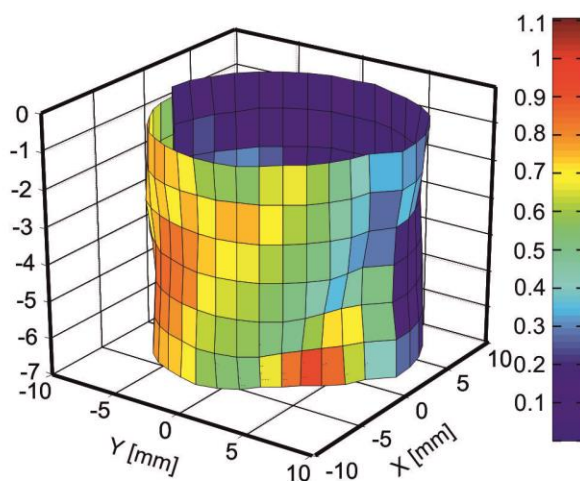




ΜΕΤΡΗΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΟΠΩΝ ΑΠΟ ΔΙΑΤΡΗΣΗ ΜΕΣΩ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ ΑΦΗΣ



**ΙΩΣΗΦ
ΠΑΠΑΔΑΚΗΣ ΚΤΙΣΤΑΚΗΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΑΡΙΣΤΟΜΕΝΗΣ ΑΝΤΩΝΙΑΔΗΣ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

στην Οικογένειά μου

Πρώτα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της παρούσας εργασίας κ. Αριστομένη Αντωνιάδη, Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης για την ατελείωτη υπομονή του και την αδιάκοπη καθοδήγηση του.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλα τα μέλη της ομάδας του εργαστηρίου Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης για τη βοήθεια τους και ιδιαιτέρως το φίλο και συνάδελφο μου Μηχ. Δημήτριο Βακόνδιο για τη συνεχή βοήθεια και στήριξή του. Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω για τη βοήθεια του τον Δρ. Μηχ. Ταξιάρχη Μπελή.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω ξεχωριστά τους φίλους μου για τα αξέχαστα χρόνια που πέρασαν αλλά και αυτά που θα έρθουν καθώς και την οικογένεια μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	4
2. ΣΤΑΘΜΗ ΓΝΩΣΕΩΝ	5
2.1 Παρουσίαση της Κατεργασίας	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
2.2 Καμπυλότητα.....	6
2.3 Κυλινδρικότητα	13
2.4 Ομοαξονικότητα	16
2.5 Επιπεδότητα.....	17
3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ	21
3.1 Εξοπλισμός Πειραμάτων	21
3.1.1 Υλικό Κατεργασίας	21
3.1.2 Εργαλειομηχανή DMU 50 eco	21
3.1.3 Συσκευή Προρύθμισης Εργαλείων	23
3.1.4 Εργαλείο Διάτρησης BOSCH	24
3.1.5 Αισθητήρας 3D PROBE	25
3.2 Εκτέλεση Πειραμάτων	26
3.2.1 Μετωπικό Φραιζάρισμα (face).....	26
3.2.2 Μηδενισμός Τεμαχίων.....	27
3.2.3 Διάτρηση Τεμαχίων	28
3.2.4 Μοντέλο Ανάλυσης και Μέτρησης Οπών.....	31
4. ΜΟΝΤΕΛΟ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΟΠΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	35
4.1 Μοντέλο Μέτρησης της Οπής.....	35
4.2 Αποτελέσματα.....	36
5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	41
6. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	43

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η κατασκευή μηχανολογικών τεμαχίων απαιτεί μια σειρά από διαμορφώσεις. Από τις διαμορφώσεις αυτές οι οπές είναι οι πιο διαδεδομένες, καθώς είναι απαραίτητες στη συναρμολόγηση τεμαχίων και ειδικότερα στις κοχλιώσεις, στις ηλώσεις, στις συναρμογές εδράνων κύλισης και ολίσθησης, αλλά και στη ροή ρευστών για λίπανση ή ψύξη.

Οι οπές γίνονται με την κατεργασία της διάτρησης που είναι μια από τις κυριότερες μηχανουργικές κατεργασίες δεδομένου ότι, όπως αναφέρθηκε, σχεδόν όλα τα μηχανολογικά εξαρτήματα περιλαμβάνουν οπές. Επιπλέον, η κατεργασία της διάτρησης λαμβάνει χώρα στα τελευταία στάδια μιας παραγωγικής διαδικασίας και συνεπώς οποιαδήποτε αστοχία ανεβάζει αρκετά το κόστος παραγωγής.

Το αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της διάτρησης μέσω της τρισδιάστατης μοντελοποίησης των οπών η οποία υλοποιείται μέσω μετρήσεων με αισθητήρα αφής. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκε σειρά πειραμάτων σε τεμάχια AL7075 όπου μετρήθηκαν η κυλινδρικότητα και η ομοαξονικότητα των οπών που διατρήθηκαν. Οι οπές στα πειράματα που διεξήχθησαν στο κέντρο κατεργασίας DMU50eco ήταν διαμέτρων 16.5 mm, 14 mm και 12 mm. Για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών της κάθε οπής έγινε επεξεργασία με κατάλληλο λογισμικό των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν με τον αισθητήρα αφής (3D probe).

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη των χαρακτηριστικών των οπών που δημιουργούνται με σκοπό τη βελτίωση της κατεργασίας η οποία προσφέρει ανταγωνιστικό πλεονέκτημα στη βιομηχανία μειώνοντας το κόστος παραγωγής. Για το σκοπό αυτό, τα τελευταία χρόνια, η έρευνα στο επιστημονικό πεδίο της διάτρησης έχει ενταθεί με πληθώρα νέων και βελτιωμένων εργαλείων διάτρησης, ως προϊόντα της αύξησης των διαθέσιμων εργαλείων προσομοίωσης και της ανάγκης για αύξηση της παραγωγικότητας. Το αποτέλεσμα της έντασης αυτής είναι η βελτίωση των κατεργασιών διάτρησης άρα και των αντίστοιχων γεωμετρικών χαρακτηριστικών των οπών.

Στο **κεφάλαιο 2** της στάθμης των γνώσεων παρουσιάζεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση της υπάρχουσας έρευνας καθώς και ορισμοί των εννοιών που αναλύονται.

Στο **κεφάλαιο 3** περιγράφεται ο εξοπλισμός και η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την διαδικασία της διάτρησης και μέτρησης των οπών.

Στο **κεφάλαιο 4** αναλύεται το μοντέλο μέτρησης των οπών και παρουσιάζονται μερικά αποτελέσματα από τα πειράματα που διεξήχθησαν.

2. ΣΤΑΘΜΗ ΓΝΩΣΕΩΝ

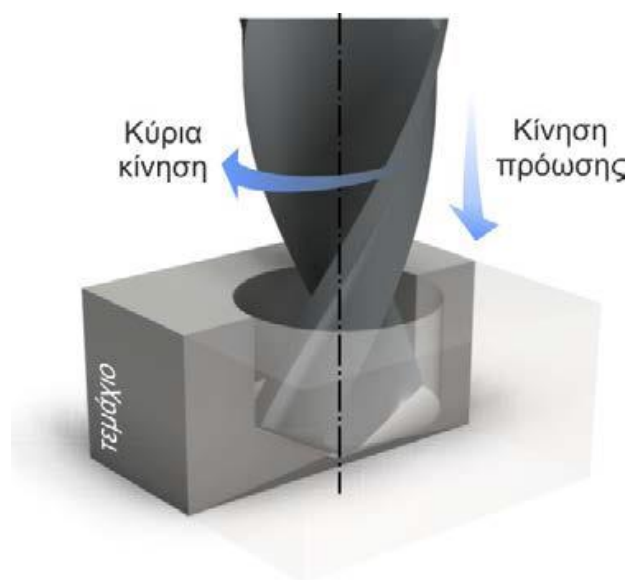
Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η κατασκευή μηχανολογικών τεμαχίων απαιτεί μια σειρά από διαμορφώσεις, εκ των οποίων οι οπές είναι οι πιο διαδεδομένες. Οι οπές είναι απαραίτητες στη συναρμολόγηση τεμαχίων και ειδικότερα στις κοχλιώσεις, στις ηλώσεις, στις συναρμογές εδράνων κύλισης και ολίσθησης, αλλά και στη ροή ρευστών για λίπανση ή ψύξη. Ως διάτρηση εννοείται η μηχανουργική κατεργασία διάνοιξης ή διεύρυνσης οπών διαμέτρου συνήθως από 0,1mm έως 60mm. Μικρότερες οπές συνήθως γίνονται με τη βοήθεια laser ή ηλεκτροδιάβρωσης, ενώ οι μεγαλύτερες με εσωτερική τόννευση. Τα τελευταία χρόνια η έρευνα στο επιστημονικό πεδίο της διάτρησης έχει ενταθεί, με εκατοντάδες ερευνητές σε όλον τον κόσμο να ασχολούνται σε διάφορους σχετικούς τομείς.

2.1 Παρουσίαση της Κατεργασίας

Η κινηματική της διάτρησης είναι απλή και παρόμοια με αυτήν της τόννευσης. Ειδικότερα η διάτρηση αποτελεί ένα συνδυασμό δύο επιμέρους κινήσεων, όπως αυτές φαίνονται στο Σχήμα 2.1.

- Η κύρια κίνηση κοπής είναι περιστροφική και αντιστοιχεί στην περιστροφή του εργαλείου γύρω από τον άξονά του. Η συνθήκη που συνδέεται άμεσα με την κίνηση αυτή είναι η ταχύτητα κοπής που εκφράζεται σε [m/min] και μεταφράζεται στις εργαλειομηχανές σε ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου σε [rpm].

- Η δευτερεύουσα κίνηση είναι μεταφορική και αντιστοιχεί στην πρόωση του εργαλείου με φορά προς το κατεργαζόμενο τεμάχιο. Η συνθήκη που συνδέεται με την κίνηση αυτή είναι η πρόωση που εκφράζεται σε [mm/rev] και συνήθως δίνεται στις εργαλειομηχανές ως [m/min].



Σχήμα 2.1 Κινηματική της διάτρησης

Η ταχύτητα κοπής v_c

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000}$$

Η πρόωση f

$$f = f_z \cdot z \cdot n.$$

όπου:

f : πρόωση ανά λεπτό [mm/min]

f_z : πρόωση ανά περιστροφή [mm/rev]

z : ο αριθμός των κόψεων

n : οι στροφές της ατράκτου σε [rpm]

v_c : η ταχύτητα κοπής [m/min]

D : η διάμετρος του εργαλείου [mm]

2.2 Καμπυλότητα

Καθημερινά μπορεί ο καθένας μας να δει οπουδήποτε μηχανές που κατασκευάζουν καμπύλα κομμάτια. Τα ρολόγια μέχρι και τα αεροπλάνα και τα διαστημόπλοια έχουν καμπύλα κομμάτια στην κατασκευή τους. Το πόσο καμπύλα είναι όμως αυτά τα κομμάτια είναι μια ιδιότητα της μετρολογίας να το εξετάσει. Η καμπυλότητα έχει να κάνει με την απόδοση και την λειτουργικότητα του τεμαχίου που κατασκευάζεται. Αν και η καμπυλότητα και το μέγεθος είναι δυο παράγοντες που επηρεάζουν τη συναρμογή των επιμέρους κομματιών μιας κατασκευής, η καμπυλότητα είναι ένας παράγοντας που μετριέται ανεξάρτητα από το μέγεθος.

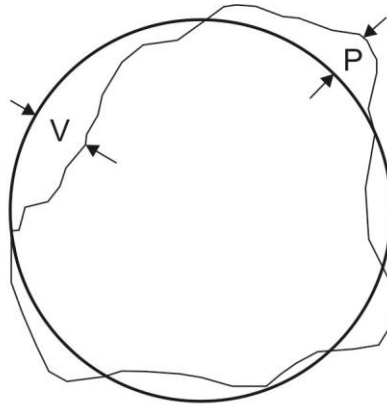
Καμπυλότητα ονομάζεται η μέτρηση της αιχμηρότητας των ακμών και των γωνιών ενός τεμαχίου. Η μέτρηση της καμπυλότητας εφαρμόζεται σε κυκλικές διατομές ή στην επιφάνεια σφαιρών.

Για να μετρηθεί η καμπυλότητα γίνεται μέτρηση της καμπυλότητας των κύκλων που βρίσκονται στα διάφορα επίπεδα που απαρτίζουν τον κύλινδρο σε σχέση με κάποιο κύκλο αναφοράς και στη συνέχεια μετρούνται οι διαφορές στις διαμέτρους των κύκλων με τον κύκλο αναφοράς.

Συνήθως, η μέτρηση γίνεται στην επιφάνεια του εξεταζόμενου τεμαχίου αν αυτό δεν είναι κυκλικό. Αν είναι κυκλικό η μέτρηση γίνεται περιστρέφοντας το κυκλικό τεμάχιο γύρω από ένα άξονα.

Η μέτρηση της καμπυλότητας μπορεί να γίνει με τους παρακάτω τρόπους:

- **Least Squares Circles (LSC):** Η μέθοδος αυτή χωρίζει το προφίλ της καμπυλότητας ενός αντικειμένου διαιρώντας τα αθροίσματα των περιοχών μέσα και έξω από τον κύκλο αναφοράς σε ίσα μέρη. Έτσι το σφάλμα της καμπυλότητας ορίζεται σαν η διαφορά της ελάχιστης και της μέγιστης απόστασης του προφίλ της καμπυλότητας από τον κύκλο αναφοράς. Εν συνεχεία αφού γίνουν οι μετρήσεις αναπαριστώνται πάνω στον κύκλο αναφοράς και μετρούνται οι διαφορές.



Least Squares Reference Centre.

Σχήμα 2.2 Μέθοδος LSC

Αναλυτικότερα οι συντεταγμένες x, y του κύκλου ελαχίστων τετραγώνων υπολογίζονται από τις παρακάτω σχέσεις :

$$x = \frac{2 * \text{sum of } x \text{ values}}{\text{number of coordinates}} = \frac{2 * \sum x}{n}$$

$$y = \frac{2 * \text{sum of } y \text{ values}}{\text{number of values}} = \frac{2 * \sum y}{n}$$

Επιπλέον οι παραπάνω συντεταγμένες μπορούν να εκφραστούν και σε πολικές ως εξής :

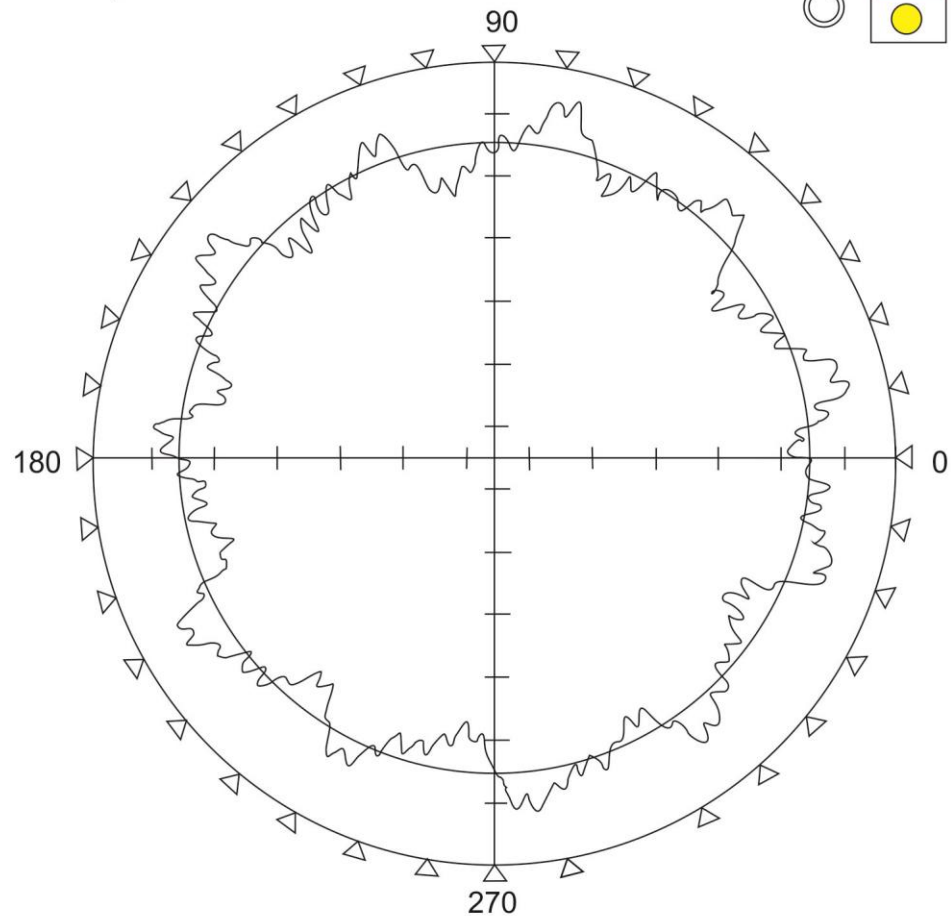
$$x = \frac{2}{n} * \sum_{i=1}^n (R_i * \cos \theta_i)$$

$$y = \frac{2}{n} * \sum_{i=1}^n (R_i * \sin \theta_i)$$

Τέλος η εξίσωση που υπολογίζει την ακτίνα του κύκλου ελαχίστων τετραγώνων είναι η παρακάτω :

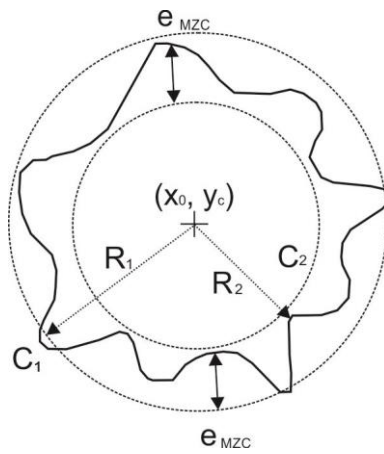
$$R = \frac{\text{sum of radial values}}{\text{number of coordinates}} = \frac{\sum R_i}{n}$$

Scale 10 μ m/div.

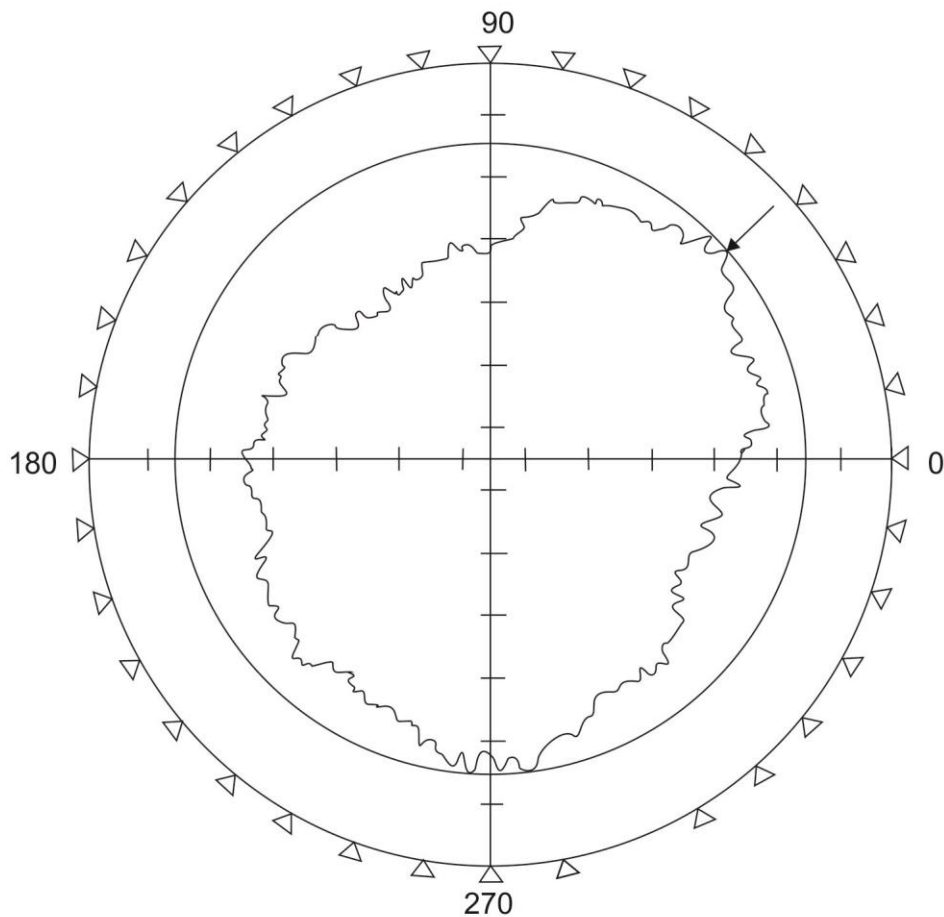


Σχήμα 2.3 Μετρήσεις και αποκλίσεις από τον κύκλο αναφοράς

- **Minimum Zone Circle (MZC):** Εδώ χρησιμοποιούνται δύο κύκλοι αναφοράς οι οποίοι ορίζουν το σφάλμα της καμπυλότητας. Ο ένας κύκλος βρίσκεται έξω από το προφίλ της καμπυλότητας έτσι ώστε το υψηλότερο σημείο του προφίλ της καμπυλότητας να αποτελεί σημείο αυτού του κύκλου. Ενώ ο άλλος κύκλος αναφοράς βρίσκεται εσωτερικά του προφίλ της καμπυλότητας έτσι ώστε το κατώτερο σημείο του προφίλ να αποτελεί σημείο του. Τέλος σαν σφάλμα της καμπυλότητας ορίζεται η διαφορά των ακτινών αυτών των δύο κύκλων.

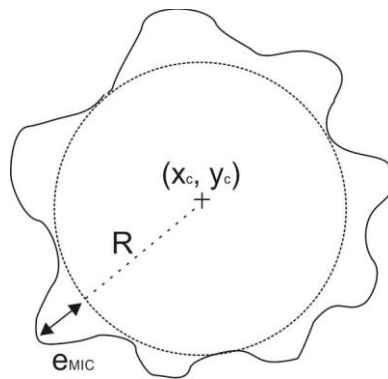


Σχήμα 2.4 Μέθοδος MSC

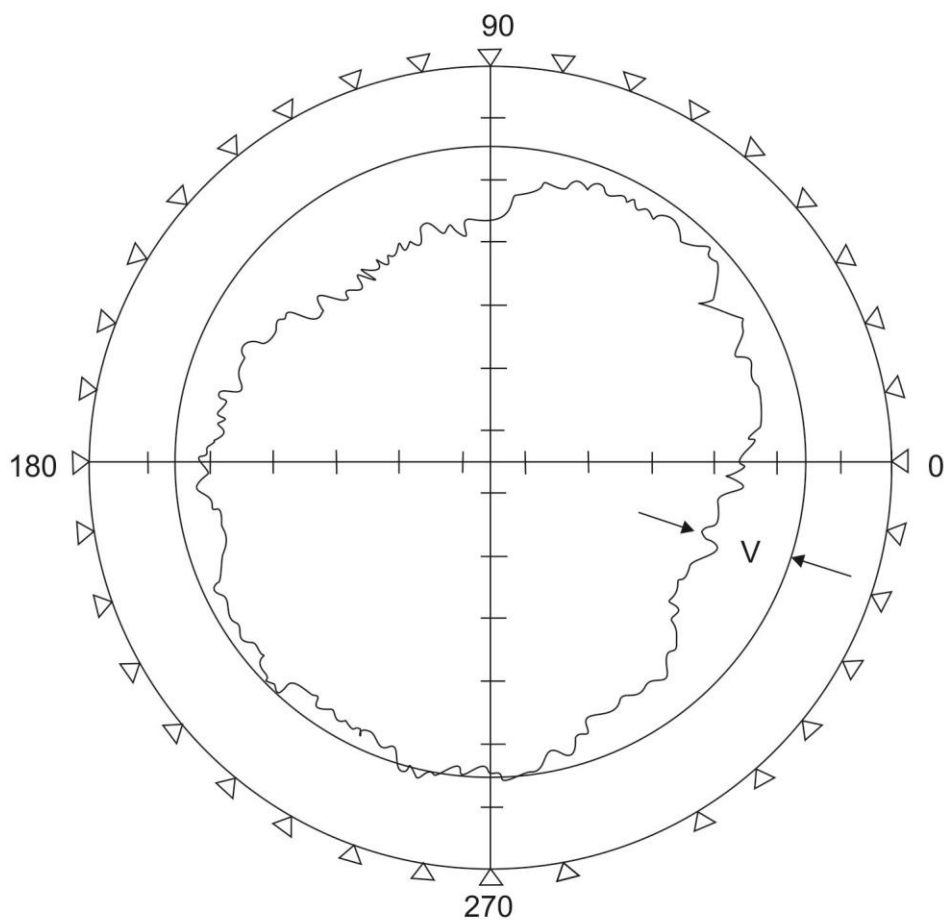


Σχήμα 2.5 Μετρήσεις και αποκλίσεις από τον κύκλο αναφοράς

- **Minimum Circumscribed Circle (MCC):** Σε αυτή την μέθοδο σαν κύκλος αναφοράς ορίζεται ο μικρότερος δυνατός κύκλος που μπορεί να περικλείει ολόκληρο το προφίλ της καμπυλότητας. Σαν σφάλμα της καμπυλότητας σε αυτή την περίπτωση ορίζεται η μεγαλύτερη απόσταση από τις αποστάσεις όλων των σημείων.

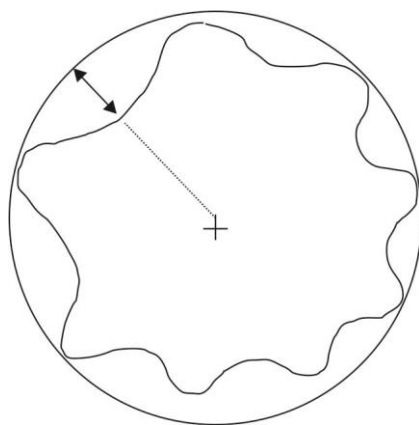


Σχήμα 2.6 Μέθοδος MCC

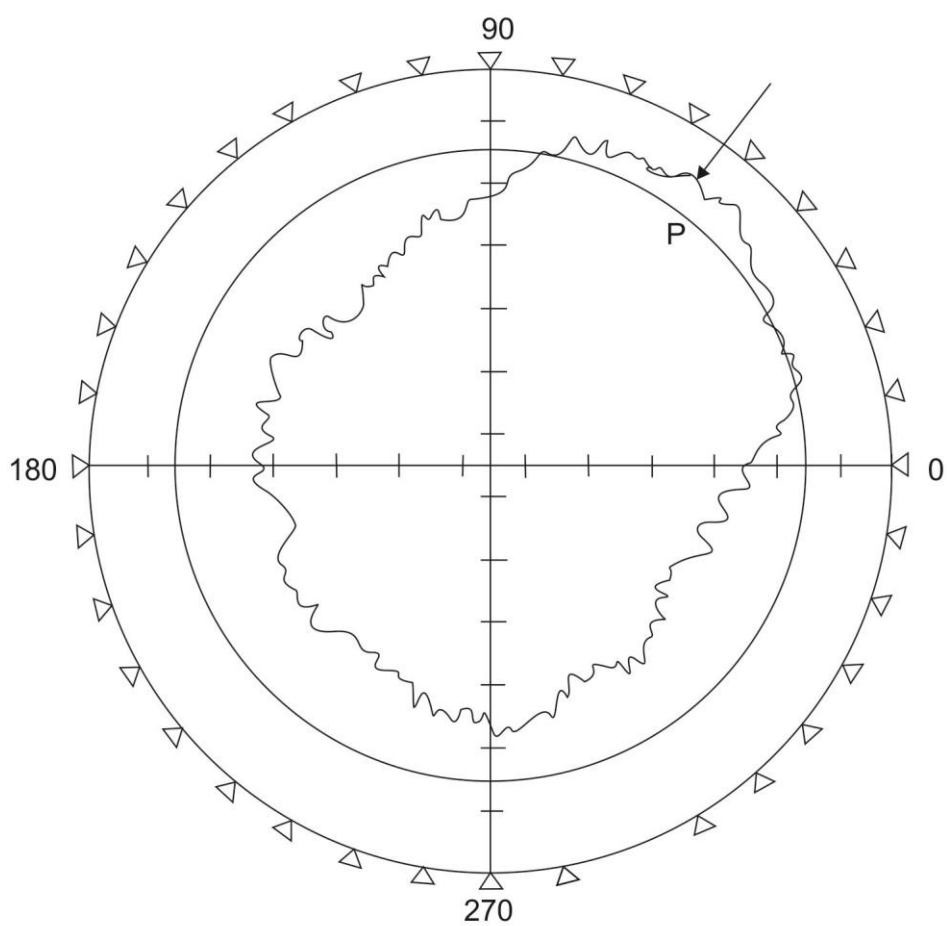


Σχήμα 2.7 Μετρήσεις και αποκλίσεις από τον κύκλο αναφοράς

- **Maximum Inscribed Circle (MIC):** Εδώ ορίζεται σαν κύκλος αναφοράς ο μεγαλύτερος κύκλος που μπορεί να περικλείεται εσωτερικά του προφίλ της καμπυλότητας. Σαν σφάλμα καμπυλότητας εδώ ορίζεται η μεγαλύτερη απόσταση σημείου του προφίλ από αυτόν τον κύκλο.



Σχήμα 2.8 Μέθοδος MIC



Σχήμα 2.9 Μετρήσεις και αποκλίσεις από τον κύκλο αναφοράς

Τα μετρητικά όργανα που χρησιμοποιούνται στην μέτρηση της καμπυλότητας είναι δύο ειδών:

- Όργανα ακίδας
- Όργανα probe

Τα όργανα ακίδας χρησιμοποιούν μια πολύ λεπτή και ευαίσθητη ακίδα όπου μετρώντας το μέγεθος των ταλαντώσεων που κάνει η ακίδα καθώς κινείται πάνω στην μετρούμενη επιφάνεια βγάζουν ένα διάγραμμα με τις αποκλίσεις της επιφάνειας από την θεωρητική τιμή.



Σχήμα 2.10 Όργανο ακίδας

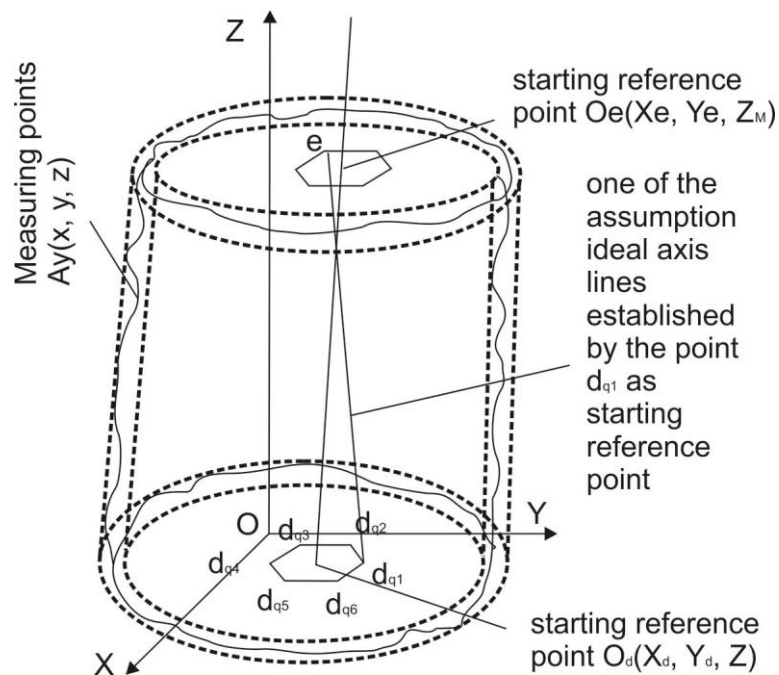
Τα όργανα probe είναι όργανα τα οποία αντί για ακίδα χρησιμοποιούν μια σφαιρική επιφάνεια. Όταν αυτή η σφαιρική επιφάνεια ακουμπήσει πάνω στο τεμάχιο διέρχεται μια μικρή τάση ρεύματος μέσα από αυτή την επιφάνεια. Μετρώντας λοιπόν κάθε φορά την τάση που διέρχεται από αυτή την επιφάνεια το μηχάνημα βγάζει συμπεράσματα για την καμπυλότητα της επιφάνειας. Τέτοιου είδους μηχανήματα είναι πολύ πιο ακριβή στην μέτρηση από τα προηγούμενα έχουν όμως και περισσότερο από δεκαπλάσια αξία. Επίσης είναι πολύ μεγάλα σε όγκο και απαιτούν ειδικά εκπαιδευμένο προσωπικό για την χρήση τους.



Σχήμα 2.11 Όργανο probe

2.3 Κυλινδρικήτητα

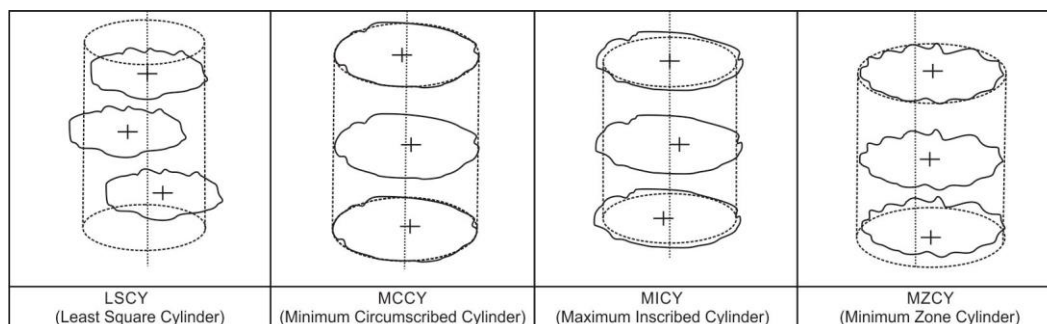
Η μέτρηση της κυλινδρικότητας εφαρμόζεται σε όλες τις εγκάρσιες τομές μίας κυκλικής επιφάνειας. Η επιφάνεια προς μέτρηση πρέπει να βρίσκεται μεταξύ δύο κυλινδρικών επιφανειών που ορίζουν την ζώνη ανοχών και ορίζονται από έναν τέλειο θεωρητικό κύλινδρο.



Σχήμα 2.12 Πραγματικός και θεωρητικός κύλινδρος

Οι αποκλίσεις του πραγματικού κυλίνδρου από τον θεωρητικό ορίζονται σαν σφάλματα της κυλινδρικότητας. Συνήθως τα σφάλματα στην κυλινδρικότητα συμβαίνουν λόγω της ακρίβειας της μηχανής που κάνει την κατεργασία και λόγω των φυσικών ιδιοτήτων του κατεργαζόμενου τεμαχίου.

Η μέτρηση της κυλινδρικότητας μοιάζει αρκετά με τη μέτρηση της καμπυλότητας. Υπάρχει και εδώ ο κύλινδρος των ελαχίστων τετραγώνων (LSCY), ο μικρότερος εγγεγραμμένος κύλινδρος (MCCY), ο μεγαλύτερος περιγεγραμμένος κύλινδρος (MICY) και τέλος ο minimum zone cylinder ο οποίος λέγεται και κύλινδρος Tschebysheff.



Σχήμα 2.13 Γραφική απεικόνιση μεθόδων μέτρησης κυλινδρικότητας

- **Least Squares Circles (LSC):** Η μέθοδος αυτή χωρίζει το προφίλ της κυλινδρικότητας ενός αντικειμένου διαιρώντας τα αθροίσματα των περιοχών μέσα και έξω από τον κύλινδρο αναφοράς σε ίσα μέρη. Έτσι το σφάλμα της κυλινδρικότητας ορίζεται σαν η διαφορά της ελάχιστης και της μέγιστης απόστασης του προφίλ της καμπυλότητας από τον κύλινδρο αναφοράς.
- **Minimum Zone Circle (MZC):** Εδώ χρησιμοποιούνται δύο κύλινδροι αναφοράς οι οποίοι ορίζουν το σφάλμα της κυλινδρικότητας. Ο ένας κύλινδρος βρίσκεται έξω από το προφίλ της κυλινδρικότητας έτσι ώστε το υψηλότερο σημείο του προφίλ της κυλινδρικότητας να αποτελεί σημείο αυτού του κυλίνδρου. Ενώ ο άλλος κύλινδρος αναφοράς βρίσκεται εσωτερικά του προφίλ της κυλινδρικότητας έτσι ώστε το κατώτερο σημείο του προφίλ να αποτελεί σημείο του. Τέλος σαν σφάλμα της κυλινδρικότητας ορίζουμε την διαφορά των ακτινών αυτών των δύο κυλίνδρων.
- **Minimum Circumscribed Circle (MCC):** Σε αυτή την μέθοδο σαν κύλινδρος αναφοράς ορίζεται ο μικρότερος δυνατός κύλινδρος που μπορεί να περικλείει ολόκληρο το προφίλ της κυλινδρικότητας. Σαν σφάλμα της κυλινδρικότητας σε αυτή την περίπτωση ορίζεται η μεγαλύτερη απόσταση από τις αποστάσεις όλων των σημείων.
- **Maximum Inscribed Circle (MIC):** Εδώ ορίζεται σαν κύλινδρος αναφοράς ο μεγαλύτερος κύλινδρος που μπορεί να περικλείεται εσωτερικά του προφίλ της κυλινδρικότητας. Σαν σφάλμα κυλινδρικότητας εδώ ορίζεται η μεγαλύτερη απόσταση σημείου του προφίλ από αυτόν τον κύκλο.

Τα μετρητικά όργανα που χρησιμοποιούνται για να μετρηθεί η κυλινδρικότητα είναι παρόμοια με αυτά που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της καμπυλότητας. Η διαφορά τους όμως με αυτά της καμπυλότητας είναι ότι τώρα έχουν κι ένα τσόκ πάνω στο οποίο προσδένεται το προς εξέταση τεμάχιο. Στην συνέχεια το τσόκ περιστρέφεται και το μηχανήμα παίρνει μετρήσεις.

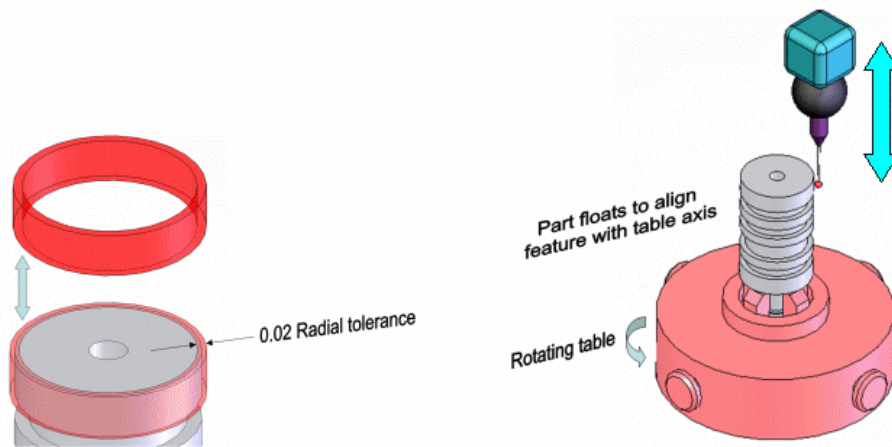
Τα όργανα είναι λοιπόν και εδώ δύο ειδών:

- Όργανα ακίδας
- Όργανα probe

Τα όργανα με ακίδα όπως ειπώθηκε προηγουμένως χρησιμοποιούν μια ακίδα για να πάρουν τις μετρήσεις τους. Πιο συγκεκριμένα το τεμάχιο περιστρέφεται στο τσόκ και η ακίδα ακουμπώντας πάνω στο τεμάχιο και κινούμενη κατά μήκος του τεμαχίου παίρνει τις μετρήσεις. Τα όργανα που χρησιμοποιούν probe λειτουργούν ομοίως με τα όργανα ακίδας μόνο που εδώ χρησιμοποιείται το probe. Όπως και στα όργανα καμπυλότητας έτσι κι εδώ μετρείται η τάση που διαπερνάει το probe και στη συνέχεια αυτή «μεταφράζεται» από την συσκευή σε προφίλ καμπυλότητας.



Σχήμα 2.14 Μηχανή μέτρησης της κυλινδρικότητας με ακίδα

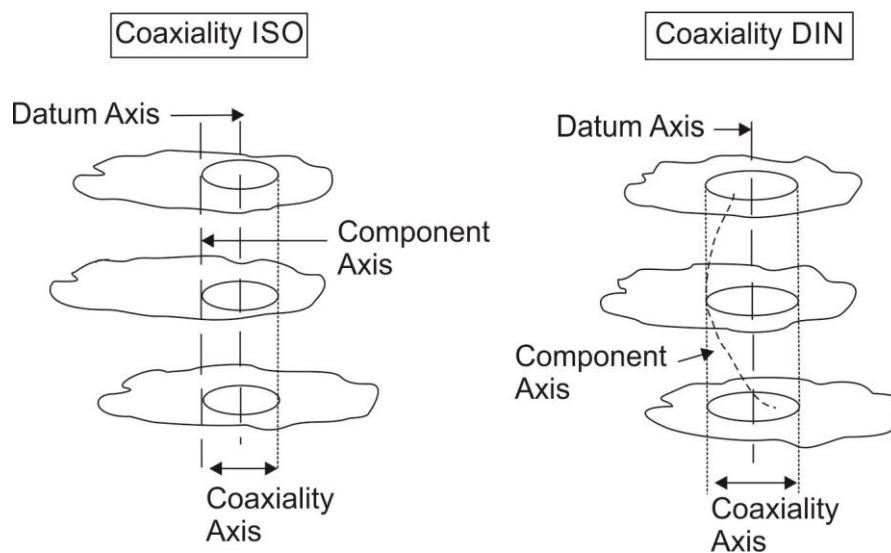


Σχήμα 2.15 Μηχανή μέτρησης της κυλινδρικότητας με probe

2.4 Ομοαξονικότητα

Η ομοαξονικότητα ορίζεται σαν η σχέση που έχουν δύο άξονες μεταξύ τους. Στην πράξη υπάρχουν δυο ορισμοί. Ένας κατά DIN κι ένας κατά ISO.

- Ομοαξονικότητα κατά DIN ορίζεται από την διάμετρο ενός κυλίνδρου προκαθορισμένου μήκους με τον άξονα του παράλληλο σε έναν άξονα αναφοράς πάνω στον οποίο βρίσκονται τα κέντρα όλων των επιπέδων που ορίζουν τον κύλινδρο.
- Ομοαξονικότητα κατά ISO ορίζεται ως η διάμετρος ενός θεωρητικού κυλίνδρου ο οποίος είναι ομοαξονικός με τον άξονα αναφοράς και ο θεωρητικός αυτός κύλινδρος περιλαμβάνει τα κέντρα των επιπέδων που ορίζουν τον κύλινδρο υπό εξέταση.



Σχήμα 2.16 Ομοαξονικότητες κατά ISO και DIN

Η μέτρηση της ομοαξονικότητας γίνεται πάντα σε σχέση με τον κάθετο άξονα που διαπερνάει το τεμάχιο που χρειάζεται να μετρηθεί και έναν ιδεατό. Για να βρεθεί ο άξονας του τεμαχίου υπάρχουν δύο μέθοδοι.

- Επιλέγονται τα κέντρα τουλάχιστον 2 κύκλων αναφοράς που να ανήκουν σε διαφορετικά επίπεδα του προς εξέταση τεμαχίου και ορίζεται ο άξονας που ενώνει τα κέντρα τους.
- Επιλέγεται ο άξονας που ενώνει τα κέντρα του κύκλου αναφοράς του γραφήματος της καμπυλότητας και του κύκλου αναφοράς για το circular flatness.

Αφού έχει επιλεγθεί ο άξονας που διαλέγεται να μελετηθεί, επιλέγεται και ο άξονας αναφοράς. Ο άξονας αναφοράς συνήθως είναι ο άξονας περιστροφής του τεμαχίου προς εξέταση. Κάθε απόκλιση λοιπόν του προς μελέτη άξονα από τον άξονα περιστροφής ορίζεται σαν σφάλμα της ομοαξονικότητας. Ένα αποδεκτό όριο για την ομοαξονικότητα είναι η απόσταση του προς εξέταση άξονα από το κέντρο του κύκλου αναφοράς για την μέτρηση της καμπυλότητας να είναι το πολύ διπλάσια από την απόσταση του κέντρου του κύκλου αναφοράς για την μέτρηση της καμπυλότητας και του άξονα περιστροφής του τεμαχίου.

2.5 Επιπεδότητα

Στην πραγματικότητα καμία επιφάνεια δεν είναι απολύτως επίπεδη. Όλες οι επιφάνειες έχουν κάποιες «ανωμαλίες» οι οποίες διακρίνονται σε όρη και κοιλάδες. Το όρος είναι κατά πόσο ένα μέρος της επιφάνειας είναι ψηλότερο από το κανονικό και κοιλάδα εννοούμε το κατά πόσο ένα μέρος της επιφάνειας είναι χαμηλότερο από το κανονικό. Λέγοντας λοιπόν μέτρηση επιπεδότητας εννοείται το κατά πόσο αυτά τα όρη και οι κοιλάδες βρίσκονται μέσα σε επιτρεπτά όρια. Η επιπεδότητα μπορεί να μετρηθεί σε οποιαδήποτε επιφάνεια είναι οριζόντια, κατακόρυφη ή και υπό κάποια κλίση.

Τα όργανα μέτρησης της επιπεδότητας διακρίνονται σε 3 κατηγορίες:

- Με ακίδα
- Με probe
- Με laser

Τα όργανα μέτρησης με ακίδα χρησιμοποιούν μια ακίδα για την μέτρηση της επιπεδότητας. Η μέτρηση γίνεται με την ακίδα να κινείται κατά μήκος της μετρούμενης επιφάνειας. Από το μήκος των ταλαντώσεων που κάνει η ακίδα η συσκευή στη συνέχεια σχηματίζει ένα διάγραμμα με τα όρη και κοιλάδες της επιφάνειας. Τα όργανα με ακίδα είναι τα φθηνότερα και συνάμα τα λιγότερο ακριβή σε μετρήσεις από τα άλλα δύο.



Σχήμα 2.17 Μηχανή μέτρησης της επιπεδότητας με ακίδα

Οι συσκευές μέτρησης με probe χρησιμοποιούν το probe και την ηλεκτρική τάση που το διαρρέει για να «διαβάσουν» το προφίλ της επιπεδότητας. Αυτές οι συσκευές είναι πιο ακριβείς από αυτές που χρησιμοποιούν ακίδα αλλά και αρκετά πιο ακριβές σε τιμή.



Σχήμα 2.18 Μηχανή μέτρησης της επιπεδότητας με probe

Τέλος, υπάρχουν οι συσκευές που χρησιμοποιούν laser για να μετρήσουν την επιπεδότητα της επιφάνειας. Αυτές οι συσκευές είναι και οι πιο ακριβείς για τέτοιες μετρήσεις αλλά και υπερβολικά ακριβές διότι η κατασκευή τους εμπεριέχει αρκετή πολυπλοκότητα. Για να μετρήσει μια τέτοια συσκευή την επιπεδότητα εκπέμπει μια δέσμη laser και στη συνέχεια μετράει την αντανάκλαση της δέσμης από την επιφάνεια. Στις περιοχές όπου υπάρχουν «όρη» οι ακτίνες επιστρέφουν νωρίτερα ενώ στις περιοχές όπου υπάρχουν «κοιλιάδες» οι ακτίνες επιστρέφουν αργότερα. Με αυτή την μέθοδο η συσκευή δημιουργεί μια απεικόνιση της επιφάνειας που χρειάζεται να μετρηθεί.

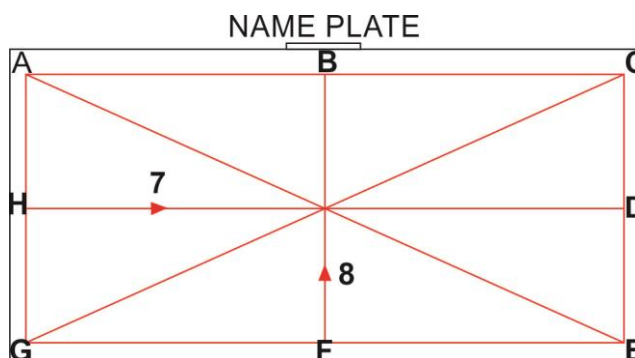


Σχήμα 2.19 Μηχανή μέτρησης της επιπεδότητας με laser

Για να μετρηθεί η επιπεδότητα μιας επιφάνειας πρέπει να υπάρχουν ορισμένες γραμμές μέτρησης πάνω στην επιφάνεια. Υπάρχουν δύο τρόποι για τη μέτρηση της επιπεδότητας:

- Η μέθοδος Moody
- Η μέθοδος πλέγματος

Στη μέθοδο Moody η μέτρηση γίνεται με οκτώ περιγεγραμμένες γραμμές στην επιφάνεια.

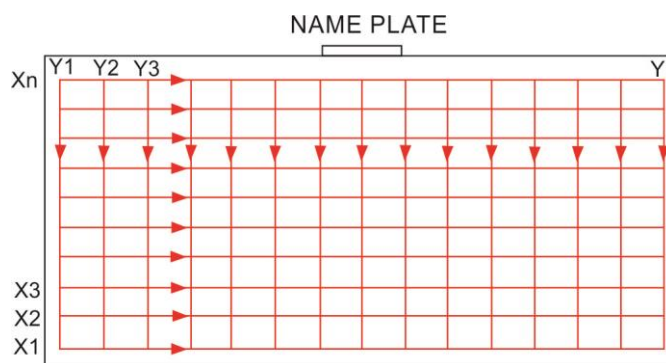


Σχήμα 2.20 Μέθοδος Moody

Αυτή η μέθοδος προτάθηκε από τον J.C Moody το 1995 και γρήγορα έγινε ευρέως αποδεκτή. Η μέθοδος αξιολογεί πολύ γρήγορα την μετρούμενη επιφάνεια και τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται σε ένα διάγραμμα και για τις 8 γραμμές. Τέλος κάθε γραμμή εξετάζεται ξεχωριστά για το αν η επιπεδότητα κατά μήκος αυτής της γραμμής βρίσκεται μέσα στα επιτρεπτά όρια. Αν η επιπεδότητα και στις 8 γραμμές βρίσκεται μέσα στα επιτρεπτά όρια τότε η επιφάνεια γίνεται αποδεκτή. Αν μια δεν βρίσκεται μέσα στα όρια τότε η επιφάνεια απορρίπτεται.

Η μέθοδος αυτή όμως έχει ένα μειονέκτημα, πρέπει να μετρηθούν όλα τα σημεία κατά μήκος και των 8 γραμμών. Αυτό δημιουργεί κάποια προβλήματα σε περιπτώσεις μέτρησης επιφανειών με οπές ή προεξοχές.

Στη μέθοδο πλέγματος ορίζεται ένας οποιοσδήποτε αριθμός γραμμών προς 2 κάθετων μεταξύ τους κατευθύνσεων.



Σχήμα 2.21 Μέθοδος πλέγματος

Με την μέθοδο πλέγματος σε αντίθεση με την μέθοδο Moody δεν είναι απαραίτητο να μετρηθούν όλα τα σημεία μιας γραμμής. Αυτό το γεγονός επιτρέπει να μετρούνται και επιφάνειες με οπές και προεξοχές όπου η μέθοδος Moody αδυνατεί να μετρήσει.

Η μέτρηση της επιπεδότητας είναι μια διαδικασία που θα πρέπει να γίνεται με ακρίβεια. Τα σφάλματα που έχουν παρατηρηθεί κατά τη διάρκεια των μετρήσεων χωρίζονται σε 2 είδη:

- Σφάλματα εργαλείου μέτρησης
- Σφάλματα επιφάνειας

Τα σφάλματα εργαλείου μέτρησης αναφέρονται αφενός μεν στην ακρίβεια του εργαλείου που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση αλλά και αφετέρου στην ευθυγράμμιση του εργαλείου με την μετρούμενη επιφάνεια. Το εργαλείο της μέτρησης πρέπει να είναι απόλυτα ευθυγραμμισμένο με την μετρούμενη επιφάνεια αλλιώς θα υπάρξουν σφάλματα στην μέτρηση. Για παράδειγμα έχει παρατηρηθεί ότι σε περιπτώσεις μη ευθυγράμμισης του εργαλείου κατά 1.5° δημιουργούνται σφάλματα μέχρι και 0.5mm.

Τα σφάλματα επιφανείας αναφέρονται στην ευθυγράμμιση της βάσης του μηχανήματος μέτρησης. Λέγονται έτσι διότι απαιτείται η επιφάνεια στην οποία στηρίζεται η συσκευή να είναι απόλυτα επίπεδη. Αν δεν είναι θα πρέπει η επιπεδότητα της επιφάνειας να διορθωθεί με την χρήση ειδικών προσθηκών στη βάση της συσκευής.

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ

3.1 Εξοπλισμός Πειραμάτων

Τα πειράματα έγιναν στο Εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης (M3) του Πολυτεχνείου Κρήτης και χρησιμοποιήθηκε ο παρακάτω εξοπλισμός:

- Υλικό κατεργασίας AL7075
- Εργαλειομηχανή DMU 50 eco
- Συσκευή Προρύθμισης Εργαλείων
- Εργαλείο Διάτρησης BOSCH
- Αισθητήρας 3D PROBE

3.1.1 Υλικό Κατεργασίας

Το υλικό που επιλέχθηκε για τη διεξαγωγή των πειραμάτων είναι το AL7075. Το συγκεκριμένο υλικό χρησιμοποιείται ευρέως στην κατασκευή δομικών εξαρτημάτων κυρίως στην αεροναυπηγικές εφαρμογές. Η αεροναυπηγική βιομηχανία απαιτεί υλικά που έχουν υψηλή αντοχή και εύκολη, όσο είναι δυνατόν, κατεργασιμότητα.

Το AL7075 είναι ένα κράμα αλουμινίου με πρωταρχικό στοιχείο κράματος τον ψευδάργυρο. Είναι σκληρό υλικό με αντοχή αντίστοιχη αυτής των χαλύβων, με καλή αντοχή σε κόπωση και μέση κατεργασιμότητα αλλά μικρότερη αντίσταση στη διάβρωση από αυτήν που έχουν άλλα κράματα αλουμινίου. Το υψηλό κόστος του περιορίζει τη χρήση του μόνο σε εφαρμογές όπου φθηνότερα κράματα δεν είναι κατάλληλα.

Η χημική σύσταση και οι μηχανικές ιδιότητες του AL7075 παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα 3.1

ΚΡΑΜΑ	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	other
7075	0,40	0,50	1,2-2,0	0,30	2,1-2,9	0,18-0,28	5,1-6,1	0,20	0,15

Πίνακας 3.1 : Χημική σύσταση AL7075 (wt.%)

Το AL7075 είναι μη θερμικά επεξεργασμένο και έχει μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό άνω των 40000 psi (275 MPa) και η μέγιστη αντοχή σε απόδοση δεν υπερβαίνει τα 21000 psi (145 MPa). Το υλικό μπορεί να επιμηκυνθεί 9-10%.

Χρησιμοποιήθηκαν τρία ίδια δοκίμια AL7075 μήκους 150 mm, πλάτους 100 mm και πάχους 20 mm.

3.1.2 Εργαλειομηχανή DMU 50 eco

Τα πειράματα έγιναν στο κέντρο κατεργασίας της Deckel Maho DMU 50 eco, το οποίο καθοδηγείται με ψηφιακή καθοδήγηση Siemens 810D.

Το κέντρο κατεργασίας γενικής χρήσης CNC DMU 50 eco (σχήμα 3.1) είναι εξοπλισμένο με ισχυρή άτρακτο για στροφές μέχρι 8.000 rpm και χαρακτηριστικά: 83 Nm (40% ED), ισχύς ατράκτου 13 kW (40% ED) και 12 m/min γρήγορη μετακίνηση. Το περιστρεφόμενο τραπέζι του καθιστά εφικτή την κατασκευή πολύ σύνθετων τεμαχίων κατεργασίας. Η υδραυλική σύσφιξη εμπεριέχεται στο περιστρεφόμενο τραπέζι και η περιοχή περιστροφής μέχρι τις 115° (-5° / +110°) καθιστά εφικτές κλίσεις μέχρι 20°.

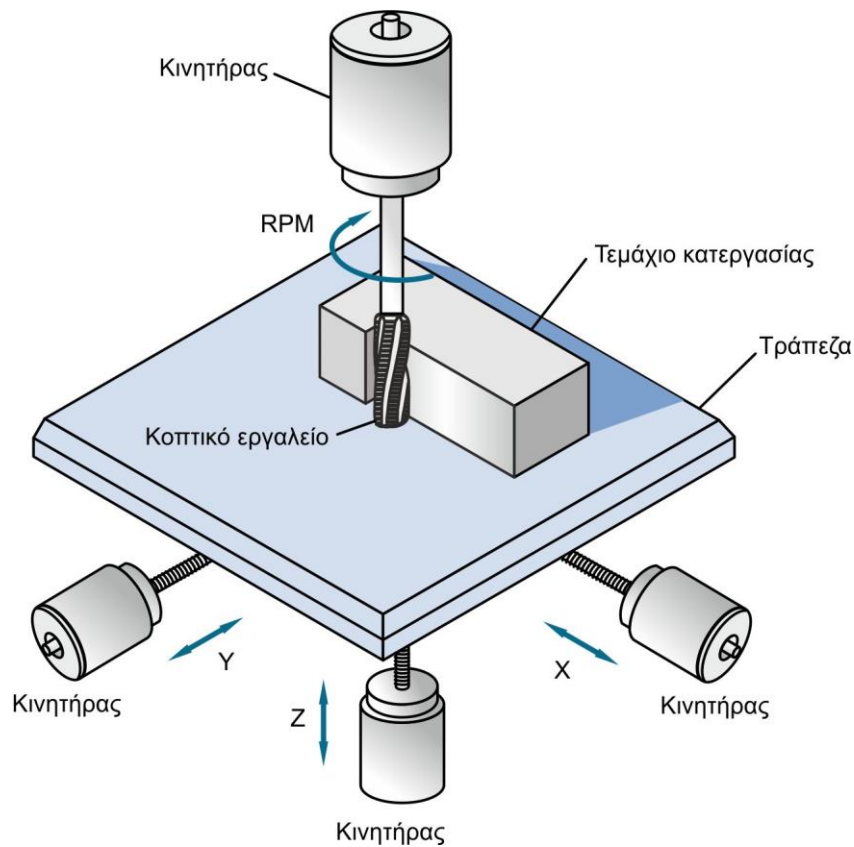
Ο εργαλειοφορέας με 16 θέσεις και το αποσπώμενο χειριστήριο καθιστούν εφικτή την απλή και άνετη εκτέλεση των διαφόρων εργασιών. Η κατασκευή είναι με χυτοσίδηρο σκελετό για μέγιστη ακρίβεια και ποιότητα επιφανειών.



Σχήμα 3.1 : Κέντρο κατεργασίας DMU 50 eco



Σχήμα 3.2 Σκελετός της DMU 50 eco



Σχήμα 3.3 Αρχές λειτουργίας τράπεζας CNC

3.1.3 Συσκευή Προρύθμισης Εργαλείων

Χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση των χαρακτηριστικών των τρυπανιών και τον έλεγχο έκκεντρης πρόσδεσης των κοπτικών η συσκευή προρύθμισης εργαλείων Microset Uno 115 eco. Η συσκευή διαθέτει ανιχνευτή ακμών για γρήγορο εντοπισμό της κοπτικής ακμής, γραμμικούς άξονες, πνευματική σύσφιξη των αξόνων για μέγιστη ακρίβεια, ενώ οι μετρήσεις πραγματοποιούνται μέσω CMOS ψηφιακής κάμερας με τηλεσκοπικούς φακούς.



Σχήμα 3.4 : Συσκευή προρύθμισης εργαλείων Microset Uno 115eco

3.1.4 Εργαλείο Διάτρησης BOSCH

Χρησιμοποιήθηκαν τρυπάνια (κοπτικά εργαλεία διάτρησης) της εταιρίας BOSCH κατασκευασμένα από ταχυχάλυβα HSS κατά DIN338. Χρησιμοποιήθηκαν τρία τρυπάνια διαφορετικών διαμέτρων. Οι διάμετροι είναι 16.5 mm, 14 mm, 12 mm.



Σχήμα 3.5 Κοπτικό εργαλείο διάτρησης 16.5 mm



Σχήμα 3.6 Κοπτικό εργαλείο διάτρησης 14 mm



Σχήμα 3.7 Κοπτικό εργαλείο διάτρησης 12 mm

3.1.5 Αισθητήρας 3D PROBE

Χρησιμοποιήθηκε αισθητήρας 3D PROBE TS642 HEIDENHAIN ο οποίος έχει τις απαραίτητες ηλεκτρικές και μηχανικές ιδιότητες που απαιτούνται για πολλών ειδών εργασίες. Αυτές είναι οι :

- Υψηλή επαναληψιμότητα του probe από $2\sigma \leq 1 \mu\text{m}$
- Μεγάλο εύρος υπέρυθρου φάσματος μέχρι 7 m
- Μεγάλες περιόδους λειτουργίας μέχρι 800 ώρες
- Χρησιμοποιεί όλων των ειδών τις τυπικές μπαταρίες μεγέθους C

Το TS642 διαθέτει μικροδιακόπτη ενσωματωμένο στο λεπτό κωνικό στέλεχος. Κατά την τοποθέτηση του καθετήρα αφής στο μηχάνημα, το TS642 ενεργοποιείται αυτόματα. Αναφέρει αμέσως την ετοιμότητα του μέσω του σήματος ετοιμότητας B.



Σχήμα 3.8 3D probe

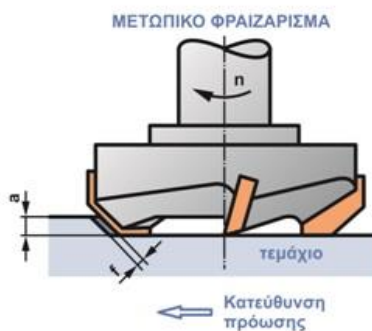


Σχήμα 3.9 3D probe

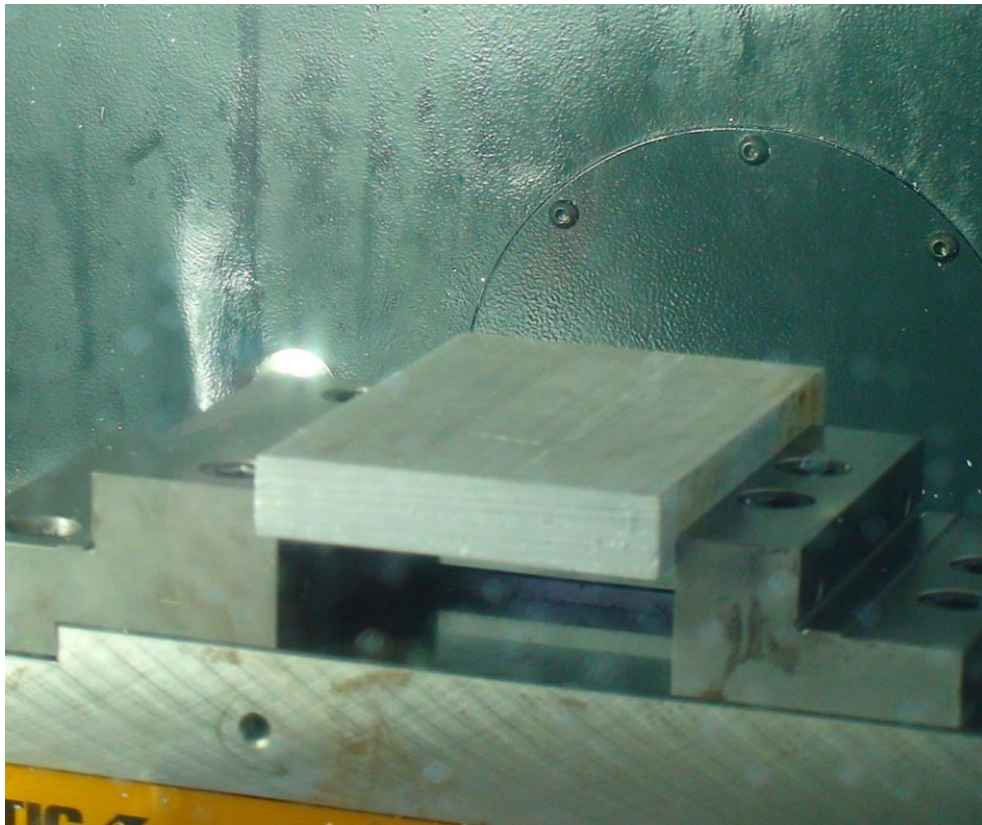
3.2 Εκτέλεση Πειραμάτων

3.2.1 Μετωπικό Φραιζάρισμα (face)

Χρησιμοποιήθηκαν τρία διαφορετικά δοκίμια υλικού AL7075, ένα για κάθε κοπτικό εργαλείο διαφορετικής διαμέτρου. Μετά την πρόσδεση του δοκιμίου πάνω στην τράπεζα της εργαλειομηχανής και την επαλήθευση της ευθυγράμμισης του με την τράπεζα, διαδικασία που ακολουθήθηκε και με τα τρία δοκίμια, εκτελέστηκε face πάνω στα δοκίμια. Η διαδικασία αυτή λέγεται μετωπικό φραιζάρισμα. Το κοπτικό τοποθετείται σε άξονα κάθετο προς την κατεργαζόμενη επιφάνεια και η κατεργαζόμενη επιφάνεια είναι το αποτέλεσμα της κοπής των κοπτικών ακμών που βρίσκονται στην περιφέρεια αλλά και στο πρόσωπό του. Η διαδικασία αυτή έγινε με σκοπό την επίτευξη της καλύτερης δυνατής επιφάνειας. Η διαδικασία έγινε μια φορά σε κάθε δοκίμιο και το πάχος κοπής ήταν 1 mm. Επετεύχθη έτσι λεία επιφάνεια κατεργασίας και σιγουρεύτηκε η παραλληλία της επιφάνειας κατεργασίας με την τράπεζα.



