



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

*«Διερεύνηση του τασικού και παραμορφωσιακού πεδίου κατά τη σύνδεση
φυσικών δομικών λίθων για την αναστήλωση αρχαίων μνημείων»*

Σμαρώ Αγαλανιώτου

Γεωλόγος, Α.Π.Θ.

ΜΔΕ, ΜΗΧ.Ο.Π, Πολυτεχνείο Κρήτης.

Επιβλέπων καθηγητής: Ζαχαρίας Αγιουτάντης

Χανιά
Μάρτιος 2013

Τριμελής συμβουλευτική επιτροπή:

- Ζαχαρίας Αγιουτάντης, Καθηγητής του Τμήματος ΜΗΧ.Ο.Π, Πολυτεχνείο Κρήτης (επιβλέπων).
- Σταύρος Κ. Κουρκουλής, Αναπληρωτής Καθηγητής της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών, Ε.Μ.Π.
- Γεώργιος Εξαδάκτυλος, Καθηγητής του Τμήματος ΜΗΧ.Ο.Π, Πολυτεχνείο Κρήτης.

Επταμελής επιτροπή:

- Ζαχαρίας Αγιουτάντης, Καθηγητής του Τμήματος ΜΗΧ.Ο.Π, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Σταύρος Κ. Κουρκουλής, Αναπληρωτής Καθηγητής της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών, Ε.Μ.Π.
- Γεώργιος Εξαδάκτυλος, Καθηγητής του Τμήματος ΜΗΧ.Ο.Π, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Εμμανουήλ Στειακάκης, Επίκουρος Καθηγητής του Τμήματος ΜΗΧ.Ο.Π. Πολυτεχνείο Κρήτης
- Παγώνα Μαραβελάκη, Επίκουρη Καθηγήτρια του Γενικού Τμήματος, Πολυτεχνείο Κρήτης
- Κωνσταντίνος Προβιδάκης, Καθηγητής του Γενικού Τμήματος, Πολυτεχνείο Κρήτης
- Μαρία Σταυρουλάκη, Λέκτορας του Γενικού Τμήματος, Πολυτεχνείο Κρήτης

Χανιά,

Ιούνιος, 2013

.....
Σμαρώ Αγαλανιώτου

Γεωλόγος, Α.Π.Θ

M.Sc., ΜΗΧ.Ο.Π., Πολυτεχνείο Κρήτης

Copyright © Σμαρώ Αγαλανιώτου, 2013.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης.

*Αφιερωμένο
στους γονείς μου*

Περίληψη

Πολλά ζητήματα πρέπει να αντιμετωπιστούν κατά τη διάρκεια των εργασιών αναστήλωσης των αρχαίων μνημείων. Ένα τέτοιο πρόβλημα αφορά τη συμβατότητα των λίθων, αφού σε κάθε περίπτωση οι νέοι λίθοι πρέπει να είναι συμβατοί με τους υφιστάμενους αναφορικά με τις μηχανικές και φυσικές ιδιότητες, τη μορφή και την υφή κλπ. Ένα άλλο πρόβλημα αφορά τις ιδιότητες ορισμένων κονιαμάτων που χρησιμοποιούνται σαν υλικό πλήρωσης όταν ενώνονται ορισμένα ογκοτεμάχια. Αυτή η εργασία χωρίζεται σε τρία μέρη.

Το πρώτο μέρος της παρούσας εργασίας εξετάζει την δυνατότητα πραγματοποίησης μη καταστρεπτικών δοκιμών (ΜΚΔ) για το χαρακτηρισμό αρχαίων και νέων υλικών. Τα εξεταζόμενα υλικά ήταν δύο ασβεστόλιθοι από την περιοχή των Χανίων της Νήσου Κρήτης, τα οποία χρησιμοποιούνται ως σύγχρονα δομικά υλικά. Αρχικά έγινε μια προσπάθεια χαρακτηρισμού τους με χρήση μη καταστρεπτικών δοκιμών (ΜΚΔ) και ειδικότερα με τη μέθοδο των υπερήχων (UPV). Στη συνέχεια έγινε μια προσπάθεια να συσχετιστούν τα αποτελέσματα των ΜΚΔ με αυτά των καταστροφικών δοκιμών. Αυτό ολοκληρώθηκε με επιτυχία για το σύγχρονο υλικό αλλά δεν κατέστη δυνατό να ολοκληρωθεί για τα αρχαία υλικά εξαιτίας της έλλειψης πρόσβασης σε αυτά.

Στο δεύτερο μέρος πραγματοποιήθηκε μία σειρά από πειράματα με σκοπό το μηχανικό χαρακτηρισμό των κονιαμάτων που χρησιμοποιούνται ως υλικό πλήρωσης όταν ενώνονται λίθοι χρησιμοποιώντας μεταλλικούς συνδέσμους. Δοκιμές μονοαξονικής και τριαξονικής θλίψης πραγματοποιήθηκαν σε δοκίμια ποζολανικού ασβεστοκονιάματος κονιάματος (χωρίς τσιμέντο) ύψους 100 mm και διαμέτρου 50 mm. Κατά τη διαδικασία αυτή δίνονται η εμπειρία της επιτυχημένης χύτευσης και των τριαξονικών δοκιμών των παραπάνω διαστάσεων.

Το τρίτο μέρος εξετάζει αριθμητικά τη μηχανική συμπεριφορά των υλικών που χρησιμοποιούνται κατά τη γωνιακή συναρμογή των επιστηλίων του Παρθενώνα της Ακρόπολης των Αθηνών. Τα γωνιακά επιστήλια ενώνονται υπό γωνία 45° χρησιμοποιώντας σύνδεσμο τιτανίου σχήματος “I”. Οι σύνδεσμοι τοποθετούνται σε

ειδικές εγκοπές και το κενό πληρώνεται με κονίαμα. Αναπτύχθηκαν αριθμητικά μοντέλα για την προσομοίωση δύο πρισματικών όγκων μαρμάρου Διονύσου, έναν σύνδεσμο τιτανίου σχήματος “Γ” και κονίαμα ανάμεσα στο μάρμαρο και το σύνδεσμο τιτανίου. Εφαρμόστηκαν στοιχεία επαφής ανάμεσα στις τρεις διεπιφάνειες που προέκυψαν (τιτάνιο - κονίαμα, κονίαμα - μάρμαρο και μάρμαρο - μάρμαρο), ενώ η διεπιφάνεια μοντελοποιήθηκε με χρήση στοιχείων επαφής. Η μοντελοποίηση πραγματοποιήθηκε σε τρεις διαστάσεις χρησιμοποιώντας έλεγχο μετατόπισης ως μηχανισμό φόρτισης του εντός του οριζόντιου επιπέδου. Διαφορετικά καταστατικά μοντέλα υλικού έχουν εφαρμοστεί για τα τρία υλικά (δηλαδή ελαστικό, τέλεια ελαστοπλαστικό και πειραματικά κατά τμήματα κρατυνόμενο). Επιπλέον, έχουν εξεταστεί διαφορετικά χαρακτηριστικά κονιαμάτων καθώς και η ένωση/σύζευξη δύο διαφορετικών μαρμάρινων ογκοτεμαχίων.

Τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης παρουσιάζουν την επίδραση της τοποθέτησης του συνδέσμου τιτανίου σχήματος “Γ”, την επίδραση των διαφορετικών καταστατικών μοντέλων υλικού, καθώς και τις αντιπροσωπευτικές τάσεις και παραμορφώσεις όλων των υλικών. Επίσης, δείχνουν την επίδραση του νέου υλικού και την επίδραση των δύο διαφορετικών μαρμάρινων ογκοτεμαχίων στο τασικό και παραμορφωσιακό πεδίο και των τριών υλικών.

Abstract

Several issues need to be addressed during the restoration work of ancient monuments. One such issue concerns the compatibility of stones, since in every case, the new stones should be compatible with the original stones with respect to mechanical and physical properties, form and texture, etc. Another concerns the properties of some of the mortar used as filling material, when joining stone pieces. This work is divided in three parts.

The first part of this thesis examines the possibility of performing non destructive testing (NDT) for the characterization of modern and ancient materials. The materials tested were two limestones from the area of Chania, Crete island, used as modern building materials. Initially, an attempt was made to characterize both materials using NDT, particularly with the method of ultrasonic waves (UPV). Then, an attempt was made to correlate NDT results with results from destructive tests. This was successfully completed for modern material but it was not completed for ancient materials due to lack of access to such materials.

In the second part a series of laboratory experiments was performed to mechanically characterize mortars used as filling material when joining stones using metal connectors. Uniaxial and triaxial testing was performed for 100mm high and 50mm diameter cylinders of pozzolanic (non-cementitious) mortars. In the process, the experience of successful casting and testing of specimens of such dimensions are given.

The third part examines numerically the mechanical behavior of the materials used to restore the corner architraves of the Parthenon Temple of the Acropolis of Athens. Corner architraves are joined at a 45 degree angle using titanium "I" shaped connectors. The connectors are placed in special slots and the void is filled with mortar. Numerical models were developed to simulate two prismatic blocks of Dionysos marble, an "I" shaped titanium connector and mortar material laid between the marble and the titanium connector. Contact elements were applied between the three resulting interfaces (titanium - mortar, mortar - marble and marble - marble),

while the interface was modeled using contact elements. Modeling was performed in three dimensions, using displacement control as the in-plane loading mechanism. Different constitutive material models have been applied to the three materials (i.e. elastic, elastic-perfectly-plastic and experimental comprising of linear segments). Moreover, different mortar characteristics as well as the coupling of two different marble pieces have been examined.

Results of numerical analysis show the effect of the location of the “T” shaped titanium joint, the effect of the different constitutive material models as well as representative stresses and strains for all the materials. Also, they show the effect of the new mortar and the effect of the two different marble pieces in the stress - strain field of all three materials.

Πρόλογος

Η παρούσα διδακτορική διατριβή εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Μηχανικής Πετρωμάτων του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης το χρονικό διάστημα Νοεμβρίου 2006 - Μάρτιος 2013. Στα πλαίσια της υλοποίησής της διερευνήθηκε το κατά πόσο είναι δυνατόν να εκτιμηθεί η συμβατότητα παλαιών και νέων υλικών με μη καταστρεπτικές δοκιμές σε συνδυασμό με καταστρεπτικές. Επίσης, μελετήθηκε πειραματικά η μηχανική συμπεριφορά και οι μηχανικές ιδιότητες ποζολανικού ασβεστοκονιάματος που χρησιμοποιείται ως πληρωτικό υλικό. Στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής μελετήθηκε αριθμητικά με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και τη χρήση του λογισμικού ANSYS 12.0 η μηχανική καταπόνηση γωνιακών μαρμάρινων επιστηλίων αρχαίων ναών κάτω από διατμητική καταπόνηση. Συγκεκριμένα, μελετήθηκε η γωνιακή συναρμογή μαρμάρινων όγκων με χρήση συνδέσμου τιτανίου μορφής διπλού T και κονιάματος ως πληρωτικό υλικό. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι μελετήθηκε σε τρεις διαφορετικές θέσεις τοποθέτησης του συνδέσμου. Χρησιμοποιήθηκαν διάφορα καταστατικά μοντέλα για κάθε υλικό. Επιπλέον, μελετήθηκαν μοντέλα με χρήση χαρακτηριστικών διαφορετικών κονιαμάτων, αρχικά αυτού που χρησιμοποιείται στις αναστηλωτικές εργασίες του Παρθενώνα, ενώ στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν τα χαρακτηριστικά του ποζολανικού ασβεστοκονιάματος που παρασκευάστηκε και μελετήθηκε εργαστηριακά, στο εργαστήριο Μηχανικής Πετρωμάτων της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης. Μελετήθηκε ακόμα, ένα σύνθετο μοντέλο, στο οποίο χρησιμοποιήθηκαν οι ιδιότητες δύο διαφορετικών μαρμάρων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζουν την επίδραση που προκαλεί η κάθε αλλαγή στο τασικό και παραμορφωσιακό πεδίο του κάθε υλικού.

Η παρούσα διδακτορική διατριβή δεν θα είχε ολοκληρωθεί χωρίς την αμέριστη υποστήριξη και συμπαράσταση ορισμένων προσώπων τα οποία και θα ήθελα να ευχαριστήσω:

- Τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Ζαχαρία Αγιουτάντη, για την ανάθεση της παρούσας εργασίας, καθώς και για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε σε όλη τη διάρκεια της έρευνας. Οι πολύτιμες συμβουλές του και η καθοδήγησή του σε

επιστημονικά θέματα συνέβαλαν καθοριστικά στην ολοκλήρωση της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

- Τον αναπληρωτή καθηγητή κ. Σταύρο Κουρκουλή για τη βοήθεια που μου προσέφερε σε επιστημονικά θέματα.
- Την επίκουρο καθηγήτρια κα. Παγώνα Μαραβελάκη, η βοήθεια της οποίας ήταν καθοριστική για την παρασκευή του ποζολανικού ασβεστοκονιάματος.
- Τον καθηγητή κ. Αντώνη Βαφείδη για τις χρήσιμες συμβουλές του στα θέματα διάδοσης κυμάτων.
- Την κα Ερμιόνη Πάσιου, Πολιτικό Μηχανικό για την πολύτιμη βοήθεια που μου παρείχε κατά την κατασκευή των αριθμητικών προσομοιωμάτων και τις συμβουλές της σχετικά με τον τρόπο χειρισμού του λογισμικού πακέτου ANSYS 12.0.
- Τον κ. Στέλιο Μαυριγιαννάκη, Μηχ. Μεταλ.- Μεταλ/ργό για τη βοήθεια του στις εργαστηριακές δοκιμές.
- Τον κ. Στράτο Λιονάκη, Χημικό για τη βοήθεια του στην παρασκευή των ποζολανικών κονιαμάτων και των δοκιμών φασματοσκοπίας υπερύθρου με μετασχηματισμό Fourier (FT-IR) που πραγματοποιήθηκαν στα εξεταζόμενα δοκίμια.

Ευχαριστίες

Εν μέρει, η παρούσα έρευνα έχει συγχρηματοδοτηθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο – ΕΚΤ) και από εθνικούς πόρους μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» του Εθνικού Στρατηγικού Πλαισίου Αναφοράς (ΕΣΠΑ) – Ερευνητικό Χρηματοδοτούμενο Έργο: **ΘΑΛΗΣ**. Επένδυση στην κοινωνία της γνώσης μέσω του Ευρωπαϊκού Κοινωνικού Ταμείου (**Ανάπτυξη και Αξιολόγηση Καινοτόμων Πειραματικών Τεχνικών για τη Μελέτη της Μηχανικής Συμπεριφοράς Φυσικών Δομικών Λίθων με Εφαρμογές στη Συντήρηση Μνημείων της Πολιτιστικής Κληρονομιάς**).

Επίσης εν μέρει η παρούσα έρευνα χρηματοδοτήθηκε από τον Ειδικό Λογαριασμό Κονδυλίων Έρευνας του Πολυτεχνείου Κρήτης μέσω προγράμματος βασικής έρευνας με τίτλο «**Διερεύνηση μηχανικής συμβατότητας φυσικών δομικών λίθων για την αναστήλωση αρχαίων μνημείων – Η περίπτωση της Επιδαύρου**»

- 1 Agalaniotou, S. and Agioutantis, Z., (2013). Finite element modeling of the stress and strain fields on corner marble architraves joint using "I" shaped titanium connectors, 10th HSTAM International Congress on Mechanics, Chania, Crete, Greece, 25 – 27 May, 2013
2. Αγαλανιώτου, Σ., Κακλής, Κ. και Αγιουτάντης, Ζ. (2011). Εκτίμηση ανισοτροπίας ασβεστολιθικών πετρωμάτων με βάση την ταχύτητα διάδοσης διαμήκων κυμάτων, *Ορυκτός Πλούτος*, Τόμ. 159, σελ. 23-35.
3. Agalaniotou, S. and Agioutantis, Z., (2009). Characterization of Neogene limestones using non-destructive methods, Sustainable exploitation of natural resources, Proceedings of 3rd International seminar Ecomining-Europe in 21st Century, Milos Island, Greece, pp. 171-181

Περιεχόμενα

<i>Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή</i>	1
1.1 Γενικά	1
1.2 Διάρθρωση της παρούσας διατριβής	2
1.3 Αναγκαιότητα και πρωτοτυπία της διατριβής	5
<i>Κεφάλαιο 2: Μνημεία και μέθοδοι επέμβασης</i>	6
2.1 Μνημεία και μέθοδοι επέμβασης.....	6
2.1.1 Γενικά.....	6
2.1.2 Κριτήρια και αρχές επεμβάσεων	7
2.1.3 Μέθοδοι επέμβασης	9
2.2 Αναστήλωση μνημείων.....	13
2.2.1 Γενικά.....	13
2.2.2 Συντήρηση και αναστήλωση των ελληνικών μνημείων	14
2.2.3 Νέες τεχνικές αναστήλωσης	26
2.2.4 Αντικατάσταση πετρωμάτων	29
2.3 Συμβατότητα φυσικών δομικών λίθων	31
2.3.1 Ορισμός συμβατότητας.....	31
2.3.2 Μελέτη συμβατότητας	32
2.3.3 Παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά δύο συμβατών υλικών 33	
2.3.4 Μηχανική Συμβατότητα και Μηχανική Καταπόνηση.....	35
<i>Κεφάλαιο 3: Δομικά υλικά μνημείων και χαρακτηρισμός τους</i>	36
3.1 Γενικά	36
3.2 ΜΚΔ σε ασβεστολιθικά υλικά.....	37
3.2.1 Μη καταστρεπτικές δοκιμές: Η μέθοδος των υπερήχων	37
3.2.2 Πειραματική διαδικασία.	40
3.2.3 Αποτελέσματα.....	50
3.3 Δοκιμές θλίψης σε ασβεστολιθικά υλικά.....	71
3.3.1 Πειραματική διαδικασία	72
3.3.2 Συμπεράσματα	79
3.4 Χαρακτηριστικά μαρμάρων.....	83
3.4.1 Γενικά.....	83

3.4.2	Πεντελικό μάρμαρο	83
3.4.3.	Μάρμαρο Διονύσου	85
3.5	Σίδηρος, τιτάνιο και κονιάματα	90
3.5.1.	Σίδηρος.....	90
3.5.2	Τιτάνιο	91
3.5.3	Κονιάματα.....	92
	<i>Κεφάλαιο 4: Κονιάματα</i>	<i>94</i>
4.1	Γενικά	94
4.1.1	Ορισμός και γενική περιγραφή των κονιαμάτων.....	94
4.2	Κατηγορίες κονιαμάτων	97
4.3	Χρήση των κονιαμάτων.....	99
4.4	Χαρακτηριστικά των κονιαμάτων	101
4.4.1	Γενικά.....	101
4.4.2	Μη μηχανικά χαρακτηριστικά των κονιαμάτων.....	102
4.4.3	Μηχανικές ιδιότητες των κονιαμάτων	104
4.5	Τριαξονικές Δοκιμές ασβεστοκονιαμένων - Πειραματική διαδικασία.....	117
4.5.1	Γενικά.....	117
4.5.2	Χρησιμοποιούμενα υλικά για την κατασκευή των κονιαμάτων.....	118
4.5.4	Μονοαξονικές δοκιμές θλίψης.....	125
4.5.5	Τριαξονικές δοκιμές θλίψης	130
4.5.6	Δοκιμές φασματοσκοπίας υπερύθρου με μετασχηματισμό Fourier FT-IR	140
4.6	Συζήτηση αποτελεσμάτων	142
	<i>Κεφάλαιο 5: Υπολογισμοί εντατικής και παραμορφωσιακής κατάστασης δομικών λίθων αρχαίων μνημείων</i>	<i>143</i>
5.1	Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων	143
5.2	Διερεύνηση του εντατικού και παραμορφωσιακού πεδίου μαρμάρινων γωνιακών επιστηλίων του Παρθενώνα της Ακρόπολης των Αθηνών που συνδέονται με σύνδεσμο τιτανίου μορφής διπλού T	144
5.2.1	Γεωμετρία των μοντέλων.....	144
5.2.2	Μηχανικές ιδιότητες των υλικών.....	147
5.2.3	Καταστατικές εξισώσεις των μοντέλων.....	148
5.2.4	Διακριτοποίηση των μοντέλων	154
5.2.5	Στοιχεία επαφής	156

5.2.6	Συνοριακές συνθήκες.....	159
5.2.7	Επίλυση του προβλήματος.....	159
5.2.8	Παραμετρική ανάλυση και αριθμητικά αποτελέσματα	160
5.2.9	Συζήτηση αποτελεσμάτων	174
5.3	Αριθμητική διερεύνηση της περίπτωσης χρήσης συμβατού μαρμάρου ως ένα από τα γωνιακά επιστύλια.....	175
5.3.1	Αριθμητικά αποτελέσματα.....	177
5.3.2	Συγκριτικά αριθμητικά αποτελέσματα	182
5.3.2	Συζήτηση Αποτελεσμάτων	192
5.4	Αριθμητική διερεύνηση της περίπτωσης χρήσης ποζολανικού κονιάματος .	193
5.4.1	Αριθμητικά αποτελέσματα.....	196
5.4.2	Συζήτηση αποτελεσμάτων	205
<i>Κεφάλαιο 6: Γενικά συμπεράσματα και προτάσεις</i>		<i>207</i>
6.1	Συμπεράσματα	207
6.2	Προτάσεις	209
<i>Κεφάλαιο 7:Βιβλιογραφία</i>		<i>211</i>
7.1	Ελληνική βιβλιογραφία:	211
7.2	Διεθνής βιβλιογραφία:	214
7.3	Ιστοσελίδες:	225

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Τα αρχαία μνημεία αποτελούν σημαντικό μέρος της παγκόσμιας πολιτιστικής κληρονομιάς και γι' αυτό το λόγο πρέπει να διαφυλάσσονται ακέραια. Η σωστή συντήρηση ή η αναστήλωση τους θεωρείται επιβεβλημένη. Τα αρχαία μνημεία είναι κατασκευασμένα από διάφορους φυσικούς δομικούς λίθους όπως για παράδειγμα το Πεντελικό μάρμαρο ή και άλλα μάρμαρα (Παρθενώνας, Ερέχθειο, Θησείο κλπ), Κεχρεάτη λίθο (θέατρο της Επιδαύρου), και διάφορους τύπους ασβεστολίθων (παραδείγματος χάριν από ασβεστόλιθο Παρνασσού από τον οποίο είναι κατασκευασμένα τα εδώλια στο αρχαίο στάδιο των Δελφών). Τα υλικά αυτά προέρχονταν από αρχαία λατομεία τα οποία είτε έχουν εξοφληθεί (δηλαδή δεν είναι δυνατή η εξόρυξη επιπλέον υλικού) είτε δεν είναι γνωστό το σημείο στο οποίο βρίσκονται, είτε προστατεύονται από επιπλέον λατομική δραστηριότητα δηλαδή δεν επιτρέπεται η λατόμευση υλικού. Κατά τις εργασίες συντήρησης, και μερικής ή ολικής αναστήλωσης των αρχαίων μνημείων πολλές φορές υφίσταται η ανάγκη αντικατάστασης μέρους των αρχαίων λίθων με νεώτερους. Οι νέοι λίθοι σε κάθε περίπτωση πρέπει να είναι συμβατοί με τους υφιστάμενους. Χαρακτηριστικά αναφέρεται η μηχανική συμβατότητα, η συμβατότητα σε διαστολές, η συμβατότητα μορφής και υφής, κλπ.

Ο Παρθενώνας της Ακρόπολης των Αθηνών είναι ένα από τα σημαντικότερα μνημεία παγκοσμίως. Κατασκευάστηκε το χρυσό αιώνα του Περικλή, δηλαδή κατά τον 5^ο αι. π.Χ. από τους αρχιτέκτονες Ικτίνο και Καλλικράτη, ενώ τη γενική επίβλεψη του έργου και του γλυπτού διάκοσμου είχε ο γλύπτης Φειδίας. Ο ναός αυτός ο οποίος ήταν αφιερωμένος στη θεά Αθηνά και για πολλούς αιώνες έμεινε άθικτος. Κατά τα υστερορωμαϊκά χρόνια υπέστη σοβαρότατες ζημιές από πυρκαγιά. Επισκευάστηκε τον 4ο αι. μ.Χ., πιθανόν κατά την περίοδο αυτοκρατορίας του Ιουλιανού. Λίγο αργότερα, ο ναός υπέστη μετασκευές προκειμένου να λειτουργήσει ως χριστιανική εκκλησία. Στη μέση βυζαντινή περίοδο ανάγεται ένας σημαντικός αριθμός χαραγμάτων στους κίονες του Παρθενώνα και αρκετές τοιχογραφίες. Το 1205 ο ναός αφιερώθηκε στην Παναγία. Στην περίοδο της Λατινοκρατίας αποδίδεται και το κλιμακοστάσιο που οικοδομήθηκε στο νότιο άκρο του οπισθόναου. Λίγες δεκαετίες

μετά την κατάληψη των Αθηνών από τους Τούρκους το 1460, ο Παρθενώνας μετατράπηκε σε τζαμί και το κλιμακοστάσιο σε μιναρέ. Η μεγαλύτερη καταστροφή στην ιστορία του μνημείου προκλήθηκε το 1687, όταν βομβαρδίστηκε κατά την πολιορκία της Ακρόπολης από τους Ενετούς. Η ανατίναξη της πυρίτιδας, που είχαν αποθηκεύσει οι Τούρκοι στο εσωτερικό του μνημείου, προκάλεσε κατάρρευση εκτενών τμημάτων του ναού και μετέτρεψε το κτίριο σε ερείπιο. Η εικόνα της καταστροφής ολοκληρώθηκε στις αρχές του 19ου αι., με τη συστηματική απομάκρυνση των γλυπτών του ναού από το λόρδο Έλγιν (ΥΣΜΑ, 2011). Στα νεότερα χρόνια ανεπιτυχείς προσπάθειες αναστήλωσής του καθώς και η ατμοσφαιρική ρύπανση της Αθήνας προκάλεσαν περαιτέρω ζημιά στο μνημείο.

Το 1983 η «Επιτροπή Συντήρησης Μνημείων Ακρόπολης» ξεκίνησε ένα νέο πρόγραμμα συντήρησης και αναστήλωσης βασισμένο στα επιτεύγματα των τελευταίων επιστημονικών ερευνών (Korres and Bouras, 1983). Η αναστήλωση του Παρθενώνα της Ακρόπολης των Αθηνών αντιμετώπισε πολλά προβλήματα κατά τη διάρκεια των χρόνων. Ένα από αυτά είναι η μηχανική συμβατότητα των χρησιμοποιούμενων υλικών και το πώς αυτά τα υλικά μπορούν να αντέξουν τις επιβαλλόμενες τάσεις και παραμορφώσεις. Αυτό το μνημείο κατασκευάστηκε από Πεντελικό μάρμαρο, το οποίο όμως δεν είναι πλέον διαθέσιμο. Γι' αυτό στις αναστηλωτικές εργασίες έχει χρησιμοποιηθεί το μάρμαρο Διονύσου το οποίο παρουσιάζει παρόμοιες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες με το αυθεντικό (Zambas, 1992).

Για την πιστοποίηση της συμβατότητας των διαφόρων φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών των λίθων είναι απαραίτητη μια σειρά δοκιμών (συνήθως εργαστηριακών) τόσο στα νέα όσο και στα παλαιότερα υλικά.

Η παρούσα διατριβή πραγματεύεται θέματα σχετικά με την συμβατότητα των υλικών που απαντώνται κατά την αναστήλωση των αρχαίων μνημείων.

1.2 Διάρθρωση της παρούσας διατριβής

Καθώς δεν είναι πάντα εύκολο να ελέγχονται τα υλικά των αρχαίων μνημείων με καταστροφικές δοκιμές, στο πρώτο μέρος της παρούσας διδακτορικής διατριβής διερευνήθηκε το κατά πόσο είναι δυνατόν να εκτιμηθεί η συμβατότητα παλαιών και νέων υλικών με μη καταστρεπτικές δοκιμές. Ειδικότερα, ελέγχθηκαν ασβεστολιθικά

πετρώματα τα οποία μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως συμβατά δομικά υλικά σε μνημείο κατασκευασμένο από ασβεστόλιθο ασθενών μηχανικών χαρακτηριστικών ή ακόμη και από Κεχρεάτη λίθο. Τα υλικά που εξετάστηκαν ήταν δύο ασβεστολιθικά πετρώματα προερχόμενα από την περιοχή των Χανίων, τα οποία χρησιμοποιούνται ως σύγχρονα δομικά υλικά.

Αρχικά έγινε μια προσπάθεια χαρακτηρισμού τους με χρήση μη καταστρεπτικών δοκιμών (ΜΚΔ) και ειδικότερα με τη μέθοδο των υπερήχων. Αυτή η τεχνική (ultrasound pulse velocity, UPV) είναι μία από τις φθηνότερες, πλέον φορητές και ιδιαίτερα εύκολες και πρακτικές μεθόδους (Bellopede and Manfredotti, 2006). Γενικά, θεωρείται μία χρήσιμη και αξιόπιστη μέθοδος για τον υπολογισμό διάφορων ελαστικών ιδιοτήτων, ύπαρξη ρωγμών ρωγμών, ή ανισοτροπίας, ορυκτολογικών ή δομικών ανωμαλιών στο εσωτερικό ενός υλικού κ.λ.π που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση της μηχανικής κατάστασης ενός υλικού χωρίς να το καταστρέψει. Μπορεί έτσι να χρησιμοποιηθεί σε πολλές περιπτώσεις αρχαίων μνημείων όπου δεν μπορεί να χρησιμοποιηθούν καταστρεπτικές δοκιμές για χαρακτηρισμό της μηχανικής του κατάστασης. Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν και καταστρεπτικές δοκιμές κυρίως μονοαξονικές δοκιμές θλίψης και έμμεσου εφελκυσμού έτσι ώστε να συσχετιστούν τα αποτελέσματα των ΜΚΔ. Ο αρχικός σχεδιασμός προέβλεπε την αντίστοιχη διαδικασία σε υλικά προερχόμενο από αρχαίο μνημείο ούτως ώστε να αναπτυχθεί η αντίστοιχη τεχνική χαρακτηρισμού μηχανικής συμβατότητας συγκεκριμένης γεωμετρίας και καταπόνησης. Όμως τελικά αυτό δεν κατέστη δυνατό και δεν ολοκληρώθηκε ο χαρακτηρισμός των σύγχρονων υλικών ως συμβατά του αρχαίου υλικού.

Στο δεύτερο μέρος της διατριβής μελετήθηκε πειραματικά η μηχανική συμπεριφορά και οι μηχανικές ιδιότητες ποζολανικών ασβεστοκονιαμάτων τα οποία χρησιμοποιούνται ή μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως υλικό πλήρωσης ανάμεσα σε μαρμάρινα ογκοτεμάχια και μεταλλικών συνδέσμους. Ο μηχανικός χαρακτηρισμός των ποζολανικών κονιαμάτων έγινε με δοκιμές μονοαξονικής και τριαξονικής φόρτισης.

Η χύτευση των ως άνω δοκιμίων ήταν μια επίπονη και χρονοβόρα διαδικασία. Μελετήθηκαν και δοκιμάστηκαν διάφοροι τρόποι χύτευσης που είχαν σχέση με τον σχεδιασμό της μήτρας, τη λίπανσή της (χωρίς λιπαντικό, με λάδι μηχανής, με

βαζελίνη, με μίγμα ελαιόλαδου - υγρού σαπουνιού), τον τρόπο χύτευσης της, είτε οριζόντια είτε κατακόρυφα, με ή χωρίς ταυτόχρονη χρήση δόνησης, καθώς και τις συνθήκες ωρίμανσης των δοκιμίων.

Διακρίνονται δύο κύριοι τρόποι μηχανικής συμπεριφοράς των δοκιμίων. Ψαθυρή ή σχεδόν ψαθυρή συμπεριφορά και πλαστική συμπεριφορά η οποία αποδίδεται στην ολοκλήρωση ή μη των διαδικασιών ενυδάτωσης του κονιάματος. Ο σχετικός έλεγχος της ολοκλήρωσης των διαδικασιών ενυδάτωσης έγινε μέσω δοκιμών φασματοσκοπίας υπερύθρου με μετασχηματισμό Fourier (FT-IR).

Στο τρίτο μέρος της παρούσας διδακτορικής διατριβής μελετήθηκε αριθμητικά η μηχανική καταπόνηση γωνιακών μαρμάρινων επιστηλίων του Παρθενώνα της Ακρόπολης των Αθηνών κάτω από διατμητική καταπόνηση. Η αναστήλωση αυτού του μνημείου αντιμετωπίζει το πρόβλημα της συμβατότητας των υλικών που χρησιμοποιούνται. Το αυθεντικό υλικό δεν εξορύσσεται πλέον και ως συμβατό υλικό χρησιμοποιείται στις αναστηλώσεις το μάρμαρο Διονύσου. Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση όπου μέρος ορισμένων επιστυλίων του Παρθενώνα τα οποία καταστράφηκαν με το πέρασμα του χρόνου, αντικαταστάθηκαν από μάρμαρο Διονύσου, το οποίο έχει μελετηθεί πλήρως και έχει πιστοποιηθεί η συμβατότητά του με το Πεντελικό μάρμαρο από προηγούμενες έρευνες (Exadaktylos et al. 2001, Βαρδουλάκης κ.ά. 2002).

Αρχικά μελετήθηκε αριθμητικά με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και τη χρήση του λογισμικού ANSYS 12.0 η γωνιακή συναρμογή μαρμάρινων όγκων με χρήση συνδέσμου τιτανίου μορφής διπλού T. Η γωνία συναρμογής των γωνιακών επιστυλίων ελήφθη ίση με 45° ώστε να ταυτίζεται με τη γωνία συναρμογής των επιστηλίων του Παρθενώνα. Η αριθμητική επίλυση των μοντέλων των γωνιακών αυτών επιστυλίων έγινε σε τρεις διαστάσεις χρησιμοποιώντας έλεγχο μετατόπισης ως μηχανισμό φόρτισης.

Εφαρμόστηκαν διαφορετικά καταστατικά μοντέλα στα τρία υλικά, τα οποία περιλάμβαναν γραμμικώς ελαστική συμπεριφορά, τέλεια ελαστοπλαστική συμπεριφορά και κατά τμήματα κρατυνόμενη συμπεριφορά. Επίσης, για την καλύτερη προσομοίωση της επαφής μεταξύ των τριών υλικών που χρησιμοποιούνται

για την αναστήλωση των επιστυλίων κατασκευάστηκε στην κάθε διεπιφάνεια ζεύγος τρισδιάστατων στοιχείων επαφής (contact elements).

Έγινε παραμετρική διερεύνηση σε σχέση με την θέση τοποθέτησης του συνδέσμου τιτανίου διπλού T, καθώς την επίδραση των διαφορετικών καταστατικών μοντέλων στις αναπτυσσόμενες τάσεις και παραμορφώσεις των τριών υλικών. Επίσης διερευνήθηκε αριθμητικά η περίπτωση που τα ογκοτεμάχια αποτελούνται από διαφορετικό μάρμαρο, καθώς και όταν χρησιμοποιείται σαν πληρωτικό υλικό ανάμεσα στα μάρμαρα και το σύνδεσμο τιτανίου ποζολανικό κονίαμα.

1.3 Αναγκαιότητα και πρωτοτυπία της διατριβής

Η πραγματοποίηση της παρούσας διδακτορικής διατριβής πρόκειται να συμβάλει στην κατανόηση της συμπεριφοράς των υλικών που χρησιμοποιούνται για την αναστήλωση αρχαίων μνημείων. Ένα ειδικό πρόβλημα που πραγματεύεται η παρούσα διατριβή είναι ο υπολογισμός συγκεντρώσεων τάσεων στα σημεία συναρμογής γωνιακών επιστυλίων με τη χρήση συνδέσμων τιτανίου και η επιλογή της θέσης της εγκοπής στα μάρμαρα για την τοποθέτηση των συνδέσμων έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται οι τάσεις και το ενδεχόμενο αστοχίας των λίθων.

Ένα άλλο σημείο πρωτοτυπίας της διατριβής έγκειται στη μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς ποζολανικού ασβεστοκονιάματος σε μονοαξονική και τριαξονική καταπόνηση κυλινδρικών δοκιμίων. Παρόμοια πειραματικά αποτελέσματα δεν φαίνεται να έχουν καταγραφεί στη ελληνική και διεθνή βιβλιογραφία μέχρι και την συγγραφή της παρούσας. Τα πειραματικά αυτά αποτελέσματα θα συμβάλλουν στην σωστή αριθμητική προσομοίωση του αντίστοιχου εντατικού πεδίου.

Κεφάλαιο 2: Μνημεία και μέθοδοι επεμβάσης

2.1 Μνημεία και μέθοδοι επέμβασης

2.1.1 Γενικά

Ένας γενικός ορισμός του μνημείου είναι ότι πρόκειται για ένα μεμονωμένο οικοδόμημα ή ένα σύνολο οικοδομημάτων που διασώθηκε από παλιότερη ιστορική περίοδο και θεωρείται σημαντικό από άποψη αρχαιολογική, ιστορική ή αισθητική. Αποτελεί δείγμα της ανθρώπινης δραστηριότητας από προηγούμενες εποχές, γι' αυτό και παρουσιάζει ξεχωριστό ενδιαφέρον (<http://el.wiktionary.org/wiki/μνημείο>). Μνημεία υπάρχουν διάσπαρτα σε όλο τον κόσμο αποτελώντας την αδιαμφισβήτητη απόδειξη της ύπαρξης παλιότερων πολιτισμών.

Η Ελλάδα αποτελεί το λίκνο του δυτικού πολιτισμού και σύμφωνα με το Ελληνικό σύνταγμα (ΦΕΚ 153/Α/28 Ιουνίου 2002):

- ως μνημεία νοούνται τα πολιτιστικά αγαθά που αποτελούν υλικές μαρτυρίες και ανήκουν στην πολιτιστική κληρονομιά της χώρας και των οποίων επιβάλλεται η προστασία.
- ως αρχαία μνημεία ή αρχαία νοούνται όλα τα πολιτιστικά αγαθά που ανάγονται στους προϊστορικούς, αρχαίους, βυζαντινούς και μεταβυζαντινούς χρόνους και χρονολογούνται έως το 1830.
- ως ακίνητα μνημεία νοούνται τα μνημεία που υπήρξαν συνδεδεμένα με το έδαφος και παραμένουν σε αυτό ή στο βυθό της θάλασσας ή στον πυθμένα λιμνών ή ποταμών, καθώς και τα μνημεία που βρίσκονται στο έδαφος ή στο βυθό της θάλασσας ή στον πυθμένα λιμνών ή ποταμών και δεν μπορούν να μετακινηθούν χωρίς βλάβη της αξίας τους ως μαρτυριών.

Τα αξιοθαύμαστα οικοδομήματα που αποτελούν δείγματα των διαφόρων πολιτισμών ανά τον κόσμο είναι κατασκευασμένα από φυσικούς δομικούς λίθους, ξύλο και διάφορα μέταλλα. Σ' αυτά που είναι κατασκευασμένα από φυσικούς δομικούς λίθου ανήκουν τα ιστορικά και τα μοντέρνα μνημεία, τα κτήρια καθώς και οι διακοσμητικές δομικές κατασκευές. Οι περισσότερο συχνά χρησιμοποιούμενοι λίθοι για την κατασκευή τους είναι το μάρμαρο και οι διάφοροι τύποι ασβεστόλιθου.

Οι κυριότερες φθορές που υφίστανται τα μνημεία διακρίνονται στις μηχανικές, στις χημικές και στις βιολογικές. Με τον όρο μηχανικές φθορές αναφέρονται οι φθορές που προκλήθηκαν από σεισμούς, βανδαλισμούς, εκρήξεις, πυρκαγιές, παγετό, καθώς και στη διόγκωση των οξειδωμένων σιδηρών συνδέσμων των νεώτερων επεμβάσεων. Οι χημικές φθορές αφορούν μορφές διάβρωσης που προκαλούνται στο μάρμαρο κυρίως από την όξινη βροχή (ΥΣΜΑ, 2009). Για την κατασκευή των διαφόρων μνημείων έχουν χρησιμοποιηθεί διαφορετικά είδη πετρωμάτων, τα οποία έχουν διαφορετικές ιδιότητες και παρουσιάζουν φθορές και ιδίως αποσάθρωση με το πέρασμα του χρόνου (Fitzner, 2004). Ένα σοβαρό πρόβλημα, το οποίο είναι συνδεδεμένο με την ατμοσφαιρική ρύπανση αποτελούν και οι διάφορες επικαθήσεις, δηλαδή η σκόνη, η αιθάλη και τα μεταλλοξείδια. Οι βιολογικές φθορές είναι μορφές διάβρωσης που προκαλούνται από τις λειχήνες, τους μύκητες, τα περιττώματα των πτηνών, τις ρίζες των φυτών και τα εκχύματά τους (ΥΣΜΑ, 2009).

Οι ανθρώπινες επεμβάσεις στα διάφορα μνημεία είναι ποικίλες και αφορούν κυρίως βανδαλισμούς, μετατροπές και καταστροφή τμημάτων του μνημείου για άλλες χρήσεις, κακομεταχείριση από ορισμένους επισκέπτες, καθώς επίσης και φθορές που προκλήθηκαν από σωστικές ή αναστηλωτικές επεμβάσεις του πρόσφατου παρελθόντος. Η αστοχία των επεμβάσεων αυτών συνίσταται, κυρίως, στη χρήση κοινού σιδήρου ως στοιχείου σύνδεσης θραυσμένων αρχιτεκτονικών μελών ή ενίσχυσης της αντοχής άλλων. Η οξείδωση του σιδήρου προκάλεσε την διάρρηξη των μαρμάρων ή τη μετακίνηση άλλων με καταστροφικά αποτελέσματα.

2.1.2 Κριτήρια και αρχές επεμβάσεων

Τα μνημεία αποτελούν σημαντικό μέρος της παγκόσμιας πολιτιστικής κληρονομιάς και γι' αυτό το λόγο πρέπει να διαφυλάσσονται ακέραια. Επομένως, η σωστή συντήρησή ή η αναστήλωση τους θεωρείται επιβεβλημένη και συγκεκριμένα κριτήρια και αρχές επεμβάσεων θα πρέπει να λαμβάνονται πάντα υπόψη πριν από οποιαδήποτε επέμβαση σε ένα μνημείο ή ένα ιστορικό κτήριο. Με βάση αυτά θα πρέπει να γίνεται η επιλογή των κατάλληλων τεχνικών οι οποίες θα καθορίσουν το τελικό αποτέλεσμα της επέμβασης. Οι διεθνείς χάρτες προστασίας μνημείων και αρχαιοτήτων, όπως για παράδειγμα ο Χάρτης της Βενετίας, θέτουν διατάξεις και

κριτήρια που πρέπει να τηρούνται σε κάθε αναστηλωτική επέμβαση. Τα κριτήρια αυτά είναι (Θεοδωρίδης 2006, Δημοσθένους 2009, <http://www.technion.ac.il/~prohitec>):

- Σεβασμός στο πρωτότυπο, ως σύνολο και ως επιμέρους στοιχεία, κατά τρόπο που να μην αλλοιώνεται η αρχική αρχιτεκτονική του φυσιογνωμία.
- Αντιστρεψιμότητα προτεινόμενων επεμβάσεων, ώστε σε περίπτωση μελλοντικής επέμβασης για αντικατάστασή της να ελαχιστοποιούνται οι ανεπιθύμητες βλάβες στο κτίριο (Jacobs, 2007).
- Συμβατότητα προτεινόμενων και υφιστάμενων υλικών, κατά τρόπο που να ελαχιστοποιούνται ανεπιθύμητες βλάβες στο κτίριο.
- Διαχρονικότητα νέων επεμβάσεων, (ώστε να μεγιστοποιείται ο ωφέλιμος χρόνος διάρκειας αυτών των επεμβάσεων και να περιορίζονται συχνές και συνήθως δαπανηρές επεμβάσεις).
- Οικονομικό κόστος επέμβασης και συντήρησης.
- Χρόνος αποπεράτωσης των εργασιών.
- Επαρκής και ευσταθής υποστήλωση κατά την διάρκεια των εργασιών επέμβασης.

Ειδικότερα για τα ελληνικά μνημεία της κλασσικής περιόδου, δόθηκε έμφαση στις αρχές της αντιστρεψιμότητας των επεμβάσεων και το σεβασμό στο αυθεντικό υλικό. Αυτό οδήγησε κατά τον σχεδιασμό των δομικών επεμβάσεων της Ακρόπολης στην υιοθέτηση των εξής πρακτικών (ΥΣΜΑ, 2009):

- Οι επεμβάσεις περιορίζονται σε τμήματα των μνημείων που έχουν διαταραχθεί από αναστηλώσεις του παρελθόντος, ή τμήματα που εμφανίζουν προβλήματα στατικής επάρκειας.
- Τα υλικά που χρησιμοποιούνται κατά την αποκατάσταση είναι αβλαβή και συμβατά προς τα αυθεντικά.
- Κατά τη σύνδεση των θραυσμάτων επιχειρείται οι απαιτούμενοι από την δομοστατική μελέτη οπλισμοί τιτανίου να είναι οι ελάχιστοι δυνατοί και οι οπές για την τοποθέτηση των οπλισμών αυτών να περιορίζονται στο ελάχιστο, ώστε να αποφεύγεται η φθορά του αρχαίου υλικού.

- Για τη σύνδεση των μελών χρησιμοποιούνται, κατά το δυνατόν, οι υπάρχουσες αρχαίες εντορμίες. Ο υπολογισμός των συνδέσμων γίνεται κατά τρόπο, ώστε σε ενδεχόμενη οριακή κατάσταση καταπόνησης να αστοχήσουν τα υλικά σύνδεσης και όχι το αρχαίο υλικό.
- Δε συγκολλούνται ποτέ θραύσματα που δεν προέρχονται από το ίδιο αρχιτεκτονικό μέλος.
- Κατά την αναστήλωση, οι συμπληρώσεις με νέο μάρμαρο είναι περιορισμένες. Αποφασίζονται πάντα με κριτήριο τη δομική και αισθητική αυτοτέλεια του μέλους που αποκαθίσταται και της περιοχής που αναστηλώνεται.

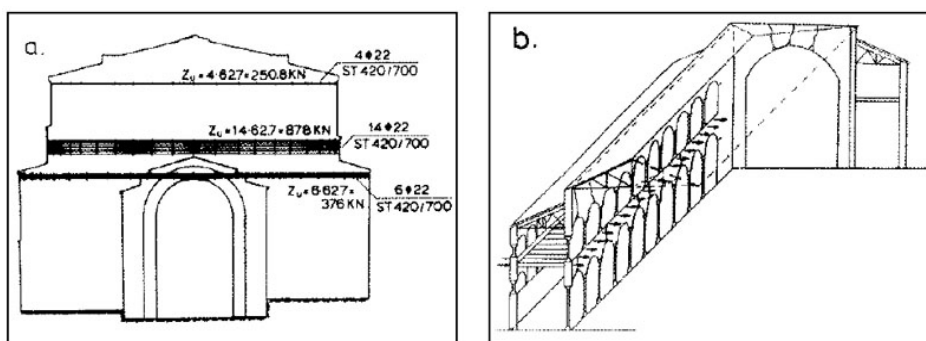
2.1.3 Μέθοδοι επέμβασης

Οι επεμβάσεις σε υφιστάμενα κτήρια και μνημεία είναι ένα θέμα που απασχόλησε την διεθνή κοινότητα για πολλές δεκαετίες, κατά τις οποίες διατυπώθηκαν διάφορες θεωρίες. Αυτές συνέβαλαν στην ωρίμανση κάποιων απόψεων οι οποίες βοήθησαν σε σημαντικό βαθμό στη σύνταξη και την υπογραφή «χαρτών» από τη διεθνή κοινότητα, στους οποίους διατυπώνονται βασικές αρχές περί προστασίας και επεμβάσεων σε μνημεία. Έτσι λοιπόν το 1935 συντάσσεται ο «Χάρτης της Αθήνας» και το 1964, μετά από συντονισμένες ενέργειες διεθνών οργανισμών όπως η UNESCO, η ICOMOS, το Συμβούλιο της Ευρώπης κ.α. συντάσσεται και υπογράφεται από πολλά κράτη, μεταξύ των οποίων και η Ελλάδα, ο «Χάρτης της Βενετίας» (Καραδέδος, 1994). Μέσα από αυτούς τους χάρτες έγινε μία προσπάθεια ταξινόμησης και προσδιορισμού του αντικειμένου κάθε μεθόδου (μορφής) επέμβασης. Σύμφωνα λοιπόν με τη διεθνή βιβλιογραφία, οι μέθοδοι επεμβάσεων διακρίνονται στην επισκευή, την ενίσχυση, ανακατασκευή, αναστήλωση, επανάχρηση, διατήρηση και συντήρηση. Επέμβαση (intervention) είναι γενικότερος όρος και αναφέρεται ή υπονοεί οποιαδήποτε από τις παρακάτω έννοιες ή εργασίες (Δημοσθένους, 2009). Οι μέθοδοι επέμβασης είναι:

- **Επισκευή (repairing)** ορίζεται η επαναφορά δομικού στοιχείου ή κτίσματος με βλάβη στην κατάσταση προ της βλάβης. Είναι φανερό ότι το ίδιο ή ανάλογο αίτιο (π.χ. σεισμός) θα προκαλέσει κατά τεκμήριο την ίδια ή ανάλογη βλάβη. Έτσι σε περίπτωση εκτεταμένων ή σοβαρών βλαβών είναι φρόνιμο η επέμβαση να περιλαμβάνει και ενίσχυση της κατασκευής ενώ σε περιορισμένες ή μικρές βλάβες αρκεί συνήθως η επισκευή (Δημοσθένους, 2009).

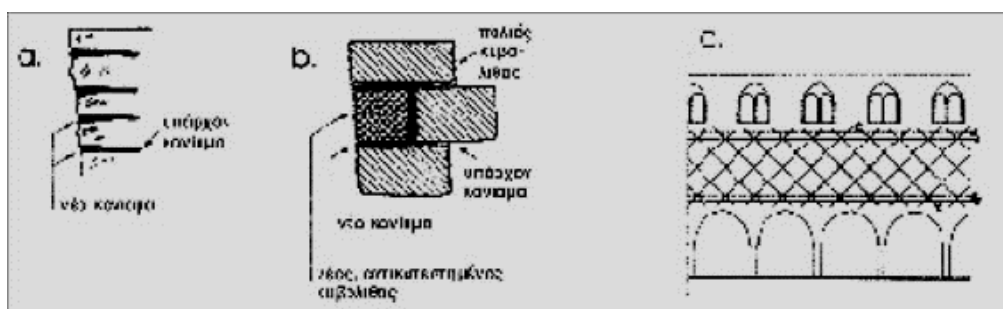
- **Ενίσχυση (strengthening)** ορίζεται το σύνολο των μέτρων αναβάθμισης των μηχανικών χαρακτηριστικών (αντοχή, δυσκαμψία) δομικού στοιχείου ή κτίσματος μέχρι ενός επιθυμητού ή απαιτητού επιπέδου (π.χ. σεισμικές δράσεις σχεδιασμού που επιβάλλουν οι τρέχοντες κανονισμοί). Σημειώνεται ότι η ενίσχυση προχωρά πέραν της επισκευής τυχόν βλαβών, είναι όμως δυνατή και η προληπτική ενίσχυση χωρίς την παρουσία βλαβών. Το επίπεδο και τα μέτρα ενίσχυσης προσδιορίζονται από ειδική μελέτη. Οι πλέον διαδεδομένες τεχνικές επισκευής και ενίσχυσης είναι το βαθύ αρμολόγημα, οι ενέσεις σε ρωγμές, η συρραφή μεγάλων ρωγμών και αποκολλημένων τοίχων (Δημοσθένους και Στυλιανίδης, 2000 - Πηγή: Θεοδωρίδης, 2006).
- **Ανακατασκευή (reconstruction)** ορίζεται η κατασκευή, στη θέση παλιού, ενός νέου δομικού στοιχείου ή κτίσματος (Burra charter, 1999 - Πηγή: Quist, 2009). Το νέο δομικό στοιχείο ή κτίσμα μπορεί να είναι αντίγραφο ή ανάλογο του υφιστάμενου ή ακόμα και τελείως νέο. Η τελική απόφαση βασίζεται σε ιστορικούς, κοινωνικούς, χρηστικούς ή άλλους λόγους.
- **Αναστήλωση (restoration)** ορίζεται η επαναφορά του δομήματος στην αρχική του μορφή. Είναι όρος που χρησιμοποιείται συνήθως για επεμβάσεις σε μνημειακά κτίσματα και έχει ένα χαρακτήρα αυστηρότητας όσον αφορά το σεβασμό της ιστορικής φυσιογνωμίας του κτίσματος (Δημοσθένους, 2009). Ένας διαφορετικός ορισμός της αναστήλωσης τη διαχωρίζει από την αποκατάσταση. Σύμφωνα με αυτόν τον ορισμό αναστήλωση είναι η επανατοποθέτηση στοιχείων ενός κτίσματος, που έχουν καταπέσει ή ανασύνθεση ενός μνημείου από τα αυθεντικά του κομμάτια, ενώ αποκατάσταση είναι η επαναφορά στην αρχική κατάσταση ενός δομικού στοιχείου (Πίττας, 1994 - Πηγή: Σκουλικίδης, 2000).

Οι τεχνικές της αποκατάστασης ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες, στις αντιστρέψιμες τεχνικές δομικής αποκατάστασης και στις μη αντιστρέψιμες. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι εξωτερικές αντιστηρίξεις, ελκυστήρες στη βάση των τόξων, δακτύλιοι στη βάση των τρούλων (*Εικόνα 2.1a*), προεντεταμένες μη ενσωματωμένες ραφές, αναστύλωση πέτρινων ή μαρμάρινων μνημείων με ξηρούς αρμούς, εξωτερικοί ελκυστήρες, εσωτερικοί μεταλλικοί κλωβοί για διευκόλυνση της περίσφιξης και βελτίωση της αντοχής και της ακαμψίας σε υπάρχοντα διαφράγματα (*Εικόνα 2.1b*).



Εικόνα 2.1: Αντιστρέψιμες επεμβάσεις. α. Προεντεταμένοι δακτύλιοι στη βάση του τρούλου της Ροτόντα Θεσσαλονίκης. β. Βελτίωση της διαφραγματικής δράσης των γυναικωνιτών της Αχειροποιήτου Θεσσαλονίκης (Πενέλης, 2009)

Τα υλικά γι' αυτές τις τεχνικές επιβάλλουν συνήθως πολύ λίγους περιορισμούς στις κατασκευές. Έτσι, στις αντιστρέψιμες τεχνικές όλα τα σύγχρονα υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν χωρίς σοβαρούς περιορισμούς. Στην κατηγορία των τεχνικών μη αντιστρεπτών δομικών αποκαταστάσεων ανήκουν τα ενέματα, ανακτήσεις κλειδιών στις ρωγμές (Εικόνα 2.2 α), βαθιά αρμολογήματα (Εικόνα 2.2β), ανάκτηση τμήματος των όψεων των τοίχων όπου αυτοί κατέρρευσαν συνολικά, ραφή των τοίχων με προεντεταμένες ράβδους, ενίσχυση της τοιχοποιίας με ενσωματωμένες ατσάλινες ράβδους (Reticolo cementato) (Εικόνα 2.2c), αλληλοσυνδέσεις μαρμάρινων ή λίθινων τμημάτων με ενσωματωμένα βλήτρα, μανδύες οπλισμένου σκυροδέματος σε τοίχους ή στην άνω πλευρά των θόλων, ενίσχυση των θεμελιώσεων, κ.τ.λ. (Πενέλης, 2009).



Εικόνα 2.2: Μη αντιστρέψιμες επεμβάσεις. α. Βαθιά αρμολογήματα. β. Ανακτήσεις κλειδιών στις ρωγμές. γ. Ενίσχυση επιστυλίων (Reticolo cementato) (Πενέλης, 2009)

- **Επανάχρηση (rehabilitation)** ορίζεται η περιορισμένη συνήθως διαρρύθμιση και μετατροπή ενός κτιρίου ώστε να εξυπηρετήσει νέες, σύγχρονες χρήσεις και

λειτουργίες. Αναφέρεται συνήθως σε αρχιτεκτονικού χαρακτήρα παρεμβάσεις (Δημοσθένους, 2009).

- **Διατήρηση (*preservation*)** ορίζεται η διαφύλαξη της υπάρχουσας κατάστασης με μέτρα αποτροπής περαιτέρω φθορών (Burra charter, 1999 - Πηγή: Quist, 2009).
- **Συντήρηση (*conservation*)** σημαίνει όλες τις διαδικασίες που απαιτούνται, συνήθως περιορισμένου ή και πρόσκαιρου, αλλά όχι πρόχειρου, χαρακτήρα μέτρα, ώστε η τελική εμφάνιση ενός μέρους να είναι τέτοια ώστε στην περίπτωση που αναφέρεται σε μνημείο στο τέλος της επέμβασης αυτό να διατηρεί τη πολιτιστική - ιστορική του σημασία (ICOSMOS, 1981 - Πηγή: Macdonald, 1995; Burra charter, 1999 - Πηγή: Quist, 2009). Η συντήρηση περιλαμβάνει σωστικές επεμβάσεις στο μνημείο και οι οποίες αποτελούν τη δομική συντήρηση και τη συντήρηση της επιφάνειας. Η δομική συντήρηση σκοπό έχει την αποκατάσταση της στατικής επάρκειας του μνημείου που κινδυνεύει με κατάρρευση λόγω φθοράς από αίτια όπως η διάβρωση και οι σεισμοί. Οι σωστικές επεμβάσεις στην επιφάνεια που αποτελούν τη συντήρηση της επιφάνειας περιλαμβάνουν τον καθαρισμό, τη στερέωση, την προστασία και την τεχνητή πατίνα (Herold, 1989-1991, Europ.Cult.Her., 1991 - Πηγή: Σκουλικίδης, 2000). Παράδειγμα σωστικών επεμβάσεων αποτελούν οι αναστηλωτικές εργασίες που πραγματοποιούνται στην Ακρόπολη από το 2000 έως σήμερα (Ιωαννίδου, 2005).

Είναι πολύ χαρακτηριστικό το γεγονός ότι το τελικό σχήμα επέμβασης, είτε πρόκειται για παραδοσιακό κτίριο είτε πρόκειται για μνημείο ή διατηρητέο κτίριο, συνήθως περιλαμβάνει συνδυασμό διαφόρων μεθόδων επέμβασης, όπως π.χ.:

- Επανάχρηση, επισκευή και ενίσχυση
- Αναστήλωση και ενίσχυση
- Διατήρηση, συντήρηση και επισκευή κ.λ.π.

Στις περισσότερες περιπτώσεις το σχήμα της επέμβασης περιλαμβάνει εργασίες επισκευής ή και ενίσχυσης. Με βάση τους ορισμούς που έχουν δοθεί πιο πάνω προκύπτει ότι πρόκειται για επεμβάσεις (επισκευή ή ενίσχυση) οι οποίες έχουν ως στόχο την άρση της παθολογίας της κατασκευής, από δομοστατικής άποψης, και την

επαύξηση της ικανότητάς της για την παραλαβή στατικών και σεισμικών φορτίσεων (Δημοσθένους, 2009).

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η απόφαση για οποιοδήποτε είδος επέμβασης πρέπει να λαμβάνεται ύστερα από πολύ προσεκτική διάγνωση της παρούσας κατάστασης του μνημείου. Το μέγεθος και η φύση των επεμβάσεων πρέπει να βρίσκονται σε ισορροπία έτσι ώστε να επιτευχθεί η απαιτούμενη ασφάλεια της δομής.

Ιδιαίτερα, όσον αφορά το σχεδιασμό μιας αναστήλωσης πρέπει να λαμβάνεται υπόψη σαν κριτήριο πέρα από την επίδραση που αυτή θα έχει στη δομή και το κόστος της, η συμβατότητα των τεχνικών σε σχέση με τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των μνημείων, καθώς επίσης και η ιστορική αξία των υπό αναστήλωση μνημείων (Crocì, 2000).

2.2 Αναστήλωση μνημείων

2.2.1 Γενικά

Από τις προαναφερόμενες επεμβάσεις σε δομικά κτήρια, η πλέον συνήθης που χρησιμοποιείται στα μνημεία είναι η αναστήλωση ή αλλιώς αποκατάσταση. Σύμφωνα με το Χάρτη της Βενετίας (άρθρο 9-13) (Μαλλούχου-Tufano, 2010) για την Αποκατάσταση και τη Συντήρηση των Μνημείων και Μνημειακών Συνόλων, που καταρτίστηκε κατά τη διάρκεια του δευτέρου Διεθνούς Συνεδρίου Αρχιτεκτόνων και Τεχνικών των Ιστορικών Μνημείων, που πραγματοποιήθηκε στη Βενετία στις 25-31 Μαΐου 1964 και που διοργανώθηκε από το Διεθνές Συμβούλιο Μνημείων και Τοποθεσιών (ICOMOS), η διαδικασία της αποκατάστασης είναι μια επέμβαση υψηλής εξειδίκευσης που επιβάλλεται να γίνεται κατ' εξαίρεση. Έχει σαν στόχο να διατηρήσει και να αποκαλύψει τις ιστορικές και αισθητικές αξίες του μνημείου και βασίζεται στον σεβασμό προς την αρχική του υπόσταση και τα αυθεντικά του στοιχεία. Σταματάει στο σημείο που αρχίζουν να υπάρχουν υποθέσεις. Πέρα από αυτό το σημείο, οποιαδήποτε εργασία που ενδεχομένως θα θεωρηθεί απαραίτητη για τεχνικούς ή αισθητικούς λόγους, θα πρέπει να διαχωρίζεται από την (αρχική) αρχιτεκτονική σύνθεση και να φέρνει την σφραγίδα της εποχής μας. Σε όλες τις περιπτώσεις η αρχαιολογική μελέτη θα προηγείται της αποκατάστασης και θα την ακολουθεί.

Οι αξιόλογες προσθήκες όλων των εποχών στη σημερινή υπόσταση ενός μνημείου πρέπει να γίνουν σεβαστές, γιατί σκοπός της αποκαταστάσεως του δεν είναι η ενότητα του αρχικού του ρυθμού. Όταν ένα κτίριο φέρνει υπερκείμενες φάσεις διαφόρων εποχών, η επαναφορά στην αρχική του κατάσταση δεν δικαιολογείται παρά μόνο κατ' εξαίρεση. Αν δηλαδή, τα στοιχεία που θα αφαιρεθούν έχουν πολύ μικρή σημασία και η σύνθεση που θα αποκαλυφθεί είναι μεγάλης ιστορικής, αρχαιολογικής ή αισθητικής αξίας κι ακόμη αν η κατάσταση της διατήρησης του μνημείου κριθεί αρκετά ικανοποιητική. Η κρίση σχετικά με την αξιολόγηση των μεταγενέστερων στοιχείων και η απόφαση για την απάλειψή τους, δεν θα πρέπει να εξαρτώνται μόνο από το άτομο που ανέλαβε την μελέτη του έργου.

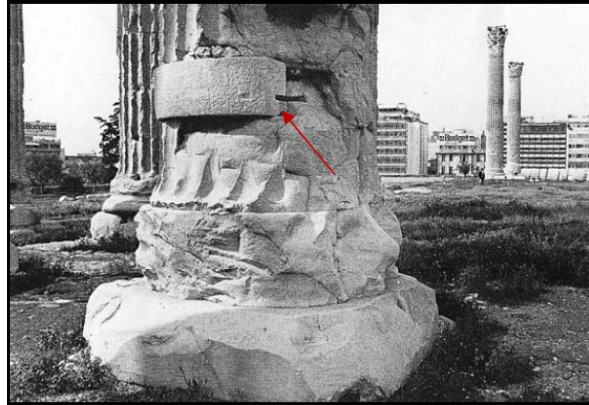
Τα στοιχεία που προορίζονται να αντικαταστήσουν τμήματα του μνημείου που έχουν καταστραφεί, πρέπει να ενσωματώνονται αρμονικά στο σύνολο, αλλά και να διακρίνονται από τα αυθεντικά μέρη, έτσι ώστε να μην πλαστογραφούνται τα καλλιτεχνικά και ιστορικά τεκμήρια του κτιρίου. Οι προσθήκες δεν μπορεί να γίνουν ανεκτές παρά μόνο αν σέβονται όλα τα ενδιαφέροντα μέρη του κτιρίου, το παραδοσιακό του πλαίσιο, την ισορροπία της συνθέσεως του και τις σχέσεις του με τον περιβάλλοντα χώρο.

2.2.2 Συντήρηση και αναστήλωση των ελληνικών μνημείων

Η σημερινή μορφή των περισσότερων ελληνικών μνημείων οφείλεται στις μεθόδους συντήρησης και αναστήλωσης που πραγματοποιήθηκαν κατά το τέλος του 19^{ου} και τις αρχές του 20^{ου} αιώνα. Το κύριο μέλημα αυτών των αναστηλώσεων καθώς και των εργασιών συντήρησης στα αρχαία μνημεία είναι η διόρθωση παλιότερων επεμβάσεων και η άρση των φθορών που δημιουργήσαν. Οι κύριες περίοδοι αναστηλώσεων αυτών των αιώνων κατά την Παπασταματίου, 2009 είναι: από το 1834 έως 1836, από το 1836 έως το 1863 (Οθωνική περίοδος), από το 1864 έως το 1884, από το 1885 έως το 1909 (1^ο αναστηλωτικό πρόγραμμα του Μπαλάνου), από το 1910 έως το 1939 (2^ο αναστηλωτικό πρόγραμμα του Μπαλάνου) και από το 1922 έως το 1939 (1^ο αναστηλωτικό πρόγραμμα του Ορλάνδου). Στη συνέχεια παρατίθενται οι επεμβάσεις που πραγματοποιούνται κατά τη διάρκεια αυτών των περιόδων.

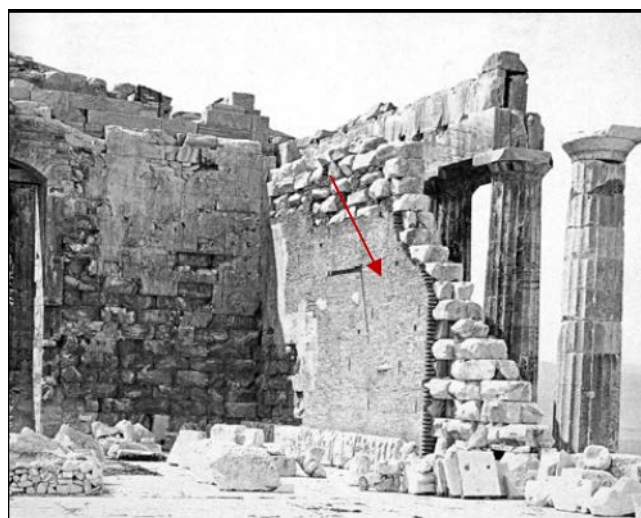
Κατά την περίοδο 1834-1836, στα Μνημεία της Ακρόπολης (Παρθενώνας, Αθηνά Νίκη), Ναός Ολυμπίου Διός (Εικόνα 2.3), ναός Ηφαίστου (Θησείο) πραγματοποιείται

η συμπλήρωση μαρμάρινων μελών με χρήση πωρόλιθου ή με νέο μάρμαρο διαφορετικού χρωματισμού. Οι συνδέσεις επιτυγχάνονται με σιδηρούς χονδροειδείς εξωτερικούς συνδέσμους.



