               | Δ     | E     | Z     | H     | Θ     | I     |
| 1           | 120±4        | 138±6 | 130±7           | 135±7 | 129±7 | 133±5 | 141±5 | 128±3 |       |
| 2           | 135±3        | 126±5 | 136±6           | 132±6 | 133±5 | 132±5 | 132±3 | 127±3 |       |
| 3           | 138±3        | 139±5 | 139±5           | 138±6 | 127±5 | 137±4 | 128±3 | 124±2 |       |
| 4           | 130±3        | 125±4 | 130±4           | 131±5 | 135±5 | 121±4 | 130±3 | 131±3 | 123±3 |
| 5           | 119±3        | 137±3 | 140±5           | 132±5 | 138±4 | 128±3 | 129±3 | 138±3 | 131±2 |
| 6           | 125±3        | 128±3 | 131±4           | 131±4 | 129±4 | 123±3 |       |       |       |
| 7           | 138±3        | 132±3 | 121±4           | 121±4 | 124±4 | 130±3 |       |       |       |
| 8           | 133±3        | 141±3 | 123±3           | 132±4 | 135±3 | 134±3 |       |       |       |
| 9           |              | 125±3 | 131±3           | 131±4 | 133±3 | 133±4 |       |       |       |
|             | M(Βάση)      |       | 131,3±0,2(mA/m) |       |       |       |       |       |       |

**Σχήμα 45α.** Η γωνία κ εμφανίζει παραπλήσιες τιμές σε κάθε εγκάρσια τομή. Οι υπολογιζόμενες τιμές της κλίσης κ από τις ενδείξεις των αισθητήρων είναι παραπλήσιες στις μετρούμενες.

**Πίνακας 15.** Η μαγνήτιση M εμφανίζει παραπλήσιες τιμές στα όστρακα του σώματος και της βάσης του αγγείου 1. Στις χρωματισμένες περιοχές ο υπολογισμός γίνεται από τις σχέσεις (28β) ανεπαρκούς μήκους.

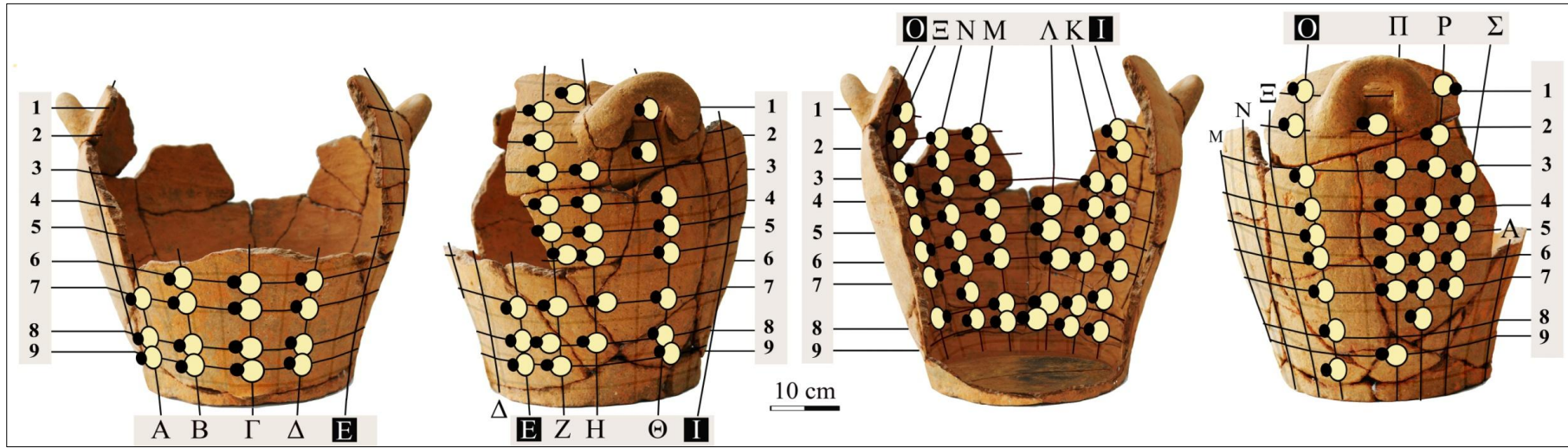
## ΑΓΓΕΙΟ 1



**Σχήμα 45β.** Η γωνία  $\omega$  εμφανίζει παραπλήσιες τιμές σε κάθε διαμήκη τομή. Από τον προσανατολισμό ( $\omega$ ) της μετασχηματισμένης οριζόντιας συνισταμένης  $M_{x\psi}^*$  στα θραύσματα του σώματος και της οριζόντιας συνισταμένης  $M_{x\psi}$  στην ίδια κατεύθυνση στα θραύσματα της βάσης, προσδιορίζεται η θέση συναρμογής τους.



## ΑΓΓΕΙΟ 2

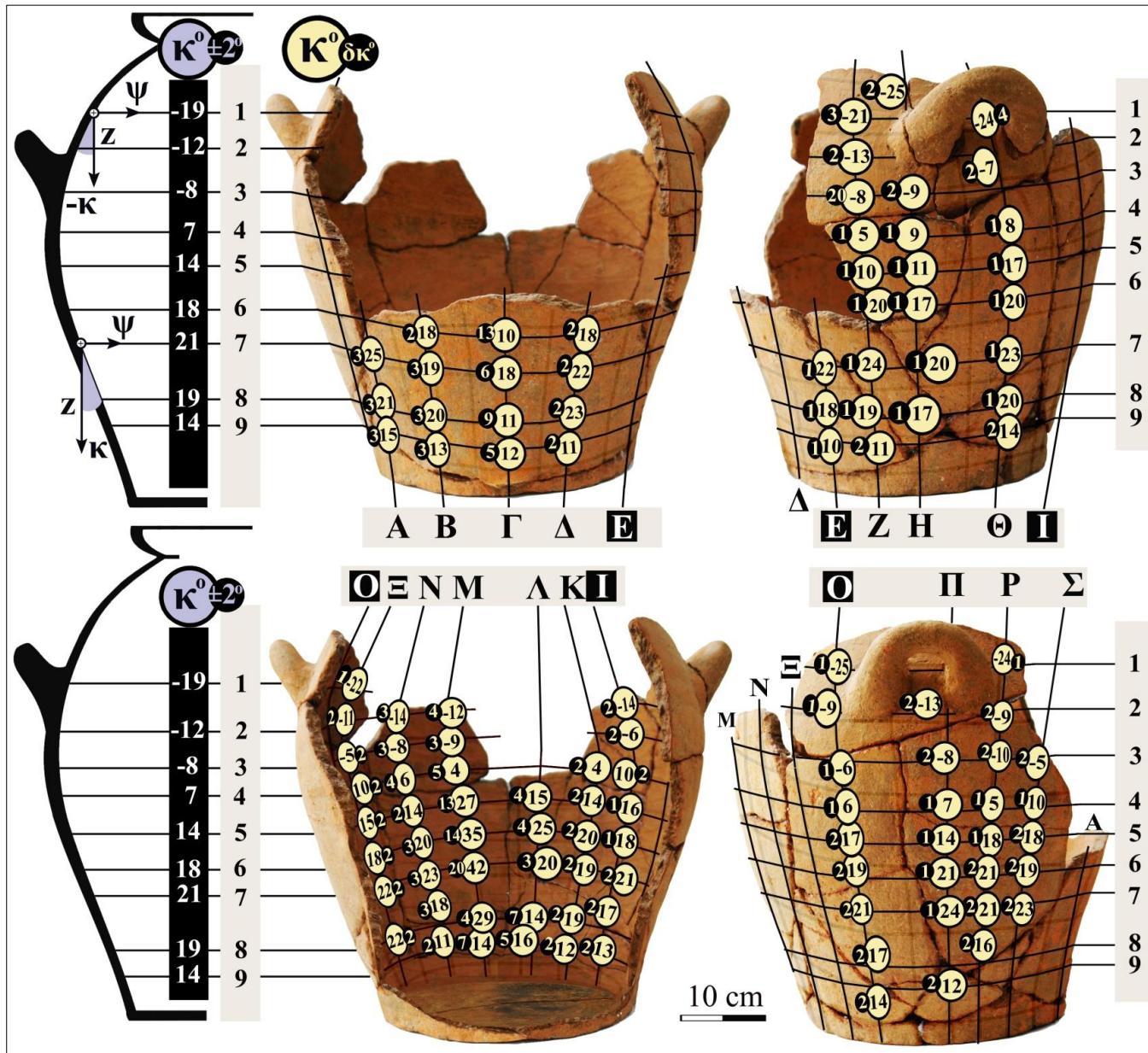


| M(Σώμα) | A                | B     | Γ     | Δ     | Ε     | Ζ      | Η      | Θ      | Ι     | Κ     | Λ     | Μ     | Ν     | Ξ     | Ο     | Π      | Ρ     | Σ     |
|---------|------------------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|
| 1       |                  |       |       |       |       | 182±12 | 153±12 | 179±14 |       |       |       |       |       | 169±3 | 171±3 |        | 168±4 |       |
| 2       |                  |       |       |       |       | 185±10 |        |        | 167±5 |       |       | 172±2 | 163±4 | 173±3 | 178±4 | 168±5  | 170±6 |       |
| 3       |                  |       |       |       |       | 181±7  | 184±7  | 181±8  | 167±3 |       |       | 167±3 | 174±4 | 164±3 | 159±4 | 170±6  | 170±6 | 163±5 |
| 4       |                  |       |       |       |       | 185±5  | 169±4  | 164±4  | 173±4 | 162±3 |       | 170±3 | 169±4 | 174±4 | 166±4 | 174±6  | 173±5 | 170±5 |
| 5       |                  |       |       |       |       | 186±4  | 175±5  | 168±4  | 163±3 | 164±3 | 161±2 | 168±2 | 169±3 | 169±4 | 173±5 | 178±7  | 174±7 | 167±6 |
| 6       |                  | 179±3 | 171±2 | 174±3 |       | 172±4  | 158±4  | 164±4  | 169±3 | 169±3 | 168±3 | 168±2 | 164±3 | 171±4 | 174±5 | 170±7  | 173±7 | 182±7 |
| 7       | 156±6            | 175±3 | 170±2 | 162±3 | 169±3 | 168±4  | 161±4  | 167±4  | 170±3 | 168±3 | 173±3 | 164±3 | 176±4 | 173±5 | 177±6 | 185±8  | 170±7 | 178±8 |
| 8       | 175±7            | 163±4 | 167±2 | 164±3 | 170±4 | 176±4  | 183±5  | 180±4  | 161±3 | 165±3 | 159±2 | 165±2 | 162±3 | 171±5 | 167±6 |        | 179±9 |       |
| 9       | 175±7            | 163±4 | 167±2 | 164±3 | 170±4 | 176±4  | 183±5  | 180±4  | 161±3 | 159±3 | 169±2 | 171±3 | 166±3 |       | 173±7 | 178±10 |       |       |
| M(Βάση) | 169,3±0,6 (mA/m) |       |       |       |       |        |        |        |       |       |       |       |       |       |       |        |       |       |



**Πίνακας 16.** Η μαγνήτιση M εμφανίζει παραπλήσιες τιμές στα όστρακα του σώματος και της βάσης του αγγείου 2. Στις χρωματισμένες περιοχές ο υπολογισμός γίνεται από τις σχέσεις ανεπαρκούς μήκους

## VASE 2



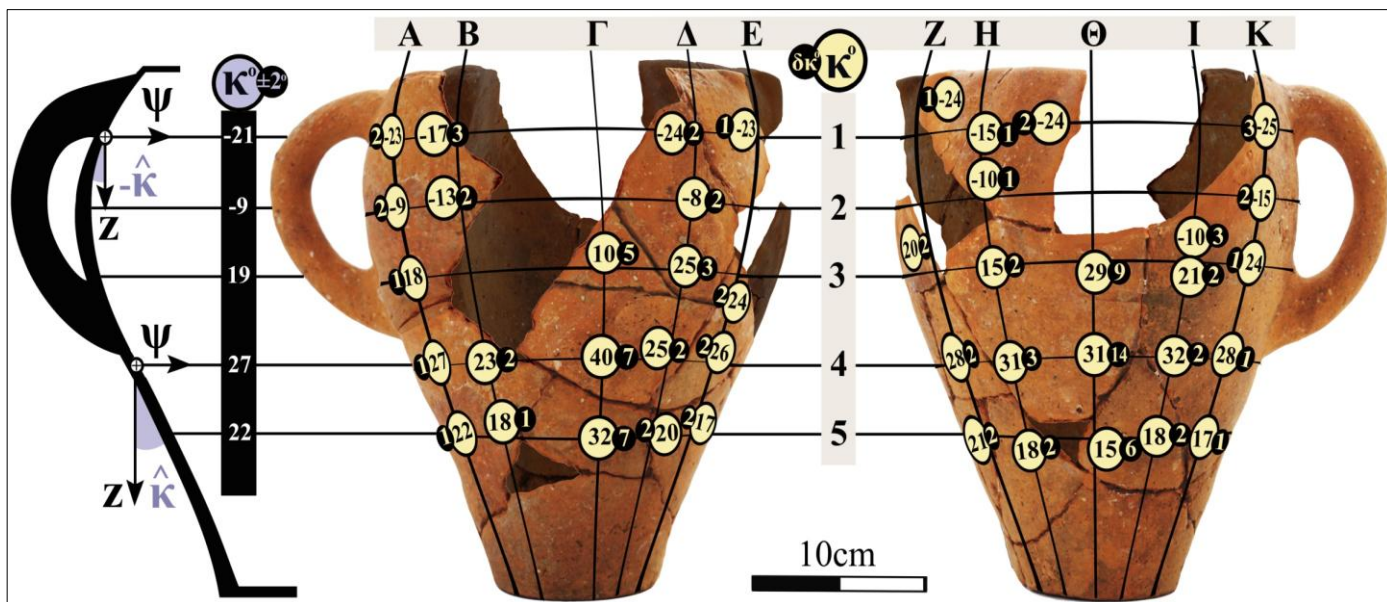
Σχήμα 46α. Η γωνία  $\kappa$  εμφανίζει παραπλήσιες τιμές σε κάθε εγκάρσια τομή. Οι υπολογιζόμενες τιμές της κλίσης  $\kappa$  από τις ενδείξεις των αισθητήρων είναι παραπλήσιες με τις μετρούμενες







## ΑΓΓΕΙΟ 3

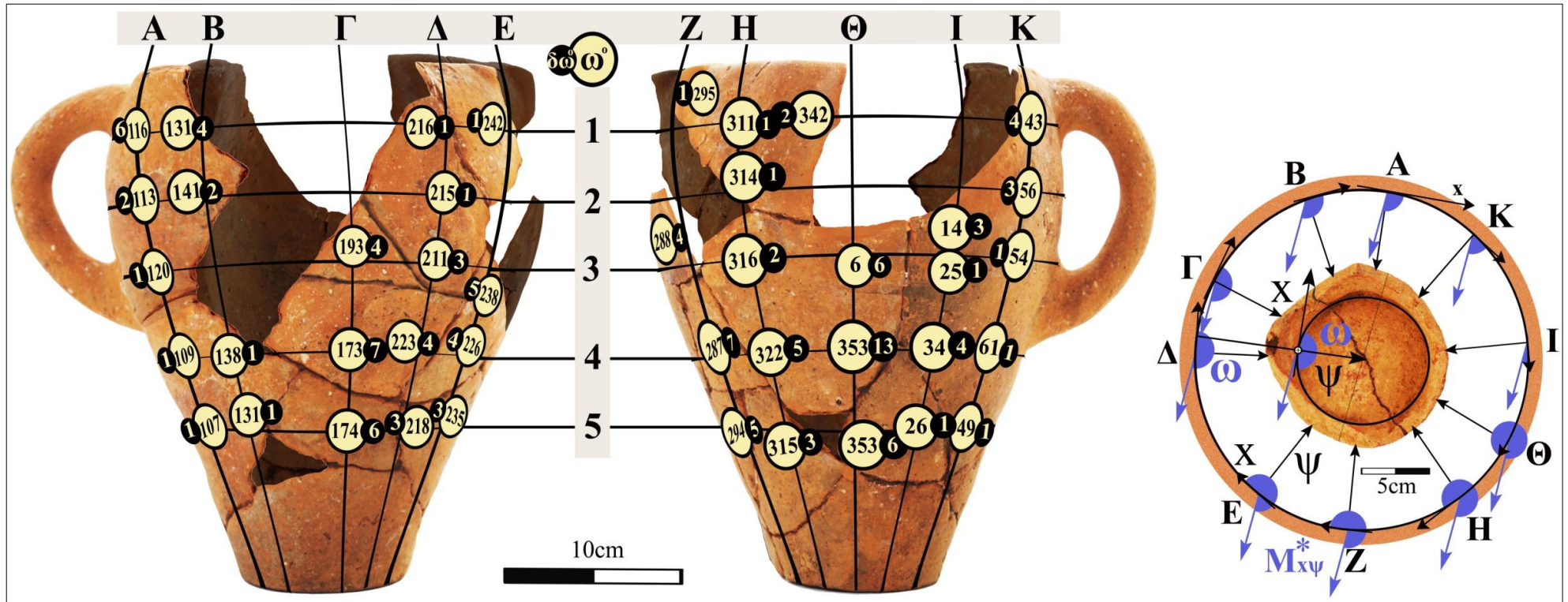


| M(Βάση)             | M(σώμα) | A     | B     | Γ     | Δ     | Ε     | Ζ     | Η     | Θ     | Ι     | Κ     |
|---------------------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 164,1±0,4<br>(mA/m) | 1       | 167±8 | 178±8 |       | 163±4 | 159±3 | 165±4 | 175±3 | 173±3 |       | 194±6 |
|                     | 2       | 166±5 | 154±4 |       | 153±3 |       |       | 177±3 |       | 169±3 | 169±5 |
|                     | 3       | 160±3 |       | 158±3 | 161±4 | 171±6 | 176±6 | 160±4 | 164±3 | 157±3 | 173±3 |
|                     | 4       | 168±3 | 161±3 | 162±3 | 162±5 | 161±5 | 181±7 | 162±5 | 166±5 | 167±4 | 155±3 |
|                     | 5       | 156±4 | 175±3 | 159±2 | 154±4 | 172±6 | 160±7 | 164±5 | 155±2 | 173±3 | 167±3 |

**Σχήμα 47α.** Η γωνία κ εμφανίζει παραπλήσιες τιμές σε κάθε εγκάρσια τομή. Οι υπολογιζόμενες τιμές της κλίσης κ από τις ενδείξεις των αισθητήρων είναι παραπλήσιες στις μετρούμενες.

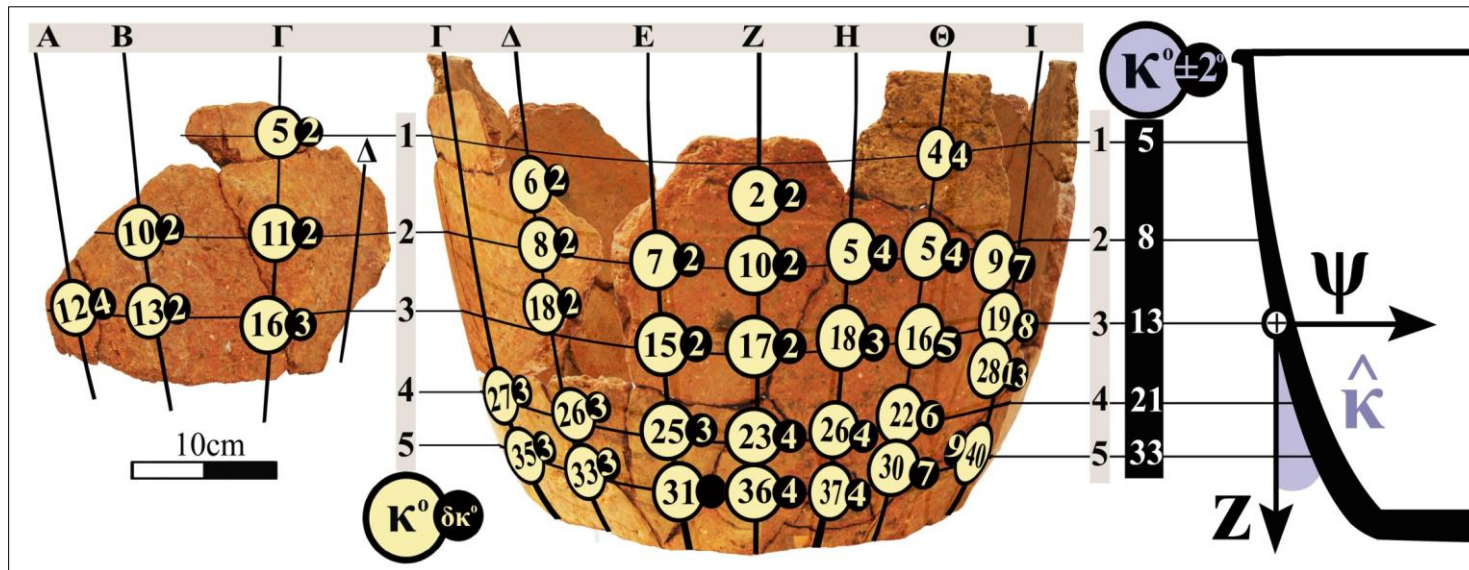
**Πίνακας 17.** Η μαγνήτιση Μ εμφανίζει παραπλήσιες τιμές στα όστρακα του σώματος και της βάσης του αγγείου 3. Στις χρωματισμένες περιοχές ο υπολογισμός γίνεται από τις σχέσεις ανεπαρκούς μήκους.

## ΑΓΓΕΙΟ 3



**Σχήμα 47β.** Η γωνία  $\omega$  εμφανίζει παραπλήσιες τιμές σε κάθε διαμήκη τομή. Από τον προσανατολισμό ( $\omega$ ) της μετασχηματισμένης οριζόντιας συνισταμένης  $M_{x\psi}^*$  στα θραύσματα του σώματος και της οριζόντιας συνισταμένης  $M_{x\psi}$  στην ίδια κατεύθυνση στα θραύσματα της βάσης, προσδιορίζεται η θέση συναρμογής τους.

## ΑΓΓΕΙΟ 4



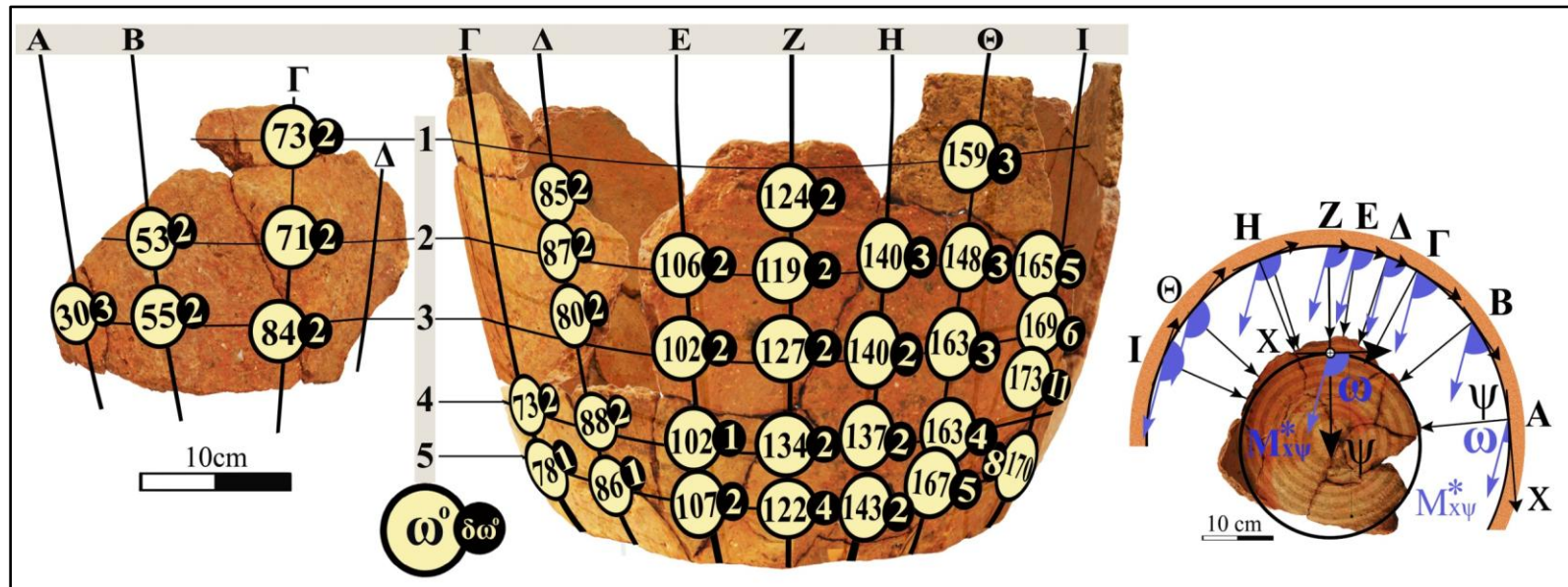
| M(Βάση)            | M(Σώμα) | A    | B    | Γ    | Δ    | E    | Z    | H    | Θ    | I    |
|--------------------|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 84,1±0,2<br>(mA/m) | 1       |      |      | 81±3 | 78±3 |      | 93±3 |      | 89±2 |      |
|                    | 2       |      | 97±3 | 86±3 | 85±3 | 92±3 | 72±3 | 76±3 | 76±3 | 77±2 |
|                    | 3       | 82±3 | 78±3 | 78±4 | 77±3 | 84±3 | 85±3 | 88±3 | 89±3 | 76±2 |
|                    | 4       |      |      | 87±4 | 76±4 | 90±4 | 80±4 | 78±4 | 78±3 | 82±3 |
|                    | 5       |      |      | 84±4 | 85±4 | 82±4 | 77±4 | 85±4 | 85±3 | 89±3 |

**Σχήμα 48α.** Η γωνία κ εμφανίζει παραπλήσιες τιμές σε κάθε εγκάρσια τομή. Οι υπολογιζόμενες τιμές της κλίσης κ από τις ενδείξεις των αισθητήρων είναι παραπλήσιες στις μετρούμενες.

**Πίνακας 18.** Η μαγνήτιση M εμφανίζει παραπλήσιες τιμές στα όστρακα του σώματος και της βάσης του αγγείου 4. Στις χρωματισμένες περιοχές ο υπολογισμός γίνεται από τις σχέσεις ανεπαρκούς μήκους.

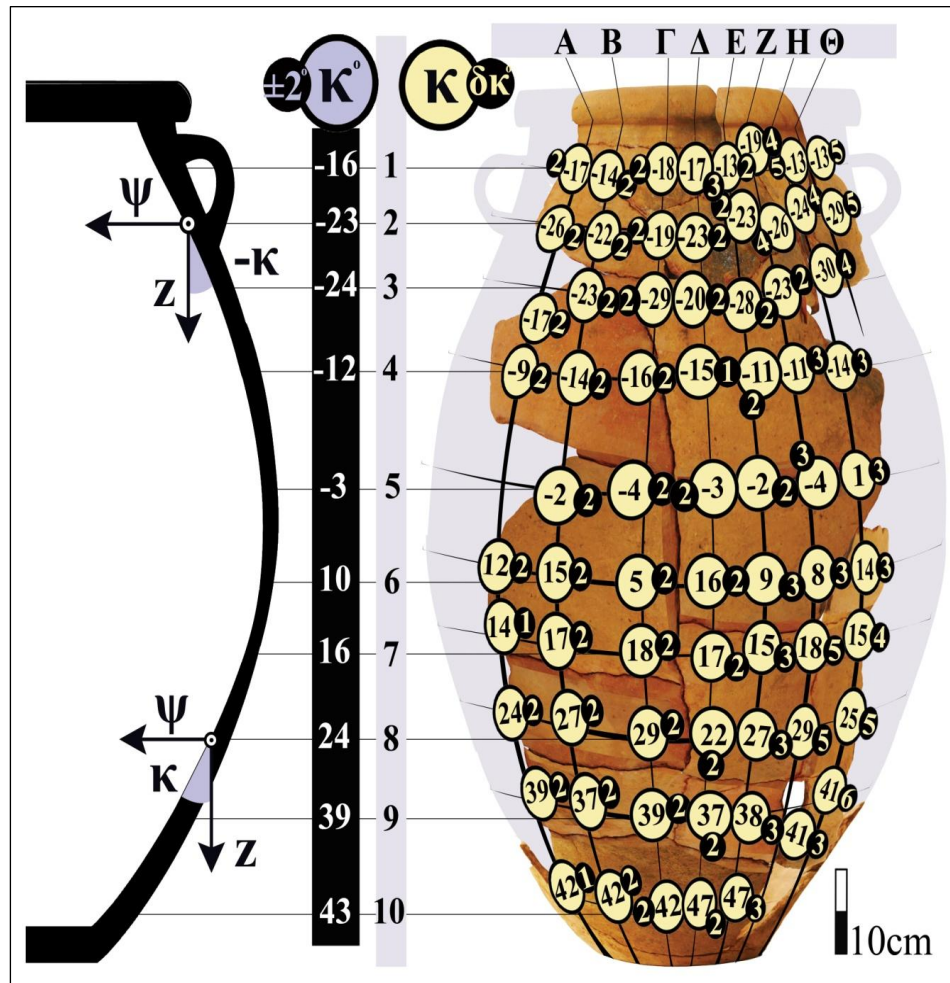


## ΑΓΓΕΙΟ 4



**Σχήμα 48β.** Η γωνία  $\omega$  εμφανίζει παραπλήσιες τιμές σε κάθε διαμήκη τομή. Από τον προσανατολισμό ( $\omega$ ) της μετασχηματισμένης οριζόντιας συνισταμένης  $M_{x\psi}^*$  στα θραύσματα του σώματος και της οριζόντιας συνισταμένης  $M_{x\psi}$  στην ίδια κατεύθυνση στα θραύσματα της βάσης, προσδιορίζεται η θέση συναρμογής τους.

## ΑΓΓΕΙΟ 5

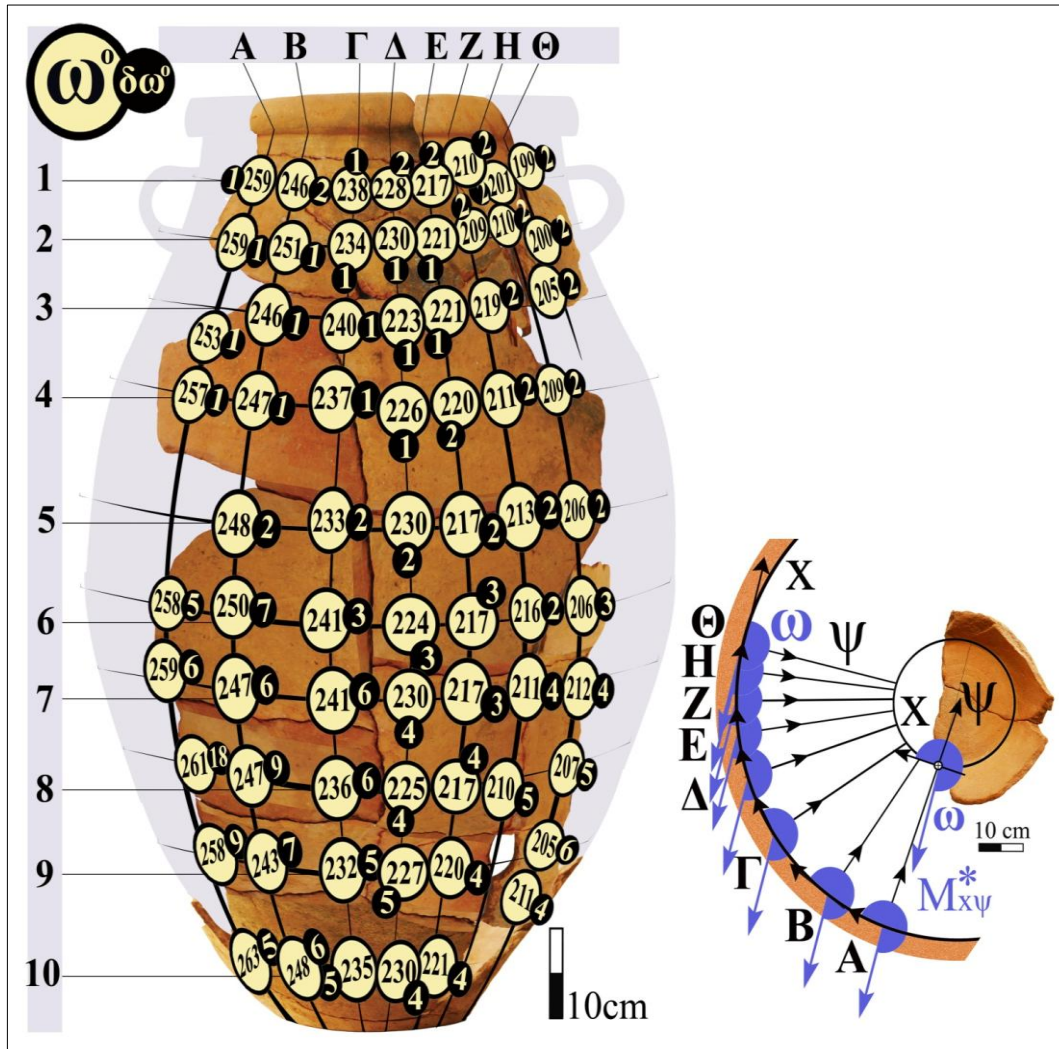


|             | M(Σώμα)          |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|             | A                | B     | Γ     | Δ     | E     | Z     | H     | Θ     |
| 1           | 110±3            | 114±5 | 110±3 | 115±4 | 111±3 | 111±3 | 113±3 | 116±3 |
| 2           | 114±3            | 114±3 | 111±3 | 113±3 | 112±3 | 110±3 | 112±3 | 110±3 |
| 3           | 108±3            | 111±3 | 112±3 | 112±3 | 113±3 | 112±3 | 111±2 |       |
| 4           | 113±4            | 112±3 | 111±3 | 113±3 | 111±3 | 115±3 | 118±3 |       |
| 5           |                  | 116±4 | 116±3 | 113±3 | 114±3 | 110±3 | 113±3 |       |
| 6           |                  |       | 114±4 | 116±3 | 110±3 | 115±3 | 111±3 |       |
| 7           |                  |       | 113±4 | 117±4 | 114±3 | 108±4 | 111±5 |       |
| 8           |                  |       | 119±4 | 113±3 | 112±3 | 113±4 | 117±4 |       |
| 9           |                  |       | 111±3 | 114±3 | 113±3 | 116±3 | 116±4 |       |
| 10          |                  |       | 119±3 | 116±3 | 115±3 |       |       |       |
| M<br>(Βάση) | 112,7±0,3 (mA/m) |       |       |       |       |       |       |       |

**Σχήμα 49α.** Η γωνία κ εμφανίζει παραπλήσιες τιμές σε κάθε εγκάρσια τομή. Οι υπολογιζόμενες τιμές της κλίσης κ από τις ενδείξεις των αισθητήρων είναι παραπλήσιες στις μετρούμενες.

**Πίνακας 19.** Η μαγνήτιση M εμφανίζει παραπλήσιες τιμές στα όστρακα του σώματος και της βάσης του αγγείου 5. Στις χρωματισμένες περιοχές ο υπολογισμός γίνεται από τις σχέσεις ανεπαρκούς μήκους.

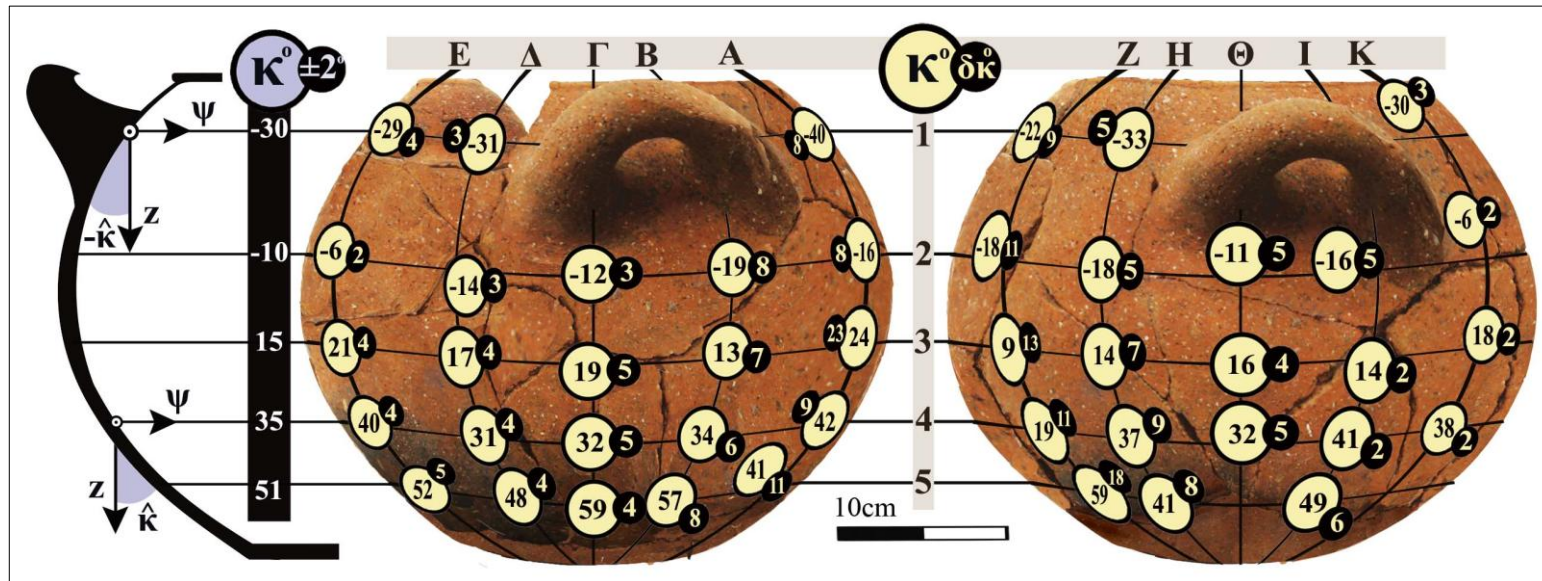
## ΑΓΓΕΙΟ 5



**Σχήμα 49β.** Η γωνία  $\omega$  εμφανίζει παραπλήσιες τιμές σε κάθε διαμήκη τομή. Από τον προσανατολισμό ( $\omega$ ) της μετασχηματισμένης οριζόντιας συνισταμένης  $M_{x\psi}^*$  στα θραύσματα του σώματος και της οριζόντιας συνισταμένης  $M_{x\psi}$  στην ίδια κατεύθυνση στα θραύσματα της βάσης, προσδιορίζεται η θέση συναρμογής τους.



## ΑΓΓΕΙΟ 6

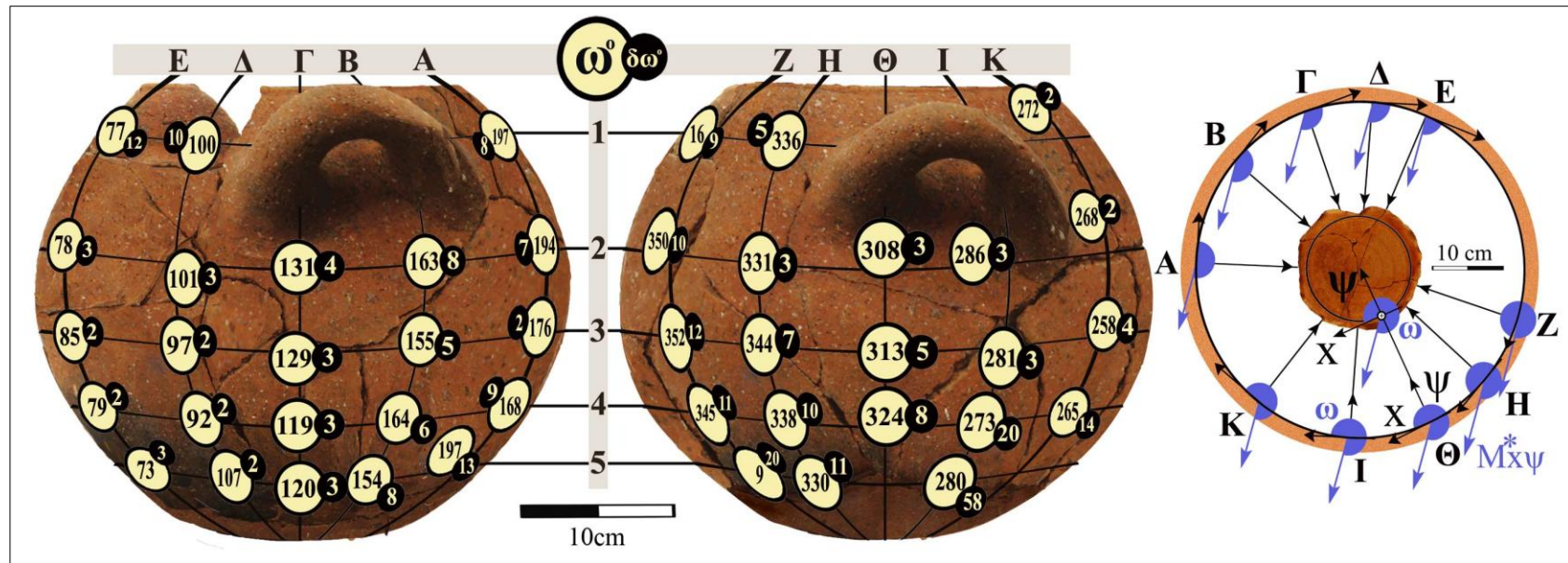


| M(Βάση)            | M(Σώμα) | A    | B    | Γ    | Δ    | E    | Z    | H    | Θ    | I    | K    |
|--------------------|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 58,3±0,2<br>(mA/m) | 1       | 51±2 |      |      | 67±4 | 53±4 | 58±3 | 58±2 |      |      | 56±3 |
|                    | 2       | 62±2 | 53±2 | 64±3 | 63±4 | 63±3 | 59±2 | 64±3 | 57±4 | 51±4 | 64±3 |
|                    | 3       | 63±2 | 51±3 | 48±4 | 59±4 | 60±4 | 61±2 | 61±2 | 52±3 | 63±3 | 61±3 |
|                    | 4       | 60±3 | 63±2 | 53±4 | 62±4 | 61±4 | 56±3 | 55±3 | 59±3 | 62±3 | 59±3 |
|                    | 5       | 57±3 | 50±4 | 51±3 | 64±4 | 55±4 | 58±3 | 54±4 |      | 55±5 |      |

**Σχήμα 50α.** Η γωνία  $\kappa$  εμφανίζει παραπλήσιες τιμές σε κάθε εγκάρσια τομή. Οι υπολογιζόμενες τιμές της κλίσης  $\kappa$  από τις ενδείξεις των αισθητήρων είναι παραπλήσιες στις μετρούμενες.

**Πίνακας 20.** Η μαγνήτιση  $M$  εμφανίζει παραπλήσιες τιμές στα όστρακα του σώματος και της βάσης του αγγείου 6. Στις χρωματισμένες περιοχές ο υπολογισμός γίνεται από τις σχέσεις ανεπαρκούς μήκους.

## ΑΓΓΕΙΟ 6



**Σχήμα 50β.** Η γωνία  $\omega$  εμφανίζει παραπλήσιες τιμές σε κάθε διαμήκη τομή. Από τον προσανατολισμό ( $\omega$ ) της μετασχηματισμένης οριζόντιας συνισταμένης  $M_{x\psi}^*$  στα θραύσματα του σώματος και της οριζόντιας συνισταμένης  $M_{x\psi}$  στην ίδια κατεύθυνση στα θραύσματα της βάσης, προσδιορίζεται η θέση συναρμογής τους.

### 3.4 Συμπεράσματα και προτάσεις μελλοντικής έρευνας

Από τα πειραματικά αποτελέσματα διαπιστώνεται ότι παρά το μικρό εύρος του μέτρου  $M$  της μαγνήτισης στα 6 αγγεία, η διαλογή των ανασκαφικών οστράκων, μπορεί να γίνει με κριτήριο τις παραπλήσιες τιμές της μαγνήτισής τους. Παρότι η μαγνήτιση  $M$  των οστράκων του σώματος των αγγείων εμφανίζει μικρό εύρος τιμών (58-169 mA/m), τα συνανήκοντα όστρακα μπορούν να διακριθούν από τις τιμές της μαγνήτισής τους, που στις περισσότερες θέσεις μέτρησης είναι παραπλήσιες αυτών που υπολογίζονται στη βάση των αγγείων (πίνακας B12) στα όρια ή κοντά στα όρια του υπολογιζόμενου σφάλματος.

Η θέση των συνανηκόντων οστράκων στα σώματα των αγγείων καθορίζεται με ικανοποιητική ακρίβεια με τον υπολογισμό των γωνιών  $\omega$ ,  $\kappa$ .

Η κλίση  $\kappa$  που εμφανίζει παραπλήσιες τιμές σε κάθε εγκάρσια τομή και καθορίζει την καθ' ύψος θέση των οστράκων, συγκρίνεται με τη μετρούμενη κλίση των τοιχωμάτων ως προς τον άξονα συμμετρίας κάθε αγγείου. Οι υπολογιζόμενες τιμές της κλίσης  $\kappa$  από τις ενδείξεις των αισθητήρων είναι παραπλήσιες με τις μετρούμενες.

Η γωνία  $\omega$  εμφανίζει παραπλήσια τιμή σε κάθε διαμήκη τομή και μεταβάλλεται στις εγκάρσιες θέσεις μέτρησης, καθορίζοντας την περιφερειακή θέση των οστράκων στο σώμα κάθε αγγείου. Από τον προσανατολισμό ( $\omega$ ) της μετασχηματισμένης οριζόντιας συνισταμένης  $M_{x\psi}^*$  στα θραύσματα του σώματος και της οριζόντιας συνισταμένης  $M_{x\psi}$  στην ίδια κατεύθυνση στα θραύσματα της βάσης, προσδιορίζεται η θέση συναρμογής τους.

Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων μπορεί να βελτιωθεί με τη λήψη περισσότερων από μία μετρήσεις σε κάθε όστρακο του σώματος των αγγείων.

Το μέτρο της θερμοπαραμένουσας μαγνήτισης όπως προσεγγίζεται από την εφαρμοζόμενη μεθοδολογία μπορεί να αποτελέσει κριτήριο διαλογής των συνανηκόντων ανασκαφικών οστράκων, ενώ η κατευθυντικότητα της όπως διαμορφώνεται από την περιστροφική συμμετρία των αγγείων, μπορεί να καθορίσει τη θέση κάθε οστράκου στο σώμα του αγγείου. Η μεθοδολογία μπορεί να εφαρμοστεί για τη διαλογή της πλειονότητας των ανασκαφικών οστράκων από αγγεία που κατασκευάστηκαν στον τροχό, με ίχνη αυλακώσεων και περιστροφική συμμετρία, υπό τις παραπάνω προϋποθέσεις:

- Η εύρεση συνανηκόντων θραυσμάτων της βάσης των αγγείων είναι απαραίτητη για τον υπολογισμό της γωνίας  $\gamma$  απόκλισης της μαγνήτισης από τον άξονα συμμετρίας των αγγείων και των παραμέτρων  $\alpha'$ ,  $\alpha''$ , λ από μετρήσεις του μαγνητικού τους πεδίου. Αυτό δεν αποτελεί πρόβλημα, γιατί η εφαρμογή της μεθόδου δεν απαιτεί κάποια αλλαγή της διαδικασίας που συνηθίζεται για τη συστηματική διαλογή των κεραμικών ευρημάτων, κατά την οποία αρχικά συγκεντρώνονται τα χαρακτηριστικά θραύσματα της μορφής των αγγείων (βάσεις, χείλη, στόμια, λαβές) και στη συνέχεια αναζητούνται με εμπειρικό τρόπο τα συνανήκοντα θραύσματα.

- Στο σύστημα αναφοράς των οστράκων όπου λαμβάνονται οι μετρήσεις, ο x-άξονας είναι προσανατολισμένος στη διεύθυνση των αυλακώσεων του αγγείου, ενώ ο  $\psi$ - άξονας είναι κάθετος στην επιφάνεια και κατευθύνεται προς το εσωτερικό των οστράκων. Για τη λήψη των μετρήσεων σε όλα τα όστρακα ως προς το ίδιο σύστημα αναφοράς, ο z- άξονας πρέπει να προσανατολίζεται προς τη βάση (ή το στόμιο) του αγγείου. Ο προσανατολισμός του κάθε οστράκου προς τη βάση ή το στόμιο του αγγείου μπορεί να γίνει εύκολα, με κριτήρια το σχήμα του και την καμπυλότητα των αυλακώσεων στην επιφάνειά του.

- Το σφάλμα στον υπολογισμό των γωνιών  $\omega$ ,  $\kappa$  αυξάνεται, όσο μικρότερη είναι η επαφή των αισθητήρων με την επιφάνεια των οστράκων. Ο προσδιορισμός της θέσης οστράκων με έντονη καμπυλότητα δυσχεραίνεται, τουλάχιστον με τους αισθητήρες fluxgate μήκους ~3cm που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα έρευνα. Η μεθοδολογία μπορεί να εφαρμοστεί σε θραύσματα μικρότερων αγγείων με μεγαλύτερη καμπυλότητα, με τη χρήση αισθητήρων fluxgate μικρότερου μήκους. Σε κάθε περίπτωση, τα θραύσματα μικρότερων αγγείων είναι ευκολότερο να ταξινομηθούν με εμπειρικό τρόπο, λόγω της χαρακτηριστικής καμπυλότητάς τους.

Για συμπληρωματική διερεύνηση, προτείνονται οι ακόλουθες προτάσεις μελλοντικής έρευνας:

**1.** Δοκιμαστική εφαρμογή της μεθόδου σε όστρακα από αρχαιολογικές ανασκαφές.

**2.** Κατασκευή κεραμικών δοκιμίων από διαφορετικές πρώτες ύλες και με διαφορετική κοκκομετρία, ψημένα στον ίδιο κλίβανο κεραμικής υπό διαφορετικές κλίσεις στο δάπεδο του κλιβάνου.

- Κατασκευή κεραμικών δοκιμίων από την ίδια πρώτη ύλη, ψημένα με την ίδια κλίση στον ίδιο κλίβανο, αλλά υπό διαφορετικές οξειδωτικές συνθήκες και σε διαφορετικές θερμοκρασίες.

-Ανάλυση της σύστασης των δοκιμίων και της περιεκτικότητάς τους σε μαγνητικά οξείδια.

Τα παραπάνω είναι απαραίτητα για την εξάρτηση της παραμένουσας μαγνήτισης από τη σύσταση του πηλού, από τις συνθήκες θερμοκρασίας/αερισμού στον κλίβανο όπτησης, από την κατευθυντικότητα του γεωμαγνητικού πεδίου και τον βαθμό μαγνητικής ανισοτροπίας του κεραμικού υλικού. Για την παραπάνω έρευνα, απαιτείται παραδοσιακός ξυλόφουρνος κεραμικής. Σε κεραμικά δοκίμια από διαφορετικούς πηλούς του εμπορίου που ψήθηκαν σε ηλεκτρικό φούρνο, το μετρούμενο μαγνητικό πεδίο ήταν μικρότερο από 10nT και χωρίς σαφή κατευθυντικότητα, ως αποτέλεσμα των μαγνητικών πεδίων από τα ηλεκτρικά ρεύματα του κλιβάνου.

**3.** Διερεύνηση της εξάρτησης των ακτίνων ευαισθησίας του κάθετου ( $\alpha'$ ) και του παράλληλου ( $\alpha''$ ) αισθητήρα από το μέτρο της μαγνήτισης του κεραμικού υλικού.

-Διερεύνηση του τρόπου, του βαθμού διέγερσης των αισθητήρων και της εξάρτησης του παράγοντα διόρθωσης  $\lambda$  των ενδείξεων του κάθετου και των ακτίνων ευαισθησίας  $\alpha'$ ,  $\alpha''$  του κάθετου και του παράλληλου αισθητήρα, από μετρήσεις των ίδιων δοκιμίων σε διαφορετικές αποστάσεις από την επιφάνειά τους.

Προϋπόθεση για τα παραπάνω αποτελούν μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου σε κεραμικά υλικά με μεγαλύτερη θερμοπαραμένουσα μαγνήτιση, έτσι ώστε το μαγνητικό τους πεδίο να εξασθενεί σε μεγαλύτερες αποστάσεις από την επιφάνειά τους.

-Διερεύνηση της εξάρτησης της σταθεράς κανονικοποίησης  $\lambda$  των ενδείξεων του κάθετου και του παράλληλου αισθητήρα και συσχετίσή της με τις διαστάσεις και τα τεχνικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων, από μετρήσεις των ίδιων δοκιμίων από αισθητήρες fluxgate διαφορετικού τύπου.

**4.** Διερεύνηση της δυνατότητας κατασκευής εύχρηστου μαγνητόμετρου fluxgate τριών αισθητήρων για τοπικές επιφανειακές μετρήσεις ασθενών πεδίων (1-1000nT) σε κεραμικά υλικά με μαγνήτιση 1-1000 mA/m για αρχαιολογική χρήση.

**5.** Διερεύνηση της επαγόμενης μαγνήτισης του κεραμικού υλικού σε εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο ως πρόσθετο κριτήριο για τη διαλογή των συνανηγόντων ανασκαφικών οστράκων.

Πειράματα διεξήχθησαν με τη διαδοχική τοποθέτηση κεραμικών κυλινδρικών δοκιμίων από συνανηγόντα όστρακα αγγείων σε συγκεκριμένες θέσεις εντός σωληνοειδούς ( $L \sim 3\text{mH}$ ) σε κύκλωμα RLC σε πεδίο ( $\sim 50 \mu\text{T}$ ) και υπολογίστηκε η επαγόμενη μαγνήτιση από την αύξηση της αυτεπαγωγής του πηνίου στη συχνότητα [34] (pp.21-34) συντονισμού (τεχνική *Null Detection*) του κυκλώματος. Κατά τη διαδοχική πρόσθεση συνανηγόντων πλακιδίων σε διαφορετικές συχνότητες συντονισμού ( $f=40\text{-}95\text{KHz}$ ), διαπιστώθηκαν παραπλήσιες αυξήσεις της επαγόμενης μαγνήτισής τους, που αποτελούν κριτήριο διάκρισης δοκιμίων από διαφορετικά αγγεία.

-Διερεύνηση της δυνατότητας κατασκευής εύχρηστου οργάνου για τοπικές επιφανειακές μετρήσεις της επαγόμενης μαγνήτισης του κεραμικού υλικού από εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο για αρχαιολογική χρήση με σκοπό τη διαλογή των συνανηγόντων ανασκαφικών οστράκων.

**6.** Διερεύνηση εφαρμογής της μεθόδου σε πετρώματα με παραμένουσα μαγνήτιση [26], για τον εντοπισμό αλλαγών της μορφολογίας του εδάφους σε τοπικό επίπεδο, με τη σύγκριση της κατευθυντικότητας του μαγνητικού πεδίου του μητρικού πετρώματος και των αποσπασμένων τμημάτων του.

## Αναφορές

1. Archaeomagnetic Applications for the Rescue of Cultural Heritage-AARCH, 2002–2006. Available online: <http://dourbes.meteo.be/aarch.net/onlytxt/no.frame.html> (accessed on 22 June 2019).
2. Burnham, R.J.P.; Tarling, D.H. Magnetization of Shards as an Assistance to the Reconstruction of Pottery Vessels. *Stud. Conserv.* 1975, 20, 152–157.
3. Castañeda, A.G.; Brown, B.; Rusinkiewicz, S.; Funkhouser, T.; Weyrich T. Global consistency in the automatic assembly of fragmented artefacts. In Proceedings of the 12th International Symposium on Virtual Reality Archaeology and Cultural Heritage VAST, Prato, Italy, 18–21 October 2011; pp. 73–80.
4. Karasik, A.; Smilansky, U. Computerized morphological classification of ceramics. *J. Archaeol. Sci.* 2011, 38, 2644–2657.
5. Cooper, D.B.; Willis, A.; Andrews, S.; Baker, J.; Cao, Y.; Han, D.; Kang, K.; Leymarie, F.F.; Orriols, X.; et al. Assembling virtual pots from 3D measurements of their fragments. In Proceedings of the Conference on Virtual Reality Archeology and Cultural Heritage, Athens, Greece, 28–30 November 2001; pp. 241–254.
6. Willis, A.; Orriols, X.; Cooper, D. B. Accurately estimating sherd 3D surface geometry with application to pot reconstruction. In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshop, Madison, WI, USA, 16–22 June 2003; p. 5.
7. Willis, A.R.; Cooper, D.B. Bayesian assembly of 3d axially symmetric shapes from fragments. In Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, San Diego, CA, USA, 27 June–2 July 2004.
8. Maiza, C.; Gaildrat, V. Automatic Classification of Archaeological Potsherds. Available online: [https://pdfs.semanticscholar.org/3c95/82c3e562b44e7d61dc0fd3487ea3dc977ff3.pdf?\\_ga=2.206671379.1607405463.1564404747-123545983.1564404747](https://pdfs.semanticscholar.org/3c95/82c3e562b44e7d61dc0fd3487ea3dc977ff3.pdf?_ga=2.206671379.1607405463.1564404747-123545983.1564404747) (accessed on 29 August 2019).
9. Belenguer, C.S.; Vidal, E.V. Archaeological Fragment Characterization and 3D Reconstruction based on Projective GPU Depth Maps. In Proceedings of the IEEE 18th International Conference on VSMM, Milan, Italy, 2–5 September 2012; pp. 275–282.
10. Cohen, F.; Zhang, Z.; Jeppson, P. Virtual reconstruction of archaeological vessels using convex hulls of surface markings. In Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), San Francisco, CA, USA, 13–18 June 2010; pp. 55–61.
11. Melero, F.J.; Torres, J.C.; León, A. On the interactive 3D reconstruction of iberian vessels. In Proceedings of the 4th International conference on Virtual Reality Archaeology and Intelligent Cultural Heritage, Brighton, UK, 5-7/11/2003; pp. 71–78.
12. Oxholm, G.; Nishino, K. A flexible approach to reassembling thin artifacts of unknown geometry. *J. Cult. Herit.* 2013, 14, 51–61.
13. Papaioannou, G.; Karabassi, E.A.; Theoharis, T. Automatic Reconstruction of Archaeological Finds-A Graphics Approach. In Proceedings of the 4th International Conference Computer Graphics and Artificial Intelligence, Limoges, France, 3-4/5 2000; pp. 117–125.
14. Papaioannou, G.; Karabassi, E.A.; Theoharis, T. Reconstruction of three-dimensional objects through matching of their parts. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 2002, 24, 114–124.
15. Üçoluk, G.; Toroslu, I.H. Automatic reconstruction of broken 3-D surfaces objects. *Comput. Graph.* 1999, 23, 573–582.
16. Mara, H.; Kampel, M.; Sablatnig, R. Preprocessing of 3D-Data for Classification of Archaeological Fragments in an Automated System. In Proceeding of the 26th Workshop of the Austrian Association for Pattern Recognition, Vision with Non-Traditional Sensors, (ÖAGM/AAPR), Graz, Austria, 10–11 September 2002.
17. Mara, H.; Sablatnig, R. Orientation of Fragments of Rotationally Symmetrical 3D-Shapes for Archaeological Documentation. In Proceedings of the IEEE Third International Symposium on 3D Data Processing, Chapel Hill, NC, USA, 14–16 June 2006; pp. 1064–1071.
18. Leita, H.C.; Stolfi, J. Measuring the information content of fracture lines. *Int. J. Comput. Vis.* 2005, 65, 163–174.
19. Hlaváčková-Schindler, K.; Kampel, M.; Sablatnig, R. Fitting of a closed planar curve representing a profile of an archaeological fragment. In Proceedings of the Conference on Virtual reality, archeology and cultural heritage, Glyfada, Greece, 28–30 November 2001; pp. 263–269.
20. Kashiara, K. Three-dimensional Reconstruction of Artifacts Based on a Hybrid. Genetic Algorithm. In Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Seoul, Korea, 14–17 October 2012; 900–905.
21. Son, K.; Almeida, E.B.; Cooper, D.B. Axially Symmetric 3D Pots Configuration System Using Axis of Symmetry and Break Curve. In Proceedings of the IEEE 26<sup>th</sup> Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Portland OR, USA, 23-28/6/2013; pp. 257–264.

22. Kampel, M.; Sablatnig, R. Profile-based Pottery Reconstruction. In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshop, Madison WI, USA, 16–22 June 2003.
23. Kampel, M.; Sablatnig, R. On 3D mosaicing of rotationally symmetric ceramic fragments. In Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition, Cambridge, UK, 26–26 August 2004.
24. Kampel, M., Sablatnig, R. An Automated Pottery Archival and Reconstruction System. *J. Vis. Comput. Animat.* 2003, 14, 111–120.
25. Kampel, M., Sablatnig, R.; Mara, H. Robust 3d Reconstruction of Archaeological Pottery Based on Concentric Circular Rills. In Proceedings of 6th International Workshop on Image Analysis for Multimedia Interactive Services, Monterux, Switzerland, 2005; pp. 14–20.
26. Zhou, M.; Geng, G.; Wu, Z.; Shui, W. A Virtual Restoration System for Broken Pottery. In Proceedings of the CAA Conference 37th Computer applications and quantitative methods in archaeology, Williamsburg, Virginia, USA, 22-26/3/2009; pp. 391–396.
27. Smith, P.; Bespalov, D.; Shokoufandeh, A.; Jeppson, P. Classification of archaeological ceramic fragments using texture and color descriptors. In Proceedings of the IEEE, Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), San Francisco, California, USA, 22-26/3/2010; pp. 49–54.
28. Huang, Q.X.; Flory, S.; Gelfand, N.; Hofer, M.; Pottmann, H. Reassembling fractured objects by geometric matching. *ACM Transact. Graph.* 2006, 25, 569–578.
29. Haliř, R. An Automatic Estimation of the Axis of Rotation of Fragments of Archaeological Pottery: A Multi-Step Model-Based Approach. In Proceeding of 17th International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Interactive Digital Media, 1999; pp. 1–7.
30. Sablatnig, R.; Menard, C. 3D Reconstruction of archaeological pottery using profile primitives. In Proceeding of the International Workshop on Synthetic-Natural Hybrid Coding and Three-Dimensional Imaging, Rhodes, Greece, 5–9 September 1997; pp. 93–96.
31. Andrews, S.; Laidlaw, D.H. Toward a Framework for Assembling Broken Pottery Vessels. In Proceeding of the 18th International Conference on Artificial Intelligence, Alberta, Canada 27-30/7/ 2002; pp. 945–946.
32. Cao, Y.; Mumford, D. Geometric structure estimation of axially symmetric pots from small fragments. In Proceedings of the International Conference on Signal Processing, Pattern Recognition and Applications, Creta, Greece, 25–28 June 2002; pp. 92–97.
33. Lu, Y.; Gardner, H.; Jin, H.; Liu, N.; Hawkins, R.; Farrington, I. Interactive Reconstruction of Archaeological Fragments in a Collaborative Environment. In Proceedings of the IEEE 9th Biennial Conference of the Australian Pattern Recognition Society on Digital Image Computing Techniques and Applications, Glenelg, Australia, 3–5 December 2007; pp. 23–29.
34. Collinson, D.W. (Ed.); *Methods in Rock Magnetism and Palaeomagnetism: Techniques and Instrumentation*, London. Chapman and Hall: New York, NY, USA, 1983; pp. 208–223.
35. Subir, K.B. Experimental Methods in Rock Magnetism and Paleomagnetism. In *Advances in Geophysics*. Barry Saltzman Ed.; Academic Press: New York, NY, USA, 1981; 23, pp. 36–41.
36. Molyneux, L. A complete result magnetometer for measuring the remanent magnetization of rocks. *Geophys. J. Int.* 1971, 24, 429–433.
37. Available online: <http://bartington.jp/Literaturepdf/Datasheets/Mag-03%20DS0013.pdf> (accessed on 22 April 2019).
38. Armen, G.B. Phase Sensitive Detection: The lock-in Amplifier. Department of Physics and Astronomy, University of Tennessee Knoxville, Knoxville TN, USA; Available online: <http://server1.phys.utk.edu/labs/modphys/Lock-In%20Amplifier%20Experiment.pdf> (accessed on 22 April 2019).
39. Available online: <http://www.phys.utk.edu/labs/modphys/Lock-In%20Amplifier%20Experiment.pdf> (accessed on 22 April 2019).
40. Available online: <https://www.thinksrs.com/downloads/pdfs/manuals/SR830m.pdf> (accessed on 22 April 2019).
41. Purcell, E. *Electricity Magnetism*, 2nd ed.; University publications of the National Technical University of Athens, Athens, Greece, 2004.
42. Curie, P. *Propriétés magnétiques des corps à diverses températures*; Gauthier-Villars et fils: Paris, France, 1895. Available online: <https://archive.org/details/propritsmagntiq00curigoog/page/n7> (accessed on 22-4-2019).
43. J.P. Spivasatava, *Elements of Solid State Physics*, PHI Learning Pvt. Ltd, 2014, Chapter 13, page 438.
44. Chrisman J. Richard, *Fundamentals of solid State Physics*, J. Wiley, New York, 1988
45. Available online: <http://earthref.org/MAGIC/books/Tauxe/Essentials/> (accessed on 22 April 2019).
46. Available online: [http://www.irm.umn.edu/hg2m/hg2m\\_b/hg2m\\_b.html](http://www.irm.umn.edu/hg2m/hg2m_b/hg2m_b.html) (accessed on 22 April 2019).



47. Available online: <http://www-users.york.ac.uk/~rfl500/posts/2015/05/reconciling-quantum-and-classical-magnetism/> (accessed on 22 April 2019).
48. Francis Bitter, Experiments of the Nature of Ferromagnetism, *Physical Review*, vol.41, page 507, 15 August 1932.
49. Heinrich Barkhausen, The Barkhausen effect, *Physical Review*, vol.24, page 439, 1 October 1924.
50. John Kerr and Michael Faraday, Theory of the Faraday and Kerr Effects in Ferromagnetics, *Physical Review*, vol.97, page 334, 15 January 1955.
51. Available online: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bethe-Slater\\_curve\\_by\\_Zureks.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bethe-Slater_curve_by_Zureks.svg) (accessed on 22 April 2019).
52. Available online: <https://www.cond-mat.de/events/correl13/manuscripts/lichtenstein.pdf> (accessed on 22 April 2019).
53. Ruderman, M. A. & Kittel, C. Indirect exchange coupling of nuclear magnetic moments by conduction electrons, *Phys. Rev.* 96, 99–102 (1954).
54. Available online: <http://flash.lakeheadu.ca/~gborrada/uploads/docs/2004-GB-MJ-AMSrev-A.pdf> (accessed on 22 April 2019).
55. Γ. Κιοσέογλου, Εισαγωγή στα μαγνητικά υλικά, Τμήμα Επιστήμης και Τεχνολογίας Υλικών του Πανεπιστημίου Κρήτης.
56. Fletcher, E. J., and W. O'Reilly, Contribution of  $\text{Fe}^{2+}$  ions to the magnetocrystalline anisotropy constant  $K$  of  $\text{Fe}_{3-x}\text{Ti}_x\text{O}_4$ , ( $0 < x < 0.1$ ), *Proc. Phys.Soc. London Solid State Phys.*, 7, 171-178.
57. Syono και Ishikawa (1963), Magnetocrystalline anisotropy and magnetostiction of  $\text{Fe}_2\text{TiO}_4(1-x)\text{Fe}_3\text{O}_4$  ( $x>0,5$ ), *J.Phys.Soc.Japan*, 19,1752.
58. Joule, J.P. (1847), , The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science.
59. Bruce M. Moskowitz, High-temperature magnetostriction of magnetite and titanomagnetites, *Papers on Geomagnetism and Paleomagnetism Marine Geology and Geophysics*, volume 98, Issue B1, 10/1/93, pages 359-371.
60. Kittel, Charles, Introduction to Solid State Physics, 1986, John Wiley and Sons.
61. Available online: <http://setiabudidaya-magnetism.blogspot.gr/> (accessed on 22 April 2019).
62. D.H.Tarling, *Paleomagnetism. Principles and Applications in Geology, Geophysics and Archaeology*, 1983, Chapman and Hall, London-New York.
63. Sporer,H., On viscous remanent magnetization of synthetic multidom+ antititanomagnetite, 1984, *Geophysic Res. Let.*, 11, No3, 209-212.
64. Khramov A.N., L.E., *Paleomagnetism. Principles, Methods and Geological Applications of paleomagnetology*, 1967, pp251, Nedra.
65. Jacobs, J.A., *Geomagnetism*, 1987, vol.3, Academic Press
66. McClelland, E. and V. P. Shcherbakov, Metastability of domain state in multi-domain magnetite: Consequences for remanence acquisition, 1995, *J.Geophys., Res.* 100, NoB3, 3841-3857.
67. Johnson, H.P., R. T. Merrill, Low-Temperature Oxidation of a Single-Domain Magnetite, 1974, *Geophys. Res.*, 79, 5533-5534.
68. Nishitani T., M. Kono, Effect of Low-Temperature Oxidation on the Remanence Properties of Titanomagnetites, 1989, *J. Geomag. Geoelectr.*, 41, 19-38.
69. Dunlop, D. J., The rock magnetism of fine particles, 1981, *Phys. Earth Plan. Inter.*, 26, 1-26
70. D.H. Tarling, *Paleomagnetism* 1st ed; Springer: Heidelberg, Germany, 1983; pp. 15–107.
71. Chikazumi, S., *Physics of Ferromagnetism*, 2nd ed.; Oxford science publications, UK: 2009; pp. 118–245.
72. L. Tauxe, *Paleomagnetic Principles and Practice*, Springer Science & Business Media, 2006
73. Ronald T. Merrill, M. W. McElhinny, Phillip L. McFadden, *The Magnetic Field of the Earth: Paleomagnetism, the Core, and the Deep Mantle*, Academic Press, 1998
74. Available online: <https://www.mindat.org/min-48762.html> (accessed on 22 April 2019).
75. Available online: [http://www.geo.auth.gr/106/8\\_silicates/phylo/serpentine.htm](http://www.geo.auth.gr/106/8_silicates/phylo/serpentine.htm) (accessed on 22 April 2019).
76. Curie, P. «Propriétés magnétiques des corps à diverses températures»; Gauthier-Villars et fils: Paris, France, 1895. Available online: <https://archive.org/details/propritsmagntiq00curigoog/page/n7> (accessed on 22-4-2019).
77. Morrish, A.H., *The Physical Principles of Magnetism*, 3rd ed.; Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE Press: New York, NY, USA, 2001; pp. 46–75.
78. Eighmy, J.L.; Sternberg, R.S. (Eds), *Archaeomagnetic Dating*, 3nd ed.; Arizona Press University : Tucson, AZ, USA, 1990; pp. 5–236.
79. Lanos, P.; Chauvin, A.; Kovacheva, M., *Archaeomagnetism, methodology and applications: Implementation and practice of the archaeomagnetic method in France and Bulgaria*, *Eur. J. Archaeol.* 1999, 2,365–392.
80. Ouahabi, M.; Daudi, L.; Hatert, F.; Fagel, N. Modified Mineral., *Phases During Clay Ceramic Firing*, *Clays Clay Mineral.* 2015, 63, 404–413.
81. Gliozzo, E.; Baldassarre, G.; Turchiano, M.; Memmi, I. T., From the kilns to the fair: Producing building materials at Faragola and Canusium (northern Apulia, Italy), *Archaeol. Anthropol. Sci.* 2016, 8, 705–729.

82. Gliozzo, E.; Iacoviello, F.; Foresi, L. M., Geosources for ceramic production: The clays from the Neogene–Quaternary Albegna Basin (southern Tuscany), *Appl. Clay Sci.* 2014, 91, 105–116.
83. Cullity, B.D.; Graham, C.D., *Introduction to Magnetic Materials*, 2nd ed.; Institute of Electrical and Electronics Engineers, John Wiley & sons Publication: Hoboken, New Jersey, USA, 2008; pp. 87–111.
84. Hunt, C.P.; Moskowitz, B.M.; Banerjee, S.K., *Magnetic Properties of Rocks and Minerals*, In *Book Rock Physics & Phase Relations A Handbook of Physical Constants*; Ahrens, T.J., Ed.; Washington, DC, USA, 1995; pp. 190–191.
85. J. Dearing, *Environmental Magnetic Susceptibility*, 2nd ed., Chi Publishing, Kenilworth, UK, 1994; pp. 40–41. Available online: [https://gmw.com/magnetic\\_properties/pdf/Om0409%20J\\_Dearing\\_Handbook\\_iss7.pdf](https://gmw.com/magnetic_properties/pdf/Om0409%20J_Dearing_Handbook_iss7.pdf) (accessed on 22 April 2019).
86. J. Dearing, *Environmental Magnetic Susceptibility: Using the Bartington MS2 System*, Chi Pub., 1994.
87. Cornell, R.M.; Schwertmann, U., *The Iron Oxides*, 2nd ed.; WILEY-VCH, Verlag, GmbH & Co: Weinheim, Germany, 2003.
88. Bohor, B.F., High-Temperature Phase Development in Illitic Clays, *Clays Clay Mineral.* 1963, 12, 233–246.
89. Galan, E.; Vivaldi, J. M.; Aguayo, F. L., *Mineralogy and Genesis of the Wealdian Sediments in the Southern Cordillera Iberica (Spain)*, *Clays Clay Mineral.* 1975, 23, 323–330.
90. Freestone, I.; Middleton, A., *Mineralogical applications of the analytical SEM in archaeology*, *Mineral. Mag.* 1987, 51, 21–31.
91. Dondi, M.; Guarini, G.; Raimondo, M., Trends in the formation of crystalline and amorphous phases during the firing of claybricks, *Tile Brick Int.* 1999, 15, 176–183.
92. Duminuco, P.; Messiga, B.; Riccardi, M.P., Firing process of natural clays. Some microtextures and related phase compositions, *Thermochim. Acta* 1998, 321, 185–190.
93. Cultrone, G.; Rodriguez-Navarro, C.; Sebastian, E.; Cazalla, O.; De la Torre, M.J., Carbonate and silicate phase reactions during ceramic firing, *Eur. J. Mineral.* 2001 13, 621–634.
94. González-García, F.; Romero-Acosta, V.; García-Ramos, G.; GonzálezRodríguez, M., Firing transformations of mixtures of clays containing illite, kaolinite and calcium carbonate used by Ornamental Tile Industries, *Appl. Clay Sci.* 1990, 5, 361–375.
95. Maggetti, M., Phase Analysis and its Significance for Technology and Origin, In *Archaeological Ceramics*; Olin, J.S., Franklin, A., Smithsonian, D., Eds.; Smithsonian Institution Press: Gaithersburg, MA, USA, 1982; pp. 121–133.
96. Bauluz, B.; Mayayo, M.J.; Yuster, A.; Fernandez-Nieto, C.; Gonzalez Lopez., TEM study of mineral transformations in fired carbonated clays: Relevance to brickmaking, *Clay Mineral.* 2004, 39, 333–344.
97. Zhu, Z.; Jiang, T.; Li, G.; Guo, Y.; Yang, Y., Thermodynamics of reactions among  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$  and  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  during roasting processes, Available online: <https://www.intechopen.com/books/thermodynamics-interaction-studies-solids-liquids-and-gases/thermodynamics-of-reactions-among-al2o3-cao-sio2-and-fe2o3-during-roasting-processes> (accessed on 29 August 2019).
98. Christine Rathosi, *Archaeological Ceramics of the NW Peloponnese: Petrographic, Mineralogical, Geochemical and Archaeometric Approach*, Department of Geology, University of Patras: Patra, Greece, 2005. Available online: [www.geology.upatras.gr/images/pdf/pro/petrografia/Rathossi\\_CV.pdf](http://www.geology.upatras.gr/images/pdf/pro/petrografia/Rathossi_CV.pdf) (accessed on 23 April 2019).
99. Maniatis, Y.; Simopoulos, A.; Kostikas, A., Effect of reducing atmosphere on minerals and iron oxides developed in fired clays: The role of Ca, *J. Am. Ceram. Soc.* 1983, 66, 773–781.
100. Stępkowska, E.T.; Jefferis, S.A., Influence of microstructure on firing colour of clays, *Appl. Clay Sci.* 1992, 6, 319–342.
101. Molera, J.; Pradell, T.; Vendrell-Saz, M., The colours of Ca-rich ceramic pastes: Origin and characterization, *Appl. Clay Sci.* 1998, 13, 187–202.
102. W.O'Reilly (1984), *Rock and mineral magnetism*, Blackie & Son, 132–171.
103. Shortland, A.J.; Freestone, I.C.; Rehren, T. (Eds.), *The Emergence of Ceramic Technology and its Evolution as Revealed with the use of Scientific Techniques*, *Advances in the study of Ancient Archaeology*; Oxbow Books: Oxford, UK, 2009. Available online: [https://www.researchgate.net/publication/228776265\\_The\\_Emergence\\_of\\_Ceramic\\_Technology\\_and\\_its\\_Evolution\\_as\\_Revealed\\_with\\_the\\_use\\_of\\_Scientific\\_Techniques](https://www.researchgate.net/publication/228776265_The_Emergence_of_Ceramic_Technology_and_its_Evolution_as_Revealed_with_the_use_of_Scientific_Techniques) . (accessed on 29-7-2019).
104. Atkinson, D.; King, J. A., Fine particle magnetic mineralogy of archaeological ceramics, *J. Phys. Conf. Ser.* 2005, 17, 145–149.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

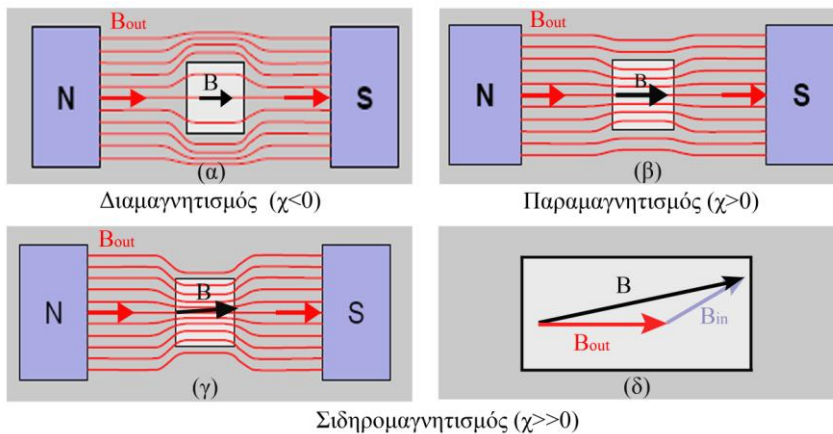
### ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

#### Εισαγωγή

Κάθε υλικό υπό την επίδραση εξωτερικού πεδίου  $\vec{B}_{out} = \mu_0 \cdot \vec{H} \left[ \frac{T \cdot m}{A} \cdot \frac{A}{m} = T \right]$ , αποκτά μαγνήτιση  $\vec{M} \left[ \frac{A}{m} \right]$  και εμφανίζει μεταβολή  $\vec{B}_{in} = \mu_0 \cdot \vec{M}$  στο εσωτερικό του πεδίο, σε σχέση με το εφαρμοζόμενο πεδίο\*  $\vec{H}$ .

Η μαγνήτιση όγκου  $\vec{M}_v = \frac{\vec{m}}{V} \left[ \frac{A \cdot m^2}{m^3} = \frac{A}{m} = \frac{J}{T \cdot m^3} \right]$  αποτελεί την επαγόμενη διπολική ροπή  $\vec{m}$  ανά κυβικό μέτρο. Το γινόμενο  $\vec{B}_{out} = \mu_0 \vec{H}$ , αντιστοιχεί στο μαγνητικό πεδίο  $\vec{H}$ , χωρίς την παρουσία ( $M=0$ ) του υλικού.

Η ολική ρευστότητα του μαγνητικού πεδίου εντός μιας εγκάρσιας τομής της μονάδας του υλικού, ως συνολικό αποτέλεσμα του εξωτερικού πεδίου  $\vec{B}_{out} = \mu_0 \vec{H}$  και του πεδίου  $\vec{B}_{in} = \mu_0 \vec{M}$  της μαγνήτισης του υλικού, υπολογίζεται από το διανυσματικό άθροισμα:  $\vec{B} = \vec{B}_{out} + \vec{B}_{in} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M})$  (A1)



**Σχήμα Α1** Απεικόνιση της μεταβολής των δυναμικών γραμμών του πεδίου, εκτός ( $\vec{B}_{out} = \mu_0 \cdot \vec{H}$ ) και εντός  $\vec{B} = \vec{B}_{out} + \vec{B}_{in} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M})$  των διαμαγνητικών, παραμαγνητικών και σιδηρομαγνητικών υλικών, που οφείλεται στο πεδίο της μαγνήτισης  $\vec{B}_{in} = \mu_0 \cdot \vec{M}$  του υλικού.

Οι ουσίες διακρίνονται αναλόγως της μαγνητικής συμπεριφοράς τους (**σχήμα Α1**) σε *διαμαγνητικές*, *παραμαγνητικές* και *σιδηρομαγνητικές*.

Σε καταστάσεις μη μαγνητικού κορεσμού, η σχέση του μαγνητικού πεδίου εντός ( $\vec{B}_{in}$ ) και εκτός ( $\vec{B}_{out}$ ) των διαμαγνητικών και των παραμαγνητικών υλικών είναι γραμμική, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\vec{B}_{in} = \chi \cdot \vec{B}_{out} \quad \text{ή} \quad \vec{M} = \chi \cdot \vec{H} \quad (A2)$$

Με την αντικατάσταση της τελευταίας σχέσης στην (A2) προκύπτει:

$$\vec{B} = (1 + \chi) \vec{B}_{out} \quad \text{ή} \quad \vec{B} = \mu_0 (\chi + 1) \cdot \vec{H} \quad (A3)$$

\* Αρκετοί συγγραφείς, κυρίως για ιστορικούς λόγους, συμβολίζουν με  $\vec{H}$  [A/m] το κύριο μαγνητικό πεδίο, ενώ το  $\vec{B}$  [T] αναφέρεται ως μαγνητική επαγωγή. Για πρακτικούς λόγους, ο συμβολισμός  $H$  έχει επικρατήσει για τα παραγόμενα πεδία από συνήθη «ελεύθερα» ρεύματα αγωγιμότητας, ενώ ο συμβολισμός  $B$  για τα μαγνητικά πεδία που οφείλονται στο άθροισμα «ελεύθερων» και «δέσμιων» ρευμάτων παραγόμενα από ενδογενείς μαγνητικές ατομικές ή μοριακές ροπές, που ισοδυναμούν με μικροσκοπικούς βρόχους ρεύματος. Επειδή είναι ασύνηθες να ονομάζεται το γήινο μαγνητικό πεδίο  $B$ , ως γήινη μαγνητική επαγωγή  $B$ , στη συνέχεια του κειμένου και όπου δεν υπάρχει σχετική επισήμανση, ο συμβολισμός  $B$  θα χρησιμοποιηθεί για το κύριο μαγνητικό πεδίο εντός της ύλης, ενώ το  $H$  για το συμβολισμό του μαγνητικού πεδίου στο κενό.

• Στα διαμαγνητικά υλικά (**σχήμα A1α**), όπου  $-10^{-4} < \chi < 0$ , το συνολικό εσωτερικό μαγνητικό πεδίο  $\vec{B} \approx \mu_0 \vec{H}$  ( $H \gg M$ ), είναι λίγο μικρότερο από το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο  $\vec{B}_{out}$ . Οι δυναμικές γραμμές του πεδίου  $\vec{B}$  εμφανίζουν μικρή αραίωση εντός των διαμαγνητικών υλικών, με αποτέλεσμα την ασθενή απώθησή τους από το εξωτερικό πεδίο.

• Στα παραμαγνητικά υλικά (**σχήμα A1β**), όπου  $10^{-6} < \chi < 10^{-2}$ , το συνολικό εσωτερικό μαγνητικό πεδίο  $\vec{B} \approx \mu_0 \vec{H}$  ( $H \gg M$ ), είναι λίγο μεγαλύτερο από το εξωτερικό πεδίο  $\vec{B}_{out}$ . Οι δυναμικές γραμμές του πεδίου  $\vec{B}$  εμφανίζουν μικρή πύκνωση εντός των παραμαγνητικών υλικών, με αποτέλεσμα την ασθενή έλξη τους από το εξωτερικό πεδίο.

• Στα σιδηρομαγνητικά υλικά (**σχήμα A1γ,δ**), όπου  $\chi > 10^{-2}$ , το συνολικό εσωτερικό μαγνητικό πεδίο  $\vec{B} \gg \mu_0 \vec{H}$  είναι αρκετά μεγαλύτερο από το εξωτερικό πεδίο  $\vec{B}_{out}$ . Οι δυναμικές γραμμές του πεδίου  $\vec{B}$  εμφανίζουν ισχυρή πύκνωση εντός των σιδηρομαγνητικών υλικών, με αποτέλεσμα την ισχυρή έλξη τους από το εξωτερικό πεδίο.

-Η σχέση μεταξύ της μαγνήτισης  $\vec{M}$  και του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου  $\vec{H}$  στα διαμαγνητικά και τα παραμαγνητικά υλικά, εκφράζεται από τον αδιάστατο λόγο  $\chi_v \equiv \chi = \frac{M}{H}$ , που χαρακτηρίζεται *μαγνητική επιδεκτικότητα όγκου* και αποτελεί τη συνολική μαγνητική ροπή ανά μονάδα όγκου:

$$M \equiv M_v = \chi \cdot H \quad [A \cdot m^2 / m^3] \quad (A4)$$

-Το πηλίκο  $\chi_m = \frac{\chi}{\rho} [m^3 / Kg]$  (A5α) αποτελεί τη *μαγνητική επιδεκτικότητα μάζας*, σε μονάδες αντίστροφης πυκνότητας  $\rho [Kg / m^3]$ . Με τη χρήση της σχέσης (A2), ορίζεται η μαγνήτιση  $\vec{M}_m$  ανά μονάδα μάζας, που αποτελεί τη συνολική επαγόμενη διπολική ροπή  $\vec{m} [A \cdot m^2]$  ανά κιλό υλικού:

$$\chi_m = \frac{M_m}{H} \Leftrightarrow M_m = \chi_m \cdot H \quad [ \frac{m^3}{kg} \cdot \frac{A}{m} = \frac{A \cdot m^2}{kg} ] \quad (A5\beta)$$

Το γινόμενο  $\chi_{mol} = g_{mol} \cdot \chi_m [ \frac{kg}{mol} \cdot \frac{m^3}{Kg} = m^3 / mol ]$  (A6α) αποτελεί τη *μοριακή μαγνητική επιδεκτικότητα*, που ορίζεται μέσω της γραμμομοριακής μάζας  $g_{mol} [Kg / mol]$ . Με τη χρήση της σχέσης (A2) ορίζεται η μαγνήτιση  $\vec{M}_{mol}$  ανά mol υλικού, που αποτελεί τη συνολική επαγόμενη διπολική ροπή  $\vec{m} [A \cdot m^2]$  ανά mol υλικού:

$$\chi_{mol} = \frac{M_{mol}}{H} \Leftrightarrow M_{mol} = \chi_{mol} \cdot H \quad [ \frac{m^3}{mol} \cdot \frac{A}{m} = \frac{A \cdot m^2}{mol} ] \quad (A6\beta)$$

Αν  $V_{mol} [m^3 / mol]$  ο γραμμομοριακός όγκος, οι μαγνητικές επιδεκτικότητες  $\chi, \chi_m$  και  $\chi_{mol}$  συνδέονται με τη σχέση:

$$\chi_{mol} = g_{mol} \cdot \chi_m = g_{mol} \cdot \frac{\chi}{\rho} = V_{mol} \cdot \chi \quad (A7\alpha)$$

Οι μαγνητίσεις  $M, M_m$  και  $M_{mol}$  συνδέονται με τη σχέση:

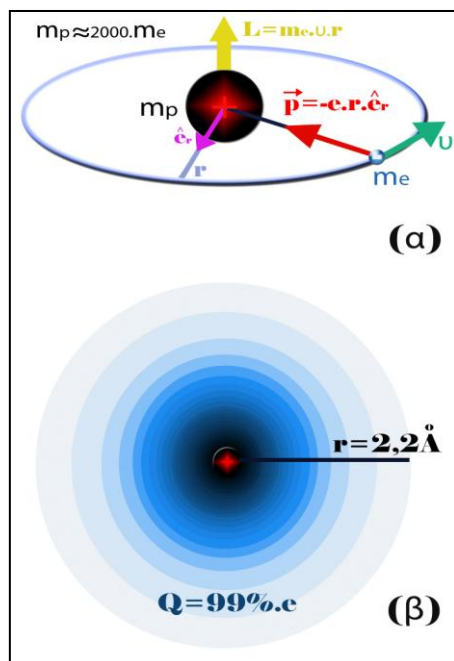
$$M_{mol} = g_{mol} \cdot M_m = g_{mol} \cdot \frac{M}{\rho} = V_{mol} \cdot M \quad (A7\beta)$$

Το γινόμενο  $\mu = \mu_0 \cdot (\chi + 1)$  (A8α) στη σχέση  $B = \mu_0 \cdot (\chi + 1) \cdot H = \mu \cdot H$  (A3), σε μονάδες  $[T \cdot m / A]$ , αποτελεί τη *μαγνητική διαπερατότητα* του υλικού. Το αδιάστατο πηλίκο  $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = \chi + 1$  (A8β) χαρακτηρίζεται *σχετική μαγνητική διαπερατότητα* του υλικού και η σχέση (A3) γράφεται:  $B = \mu_r \mu_0 \cdot H$

Η μαγνητική επιδεκτικότητα των σιδηρομαγνητικών υλικών δεν είναι βαθμωτή ποσότητα. Η μαγνήτιση  $\vec{M}$  μπορεί να έχει διαφορετική κατεύθυνση από εκείνη του εφαρμοζόμενου πεδίου  $\vec{H}$  (**σχήμα A1δ**) και η μαγνητική επιδεκτικότητα ορίζεται από τον τανυστή  $\chi_{ij} = \frac{M_i}{H_j}$  (A.9), που περιγράφει τη συμπεριφορά της  $i$ -συνιστώσας της μαγνήτισης  $\vec{M}$ , υπό την επίδραση της  $j$ -συνιστώσας του πεδίου  $\vec{H}$ .

Πειραματικά χρησιμοποιείται η σχέση  $\chi_f = \frac{dM}{dH}$  (A10) για κάθε κατεύθυνση μέτρησης, όπου η μετρούμενη μαγνητική επιδεκτικότητα  $\chi_f$  δεν είναι σταθερή, αλλά εξαρτάται τόσο από την τιμή της έντασης  $H$  όσο και από τη μηχανική, θερμική και μαγνητική προϊστορία του υλικού. Σε ισχυρά μαγνητικά υλικά, για τα οποία ισχύει  $M \gg H$ , η σχέση (A1) προσεγγίζεται:  $B \approx \mu_0 M$

➤ Η διαφορετική μαγνήτιση  $\vec{M}$  των υλικών εντός του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου  $\vec{H}$ , μπορεί να ερμηνευτεί ως μοναδικό αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης του μαγνητικού πεδίου μικροσκοπικών ρευματοφόρων βρόχων κατανεμημένων σε όλο το υλικό, με το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Η αλληλεπίδραση των ηλεκτρικών ρευμάτων εντός των ατόμων με μαγνητικά πεδία, διερευνάται χωρίς προχωρημένες έννοιες κβαντομηχανικής, βάσει της αρχικής κβαντικής θεωρίας του Bohr. Κατά το πλανητικό μοντέλο του Bohr (**σχήμα A2α**), οι επιτρεπόμενες τροχιές ακτίνας  $r$  των ηλεκτρονίων μάζας  $m_e$ , με ταχύτητα  $v_r$ , είναι εκείνες για τις οποίες το μέτρο της τροχιακής στροφορμής  $L_r = m_e \cdot v_r \cdot r = n \cdot \hbar$ , ( $n \in \mathbb{N}^*$ ) (A11) των ηλεκτρονίων είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της ποσότητας  $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ , όπου  $h = 6,6260755(40) \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ .



**Σχήμα A2. (α)** Άτομο του υδρογόνου στη θεμελιώδη στάθμη ( $n=1$ ), σύμφωνα με το πλανητικό μοντέλο της αρχικής κβαντικής θεωρίας του Bohr. Η μέση χρονική τιμή της συνεχώς μεταβαλλόμενης ηλεκτρικής διπολικής ροπής  $\vec{p} = -e \cdot \vec{r} \cdot \hat{e}_r$  πρέπει να είναι μηδενική, εφόσον δεν παρατηρείται παραγωγή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

**(β)** Σύμφωνα με τη σύγχρονη κβαντομηχανική θεώρηση, για διεργασίες που απαιτούν μεγαλύτερους χρόνους αλληλεπίδρασης από την περίοδο  $T \approx 10^{-17} \text{ s}$  περιστροφής του ηλεκτρονίου, κατά την οποία υπάρχει η δυνατότητα εντοπισμού του σε κάποια απόσταση από τον πυρήνα, το ηλεκτρικό φορτίο συμπεριφέρεται ως μια στατική κατανομή αρνητικού φορτίου, με εκθετικά μειούμενη πυκνότητα, όπου το 99% του φορτίου συγκεντρώνεται σε μια σφαίρα ακτίνας  $2,2 \cdot 10^{-10} \text{ m}$ , γύρω από τον πυρήνα.

Η κίνηση του πυρήνα είναι τόσο αργή, λόγω της μεγαλύτερης μάζας του συγκριτικά με την ταχύτητα των ηλεκτρονίων, ώστε να μπορούν να παραβλεφθούν<sup>1</sup> τα μαγνητικά του φαινόμενα. Επιπλέον, παρότι η κατεύθυνση της ακτινικής ηλεκτρικής διπολικής ροπής  $\vec{p} = -e.r.\vec{e}_r$  [C.m] ηλεκτρονίου-πρωτονίου μεταβάλλεται συνεχώς, η μέση χρονική τιμή της πρέπει να είναι μηδενική, εφόσον δεν παρατηρείται παραγωγή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Η απουσία μιας τέτοιας ακτινοβολίας στο πιο απλό άτομο του υδρογόνου αποτέλεσε ανεξήγητο παράδοξο της παλαιάς κβαντικής φυσικής.

Στη σύγχρονη κβαντομηχανική θεώρηση, η μέση κατανομή του ηλεκτρονιακού φορτίου ως προς το χρόνο, έχει τη μορφή ενός σφαιρικού νέφους (**σχήμα A2β**), που δεν περιστρέφεται, ούτε ταλαντώνεται και περιβάλλει τον πυρήνα με ομαλά ελαττούμενη πυκνότητα προς κάθε κατεύθυνση. Για διεργασίες που

απαιτούν μεγαλύτερους χρόνους αλληλεπίδρασης από την περίοδο περιστροφής  $T = \frac{v_e}{2\pi.a_0} \approx 10^{-17} \text{ s}$ , όπου

υπάρχει η δυνατότητα εντοπισμού του ηλεκτρονίου σε κάποια απόσταση γύρω από τον πυρήνα, το ηλεκτρονιακό φορτίο συμπεριφέρεται ως μια σφαιρική κατανομή αρνητικού φορτίου ακτίνας  $2,2 \cdot 10^{-10} \text{ m}$ , με εκθετικά μειούμενη πυκνότητα. Σύμφωνα με το παραπάνω μοντέλο για πιο πολύπλοκα άτομα, το μέγεθος του κεντρικού πυρήνα είναι πολύ μικρότερο του ηλεκτρονιακού νέφους, ώστε η συμπεριφορά του ως κεντρικό σημειακό φορτίο να έχει αμελητέα αλληλεπίδραση στην ηλεκτρονιακή δομή των ατόμων. Κατ' επέκταση, η ηλεκτρονιακή δομή των μορίων, πρέπει να απεικονιστεί ως ένα μοναδικό νέφος αρνητικού φορτίου με ομαλά μεταβαλλόμενη πυκνότητα γύρω από τα σημειακά φορτία των πυρήνων. Παρότι το σχήμα και η μεταβολή της πυκνότητας φορτίου διαφέρουν σε διαφορετικά μόρια, στις παρυφές του ηλεκτρονιακού νέφους, η πυκνότητα πρέπει να μειώνεται πάντα εκθετικά, έτσι ώστε να έχει νόημα η διάκριση του σχήματος και η δυνατότητα κατανομής του μοριακού φορτίου. Η κβαντομηχανική κατατάσσει τα άτομα σε *στάσιμες*, ανεξάρτητες από το χρόνο καταστάσεις που αντιστοιχούν στις χαμηλότερες θεμελιώδεις ενεργειακές στάθμες των ατόμων και σε *διεγερμένες*, χρονοεξαρτημένες καταστάσεις, στις οποίες τα άτομα ακτινοβολούν ηλεκτρομαγνητική ενέργεια, λόγω της ύπαρξης δονούμενων ηλεκτρικών φορτίων.

Ο *Pierre Curie* (1895) έκανε τις πρώτες συστηματικές μαγνητικές μετρήσεις [42], όπου διαπίστωσε ότι η μαγνητική επιδεκτικότητα μάζας  $\chi_m$  των διαμαγνητικών υλικών είναι ανεξάρτητη της θερμοκρασίας, ενώ μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα προς τη θερμοκρασία στις παραμαγνητικές ουσίες, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\chi_m = \frac{C}{T} \quad \text{όπου } C \text{ η σταθερά του Curie} \quad (\text{A12})$$

<sup>1</sup> Ο λόγος των μαζών πρωτονίου  $m_p = 1,6726231(10) \cdot 10^{-27} \text{ kg}$  και ηλεκτρονίου  $m_e = 9,1093897(54) \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ , είναι  $\frac{m_p}{m_e} = 1836,152701(37) \gg 2000$ . Η ταχύτητα  $v_e$  του ηλεκτρονίου, για την ακτίνα του Bohr  $r = a_0 = 5,29177249(24) \cdot 10^{-11} \text{ m}$ , στη θεμελιώδη στάθμη ( $n=1$ ) του ατόμου του υδρογόνου, υπολογίζεται από τη σχέση (A11):

$$v_e = \frac{h}{2\pi.m_e.a_0} = 1,3745670(66) \cdot 10^7 \text{ m/s} \approx 10^7 \text{ m/s}.$$

Όσον αφορά τις μαγνητικές ροπές, η ηλεκτρονιακή μαγνητόνη (του Bohr)  $\mu_e \equiv \mu_B = \frac{e.h}{4\pi.m_e} = 9,2740155(18) \cdot 10^{-24} \text{ J/T}$  είναι

επίσης  $\frac{\mu_B}{\mu_N} = \frac{m_p}{m_N} \approx 2000$  φορές μεγαλύτερη από την πυρηνική μαγνητόνη  $\mu_N = \frac{e.h}{4\pi.m_p} = 5,0507864(82) \cdot 10^{-27} \text{ J/T}$ , όπου

$e = 1,60217733(49) \cdot 10^{-19} \text{ C}$ .

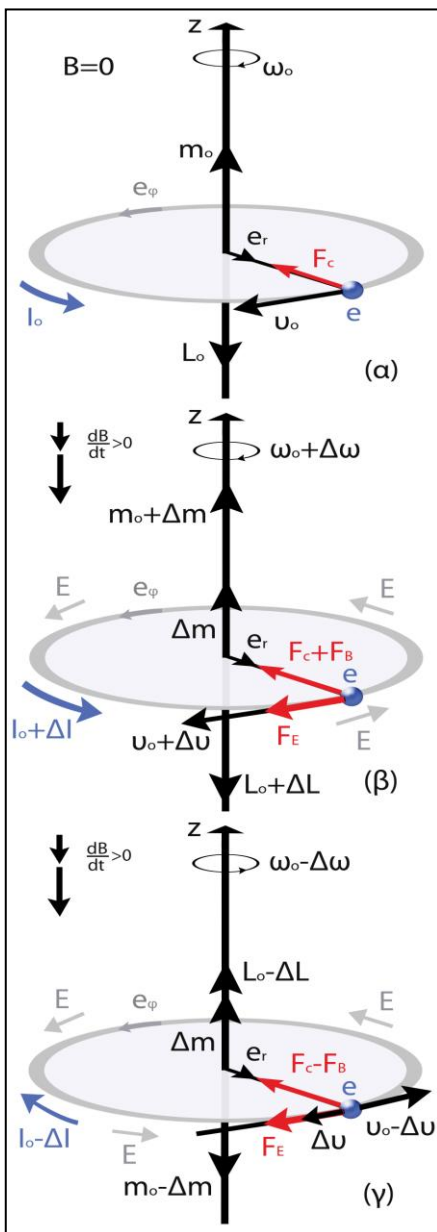
Οι τιμές των μονάδων ελήφθησαν από το «*The 1986 Adjustment of the Fundamental Physical Constants*».



Αργότερα (1905), ο *Langevin* [43] βασιζόμενος στις πειραματικές διαπιστώσεις του Curie, ανέπτυξε τη θεωρία του διαμαγνητισμού και του παραμαγνητισμού. Το κλασικό μοντέλο Langevin του παραμαγνητισμού, αποτέλεσε τη βάση για την εξέλιξη και την εξήγηση του σιδηρομαγνητισμού, σύμφωνα με την κβαντική θεωρία.

### A1. Διαμαγνητισμός

Ο διαμαγνητισμός ως μαγνητικό φαινόμενο κάθε ατόμου ή μορίου, αποδεικνύεται πως αποτελεί εγγενές χαρακτηριστικό των θεμελιωδών χρονοανεξάρτητων καταστάσεων της ατομικής δομής. Η πλειονότητα των οργανικών ενώσεων και πρακτικά όλες οι ανόργανες ενώσεις είναι διαμαγνητικές. Διαμαγνητικές χαρακτηρίζονται οι ουσίες που απωθούνται ασθενώς εντός μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου. Η αντίθετη μαγνητική συμπεριφορά παρατηρείται σε περιπτώσεις όπου ο διαμαγνητισμός επισκιάζεται από ισχυρότερες παραμαγνητικές ή σιδηρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις, που οδηγούν σε έλξη.



➤ Η μέση ταχύτητα των περιφερόμενων ηλεκτρονίων (σχήμα A3a), σε τροχιές μέσης ακτίνας  $r$ , υπό την επίδραση της κεντρομόλου δύναμης Coulomb  $F_o = \frac{m_e \cdot v_o^2}{r} = F_c = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_o \cdot r^2}$ , με περίοδο  $T_o = \frac{2\pi r}{v_o}$ , υπολογίζεται από τη σχέση:

$$v_o = \sqrt{\frac{e^2}{4\pi\epsilon_o \cdot m_e \cdot r}} \quad (A13)$$

Οι τροχιές των ηλεκτρονίων ισοδυναμούν με δακτυλίους ρεύματος, με ένταση:  $I_o = \frac{e}{T} = \frac{v_o \cdot e}{2\pi r}$  (A14)

Οι μαγνητικές διπολικές ροπές αντιθέτου φοράς προς τις τροχιακές στροφορμές  $L_o = m_e \cdot v_o \cdot r$  (A11) των ηλεκτρονίων,

υπολογίζονται από τη σχέση:  $m_o = \pi r^2 \cdot I_o = \frac{e \cdot v_o \cdot r}{2}$  (A15)

Η μέση τροχιακή στροφορμή συνδέεται με την αντιπαράλληλη μέση μαγνητική διπολική ροπή σύμφωνα με τη σχέση:

$$m_o = \frac{e}{2m_e} \cdot L_o \quad (A.16)$$

Το πηλίκο  $\frac{m}{L} = \frac{e}{2m_e} = \gamma$ , αποτελεί βασικό γνώρισμα του ατομικού

μαγνητισμού και χαρακτηρίζεται γυρομαγνητικός λόγος του ηλεκτρονίου.

**Σχήμα A3.** Ο διαμαγνητισμός αποτελεί εγγενές παράγωγο της τροχιακής μαγνητικής διπολικής ροπής των ηλεκτρονίων (α) και οφείλεται στην επαγόμενη μεταβολή της μαγνητικής ροπής (β,γ), σε κατεύθυνση αντίθετη προς τη μεταβολή του εφαρμοζόμενου πεδίου.

Όπως η τροχιακή στροφορμή, έτσι και η μαγνητική διπολική ροπή, αποτελεί σταθερά της κίνησης σε μέτρο και κατεύθυνση, όχι μόνο για κυκλικές ή ελλειπτικές τροχιές, αλλά και για τροχιές τύπου ροζέτας, που δεν ακολουθούν το νόμο του αντίστροφου τετραγώνου.