Σχήμα 3.10 Μετωπικό φραιζάρισμα (face)



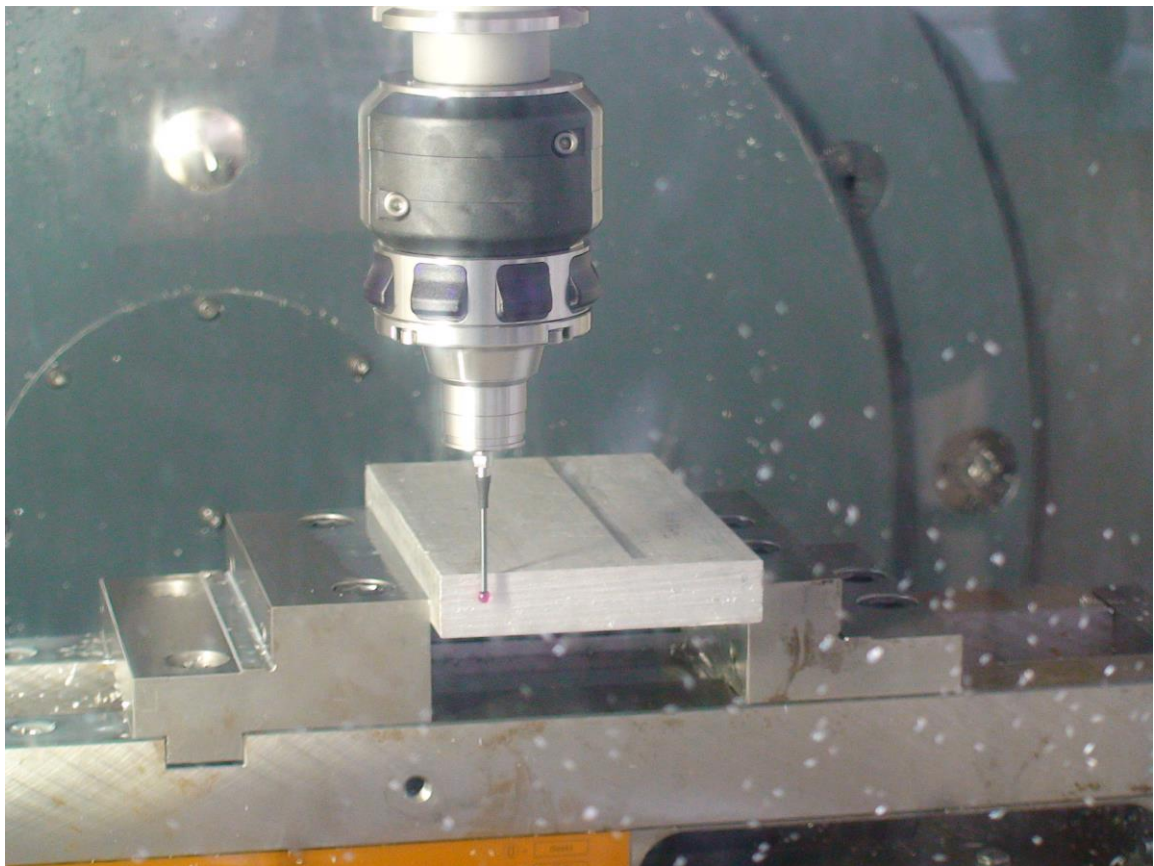
Σχήμα 3.11 Τεμάχιο μετά από κατεργασία face

3.2.2 Μηδενισμός Τεμαχίων

Έπειτα ακολούθησε ο μηδενισμός του τεμαχίου ώστε να εκτελεστούν σωστά τα πειράματα. Για το μηδενισμό του τεμαχίου χρησιμοποιήθηκε ο αισθητήρας 3D probe. Μετά την τοποθέτηση του αισθητήρα στη μηχανή, χειροκίνητα μετακινήθηκε και τοποθετήθηκε πάνω από το τεμάχιο έτσι ώστε να μηδενιστεί ο άξονας z. Ο μηδενισμός γίνεται με εντολή της εργαλειομηχανής που είναι εγκατεστημένη.

Ο αισθητήρας αφού τοποθετείται λίγα χιλιοστά πάνω από το τεμάχιο κατεβαίνει κάθετα στον άξονα z μέχρι να ακουμπήσει το δοκίμιο. Έστερα ανεβαίνει λίγα χιλιοστά στον άξονα z μέχρι να δείξει τη μέτρηση. Η μέτρηση που δείχνει, είναι η απόσταση που διαφέρει το σημείο που ακούμπησε ο αισθητήρας από το προηγούμενο σημείο μηδέν του άξονα z. Έπειτα, ο χειριστής επιλέγει να ορίσει το μηδέν στο σημείο που μόλις μετρήθηκε το οποίο είναι στην επιφάνεια του τεμαχίου.

Για να μηδενιστούν οι άξονες x και y ακολουθείται η ίδια διαδικασία στους αντίστοιχους άξονες. Μηδενισμός έγινε και στα τρία τεμάχια μετά την πρόσδεση τους πάνω στην τράπεζα της εργαλειομηχανής. Μετά το μηδενισμό τα τεμάχια δεν βγήκαν από τη θέση πρόσδεσής τους πάνω στην τράπεζα της εργαλειομηχανής παρά μόνο με το πέρας των πειραμάτων στο κάθε ένα.

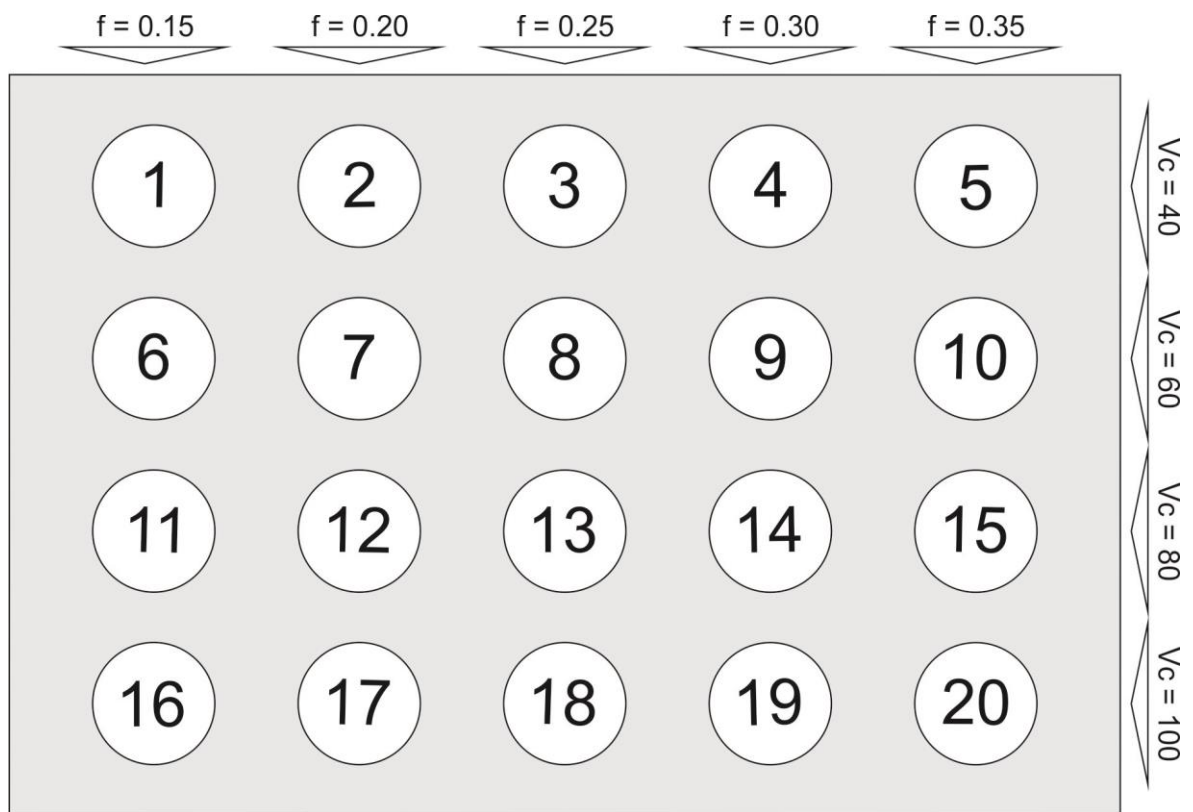


Σχήμα 3.12 Μηδενισμός άξονα x

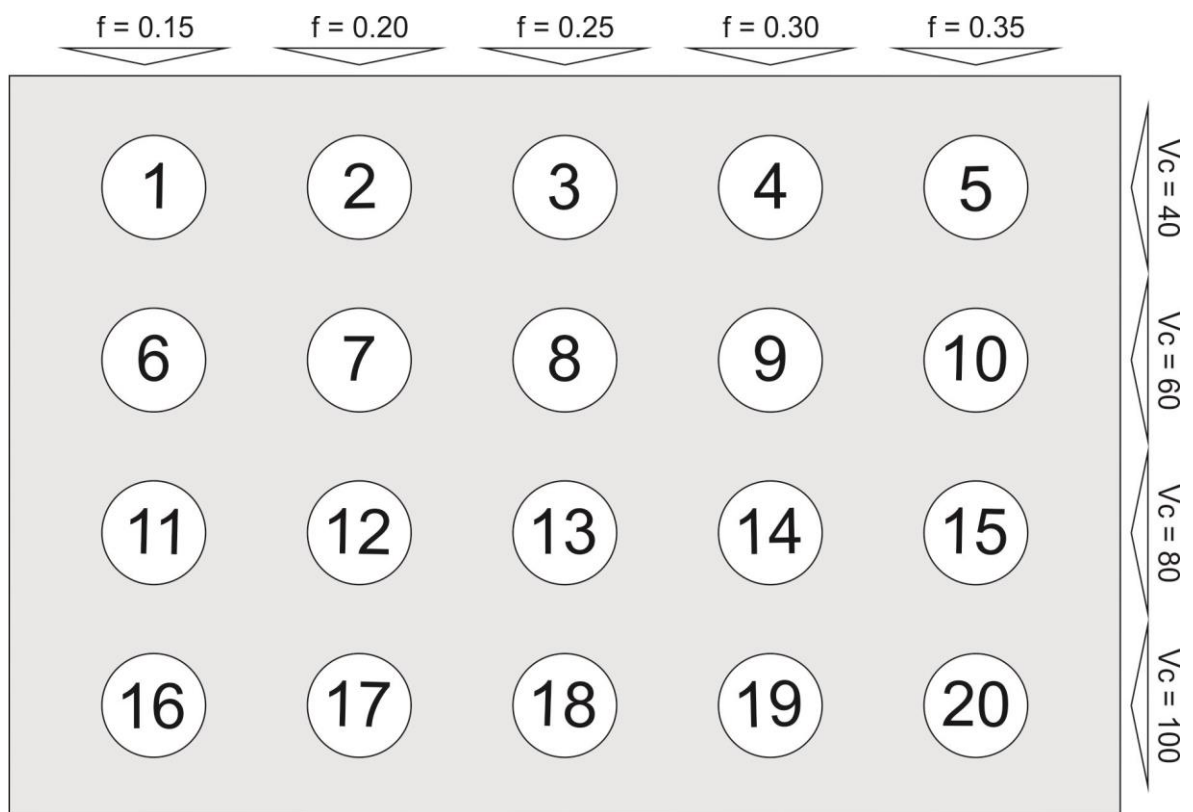
3.2.3 Διάτρηση Τεμαχίων

Μετά το πέρας του μηδενισμού απομακρύνθηκε ο αισθητήρας 3D probe και στη θέση του μπήκε το κοπτικό εργαλείο. Στο κάθε τεμάχιο θα ανοιχτούν 20 οπές σε σημεία που καθορίστηκαν στην αρχή των πειραμάτων όπως θα φανεί και στα [σχήματα 3.13-3.15](#) που ακολουθούν. Στα τρία τεμάχια θα χρησιμοποιηθούν όπως ειπώθηκε προηγουμένως τρία διαφορετικά κοπτικά εργαλεία διαφορετικών διαμέτρων. Όλες οι οπές του κάθε τεμαχίου γίνονται με το ίδιο κοπτικό εργαλείο. Οι οπές σε κάθε τεμάχιο είναι αριθμημένες από το 1-20. Η ίδια αρίθμηση επικρατεί και στα υπόλοιπα τεμάχια. Κάθε οπή έχει γίνει κάτω από διαφορετικές συνθήκες ταχύτητας κοπής και πρόωσης.

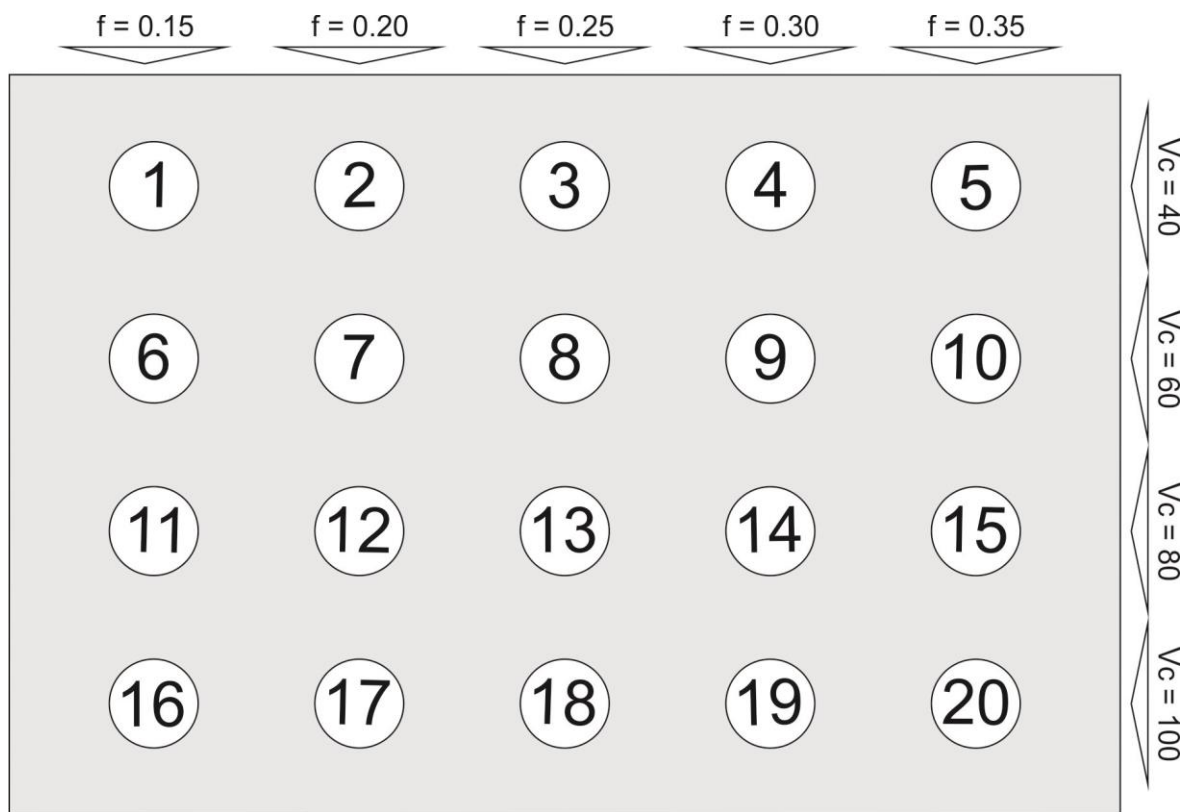
Το σημείο (0, 0) είναι στην πάνω αριστερή γωνία όπως φαίνεται στα [σχήματα 3.13-3.15](#) όπου και ξεκινάει η μέτρηση. Όλες οι αποστάσεις των κέντρων των οπών είναι μετρημένες με αρχή εκείνο το σημείο και είναι ίδιες για κάθε τεμάχιο. Επιπλέον, φαίνεται ότι κάθε στήλη (κάθετα) οπών του τεμαχίου έχει γίνει με διαφορετική ταχύτητα κοπής και κάθε σειρά (οριζόντια) οπών έχει γίνει με διαφορετική πρόωση. Με την ίδια διαδικασία έγιναν και στα άλλα δυο τεμάχια οι οπές.



Σχήμα 3.13 Τεμάχιο με οπές διαμέτρου 16.5 mm



Σχήμα 3.14 Τεμάχιο με οπές διαμέτρου 14 mm



Σχήμα 3.15 Τεμάχιο με οπές διαμέτρου 12 mm

Για να γίνουν οι οπές χρησιμοποιώντας τα κοπτικά εργαλεία γράφτηκε G-κώδικας στην εργαλειομηχανή κατάλληλος ώστε να κάνει τις οπές σε κάθε τεμάχιο και ρυθμίζοντας ταυτόχρονα τον αριθμό των στροφών n (rpm) και πρόωσης F (m/min) που δέχεται η εργαλειομηχανή.

$$n = \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \cdot D}$$

$$F = f \cdot n$$

Παρατίθεται ο πίνακας 3.2 για το κάθε τεμάχιο με τον αριθμό των στροφών του και της πρόωσης του.

	n	F		n	F		n	F
1	909	136	1	772	116	1	1061	159
2	909	181	2	772	154	2	1061	212
3	909	227	3	772	193	3	1061	265
4	909	272	4	772	231	4	1061	318
5	909	318	5	772	270	5	1061	371
6	1365	204	6	1157	174	6	1592	239
7	1365	273	7	1157	231	7	1592	318
8	1365	341	8	1157	289	8	1592	398
9	1365	409	9	1157	347	9	1592	477
10	1365	477	10	1157	405	10	1592	557
11	1820	273	11	1543	231	11	2123	318
12	1820	364	12	1543	309	12	2123	424
13	1820	455	13	1543	386	13	2123	530
14	1820	546	14	1543	463	14	2123	637
15	1820	637	15	1543	540	15	2123	743
16	2275	341	16	1929	289	16	2653	398
17	2275	455	17	1929	386	17	2653	530
18	2275	568	18	1929	482	18	2653	663
19	2275	682	19	1929	579	19	2653	796
20	2275	796	20	1929	675	20	2653	928

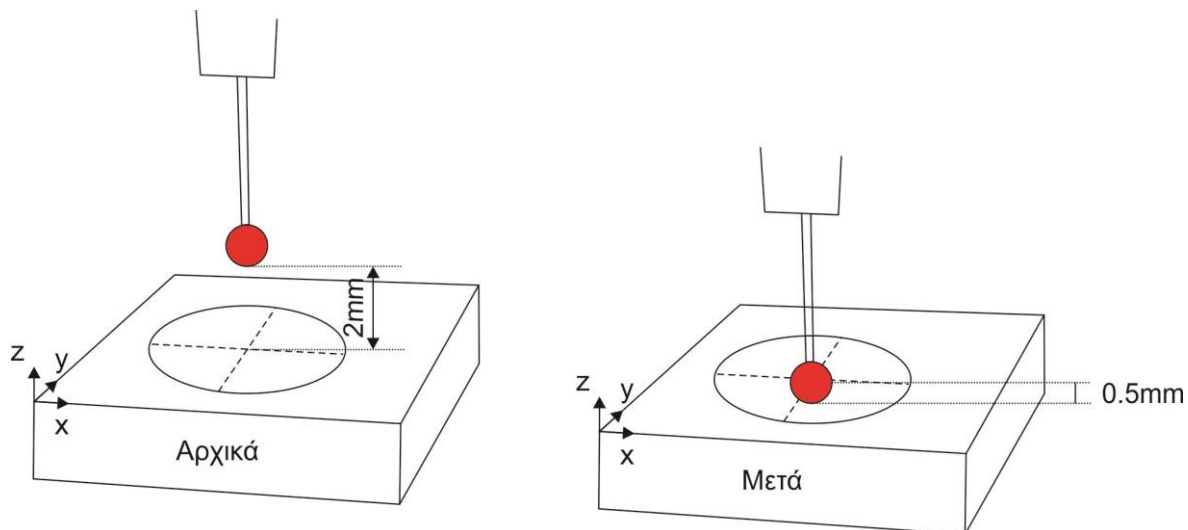
Πίνακας 3.2 Τιμές στροφών και πρόωσης για οπές με διάμετρο 16.5 mm, 14 mm, 12 mm

3.2.4 Μοντέλο Ανάλυσης και Μέτρηση Οπών

Για τη μέτρηση των οπών χρησιμοποιήθηκε ο τρισδιάστατος μετρητικός βραχίονας HEIDENHAIN TS642. Λόγω του μεγάλου πλήθους των μετρήσεων που απαιτούνται για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών μιας οπής, η διαδικασία αυτοματοποιήθηκε, κάνοντας χρήση των προχωρημένων δυνατοτήτων του ελεγκτή της εργαλειομηχανής Siemens Sinumerik810D. Στο πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε ο χρήστης εισάγει το αρχικό και τελικό βάθος των επιπέδων μέτρησης και τη διακριτοποίηση της γωνίας και του βάθους των μετρήσεων και ο ελεγκτής αναλαμβάνει την αυτόματη καταγραφή των αποτελεσμάτων σε ειδικά διαμορφωμένα αρχεία. Για τις μετρήσεις της παρούσας εργασίας ακολουθήθηκε η στρατηγική μέτρησης των προφίλ κυκλικότητας.

Ο χειριστής μέσα από το control panel της εργαλειομηχανής όριζε την αρχική θέση του αισθητήρα η οποία ήταν στο κέντρο της οπής της οποίας μετρούσε. Οι συντεταγμένες της

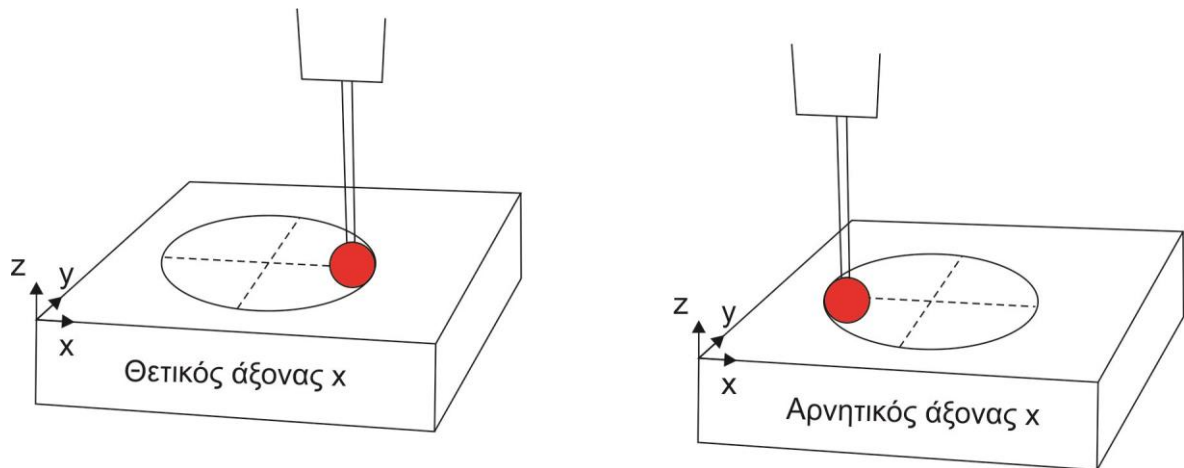
οπής είναι γνωστές. Μετά την τοποθέτηση του αισθητήρα στη συγκεκριμένη θέση, ο χειριστής όριζε ως $(0, 0)$ το κέντρο της οπής για τις ανάγκες του προγράμματος. Ορίστηκε επίπεδο ασφαλείας στα 2mm, διακριτοποίηση της γωνίας των μετρήσεων στις 10 μοίρες και διακριτοποίηση του βάθους στα 1mm. Το τελικό επίπεδο ήταν στα -9mm για ασφάλεια ενώ η πρώτη μέτρηση γινόταν στα -0.5mm και η τελευταία στα -6.5mm. Ο διαθέσιμος κύκλος μετρήσεων του ελεγκτή λαμβάνει μετρήσεις στη θετική και αρνητική κατεύθυνση των αξόνων x και y . Αυτό σημαίνει ότι οι μετρήσεις λαμβάνονται με τη σειρά 0 - 180 - 90 - 270 και στη συνέχεια γίνεται επαναφορά του βραχίονα και περιστροφή της τράπεζας κατά τη γωνία διακριτοποίησης.



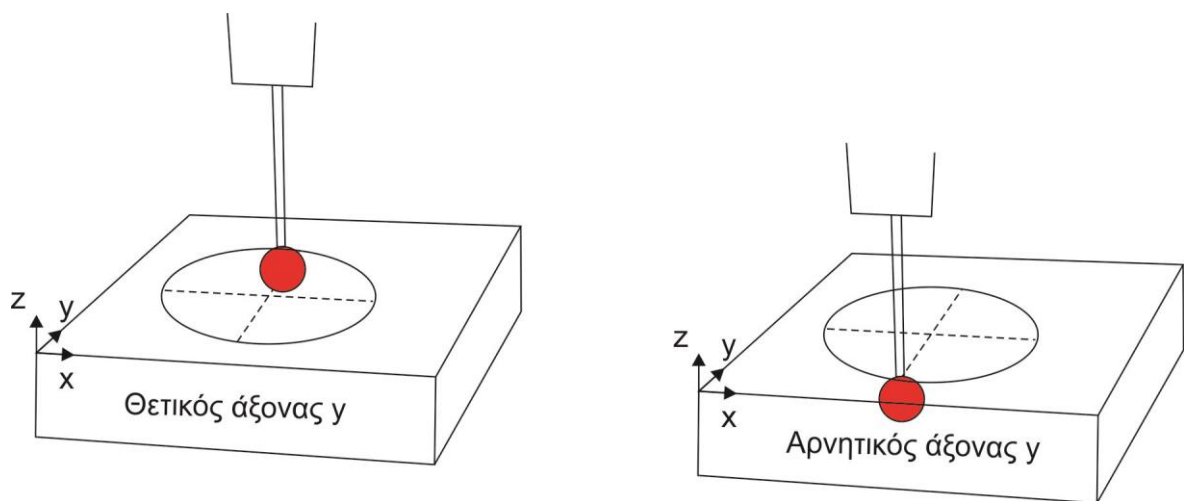
Σχήμα 3.16 Θέση ελεγκτή probe στο επίπεδο ασφαλείας και στην πρώτη μέτρηση

Αναλυτικότερα, ο χειριστής μετά τον ορισμό της αρχικής θέσης του αισθητήρα 3D probe έτρεχε το πρόγραμμα το οποίο αναγνώριζε ότι ο αισθητήρας βρίσκεται στο επίπεδο ασφαλείας. Έπειτα, αναλάμβανε να κατεβάσει κατακόρυφα τον ελεγκτή 2.5 mm από το επίπεδο ασφαλείας, δηλαδή στο σημείο -0.5mm που βρίσκεται μέσα στην οπή. Στο σημείο -0.5mm ο ελεγκτής ξεκινάει να παίρνει τις πρώτες του μετρήσεις. Πρώτα μετακινείται στα θετικά του άξονα x μέχρι να ακουμπήσει την άκρη της οπής. Εκεί ο ελεγκτής σταματάει και καταγράφεται η μέτρηση. Έχει οριστεί βέβαια στο πρόγραμμα η διάμετρος της οπής ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι πιθανότητες λάθους και πιθανής καταστροφής του ελεγκτή.

Μετά ο ελεγκτής μετακινείται στην αρνητική διεύθυνση του x άξονα μέχρι να ακουμπήσει την άκρη της οπής, όπου και εκεί θα σταματήσει για να πάρει μέτρηση. Στη συνέχεια, θα επιστρέψει στο κέντρο της οπής που είναι ορισμένο το $(0, 0)$ για να αλλάξει κατεύθυνση και να κινηθεί θετικά στον άξονα y μέχρι να ακουμπήσει στην άκρη της οπής και να πάρει τη μέτρηση. Ύστερα, θα μετακινηθεί αρνητικά στον άξονα y μέχρι να πάρει τη μέτρηση του. Μετά από κάθε μέτρηση ο ελεγκτής επιστρέφει στη θέση $(0, 0)$ για ασφάλεια και έπειτα συνεχίζει τη μετακίνηση του στους άξονες.



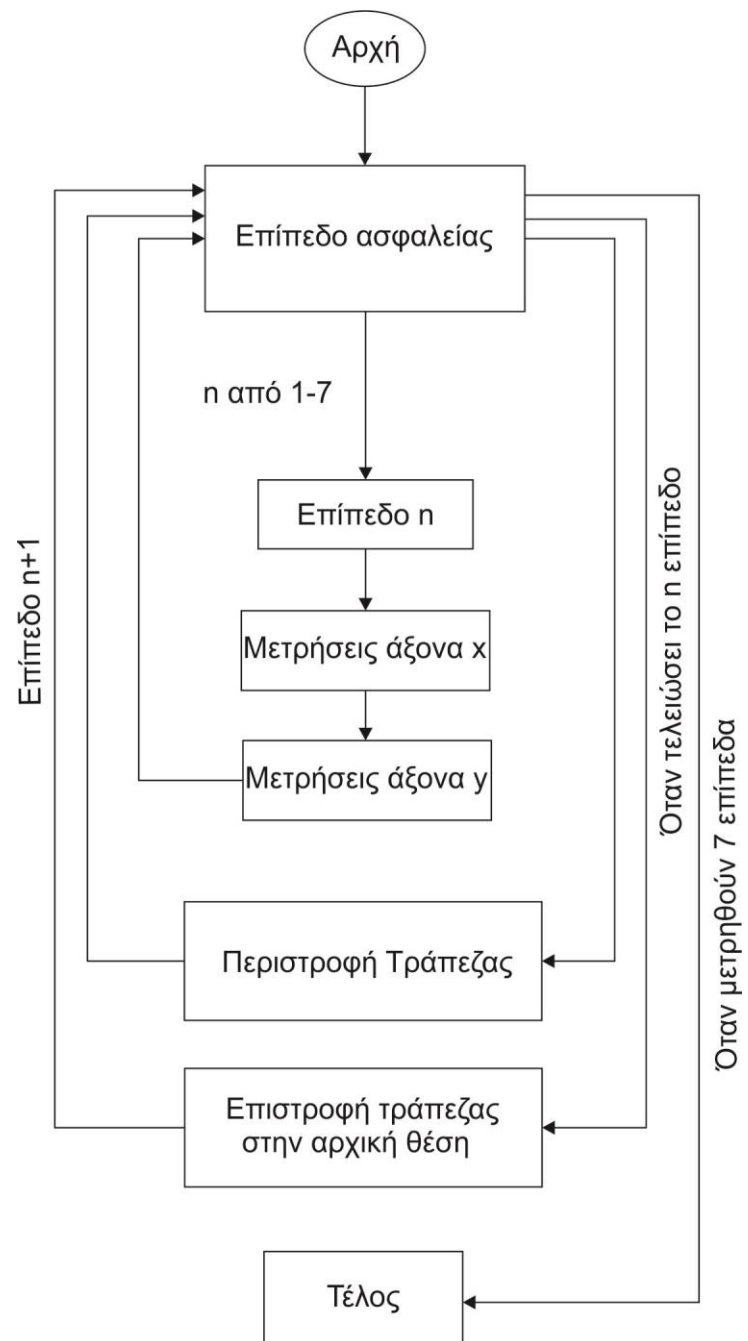
Σχήμα 3.17 Θέσεις του ελεγκτή στον άξονα x



Σχήμα 3.18 Θέσεις του ελεγκτή στον άξονα y

Μόλις πάρει τις μετρήσεις ο ελεγκτής μετακινείται στο επίπεδο ασφαλείας ώστε η τράπεζα να περιστραφεί κατά τη γωνία διακριτοποίησης. Μετά την περιστροφή της τράπεζας ο βραχίονας μετακινείται πάνω από το κέντρο της οπής, πάντα στο επίπεδο ασφαλείας, όπου αυτόματα ορίζει ξανά το $(0, 0)$ για να επαναλάβει την ίδια διαδικασία και να πάρει τις μετρήσεις. Η διαδικασία θα επαναλαμβάνεται μέχρι η τράπεζα να γυρίσει ένα τεταρτημόριο και έπειτα θα επιστρέψει στην αρχική της θέση. Με την επαναφορά της τράπεζας στην αρχική της θέση έχει γίνει ένας κύκλος μετρήσεων σε ένα επίπεδο.

Συνολικά εξετάζονται 7 επίπεδα σε κάθε οπή τα οποία θεωρούνται αρκετά για τη μελέτη. Στο τέλος των μετρήσεων και των 7 επιπέδων της οπής ο βραχίονας στον οποίο έχει προσδεθεί ο ελεγκτής ανεβαίνει κατακόρυφα και απομακρύνεται από το τεμάχιο. Αυτό σημαίνει ότι οι μετρήσεις για την πρώτη οπή έχουν τελειώσει και μπορεί ο χειριστής να ξεκινήσει να παίρνει μετρήσεις και από τις υπόλοιπες οπές. Η διαδικασία επαναλήφθηκε για όλες τις οπές που έγιναν. Οι μετρήσεις καταγράφονται και αποθηκεύονται μέσα στην εργαλειομηχανή σε ένα αρχείο mrf το οποίο είναι προσβάσιμο από την κεντρική μονάδα του υπολογιστή της εργαλειομηχανής. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε οπή που ο χειριστής ετοιμάζεται να μετρήσει.



Σχήμα 3.19 Κύκλος λειτουργίας G-code

4. ΜΟΝΤΕΛΟ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΟΠΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 Μοντέλο Μέτρησης της Οπής

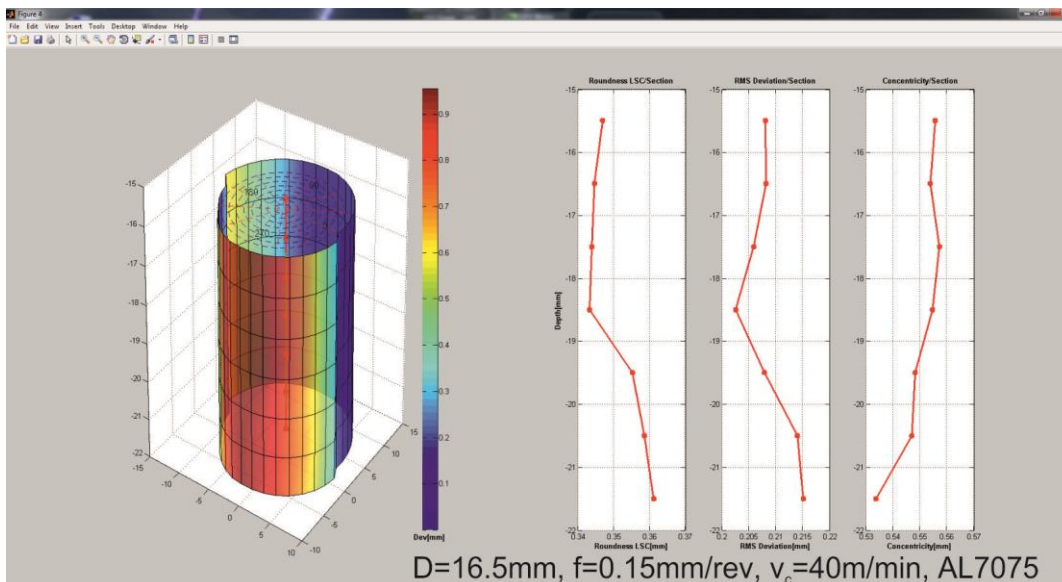
Για την ανάλυση των κατεργασμένων οπών χρησιμοποιήθηκε μια διεπαφή η οποία επεξεργάζεται τα αρχεία των μετρήσεων και παρουσιάζει τα αποτελέσματα. Η διεπαφή δημιουργήθηκε στο πρόγραμμα MATLAB. Η παρουσίαση των μετρήσεων σε κάθε επίπεδο μέτρησης παρουσιάζεται στο [σχήμα 4.1](#). Το κάθε πολικό διάγραμμα αντιστοιχεί σε διαφορετικό βάθος μέτρησης της οπής ενώ ο τρόπος παρουσίασης τους ακολουθεί το πρότυπο ISO 4291.



Σχήμα 4.1 Αποτελέσματα μετρήσεων οπής σε διαφορετικά βάθη

Επιπρόσθετα, το πρόγραμμα κατασκευάζει την 3D οπή από τις παραπάνω δισδιάστατες μετρήσεις για καλύτερη εμποπτεία των αποτελεσμάτων [σχήμα 4.2](#). Στο κάτω επίπεδο της 3D οπής σχεδιάζεται ένα πολικό διάγραμμα ώστε να μπορεί ο χρήστης να μελετήσει τις γωνίες στις οποίες παρουσιάζονται οι μέγιστες παραμορφώσεις ενώ επίσης σχεδιάζονται τα τρισδιάστατα κέντρα σε κάθε επίπεδο μέτρησης. Τα κέντρα αυτά υπολογίζονται με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων.

Δεξιά της τρισδιάστατης οπής παρουσιάζονται τρία διαγράμματα: Στο πρώτο διάγραμμα παρουσιάζεται η μεταβολή της κυκλικότητας σε κάθε επίπεδο μέτρησης. Το δεύτερο διάγραμμα παρουσιάζει τη μέση τετραγωνική απόκλιση της κυκλικότητας, ενώ το τρίτο παρουσιάζει την μεταβολή της ομοκεντρικότητας σε κάθε επίπεδο μέτρησης. Τέλος, το πρόγραμμα επιστρέφει την τιμή της κυκλινδρικότητας και της ομοαξονικότητας της οπής.



Σχήμα 4.2 Τρισδιάστατη απεικόνιση κατεργασμένης οπής

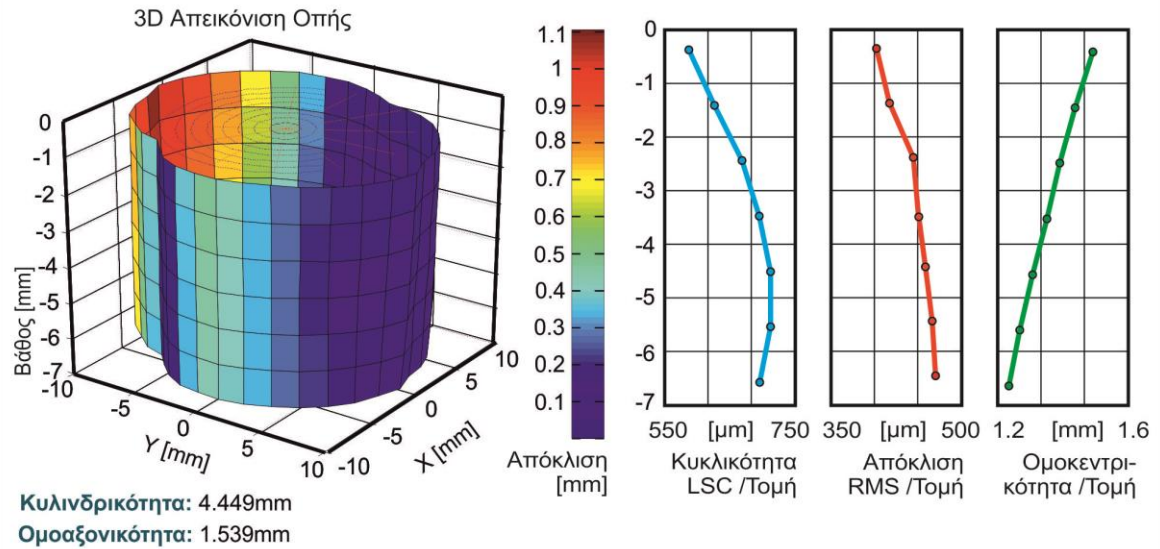
4.2 Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα περιλαμβάνουν τις μετρήσεις της οπής. Το πρώτο αποτέλεσμα αφορά την τρισδιάστατη αναπαράσταση της μετρημένης οπής. Η χρωματική κλίμακα αντιστοιχεί στη διαφορά του μετρημένου προφίλ σε κάθε επίπεδο από τη θεωρητική ακτίνα και το κέντρο του κυλίνδρου ελαχίστων τετραγώνων. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα μεταβολής της κυκλικότητας (μετρημένης με τη μέθοδο LSC) και της ομοκεντρικότητας συναρτήσει του βάθους μέτρησης. Τα διαγράμματα αυτά αποτελούν τη βάση για τον υπολογισμό της κυλινδρικότητας και της ομοαξονικότητας που παρουσιάζονται στη συνέχεια.

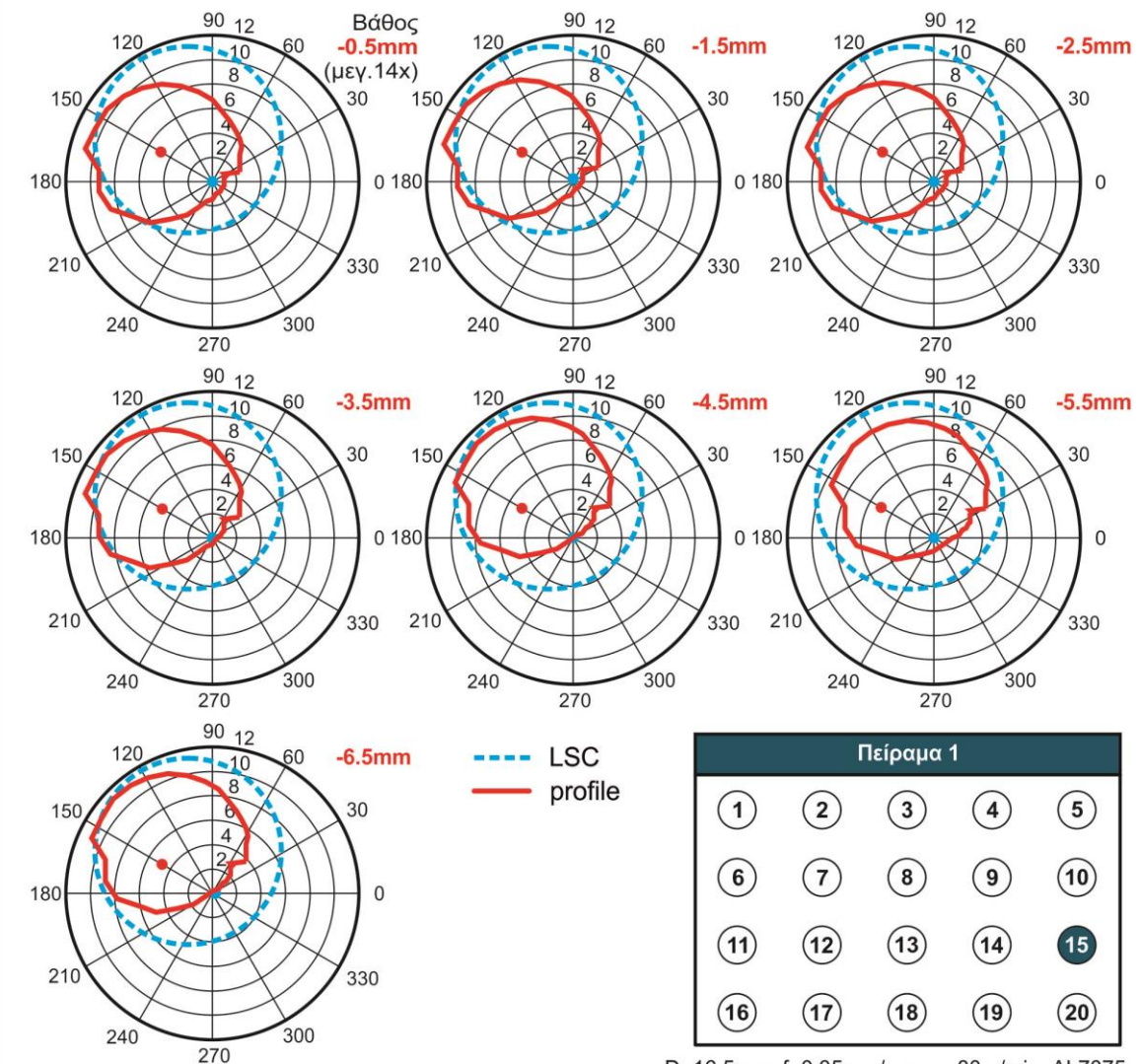
Επίσης παρουσιάζονται τα πολικά διαγράμματα που αντιστοιχούν σε όλα τα βάθη μέτρησης. Τόσο η κλίμακα μεγέθυνσης του προφίλ στο δισδιάστατο πολικό διάγραμμα, όσο και η αντίστοιχη κλίμακα μεγέθυνσης της τρισδιάστατης αναπαράστασης, επιλέγονται αυτόματα κάθε φορά με βάση τους κανόνες απεικόνισης του προτύπου ISO4291. Με μπλε χρώμα στο διάγραμμα απεικονίζεται το θεωρητικό κέντρο και το μετρούμενο προφίλ της οπής σε μεγέθυνση, ενώ με κόκκινο χρώμα απεικονίζεται ο κύκλος ελαχίστων τετραγώνων και το αντίστοιχο κέντρο του.

Στο σχήμα 4.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ενός πειράματος. Στο συγκεκριμένο πείραμα υπήρξε έντονη ταλαντωτική συμπεριφορά του εργαλείου. Αυτό απεικονίζεται στη μετρημένη οπή. Στην αναπαράσταση της τρισδιάστατης οπής παρατηρούνται δύο κορυφές οι οποίες φαίνονται και στο πολικό διάγραμμα. Φαίνεται ότι οι δύο κορυφές δεν εξομαλύνονται που σημαίνει ότι καθώς το εργαλείο εισχωρούσε στο τεμάχιο η ταλάντωση παρέμεινε μεγάλη με αποτέλεσμα να μην εξομαλυνθούν οι κορυφές. Επίσης, παρατηρείται ότι οι τιμές της ομοκεντρικότητας σε συνάρτηση με το βάθος μειώνονται σταδιακά που είναι αποτέλεσμα της έκκεντρης εισχώρησης του εργαλείου στο τεμάχιο. Η μέγιστη τιμή φτάνει τα 1.49 mm, τιμή αρκετά μεγάλη που παρατηρείται στην είσοδο του εργαλείου στο τεμάχιο και η μικρότερη είναι 1.22 μ m στο τέλος της οπής.

3D Απεικόνιση Οπής, Κυκλικότητα, Απόκλιση RMS, Ομοκεντρικότητα



Αποκλίσεις σε συγκεκριμένα βάθη μέτρησης



Σχήμα 4.3 Αποτελέσματα πειράματος

Στο σχήμα 4.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ενός ακόμα πειράματος. Στο συγκεκριμένο πείραμα παρατηρείται μια σταδιακή αύξηση των αποκλίσεων οι οποίες μεγιστοποιούνται στα τελευταία δύο επίπεδα της οπής και αγγίζουν τα 900 μm . Για βάθος 3.5 mm παρατηρείται αύξηση των αποκλίσεων από τη θεωρητική ακτίνα των 6 mm. Η μέγιστη τιμή της κυκλικότητας παρατηρείται σε βάθος 2.5 mm και 5.5 mm και φτάνει τα 500 μm . Οι τιμές της ομοκεντρικότητας είναι χαμηλές αποτέλεσμα της έκκεντρης εισχώρησης του εργαλείου στο τεμάχιο.

Στο σχήμα 4.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ενός ακόμα πειράματος. Στην τρισδιάστατη αναπαράσταση της οπής παρατηρείται ότι υπάρχει μία κορυφή η οποία έχει μέγιστη απόκλιση 460 μm από τον κύκλο των ελαχίστων τετραγώνων στο τελευταίο επίπεδο μέτρησης. Παρατηρείται επίσης ότι η κορυφή δεν εξομαλύνθηκε στη διάρκεια της κοπής αλλά παρέμεινε σε όλα τα επίπεδα. Η ομοκεντρικότητα των διαδοχικών προφίλ κυμαίνεται σε σχετικά μικρά επίπεδα για τις μεταξύ τους τιμές με τη μέγιστη να ανέρχεται στα 380 μm στην είσοδο της οπής.

Αναφορικά με την πρόβλεψη της κυλινδρικότητας παρατηρείται η μέγιστη απόκλιση της σε όλα τα πειράματα για την οπή που έγινε με το εργαλείο διαμέτρου 16.5 mm, πρόωση των 0.35 mm/rev και ταχύτητα κοπής 80 m/min. Στην περίπτωση αυτή εμφανίζεται η μεγαλύτερη ταλαντωτική συμπεριφορά του εργαλείου.

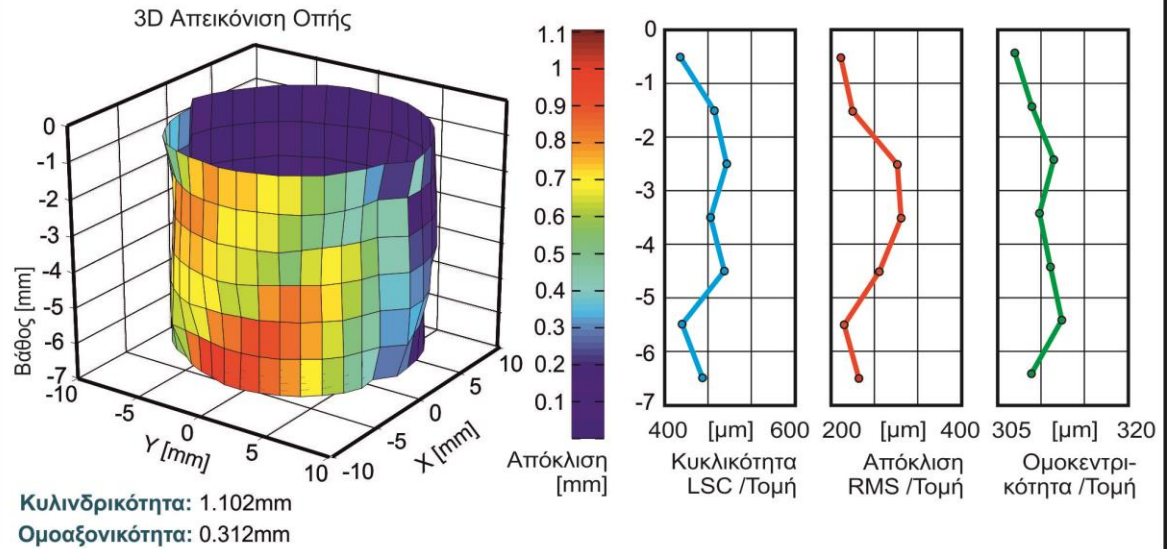
Η καλύτερη απόδοση της κυλινδρικότητας εμφανίζεται στο πείραμα που έγινε με το εργαλείο διαμέτρου 12 mm, πρόωση 0.25 mm/rev και ταχύτητα κοπής 40 m/min όπου τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της οπής παραμένουν όλα σε καλά επίπεδα.

Αντίστοιχα με την πρόβλεψη της ομοαξονικότητας παρατηρείται η μέγιστη τιμή της ανάμεσα σε όλα τα πειράματα για την οπή που έγινε με το εργαλείο διαμέτρου 16.5 mm, πρόωση των 0.35 mm/rev και ταχύτητα κοπής 80 m/min. Λόγω της έντονης ταλάντωσης του εργαλείου παρατηρείται η τόσο μεγάλη τιμή της ομοαξονικότητας.

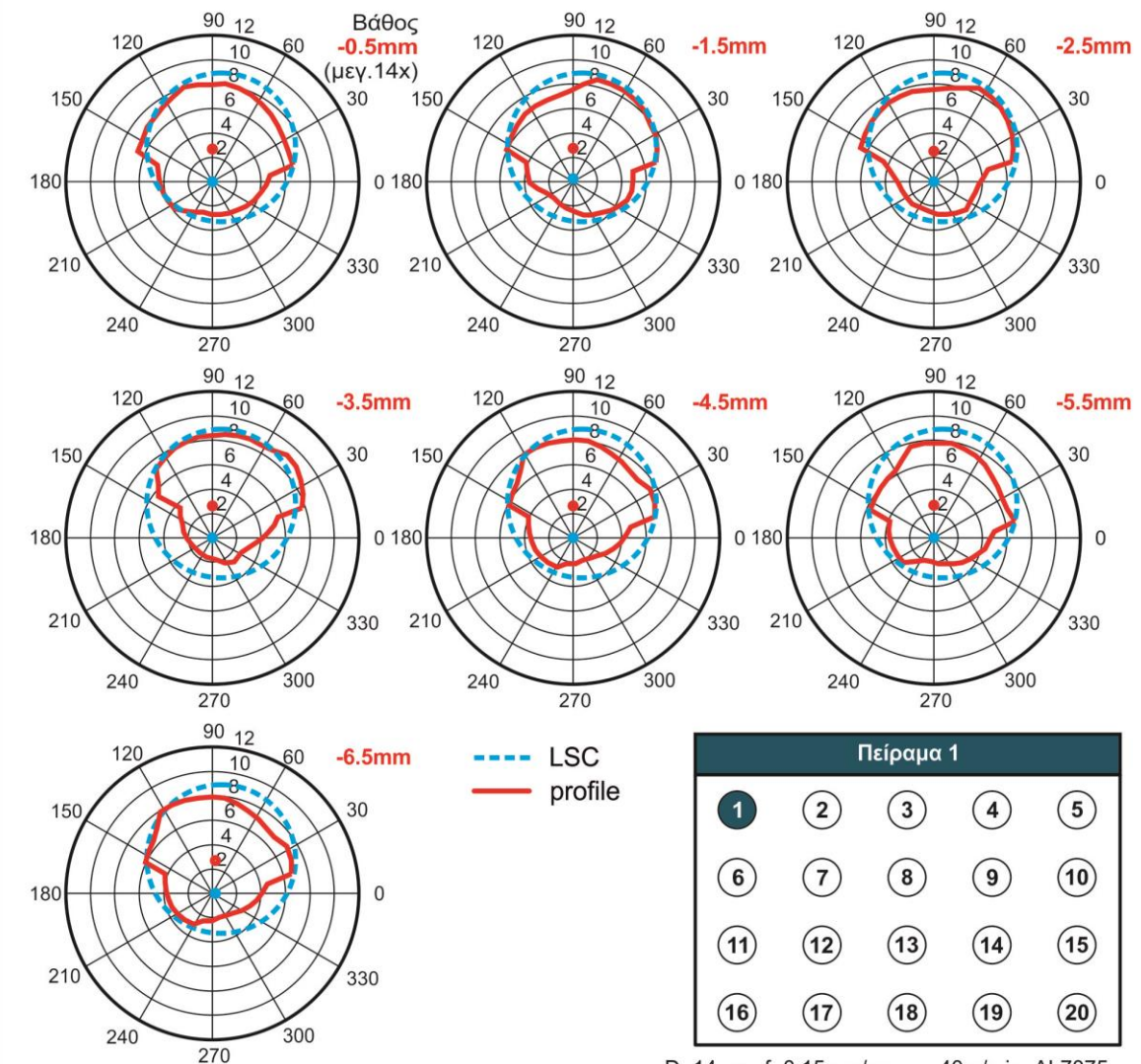
Ενώ η καλύτερη απόδοση της ομοαξονικότητας εμφανίζεται στο πείραμα που έγινε με το εργαλείο διαμέτρου 14 mm, πρόωση 0.35 mm/rev και ταχύτητα κοπής 80 m/min.

Μια αξιοσημείωτη παρατήρηση είναι ότι όσο μικρότερο είναι το μέγεθος του εργαλείου και όσο μικρότερη η ταχύτητα κοπής τόσο καλύτερη ποιότητα οπών παίρνουμε.

3D Απεικόνιση Οπής, Κυκλικότητα, Απόκλιση RMS, Ομοκεντρικότητα

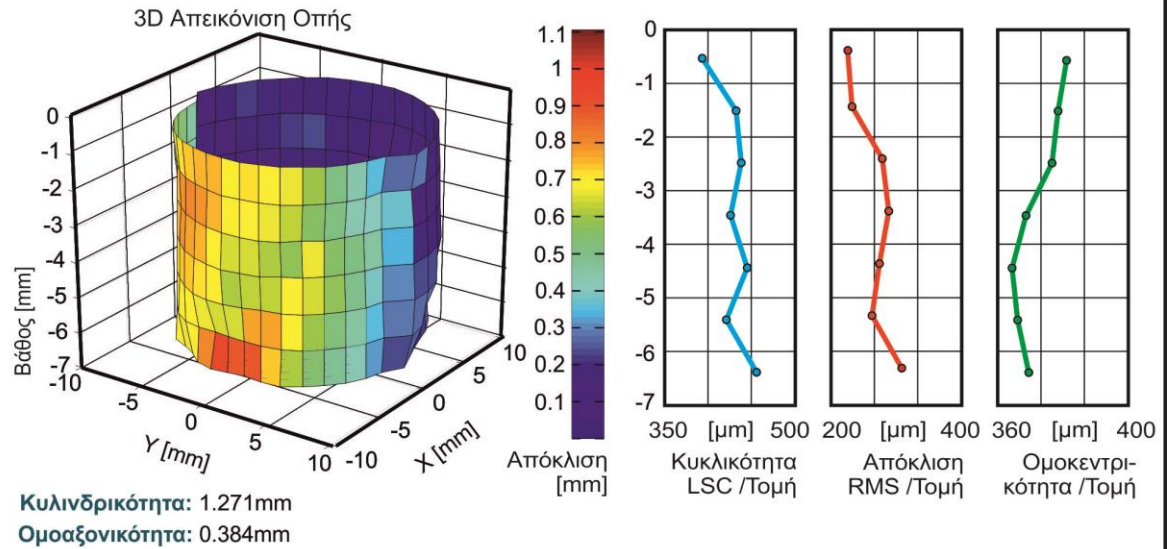


Αποκλίσεις σε συγκεκριμένα βάθη μέτρησης

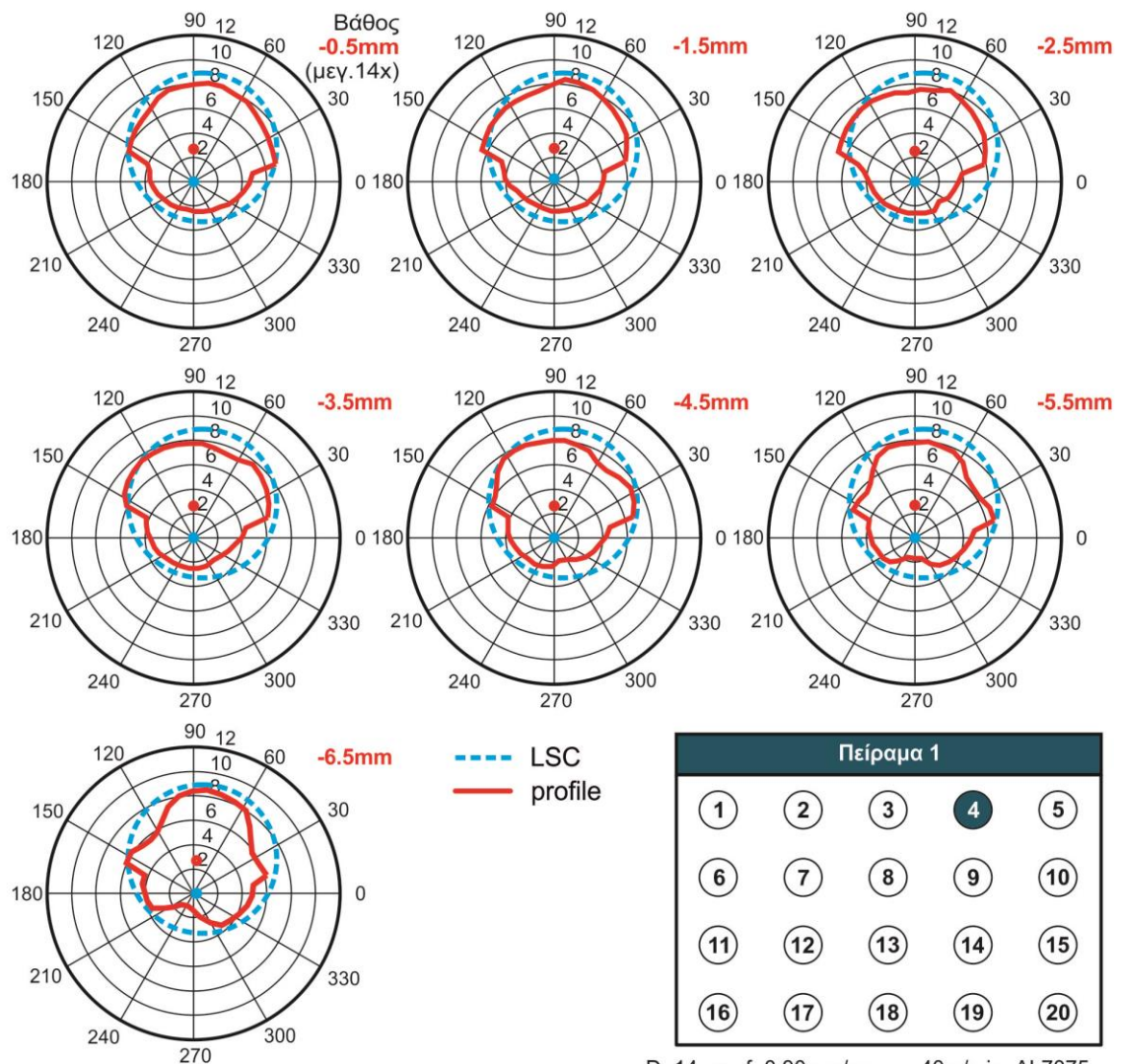


Σχήμα 4.4 Αποτελέσματα Πειράματος

3D Απεικόνιση Οπής, Κυκλικότητα, Απόκλιση RMS, Ομοκεντρικότητα

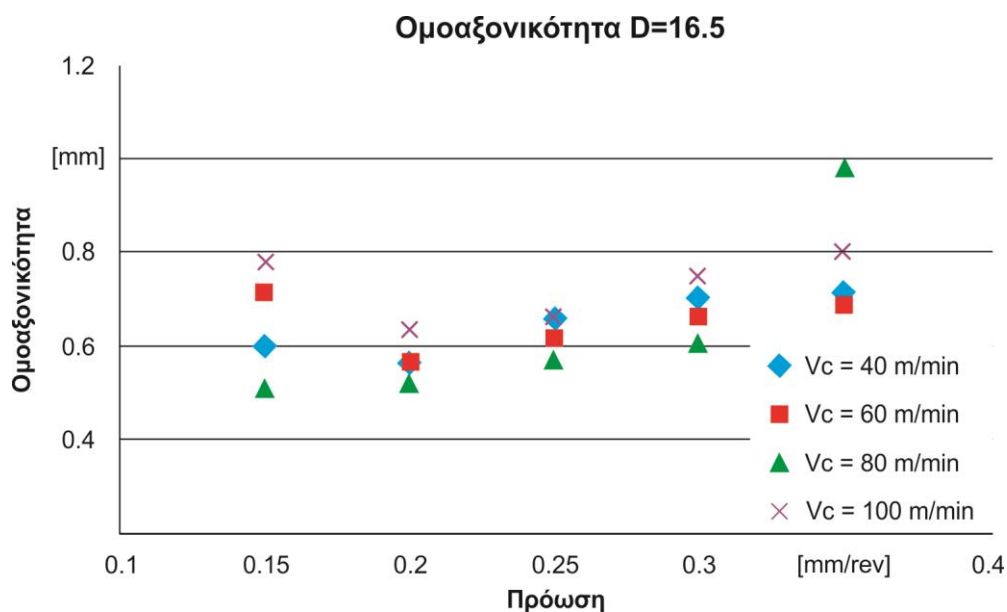


Αποκλίσεις σε συγκεκριμένα βάθη μέτρησης



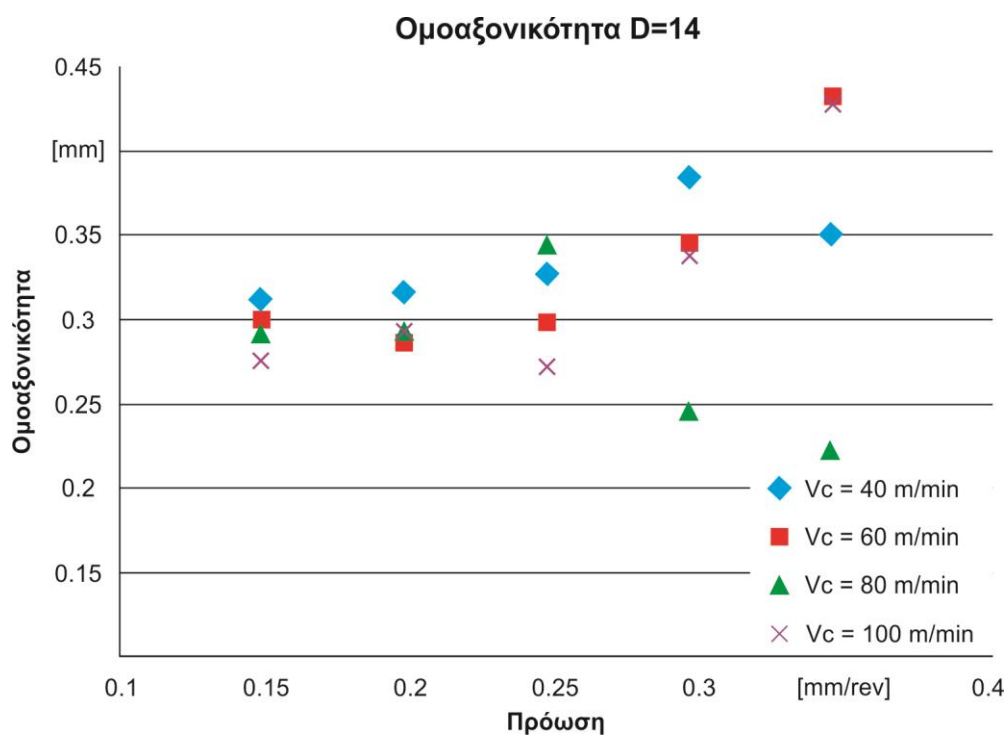
Σχήμα 4.5 Αποτελέσματα Πειράματος

Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα ομοαξονικότητας σε συνάρτηση με την πρόωση και την ταχύτητα κοπής αλλά και τα διαγράμματα κυλινδρικότητας σε συνάρτηση με την πρόωση και την ταχύτητα κοπής.