Εικόνα 2.3: Επισκευή κίονα Ολυμπίου Διός (1835) (Παπασταματίου, 2009)

Την δεύτερη περίοδο (Οθωνική περίοδος) 1836-1863, στον Παρθενώνα, στο Ερέχθειο, στα Προπύλαια, στην Αθηνά Νίκη, στο μνημείο Θρασύλλου, στο Θησείο και στην περίβολο του Ολυμπίου Διός χρησιμοποιούνται σιδερένιες στεφάνες, σιδερένιοι ράβδοι σχήματος Π και ελκυστήρες για συνδέσεις και στηρίξεις δομικού υλικού. Πραγματοποιούνται συμπληρώσεις, στερεώσεις και επενδύσεις τοίχων με αργολιθοδομές, και οπτοπλινθοδομές (Εικόνα 2.4), καθώς και αντιστηρίξεις με διάφορα υλικά. Γίνονται συμπληρώσεις με νέο μάρμαρο ή από μάρμαρο προερχόμενο από διάσπαρτα μέλη και προκειμένου να προσαρμοστούν κατάλληλα απολαξεύονται τα αρχαία μέλη (Εικόνα 2.5)



Εικόνα 2.4: Στερέωση του βόρειου τοίχου του Παρθενώνα με οπτοπλινθοδομή (Παπασταματίου, 2009)



Εικόνα 2.5: Λιθόπλινθος διαμορφωμένος με συμπλήρωμα το 1838 (Παπασταματίου, 2009)

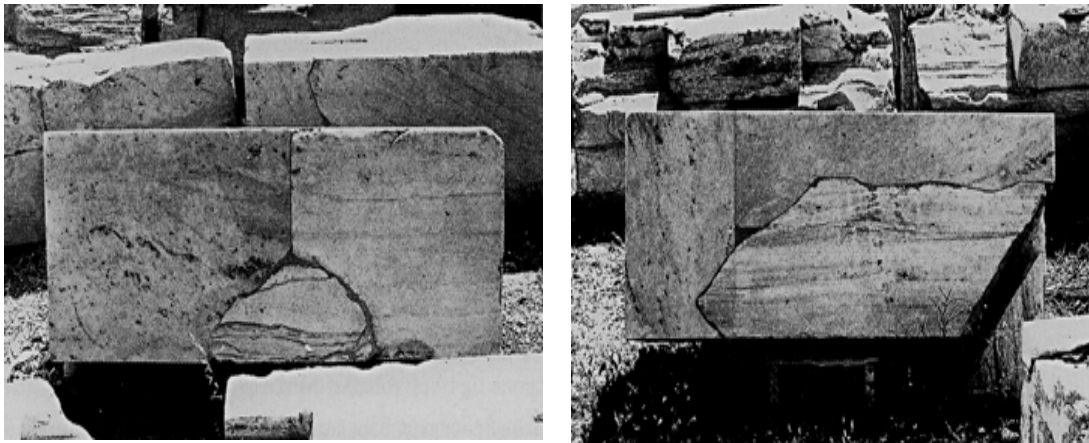
Κατά την περίοδο τρίτη περίοδο 1864-1884 στο Τείχος της Ακρόπολης, στην Αθηνά Νίκη, στο μνημείο στα Αγρίππα, στα Προπύλαια, στη Βιβλιοθήκη Αδριανού, στο μνημείο Λυσικράτους, στην Αρχαία Αγορά (πλατεία Γιγάντων, Αγορανομείο), στο Λέοντας Κέας, στο άγαλμα νησίδας Ράφτη, στο ναό της Αθηνάς Αφαίας στην Αίγινα, στο Επικούρειο Απόλλωνα στις Βάσσεις Φιγαλείας (*Εικόνα 3.6*), στο ναό του Ποσειδώνα στο Σούνιο, στο ναό του Ολυμπίου Διός χρησιμοποιούνται σιδηρές στεφάνες, σιδηροδοκοί και ελκυστήρες, για συνδέσεις και αντιστηρίξεις. Επίσης, για αντιστήριξη χρησιμοποιούνται τοιχοποιίες από πλίνθους και παρόλινθους και το δομικό υλικό των μνημείων συμπληρώνεται με νέο μάρμαρο. Για τις σφραγίσεις ρωγμών γνωστό είναι το λεγόμενο «γαλλικόν χώμα», δηλαδή φυσική υδραυλική άσβεστο που χρησιμοποιεί ο Martinelli. Πιθανή είναι η αδιαβροχοποίηση της επιφάνειας των μαρμάρων με τον εμποτισμό τους με διάλυμα πυριτικού καλίου ή «εν θερμώ» με στεατικό οξύ. Γίνονται στερεώσεις κυρίως θεμελίων με τσιμεντοσκυρόδεμα.



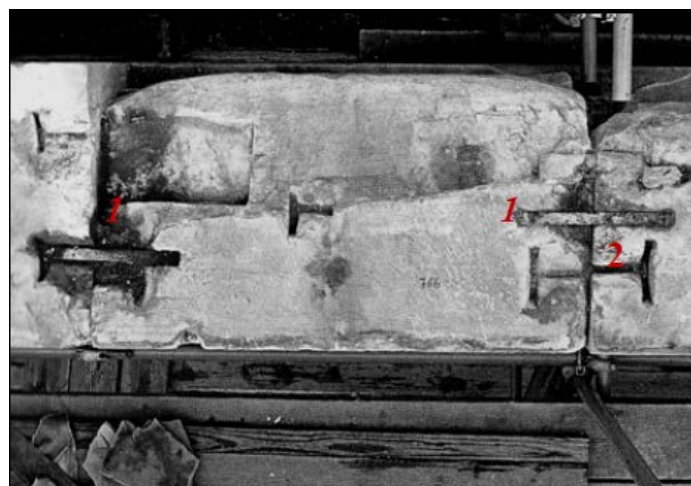
Εικόνα 2.6: Ναός Επικούρειου Απόλλωνα με τις σιδερένιες στεφάνες του 1880 (Παπασταματίου, 2009)

Η επόμενη αναστηλωτική περίοδος είναι το 1885-1909, όπου πραγματοποιείται το πρώτο αναστηλωτικό πρόγραμμα του Μπαλάνου. Τα μνημεία στα οποία εφαρμόζεται αυτό το πρόγραμμα είναι ο Παρθενώνας, το μνημείο του Φιλοπάππου, ο τύμβος του Μαραθώνα, το Ωδείο Ηρώδου Αττικού, ο ναός του Ποσειδώνα στο Σούνιο, το μνημείο των Δελφών, της Αθηνάς Νίκης, το τείχος της Ακρόπολης, ο πύργος Belvedere, η στοά του Αττάλου, το Ερέχθειο, ο Επικούρειος Απόλλωνας, ο ναός του Ολυμπίου Διός, τα μνημεία της Επιδαύρου, τα μνημεία της αρχαίας Κορίνθου. Αναφορικά με τις τεχνικές και τα υλικά που χρησιμοποιούνται αυτή την περίοδο χαρακτηριστικό στοιχείο αποτελεί η επιλογή του σιδήρου και του τσιμέντου ως κύρια υλικά της επέμβασης. Άλλες αρχές συνιστούν, η ομοιότητα χρώματος και υφής ανάμεσα στα αρχαία τμήματα και τις νέες προσθήκες. Για την επίτευξη του στόχου αυτού γίνεται χρήση αρχαίου υλικού κατάλληλα απολαξευμένου με συνέπεια τις παραποθετησείς μελών και τη συναρμογή πολλών θραυσμάτων ποικίλης προέλευσης, σπάνια συνανηκόντων (Εικόνα 2.7). Τα νέα συμπληρώματα (από πεντελικό μάρμαρο ή ελευσίνιο λίθο) οξειδώνονται τεχνητά με διάλυμα θειικού σιδήρου ή χονδρολαξεύονται με αδρή κατεργασία ώστε να προσομοιάζουν με τα αρχαία φθαρμένα μέλη. Επισημαίνεται η εμφάνιση για πρώτη φορά απολαξεύσεων αρχαίου υλικού προκειμένου να δημιουργηθούν εγκοπές για την προσαρμογή νέων κομματιών. Μεταλλικά στοιχεία διαφόρων σχημάτων και ποιοτήτων (σιδερένια συνδετήρια σχήματος διπλού T ή Π, γαλβανισμένα στοιχεία σχήματος διπλού T ή Π, συνδετήρια με σκέλη μορφής χελιδονοουράς, μεταλλικές ράβδοι, μικρής διατομής,

μεταλλικοί δοκοί, μεγάλα σιδερένια φέροντα στοιχεία και οπλισμοί) ενσωματώνονται στα αρχαία μέλη εμβαπτιζόμενα άλλοτε σε τσιμέντο κι άλλοτε σε μόλυβδο (Εικόνα 2.8, 2.9). Γίνεται χρήση διάφορων κονιαμάτων (λεπτόκοκκων, χονδρόκοκκων) με υδραυλική κονία ή τσιμεντοκονιάματα για την σφράγιση μεγάλων κενών, για εξομάλυνση των επιφανειών έδρασης, για συμπληρώσεις, ακόμη και για επίχριση της επιφάνειας των μελών προς αισθητική αποκατάσταση. Την περίοδο αυτή εισάγεται και η χρήση της λιθόκολλας meyer10 και των ορειχάλκινων βλήτρων.



Εικόνα 2.7: Τρόποι συναρμογής λιθοπλίνθων από ποικίλα θραύσματα και νέες προσθήκες (Παπασταματίου, 2009)



*Εικόνα 2.8: 1. Επιμήκεις σύνδεσμοι της επέμβασης Πιττάκη (Παπασταματίου, 2009),
2. Σύνδεσμοι διπλού T της επέμβασης Μπαλάνου (Παπασταματίου, 2009)*



Εικόνα 2.9: Συνδετήρια στοιχεία διαφόρων σχημάτων και διατομών της επέμβασης Μπαλάνου (Παπασταματίου, 2009)

Το 1910-1939 είναι η περίοδος κατά την οποία εφαρμόζεται το δεύτερο αναστηλωτικό πρόγραμμα του Μπαλάνου. Τα μνημεία στα οποία πραγματοποιούνται οι αναστηλώσεις του προγράμματος είναι τα εξής: τα Προπύλαια, η Πύλη του Αδριανού, ο ναός της Αφαίας στην Αίγινα, η Ζωφόρος στον Παρθενώνα, οι τοιχογραφίες στον Παρθενώνα, το μνημείο του Αγρίππα, το Ωρολόγιο του Κηρρύστου, ο Επικούρειος Απόλλωνας, η Κρήνη Γλαύκης της Αρχαίας Κορίνθου, το πρόπυλο της Ρωμαϊκής Αγοράς, το Φαληρικό τείχος, το ιερό του Απόλλωνος του Πτώου, το Θέατρο του Διονύσου, τα Κορώνεια τείχη, το τείχος της Ακρόπολης, η Πύλη των Λεόντων στις Μυκήνες, ο ναός του Διός Νεμέα, τα μνημεία της Επιδαύρου, το Ωδείο Ηρώδου Αττικού, η Αθηνά Νίκη, ο Παρθενώνας, ο ναός του Απόλλωνα Δελφών. Οι τεχνικές και τα υλικά που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν εκτεταμένες συρραφές αρχαίων διάσπαρτων μελών σπάνια συνανηκόντων τα οποία υφίστανται απολαξεύσεις, αποκοπές, διατρήσεις και ακρωτηριασμούς προκειμένου να συνενωθούν και να προσαρμοστούν με τις νέες προσθήκες (τμήματα νέου μαρμάρου). Τα μάρμαρα συνδέονται εσωτερικά και εξωτερικά κατά κανόνα με σιδηρά στοιχεία, καμιά φορά και με ορειχάλκινα, διαφόρων μεγεθών και τύπων που σπάνια μολυβδοχοούνται και συνήθως εγκιβωτίζονται με τσιμεντοκονίαμα. Με τσιμεντοκονίαμα ή και με κοινό σκυρόδεμα γεμίζονται κενά και αρμοί (Εικόνα 2.10). Σιδηροδοκοί διατομής διπλού T, και μεγάλων διατομών σιδερένιοι οπλισμοί (σχημάτων διπλού T, Π, Γ) προσαρμόζονται στα μάρμαρα εσωτερικά ή εξωτερικά και καλύπτονται με τσιμεντοκονίαμα. Χρησιμοποιούνται ακόμα και τσιμεντένια εκμαγεία. Τα μάρμαρα συγκολλούνται με τσιμεντοκονίαμα και κονίαμα meyer.



Εικόνα 2.10: Πύλη Αδριανού. Ισχυρά τσιμεντοκονιάματα επικαλύπτουν σιδηρά συνδετήρια και σφραγίζουν αρμούς και κενά (Παπασταματίου, 2009).

Η περίοδος 1922-1939 αποτελεί το πρώτο αναστηλωτικό πρόγραμμα του Ορλάνδου οι επεμβάσεις του οποίου πραγματοποιούνται στο Θησείο, στα μνημεία αρχαίας Σικυώνας, στα μνημεία της Ελευσίνας, στο μνημείο Ιερολογιτών Λεύκτρων, στον Απόλλωνα της Κολώνας Αίγινας, στα μνημεία Ρωμαϊκής Αγοράς, στο ναό του Διός Νεμέας, στα μνημεία Ελευθερών Βοιωτίας, στη ρωμαϊκή έπαυλη και στην αρχαία αγορά της Αρχαίας Κορίνθου, στην Πύλη Αδριανού, στο Θέατρο Διονύσου Ολυμπίου, στο ναό του Ποσειδώνα στο Σούνιο, στα μνημεία της Ολυμπίας, στους Δελφούς, στο τείχος Στυμφάλου, στο ναό της Αθηνάς και του Ασκληπιού Αλίζφειρας Αρκαδίας, στον Απόλλων Ζωστήρας Βουλιαγμένης, στο μνημείο Φιλοπάππου, στα μνημεία Μεγάρων, Ναυπλίου, Μυκηνών, Αίγινας, Μυστρά, Δαφνίου, Μετεώρων και Αγίου Όρους, στα στάδια και ωδεία Ηρώδου Αττικού, Διονύσου, Παναθηναϊκό Στάδιο, στο Τελεστήριο Ελευσίνας, στο Ασκληπιείο και στο θέατρο Επιδαύρου, στο Ωδείο Πατρών, Άργους, Τίρυνθας και Κρήτης.

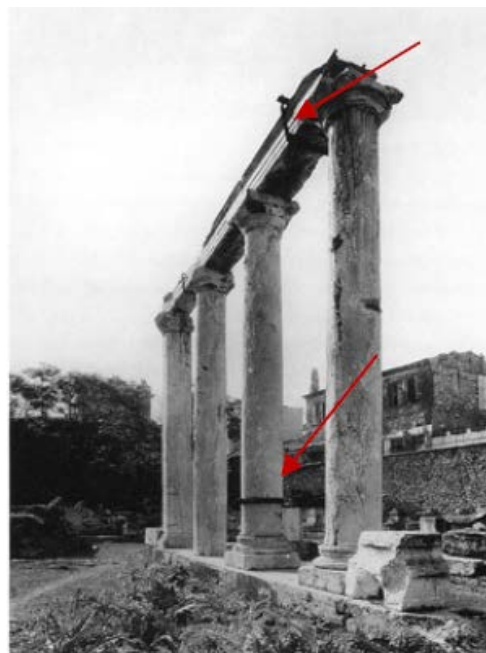
Στη δεύτερη μεταπολεμική φάση επισκευάζονται επί Ορλάνδου πλήθος βυζαντινά μνημεία (π.χ Παρηγορήτισσα Άρτας (*Εικόνα 2.11*)) καθώς και τα μνημεία της Ακρόπολης, ενώ έχουν ήδη αρχίσει και οι αναστηλωτικές εργασίες στο ωδείο του Ηρώδου του Αττικού. Αναφορικά με τις τεχνικές και τα υλικά ο Ορλάνδος ακολουθεί σε μεγάλο βαθμό έως το τέλος του έργου του τις τακτικές του Μπαλάνου και συγκεκριμένα την αποκατάσταση σε μεγάλο βαθμό με υποθετική ανακατασκευή των μνημείων, την αντικατάσταση ή συμπλήρωση ελλειπόντων μελών ή την συμπλήρωση των υφιστάμενων με τον ίδιο δομικό λίθο με τον αρχαίο ο οποίος αποδίδεται σχηματοποιημένα (χονδρολαξεύσεις) (*Εικόνα 2.12*). Συνεχίζονται οι επιπεδώσεις των επιφανειών θραύσης των μελών κατά την συμπλήρωση τους προκειμένου να προσαρμοστούν με τα νέα. Ο Ορλάνδος δεν χρησιμοποιεί τσιμέντο στις συμπληρώσεις χρησιμοποιεί ωστόσο σιδηρά στοιχεία (κυρίως σιδερένιες στεφάνες) (*Εικόνα 2.13*) τα οποία καταργεί μόνο όταν αρχίζουν να φαίνονται τα αποτελέσματα της προηγούμενης χρήσης τους και τα αντικαθιστά με ορειχάλκινα ή ανοξείδωτο χάλυβα για τους ισχυρότερους οπλισμούς. Εκτεταμένη είναι την περίοδο αυτή η χρήση της λιθόκολλας meyer, ακόμη και για επαλείψεις επιφάνειας μαρμάρων που παρουσίαζαν αποσάθρωση.



Εικόνα 2.11: Παρηγορήτισσα Άρτας, επέμβαση Ορλάνδου 1960, σιδηρές στεφάνες συγκράτησης, σιδηρά συνδετήρια και ελκυστήρες διαρρηγνύουν τα μαρμάρινα μέλη (Παπασταματίου, 2009) .



Εικόνα 2.12: Θησείο, προσθήκες μελών με νέο μάρμαρο που αποδίδει σχηματικά το μέλος (Παπασταματίου, 2009)



Εικόνα 2.13: Βιβλιοθήκη Αδριανού, συγκράτηση με μεταλλικές στεφάνες (Παπασταματίου, 2009)

Παράλληλα με τα αναστηλωτικά προγράμματα του Μπαλάνου και του Ορλάνδου, πραγματοποιούνται από το 1901-1930 οι ανασκαφές και ταυτόχρονα οι πρώτες αναστηλωτικές εργασίες της Κνωσσού από τον Aurthur Evans. Στις πρώτες αναστηλωτικές εργασίες στην Κνωσό το 1901-1921 ο Evans χρησιμοποιεί το ξύλο και την πέτρα και έπειτα τη σιδηροδοκό διπλού ταυ, τις οποίες γεφυρώνει με πλίθινους θολίσκους, όταν πρόκειται να στεγάσει ένα χώρο. Το 1922 πολλές περιοχές του ανακτόρου (αλλά και μινωικά κτίσματα της ευρύτερης περιοχής) στερεώνονται και συμπληρώνονται με τη νεοφερμένη τεχνολογία του béton armé. Το 1930 κλείνει η περίοδος αυτή με την ανακατασκευή της Αίθουσας του Θρόνου και την προσθήκη ενός ορόφου. Αυτή είναι η πρώτη φορά που χρησιμοποιήθηκε το οπλισμένο σκυρόδεμα σε αναστηλώσεις στην Ελλάδα. Στην Φαιστό ωστόσο οι επεμβάσεις στα προϊστορικά μνημεία είναι λίγες και συντηρητικές (Παλύβου, 2010).

Στη συνέχεια, από το 1953 έως το τέλος της δεκαετίας του '50 η Αμερικάνικη Σχολή Κλασικών συνεχίζει τις επεμβάσεις συντήρησης στο ναό του Ηφαίστου, ενώ το 1973 και το 1975 η Εφορεία Αρχαιοτήτων Ακροπόλεως πραγματοποιεί επεμβάσεις σε διάφορους κίονες του ναού. Επίσης, πραγματοποιούνται συντηρήσεις σε επιφάνειες

του μαρμάρου και του πωρόλιθου, οι οποίες συνίστανται στη συμπλήρωση τμημάτων που λείπουν και σε φραγή των ρωγμών. Για τις εργασίες αυτές χρησιμοποιούνται τσιμεντοκονιάματα και κονιάματα ποικίλης σύστασης, τα οποία σε αρκετά σημεία παρουσιάζουν φθορές (Λαμπρόπουλος και Βομβογιάννη, 1999).

Το 1953 πραγματοποιείται η αναστήλωση του Ιερού της Σαμοθράκης από τον Karl Lehman της αμερικανικής αρχαιολογικής αποστολής στη Σαμοθράκη που χρηματοδοτείται από το ίδρυμα Bollingen. Πρέπει να σημειωθεί ότι από τη μεριά της Ελλάδας υπεύθυνος είναι ο Ορλάνδος και οι δύο πλευρές συνεργάζονται για την πραγματοποίηση της αναστήλωσης του Ιερού. Εκτός από τον εγχώριο ασβεστόλιθο και το μάρμαρο της Δράμας στην ανακατασκευή του ελλείποντος τμήματος του στερεοβάτη και της κρηπίδας χρησιμοποιείται στο εσωτερικό τσιμέντο για την επαύξηση της στατικής ικανότητας του μνημείου και την εξασφάλισή του έναντι σεισμών. Παρομοίως, μεγάλη χρήση τσιμέντου με πρόσμειξη μαρμάρου γίνεται στην ανωδομή του μνημείου: στις οριζόντιες επιφάνειες έδρασης των σπονδύλων των κιόνων και στην πλήρωση ακανόνιστων κενών στην επιφάνειά τους, για την επαύξηση της ευστάθειάς τους, στη συγκόλληση των συμπληρωμάτων στους σπονδύλους, στα κιονόκρανα και στο επιστύλιο, στη μόνωση των νέων συνδέσμων της επέμβασης (σε συνδυασμό με μολυβδοχήσεις στις περιπτώσεις που οι σύνδεσμοι είναι εμφανείς). Όσον αφορά τους συνδέσμους και τους γομφούς της αναστήλωσης, αυτοί κατασκευάζονται από ορείχαλκο, στις ίδιες διαστάσεις και μορφή με τους αρχαίους και τοποθετούνται κατά κανόνα στις αρχαίες εντροπίες. Για τη σύνδεση του θραυσμένου σε δύο τμήματα εξωτερικού λίθου του επιστυλίου ή την εξουδετέρωση κομμού του μαρμάρου του αντιθήματος χρησιμοποιούνται αντίστοιχα μεταλλικές ράβδοι και σιδερένιες καρφίδες, που ενσωματώνονται αεροστεγώς στα αρχαία μέλη, επικαλυπτόμενες με τσιμέντο με πρόσμειξη μαρμάρου (Μαλλούχου - Tufano, 2010). Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι η συμπλήρωση του μνημείου με χρήση συμβατών φυσικών λίθων πραγματοποιήθηκε με βάση αισθητικά κριτήρια (χρώμα και υφή).

Το 1961-1962 πραγματοποιείται η αναστήλωση της στοάς της Αρτέμιδος στη Βραυρώνα από τον αρχιτέκτονα της Υπηρεσίας Αναστηλώσεως Χαρ. Μπούρα, με την επιστασία του γλύπτη του Εθνικού Αρχαιολογικού Μουσείου Στ. Τριάντη. Κατά την αναστήλωση πραγματοποιούνται οι ακόλουθες εργασίες:

Η επιφάνεια έδρασης του μνημείου τριπλασιάζεται με την κατασκευή βάσης από άοπλο σκυρόδεμα. Αναστηλώνονται 37 σφόνδυλοι (οι 31 αρχαίοι). Τα έξι μαρμάρινα κιονόκρανα που διατηρούνταν τοποθετούνται στις αρχικές τους θέσεις, από τα είκοσι θραύσματα που διασώθηκαν συναρμολογούνται ένα νέο και συμπληρώνονται δύο νέα. Η σύνδεση των θραυσμάτων γίνεται με ανοξείδωτους ορειχάλκινους συνδέσμους. Προστίθεται επίσης ένα νέο κιονόκρανο. Εκτός του μοναδικού διασωθέντος επιστυλίου κατασκευάζονται και χρησιμοποιούνται έξι νέα επιστύλια, ενισχυμένα με ράβδους ανοξείδωτου χάλυβα. Τέλος, τοποθετούνται στις αρχικές τους θέσεις τα αναθηματικά βάθρα. Πραγματοποιούνται συμπληρώσεις στο μνημείο οι οποίες γίνονται με χρήση του ίδιου εντόπιου ψαμμίτη και λευκού πεντελικού μαρμάρου, ενώ μεταξύ των αρχαίων και των νέων τεμαχίων και όπου υπάρχει κενό τοποθετείται τσιμεντοκονίαμα μικρής περιεκτικότητας σε τσιμέντο (<http://img.pathfinder.gr>).

Από το 1970 αρχίζει μία νέα επέμβαση στα κλασικά κτήρια της Ακρόπολης. Το 1975 αρχίζουν στην Ακρόπολη τα αναστηλωτικά έργα υπό την εποπτεία της Επιτροπής Συντηρήσεων Μνημείων Ακροπόλεως (ΕΣΜΑ). Η αστοχία παλαιότερων αναστηλώσεων προκαλεί εκτεταμένες καταστροφές, ρηγματώσεις και θραύσεις μαρμάρων. Επίσης, κατά τη διάρκεια των σωστικών έργων προκύπτουν νέα προβλήματα ευστάθειας οφειλόμενα σε πυρκαγιές, εκρήξεις και σεισμούς. Έτσι ο αρχικός καθαρά αναστηλωτικός χαρακτήρας του αρχικού προγράμματος μετεξελίσσεται και συμπεριλαμβάνει αναστηλωτικά προγράμματα που επαυξάνουν τη στατική επάρκεια των μνημείων. Η αναστήλωση του Ερεχθείου αποτελεί το πρώτο ολοκληρωμένο αναστηλωτικό πρόγραμμα που εκπονήθηκε υπό την επιστημονική ευθύνη της ΕΣΜΑ. Η επέμβαση, που αποσκοπούσε στην άρση των αστοχιών των παλαιότερων αναστηλωτικών επεμβάσεων, πραγματοποιήθηκε μεταξύ των ετών 1979 και 1987 (Μπούρας και Ζάμπας, 2001).

Πραγματοποιούνται επίσης έργα αποκατάστασης στα Προπύλαια. Κατά την αποκατάσταση του Μπαλάνου έγινε εκτεταμένη χρήση σιδήρου για τη σύνδεση των θραυσμάτων δημιουργώντας έτσι προβλήματα στα αποκατεστημένα μέλη και η λάξευση των επιφανειών θραύσης κατέστρεψε πολύτιμο αρχαίο υλικό, με αποτέλεσμα στην πρώτη περίπτωση να επιβάλλεται η αποσυναρμολόγηση των μελών και επομένως μία νέα επέμβαση, ενώ στην δεύτερη περίπτωση η καταστροφή

αρχαίου υλικού οδήγησε στην μείωση των πιθανοτήτων ταύτισης και συγκόλλησης με τα αυθεντικά ελλείποντα τμήματα (Ιωαννίδου, 2007).

Κατά τα έτη 1981-1982 επιχειρείται η συντήρηση του 2^{ου} από νότο επιστυλίου του θριγκού της ανατολικής στοάς των Προπυλαίων, σύμφωνα με τη μελέτη της αρχιτέκτονας Α. Τζάκου και της πολιτικού μηχανικού Μ. Ιωαννίδου. Η επέμβαση αποκαθιστά τις βλάβες (εκτεταμένες διαρρήξεις) που είχαν προκληθεί από την οξείδωση των σιδηρών στοιχείων στο επιστύλιο αυτό και σε γειτονικά μέλη, που είχαν χρησιμοποιηθεί κατά την αναστήλωση του Ν. Μπαλάνου. Το 1990 ξεκινά η καθαίρεση των αναστηλωμένων φατνωματικών οροφών του κεντρικού κτηρίου των Προπυλαίων, διαδικασία που ολοκληρώνεται δύο χρόνια αργότερα, το 1992. Παράλληλα, ξεκινά η μελέτη για την ταύτιση των θραυσμάτων των φατνωματικών πλακών και των δοκών της οροφής. Αποτέλεσμα της διαδικασίας αυτής που ολοκληρώνεται το 1996, είναι η ανεύρεση μεγάλου αριθμού θραυσμάτων φατνωματικών πλακών και δοκών, οργανωμένων σε ομάδες συνανηκόντων. Το υλικό αυτό επρόκειτο να αξιοποιηθεί κατά τη νέα αναστήλωση (ΥΣΜΑ, 2009).

Το 1997, μετά την έγκριση της μελέτης του αρχιτέκτονα Τ. Τανούλα και της πολιτικού μηχανικού Μ. Ιωαννίδου αρχίζουν οι εργασίες αποκατάστασης του ανατολικού άκρου του νοτίου τοίχου του κεντρικού κτηρίου των Προπυλαίων. Καθαίρονται συνολικά 38 λιθόπλινθοι του νοτίου τοίχου, καθώς και οι δύο λίθοι επιστυλίου που συνέδεαν τον νότιο τοίχο με το νοτιοανατολικό δωρικό κίονα του μνημείου. Μετά την αποκατάστασή τους τα αρχιτεκτονικά μέλη τοποθετούνται στις αρχικές τους θέσεις. Το έργο - πλην της ανατοποθέτησης των δύο επιστυλίων - ολοκληρώνεται το 2001. Την ίδια χρονιά ξεκινά η στερέωση και συντήρηση του κεντρικού υπερθύρου των Προπυλαίων, η οποία πραγματοποιείται χωρίς το μέλος να καταβιβασθεί από το μνημείο και ολοκληρώνεται το 2005. Το 2000 δημιουργήθηκε το ΥΣΜΑ (Υπηρεσία Συντηρήσεως Μνημείων Ακρόπολης). Από το 2002 έως το 2009 εφαρμόζεται το πρόγραμμα αποκατάστασης της ανωδομής του κεντρικού κτηρίου των Προπυλαίων, βάσει της εγκεκριμένης μελέτης των Τ. Τανούλα και Μ. Ιωαννίδου. Τον Ιανουάριο του 2002 αρχίζει η βαθμιαία καθαίρεση αρχιτεκτονικών μελών του μνημείου από την ανατολική πρόσταση και συνεχίζεται στο βόρειο τοίχο και το θυραίο τοίχο των Προπυλαίων (ΥΣΜΑ, 2009). Επίσης, προέκυψε το

πρόγραμμα αποκατάστασης του βορείου τοίχου και το πρόγραμμα αποκατάστασης της ανατολικής κιονοστοιχίας του κεντρικού κτηρίου των Προπυλαίων, στο πλαίσιο των οποίων αποξηλώθηκαν συνολικά 55 αρχιτεκτονικά μέλη από το βόρειο τοίχο και 35 αρχιτεκτονικά μέλη από την ανατολική στοά των Προπυλαίων. Οι εργασίες αποσυναρμολόγησης ολοκληρώθηκαν το Μάιο του 2003 (ΥΣΜΑ, 2011).

Παράλληλα, προχώρησαν οι εργασίες δομικής αποκατάστασης και συντήρησης των αρχιτεκτονικών μελών που καταβιβάζονταν από το μνημείο. Τα αρχιτεκτονικά μέλη αποσυναρμολογήθηκαν στα επιμέρους θραύσματα και μετά τη συγκόλληση των συνανηκόντων θραυσμάτων με αφανείς ράβδους τιτανίου, συμπληρώθηκαν με νέο μάρμαρο – όπου αυτό προβλεπόταν από τη μελέτη – προκειμένου να αποκατασταθεί η δομική τους αυτοτέλεια. Μετά την αποκατάστασή τους και τη συντήρηση των επιφανειών που ήταν αθέατες μετά την ολοκλήρωση της επέμβασης, τα μέλη ανατοποθετήθηκαν στις αρχικές τους θέσεις. Το πρόγραμμα αποκατάστασης της ανωδομής των Προπυλαίων ολοκληρώθηκε τον Οκτώβριο του 2009 (ΥΣΜΑ, 2011).

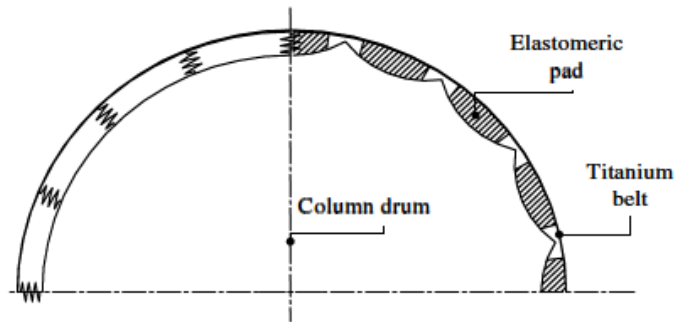
Εργασίες συντήρησης και αποκατάστασης πραγματοποιήθηκαν από την ΥΣΜΑ και στο ναό της Αθηνάς Νίκης από το 2002-2010.

2.2.3 Νέες τεχνικές αναστήλωσης

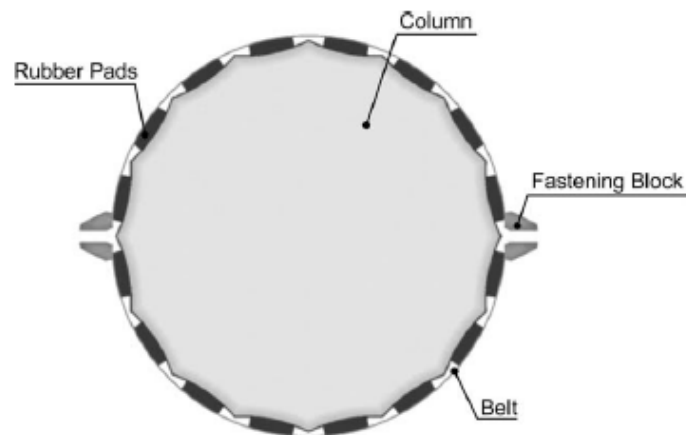
Με την πάροδο του χρόνου και επομένως τη δράση τόσο των στοιχείων της φύσης όσο και εξαιτίας του ανθρώπινου παράγοντα, τα διάφορα αρχαία μνημεία και οικοδομήματα, υφίστανται διάφορες φθορές. Για την διατήρηση και συντήρηση τους χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι. Στη σύγχρονη εποχή, έχουν αναπτυχθεί αρκετές τεχνικές αναστήλωσης, από τις οποίες επιγραμματικά οι πιο σύγχρονες είναι οι εξής:

➤ *Jacketing technique*

Πρόκειται για μια τεχνική χρήσης εξωτερικού δακτυλίου για ενίσχυση της δομής που έχει υποστεί ρωγμάτωση, παραδείγματος χάριν ενός κίονα. Ο δακτύλιος αποτελείται από ράβδους τιτανίου που δένουν στην άκρη (Εικόνα 2.14, 2.15) (Fabbrocino et al, 2006).



Εικόνα 2.14: Jacketing system mechanism (Fabbrocino et al., 2006)



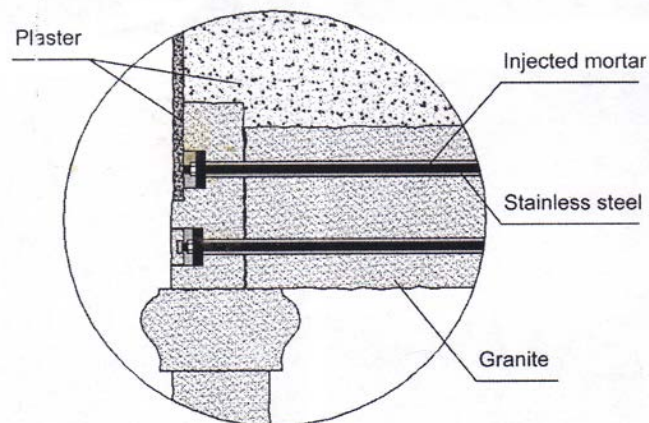
Εικόνα 2.15: Multi layer jacketing system (Fabbrocino et al., 2006)

➤ **Κονιάματα και ίνες**

Αυτή η μέθοδος αφορά τη χρήση κονιαμάτων και ινών από ασβέστη για κλείσιμο διαφόρων ρωγμών (Tringali et al., 2003)

➤ **Ατσάλινες ράβδοι / ατσάλινα στελέχη και κονιάματα**

Είναι μία νέα τεχνική ενίσχυσης δομικών στοιχείων με συνδυαστική χρήση ατσάλινων ράβδων, ενέσιμου κονιάματος και απλού κονιάματος. Οι ατσάλινες ράβδοι και τα ενέσιμα κονιάματα χρησιμοποιούνται επίσης και για την ένωση δύο δομικών στοιχείων (Εικόνα 2.16) (Lourenço, 2006).



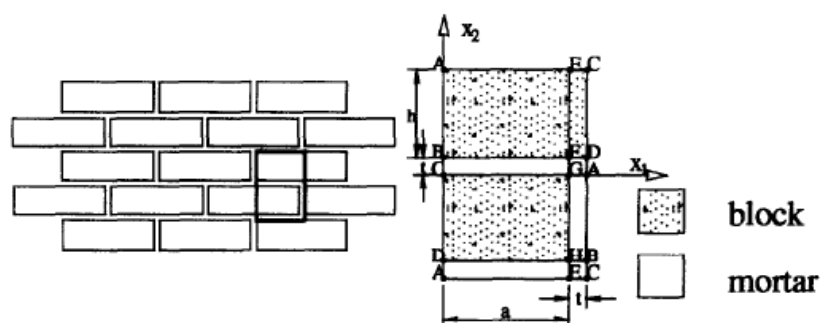
Εικόνα 2.16: Μηχανισμός αύξησης της αντοχής των υλικών με χρήση κονιάματος και ράβδων (Lourenço, 2006)

➤ **Τεχνική πολυμερούς συμπληρώματος (πολυεστερική ρυτίνη)**

Αυτή η τεχνική περιλαμβάνει υψηλής αντοχής ίνες οι οποίες βρίσκονται σε ένα μείγμα πολυεστερικής ρητίνης. Το μείγμα αυτό έχει 5-10 φορές υψηλότερη αντοχή από το ατσάλι και μόλις το $\frac{1}{4}$ του βάρους του (Borchardt, 2003).

➤ **Η FRP μέθοδος.**

Η μέθοδος FRP = fiber – reinforced plastic μπορεί να αντικαταστήσει τις κλασσικές ατσάλινες ράβδους για την ενίσχυση διατομής σκυροδέματος (concrete beam) ή να χρησιμοποιηθεί σαν tendons για prestressing και για την ενίσχυση σκυροδέματος (Εικόνα 2.17). Παρόλα αυτά έβλαψε την τοιχοποιία στην οποία εφαρμόστηκε αφού παρατηρήθηκε αποσύνδεση των FRP ελασμάτων στην περιοχή των ρωγμών (Luciano and Sacco, 1997).



Εικόνα 2.17: Σχήματα από μία τοιχοποιία και χρήση FRP μέθοδο για την αναστήλωση της (Luciano and Sacco, 1997)

➤ **Η τεχνική Dutchmen**

Η τεχνική της αντικατάστασης μέρος ενός πετρώματος από ίδιο ή παρόμοιο υλικό όταν μέρος του αρχικού πετρώματος έχει χαθεί είναι γνωστή σαν Dutchmen technique. Περιλαμβάνει προσεκτική τοποθέτηση του νέου λίθινου κομματιού στο άνοιγμα του αρχικού πετρώματος έτσι ώστε να ταιριάζει το τελικό αποτέλεσμα με το περιβάλλον πέτρωμα. Για να ενωθούν το νέο με το παλιό υλικό / πέτρωμα στη συγκεκριμένη τεχνική, συνήθως χρησιμοποιούνται ράβδοι ατσάλινες ή από τιτάνιο, καθώς και σύνθετα πολυμερή (Griswold and Uricheck, 1998).

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι σε πολλές περιπτώσεις αναστηλώσεων, όπου χρησιμοποιείται σαν μέθοδος ενίσχυσης των δομών που έχουν υποστεί ζημιές κατά το πέρασμα των χρόνων η χρήση μεταλλικών στελεχών, το ατσάλι έχει αντικατασταθεί από μείγματα αλουμινίου καθώς και τιτανίου.

2.2.4 Αντικατάσταση πετρωμάτων

Μία σημαντική μέθοδος αποκατάστασης αρχαίων γλυπτών και μνημείων είναι η αντικατάσταση, η οποία αποτελεί την πιο βιώσιμη προσέγγιση αναστήλωσης μεγάλης καταστραμμένης περιοχής ενός μνημείου ή ενός κτηρίου (Sanders et al., 2005) και χρησιμοποιείται πολύ συχνά στην αποκατάσταση κατεστραμμένης τοιχοποιίας (Public Works and Government Services Canada, 2000). Συγκεκριμένα αποτελεί την τρίτη φάση αποκατάστασης μιας τοιχοποιίας (Watson, 1995). Με αυτή τη μέθοδο, ένα κομμάτι ή μία μονάδα πετρώματος τοποθετείται στην περιοχή από όπου έχει χαθεί το αρχικό πέτρωμα. Όταν μέρος ενός δομικού λίθου έχει καταστραφεί σε τέτοιο βαθμό ώστε δεν μπορεί να λειτουργήσει σαν στοιχείο που φέρει φορτία, τότε η αντικατάσταση του πετρώματος είναι δικαιολογημένη (Griswold and Uricheck, 1998). Σύμφωνα με τους Török Akos and Vásárhelyi (2010) όταν το αρχικό πέτρωμα της πρόσοψης ενός κτηρίου, όπως το Κοινοβούλιο στη Βουδαπέστη, έχει υποστεί διάβρωση και δεν υπάρχει τέτοια ποιότητα πετρώματος διαθέσιμη πλέον, τότε η χρήση άλλου τύπου πετρώματος που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή της πρόσοψης του κτηρίου θα μπορούσε να αποτελέσει μία καλή εναλλακτική λύση.

Η διαθεσιμότητα των αυθεντικών πετρωμάτων από τα οποία είναι κτισμένα τα μνημεία μπορεί να είναι περιορισμένη όχι μόνο εξαιτίας διαφόρων γεωλογικών παραγόντων αλλά επίσης μπορεί να οφείλεται στις κυβερνητικές απαιτήσεις, στον τοπικό σχεδιασμό καθώς και στην προστασία φυσικών και υδάτινων πόρων (Häfner 2007 - Πηγή: Přikryl and Török, 2010). Ακόμα και αν τα αυθεντικά πετρώματα εξορύσσονται ακόμα (το οποίο δεν είναι το πιο σύνηθες στις μεγάλες βιομηχανικές χώρες) η ποιότητα των διαθέσιμων πετρωμάτων μπορεί να διαφέρει από αυτά που εξορύχτηκαν στο παρελθόν. Η ποσότητα των εξορυσσόμενων λίθων είναι ένα άλλο ζήτημα όσον αφορά την προμήθεια υλικών για αναστήλωση των μνημείων (Selonen et al., 2000).

Σε περιπτώσεις όπου ο αυθεντικός λίθος δεν είναι πλέον διαθέσιμος, το ενδιαφέρον εστιάζεται σε εναλλακτικά υλικά και στην καταλληλότητά τους να χρησιμοποιηθούν σαν υποκατάστατα υλικά χωρίς να αλλοιώσουν το χαρακτήρα του μνημείου. Η αντικατάσταση ενός πετρώματος μπορεί να γίνει με χρήση του ίδιου του πετρώματος ή με άλλο φυσικό πέτρωμα που έχει παρόμοιες ιδιότητες ή με χρήση τεχνητού πετρώματος, παρόμοιου με το αρχικό. Η χρήση διαφορετικού φυσικού δομικού λίθου σαν υποκατάστατο υλικό γίνεται σε περιπτώσεις που το λατομείο από όπου λήφθηκαν οι όγκοι του αυθεντικού πετρώματος έχει κλείσει ή είναι άγνωστο. Παραδείγματα αντικατάστασης ενός πετρώματος από άλλο συμβατό του αποτελούν πολλά αρχαία μνημεία με πιο αξιοσημείωτο αυτό του Παρθενώνα, όπου το αρχικό Πεντελικό μάρμαρο αντικαταστάθηκε από το μάρμαρο του Διονύσου, καθώς επίσης και πολλές περιπτώσεις στην Flanders κ.λ.π. (Dreezen and Duser, 2004). Τα τεχνητά πετρώματα αποτελούνται συνήθως από ασβέστη ή είναι μείγμα τσιμέντου και νερού (Pecchioni et al., 2005).

Η Dutchmen technique, συνήθως χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις μαρμάρων και γρανιτών επειδή είναι δύσκολη η παραγωγή παρόμοιων πετρωμάτων (Sourlis, 1988). Ένα πρόβλημα που προκύπτει από την χρήση υποκατάστατων φυσικών λίθων είναι το αισθητικό αποτέλεσμα που προκύπτει και το οποίο παρουσιάζει διαφορές με το αρχικό. Ωστόσο, αυτό το πρόβλημα σταδιακά ελαττώνεται εξαιτίας της αποσάθρωσης (Papanikolaou, 1994). Γαλλικοί ασβεστόλιθοι διερευνήθηκαν σε σχέση με τα εξωτερικά τους χαρακτηριστικά για πιθανή χρήση τους σαν υποκατάστατα υλικά σε αρχαία μνημεία, αλλά απορρίφθηκαν εξαιτίας της μη

συμβατότητας των φυσικών ιδιοτήτων τους με το αρχικό πέτρωμα. (Rozenbaum et al., 2008). Επομένως, υπάρχει αλληλεξάρτηση των αισθητικών κριτηρίων και των φυσικών παραμέτρων κατά την μελέτη συμβατότητας ενός πετρώματος με κάποιο άλλο.

2.3 Συμβατότητα φυσικών δομικών λίθων

2.3.1 Ορισμός συμβατότητας

Ο όρος ‘συμβατότητα’ χρησιμοποιείται συχνά αναφορικά με τη διατήρηση της πολιτιστικής κληρονομιάς (Ngoma, 2009), ωστόσο δεν έχει πλήρως αποσαφηνιστεί μέχρι στιγμής, είναι απλά αποδεκτό ότι συμβατότητα δεν σημαίνει απαραίτητα υλικά με τα ίδια χημικά συστατικά αλλά με παρόμοιες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες (Rodrigues 1996, Rodrigues and Grossi, 2007). Σύμφωνα με τον Van Hees et al, 2002 (Πηγή: Quist, 2009) συμβατότητα σημαίνει ότι οι treatments "θεραπείες" και τα εισαχθέντα υλικά δεν θα έχουν αρνητικές συνέπειες για την υπάρχουσα ιστορική δομή, αναφορικά με τα τεχνικά και αισθητικά χαρακτηριστικά της καθώς και για την ιστορική της αξία. Αυτές οι τρεις απόψεις για τη συμβατότητα μπορούν να υποδιαιρεθούν σε μικρότερες κατηγορίες έτσι ώστε να καλύψουν όλες τις πλευρές της επέμβασης. Μέχρι τώρα ο προσδιορισμός της συμβατότητας των υλικών στηριζόταν σε πειραματικά αποτελέσματα σε συνθήκες εργαστηρίου οι οποίες διαφέρουν σημαντικά από τις πραγματικές. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια η μελέτη της συμβατότητας πραγματοποιείται εκτός από πειραματικά και υπολογιστικά με προσομοιώσεις μοντέλων σε διάφορα λογισμικά προγράμματα. Η σύγκλιση των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων δίνει το καλύτερα προσεγγιστικό αποτέλεσμα αναφορικά με τη συμβατότητα των διαφόρων υλικών.

Το αντικείμενο και οι αρχές της αποκατάστασης των ιστορικών κτιρίων παρουσιάζονται στον Χάρτη της Βενετίας (Venice Charter 1964 - Πηγή: Θεοδωρίδης, 2006) που στόχο έχει να αποτρέψει ή να ελαχιστοποιήσει τις πιθανότητες μιας άστοχης και ίσως μακροπρόθεσμα βλαπτικής εφαρμογής. Η ορθή επιλογή των υλικών και των μεθόδων αποκατάστασης είναι ιδιαίτερα δύσκολη εξ’ αιτίας της ταχύτατης εξέλιξης της τεχνολογίας, της πληθώρας νέων υλικών που χρησιμοποιούνται στις επισκευές καθώς και ότι ο Χάρτης της Βενετίας αφήνει πολλά

περιθώρια επιλογών. Γενικά θεωρείται ότι ο καλύτερος τρόπος για την επίτευξη της ζητούμενης συμβατότητας και ανθεκτικότητας είναι η χρήση «παραδοσιακών» υλικών και αναστρέψιμων μεθόδων επέμβασης, στο μέτρο του δυνατού (Penelis 1989 - Πηγή: Θεοδωρίδης, 2006).

Σε κάθε περίπτωση αποκατάστασης είναι απαραίτητη η ακριβής εκτίμηση των παλιών υλικών και των παραγόντων που συνετέλεσαν στην αλλοίωσή τους. Επιπλέον, ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται σε ορισμένες παραμέτρους των παλιών υλικών όταν αυτά αποφασιστούν να χρησιμοποιηθούν εκ νέου στην επισκευή του κτιρίου (Θεοδωρίδης, 2006). Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι αυτό της Ακρόπολης, όπου γίνεται προσθήκη νέου μαρμάρου σε τμήματα του μνημείου όπου λείπουν μέρη από το αρχικό αυθεντικό υλικό με τελικό στόχο να αποκτήσει το μνημείο την αρχική δομική αυτοτέλειά του. Η χρήση νέου υλικού κατά την αναστήλωση είναι συνήθως περιορισμένη, ωστόσο σε περίπτωση χρήσης υποκατάστατου υλικού τα κριτήρια για την επιλογή είναι πάντα η σταθερότητα των μελών και του μνημείου και η δομική και αισθητική αυτονομία της περιοχής που αναστηλώνεται (Ioannidou, 2007).

2.3.2 Μελέτη συμβατότητας

Στα πλαίσια της πραγματοποίησης μιας μελέτης συμβατότητας δύο διαφορετικών δομικών λίθων εκτός από την διερεύνηση των φυσικών και αισθητικών χαρακτηριστικών των πετρωμάτων θα πρέπει να ελεγχθεί και η μηχανική συμπεριφορά τους. Στην πραγματικότητα, για να προκύψουν συμπεράσματα σχετικά με την συμβατότητα ενός πετρώματος σε σχέση με το αυθεντικό πέτρωμα, από το οποίο είναι κτισμένο το μνημείο, απαιτείται η μηχανική διερεύνηση της συνδυασμένης συμπεριφοράς των δύο υλικών. Είναι επομένως, πολύ ενδιαφέρον να γνωρίζουμε το βαθμό στον οποίο οι διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες του νέου υλικού θα τροποποιήσει τα χαρακτηριστικά του αρχικού πετρώματος. Η συνδυασμένη συμπεριφορά των δύο υλικών αντιπροσωπεύει ένα νέο μη ομογενή υλικό (Kourkoulis, 2006).

2.3.3 Παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά δύο συμβατών υλικών

Πολλές φορές για την πραγματοποίηση της αναστήλωσης ενός μνημείου είναι επιβεβλημένη λόγω συνθηκών η χρήση της αντικατάστασης πετρωμάτων, όπως προαναφέρθηκε. Για την επιτυχή έκβαση μίας τέτοιας αναστήλωσης είναι απαραίτητη η συμβατότητα των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν. Αυτό απαιτεί την πλήρωση ορισμένων προϋποθέσεων.

Το σχετικό μέγεθος, το σχήμα, η θέση του εισερχόμενου υλικού, καθώς και η αντοχή των δεσμών της διεπιφάνειας παίζουν ένα σημαντικό ρόλο στην παρατηρούμενη συμπεριφορά των δύο συμβατών υλικών και αποτελούν τις παραμέτρους του προβλήματος. Κατανοώντας τη λειτουργία αυτών των παραμέτρων κανείς μπορεί να προβλέψει και να ελαττώσει τα αποτελέσματα της εισαγωγής ενός μη συμβατού μηχανικά πετρώματος σε ένα αρχαίο μνημείο (Kourkoulis, 2006). Η λεπτομερής μελέτη του αυθεντικού υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένο ένα μνημείο καθώς και οι ιστορικές πληροφορίες που αφορούν την κατασκευή του μνημείου διευκολύνει την αναστήλωση του με χρήση άλλων συμβατών υλικών (Moropoulou and Polikreti, 2009). Είναι επομένως επιβεβλημένη η διερεύνηση της φυσικοχημικής και μηχανικής συμπεριφοράς των υλικών αρχαίων και συμβατών πριν από κάθε αναστηλωτική επέμβαση. Από μηχανικής άποψης στην περίπτωση επέμβασης σε ένα μνημείο με χρήση δύο συμβατών υλικών πρέπει να ληφθεί υπόψη εκτός από τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών, η ύπαρξη ή μη ανισοτροπίας στα δύο υλικά και να προηγηθεί η λεπτομερής μελέτη καθενός ξεχωριστά προτού πραγματοποιηθεί η συνδυασμένη διερεύνησή τους.

Η συμβατότητα μεταξύ φυσικών δομικών λίθων κρίνεται με βάση ορισμένες παραμέτρους. Αυτές είναι (Kourkoulis et al., 2004):

- Ο γεωλογικός χαρακτηρισμός του κάθε πετρώματος, δηλαδή το χρώμα, η υφή, η χρησιμότητά του κ.λ.π. Σύμφωνα με τους Dreezen and Duser (2004) είναι απαραίτητη η πετρογραφική ανάλυση τόσο του αυθεντικού υλικού όσο και του πιθανού υποκατάστατου του πριν από οποιαδήποτε αναστηλωτική εργασία. Οι Elert et al (2004) τόνισαν την αναγκαιότητα της μελέτης της σύνθεσης και της μικροδομής των υποκατάστατων πετρωμάτων.

- Οι αισθητικοί παράμετροι πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για την συμβατότητα των υλικών, ένα παράδειγμα χρησιμοποίησης συμβατών φυσικών δομικών λίθων με βάση αισθητικά κριτήρια αποτελεί η αναστήλωση του Ιερού της Σαμοθράκης το 1956.
- Οι φυσικές ιδιότητες του κάθε υλικού και επομένως η πυκνότητά του, το πορώδες, η διαπερατότητά του κ.λ.π.
- Οι μηχανικές ιδιότητες του κάθε υλικού, για παράδειγμα η αντοχή σε εφελκυσμό και θλίψη, το μέτρο ελαστικότητας, ο λόγος Poisson, η ανισότροπη συμπεριφοράς κάτω από τριαξονικές δοκιμές κ.λ.π.
- Η μηχανική και φυσικοχημική αποσάθρωση, παραδείγματος χάρη η ανταπόκριση του κάθε υλικού σε δοκιμές Los Angeles, σε διαφορετικές θερμοκρασίες και περιεχόμενη υγρασία, σε κύκλους ψύξης – θέρμανσης.
- Η διάβρωση των δομικών υλικών τα οποία είναι κυρίως πορώδη. Ο κίνδυνος διάβρωσης οφείλεται στο νερό που απορροφάνε τα υλικά αυτά καθώς και στα άλατα που περιέχονται σ' αυτά. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι ο ασβεστόλιθος, ο οποίος θεωρείται ένας δομικός λίθος που υπόκειται διάβρωση λόγω αλάτων, γιατί περιέχει ανθρακικό ασβέστιο (Jacob, 2007).

Η πέτρα και ιδιαίτερα τα μάρμαρα και οι ασβεστόλιθοι είναι ένα υλικό που χρησιμοποιείται διαχρονικά για την κατασκευή ιστορικών δομών (Sanders et al, 2005). Η καταστροφή τους οφείλεται στην παρουσία ρωγμών διαφόρων μεγεθών, που κυρίως παρουσιάζονται κατά τις δοκιμές εφελκυσμού ή εξαιτίας ύπαρξης συμπιεστικών τάσεων και επομένως αυτές πρέπει να εξετάζονται προσεκτικά.

Πρέπει να ληφθεί υπόψη πως σημαντικά δομικά στοιχεία που πρέπει να εξετάζονται στο εργαστήριο πριν εφαρμοστεί οποιαδήποτε μέθοδος αποκατάστασης είναι: η ανομοιογένεια, η ανισοτροπία, η επίδραση του μεγέθους «size effect», η επίδραση του σχήματος, η σκληρότητα, η ψαθυρότητα κ.λ.π. (Vardoulakis et al., 1997).

Στην περίπτωση που δεν πληρείται κάποιος από τους παραπάνω παράγοντες, η αναστήλωση δεν είναι επιτυχής και η διάρκεια ζωής της είναι βραχυπρόθεσμη. Στην περίπτωση αισθητικού λάθους αλλοιώνεται αυτόματα ο ιστορικός χαρακτήρας του μνημείου. Σε περίπτωση μη συμβατότητας φυσικοχημικού παράγοντα οι πιο πιθανές συνέπειες είναι στην καλύτερη περίπτωση η καταστροφή του ενός μόνο από τα δύο υλικά, όπως στην περίπτωση διάβρωσης του, ενώ στην χειρότερη περίπτωση και τα

δύο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η λανθασμένη αναστήλωση κατά την περίοδο του Μπαλάνου των επιστηλίων του Παρθενώνα με χρήση σιδερένιων συνδέσμων, οι οποίοι υφίστανται οξείδωση με συνέπεια τη διόγκωσή τους και επομένως την καταστροφή μέρους των μαρμάρων που ενώνουν.

2.3.4 Μηχανική Συμβατότητα και Μηχανική Καταπόνηση

Σε κάθε περίπτωση επέμβασης σε αρχαία οικοδομήματα, είτε με την αντικατάσταση λίθινων τμημάτων, είτε με την προσθήκη τμημάτων τα οποία έχουν καταστραφεί, είτε με την αντικατάσταση ή και την προσθήκη μεταλλικών συνδέσμων για τη βελτίωση της συναρμογής και μηχανικής συμπεριφοράς τμημάτων του μνημείου, επέρχεται μία σημαντική μεταβολή στη μηχανική καταπόνηση των λίθων στους οποίους γίνεται η επέμβαση. Το αν ένα τμήμα πετρώματος μπορεί να ανταπεξέλθει επιτυχώς στην αλλαγή της εντατικής του κατάστασης εξαρτάται κατά ένα μεγάλο μέρος από τις μηχανικές ιδιότητες του πετρώματος αυτού κάθε αυτού, από τα σχετικά μεγέθη των μηχανικών ιδιοτήτων παλαιών και νέων τμημάτων και από την σχέση των μηχανικών ιδιοτήτων τμημάτων πετρώματος και ενισχυτικών συνδέσμων οι οποίοι τοποθετούνται μέσα στο πέτρωμα. Για παράδειγμα, εάν σε μία κατασκευή η οποία αποτελείται από υλικό με χαμηλό μέτρο ελαστικότητας συμπληρωθούν τμήματα τα οποία έχουν υψηλό μέτρο ελαστικότητας τότε στις διεπιφάνειες, λόγω της διαφορετικής δυνατότητας παραμόρφωσης του κάθε τμήματος, θα αναπτυχθούν τάσεις οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν στη μερική ή πλήρη καταστροφή των τμημάτων με χαμηλά μέτρα ελαστικότητας. Επίσης, εάν για παράδειγμα δύο υλικά έχουν διαφορετικές θερμικές ιδιότητες, λόγω της διαφορετικής συστολής - διαστολής μπορούν να αναπτυχθούν τάσεις οι οποίες μπορούν να οδηγήσουν στη ρηγμάτωση των παλαιών ή και των νέων τεμαχίων. Τέλος, στην περίπτωση που προστίθενται μεταλλικοί σύνδεσμοι για τη συγκράτηση των γειτονικών λίθων ή για την εξουδετέρωση εφελκυστικών τάσεων οι οποίες τυχόν αναπτύσσονται, η συναρμογή των τεμαχίων μεταξύ τους καθώς και η συναρμογή των λίθων με τους μεταλλικούς συνδέσμους πρέπει να πληροί ορισμένες προδιαγραφές ούτως ώστε να μη δημιουργούνται συγκεντρώσεις τάσεων σε σημεία αλλαγής καμπυλότητας των λίθων.

Κεφάλαιο 3: Δομικά υλικά μνημείων και χαρακτηρισμός τους

3.1 Γενικά

Τα αρχαία μνημεία με το πέρασμα των αιώνων υφίστανται ζημιές που καθιστούν αναγκαία την αναστήλωσή τους. Κατά τις εργασίες συντήρησης, και μερικής ή ολικής αναστήλωσης των αρχαίων μνημείων πολλές φορές υφίσταται η ανάγκη αντικατάστασης μέρους των αρχαίων λίθων με νεώτερους. Σε κάθε είδους επέμβαση στα αρχαία μνημεία προκαλούνται μεταβολές στη μηχανική καταπόνηση των λίθων καθιστώντας αναγκαία τη διερεύνηση της μηχανικής συμβατότητας των υλικών που χρησιμοποιούνται κατά την επέμβαση. Για την πιστοποίηση της συμβατότητας των διαφόρων φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών των λίθων είναι απαραίτητη μια σειρά δοκιμών (συνήθως εργαστηριακών) τόσο στα νέα όσο και στα παλαιότερα υλικά. Καθώς δεν είναι πάντα εύκολο να ελέγχονται τα υλικά των αρχαίων μνημείων με καταστροφικές δοκιμές, σε αυτό το κεφάλαιο διερευνάται το κατά πόσο είναι δυνατόν να εκτιμηθεί η συμβατότητα παλαιών και νέων υλικών με μη καταστρεπτικές δοκιμές .

Στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής ελέγχθηκαν δύο είδη νεογενών ασβεστολίθων τα οποία μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως συμβατά δομικά υλικά με ασβεστόλιθο ασθενών μηχανικών χαρακτηριστικών ή ακόμη και με τον Κεχρεάτη λίθο. Τα υλικά που εξετάστηκαν ήταν δύο ασβεστολιθικά πετρώματα προερχόμενα από την περιοχή των Χανίων, τα οποία χρησιμοποιούνται ως σύγχρονα δομικά υλικά.

Αρχικά έγινε μια προσπάθεια χαρακτηρισμού τους με χρήση μη καταστρεπτικών δοκιμών (ΜΚΔ) και ειδικότερα με τη μέθοδο των υπερήχων. Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν και καταστρεπτικές δοκιμές έτσι ώστε να συσχετιστούν τα αποτελέσματα των ΜΚΔ με αυτά των καταστρεπτικών δοκιμών. Ο αρχικός σχεδιασμός προέβλεπε την αντίστοιχη διαδικασία σε υλικά προερχόμενο από αρχαίο μνημείο ούτως ώστε να αναπτυχθεί η αντίστοιχη τεχνική χαρακτηρισμού μηχανικής συμβατότητας συγκεκριμένης γεωμετρίας και καταπόνησης. Όμως τελικά αυτό δεν κατέστη δυνατό.

Μία σημαντική περίπτωση αναστήλωσης μνημείων όπου δεν είναι δυνατή η χρήση του αυθεντικού υλικού είναι και η περίπτωση του Παρθενώνα της Ακρόπολης των Αθηνών. Το αυθεντικό υλικό δεν εξορύσσεται πλέον και ως συμβατό υλικό χρησιμοποιείται στις αναστηλώσεις το μάρμαρο Διονύσου. Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση όπου μέρος ορισμένων επιστυλίων του που καταστράφηκαν με το πέρασμα του χρόνου, αντικαταστάθηκαν από αυτό. Η συμβατότητά του μαρμάρου του Διονύσου με το Πεντελικό μάρμαρο έχει πιστοποιηθεί από προηγούμενες έρευνες (Exadaktylos et al. 2001, Βαρδουλάκης κ.ά. 2002). Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται όλες οι πληροφορίες που αφορούν τα δομικά υλικά από τα οποία είναι κατασκευασμένο και αναστηλωμένο το σημαντικό αυτό μνημείο, καθώς σε επόμενο κεφάλαιο εξετάζεται η μηχανική συμβατότητα συγκεκριμένης γεωμετρίας και καταπόνησης.

3.2 ΜΚΔ σε ασβεστολιθικά υλικά

3.2.1 Μη καταστρεπτικές δοκιμές: Η μέθοδος των υπερήχων

Στις εργασίες συντήρησης και αναστήλωσης είναι απαραίτητη η χρήση συμβατών υλικών όπου υφίσταται η ανάγκη αντικατάστασης μέρους των αρχαίων λίθων με νεώτερους. Η συμβατότητά τους εξετάζεται από πολλές πλευρές, μία εκ των οποίων είναι η μηχανική αντοχή τους. Επομένως, ο μηχανικός χαρακτηρισμός τέτοιων φυσικών δομικών υλικών περιλαμβάνει τον καθορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων τους. Αυτές μπορούν να προσδιοριστούν με χρήση δοκιμών που ανήκουν σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τις καταστρεπτικές δοκιμές και τις μη καταστρεπτικές δοκιμές.

Οι μη καταστρεπτικές δοκιμές αποτελούν μία μεγάλη ομάδα τεχνικών ανάλυσης, που χρησιμοποιούνται ευρέως στον τομέα της επιστήμης και της βιομηχανίας. Ορίζονται ως οι δοκιμές που χρησιμοποιούνται για την εξέταση ενός αντικειμένου, ενός υλικού ή ενός συστήματος, χωρίς να το καταστρέφουν κατά τη διάρκεια της εξέτάσής του (Κωτούζας, 2003) και χωρίς να βλάπτουν τη μελλοντική χρήση του (ASNT 2012, Blitz and Simpson 1996).

Στις μη καταστρεπτικές μεθόδους ανήκουν οι κρουστικές μέθοδοι (κρουσίμετρο αναπηδήσης του Schmidt, η σφύρα του Franck, η σφύρα του Einbeck), η μέθοδος των

υπερήχων, η ραδιοπερατότητα (Χαλιορής, 2009), η ραδιογραφία, ο οπτικός έλεγχος, τα διεισδυτικά υγρά, τα μαγνητικά σωματίδια, τα δινορρέυματα, οι δοκιμές διαρροής, η ακουστική εκπομπή, η θερμογραφία υπερύθρων, η ολογραφία νετρονίων, ο μακροσκοπικός έλεγχος μέσω χημικής προσβολής και ο μικροσκοπικός έλεγχος μέσω χημικής προσβολής (Κωτούζας, 2003).

Οι μέθοδοι των μη καταστρεπτικών δοκιμών είναι επίσης ιδιαίτερα γνωστές στο πεδίο των γεωτεχνικών εφαρμογών. Μεταξύ των διαθέσιμων μη καταστροφικών μεθόδων, η τεχνική των υπερήχων (ultrasound pulse velocity, UPV) είναι μία από τις φθηνότερες, πλέον φορητές και ιδιαίτερα εύκολες και πρακτικές μεθόδους (Bellorpede and Manfredotti, 2006). Γενικά, θεωρείται μία χρήσιμη και αξιόπιστη μέθοδος για τον υπολογισμό των ελαστικών ιδιοτήτων, όπως είναι το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας (E) (Raj and Tayib 1994, Al-Shayea 2004, Martínez et al. 2008), το μέτρο διάτμησης (G), ο λόγος Poisson (ν) (Κούκης και Σαμπατακάκης 2002, Allison 1988, Al-Shayea 2004, Martínez et al. 2008) καθώς και της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη των πετρωμάτων (Uchida et al. 1999, Yasar et al. 2004, Svahn 2006, Sharma and Singh, 2007). Η τεχνική των UPV μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση υπαρχόντων κλειστών ρωγμών στα υλικά (Saka and Uchikawa 1995, Prassianakis and Prassianakis 2004), καθώς και για τον υπολογισμό του βάθους των ρωγμών σε ένα πέτρωμα (Blair 1990, Kahraman et al. 2008). Η διάδοση των υπερήχων σε θραυσμένα πετρώματα (Watanabe et al. 1995, Kahraman 2001, Kahraman 2002) καθώς και η παραμόρφωση των πετρωμάτων (Gladwin, 1982) αποτελούν επίσης εφαρμογές των σεισμικών μεθόδων.