Το δεξιόστροφα περιφερόμενο ηλεκτρόνιο (**σχήμα A3α**), σε τροχιά ακτίνας  $r$ , με ταχύτητα  $\vec{v}_0 = v_0 \cdot \hat{e}_\phi$ , ισοδυναμεί με δακτύλιο δεξιόστροφου ρεύματος, έντασης  $I_0 = \frac{v_0 \cdot e}{2\pi r}$  (A14), με μαγνητική διπολική

ροπή  $\vec{m}_0 = \pi r^2 \cdot I_0 \cdot \hat{z} = \frac{e \cdot v_0 \cdot r}{2} \cdot \hat{z}$ . Όταν δεν υπάρχει μαγνητικό πεδίο, το ρόλο της κεντρομόλου δύναμης

$\vec{F}_0 = -\frac{m_e \cdot v_0^2}{r} \cdot \hat{e}_r = -m_e \cdot \omega_0^2 \cdot r \cdot \hat{e}_r$  έχει η έλξη Coulomb  $\vec{F}_c = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \cdot r^2} \cdot \hat{e}_r$  και η κυκλική συχνότητα  $\omega_0$  υπολογίζεται

$$\text{από τη σχέση: } m_e \cdot \omega_0^2 \cdot r = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \cdot r^2} \Leftrightarrow \omega_0 = \sqrt{\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \cdot m_e \cdot r^3}} \quad (\text{A17})$$

Η εφαρμογή χρονομεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου  $\frac{dB}{dt} > 0$ , καθέτως προς το επίπεδο περιφοράς του ηλεκτρονίου (**σχήμα A3β**), έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία αριστερόστροφου ηλεκτρικού πεδίου

$$\vec{E} = E \cdot \hat{e}_\phi, \text{ που υπολογίζεται από τη σχέση: } \oint_{C=2\pi r} \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_{S=\pi r^2} \vec{B} \cdot d\vec{s} \Leftrightarrow \vec{E} = \frac{r}{2} \cdot \frac{dB}{dt} \cdot \hat{e}_\phi \quad (\text{A18})$$

Η αναπτυσσόμενη δύναμη  $\vec{F}_E = -e \cdot \vec{E} = -e \cdot E \cdot \hat{e}_\phi$  του ηλεκτρικού πεδίου  $\vec{E}$ , προκαλεί την αύξηση της ταχύτητας του ηλεκτρονίου κατά  $\Delta v$ , που υπολογίζεται από τον 2<sup>ο</sup> νόμο του Νεύτωνα, σύμφωνα με την προηγούμενη σχέση:

$$F_E = m_e \cdot \frac{dv}{dt} = e \cdot E = \frac{e \cdot r}{2} \cdot \frac{dB}{dt} \Leftrightarrow dv = \frac{e \cdot r}{2m_e} \cdot dB \quad (\text{A19})$$

Η απαλοιφή του χρόνου στην τελευταία σχέση αποτελεί την έκφραση της ανεξαρτησίας της τελικής ταχύτητας του ηλεκτρονίου από το χρονικό ρυθμό μεταβολής  $\frac{dB}{dt}$  του εφαρμοζόμενου πεδίου. Η αύξηση του μαγνητικού πεδίου κατά  $\Delta B = B - B_0$ , σε οποιονδήποτε χρόνο  $\Delta t$ , έχει ως αποτέλεσμα τη αύξηση της ταχύτητας του ηλεκτρονίου κατά  $\Delta v$ , που προσδιορίζεται από την τελευταία σχέση:

$$\int_{B_0}^{B_0 + \Delta B} dB = \frac{2m_e}{e \cdot r} \cdot \int_{v_0}^{v_0 + \Delta v} dv \Leftrightarrow \Delta B = \frac{2m_e \cdot \Delta v}{e \cdot r} \Leftrightarrow \Delta v = \frac{\Delta B \cdot e \cdot r}{2m_e} \quad (\text{A20})$$

Η σταθερότητα της ακτίνας περιστροφής  $r$ , στον υπολογισμό του παραπάνω ορισμένου ολοκληρώματος ή η παραμονή του ηλεκτρονίου στην ίδια ενεργειακή στάθμη υπό την επίδραση οποιουδήποτε μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου, προϋποθέτει πρόσθετη κεντρομόλο δύναμη στην έλξη Coulomb του πυρήνα. Το μέτρο της κεντρομόλου δύναμης  $\vec{F} = \vec{F}_c + \Delta \vec{F}$  μετά την αύξηση της ταχύτητας  $v_0 + \Delta v = v = \omega \cdot r$  και της γωνιακής συχνότητας  $\omega_0 + \Delta \omega = \omega$  του ηλεκτρονίου, από τη μεταβολή  $\Delta B$  του

$$\text{μαγνητικού πεδίου, υπολογίζεται: } F = \frac{m_e \cdot (v_0 + \Delta v)^2}{r} = \frac{m_e \cdot v_0^2}{r} + \frac{m_e \cdot (\Delta v)^2}{r} + \frac{2m_e \cdot v_0 \cdot \Delta v}{r} \quad (\text{A21})$$

Αν  $\Delta B \approx 0$ , έτσι ώστε  $\Delta v \ll v_0$ , τότε  $(\Delta v)^2 \approx 0$ . Με προσέγγιση πρώτης τάξεως ως προς  $\frac{\Delta v}{v_0}$ , η προηγούμενη σχέση γράφεται:

$$F = F_c + \frac{2m_e \cdot v_0 \cdot \Delta v}{r} = F_c + \Delta F \quad (\text{A22})$$

Η απαιτούμενη αύξηση  $\Delta F$  στην κεντρομόλο δύναμη  $\vec{F}_c = -F \cdot \hat{e}_r$ , ώστε να διατηρηθεί η ακτίνα περιστροφής  $r$  σταθερή, οφείλεται στο ίδιο το μαγνητικό πεδίο  $\vec{B}$ , που ασκεί μαγνητική ακτινική δύναμη:

$$\vec{F}_B = -e \cdot (\vec{v}_0 + \Delta \vec{v}) \times \vec{B} = -e \cdot (v_0 + \Delta v) \cdot B \cdot (-\hat{z}) = -e \cdot (v_0 + \Delta v) \cdot B \cdot \hat{e}_r \quad (\text{A23})$$

Με αντικατάσταση της (A20) στην προηγούμενη σχέση, η δύναμη  $F_B$  υπολογίζεται:

$$F_B = e \cdot (v_0 + \Delta v) \cdot \frac{2m_e \cdot \Delta v}{e \cdot r} = \frac{2m_e \cdot v_0 \cdot \Delta v}{r} + \frac{2m_e \cdot (\Delta v)^2}{r} \stackrel{(\Delta v)^2 \rightarrow 0}{\approx} \frac{2m_e \cdot v_0 \cdot \Delta v}{r} = \Delta F \quad (A24)$$

Η έλξη Coulomb στο ρόλο της κεντρομόλου δύναμης, δε συνέβαλε στην απόδειξη της διατήρησης της ακτίνας περιστροφής κατά τη μεταβολή του μαγνητικού πεδίου. Επομένως το συμπέρασμα μπορεί να γενικευτεί για κάθε είδος κεντρομόλου δύναμης, όπως για την ασκούμενη ενεργό δύναμη σε ηλεκτρόνια βαρύτερων ατόμων, που έχει διαφορετική εξάρτηση από την ακτίνα περιστροφής.

Στην τελική κατάσταση, η κεντρομόλος δύναμη  $F = \frac{m_e \cdot v^2}{r_0} = m_e \cdot \omega^2 \cdot r_0$  αποτελεί το άθροισμα της έλξης

Coulomb του πυρήνα  $F_c = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \cdot r^2} = m_e \cdot \omega_0^2 \cdot r_0$  και της δύναμης  $F_B = e \cdot v \cdot B = e \cdot \omega \cdot r_0 \cdot B$  του μαγνητικού πεδίου  $\vec{B}$ ,

σύμφωνα με τη σχέση:

$$m_e \cdot \omega^2 \cdot r_0 = m_e \cdot \omega_0^2 \cdot r_0 + e \cdot \omega \cdot r_0 \cdot B \Leftrightarrow \omega^2 - \frac{e \cdot B}{m_e} \cdot \omega - \omega_0^2 = 0 \quad (A25)$$

Η αποδεκτή λύση της παραπάνω δευτεροβάθμιας εξίσωσης ως προς  $\omega$  είναι:

$$\omega = \frac{eB}{2m_e} + \sqrt{\left(\frac{eB}{2m_e}\right)^2 + \omega_0^2} \quad (A26)$$

Όταν το μαγνητικό πεδίο είναι αρκετά μικρό, ώστε η αλλαγή στη συχνότητα να είναι επίσης μικρή και η

τελευταία σχέση γράφεται:  $\omega \stackrel{(\frac{eB}{2m_e})^2 \rightarrow 0}{\approx} \omega_0 + \frac{eB}{2m_e} \quad (A27)$

Η συχνότητα μεταβάλλεται κατά την ποσότητα  $\Delta\omega$  που χαρακτηρίζεται ως συχνότητα του *Larmor*:

$$\Delta\omega = \omega_L = \frac{eB}{2m_e} \quad (A28)$$

Με αντικατάσταση της προηγούμενης σχέσης στην (A14) υπολογίζεται η αντίστοιχη μεταβολή του

ρεύματος:  $\Delta I = \frac{\Delta v \cdot e}{2\pi \cdot r} = \frac{\Delta\omega \cdot r \cdot e}{2\pi \cdot r} = \frac{e}{2\pi} \cdot \Delta\omega = \frac{e^2 \cdot r^2}{4m_e} \cdot B \quad (A29)$

Η μεταβολή της μαγνητικής διπολικής ροπής  $\Delta\vec{m}$  που προκαλείται από τη δημιουργία αριστερόστροφου επαγωγικού ρεύματος στο δακτύλιο, υπολογίζεται από την προηγούμενη σχέση:

$$\Delta\vec{m} = \Delta I \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \hat{z} = \frac{e^2 \cdot r^2}{4m_e} \cdot B \cdot \hat{z} \quad (A30)$$

Αν το ηλεκτρόνιο περιστρέφονταν δεξιόστροφα (**σχήμα A3γ**), τότε η μεταβολή του ίδιου μαγνητικού πεδίου θα προκαλούσε τη μείωση της ταχύτητάς του και η αρχική διπολική ροπή του  $\vec{m}_0 = -m_0 \cdot \hat{z}$ , θα μειώνονταν κατά την ίδια ποσότητα.

Επομένως σε κάθε περίπτωση η επαγόμενη μεταβολή της μαγνητικής διπολικής ροπής είναι αντίθετη προς τη μεταβολή του μαγνητικού πεδίου και προκαλεί την άπωση των διαμαγνητικών υλικών από το εφαρμοζόμενο πεδίο.

➤ Σε πολυηλεκτρονιακά άτομα, με ατομικό αριθμό  $Z$ , η κίνηση των ηλεκτρονίων γύρω από τον  $z$ -

άξονα, ισοδυναμεί με ρεύμα (A14):  $I = -\frac{Z \cdot e}{T} = -\frac{Z \cdot e}{2\pi} \cdot \omega_0 \quad (A31)$

Οι μικρές μεταβολές του μαγνητικού πεδίου  $\Delta B = B \approx \mu_o \cdot H$  προκαλούν την αλλαγή της συχνότητας  $\Delta\omega = \frac{e \cdot B}{2m_e}$  (A28) και τη δημιουργία πρόσθετου ρεύματος  $\Delta I$  που υπολογίζεται με αντικατάσταση της (A28)

στη σχέση (A31):  $\Delta I = -\frac{Z \cdot e}{2\pi} \cdot \Delta\omega = -\frac{Z \cdot e^2}{4\pi \cdot m_e} \cdot B$  (A32)

Η μαγνητική διπολική ροπή κάθε ηλεκτρονίου σε απόσταση  $\xi$  από τον πυρήνα, υπολογίζεται από προηγούμενη σχέση:  $m_e = \Delta I \cdot \pi \xi^2 = -\frac{Z \cdot e^2 \cdot \xi^2}{4 \cdot m_e} \cdot B$  (A33)

Αν η κατανομή του φορτίου είναι σφαιρικά συμμετρική, τότε  $\langle x^2 \rangle = \langle y^2 \rangle = \langle z^2 \rangle = \frac{1}{3} \cdot \langle \xi^2 \rangle$ , όπου  $\langle \xi^2 \rangle$  η μέση τετραγωνική απόσταση των ηλεκτρονίων από τον πυρήνα. Για τις τροχιές των ηλεκτρονίων που είναι κάθετες στο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, ισχύει:  $\langle \xi^2 \rangle = \langle x^2 \rangle + \langle y^2 \rangle = \frac{2}{3} \cdot \langle r^2 \rangle$  (A34)

Η μέση μαγνητική διπολική ροπή κάθε ατόμου  $\langle m_a \rangle$ , υπολογίζεται με αντικατάσταση της προηγούμενης σχέσης στην (A33):  $\langle m_a \rangle = -\frac{Z \cdot e^2 \cdot \langle r^2 \rangle}{6 \cdot m_e} \cdot B$  (A35)

Η συνολική μέση  $\langle M \rangle$  μαγνήτιση  $n_a \cdot (m^{-3})$  αριθμού ατόμων, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\langle M \rangle = n_a \cdot \langle m_a \rangle \quad (A36)$$

Η μαγνητική επιδεκτικότητα όγκου<sup>2</sup> του υλικού υπολογίζεται με αντικατάσταση των παραπάνω σχέσεων (A35, A36) στη σχέση (A4):

$$\chi = \frac{\langle M \rangle}{H} = \frac{\mu_o \cdot \langle M \rangle}{B} = \frac{\mu_o \cdot n_a}{B} \cdot \langle m_a \rangle = -\frac{\mu_o \cdot n_a \cdot Z \cdot e^2 \cdot \langle r^2 \rangle}{6 \cdot m_e} \quad (A37)$$

Παρότι η μαγνητική διπολική ροπή του υψηλού αριθμού των ηλεκτρονίων θα μπορούσε να προσδώσει στην ύλη ισχυρές μαγνητικές ιδιότητες, στην πραγματικότητα δε συμβαίνει αυτό, γιατί δεν υπάρχει κάποιο φυσικό αίτιο που να υποχρεώνει όλες τις τροχιακές διπολικές ροπές των ηλεκτρονίων να προσανατολίζονται στην ίδια κατεύθυνση, ούτε και να περιφέρονται κατά την ίδια φορά. Παρότι το μαγνητικό πεδίο αποτελεί εγγενές παράγωγο της τροχιακής κίνησης των ηλεκτρονίων, η ύπαρξή του δε γίνεται αισθητή στην ύλη, λόγω της αλληλεξουδετέρωσης, που οφείλεται στον τυχαίο προσανατολισμό των αξόνων περιφοράς ή στις διαφορετικές φορές περιστροφής των ηλεκτρονίων γύρω από κάθε άξονα.

Η χαρακτηριστική τιμή  $\chi = 10^{-6}$  της μαγνητικής διαπερατότητας για τα διαμαγνητικά υλικά, προκύπτει από την τελευταία σχέση, για  $n_a \approx 10^{28}$  άτομα/ $\mu^3$ ,  $Z=1$ ,  $\langle r^2 \rangle \approx 10^{-20}$  m και  $m_e \approx 9 \cdot 10^{-31}$  kg.

<sup>2</sup> Οι τιμές της διαμαγνητικής επιδεκτικότητας διαφόρων υλικών είναι αναρτημένες στις ιστοσελίδες <http://en.wikipedia.org/wiki/Diamagnetism> και [http://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic\\_susceptibility](http://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_susceptibility).

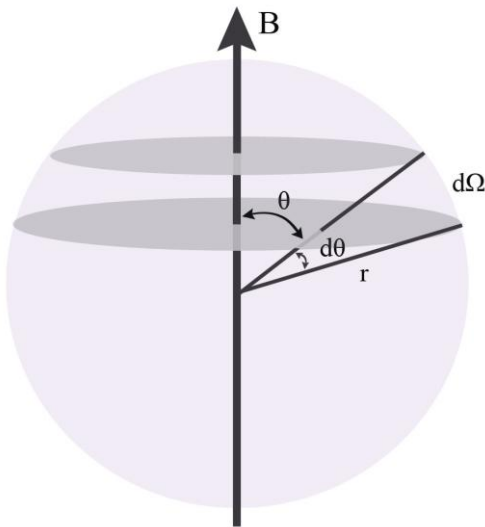
## A2. Παραμαγνητισμός

Παραμαγνητικές χαρακτηρίζονται οι ουσίες που έλκονται προς την περιοχή του ισχυρότερου μαγνητικού πεδίου. Παραμαγνητικά υλικά είναι όλα τα άτομα, ιόντα ή μόρια με περιττό αριθμό ηλεκτρονίων, που εμφανίζουν μη μηδενική συνολική ιδιοστροφορμή. Η ένταση των παραμαγνητικών φαινομένων ενδέχεται να είναι ασθενής στα επίπεδα του κοινού διαμαγνητισμού σε κάποια υλικά και πολύ ισχυρότερη σε κάποια άλλα. Σε όλα τα υλικά η ένταση των παραμαγνητικών φαινομένων αυξάνεται με την ελάττωση της θερμοκρασίας και οδηγεί σε σχετικά έντονα φαινόμενα σε θερμοκρασίες κοντά στο απόλυτο μηδέν.

### A2.1 Κλασική προσέγγιση του παραμαγνητισμού

Σύμφωνα με το κλασικό μοντέλο του Langevin, τα παραμαγνητικά υλικά θεωρούνται ως μαγνητικά ρευστά, αποτελούμενα από μη αλληλεπιδρώντα άτομα, ιόντα ή μόρια, που εμφανίζουν μη μηδενική μαγνητική ροπή σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας. Απουσίας μαγνητικού πεδίου οι μαγνητικές ροπές διατηρούν τυχαίες διευθύνσεις, με αποτέλεσμα η συνισταμένη ροπή να είναι μηδενική.

Υπό την επίδραση του πεδίου οι μαγνητικές ροπές των ατόμων, τείνουν να ευθυγραμμιστούν στη διεύθυνση του πεδίου, σε ανταγωνισμό με τον αποπροσανατολισμό της χαοτικής θερμικής κίνησης που εξαρτάται από τη θερμοκρασία του υλικού. Όλες οι γωνίες μεταξύ των μαγνητικών ροπών των μονήρων ηλεκτρονίων και του εξωτερικού πεδίου είναι εφικτές, σύμφωνα με το κλασικό πρότυπο του Langevin. Για τη μαθηματική επεξεργασία του προβλήματος, ο Langevin είναι ο πρώτος που χρησιμοποίησε για την ενεργειακή περιγραφή των δίπολων, την στατιστική κατανομή του Boltzmann.



Σε κάθε άτομο ενός παραμαγνητικού υλικού με μαγνητική ροπή  $\vec{m}_a$ , υπό γωνία  $\hat{\theta}$  με τη διεύθυνση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου  $\vec{B} \approx \mu_0 \cdot \vec{H}$ , δέχεται ένα ζεύγος δυνάμεων  $\vec{N} = \mu_0 \cdot \vec{m}_a \times \vec{H}$ , με μέτρο:

$$N = \mu_0 \cdot m_a \cdot H \cdot \eta \mu \theta \quad (\text{A38})$$

Η τυχαία κατανομή των δίπολων (σχήμα A4), επιβάλλει την παραδοχή σφαιρικής συμμετρίας.

**Σχήμα A4.** Απεικόνιση του τρόπου υπολογισμού της μέσης μαγνητικής ροπής μη αλληλεπιδρώντων ηλεκτρονίων παραμαγνητικού υλικού, σύμφωνα με τη θεωρία Langevin-Boltzmann.

Η δυναμική ενέργεια κάθε ατόμου, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\int_{E_m=0}^{E_m} E \cdot dE = - \int_{\theta=\pi/2}^{\theta} \mu_0 \cdot m_a \cdot H \cdot \eta \mu \theta \cdot d\theta \Leftrightarrow E_m = -\mu_0 \cdot m_a \cdot H \cdot \cos \theta \quad (\text{A39})$$

Αν  $n_0$  ο συνολικός αριθμός των ατόμων, τότε στο διάστημα μεταξύ των γωνιών  $\theta$  και  $\theta+d\theta$  που ορίζει τη στερεά γωνία  $d\Omega$ , υπάρχουν  $n(\theta) \cdot d\theta$  μαγνητικές ροπές, που υπολογίζονται σύμφωνα με την κατανομή

Boltzmann από τη σχέση:  $n(\theta) \cdot d\theta = n_0 \cdot e^{-\frac{E}{k_B T}} \cdot d\Omega$ , όπου  $n_0 = \int_{\theta=0}^{\theta=\pi} n(\theta) \cdot d\theta$  (A40)

Επειδή  $d\Omega = ds/r^2 = 2\pi \cdot \eta \mu \theta \cdot d\theta$ , η προηγούμενη σχέση γράφεται:  $n(\theta) \cdot d\theta = n_o \cdot e^{-\frac{E}{k_B T}} \cdot 2\pi \cdot \eta \mu \theta \cdot d\theta$  (A41)

Το άθροισμα των συνιστωσών των ροπών που είναι παράλληλες στο  $\vec{B}$ , αποτελεί τη στοιχειώδη ροπή

$dm_a = (m_a \cdot \sin\theta) \cdot n(\theta) d\theta \stackrel{(A40)}{=} m_a \cdot \sin\theta \cdot n_o \cdot e^{-\frac{E}{k_B T}} \cdot 2\pi \cdot \eta \mu \theta \cdot d\theta$ , ενώ η συνολική ροπή  $m_{ολ.}$  για το χώρο  $d\Omega$  ορίζεται

από τη σχέση:  $m_{ολ.} = \int_{\theta=0}^{\theta=\pi} m_a \cdot \sin\theta \cdot n_o \cdot e^{-\frac{E}{k_B T}} \cdot 2\pi \cdot \eta \mu \theta \cdot d\theta$  (A42)

Η μέση ροπή  $\langle m_a \rangle$  κάθε ατόμου, υπολογίζεται μέσω των σχέσεων (A40, A42), για  $E = E_m = -m_a \cdot \mu_o \cdot H \cdot \sin\theta$  (A39), από το πηλίκο:

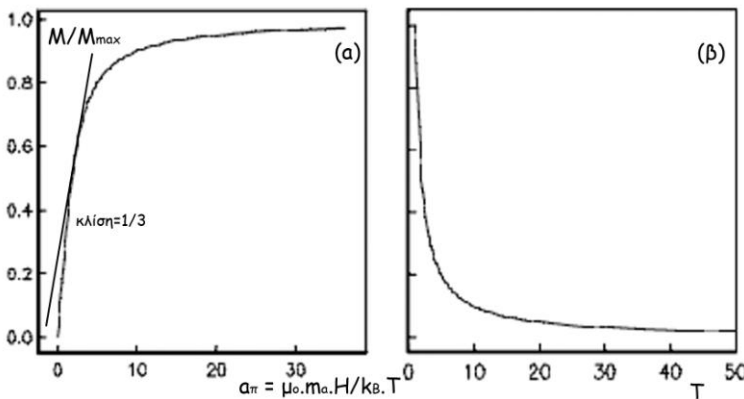
$$\begin{aligned} \langle m_a \rangle &= \frac{m_{ολ.}}{n_o} = \frac{\int_{\theta=0}^{\theta=\pi} m_a \cdot \sin\theta \cdot n_o \cdot e^{-\frac{E_m}{k_B T}} \cdot 2\pi \cdot \eta \mu \theta \cdot d\theta}{\int_{\theta=0}^{\theta=\pi} n(\theta) \cdot d\theta} = m_a \cdot \frac{\int_{\theta=0}^{\theta=\pi} e^{\frac{\mu_o \cdot m_a \cdot H \cdot \sin\theta}{k_B T}} \cdot \sin\theta \cdot \eta \mu \theta \cdot d\theta}{\int_{\theta=0}^{\theta=\pi} e^{\frac{\mu_o \cdot m_a \cdot H \cdot \sin\theta}{k_B T}} \cdot \eta \mu \theta \cdot d\theta} \\ &= m_a \cdot \frac{\int_{x=-1}^{x=1} e^{a_\pi x} \cdot x \cdot dx}{\int_{x=-1}^{x=1} e^{a_\pi x} \cdot dx} = m_a \cdot \left( \frac{e^{a_\pi} + e^{-a_\pi}}{e^{a_\pi} - e^{-a_\pi}} - \frac{1}{a_\pi} \right) = m_a \cdot \left( \coth a_\pi - \frac{1}{a_\pi} \right) = m_a \cdot L(a_\pi) \end{aligned}$$

Η τελευταία σχέση περιγράφει σύμφωνα με τη θεωρία του Langevin τη μαγνητική συμπεριφορά των ηλεκτρονιακών ροπών, συναρτήσει του πεδίου B και της απόλυτης θερμοκρασίας T:

$$L(a_\pi) = m_a \cdot \left( \coth a_\pi - \frac{1}{a_\pi} \right) \quad (A43\alpha), \quad \text{όπου } a_\pi = \frac{\mu_o \cdot m_a \cdot H}{k_B \cdot T} \quad (A43\beta)$$

Αν το υλικό έχει όγκο V και περιέχει  $n = n_o/V$  (m<sup>-3</sup>) άτομα, η μαγνήτιση υπολογίζεται από τη σχέση:

$$M = n \cdot \langle m_a \rangle = n \cdot m_a \cdot \left( \coth \frac{\mu_o \cdot m_a \cdot H}{k_B \cdot T} - \frac{k_B \cdot T}{\mu_o \cdot m_a \cdot H} \right) = M_{\max} \cdot \left( \coth \frac{\mu_o \cdot m_a \cdot H}{k_B \cdot T} - \frac{k_B \cdot T}{\mu_o \cdot m_a \cdot H} \right) \quad (A44)$$



**Διάγραμμα Α1. (α)** Γραφική παράσταση του λόγου  $M/M_{\max}$  της παραμαγνήτισης, σύμφωνα με τη συνάρτηση  $L(a_\pi)$  του Langevin. **(β)** Γραφική παράσταση του λόγου  $M/M_{\max}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας T.

Σύμφωνα με την τελευταία σχέση, που παριστάνεται γραφικά στο **διάγραμμα Α1** ισχύει:



- Στο όριο υψηλής θερμοκρασίας, όταν  $T \gg \frac{\mu_o \cdot m_a \cdot H}{k_B}$ , τότε η  $L(\alpha_\pi)$  μέσω της σειράς Taylor για

$$\alpha_\pi \rightarrow 0 \text{ προσεγγίζεται από τη σχέση: } L(\alpha_\pi) \approx \frac{1}{3} \alpha_\pi, \text{ όπου } \alpha_\pi = \frac{\mu_o \cdot m_a \cdot H}{k_B \cdot T} \quad (A45)$$

Με αντικατάσταση της προηγούμενης σχέσης στην (A44), η μαγνήτιση υπολογίζεται:

$$M \approx M_{\max} \cdot \frac{1}{3} \cdot \alpha_\pi = n \cdot m_a \cdot \frac{1}{3} \cdot \alpha_\pi = n \cdot \frac{\mu_o \cdot m_a^2 \cdot H}{3 k_B \cdot T} \quad (A46)$$

Επομένως η εξάρτηση της μαγνήτισης  $M$  με την παράμετρο  $\alpha_\pi$  είναι γραμμική, όταν η θερμική ενέργεια  $k_B \cdot T$  είναι πολύ μεγαλύτερη από τη μαγνητική  $\mu_o \cdot m_a \cdot H$ , με κλίση  $\sim \frac{1}{3}$ . Η μαγνητική επιδεκτικότητα

$$\text{όγκου (A4) από την παραπάνω σχέση (A46) υπολογίζεται: } \chi = \frac{M}{H} = \frac{n \cdot \mu_o \cdot m_a^2}{3 k_B} \cdot \frac{1}{T} \quad (A47)$$

$$\text{Η μαγνητική επιδεκτικότητα μάζας υπολογίζεται από τη σχέση (A5α): } \chi_m = \frac{\chi}{\rho} = \frac{n \cdot \mu_o \cdot m_a^2}{3 k_B \cdot \rho} \cdot \frac{1}{T} \quad (A48)$$

Ο συντελεστής του  $\frac{1}{T}$  της τελευταίας σχέσης, αποτελεί έκφραση της σταθεράς στη σχέση (A12) του Curie.

- Όταν  $H \rightarrow 0$ , τότε  $M \rightarrow 0$ . Επομένως δεν υπάρχει αυτογενής μαγνητική πόλωση.

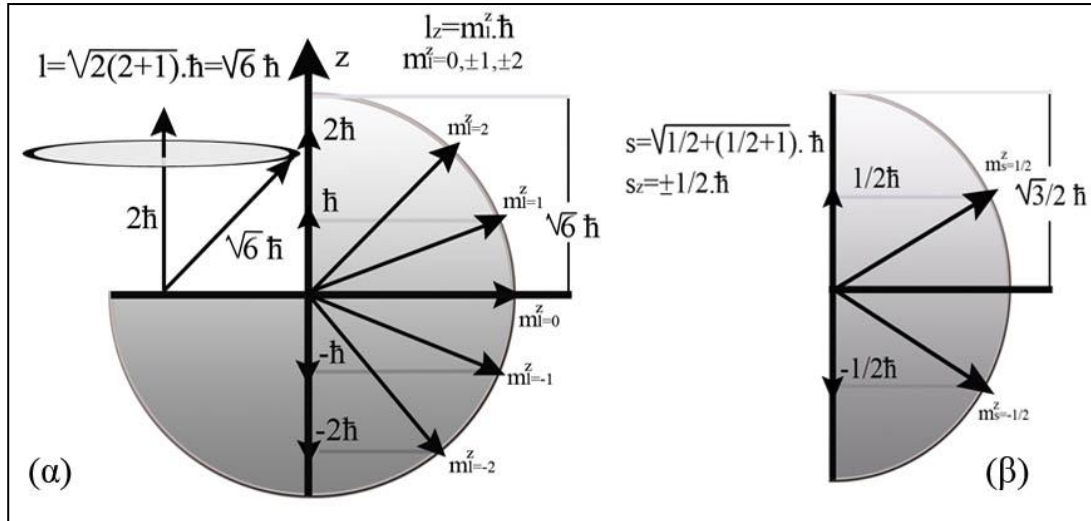
- Στο όριο υψηλού πεδίου, όταν  $H \gg \frac{k_B \cdot T}{\mu_o \cdot m_a}$ , τότε  $L(\alpha_\pi) \approx 1$  και  $M = M_{\max} = n \cdot m_a$ . Η μαγνήτιση  $M$

λαμβάνει ποσοστό 90% της μέγιστης μαγνήτισης  $M_{\max}$ , όταν η ποσότητα  $\mu_o \cdot m_a \cdot H$  είναι 10-20 φορές μεγαλύτερη του  $k_B \cdot T$ .

### A2.2 Κβαντική προσέγγιση του παραμαγνητισμού

Ενώ κατά το κλασικό μοντέλο Langevin, όλες οι γωνίες μεταξύ των μαγνητικών ροπών των μονήρων ηλεκτρονίων και του μαγνητικού πεδίου είναι εφικτές, κατά την κβαντική θεώρηση μόνο συγκεκριμένες γωνίες είναι επιτρεπτές.

Η μαγνητική ροπή ενός ηλεκτρονίου, είναι αποτέλεσμα της ιδιοστροφορμής  $\vec{s}$  και της τροχιακής στροφορμής  $\vec{l}$ .



**Σχήμα A5.** (α) Σχηματική απεικόνιση των 5 δυνατών προσανατολισμών  $l_z$  της τροχιακής στροφορμής  $l = \sqrt{6} \cdot \hbar$  του ηλεκτρονίου, για  $l=2$  και  $m_l^z = 0, \pm 1, \pm 2$ . (β) Απεικόνιση των 2 δυνατών προσανατολισμών  $s_z$  της ιδιοστροφορμής (spin)  $s = \sqrt{3}/2 \cdot \hbar$  του ηλεκτρονίου για  $s = 1/2$  και  $m_s^z = \pm 1/2$ .

➤ Η τιμή  $s$  της ιδιοστροφορμής  $\vec{s}$  καθορίζεται από τον κβαντικό αριθμό  $s$  του spin, που έχει μια μόνο τιμή για το ηλεκτρόνιο ( $s = 1/2$ ), σύμφωνα με τη σχέση  $s = \sqrt{s(s+1)} \cdot \hbar = \sqrt{3}/2 \cdot \hbar$ . Οι επιτρεπτοί προσανατολισμοί του spin ως προς κάθε z-άξονα αναφοράς (σχήμα A5β), καθορίζονται από το μαγνητικό κβαντικό αριθμό  $m_s^z = \pm 1/2$  και λαμβάνουν τιμές:  $s_z = \hbar \cdot m_s^z = \pm 1/2 \cdot \hbar$ .

Η μαγνητική ροπή  $\vec{m}_s$ , καθορίζεται από το αντιπαράλληλο spin του ηλεκτρονίου, μέσω της σχέσης  $\vec{m}_s = -\frac{e}{m_e} \cdot \vec{s}$  και έχει μέτρο  $m_s = \frac{e}{m_e} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \hbar = \sqrt{3} \cdot \frac{e \cdot \hbar}{2m_e} = \sqrt{3} \cdot \mu_B$ . Η αναλλοίωτη ποσότητα  $\mu_B = \frac{e \cdot \hbar}{2m_e}$  αποτελεί τη μαγνητόνη του Bohr με τιμή  $\mu_B = 0,93 \cdot 10^{-23} \text{ A} \cdot \text{m}^2$ .

Το διάνυσμα  $\vec{m}_s$  έχει 2 πιθανές προβολές  $\vec{m}_{sz} = -\frac{e}{m_e} \cdot s_z \cdot \hat{z} = -\frac{e}{m_e} \cdot (\pm \frac{1}{2} \cdot \hbar) \cdot \hat{z} = \pm \mu_B \cdot \hat{z}$  πάνω στον z-άξονα. Ο λόγος της μαγνητικής ροπής του spin ως προς το spin, είναι  $g_s = \frac{m_s}{s} = \frac{\frac{e}{m_e} \cdot s}{s} = 2 \cdot (\frac{e}{2m_e}) = 2$ , αν ως μονάδα μέτρησης ληφθεί το μέγεθος  $\frac{e}{2m_e}$ .

Επομένως, η προβολή της μαγνητικής ροπής του spin του ηλεκτρονίου κατά τον z-άξονα, εκφράζεται ως συνάρτηση του  $g_s$ , μέσω της σχέσης:  $\vec{m}_{sz} = g_s \cdot m_s^z \cdot \mu_B \cdot \hat{z}$ , όπου  $m_s^z = \pm \frac{1}{2}$  (A49)

Η τιμή  $l$  της τροχιακής στροφορμής  $\vec{l}$  του ηλεκτρονίου είναι κβαντισμένη και η τιμή της καθορίζεται από τον αριθμό  $l$ , σύμφωνα με τη σχέση  $l = \sqrt{l(l+1)} \cdot \hbar$ , όπου το  $l$  λαμβάνει  $0, 1, \dots, n-1$  ακέραιες τιμές, σε σχέση με τον κύριο κβαντικό αριθμό  $n$  που καθορίζει την ενέργεια του ηλεκτρονίου.

Οι επιτρεπτοί  $2l+1$  προσανατολισμοί της τροχιακής στροφορμής ως προς κάθε άξονα ( $z$ ) αναφοράς (σχήμα A5a), εξαρτώνται από το μαγνητικό κβαντικό αριθμό  $m_l^z = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$ , σύμφωνα με τη σχέση  $l_z = m_l^z \cdot \hbar \cdot \hat{z}$ .

Η μαγνητική ροπή  $\vec{m}_l$ , καθορίζεται από την αντιπαράλληλη τροχιακή στροφορμή  $\vec{l}$  του ηλεκτρονίου, μέσω της σχέσης  $\vec{m}_l = -\frac{e}{2m_e} \cdot \vec{l}$ , με μέτρο  $m_l = \frac{e}{2m_e} \cdot \sqrt{l(l+1)} \cdot \hbar$ . Το διάνυσμα  $\vec{m}_l$  έχει  $2l+1$  πιθανές προβολές

$\vec{m}_{lz} = -\frac{e}{2m_e} \cdot l_z \cdot \hat{z} = -\frac{e}{2m_e} \cdot m_l^z \cdot \hbar \cdot \hat{z} = -m_l^z \cdot \mu_B \cdot \hat{z}$  πάνω στον z-άξονα. Ο λόγος της μαγνητικής ροπής της τροχιακής

στροφορμής, ως προς την τροχιακή στροφορμή, είναι  $g_l = \frac{m_l}{l} = \frac{\frac{e}{2m_e} \cdot l}{l} = \frac{e}{2m_e} = 1$ , αν ως μονάδα μέτρησης

ληφθεί το μέγεθος  $\frac{e}{2m_e}$ . Επομένως, η προβολή της μαγνητικής ροπής της τροχιακής στροφορμής του ηλεκτρονίου κατά τον z-άξονα, εκφράζεται ως συνάρτηση του  $g_l$ , μέσω της σχέσης:

$$\vec{m}_{lz} = g_l \cdot m_l^z \cdot \mu_B \cdot \hat{z}, \text{ όπου } m_l^z = 0, \pm 1, \dots, \pm l \quad (A50)$$

➤ Σε κάθε άτομο με ατομικό αριθμό  $Z$ , η συνολική τροχιακή στροφορμή  $\vec{L} = \sum_Z \vec{l}$  και η συνολική ιδιοστροφορμή  $\vec{S} = \sum_Z \vec{s}$ , αποτελούν το αντίστοιχο διανυσματικό άθροισμα των τροχιακών στροφορμών των  $Z$  ηλεκτρονίων του ατόμου. Σύμφωνα με την αρχή του Pauli, στη βασική κατάσταση ελάχιστης ενέργειας, το άθροισμα της συνολικής τροχιακής στροφορμής και της ιδιοστροφορμής των ηλεκτρονίων είναι μέγιστο.

Η συνολική μαγνητική ροπή  $\vec{m}_L$  της τροχιακής κίνησης των ηλεκτρονίων, συνδέεται με την αντιπαράλληλη συνολική στροφορμή  $\vec{L} = \sqrt{L(L+1)} \cdot \hbar$ , που λαμβάνει  $2L+1$  τιμές  $0, \pm 1, \dots, \pm L$ , μέσω της σχέσης:

$$m_L = \frac{e}{2m_e} \cdot L = \frac{\mu_B}{\hbar} \cdot \sqrt{L(L+1)} \cdot \hbar = \mu_B \cdot \sqrt{L(L+1)} \quad (A51)$$

Το πηλίκο  $g_L = \frac{m_L}{L} = \frac{e}{2m_e}$  σε μονάδες  $\frac{e}{2m_e}$  ισούται με 1.

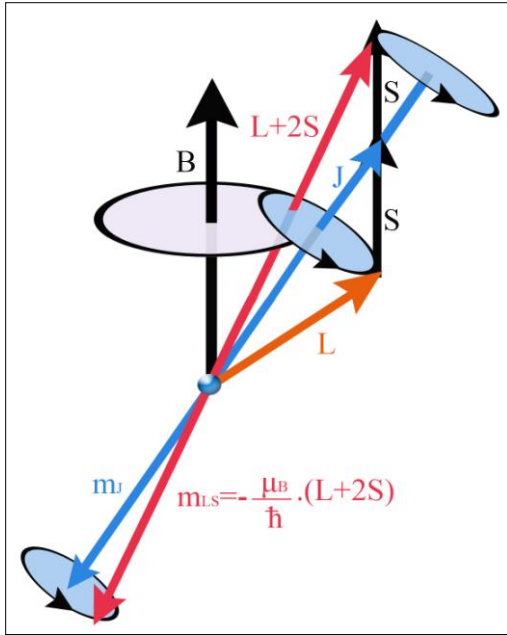
Η συνολική μαγνητική ροπή  $\vec{m}_s$  του spin, συνδέεται με την αντιπαράλληλη συνολική ιδιοστροφορμή  $\vec{S} = \sqrt{S(S+1)} \cdot \hbar$ , που λαμβάνει  $2S+1$  τιμές  $0, \pm 1, \dots, \pm S$ , μέσω της σχέσης:

$$m_s = \frac{e}{m_e} \cdot S = \frac{2\mu_B}{\hbar} \cdot \sqrt{S(S+1)} \cdot \hbar = 2\mu_B \cdot \sqrt{S(S+1)} \quad (A52)$$

Το πηλίκο  $g_s = \frac{m_s}{S} = \frac{e}{m_e}$  σε μονάδες  $\frac{e}{2m_e}$  ισούται με 2.

Το μέτρο  $J = \sqrt{J(J+1)} \cdot \hbar$  της συνολικής στροφορμής  $\vec{J} = \vec{L} + \vec{S}$  λαμβάνει  $2J+1$  δυνατές τιμές  $m_J = 0, \pm 1, \dots, \pm J$ , καθώς εξαρτάται από τον κβαντικό αριθμό  $J$ , που σύμφωνα με τους κανόνες του Hund για κάθε άτομο στη βασική κατάσταση ελάχιστης ενέργειας, ισούται με  $L-S$  ή  $L+S$ , για κάθε υποστιβάδα

s,p,d,f , αναλόγως αν είναι λιγότερο ή περισσότερο από ημιπλήρης σε ηλεκτρόνια. Η τιμή του  $J$  κυμαίνεται στο διάστημα  $J \in [\frac{1}{2}, \infty)$  και μπορεί να είναι ακέραιος ή ημιακέραιος αριθμός.

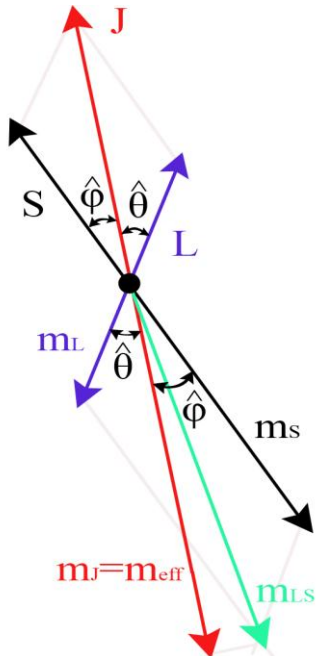


Οι  $2J+1$  δυνατές προβολές της μαγνητικής ροπής, μέτρου  $m_J = m_J \cdot \hbar$  του spin σε σχέση με οποιονδήποτε άξονα (σχήμα A6), δεν είναι ευθυγραμμισμένες με τις αντίστοιχες συνισταμένες μαγνητικές ροπές του ατόμου, εφόσον  $g_L \neq g_S$  και υπολογίζονται από τις σχέσεις (A51) και (A52):

$$\vec{m}_{LS} = \vec{m}_L + \vec{m}_S = -\frac{e}{2m_e} \cdot \vec{L} - \frac{e}{m_e} \cdot \vec{S} = -\frac{\mu_B}{\hbar} \cdot (\vec{L} + 2\vec{S}) \quad (A53)$$

**Σχήμα A6.** Απεικόνιση των διανυσμάτων της τροχιακής στροφορμής  $\vec{L}$ , της ιδιοστροφορμής  $\vec{S}$ , της ολικής στροφορμής  $\vec{J} = \vec{L} + \vec{S} = -\frac{\mu_B}{\hbar} \cdot (\vec{L} + 2\vec{S})$  και των μαγνητικών διπολικών ροπών  $\vec{m}_J$  και  $\vec{m}_{LS}$  του ηλεκτρονίου, εντός του μαγνητικού πεδίου  $\vec{B}$ .

Στην αλληλεπίδραση του ατόμου με μαγνητικά πεδία (σχήμα A7), συμβάλλουν οι  $2J+1$  προβολές του ανύσματος  $\vec{m}_{LS}$  στην κατεύθυνση του  $\vec{J}$ :  $m_J = m_S \cdot \sin\theta + m_L \cdot \cos\theta$  (A54)



Για κάθε τιμή  $m_J = 0, \pm 1, \dots, \pm J$ , σύμφωνα με το νόμο των συνημίτονων στα τρίγωνα που σχηματίζουν τα  $\vec{J}, \vec{S}, \vec{L}$ , ισχύει:

$$\cos\theta = \frac{L^2 + J^2 - S^2}{2LJ} = \frac{L(L+1) + J(J+1) - S(S+1)}{2\sqrt{L(L+1)} \cdot J(J+1)} \quad (A55\alpha)$$

$$\cos\phi = \frac{S^2 + J^2 - L^2}{2SJ} = \frac{S(S+1) + J(J+1) - L(L+1)}{2\sqrt{S(S+1)} \cdot J(J+1)} \quad (A55\beta)$$

Με αντικατάσταση των σχέσεων (A51, A52) και (A.55) στην (A54) το  $m_J$ , που χαρακτηρίζεται ως ενεργός μαγνητική ροπή  $m_{eff}$ ,

$$\text{υπολογίζεται: } m_{eff} \equiv m_J = g \cdot \mu_B \cdot \sqrt{J(J+1)} \quad (A56\alpha)$$

Η παράμετρος  $g$  στην παραπάνω σχέση, χαρακτηρίζεται ως παράγοντας Lande:  $g = 1 + \frac{J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)}$  (A56β)

**Σχήμα A7.** Υπολογισμός της συνιστώσας  $m_J = m_{eff}$  της συνολικής μαγνητικής ροπής  $\vec{m}_{LS} = \vec{m}_L + \vec{m}_S$  που οφείλεται στην τροχιακή στροφορμή  $\vec{L}$  και στο spin  $\vec{S}$  του ατόμου, στην κατεύθυνση του διανύσματος  $\vec{J} = \vec{L} + \vec{S}$ .





Επομένως η βασική κατάσταση του ιόντος, είναι η  $^{2S+1}D_J = ^6D_{5/2}$ . Στο σχήμα απεικονίζονται οι 5 δυνατοί προσανατολισμοί της ενεργού μαγνητικής ροπής  $m_J = m_{\text{eff}}$ , για  $m_J = 0, \pm 1$ , στην κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου  $\vec{B}$ , όταν η ολική στροφορμή είναι  $\mathbf{J} = \sqrt{6} \cdot \hbar$ , για  $J=2$  και των αντίστοιχων μαγνητικών ενεργειών  $E_{m_J} = g \cdot m_J \cdot \mu_B \cdot B$ .

Η μέση μαγνήτιση  $M = n \cdot \langle m_J^B \rangle$  για  $n(m^{-3})$  άτομα ανά μονάδα όγκου, υπολογίζεται από την προηγούμενη σχέση:

$$M = n \frac{\sum_{m_J=-J}^{m_J=J} m_J^B \cdot e^{-\frac{E_{m_J}}{k_B \cdot T}}}{\sum_{m_J=-J}^{m_J=J} e^{-\frac{E_{m_J}}{k_B \cdot T}}} = n \frac{\sum_{m_J=-J}^{m_J=J} g \cdot m_J \cdot \mu_B \cdot e^{-\frac{m_J \cdot \mu_B \cdot g \cdot \mu_o \cdot H}{k_B \cdot T}}}{\sum_{m_J=-J}^{m_J=J} e^{-\frac{m_J \cdot \mu_B \cdot g \cdot \mu_o \cdot H}{k_B \cdot T}}} \quad b_\pi = \frac{\mu_B \cdot g \cdot J \cdot \mu_o \cdot H}{k_B \cdot T} = ng\mu_B \frac{\sum_{m_J=-J}^{m_J=J} m_J \cdot e^{-\frac{m_J \cdot b_\pi}{J}}}{\sum_{m_J=-J}^{m_J=J} e^{-\frac{m_J \cdot b_\pi}{J}}} = \quad (A62)$$

$$= ng\mu_B \frac{d}{db} \ln \sum_{m_J=-J}^{m_J=J} e^{-\frac{m_J \cdot b_\pi}{J}}$$

+

Ο όρος  $\sum_{m_J=-J}^{m_J=J} e^{-\frac{m_J \cdot b_\pi}{J}}$  αποτελεί άθροισμα γεωμετρικής προόδου που υπολογίζεται από τη σχέση

$\alpha + \alpha \cdot r + \alpha \cdot r^2 + \dots + \alpha \cdot r^{v-1} = \frac{\alpha(1-r^v)}{1-r}$  για  $\alpha = e^{-b_\pi}$ , πολλαπλασιαστικό όρο τον  $r = e^{-b_\pi/J}$ , για  $v=2J+1$  όρους. Η προηγούμενη σχέση (A62) γράφεται:

$$M = ng\mu_B \cdot \frac{d}{db_\pi} \ln \left[ \frac{e^{-b_\pi} \cdot (1 - e^{-\frac{(2J+1) \cdot b_\pi}{J}})}{(1 - e^{-\frac{b_\pi}{J}})} \right] = ng\mu_B \cdot \frac{d}{db_\pi} \ln \left[ \frac{\sinh(\frac{2J+1}{2} \cdot \frac{b_\pi}{J})}{\sinh(\frac{b_\pi}{2J})} \right] = \quad (A63)$$

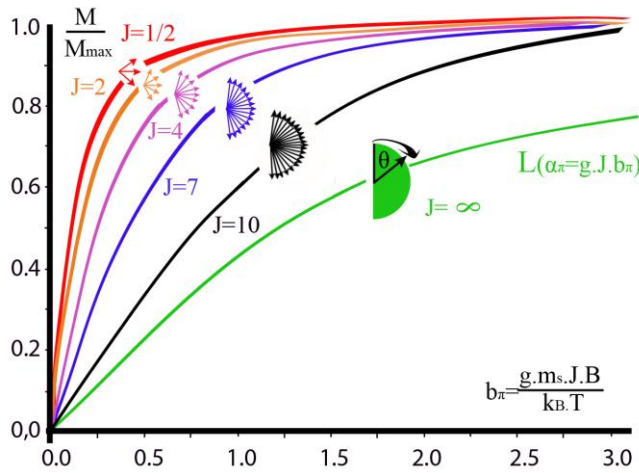
$$= ng\mu_B J \left[ \frac{2J+1}{2J} \coth(\frac{2J+1}{2J} b_\pi) - \frac{1}{2J} \coth(\frac{1}{2J} b_\pi) \right] = ng\mu_B J \cdot B_J(b_\pi)$$

Επειδή  $m_{\text{max}} = g\mu_B J$  (A59) και  $M_{\text{max}} = n \cdot m_{\text{max}}$ , η παραπάνω σχέση γράφεται:

$$M = M_{\text{max}} \cdot B_J(b_\pi) \Leftrightarrow \frac{M}{M_{\text{max}}} = B_J(b_\pi) = \left[ \frac{2J+1}{2J} \coth(\frac{2J+1}{2J} b_\pi) - \frac{1}{2J} \coth(\frac{1}{2J} b_\pi) \right], \quad (A64\alpha)$$

$$\text{όπου} \quad b_\pi = \frac{\mu_B \cdot g \cdot J \cdot \mu_o \cdot H}{k_B \cdot T} \quad (A64\beta) \quad \text{και} \quad M_{\text{max}} = ng\mu_B J \quad (A64\gamma)$$

Η συνάρτηση  $B_J(b_\pi)$  αποτελεί τη συνάρτηση *Brillouin*, υπολογισμού της μαγνήτισης κατά την κβαντική θεώρηση. Όσο αυξάνεται η τιμή  $J$  και το πλήθος των προβολών  $m_J = 0, \pm 1, \dots, \pm J$  της ολικής στροφορμής στην κατεύθυνση του  $\vec{H}$  (διάγραμμα A2), τόσο η συνάρτηση Brillouin  $B_J(b_\pi)$  της κβαντικής θεώρησης, τείνει στη συνάρτηση  $L(\alpha_\pi = \frac{b_\pi}{gJ})$  (A43α) του κλασικού μοντέλου Langevin.



**Διάγραμμα A2.** Η κβαντική θεωρία της συνάρτησης  $B_J(b_\pi)$  συμπίπτει με τη συνάρτηση

$$L(a_\pi = \frac{b_\pi}{g \cdot J}) \text{ του κλασικού μοντέλου, όταν } J \rightarrow \infty.$$

Από το σχήμα<sup>3</sup> [44] διαπιστώνεται ότι ο κορεσμός κατά την κβαντική θεωρία Brillouin επέρχεται νωρίτερα από ότι προβλέπει η συνάρτηση Langevin.

Για την τιμή της μαγνήτισης από την προηγούμενη σχέση (A64a), διακρίνονται οι περιπτώσεις:

- Όταν  $H \rightarrow 0$ , τότε  $M \rightarrow 0$ . Επομένως δεν υπάρχει αυτογενής μαγνητική πόλωση.

- Στο όριο υψηλού πεδίου, όταν  $H \gg \frac{k_B \cdot T}{\mu_B \cdot g \cdot J \cdot \mu_o}$ , τότε  $b_\pi \rightarrow \infty$ ,  $B_J(b_\pi) \approx 1$  και η μαγνήτιση

$M = M_{\max} = n \cdot g \cdot \mu_B \cdot J$  προσεγγίζει τη μαγνήτιση κόρου.

- Στο όριο υψηλής θερμοκρασίας, όταν  $T \gg \frac{g \cdot J \cdot \mu_B \cdot \mu_o \cdot H}{k_B}$ , τότε  $b_\pi \rightarrow 0$ . Επειδή για  $x \rightarrow 0$  η  $f(x) = \coth x$

προσεγγίζεται μέσω του αναπτύγματος Taylor από τη σχέση  $\coth x \approx \frac{1}{x} + \frac{x}{3}$ , η  $B_J(b_\pi)$  υπολογίζεται:

$$B_J(b_\pi) \approx \frac{2J+1}{2J} \cdot \left( \frac{2J}{2J+1} \cdot \frac{1}{b_\pi} + \frac{1}{3} \cdot \frac{2J+1}{2J} \cdot b_\pi \right) - \frac{1}{2J} \cdot \left( \frac{2J}{b_\pi} + \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{2J} \cdot b_\pi \right) = \frac{J+1}{3J} \cdot b_\pi \quad (\text{A65}\alpha)$$

Η μαγνήτιση  $M = M_{\max} \cdot B_J(b_\pi)$  (A64a), σύμφωνα με την προηγούμενη σχέση, προσεγγίζεται:

$$M = (n \cdot g \cdot \mu_B \cdot J) \cdot \frac{J+1}{3J} \cdot \frac{\mu_B \cdot g \cdot J \cdot \mu_o \cdot H}{k_B \cdot T} = \frac{n \cdot g^2 \cdot J \cdot (J+1) \cdot \mu_B^2 \cdot \mu_o \cdot H}{3k_B \cdot T} \quad (\text{A65}\beta)$$

Με την προσθήκη της ενεργού μαγνητικής ροπής  $m_{\text{eff}} \equiv m_J = g \cdot \mu_B \cdot \sqrt{J(J+1)}$  (A56a), η τελευταία σχέση

γράφεται: 
$$M = \frac{n \cdot m_{\text{eff}}^2 \cdot \mu_o \cdot H}{3k_B \cdot T} \quad (\text{A65}\gamma)$$

Η μαγνητική επιδεκτικότητα  $\chi$  ανά μονάδα όγκου από την προηγούμενη σχέση υπολογίζεται (A4):

$$\chi = \frac{M}{H} = \frac{n \cdot m_{\text{eff}}^2 \cdot \mu_o}{3k_B \cdot T} \quad (\text{A66})$$

Η μαγνητική επιδεκτικότητα ανά μονάδα μάζας  $\chi_m$ , υπολογίζεται (A5a):  $\chi_m = \frac{\chi}{\rho} = \frac{n \cdot m_{\text{eff}}^2 \cdot \mu_o}{3\rho k_B} \cdot \frac{1}{T}$  (A67)

Ο συντελεστής του  $1/T$  στην παραπάνω σχέση αποτελεί έκφραση της σταθεράς του Curie, που προκύπτει από τη σχέση (A48) της κλασικής προσέγγισης, με την αντικατάσταση του  $m_a$  από την ενεργό μαγνητική ροπή  $m_{\text{eff}}$ .

Τα παραμαγνητικά υλικά αποτελούνται από άτομα ή ιόντα με ασυμπλήρωτη την εξωτερική στιβάδα, έτσι ώστε εμφανίζουν μόνιμη διπολική ροπή των spin, όπως τα στοιχεία των σπανίων γαιών, με ατομικούς αριθμούς  $Z = 57 - 71$  και  $Z = 91 - 102$ , καθώς και τα στοιχεία μεταπτώσεως, με  $Z = 21 - 29$ ,  $Z = 39 - 47$  και

<sup>3</sup> Επανασχεδίαση από το βιβλίο του Chrisman J. Richard «Fundamentals of solid State Physics», J. Wiley, New York, 1988.

$Z = 71-79$ , που έχουν τις στιβάδες 4f ή 5f (σπάνιες γαίες) ή τις 3d, 4d ή 5d (στοιχεία μεταπτώσεως) ασυμπλήρωτες.

Η σύγκριση των θεωρητικών και των πειραματικών τιμών της μαγνήτισης, γίνεται από τον πειραματικό προσδιορισμό της σταθεράς  $C = \frac{n \cdot m_{\text{eff}}^2 \cdot \mu_0}{3\rho k_B}$  (A67), όπου υπολογίζεται η ενεργός μαγνητική ροπή:

$$m_{\text{eff}}^{\pi} = \sqrt{\frac{3C \cdot \rho \cdot k_B}{n \cdot \mu_0}} \quad (\text{A68})$$

Η πειραματική τιμή συγκρίνεται με τη θεωρητική (A56α) τιμή  $m_{\text{eff}} \equiv m_J = g \cdot \mu_B \cdot \sqrt{J(J+1)}$ .

Όπως διαπιστώνεται στον **πίνακα A1**, οι θεωρητικές τιμές της ενεργού μαγνητικής ροπής στις σπάνιες γαίες, συμφωνούν αρκετά με τα πειραματικά δεδομένα. Όμως στα μέταλλα μετάβασης, η θεωρητική προσεγγίζει την πειραματική τιμή<sup>4</sup> μόνο αν θεωρηθεί μηδενική ( $L=0$ ,  $J=S$ ,  $g=2$ ) η μαγνητική ροπή λόγω της τροχιακής στροφορμής των ιόντων.

Ο μηδενισμός ή η «παγωμένη» τροχιακή ροπή, οφείλεται στην επιμήκυνση των τροχιών υπό την επίδραση του ηλεκτρικού κρυσταλλικού πεδίου κάθε ατόμου ή ιόντος. Λόγω της ισχυρής σύζευξης των τροχιών με το κρυσταλλικό πλέγμα, η επίδραση εξωτερικού μαγνητικού πεδίου είναι μικρή στην τροχιακή κίνηση, ενώ αντίθετα επηρεάζει μόνο τις μαγνητικές ροπές λόγω spin, που στρέφονται στην διεύθυνση του πεδίου.

|                  |                        | Θεωρητικές τιμές |     |      |        |                          | Θεωρητικές τιμές<br>«παγωμένης» τροχιακής<br>στροφορμής<br>( $L=0$ , $J=S$ , $g=2$ ) | Πειραματικές<br>τιμές          |
|------------------|------------------------|------------------|-----|------|--------|--------------------------|--|--------------------------------|
| Ιόν              | Αριθμός<br>ηλεκτρονίων | L                | S   | J    | g      | $m_{\text{eff}} (\mu_B)$ | $m_{\text{eff}} (\mu_B)$   | $m_{\text{eff}}^{\pi} (\mu_B)$ |
| Ce <sup>+3</sup> | 1                      | 3                | 1/2 | 5/2  | 6/7    | 2,53                     |  | 2,39                           |
| Pr <sup>+3</sup> | 2                      | 5                | 1   | 4    | 4/5    | 3,58                     |  | 3,60                           |
| Nd <sup>+3</sup> | 3                      | 6                | 3/2 | 9/2  | 8/11   | 3,62                     |  | 3,62                           |
| Pm <sup>+3</sup> | 4                      | 6                | 2   | 4    | 3/5    | 2,68                     |  | -                              |
| Sm <sup>+3</sup> | 5                      | 5                | 5/2 | 5/2  | 2/7    | 0,85                     |  | 1,54                           |
| Eu <sup>+3</sup> | 6                      | 3                | 3   | 0    | 1      | 0                        |  | 3,61                           |
| Gd <sup>+3</sup> | 7                      | 0                | 7/2 | 7/2  | 2      | 7,94                     |  | 8,20                           |
| Tb <sup>+3</sup> | 8                      | 3                | 3   | 6    | 43/22  | 12,7                     |  | 9,60                           |
| Dy <sup>+3</sup> | 9                      | 5                | 5/2 | 15/2 | 4/3    | 10,6                     |  | 10,5                           |
| Ho <sup>+3</sup> | 10                     | 6                | 2   | 8    | 5/4    | 10,6                     |  | 10,5                           |
| Er <sup>+3</sup> | 11                     | 6                | 3/2 | 15/2 | 113/96 | 9,40                     |  | 9,50                           |
| Tm <sup>+3</sup> | 12                     | 5                | 1   | 6    | 8/7    | 7,41                     |  | 7,20                           |
| Ym <sup>+3</sup> | 13                     | 3                | 1/2 | 7/2  | 25/21  | 4,72                     |  | 4,40                           |
| V <sup>+2</sup>  | 3                      | 3                | 3/2 | 3/2  | 2/5    | 0,77                     | 3,87   | 3,80                           |
| Cr <sup>+2</sup> | 4                      | 2                | 2   | 0    | 1      | 0                        | 4,90   | 4,90                           |
| Mn <sup>+2</sup> | 5                      | 0                | 5/2 | 5/2  | 2      | 5,92                     | 5,92   | 5,90                           |
| Fe <sup>+2</sup> | 6                      | 2                | 2   | 4    | 3/2    | 6,71                     | 4,90   | 5,40                           |
| Co <sup>+2</sup> | 7                      | 3                | 3/2 | 9/2  | 4/3    | 6,63                     | 3,87   | 4,80                           |
| Ni <sup>+2</sup> | 8                      | 3                | 1   | 4    | 5/4    | 5,59                     | 2,83   | 3,20                           |
| Cu <sup>+2</sup> | 9                      | 2                | 1/2 | 5/2  | 6/5    | 3,55                     | 1,73   | 1,90                           |

**Πίνακας A1.** Συγκριτικός πίνακας των θεωρητικών  $m_{\text{eff}}$  και των πειραματικών  $m_{\text{eff}}^{\pi}$  τιμών της ενεργού μαγνητικής ροπής, σε μαγνητόνες  $\mu_B$  του Bohr.

<sup>4</sup> Οι πειραματικές τιμές λήφθηκαν από «American Institute of Physics Handbook», Mc-Graw-Hill, 1963, Database: Worldcat.

Πολλές παραμαγνητικές ουσίες δεν ακολουθούν ούτε την κλασική ούτε την κβαντική συμπεριφορά όπως περιγράφεται από τα παραπάνω μοντέλα, τα οποία θεωρούν ότι η μαγνητική συμπεριφορά εξαρτάται αποκλειστικά από το εξωτερικό πεδίο και τη θερμική κίνηση των ηλεκτρονίων και δε λαμβάνουν υπόψη τις υπάρχουσες αλληλεπιδράσεις μεταξύ των ατόμων. Παρότι κανένα μοντέλο δεν προβλέπει ενδογενή μαγνητική πόλωση σε μηδενικό εξωτερικό πεδίο, η θεωρία του Langevin έθεσε τις βάσεις για την εξήγηση της μαγνητικής συμπεριφοράς των σιδηρομαγνητικών υλικών.

### A3. Σιδηρομαγνητισμός

Η συμπεριφορά των σιδηρομαγνητικών υλικών, προϋποθέτει ισχυρές ενεργειακές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των γειτονικών μαγνητικών ροπών των μονήρων ηλεκτρονίων στους κρυστάλλους, που προκαλούν την εμφάνιση παραμένουσας ή αυθόρμητης μαγνήτισης, χωρίς την εφαρμογή εξωτερικού πεδίου.

Ο Weiss (1907) επέκτεινε την κλασική θεωρία του Langevin για τον παραμαγνητισμό, στον σιδηρομαγνητισμό, υποθέτοντας ότι απουσίας εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, οι γειτονικές μαγνητικές ροπές των spin αλληλεπιδρούν αυθόρμητα με τον ίδιο τρόπο μεταξύ τους και προσανατολίζονται κατά περιοχές, όταν η συνολική ενέργεια των ατόμων γίνεται μικρότερη. Στη θερμοκρασία του απόλυτου μηδενός (0K) όλες οι μαγνητικές ροπές είναι προσανατολισμένες και η μαγνήτιση  $M_{T=0K} \equiv M_0$  του υλικού αποκτά τη μέγιστη τιμή. Σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες, η θερμική κίνηση συμβάλλει στον αποπροσανατολισμό τους και πάνω από μια συγκεκριμένη θερμοκρασία προκαλεί την τυχαία ανακατανομή τους, με αποτέλεσμα το μηδενισμό της αυθόρμητης μακροσκοπικής μαγνήτισης.

Με την επίδραση εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, οι μαγνητικές περιοχές τείνουν να προσανατολιστούν στην κατεύθυνσή του, με αποτέλεσμα την εμφάνιση μακροσκοπικής μαγνήτισης. Σύμφωνα με αυτήν την παραδοχή, οι διευθύνσεις των μαγνητικών ροπών κατανέμονται ομοιογενώς, έτσι ώστε οι τοπικές τιμές της μαγνήτισης σε όλο τον όγκο του υλικού, να ισούνται με την τιμή της μακροσκοπικής μαγνήτισης. Ο Weiss αποδίδει τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μαγνητικών ροπών σε ένα μέσο «μοριακό» πεδίο  $\vec{H}_w$ , ανάλογο της μακροσκοπικής μαγνήτισης  $\vec{M}$ , που δρα σε όλες τις θερμοκρασίες, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\vec{H}_w = \lambda \cdot \vec{M}, \lambda \in \mathbb{R} \quad (A69)$$

Με αυτή την παραδοχή, ένα υλικό μπορεί να μαγνητιστεί αυτογενώς από το «μοριακό» πεδίο, χωρίς την επίδραση εξωτερικού πεδίου.

Αν η θερμοκρασία Curie  $T_c$  είναι η θερμοκρασία που ο αποπροσανατολισμός της θερμικής κίνησης υπερσχύει της αυτογενούς μαγνήτισης, τότε για υλικά με διπολική ροπή  $\mu_B = 0,93 \cdot 10^{-23} \text{ J/T}$  και  $T_c = 1000 \text{ K}$ , η ένταση του «μοριακού» πεδίου προσεγγίζεται από τη σχέση:

$$\mu_B \cdot H_w = k_B \cdot T_c \Leftrightarrow H_w = \frac{k_B \cdot T_c}{\mu_B} = \frac{1,4 \cdot 10^{-23} \cdot 10^3}{0,93 \cdot 10^{-23}} = 2 \cdot 10^3 \text{ A/m}$$

Το μοριακό πεδίο  $B_w = \mu_0 \cdot H_w = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 2 \cdot 10^3 = 2 \text{ mT}$  είναι ιδιαίτερα ισχυρό, περίπου 1000 φορές μεγαλύτερο από το μαγνητικό πεδίο της γης.

Το συνολικό μαγνητικό πεδίο  $\vec{B}$  εντός του υλικού, με την εφαρμογή εξωτερικού πεδίου  $\vec{H}$ , γράφεται (A1):

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot (\vec{H} + \vec{H}_w) = \mu_0 \cdot (\vec{H} + \lambda \cdot \vec{M}) \quad (A70)$$

Η θεωρητική τεκμηρίωση της μαγνητικής συμπεριφοράς των υλικών με την εισαγωγή του μοριακού πεδίου του Weiss, περιγράφεται σύμφωνα με το κλασικό μοντέλο του Langevin και της κβαντικής προσέγγισης του Brillouin.

### A3.1 Κλασική προσέγγιση του σιδηρομαγνητισμού

Με την εισαγωγή του μέσου μοριακού πεδίου του Weiss (A69), η μαγνήτιση σύμφωνα με το κλασικό μοντέλο, υπολογίζεται με την αλλαγή της παραμέτρου  $\alpha_\pi = \frac{\mu_o \cdot m_a \cdot H}{k_B \cdot T}$  (A43β) από την  $\alpha_\sigma$  στη συνάρτηση του Langevin (A43α):

$$\alpha_\sigma = \frac{\mu_o \cdot m_a \cdot (H + \lambda \cdot M)}{k_B \cdot T} = \frac{\mu_o \cdot M_0 \cdot (H + \lambda \cdot M)}{n \cdot k_B \cdot T} \quad (A71)$$

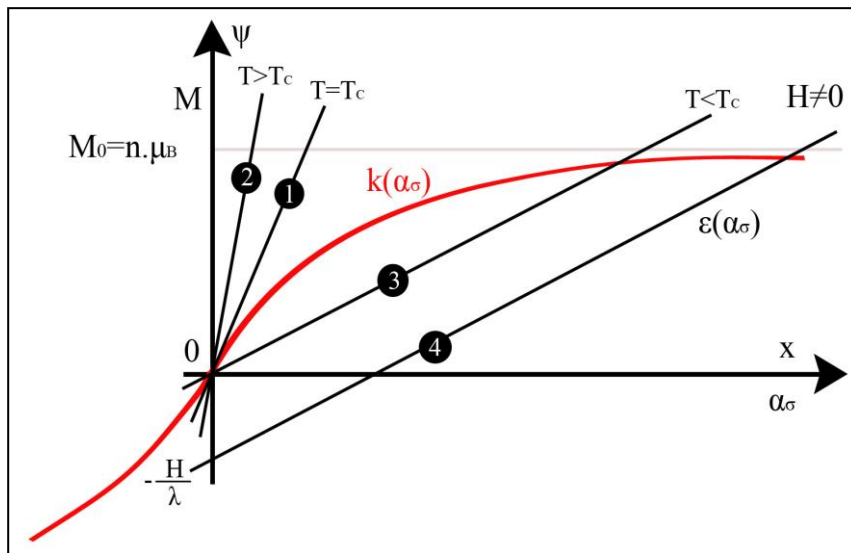
Στην παραπάνω σχέση, η μέγιστη μαγνήτιση (κορεσμού)  $M_{\max} = M_0 = n \cdot m_a$  λαμβάνεται στο απόλυτο μηδέν (0K). Η μαγνήτιση του υλικού, σύμφωνα με τη σχέση (A44) υπολογίζεται:

$$k(\alpha_\sigma) = M = M_0 \cdot L(\alpha_\sigma) \quad (A72)$$

Η μαγνήτιση  $M$  από την τελευταία σχέση υπολογίζεται:

$$\varepsilon(\alpha_\sigma) = M = \frac{n \cdot k_B \cdot T}{\mu_o \cdot M_0 \cdot \lambda} \cdot \alpha_\sigma - \frac{H}{\lambda} \quad (A73\alpha) \quad \text{ή} \quad \frac{M}{M_0} = \frac{n \cdot k_B \cdot T}{\mu_o \cdot M_0^2 \cdot \lambda} \cdot \alpha_\sigma - \frac{H}{\lambda \cdot M_0} \quad (A73\beta)$$

Οι επιτρεπτές τιμές της μαγνήτισης υπολογίζονται γραφικά (**διάγραμμα A3**) από τα κοινά σημεία της καμπύλης  $k(\alpha_\sigma)$  και της ευθείας  $\varepsilon(\alpha_\sigma)$ . Σε κάθε θέση της ευθείας  $\varepsilon(\alpha_\sigma)$ , η κλίση της είναι ανάλογη της θερμοκρασίας  $T$ , που καθορίζει τα σημεία τομής της με την καμπύλη  $k(\alpha_\sigma)$ .



**Διάγραμμα A3.** Μεταβολή της μαγνήτισης  $M$  ως συνάρτηση της παραμέτρου  $\alpha_\sigma$ .

Από τη γραφική παράσταση διαπιστώνεται:

➤ Απουσίας εξωτερικού πεδίου  $H=0$ , στις θέσεις 1,2 και 3 της ευθείας  $\varepsilon(\alpha_\sigma)$ , σύμφωνα με τις σχέσεις (A73β) και (A71), ισχύει:



$$\frac{M}{M_0} \stackrel{H=0}{=} \frac{n \cdot k_B \cdot T}{\mu_o \cdot M_0^2 \cdot \lambda} \cdot \alpha_o \quad (A74\alpha), \quad \text{όταν} \quad \alpha_o \stackrel{H=0}{=} \frac{\mu_o \cdot M_0 \cdot \lambda \cdot M}{n \cdot k_B \cdot T} \quad (A74\beta)$$

• Όταν οι κλίσεις της ευθείας και της καμπύλης  $k(\alpha_o)$  συμπίπτουν στην αρχή των αξόνων (θέση 1), η κλίση της ευθείας  $\varepsilon(\alpha_o)$  είναι ίση με την κλίση  $\frac{1}{3}$  της προσέγγισης Langevin  $L(\alpha_o) \approx \frac{1}{3} \alpha_o$  (A45) στο όριο υψηλής θερμοκρασίας και η θερμοκρασία Curie  $T_c$  υπολογίζεται από τη σχέση:

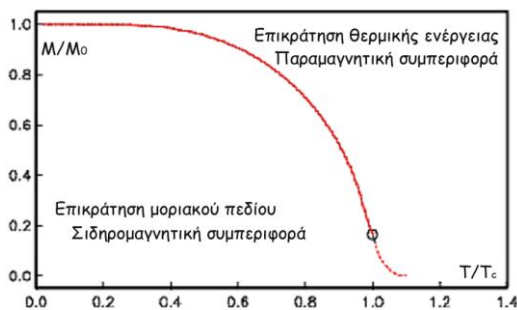
$$\frac{n \cdot k_B \cdot T_c}{\mu_o \cdot M_0^2 \cdot \lambda} = \frac{1}{3} \Leftrightarrow T_c = \frac{\mu_o \cdot M_0^2 \cdot \lambda}{3 \cdot n \cdot k_B} \stackrel{M_0=n \cdot m_a}{=} \frac{n \cdot \mu_o \cdot m_a^2 \cdot \lambda}{3 \cdot k_B} \quad (A75)$$

Με την αντικατάσταση της παραμέτρου  $\lambda = \frac{3 \cdot n \cdot k_B \cdot T_c}{\mu_o \cdot M_0^2}$  από την προηγούμενη σχέση στην (A74α), ο λόγος

$$M/M_0 \text{ συναρτήσει του πηλίκου } T/T_c, \text{ υπολογίζεται: } \frac{M}{M_0} = \frac{1}{3} \cdot \frac{T}{T_c} \cdot \alpha_o \quad (A76)$$

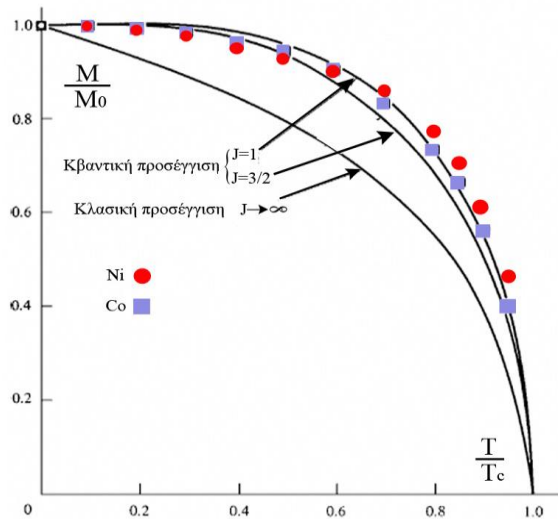
• Όταν  $T > T_c$  η ευθεία  $\varepsilon(\alpha_o)$  στρέφεται προς τον ημιάξονα  $O\psi$  (θέση 2) και υπάρχει μόνο ένα κοινό σημείο με την καμπύλη  $k(\alpha_o)$  στη θέση  $\alpha_o = 0$ , όταν  $H=0$ . Επομένως σε υψηλότερες θερμοκρασίες της  $T_c$ , το μέσο «μοριακό» πεδίο  $H_w = \lambda \cdot M$  (A69) είναι αμελητέο σε σχέση με το εφαρμοζόμενο πεδίο  $H$  με αποτέλεσμα να μην εμφανίζεται αυτογενής μαγνητική πόλωση και να υπερισχύει (**διάγραμμα A4**) η παραμαγνητική συμπεριφορά.

• Όταν  $T < T_c$  η ευθεία  $\varepsilon(\alpha_o)$  στρέφεται προς τον ημιάξονα  $Ox$  (θέση 3) και εκτός από τη θέση  $\alpha_o = 0$ ,  $H=0$ , υπάρχει ένα δεύτερο κοινό σημείο για  $\alpha_o \neq 0$  με την καμπύλη  $k(\alpha_o)$ , που υποδηλώνει την ύπαρξη αυτογενούς μαγνητικής πόλωσης χωρίς την ύπαρξη εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Όταν  $T \ll T_c$ , το σημείο τομής των  $\varepsilon(\alpha_o)$  και  $k(\alpha_o)$  μετακινείται δεξιότερα, υποδηλώνοντας μαγνητική πόλωση  $M = M_0 = n \cdot m_a$  (A75) σε κατάσταση κορεσμού, σε θερμοκρασίες κοντά στο απόλυτο μηδέν.



**Διάγραμμα A4.** Γραφική παράσταση<sup>5</sup> [45] της μαγνήτισης  $M/M_0$  συναρτήσει της θερμοκρασίας  $T/T_c$ . Όταν  $T < T_c$ , επικρατεί το «μοριακό» πεδίο και το υλικό εμφανίζει σιδηρομαγνητική συμπεριφορά, ενώ όταν  $T > T_c$  επικρατεί η θερμική ενέργεια και το υλικό εμφανίζει παραμαγνητική συμπεριφορά.

<sup>5</sup> Η γραφική παράσταση προέρχεται από το διαδικτυακό βιβλίο: «Essentials of Paleomagnetism: Third Web Edition» στην ιστοσελίδα: <http://earthref.org/MAGIC/books/Tauxe/Essentials/> (chapter 3, figure 3.7)



**Διάγραμμα A5.** Απεικόνιση<sup>6</sup> [46,47] της μεταβολής του λόγου  $\frac{M}{M_0}$  ως συνάρτηση του λόγου  $\frac{T}{T_c}$ . Οι συνεχείς καμπύλες είναι αποτέλεσμα θεωρητικών υπολογισμών για  $J=S=1$  και  $J=S=\frac{3}{2}$ , ενώ τα σημεία αποτελούν αποτελέσματα πειραματικών μετρήσεων για τα στοιχεία Ni και Co.

Η μεταβολή του λόγου  $\frac{M}{M_0}$  συναρτήσει του λόγου  $\frac{T}{T_c}$ , σύμφωνα με την κλασική θεώρηση, σχεδιάζεται στο **διάγραμμα A.5** βάσει της σχέσης (A85), όπου συγκρίνεται με την καμπύλη της κβαντικής προσέγγισης για τα στοιχεία Ni και Co. Η κλασική θεώρηση  $J \rightarrow \infty$  δεν προσεγγίζει τα πειραματικά αποτελέσματα, όσο οι κβαντικές καμπύλες για  $J=1, \frac{3}{2}$ .

➤ Με την εφαρμογή εξωτερικού πεδίου  $H \neq 0$ , (διάγραμμα A3, θέση 4), διακρίνονται οι περιπτώσεις:

- Για  $T > T_c$ , ισχύει η προσέγγιση υψηλής θερμοκρασίας (A45)  $L(\alpha_\sigma) \approx \frac{1}{3} \alpha_\sigma \stackrel{(A71)}{=} \frac{\mu_o \cdot m_a \cdot (H + \lambda \cdot M)}{3k_B \cdot T}$

και η μαγνήτιση υπολογίζεται με την αντικατάσταση της παραμέτρου  $\lambda = \frac{3k_B \cdot T}{n \cdot m_o \cdot m_a^2 \cdot T_c}$  από τη σχέση (A75) στη σχέση (A72):

$$M \approx n \cdot m_a \cdot L(\alpha_\sigma) = \frac{n \cdot \mu_o \cdot m_a^2 \cdot (H + \lambda \cdot M)}{3k_B \cdot T} \Leftrightarrow M \approx \frac{n \cdot \mu_o \cdot m_a^2 \cdot H}{3k_B \cdot (T - T_c)} \quad (A77)$$

Η μαγνητική επιδεκτικότητα  $\chi$  ανά μονάδα όγκου υπολογίζεται από τη σχέση (A4):

$$\chi = \frac{M}{H} = \frac{n \cdot \mu_o \cdot m_a^2}{3k_B \cdot (T - T_c)} \quad (A78)$$

Η μαγνητική επιδεκτικότητα ανά μονάδα μάζας, υπολογίζεται από τη σχέση (A5a):

$$\chi_m = \frac{\chi}{\rho} = \frac{n \cdot \mu_o \cdot m_a^2}{3k_B \cdot \rho \cdot (T - T_c)} \quad (A79)$$

Ο συντελεστής του  $\frac{1}{T - T_c}$  αποτελεί έκφραση της σταθεράς του Curie και η προηγούμενη σχέση γράφεται:

$$\chi_m = \frac{C}{T - T_c}, \quad \text{όπου } C = \frac{n \cdot \mu_o \cdot m_a^2}{3k_B \cdot \rho} \quad (A80)$$

<sup>6</sup> Οι πειραματικές μετρήσεις για το Ni και το Co λήφθηκαν από τις ιστοσελίδες:

[http://www.irm.umn.edu/hg2m/hg2m\\_b/hg2m\\_b.html](http://www.irm.umn.edu/hg2m/hg2m_b/hg2m_b.html) και

<http://www-users.york.ac.uk/~rfl500/posts/2015/05/reconciling-quantum-and-classical-magnetism/>

• Όταν  $H \neq 0$  και  $T < T_c$ , το εφαρμοζόμενο εξωτερικό πεδίο  $H$  είναι αμελητέο σε σχέση με το «μοριακό» πεδίο  $H_w$ . Με την προσέγγιση  $H + \lambda \cdot M \approx \lambda \cdot M$  (A70), η σχέση (A72) γράφεται:

$$\frac{M}{M_0} = \coth\left(\frac{\mu_o \cdot M_0 \cdot \lambda \cdot M}{n \cdot k_B \cdot T}\right) - \frac{n \cdot k_B \cdot T}{\mu_o \cdot M_0 \cdot \lambda \cdot M}$$

Με την αντικατάσταση της παραμέτρου  $\lambda = \frac{3 \cdot n \cdot k_B \cdot T_c}{\mu_o \cdot M_0^2}$  από τη σχέση (A75) στην προηγούμενη σχέση, ο λόγος

$$\frac{M}{M_0} \text{ υπολογίζεται: } \frac{M}{M_0} = \coth\left(\frac{3T_c}{T} \cdot \frac{M}{M_0}\right) - \frac{T}{3T_c} \cdot \frac{M_0}{M} \quad (\text{A81})$$

### A3.2 Κβαντική προσέγγιση του σιδηρομαγνητισμού

Η κβαντική προσέγγιση διαφοροποιείται από το κλασικό μοντέλο, με την θεώρηση της κβάντωσης της ενέργειας κάθε μαγνητικού δίπολου. Η μαγνήτιση με την εισαγωγή του μοριακού πεδίου του Weiss, υπολογίζεται με την αλλαγή της παραμέτρου  $b_\pi = \frac{\mu_B \cdot g \cdot J \cdot \mu_o \cdot H}{k_B \cdot T}$  (A64β) από την  $b_\sigma$ :

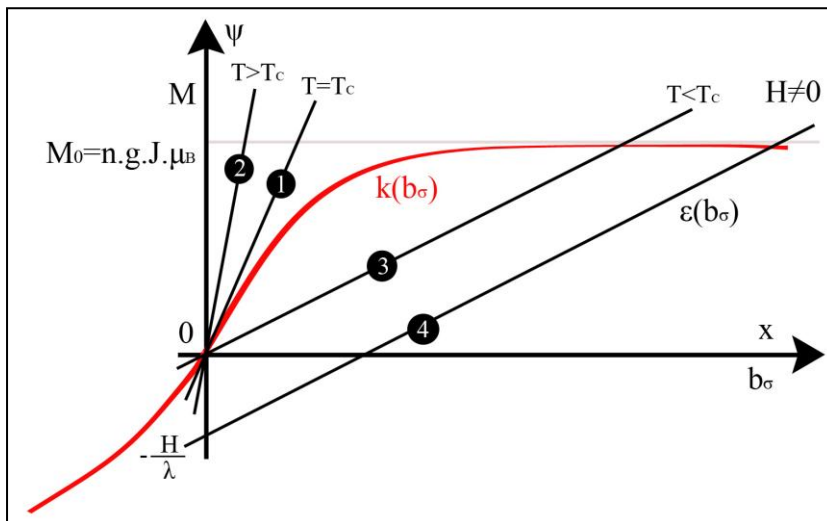
$$b_\sigma = \frac{\mu_B \cdot g \cdot J \cdot \mu_o \cdot (H + H_w)}{k_B \cdot T} = \frac{M_0 \cdot \mu_o \cdot (H + \lambda \cdot M)}{n \cdot k_B \cdot T} \quad (\text{A82})$$

Με την αντικατάσταση της προηγούμενης σχέσης και της τιμής (κορεσμού) της μαγνήτισης (A63) στο απόλυτο μηδέν  $M_0 = n \cdot g \cdot \mu_B \cdot J$  στη συνάρτηση του Brillouin (A64α), η μαγνήτιση υπολογίζεται από τη σχέση:

$$k(b_\sigma) = M = M_0 \cdot B_J(b_\sigma) \quad (\text{A83})$$

Η μαγνήτιση  $M$  από την προηγούμενη σχέση, υπολογίζεται:

$$\varepsilon(b_\sigma) = M(b_\sigma) = \frac{n \cdot k_B \cdot T}{\lambda \cdot \mu_o \cdot M_0} \cdot b_\sigma - \frac{H}{\lambda} \quad (\text{A84α}) \quad \text{ή} \quad \frac{M}{M_0} = \frac{n \cdot k_B \cdot T}{\lambda \cdot \mu_o \cdot M_0^2} \cdot b_\sigma - \frac{H}{\lambda \cdot M_0} \quad (\text{A84β})$$



Οι επιτρεπτές τιμές της μαγνήτισης υπολογίζονται γραφικά (διάγραμμα A6) από τα κοινά σημεία της καμπύλης  $k(b_\sigma)$  και της ευθείας  $\varepsilon(b_\sigma)$ .

**Διάγραμμα A6.** Μεταβολή της μαγνήτισης  $M$  ως συνάρτηση της παραμέτρου  $b_\sigma$ .

Οι γραφικές παραστάσεις των  $k(b_\sigma)$  και  $\varepsilon(b_\sigma)$  είναι παρόμοιες με αυτές της κλασικής προσέγγισης (διάγραμμα A3) ως προς το πλήθος των κοινών σημείων με τη μεταβολή της θερμοκρασίας  $T$  ή της κλίσης της ευθείας  $\varepsilon(b_\sigma)$  και ισχύουν τα ίδια συμπεράσματα:

➤ Απουσίας μαγνητικού πεδίου  $H=0$ , σύμφωνα με τις σχέσεις (A84β),(A82) ισχύει:

$$\frac{M}{M_0} \stackrel{H=0}{=} \frac{n \cdot k_B \cdot T}{\lambda \cdot \mu_o \cdot M_0^2} \cdot b_o \quad (A85\alpha), \quad \text{όταν} \quad b_o \stackrel{H=0}{=} \frac{M_{\max} \cdot \mu_o \cdot \lambda \cdot M}{n \cdot k_B \cdot T} \quad (A85\beta)$$

• Όταν οι κλίσεις της ευθείας και της καμπύλης  $k(b_o)$  συμπίπτουν στην αρχή των αξόνων (θέση1), η κλίση της ευθείας  $\varepsilon(b_o)$  είναι ίση με την κλίση  $\frac{J+1}{3J}$  της προσέγγισης Brillouin  $B_J(b_o) \approx \frac{J+1}{3J} \cdot b_o$  (A65α) στο όριο υψηλής θερμοκρασίας και η θερμοκρασία Curie  $T_c$  υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\frac{n \cdot k_B \cdot T_c}{\lambda \cdot \mu_o \cdot M_0^2} = \frac{J+1}{3J} \Leftrightarrow T_c = \frac{J+1}{3J} \cdot \frac{\lambda \cdot \mu_o \cdot M_0^2}{n \cdot k_B} \stackrel{(A64\gamma)}{=} \frac{J+1}{3J} \cdot \frac{\lambda \cdot \mu_o \cdot n \cdot g^2 J \cdot \mu_B^2}{3k_B} \stackrel{(A61)}{=} \frac{n \cdot \mu_o \cdot m_{\text{eff}}^2 \cdot \lambda}{3k_B} \quad (A86\alpha)$$

Με την αντικατάσταση της σταθεράς  $\lambda = \frac{3 \cdot J \cdot T_c \cdot n \cdot k_B}{(J+1) \cdot \mu_o \cdot M_0^2}$  (A86β) από την προηγούμενη σχέση στην (A85α), ο

λόγος  $\frac{M}{M_0}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας  $T$  υπολογίζεται:

$$\frac{M}{M_0} = \frac{J+1}{3J} \cdot \frac{T}{T_c} \cdot b_o \quad (A87)$$

• Όταν  $T > T_c$  (θέση 2) υπάρχει μόνο ένα κοινό σημείο με την καμπύλη  $k(b_o)$  στη θέση  $b_o=0$ , όταν  $H=0$ . Επομένως σε υψηλότερες θερμοκρασίες της  $T_c$ , το μέσο «μοριακό» πεδίο  $H_w = \lambda \cdot M$  (A69) είναι αμελητέο σε σχέση με το εφαρμοζόμενο πεδίο  $H$  με αποτέλεσμα να μην εμφανίζεται αυτογενής μαγνητική πόλωση και να υπερισχύει η παραμαγνητική συμπεριφορά.

• Όταν  $T < T_c$  (θέση 3) εκτός από τη θέση  $b_o=0$ ,  $H=0$ , υπάρχει ένα δεύτερο κοινό σημείο για  $b_o \neq 0$  με την καμπύλη  $k(b_o)$ , που υποδηλώνει την ύπαρξη αυτογενούς μαγνητικής πόλωσης, χωρίς την ύπαρξη εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Όταν  $T \ll T_c$ , το σημείο τομής των  $\varepsilon(b_o)$  και  $k(b_o)$  μετακινείται δεξιότερα, υποδηλώνοντας μαγνητική πόλωση  $M = M_0 = n \cdot \mu_B \cdot g \cdot J$  (A83) σε κατάσταση κορεσμού, σε θερμοκρασίες κοντά στο απόλυτο μηδέν.

Η καμπύλη της μαγνήτισης  $M$  εμφανίζει ασυνέχεια στη θερμοκρασία  $T_c$  (διάγραμμα A7), που προβλέπεται και μπορεί να υπολογιστεί θεωρητικά, αλλά δε συμφωνεί ακριβώς με τα πειραματικά δεδομένα.

Για θερμοκρασίες μικρότερες αλλά παραπλήσιες της  $T_c$ , έτσι ώστε  $\frac{T}{T_c} \approx 1$ , η συνάρτηση  $\coth x$  μέσω

του αναπτύγματος Taylor προσεγγίζεται:  $\coth x \approx \frac{1}{x} + \frac{x}{3} - \frac{x^3}{45}$ . Για  $x=b_o$ , η συνάρτηση Brillouin  $B_J(b_o)$  (A64α), προσεγγίζεται:

$$\begin{aligned} \frac{M}{M_0} &= \frac{2J+1}{2J} \left[ \frac{2J}{2J+1} \cdot \frac{1}{b_o} + \frac{1}{3} \cdot \frac{2J+1}{2J} \cdot b_o - \frac{1}{45} \left( \frac{2J+1}{2J} \right)^3 \cdot b_o^3 \right] - \frac{1}{2J} \left[ 2J \cdot \frac{1}{b_o} + \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{2J} \cdot b_o - \frac{1}{45} \left( \frac{b_o}{2J} \right)^3 \right] = \\ &= \frac{J+1}{3J} \cdot b_o - \frac{(J+1) \cdot (2J^2 + 2J + 1)}{90 \cdot J^3} \cdot b_o^3 \end{aligned} \quad (A88)$$

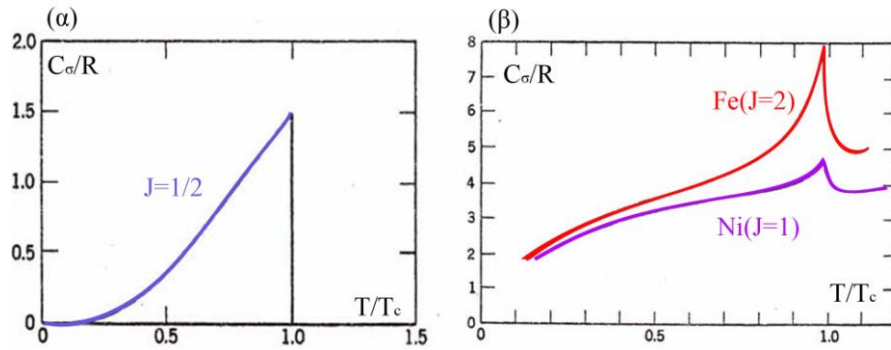
Με αντικατάσταση της παραμέτρου  $b_o = \frac{3J}{J+1} \cdot \frac{T_c}{T} \cdot \frac{M}{M_0}$  από τη σχέση (A87) η τελευταία σχέση γράφεται:

$$\left(\frac{M}{M_0}\right)^2 = \frac{10.(J+1)^2}{3.(2J^2+2J+1)} \cdot \left(\frac{T}{T_c}\right)^2 \cdot \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^{\frac{T}{T_c} \rightarrow 1} \approx \frac{10.(J+1)^2}{3.(2J^2+2J+1)} \cdot \left(1 - \frac{T}{T_c}\right) \quad (A89)$$

Επειδή  $\frac{d(\frac{M}{M_0})}{dT} = -\left[\frac{10.(J+1)^2}{3.(2J^2+2J+1)}\right]^{1/2} \cdot \frac{1}{2T_c \cdot \sqrt{1 - \frac{T}{T_c}}}$ , η αυτογενής μαγνήτιση  $M$  μειώνεται συνεχώς με την αύξηση της θερμοκρασίας  $T$  και εμφανίζει ασυνέχεια στη θερμοκρασία  $T_c$ .

Το μέγεθος της ασυνέχειας στην καμπύλη της μαγνήτισης (**διάγραμμα A7**), μπορεί να υπολογιστεί από τη μεταβολή της ειδικής θερμότητας  $C_\sigma$ , πλησίον της θερμοκρασίας  $T_c$ . Η αύξηση της εσωτερικής ενέργειας  $U_\sigma$  του σιδηρομαγνητικού υλικού από την ύπαρξη αυτογενούς μαγνήτισης, ως αποτέλεσμα του μέσου «μοριακού» πεδίου  $H_w = \lambda \cdot M$ , υπολογίζεται από τη σχέση:

$$dU_\sigma = -\int H_w \cdot dM = -\int \lambda \cdot M \cdot dM = -\frac{1}{2} \cdot \lambda \cdot M^2 \quad (A90)$$



**Διάγραμμα A7.** (α) Απεικόνιση της μορφής και του μέτρου στην ασυνέχεια της μεταβολής της ειδικής θερμότητας  $C_\sigma$  σιδηρομαγνητικού υλικού για  $J = \frac{1}{2}$ , όπως υπολογίζεται από τη σχέση (A98). (β) Απεικόνιση της ασυνέχειας στη μεταβολή της ειδικής θερμότητας, όπως καταγράφεται πειραματικά [46,47] για τον Fe ( $J=S=2$ ) και το Ni ( $J=S=1$ ). Οι θεωρητικές τιμές υπολογίζονται από την ίδια σχέση,  $dC_{Fe} = \frac{30}{13}R = 2,3R$  και  $dC_{Ni} = 2R$ .

Η αύξηση της ειδικής θερμότητας  $dC_\sigma$ , υπολογίζεται από τη σχέση:

$$dC_\sigma = \frac{dU_\sigma}{dT} = -\frac{1}{2} \cdot \lambda \cdot \frac{dM^2}{dT} = -\frac{1}{2} \cdot \lambda \cdot \frac{d(\frac{M^2}{M_0^2}) \cdot M_0^2}{d(\frac{T}{T_c}) \cdot T_c} = -\frac{1}{2} \cdot \lambda \cdot \frac{M_0^2}{T_c} \cdot \frac{d(\frac{M}{M_0})^2}{d(\frac{T}{T_c})} \quad (A91)$$

Η ποσότητα  $\lambda \cdot \frac{M_0^2}{T_c}$  από τη σχέση (A86β) υπολογίζεται:  $\lambda \cdot \frac{M_0^2}{T_c} = \frac{3J}{J+1} \cdot \frac{n \cdot k_B}{\lambda \cdot \mu_o}$  (A92)

Με την αντικατάσταση της τελευταίας σχέσης στη σχέση (A91), η μεταβολή της ειδικής θερμότητας

$$\text{υπολογίζεται: } dC_\sigma = -\frac{1}{2} \cdot \frac{3J}{J+1} \cdot \frac{n \cdot k_B}{\mu_o} \cdot \frac{d(\frac{M}{M_0})^2}{d(\frac{T}{T_c})} \quad (A93)$$

Με την αντικατάσταση του πηλίκου  $(\frac{M}{M_0})^2$  από τη σχέση (A89), η προηγούμενη σχέση γράφεται:

$$dC_\sigma = \frac{5J(J+1)}{2J^2+2J+1} \cdot \frac{n \cdot k_B}{\mu_0} = \frac{5J(J+1)}{2J^2+2J+1} \cdot R \quad (A94)$$

όπου  $R=8,314 \text{ J/mol.K}$  η παγκόσμια σταθερά των αερίων.

Οι διαφορές μεταξύ θεωρίας και πειραματικών αποτελεσμάτων στο μέτρο και τη μορφή της ασυνέχειας, υποδηλώνουν φαινόμενα που δεν προβλέπονται από τη θεωρία του μέσου «μοριακού» πεδίου.

➤ Με την εφαρμογή εξωτερικού πεδίου  $H \neq 0$ , διακρίνονται οι παρακάτω περιπτώσεις:

• Για  $T > T_c$  (διάγραμμα 6, θέση 4), ισχύει η προσέγγιση υψηλής θερμοκρασίας (A65α)

$$B_J(b_\sigma) \approx \frac{J+1}{3J} \cdot b_c = \frac{J+1}{3J} \cdot \frac{M_0 \cdot \mu_0 \cdot (H + \lambda \cdot M)}{n \cdot k_B \cdot T} \quad \text{και η μαγνήτιση υπολογίζεται με αντικατάσταση της σταθεράς}$$

$$\lambda = \frac{3n \cdot k_B \cdot T_c}{\mu_0 \cdot M_0^2} \quad \text{από τη σχέση (A86) στη σχέση (A83):}$$

$$M = M_0 \cdot \frac{J+1}{3J} \cdot \frac{M_0 \cdot \mu_0 \cdot (H + \lambda \cdot M)}{n \cdot k_B \cdot T} \Leftrightarrow M = \frac{n \cdot g^2 \cdot \mu_B^2 \cdot J(J+1) \cdot \mu_0 \cdot H}{3k_B \cdot (T - T_c)} \stackrel{(A61)}{=} \frac{n \cdot m_{\text{eff}}^2 \cdot \mu_0 \cdot H}{3k_B \cdot (T - T_c)} \quad (A95)$$

Η μαγνητική επιδεκτικότητα  $\chi$  ανά μονάδα όγκου, υπολογίζεται με την αντικατάσταση της προηγούμενης σχέσης στην (A4):  $\chi = \frac{M}{H} = \frac{n \cdot m_{\text{eff}}^2 \cdot \mu_0}{3k_B \cdot (T - T_c)} \quad (A96)$

Η μαγνητική επιδεκτικότητα  $\chi_m$  ανά μονάδα μάζας, υπολογίζεται από τη σχέση (A5α):

$$\chi_m = \frac{\chi}{\rho} = \frac{n \cdot m_{\text{eff}}^2 \cdot \mu_0}{3k_B \cdot \rho} \cdot \frac{1}{T - T_c} \quad (A97)$$

Ο συντελεστής του  $\frac{1}{T - T_c}$ , αποτελεί έκφραση της σταθεράς του Curie και η προηγούμενη σχέση γράφεται:

$$\chi_m = \frac{C}{T - T_c}, \quad \text{όπου } C = \frac{n \cdot m_{\text{eff}}^2 \cdot \mu_0}{3k_B \cdot \rho} \quad (A98)$$

• Όταν  $H \neq 0$  και  $T < T_c$ , το εφαρμοζόμενο εξωτερικό πεδίο  $H$  είναι αμελητέο σε σχέση με το «μοριακό» πεδίο. Με την αντικατάσταση της παραμέτρου  $b_\sigma = \frac{M_0 \cdot \mu_0 \cdot \lambda \cdot M}{n \cdot k_B \cdot T}$  από τη σχέση (A82) και της

σταθεράς  $\lambda = \frac{3J}{J+1} \cdot \frac{n \cdot k_B \cdot T_c}{\mu_0 \cdot M_0^2}$  από τη σχέση (A86) στη σχέση (A83), η μαγνήτιση υπολογίζεται:

$$\frac{M}{M_0} = \frac{2J+1}{2J} \cdot \coth\left(\frac{3}{2} \cdot \frac{2J+1}{J+1} \cdot \frac{M}{M_0} \cdot \frac{T_c}{T}\right) - \frac{1}{2J} \cdot \coth\left(\frac{3}{2} \cdot \frac{1}{J+1} \cdot \frac{M}{M_0} \cdot \frac{T_c}{T}\right) \quad (A99)$$

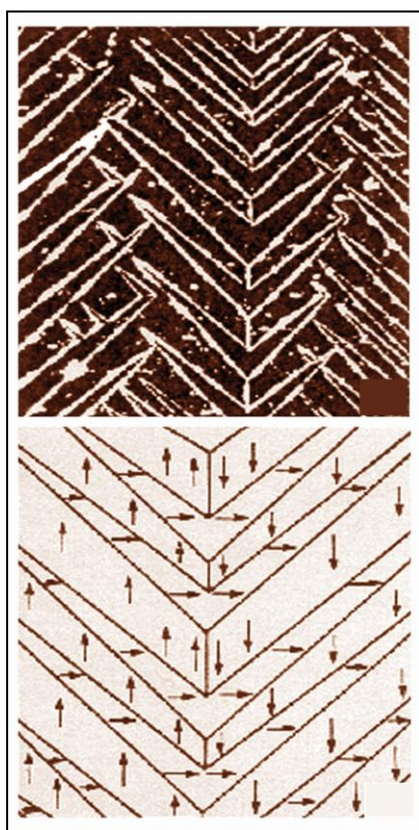


### A3.3 Προέλευση του «μοριακού» πεδίου του Weiss

Παρότι το μέσο «μοριακό» πεδίο του Weiss που υπολογίζεται με την παραδοχή της ομοιογενούς κατανομής των μαγνητικών ροπών σε όλο τον όγκο του υλικού εξηγεί την εμφάνιση της ενδογενούς μαγνήτισης, δεν αιτιολογεί την προέλευσή του, ούτε την αυθόρμητη οργάνωση των μαγνητικών ροπών κατά περιοχές με επιλεκτικό προσανατολισμό της αυθόρμητης μαγνήτισης προς συγκεκριμένες «εύκολες» κατευθύνσεις.

Τα σιδηρομαγνητικά υλικά χωρίς την εφαρμογή εξωτερικού πεδίου (σχήμα A10), εμφανίζουν αυθόρμητα παράλληλες ή αντιπαράλληλες ηλεκτρονιακές ροπές κατά μήκος συγκεκριμένων κρυσταλλογραφικών διευθύνσεων, εντός οριοθετημένων περιοχών (περιοχές Weiss), που συνιστούν μαγνητικούς τομείς διαφόρων μεγεθών και σχημάτων με διαφορετικούς προσανατολισμούς, έτσι ώστε η συνολική μαγνήτιση να είναι μηδενική.

Οι περιοχές Weiss διαχωρίζονται από ευκίνητα μαγνητικά τοιχώματα (τοιχώματα Bloch), που περιέχουν ενδιάμεσα προσανατολισμένες ηλεκτρονιακές ροπές, σε σχέση με τις γειτονικές περιοχές.