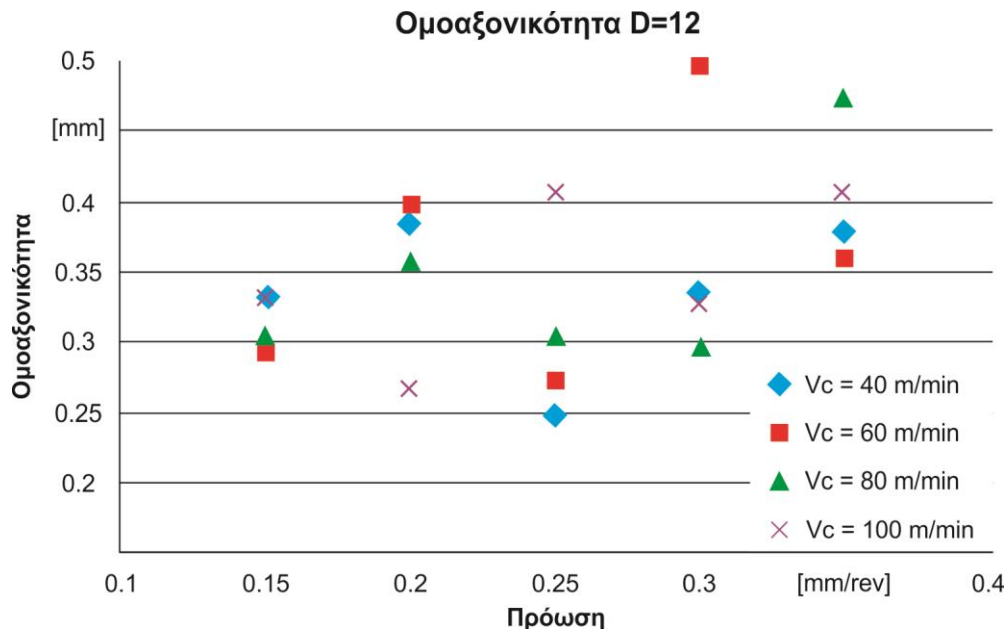
Σχήμα 4.6 Διάγραμμα Ομοαξονικότητας με κοπτικό διαμέτρου 16.5mm

Στο σχήμα 4.6 παρατηρείται ότι για τις τιμές 40, 60, 100 της ταχύτητας κοπής είναι κακή πρόωση η 0.15. Για τιμή 80 της ταχύτητας κοπής παρατηρείται ότι η τιμή της ομοαξονικότητας ξεκινάει από τη χαμηλότερη τιμή και σταδιακά αυξάνει φτάνοντας τη μέγιστη τιμή της στη μεγαλύτερη πρόωση και στη μεγαλύτερη ταχύτητα κοπής.



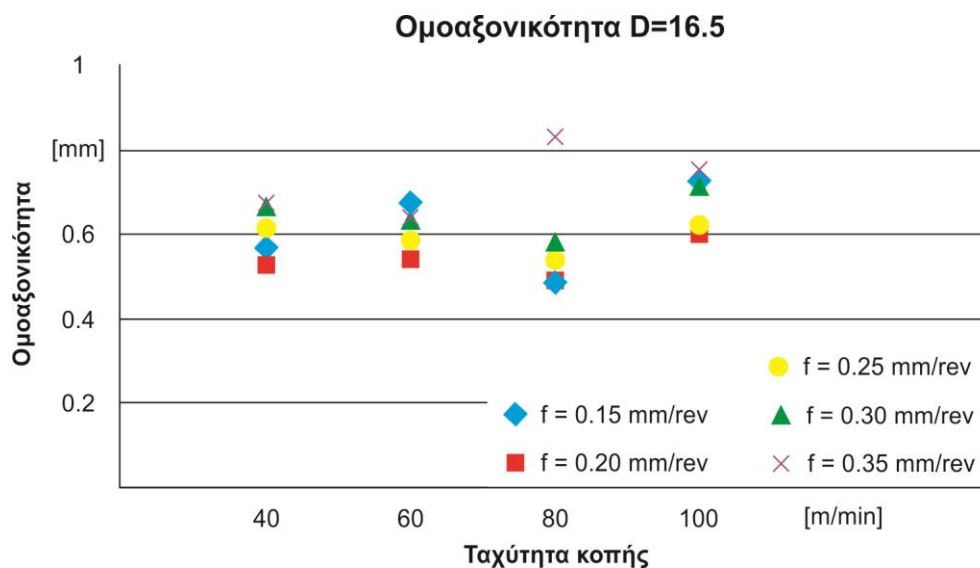
Σχήμα 4.7 Διάγραμμα Ομοαξονικότητας με κοπτικό διαμέτρου 14mm

Στο σχήμα 4.7 παρατηρείται ότι για ταχύτητα κοπής 80 είναι καλύτερες οι προώσεις των 0.30 και 0.35. Μεγαλύτερη πρόωση φαίνεται ότι βελτιώνει την κοπή. Ενώ στις ταχύτητες κοπής 40, 60 και 100 φαίνεται η λογική σειρά των τιμών η οποία αυξάνει όσο μεγαλώνουν οι προώσεις. Με εξαίρεση για την ταχύτητα κοπής 100 και πρόωση 0.25 που παρατηρείται η μικρότερη τιμή της.



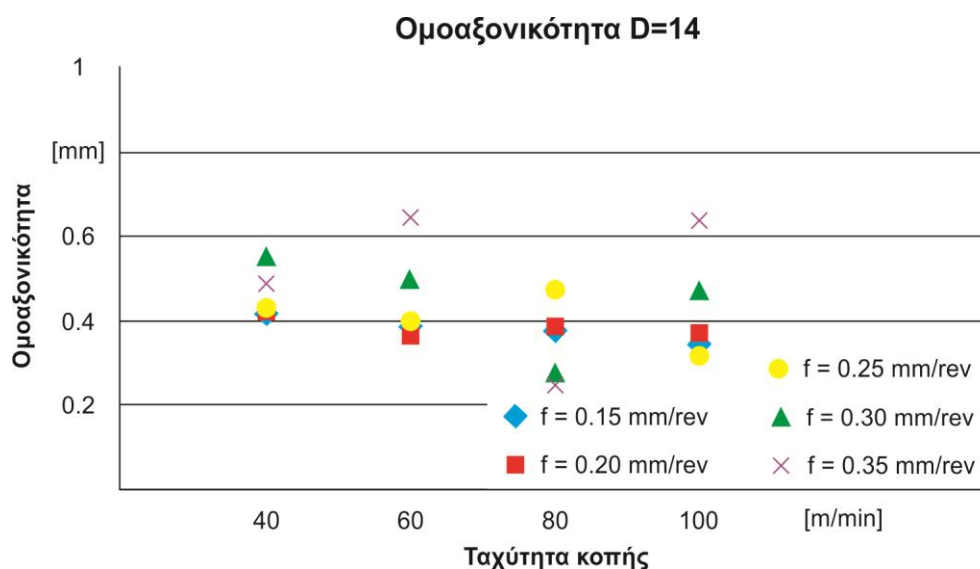
Σχήμα 4.8 Διάγραμμα Ομοαξονικότητας με κοπτικό διαμέτρου 12mm

Στο σχήμα 4.8 παρατηρείται ότι για κάθε τιμή της ταχύτητας κοπής παρουσιάζεται καμπύλη με ανώτατα και κατώτατα σημεία. Αυτό σημαίνει ότι δίνονται χαμηλές τιμές ομοαξονικότητας σε παραπάνω από ένα σημεία. Κυρίως φαίνεται ότι για πρόωση 0.25 παρατηρείται η χαμηλότερη τιμή των 40 και 60 ενώ για τη μεγαλύτερη ταχύτητα κοπής παρατηρείται η χαμηλότερη τιμή στα 0.20 σε πρόωση.



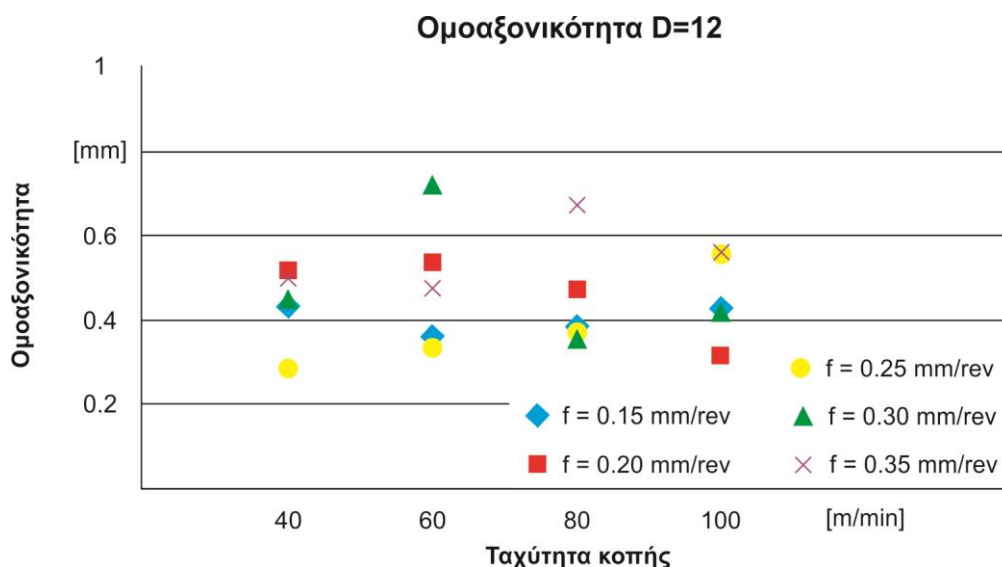
Σχήμα 4.9 Διάγραμμα Ομοαξονικότητας με κοπτικό διαμέτρου 16.5mm

Στο σχήμα 4.9 παρατηρείται η χαμηλότερη τιμή της ομοαξονικότητας από όλες τις προώσεις στην ταχύτητα κοπής 80, με μόνη εξαίρεση την μεγαλύτερη πρόωση 0.35 όπου η χαμηλότερη της τιμή εμφανίζεται στην ταχύτητα κοπής 60. Το συμπέρασμα είναι ότι για το εργαλείο κοπής 16.5mm η καλύτερη ταχύτητα κοπής είναι 80m/min.

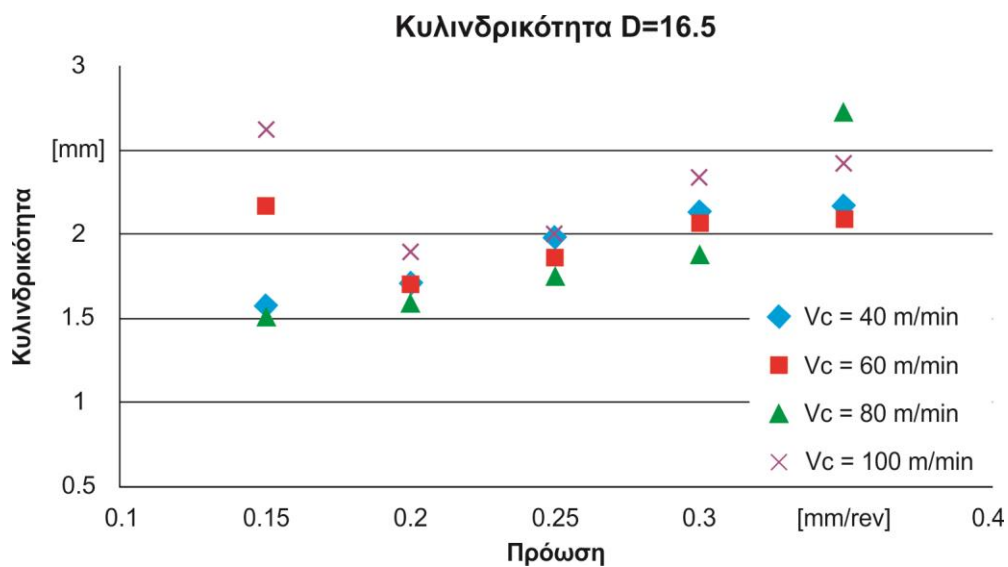


Σχήμα 4.10 Διάγραμμα Ομοαξονικότητας με κοπτικό διαμέτρου 14mm

Στο σχήμα 4.10 παρατηρείται ότι για τις μεγαλύτερες προώσεις 0.30 και 0.35 φαίνονται οι μικρότερες τιμές τους για ταχύτητα κοπής 80. Το συμπέρασμα είναι ότι όταν έχουμε μεγάλες τιμές πρόωσης τότε η καλύτερη ταχύτητας κοπής είναι στα 80m/min. Σε αντίθεση με τις μικρές προώσεις όπου παρατηρούνται οι μικρότερες τιμές της ομοαξονικότητας για ταχύτητα κοπής 60m/min.

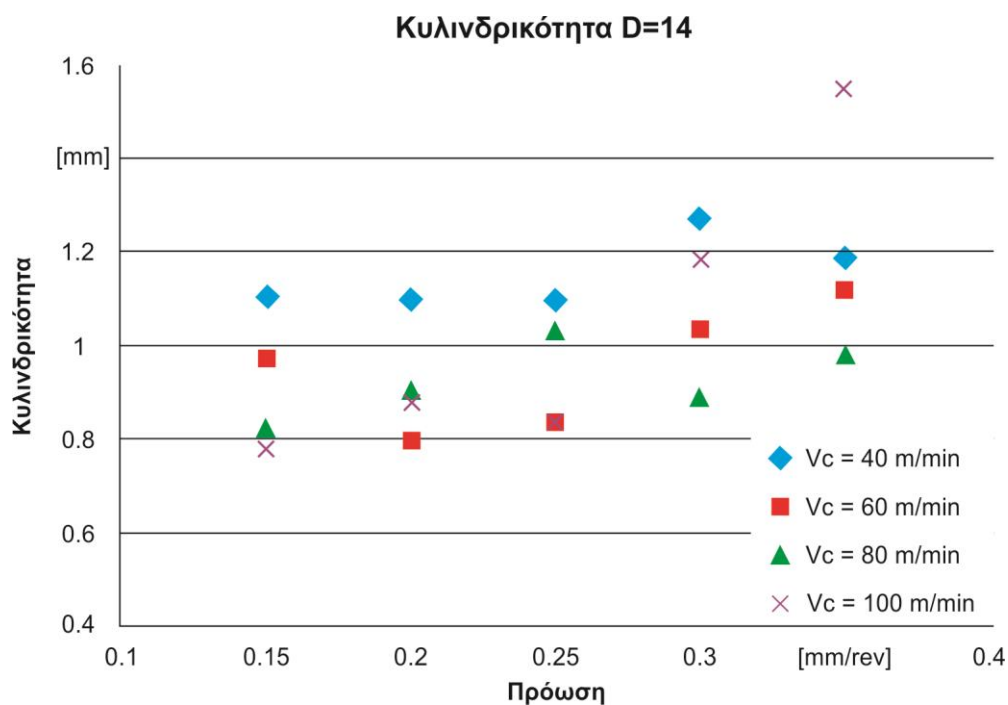


Σχήμα 4.11 Διάγραμμα Ομοαξονικότητας με κοπτικό διαμέτρου 12mm

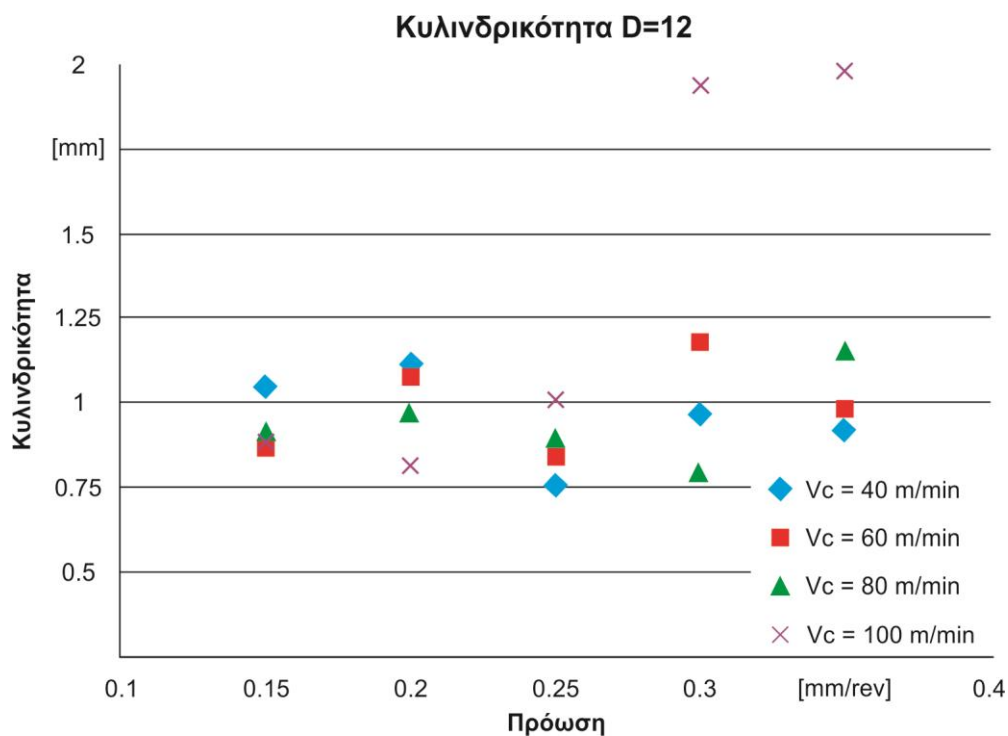


Σχήμα 4.12 Διάγραμμα Κυλινδρικότητας με κοπτικό διαμέτρου 16.5mm

Στο σχήμα 4.12 παρατηρείται ότι για τιμές ταχύτητας κοπής 40 και 80 έχουμε αύξηση της τιμής της κυλινδρικότητας όσο αυξάνεται και η πρόωση σε αντίθεση με τις υπόλοιπες ταχύτητες κοπής όπου οι τιμές της κυλινδρικότητας κινούνται πάνω σε καμπύλη με αυξομειώσεις των μέγιστων και ελάχιστων.

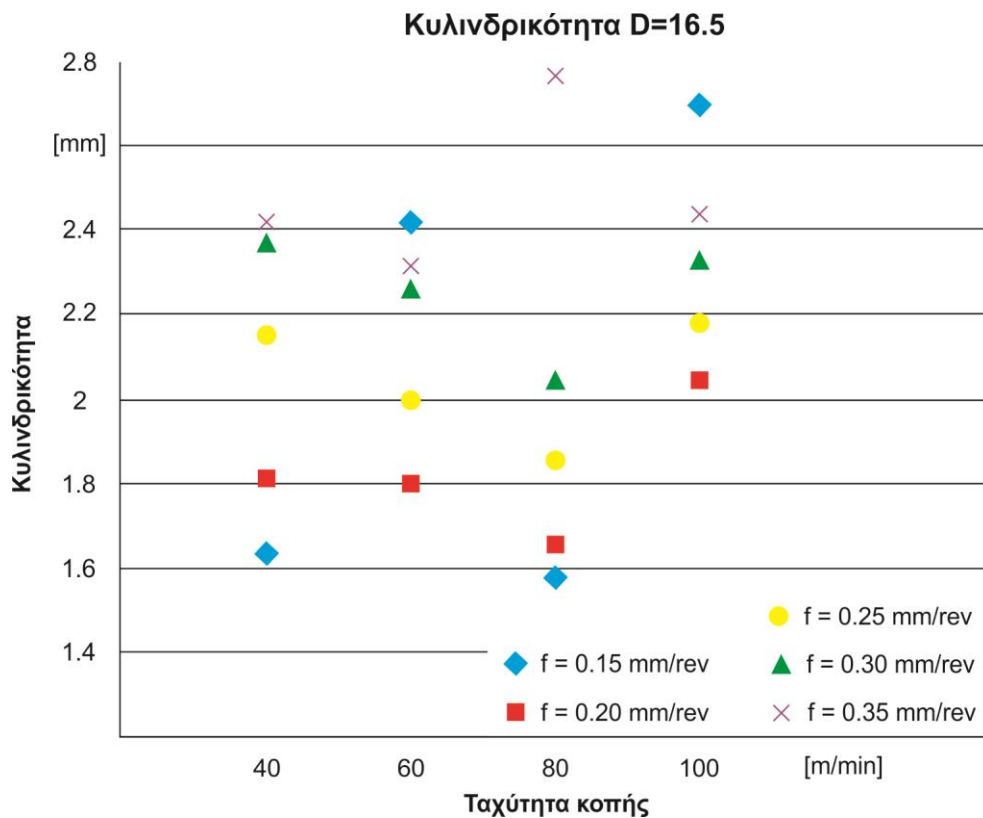


Σχήμα 4.13 Διάγραμμα Κυλινδρικότητας με κοπτικό διαμέτρου 14mm

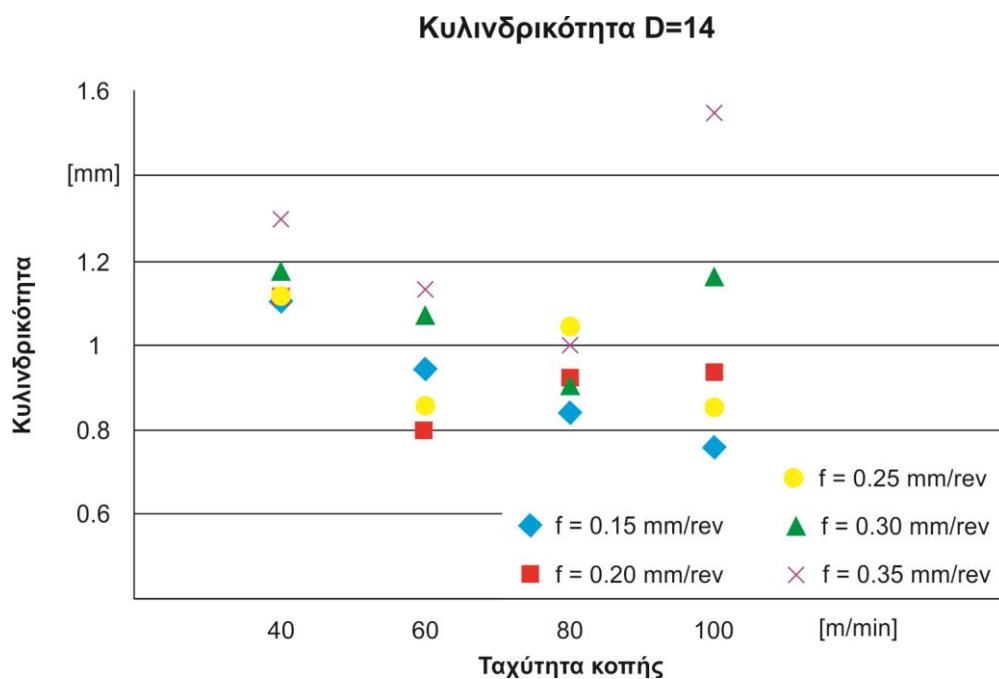


Σχήμα 4.14 Διάγραμμα Κυλινδρικότητας με κοπτικό διαμέτρου 12mm

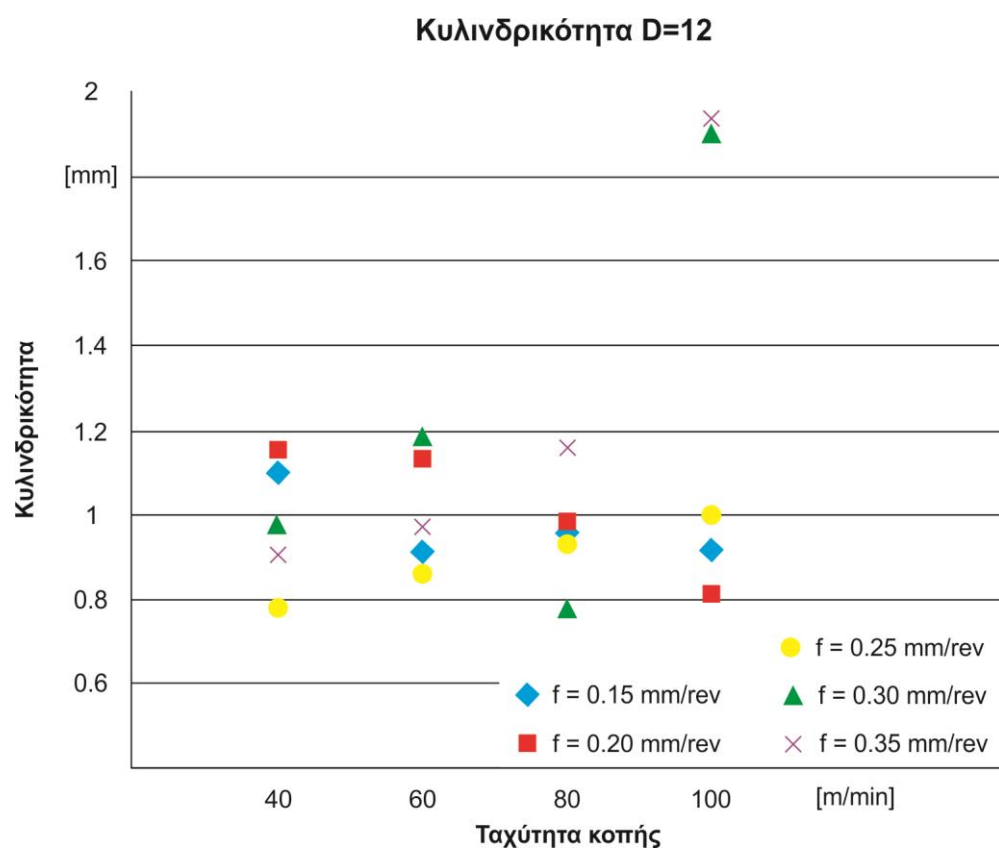
Στο σχήμα 4.14 παρατηρείται ότι για τιμή της ταχύτητας κοπής 100 η κυλινδρική παρουσιάζει μεγάλη απόκλιση στις τιμές της όταν η πρόωση είναι 0.30 και 0.35



Σχήμα 4.15 Διάγραμμα Κυλινδρικότητας με κοπτικό διαμέτρου 16.5mm



Σχήμα 4.16 Διάγραμμα Κυλινδρικότητας με κοπτικό διαμέτρου 14mm



Σχήμα 4.17 Διάγραμμα Κυλινδρικότητας με κοπτικό διαμέτρου 12mm

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Belis T., Antoniadis A., Drilling simulation with use of the finite elements method considering dynamic phenomena and cutting conditions optimization.
- [2] Gong, Y., Lin, C., and Ehmann, K. F., 2005, "Dynamics of initial penetration in drilling: part 2-motion models for drill skidding and wandering with experimental verification," *Journal of manufacturing science and engineering*, 127(2), pp. 289-297.
- [3] Katz, Z., and Poustie, A., 2001, "On the hole quality and drill wandering relationship," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 17(4), pp. 233-237.
- [4] Hamade, R., and Ismail, F., 2005, "A case for aggressive drilling of aluminum," *Journal of materials processing technology*, 166(1), pp. 86-97.
- [5] Standard, I., 2003, "ISO12180-2 Geometrical Product Specifications (GPS)-Cylindricity - Part 2: Specification operators," International Organization for Standardization.
- [6] Standard, I., 2003, "ISO12180-1: Geometrical product specifications (GPS) — Cylindricity Part 1: Terms, definitions and parameters of cylindrical form," International Organization for Standardization.
- [7] Standard, I., 2010, "ISO 286-2:2010 Geometrical product specifications (GPS) -- ISO code system for tolerances on linear sizes -- Part 2: Tables of standard tolerance classes and limit deviations for holes and shafts," international Organization for Standardization.
- [8] Cioboata, D., Palade, D., Abalaru, A., Stanciu, D., Savu, L., Logofatu, C., and Traistaru, F., "Considerations regarding evaluation of the accuracy assessment of the roundness."
- [9] Standard, I., 2006, "ISO-1101: Geometrical Product Specifications (GPS)-Geometrical tolerancing-Tolerances of form, orientation, location and run-out," International Organization for Standardization.
- [10] Bayly, P. V., Metzler, S. A., Schaut, A. J., and Young, K. A., 2001, "Theory of torsional chatter in twist drills: model, stability analysis and composition to test," *Journal of manufacturing science and engineering*, 123(4), pp. 552-561.
- [11] Roukema, J. C., and Altintas, Y., 2006, "Time domain simulation of torsional-axial vibrations in drilling," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(15), pp. 2073-2085.
- [12] Pirtini, M., and Lazoglu, I., 2005, "Forces and hole quality in drilling," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(11), pp. 1271-1281.
- [13] Standard, I., 2007, "DD CEN ISO TS 12781-1-2007 Geometrical product specifications (GPS) - Flatness Part 1 Vocabulary and parameters of flatness."
- [14] Standard, I., 2007, "DD CEN ISO TS 12781-2-2007 Geometrical Product Specifications (GPS) - Flatness Part 2 Specification operators."
- [15] Marquardt, D. W., 1963, "An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters," *Journal of the Society for Industrial & Applied Mathematics*, 11(2), pp. 431-441.

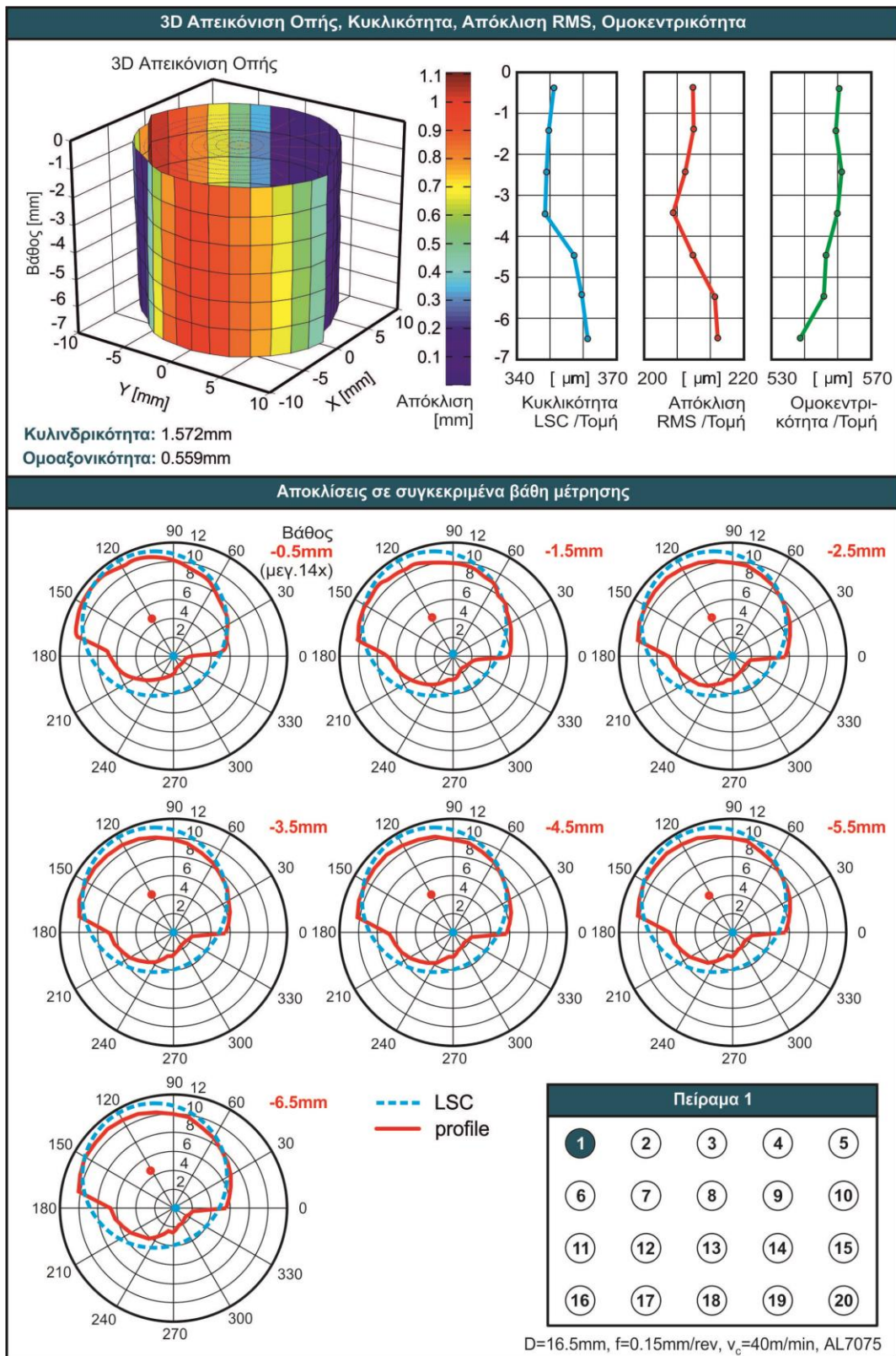
[16] Manual TR440_450

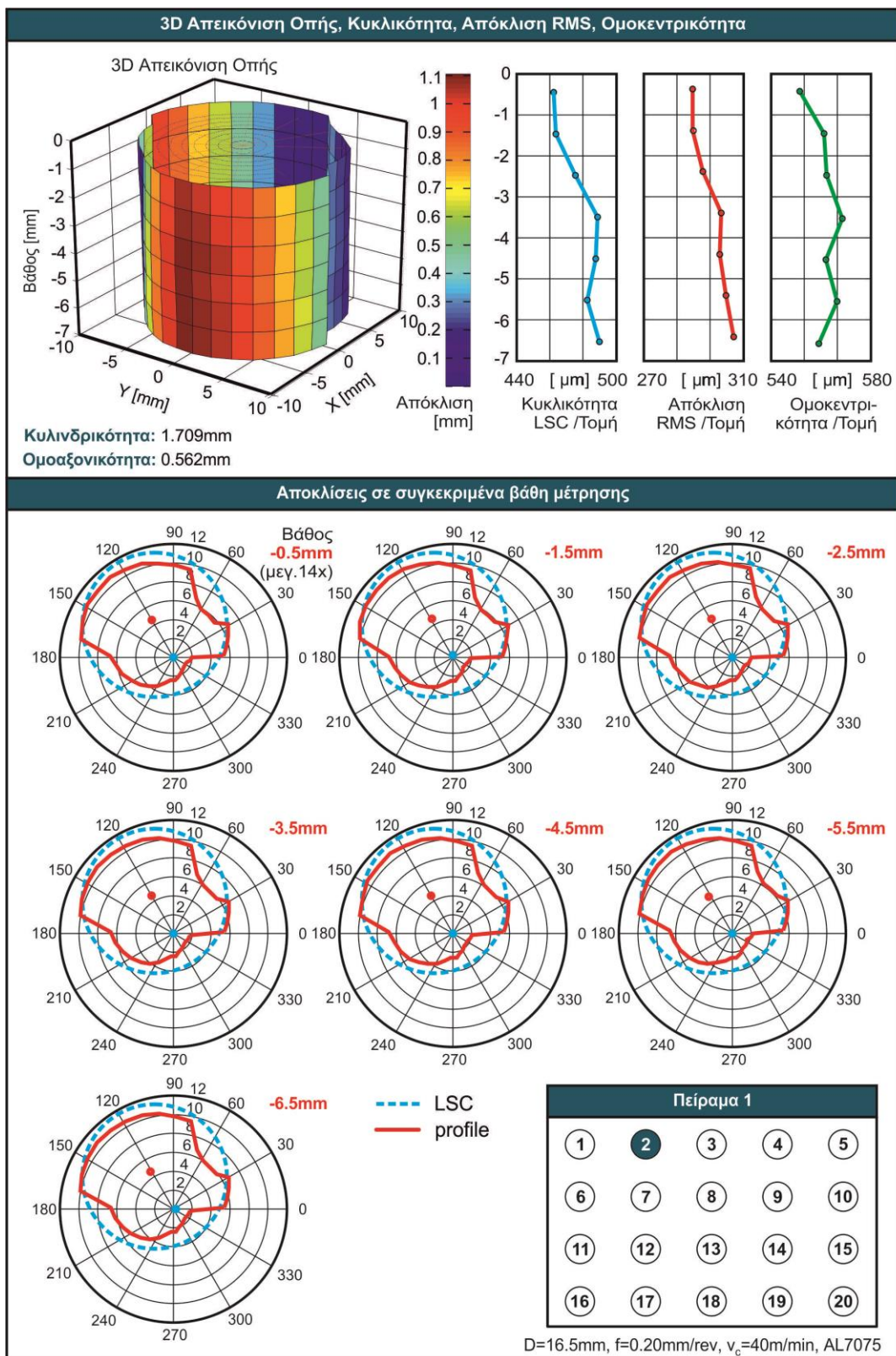
[17] Manual Brochure_Roundness_Booklet

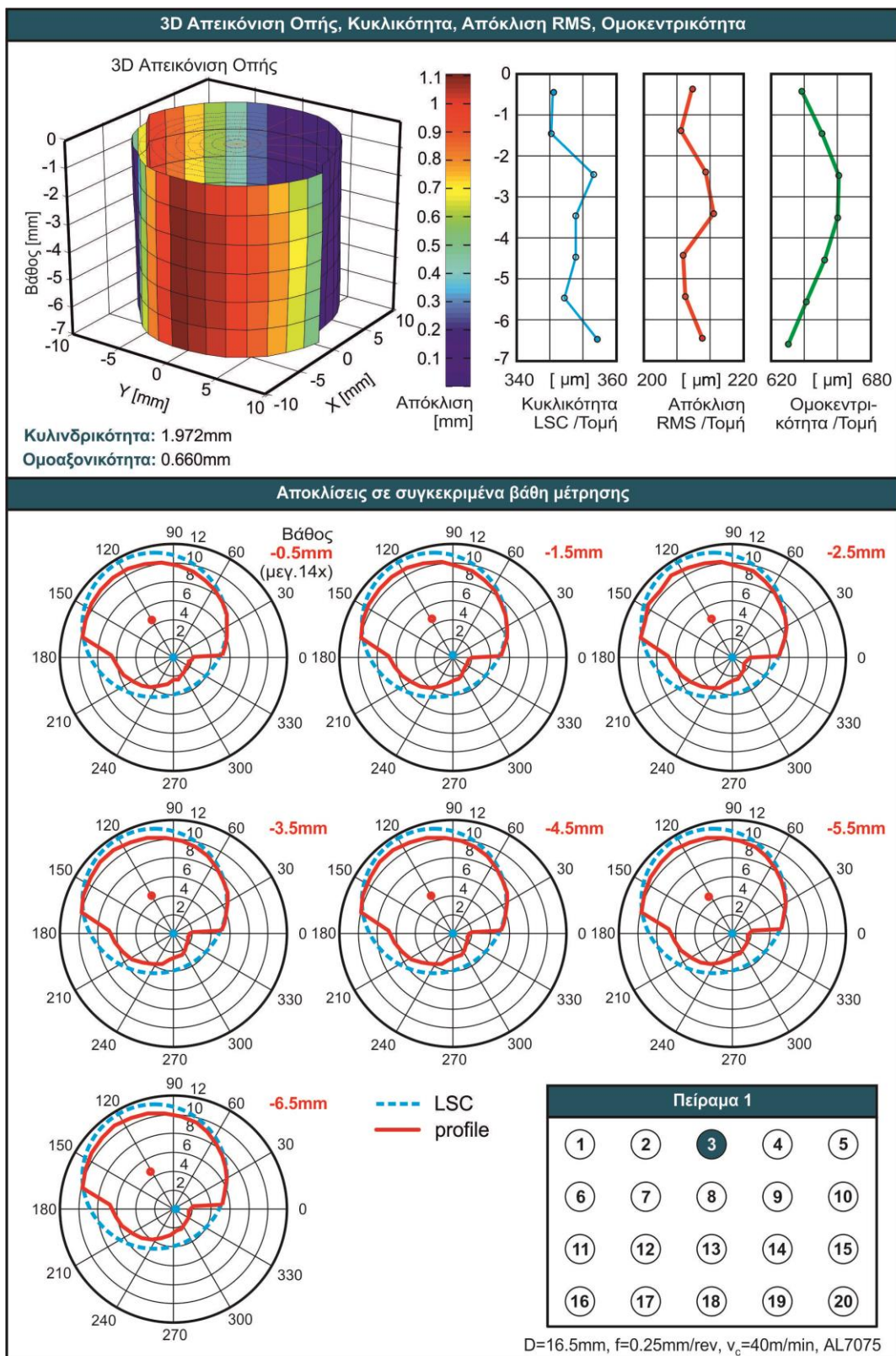
[18] Manual QuickGuide_Roundtest

[19] Manual SINUMERIK 840D sl/840D/840Di sl/840Di/810D Measuring cycles HMI sl

[20] Henrik S. Nielsen and Mark C. Malburg Corporate Metrology, Cummins Engine Company, Inc., Colombus, IN, USA, "Traceability and correlation in roundness measurement."

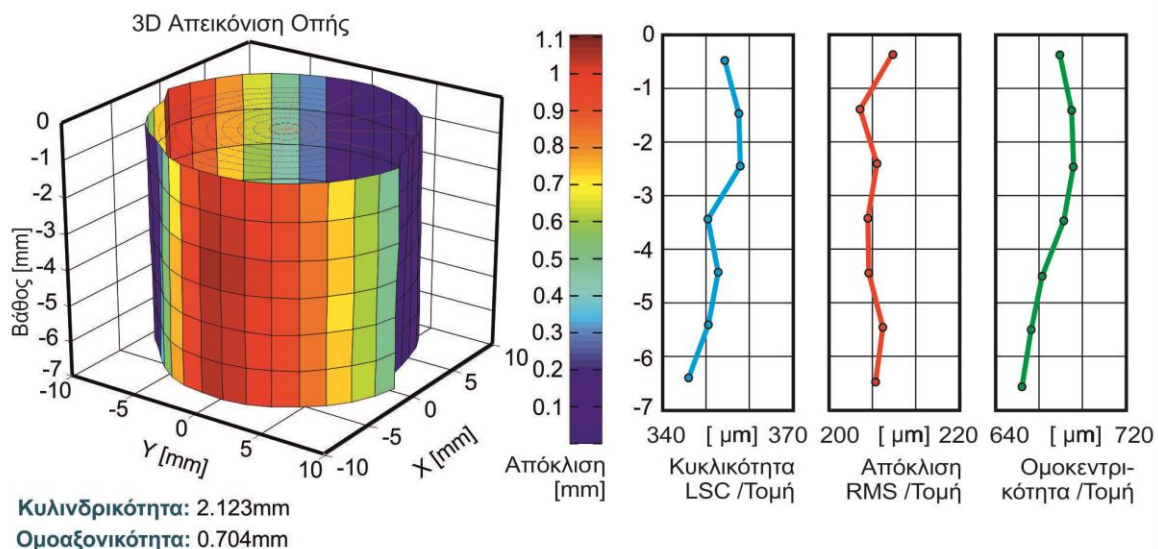




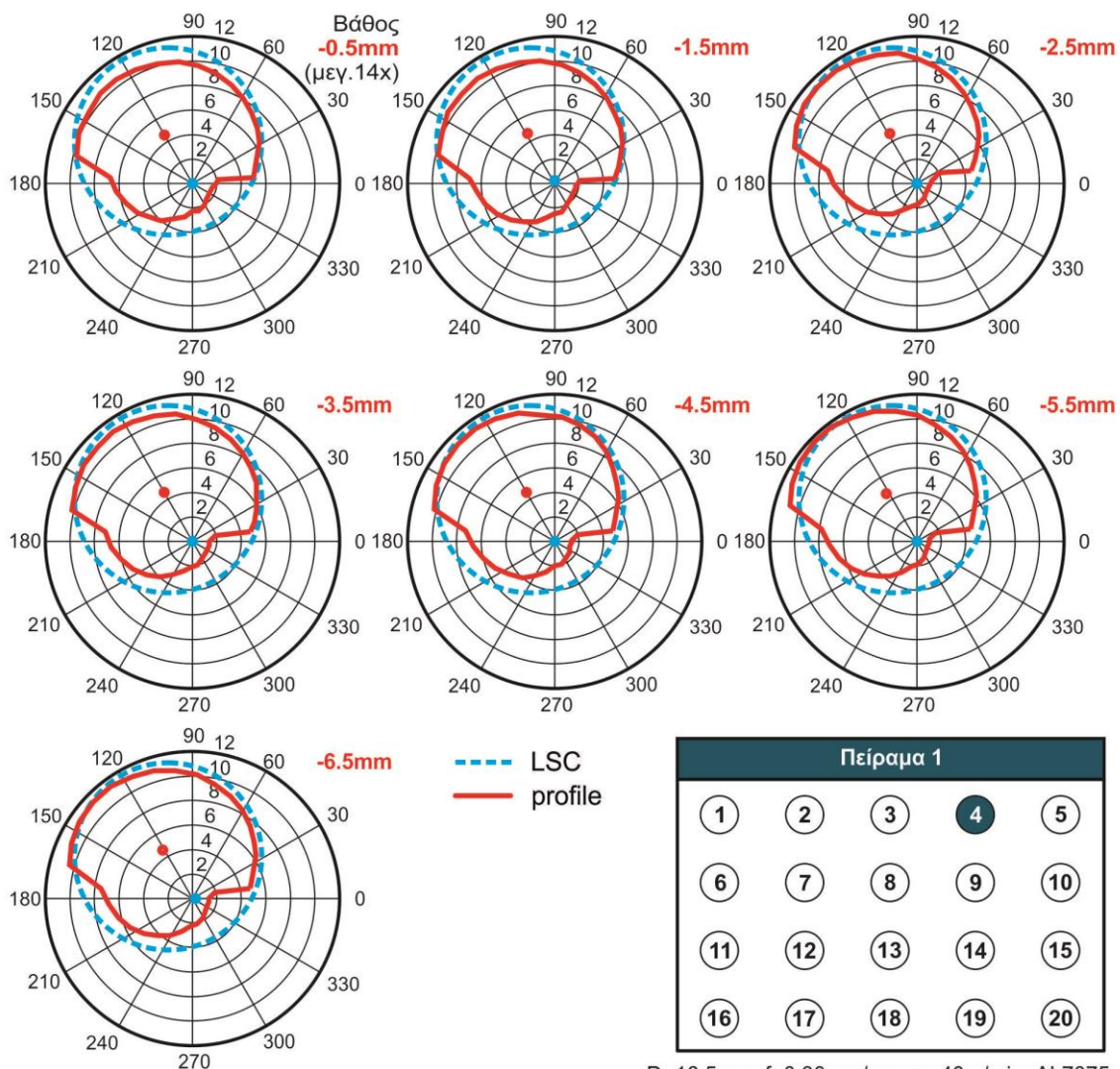




3D Απεικόνιση Οπής, Κυκλικότητα, Απόκλιση RMS, Ομοκεντρικότητα



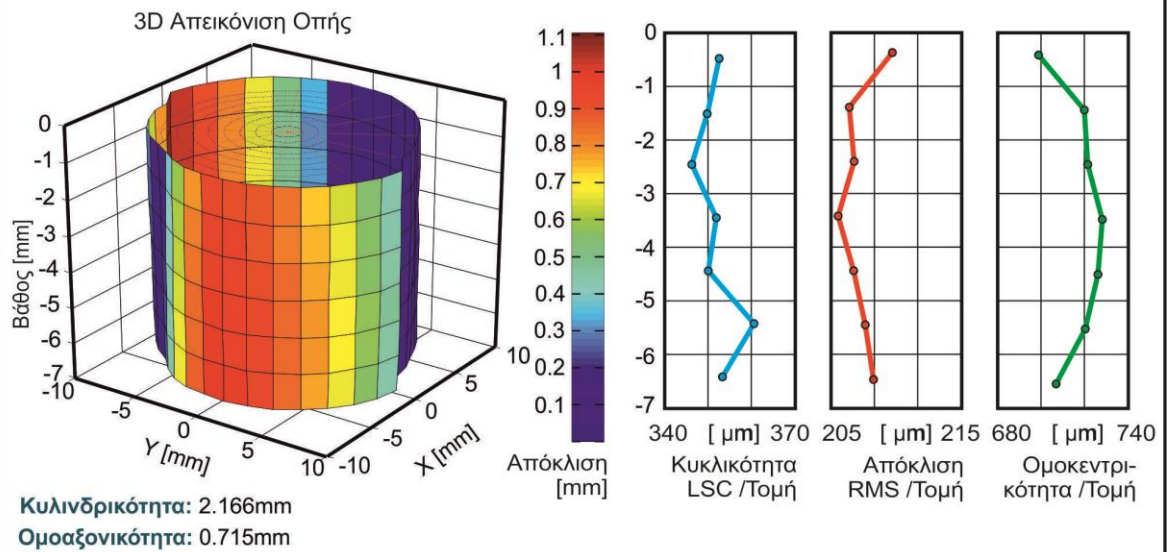
Αποκλίσεις σε συγκεκριμένα βάθη μέτρησης



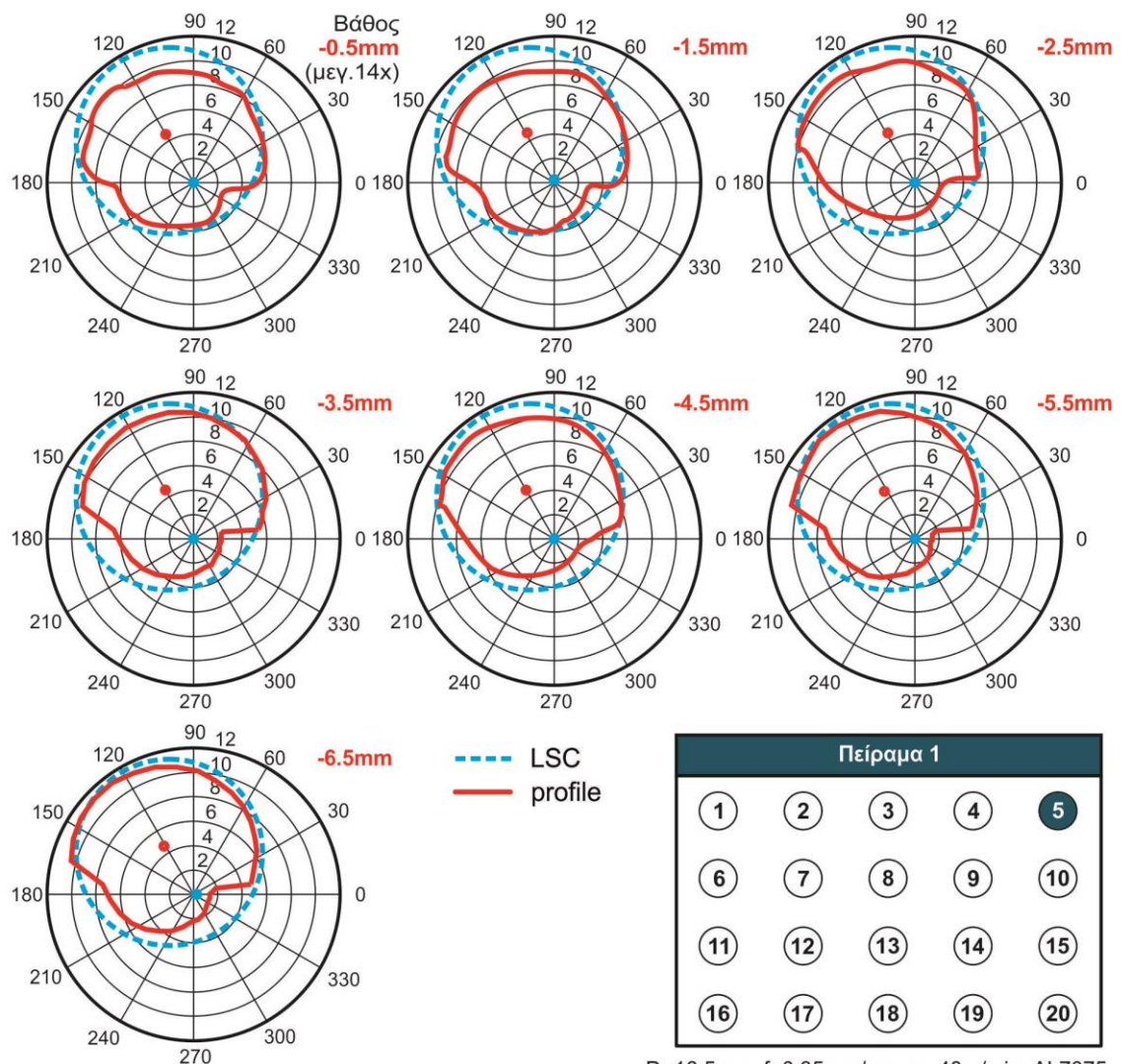
D=16.5mm, f=0.30mm/rev, v_c=40m/min, AL7075



3D Απεικόνιση Οπής, Κυκλικότητα, Απόκλιση RMS, Ομοκεντρικότητα



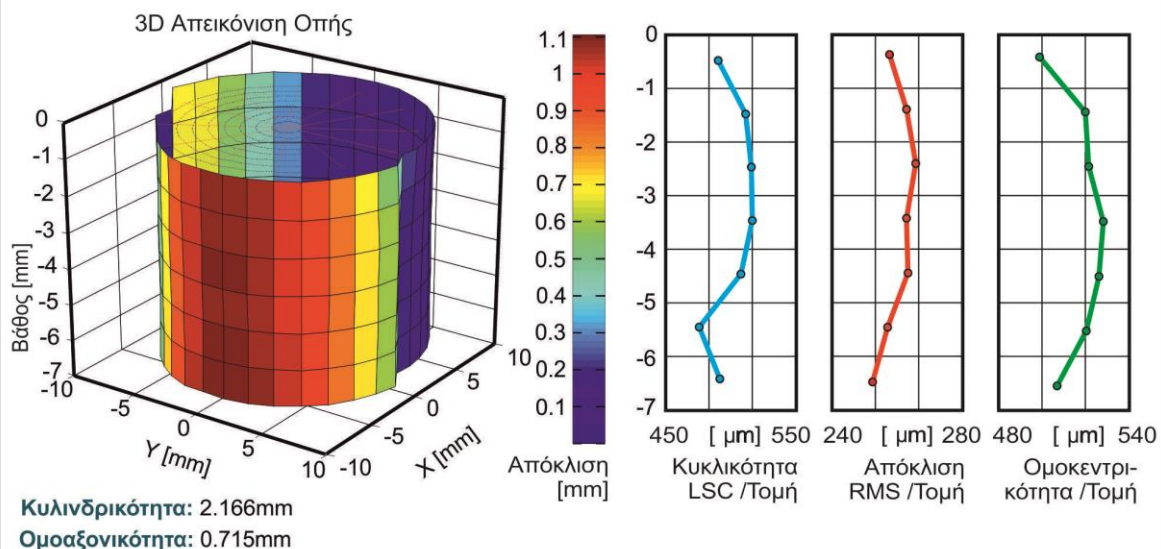
Αποκλίσεις σε συγκεκριμένα βάθη μέτρησης



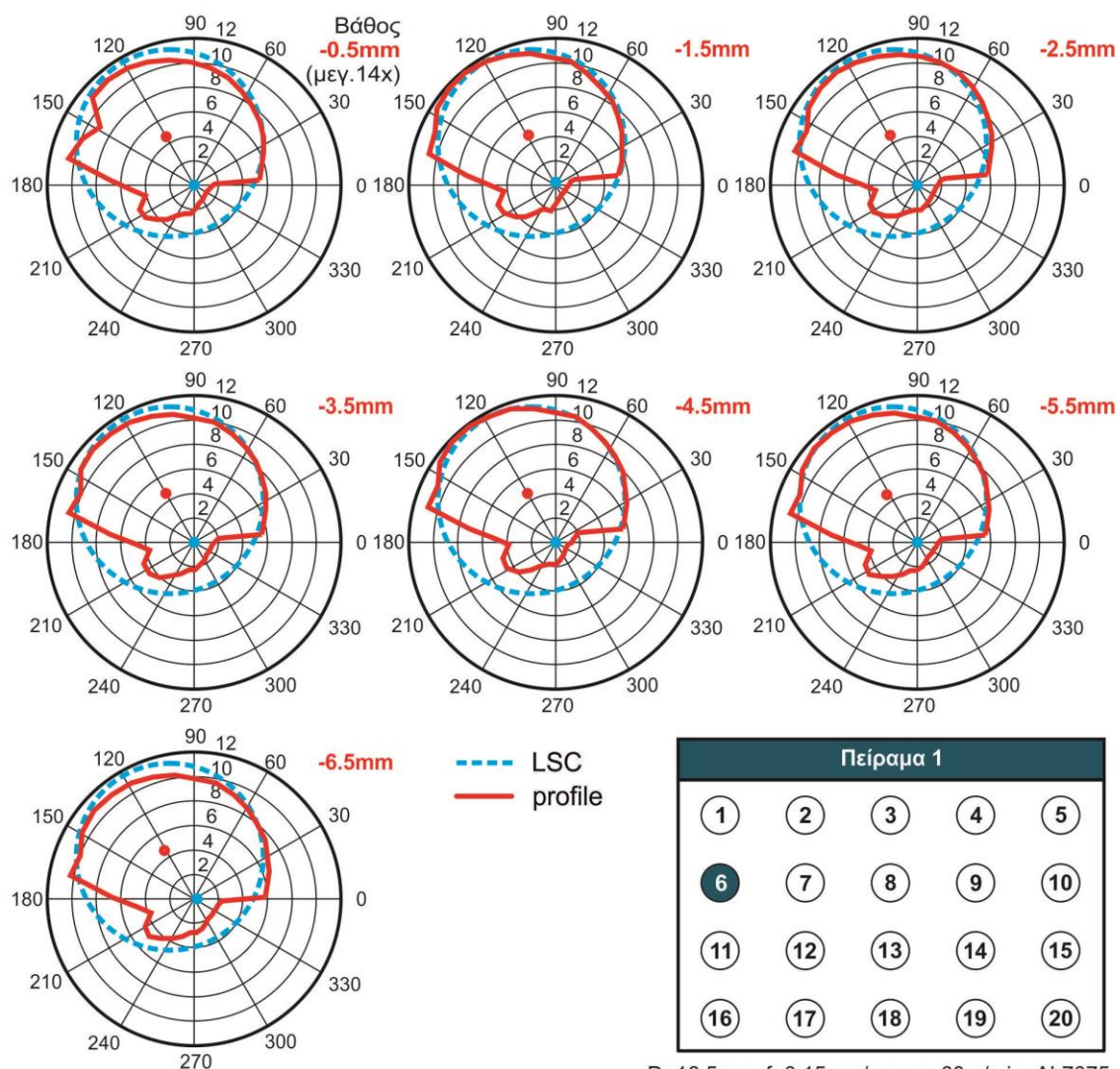
D=16.5mm, f=0.35mm/rev, v_c=40m/min, AL7075



3D Απεικόνιση Οπής, Κυκλικότητα, Απόκλιση RMS, Ομοκεντρικότητα



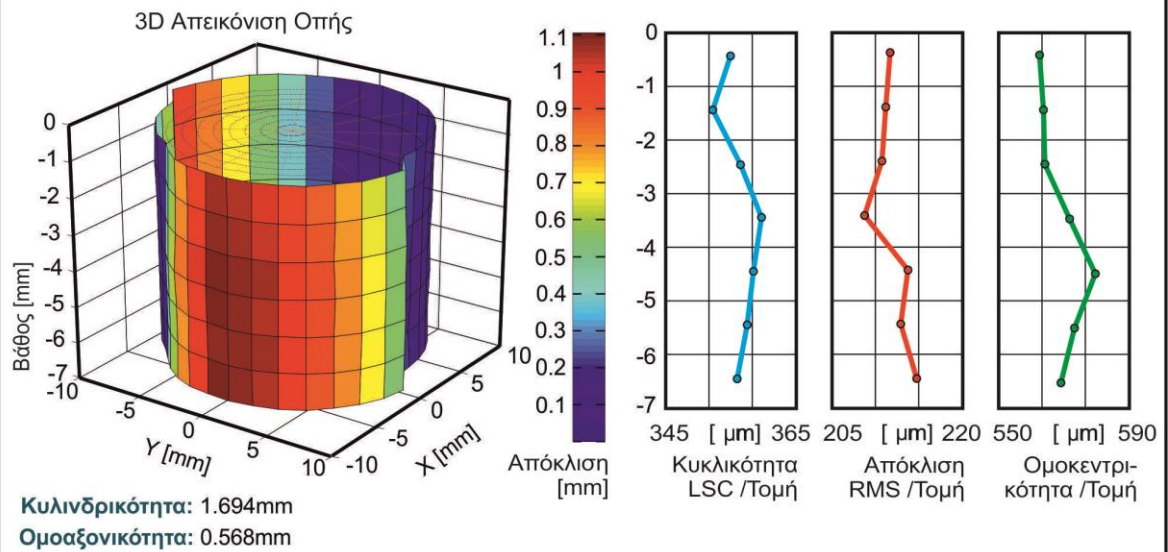
Αποκλίσεις σε συγκεκριμένα βάθη μέτρησης