Η σύγκριση των θεωρητικών τιμών με τη μετρούμενη τιμή της ταχύτητας των κυμάτων αυτών μπορεί να αποτελέσει ένα δείκτη της ποιότητας του πετρώματος (Vasconcelos et al., 2008). Ο προσδιορισμός της ταχύτητας των διαμήκων κυμάτων σε ένα συγκεκριμένο τύπο φυσικών λίθων επιτρέπει τον καθορισμό των συνθηκών και των δομών που υπάρχουν μέσα σε αυτά, όπως είναι η περιεχόμενη υγρασία ή αλατότητα, τυχόν ρωγματώσεις κ.λ.π. (Wolfram, 1999). Με αυτό τον τρόπο, μπορούν να εντοπιστούν υπάρχουσες ρωγμές (Bodare, 1998) στα πετρώματα και επομένως και στο εσωτερικό αρχαίων αγαλμάτων, σε αρχαία μνημεία, σε εκκλησίες κ.λ.π.

Η τεχνική υπολογισμού των ταχυτήτων των υπερήχων διαμέσου ενός πετρώματος (UPV) θεωρείται κατάλληλη μέθοδος για την ποσοτικοποίηση της φθοράς καθώς και της ανίχνευσης των μόνιμων αλλοιώσεων της δομής του πετρώματος. Ο προσδιορισμός του μεγέθους της αλλοίωσης της δομής είναι πολύ σημαντικός πριν από κάθε επισκευή, γι' αυτό το λόγο είναι επιθυμητή η χρήση μιας μη καταστροφικής μεθόδου (Grizato et al., 2004).

Σύμφωνα με διάφορους ερευνητές (Sermeri-Kabashi and Snerhlage 2000, Zezza and Sebastián Pardo 1992 - Πηγή: Luque et al. 2010, Christaras 1997) με τη μέθοδο των υπερήχων μπορεί να ανιχνευτεί η ύπαρξη ανισοτροπίας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα μάρμαρα Carrara, τα οποία αποτελούν υλικό κατασκευής πολλών αρχαίων μνημείων, στα οποία προσδιορίστηκε η ύπαρξη ανισοτροπίας στη δομή τους με χρήση υπερήχων (Sermeri-Kabashi and Snerhlage, 2000).

Οι μετρήσεις των υπερήχων είναι κατάλληλες και αρκετά ακριβείς για την ανίχνευση χημικών και δομικών ανωμαλιών, καθώς και ασυνεχειών στα μάρμαρα (Sáez-Pérez and Rodríguez-Gordillo, 2009) αλλά και σε άλλα πετρώματα, όπως για παράδειγμα οι ψαμμίτες (King et al., 1995). Αξίζει να σημειωθεί ότι με χρήση των ταχυτήτων των διαμήκων κυμάτων πραγματοποιήθηκε από πολλούς ερευνητές (Zezza 1993, Christaras et al. 1997, Christaras 2003, Svahn 2006) ο υπολογισμός του βαθμού της αποσάθρωσης σε διάφορους φυσικούς δομικούς λίθους. Επίσης, με χρήση των υπερήχων μπορούν να υπολογιστούν δείκτες για το ποσοστό αποσάθρωσης (Karpuz and Paşamehmetoğlu, 1995).

Όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος των πόρων και των μικροδιακλάσεων, τόσο πιο αργή είναι η διάδοση των ελαστικών κυμάτων (Vasconcelos et al., 2008). Είναι ξεκάθαρο πως η ταχύτητα των διαμήκων κυμάτων μπορεί να αποτελέσει ένα καλό διαγνωστικό εργαλείο σχετικά με τις αλλαγές στο πορώδες και τις μηχανικές ιδιότητες των πετρωμάτων (Ferreira Pinto and Rodrigues Delgado, 2007). Όταν τέτοιες μετρήσεις λαμβάνονται ως τομογραφία, τότε μπορεί να προκύψουν πληροφορίες που αφορούν τις αλλαγές των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών (Popovics 2003, Grinzato et al. 2004, Meglis et al. 2005). Οι Papida et al. (2000) χρησιμοποίησαν μια τεχνική υπερήχων με σκοπό τον υπολογισμό της φυσικής και βακτηριακής αποσάθρωσης των ασβεστολίθων και των δολομιτών.

Επίσης, οι μετρούμενες ταχύτητες των διαμήκων ή εγκάρσιων κυμάτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως δείκτες της ακεραιότητας των εξεταζόμενων δειγμάτων σε σχέση με την έκθεσή τους στην υγρασία (Birgisson et al. 2003, Wolfram 1999). Σύμφωνα με τους Siegesmund et al. (2010) η απορρόφηση του νερού καθώς και η περιεκτικότητα σε νερό των μαρμάρων μπορούν να ανιχνευτούν χρησιμοποιώντας δοκιμές μέτρησης ταχύτητας υπερήχων (UPV).

Με βάση τους Sáez-Pérez και Rodríguez-Gordillo (2009) η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων είναι μία από τις μη καταστροφικές φυσικές μεθόδους με τη μεγαλύτερη αποδοχή και εφαρμογή στη μελέτη των δομικών χαρακτηριστικών και την συντήρηση των δομικών λίθων στα ιστορικά κτήρια. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι αυτό της Αυστρίας, όπου την τελευταία εικοσαετία πραγματοποιήθηκε αξιολόγηση της δομικής κατάστασης διάφορων γλυπτών και μνημείων με χρήση διαφόρων μη καταστροφικών μεθόδων, μία εκ των οποίων ήταν η μέθοδος των υπερήχων (Svahn, 2006). Η διάδοση των υπερήχων χρησιμοποιείται ακόμα σαν μέρος της πετρογραφικής εξέτασης ασβεστολιθικών υλικών με σκοπό την χαρτογράφησή τους και τη χρήση τους σαν υποκατάστατα υλικά σε αρχαία μνημεία, όπως φαίνεται στη μελέτη των Fronteau et al. (2010) καθώς και στις διακοσμητικές λίθινες δομές όπως είναι τα αγάλματα, οι κίονες και τα κιγκλιδώματα (Fitzner, 2004). Τα συμπεράσματα που προέκυψαν έδειξαν ότι η διάδοση της ταχύτητας των υπερήχων είναι μία αποτελεσματική διαγνωστική τεχνική για την αξιολόγηση της μηχανικής κατάστασης των δομών.

Η μέθοδος των υπερήχων χρησιμοποιείται ακόμα σε δοκίμια κονιαμάτων για αξιολόγηση της συμπαγοποίησής τους (Βογιατζής κ.ά., 2008), καθώς και για τον έλεγχο των ίδιων των κονιαμάτων (Bodare, 1998).

3.2.2 Πειραματική διαδικασία.

3.2.2.1 Δειγματοληψία – Διαμόρφωση δοκιμίων

Οι εργαστηριακές δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε δύο διαφορετικούς νεογενείς ασβεστόλιθους της Κρήτης. Το πρώτο υλικό, ο παρόλιθος (πέτρωμα Α) λήφθηκε από το λατομείο που βρίσκεται στην περιοχή του Αλφά, κοντά στην πόλη του Ρεθύμνου, της Νήσου Κρήτης. Αυτό το πέτρωμα είναι γενικά πορώδες και συνήθως παρουσιάζει

στο εσωτερικό του ζώνες ίδιου υλικού διαφορετικών ιδιοτήτων. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι από το λατομείο του Αλφά εξορύσσονται τρία υλικά με εμπορικές ονομασίες Σκληρή, Αλφάς και Πωρόλιθος. Η διαβάθμιση των υλικών αναφέρεται τόσο στην αντοχή τους όσο και στην δυσκαμψία τους, η οποία μειώνεται αντίστοιχα. Το δεύτερο υλικό (πέτρωμα Β) λήφθηκε από το Σχιστήριο των Βρυσών, μια περιοχή κοντά στην πόλη των Χανίων, επίσης της Νήσου Κρήτης και πρόκειται για έναν μαργαϊκό ασβεστόλιθο.

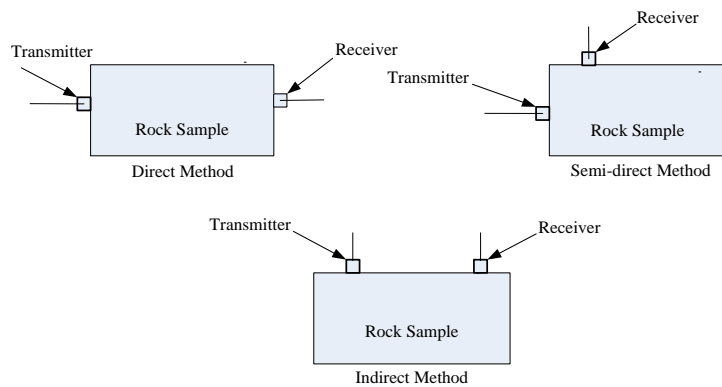
Από τις δύο ως άνω επιχειρήσεις εξόρυξης παρελήφθησαν ογκοτεμάχια προσανατολισμένα στα «νερά» των υλικών, με σκοπό τη διερεύνηση της επίδρασης της ανισοτροπίας τόσο στην ταχύτητα των διαμήκων κυμάτων, όσο και στην αντοχή σε μονοαξονική θλίψη.

Αρχικά τα ογκοτεμάχια (*Εικόνα 3.2, 3.3, 3.4α,β,γ,δ,ε*) ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των ταχυτήτων διάδοσης των διαμήκων κυμάτων σε τρεις προσανατολισμούς. Στη συνέχεια, έγινε πυρηνοληψία διαμέτρου NX ($D=54\text{ mm}$) έτσι ώστε να προκύψουν κύλινδροι με λόγο ύψους/διαμέτρου (H/D) 2:1, σύμφωνα με την προτεινόμενη μέθοδο της ISRM (Brown, 1981). Στα κυλινδρικά δοκίμια έγινε μέτρηση της ταχύτητας διάδοσης των διαμήκων κυμάτων και της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη.

3.2.2.2 Μέτρηση διαμήκων κυμάτων

Σύμφωνα με τον Brown (1981), υπάρχουν τρεις διαφορετικοί μέθοδοι υπολογισμού των ταχυτήτων των διαμήκων ή εγκάρσιων κυμάτων στο εργαστήριο: η άμεση μέθοδος (direct method), η ημι-άμεση μέθοδος (semi - direct method) και η έμμεση μέθοδος (indirect method) (*Εικόνα 4.1*). Σε αυτή τη μελέτη χρησιμοποιήθηκε η άμεση μέθοδος. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις ήταν μία μονάδα Pundit (model 6). Αυτή η πειραματική συσκευή περιλαμβάνει μία γεννήτρια κυματομορφών και δύο πιεζοηλεκτρικούς πρεσσοστάτες οι οποίοι εκπέμπουν και δέχονται διαμήκη κύματα στη συχνότητα των 54 kHz. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα διαμήκη κύματα που διαδίδονται μέσω του πετρώματος αναφέρονται και ως ακουστικά (sonic waves) λόγω του όμοιου τρόπου διάδοσης. Επίσης, όταν οι

ταλαντώσεις που παράγουν τέτοια κύματα είναι σε φάσμα υψηλότερο των ακουστικών συχνοτήτων, τότε τα κύματα αυτά χαρακτηρίζονται ως υπέρηχοι (ultrasound).



Εικόνα 3.1: Τρεις μέθοδοι μέτρησης των ταχυτήτων των διαμήκων κυμάτων (Brown, 1981).

Στην *Εικόνα 3.2* φαίνεται η εφαρμογή της άμεσης μεθόδου στο ογκοτεμάχιο πέτρωμα Α, ενώ στην *Εικόνα 3.3* παρουσιάζεται η διαδικασία μέτρησης με την έμμεση μέθοδο.



Εικόνα 3.2: Μετρήσεις ταχύτητας των διαμήκων κυμάτων με χρήση της άμεσης μεθόδου στο ογκοτεμάχιο του πετρώματος Α.



Εικόνα 3.3: Μετρήσεις ταχύτητας των διαμήκων κυμάτων με χρήση της έμμεσης μεθόδου στο ογκοτεμάχιο του πετρώματος Α.

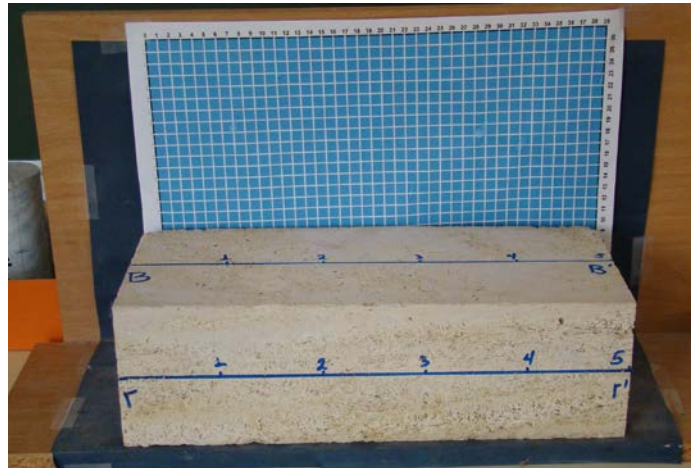
Οι μετρήσεις των διαμήκων κυμάτων πραγματοποιήθηκαν σε τέσσερα ογκοτεμάχια πωρόλιθου (Εικόνα 3.4α, 3.4β, 3.4γ, 3.4δ), που χαρακτηρίζονται ως Π1, Π2, Π3, Π5. Τα ογκοτεμάχια Π2, Π3 και Π5 προήλθαν από το ίδιο αρχικό ογκοτεμάχιο, ενώ το Π1 προήλθε από διαφορετικό. Σε κάθε ογκοτεμάχιο χαράχθηκαν παράλληλες και εγκάρσιες γραμμές ΑΑ', ΒΒ', ΓΓ', ΕΕ' όπως φαίνεται ενδεικτικά στην Εικόνα 3.3. Οι διαστάσεις τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1: Διαστάσεις ογκοτεμαχίων

ΟΓΚΟΤΕΜΑΧΙΟ	Ε και Ε' (mm)	ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ	
		ΑΑ' και ΒΒ' (mm)	ΓΓ' και ΔΔ' (mm)
Π1	420	124	102
Π2	400	168.5	117
Π3	400	126	168
Π5	178	133	164

Αρχικά οι χρόνοι διαδρομής των διαμήκων κυμάτων μετρήθηκαν χωρίς να παρεμβάλλεται λιπαντικό μέσο ανάμεσα στις επιφάνειες του πετρώματος και τους πρεσοστάτες, ενώ σε ένα επόμενο στάδιο πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με χρήση λιπαντικού (τύπου βαζελίνης) για καλύτερη σύζευξη μεταξύ των πρεσοστατών και των επιφανειών του πετρώματος. Στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι αντίστοιχες ταχύτητες των διαμήκων κυμάτων. Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε και για τα

ογκοτεμάχια του μαργαϊκού ασβεστόλιθου των Βρυσών Β1 και Β2 διαστάσεων 350 mm * 200 mm * 150 mm το κάθε ένα (Εικόνα 3.4ε).



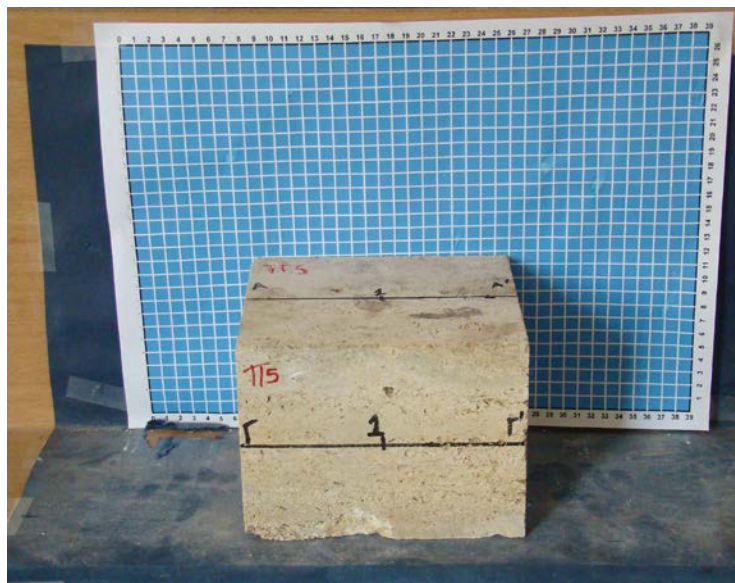
Εικόνα 3.4α: Ογκοτεμάχιο πωρόλιθου Π1 με χαραγμένες τις περιοχές μέτρησης των ταχυτήτων των διαμήκων κυμάτων. Ο κάναβος έχει διάσταση κυψέλης 1 cm^2 . Φαίνονται οι πλευρές Β και Γ.



Εικόνα 3.4β: Ογκοτεμάχιο πωρόλιθου Π2 με χαραγμένες τις περιοχές μέτρησης των ταχυτήτων των διαμήκων κυμάτων. Ο κάναβος έχει διάσταση κυψέλης 1 cm^2 . Φαίνονται οι πλευρές Β και Γ.



Εικόνα 3.4γ: Ογκοτεμάχιο πωρόλιθου Π3 με χαραγμένες τις περιοχές μέτρησης των ταχυτήτων των διαμήκων κυμάτων. Ο κάναβος έχει διάσταση κυψέλης 1 cm^2 . Φαίνονται οι πλευρές Α και Δ.



Εικόνα 3.4δ: Ογκοτεμάχιο πωρόλιθου Π5 με χαραγμένες τις περιοχές μέτρησης των ταχυτήτων των διαμήκων κυμάτων. Ο κάναβος έχει διάσταση κυψέλης 1 cm^2 . Φαίνονται οι πλευρές Α και Γ.



Εικόνα 3.4ε: Ογκοτεμάχια μαργαϊκού ασβεστόλιθου από το Σχιστήριο Βρυσών

Έπειτα από την ολοκλήρωση των μετρήσεων των διαμήκων κυμάτων στα ογκοτεμάχια, εξήχθησαν από αυτά κυλινδρικά δοκίμια με χρήση εργαστηριακού εξοπλισμού πυρηνοληψίας. Εξαιτίας της ανισοτροπίας των ογκοτεμαχίων τα δοκίμια εξήχθησαν σε διάφορες διευθύνσεις με βάση τους κύριους άξονες του κάθε ογκοτεμαχίου. Έτσι, προέκυψαν κυλινδρικά δοκίμια κατά τη διεύθυνση ΓΔ και πρισματικά κατά τη διεύθυνση ΑΒ από το ογκοτεμάχιο Π2, καθώς και κυλινδρικά δοκίμια και προς τις τρεις διευθύνσεις από τα ογκοτεμάχια Π3 και Π5 για το πέτρωμα Α (πωρόλιθος). Από το ογκοτεμάχιο Π1 εξήχθησαν μόνο κυλινδρικά δοκίμια κατά τη διεύθυνση ΑΒ (Εικόνα 3.5).



Εικόνα 3.5: Δοκίμια που προήλθαν από το ογκοτεμάχιο Π1.

Στον Πίνακα 3.2 δίνονται οι διαστάσεις h (ύψος), d (διάμετρος) και w (πλάτος) και ο προσανατολισμός των δοκιμίων. Για το πέτρωμα Β (μαργαϊκός ασβεστόλιθος), από το ογκοτεμάχιο Β2 εξήχθησαν συνολικά δεκατέσσερα κυλινδρικά δοκίμια και για

τους τρεις προσανατολισμούς, ενώ για το ογκοτεμάχιο B1 εξήχθησαν έξι κυλινδρικά δοκίμια μόνο προς τη διεύθυνση AB (Πίνακας 3.2).

Πίνακας 3.2: Διαστάσεις και γεωμετρία των δοκιμίων.

ΠΕΤΡΩΜΑ	ΔΟΚΙΜΙΟ	h (cm)	d (cm)	w (cm)	ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ
A (Ογκοτεμάχιο Π1)	P1S01AB	9.52	5.20		κυλινδρικό
	P1S02AB	9.89	5.20		κυλινδρικό
	P1S03AB	9.68	5.20		κυλινδρικό
	P1S04AB	9.81	5.20		κυλινδρικό
	P1S05AB	9.61	5.20		κυλινδρικό
	P1S06AB	9.52	5.20		κυλινδρικό
	P1S07AB	8.86	5.20		κυλινδρικό
	P1S08AB	8.63	5.20		κυλινδρικό
	P1S09AB	9.44	5.20		κυλινδρικό
	P1S10AB	9.47	5.20		κυλινδρικό
	P1S11AB	9.48	5.20		κυλινδρικό
A (Ογκοτεμάχιο Π2)	P2S01ΓΔ	10.76	5.20		κυλινδρικό
	P2S02ΓΔ	10.66	5.20		κυλινδρικό
	P2S03ΓΔ	4.62	5.20		κυλινδρικό
	P2S04ΓΔ	4.57	5.20		κυλινδρικό
	P2S08EE'	11.83	4.90		κυλινδρικό
	P2S05AB	12.12	5.80	6.16	πρισματικό
	P2S06AB	12.12	5.80	4.95	πρισματικό
	P2S07AB	11.80	4.90	5.20	πρισματικό
B (Ογκοτεμάχιο B1)	B1S01AB	12.50	5.20		κυλινδρικό
	B1S02AB	11.35	5.20		κυλινδρικό
	B1S03AB	13.15	5.20		κυλινδρικό
	B1S04AB	12.48	5.20		κυλινδρικό
	B1S05AB	13.23	5.20		κυλινδρικό
	B1S06AB	10.23	5.20		κυλινδρικό
B (Ογκοτεμάχιο B2)	B2S01AB	10.50	5.13		κυλινδρικό
	B2S02AB	12.22	5.10		κυλινδρικό
	B2S03AB	11.66	5.15		κυλινδρικό
	B2S04AB	11.30	5.12		κυλινδρικό
	B2S05AB	11.23	5.15		κυλινδρικό

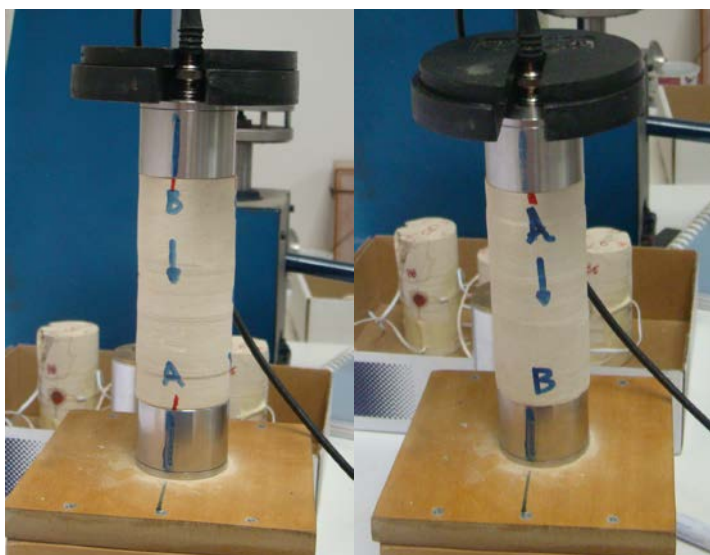
B2S06AB	8.30	5.15	κυλινδρικό
B2S07AB	11.42	5.15	κυλινδρικό
B2S08AB	10.20	5.17	κυλινδρικό
B2S10ΓΔ	8.00	5.06	κυλινδρικό
B2S11ΓΔ	9.82	5.10	κυλινδρικό
B2S12ΓΔ	2.23	5.08	κυλινδρικό
B2S13ΓΔ	2.25	5.12	κυλινδρικό
B2S14ΓΔ	2.75	5.14	κυλινδρικό
B2S09EE'	10.10	5.17	κυλινδρικό

Ο χρόνος διαδρομής των διαμήκων κυμάτων μετρήθηκε για κάθε δείγμα υπό φυσικές συνθήκες και υπό συνθήκες κορεσμού σχετικά με την ύπαρξη ή μη λιπαντικού μέσου ανάμεσα στους πρεσοστάτες και τις επιφάνειες των δοκιμίων. Τα δοκίμια για να κορεστούν παρέμειναν μέσα σε νερό για τέσσερις μέρες. Η επαφή μεταξύ των πρεσοστατών και των επιφανειών του κάθε δοκιμίου ενισχύθηκε με την επιβολή βάρους 1.5 kg πάνω από τον πομπό (Εικόνα 3.6).

Οι μετρήσεις για κάθε δοκίμιο πραγματοποιήθηκαν τέσσερις φορές με περιστροφή των πρεσοστατών 90° γύρω από τον άξονα συμμετρίας του δοκιμίου. Επιπλέον, οι μετρήσεις επαναλήφθηκαν με αντιστροφή της διεύθυνσης των P-waves κατόπιν αντιστροφής των δοκιμίων ανάμεσα στους πρεσοστάτες (Εικόνα 3.7).



Εικόνα 3.6: Μετρήσεις σε δοκίμιο του πετρώματος B.



Εικόνα 3.7: Μετρήσεις UPV σε δοκίμιο του πετρώματος Β.

Έπειτα, υπολογίστηκε για κάθε δοκίμιο ο μέσος όρος της ταχύτητας των διαμήκων κυμάτων. Επιπλέον, μετρήθηκαν στο εργαστήριο η φαινόμενη πυκνότητα και το ολικό πορώδες σύμφωνα με το DIN EN 993-1 (Feb.95) για ορισμένα από τα δοκίμια. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.3, από τα οποία προκύπτει ότι το ογκοτεμάχιο Π2 του πετρώματος Α, δηλαδή του παρόλιθου, έχει υψηλότερο πορώδες από το ογκοτεμάχιο Β2, του πετρώματος Β, δηλαδή του μαργαϊκού ασβεστόλιθου των Βρυσών, όμως και τα δύο αυτά ογκοτεμάχια παρουσιάζουν παρόμοια πυκνότητα, η οποία είναι περίπου 1.8 g/cm^3 .

Πίνακας 3.3: Πυκνότητα και πορώδες ορισμένων δοκιμίων.

ΠΕΤΡΩΜΑ	ΔΟΚΙΜΙΟ	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ $\rho \text{ (g/cm}^3\text{)}$	ΠΟΡΩΔΕΣ πα %
Α (Ογκοτεμάχιο Π2)	P2S01ΓΔ	1.85	
	P2S02ΓΔ	1.82	
	P2S03ΓΔ	1.75	64
	P2S04ΓΔ	1.71	86
	P2S08ΕΕ'	1.82	
	P2S05ΑΒ	2.08	
	P2S06ΑΒ	1.65	
	P2S07ΑΒ	1.98	
M.O.		1.83	75

	B2S01AB	1.88	
	B2S02AB	1.86	
	B2S03AB	1.86	
	B2S04AB	1.87	
	B2S05AB	1.84	
	B2S06AB	1.84	
B	B2S07AB	1.84	
(Ογκοτεμάχιο B2)	B2S08AB	1.84	
	B2S09EE'	1.88	
	B2S10ΓΔ	1.75	
	B2S11ΓΔ	1.73	
	B2S12ΓΔ	1.70	
	B2S13ΓΔ	1.74	26
	B2S14ΓΔ	1.72	25
M.O.		1.81	26

3.2.3 Αποτελέσματα

3.2.3.1 Υπολογισμός ταχυτήτων των διαμήκων κυμάτων για τα ογκοτεμάχια των πετρωμάτων

Σε κάθε σειρά μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν 4 σημεία μέτρησης κατά το μήκος του κάθε ογκοτεμαχίου (πλευρές Α, Β, Γ, Δ) και ένα σημείο μέτρησης κατά το πλάτος του (πλευρά Ε). Επομένως, έγιναν συνολικά 33 μετρήσεις σε κάθε διακριτή διεύθυνση και με την εναλλαγή της θέσης πομπού και δέκτη έγιναν συνολικά 66 μετρήσεις. Για παράδειγμα, θέτοντας τον πομπό στο σημείο Α1, μπορούσαν να ληφθούν 4 άμεσες μετρήσεις ανάμεσα στις πλευρές Α και Β (Α1Β1, Α1Β2, Α1Β3, Α1Β4 - *Εικόνα 3.8α*), 4 ημιάμεσες μετρήσεις μεταξύ των πλευρών Α και Γ ή Α και Δ, κ.λ.π. Η διαδικασία επαναλαμβανόταν αλλάζοντας θέση στον πομπό και στον δέκτη.

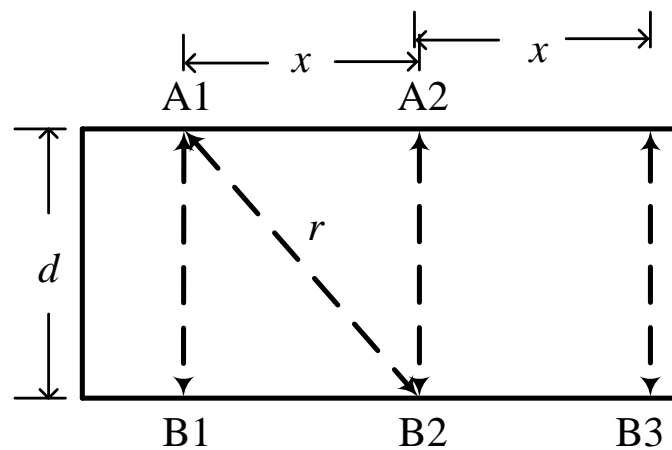
Η ταχύτητα των διαμήκων κυμάτων στα ογκοτεμάχια των πετρωμάτων υπολογίστηκε με δύο διαφορετικούς τρόπους. Η πρώτη μέθοδος χρησιμοποιεί την πραγματική απόσταση r μεταξύ του πομπού και του δέκτη (3.1) (όπως υπολογίστηκε από το Πυθαγόρειο Θεώρημα) για τον υπολογισμό της ταχύτητας u των P-waves όταν ο

μετρούμενος χρόνος διαδρομής των υπερήχων είναι t όπως φαίνεται στην *Εικόνα 3.8α*.

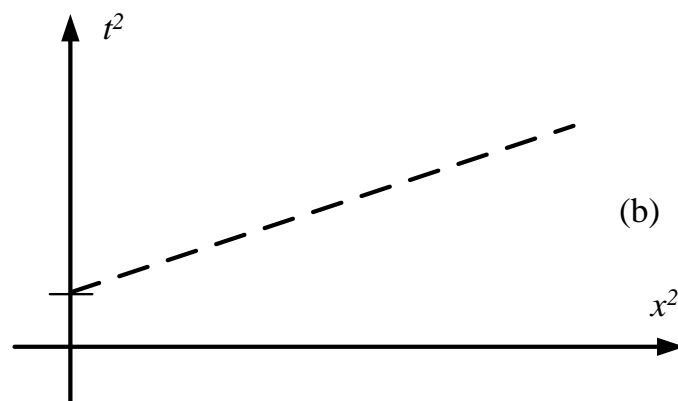
$$r = \sqrt{x^2 + d^2} \text{ και } u = r/t \quad (3.1)$$

Στη δεύτερη μέθοδο, η ταχύτητα υπολογίζεται από τη ρίζα του $1/a$ όπου a , είναι η κλίση της ευθείας γραμμής όταν τα δεδομένα απεικονίζονται σε ένα διάγραμμα $t^2 - x^2$ (*Εικόνα 3.8β*) όπως προκύπτει από την εξίσωση (3.2) (Sheriff and Geldart, 1999):

$$t^2 = \frac{d^2}{u^2} + \frac{x^2}{u^2} \Rightarrow t^2 = \frac{d^2 + x^2}{u^2} \Rightarrow u = \sqrt{\frac{d^2 + x^2}{t^2}} = \sqrt{\frac{1}{a}} \quad (3.2)$$



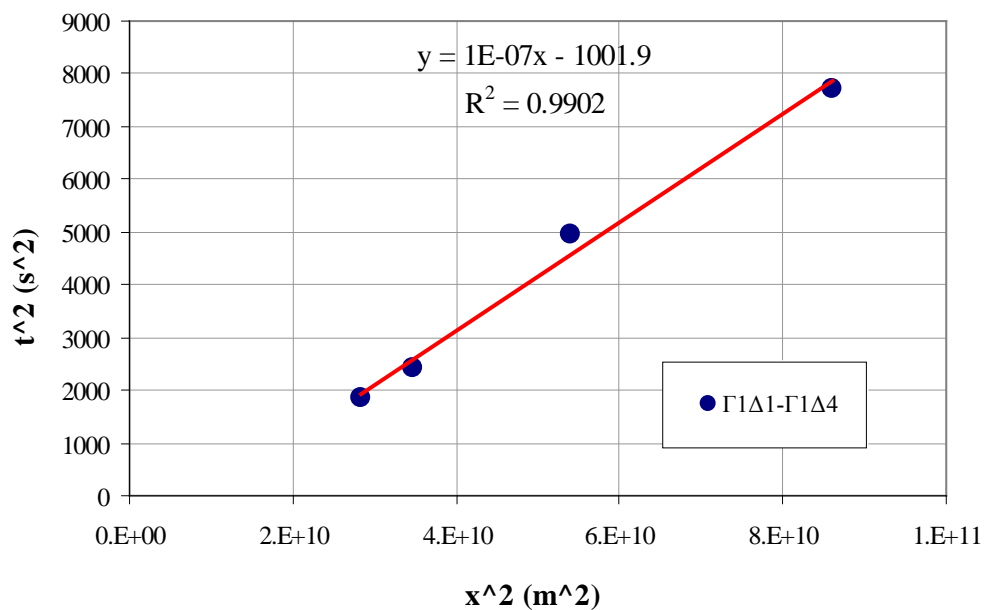
Εικόνα 3.8α: Μετρήσεις ταχυτήτων από τη θέση A1 στη θέση B1, B2, B3



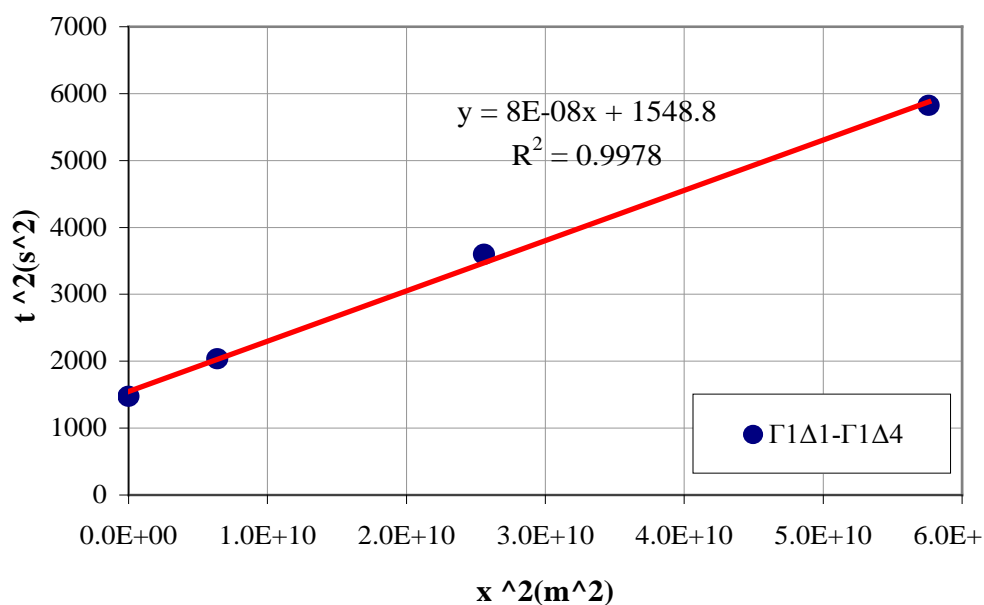
Εικόνα 3.8β: Τυπικό γράφημα τετραγώνου χρόνου διαδρομής και τετραγώνου απόστασης.

Στην *Εικόνα 3.9α, β, γ, δ* παρουσιάζονται δεδομένα χρόνου - απόστασης διαδρομής όπως αυτά προήλθαν ακολουθώντας την άμεση μέτρηση (direct method) τόσο στον πωρόλιθο όσο και στο μαργαϊκό ασβεστόλιθο των Βρυσών, ενώ στην *Εικόνα 3.9ε* όπως αυτά προήλθαν από τις έμμεσες μετρήσεις (indirect method) στον πωρόλιθο. Στις εικόνες αυτές η γραμμική γραμμή τάσης δείχνει μία σταθερή αύξηση του τετραγώνου του χρόνου, ενώ το R-τετράγωνο σε όλες τις περιπτώσεις πλησιάζει τη μονάδα, δηλαδή δείχνει ισχυρή γραμμική σχέση εξάρτησης των μεταβλητών Y και X. Στην *Εικόνα 3.10α, 3.10β* παρουσιάζονται ενδεικτικά αποτελέσματα για άμεσες μετρήσεις μεταξύ των πλευρών Γ και Δ για τις οποίες υπολογίστηκε η ταχύτητα των διαμήκων κυμάτων χρησιμοποιώντας τις δύο μεθόδους, στο πέτρωμα Α (πωρόλιθος) και στο πέτρωμα Β (μαργαϊκός ασβεστόλιθος) χωρίς χρήση λιπαντικού ανάμεσα στο πέτρωμα και τους πρεσσοστάτες. Στις εικόνες αυτές παρατηρείται ότι οι τιμές των ταχυτήτων u_1 και u_2 διαφέρουν μεταξύ τους.

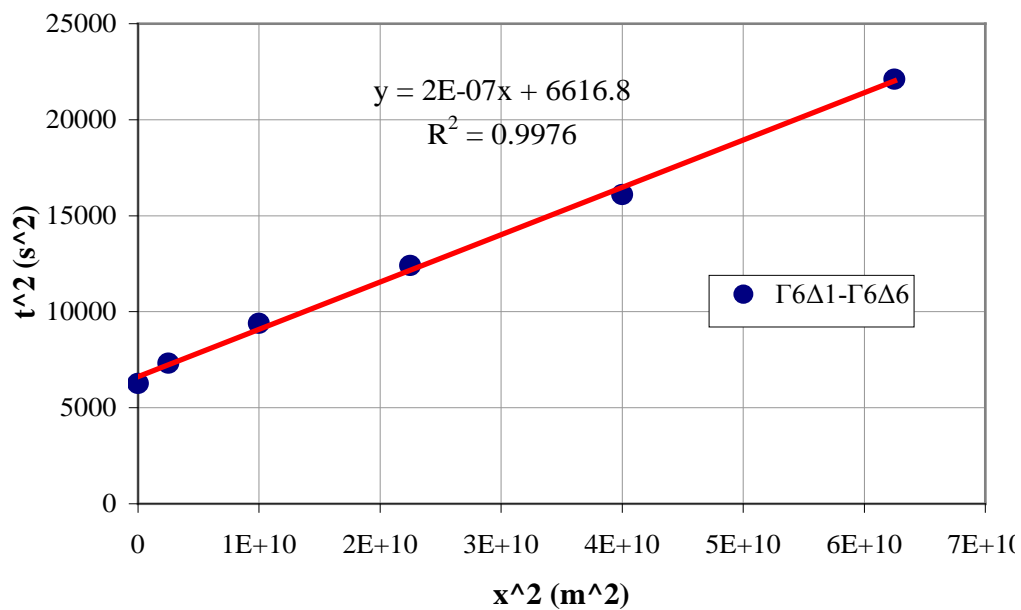
Στην *Εικόνα 3.11α, 3.11β* παρουσιάζονται παρόμοια αποτελέσματα για πρεσσοστάτες ανάμεσα στους οποίους και τις επιφάνειες του πετρώματος χρησιμοποιήθηκε λιπαντικό, όπου παρατηρείται επίσης ότι οι τιμές των ταχυτήτων u_1 και u_2 διαφέρουν μεταξύ τους. Ωστόσο, παρατηρώντας όλες τις *Εικόνες 3.10α,β και 3.11α,β* γίνεται φανερό ότι η καμπύλες των ταχυτήτων u_2 είναι πιο ομαλές στην περίπτωση που χρησιμοποιείται λιπαντικό μέσο ανάμεσα στους πρεσσοστάτες και το πέτρωμα. Στην *Εικόνα 3.12α, β, γ, δ* παρουσιάζονται συνολικά τα αποτελέσματα για άμεσες μετρήσεις μεταξύ όλων των πλευρών, με και χωρίς τη χρήση λιπαντικού, τόσο για το πέτρωμα Α (ογκοτεμάχιο Π2) όσο και για το πέτρωμα Β (ογκοτεμάχιο Β2). Στις *Εικόνες αυτές* οι ταχύτητες u_1 και u_2 είναι διαφορετικές και οι αντίστοιχες καμπύλες ταχύτητας - απόστασης για ταχύτητες u_1 και u_2 δεν συμπίπτουν σε καμία περίπτωση. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις η χρήση λιπαντικού μεταξύ του πετρώματος και των πρεσσοστατών έχει δώσει υψηλότερες τιμές ταχυτήτων των υπερήχων, με μικρότερη τυπική απόκλιση, από ότι στις περιπτώσεις χωρίς λίπανση.



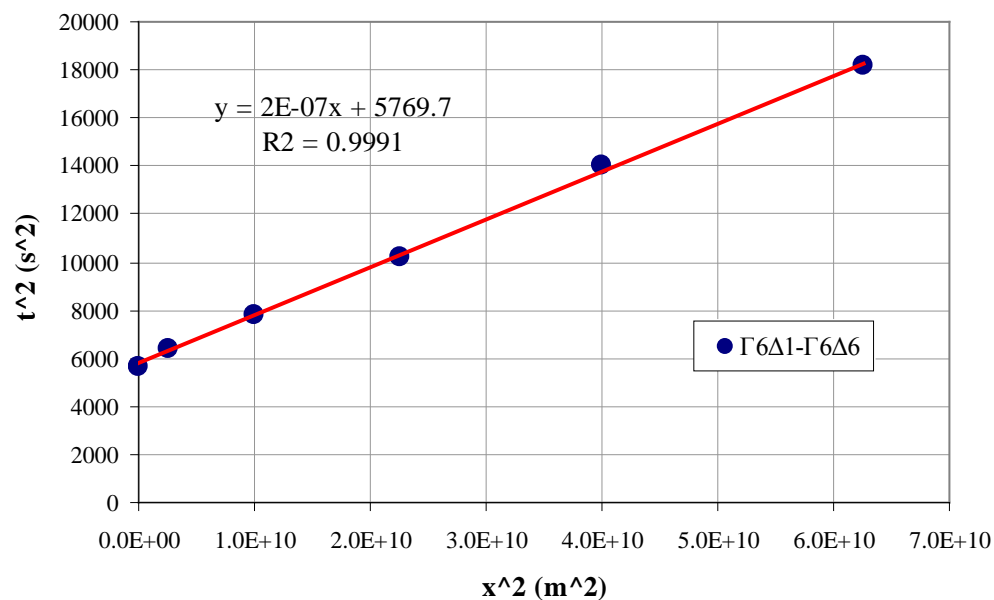
Εικόνα 3.9α: Διάγραμμα τετραγώνων χρόνου - απόστασης διαδρομής για τις μετρήσεις κατά τη διεύθυνση ΓΔ στο ογκοτεμάχιο Π2, του πετρώματος Α, χωρίς λίπανση.



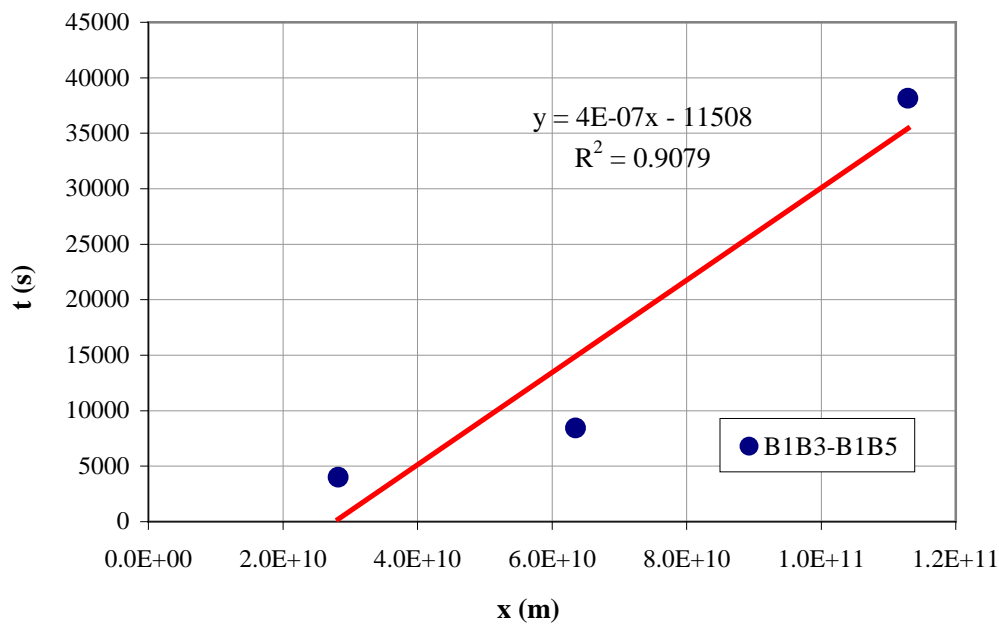
Εικόνα 3.9β: Διάγραμμα τετραγώνων χρόνου - απόστασης διαδρομής για τις μετρήσεις κατά τη διεύθυνση ΓΔ στο ογκοτεμάχιο Π2, του πετρώματος Α, με λίπανση.



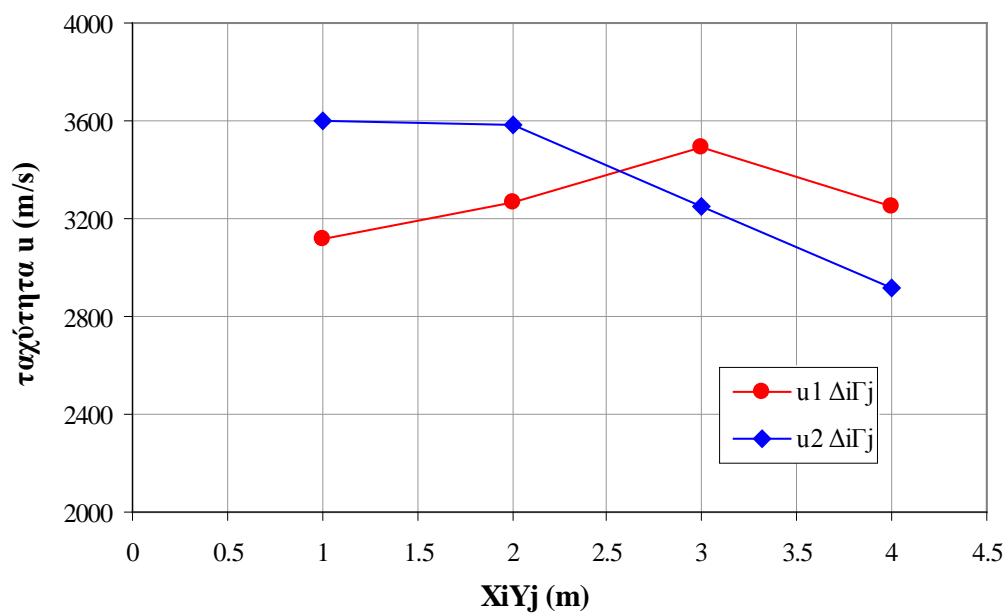
Εικόνα 3.9γ: Διάγραμμα τετραγώνων χρόνου - απόστασης διαδρομής για τις μετρήσεις κατά τη διεύθυνση ΓΔ στο ογκοτεμάχιο Β2, του πετρώματος Β, χωρίς λίπανση.



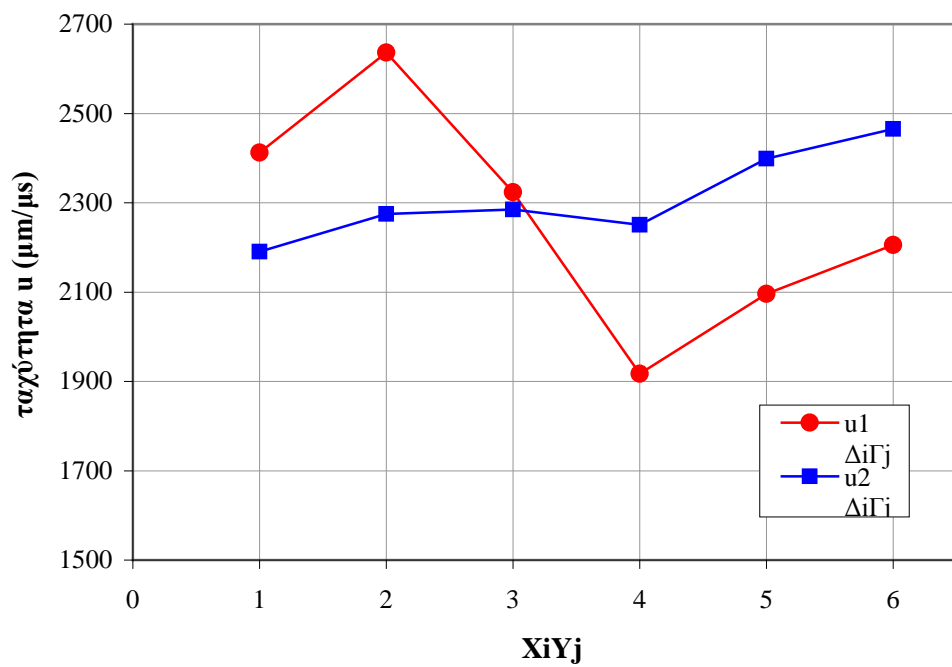
Εικόνα 3.9δ: Διάγραμμα τετραγώνων χρόνου - απόστασης διαδρομής για τις μετρήσεις κατά τη διεύθυνση ΓΔ στο ογκοτεμάχιο Β2, του πετρώματος Β, με λίπανση.



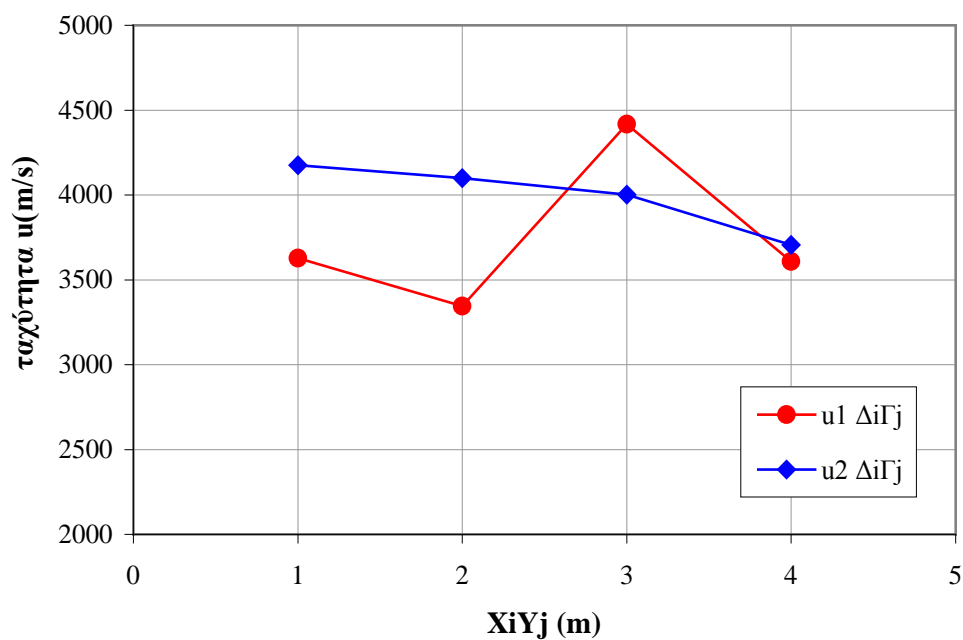
Εικόνα 3.9ε: Διάγραμμα τετραγώνων χρόνου - απόστασης διαδρομής για τις μετρήσεις κατά τη διεύθυνση BiBj στο ογκοτεμάχιο Π1, του πετρώματος A, χωρίς λίπανση.



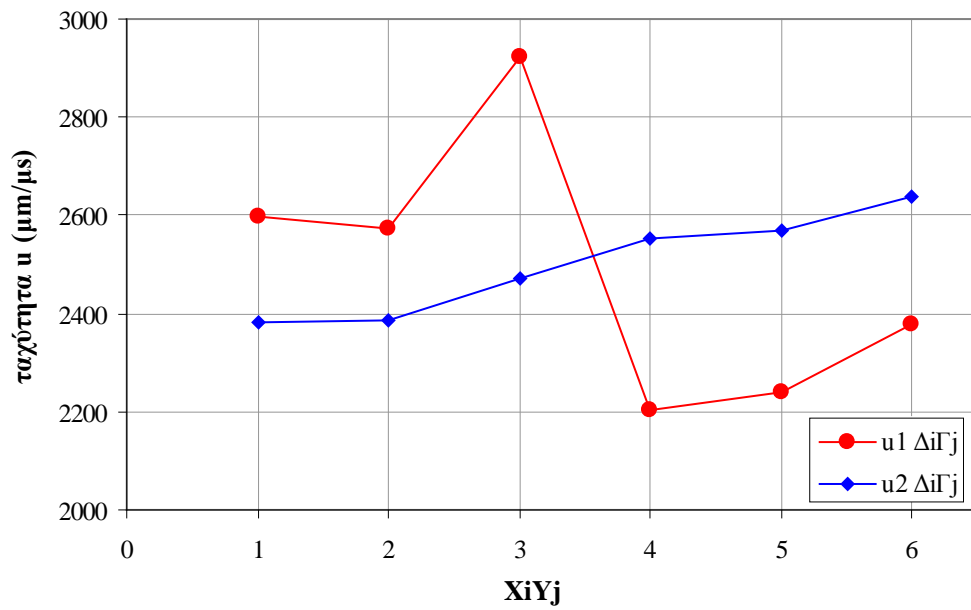
Εικόνα 3.10α: Ταχύτητα των διαμήκων κυμάτων $u_1 = \sqrt{1/a}$ και $u_2 = x/t$ - απόσταση XiYj για το πέτρωμα A (ογκοτεμάχιο Π2) χωρίς λίπανση.



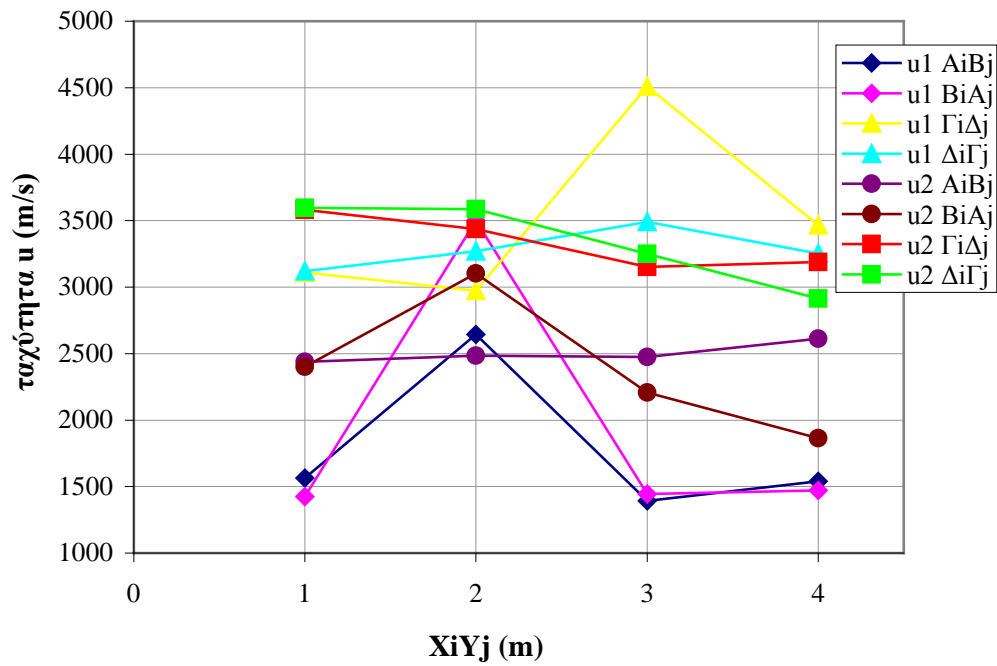
Εικόνα 3.10β: Ταχύτητα των διαμήκων κυμάτων $u_1 = \sqrt{1/a}$ και $u_2 = x/t$ - απόσταση $XiYj$ για το πέτρωμα B (ογκοτεμάχιο B2) χωρίς λίπανση.



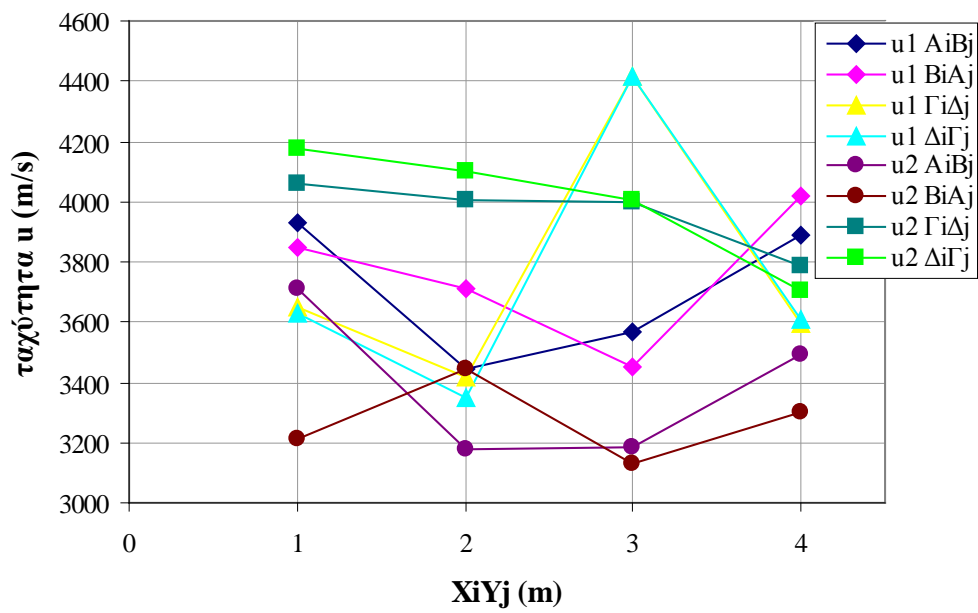
Εικόνα 3.11α: Ταχύτητα των διαμήκων κυμάτων $u_1 = \sqrt{1/a}$ και $u_2 = x/t$ - απόσταση $XiYj$ για το πέτρωμα A (ογκοτεμάχιο Π2) με λίπανση.



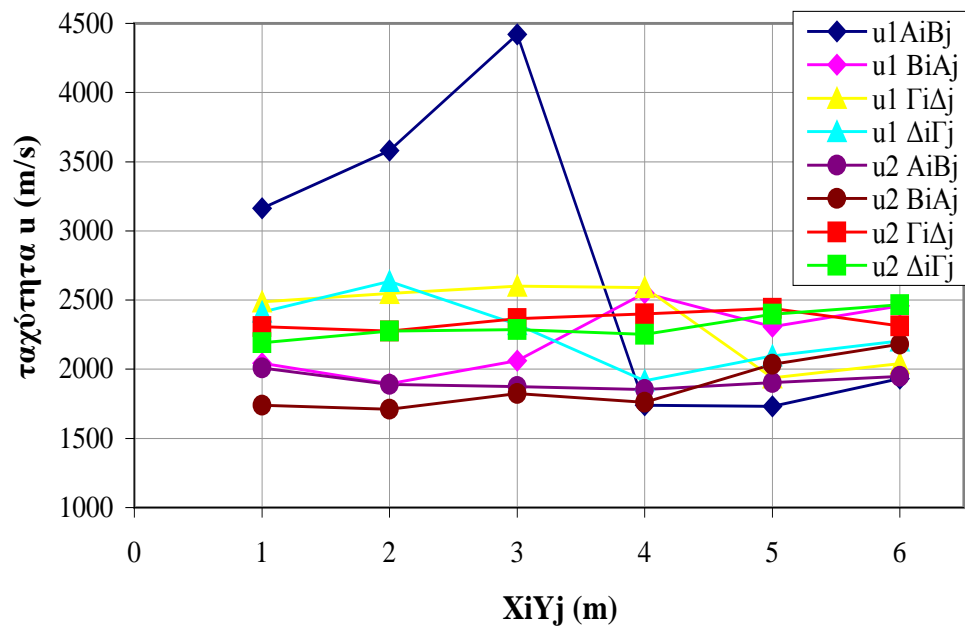
Εικόνα 3.11β: Ταχύτητα των διαμήκων κυμάτων $u_1 = \sqrt{1/a}$ και $u_2 = x/t$ - απόσταση XiYj για το πέτρωμα B (ογκοτεμάχιο B2) με λίπανση



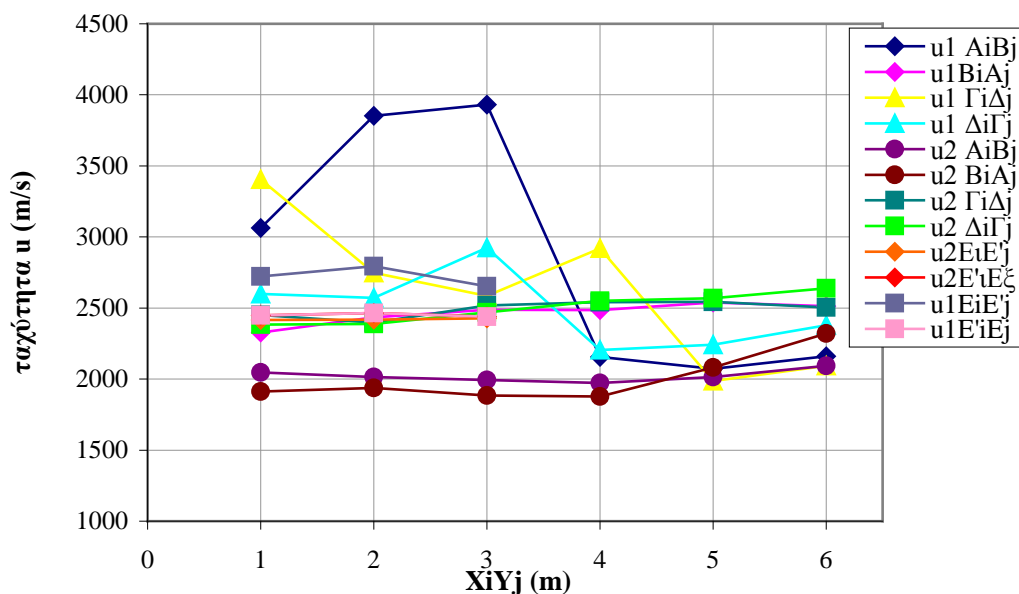
Εικόνα 3.12α: Διάγραμμα ταχυτήτων u_1 και u_2 για όλες τις πλευρές του ογκοτεμάχιου Π2 χωρίς λίπανση



Εικόνα 3.12β: Διάγραμμα ταχυτήτων u_1 και u_2 για όλες τις πλευρές του ογκοτεμάχιου Π2 με λίπανση



Εικόνα 3.12γ: Διάγραμμα ταχυτήτων u_1 και u_2 για όλες τις πλευρές του ογκοτεμάχιου Β2 χωρίς λίπανση



Εικόνα 3.12δ: Διάγραμμα ταχυτήτων u_1 και u_2 για όλες τις πλευρές του ογκοτεμάχιου B2 με λίπανση

Αναλυτικά αποτελέσματα για τον πυρόλιθο (πέτρωμα A) δίνονται στον Πίνακα 3.4 για το ογκοτεμάχιο Π1 και στους Πίνακες 3.5, 3.6, 3.7 για τα ογκοτεμάχια Π2, Π3 και Π5 αντίστοιχα, χωρίς χρήση λιπαντικού μέσου ανάμεσα στους πρεσσοστάτες και τις επιφάνειες του πετρώματος. Στους Πίνακες 3.8, 3.9 δίνονται αναλυτικά αποτελέσματα για τα ογκοτεμάχια Π2, και Π3 αντίστοιχα, με χρήση λιπαντικού μέσου. Παρατηρείται ότι σε όλες τις περιπτώσεις οι υπολογιζόμενες τιμές των ταχυτήτων, για μετρήσεις χρόνου διαδρομής που έγιναν στη διεύθυνση AB είναι παρόμοιες με αυτές που έγιναν στη διεύθυνση BA και το ίδιο ισχύει για τις τιμές των ταχυτήτων κατά τις διευθύνσεις ΓΔ, ΔΓ και Ε'Ε, Ε'Ε. Όμως, οι ταχύτητες u_1 και u_2 διαφέρουν μεταξύ τους στις περιπτώσεις όπου δεν χρησιμοποιείται λιπαντικό μέσο ανάμεσα στους πρεσσοστάτες και τις επιφάνειες του πετρώματος, στην περίπτωση που χρησιμοποιείται λιπαντικό μέσο οι τιμές των ταχυτήτων u_1 και u_2 διαφέρουν λιγότερο μεταξύ τους. Επίσης, παρατηρείται ότι η ταχύτητες είναι διαφορετικές κατά τις διευθύνσεις AB, ΓΔ και AB, ΕΕ', ενώ είναι παρόμοιες για τις διευθύνσεις ΓΔ, ΕΕ'. Αντίστοιχα αποτελέσματα του πετρώματος B (ογκοτεμάχια B1 και B2) δίνονται στους Πίνακες 3.10, 3.11, 3.12 όπου παρατηρείται ότι οι υπολογιζόμενες τιμές των ταχυτήτων, για μετρήσεις χρόνου διαδρομής που έγιναν στη διεύθυνση AB είναι παρόμοιες με αυτές που έγιναν στη διεύθυνση BA και το ίδιο ισχύει για τις τιμές των ταχυτήτων κατά τις διευθύνσεις ΓΔ, ΔΓ και Ε'Ε, Ε'Ε. Όμως, οι ταχύτητες u_1 και u_2

διαφέρουν μεταξύ τους σχεδόν παντού, εκτός από την περίπτωση του ογκοτεμαχίου B1, όπου είναι παρόμοιες. Στον Πίνακα 3.13 δίνονται συγκριτικά οι ταχύτητες των διαμήκων κυμάτων u_1 και u_2 χωρίς χρήση λιπαντικού ανάμεσα στους πρεσσοστάτες για τα δύο ογκοτεμάχια του μαργαϊκού ασβεστόλιθου. Εδώ παρατηρείται ότι οι ταχύτητες των δύο ογκοτεμαχίων είναι παρόμοιες. Η ταχύτητα των διαμήκων κυμάτων υπολογίζεται με χρήση και των δύο μεθόδων, όπως αυτές αναφέρονται παραπάνω λεπτομερώς.

Πίνακας 3.4: Ταχύτητες των διαμήκων κυμάτων (m/s) για το ογκοτεμάχιο ΠΙ του πετρώματος Α χωρίς χρήση λιπαντικού μέσου ανάμεσα στους πρεσσοστάτες (πωρόλιθος Αλφά).

ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ	$u_1 = \sqrt{1/a}$	$u_2 = \frac{x}{t}$
A1B1-A1B4	4616	4801
A2B1-A2B4	4750	4844
A3B1-A3B4	4642	4629
A4B1-A4B4	4241	4430
Μέση τιμή	4562	4676
Τυπική απόκλιση	222	188
B1A1-B1A4	4619	4504
B2A1-B2A4	4870	4773
B3A1-B3A4	4768	4389
B4A1-A4A4	4414	4363
Μέση τιμή	4668	4507
Τυπική απόκλιση	198	187
Γ1Δ1-Γ1Δ4	2367	3143
Γ2Δ1-Γ2Δ4	1591	2886
Γ3Δ1-Γ3Δ4	1895	3718
Γ4Δ1-Γ4Δ4	1794	3121
Μέση τιμή	1912	3217
Τυπική απόκλιση	329	354
Δ1Γ1-Δ1Γ4	2409	2591
Δ2Γ1-Δ2Γ4	2005	3937
Δ3Γ1-Δ3Γ4	1607	3177
Δ4Γ1-Δ4Γ4	1573	3719
Μέση τιμή	1899	3356
Τυπική απόκλιση	393	602

Πίνακας 3.5: Ταχύτητες των διαμήκων κυμάτων (m/s) για το ογκοτεμάχιο Π2 του πετρώματος A χωρίς χρήση λιπαντικού μέσου ανάμεσα στους πρεσοστάτες (πωρόλιθος Αλφά).

ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ	$u_1 = \sqrt{1/a}$	$u_2 = \frac{x}{t}$
A1B1-A1B4	1564	2437
A2B1-A2B4	2645	2485
A3B1-A3B4	1392	2476
A4B1-A4B4	1540	2611
Μέση τιμή	1785	2502
Τυπική απόκλιση	578	76
B1A1-B1A4	1424	2401
B2A1-B2A4	3502	3102
B3A1-B3A4	1444	2207
B4A1-A4A4	1472	1865
Μέση τιμή	1960	2394
Τυπική απόκλιση	522	1028
Γ1Δ1-Γ1Δ4	3111	3581
Γ2Δ1-Γ2Δ4	2973	3437
Γ3Δ1-Γ3Δ4	4510	3153
Γ4Δ1-Γ4Δ4	3467	3188
Μέση τιμή	3515	3340
Τυπική απόκλιση	205	695
Δ1Γ1-Δ1Γ4	3120	3597
Δ2Γ1-Δ2Γ4	3270	3587
Δ3Γ1-Δ3Γ4	3490	3249
Δ4Γ1-Δ4Γ4	3253	2914
Μέση τιμή	3283	3337
Τυπική απόκλιση	153	325
ΕΕ'-Ε'Ε	-	3687
Ε'Ε-ΕΕ'	-	3683
Μέση τιμή	-	3685
Τυπική απόκλιση	-	3

Πίνακας 3.6: Ταχύτητες των διαμήκων κυμάτων (m/s) για το ογκοτεμάχιο Π3 του πετρώματος A χωρίς χρήση λιπαντικού μέσου ανάμεσα στους πρεσοστάτες (πωρόλιθος Αλφά).

ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ	$u_1 = \sqrt{1/a}$	$u_2 = \frac{x}{t}$
A1B1-A1B4	2440	1602
A2B1-A2B4	3061	2011
A3B1-A3B4	-	2267
A4B1-A4B4	2170	1955
Μέση τιμή	2557	1959
Τυπική απόκλιση	457	274
B1A1-B1A4	2442	1522
B2A1-B2A4	1569	1823

B3A1-B3A4	-	1890
B4A1-A4A4	1999	1746
Μέση τιμή	2003	1745
Τυπική απόκλιση	437	160
Γ1Δ1-Γ1Δ4	3541	3176
Γ2Δ1-Γ2Δ4	3463	3241
Γ3Δ1-Γ3Δ4	-	3217
Γ4Δ1-Γ4Δ4	3350	3077
Μέση τιμή	3451	3178
Τυπική απόκλιση	96	72
Δ1Γ1-Δ1Γ4	2911	3357
Δ2Γ1-Δ2Γ4	2967	3215
Δ3Γ1-Δ3Γ4	3160	3138
Δ4Γ1-Δ4Γ4	3923	3059
Μέση τιμή	3240	3192
Τυπική απόκλιση	467	127
ΕΕ'-Ε'Ε	-	3431
Ε'Ε-ΕΕ'	-	3425
Μέση τιμή	-	3428
Τυπική απόκλιση	-	4

Πίνακας 3.7: Ταχύτητες των διαμήκων κυμάτων (m/s) για το ογκοτεμάχιο Π5 του πετρώματος Α χωρίς χρήση λιπαντικού μέσου ανάμεσα στους πρεσοστάτες (πωρόλιθος Αλφά).

ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ	$u_1 = \sqrt{1/a}$	$u_2 = \frac{x}{t}$
A1B1-A1B4	3221	2464
A2B1-A2B4	-	1366
A3B1-A3B4	2930	1606
Μέση τιμή	3076	1812
Τυπική απόκλιση	205	577
B1A1-B1A4	1497	2023
B2A1-B2A4	-	1422
B3A1-B3A4	-	1696
Μέση τιμή	-	1714
Τυπική απόκλιση	-	301
Γ1Δ1-Γ1Δ4	5315	3559
Γ2Δ1-Γ2Δ4	5694	2689
Γ3Δ1-Γ3Δ4	6242	3237
Μέση τιμή	5750	3162
Τυπική απόκλιση	466	440
Δ1Γ1-Δ1Γ4	5508	3477
Δ2Γ1-Δ2Γ4	5664	3247
Δ3Γ1-Δ3Γ4	6250	3385
Μέση τιμή	5807	3370
Τυπική απόκλιση	391	116

ΕΕ'-Ε'Ε	-	3039
Ε'Ε-ΕΕ'	-	3060
Μέση τιμή	-	3050
Τυπική απόκλιση	-	15

Πίνακας 3.8: Ταχύτητες των διαμήκων κυμάτων (m/s) για το ογκοτεμάχιο Π2 του πετρώματος Α με χρήση λιπαντικού μέσου ανάμεσα στους πρεσοστάτες (πωρόλιθος Αλφά).

ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ	$u_1 = \sqrt{1/a}$	$u_2 = \frac{x}{t}$
A1B1-A1B4	3930	3710
A2B1-A2B4	3443	3179
A3B1-A3B4	3568	3186
A4B1-A4B4	3887	3490
Μέση τιμή	3707	3391
Τυπική απόκλιση	239	257
B1A1-B1A4	3847	3209
B2A1-B2A4	3713	3445
B3A1-B3A4	3448	3133
B4A1-A4A4	4020	3300
Μέση τιμή	3757	3272
Τυπική απόκλιση	241	134
Γ1Δ1-Γ1Δ4	3647	4060
Γ2Δ1-Γ2Δ4	3416	4002
Γ3Δ1-Γ3Δ4	4417	3997
Γ4Δ1-Γ4Δ4	3593	3783
Μέση τιμή	3768	3961
Τυπική απόκλιση	444	122
Δ1Γ1-Δ1Γ4	3627	4176
Δ2Γ1-Δ2Γ4	3346	4100
Δ3Γ1-Δ3Γ4	4417	4002
Δ4Γ1-Δ4Γ4	3608	3705
Μέση τιμή	3750	3996
Τυπική απόκλιση	463	207
ΕΕ'	-	3929
Ε'Ε	-	3937
Μέση τιμή	-	3933
Τυπική απόκλιση	-	5

Πίνακας 3.9: Ταχύτητες των διαμήκων κυμάτων (m/s) για το ογκοτεμάχιο Π3 του πετρώματος Α με χρήση λιπαντικού μέσου ανάμεσα στους πρεσσοστάτες (πωρόλιθος Αλφά).

ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ	$u_1 = \sqrt{1/a}$	$u_2 = \frac{x}{t}$
Γ1Δ1-Γ1Δ4	4105	4112
Γ2Δ1-Γ2Δ4	3924	4024
Γ3Δ1-Γ3Δ4	3360	3960
Γ4Δ1-Γ4Δ4	3286	3477
Μέση τιμή	3669	3893
Τυπική απόκλιση	407	284
Δ1Γ1-Δ1Γ4	3309	3910
Δ2Γ1-Δ2Γ4	3299	4031
Δ3Γ1-Δ3Γ4	4405	3847
Δ4Γ1-Δ4Γ4	4277	3921
Μέση τιμή	3671	3927
Τυπική απόκλιση	601	76
ΕΕ'	-	3656
Ε'Ε	-	3646
Μέση τιμή	-	3651
Τυπική απόκλιση	-	7

Πίνακας 3.10: Ταχύτητες των διαμήκων κυμάτων (m/s) για το ογκοτεμάχιο Β1 του πετρώματος Β χωρίς χρήση λιπαντικού μέσου ανάμεσα στους πρεσσοστάτες (μαργαϊκός ασβεστόλιθος Βρυσών).

ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ	$u_1 = \sqrt{1/a}$	$u_2 = \frac{x}{t}$
A1B1-A1B4	2457	2199
A2B1-A2B4	2541	2212
A3B1-A3B4	2072	1946
A4B1-A4B4	2754	2225
A5B1-A5B5	2701	2221
A6B1-A6B6	2466	2217
Μέση τιμή	2498	2170
Τυπική απόκλιση	242	110
B1A1-B1A4	2467	2218
B2A1-B2A4	2514	2206
B3A1-B3A4	2506	2109
B4A1-A4A4	1858	2071
B5A1-B5A5	2367	2205
B6A1-B6A6	2410	2238
Μέση τιμή	2354	2174

Τυπική απόκλιση	249	68
Γ1Δ1-Γ1Δ4	2933	2604
Γ2Δ1-Γ2Δ4	2577	2606
Γ3Δ1-Γ3Δ4	2597	2668
Γ4Δ1-Γ4Δ4	2496	2632
Γ5Δ1-Γ5Δ6	2402	2638
Γ6Δ1Γ6Δ6	2568	2629
Μέση τιμή	2596	2629
Τυπική απόκλιση	180	24
Δ1Γ1-Δ1Γ4	2654	2741
Δ2Γ1-Δ2Γ4	2129	2643
Δ3Γ1-Δ3Γ4	2829	2712
Δ4Γ1-Δ4Γ4	2620	2711
Δ5Γ1-Δ5Γ5	2671	2734
Δ6Γ1-Δ6Γ6	2488	2378
Μέση τιμή	2565	2653
Τυπική απόκλιση	240	139
E1E'1-E1E'3	2527	2631
E2E'1-E2E'3	2810	2662
E3E'1-E3E'3	2919	2628
Μέση τιμή	2723	2640
Τυπική απόκλιση	202	19
E'1E1-E'1E3	2881	2649
E'2E1-E'2E3	2646	2658
E'3E1-E'3E3	2455	2631
Μέση τιμή	2661	2646
Τυπική απόκλιση	213	14

Πίνακας 3.11: Ταχύτητες των διαμήκων κυμάτων (m/s) για το ογκοτεμάχιο B2 του πετρώματος B χωρίς χρήση λιπαντικού μέσου ανάμεσα στους πρεσσοστάτες (μαργαϊκός ασβεστόλιθος Βρυσών).

ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ	$u_1 = \sqrt{1/a}$	$u_2 = \frac{x}{t}$
A1B1-A1B4	3162	2008
A2B1-A2B4	3580	1891
A3B1-A3B4	4420	1876
A4B1-A4B4	1741	1854
A5B1-A5B5	1731	1903
A6B1-A6B6	1933	1948
Μέση τιμή	2761	1913
Τυπική απόκλιση	1129	56
B1A1-B1A4	2043	1738
B2A1-B2A4	1896	1712
B3A1-B3A4	2062	1825
B4A1-A4A4	2549	1760
B5A1-B5A5	2307	2035

B6A1-B6A6	2459	2182
Μέση τιμή	2219	1875
Τυπική απόκλιση	259	190
Γ1Δ1-Γ1Δ4	2487	2308
Γ2Δ1-Γ2Δ4	2548	2275
Γ3Δ1-Γ3Δ4	2599	2365
Γ4Δ1-Γ4Δ4	2589	2400
Γ5Δ1-Γ5Δ6	1937	2438
Γ6Δ1Γ6Δ6	2039	2312
Μέση τιμή	2367	2350
Τυπική απόκλιση	298	62
Δ1Γ1-Δ1Γ4	2412	2191
Δ2Γ1-Δ2Γ4	2636	2275
Δ3Γ1-Δ3Γ4	2324	2285
Δ4Γ1-Δ4Γ4	1918	2251
Δ5Γ1-Δ5Γ5	2096	2399
Δ6Γ1-Δ6Γ6	2205	2465
Μέση τιμή	2265	2311
Τυπική απόκλιση	251	102
E1E'1-E1E'3	2401	2263
E2E'1-E2E'3	2019	2301
E3E'1-E3E'3	2098	2284
Μέση τιμή	2172	2283
Τυπική απόκλιση	201	19
E'1E1-E'1E3	2307	2284
E'2E1-E'2E3	1885	2265
E'3E1-E'3E3	2591	2292
Μέση τιμή	2261	2280
Τυπική απόκλιση	355	14

Πίνακας 3.12: Ταχύτητες των διαμήκων κυμάτων (m/s) για το ογκοτεμάχιο B2 του πετρώματος B με χρήση λιπαντικού μέσου ανάμεσα στους πρεσσοστάτες (μαργαϊκός ασβεστόλιθος Βρυσών).

ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ	$u_1 = \sqrt{1/a}$	$u_2 = \frac{x}{t}$
A2B1-A2B4	3852	2014
A3B1-A3B4	3932	1993
A4B1-A4B4	2157	1973
A5B1-A5B5	2072	2015
A6B1-A6B6	2160	2093
Μέση τιμή	2873	2022
Τυπική απόκλιση	869	42
B1A1-B1A4	2328	1912
B2A1-B2A4	2435	1938
B3A1-B3A4	2488	1883
B4A1-A4A4	2486	1877
B5A1-B5A5	2539	2082

B6A1-B6A6	2513	2321
Μέση τιμή	2465	2002
Τυπική απόκλιση	76	173
Γ1Δ1-Γ1Δ4	3405	2451
Γ2Δ1-Γ2Δ4	2747	2398
Γ3Δ1-Γ3Δ4	2586	2518
Γ4Δ1-Γ4Δ4	2919	2540
Γ5Δ1-Γ5Δ6	1987	2543
Γ6Δ1Γ6Δ6	2092	2504
Μέση τιμή	2623	2492
Τυπική απόκλιση	529	57
Δ1Γ1-Δ1Γ4	2599	2383
Δ2Γ1-Δ2Γ4	2572	2387
Δ3Γ1-Δ3Γ4	2923	2470
Δ4Γ1-Δ4Γ4	2204	2551
Δ5Γ1-Δ5Γ5	2241	2569
Δ6Γ1-Δ6Γ6	2378	2639
Μέση τιμή	2486	2500
Τυπική απόκλιση	269	104
E1E'1-E1E'3	2723	2416
E2E'1-E2E'3	2793	2418
E3E'1-E3E'3	2652	2428
Μέση τιμή	2723	2420
Τυπική απόκλιση	70	6
E'1E1-E'1E3	2420	2448
E'2E1-E'2E3	2405	2464
E'3E1-E'3E3	2825	2439
Μέση τιμή	2550	2450
Τυπική απόκλιση	238	13

Πίνακας 3.13: Συγκριτικές ταχύτητες των διαμήκων κυμάτων (m/s) για τα ογκοτεμάχια B1 και B2 του πετρώματος B χωρίς χρήση λιπαντικού μέσου ανάμεσα στους πρεσσοστάτες (μαργαϊκός ασβεστόλιθος Βρυσών).

ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ	$u_1 = \sqrt{1/a}$		$u_2 = \frac{x}{t}$	
	B1	B2	B1	B2
AB	2426	2490	2172	1894
ΓΔ	2587	2316	2641	2331
ΕΕ'	2723	2217	2643	2282

Από τα παραπάνω γραφήματα και τους πίνακες που αφορούν τον υπολογισμό των ταχυτήτων των υπερήχων σε ογκοτεμάχια ασβεστολιθικού υλικού, γίνεται φανερό ότι η χρήση λιπαντικού μεταξύ των επιφανειών του πετρώματος και των πρεσσοστατών

αυξάνει τις τιμές των ταχυτήτων των υπερήχων. Επίσης, παρατηρείται ότι για τον πωρόλιθο από τον Αλφά, το ογκοτεμάχιο Π1 παρουσιάζει διαφορετικές τιμές από τα ογκοτεμάχια Π2, Π3 και Π5, τα οποία προήλθαν από το ίδιο αρχικό ογκοτεμάχιο. Αντίθετα τα ογκοτεμάχια Β1 και Β2 του μαργαϊκού ασβεστολίθου των Βρυσών παρουσιάζουν παρόμοιες τιμές ταχυτήτων των υπερήχων. Προκύπτει επομένως το συμπέρασμα ότι τα ογκοτεμάχια από το λατομείο του Αλφά θα πρέπει να εξετάζονται ξεχωριστά το καθένα και να χαρακτηρίζονται ξεχωριστά και όχι σαν ένα ενιαίο πέτρωμα, αντίθετα με το μαργαϊκό ασβεστολίθο των Βρυσών που μπορεί να εξετάζεται σαν ένα πέτρωμα όποιο ογκοτεμάχιο του και αν εξετάζεται. Επίσης, παρατηρήθηκε ότι σε όλα τα ογκοτεμάχια του πωρόλιθου οι ταχύτητες των δύο από τις τρεις εξεταζόμενες διευθύνσεις είναι παρόμοιες, ενώ στα ογκοτεμάχια του μαργαϊκού ασβεστολίθου των Βρυσών οι ταχύτητες είναι παρόμοιες και προς τις τρεις διευθύνσεις.

3.2.3.2 Υπολογισμός ταχυτήτων των διαμήκων κυμάτων για τα κυλινδρικά δοκίμια

Παρόμοιες μετρήσεις λήφθηκαν για τα δοκίμια που προήλθαν από τα εξεταζόμενα ογκοτεμάχια. Στην *Εικόνα 3.13* παρουσιάζονται τα δοκίμια 5 και 6 που προήλθαν από το ογκοτεμάχιο Π1 του πωρόλιθου.



Εικόνα 3.13: Δοκίμια που προήλθαν από ογκοτεμάχιο πωρόλιθου

Στον *Πίνακα 3.14* παρουσιάζονται οι ταχύτητες των διαμήκων κυμάτων για τα δοκίμια που προήλθαν από το ογκοτεμάχιο Π1 κατά τη διεύθυνση ΑΒ. Αυτά εξετάστηκαν σε διαφορετικές συνθήκες σχετικά με την ύπαρξη ή μη λιπαντικού

μέσου ανάμεσα στους πρεσσοστάτες και τις επιφάνειες του πετρώματος καθώς και με το ποσοστό υγρασίας. Παρόμοια αποτελέσματα παρουσιάζονται και στον Πίνακα 3.15 για δοκίμια που προήλθαν από το ογκοτεμάχιο Π2 κατά τη διεύθυνση ΑΒ, ΓΔ και ΕΕ'. Παρατηρώντας τους Πίνακες 3.14, 3.15 γίνεται φανερό ότι στην περίπτωση που χρησιμοποιείται λιπαντικό μέσο οι ταχύτητες είναι πάντα υψηλότερες. Επίσης γίνεται φανερό ότι στην περίπτωση κορεσμού των δοκιμίων οι ταχύτητες είναι μικρότερες σε σχέση με αυτές που υπολογίστηκαν σε φυσικές συνθήκες υγρασίας των δοκιμίων, στην περίπτωση που χρησιμοποιείται λιπαντικό μέσο. Για τα δοκίμια που προήλθαν από το ογκοτεμάχιο Π2 όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.15 οι ταχύτητες των δοκιμίων που προήλθαν από τη διεύθυνση ΑΒ του αρχικού ογκοτεμαχίου είναι διαφορετικές από τις ταχύτητες των δοκιμίων που προήλθαν από τις διευθύνσεις ΓΔ και ΕΕ', οι ταχύτητες των οποίων μεταξύ τους είναι παρόμοιες. Ομοίως, στους Πίνακα 3.16 και Πίνακα 3.17 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τα κυλινδρικά δοκίμια που προήλθαν από το ογκοτεμάχιο Β1 και Β2 αντίστοιχα. Από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται σ' αυτούς τους πίνακες γίνεται φανερό ότι και στις δύο περιπτώσεις οι ταχύτητες των υπερήχων κυμάτων είναι υψηλότερες στην περίπτωση που χρησιμοποιείται λιπαντικό ανάμεσα στους πρεσσοστάτες και τις επιφάνειες του πετρώματος και στην περίπτωση που τα δοκίμια βρίσκονται σε φυσικές συνθήκες υγρασίας.

Πίνακας 3.14: Ταχύτητες των διαμήκων κυμάτων P (m/s) για κυλινδρικά δοκίμια από το πέτρωμα Α (ογκοτεμάχιο Π1).

ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΔΟΚΙΜΙΟ	Φυσικές συνθήκες υγρασίας		Συνθήκες κορεσμού	
	πρεσσοστάτες χωρίς λίπανση	πρεσσοστάτες με λίπανση	πρεσσοστάτες χωρίς λίπανση	πρεσσοστάτες με λίπανση
	ΑΒ	ΑΒ	ΑΒ	ΑΒ
	u(m/s)	u (m/s)	u(m/s)	u (m/s)
P1S01AB	4319	5000	4599	4806
P1S02AB	4295	4989	4400	4772
P1S03AB	4418	5133	4448	4955
P1S04AB	4589	5123	4434	4868
P1S05AB	4671	5251	4353	5018
P1S06AB	4580	5164	4569	4924
P1S07AB	4252	5271	4618	4989
P1S08AB	4709	5319	4584	5010

P1S09AB	4580	5079	4388	4783
P1S10AB	4694	5175	4329	4932
P1S11AB	4242	5070	4334	4855
Μέση τιμή	4486	5143	4460	4901
Τυπική απόκλιση	184	107	112	90

Πίνακας 3.15: Μέση τιμή των ταχυτήτων των διαμήκων κυμάτων P (m/s) για κυλινδρικά και πρισματικά δοκίμια από το πέτρωμα Α (ογκοτεμάχιο Π2).

ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ	Φυσικές συνθήκες υγρασίας		Συνθήκες κορεσμού	
	Πρεσσοστάτες χωρίς λίπανση	Πρεσσοστάτες με λίπανση	Πρεσσοστάτες χωρίς λίπανση	Πρεσσοστάτες με λίπανση
	v (m/s)	v (m/s)	v (m/s)	v (m/s)
Μέση τιμή ΑΒ	2804	3696	2841	3326
Τυπική απόκλιση ΑΒ	8	372	40	13
Μέση τιμή ΓΔ	3325	4910	3679	4431
Τυπική απόκλιση ΓΔ	4	648	22	35
Μέση τιμή ΕΕ΄	3743	4959	3935	4246
Τυπική απόκλιση ΕΕ΄	47	655	45	25

Πίνακας 3.16: Ταχύτητες των διαμήκων κυμάτων P (m/s) για κυλινδρικά δοκίμια από το πέτρωμα Β (από ογκοτεμάχιο Β1).

ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΔΟΚΙΜΙΟ	Φυσικές συνθήκες υγρασίας	
	Πρεσσοστάτες χωρίς λίπανση	Πρεσσοστάτες με λίπανση
	ΑΒ v (m/s)	ΑΒ v (m/s)
B1S01AB	2237	2358
B1S02AB	2152	2298
B1S03AB	2331	2489
B1S04AB	2243	2403
B1S05AB	2250	2389
B1S06AB	2410	2580
Μέση τιμή	2271	2420

Πίνακας 3.17: Μέση τιμή ταχυτήτων των διαμήκων κυμάτων P (m/s) για κυλινδρικών δοκίμια που προ από το πέτρωμα B (από ογκοτεμάχιο $B2$).

ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ	Φυσικές συνθήκες υγρασίας		Συνθήκες κορεσμού	
	Πρεσσοστάτες χωρίς λίπανση	Πρεσσοστάτες με λίπανση	Πρεσσοστάτες χωρίς λίπανση	Πρεσσοστάτες με λίπανση
	v (m/s)	v (m/s)	v (m/s)	v (m/s)
Μέση τιμή AB	2098	2525	2025	2128
Τυπική απόκλιση AB	8	2	6	7
Μέση τιμή $\Gamma\Delta$	2026	2783	2042	2263
Τυπική απόκλιση $\Gamma\Delta$	6	3	4	6
Μέση τιμή EE'	2476	3007	2457	2593
Τυπική απόκλιση EE'	5	6	15	1

Από τους Πίνακες 3.14, 3.15, 3.16 και 3.17 προκύπτει ότι σε όλες τις περιπτώσεις η χρήση λιπαντικού μέσου αυξάνει την ταχύτητα των υπερήχων κυμάτων. Επίσης, η μέτρηση των ταχυτήτων των υπερήχων των δοκιμίων σε φυσικές συνθήκες υγρασίας δίνει τις περισσότερες φορές υψηλότερες τιμές από ότι στις περιπτώσεις που τα δοκίμια είναι κορεσμένα, ιδίως όταν ανάμεσα στο πέτρωμα και τους πρεσσοστάτες χρησιμοποιείται λιπαντικό.

3.3 Δοκιμές θλίψης σε ασβεστολιθικά υλικά

Οι μηχανικές ιδιότητες των πετρωμάτων περιγράφουν την αντοχή των υλικών αυτών σε διάφορες μορφές καταπονήσεων. Στις μηχανικές ιδιότητες περιλαμβάνονται και οι διάφορες σταθερές που επηρεάζουν τη μηχανική συμπεριφορά των υλικών, όπως οι σταθερές ελαστικότητας κ.λ.π. (Αγιουτάντης, 2002). Οι δοκιμές που πραγματοποιούνται με καταστροφή του εξεταζόμενου δοκιμίου όταν αυτό υφίσταται καταπόνηση ανήκουν στην κατηγορία των καταστρεπτικών δοκιμών. Οι συνηθέστερες από τις οποίες είναι: η δοκιμή σε θλίψη (μονοαξονική ή τριαξονική), η

δοκιμή σε εφελκυσμό (έμμεσο ή άμεσο), η δοκιμή σε διάτμηση, η δοκιμή σε κάμψη, η δοκιμή σε στρέψη, η δοκιμή σε ερπυσμό.

3.3.1 Πειραματική διαδικασία

Οι καταστρεπτικές δοκιμές αποτελούν τη δεύτερη μεγάλη κατηγορία δοκιμών που χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων των διαφόρων πετρωμάτων. Τα ασβεστολιθικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία (πωρόλιθος από την περιοχή Αλφάς Ρεθύμνου και μαργαϊκός ασβεστόλιθος από την περιοχή Βρυσών Χανίων) αρχικά μελετήθηκαν με χρήση μη καταστρεπτικών δοκιμών και έπειτα υποβλήθηκαν σε καταστρεπτικές δοκιμές ώστε να διερευνηθεί πιθανή συσχέτιση των αποτελεσμάτων τις δύο αυτές διαφορετικές δοκιμές. Ειδικότερα, τα δοκίμια του πωρόλιθου υποβλήθηκαν σε δοκιμές μονοαξονικής θλίψης και έμμεσου εφελκυσμού, ενώ του μαργαϊκού ασβεστόλιθου των Βρυσών μόνο σε δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.

3.3.1.1 Δοκιμές μονοαξονικής θλίψης

Οι δοκιμές μονοαξονικής θλίψης έγιναν σε άκαμπτη μηχανή φόρτισης MTS-815 χρησιμοποιώντας κελί φόρτισης 500 kN, σε συνθήκη ελέγχου μετατόπισης με ρυθμό 0.01 mm/s. Διεξήχθησαν συνολικά δεκατέσσερις δοκιμές μονοαξονικής θλίψης στον πωρόλιθο (δοκίμια που εξήχθησαν από τα ογκοτεμάχια Π2, Π3 και Π5, που προέρχονταν από το ίδιο αρχικό ογκοτεμάχιο) στις τρεις διευθύνσεις και στις οποίες υπολογίστηκε η αντοχή των δοκιμών και το μέτρο ελαστικότητας του υλικού (*Εικόνα 3.14α, β*) των οποίων τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον *Πίνακα 3.18*. Από όπου προκύπτει ότι η μέση τιμή της αντοχής των δοκιμών, καθώς και το μέτρο ελαστικότητας διαφέρει στις τρεις διευθύνσεις.



Εικόνα 3.14α: Δοκίμιο κατά τη διάρκεια της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης



Εικόνα 3.14β: Δοκίμιο μετά τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης

Πίνακας 3.18: Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη και μέτρο ελαστικότητας του πωρόλιθου με βάση τα ογκοτεμάχια Π2, Π3 και Π5

ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ	ΔΟΚΙΜΙΟ	C ₀ [MPa]	E [MPa]
AB	P3S01AB	9.82	12708
	P3S02AB	9.75	10455
	P3S03AB	11.15	12336
	P3S04AB	11.57	9531
	P2S05AB	7.46	2900
	P2S07AB	4.57	3700
	Μέση τιμή	9.05	8605
	Τυπική απόκλιση	2.62	4281
ΓΔ	P2S01ΓΔ	12.95	19700
	P3S02ΓΔ	17.82	23082
	P3S03ΓΔ	18.89	20762
	P3S04ΓΔ	27.8	22801
	P3S08ΓΔ	10.76	23487
	Μέση τιμή	17.64	21966
	Τυπική απόκλιση	6.6	16.46
ΕΕ'	P2S01ΕΕ	12.95	17160
	P3S02ΕΕ'	11.35	9973
	P5S03ΕΕ'	13.62	13218
	Μέση τιμή	12.64	13450
	Τυπική απόκλιση	1.17	3599

Διεξήχθησαν άλλες επτά δοκιμές μονοαξονικής θλίψης στον πωρόλιθο (δοκίμια που εξήχθησαν από το ογκοτεμάχιο Π1) μόνο κατά τη διεύθυνση AB (Πίνακας 3.19), οι οποίες παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές αντοχής σε μονοαξονική θλίψη και μέτρου ελαστικότητας εξαιτίας της ύπαρξης ζώνωσης στο ογκοτεμάχιο. Στον Πίνακα 3.19 παρουσιάζεται η αντοχή των δοκιμών σε μονοαξονική θλίψη Co και το μέτρο ελαστικότητας E.

Πίνακας 3.19: Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη και μέτρο ελαστικότητας του πωρόλιθου με βάση το ογκοτεμάχιο Π1.

ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ	ΔΟΚΙΜΙΟ	Co [MPa]	E [MPa]
AB	P1S02AB	58.30	20297
	P1S03AB	63.48	25801
	P1S04AB	65.01	24291
	P1S05AB	63.84	18871
	P1S07AB	56.95	23978
	P1S08AB	58.24	20950
	P1S11AB	59.95	20160
	Μέση τιμή	61	22050
	Τυπική απόκλιση	3	2607

Από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.18 και 3.19 προκύπτει ότι εξαιτίας της ύπαρξης δύο τουλάχιστον διαφορετικών οριζόντων σε κάθε ογκοτεμάχιο δεν είναι δυνατός ο χαρακτηρισμός κάθε υλικού ξεχωριστά παρά μόνο κάθε ογκοτεμάχιο. Το πάχος του κάθε οριζόντα διαφέρει στα ογκοτεμάχια και ο συνδυασμός των υλικών που υπάρχουν στο καθένα καθορίζει το χαρακτήρα του.

Για να επιβεβαιωθεί η διαφορά στη δυσκαμψία του υλικού των τριών οριζόντων του Νεογενούς Ασβεστόλιθου του λατομείου του Αλφά, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές μονοαξονικής θλίψης σε έξι δοκίμια Αλφόπετρας και σε έξι δοκίμια Σκληρής. Στον Πίνακα 3.20 παρουσιάζονται οι διαστάσεις των δοκιμών, η αντοχή τους σε δοκιμές μονοαξονικής θλίψης και το μέτρο ελαστικότητάς τους. Με βάση τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών η Σκληρή έχει υψηλότερες τιμές αντοχής σε μονοαξονική θλίψη και μέτρου ελαστικότητας του Young, ακολουθεί η Αλφόπετρα, ενώ ο Πωρόλιθος παρουσιάζει τις χαμηλότερες τιμές. Στο ογκοτεμάχιο Π1 υπήρχε μία ζώνη Σκληρής,

όπως προέκυψε από τα αποτελέσματα της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη των δοκιμίων που εξήχθησαν από αυτό το ογκοτεμάχιο σε σύγκριση με τα αποτελέσματα από τη μονοαξονική θλίψη δοκιμίων Σκληρής.

Πίνακας 3.20: Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, μέτρο ελαστικότητας και γεωμετρία δοκιμίων Αλφόπετρας και Σκληρής

ΔΟΚΙΜΙΟ (ΑΛΦΟΠΕΤΡΑ)	Co [MPa]	E [MPa]	h (cm)	d (cm)
A11	11.78	3479	6.9	5.2
A12	3.73	1238	5.9	5.2
A13	5.71	1779	5.5	5.2
A21	8.09	3271	6.2	5.2
A22	19.96	4781	6.1	5.2
A23	8.04	2118	6.2	5.2
Μέση τιμή	9.85	2778		
Τυπική απόκλιση	5.77	1308		
ΔΟΚΙΜΙΟ (ΣΚΛΗΡΗ)	Co [MPa]	E [MPa]	h (cm)	d (cm)
S11	57.08	9111	4.3	5.2
S12	48.16	7514	4.2	5.2
S13	49.68	9746	4.8	5.2
S21	79.23	10657	4.4	5.2
S22	60.39	10627	4.6	5.2
S23	72.21	11932	4.6	5.2
Μέση τιμή	61	9931		
Τυπική απόκλιση	12	1521		

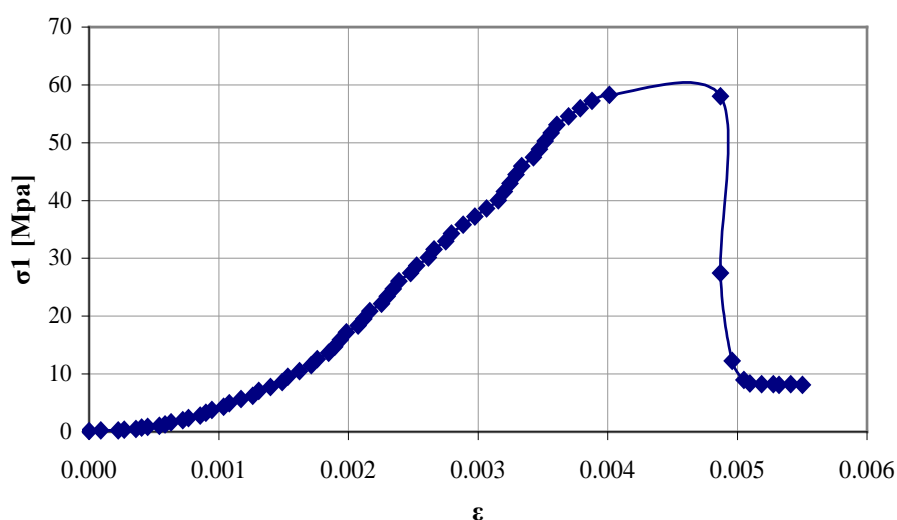
Στη συνέχεια διεξήχθησαν στο μαργαϊκό ασβεστόλιθο των Βρυσών πέντε δοκιμές μονοαξονικής θλίψης στα δοκίμια που εξήχθησαν από το ογκοτεμάχιο B2, τρεις από τις οποίες κατά τη διεύθυνση AB και από μία κατά τη διεύθυνση ΓΔ και ΕΕ' αντιστοίχως (Πίνακας 3.21). Οι τιμές της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη είναι σχεδόν ίσες με 9.3 MPa και 9.2 MPa για τις διευθύνσεις ΓΔ και ΕΕ' αντιστοίχως, ενώ διαφέρουν ελάχιστα κατά τη διεύθυνση AB όπου η τιμή της είναι 11.7 MPa. Το μέτρο ελαστικότητας κατά τις τρεις διευθύνσεις έχει σχετικά παρόμοιες τιμές που κυμαίνονται από 3004 MPa έως 3151 MPa. Οι αντίστοιχοι λόγοι Poisson είναι

παρόμοιοι κατά τη διεύθυνση ΓΔ και ΕΕ΄ με τιμές 0.18 και 0.19 αντιστοίχως, ενώ διαφοροποιείται λίγο κατά τη διεύθυνση ΑΒ όπου είναι ίσος με 0.16.

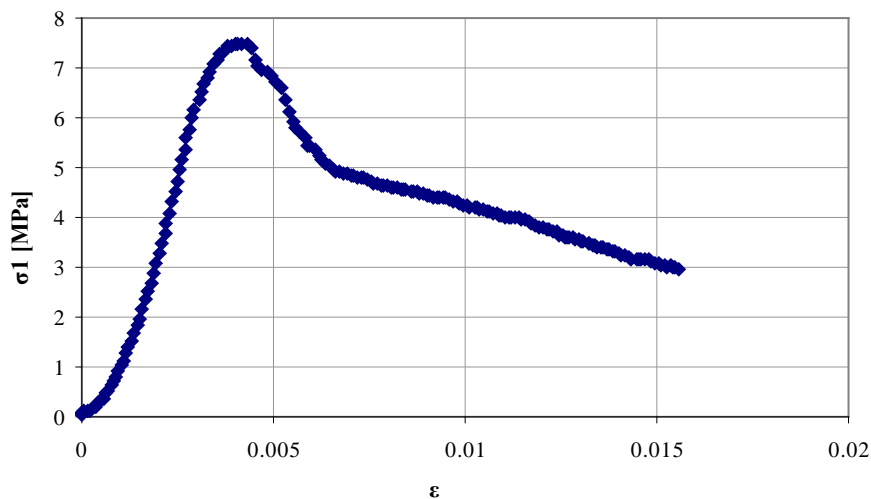
Πίνακας 3.21: Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, μέτρο ελαστικότητας και λόγος Poisson) του μαργαϊκού ασβεστόλιθου των Βρυσών.

ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ	ΔΟΚΙΜΙΟ	Co [MPa]	E [MPa]	ν
ΑΒ	B2S04AB	13.2	3133	0.16
	B2S07AB	10.4	2651	0.17
	B2S05AB	11.4	3449	0.16
	Μέση τιμή	11.7	3078	0.16
	Τυπική απόκλιση	1.4	402	0.01
ΓΔ	ΓΔ10	9.3	3004	0.18
ΕΕ'	ΕΕ'9	9.2	3151	0.19

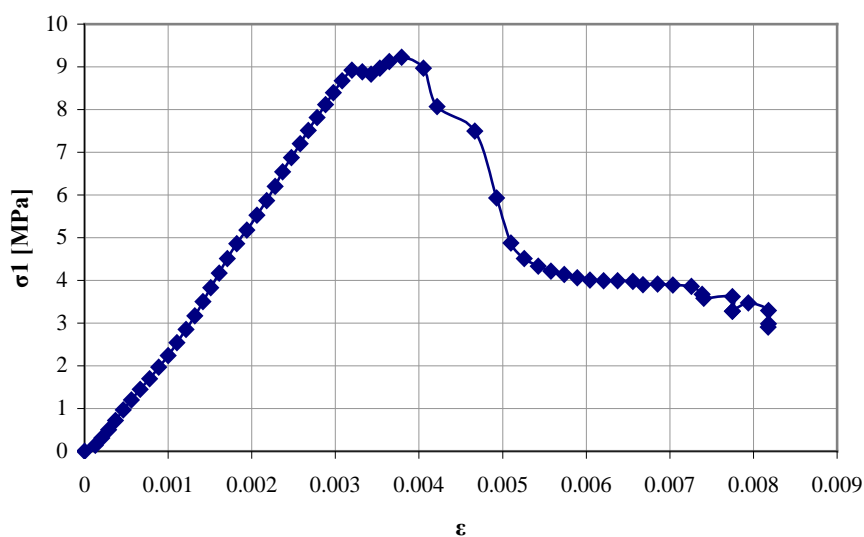
Στις *Εικόνες 3.15α,β και 3.16* δίνονται τυπικές καμπύλες τάσης - ανηγμένης παραμόρφωσης του πωρόλιθου και του μαργαϊκού ασβεστόλιθου αντιστοίχως. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι δεν πραγματοποιήθηκε έλεγχος της επίδρασης του μεγέθους των δοκίμιων στα μετρούμενα αποτελέσματα (size effect).



Εικόνα 3.15β: Καμπύλη αξονικής τάσης - ανηγμένης παραμόρφωσης κυλινδρικού δοκιμίου P1S02AB του πωρόλιθου (ογκοτεμάχιο Π1).



Εικόνα 3.15β: Καμπύλη αξονικής τάσης - ανηγμένης παραμόρφωσης πρισματικού δοκιμίου P2S05AB του πωρόλιθου (ογκοτεμάχιο Π2).



Εικόνα 3.16: Καμπύλη αξονικής τάσης - ανηγμένης παραμόρφωσης του δοκιμίου EE'9 του μαργαϊκού ασβεστόλιθου των Βρυσών.

3.3.1.2 Δοκιμές έμμεσου εφελκυσμού

Οι δοκιμές έμμεσου εφελκυσμού πραγματοποιήθηκαν με ρυθμό φόρτισης 200 N/s. Πραγματοποιήθηκαν πέντε δοκιμές έμμεσου εφελκυσμού κατά τη διεύθυνση AB σε δοκίμια που εξήχθησαν από το ογκοτεμάχιο Π1, από τις οποίες υπολογίστηκε η αντοχή των δοκιμίων σε εφελκυσμό (Εικόνα 3.17α, β). Οι διαστάσεις των δοκιμίων

ήταν: διάμετρος 54 mm, πλάτος 27 mm με λόγο διαμέτρου προς πλάτος 2:1, σύμφωνα με τις προδιαγραφές της Διεθνούς Ένωσης Μηχανικής Πετρωμάτων (IRSM).



Εικόνα 3.17α: Δοκίμιο κατά τη διάρκεια της δοκιμής έμμεσου εφελκυσμού

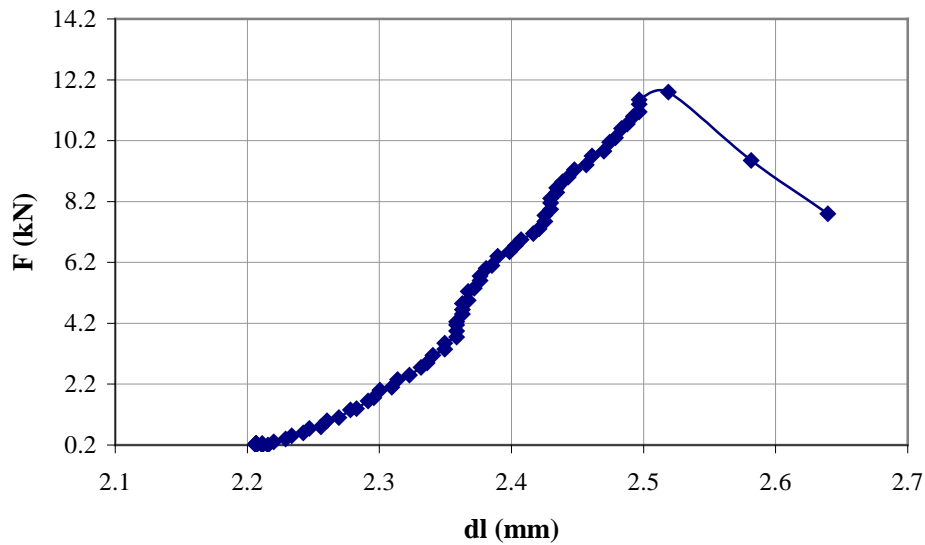


Εικόνα 3.17β: Δοκίμιο μετά τη δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού

Τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.22. Σύμφωνα με αυτά η μέση τιμή της αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό του συγκεκριμένου πωρόλιθου κατά τη διεύθυνση AB είναι 0.622 MPa. Στην Εικόνα 3.18 δίνεται μία τυπική καμπύλη φορτίου - μετατόπισης σε έμμεσο εφελκυσμό, όπου η μέγιστη ασκούμενη δύναμη είναι $F=11.8$ kN με αντίστοιχη μετατόπιση 2.52 mm.

Πίνακας 3.22: Αντοχή έμμεσου εφελκυσμού σε δοκίμια πωρόλιθου που προήλθαν από το ογκοτεμάχιο ΠΙ.

ΔΟΚΙΜΙΟ	To [MPa]
P1S01ABa	0.537
P1S01ABb	0.503
P1S01ABc	0.529
P1S10ABa	0.795
P1S10ABb	0.746
Μέση τιμή	0.622
Τυπική απόκλιση	0.137

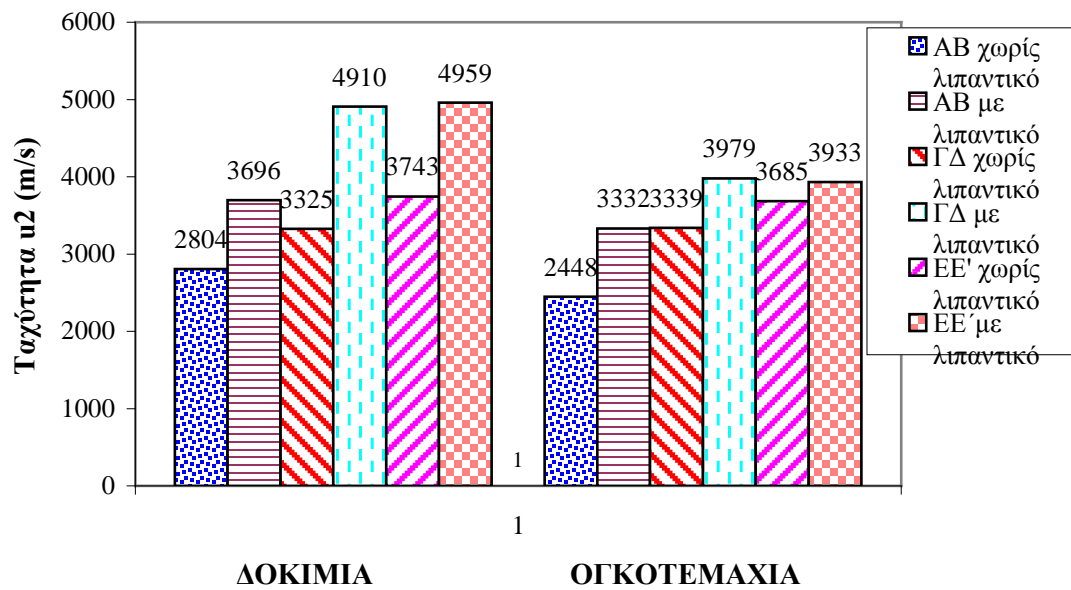


Εικόνα 3.18: Καμπύλη φορτίου - μετατόπισης σε δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού του δοκιμίου P1S01ABb του πωρόλιθου.

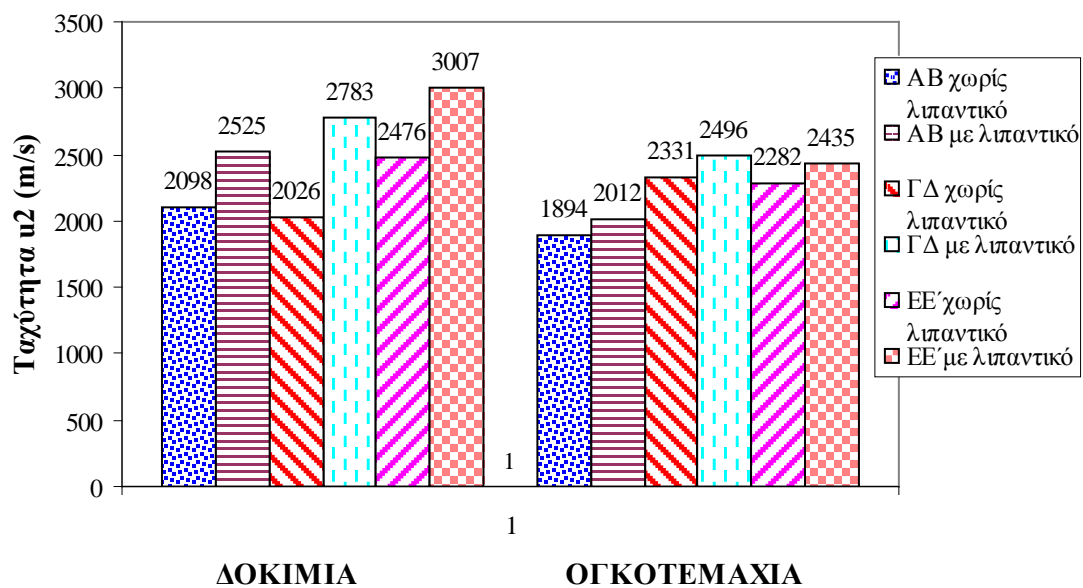
3.3.2 Συμπεράσματα

Ο προσδιορισμός των ταχυτήτων των διαμήκων κυμάτων μπορεί να βοηθήσει στον χαρακτηρισμό τόσο ογκοτεμαχίων όσο και δοκιμίων ενός πετρώματος. Επίσης, μπορεί να προσδιοριστεί ο ανισότροπος χαρακτήρας ενός υλικού συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των μετρήσεων σε διαφορετικές διευθύνσεις. Άλλες δοκιμές (π.χ. καταστροφικές ή μη δοκιμές για τον προσδιορισμό της αντοχής ενός υλικού) μπορεί να χρειαστεί να συνδυαστούν με αυτές τις δοκιμές για έναν πλήρη χαρακτηρισμό του πετρώματος.

Αρχικά, παρατηρήθηκε η επίδραση του λιπαντικού υλικού μεταξύ του πετρώματος και των πρεσσοστατών. Στην Εικόνα 3.19 και στο Εικόνα 3.20 παρουσιάζεται η μέση τιμή της υπολογισθείσας ταχύτητας των διαμήκων κυμάτων, τόσο στην περίπτωση των ογκοτεμαχίων (Π2 και B2)(ταχύτητα u_2), όσο και στην περίπτωση των κυλινδρικών δοκιμίων των δύο υλικών. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η εφαρμογή του προκαλεί αύξηση της υπολογισθείσας ταχύτητας u_2 των διαμήκων κυμάτων και στις δύο περιπτώσεις και για τις τρεις διευθύνσεις. Ανάλογα συμπεράσματα προκύπτουν και για την ταχύτητα u_1 .



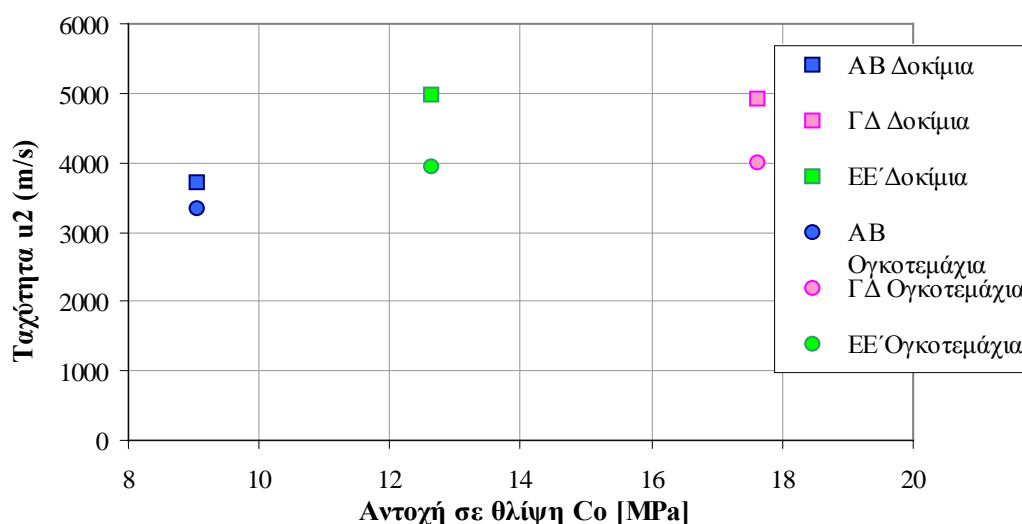
Εικόνα 3.19: Σύγκριση της ταχύτητας u_2 των διαμήκων κυμάτων με και χωρίς την εφαρμογή λιπαντικού υλικού για το ογκοτεμάχιο Π2 και τα δοκίμια που προήλθαν από αυτό.



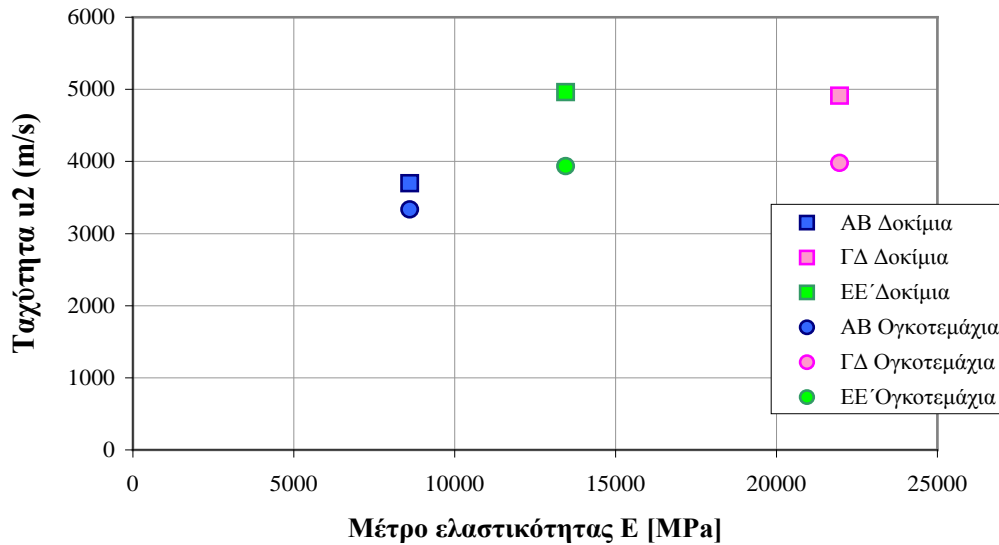
Εικόνα 3.20: Σύγκριση της ταχύτητας u_2 των διαμήκων κυμάτων με και χωρίς την εφαρμογή λιπαντικού υλικού για το ογκοτεμάχιο Β2 και τα δοκίμια που προήλθαν από αυτό.

Επιπλέον, παρατηρήθηκε στα κυλινδρικά δοκίμια και των δύο υλικών αύξηση της ταχύτητας των διαμήκων κυμάτων, όταν οι μετρήσεις των χρόνων διαδρομής των κυμάτων πραγματοποιούνται σε φυσικές συνθήκες υγρασίας από ότι σε συνθήκες κορεσμού και με τη χρήση λιπαντικού μέσου ανάμεσα στους πρεσσοστάτες και το πέτρωμα. Ωστόσο, χωρίς τη χρήση λιπαντικού υλικού τα αποτελέσματα είναι διφορούμενα και είναι ανέφικτο να προκύψουν σαφή συμπεράσματα.

Στη συνέχεια, έγινε προσπάθεια να συσχετισθεί η ταχύτητα των διαμήκων κυμάτων με τις μηχανικές ιδιότητες του πωρόλιθου, όπως είναι η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη και το μέτρο ελαστικότητας. Στην *Εικόνα 3.21*, *Εικόνα 3.22* παρουσιάζεται η μεταβολή της μέσης τιμής της ταχύτητας τόσο στην περίπτωση ογκοτεμαχίου (Π2 και Π3) (ταχύτητα u_2 με χρήση λιπαντικού υλικού ανάμεσα στους πρεσσοστάτες), όσο και στην περίπτωση των κυλινδρικών δοκιμίων συναρτήσει της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη και του μέτρου ελαστικότητας αντίστοιχα, στις τρεις διευθύνσεις φόρτισης.



Εικόνα 3.21: Συσχέτιση της ταχύτητας των διαμήκων κυμάτων με την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη για τις τρεις διευθύνσεις φόρτισης.



Εικόνα 3.22: Συσχέτιση της ταχύτητας των διαμήκων κυμάτων με το μέτρο ελαστικότητας για τις τρεις διευθύνσεις φόρτισης.

Παρατηρήθηκε ότι στις διευθύνσεις ΓΔ και ΕΕ' η ταχύτητα των διαμήκων κυμάτων παραμένει σταθερή και είναι υψηλότερη από ότι στη διεύθυνση ΑΒ, τόσο στην περίπτωση των ογκοτεμαχίων Π2 και Π3, όσο και στην περίπτωση των κυλινδρικών δοκιμίων τους. Το γεγονός αυτό καταδεικνύει τον ανισότροπο χαρακτήρα του πορώλιθου που αντιστοιχεί στα ογκοτεμάχια Π2 και Π3, ο οποίος τελικά μπορεί να χαρακτηριστεί και ως εγκαρσώς ισότροπο υλικό εξαιτίας των παρόμοιων μηχανικών ιδιοτήτων του κατά τις δύο από τις τρεις διευθύνσεις ανισοτροπίας του. Εξαιτίας όμως της ύπαρξης δύο τουλάχιστον διαφορετικών οριζόντων σε κάθε ογκοτεμάχιο πορώλιθου προκύπτει σαν συμπέρασμα ότι δε μπορεί να χαρακτηριστεί κάθε υλικό ξεχωριστά παρά μόνο κάθε ογκοτεμάχιο. Το συμπέρασμα αυτό ενισχύεται από τις διαφορετικές ταχύτητες υπερήχων που προέκυψαν στα ογκοτεμάχια Π1 σε σχέση με τα Π2, Π3, Π5 τα οποία προήλθαν από το ίδιο αρχικό ογκοτεμάχιο, καθώς και από τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις δοκιμές σε μονοαξονική θλίψη των δοκιμίων που προήλθαν από αυτά τα ογκοτεμάχια, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως.

Αναφορικά με το πέτρωμα Β δεν ήταν δυνατή η συσχέτιση της ταχύτητας των διαμήκων κυμάτων με την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη και το μέτρο ελαστικότητας, γεγονός που οφείλεται στην έλλειψη στατιστικά επαρκών δοκιμών θλίψης σε κυλινδρικά δοκίμια κατά τις τρεις διευθύνσεις. Ωστόσο, με βάση τις ταχύτητες u_1 και u_2 των διαμήκων κυμάτων των ογκοτεμαχίων Β1 και Β2 καθώς και

των αντίστοιχων ταχυτήτων των κυλινδρικών τους δοκιμίων, το υλικό μπορεί να χαρακτηριστεί ως αρκετά ισότροπο.

3.4 Χαρακτηριστικά μαρμάρων

3.4.1 Γενικά

Ένα από τα πιο χαρακτηριστικά παραδείγματα μνημείων παγκοσμίως είναι ο Παρθενώνας της Ακρόπολης των Αθηνών, στον οποίο πραγματοποιούνται αναστηλωτικές εργασίες από το 1896 έως και σήμερα. Τα χρησιμοποιούμενα υλικά στις αναστηλώσεις είναι μάρμαρο Διονύσου, σύνδεσμος τιτανίου και τσιμεντοκονίαμα σαν πληρωτικό υλικό.

3.4.2 Πεντελικό μάρμαρο

Ο κύριος λόγος για τον οποίο η Πεντέλη έγινε γνωστή από τους αρχαίους χρόνους, είναι τα μάρμαρά της. Το πεντελικό μάρμαρο, εξορυσσόταν κατά το "Χρυσό Αιώνα" του Περικλή (Αθήνα, 5ος αιώνας π.Χ.), παρέχοντας χιλιάδες κυβικά μέτρα υλικού με τα οποία κτίστηκαν τα περισσότερα αρχιτεκτονικά και γλυπτικά αριστουργήματα της κλασικής περιόδου: από την Ακρόπολη των Αθηνών μέχρι τα αγάλματα και τα μνημεία των κλασσικών ελληνιστικών και ρωμαϊκών χρόνων. Τα κύρια χαρακτηριστικά του ήταν η μοναδική λευκή απόχρωσή του, η ανθεκτικότητά του, η καθαρότητα, η διαύγεια και η διαφάνειά του (http://www.oryktosploutos.net/2011/04/blog-post_15.html). Το ειδικό του βάρος είναι 2.72 g/cm^3 , ο συντελεστής θερμικής διαστολή του είναι $11 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, ενώ το πορώδες του είναι χαμηλό και κυμαίνεται από 0.3 έως 2.1 όταν είναι διαβρωμένο (Σκουλικίδης, 2000). Επίσης, παρουσιάζει σχιστότητα, ιδιότητα που διευκολύνει την εξόρυξη των ογκόλιθων και γίνεται ιδιαίτερα αντιληπτή κατά τη μηχανική επεξεργασία του πετρώματος. Έχει λεπτό υποσακχαροειδή ιστό και μεγάλη συνεκτικότητα, φυσιολογική αντοχή στη θραύση και στιλβώνεται εύκολα. Όταν το Πεντελικό μάρμαρο εκτεθεί στους ατμοσφαιρικούς παράγοντες, δημιουργείται χρυσό επιφανειακό επίχρισμα, που κάνει ιδιαίτερα επιβλητικά τα αγάλματα που κατασκευάζονται από το μάρμαρο αυτό (<http://osme.8m.com/greekmarbleinanc.htm>).

Οι μηχανικές ιδιότητες του Πεντελικού μαρμάρου μελετήθηκαν πρώτη φορά από τον καθηγητή Θεοτοκά το 1976. Πραγματοποίησε στο Εργαστήριο Αντοχής Υλικών του

Ε.Μ.Π. δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης σε τρία πρισματικά δοκίμια διαστάσεων 7*7*7 cm από άμορφο αρχαίο θραύσμα που έδωσαν θλιπτική αντοχή 77.8 MPa. Επίσης, πραγματοποίησε δοκιμές εφελκυστικής αντοχής σε τρία πρισματικά δοκίμια διαστάσεων 2*2*26 cm σε δοκιμή κάμψης τριών σημείων που έδωσαν μέση τιμή εφελκυστικής αντοχής 18.4 MPa (Ζαμπάς, 1994 - Πηγή: Γαννιάρη-Παπαγεωργίου, 2010). Το 1980 μελετήθηκε από τους Koroneo et al., οι μηχανικές ιδιότητες του μαρμάρου της Άνω Πεντέλης αλλά και της Κάτω Πεντέλης σε κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 60 mm και ύψους 150 mm, δίνοντας τιμές για αντοχή σε εφελκυσμό 59.7 MPa και 32.4 MPa αντιστοίχως, ενώ η αντοχή σε κάμψη έδωσε τιμές 21.3 και 16.8 MPa αντιστοίχως. Το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας μετρήθηκε με χρήση συχνοτήτων και υπολογίστηκε ίσο με 57.4 GPa και 55.3 GPa αντιστοίχως.

Στη συνέχεια μελετήθηκαν το 1983 από τον Κ. Ζαμπά, ο οποίος πραγματοποίησε δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης χρησιμοποιώντας σαράντα τρία πρισματικά δοκίμια διαστάσεων 5*5*15 cm, που έδωσαν τιμή θλιπτικής αντοχής 58.5 MPa. Το 1989 στα Εργαστήρια του Εργοταξίου Αποκατάστασης του Παρθενώνα ο Κ. Ζαμπάς πραγματοποίησε δοκιμές κάμψης τριών σημείων χρησιμοποιώντας 68 κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου και ύψους ίσα με $d=3.5$ cm και $h=15$ cm, τα οποία έδωσαν μέση τιμή εφελκυστικής αντοχής 19.4 ± 3 MPa (στρώσεις μαρμάρου κάθετες στη φόρτιση) και 13.1 ± 2.7 MPa (στρώσεις μαρμάρου παράλληλες στη φόρτιση). Για τον προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας E του Πεντελικού μαρμάρου έγιναν στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος του Ε.Μ.Π δοκιμές κάμψης τριών σημείων με δοκούς μεγάλου μεγέθους (πρισματικά δοκίμια 19x16.5x80 cm), που έδωσαν μέση τιμή $E=28$ GPa. Για τον προσδιορισμό του λόγου Poisson ν πραγματοποιήθηκαν το 1984 από τον Θ. Τάσιο δοκιμές σε κυλινδρικά δοκίμια 10*10 cm που έδωσαν $\nu=0.35$ (Ζαμπάς, 1994 - Πηγή: Γαννιάρη-Παπαγεωργίου, 2010).

Σήμερα στην περιοχή των αρχαίων λατομείων και σε υψόμετρο 700 μέτρων διατηρείται σε σχετικά καλή κατάσταση ένα από τα αρχαία μέτωπα εξόρυξης. Η νεότερη εξόρυξη στην Πεντέλη άρχισε το 1836 και συνεχίστηκε μέχρι το 1976 σε διάφορες θέσεις της νότιας πλευράς του Πεντελικού όρους. Από το 1976 η εξόρυξη πεντελικού μαρμάρου συνεχίζεται μόνο στη βόρεια πλευρά της Πεντέλης, στην περιοχή του Διονύσου (<http://osme.8m.com/greekmarbleinanc.htm>).

3.4.3. Μάρμαρο Διονύσου

Το Πεντελικό μάρμαρο είναι το βασικό υλικό από το οποίο είναι οικοδομημένα τα περισσότερα μνημεία της Ακρόπολης. Ωστόσο, εφόσον τα λατομεία της Πεντέλης είναι κλειστά, στις αναστηλωτικές εργασίες χρησιμοποιείται σήμερα σαν υποκατάστατο ή σαν υλικό συμπλήρωσης το μάρμαρο Διονύσου το οποίο λατομείται από το βουνό Διόνυσος στην Αττική, 30 km από την Αθήνα, επειδή παρουσιάζει παρόμοιες ιδιότητες με το Πεντελικό αρχαίο μάρμαρο από το οποίο είναι κτισμένα τα μνημεία (Εικόνα 3.23 και Εικόνα 3.24).



Εικόνα 3.23: Μάρμαρο Διονύσου (<http://www.dionyssomarble.gr>)



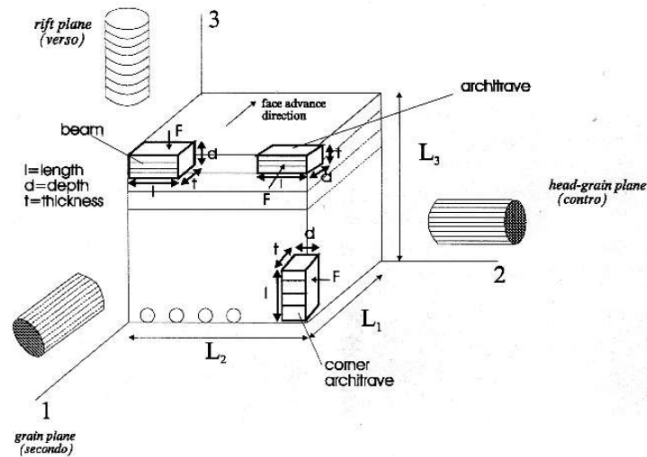
Εικόνα 3.24: Μάρμαρο Διονύσου που χρησιμοποιήθηκε στην αναστήλωση του Παρθενώνα (<http://www.dionyssomarble.gr>)

Το μάρμαρο του Διονύσου είναι ασβεστιτικό μάρμαρο και αποτελείται από 98% ασβεστίτη, 0.5% μοσχοβίτη, 0.3% σερίκητη, 0.2% χαλαζία και 0.1% χλωρίτη. Η φαινόμενη πυκνότητα του είναι 2717 kg/m^3 . Ο συντελεστής θερμικής διαστολής είναι $9 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ανάμεσα στους 15 και 100°C . Το πορώδες του είναι πολύ μικρό και κυμαίνεται από 0.3% στην αρχική του κατάσταση έως 0.7% μετά την επίδραση

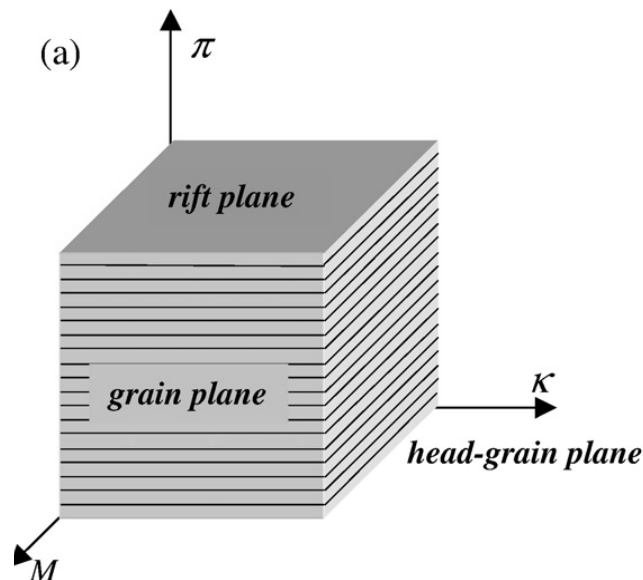
διαφόρων φυσικών ή τεχνητών διαβρωτικών παραγόντων. Το μέγεθος των κόκκων του κυμαίνεται γύρω στα $0.43 \cdot 10^{-3}$ m και οι κρύσταλλοι έχουν πολυγωνικό σχήμα, είναι σχεδόν ομοιόμορφοι όσον αφορά τις διαστάσεις τους, οι οποίες κυμαίνονται από $900 \mu\text{m} * 650 \mu\text{m}$ και $950 \mu\text{m} * 874 \mu\text{m}$ (Tassogiannopoulos, 1986 - Πηγή: Kourkoulis et al., 1999).