**Σχήμα A10.** Καταγραφή των προϋπαρχόντων μαγνητικών περιοχών (1931) από τον Francis Bitter<sup>7</sup> [48], μέσω μίγματος λεπτής μαγνητικής σκόνης σε υγρό φορέα, που τοποθετήθηκε στην επιφάνεια αμαγνήτιστου σιδηρομαγνητικού υλικού. Η χαρτογράφηση επιτυγχάνεται με τη συσσώρευση των σωματιδίων στα σύνορα των μαγνητικών περιοχών, όπου η μεταβολή του εσωτερικού μαγνητικού πεδίου είναι μέγιστη. Άλλες μέθοδοι παρατήρησης των μαγνητικών περιοχών, χρησιμοποιούν μαγνητοοπτικές μεθόδους όπως η τεχνική Barkhausen [49], που βασίζεται στην παρατήρηση διακριτών αλλαγών στην μαγνητική επαγωγή εξαιτίας των επαναπροσανατολισμών των περιοχών με την αύξηση του μαγνητικού πεδίου και η μέθοδος Kerr και Faraday [50] που βασίζεται στη μέτρηση της περιστροφής της πόλωσης, κατά την ανάκλαση του φωτός στην επιφάνεια του μαγνητικού υλικού. Σήμερα χρησιμοποιείται η ηλεκτρονική μικροσκοπία διερχόμενης δέσμης (TEM) συνήθως σε λεπτά υμένια, η τοπογραφία περίθλασης ακτινών X και περίθλασης νετρονίων, μέσω της καταγραφής των πλεγματικών μεταβολών κατά τη μαγνήτιση και η μικροσκοπία μαγνητικής δύναμης (MFM).

Παρά την πολυπλοκότητα της οργανωτικής δομής και των μηχανισμών αλληλεπίδρασης μεταξύ των μαγνητικών περιοχών, η τελική διαμόρφωση της μαγνήτισης των σιδηρομαγνητικών υλικών, καθορίζεται από την απαίτηση ελαχιστοποίησης της ενέργειάς τους. Για την αλλαγή της μαγνήτισης από μια «εύκολη» κατεύθυνση σε άλλη, απαιτείται ενέργεια. Αν το ενεργειακό φράγμα είναι αρκετά υψηλό, το υλικό μπορεί να παραμείνει μαγνητισμένο προς την ίδια κατεύθυνση για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα δεκαετομμυρίων χρόνων.

<sup>7</sup> Francis Bitter, «*Experiments of the Nature of Ferromagnetism*», Physical Review, vol.41, page 507, 15 August 1932. Οι εικόνες προέρχονται από το βιβλίο του David C.Jiles, «*Introduction to Magnetism and Magnetic Materials*», CRC Press (1998).

Η συνολική ενέργεια  $\varepsilon_{\text{ολ.}} (\text{J/m}^3)$  ενός σιδηρομαγνητικού υλικού, υπολογίζεται από το άθροισμα:

$$\varepsilon_{\text{ολ.}} = \varepsilon_{\text{H}} + \varepsilon_{\text{ex}} + \varepsilon_{\text{d}} + \varepsilon_{\mu} + \varepsilon_{\text{o}} \quad (\text{A100}), \quad \text{όπου:}$$

1)  $\varepsilon_{\text{H}}$ : Η ενέργεια της μαγνήτισης του υλικού που οφείλεται στην αλληλεπίδρασή του με εξωτερικό μαγνητικό πεδίο  $H$ ,

2)  $\varepsilon_{\text{ex}}$ : η ενέργεια ανταλλαγής,

3)  $\varepsilon_{\text{d}}$ : η ενέργεια απομαγνήτισης,

4)  $\varepsilon_{\mu} = \varepsilon_{\text{s}} + \varepsilon_{\text{κ}} + \varepsilon_{\sigma} + \varepsilon_{\text{E}}$ , η ενέργεια μαγνητικής ανισοτροπίας, ως άθροισμα των ενεργειών: 4α) ανισοτροπίας σχήματος ( $\varepsilon_{\text{s}}$ ), 4β) μαγνητοκρυσταλλικής ανισοτροπίας ( $\varepsilon_{\text{κ}}$ ) 4γ) μαγνητοελαστικής ανισοτροπίας ( $\varepsilon_{\sigma}$ ) και 4δ) επιφανειακής ανισοτροπίας ( $\varepsilon_{\text{E}}$ ).

5)  $\varepsilon_{\text{o}}$ : οποιαδήποτε άλλη ενέργεια που μπορεί να οφείλεται σε ατέλειες της κρυσταλλικής δομής.

**2) Ενέργεια ανταλλαγής ( $\varepsilon_{\text{ex}}$ ):** Η προέλευση του «μοριακού πεδίου» του Weiss αποδόθηκε από τον Heisenberg (1928) στις κβαντομηχανικές δυνάμεις ανταλλαγής, που οφείλονται στα spin των ατόμων. Σύμφωνα με την κλασική φυσική, οι θέσεις δυο ατόμων καθορίζονται από την τάση ελαχιστοποίησης της ενέργειας των απωστικών και ελκτικών δυνάμεων μεταξύ των ηλεκτρονίων ή των πυρήνων και μεταξύ των ηλεκτρονίων και των πυρήνων των ατόμων. Σύμφωνα με την απαγορευτική αρχή του Pauli κατά την κβαντική θεώρηση, οι δυνάμεις ανταλλαγής μειώνουν επιπλέον την ενέργεια των ατόμων και συνεπώς τα άτομα μπορούν να υπάρξουν στον ίδιο χώρο σχηματίζοντας μόριο, μόνο αν έχουν παράλληλα ή αντιπαράλληλα spins.

Η αλληλεπίδραση των ατόμων με  $n$  ηλεκτρόνια, με κβαντικό αριθμό spin  $S = n \cdot \frac{1}{2}$  και με την προϋπόθεση ότι η αλληλεπίδραση spin-τροχιάς είναι μικρή, περιγράφεται μαθηματικά από τη χαμιλτονιανή:

$$H_{\text{ex}} = - \sum_i \sum_j J_{\text{ex}} \cdot \vec{S}_i \cdot \vec{S}_j \quad (\text{A101})$$

Στο παραπάνω άθροισμα,  $\vec{S}_i$  και  $\vec{S}_j$ , είναι τα spin των ατόμων στις θέσεις  $i$  και  $j$  του κρυστάλλου και  $J_{\text{ex}}$  ( $J$ ) το ολοκλήρωμα ανταλλαγής, που περιγράφει το είδος και το ποσοστό της επικάλυψης των τροχιακών των ατόμων. Η αλληλεπίδραση εξωτερικού μαγνητικού πεδίου  $H$  σε οποιαδήποτε  $z$ -κατάσταση, με άτομα συνολικής διπολικής ροπής  $m_a$ , υπολογίζεται από τις ιδιοτιμές του τελεστή  $\hat{H}$  στην εξίσωση του Hamilton:

$$H = H_{\text{H}} + H_{\text{W}} = \frac{m_a \cdot \mu_o \cdot H}{S} \cdot \sum_{j=1}^N S_j^z - \sum_{j,j'} \sum J_{\text{ex}} \cdot \vec{S}_j \cdot \vec{S}_{j'} \quad (\text{A102})$$

Επειδή η επίλυση του προβλήματος είναι εφικτή για μικρό εύρος θερμοκρασιών, αναζητούνται προσεγγιστικές λύσεις με την επιπλέον παραδοχή της ταχείας εξασθένησης των δυνάμεων ανταλλαγής, συναρτήσει της απόστασης. Στην απλούστερη περίπτωση αλληλεπιδράσεων μικρής εμβέλειας, μεταξύ ζευγαριών από spins  $\vec{S}_i, \vec{S}_j$  γειτονικών ατόμων  $i, j$  που σχηματίζουν γωνία  $\hat{\phi}_{ij}$ , η ενέργεια ανταλλαγής υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$E_{\text{ex}} = -2 \cdot J_{\text{ex}} \cdot \sum \vec{S}_i \cdot \vec{S}_j = -2 \cdot J_{\text{ex}} \cdot \sum S_i \cdot S_j \cdot \sin \phi_{ij} \quad (\text{A103})$$

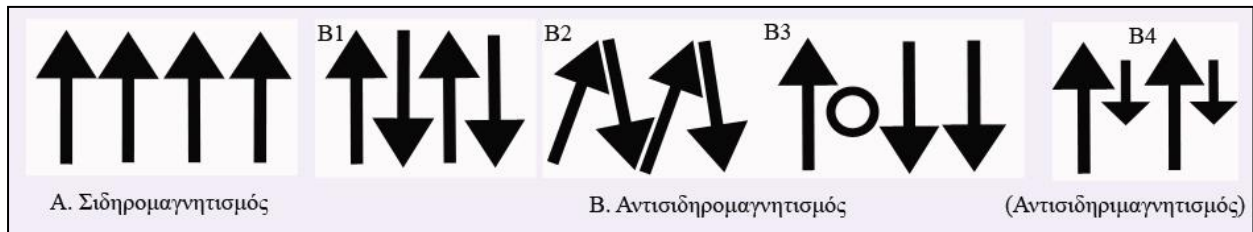
Από την τελευταία εξίσωση, εξάγονται τα παρακάτω ποιοτικά συμπεράσματα:

- Αν  $J_{\text{ex}} > 0$ , η ενέργεια ελαχιστοποιείται για  $\phi_{ij} = 0^\circ$  ή  $\sin 0^\circ = 1$ , όταν τα spin είναι παράλληλα.

Συνεπώς, απαραίτητη προϋπόθεση για την εμφάνιση σιδηρομαγνητισμού είναι  $J_{\text{ex}} > 0$ .

- Αν  $J_{ex} < 0$ , η ενέργεια ελαχιστοποιείται για  $\phi_{ij} = 180^\circ$  ή  $\sin 180^\circ = -1$ , όταν τα spin είναι αντιπαράλληλα. Συνεπώς, απαραίτητη προϋπόθεση για την εμφάνιση του αντισιδηρομαγνητισμού είναι  $J_{ex} < 0$ .

Ο προσανατολισμός των μαγνητικών ροπών, εξαρτάται από το πρόσημο της ενέργειας ανταλλαγής  $J_{ex}$ , ενώ ο τρόπος διάταξης από την κρυσταλλική δομή των σιδηρομαγνητικών υλικών.



**Σχήμα Α11.** Απεικόνιση του προσανατολισμού των μαγνητικών ροπών των μονήρων ηλεκτρονίων, στα σιδηρομαγνητικά (Α), τα αντισιδηρομαγνητικά (Β) υλικά.

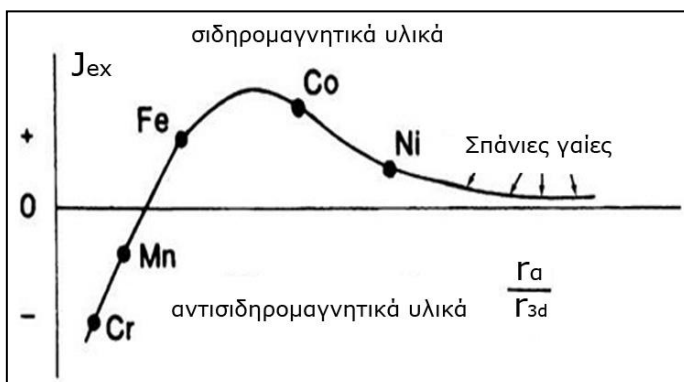
-Στα σιδηρομαγνητικά υλικά Fe, Co, Ni, Gd, Dy, EuO, EuS, κ.ά., οι ηλεκτρονιακές ροπές (σχήμα Α11Α) έχουν παράλληλη διάταξη.

-Στα αντισιδηρομαγνητικά υλικά (Cr, α-Mn, Ce, Nd, MnO, MnF<sub>2</sub>, FeTiO<sub>3</sub>, κ.ά., οι ηλεκτρονιακές ροπές είναι αντίθετες (σχήμα Α11Β), με αποτέλεσμα η συνολική μαγνήτιση να είναι μηδενική. Σε κάποια αντισιδηρομαγνητικά υλικά οι ηλεκτρονιακές ροπές αποκλίνουν κάποιες μοίρες (π.χ. αιματίτης) από την τέλεια ευθυγράμμιση (σχήμα Α11/Β2) ή δεν αλληλοαναιρούνται τελείως λόγω ατελειών (π.χ. λεπτόκοκκος αιματίτης) στην κρυσταλλική δομή (σχήμα Α11/Β3), με αποτέλεσμα να εμφανίζουν ασθενή παραμένουσα μαγνήτιση.

-Στα αντισιδηριμαγνητικά (σχήμα Α11/Β4) ή σιδηριμαγνητικά υλικά (φερρίτες), οι αντιπαράλληλες μαγνητικές ροπές εμφανίζουν άνισα μέτρα, με αποτέλεσμα να εμφανίζουν συνολική ροπή, ασθενέστερη από των σιδηρομαγνητικών υλικών. Χαρακτηριστικές αντισιδηριμαγνητικές ενώσεις είναι του τύπου  $Me^{+2}Fe^{+3}O_4$ , όπου Me: Mn, Co, Ni, Cu, Mg, Zn, Cd.

➤ Οι ενεργειακές αλληλεπιδράσεις μειώνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας και μηδενίζονται πάνω από μια χαρακτηριστική για κάθε σιδηρομαγνητικό υλικό θερμοκρασία Curie ( $T_c$ ), όπου επικρατεί η παραμαγνητική συμπεριφορά. Η αντίστοιχη θερμοκρασία για τα αντισιδηριμαγνητικά υλικά, καλείται θερμοκρασία Neel ( $T_N$ ).

Το πρόσημο του ολοκληρώματος ανταλλαγής  $J_{ex}$ , σε συνάρτηση με το πηλίκο  $\frac{r_a}{r_{3d}}$  της ακτίνας  $r_a$  μεταξύ των ατόμων, προς την ακτίνα  $r_{3d}$  του 3d τροχιακού, προβλέπεται από την καμπύλη (διάγραμμα Α8) των Bethe-Slater.



**Διάγραμμα Α8.** Γραφική παράσταση της καμπύλης Bethe-Slater [51]. Όσο η απόσταση  $r_a$  μεταξύ ίδιων ατόμων ελαττώνεται χωρίς να μεταβάλλεται η ακτίνα των 3d τροχιακών τους, αυξάνεται η θετική αλληλεπίδραση ανταλλαγής  $J_{ex}$ , που ευνοεί την παράλληλη διάταξη των spin μέχρι κάποια απόσταση προσέγγισης, πέρα από την οποία ευνοείται η αντιπαράλληλη διάταξη των spin.

Το μέτρο της επικάλυψης του ολοκληρώματος ανταλλαγής  $J_{\text{ex}}$ , είναι ανάλογο της θερμοκρασίας  $T_c$ . Η ενέργεια ανταλλαγής  $E_{\text{ex}}$  μεταξύ ενός ατόμου σε έναν κρύσταλλο, με  $\gamma$  πλησιέστερους γείτονες με τα ίδια ομόρροπα spin  $\vec{S}_i = \vec{S}_j = \vec{S}$ , υπολογίζεται από την τελευταία εξίσωση (A103):  $E_{\text{ex}} = -2\gamma \cdot J_{\text{ex}} \cdot S^2$  (A104)

Η μέγιστη ενέργεια  $E_w$  του «μοριακού» πεδίου  $H_w = \lambda \cdot M_o$  των  $n(\text{m}^{-3})$  προσανατολισμένων μαγνητικών ροπών  $m_o = g \cdot J \cdot \mu_B$  (A59), με συνολική μαγνήτιση  $M_o = n \cdot m_o$ , υπολογίζεται από τη σχέση:

$$E_w = -m_o \cdot \mu_o \cdot H_w = -\frac{M_o}{n} \cdot \lambda \cdot \mu_o \cdot M_o = -\frac{\lambda \cdot \mu_o \cdot M_o^2}{n} \quad (\text{A105})$$

Επειδή  $E_{\text{ex}} = E_w$ , το ολοκλήρωμα ανταλλαγής  $J_{\text{ex}}$  υπολογίζεται από τις σχέσεις (A104), (A105), μέσω της εξίσωσης:  $-2\gamma \cdot J_{\text{ex}} \cdot S^2 = -\frac{\lambda \cdot \mu_o \cdot M_o^2}{n} \Leftrightarrow J_{\text{ex}} = \frac{\lambda \cdot \mu_o \cdot M_o^2}{2 \cdot n \cdot \gamma \cdot S^2}$  (A106)

Με την αντικατάσταση της σταθεράς  $\lambda = \frac{3 \cdot J \cdot n \cdot k_B \cdot T_c}{(J+1) \cdot \mu_o \cdot M_o^2}$  από τη σχέση (A86) στην προηγούμενη σχέση, η

ενέργεια ανταλλαγής υπολογίζεται:  $J_{\text{ex}} = \frac{3 \cdot J \cdot k_B \cdot T_c}{2(J+1) \cdot \gamma \cdot S^2}$  (A107)

Επειδή η συνολική στροφορμή  $J = S + L \approx S$  οφείλεται κυρίως στο spin, η τελευταία σχέση γράφεται:

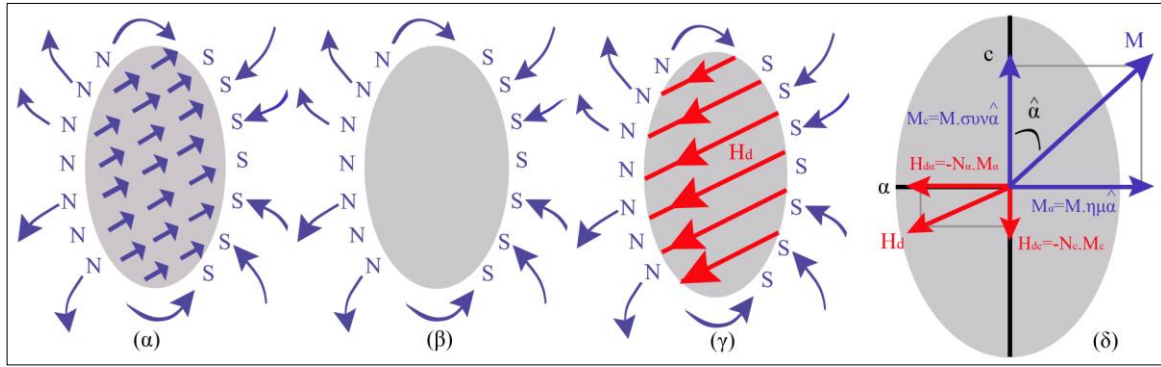
$$J_{\text{ex}} = \frac{3 \cdot S \cdot k_B \cdot T_c}{2(S+1) \cdot \gamma \cdot S^2} = \frac{3 \cdot k_B \cdot T_c}{2S(S+1) \cdot \gamma} \quad (\text{A108})$$

Σύμφωνα με την τελευταία σχέση, το μέτρο της επικάλυψης των τροχιακών που εκφράζει το ολοκλήρωμα ανταλλαγής  $J_{\text{ex}}$ , είναι ανάλογο της θερμοκρασίας  $T_c$ , όπως φαίνεται στο διάγραμμα A8, όπου το Co ( $T_c = 1388\text{K}$ ) έχει την υψηλότερη θερμοκρασία Curie, ενώ το Ni ( $T_c = 627\text{K}$ ) τη χαμηλότερη.

Η ενέργεια ανταλλαγής δεν εξαρτάται από τις μαγνητοστατικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ γειτονικών μαγνητικών ροπών, αλλά είναι ηλεκτροστατικής προέλευσης και απαιτείται η κβαντομηχανική για την περιγραφή της. Η σχέση (A103) αποτελεί το εντοπισμένο μοντέλο του Heisenberg για μη μεταλλικά ορυκτά, όπως ο μαγνητίτης ή ο αιματίτης. Για την περιγραφή του μαγνητισμού των μετάλλων, των κραμάτων και των ενώσεων, εφαρμόζονται συλλογικά μοντέλα ηλεκτρονίων με στατιστική Fermi. Η θεωρία *itinerant electron ferromagnetism* του Stoner<sup>8</sup> [52], που αποτελεί προσέγγιση μέσου πεδίου, περιγράφει τις ιδιότητες των 3d ηλεκτρονίων σε μεταβατικά μέταλλα, ενώ ο μαγνητισμός των σπάνιων γαιών περιγράφεται με το μοντέλο (RKKY) της αλληλεπίδρασης s-d ηλεκτρονίων των Ruderman-Kittel-Kasuya-Yosida [53], όπου τα spin των ατόμων αλληλεπιδρούν έμμεσα μέσω της ταινίας των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας.

**3) Ενέργεια απομαγνήτισης ( $\epsilon_d$ ):** Η στατική μαγνητοκρυσταλλική ενέργεια  $\epsilon_{\text{ms}}(\frac{J}{\text{m}^3})$  οφείλεται στην αλληλεπίδραση μακράς εμβέλειας τύπου δίπολου-δίπολου, που οφείλεται στη μαγνήτιση υπό την επίδραση του πεδίου απομαγνήτισης  $\vec{H}_d$  της ενδογενούς μαγνήτισης  $\vec{M}$  που δημιουργούν οι κατανεμημένοι μαγνητικοί πόλοι στον όγκο του υλικού και υπολογίζεται από τη σχέση:  $\epsilon_{\text{ms}} = \mu_o \cdot \int \vec{H}_d \cdot d\vec{M}$  (A109)

<sup>8</sup> Alexander Lichtenstein I. Institut für Theoretische Physik Universität Hamburg, 20355 Hamburg, Germany, «Magnetism: From Stoner to Hubbard».



**Σχήμα A12.** (α) Προσανατολισμός μαγνητικών δίπολων εντός κρυστάλλου ελλειψοειδούς συμμετρίας, αποτελούμενου από μια περιοχή Weiss. (β) Δημιουργία πανομοιότυπου εξωτερικού πεδίου από θεωρούμενα επιφανειακά μονόπολα, (γ) Πεδίο απομαγνήτισης  $\vec{H}_d$  ως αποτέλεσμα ύπαρξης επιφανειακών μονόπολων. (δ) Απεικόνιση του πεδίου απομαγνήτισης  $\vec{H}_d$  και της ενδογενούς μαγνήτισης  $\vec{M}$  που σχηματίζει γωνία  $\hat{\alpha}$  με τον άξονα μαγνήτισης c.

Το εξωτερικό μικροσκοπικό πεδίο κάθε κρυστάλλου, είναι ανάλογο της ενδογενούς μαγνήτισης  $\vec{M}$  του υλικού και πανομοιότυπο με το πεδίο που θα μπορούσε να παραχθεί από ένα σύνολο ελεύθερων μονόπολων (σχήμα A12α,β) στην επιφάνειά του. Το εσωτερικό πεδίο απομαγνήτισης  $\vec{H}_d$  (σχήμα A12γ) που παράγουν τα επιφανειακά μονόπολα είναι ανάλογο της μαγνήτισης  $\vec{M}$ , και προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$\vec{H}_d = N \cdot \vec{M} \quad (A110)$$

Ο αδιάστατος συντελεστής  $N$  στην τελευταία σχέση, που εκφράζει τον παράγοντα απομαγνήτισης, είναι ένας  $3 \times 3$  τανυστής, που εξαρτάται από το σχήμα και τον προσανατολισμό της μαγνήτισης και το σχήμα του κρυστάλλου. Αν  $N_a, N_b, N_c$  οι συντελεστές απομαγνήτισης κατά τους άξονες συμμετρίας a, b, c, σε κάθε περίπτωση ισχύει:  $N_a + N_b + N_c = 1$  (A111)

Η μαγνητοκρυσταλλική ενέργεια  $\varepsilon_{ms}^{(i)} \left( \frac{J}{m^3} \right)$ , υπολογίζεται για κάθε άξονα συμμετρίας  $i=a, b, c$  από τη σχέση:

$$\varepsilon_{ms}^{(i)} = \mu_0 \cdot \int \vec{H}_{di} \cdot d\vec{M}_i = \mu_0 \cdot \int N_i \cdot \vec{M}_i \cdot d\vec{M}_i = \frac{1}{2} \mu_0 \cdot N_i \cdot M_i^2 \quad (A112)$$

Αν  $\sin a, \sin b$  και  $\sin c$  τα συνημίτονα κατεύθυνσης του ανύσματος της ενδογενούς μαγνήτισης κατά τους άξονες a, b και c, η συνολική μαγνητοκρυσταλλική ενέργεια υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\varepsilon_{ms} = \frac{1}{2} \mu_0 \cdot M^2 \cdot (N_a \cdot \sin^2 \hat{a} + N_b \cdot \sin^2 \hat{b} + N_c \cdot \sin^2 \hat{c})$$

Στην απλούστερη περίπτωση ενός κρυστάλλου με ελλειψοειδή συμμετρία που συνίσταται από μια περιοχή Weiss (σχήμα A12δ), με  $N_b \approx 0$  και σταθερές απομαγνήτισης  $N_c$  και  $N_a$  κατά τους αντίστοιχους άξονες c, a, υπό γωνία  $\hat{\alpha}$  μεταξύ της ενδογενούς μαγνήτισης  $\vec{M}$  και του άξονα c, η ενέργεια απομαγνήτισης  $\varepsilon_{ms}$  προσδιορίζεται από τη σχέση (A112):

$$\varepsilon_{ms} = \frac{1}{2} \mu_0 \cdot N_c \cdot (M \cdot \sin \alpha)^2 + \frac{1}{2} \mu_0 \cdot N_a \cdot (M \cdot \eta \mu \alpha)^2 = \frac{1}{2} \mu_0 \cdot M^2 \cdot (N_c \cdot \sin^2 \alpha + N_a \cdot \eta \mu^2 \alpha) \quad (A113)$$

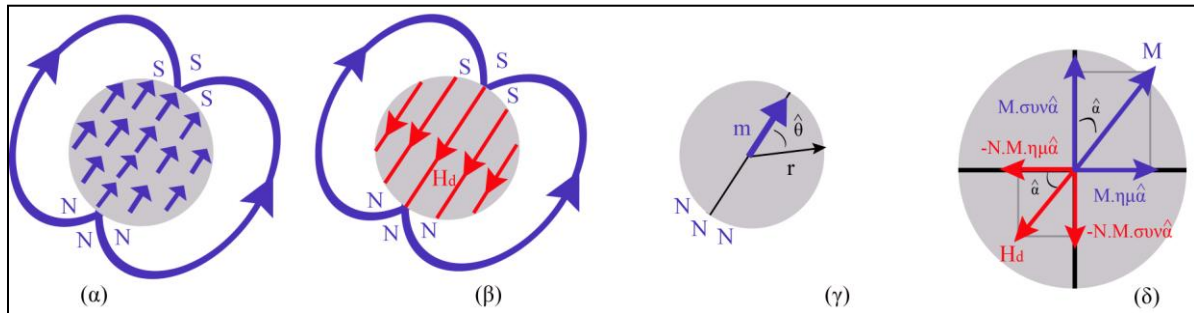
Με την αντικατάσταση  $\sin^2 \alpha = 1 - \eta \mu^2 \alpha$  η τελευταία σχέση γράφεται:

$$\varepsilon_{ms} = \frac{1}{2} \mu_0 \cdot N_c \cdot M^2 + \frac{1}{2} \mu_0 \cdot (N_a - N_c) \cdot M^2 \cdot \eta \mu^2 \alpha = \varepsilon_d + \varepsilon_s(\hat{\alpha}) \quad (A114)$$



Ο πρώτος όρος  $\epsilon_d = \frac{1}{2} \cdot \mu_o \cdot N_c \cdot M^2$  (A115) του παραπάνω αθροίσματος, που εξαρτάται από το σχήμα του κρυστάλλου μέσω της τιμής του συντελεστή απομαγνήτισης  $N_c$  και είναι ανεξάρτητος του προσανατολισμού της μαγνήτισης  $\vec{M}$ , αποτελεί την ενέργεια απομαγνήτισης.

Ο δεύτερος όρος  $\epsilon_s(\hat{a}) = \frac{1}{2} \cdot \mu_o \cdot (N_a - N_c) \cdot M^2 \cdot \eta \mu^2 \alpha$  (A116), που αποτελεί μέτρο της απόκλισης της συμμετρίας του κρυστάλλου από το σφαιρικό σχήμα ( $\Delta N = 0$ ), μέσω της διαφοράς  $\Delta N = N_a - N_c$  και είναι συνάρτηση της γωνίας  $\hat{a}$  μεταξύ της μαγνήτισης  $\vec{M}$  και του άξονα  $c$ , αποτελεί την ενέργεια κρυσταλλικής ανισοτροπίας σχήματος.



**Σχήμα A13.** (α) Προσανατολισμός μαγνητικών δίπολων εντός κρυστάλλου σφαιρικής συμμετρίας, αποτελούμενου από μια περιοχή Weiss. (β) Πεδίο απομαγνήτισης  $\vec{H}_d$  ως αποτέλεσμα ύπαρξης θεωρούμενων επιφανειακών μονόπολων. (γ) Για τον υπολογισμό του πεδίου απομαγνήτισης  $\vec{H}_d$  στον ισημερινό, γίνεται η υπόθεση ότι η συνολική διπολική ροπή  $\vec{m}$ , οφείλεται σε συγκεντρωμένα μονόπολα στον βόρειο πόλο της σφαίρας. (δ) Απεικόνιση του πεδίου απομαγνήτισης  $\vec{H}_d$  και της ενδογενούς μαγνήτισης  $\vec{M}$  που σχηματίζει γωνία  $\hat{a}$  με έναν άξονα συμμετρίας της σφαίρας.

Στην ειδικότερη περίπτωση ενός κυβικού κρυστάλλου με σφαιρική συμμετρία (σχήμα A13), όπου  $N = N_a = N_b = N_c$ , ισχύει (A114):  $\epsilon_{ms} = \epsilon_d = \frac{1}{2} \cdot \mu_o \cdot N \cdot M^2$  (A117) και  $\epsilon_s = 0$

Αν η σφαίρα έχει ακτίνα  $r$  με ενδογενή μαγνήτιση  $\vec{M}$  και οι φορείς της μαγνήτισης είναι περισσότερο συγκεντρωμένοι στο βόρειο παρά στον νότιο πόλο (σχήμα A13γ), η διπολική ροπή  $\vec{m}$  ολόκληρης της σφαίρας προσεγγίζεται από τη σχέση:  $m = M \cdot V = \frac{4}{3} \pi r^3 \cdot M$  (A118)

Το πεδίο  $H_d$  στον ισημερινό της σφαίρας ( $\theta = \pi/2$ ), προσεγγίζεται από τη σχέση:

$$H_d = -\frac{m}{4\pi r^3} \quad (A119)$$

Με αντικατάσταση της (A.118) στην προηγούμενη σχέση, το πεδίο απομαγνήτισης  $H_d$  συναρτήσει της μαγνήτισης  $M$  υπολογίζεται:  $\vec{H}_d = -\frac{1}{3} \vec{M}$  (A120)

Επομένως σύμφωνα με την τελευταία σχέση για κάθε ισοδύναμο άξονα σφαιρικής συμμετρίας  $a=b=c$ , ισχύει:  $N_a = N_b = N_c = \frac{1}{3}$  (A121)

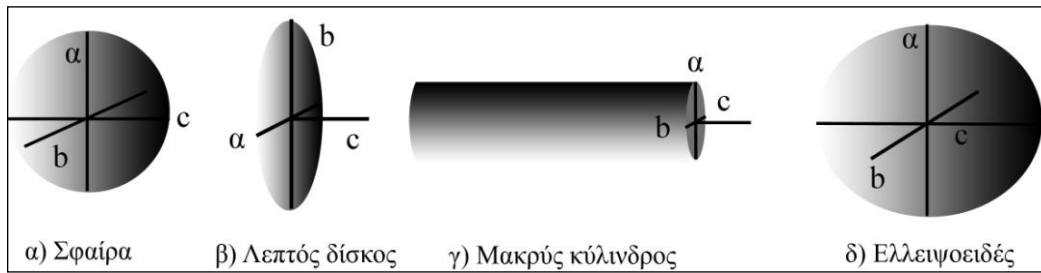
Η ενέργεια απομαγνήτισης υπολογίζεται (A117):  $\epsilon_{ms} = \epsilon_d = \frac{1}{6} \cdot \mu_o \cdot M^2$  (A122)



Σε έναν κρύσταλλο ελλειψοειδούς συμμετρίας, με ενδογενή μαγνήτιση παράλληλη στο μεγάλο άξονα  $c$  ή στο μικρό άξονα  $a$ , το πεδίο απομαγνήτισης είναι αντιστρόφως ανάλογο του τετραγώνου της ακτίνας και οι αντίστοιχες τιμές του πεδίου απομαγνήτισης  $H_d$  θα είναι μικρότερες ( $N_c < \frac{1}{3}$ ) ή μεγαλύτερες ( $N_a > \frac{1}{3}$ ) από το πεδίο της σφαίρας.

**4) Ενέργεια μαγνητικής ανισοτροπίας ( $\epsilon_\mu$ ):** Η μαγνητική ανισοτροπία προσδιορίζει την εξάρτηση της μαγνητικής ελεύθερης ενέργειας για κάθε κρύσταλλο σιδηρομαγνητικού υλικού από τη διεύθυνση της μαγνήτισης σε σχέση με κάποιον άξονα συμμετρίας (ανισοτροπία σχήματος- $\epsilon_s$ ) ή κρυσταλλογραφικό άξονα (μαγνητοκρυσταλλική ανισοτροπία- $\epsilon_k$ ), ή άξονα άσκησης μηχανικής τάσης (μαγνητοελαστική ανισοτροπία) ή σε σχέση με κάποια επιφάνεια ή διεπιφάνεια (επιφανειακή ανισοτροπία) του υλικού. Σε κάθε περίπτωση, η ενέργεια ανισοτροπίας ελαχιστοποιείται σε συγκεκριμένες κατευθύνσεις «εύκολης» μαγνήτισης, ενώ ταυτόχρονα παρεμποδίζεται η ελεύθερη περιστροφή των μαγνητικών ατομικών ροπών προς «δύσκολες» ενεργειακά αναβαθμισμένες κατευθύνσεις.

**4α) Η ανισοτροπία σχήματος ( $\epsilon_s$ )** καθορίζεται από τη διαφορά των εξαρτώμενων συντελεστών απομαγνήτισης  $N_a, N_b, N_c$  κατά τους άξονες συμμετρίας  $a, b, c$  από το σχήμα και από τον προσανατολισμό της μαγνήτισης  $\vec{M}$  στο εσωτερικό του κρυστάλλου.



**Σχήμα A14.** Άξονες συμμετρίας σε απλά γεωμετρικά σχήματα

Οι παράγοντες απομαγνήτισης  $N_a, N_b, N_c$  και οι μέγιστες ενέργειες ανισοτροπίας (A116)

$\epsilon_s = \frac{1}{2} \cdot \mu_o \cdot (N_a - N_c) \cdot M^2$  σε απλά γεωμετρικά σχήματα, για  $\alpha = 90^\circ$ , υπολογίζονται:

-Σφαίρα (σχήμα A14α):  $N_a = N_b = N_c = \frac{1}{3}$ ,  $\epsilon_s = 0$  (A123)

-Λεπτός δίσκος (σχήμα A14β):  $N_a = N_b = 0$ ,  $N_c = 1$ ,  $\epsilon_s = -\frac{\mu_o}{2} \cdot M^2$  (A124)

-Μακρύς κύλινδρος (σχήμα A14γ):  $N_a = N_b = \frac{1}{2}$ ,  $N_c = 0$ ,  $\epsilon_s = \frac{\mu_o}{4} \cdot M^2$  (A125)

-Ελλειψοειδές (σχήμα A14δ): Για σχεδόν σφαιρική συμμετρία, ο συντελεστής απομαγνήτισης  $N_a$  προσεγγίζεται από τη σχέση<sup>9</sup> [54]:  $N_a = \frac{1}{3} \cdot [1 - \frac{2}{5} \cdot (2 - \frac{b}{a} - \frac{c}{a})]$  (A126)

<sup>9</sup> Graham J. Borradaile and Mike Jackson, «Anisotropy of magnetic susceptibility (AMS): Magnetic petrofabrics of deformed rocks»,

Για σχεδόν κυβικούς κρυστάλλους μαγνητίτη, με μικρή απόκλιση από τη σφαιρική συμμετρία, όπου  $b=c, N_b=N_c=x$  και  $\frac{c}{a}=\frac{13}{10}$ , ο  $N_a$  υπολογίζεται από την τελευταία σχέση:  $N_a=\frac{31}{75}\approx 0,4$ . Από τη σχέση (A111) οι  $N_b, N_c$  υπολογίζονται:  $N_a+N_b+N_c=0,4+2x=1 \Leftrightarrow x=N_b=N_c\approx 0,3$

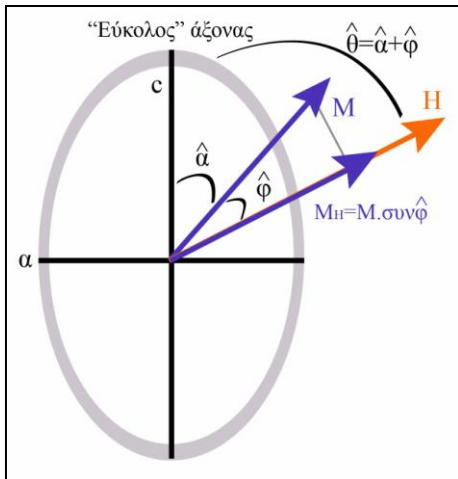
Επειδή για τον μαγνητίτη  $M=480 \text{ KA/m}$ , η  $\epsilon_s(\alpha=90^\circ)$  υπολογίζεται (A116):

$$\epsilon_s = \frac{1}{2} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot (0,4-0,3) \cdot 480^2 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3 \approx 1 \cdot 10^4 \text{ J/m}^3 \quad (\text{A127})$$

Με την αντικατάσταση  $\sin 2\alpha = 1 - 2\eta\mu^2\alpha = 2\sin^2\alpha - 1$  στη σχέση (A113), η μαγνητοκρυσταλλική ενέργεια  $\epsilon_{ms}$  ενός κρυστάλλου με ελλειψοειδή συμμετρία (**σχήμα A14δ**) και ενδογενή μαγνήτιση  $\vec{M}$ , απουσίας εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, υπολογίζεται:

$$\epsilon_{ms} = \frac{1}{4} \cdot \mu_o \cdot (N_c + N_a) \cdot M^2 - \frac{1}{4} \cdot \mu_o \cdot (N_a - N_c) \cdot M^2 \cdot \sin 2\alpha \quad (\text{A.128})$$

Από την τελευταία σχέση συμπεραίνεται ότι η τιμή της μαγνητοκρυσταλλικής ενέργειας  $\epsilon_{ms}$  καθορίζεται από τη διαφορά  $\Delta N = N_a - N_c$  και γίνεται ελάχιστη ( $\hat{\alpha}=0$ ) ή μέγιστη ( $\hat{\alpha}=90^\circ$ ), όταν η μαγνήτιση  $\vec{M}$  έχει την αντίστοιχη διεύθυνση του «εύκολου» άξονα  $c$  ή του μικρού άξονα  $a$ .



Εντός μαγνητικού πεδίου  $\vec{H}$  (**σχήμα A15**), υπό γωνία  $\hat{\phi}$  με τη διεύθυνση της ενδογενούς μαγνήτισης  $\vec{M}$  και υπό γωνία  $\hat{\theta} = \hat{\phi} + \hat{\alpha}$  με τη διεύθυνση του  $c$  άξονα, η συνιστώσα  $M_H = M \cdot \sin \hat{\phi}$  της ενδογενούς μαγνήτισης  $\vec{M}$  στη διεύθυνση του εξωτερικού πεδίου  $\vec{H}$ , προσδίδει στον κρύσταλλο πρόσθετη ενέργεια:

$$\epsilon_H = \mu_o \cdot H \cdot M \cdot \sin \hat{\phi} \quad (\text{A129})$$

**Σχήμα A15.** Κρύσταλλος ελλειψοειδούς συμμετρίας με ενδογενή μαγνήτιση  $\vec{M}$ , εντός εξωτερικού πεδίου  $\vec{H}$ .

Η συνολική ενέργεια  $\epsilon$  του σωματιδίου προσδιορίζεται από τις σχέσεις (A128, A129):

$$\epsilon = \epsilon_{ms} + \epsilon_H = \frac{1}{4} \cdot \mu_o \cdot (N_c + N_a) \cdot M^2 - \frac{1}{4} \cdot \mu_o \cdot (N_c - N_a) \cdot M^2 \cdot \sin 2\alpha + \mu_o \cdot H \cdot M \cdot \sin \hat{\phi} \quad (\text{A130})$$

Η θέση του ανύσματος της ενδογενούς μαγνήτισης  $\vec{M}$  σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας καθορίζεται από την ελαχιστοποίηση της συνολικής ενέργειας  $\epsilon$ , βάσει των σχέσεων:

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial \hat{\phi}} = \frac{1}{2} \cdot \mu_o \cdot (N_c - N_a) \cdot M^2 \cdot \eta \mu 2\hat{\alpha} - \mu_o \cdot H \cdot M \cdot \eta \mu \hat{\phi} = 0 \quad (\text{A131})$$

$$\frac{\partial^2 \epsilon}{\partial^2 \hat{\phi}} = \mu_o \cdot (N_c - N_a) \cdot M^2 \cdot \sin 2\hat{\alpha} - \mu_o \cdot H \cdot M \cdot \sin \hat{\phi} \quad (\text{A.132})$$

Η θέση του ανύσματος της ενδογενούς μαγνήτισης  $\vec{M}$  εξαρτάται από το πρόσημο της δεύτερης παραγώγου  $\frac{\partial^2 \epsilon}{\partial^2 \hat{\phi}}$ , ως προς τη γωνία  $\hat{\phi}$ .

Αν  $\frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial^2 \varphi} > 0$  ή  $\frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial^2 \varphi} < 0$ , η λύσεις της (A130) αντιστοιχούν στο ελάχιστο (ευσταθής ισορροπία) ή στο μέγιστο (ασταθής ισορροπία) της συνολικής ενέργειας  $\varepsilon$ .

Όταν  $\frac{\partial \varepsilon}{\partial \varphi} = \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial^2 \varphi} = 0$  το διάνυσμα της ενδογενούς μαγνήτισης  $\vec{M}$  μεταβαίνει από θέση ευσταθούς ισορροπίας σε κατάσταση ασταθούς ισορροπίας, στην περίπτωση που το εξωτερικό πεδίο  $H$  λάβει μια κρίσιμη τιμή, που προσδιορίζεται από τη λύση του συστήματος των εξισώσεων (A131) και (A132):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \varphi} = \frac{1}{2} \eta \mu 2\alpha - \frac{H}{(N_a - N_c) \cdot M} \cdot \eta \mu \varphi = 0 \\ \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial^2 \varphi} = \sigma \nu 2\alpha + \frac{H}{(N_a - N_c) \cdot M} \cdot \sigma \nu \varphi = 0 \end{array} \right\} \Leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} \frac{H}{(N_a - N_c) \cdot M} = h \\ \frac{1}{2} \eta \mu 2\alpha = h \cdot \eta \mu \varphi \\ \sigma \nu 2\alpha = -h \cdot \sigma \nu \varphi \end{array} \right\} \quad (A.133)$$

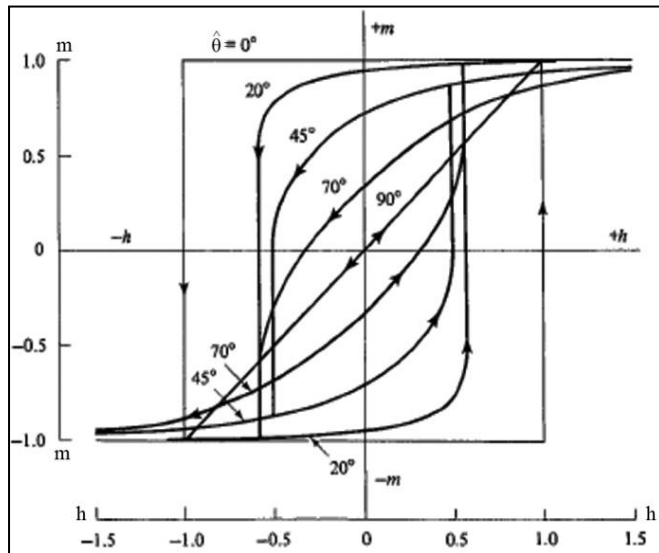
Αν οι εξισώσεις του συστήματος υψωθούν στο τετράγωνο και προστεθούν κατά μέλη για την απαλοιφή της γωνίας  $\hat{\varphi}$ , η νέα μεταβλητή  $h$  υπολογίζεται:

$$h = \frac{H}{(N_a - N_c) \cdot M} = \sqrt{1 - \frac{3}{4} \eta \mu^2 2\alpha} \Leftrightarrow H = (N_a - N_c) \cdot M \cdot \sqrt{1 - \frac{3}{4} \eta \mu^2 2\alpha} \quad (A134)$$

Με τη διαίρεση των εξισώσεων του συστήματος κατά μέλη και την αντικατάσταση  $h^2 = 1 - \frac{3}{4} \eta \mu^2 2\alpha$  από την

προηγούμενη σχέση, προκύπτει η εξίσωση:  $\varepsilon \varphi^3 \alpha = -\varepsilon \varphi \theta$  (A135)

Από τις σχέσεις (A134) και (A135) διαπιστώνεται ότι για  $\theta = 180^\circ$ , τότε  $\alpha = 0^\circ$  ή  $\alpha = 180^\circ$  και η ένταση του πεδίου  $H = H_K$  μαγνητίζει το υλικό σε κατάσταση κόρου:  $H_K = M \cdot (N_a - N_c)$  (A136)

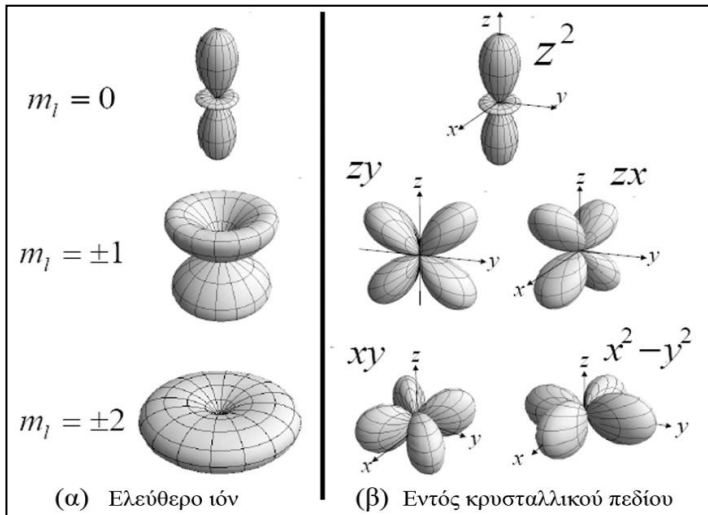


Πρακτικά αυτό σημαίνει, ότι αν η ένταση του εξωτερικού πεδίου λάβει την τιμή κόρου  $H_K$  κατά την κατεύθυνση  $-c$ , το διάνυσμα της ενδογενούς μαγνήτισης μεταβαίνει από την κατάσταση ευσταθούς ισορροπίας  $\alpha = 0^\circ$ , στην κατάσταση ασταθούς ισορροπίας  $\alpha = 180^\circ$ , διαγράφοντας τον ορθογώνιο βρόχο υστέρησης που φαίνεται στο **διάγραμμα A9**.

**Διάγραμμα A9.** Ορθογώνιος βρόχος υστέρησης κρυστάλλου<sup>10</sup> [55] με κυρίαρχη την ομοαξονική ανισοτροπία.

<sup>10</sup> Το διάγραμμα λήφθηκε από το βιβλίο «Εισαγωγή στα μαγνητικά υλικά» του κ. Γ. Κιοσέογλου, για το Τμήμα Επιστήμης και Τεχνολογίας Υλικών του Πανεπιστημίου Κρήτης.

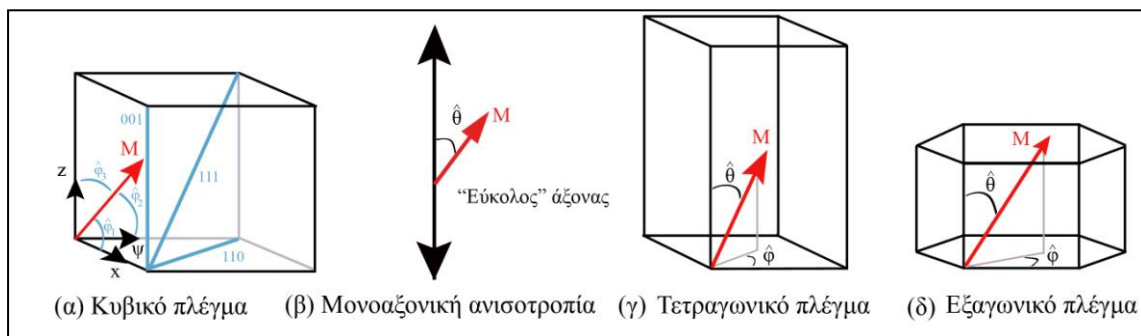
**4β)** Η **μαγνητοκρυσταλλική ανισοτροπία** ( $\epsilon_k$ ), δεν είναι μαγνητοστατικής αλλά ηλεκτροστατικής προέλευσης όπως και η ενέργεια ανταλλαγής ( $\epsilon_{ex}$ ) και οφείλεται στη σύζευξη μεταξύ του ηλεκτρονιακού spin που καθορίζει την κατανομή των ηλεκτρονιακών φορτίων και της μαγνητικής ροπής των ατόμων. Η κατανομή των ηλεκτρονιακών φορτίων επηρεάζεται από το κρυσταλλικό πεδίο των γειτονικών ατόμων (**σχήμα A16**), λόγω της σύζευξης τροχιάς-πλέγματος.



Ενώ η επίδραση εξωτερικού μαγνητικού πεδίου προκαλεί την αλλαγή της κατεύθυνσης των spins των ηλεκτρονίων και της τροχιάς τους, η ισχυρή σύζευξη της τροχιάς με το κρυσταλλικό πλέγμα αντισταθεί στην τάση στροφής των spins στην κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου.

**Σχήμα A16.** Απεικόνιση διαμόρφωσης 3d τροχιακών ατόμου, ως ελεύθερο ιόν **(α)** και εντός κρυσταλλικού πεδίου **(β)**.

Η μαγνητοκρυσταλλική ενέργεια ανισοτροπίας εκφράζεται φαινομενολογικά ως δυναμοσειρά, με μορφή που εξαρτάται από την κρυσταλλική δομή, επειδή πρέπει να είναι σύμφωνη με την κρυσταλλική συμμετρία.



**Σχήμα A17.** Απεικόνιση των γωνιών μεταξύ της μαγνήτισης  $\vec{M}$  και των κρυσταλλογραφικών αξόνων, σε διαφορετικούς κρυστάλλους, για τον υπολογισμό της ενέργειας μαγνητοκρυσταλλικής ανισοτροπίας.

- Για κυβικό πλέγμα (**σχήμα A17α**), η ενέργεια ανισοτροπίας εκφράζεται ως συνάρτηση των συνημίτονων κατεύθυνσης  $\alpha_i = \cos \phi_i$  της μαγνήτισης  $\vec{M}$  με τους κρυσταλλογραφικούς άξονες 100, 010 και 001, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\epsilon_k = k_1 \cdot (\alpha_2^2 + \alpha_2^2 \cdot \alpha_3^2 + \alpha_3^2 \cdot \alpha_1^2) + k_2 \cdot \alpha_1^2 \cdot \alpha_2^2 \cdot \alpha_3^2 + \dots \quad (A137)$$

Οι σταθερές  $k_1, k_2$  στην τελευταία σχέση, σε μονάδες  $\frac{J}{m^3}$  είναι οι πειραματικά προσδιοριζόμενες σταθερές πρώτης και δεύτερης τάξης της μαγνητοκρυσταλλικής ανισοτροπίας.

- Για τετραγωνικά, εξαγωνικά και τριγωνικά πλέγματα η ενέργεια μαγνητοκρυσταλλικής ανισοτροπίας αποτελεί συνάρτηση των γωνιών  $\hat{\theta}, \hat{\phi}$  μεταξύ της μαγνήτισης  $\vec{M}$  με τον κύριο άξονα και με την ακμή στο κάθετο επίπεδο προς τον κύριο άξονα, σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$\text{Τετραγωνικό πλέγμα (σχήμα A17γ): } \varepsilon_k = k_1 \cdot \eta \mu^2 \theta + k_2 \cdot \eta \mu^4 \theta + k_2' \cdot \eta \mu^4 \theta \cdot \sin 4\phi + \dots \quad (\text{A138})$$

$$\text{Εξαγωνικό πλέγμα (σχήμα A17δ): } \varepsilon_k = k_1 \cdot \eta \mu^2 \theta + k_2 \cdot \eta \mu^4 \theta + k_3 \cdot \eta \mu^6 \theta + k_3' \cdot \eta \mu^6 \theta \cdot \sin 6\phi + \dots \quad (\text{A.139})$$

Για μονοαξονικούς κρυστάλλους (σχήμα A17β) σε τετραγωνικά, εξαγωνικά και τριγωνικά πλέγματα η ενέργεια μαγνητοκρυσταλλικής ανισοτροπίας προσεγγίζεται από τη σχέση:

$$\varepsilon_k = k_1 \cdot \eta \mu^2 \theta + k_2 \cdot \eta \mu^4 \theta + \dots \quad (\text{A140})$$

Με επιπλέον προσέγγιση πρώτης τάξης ( $k_2 \approx 0$ ), τότε  $k_1 > 0$  ή  $k_1 < 0$ , αν η μαγνήτιση  $\vec{M}$  είναι παράλληλη ή κάθετη προς τον κύριο άξονα συμμετρίας.

-Σε τριαξονικούς κρυστάλλους σε ορθορομβικά, μονοκλινή ή τρικλινή πλέγματα, συνήθως υπάρχει ένας «εύκολος» άξονας μαγνήτισης και η μαγνητική συμπεριφορά είναι παρόμοια των μονοαξονικών κρυστάλλων.

Στην περίπτωση του κυβικού πλέγματος των κρυστάλλων μαγνητίτη, όταν η μαγνήτιση  $\vec{M}$  είναι παράλληλη σε κάποιον από τους κρυσταλλογραφικούς άξονες 001, 110 ή 111, η ενέργεια κρυσταλλικής ανισοτροπίας προσδιορίζεται από τη σχέση (A137) στον **πίνακα A.2**.

| Άξονες     | $\alpha_1$   | $\alpha_2$   | $\alpha_3$   | $\varepsilon_k$  |
|------------|--------------|--------------|--------------|------------------|
| <b>001</b> | 0            | 0            | 1            | 0                |
| <b>110</b> | $\sqrt{2}/2$ | $\sqrt{2}/2$ | 0            | $k_1/4$          |
| <b>111</b> | $\sqrt{3}/3$ | $\sqrt{3}/3$ | $\sqrt{3}/3$ | $k_1/3 + k_2/27$ |

**Πίνακας A2.** Προσδιορισμός της ενέργειας μαγνητοκρυσταλλικής ανισοτροπίας  $\varepsilon_k$  για τον κυβικό κρύσταλλο του μαγνητίτη, όταν η μαγνήτιση  $\vec{M}$  είναι παράλληλη σε κάποιον από τους κρυσταλλογραφικούς άξονες 001, 110 ή 111.

-Αν  $k_1 > 0$ , ισχύει:  $\varepsilon_{100} < \varepsilon_{110} < \varepsilon_{111}$ . Ο «εύκολος» άξονας μαγνήτισης είναι ο 100 και ο «δύσκολος» ο άξονας 111.

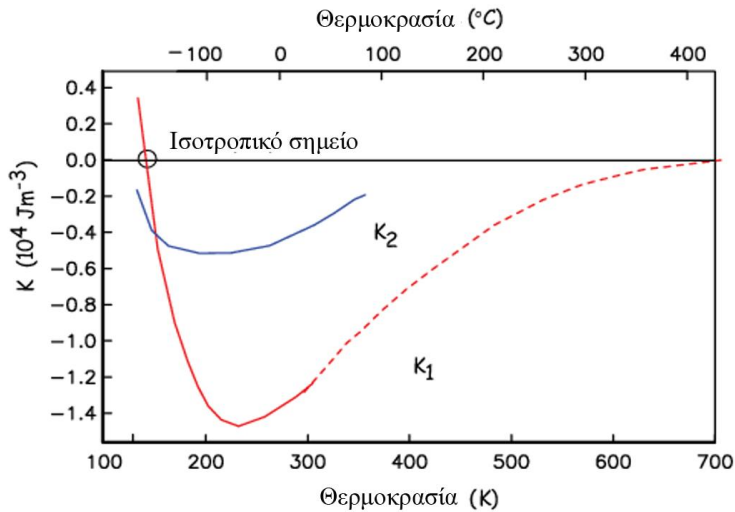
-Αν  $k_1 < 0$ , ισχύει:  $\varepsilon_{100} > \varepsilon_{110} > \varepsilon_{111}$ . Ο «εύκολος» άξονας μαγνήτισης είναι ο 111 και ο «δύσκολος» ο άξονας 100.

Για τον μαγνητίτη, όπου  $k_1 = -1,35 \cdot 10^4 \text{ J/m}^3$ , το ενεργειακό φράγμα  $\Delta \varepsilon_k$  για την αλλαγή της μαγνήτισης από την «εύκολη» κατεύθυνση 111 στην 110, σε θερμοκρασία δωματίου, για  $k_2 \approx 0$ , προσεγγίζεται:

$$\Delta \varepsilon_k \approx \varepsilon_k^{111} - \varepsilon_k^{110} = \frac{k_1}{3} - \frac{k_1}{4} = \frac{k_1}{12} = -0,11 \cdot 10^4 \text{ J/m}^3$$

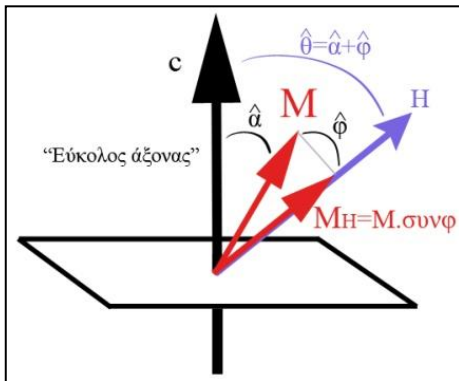
Επειδή οι ηλεκτρονιακές αλληλεπιδράσεις εξαρτώνται από τις ατομικές αποστάσεις, οι σταθερές της μαγνητοκρυσταλλικής ανισοτροπίας αποτελούν συνάρτηση της θερμοκρασίας.

Η σταθερά  $k_1$  στον μαγνητίτη (διάγραμμα A10) αλλάζει πρόσημο σε μια θερμοκρασία  $-153^\circ\text{C}$ , που χαρακτηρίζεται ως ισοτροπικό σημείο, όπου δεν υπάρχει μεγάλη μαγνητοκρυσταλλική ανισοτροπία και οι μαγνητικές ροπές μπορούν να περιστραφούν σχεδόν ελεύθερα μέσα στον κρύσταλλο. Κάτω από το ισοτροπικό σημείο, όπου  $k_1 > 0$ , τα φράγματα μαγνητοκρυσταλλικής ενέργειας λειτουργούν κατά διαφορετικό τρόπο, εφόσον οι διαγώνιες διευθύνσεις αποτελούν τις υψηλότερες ενεργειακές καταστάσεις.



**Διάγραμμα A10.** Απεικόνιση της μεταβολής των πειραματικά προσδιοριζόμενων σταθερών  $k_1, k_2$  του μαγνητίτη ως συνάρτηση της θερμοκρασίας. Οι διακεκομμένες γραμμές είναι στοιχεία [56] από Fletcher και O'Reilly (1974), ενώ οι υπόλοιπες [57] από Syono και Ishikawa (1963). Για τον μαγνητίτη σε θερμοκρασία δωματίου (300K) όπου  $k_1 = -1,35 \cdot 10^4 \text{ J/m}^3$ .

Όταν η κυρίαρχη μαγνητοκρυσταλλική ανισοτροπία ενός κρυστάλλου αποτελείται από μια περιοχή Weiss είναι μονοαξονική και η ενδογενής μαγνήτιση  $\vec{M}$  σχηματίζει γωνία  $\hat{\alpha}$  με τον «εύκολο» άξονα  $c$ , η ενέργεια κρυσταλλικής ανισοτροπίας, με προσέγγιση πρώτης τάξης ( $k_2 \approx 0$ ) υπολογίζεται από τη σχέση (A140):  $\epsilon_k = k_1 \cdot \eta \mu^2 a$  (A141)



**Σχήμα A18.** Σιδηρομαγνητική περιοχή, με μονοαξονική μαγνητοκρυσταλλική ανισοτροπία, αποτελούμενη από μια περιοχή Weiss μαγνήτισης  $\vec{M}$ , εντός μαγνητικού πεδίου  $\vec{H}$ . Ένα παράδειγμα ορυκτού που κυριαρχεί η ομοαξονική ανισοτροπία είναι ο αιματίτης, επί του βασικού επιπέδου στον εξαγωνικό του κρύσταλλο.

Εντός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου  $\vec{H}$ , υπό γωνία  $\hat{\phi}$  με την κατεύθυνση της μαγνήτισης  $\vec{M}$  (σχήμα A18) ο κρύσταλλος αποκτά πρόσθετη ενέργεια λόγω της συνιστώσας  $M_H = M \cdot \sin \phi$  της μαγνήτισης στην κατεύθυνση του πεδίου, που υπολογίζεται από τη σχέση:  $\epsilon_H = -\mu_0 \cdot H \cdot M \cdot \sin \phi$  (A142)

Η συνολική ενέργεια  $\epsilon$  του σωματιδίου, υπολογίζεται από τις σχέσεις (A141, A142):

$$\epsilon = \epsilon_k + \epsilon_H = k_1 \cdot \eta \mu^2 a - \mu_0 \cdot H \cdot M \cdot \sin \phi \quad (\text{A143})$$

Η θέση του διανύσματος  $\vec{M}$  σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας, ορίζεται από την ελαχιστοποίηση της συνολικής ενέργειας  $\epsilon$ , μέσω των σχέσεων:

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial \phi} = -k_1 \cdot \eta \mu^2 a + \mu_0 \cdot H \cdot M \cdot \sin \phi = 0 \quad (\text{A144})$$

$$\frac{\partial^2 \epsilon}{\partial^2 \phi} = 2k_1 \cdot \sin 2\alpha + \mu_0 \cdot H \cdot M \cdot \sin \phi > 0 \quad (\text{A145})$$



Στην ειδική περίπτωση που το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο  $\vec{H}$  είναι κάθετο στον «εύκολο» άξονα  $c$ , η ενδογενής μαγνήτιση  $M$  προσδιορίζεται με την αντικατάσταση  $\theta = \pi/2$  και  $\varphi = \pi/2 - \alpha$  στη σχέση (A144):

$$M = \frac{2k_1 \cdot \eta \mu \alpha}{\mu_o \cdot H} \quad (A146)$$

Η συνιστώσα της μαγνήτισης  $M_H$  στην κατεύθυνση του πεδίου  $\vec{H}$  υπολογίζεται:

$$M_H = M \cdot \sin(\pi/2 - \alpha) = M \cdot \eta \mu \alpha \quad (A147)$$

Από τις σχέσεις (A146), (A147) υπολογίζεται ανηγμένη μαγνήτιση:  $m = \frac{M_H}{M} = \frac{\mu_o \cdot M}{2k_1} \cdot H$  (A148)

Επειδή σύμφωνα με την τελευταία σχέση, η ανηγμένη μαγνήτιση  $m$  είναι γραμμική εξάρτηση του εξωτερικού πεδίου  $H$ , δεν εμφανίζεται υστέρηση. Ο μαγνητικός κόρος  $m = \frac{M_H}{M} = 1$  συμβαίνει σύμφωνα με

την τελευταία σχέση, σε πεδίο έντασης:  $H = H_k = \frac{2k_1}{\mu_o \cdot M}$  (A149)

Όπως στην περίπτωση της ανισοτροπίας σχήματος, όταν  $\frac{\partial \varepsilon}{\partial \varphi} = \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial^2 \varphi} = 0$ , το διάνυσμα της ενδογενούς

μαγνήτισης  $\vec{M}$  μεταβαίνει από θέση ευσταθούς ισορροπίας σε κατάσταση ασταθούς ισορροπίας, στην περίπτωση που το εξωτερικό πεδίο  $H$  λάβει μια κρίσιμη τιμή, που υπολογίζεται από τη λύση του συστήματος των εξισώσεων (A144) και (A145):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \varphi} = \eta \mu 2\alpha - \frac{\mu_o \cdot H \cdot M}{k_1} \cdot \eta \mu \varphi = 0 \\ \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial^2 \varphi} = \sin 2\alpha + \frac{\mu_o \cdot H \cdot M}{2k_1} \cdot \sin \varphi = 0 \end{array} \right\} \Leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{2} \cdot \eta \mu 2\alpha = h \cdot \eta \mu \varphi \\ \sin 2\alpha = -h \cdot \sin \varphi \end{array} \right\} \quad (A150)$$

Από τη λύση του συστήματος προκύπτει ότι:

$$h = \frac{\mu_o \cdot H \cdot M}{2k_1} = \sqrt{1 - \frac{3}{4} \cdot \eta \mu^2 2\alpha} \Leftrightarrow H = \frac{2k_1}{\mu_o \cdot M} \cdot \sqrt{1 - \frac{3}{4} \cdot \eta \mu^2 2\alpha} \quad (A151) \quad \varepsilon \varphi^3 \alpha = -\varepsilon \varphi \theta \quad (A152)$$

Από τις σχέσεις (A151), (A152) διαπιστώνεται ότι αν  $\theta = 180^\circ$ , τότε  $\alpha = 0^\circ$  ή  $\alpha = 180^\circ$  και η ένταση του πεδίου

$H = H_k$  μαγνητίζει το υλικό σε κατάσταση κόρου:  $H = H_k = \frac{2k_1}{\mu_o \cdot M}$  (A153)

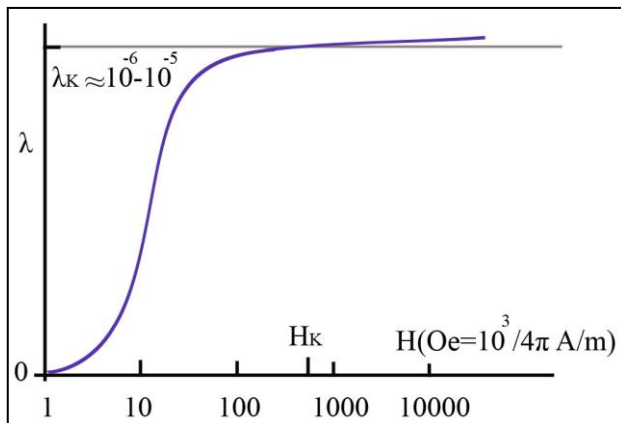
Όπως στην περίπτωση της ανισοτροπίας σχήματος, όταν η ένταση του εξωτερικού πεδίου λάβει την τιμή κόρου  $H_k$  κατά την κατεύθυνση  $-c$ , το διάνυσμα της ενδογενούς μαγνήτισης μεταβαίνει από την κατάσταση ευσταθούς ισορροπίας ( $\alpha = 0^\circ$ ), στην κατάσταση ασταθούς ισορροπίας ( $\alpha = 180^\circ$ ), διαγράφοντας τον ορθογώνιο βρόχο υστέρησης που φαίνεται στο διάγραμμα A9.

**4γ) Μαγνητοελαστική ανισοτροπία ( $\varepsilon_\sigma$ ):** Η αύξηση της διάστασης  $l$  των σιδηρομαγνητικών υλικών στη διεύθυνση της παραμένουσας μαγνήτισης ή της επαγόμενης μαγνήτισης εντός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, ορίζεται ως η κλασματική μεταβολή του μεγέθους του υλικού, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\lambda = \frac{\Delta l}{l} \quad (\text{A154}\alpha)$$

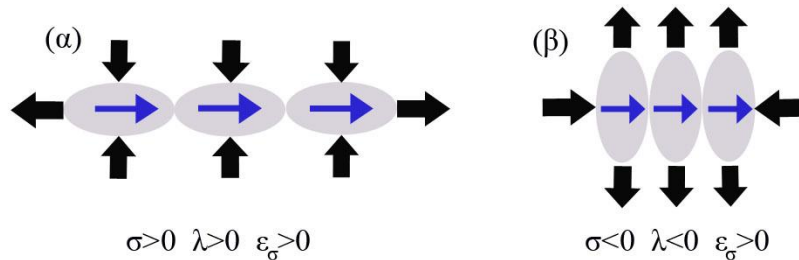
Επειδή ο όγκος παραμένει σταθερός, η αύξηση της διάστασης  $l$  στη διεύθυνση της μαγνήτισης, προϋποθέτει την ισόποση μείωση των διαστάσεων στις δύο εγκάρσιες διευθύνσεις:  $\lambda_\perp = -\frac{\lambda}{2} = -\frac{\Delta l}{2l}$  (A154β)

Για τον λόγο αυτόν, το φαινόμενο χαρακτηρίζεται ως μαγνητοσυστολή και ανακαλύφθηκε από τον *Joule* [58] το 1842.



Το μέγεθος της μαγνητοσυστολής αυξάνεται με την αύξηση της έντασης του πεδίου  $H$ , κατά την τυπική σιγμοειδή καμπύλη του **διαγράμματος A11** και λαμβάνει τη μέγιστη τιμή  $\lambda_K \approx 10^{-6} - 10^{-5}$  στην κατάσταση μαγνητικού κόρου.

**Διάγραμμα A11.** Μεταβολή της μαγνητοσυστολής  $\lambda$  σε συνάρτηση με την τιμή του εφαρμοζόμενου πεδίου  $H$ .



**Σχήμα A19.** Απεικόνιση της μαγνητοδιαστολής (α) και της μαγνητοσυστολής (β) κατά τη διεύθυνση της μαγνήτισης.

Η μαγνητοσυστολή είναι θετική ( $\lambda > 0$ ) για υλικά που διογκώνονται (**σχήμα A19α**) στη διεύθυνση της μαγνήτισης και αρνητική ( $\lambda < 0$ ) για υλικά που συρρικνώνονται (**σχήμα A19β**) σε αυτήν την κατεύθυνση.

Η μαγνητοσυστολή μεταβάλλει την ενέργεια ανταλλαγής  $\varepsilon_{ex}$  και προκαλεί αλλαγές στις θέσεις των ατόμων, μεταβάλλοντας τη μορφή των τροχιακών και τα σχήματα των κρυστάλλων. Η ενέργεια μαγνητοελαστικής ανισοτροπίας  $\varepsilon_\sigma$  ( $\frac{J}{m^3}$ ) που προκαλείται από την άσκηση πίεσης  $\sigma$  ( $\frac{N}{m^2} = \frac{J}{m^3}$ ) σε έναν κρύσταλλο, υπό γωνία  $\hat{\theta}$  σε σχέση με τον κύριο κρυσταλλογραφικού άξονα  $c$ , προσεγγίζεται από τη σχέση:

$$\varepsilon_\sigma = \frac{3}{2} \lambda \cdot \sigma \cdot \eta \cdot \mu^2 \theta \quad (\text{A155})$$

Η αδιάστατη σταθερά  $\lambda$  στην τελευταία σχέση προσδιορίζεται πειραματικά. Από τις πειραματικές τιμές των σταθερών  $\lambda_{111}=78,2 \cdot 10^{-6}$  και  $\lambda_{100}=21,8 \cdot 10^{-6}$ , για άσκηση πίεσης παράλληλα στους κρυσταλλογραφικούς άξονες 111 και 100, για τον μαγνητίτη [59], η σταθερά  $\lambda$  προσεγγίζεται από τη σχέση:

$$\lambda = \frac{2}{5} \cdot \lambda_{100} + \frac{3}{5} \cdot \lambda_{111} \approx 38,2 \cdot 10^{-6}$$

**4δ) Επιφανειακή ανισοτροπία ( $\varepsilon_E$ ):** Η μειωμένη συμμετρία στην επιφάνεια ενός σιδηρομαγνητικού υλικού προκαλεί την εμφάνιση ανισοτροπίας, λόγω της διαφοράς των γειτόνων κάθε ατόμου στην επιφάνεια του υλικού.

Αν  $k_V (\text{J/m}^3)$  και  $k_A (\text{J/m}^2)$  οι πειραματικά προσδιοριζόμενες σταθερές ανισοτροπίας όγκου  $V$  του υλικού, επιφάνειας  $S$ , η ενέργεια της επιφανειακής ανισοτροπίας  $\varepsilon_E (\text{J/m}^3)$  υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\varepsilon_E = k_V + k_A \cdot \frac{S}{V} \quad (\text{A156})$$

#### A3.4 Μορφολογία και συμπεριφορά των σιδηρομαγνητικών περιοχών

Η συνθήκη ευσταθούς θερμοδυναμικής ισορροπίας για ένα σιδηρομαγνητικό υλικό, προϋποθέτει την ελαχιστοποίηση της συνολικής ενέργειας (A100):  $\varepsilon_{\text{ολ}} = \varepsilon_H + \varepsilon_{\text{ex}} + \varepsilon_d + \varepsilon_K + \varepsilon_o$

Η επίλυση της παραπάνω συνθήκης οδηγεί σε μη γραμμικές διαφορικές εξισώσεις που παρουσιάζουν δυσκολίες μαθηματικής ανάλυσης και πρέπει να μετατραπούν σε γραμμικές για να επιλυθούν. Εναλλακτικά, μπορούν να παραβλεφθούν κάποιοι όροι του αθροίσματος σε σχέση με κάποιους άλλους που θεωρούνται πιο σημαντικοί, όπως η ενέργεια ανταλλαγής  $\varepsilon_{\text{ex}}$ .

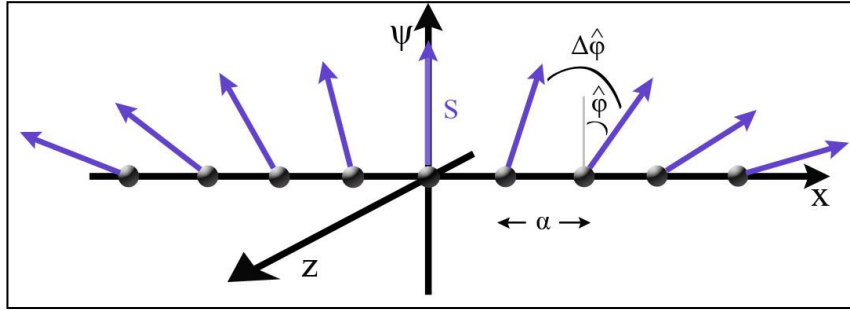
➤ Σύμφωνα με τη σχέση (A103)  $E_{\text{ex}} = -2 \cdot J_{\text{ex}} \cdot \sum S_i \cdot S_j \cdot \cos \hat{\phi}_{ij}$  του εντοπισμένου μοντέλου του Heisenberg για μη μεταλλικά ορυκτά, η ενέργεια ανταλλαγής  $E_{\text{ex}}$  ελαχιστοποιείται για  $J_{\text{ex}} > 0$  και  $\phi_{ij} = 0^\circ$  (σιδηρομαγνητισμός) ή για  $J_{\text{ex}} < 0$  και  $\phi_{ij} = 180^\circ$  (αντισιδηρομαγνητισμός). Όμως λόγω των υπολοίπων όρων της συνολικής ενέργειας (A100) τα spins δεν έχουν την ίδια διεύθυνση και η αλληλεπίδραση ανταλλαγής ελαχιστοποιεί τη γωνία  $\hat{\phi}_{ij}$ . Στην απλούστερη περίπτωση όπου  $|\vec{S}_i| = |\vec{S}_j| = S$ , ισχύει  $\vec{S}_i \cdot \vec{S}_j = S^2 \cdot \cos \phi_{ij}$  και η ενέργεια ανταλλαγής των ζευγών από γειτονικά spin υπολογίζεται από τη σχέση:

➤

$$E_{\text{ex}} = -2 \cdot J_{\text{ex}} \cdot S^2 \cdot \sum \cos \phi_{ij} \quad (\text{A157})$$

Με την προσέγγιση Taylor  $\cos \phi_{ij} \approx 1 - \frac{1}{2} \cdot \phi_{ij}^2$  για  $\phi_{ij} \rightarrow 0^\circ$ , η προηγούμενη σχέση γράφεται:

$$E_{\text{ex}} = J_{\text{ex}} \cdot S^2 \cdot \sum \phi_{ij}^2 + \sigma, \quad \text{όπου } \sigma = \text{σταθερά} \quad (\text{A158})$$



**Σχήμα A20.** Απεικόνιση σειράς ατόμων με spins ίδιου μέτρου  $S$  που αποκλίνουν από τα γειτονικά τους κατά γωνία  $\Delta\hat{\phi}$  και από την κατεύθυνση του  $\psi$ -άξονα κατά γωνία  $\hat{\phi}$ .

Σε σειρά ατόμων κατά μήκος του  $x$  άξονα (**σχήμα A20**) σε απόσταση ίση με την πλεγματική σταθερά  $a$ , η γωνία  $\hat{\phi}$  μπορεί να θεωρηθεί ως συνεχής συνάρτηση  $\hat{\phi}(x)$  του  $x$ , σύμφωνα με τη σχέση:

$$\delta\hat{\phi} = \frac{d\hat{\phi}}{dx} \cdot a \quad (A159)$$

Σε απλό κυβικό πλέγμα, όπου υπάρχουν  $1/a^3$  άτομα ανά μονάδα όγκου, η ενέργεια ανταλλαγής  $\epsilon_{ex} \left( \frac{J}{m^3} \right)$  σύμφωνα με τις σχέσεις (A158) και (A159) γράφεται:

$$\epsilon_{ex} = \frac{J_{ex} \cdot S^2 \cdot \left( \frac{d\hat{\phi}}{dx} \cdot a \right)^2}{a^3} = \frac{J_{ex} \cdot S^2}{a} \cdot \left( \frac{d\hat{\phi}}{dx} \right)^2 = \zeta \cdot \left( \frac{d\hat{\phi}}{dx} \right)^2 \quad (A160)$$

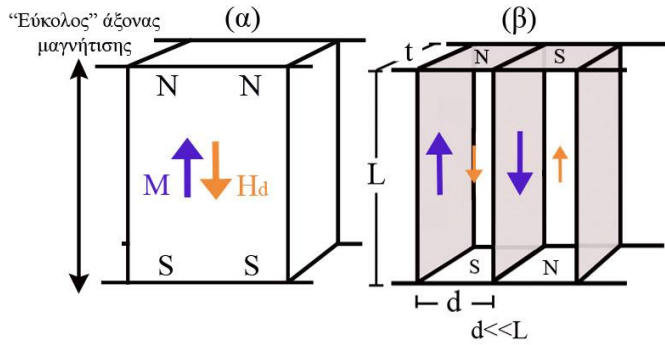
Η ποσότητα  $\zeta = \frac{J_{ex} \cdot S^2}{a}$  στην τελευταία σχέση, σε μονάδες  $\frac{J}{m}$ , αποτελεί τη σταθερά ανταλλαγής. Αν  $\vec{S} = S \cdot (\alpha_x \cdot \hat{x} + \alpha_\psi \cdot \hat{\psi} + \alpha_z \cdot \hat{z})$ , όπου  $\alpha_i = \sin\phi_i$  τα συνημίτονα κατεύθυνσης στους άξονες  $i=x, \psi, z$ , η γενικότερη έκφραση για την ενέργεια ανταλλαγής γράφεται:

$$\epsilon_{ex} = Z \cdot [(\nabla a_x)^2 + (\nabla a_\psi)^2 + (\nabla a_z)^2], \text{ όπου } Z = \frac{c \cdot J_{ex} \cdot S^2}{a} \quad (A161)$$

Η παράμετρος  $c$  στη σταθερά ανταλλαγής  $Z$ , εξαρτάται από την κρυσταλλική δομή. Για απλό κυβικό πλέγμα  $c=1$ , για χωροκεντρωμένο (bcc) κυβικό πλέγμα  $c=2$ , για εδροκεντρωμένο (fcc)  $c=4$ , ενώ για εξαγωνική δομή πυκνής διατάξεως  $c=2\sqrt{2}$ .

Η σταθερά ανταλλαγής έχει τυπική τιμή  $Z=10^{-11} \frac{J}{m}$ , για τα βασικά στοιχεία Fe, Co και Ni.

Παρότι η ενέργεια ανταλλαγής είναι βασική για τον σιδηρομαγνητισμό, δεν εξηγεί το διαχωρισμό σε μαγνητικές περιοχές, εάν δεν συμπεριληφθούν οι υπόλοιπες μορφές ενέργειας.



**Σχήμα A21.** Απεικόνιση του διαχωρισμού υμενίου απείρου μήκους σιδηρομαγνητικού υλικού σε περιοχές Weiss για την ελαχιστοποίηση της ενέργειας απομαγνήτισης  $e_d$ . Η έκταση του πεδίου απομαγνήτισης  $H_d$  περιορίζεται λόγω της εγγύτητας των πόλων στο άνω και κάτω μέρος του υμενίου, σε κάθε σχηματιζόμενη περιοχή.

➤ Η ενεργειακή απαίτηση σχηματισμού των περιοχών Weiss μπορεί να προβλεφθεί με απλή ποιοτική ανάλυση, στην περίπτωση ενός υμενίου απείρου μήκους (**σχήμα A21**), πλάτους  $t$  και πάχους  $L$ , κατά τη διεύθυνση της ομοιόμορφης ενδογενούς μαγνήτισης  $\vec{M}$ .

Η ενέργεια απομαγνήτισης  $e_d$  ( $\text{J/m}^2$ ) ανά μοναδιαίο εμβαδόν της επιφάνειας του υμενίου, αποτελούμενου από μια περιοχή Weiss (**σχήμα A21α**), υπολογίζεται από τη σχέση (A115):

$$e_{Yd}^{N=1} = \frac{1}{2} \cdot \mu_o \cdot M^2 \cdot L \quad (\text{A162})$$

Η ενέργεια απομαγνήτισης  $e_d$  εντός του υμενίου με διαστάσεις  $d, L$  υπολογίζεται από τον Kittel. [60] κατά το διαχωρισμό του σε περιοχές Weiss, με την παραδοχή ότι ο συντελεστής απομαγνήτισης μειώνεται από  $N = d/L = 1$  σε  $N = d/L$ , σύμφωνα με τη σχέση:  $e_d^N = \beta \cdot \mu_o \cdot M^2 \cdot d$ , όπου  $\beta = 0,136$  (A163)

Κάθε ενδιάμεση περιοχή Weiss (**σχήμα A22β**) οριοθετείται από τη γειτονική της μέσω 2 τοιχωμάτων Bloch συνολικού εμβαδού  $2 \cdot L \cdot t$  και από τις 2 κάθετες επιφάνειες στη διεύθυνση της μαγνήτισης  $\vec{M}$ , συνολικού εμβαδού  $2 \cdot t \cdot d$ . Αν  $e_t$  ( $\text{J/m}^2$ ) η μονάδα επιφανειακής ενέργειας στα τοιχώματα των περιοχών Weiss, η ενέργεια  $e_{\text{Bloch}}$  ( $\text{J/m}^2$ ) των ενδιάμεσων τοιχωμάτων Bloch με επιφάνεια  $e_t \cdot 2 \cdot L \cdot t$ , προς την επιφάνεια  $2 \cdot t \cdot d$

του υμενίου, υπολογίζεται από τη σχέση:  $e_{\text{Bloch}} = \frac{e_t \cdot 2 \cdot L \cdot t}{2 \cdot t \cdot d} = \frac{e_t \cdot L}{d}$  (A164)

Οι ενέργειες  $e_t$  των τοιχωμάτων των περιοχών Weiss, είναι της τάξης  $10^{-3} \text{ J/m}^2$ .

Η συνολική ενέργεια  $e_Y$  ( $\text{J/m}^2$ ) ανά μοναδιαίο εμβαδόν της επιφάνειας του υμενίου, σύμφωνα με τις σχέσεις (A163) και (A164) υπολογίζεται:  $e_Y = e_d + e_{\text{Bloch}} = \beta \cdot \mu_o \cdot M^2 \cdot d + \frac{e_t \cdot L}{d}$  (A165)

Το εύρος  $d$  των περιοχών Weiss καθορίζεται μέσω της τελευταίας σχέσης, από την ελαχιστοποίηση της ενέργειας  $e_Y$  του υμενίου, βάσει της συνθήκης:

$$\frac{\partial e_Y}{\partial d} = -\frac{e_t \cdot L}{d^2} + \beta \cdot \mu_o \cdot M^2 = 0 \Leftrightarrow d = \sqrt{\frac{e_t \cdot L}{\beta \cdot \mu_o \cdot M^2}} \quad (\text{A166}), \quad \text{εφόσον} \quad \frac{\partial^2 e_Y}{\partial^2 d} = \frac{2 \cdot e_t \cdot L}{d^3} > 0$$

Σύμφωνα με την τελευταία σχέση, για  $L = \frac{\beta \cdot \mu_o \cdot d^2 \cdot M^2}{e_t}$ , η ελάχιστη τιμή της ενέργειας  $e_{Y(\min)}$  υπολογίζεται από

τη σχέση (A165):  $e_{Y(\min)} = 2 \cdot \beta \cdot \mu_o \cdot M^2 \cdot d^{\beta=0,136} = 0,272 \cdot \mu_o \cdot M^2 \cdot d$  (A167)

Για το κοβάλτιο, όπου  $e_\tau = 7,6 \cdot 10^{-3} \text{ J/m}^2$ ,  $M = 1422 \cdot 10^3 \text{ A/m}$ , για  $L = 1 \text{ cm}$ , το πάχος  $d$  των περιοχών Weiss υπολογίζεται από τη σχέση (A166):

$$d = \sqrt{\frac{(7,6 \cdot 10^{-3}) \cdot 10^{-2}}{0,136 \cdot (4\pi \cdot 10^{-7}) \cdot (1422 \cdot 10^3)^2}} \text{ m} = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ m} = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ cm}$$

Το υπολογιζόμενο πάχος  $d$  των τοιχωμάτων αντιστοιχεί σε  $N = \frac{L}{d} = \frac{1}{1,5 \cdot 10^{-3}} \approx 700$  περιοχές Weiss, για κυβικό κρύσταλλο πλευράς  $L = 1 \text{ cm}$ .

Η ενέργεια πριν και μετά το διαχωρισμό του κρυστάλλου σε περιοχές Weiss υπολογίζεται από τις σχέσεις (A162) και (A167):

$$e_{Yd}^{N=1} = \frac{1}{2} \cdot \mu_o \cdot M^2 \cdot L, \quad e_{Y(\min)}^{N \approx 700} = 0,272 \cdot \mu_o \cdot M^2 \cdot d$$

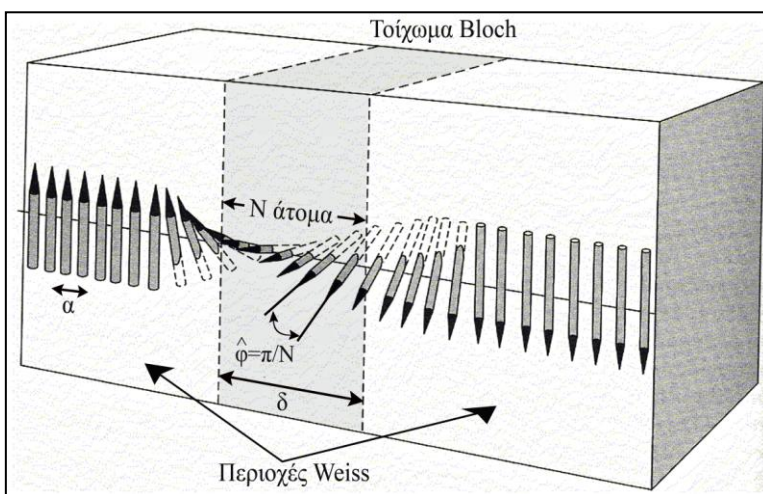
Το πηλίκο  $\frac{e_{Yd}^{N=1}}{e_Y^{N \approx 700}}$  υπολογίζεται:  $\frac{e_d^{N=1}}{e_Y^{N \approx 700}} = \frac{0,5 \cdot \mu_o \cdot M^2 \cdot L}{0,272 \cdot \mu_o \cdot M^2 \cdot d} = 1,8 \cdot \frac{L}{d} = 1,8 \cdot N \approx 1,8 \cdot 700 = 1300$

Επομένως, η ενέργεια μειώνεται κατά το διαχωρισμό του κρυστάλλου σε περίπου 700 περιοχές Weiss, κατά περίπου 1300 φορές.

Ο προηγούμενος υπολογισμός της αύξησης του αριθμού και της ταυτόχρονης μείωσης του μεγέθους των περιοχών Weiss, από την ισορροπία μεταξύ της μειούμενης ενέργειας απομαγνήτισης  $e_d$  και της αυξανόμενης επιφανειακής ενέργειας στα σχηματιζόμενα τοιχώματα Bloch μεταξύ των διαχωριζόμενων περιοχών, έγινε με την παραδοχή ότι το πάχος των τοιχωμάτων Bloch είναι αμελητέο.

➤ Όμως παρότι σε ένα σιδηρομαγνητικό υλικό συνήθως υπάρχουν πολλές περιοχές Weiss με ομοιόμορφη μαγνήτιση στην κατεύθυνση κάποιου «εύκολου» άξονα για την ελαχιστοποίηση της ενέργειας ανισοτροπίας  $e_K$ , που αλλάζει απότομα κατεύθυνση αμφιπλεύρως των στενών συνόρων, συναντώνται παχύτερα τοιχώματα Bloch, όπου οι ατομικές μαγνητικές ροπές δεν είναι παράλληλες ούτε μεταξύ τους, ούτε με τη διεύθυνση της «εύκολης» μαγνήτισης, με αποτέλεσμα να αυξάνουν ταυτόχρονα οι όροι  $e_{ex}$  και  $e_K$  της συνολικής ενέργειας  $e_{ολ}$ . Ο ανταγωνισμός ελαχιστοποίησης των ενεργειών  $e_{ex}$  και  $e_K$ , καθορίζει το πάχος  $\delta$  των ενδιάμεσων τοιχωμάτων Bloch.

Τα spin των ατόμων στα τοιχώματα Bloch (σχήμα A22), δε διατηρούν τις ίδιες διευθύνσεις, αλλά αλλάζουν βαθμιαία προσανατολισμό, συνιστώντας ένα μεταβατικό στρώμα μεταξύ των γειτονικών περιοχών Weiss, που ελαχιστοποιεί την ενέργεια ανταλλαγής  $e_{ex}$  του συστήματος.



**Σχήμα A22.** Απεικόνιση της διάταξης των ατομικών spin του διαχωριστικού τοιχώματος Bloch, μεταξύ δύο κυβικών περιοχών Weiss με αυθόρμητα προσανατολισμένες μαγνητικές ροπές. Οι μαγνητικές ροπές του τοιχώματος Bloch αλλάζουν βαθμιαία προσανατολισμό, συνιστώντας ένα μεταβατικό στρώμα μεταξύ των γειτονικών περιοχών, που συνήθως εμφανίζουν γωνιακή μετατόπιση  $180^\circ$  ή  $90^\circ$ .



Η ενέργεια ανταλλαγής ενός ζεύγους γειτονικών ατόμων, υπολογίζεται από τη σχέση (A103):

$E_{ex} = -2 \cdot J_{ex} \cdot S^2 \cdot \sin \varphi$ . Σύμφωνα με την προσέγγιση Taylor  $\sin \varphi \approx 1 - \frac{\varphi^2}{2} + \frac{\varphi^4}{24}$  και η παραπάνω σχέση γράφεται:

$E_{ex} = -2 \cdot J_{ex} \cdot S^2 + J_{ex} \cdot S^2 \cdot \varphi^2$ . Επομένως η εξάρτηση της ενέργειας ανταλλαγής  $E_{ex}$  από τη γωνία  $\varphi$ , περιγράφεται από τη σχέση:

$$E_{ex} = J_{ex} \cdot S^2 \cdot \varphi^2 \quad (A168)$$

Αν τα τοιχώματα Bloch έχουν αμελητέο πάχος ( $\delta \approx 0$ ) και τα ατομικά spin είναι αντίθετα ( $\varphi = \pi$ ) η ενέργεια ανταλλαγής των ατόμων στις γειτονικές περιοχές Weiss, υπολογίζεται:

$$E_{ex(Weiss)}^{\varphi=\pi} = J_{ex} \cdot S^2 \cdot \pi^2 \quad (A169)$$

Στην περίπτωση που το πάχος  $\delta$  των διαχωριστικών τοιχωμάτων Bloch ορίζεται από σειρά  $N$  ατόμων, με διαδοχικές μεταβολές των γωνιών μεταξύ των ατομικών ροπών κατά  $\varphi = \frac{\pi}{N}$ , η ενέργεια ανταλλαγής των ατόμων στις γειτονικές περιοχές Weiss υπολογίζεται (A168):

$$E_{ex(Weiss)}^{\varphi=\frac{\pi}{N}} = N \cdot [J_{ex} \cdot S^2 \cdot (\frac{\pi}{N})^2] = J_{ex} \cdot S^2 \cdot \frac{\pi^2}{N} \quad (A170)$$

Επομένως σύμφωνα με τις σχέσεις (A169), (A170) η ενέργεια ανταλλαγής  $E_{ex(Weiss)}^{\varphi=\frac{\pi}{N}} < E_{ex(Weiss)}^{\varphi=\pi}$  μεταξύ των ατόμων στις γειτονικές περιοχές Weiss, ελαττώνεται με την αύξηση του αριθμού  $N$  της σειράς των ατόμων ή με την αύξηση του πάχους των τοιχωμάτων Bloch.

Όταν τα ατομικά spin αποκλίνουν διαδοχικά κατά  $\varphi = \frac{\pi}{N}$  εντός τοιχωμάτων Bloch πάχους  $\delta = N \cdot a$  που παρεμβάλλονται παραλλήλως προς μια έδρα κυβικών κρυστάλλων (σχήμα A22) με πλεγματική σταθερά  $a$ , διαχωρίζοντας περιοχές Weiss με αντίθετα ατομικά spin, τότε σε κάθε τοίχωμα Bloch αντιστοιχούν  $\frac{1}{a^2}$

σειρές  $N$  ατόμων. Η ενέργεια ανταλλαγής  $e_{ex}^{Bloch} (\frac{J}{m^2})$  των ατόμων του τοιχώματος Bloch ανά μονάδα

επιφάνειας, υπολογίζεται (A168):

$$e_{ex(Bloch)} = J_{ex} \cdot S^2 \cdot (\frac{\pi}{N})^2 \cdot \frac{N}{a^2} = \frac{J_{ex} \cdot S^2 \cdot \pi^2}{N \cdot a^2} \stackrel{\delta=N \cdot a}{=} \frac{J_{ex} \cdot S^2 \cdot \pi^2}{\delta \cdot a} \quad (A171)$$

Ενώ η ενέργεια ανταλλαγής σύμφωνα με την τελευταία σχέση μειώνεται με την αύξηση του πάχους των τοιχωμάτων Bloch, η ενέργεια κρυσταλλικής ανισοτροπίας  $e_k$  αυξάνεται, γιατί ταυτόχρονα αυξάνει ο αριθμός των ατομικών μαγνητικών ροπών στις «δύσκολες» διευθύνσεις μαγνήτισης.

Αν  $k_1 > 0$  η σταθερά πρώτης τάξης της κρυσταλλικής ανισοτροπίας του υλικού και  $e_{k(Bloch)} = k_1 \cdot \delta$  (A172) η ενέργεια κρυσταλλικής ανισοτροπίας ανά μονάδα επιφάνειας του τοιχώματος ( $\frac{J}{m^2}$ ), τότε η

συνολική ενέργεια  $e_{Bloch} (\frac{J}{m^2})$  του τοιχώματος Bloch, υπολογίζεται από τον άθροισμα των σχέσεων (A171)

και (A172):

$$e_{Bloch}(\delta) = e_{ex(Bloch)} + e_{k(Bloch)} = \frac{J_{ex} \cdot S^2 \cdot \pi^2}{\delta \cdot a} + k_1 \cdot \delta \quad (A173)$$

Το πάχος  $\delta$  του τοιχώματος που καθορίζεται από τον ανταγωνισμό των ενεργειών  $e_{ex(Bloch)}$  και  $e_{k(Bloch)}$ , για την ελαχιστοποίηση της συνολικής ενέργειας  $e_{Bloch}(\delta)$ , υπολογίζεται από τη λύση της εξίσωσης:

$$\frac{\partial e_{Bloch}}{\partial \delta} = -\frac{J_{ex} \cdot S^2 \cdot \pi^2}{\delta^2 \cdot a} + k_1 = 0 \Leftrightarrow \delta = \sqrt{\frac{J_{ex} \cdot S^2 \cdot \pi^2}{k_1 \cdot a}} \quad (A174), \quad \text{εφόσον} \quad \frac{\partial^2 e_{Bloch}}{\partial^2 \delta} = \frac{2 \cdot J_{ex} \cdot S^2 \cdot \pi^2}{\delta^3 \cdot a} > 0$$

Για παράδειγμα στον σίδηρο, με πλεγματική σταθερά  $a=2,86 \text{ \AA}$ , όπου  $k_1=4,6 \cdot 10^4 \text{ J/m}^3$ ,  $T_c=1043 \text{ K}$ ,  $J_{ex}=0,3 \cdot k_B \cdot T_c$  και  $S=\frac{1}{2}$  το πάχος του τοιχώματος Bloch υπολογίζεται (A174):

$$\delta = \sqrt{\frac{0,3 \cdot (1,38 \cdot 10^{-23}) \cdot 1043 \cdot 0,5^2 \cdot \pi^2}{(4,6 \cdot 10^4) \cdot (2,86 \cdot 10^{-10})}} = 290 \text{ \AA}$$

Ο αριθμός  $N$  της σειράς των ατόμων στο πάχος  $\delta=N \cdot a$  του τοιχώματος Bloch, υπολογίζεται από τη σχέση :

$$N = \frac{\delta}{a} = \frac{290 \text{ \AA}}{2,86 \text{ \AA}} = 100$$

Με την αντικατάσταση (A174)  $J_{ex} = \frac{k_1 \cdot a \cdot \delta^2}{\pi^2 \cdot S^2}$ , η ενέργεια του τοιχώματος Bloch υπολογίζεται από τη σχέση (A173):

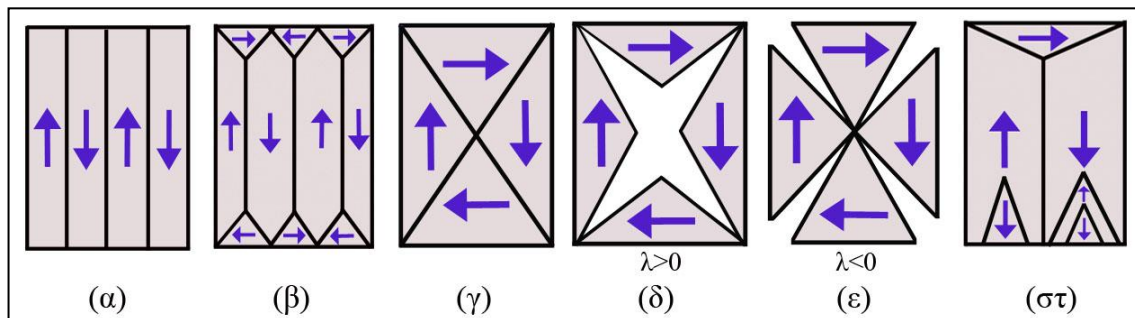
$$e_{\text{Bloch}} = 2 \cdot k_1 \cdot \delta = 2 \cdot (4,6 \cdot 10^4) \cdot (290 \cdot 10^{-10}) = 2,7 \cdot 10^{-3} \left( \frac{\text{J}}{\text{m}^2} \right)$$

Με την αντικατάσταση του ολοκληρώματος ανταλλαγής  $J_{ex}$  από τη σχέση (A108), το πάχος  $\delta$  του τοιχώματος υπολογίζεται από τη σχέση (A174):

$$\delta = \sqrt{\frac{S^2 \cdot \pi^2}{k_1 \cdot a} J_{ex}} = \sqrt{\frac{S^2 \cdot \pi^2}{k_1 \cdot a} \cdot \frac{3 \cdot k_B \cdot T_c}{2(S+1)\gamma S}} = \sqrt{\frac{3S \cdot \pi^2 \cdot k_B}{2(S+1)\gamma a}} \cdot \sqrt{\frac{T_c}{k_1}} \quad (\text{A175})$$

Εφόσον σύμφωνα με την τελευταία σχέση  $\delta \sim \sqrt{\frac{T_c}{k_1}}$ , το πάχος των τοιχωμάτων Bloch είναι μεγαλύτερο σε σιδηρομαγνητικά υλικά, που εμφανίζουν μεγαλύτερη θερμοκρασία Curie  $T_c$  και μικρότερη σταθερά κρυσταλλικής ανισοτροπίας  $k_1$ .

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η ενέργεια ανταλλαγής  $e_{ex}$  είναι υπεύθυνη για τη διάταξη των ατομικών spin κάθε περιοχής σε παράλληλη ή αντιπαράλληλη διάταξη, με αποκλίσεις που οφείλονται στις υπόλοιπες μορφές ενέργειας. Ο διαχωρισμός του υλικού σε περιοχές Weiss, οφείλεται στη μαγνητοστατική ενέργεια  $e_{ms}$  του πεδίου απομαγνήτισης  $H_d$  ή και της ανισοτροπίας σχήματος  $e_s$ . Ο προσανατολισμός της ομοιόμορφης μαγνήτισης κάθε περιοχής στην κατεύθυνση κάποιου εύκολου άξονα, οφείλεται στην ενέργεια ανισοτροπίας  $e_k$ . Το πάχος των διαχωριστικών τοιχωμάτων Bloch καθορίζεται κυρίως από τον ανταγωνισμό της ενέργειας ανταλλαγής  $e_{ex}$  και της μαγνητοκρυσταλλικής ενέργειας  $e_{ms}$  για την ελαχιστοποίηση της συνολικής ενέργειας.



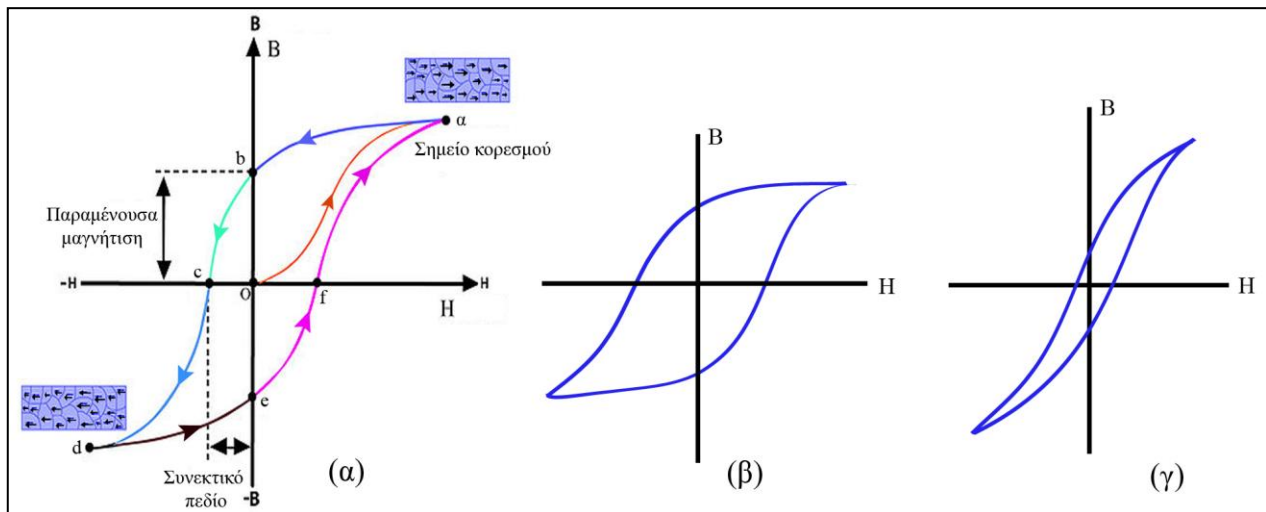
Σχήμα A23. Απεικόνιση πιθανών μορφών περιοχών Weiss

Στην περίπτωση των μονοαξονικών κρυστάλλων, η πιθανή μορφή των περιοχών Weiss απεικονίζεται στο **σχήμα A23α**. Μια πιθανή δομή, ιδιαίτερα για κυβικά πλέγματα (**σχήμα A23β,γ**) είναι ο σχηματισμός μικρότερων περιοχών κλειστής μαγνητικής ροής (closure domains), όπου δε σχηματίζονται πόλοι στην επιφάνεια ή στον όγκο του υλικού, με αποτέλεσμα η μαγνητοστατική ενέργεια  $\epsilon_{ms}$  να είναι μηδενική. Στην πραγματικότητα ενοείται ο σχηματισμός μικρότερων περιοχών Weiss, για δυο επιπλέον λόγους:

-Η μαγνήτιση κάθε περιοχής λόγω της μαγνητοσυστολής  $\epsilon_\sigma$  μεταβάλλει το σχήμα της. Σε ορισμένα υλικά με θετική μαγνητοσυστολή ( $\lambda > 0$ ) οι περιοχές διογκώνονται στη διεύθυνση της μαγνήτισης (**σχήμα A23δ**) και σε άλλα συρρικνώνονται ( $\lambda < 0$ ) προς την ίδια διεύθυνση (**σχήμα A23ε**). Η ρήξη κατά μήκος των συνοριακών περιοχών που μεταβάλλουν το σχήμα τους, απαιτεί ποσότητα ενέργειας τόσο μεγαλύτερη, όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος των περιοχών. Επειδή ο διαχωρισμός των περιοχών σε μικρότερες απαιτεί μικρότερα ποσά ενέργειας, ενοείται ο κατακερματισμός των μεγαλύτερων περιοχών Weiss.