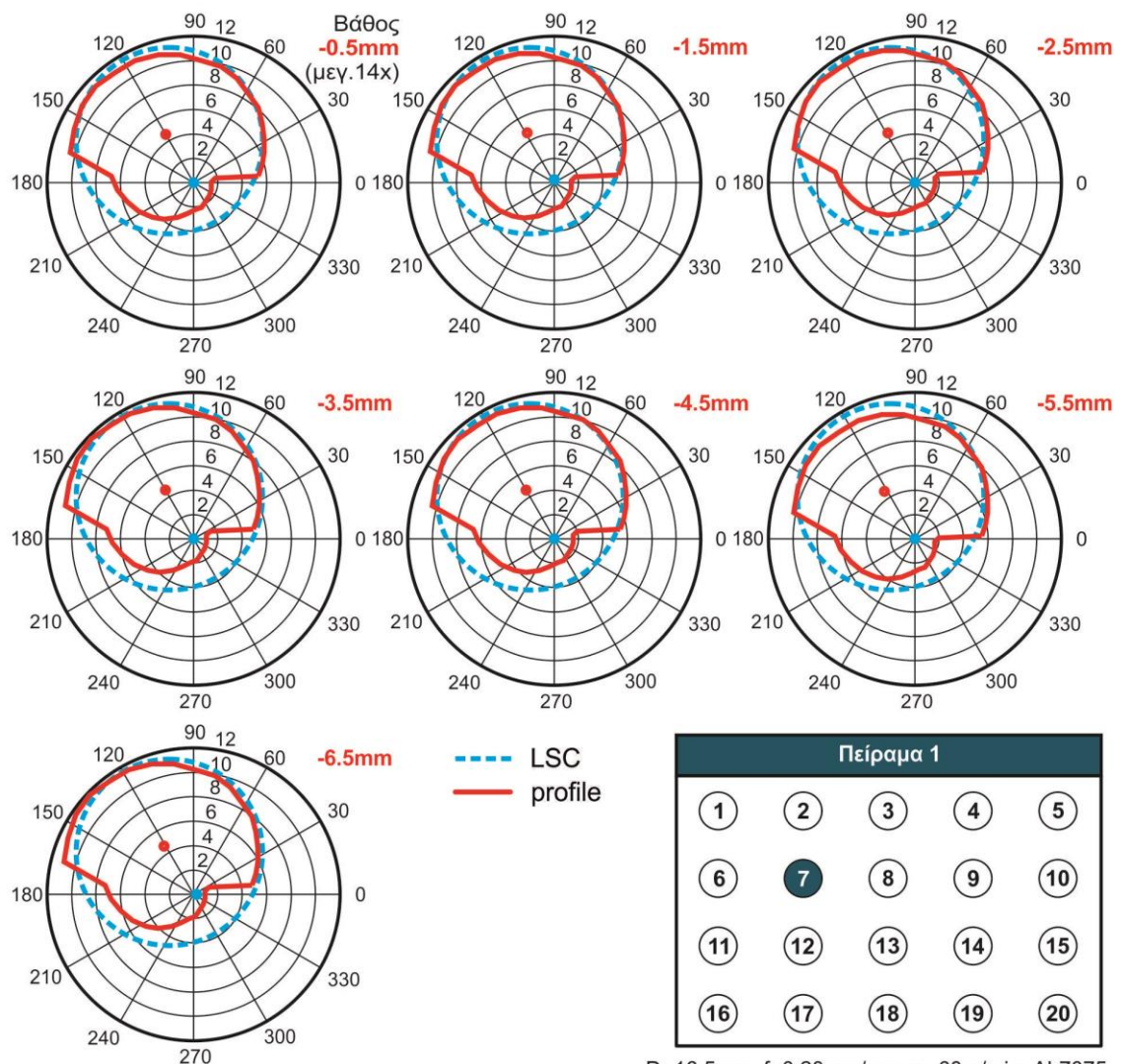
D=16.5mm, f=0.15mm/rev, $v_c=60\text{m/min}$, AL7075



3D Απεικόνιση Οπής, Κυκλικότητα, Απόκλιση RMS, Ομοκεντρικότητα



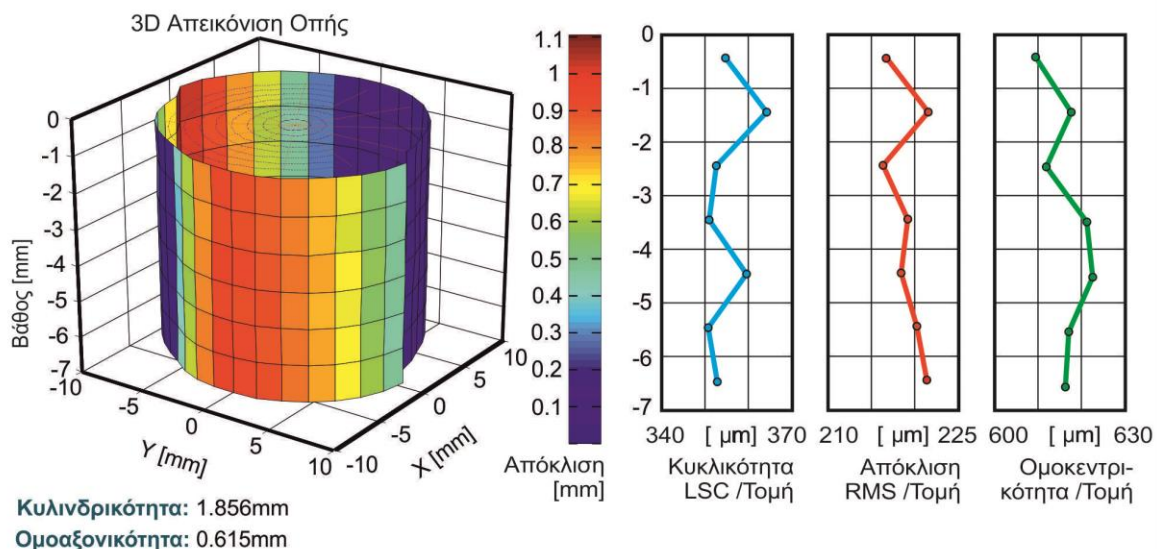
Αποκλίσεις σε συγκεκριμένα βάθη μέτρησης



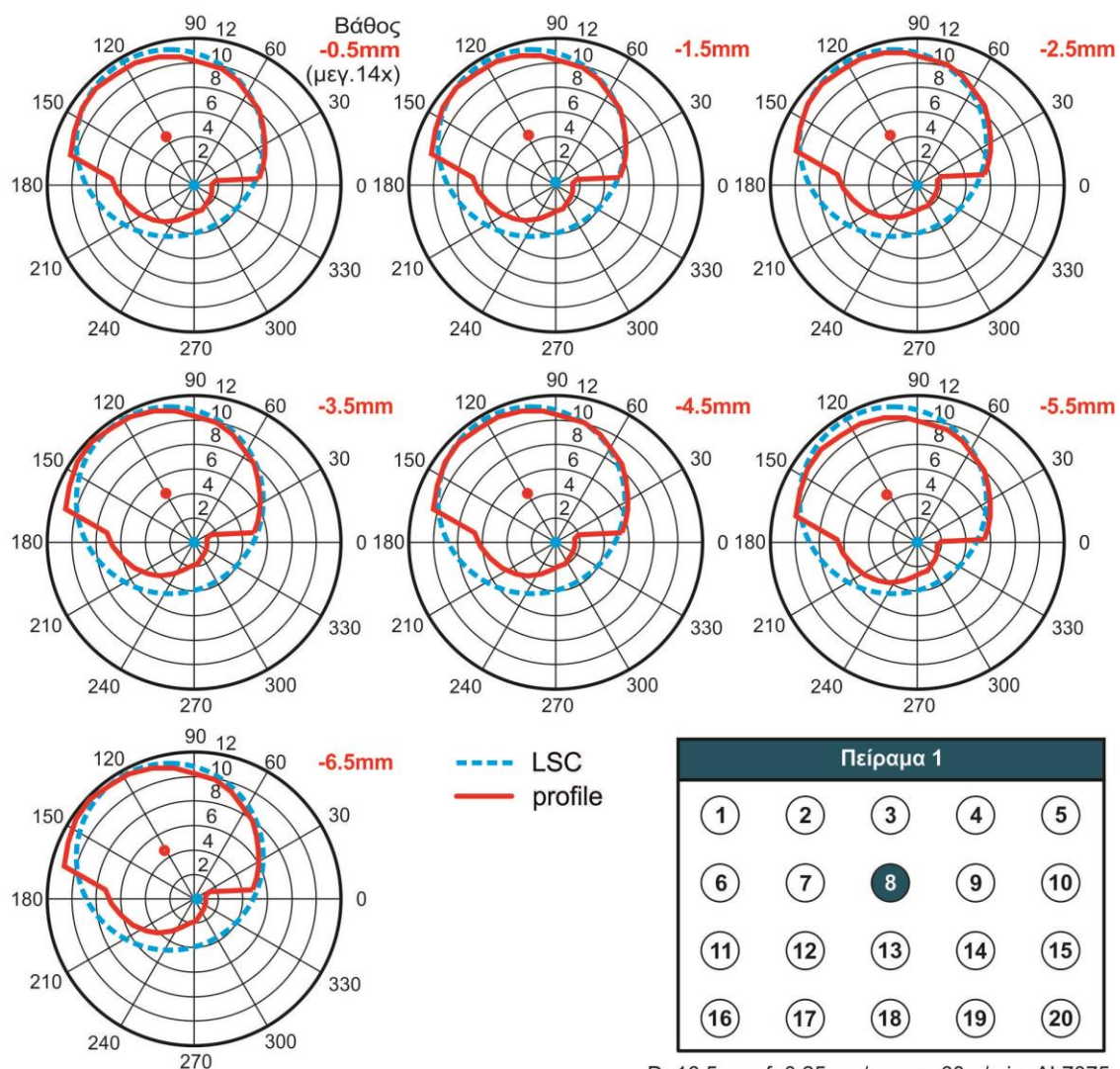
D=16.5mm, f=0.20mm/rev, v_c=60m/min, AL7075



3D Απεικόνιση Οπής, Κυκλικότητα, Απόκλιση RMS, Ομοκεντρικότητα

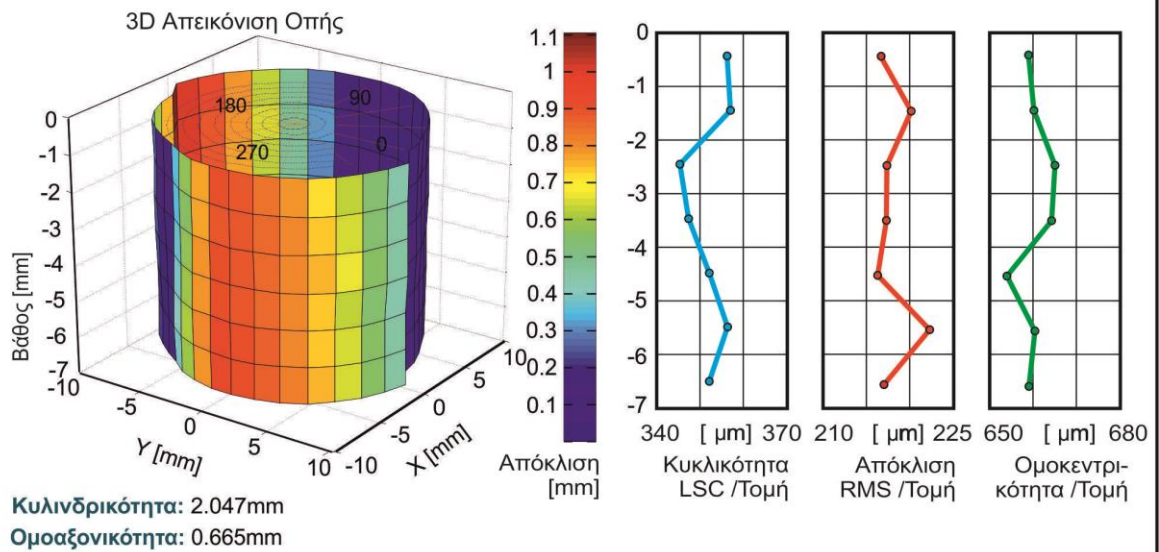


Αποκλίσεις σε συγκεκριμένα βάθη μέτρησης

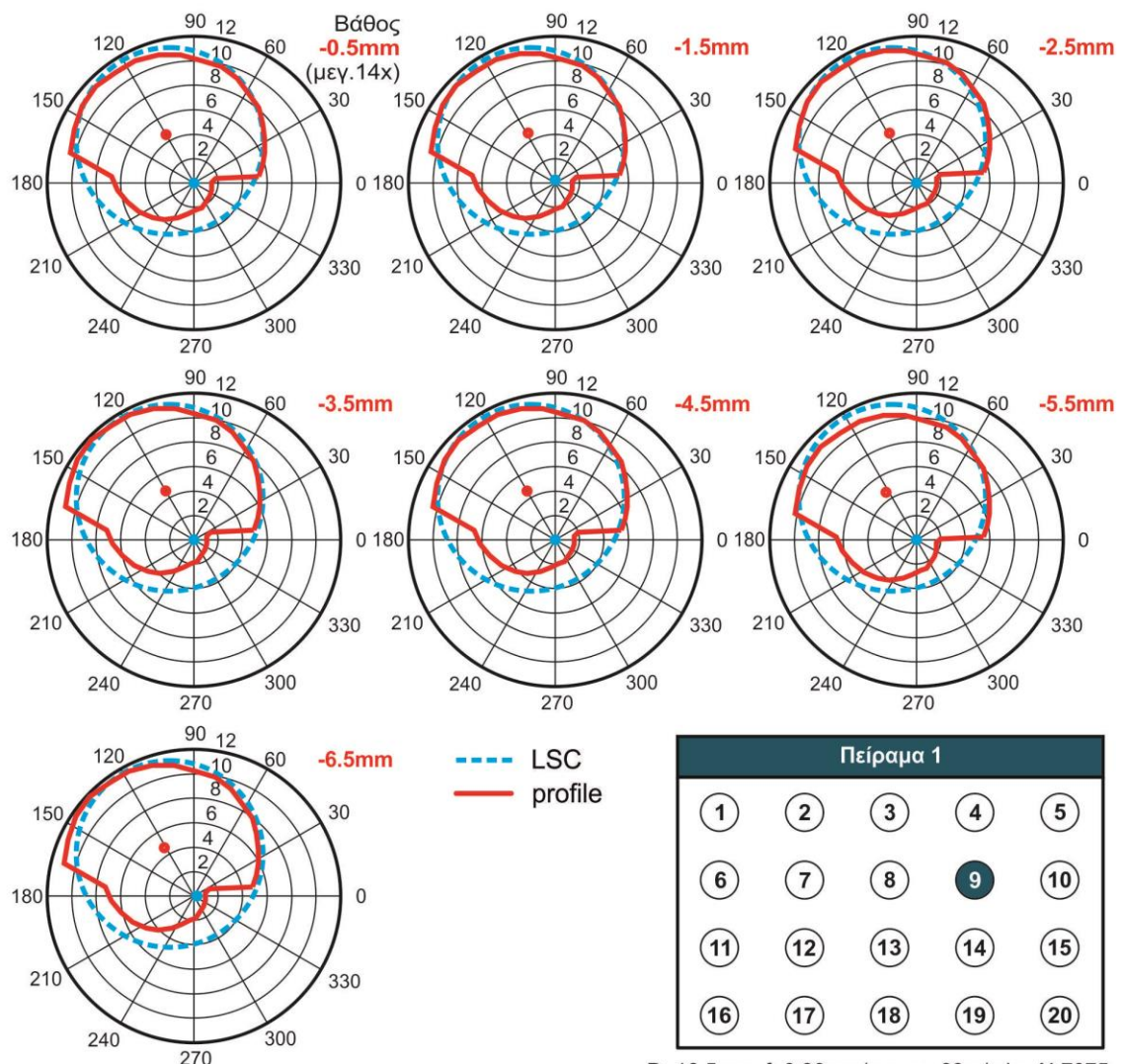


D=16.5mm, f=0.25mm/rev, $v_c=60\text{m/min}$, AL7075

3D Απεικόνιση Οπής, Κυκλικότητα, Απόκλιση RMS, Ομοκεντρικότητα



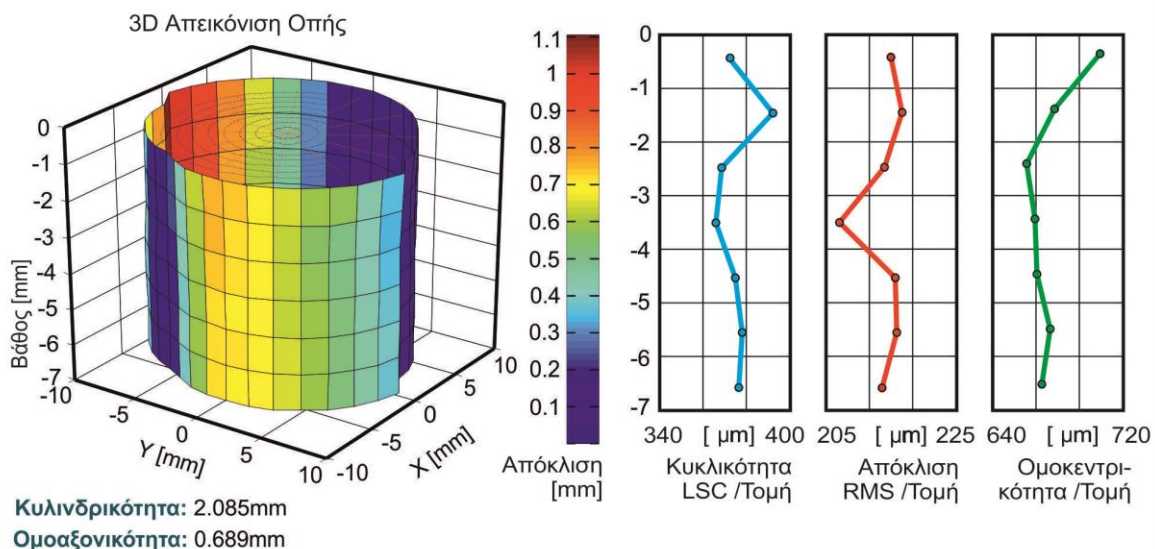
Αποκλίσεις σε συγκεκριμένα βάθη μέτρησης



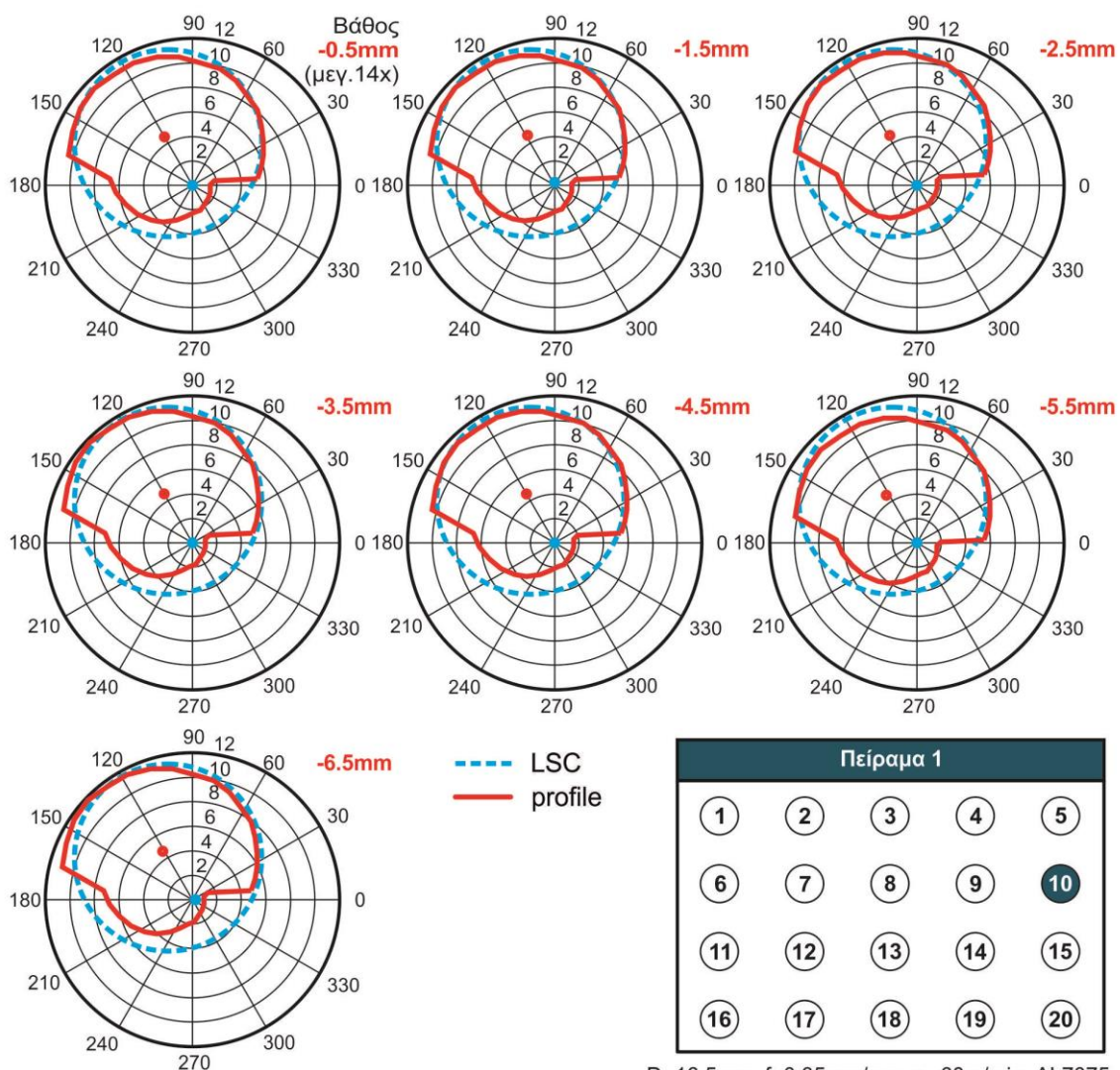
D=16.5mm, f=0.30mm/rev, $v_c=60\text{m/min}$, AL7075



3D Απεικόνιση Οπής, Κυκλικότητα, Απόκλιση RMS, Ομοκεντρικότητα



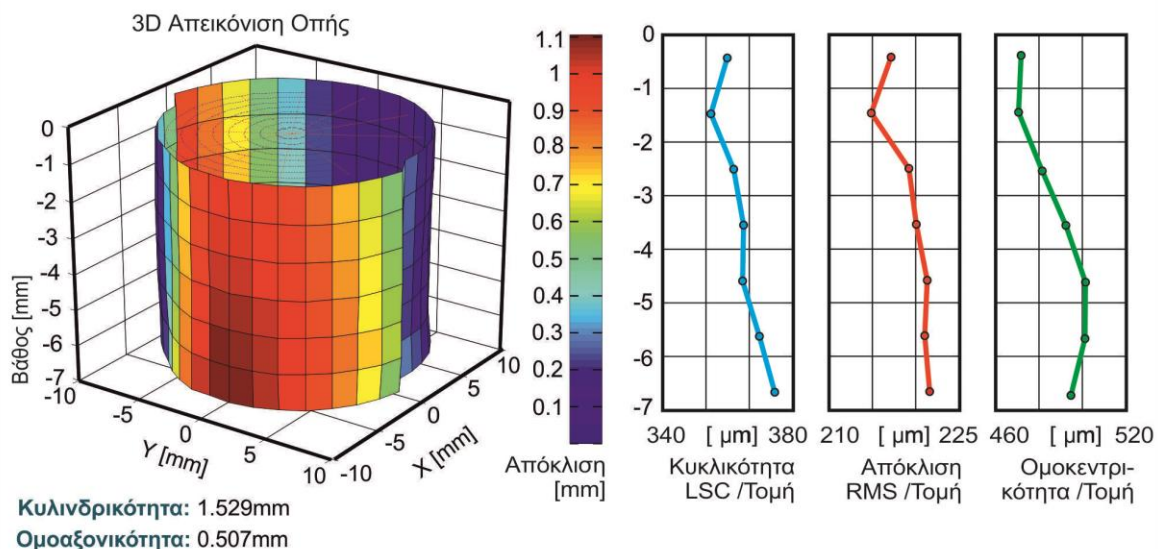
Αποκλίσεις σε συγκεκριμένα βάθη μέτρησης



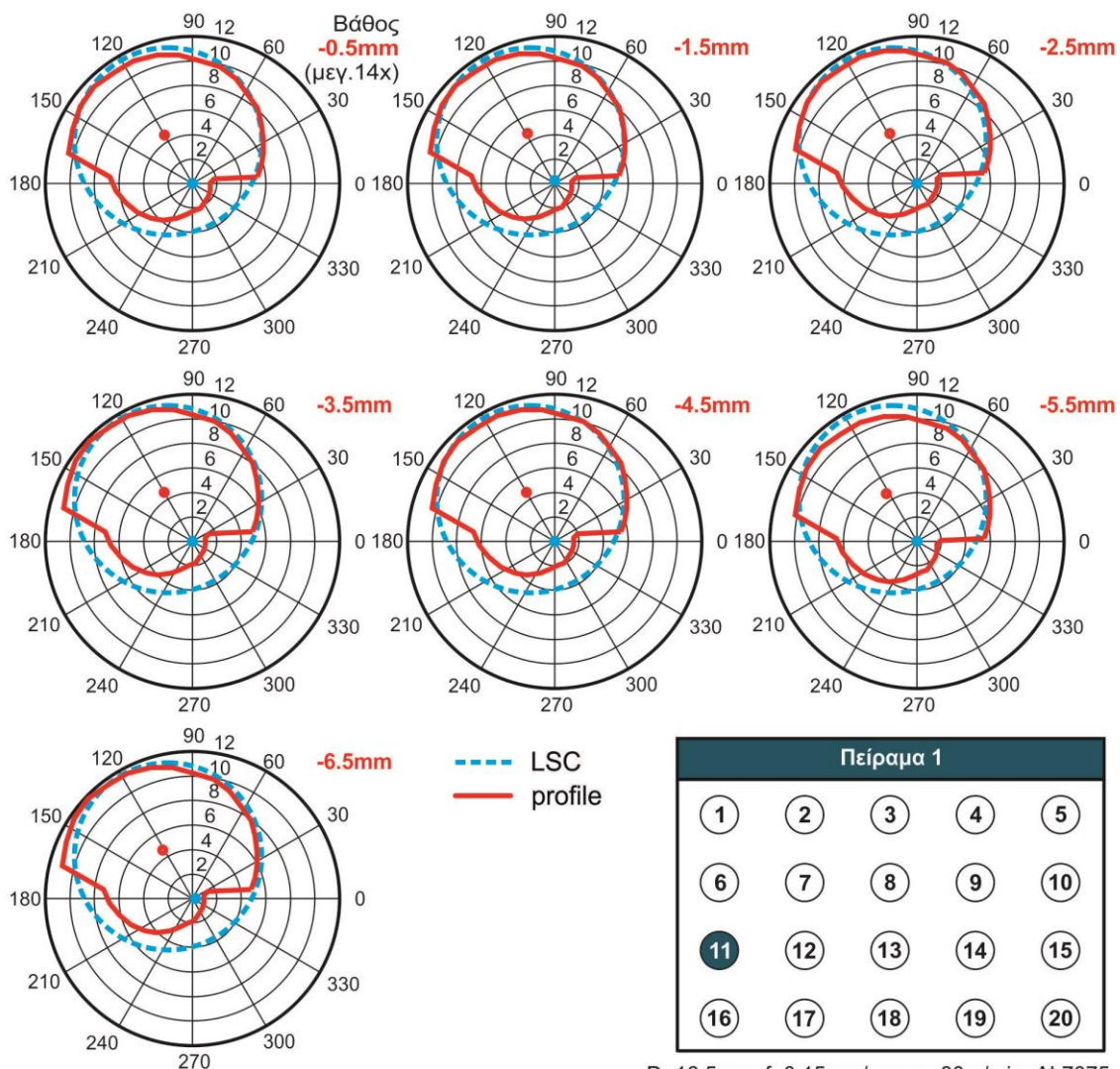
D=16.5mm, f=0.35mm/rev, v_c=60m/min, AL7075



3D Απεικόνιση Οπής, Κυκλικότητα, Απόκλιση RMS, Ομοκεντρικότητα



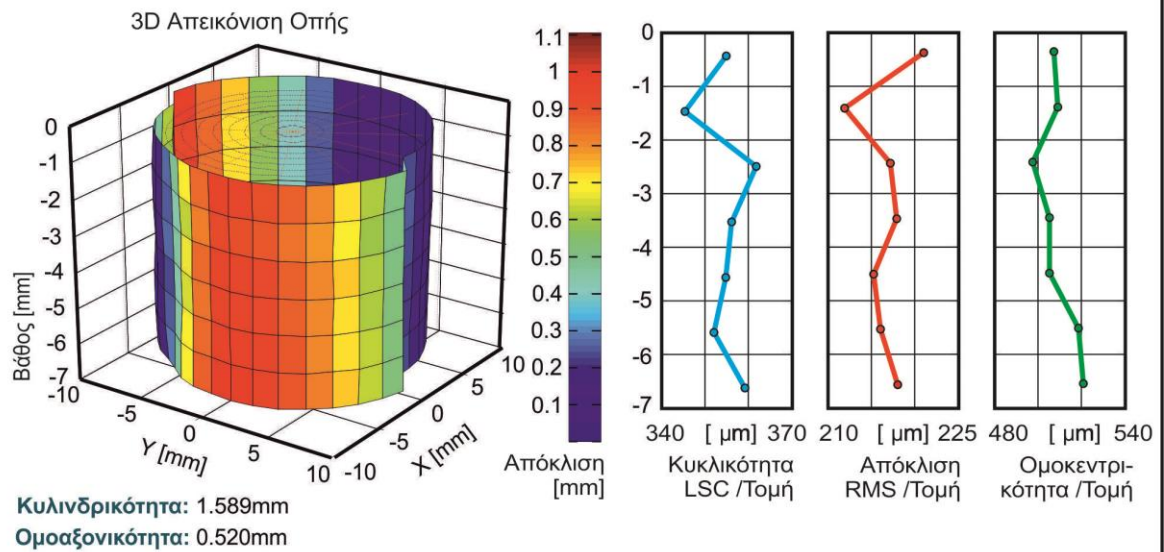
Αποκλίσεις σε συγκεκριμένα βάθη μέτρησης



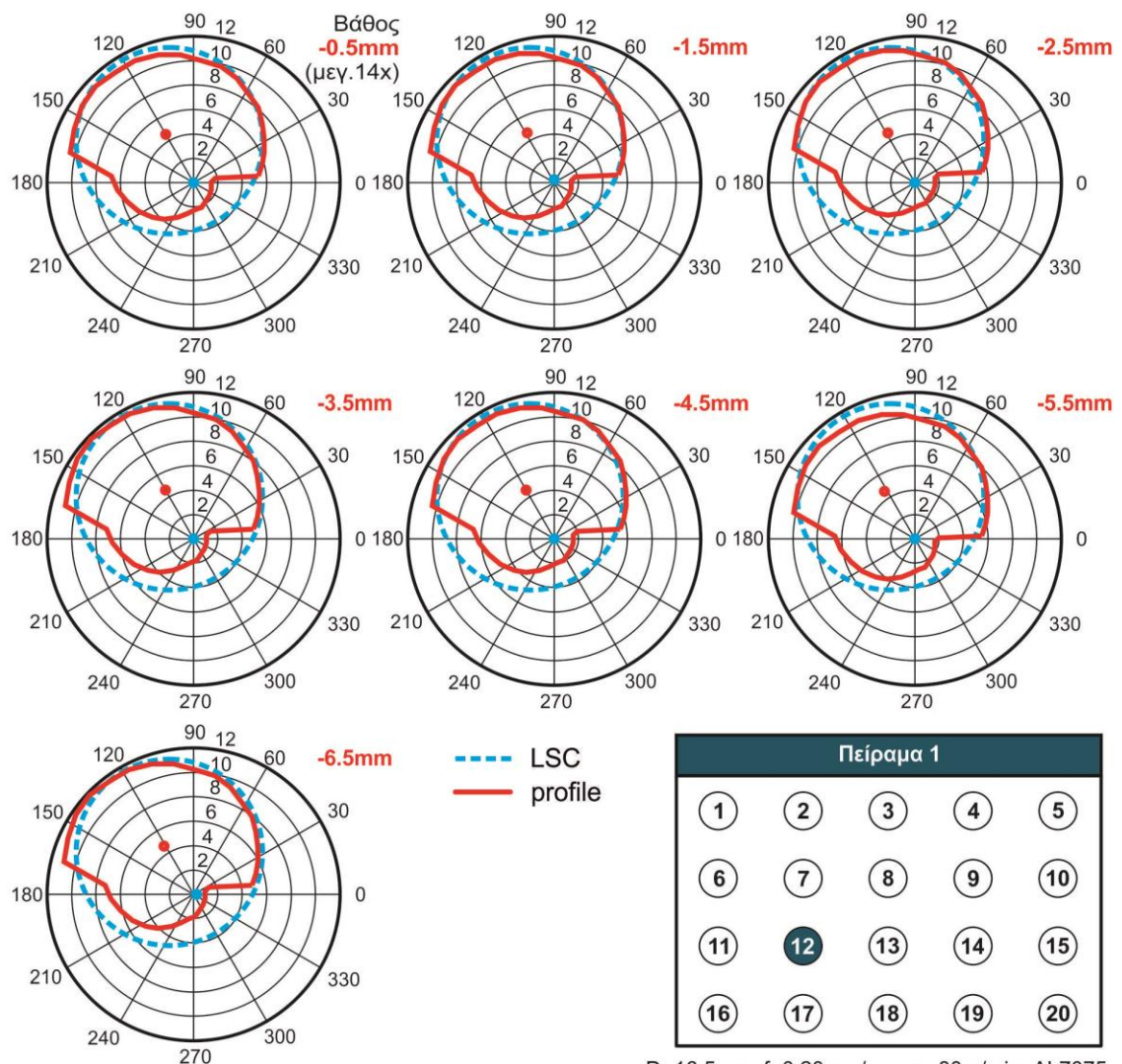
D=16.5mm, f=0.15mm/rev, $v_c=80\text{m/min}$, AL7075



3D Απεικόνιση Οπής, Κυκλικότητα, Απόκλιση RMS, Ομοκεντρικότητα

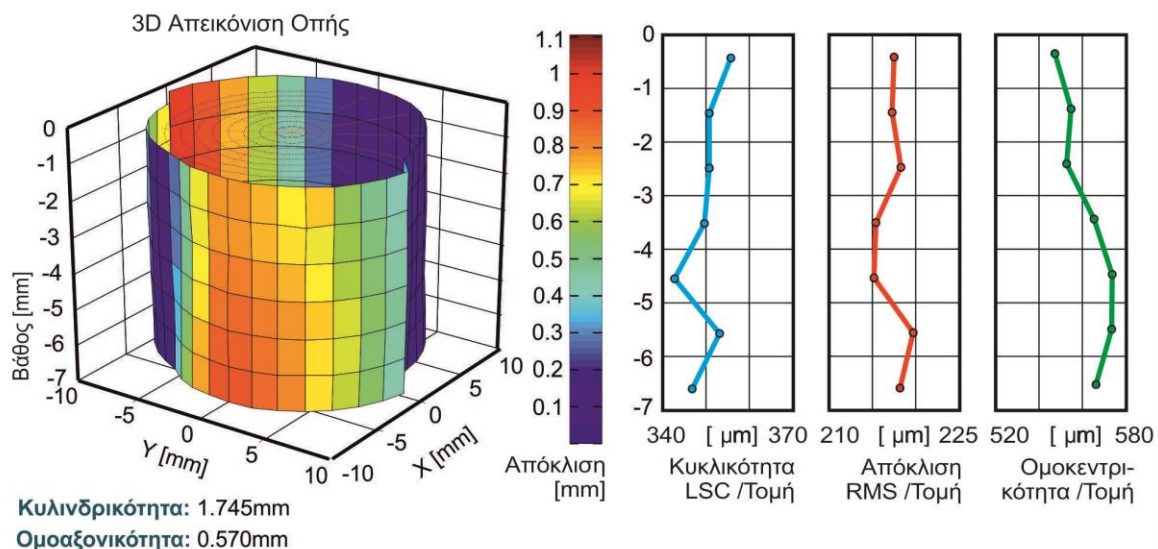


Αποκλίσεις σε συγκεκριμένα βάθη μέτρησης

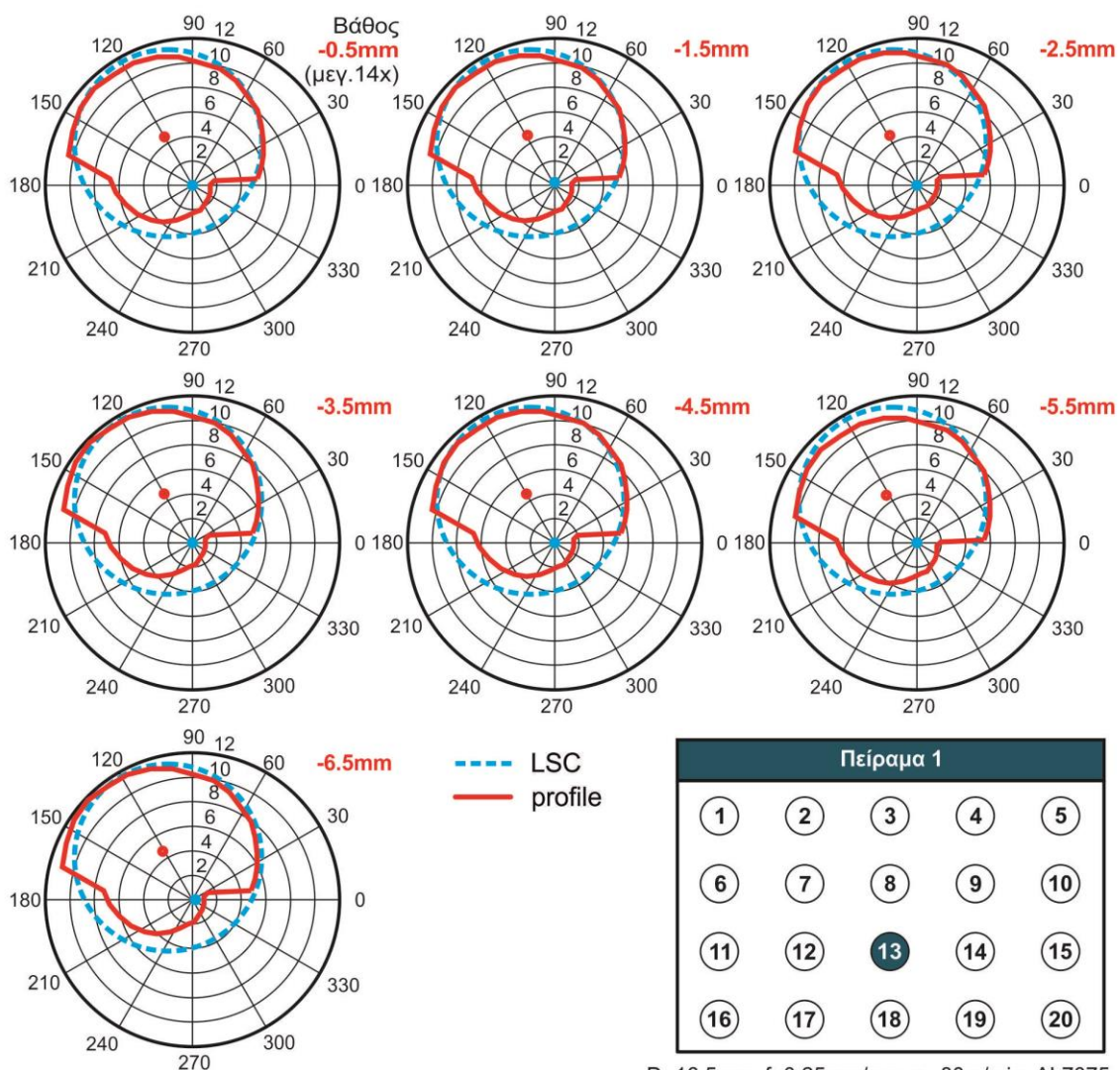


D=16.5mm, f=0.20mm/rev, $v_c=80\text{m/min}$, AL7075

3D Απεικόνιση Οπής, Κυκλικότητα, Απόκλιση RMS, Ομοκεντρικότητα



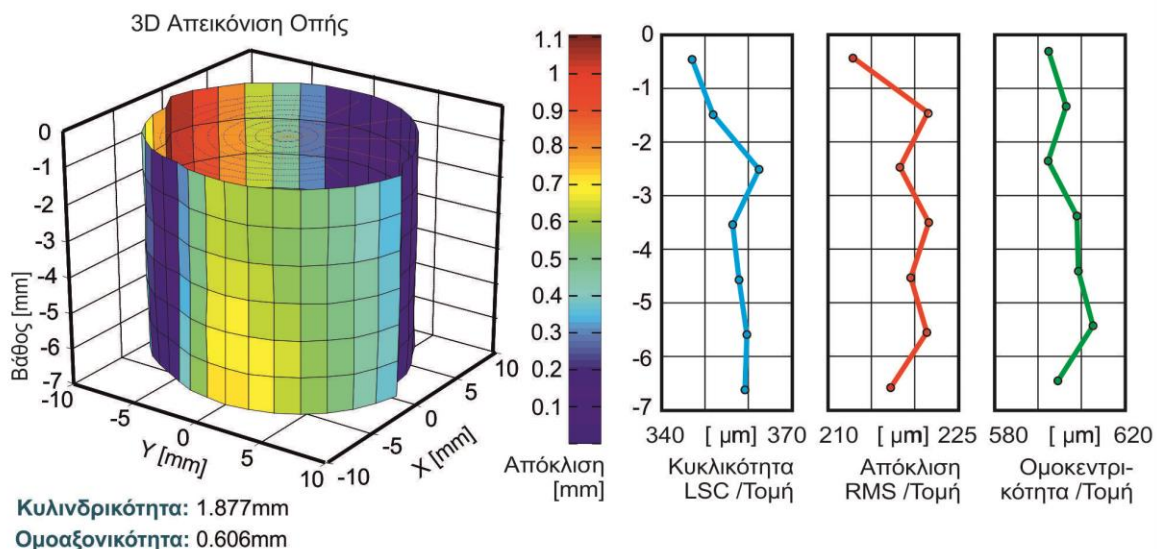
Αποκλίσεις σε συγκεκριμένα βάθη μέτρησης



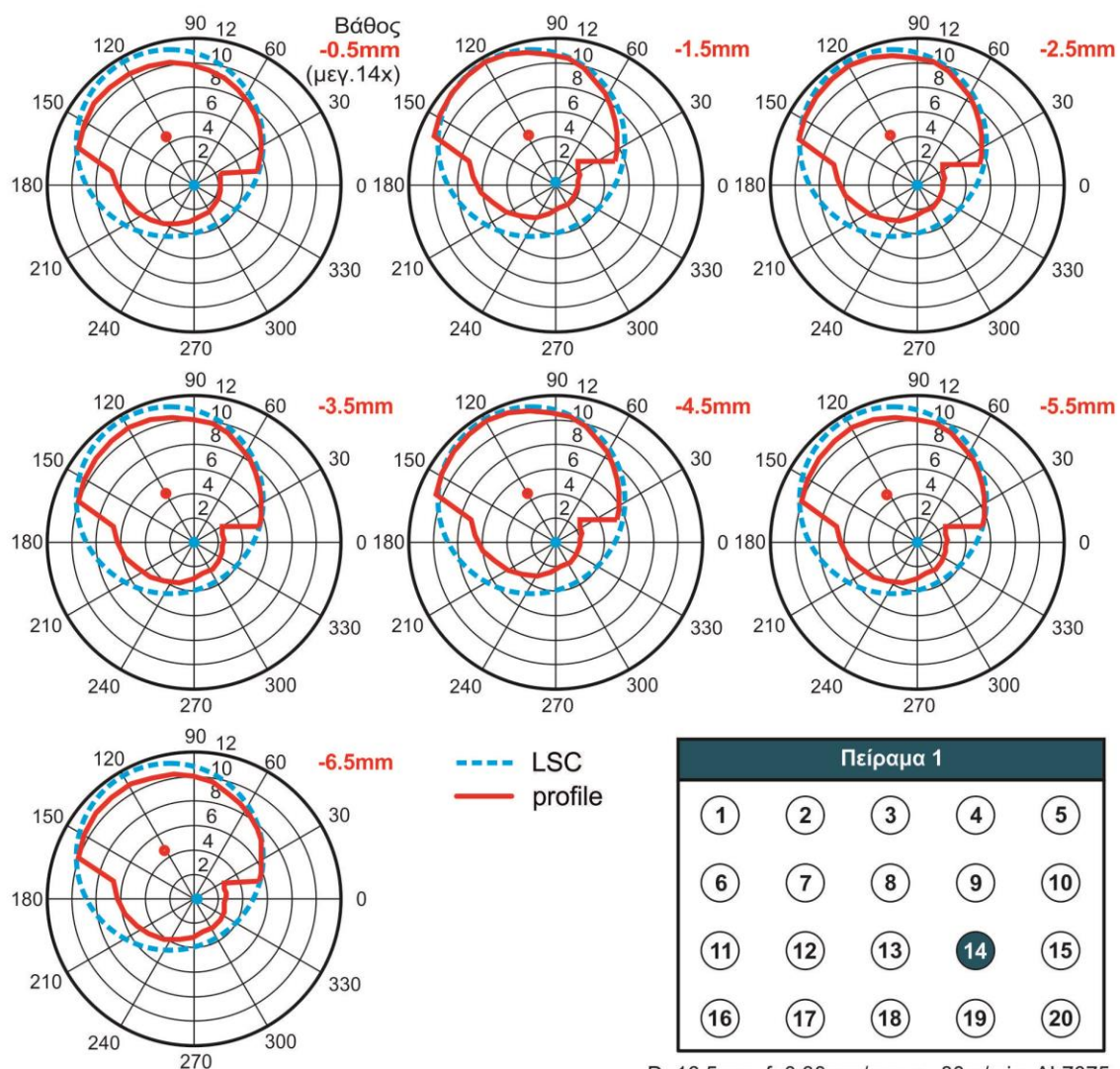
D=16.5mm, f=0.25mm/rev, $v_c=80\text{m/min}$, AL7075



3D Απεικόνιση Οπής, Κυκλικότητα, Απόκλιση RMS, Ομοκεντρικότητα



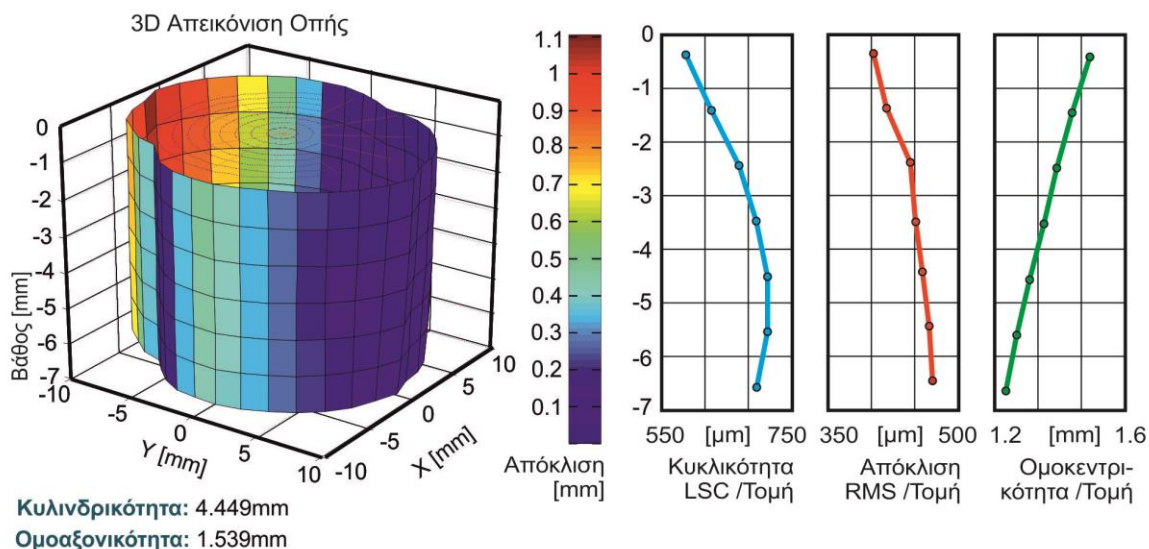
Αποκλίσεις σε συγκεκριμένα βάθη μέτρησης



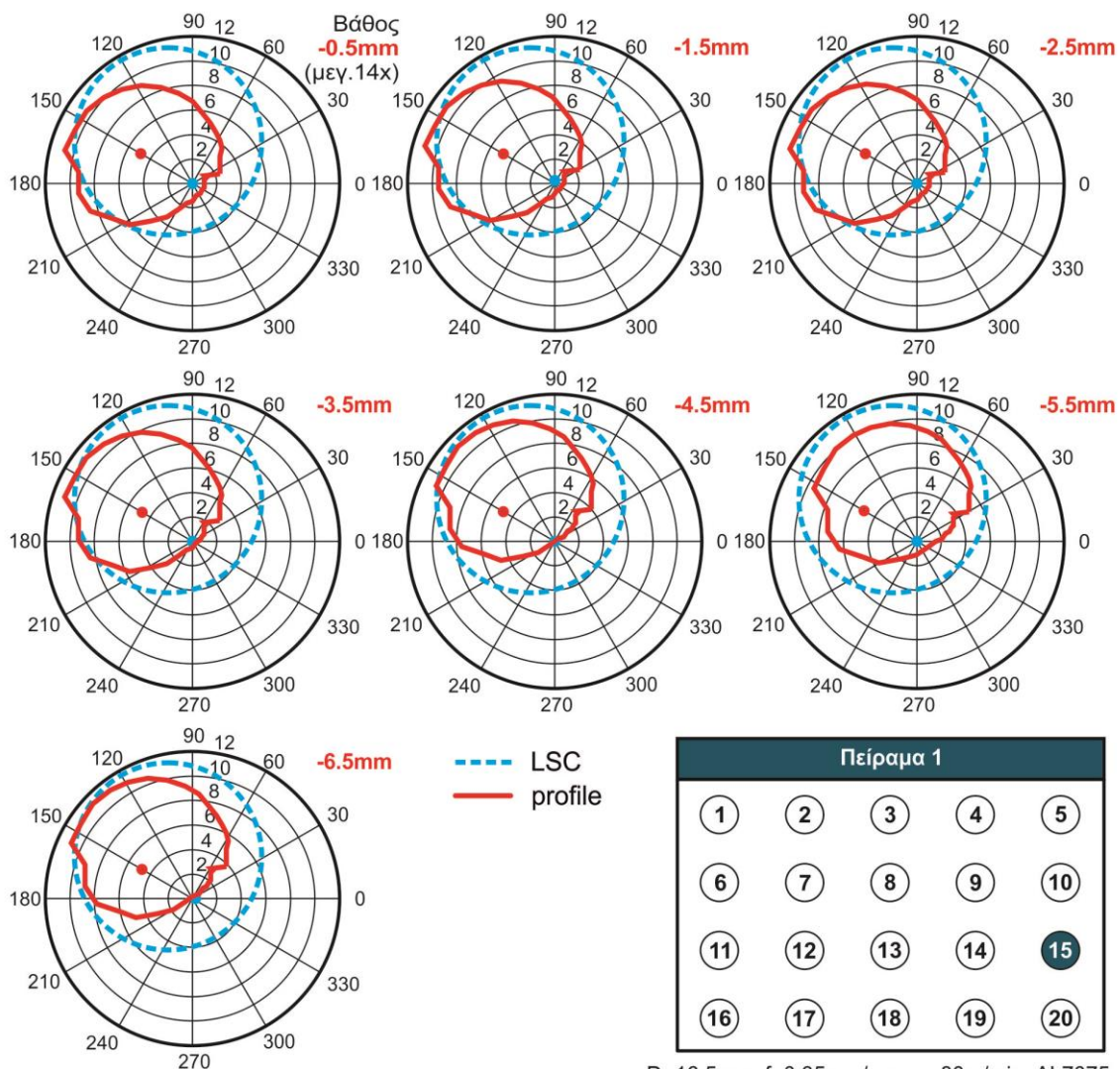
D=16.5mm, f=0.30mm/rev, v_c=80m/min, AL7075



3D Απεικόνιση Οπής, Κυκλικότητα, Απόκλιση RMS, Ομοκεντρικότητα



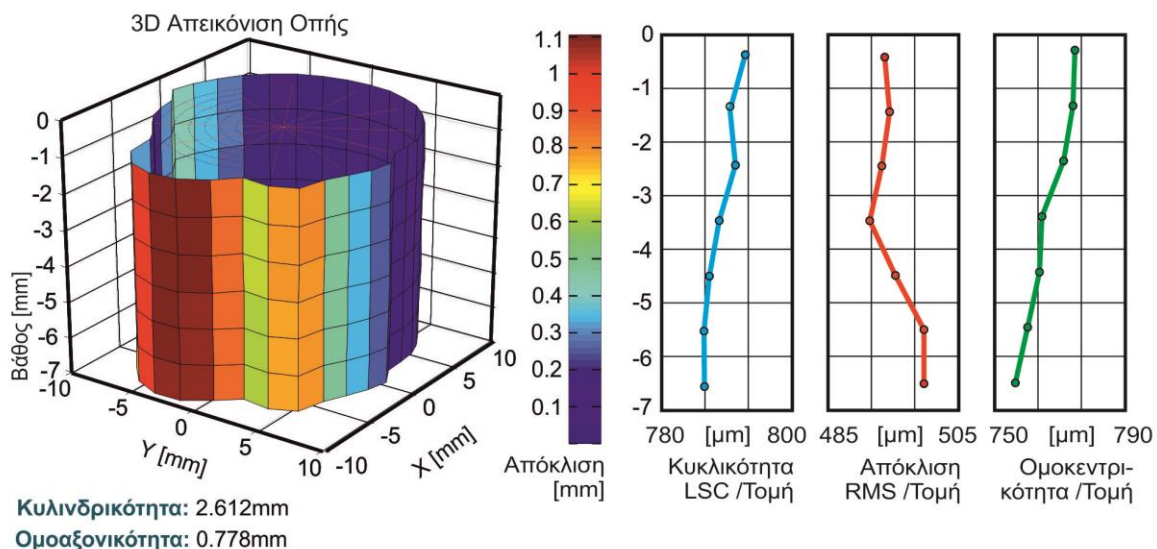
Αποκλίσεις σε συγκεκριμένα βάθη μέτρησης



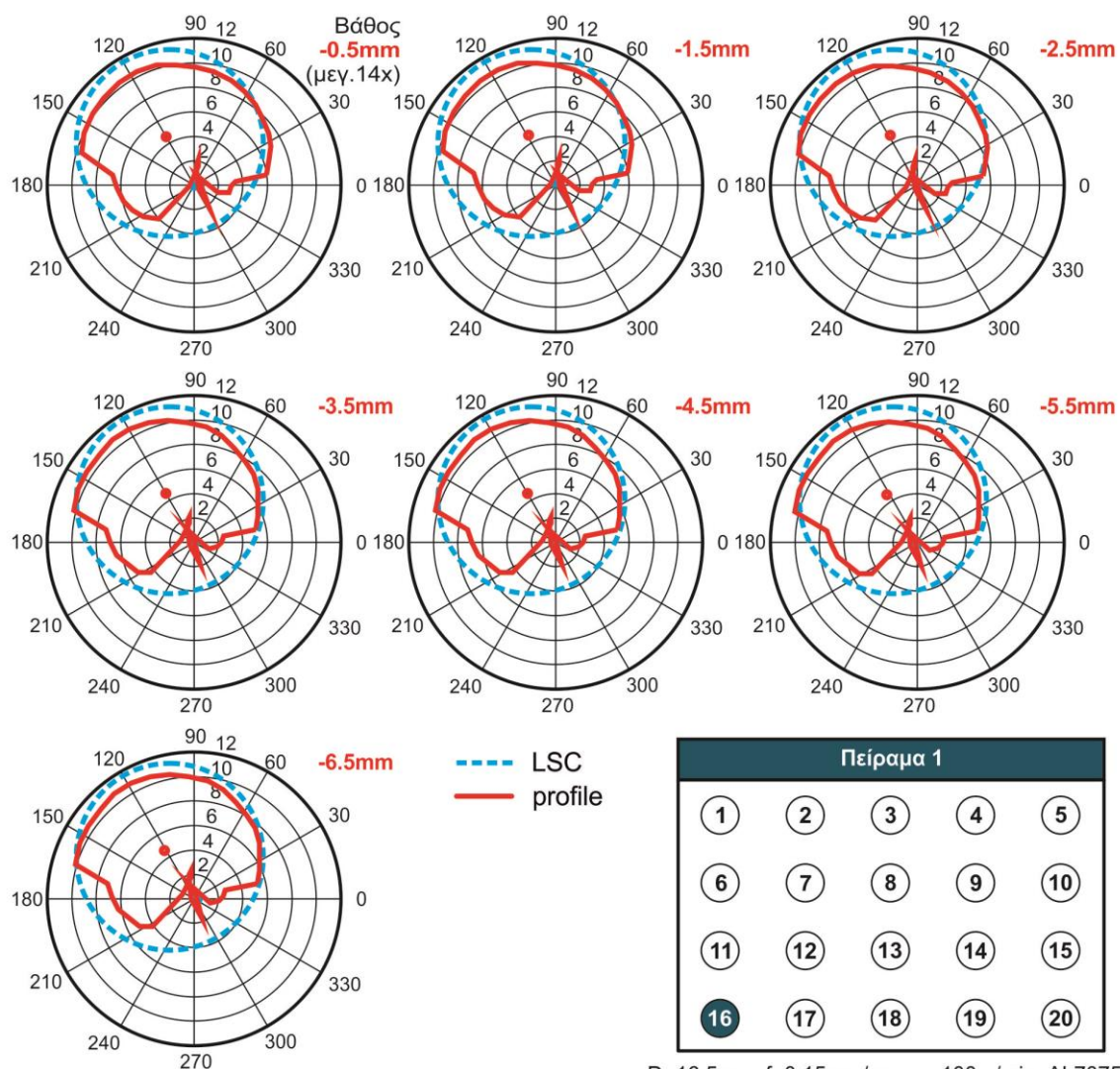
D=16.5mm, f=0.35mm/rev, v_c=80m/min, AL7075



3D Απεικόνιση Οπής, Κυκλικότητα, Απόκλιση RMS, Ομοκεντρικότητα



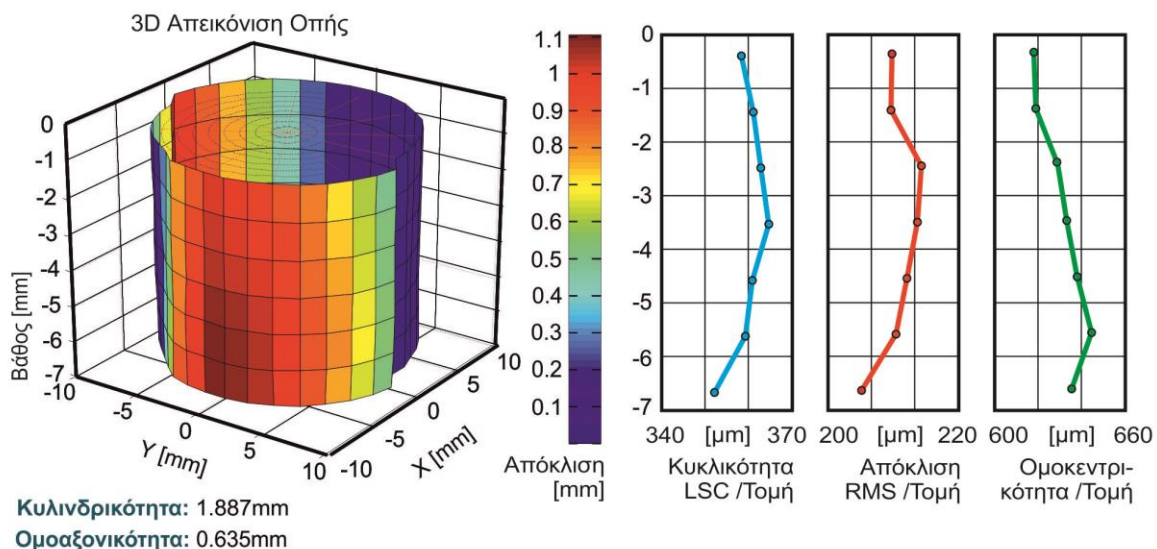
Αποκλίσεις σε συγκεκριμένα βάθη μέτρησης



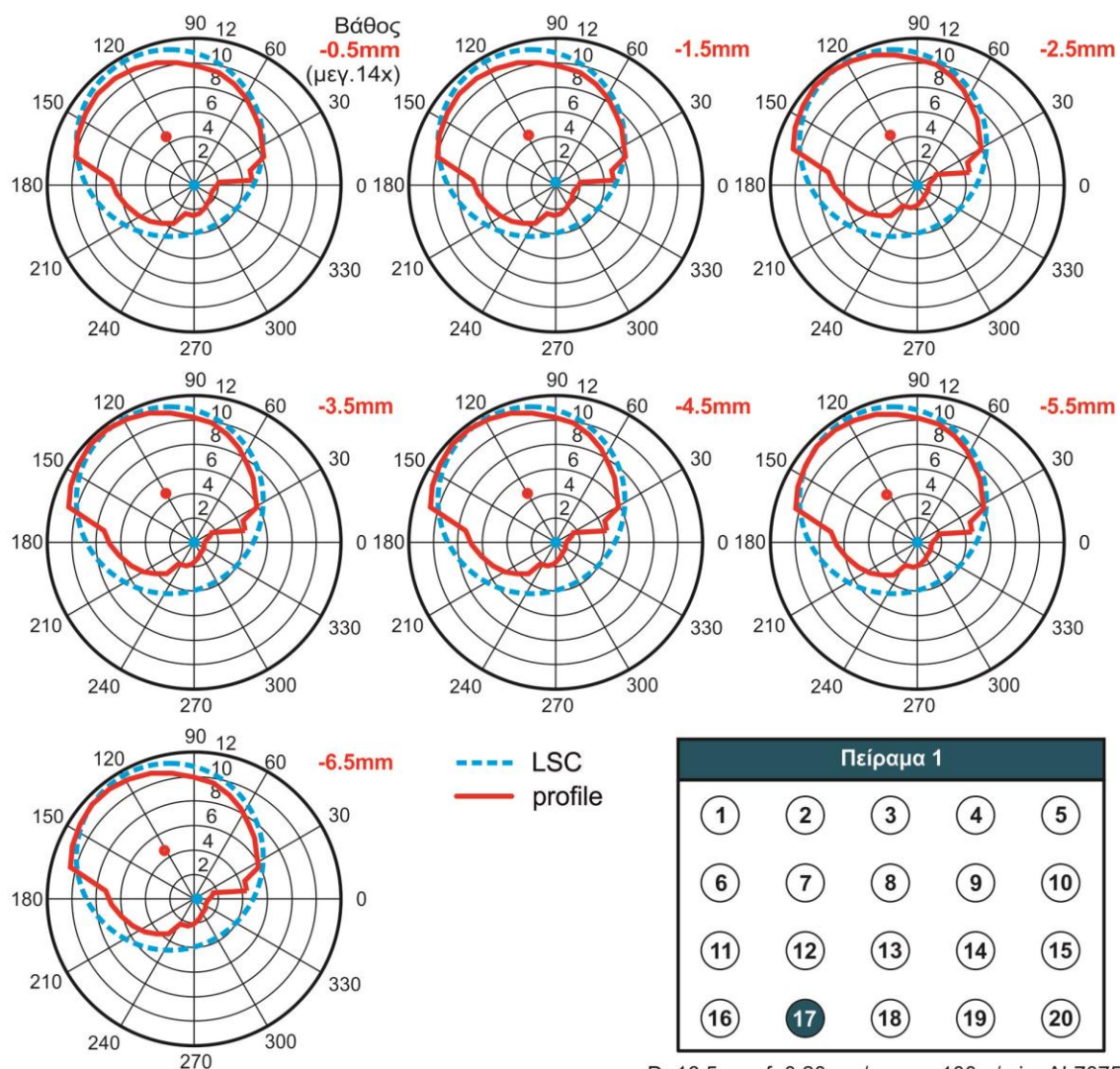
D=16.5mm, f=0.15mm/rev, $v_c=100\text{m/min}$, AL7075