Γενικά έχει άσπρο χρώμα με χαρακτηριστική ταινία ανοικτού πράσινου χρώματος να διασχίζει τη μάζα, ενώ παρατηρούνται διάσπαρτα στη μάζα ημίλευκα συσσωματώματα (<http://www.dionyssomarble.com>). Στην αναστήλωση χρησιμοποιούνται λευκά μάρμαρα με λίγες σταχτόχρωμες φλέβες κατά τη διεύθυνση της σχιστότητας του υλικού. Τοπικά εντοπίζονται ασημόχρωμες περιοχές λόγω της παρουσίας μικρών ποσοτήτων μοσχοβίτη και χλωρίτη (Tassogiannopoulos, 1986 - Πηγή: Βαρδουλάκης κ.ά., 2002). Επίσης, παρουσιάζουν σακχαροειδή μικροδομή και υποπολυγωνική υφή (Cardani and Meda, 1999).

Αναφορικά με τη μηχανική αντοχή του μαρμάρου του Διονύσου, έχει αναφερθεί ότι για την αντοχή σε εφελκυσμό οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 2.4 MPa και 19.5 MPa, ενώ οι αντίστοιχες πειραματικές τιμές του μέτρου ελαστικότητας του Young κυμαίνονται μεταξύ 23 GPa και 90 GPa. Αυτή η διακύμανση μπορεί να αποδοθεί στις διαφορετικές συνθήκες κάτω από τις οποίες πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές καθώς και στην ανισοτροπία του μαρμάρου του Διονύσου (Ζαμπάς, 1994 - Πηγή: Kourkoulis et al., 1999). Υπάρχουν τρεις διευθύνσεις ανισοτροπίας, μία κάθετη στη στρώση (rift plane ή verso ή Π-plane) και δύο εντός του επιπέδου των στρώσεων (grain plane ή secondo ή M-plane και heand-grain plane ή contro ή κ-plane) όπως φαίνεται στις *Εικόνες 3.25 και 3.26* στην οποία διευκρινίζεται και η σχετική ορολογία (Βαρδουλάκης κ.ά., 2002).



Εικόνα 3.25: Η ανισοτροπία του Διονυσιακού μαρμάρου και η σχετική διεθνής ορολογία για τα δοκίμια (Franzini, 1998 - Πηγή: Kourkoulis et al., 1999)



Εικόνα 3.26: Σχηματική αναπαράσταση των διευθύνσεων ανισοτροπίας του μάρμαρου του Διονύσου (Βαρδουλάκης κ.ά., 2002)

Οι Vardoulakis and Kourkoulis (1997) έπειτα από μια σειρά δοκιμών άμεσου εφελκυσμού και μονοαξονικής θλίψης σε κυλινδρικά δοκίμια μαρμάρου Διονύσου, συμπέραναν ότι οι μηχανικές ιδιότητες κατά μήκος των δύο από τις τρεις διευθύνσεις ανισοτροπίας (αυτές κατά τα επίπεδα grain και head grain) είναι παραπλήσιες. Επομένως, με μια πρώτη προσέγγιση το μάρμαρο Διονύσου μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα εγκάρσιως ισότροπο υλικό, του οποίου η μηχανική συμπεριφορά περιγράφεται από πέντε σταθερές: δύο μέτρα ελαστικότητας E και E' , στο επίπεδο εγκάρσιας

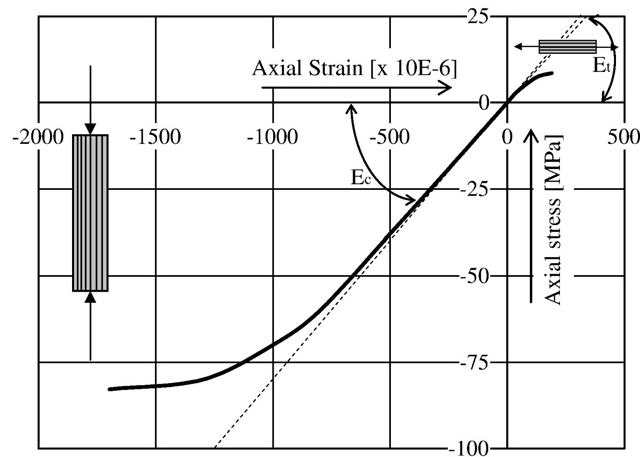
ισοτροπίας και κάθετα σ' αυτό, δύο λόγους Poisson ν και ν' που περιγράφουν την εγκάρσια ανταπόκριση των παραμορφώσεων εντός του επιπέδου ισοτροπίας σε εφελκυστικές φορτίσεις παράλληλα και κάθετα σ' αυτό και το μέτρο διάτμησης G , σε επίπεδα κάθετα στο επίπεδο ισοτροπίας.

Σύμφωνα, με τους Kourkoulis et al. (2012) το Διονυσιακό μάρμαρο είναι ένα ορθότροπο υλικό, ωστόσο, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, εξαιτίας των μηχανικών του ιδιοτήτων κατά μήκος των δύο διευθύνσεων ανισοτροπίας οι οποίες είναι παραπλήσιες, μπορεί να θεωρηθεί ως εγκαρσώς ισότροπο υλικό. Οι τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων του μαρμάρου του Διονύσου και η αντοχή του σε εφελκυσμό με βάση εργαστηριακές δοκιμές στο Ε.Μ.Π. παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.23.

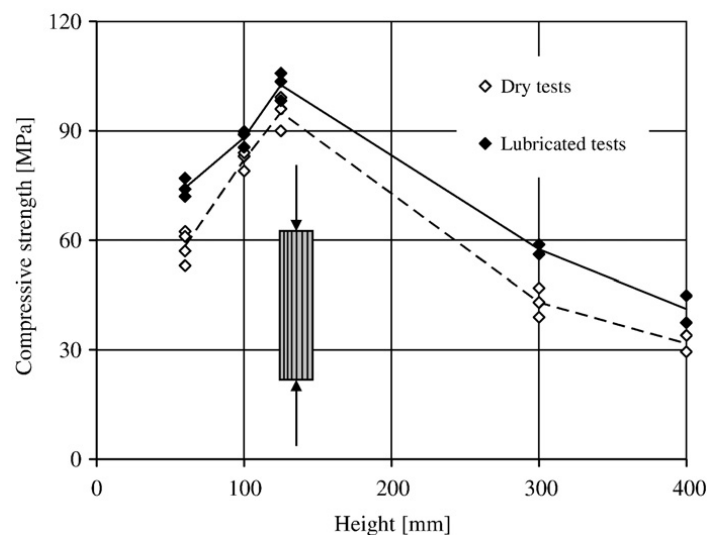
Πίνακας 3.23: Μηχανικές ιδιότητες μαρμάρου Διονύσου υπό άμεση φόρτιση σε μονοαξονική θλίψη (ρυθμός φόρτισης 10^{-6} m/min) (Kourkoulis et al., 1999).

	E [MPa]	ν [-]	σ_f [MPa]
Ισχυρή διεύθυνση	$84.5 \cdot 10^3$	0.26	10.8
Ενδιάμεση διεύθυνση	$79.5 \cdot 10^3$	0.26	9.5
Ασθενής διεύθυνση	$50.0 \cdot 10^3$	0.11	5.3

Παρατηρήθηκε επίσης, όπως φαίνεται και στην *Εικόνα 3.27* ότι το υλικό είναι ελαφρώς μη γραμμικό υλικό τόσο στην περιοχή του εφελκυσμού όσο και της θλίψης και παρουσιάζεται "διπλομετρικό" (bimodular), δηλαδή το μέτρο ελαστικότητας στη θλίψη E_c είναι διαφορετικό από αυτό στον εφελκυσμό E_t (Kourkoulis et al., 2010). Σε δοκιμές κάμψης τριών σημείων σε πρισματικά δοκίμια μαρμάρων Διονύσου παρατηρήθηκε ότι το μέτρο ελαστικότητας στον εφελκυσμό ήταν μεγαλύτερο από αυτό στη θλίψη και συγκεκριμένα $E_c / E_t \sim 0.8$ (Exadaktylos et al., 2001). Πρέπει να σημειωθεί ακόμα ότι η αντοχή σε εφελκυσμό του μαρμάρου Διονύσου που προκύπτει από εργαστηριακές δοκιμές εξαρτάται από το φαινόμενο της κλίμακας γνωστό σαν size effect (Kourkoulis et al., 2010). Αυτό φαίνεται καθαρά στην *Εικόνα 3.28*, όπου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την δοκιμή θλίψης σε κυλινδρικά δοκίμια μαρμάρου του Διονύσου που είχαν αναλογία ύψους - διαμέτρου ίση με 2, προς το ύψος των δοκιμίων.

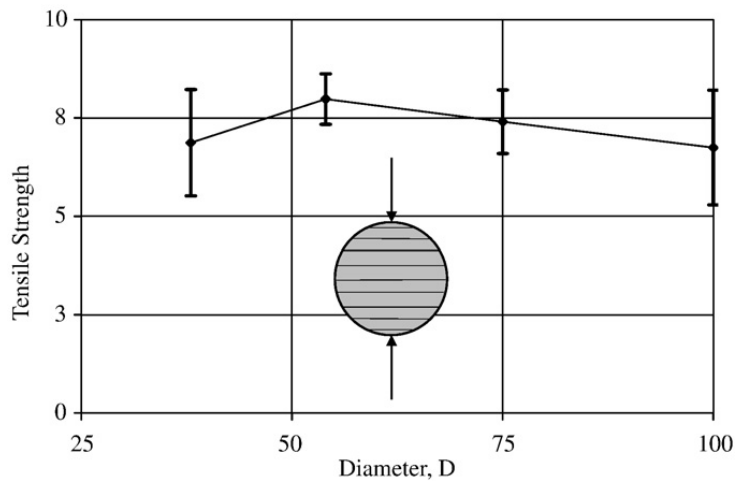


Εικόνα 3.27: Καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης του μαρμάρου Διονύσου για δοκίμια που κόπηκαν και φορτίστηκαν κατά την ισχυρή διεύθυνση ανισοτροπίας, παράλληλα στα επίπεδα των στρώσεων, τόσο στην εφελκυστική όσο και στη θλιπτική περιοχή (Kourkoulis et al., 2010)



Εικόνα 3.28: Το φαινόμενο της κλίμακας για δοκιμές θλίψης του μαρμάρου Διονύσου (Kaklis and Vardoulakis, 2004)

Παρόμοια πειράματα πραγματοποιήθηκαν και από τους Kaklis and Vardoulakis (2004), οι οποίοι μελέτησαν την εφελκυστική αντοχή του μαρμάρου Διονύσου με δοκιμές Brazil σύμφωνα με το πρότυπο ISRM (ISRM, 1988). Τα αποτελέσματα των πειραμάτων τους παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.29.



Εικόνα 3.29: Το φαινόμενο της κλίμακας για δοκιμές εφελκυσμού του μαρμάρου Διονύσου (Kaklis and Vardoulakis, 2004).

3.5 Σίδηρος, τιτάνιο και κονιάματα

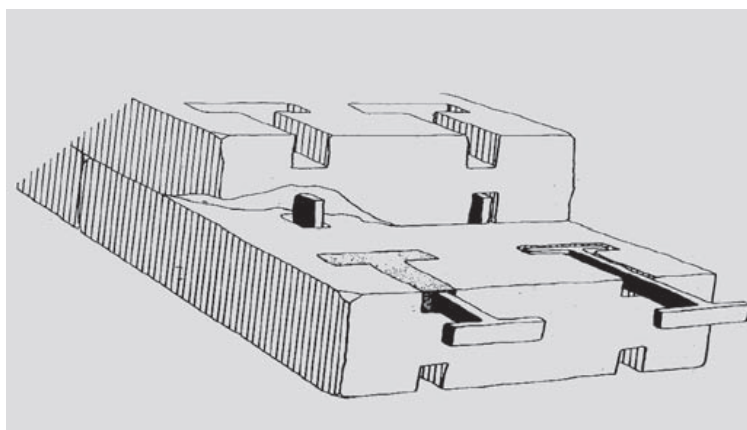
3.5.1. Σίδηρος

Για την κατασκευή του Παρθενώνα χρησιμοποιήθηκαν εκτός από τους μεγάλους ογκόλιθους μαρμάρων και μεταλλικοί σύνδεσμοι. Οι Αθηναίοι μεταλλοτεχνίτες στην ανέγερση του Παρθενώνα συγκολλούσαν δύο απλά ταν σε ένα διπλό Εικόνα 3.30. Οι σύνδεσμοι του Παρθενώνα και του Ερεχθείου σε σχήμα T αποτελούνταν από δύο διακριτές μορφές σιδήρου: α) μαλακό σίδηρο με ελάχιστο άνθρακα, και β) σκληρό χάλυβα με κυμαινόμενη περιεκτικότητα σε άνθρακα, οι οποίες ήταν συγκολλημένες με σφυρηλασία σε θερμοκρασίες μεταξύ 1200-1250 °C. Τα μεταλλεύματα σιδήρου των ναών της Ακρόπολης προέρχονται από τη Λακωνία (Βαρουφάκης, 2010).



Εικόνα 3.30: Σιδερένιο διπλό ταν από τον Παρθενώνα (Βαρουφάκης, 2010)

Ο τρόπος τοποθέτησης των σιδερένιων διπλών T και των γόμφων που ήταν καλυμμένοι με μόλυβδο φαίνεται στην Εικόνα 3.31 (Βαρουφάκης, 2010). Η χρήση του μολύβδου ήταν απαραίτητη για την προστασία του σιδήρου από την οξείδωση.



Εικόνα 3.31: Σκαρίφημα που δείχνει τον τρόπο τοποθέτησης των σιδερένιων διπλών των και των γόμφων, που ήταν καλυμμένοι με μόλυβδο (Βαρουφάκης, 2010).

3.5.2 Τιτάνιο

Το καθαρό εμπορικό τιτάνιο Grade 2, σύμφωνα με το ASTM B348, χρησιμοποιείται ως μέταλλο κατασκευής συνδετήριων στοιχείων (συνδέσμων, γόμφων, οπλισμών) για την αποκατάσταση αρχαίων μνημείων. Χρησιμοποιείται εκτεταμένα στις αναστηλωτικές εργασίες της Ακρόπολης, ύστερα από πρόταση του καθηγητή Θ.Ν. Σκουλικίδη το 1971 (Γαννιάρη-Παπαγεωργίου, 2010). Από το 1979 έως σήμερα, χρησιμοποιήθηκε επίσης και στην αποκατάσταση του αρχαίου πύργου του Δρακάνου (Ζάμπας, 2009). Επιλέχθηκε εξαιτίας της ισχυρής αντίστασής του σε κάθε είδους διάβρωση καθώς και εξαιτίας των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων του που το καθιστά συμβατό υλικό με το αυθεντικό μάρμαρο της Ακρόπολης. Ο λόγος Poisson είναι ίσος με 0.32 και είναι πρακτικά ίσος με αυτό του μαρμάρου. Επίσης, το τιτάνιο παρουσιάζει χαμηλό συντελεστή θερμικής διαστολής ($9 \cdot 10^{-6} \text{ grad}^{-1}$), ισχυρή (αλλά όχι υπερβολικά υψηλή) μηχανική αντοχή και υψηλή επιμήκυνση θραύσης (20% έως 22%). Το όριο διαρροής του τιτανίου είναι ίσο με 300 MPa, ενώ η εφελκυστική αντοχή του είναι ίση με 420 MPa (Vintzileou and Papadopoulos, 2001). Το μέτρο ελαστικότητας του τιτανίου είναι 105 GPa, ενώ ορισμένες σημαντικές φυσικές ιδιότητές του είναι η πυκνότητα του, η οποία είναι ίση με 4.51 g/cm^3 και η θερμοαγωγιμότητα του που είναι $0.007 \text{ cal grad}^{-1}/\text{cm s}$ και (Ζαμπάς, 1994 - Πηγή: Γαννιάρη-Παπαγεωργίου, 2010). Επίσης, σε σύγκριση με το σίδηρο το τιτάνιο δεν παρουσιάζει οξείδωση. Το μοναδικό μειονέκτημά του καθώς και όλων των μεταλλικών συνδέσμων που τοποθετούνται για ενίσχυση είναι ότι δε βελτιώνουν

σημαντικά τη σεισμική συμπεριφορά των στηλών και σε ορισμένες περιπτώσεις υποβιβάζουν την αντοχή τους (Konstantinidis and Makris, 2005).

3.5.3 Κονιάματα

Τα κονιάματα είναι μίγματα κονιών με νερό ή και αδρανή υλικά. Η σύνθεση και η επεξεργασία των κονιαμάτων γίνεται υπό μορφή πολτού, που με τη δράση του ατμοσφαιρικού αέρα ή του νερού πήζει και σκληραίνει προς πέτρινο υλικό (Βιάζης, 2007).

Στην αναστήλωση του Παρθενώνα της Ακρόπολης των Αθηνών χρησιμοποιούνται δύο είδη κονιαμάτων. Αυτά είναι τα κονιάματα τύπου Ι και τα κονιάματα τύπου ΙΙ:

Κονίαμα αποκατάστασης θραυσμένων δομικών μελών (Κονίαμα τύπου Ι).

Στην περίπτωση αυτή το κονίαμα αποτελείται από λευκό τσιμέντο και νερό. Για τον προσδιορισμό των μηχανικών χαρακτηριστικών του παρασκευάστηκαν από τους τεχνίτες του εργοταξίου του Παρθενώνα κυλινδρικά δοκίμια (διάμετρος προς ύψος $\sim 1/2$), τα οποία συντηρήθηκαν μέσα σε νερό για 28 ημέρες, όπως επιβάλλεται από τον κανονισμό συντήρησης δοκιμίων τσιμέντου.

Στη συνέχεια τα δοκίμια αυτά υποβλήθηκαν σε πειράματα μονοαξονικής θλίψης που διαθέτει το Εργαστήριο Αντοχής των Υλικών του Ε.Μ.Π. και με συμπλέγματα ηλεκτρομηκυνσιομέτρων μετρήθηκαν οι παραμορφώσεις της περιφέρειας κάθε δοκιμίου σε 3 σημεία. Οι δοκιμές υλοποιήθηκαν με ρυθμό επιβαλλόμενης μετατόπισης 0.01 mm/s. Η μορφή αστοχίας ήταν ψαθυρή με σημαντική ή πλήρη καταστροφή των δοκιμίων. Οι δοκιμές αυτές έδωσαν για το κονίαμα τις εξής τιμές: μέτρο ελαστικότητας του Young $E \sim 15.5 \cdot 10^3$ MPa, λόγος Poisson $\nu \sim 0.26$, όριο διαρροής $\sigma_y \sim 10$ MPa και αντοχή σε θλίψη $\sigma_c \sim 35$ MPa. Επίσης, παρόμοια κυλινδρικά δοκίμια υποβλήθηκαν σε δοκιμές έμμεσου εφελκυσμού (Brazil test) δίνοντας τιμές αντοχής σε εφελκυσμό ίση με 2 MPa (Kourkoulis et al., 2008 - Πηγή: Marinelli et al. 2009, Kourkoulis and Pasiou 2009).

***Κονίαμα των συνδέσεων δομικών μελών με χρήση συνδετηρίων στοιχείων
(Κονίαμα τύπου ΙΙ).***

Το κονίαμα των συνδέσεων των δομικών μελών αποτελείται από ένα μέρος λευκού τσιμέντου, δύο μέρη χονδρόκοκκης χαλαζιακής άμμου, ένα μέρος λεπτόκοκκης χαλαζιακής άμμου και νερό (Γαννιάρη - Παπαγεωργίου, 2010).

Κεφάλαιο 4: Κονιάματα

4.1 Γενικά

Η ενότητα αυτή πραγματεύεται θέματα που σχετίζονται με τη παρασκευή, τη χρήση, και τις μηχανικές ιδιότητες κονιαμάτων. Ειδικότερα, όταν τα κονιάματα χρησιμοποιούνται ως πληρωτικό υλικό σε εργασίες αναστήλωσης είναι απαραίτητη η διερεύνηση της μηχανικής τους συμπεριφοράς σε μονοαξονική και τριαξονική θλιπτική καταπόνηση. Στο δεύτερο μέρος της παρούσας ενότητας παρουσιάζονται πειραματικά αποτελέσματα από τριαξονικές δοκιμές κονιαμάτων που έγιναν στο εργαστήριο Μηχανικής Πετρωμάτων του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης. Η πειραματική διαδικασία που περιλαμβάνει χύτευση και τριαξονική φόρτιση κυλίνδρων μη τσιμεντούχου κονιάματος αποτελεί σαφώς πρωτοτυπία σε διεθνές επίπεδο, καθώς δεν είναι καταγεγραμμένα αντίστοιχα πειράματα στην παγκόσμια βιβλιογραφία.

4.1.1 Ορισμός και γενική περιγραφή των κονιαμάτων

Κονίαμα είναι ένα υλικό που προορίζεται να συνδέσει μεταξύ τους διάφορα στοιχεία με σκοπό τη δημιουργία μιας ενιαίας μονολιθικής μάζας που να αντέχει σε υψηλά φορτία αναπτύσσοντας ικανοποιητικές αντοχές με μεγάλο συντελεστή ασφάλειας (ΤΕΕ, 2013). Οι αρχαίοι ονόμαζαν κονίαμα το μίγμα κονίας, αδρανών και νερού (Πάχτα, 2011). Στη σύγχρονη εποχή κονιάματα θεωρούνται τα μίγματα μίας ή περισσοτέρων συνδετικών υλών γνωστών ως κονιών, νερού, λεπτόκοκκων αδρανών (<4 mm) και ενδεχομένως ειδικών προσθέτων, τα οποία έχουν αξιόλογη ρευστότητα και πλαστικότητα όταν είναι νωπά, ενώ μετά την πήξη και σκλήρυνση της συνδετικής ύλης αποκτούν μηχανική αντοχή και άλλες φυσικές και χημικές ιδιότητες. Οι ιδιότητες του νωπού και του σκληρυμένου κονιάματος εξαρτώνται από το είδος και τις αναλογίες των πρώτων υλών, από τον τρόπο ανάμιξης και μορφοποίησης και από τις συνθήκες που επικρατούν και εφαρμόζονται κατά την διάρκεια της σκλήρυνσης (Παπαγιάννη κ.ά., 2000-Πηγή:Βογιατζής κ.ά., 2008).

Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι εκτός από τα κονιάματα τα οποία χρησιμοποιούν ένα είδος κονιάς, υπάρχουν και τα σύνθετα κονιάματα, τα οποία περιέχουν δύο είδη κονιών (ΓΤΣΥ, 2002). Στη συνέχεια αναλύονται τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την παρασκευή ενός κονιάματος και συγκεκριμένα η κονία, τα αδρανή και το νερό.

Κονία είναι το κονιοποιημένο υλικό, που όταν αναμιχθεί με νερό σχηματίζει πολτό, που παρουσιάζει συγκολλητικές ιδιότητες και μετά από ορισμένο χρόνο πηγνύεται και σκληραίνεται, εξαιτίας φυσικών ή χημικών φαινομένων. Οι κονίες παράγονται κατά το πλείστον με βιομηχανικές επεξεργασίες. Όσο λεπτότερη είναι η κονία, τόσο καλύτερα αντιδρά με το νερό και εμφανίζει ταχύτερα τις ιδιότητές της. (Βιάζης, 2007).

Τα συγκολλητικά υλικά που χρησιμοποιούνται ως κονίες είναι το τσιμέντο, ο πολτός άσβεστου, η κονιοποιημένη υδράσβεστος, τα τσιμέντα τοιχοποιίας τα ποζολανικά υλικά και η γύψος (ΤΕΕ, 2013).

Αδρανή είναι τα υλικά τα οποία προέρχονται από τη φυσική αποσάθρωση ή την τεχνητή θραύση των πετρωμάτων, καθώς και διάφορα υλικά, όπως σκουριές από υψικάμινους, βιομηχανικά παραπροϊόντα κ.ά. Αποτελούνται από συμπαγείς κόκκους του ίδιου ή διαφορετικού μεγέθους. Τα αδρανή που προέρχονται από τη φυσική αποσάθρωση των πετρωμάτων ονομάζονται συλλεκτά, ενώ τα αδρανή που προέρχονται από τη θραύση των πετρωμάτων με τεχνητό τρόπο ονομάζονται θραυστά αδρανή. Ανάλογα με το μέγεθος των κόκκων τους, διακρίνονται σε άμμο, γαρμπίλι και σκύρα.. Τα χονδρόκοκκα συλλεκτά υλικά γαρμπίλι και σκύρα ονομάζονται χαλίκια, ενώ το αδρανές υλικό, το οποίο περιλαμβάνει κόκκους όλων των μεγεθών ονομάζεται αμμοχάλικο. (Κορωναίος και Πουλάκος, 2006).

Η άμμος είναι το συνηθέστερο αδρανές υλικό που χρησιμοποιείται στα κονιάματα. Για την παρασκευή κονιαμάτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμμοι ποταμών, θινών και θαλάσσης καθώς και ορυκτοί άμμοι (Wendehorst, 2009). Γι' αυτό πρέπει να τηρούνται ορισμένες παράμετροι κατά την επιλογή της. Ειδικότερα, δεν πρέπει να περιέχει προσμίξεις που να είναι ικανές να προκαλέσουν μείωση της αντοχής και της σταθερότητας των κονιαμάτων, να επηρεάσουν δυσμενώς άλλες ιδιότητές τους και να

προκαλέσουν επιβλαβείς χημικές αντιδράσεις με την εκάστοτε συνδετική ύλη (TEE, 2013).

Κατά την επιλογή και την χρήση των αδρανών, έμφαση δίνεται στην κοκκομετρική διαβάθμιση, στην παρουσία αλάτων και στην υγρασία. Γενικά, προτιμάται η χρήση αδρανών με σχετικά μεγάλο εύρος κοκκομετρικής διαβάθμισης προκειμένου να καλύπτουν οι μικροί κόκκοι τα κενά που αφήνουν οι μεγαλύτεροι. Αυξημένο ποσοστό κονιάς θα οδηγήσει σε ρωγμές εξαιτίας της αυξημένης συστολής ξήρανσης. Όταν όμως υπάρχουν αδρανή με παιπάλη σε ποσοστό μεγαλύτερο του 5%, τότε δημιουργείται έντονο πρόβλημα καθόσον καλύπτονται οι κόκκοι του αδρανούς και εμποδίζεται η ένωση του με τον πολτό. Η παρουσία αλάτων και άλλων προσμίξεων καθιστούν δύσκολη την πρόσφυση μεταξύ αδρανούς και συνδετικού υλικού. Στα επιβλαβή συστατικά περιλαμβάνονται φυτικές και χημικές ουσίες, τεμάχια άνθρακα, τέφρες κλπ. Σχετικά με την υγρασία, οι αναλογίες μίξης των συστατικών των κονιαμάτων που δίνονται στα διάφορα πρότυπα, ισχύουν με την προϋπόθεση ότι η άμμος περιέχει υγρασία περίπου 3%. Κατά τον καθορισμό των αναλογιών ενός κονιάματος οι ποσότητες της άμμου πρέπει να διορθώνονται ανάλογα με την υγρασία που έχουν (TEE, 2013).

Βελτιωτικά ή χημικά πρόσμικτα (admixtures) είναι τα υλικά που προστίθενται, σε μικρές ποσότητες σε σχέση με την μάζα της κονιάς, κατά την διάρκεια της ανάμιξης του κονιάματος με σκοπό να τροποποιήσουν τις ιδιότητες κυρίως του νωπού αλλά και του σκληρυμένου κονιάματος. Δεδομένου ότι βρίσκονται σε υπέρλεπτο διαμερισμό, η προσθήκη τους πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή και σε πρώτη φάση να αναμειγνύονται με τις κονίες και όχι και με τα αδρανή για να αποφευχθεί ο σχηματισμός συσσωματωμάτων. Σε αυτά υπάγονται οι ρευστοποιητές, οι υπερρευστοποιητές, οι πλαστικοποιητές, οι επιταχυντές πήξης, οι επιβραδυντές και τα αερακτικά. Συνήθως προστίθενται σε μικρά ποσοστά και δεν υπερβαίνουν το 2%. Αν χρησιμοποιηθούν σε μικρότερα ποσοστά όπως 0.2% (2g ανά Kg τσιμέντου), θα πρέπει να προστεθούν με μορφή αιωρήματος με μέρος του νερού (TEE, 2013).

Τα **πρόσθετα συστατικά (additives)** είναι τα λεπτομερώς διαμερισμένα ανόργανα υλικά που χρησιμοποιούνται στο κονίαμα στοχεύοντας είτε να βελτιώσουν κάποιες ιδιότητες του είτε να πετύχουν συγκεκριμένες ιδιότητες. Διακρίνονται δύο κατηγορίες

προσθέτων: τα σχεδόν αδρανή πρόσθετα (τύπου Ι, όπου υπάγονται τα filler αδρανών με προδιαγραφές σύμφωνες με το ΕΛΟΤ EN 12620 και τα χρώματα) και τα πρόσθετα που έχουν ποζολανικές ή λανθάνουσες υδραυλικές ιδιότητες. Τα τελευταία (τύπου ΙΙ), περιλαμβάνουν τις ιπτάμενες τέφρες, σύμφωνα με το ΕΛΟΤ EN 450 και την πυριτική παιπάλη (ΤΕΕ, 2013). Ανάλογα με την ιδιότητα του κονιάματος που βελτιώνουν διακρίνονται σε στεγανοποιητικά, πλαστικοποιά, προστασίας σε σχέση με τον παγετό και για την κατασκευή των κονιαμάτων υπό πίεση (Κορωναίος και Πουλάκος, 2006).

Στην παρασκευή των κονιαμάτων χρησιμοποιείται **νερό** το οποίο πρέπει να είναι απαλλαγμένο από επιβλαβείς προσμίξεις όπως οργανικά και ανόργανα οξέα, λίπη και λάδια, διαλυτά σάκχαρα, αιωρούμενες ουσίες και υπερβολικά ποσά διαλυμένων αλάτων (κυρίως θεικών και χλωριούχων). Τα πολύ σκληρά νερά καθώς και το θαλασσίνο νερό μπορούν να τη δοκιμή καταλληλότητας νερού (ΤΕΕ, 2013).

4.2 Κατηγορίες κονιαμάτων

Τα κονιάματα μπορούν να ταξινομηθούν σε διάφορες κατηγορίες όπως αναφέρονται παρακάτω (ΤΕΕ, 2013):

- Ανάλογα με τον τρόπο πήξης και σκλήρυνσης της κονιάς διακρίνονται σε **υδραυλικά και αερικά κονιάματα**. Αν ένα κονίαμα πήζει και σκληραίνει μόνο στον αέρα καλείται αερικό. Αν δε πήζει και σκληραίνει και στον αέρα και στο νερό, καλείται υδραυλικό (Βιάζης, 2007).
- **Ανάλογα με το φαινόμενο βάρος** τους διακρίνονται σε ελαφριά ($<1500\text{kg/m}^3$) και βαριά ($>1500\text{kg/m}^3$)
- **Ανάλογα με τις ιδιότητές τους** διακρίνονται σε θερμομονωτικά, ηχοαπορροφητικά, διακοσμητικά και στεγανοποιητικά.
- **Ανάλογα με το είδος της κονιάς ή των αδρανών διακρίνονται σε:**
 1. **Τσιμεντοκονιάματα** όταν η συνδετική ύλη είναι το τσιμέντο
 2. **Ασβεστοκονιάματα** όταν η συνδετική ύλη είναι ο πολτός ασβέστου ή η κονιοποιημένη υδράσβεστος.
 3. **Τσιμεντοασβεστοκονιάματα** ή μίκτα κονιάματα με μίγμα τσιμέντου και ασβέστου ως συνδετική ύλη.

4. **Ποξολανικά κονιάματα** τα οποία έχουν συνδετική ύλη άσβεστο (με μερική υποκατάσταση με τσιμέντο) και ποξολάνη (φυσική ή τεχνητή).
 5. **Μαρμαροκονιάματα** με κύριο αδρανές την μαρμαρόσκονη αντί της άμμου και συνδετική ύλη ασβέστη ή τσιμέντο (με ενδεχόμενη μικρή προσθήκη γύψου)
 6. **Γυψοκονιάματα** με κύριο συνδετικό υλικό την γύψο.
- **Ανάλογα με την ποσότητα της κονιάς διακρίνονται σε (Κορωναίος και Πουλάκος, 2006):**
1. **Κανονικό κονίαμα:** Ως κανονικό χαρακτηρίζεται το κονίαμα στο οποίο η χρησιμοποιούμενη ποσότητα κονιάς είναι τόση, όση ακριβώς χρειάζεται για να γεμίσουν τα κενά μεταξύ των κόκκων της άμμου.
 2. **Παχύ κονίαμα:** Ως παχύ χαρακτηρίζεται το κονίαμα στο οποίο χρησιμοποιείται περισσότερη ποσότητα κονιάς από εκείνη που χρειάζεται για την παρασκευή κανονικού κονιάματος.
 3. **Ισχνό κονίαμα:** Ως ισχνό χαρακτηρίζεται το κονίαμα στο οποίο ο παρασκευαζόμενος πολτός της κονιάς δεν γεμίζει πλήρως τα κενά μεταξύ των κόκκων της άμμου.
- **Ανάλογα με την χρήση τους διακρίνονται σε** κονιάματα δόμησης ή κονιάματα τοιχοποιίας, κονιάματα επιχρισμάτων, ισοπεδωτικά ή κονιάματα εξίσωσης δαπέδων, επισκευαστικά κονιάματα και συγκολλητικά όπου υπάγονται οι διάφορες κόλλες (ΤΕΕ, 2013).
- **Ανάλογα με τη μηχανική τους αντοχή διακρίνονται σε (Κορωναίος και Πουλάκος 2006, Λίτινας 2008):**
1. **κονιάματα χαμηλής αντοχής.** Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν τα πηλοκονιάματα και τα καθαρά ασβεστοκονιάματα. Η αντοχή που παρουσιάζουν αυτά τα κονιάματα είναι έως 5 MPa.
 2. **κονιάματα μέτριας αντοχής.** Τέτοια κονιάματα είναι τα θηραϊκοκονιάματα και τα ασβεστοτσιμεντοκονιάματα. Η αντοχή που παρουσιάζουν αυτά τα κονιάματα είναι 5 έως 15 MPa.

3. **κονιάματα υψηλής αντοχής**, τα οποία είναι τα τσιμεντοκονιάματα και τα οργανικά κονιάματα. Η αντοχή που παρουσιάζουν αυτά τα κονιάματα είναι πάνω από 15 MPa.
- **Ανάλογα με τον μέγιστο κόκκο της άμμου διακρίνονται σε:** λεπτόκοκκα και χονδρόκοκκα (Λίτινας, 2008).
 - **Ανάλογα με την συνεκτικότητα και την κατεργασία τους διακρίνονται σε** μαλακά ή σφιχτά, ρευστά, πεταχτά, ενέματα (Λίτινας, 2008):.
 - **Ανάλογα με τον τρόπο παρασκευής τους διακρίνονται σε:** εργοταξιακά και εργοστασιακά (έτοιμα κονιάματα) (Λίτινας 2008).
 - **Ανάλογα με την μορφή και την φάση εφαρμογής τους διακρίνονται σε** (Λίτινας, 2008):
 1. **ξηρό κονίαμα** (το ομοιογενές μίγμα όλων των υλικών του κονιάματος εκτός του νερού),
 2. **νωπό κονίαμα** (το πλήρες αναμεμιγμένο- ξηρό κονίαμα και νερό- και έτοιμο προς χρήση κονίαμα) και
 3. **σκληρυμένο κονίαμα** (το κονίαμα μετά την εφαρμογή του).
 - **Ανάλογα με τον τρόπο σύνθεσης τους διακρίνονται σε:** σχεδιασμένο κονίαμα και κονίαμα με συγκεκριμένη σύνθεση (Λίτινας, 2008).

Η σύνθεση των μικτών κονιαμάτων εκφράζεται με τρεις αριθμούς που αναφέρονται, με την σειρά, σε μέρη όγκου τσιμέντου προς ασβέστη προς άμμο. Όταν γίνεται αναφορά σε απλά κονιάματα, δηλαδή κονιάματα με μία κονία, πάλι προτίθεται ο όγκος της κονίας σε σχέση με τον όγκο της άμμου. Είναι προφανές ότι τα παραπάνω κονιάματα έχουν διαφορετικές συνθέσεις και ιδιότητες ανάλογα με την χρήση τους (ΤΕΕ, 2013).

4.3 Χρήση των κονιαμάτων

Σύμφωνα με το Βιάζη (2007) τα κονιάματα χρησιμοποιούνται συνήθως σαν συνδετική ύλη των πετρωμάτων για την κατασκευή μιας λιθοδομής ή τουβλοδομής ή για την επένδυση διαφόρων επιφανειών που σκοπό έχει την προφύλαξη, τη μόνωση και την αισθητική εμφάνιση. Άλλες χρήσεις των κονιαμάτων είναι η κατασκευή

διακοσμητικών στοιχείων, στόμωση μικροδιαρροών, έμφραξη μικρορωγμών ή πόρων κ.λ.π. Ο σκοπός του κονιάματος κατά τη δόμηση είναι να προσδίδει στο λίθο, φυσική ή τεχνητή, πλήρη έδραση και να εμποδίζει στο νερό να διέρχεται από τους αρμούς. Οι Palomo et al. (2003) θεωρούν ότι το κονίαμα σαν οικοδομικό υλικό χρησιμοποιείται σαν συνδετικό υλικό μεταξύ των άλλων υλικών (πέτρες, τούβλα) καθώς και για να καλυφτούν και να προστατευτούν οι κάθετες επιφάνειες (τοίχους, προσόψεις, κ.λ.π.).

Τα κονιάματα χρησιμοποιούνται επίσης σαν επισκευαστικά υλικά σε κτίρια αλλά και σε μνημεία. Σε αυτές τις περιπτώσεις τα κονιάματα πρέπει να πληρούν τις ακόλουθες απαιτήσεις: να έχουν λευκό χρώμα (υπό σκέψη να είναι έγχρωμο), να είναι συμβατά με τους φυσικούς δομικούς λίθους, να είναι απαλλαγμένα από αλκάλια, να έχουν υψηλότερες μηχανικές αντοχές από τα ασβεστοκονιάματα, να έχουν καλύτερη πρόσφυση και αντοχή σε διάτμηση από ό, τι τα ασβεστοκονιάματα, η κατανομή του μεγέθους των πόρων πρέπει να είναι κατάλληλη για να επιτευχθεί υψηλή διαπερατότητα στην εξάτμιση αλλά να μην είναι πολύ διαπερατά από το νερό (Blanco-Varela and Fortes-Revilla, 2004). Γενικά, τα κονιάματα αποτελούν σε έναν ορισμένο βαθμό την προστασία του κτιρίου.

Στη σύγχρονη εποχή ένα είδος κονιάματος, το τσιμεντοκονίαμα, αποτελεί σημαντικό υλικό αποκατάστασης αρχαίων μνημείων σε περιπτώσεις ανακατασκευών και επιφανειακών αρμολογημάτων - επιχρίσεων τοιχοποιιών. Ωστόσο, παρουσιάστηκαν ορισμένα μειονεκτήματα με το πέρασμα των χρόνων. Ένα τυπικό τσιμεντοκονίαμα παρουσιάζει θλιπτική αντοχή της τάξεως των 17-24 MPa, ενώ η αντοχή των ιστορικών κονιαμάτων αντιστοιχεί σε 0.5-2.5 MPa (Papayianni, 2005_Πηγή: Πάχτα, 2011). Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι άλλοι ερευνητές θεωρούν ότι η αντοχή σε θλίψη ενός τυπικού τσιμεντοκονιάματος δεν πρέπει να υπερβαίνει σε θλίψη (σε δοκίμια 28 ημερών) τα 10 MPa (Βιάζης, 2007). Επίσης, η πλαστικότητα και η ελαστικότητά του μπορεί να αυξηθεί, ώστε η πρόσφυσή του να είναι ισχυρή για να μην παρουσιάζει ρηγματώσεις και να εξασφαλίζει πλήρη στεγανότητα του κονιάματος, με την προσθήκη σ' αυτό μικρής ποσότητας υδράσβεστου με τη μορφή πολτού ή σκόνης, χωρίς να μειώνεται η περιεκτικότητα του τσιμέντου (Κορωναίος και Πουλάκος, 2006). Η υψηλή αντοχή σε συνδυασμό με τη μεγάλη σκληρότητα και ακαμψία του τσιμέντου μπορεί σε περιπτώσεις κινήσεων (σεισμός) ή φορτίσεων να δημιουργήσει υψηλές τάσεις στα αυθεντικά υλικά με συνέπεια την περαιτέρω αποσάθρωση ή και

την πλήρη κατάρρευσή τους (Valuzi et al. 2005, Valluzzi 2007). Τα τσιμεντοκονιάματα παρουσιάζουν πολύ χαμηλό πορώδες (10 έως 20%) σε αντίθεση με τα τσιμεντοκονιάματα των ιστορικών κονιαμάτων που παρουσιάζουν υψηλό πορώδες (20 έως 30%) (Papayianni and Stefanidou, 2006). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να διακόπτεται η διέλευση του αέρα και της υγρασίας στο εσωτερικό των δομών και επομένως να παγιδευεται η υγρασία και τα διαλυτά άλατα (Papayianni, 2005_Πηγή: Πάχτα, 2011).

Είναι προφανές ότι τα χαρακτηριστικά των κονιαμάτων, καταδεικνύουν την μεγάλη σημασία των κονιαμάτων για τη συντήρηση των μνημείων, και κατ' επέκταση για την διατήρηση της ιστορικής κληρονομιάς (Palomo et al., 2003) γι' αυτό το λόγο στην επόμενη ενότητα αναλύονται τα χαρακτηριστικά αυτά.

4.4 Χαρακτηριστικά των κονιαμάτων

4.4.1 Γενικά

Ορισμένα χαρακτηριστικά των κονιαμάτων, κυρίως εκείνα που σχετίζονται με την ετερογενή τους σύνθεση και το μεγάλο πορώδες, μπορούν να επηρεάσουν την ανθεκτικότητά τους στο χρόνο με το να τα καταστήσουν επιρρεπή σε προσβολές από εξωτερικούς παράγοντες. Έτσι τα χαρακτηριστικά αυτά μπορούν να συμβάλουν στην ευστάθεια των υλικών που βρίσκονται σε επαφή μαζί τους. Επίσης, μερικά από αυτά τα χαρακτηριστικά, μπορούν να υποκινήσουν την προσβολή από μολυσμένους παράγοντες και να ξεκινήσει η φθορά των υλικών που υποτίθεται ότι τα κονιάματα προστατεύουν ή συνδέουν (Palomo et al., 2003). Όλα αυτά εξηγούν το λόγο για τον οποίο πρέπει να είναι γνωστά τα χαρακτηριστικά των κονιαμάτων, ώστε με αυτό τον τρόπο να ελαχιστοποιούνται οι μακροπρόθεσμες ανεπιθύμητες επιπτώσεις που μπορούν να προκληθούν από τα κονιάματα στις κατασκευές και κυρίως στις αναστηλώσεις αρχαίων μνημείων όπου αυτά χρησιμοποιούνται.

Στη συνέχεια παρατίθενται τα χαρακτηριστικά των κονιαμάτων, τα οποία ανήκουν σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τα μη μηχανικά και τα μηχανικά χαρακτηριστικά.

4.4.2 Μη μηχανικά χαρακτηριστικά των κονιαμάτων

Τα κονιάματα παρουσιάζουν ορισμένες μη μηχανικές ιδιότητες, οι οποίες καθορίζουν την ποιότητα του κονιάματος και τα πεδία εφαρμογής του. Αυτές είναι η εργασιμότητα για τα νωπά κονιάματα, ενώ για τα σκληρυμένα είναι η πρόσφυση και η ανθεκτικότητα. Οι θεωρούμενες ελάχιστες ή μέγιστες τιμές αυτών των ιδιοτήτων αποτελούν τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των κονιαμάτων και είναι η εργασιμότητα, η ανθεκτικότητα και η πρόσφυση (TEE, 2013).

Εργασιμότητα είναι μία σύνθετη ιδιότητα και συντίθεται από την πλαστικότητα, που είναι η ικανότητα να μορφοποιείται το κονίαμα χωρίς να χάνει την συνοχή του, την ρευστότητα, δηλαδή την εσωτερική ευκινησία του μίγματος ώστε να γεμίζουν τα κενά, καθώς και το αναπόμικτο, που είναι η ικανότητα να διατηρεί την ομοιογένεια και να μην διαχωρίζεται σε στρώσεις διαφόρων συνθέσεων κατά την παραμονή του ή την μεταφορά του, όταν κοπανιέται ή πέφτει από ψηλά.

Στα κονιάματα που παρασκευάζονται με βάση το πρότυπο ASTM C 270, οι ιδιότητες που συνθέτουν την εργασιμότητα, επηρεάζονται από διάφορους παράγοντες με αλληλοσυγκρουόμενες επιδράσεις σε σημείο ώστε η βελτίωση της μιας ιδιότητας να συνεπάγεται επιδείνωση μιας άλλης. Αύξηση π.χ. του ποσοστού του νερού αυξάνει την ρευστότητα αλλά μειώνει το αναπόμικτο δηλαδή μεγαλώνει τους κινδύνους και το ενδεχόμενο διαχωρισμού των υλικών που το αποτελούν. Η ρευστότητα επηρεάζεται επίσης από το μέγεθος και το είδος των κόκκων του αδρανούς. Μεγαλύτερη αναλογία μεγάλων κόκκων, όπως και κόκκων με λεία και καμπύλη επιφάνεια αυξάνουν την ρευστότητα. Στην πλαστικότητα του δεν παίζει σημαντικό ρόλο η αύξηση της ποσότητας του νερού. Αντίθετα, η πλαστικότητα επηρεάζεται ευνοϊκά από τη σφαιρικότητα των κόκκων των αδρανών και από την αύξηση της περιεκτικότητας σε συνδετική ύλη και filler. Η χρησιμοποίηση τέλος χημικών προσμίκτων, τροποποιεί, προς την κατεύθυνση που επιδιώκεται, την εργασιμότητα (Βιάζης, 2007).

Ένα καλά διαβαθμισμένο αδρανές έχει λιγότερα κενά μεταξύ των κόκκων του από το κακώς διαβαθμισμένο και απαιτεί λιγότερη πάστα κονίας για να γεμίσει τα κενά. Έτσι πρόσθετο ποσό πάστας κονίας θα περιβάλλει τους κόκκους των αδρανών και θα

προσδίδει καλύτερη ρευστότητα. Για κονιάματα με χαμηλό λόγο άμμου / τσιμέντου η επίδραση του μεγέθους των αδρανών στη ρευστότητα του κονιάματος μπορεί να μην είναι σημαντική, αλλά γίνεται σημαντική όσο ο λόγος αυτός αυξάνεται. Η εργασιμότητα γενικά αυξάνεται με χρήση καλά διαβαθμισμένης άμμου (που το 10% κατά προσέγγιση να διέρχεται από το κόσκινο No 100), με χρήση υψηλής πλαστικότητας του ασβέστη και με αύξηση του περιεχόμενου αέρα, όχι όμως περισσότερο από 12% (Βιάζης, 2007).

Ανθεκτικότητα είναι η ικανότητα μιας κατασκευής να διατηρεί την αρχική της εμφάνιση, την αντοχή και την ακεραιότητα της για πολλά χρόνια. Στην τοιχοποιία οι δύο πιο σημαντικές προϋποθέσεις για την εξασφάλιση της ανθεκτικότητας είναι μία αμετάβλητη σε διαστάσεις δομική μονάδα και ένα κονίαμα που να εξασφαλίζει μία μόνιμη και τέλεια πρόσφυση, καθιστώντας παράλληλα την όλη κατασκευή υδατοστεγή. Μία συνολική θεώρηση του θέματος της ανθεκτικότητας περιλαμβάνει μεταξύ άλλων αντιμετώπιση των θεμάτων της εξανθήσεως, της αυτογενούς αποκαταστάσεως μικρορωγμών, του περιεχομένου αέρα, του παγετού και της στεγανότητας (TEE, 2013).

Η καταστροφή του κονιάματος συμβαίνει μέσα από διαφορετικές χημικές, φυσικές, μηχανικές, βιολογικές κ.λπ., διαδικασίες. Πολύ συχνά, περισσότεροι από ένα μηχανισμοί φθοράς, πραγματοποιούνται ταυτόχρονα στα κονιάματα. Επίσης, συχνά, χημικές διαδικασίες ή βιολογικές διαδικασίες, κ.λπ., έχουν φυσικές ή μηχανικές επιπτώσεις στα κονιάματα. Αυτό σημαίνει ότι είναι αρκετά δύσκολο να καθιερωθεί μια ταξινόμηση των μηχανισμών φθοράς των κονιαμάτων (Μαρινάκη, 2004). Μερικές από τις διαδικασίες φθοράς που παρατηρούνται πιο συχνά είναι (Palomo et al., 2003):

- ***Η διάλυση και διήθηση των συστατικών των ενυδατωμένων συστατικών.***
- ***Η αλληλεπίδραση των κονιαμάτων με τους ατμοσφαιρικούς ρύπους*** οι σημαντικότεροι από τους οποίους είναι: SO_2 , NO_x και CO_2
- ***Η κρυστάλλωση των διαλυτών αλάτων***, η οποία φθείρει το πορώδες σύστημα των κονιαμάτων.
- Εκτεταμένες αντιδράσεις όπως:

1. Ενυδάτωση του CaO και του MgO

2. **Σχηματισμός ετριγκίτη** $[Ca_6Al_2(SO_4)_3(OH)_{12} \cdot 26 H_2O]$.
3. **Σχηματισμός Τομασίτη** $[Ca_3(SO_4)(CO_3)\{Si(OH)_6\} \cdot 12H_2O]$
4. *Οι αλλαγές όγκου λόγω θερμικών αλλαγών ή λόγω παρουσίας ύδατος*
5. **Φθορά** εξαιτίας βιολογικών αιτιών

Η **πρόσφυση** μπορεί να θεωρηθεί ως το αποτέλεσμα μιας συνδυασμένης δράσης μηχανικής προσφύσεως και χημικής αντιδράσεως. Η μηχανική πρόσφυση επισυμβαίνει όταν ενυδατώνεται το συνδετικό υλικό προκειμένου να σχηματίσει πυριτικούς κρυστάλλους που εισχωρούν μέσα στις ρωγμές ή στα τριχοειδή κενά των τούβλων. Η χημική πρόσφυση λαμβάνει χώρα στην διεπιφάνεια κονιάματος και μονάδας τοιχοποιίας. Η άσβεστος σε ένα κονίαμα δημιουργεί περιβάλλον με pH περίπου 12.4 στο οποίο οι πυριτικές και οι ενώσεις του αργιλίου διαλύονται και αντιδρούν με τα ιόντα ασβεστίου του κονιάματος για να δώσουν κατάλληλα προϊόντα που κατά κάποιο τρόπο εμπλέκουν σε ένα ιδιαίτερα σταθερό δεσμό το κονίαμα και τα τούβλα μεταξύ τους (Βιάζης 2007, TEE, 2013)

4.4.3 Μηχανικές ιδιότητες των κονιαμάτων

Στα κονιάματα εκτός από τα ποιοτικά χαρακτηριστικά θα πρέπει ακόμα να λαμβάνονται υπόψη και οι μηχανικές ιδιότητές του. Στα κονιάματα δόμησης αλλά και σε άλλες κατηγορίες κονιαμάτων η μηχανική αντοχή δεν είναι γενικά απαραίτητο να είναι μεγάλη και κατά κανόνα πρέπει να είναι μικρότερη από αυτή των δομικών στοιχείων με τα οποία χρησιμοποιείται. Οι παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η μηχανική αντοχή των κονιαμάτων είναι (TEE, 2013):

- **Η ποιότητα και η κοκκομετρική σύνθεση της άμμου**, όπου όταν η κοκκομετρική σύνθεση της οδηγεί στον περιορισμό του ποσοστού των κενών χώρων και επομένως του ποσοστού της κονιάς, λαμβάνονται ισχυρότερα κονιάματα.
- **Το είδος της κονιάς**. Ένα σημαντικό παράδειγμα είναι η άσβεστος, που χρησιμοποιείται στα διάφορα τσιμεντοκονιάματα, παρόλο που η αντοχή της μετά την σκλήρυνση είναι μικρότερη από εκείνη του τσιμέντου, επειδή βελτιώνει μερικές βασικές τους ιδιότητες, ορισμένες εκ των οποίων είναι:

1. *η αύξηση της ανθεκτικότητας του κονιάματος,*
 2. *η αύξηση της πρόσφυσης του κονιάματος με τα δομικά υλικά, καθώς και των παραγόντων που επηρεάζουν την αντοχή, έκταση και ανθεκτικότητα της προσφύσεως*
 3. *η αύξηση της στεγανότητας των τοιχοποιιών*
 4. *η αύξηση της πλαστικότητας και εργασιμότητας*
 5. *η εξασφάλιση της ικανότητας για αυτογενή αποκατάσταση μικρορωγμών και*
 6. *η μείωση των εξανθημάτων των τοιχοποιιών*
- **Ο λόγος νερό/τσιμέντο.** Ειδικά για τα τσιμεντοκονιάματα, η αντοχή τους αυξάνει (μέσα σε ορισμένα όρια) αντιστρόφως ανάλογα με τον λόγο N/T.
 - **Ο τρόπος παρασκευής και εφαρμογής του κονιάματος** καθώς και οι συνθήκες που επικρατούν ή εξασφαλίζονται κατά την διάρκεια της πήξης ή της σκλήρυνσης
 - **Ο εγκλωβισμένος αέρας.** Η αντοχή των κονιαμάτων μειώνεται σταθερά όσο η περιεκτικότητα σε εγκλωβισμένο αέρα αυξάνει.

Γενικώς, η μείωση στην ικανότητα του κονιάματος για συγκράτηση νερού ή άμμου, αυξάνει παράλληλα με την αντοχή και αυτό ισχύει για όλα τα κονιάματα (TEE, 2013).

4.4.3.1 Κονιάματα με υδραυλική κονία

Πρόσφατες έρευνες των Moropoulou et al. (2005) έδειξαν ότι η ανάπτυξη των αντοχών των κονιαμάτων αποκατάστασης, συνδέεται με τις αντιδράσεις της υδρασβέστου με τα ενεργά πρόσθετα. Συγκεκριμένα, καλύτερη μηχανική συμπεριφορά παρατηρήθηκε σε κονιάματα κονιοποιημένης άσβεστο (lime powder) και κονιάματα με κονιοποιημένη άσβεστο και τεχνητά ποζολανικά πρόσθετα. Αυτά τα υλικά παρουσίασαν επίσης χαμηλό λόγο θλιπτικής (compressive strength) αντοχής - αντοχής κάμψης (flexural strength) f_c/f_f . Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι μετακαολίνες (Bakolas et al. 2006) και το θραυσμένο κεραμικό (Bakolas et al. 2008). Αναφορικά με τους μετακαολίνες οι Bakolas et al. (2006) προκειμένου να αξιολογηθεί η ποζολανική δραστηριότητα του μετακαολίνη, αρκετές πάστες

παρασκευάστηκαν, με ανάμιξη μετακαολίνη με ένυδρη άσβεστο, σε διαφορετικές αναλογίες. Η μεγαλύτερη αντοχή που προσδιορίστηκε από δοκιμές μονοαξονικής θλίψης αναπτύχθηκε σε εκείνη που παρασκευάστηκε με αναλογία μετακαολίνη προς ασβέστη ίση με 1. Σχετικά με το θρασμένο κεραμικό, οι Bakolas et al. (2008) προκειμένου να αξιολογηθεί η ποζολανική δραστικότητα της κεραμικής κονίας, παρασκευάστηκαν αρκετά μίγματα, με ανάμιξη κεραμικής κονίας με ενυδατωμένο ασβέστη, σε διαφορετικές αναλογίες. Από αυτά προέκυψε ότι τη μεγαλύτερη αντοχή που προσδιορίστηκε από θλιπτικές δοκιμές παρουσίασε το μίγμα με αναλογία κεραμικής κονίας προς υδράσβεστο 3:1.

Η χρήση πρόσθετων που συμβάλλουν στην παραγωγή κονιαμάτων αποκατάστασης ελαφρότερων, με πιο συμβατή μικροδομή, απασχολεί ιδιαίτερα την σύγχρονη έρευνα (Katsioti et al., 2007, Πηγή: Βογιατζής κ.ά., 2008).

Τα κονιάματα υδραυλικής άσβεστου ανάλογα με την αντοχή που αναπτύσσουν χαρακτηρίζονται χαμηλής ή υψηλής υδραυλικότητας. Το 2008 πραγματοποιήθηκαν πειράματα στο στο τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης από τους Μαρκόπουλος κ.ά, όπου έγινε σύνθεση κονιαμάτων υδραυλικής ασβέστου με κατάλληλα αδρανή και ελέγχθηκε η μηχανική τους συμπεριφορά με δοκιμές ανεμπόδιστης μονοαξονικής θλίψης σε διαφορετικούς χρόνους ζωής των δοκιμίων. Σύμφωνα με τις ευρωπαϊκές προδιαγραφές οι τιμές των αντοχών που προσδιορίστηκαν ταξινομούν τα κονιάματα με αντοχή 1.11 MPa στην κατηγορία της φυσικής υδραυλικής ασβέστου χαμηλής υδραυλικότητας (NHL2) και τα κονιάματα με αντοχή 6.76 MPa στα κονιάματα υψηλής υδραυλικότητας (NHL5).

Σύμφωνα με πειράματα μονοαξονικής θλίψης που πραγματοποιήθηκαν σε δομικά κονιάματα, παρατηρήθηκε αύξηση της τιμής της αντοχής τους όταν σε αυτά προστέθηκε τσιμέντο (Μαρκόπουλος κ.α., 2008). Η θλιπτική αντοχή είναι το ποιοτικό χαρακτηριστικό των κονιαμάτων δόμησης σύμφωνα με το οποίο αυτά κατατάσσονται σε κατηγορίες στο πρότυπο ΕΛΟΤ EN 998-2 (Πίνακας 4.1). Η κάθε κατηγορία θλιπτικής αντοχής συμβολίζεται με το γράμμα M μετά το οποίο αναγράφεται η αντοχή σε MPa. Η θλιπτική αντοχή 28 ημερών προσδιορίζεται σύμφωνα με το ΕΛΟΤ EN 1015-11. Η σχέση μεταξύ ελάχιστης θλιπτικής αντοχής και των αναλογιών (κατ’

όγκο) συστατικών προκύπτει από τον Πίνακα 4.2, όπως δίδεται στο ΕΛΟΤ EN 998-2 (ΤΕΕ, 2013)

Πίνακας 4.1: Κατηγορίες κονιαμάτων ΕΛΟΤ EN 998-2 (ΤΕΕ, 2013)

Κατηγορία κονιαμάτων:	M 1	M 2.5	M 5	M 10	M 15	M 20
Ελάχιστη αντοχή σε θλίψη [MPa]:	1	2.5	5	10	15	20

Πίνακας 4.2: Σχέση μεταξύ ελάχιστης θλιπτικής αντοχής και αναλογιών συστατικών ΕΛΟΤ EN 998-2 (ΤΕΕ, 2013)

Ελάχιστη αντοχή σε θλίψη [MPa]	Τσιμέντο	Υδράσβεστος	Αδρανή
1	0	1 – 1.5	4 – 5
1	1	1 - 2	6 – 9
2.5	1	1	6
5	1	0 – 0.5	3 – 4.5

Οι Blanco-Varela and Fortes-Revilla, 2004 παρασκεύασαν τέσσερα διαφορετικά κονιάματα αναμειγνύοντας ασβέστη, μετακαολίνη, άμμο, νερό και σε ορισμένες περιπτώσεις πλαστικοποιητή (Πίνακας 4.3). Τα δοκίμια ήταν πρισματικά διαστάσεων 1x1x6 cm, ενώ οι συνθήκες ωρίμανσής τους περιλάμβαναν την παραμονή τους σε θάλαμο σταθερής θερμοκρασίας και υγρασίας 21°C και 100% υγρασία, για μία μέρα και διατήρηση έπειτα για 15 μέρες σε σταθερές συνθήκες. Μετά από αυτό το διάστημα πραγματοποιήθηκαν δοκιμές από τις οποίες προέκυψαν οι αντοχές σε θλίψη, σε κάμψη, το πορώδες και το μέγεθος των κόκκων των εξεταζόμενων κονιαμάτων (Πίνακας 4.3).

Πίνακας 4.3: Μηχανική αντοχή, πορώδες και αναλογίες κονιαμάτων (Blanco-Varela and Fortes-Revilla, 2004)

Τύπος κονιάματος	Ασβέστης: Μετακαολίνης	Πρόσμικτα 2%	Ασβέστης και μετακαολίνης: νερό	Πορώδες %	Αντοχή σε κάμψη [MPa]	Αντοχή σε εφελκυσμό [MPa]
I	1:1	Ναι	0.553	29.15	23.61	82.5

II	1:2	Ναι	0.509	27.75	19.01	60.6
III	1:1	Όχι	0.975	34.72	10.36	29.9
IV	1:2	Όχι	1.000	37.51	10.22	29.28

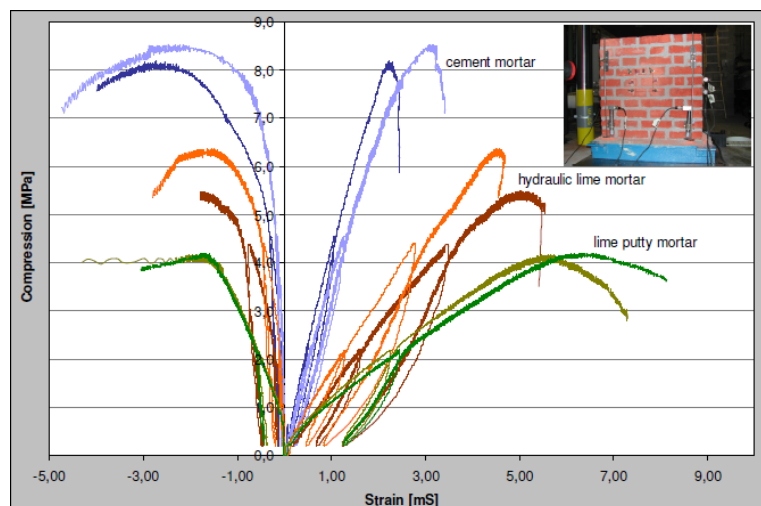
Παρόμοια πειράματα μονοαξονικής θλίψης πραγματοποιήθηκαν σε κυβικά δοκίμια ασβεστοκονιαμάτων, κονιαμάτων με ασβέστη και μετακαολίνη, καθώς και κονιαμάτων με ασβέστη, μετακαολίνη και τσιμέντο Portland, διαφόρων διαστάσεων, από τους Drdácý et al. (2008). Τα δοκίμια εξετάστηκαν μετά από ωρίμανση 100 ημερών και από τις δοκιμές προέκυψε ότι το μέτρο ελαστικότητας για τα ασβεστοκονιάματα έφτανε τα 1.6 GPa, ενώ η συμπεριφορά όλων των δοκιμίων ήταν μη γραμμική και δεν ολοκληρώθηκε η διαδικασία της ενανθράκωσης.

4.4.3.2 Τσιμεντοκονιάματα

Σε κονιάματα με τσιμέντο πραγματοποιήθηκαν μονοαξονικές και τριαξονικές δοκιμές φόρτισης. Οι Hayen et al. 2009 μελέτησαν τρία διαφορετικής σύστασης κονιάματα που χρησιμοποιούνται στην τοιχοποιία (Πίνακας 4.4). Ο κύριος σκοπός της έρευνάς τους ήταν να αποσαφηνίσουν την επίδραση του κονιάματος στη δομή ώστε να διευκρινιστεί η προέλευση των παραμορφώσεων της τοιχοποιίας. Γι' αυτό το σκοπό, πραγματοποίησαν δοκιμές μονοαξονικής θλίψης σε απλή τοιχοποιία. Αυτές οι δοκιμές αποτελούνταν από μία ακολουθία κύκλων φόρτισης αποφόρτισης, με φόρτιση 250 kN στο τέλος κάθε κύκλου φόρτισης, έτσι ώστε να εξεταστεί η ελαστική και / ή πλαστική συμπεριφορά της δομής της τοιχοποιίας. Ο ρυθμός φόρτισης ήταν σταθερός και ίσος με 0.1 mm/min. Οι παραμορφώσεις της τοιχοδομής μετρήθηκαν με χρήση μιας σειράς LVDT's, που τοποθετήθηκαν στην τοιχοδομή. Εκτός των άλλων, τοποθετήθηκαν επίσης τέσσερα ζεύγη LVDT's κάθετα και από δύο κοντά στις γωνίες της μπροστινής και της πίσω επιφάνειας, ώστε να μετρηθούν οι κάθετες μετατοπίσεις της δομής. Τα αποτελέσματα των κάθετων παραμορφώσεων και τάσεων στην *Εικόνα 4.1*.