-Ο σχηματισμός μικρότερων περιοχών Weiss ενοείται κυρίως στην επιφάνεια του υλικού, λόγω της δημιουργίας ευρύτερων περιοχών κλειστής μαγνητικής ροής. Επιπλέον, λόγω της ανισοτροπίας  $\epsilon_E$  στην επιφάνεια, όπου το πεδίο απομαγνήτισης  $H_d$  είναι ισχυρότερο (**σχήμα A23στ**), σχηματίζονται ανάστροφες περιοχές ακίδας (reverse spike domains), που περιορίζουν τη μαγνητοστατική ενέργεια  $\epsilon_{ms}$ , χωρίς να αυξάνεται ταυτόχρονα η ενέργεια των διαχωριστικών τοιχωμάτων Bloch, λόγω της μικρότερης έκτασης των συνοριακών περιοχών.

➤ Εάν ένα σιδηρομαγνητικό υλικό (**διάγραμμα A12**) μαγνητιστεί υπό την επίδραση μαγνητικού πεδίου  $\vec{H}$  μέχρι την κατάσταση κόρου (καμπύλη  $Oa$ ) και στη συνέχεια μηδενιστεί ( $H=0$ ), το συνολικό μαγνητικό πεδίο  $B$  του υλικού δε μηδενίζεται, αλλά διατηρεί μια θετική τιμή (σημείο  $b$ ) που οφείλεται στην παραμένουσα μαγνήτιση  $M$ .



**Διάγραμμα A12.** Τυπικός βρόχος υστέρησης (α) σιδηρομαγνητικού υλικού, (β) «σκληρού» σιδηρομαγνητικού υλικού και (γ) «μαλακού» σιδηρομαγνητικού υλικού.

Το φαινόμενο χαρακτηρίζεται μαγνητική υστέρηση και η τιμή της παραμένουσας μαγνήτισης  $M$  εξαρτάται από το υλικό και την κατεργασία του. Με την αντιστροφή της φοράς του πεδίου (καμπύλη  $bc$ ), η μαγνήτιση μηδενίζεται στο σημείο  $c$ . Η τιμή του εφαρμοζόμενου πεδίου  $H_c$ , για την οποία μηδενίζεται η μαγνήτιση, χαρακτηρίζεται ως συνεκτικό πεδίο ή συνεκτική δύναμη. Με την αύξηση του μαγνητικού πεδίου  $H$  κατά την ίδια φορά (καμπύλη  $cd$ ), το σιδηρομαγνητικό υλικό επέρχεται ξανά σε κατάσταση κόρου, με τις μαγνητικές ροπές αντίστροφα προσανατολισμένες, στην κατεύθυνση του πεδίου  $\vec{H}$ . Με τη μείωση του πεδίου  $H$

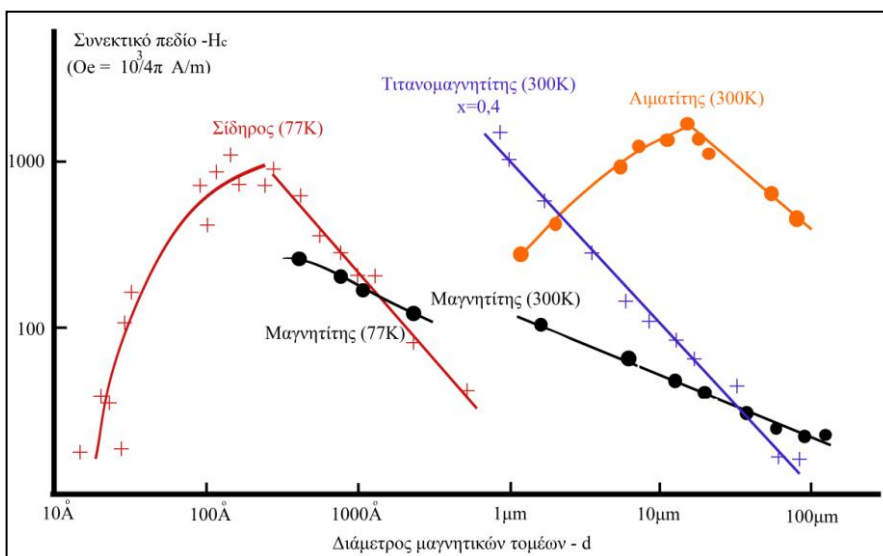
(καμπύλη de) μέχρι το μηδενισμό του, το συνολικό μαγνητικό πεδίο  $B$  δε μηδενίζεται, αλλά διατηρεί μια αρνητική τιμή (σημείο e), οφειλόμενη στην παραμένουσα μαγνήτιση  $M$ , με αντίθετη κατεύθυνση σε σχέση με τη μαγνήτιση στο σημείο b. Το εμβαδόν που περικλείει η κλειστή καμπύλη abcdefa, που χαρακτηρίζεται βρόχος υστέρησης, σε μονάδες  $B \cdot H(T \cdot \frac{J}{T \cdot m^3} = \frac{J}{m^3})$ , αποτελεί το μέτρο των απωλειών ενέργειας που συμβαίνουν σε έναν πλήρη κύκλο μαγνήτισης και απομαγνήτισης του σιδηρομαγνητικού υλικού.

Η τιμή του συνεκτικού πεδίου  $H_c$  διαχωρίζει τα σιδηρομαγνητικά υλικά σε «σκληρά» ή «μαλακά», αναλόγως των εφαρμογών τους. Όταν  $H_c > 100 \text{ Oe}$  ( $= \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{KA}{m}$ ) το υλικό χαρακτηρίζεται σαν «σκληρό», ενώ για  $H_c < 5 \text{ Oe}$  χαρακτηρίζεται σαν «μαλακό».

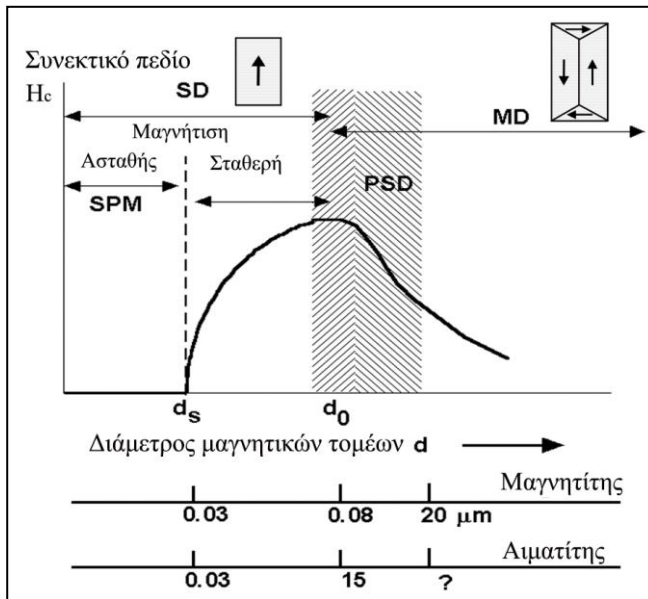
-Τα «σκληρά» σιδηρομαγνητικά υλικά (**διάγραμμα A12β**), έχουν μεγάλη ένταση συνεκτικού πεδίου  $H_c$ , μικρή παραμένουσα μαγνήτιση και μικρή τιμή της μαγνητικής διαπερατότητας  $\mu$  υπό την επίδραση εξωτερικού πεδίου. Τα υλικά αυτά είναι κατάλληλα για την κατασκευή σταθερών μαγνητών, ως πηγές μαγνητικής ροής που χρησιμοποιούνται σε ηλεκτροακουστικές συσκευές (μικρόφωνα, μεγάφωνα, κ.ά.), σε όργανα ηλεκτρικών μετρήσεων, κ.τ.λ. Στην κατηγορία των «σκληρών» σιδηρομαγνητικών υλικών, ανήκουν μορφές χάλυβα με διαφορετική περιεκτικότητα σε C, W, Cr και Co, καθώς και κράματα Al-Si-Fe, Al-Ni-Fe, Al-Ni-Co, μεταλλοκεραμικά υλικά και κράματα με βάση οξείδια μετάλλων και τα ευγενή μέταλλα.

-Τα «μαλακά» σιδηρομαγνητικά υλικά (**διάγραμμα A12γ**), παρουσιάζουν μικρή ένταση του συνεκτικού πεδίου  $H_c$ , μεγάλη τιμή της παραμένουσας μαγνήτισης και μεγάλη μαγνητική διαπερατότητα  $\mu$ . Τα υλικά αυτά χρησιμοποιούνται για την κατασκευή πυρήνων σε μετασχηματιστές, πηνία, ηλεκτρομαγνήτες, κ.τ.λ. Στην κατηγορία των «μαλακών» σιδηρομαγνητικών υλικών, ανήκουν ο καθαρός σφυρήλατος σίδηρος, ο μαλακός χάλυβας κατασκευής φύλλων και ελασμάτων, διάφορα κράματα Fe-Si-Al που δεν επιδέχονται σφυρηλάτηση και θερμομαγνητικά κράματα που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή πυρήνων υψηλών σχετικά συχνοτήτων.

Η τιμή του συνεκτικού πεδίου  $H_c$  εξαρτάται κυρίως το μέγεθος των μαγνητικών τομέων ή μαγνητικών κόκκων, που εμφανίζουν την ίδια μαγνητική συμπεριφορά. Με την αύξηση του μεγέθους των μαγνητικών τομέων (διάγραμμα A13), το συνεκτικό πεδίο αυξάνεται μέχρι ένα ορισμένο μέγεθος, πέρα από το οποίο το συνεκτικό πεδίο μειώνεται ξανά.



**Διάγραμμα A13.** Μεταβολή [12] του συνεκτικού πεδίου  $H_c$ , συνάρτησε του μεγέθους των μαγνητικών τομέων σιδήρου, μαγνητίτη, αιματίτη και τιτανομαγνητίτη, σε συγκεκριμένες θερμοκρασίες.



Το μέγεθος των μαγνητικών τομέων καθορίζεται από τον αριθμό των περιοχών Weiss από τις οποίες συνίστανται τα μαγνητικά υλικά και με βάση το κριτήριο αυτό, οι μαγνητικοί κόκκοι ταξινομούνται σε κλίμακες μεγεθών, σύμφωνα με το **διάγραμμα A14**.

**Διάγραμμα A14.** Ταξινόμηση της διαμέτρου  $d$  των μαγνητικών τομέων, συναρτήσει του συνεκτικού του πεδίου  $H_c$ . Ταξινόμηση [60] των μαγνητικών κόκκων του μαγνητίτη και του αιματίτη.

Οι κόκκοι μεγάλου μεγέθους, με διάμετρο  $d$  μεγαλύτερη από μια χαρακτηριστική διάμετρο  $d_0$  για κάθε σιδηρομαγνητικό υλικό, συνίστανται από πολλές περιοχές Weiss και χαρακτηρίζονται ως Multi Domain-MD. Οι MD κόκκοι μαγνητίζονται κατά τη διεύθυνση του εφαρμοζόμενου πεδίου με μετατόπιση των διαχωριστικών τους τοιχωμάτων και με περιστροφή των μαγνητικών ροπών στην κατεύθυνση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Η συνεκτική δύναμη  $H_c$  των MD κόκκων, μειώνεται με την αύξηση του μεγέθους τους,

$$\text{σύμφωνα με τη σχέση: } H_c = \alpha + \frac{b}{d} \quad (\text{A176})$$

Οι σταθερές  $\alpha [A/m]$  και  $b[A]$  στην παραπάνω σχέση προσδιορίζονται πειραματικά για κάθε σιδηρομαγνητικό υλικό.

Οι κόκκοι μικρότερου μεγέθους με  $d < d_0$  που χαρακτηρίζονται ως Single Domain-SD, συνίστανται από μια περιοχή Weiss, με μαγνήτιση που μεταβάλλεται μόνο με περιστροφή των spin. Η συνεκτική δύναμη  $H_c$  των SD κόκκων, μειώνεται με τη μείωση του μεγέθους τους, λόγω θερμικών φαινομένων, σύμφωνα με τη σχέση:

$$H_c = c - \frac{f}{d^{3/2}} \quad (\text{A177})$$

Οι σταθερές  $c [A/m]$  και  $f [A \cdot m^{1/2}]$  στην παραπάνω σχέση προσδιορίζονται πειραματικά για κάθε σιδηρομαγνητικό υλικό.

Όταν η τιμή της διαμέτρου των κόκκων γίνει μικρότερη από μια χαρακτηριστική τιμή  $d_s$  για κάθε σιδηρομαγνητικό υλικό, η συνεκτική δύναμη  $H_c$  μηδενίζεται εξαιτίας των έντονων θερμικών φαινομένων που μπορούν να απομαγνητίσουν κόκκους από την κατάσταση του μαγνητικού κόρου.

Οι ψευδοκόκκοι μονής περιοχής που χαρακτηρίζονται ως Pseudo single domains-PSD, έχουν διαστάσεις μεταξύ των κόκκων SD και MD. Κατά το στάδιο της μαγνήτισης συμπεριφέρονται ως κόκκοι SD, αλλά εμφανίζουν πιο σταθερή μαγνήτιση.

Αν  $\epsilon_i (\frac{J}{m^3})$ , όπου  $i=s, k, \sigma$  η ενέργεια ανισοτροπίας (σχήματος, κρυσταλλικής ή μαγνητοελαστικής) ενός SD κόκκου, όγκου  $V$  με μαγνήτιση  $\vec{M}_0$  που σχηματίζει γωνία  $\hat{\theta}$  με την «εύκολη» κατεύθυνση μαγνήτισης, απουσίας μαγνητικού πεδίου, η συνολική του ενέργεια σε κάθε περίπτωση προσεγγίζεται από τη σχέση (A116, A141, A155):

$$E \approx \epsilon_i \cdot V \cdot \eta \mu^2 \theta \quad (\text{A178})$$

Η υπέρβαση του ενεργειακού φράγματος στις θέσεις  $\theta = \pm \pi/2$ , όπου  $E = E_{\max} \approx \epsilon_i \cdot V$ , από τις θέσεις ευσταθούς ισορροπίας ( $\theta = 0, \pi$ ) όπου η ενέργεια ελαχιστοποιείται ( $E = E_{\min}$ ), απαιτεί μικρότερη αύξηση της θερμοκρασίας, όσο μικρότερος είναι ο όγκος  $V$  του SD κόκκου. Αν το μέγεθος των σωματιδίων (Super Paramagnetic-SP), είναι αρκετά μικρό ( $d < d_s$ ), η θερμική διέγερση μπορεί να υπερνικήσει τις δυνάμεις ανισοτροπίας και να αναγκάσει τη μαγνήτιση των κόκκων να στραφεί από τη διεύθυνση εύκολης μαγνήτισης σε μία άλλη, χωρίς την επίδραση εξωτερικού πεδίου. Με την εφαρμογή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, οι SP κόκκοι τείνουν να ευθυγραμμιστούν στην κατεύθυνσή του, ενώ με το μηδενισμό του επανέρχονται λόγω της θερμικής ενέργειας στην διεύθυνση «εύκολης» μαγνήτισης, επιδεικνύοντας παραμαγνητική συμπεριφορά, χωρίς να εμφανίζουν παραμένονσα μαγνήτιση. Η τιμή της μαγνητικής ροπής των ατόμων στους SP κόκκους είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτές των ατόμων στα κλασσικά παραμαγνητικά υλικά και για τον λόγο αυτό ονομάζονται υπερ-παραμαγνητικοί κόκκοι.

Σε κάθε κλίμακα μεγέθους, με την πάροδο του χρόνου  $t$  η θερμική ενέργεια των μικρότερων κόκκων με αρχική μαγνήτιση  $M_0$  υπό την επίδραση της θερμοκρασίας, υπερβαίνει την ενέργεια ανισοτροπίας, με αποτέλεσμα τη συνολική σταδιακή αποδιοργάνωση των ευθυγραμμισμένων μαγνητικών ροπών και το

μηδενισμό της μαγνήτισης  $M(t)$ , σύμφωνα με τη σχέση:  $M(t) = M_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$  (A179)

Η σταθερά  $\tau$  στην τελευταία σχέση, αποτελεί τον χρόνο χαλάρωσης που απαιτείται για τη μείωση της μαγνήτισης στο  $1/e$  της αρχικής της τιμής  $M_0$ . Η τιμή της συχνότητας  $1/\tau$  [s<sup>-1</sup>] εξαρτάται από τον ανταγωνισμό μεταξύ της θερμικής ενέργειας  $k_B \cdot T$  και της ενέργειας ανισοτροπίας  $\epsilon_i \cdot V$ , που αντιστοιχεί στο άθροισμα των ανά δευτερόλεπτο πιθανοτήτων να αντιστραφεί η κατεύθυνση των μαγνητικών ροπών.

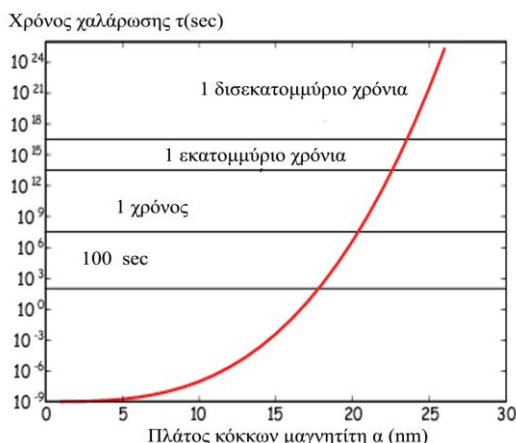
Επομένως η συχνότητα  $1/\tau$  είναι ανάλογη του συντελεστή Boltzman  $e^{-\frac{\epsilon_i \cdot V}{k_B \cdot T}}$ , αφού η ενέργεια  $\epsilon_i \cdot V$  αποτελεί

το αίτιο της ενεργειακής μεταβολής, σύμφωνα με τη σχέση:  $\frac{1}{\tau} = f \cdot e^{-\frac{\epsilon_i \cdot V}{k_B \cdot T}}$  (A180)

Οι τιμές του συντελεστή συχνότητας  $f$  είναι χαρακτηριστικές για κάθε σιδηρομαγνητικό υλικό και

κυμαίνονται από  $(10^9 - 10^{10}) \text{ s}^{-1}$ . Για  $f \approx 10^9 \text{ s}^{-1}$  η τελευταία σχέση γράφεται:  $\tau = 10^{-9} \cdot e^{\frac{\epsilon_i \cdot V}{k_B \cdot T}}$  (A181)

Ο χρόνος χαλάρωσης  $\tau$  είναι πολύ ευαίσθητος στον όγκο  $V$  και στις αλλαγές του σχήματος των κόκκων και η τιμή του μπορεί να κυμανθεί από κλάσματα του δευτερολέπτου (**διάγραμμα A15**), μέχρι δισεκατομμύρια χρόνια.



**Διάγραμμα A15.** Μεταβολή του χρόνου χαλάρωσης

$\tau = 10^{-9} \cdot e^{\frac{\epsilon_s \cdot V}{k_B \cdot T}}$  [45] λόγω της μεταβολής της ανισοτροπίας σχήματος του μαγνητίτη, από την αλλαγή του πλάτους  $a$  των κυβικών κόκκων, για  $0 < a \leq \frac{13}{10} \cdot c$  και  $b = c = 23 \text{ nm}$ , σε θερμοκρασία δωματίου

$T = 300 \text{ K}$ . Η  $\epsilon_s$  υπολογίζεται για κάθε τιμή του πλάτους  $a$  από τις σχέσεις (A126) και (A127).



Σε κάθε θερμοκρασία  $T$ , ορίζεται ένας κρίσιμος όγκος κόκκων  $V_s$ , με διάμετρο  $d_s$ , όπου για  $d > d_s$  οι κόκκοι εμφανίζουν σταθερή μαγνήτιση, ενώ για  $d < d_s$ , οι κόκκοι εμφανίζουν το φαινόμενο του υπερμαγνητισμού. Η κρίσιμη τιμή  $d_s$ , ορίζεται από τον χρόνο χαλάρωσης  $\tau = 100s$ , που συνήθως απαιτείται για τη μέτρηση της παραμένουσας μαγνήτισης των σιδηρομαγνητικών υλικών. Για  $\tau = 100s$  υπολογίζεται από τη σχέση (A181) ο λόγος: 
$$\frac{\varepsilon_i \cdot V_s}{k_B \cdot T} \approx 25 \quad (A182)$$

Σύμφωνα με την προηγούμενη σχέση, προσεγγίζεται ο κρίσιμος όγκος  $V_s$  για κόκκους με ενέργεια ανισοτροπίας  $\varepsilon_i$ , σε συγκεκριμένη θερμοκρασία  $T$ : 
$$V_s = \frac{25 \cdot k_B \cdot T}{\varepsilon_i} \quad (A183)$$

Από την ίδια σχέση (A182), προσεγγίζεται το ενεργειακό φράγμα  $E_i$  σε συγκεκριμένη θερμοκρασία  $T$ , για κόκκους συγκεκριμένου όγκου  $V$  με ενέργεια ανισοτροπίας  $\varepsilon_i$ , κάτω από το οποίο η μαγνήτιση είναι σταθερή:  $E_s = \varepsilon_i \cdot V = 25 \cdot k_B \cdot T \quad (A184)$

Επιπλέον, για καθορισμένο όγκο  $V$  και για ενέργεια ανισοτροπίας  $\varepsilon_i$  των κόκκων, προσεγγίζεται η θερμοκρασία φραγμού  $T_s$ , κάτω από την οποία η μαγνήτιση είναι σταθερή, από τη σχέση:

$$T_s = \frac{\varepsilon_i \cdot V}{25 \cdot k_B} \quad (A185)$$

### A3.5 Κατηγορίες φυσικών μαγνητίσεων

Η αρχαιομαγνήτιση αποτελεί το άθροισμα της *αρχικής* ή *κύριας παραμένουσας μαγνήτισης* των σιδηρομαγνητικών προσμίξεων, σε υλικά που αποτύπωσαν την ένταση και τη διεύθυνση του γεωμαγνητικού πεδίου και δευτερευουσών ή παρασιτικών μαγνητίσεων που αποκτήθηκαν με το πέρασμα του χρόνου.

Η θερμοπαραμένουσα μαγνήτιση αποτελεί την πιο διαδεδομένη μαγνήτιση σε φυσικές συνθήκες, που αποκτάται κατά την ψύξη των υλικών στην κατεύθυνση του γήινου μαγνητικού πεδίου, από θερμοκρασία μεγαλύτερη της  $T_c$  μέχρι την ελάχιστη μικρότερη θερμοκρασία  $T_s$  φραγμού (A185). Όλα τα ηφαιστειακά πετρώματα αλλά και τεκμήρια της ανθρώπινης δραστηριότητας, όπως τα προϊόντα ψημένης αργίλου, απέκτησαν θερμοπαραμένουσα μαγνήτιση που διατηρείται αναλλοίωτη μέχρι σήμερα. Το διανυσματικό άθροισμα της κύριας και των δευτερευουσών μαγνητίσεων χαρακτηρίζεται φυσική παραμένουσα μαγνήτιση. Για τα αρχαιομαγνητικά υλικά, ισχύει η παραδοχή ότι η φυσική παραμένουσα μαγνήτιση ταυτίζεται με την παραμένουσα θερμομαγνήτιση που είναι πολύ σταθερή. Στις δευτερεύουσες μαγνητίσεις συμπεριλαμβάνονται:

-Η *ιξώδης παραμένουσα μαγνήτιση*, που αποκτάται υπό την επίδραση του γεωμαγνητικού πεδίου, μετά από την αρχική μαγνήτιση που αποτυπώνεται κατά την τελευταία ψύξη των υλικών, δυσχεραίνοντας τον προσδιορισμό του αρχικού διανύσματος [62] του αρχαίου γεωμαγνητικού πεδίου. Ο συντελεστής ιξώδους, εξαρτάται από το μέγεθος και τη σύσταση των μαγνητικών κόκκων. Σε θερμοκρασία δωματίου, μεγάλο ιξώδες εμφανίζουν οι SD κόκκοι με διαστάσεις παραπλήσιες στους SP κόκκους, ενώ μικρότερο ιξώδες εμφανίζουν οι MD κόκκοι, λόγω της κίνησης των τοιχωμάτων Bloch. Επιπλέον, η αύξηση της ποσότητας τιτανίου [63] σε πετρώματα με σιδηρομαγνητικές προσμίξεις, αυξάνει τον συντελεστή ιξώδους. Η ιξώδης παραμένουσα μαγνήτιση είναι ασθενής μαγνήτιση, που εύκολα μηδενίζεται σε εναλλασσόμενο πεδίο [64] διαδικασία κατά την οποία υπολογίζεται ο συντελεστής ιξώδους.

-Η *χημική παραμένουσα μαγνήτιση*, αποκτάται εντός του γεωμαγνητικού πεδίου, σε θερμοκρασίες  $T < T_c$ , λόγω χημικών [65] μεταβολών (π.χ. επανακρυστάλλωση) των μαγνητικών κόκκων, από την επίδραση διαλυμάτων ή βιολογικών διαδικασιών ή κατά τη μεταβολή της θερμοκρασίας ή λόγω πίεσης. Επειδή κατά τη

διάρκεια των χημικών μεταβολών [66] οι MD κόκκοι κατακερματίζονται σε μικρότερους, η παραμένουσα μαγνήτιση διατηρείται μόνο αν οι αρχικοί φορείς της μαγνήτισης είναι κόκκοι SD. Αυτή η επισήμανση είναι πολύ σημαντική στον παλαιομαγνητισμό, γιατί στα πετρώματα που συνίστανται από MD κόκκους, η μετρούμενη μαγνήτιση δεν αντιστοιχεί πάντα στο γεωμαγνητικό πεδίο κατά την ψύξη του πετρώματος, αλλά στον μετέπειτα χρόνο επίδρασης της χημικής παραμένουσας μαγνήτισης. Για παράδειγμα, σε εργαστηριακές μετρήσεις με τεχνητές συνθήκες διαγένεσης [67,68], μέσω οξειδωσης σε χαμηλές θερμοκρασίες τεχνητών δειγμάτων από μαγνητίτη σε μαγγελίτη ή αιματίτη, απέδειξαν ότι η χημική παραμένουσα μαγνήτιση δεν επηρεάζει τη διεύθυνση της αρχικής μαγνήτισης μόνο στην περίπτωση που ο μαγγελίτης είναι το τελικό προϊόν της οξειδωσης.

-Η *θραυσματοπαγής παραμένουσα μαγνήτιση* είναι αποτέλεσμα της καταβύθισης στο νερό, μαγνητικών κόκκων με διαστάσεις [69] 30-100  $\mu m$ , όταν η μαγνητική δύναμη από το γεωμαγνητικό πεδίο είναι μεγαλύτερη από τη βαρυτική και την υδροδυναμική δύναμη. Οι μεγαλύτεροι κόκκοι καταλήγουν στο βυθό με τη μεγαλύτερή τους διάσταση λόγω της βαρυτικής δύναμης ή με τη φορά του μεγαλύτερου άξονα στη διεύθυνση των υδατικών ρευμάτων λόγω της υδροδυναμικής δύναμης. Για μικρότερους κόκκους η κίνηση είναι χαοτική και στηρίζεται στην κίνηση Braoun.

### ***A3.6 Μαγνητικές ιδιότητες του σερπεντινίτη και του ψημένου πηλού***

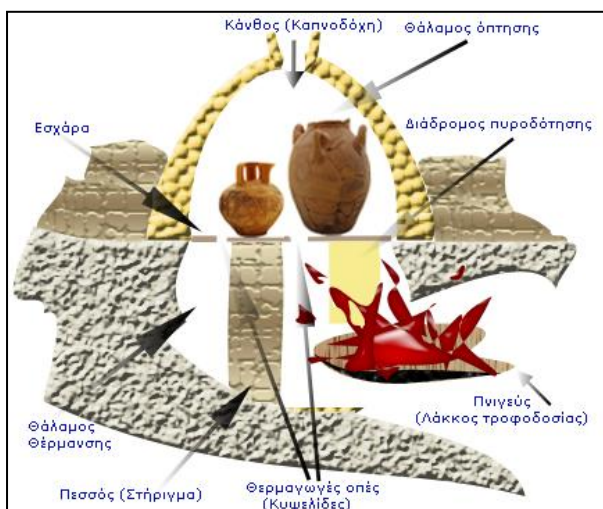
Από τον 19<sup>ο</sup> αιώνα, είχε ήδη παρατηρηθεί [70,71] ότι τα πετρώματα φέρουν αναλλοίωτη την πληροφορία της διεύθυνσης του γεωμαγνητικού πεδίου κατά τον χρόνο σχηματισμού τους. Η μέθοδος του παλαιομαγνητισμού [72], χρησιμοποιείται για την εξέταση των μεταβολών του γήινου μαγνητικού πεδίου, μέσω χρονολογημένων πετρωμάτων που διατηρούν θερμοπαραμένουσα μαγνήτιση. Η διεύθυνση της παραμένουσας μαγνήτισης ενός πετρώματος εξετάζεται για τον υπολογισμό της θέσης του μαγνητικού πόλου της γης κατά το χρόνο σχηματισμού του πετρώματος. Η μελέτη των πετρωμάτων διαφόρων ηλικιών μιας ηπείρου, παρέχει διαφορετικές διευθύνσεις κίνησης του μαγνητικού πόλου και η συσχέτιση των μέσων θέσεων των πόλων παριστάνεται από μια γραμμή που χαρακτηρίζεται ως φαινόμενη τροχιά περιφοράς των πόλων. Επειδή κάθε ήπειρος εμφανίζει διαφορετική φαινόμενη τροχιά, οι γραμμές απεικονίζουν τις σχετικές κινήσεις των ηπείρων ως προς τον μαγνητικό πόλο [73].

Επειδή η παραμένουσα μαγνήτιση στον σερπεντινίτη, διατηρεί την κατεύθυνση του γήινου μαγνητικού πεδίου κατά το χρόνο σχηματισμού του πετρώματος, τα θραύσματα του πετρώματος προσανατολίζονται λόγω της παραπλήσιας κατευθυντικότητας του μαγνητικού τους πεδίου, κατά τον τρόπο που συναρμόζουν.

Ο σερπεντινίτης [74] είναι μεταμορφωμένο πέτρωμα και αποτελείται κυρίως από σερπεντίνη [75] και πιθανώς από μικρότερες ποσότητες τάλκη, αμφίβολου και χλωρίτη. Πρόκειται για δευτερογενές ορυκτό ως προϊόν εξαλλοίωσης μαγνησιούχων πυριτικών ορυκτών, όπως οι πυρόξενοι με γενικό τύπο  $R_2Si_2O_6$  (R: Mg, Fe, Ca, Mn, Al, Na, Li) και ο ολιβίνης  $R_2SiO_4$  (R: Mg, Fe) που βρίσκονται σε πυριγενή και μεταμορφωμένα πετρώματα. Μόνο μικρές ποσότητες ιόντων Fe από τα πρόδρομα ορυκτά του σερπεντίνης, αντικαθιστούν τα ιόντα Mg και ενσωματώνονται στην κρυσταλλική δομή του.

Οι μεγαλύτερες ποσότητες σχηματίζουν εγκλείσματα σιδηρομαγνητικών οξειδίων του Fe, κυρίως μαγνητίτη αλλά και αιματίτη, στα οποία ο σερπεντινίτης οφείλει το σκουρότερο χρώμα του και τις μαγνητικές του ιδιότητες. Η μόνιμη μαγνήτιση του σερπεντινίτη, οφείλεται στις ιδιότητες του μαγνητίτη και του αιματίτη να αποκτούν μαγνήτιση και να τη διατηρούν κατά την ψύξη τους στην κατεύθυνση του γήινου μαγνητικού πεδίου, εφόσον θερμανθούν σε θερμοκρασίες υψηλότερες [76,77] των αντίστοιχων θερμοκρασιών Curie.

Οι μαγνητικές ιδιότητες των κεραμικών και γενικά των ψημένων αργίλων που έχουν υποστεί εκούσια ή ακούσια θερμική επεξεργασία και περιέχουν σιδηρομαγνητικά υλικά, εξετάζονται με τη μέθοδο του αρχαιομαγνητισμού [78-79] που βασίζεται στις αρχές του παλαιομαγνητισμού και εφαρμόζεται σε προϊόντα της ανθρώπινης δραστηριότητας. Τα υλικά που εξετάζονται με τη μέθοδο του αρχαιομαγνητισμού διακρίνονται σε 2 βασικές κατηγορίες:



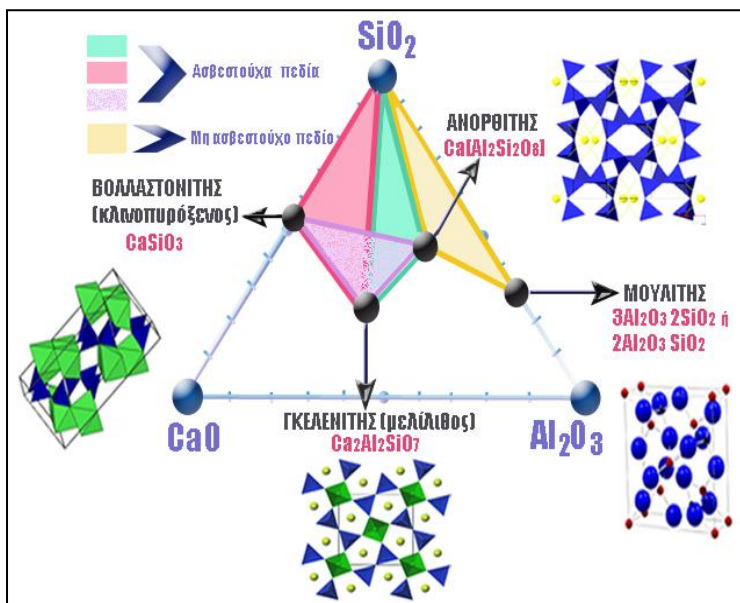
- Τα αντικείμενα που έχουν μετακινηθεί μετά το στάδιο της όπτησης, όπως τα αγγεία, για τα οποία μπορούν να εξαχθούν μόνο τεχνολογικές πληροφορίες (π.χ. θερμοκρασίες όπτησης).

- Τα αντικείμενα που βρίσκονται στην ίδια θέση από τον χρόνο της τελευταίας θέρμανσής τους, όπως εστίες, κλίβανοι (**σχήμα A24**) και καμένα δομικά στοιχεία, για τα οποία μπορούν να εξαχθούν τεχνολογικές πληροφορίες και να χρονολογηθούν με τη χρήση αρχαιομαγνητικών χαρτών αναφοράς του γήινου μαγνητικού πεδίου.

**Σχήμα A24.** Σχηματική απεικόνιση αρχαίου κλίβανου πρωτοαρχαϊκής περιόδου (Διασκευή σχεδίου του F. Tomasello).

Η σύνταξη αρχαιομαγνητικών καμπυλών αναφοράς των μεταβολών της αρχαιοέντασης και των αρχαιοδιευθύνσεων του μαγνητικού πεδίου της γης σε τοπικό επίπεδο, απαιτεί τη χρονολόγηση δειγμάτων από συγκεκριμένες γεωγραφικές περιοχές με τη χρήση άλλων μεθόδων. Επειδή στην Ελλάδα η συλλογή στοιχείων από χρονολογημένα και τοπικά καθορισμένα δείγματα επιχειρείται μόνο τα τελευταία 20 χρόνια, χρησιμοποιούνται κυρίως ανηγμένες καμπύλες αναφοράς από γειτονικές χώρες.

Ο πηλός δεν έχει ορισμένη ορυκτολογική σύσταση, γιατί ο σχηματισμός του οφείλεται στην εξαλλοίωση κατακεραματισμένων πυριγενών, ιζηματογενών και μεταμορφωσιγενών πετρωμάτων. Τυπικά συστατικά της πρώτης ύλης σύμφωνα με το «κλασικό» τριγωνικό διάγραμμα [80-82] *Levin* (**διάγραμμα A16**), αποτελούν διάφορες αργιλοπυριτικές ενώσεις του  $\text{SiO}_2$  (45-70%), του  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (10-30%) και του  $\text{CaO}$  (<20%) με μικρότερες προσμίξεις οξειδίων του σιδήρου (<6%) και του μαγνησίου (2-3%). Η τελική ορυκτολογική σύσταση των κεραμικών και οι μαγνητικές τους ιδιότητες, διαμορφώνονται κατά την όπτηση (σε τυπικές θερμοκρασίες 600°-1100° C) και εξαρτάται από τη σύσταση του πηλού και από τις συνθήκες θέρμανσης (ρυθμός θέρμανσης/ψύξης) και αερισμού (οξειδωτική-αναγωγική ατμόσφαιρα) στον κλίβανο.



Οι παράγοντες αυτοί, επιδρούν στη δημιουργία ασβεστοαλουμινοπυριτικών ορυκτών (βολλαστονίτης, κλινοπυρόξενος, γκελενίτης, πλαγιόκλαστο) και στη διατήρηση υπολειμματικών φάσεων, όπως του χαλαζία και του αλκαλικού αστρίου.

**Διάγραμμα A16.** Ορυκτολογική σύσταση των αρχαίων κεραμικών, στο τριγωνικό διάγραμμα  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{CaO}$ - $\text{SiO}_2$  (Levin-1964).

Τα περιεχόμενα αργιλοπυριτικά ορυκτά στη σύσταση του οπτού πηλού (**πίνακας A3**) είναι παραμαγνητικά ή διαμαγνητικά [83] με τυπική [84,85] μαγνητική επιδεκτικότητα 1000 φορές μικρότερη των

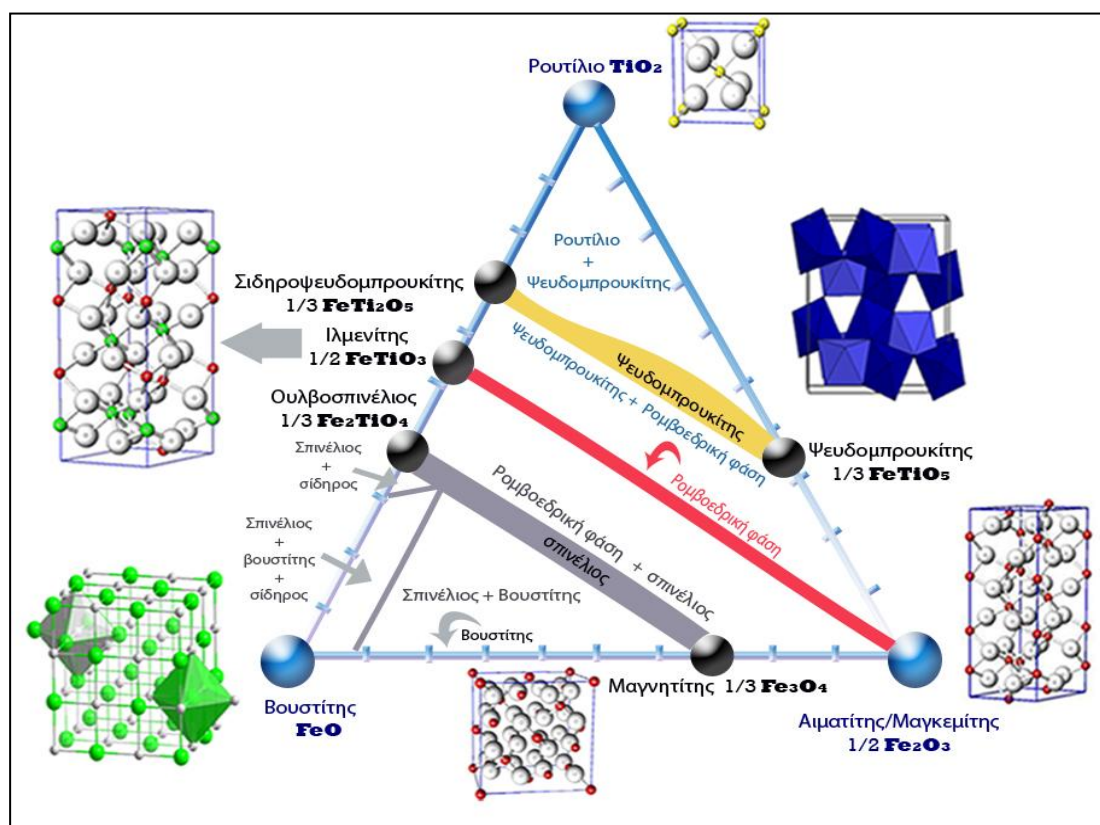
αντισιδηρομαγνητικών ([83], pp. 151–173) και 10000 φορές μικρότερη των αντισιδηριμαγνητικών οξειδίων ([83], pp. 175–195) του σιδήρου. Οι μαγνητικές επιδεκτικότητες  $\chi_m$  [ $\text{m}^3/\text{kg}$ ] των επιλεγμένων μετάλλων και ορυκτών του πίνακα, σε μονάδες αντίστροφης πυκνότητας ( $1/\rho$ ), μετριοούνται με το φορητό όργανο MS2 System μέτρησης της μαγνητικής επιδεκτικότητας της Bartington, στις συχνότητες  $k_{\text{hf}}=0,46\text{KHz}$  και  $k_{\text{hf}}=4,6\text{KHz}$ . Η μαγνητική επιδεκτικότητα έχει μικρότερη τιμή στην υψηλότερη συχνότητα ( $k_{\text{hf}}$ ), λόγω του αποπροσανατολισμού των μαγνητικών περιοχών από τη θερμότητα που παράγει η ταχύτερη κίνηση των μικρότερων μαγνητικών κόκκων.

| ΟΡΥΚΤΟ  | ΧΗΜΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ   | Fe (%) | ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ<br>ΜΑΖΑΣ $(10^{-6} \cdot m^3 / Kg)$<br>$\chi_m = \frac{k_{yf} - k_{hf}}{\rho} \cdot 100$ |
|---|---|--------|---|
| <b>ΚΥΡΙΩΣ ΣΙΔΗΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΜΕΤΑΛΛΑ</b>                                   |   |        |   |
| Σίδηρος   | $\alpha Fe$   | 100    | 276000  |
| Κοβάλτιο  | Co  |        | 204000  |
| Νικέλιο   | Ni  |        | 68850   |
| <b>ΑΝΤΙΣΙΔΗΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ</b>  |   |        |   |
| Μαγνητίτης<br>0,012-0.069 $\mu m$<br>0,09-2000 $\mu m$<br>1-250 $\mu m$ | $Fe_3O_4$   | 72     | 513-1116<br>596 $\pm$ 77<br>440-716   |
| Μαγκεμίτης  | $\gamma Fe_2O_3$  | 70     | 410,440   |
| Τιτανομαγνητίτης  | $Fe_3O_4 - Fe_2TiO_4$   |        | 169-290   |
| Τιτανοαιματίτης   | $Fe_2O_3 - FeTiO_3$   |        | 281-315   |
| Πυρροτίτης  | $Fe_7S_8$   |        | 50,53   |
| <b>ΑΝΤΙΣΙΔΗΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ</b>  |   |        |   |
| Αιματίτης   | $\alpha Fe_2O_3$  | 70     | 1.19-1.69   |
| Γκετίτης  | $\alpha FeOOH$  | 63     | 0.35, 0.38, 0.7 (<1.26)   |
| <b>ΠΑΡΑΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ (20° C)</b>                                      |   |        |   |
| Ιλμενίτης   | $FeTiO_3$   | 70     | 1.7, 2  |
| Ολιβίνης  | $4[(Mg, Fe)_2SiO_4]$  | <55    | 0.01-1.3  |
| Βιοτίτης  | $K(Mg, Fe^{+2})_3[AlSi_3O_{10}(OH, F)_2]$   | 31     | 0.05-0.95   |
| Πυρόξενο  | $(Mg, Fe)_2Si_2O_6$   | <12    | 0.04-0.94   |
| Αμφίβολος   | $Ca_2(Mg, Fe)_5Si_8O_{22}(OH)_2$  |        | 0.16-0.69   |
| Σιδηροπυρίτης   | $FeS_2$   | 47     | 0.3   |
| Λεπιδοκροκίτης  | $\gamma FeOOH$  | 63     | 0.5-0.75, 0.69  |
| Βερμικουλίτης   | Σύνθετο πυριτικό άλας   |        | 0.152   |
| Ιλλίτης   | $(K, H^+)(Al, Mg, Fe)_2(Si, Al)_4O_{10}$<br>[(OH) <sub>2</sub> .H <sub>2</sub> O] |        | 0.15  |
| Χαλκοπυρίτης  | $CuFeS_2$   | 30     | 0.03  |
| Δολομίτης   | $CaMg(CO_3)_2$  |        | 0.011   |
| <b>ΔΙΑΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ</b>   |   |        |   |
| Ασβεστίτης  | $CaCO_3$  |        | -0.0048   |
| Χαλαζίας  | $SiO_2$   |        | -0.0058   |
| Καολινίτης  | $Al_2Si_2O_5(OH)_4$   |        | -0.019  |

**Πίνακας Α3.** Συγκριτικός πίνακας [86] τιμών μαγνητικής επιδεκτικότητας μάζας  $\chi_m$  επιλεγμένων ορυκτών.

Από τη σύγκριση των μαγνητικών επιδεκτικότητων μάζας συμπεραίνεται πως η κατευθυντικότητα του μόνιμου μαγνητικού πεδίου των οστράκων οφείλεται κυρίως στην θερμοπαραμένουσα μαγνήτιση  $\vec{M}$  των σιδηρι(ο)μαγνητικών συστατικών του οπτού πηλού, που σχηματίζονται κατά τη διάρκεια της όπτησης και προσανατολίζονται κατά την ψύξη τους στην κατεύθυνση του γήινου μαγνητικού πεδίου.

Τα μαγνητικά οξείδια του σιδήρου ( $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) σύμφωνα με το τριαδικό διάγραμμα φάσεων ([87], pp. 411), των οξειδίων Fe-Ti (**Διάγραμμα A17**), σχηματίζουν τρεις βασικές σειρές στερεών διαλυμάτων με το διοξείδιο του τιτανίου ( $\text{TiO}_2$ ), τη σειρά τιτανομαγνητίτη-ολβοσπινέλιου ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ - $\text{Fe}_2\text{TiO}_4$ ) με δομή αντίστροφη του σπινελίου, τη σειρά τιτανοαιματίτη/μαγκεμίτη-ιλεμνίτη [ $(\alpha,\gamma)\text{Fe}_2\text{O}_3$ - $\text{FeTiO}_3$ ] με ρομβοεδρική δομή και τη σειρά των υδροξειδίων του σιδήρου σιδηροψευδομπρουκίτη- ψευδομπρουκίτη ( $\text{FeTiO}_5$ - $\text{FeTiO}_3$ ) με ορθορομβική δομή.



**Διάγραμμα A17.** Τριαδικό διάγραμμα φάσεων των οξειδίων Fe-Ti (Butler 1992).

Από τα ορυκτά των τριών βασικών σειρών στερεών διαλυμάτων που σχηματίζουν τα μαγνητικά οξείδια του σιδήρου, κατά την ενδεχόμενη αντικατάσταση των ιόντων του σιδήρου ( $\text{Fe}$ ) από τιτάνιο ( $\text{Ti}$ ), τα σημαντικότερα για τη μαγνητική συμπεριφορά του οπτού πηλού είναι τα ορυκτά των ομάδων του τιτανομαγνητίτη και του τιτανοαιματίτη.

Από τα ορυκτά των τριών στερεών διαλυμάτων των οξειδίων του σιδήρου, κυρίαρχο ρόλο στη μαγνητική συμπεριφορά των κεραμικών έχουν τα ορυκτά των ομάδων του τιτανομαγνητίτη και του τιτανοαιματίτη, γιατί τα υπόλοιπα [88-97] αφυδατώνονται ή οξειδώνονται κατά την όπτηση των αγγείων σε ορυκτά μικρής μαγνητικής επιδεκτικότητας ή μετατρέπονται σε ορυκτά της σειράς του τιτανομαγνητίτη και του τιτανοαιματίτη.

Τα ορυκτά της σειράς ψευδομπρουκίτη/σιδηροψευδομπρουκίτη αφυδατώνονται ή οξειδώνονται κατά την όπτηση, στα ορυκτά των υπολοίπων ομάδων. Τα συχνότερα περιεχόμενα ορυκτά των υδροξειδίων του σιδήρου της σειράς ψευδομπρουκίτη/σιδηροψευδομπρουκίτη, όπως ο λεπιδοκροκίτης ( $\gamma\text{FeOOH}$ ) ή ο γκετίτης

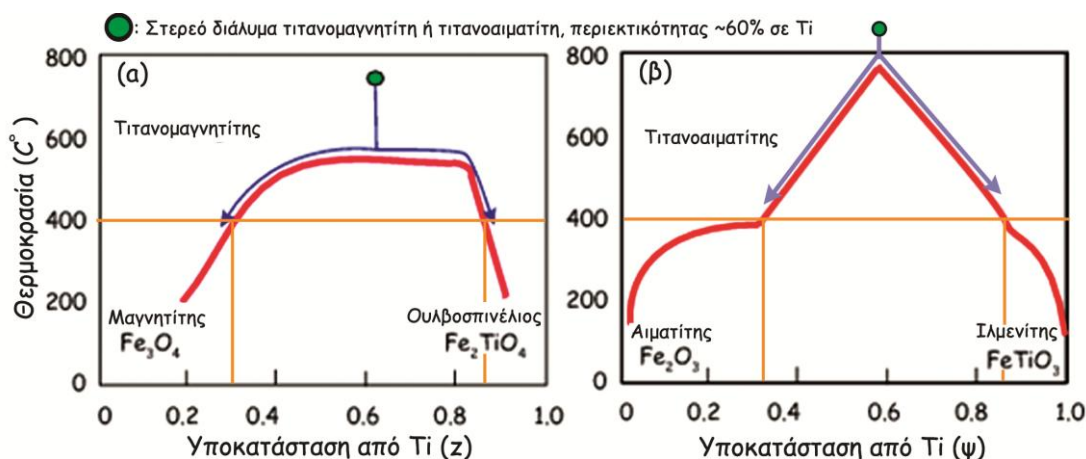


( $\alpha\text{FeOOH}$ ), έχουν αμελητέα επίδραση στις μαγνητικές ιδιότητες της ψημένης αργίλου, είτε λόγω της μικρής μαγνητικής επιδεκτικότητας, είτε λόγω της μετατροπής τους κατά την όπτηση [98] του πηλού, σε ορυκτά των υπολοίπων σειρών του τριαδικού συστήματος.

Ο αντισιδηρομαγνητικός γκετίτης ( $\chi_m < 1,26 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$ ) που αποτελεί το μοναδικό υδροξείδιο του σιδήρου με παραμένουσα μαγνήτιση, αφυδατώνεται κοντά στους  $200^\circ \text{C}$  και σε θερμοκρασίες  $250\text{--}400^\circ \text{C}$  μετατρέπεται σε αιματίτη, ενώ ο παραμαγνητικός λεπιδοκροκίτης [ $\chi_m = (0,50\text{--}0,75) \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$ ] μετατρέπεται αρχικά σε μαγκεμίτη και στη συνέχεια σε αιματίτη.

Από τη σειρά τιτανο[αιματίτη( $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$ )-μαγκεμίτη( $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$ )], τα ορυκτά που περιέχονται στη ψημένη άργιλο ανήκουν στην αντισιδηρομαγνητική ομάδα του τιταναιματίτη, εφόσον ο αντισιδηρομαγνητικός μαγκεμίτης [ $\chi_m = (410\text{--}440) \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$ ] μετατρέπεται σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των  $250^\circ \text{C}$  σε αιματίτη [ $\chi_m = (1,19\text{--}1,69) \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$ ].

Σύμφωνα με τα παραπάνω, οι μαγνητικές ιδιότητες του οπτού πηλού, εξαρτώνται κύρια από την περιεκτικότητά του σε δευτερογενή ορυκτά των σειρών του τιταναιματίτη και του τιτανομαγνητίτη που σχηματίζεται κατά την όπτηση. Οι μαγνητικές ιδιότητες του ψημένου πηλού καθορίζονται [87] (pp. 58, 409–412) από την επίδραση της θερμοκρασίας ψύξης στις συνθέσεις ισορροπίας στερεών διαλυμάτων τιτανομαγνητίτη (Nagata 1961) και τιταναιματίτη (Robinson 2004), αναλόγως της περιεκτικότητάς τους σε τιτάνιο.

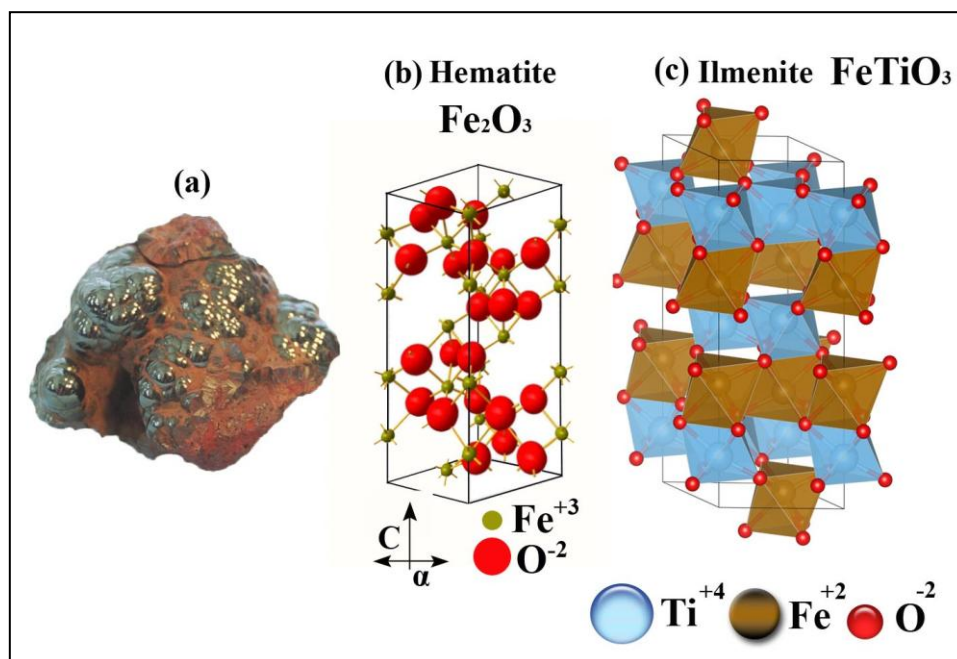


**Διάγραμμα A18.** Επίδραση της θερμοκρασίας ψύξης<sup>11</sup> [45] στις συνθέσεις ισορροπίας στερεών διαλυμάτων (α) τιτανομαγνητίτη (Nagata-1961) και (β) τιταναιματίτη (Robinson 2004), αναλόγως της περιεκτικότητάς τους σε τιτάνιο.

Πάνω από τις θερμοκρασίες των  $600^\circ \text{C}$  για τον τιτανομαγνητίτη (διάγραμμα A18α) και των  $800^\circ \text{C}$  για τον τιταναιματίτη (διάγραμμα A18β), όλες οι συνθέσεις της κρυσταλλικής δομής για τα αντίστοιχα στερεά διαλύματα, είναι θερμοδυναμικά σταθερές. Κατά την ελάττωση της θερμοκρασίας, οι συνθέσεις ισορροπίας σε κάθε διάγραμμα, καθορίζονται από τα σημεία τομής της κόκκινης γραμμής, με την οριζόντια ευθεία που διέρχεται από κάθε θερμοκρασία ψύξης. Για παράδειγμα κατά την ψύξη στους  $400^\circ \text{C}$  στερεών διαλυμάτων τιτανομαγνητίτη ή τιταναιματίτη με περιεκτικότητα 60% σε Ti, οι υποκαταστάσεις Ti στις δύο φάσεις ισορροπίας και στα δυο διαγράμματα, είναι περίπου 0,3 και 0,9.

<sup>11</sup> <http://earthref.org/MAGIC/books/Tauxe/Essentials/WebBook3ch6.html#x8-530006>

• Ο αιματίτης- $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (σχήμα A25α) σχηματίζει ρομβοεδρικό κρύσταλλο [87] (pp. 29–31, 61, 64, 81–87), με δομή κορουνδίου (σχήμα A25β). Τα μεταλλικά κατιόντα  $\text{Fe}^{+3}$  τοποθετούνται σε εξαγωνική διάταξη (σχήμα A25γ), επί ισαπεχόντων επιπέδων, καθέτως προς το C-άξονα.



**Σχήμα A25.** Σειρά τιτανοαιματίτη [αιματίτης( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )/ιλιμενίτης( $\text{FeTiO}_3$ )]. (α) Μετάλλευμα<sup>12</sup> αιματίτη. (β) Διάταξη<sup>13</sup> των ιόντων του ρομβοεδρικού κρυστάλλου αιματίτη, με δομή κορουνδίου, (γ) Εξαγωνική<sup>14</sup> διάταξη των μεταλλικών κατιόντων στον αιματίτη και στον ιλιμενίτη (Ishikawa 1985).

Κάθε κατιόν  $_{26}\text{Fe}^{+3}$  [ $1s^2, 2s^2, 2p^6, 3s^2, 3p^6, 3d^5$ ] περιέχει [87] (pp. 111–117) 5 ασύζευκτα ηλεκτρόνια ( $e^-$ ) στο 3d τροχιακό. Λόγω της αντιστάθμισης φορτίου και των  $2 \times 5 = 10$  μονήρων  $e^-$  με αντιπαράλληλα spin, κατά το σχήμα  $|\text{Fe}^{+3}\text{Fe}^{+3}|\text{O}_3^{-2}$ , ο αιματίτης θα έπρεπε θεωρητικά [87] (pp. 126–128) να εμφανίζει μηδενική μαγνήτιση. Η ασθενής αντισιδηρομαγνητική συμπεριφορά του, με μαγνητική επιδεκτικότητα  $\chi_m = (1,19 - 1,69) \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{Kg}$  [85] (p. 40), οφείλεται σε ατέλειες του πλέγματος και αυξάνεται με την εμπλοκή άλλων ατόμων στον κρύσταλλο, που διαταράσσουν περισσότερο την παράλληλη ευθυγράμμιση των αντίθετων ηλεκτρονιακών ροπών.

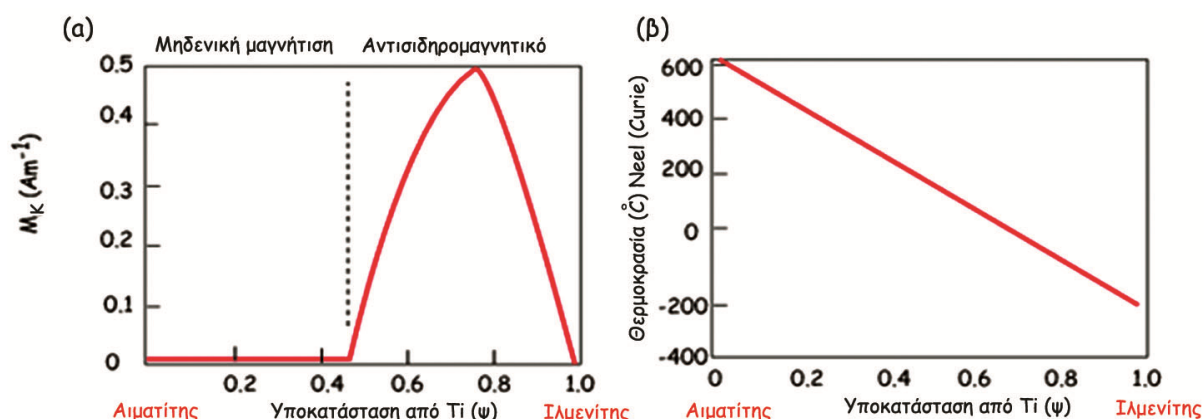
Η υποκατάσταση  $\text{Fe}^{+3}$  από  $\text{Ti}^{+4}$  (Nagata 1961, Stacey και Banerjee 1974), αυξάνει<sup>15</sup> [63] τη μαγνήτιση κορεσμού των ορυκτών  $[\text{Fe}_{2-\psi}\text{Ti}_\psi\text{O}_3]$  της σειράς αιματίτη ( $\psi=0$ )-ιλιμενίτη ( $\psi=1$ ). Όταν η υποκατάσταση είναι μικρότερη από  $\psi \approx 0,5$  (διάγραμμα A19α), τα κατιόντα  $\text{Ti}^{+4}$  κατανέμονται ισότιμα μεταξύ των στρώσεων των κατιόντων  $\text{Fe}^{+3}$  και ο κρύσταλλος δεν εμφανίζει μαγνήτιση. Για μεγαλύτερες συγκεντρώσεις ( $0,5 < \psi < 0,8$ ) τιτανίου, τα κατιόντα  $_{22}\text{Ti}^{+4}$  [ $1s^2, 2s^2, 2p^6, 3s^2, 3p^6$ ] που δεν περιέχουν ασύζευκτα  $e^-$ , κατανέμονται ατάκτως σε εναλλασσόμενες στρώσεις μεταξύ των κατιόντων  $\text{Fe}^{+3}$  (σχήμα A25γ), και ο κρύσταλλος για  $\psi \approx 0,8$  αποκτά μέγιστες αντισιδηρομαγνητικές ιδιότητες.

<sup>12</sup> Η εικόνα λήφθηκε από την ιστοσελίδα: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hematite.jpg> licensed under the Free Documentation License (GFDL).

<sup>13</sup> Η εικόνα λήφθηκε από την ιστοσελίδα: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hematite\\_unit\\_cell.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hematite_unit_cell.jpg) licensed under the Creative Commons- Attribution-ShareAlike 3.0 Unported.

<sup>14</sup> Η εικόνα λήφθηκε από την ιστοσελίδα: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ilmenit-Struktur.png> licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International.

<sup>15</sup> <http://earthref.org/MAGIC/books/Tauxe/Essentials/WebBook3ch6.html#x8-530006>.



**Διάγραμμα A19.** Μεταβολή (α) της μαγνήτισης κορεσμού  $M_K$  (A/m) και (β) της θερμοκρασίας Neel [45] των ορυκτών του τιτανοαιματίτη  $[Fe_{2-\psi}Ti_\psi O_3]$ , κατά την υποκατάσταση  $Fe^{+3}$  από  $Ti^{+4}$ .

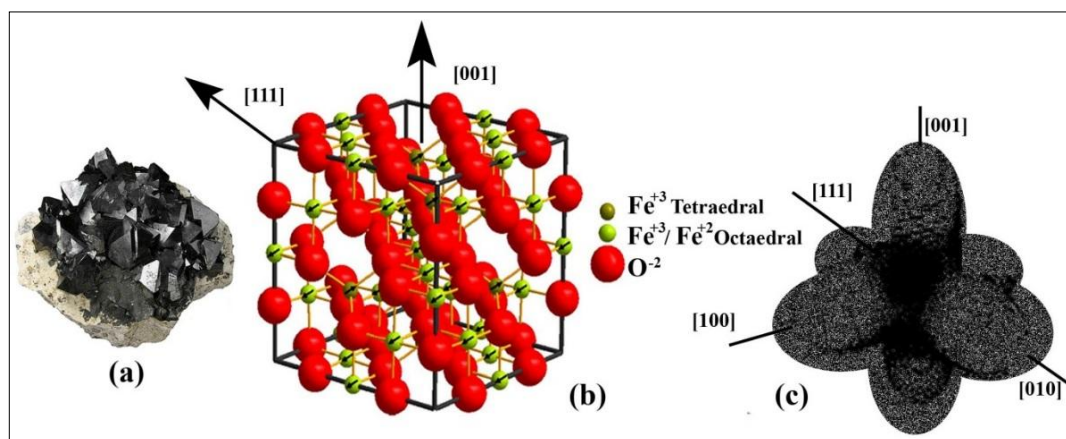
Για μεγαλύτερες περιεκτικότητες ( $\psi > 0,8$ ), τα κατιόντα τιτανίου κατανέμονται συμμετρικά μεταξύ των στρώσεων των κατιόντων  $Fe^{+3}$ , με αποτέλεσμα ο ιλμενίτης να μην εμφανίζει αντισιδηρομαγνητικές ιδιότητες, αλλά παραμαγνητική συμπεριφορά. Η αντίστοιχη θερμοκρασία Neel, της θερμοκρασίας Curie για αντισιδηρομαγνητικά υλικά, μειώνεται απότομα (**διάγραμμα A19β**), από τους 685°C που αντιστοιχεί στον αιματίτη, με την αύξηση της υποκατάστασης  $Fe^{+3}$  από  $Ti^{+4}$ .

Ο αιματίτης αποτελεί πρωτογενές συστατικό του πηλού ή σχηματίζεται στην ψημένη άργιλο [98], από την αφυδάτωση και την επανακρυστάλλωση των περιεχόμενων υδροξειδίων και οξυδροξειδίων του σιδήρου και από τη διάσπαση των υπαρχόντων σιδηρούχων (π.χ. ιλλίτης, χλωρίτης) ορυκτών. Η παραμένουσα θερμομαγνήτιση οφείλεται αποκλειστικά στον δευτερογενώς σχηματιζόμενο αιματίτη κατά την όπτηση των αγγείων, εφόσον οι μαγνητικοί κόκκοι του αιματίτη στην πρώτη ύλη δε διατηρούν συγκεκριμένη κατευθυντικότητα μετά από την ανάμιξη του πηλού.

Υψηλά ποσοστά αιματίτη (<6%) αναμένονται σε υψηλές θερμοκρασίες ( $T > 950^\circ C$ ) και οξειδωτικές συνθήκες όπτησης, σε αργίλους με μικρή περιεκτικότητα σε CaO (<5%), ενώ σε μεγαλύτερη ποσότητα, η περιεκτικότητα του πηλού σε αιματίτη περιορίζεται [98] (pp. 124–126) γιατί ο  $Fe^{+3}$  συμμετέχει στον αλουμινούχο κλινοπυρόξενο στις οκταεδρικές θέσεις και στον γκελενίτη στις οκταεδρικές και τετραεδρικές θέσεις.

Το υψηλό ποσοστό του CaO οφείλεται στην εσκεμμένη ανάμιξη ασβεστούχων αργιλικών πηλών ή την προσθήκη ασβεστίτη σε πηλούς με μικρή περιεκτικότητα σε ασβέστιο, κυρίως λόγω της πυροσυσσωμάτωσης (sintering) του πηλού σε χαμηλότερες θερμοκρασίες [99] και της μικρότερης ανάγκης ελέγχου της θερμοκρασίας όπτησης κατά τον κλιβανισμό. Επιπλέον, η μικρή διαφοροποίηση του συντελεστή θερμικής διαστολής-συστολής που επιτυγχάνεται σε θερμοκρασίες 850°-1050° C με την προσθήκη ασβεστίου [100,101], μειώνει την πιθανότητα δημιουργίας μικρορωγματώσεων, όταν εφαρμόζονται αργλικές επιστρώσεις και προσδίδει φωτεινά χρώματα στο χρώμα του πηλού [88] (pp. 130–136), δημιουργώντας την απαραίτητη αντίθεση με τον συνήθως σκουρόχρωμο γραπτό διάκοσμο.

• Ο μαγνητίτης (σχήμα A26α) κρυσταλλώνεται σε ολοεδρία κατά το κυβικό σύστημα [87] (pp. 32,61,64,87–92), με δομή αντίστροφου σπινελίου. Τα ανιόντα οξυγόνου ( $O^{2-}$ ) σχηματίζουν σε κάθε δομική μονάδα ενδοκεντρωμένο κυβικό πλέγμα (σχήμα A26β), εντός του οποίου τοποθετούνται τα κατιόντα  $Fe^{+2}$  και  $Fe^{+3}$  σε 4 τετραεδρικές θέσεις και 8 οκταεδρικές θέσεις. Για να διατηρηθεί η ισορροπία φορτίου με τα 4 ανιόντα  $O^{2-}$ , τα  $Fe^{+2}$  καταλαμβάνουν οκταεδρικές θέσεις, ενώ τα  $Fe^{+3}$  κατανέμονται ισομερώς μεταξύ των οκταεδρικών (B) και τετραεδρικών θέσεων(A), κατά το σχήμα:  $Fe^{+3}|Fe^{+3}Fe^{+2}|O_4^{2-}$



**Σχήμα A26.** Μαγνητίτης- $Fe_3O_4$ . (α) Οκτάεδρο μαγνητίτη<sup>16</sup>. (β) Εσωτερική δομή κρυστάλλου<sup>17</sup>. Η διαγώνια [1,1,1] και η κάθετη κατεύθυνση [0,0,1] στην επιφάνεια του κύβου υποδεικνύονται με βέλη. Οι μεγάλες κόκκινες σφαίρες παριστάνουν ανιόντα οξυγόνου ( $O^{2-}$ ), οι κίτρινες σφαίρες τετραεδρικής συμμετρίας στις θέσεις Α αντιστοιχούν σε κατιόντα  $Fe^{+3}$ , ενώ οι θέσεις Β καταλαμβάνονται από κατιόντα  $Fe^{+2}$  και  $Fe^{+3}$  οκταεδρικής διαμόρφωσης. (γ) Κατευθύνσεις μαγνητικής ανισοτροπίας του κρυστάλλου. Η διαγώνιος [1,1,1] του κύβου, με τη μικρότερη ενέργεια, αποτελεί την «εύκολη» κατεύθυνση μαγνήτισης.

Τα κατιόντα  $_{26}Fe^{+2} [1s^2, 2s^2, 2p^6, 3s^2, 3p^6, 3d^6]$  περιέχουν 4 ασύζευκτα  $e^-$ , ενώ τα  $_{26}Fe^{+3} [1s^2, 2s^2, 2p^6, 3s^2, 3p^6, 3d^5]$  περιέχουν 5 ασύζευκτα  $e^-$  στα 3d τροχιακά. Από τα  $5+4=9 e^-$  των  $Fe^{+3}$  και  $Fe^{+2}$  στις οκταεδρικές θέσεις, τα  $5e^-$  έχουν αντιπαράλληλα spin με τα  $5e^-$  των  $Fe^{+3}$  στις τετραεδρικές θέσεις και οι ηλεκτρονιακές μαγνητικές ροπές τους αλληλοεξουδετερώνονται. Επομένως η αντισιδηριμαγνητική συμπεριφορά του μαγνητίτη [85] (pp. 128–130) αντιστοιχεί σε  $9-5=4 e^-$  ή σε 4 μαγνητόνες του Bohr ( $\mu_B=0,93 \cdot 10^{-23} J/T$ ) ανά μόριο ( $0^\circ K$ ).

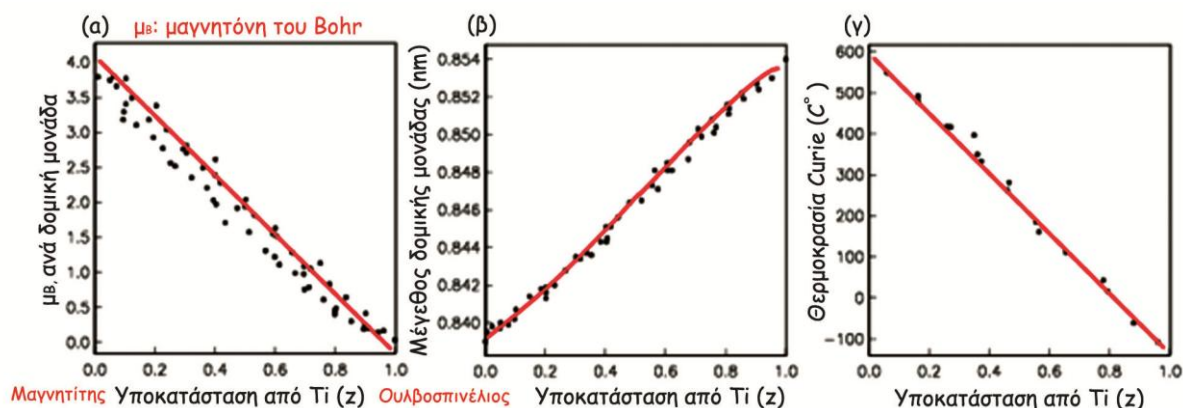
Η υποκατάσταση του  $Fe^{+3}$  από  $Ti^{+4}$  (διάγραμμα A20) στον μαγνητίτη  $Fe^{+3}|Fe^{+3}Fe^{+2}|O_4$  ( $z=0$ ), προκαλεί τη μετατροπή του  $Fe^{+3}$  σε  $Fe^{+2}$  για τη διατήρηση της ισορροπίας φορτίου κατά το σχήμα:  $Fe^{+2}|Fe^{+2}Ti^{+4}|O_4$  ( $z=1$ , ουλβοσπινέλιος). Επειδή τα κατιόντα  $Ti^{+4}$  δεν περιέχουν ασύζευκτα  $e^-$ , τα 4 μονήρη  $e^-$  των  $Fe^{+2}$  στις οκταεδρικές θέσεις έχουν αντιπαράλληλα spin με τα 4 μονήρη  $e^-$  των  $Fe^{+2}$  στις τετραεδρικές θέσεις και ο ουλβοσπινέλιος δεν εμφανίζει μαγνητική συμπεριφορά. Η σταδιακή αύξηση της υποκατάστασης<sup>18</sup> [45] του  $Fe^{+3}$  από  $Ti^{+4}$  προκαλεί τη μείωση (διάγραμμα A20α) της μαγνήτισης (W.O'Reilly 1984), της θερμοκρασίας Curie (διάγραμμα A20γ) και την αύξηση του μεγέθους (διάγραμμα A20β) των δομικών μονάδων. Η μαγνητική επιδεκτικότητα  $\chi_m=(169-290) \cdot 10^{-6} m^3/Kg$  των συνήθων στερεών διαλυμάτων τιτανομαγνητίτη [84] (pp. 40) αντιστοιχεί στο 15% των υψηλότερων τιμών  $\chi_m=(440-1116) \cdot 10^{-6} m^3/Kg$  του μαγνητίτη.

<sup>16</sup> Η εικόνα ελήφθη από την ιστοσελίδα <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Magnetite-244496.jpg>, licensed under the Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported).

<sup>17</sup> Η εικόνα ελήφθη από την ιστοσελίδα <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Magnetit1.jpg>, licensed under the Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported, 2.5 Generic, 2.0 Generic and 1.0 Generic license).

<sup>18</sup> <http://earthref.org/MAGIC/books/Tauxe/Essentials/WebBook3ch6.html#x8-530006>.





**Διάγραμμα A20.** Επίδραση της υποκατάστασης (z) τιτανίου [102] (pp.132-171) στο πλέγμα τιτανομαγνητίτη  $[\text{Fe}_{3-z}\text{Ti}_z\text{O}_4]$ , από  $z=0$  (μαγνητίτης:  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) έως  $z=1$  (ουλβοσπινέλιος:  $\text{Fe}_2\text{TiO}_4$ ). (α) Μεταβολή της μαγνήτισης ( $\mu_B=0,93 \cdot 10^{-23} \text{J/T}$ ) ανά δομική μονάδα. (β) Μεταβολή μεγέθους της δομικής μονάδας (nm). (γ) Μεταβολή της θερμοκρασίας ( $^\circ\text{C}$ ) Curie.

Ο μαγνητίτης σχηματίζεται κατά την όπτηση, από τη μερική αναγωγή του αιματίτη σε συνθήκες ελλείψεως οξυγόνου και σε θερμοκρασίες υψηλότερες των  $570^\circ\text{C}$  στο εσωτερικό της μάζας του οπτού πηλού [103], που αποκτά σκουρότερες αποχρώσεις. Η αναγωγή του αιματίτη  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  σε μαγνητίτη  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , συμβαίνει σύμφωνα με τη εξώθερμη αντίδραση:  $3\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CO} \rightarrow 2\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO}_2$ , όπου  $\Delta H_0 = -12,53 \text{ Kcal}$

Με βάση την εξίσωση Van't Hoff, ισχύει: 
$$\frac{d \ln \left( \frac{P_{\text{CO}_2}}{P_{\text{CO}}} \right)}{dT} = \frac{\Delta H_0}{R \cdot T^2}, \quad R = 8,314 \text{ J/mol.K}$$

Η αρνητική τιμή της ενθαλπίας  $\Delta H_0$  στην παραπάνω εξίσωση, αντιστοιχεί σε μείωση του λόγου  $\frac{P_{\text{CO}_2}}{P_{\text{CO}}}$ , αυξανόμενης της θερμοκρασίας  $T$ . Η αύξηση της θερμοκρασίας, σύμφωνα με την αρχή Le Chatelier, δεν ευνοεί την εξώθερμη αντίδραση και απαιτούνται ισχυρότερες αναγωγικές συνθήκες για την αποκατάσταση της θερμοδυναμικής ισορροπίας. Επομένως σε υψηλές θερμοκρασίες στον θάλαμο όπτησης και σε ήπιες αναγωγικές συνθήκες, περιορίζεται ο σχηματισμός του μαγνητίτη.

Αναλόγως του μεγέθους των μαγνητικών κόκκων, εμφανίζει τις μεγαλύτερες τιμές μαγνητικής επιδεκτικότητας, συγκριτικά με τα υπόλοιπα ορυκτολογικά συστατικά του οπτού πηλού. Η τιμή της μαγνητικής επιδεκτικότητας του μαγνητίτη, είναι περίπου 1000 φορές μεγαλύτερη από τη μαγνητική επιδεκτικότητα του ισχυρότερου παραμαγνητικού ορυκτού και περίπου 10000 φορές μεγαλύτερη από τις τιμές των διαμαγνητικών αργιλοπυριτικών ορυκτών.

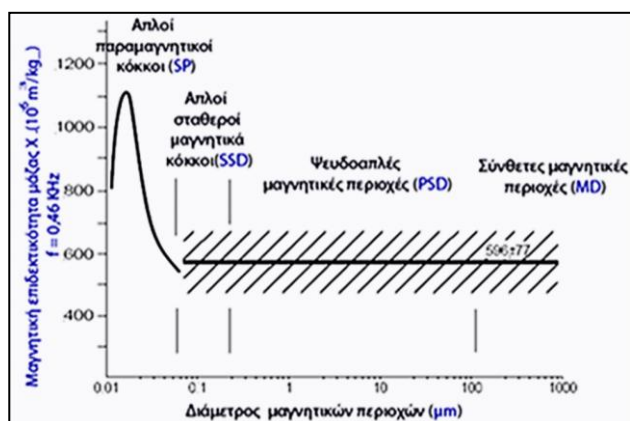
Η περιεκτικότητα του πηλού σε μαγνητίτη είναι μικρότερη από τα κατώτερα όρια ανιχνευσιμότητας (0,1%) με συμβατικές<sup>19</sup> μεθόδους ανάλυσης. Η συνολική μαγνητική επιδεκτικότητα του οπτού πηλού εκτιμάται θεωρητικά (πίνακας A4) από το άθροισμα των τιμών της μαγνητικής επιδεκτικότητας των επιμέρους συνηθέστερων διαμαγνητικών, παραμαγνητικών, αντισιδηρομαγνητικών και αντισιδηριμαγνητικών οξειδίων του. Η τυπική περιεκτικότητα του οπτού πηλού σε βασικά μεταλλικά οξείδια, εκτός του μαγνητίτη, προσδιορίζεται από επεξεργασία 50 αναλύσεων με τη μέθοδο ICP-OES (Spectro-Ciros, Spectro Analytical Instruments Inc, Kleve, Germany) κεραμικού υλικού σε όστρακα διαφορετικών αρχαιολογικών ανασκαφικών αγγείων. Η συνεισφορά του μαγνητίτη στις μαγνητικές ιδιότητες του οπτού πηλού, υπολογίζεται στον παρακάτω πίνακα, για την υποθετική τιμή της περιεκτικότητάς του  $C_{\text{Fe}_3\text{O}_4} = 0,01\%$ .

<sup>19</sup> Οι αναλύσεις όλων των οστράκων ή των δειγμάτων σερπεντίνη με περιθλασιμετρία ακτίνων X (XRD) που πραγματοποιήθηκαν στη Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης, δεν ανίχνευσαν μαγνητίτη, λόγω της μικρότερης περιεκτικότητάς του από τα όρια ανιχνευσιμότητας του οργάνου.

| Είδος οξειδίου | Βασικά οξείδια πηλού           | Τυπική περιεκτικότητα οξειδίων (C <sub>i</sub> % w/w) | Μαγνητική επιδεκτικότητα <sup>20</sup> μάζας $\chi_m (10^{-6} \text{ m}^3/\text{Kg})$ | Ανηγμένη μαγνητική επιδεκτικότητα Μάζας $A_i = \chi \cdot C_i / 100$ | Εκατοστιαία μαγνητική επιδεκτικότητα $A(\%) = (A_i / \Sigma A_i) \cdot 100$ |
|----------------|--------------------------------|---|---|--|---|
| d              | SiO <sub>2</sub>               | 59  | -0,0058   | -0,0034  | -1,7  |
| d              | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 16  | -0,0046   | -0,00074   | -0,37   |
| d              | CaO                            | 9   | -0,0034   | -0,00031   | -0,16   |
| f              | $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$  | 7   | +1,7  | +0,12  | +60   |
| F              | Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> | 0,01  | +800  | +0,08  | +40   |
| d              | MgO                            | 3,2   | -0,0032   | -0,00010   | -0,050  |
|                | K <sub>2</sub> O               | 3   |   |  |   |
| d              | Na <sub>2</sub> O              | 1,2   | -0,0040   | -0,000048  | -0,0024   |
| p              | TiO <sub>2</sub>               | 1   | +0,00093  | +0,0000093   | +0,0047   |
|                | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0,5   |   |  |   |
| f              | MnO                            | 0,1   | +0,86   | +0,00086   | +0,43   |
|                | Σύνολο                         | 100   |   | $\Sigma A_i = 0,20$  | 98  |

**Πίνακας Α4.** Εκτίμηση της μαγνητικής συνεισφοράς των βασικών διαμαγνητικών (d), αντισιδηρομαγνητικών (f), αντισιδηριμαγνητικών (F) και παραμαγνητικών (p) οξειδίων στη μαγνητική επιδεκτικότητα του κεραμικού υλικού.

Εκτός από την περιεκτικότητα του κεραμικού σε μαγνητικά υλικά, η μαγνητική συμπεριφορά του εξαρτάται από το σχήμα και το μέγεθος (**διάγραμμα Α21**) των μαγνητικών κόκκων.



Η μαγνήτιση των αντισιδηρομαγνητικών περιοχών εμφανίζει υψηλή παραμαγνητική συμπεριφορά σε κόκκους (SP) με διάμετρο μικρότερη των 30nm και επηρεάζει τις μετρήσεις μαγνητικής επιδεκτικότητας σε εναλλασσόμενα μαγνητικά πεδία.

**Διάγραμμα Α21.** Μαγνητική επιδεκτικότητα [86], συναρτήσει του μεγέθους των μαγνητικών περιοχών.

Συμπερασματικά, η θερμοπαραμένουσα μαγνήτιση των οστράκων, οφείλεται στα σχηματιζόμενα οξείδια του μαγνητίτη και του αιματίτη κατά τη διάρκεια της όπτησης [104], που προσανατολίζονται κατά την ψύξη στην κατεύθυνση του γήινου μαγνητικού πεδίου. Η παραμαγνητική συμπεριφορά του οπτού πηλού, οφείλεται στα αμιγώς παραμαγνητικά ή διαμαγνητικά αργιλοπυριτικά συστατικά του οπτού πηλού και πιθανώς [85] (pp. 43–48, 359–408) στη συνεισφορά των μικρότερων ( $d < 0,03 \mu\text{m}$ ) αντισιδηρομαγνητικών κόκκων.

<sup>20</sup> Οι τιμές της μαγνητικής επιδεκτικότητας των οξειδίων αναφέρονται:

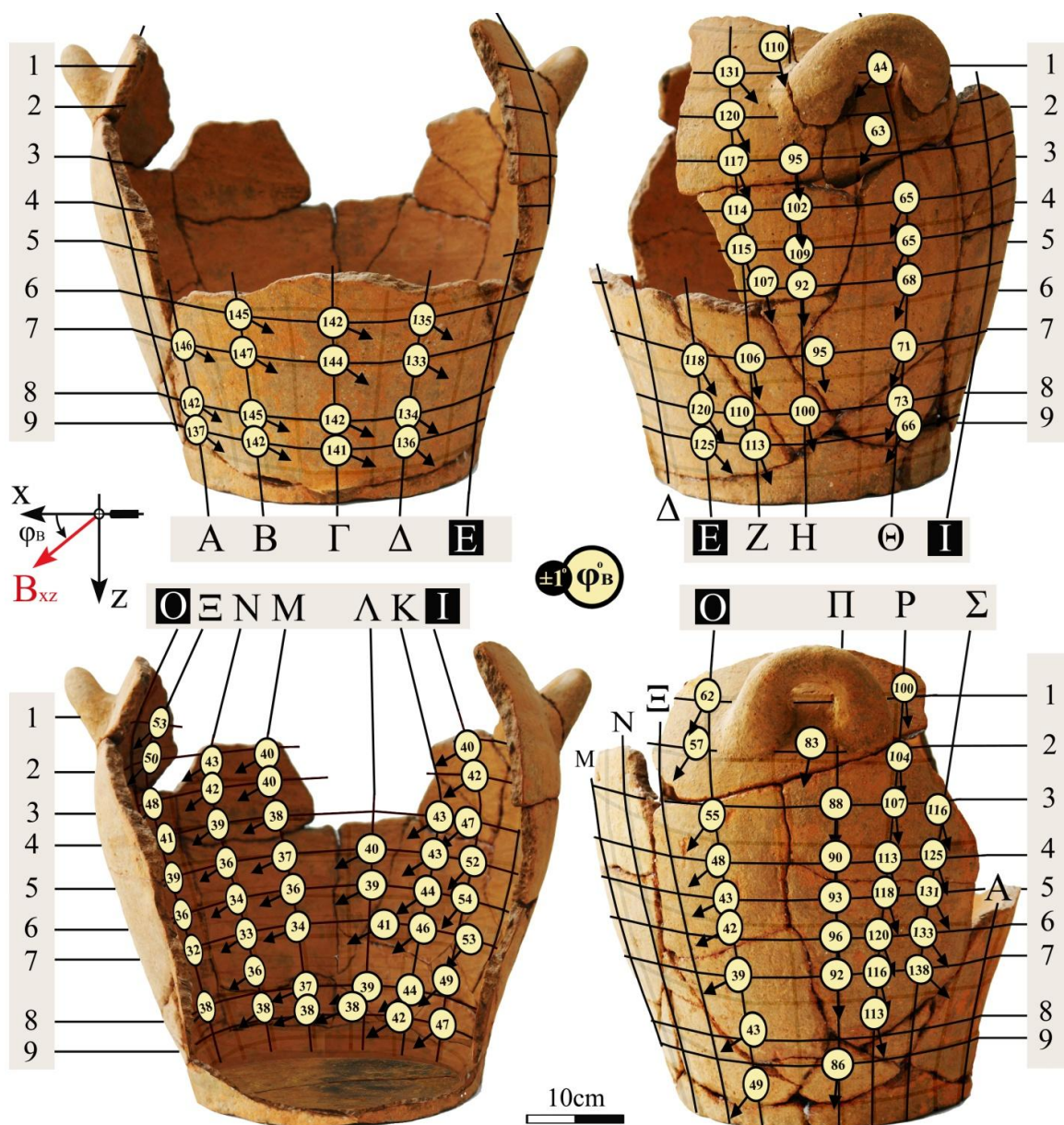
Landolt-Börnstein: «Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology», (New Series, II/2, II/8, II/10, II/11, II/12a II/16, III/19), Springer-Verlag: «Coordination and Organometallic Transition Metal Compounds», (Heidelberg, 1966-1984), Springer-Verlag: «Diamagnetic Susceptibility», Heidelberg 1986, Springer-Verlag: «Magnetic Properties of Metals», (Heidelberg, 1986-1992), Masson: «Tables de Constantes et Données Numérique», Volume 7, Relaxation Paramagnetique, Paris, 1957.



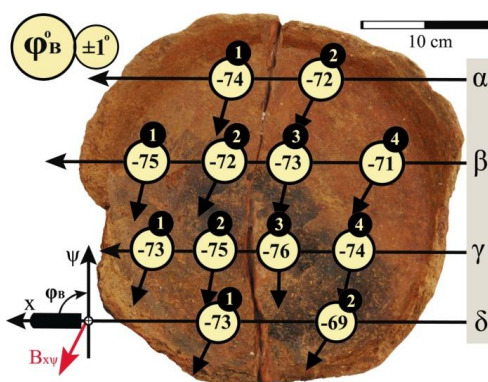
## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

## ΣΥΜΠΛΗΡΩΜΑΤΙΚΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

## ΑΓΓΕΙΟ 2 (α-Σώμα)



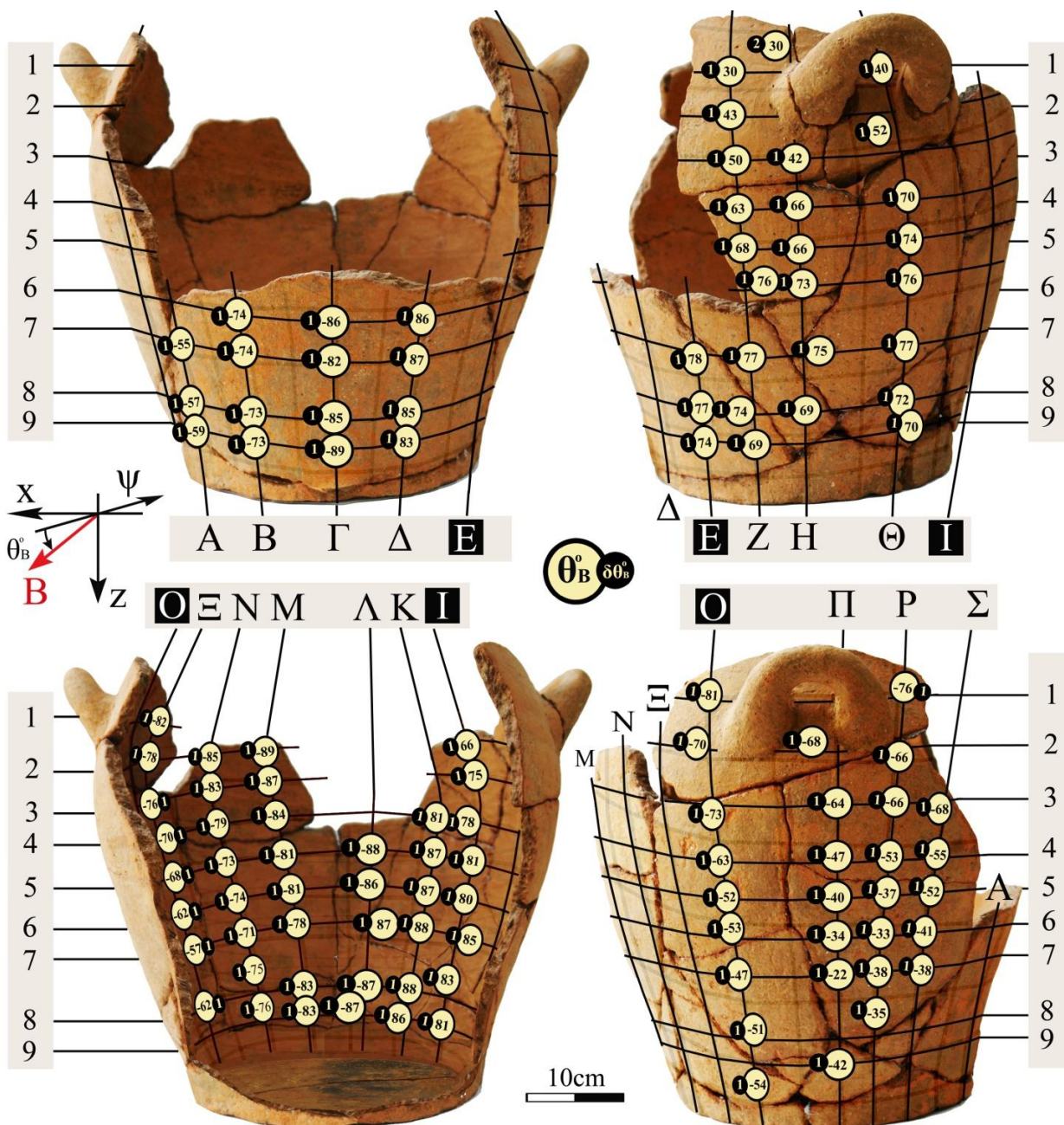
Αγγείο 2 (β-Βάση)

Σχήμα Β1. Απεικόνιση των μετρούμενων γωνιών  $\Phi_B$ 

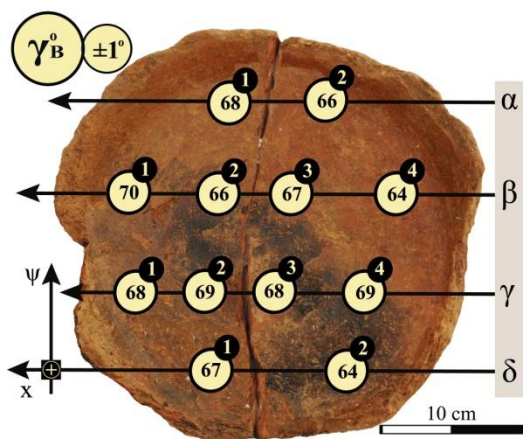
μεταξύ της  $\vec{B}_{xz}$  και των εγκάρσιων αυλακώσεων του σώματος (α) και των γωνιών  $\Phi_B$  μεταξύ της  $\vec{B}_{xy}$  και της σημειωμένης κατεύθυνσης συναρμογής στα θραύσματα της βάσης (β) του αγγείου 2, στα θεωρούμενα συστήματα αναφοράς για τα όστρακα του σώματος και της βάσης των αγγείων. Οι μετρήσεις γίνονται από έναν αισθητήρα σε σταθερή οριζόντια θέση, καθέτως προς την κατακόρυφη συνιστώσα και την οριζόντια συνισταμένη του γήινου μαγνητικού πεδίου.



## ΑΓΓΕΙΟ 2 (α-Σώμα)

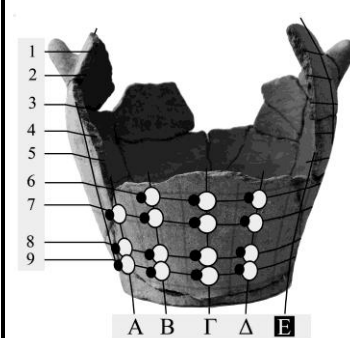
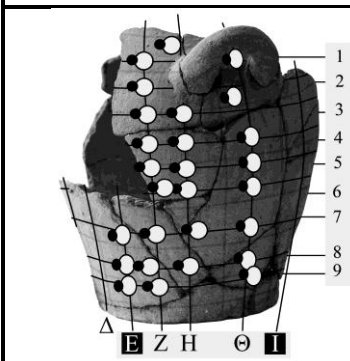


## Αγγείο 2 (β-Βάση)

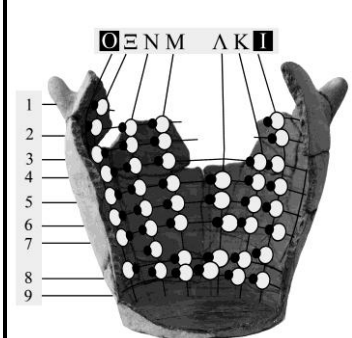
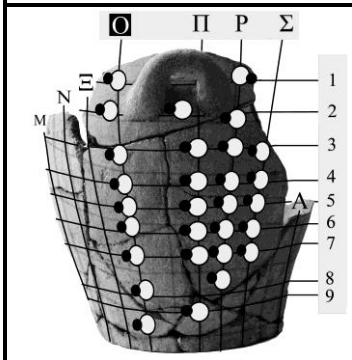


**Σχήμα Β2.** Απεικόνιση των υπολογιζόμενων γωνιών  $\theta_B$  μεταξύ της  $\vec{B}$  και της  $\psi$ -κατεύθυνσης του αισθητήρα από μετρήσεις της  $B_{xz}$  και της  $B_\psi$  σε όστρακα του σώματος (α) και των γωνιών  $\gamma_B$  μεταξύ της  $\vec{B}$  και της  $z$ -κατεύθυνσης του αισθητήρα από μετρήσεις της  $B_{xy}$  και της  $B_z$ , σε θραύσματα της βάσης (β) του αγγείου 2, από έναν αισθητήρα σε σταθερή οριζόντια θέση, καθέτως προς την κατακόρυφη συνιστώσα και την οριζόντια συνισταμένη του γήινου μαγνητικού πεδίου.