3D Απεικόνιση Οπής, Κυκλικότητα, Απόκλιση RMS, Ομοκεντρικότητα



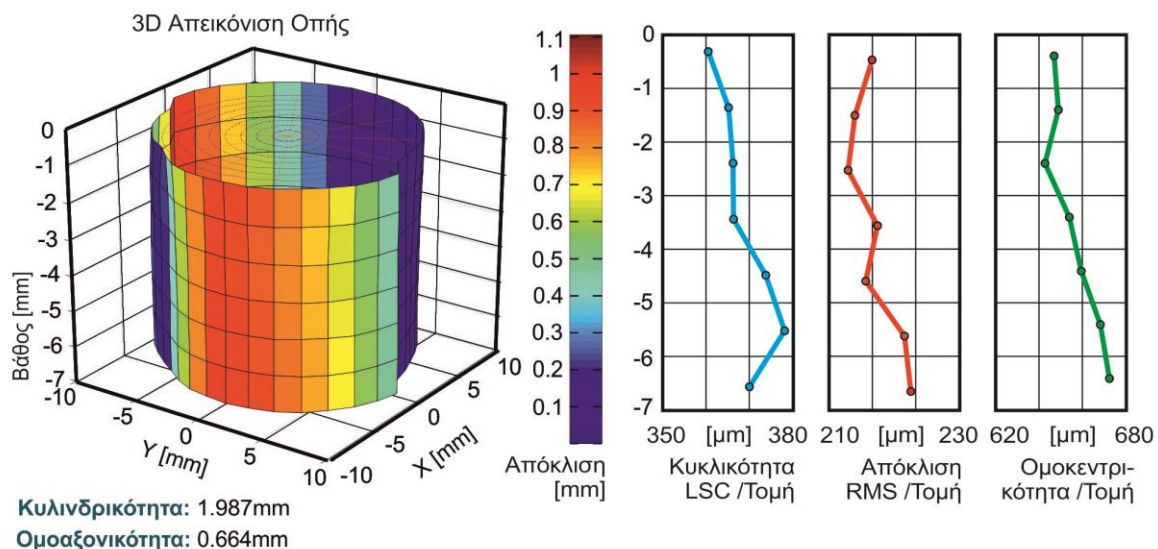
Αποκλίσεις σε συγκεκριμένα βάθη μέτρησης



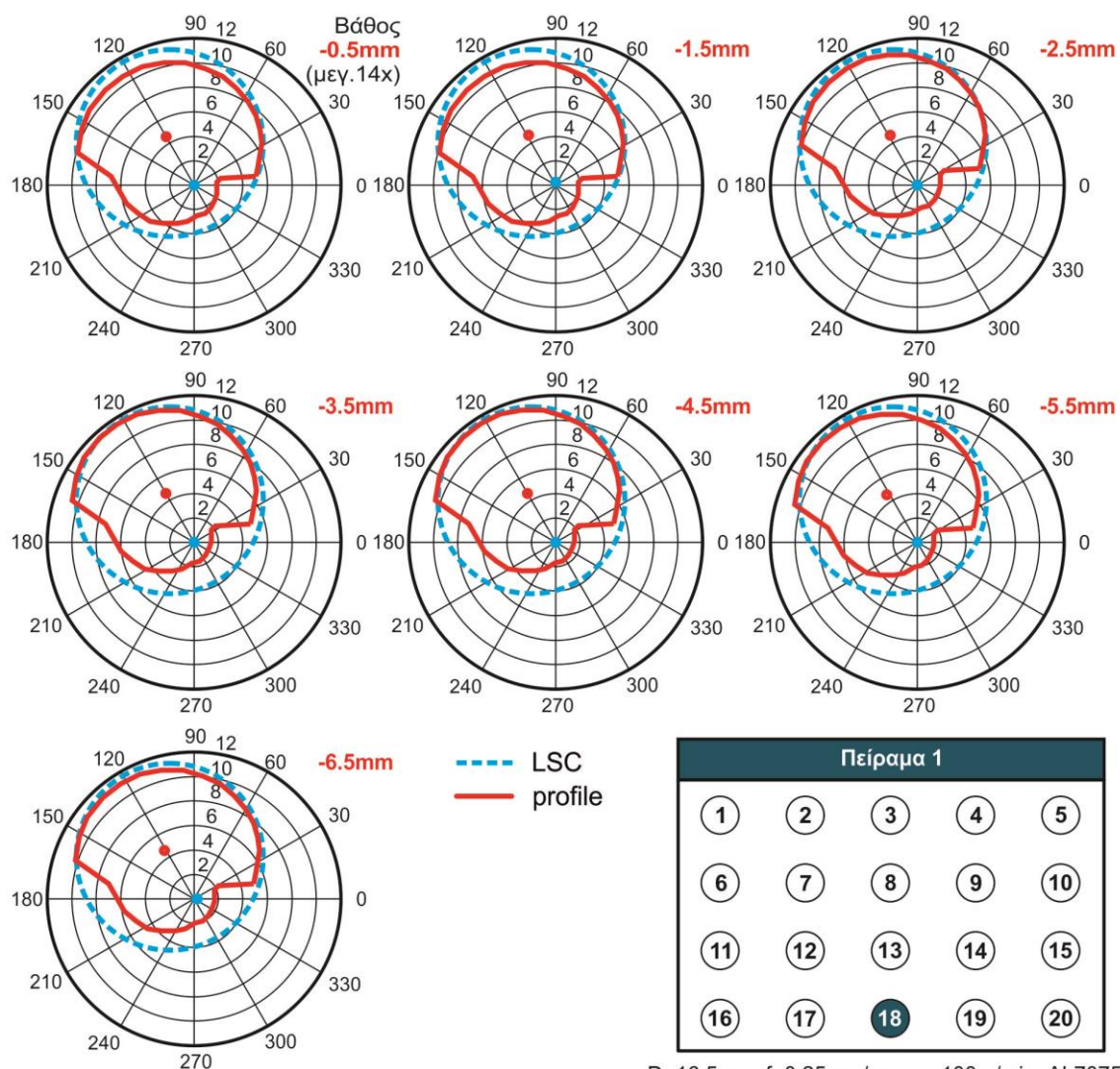
D=16.5mm, f=0.20mm/rev, $v_c=100\text{m/min}$, AL7075



3D Απεικόνιση Οπής, Κυκλικότητα, Απόκλιση RMS, Ομοκεντρικότητα



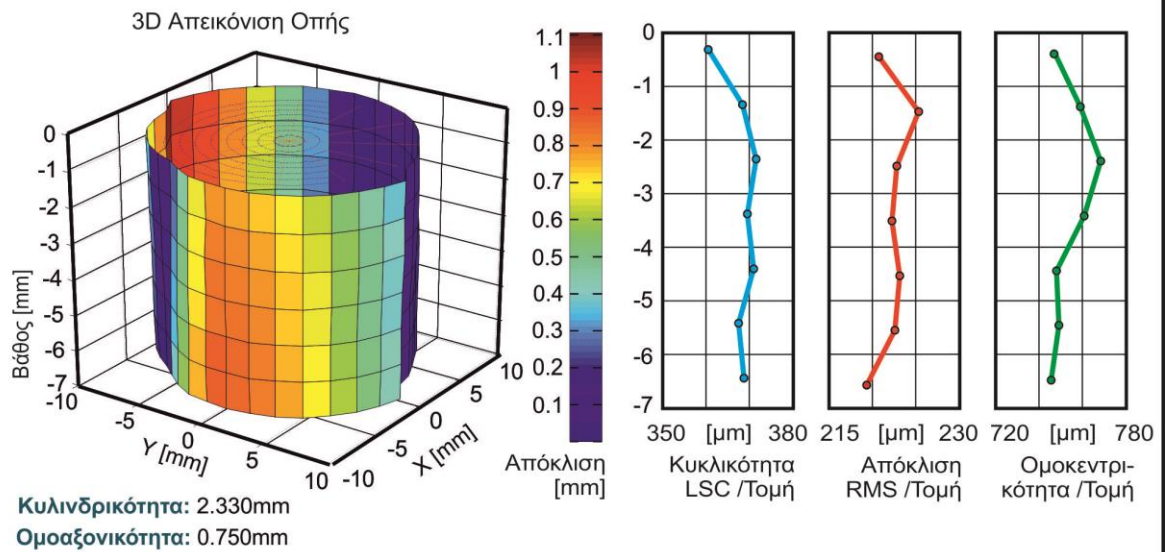
Αποκλίσεις σε συγκεκριμένα βάθη μέτρησης



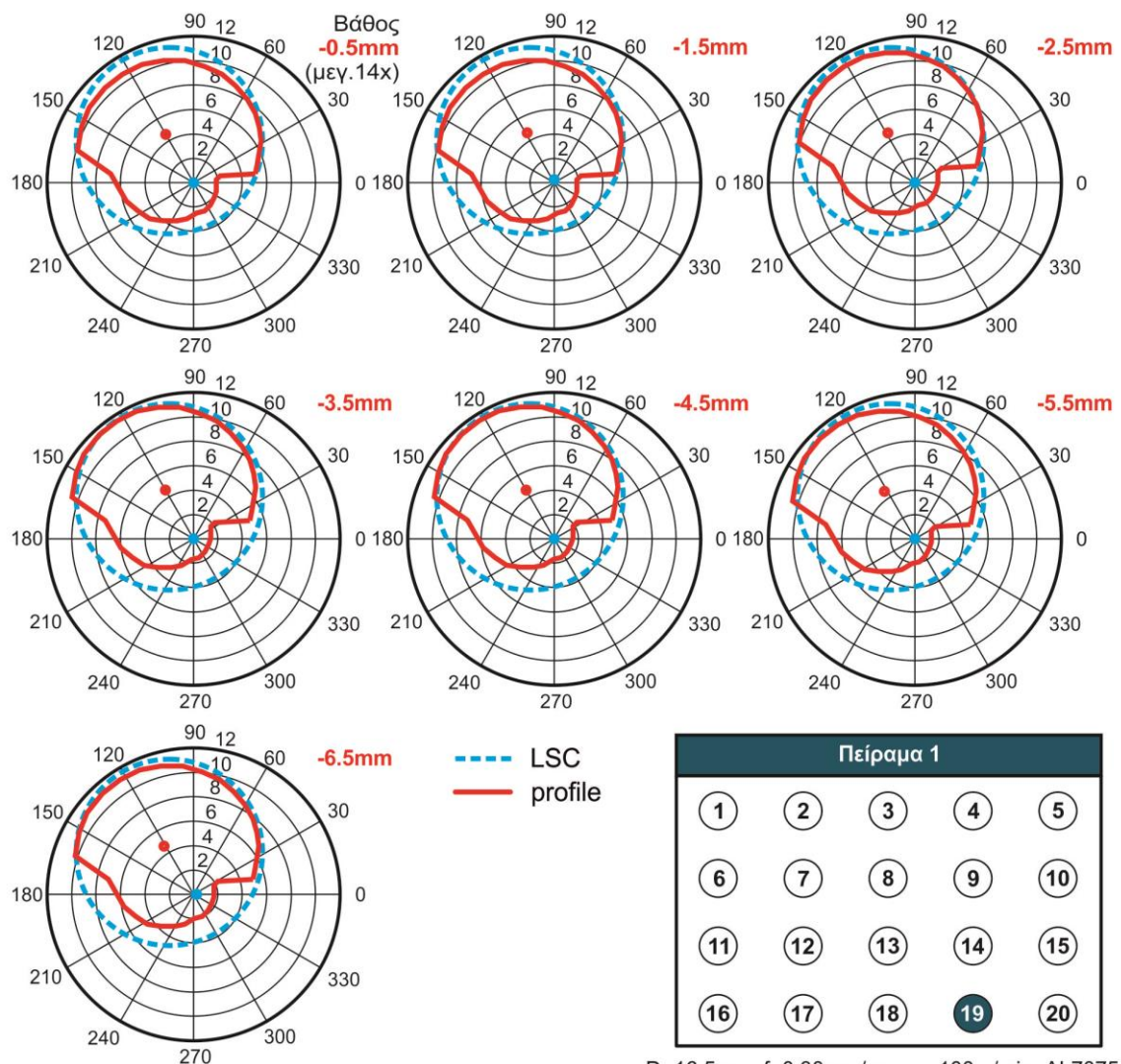
D=16.5mm, f=0.25mm/rev, v_c =100m/min, AL7075



3D Απεικόνιση Οπής, Κυκλικότητα, Απόκλιση RMS, Ομοκεντρικότητα



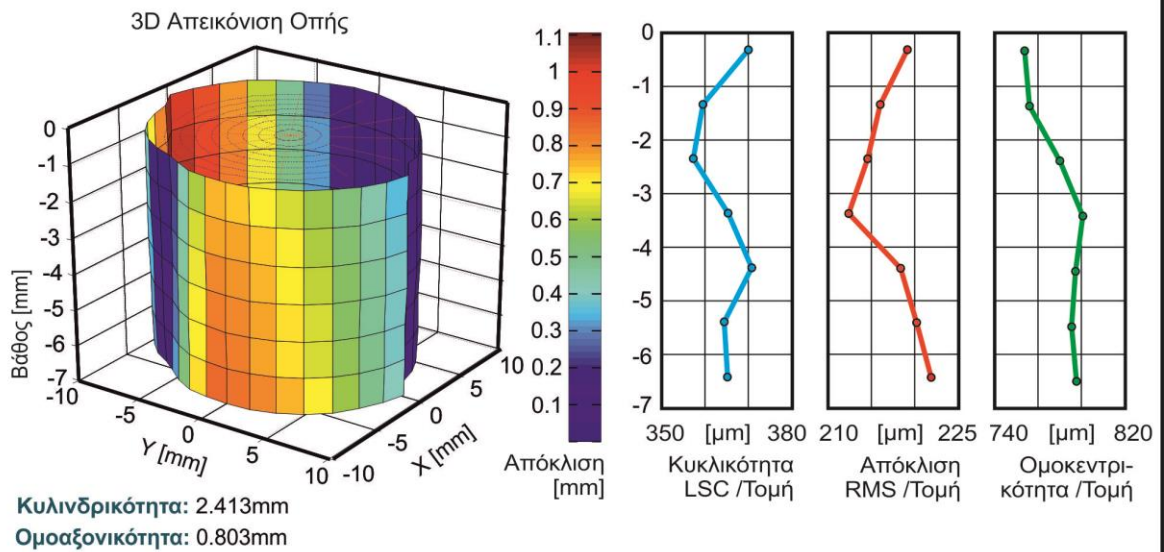
Αποκλίσεις σε συγκεκριμένα βάθη μέτρησης



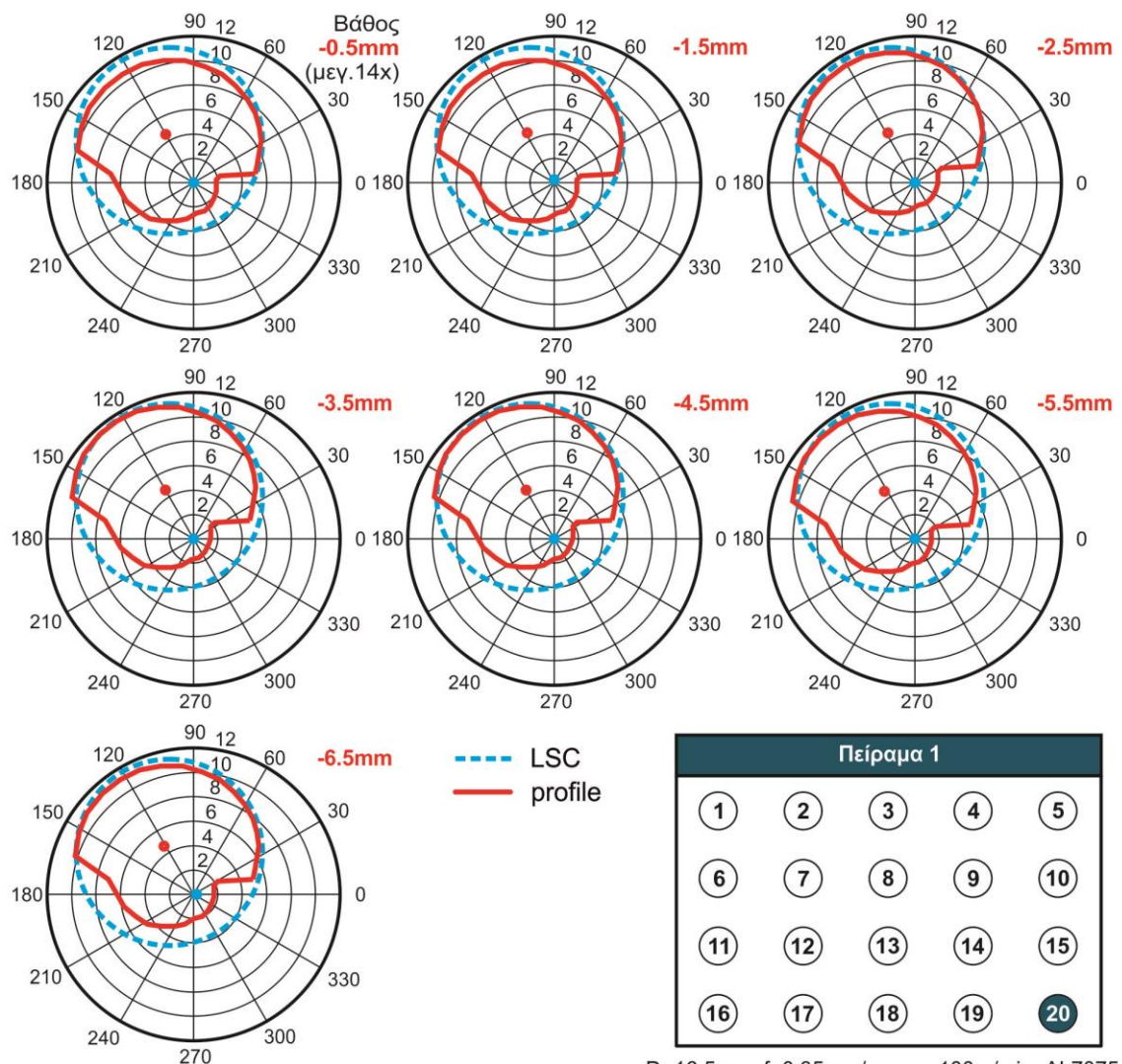
D=16.5mm, f=0.30mm/rev, $v_c=100\text{m/min}$, AL7075



3D Απεικόνιση Οπής, Κυκλικότητα, Απόκλιση RMS, Ομοκεντρικότητα



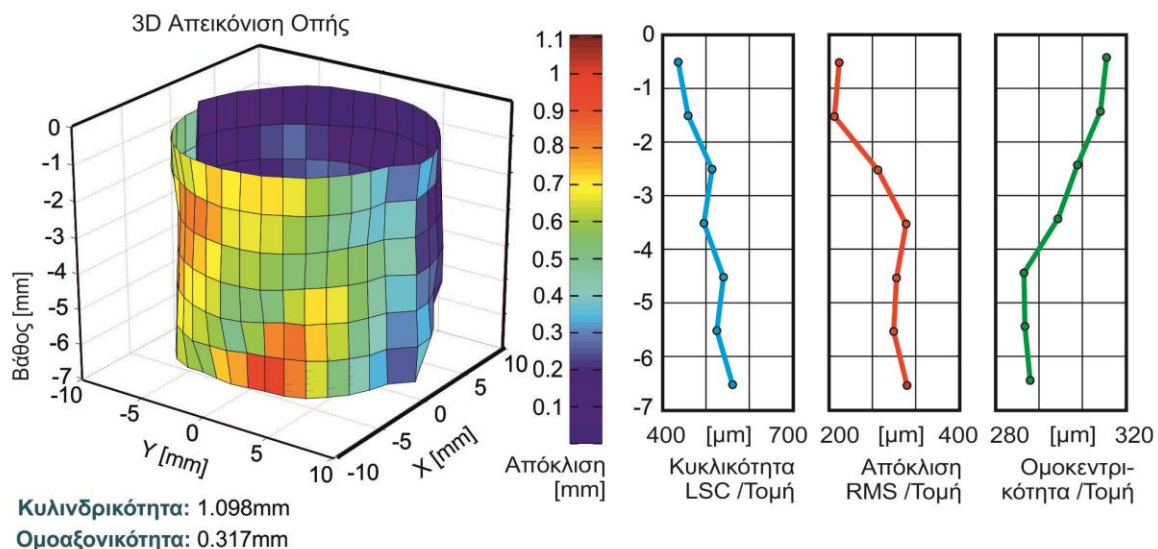
Αποκλίσεις σε συγκεκριμένα βάθη μέτρησης



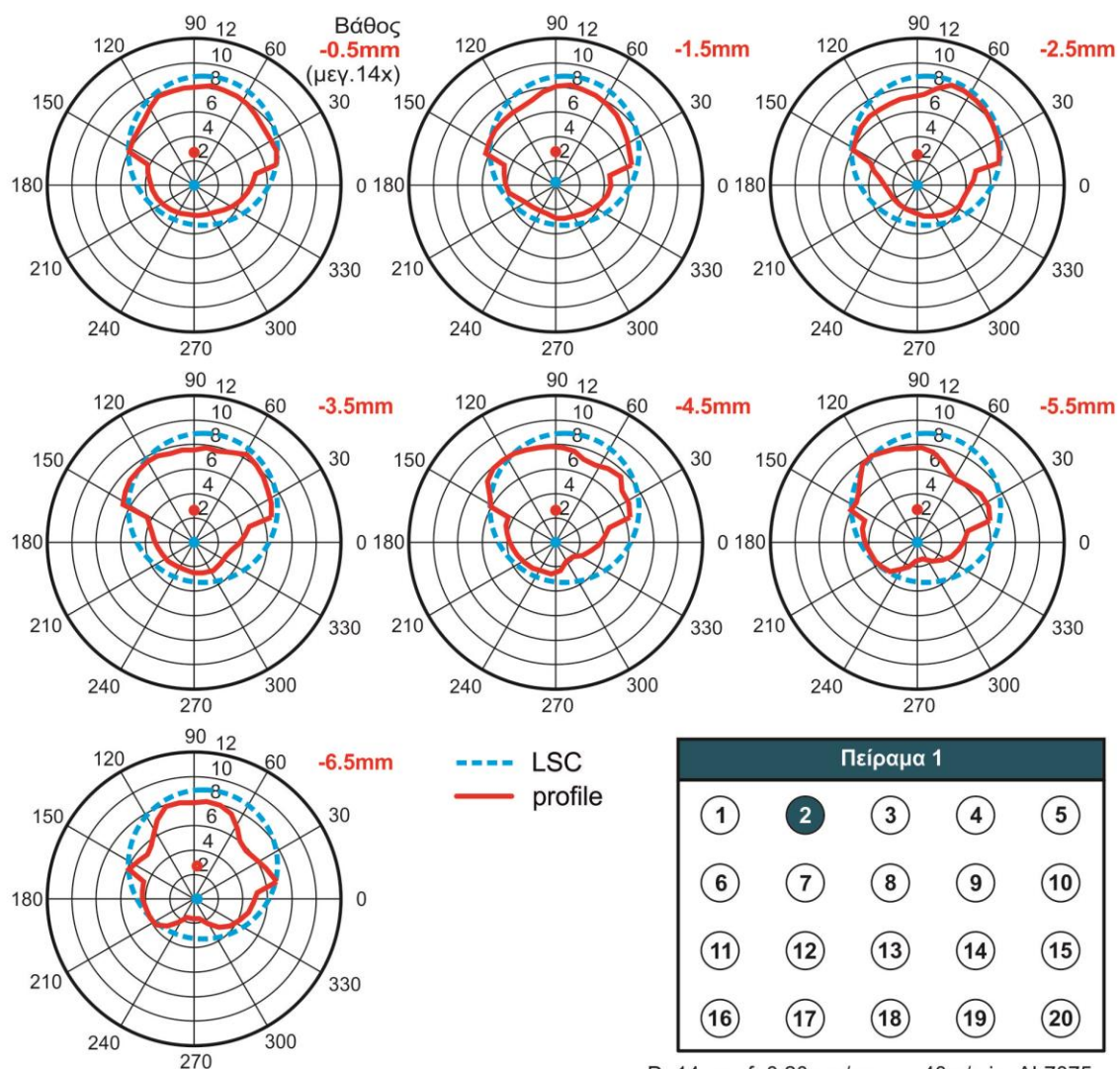
D=16.5mm, f=0.35mm/rev, v_c =100m/min, AL7075



3D Απεικόνιση Οπής, Κυκλικότητα, Απόκλιση RMS, Ομοκεντρικότητα

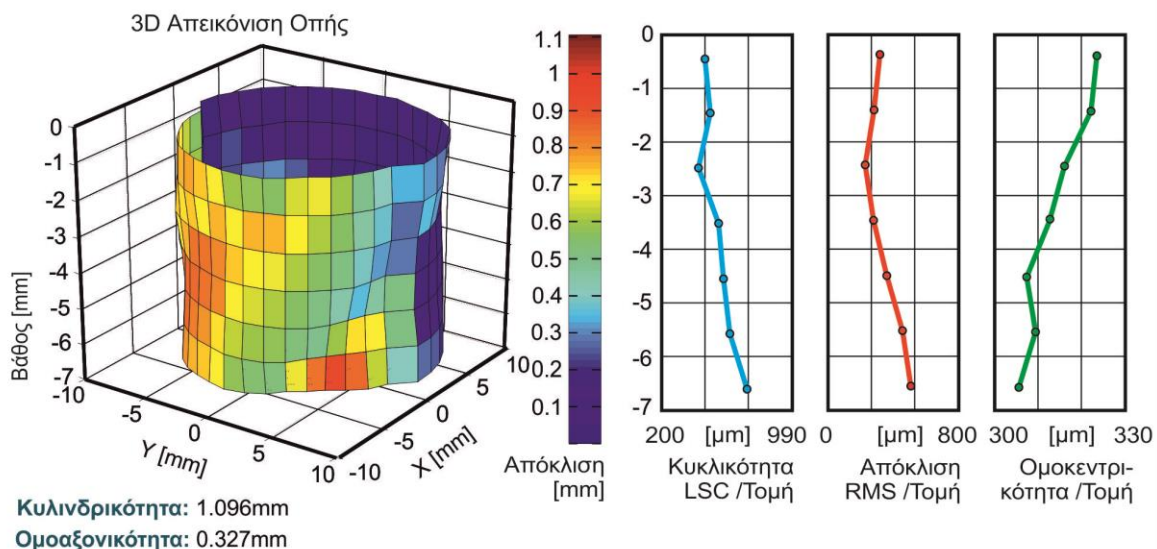


Αποκλίσεις σε συγκεκριμένα βάθη μέτρησης

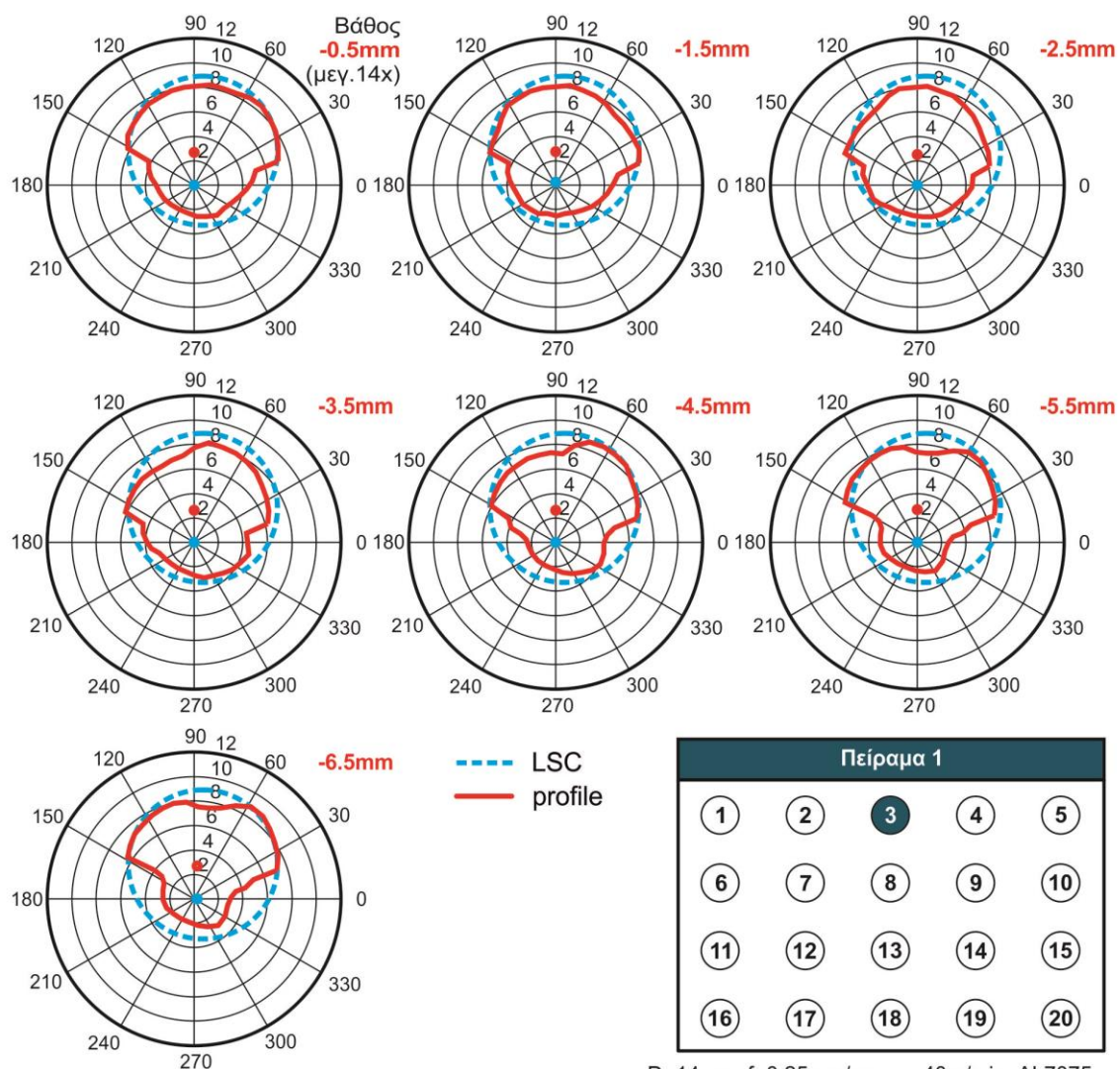


D=14mm, f=0.20mm/rev, v_c =40m/min, AL7075

3D Απεικόνιση Οπής, Κυκλικότητα, Απόκλιση RMS, Ομοκεντρικότητα



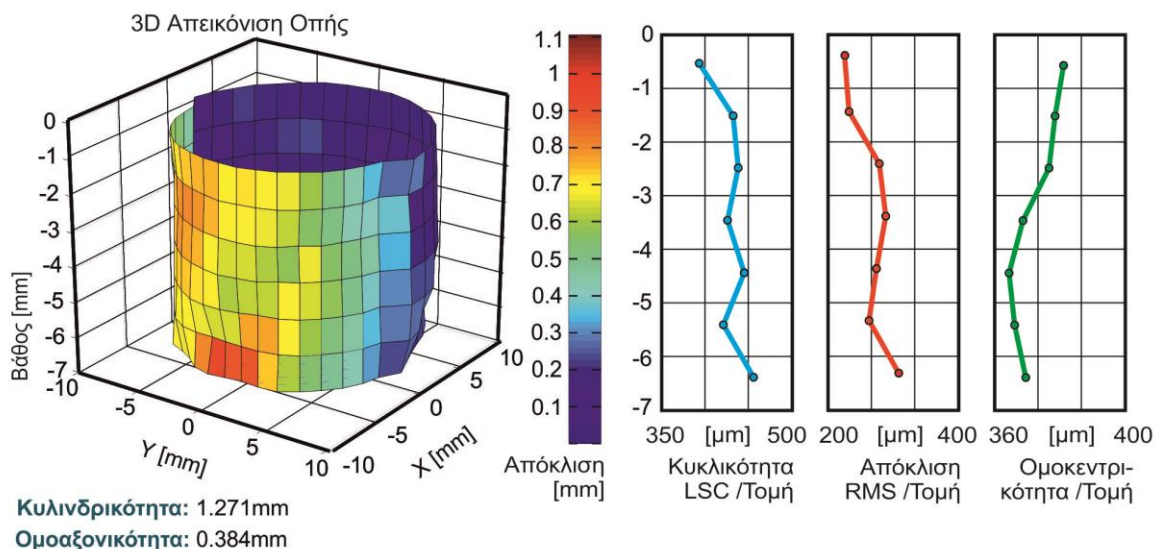
Αποκλίσεις σε συγκεκριμένα βάθη μέτρησης



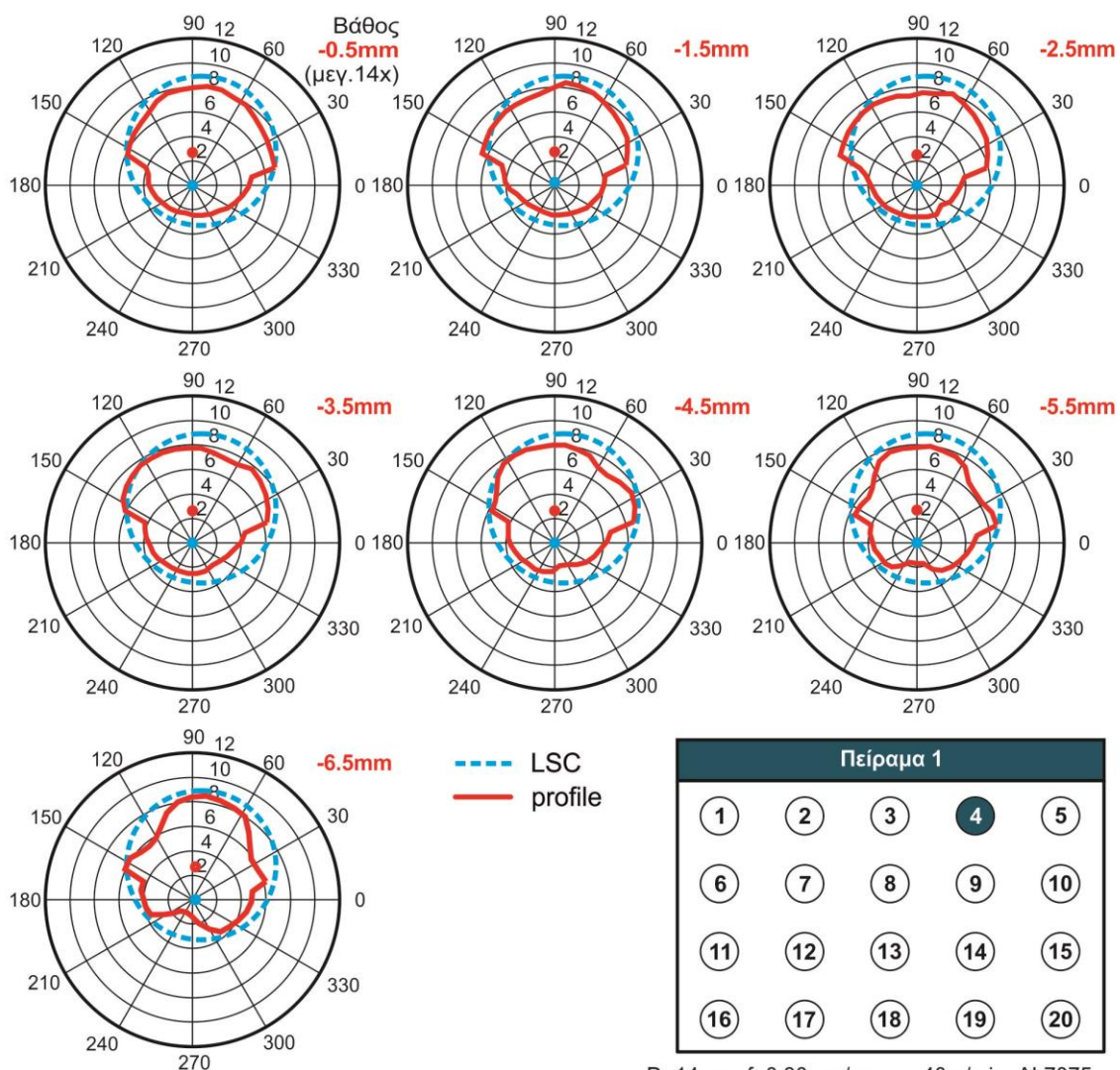
D=14mm, f=0.25mm/rev, $v_c=40\text{m/min}$, AL7075



3D Απεικόνιση Οπής, Κυκλικότητα, Απόκλιση RMS, Ομοκεντρικότητα

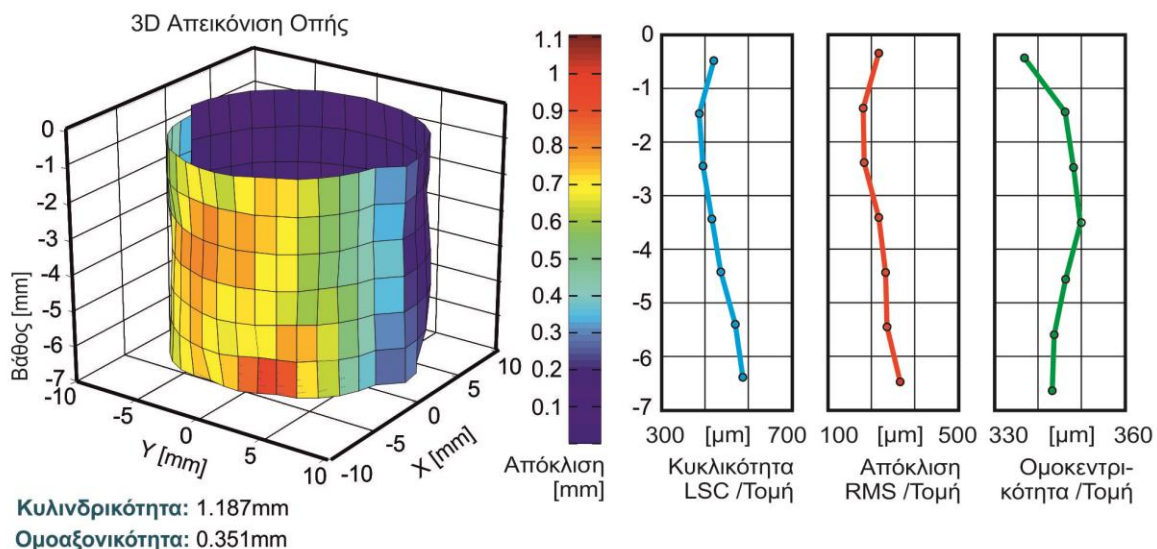


Αποκλίσεις σε συγκεκριμένα βάθη μέτρησης

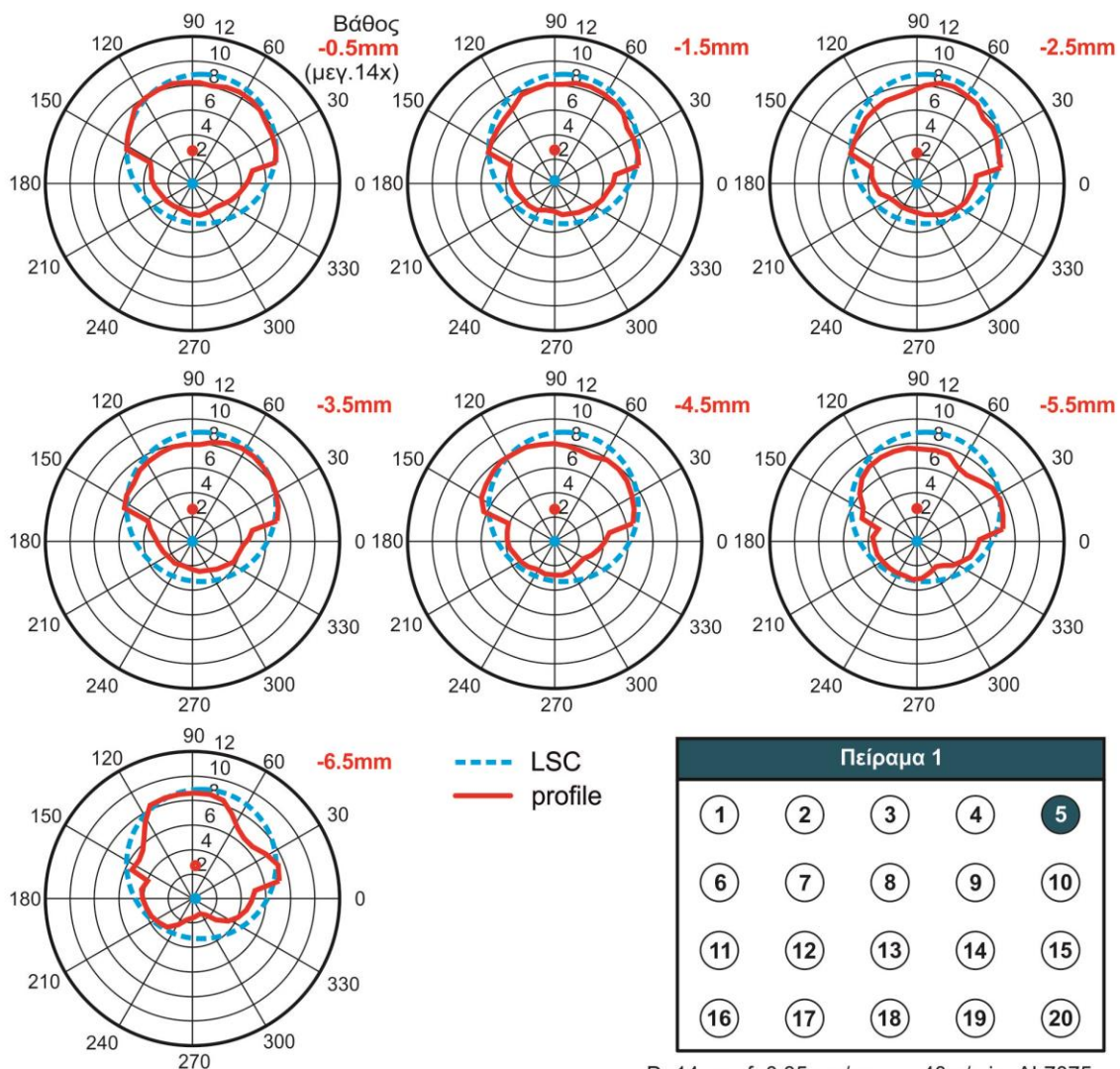




3D Απεικόνιση Οπής, Κυκλικότητα, Απόκλιση RMS, Ομοκεντρικότητα



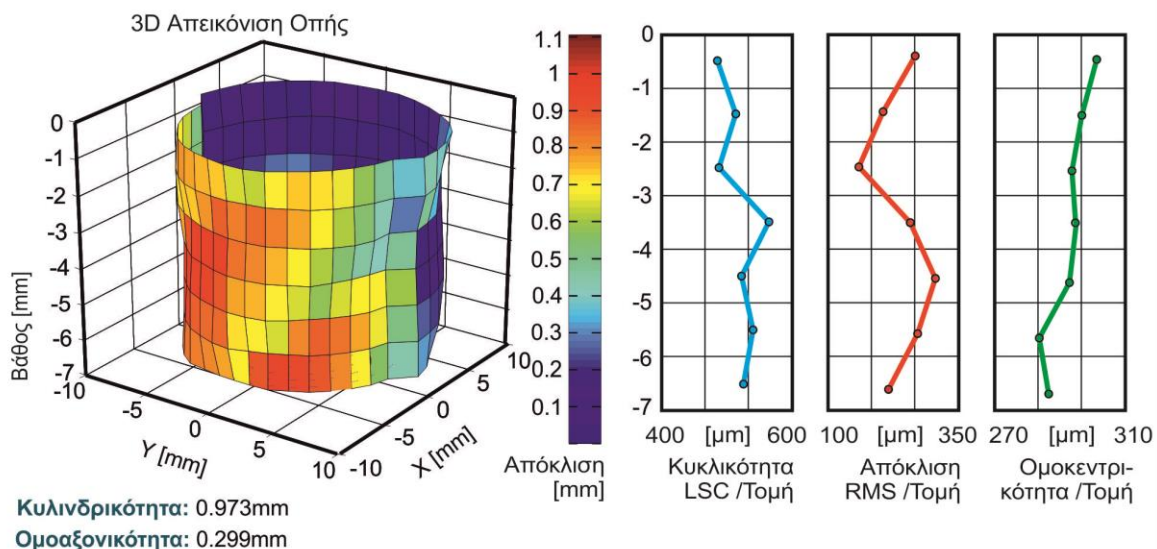
Αποκλίσεις σε συγκεκριμένα βάθη μέτρησης



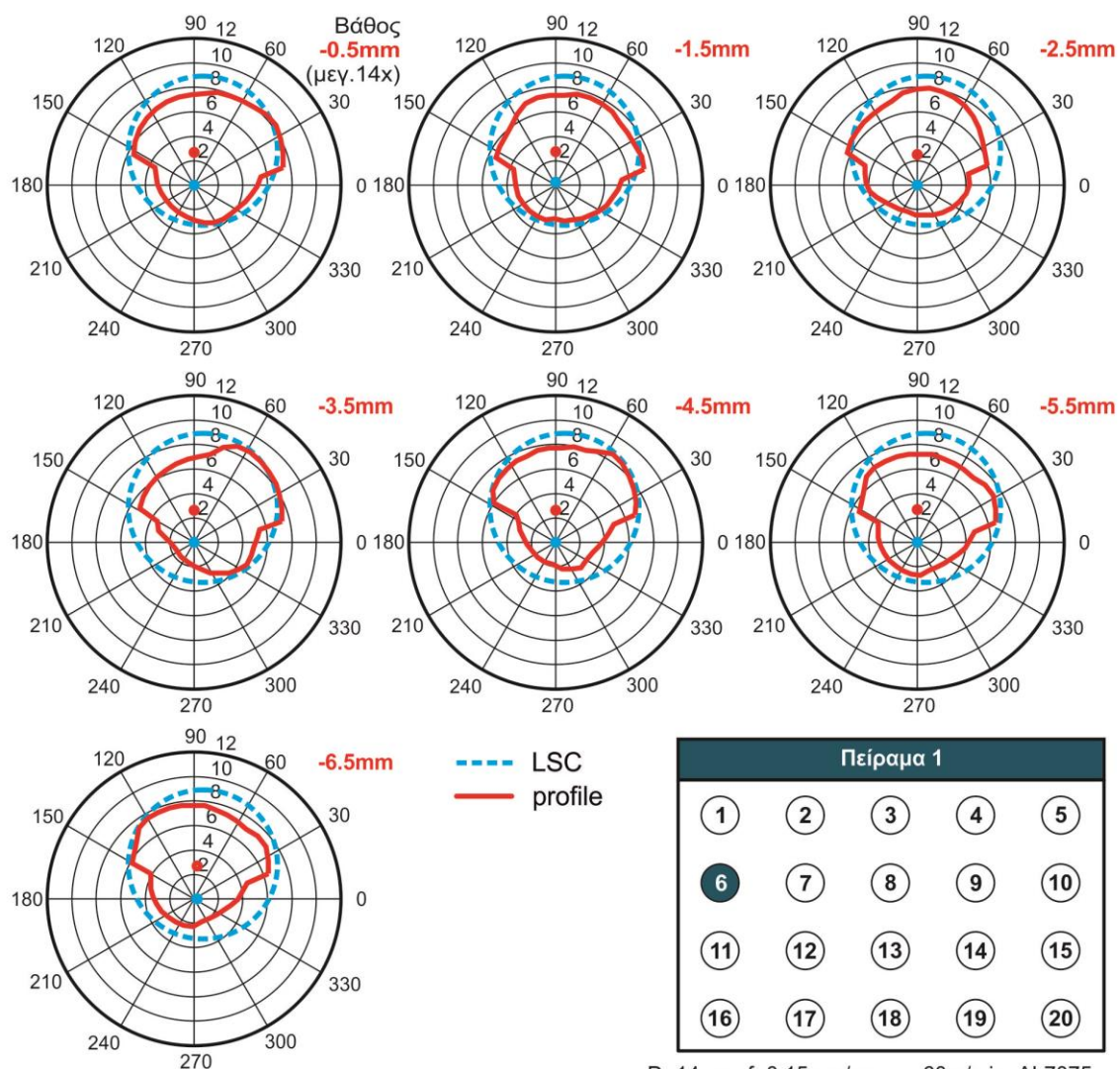
D=14mm, f=0.35mm/rev, v_c=40m/min, AL7075



3D Απεικόνιση Οπής, Κυκλικότητα, Απόκλιση RMS, Ομοκεντρικότητα



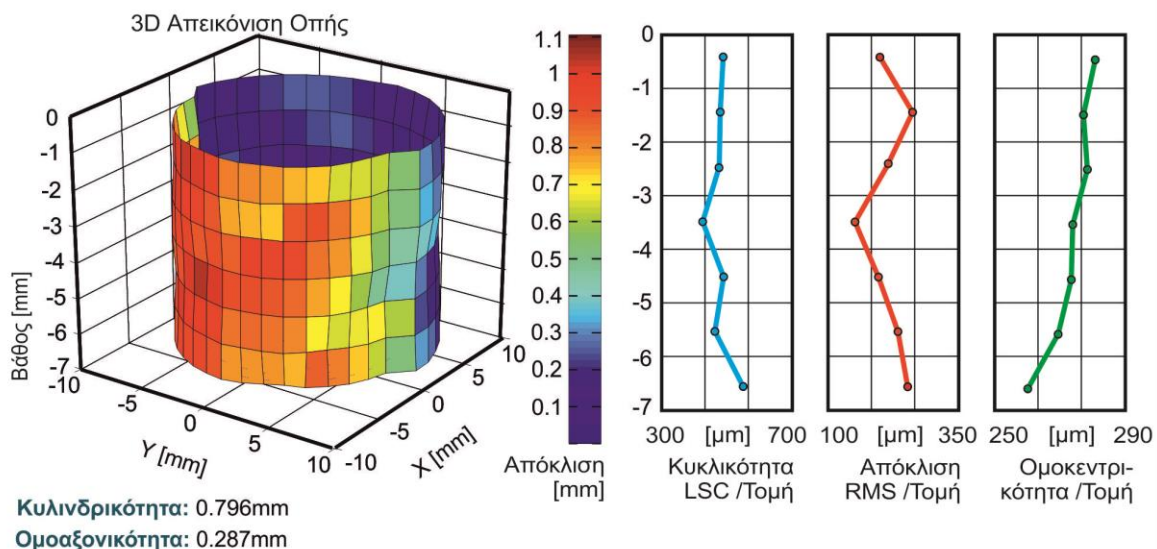
Αποκλίσεις σε συγκεκριμένα βάθη μέτρησης



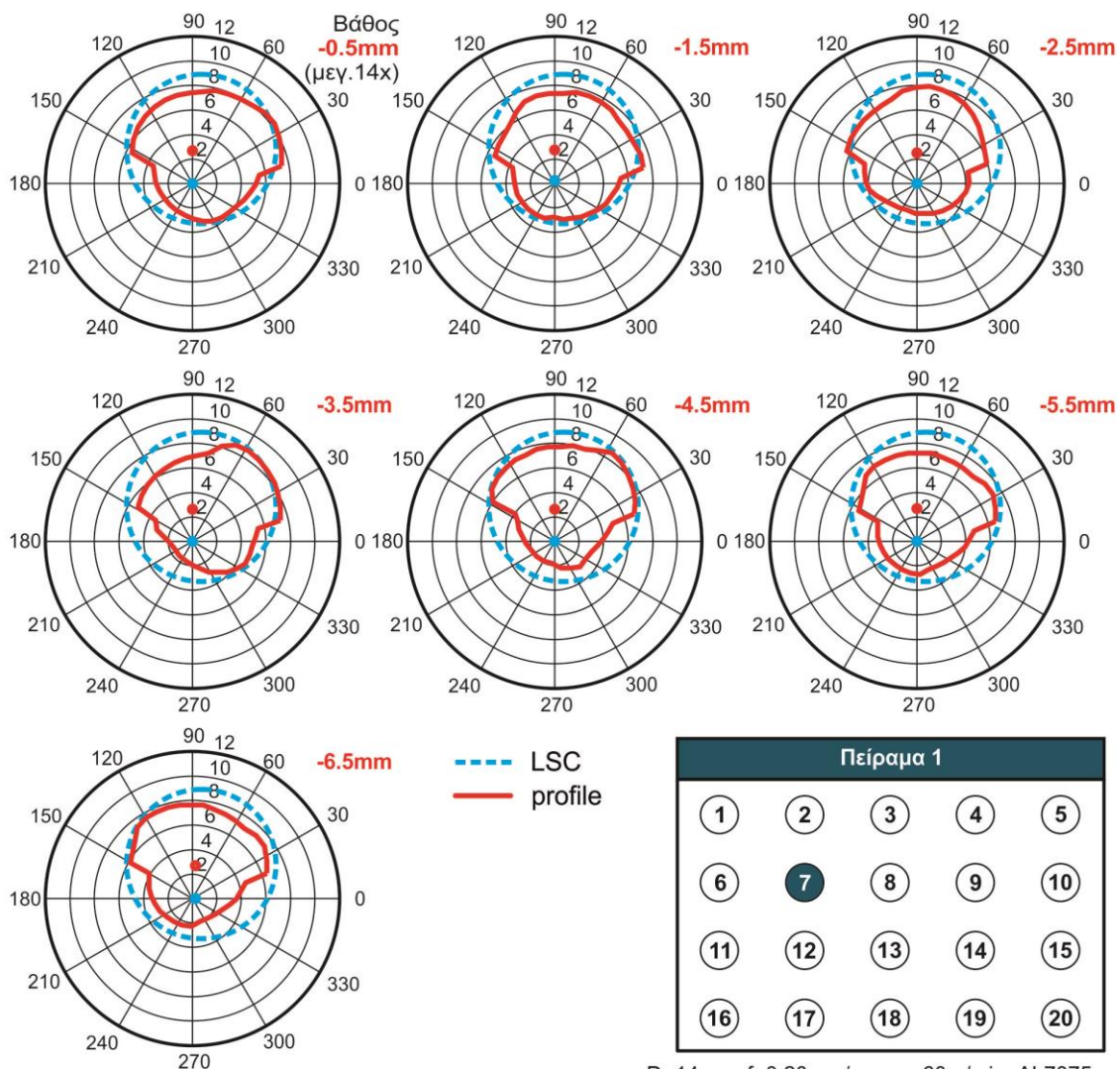
D=14mm, f=0.15mm/rev, v_c =60m/min, AL7075



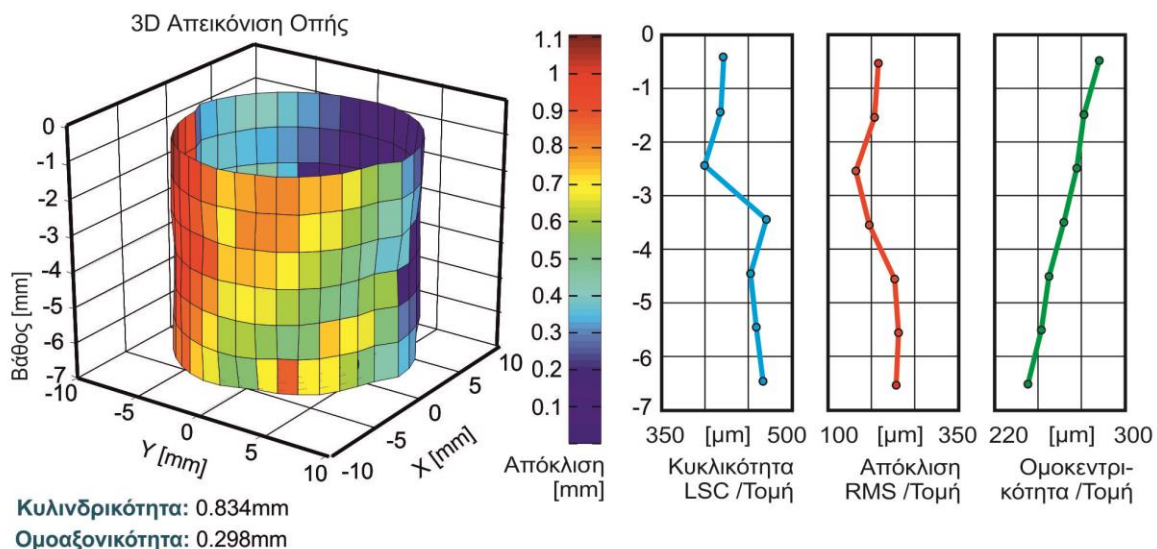
3D Απεικόνιση Οπής, Κυκλικότητα, Απόκλιση RMS, Ομοκεντρικότητα



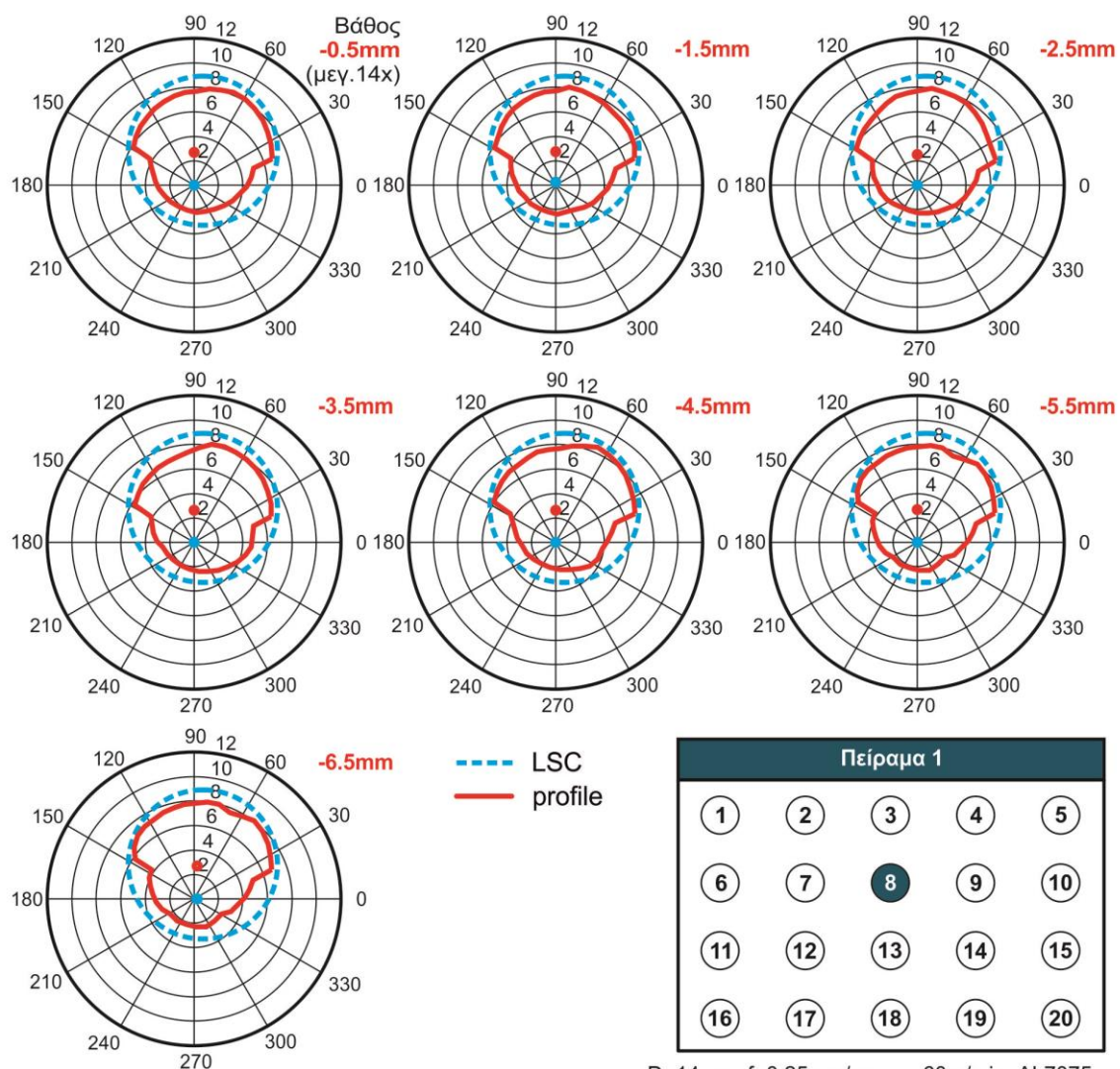
Αποκλίσεις σε συγκεκριμένα βάθη μέτρησης



3D Απεικόνιση Οπής, Κυκλικότητα, Απόκλιση RMS, Ομοκεντρικότητα



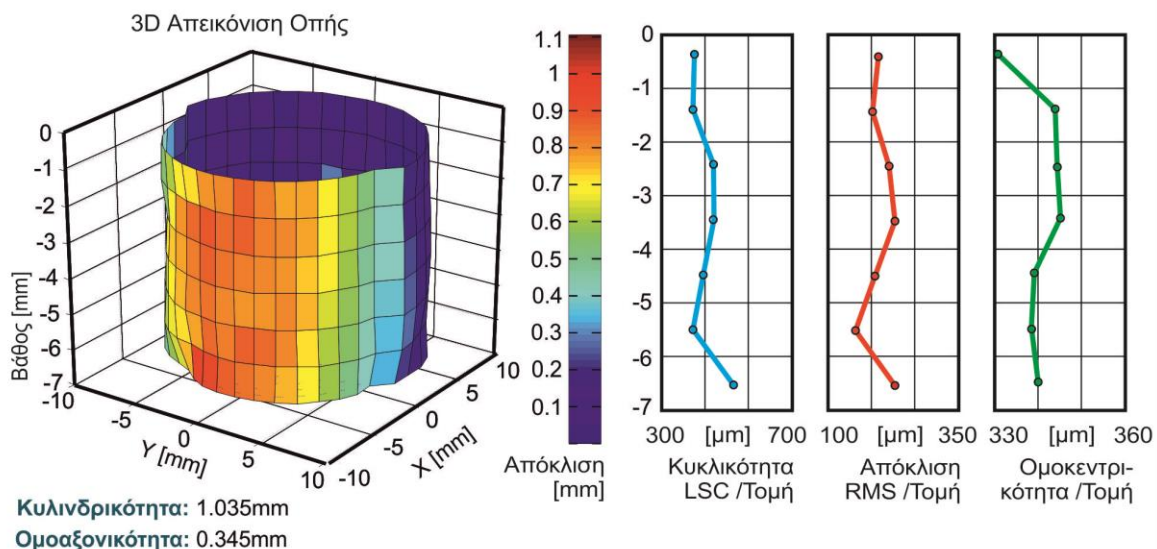
Αποκλίσεις σε συγκεκριμένα βάθη μέτρησης