Πίνακας 4.4: Μηχανικές ιδιότητες των κονιαμάτων ηλικίας 28 ημερών (η τυπική απόκλιση είναι μέσα στις παρενθέσεις) (Hayen et al. 2009)

Τύπος κονιάματος	f_t [MPa]	f_c [MPa]	E_v [MPa]
Ασβεστοπολτός	0.52 (0.03)	0.79 (0.09)	96 (36)
Υδραυλικό ασβεστοκονίαμα	1.34 (0.11)	4.47 (0.28)	-
Τσιμεντοκονίαμα	5.81 (0.35)	19.47 (1.23)	3325 (1643)



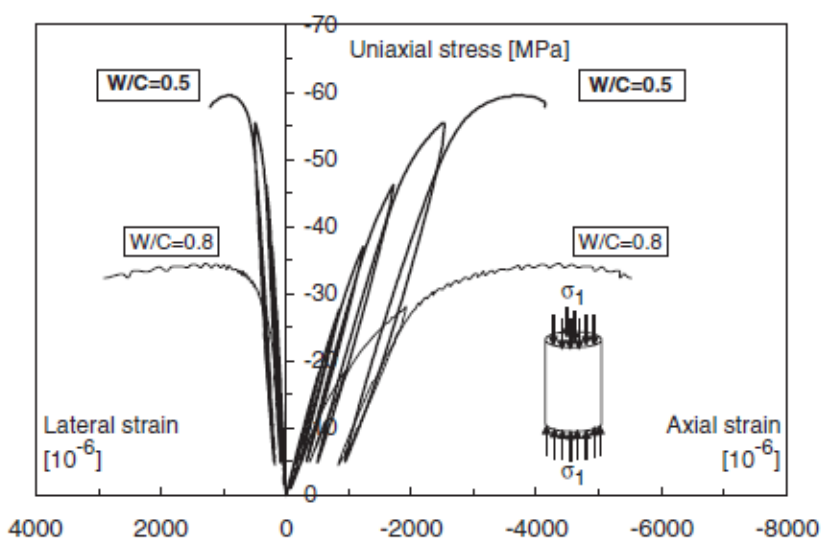
Εικόνα 4.1: Ανάπτυξη των κάθετων τάσεων και παραμορφώσεων (-) οριζόντιες παραμορφώσεις στα αριστερά και (+) κάθετες παραμορφώσεις στα δεξιά (Hayen et al., 2009)

Σε δύο κονιάματα διαφορετικής σύστασης μόνο σε ότι αφορά την αναλογία νερού - τσιμέντου (Πίνακας 4.5), η αύξηση της αναλογίας νερού - τσιμέντου έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της μονοαξονικής αντοχής και την αύξηση του πορώδους, καθώς επίσης και τη μείωση του μέτρου ελαστικότητας του Young (Εικόνα 4.2). Συγκεκριμένα, το μέτρο ελαστικότητας του Young για τα δύο κονιάματα παραμένει σταθερό μέχρι ένα επίπεδο ξήρανσης και έπειτα μειώνεται 15% (κονίαμα 05) και 18% (κονίαμα 08). Η γενική συμπεριφορά μπορεί να θεωρηθεί ψαθυρή με αποτελέσματα χαλάρωσης (softening effects). Η συμπεριφορά των υλικών υπό υδροστατική φόρτιση φαίνεται στις Εικόνες 4.3 και, 4.4. Η υδροστατική φόρτιση κυμαινόταν ανάμεσα στα 0 – 15 MPa. Οι τιμές των παραμορφώσεων που μετρήθηκαν στο κονίαμα είναι παρόμοιες, το οποίο υποδηλώνει μία σχεδόν ισότροπη και άρα μία ομογενή συνεισφορά των μικρορωγμών χωρίς κανένα προτιμώμενο προσανατολισμό. Επίσης φαίνεται να διατηρείται μία γενική ισοτροπία μετά την

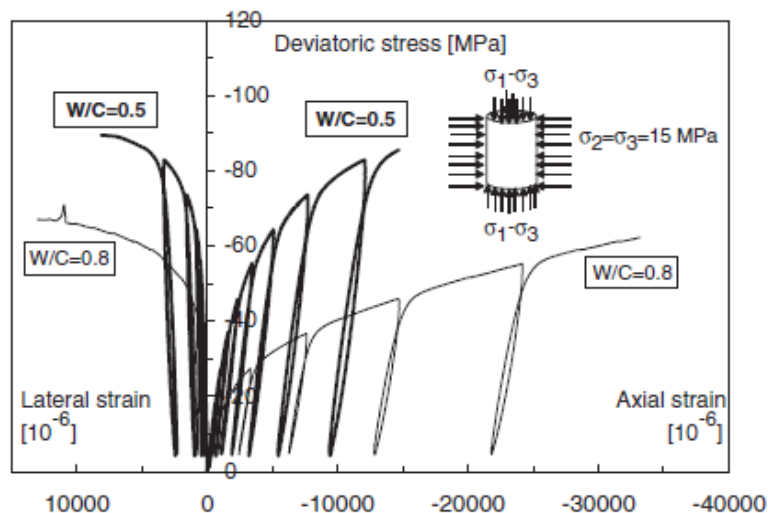
ξηράνση. Μαζί με την μείωση του μέτρου συμπίεσης, μία αύξηση στην αναλογία νερού - τσιμέντου οδηγεί το κονίαμα 08 σε απώλεια της γραμμικής συμπεριφοράς του από τα 10 MPa και πάνω, η οποία μπορεί να θεωρηθεί σαν ελαστοπλαστική φάση (Yurtdas et al., 2006).

Πίνακας 4.5: Σύνθεση κονιαμάτων (Yurtdas et al., 2006).

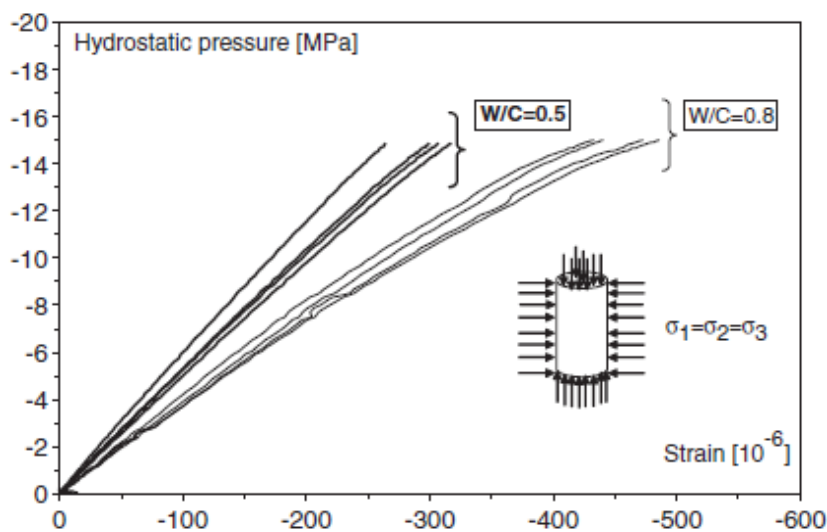
ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ:	KONIAMA 05	KONIAMA 08
Άμμος (EN 196-1) 0/2 mm	1350 kg	1350 kg
Τσιμέντο CEM II/B-M 32.5 R (EN 197-1)	450 kg	450 kg
Νερό	225 kg	360 kg
Αναλογία N/T (W/C)	0.5	0.8



Εικόνα 4.2: Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης στο κονίαμα 05 και 08 σε δείγματα που ξηράνθηκαν για 9 και 15 μέρες αντίστοιχα σε ελεγχόμενο περιβάλλον (Yurtdas et al., 2006)

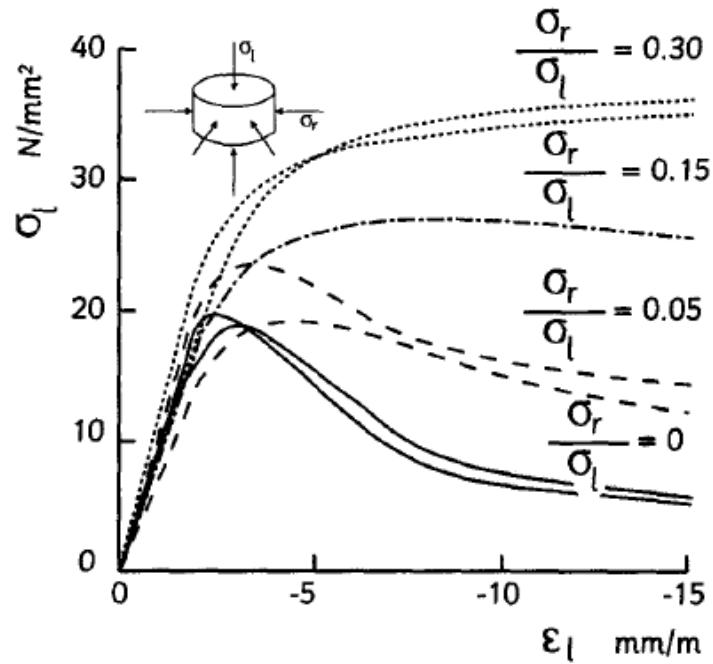


Εικόνα 4.3: Τριαξονική δοκιμή στο κονίαμα 05 και 08 σε δείγματα που ξηράνθηκαν για 14 και 16 μέρες αντίστοιχα σε ελεγχόμενο περιβάλλον (Yurtdas et al., 2006)

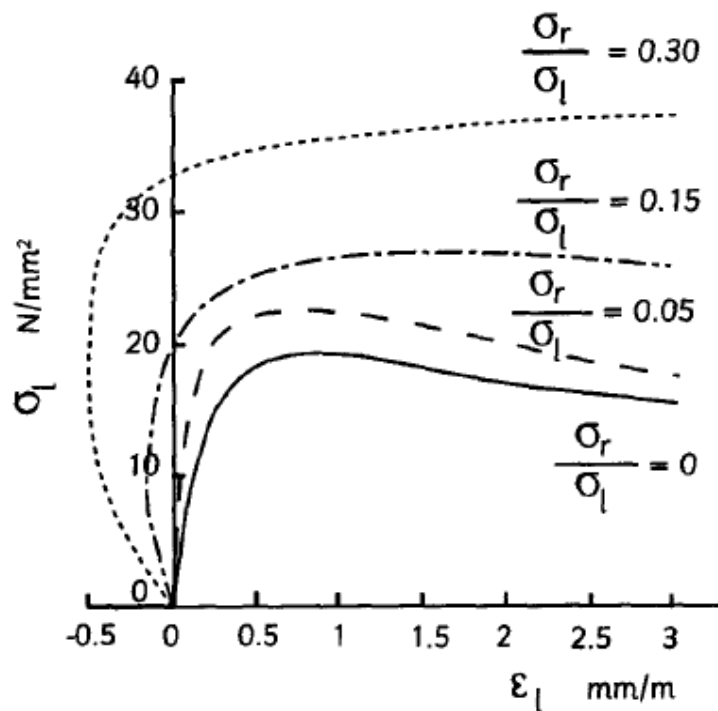


Εικόνα 4.4: Απόκριση των τεσσάρων ηλεκτρικών μηχανομετρητών για κάθε δείγμα κάτω από υδροστατική συμπίεση (Yurtdas et al., 2006)

Ο Binde, 1998 πραγματοποίησε τριαξονικές δοκιμές σε κονιάματα τοιχοποιίας και συγκεκριμένα σε τσιμεντοκονίαμα Portland ώστε να προσδιορίσει τις πλευρικές τους παραμορφώσεις. Τα δοκίμια του ήταν κυλινδρικά, ύψους 12 mm και διάμετρο 30 mm, σύμφωνα με τους κανονισμούς που ίσχυαν στη Γερμανία. Τα αποτελέσματα των τριαξονικών αυτών δοκιμών φαίνονται στις Εικόνες 4.5 και 4.6 (Binde, 1998).



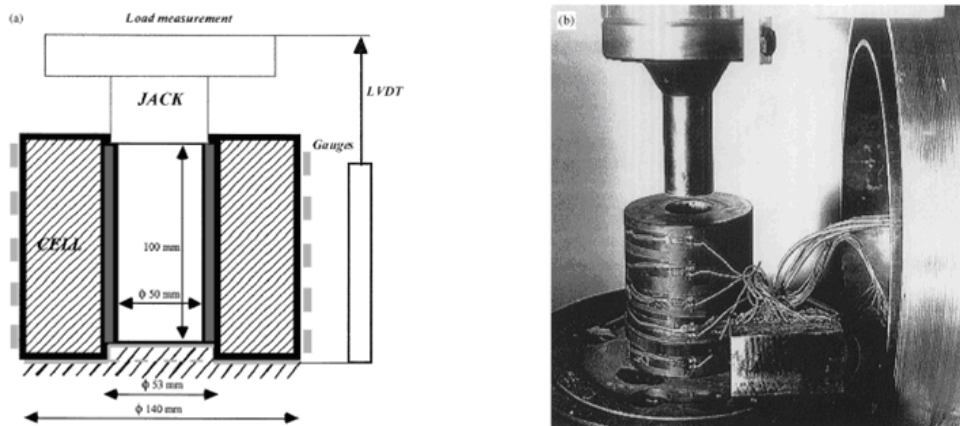
Εικόνα 4.5: Διαμήκεις τάσεις και ανηγμένες παραμορφώσεις για τσιμεντοκονίαμα Portland (Binde, 1998)



Εικόνα 4.6: Ακτινικές ανηγμένες παραμορφώσεις συναρτήσει των διαμήκων τάσεων για τσιμεντοκονίαμα Portland (Binde, 1998)

Οι Burlion et al. (2001) πραγματοποίησαν πειράματα τριαξονικής θλίψης, τα οποία ονομάζονται **πειράματα μονοαξονικής θλίψης με πλευρικό περιορισμό** επειδή έχουν

αξονικές τάσεις διαφορετικές από τις ακτινικές, σε κυλινδρικά δοκίμια τσιμεντοκονιάματος, στα οποία οι αξονικές τάσεις ήταν διαφορετικές από τις ακτινικές και οι πλευρές των δοκιμίων ήταν περιορισμένες πλευρικά με χάλυβα (Εικόνα 4.7) εμποδίζοντας έτσι την παραμόρφωσή τους και γι' αυτό δεν αστόχησαν ποτέ. Οι καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης παρουσιάζουν επαναληψιμότητα και παραλαμβάνουν πολύ μεγάλο φορτίο 1200 MPa.



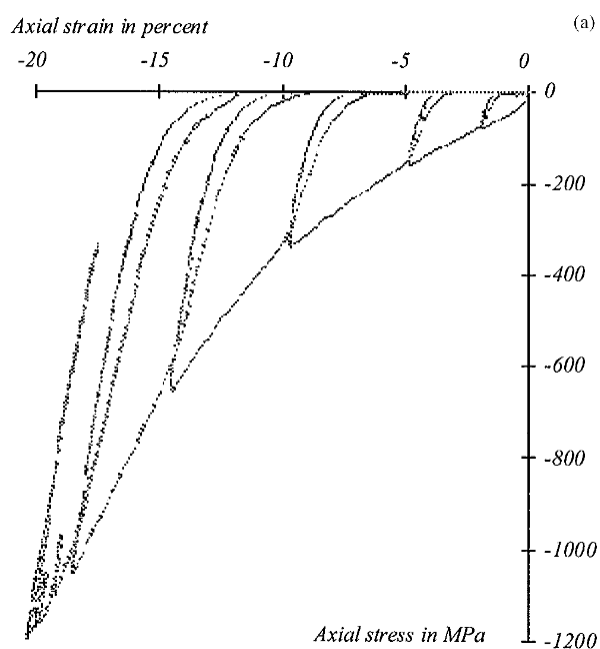
Εικόνα 4.7: (α) αρχές πειραμάτων μονοαξονικής θλίψης με πλευρικό περιορισμό και (β) δοκιμή μονοαξονικής θλίψης με πλευρικό περιορισμό

Μελετήθηκαν τρία είδη κονιαμάτων διαφορετικής σύστασης, με αναλογία νερού - τσιμέντου 0.3, 0.5 και 0.8 αντιστοίχως (Πίνακας 4.6). Στην Εικόνα 4.8 φαίνονται τα αποτελέσματα για το κονίαμα με αναλογία $W/C = 0.5$, όπου W είναι νερό και όπου C είναι τσιμέντο. Παρουσιάζονται οι καμπύλες αξονικών τάσεων - αξονικών παραμορφώσεων, καθώς και αξονικών παραμορφώσεων - ακτινικών τάσεων. Αυτά τα διαγράμματα δείχνουν ότι μετά από μία μικρή ελαστική περιοχή το υλικό συμπεριφέρεται σαν ελαστικοπλαστικό.

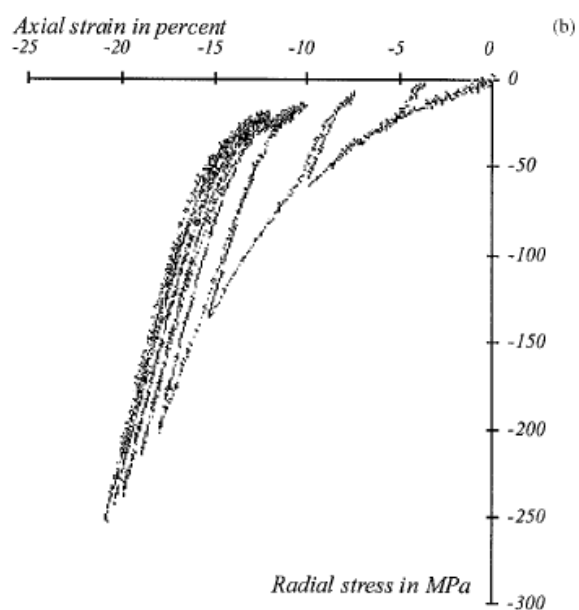
Πίνακας 4.6: Αναλογίες μειγμάτων για τα εξεταζόμενα κονιάματα (Burlion et al., 2001)

(W/C) N/T=0.3	Ποσότητα (kg/m ³)
Άμμος "Leucat" 0/2 mm	1350
Τσιμέντο CPJ/CEM IIb 45	450
Νερό	135
Υπερπλαστικοποιητής	9
(W/C) N/T =0.5	Ποσότητα (kg/m ³)
Άμμος "Leucat" 0/2 mm	1350
Τσιμέντο CPJ/CEM IIb 45	450

Νερό	225
(W/C) N/T=8.	Ποσότητα (kg/m ³)
Άμμος "Leucat" 0/2 mm	1350
Τσιμέντο CPJ/CEM IIb 45	450
Νερό	360

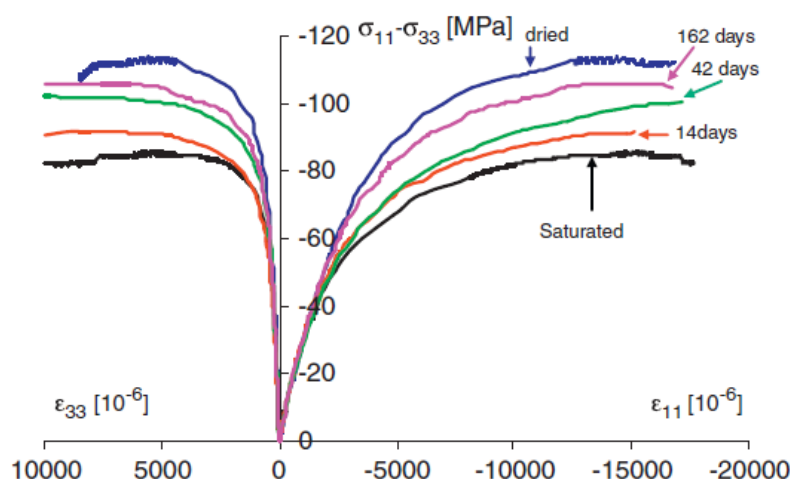


Εικόνα 4.8: Αποτελέσματα κονιαμάτων: α. καμπύλη αξονικής παραμόρφωσης - αξονικής τάσης (Burlion et al., 2001)



Εικόνα 4.8: β. καμπύλη αξονικής παραμόρφωσης - ακτινικής τάσης (Burlion et al., 2001)

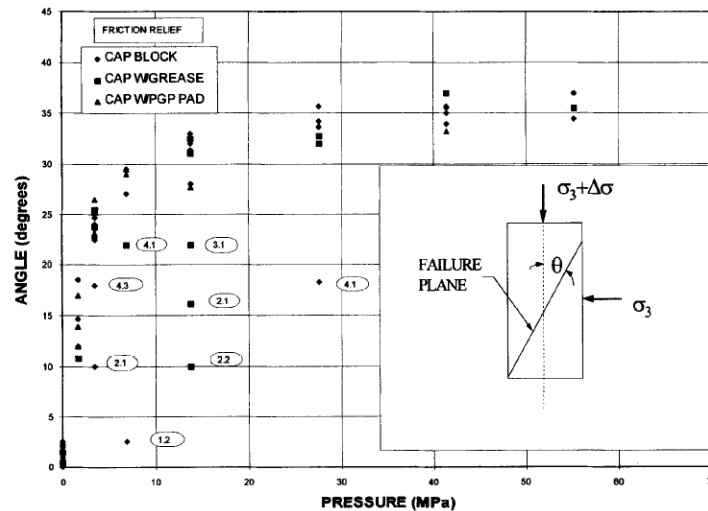
Σύμφωνα με τους Chen et al (2010) ένα ελαστοπλαστικό μοντέλο τσιμεντοκονιάματος παρουσιάζει μετάβαση από τη ψαθυρή στην πλαστική κατάσταση καθώς αυξάνεται η πλευρική πίεση σε μια τριαξονική δοκιμή (Εικόνα 4.9).



Εικόνα 4.9: Καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης ενός τσιμεντοκονιάματος σε διάφορους χρόνους ξήρανσης σε τριαξονική δοκιμή συμπίεσης με πλευρική τάση 15 MPa (Chen et al., 2010)

Το 1997 διερευνήθηκε από τους Rutland and Wang ο μηχανισμός αστοχίας διαφόρων τσιμεντοκονιαμάτων καθώς αυξάνεται η πλευρική τάση (confining pressure) σε τριαξονικές δοκιμές. Γι' αυτό το σκοπό, πραγματοποιήθηκαν 95 τριαξονικές δοκιμές σε κυλινδρικά δοκίμια κονιαμάτων που έδειξαν ότι υπάρχει μία αλλαγή στον προσανατολισμό του επιπέδου αστοχίας καθώς αυξάνεται η πλευρική πίεση. Η πλευρική πίεση στις δοκιμές αυτές κυμαινόταν από 0 έως 56 MPa. Στην Εικόνα 4.10 φαίνεται η σχέση μεταξύ των μετρούμενων γωνιών του επιπέδου αστοχίας και της πλευρικής πίεσης για τα κυλινδρικά δοκίμια. Σ' αυτή την εικόνα φαίνεται η τάση που έχει η γωνία του επιπέδου αστοχίας να αλλάζει κλίση καθώς αυξάνεται η πλευρική πίεση στην τριαξονική δοκιμή. Οι δοκιμές μονοαξονικής θλίψης και οι δοκιμές με πλευρική πίεση 1.7 MPa έδειξαν μεγάλες πλαστικές πλευρικές παραμορφώσεις σε σχέση με τις πλαστικές αξονικές παραμορφώσεις. Καθώς η πλευρική τάση μεγαλώνει πάνω από 1.7 MPa, η πλειοψηφία των πλαστικών παραμορφώσεων παρουσιάζονται στην αξονική διεύθυνση και όχι στην πλευρική. Δοκιμές στα 42 MPa προξενούν αξονικές παραμορφώσεις 5 έως 10 φορές μεγαλύτερες από τις πλευρικές πλαστικές

παραμορφώσεις. Στα 3.5 MPa η αξονική πλαστική παραμόρφωση είναι περίπου τρεις φορές μεγαλύτερη από την πλευρική πλαστική παραμόρφωση. Το σύνολο των πλευρικών παραμορφώσεων σε σχέση με τις αξονικές παραμορφώσεις, αυξάνει κατά τη διαδικασία της φόρτισης.



Εικόνα 4.10: Γωνία αστοχίας - πλευρική τάση (Rutland and Wang, 1997)

Ενώ τα κονιάματα συμπεριφέρονται σχεδόν σαν ελαστικά ψαθυρά υλικά, πρόσφατες μελέτες έδειξαν ότι η μηχανική συμπεριφορά του κονιάματος σε τριαξονική συμπίεση αλλάζει δραματικά (Hayen et al., 2003). Υπό την παρουσία οριζόντιου περιορισμού, το κονιάμα δεν είναι πλέον ψαθυρό, αλλά εν μέρει ελαστοπλαστικό υλικό. Η ύπαρξη του περιορισμού έχει σαν αποτέλεσμα την ταυτόχρονη αύξηση της αντοχής σε θλίψη του κονιάματος. Καθώς τα κονιάματα μετατρέπονται σε ελαστοπλαστικά υλικά, απορροφούν τις παραμορφώσεις της συνολικής δομής εισάγοντας την πλαστικότητα στη δομή της τοιχοποιίας (Hayen et al., 2003).

Από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση που παρατέθηκε παραπάνω γίνεται φανερό πως πραγματοποιήθηκαν δοκιμές μονοαξονικής και τριαξονικής θλίψης σε κονιάματα από τσιμέντο, ενώ σε κονιάματα από υδραυλική κονία πραγματοποιήθηκαν μόνο μονοαξονικές δοκιμές. Οι τριαξονικές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής έγιναν σε ποζολανικά αβσεστολιθικά κονιάματα που χρησιμοποιούνται σαν συγκολλητικά υλικά και ίδια πειράματα δεν έχουν ξαναγίνει.

4.5 Τριαξονικές Δοκιμές ασβεστοκονιαμένων - Πειραματική διαδικασία

4.5.1 Γενικά

Από την προηγούμενη ενότητα (4.4.3.2) γίνεται φανερό ότι στη βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετές αναφορές για τη ψαθυρή συμπεριφορά των τσιμεντοκονιαμάτων και τη σταδιακή μετάβασή τους σε ελαστοπλαστική συμπεριφορά με αύξηση της πλευρικής πίεσης κατά τις τριαξονικές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν σε αυτές. Για τα ποζολανικά ασβεστοκονιάματα, τα οποία ως υλικό πλήρωσης περιλαμβάνουν ασβέστη και μετακαολίνη έχει μελετηθεί μόνο η συμπεριφορά κυβικών δοκιμίων σε μονοαξονική θλίψη. Σε αυτή την ενότητα αναλύεται η πειραματική διαδικασία για την παρασκευή (χύτευση) και τριαξονική καταπόνηση κυλινδρικών δοκιμίων κονιαμάτων, τα οποία αποτελούνται από υδράσβεστο και μετακαολίνη και τα οποία χρησιμοποιούνται σαν πληρωτικά υλικά κυρίως σε αναστηλωτικές εργασίες, η σύσταση και η αναλογία των οποίων είναι παρόμοια με υλικό που αναπτύχθηκε από τους Maravelaki et al. (2013).

Η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε περιλάμβανε δύο μέρη, α) την παρασκευή των κονιαμάτων και β) τις δοκιμές μονοαξονικής θλίψης και τριαξονικής καταπόνησης για τον προσδιορισμό της αντοχής και της μηχανικής συμπεριφοράς τους.

α) Η παρασκευή ενός κονιάματος αποτελείται από τρία στάδια.

- **Το πρώτο στάδιο είναι προπαρασκευαστικό και περιλαμβάνει** την προετοιμασία της μήτρας πριν τη χύτευση του κονιάματος, δηλαδή τη συναρμογή της και το λάδωμα του εσωτερικού της με λιπαντικό μέσο ώστε να ξεκολλάει το δοκίμιο εύκολα κατά την αφαίρεσή του από αυτή.
- **Το δεύτερο στάδιο περιλαμβάνει:**
 1. την επιλογή και ανάμειξη των υλικών του κονιάματος
 2. τον τρόπο χύτευσης του κονιάματος
- **Το τρίτο στάδιο περιλαμβάνει τις συνθήκες ωρίμανσης του κονιάματος:**
 1. το κονίαμα αφαιρείται από την μήτρα μετά από τέσσερις ημέρες,
 2. μετά πρέπει να μείνει στην υγρασία είκοσι δύο μέρες

3. και τέλος πρέπει να μείνει εκτός υγρασίας σε φυσικές συνθήκες (δωμάτιο εργαστηρίου) δύο μέρες ώστε να στεγνώσει και να είναι έτοιμο για τη δοκιμή μονοαξονικής ή τριαξονικής θλίψης από όπου θα προσδιοριστεί η μηχανική αντοχή του.

β) Για την πραγματοποίηση των τριαξονικών δοκιμών θλίψης οι πλευρές του κάθε δοκιμίου επιβάλλεται να είναι λείες χωρίς ανωμαλίες με ανοχή 0.3 mm σε όλο το μήκος του δοκιμίου. Επίσης, το φορτίο κατά τη διάρκεια της δοκιμής πρέπει να επιβάλλεται χωρίς διακοπές με σταθερό ρυθμό φόρτισης μεταξύ 0.5-1.0 MPa/s. (Αγιουτάντης, 2002).

4.5.2 Χρησιμοποιούμενα υλικά για την κατασκευή των κονιαμάτων

Τα κονιάματα που μελετήθηκαν στην παρούσα διδακτορική διατριβή είναι ποζολανικά ασβεστοκονιάματα πλήρωσης, τα οποία παρασκευάστηκαν από αδρανή, κονία και νερό. Ως αδρανή χρησιμοποιήθηκαν δύο κοκκομετρικά κλάσματα ασβεστολιθικής άμμου 63 μm και 125 μm σε ίση αναλογία, αφού πρώτα πλύθηκαν με απιοντισμένο νερό και έπειτα ξηράνθηκαν ώστε να μην περιέχουν υγρασία. Η κονία αποτελούνταν από υδράσβεστο και μετακαολίνη σε αναλογία 2:3. Εδώ πρέπει να αναφερθεί ότι ο μετακαολίνης είναι μία λευκού χρώματος τεχνητή ποζολάνη που λαμβάνεται από τη θερμική επεξεργασία του καολίνης, είναι σχεδόν άμορφος, συμβατός με τους φυσικούς λίθους, απαλλαγμένος από αλκάλια, έχει πολύ υψηλή ειδική επιφάνεια που συνεπάγεται πολύ υψηλή αντιδραστικότητα με τον ασβέστη (Blanco-Varela and Fortes-Revilla, 2004). Επίσης σημαντική είναι η επίδρασή του στην αντοχή των κονιαμάτων. Στα κονιάματα η αντικατάσταση του τσιμέντου με 5-20% μετακαολίνη οδηγεί σε σημαντική αύξηση της θλιπτικής αντοχής για τα κονιάματα υψηλής απόδοσης έως τις 28 ημέρες (Ambroise et al., 1994). Το νερό που χρησιμοποιήθηκε ήταν απιοντισμένο, ώστε να είναι απαλλαγμένο από άλατα.

Η αναλογία των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή των κονιαμάτων δηλαδή άμμος: κονία: νερό ήταν αντίστοιχα 1:1:0.8 (Maravelaki-Kalaitzaki, 2013). Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι η αναλογία των συγκολλητικών υλικών, δηλαδή ο μετακαολίνης προς την υδράσβεστο, ήταν 2:3. Μετά την ανάμειξη των συστατικών ακολούθησε η χύτευση σε κατάλληλες κυλινδρικές μήτρες, οι οποίες έπρεπε να έχουν διάμετρο περίπου 5 cm, οι βάσεις τους να είναι παράλληλες μεταξύ τους με ανοχή

περίπου 0.02 mm και ορθογώνιες ως προς τον άξονα συμμετρίας του δοκιμίου με ανοχή 0.001 ακτίνια (περίπου 3.5 λεπτά της μοίρας). Οι μήτρες έπρεπε να είναι κυλινδρικές και να πληρούν αυτές τις προδιαγραφές επειδή η αντοχή και η μηχανική συμπεριφορά των κονιαμάτων θα προσδιοριζόταν με τριαξονικές δοκιμές θλίψης.

4.5.3 Χύτευση κονιαμάτων

Στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής έγιναν διάφορες δοκιμές χύτευσης μέχρι να επιλεγεί η καλύτερη από αυτές. Οι αλλαγές που έγιναν αφορούσαν την κατασκευή των μητρών, τον τρόπο χύτευσης, τις συνθήκες ωρίμανσης των δοκιμίων καθώς και το λάδωμα των μητρών πριν την χύτευση των κονιαμάτων.

1. Αρχικές μήτρες και οριζόντια χύτευση.

Σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν αρχικά δύο ανοξείδωτες κυλινδρικές μήτρες όπως αυτές παρουσιάζονται στην *Εικόνα 4.11*. Η χύτευση πραγματοποιήθηκε οριζόντια από μία μικρή εσοχή διαμέτρου 1 cm, η οποία βρισκόταν στο κέντρο της κυλινδρικής επιφάνειας της μήτρας. Ο συνολικός αριθμός κονιαμάτων που χυτεύθηκαν στις μήτρες όπως αυτές παρουσιάζονται στις *Εικόνες 4.11, 4.12, 4.13* είναι έξι. Σχετικά με τις συνθήκες ωρίμανσης των δοκιμίων, για τις δοκιμές από το δοκίμιο D1 έως το δοκίμιο D6U το δοκίμιο έβγαινε από τη μήτρα τέσσερις μέρες μετά την χύτευσή του και τοποθετούνταν για είκοσι δύο μέρες σε ένα πλαστικό κουτί, το οποίο ήταν ερμητικά κλειστό και μέσα στο οποίο υπήρχε δοχείο με νερό έτσι ώστε το κονίαμα να βρίσκεται συνεχώς σε υγρό περιβάλλον.



Εικόνα 4.11: Μήτρα που χρησιμοποιήθηκε αρχικά



Εικόνα 4.12: Εσωτερικές πλαϊνές πλευρές της αρχικής μήτρας



Εικόνα 4.13: Εξωτερικές πλαϊνές πλευρές της μήτρας

Μετά τις πρώτες χυτεύσεις διαπιστώθηκε ότι ο τρόπος σύνδεσης των πλαϊνών πλευρών της κάθε μήτρας με το κυλινδρικό τμήμα δεν ήταν δόκιμος, καθώς κατά την αφαίρεση της μήτρας ήταν δυνατόν να αποκολλουθούν τμήματα κονιάματος από τις βάσεις του δοκιμίου. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα αρκετά δοκίμια να μη μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε καμία δοκιμή γιατί οι βάσεις τους δεν πληρούσαν τις προδιαγραφές φόρτισης.

2. Χρήση σφικτήρων στις αρχικές μήτρες και δόνηση κατά την οριζόντια χύτευση

Για να λυθεί το πρόβλημα που παρουσιάστηκε στις βάσεις των δοκιμίων τοποθετήθηκαν σφικτήρες στην κυλινδρική επιφάνεια της κάθε μήτρας και συγκεκριμένα δεξιά και αριστερά από την οπή από όπου γινόταν η χύτευση, ώστε η διάμετρος της μήτρας να διατηρείται σταθερή και ίση με 5 cm και οι βάσεις της να εφαρμόζουν καλύτερα στον κορμό της. Η χύτευση ήταν και εδώ οριζόντια. Αυτή η αλλαγή στις μήτρες είχε ως αποτέλεσμα να λυθεί αυτό πρόβλημα όμως προέκυψε ένα νέο, το οποίο αφορούσε τη ρωγμάτωση που παρουσιάστηκε σε αρκετά δοκίμια. Αρχικά θεωρήθηκε ότι για τις ρωγμές που παρατηρήθηκαν έφταιγε ο αέρας που εγκλωβιζόταν στη μήτρα κατά τη χύτευση. Γι' αυτό στις επόμενες πέντε χυτεύσεις χρησιμοποιήθηκε δόνηση κατά τη χύτευση. Καθώς εκείνη την χρονική περίοδο δεν υπήρχε διαθέσιμη τράπεζα δόνησης, χρησιμοποιήθηκε μία μηχανή δόνησης, η οποία χρησιμοποιείται για κοσκίνισμα υλικού (*Εικόνα 4.14*). Μετά τις χυτεύσεις η μήτρα τοποθετείτο αμέσως επάνω στη μηχανή δόνησης μέσα σε φελιζόλ ώστε να μένει σταθερή ενώ η δόνηση διαρκούσε ένα λεπτό. Το αποτέλεσμα ήταν να δημιουργούνται

περισσότεροι πόροι και ρωγμές στην κυλινδρική επιφάνεια των δοκιμίων, στη θέση τοποθέτησης των σφικτήρων και τα δοκίμια να καταστρέφονται (Εικόνα 4.15). Με αυτόν τον τρόπο χύτευσης δεν έγινε δυνατή η λήψη δοκιμίου που να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε δοκιμές μονοαξονικής ή τριαξονικής θλίψης.



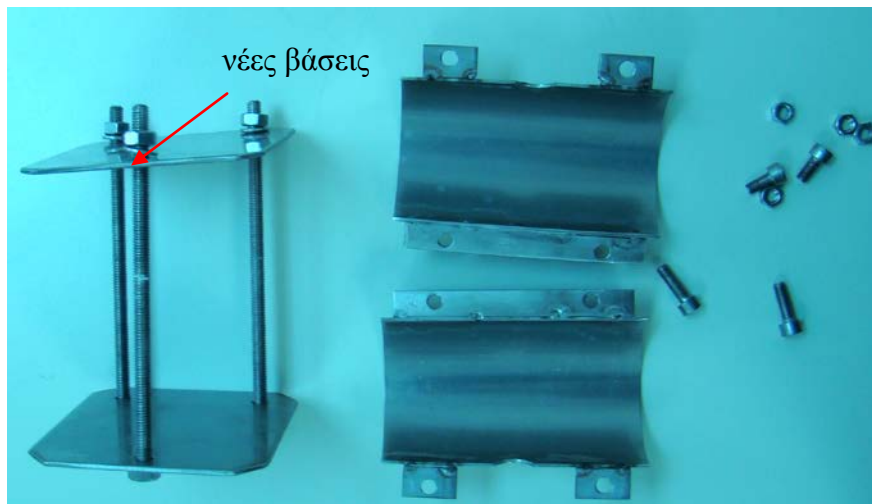
Εικόνα 4.14: Μηχανή δόνησης



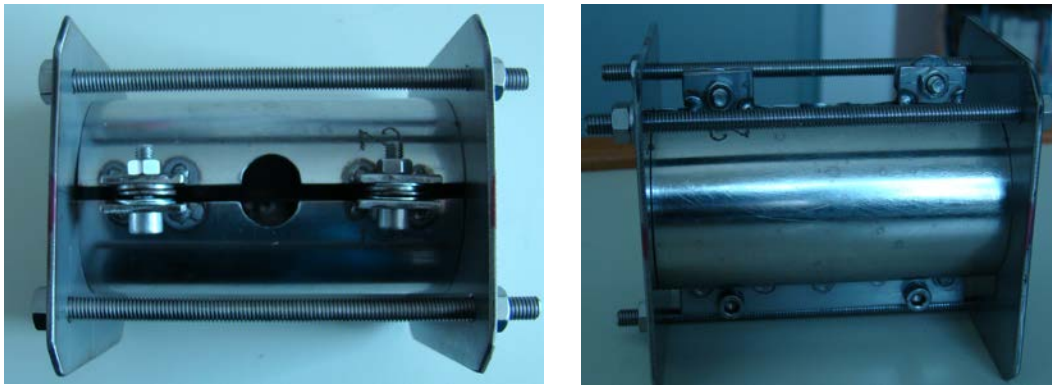
Εικόνα 4.15: Ρωγμές και πόροι στην επιφάνεια ενός κονιάματος εξαιτίας των σφικτήρων και της δόνησης.

3. Νέες μήτρες, οριζόντια χύτευση και νέες συνθήκες ωρίμανσης των κονιαμάτων

Εξαιτίας της παρουσίας πόρων και ρωγμών στις επιφάνειες των δοκιμίων κατά τη χύτευση των κονιαμάτων αποφασίστηκε η αλλαγή των βάσεων της μήτρας, η μη χρήση σφικτήρων στο κυλινδρικό τμήμα της μήτρας, καθώς επίσης και η τροποποίηση του τρόπου ωρίμανσης τους. Μία από τις δύο νέες μήτρες φαίνεται στις Εικόνες 4.16 και 4.17. Αναφορικά με τις συνθήκες ωρίμανσης, όλα τα δοκίμια από το D7 έως και το τελευταίο D38 τοποθετήθηκαν σε θάλαμο γήρανσης, όπου οι συνθήκες υγρασίας και θερμοκρασίας ήταν σταθερές και ίσες με 65% και 22 °C αντίστοιχα.

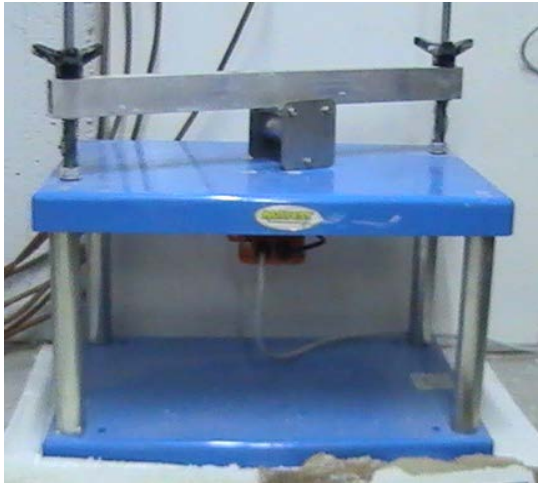


Εικόνα 4.16 : Νέα μήτρα αποσυναρμολογημένη

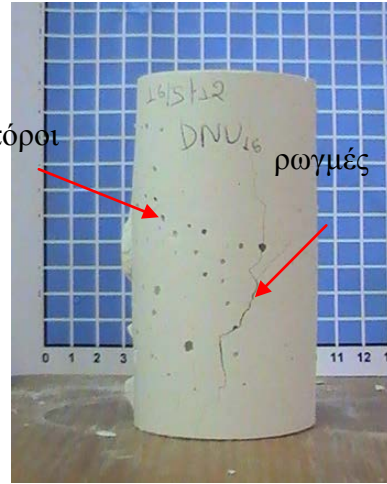


Εικόνα 4.17: Νέα μήτρα συναρμολογημένη

Στην προσπάθεια βελτίωσης της διαδικασίας χύτευσης των κονιαμάτων, στις νέες μήτρες ελέγχθηκε ξανά το ενδεχόμενο ύπαρξης κενού αέρα στο εσωτερικό των δοκιμίων. Δοκιμάστηκε η εξάλειψη του με χρήση δόνησης, αυτή τη φορά όμως με χρήση τράπεζας δόνησης. Στην Εικόνα 4.18 φαίνεται το κονίαμα όταν τοποθετούνταν στην τράπεζα δόνησης αποκτούσε πολλούς πόρους και ρωγμές στην επιφάνεια του, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.19, ακριβώς ότι είχε συμβεί και σε προηγούμενες αντίστοιχες χυτεύσεις. Επειδή με αυτό τον τρόπο χύτευσης καταστράφηκαν πολλά δοκίμια κατά την αφαίρεσή τους από τις μήτρες τους, αποφασίστηκε η μη χρήση δόνησης κατά τη διάρκεια χύτευσης των επόμενων κονιαμάτων.



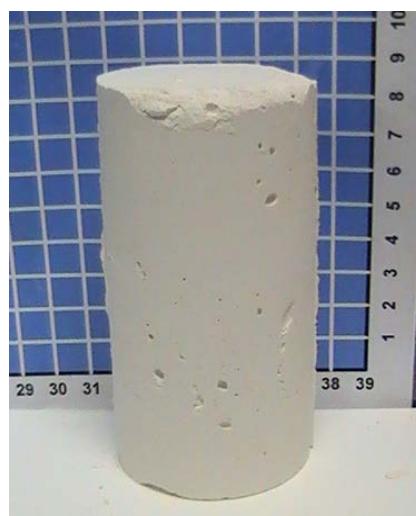
Εικόνα 4.18: Μήτρα κονιάματος πάνω σε τράπεζα δόνησης αμέσως μετά τη χύτευση του κονιάματος



Εικόνα 4.19: Καταστραμμένο δοκίμιο εξαιτίας της δόνησής του κατά τη χύτευση σε τράπεζα δόνησης

4. Κατακόρυφη χύτευση.

Επίσης, έγινε μία προσπάθεια αλλαγής του τρόπου χύτευσης των κονιαμάτων. Γι' αυτό χυτεύθηκαν δύο κονιάματα κατακόρυφα και ταυτόχρονα κατά τη χύτευση το υλικό χτυπήθηκε μία μεταλλική ράβδο αρκετές φορές έτσι ώστε να μην εγκλωβιστεί αέρας στο εσωτερικό του. Το αποτέλεσμα όμως ήταν τα δοκίμια που προέκυψαν να είναι γεμάτα με μεγάλους πόρους στη βάση από όπου χυτεύθηκαν, σε τέτοιο βαθμό ώστε να μη μπορούν να βελτιωθούν με λείανση και επομένως δεν ήταν εφικτή η χρήση τους για τριαξονική ή μονοαξονική δοκιμή (Εικόνα 4.20). Γι' αυτό, απορρίφθηκε αυτός ο τρόπος χύτευσης.



Εικόνα 4.20: Δοκίμιο που χυτεύθηκε κατακόρυφα

5. Νέος τρόπος λίπανση της μήτρας και οριζόντια χύτευση

Πραγματοποιήθηκαν αλλαγές που αφορούσαν το προπαρασκευαστικό στάδιο δηλαδή το στάδιο πριν τη διαδικασία της χύτευσης, ενώ όλες οι επόμενες χυτεύσεις πραγματοποιήθηκαν οριζόντια, από την οπή που είχαν οι μήτρες.

Θεωρώντας ότι κατά τη χύτευση το λιπαντικό ανακατεύεται με το κονίαμα και αυτό επηρεάζει τη μηχανική συμπεριφορά των κονιαμάτων, αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί διαφορετικό υλικό για τη λίπανση των μητρών. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι τα δοκίμια από το D1 έως και το D21 χυτεύθηκαν σε μήτρες που λιπάνθηκαν με λάδι μηχανής και τα αποτελέσματα της μηχανικής τους συμπεριφοράς δεν έδιναν σαφή συμπεράσματα. Γι' αυτό η επόμενη χύτευση έγινε

- αρχικά χωρίς χρήση λίπανσης της μήτρας, όμως το δοκίμιο βγήκε κατεστραμμένο από αυτήν (Εικόνα 4.21).



Εικόνα 4.21: Δοκίμιο που χυτεύθηκε σε μήτρα που δε λιπάνθηκε

- Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε βαζελίνη για τη λίπανση των μητρών, όμως τα δοκίμια που προέκυψαν ήταν γεμάτα μεγάλους πόρους στην εξωτερική κυλινδρική τους επιφάνεια καθώς και στις βάσεις του δοκιμίου Εικόνα 4.22, 4.23. Αυτό είχε σαν συνέπεια, η λύση της βαζελίνης να απορριφθεί.



Εικόνα 4.22: Μεγάλοι πόροι στην εξωτερική επιφάνεια κονιάματος



Εικόνα 4.23: Μεγάλοι πόροι στην βάση κονιάματος

- Τέλος χρησιμοποιήθηκε για την λίπανση της μήτρας μίγμα ελαιόλαδου και υγρού σαπουνιού. Επιλέχθηκε υγρό σαπούνι γιατί έχει την ικανότητα να αραιώνει την λιπαντική ικανότητα του λαδιού. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι η ποσότητα του υγρού σαπουνιού πρέπει να είναι αρκετή ώστε να μειώσει τη λιπαντική ικανότητα του λαδιού. Τα αποτελέσματα της μηχανικής συμπεριφοράς των κονιαμάτων βελτιώθηκαν για τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν με αυτόν τον τρόπο. Γι' αυτό οι μήτρες των δοκιμών από το D22 μέχρι και το τελευταίο λιπάνθηκαν με μίγμα ελαιόλαδου - υγρού σαπουνιού.

4.5.4 Μονοαξονικές δοκιμές θλίψης

Μετά τη χύτευση των κονιαμάτων πραγματοποιήθηκαν αρχικά δύο μονοαξονικές δοκιμές θλίψης για ένα πρώτο προσδιορισμό της αντοχής και της μηχανικής συμπεριφοράς των κονιαμάτων. Τα δοκίμια που υποβλήθηκαν στη δοκιμή αυτή ήταν το D6U και το D9. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι τα δοκίμια οι μήτρες που χρησιμοποιήθηκαν είχαν λιπανθεί με λάδι μηχανής. Στη συνέχεια παρατίθενται τα δύο δοκίμια πριν και μετά τη δοκιμή σε μονοαξονική θλίψη (Εικόνες 4.24,4.25,4.26,4.27). Από τις εικόνες αυτές φαίνεται η αστοχία των δοκιμών.



Εικόνα 4.24: Δοκιμιο D6U πριν τη μονοαξονική θλίψη.



Εικόνα 4.25: Δοκιμιο D6U μετά τη μονοαξονική θλίψη.



Εικόνα 4.26: Δοκιμιο D9 πριν τη μονοαξονική θλίψη



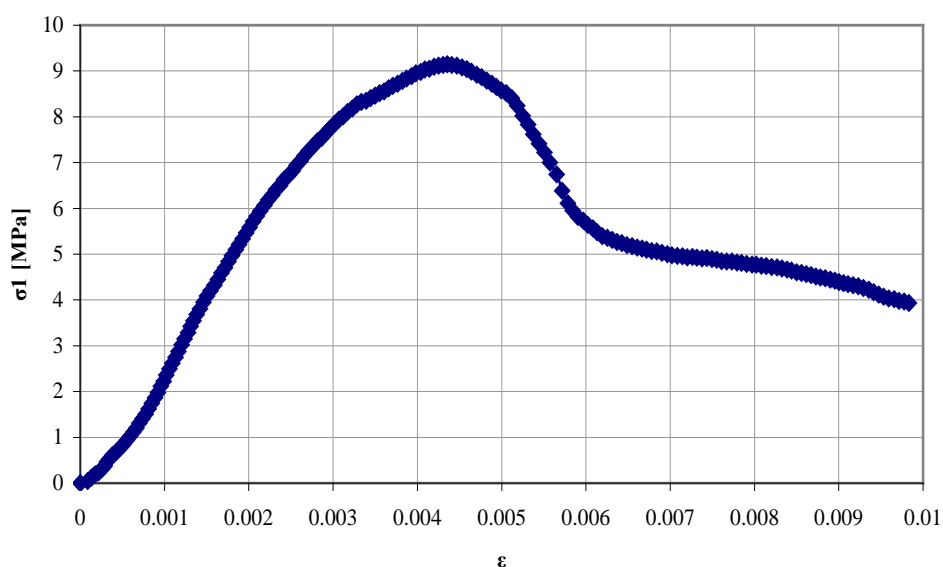
Εικόνα 4.27: Δοκιμιο D9 μετά τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης

Στον Πίνακα 4.7 παρουσιάζονται οι αντοχές (C_o) που ανέπτυξαν τα δύο αυτά δοκίμια και τα αντίστοιχα μέτρα ελαστικότητας E . Η μέγιστη αντοχή τους είναι 9.2 MPa και αναπτύσσεται στο D9, ενώ το μέτρο ελαστικότητάς τους είναι 3.19 ± 0.25 .

Πίνακας 4.7: Αντοχές σε μονοαξονική θλίψη και μέτρο ελαστικότητας

ΔΟΚΙΜΙΟ	Co [MPa]	E [GPa]
D6U	8.12	3.36
D9	9.20	3.01
M.O.	8.66	3.19
T.a.	0.76	0.25

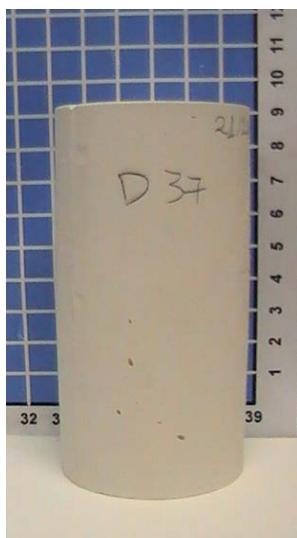
Στην *Εικόνα 4.28* παρουσιάζεται ενδεικτικά η καμπύλη αξονικής τάσης - ανηγμένης παραμόρφωσης του δοκιμίου D9 όπου φαίνεται ότι το υλικό παρουσίασε μικρή πλαστική περιοχή περίπου $\varepsilon = 0.001$ και έπειτα αστόχησε απότομα στα 9.2 MPa.



Εικόνα 4.28: Καμπύλη αξονικής τάσης - ανηγμένης παραμόρφωσης του δοκιμίου D9.

Μετά την αλλαγή στο υλικό λίπανση της μήτρας και με χρήση του μίγματος ελαιόλαδου - υγρού σαπουνιού, πραγματοποιήθηκαν ακόμα δύο μονοαξονικές δοκιμές στα δοκίμια D37 και D38.

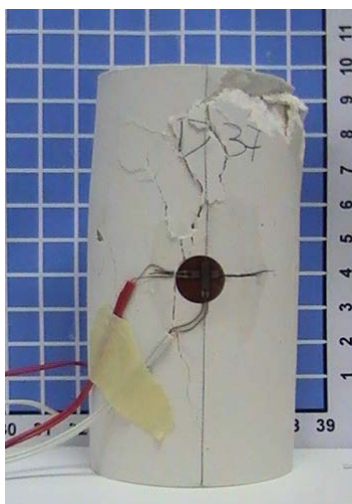
Στο δοκίμιο D37 κατά τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης τοποθετήθηκε ζεύγος ηλεκτρικών μηχανομετρών τα οποία κατέγραψαν τις πλευρικές ανηγμένες παραμορφώσεις. Από αυτά προέκυψε ο λόγος Poisson $\nu = 0.2$ για το κονίαμα που εξετάστηκε και το μέτρο ελαστικότητας για το συγκεκριμένο δοκίμιο $E = 1.63$ GPa. Στις *Εικόνες 4.29, 4.30 και 4.31* παρουσιάζεται το δοκίμιο D37 πριν την τοποθέτηση των ηλεκτρικών μηχανομετρών, μετά την τοποθέτησή τους και τέλος μετά τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.



Εικόνες 4.29: Δοκίμιο D37 πριν τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.

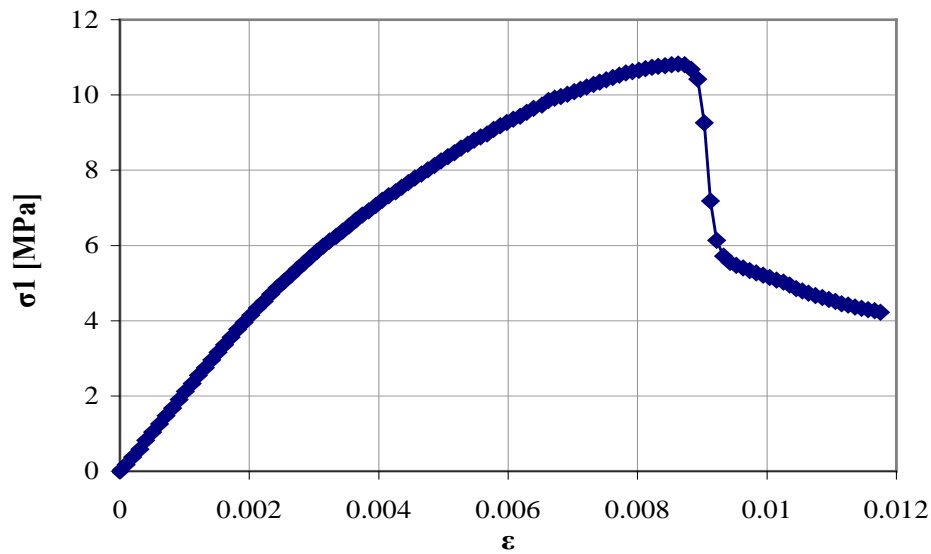


Εικόνες 4.30: Δοκίμιο D37 με ηλεκτρικά μηχανοσκόμμετρα στη μηχανή μονοαξονικής θλίψης

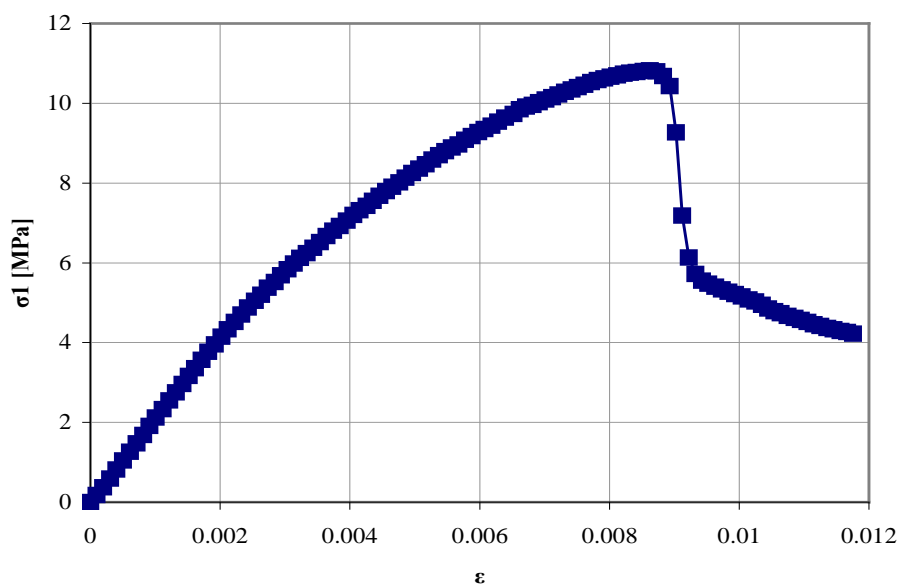


Εικόνες 4.31: Δοκίμιο D37 με ηλεκτρικά μηχανοσκόμμετρα μετά τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης

Στην *Εικόνα 4.32* παρουσιάζεται η καμπύλη αξονικής τάσης - ανηγμένης παραμόρφωσης του δοκιμίου D37 όπου φαίνεται ότι το δοκίμιο αστοχεί απότομα στα 10.82 MPa. Στην *Εικόνα 4.33* παρουσιάζεται η αντίστοιχη καμπύλη αξονικής τάσης - ανηγμένης παραμόρφωσης του δοκιμίου D38, απ' όπου η αντοχή του δοκιμίου είναι 11.68 MPa. Και στις δύο περιπτώσεις η ανηγμένη παραμόρφωση που αντιστοιχεί στην πλαστική περιοχή είναι της τάξεως του 0.1%.



Εικόνα 4.32: Καύση αξονικής τάσης - ανηγμένης παραμόρφωσης του δοκιμίου D37.



Εικόνα 4.33: Καύση αξονικής τάσης - ανηγμένης παραμόρφωσης του δοκιμίου D38.

Στον Πίνακα 4.8 παρουσιάζονται συγκριτικά οι αντοχές και τα μέτρα ελαστικότητας και των τεσσάρων δοκιμίων που προσδιορίστηκαν από δοκιμές μονοαξονικής θλίψης, απ' όπου φαίνεται ότι η αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας των δοκιμίων D37, D38 είναι μεγαλύτερα από αυτά των δοκιμίων D6 και D9.

Πίνακας 4.8: Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη και μέτρο ελαστικότητας όλων των δοκιμίων

ΔΟΚΙΜΙΟ	Co [MPa]	E
D6U	8.12	3.36
D9	9.20	3.01
D37	10.82	3.76
D38	11.68	3.59
M.O.	9.96	3.43
T.α.	1.60	0.32

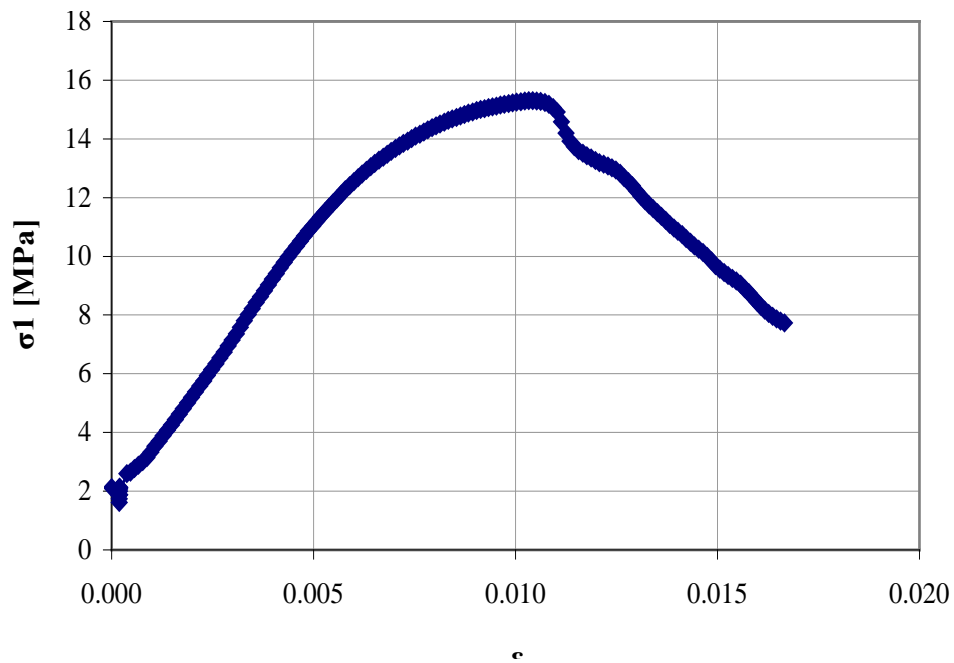
Εκτός από τις μονοαξονικές δοκιμές σε κυλινδρικά δοκίμια ποζολανικού ασβεστοκονιάματος, πραγματοποιήθηκαν και τριαξονικές δοκιμές καταπόνησης.

4.5.5 Τριαξονικές δοκιμές θλίψης

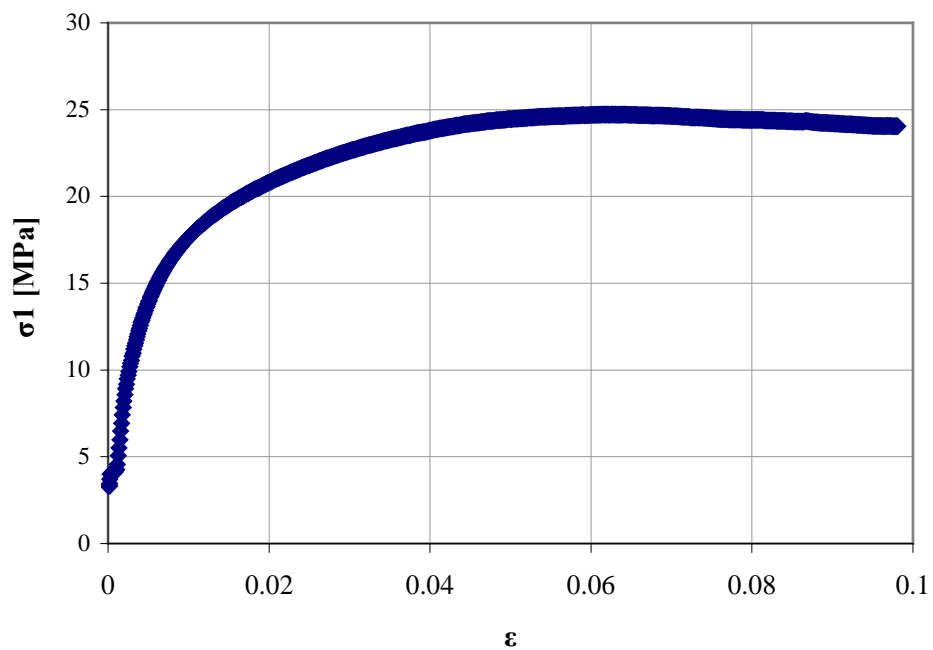
Πραγματοποιήθηκαν τριαξονικές δοκιμές καταπόνησης των κυλινδρικών δοκιμίων για προσδιορισμό της μηχανικής συμπεριφοράς και των μηχανικών ιδιοτήτων των κονιαμάτων. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι από το πρώτο δοκίμιο μέχρι και το εικοστό πρώτο, όποιες αλλαγές και αν έγιναν κατά τη διαδικασία της χύτευσης τα αποτελέσματα δεν παρουσίαζαν επαναληψιμότητα. Ειδικότερα, για ορισμένα δοκίμια όπως το D2, το D13 και το D20 η ανηγμένη παραμόρφωση που αντιστοιχεί στην πλαστική περιοχή ήταν της τάξεως του 0.5%, ενώ για άλλα δοκίμια, όπως το D4, το D7 και το D21 η ανηγμένη παραμόρφωση που αντιστοιχεί στην πλαστική περιοχή ήταν της τάξεως του 8-20%. Οι αντίστοιχες καμπύλες αξονικής τάσης - ανηγμένης παραμόρφωσης δίνονται στις *Εικόνες 4.34, 4.35, 4.36, 4.37, 4.38 και 4.39*.

Από τα δοκίμια D1 - D21 αυτά που εμφανίστηκαν με περισσότερο πλαστική συμπεριφορά (με ανηγμένη παραμόρφωση που αντιστοιχεί στην πλαστική περιοχή της τάξεως του 8-20%) ήταν το D4, D7, D10, D17, D21. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι με βάση τη σύσταση και την αναλογία των κονιαμάτων, αναμενόταν να παρουσιάσουν αρκετά πλαστική συμπεριφορά (η ανηγμένη παραμόρφωση να είναι άνω του 10%). Επομένως, η ανηγμένη παραμόρφωση που αντιστοιχούσε στην πλαστική περιοχή και η οποία ήταν της τάξεως του 0.5% καταδείκνυε ότι κάποιος παράγοντας κατά τη διαδικασία της χύτευσης μέχρι την τριαξονική δοκιμή θλίψης επηρέαζε τη συμπεριφορά των κονιαμάτων. Από την ενότητα 4.5.3 όπου αναφέρονται

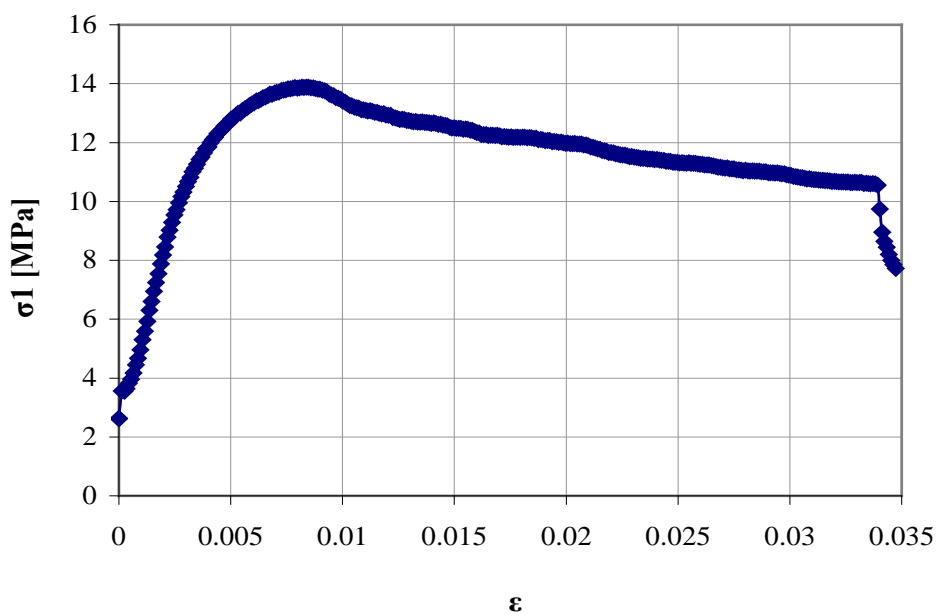
οι δοκιμές FTIR που πραγματοποιήθηκαν στα δοκίμια προκύπτει ότι ο παράγοντας αυτός ήταν το υλικό λίπανσης των μητρών γιατί εμπόδιζε την ολοκλήρωση των αντιδράσεων ενυδάτωσης των κονιαμάτων. Στα δοκίμια D1 - D21 η λίπανση γινόταν με λάδι μηχανής.