Πίνακας Β1α-ΑΓΓΕΙΟ 2 (α-Σώμα)

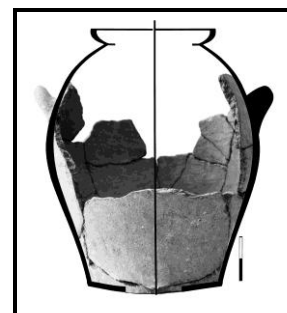
|  |   | Αγγείο 2<br>α. Σώμα                | Μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου στην κατεύθυνση της Bxz |       |       |      |      |      |      |      |      |
|--|---|------------------------------------|---|-------|-------|------|------|------|------|------|------|
|  |   |                                    | A   | B     | Γ     | Δ    | E    | Z    | H    | Θ    | I    |
|   | 1 | B <sub>xz</sub> (±1) nT            |   |       |       |      |      | 21   | 16   | 28   |      |
|  |   | B <sub>ψ</sub> (±1) nT             |   |       |       |      |      | 37   | 28   | 33   |      |
|  |   | B (δB=1 nT)                        |   |       |       |      |      | 43   | 32   | 43   |      |
|  |   | θ <sub>B</sub> ° ± δθ <sub>B</sub> |   |       |       |      |      | 30±1 | 30±2 | 40±1 |      |
|  |   | φ <sub>B</sub> ° (±1°)             |   |       |       |      |      | 131  | 110  | 44   |      |
|  | 2 | B <sub>xz</sub> (±1) nT            |   |       |       |      |      | 35   |      |      | 71   |
|  |   | B <sub>ψ</sub> (±1) nT             |   |       |       |      |      | 38   |      |      | 32   |
|  |   | B (δB=1 nT)                        |   |       |       |      |      | 52   |      |      | 78   |
|  |   | θ <sub>B</sub> ° ± δθ <sub>B</sub> |   |       |       |      |      | 43±1 |      |      | 66±1 |
|  |   | φ <sub>B</sub> ° (±1°)             |   |       |       |      |      | 120  |      |      | 40   |
|  | 3 | B <sub>xz</sub> (±1) nT            |   |       |       |      |      | 46   | 38   | 49   | 89   |
|  |   | B <sub>ψ</sub> (±1) nT             |   |       |       |      |      | 38   | 42   | 38   | 24   |
|  |   | B (δB=1 nT)                        |   |       |       |      |      | 60   | 57   | 62   | 92   |
|  |   | θ <sub>B</sub> ° ± δθ <sub>B</sub> |   |       |       |      |      | 50±1 | 42±1 | 52±1 | 75±1 |
|  |   | φ <sub>B</sub> ° (±1°)             |   |       |       |      |      | 117  | 95   | 63   | 42   |
|  | 4 | B <sub>xz</sub> (±1) nT            |   |       |       |      |      | 73   | 73   | 77   | 92   |
|  |   | B <sub>ψ</sub> (±1) nT             |   |       |       |      |      | 37   | 33   | 28   | 20   |
|  |   | B (δB=1 nT)                        |   |       |       |      |      | 82   | 80   | 82   | 94   |
|  |   | θ <sub>B</sub> ° ± δθ <sub>B</sub> |   |       |       |      |      | 63±1 | 66±1 | 70±1 | 78±1 |
|  |   | φ <sub>B</sub> ° (±1°)             |   |       |       |      |      | 114  | 102  | 65   | 47   |
|  | 5 | B <sub>xz</sub> (±1) nT            |   |       |       |      |      | 88   | 73   | 90   | 99   |
|  |   | B <sub>ψ</sub> (±1) nT             |   |       |       |      |      | 35   | 33   | 26   | 15   |
|  |   | B (δB=1 nT)                        |   |       |       |      |      | 95   | 80   | 94   | 100  |
|  |   | θ <sub>B</sub> ° ± δθ <sub>B</sub> |   |       |       |      |      | 68±1 | 66±1 | 74±1 | 81±1 |
|  |   | φ <sub>B</sub> ° (±1°)             |   |       |       |      |      | 115  | 109  | 65   | 52   |
|  | 6 | B <sub>xz</sub> (±1) nT            |   | 88    | 105   | 102  |      | 93   | 86   | 93   | 104  |
|  |   | B <sub>ψ</sub> (±1) nT             |   | -26   | -8    | 8    |      | 23   | 26   | 23   | 19   |
|  |   | B (δB=1 nT)                        |   | 92    | 105   | 102  |      | 96   | 90   | 96   | 106  |
|  |   | θ <sub>B</sub> ° ± δθ <sub>B</sub> |   | -74±1 | -86±1 | 86±1 |      | 76±1 | 73±1 | 76±1 | 80±1 |
|  |   | φ <sub>B</sub> ° (±1°)             |   | 145   | 142   | 135  |      | 107  | 92   | 68   | 54   |
|  | 7 | B <sub>xz</sub> (±1) nT            | 47  | 88    | 100   | 107  | 94   | 95   | 89   | 95   | 107  |
|  |   | B <sub>ψ</sub> (±1) nT             | -33   | -26   | -14   | 5    | 20   | 22   | 24   | 22   | 9    |
|  |   | B (δB=1 nT)                        | 57  | 92    | 101   | 107  | 96   | 98   | 92   | 98   | 107  |
|  |   | θ <sub>B</sub> ° ± δθ <sub>B</sub> | -55±1   | -74±1 | -82±1 | 87±1 | 78±1 | 77±1 | 75±1 | 77±1 | 85±1 |
|  |   | φ <sub>B</sub> ° (±1°)             | 146   | 147   | 144   | 133  | 118  | 106  | 95   | 71   | 53   |
|  | 8 | B <sub>xz</sub> (±1) nT            | 55  | 87    | 102   | 104  | 92   | 86   | 77   | 85   | 97   |
|  |   | B <sub>ψ</sub> (±1) nT             | -36   | -27   | -9    | 9    | 22   | 25   | 30   | 27   | 12   |
|  |   | B (δB=1 nT)                        | 66  | 91    | 102   | 104  | 95   | 90   | 83   | 89   | 98   |
|  |   | θ <sub>B</sub> ° ± δθ <sub>B</sub> | -57±1   | -73±1 | -85±1 | 85±1 | 77±1 | 74±1 | 69±1 | 72±1 | 83±1 |
|  |   | φ <sub>B</sub> ° (±1°)             | 142   | 145   | 142   | 134  | 120  | 110  | 100  | 73   | 49   |
|  | 9 | B <sub>xz</sub> (±1) nT            | 51  | 81    | 108   | 101  | 88   | 77   |      | 77   | 102  |
|  |   | B <sub>ψ</sub> (±1) nT             | -31   | -24   | -2    | 12   | 25   | 29   |      | 28   | 16   |
|  |   | B (δB=1 nT)                        | 60  | 84    | 108   | 102  | 91   | 82   |      | 82   | 103  |
|  |   | θ <sub>B</sub> ° ± δθ <sub>B</sub> | -59±1   | -73±1 | -89±1 | 83±1 | 74±1 | 69±1 |      | 70±1 | 81±1 |
|  |   | φ <sub>B</sub> ° (±1°)             | 137   | 142   | 141   | 136  | 125  | 113  |      | 66   | 47   |

Πίνακας Β1α. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μετρήσεων του μαγνητικού πεδίου με τον αισθητήρα στην κατεύθυνση της  $\vec{B}_{xz}$  σε όστρακα του σώματος του αγγείου 2.

|  |                                    | Αγγείο 2<br>α. Σώμα                | Μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου στην κατεύθυνση της Bxz |       |       |       |       |       |       |       |       |
|--|------------------------------------|------------------------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|  |                                    |                                    | K   | Λ     | M     | N     | Ξ     | Ο     | Π     | P     | Σ     |
|   | 1                                  | B <sub>xz</sub> (±1) nT            |   |       |       |       | 101   | 101   |       | 86    |       |
|  |                                    | B <sub>ψ</sub> (±1) nT             |   |       |       |       | -15   | -16   |       | -22   |       |
|  |                                    | B (δB=1 nT)                        |   |       |       |       | 102   | 102   |       | 89    |       |
|  |                                    | θ <sub>B</sub> ° ± δθ <sub>B</sub> |   |       |       |       | -82±1 | -81±1 |       | -76±1 |       |
|  |                                    | φ <sub>B</sub> ° (±1°)             |   |       |       |       | 53    | 62    |       | 100   |       |
|  | 2                                  | B <sub>xz</sub> (±1) nT            |   |       | 105   | 106   | 95    | 81    | 71    | 73    |       |
|  |                                    | B <sub>ψ</sub> (±1) nT             |   |       | -2    | -10   | -21   | -30   | -29   | -32   |       |
|  |                                    | B (δB=1 nT)                        |   |       | 105   | 106   | 97    | 86    | 77    | 80    |       |
|  |                                    | θ <sub>B</sub> ° ± δθ <sub>B</sub> |   |       | -89±1 | -85±1 | -78±1 | -70±1 | -68±1 | -66±1 |       |
|  |                                    | φ <sub>B</sub> ° (±1°)             |   |       | 40    | 43    | 50    | 57    | 83    | 104   |       |
|  | 3                                  | B <sub>xz</sub> (±1) nT            |   |       | 103   | 104   | 92    | 87    | 67    | 67    | 73    |
|  |                                    | B <sub>ψ</sub> (±1) nT             |   |       | -5    | -12   | -23   | -26   | -33   | -30   | -30   |
|  |                                    | B (δB=1 nT)                        |   |       | 103   | 105   | 95    | 91    | 75    | 73    | 79    |
|  |                                    | θ <sub>B</sub> ° ± δθ <sub>B</sub> |   |       | -87±1 | -83±1 | -76±1 | -73±1 | -64±1 | -66±1 | -68±1 |
|  |                                    | φ <sub>B</sub> ° (±1°)             |   |       | 40    | 42    | 48    | 55    | 88    | 107   | 116   |
|  | 4                                  | B <sub>xz</sub> (±1) nT            | 103   |       | 107   | 97    | 81    | 65    | 45    | 50    | 57    |
|  |                                    | B <sub>ψ</sub> (±1) nT             | 17  |       | -11   | -19   | -30   | -33   | -42   | -38   | -40   |
|  |                                    | B (δB=1 nT)                        | 104   |       | 108   | 99    | 86    | 73    | 62    | 63    | 70    |
|  |                                    | θ <sub>B</sub> ° ± δθ <sub>B</sub> | 81±1  |       | -84±1 | -79±1 | -70±1 | -63±1 | -47±1 | -53±1 | -55±1 |
|  |                                    | φ <sub>B</sub> ° (±1°)             | 43  |       | 38    | 39    | 41    | 48    | 90    | 113   | 125   |
| 5  | B <sub>xz</sub> (±1) nT            | 107                                | 109   | 99    | 90    | 79    | 52    | 35    | 31    | 48    |       |
|  | B <sub>ψ</sub> (±1) nT             | 6                                  | -3  | -16   | -27   | -32   | -40   | -41   | -41   | -38   |       |
|  | B (δB=1 nT)                        | 107                                | 109   | 100   | 94    | 85    | 66    | 54    | 51    | 61    |       |
|  | θ <sub>B</sub> ° ± δθ <sub>B</sub> | 87±1                               | -88±1   | -81±1 | -73±1 | -68±1 | -52±1 | -40±1 | -37±1 | -52±1 |       |
|  | φ <sub>B</sub> ° (±1°)             | 43                                 | 40  | 37    | 36    | 39    | 43    | 93    | 118   | 131   |       |
| 6  | B <sub>xz</sub> (±1) nT            | 104                                | 103   | 99    | 86    | 68    | 49    | 27    | 26    | 36    |       |
|  | B <sub>ψ</sub> (±1) nT             | 6                                  | -7  | -16   | -25   | -36   | -37   | -40   | -40   | -41   |       |
|  | B (δB=1 nT)                        | 104                                | 103   | 100   | 90    | 77    | 61    | 48    | 48    | 55    |       |
|  | θ <sub>B</sub> ° ± δθ <sub>B</sub> | 87±1                               | -86±1   | -81±1 | -74±1 | -62±1 | -53±1 | -34±1 | -33±1 | -41±1 |       |
|  | φ <sub>B</sub> ° (±1°)             | 44                                 | 39  | 36    | 34    | 36    | 42    | 96    | 120   | 133   |       |
| 7  | B <sub>xz</sub> (±1) nT            | 108                                | 108   | 96    | 83    | 57    | 41    | 17    | 31    | 31    |       |
|  | B <sub>ψ</sub> (±1) nT             | 4                                  | 1   | -20   | -28   | -37   | -38   | -43   | -39   | -39   |       |
|  | B (δB=1 nT)                        | 108                                | 108   | 98    | 88    | 68    | 56    | 46    | 50    | 50    |       |
|  | θ <sub>B</sub> ° ± δθ <sub>B</sub> | 88±1                               | 87±1  | -78±1 | -71±1 | -57±1 | -47±1 | -22±1 | -38±1 | -38±1 |       |
|  | φ <sub>B</sub> ° (±1°)             | 46                                 | 41  | 34    | 33    | 32    | 39    | 92    | 116   | 138   |       |
| 8  | B <sub>xz</sub> (±1) nT            | 108                                | 104   | 104   | 88    | 63    | 46    |       | 26    |       |       |
|  | B <sub>ψ</sub> (±1) nT             | 4                                  | -5  | -13   | -24   | -34   | -37   |       | -37   |       |       |
|  | B (δB=1 nT)                        | 108                                | 104   | 105   | 91    | 72    | 59    |       | 45    |       |       |
|  | θ <sub>B</sub> ° ± δθ <sub>B</sub> | 88±1                               | -87±1   | -83±1 | -75±1 | -62±1 | -51±1 |       | -35±1 |       |       |
|  | φ <sub>B</sub> ° (±1°)             | 44                                 | 39  | 37    | 36    | 38    | 43    |       | 113   |       |       |
| 9  | B <sub>xz</sub> (±1) nT            | 103                                | 108   | 105   | 91    |       | 48    | 32    |       |       |       |
|  | B <sub>ψ</sub> (±1) nT             | 8                                  | -6  | -12   | -23   |       | -35   | -36   |       |       |       |
|  | B (δB=1 nT)                        | 103                                | 108   | 106   | 94    |       | 59    | 48    |       |       |       |
|  | θ <sub>B</sub> ° ± δθ <sub>B</sub> | 86±1                               | -87±1   | -83±1 | -76±1 |       | -54±1 | -42±1 |       |       |       |
|  | φ <sub>B</sub> ° (±1°)             | 42                                 | 38  | 38    | 38    |       | 49    | 86    |       |       |       |

**Πίνακας B1a (συνέχεια)** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μετρήσεων του μαγνητικού πεδίου με τον αισθητήρα στην κατεύθυνση της  $\vec{B}_{xz}$  σε όστρακα του σώματος του αγγείου 2.

Πίνακας B1β- ΑΓΓΕΙΟ 2 (β-Βάση)



|   | Αγγείο 2<br>β.Βάση   | Μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου στην κατεύθυνση της B <sub>xψ</sub> |     |     |     |
|---|--|---|-----|-----|-----|
|   |  | α   | β   | γ   | δ   |
| 1 | B <sub>xψ</sub> (±1) nT  | 76  | 81  | 76  | 76  |
|   | B <sub>z</sub> (±1) nT   | 31  | 30  | 31  | 32  |
|   | B (δB=1 nT)  | 82  | 86  | 82  | 82  |
|   | γ <sub>B</sub> <sup>o</sup> (δγ <sub>B</sub> =1 <sup>o</sup> ) | 68  | 70  | 68  | 67  |
|   | Φ <sub>B</sub> <sup>o</sup> (±1 <sup>o</sup> )                 | -74   | -75 | -73 | -73 |
| 2 | B <sub>xψ</sub> (±1) nT  | 73  | 75  | 81  | 70  |
|   | B <sub>z</sub> (±1) nT   | 33  | 34  | 31  | 34  |
|   | B (δB=1 nT)  | 80  | 82  | 87  | 78  |
|   | γ <sub>B</sub> <sup>o</sup> (δγ <sub>B</sub> =1 <sup>o</sup> ) | 66  | 66  | 69  | 64  |
|   | Φ <sub>B</sub> <sup>o</sup> (±1 <sup>o</sup> )                 | -72   | -72 | -75 | -69 |
| 3 | B <sub>xψ</sub> (±1) nT  |   | 79  | 87  |     |
|   | B <sub>z</sub> (±1) nT   |   | 33  | 35  |     |
|   | B (δB=1 nT)  |   | 86  | 94  |     |
|   | γ <sub>B</sub> <sup>o</sup> (δγ <sub>B</sub> =1 <sup>o</sup> ) |   | 67  | 68  |     |
|   | Φ <sub>B</sub> <sup>o</sup> (±1 <sup>o</sup> )                 |   | -73 | -76 |     |
| 4 | B <sub>xψ</sub> (±1) nT  |   | 71  | 79  |     |
|   | B <sub>z</sub> (±1) nT   |   | 34  | 31  |     |
|   | B (δB=1 nT)  |   | 79  | 85  |     |
|   | γ <sub>B</sub> <sup>o</sup> (δγ <sub>B</sub> =1 <sup>o</sup> ) |   | 64  | 69  |     |
|   | Φ <sub>B</sub> <sup>o</sup> (±1 <sup>o</sup> )                 |   | -71 | -74 |     |

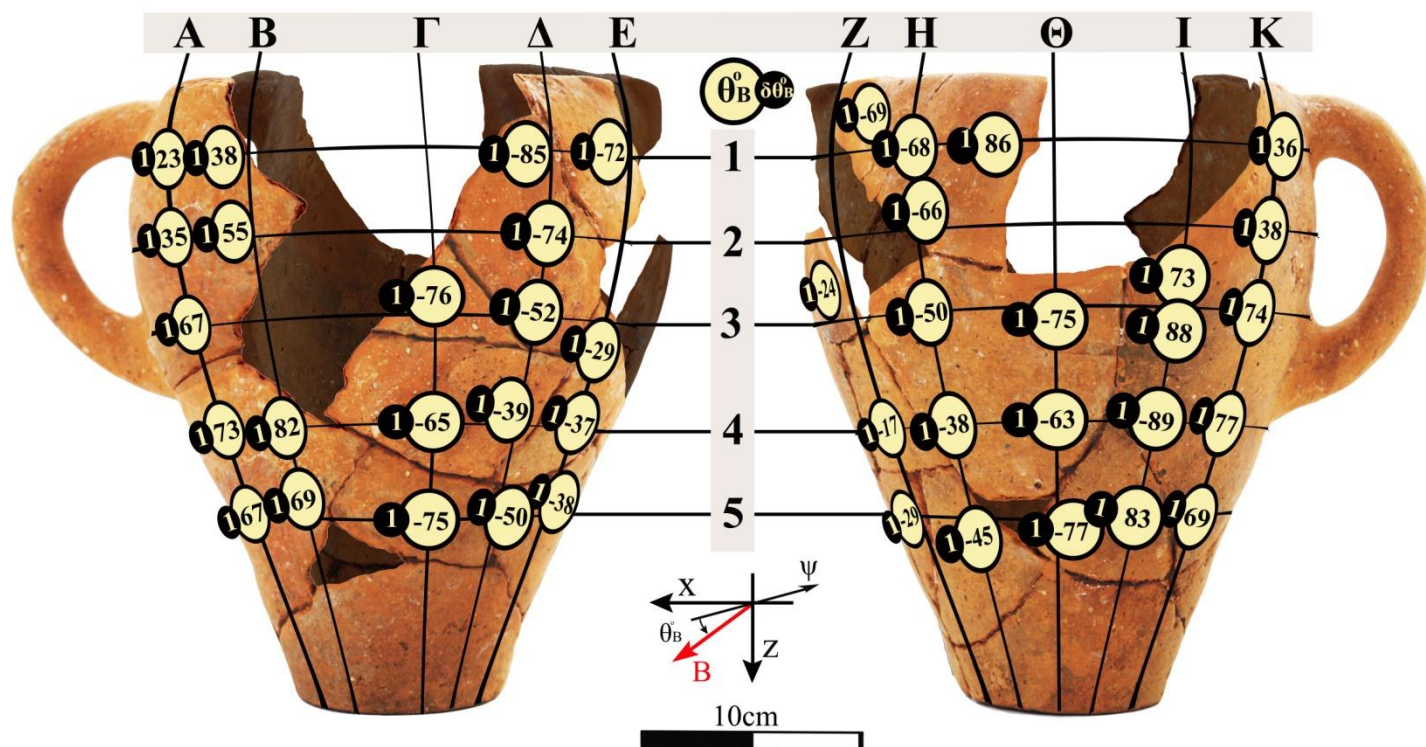
**Πίνακας B1β.** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μετρήσεων του μαγνητικού πεδίου με τον αισθητήρα στην κατεύθυνση της  $\vec{B}_{xψ}$  σε όστρακα της βάσης του αγγείου 2.



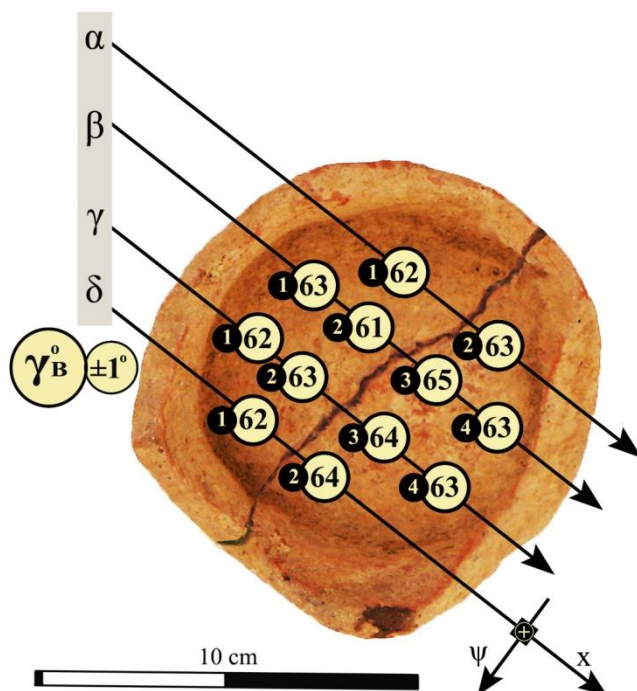




ΑΓΓΕΙΟ 3 (α-Σώμα)



Αγγείο 3 (β. Βάση)



**Σχήμα Β4.** Απεικόνιση των υπολογιζόμενων γωνιών  $\theta_B$  μεταξύ της  $\vec{B}$  και της  $\psi$ -κατεύθυνσης του αισθητήρα από μετρήσεις της  $B_{xz}$  και της  $B_\psi$  σε όστρακα του σώματος (α) και των γωνιών  $\gamma_B$  μεταξύ της  $\vec{B}$  και της  $z$ -κατεύθυνσης του αισθητήρα από μετρήσεις της  $B_{x\psi}$  και της  $B_z$ , σε θραύσματα της βάσης (β) του αγγείου 3, από έναν αισθητήρα σε σταθερή οριζόντια θέση, καθέτως προς την κατακόρυφη συνιστώσα και την οριζόντια συνισταμένη του γήινου μαγνητικού πεδίου.

Πίνακας Β2-ΑΓΓΕΙΟ 3



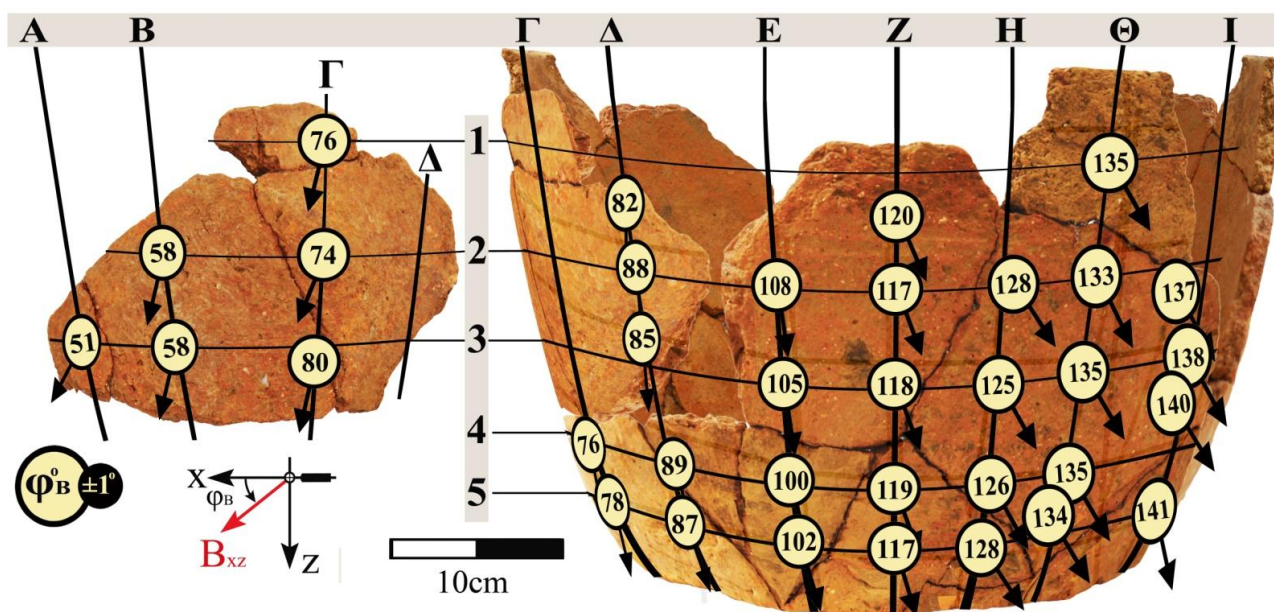
|   | β. Βάση                                      | Μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου στη διεύθυνση της $B_{x\psi}$ |     |     |     |
|---|--|---|-----|-----|-----|
|   |  | α   | β   | γ   | δ   |
| 1 | $B_{x\psi} (\pm 1) \text{ nT}$               | 65  | 63  | 61  | 64  |
|   | $B_z (\pm 1) \text{ nT}$                     | 35  | 32  | 32  | 34  |
|   | $B (\delta B=1 \text{ nT})$                  | 74  | 71  | 69  | 72  |
|   | $\gamma_B^\circ (\delta \gamma_B = 1^\circ)$ | 62  | 63  | 62  | 62  |
|   | $\Phi_B^\circ (\pm 1^\circ)$                 | 330   | 328 | 326 | 328 |
|   |  |   |     |     |     |
| 2 | $B_{x\psi} (\pm 1) \text{ nT}$               | 64  | 65  | 67  | 75  |
|   | $B_z (\pm 1) \text{ nT}$                     | 33  | 36  | 34  | 36  |
|   | $B (\delta B=1 \text{ nT})$                  | 72  | 74  | 75  | 83  |
|   | $\gamma_B^\circ (\delta \gamma_B = 1^\circ)$ | 63  | 61  | 63  | 64  |
|   | $\Phi_B^\circ (\pm 1^\circ)$                 | 327   | 325 | 328 | 331 |
|   |  |   |     |     |     |
| 3 | $B_{x\psi} (\pm 1) \text{ nT}$               |   | 71  | 73  |     |
|   | $B_z (\pm 1) \text{ nT}$                     |   | 33  | 35  |     |
|   | $B (\delta B=1 \text{ nT})$                  |   | 78  | 81  |     |
|   | $\gamma_B^\circ (\delta \gamma_B = 1^\circ)$ |   | 65  | 64  |     |
|   | $\Phi_B^\circ (\pm 1^\circ)$                 |   | 331 | 328 |     |
|   |  |   |     |     |     |
| 4 | $B_{x\psi} (\pm 1) \text{ nT}$               |   | 67  | 61  |     |
|   | $B_z (\pm 1) \text{ nT}$                     |   | 34  | 31  |     |
|   | $B (\delta B=1 \text{ nT})$                  |   | 75  | 68  |     |
|   | $\gamma_B^\circ (\delta \gamma_B = 1^\circ)$ |   | 63  | 63  |     |
|   | $\Phi_B^\circ (\pm 1^\circ)$                 |   | 329 | 324 |     |
|   |  |   |     |     |     |

|   | α. Σώμα                                      | Μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου στη διεύθυνση της $B_{xz}$ |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|---|--|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|   |  | A  | B   | Γ   | Δ   | E   | Z   | H   | Θ   | I   | K   |
| 1 | $B_{xz} (\pm 1) \text{ nT}$                  | 29   | 53  |     | 105 | 96  | 90  | 92  | 105 |     | 59  |
|   | $B_\psi (\pm 1) \text{ nT}$                  | 34   | 34  |     | -5  | -16 | -17 | -19 | 4   |     | 40  |
|   | $B (\delta B=1 \text{ nT})$                  | 45   | 63  |     | 105 | 97  | 92  | 94  | 105 |     | 71  |
|   | $\theta_B^\circ (\delta \theta_B = 1^\circ)$ | 40   | 57  |     | -87 | -81 | -79 | -78 | 88  |     | 56  |
|   | $\Phi_B^\circ (\pm 1^\circ)$                 | 128  | 137 |     | 130 | 113 | 68  | 60  | 45  |     | 41  |
|   |  |  |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 2 | $B_{xz} (\pm 1) \text{ nT}$                  | 50   | 79  |     | 99  |     |     | 97  |     | 94  | 60  |
|   | $B_\psi (\pm 1) \text{ nT}$                  | 36   | 28  |     | -14 |     |     | -22 |     | 14  | 38  |
|   | $B (\delta B=1 \text{ nT})$                  | 62   | 84  |     | 100 |     |     | 99  |     | 95  | 71  |
|   | $\theta_B^\circ (\delta \theta_B = 1^\circ)$ | 54   | 70  |     | -82 |     |     | -77 |     | 82  | 58  |
|   | $\Phi_B^\circ (\pm 1^\circ)$                 | 120  | 134 |     | 130 |     |     | 57  |     | 44  | 50  |
|   |  |  |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 3 | $B_{xz} (\pm 1) \text{ nT}$                  | 94   |     | 102 | 76  | 44  | 38  | 73  | 95  | 106 | 96  |
|   | $B_\psi (\pm 1) \text{ nT}$                  | 20   |     | -13 | -30 | -40 | -42 | -31 | -13 | 2   | 14  |
|   | $B (\delta B=1 \text{ nT})$                  | 96   |     | 103 | 82  | 59  | 57  | 79  | 96  | 106 | 97  |
|   | $\theta_B^\circ (\delta \theta_B = 1^\circ)$ | 78   |     | -83 | -68 | -48 | -42 | -67 | -82 | 89  | 82  |
|   | $\Phi_B^\circ (\pm 1^\circ)$                 | 111  |     | 139 | 141 | 134 | 58  | 43  | 41  | 49  | 64  |
|   |  |  |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 4 | $B_{xz} (\pm 1) \text{ nT}$                  | 102  | 104 | 87  | 55  | 52  | 27  | 52  | 89  | 99  | 102 |
|   | $B_\psi (\pm 1) \text{ nT}$                  | 16   | 7   | -20 | -34 | -35 | -44 | -33 | -23 | -1  | 12  |
|   | $B (\delta B=1 \text{ nT})$                  | 103  | 104 | 89  | 65  | 63  | 52  | 62  | 92  | 99  | 103 |
|   | $\theta_B^\circ (\delta \theta_B = 1^\circ)$ | 81   | 86  | -77 | -58 | -56 | -32 | -58 | -76 | -89 | 83  |
|   | $\Phi_B^\circ (\pm 1^\circ)$                 | 107  | 121 | 143 | 146 | 140 | 53  | 34  | 38  | 51  | 67  |
|   |  |  |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 5 | $B_{xz} (\pm 1) \text{ nT}$                  | 88   | 95  | 96  | 71  | 59  | 39  | 64  | 101 | 104 | 95  |
|   | $B_\psi (\pm 1) \text{ nT}$                  | 19   | 18  | -13 | -30 | -38 | -35 | -32 | -12 | 6   | 18  |
|   | $B (\delta B=1 \text{ nT})$                  | 90   | 97  | 97  | 77  | 70  | 52  | 72  | 102 | 104 | 97  |
|   | $\theta_B^\circ (\delta \theta_B = 1^\circ)$ | 78   | 79  | -82 | -67 | -57 | -48 | -63 | -83 | 87  | 79  |
|   | $\Phi_B^\circ (\pm 1^\circ)$                 | 105  | 119 | 140 | 142 | 135 | 56  | 41  | 41  | 50  | 61  |
|   |  |  |     |     |     |     |     |     |     |     |     |

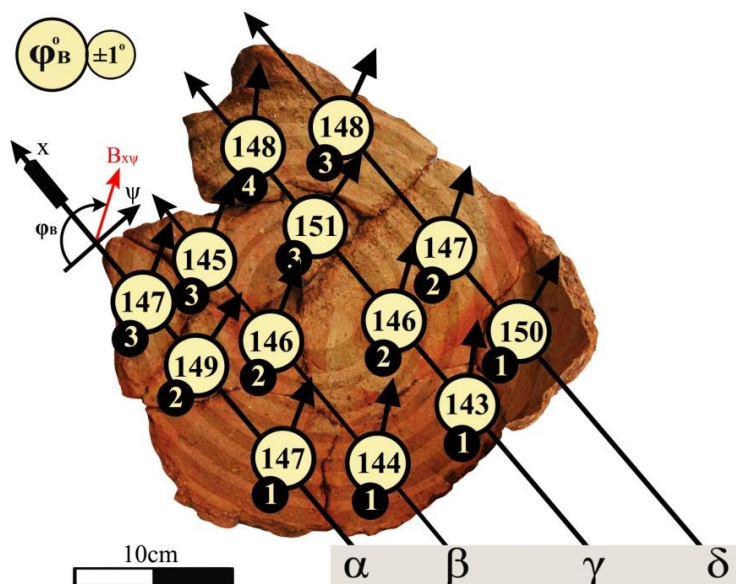
Πίνακας Β2α,β. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μετρήσεων του μαγνητικού πεδίου με τον αισθητήρα στην κατεύθυνση της  $\vec{B}_{x\psi}$  σε όστρακα της βάσης (β) και στην κατεύθυνση της  $\vec{B}_{xz}$  σε όστρακα του σώματος (α) του αγγείου

3.

## ΑΓΓΕΙΟ 4 (α-Σώμα)



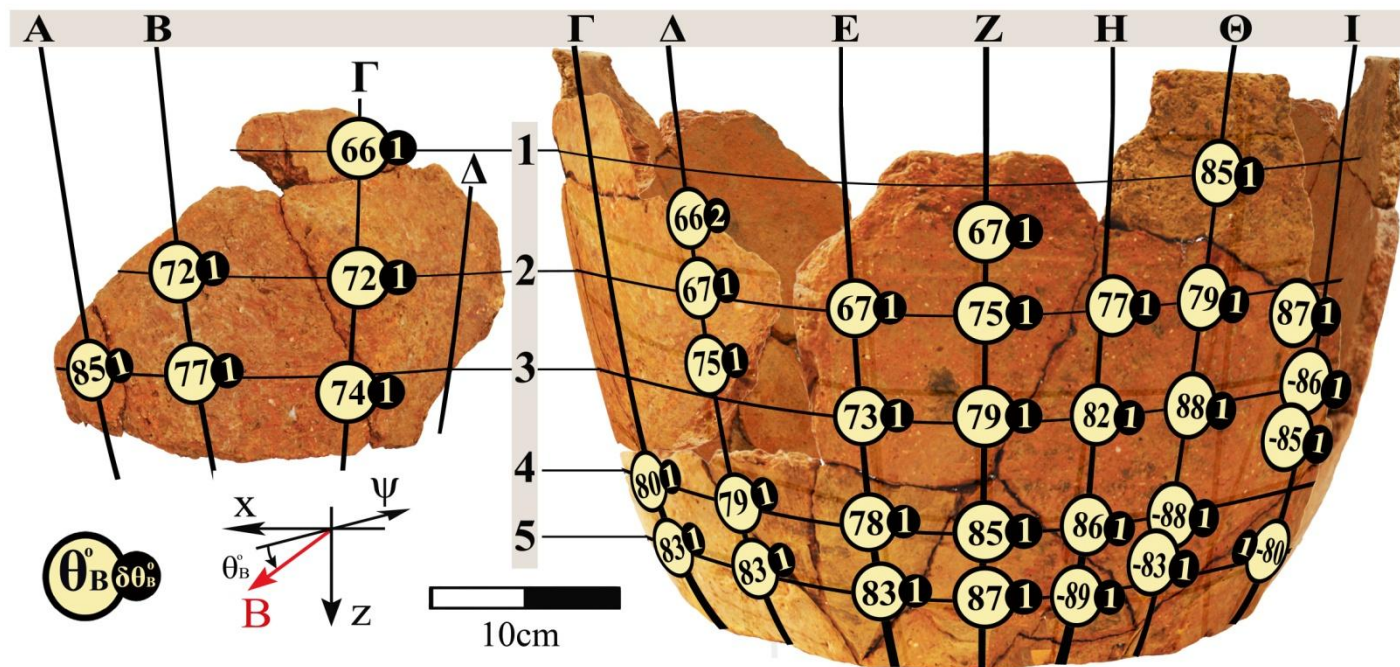
## ΑΓΓΕΙΟ 4 (β-Βάση)



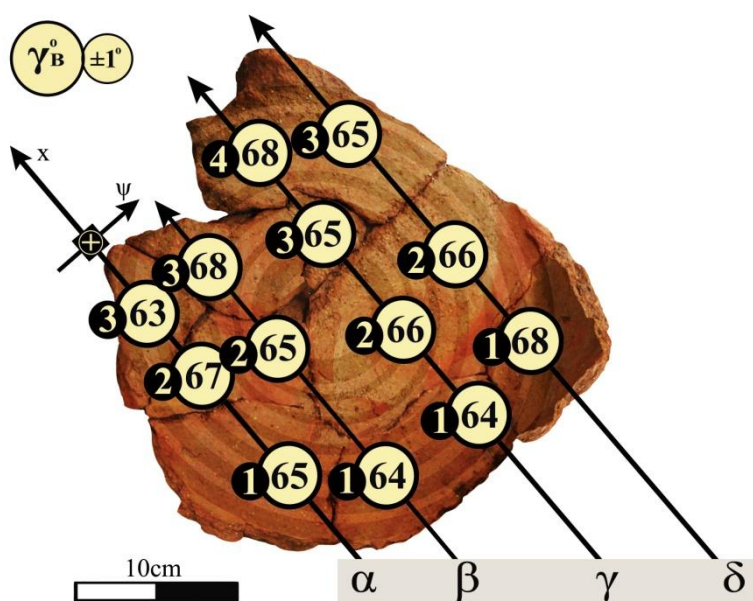
**Σχήμα B5.** Απεικόνιση των μετρούμενων γωνιών  $\Phi_B$  μεταξύ της  $\vec{B}_{xz}$  και των εγκάρσιων αυλακώσεων του σώματος (α) και των γωνιών  $\Phi_B$  μεταξύ της  $\vec{B}_{xw}$  και της σημειωμένης κατεύθυνσης συναρμογής στα θραύσματα της βάσης (β) του αγγείου 4, στα θεωρούμενα συστήματα αναφοράς για τα όστρακα του σώματος και της βάσης των αγγείων. Οι μετρήσεις γίνονται από έναν αισθητήρα σε σταθερή οριζόντια θέση, καθέτως προς την κατακόρυφη συνιστώσα και την οριζόντια συνισταμένη του γήινου μαγνητικού πεδίου.



## ΑΓΓΕΙΟ 4 (α-Σώμα)

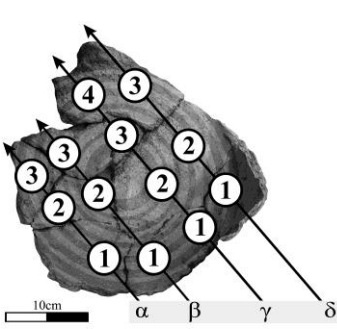


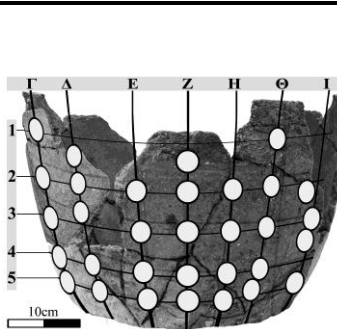
## Αγγείο 4 (β-Βάση)



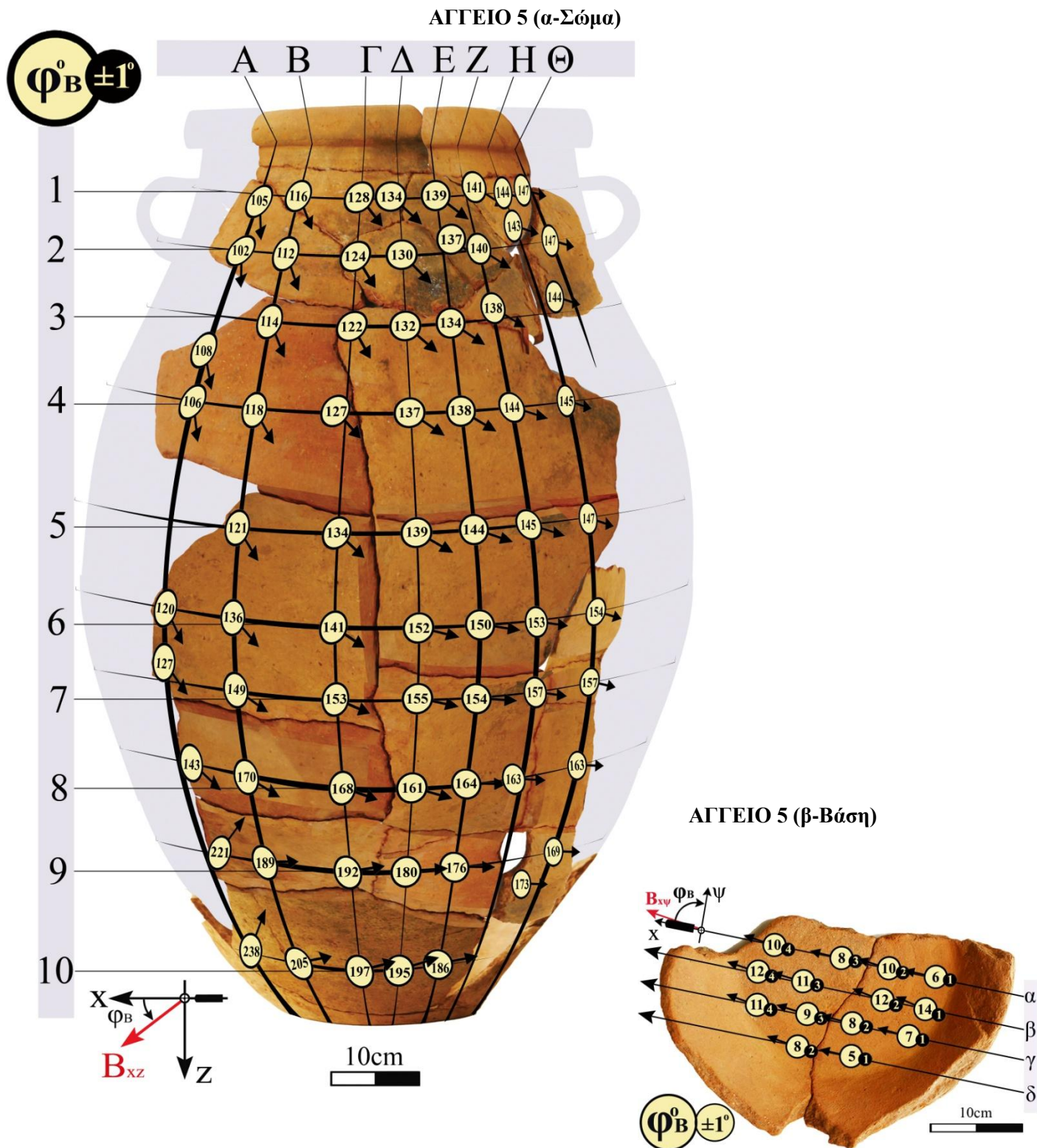
**Σχήμα B6.** Απεικόνιση των υπολογιζόμενων γωνιών  $\theta_B$  μεταξύ της  $\vec{B}$  και της  $\psi$ -κατεύθυνσης του αισθητήρα από μετρήσεις της  $B_{xz}$  και της  $B_\psi$  σε όστρακα του σώματος (α) και των γωνιών  $\gamma_B$  μεταξύ της  $\vec{B}$  και της  $z$ -κατεύθυνσης του αισθητήρα από μετρήσεις της  $B_{x\psi}$  και της  $B_z$ , σε θραύσματα της βάσης (β) του αγγείου 4, από έναν αισθητήρα σε σταθερή οριζόντια θέση, καθέτως προς την κατακόρυφη συνιστώσα και την οριζόντια συνισταμένη του γήινου μαγνητικού πεδίου.

Πίνακας Β3-ΑΓΓΕΙΟ 4

|  | β.Βάση   |     | Μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου στη διεύθυνση της Bxψ |     |     |   |
|---|--|-----|---|-----|-----|---|
|   |  |     | α   | β   | γ   | δ |
| 1   | B <sub>xψ</sub> (±1) nT  | 35  | 36  | 35  | 42  |   |
|   | B <sub>z</sub> (±1) nT   | 16  | 17  | 17  | 17  |   |
|   | B (δB=1 nT)  | 38  | 40  | 39  | 45  |   |
|   | γ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> (δγ <sub>B</sub> =1 <sup>ο</sup> ) | 65  | 64  | 64  | 68  |   |
|   | Φ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> (±1 <sup>ο</sup> )                 | 147 | 144   | 143 | 150 |   |
|   |  |     |   |     |     |   |
| 2   | B <sub>xψ</sub> (±1) nT  | 40  | 39  | 38  | 38  |   |
|   | B <sub>z</sub> (±1) nT   | 17  | 18  | 17  | 17  |   |
|   | B (δB=1 nT)  | 43  | 43  | 42  | 42  |   |
|   | γ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> (δγ <sub>B</sub> =1 <sup>ο</sup> ) | 67  | 65  | 66  | 66  |   |
|   | Φ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> (±1 <sup>ο</sup> )                 | 149 | 146   | 146 | 147 |   |
|   |  |     |   |     |     |   |
| 3   | B <sub>xψ</sub> (±1) nT  | 36  | 40  | 41  | 35  |   |
|   | B <sub>z</sub> (±1) nT   | 18  | 16  | 19  | 16  |   |
|   | B (δB=1 nT)  | 40  | 43  | 45  | 38  |   |
|   | γ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> (δγ <sub>B</sub> =1 <sup>ο</sup> ) | 63  | 68  | 65  | 65  |   |
|   | Φ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> (±1 <sup>ο</sup> )                 | 147 | 145   | 151 | 148 |   |
|   |  |     |   |     |     |   |
| 4   | B <sub>xψ</sub> (±1) nT  |     |   | 40  |     |   |
|   | B <sub>z</sub> (±1) nT   |     |   | 16  |     |   |
|   | B (δB=1 nT)  |     |   | 43  |     |   |
|   | γ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> (δγ <sub>B</sub> =1 <sup>ο</sup> ) |     |   | 68  |     |   |
|   | Φ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> (±1 <sup>ο</sup> )                 |     |   | 148 |     |   |
|   |  |     |   |     |     |   |

|  | α. Σώμα  |    | Μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου στη διεύθυνση της Bxz |    |     |     |     |     |     |     |
|--|--|----|---|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|  |  |    | Α   | Β  | Γ   | Δ   | Ε   | Ζ   | Η   | Θ   |
| 1  | B <sub>xz</sub> (±1) nT  |    |   | 35 |     |     |     | 51  | 52  |     |
|  | B <sub>ψ</sub> (±1) nT   |    |   | 17 |     |     |     | 3   | -3  |     |
|  | B (δB=1 nT)  |    |   | 39 |     |     |     | 51  | 52  |     |
|  | Θ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> (δΘ <sub>B</sub> =1 <sup>ο</sup> ) |    |   | 64 |     |     |     | 87  | -87 |     |
|  | Φ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> (±1 <sup>ο</sup> )                 |    |   | 81 |     |     |     | 138 | 139 |     |
|  |  |    |   |    |     |     |     |     |     |     |
| 2  | B <sub>xz</sub> (±1) nT  |    | 45  | 38 | 39  | 46  | 50  | 52  | 53  |     |
|  | B <sub>ψ</sub> (±1) nT   |    | 13  | 17 | 17  | 13  | 8   | 2   | -5  |     |
|  | B (δB=1 nT)  |    | 47  | 42 | 43  | 48  | 51  | 52  | 53  |     |
|  | Θ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> (δΘ <sub>B</sub> =1 <sup>ο</sup> ) |    | 74  | 66 | 66  | 74  | 81  | 88  | -85 |     |
|  | Φ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> (±1 <sup>ο</sup> )                 |    | 58  | 82 | 100 | 120 | 132 | 136 | 139 |     |
|  |  |    |   |    |     |     |     |     |     |     |
| 3  | B <sub>xz</sub> (±1) nT  | 49 | 47  | 42 | 43  | 48  | 52  | 52  | 53  | 46  |
|  | B <sub>ψ</sub> (±1) nT   | 8  | 12  | 16 | 15  | 12  | 6   | 2   | -6  | -11 |
|  | B (δB=1 nT)  | 50 | 48  | 45 | 46  | 50  | 52  | 52  | 53  | 47  |
|  | Θ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> (δΘ <sub>B</sub> =1 <sup>ο</sup> ) | 81 | 76  | 69 | 71  | 76  | 83  | 88  | -84 | -77 |
|  | Φ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> (±1 <sup>ο</sup> )                 | 49 | 61  | 83 | 99  | 119 | 132 | 135 | 140 | 138 |
|  |  |    |   |    |     |     |     |     |     |     |
| 4  | B <sub>xz</sub> (±1) nT  |    |   | 46 | 46  | 49  | 52  | 54  | 50  | 44  |
|  | B <sub>ψ</sub> (±1) nT   |    |   | 11 | 12  | 10  | 4   | -1  | -8  | -13 |
|  | B (δB=1 nT)  |    |   | 47 | 48  | 50  | 52  | 54  | 51  | 46  |
|  | Θ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> (δΘ <sub>B</sub> =1 <sup>ο</sup> ) |    |   | 77 | 75  | 78  | 86  | -89 | -81 | -74 |
|  | Φ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> (±1 <sup>ο</sup> )                 |    |   | 83 | 98  | 115 | 129 | 137 | 140 | 141 |
|  |  |    |   |    |     |     |     |     |     |     |
| 5  | B <sub>xz</sub> (±1) nT  |    |   | 51 | 50  | 52  | 53  | 53  | 48  | 43  |
|  | B <sub>ψ</sub> (±1) nT   |    |   | 8  | 9   | 6   | 1   | -4  | -10 | -15 |
|  | B (δB=1 nT)  |    |   | 52 | 51  | 52  | 53  | 53  | 49  | 46  |
|  | Θ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> (δΘ <sub>B</sub> =1 <sup>ο</sup> ) |    |   | 81 | 80  | 83  | 89  | -86 | -78 | -71 |
|  | Φ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> (±1 <sup>ο</sup> )                 |    |   | 85 | 101 | 115 | 127 | 137 | 143 | 149 |
|  |  |    |   |    |     |     |     |     |     |     |

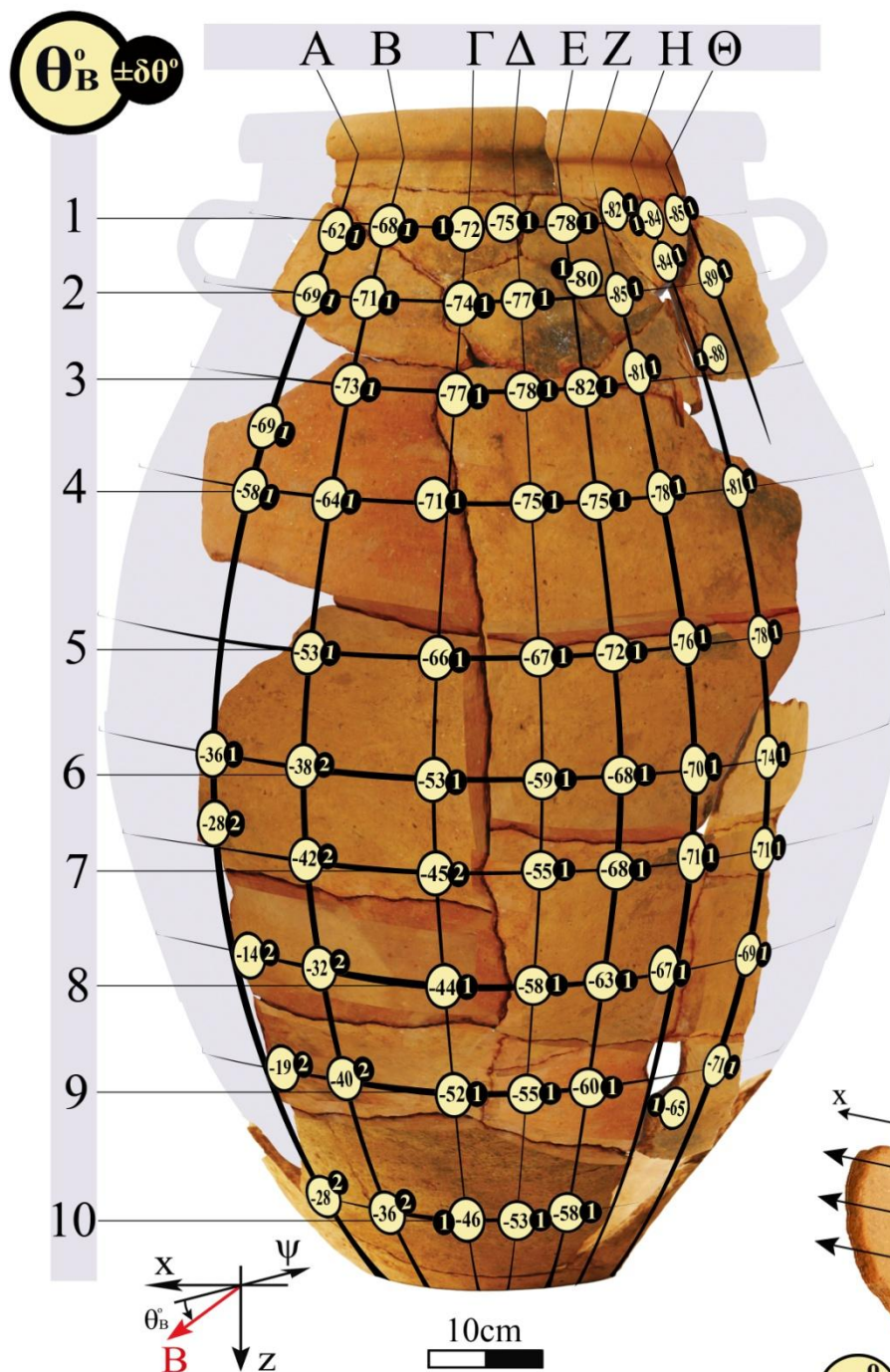
Πίνακας Β3α,β. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μετρήσεων του μαγνητικού πεδίου με τον αισθητήρα στην κατεύθυνση της  $\vec{B}_{xψ}$  σε όστρακα της βάσης (β) και στην κατεύθυνση της  $\vec{B}_{xz}$  σε όστρακα του σώματος (α) του αγγείου 4.



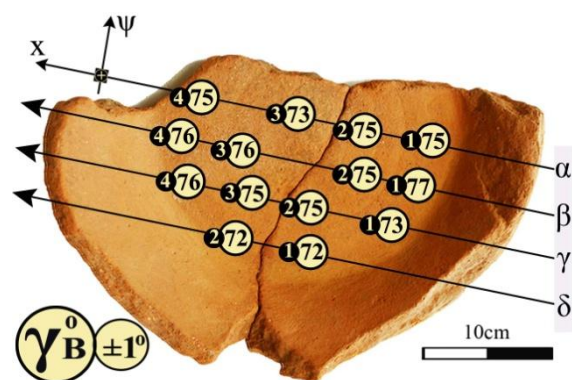
**Σχήμα B7.** Απεικόνιση των μετρούμενων γωνιών  $\Phi_B$  μεταξύ της  $\vec{B}_{xz}$  και των εγκάρσιων αυλακώσεων του σώματος (**α**) και των γωνιών  $\Phi_B$  μεταξύ της  $\vec{B}_{xy}$  και της σημειωμένης κατεύθυνσης συναρμογής στα θραύσματα της βάσης (**β**) του αγγείου 5, στα θεωρούμενα συστήματα αναφοράς για τα όστρακα του σώματος και της βάσης των αγγείων. Οι μετρήσεις γίνονται από έναν αισθητήρα σε σταθερή οριζόντια θέση, καθέτως προς την κατακόρυφη συνιστώσα και την οριζόντια συνισταμένη του γήινου μαγνητικού πεδίου.



## ΑΓΓΕΙΟ 5 (α-Σώμα)



## Αγγείο 5 (β-Βάση)



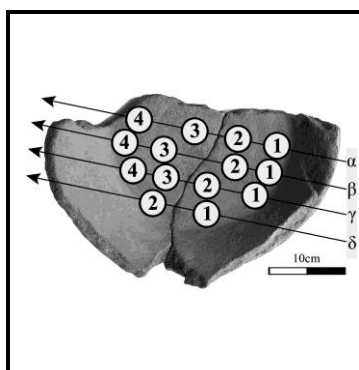
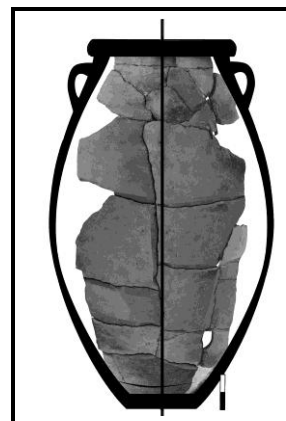
**Σχήμα B8.** Απεικόνιση των υπολογιζόμενων γωνιών  $\theta_B$  μεταξύ της  $\vec{B}$  και της  $\psi$ -κατεύθυνσης του αισθητήρα από μετρήσεις της  $B_{xz}$  και της  $B_\psi$  σε όστρακα του σώματος (α) και των γωνιών  $\gamma_B$  μεταξύ της  $\vec{B}$  και της  $z$ -κατεύθυνσης του αισθητήρα από μετρήσεις της  $B_{x\psi}$  και της  $B_z$ , σε θραύσματα της βάσης (β) του αγγείου 5, από έναν αισθητήρα σε σταθερή οριζόντια θέση, καθέτως προς την κατακόρυφη συνιστώσα και την οριζόντια συνισταμένη του γήινου μαγνητικού πεδίου.

Πίνακας B4a-ΑΓΓΕΙΟ 5 (α-Σώμα)

|    | Αγγείο 5<br>α. Σώμα                  | Μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου στην κατεύθυνση της $B_{xz}$ |       |       |       |       |       |       |       |
|----|--------------------------------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|    |                                      | A  | B     | Γ     | Δ     | Ε     | Ζ     | Η     | Θ     |
| 1  | $B_{xz} (\pm 1) \text{ nT}$          | 45   | 53    | 58    | 62    | 66    | 66    | 71    | 67    |
|    | $B_{\psi} (\pm 1) \text{ nT}$        | -24  | -22   | -19   | -17   | -14   | -9    | -7    | -6    |
|    | $B (\delta B=1 \text{ nT})$          | 51   | 57    | 61    | 64    | 67    | 67    | 71    | 67    |
|    | $\theta_B^\circ \pm \delta \theta_B$ | -62±1  | -68±1 | -72±1 | -75±1 | -78±1 | -82±1 | -84±1 | -85±1 |
|    | $\phi_B^\circ (\pm 1^\circ)$         | 105  | 116   | 128   | 134   | 139   | 141   | 144   | 147   |
| 2  | $B_{xz} (\pm 1) \text{ nT}$          | 55   | 57    | 61    | 64    | 64    | 70    | 70    | 72    |
|    | $B_{\psi} (\pm 1) \text{ nT}$        | -21  | -20   | -18   | -15   | -12   | -6    | -7    | -1    |
|    | $B (\delta B=1 \text{ nT})$          | 59   | 60    | 64    | 66    | 65    | 70    | 70    | 72    |
|    | $\theta_B^\circ \pm \delta \theta_B$ | -69±1  | -71±1 | -74±1 | -77±1 | -80±1 | -85±1 | -84±1 | -89±1 |
|    | $\phi_B^\circ (\pm 1^\circ)$         | 102  | 112   | 124   | 130   | 137   | 140   | 143   | 147   |
| 3  | $B_{xz} (\pm 1) \text{ nT}$          | 53   | 60    | 64    | 66    | 66    | 68    | 68    |       |
|    | $B_{\psi} (\pm 1) \text{ nT}$        | -21  | -19   | -15   | -14   | -10   | -11   | -3    |       |
|    | $B (\delta B=1 \text{ nT})$          | 57   | 63    | 66    | 67    | 67    | 69    | 68    |       |
|    | $\theta_B^\circ \pm \delta \theta_B$ | -69±1  | -73   | -77   | -78   | -82   | -81   | -88   |       |
|    | $\phi_B^\circ (\pm 1^\circ)$         | 108  | 114   | 122   | 132   | 134   | 138   | 144   |       |
| 4  | $B_{xz} (\pm 1) \text{ nT}$          | 41   | 49    | 57    | 61    | 61    | 65    | 66    |       |
|    | $B_{\psi} (\pm 1) \text{ nT}$        | -26  | -24   | -20   | -17   | -17   | -14   | -11   |       |
|    | $B (\delta B=1 \text{ nT})$          | 48   | 54    | 60    | 63    | 63    | 66    | 67    |       |
|    | $\theta_B^\circ \pm \delta \theta_B$ | -58±1  | -64±1 | -71±1 | -75±1 | -75   | -78   | -81   |       |
|    | $\phi_B^\circ (\pm 1^\circ)$         | 106  | 118   | 127   | 137   | 138±1 | 144±1 | 145±1 |       |
| 5  | $B_{xz} (\pm 1) \text{ nT}$          |  | 38    | 50    | 51    | 57    | 62    | 64    |       |
|    | $B_{\psi} (\pm 1) \text{ nT}$        |  | -27   | -23   | -22   | -19   | -16   | -14   |       |
|    | $B (\delta B=1 \text{ nT})$          |  | 46    | 55    | 55    | 60    | 64    | 65    |       |
|    | $\theta_B^\circ \pm \delta \theta_B$ |  | -55±1 | -66±1 | -67   | -72   | -76   | -78   |       |
|    | $\phi_B^\circ (\pm 1^\circ)$         |  | 121   | 134   | 139±1 | 144±1 | 145±1 | 147±1 |       |
| 6  | $B_{xz} (\pm 1) \text{ nT}$          | 21   | 22    | 34    | 41    | 51    | 56    | 59    |       |
|    | $B_{\psi} (\pm 1) \text{ nT}$        | -29  | -29   | -26   | -25   | -21   | -21   | -17   |       |
|    | $B (\delta B=1 \text{ nT})$          | 35   | 36    | 43    | 48    | 55    | 60    | 61    |       |
|    | $\theta_B^\circ \pm \delta \theta_B$ | -36±2  | -38±2 | -53±1 | -59±1 | -68±1 | -70±1 | -74±1 |       |
|    | $\phi_B^\circ (\pm 1^\circ)$         | 120  | 136   | 141   | 152   | 150   | 153   | 154   |       |
| 7  | $B_{xz} (\pm 1) \text{ nT}$          | 16   | 25    | 27    | 37    | 53    | 53    | 51    |       |
|    | $B_{\psi} (\pm 1) \text{ nT}$        | -30  | -28   | -27   | -26   | -22   | -19   | -18   |       |
|    | $B (\delta B=1 \text{ nT})$          | 34   | 37    | 38    | 45    | 57    | 56    | 54    |       |
|    | $\theta_B^\circ \pm \delta \theta_B$ | -28±2  | -42±2 | -45±2 | -55±1 | -68±1 | -71±1 | -71±1 |       |
|    | $\phi_B^\circ (\pm 1^\circ)$         | 127  | 149   | 153   | 155   | 154   | 157   | 157   |       |
| 8  | $B_{xz} (\pm 1) \text{ nT}$          | 8  | 19    | 28    | 40    | 47    | 52    | 54    |       |
|    | $B_{\psi} (\pm 1) \text{ nT}$        | -32  | -31   | -29   | -25   | -24   | -22   | -21   |       |
|    | $B (\delta B=1 \text{ nT})$          | 33   | 36    | 40    | 47    | 53    | 56    | 58    |       |
|    | $\theta_B^\circ \pm \delta \theta_B$ | -14±2  | -32±2 | -44±1 | -58±1 | -63±1 | -67±1 | -69±1 |       |
|    | $\phi_B^\circ (\pm 1^\circ)$         | 143  | 170   | 168   | 161   | 164   | 163   | 163   |       |
| 9  | $B_{xz} (\pm 1) \text{ nT}$          | 11   | 24    | 34    | 38    | 44    | 49    | 56    |       |
|    | $B_{\psi} (\pm 1) \text{ nT}$        | -32  | -29   | -27   | -27   | -26   | -23   | -20   |       |
|    | $B (\delta B=1 \text{ nT})$          | 33   | 37    | 43    | 46    | 51    | 54    | 59    |       |
|    | $\theta_B^\circ \pm \delta \theta_B$ | -19±2  | -40±2 | -52±1 | -55±1 | -60±1 | -65±1 | -71±1 |       |
|    | $\phi_B^\circ (\pm 1^\circ)$         | 221  | 189   | 192   | 180   | 176   | 173   | 169   |       |
| 10 | $B_{xz} (\pm 1) \text{ nT}$          | 17   | 22    | 31    | 37    | 43    |       |       |       |
|    | $B_{\psi} (\pm 1) \text{ nT}$        | -32  | -31   | -30   | -28   | -27   |       |       |       |
|    | $B (\delta B=1 \text{ nT})$          | 36   | 38    | 43    | 46    | 51    |       |       |       |
|    | $\theta_B^\circ \pm \delta \theta_B$ | -28±2  | -36±2 | -46±1 | -53±1 | -58±1 |       |       |       |
|    | $\phi_B^\circ (\pm 1^\circ)$         | 238  | 205   | 197   | 195   | 186   |       |       |       |

Πίνακας B4a. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μετρήσεων του μαγνητικού πεδίου με τον αισθητήρα στην κατεύθυνση της  $\vec{B}_{xz}$  σε όστρακα του σώματος (α) του αγγείου 5.

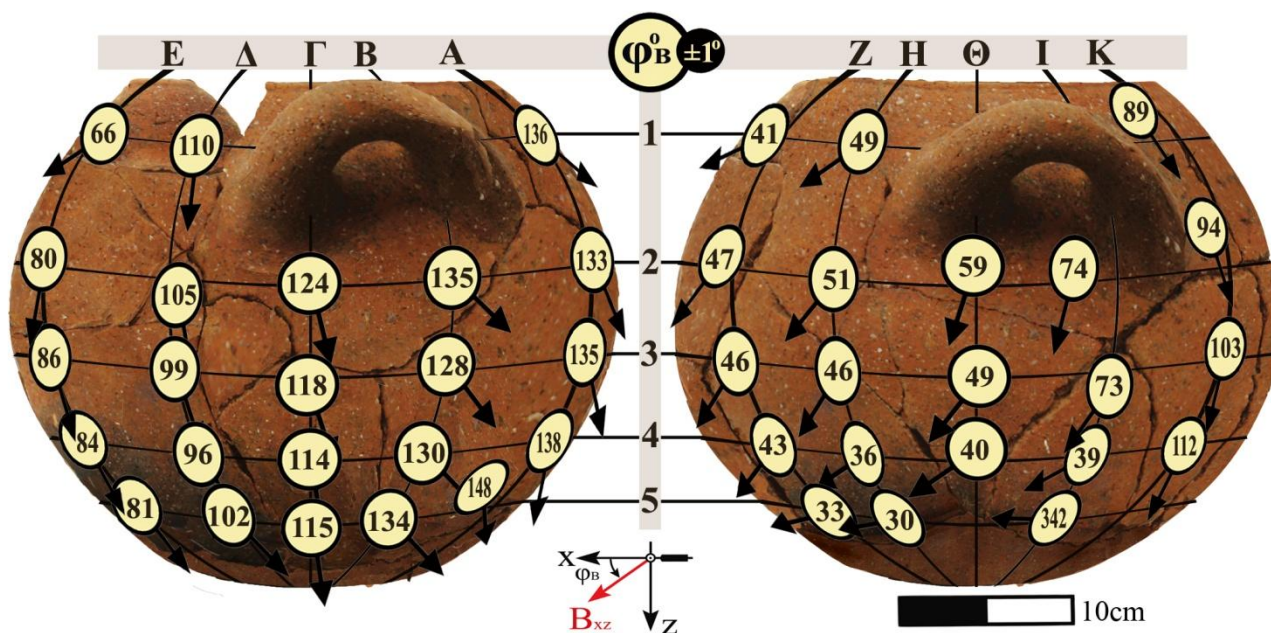
Πίνακας B4β-ΑΓΓΕΙΟ 5 (β-Βάση)



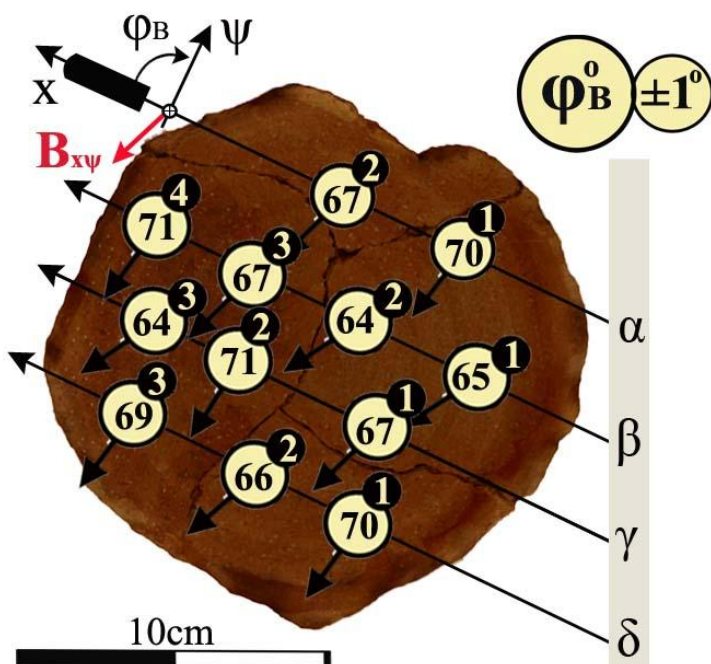
| Αγγείο 5<br>β.Βάση |  | Μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου στην κατεύθυνση της B <sub>xψ</sub> |    |    |    |
|--------------------|--|---|----|----|----|
|                    |  | α   | β  | γ  | δ  |
| 1                  | B <sub>xψ</sub> ( ±1) nT                                       | 55  | 67 | 59 | 57 |
|                    | B <sub>z</sub> ( ±1) nT  | 15  | 16 | 18 | 18 |
|                    | B (δB=1 nT)  | 57  | 69 | 62 | 60 |
|                    | γ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> (δγ <sub>B</sub> =1 <sup>ο</sup> ) | 75  | 77 | 73 | 72 |
|                    | φ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> (±1 <sup>ο</sup> )                 | 6   | 14 | 7  | 5  |
|                    |  |   |    |    |    |
| 2                  | B <sub>xψ</sub> ( ±1) nT                                       | 62  | 65 | 57 | 58 |
|                    | B <sub>z</sub> ( ±1) nT  | 17  | 18 | 15 | 19 |
|                    | B (δB=1 nT)  | 64  | 67 | 59 | 61 |
|                    | γ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> (δγ <sub>B</sub> =1 <sup>ο</sup> ) | 75  | 75 | 75 | 72 |
|                    | φ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> (±1 <sup>ο</sup> )                 | 10  | 12 | 8  | 8  |
|                    |  |   |    |    |    |
| 3                  | B <sub>xψ</sub> ( ±1) nT                                       | 58  | 62 | 61 |    |
|                    | B <sub>z</sub> ( ±1) nT  | 18  | 16 | 16 |    |
|                    | B (δB=1 nT)  | 61  | 64 | 63 |    |
|                    | γ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> (δγ <sub>B</sub> =1 <sup>ο</sup> ) | 73  | 76 | 75 |    |
|                    | φ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> (±1 <sup>ο</sup> )                 | 8   | 11 | 9  |    |
|                    |  |   |    |    |    |
| 4                  | B <sub>xψ</sub> ( ±1) nT                                       | 60  | 61 | 62 |    |
|                    | B <sub>z</sub> ( ±1) nT  | 16  | 15 | 15 |    |
|                    | B (δB=1 nT)  | 62  | 63 | 64 |    |
|                    | γ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> (δγ <sub>B</sub> =1 <sup>ο</sup> ) | 75  | 76 | 76 |    |
|                    | φ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> (±1 <sup>ο</sup> )                 | 10  | 12 | 11 |    |
|                    |  |   |    |    |    |

Πίνακας B4β. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μετρήσεων του μαγνητικού πεδίου με τον αισθητήρα στην κατεύθυνση της  $\vec{B}_{xψ}$  σε όστρακα της βάσης του αγγείου 5.

## ΑΓΓΕΙΟ 6 (α-Σώμα)



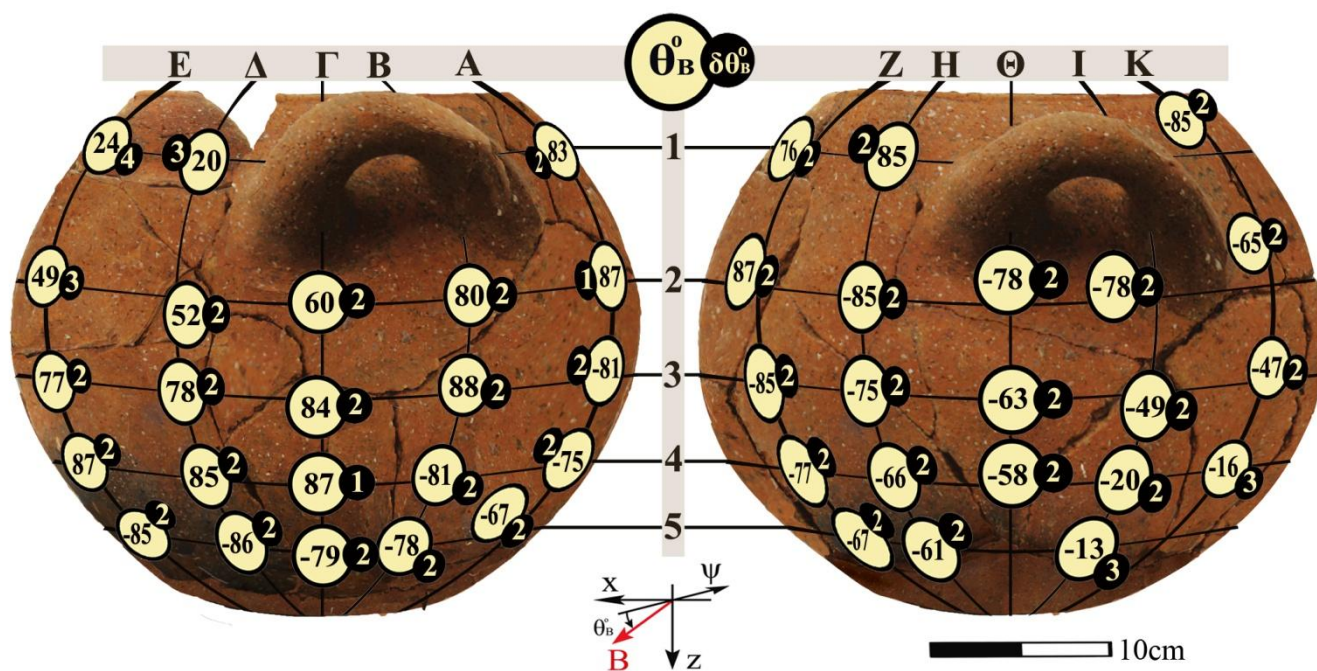
## ΑΓΓΕΙΟ 6 (β-Βάση)



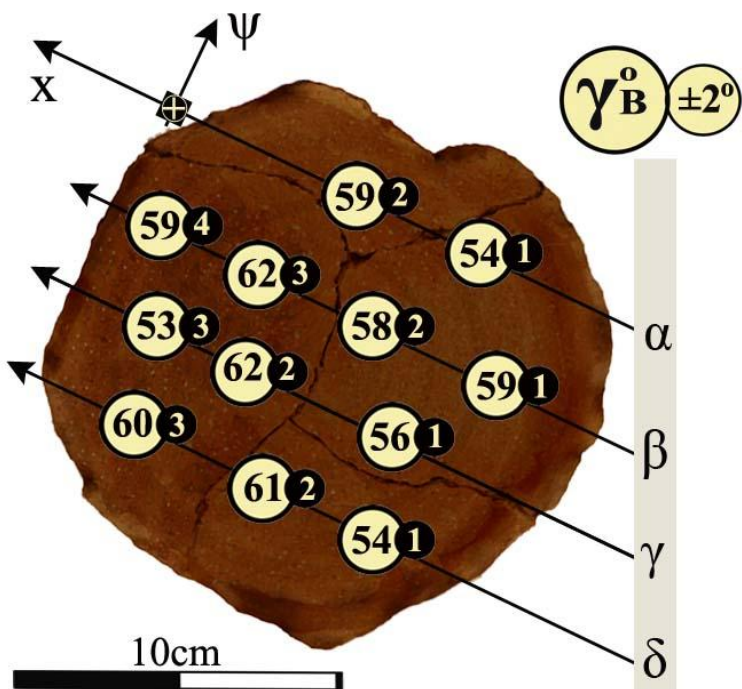
**Σχήμα B9.** Απεικόνιση των μετρούμενων γωνιών  $\phi_B$  μεταξύ της  $\vec{B}_{xz}$  και των εγκάρσιων αυλακώσεων του σώματος (**α**) και των γωνιών  $\phi_B$  μεταξύ της  $\vec{B}_{xz}$  και της σημειωμένης κατεύθυνσης συναρμογής στα θραύσματα της βάσης (**β**) του αγγείου 6, στα θεωρούμενα συστήματα αναφοράς για τα όστρακα του σώματος και της βάσης των αγγείων. Οι μετρήσεις γίνονται από έναν αισθητήρα σε σταθερή οριζόντια θέση, καθέτως προς την κατακόρυφη συνιστώσα και την οριζόντια συνισταμένη του γήινου μαγνητικού πεδίου.



## ΑΓΓΕΙΟ 6 (α-Σώμα)



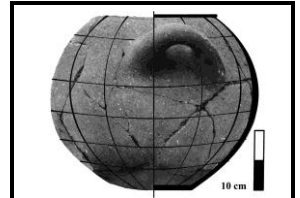
## Αγγείο 6 (β-Βάση)



**Σχήμα B10.** Απεικόνιση των υπολογιζόμενων γωνιών  $\theta_B$  μεταξύ της  $\vec{B}$  και της  $\psi$ -κατεύθυνσης του αισθητήρα από μετρήσεις της  $B_{xz}$  και της  $B_\psi$  σε όστρακα του σώματος (α) και των γωνιών  $\gamma_B$  μεταξύ της  $\vec{B}$  και της  $z$ -κατεύθυνσης του αισθητήρα από μετρήσεις της  $B_{x\psi}$  και της  $B_z$ , σε θραύσματα της βάσης (β) του αγγείου 6, από έναν αισθητήρα σε σταθερή οριζόντια θέση, καθέτως προς την κατακόρυφη συνιστώσα και την οριζόντια συνισταμένη του γήινου μαγνητικού πεδίου



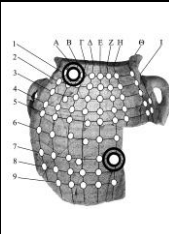

Πίνακας B5α,β -ΑΓΓΕΙΟ 6

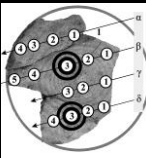



|   | Αγγείο 6<br>β.Βάση   | Μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου στην κατεύθυνση της B <sub>xψ</sub> |    |    |    |
|---|--|---|----|----|----|
|   |  | α   | β  | γ  | δ  |
| 1 | B <sub>xψ</sub> (±1) nT  | 21  | 20 | 21 | 21 |
|   | B <sub>z</sub> (±1) nT   | 15  | 12 | 14 | 15 |
|   | B (δB=1 nT)  | 26  | 23 | 25 | 26 |
|   | γ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> (δγ <sub>B</sub> =2 <sup>ο</sup> ) | 54  | 59 | 56 | 54 |
|   | φ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> (±1 <sup>ο</sup> )                 | 70  | 65 | 67 | 70 |
|   |  |   |    |    |    |
| 2 | B <sub>xψ</sub> (±1) nT  | 23  | 24 | 28 | 22 |
|   | B <sub>z</sub> (±1) nT   | 14  | 15 | 15 | 12 |
|   | B (δB=1 nT)  | 27  | 28 | 32 | 25 |
|   | γ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> (δγ <sub>B</sub> =2 <sup>ο</sup> ) | 59  | 58 | 62 | 61 |
|   | φ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> (±1 <sup>ο</sup> )                 | 67  | 64 | 71 | 66 |
|   |  |   |    |    |    |
| 3 | B <sub>xψ</sub> (±1) nT  |   | 24 | 20 | 24 |
|   | B <sub>z</sub> (±1) nT   |   | 13 | 15 | 14 |
|   | B (δB=1 nT)  |   | 27 | 25 | 28 |
|   | γ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> (δγ <sub>B</sub> =2 <sup>ο</sup> ) |   | 62 | 53 | 60 |
|   | φ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> (±1 <sup>ο</sup> )                 |   | 67 | 64 | 69 |
|   |  |   |    |    |    |
| 4 | B <sub>xψ</sub> (±1) nT  |   | 25 |    |    |
|   | B <sub>z</sub> (±1) nT   |   | 15 |    |    |
|   | B (δB=1 nT)  |   | 29 |    |    |
|   | γ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> (δγ <sub>B</sub> =2 <sup>ο</sup> ) |   | 59 |    |    |
|   | φ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> (±1 <sup>ο</sup> )                 |   | 71 |    |    |
|   |  |   |    |    |    |

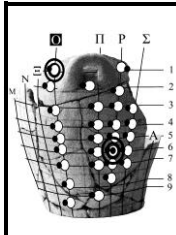
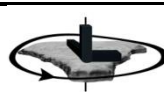
|   | Αγγείο 6<br>α. Σώμα                            | Μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου στην κατεύθυνση της B <sub>xz</sub> |       |       |       |       |       |       |       | I     | K     |
|---|--|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|   |  | A   | B     | Γ     | Δ     | E     | Z     | H     | Θ     |       |       |
| 1 | B <sub>xz</sub> (±1) nT                        | 32  |       |       | 6     | 6     | 29    | 38    |       |       | 37    |
|   | B <sub>ψ</sub> (±1) nT                         | 4   |       |       | 17    | 14    | 7     | 3     |       |       | -3    |
|   | B (δB=1 nT)                                    | 32  |       |       | 18    | 15    | 30    | 38    |       |       | 37    |
|   | θ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> ± δθ <sub>B</sub>  | 83±2  |       |       | 20±3  | 24±4  | 76±2  | 85±2  |       |       | -85±2 |
|   | φ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> (±1 <sup>ο</sup> ) | 136   |       |       | 110   | 66    | 41    | 49    |       |       | 89    |
|   |  |   |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 2 | B <sub>xz</sub> (±1) nT                        | 39  | 35    | 24    | 20    | 17    | 37    | 34    | 35    | 35    | 27    |
|   | B <sub>ψ</sub> (±1) nT                         | 2   | 6     | 14    | 16    | 15    | 2     | -3    | -7    | -7    | -13   |
|   | B (δB=1 nT)                                    | 39  | 36    | 28    | 25    | 22    | 37    | 34    | 36    | 36    | 30    |
|   | θ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> ± δθ <sub>B</sub>  | 87±1  | 80±2  | 60±2  | 52±2  | 49±3  | 87±2  | -85±2 | -78±2 | -78±2 | -65±2 |
|   | φ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> (±1 <sup>ο</sup> ) | 133   | 135   | 124   | 105   | 80    | 47    | 51    | 59    | 74    | 94    |
|   |  |   |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 3 | B <sub>xz</sub> (±1) nT                        | 35  | 37    | 37    | 34    | 31    | 34    | 32    | 25    | 18    | 18    |
|   | B <sub>ψ</sub> (±1) nT                         | -5  | 1     | 4     | 7     | 7     | -3    | -8    | -13   | -16   | -17   |
|   | B (δB=1 nT)                                    | 35  | 37    | 37    | 35    | 32    | 34    | 33    | 28    | 24    | 25    |
|   | θ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> ± δθ <sub>B</sub>  | -81±2   | 88±2  | 84±2  | 78±2  | 77±2  | -85±2 | -75±2 | -63±2 | -49±2 | -47±2 |
|   | φ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> (±1 <sup>ο</sup> ) | 135   | 128   | 118   | 99    | 86    | 46    | 46    | 49    | 73    | 103   |
|   |  |   |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 4 | B <sub>xz</sub> (±1) nT                        | 31  | 33    | 39    | 37    | 38    | 32    | 26    | 24    | 7     | 5     |
|   | B <sub>ψ</sub> (±1) nT                         | -8  | -5    | 2     | 3     | 2     | -7    | -12   | -15   | -19   | -18   |
|   | B (δB=1 nT)                                    | 32  | 33    | 39    | 37    | 38    | 33    | 28    | 28    | 20    | 19    |
|   | θ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> ± δθ <sub>B</sub>  | -75±2   | -81±2 | 87±1  | 85±2  | 87±2  | -77±2 | -66±2 | -58±2 | -20±3 | -16±3 |
|   | φ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> (±1 <sup>ο</sup> ) | 138   | 130   | 114   | 96    | 84    | 43    | 36    | 40    | 39    | 112   |
|   |  |   |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 5 | B <sub>xz</sub> (±1) nT                        | 25  | 34    | 33    | 34    | 34    | 27    | 23    |       | 4     |       |
|   | B <sub>ψ</sub> (±1) nT                         | -11   | -7    | -6    | -2    | -3    | -12   | -13   |       | -17   |       |
|   | B (δB=1 nT)                                    | 27  | 35    | 34    | 34    | 34    | 29    | 26    |       | 17    |       |
|   | θ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> ± δθ <sub>B</sub>  | -67±2   | -78±2 | -79±2 | -86±2 | -85±2 | -67±2 | -61±2 |       | -13±3 |       |
|   | φ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> (±1 <sup>ο</sup> ) | 148   | 134   | 115   | 102   | 81    | 33    | 30    |       | 342   |       |
|   |  |   |       |       |       |       |       |       |       |       |       |

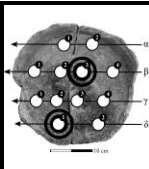

Πίνακας B5α,β. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μετρήσεων του μαγνητικού πεδίου με τον αισθητήρα στην κατεύθυνση της  $\vec{B}_{xψ}$  σε όστρακα της βάσης (β) και στην κατεύθυνση της  $\vec{B}_{xz}$  σε όστρακα του σώματος (α) του αγγείου 6.

|  | Πίνακας Β6          |                         | Θέση Β1                  |                          |                          |             |                             |                              |                             |                              | Θέση Ζ7                  |                          |                          |             |                             |                              |  |                              |
|---|---------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------|-----------------------------|------------------------------|---|------------------------------|
|   | ΑΓΓΕΙΟ 1<br>α. Σώμα |                         |                          |                          |                          |             |                             |                              |                             |                              |                          |                          |                          |             |                             |                              |   |                              |
|   | n                   | φ <sub>δ</sub><br>(±1°) | B <sub>x</sub><br>(±1nT) | B <sub>ψ</sub><br>(±1nT) | B <sub>z</sub><br>(±1nT) | B<br>(±1nT) | θ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | δθ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | φ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | δφ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | B <sub>x</sub><br>(±1nT) | B <sub>ψ</sub><br>(±1nT) | B <sub>z</sub><br>(±1nT) | B<br>(±1nT) | θ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | δθ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | φ <sub>B</sub> <sup>ο</sup>   | δφ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> |
|   | 1                   | 0                       | 33                       | 32                       | 0                        | 46          | 46                          | 2                            | 0                           | 2                            | 81                       | 8                        | 0                        | 81          | 84                          | 1                            | 0   | 1                            |
|   | 2                   | 30                      | 32                       | 33                       | 15                       | 48          | 47                          | 2                            | 25                          | 2                            | 68                       | 7                        | 43                       | 81          | 85                          | 1                            | 32  | 1                            |
|   | 3                   | 60                      | 16                       | 31                       | 31                       | 47          | 48                          | 2                            | 63                          | 2                            | 37                       | 8                        | 72                       | 81          | 84                          | 1                            | 63  | 1                            |
|   | 4                   | 90                      | -1                       | 30                       | 33                       | 45          | 48                          | 2                            | 92                          | 2                            | -1                       | 6                        | 80                       | 80          | 86                          | 1                            | 91  | 1                            |
|   | 5                   | 120                     | -18                      | 31                       | 29                       | 46          | 48                          | 2                            | 122                         | 2                            | -37                      | 8                        | 72                       | 81          | 84                          | 1                            | 117   | 1                            |
|   | 6                   | 150                     | -32                      | 32                       | 15                       | 48          | 48                          | 2                            | 155                         | 2                            | -70                      | 9                        | 40                       | 81          | 84                          | 1                            | 150   | 1                            |
|   | 7                   | 180                     | -35                      | 32                       | 0                        | 47          | 48                          | 2                            | 180                         | 2                            | -80                      | 10                       | -1                       | 81          | 83                          | 1                            | 181   | 1                            |
|   | 8                   | 210                     | -27                      | 33                       | -19                      | 47          | 45                          | 2                            | 215                         | 2                            | -67                      | 9                        | -42                      | 80          | 84                          | 1                            | 212   | 1                            |
|   | 9                   | 240                     | -15                      | 34                       | -32                      | 49          | 46                          | 2                            | 245                         | 2                            | -36                      | 8                        | -71                      | 80          | 84                          | 1                            | 243   | 1                            |
|   | 10                  | 270                     | 1                        | 34                       | -33                      | 47          | 44                          | 2                            | 272                         | 2                            | 2                        | 7                        | -78                      | 78          | 85                          | 1                            | 271   | 1                            |
| 11  | 300                 | 17                      | 33                       | -31                      | 48                       | 47          | 2                           | 299                          | 2                           | 40                           | 6                        | -69                      | 80                       | 86          | 1                           | 300                          | 1   |                              |
| 12  | 330                 | 29                      | 32                       | -17                      | 46                       | 46          | 2                           | 330                          | 2                           | 68                           | 8                        | -41                      | 80                       | 84          | 1                           | 329                          | 1   |                              |

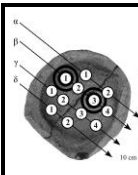

|  | Πίνακας Β6          |                                      | Θέση β3                  |                          |                          |             |                             |                              |                             |                              | Θέση δ3                  |                          |                          |             |                             |                              |  |                              |
|---|---------------------|--------------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------|-----------------------------|------------------------------|---|------------------------------|
|   | ΑΓΓΕΙΟ 1<br>β. Βάση |                                      |                          |                          |                          |             |                             |                              |                             |                              |                          |                          |                          |             |                             |                              |   |                              |
|   | n                   | φ <sub>δ</sub><br>(±1 <sup>ο</sup> ) | B <sub>x</sub><br>(±1nT) | B <sub>ψ</sub><br>(±1nT) | B <sub>z</sub><br>(±1nT) | B<br>(±1nT) | γ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | δγ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | φ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | δφ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | B <sub>x</sub><br>(±1nT) | B <sub>ψ</sub><br>(±1nT) | B <sub>z</sub><br>(±1nT) | B<br>(±1nT) | γ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | δγ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | φ <sub>B</sub> <sup>ο</sup>   | δφ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> |
| 1   | 0                   | 65                                   | 0                        | 25                       | 70                       | 69          | 1                           | 0                            | 1                           | 60                           | 0                        | 24                       | 65                       | 68          | 1                           | 0                            | 1   |                              |
| 2   | 30                  | 55                                   | 33                       | 24                       | 68                       | 69          | 1                           | 31                           | 1                           | 50                           | 33                       | 23                       | 64                       | 69          | 1                           | 33                           | 1   |                              |
| 3   | 60                  | 30                                   | 58                       | 24                       | 70                       | 70          | 1                           | 63                           | 1                           | 30                           | 52                       | 25                       | 65                       | 67          | 1                           | 60                           | 1   |                              |
| 4   | 90                  | 1                                    | 63                       | 25                       | 68                       | 68          | 1                           | 89                           | 1                           | 2                            | 60                       | 26                       | 65                       | 67          | 1                           | 88                           | 1   |                              |
| 5   | 120                 | -34                                  | 56                       | 26                       | 70                       | 68          | 1                           | 121                          | 1                           | -28                          | 55                       | 25                       | 67                       | 68          | 1                           | 117                          | 1   |                              |
| 6   | 150                 | -55                                  | 34                       | 24                       | 69                       | 70          | 1                           | 148                          | 1                           | -55                          | 29                       | 24                       | 67                       | 69          | 1                           | 152                          | 1   |                              |
| 7   | 180                 | -63                                  | 2                        | 23                       | 67                       | 70          | 1                           | 178                          | 1                           | -59                          | 1                        | 23                       | 63                       | 69          | 1                           | 179                          | 1   |                              |
| 8   | 210                 | -57                                  | -31                      | 23                       | 69                       | 70          | 1                           | 209                          | 1                           | -51                          | -33                      | 22                       | 65                       | 70          | 1                           | 213                          | 1   |                              |
| 9   | 240                 | -32                                  | -57                      | 24                       | 70                       | 70          | 1                           | 241                          | 1                           | -27                          | -54                      | 23                       | 65                       | 69          | 1                           | 243                          | 1   |                              |
| 10  | 270                 | 1                                    | -64                      | 24                       | 68                       | 69          | 1                           | 271                          | 1                           | 1                            | -63                      | 24                       | 67                       | 69          | 1                           | 271                          | 1   |                              |
| 11  | 300                 | 30                                   | -55                      | 25                       | 67                       | 68          | 1                           | 299                          | 1                           | 31                           | -51                      | 24                       | 64                       | 68          | 1                           | 301                          | 1   |                              |
| 12  | 330                 | 56                                   | -33                      | 26                       | 70                       | 68          | 1                           | 329                          | 1                           | 55                           | -27                      | 24                       | 66                       | 69          | 1                           | 334                          | 1   |                              |

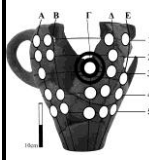

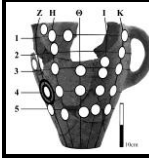
**Πίνακας Β6** Αποτελέσματα μετρήσεων του μαγνητικού πεδίου κατά την περιστροφή ακανόνιστων οστράκων γύρω από την τρισσορθογώνια διάταξη των αισθητήρων/μαγνητών σε θραύσματα του σώματος (**α**) και της βάσης(**β**) του αγγείου 1.

|  | Πίνακας Β7          |             | Θέση Ο1                  |                          |                          |             |                  |                   |                  |                   | Θέση Ρ6                  |                          |                          |             |                  |                   |  |                   |
|---|---------------------|-------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------|------------------|-------------------|---|-------------------|
|   | ΑΓΓΕΙΟ 2<br>α. Σώμα |             |                          |                          |                          |             |                  |                   |                  |                   |                          |                          |                          |             |                  |                   |   |                   |
|   | n                   | φδ<br>(±1°) | B <sub>x</sub><br>(±1nT) | B <sub>ψ</sub><br>(±1nT) | B <sub>z</sub><br>(±1nT) | B<br>(±1nT) | θ <sub>B</sub> ° | δθ <sub>B</sub> ° | φ <sub>B</sub> ° | δφ <sub>B</sub> ° | B <sub>x</sub><br>(±1nT) | B <sub>ψ</sub><br>(±1nT) | B <sub>z</sub><br>(±1nT) | B<br>(±1nT) | θ <sub>B</sub> ° | δθ <sub>B</sub> ° | φ <sub>B</sub> °  | δφ <sub>B</sub> ° |
|   | 1                   | 0           | 101                      | -17                      | 0                        | 102         | -80              | 1                 | 0                | 1                 | 26                       | -40                      | 0                        | 48          | -33              | 3                 | 0   | 2                 |
|   | 2                   | 30          | 84                       | -15                      | 51                       | 99          | -81              | 1                 | 31               | 1                 | 24                       | -44                      | 14                       | 52          | -32              | 3                 | 30  | 2                 |
|   | 3                   | 60          | 46                       | -14                      | 87                       | 99          | -82              | 1                 | 62               | 1                 | 13                       | -41                      | 24                       | 49          | -34              | 3                 | 62  | 2                 |
|   | 4                   | 90          | 3                        | -16                      | 102                      | 103         | -81              | 1                 | 88               | 1                 | 1                        | -38                      | 27                       | 47          | -35              | 3                 | 88  | 2                 |
|   | 5                   | 120         | -56                      | -15                      | 83                       | 101         | -81              | 1                 | 124              | 1                 | -13                      | -37                      | 24                       | 46          | -36              | 3                 | 118   | 2                 |
|   | 6                   | 150         | -87                      | -18                      | 45                       | 100         | -80              | 1                 | 153              | 1                 | -26                      | -40                      | 16                       | 50          | -37              | 2                 | 148   | 2                 |
|   | 7                   | 180         | -98                      | -18                      | -1                       | 100         | -80              | 1                 | 181              | 1                 | -27                      | -39                      | 1                        | 47          | -35              | 3                 | 178   | 2                 |
|   | 8                   | 210         | -85                      | -17                      | -52                      | 101         | -80              | 1                 | 211              | 1                 | -26                      | -41                      | -13                      | 50          | -35              | 3                 | 207   | 2                 |
|   | 9                   | 240         | -52                      | -15                      | -83                      | 99          | -81              | 1                 | 238              | 1                 | -13                      | -42                      | -27                      | 52          | -36              | 2                 | 244   | 2                 |
|   | 10                  | 270         | 4                        | -19                      | -98                      | 100         | -79              | 1                 | 272              | 1                 | 1                        | -38                      | -31                      | 49          | -39              | 2                 | 272   | 2                 |
| 11  | 300                 | 51          | -18                      | -85                      | 101                      | -80         | 1                | 301               | 1                | 14                | -40                      | -24                      | 49                       | -35         | 3                | 300               | 2   |                   |
| 12  | 330                 | 84          | -16                      | -52                      | 100                      | -81         | 1                | 328               | 1                | 23                | -42                      | -14                      | 50                       | -33         | 3                | 239               | 2   |                   |

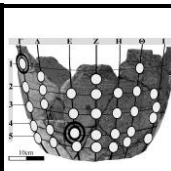

|  | Πίνακας Β7 |   | Θέση β3                |                             |                        |                      |                    |                          |                     |                           | Θέση δ1                |                             |                        |                      |                    |                          |                     |                           |  |  |
|---|------------|---|------------------------|-----------------------------|------------------------|----------------------|--------------------|--------------------------|---------------------|---------------------------|------------------------|-----------------------------|------------------------|----------------------|--------------------|--------------------------|---------------------|---------------------------|---|--|
|   | ΑΓΓΕΙΟ 2   |   |                        |                             |                        |                      |                    |                          |                     |                           |                        |                             |                        |                      |                    |                          |                     |                           |   |  |
|   | β. Βάση    |   |                        |                             |                        |                      |                    |                          |                     |                           |                        |                             |                        |                      |                    |                          |                     |                           |   |  |
|   | n          | $\varphi_{\delta}$<br>( $\pm 1^{\circ}$ ) | $B_x$<br>( $\pm 1nT$ ) | $B_{\psi}$<br>( $\pm 1nT$ ) | $B_z$<br>( $\pm 1nT$ ) | $B$<br>( $\pm 1nT$ ) | $\gamma_B^{\circ}$ | $\delta\gamma_B^{\circ}$ | $\varphi_B^{\circ}$ | $\delta\varphi_B^{\circ}$ | $B_x$<br>( $\pm 1nT$ ) | $B_{\psi}$<br>( $\pm 1nT$ ) | $B_z$<br>( $\pm 1nT$ ) | $B$<br>( $\pm 1nT$ ) | $\gamma_B^{\circ}$ | $\delta\gamma_B^{\circ}$ | $\varphi_B^{\circ}$ | $\delta\varphi_B^{\circ}$ |   |  |
|   | 1          | 0   | 75                     | 0                           | 34                     | 82                   | 66                 | 1                        | 0                   | 1                         | 76                     | 0                           | 32                     | 82                   | 67                 | 1                        | 0                   | 1                         |   |  |
|   | 2          | 30  | 67                     | 39                          | 33                     | 84                   | 67                 | 1                        | 30                  | 1                         | 66                     | 37                          | 31                     | 82                   | 68                 | 1                        | 29                  | 1                         |   |  |
|   | 3          | 60  | 36                     | 69                          | 32                     | 84                   | 68                 | 1                        | 62                  | 1                         | 34                     | 67                          | 30                     | 81                   | 68                 | 1                        | 63                  | 1                         |   |  |
|   | 4          | 90  | 1                      | 78                          | 34                     | 85                   | 66                 | 1                        | 89                  | 1                         | 2                      | 76                          | 29                     | 81                   | 69                 | 1                        | 88                  | 1                         |   |  |
|   | 5          | 120                                       | -44                    | 66                          | 35                     | 87                   | 66                 | 1                        | 124                 | 1                         | -40                    | 62                          | 32                     | 80                   | 67                 | 1                        | 123                 | 1                         |   |  |
|   | 6          | 150                                       | -67                    | 42                          | 36                     | 87                   | 66                 | 1                        | 148                 | 1                         | -65                    | 39                          | 33                     | 83                   | 66                 | 1                        | 149                 | 1                         |   |  |
|   | 7          | 180                                       | -79                    | 1                           | 36                     | 87                   | 66                 | 1                        | 179                 | 1                         | -77                    | 2                           | 33                     | 84                   | 67                 | 1                        | 179                 | 1                         |   |  |
|   | 8          | 210                                       | -67                    | -43                         | 33                     | 86                   | 67                 | 1                        | 213                 | 1                         | -66                    | -36                         | 32                     | 82                   | 67                 | 1                        | 209                 | 1                         |   |  |
|   | 9          | 240                                       | -36                    | -71                         | 32                     | 86                   | 68                 | 1                        | 243                 | 1                         | -33                    | -68                         | 31                     | 82                   | 68                 | 1                        | 244                 | 1                         |   |  |
| 10  | 270        | 1   | -79                    | 37                          | 87                     | 65                   | 1                  | 271                      | 1                   | -3                        | -74                    | 31                          | 80                     | 67                   | 1                  | 268                      | 1                   |                           |   |  |
| 11  | 300        | 37  | -70                    | 31                          | 85                     | 69                   | 1                  | 298                      | 1                   | 39                        | -64                    | 30                          | 81                     | 68                   | 1                  | 301                      | 1                   |                           |   |  |
| 12  | 330        | 69  | -38                    | 32                          | 85                     | 68                   | 1                  | 331                      | 1                   | 67                        | -34                    | 32                          | 82                     | 67                   | 1                  | 333                      | 1                   |                           |   |  |



**Πίνακας Β7.** Αποτελέσματα μετρήσεων του μαγνητικού πεδίου κατά την περιστροφή ακανόνιστων οστράκων γύρω από την τρισσορθογώνια διάταξη των αισθητήρων/μαγνητών σε θραύσματα του σώματος (α) και της βάσης(β) του αγγείου 2.

|  | Πίνακας B8          |                                      | Θέση β1                  |                          |                          |             |                             |                              |                             |                              | Θέση β3                  |                          |                          |             |                             |                              |  |                              |
|---|---------------------|--------------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------|-----------------------------|------------------------------|---|------------------------------|
|   | ΑΓΓΕΙΟ 3<br>β. Βάση |                                      |                          |                          |                          |             |                             |                              |                             |                              |                          |                          |                          |             |                             |                              |   |                              |
|   | n                   | φ <sub>δ</sub><br>(±1 <sup>ο</sup> ) | B <sub>x</sub><br>(±1nT) | B <sub>ψ</sub><br>(±1nT) | B <sub>z</sub><br>(±1nT) | B<br>(±1nT) | γ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | δγ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | φ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | δφ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | B <sub>x</sub><br>(±1nT) | B <sub>ψ</sub><br>(±1nT) | B <sub>z</sub><br>(±1nT) | B<br>(±1nT) | γ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | δγ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | φ <sub>B</sub> <sup>ο</sup>   | δφ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> |
|   | 1                   | 0                                    | 63                       | 0                        | 32                       | 71          | 63                          | 1                            | 0                           | 1                            | 71                       | 0                        | 33                       | 78          | 65                          | 1                            | 0   | 1                            |
|   | 2                   | 30                                   | 56                       | 31                       | 32                       | 72          | 63                          | 1                            | 29                          | 1                            | 60                       | 34                       | 35                       | 77          | 63                          | 1                            | 30  | 1                            |
|   | 3                   | 60                                   | 30                       | 59                       | 33                       | 74          | 64                          | 1                            | 63                          | 1                            | 38                       | 63                       | 35                       | 81          | 65                          | 1                            | 59  | 1                            |
|   | 4                   | 90                                   | -2                       | 66                       | 33                       | 74          | 63                          | 1                            | 92                          | 1                            | -1                       | 68                       | 34                       | 76          | 63                          | 1                            | 91  | 1                            |
|   | 5                   | 120                                  | -35                      | 54                       | 34                       | 73          | 62                          | 1                            | 123                         | 1                            | -36                      | 57                       | 32                       | 75          | 65                          | 1                            | 122   | 1                            |
|   | 6                   | 150                                  | -56                      | 35                       | 35                       | 75          | 62                          | 1                            | 148                         | 1                            | -60                      | 38                       | 31                       | 77          | 66                          | 1                            | 148   | 1                            |
|   | 7                   | 180                                  | -68                      | 2                        | 34                       | 76          | 63                          | 1                            | 178                         | 1                            | -68                      | 1                        | 31                       | 75          | 65                          | 1                            | 179   | 1                            |
|   | 8                   | 210                                  | -58                      | -31                      | 35                       | 74          | 62                          | 1                            | 208                         | 1                            | -58                      | -40                      | 33                       | 78          | 65                          | 1                            | 215   | 1                            |
|   | 9                   | 240                                  | -31                      | -59                      | 31                       | 74          | 65                          | 1                            | 242                         | 1                            | -37                      | -60                      | 34                       | 78          | 64                          | 1                            | 238   | 1                            |
|   | 10                  | 270                                  | -3                       | -67                      | 32                       | 74          | 64                          | 1                            | 267                         | 1                            | -2                       | -71                      | 33                       | 78          | 65                          | 1                            | 268   | 1                            |
| 11  | 300                 | 33                                   | -55                      | 32                       | 72                       | 63          | 1                           | 301                          | 1                           | 38                           | -61                      | 31                       | 78                       | 67          | 1                           | 302                          | 1   |                              |
| 12  | 330                 | 59                                   | -30                      | 34                       | 74                       | 63          | 1                           | 333                          | 1                           | 62                           | -33                      | 33                       | 78                       | 65          | 1                           | 332                          | 1   |                              |

|   | Πίνακας B8          |                         | Θέση Γ3                  |                          |                          |             |                             |                              |                             |                              | Θέση Ζ4                  |                          |                          |             |                             |                              |  |                              |
|--|---------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------|-----------------------------|------------------------------|---|------------------------------|
|  | ΑΓΓΕΙΟ 3<br>α. Σώμα |                         |                          |                          |                          |             |                             |                              |                             |                              |                          |                          |                          |             |                             |                              |   |                              |
|  | n                   | φ <sub>δ</sub><br>(±1°) | B <sub>x</sub><br>(±1nT) | B <sub>ψ</sub><br>(±1nT) | B <sub>z</sub><br>(±1nT) | B<br>(±1nT) | θ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | δθ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | φ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | δφ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | B <sub>x</sub><br>(±1nT) | B <sub>ψ</sub><br>(±1nT) | B <sub>z</sub><br>(±1nT) | B<br>(±1nT) | θ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | δθ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | φ <sub>B</sub> <sup>ο</sup>   | δφ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> |
|  | 1                   | 0                       | 102                      | -13                      | 0                        | 103         | -83                         | 1                            | 0                           | 1                            | 27                       | -44                      | 0                        | 52          | -32                         | 3                            | 0   | 2                            |
|  | 2                   | 30                      | 87                       | -11                      | 48                       | 100         | -84                         | 1                            | 29                          | 1                            | 25                       | -44                      | 16                       | 53          | -34                         | 3                            | 33  | 2                            |
|  | 3                   | 60                      | 46                       | -12                      | 89                       | 101         | -83                         | 1                            | 63                          | 1                            | 14                       | -42                      | 25                       | 51          | -34                         | 3                            | 61  | 2                            |
|  | 4                   | 90                      | 2                        | -12                      | 99                       | 100         | -83                         | 1                            | 89                          | 1                            | -2                       | -40                      | 30                       | 50          | -37                         | 2                            | 94  | 2                            |
|  | 5                   | 120                     | -47                      | -13                      | 87                       | 100         | -83                         | 1                            | 118                         | 1                            | -16                      | -39                      | 25                       | 49          | -37                         | 2                            | 123   | 2                            |
|  | 6                   | 150                     | -90                      | -13                      | 47                       | 102         | -83                         | 1                            | 152                         | 1                            | -26                      | -39                      | 16                       | 50          | -38                         | 2                            | 148   | 2                            |
|  | 7                   | 180                     | -98                      | -14                      | 2                        | 99          | -82                         | 1                            | 181                         | 1                            | -30                      | -38                      | 1                        | 48          | -38                         | 2                            | 178   | 2                            |
|  | 8                   | 210                     | -85                      | -15                      | -54                      | 102         | -82                         | 1                            | 212                         | 1                            | -24                      | -39                      | -17                      | 49          | -37                         | 2                            | 215   | 2                            |
|  | 9                   | 240                     | -47                      | -16                      | -88                      | 101         | -81                         | 1                            | 242                         | 1                            | -13                      | -40                      | -26                      | 49          | -36                         | 3                            | 243   | 2                            |
|  | 10                  | 270                     | -2                       | -14                      | -99                      | 100         | -82                         | 1                            | 269                         | 1                            | -1                       | -41                      | -31                      | 51          | -37                         | 2                            | 268   | 2                            |
|  | 11                  | 300                     | 53                       | -14                      | -83                      | 99          | -82                         | 1                            | 303                         | 1                            | 15                       | -42                      | -26                      | 52          | -36                         | 2                            | 300   | 2                            |
| 12   | 330                 | 83                      | -14                      | -54                      | 100                      | -82         | 1                           | 327                          | 1                           | 25                           | -44                      | -15                      | 53                       | -34         | 3                           | 329                          | 2   |                              |

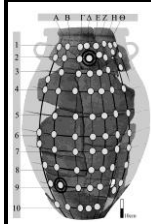

**Πίνακας B8.** Αποτελέσματα μετρήσεων του μαγνητικού πεδίου κατά την περιστροφή ακανόνιστων οστράκων γύρω από την τρισσορθογώνια διάταξη των αισθητήρων/μαγνητών σε θραύσματα του σώματος (**α**) και της βάσης(**β**) του αγγείου 3.