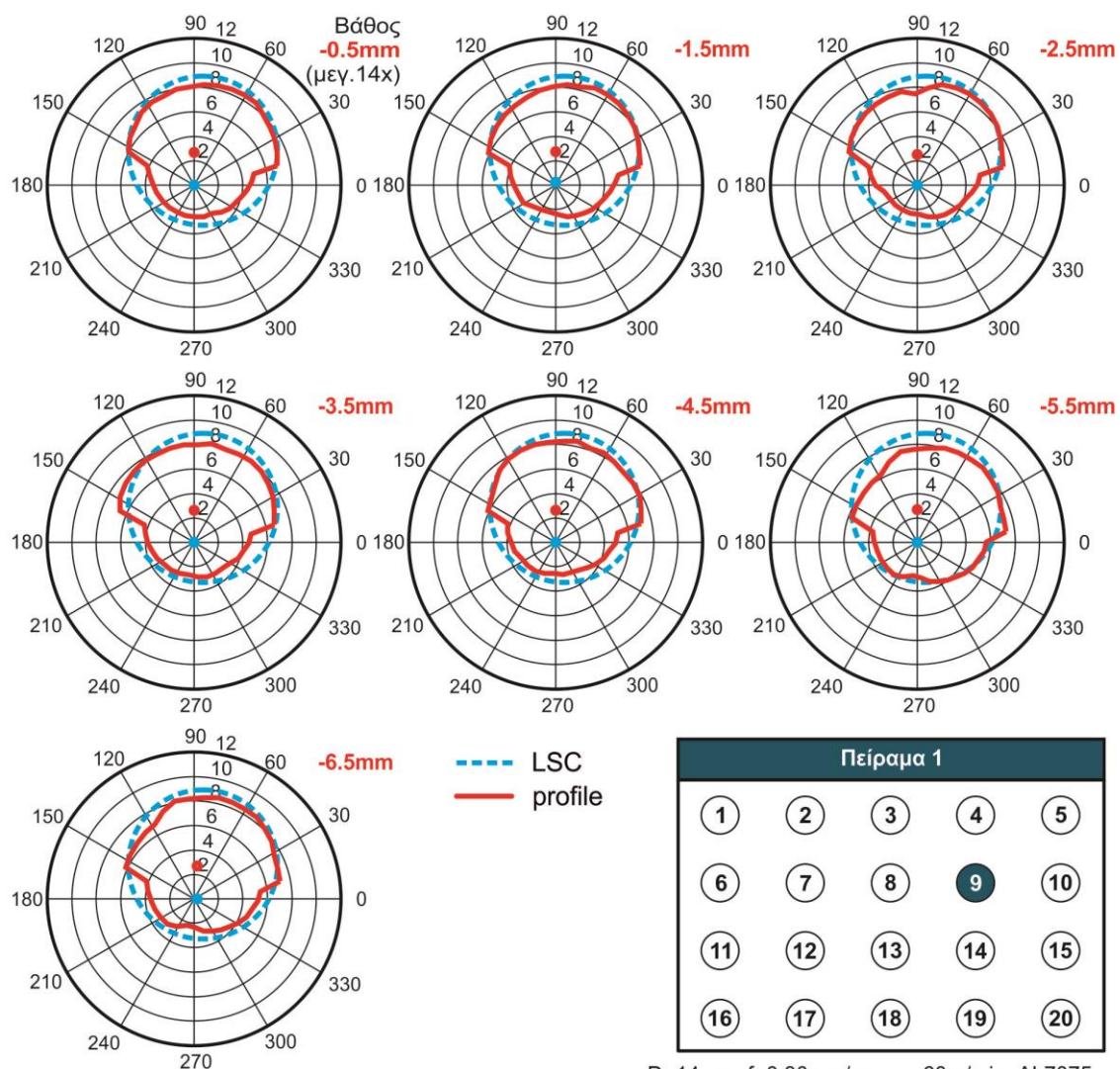
D=14mm, f=0.25mm/rev, v_c=60m/min, AL7075



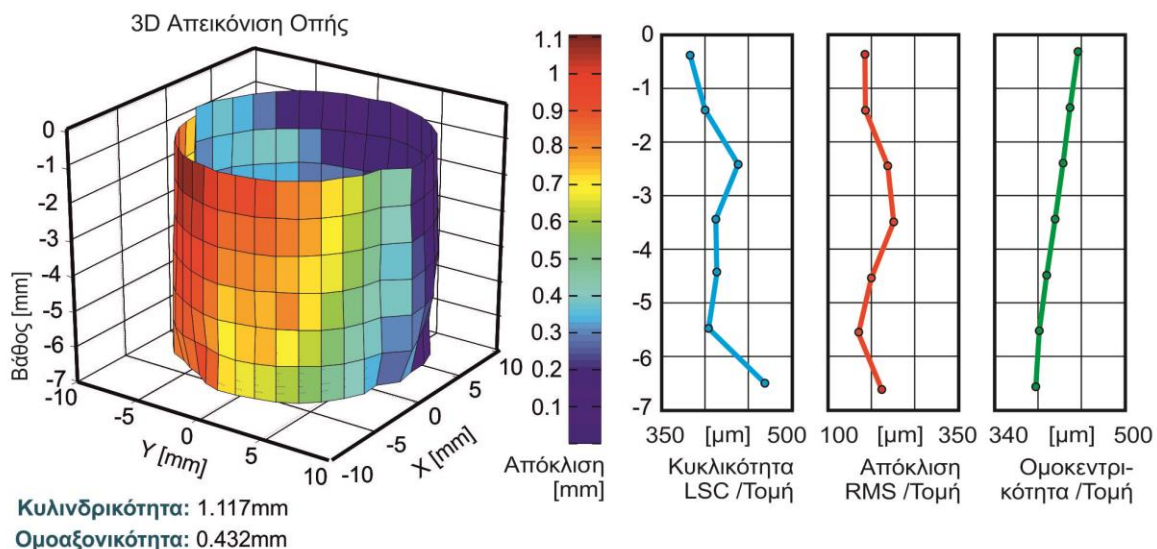
3D Απεικόνιση Οπής, Κυκλικότητα, Απόκλιση RMS, Ομοκεντρικότητα



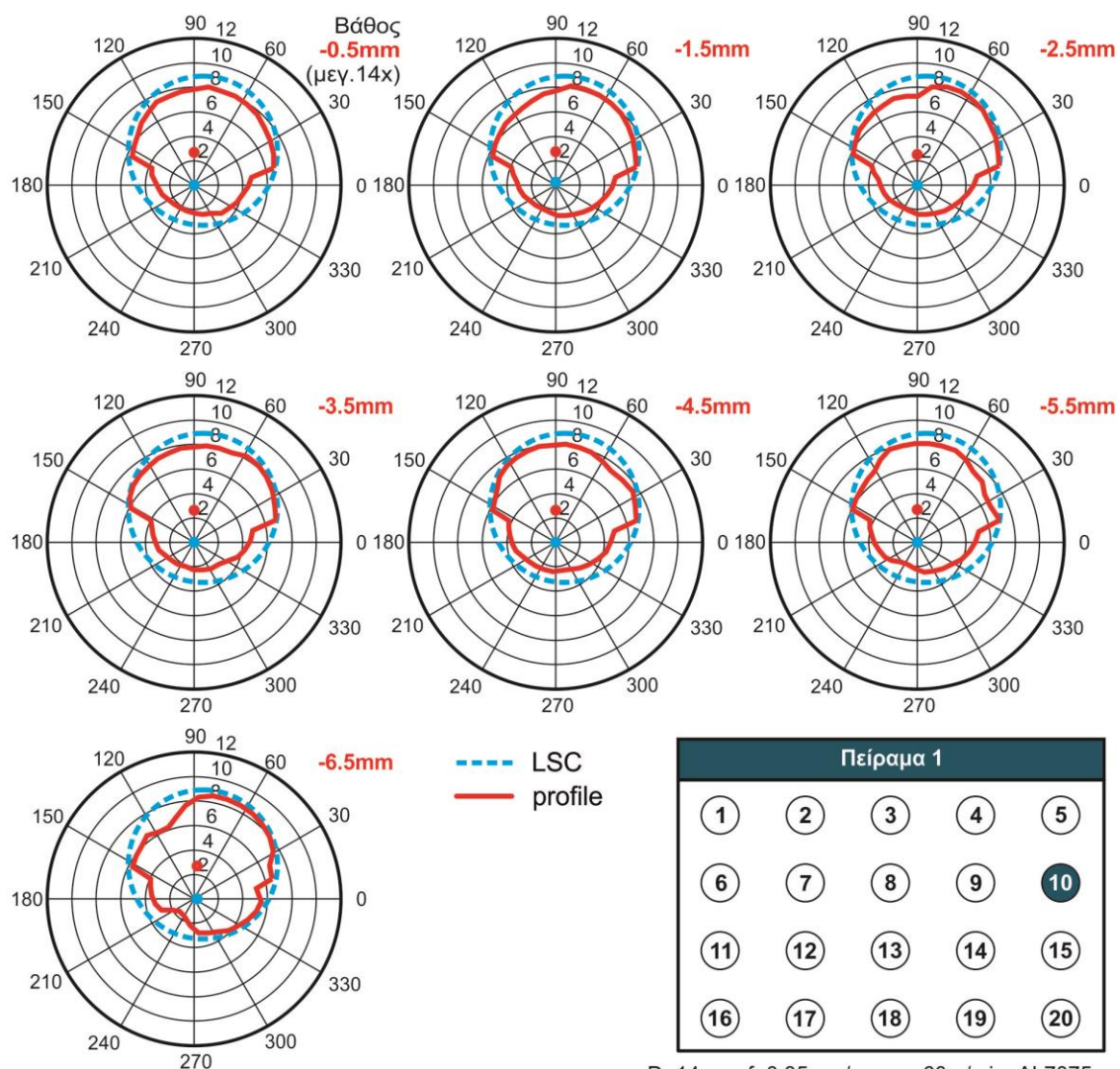
Αποκλίσεις σε συγκεκριμένα βάθη μέτρησης



3D Απεικόνιση Οπής, Κυκλικότητα, Απόκλιση RMS, Ομοκεντρικότητα



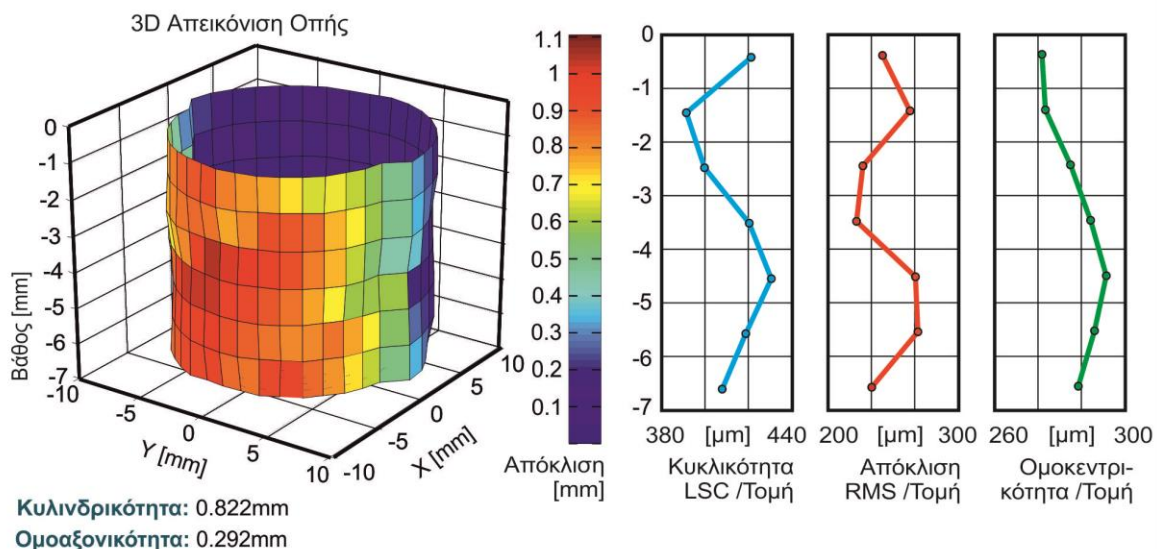
Αποκλίσεις σε συγκεκριμένα βάθη μέτρησης



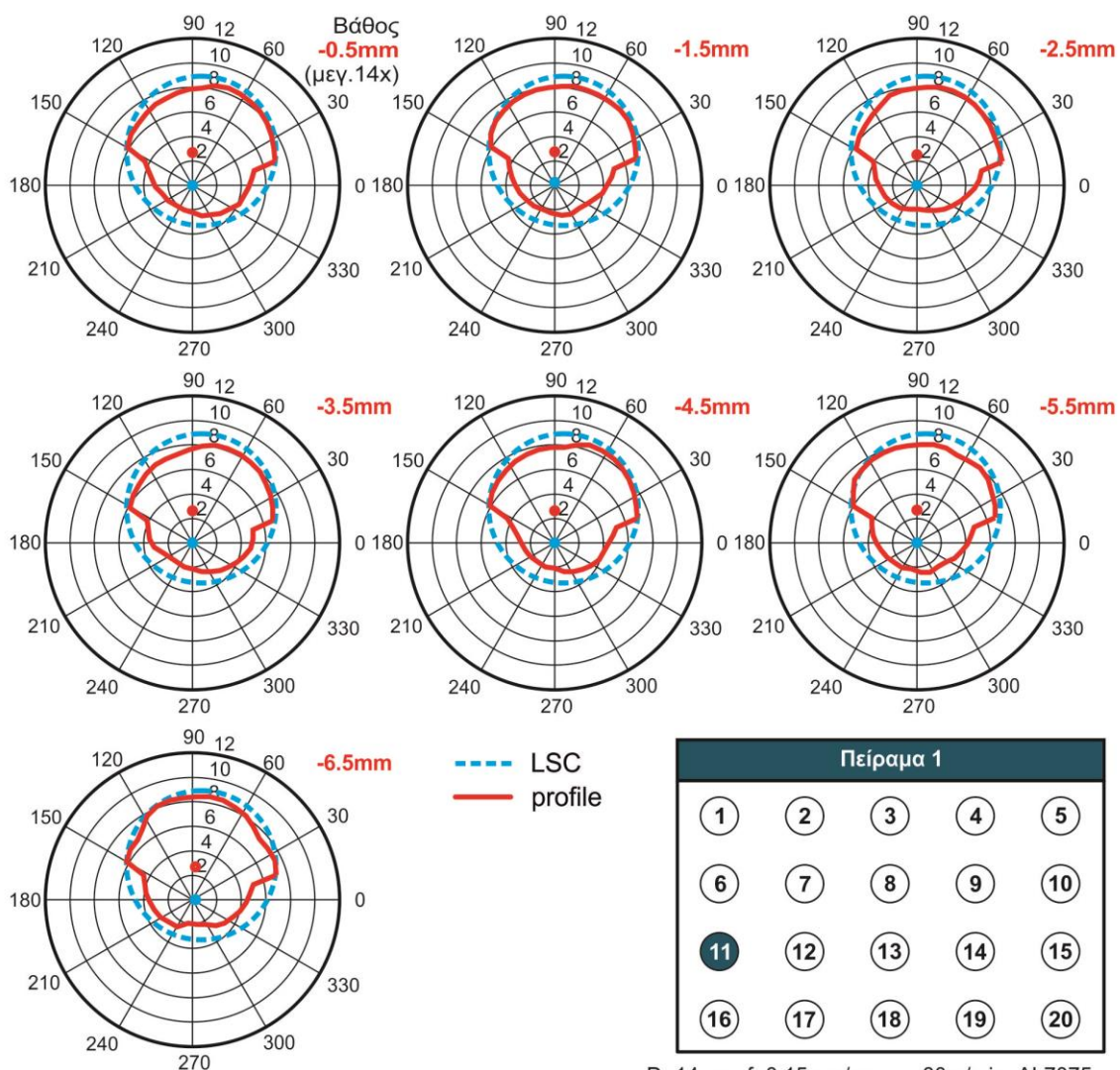
D=14mm, f=0.35mm/rev, v_c=60m/min, AL7075



3D Απεικόνιση Οπής, Κυκλικότητα, Απόκλιση RMS, Ομοκεντρικότητα

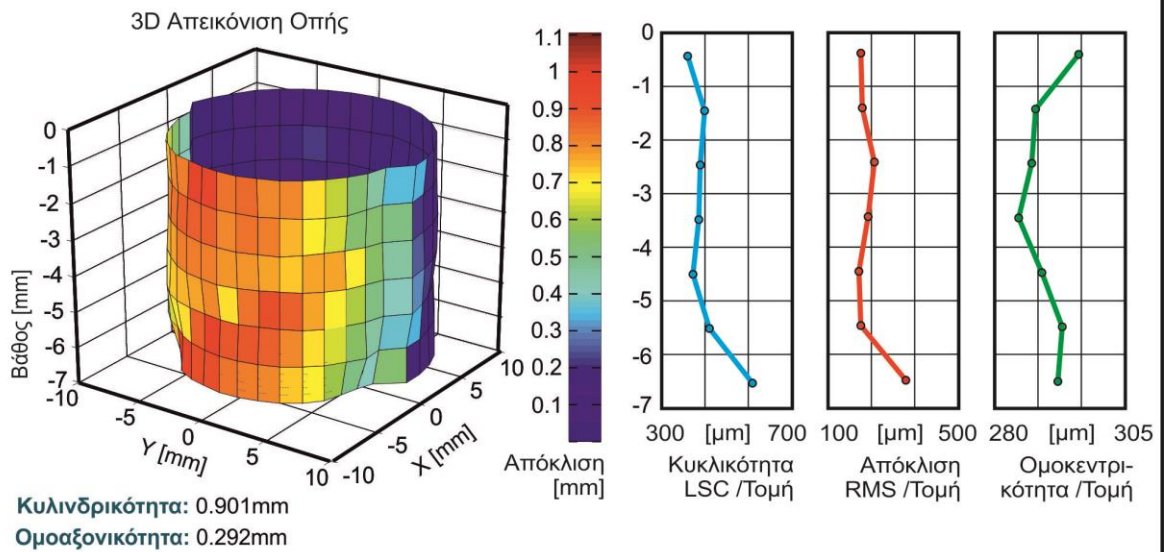


Αποκλίσεις σε συγκεκριμένα βάθη μέτρησης

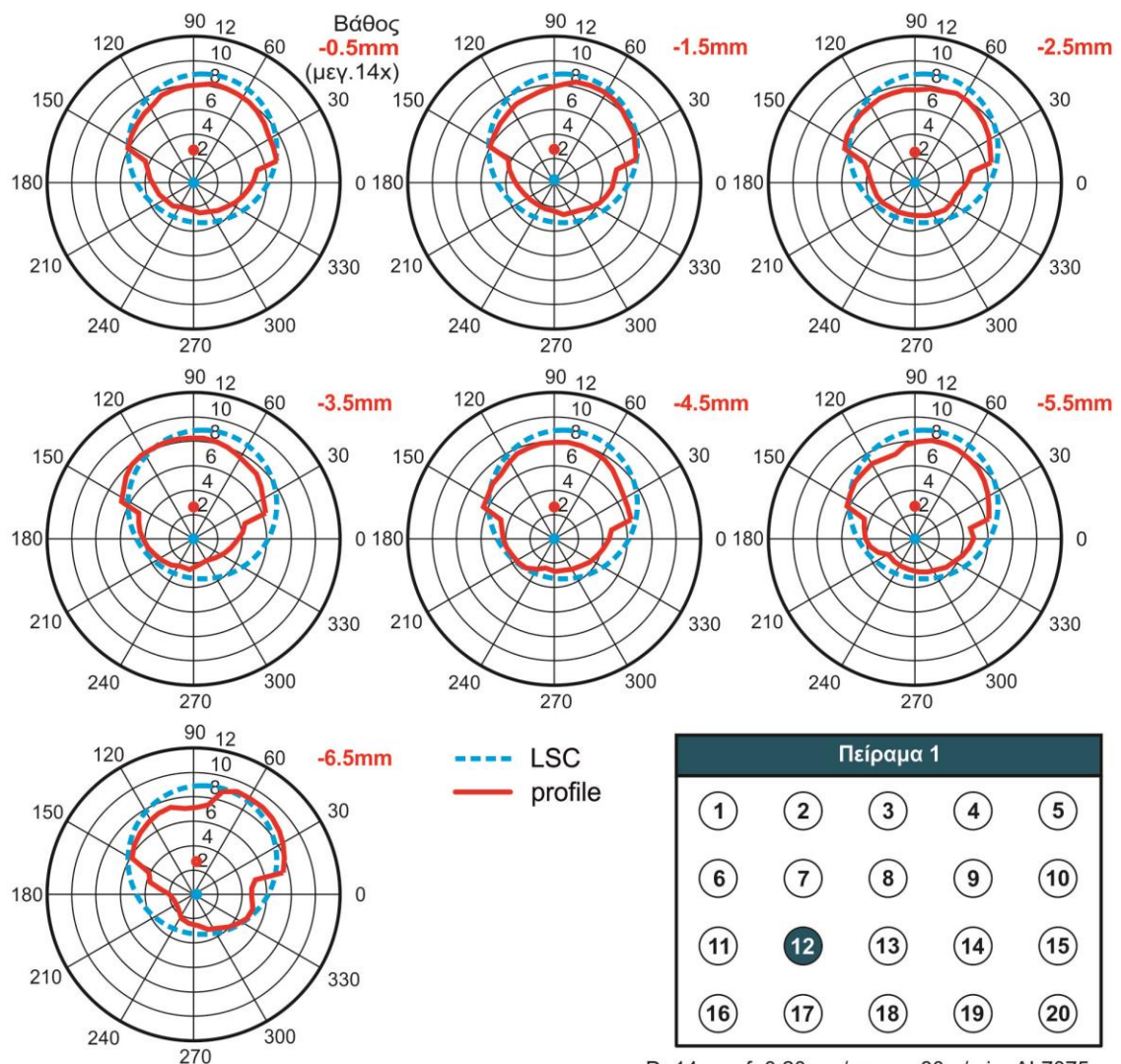


D=14mm, f=0.15mm/rev, v_c =80m/min, AL7075

3D Απεικόνιση Οπής, Κυκλικότητα, Απόκλιση RMS, Ομοκεντρικότητα



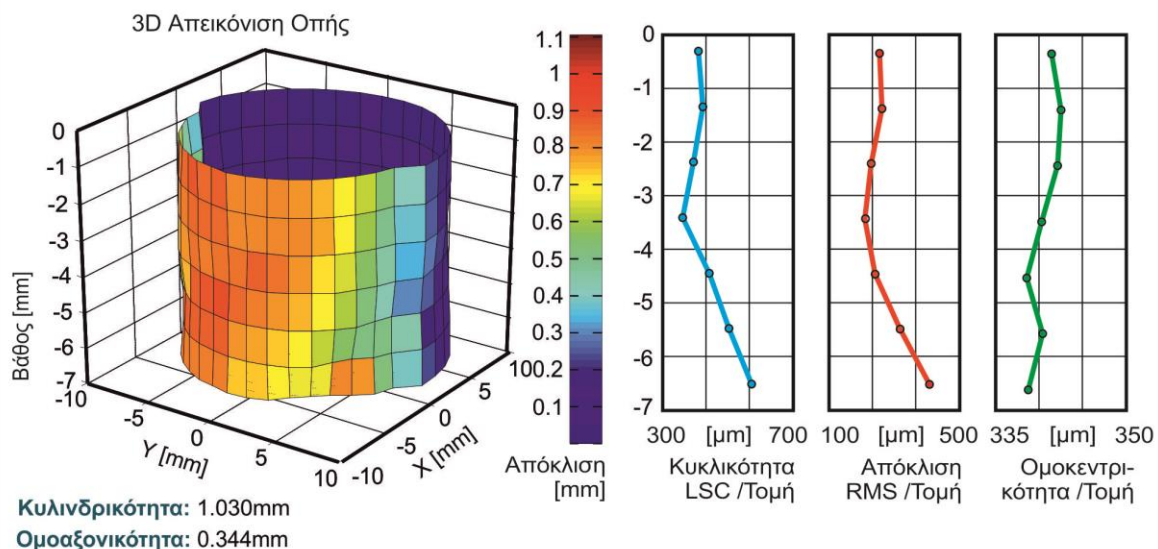
Αποκλίσεις σε συγκεκριμένα βάθη μέτρησης



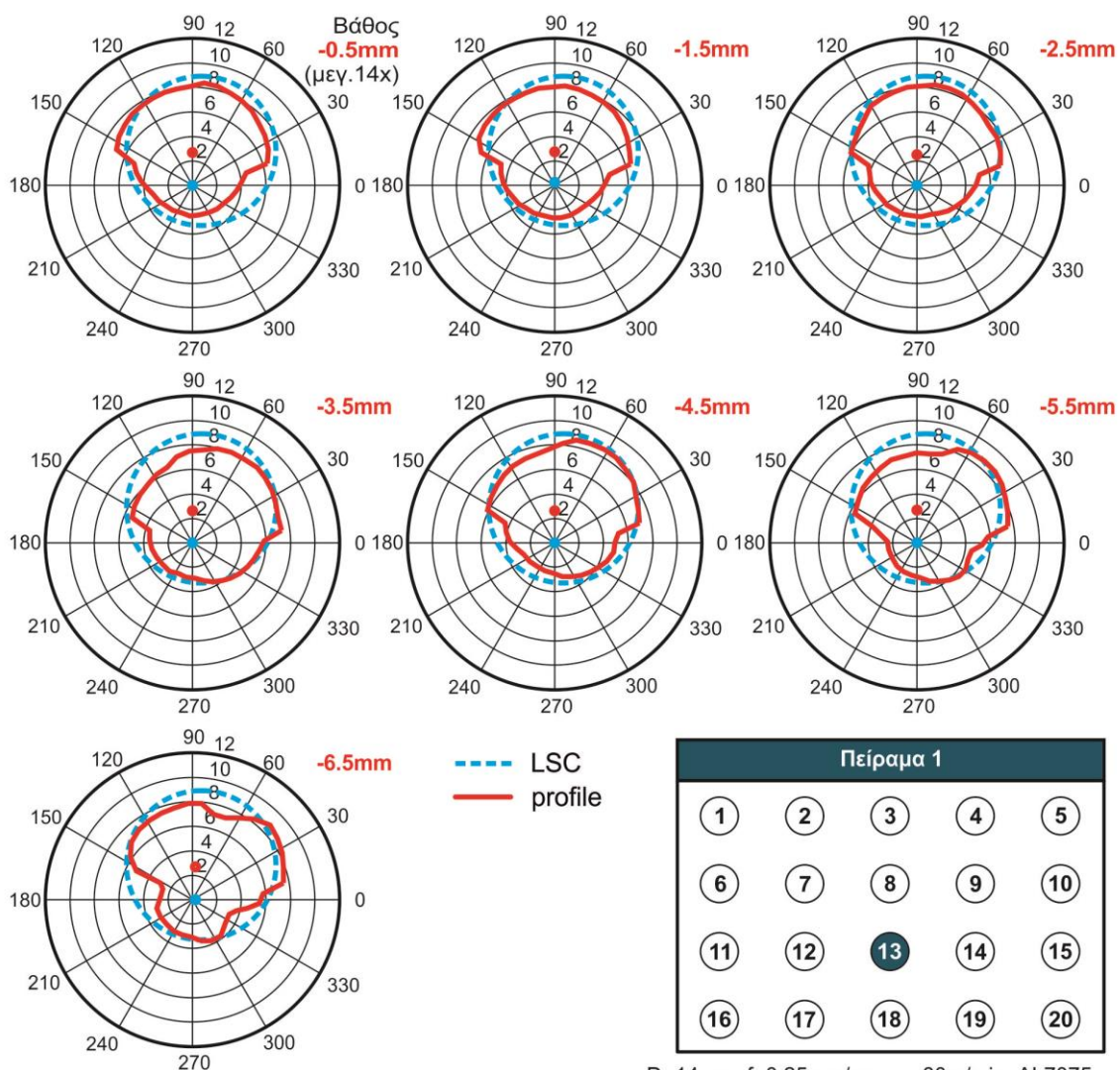
D=14mm, f=0.20mm/rev, v_c=80m/min, AL7075



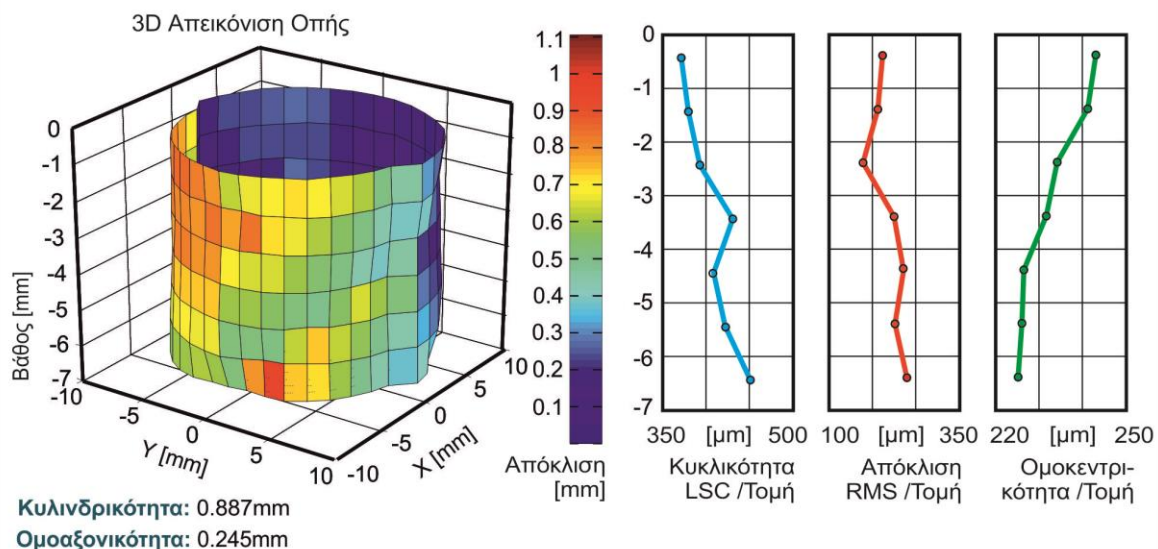
3D Απεικόνιση Οπής, Κυκλικότητα, Απόκλιση RMS, Ομοκεντρικότητα



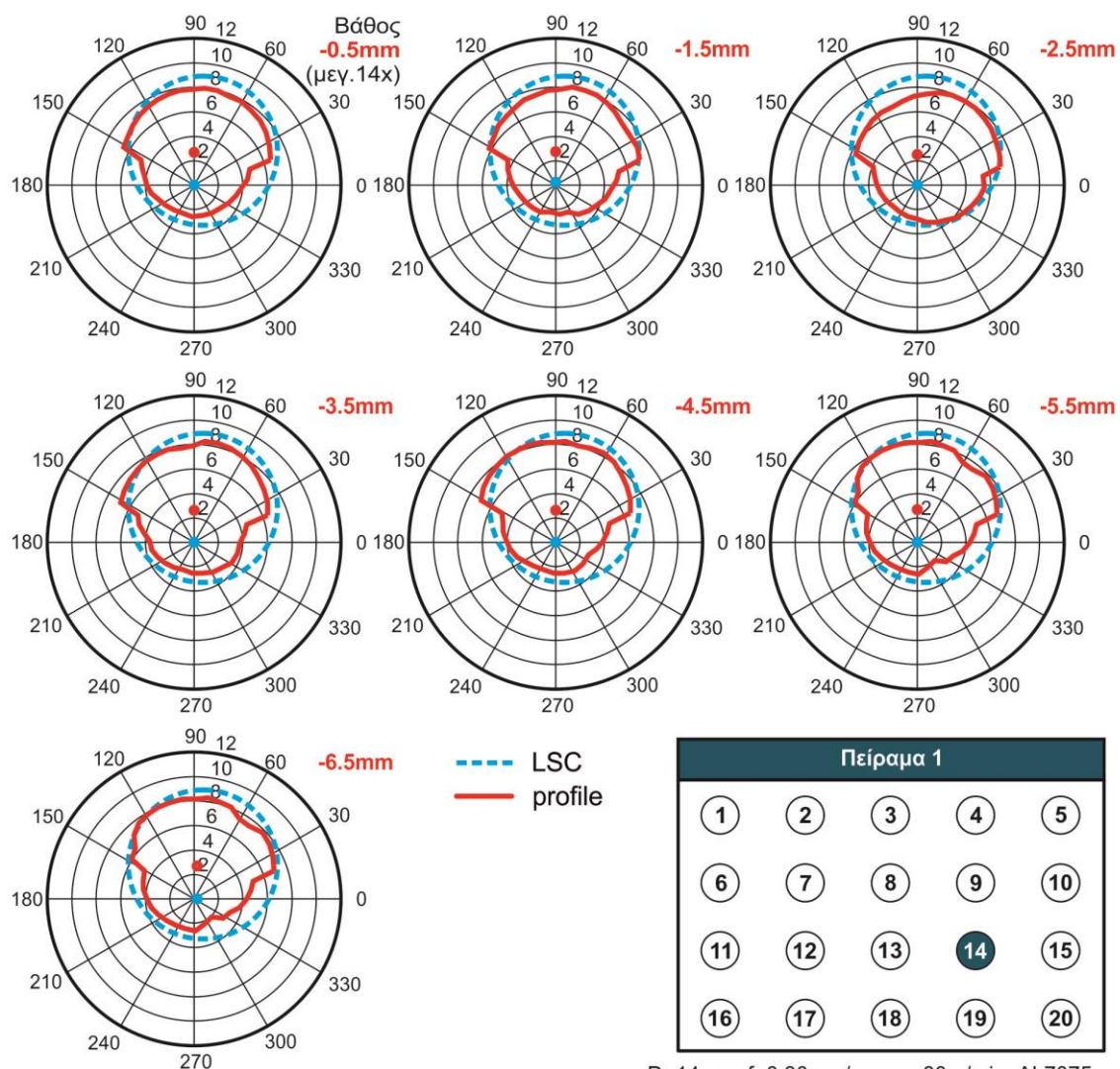
Αποκλίσεις σε συγκεκριμένα βάθη μέτρησης

D=14mm, f=0.25mm/rev, v_c =80m/min, AL7075

3D Απεικόνιση Οπής, Κυκλικότητα, Απόκλιση RMS, Ομοκεντρικότητα

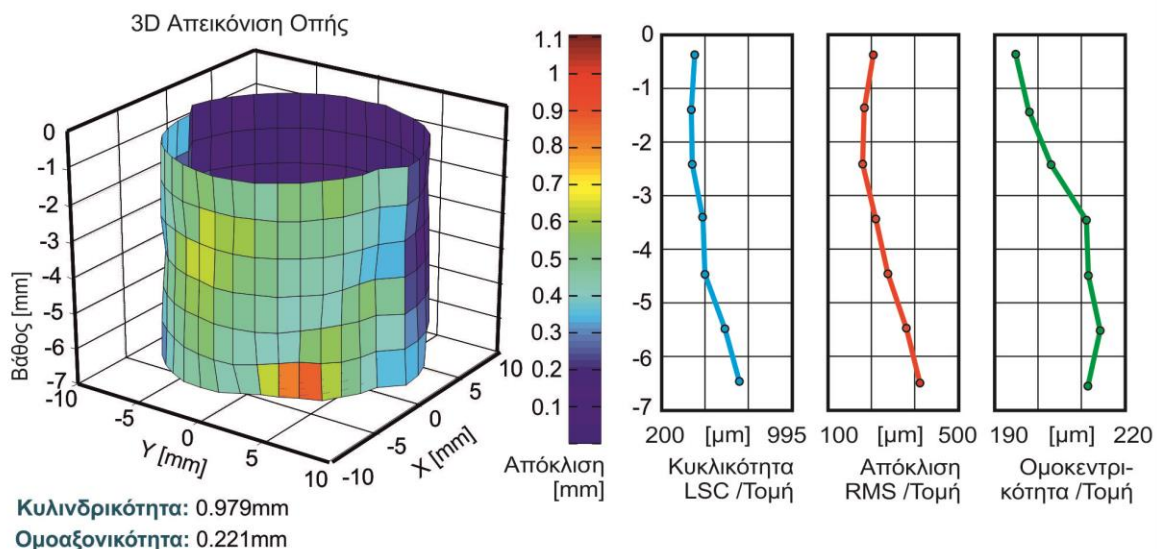


Αποκλίσεις σε συγκεκριμένα βάθη μέτρησης

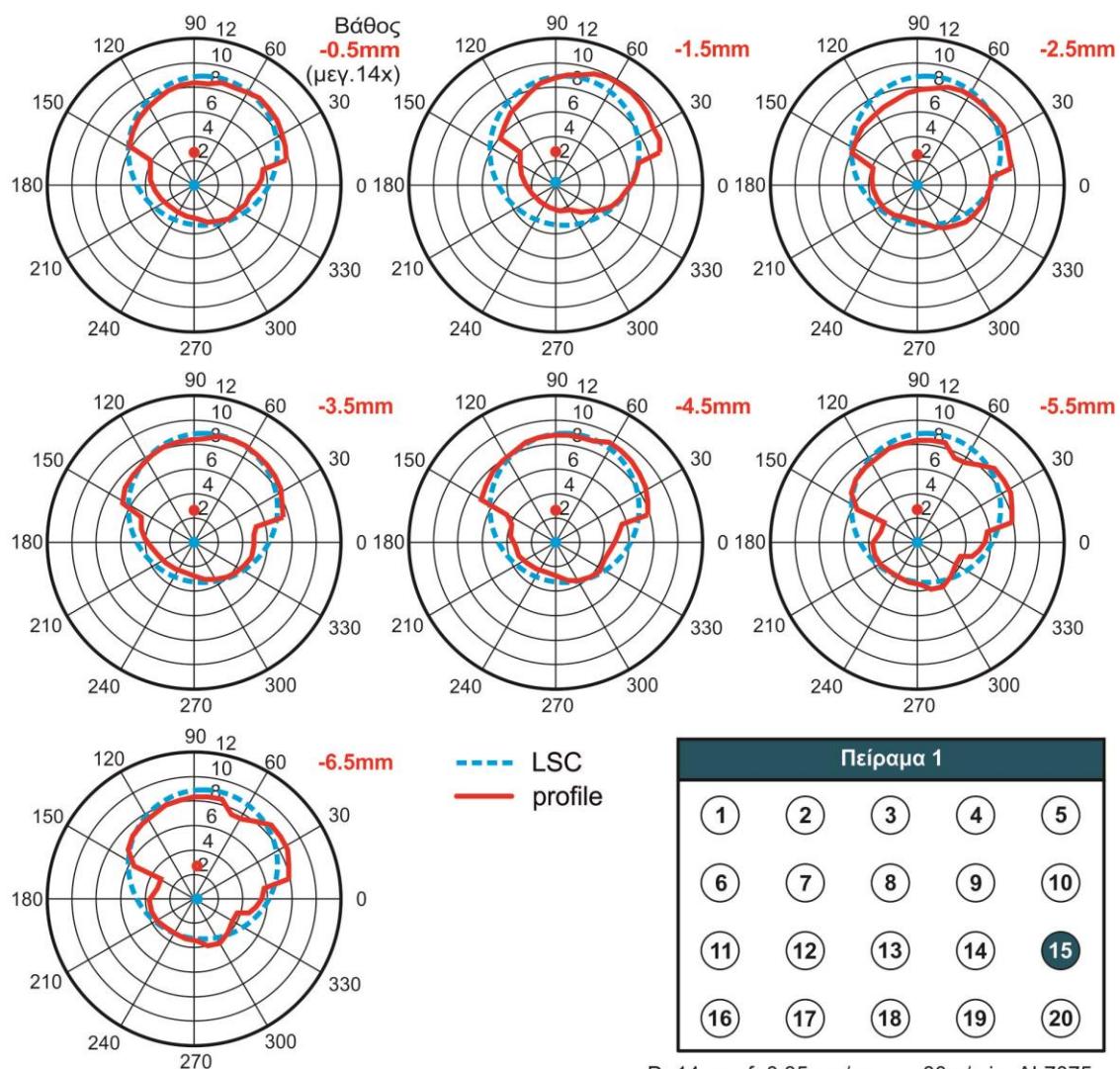


D=14mm, f=0.30mm/rev, v_c=80m/min, AL7075

3D Απεικόνιση Οπής, Κυκλικότητα, Απόκλιση RMS, Ομοκεντρικότητα



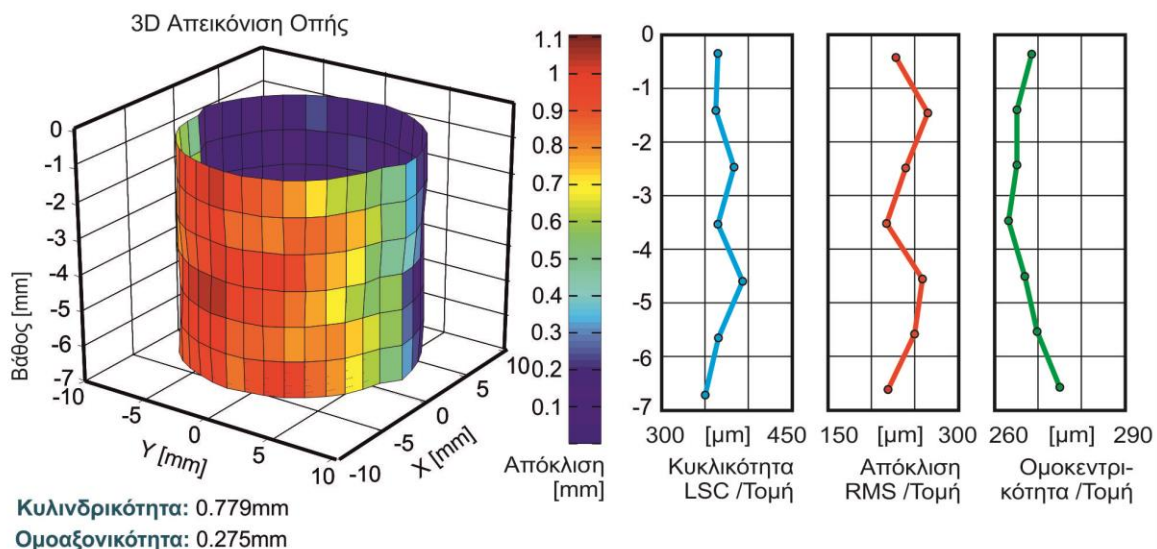
Αποκλίσεις σε συγκεκριμένα βάθη μέτρησης



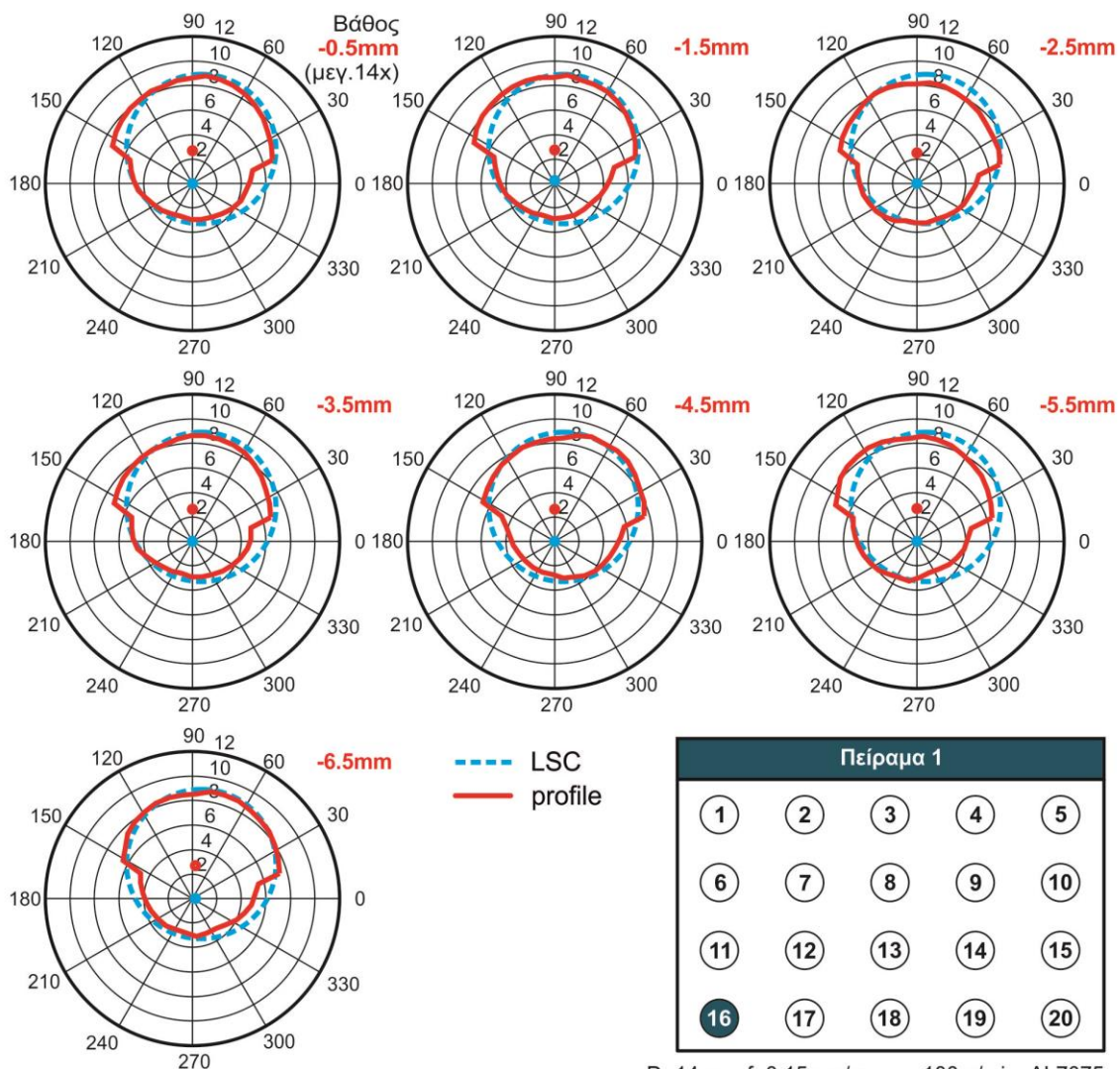
D=14mm, f=0.35mm/rev, v_c=80m/min, AL7075



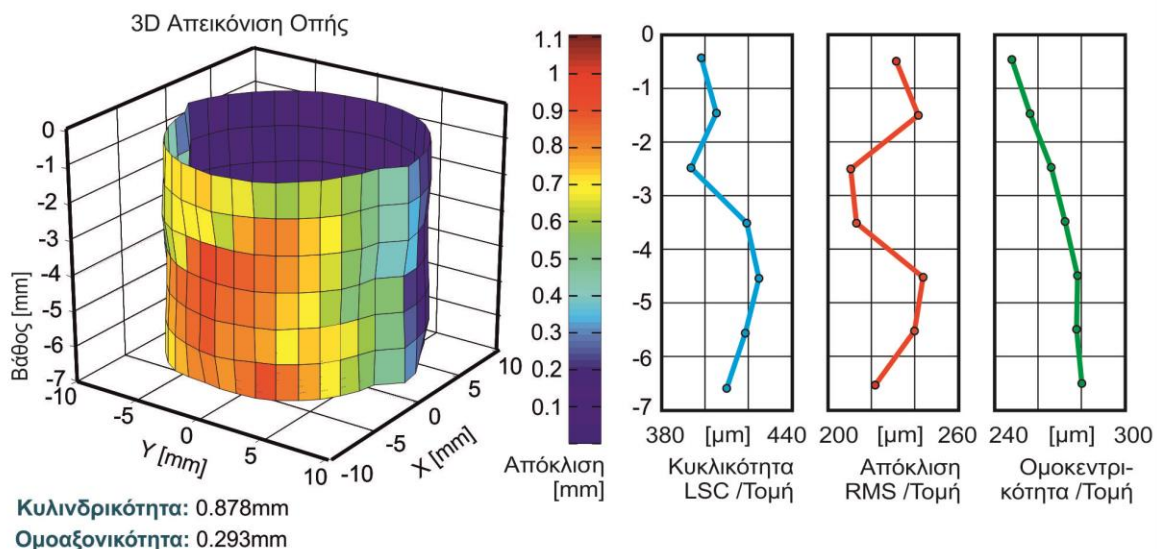
3D Απεικόνιση Οπής, Κυκλικότητα, Απόκλιση RMS, Ομοκεντρικότητα



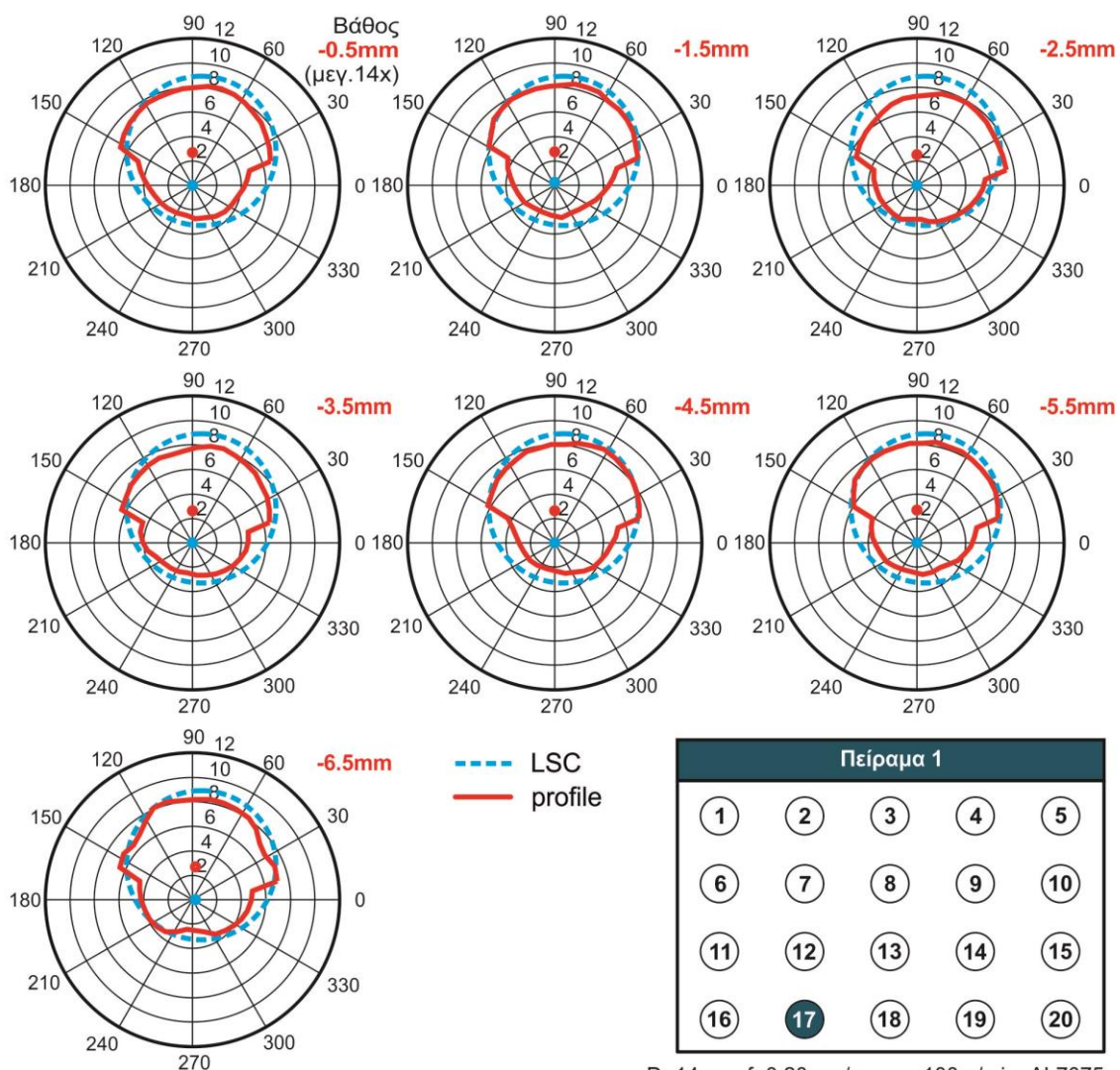
Αποκλίσεις σε συγκεκριμένα βάθη μέτρησης



3D Απεικόνιση Οπής, Κυκλικότητα, Απόκλιση RMS, Ομοκεντρικότητα



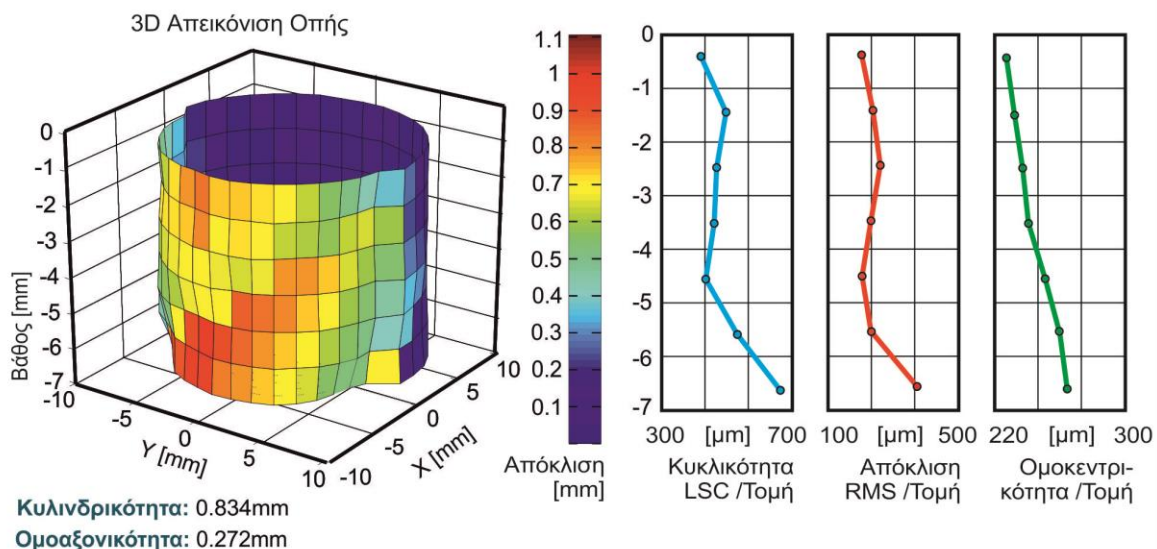
Αποκλίσεις σε συγκεκριμένα βάθη μέτρησης



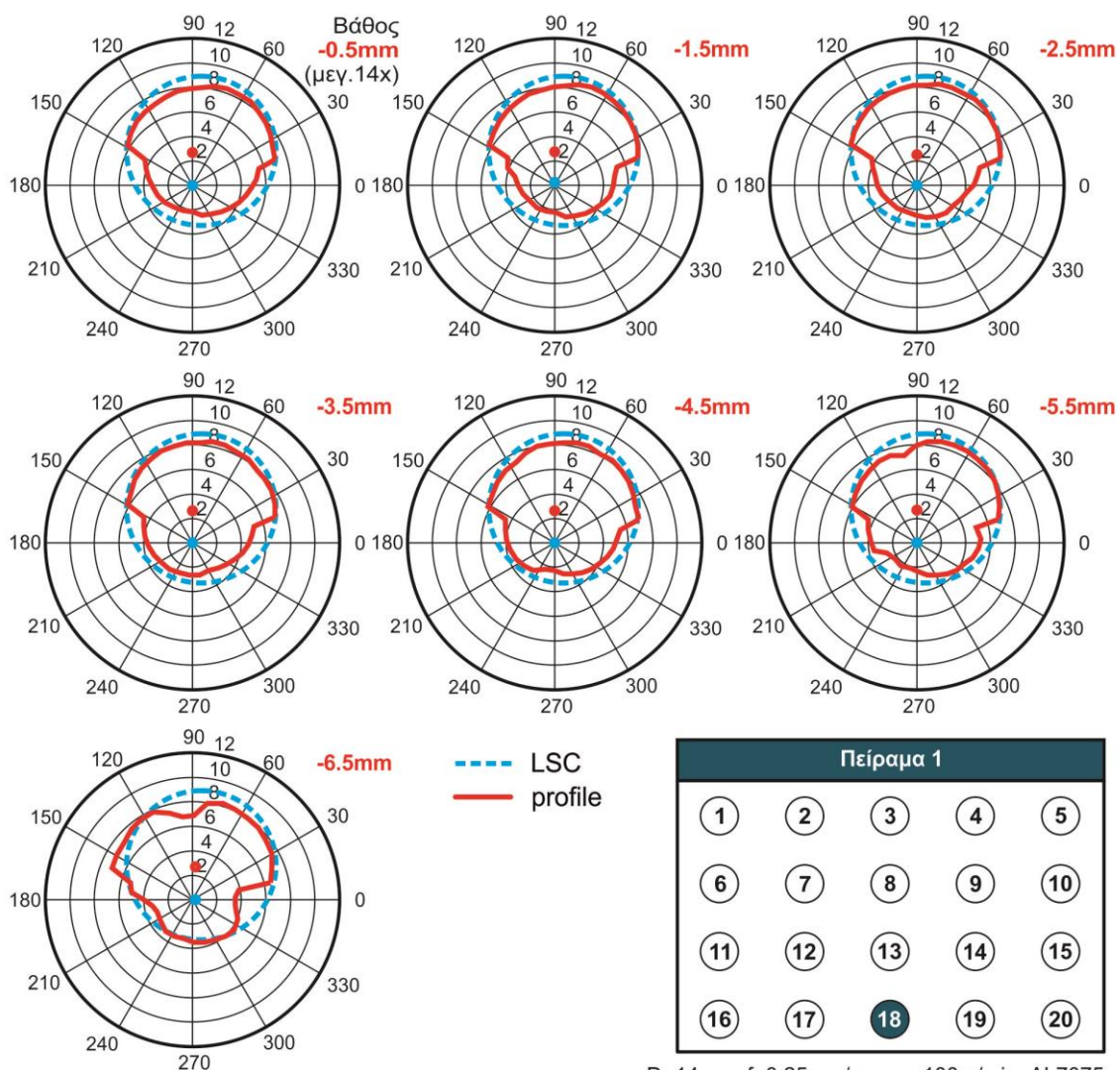
D=14mm, f=0.20mm/rev, v_c=100m/min, AL7075



3D Απεικόνιση Οπής, Κυκλικότητα, Απόκλιση RMS, Ομοκεντρικότητα



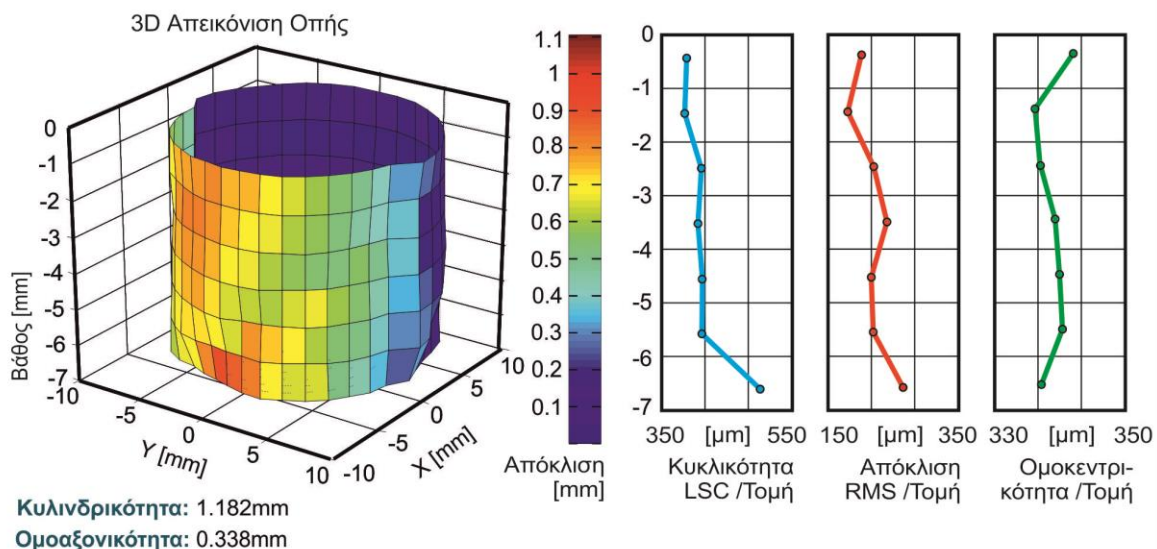
Αποκλίσεις σε συγκεκριμένα βάθη μέτρησης



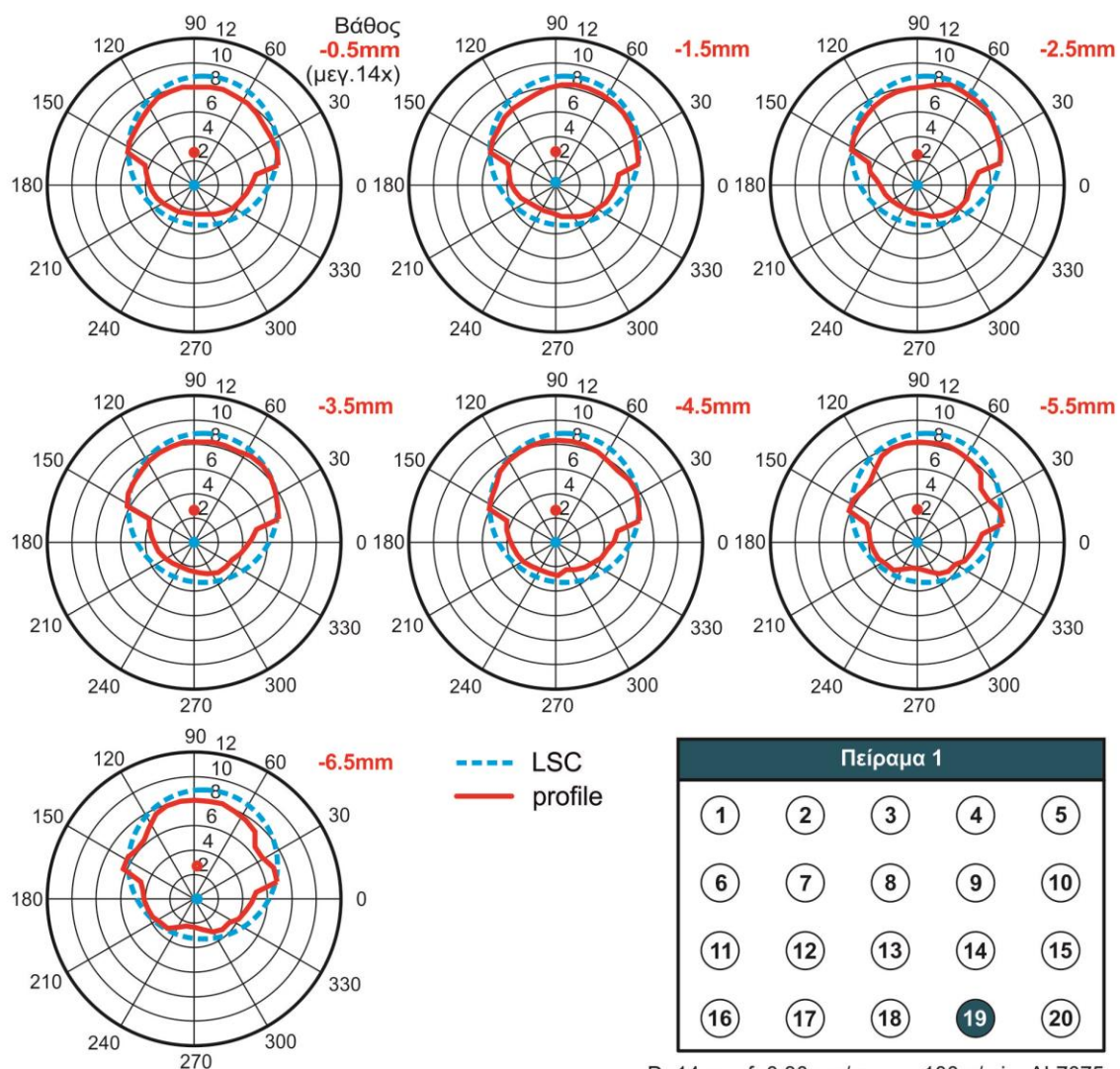
D=14mm, f=0.25mm/rev, v_c=100m/min, AL7075