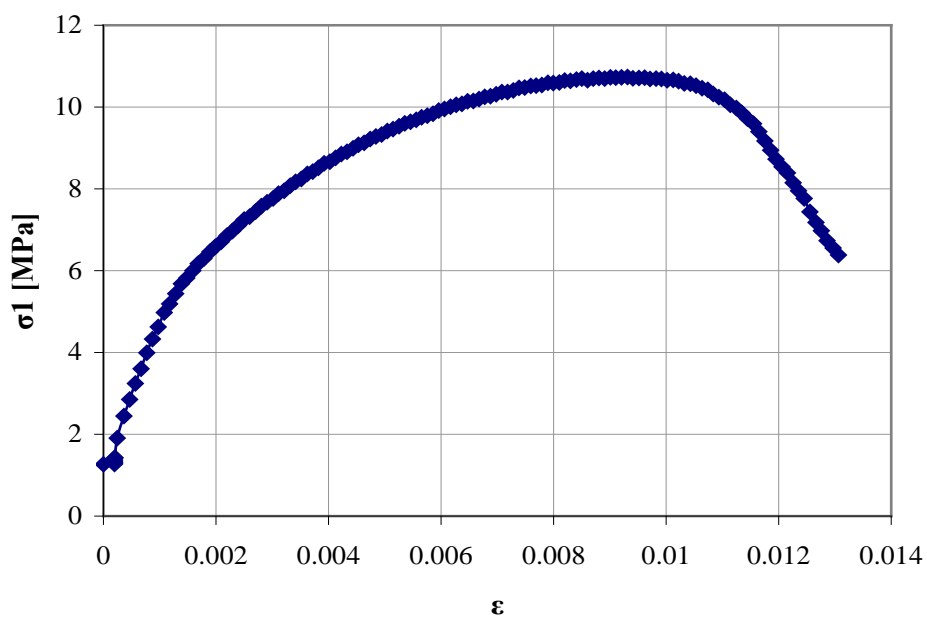
Εικόνα 4.34: Καμπύλη αξονικής τάσης - ανηγμένης παραμόρφωσης για το δοκίμιο D2



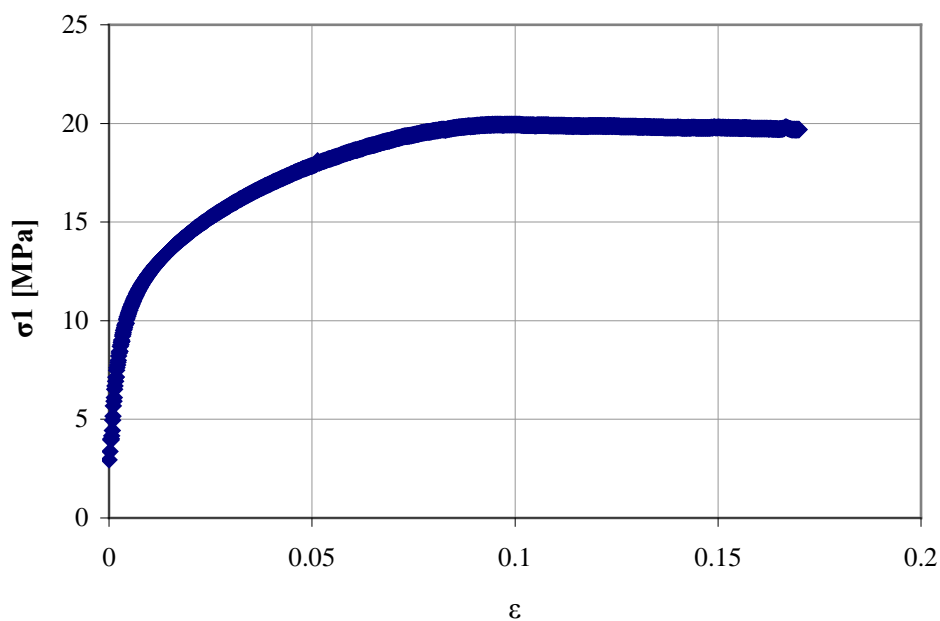
Εικόνα 4.35: Καμπύλη αξονικής τάσης - ανηγμένης παραμόρφωσης για το δοκίμιο D4



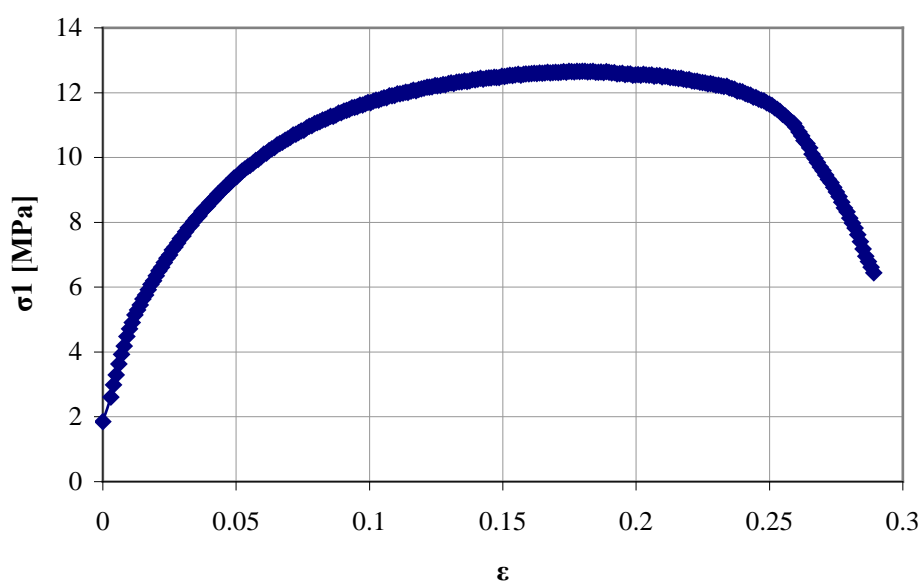
Εικόνα 4.36: Καμπύλη αξονικής τάσης - ανηγμένης παραμόρφωση για το δοκίμιο D13.



Εικόνα 4.37: Καμπύλη αξονικής τάσης - ανηγμένης παραμόρφωση για το δοκίμιο D20.



Εικόνα 4.38: Καμπύλη αξονικής τάσης - ανηγμένης παραμόρφωση για το δοκίμιο D7.



Εικόνα 4.39: Καμπύλη αξονικής τάσης - ανηγμένης παραμόρφωση για το δοκίμιο D21.

Στις Εικόνες 4.40, 4.41 παρουσιάζεται ενδεικτικά το δοκίμιο D4 το οποίο όπως φάνηκε στην Εικόνα 4.35 παρουσίασε ανηγμένη παραμόρφωση, που αντιστοιχεί στην πλαστική περιοχή, ίση με 10%, πριν και μετά την τριαξονική του καταπόνηση, όπου φαίνεται η παραμόρφωση που υπέστη. Αντίστοιχα στις Εικόνες 4.42, 4.43 παρουσιάζεται το δοκίμιο D20 πριν και μετά την τριαξονική καταπόνηση



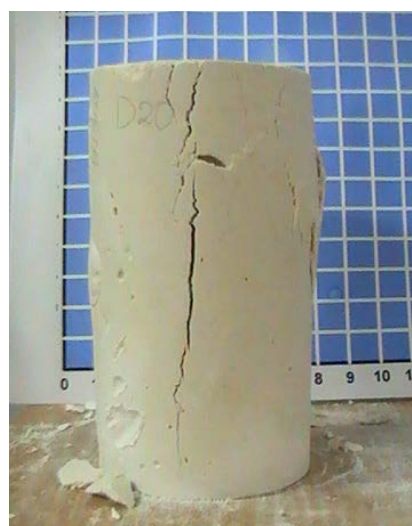
Εικόνες 4.40: Δοκίμιο D4 πριν την τριαξονική δοκιμή



Εικόνες 4.41: Δοκίμιο D4 μετά την τριαξονική δοκιμή



Εικόνα 4.42: Δοκίμιο D20 πριν την τριαξονική καταπόνηση



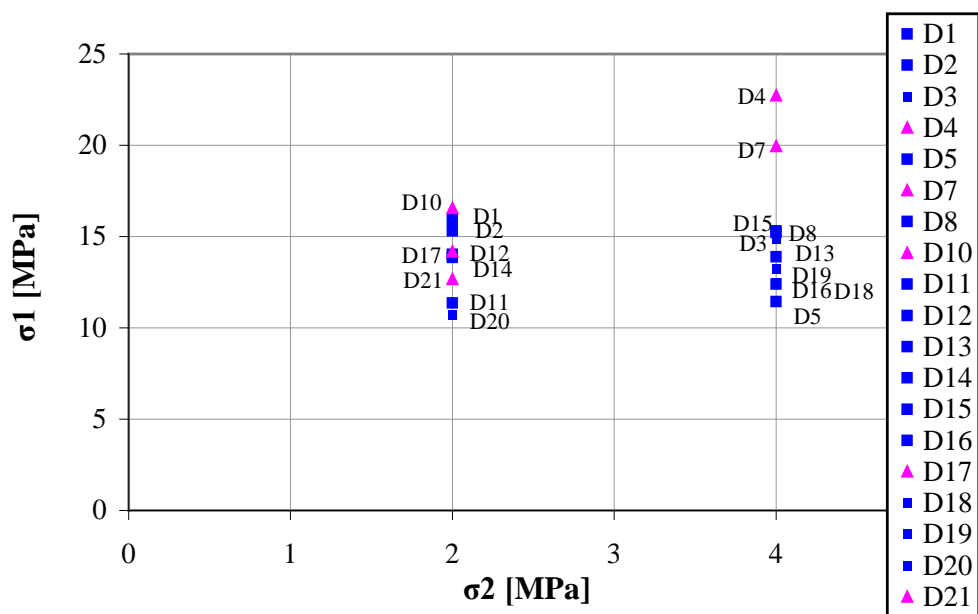
Εικόνα 4.43: Δοκίμιο D20 μετά την τριαξονική καταπόνηση

Οι πλευρικές τάσεις που ασκήθηκαν σε κάθε δοκίμιο από το D1 - D21, καθώς και οι αντοχές που ανέπτυξαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.9. Το αντίστοιχο διάγραμμα τάσεων σ_1 - σ_2 δίνεται στην Εικόνα 4.44, από όπου φαίνεται ότι μόνο η αντοχή που παρουσίασαν τα πολύ πλαστικά κονιάματα (ροζ τριγωνικά σημεία) αυξανόταν καθώς αυξανόταν η πλευρική τάση, ενώ τα λιγότερα πλαστικά κονιάματα (μπλε τετράγωνα σημεία) παρουσίασαν διακύμανση των τιμών καθώς αυξανόταν η πλευρική τάση. Η αναλογία των κονιαμάτων που παρουσίασαν πλαστική συμπεριφορά προς το

συνολικό πλήθος των κονιαμάτων ήταν 1:4. Αλλάζοντας όμως το υλικό λίπανσης αυτή η αναλογία άλλαξε.

Πίνακας 4.9: Αντοχή σε τριαξονική θλίψη των δοκιμίων D1 έως D21 του κονιάματος

ΔΟΚΙΜΙΟ	Co [MPa]	$\sigma_2=\sigma_3$ [MPa]
D1	15.9	2
D2	15.3	2
D3	14.9	4
D4	22.7	4
D5	11.4	4
D7	19.9	4
D8	15.2	4
D10	16.5	2
D11	11.4	2
D12	14.0	2
D13	13.9	4
D14	13.9	2
D15	15.3	4
D16	12.4	4
D17	14.2	2
D18	12.4	4
D19	13.2	4
D20	10.7	2
D21	12.7	2



Εικόνα 4.44: Διάγραμμα κύριων τάσεων σ_1 - σ_2 για δοκίμια D1-D21 μετά από τριαξονική καταπόνηση

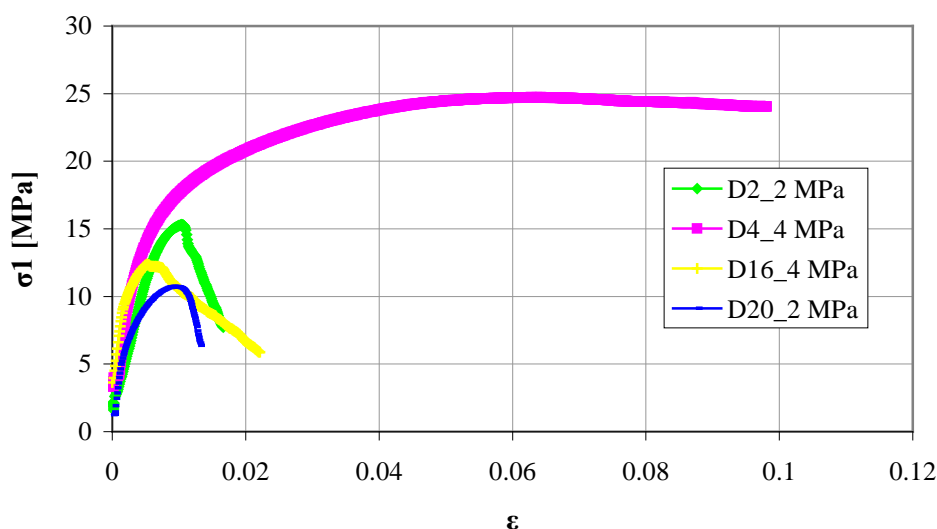
Όλα τα υπόλοιπα δοκίμια χυτεύθηκαν σε μήτρες που λιπάνθηκαν με μίγμα ελαιόλαδου - υγρού σαπουνιού, οπότε και τα αποτελέσματα είχαν επαναληψιμότητα. Στην Εικόνα 4.45 παρουσιάζονται δύο αρκετά πλαστικά δοκίμια μετά την τριαξονική τους καταπόνηση, όπου είναι εμφανής η παραμόρφωση που υπέστησαν. Τα δοκίμια αστόχησαν σε διάτμηση.



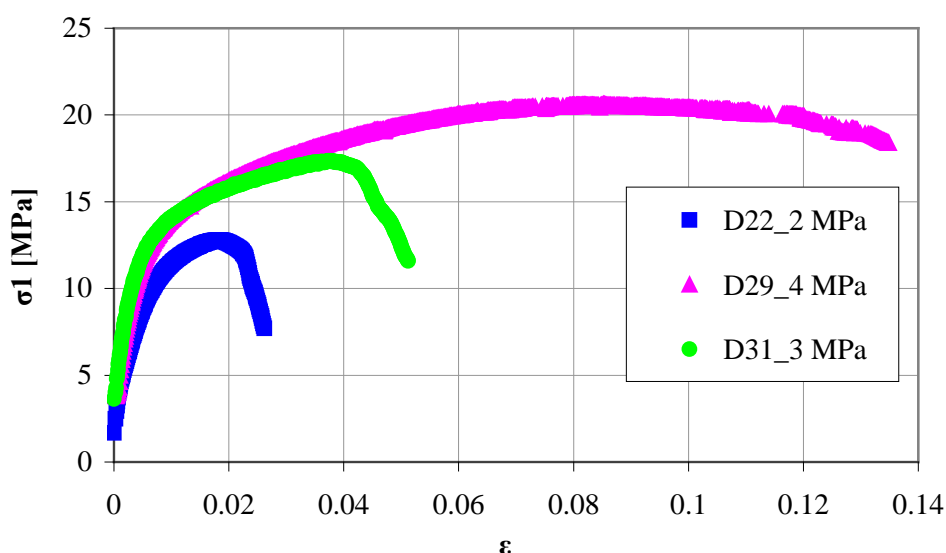
Εικόνα 4.45: Δοκίμια D23 και D25 μετά την τριαξονική τους καταπόνηση.

Στην Εικόνα 4.46 παρουσιάζονται ενδεικτικές καμπύλες αξονικής τάσης - ανηγμένης παραμόρφωσης δοκιμίων (D2, D4, D16, D20) η συμπεριφορά των οποίων δεν ήταν

επαναλήψιμη, αφού για την ίδια επιβαλλόμενη πλευρική τάση ορισμένες φορές τα εξεταζόμενα δοκίμια παρουσίαζαν πλαστική παραμόρφωση που κυμαινόταν από 8% έως 20%. Στην Εικόνα 4.47 παρουσιάζονται οι αντίστοιχες καμπύλες για δοκίμια (D22, D29 και D31) τα αποτελέσματα από τις τριαξονικές δοκιμές θλίψης των οποίων ήταν επαναλήψιμα.



Εικόνα 4.46: Καμπύλη αξονικής τάσης - ανηγμένης παραμόρφωσης των δοκιμίων D2, D4, D16 και D20



Εικόνα 4.47: Καμπύλη αξονικής τάσης - ανηγμένης παραμόρφωσης των δοκιμίων (D22, D29 και D31)

Τα αποτελέσματα που αφορούν την αντοχή που ανέπτυξαν σε πλευρικές τάσεις 1, 2, 3, 4 MPa τα δοκίμια D22, D23, D25, D27, D29, D30, D31, D32, D35, D37 και D38

παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.10, από όπου φαίνεται ότι τη μεγαλύτερη αντοχή ανέπτυξε το δοκίμιο D29. Το μέτρο ελαστικότητας των δοκιμίων ήταν 1.89 ± 0.56 GPa.

Πίνακας 4.10: Αντοχή δοκιμίων κονιαμάτων, οι μήτρες στις οποίες χυτεύθηκαν είχαν λιπανθεί με μίγμα λαδιού και υγρού σαπουνιού, που προσδιορίστηκε σε τριαξονική θλίψη.

ΔΟΚΙΜΙΟ	Co [MPa]	$\sigma_2=\sigma_3$ [MPa]	E [GPa]
D22	12.8	2	1.03
D23	14.2	2	1.03
D24	11.5	4	2.37
D25	19.2	4	1.65
D27	18.5	4	1.59
D29	20.6	4	2.46
D30	15.2	3	2.24
D31	16.9	3	2.08
D32	16.2	3	1.73
D35	13.4	1	2.92
D37	10.8	0	1.63
D38	11.2	0	1.92
M.O.			1.89
T.α.			0.56

Για τα κονιάματα D22, D23, D25, D27, D29, D30, D31, D32, D35, D37 και D38 το διάγραμμα κύριων τάσεων σ_1 - σ_2 παρουσιάζεται στην *Εικόνα 4.47*. Σ' αυτή φαίνεται ότι καθώς αυξάνεται η πλευρική τάση, αυξάνεται και η αντοχή των κονιαμάτων. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι σε αυτό το διάγραμμα η μηχανική συμπεριφορά των κονιαμάτων παρουσιάζεται με διαφορετικά χρώματα και σχήματα. Συγκεκριμένα, τα κονιάματα για τα οποία η ανηγμένη παραμόρφωση στην πλαστική περιοχή ήταν άνω του 10 % συμβολίζονται με ροζ τρίγωνα. Τα κονιάματα για τα οποία η ανηγμένη παραμόρφωση στην πλαστική περιοχή ήταν 5-10 % συμβολίζονται με πράσινους κύκλους. Τα κονιάματα για τα οποία η ανηγμένη παραμόρφωση στην πλαστική περιοχή ήταν 2-5% συμβολίζονται με μπλε τετράγωνα, ενώ με κίτρινο κύκλο παρουσιάζονται τα κονιάματα η αντοχή των οποίων προσδιορίστηκε από δοκιμή μονοαξονικής θλίψης. Από το διάγραμμα κύριων τάσεων σ_1 - σ_2 , που προέκυψε από

συνδυασμό των αποτελεσμάτων μονοαξονικών και τριαξονικών δοκιμών θλίψης, προκύπτει για το εξεταζόμενο ποζολανικό κονίαμα και το κριτήριο αστοχίας του Coulomb - Navier (Εικόνα 4.48):

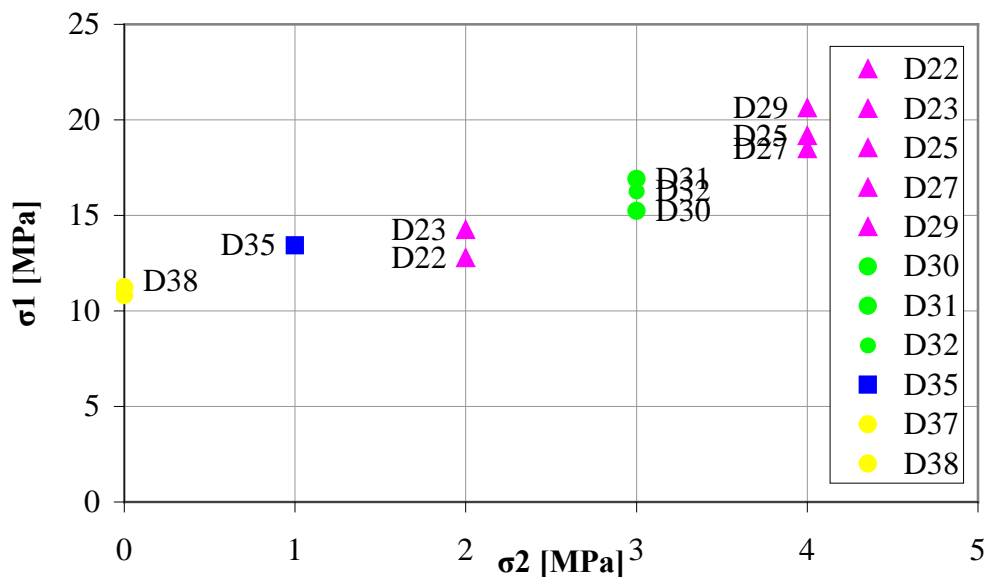
$$\sigma_1 = C_o + q' \sigma_2 \quad (4.1)$$

όπου:

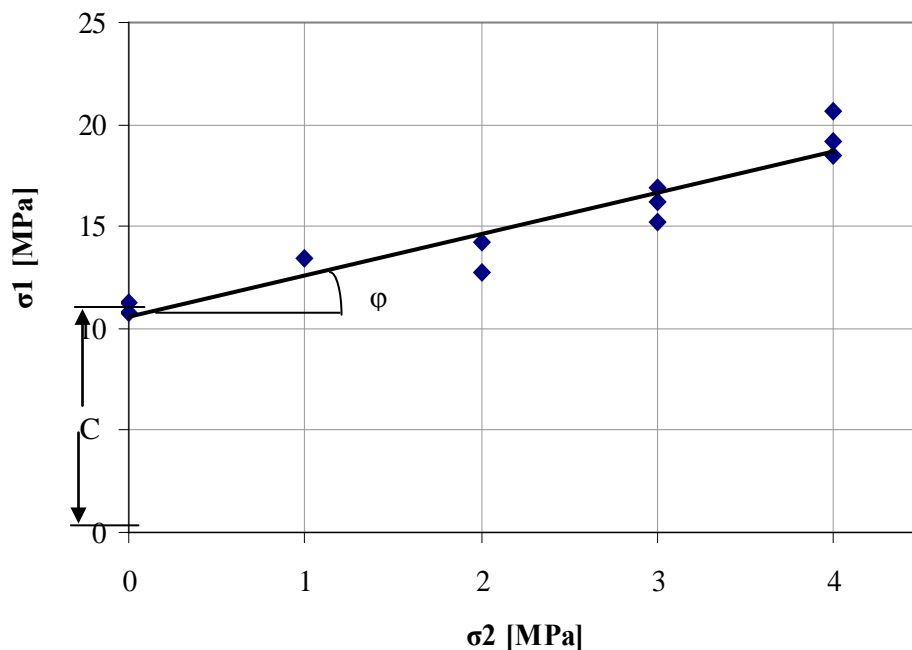
C_o η αντοχή του ποζολανικού κονιάματος σε μονοαξονική θλίψη, $q' = \frac{1 + \eta\mu\phi}{1 - \eta\mu\phi}$ και ϕ

η γωνία εσωτερικής τριβής του. Το υλικό αστοχεί όταν $\sigma_1 \geq C_o + q' \sigma_2$.

Η αναλογία των κονιαμάτων που παρουσίασαν υψηλές παραμορφώσεις στην πλαστική περιοχή σε σχέση με το συνολικό αριθμό των δοκιμών συγκριτικά με τις αρχικές δοκιμές αυξήθηκε και ήταν ίση με 8:9.



Εικόνα 4.47: Διάγραμμα κύριων τάσεων σ_1 - σ_2



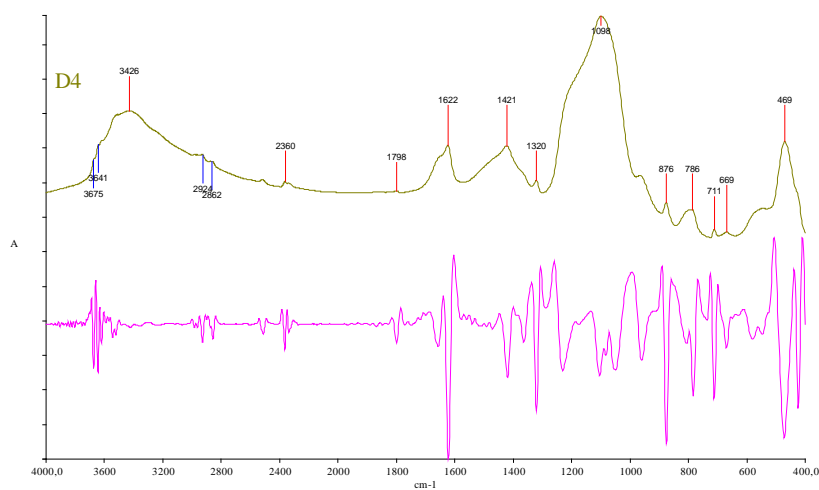
Εικόνα 4.48: Κριτήριο αστοχίας του ποζολανικού κονιάματος σε άξονες σ_1 , σ_2

4.5.6 Δοκιμές φασματοσκοπίας υπερύθρου με μετασχηματισμό Fourier FT-IR

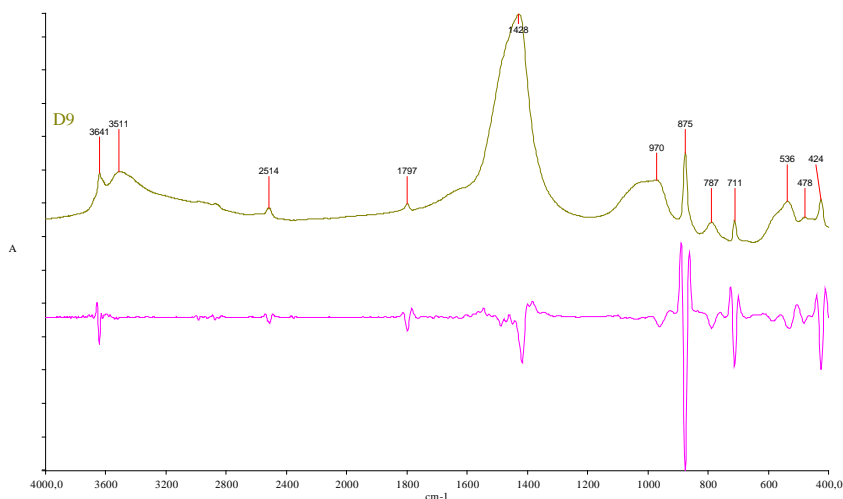
Επειδή η μηχανική συμπεριφορά που παρουσίαζαν τα κονιάματα D1 έως D21 δεν ήταν επαναλήψιμη, σε μια προσπάθεια να βρεθεί η αιτία αυτού του φαινομένου πραγματοποιήθηκαν δοκιμές φασματοσκοπίας υπερύθρου με μετασχηματισμό Fourier (FT-IR), η οποία χρησιμοποιείται κυρίως στην περιοχή $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$, στα δοκίμια αυτά, αλλά και στη συνέχεια σε όλα τα κονιάματα που χυτεύθηκαν και των οποίων η μηχανική αντοχή προσδιορίστηκε με μονοαξονική ή τριαξονική δοκιμή θλίψης.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε περιλάμβανε αρχικά τη λειοτρίβηση μέρους του κονιάματος. Συγκεκριμένα ελήφθη δείγμα περιμετρικά του κέντρου του κάθε δοκιμίου. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε η δημιουργία πελετών, οι οποίες τοποθετήθηκαν σε φούρνο στους 80°C για δέκα ώρες, έτσι ώστε να φύγει η περιεχόμενη υγρασία και έπειτα σε ξηραντήρα μέχρι να αποκτήσουν θερμοκρασία δωματίου. Στη συνέχεια τοποθετήθηκαν στη συσκευή υπέρυθρης φασματοσκοπίας με μετασχηματισμό, Perkin-Elmer system 1000.

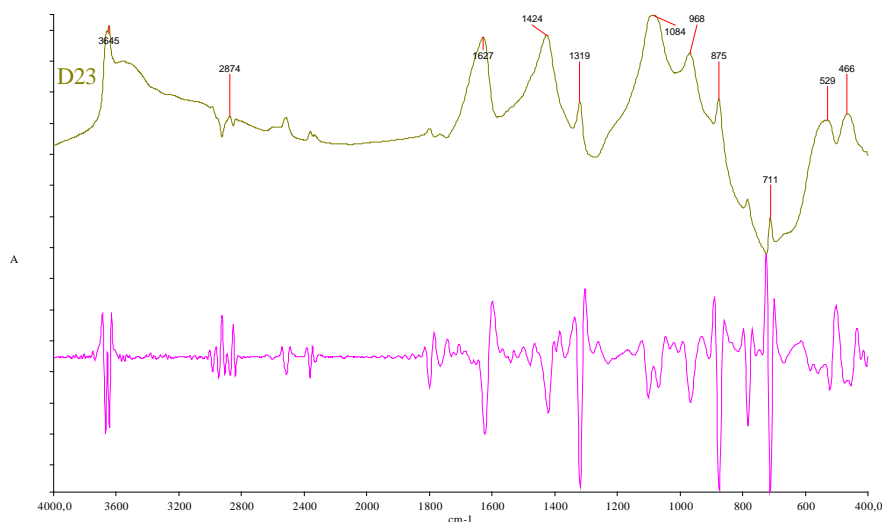
Τα αποτελέσματα από αυτή τη δοκιμή έδειξαν διαφορές στη δημιουργία υδραυλικών συστατικών ενυδάτωσης στην περιοχή από 970 - 1100 cm^{-1} . Αυτό το αποτέλεσμα είναι πολύ σημαντικό γιατί τα υδραυλικά συστατικά προσδίδουν την πλαστική συμπεριφορά του κονιάματος και συγκεκριμένα όσο μεγαλύτερη είναι η κορυφή των υδραυλικών συστατικών στο διάγραμμα τόσο πιο πλαστικά συμπεριφέρεται το κονίαμα. Ενδεικτικά αποτελέσματα ενός κονιάματος με πολύ πλαστική συμπεριφορά (δοκίμιο D4), ενός με αρκετά πλαστική συμπεριφορά (δοκίμιο D23) και ενός λίγο πλαστικού κονιάματος (δοκίμιο D9), παρατίθενται στις *Εικόνες 4.49, 4.50, 4.51*.



Εικόνα 4.49: Ανάλυση FT-IR στο δοκίμιο D4



Εικόνα 4.50: Ανάλυση FT-IR στο δοκίμιο D9



Εικόνα 4.51: Ανάλυση FT-IR στο δοκίμιο D23

4.6 Συζήτηση αποτελεσμάτων

Από την πειραματική διαδικασία χύτευσης ποζολανικών κονιαμάτων προέκυψε ότι:

- για την παρασκευή κονιαμάτων είναι καλύτερο να χρησιμοποιείται μήτρα με οριζόντια χύτευση που εξασφαλίζει επίπεδες επιφάνειες φόρτισης.
- να γίνεται διευκόλυνση των αντιδράσεων ενυδάτωσης με χρήση σαπουνέλαιου και
- οι συνθήκες ωρίμανσης να είναι σταθερές σε κλειστό δοχείο

Από τα αποτελέσματα των μονοαξονικών και τριαξονικών δοκιμών προέκυψε ότι:

- Η αντοχή των δοκιμίων αυξάνεται καθώς αυξάνει η πλευρική πίεση.
- Η μηχανική συμπεριφορά των δοκιμίων αλλάζει σταδιακά καθώς αυξάνεται η πλευρική πίεση και συγκεκριμένα αυξάνει η πλαστική περιοχή

Κεφάλαιο 5: Υπολογισμοί εντατικής και παραμορφωσιακής κατάστασης δομικών λίθων αρχαίων μνημείων

5.1 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων

Τα τελευταία χρόνια, ιδιαίτερα με την ανάπτυξη της τεχνολογίας των υπολογιστών, μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι λεγόμενες αριθμητικές μέθοδοι επίλυσης (numerical methods). Σήμερα υπάρχει πλήθος μεθόδων για την αριθμητική επίλυση των προβλημάτων ελαστικότητας - πλαστικότητας σε ομογενή, ανομοιογενή, ισότροπα, ανισότροπα, συνεχή και ασυνεχή υλικά (π.χ. εδάφη, πετρώματα) (Αγιουτάντης, 2002). Μία από τις σημαντικότερες αριθμητικές μεθόδους είναι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (ΜΠΣ).

Η μέθοδος αυτή αποτελεί ισχυρό εργαλείο στη μελέτη των κατασκευών και βρίσκει μεγάλο αριθμό εφαρμογών. Στο πεδίο της ανάλυσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί όχι μόνο στο (συμβατικό) ελαστικό πεδίο (θεωρία μικρών μετατοπίσεων) αλλά και για μη-γραμμικά προβλήματα, δυναμική συμπεριφορά κ.ά. Το χαρακτηριστικό της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι η χρήση δισδιάστατων και τρισδιάστατων στοιχείων για την προσομοίωση συνεχών μέσων (Καρύδης, 2003).

Στις ΜΠΣ, ο υπό μελέτη χώρος (domain) διαιρείται σε επιμέρους τμήματα (πεπερασμένα στοιχεία). Το κάθε στοιχείο αποτελείται από κόμβους. Η συμπεριφορά του κάθε τμήματος περιγράφεται μέσα από διαφορικές εξισώσεις. Εξασφαλίζοντας τις απαιτήσεις συνέχειας και ισορροπίας μεταξύ των στοιχείων αυτών, μπορεί να ληφθεί μία μοναδική λύση από το γραμμικό σύστημα των αλγεβρικών εξισώσεων (Becker 1992, Hoek et al. 1991 - Πηγή: Αγιουτάντης, 2002).

Οι ΜΠΣ ανήκουν στις διαφορικές μεθόδους και περιλαμβάνουν τη μέθοδο κατά Ritz, τη μέθοδο των σταθμισμένων υπολοίπων (weighted residuals), τη μέθοδο ελαχιστοποίησης συναρτησοειδών (functionals) μίας συνάρτησης παρεμβολής (variational approach) κ.λ.π. Οι άγνωστες ποσότητες υπολογίζονται στους κόμβους του καννάβου των πεπερασμένων στοιχείων και μέσω γραμμικών ή μη γραμμικών συναρτήσεων παρεμβολής υπολογίζονται στα υπόλοιπα σημεία του μέσου.

Σημειώνεται ότι οι ΜΠΣ αποτελούν γενικότερες μεθόδους επιλύσεως διαφορικών εξισώσεων (Αγιουτάντης, 2002).

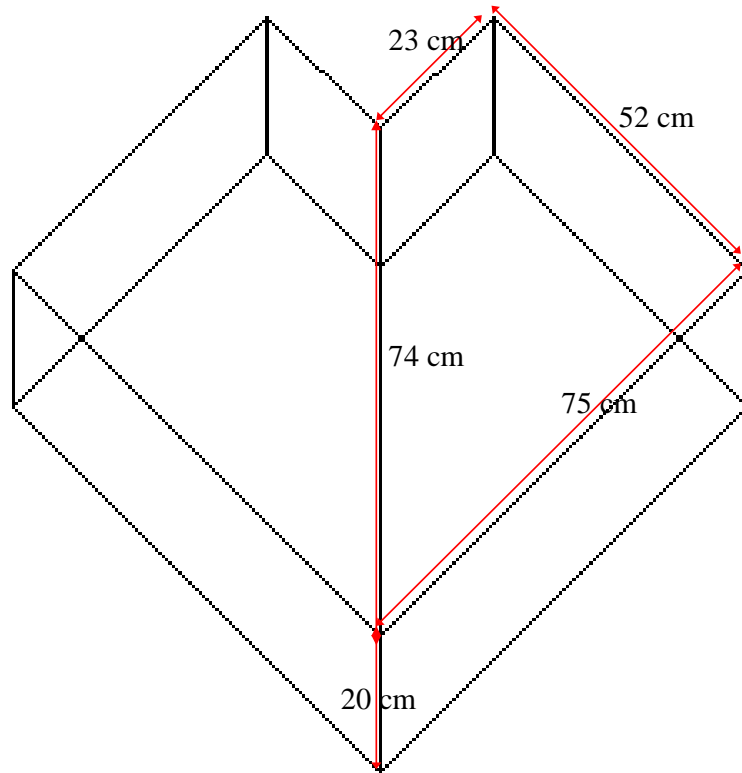
Η μοντελοποίηση και η αριθμητική ανάλυση ιστορικών κατασκευών αποτελούν το κλειδί για τη συντήρηση και την αναστήλωση των μνημείων (Lourenço, 2002). Η κατάλληλη και λογική χρήση της δομικής ανάλυσης μπορεί να βοηθήσει στον καθορισμό της πραγματικής κατάστασης της δομής και στην πρόβλεψη της μελλοντικής της συμπεριφοράς (Binda and Saisi, 2001).

5.2 Διερεύνηση του εντατικού και παραμορφωσιακού πεδίου μαρμάρινων γωνιακών επιστηλίων του Παρθενώνα της Ακρόπολης των Αθηνών που συνδέονται με σύνδεσμο τιτανίου μορφής διπλού T

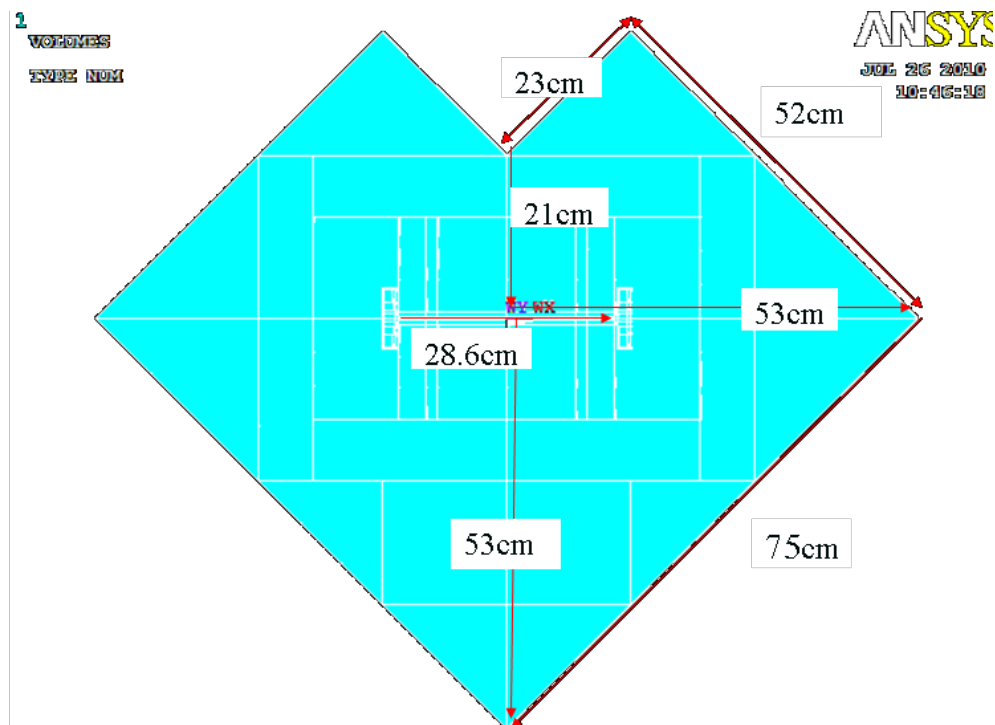
5.2.1 Γεωμετρία των μοντέλων

Στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής μελετήθηκε αριθμητικά με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και τη χρήση του λογισμικού ANSYS 12.0 η μηχανική καταπόνηση γωνιακών μαρμάρινων επιστηλίων αρχαίων ναών κάτω από διατμητική καταπόνηση. Συγκεκριμένα, μελετήθηκε η γωνιακή συναρμογή μαρμάρινων όγκων με χρήση συνδέσμου τιτανίου μορφής διπλού T. Η γωνία συναρμογής των γωνιακών επιστηλίων ελήφθη ίση με 45° ώστε να ταυτίζεται με τη γωνία συναρμογής των επιστηλίων του Παρθενώνα. Η αριθμητική επίλυση των μοντέλων των γωνιακών αυτών επιστηλίων έγινε σε τρεις διαστάσεις χρησιμοποιώντας έλεγχο μετατόπισης ως μηχανισμό φόρτισης.

Στην *Εικόνα 5.1* φαίνονται οι πλήρεις διαστάσεις των δύο γωνιακών επιστηλίων. Στην *Εικόνα 5.2* φαίνεται η κάτοψη ενός μοντέλου συναρμογής δύο μαρμάρινων επιστηλίων με γωνία 45° . Στο αριθμητικό μοντέλο που κατασκευάστηκε και το οποίο φαίνεται στην *Εικόνα 5.1* το μήκος των επιστηλίων περιορίζεται έτσι ώστε τα μοντέλα που προκύπτουν να έχουν μικρό μέγεθος. Αυτό διευκολύνεται λόγω της συμμετρίας κατά τον άξονα x και το γεγονός ότι το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στην περιοχή γύρω από το σύνδεσμο.

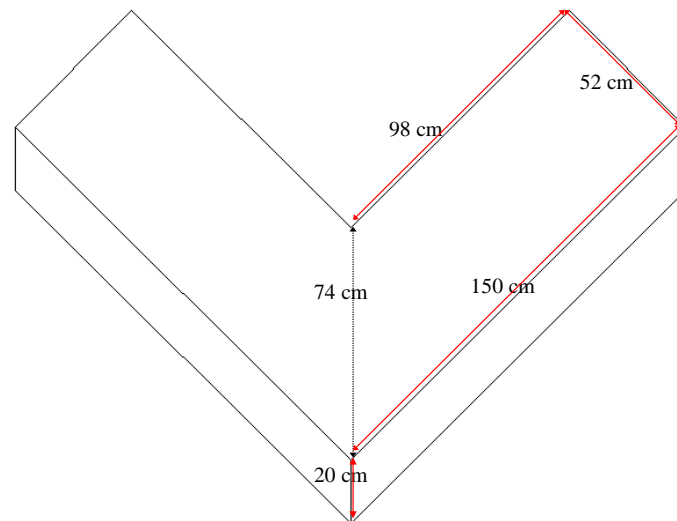


Εικόνα 5.1: Συναρμογή δύο μαρμάρινων επιστυλίων με γωνία 45°



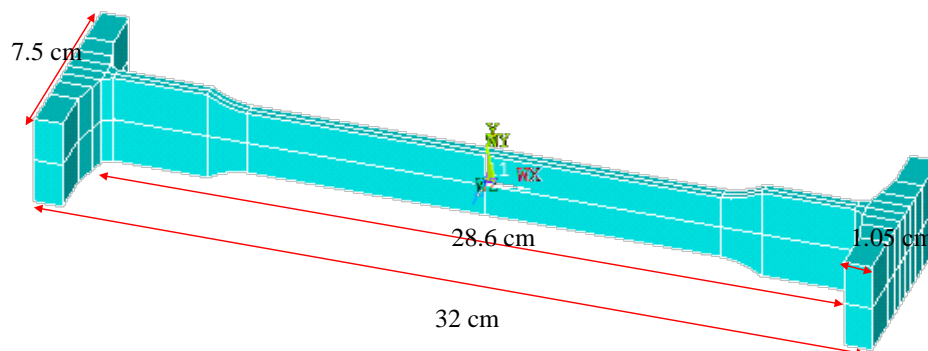
Εικόνα 5.2: Κάτοψη μοντέλου συναρμογής δύο μαρμάρινων επιστυλίων με γωνία 45°

Στην περίπτωση που οι γεωμετρικές διαστάσεις των αριθμητικών μοντέλων των δύο γωνιακών επιστυλίων ήταν μεγαλύτερες όπως φαίνεται στην *Εικόνα 5.3* όπου το μήκος κάθε γωνιακού επιστυλίου αυξήθηκε κατά 75 cm σε σχέση με αυτό της *Εικόνας 5.1* τότε ο χρόνος επίλυσης αυξάνεται σημαντικά. Σε κάθε περίπτωση για την επίλυση τέτοιων μοντέλων απαιτούνται ισχυρές υπολογιστικές μονάδες με επαυξημένη μνήμη και περισσότερους επεξεργαστές.

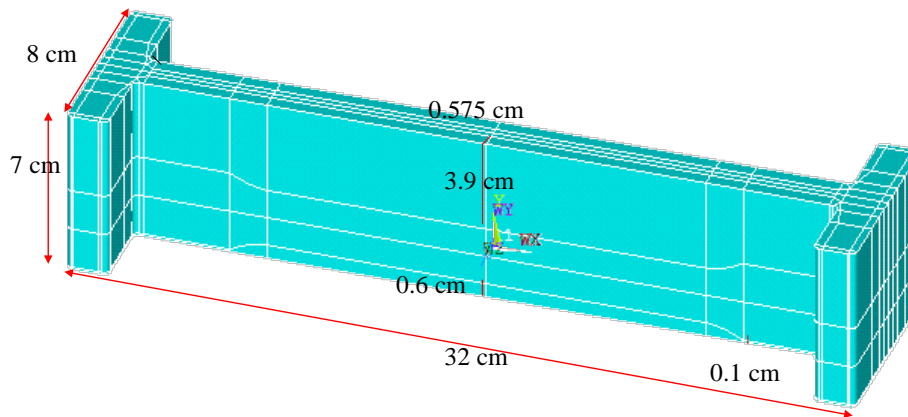


Εικόνα 5.3: Συναρμογή δύο μαρμάρινων επιστυλίων μεγάλων διαστάσεων γωνίας 45°

Η γεωμετρία των μοντέλων περιλαμβάνει δύο μαρμάρινα ογκοτεμάχια πρισματικού σχήματος. Το βάθος των ογκοτεμαχίων είναι 20 cm, το μήκος του συνδέσμου 28.6 cm και το βάθος της εντορμίας είναι 7 cm. Στην *Εικόνα 5.4* φαίνεται με λεπτομέρεια η γεωμετρία του συνδέσμου τιτανίου. Στην *Εικόνα 5.5* φαίνεται σε τρισδιάστατη μορφή το κονίαμα.



Εικόνα 5.4: Διαστάσεις συνδέσμου τιτανίου



Εικόνα 5.5: Διαστάσεις κονιάματος και εντορμίας

5.2.2 Μηχανικές ιδιότητες των υλικών

Τα χρησιμοποιούμενα υλικά ήταν μάρμαρο Διονύσου, υλικό που χρησιμοποιείται ήδη σαν υποκατάστατο του αρχαίου πετρώματος για την αναστύλωση του συγκεκριμένου μνημείου, σύνδεσμος τιτανίου και κονίαμα ως συνδετικό υλικό. Επίσης, στα μοντέλα ορίστηκαν και οι συντελεστές τριβής ανάμεσα στα στοιχεία επαφής, δηλαδή ο συντελεστής τριβής ανάμεσα στα μάρμαρα, ο συντελεστής τριβής ανάμεσα στο κονίαμα και το μάρμαρο και τέλος ο συντελεστής τριβής μεταξύ τιτανίου και κονιάματος. Για την κατασκευή των διαφόρων μοντέλων είναι απαραίτητο να οριστούν οι μηχανικές ιδιότητες των χρησιμοποιούμενων υλικών καθώς και οι ιδιότητες των διεπιφανειών τους. Στον Πίνακα 5.1 και 5.2 παρουσιάζονται αντίστοιχα οι ιδιότητες των υλικών και των διεπιφανειών που χρησιμοποιήθηκαν στα μοντέλα που επιλύθηκαν.

Πίνακας 5.1: Ιδιότητες υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στα 3D μοντέλα

ΥΛΙΚΟ	E [MPa]	ν	ρ (g/cm ³)
1. Τιτάνιο	$100 \cdot 10^3$	$\nu=0.32$	$\rho=4.51$
2. Κονίαμα	$10.55 \cdot 10^3$	$\nu=0.26$	$\rho=1.70$
3. Μάρμαρο	$75.3 \cdot 10^3$	$\nu=0.26$	$\rho=2.70$

Πίνακας 5.2: Ιδιότητες διεπιφανειών που χρησιμοποιήθηκαν στα 3D μοντέλα

Διεπιφάνεια	Συντελεστής τριβής:
1.μεταξύ τιτανίου και κονιάματος	$\mu=0.25$
2.μεταξύ του κονιάματος και του μαρμάρου	$\mu=0.50$
3.ανάμεσα στα μάρμαρα	$\mu=0.70$

5.2.3 Καταστατικές εξισώσεις των μοντέλων

Η εφαρμογή ενός συστήματος εξωτερικών δυνάμεων σε ένα σώμα προκαλεί παραμόρφωση του σώματος. Το μέγεθος των παραμορφώσεων εξαρτάται από τη μηχανική συμπεριφορά του υλικού και το μέγεθος των δυνάμεων που δρουν σ' αυτό. Οι σχέσεις αυτές του αιτίου - αποτελέσματος εκφράζονται συνήθως από τις καταστατικές εξισώσεις του υλικού. Όταν οι καταστατικές εξισώσεις είναι ανεξάρτητες από το χρόνο, τότε έχουν τη γενική μορφή:

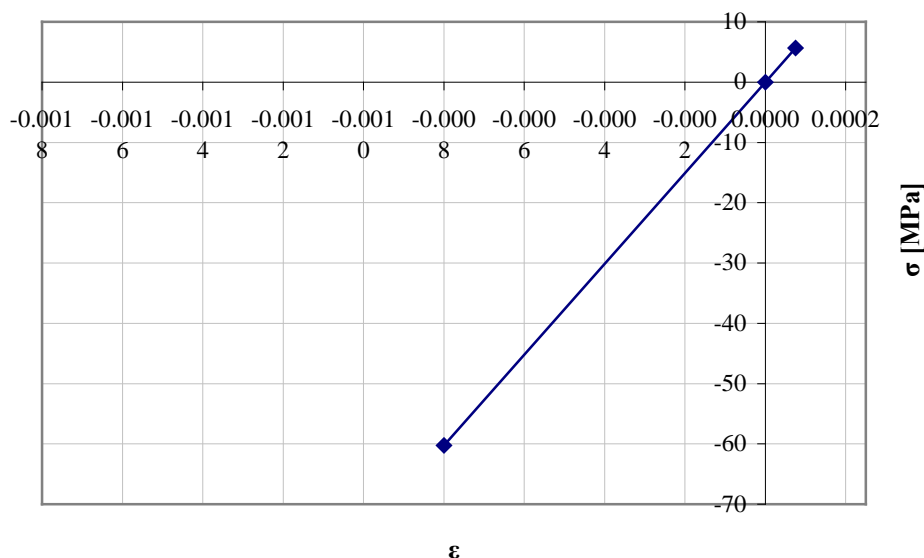
$$\sigma_{ij} = f(\varepsilon_{ij})$$

Λόγω του πολύπλοκου τρόπου αντίδρασης των φυσικών υλικών σε εξωτερικές επιδράσεις, η μελέτη της συμπεριφοράς τους είναι δυνατόν να γίνει με υπέρθεση ορισμένων προτύπων (μοντέλων) ανάλογα με την περιοχή τάσεων - παραμορφώσεων που εξετάζεται. Σε κάθε μορφή συμπεριφοράς του υλικού αντιστοιχούν και διαφορετικές καταστατικές εξισώσεις. Επίσης, σε αρκετές περιπτώσεις οι καταστατικές εξισώσεις απλοποιούνται με την εισαγωγή ορισμένων παραδοχών ή / και προσδιορίζονται πειραματικά (Αγιουτάντης, 2002).

Τα καταστατικά μοντέλα που εφαρμόστηκαν στο γεωμετρικό μοντέλο που περιγράφηκε προηγουμένως περιλαμβάνουν γραμμικώς ελαστική συμπεριφορά, τέλεια ελαστοπλαστική συμπεριφορά και κατά τμήματα κρατυνόμενη συμπεριφορά. Πιο συγκεκριμένα για το μάρμαρο χρησιμοποιήθηκαν εναλλακτικά οι ακόλουθοι καταστατικοί νόμοι:

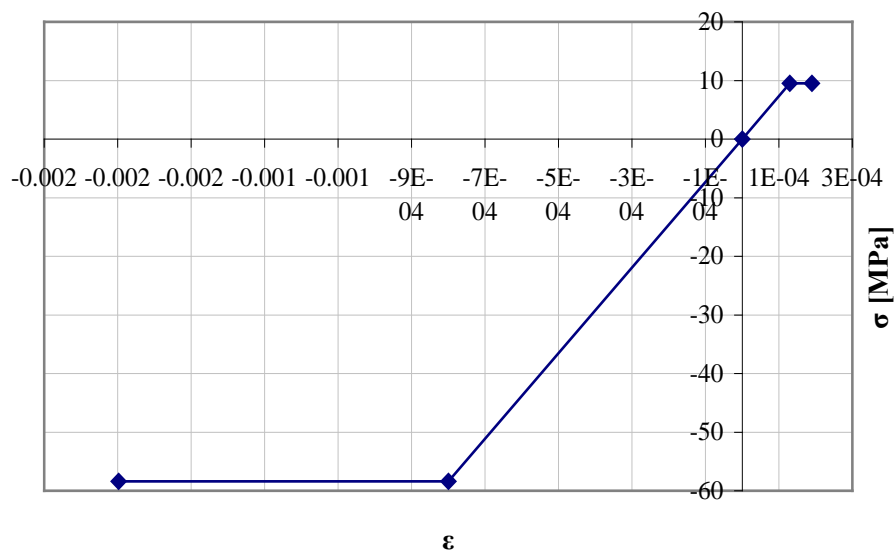
Το μάρμαρο θεωρήθηκε σε μία πρώτη απλοποιημένη εκδοχή ως ένα γραμμικώς ελαστικό και ισότροπο υλικό, το οποίο είχε μέτρο ελαστικότητας $E=75.3 \cdot 10^3$ MPa και λόγο Poisson $\nu=0.26$. Ενδεικτικά παρατίθενται στην *Εικόνα 5.6* οι καμπύλες

τάσης - ανηγμένης παραμόρφωσης του μαρμάρου, όταν η συμπεριφορά του θεωρείται γραμμικώς ελαστική.



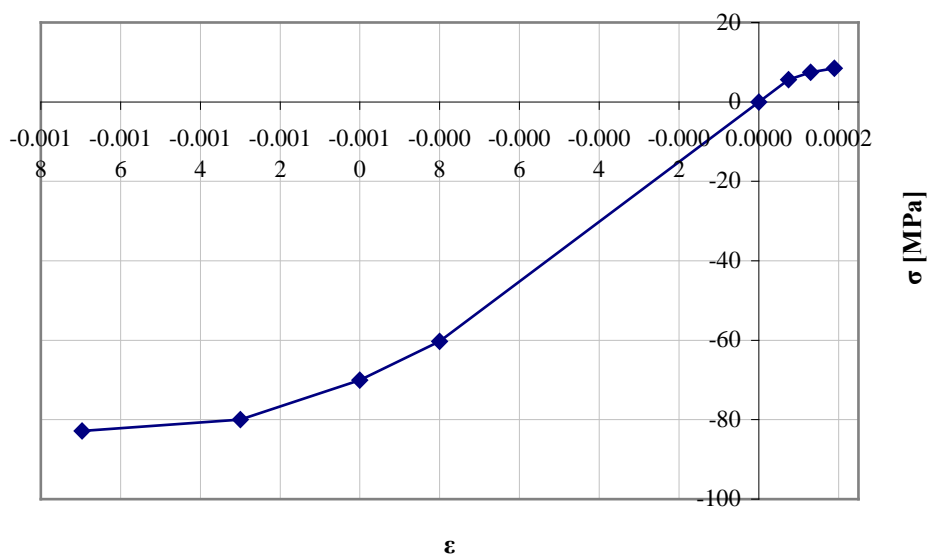
Εικόνα 5.6: Καμπύλη τάσης - ανηγμένης παραμόρφωσης γραμμικώς ελαστικής συμπεριφοράς του μαρμάρου όταν $E=75.3 \cdot 10^3 \text{ MPa}$ και $\nu=0.26$

Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε ένα δεύτερο απλοποιημένο καταστατικό μοντέλο, όπου το μάρμαρο θεωρείται ως ελαστοπλαστικό υλικό. Στις καμπύλες τάσης - ανηγμένης παραμόρφωσης, η τέλεια ελαστοπλαστική συμπεριφορά του μαρμάρου χαρακτηρίζεται από ένα γραμμικώς ελαστικό κλάδο και έναν πλαστικό κλάδο. Στην Εικόνα 5.7 παρουσιάζονται ενδεικτικές καμπύλες τάσης - ανηγμένης παραμόρφωσης ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς του μαρμάρου, όπου το χρησιμοποιούμενο μέτρο ελαστικότητας είναι $E=73 \cdot 10^3 \text{ MPa}$ και ο λόγος Poisson είναι $\nu=0.26$, ενώ η τάση στο σημείο διαρροής είναι $\sigma=9.49 \text{ MPa}$ και η ανηγμένη παραμόρφωση $\epsilon=0.00013$ για τον εφελκυσμό, ενώ για τη θλίψη είναι $\sigma=-58.4 \text{ MPa}$ και $\epsilon=-0.0008$ (το μείον δείχνει θλίψη, ενώ το συν εφελκυσμό στη μηχανική του στερεού σώματος).



Εικόνα 5.7: Καμπύλες τάσης - ανηγμένης παραμόρφωσης ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς του μαρμάρου όταν $E=73 \cdot 10^3 \text{ MPa}$ και $\nu=0.26$

Σε επόμενο στάδιο για την προσομοίωση της συμπεριφοράς του μαρμάρου χρησιμοποιήθηκαν πειραματικές καμπύλες τάσης - ανηγμένης παραμόρφωσης, όπως αυτές προέκυψαν από τα πειράματα των Kourkoulis and Vardoulakis (1997) και οι οποίες παρουσιάζονται στις Εικόνες 5.8. Τα σημεία τάσεως σ - ανηγμένης παραμόρφωσης ε που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή αυτών των πειραματικών καμπυλών σ - ε δίνονται στον Πίνακα 5.3 (το μείον δείχνει θλίψη, ενώ το συν εφελκυσμό στη μηχανική του στερεού σώματος).

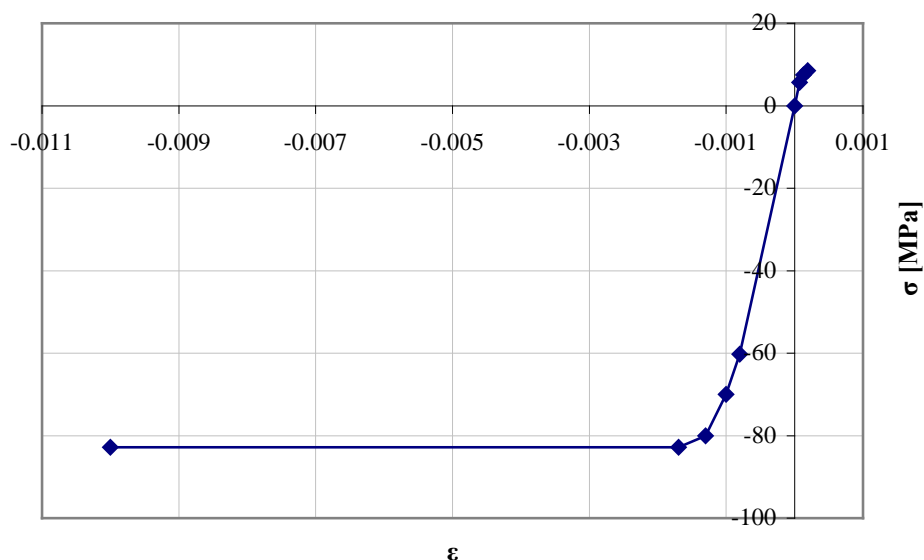


Εικόνα 5.8: Πειραματικές καμπύλες τάσης - ανηγμένης παραμόρφωσης του μαρμάρου όταν $E=75.3 \cdot 10^3 \text{ MPa}$ και $\nu=0.26$ (Kourkoulis and Vardoulakis, 1997)

Πίνακας 5.3: Δεδομένα σ - ε για τις πειραματικές καμπύλες του μαρμάρου (Kourkoulis and Vardoulakis, 1997)

σ [MPa]	8.5	7.5	5.6475	0.0	-60.24	-70	-80	-82.8
ε	0.00019	0.00013	0.000075	0.0	-0.0008	-0.001	-0.0013	-0.001697

Επίσης, μελετήθηκε η περίπτωση όπου στην πειραματική καμπύλη θλίψης του μαρμάρου των Kourkoulis and Vardoulakis, 1997 προστέθηκε ένα ακόμα σημείο τάσης - ανηγμένης παραμόρφωσης, ($\sigma=-82.8$ MPa $\varepsilon=-0.01$) (Εικόνα 5.9), ώστε να αυξηθεί η πλαστική περιοχή, ούτως ώστε στην περίπτωση που το αριθμητικό μοντέλο κινηθεί προς την περιοχή αυτή να μπορούν να υπολογιστούν οι αντίστοιχες τάσεις και ανηγμένες παραμορφώσεις.

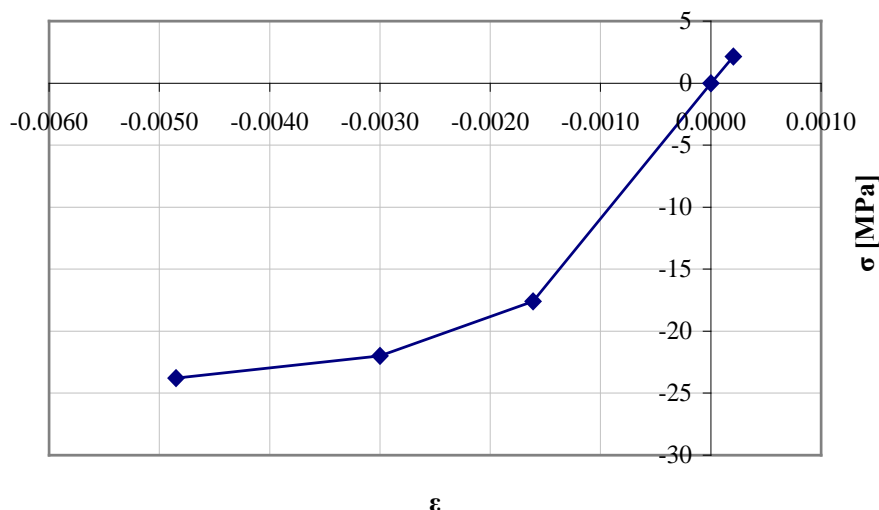


Εικόνα 5.9: Πειραματική καμπύλη τάσης - ανηγμένης παραμόρφωσης του μαρμάρου σε μονοαξονική θλίψη με $E=75.3 \cdot 10^3$ MPa και $\nu=0.26$, στην οποία επιμηκύνθηκε ο πλαστικός κλάδος.

Για το κονιάμα χρησιμοποιήθηκαν οι ακόλουθοι νόμοι:

Αρχικά θεωρήθηκε γραμμικώς ελαστικό και ισότροπο, ενώ στη συνέχεια η συμπεριφορά του κονιάματος προσδιορίστηκε από τις πειραματικές καμπύλες τάσης - ανηγμένης παραμόρφωσής του σε δοκιμές θλίψης και εφελκυσμού, όπως αυτές προέκυψαν από τα πειράματα των Kourkoulis and Pasiou (2011) και οι οποίες παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.10. Το χρησιμοποιούμενο μέτρο ελαστικότητας είναι

$E=10.55 \cdot 10^3$ MPa και ο λόγος Poisson $\nu=0.26$. Τα δεδομένα τάσεως - ανηγμένης παραμόρφωσης για την κατασκευή των πειραματικών καμπυλών σ - ϵ του κονιάματος παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.4 (το μείον δείχνει θλίψη, ενώ το συν εφελκυσμό στη μηχανική του στερεού σώματος).



Εικόνα 5.10: Πειραματικές καμπύλες τάσης - ανηγμένης παραμόρφωσης του κονιάματος με $E=10.55 \cdot 10^3$ MPa και $\nu=0.26$ (Kourkoulis and Pasiou, 2011)

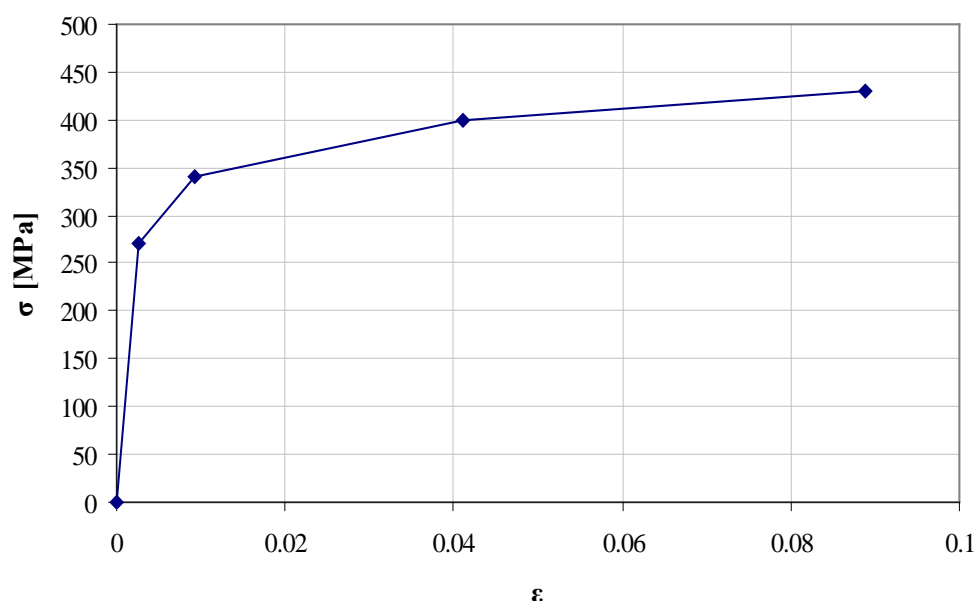
Πίνακας 5.4: Δεδομένα σ - ϵ για τις πειραματικές καμπύλες κονιάματος (Kourkoulis and Pasiou, 2011)

σ [Mpa]	2.142	2.142	0	-17.6	-22	-23.78
ϵ	0.00025	0.000203064	0	-0.001612	-0.003	-0.00485

Για το τιτάνιο χρησιμοποιήθηκαν οι ακόλουθοι νόμοι:

Το τιτάνιο σε μία πρώτη απλοποιημένη εκδοχή θεωρήθηκε σαν ένα γραμμικώς ελαστικό και ισότροπο υλικό, το οποίο είχε μέτρο ελαστικότητας $E=100 \cdot 10^3$ MPa και λόγο Poisson $\nu=0.32$. Στη συνέχεια η συμπεριφορά του τιτανίου προσδιορίστηκε από την πειραματική καμπύλη τάσης - ανηγμένης παραμόρφωσης του τιτανίου (Εικόνα 5.11) η οποία παρουσιάζει κατά τμήματα γραμμικώς ισότροπη κράτυνση και η οποία προήλθε από πειράματα που πραγματοποίησαν οι Kourkoulis and Pasiou (2011). Τα δεδομένα τάσεως - ανηγμένης παραμόρφωσης για την κατασκευή των πειραματικών

καμπυλών σ - ϵ παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.5 (το μείον δείχνει θλίψη, ενώ το συν εφελκυσμό στη μηχανική του στερεού σώματος).



Εικόνα 5.11: Πειραματική καμπύλη τάσης - ανηγμένης παραμόρφωσης του τιτανίου που παρουσιάζει κατά τμήματα γραμμικώς ισότροπη κράτυνση σε εφελκυσμό (Kourkoulis and Pasiou, 2011).

Πίνακας 5.5: Δεδομένα σ - ϵ για την του τιτανίου Πειραματική καμπύλη τάσης - ανηγμένης παραμόρφωσης του τιτανίου που παρουσιάζει κατά τμήματα γραμμικώς ισότροπη κράτυνση σε εφελκυσμό (Kourkoulis and Pasiou, 2011)

σ [MPa]	0	270	340	400	430
ϵ	0	0.0027	0.00922	0.041	0.08874

Ο συνδυασμός των παραπάνω για τα τρία υλικά δίνουν τις περιπτώσεις που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.6, όπου E= ελαστική συμπεριφορά του υλικού, σ - ϵ =πειραματική καμπύλη του υλικού και E-Π= ελαστοπλαστική συμπεριφορά του υλικού.

Πίνακας 5.6: Συνδυασμοί καταστατικών νόμων:

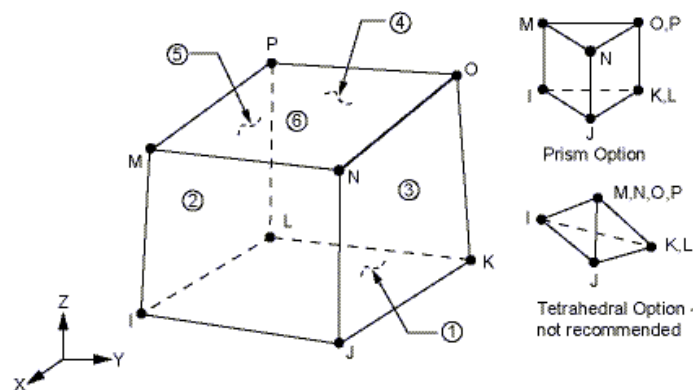
	TITANIO	KONIAMA	ΜΑΡΜΑΡΟ
1.	E	E	E
2.	σ - ϵ	σ - ϵ	E

3.	E	E	E-Π
4.	σ-ε	σ-ε	E-Π
5.	E	σ-ε	σ-ε
6.	E	E	σ-ε
7.	σ-ε	σ-ε	σ-ε(*)
8.	σ-ε	σ-ε	σ-ε
9.	σ-ε	σ-ε(*)	σ-ε
10.	σ-ε	E	σ-ε

(*) με επιμήκυνση του πλαστικού κλάδου

5.2.4 Διακριτοποίηση των μοντέλων

Για τη διακριτοποίηση όλων των μοντέλων χρησιμοποιήθηκε το στοιχείο SOLID185, το οποίο χρησιμοποιείται γενικά για τρισδιάστατη προσομοίωση στερεών δομών. Είναι οκτακομβικό στοιχείο χωρίς ενδιάμεσους κόμβους, έχει τις ιδιότητες των ορθότροπων υλικών, καθώς επίσης τρεις βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο (κατά τις διευθύνσεις x, y, z). Επιπλέον, δέχεται επιφανειακά φορτία, ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε προβλήματα πλαστικότητας, υπερπλαστικότητας, ερπυσμού και μεγάλων τασικών παραμορφώσεων. Η γεωμετρία και οι θέσεις των κόμβων του στοιχείου παρουσιάζονται στην *Εικόνα 5.12*.