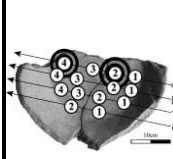

|  | Πίνακας Β9          |   | Θέση Γ1                |                             |                        |                      |                    |                          |                     |                           | Θέση Ε4                |                             |                        |                      |                    |                          |  |                           |
|---|---------------------|---|------------------------|-----------------------------|------------------------|----------------------|--------------------|--------------------------|---------------------|---------------------------|------------------------|-----------------------------|------------------------|----------------------|--------------------|--------------------------|---|---------------------------|
|   | ΑΓΓΕΙΟ 4<br>α. Σώμα |   |                        |                             |                        |                      |                    |                          |                     |                           |                        |                             |                        |                      |                    |                          |   |                           |
|   | n                   | $\varphi_{\delta}$<br>( $\pm 1^{\circ}$ ) | $B_x$<br>( $\pm 1nT$ ) | $B_{\psi}$<br>( $\pm 1nT$ ) | $B_z$<br>( $\pm 1nT$ ) | $B$<br>( $\pm 1nT$ ) | $\theta_B^{\circ}$ | $\delta\theta_B^{\circ}$ | $\varphi_B^{\circ}$ | $\delta\varphi_B^{\circ}$ | $B_x$<br>( $\pm 1nT$ ) | $B_{\psi}$<br>( $\pm 1nT$ ) | $B_z$<br>( $\pm 1nT$ ) | $B$<br>( $\pm 1nT$ ) | $\theta_B^{\circ}$ | $\delta\theta_B^{\circ}$ | $\varphi_B^{\circ}$   | $\delta\varphi_B^{\circ}$ |
|   | 1                   | 0   | 36                     | 16                          | 0                      | 39                   | 66                 | 2                        | 0                   | 2                         | 49                     | 10                          | 0                      | 50                   | 78                 | 1                        | 0   | 1                         |
|   | 2                   | 30  | 30                     | 15                          | 15                     | 37                   | 66                 | 2                        | 27                  | 2                         | 38                     | 10                          | 24                     | 46                   | 77                 | 1                        | 32  | 1                         |
|   | 3                   | 60  | 18                     | 15                          | 30                     | 38                   | 67                 | 2                        | 59                  | 2                         | 24                     | 11                          | 43                     | 50                   | 77                 | 1                        | 61  | 1                         |
|   | 4                   | 90  | 0                      | 16                          | 34                     | 38                   | 65                 | 2                        | 90                  | 2                         | 0                      | 9                           | 48                     | 49                   | 79                 | 1                        | 90  | 1                         |
|   | 5                   | 120                                       | -18                    | 17                          | 30                     | 39                   | 64                 | 2                        | 121                 | 2                         | -24                    | 9                           | 43                     | 50                   | 80                 | 1                        | 119   | 1                         |
|   | 6                   | 150                                       | -29                    | 17                          | 18                     | 38                   | 64                 | 2                        | 148                 | 2                         | -42                    | 8                           | 26                     | 50                   | 81                 | 1                        | 148   | 1                         |
|   | 7                   | 180                                       | -34                    | 17                          | -1                     | 38                   | 63                 | 2                        | 182                 | 2                         | -49                    | 9                           | 2                      | 50                   | 80                 | 1                        | 178   | 1                         |
|   | 8                   | 210                                       | -27                    | 18                          | -20                    | 38                   | 62                 | 2                        | 217                 | 2                         | -43                    | 10                          | -26                    | 51                   | 79                 | 1                        | 211   | 1                         |
|   | 9                   | 240                                       | -18                    | 19                          | -29                    | 39                   | 61                 | 2                        | 238                 | 2                         | -23                    | 9                           | -43                    | 50                   | 80                 | 1                        | 242   | 1                         |
|   | 10                  | 270                                       | -1                     | 18                          | -35                    | 39                   | 63                 | 2                        | 268                 | 2                         | 2                      | 9                           | -49                    | 50                   | 80                 | 1                        | 272   | 1                         |
| 11  | 300                 | 19  | 17                     | -29                         | 39                     | 64                   | 2                  | 303                      | 2                   | 22                        | 9                      | -42                         | 48                     | 79                   | 1                  | 298                      | 1   |                           |
| 12  | 330                 | 31  | 17                     | -16                         | 39                     | 64                   | 2                  | 333                      | 2                   | 41                        | 10                     | -25                         | 49                     | 78                   | 1                  | 329                      | 1   |                           |

|  | Πίνακας Β9          |                                      | Θέση α3                  |                          |                          |             |                             |                              |                             |                              | Θέση γ2                  |                          |                          |             |                             |                              |  |                              |
|---|---------------------|--------------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------|-----------------------------|------------------------------|---|------------------------------|
|   | ΑΓΓΕΙΟ 4<br>β. Βάση |                                      |                          |                          |                          |             |                             |                              |                             |                              |                          |                          |                          |             |                             |                              |   |                              |
|   | n                   | φ <sub>δ</sub><br>(±1 <sup>ο</sup> ) | B <sub>x</sub><br>(±1nT) | B <sub>ψ</sub><br>(±1nT) | B <sub>z</sub><br>(±1nT) | B<br>(±1nT) | γ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | δγ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | φ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | δφ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | B <sub>x</sub><br>(±1nT) | B <sub>ψ</sub><br>(±1nT) | B <sub>z</sub><br>(±1nT) | B<br>(±1nT) | γ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | δγ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | φ <sub>B</sub> <sup>ο</sup>   | δφ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> |
|   | 1                   | 0                                    | 36                       | 0                        | 18                       | 40          | 63                          | 2                            | 0                           | 2                            | 38                       | 0                        | 17                       | 42          | 66                          | 2                            | 0   | 2                            |
|   | 2                   | 30                                   | 29                       | 18                       | 18                       | 39          | 62                          | 2                            | 32                          | 2                            | 33                       | 20                       | 18                       | 43          | 65                          | 2                            | 31  | 1                            |
|   | 3                   | 60                                   | 20                       | 30                       | 18                       | 40          | 63                          | 2                            | 56                          | 2                            | 21                       | 32                       | 18                       | 42          | 65                          | 2                            | 57  | 1                            |
|   | 4                   | 90                                   | 0                        | 38                       | 17                       | 42          | 66                          | 2                            | 90                          | 2                            | -1                       | 38                       | 17                       | 42          | 66                          | 2                            | 92  | 2                            |
|   | 5                   | 120                                  | -16                      | 29                       | 16                       | 37          | 64                          | 2                            | 119                         | 2                            | -18                      | 35                       | 16                       | 42          | 68                          | 2                            | 117   | 1                            |
|   | 6                   | 150                                  | -31                      | 20                       | 17                       | 41          | 65                          | 2                            | 147                         | 2                            | -33                      | 20                       | 17                       | 42          | 66                          | 2                            | 149   | 1                            |
|   | 7                   | 180                                  | -35                      | 0                        | 18                       | 39          | 63                          | 2                            | 180                         | 2                            | -37                      | 0                        | 18                       | 41          | 64                          | 2                            | 180   | 2                            |
|   | 8                   | 210                                  | -32                      | -18                      | 18                       | 41          | 64                          | 2                            | 209                         | 2                            | -34                      | -19                      | 18                       | 43          | 65                          | 2                            | 209   | 1                            |
|   | 9                   | 240                                  | -18                      | -32                      | 19                       | 41          | 63                          | 2                            | 241                         | 2                            | -18                      | -34                      | 18                       | 42          | 65                          | 2                            | 242   | 1                            |
| 10  | 270                 | 0                                    | -39                      | 19                       | 43                       | 64          | 2                           | 270                          | 1                           | -2                           | -39                      | 17                       | 43                       | 66          | 2                           | 267                          | 1   |                              |
| 11  | 300                 | 18                                   | -31                      | 18                       | 40                       | 63          | 2                           | 300                          | 2                           | 19                           | -34                      | 17                       | 42                       | 66          | 2                           | 299                          | 1   |                              |
| 12  | 330                 | 33                                   | -17                      | 17                       | 41                       | 65          | 2                           | 333                          | 2                           | 33                           | -17                      | 18                       | 41                       | 64          | 2                           | 333                          | 2   |                              |

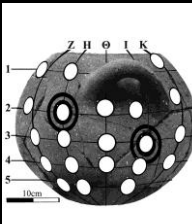

**Πίνακας Β9.** Αποτελέσματα μετρήσεων του μαγνητικού πεδίου κατά την περιστροφή ακανόνιστων οστράκων γύρω από την τρισορθογώνια διάταξη των αισθητήρων/μαγνητών σε θραύσματα του σώματος (**α**) και της βάσης(**β**) του **αγγείου 4**.

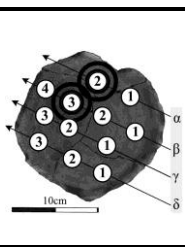



|  | Πίνακας B10         |   | Θέση B9                         |                                 |                                 |                    |                             |                              |                             |                              | Θέση Δ2                         |                                 |                                 |                    |                             |                              |  |                              |
|---|---------------------|---|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------|-----------------------------|------------------------------|---|------------------------------|
|   | ΑΓΓΕΙΟ 5<br>α. Σώμα |   |                                 |                                 |                                 |                    |                             |                              |                             |                              |                                 |                                 |                                 |                    |                             |                              |   |                              |
|   | n                   | $\varphi_{\delta}$<br>( $\pm 1^{\circ}$ ) | B <sub>x</sub><br>( $\pm 1nT$ ) | B <sub>ψ</sub><br>( $\pm 1nT$ ) | B <sub>z</sub><br>( $\pm 1nT$ ) | B<br>( $\pm 1nT$ ) | θ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | δθ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | φ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | δφ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | B <sub>x</sub><br>( $\pm 1nT$ ) | B <sub>ψ</sub><br>( $\pm 1nT$ ) | B <sub>z</sub><br>( $\pm 1nT$ ) | B<br>( $\pm 1nT$ ) | θ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | δθ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | φ <sub>B</sub> <sup>ο</sup>   | δφ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> |
|   | 1                   | 0   | 22                              | -29                             | 0                               | 36                 | -37                         | 3                            | 0                           | 3                            | 63                              | -16                             | 0                               | 65                 | -76                         | 1                            | 0   | 1                            |
|   | 2                   | 30  | 17                              | -29                             | 11                              | 35                 | -35                         | 4                            | 33                          | 3                            | 51                              | -15                             | 32                              | 62                 | -76                         | 1                            | 32  | 1                            |
|   | 3                   | 60  | 10                              | -28                             | 18                              | 35                 | -36                         | 4                            | 61                          | 3                            | 31                              | -14                             | 57                              | 66                 | -78                         | 1                            | 61  | 1                            |
|   | 4                   | 90  | 2                               | -27                             | 22                              | 35                 | -39                         | 3                            | 85                          | 3                            | -3                              | -17                             | 60                              | 62                 | -74                         | 1                            | 93  | 1                            |
|   | 5                   | 120                                       | -12                             | -28                             | 18                              | 35                 | -38                         | 3                            | 124                         | 3                            | -33                             | -16                             | 51                              | 63                 | -75                         | 1                            | 123   | 1                            |
|   | 6                   | 150                                       | -20                             | -29                             | 10                              | 37                 | -38                         | 3                            | 153                         | 3                            | -54                             | -15                             | 32                              | 65                 | -77                         | 1                            | 149   | 1                            |
|   | 7                   | 180                                       | -21                             | -29                             | 0                               | 36                 | -36                         | 4                            | 180                         | 3                            | -61                             | -18                             | 2                               | 64                 | -74                         | 1                            | 178   | 1                            |
|   | 8                   | 210                                       | -18                             | -30                             | -13                             | 37                 | -37                         | 3                            | 216                         | 3                            | -55                             | -19                             | -34                             | 67                 | -74                         | 1                            | 212   | 1                            |
|   | 9                   | 240                                       | -11                             | -30                             | -20                             | 38                 | -37                         | 3                            | 241                         | 3                            | -31                             | -18                             | -53                             | 64                 | -74                         | 1                            | 240   | 1                            |
|   | 10                  | 270                                       | -1                              | -29                             | -22                             | 36                 | -37                         | 3                            | 267                         | 3                            | -1                              | -17                             | -61                             | 63                 | -74                         | 1                            | 269   | 1                            |
| 11  | 300                 | 11  | -28                             | -19                             | 36                              | -38                | 3                           | 300                          | 3                           | 30                           | -15                             | -55                             | 64                              | -77                | 1                           | 299                          | 1   |                              |
| 12  | 330                 | 19  | -28                             | -11                             | 36                              | -38                | 3                           | 330                          | 3                           | 53                           | -14                             | -33                             | 64                              | -77                | 1                           | 328                          | 1   |                              |

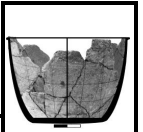
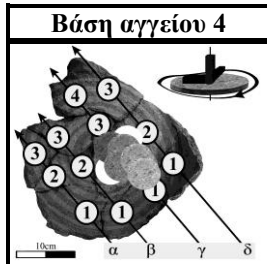
|  | Πίνακας B10         |   | Θέση α2                |                             |                        |                    |                    |                          |                     |                           | Θέση α4                |                             |                        |                    |                    |                          |  |                           |
|---|---------------------|---|------------------------|-----------------------------|------------------------|--------------------|--------------------|--------------------------|---------------------|---------------------------|------------------------|-----------------------------|------------------------|--------------------|--------------------|--------------------------|---|---------------------------|
|   | ΑΓΓΕΙΟ 5<br>β. Βάση |   |                        |                             |                        |                    |                    |                          |                     |                           |                        |                             |                        |                    |                    |                          |   |                           |
|   | n                   | $\varphi_{\delta}$<br>( $\pm 1^{\circ}$ ) | $B_x$<br>( $\pm 1nT$ ) | $B_{\psi}$<br>( $\pm 1nT$ ) | $B_z$<br>( $\pm 1nT$ ) | B<br>( $\pm 1nT$ ) | $\gamma_B^{\circ}$ | $\delta\gamma_B^{\circ}$ | $\varphi_B^{\circ}$ | $\delta\varphi_B^{\circ}$ | $B_x$<br>( $\pm 1nT$ ) | $B_{\psi}$<br>( $\pm 1nT$ ) | $B_z$<br>( $\pm 1nT$ ) | B<br>( $\pm 1nT$ ) | $\gamma_B^{\circ}$ | $\delta\gamma_B^{\circ}$ | $\varphi_B^{\circ}$   | $\delta\varphi_B^{\circ}$ |
|   | 1                   | 0   | 62                     | 0                           | 17                     | 64                 | 75                 | 1                        | 0                   | 1                         | 61                     | 0                           | 16                     | 63                 | 75                 | 1                        | 0   | 1                         |
|   | 2                   | 30  | 54                     | 28                          | 17                     | 63                 | 74                 | 1                        | 27                  | 1                         | 49                     | 34                          | 15                     | 61                 | 76                 | 1                        | 35  | 1                         |
|   | 3                   | 60  | 32                     | 51                          | 18                     | 63                 | 73                 | 1                        | 58                  | 1                         | 30                     | 51                          | 15                     | 61                 | 76                 | 1                        | 60  | 1                         |
|   | 4                   | 90  | -1                     | 61                          | 19                     | 64                 | 73                 | 1                        | 91                  | 1                         | -2                     | 63                          | 16                     | 65                 | 76                 | 1                        | 92  | 1                         |
|   | 5                   | 120                                       | -31                    | 54                          | 18                     | 65                 | 74                 | 1                        | 120                 | 1                         | -31                    | 50                          | 17                     | 61                 | 74                 | 1                        | 122   | 1                         |
|   | 6                   | 150                                       | -55                    | 30                          | 18                     | 65                 | 74                 | 1                        | 151                 | 1                         | -52                    | 34                          | 17                     | 64                 | 75                 | 1                        | 147   | 1                         |
|   | 7                   | 180                                       | -61                    | 2                           | 17                     | 63                 | 74                 | 1                        | 178                 | 1                         | -59                    | 2                           | 18                     | 62                 | 73                 | 1                        | 178   | 1                         |
|   | 8                   | 210                                       | -52                    | -33                         | 17                     | 64                 | 75                 | 1                        | 212                 | 1                         | -50                    | -31                         | 18                     | 62                 | 73                 | 1                        | 212   | 1                         |
|   | 9                   | 240                                       | -31                    | -55                         | 16                     | 65                 | 76                 | 1                        | 241                 | 1                         | -27                    | -54                         | 19                     | 63                 | 73                 | 1                        | 243   | 1                         |
|   | 10                  | 270                                       | 1                      | -62                         | 15                     | 64                 | 76                 | 1                        | 271                 | 1                         | -1                     | -59                         | 18                     | 62                 | 73                 | 1                        | 269   | 1                         |
| 11  | 300                 | 33  | -52                    | 16                          | 64                     | 75                 | 1                  | 302                      | 1                   | 30                        | -55                    | 17                          | 65                     | 75                 | 1                  | 299                      | 1   |                           |
| 12  | 330                 | 52  | -34                    | 17                          | 64                     | 75                 | 1                  | 327                      | 1                   | 54                        | -29                    | 17                          | 64                     | 74                 | 1                  | 332                      | 1   |                           |

**Πίνακας B10.** Αποτελέσματα μετρήσεων του μαγνητικού πεδίου κατά την περιστροφή ακανόνιστων οστράκων γύρω από την τρισορθογώνια διάταξη των αισθητήρων/μαγνητών σε θραύσματα του σώματος (α) και της βάσης(β) του αγγείου 5.

|  | Πίνακας B11         |                         | Θέση H2                  |                          |                          |             |                             |                              |                             |                              | Θέση I3                  |                          |                          |             |                             |                              |  |                              |
|---|---------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------|-----------------------------|------------------------------|---|------------------------------|
|   | ΑΓΓΕΙΟ 6<br>α. Σώμα |                         |                          |                          |                          |             |                             |                              |                             |                              |                          |                          |                          |             |                             |                              |   |                              |
|   | n                   | Φ <sub>δ</sub><br>(±1°) | B <sub>x</sub><br>(±1nT) | B <sub>ψ</sub><br>(±1nT) | B <sub>z</sub><br>(±1nT) | B<br>(±1nT) | θ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | δθ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | φ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | δφ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | B <sub>x</sub><br>(±1nT) | B <sub>ψ</sub><br>(±1nT) | B <sub>z</sub><br>(±1nT) | B<br>(±1nT) | θ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | δθ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | φ <sub>B</sub> <sup>ο</sup>   | δφ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> |
|   | 1                   | 0                       | 34                       | -3                       | 0                        | 34          | -85                         | 2                            | 0                           | 2                            | 19                       | -16                      | 0                        | 25          | -50                         | 4                            | 0   | 3                            |
|   | 2                   | 30                      | 31                       | -4                       | 18                       | 36          | -84                         | 2                            | 30                          | 2                            | 17                       | -18                      | 11                       | 27          | -48                         | 3                            | 33  | 3                            |
|   | 3                   | 60                      | 16                       | -2                       | 32                       | 36          | -87                         | 2                            | 63                          | 2                            | 11                       | -18                      | 18                       | 28          | -50                         | 3                            | 59  | 3                            |
|   | 4                   | 90                      | 1                        | -1                       | 35                       | 35          | -88                         | 2                            | 88                          | 2                            | -1                       | -17                      | 22                       | 28          | -52                         | 3                            | 93  | 3                            |
|   | 5                   | 120                     | -18                      | -4                       | 29                       | 34          | -83                         | 2                            | 122                         | 2                            | -10                      | -17                      | 16                       | 25          | -48                         | 4                            | 122   | 3                            |
|   | 6                   | 150                     | -33                      | -3                       | 17                       | 37          | -85                         | 2                            | 153                         | 2                            | -17                      | -16                      | 11                       | 26          | -52                         | 3                            | 147   | 3                            |
|   | 7                   | 180                     | -38                      | -2                       | 2                        | 38          | -87                         | 2                            | 183                         | 2                            | -20                      | -17                      | 1                        | 26          | -50                         | 3                            | 177   | 3                            |
|   | 8                   | 210                     | -29                      | -3                       | -20                      | 35          | -85                         | 2                            | 215                         | 2                            | -18                      | -15                      | -8                       | 25          | -53                         | 3                            | 204   | 3                            |
|   | 9                   | 240                     | -19                      | -3                       | -32                      | 37          | -85                         | 2                            | 239                         | 2                            | -10                      | -15                      | -19                      | 26          | -55                         | 3                            | 242   | 3                            |
|   | 10                  | 270                     | -1                       | -5                       | -36                      | 36          | -82                         | 2                            | 268                         | 2                            | 1                        | -14                      | -22                      | 26          | -58                         | 3                            | 273   | 3                            |
| 11  | 300                 | 18                      | -4                       | -31                      | 36                       | -84         | 2                           | 300                          | 2                           | 10                           | -15                      | -17                      | 25                       | -53         | 3                           | 300                          | 3   |                              |
| 12  | 330                 | 31                      | -3                       | -20                      | 37                       | -85         | 2                           | 327                          | 2                           | 17                           | -15                      | -11                      | 25                       | -53         | 3                           | 327                          | 3   |                              |

|  | Πίνακας Β11         |                                      | Θέση α2                  |                          |                          |             |                             |                              |                             |                              | Θέση β3                  |                          |                          |             |                             |                              |  |                              |
|--|---------------------|--------------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------|-----------------------------|------------------------------|---|------------------------------|
|  | ΑΓΓΕΙΟ 6<br>β. Βάση |                                      |                          |                          |                          |             |                             |                              |                             |                              |                          |                          |                          |             |                             |                              |   |                              |
|  | n                   | Φ <sub>δ</sub><br>(±1 <sup>ο</sup> ) | B <sub>x</sub><br>(±1nT) | B <sub>ψ</sub><br>(±1nT) | B <sub>z</sub><br>(±1nT) | B<br>(±1nT) | γ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | δγ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | φ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | δφ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | B <sub>x</sub><br>(±1nT) | B <sub>ψ</sub><br>(±1nT) | B <sub>z</sub><br>(±1nT) | B<br>(±1nT) | γ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | δγ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | φ <sub>B</sub> <sup>ο</sup>   | δφ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> |
|  | 1                   | 0                                    | 23                       | 0                        | 14                       | 27          | 59                          | 3                            | 0                           | 2                            | 24                       | 0                        | 14                       | 28          | 60                          | 3                            | 0   | 2                            |
|  | 2                   | 30                                   | 18                       | 9                        | 14                       | 25          | 55                          | 3                            | 27                          | 3                            | 21                       | 12                       | 13                       | 27          | 62                          | 3                            | 30  | 2                            |
|  | 3                   | 60                                   | 11                       | 21                       | 13                       | 27          | 61                          | 3                            | 62                          | 2                            | 13                       | 21                       | 12                       | 27          | 64                          | 3                            | 58  | 2                            |
|  | 4                   | 90                                   | -1                       | 23                       | 12                       | 26          | 62                          | 3                            | 92                          | 2                            | -1                       | 24                       | 13                       | 27          | 62                          | 3                            | 92  | 2                            |
|  | 5                   | 120                                  | -12                      | 17                       | 14                       | 25          | 56                          | 3                            | 125                         | 3                            | -11                      | 19                       | 14                       | 26          | 57                          | 3                            | 120   | 3                            |
|  | 6                   | 150                                  | -21                      | 11                       | 15                       | 28          | 58                          | 3                            | 152                         | 2                            | -21                      | 11                       | 15                       | 28          | 58                          | 3                            | 152   | 2                            |
|  | 7                   | 180                                  | -23                      | 1                        | 15                       | 27          | 57                          | 3                            | 178                         | 2                            | -24                      | 1                        | 15                       | 28          | 58                          | 3                            | 178   | 2                            |
|  | 8                   | 210                                  | -22                      | -12                      | 14                       | 29          | 61                          | 3                            | 209                         | 2                            | -19                      | -14                      | 14                       | 27          | 59                          | 3                            | 216   | 2                            |
|  | 9                   | 240                                  | -10                      | -18                      | 13                       | 24          | 58                          | 3                            | 241                         | 3                            | -12                      | -21                      | 13                       | 27          | 62                          | 3                            | 240   | 2                            |
|  | 10                  | 270                                  | 1                        | -23                      | 15                       | 27          | 57                          | 3                            | 272                         | 2                            | 1                        | -24                      | 15                       | 28          | 58                          | 3                            | 272   | 2                            |
| 11   | 300                 | 13                                   | -18                      | 14                       | 26                       | 58          | 3                           | 306                          | 3                           | 10                           | -21                      | 14                       | 27                       | 59          | 3                           | 295                          | 2   |                              |
| 12   | 330                 | 21                                   | -12                      | 14                       | 28                       | 60          | 3                           | 330                          | 2                           | 21                           | -11                      | 14                       | 28                       | 59          | 3                           | 332                          | 2   |                              |

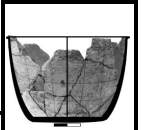
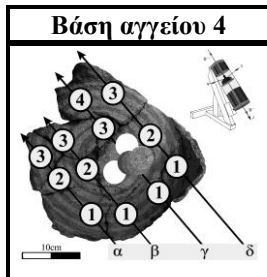
**Πίνακας B11.** Αποτελέσματα μετρήσεων του μαγνητικού πεδίου κατά την περιστροφή ακανόνιστων οστράκων γύρω από την τρισορθογώνια διάταξη των αισθητήρων/μαγνητών σε θραύσματα του σώματος (**α**) και της βάσης(**β**) του αγγείου 6.



Πίνακας B12a

| Δοκίμιο                                 |   | Μετρήσεις σε θέσεις στροφής $\phi_B (\pm 0,5^\circ)$ κυλινδρικών δοκιμών με τη διάταξη αισθητήρων/μαγνητών |            |            |            |             |             |             |             |             |             |             |             |               |                      |     |
|---|---|--|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------|----------------------|-----|
| $L \pm 1 \text{ mm}$                    | $\iota$                                 | $0^\circ$  | $30^\circ$ | $60^\circ$ | $90^\circ$ | $120^\circ$ | $150^\circ$ | $180^\circ$ | $210^\circ$ | $240^\circ$ | $270^\circ$ | $300^\circ$ | $330^\circ$ | $\bar{\iota}$ | $\delta \bar{\iota}$ |     |
| 22mm                                    | $B_x (\pm 0,2) \text{ nT}$              | 37,8   | 32,5       | 18,3       | -0,3       | -19,3       | -32,6       | -38,3       | -33,0       | -18,6       | -0,3        | 18,7        | 33,1        |               |                      |     |
|   | $B_\psi (\pm 0,2) \text{ nT}$           | 0,0  | 19,4       | 33,4       | 37,7       | 32,3        | 19,4        | -0,5        | -18,7       | -33,4       | -38,3       | -33,3       | -18,2       |               |                      |     |
|   | $B_z \pm (0,2) \text{ nT}$              | 17,7   | 17,7       | 17,6       | 17,5       | 17,3        | 17,6        | 17,4        | 17,9        | 17,8        | 17,7        | 17,6        | 17,8        | 17,6          | 0,1                  |     |
|   | $B, \delta B = 0,2 \text{ nT}$          | 41,7   | 41,8       | 42,0       | 41,6       | 41,4        | 41,8        | 42,1        | 41,9        | 42,2        | 42,2        | 42,1        | 41,8        | 41,9          | 0,2                  |     |
|   | $\gamma_B, \delta \gamma_B = 0,3^\circ$ | 64,9   | 64,9       | 65,2       | 65,1       | 65,3        | 65,1        | 65,6        | 64,7        | 65,0        | 65,2        | 65,3        | 64,8        | 65,1          | 0,2                  |     |
|   | $\phi_B, \delta \phi_B = 0,3^\circ$     | 0,5  | 30,8       | 61,3       | 90,5       | 120,9       | 149,2       | 180,7       | 209,5       | 240,9       | 269,6       | 299,3       | 331,2       |               |                      |     |
| Στήλη n πλακιδίων                       |   | Διάμετρος δοκιμίου/πλακιδίων = $40,0 (\pm 0,5) \text{ mm}$   |            |            |            |             |             |             |             |             |             |             |             |               |                      |     |
| $L_n \pm 0,2 \text{ mm}$                | $\iota$                                 | $0^\circ$  | $30^\circ$ | $60^\circ$ | $90^\circ$ | $120^\circ$ | $150^\circ$ | $180^\circ$ | $210^\circ$ | $240^\circ$ | $270^\circ$ | $300^\circ$ | $330^\circ$ | $\bar{\iota}$ | $\delta \bar{\iota}$ |     |
| m                                       | 3,0                                     | $B_x (\pm 0,2) \text{ nT}$   | 20,2       | 16,6       | 9,5        | -0,2        | -9,4        | -18,0       | -20,6       | -17,8       | -10,4       | 0,3         | 10,6        | 17,0          |                      |     |
| $B_\psi (\pm 0,2) \text{ nT}$           |   | 0,0  | 9,4        | 16,7       | 18,9       | 16,8        | 9,5         | -0,1        | -10,3       | -17,8       | -19,1       | -16,7       | -10,2       |               |                      |     |
| $B_z \pm (0,2) \text{ nT}$              |   | 12,4   | 11,8       | 13,5       | 12,0       | 12,5        | 12,9        | 13,2        | 12,0        | 11,9        | 12,9        | 12,3        | 12,1        | 12,5          | 0,5                  |     |
| $B, \delta B = 0,2 \text{ nT}$          |   | 23,7   | 22,4       | 23,5       | 22,4       | 23,0        | 24,1        | 24,5        | 23,8        | 23,8        | 23,1        | 23,3        | 23,2        | 23,4          | 0,5                  |     |
| $\gamma_B, \delta \gamma_B = 0,7^\circ$ |   | 58,5   | 58,3       | 54,9       | 57,6       | 57,0        | 57,6        | 57,3        | 59,7        | 60,0        | 56,0        | 58,1        | 58,6        | 57,8          | 0,5                  |     |
| $\phi_B, \delta \phi_B = 0,6^\circ$     |   | 0,0  | 29,5       | 60,4       | 90,6       | 119,2       | 152,2       | 180,3       | 210,1       | 239,7       | 270,9       | 302,4       | 329,0       |               |                      |     |
| 2                                       | 6,0                                     | $B_x (\pm 0,2) \text{ nT}$   | 30,2       | 25,5       | 14,6       | -0,3        | -14,8       | -25,2       | -30,5       | -26,1       | -15,0       | 0,2         | 15,0        | 25,4          |                      |     |
|   |   | $B_\psi (\pm 0,2) \text{ nT}$  | 0,0        | 15,7       | 26,4       | 29,7        | 26,7        | 15,6        | -0,3        | -15,7       | -25,8       | -30,5       | -25,2       | -15,1         |                      |     |
|   |   | $B_z \pm (0,2) \text{ nT}$   | 15,8       | 16,0       | 16,3       | 16,6        | 15,7        | 15,5        | 16,0        | 16,4        | 15,8        | 15,9        | 16,3        | 16,4          | 16,1                 | 0,3 |
|   |   | $B, \delta B = 0,2 \text{ nT}$   | 34,1       | 34,0       | 34,3       | 34,0        | 34,3        | 33,4        | 34,4        | 34,6        | 33,8        | 34,4        | 33,6        | 33,8          | 34,1                 | 0,3 |
|   |   | $\gamma_B, \delta \gamma_B = 0,4^\circ$  | 62,4       | 61,9       | 61,6       | 60,8        | 62,8        | 62,4        | 62,3        | 61,7        | 62,1        | 62,5        | 60,9        | 61,0          | 61,9                 | 0,3 |
|   |   | $\phi_B, \delta \phi_B = 0,4^\circ$  | 0,0        | 31,6       | 61,1       | 90,6        | 119,0       | 148,2       | 180,6       | 211,0       | 239,8       | 270,4       | 300,8       | 329,3         |                      |     |
| 3                                       | 9,0                                     | $B_x (\pm 0,2) \text{ nT}$   | 34,5       | 29,5       | 16,6       | -0,1        | -17,2       | -29,2       | -34,6       | -29,2       | -16,3       | 0,2         | 17,3        | 29,9          |                      |     |
|   |   | $B_\psi (\pm 0,2) \text{ nT}$  | 0,0        | 17,0       | 29,4       | 34,0        | 29,7        | 17,8        | -0,3        | -17,7       | -30,4       | -34,1       | -29,8       | -17,1         |                      |     |
|   |   | $B_z \pm (0,2) \text{ nT}$   | 17,1       | 17,3       | 17,0       | 16,6        | 16,9        | 17,0        | 16,8        | 17,2        | 17,0        | 16,8        | 16,9        | 17,1          | 17,0                 | 0,1 |
|   |   | $B, \delta B = 0,2 \text{ nT}$   | 38,5       | 38,2       | 37,8       | 37,8        | 38,3        | 38,2        | 38,5        | 38,2        | 38,5        | 38,0        | 38,4        | 38,5          | 38,2                 | 0,2 |
|   |   | $\gamma_B, \delta \gamma_B = 0,4^\circ$  | 63,6       | 63,1       | 63,3       | 64,0        | 63,8        | 63,6        | 64,1        | 63,3        | 63,8        | 63,8        | 63,9        | 63,6          | 63,6                 | 0,2 |
|   |   | $\phi_B, \delta \phi_B = 0,4^\circ$  | 0,0        | 30,0       | 60,5       | 90,2        | 120,1       | 148,6       | 180,5       | 211,2       | 241,8       | 270,3       | 300,1       | 330,2         |                      |     |
| 4                                       | 12,0                                    | $B_x (\pm 0,2) \text{ nT}$   | 36,5       | 31,8       | 17,7       | -0,2        | -18,2       | -31,0       | -36,2       | -31,5       | -18,3       | 0,6         | 18,4        | 31,5          |                      |     |
|   |   | $B_\psi (\pm 0,2) \text{ nT}$  | 0,0        | 18,2       | 31,6       | 36,1        | 31,7        | 18,5        | -0,2        | -18,4       | -31,1       | -36,0       | -31,4       | -18,3         |                      |     |
|   |   | $B_z \pm (0,2) \text{ nT}$   | 17,2       | 17,3       | 17,5       | 17,4        | 17,5        | 17,1        | 16,9        | 17,2        | 17,0        | 17,4        | 17,0        | 17,2          | 17,2                 | 0,2 |
|   |   | $B, \delta B = 0,2 \text{ nT}$   | 40,3       | 40,5       | 40,2       | 40,1        | 40,5        | 39,9        | 40,0        | 40,3        | 39,9        | 40,0        | 40,2        | 40,3          | 40,2                 | 0,2 |
|   |   | $\gamma_B, \delta \gamma_B = 0,3^\circ$  | 64,8       | 64,7       | 64,2       | 64,3        | 64,4        | 64,7        | 65,0        | 64,8        | 64,8        | 64,2        | 65,0        | 64,7          | 64,6                 | 0,2 |
|   |   | $\phi_B, \delta \phi_B = 0,3^\circ$  | 0,0        | 29,8       | 60,7       | 90,3        | 119,9       | 149,2       | 180,3       | 210,3       | 239,5       | 271,0       | 300,4       | 329,8         |                      |     |
| 5                                       | 15,0                                    | $B_x (\pm 0,2) \text{ nT}$   | 37,3       | 32,3       | 18,8       | -0,2        | -19,0       | -32,5       | -37,6       | -32,8       | -19,1       | 0,3         | 18,8        | 32,4          |                      |     |
|   |   | $B_\psi (\pm 0,2) \text{ nT}$  | 0,0        | 19,1       | 32,3       | 37,1        | 32,4        | 18,3        | -0,1        | -18,6       | -32,0       | -37,2       | -32,0       | -18,4         |                      |     |
|   |   | $B_z \pm (0,2) \text{ nT}$   | 17,5       | 17,5       | 17,3       | 17,4        | 17,6        | 17,7        | 17,7        | 17,8        | 17,5        | 17,5        | 17,4        | 17,5          | 17,5                 | 0,1 |
|   |   | $B, \delta B = 0,2 \text{ nT}$   | 41,2       | 41,4       | 41,2       | 41,0        | 41,5        | 41,3        | 41,6        | 41,7        | 41,2        | 41,1        | 41,0        | 41,2          | 41,3                 | 0,2 |
|   |   | $\gamma_B, \delta \gamma_B = 0,3^\circ$  | 64,9       | 65,0       | 65,2       | 64,9        | 64,9        | 64,6        | 64,8        | 64,7        | 64,8        | 64,8        | 64,9        | 64,8          | 64,9                 | 0,2 |
|   |   | $\phi_B, \delta \phi_B = 0,3^\circ$  | 0,0        | 30,6       | 59,8       | 90,3        | 120,4       | 150,6       | 180,2       | 209,6       | 239,2       | 270,5       | 300,4       | 330,4         |                      |     |
| 6                                       | 18,0                                    | $B_x (\pm 0,2) \text{ nT}$   | 38,0       | 32,6       | 18,5       | -0,3        | -19,3       | -32,7       | -38,1       | -32,6       | -18,4       | 0,2         | 19,2        | 33,3          |                      |     |
|   |   | $B_\psi (\pm 0,2) \text{ nT}$  | 0,0        | 19,0       | 33,0       | 38,2        | 32,6        | 19,1        | -0,2        | -19,3       | -33,0       | -37,8       | -32,5       | -18,4         |                      |     |
|   |   | $B_z \pm (0,2) \text{ nT}$   | 17,5       | 17,4       | 17,6       | 17,6        | 17,5        | 17,5        | 17,4        | 17,6        | 17,7        | 17,6        | 17,7        | 17,6          | 17,6                 | 0,1 |
|   |   | $B, \delta B = 0,2 \text{ nT}$   | 41,8       | 41,6       | 41,7       | 42,1        | 41,7        | 41,7        | 41,9        | 41,8        | 41,7        | 41,7        | 41,7        | 41,9          | 41,8                 | 0,1 |
|   |   | $\gamma_B, \delta \gamma_B = 0,3^\circ$  | 65,3       | 65,2       | 65,1       | 65,3        | 65,2        | 65,2        | 65,5        | 65,1        | 64,9        | 65,0        | 64,9        | 65,2          | 65,1                 | 0,1 |
|   |   | $\phi_B, \delta \phi_B = 0,3^\circ$  | 0,0        | 30,2       | 60,7       | 90,4        | 120,6       | 149,7       | 180,3       | 210,6       | 240,9       | 270,3       | 300,6       | 331,1         |                      |     |
| 7                                       | 21,0                                    | $B_x (\pm 0,2) \text{ nT}$   | 38,0       | 33,2       | 19,1       | -0,2        | -19,2       | -32,8       | -38,1       | -32,7       | -19,0       | 0,4         | 19,4        | 33,2          |                      |     |
|   |   | $B_\psi (\pm 0,2) \text{ nT}$  | 0,0        | 18,7       | 32,7       | 38,2        | 32,7        | 19,0        | -0,1        | -19,2       | -32,6       | -37,9       | -32,8       | -18,8         |                      |     |
|   |   | $B_z \pm (0,2) \text{ nT}$   | 17,6       | 17,5       | 17,5       | 17,6        | 17,7        | 17,6        | 17,8        | 17,6        | 17,5        | 17,5        | 17,6        | 17,6          | 17,6                 | 0,1 |
|   |   | $B, \delta B = 0,2 \text{ nT}$   | 41,9       | 41,9       | 41,7       | 42,1        | 41,8        | 41,8        | 42,1        | 41,8        | 41,6        | 41,7        | 42,0        | 42,0          | 41,9                 | 0,1 |
|   |   | $\gamma_B, \delta \gamma_B = 0,3^\circ$  | 65,1       | 65,3       | 65,2       | 65,3        | 65,0        | 65,1        | 65,0        | 65,1        | 65,1        | 65,2        | 65,2        | 65,2          | 65,2                 | 0,1 |
|   |   | $\phi_B, \delta \phi_B = 0,3^\circ$  | 0,0        | 29,4       | 59,7       | 90,3        | 120,4       | 149,9       | 180,2       | 210,4       | 239,8       | 270,6       | 300,6       | 330,5         |                      |     |
| 8                                       | 24,0                                    | $B_x (\pm 0,2) \text{ nT}$   | 38,0       | 32,7       | 18,7       | -0,4        | -18,7       | -33,3       | -38,2       | -32,7       | -19,4       | -0,3        | 18,5        | 12,7          |                      |     |
|   |   | $B_\psi (\pm 0,2) \text{ nT}$  | 0,0        | 19,0       | 33,1       | 37,9        | 32,8        | 18,5        | -0,1        | -19,3       | -32,5       | -38,1       | -33,0       | -19,2         |                      |     |
|   |   | $B_z \pm (0,2) \text{ nT}$   | 17,6       | 17,5       | 17,6       | 17,6        | 17,4        | 17,6        | 17,6        | 17,7        | 17,6        | 17,6        | 17,5        | 17,6          | 17,6                 | 0,1 |
|   |   | $B, \delta B = 0,2 \text{ nT}$   | 41,9       | 41,7       | 41,9       | 41,8        | 41,6        | 42,0        | 42,1        | 41,9        | 41,7        | 42,0        | 41,7        | 41,8          | 41,8                 | 0,1 |
|   |   | $\gamma_B, \delta \gamma_B = 0,3^\circ$  | 65,1       | 65,2       | 65,2       | 65,1        | 65,3        | 65,2        | 65,3        | 65,0        | 65,1        | 65,2        | 65,2        | 65,1          | 65,2                 | 0,1 |
|   |   | $\phi_B, \delta \phi_B = 0,3^\circ$  | 0,0        | 30,2       | 60,5       | 90,6        | 119,7       | 150,9       | 180,1       | 210,5       | 239,2       | 269,5       | 299,3       | 329,6         |                      |     |

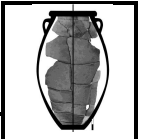
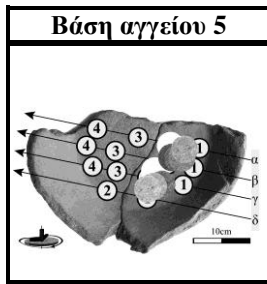
**Πίνακας B12a.** Μετρήσεις σε θέσεις στροφής των δοκιμών του **αγγείου 4**, με τη διάταξη αισθητήρων/μαγνητών. Το μαγνητικό πεδίο  $B$  αποκτά σταθερή τιμή, όταν το πάχος της στήλης γίνεται μεγαλύτερο από αυτό στην σκιασμένη περιοχή του πίνακα.



Πίνακας B12β

| Δοκίμιο                                 |   | Μετρήσεις σε θέσεις στροφής $\phi_8 (\pm 0,5^\circ)$ κυλινδρικών δοκιμών εντός του σωληνοειδούς |                            |            |            |             |             |             |             |             |             |             |             |               |                     |     |
|---|---|---|----------------------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------|---------------------|-----|
| $L \pm 1 \text{ mm}$                    | $\iota$                                 | $0^\circ$   | $30^\circ$                 | $60^\circ$ | $90^\circ$ | $120^\circ$ | $150^\circ$ | $180^\circ$ | $210^\circ$ | $240^\circ$ | $270^\circ$ | $300^\circ$ | $330^\circ$ | $\bar{\iota}$ | $\delta\bar{\iota}$ |     |
| 22mm                                    | $B_x (\pm 0,2) \text{ nT}$              | 38,1  | 32,6                       | 18,2       | -0,2       | -19,4       | -32,8       | -38,2       | -33,1       | -18,3       | -0,4        | 18,3        | 33,0        |               |                     |     |
|   | $B_\psi (\pm 0,2) \text{ nT}$           | 0,2   | 19,2                       | 33,2       | 38,2       | 32,5        | 19,4        | -0,2        | -18,8       | -33,3       | -38,1       | -33,0       | -18,7       |               |                     |     |
|   | $B_z \pm (0,2) \text{ nT}$              | 17,6  | 17,8                       | 17,5       | 17,6       | 17,4        | 17,6        | 17,5        | 17,4        | 17,7        | 17,5        | 17,6        | 17,7        | 17,6          | 0,1                 |     |
|   | $B, \delta B = 0,2 \text{ nT}$          | 42,0  | 41,8                       | 41,7       | 42,1       | 41,7        | 42,0        | 42,0        | 41,9        | 41,9        | 41,9        | 41,6        | 41,9        | 41,9          | 0,1                 |     |
|   | $\gamma_B, \delta \gamma_B = 0,3^\circ$ | 65,2  | 64,8                       | 65,2       | 65,3       | 65,3        | 65,2        | 65,4        | 65,4        | 65,0        | 65,3        | 65,0        | 65,0        | 65,2          | 0,1                 |     |
|   | $\phi_B, \delta \phi_B = 0,3^\circ$     | 0,3   | 30,5                       | 61,3       | 90,3       | 120,8       | 149,4       | 180,3       | 209,6       | 241,2       | 269,4       | 299,0       | 330,5       |               |                     |     |
| Στήλη η πλακιδίων                       |   | Διάμετρος δοκιμίου/πλακιδίων = $40,0 (\pm 0,5) \text{ mm}$                                      |                            |            |            |             |             |             |             |             |             |             |             |               |                     |     |
| $L_n \pm 0,2 \text{ mm}$                | $\iota$                                 | $0^\circ$   | $30^\circ$                 | $60^\circ$ | $90^\circ$ | $120^\circ$ | $150^\circ$ | $180^\circ$ | $210^\circ$ | $240^\circ$ | $270^\circ$ | $300^\circ$ | $330^\circ$ | $\bar{\iota}$ | $\delta\bar{\iota}$ |     |
| m                                       | 1                                       | 3,0   | $B_x (\pm 0,2) \text{ nT}$ | 19,7       | 17,9       | 10,4        | -0,1        | -9,4        | -17,8       | -20,8       | -17,0       | -9,9        | 10,4        | 18,1          |                     |     |
| $B_\psi (\pm 0,2) \text{ nT}$           |   |   | 0,0                        | 9,3        | 16,7       | 19,3        | 16,8        | 9,3         | -0,2        | -10,2       | -16,8       | -19,7       | -17,5       | -10,4         |                     |     |
| $B_z \pm (0,2) \text{ nT}$              |   |   | 12,1                       | 12,3       | 13,5       | 13,4        | 12,3        | 12,4        | 12,2        | 13,1        | 13,3        | 12,7        | 12,0        | 11,8          | 12,6                | 0,5 |
| $B, \delta B = 0,2 \text{ nT}$          |   |   | 23,1                       | 23,6       | 23,9       | 23,5        | 22,8        | 23,6        | 24,1        | 23,8        | 23,6        | 23,4        | 23,6        | 24,0          | 23,6                | 0,2 |
| $\gamma_B, \delta \gamma_B = 0,7^\circ$ |   |   | 58,4                       | 58,6       | 55,5       | 55,2        | 57,4        | 58,3        | 59,6        | 56,5        | 55,7        | 57,2        | 59,5        | 60,5          | 57,7                | 0,2 |
| $\phi_B, \delta \phi_B = 0,6^\circ$     |   |   | 0,0                        | 27,5       | 58,1       | 90,3        | 119,2       | 152,4       | 180,6       | 211,0       | 239,5       | 270,9       | 300,7       | 389,9         |                     |     |
| 2                                       | 6,0                                     | $B_x (\pm 0,2) \text{ nT}$  | 30,2                       | 25,5       | 14,6       | -0,3        | -14,8       | -25,2       | -30,5       | -26,1       | -15,0       | 0,2         | 15,0        | 25,4          |                     |     |
|   |   | $B_\psi (\pm 0,2) \text{ nT}$   | 0,0                        | 15,7       | 26,4       | 29,7        | 26,7        | 15,1        | -0,2        | -15,3       | -26,4       | -30,1       | -26,0       | -15,7         |                     |     |
|   |   | $B_z \pm (0,2) \text{ nT}$  | 15,6                       | 16,3       | 16,0       | 16,3        | 15,9        | 16,4        | 16,2        | 16,0        | 15,8        | 16,4        | 16,1        | 15,8          | 16,1                | 0,2 |
|   |   | $B, \delta B = 0,2 \text{ nT}$  | 34,0                       | 34,1       | 34,1       | 33,9        | 34,4        | 33,6        | 34,5        | 34,2        | 34,2        | 34,3        | 34,1        | 33,8          | 34,1                | 0,2 |
|   |   | $\gamma_B, \delta \gamma_B = 0,4^\circ$   | 62,7                       | 61,4       | 62,1       | 61,2        | 62,5        | 60,8        | 62,0        | 62,1        | 62,5        | 61,4        | 61,8        | 62,1          | 61,9                | 0,2 |
|   |   | $\phi_B, \delta \phi_B = 0,4^\circ$   | 0,0                        | 31,6       | 61,1       | 90,6        | 119,0       | 149,1       | 180,4       | 210,4       | 240,4       | 270,4       | 300,0       | 328,3         |                     |     |
| 3                                       | 9,0                                     | $B_x (\pm 0,2) \text{ nT}$  | 34,2                       | 30,0       | 16,9       | -0,2        | -16,6       | -29,7       | -34,0       | -29,5       | -16,8       | 0,1         | 17,7        | 29,5          |                     |     |
|   |   | $B_\psi (\pm 0,2) \text{ nT}$   | 0,0                        | 17,5       | 29,6       | 34,6        | 29,6        | 17,5        | -0,2        | -17,4       | -30,2       | -33,9       | -29,4       | -17,6         |                     |     |
|   |   | $B_z \pm (0,2) \text{ nT}$  | 16,8                       | 17,0       | 17,4       | 16,6        | 16,8        | 17,4        | 17,0        | 17,1        | 17,0        | 16,6        | 16,7        | 17,3          | 17,0                | 0,2 |
|   |   | $B, \delta B = 0,2 \text{ nT}$  | 38,1                       | 38,7       | 38,3       | 38,4        | 37,9        | 38,6        | 38,0        | 38,3        | 38,5        | 37,7        | 38,2        | 38,5          | 38,3                | 0,2 |
|   |   | $\gamma_B, \delta \gamma_B = 0,4^\circ$   | 63,8                       | 63,9       | 63,0       | 64,4        | 63,7        | 63,2        | 63,4        | 63,5        | 63,8        | 63,9        | 64,1        | 63,3          | 63,7                | 0,2 |
|   |   | $\phi_B, \delta \phi_B = 0,3^\circ$   | 0,0                        | 30,3       | 60,3       | 90,3        | 119,3       | 149,5       | 180,3       | 210,5       | 240,9       | 270,2       | 301,0       | 329,2         |                     |     |
| 4                                       | 12,0                                    | $B_x (\pm 0,2) \text{ nT}$  | 36,3                       | 31,4       | 18,0       | -0,1        | -17,8       | -31,0       | -36,6       | -31,0       | -18,2       | 0,3         | 18,4        | 31,2          |                     |     |
|   |   | $B_\psi (\pm 0,2) \text{ nT}$   | 0,0                        | 18,0       | 31,9       | 36,7        | 31,6        | 18,7        | -0,4        | -18,5       | -31,0       | -36,6       | -31,1       | -18,5         |                     |     |
|   |   | $B_z \pm (0,2) \text{ nT}$  | 17,3                       | 17,0       | 17,2       | 17,0        | 17,6        | 17,3        | 17,6        | 17,0        | 17,2        | 17,1        | 17,0        | 17,4          | 17,2                | 0,2 |
|   |   | $B, \delta B = 0,2 \text{ nT}$  | 40,2                       | 40,0       | 40,5       | 40,4        | 40,3        | 40,1        | 40,6        | 39,9        | 39,9        | 40,4        | 39,9        | 40,2          | 40,2                | 0,2 |
|   |   | $\gamma_B, \delta \gamma_B = 0,3^\circ$   | 64,5                       | 64,8       | 64,8       | 65,1        | 64,1        | 64,5        | 64,3        | 64,8        | 64,4        | 65,0        | 64,8        | 64,4          | 64,6                | 0,2 |
|   |   | $\phi_B, \delta \phi_B = 0,3^\circ$   | 0,0                        | 29,8       | 60,6       | 90,2        | 119,4       | 148,9       | 180,6       | 210,8       | 239,6       | 270,5       | 300,6       | 329,3         |                     |     |
| 5                                       | 15,0                                    | $B_x (\pm 0,2) \text{ nT}$  | 37,2                       | 32,0       | 19,1       | -0,1        | -19,3       | -32,3       | -37,7       | -32,4       | -19,0       | 0,2         | 19,2        | 32,3          |                     |     |
|   |   | $B_\psi (\pm 0,2) \text{ nT}$   | 0,0                        | 18,7       | 32,1       | 37,3        | 32,5        | 18,3        | -0,2        | -18,2       | -32,3       | -37,3       | -32,4       | -18,7         |                     |     |
|   |   | $B_z \pm (0,2) \text{ nT}$  | 17,5                       | 17,4       | 17,3       | 17,6        | 17,6        | 17,4        | 17,3        | 17,6        | 17,7        | 17,6        | 17,5        | 17,4          | 17,5                | 0,1 |
|   |   | $B, \delta B = 0,2 \text{ nT}$  | 41,1                       | 40,9       | 41,2       | 41,2        | 41,7        | 41,0        | 41,5        | 41,1        | 41,4        | 41,2        | 41,5        | 41,2          | 41,3                | 0,2 |
|   |   | $\gamma_B, \delta \gamma_B = 0,3^\circ$   | 64,8                       | 64,9       | 65,1       | 64,7        | 65,0        | 64,9        | 65,4        | 64,7        | 64,7        | 64,7        | 65,1        | 65,0          | 64,9                | 0,2 |
|   |   | $\phi_B, \delta \phi_B = 0,3^\circ$   | 0,0                        | 30,3       | 59,2       | 90,2        | 120,7       | 150,5       | 180,3       | 209,3       | 239,5       | 270,3       | 300,7       | 329,9         |                     |     |
| 6                                       | 18,0                                    | $B_x (\pm 0,2) \text{ nT}$  | 38,1                       | 32,9       | 18,7       | -0,1        | -19,5       | -32,6       | -38,0       | -32,8       | -18,6       | 0,1         | 19,4        | 33,0          |                     |     |
|   |   | $B_\psi (\pm 0,2) \text{ nT}$   | 0,0                        | 19,3       | 33,0       | 38,0        | 32,8        | 19,0        | -0,2        | -19,5       | -33,3       | -38,0       | -32,8       | -18,7         |                     |     |
|   |   | $B_z \pm (0,2) \text{ nT}$  | 17,5                       | 17,6       | 17,6       | 17,5        | 17,5        | 17,7        | 17,6        | 17,6        | 17,6        | 17,4        | 17,5        | 17,7          | 17,6                | 0,1 |
|   |   | $B, \delta B = 0,2 \text{ nT}$  | 41,9                       | 42,0       | 41,8       | 41,8        | 42,0        | 41,7        | 41,9        | 42,0        | 42,0        | 41,8        | 41,9        | 41,9          | 41,9                | 0,1 |
|   |   | $\gamma_B, \delta \gamma_B = 0,3^\circ$   | 65,3                       | 65,2       | 65,1       | 65,3        | 65,4        | 64,9        | 65,1        | 65,2        | 65,2        | 65,4        | 65,3        | 65,0          | 65,2                | 0,1 |
|   |   | $\phi_B, \delta \phi_B = 0,3^\circ$   | 0,0                        | 30,4       | 60,5       | 90,2        | 120,7       | 149,8       | 180,3       | 210,7       | 240,8       | 270,2       | 300,6       | 330,5         |                     |     |
| 7                                       | 21,0                                    | $B_x (\pm 0,2) \text{ nT}$  | 38,1                       | 33,0       | 19,0       | -0,1        | -19,5       | -32,7       | -38,0       | -32,5       | -19,3       | 0,2         | 19,2        | 33,0          |                     |     |
|   |   | $B_\psi (\pm 0,2) \text{ nT}$   | 0,0                        | 18,8       | 32,9       | 38,0        | 32,6        | 19,2        | -0,2        | -19,4       | -32,9       | -37,8       | -32,7       | -18,5         |                     |     |
|   |   | $B_z \pm (0,2) \text{ nT}$  | 17,5                       | 17,6       | 17,3       | 17,4        | 17,6        | 17,8        | 17,7        | 17,5        | 17,6        | 17,5        | 17,7        | 17,6          | 17,6                | 0,1 |
|   |   | $B, \delta B = 0,2 \text{ nT}$  | 41,9                       | 41,9       | 41,7       | 41,8        | 41,9        | 41,9        | 41,9        | 41,7        | 42,0        | 41,7        | 41,8        | 41,7          | 41,8                | 0,1 |
|   |   | $\gamma_B, \delta \gamma_B = 0,3^\circ$   | 65,3                       | 65,1       | 65,5       | 65,4        | 65,1        | 64,9        | 65,0        | 65,2        | 65,2        | 65,2        | 65,0        | 65,1          | 65,2                | 0,1 |
|   |   | $\phi_B, \delta \phi_B = 0,3^\circ$   | 0,0                        | 29,7       | 60,0       | 90,2        | 120,9       | 149,6       | 180,3       | 210,8       | 239,6       | 270,3       | 300,4       | 330,7         |                     |     |
| 8                                       | 24,0                                    | $B_x (\pm 0,2) \text{ nT}$  | 38,0                       | 32,7       | 18,8       | -0,2        | -18,8       | -33,0       | -38,0       | -32,9       | -19,2       | -0,1        | 18,6        | 32,8          |                     |     |
|   |   | $B_\psi (\pm 0,2) \text{ nT}$   | 0,0                        | 19,3       | 33,0       | 38,2        | 33,0        | 18,5        | -0,2        | -19,1       | -32,7       | -38,0       | -33,2       | -19,0         |                     |     |
|   |   | $B_z \pm (0,2) \text{ nT}$  | 17,5                       | 17,6       | 17,6       | 17,4        | 17,3        | 17,4        | 17,6        | 17,8        | 17,7        | 17,6        | 17,7        | 17,6          | 17,6                | 0,1 |
|   |   | $B, \delta B = 0,2 \text{ nT}$  | 41,8                       | 41,9       | 41,9       | 42,0        | 41,7        | 41,6        | 41,9        | 42,0        | 41,8        | 41,9        | 42,0        | 41,8          | 41,9                | 0,1 |
|   |   | $\gamma_B, \delta \gamma_B = 0,3^\circ$   | 65,3                       | 65,1       | 65,1       | 65,5        | 65,5        | 65,3        | 65,1        | 64,9        | 65,0        | 65,1        | 65,1        | 65,1          | 65,2                | 0,1 |
|   |   | $\phi_B, \delta \phi_B = 0,3^\circ$   | 0,0                        | 30,5       | 60,3       | 90,3        | 119,7       | 150,7       | 180,3       | 210,1       | 239,6       | 269,8       | 299,3       | 329,9         |                     |     |

Πίνακας B12β. Μετρήσεις σε θέσεις στροφής των δοκιμών του αγγείου 4 εντός του πηνίου. Το μαγνητικό πεδίο B αποκτά σταθερή τιμή, όταν το πάχος της στήλης γίνεται μεγαλύτερο από αυτό στην σκιασμένη περιοχή του πίνακα.

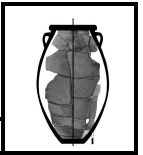
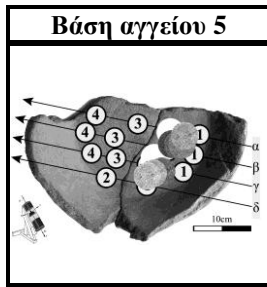


Πίνακας B13a

| Δοκίμιο                  |   | Μετρήσεις σε θέσεις στροφής $\phi_s (\pm 0,5^\circ)$ κυλινδρικών δοκιμών με τη διάταξη αισθητήρων/μαγνητών |            |            |            |             |             |             |             |             |             |             |             |               |                      |     |
|--------------------------|---|--|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------|----------------------|-----|
| $L \pm 1 \text{ mm}$     | $\iota$                                 | $0^\circ$  | $30^\circ$ | $60^\circ$ | $90^\circ$ | $120^\circ$ | $150^\circ$ | $180^\circ$ | $210^\circ$ | $240^\circ$ | $270^\circ$ | $300^\circ$ | $330^\circ$ | $\bar{\iota}$ | $\delta \bar{\iota}$ |     |
| 22mm                     | $B_x (\pm 0,2) \text{ nT}$              | 59,7   | 51,8       | 28,4       | -0,5       | -31,0       | -51,2       | -60,3       | -52,0       | -28,3       | -1,20       | 28,2        | 52,1        |               |                      |     |
|                          | $B_\psi (\pm 0,2) \text{ nT}$           | 0,0  | 29,4       | 51,8       | 59,7       | 51,3        | 30,4        | 0,8         | -28,7       | -52,4       | -59,3       | -52,3       | -28,2       |               |                      |     |
|                          | $B_z \pm (0,2) \text{ nT}$              | 16,7   | 16,5       | 16,9       | 16,5       | 16,3        | 16,4        | 16,7        | 16,9        | 16,1        | 16,4        | 16,6        | 16,8        | 16,6          | 0,2                  |     |
|                          | $B, \delta B = 0,2 \text{ nT}$          | 62,0   | 61,8       | 61,4       | 61,9       | 62,1        | 61,8        | 62,6        | 61,8        | 61,7        | 61,5        | 61,7        | 61,6        | 61,8          | 0,2                  |     |
|                          | $\gamma_B, \delta \gamma_B = 0,2^\circ$ | 74,4   | 74,5       | 74,0       | 74,6       | 74,8        | 74,6        | 74,5        | 74,1        | 74,9        | 74,5        | 74,4        | 74,2        | 74,5          | 0,2                  |     |
|                          | $\phi_B, \delta \phi_B = 0,2^\circ$     | 0,0  | 29,6       | 61,3       | 90,5       | 121,1       | 149,3       | 179,2       | 208,9       | 241,6       | 268,8       | 298,3       | 331,6       |               |                      |     |
| Στήλη η πλακιδίων        |   | Διάμετρος δοκιμίου/πλακιδίων = $40,0 (\pm 0,5) \text{ mm}$   |            |            |            |             |             |             |             |             |             |             |             |               |                      |     |
| $L_n \pm 0,2 \text{ mm}$ | $\iota$                                 | $0^\circ$  | $30^\circ$ | $60^\circ$ | $90^\circ$ | $120^\circ$ | $150^\circ$ | $180^\circ$ | $210^\circ$ | $240^\circ$ | $270^\circ$ | $300^\circ$ | $330^\circ$ | $\bar{\iota}$ | $\delta \bar{\iota}$ |     |
| 1                        | 3,0                                     | $B_x (\pm 0,2) \text{ nT}$   | 42,6       | 38,9       | 19,5       | 0,4         | -21,4       | -36,8       | -44,0       | -38,2       | -20,4       | -0,70       | 20,3        | 35,3          |                      |     |
|                          |   | $B_\psi (\pm 0,2) \text{ nT}$  | 0,0        | 20,4       | 35,8       | 42,4        | 37,1        | 22,1        | -0,7        | -20,7       | -38,4       | -42,5       | -35,6       | -23,2         |                      |     |
|                          |   | $B_z \pm (0,2) \text{ nT}$   | 14,7       | 14,6       | 14,1       | 14,0        | 14,2        | 14,5        | 14,6        | 14,7        | 14,6        | 14,3        | 14,6        | 14,8          | 14,5                 | 0,2 |
|                          |   | $B, \delta B = 0,2 \text{ nT}$   | 45,1       | 46,3       | 43,1       | 44,7        | 45,1        | 45,3        | 46,4        | 45,9        | 45,9        | 44,8        | 43,5        | 44,8          | 45,1                 | 0,7 |
|                          |   | $\gamma_B, \delta \gamma_B = 0,3^\circ$  | 71,0       | 71,6       | 70,9       | 71,7        | 71,7        | 71,3        | 71,6        | 71,3        | 71,4        | 71,4        | 70,4        | 70,7          | 71,3                 | 0,7 |
|                          |   | $\phi_B, \delta \phi_B = 0,3^\circ$  | 0,0        | 27,7       | 61,4       | 89,5        | 120,0       | 149,0       | 180,9       | 208,5       | 242,0       | 269,1       | 299,7       | 326,7         |                      |     |
| 2                        | 6,0                                     | $B_x (\pm 0,2) \text{ nT}$   | 54,8       | 47,2       | 28,1       | 0,9         | -26,1       | -47,9       | -54,4       | -47,5       | -26,3       | 0,50        | 28,5        | 48,0          |                      |     |
|                          |   | $B_\psi (\pm 0,2) \text{ nT}$  | 0,0        | 28,5       | 47,2       | 54,3        | 48,9        | 28,0        | -0,6        | -26,2       | -47,6       | -56,2       | -48,3       | -28,3         |                      |     |
|                          |   | $B_z \pm (0,2) \text{ nT}$   | 15,7       | 15,9       | 16,3       | 16,1        | 16,0        | 16,3        | 16,6        | 16,2        | 15,8        | 15,6        | 15,9        | 16,3          | 16,1                 | 0,2 |
|                          |   | $B, \delta B = 0,2 \text{ nT}$   | 57,0       | 57,4       | 57,3       | 56,6        | 57,7        | 57,8        | 56,9        | 56,6        | 56,6        | 58,3        | 58,3        | 58,1          | 57,4                 | 0,5 |
|                          |   | $\gamma_B, \delta \gamma_B = 0,2^\circ$  | 74,0       | 73,9       | 73,5       | 73,5        | 73,9        | 73,6        | 73,0        | 73,4        | 73,8        | 74,5        | 74,2        | 73,7          | 73,7                 | 0,5 |
|                          |   | $\phi_B, \delta \phi_B = 0,2^\circ$  | 0,0        | 31,1       | 59,2       | 89,1        | 118,1       | 149,7       | 180,6       | 208,9       | 241,1       | 270,5       | 300,5       | 329,5         |                      |     |
| 3                        | 9,0                                     | $B_x (\pm 0,2) \text{ nT}$   | 58,3       | 51,0       | 28,4       | -0,5        | -28,8       | -50,0       | -59,3       | -49,6       | -29,6       | 0,50        | 30,6        | 50,7          |                      |     |
|                          |   | $B_\psi (\pm 0,2) \text{ nT}$  | 0,0        | 29,4       | 51,5       | 58,4        | 51,0        | 30,2        | -0,4        | -30,4       | -51,0       | -58,2       | -50,7       | -30,5         |                      |     |
|                          |   | $B_z \pm (0,2) \text{ nT}$   | 16,0       | 16,4       | 16,4       | 16,2        | 16,1        | 16,3        | 16,4        | 16,6        | 16,5        | 16,8        | 16,5        | 16,4          | 16,4                 | 0,2 |
|                          |   | $B, \delta B = 0,2 \text{ nT}$   | 60,5       | 61,1       | 61,1       | 60,6        | 60,7        | 60,6        | 61,5        | 60,5        | 61,2        | 60,6        | 61,5        | 61,4          | 60,9                 | 0,4 |
|                          |   | $\gamma_B, \delta \gamma_B = 0,2^\circ$  | 74,7       | 74,4       | 74,4       | 74,5        | 74,6        | 74,4        | 74,5        | 74,1        | 74,4        | 73,9        | 74,4        | 74,5          | 74,4                 | 0,4 |
|                          |   | $\phi_B, \delta \phi_B = 0,2^\circ$  | 0,0        | 30,0       | 61,1       | 90,5        | 119,5       | 148,9       | 180,4       | 211,5       | 239,9       | 270,5       | 301,1       | 329,0         |                      |     |
| 4                        | 12,0                                    | $B_x (\pm 0,2) \text{ nT}$   | 59,4       | 51,7       | 29,5       | -0,4        | -29,4       | -51,0       | -59,3       | -51,6       | -31,3       | 0,40        | 30,5        | 51,8          |                      |     |
|                          |   | $B_\psi (\pm 0,2) \text{ nT}$  | 0,0        | 29,5       | 52,5       | 59,3        | 52,5        | 30,7        | -0,5        | -30,4       | -51,5       | -59,3       | -51,3       | -30,2         |                      |     |
|                          |   | $B_z \pm (0,2) \text{ nT}$   | 16,5       | 16,3       | 16,4       | 16,3        | 16,5        | 16,5        | 16,7        | 16,6        | 16,5        | 16,4        | 16,2        | 16,2          | 16,4                 | 0,1 |
|                          |   | $B, \delta B = 0,2 \text{ nT}$   | 61,6       | 61,7       | 62,4       | 61,5        | 62,4        | 61,8        | 61,6        | 62,1        | 62,5        | 61,5        | 61,8        | 62,1          | 61,9                 | 0,3 |
|                          |   | $\gamma_B, \delta \gamma_B = 0,2^\circ$  | 74,5       | 74,7       | 74,8       | 74,6        | 74,7        | 74,5        | 74,3        | 74,5        | 74,7        | 74,5        | 74,8        | 74,9          | 74,6                 | 0,3 |
|                          |   | $\phi_B, \delta \phi_B = 0,2^\circ$  | 0,0        | 29,7       | 60,7       | -89,6       | 119,2       | 149,0       | 180,5       | 210,5       | 238,7       | 270,4       | 300,7       | 329,8         |                      |     |
| 5                        | 15,0                                    | $B_x (\pm 0,2) \text{ nT}$   | 60,0       | 51,8       | 29,3       | -0,2        | -30,8       | -50,7       | -59,3       | -52,0       | -30,4       | 0,40        | 28,4        | 51,6          |                      |     |
|                          |   | $B_\psi (\pm 0,2) \text{ nT}$  | 0,0        | 29,8       | 52,0       | 59,5        | 51,0        | 31,3        | -0,4        | -29,6       | -51,4       | -59,7       | -52,0       | -29,3         |                      |     |
|                          |   | $B_z \pm (0,2) \text{ nT}$   | 16,5       | 16,3       | 16,3       | 16,2        | 16,4        | 16,6        | 16,7        | 16,5        | 16,2        | 16,1        | 16,7        | 16,4          | 16,4                 | 0,2 |
|                          |   | $B, \delta B = 0,2 \text{ nT}$   | 62,2       | 61,9       | 61,9       | 61,7        | 61,8        | 61,9        | 61,6        | 62,1        | 61,9        | 61,8        | 61,6        | 61,6          | 61,8                 | 0,2 |
|                          |   | $\gamma_B, \delta \gamma_B = 0,2^\circ$  | 74,6       | 74,7       | 74,7       | 74,8        | 74,6        | 74,4        | 74,3        | 74,6        | 74,8        | 74,9        | 74,3        | 74,6          | 74,6                 | 0,2 |
|                          |   | $\phi_B, \delta \phi_B = 0,2^\circ$  | 0,0        | 29,9       | 60,6       | 90,2        | 121,1       | 148,3       | 180,4       | 209,6       | 239,4       | 270,4       | 298,6       | 330,4         |                      |     |
| 6                        | 18,0                                    | $B_x (\pm 0,2) \text{ nT}$   | 59,6       | 51,2       | 30,1       | 0,3         | -30,8       | -51,1       | -59,3       | -51,6       | -30,8       | 0,60        | 30,1        | 51,4          |                      |     |
|                          |   | $B_\psi (\pm 0,2) \text{ nT}$  | 0,0        | 30,5       | 51,8       | 59,3        | 51,1        | 30,8        | 0,6         | -30,3       | -51,1       | -59,2       | -51,0       | -31,7         |                      |     |
|                          |   | $B_z \pm (0,2) \text{ nT}$   | 16,3       | 16,2       | 16,4       | 16,5        | 16,4        | 16,7        | 16,4        | 16,4        | 16,5        | 16,3        | 16,7        | 16,8          | 16,5                 | 0,1 |
|                          |   | $B, \delta B = 0,2 \text{ nT}$   | 61,8       | 61,8       | 62,1       | 61,6        | 61,9        | 62,0        | 61,5        | 62,0        | 61,9        | 61,4        | 61,5        | 62,7          | 61,8                 | 0,3 |
|                          |   | $\gamma_B, \delta \gamma_B = 0,2^\circ$  | 74,7       | 74,8       | 74,7       | 74,5        | 74,6        | 74,4        | 74,5        | 74,7        | 74,5        | 74,6        | 74,3        | 74,5          | 74,6                 | 0,3 |
|                          |   | $\phi_B, \delta \phi_B = 0,2^\circ$  | 0,0        | 30,8       | 59,8       | 89,7        | 121,1       | 148,9       | 179,4       | 210,4       | 238,9       | 270,6       | 300,5       | 328,3         |                      |     |
| 7                        | 21,0                                    | $B_x (\pm 0,2) \text{ nT}$   | 59,8       | 52,1       | 28,7       | -0,7        | -28,5       | -51,1       | -61,2       | -51,0       | -29,7       | 1,00        | 31,5        | 52,5          |                      |     |
|                          |   | $B_\psi (\pm 0,2) \text{ nT}$  | 0,0        | 29,0       | 52,5       | 59,3        | 52,2        | 30,2        | -1,0        | -30,3       | -50,4       | -59,3       | -51,7       | -29,0         |                      |     |
|                          |   | $B_z \pm (0,2) \text{ nT}$   | 16,6       | 16,4       | 16,7       | 16,4        | 16,5        | 16,6        | 16,5        | 16,7        | 16,7        | 16,5        | 16,5        | 16,4          | 16,5                 | 0,1 |
|                          |   | $B, \delta B = 0,2 \text{ nT}$   | 62,1       | 61,8       | 62,1       | 61,5        | 61,7        | 61,6        | 63,4        | 61,6        | 60,8        | 61,6        | 62,7        | 62,2          | 61,9                 | 0,5 |
|                          |   | $\gamma_B, \delta \gamma_B = 0,2^\circ$  | 74,5       | 74,6       | 74,4       | 74,5        | 74,5        | 74,4        | 74,9        | 74,3        | 74,1        | 74,5        | 74,8        | 74,7          | 74,5                 | 0,5 |
|                          |   | $\phi_B, \delta \phi_B = 0,2^\circ$  | 0,0        | 29,1       | 61,3       | 90,7        | 118,6       | 149,4       | 180,9       | 210,7       | 239,5       | 270,4       | 301,4       | 331,1         |                      |     |
| 8                        | 24,0                                    | $B_x (\pm 0,2) \text{ nT}$   | 59,9       | 51,1       | 29,8       | -0,8        | -29,3       | -52,4       | -60,3       | -51,0       | -30,0       | -0,20       | 29,0        | 51,0          |                      |     |
|                          |   | $B_\psi (\pm 0,2) \text{ nT}$  | 0,0        | 30,5       | 51,4       | 59,5        | 52,4        | 29,3        | -0,3        | -30,6       | -51,6       | -60,2       | -52,5       | -30,7         |                      |     |
|                          |   | $B_z \pm (0,2) \text{ nT}$   | 16,3       | 16,6       | 16,8       | 16,4        | 16,6        | 16,5        | 16,3        | 16,1        | 16,5        | 16,8        | 16,7        | 16,5          | 16,5                 | 0,2 |
|                          |   | $B, \delta B = 0,2 \text{ nT}$   | 62,1       | 61,8       | 61,7       | 61,7        | 62,3        | 62,3        | 62,5        | 61,6        | 61,9        | 62,5        | 62,3        | 61,8          | 62,0                 | 0,3 |
|                          |   | $\gamma_B, \delta \gamma_B = 0,2^\circ$  | 74,8       | 74,4       | 74,2       | 74,6        | 74,5        | 74,6        | 74,9        | 74,9        | 74,5        | 74,4        | 74,4        | 74,5          | 74,6                 | 0,3 |
|                          |   | $\phi_B, \delta \phi_B = 0,2^\circ$  | 0,0        | 30,8       | 59,9       | 90,8        | 119,2       | 150,8       | 180,3       | 211,0       | 239,8       | 269,8       | 298,9       | 329,0         |                      |     |

**Πίνακας B13a** Μετρήσεις σε θέσεις στροφής των δοκιμών του αγγείου 5, με τη διάταξη αισθητήρων/μαγνητών. Το μαγνητικό πεδίο B αποκτά σταθερή τιμή, όταν το πάχος της στήλης γίνεται μεγαλύτερο από αυτό στην σκιασμένη περιοχή του πίνακα.

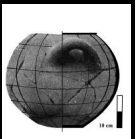
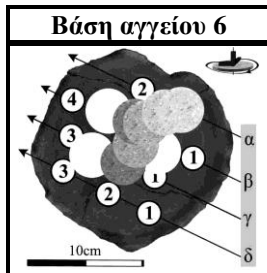




Πίνακας B13β

| Δοκίμιο                                 |   | Μετρήσεις σε θέσεις στροφής $\phi_s (\pm 0,5^\circ)$ κυλινδρικών δοκιμών εντός του σωληνοειδούς |            |            |            |             |             |             |             |             |             |             |             |               |                      |     |
|---|---|---|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------|----------------------|-----|
| $L \pm 1 \text{ mm}$                    | $\iota$                                 | $0^\circ$   | $30^\circ$ | $60^\circ$ | $90^\circ$ | $120^\circ$ | $150^\circ$ | $180^\circ$ | $210^\circ$ | $240^\circ$ | $270^\circ$ | $300^\circ$ | $330^\circ$ | $\bar{\iota}$ | $\delta \bar{\iota}$ |     |
| 22mm                                    | $B_x (\pm 0,2) \text{ nT}$              | 61,2  | 51,6       | 30,4       | -0,3       | -28,4       | -51,2       | -59,7       | -51,0       | -28,0       | -1,30       | 28,0        | 50,4        |               |                      |     |
|   | $B_\psi (\pm 0,2) \text{ nT}$           | 0,0   | 28,4       | 51,4       | 59,7       | 52,5        | 30,8        | 1,2         | -31,0       | -52,8       | -59,7       | -52,8       | -32,0       |               |                      |     |
|   | $B_z \pm (0,2)\text{nT}$                | 16,5  | 16,4       | 16,7       | 16,5       | 16,5        | 16,3        | 16,8        | 16,6        | 16,0        | 16,6        | 16,7        | 16,6        | 16,5          | 0,2                  |     |
|   | $B, \delta B = 0,2 \text{ nT}$          | 63,4  | 61,1       | 62,0       | 61,9       | 61,9        | 61,9        | 62,0        | 61,9        | 61,9        | 62,0        | 62,1        | 62,0        | 62,0          | 0,2                  |     |
|   | $\gamma_B, \delta \gamma_B = 0,2^\circ$ | 74,9  | 74,4       | 74,4       | 74,6       | 74,5        | 74,7        | 74,3        | 74,5        | 75,0        | 74,5        | 74,4        | 74,5        | 74,6          | 0,2                  |     |
|   | $\phi_B, \delta \phi_B = 0,2^\circ$     | 0,0   | 28,8       | 59,4       | 90,3       | 118,4       | 149,0       | 178,8       | 211,3       | 242,1       | 268,8       | 297,9       | 327,6       |               |                      |     |
| Στήλη η πλακιδίων                       |   | Διάμετρος δοκιμίου/πλακιδίων = $40,0(\pm 0,5)\text{mm}$   |            |            |            |             |             |             |             |             |             |             |             |               |                      |     |
| $L_n \pm 0,2 \text{ mm}$                | $\iota$                                 | $0^\circ$   | $30^\circ$ | $60^\circ$ | $90^\circ$ | $120^\circ$ | $150^\circ$ | $180^\circ$ | $210^\circ$ | $240^\circ$ | $270^\circ$ | $300^\circ$ | $330^\circ$ | $\bar{\iota}$ | $\delta \bar{\iota}$ |     |
| m                                       | 3,0                                     | $B_x (\pm 0,2) \text{ nT}$  | 43,1       | 36,9       | 20,8       | 0,6         | -23,4       | -38,6       | -44,5       | -36,2       | -19,6       | -1,20       | 20,8        | 37,5          |                      |     |
| $B_\psi (\pm 0,2) \text{ nT}$           |   | 0,0   | 22,3       | 39,5       | 43,4       | 36,4        | 21,6        | -0,5        | -22,7       | -38,0       | -44,5       | -37,6       | -21,2       |               |                      |     |
| $B_z \pm (0,2)\text{nT}$                |   | 14,4  | 14,3       | 14,0       | 14,4       | 14,9        | 15,0        | 14,3        | 14,2        | 14,4        | 14,0        | 14,5        | 14,6        | 14,4          | 0,2                  |     |
| $B, \delta B = 0,2 \text{ nT}$          |   | 45,4  | 45,4       | 46,8       | 45,7       | 45,8        | 46,7        | 46,7        | 45,0        | 45,1        | 46,7        | 45,4        | 45,5        | 45,9          | 0,6                  |     |
| $\gamma_B, \delta \gamma_B = 0,3^\circ$ |   | 71,5  | 71,7       | 72,6       | 71,6       | 71,0        | 71,3        | 72,2        | 71,6        | 71,4        | 72,5        | 71,4        | 71,3        | 71,7          | 0,6                  |     |
| $\phi_B, \delta \phi_B = 0,3^\circ$     |   | 0,0   | 31,1       | 62,2       | 89,2       | 122,7       | 150,8       | 180,6       | 212,1       | 242,7       | 268,5       | 299,0       | 330,5       |               |                      |     |
| 2                                       | 6,0                                     | $B_x (\pm 0,2) \text{ nT}$  | 55,7       | 47,9       | 29,3       | -0,9        | -25,5       | -48,4       | -55,0       | -46,5       | -25,3       | 0,70        | 28,4        | 48,7          |                      |     |
|   |   | $B_\psi (\pm 0,2) \text{ nT}$   | 0,0        | 27,5       | 47,0       | 55,3        | 48,2        | 27,3        | -0,3        | -29,2       | -48,6       | -55,2       | -47,3       | -29,3         |                      |     |
|   |   | $B_z \pm (0,2)\text{nT}$  | 16,3       | 15,6       | 16,5       | 15,6        | 16,0        | 16,7        | 16,4        | 15,7        | 15,9        | 15,5        | 15,9        | 15,8          | 16,0                 | 0,3 |
|   |   | $B, \delta B = 0,2 \text{ nT}$  | 58,0       | 57,4       | 57,8       | 57,5        | 56,8        | 58,0        | 57,4        | 57,1        | 57,1        | 57,3        | 57,4        | 59,0          | 57,6                 | 0,4 |
|   |   | $\gamma_B, \delta \gamma_B = 0,3^\circ$   | 73,7       | 74,2       | 73,4       | 74,2        | 73,6        | 73,3        | 73,4        | 74,0        | 73,8        | 74,3        | 73,9        | 74,5          | 73,9                 | 0,4 |
|   |   | $\phi_B, \delta \phi_B = 0,2^\circ$   | 0,0        | 29,9       | 58,1       | -89,1       | 117,9       | 150,6       | 180,3       | 212,1       | 242,5       | 270,7       | 301,0       | 329,0         |                      |     |
| 3                                       | 9,0                                     | $B_x (\pm 0,2) \text{ nT}$  | 58,7       | 51,3       | 27,6       | -0,3        | -29,5       | -50,6       | -58,7       | -49,8       | -30,8       | 1,20        | 27,6        | 52,7          |                      |     |
|   |   | $B_\psi (\pm 0,2) \text{ nT}$   | 0,0        | 28,5       | 51,8       | 58,7        | 50,5        | 29,7        | -1,0        | -31,0       | -50,0       | -58,7       | -52,7       | -27,5         |                      |     |
|   |   | $B_z \pm (0,2)\text{nT}$  | 15,8       | 16,0       | 16,2       | 16,0        | 16,3        | 16,3        | 16,4        | 16,2        | 16,7        | 16,9        | 16,4        | 16,2          | 16,3                 | 0,2 |
|   |   | $B, \delta B = 0,2 \text{ nT}$  | 60,8       | 60,8       | 60,9       | 60,8        | 60,7        | 60,9        | 61,0        | 60,9        | 61,1        | 61,1        | 61,7        | 61,6          | 61,0                 | 0,2 |
|   |   | $\gamma_B, \delta \gamma_B = 0,2^\circ$   | 74,9       | 74,7       | 74,6       | 74,8        | 74,4        | 74,5        | 74,4        | 74,6        | 74,1        | 73,9        | 74,6        | 74,8          | 74,5                 | 0,2 |
|   |   | $\phi_B, \delta \phi_B = 0,2^\circ$   | 0,0        | 29,1       | 62,0       | 90,3        | 120,3       | 149,6       | 181,0       | 211,9       | 238,4       | 271,2       | 297,6       | 332,4         |                      |     |
| 4                                       | 12,0                                    | $B_x (\pm 0,2) \text{ nT}$  | 59,8       | 50,7       | 31,5       | -0,8        | -29,0       | -50,2       | -59,7       | -52,6       | -30,3       | 0,20        | 31,5        | 51,0          |                      |     |
|   |   | $B_\psi (\pm 0,2) \text{ nT}$   | 0,0        | 31,5       | 50,5       | 59,0        | 52,0        | 30,0        | -1,4        | -28,4       | -51,5       | -59,7       | -50,3       | -30,8         |                      |     |
|   |   | $B_z \pm (0,2)\text{nT}$  | 16,7       | 16,2       | 16,4       | 16,6        | 16,8        | 16,1        | 16,0        | 16,2        | 16,7        | 16,0        | 16,3        | 16,5          | 16,4                 | 0,2 |
|   |   | $B, \delta B = 0,2 \text{ nT}$  | 62,1       | 61,8       | 61,7       | 61,3        | 61,9        | 60,7        | 61,8        | 61,9        | 62,0        | 61,8        | 61,5        | 61,8          | 61,7                 | 0,3 |
|   |   | $\gamma_B, \delta \gamma_B = 0,2^\circ$   | 74,4       | 74,8       | 74,6       | 74,3        | 74,2        | 74,6        | 75,0        | 74,8        | 74,4        | 75,0        | 74,6        | 74,5          | 74,6                 | 0,3 |
|   |   | $\phi_B, \delta \phi_B = 0,2^\circ$   | 0,0        | 31,9       | 58,0       | -89,2       | 119,1       | 149,1       | 181,3       | 208,4       | 239,5       | 270,2       | 302,1       | 328,9         |                      |     |
| 5                                       | 15,0                                    | $B_x (\pm 0,2) \text{ nT}$  | 59,7       | 51,2       | 27,3       | 1,3         | -29,8       | -50,9       | -59,9       | -52,6       | -30,1       | 0,70        | 28,0        | 52,0          |                      |     |
|   |   | $B_\psi (\pm 0,2) \text{ nT}$   | 0,0        | 30,8       | 53,0       | 59,7        | 52,6        | 31,3        | -0,7        | -28,6       | -51,6       | -59,7       | -52,8       | -29,0         |                      |     |
|   |   | $B_z \pm (0,2)\text{nT}$  | 16,1       | 16,0       | 16,5       | 16,4        | 16,4        | 16,3        | 16,5        | 16,8        | 17,0        | 16,6        | 16,9        | 16,4          | 16,5                 | 0,2 |
|   |   | $B, \delta B = 0,2 \text{ nT}$  | 61,8       | 61,9       | 61,9       | 61,9        | 62,6        | 61,9        | 62,1        | 62,2        | 62,1        | 62,0        | 62,1        | 61,8          | 62,0                 | 0,2 |
|   |   | $\gamma_B, \delta \gamma_B = 0,2^\circ$   | 74,9       | 75,0       | 74,5       | 74,6        | 74,8        | 74,7        | 74,6        | 74,3        | 74,1        | 74,5        | 74,2        | 74,6          | 74,6                 | 0,3 |
|   |   | $\phi_B, \delta \phi_B = 0,2^\circ$   | 0,0        | 31,0       | 62,7       | 88,8        | 119,5       | 148,4       | 180,7       | 208,5       | 239,7       | 270,7       | 297,9       | 330,9         |                      |     |
| 6                                       | 18,0                                    | $B_x (\pm 0,2) \text{ nT}$  | 59,7       | 51,7       | 31,3       | -0,7        | -29,8       | -52,3       | -59,6       | -51,0       | -30,5       | 0,40        | 29,3        | 50,7          |                      |     |
|   |   | $B_\psi (\pm 0,2) \text{ nT}$   | 0,0        | 30,0       | 50,9       | 59,6        | 51,7        | 29,5        | 0,4         | -31,3       | -51,3       | -59,7       | -52,5       | -31,7         |                      |     |
|   |   | $B_z \pm (0,2)\text{nT}$  | 16,1       | 16,0       | 16,2       | 16,7        | 16,5        | 16,8        | 16,3        | 16,0        | 16,1        | 16,6        | 16,5        | 16,7          | 16,4                 | 0,3 |
|   |   | $B, \delta B = 0,2 \text{ nT}$  | 61,8       | 61,9       | 61,9       | 61,9        | 61,9        | 62,4        | 61,8        | 61,9        | 61,8        | 62,0        | 62,3        | 62,1          | 62,0                 | 0,1 |
|   |   | $\gamma_B, \delta \gamma_B = 0,2^\circ$   | 74,9       | 75,0       | 74,8       | 74,3        | 74,5        | 74,4        | 74,7        | 75,0        | 74,9        | 74,5        | 74,7        | 74,4          | 74,7                 | 0,1 |
|   |   | $\phi_B, \delta \phi_B = 0,2^\circ$   | 0,0        | 30,1       | 58,4       | -89,3       | 120,0       | 150,6       | 179,6       | 211,5       | 239,3       | 270,4       | 299,2       | 328,0         |                      |     |
| 7                                       | 21,0                                    | $B_x (\pm 0,2) \text{ nT}$  | 59,7       | 51,2       | 28,2       | -0,9        | -28,0       | -50,7       | -59,8       | -51,7       | -30,7       | 1,00        | 31,7        | 51,3          |                      |     |
|   |   | $B_\psi (\pm 0,2) \text{ nT}$   | 0,0        | 30,9       | 52,7       | 59,7        | 52,5        | 31,7        | -1,0        | -29,7       | -51,4       | -59,7       | -50,7       | -30,5         |                      |     |
|   |   | $B_z \pm (0,2)\text{nT}$  | 16,5       | 16,2       | 16,0       | 16,1        | 16,4        | 16,5        | 16,2        | 16,2        | 16,1        | 16,3        | 16,4        | 16,4          | 16,3                 | 0,1 |
|   |   | $B, \delta B = 0,2 \text{ nT}$  | 61,9       | 62,0       | 61,9       | 61,8        | 61,7        | 62,0        | 62,0        | 61,8        | 62,0        | 61,9        | 62,0        | 61,9          | 61,9                 | 0,1 |
|   |   | $\gamma_B, \delta \gamma_B = 0,2^\circ$   | 74,6       | 74,8       | 75,0       | 74,9        | 74,6        | 74,6        | 74,8        | 74,8        | 74,9        | 74,7        | 74,7        | 74,6          | 74,8                 | 0,1 |
|   |   | $\phi_B, \delta \phi_B = 0,2^\circ$   | 0,0        | 31,1       | 61,8       | 90,9        | 118,1       | 148,0       | 181,0       | 209,9       | 239,2       | 271,0       | 302,0       | 329,3         |                      |     |
| 8                                       | 24,0                                    | $B_x (\pm 0,2) \text{ nT}$  | 59,7       | 51,7       | 29,0       | -0,5        | -27,3       | -52,8       | -59,7       | -51,0       | -31,3       | -0,70       | 28,4        | 51,2          |                      |     |
|   |   | $B_\psi (\pm 0,2) \text{ nT}$   | 0,0        | 29,9       | 52,3       | 59,7        | 53,2        | 28,3        | -0,6        | -31,6       | -50,6       | -59,2       | -52,8       | -31,7         |                      |     |
|   |   | $B_z \pm (0,2)\text{nT}$  | 16,1       | 16,4       | 16,5       | 16,1        | 16,3        | 16,7        | 16,0        | 16,4        | 16,7        | 17,0        | 16,9        | 16,3          | 16,5                 | 0,3 |
|   |   | $B, \delta B = 0,2 \text{ nT}$  | 61,8       | 61,9       | 62,0       | 61,8        | 62,0        | 62,2        | 61,8        | 62,2        | 61,8        | 61,6        | 62,3        | 62,4          | 62,0                 | 0,2 |
|   |   | $\gamma_B, \delta \gamma_B = 0,2^\circ$   | 74,9       | 74,6       | 74,6       | 74,9        | 74,8        | 74,4        | 75,0        | 74,7        | 74,3        | 74,0        | 74,3        | 74,9          | 74,6                 | 0,2 |
|   |   | $\phi_B, \delta \phi_B = 0,2^\circ$   | 0,0        | 30,0       | 61,0       | 90,5        | 117,2       | 151,8       | 180,6       | 211,8       | 238,3       | 269,3       | 298,3       | 328,2         |                      |     |

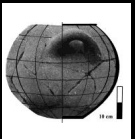
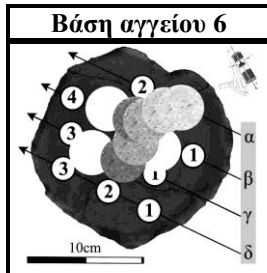
Πίνακας B13β. Μετρήσεις σε θέσεις στροφής των δοκιμίων του αγγείου 5 εντός του πηνίου. Το μαγνητικό πεδίο B αποκτά σταθερή τιμή, όταν το πάχος της στήλης γίνεται μεγαλύτερο από αυτό στην σκιασμένη περιοχή του πίνακα.



Πίνακας Β14α

| Δοκίμιο                  |   | Μετρήσεις σε θέσεις στροφής $\phi_s (\pm 0,5^\circ)$ κυλινδρικών δοκιμίων με τη διάταξη αισθητήρων/μαγνητών |            |            |            |             |             |             |             |             |             |             |             |               |                     |     |
|--------------------------|---|---|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------|---------------------|-----|
| $L \pm 1 \text{ mm}$     | $\iota$                                 | $0^\circ$   | $30^\circ$ | $60^\circ$ | $90^\circ$ | $120^\circ$ | $150^\circ$ | $180^\circ$ | $210^\circ$ | $240^\circ$ | $270^\circ$ | $300^\circ$ | $330^\circ$ | $\bar{\iota}$ | $\delta\bar{\iota}$ |     |
| 18mm                     | $B_x (\pm 0,2) \text{ nT}$              | 24,1  | 20,6       | 12,6       | 0,4        | -11,4       | -20,5       | -24,3       | -21,1       | -13,2       | -0,80       | 12,4        | 20,8        |               |                     |     |
|                          | $B_\psi (\pm 0,2) \text{ nT}$           | 0,0   | 12,3       | 20,3       | 24,0       | 21,7        | 12,2        | 0,8         | -11,2       | -20,5       | -23,7       | -21,0       | -11,7       |               |                     |     |
|                          | $B_z \pm (0,2) \text{ nT}$              | 13,7  | 13,5       | 14,4       | 14,6       | 14,3        | 13,6        | 13,5        | 13,5        | 13,5        | 14,1        | 14,5        | 14,3        | 14,0          | 0,4                 |     |
|                          | $B, \delta B = 0,2 \text{ nT}$          | 27,7  | 27,5       | 27,9       | 28,1       | 28,4        | 27,5        | 27,8        | 27,4        | 27,9        | 27,6        | 28,4        | 27,8        | 27,8          | 0,2                 |     |
|                          | $\gamma_B, \delta \gamma_B = 0,5^\circ$ | 60,4  | 60,6       | 58,9       | 58,7       | 59,7        | 60,3        | 61,0        | 60,5        | 61,0        | 59,3        | 59,3        | 59,1        | 59,9          | 0,2                 |     |
|                          | $\phi_B, \delta \phi_B = 0,5^\circ$     | 0,0   | 30,8       | 58,2       | 89,0       | 117,7       | 149,2       | 178,1       | 208,0       | 237,2       | 268,1       | 300,6       | 330,6       |               |                     |     |
| Στήλη η πλακιδίων        |   | Διάμετρος δοκιμίου/πλακιδίων = $40,0(\pm 0,5) \text{ mm}$   |            |            |            |             |             |             |             |             |             |             |             |               |                     |     |
| $L_n \pm 0,2 \text{ mm}$ | $\iota$                                 | $0^\circ$   | $30^\circ$ | $60^\circ$ | $90^\circ$ | $120^\circ$ | $150^\circ$ | $180^\circ$ | $210^\circ$ | $240^\circ$ | $270^\circ$ | $300^\circ$ | $330^\circ$ | $\bar{\iota}$ | $\delta\bar{\iota}$ |     |
| 1                        | 3,0                                     | $B_x (\pm 0,2) \text{ nT}$  | 10,8       | 9,3        | 6,2        | 0,2         | -5,4        | -10,4       | -12,2       | -9,4        | -5,4        | -0,30       | 4,7         | 9,9           |                     |     |
|                          |   | $B_\psi (\pm 0,2) \text{ nT}$   | 0,0        | 6,4        | 9,7        | 12,3        | 9,4         | 5,5         | -0,6        | -5,3        | -9,3        | -11,9       | -10,5       | -5,9          |                     |     |
|                          |   | $B_z \pm (0,2) \text{ nT}$  | 8,5        | 8,7        | 9,2        | 9,4         | 9,5         | 9,3         | 10,1        | 10,3        | 9,3         | 8,6         | 8,5         | 8,3           | 9,1                 | 0,5 |
|                          |   | $B, \delta B = 0,2 \text{ nT}$  | 13,7       | 14,3       | 14,7       | 15,5        | 14,4        | 15,0        | 15,8        | 14,9        | 14,2        | 14,7        | 14,3        | 14,2          | 14,7                | 0,5 |
|                          |   | $\gamma_B, \delta \gamma_B \approx 1^\circ$   | 51,8       | 52,4       | 51,4       | 52,6        | 48,8        | 51,7        | 50,4        | 46,3        | 49,1        | 54,2        | 53,5        | 54,2          | 51,4                | 0,5 |
|                          |   | $\phi_B, \delta \phi_B \approx 1^\circ$   | 0,0        | 34,5       | 57,4       | 89,1        | 119,9       | 152,1       | 182,8       | 209,4       | 239,9       | 268,6       | 294,1       | 329,2         |                     |     |
| 2                        | 6,0                                     | $B_x (\pm 0,2) \text{ nT}$  | 18,6       | 15,3       | 8,6        | 0,4         | -9,2        | -15,0       | -18,4       | -15,3       | -8,4        | 0,50        | 9,0         | 15,6          |                     |     |
|                          |   | $B_\psi (\pm 0,2) \text{ nT}$   | 0,0        | 9,4        | 15,3       | 18,4        | 15,3        | 9,1         | -0,2        | -8,7        | -15,6       | -18,4       | -15,3       | -9,0          |                     |     |
|                          |   | $B_z \pm (0,2) \text{ nT}$  | 12,5       | 12,2       | 12,0       | 11,8        | 12,0        | 12,3        | 12,4        | 12,7        | 12,8        | 12,0        | 12,5        | 12,9          | 12,3                | 0,3 |
|                          |   | $B, \delta B = 0,2 \text{ nT}$  | 22,4       | 21,7       | 21,3       | 21,9        | 21,5        | 21,4        | 22,2        | 21,7        | 21,9        | 22,0        | 21,7        | 22,2          | 21,8                | 0,3 |
|                          |   | $\gamma_B, \delta \gamma_B = 0,7^\circ$   | 56,1       | 55,8       | 55,6       | 57,3        | 56,1        | 55,0        | 56,0        | 54,2        | 54,2        | 56,9        | 54,8        | 54,4          | 55,5                | 0,3 |
|                          |   | $\phi_B, \delta \phi_B = 0,6^\circ$   | 0,0        | 31,6       | 60,7       | 88,8        | 121,0       | 148,8       | 180,6       | 209,6       | 241,7       | 271,6       | 300,5       | 330,0         |                     |     |
| 3                        | 9,0                                     | $B_x (\pm 0,2) \text{ nT}$  | 21,4       | 18,1       | 10,5       | -0,4        | -10,0       | -18,4       | -20,7       | -18,1       | -10,3       | -0,60       | 10,8        | 18,4          |                     |     |
|                          |   | $B_\psi (\pm 0,2) \text{ nT}$   | 0,0        | 10,8       | 18,1       | 21,5        | 18,3        | 11,1        | -0,3        | -10,6       | -18,5       | -21,5       | -18,3       | -10,5         |                     |     |
|                          |   | $B_z \pm (0,2) \text{ nT}$  | 13,4       | 13,0       | 13,4       | 12,5        | 12,6        | 12,9        | 12,4        | 12,8        | 13,6        | 13,5        | 13,3        | 13,0          | 13,0                | 0,3 |
|                          |   | $B, \delta B = 0,2 \text{ nT}$  | 25,2       | 24,8       | 24,8       | 24,9        | 24,4        | 25,1        | 24,1        | 24,6        | 25,2        | 25,4        | 25,1        | 24,9          | 24,9                | 0,3 |
|                          |   | $\gamma_B, \delta \gamma_B = 0,6^\circ$   | 57,9       | 58,3       | 57,4       | 59,8        | 58,9        | 59,0        | 59,1        | 58,6        | 57,3        | 57,9        | 58,0        | 58,5          | 58,4                | 0,3 |
|                          |   | $\phi_B, \delta \phi_B = 0,5^\circ$   | 0,0        | 30,8       | 59,9       | 91,1        | 118,7       | 148,9       | 180,8       | 210,4       | 240,9       | 268,4       | 300,5       | 330,3         |                     |     |
| 4                        | 12,0                                    | $B_x (\pm 0,2) \text{ nT}$  | 22,3       | 19,3       | 11,0       | -0,3        | -11,4       | -19,5       | -22,3       | -19,9       | -11,3       | -0,40       | 11,3        | 19,2          |                     |     |
|                          |   | $B_\psi (\pm 0,2) \text{ nT}$   | 0,0        | 11,5       | 19,5       | 22,6        | 19,4        | 11,4        | -0,3        | -11,4       | -19,2       | -22,2       | -19,8       | -11,7         |                     |     |
|                          |   | $B_z \pm (0,2) \text{ nT}$  | 13,5       | 13,2       | 13,0       | 12,8        | 13,4        | 13,5        | 13,4        | 13,7        | 13,8        | 13,7        | 13,5        | 13,2          | 13,4                | 0,2 |
|                          |   | $B, \delta B = 0,2 \text{ nT}$  | 26,1       | 26,1       | 25,9       | 26,0        | 26,2        | 26,3        | 26,0        | 26,7        | 26,2        | 26,1        | 26,5        | 26,1          | 26,2                | 0,2 |
|                          |   | $\gamma_B, \delta \gamma_B = 0,6^\circ$   | 58,8       | 59,6       | 59,9       | 60,5        | 59,2        | 59,1        | 59,0        | 59,1        | 58,2        | 58,3        | 59,4        | 59,6          | 59,2                | 0,2 |
|                          |   | $\phi_B, \delta \phi_B = 0,5^\circ$   | 0,0        | 30,8       | 60,6       | 90,8        | 120,4       | 149,7       | 180,8       | 209,8       | 239,5       | 269,0       | 299,7       | 328,6         |                     |     |
| 5                        | 15,0                                    | $B_x (\pm 0,2) \text{ nT}$  | 23,4       | 20,0       | 12,0       | 0,2         | -11,8       | -20,4       | -23,2       | -20,5       | -12,1       | -0,30       | 11,2        | 20,2          |                     |     |
|                          |   | $B_\psi (\pm 0,2) \text{ nT}$   | 0,0        | 11,7       | 20,1       | 23,1        | 19,8        | 12,0        | -0,3        | -11,3       | -20,3       | -23,6       | -20,3       | -11,2         |                     |     |
|                          |   | $B_z \pm (0,2) \text{ nT}$  | 14,0       | 13,7       | 13,8       | 13,7        | 13,8        | 13,6        | 13,3        | 13,2        | 13,5        | 13,4        | 13,9        | 13,7          | 13,6                | 0,2 |
|                          |   | $B, \delta B = 0,2 \text{ nT}$  | 27,3       | 26,9       | 27,2       | 26,9        | 26,9        | 27,3        | 26,7        | 26,9        | 27,2        | 27,1        | 27,0        | 26,9          | 27,0                | 0,2 |
|                          |   | $\gamma_B, \delta \gamma_B = 0,6^\circ$   | 59,1       | 59,4       | 59,5       | 59,3        | 59,1        | 60,1        | 60,2        | 60,6        | 60,3        | 60,4        | 59,1        | 59,3          | 59,7                | 0,2 |
|                          |   | $\phi_B, \delta \phi_B = 0,5^\circ$   | 0,0        | 30,3       | 59,2       | 89,5        | 120,8       | 149,5       | 180,7       | 208,9       | 239,2       | 269,3       | 298,9       | 331,0         |                     |     |
| 6                        | 18,0                                    | $B_x (\pm 0,2) \text{ nT}$  | 23,8       | 20,8       | 12,7       | 0,2         | -12,3       | -21,4       | -23,6       | -20,1       | -12,7       | -0,60       | 11,8        | 20,5          |                     |     |
|                          |   | $B_\psi (\pm 0,2) \text{ nT}$   | 0,0        | 11,4       | 20,3       | 23,8        | 20,1        | 11,3        | -0,3        | -12,6       | -20,7       | -23,8       | -21,1       | -12,4         |                     |     |
|                          |   | $B_z \pm (0,2) \text{ nT}$  | 13,9       | 13,7       | 13,9       | 13,9        | 13,8        | 14,3        | 14,0        | 13,8        | 13,7        | 13,5        | 13,8        | 14,0          | 13,9                | 0,1 |
|                          |   | $B, \delta B = 0,2 \text{ nT}$  | 27,6       | 27,4       | 27,7       | 27,6        | 27,3        | 28,1        | 27,4        | 27,4        | 27,9        | 27,4        | 27,8        | 27,7          | 27,6                | 0,2 |
|                          |   | $\gamma_B, \delta \gamma_B = 0,5^\circ$   | 59,7       | 60,0       | 59,9       | 59,7        | 59,6        | 59,4        | 59,3        | 59,8        | 60,6        | 60,4        | 60,3        | 59,7          | 59,9                | 0,2 |
|                          |   | $\phi_B, \delta \phi_B = 0,5^\circ$   | 0,0        | 28,7       | 58,0       | 89,5        | 121,5       | 152,2       | 180,7       | 212,1       | 238,5       | 268,6       | 299,2       | 328,8         |                     |     |
| 7                        | 21,0                                    | $B_x (\pm 0,2) \text{ nT}$  | 24,3       | 21,1       | 11,7       | -0,4        | -12,4       | -21,3       | -24,0       | -20,3       | -12,3       | 0,60        | 11,4        | 21,4          |                     |     |
|                          |   | $B_\psi (\pm 0,2) \text{ nT}$   | 0,0        | 12,3       | 21,4       | 23,8        | 20,2        | 11,4        | 0,4         | -12,2       | -21,0       | -24,4       | -21,1       | -11,7         |                     |     |
|                          |   | $B_z \pm (0,2) \text{ nT}$  | 14,3       | 14,0       | 14,2       | 14,0        | 13,6        | 13,4        | 14,0        | 13,8        | 13,9        | 13,6        | 14,0        | 14,2          | 13,9                | 0,2 |
|                          |   | $B, \delta B = 0,2 \text{ nT}$  | 28,2       | 28,2       | 28,2       | 27,6        | 27,3        | 27,6        | 27,8        | 27,4        | 28,0        | 27,9        | 27,8        | 28,2          | 27,9                | 0,3 |
|                          |   | $\gamma_B, \delta \gamma_B = 0,5^\circ$   | 59,5       | 60,2       | 59,8       | 59,5        | 60,2        | 61,0        | 59,7        | 59,8        | 60,3        | 60,9        | 59,7        | 59,8          | 60,0                | 0,3 |
|                          |   | $\phi_B, \delta \phi_B = 0,5^\circ$   | 0,0        | 30,2       | 61,3       | 91,0        | 121,5       | 151,8       | 179,0       | 211,0       | 239,6       | 271,4       | 298,4       | 331,3         |                     |     |
| 8                        | 24,0                                    | $B_x (\pm 0,2) \text{ nT}$  | 24,2       | 20,9       | 12,0       | 0,3         | -12,0       | -21,2       | -24,3       | -21,4       | -12,4       | -0,20       | 12,4        | 20,8          |                     |     |
|                          |   | $B_\psi (\pm 0,2) \text{ nT}$   | 0,0        | 12,3       | 21,0       | 24,4        | 20,8        | 11,7        | -0,2        | -11,4       | -20,8       | -24,1       | -20,7       | -12,4         |                     |     |
|                          |   | $B_z \pm (0,2) \text{ nT}$  | 14,0       | 13,9       | 13,8       | 14,2        | 14,4        | 14,0        | 14,2        | 13,8        | 13,6        | 13,7        | 13,9        | 14,1          | 14,0                | 0,2 |
|                          |   | $B, \delta B = 0,2 \text{ nT}$  | 28,0       | 28,0       | 27,8       | 28,2        | 28,0        | 28,0        | 28,1        | 27,9        | 27,8        | 27,7        | 27,8        | 28,0          | 27,9                | 0,1 |
|                          |   | $\gamma_B, \delta \gamma_B = 0,5^\circ$   | 60,0       | 60,2       | 60,3       | 59,8        | 59,1        | 60,0        | 59,7        | 60,4        | 60,7        | 60,4        | 60,1        | 59,8          | 60,0                | 0,1 |
|                          |   | $\phi_B, \delta \phi_B = 0,5^\circ$   | 0,0        | 30,5       | 60,3       | 89,3        | 120,0       | 151,1       | 180,5       | 208,0       | 239,2       | 269,5       | 300,9       | 329,2         |                     |     |

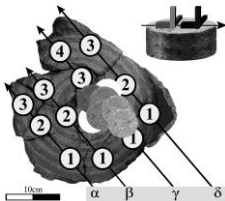
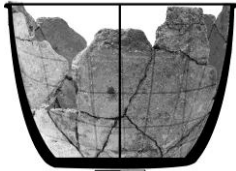
**Πίνακας Β14α.** Μετρήσεις σε θέσεις στροφής των δοκιμίων του αγγείου 6, με τη διάταξη αισθητήρων/μαγνητών. Το μαγνητικό πεδίο  $B$  αποκτά σταθερή τιμή, όταν το πάχος της στήλης γίνεται μεγαλύτερο από αυτό στην σκιασμένη περιοχή του πίνακα.