3D Απεικόνιση Οπής, Κυκλικότητα, Απόκλιση RMS, Ομοκεντρικότητα



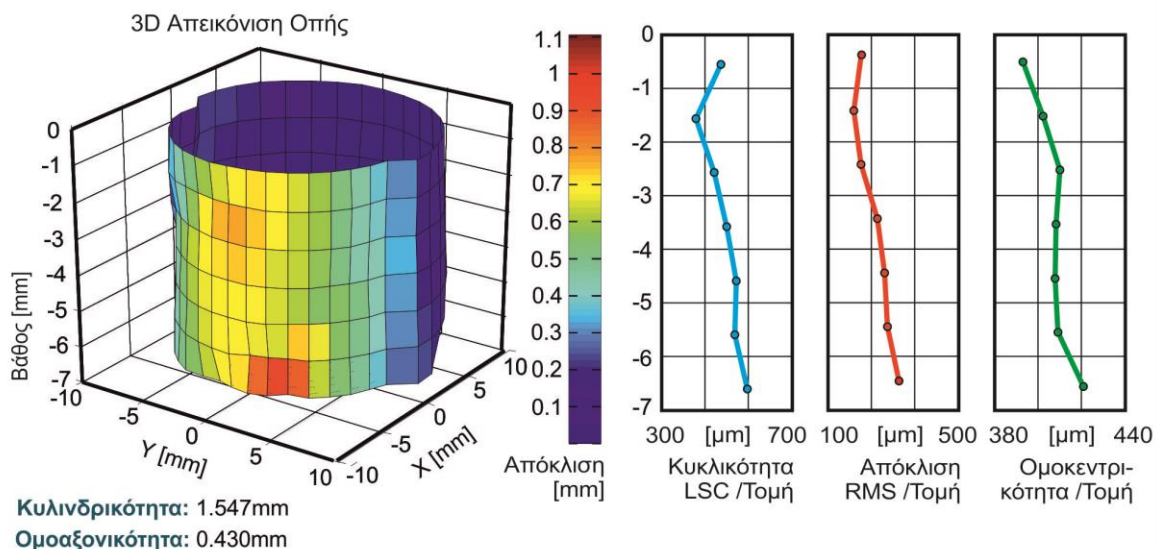
Αποκλίσεις σε συγκεκριμένα βάθη μέτρησης



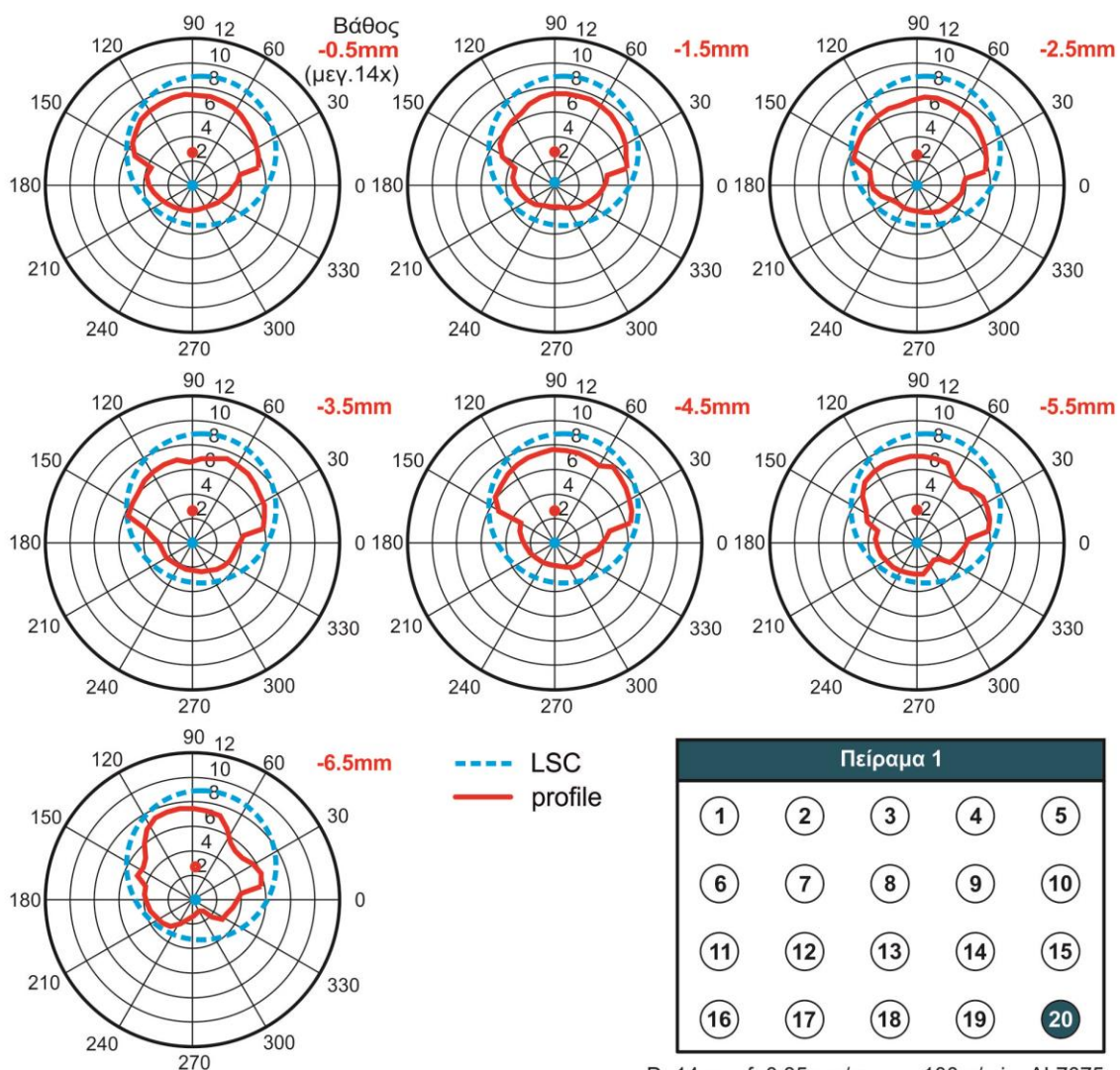
D=14mm, f=0.30mm/rev, v_c =100m/min, AL7075



3D Απεικόνιση Οπής, Κυκλικότητα, Απόκλιση RMS, Ομοκεντρικότητα



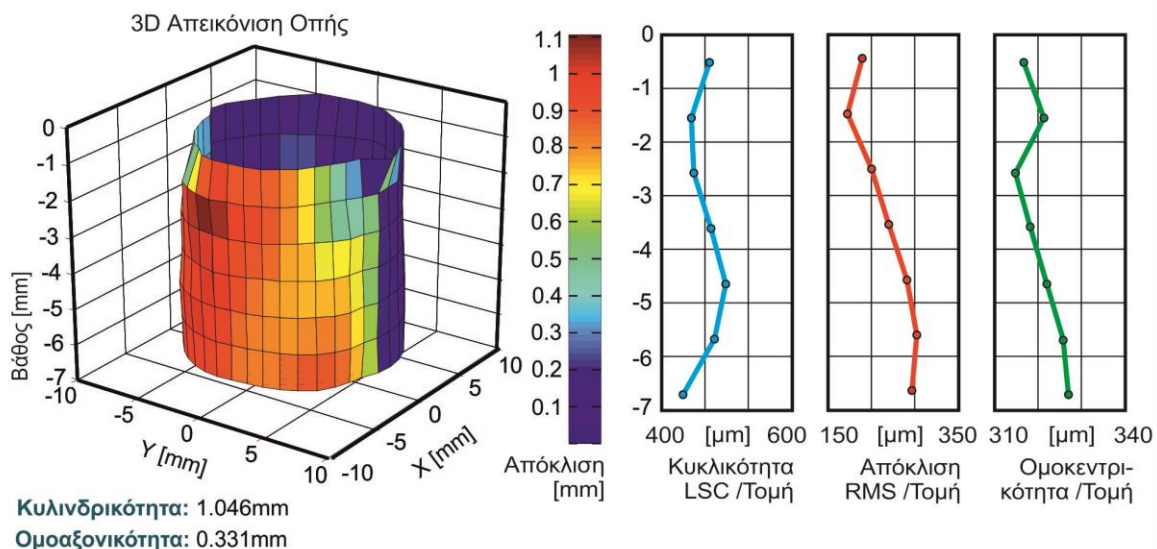
Αποκλίσεις σε συγκεκριμένα βάθη μέτρησης



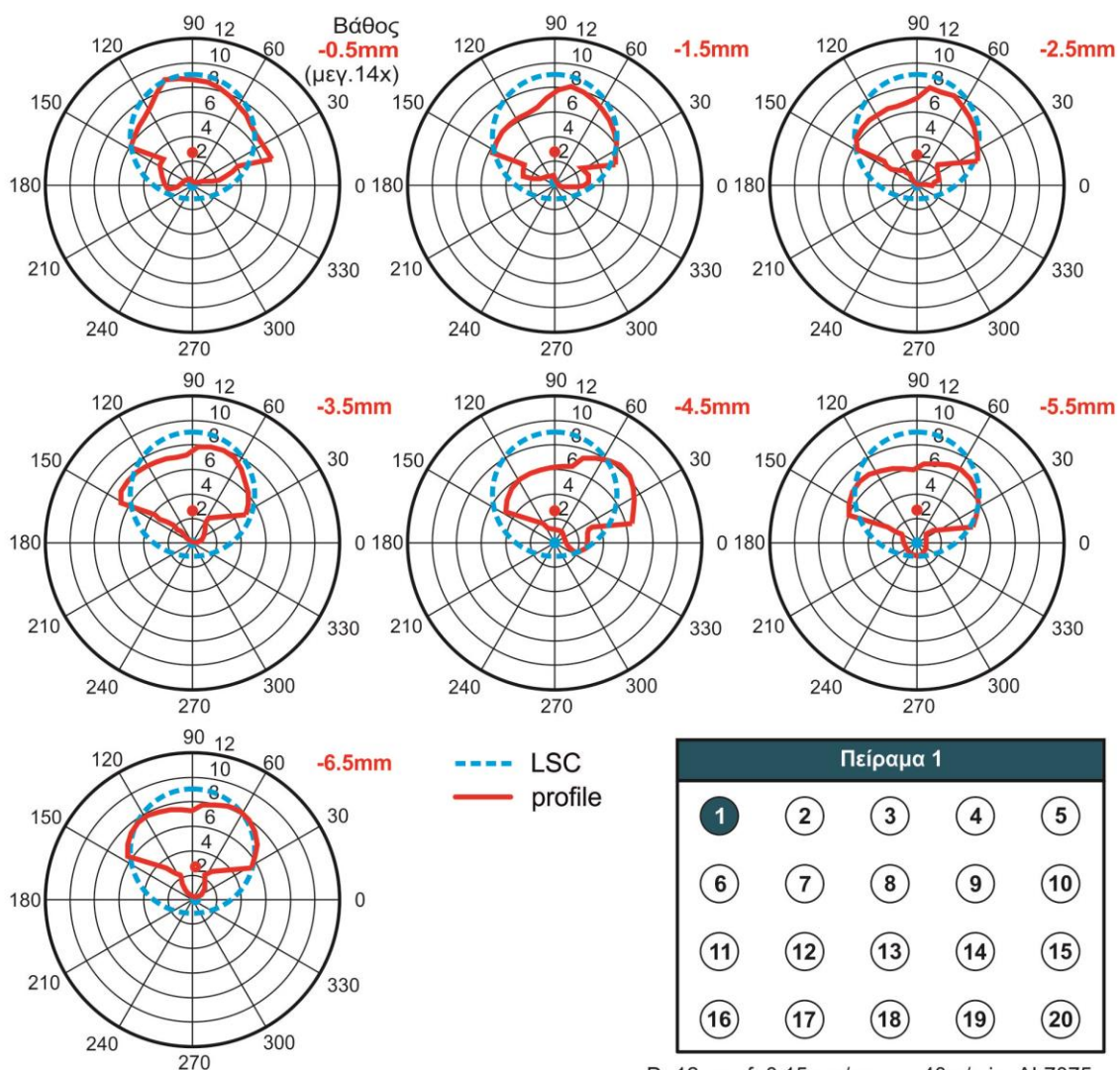
D=14mm, f=0.35mm/rev, v_c =100m/min, AL7075



3D Απεικόνιση Οπής, Κυκλικότητα, Απόκλιση RMS, Ομοκεντρικότητα

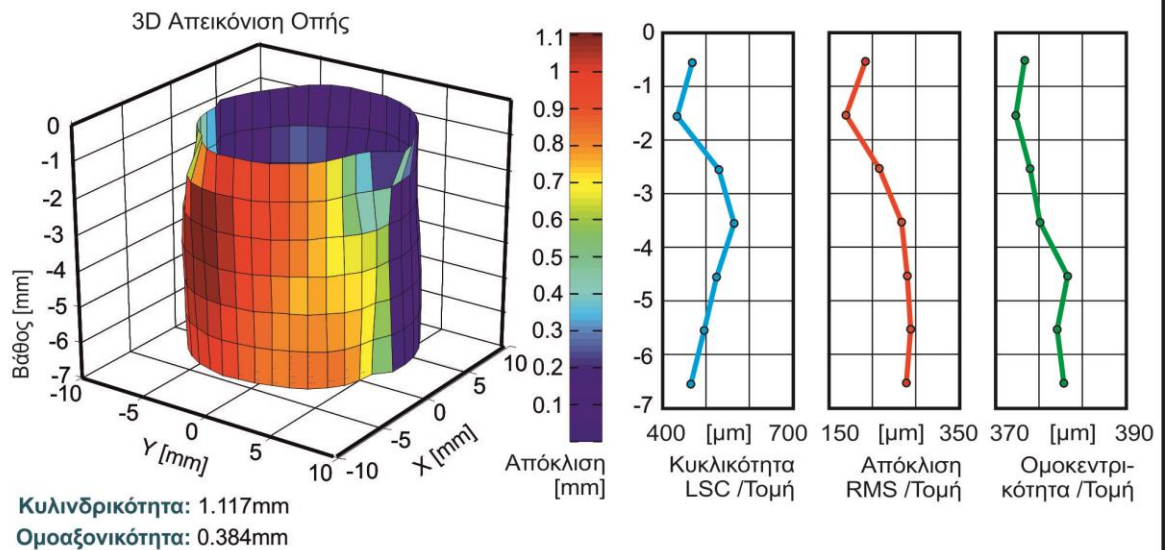


Αποκλίσεις σε συγκεκριμένα βάθη μέτρησης

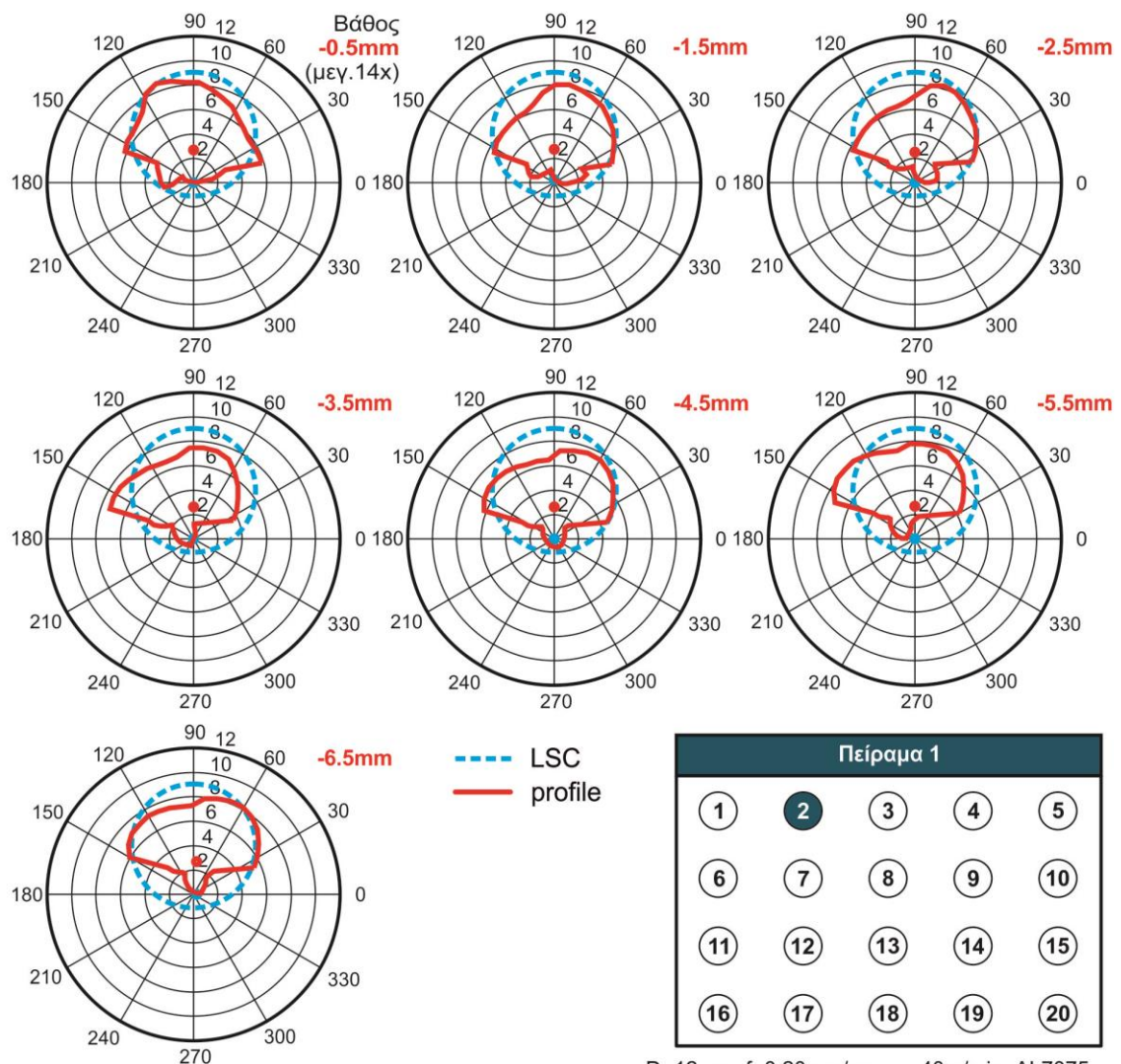


D=12mm, f=0.15mm/rev, v_c=40m/min, AL7075

3D Απεικόνιση Οπής, Κυκλικότητα, Απόκλιση RMS, Ομοκεντρικότητα

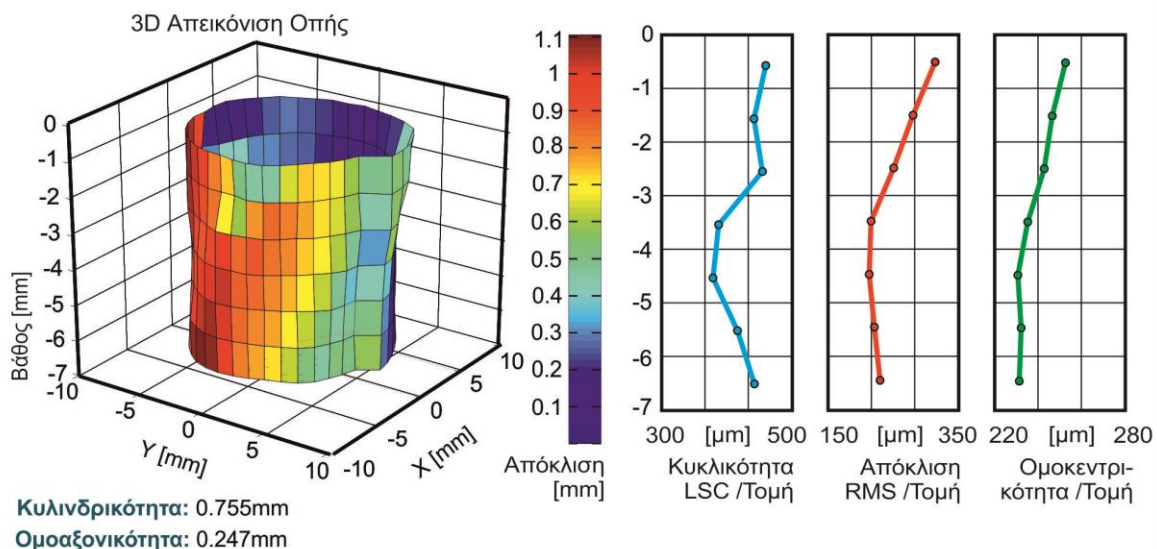


Αποκλίσεις σε συγκεκριμένα βάθη μέτρησης

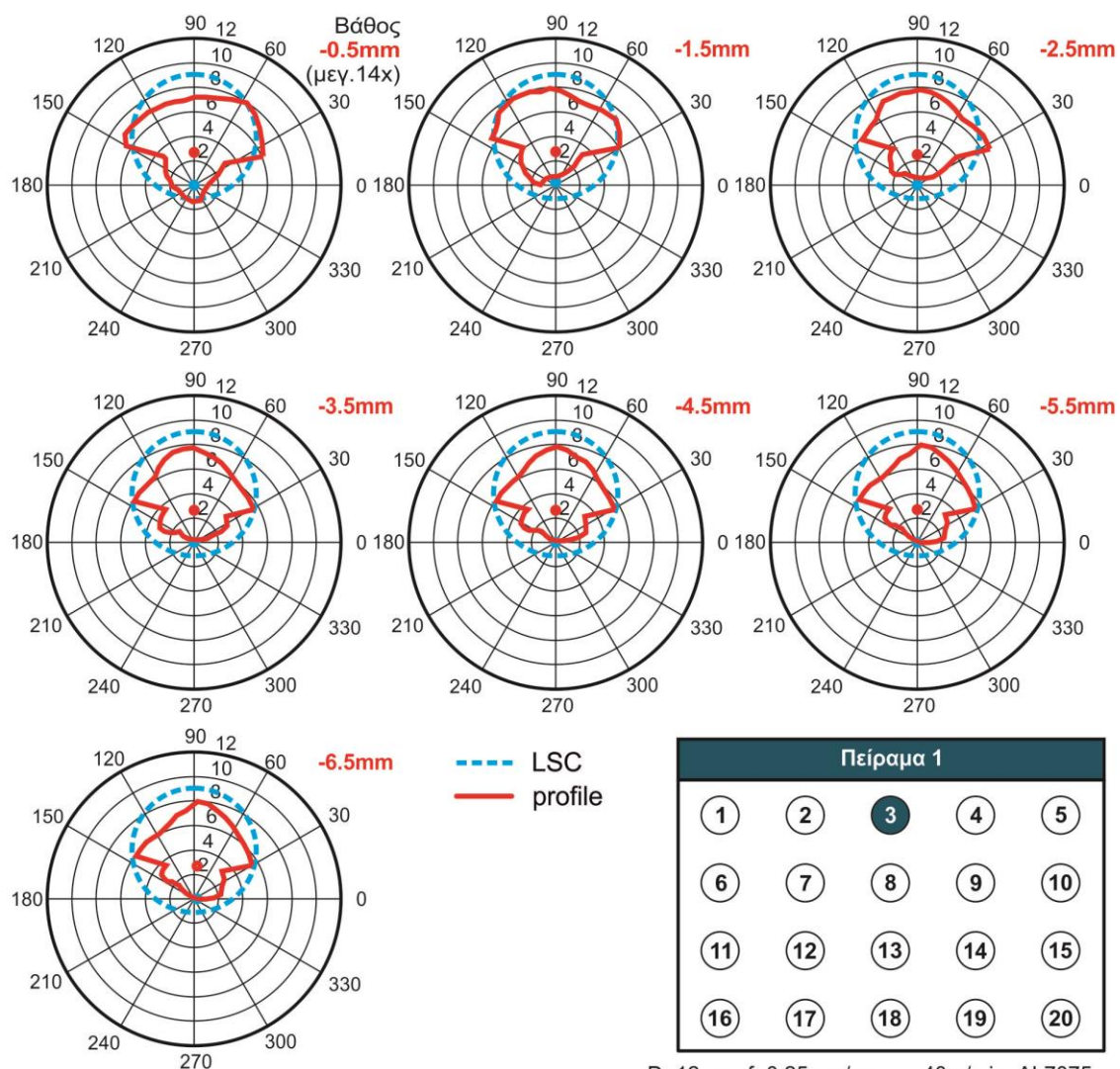


D=12mm, f=0.20mm/rev, v_c=40m/min, AL7075

3D Απεικόνιση Οπής, Κυκλικότητα, Απόκλιση RMS, Ομοκεντρικότητα

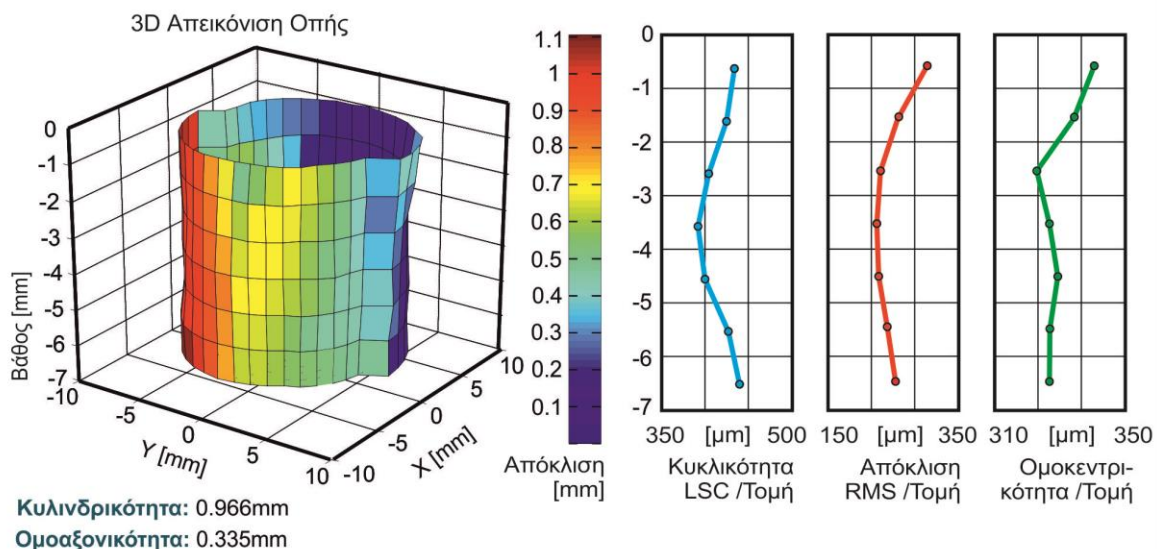


Αποκλίσεις σε συγκεκριμένα βάθη μέτρησης

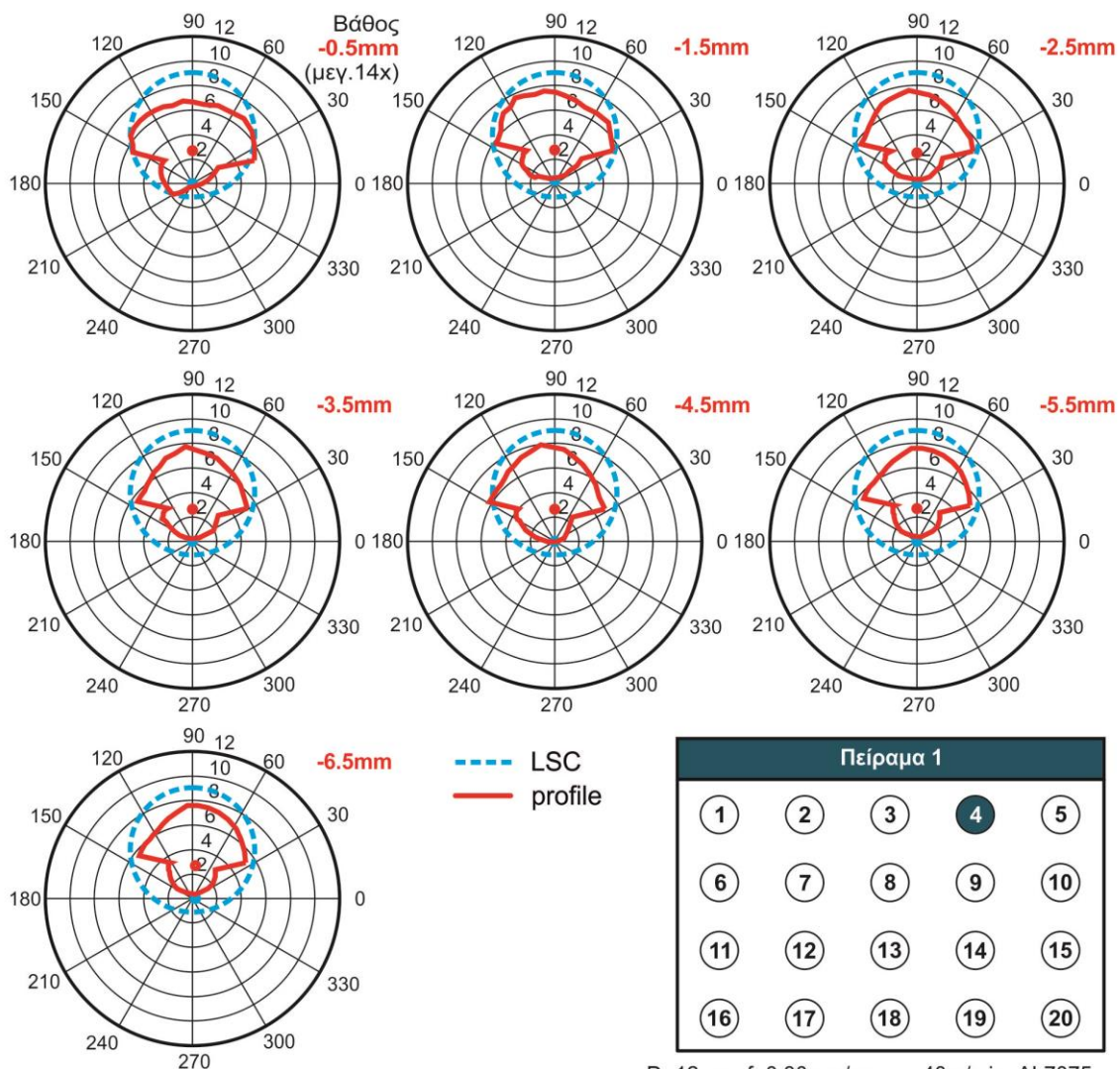


D=12mm, f=0.25mm/rev, $v_c=40\text{m/min}$, AL7075

3D Απεικόνιση Οπής, Κυκλικότητα, Απόκλιση RMS, Ομοκεντρικότητα

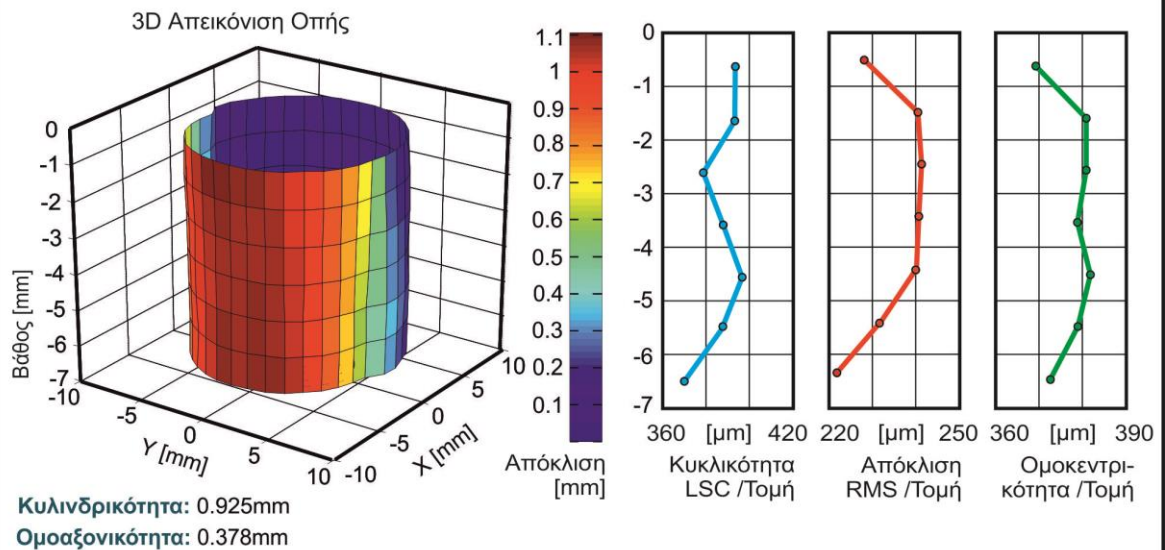


Αποκλίσεις σε συγκεκριμένα βάθη μέτρησης

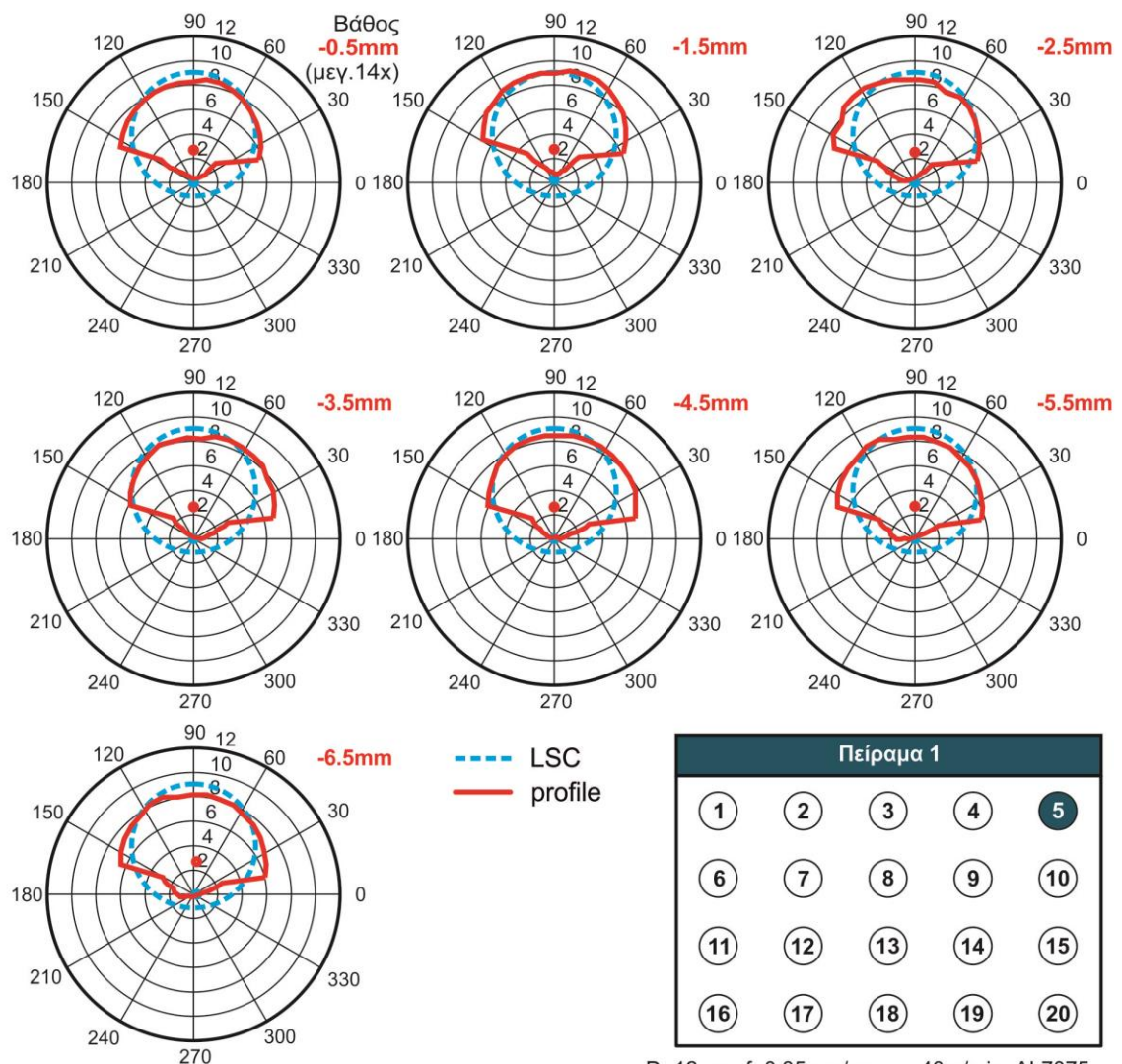


D=12mm, f=0.30mm/rev, v_c =40m/min, AL7075

3D Απεικόνιση Οπής, Κυκλικότητα, Απόκλιση RMS, Ομοκεντρικότητα

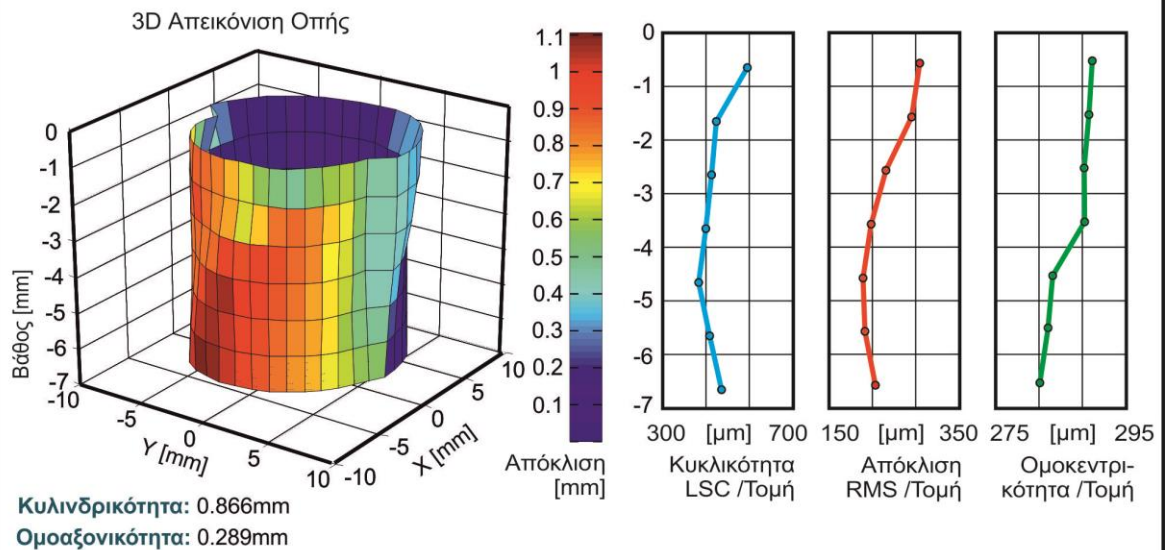


Αποκλίσεις σε συγκεκριμένα βάθη μέτρησης

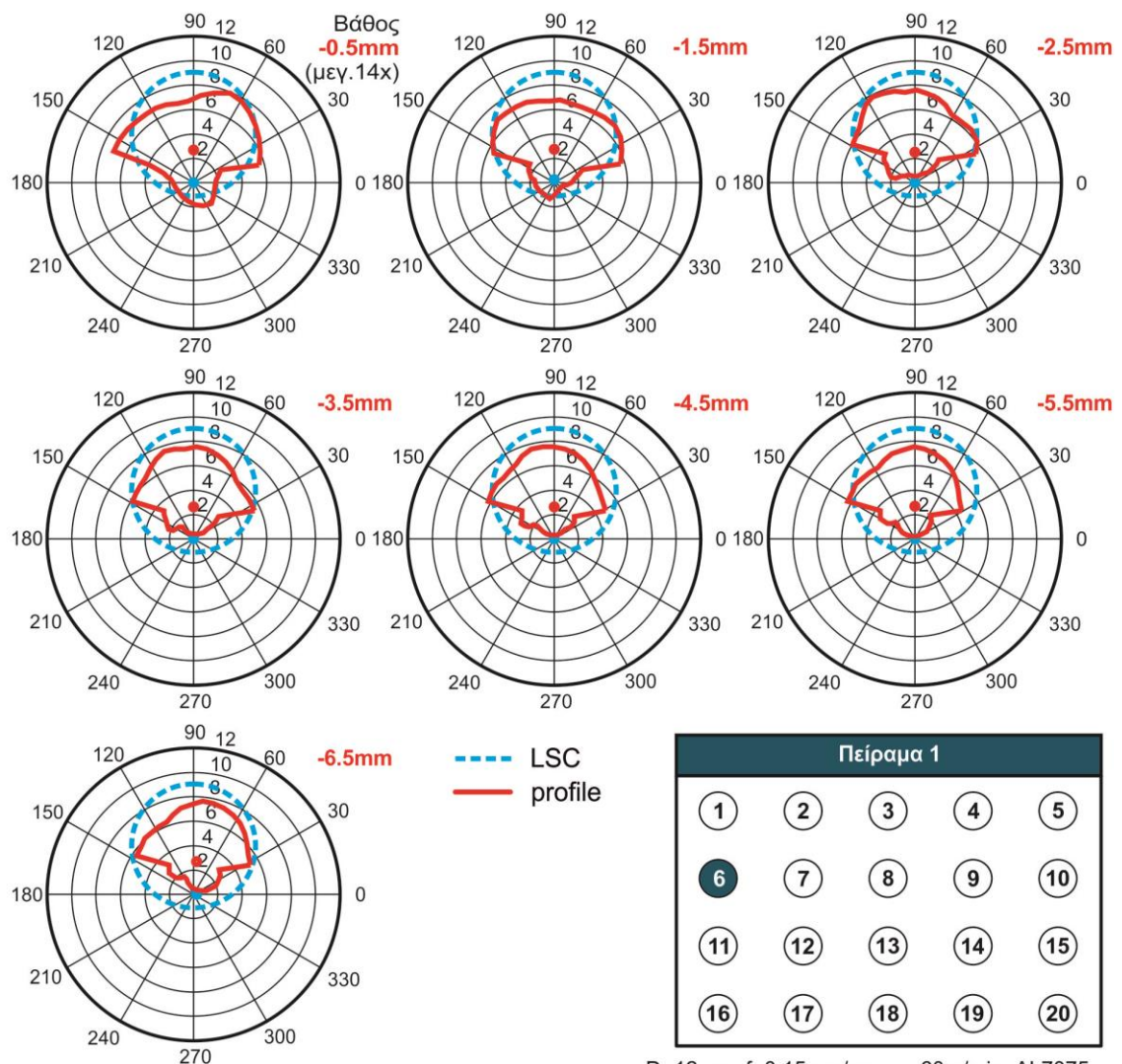


D=12mm, f=0.35mm/rev, v_c=40m/min, AL7075

3D Απεικόνιση Οπής, Κυκλικότητα, Απόκλιση RMS, Ομοκεντρικότητα

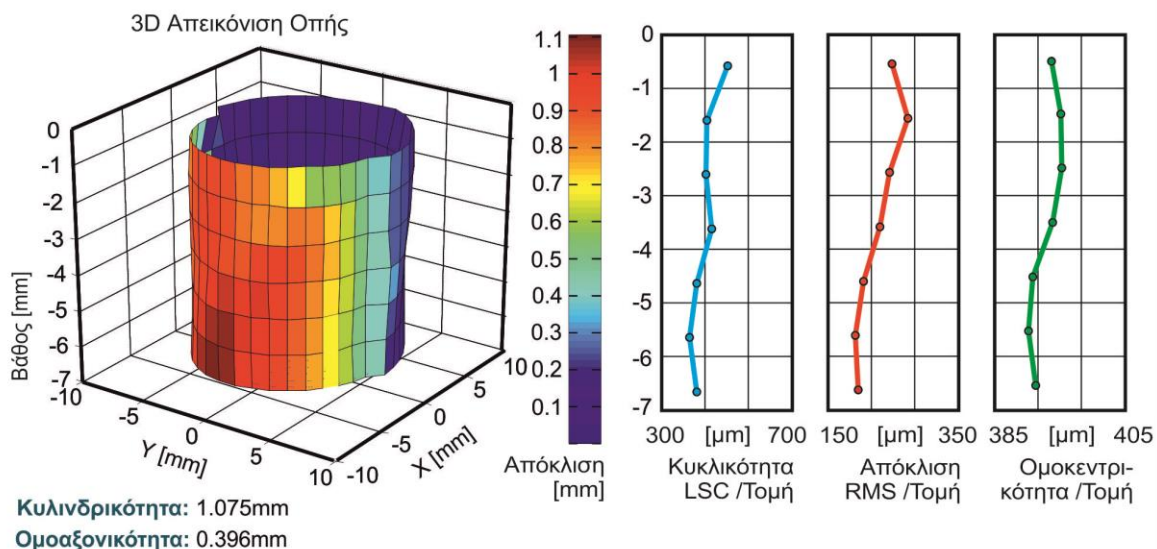


Αποκλίσεις σε συγκεκριμένα βάθη μέτρησης

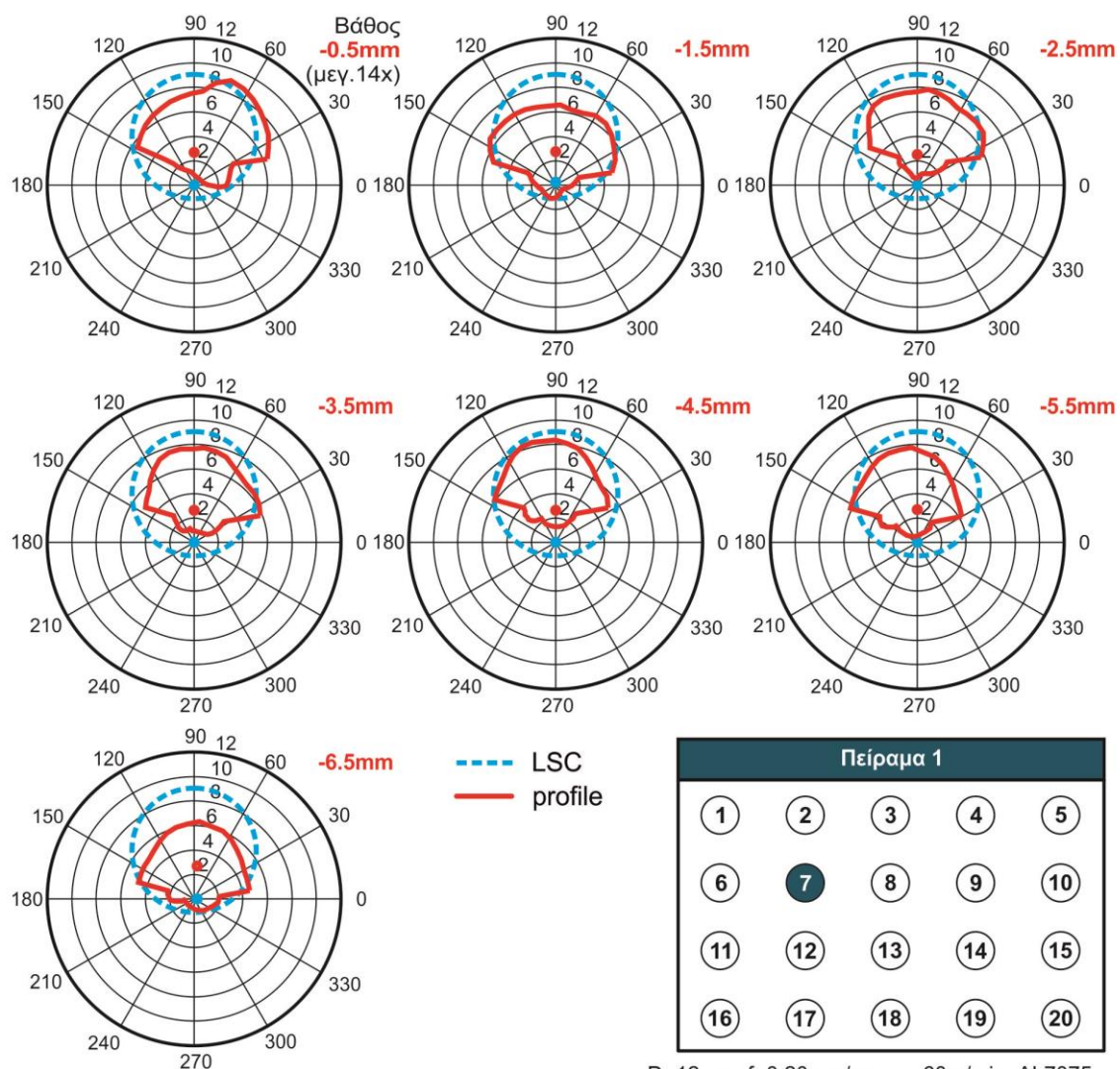


D=12mm, f=0.15mm/rev, v_c=60m/min, AL7075

3D Απεικόνιση Οπής, Κυκλικότητα, Απόκλιση RMS, Ομοκεντρικότητα

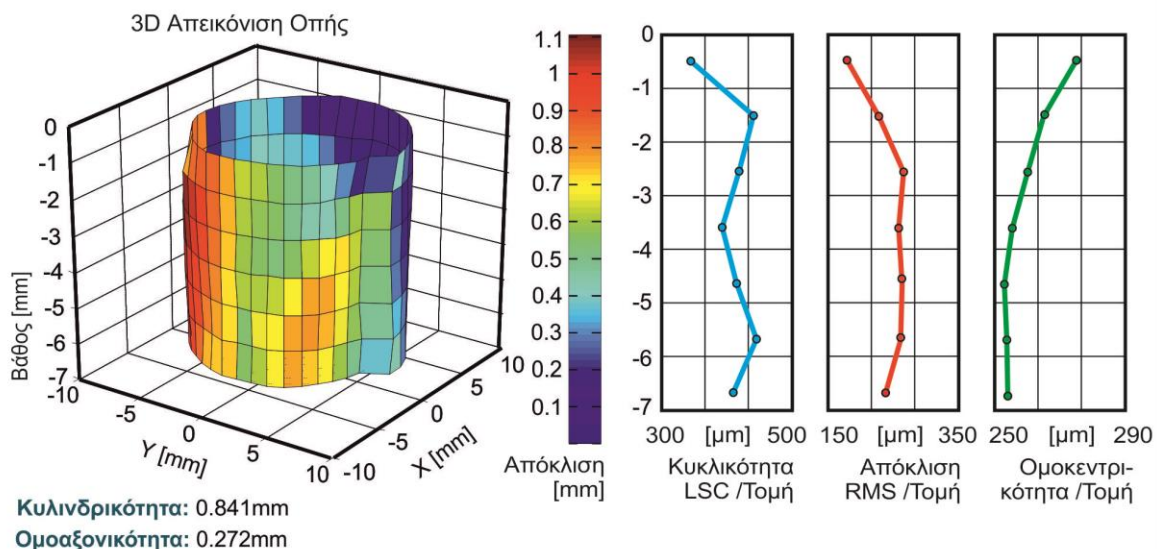


Αποκλίσεις σε συγκεκριμένα βάθη μέτρησης

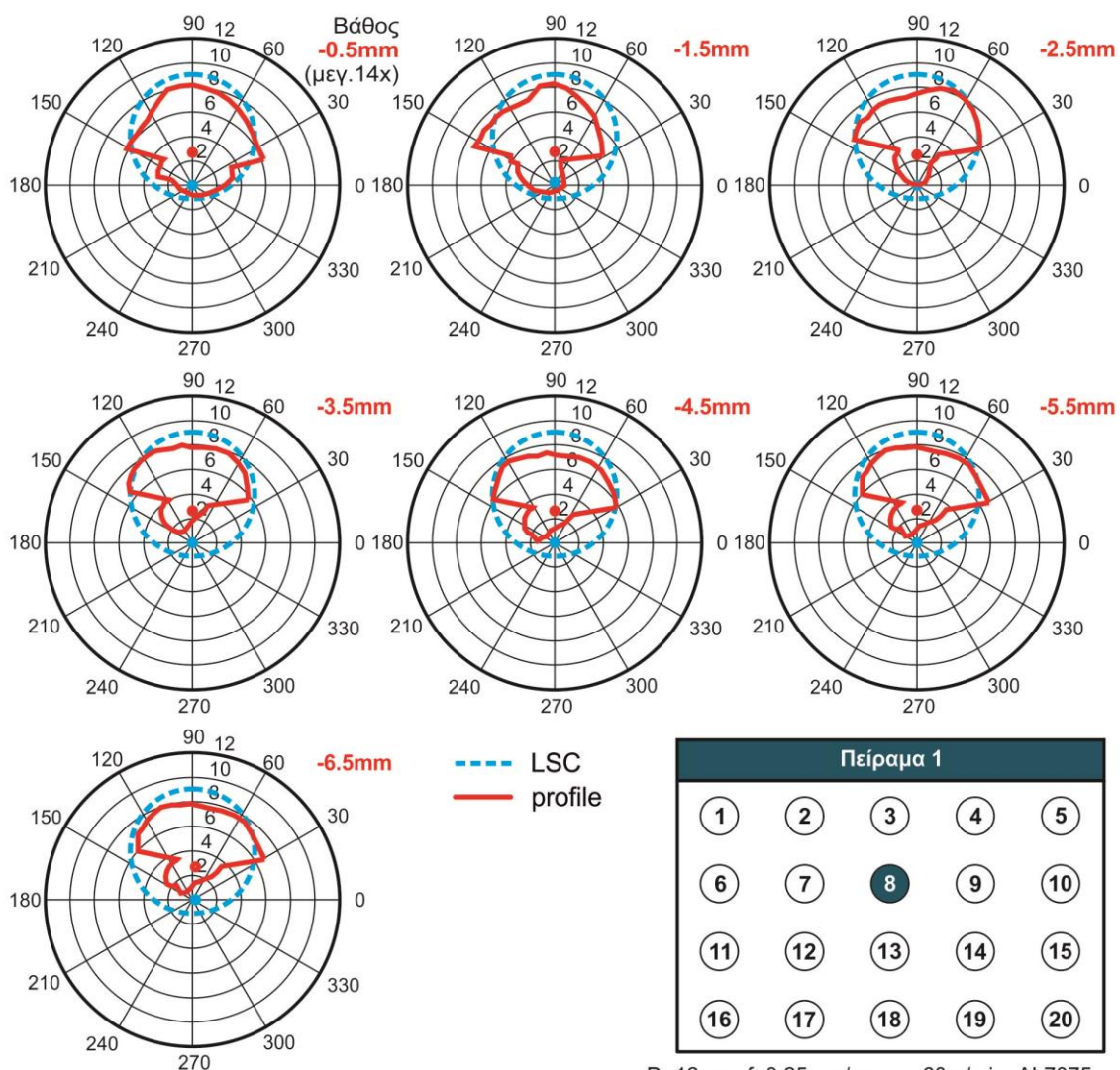


D=12mm, f=0.20mm/rev, v_c=60m/min, AL7075

3D Απεικόνιση Οπής, Κυκλικότητα, Απόκλιση RMS, Ομοκεντρικότητα

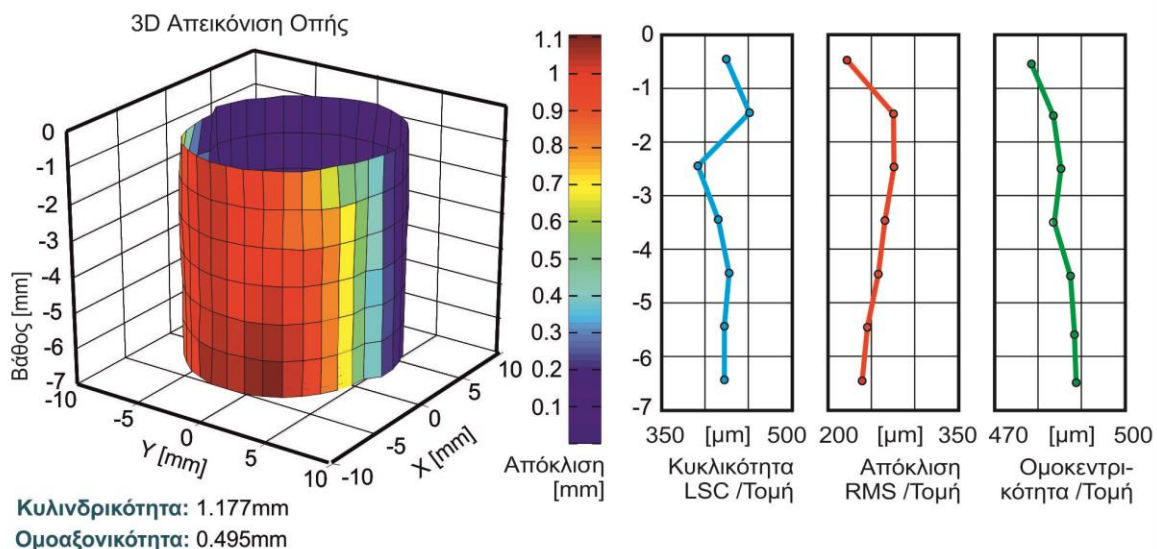


Αποκλίσεις σε συγκεκριμένα βάθη μέτρησης

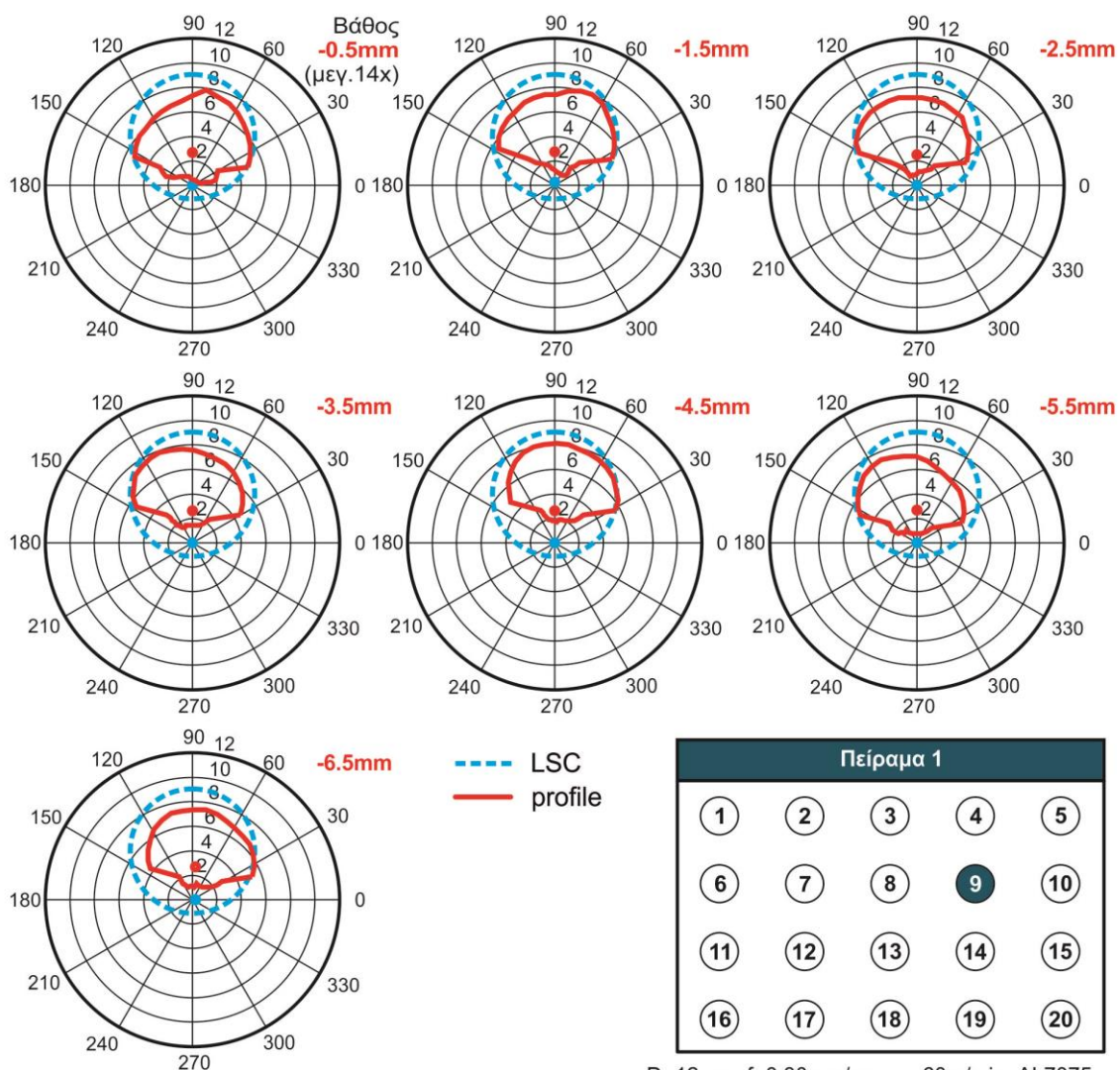


D=12mm, f=0.25mm/rev, v_c=60m/min, AL7075

3D Απεικόνιση Οπής, Κυκλικότητα, Απόκλιση RMS, Ομοκεντρικότητα

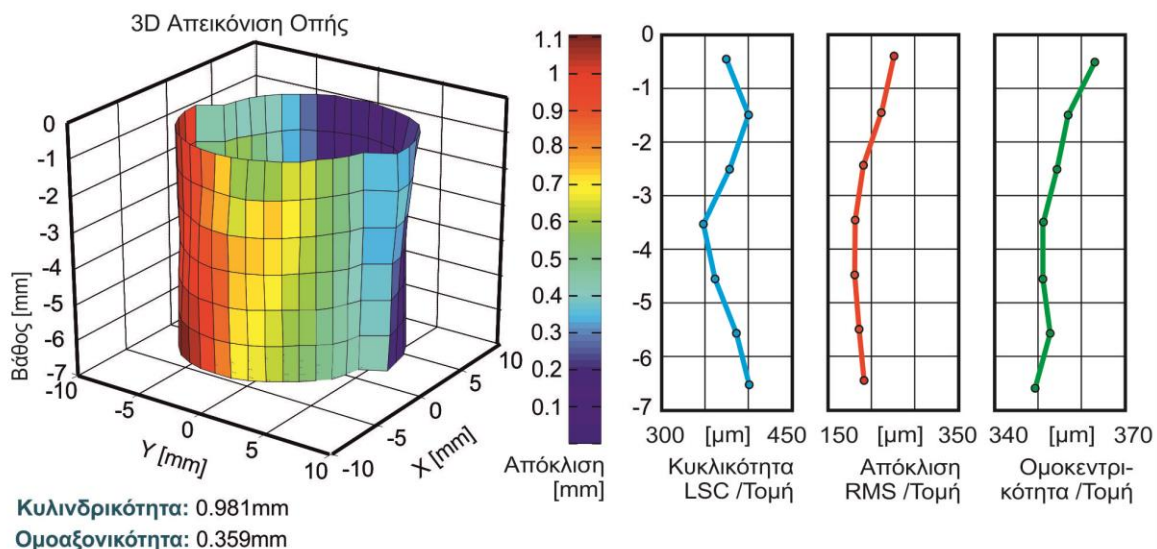


Αποκλίσεις σε συγκεκριμένα βάθη μέτρησης

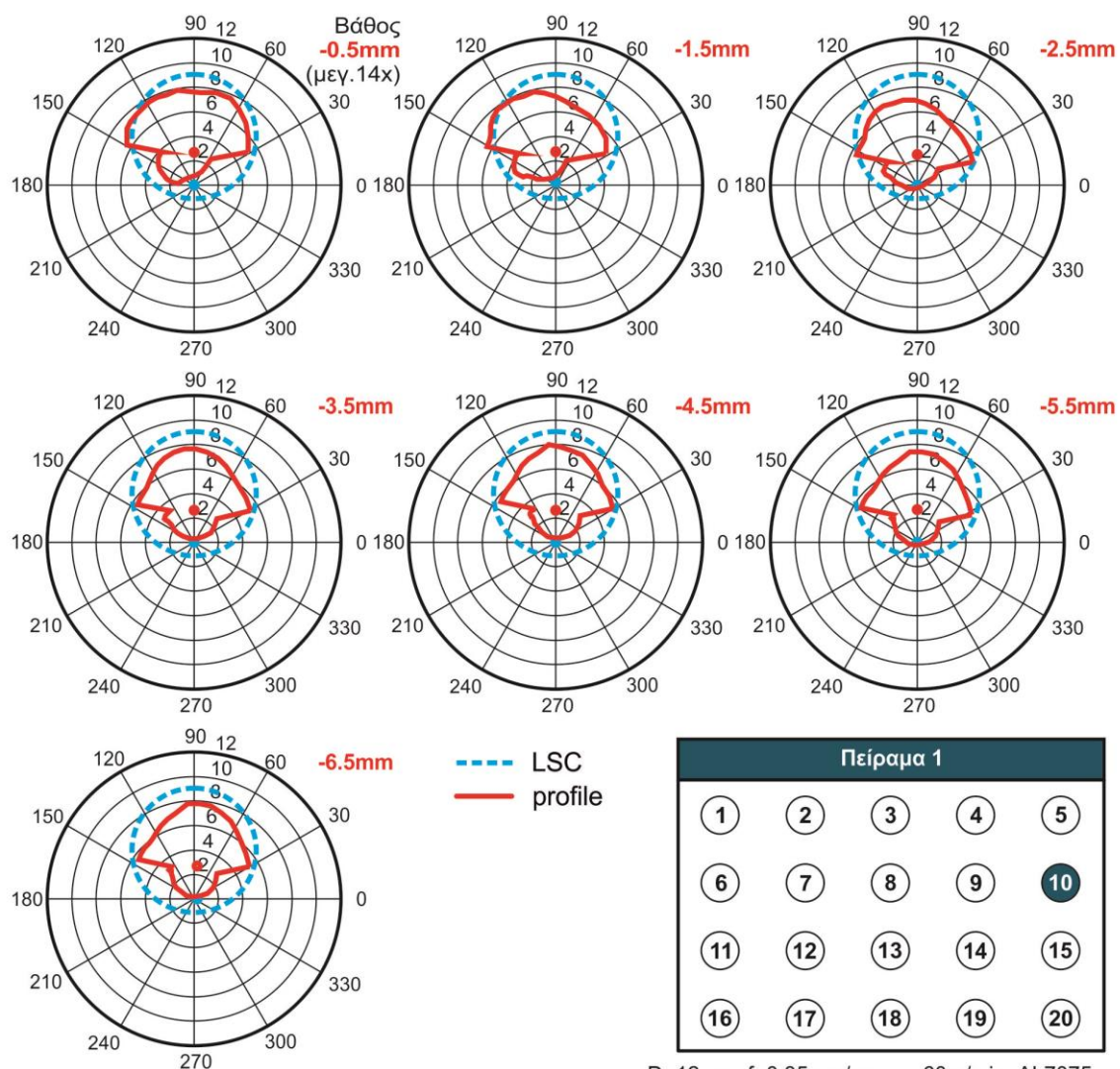


D=12mm, f=0.30mm/rev, v_c=60m/min, AL7075

3D Απεικόνιση Οπής, Κυκλικότητα, Απόκλιση RMS, Ομοκεντρικότητα



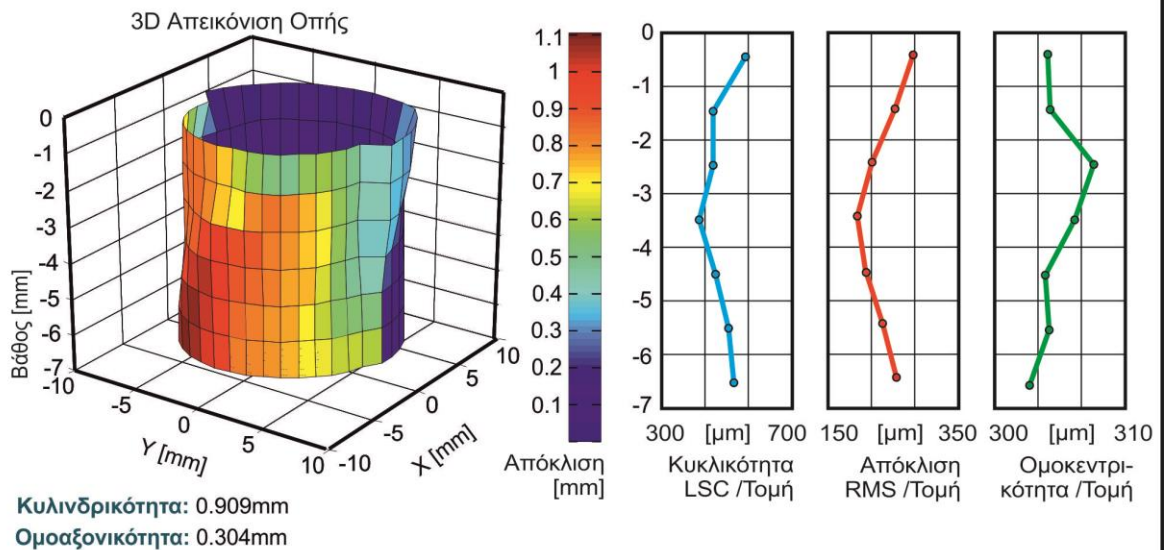
Αποκλίσεις σε συγκεκριμένα βάθη μέτρησης