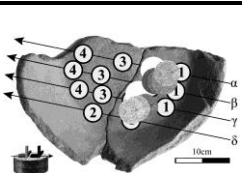
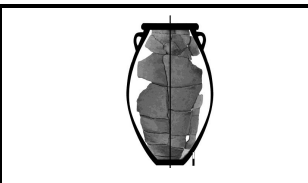
Πίνακας B14β

| Δοκίμιο                  |   | Μετρήσεις σε θέσεις στροφής $\phi_8 (\pm 0,5^\circ)$ κυλινδρικών δοκιμίων εντός του σωληνοειδούς |            |            |            |             |             |             |             |             |             |             |             |               |                     |     |
|--------------------------|---|--|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------|---------------------|-----|
| $L \pm 1 \text{ mm}$     | $\iota$                                 | $0^\circ$  | $30^\circ$ | $60^\circ$ | $90^\circ$ | $120^\circ$ | $150^\circ$ | $180^\circ$ | $210^\circ$ | $240^\circ$ | $270^\circ$ | $300^\circ$ | $330^\circ$ | $\bar{\iota}$ | $\delta\bar{\iota}$ |     |
| 18mm                     | $B_x (\pm 0,2) \text{ nT}$              | 24,0   | 21,3       | 12,9       | -0,6       | -12,7       | -20,6       | -24,0       | -20,6       | -11,2       | -0,60       | 12,7        | 20,4        |               |                     |     |
|                          | $B_\psi (\pm 0,2) \text{ nT}$           | 0,0  | 11,5       | 20,5       | 23,7       | 20,6        | 12,8        | 0,4         | -12,6       | -21,5       | -24,7       | -21,0       | -12,3       |               |                     |     |
|                          | $B_z \pm (0,2) \text{ nT}$              | 13,9   | 13,6       | 14,1       | 14,0       | 14,0        | 13,9        | 13,8        | 13,3        | 13,4        | 14,0        | 14,1        | 14,4        | 13,9          | 0,2                 |     |
|                          | $B, \delta B = 0,2 \text{ nT}$          | 27,7   | 27,8       | 28,0       | 27,5       | 28,0        | 28,0        | 27,7        | 27,6        | 27,7        | 28,4        | 28,3        | 27,8        | 27,9          | 0,2                 |     |
|                          | $\gamma_B, \delta \gamma_B = 0,5^\circ$ | 59,9   | 60,7       | 59,8       | 59,4       | 60,0        | 60,2        | 60,1        | 61,2        | 61,1        | 60,5        | 60,1        | 58,8        | 60,1          | 0,2                 |     |
|                          | $\phi_B, \delta \phi_B = 0,5^\circ$     | 0,0  | 28,4       | 57,8       | 91,5       | 121,7       | 148,1       | 179,0       | 211,5       | 242,5       | 268,6       | 301,2       | 328,9       |               |                     |     |
| Στήλη n πλακιδίων        |   | Διάμετρος δοκιμίου/πλακιδίων = $40,0(\pm 0,5) \text{ mm}$  |            |            |            |             |             |             |             |             |             |             |             |               |                     |     |
| $L_n \pm 0,2 \text{ mm}$ | $\iota$                                 | $0^\circ$  | $30^\circ$ | $60^\circ$ | $90^\circ$ | $120^\circ$ | $150^\circ$ | $180^\circ$ | $210^\circ$ | $240^\circ$ | $270^\circ$ | $300^\circ$ | $330^\circ$ | $\bar{\iota}$ | $\delta\bar{\iota}$ |     |
| 1<br>m                   | 3,0                                     | $B_x (\pm 0,2) \text{ nT}$   | 11,6       | 10,8       | 5,7        | 0,4         | -5,6        | -9,8        | -11,6       | -10,1       | -5,6        | -0,50       | 5,3         | 9,7           |                     |     |
|                          |   | $B_\psi (\pm 0,2) \text{ nT}$  | 0,0        | 4,1        | 10,0       | 11,3        | 9,9         | 5,6         | -0,3        | -5,6        | -9,8        | -11,6       | -9,9        | -5,4          |                     |     |
|                          |   | $B_z \pm (0,2) \text{ nT}$   | 9,2        | 8,9        | 9,0        | 9,2         | 8,7         | 9,6         | 9,7         | 10,0        | 9,6         | 9,3         | 9,0         | 8,9           | 9,3                 | 0,3 |
|                          |   | $B, \delta B = 0,2 \text{ nT}$   | 14,8       | 14,6       | 14,6       | 14,6        | 14,3        | 14,8        | 15,1        | 15,3        | 14,8        | 14,9        | 14,4        | 14,2          | 14,7                | 0,3 |
|                          |   | $\gamma_B, \delta \gamma_B \approx 1^\circ$  | 51,6       | 52,4       | 52,0       | 50,9        | 52,6        | 49,6        | 50,1        | 49,1        | 49,6        | 51,3        | 51,3        | 51,3          | 51,0                | 0,3 |
|                          |   | $\phi_B, \delta \phi_B \approx 1^\circ$  | 0,0        | 20,8       | 60,3       | 88,0        | 119,5       | 150,3       | 181,5       | 209,0       | 240,3       | 267,5       | 298,2       | 330,9         |                     |     |
| 2                        | 6,0                                     | $B_x (\pm 0,2) \text{ nT}$   | 18,0       | 15,4       | 8,4        | -0,4        | -9,5        | -15,5       | -18,0       | -15,1       | -9,6        | 0,60        | 8,5         | 16,1          |                     |     |
|                          |   | $B_\psi (\pm 0,2) \text{ nT}$  | 0,0        | 9,1        | 15,9       | 18,0        | 15,5        | 9,6         | -0,4        | -9,7        | -15,1       | -18,0       | -16,0       | -8,5          |                     |     |
|                          |   | $B_z \pm (0,2) \text{ nT}$   | 12,3       | 12,1       | 11,7       | 11,6        | 11,9        | 12,2        | 12,5        | 12,4        | 12,2        | 12,0        | 12,2        | 12,1          | 12,1                | 0,2 |
|                          |   | $B, \delta B = 0,2 \text{ nT}$   | 21,8       | 21,6       | 21,5       | 21,4        | 21,7        | 21,9        | 21,9        | 21,8        | 21,7        | 21,6        | 21,8        | 21,9          | 21,7                | 0,1 |
|                          |   | $\gamma_B, \delta \gamma_B = 0,7^\circ$  | 55,7       | 55,9       | 57,0       | 57,2        | 56,8        | 56,2        | 55,2        | 55,4        | 55,7        | 56,3        | 56,0        | 56,4          | 56,2                | 0,1 |
|                          |   | $\phi_B, \delta \phi_B = 0,6^\circ$  | 0,0        | 30,6       | 62,2       | 91,3        | 121,5       | 148,2       | 181,3       | 212,7       | 237,6       | 271,9       | 298,0       | 332,2         |                     |     |
| 3                        | 9,0                                     | $B_x (\pm 0,2) \text{ nT}$   | 21,1       | 18,4       | 10,1       | -0,6        | -11,2       | -18,6       | -21,1       | -18,7       | -11,2       | -0,30       | 11,2        | 18,7          |                     |     |
|                          |   | $B_\psi (\pm 0,2) \text{ nT}$  | 0,0        | 10,3       | 18,5       | 21,1        | 17,9        | 10,1        | -0,5        | -9,8        | -17,9       | -21,1       | -17,8       | -10,2         |                     |     |
|                          |   | $B_z \pm (0,2) \text{ nT}$   | 13,1       | 13,0       | 12,9       | 12,7        | 12,8        | 13,0        | 12,6        | 13,2        | 13,4        | 13,2        | 13,0        | 13,1          | 13,0                | 0,2 |
|                          |   | $B, \delta B = 0,2 \text{ nT}$   | 24,8       | 24,8       | 24,7       | 24,6        | 24,7        | 24,8        | 24,6        | 24,9        | 25,0        | 24,9        | 24,7        | 25,0          | 24,8                | 0,1 |
|                          |   | $\gamma_B, \delta \gamma_B = 0,6^\circ$  | 58,2       | 58,3       | 58,5       | 59,0        | 58,8        | 58,4        | 59,2        | 58,0        | 57,6        | 58,0        | 58,3        | 58,4          | 58,4                | 0,1 |
|                          |   | $\phi_B, \delta \phi_B = 0,5^\circ$  | 0,0        | 29,2       | 61,4       | 91,6        | 122,0       | 151,5       | 181,4       | 207,7       | 238,0       | 269,2       | 302,2       | 331,4         |                     |     |
| 4                        | 12,0                                    | $B_x (\pm 0,2) \text{ nT}$   | 22,6       | 19,0       | 10,7       | -0,4        | -10,6       | -20,5       | -22,6       | -19,8       | -10,8       | -0,20       | 10,4        | 19,5          |                     |     |
|                          |   | $B_\psi (\pm 0,2) \text{ nT}$  | 0,0        | 12,2       | 19,8       | 22,4        | 20,2        | 10,7        | 0,5         | -10,8       | -19,8       | -22,5       | -19,8       | -11,7         |                     |     |
|                          |   | $B_z \pm (0,2) \text{ nT}$   | 13,7       | 13,4       | 13,1       | 12,9        | 13,2        | 13,7        | 13,6        | 13,8        | 13,9        | 13,5        | 13,3        | 13,0          | 13,4                | 0,3 |
|                          |   | $B, \delta B = 0,2 \text{ nT}$   | 26,4       | 26,3       | 26,0       | 25,9        | 26,4        | 26,9        | 26,4        | 26,4        | 26,5        | 26,2        | 26,0        | 26,2          | 26,3                | 0,2 |
|                          |   | $\gamma_B, \delta \gamma_B = 0,6^\circ$  | 58,8       | 59,3       | 59,8       | 60,1        | 59,9        | 59,4        | 59,0        | 58,5        | 58,4        | 59,0        | 59,3        | 60,2          | 59,3                | 0,2 |
|                          |   | $\phi_B, \delta \phi_B = 0,5^\circ$  | 0,0        | 32,7       | 61,6       | 91,0        | 117,7       | 152,4       | 178,7       | 208,6       | 241,4       | 269,5       | 297,7       | 329,0         |                     |     |
| 5                        | 15,0                                    | $B_x (\pm 0,2) \text{ nT}$   | 23,3       | 20,0       | 12,3       | 0,5         | -12,3       | -20,6       | -23,4       | -20,3       | -11,5       | -0,60       | 11,0        | 20,7          |                     |     |
|                          |   | $B_\psi (\pm 0,2) \text{ nT}$  | 0,0        | 11,3       | 19,7       | 23,5        | 19,9        | 11,5        | -0,1        | -11,5       | -20,1       | -23,1       | -20,7       | -11,0         |                     |     |
|                          |   | $B_z \pm (0,2) \text{ nT}$   | 13,6       | 13,9       | 14,0       | 13,6        | 14,0        | 13,9        | 13,5        | 13,0        | 13,7        | 13,3        | 13,8        | 13,5          | 13,7                | 0,2 |
|                          |   | $B, \delta B = 0,2 \text{ nT}$   | 27,0       | 26,8       | 27,1       | 27,2        | 27,3        | 27,4        | 27,0        | 26,7        | 26,9        | 26,7        | 27,2        | 27,1          | 27,0                | 0,2 |
|                          |   | $\gamma_B, \delta \gamma_B = 0,6^\circ$  | 59,7       | 58,8       | 58,9       | 59,9        | 59,1        | 59,5        | 60,0        | 60,9        | 59,4        | 60,1        | 59,5        | 60,1          | 59,7                | 0,2 |
|                          |   | $\phi_B, \delta \phi_B = 0,5^\circ$  | 0,0        | 29,5       | 58,0       | 88,8        | 121,7       | 150,8       | 180,2       | 209,5       | 240,2       | 268,5       | 298,0       | 332,0         |                     |     |
| 6                        | 18,0                                    | $B_x (\pm 0,2) \text{ nT}$   | 23,9       | 21,2       | 11,4       | -0,4        | -11,6       | -20,4       | -23,9       | -20,7       | -12,2       | -0,70       | 12,5        | 20,3          |                     |     |
|                          |   | $B_\psi (\pm 0,2) \text{ nT}$  | 0,0        | 11,4       | 21,0       | 23,9        | 20,9        | 12,4        | -0,2        | -12,1       | -20,5       | -23,9       | -20,1       | -12,6         |                     |     |
|                          |   | $B_z \pm (0,2) \text{ nT}$   | 13,6       | 13,9       | 14,2       | 14,2        | 14,0        | 14,2        | 13,7        | 13,7        | 13,6        | 13,3        | 13,5        | 13,6          | 13,8                | 0,3 |
|                          |   | $B, \delta B = 0,2 \text{ nT}$   | 27,5       | 27,8       | 27,8       | 27,8        | 27,7        | 27,8        | 27,5        | 27,6        | 27,5        | 27,4        | 27,2        | 27,5          | 27,6                | 0,2 |
|                          |   | $\gamma_B, \delta \gamma_B = 0,5^\circ$  | 60,4       | 60,0       | 59,3       | 59,3        | 59,6        | 59,3        | 60,2        | 60,3        | 60,3        | 60,9        | 60,3        | 60,4          | 60,0                | 0,2 |
|                          |   | $\phi_B, \delta \phi_B = 0,5^\circ$  | 0,0        | 28,3       | 61,5       | -89,0       | 119,0       | 148,7       | 180,5       | 210,3       | 239,2       | 268,3       | 301,9       | 328,2         |                     |     |
| 7                        | 21,0                                    | $B_x (\pm 0,2) \text{ nT}$   | 24,2       | 20,7       | 12,6       | 0,2         | -12,9       | -20,8       | -24,2       | -20,6       | -12,7       | -0,40       | 11,4        | 20,8          |                     |     |
|                          |   | $B_\psi (\pm 0,2) \text{ nT}$  | 0,0        | 12,1       | 20,7       | 24,1        | 20,5        | 12,3        | 0,3         | -12,8       | -20,7       | -24,1       | -21,4       | -12,5         |                     |     |
|                          |   | $B_z \pm (0,2) \text{ nT}$   | 14,0       | 13,8       | 14,0       | 13,8        | 13,5        | 13,7        | 14,2        | 13,6        | 14,0        | 13,6        | 13,8        | 14,0          | 13,8                | 0,2 |
|                          |   | $B, \delta B = 0,2 \text{ nT}$   | 28,0       | 27,7       | 28,0       | 27,8        | 27,7        | 27,8        | 28,1        | 27,8        | 28,0        | 27,7        | 27,9        | 28,0          | 27,9                | 0,1 |
|                          |   | $\gamma_B, \delta \gamma_B = 0,5^\circ$  | 60,0       | 60,1       | 60,0       | 60,2        | 60,9        | 60,4        | 59,6        | 60,7        | 60,0        | 60,6        | 60,4        | 60,0          | 60,2                | 0,1 |
|                          |   | $\phi_B, \delta \phi_B = 0,5^\circ$  | 0,0        | 30,3       | 58,7       | 269,5       | 122,2       | 149,4       | 179,3       | 211,9       | 238,5       | 269,0       | 298,0       | 329,0         |                     |     |
| 8                        | 24,0                                    | $B_x (\pm 0,2) \text{ nT}$   | 24,2       | 21,0       | 11,6       | -0,4        | -11,7       | -21,3       | -24,2       | -21,1       | -11,9       | 0,50        | 12,5        | 20,6          |                     |     |
|                          |   | $B_\psi (\pm 0,2) \text{ nT}$  | 0,0        | 12,2       | 21,4       | 24,0        | 21,4        | 11,5        | 0,3         | -11,7       | -21,1       | -24,2       | -20,8       | -12,7         |                     |     |
|                          |   | $B_z \pm (0,2) \text{ nT}$   | 13,7       | 14,2       | 14,0       | 14,0        | 13,8        | 13,7        | 13,0        | 13,7        | 14,0        | 13,7        | 14,0        | 13,7          | 13,8                | 0,2 |
|                          |   | $B, \delta B = 0,2 \text{ nT}$   | 27,8       | 28,1       | 28,1       | 27,8        | 28,0        | 27,8        | 27,5        | 27,7        | 28,0        | 27,8        | 28,0        | 27,8          | 27,9                | 0,1 |
|                          |   | $\gamma_B, \delta \gamma_B = 0,5^\circ$  | 60,5       | 59,7       | 60,1       | 59,7        | 60,5        | 60,5        | 61,8        | 60,4        | 60,0        | 60,5        | 60,0        | 60,5          | 60,3                | 0,1 |
|                          |   | $\phi_B, \delta \phi_B = 0,5^\circ$  | 0,0        | 30,2       | 61,5       | -89,0       | 118,7       | 151,6       | 179,3       | 209,0       | 240,6       | 268,3       | 301,0       | 328,3         |                     |     |

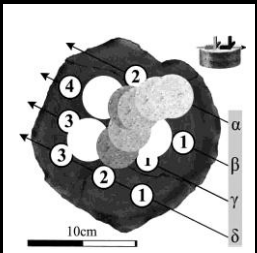
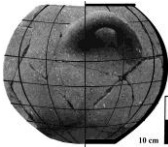
Πίνακας B14β Μετρήσεις σε θέσεις στροφής των δοκιμίων του αγγείου 6 εντός του πηνίου. Το μαγνητικό πεδίο B αποκτά σταθερή τιμή, όταν το πάχος της στήλης γίνεται μεγαλύτερο από αυτό στην σκιασμένη περιοχή του πίνακα.

|   |           |   |                          |                         |           |                             |                              |                               |   |  |
|---|-----------|---|--------------------------|-------------------------|-----------|-----------------------------|------------------------------|-------------------------------|---|--|
|  |           |   |                          |                         |           |                             |                              |                               |  |  |
|   |           | ΑΓΓΕΙΟ 4  |                          |                         |           |                             |                              |                               |   |  |
|   |           | Πίνακας B15   |                          |                         |           |                             |                              |                               |   |  |
| Βάση αγγείου 4  |           | Μετρήσεις κυλινδρικών δοκιμών στην κατεύθυνση της Βκψ |                          |                         |           |                             |                              |                               |   |  |
| n   | L(±0,2)mm | D <sub>n</sub> (±0,2)mm                               | B <sub>κψ</sub> (±0,2)nT | B <sub>z</sub> (±0,2)nT | B(±0,2)nT | γ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | δγ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | d=1/2.L.εφγ <sub>B</sub> (mm) | Δd(mm)  |  |
| 1   | 20,0      | 25,0  | 38,4                     | 17,6                    | 42,2      | 65,4                        | 0,3                          | 21,6                          | 0,3   |  |
| 2   |           | 24,0  | 38,3                     | 17,7                    | 42,2      | 65,2                        | 0,3                          |                               |   |  |
| 3   |           | 23,0  | 38,3                     | 17,6                    | 42,2      | 65,3                        | 0,3                          |                               |   |  |
| 4   |           | 22,0  | 38,2                     | 17,7                    | 42,1      | 65,1                        | 0,3                          |                               |   |  |
| 5   |           | 21,0  | 38,1                     | 17,6                    | 42,0      | 65,2                        | 0,3                          |                               |   |  |
| 6   |           | 20,0  | 37,9                     | 17,7                    | 41,8      | 65,0                        | 0,3                          |                               |   |  |
| 7   |           | 19,0  | 37,8                     | 17,5                    | 41,7      | 65,2                        | 0,3                          |                               |   |  |
| 8   |           | 18,0  | 37,6                     | 17,5                    | 41,5      | 65,0                        | 0,3                          |                               |   |  |
| 9   |           | 17,0  | 37,4                     | 17,4                    | 41,2      | 65,1                        | 0,3                          |                               |   |  |
| 10  |           | 16,0  | 37,1                     | 17,4                    | 41,0      | 64,9                        | 0,3                          |                               |   |  |
| 11  |           | 15,0  | 36,8                     | 17,3                    | 40,7      | 64,8                        | 0,3                          |                               |   |  |
| 12  |           | 14,0  | 36,5                     | 17,4                    | 40,4      | 64,5                        | 0,3                          |                               |   |  |
| 13  |           | 13,0  | 36,0                     | 17,2                    | 39,9      | 64,5                        | 0,3                          |                               |   |  |
| 14  |           | 12,0  | 35,5                     | 17,0                    | 39,4      | 64,4                        | 0,4                          |                               |   |  |

**Πίνακας B15.** Μετρήσεις στη διεύθυνση της  $\vec{B}_{κψ}$  των δοκιμών του **αγγείου 4**, με τη διάταξη αισθητήρων/μαγνητών. Το μαγνητικό πεδίο B αρχίζει να μειώνεται, όταν η απόσταση D<sub>n</sub> μεταξύ της θέσης μέτρησης και του άκρου του δοκιμίου γίνεται μικρότερη από αυτήν στην σκιασμένη περιοχή του πίνακα.

|   |           |   |                          |                         |           |                             |                              |                               |             |  |  |  |  |  |  |
|---|-----------|---|--------------------------|-------------------------|-----------|-----------------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------|--|--|--|--|--|--|
|  |           |  |                          |                         |           |                             |                              |                               |             |  |  |  |  |  |  |
|   |           |   |                          |                         |           |                             |                              |                               | ΑΓΓΕΙΟ 5    |  |  |  |  |  |  |
|   |           |   |                          |                         |           |                             |                              |                               | Πίνακας B16 |  |  |  |  |  |  |
| Βάση αγγείου 5  |           | Μετρήσεις κυλινδρικών δοκιμών στην κατεύθυνση της Βκψ                                 |                          |                         |           |                             |                              |                               |             |  |  |  |  |  |  |
| n   | L(±0,2)mm | D <sub>n</sub> (±0,2)mm   | B <sub>κψ</sub> (±0,2)nT | B <sub>z</sub> (±0,2)nT | B(±0,2)nT | γ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | δγ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | d=1/2.L.εφγ <sub>B</sub> (mm) | Δd(mm)      |  |  |  |  |  |  |
| 1   | 12,0      | 25,0  | 60,2                     | 16,8                    | 62,5      | 74,4                        | 0,2                          | 21,7                          | 0,3         |  |  |  |  |  |  |
| 2   |           | 24,0  | 60,3                     | 16,6                    | 62,5      | 74,6                        | 0,2                          |                               |             |  |  |  |  |  |  |
| 3   |           | 23,0  | 60,2                     | 16,7                    | 62,5      | 74,5                        | 0,2                          |                               |             |  |  |  |  |  |  |
| 4   |           | 22,0  | 60,1                     | 16,6                    | 62,4      | 74,6                        | 0,2                          |                               |             |  |  |  |  |  |  |
| 5   |           | 21,0  | 59,9                     | 16,5                    | 62,1      | 74,6                        | 0,2                          |                               |             |  |  |  |  |  |  |
| 6   |           | 20,0  | 59,7                     | 16,5                    | 61,9      | 74,6                        | 0,2                          |                               |             |  |  |  |  |  |  |
| 7   |           | 19,0  | 59,4                     | 16,5                    | 61,6      | 74,5                        | 0,2                          |                               |             |  |  |  |  |  |  |
| 8   |           | 18,0  | 59,1                     | 16,4                    | 61,3      | 74,5                        | 0,2                          |                               |             |  |  |  |  |  |  |
| 9   |           | 17,0  | 58,9                     | 16,4                    | 61,1      | 74,4                        | 0,2                          |                               |             |  |  |  |  |  |  |
| 10  |           | 16,0  | 58,4                     | 16,4                    | 60,7      | 74,3                        | 0,2                          |                               |             |  |  |  |  |  |  |
| 11  |           | 15,0  | 58,0                     | 16,3                    | 60,2      | 74,3                        | 0,2                          |                               |             |  |  |  |  |  |  |
| 12  |           | 14,0  | 57,7                     | 16,3                    | 60,0      | 74,2                        | 0,2                          |                               |             |  |  |  |  |  |  |
| 13  |           | 13,0  | 56,8                     | 16,1                    | 59,0      | 74,2                        | 0,2                          |                               |             |  |  |  |  |  |  |
| 14  |           | 12,0  | 56,0                     | 15,9                    | 58,2      | 74,1                        | 0,2                          |                               |             |  |  |  |  |  |  |

**Πίνακας B16.** Μετρήσεις στη διεύθυνση της  $\vec{B}_{κψ}$  των δοκιμών του **αγγείου 5**, με τη διάταξη αισθητήρων/μαγνητών. Το μαγνητικό πεδίο B αρχίζει να μειώνεται, όταν η απόσταση D<sub>n</sub> μεταξύ της θέσης μέτρησης και του άκρου του δοκιμίου γίνεται μικρότερη από αυτήν στην σκιασμένη περιοχή του πίνακα.

|  |                       |   |                               |                         |                       |                  |                        |  |                       |
|---|-----------------------|---|-------------------------------|-------------------------|-----------------------|------------------|------------------------|---|-----------------------|
| <b>ΑΓΓΕΙΟ 6</b>   |                       |   |                               |                         |                       |                  |                        |   |                       |
| <b>Πίνακας B17</b>  |                       |   |                               |                         |                       |                  |                        |   |                       |
| <b>Βάση αγγείου 6</b>   |                       | <b>Μετρήσεις κυλινδρικών δοκιμών στην κατεύθυνση της <math>B_{x\psi}</math></b> |                               |                         |                       |                  |                        |   |                       |
| n   | $L(\pm 0,2)\text{mm}$ | $D_n(\pm 0,2)\text{mm}$   | $B_{x\psi}(\pm 0,2)\text{nT}$ | $B_z(\pm 0,2)\text{nT}$ | $B(\pm 0,2)\text{nT}$ | $\gamma_B^\circ$ | $\delta\gamma_B^\circ$ | $d=1/2 \cdot L \cdot \epsilon\phi\gamma_B(\text{mm})$                               | $\Delta d(\text{mm})$ |
| 1   | <b>21,0</b>           | 24,0  | 24,2                          | 13,3                    | 27,6                  | 61,2             | 0,5                    | <b>19,3</b>   | <b>0,3</b>            |
| 2   |                       | 23,0  | 24,2                          | 13,2                    | 27,6                  | 61,4             | 0,5                    |   |                       |
| 3   |                       | 22,0  | 24,1                          | 13,1                    | 27,5                  | 61,5             | 0,5                    |   |                       |
| 4   |                       | 21,0  | 24,2                          | 13,2                    | 27,6                  | 61,4             | 0,5                    |   |                       |
| <b>5</b>  |                       | <b>20,0</b>   | <b>24,2</b>                   | <b>13,2</b>             | <b>27,6</b>           | <b>61,4</b>      | <b>0,5</b>             |   |                       |
| 6   |                       | 19,0  | 24,1                          | 13,1                    | 27,4                  | 61,5             | 0,5                    |   |                       |
| 7   |                       | 18,0  | 24,0                          | 13,1                    | 27,3                  | 61,4             | 0,5                    |   |                       |
| 8   |                       | 17,0  | 23,9                          | 13,1                    | 27,3                  | 61,3             | 0,5                    |   |                       |
| 9   |                       | 16,0  | 23,8                          | 13,1                    | 27,2                  | 61,2             | 0,5                    |   |                       |
| 10  |                       | 15,0  | 23,6                          | 13,0                    | 26,9                  | 61,2             | 0,5                    |   |                       |
| 11  |                       | 14,0  | 23,3                          | 13,0                    | 26,7                  | 60,8             | 0,5                    |   |                       |
| 12  |                       | 13,0  | 23,0                          | 12,9                    | 26,4                  | 60,7             | 0,6                    |   |                       |
| 13  |                       | 12,0  | 22,8                          | 12,8                    | 26,1                  | 60,7             | 0,6                    |   |                       |
| 14  |                       | 11,0  | 22,4                          | 12,8                    | 25,8                  | 60,3             | 0,6                    |   |                       |

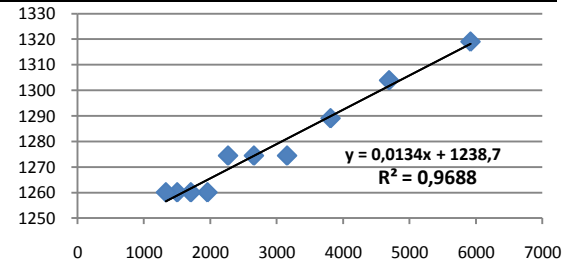
**Πίνακας B17.** Μετρήσεις στη διεύθυνση της  $\vec{B}_{x\psi}$  των δοκιμών του **αγγείου 6**, με τη διάταξη αισθητήρων/μαγνητών. Το μαγνητικό πεδίο  $B$  αρχίζει να μειώνεται, όταν η απόσταση  $D_n$  μεταξύ της θέσης μέτρησης και του άκρου του δοκιμίου γίνεται μικρότερη από αυτήν στην σκιασμένη περιοχή του πίνακα.



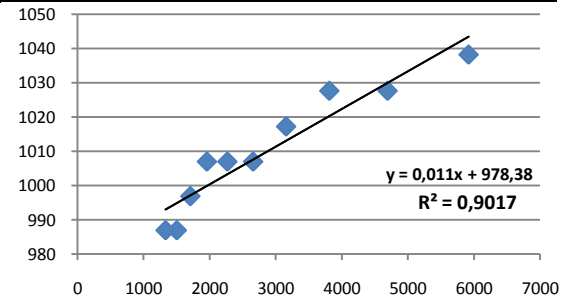
| ΠΙΝΑΚΑΣ B18     |                             | ΑΓΓΕΙΟ 4   |   |                                       |                                      |   |   |  |   |   |  |                             |                         |                            |                             |
|-----------------|-----------------------------|--|---|---------------------------------------|--------------------------------------|---|---|--|---|---|--|-----------------------------|-------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| Πίνακας α       |                             |  |   |                                       |                                      |   |   |  |   |   |  |                             |                         |                            |                             |
| L=40,5±0,2 (mm) |                             |  |   |                                       |                                      |   |   |  |   |   |  |                             |                         |                            |                             |
|                 |                             | Βάση(B)  |   |                                       |                                      | Πλευρές(s)                                |   |  |   |   |  |                             |                         |                            |                             |
| n               | D <sub>n</sub> (mm)<br>±0,2 | B <sub>xψ</sub> <sup>//</sup> (nT)<br>±0,2                                       | B <sub>z</sub> <sup>⊥</sup> (nT)<br>±0,2  | B <sub>B</sub> (nT)<br>±0,2           | γ <sub>B</sub><br>±0,2°              | B <sub>xψ</sub> <sup>⊥</sup> (nT)<br>±0,2 | B <sub>z</sub> <sup>//</sup> (nT)<br>±0,2 | B <sub>s</sub> (nT)<br>±0,2                | γ <sub>s</sub> <sup>°</sup>               | δγ <sub>s</sub> <sup>°</sup>              | λ <sub>xψ</sub>                          | <λ <sub>xψ</sub> ><br>±0,02 | λ <sub>z</sub>          | <λ <sub>z</sub> ><br>±0,02 |                             |
| 1               | 13,0                        | 36,2   | 17,3                                      | 40,1                                  | 64,5                                 | 19,5                                      | 32,0                                      | 37,5                                       | 58,6                                      | 0,2                                       | 1,86                                     | 1,91                        | 1,85                    | 1,91                       |                             |
| 2               | 14,6                        | 36,8   | 17,4                                      | 40,7                                  | 64,7                                 | 19,6                                      | 32,9                                      | 38,3                                       | 59,2                                      | 0,2                                       | 1,88                                     |                             | 1,89                    |                            |                             |
| 3               | 16,2                        | 37,1   | 17,5                                      | 41,0                                  | 64,7                                 | 19,6                                      | 33,2                                      | 38,6                                       | 59,4                                      | 0,2                                       | 1,89                                     |                             | 1,90                    |                            |                             |
| 4               | 17,8                        | 37,6   | 17,6                                      | 41,5                                  | 64,9                                 | 19,7                                      | 33,5                                      | 38,9                                       | 59,5                                      | 0,1                                       | 1,91                                     |                             | 1,90                    |                            |                             |
| 5               | 19,4                        | 37,9   | 17,6                                      | 41,8                                  | 65,1                                 | 19,8                                      | 33,7                                      | 39,1                                       | 59,6                                      | 0,1                                       | 1,91                                     |                             | 1,91                    |                            |                             |
| 6               | 21,0                        | 38,1   | 17,6                                      | 42,0                                  | 65,2                                 | 19,8                                      | 33,9                                      | 39,3                                       | 59,7                                      | 0,1                                       | 1,92                                     |                             | 1,93                    |                            |                             |
| 7               | 22,6                        | 38,3   | 17,7                                      | 42,2                                  | 65,2                                 | 19,8                                      | 34,0                                      | 39,3                                       | 59,8                                      | 0,1                                       | 1,93                                     |                             | 1,92                    |                            |                             |
| 8               | 24,2                        | 38,4   | 17,7                                      | 42,3                                  | 65,3                                 | 19,9                                      | 34,1                                      | 39,5                                       | 59,7                                      | 0,1                                       | 1,93                                     |                             | 1,93                    |                            |                             |
| 9               | 25,8                        | 38,7   | 17,7                                      | 42,6                                  | 65,4                                 | 20,0                                      | 34,2                                      | 39,6                                       | 59,7                                      | 0,1                                       | 1,94                                     |                             | 1,93                    |                            |                             |
| 10              | 27,4                        | 38,8   | 17,7                                      | 42,6                                  | 65,5                                 | 20,0                                      | 34,3                                      | 39,7                                       | 59,8                                      | 0,1                                       | 1,94                                     |                             | 1,94                    |                            |                             |
|                 |                             |  |   |                                       |                                      |   |   |  |   |   |  |                             |                         |                            |                             |
| Πίνακας β       |                             | Μετρήσεις με την ίδια τοποθέτηση του αισθητήρα στη βάση (B) και στις πλευρές (s) |   |                                       |                                      |   |   |  |   |   |  |                             |                         |                            |                             |
| n               | D <sub>n</sub> (mm)<br>±0,2 | B <sub>xψ</sub> <sup>//</sup> (nT)<br>±0,2                                       | B <sub>z</sub> <sup>//</sup> (nT)<br>±0,2 | B <sup>//</sup> (nT)<br>±0,2          | γ <sup>//</sup>                      | δγ <sup>//</sup>                          | <γ <sup>//</sup> ><br>±0,1°               | d <sup>//</sup> (mm)<br>±0,3               | (s)                                       | B <sub>xψ</sub> <sup>⊥</sup> (nT)<br>±0,2 | B <sub>z</sub> <sup>⊥</sup> (nT)<br>±0,2 | B <sup>⊥</sup> (nT)<br>±0,2 | γ <sup>⊥</sup><br>±0,3° | <γ <sup>⊥</sup> ><br>±0,1° | d <sup>⊥</sup> (mm)<br>±0,3 |
| 1               | 13,0                        | 36,2   | 32,0                                      | 48,3                                  | 48,5                                 | 0,2                                       | 48,4°                                     | 45,6                                       | 19,5                                      | 17,3                                      | 26,1                                     | 48,4                        | 48,4°                   | 45,5                       |                             |
| 2               | 14,6                        | 36,8   | 32,9                                      | 49,4                                  | 48,2                                 | 0,2                                       |   |  | 19,6                                      | 17,4                                      | 26,2                                     | 48,4                        |                         |                            |                             |
| 3               | 16,2                        | 37,1   | 33,2                                      | 49,8                                  | 48,2                                 | 0,2                                       |   |  | 19,6                                      | 17,5                                      | 26,3                                     | 48,2                        |                         |                            |                             |
| 4               | 17,8                        | 37,6   | 33,5                                      | 50,4                                  | 48,3                                 | 0,2                                       |   |  | 19,7                                      | 17,6                                      | 26,4                                     | 48,2                        |                         |                            |                             |
| 5               | 19,4                        | 37,9   | 33,7                                      | 50,7                                  | 48,4                                 | 0,2                                       |   |  | 19,8                                      | 17,6                                      | 26,5                                     | 48,4                        |                         |                            |                             |
| 6               | 21,0                        | 38,1   | 33,9                                      | 51,0                                  | 48,3                                 | 0,1                                       |   |  | 19,8                                      | 17,6                                      | 26,5                                     | 48,4                        |                         |                            |                             |
| 7               | 22,6                        | 38,3   | 34,0                                      | 51,2                                  | 48,4                                 | 0,1                                       |   |  | 19,8                                      | 17,7                                      | 26,6                                     | 48,2                        |                         |                            |                             |
| 8               | 24,2                        | 38,4   | 34,1                                      | 51,4                                  | 48,4                                 | 0,1                                       |   |  | 19,9                                      | 17,7                                      | 26,6                                     | 48,3                        |                         |                            |                             |
| 9               | 25,8                        | 38,7   | 34,2                                      | 51,6                                  | 48,5                                 | 0,1                                       |   |  | 20,0                                      | 17,7                                      | 26,7                                     | 48,5                        |                         |                            |                             |
| 10              | 27,4                        | 38,8   | 34,3                                      | 51,8                                  | 48,5                                 | 0,1                                       |   |  | 20,0                                      | 17,7                                      | 26,7                                     | 48,5                        |                         |                            |                             |
|                 |                             |  |   |                                       |                                      |   |   |  |   |   |  |                             |                         |                            |                             |
| Πίνακας γ       |                             | Διορθωμένες μετρήσεις  |   |                                       |                                      |   |   |  |   |   |  |                             |                         |                            |                             |
|                 |                             | Βάση(B)  |   |                                       |                                      |   |   | Πλευρές(s)                                 |   |   |  |                             |                         |                            |                             |
| n               | D <sub>n</sub> (mm)<br>±0,2 | B <sub>xψ</sub> <sup>//</sup> (nT)<br>±0,2                                       | *B <sub>z</sub> <sup>⊥</sup> (nT)<br>±0,5 | *B <sub>B</sub> (nT)<br>±0,4          | *γ <sub>B</sub><br>±0,5°             | ℓ <sub>B</sub><br>(mm)                    | δℓ <sub>B</sub><br>(mm)                   | *B <sub>xψ</sub> <sup>⊥</sup> (nT)<br>±0,6 | B <sub>z</sub> <sup>//</sup> (nT)<br>±0,2 | *B <sub>s</sub> (nT)<br>±0,5              | *γ <sub>s</sub><br>±0,5°                 | ℓ <sub>s</sub><br>(mm)      | δℓ <sub>s</sub><br>(mm) |                            |                             |
| 1               | 13,0                        | 36,2   | 33,0                                      | 49,0                                  | 47,6                                 | 17,6                                      | 0,3                                       | 37,3                                       | 32,0                                      | 49,1                                      | 40,6                                     | 20,0                        | 0,4                     |                            |                             |
| 2               | 14,6                        | 36,8   | 33,2                                      | 49,6                                  | 47,9                                 | 19,7                                      | 0,3                                       | 37,5                                       | 32,9                                      | 49,9                                      | 41,3                                     | 22,1                        | 0,4                     |                            |                             |
| 3               | 16,2                        | 37,1   | 33,4                                      | 49,9                                  | 48,0                                 | 21,8                                      | 0,3                                       | 37,5                                       | 33,2                                      | 50,1                                      | 41,5                                     | 24,4                        | 0,4                     |                            |                             |
| 4               | 17,8                        | 37,6   | 33,6                                      | 50,4                                  | 48,2                                 | 23,9                                      | 0,3                                       | 37,7                                       | 33,5                                      | 50,4                                      | 41,7                                     | 26,8                        | 0,4                     |                            |                             |
| 5               | 19,4                        | 37,9   | 33,6                                      | 50,7                                  | 48,4                                 | 25,9                                      | 0,3                                       | 37,8                                       | 33,7                                      | 50,7                                      | 41,7                                     | 29,2                        | 0,4                     |                            |                             |
| 6               | 21,0                        | 38,1   | 33,6                                      | 50,8                                  | 48,6                                 | 28,0                                      | 0,3                                       | 37,8                                       | 33,9                                      | 50,8                                      | 41,9                                     | 31,5                        | 0,4                     |                            |                             |
| 7               | 22,6                        | 38,3   | 33,8                                      | 51,1                                  | 48,6                                 | 30,1                                      | 0,3                                       | 37,8                                       | 34,0                                      | 50,9                                      | 41,9                                     | 33,8                        | 0,4                     |                            |                             |
| 8               | 24,2                        | 38,4   | 33,8                                      | 51,2                                  | 48,6                                 | 32,2                                      | 0,4                                       | 38,0                                       | 34,1                                      | 51,1                                      | 41,9                                     | 36,3                        | 0,4                     |                            |                             |
| 9               | 25,8                        | 38,7   | 33,8                                      | 51,4                                  | 48,9                                 | 34,3                                      | 0,4                                       | 38,2                                       | 34,2                                      | 51,3                                      | 41,8                                     | 38,7                        | 0,5                     |                            |                             |
| 10              | 27,4                        | 38,8   | 33,8                                      | 51,5                                  | 48,9                                 | 36,3                                      | 0,4                                       | 38,2                                       | 34,3                                      | 51,4                                      | 41,9                                     | 41,0                        | 0,5                     |                            |                             |
|                 |                             |  |   |                                       |                                      |   |   |  |   |   |  |                             |                         |                            |                             |
| Πίνακας δ       |                             | n  | D <sub>n</sub> (mm)                       | B <sub>xψ</sub> <sup>⊥</sup> (±0,2nT) | B <sub>z</sub> <sup>⊥</sup> (±0,2nT) | M <sub>z</sub> (mA/m)                     |   | M <sub>xψ</sub> (mA/m)                     |   | γ°  |  |                             |                         |                            |                             |
|                 |                             | 10   | 27,4±0,2                                  | 20,0                                  | 17,7                                 | 28,2±0,3                                  |   | 31,8±0,3                                   |   | 48,5±0,3                                  |  |                             |                         |                            |                             |

**Πίνακας B18.** Ενδεικτικές μετρήσεις της ίδιας συνιστώσας (B<sub>xψ</sub>, B<sub>z</sub>) του πεδίου από τον κάθετο (⊥) και τον παράλληλο (//) αισθητήρα σε ισαπέχουσες θέσεις κατά D<sub>n</sub> από τα άκρα, στη βάση (B) και στην πλευρά (s) του κυλινδρικού δοκιμίου από τη βάση του αγγείου 4.

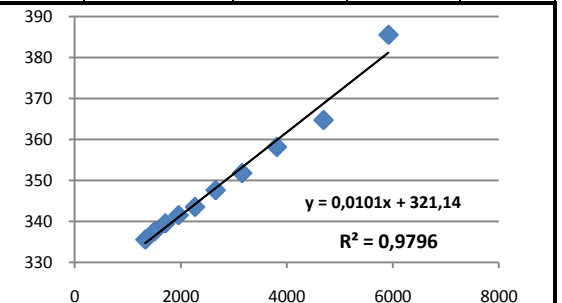
| ΑΓΓΕΙΟ 4   |                      |             |           |              |                           |                                |                                 |
|--|----------------------|-------------|-----------|--------------|---------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| Μετρήσεις της $B_z$ από τους κάθετους αισθητήρες       |                      |             |           |              |                           |                                |                                 |
| n  | $B_z^\perp$          | $D_n$       | $x_n$     | $\psi_n$     | $(x_n - \bar{x})^2$       | $\psi_n (x_n - \bar{x})$       | $(\psi_n - \bar{\psi})^2$       |
| 1  | 17,3                 | 13,0        | 5917,2    | 1319,1       | 9103654,3                 | 3979929,8                      | 1719,2                          |
| 2  | 17,4                 | 14,6        | 4691,3    | 1304,0       | 3209035,8                 | 2335869,2                      | 694,1                           |
| 3  | 17,5                 | 16,2        | 3810,4    | 1289,1       | 828939,7                  | 1173667,6                      | 131,9                           |
| 4  | 17,6                 | 17,8        | 3156,2    | 1274,5       | 65655,7                   | 326565,7                       | 9,7                             |
| 5  | 17,6                 | 19,4        | 2657,0    | 1274,5       | 59001,9                   | -309576,0                      | 9,7                             |
| 6  | 17,6                 | 21,0        | 2267,6    | 1274,5       | 399878,9                  | -805932,5                      | 9,7                             |
| 7  | 17,7                 | 22,6        | 1957,9    | 1260,1       | 887489,9                  | -1187120,8                     | 305,6                           |
| 8  | 17,7                 | 24,2        | 1707,5    | 1260,1       | 1421817,4                 | -1502571,4                     | 305,6                           |
| 9  | 17,7                 | 25,8        | 1502,3    | 1260,1       | 1953341,5                 | -1761174,1                     | 305,6                           |
| 10   | 17,7                 | 27,4        | 1332,0    | 1260,1       | 2458466,9                 | -1975811,0                     | 305,6                           |
|  | $\pm 0,2nT$          | $\pm 0,2mm$ | $\bar{x}$ | $\bar{\psi}$ | $\Sigma(x_n - \bar{x})^2$ | $\Sigma\psi_n (x_n - \bar{x})$ | $\Sigma(\psi_n - \bar{\psi})^2$ |
|  |                      |             | 2899,9    | 1277,6       | 20387282,0                | 273846,5                       | 3796,9                          |
|  |                      |             |           |              |                           |                                | $\Sigma R_i^2$                  |
|  |                      |             |           |              |                           |                                | 118,5                           |
| ΑΓΓΕΙΟ 4   |                      |             |           |              |                           |                                |                                 |
| Μετρήσεις της $B_{xy}$ από τους κάθετους αισθητήρες    |                      |             |           |              |                           |                                |                                 |
| n  | $B_{xy}^\perp$       | $D_n$       | $x_n$     | $\psi_n$     | $(x_n - \bar{x})^2$       | $\psi_n (x_n - \bar{x})$       | $(\psi_n - \bar{\psi})^2$       |
| 1  | 19,5                 | 13,0        | 5917,2    | 1038,2       | 9103654,3                 | 3132552,7                      | 781,9                           |
| 2  | 19,6                 | 14,6        | 4691,3    | 1027,7       | 3209035,8                 | 1840919,8                      | 302,6                           |
| 3  | 19,6                 | 16,2        | 3810,4    | 1027,7       | 828939,7                  | 935640,6                       | 302,6                           |
| 4  | 19,7                 | 17,8        | 3156,2    | 1017,2       | 65655,7                   | 260653,4                       | 48,8                            |
| 5  | 19,8                 | 19,4        | 2657,0    | 1007,0       | 59001,9                   | -244603,3                      | 10,6                            |
| 6  | 19,8                 | 21,0        | 2267,6    | 1007,0       | 399878,9                  | -636786,2                      | 10,6                            |
| 7  | 19,8                 | 22,6        | 1957,9    | 1007,0       | 887489,9                  | -948661,0                      | 10,6                            |
| 8  | 19,9                 | 24,2        | 1707,5    | 996,9        | 1421817,4                 | -1188708,9                     | 178,4                           |
| 9  | 20,0                 | 25,8        | 1502,3    | 987,0        | 1953341,5                 | -1379395,6                     | 542,9                           |
| 10   | 20,0                 | 27,4        | 1332,0    | 987,0        | 2458466,9                 | -1547504,5                     | 542,9                           |
|  | $\pm 0,2nT$          | $\pm 0,2mm$ | $\bar{x}$ | $\bar{\psi}$ | $\Sigma(x_n - \bar{x})^2$ | $\Sigma\psi_n (x_n - \bar{x})$ | $\Sigma(\psi_n - \bar{\psi})^2$ |
|  |                      |             | 2899,9    | 1010,3       | 20387282,0                | 224107,2                       | 2732,0                          |
|  |                      |             |           |              |                           |                                | $\Sigma R_i^2$                  |
|  |                      |             |           |              |                           |                                | 268,5                           |
| ΑΓΓΕΙΟ 4   |                      |             |           |              |                           |                                |                                 |
| Μετρήσεις της $B_z$ από τους παράλληλους αισθητήρες    |                      |             |           |              |                           |                                |                                 |
| n  | $B_z^{\parallel}$    | $D_n$       | $x_n$     | $\psi_n$     | $(x_n - \bar{x})^2$       | $\psi_n (x_n - \bar{x})$       | $(\psi_n - \bar{\psi})^2$       |
| 1  | 32,0                 | 13,0        | 5917,2    | 385,5        | 9103654,3                 | 1163235,5                      | 1224,0                          |
| 2  | 32,9                 | 14,6        | 4691,3    | 364,7        | 3209035,8                 | 653364,0                       | 201,1                           |
| 3  | 33,2                 | 16,2        | 3810,4    | 358,2        | 828939,7                  | 326095,7                       | 58,1                            |
| 4  | 33,5                 | 17,8        | 3156,2    | 351,8        | 65655,7                   | 90137,7                        | 1,5                             |
| 5  | 33,7                 | 19,4        | 2657,0    | 347,6        | 59001,9                   | -84437,0                       | 8,6                             |
| 6  | 33,9                 | 21,0        | 2267,6    | 343,5        | 399878,9                  | -217232,4                      | 49,3                            |
| 7  | 34,0                 | 22,6        | 1957,9    | 341,5        | 887489,9                  | -321724,1                      | 81,7                            |
| 8  | 34,1                 | 24,2        | 1707,5    | 339,5        | 1421817,4                 | -404830,2                      | 121,8                           |
| 9  | 34,2                 | 25,8        | 1502,3    | 337,5        | 1953341,5                 | -471733,4                      | 169,5                           |
| 10   | 34,3                 | 27,4        | 1332,0    | 335,6        | 2458466,9                 | -526142,9                      | 224,5                           |
|  | $\pm 0,2nT$          | $\pm 0,2mm$ | $\bar{x}$ | $\bar{\psi}$ | $\Sigma(x_n - \bar{x})^2$ | $\Sigma\psi_n (x_n - \bar{x})$ | $\Sigma(\psi_n - \bar{\psi})^2$ |
|  |                      |             | 2899,9    | 350,5        | 20387282,0                | 206732,9                       | 2140,1                          |
|  |                      |             |           |              |                           |                                | $\Sigma R_i^2$                  |
|  |                      |             |           |              |                           |                                | 43,7                            |
| ΑΓΓΕΙΟ 4   |                      |             |           |              |                           |                                |                                 |
| Μετρήσεις της $B_{xy}$ από τους παράλληλους αισθητήρες |                      |             |           |              |                           |                                |                                 |
| n  | $B_{xy}^{\parallel}$ | $D_n$       | $x_n$     | $\psi_n$     | $(x_n - \bar{x})^2$       | $\psi_n (x_n - \bar{x})$       | $(\psi_n - \bar{\psi})^2$       |
| 1  | 36,2                 | 13,0        | 5917,2    | 301,3        | 9103654,3                 | 908971,9                       | 596,7                           |
| 2  | 36,8                 | 14,6        | 4691,3    | 291,5        | 3209035,8                 | 522217,5                       | 215,6                           |
| 3  | 37,1                 | 16,2        | 3810,4    | 286,8        | 828939,7                  | 261140,0                       | 99,7                            |
| 4  | 37,6                 | 17,8        | 3156,2    | 279,2        | 65655,7                   | 71551,7                        | 5,8                             |
| 5  | 37,9                 | 19,4        | 2657,0    | 274,8        | 59001,9                   | -66759,7                       | 4,0                             |
| 6  | 38,1                 | 21,0        | 2267,6    | 272,0        | 399878,9                  | -171978,5                      | 23,7                            |
| 7  | 38,3                 | 22,6        | 1957,9    | 269,1        | 887489,9                  | -253538,5                      | 59,4                            |
| 8  | 38,4                 | 24,2        | 1707,5    | 267,7        | 1421817,4                 | -319241,4                      | 82,9                            |
| 9  | 38,7                 | 25,8        | 1502,3    | 263,6        | 1953341,5                 | -368406,2                      | 175,3                           |
| 10   | 38,8                 | 27,4        | 1332,0    | 262,2        | 2458466,9                 | -411176,7                      | 213,0                           |
|  | $\pm 0,2nT$          | $\pm 0,2mm$ | $\bar{x}$ | $\bar{\psi}$ | $\Sigma(x_n - \bar{x})^2$ | $\Sigma\psi_n (x_n - \bar{x})$ | $\Sigma(\psi_n - \bar{\psi})^2$ |
|  |                      |             | 2899,9    | 276,8        | 20387282,0                | 172780,3                       | 1476,0                          |
|  |                      |             |           |              |                           |                                | $\Sigma R_i^2$                  |
|  |                      |             |           |              |                           |                                | 11,8                            |



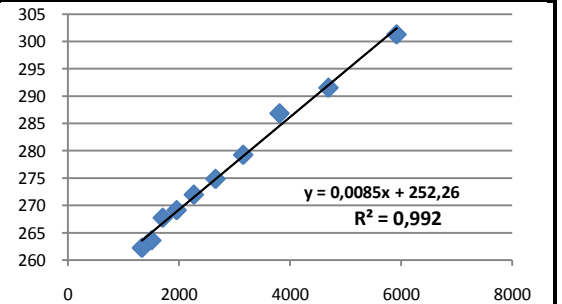
| $b_z^\perp$       | $\delta b_z^\perp$ | $w_z^\perp$          | $\delta w_z^\perp$      |
|-------------------|--------------------|----------------------|-------------------------|
| 0,0134            | 0,0009             | 1238,7               | 2,8                     |
| $M_z^\perp$ (A/m) | $\delta M_z^\perp$ | $\alpha_z^\perp$ (m) | $\delta \alpha_z^\perp$ |
| 0,02841           | 0,00003            | 0,00664              | 0,00002                 |



| $b_{xy}^\perp$       | $\delta b_{xy}^\perp$ | $w_{xy}^\perp$          | $\delta w_{xy}^\perp$      |
|----------------------|-----------------------|-------------------------|----------------------------|
| 0,0110               | 0,0013                | 978,4                   | 4,1                        |
| $M_{xy}^\perp$ (A/m) | $\delta M_{xy}^\perp$ | $\alpha_{xy}^\perp$ (m) | $\delta \alpha_{xy}^\perp$ |
| 0,0320               | 0,0001                | 0,0068                  | 0,0004                     |

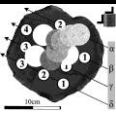
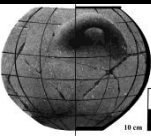


| $b_z^\parallel$       | $\delta b_z^\parallel$ | $w_z^\parallel$          | $\delta w_z^\parallel$      |
|-----------------------|------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| 0,0101                | 0,0005                 | 321,1                    | 1,7                         |
| $M_z^\parallel$ (A/m) | $\delta M_z^\parallel$ | $\alpha_z^\parallel$ (m) | $\delta \alpha_z^\parallel$ |
| 0,0558                | 0,0001                 | 0,0113                   | 0,0003                      |



| $b_{xy}^\parallel$       | $\delta b_{xy}^\parallel$ | $w_{xy}^\parallel$          | $\delta w_{xy}^\parallel$      |
|--------------------------|---------------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| 0,00847                  | 0,00027                   | 252,3                       | 0,9                            |
| $M_{xy}^\parallel$ (A/m) | $\delta M_{xy}^\parallel$ | $\alpha_{xy}^\parallel$ (m) | $\delta \alpha_{xy}^\parallel$ |
| 0,0630                   | 0,0001                    | 0,0117                      | 0,0001                         |

Πίνακας B19. Υπολογισμός της μαγνήτισης και των ακτίνων ευαισθησίας με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων.

|                 |                             |   |   |                                       |                                      |   |   |  |   |                             |                             |                            |                             |   |  |
|-----------------|-----------------------------|---|---|---------------------------------------|--------------------------------------|---|---|--|---|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|---|--|
|                 |                             |  |   | ΑΓΓΕΙΟ 6                              |                                      |   |   |  |   |                             |                             |                            |                             |  |  |
| Πίνακας B20     |                             |   |   |                                       |                                      |   |   |  |   |                             |                             |                            |                             |   |  |
| L=41,2±0,2 (mm) |                             |   |   |                                       |                                      |   |   |  |   |                             |                             |                            |                             |   |  |
|                 |                             | Μετρήσεις από τον κάθετο και τον παράλληλο αισθητήρα στην ίδια θέση μέτρησης      |   |                                       |                                      |   |   |  |   |                             |                             |                            |                             |   |  |
|                 |                             | Βάση(B)   |   |                                       |                                      | Πλευρές(s)                                |   |  |   |                             |                             |                            |                             |   |  |
| n               | D <sub>n</sub> (mm)<br>±0,2 | B <sub>xψ</sub> <sup>//</sup> (nT)<br>±0,2  | B <sub>z</sub> <sup>⊥</sup> (nT)<br>±0,2  | B <sub>B</sub> (nT)<br>±0,2           | γ <sub>B</sub><br>±0,2°              | B <sub>xψ</sub> <sup>⊥</sup> (nT)<br>±0,2 | B <sub>z</sub> <sup>//</sup> (nT)<br>±0,2 | B <sub>s</sub> (nT)<br>±0,2                | γ <sub>s</sub> <sup>ο</sup><br>±0,2       | λ <sub>xψ</sub>             | <λ <sub>xψ</sub> ><br>±0,02 | λ <sub>z</sub>             | <λ <sub>z</sub> ><br>±0,03  |   |  |
| 1               | 11,0                        | 22,9  | 13,3                                      | 26,5                                  | 59,9                                 | 12,7                                      | 23,9                                      | 27,1                                       | 62,0                                      | 1,80                        | 1,85                        | 1,80                       | 1,85                        |   |  |
| 2               | 13,0                        | 23,4  | 13,6                                      | 27,1                                  | 59,8                                 | 12,8                                      | 24,2                                      | 27,4                                       | 62,1                                      | 1,83                        |                             | 1,78                       |                             |   |  |
| 3               | 15,0                        | 23,6  | 13,7                                      | 27,3                                  | 59,9                                 | 12,9                                      | 25,1                                      | 28,2                                       | 62,8                                      | 1,83                        |                             | 1,83                       |                             |   |  |
| 4               | 17,0                        | 24,0  | 13,7                                      | 27,6                                  | 60,3                                 | 12,9                                      | 25,4                                      | 28,5                                       | 63,1                                      | 1,86                        |                             | 1,85                       |                             |   |  |
| 5               | 19,0                        | 24,1  | 13,8                                      | 27,8                                  | 60,2                                 | 13,0                                      | 25,6                                      | 28,7                                       | 63,1                                      | 1,85                        |                             | 1,86                       |                             |   |  |
| 6               | 21,0                        | 24,3  | 13,8                                      | 27,9                                  | 60,4                                 | 13,0                                      | 25,8                                      | 28,9                                       | 63,3                                      | 1,87                        |                             | 1,87                       |                             |   |  |
| 7               | 23,0                        | 24,5  | 13,9                                      | 28,2                                  | 60,4                                 | 13,1                                      | 25,9                                      | 29,0                                       | 63,2                                      | 1,87                        |                             | 1,86                       |                             |   |  |
| 8               | 25,0                        | 24,6  | 13,9                                      | 28,3                                  | 60,5                                 | 13,1                                      | 26,0                                      | 29,1                                       | 63,3                                      | 1,88                        |                             | 1,87                       |                             |   |  |
| 9               | 27,0                        | 24,7  | 14,0                                      | 28,4                                  | 60,5                                 | 13,2                                      | 26,2                                      | 29,3                                       | 63,3                                      | 1,87                        |                             | 1,87                       |                             |   |  |
| 10              | 29,0                        | 24,8  | 14,0                                      | 28,5                                  | 60,6                                 | 13,2                                      | 26,3                                      | 29,4                                       | 63,3                                      | 1,88                        |                             | 1,88                       |                             |   |  |
|                 |                             | Μετρήσεις με την ίδια τοποθέτηση του αισθητήρα στη βάση (B) και στις πλευρές (s)  |   |                                       |                                      |   |   |  |   |                             |                             |                            |                             |   |  |
| Πίνακας β       |                             | (b)   | (s)                                       |                                       |                                      |   |   | (s)  | (b)                                       |                             |                             |                            |                             |   |  |
| n               | D <sub>n</sub> (mm)<br>±0,2 | B <sub>xψ</sub> <sup>//</sup> (nT)<br>±0,2  | B <sub>z</sub> <sup>//</sup> (nT)<br>±0,2 | B <sup>//</sup> (nT)<br>±0,2          | γ <sup>//</sup><br>±0,2              | <γ <sup>//</sup> ><br>±0,2°               | d <sup>//</sup> (mm)<br>±0,3              | B <sub>xψ</sub> <sup>⊥</sup> (nT)<br>±0,2  | B <sub>z</sub> <sup>⊥</sup> (nT)<br>±0,2  | B <sup>⊥</sup> (nT)<br>±0,2 | γ <sup>⊥</sup><br>±0,3°     | <γ <sup>⊥</sup> ><br>±0,1° | d <sup>⊥</sup> (mm)<br>±0,2 |   |  |
| 1               | 11,0                        | 22,9  | 23,9                                      | 33,1                                  | 43,8                                 | 43,4°                                     | 39,0                                      | 12,7                                       | 13,3                                      | 18,4                        | 43,7                        | 43,3°                      | 38,9                        |   |  |
| 2               | 13,0                        | 23,4  | 24,2                                      | 33,7                                  | 44,0                                 |   |   | 12,8                                       | 13,6                                      | 18,7                        | 43,3                        |                            |                             |   |  |
| 3               | 15,0                        | 23,6  | 25,1                                      | 34,5                                  | 43,2                                 |   |   | 12,9                                       | 13,7                                      | 18,8                        | 43,3                        |                            |                             |   |  |
| 4               | 17,0                        | 24,0  | 25,4                                      | 34,9                                  | 43,4                                 |   |   | 12,9                                       | 13,7                                      | 18,8                        | 43,3                        |                            |                             |   |  |
| 5               | 19,0                        | 24,1  | 25,6                                      | 35,2                                  | 43,3                                 |   |   | 13,0                                       | 13,8                                      | 19,0                        | 43,3                        |                            |                             |   |  |
| 6               | 21,0                        | 24,3  | 25,8                                      | 35,4                                  | 43,3                                 |   |   | 13,0                                       | 13,8                                      | 19,0                        | 43,3                        |                            |                             |   |  |
| 7               | 23,0                        | 24,5  | 25,9                                      | 35,7                                  | 43,4                                 |   |   | 13,1                                       | 13,9                                      | 19,1                        | 43,3                        |                            |                             |   |  |
| 8               | 25,0                        | 24,6  | 26,0                                      | 35,8                                  | 43,4                                 |   |   | 13,1                                       | 13,9                                      | 19,1                        | 43,3                        |                            |                             |   |  |
| 9               | 27,0                        | 24,7  | 26,2                                      | 36,0                                  | 43,3                                 |   |   | 13,2                                       | 14,0                                      | 19,2                        | 43,3                        |                            |                             |   |  |
| 10              | 29,0                        | 24,8  | 26,3                                      | 36,1                                  | 43,3                                 |   |   | 13,2                                       | 14,0                                      | 19,2                        | 43,3                        |                            |                             |   |  |
|                 |                             | Διορθωμένες μετρήσεις   |   |                                       |                                      |   |   |  |   |                             |                             |                            |                             |   |  |
| Πίνακας γ       |                             | Βάση(B)   |   |                                       |                                      |   |   | Πλευρές(s)                                 |   |                             |                             |                            |                             |   |  |
| n               | D <sub>n</sub> (mm)<br>±0,2 | B <sub>xψ</sub> <sup>//</sup> (nT)<br>±0,2  | *B <sub>z</sub> <sup>⊥</sup> (nT)<br>±0,6 | B <sub>B</sub> (nT)<br>±0,3           | γ <sub>B</sub><br>±0,8°              | ℓ <sub>B</sub><br>(mm)                    | δℓ <sub>B</sub><br>(mm)                   | *B <sub>xψ</sub> <sup>⊥</sup> (nT)<br>±0,9 | B <sub>z</sub> <sup>//</sup> (nT)<br>±0,2 | B <sub>s</sub> (nT)<br>±0,8 | γ <sub>s</sub><br>±0,2°     | ℓ <sub>s</sub><br>(mm)     | δℓ <sub>s</sub><br>(mm)     |   |  |
| 1               | 11,0                        | 22,9  | 24,6                                      | 33,6                                  | 43,0                                 | 16,1                                      | 0,4                                       | 23,5                                       | 23,9                                      | 33,6                        | 45,4                        | 15,4                       | 0,3                         |   |  |
| 2               | 13,0                        | 23,4  | 25,1                                      | 34,3                                  | 43,0                                 | 19,1                                      | 0,4                                       | 23,7                                       | 24,2                                      | 33,9                        | 45,6                        | 18,2                       | 0,3                         |   |  |
| 3               | 15,0                        | 23,6  | 25,3                                      | 34,6                                  | 43,0                                 | 22,0                                      | 0,4                                       | 23,9                                       | 25,1                                      | 34,7                        | 46,4                        | 20,7                       | 0,3                         |   |  |
| 4               | 17,0                        | 24,0  | 25,3                                      | 34,9                                  | 43,5                                 | 24,7                                      | 0,5                                       | 23,9                                       | 25,4                                      | 34,9                        | 46,7                        | 23,4                       | 0,3                         |   |  |
| 5               | 19,0                        | 24,1  | 25,5                                      | 35,1                                  | 43,4                                 | 27,7                                      | 0,5                                       | 24,1                                       | 25,6                                      | 35,2                        | 46,7                        | 26,1                       | 0,3                         |   |  |
| 6               | 21,0                        | 24,3  | 25,5                                      | 35,2                                  | 43,6                                 | 30,4                                      | 0,5                                       | 24,1                                       | 25,8                                      | 35,3                        | 46,9                        | 28,7                       | 0,3                         |   |  |
| 7               | 23,0                        | 24,5  | 25,7                                      | 35,5                                  | 43,7                                 | 33,3                                      | 0,6                                       | 24,3                                       | 25,9                                      | 35,5                        | 46,8                        | 31,5                       | 0,3                         |   |  |
| 8               | 25,0                        | 24,6  | 25,7                                      | 35,6                                  | 43,8                                 | 36,1                                      | 0,6                                       | 24,3                                       | 26,0                                      | 35,6                        | 46,9                        | 34,2                       | 0,3                         |   |  |
| 9               | 27,0                        | 24,7  | 25,9                                      | 35,8                                  | 43,7                                 | 39,1                                      | 0,6                                       | 24,5                                       | 26,2                                      | 35,9                        | 46,9                        | 36,9                       | 0,3                         |   |  |
| 10              | 29,0                        | 24,8  | 25,9                                      | 35,8                                  | 43,8                                 | 41,9                                      | 0,7                                       | 24,5                                       | 26,3                                      | 35,9                        | 47,1                        | 39,6                       | 0,3                         |   |  |
| Πίνακας δ       |                             | n   | D <sub>n</sub> (mm)                       | B <sub>xψ</sub> <sup>⊥</sup> (±0,2nT) | B <sub>z</sub> <sup>⊥</sup> (±0,2nT) | M <sub>z</sub> (mA/m)                     |   | M <sub>xψ</sub> (mA/m)                     |   | γ°                          |                             |                            |                             |   |  |
|                 |                             | 10  | 29,0±0,2                                  | 13,2                                  | 14,0                                 | 42,6±0,2                                  |   | 40,1±0,2                                   |   | 43,3±0,3                    |                             |                            |                             |   |  |

**Πίνακας B20.** Ενδεικτικές μετρήσεις της ίδιας συνιστώσας (B<sub>xψ</sub>, B<sub>z</sub>) του πεδίου από τον κάθετο (⊥) και τον παράλληλο (//) αισθητήρα σε ισαπέχουσες θέσεις κατά D<sub>n</sub> από τα άκρα, στη βάση (B) και στην πλευρά (s) του κυλινδρικού δοκιμίου από τη βάση του αγγείου 6.

| ΑΓΓΕΙΟ 6    |             |  |           |              |                           |                                |                                 |                      |                         |
|-------------|-------------|--|-----------|--------------|---------------------------|--------------------------------|---------------------------------|----------------------|-------------------------|
| Πίνακας B21 |             | Μετρήσεις της $B_z$ από τους κάθετους αισθητήρες |           |              |                           |                                |                                 |                      |                         |
| n           | $B_z^\perp$ | $D_n$  | $x_n$     | $\psi_n$     | $(x_n - \bar{x})^2$       | $\psi_n (x_n - \bar{x})$       | $(\psi_n - \bar{\psi})^2$       |                      |                         |
| 1           | 13,3        | 11,0   | 8264,5    | 2231,8       | 24472348,7                | 11040640,8                     | 22023,85                        |                      |                         |
| 2           | 13,6        | 13,0   | 5917,2    | 2134,4       | 6758182,3                 | 5548771,9                      | 2603,89                         |                      |                         |
| 3           | 13,7        | 15,0   | 4444,4    | 2103,4       | 1269982,7                 | 2370377,5                      | 399,30                          |                      |                         |
| 4           | 13,7        | 17,0   | 3460,2    | 2103,4       | 20362,8                   | 300149,3                       | 399,30                          |                      |                         |
| 5           | 13,8        | 19,0   | 2770,1    | 2073,0       | 299675,5                  | -1134820,5                     | 107,97                          |                      |                         |
| 6           | 13,8        | 21,0   | 2267,6    | 2073,0       | 1102364,8                 | -2176527,9                     | 107,97                          |                      |                         |
| 7           | 13,9        | 23,0   | 1890,4    | 2043,3       | 2036757,6                 | -2916082,5                     | 1608,90                         |                      |                         |
| 8           | 13,9        | 25,0   | 1600,0    | 2043,3       | 2949838,3                 | -3509370,7                     | 1608,90                         |                      |                         |
| 9           | 14,0        | 27,0   | 1371,7    | 2014,2       | 3786010,1                 | -3919174,0                     | 4788,19                         |                      |                         |
| 10          | 14,0        | 29,0   | 1189,1    | 2014,2       | 4530293,8                 | -4287132,0                     | 4788,19                         |                      |                         |
|             | $\pm 0,2nT$ | $\pm 0,2mm$                                      | $\bar{x}$ | $\bar{\psi}$ | $\Sigma(x_n - \bar{x})^2$ | $\Sigma\psi_n (x_n - \bar{x})$ | $\Sigma(\psi_n - \bar{\psi})^2$ | $\Sigma R_i^2$       |                         |
|             |             |  | 3317,5    | 2083,4       | 47225816,7                | 1316831,91                     | 38436,5                         | 1718,3               |                         |
|             |             |  |           |              |                           |                                |                                 | $b_z^\perp$          | $\delta b_z^\perp$      |
|             |             |  |           |              |                           |                                |                                 | 0,028                | 0,002                   |
|             |             |  |           |              |                           |                                |                                 | $w_z^\perp$          | $\delta w_z^\perp$      |
|             |             |  |           |              |                           |                                |                                 | 1990,9               | 8,5                     |
|             |             |  |           |              |                           |                                |                                 | $M_z^\perp$ (A/m)    | $\delta M_z^\perp$      |
|             |             |  |           |              |                           |                                |                                 | 0,02241              | 0,00005                 |
|             |             |  |           |              |                           |                                |                                 | $\alpha_z^\perp$ (m) | $\delta \alpha_z^\perp$ |
|             |             |  |           |              |                           |                                |                                 | 0,0075               | 0,0003                  |

| ΑΓΓΕΙΟ 6 |                |   |           |              |                           |                                |                                 |                         |                            |
|----------|----------------|---|-----------|--------------|---------------------------|--------------------------------|---------------------------------|-------------------------|----------------------------|
| Αγχείο 6 |                | Μετρήσεις της $B_{xy}$ από τους κάθετους αισθητήρες |           |              |                           |                                |                                 |                         |                            |
| n        | $B_{xy}^\perp$ | $D_n$   | $x_n$     | $\psi_n$     | $(x_n - \bar{x})^2$       | $\psi_n (x_n - \bar{x})$       | $(\psi_n - \bar{\psi})^2$       |                         |                            |
| 1        | 12,7           | 11,0  | 8264,5    | 2447,7       | 24472348,7                | 12108493,7                     | 11454,69                        |                         |                            |
| 2        | 12,8           | 13,0  | 5917,2    | 2409,6       | 6758182,3                 | 6264043,3                      | 4751,51                         |                         |                            |
| 3        | 12,9           | 15,0  | 4444,4    | 2372,4       | 1269982,7                 | 2673494,1                      | 1006,05                         |                         |                            |
| 4        | 12,9           | 17,0  | 3460,2    | 2372,4       | 20362,8                   | 338531,5                       | 1006,05                         |                         |                            |
| 5        | 13,0           | 19,0  | 2770,1    | 2336,0       | 299675,5                  | -1278788,3                     | 21,52                           |                         |                            |
| 6        | 13,0           | 21,0  | 2267,6    | 2336,0       | 1102364,8                 | -2452650,7                     | 21,52                           |                         |                            |
| 7        | 13,1           | 23,0  | 1890,4    | 2300,5       | 2036757,6                 | -3283120,5                     | 1613,40                         |                         |                            |
| 8        | 13,1           | 25,0  | 1600,0    | 2300,5       | 2949838,3                 | -3951083,9                     | 1613,40                         |                         |                            |
| 9        | 13,2           | 27,0  | 1371,7    | 2265,7       | 3786010,1                 | -4408620,9                     | 5608,63                         |                         |                            |
| 10       | 13,2           | 29,0  | 1189,1    | 2265,7       | 4530293,8                 | -4822531,4                     | 5608,63                         |                         |                            |
|          | $\pm 0,2nT$    | $\pm 0,2mm$   | $\bar{x}$ | $\bar{\psi}$ | $\Sigma(x_n - \bar{x})^2$ | $\Sigma\psi_n (x_n - \bar{x})$ | $\Sigma(\psi_n - \bar{\psi})^2$ | $\Sigma R_i^2$          |                            |
|          |                |   | 3317,5    | 2340,6       | 47225816,7                | 1187766,9                      | 32705,4                         | 2832,1                  |                            |
|          |                |   |           |              |                           |                                |                                 | $b_{xy}^\perp$          | $\delta b_{xy}^\perp$      |
|          |                |   |           |              |                           |                                |                                 | 0,025                   | 0,003                      |
|          |                |   |           |              |                           |                                |                                 | $w_{xy}^\perp$          | $\delta w_{xy}^\perp$      |
|          |                |   |           |              |                           |                                |                                 | 2257,2                  | 10,9                       |
|          |                |   |           |              |                           |                                |                                 | $M_{xy}^\perp$ (A/m)    | $\delta M_{xy}^\perp$      |
|          |                |   |           |              |                           |                                |                                 | 0,0210                  | 0,0001                     |
|          |                |   |           |              |                           |                                |                                 | $\alpha_{xy}^\perp$ (m) | $\delta \alpha_{xy}^\perp$ |
|          |                |   |           |              |                           |                                |                                 | 0,0067                  | 0,0004                     |

| ΑΓΓΕΙΟ 6 |                   |   |           |              |                           |                                |                                 |                            |                               |
|----------|-------------------|---|-----------|--------------|---------------------------|--------------------------------|---------------------------------|----------------------------|-------------------------------|
| Αγχείο 6 |                   | Μετρήσεις της $B_z$ από τους παράλληλους αισθητήρες |           |              |                           |                                |                                 |                            |                               |
| n        | $B_z^{\parallel}$ | $D_n$   | $x_n$     | $\psi_n$     | $(x_n - \bar{x})^2$       | $\psi_n (x_n - \bar{x})$       | $(\psi_n - \bar{\psi})^2$       |                            |                               |
| 1        | 23,9              | 11,0  | 8264,5    | 691,1        | 24472348,7                | 3419020,9                      | 6299,6                          |                            |                               |
| 2        | 24,2              | 13,0  | 5917,2    | 674,1        | 6758182,3                 | 1752443,2                      | 3886,4                          |                            |                               |
| 3        | 25,1              | 15,0  | 4444,4    | 626,6        | 1269982,7                 | 706173,2                       | 221,0                           |                            |                               |
| 4        | 25,4              | 17,0  | 3460,2    | 611,9        | 20362,8                   | 87319,5                        | 0,0                             |                            |                               |
| 5        | 25,6              | 19,0  | 2770,1    | 602,4        | 299675,5                  | -329765,6                      | 87,9                            |                            |                               |
| 6        | 25,8              | 21,0  | 2267,6    | 593,1        | 1102364,8                 | -622705,9                      | 348,8                           |                            |                               |
| 7        | 25,9              | 23,0  | 1890,4    | 588,5        | 2036757,6                 | -839904,4                      | 540,5                           |                            |                               |
| 8        | 26,0              | 25,0  | 1600,0    | 584,0        | 2949838,3                 | -1003025,9                     | 771,0                           |                            |                               |
| 9        | 26,2              | 27,0  | 1371,7    | 575,1        | 3786010,1                 | -1119046,3                     | 1343,1                          |                            |                               |
| 10       | 26,3              | 29,0  | 1189,1    | 570,8        | 4530293,8                 | -1214818,6                     | 1682,1                          |                            |                               |
|          | $\pm 0,2nT$       | $\pm 0,2mm$   | $\bar{x}$ | $\bar{\psi}$ | $\Sigma(x_n - \bar{x})^2$ | $\Sigma\psi_n (x_n - \bar{x})$ | $\Sigma(\psi_n - \bar{\psi})^2$ | $\Sigma R_i^2$             |                               |
|          |                   |   | 3317,5    | 611,8        | 47225816,7                | 835690,0                       | 15180,3                         | 392,3                      |                               |
|          |                   |   |           |              |                           |                                |                                 | $b_z^{\parallel}$          | $\delta b_z^{\parallel}$      |
|          |                   |   |           |              |                           |                                |                                 | 0,018                      | 0,001                         |
|          |                   |   |           |              |                           |                                |                                 | $w_z^{\parallel}$          | $\delta w_z^{\parallel}$      |
|          |                   |   |           |              |                           |                                |                                 | 553,1                      | 4,0                           |
|          |                   |   |           |              |                           |                                |                                 | $M_z^{\parallel}$ (A/m)    | $\delta M_z^{\parallel}$      |
|          |                   |   |           |              |                           |                                |                                 | 0,0425                     | 0,0002                        |
|          |                   |   |           |              |                           |                                |                                 | $\alpha_z^{\parallel}$ (m) | $\delta \alpha_z^{\parallel}$ |
|          |                   |   |           |              |                           |                                |                                 | 0,0113                     | 0,0003                        |

| ΑΓΓΕΙΟ 6 |                      |  |           |              |                           |                                |                                 |                               |                                  |
|----------|----------------------|--|-----------|--------------|---------------------------|--------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| Αγχείο 6 |                      | Μετρήσεις της $B_{xy}$ από τους παράλληλους αισθητήρες |           |              |                           |                                |                                 |                               |                                  |
| n        | $B_{xy}^{\parallel}$ | $D_n$  | $x_n$     | $\psi_n$     | $(x_n - \bar{x})^2$       | $\psi_n (x_n - \bar{x})$       | $(\psi_n - \bar{\psi})^2$       |                               |                                  |
| 1        | 22,9                 | 11,0   | 8264,5    | 752,8        | 24472348,7                | 3724145,1                      | 5081,2                          |                               |                                  |
| 2        | 23,4                 | 13,0   | 5917,2    | 721,0        | 6758182,3                 | 1874316,7                      | 1556,7                          |                               |                                  |
| 3        | 23,6                 | 15,0   | 4444,4    | 708,8        | 1269982,7                 | 798793,7                       | 744,5                           |                               |                                  |
| 4        | 24,0                 | 17,0   | 3460,2    | 685,4        | 20362,8                   | 97803,9                        | 14,9                            |                               |                                  |
| 5        | 24,1                 | 19,0   | 2770,1    | 679,7        | 299675,5                  | -372092,8                      | 3,3                             |                               |                                  |
| 6        | 24,3                 | 21,0   | 2267,6    | 668,6        | 1102364,8                 | -701956,0                      | 168,0                           |                               |                                  |
| 7        | 24,5                 | 23,0   | 1890,4    | 657,7        | 2036757,6                 | -938636,1                      | 568,1                           |                               |                                  |
| 8        | 24,6                 | 25,0   | 1600,0    | 652,4        | 2949838,3                 | -1120440,1                     | 850,9                           |                               |                                  |
| 9        | 24,7                 | 27,0   | 1371,7    | 647,1        | 3786010,1                 | -1259089,8                     | 1186,2                          |                               |                                  |
| 10       | 24,8                 | 29,0   | 1189,1    | 641,9        | 4530293,8                 | -1366216,6                     | 1572,1                          |                               |                                  |
|          | $\pm 0,2nT$          | $\pm 0,2mm$  | $\bar{x}$ | $\bar{\psi}$ | $\Sigma(x_n - \bar{x})^2$ | $\Sigma\psi_n (x_n - \bar{x})$ | $\Sigma(\psi_n - \bar{\psi})^2$ | $\Sigma R_i^2$                |                                  |
|          |                      |  | 3317,5    | 681,5        | 47225816,7                | 736628,1                       | 11745,9                         | 256,0                         |                                  |
|          |                      |  |           |              |                           |                                |                                 | $b_{xy}^{\parallel}$          | $\delta b_{xy}^{\parallel}$      |
|          |                      |  |           |              |                           |                                |                                 | 0,0156                        | 0,0008                           |
|          |                      |  |           |              |                           |                                |                                 | $w_{xy}^{\parallel}$          | $\delta w_{xy}^{\parallel}$      |
|          |                      |  |           |              |                           |                                |                                 | 629,8                         | 3,3                              |
|          |                      |  |           |              |                           |                                |                                 | $M_{xy}^{\parallel}$ (A/m)    | $\delta M_{xy}^{\parallel}$      |
|          |                      |  |           |              |                           |                                |                                 | 0,0398                        | 0,0001                           |
|          |                      |  |           |              |                           |                                |                                 | $\alpha_{xy}^{\parallel}$ (m) | $\delta \alpha_{xy}^{\parallel}$ |
|          |                      |  |           |              |                           |                                |                                 | 0,0100                        | 0,0001                           |

Πίνακας B21. Υπολογισμός της μαγνήτισης και των ακτίνων ευαισθησίας με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων.



ΑΓΓΕΙΟ 1

Πίνακας B22

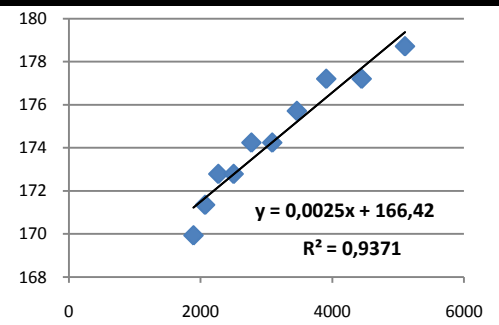
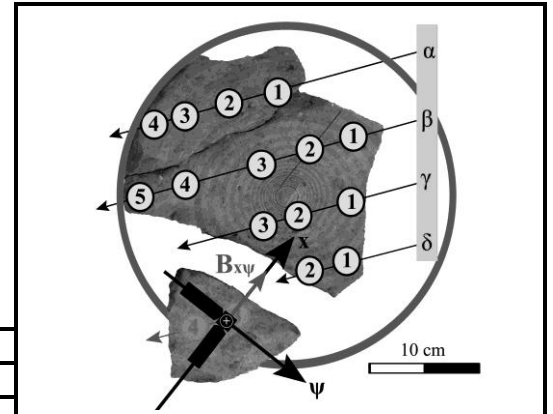
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΕ ΟΣΤΡΑΚΟ ΤΗΣ ΒΑΣΗΣ ΤΟΥ ΑΓΓΕΙΟΥ 1

$L \pm \Delta L (mm)$  Μετρήσεις με την τρισσορθογώνια διάταξη των αισθητήρων στη διεύθυνση της  $B_{x\psi}$

$21,2 \pm 0,5$  Μετρήσεις της  $B_z$  από τον κάθετο z- αισθητήρα

| $n$ | $\lambda \cdot B_z$ | $D_n$ | $x_n$  | $\psi_n$ | $(x_n - \bar{x})^2$ | $\psi_n(x_n - \bar{x})$ | $(\psi_n - \bar{\psi})^2$ |
|-----|---------------------|-------|--------|----------|---------------------|-------------------------|---------------------------|
| 1   | 48,2                | 23    | 1890,4 | 169,9    | 1585056,5           | -213938,0               | 20,1                      |
| 2   | 48,0                | 22    | 2066,1 | 171,3    | 1173395,3           | -185609,2               | 9,4                       |
| 3   | 47,8                | 21    | 2267,6 | 172,8    | 777528,4            | -152356,9               | 2,7                       |
| 4   | 47,8                | 20    | 2500,0 | 172,8    | 421654,7            | -112197,3               | 2,7                       |
| 5   | 47,6                | 19    | 2770,1 | 174,2    | 143842,9            | -66083,1                | 0,0                       |
| 6   | 47,6                | 18    | 3086,4 | 174,2    | 3960,1              | -10964,8                | 0,0                       |
| 7   | 47,4                | 17    | 3460,2 | 175,7    | 96632,8             | 54621,7                 | 1,7                       |
| 8   | 47,2                | 16    | 3906,3 | 177,2    | 572898,5            | 134126,5                | 7,8                       |
| 9   |                     |       |        |          |                     |                         |                           |
| 10  | 47,2                | 15    | 4444,4 | 177,2    | 1677271,1           | 229497,2                | 7,8                       |
| 10  | 47,0                | 14    | 5102,0 | 178,7    | 3813003,7           | 348977,7                | 18,5                      |

|  | $\pm 0,2nT$ | $\pm 0,2mm$ | $\bar{x}$ | $\bar{\psi}$ | $\Sigma(x_n - \bar{x})^2$ | $\Sigma\psi_n(x_n - \bar{x})$ | $\Sigma(\psi_n - \bar{\psi})^2$ | $\Sigma R_i^2$ |
|--|-------------|-------------|-----------|--------------|---------------------------|-------------------------------|---------------------------------|----------------|
|  |             |             | 3149,3    | 174,4        | 10265244,0                | 26073,8                       | 70,7                            | 4,4            |



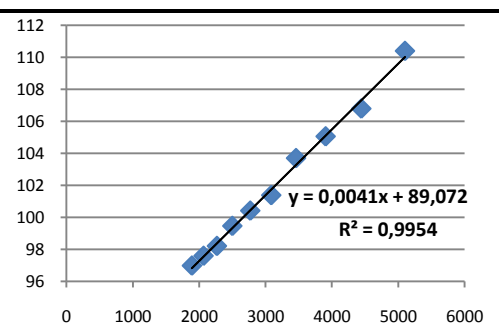
| $b_z$  | $\delta b_z$ | $w_z$ | $\delta w_z$ |
|--------|--------------|-------|--------------|
| 0,0025 | 0,0002       | 166,4 | 0,8          |

| $M_z (A/m)$ | $\delta M_z$ | $\alpha_z^\perp (m)$ | $\delta \alpha_z^\perp$ |
|-------------|--------------|----------------------|-------------------------|
| 0,0775      | 0,0002       | 0,0082               | 0,0004                  |

Αγγείο 1 Μετρήσεις της  $B_{x\psi}$  από τον παράλληλο x-αισθητήρα

| $n$ | $B_{x\psi}$ | $D_n$ | $x_n$  | $\psi_n$ | $(x_n - \bar{x})^2$ | $\psi_n(x_n - \bar{x})$ | $(\psi_n - \bar{\psi})^2$ |
|-----|-------------|-------|--------|----------|---------------------|-------------------------|---------------------------|
| 1   | 63,8        | 23    | 1890,4 | 97,0     | 1585056,5           | -122107,1               | 25,2                      |
| 2   | 63,6        | 22    | 2066,1 | 97,6     | 1173395,3           | -105722,6               | 19,4                      |
| 3   | 63,4        | 21    | 2267,6 | 98,2     | 777528,4            | -86604,3                | 14,3                      |
| 4   | 63,0        | 20    | 2500,0 | 99,5     | 421654,7            | -64588,8                | 6,4                       |
| 5   | 62,7        | 19    | 2770,1 | 100,4    | 143842,9            | -38086,3                | 2,5                       |
| 6   | 62,4        | 18    | 3086,4 | 101,4    | 3960,1              | -6380,4                 | 0,4                       |
| 7   | 61,7        | 17    | 3460,2 | 103,7    | 96632,8             | 32236,8                 | 2,9                       |
| 8   | 61,3        | 16    | 3906,3 | 105,1    | 572898,5            | 79520,2                 | 9,3                       |
| 9   |             |       |        |          |                     |                         |                           |
| 10  | 60,8        | 15    | 4444,4 | 106,8    | 1677271,1           | 138310,2                | 23,0                      |
| 10  | 59,8        | 14    | 5102,0 | 110,4    | 3813003,7           | 215571,3                | 70,5                      |

|  | $\pm 0,2nT$ | $\pm 0,2mm$ | $\bar{x}$ | $\bar{\psi}$ | $\Sigma(x_n - \bar{x})^2$ | $\Sigma\psi_n(x_n - \bar{x})$ | $\Sigma(\psi_n - \bar{\psi})^2$ | $\Sigma R_i^2$ |
|--|-------------|-------------|-----------|--------------|---------------------------|-------------------------------|---------------------------------|----------------|
|  |             |             | 3149,3    | 102,0        | 10265244,0                | 42149,2                       | 173,9                           | 0,8            |



| $b_{x\psi}$ | $\delta b_{x\psi}$ | $w_{x\psi}$ | $\delta w_{x\psi}$ |
|-------------|--------------------|-------------|--------------------|
| 0,0041      | 0,0001             | 89,1        | 0,3                |

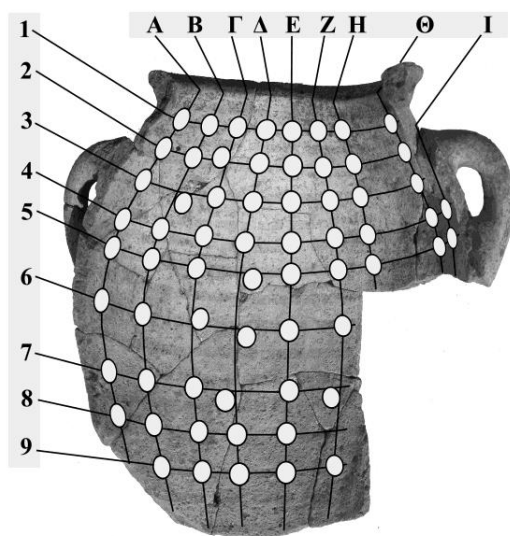
| $M_{x\psi} (A/m)$ | $\delta M_{x\psi}$ | $\alpha_{x\psi}^{//} (m)$ | $\delta \alpha_{x\psi}^{//}$ |
|-------------------|--------------------|---------------------------|------------------------------|
| 0,1060            | 0,0002             | 0,0142                    | 0,0002                       |

**Πίνακας B22** Υπολογισμός της μαγνήτισης και της ακτίνας ευαισθησίας των αισθητήρων με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, από μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου σε όστρακο της βάσης του αγγείου 1.





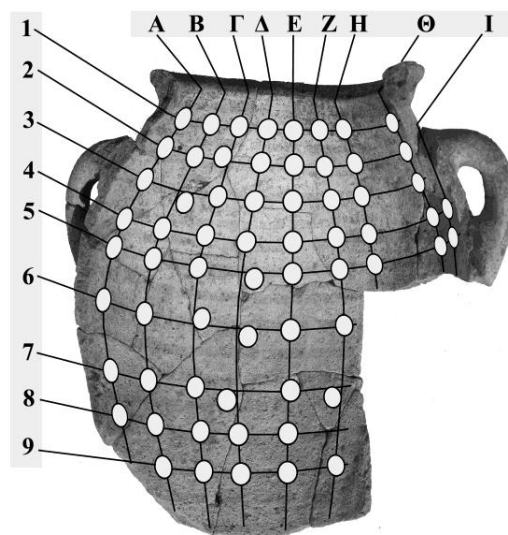
**Πίνακας B24a.** Ενδείξεις των αισθητήρων Bi ( $i = xy, z$ ) και μετρήσεις των αποστάσεων D, L, με τον x αισθητήρα προσανατολισμένο στην κοινή κατεύθυνση των  $B_{xy}$ ,  $M_{xy}$  σε όστρακα του αγγείου 1.



| Αγγείο 1 |                     |            |            |            |            |            |            |            |             |             |
|----------|---------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|
|          |                     |            |            |            |            |            |            |            |             |             |
|          |                     | A          | B          | Γ          | Δ          | E          | Z          | H          | Θ           | I           |
| 1        | D ( $\pm 0.3$ ) cm  | 5.2        | 9.5        | 15.3       | 29.5       | 23.8       | 17.1       | 11.3       | 3.7         |             |
|          | L ( $\pm 0.1$ ) cm  | 1,0        | 1.1        | 1.1        | 1.2        | 1.1        | 1.1        | 1.0        | 1.1         |             |
|          | $B_{xz} (\pm 1)$ nT | 50         | 33         | 18         | 2          | 15         | 40         | 55         | 80          |             |
|          | $B_y (\pm 1)$ nT    | 23         | 33         | 33         | 36         | 31         | 30         | 25         | 7           |             |
|          | B ( $\pm 1$ ) nT    | 55         | 47         | 38         | 36         | 34         | 50         | 60         | 80          |             |
|          | $\theta_B^\circ$    | 65 $\pm$ 1 | 45 $\pm$ 1 | 29 $\pm$ 2 | 3 $\pm$ 2  | 26 $\pm$ 2 | 53 $\pm$ 1 | 66 $\pm$ 1 | 85 $\pm$ 1  |             |
| 2        | D ( $\pm 0.3$ ) cm  | 5.3        | 10.7       | 16.7       | 18.9       | 24.3       | 18.3       | 13.1       | 3.5         |             |
|          | L ( $\pm 0.1$ ) cm  | 1.1        | 1.1        | 1.2        | 1.2        | 1.3        | 1.3        | 1.2        | 1.2         |             |
|          | $B_{xz} (\pm 1)$ nT | 67         | 33         | 20         | 9          | 25         | 38         | 64         | 83          |             |
|          | $B_y (\pm 1)$ nT    | 22         | 31         | 35         | 35         | 33         | 31         | 23         | 5           |             |
|          | B ( $\pm 1$ ) nT    | 71         | 45         | 40         | 36         | 41         | 49         | 68         | 83          |             |
|          | $\theta_B^\circ$    | 72 $\pm$ 1 | 47 $\pm$ 1 | 30 $\pm$ 1 | 14 $\pm$ 2 | 37 $\pm$ 1 | 51 $\pm$ 1 | 70 $\pm$ 1 | 87 $\pm$ 1  |             |
| 3        | D ( $\pm 0.3$ ) cm  | 6.6        | 3.0        | 3.8        | 22.8       | 29.5       | 19.9       | 15.4       | 2.9         |             |
|          | L ( $\pm 0.1$ ) cm  | 1.2        | 1.2        | 1.3        | 1.2        | 1.3        | 1.4        | 1.3        | 1.3         |             |
|          | $B_{xz} (\pm 1)$ nT | 71         | 37         | 22         | 16         | 31         | 48         | 73         | 81          |             |
|          | $B_y (\pm 1)$ nT    | 20         | 32         | 35         | 34         | 31         | 28         | 18         | 2           |             |
|          | B ( $\pm 1$ ) nT    | 74         | 49         | 41         | 38         | 44         | 56         | 75         | 81          |             |
|          | $\theta_B^\circ$    | 74 $\pm$ 1 | 49 $\pm$ 1 | 32 $\pm$ 1 | 25 $\pm$ 2 | 45 $\pm$ 1 | 60 $\pm$ 1 | 76 $\pm$ 1 | 89 $\pm$ 1  |             |
| 4        | D ( $\pm 0.3$ ) cm  | 7.2        | 4.4        | 8.8        | 6.7        | 5.9        | 22.7       | 15.9       | 3.3         | 10.3        |
|          | L ( $\pm 0.1$ ) cm  | 1.2        | 1.3        | 1.4        | 1.3        | 1.4        | 1.4        | 1.4        | 1.4         | 1.4         |
|          | $B_{xz} (\pm 1)$ nT | 75         | 55         | 37         | 32         | 33         | 54         | 70         | 83          | 82          |
|          | $B_y (\pm 1)$ nT    | 17         | 25         | 31         | 31         | 33         | 26         | 19         | -5          | -9          |
|          | B ( $\pm 1$ ) nT    | 77         | 60         | 48         | 45         | 47         | 60         | 73         | 83          | 81          |
|          | $\theta_B^\circ$    | 77 $\pm$ 1 | 66 $\pm$ 1 | 50 $\pm$ 1 | 46 $\pm$ 1 | 45 $\pm$ 1 | 64 $\pm$ 1 | 75 $\pm$ 1 | -87 $\pm$ 1 | -83 $\pm$ 1 |
| 5        | D ( $\pm 0.3$ ) cm  | 2.8        | 7.9        | 2.5        | 12.8       | 11.4       | 24.0       | 11.7       | 6.1         | 7.9         |
|          | L ( $\pm 0.1$ ) cm  | 1.3        | 1.3        | 1.3        | 1.3        | 1.5        | 1.4        | 1.4        | 1.5         | 1.5         |
|          | $B_{xz} (\pm 1)$ nT | 78         | 63         | 44         | 37         | 44         | 66         | 75         | 81          | 79          |
|          | $B_y (\pm 1)$ nT    | 15         | 24         | 32         | 32         | 32         | 22         | 15         | -6          | -9          |
|          | B ( $\pm 1$ ) nT    | 79         | 67         | 54         | 49         | 54         | 70         | 76         | 81          | 80          |
|          | $\theta_B^\circ$    | 79 $\pm$ 1 | 69 $\pm$ 1 | 54 $\pm$ 1 | 49 $\pm$ 1 | 54 $\pm$ 1 | 72 $\pm$ 1 | 79 $\pm$ 1 | -86 $\pm$ 1 | -84 $\pm$ 1 |

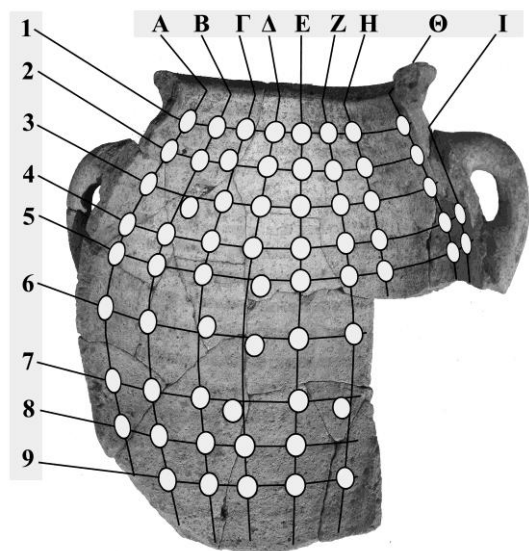
| $a_v^{\perp}$ (cm) | $a_{x,z}^{\parallel}$ (cm) | $\lambda$     |
|--------------------|----------------------------|---------------|
| 0,82 $\pm$ 0,04    | 1,42 $\pm$ 0,02            | 2,0 $\pm$ 0,1 |

**Πίνακας 24α (συνέχεια).** Ενδείξεις των αισθητήρων  $B_i$  ( $i = xy, z$ ) και μετρήσεις των αποστάσεων  $D$ ,  $L$ , με τον  $x$  αισθητήρα προσανατολισμένο στην κοινή κατεύθυνση των  $B_{xy}$ ,  $M_{xy}$  σε όστρακα του σώματος του αγγείου 1.