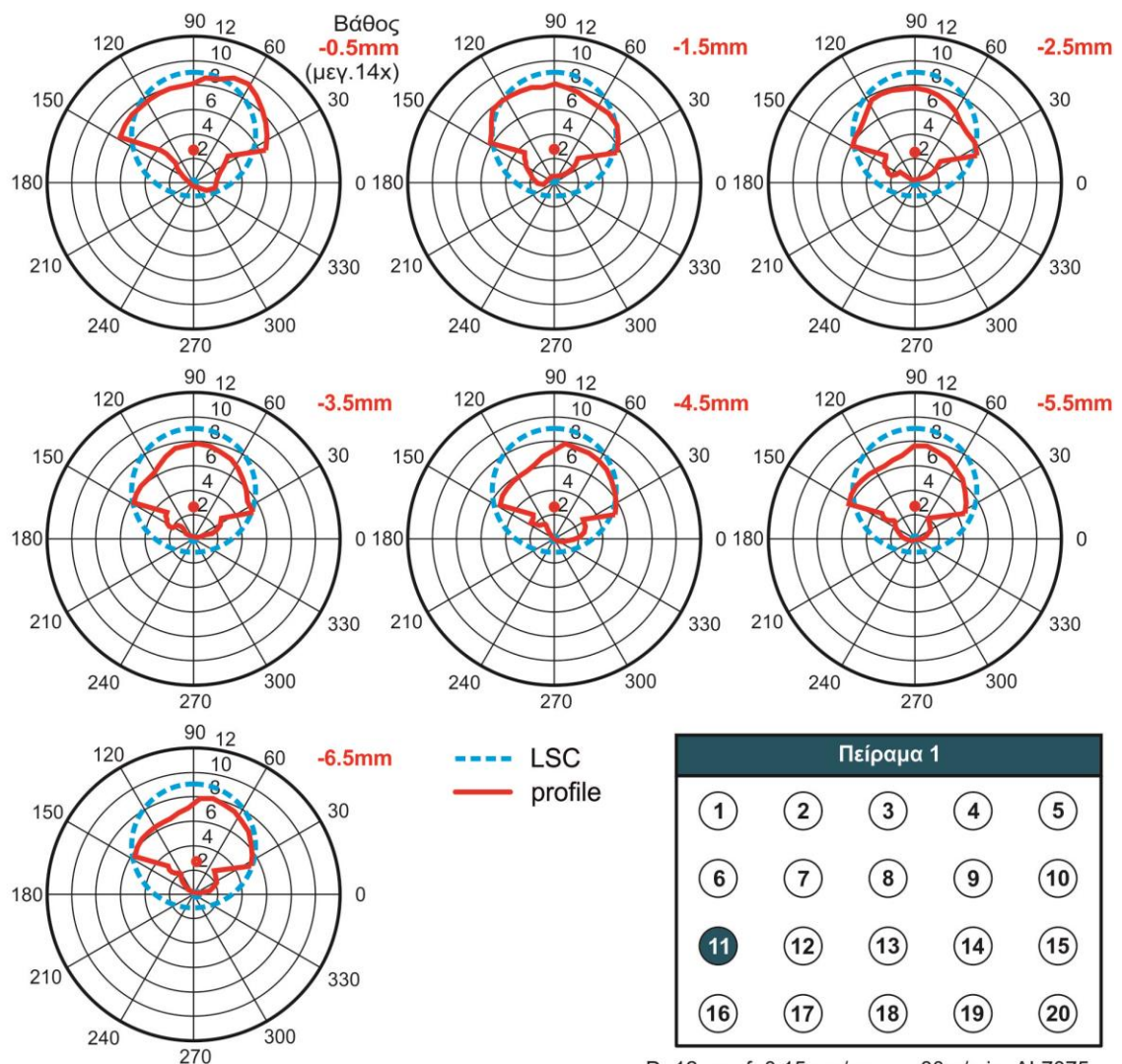
D=12mm, f=0.35mm/rev, v_c=60m/min, AL7075



3D Απεικόνιση Οπής, Κυκλικότητα, Απόκλιση RMS, Ομοκεντρικότητα



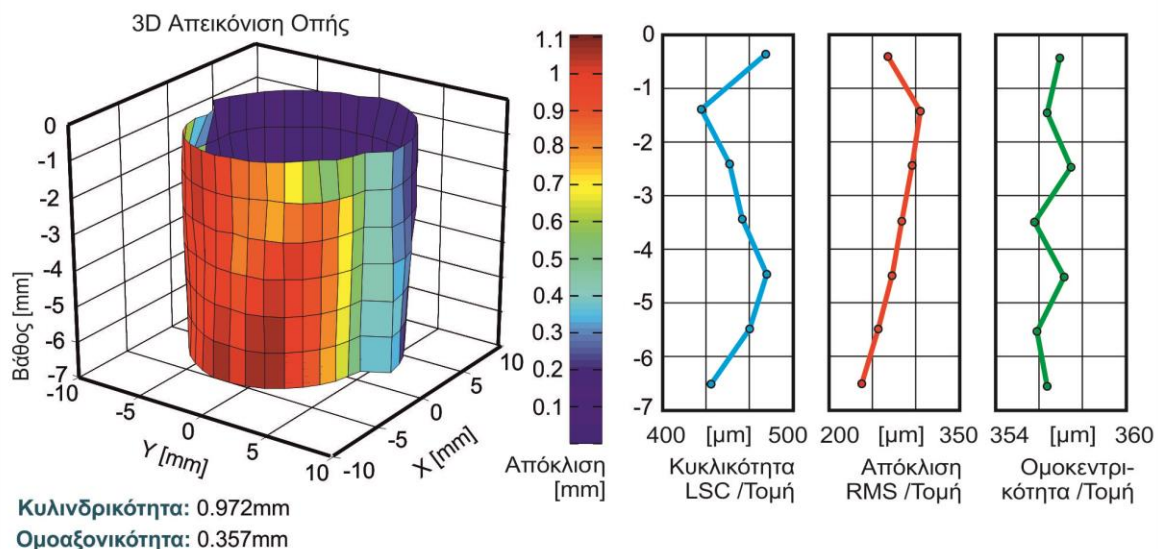
Αποκλίσεις σε συγκεκριμένα βάθη μέτρησης



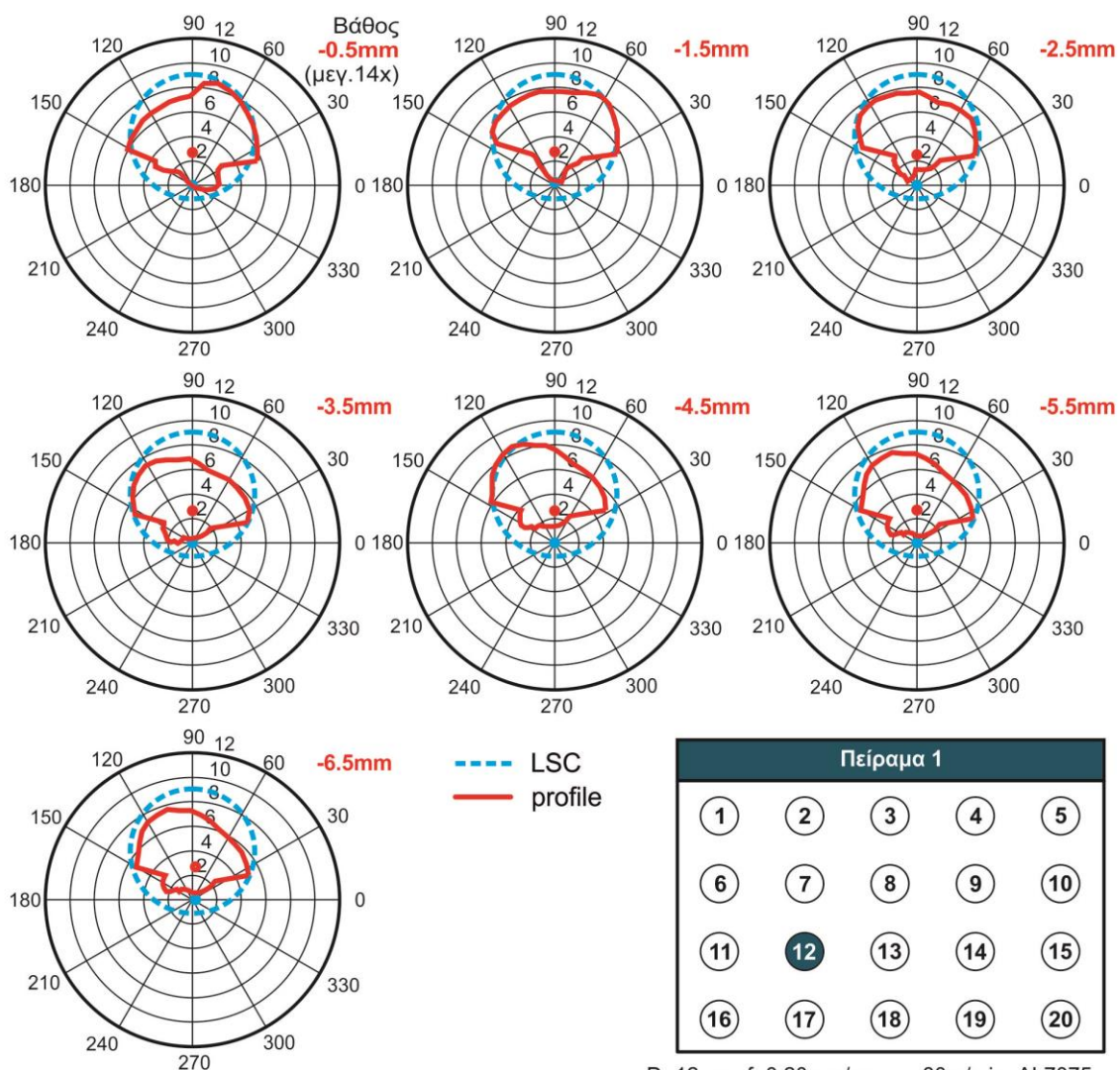
D=12mm, f=0.15mm/rev, v_c=80m/min, AL7075



3D Απεικόνιση Οπής, Κυκλικότητα, Απόκλιση RMS, Ομοκεντρικότητα

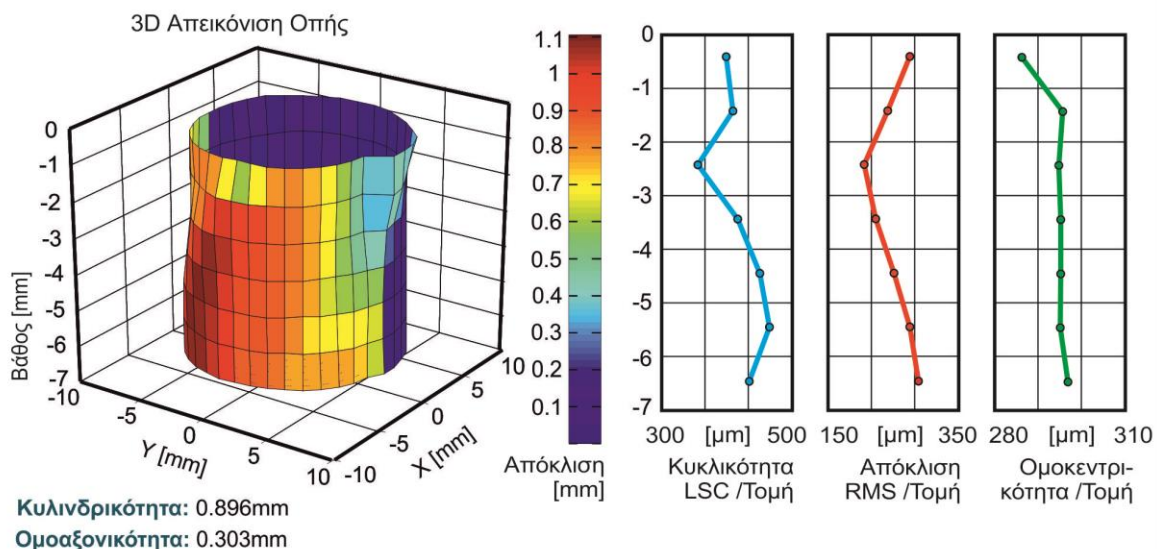


Αποκλίσεις σε συγκεκριμένα βάθη μέτρησης

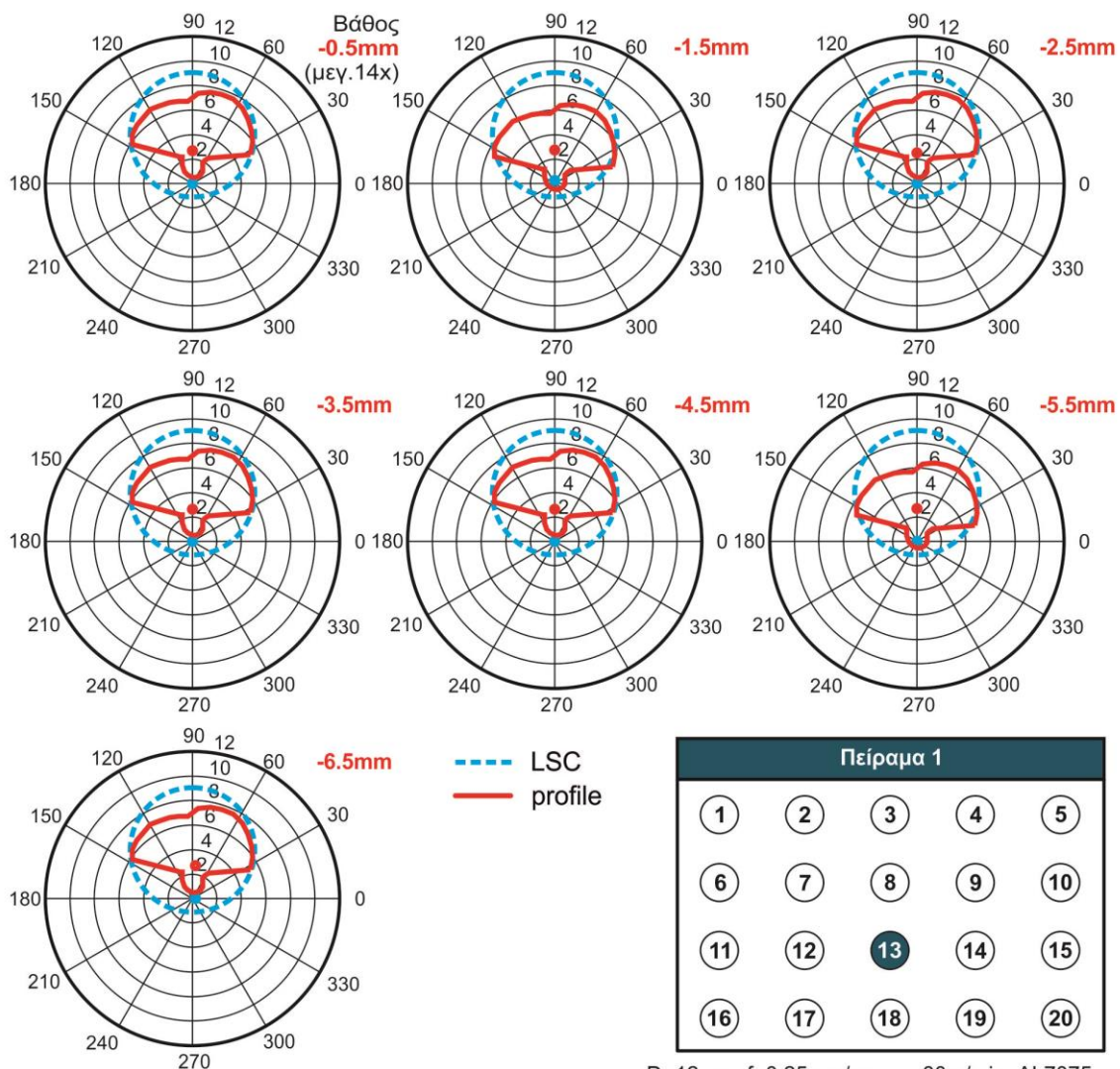
D=12mm, f=0.20mm/rev, v_c=80m/min, AL7075



3D Απεικόνιση Οπής, Κυκλικότητα, Απόκλιση RMS, Ομοκεντρικότητα



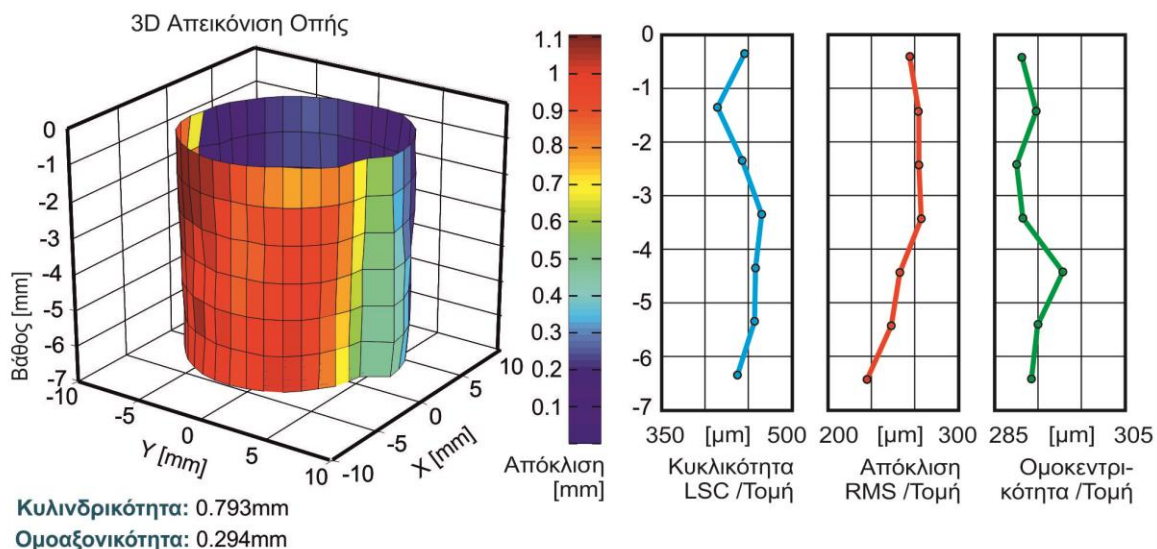
Αποκλίσεις σε συγκεκριμένα βάθη μέτρησης



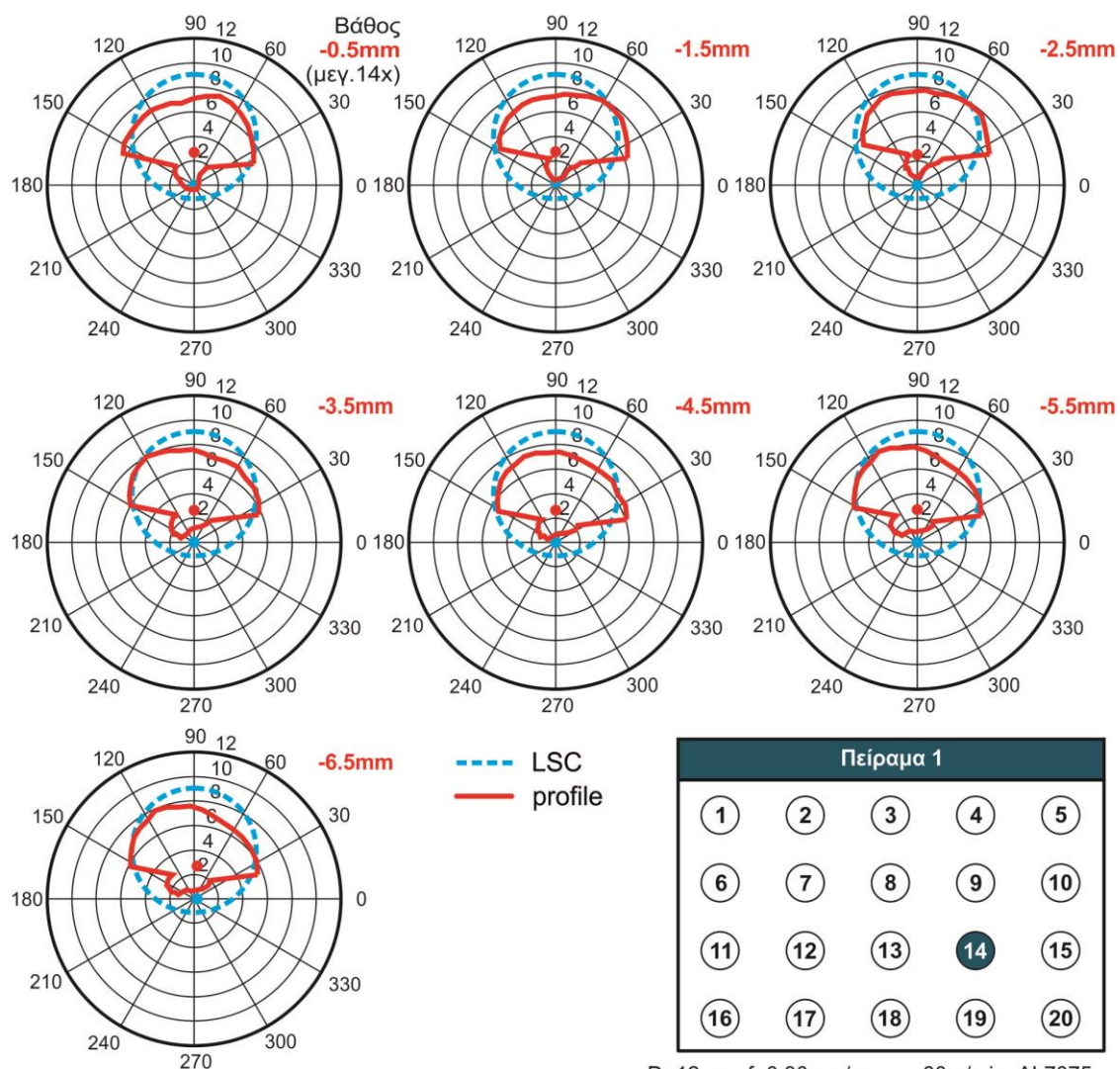
D=12mm, f=0.25mm/rev, v_c=80m/min, AL7075



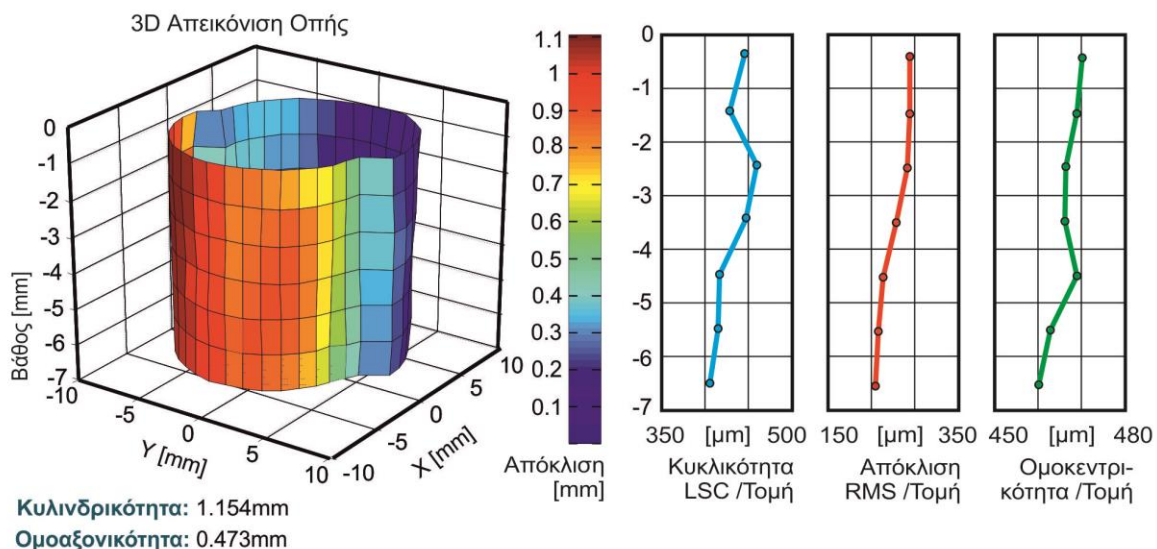
3D Απεικόνιση Οπής, Κυκλικότητα, Απόκλιση RMS, Ομοκεντρικότητα



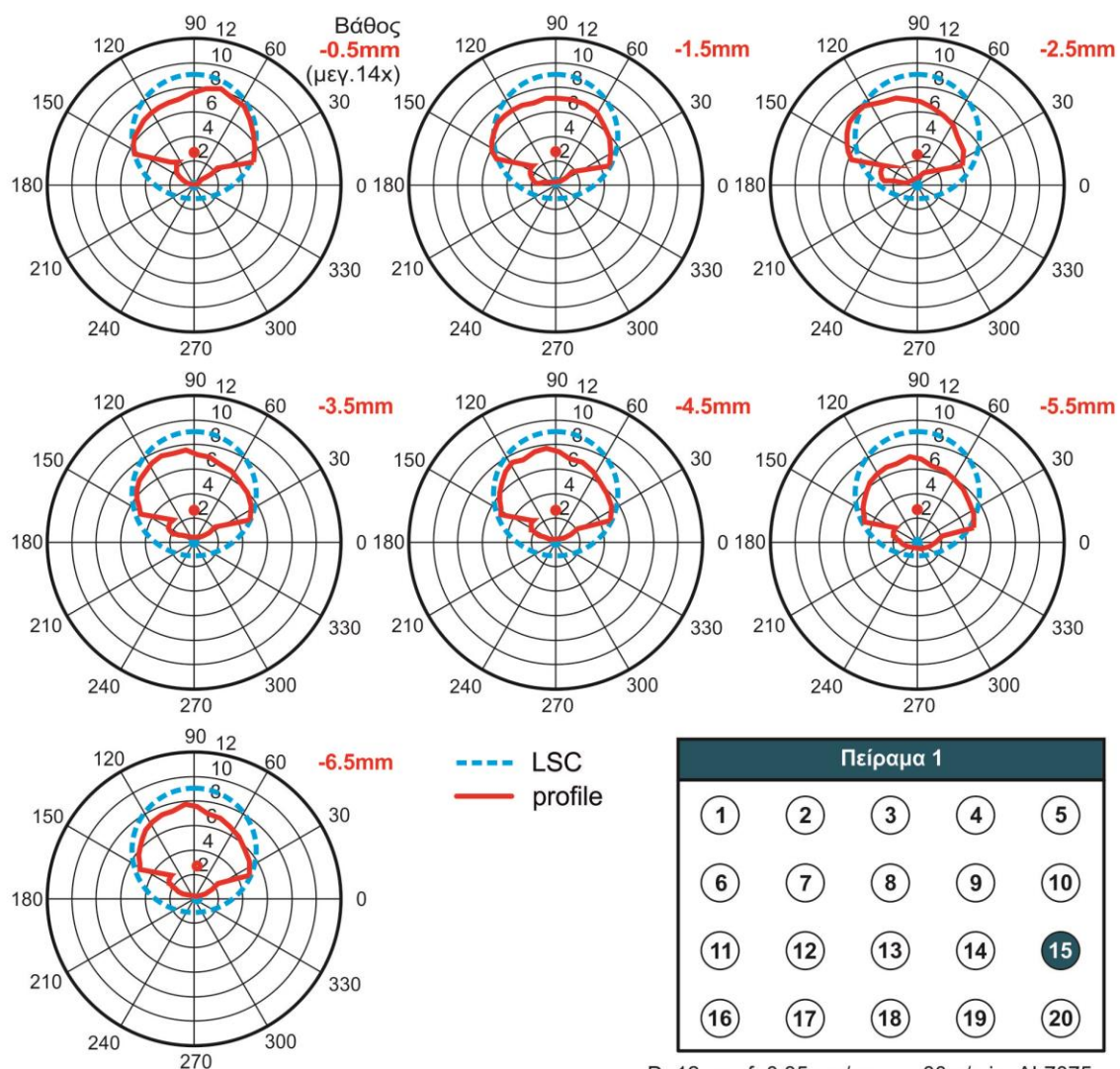
Αποκλίσεις σε συγκεκριμένα βάθη μέτρησης



3D Απεικόνιση Οπής, Κυκλικότητα, Απόκλιση RMS, Ομοκεντρικότητα



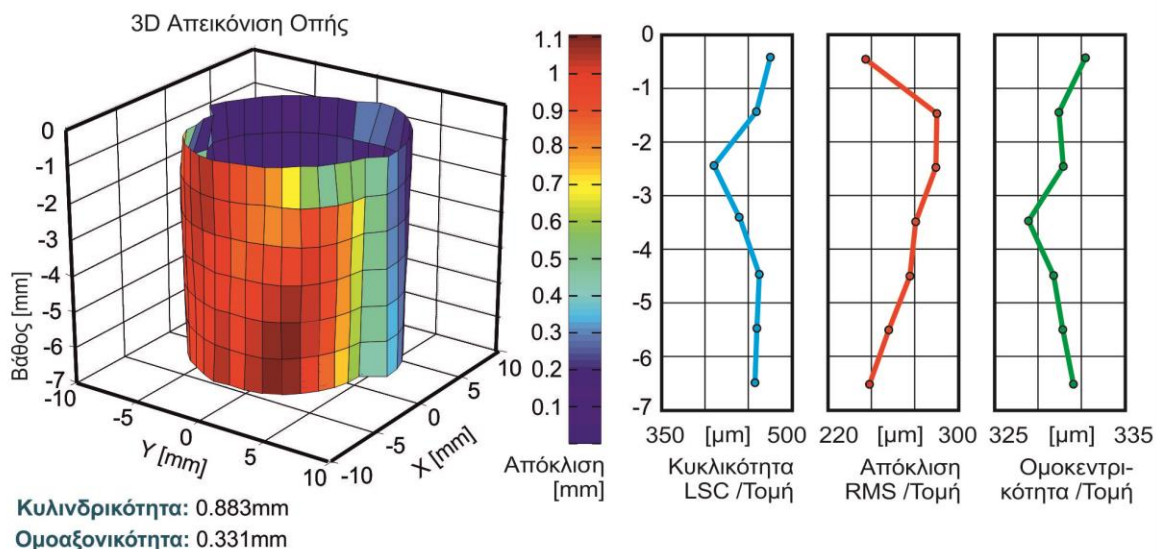
Αποκλίσεις σε συγκεκριμένα βάθη μέτρησης



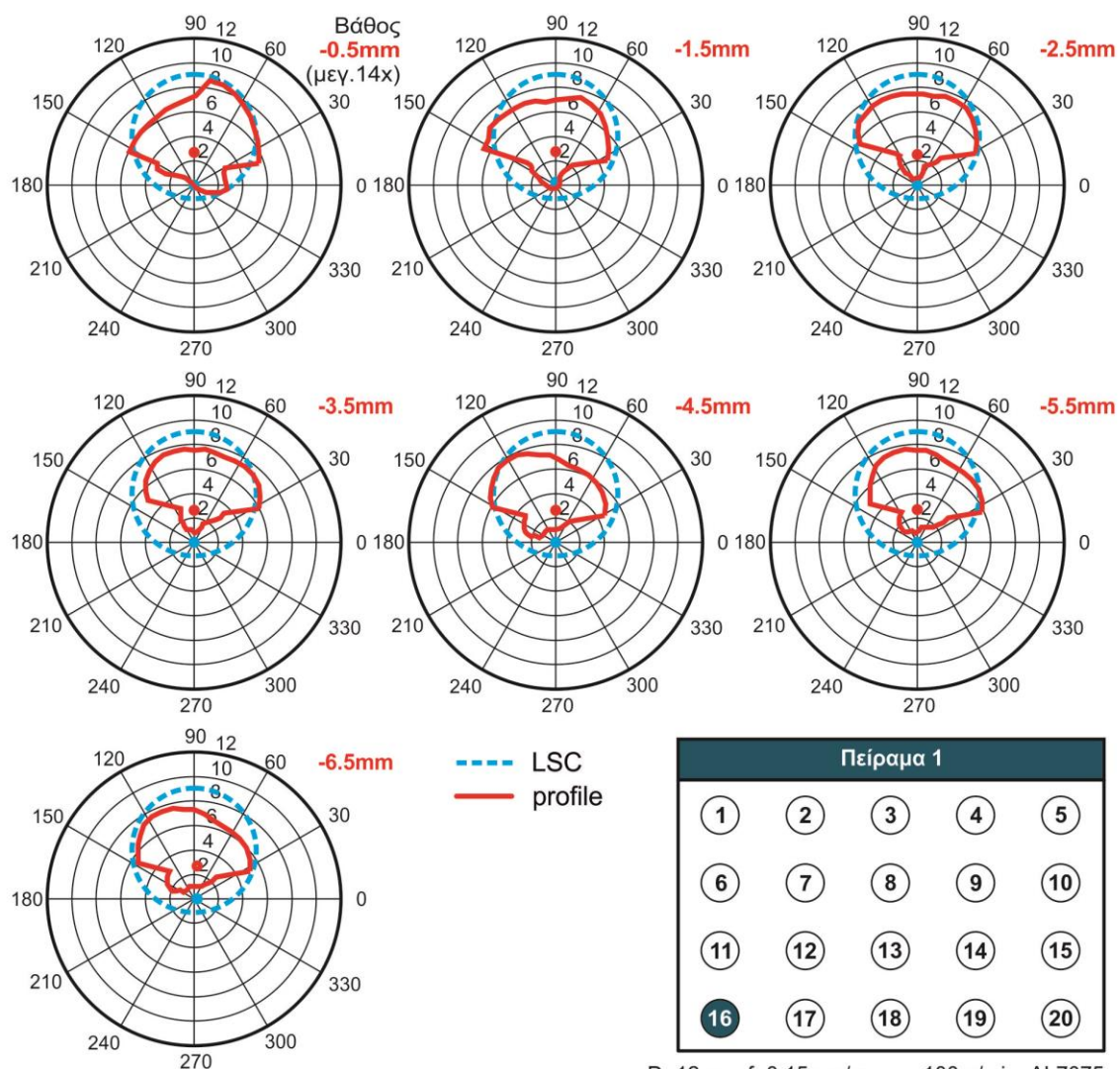
D=12mm, f=0.35mm/rev, v_c=80m/min, AL7075



3D Απεικόνιση Οπής, Κυκλικότητα, Απόκλιση RMS, Ομοκεντρικότητα



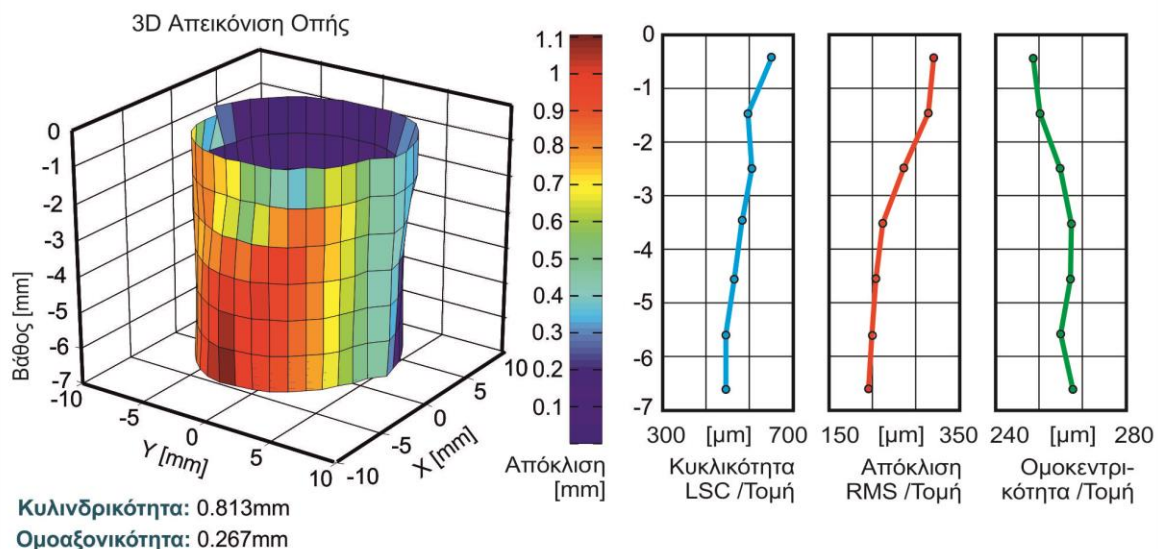
Αποκλίσεις σε συγκεκριμένα βάθη μέτρησης



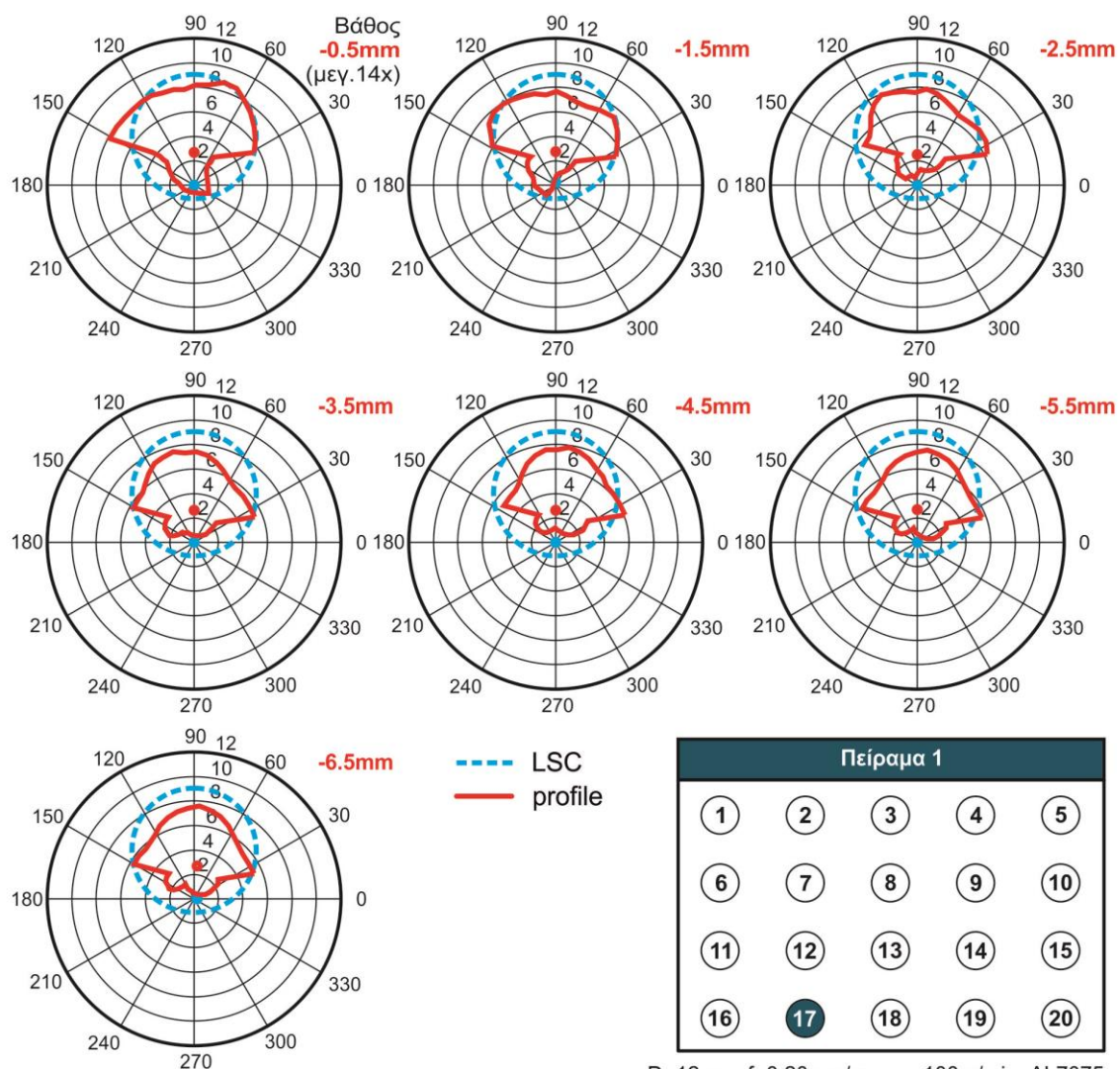
D=12mm, f=0.15mm/rev, v_c =100m/min, AL7075



3D Απεικόνιση Οπής, Κυκλικότητα, Απόκλιση RMS, Ομοκεντρικότητα



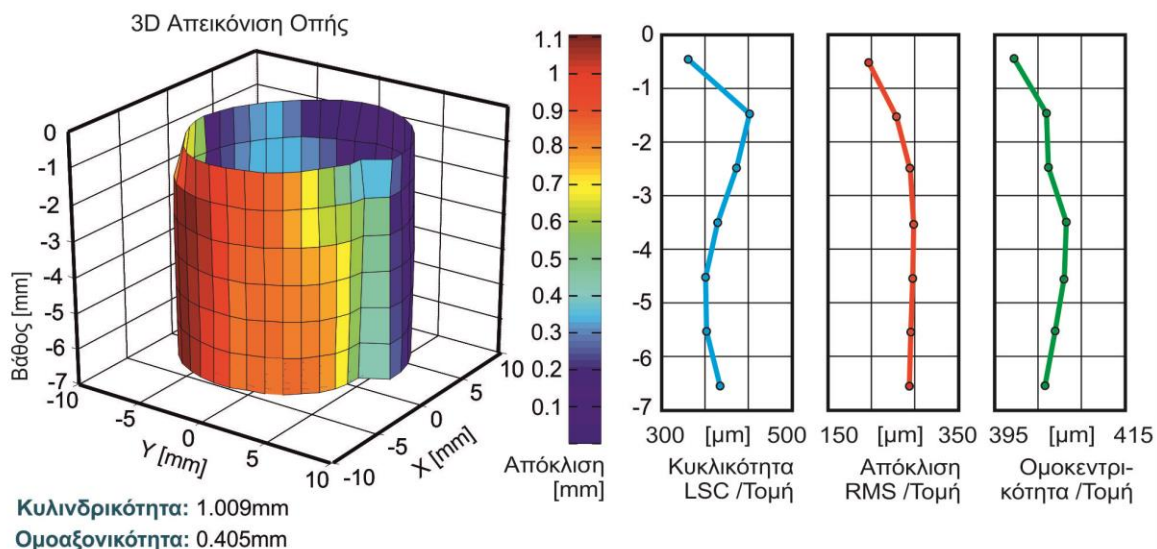
Αποκλίσεις σε συγκεκριμένα βάθη μέτρησης



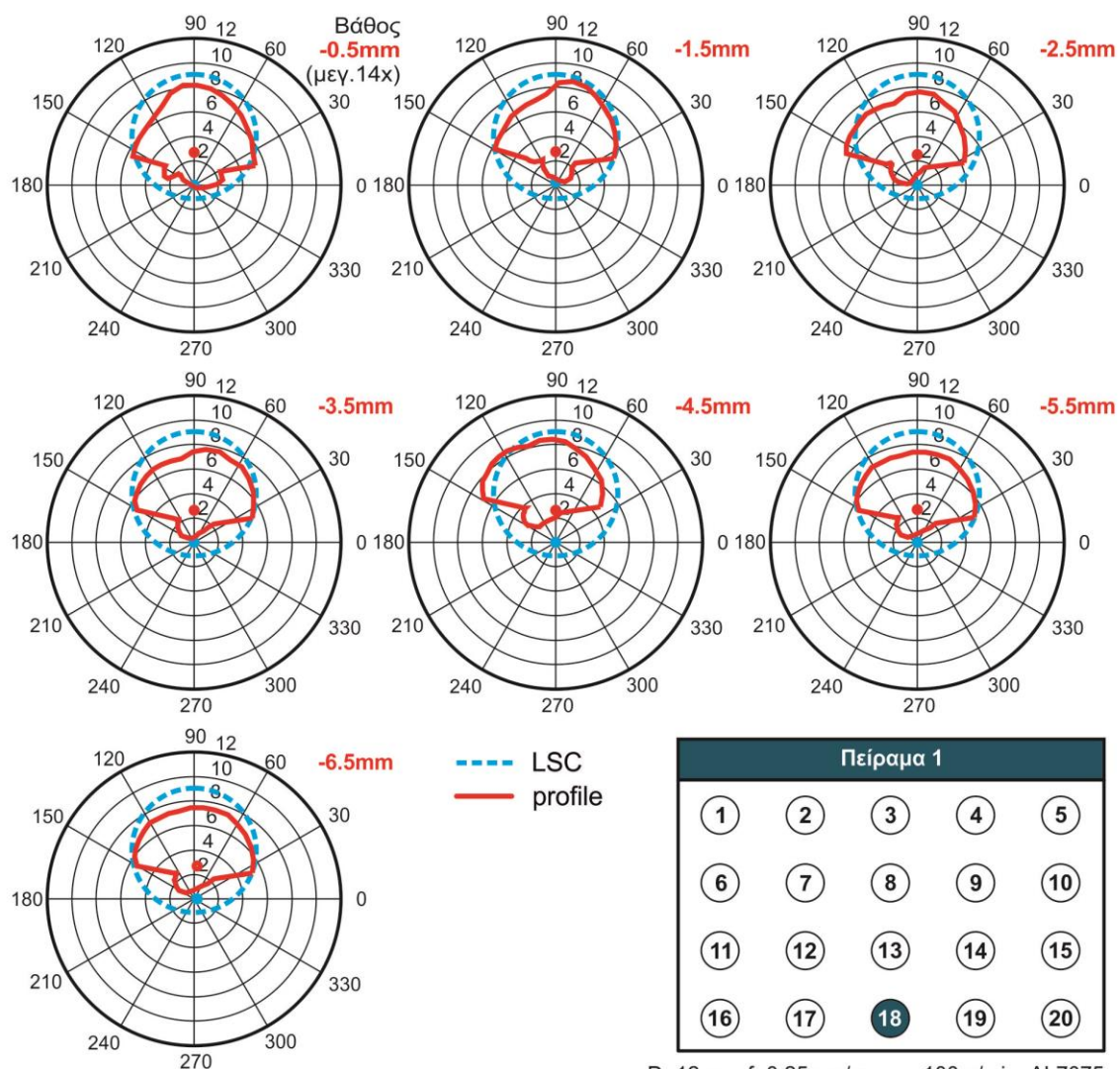
D=12mm, f=0.20mm/rev, v_c =100m/min, AL7075



3D Απεικόνιση Οπής, Κυκλικότητα, Απόκλιση RMS, Ομοκεντρικότητα



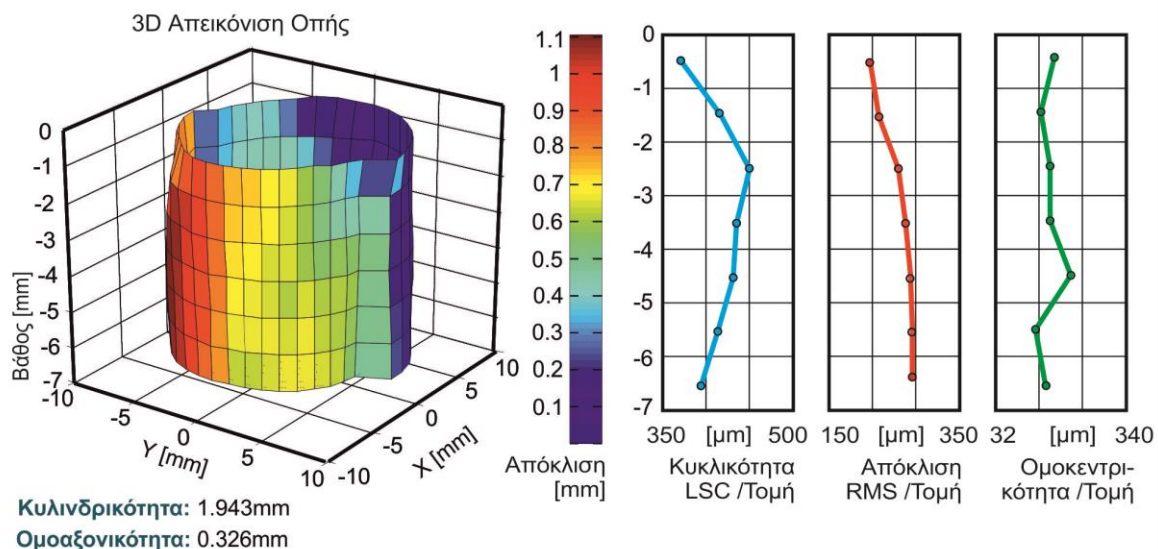
Αποκλίσεις σε συγκεκριμένα βάθη μέτρησης



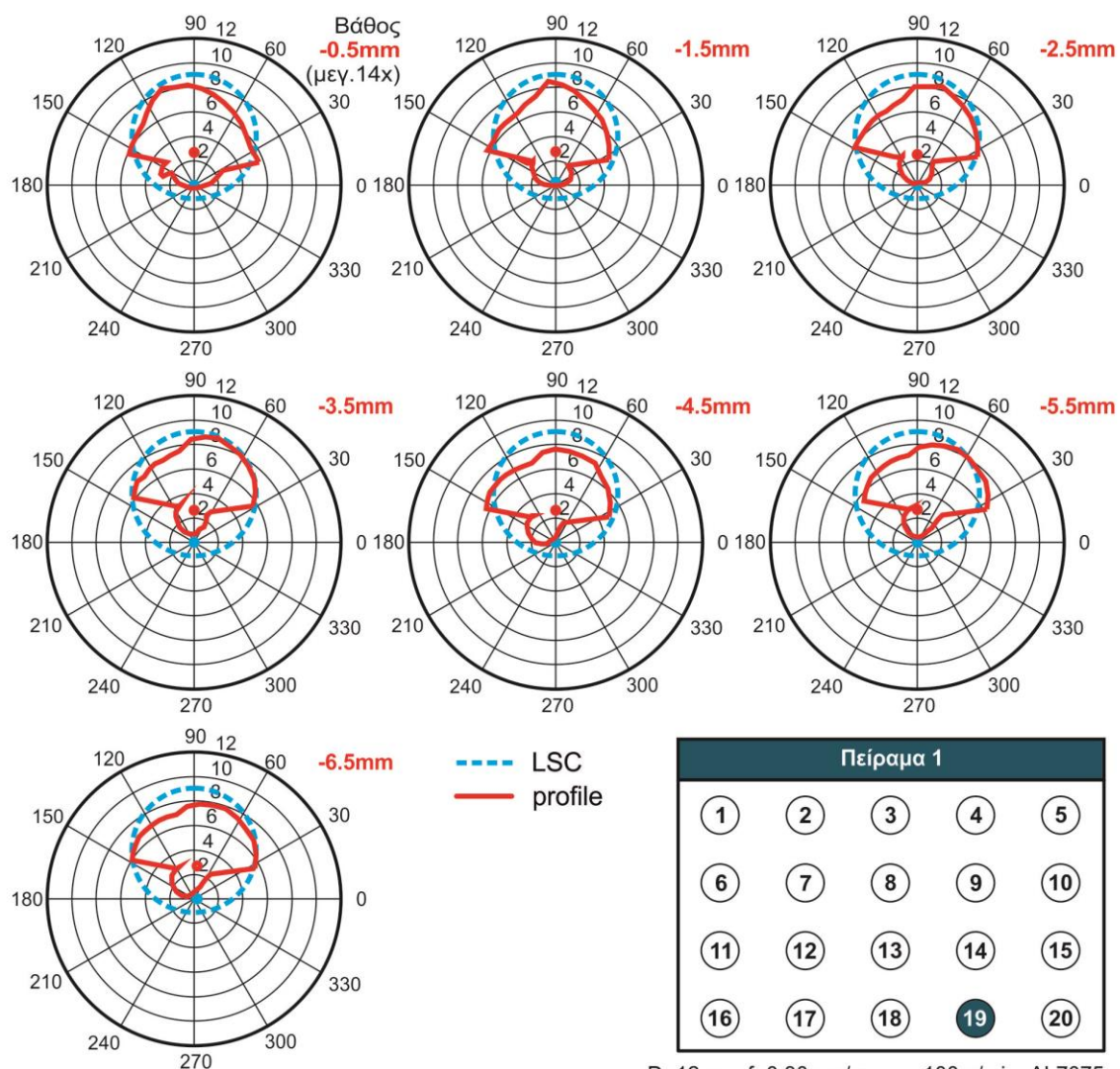
D=12mm, f=0.25mm/rev, v_c =100m/min, AL7075



3D Απεικόνιση Οπής, Κυκλικότητα, Απόκλιση RMS, Ομοκεντρικότητα

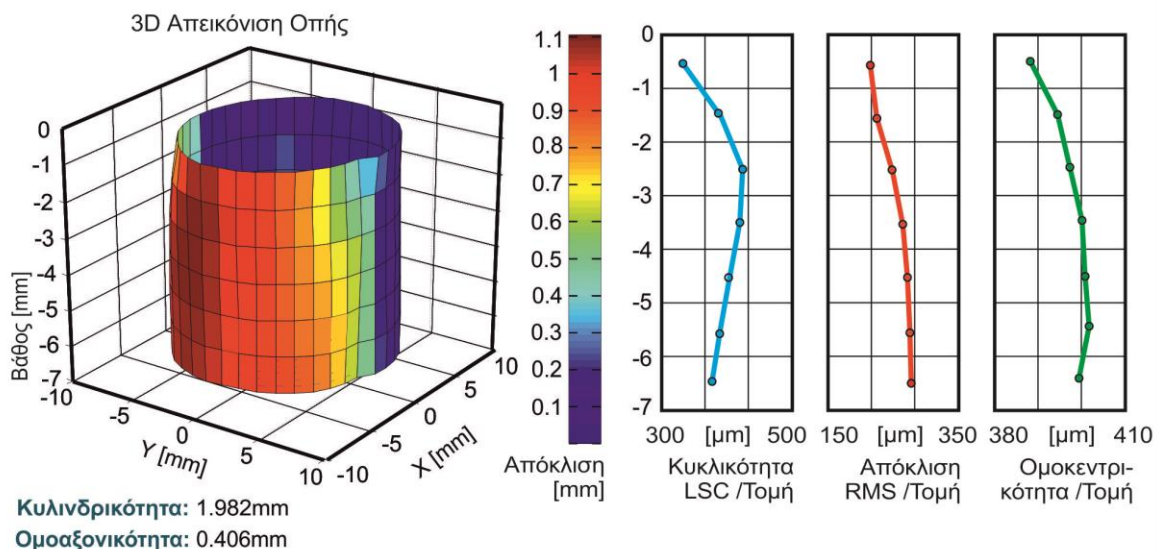


Αποκλίσεις σε συγκεκριμένα βάθη μέτρησης

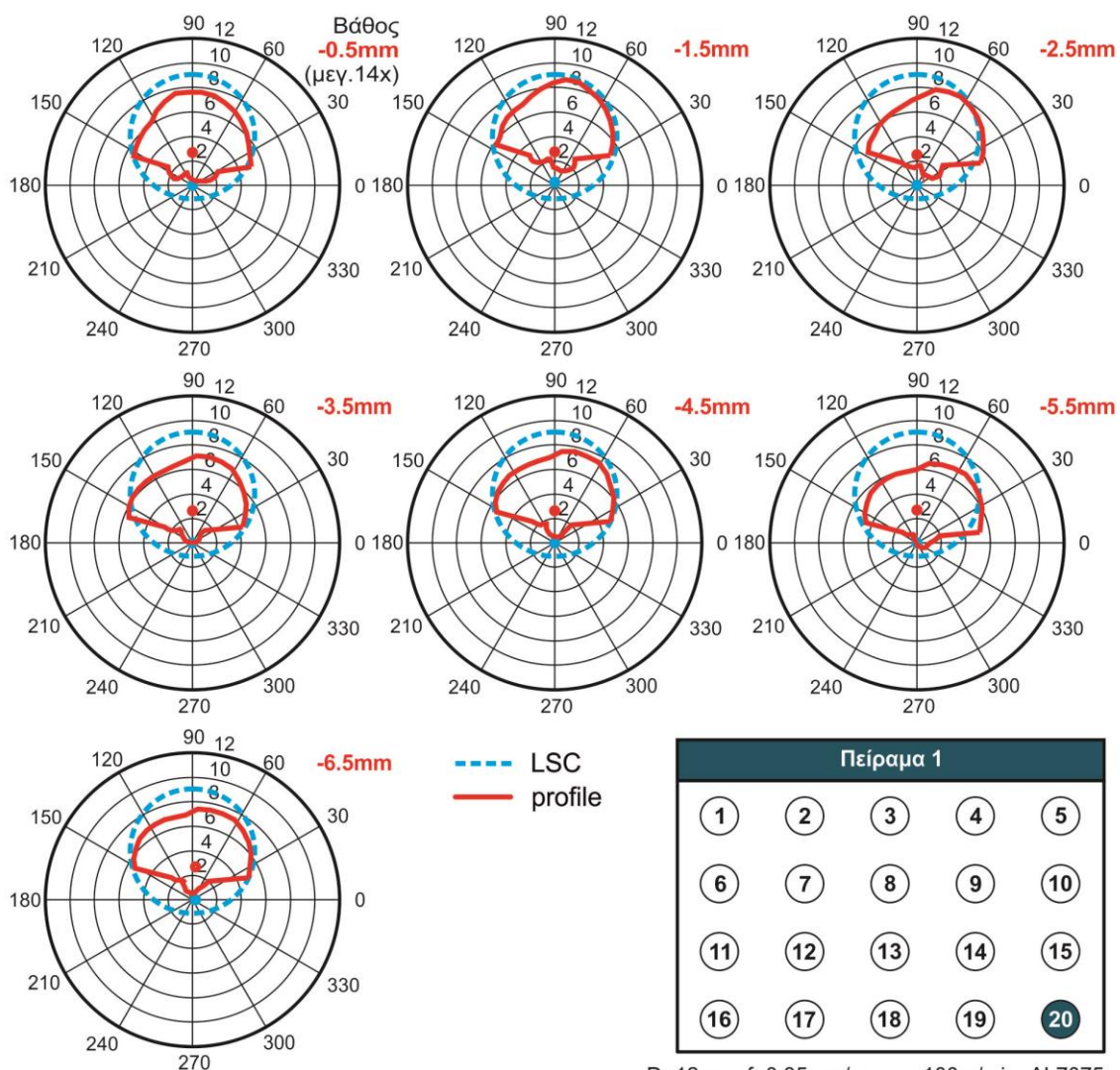


D=12mm, f=0.30mm/rev, v_c =100m/min, AL7075

3D Απεικόνιση Οπής, Κυκλικότητα, Απόκλιση RMS, Ομοκεντρικότητα



Αποκλίσεις σε συγκεκριμένα βάθη μέτρησης



D=12mm, f=0.35mm/rev, v_c =100m/min, AL7075