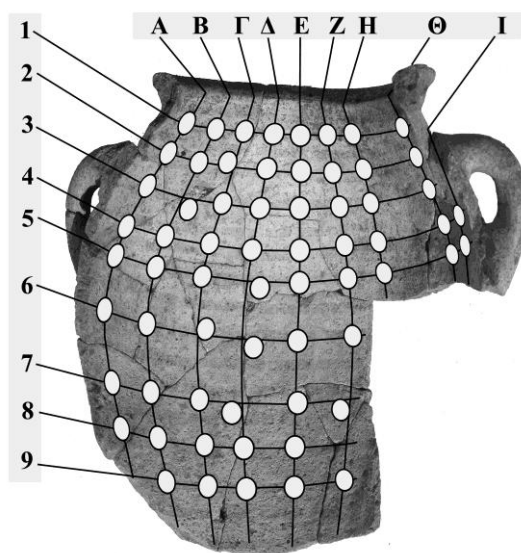
| Αγγείο 1 |                     |            |            |            |            |            |            |   |   |   |
|----------|---------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|---|---|---|
|          |                     |            |            |            |            |            |            |   |   |   |
|          |                     | A          | B          | Γ          | Δ          | Ε          | Ζ          | Η | Θ | Ι |
| 6        | D ( $\pm 0.3$ ) cm  | 6.9        | 3.2        | 12,7       | 6.7        | 8.2        | 8.0        |   |   |   |
|          | L ( $\pm 0.1$ ) cm  | 1.6        | 1.5        | 1,4        | 1.5        | 1.6        | 1.7        |   |   |   |
|          | $B_{xz} (\pm 1)$ nT | 76         | 70         | 63         | 58         | 68         | 79         |   |   |   |
|          | $B_y (\pm 1)$ nT    | 12         | 17         | 27         | 27         | 21         | 13         |   |   |   |
|          | $B (\pm 1)$ nT      | 77         | 72         | 69         | 64         | 71         | 80         |   |   |   |
|          | $\theta_B^\circ$    | 81 $\pm$ 1 | 76 $\pm$ 1 | 67 $\pm$ 1 | 65 $\pm$ 1 | 73 $\pm$ 1 | 81 $\pm$ 1 |   |   |   |
| 7        | D ( $\pm 0.3$ ) cm  | 7.1        | 4.9        | 5.4        | 11.8       | 3.3        | 3.6        |   |   |   |
|          | L ( $\pm 0.1$ ) cm  | 1.7        | 1.7        | 1.8        | 1.7        | 1.8        | 1.7        |   |   |   |
|          | $B_{xz} (\pm 1)$ nT | 85         | 78         | 73         | 66         | 71         | 81         |   |   |   |
|          | $B_y (\pm 1)$ nT    | 2          | 12         | 19         | 22         | 20         | 8          |   |   |   |
|          | $B (\pm 1)$ nT      | 85         | 79         | 75         | 70         | 74         | 81         |   |   |   |
|          | $\theta_B^\circ$    | 89 $\pm$ 1 | 81 $\pm$ 1 | 75 $\pm$ 1 | 72 $\pm$ 1 | 74 $\pm$ 1 | 84 $\pm$ 1 |   |   |   |
| 8        | D ( $\pm 0.3$ ) cm  | 7.4        | 4.5        | 10.9       | 8.8        | 9.6        | 5.5        |   |   |   |
|          | L ( $\pm 0.1$ ) cm  | 1.8        | 1.8        | 1.9        | 1.9        | 1.9        | 2.0        |   |   |   |
|          | $B_{xz} (\pm 1)$ nT | 86         | 76         | 76         | 69         | 73         | 80         |   |   |   |
|          | $B_y (\pm 1)$ nT    | 1          | 13         | 17         | 18         | 19         | 8          |   |   |   |
|          | $B (\pm 1)$ nT      | 86         | 77         | 78         | 71         | 75         | 80         |   |   |   |
|          | $\theta_B^\circ$    | 89 $\pm$ 1 | 80 $\pm$ 1 | 77 $\pm$ 1 | 75 $\pm$ 1 | 75 $\pm$ 1 | 84 $\pm$ 1 |   |   |   |
| 9        | D ( $\pm 0.3$ ) cm  |            | 10.2       | 16.9       | 15.2       | 13.8       | 11.2       |   |   |   |
|          | L ( $\pm 0.1$ ) cm  |            | 1.9        | 2.0        | 2.1        | 2.0        | 2.0        |   |   |   |
|          | $B_{xz} (\pm 1)$ nT |            | 79         | 79         | 76         | 78         | 82         |   |   |   |
|          | $B_y (\pm 1)$ nT    |            | 5          | 14         | 16         | 14         | 4          |   |   |   |
|          | $B (\pm 1)$ nT      |            | 79         | 80         | 78         | 79         | 82         |   |   |   |
|          | $\theta_B^\circ$    |            | 86 $\pm$ 1 | 80 $\pm$ 1 | 78 $\pm$ 1 | 80 $\pm$ 1 | 87 $\pm$ 1 |   |   |   |

**Table 24β.** Ενδείξεις των αισθητήρων  $B_i$  ( $i=x,y,z$ ), με τον  $x$  αισθητήρα προσανατολισμένο στη διεύθυνση των αυλακώσεων σε όστρακα του σώματος του αγγείου 1.



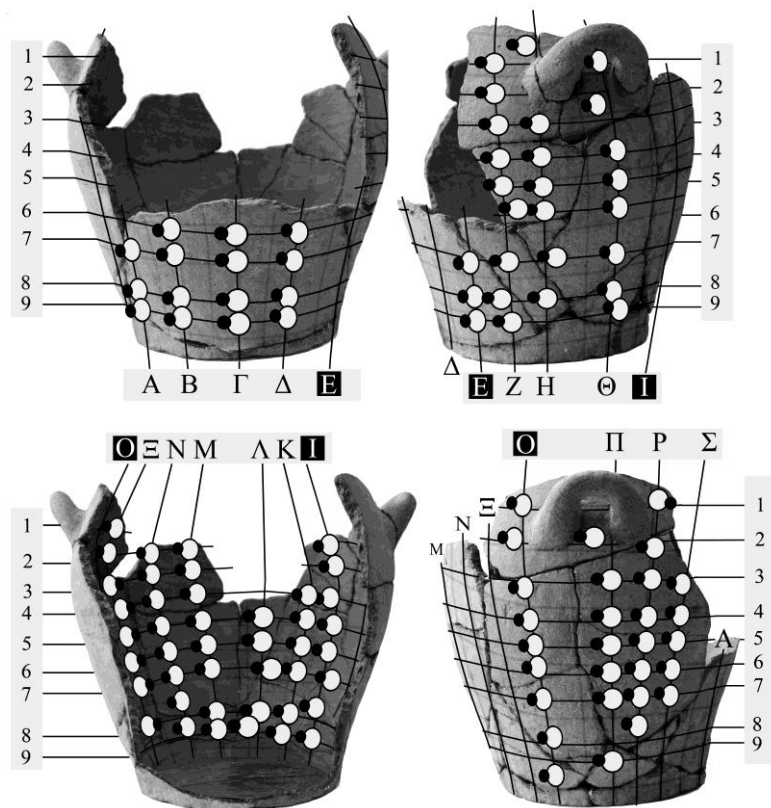
| Αγγείο 1 |                  | A    | B    | Γ    | Δ      | E     | Z     | H     | Θ     | I     |
|----------|------------------|------|------|------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1        | $B_y (\pm 1nT)$  | 23   | 32   | 32   | 35     | 31    | 29    | 25    | 7     |       |
|          | $B_x (\pm 1nT)$  | 47   | 33   | 18   | -3     | -19   | -41   | -57   | -60   |       |
|          | $B_z (\pm 1nT)$  | 16   | 7    | 3    | -1     | 5     | 8     | 23    | 51    |       |
|          | $B (\pm 1nT)$    | 55   | 46   | 37   | 35     | 37    | 51    | 66    | 79    |       |
|          | $\theta_B^\circ$ | 65±1 | 47±1 | 30±2 | 5±2    | 32±2  | 55±1  | 68±1  | 85±1  |       |
|          | $\phi_B^\circ$   | 19±1 | 12±2 | 9±3  | 198±18 | 165±3 | 169±1 | 158±1 | 140±1 |       |
| 2        | $B_y (\pm 1nT)$  | 22   | 30   | 34   | 34     | 34    | 30    | 23    | 5     |       |
|          | $B_x (\pm 1nT)$  | 60   | 29   | 18   | -3     | -22   | -39   | -57   | -62   |       |
|          | $B_z (\pm 1nT)$  | 31   | 9    | 11   | 9      | 11    | 14    | 29    | 49    |       |
|          | $B (\pm 1nT)$    | 71   | 43   | 40   | 35     | 42    | 51    | 68    | 72    |       |
|          | $\theta_B^\circ$ | 72±1 | 45±1 | 32±1 | 16±2   | 36±1  | 54±1  | 70±1  | 86±1  |       |
|          | $\phi_B^\circ$   | 27±1 | 17±2 | 31±3 | 108±6  | 153±2 | 160±1 | 153±1 | 142±1 |       |
| 3        | $B_y (\pm 1nT)$  | 20   | 32   | 36   | 35     | 32    | 28    | 17    | 3     |       |
|          | $B_x (\pm 1nT)$  | 62   | 31   | 13   | -3     | -20   | -47   | -60   | -62   |       |
|          | $B_z (\pm 1nT)$  | 40   | 25   | 17   | 17     | 21    | 29    | 38    | 47    |       |
|          | $B (\pm 1nT)$    | 76   | 51   | 42   | 39     | 43    | 62    | 73    | 78    |       |
|          | $\theta_B^\circ$ | 75±1 | 51±1 | 31±1 | 26±1   | 42±1  | 63±1  | 77±1  | 88±1  |       |
|          | $\phi_B^\circ$   | 33±1 | 39±1 | 53±3 | 100±3  | 134±2 | 148±1 | 148±1 | 143±1 |       |
| 4        | $B_y (\pm 1nT)$  | 17   | 24   | 32   | 32     | 33    | 25    | 19    | -6    | -9    |
|          | $B_x (\pm 1nT)$  | 59   | 41   | 19   | -2     | -21   | -40   | -58   | -63   | -56   |
|          | $B_z (\pm 1nT)$  | 42   | 37   | 30   | 33     | 29    | 31    | 40    | 51    | 50    |
|          | $B (\pm 1nT)$    | 74   | 60   | 48   | 46     | 49    | 56    | 73    | 81    | 76    |
|          | $\theta_B^\circ$ | 77±1 | 67±1 | 48±1 | 46±1   | 47±1  | 64±1  | 75±1  | -86±1 | -83±1 |
|          | $\phi_B^\circ$   | 35±1 | 42±1 | 58±2 | 93±2   | 126±2 | 142±1 | 145±1 | 141±1 | 139±1 |
| 5        | $B_y (\pm 1nT)$  | 15   | 23   | 32   | 32     | 32    | 22    | 15    | -6    | -10   |
|          | $B_x (\pm 1nT)$  | 54   | 48   | 21   | -7     | -21   | -48   | -58   | -68   | -61   |
|          | $B_z (\pm 1nT)$  | 41   | 47   | 40   | 35     | 41    | 42    | 47    | 52    | 51    |
|          | $B (\pm 1nT)$    | 69   | 71   | 55   | 48     | 56    | 67    | 76    | 86    | 80    |
|          | $\theta_B^\circ$ | 78±1 | 71±1 | 55±1 | 48±1   | 55±1  | 71±1  | 79±1  | -86±1 | -83±1 |
|          | $\phi_B^\circ$   | 37±1 | 44±1 | 62±1 | 101±1  | 117±1 | 139±1 | 141±1 | 143±1 | 140±1 |


**Table 24β (συνέχεια)** Ενδείξεις των αισθητήρων  $B_i$  ( $i=x,y,z$ ), με τον  $x$  αισθητήρα προσανατολισμένο στη διεύθυνση των αυλακώσεων σε όστρακα του σώματος του αγγείου 1.



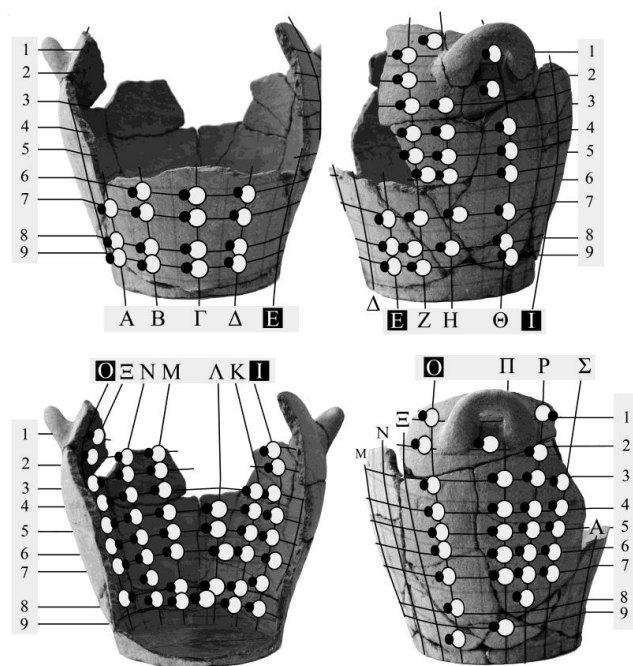
| Αγγείο 1 |                  | A    | B    | Γ    | Δ    | E     | Z     | H | Θ | I |
|----------|------------------|------|------|------|------|-------|-------|---|---|---|
| 6        | $B_y (\pm 1nT)$  | 11   | 18   | 26   | 27   | 22    | 14    |   |   |   |
|          | $B_x (\pm 1nT)$  | 55   | 42   | 21   | -1   | -28   | -48   |   |   |   |
|          | $B_z (\pm 1nT)$  | 51   | 57   | 54   | 56   | 60    | 53    |   |   |   |
|          | $B (\pm 1nT)$    | 76   | 76   | 64   | 62   | 70    | 73    |   |   |   |
|          | $\theta_B^\circ$ | 82±1 | 76±1 | 66±1 | 64±1 | 72±1  | 79±1  |   |   |   |
|          | $\phi_B^\circ$   | 43±1 | 54±1 | 69±1 | 91±1 | 115±1 | 132±1 |   |   |   |
| 7        | $B_y (\pm 1nT)$  | 2    | 12   | 18   | 21   | 20    | 8     |   |   |   |
|          | $B_x (\pm 1nT)$  | 65   | 48   | 20   | -5   | -25   | -52   |   |   |   |
|          | $B_z (\pm 1nT)$  | 57   | 63   | 63   | 61   | 61    | 61    |   |   |   |
|          | $B (\pm 1nT)$    | 86   | 81   | 69   | 65   | 69    | 84    |   |   |   |
|          | $\theta_B^\circ$ | 89±1 | 81±1 | 75±1 | 71±1 | 73±1  | 84±1  |   |   |   |
|          | $\phi_B^\circ$   | 41±1 | 53±1 | 72±1 | 95±1 | 112±1 | 130±1 |   |   |   |
| 8        | $B_y (\pm 1nT)$  | 1    | 12   | 16   | 18   | 18    | 9     |   |   |   |
|          | $B_x (\pm 1nT)$  | 62   | 47   | 20   | 1    | -27   | -50   |   |   |   |
|          | $B_z (\pm 1nT)$  | 56   | 71   | 67   | 74   | 71    | 65    |   |   |   |
|          | $B (\pm 1nT)$    | 84   | 82   | 72   | 76   | 78    | 82    |   |   |   |
|          | $\theta_B^\circ$ | 89±1 | 82±1 | 77±1 | 76±1 | 77±1  | 84±1  |   |   |   |
|          | $\phi_B^\circ$   | 42±1 | 56±1 | 73±1 | 89±1 | 111±1 | 128±1 |   |   |   |
| 9        | $B_y (\pm 1nT)$  |      | 6    | 14   | 16   | 15    | 4     |   |   |   |
|          | $B_x (\pm 1nT)$  |      | 44   | 27   | -4   | -29   | -51   |   |   |   |
|          | $B_z (\pm 1nT)$  |      | 64   | 72   | 75   | 72    | 66    |   |   |   |
|          | $B (\pm 1nT)$    |      | 86   | 78   | 77   | 79    | 84    |   |   |   |
|          | $\theta_B^\circ$ |      | 86±1 | 80±1 | 78±1 | 79±1  | 87±1  |   |   |   |
|          | $\phi_B^\circ$   |      | 55±1 | 71±1 | 93±1 | 112±1 | 128±1 |   |   |   |


**Πίνακας B25a.** Ενδείξεις των αισθητήρων Bi ( $i = xy,z$ ) και μετρήσεις των αποστάσεων D, L, με τον x αισθητήρα προσανατολισμένο στην κοινή κατεύθυνση των  $B_{xy}$ ,  $M_{xy}$  σε όστρακα του σώματος του **αγγείου 2**.



| Αγγείο 2  |                         |                      |   |                             |   |           |      |      |      |      |
|---|-------------------------|----------------------|---|-----------------------------|---|-----------|------|------|------|------|
|  |                         |                      |   |                             |   |           |      |      |      |      |
|   |                         | $\alpha_v^L$<br>(cm) |   | $\alpha_{x,z}^{//}$<br>(cm) |   | $\lambda$ |      |      |      |      |
|   |                         | 1,15±<br>0,053       |   | 1,66±<br>0,05               |   | 2,0±0,1   |      |      |      |      |
|   |                         | A                    | B | Γ                           | Δ | E         | Z    | H    | Θ    | I    |
| 1   | D (±0.3) cm             |                      |   |                             |   |           | 5.7  | 2.5  | 3.4  |      |
|   | L (±0.1) cm             |                      |   |                             |   |           | 0.9  | 0.8  | 0.8  |      |
|   | B <sub>xz</sub> (±1) nT |                      |   |                             |   |           | 21   | 16   | 28   |      |
|   | B <sub>y</sub> (±1) nT  |                      |   |                             |   |           | 37   | 28   | 33   |      |
|   | B (±1) nT               |                      |   |                             |   |           | 43   | 32   | 43   |      |
|   | θ <sub>8</sub> °        |                      |   |                             |   |           | 30±1 | 30±2 | 40±1 |      |
| 2   | D (±0.3) cm             |                      |   |                             |   |           | 9.3  |      |      | 2.0  |
|   | L (±0.1) cm             |                      |   |                             |   |           | 1.0  |      |      | 1.1  |
|   | B <sub>xz</sub> (±1) nT |                      |   |                             |   |           | 35   |      |      | 71   |
|   | B <sub>y</sub> (±1) nT  |                      |   |                             |   |           | 38   |      |      | 32   |
|   | B (±1) nT               |                      |   |                             |   |           | 52   |      |      | 78   |
|   | θ <sub>8</sub> °        |                      |   |                             |   |           | 43±1 |      |      | 66±1 |
| 3   | D (±0.3) cm             |                      |   |                             |   |           | 13.1 | 11.9 | 10.6 | 3.7  |
|   | L (±0.1) cm             |                      |   |                             |   |           | 1.2  | 1.3  | 1.1  | 1.2  |
|   | B <sub>xz</sub> (±1) nT |                      |   |                             |   |           | 46   | 38   | 49   | 89   |
|   | B <sub>y</sub> (±1) nT  |                      |   |                             |   |           | 38   | 42   | 38   | 24   |
|   | B (±1) nT               |                      |   |                             |   |           | 60   | 57   | 62   | 92   |
|   | θ <sub>8</sub> °        |                      |   |                             |   |           | 50±1 | 42±1 | 52±1 | 75±1 |
| 4   | D (±0.3) cm             |                      |   |                             |   |           | 2.8  | 2.6  | 6.4  | 1.7  |
|   | L (±0.1) cm             |                      |   |                             |   |           | 1.5  | 1.6  | 1.5  | 1.5  |
|   | B <sub>xz</sub> (±1) nT |                      |   |                             |   |           | 73   | 73   | 77   | 92   |
|   | B <sub>y</sub> (±1) nT  |                      |   |                             |   |           | 37   | 33   | 28   | 20   |
|   | B (±1) nT               |                      |   |                             |   |           | 82   | 80   | 82   | 94   |
|   | θ <sub>8</sub> °        |                      |   |                             |   |           | 63±1 | 66±1 | 70±1 | 78±1 |
| 5   | D (±0.3) cm             |                      |   |                             |   |           | 6.7  | 2.6  | 10.4 | 2.3  |
|   | L (±0.1) cm             |                      |   |                             |   |           | 1.6  | 1.6  | 1.4  | 1.3  |
|   | B <sub>xz</sub> (±1) nT |                      |   |                             |   |           | 88   | 73   | 90   | 99   |
|   | B <sub>y</sub> (±1) nT  |                      |   |                             |   |           | 35   | 33   | 26   | 15   |
|   | B (±1) nT               |                      |   |                             |   |           | 95   | 80   | 94   | 100  |
|   | θ <sub>8</sub> °        |                      |   |                             |   |           | 68±1 | 66±1 | 74±1 | 81±1 |

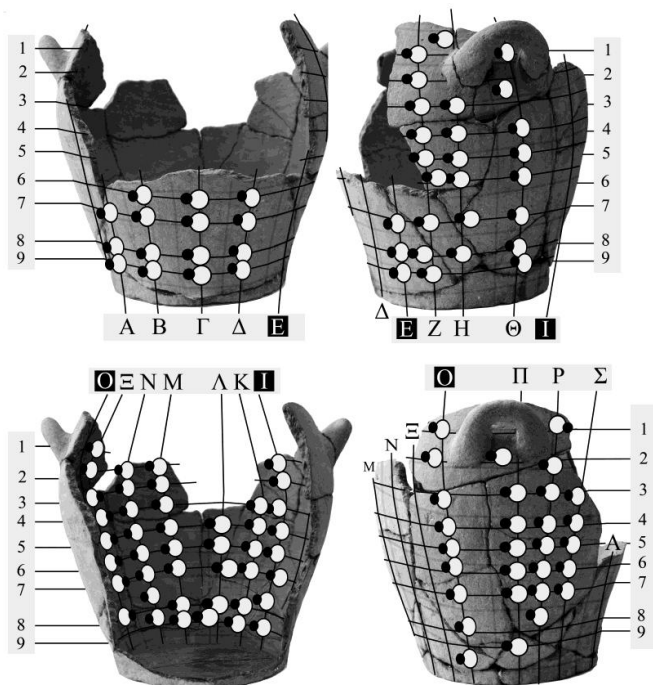
**Πίνακας B25a (συνέχεια)** Ενδείξεις των αισθητήρων Bi ( $i = xy, z$ ) και μετρήσεις των αποστάσεων D, L, με τον x αισθητήρα προσανατολισμένο στην κοινή κατεύθυνση των  $B_{xy}$ ,  $M_{xy}$  σε όστρακα του σώματος του αγγείου 2.



| Αγγείο 2  |                        |       |       |       |      |      |      |      |      |      |
|---|------------------------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|
|  |                        |       |       |       |      |      |      |      |      |      |
|   |                        | A     | B     | Γ     | Δ    | E    | Z    | H    | Θ    | I    |
| 6   | D (±0.3) cm            |       | 23.2  | 7.6   | 6.4  |      | 8.9  | 9.4  | 11.4 | 3.3  |
|   | L (±0.1) cm            |       | 1.3   | 1.3   | 1.3  |      | 1.4  | 1.3  | 1.3  | 1.3  |
|   | B <sub>α</sub> (±1) nT |       | 88    | 105   | 102  |      | 93   | 86   | 93   | 104  |
|   | B <sub>γ</sub> (±1) nT |       | -26   | -8    | 8    |      | 23   | 26   | 23   | 19   |
|   | B (±1) nT              |       | 92    | 105   | 102  |      | 96   | 90   | 96   | 106  |
|   | θ <sub>s</sub> °       |       | -74±1 | -86±1 | 86±1 |      | 76±1 | 73±1 | 76±1 | 80±1 |
| 7   | D (±0.3) cm            | 27.8  | 21.2  | 14.6  | 11.0 | 8.1  | 3.9  | 2.7  | 14.6 | 3.0  |
|   | L (±0.1) cm            | 1.1   | 1.3   | 1.2   | 1.2  | 1.4  | 1.3  | 1.2  | 1.2  | 1.2  |
|   | B <sub>α</sub> (±1) nT | 47    | 88    | 100   | 107  | 94   | 95   | 89   | 95   | 107  |
|   | B <sub>γ</sub> (±1) nT | -33   | -26   | -14   | 5    | 20   | 22   | 24   | 22   | 9    |
|   | B (±1) nT              | 57    | 92    | 101   | 107  | 96   | 98   | 92   | 98   | 107  |
|   | θ <sub>s</sub> °       | -55±1 | -74±1 | -82±1 | 87±1 | 78±1 | 77±1 | 75±1 | 77±1 | 85±1 |
| 8   | D (±0.3) cm            | 12.9  | 14.1  | 8.7   | 14.8 | 10.0 | 2.9  | 3.2  | 3.3  | 1.8  |
|   | L (±0.1) cm            | 1.0   | 1.1   | 1.0   | 1.1  | 1.2  | 1.1  | 1.1  | 1.1  | 1.1  |
|   | B <sub>α</sub> (±1) nT | 55    | 87    | 102   | 104  | 92   | 86   | 77   | 85   | 97   |
|   | B <sub>γ</sub> (±1) nT | -36   | -27   | -9    | 9    | 22   | 25   | 30   | 27   | 12   |
|   | B (±1) nT              | 66    | 91    | 102   | 104  | 95   | 90   | 83   | 89   | 98   |
|   | θ <sub>s</sub> °       | -57±1 | -73±1 | -85±1 | 85±1 | 77±1 | 74±1 | 69±1 | 72±1 | 83±1 |
| 9   | D (±0.3) cm            | 4.9   | 7.6   | 8.7   | 16.6 | 13.0 | 4.1  |      | 4.4  | 2.4  |
|   | L (±0.1) cm            | 0.9   | 0.9   | 0.9   | 1.0  | 1.1  | 1.0  |      | 0.9  | 1.0  |
|   | B <sub>α</sub> (±1) nT | 51    | 81    | 108   | 101  | 88   | 77   |      | 77   | 102  |
|   | B <sub>γ</sub> (±1) nT | -31   | -24   | -2    | 12   | 25   | 29   |      | 28   | 16   |
|   | B (±1) nT              | 60    | 84    | 108   | 102  | 91   | 82   |      | 82   | 103  |
|   | θ <sub>s</sub> °       | -59±1 | -73±1 | -89±1 | 83±1 | 74±1 | 69±1 |      | 70±1 | 81±1 |

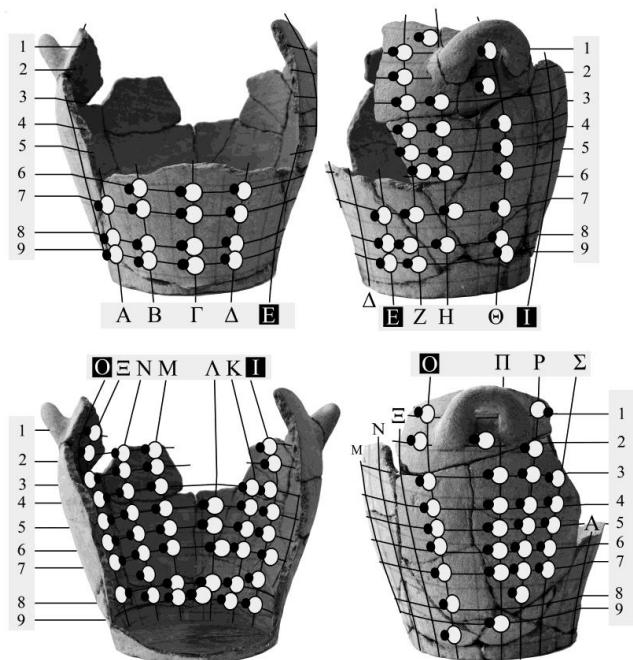


**Πίνακας B25a (συνέχεια)** Ενδείξεις των αισθητήρων Bi ( $i = xy, z$ ) και μετρήσεις των αποστάσεων D, L, με τον x αισθητήρα προσανατολισμένο στην κοινή κατεύθυνση των  $B_{xy}$ ,  $M_{xy}$  σε όστρακα του αγγείου 2.



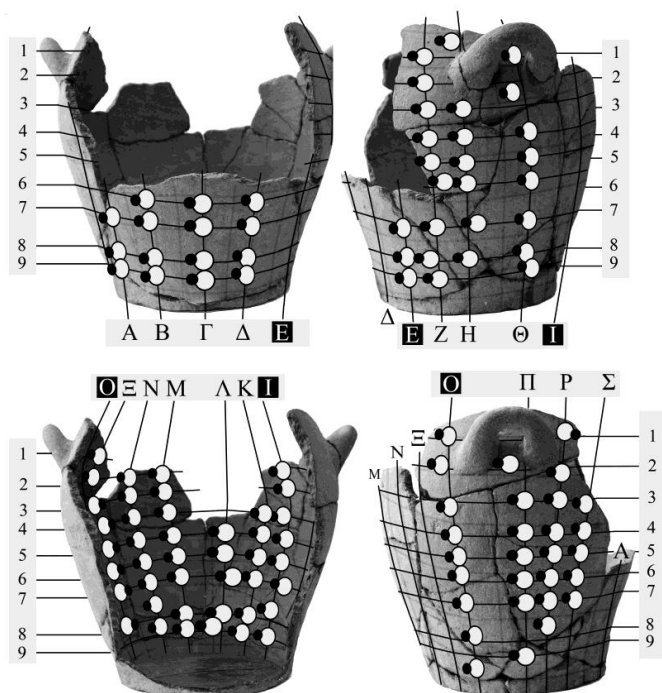
| Αγγείο 2 |                     |            |             |             |             |             |             |             |             |             |
|----------|---------------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|          |                     |            |             |             |             |             |             |             |             |             |
|          |                     | K          | Λ           | M           | N           | Ξ           | Ο           | Π           | P           | Σ           |
| 1        | D ( $\pm 0.3$ ) cm  |            |             |             |             | 7.2         | 9.4         |             | 4.2         |             |
|          | L ( $\pm 0.1$ ) cm  |            |             |             |             | 1.1         | 1.1         |             | 1.0         |             |
|          | $B_{xz} (\pm 1)$ nT |            |             |             |             | 101         | 101         |             | 86          |             |
|          | $B_y (\pm 1)$ nT    |            |             |             |             | -15         | -16         |             | -22         |             |
|          | B ( $\pm 1$ ) nT    |            |             |             |             | 102         | 102         |             | 89          |             |
|          | $\theta_B^\circ$    |            |             |             |             | -82 $\pm 1$ | -81 $\pm 1$ |             | -76 $\pm 1$ |             |
| 2        | D ( $\pm 0.3$ ) cm  |            |             | 10.9        | 2.7         | 3.6         | 5.0         | 3.0         | 12.6        |             |
|          | L ( $\pm 0.1$ ) cm  |            |             | 1.1         | 1.2         | 1.2         | 1.2         | 1.1         | 1.0         |             |
|          | $B_{xz} (\pm 1)$ nT |            |             | 105         | 106         | 95          | 81          | 71          | 73          |             |
|          | $B_y (\pm 1)$ nT    |            |             | -2          | -10         | -21         | -30         | -29         | -32         |             |
|          | B ( $\pm 1$ ) nT    |            |             | 105         | 106         | 97          | 86          | 77          | 80          |             |
|          | $\theta_B^\circ$    |            |             | -89 $\pm 1$ | -85 $\pm 1$ | -78 $\pm 1$ | -70 $\pm 1$ | -68 $\pm 1$ | -66 $\pm 1$ |             |
| 3        | D ( $\pm 0.3$ ) cm  |            |             | 11.6        | 4.7         | 8.6         | 10.7        | 8.4         | 8.4         | 8.5         |
|          | L ( $\pm 0.1$ ) cm  |            |             | 1.2         | 1.3         | 1.3         | 1.3         | 1.2         | 1.1         | 1.1         |
|          | $B_{xz} (\pm 1)$ nT |            |             | 103         | 104         | 92          | 87          | 67          | 67          | 73          |
|          | $B_y (\pm 1)$ nT    |            |             | -5          | -12         | -23         | -26         | -33         | -30         | -30         |
|          | B ( $\pm 1$ ) nT    |            |             | 103         | 105         | 95          | 91          | 75          | 73          | 79          |
|          | $\theta_B^\circ$    |            |             | -87 $\pm 1$ | -83 $\pm 1$ | -76 $\pm 1$ | -73 $\pm 1$ | -64 $\pm 1$ | -66 $\pm 1$ | -68 $\pm 1$ |
| 4        | D ( $\pm 0.3$ ) cm  | 3.6        |             | 6.7         | 3.3         | 8.6         | 8.4         | 2.0         | 2.6         | 3.2         |
|          | L ( $\pm 0.1$ ) cm  | 1.4        |             | 1.6         | 1.7         | 1.7         | 1.7         | 1.6         | 1.5         | 1.5         |
|          | $B_{xz} (\pm 1)$ nT | 103        |             | 107         | 97          | 81          | 65          | 45          | 50          | 57          |
|          | $B_y (\pm 1)$ nT    | 17         |             | -11         | -19         | -30         | -33         | -42         | -38         | -40         |
|          | B ( $\pm 1$ ) nT    | 104        |             | 108         | 99          | 86          | 73          | 62          | 63          | 70          |
|          | $\theta_B^\circ$    | 81 $\pm 1$ |             | -84 $\pm 1$ | -79 $\pm 1$ | -70 $\pm 1$ | -63 $\pm 1$ | -47 $\pm 1$ | -53 $\pm 1$ | -55 $\pm 1$ |
| 5        | D ( $\pm 0.3$ ) cm  | 3.0        | 4.0         | 9.9         | 3.9         | 5.4         | 7.9         | 14.8        | 11.7        | 7.6         |
|          | L ( $\pm 0.1$ ) cm  | 1.2        | 1.3         | 1.4         | 1.5         | 1.4         | 1.5         | 1.4         | 1.4         | 1.3         |
|          | $B_{xz} (\pm 1)$ nT | 107        | 109         | 99          | 90          | 79          | 52          | 35          | 31          | 48          |
|          | $B_y (\pm 1)$ nT    | 6          | -3          | -16         | -27         | -32         | -40         | -41         | -41         | -38         |
|          | B ( $\pm 1$ ) nT    | 107        | 109         | 100         | 94          | 85          | 66          | 54          | 51          | 61          |
|          | $\theta_B^\circ$    | 87 $\pm 1$ | -88 $\pm 1$ | -81 $\pm 1$ | -73 $\pm 1$ | -68 $\pm 1$ | -52 $\pm 1$ | -40 $\pm 1$ | -37 $\pm 1$ | -52 $\pm 1$ |

**Πίνακας B25a (συνέχεια)** Ενδείξεις των αισθητήρων Bi ( $i = xy, z$ ) και μετρήσεις των αποστάσεων D, L, με τον x αισθητήρα προσανατολισμένο στην κοινή κατεύθυνση των  $B_{xy}$ ,  $M_{xy}$  σε όστρακα του σώματος του **αγγείου 2**.



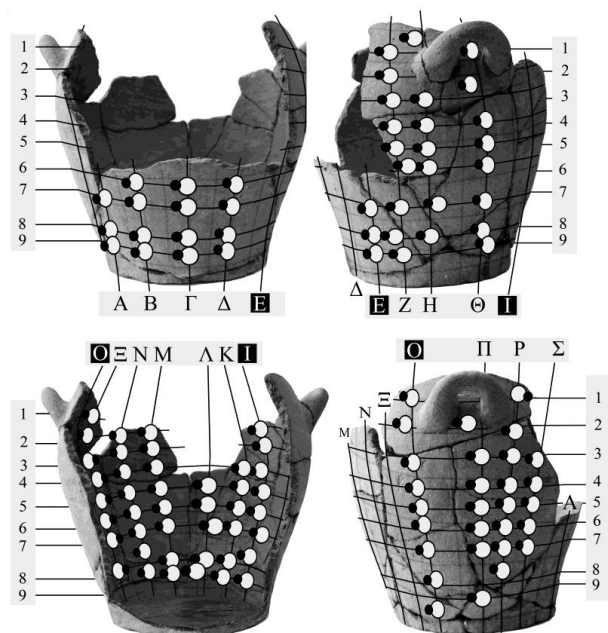
| Αγγείο 2 |                     |            |             |             |             |             |             |             |             |             |
|----------|---------------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|          |                     | K          | Λ           | M           | N           | Ξ           | O           | Π           | P           | Σ           |
| 6        | D ( $\pm 0.3$ ) cm  | 7.5        | 3.9         | 8.8         | 3.7         | 6.7         | 5.7         | 9.8         | 7.8         | 4.8         |
|          | L ( $\pm 0.1$ ) cm  | 1.2        | 1.2         | 1.3         | 1.4         | 1.5         | 1.4         | 1.3         | 1.3         | 1.3         |
|          | $B_{xz} (\pm 1)$ nT | 104        | 103         | 99          | 86          | 68          | 49          | 27          | 26          | 36          |
|          | $B_y (\pm 1)$ nT    | 6          | -7          | -16         | -25         | -36         | -37         | -40         | -40         | -41         |
|          | B ( $\pm 1$ ) nT    | 104        | 103         | 100         | 90          | 77          | 61          | 48          | 48          | 55          |
|          | $\theta_8^\circ$    | 87 $\pm 1$ | -86 $\pm 1$ | -81 $\pm 1$ | -74 $\pm 1$ | -62 $\pm 1$ | -53 $\pm 1$ | -34 $\pm 1$ | -33 $\pm 1$ | -41 $\pm 1$ |
| 7        | D ( $\pm 0.3$ ) cm  | 7.7        | 10.5        | 8.3         | 3.8         | 8.3         | 4.2         | 5.4         | 5.0         | 2.0         |
|          | L ( $\pm 0.1$ ) cm  | 1.2        | 1.2         | 1.2         | 1.2         | 1.3         | 1.3         | 1.3         | 1.2         | 1.2         |
|          | $B_{xz} (\pm 1)$ nT | 108        | 108         | 96          | 83          | 57          | 41          | 17          | 31          | 31          |
|          | $B_y (\pm 1)$ nT    | 4          | 1           | -20         | -28         | -37         | -38         | -43         | -39         | -39         |
|          | B ( $\pm 1$ ) nT    | 108        | 108         | 98          | 88          | 68          | 56          | 46          | 50          | 50          |
|          | $\theta_8^\circ$    | 88 $\pm 1$ | 89 $\pm 1$  | -78 $\pm 1$ | -71 $\pm 1$ | -57 $\pm 1$ | -47 $\pm 1$ | -22 $\pm 1$ | -38 $\pm 1$ | -38 $\pm 1$ |
| 8        | D ( $\pm 0.3$ ) cm  | 2.3        | 1.8         | 6.6         | 2.7         | 3.8         | 2.0         |             | 2.0         |             |
|          | L ( $\pm 0.1$ ) cm  | 1.1        | 1.1         | 1.1         | 1.1         | 1.2         | 1.2         |             | 1.1         |             |
|          | $B_{xz} (\pm 1)$ nT | 108        | 104         | 104         | 88          | 63          | 46          |             | 26          |             |
|          | $B_y (\pm 1)$ nT    | 4          | -5          | -13         | -24         | -34         | -37         |             | -37         |             |
|          | B ( $\pm 1$ ) nT    | 108        | 104         | 105         | 91          | 72          | 59          |             | 45          |             |
|          | $\theta_8^\circ$    | 88 $\pm 1$ | -87 $\pm 1$ | -83 $\pm 1$ | -75 $\pm 1$ | -62 $\pm 1$ | -51 $\pm 1$ |             | -35 $\pm 1$ |             |
| 9        | D ( $\pm 0.3$ ) cm  | 2.1        | 1.8         | 2.7         | 2.5         |             | 2.1         | 2.7         |             |             |
|          | L ( $\pm 0.1$ ) cm  | 0.9        | 1.1         | 0.9         | 1.0         |             | 1.1         | 1.0         |             |             |
|          | $B_{xz} (\pm 1)$ nT | 103        | 108         | 105         | 91          |             | 48          | 32          |             |             |
|          | $B_y (\pm 1)$ nT    | 8          | -6          | -12         | -23         |             | -35         | -36         |             |             |
|          | B ( $\pm 1$ ) nT    | 103        | 108         | 106         | 94          |             | 59          | 48          |             |             |
|          | $\theta_8^\circ$    | 86 $\pm 1$ | -87 $\pm 1$ | -83 $\pm 1$ | -76 $\pm 1$ |             | -54 $\pm 1$ | -42 $\pm 1$ |             |             |

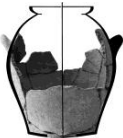
**Πίνακας 25β.** Ενδείξεις των αισθητήρων  $B_i$  ( $i=x,y,z$ ), με τον  $x$  αισθητήρα προσανατολισμένο στη διεύθυνση των αυλακώσεων σε όστρακα του σώματος του **αγγείου 2**.



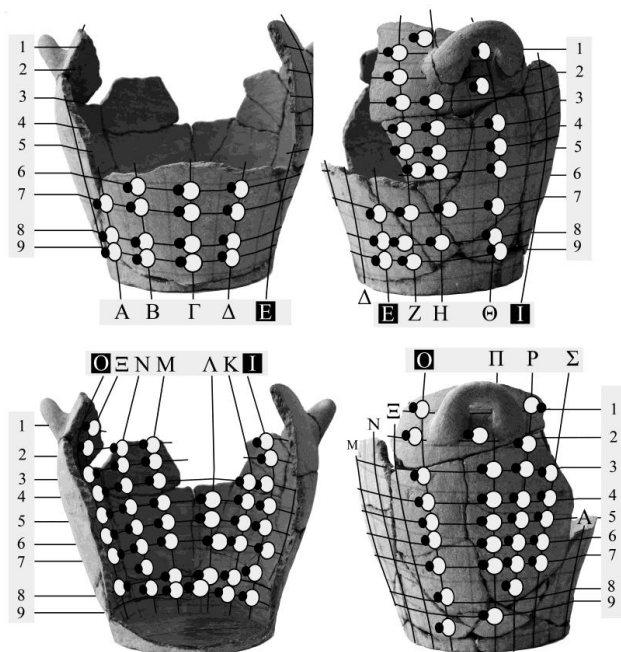
| Αγγείο 2 |                  | A | B | Γ | Δ | E | Z     | H     | Θ    | I    |
|----------|------------------|---|---|---|---|---|-------|-------|------|------|
| 1        | $B_y (\pm 1nT)$  |   |   |   |   |   | 35    | 29    | 34   |      |
|          | $B_x (\pm 1nT)$  |   |   |   |   |   | -13   | -2    | 19   |      |
|          | $B_z (\pm 1nT)$  |   |   |   |   |   | 19    | 11    | 17   |      |
|          | $B (\pm 1nT)$    |   |   |   |   |   | 42    | 31    | 42   |      |
|          | $\theta_B^\circ$ |   |   |   |   |   | 33±1  | 21±2  | 37±1 |      |
|          | $\phi_B^\circ$   |   |   |   |   |   | 124±2 | 100±5 | 42±2 |      |
| 2        | $B_y (\pm 1nT)$  |   |   |   |   |   | 38    |       |      | 32   |
|          | $B_x (\pm 1nT)$  |   |   |   |   |   | -15   |       |      | 51   |
|          | $B_z (\pm 1nT)$  |   |   |   |   |   | 32    |       |      | 43   |
|          | $B (\pm 1nT)$    |   |   |   |   |   | 52    |       |      | 74   |
|          | $\theta_B^\circ$ |   |   |   |   |   | 43±1  |       |      | 64±1 |
|          | $\phi_B^\circ$   |   |   |   |   |   | 115±2 |       |      | 40±1 |
| 3        | $B_y (\pm 1nT)$  |   |   |   |   |   | 38    | 41    | 37   | 25   |
|          | $B_x (\pm 1nT)$  |   |   |   |   |   | -24   | -5    | 25   | 65   |
|          | $B_z (\pm 1nT)$  |   |   |   |   |   | 44    | 41    | 44   | 59   |
|          | $B (\pm 1nT)$    |   |   |   |   |   | 63    | 58    | 63   | 91   |
|          | $\theta_B^\circ$ |   |   |   |   |   | 53±1  | 45±1  | 54±1 | 74±1 |
|          | $\phi_B^\circ$   |   |   |   |   |   | 119±1 | 97±1  | 60±1 | 42±1 |
| 4        | $B_y (\pm 1nT)$  |   |   |   |   |   | 37    | 33    | 29   | 20   |
|          | $B_x (\pm 1nT)$  |   |   |   |   |   | -27   | -17   | 36   | 61   |
|          | $B_z (\pm 1nT)$  |   |   |   |   |   | 71    | 72    | 70   | 73   |
|          | $B (\pm 1nT)$    |   |   |   |   |   | 84    | 81    | 84   | 97   |
|          | $\theta_B^\circ$ |   |   |   |   |   | 64±   | 66±1  | 70±  | 78±1 |
|          | $\phi_B^\circ$   |   |   |   |   |   | 1     |       | 1    |      |
| 5        | $B_y (\pm 1nT)$  |   |   |   |   |   | 34    | 33    | 25   | 16   |
|          | $B_x (\pm 1nT)$  |   |   |   |   |   | -32   | -12   | 35   | 59   |
|          | $B_z (\pm 1nT)$  |   |   |   |   |   | 81    | 77    | 82   | 75   |
|          | $B (\pm 1nT)$    |   |   |   |   |   | 93    | 85    | 93   | 97   |
|          | $\theta_B^\circ$ |   |   |   |   |   | 69±1  | 67±1  | 74±1 | 80±1 |
|          | $\phi_B^\circ$   |   |   |   |   |   | 112±1 | 99±1  | 67±1 | 52±1 |


**Πίνακας 25β (συνέχεια).** Ενδείξεις των αισθητήρων  $B_i$  ( $i=x,y,z$ ), με τον  $x$  αισθητήρα προσανατολισμένο στη διεύθυνση των αυλακώσεων σε όστρακα του σώματος του αγγείου 2.



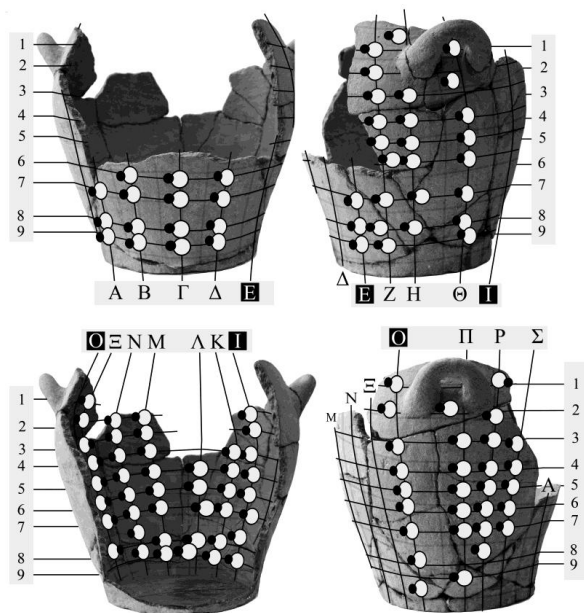
| Αγγείο 2   |                             |       |       |       |       |       |       |       |      |      |
|--|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|
|  |                             |       |       |       |       |       |       |       |      |      |
|  |                             | A     | B     | Γ     | Δ     | E     | Z     | H     | Θ    | I    |
| 6  | B <sub>γ</sub> (±1nT)       |       | -29   | -8    | 8     |       | 23    | 27    | 23   | 18   |
|  | B <sub>χ</sub> (±1nT)       |       | -75   | -83   | -75   |       | -38   | -5    | 31   | 56   |
|  | B <sub>z</sub> (±1nT)       |       | 53    | 66    | 78    |       | 87    | 78    | 84   | 81   |
|  | B (±1nT)                    |       | 96    | 106   | 109   |       | 98    | 83    | 92   | 100  |
|  | θ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> |       | -72±1 | -86±1 | 86±1  |       | 76±1  | 71±1  | 76±1 | 80±1 |
|  | φ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> |       | 145±1 | 142±1 | 134±1 |       | 114±1 | 94±1  | 70±1 | 55±1 |
| 7  | B <sub>γ</sub> (±1nT)       | -33   | -25   | -15   | 5     | 20    | 22    | 25    | 22   | 10   |
|  | B <sub>χ</sub> (±1nT)       | -37   | -76   | -82   | -70   | -42   | -22   | -10   | 26   | 67   |
|  | B <sub>z</sub> (±1nT)       | 24    | 53    | 61    | 73    | 87    | 91    | 83    | 89   | 80   |
|  | B (±1nT)                    | 55    | 96    | 103   | 101   | 99    | 96    | 87    | 95   | 105  |
|  | θ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | -53±1 | -75±1 | -82±1 | 87±1  | 78±1  | 77±1  | 73±1  | 77±1 | 85±1 |
|  | φ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | 147±1 | 145±1 | 143±1 | 134±1 | 116±1 | 104±1 | 97±1  | 74±1 | 50±1 |
| 8  | B <sub>γ</sub> (±1nT)       | -35   | -27   | -9    | 7     | 22    | 25    | 29    | 26   | 11   |
|  | B <sub>χ</sub> (±1nT)       | -42   | -66   | -81   | -67   | -44   | -33   | -16   | 23   | 64   |
|  | B <sub>z</sub> (±1nT)       | 31    | 45    | 64    | 77    | 83    | 86    | 84    | 89   | 72   |
|  | B (±1nT)                    | 63    | 84    | 104   | 102   | 96    | 95    | 90    | 96   | 97   |
|  | θ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | -56±1 | -71±1 | -85±1 | 86±1  | 77±1  | 75±1  | 71±1  | 74±1 | 83±1 |
|  | φ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | 144±1 | 146±1 | 142±1 | 131±1 | 118±1 | 111±1 | 101±1 | 76±1 | 48±1 |
| 9  | B <sub>γ</sub> (±1nT)       | -30   | -24   | -1    | 13    | 26    | 28    |       | 28   | 16   |
|  | B <sub>χ</sub> (±1nT)       | -35   | -70   | -80   | -78   | -50   | -27   |       | 29   | 65   |
|  | B <sub>z</sub> (±1nT)       | 32    | 54    | 67    | 78    | 76    | 68    |       | 77   | 75   |
|  | B (±1nT)                    | 56    | 92    | 104   | 111   | 95    | 78    |       | 87   | 101  |
|  | θ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | -58±1 | -75±1 | -89±1 | 83±1  | 74±1  | 69±1  |       | 71±1 | 81±1 |
|  | φ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | 138±1 | 142±1 | 1401  | 135±1 | 123±1 | 112±1 |       | 69±1 | 49±1 |

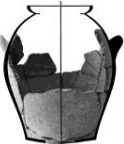
**Πίνακας 25β (συνέχεια).** Ενδείξεις των αισθητήρων  $B_i$  ( $i=x,y,z$ ), με τον  $x$  αισθητήρα προσανατολισμένο στη διεύθυνση των αυλακώσεων σε όστρακα του σώματος του αγγείου 2.



| Αγγείο 2   |                             |      |       |       |       |       |       |       |       |       |
|--|-----------------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|  |                             |      |       |       |       |       |       |       |       |       |
|  |                             | K    | Λ     | M     | N     | Ξ     | O     | Π     | P     | Σ     |
| 1  | B <sub>y</sub> (±1nT)       |      |       |       |       | -14   | -17   |       | -23   |       |
|  | B <sub>x</sub> (±1nT)       |      |       |       |       | 59    | 45    |       | -13   |       |
|  | B <sub>z</sub> (±1nT)       |      |       |       |       | 83    | 90    |       | 89    |       |
|  | B(±1nT)                     |      |       |       |       | 103   | 102   |       | 93    |       |
|  | θ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> |      |       |       |       | -82±1 | -80±1 |       | -76±1 |       |
|  | φ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> |      |       |       |       | 55±1  | 63±1  |       | 98±1  |       |
| 2  | B <sub>y</sub> (±1nT)       |      |       | -1    | -10   | -20   | -29   | -30   | -31   |       |
|  | B <sub>x</sub> (±1nT)       |      |       | 82    | 70    | 63    | 42    | 8     | -19   |       |
|  | B <sub>z</sub> (±1nT)       |      |       | 70    | 71    | 76    | 74    | 73    | 66    |       |
|  | B(±1nT)                     |      |       | 108   | 100   | 101   | 90    | 79    | 75    |       |
|  | θ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> |      |       | -89±1 | -84±1 | -79±1 | -71±1 | -68±1 | -66±1 |       |
|  | φ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> |      |       | 40±1  | 45±1  | 50±1  | 60±1  | 84±1  | 106±1 |       |
| 3  | B <sub>y</sub> (±1nT)       |      |       | -6    | -12   | -22   | -26   | -33   | -30   | -30   |
|  | B <sub>x</sub> (±1nT)       |      |       | 78    | 77    | 60    | 46    | 4     | -23   | -33   |
|  | B <sub>z</sub> (±1nT)       |      |       | 69    | 73    | 67    | 66    | 67    | 68    | 61    |
|  | B(±1nT)                     |      |       | 104   | 107   | 93    | 85    | 75    | 78    | 76    |
|  | θ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> |      |       | -87±1 | -84±1 | -76±1 | -72±1 | -64±1 | -67±1 | -67±1 |
|  | φ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> |      |       | 41±1  | 43±1  | 48±1  | 55±1  | 87±1  | 109±1 | 118±1 |
| 4  | B <sub>y</sub> (±1nT)       | 17   |       | -10   | -18   | -30   | -34   | -41   | -38   | -39   |
|  | B <sub>x</sub> (±1nT)       | 68   |       | 81    | 76    | 65    | 44    | 1     | -23   | -28   |
|  | B <sub>z</sub> (±1nT)       | 66   |       | 66    | 63    | 56    | 53    | 46    | 50    | 44    |
|  | B(±1nT)                     | 96   |       | 105   | 100   | 91    | 77    | 62    | 67    | 65    |
|  | θ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | 80±1 |       | -85±1 | -80±1 | -71±1 | -64±1 | -48±1 | -55±1 | -53±1 |
|  | φ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | 44±1 |       | 39±1  | 40±1  | 41±1  | 50±1  | 89±1  | 115±1 | 122±1 |
| 5  | B <sub>y</sub> (±1nT)       | 6    | -2    | -14   | -26   | -32   | -39   | -42   | -41   | -38   |
|  | B <sub>x</sub> (±1nT)       | 74   | 77    | 80    | 70    | 59    | 38    | -2    | -14   | -30   |
|  | B <sub>z</sub> (±1nT)       | 70   | 65    | 59    | 54    | 47    | 36    | 35    | 29    | 31    |
|  | B(±1nT)                     | 102  | 101   | 100   | 92    | 82    | 65    | 55    | 52    | 57    |
|  | θ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | 87±1 | -89±1 | -82±1 | -74±1 | -67±1 | -53±1 | -40±1 | -38±1 | -49±1 |
|  | φ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | 43±1 | 40±1  | 36±1  | 38±1  | 39±1  | 43±1  | 93±2  | 116±2 | 134±1 |

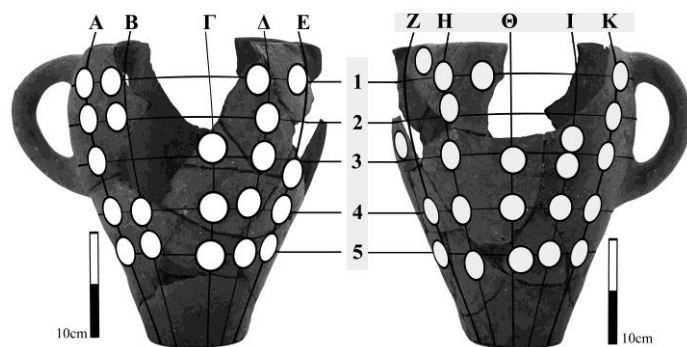
**Πίνακας 25β (συνέχεια).** Ενδείξεις των αισθητήρων  $B_i$  ( $i=x,y,z$ ), με τον  $x$  αισθητήρα προσανατολισμένο στη διεύθυνση των αυλακώσεων σε όστρακα του σώματος του αγγείου 2.



| Αγγείο 2   |                             |      |       |       |       |       |       |       |       |       |  |
|--|-----------------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|
|  |                             |      |       |       |       |       |       |       |       |       |  |
|  |                             | K    | Λ     | M     | N     | Ξ     | O     | Π     | P     | Σ     |  |
| 6  | B <sub>y</sub> (±1nT)       | 6    | -6    | -17   | -25   | -34   | -38   | -40   | -40   | -41   |  |
|  | B <sub>x</sub> (±1nT)       | 73   | 80    | 81    | 71    | 55    | 41    | -5    | -13   | -25   |  |
|  | B <sub>z</sub> (±1nT)       | 76   | 68    | 57    | 49    | 42    | 34    | 23    | 23    | 30    |  |
|  | B (±1nT)                    | 106  | 105   | 100   | 90    | 77    | 65    | 465   | 48    | 57    |  |
|  | θ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | 87±1 | -87±1 | -80±1 | -74±1 | -64±1 | -54±1 | -30±1 | -33±1 | -44±1 |  |
|  | φ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | 46±1 | 40±1  | 35±1  | 35±1  | 37±1  | 40±1  | 102±2 | 119±2 | 130±1 |  |
| 7  | B <sub>y</sub> (±1nT)       | 5    | 1     | -20   | -27   | -36   | -39   | -43   | -39   | -39   |  |
|  | B <sub>x</sub> (±1nT)       | 75   | 80    | 78    | 74    | 48    | 35    | -1    | -12   | -26   |  |
|  | B <sub>z</sub> (±1nT)       | 74   | 74    | 50    | 48    | 33    | 29    | 19    | 23    | 23    |  |
|  | B (±1nT)                    | 105  | 109   | 95    | 92    | 68    | 60    | 47    | 47    | 52    |  |
|  | θ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | 87±1 | 89±1  | -78±1 | -73±1 | -58±1 | -49±1 | -24±1 | -34±1 | -42±1 |  |
|  | φ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | 45±1 | 43±1  | 33±1  | 33±1  | 35±1  | 40±1  | 93±3  | 118±2 | 139±2 |  |
| 8  | B <sub>y</sub> (±1nT)       | 5    | -4    | -15   | -25   | -35   | -37   |       | -38   |       |  |
|  | B <sub>x</sub> (±1nT)       | 79   | 77    | 80    | 68    | 51    | 29    |       | -11   |       |  |
|  | B <sub>z</sub> (±1nT)       | 73   | 63    | 58    | 48    | 35    | 31    |       | 28    |       |  |
|  | B (±1nT)                    | 103  | 100   | 100   | 87    | 71    | 56    |       | 48    |       |  |
|  | θ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | 87±1 | -88±1 | -81±1 | -73±1 | -60±1 | -49±1 |       | -38±1 |       |  |
|  | φ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | 45±1 | 39±1  | 361   | 35±1  | 34±1  | 47±1  |       | 111±2 |       |  |
| 9  | B <sub>y</sub> (±1nT)       | 7    | -4    | -13   | -24   |       | -36   | -37   |       |       |  |
|  | B <sub>x</sub> (±1nT)       | 72   | 81    | 82    | 68    |       | 33    | 3     |       |       |  |
|  | B <sub>z</sub> (±1nT)       | 67   | 67    | 63    | 55    |       | 36    | 32    |       |       |  |
|  | B (±1nT)                    | 99   | 105   | 104   | 91    |       | 61    | 49    |       |       |  |
|  | θ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | 86±1 | -88±1 | -83±1 | -75±1 |       | -54±1 | -41±1 |       |       |  |
|  | φ <sub>B</sub> <sup>ο</sup> | 43±1 | 40±1  | 38±1  | 39±1  |       | 47±1  | 85±2  |       |       |  |



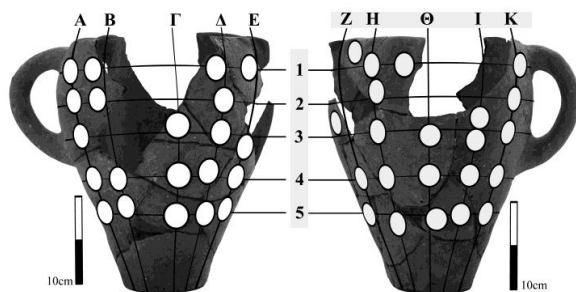
**Πίνακας B26a** Ενδείξεις των αισθητήρων Bi (i = xy,z) και μετρήσεις των αποστάσεων D, L, με τον x αισθητήρα προσανατολισμένο στην κοινή κατεύθυνση των  $B_{xy}$ ,  $M_{xy}$  σε όστρακα του σώματος του αγγείου 3.



| Αγγείο 3 |                             |      |      |       |       |       |       |       |       |       |      |
|----------|-----------------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
|          |                             |      |      |       |       |       |       |       |       |       |      |
|          |                             | A    | B    | Γ     | Δ     | Ε     | Ζ     | Η     | Θ     | Ι     | Κ    |
| 1        | D (±0.3) cm                 | 5.3  | 4.4  |       | 2.9   | 4.8   | 4.6   | 7.6   | 4.3   |       | 2.6  |
|          | L (±0.1) cm                 | 1.1  | 0.9  |       | 0.8   | 1.0   | 1.1   | 0.9   | 9.0   |       | 1.2  |
|          | $B_{xz} (\pm 1) \text{ nT}$ | 29   | 53   |       | 105   | 96    | 90    | 92    | 105   |       | 59   |
|          | $B_y (\pm 1) \text{ nT}$    | 34   | 34   |       | -5    | -16   | -17   | -19   | 4     |       | 40   |
|          | $B (\pm 1) \text{ nT}$      | 45   | 63   |       | 105   | 97    | 92    | 94    | 105   |       | 71   |
|          | $\theta_s^\circ$            | 40±1 | 57±1 |       | -87±1 | -81±1 | -79±1 | -78±1 | 88±1  |       | 56±1 |
| 2        | D (±0.3) cm                 | 7.8  | 9.7  |       | 5.4   |       |       | 4.5   |       | 1.9   | 3.7  |
|          | L (±0.1) cm                 | 1.4  | 1.3  |       | 1.5   |       |       | 1.5   |       | 1.4   | 1.5  |
|          | $B_{xz} (\pm 1) \text{ nT}$ | 50   | 79   |       | 99    |       |       | 97    |       | 94    | 60   |
|          | $B_y (\pm 1) \text{ nT}$    | 36   | 28   |       | -14   |       |       | -22   |       | 14    | 38   |
|          | $B (\pm 1) \text{ nT}$      | 62   | 84   |       | 100   |       |       | 99    |       | 95    | 71   |
|          | $\theta_s^\circ$            | 54±1 | 70±1 |       | -82±1 |       |       | -77±1 |       | 82±1  | 58±1 |
| 3        | D (±0.3) cm                 | 8.6  |      | 4.1   | 3.1   | 5.1   | 3.0   | 12.3  | 4.1   | 4.6   | 8.9  |
|          | L (±0.1) cm                 | 1.4  |      | 1.2   | 1.4   | 1.3   | 1.3   | 1.4   | 1.5   | 1.4   | 1.3  |
|          | $B_{xz} (\pm 1) \text{ nT}$ | 94   |      | 102   | 76    | 44    | 38    | 73    | 95    | 106   | 96   |
|          | $B_y (\pm 1) \text{ nT}$    | 20   |      | -13   | -30   | -40   | -42   | -31   | -13   | 2     | 14   |
|          | $B (\pm 1) \text{ nT}$      | 96±1 |      | 103±1 | 82±1  | 59±1  | 57±1  | 79±1  | 95±1  | 106±1 | 97±1 |
|          | $\theta_s^\circ$            | 78   |      | -83   | -68   | -48   | -42   | -67   | -82   | 89    | 82   |
| 4        | D (±0.3) cm                 | 4.1  | 5.6  | 5.0   | 2.4   | 2.0   | 3.8   | 8.7   | 2.7   | 8.3   | 15.7 |
|          | L (±0.1) cm                 | 1.4  | 1.3  | 1.3   | 1.5   | 1.3   | 1.3   | 1.3   | 1.4   | 1.4   | 1.3  |
|          | $B_{xz} (\pm 1) \text{ nT}$ | 102  | 104  | 87    | 55    | 52    | 27    | 52    | 89    | 99    | 102  |
|          | $B_y (\pm 1) \text{ nT}$    | 16   | 7    | -20   | -34   | -35   | -44   | -33   | -23   | -1    | 12   |
|          | $B (\pm 1) \text{ nT}$      | 103  | 104  | 89    | 65    | 63    | 52    | 62    | 92    | 99    | 103  |
|          | $\theta_s^\circ$            | 81±1 | 86±1 | -77±1 | -58±1 | -56±1 | -32±1 | -58±1 | -76±1 | -89±1 | 83±1 |
| 5        | D (±0.3) cm                 | 9.8  | 10.7 | 4.5   | 7.4   | 8.4   | 2.3   | 3.2   | 6.8   | 4.9   | 18.8 |
|          | L (±0.1) cm                 | 1.3  | 1.2  | 1.1   | 1.2   | 1.2   | 1.1   | 1.1   | 1.2   | 1.2   | 1.3  |
|          | $B_{xz} (\pm 1) \text{ nT}$ | 88   | 95   | 96    | 71    | 59    | 39    | 64    | 101   | 104   | 95   |
|          | $B_y (\pm 1) \text{ nT}$    | 19   | 18   | -13   | -30   | -38   | -35   | -32   | -12   | 6     | 18   |
|          | $B (\pm 1) \text{ nT}$      | 90   | 97   | 97    | 77    | 70    | 52    | 72    | 102   | 104   | 97   |
|          | $\theta_s^\circ$            | 78±1 | 79±1 | -82±1 | -67±1 | -57±1 | -48±1 | -63±1 | -83±1 | 87±1  | 79±1 |

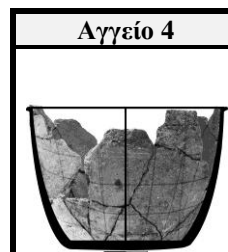
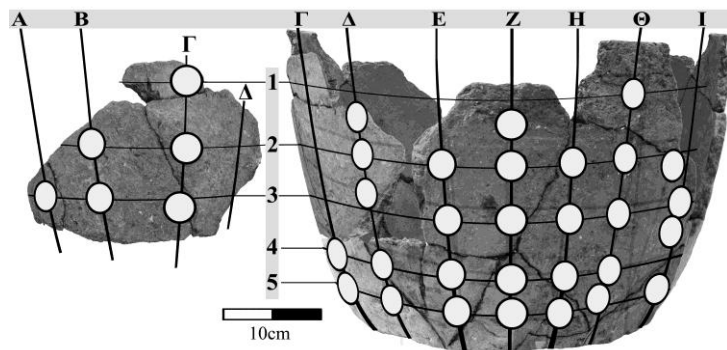
| $a_v^L$<br>(cm) | $a_{xz}^{//}$<br>(cm) | $\lambda$   |
|-----------------|-----------------------|-------------|
| 1,07<br>±0,05   | 1,61<br>±0,03         | 2,0<br>±0,1 |

**Πίνακας 26β.** Ενδείξεις των αισθητήρων  $B_i$  ( $i=x,y,z$ ), με τον  $x$  αισθητήρα προσανατολισμένο στη διεύθυνση των αυλακώσεων σε όστρακα του σώματος του αγγείου 3.



| Αγγείο 3 |                  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |
|----------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
|          |                  | A     | B     | Γ     | Δ     | E     | Z     | H     | Θ     | I     | K    |
| 1        | $B_y (\pm 1nT)$  | 36    | 34    |       | -6    | -16   | -17   | -19   | 4     |       | 40   |
|          | $B_x (\pm 1nT)$  | -22   | -38   |       | -60   | -34   | 31    | 51    | 75    |       | 51   |
|          | $B_z (\pm 1nT)$  | 26    | 40    |       | 82    | 87    | 91    | 86    | 78    |       | 39   |
|          | $B (\pm 1nT)$    | 50    | 65    |       | 102   | 95    | 98    | 102   | 108   |       | 76   |
|          | $\theta_B^\circ$ | 43±1  | 58±1  |       | -87±1 | -80±1 | -80±1 | -79±1 | 88±1  |       | 58±1 |
|          | $\phi_B^\circ$   | 130±2 | 134±1 |       | 126±1 | 111±1 | 71±1  | 59±1  | 46±1  |       | 37±1 |
| 2        | $B_y (\pm 1nT)$  | 36    | 28    |       | -15   |       |       | -22   |       | 15    | 37   |
|          | $B_x (\pm 1nT)$  | -24   | -51   |       | -57   |       |       | 55    |       | 73    | 37   |
|          | $B_z (\pm 1nT)$  | 49    | 51    |       | 71    |       |       | 84    |       | 67    | 46   |
|          | $B (\pm 1nT)$    | 65    | 77    |       | 92    |       |       | 103   |       | 100   | 70   |
|          | $\theta_B^\circ$ | 57±1  | 69±1  |       | -81±1 |       |       | -78±1 |       | 81±1  | 58±1 |
|          | $\phi_B^\circ$   | 116±1 | 135±1 |       | 129±1 |       |       | 57±1  |       | 43±1  | 51±1 |
| 3        | $B_y (\pm 1nT)$  | 19    |       | -14   | -31   | -39   | -41   | -32   | -14   | 2     | 14   |
|          | $B_x (\pm 1nT)$  | -36   |       | -70   | -58   | -31   | 18    | 48    | 74    | 65    | 46   |
|          | $B_z (\pm 1nT)$  | 84    |       | 64    | 43    | 30    | 33    | 49    | 65    | 74    | 94   |
|          | $B (\pm 1nT)$    | 93    |       | 96    | 79    | 58    | 56    | 76    | 99    | 99    | 106  |
|          | $\theta_B^\circ$ | 78±1  |       | -82±1 | -67±1 | -48±1 | -43±1 | -65±1 | -82±1 | 89±1  | 82±1 |
|          | $\phi_B^\circ$   | 113±1 |       | 138±1 | 143±1 | 136±1 | 61±2  | 46±1  | 41±1  | 49±1  | 64±1 |
| 4        | $B_y (\pm 1nT)$  | 16    | 9     | -19   | -35   | -35   | -43   | -34   | -22   | -1    | 12   |
|          | $B_x (\pm 1nT)$  | -25   | -55   | -72   | -46   | -41   | 16    | 48    | 73    | 63    | 34   |
|          | $B_z (\pm 1nT)$  | 97    | 83    | 58    | 36    | 32    | 22    | 30    | 55    | 84    | 88   |
|          | $B (\pm 1nT)$    | 101   | 100   | 94    | 68    | 63    | 51    | 66    | 94    | 105   | 95   |
|          | $\theta_B^\circ$ | 81±1  | 85±1  | -78±1 | -59±1 | -56±1 | -32±1 | -59±1 | -76±1 | -89±1 | 83±1 |
|          | $\phi_B^\circ$   | 104±1 | 124±1 | 141±1 | 142±1 | 142±1 | 54±2  | 32±1  | 37±1  | 53±1  | 69±1 |
| 5        | $B_y (\pm 1nT)$  | 19    | 17    | -15   | -30   | -37   | -36   | -33   | -13   | -5    | 17   |
|          | $B_x (\pm 1nT)$  | -21   | -52   | -72   | -49   | -36   | 21    | 44    | 70    | 71    | 49   |
|          | $B_z (\pm 1nT)$  | 86    | 89    | 62    | 42    | 42    | 28    | 43    | 62    | 82    | 85   |
|          | $B (\pm 1nT)$    | 91    | 104   | 96    | 71    | 67    | 50    | 70    | 94    | 109   | 100  |
|          | $\theta_B^\circ$ | 78±1  | 81±1  | -81±1 | -65±1 | -56±1 | -44±1 | -62±1 | -82±1 | 87±1  | 80±1 |
|          | $\phi_B^\circ$   | 104±1 | 120±1 | 139±1 | 139±1 | 131±1 | 53±2  | 44±1  | 42±1  | 49±1  | 60±1 |

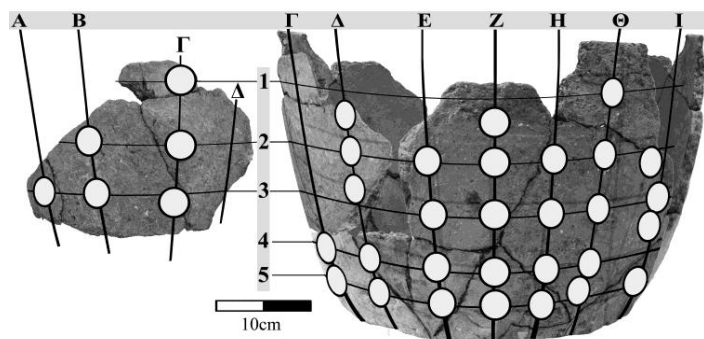
**Πίνακας B27a** Ενδείξεις των αισθητήρων Bi ( $i = xy,z$ ) και μετρήσεις των αποστάσεων D, L, με τον x αισθητήρα προσανατολισμένο στην κοινή κατεύθυνση των  $B_{xy}$ ,  $M_{xy}$  σε όστρακα του σώματος του **αγγείου 4**.



| $\alpha_v^I$ (cm) | $\alpha_{x,z}^{II}$ (cm) | $\lambda$ |
|-------------------|--------------------------|-----------|
| 0.67±0,03         | 1.15±0,02                | 1.97±0,01 |

| Αγγείο 4 |                     | A    | B    | Γ    | Δ    | Ε    | Ζ    | Η     | Θ     | Ι     |
|----------|---------------------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|
| 1        | D (±0.3) cm         |      |      | 1.7  | 1.6  |      | 4,2  |       | 5,7   |       |
|          | L (±0.1) cm         |      |      | 0.9  | 1.2  |      | 1,1  |       | 0,9   |       |
|          | $B_{xz} (\pm 1) nT$ |      |      | 37   | 35   |      | 40   |       | 54    |       |
|          | $B_y (\pm 1) nT$    |      |      | 16   | 15   |      | 17   |       | 5     |       |
|          | $B (\pm 1) nT$      |      |      | 40   | 38   |      | 44   |       | 54    |       |
|          | $\theta_B^\circ$    |      |      | 66±1 | 66±2 |      | 67±1 |       | 85±1  |       |
| 2        | D (±0.3) cm         |      | 4.2  | 6.7  | 5.3  | 4.1  | 8.8  | 2.4   | 2.7   | 3.5   |
|          | L (±0.1) cm         |      | 1.3  | 1.3  | 1.3  | 1.2  | 1.3  | 1.3   | 1.3   | 1.5   |
|          | $B_{xz} (\pm 1) nT$ |      | 47   | 43   | 43   | 43   | 46   | 43    | 48    | 55    |
|          | $B_y (\pm 1) nT$    |      | 15   | 14   | 18   | 18   | 12   | 10    | 9     | 3     |
|          | $B (\pm 1) nT$      |      | 49   | 45   | 47   | 47   | 48   | 44    | 49    | 55    |
|          | $\theta_B^\circ$    |      | 72±1 | 72±1 | 67±1 | 67±1 | 75±1 | 77±1  | 79±1  | 87±1  |
| 3        | D (±0.3) cm         | 1.9  | 10,6 | 2.0  | 9.1  | 9.9  | 13.9 | 4.4   | 9.6   | 2.8   |
|          | L (±0.1) cm         | 1.8  | 1.7  | 1.8  | 1.8  | 1.8  | 1.7  | 1.7   | 1.6   | 1.7   |
|          | $B_{xz} (\pm 1) nT$ | 53   | 52   | 47   | 47   | 47   | 50   | 53    | 55    | 49    |
|          | $B_y (\pm 1) nT$    | 5    | 12   | 13   | 12   | 14   | 10   | 7     | 2     | -3    |
|          | $B (\pm 1) nT$      | 53   | 53   | 49   | 49   | 49   | 51   | 53    | 55    | 49    |
|          | $\theta_B^\circ$    | 85±1 | 77±1 | 74±1 | 75±1 | 73±1 | 79±1 | 82±1  | 88±1  | -86±1 |
| 4        | D (±0.3) cm         |      |      | 1.7  | 2.8  | 3.0  | 2.3  | 7.5   | 3>8   | 2.0   |
|          | L (±0.1) cm         |      |      | 2.1  | 2.1  | 2.0  | 2.1  | 2.1   | 2.0   | 2.0   |
|          | $B_{xz} (\pm 1) nT$ |      |      | 50   | 45   | 49   | 53   | 55    | 55    | 53    |
|          | $B_y (\pm 1) nT$    |      |      | 9    | 9    | 10   | 5    | 4     | -2    | -5    |
|          | $B (\pm 1) nT$      |      |      | 51   | 46   | 50   | 53   | 55    | 55    | 53    |
|          | $\theta_B^\circ$    |      |      | 80±1 | 79±1 | 78±1 | 85±1 | 86±1  | -88±1 | -85±1 |
| 5        | D (±0.3) cm         |      |      | 4.8  | 2.6  | 6.6  | 5.5  | 2.5   | 2.3   | 4.4   |
|          | L (±0.1) cm         |      |      | 2.2  | 2.3  | 2.2  | 2.1  | 2.3   | 2.1   | 2.2   |
|          | $B_{xz} (\pm 1) nT$ |      |      | 53   | 54   | 53   | 55   | 54    | 48    | 51    |
|          | $B_y (\pm 1) nT$    |      |      | 6    | 7    | 6    | 3    | -1    | -6    | -9    |
|          | $B (\pm 1) nT$      |      |      | 53   | 54   | 53   | 55   | 54    | 48    | 52    |
|          | $\theta_B^\circ$    |      |      | 83±1 | 83±1 | 83±1 | 87±1 | -89±1 | -83±1 | -80±1 |

**Πίνακας 27β.** Ενδείξεις των αισθητήρων  $B_i$  ( $i=x,y,z$ ), με τον  $x$  αισθητήρα προσανατολισμένο στη διεύθυνση των αυλακώσεων σε όστρακα του σώματος του **αγγείου 4**.

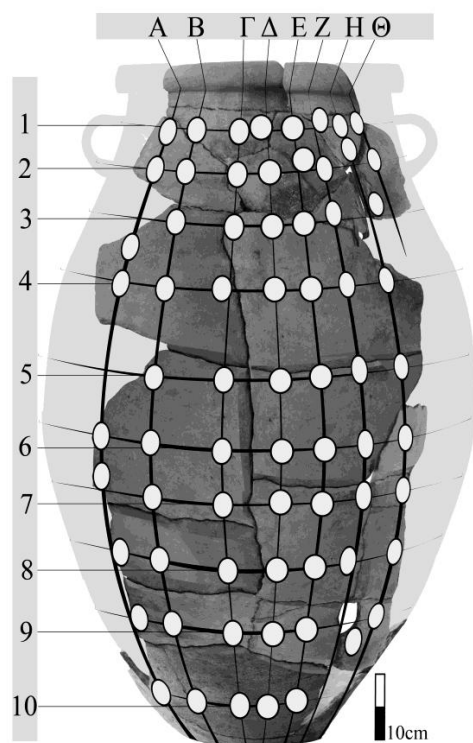


| Αγγείο 4 |                  |      |      |      |      |       |       |       |       |       |
|----------|------------------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
|          |                  | A    | B    | Γ    | Δ    | E     | Z     | H     | Θ     | I     |
| 1        | $B_y (\pm 1nT)$  |      |      | 16   | 16   |       | 17    |       | 6     |       |
|          | $B_x (\pm 1nT)$  |      |      | 10   | 3    |       | -23   |       | -39   |       |
|          | $B_z (\pm 1nT)$  |      |      | 33   | 14   |       | 37    |       | 38    |       |
|          | $B (\pm 1nT)$    |      |      | 38   | 38   |       | 47    |       | 55    |       |
|          | $\theta_B^\circ$ |      |      | 65±1 | 65±2 |       | 68±1  |       | 84±1  |       |
|          | $\phi_B^\circ$   |      |      | 73±1 | 85±2 |       | 122±1 |       | 136±1 |       |
| 2        | $B_y (\pm 1nT)$  |      | 14   | 15   | 17   | 18    | 12    | 10    | 8     | 2     |
|          | $B_x (\pm 1nT)$  |      | 27   | 13   | 2    | -11   | -16   | -27   | -30   | -35   |
|          | $B_z (\pm 1nT)$  |      | 45   | 41   | 38   | 40    | 34    | 33    | 33    | 33    |
|          | $B (\pm 1nT)$    |      | 54   | 46   | 42   | 45    | 40    | 44    | 45    | 48    |
|          | $\theta_B^\circ$ |      | 75±1 | 71±1 | 66±2 | 66±1  | 72±2  | 77±1  | 80±1  | 88±1  |
|          | $\phi_B^\circ$   |      | 59±1 | 72±1 | 87±2 | 105±1 | 115±2 | 129±1 | 132±1 | 137±1 |
| 3        | $B_y (\pm 1nT)$  | 6    | 11   | 13   | 12   | 14    | 10    | 7     | 1     | -2    |
|          | $B_x (\pm 1nT)$  | 33   | 21   | 4    | 6    | -8    | -24   | -32   | -40   | -35   |
|          | $B_z (\pm 1nT)$  | 37   | 38   | 40   | 41   | 43    | 43    | 43    | 39    | 32    |
|          | $B (\pm 1nT)$    | 50   | 45   | 42   | 43   | 46    | 50    | 54    | 56    | 47    |
|          | $\theta_B^\circ$ | 83±1 | 76±1 | 72±1 | 74±1 | 72±1  | 78±1  | 82±1  | 89±1  | -88±1 |
|          | $\phi_B^\circ$   | 48±1 | 61±1 | 84±1 | 82±1 | 101±1 | 119±1 | 127±1 | 136±1 | 138±1 |
| 4        | $B_y (\pm 1nT)$  |      |      | 9    | 9    | 11    | 6     | 4     | -1    | -6    |
|          | $B_x (\pm 1nT)$  |      |      | 12   | 1    | -9    | -26   | -27   | -35   | -38   |
|          | $B_z (\pm 1nT)$  |      |      | 49   | 44   | 51    | 41    | 40    | 34    | 32    |
|          | $B (\pm 1nT)$    |      |      | 51   | 45   | 53    | 49    | 48    | 49    | 50    |
|          | $\theta_B^\circ$ |      |      | 80±1 | 78±1 | 78±1  | 83±1  | 85±1  | -89±1 | -83±1 |
|          | $\phi_B^\circ$   |      |      | 76±1 | 89±1 | 100±1 | 122±1 | 124±1 | 136±1 | 140±1 |
| 5        | $B_y (\pm 1nT)$  |      |      | 6    | 7    | 7     | 3     | -1    | -5    | -9    |
|          | $B_x (\pm 1nT)$  |      |      | 8    | 3    | -11   | -19   | -32   | -39   | -41   |
|          | $B_z (\pm 1nT)$  |      |      | 51   | 51   | 48    | 44    | 43    | 35    | 33    |
|          | $B (\pm 1nT)$    |      |      | 52   | 52   | 50    | 48    | 54    | 53    | 53    |
|          | $\theta_B^\circ$ |      |      | 83±1 | 82±1 | 82±1  | 86±1  | -89±1 | -84±1 | -80±1 |
|          |                  |      |      | 81±1 | 87±1 | 103±1 | 113±1 | 127±1 | 138±1 | 141±1 |

Αγγείο 5

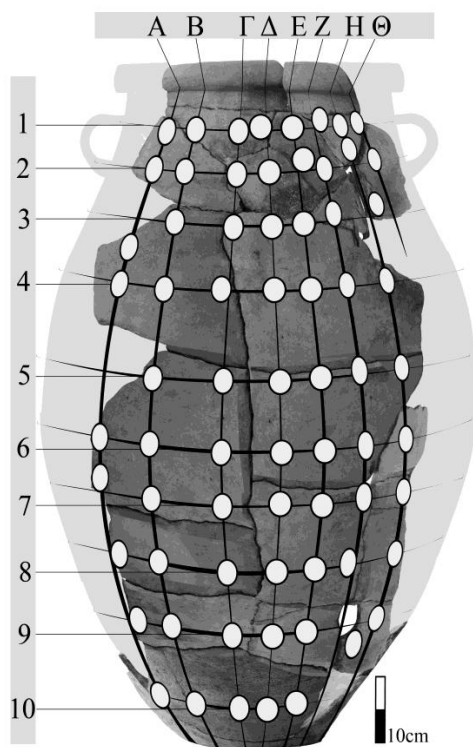
 $\alpha_y^L$  (cm) $\alpha_{x,z}^{//}$  (cm) $\lambda$

**Πίνακας B28a** Ενδείξεις των αισθητήρων Bi (i = xy,z) και μετρήσεις των αποστάσεων D, L, με τον x αισθητήρα προσανατολισμένο στην κοινή κατεύθυνση των  $B_{xy}$ ,  $M_{xy}$  σε όστρακα του σώματος του **αγγείου 5**.



|   |                    | 1,04±0,03 |        | 1,41±0,03 |       | 2,03±0,01 |       |       |       |
|---|--------------------|-----------|--------|-----------|-------|-----------|-------|-------|-------|
|   |                    | A         | B      | Γ         | Δ     | Ε         | Ζ     | Η     | Θ     |
| 1 | D (±0.3) cm        | 10.4      | 2.2    | 4.7       | 1.8   | 10.4      | 7.6   | 3.3   | 1.2   |
|   | L (±0.1) cm        | 2.9       | 2.8    | 2.7       | 2.7   | 2.6       | 2.6   | 2.5   | 2.6   |
|   | $B_{xz}(\pm 1)$ nT | 45        | 53     | 58        | 62    | 66        | 66    | 71    | 67    |
|   | $B_y(\pm 1)$ nT    | -24       | -22    | -19       | -17   | -14       | -9    | -7    | -6    |
|   | B (±1) nT          | 51        | 57     | 61        | 64    | 67        | 67    | 71    | 67    |
|   | $\theta_B^\circ$   | -62±1     | -68±1  | -72±1     | -75±1 | -78±1     | -82±1 | -84±1 | -85±1 |
| 2 | D (±0.3) cm        | 3.0       | 6.0    | 7.1       | 8.6   | 6.9       | 3.8   | 1.8   | 4.7   |
|   | L (±0.1) cm        | 2.4       | 2.4    | 2.3       | 2.3   | 2.3       | 2.2   | 2.2   | 2.2   |
|   | $B_{xz}(\pm 1)$ nT | 55        | 57     | 61        | 64    | 64        | 70    | 70    | 72    |
|   | $B_y(\pm 1)$ nT    | -21       | -20    | -18       | -15   | -12       | -6    | -7    | -1    |
|   | B (±1) nT          | 59        | 60     | 64        | 66    | 65        | 70    | 70    | 72    |
|   | $\theta_B^\circ$   | -69±1     | -71±1  | -74±1     | -77±1 | -80±1     | -85±1 | -84±1 | -89±1 |
| 3 | D (±0.3) cm        | 15.4      | 25.0   | 26.4      | 32.1  | 23.1      | 6.7   | 4.8   |       |
|   | L (±0.1) cm        | 2.2       | 2.2    | 2.1       | 2.0   | 2.0       | 2.0   | 1.9   |       |
|   | $B_{xz}(\pm 1)$ nT | 53        | 60     | 64        | 66    | 66        | 68    | 68    |       |
|   | $B_y(\pm 1)$ nT    | -21       | -19    | -15       | -14   | -10       | -11   | -3    |       |
|   | B (±1) nT          | 57        | 63     | 66        | 67    | 67        | 69    | 68    |       |
|   | $\theta_B^\circ$   | -69±1     | -73±1  | -77±1     | -78±1 | -82±1     | -81±1 | -88±1 |       |
| 4 | D (±0.3) cm        | 7.4       | 12.9   | 4,3       | 20.7  | 20.8      | 13.1  | 6.4   |       |
|   | L (±0.1) cm        | 2.0       | 2.0    | 1.9       | 1.9   | 1.8       | 1.8   | 1.7   |       |
|   | $B_{xz}(\pm 1)$ nT | 41        | 49     | 57        | 61    | 61        | 65    | 66    |       |
|   | $B_y(\pm 1)$ nT    | -26       | -24    | -20       | -17   | -17       | -14   | -11   |       |
|   | B (±1) nT          | 48        | 54     | 60        | 63    | 63        | 66    | 67    |       |
|   | $\theta_B^\circ$   | -58±1     | -64±1  | -71±1     | -75±1 | -75±1     | -78±1 | -81±1 |       |
| 5 | D (±0.3) cm        |           | 28.4   | 6.0       | 20.0  | 14.2      | 9.2   | 3.6   |       |
|   | L (±0.1) cm        |           | 1.7    | 1.6       | 1.5   | 1.5       | 1.5   | 1.4   |       |
|   | $B_{xz}(\pm 1)$ nT |           | 38     | 50        | 51    | 57        | 62    | 64    |       |
|   | $B_y(\pm 1)$ nT    |           | -27    | -23       | -22   | -19       | -16   | -14   |       |
|   | B (±1) nT          |           | 46     | 55        | 55    | 60        | 64    | 65    |       |
|   | $\theta_B^\circ$   |           | -55±11 | -66±1     | -67±1 | -72±1     | -76±1 | -78±1 |       |

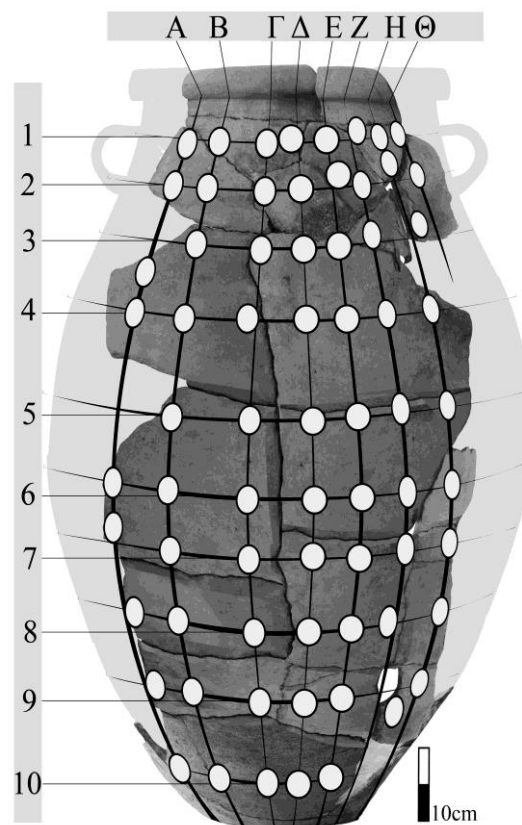
**Πίνακας B28a (συνέχεια).** Ενδείξεις των αισθητήρων Bi ( $i = xy, z$ ) και μετρήσεις των αποστάσεων D, L, με τον x αισθητήρα προσανατολισμένο στην κοινή κατεύθυνση των  $B_{xy}$ ,  $M_{xy}$  σε όστρακα του σώματος του αγγείου 5.



| Αγγείο 5 |                     |             |             |             |             |             |             |             |   |
|----------|---------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---|
|          |                     |             |             |             |             |             |             |             |   |
|          |                     | A           | B           | Γ           | Δ           | E           | Z           | H           | Θ |
| 6        | D ( $\pm 0.3$ ) cm  | 12.9        | 17.1        | 6.1         | 15.5        | 9.0         | 3.0         | 3.3         |   |
|          | L ( $\pm 0.1$ ) cm  | 1.4         | 1.4         | 1.4         | 1.4         | 1.4         | 1.3         | 1.3         |   |
|          | $B_{xz} (\pm 1)$ nT | 21          | 22          | 34          | 41          | 51          | 56          | 59          |   |
|          | $B_y (\pm 1)$ nT    | -29         | -29         | -26         | -25         | -21         | -21         | -17         |   |
|          | B ( $\pm 1$ ) nT    | 35          | 36          | 43          | 48          | 55          | 60          | 61          |   |
|          | $\theta_B^\circ$    | -36 $\pm 2$ | -38 $\pm 2$ | -53 $\pm 1$ | -59 $\pm 1$ | -68 $\pm 1$ | -70 $\pm 1$ | -74 $\pm 1$ |   |
| 7        | D ( $\pm 0.3$ ) cm  | 4.5         | 6.3         | 5.3         | 14.9        | 8.0         | 1.8         | 1.4         |   |
|          | L ( $\pm 0.1$ ) cm  | 2.5         | 1.5         | 1.4         | 1.4         | 1.5         | 1.5         | 1.5         |   |
|          | $B_{xz} (\pm 1)$ nT | 16          | 25          | 27          | 37          | 53          | 53          | 51          |   |
|          | $B_y (\pm 1)$ nT    | -30         | -28         | -27         | -26         | -22         | -19         | -18         |   |
|          | B ( $\pm 1$ ) nT    | 34          | 37          | 38          | 45          | 57          | 56          | 54          |   |
|          | $\theta_B^\circ$    | -28 $\pm 2$ | -42 $\pm 2$ | -45 $\pm 2$ | -55 $\pm 1$ | -68 $\pm 1$ | -71 $\pm 1$ | -71 $\pm 1$ |   |
| 8        | D ( $\pm 0.3$ ) cm  | 9.1         | 10.0        | 5.7         | 13.8        | 7.6         | 2.0         | 1.7         |   |
|          | L ( $\pm 0.1$ ) cm  | 1.6         | 1.7         | 1.6         | 1.6         | 1.6         | 1.7         | 1.7         |   |
|          | $B_{xz} (\pm 1)$ nT | 8           | 19          | 28          | 40          | 47          | 52          | 54          |   |
|          | $B_y (\pm 1)$ nT    | -32         | -31         | -29         | -25         | -24         | -22         | -21         |   |
|          | B ( $\pm 1$ ) nT    | 33          | 36          | 40          | 47          | 53          | 56          | 58          |   |
|          | $\theta_B^\circ$    | -14 $\pm 2$ | -32 $\pm 2$ | -44 $\pm 1$ | -58 $\pm 1$ | -63 $\pm 1$ | -67 $\pm 1$ | -69 $\pm 1$ |   |
| 9        | D ( $\pm 0.3$ ) cm  | 5.3         | 13.5        | 3.7         | 11.1        | 5.6         | 5.5         | 2.4         |   |
|          | L ( $\pm 0.1$ ) cm  | 1.7         | 1.7         | 1.7         | 1.8         | 1.8         | 1.9         | 1.9         |   |
|          | $B_{xz} (\pm 1)$ nT | 11          | 24          | 34          | 38          | 44          | 49          | 56          |   |
|          | $B_y (\pm 1)$ nT    | -31         | -29         | -27         | -27         | -26         | -23         | -20         |   |
|          | B ( $\pm 1$ ) nT    | 33          | 37          | 43          | 46          | 51          | 54          | 59          |   |
|          | $\theta_B^\circ$    | -19 $\pm 2$ | -40 $\pm 2$ | -52 $\pm 1$ | -55 $\pm 1$ | -60 $\pm 1$ | -65 $\pm 1$ | -71 $\pm 1$ |   |
| 10       |                     | 7.8         | 21.7        | 15.2        | 9.9         | 4.2         |             |             |   |
|          |                     | 2.1         | 2.1         | 2.2         | 2.3         | 2.3         |             |             |   |
|          |                     | 17          | 22          | 31          | 37          | 43          |             |             |   |
|          |                     | -32         | -31         | -30         | -28         | -27         |             |             |   |
|          |                     | 36          | 38          | 43          | 46          | 51          |             |             |   |
|          |                     | -28 $\pm 2$ | -36 $\pm 2$ | -46 $\pm 1$ | -53 $\pm 1$ | -58 $\pm 1$ |             |             |   |

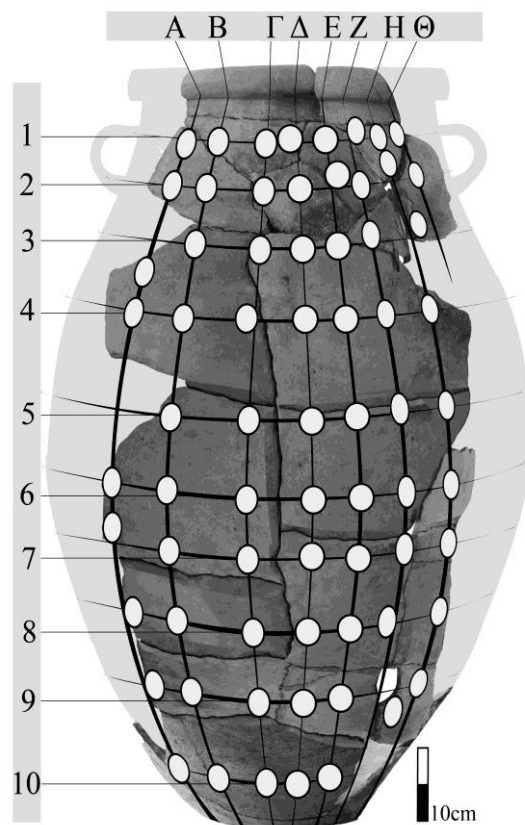


**Πίνακας 28β.** Ενδείξεις των αισθητήρων  $B_i$  ( $i=x,y,z$ ), με τον  $x$  αισθητήρα προσανατολισμένο στη διεύθυνση των αυλακώσεων σε όστρακα του σώματος του **αγγείου 5**.



| Αγγείο 5 |                  |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|          |                  | A     | B     | Γ     | Δ     | Ε     | Ζ     | Η     | Θ     |
| 1        | $B_y (\pm 1nT)$  | -23   | -23   | -19   | -17   | -14   | -9    | -7    | -6    |
|          | $B_x (\pm 1nT)$  | -11   | -24   | -32   | -40   | -49   | -53   | -58   | -59   |
|          | $B_z (\pm 1nT)$  | 48    | 45    | 47    | 45    | 41    | 42    | 38    | 38    |
|          | $B (\pm 1nT)$    | 54    | 56    | 60    | 62    | 65    | 68    | 70    | 70    |
|          | $\theta_B^\circ$ | 115±1 | -66±1 | -72±1 | -74±1 | -78±1 | -83±1 | -84±1 | -85±1 |
|          | $\phi_B^\circ$   | 103±1 | 118±1 | 124±1 | 132±1 | 140±1 | 142±1 | 147±1 | 147±1 |
| 2        | $B_y (\pm 1nT)$  | -20   | -21   | -18   | -15   | -12   | -6    | -7    | -1    |
|          | $B_x (\pm 1nT)$  | -12   | -20   | -35   | -40   | -46   | -53   | -53   | -57   |
|          | $B_z (\pm 1nT)$  | 56    | 53    | 47    | 50    | 47    | 43    | 43    | 39    |
|          | $B (\pm 1nT)$    | 61    | 60    | 61    | 66    | 67    | 70    | 69    | 69    |
|          | $\theta_B^\circ$ | -71±1 | -70±1 | -73±1 | -77±1 | -80±1 | -85±1 | -84±1 | -89±1 |
|          | $\phi_B^\circ$   | 102±1 | 111±1 | 127±1 | 129±1 | 134±1 | 141±1 | 141±1 | 146±1 |
| 3        | $B_y (\pm 1nT)$  | -22   | -19   | -15   | -14   | -10   | -11   | -3    |       |
|          | $B_x (\pm 1nT)$  | -17   | -24   | -31   | -45   | -47   | -48   | -55   |       |
|          | $B_z (\pm 1nT)$  | 47    | 52    | 55    | 46    | 49    | 46    | 42    |       |
|          | $B (\pm 1nT)$    | 54    | 60    | 65    | 66    | 69    | 67    | 69    |       |
|          | $\theta_B^\circ$ | -67±1 | -72±1 | -77±1 | -78±1 | -82±1 | -81±1 | -88±1 |       |
|          | $\phi_B^\circ$   | 110±1 | 115±1 | 119±1 | 134±1 | 134±1 | 136±1 | 143±1 |       |
| 4        | $B_y (\pm 1nT)$  | -26   | -23   | -20   | -17   | -16   | -13   | -11   |       |
|          | $B_x (\pm 1nT)$  | -13   | -23   | -32   | -43   | -46   | -54   | -57   |       |
|          | $B_z (\pm 1nT)$  | 40    | 44    | 45    | 44    | 40    | 40    | 42    |       |
|          | $B (\pm 1nT)$    | 49    | 55    | 59    | 64    | 63    | 68    | 72    |       |
|          | $\theta_B^\circ$ | -59±2 | -65±1 | -70±1 | -75±1 | -76±1 | -79±1 | -81±1 |       |
|          | $\phi_B^\circ$   | 108±1 | 118±1 | 125±1 | 134±1 | 139±1 | 143±1 | 144±1 |       |
| 5        | $B_y (\pm 1nT)$  |       | -27   | -23   | -22   | -18   | -15   | -14   |       |
|          | $B_x (\pm 1nT)$  |       | -21   | -36   | -37   | -48   | -50   | -55   |       |
|          | $B_z (\pm 1nT)$  |       | 33    | 36    | 34    | 34    | 35    | 33    |       |
|          | $B (\pm 1nT)$    |       | 47    | 56    | 55    | 61    | 63    | 66    |       |
|          | $\theta_B^\circ$ |       | -56±2 | -66±1 | -67±1 | -73±1 | -76±1 | -78±1 |       |
|          | $\phi_B^\circ$   |       | 122±1 | 135±1 | 137±1 | 145±1 | 145±1 | 149±1 |       |

**Πίνακας 28β (συνέχεια)** Ενδείξεις των αισθητήρων  $B_i$  ( $i=x,y,z$ ), με τον  $x$  αισθητήρα προσανατολισμένο στη διεύθυνση των αυλακώσεων σε όστρακα του σώματος του **αγγείου 5**.



| Αγγείο 5 |                  | A     | B     | Γ     | Δ     | Ε     | Ζ     | Η     | Θ |
|----------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---|
| 6        | $B_y (\pm 1nT)$  | -28   | -28   | -26   | -24   | -20   | -20   | -17   |   |
|          | $B_x (\pm 1nT)$  | -10   | -16   | -25   | -40   | -45   | -48   | -53   |   |
|          | $B_z (\pm 1nT)$  | 16    | 14    | 24    | 19    | 25    | 27    | 25    |   |
|          | $B (\pm 1nT)$    | 33    | 35    | 43    | 50    | 55    | 58    | 61    |   |
|          | $\theta_B^\circ$ | -34±4 | -38±3 | -54±2 | -62±1 | -69±1 | -70±1 | -74±1 |   |
|          | $\phi_B^\circ$   | 122±3 | 139±3 | 136±2 | 155±1 | 151±1 | 151±1 | 155±1 |   |
| 7        | $B_y (\pm 1nT)$  | -30   | -29   | -27   | -26   | -22   | -19   | -19   |   |
|          | $B_x (\pm 1nT)$  | -9    | -20   | -24   | -35   | -47   | -48   | -47   |   |
|          | $B_z (\pm 1nT)$  | 11    | 13    | 12    | 16    | 22    | 20    | 22    |   |
|          | $B (\pm 1nT)$    | 33    | 37    | 38    | 46    | 56    | 55    | 55    |   |
|          | $\theta_B^\circ$ | -26±5 | -40±3 | -45±3 | -56±2 | -67±1 | -70±1 | -70±1 |   |
|          | $\phi_B^\circ$   | 129±4 | 147±2 | 153±2 | 155±1 | 155±1 | 157±1 | 155±1 |   |
| 8        | $B_y (\pm 1nT)$  | -31   | -31   | -29   | -25   | -23   | -21   | -20   |   |
|          | $B_x (\pm 1nT)$  | -8    | -21   | -30   | -39   | -45   | -51   | -53   |   |
|          | $B_z (\pm 1nT)$  | 5     | 4     | 4     | 13    | 12    | 14    | 18    |   |
|          | $B (\pm 1nT)$    | 32    | 37    | 42    | 48    | 52    | 57    | 59    |   |
|          | $\theta_B^\circ$ | -17±8 | -35±3 | -47±2 | -59±2 | -64±1 | -69±1 | -71±1 |   |
|          | $\phi_B^\circ$   | 148±6 | 169±3 | 172±2 | 162±1 | 165±1 | 165±1 | 161±1 |   |
| 9        | $B_y (\pm 1nT)$  | -32   | -29   | -27   | -27   | -25   | -23   | -21   |   |
|          | $B_x (\pm 1nT)$  | -11   | -23   | -33   | -38   | -44   | -52   | -56   |   |
|          | $B_z (\pm 1nT)$  | -10   | -5    | -4    | 0     | 2     | 5     | 9     |   |
|          | $B (\pm 1nT)$    | 35    | 37    | 43    | 46    | 50    | 57    | 60    |   |
|          | $\theta_B^\circ$ | -25±5 | -39±3 | -51±2 | -55±2 | -61±1 | -67±1 | -70±1 |   |
|          | $\phi_B^\circ$   | 222±4 | 192±2 | 187±2 | 180±2 | 177±1 | 175±1 | 171±1 |   |
| 10       | $B_y (\pm 1nT)$  | -32   | -31   | -30   | -28   | -26   |       |       |   |
|          | $B_x (\pm 1nT)$  | -7    | -21   | -34   | -38   | -45   |       |       |   |
|          | $B_z (\pm 1nT)$  | -14   | -12   | -8    | -11   | -6    |       |       |   |
|          | $B (\pm 1nT)$    | 35    | 39    | 46    | 48    | 52    |       |       |   |
|          | $\theta_B^\circ$ | -26±5 | -38±3 | -50±2 | -55±2 | -61±1 |       |       |   |
|          | $\phi_B^\circ$   | 243±4 | 210±2 | 193±2 | 196±1 | 188±1 |       |       |   |