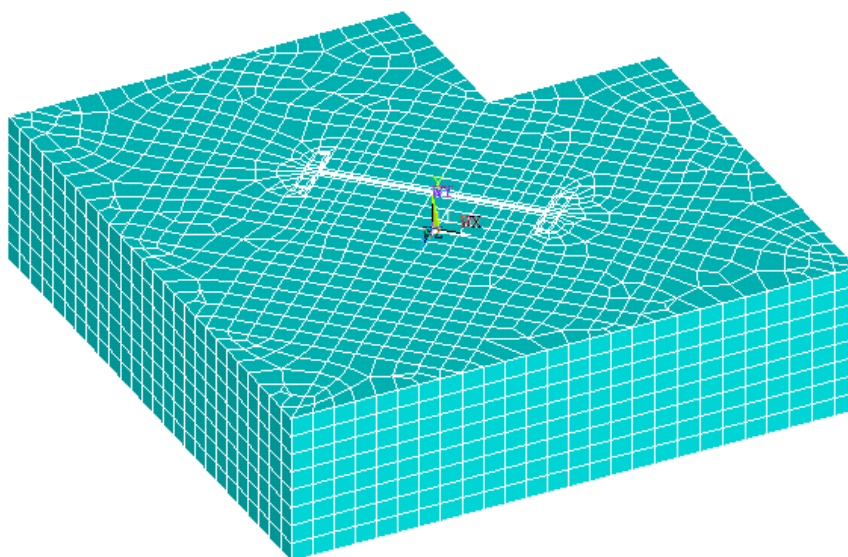
Εικόνα 5.12: Το στοιχείο SOLID 185 (ANSYS 12.0, 2009)

Στη διακριτοποίηση του κάθε μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν εξαεδρικά (πρισματικά) και τετραεδρικά στοιχεία με χρήση του αυτόματου αλγόριθμου του ANSYS 12.0, ο οποίος απαιτεί ως στοιχείο εισόδου το βήμα διακριτοποίησης σε μονάδες μήκους (εν

προκειμένω m). Για τον προσδιορισμό του κατάλληλου βήματος διακριτοποίησης πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας. Έγινε έτσι έλεγχος του αριθμού των κόμβων και των στοιχείων που δημιουργήθηκαν σε διάφορα βήματα της διακριτοποίησης e (m), δηλαδή σε διάφορες περιπτώσεις πύκνωσης ή αραιώσης του καννάβου (Πίνακας 5.7). Η επιλογή ενός πολύ αραιού πλέγματος έχει ως συνέπεια τη λήψη μη αξιόπιστων αποτελεσμάτων. Σε αντίθετη περίπτωση, αυξάνει κατά πολύ ο αριθμός των στοιχείων και αυτό οδηγεί σε μεγάλο σύστημα γραμμικών εξισώσεων, επιβαρύνοντας έτσι την υπολογιστική διαδικασία, δηλαδή αυξάνει υπερβολικά ο υπολογιστικός χρόνος επίλυσης και ορισμένες φορές, όπως για παράδειγμα για βήμα διακριτοποίησης $e=0.01$ m, είναι αδύνατη ακόμα και η ολοκλήρωση της επίλυσης του μοντέλου. Με βάση αυτές τις παραμέτρους, για την επίλυση των μοντέλων επιλέχθηκε ως βήμα διακριτοποίησης $e=0.03$ m. Πρέπει να σημειωθεί ότι χρησιμοποιήθηκε ομοιόμορφη διακριτοποίηση σε όλα τα μοντέλα. Αυτό επιλέχθηκε έπειτα από διάφορες δοκιμές διακριτοποίησης του γεωμετρικού μοντέλου M8, στο οποίο ο σύνδεσμος είναι τοποθετημένος στη θέση I (Εικόνα 5.18. Πραγματοποιήθηκαν και δοκιμές, πύκνωσης και αραιώσης του πλέγματος χρησιμοποιώντας βήμα διακριτοποίησης για το σύνδεσμο τιτανίου και για το κονίαμα $e=0.01$ m και 0.03 m για το μάρμαρο, όπου τα αποτελέσματα έδειξαν αύξηση της επιβαλλόμενης μετατόπισης μόλις της τάξης του 4%. Ένα παράδειγμα ομοιόμορφα διακριτοποιημένου μοντέλου παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.13.

Πίνακας 5.7: Δοκιμές διακριτοποίησης σε τρισδιάστατα μοντέλα

	Βήμα διακριτοποίησης (m)	Σύνολο κόμβων	Σύνολο στοιχείων
1.	0.010	121965	116575
2.	0.020	20198	18971
3.	0.025	13762	13091
4.	0.030	9523	9147
5.	0.035	6934	6742
6.	0.040	5263	5114
7.	0.050	3833	3794
8.	0.070	3.083	3.224
9.	0.100	Αδύνατον να διακριτοποιηθεί το μοντέλο από τον αυτόματο αλγόριθμο του ANSYS 12.0	



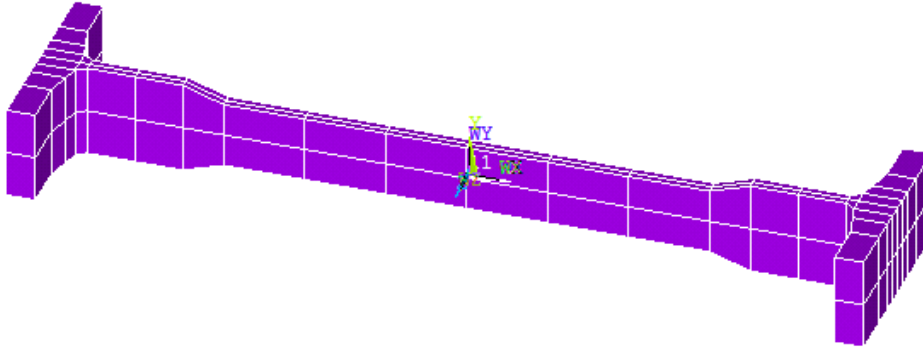
Εικόνα 5.13: Ένα 3D μοντέλο που έχει διακριτοποιηθεί με βήμα $e=0.03$ (m)

5.2.5 Στοιχεία επαφής

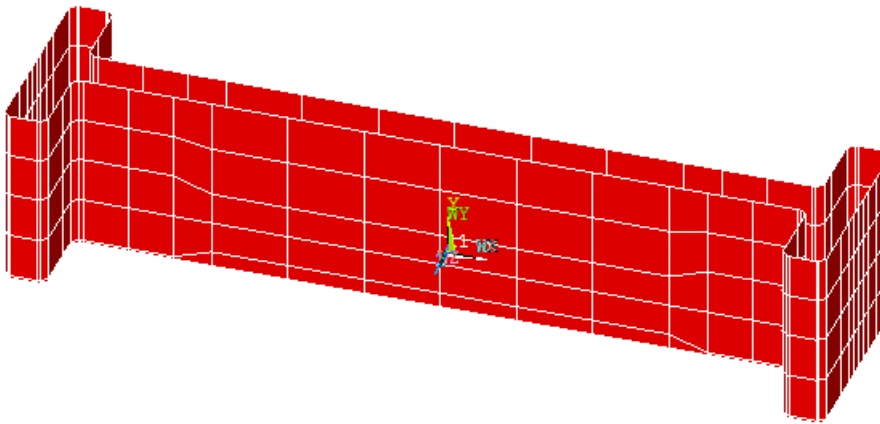
Για την καλύτερη προσομοίωση της επαφής μεταξύ των τριών υλικών που χρησιμοποιούνται για την αναστήλωση των επιστυλίων κατασκευάστηκε στην κάθε διεπιφάνεια ζεύγος τρισδιάστατων στοιχείων επαφής (contact elements). Έτσι σε κάθε μοντέλο δημιουργήθηκαν τρία ζεύγη στοιχείων επαφής, κάθε ζεύγος από τα οποία αποτελείται από τα στοιχεία target και contact, τα οποία προσομοιώνουν την πιο άκαμπτη και την πιο εύκαμπτη επιφάνεια, αντίστοιχα. Τα τρία ζεύγη στοιχείων επαφής που δημιουργήθηκαν ήταν:

1. τιτάνιο –κονίαμα (target – contact)
2. κονίαμα – μάρμαρο (target – contact)
3. μάρμαρο – μάρμαρο (target – contact)

Ενδεικτικά παρουσιάζονται η εξωτερική επιφάνεια τιτανίου που χρησιμοποιείται ως επιφάνεια επαφής στο ζεύγος επαφής τιτανίου – κονιάματος και η εξωτερική επιφάνεια κονιάματος που χρησιμοποιείται ως επιφάνεια επαφής στο ζεύγος επαφής κονιάματος – μαρμάρου στην Εικόνα 5.14α και Εικόνα 5.14β, αντίστοιχα.



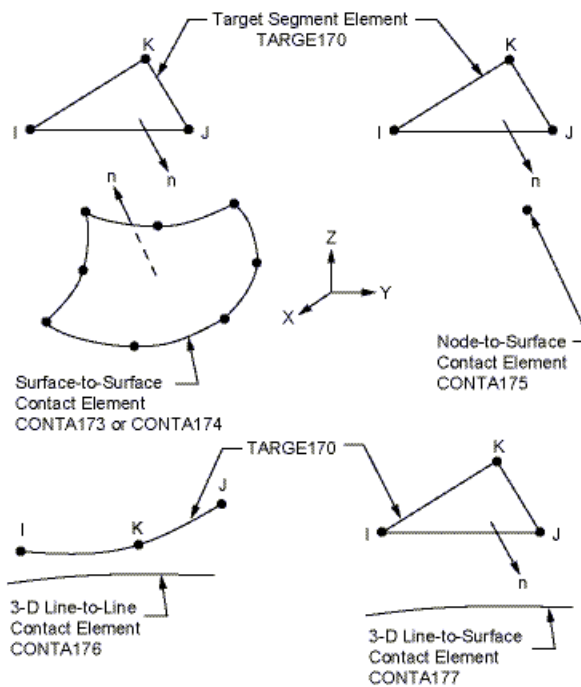
Εικόνα 5.14α: Εξωτερική επιφάνεια τιτανίου που χρησιμοποιείται ως επιφάνεια επαφής στο ζεύγος επαφής τιτανίου – κονιάματος



Εικόνα 5.14β: Εξωτερική επιφάνεια κονιάματος που χρησιμοποιείται ως επιφάνεια επαφής στο ζεύγος επαφής κονιάματος – μαρμάρου

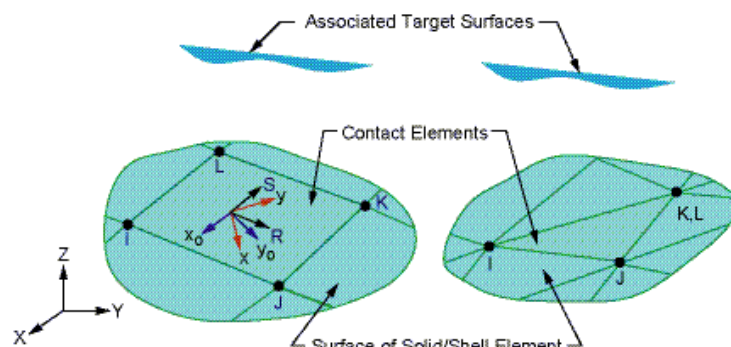
Τα στοιχεία αυτά έχουν την ιδιότητα να μεταφέρουν τάσεις από την εξωτερική πλευρά τους στην εσωτερική και από εκεί στο υπόλοιπο στερεό. Η σχετική τους κίνηση μπορεί να οριστεί με πολλούς τρόπους. Στην προκειμένη περίπτωση θεωρήθηκαν μεταξύ των υλικών συνθήκες απλής επαφής και σε κάθε περίπτωση ορίστηκε ο κατάλληλος συντελεστής τριβής μ , όπως παρουσιάστηκε στον Πίνακα 5.2, στον οποίο ορίστηκαν οι ιδιότητες των διεπιφανειών. Τα στοιχεία επαφής που χρησιμοποιήθηκαν ήταν το CONTA173 και το TARGE170.

Το στοιχείο TARGE170 αντιπροσωπεύει διάφορες τρισδιάστατες επιφάνειες αναφοράς (target surfaces) για τα σχετιζόμενα στοιχεία επαφής CONTA173, CONTA174, CONTA175, CONTA176 και CONTA177. Δέχεται μετατοπίσεις, τάσεις και ροπές. Η γεωμετρία και οι θέσεις των κόμβων του παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.15.



Εικόνα 5.15: Το στοιχείο TARGE170 (ANSYS 12.0, 2009)

Το στοιχείο CONTA173 χρησιμοποιείται για επαφή και ολίσθηση ανάμεσα σε τρισδιάστατες επιφάνειες αναφοράς (TARGE170) και μία παραμορφώσιμη επιφάνεια που καθορίζεται από αυτό το στοιχείο. Καθορίζεται από τέσσερις κόμβους (Εικόνα 5.16). Έχει τρεις βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο (μετατόπιση κατά τις διευθύνσεις x , y , z). Επίσης, δέχεται επιφανειακά φορτία, ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε προβλήματα μη γραμμικής ανάλυσης.



R = άξονας x του στοιχείου για ισότροπη τριβή

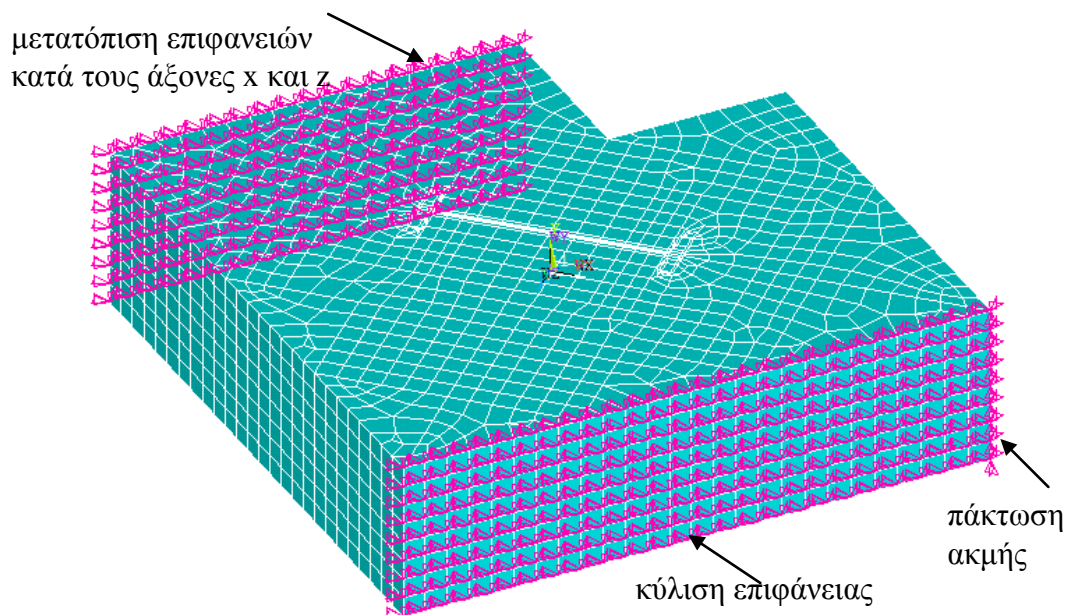
X , X_0 = άξονες του στοιχείου για ορθότροπη τριβή για άλλα συστήματα συντεταγμένων

Εικόνα 5.16: Το στοιχείο CONTA173 (ANSYS 12.0, 2009)

5.2.6 Συνοριακές συνθήκες

Σε κάθε μοντέλο ορίζονται οι συνοριακές συνθήκες, οι οποίες είναι απαραίτητες για την επίλυση του προβλήματος και συνήθως εκφράζονται με τις συνθήκες ισορροπίας του πεδίου (π.χ. αγκύρωση των κατώτερων ή/και πλευρικών κόμβων κ.λ.π). Η φόρτιση του υλικού αποτελεί επίσης μία συνοριακή συνθήκη, καθώς σε αντίθετη περίπτωση η υπολογιζόμενη παραμόρφωση είναι μηδενική. Στην περίπτωση που φορτιστεί ένα σώμα όταν όλοι οι κόμβοι του είναι ελεύθεροι να μετακινηθούν, τότε δεν υφίσταται παραμόρφωση, αλλά απλή μετακίνηση (ή στροφή). Στην περίπτωση αυτή δεν είναι δυνατή η επίλυση του προβλήματος και δεν είναι δυνατός ο προσδιορισμός των δυνάμεων και των μετατοπίσεων σε κάποιο κόμβο (Αγιουτάντης, 2002).

Σε όλα τα μοντέλα που επιλύθηκαν εφαρμόστηκε διατμητική φόρτιση με επιβολή κύλισης σε μία πλευρά του δεξιού μαρμάρινου όγκου *Εικόνα 5.17*, ενώ ταυτόχρονα πακτώθηκε η ακμή 2352. Επίσης, μετατοπίστηκε το αριστερό μαρμάρινο ογκοτεμάχιο, στο οποίο επιβλήθηκε μετατόπιση έως 0.431 mm κατά τη διεύθυνση x και z των επιφανειών του όπως φαίνεται στην *Εικόνα 5.17*.



Εικόνα 5.17: Συνοριακές συνθήκες που ορίστηκαν στα μοντέλα

5.2.7 Επίλυση του προβλήματος

Πραγματοποιήθηκε στατική επίλυση των μοντέλων. Καθώς η ανάλυση περιελάμβανε μη γραμμικούς καταστατικούς νόμους χρησιμοποιήθηκε αυτόματα η μέθοδος

Newton – Raphson. Η μέθοδος αυτή μπορεί συχνά να συγκλίνει αξιοσημείωτα γρήγορα, ειδικά εάν οι επαναλήψεις ξεκινάνε «αρκετά κοντά στη επιθυμητή ρίζα», κάτι που εξαρτάται από το υπάρχον πρόβλημα κάθε φορά. Όταν οι επαναλήψεις ξεκινάνε μακριά από την επιθυμητή ρίζα η μέθοδος Newton–Raphson μπορεί να αποτύχει να συγκλίνει. Οι περισσότερες εφαρμογές συνήθως περιλαμβάνουν μία ρουτίνα, η οποία προσπαθεί να ανιχνεύσει και να υπερνικήσει τις πιθανές αποτυχίες σύγκλισης.

Τελικά οι γενικευμένες εξισώσεις που επιλύονται από το πρόγραμμα των πεπερασμένων στοιχείων είναι οι ακόλουθες:

$$[K_i^T]\{\Delta u_i\}=\{F^a\}-\{F_i^{nr}\}$$

$$\{u_{i+1}\}=\{u_i\}+\{\Delta u_i\}$$

Όπου:

$[K_i^T]$ = ο εκάστοτε πίνακας ακαμψίας

$\{u_i\}$ = το διάνυσμα των μετατοπίσεων

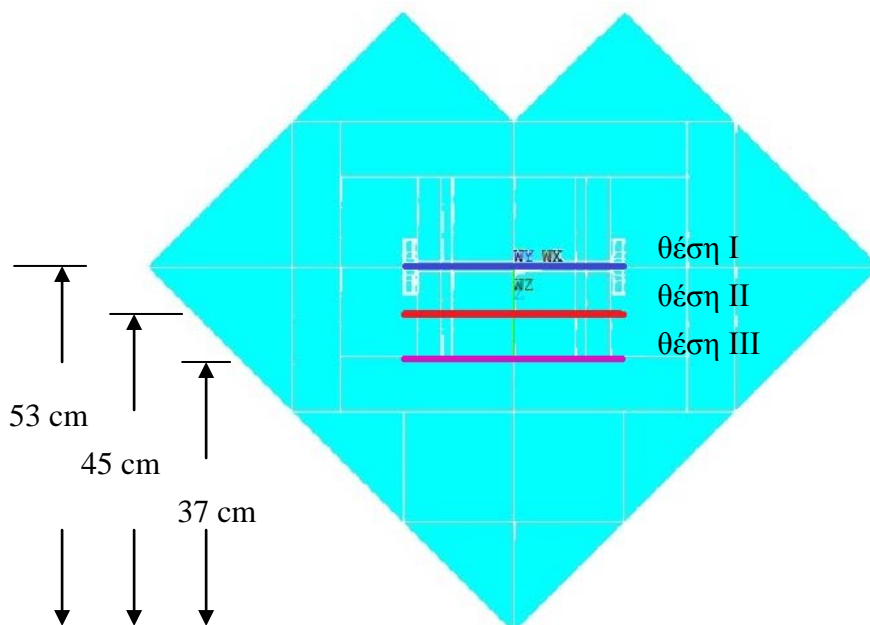
$\{F_i^{nr}\}$ = το διάνυσμα των δυνάμεων

i = αντιπροσωπεύει την τρέχουσα επανάληψη

5.2.8 Παραμετρική ανάλυση και αριθμητικά αποτελέσματα

Η παραμετρική ανάλυση των τρισδιάστατων μοντέλων περιλαμβάνει συνδυασμό των καταστατικών εξισώσεων των τριών υλικών όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής μελετήθηκε η μηχανική καταπόνηση των γωνιακών επιστυλίων όταν ο σύνδεσμος διπλού ταυ τοποθετείται σε τρεις διαφορετικές θέσεις. Αρχικά σε απόσταση 53 cm (θέση I), στη συνέχεια σε απόσταση 45 cm (θέση II) και τέλος σε απόσταση 37 cm (θέση III), από την εξωτερική γωνία συναρμογής των μαρμάρινων ογκοτεμαχίων όπως φαίνεται στην *Εικόνα 5.18*. Στον *Πίνακα 5.8* παρουσιάζονται τα μοντέλα που επιλύθηκαν και στον *Πίνακα 5.9* οι μετατοπίσεις που επιβλήθηκαν σε κάθε μοντέλο και τα δεδομένα που προέκυψαν. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι στα υλικά που θεωρήθηκαν γραμμικά ελαστικά και ισότροπα χρησιμοποιήθηκαν μόνο το μέτρο

ελαστικότητας (E) και ο λόγος Poisson ν , όπως αυτά παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1, χωρίς χρήση επιπλέον καμπυλών τάσης - ανηγμένης παραμόρφωσης. Στην περίπτωση που το μάρμαρο θεωρήθηκε ελαστοπλαστικό υλικό το μέτρο ελαστικότητας που χρησιμοποιήθηκε γι' αυτό το υλικό ήταν $E=73 \cdot 10^3$ MPa και ο λόγος Poisson $\nu=0.26$, ενώ για τα υπόλοιπα υλικά χρησιμοποιήθηκαν οι μηχανικές ιδιότητες όπως αυτές αναφέρονται στον Πίνακα 5.1. Επίσης, εκτός από την περίπτωση όπου τα υλικά θεωρήθηκαν ελαστικά και ισότροπα, σε όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκαν οι αντίστοιχες καμπύλες τάσης - ανηγμένης παραμόρφωσης όπως αυτές παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 5.2.3. Από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.9 προκύπτει ότι μόνο στις περιπτώσεις που το μάρμαρο θεωρηθεί γραμμικώς ελαστικό υλικό η μετατόπιση που μπορεί να λάβει το αντίστοιχο μοντέλο είναι μεγαλύτερη και συγκεκριμένα διπλάσια από αυτή που μπορεί να λάβει το μοντέλο όταν και τα τρία υλικά, δηλαδή το μάρμαρο, το κονίαμα και το τιτάνιο, θεωρηθούν μη γραμμικώς ελαστικά. Το ίδιο συμβαίνει και στην περίπτωση που το μάρμαρο θεωρηθεί ελαστοπλαστικό υλικό με μέτρο ελαστικότητας $E=73 \cdot 10^3$ MPa και λόγο Poisson $\nu=0.26$.



Εικόνα 5.18: Κάτοψη του αριθμητικού μοντέλου, όπου παρουσιάζονται οι τρεις θέσεις όπου τοποθετήθηκε ο σύνδεσμος

Πίνακας 5.8: Μοντέλα που επιλύθηκαν

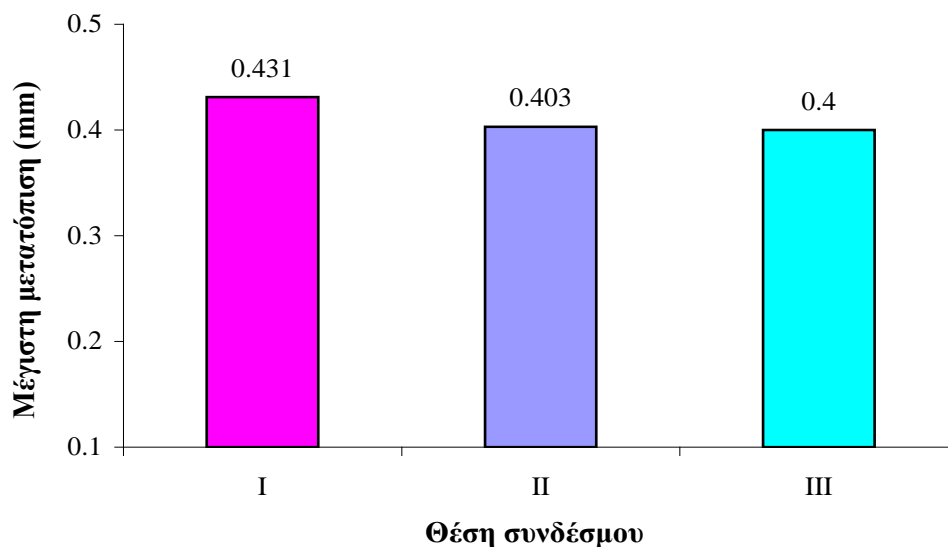
Τίτλος μοντέλου	Τιτάνιο	Κονίαμα	Μάρμαρο	Θέση συνδέσμου
M1	E	E	E	I
M2	σ-ε	E	σ-ε	I
M3	E	σ-ε	σ-ε	I
M4	E	E	σ-ε	I
M5	σ-ε	E	E	I
M6	σ-ε	σ-ε	E	I
M7	σ-ε	σ-ε	E-Π	I
M8	σ-ε	σ-ε	σ-ε	I
M9	σ-ε	σ-ε	σ-ε	I
M10	σ-ε	σ-ε	σ-ε	I
M11	σ-ε	σ-ε	σ-ε	II
M12	σ-ε	σ-ε	σ-ε	III

Πίνακας 5.9: Εφαρμοζόμενες και ληφθείσες μετατοπίσεις σε κάθε μοντέλο

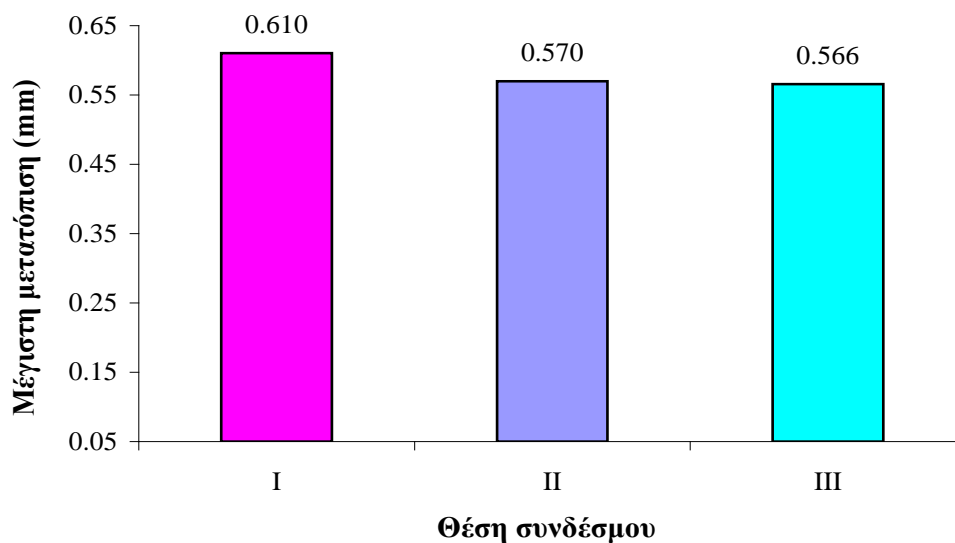
Τίτλος μοντέλου	Δοθείσα μετατόπιση (mm)	Αποτέλεσμα: το μοντέλο	Σημείωση
M1	1	επιλύεται	
M2	0.435	δεν επιλύεται	
M3	0.707	δεν επιλύεται	
M4	0.431	δεν επιλύεται	
M5	0.707	επιλύεται	
M6	0.707	επιλύεται	
M7	0.707	επιλύεται	για το μάρμαρο $E=73 \cdot 10^3$ MPa και $\nu=0.26$
M8	0.431	επιλύεται	
M9	0.500	δεν επιλύεται	(*)
M10	0.450	δεν επιλύεται	(*)
M11	0.403	επιλύεται	
M12	0.4	επιλύεται	

*Σημειώνεται ότι το τελευταίο σημείο αυτών των καμπυλών καθορίζεται από την αντοχή του υλικού σε μονοαξονική θλίψη σε ανηγμένη παραμόρφωση 0.01.

Στα πλαίσια της παραμετρικής διερεύνησης ορισμένα μοντέλα απλοποιήθηκαν, ωστόσο ο τελικός στόχος ήταν να διερευνηθεί το εντατικό και παραμορφωσιακό πεδίο των γωνιακών μαρμάρινων επιστυλίων του Παρθενώνα της Ακρόπολης των Αθηνών. Γι' αυτό το λόγο, δίνεται έμφαση στα γεωμετρικά μοντέλα τα υλικά των οποίων περιγράφονται από τις πειραματικές καμπύλες τάσης - ανηγμένης παραμόρφωσης, δηλαδή για τα μοντέλα M8, M11 και M12 (Πίνακας 5.8, 5.9). Στις επόμενες εικόνες παρατίθενται συγκριτικά ιστογράμματα από τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επίλυση των τριών αυτών μοντέλων. Ειδικότερα, στην *Εικόνα 5.19* παρουσιάζεται η μέγιστη μετατόπιση που έλαβαν τα τρία μοντέλα κατά του άξονες x και z, όπου η μετατόπιση ήταν ίση κατά τους δύο άξονες. Στην *Εικόνα 5.20* παρουσιάζεται η μετατόπιση που έλαβαν τα τρία μοντέλα κατά τη συνισταμένη των αξόνων x και z. Και στις δύο εικόνες φαίνεται ότι τη μεγαλύτερη μετατόπιση έλαβε το μοντέλο M8, όπου ο σύνδεσμος ήταν τοποθετημένος στη θέση I, γι' αυτό το λόγο θα αξιοποιηθούν τα αποτελέσματα αυτού του μοντέλου.

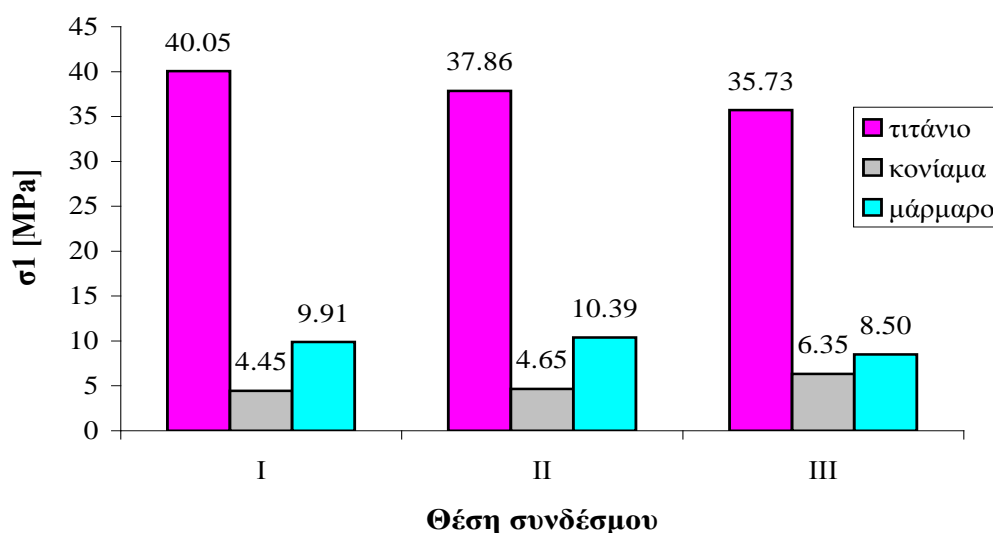


Εικόνα 5.19: Μέγιστη ληφθείσα μετατόπιση κατά τους άξονες x και z για τις τρεις διαφορετικές θέσεις τοποθέτησης του συνδέσμου



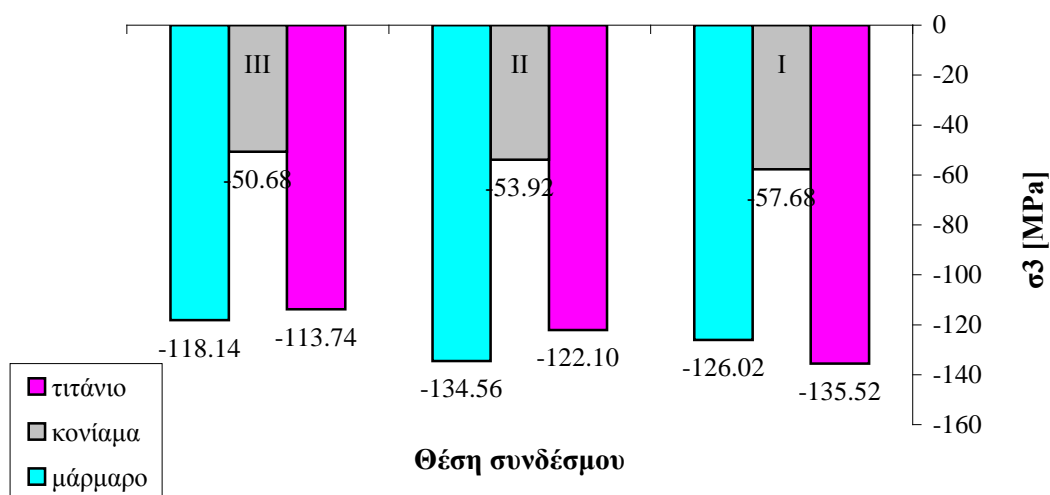
Εικόνα 5.20: Συνολική μέγιστη ληφθείσα μετατόπιση για τις τρεις διαφορετικές θέσεις τοποθέτησης του συνδέσμου

Στην Εικόνα 5.21 παρουσιάζεται η τιμή της μέγιστης κύριας τάσης, που αναπτύσσεται σε κάθε υλικό στις τρεις διαφορετικές θέσεις τοποθέτησης του συνδέσμου για τα μοντέλα M8, M11 και M12. Όπως φαίνεται από το ιστόγραμμα, η μέγιστη κύρια τάση και στις τρεις περιπτώσεις τοποθέτησης του συνδέσμου παρουσιάζεται στο τιτάνιο και δείχνει εφελκυσμό.



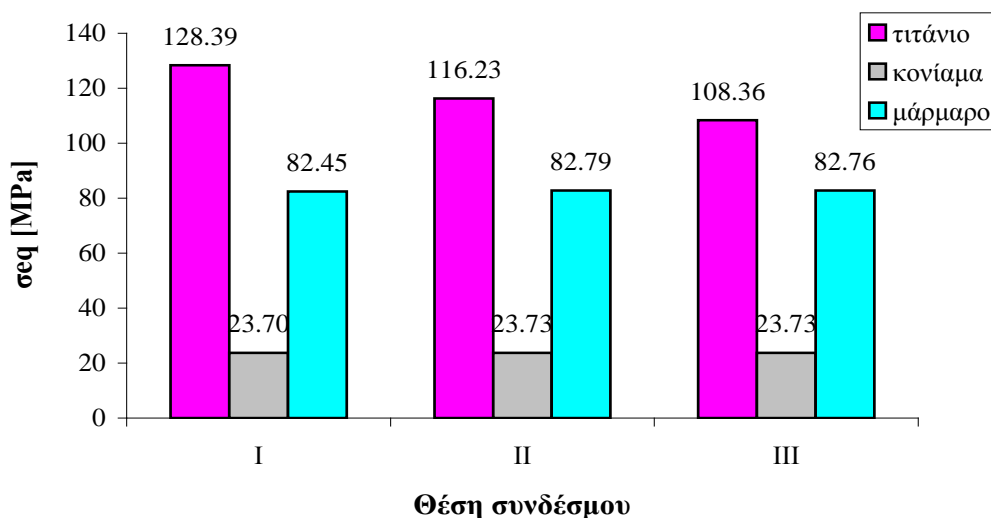
Εικόνα 5.21: Μέγιστη αναπτυσσόμενη κύρια τάση, η οποία δείχνει εφελκυσμό, για τα τρία υλικά και στις τρεις θέσεις τοποθέτησης του συνδέσμου

Στην *Εικόνα 5.22* παρουσιάζεται η τιμή μόνο της μικρότερης κύριας τάσης, δηλαδή της τάσης σ_3 , που αναπτύσσεται σε κάθε υλικό στις τρεις διαφορετικές θέσεις τοποθέτησης του συνδέσμου, η οποία δείχνει θλίψη και για τα τρία υλικά στα μοντέλα M8, M11, M12. Από τα ιστογράμματα φαίνεται ότι στις θέσεις τοποθέτησης του συνδέσμου II και III η μικρότερη κύρια τάση αναπτύσσεται στο μάρμαρο, ενώ στη θέση I αναπτύσσεται στο τιτάνιο. Παρατηρείται μία μικρή διαφορά στις τιμές της ελάχιστης κύριας τάσης, σ_3 που αναπτύσσεται στο μάρμαρο και το τιτάνιο, διαφορά που έγκειται στο 7.3%, 9.7% και 3.9% για τις τρεις θέσεις I, II και III τοποθέτησης του συνδέσμου αντίστοιχα.



Εικόνα 5.22: Ελάχιστη αναπτυσσόμενη κύρια τάση, η οποία δείχνει θλίψη για τα τρία υλικά και στις τρεις θέσεις τοποθέτησης του συνδέσμου

Στην *Εικόνα 5.23* παρουσιάζεται η τιμή της μεγαλύτερης ισοδύναμης τάσης von Mises, σ_{eq} , που αναπτύσσεται σε κάθε υλικό, στις τρεις διαφορετικές θέσεις τοποθέτησης του συνδέσμου που αντιστοιχούν στα μοντέλα M8, M11 και M12. Από το ιστόγραμμα αυτής της εικόνας φαίνεται ότι η μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση κατά von Mises παρουσιάζεται στο τιτάνιο και στις τρεις περιπτώσεις.



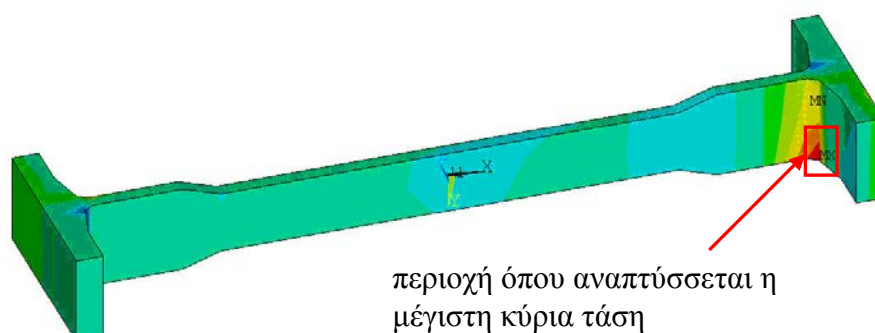
Εικόνα 5.23: Μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση σ_{eq} κατά von Mises και στις τρεις θέσεις τοποθέτησης του συνδέσμου

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως και φαίνεται και στα ιστογράμματα των Εικόνων 5.20 και 5.21, το γεωμετρικό μοντέλο που δέχθηκε τη μεγαλύτερη μετατόπιση ήταν το M8, δηλαδή αυτό όπου ο σύνδεσμος τιτανίου τοποθετήθηκε στη θέση I, δηλαδή σε απόσταση 53 cm από την εξωτερική γωνία συναρμογής των μαρμαρίνων ογκοτεμαχίων. Σ' αυτό το μοντέλο η συμπεριφορά των υλικών καθορίστηκε από πειραματικές καμπύλες τάσης - ανηγμένης παραμόρφωσης σε μονοαξονική θλίψη και εφελκυσμό.

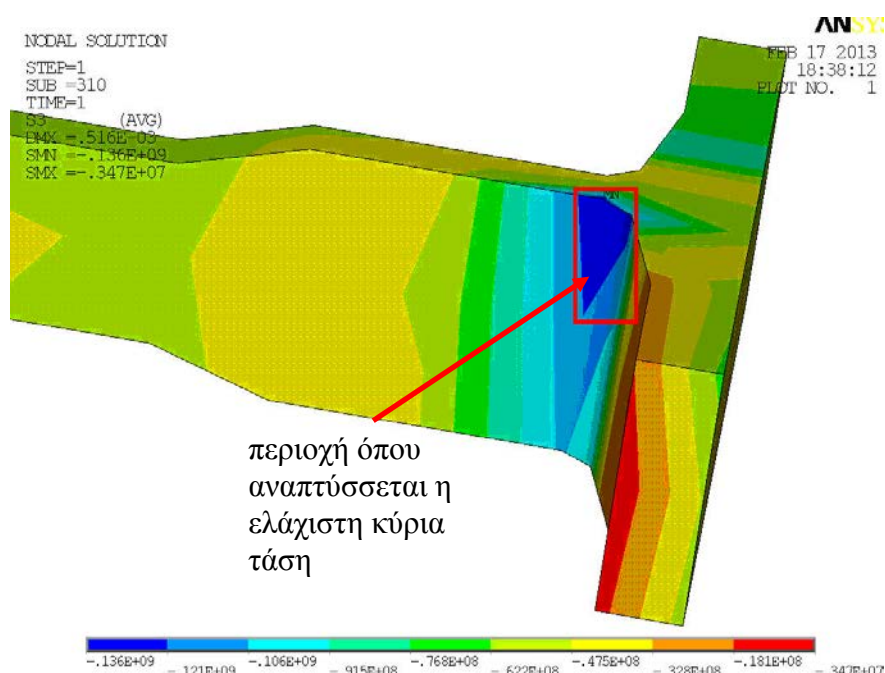
Στη συνέχεια παρουσιάζονται ενδεικτικά σχήματα και διαγράμματα από τις επιλύσεις του αριθμητικού αυτού μοντέλου. Αρχικά παρατίθενται στον Πίνακα 5.10 τα ζεύγη των κύριων τάσεων του μοντέλου για τους κόμβους που παρουσιάζουν την υψηλότερη τιμή της μέγιστης και τη χαμηλότερη τιμή της ελάχιστης κύριας τάσης αντίστοιχα. Στο τιτάνιο αναπτύχθηκε ο μέγιστος εφελκυσμός, ενώ το μάρμαρο και το κονίαμα υφίστανται υψηλές τιμές θλίψης. Ειδικότερα τα αριθμητικά αποτελέσματα του μοντέλου M8 δείχνουν ότι οι μέγιστες και οι ελάχιστες κύριες τάσεις που αναπτύχθηκαν στο σύνδεσμο τιτανίου κυμαίνονται από 10.01 έως 40.05 MPa και από - 135.52 έως -103.72 MPa όπως φαίνεται στις Εικόνες 5.24, 5.25 αντίστοιχα.

Πίνακας 5.10: Ζεύγη τιμών τάσεων στους κόμβους όπου αναπτύσσεται η υψηλότερη και χαμηλότερη τιμή για την μέγιστη και ελάχιστη κύρια τάση σ_1 , σ_3

	Υψηλότερες τάσεις	μέγιστες	κύριες	Μικρότερες τάσεις	ελάχιστες	κύριες
	σ_1 [MPa]	σ_3 [MPa]	σ_{eq} [MPa]	σ_3 MPa]	σ_1 MPa]	σ_{eq} [MPa]
Τιτάνιο	40.05	-40.98	71.99	-135.52	2.39	128.39
Κονίαμα	4.45	-5.17	8.82	-57.68	-35.08	20.28
Μάρμαρο	9.91	-82.87	80.69	-126.02	-39.28	82.39

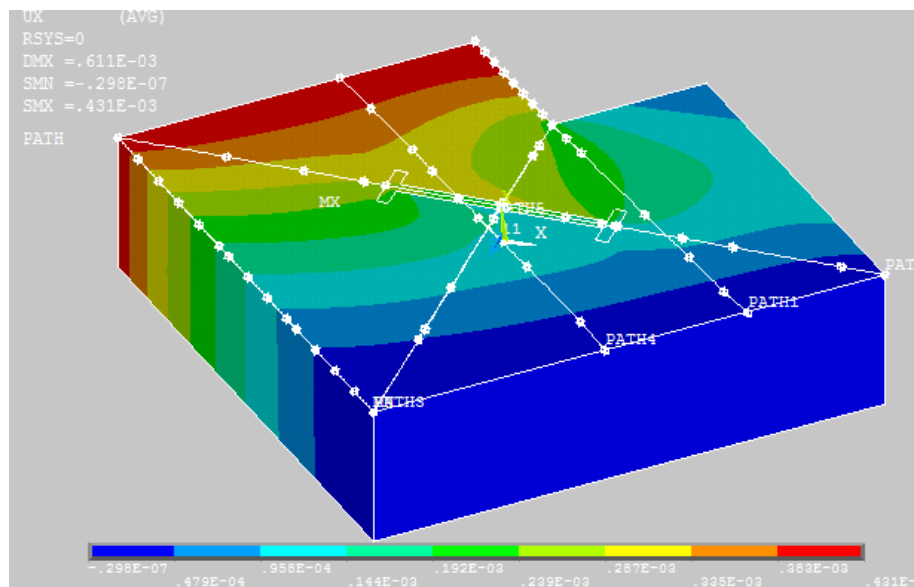


Εικόνα 5.24: Κατανομή μέγιστης κύριας τάσης στο τιτάνιο στρέφοντας τον άξονα x κατά 180° αριστερά.

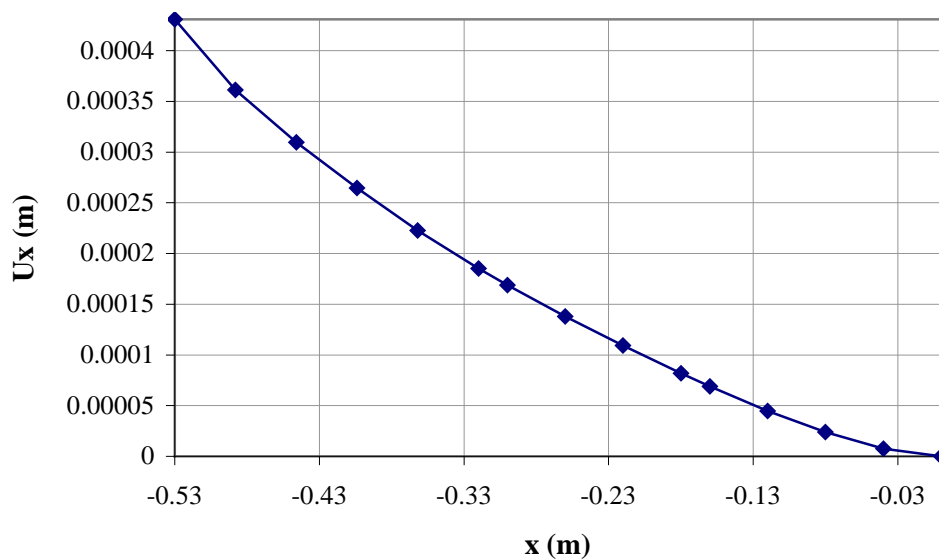


Εικόνα 5.25: Κατανομή της ελάχιστης κύριας τάσης στο τιτάνιο

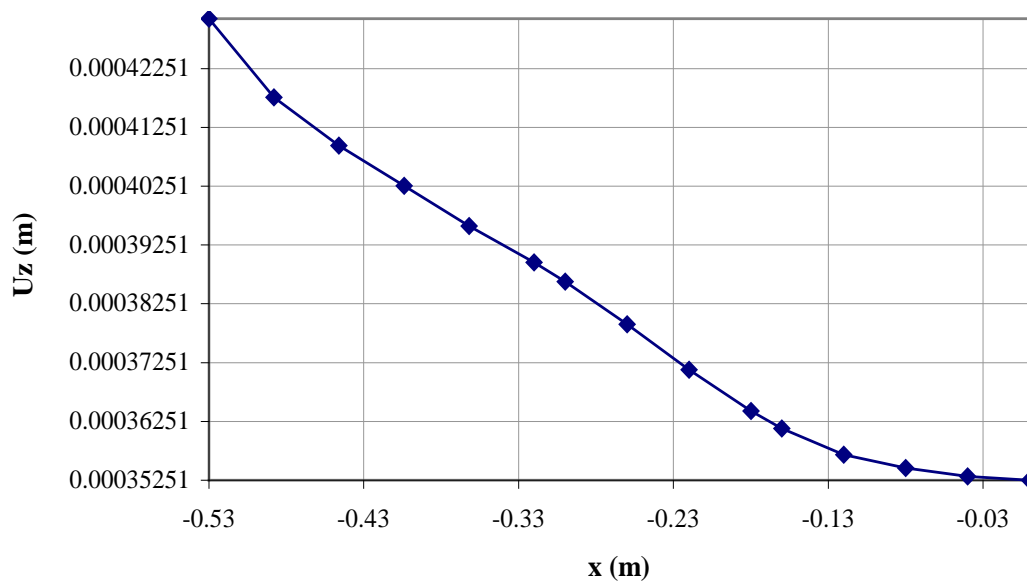
Στη συνέχεια, παρουσιάζονται στην *Εικόνα 5.26* οι ισοϋψείς κατά τη διεύθυνση του άξονα x όπου έχουν σχεδιαστεί συγκεκριμένες διαδρομές (paths). Στις *Εικόνες 5.27, 5.28* παρουσιάζεται η μετατόπιση U_x και U_z των κόμβων της διαδρομής *PATH3* κατά τον άξονα x . Από αυτές τις εικόνες προκύπτει ότι το δεξί ογκοτεμάχιο είναι πιο σταθερό, ενώ το αριστερό μετακινήθηκε προς τα δεξιά.



Εικόνα 5.26: Σχεδιασμός διαδρομών πάνω στο μοντέλο, που δείχνουν την μετατόπιση των κόμβων κατά τον x άξονα.

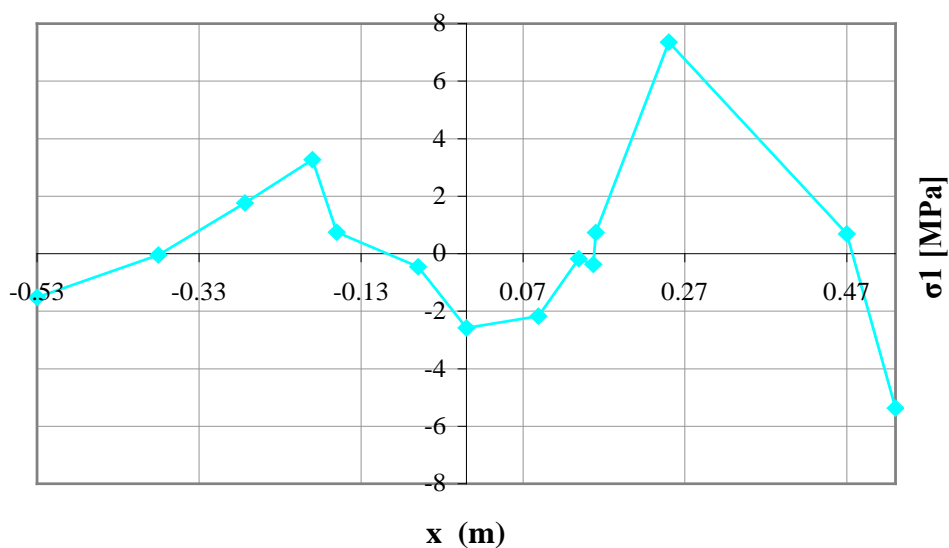


*Εικόνα 5.27: Μετατόπιση (U_x) των κόμβων της διαδρομής *PATH3* - θέση των κόμβων στον άξονα x .*

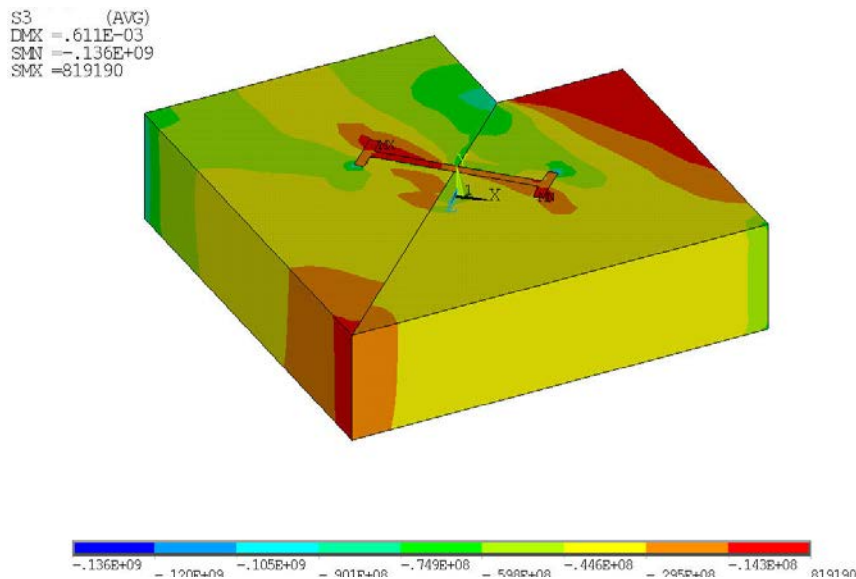


Εικόνα 5.28: Μετατόπιση (U_z) των κόμβων της διαδρομής *PATH3* - θέση των κόμβων στον άξονα x .

Στην Εικόνα 5.29 δίνεται ενδεικτικά η μεταβολή της μέγιστης κύριας τάσης κατά τη διαδρομή *PATH2*, ενώ στην Εικόνα 5.30 παρουσιάζονται οι ισοτασικές που αντιστοιχούν στην κύρια τάση σ_3 και φαίνεται ότι στις εξωτερικές επιφάνειες του μοντέλου, η περιοχή γύρω από τις κεφαλές του συνδέσμου καθώς και οι περιοχές στις γωνίες συναρμογής των δύο ογκοτεμαχίων παρουσιάζουν σημαντική διακύμανση στις τιμές της κύρια τάσης σ_3 .

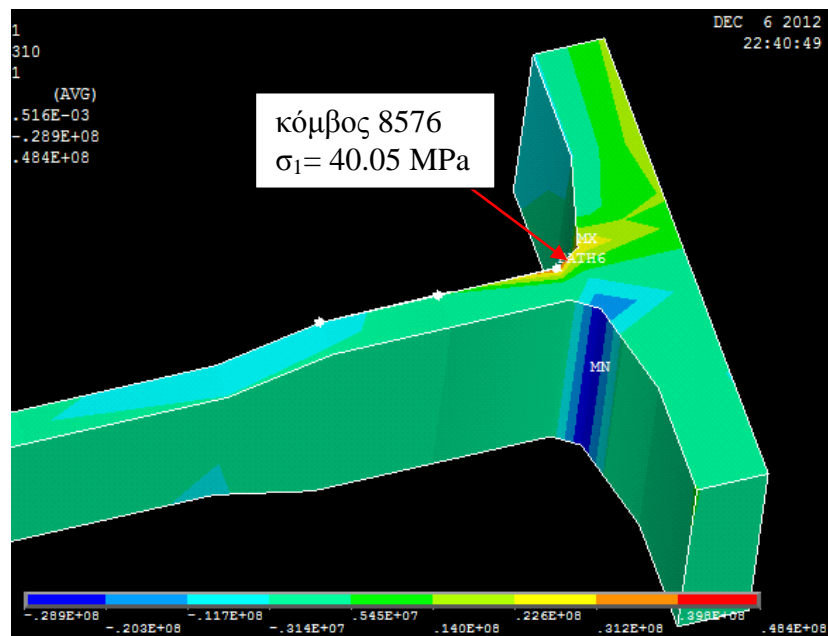


Εικόνα 5.29: Μεταβολή της σ_1 στο *PATH2* κατά τον άξονα x .

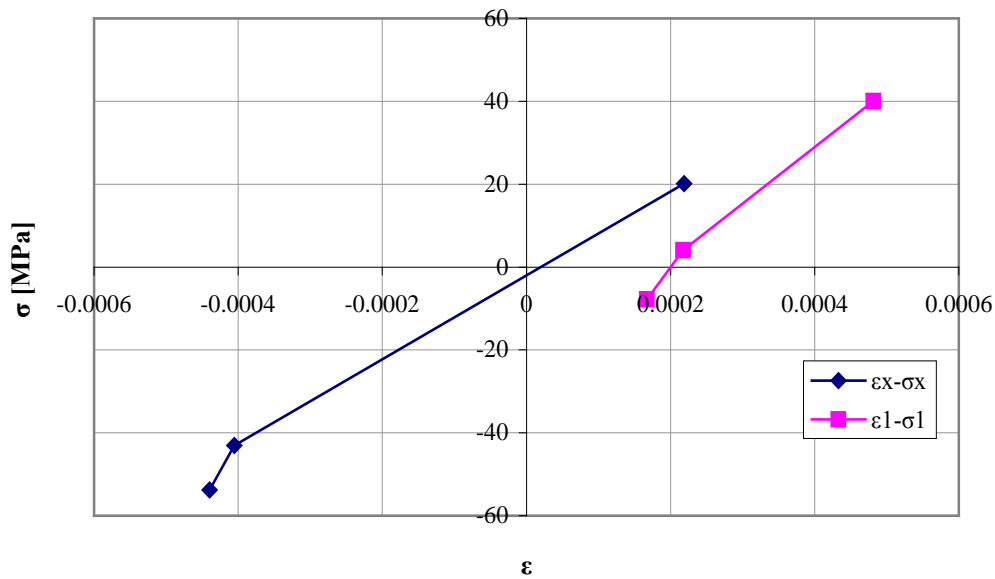


Εικόνα 5.30: Ισοτασικές της κύριας τάσης σ_3

Στην Εικόνα 5.31 παρουσιάζεται η διαδρομή PATH6, η οποία καθορίστηκε στο σύνδεσμο τιτανίου στην περιοχή της μέγιστης κύριας τάσης. Η Εικόνα 5.32 δείχνει τη σχέση τάσης - ανηγμένης παραμόρφωσης κατά μήκος της διαδρομής PATH6, παρουσιάζοντας τις αλλαγές από τον εφελκυσμό στη θλίψη.

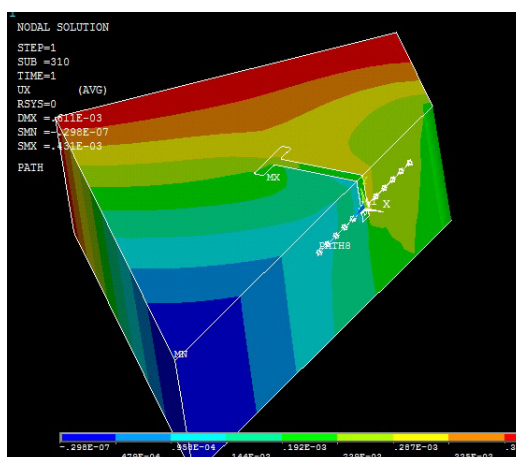


Εικόνα 5.31: Διαδρομή πάνω στο τιτάνιο (PATH6), που περιλαμβάνει τον κόμβο 8576, στον οποίο παρουσιάζεται η μέγιστη κύρια τάση η οποία δείχνει εφελκυσμό.

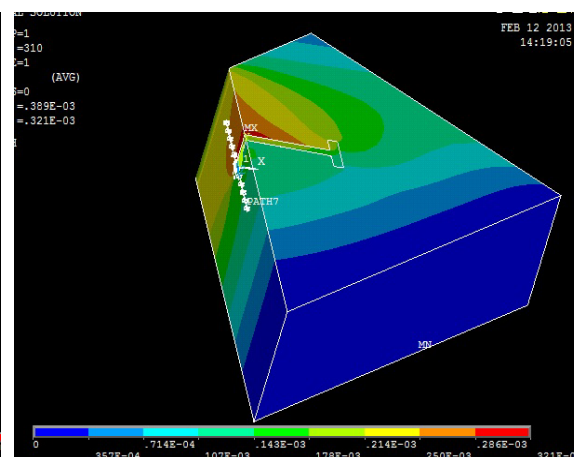


Εικόνα 5.32: Τάση - ανηγμένη παραμόρφωση κατά μήκος της διαδρομής PATH6

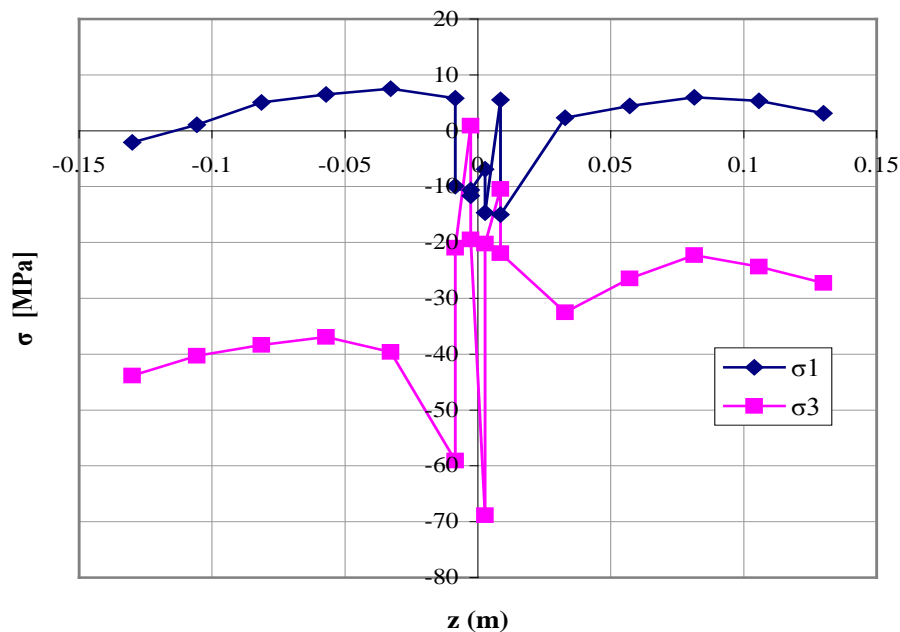
Στις Εικόνες 5.33 και 5.34 παρουσιάζονται η αριστερή και η δεξιά διεπιφάνεια των τριών υλικών στο σημείο που ενώνονται τα δύο ογκοτεμάχια και στις οποίες είναι σχεδιασμένες οι διαδρομές PATH8 και PATH7 αντιστοίχως. Στις Εικόνες 5.35 , 5.36 παρουσιάζονται διαγράμματα μεταβολής των κύριων τάσεων σ_1 και σ_3 που αναπτύσσονται στις δύο διεπιφάνειες, από όπου φαίνεται ότι το τιτάνιο και το κονίαμα υφίστανται θλίψη (αντιστοιχούν στα τμήματα του διαγράμματος όπου η τάση αλλάζει απότομα), ενώ το μάρμαρο εφελκυσμό.



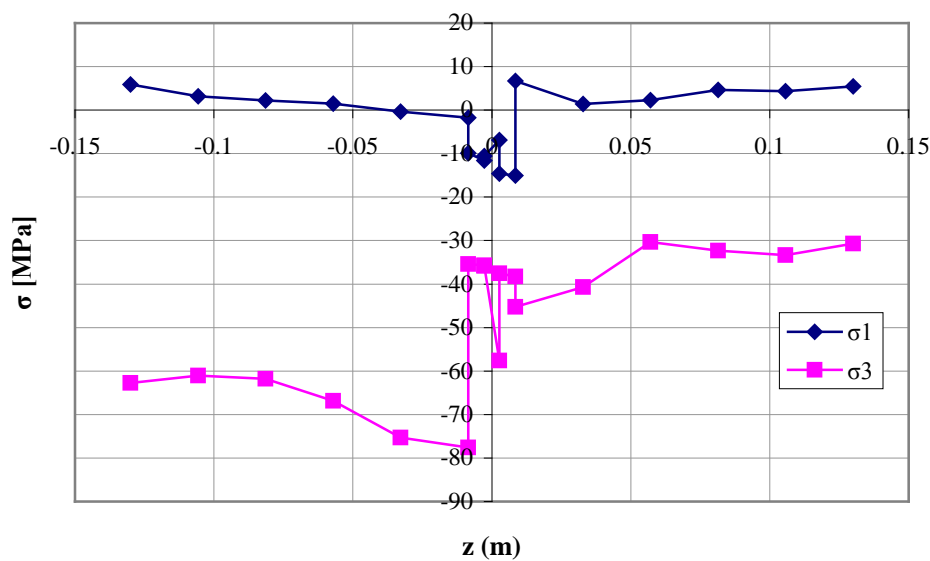
Εικόνα 5.33: Διαδρομή PATH 8 στην αριστερή διεπιφάνεια του μοντέλου



Εικόνα 5.34: Διαδρομή PATH 7 στη δεξιά διεπιφάνεια του μοντέλου



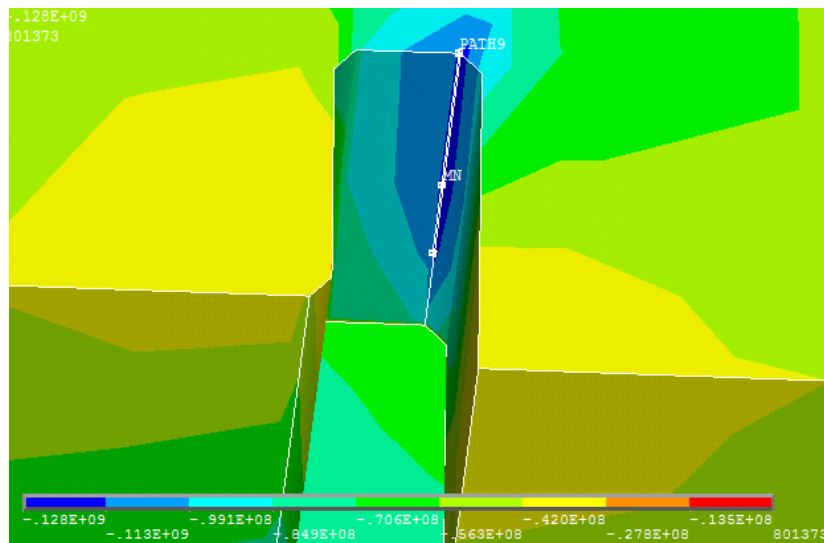
Εικόνα 5.35: Μεταβολή των μέγιστων και ελάχιστων κύριων τάσεων κατά τον άξονα z για τη διαδρομή PATH 7.



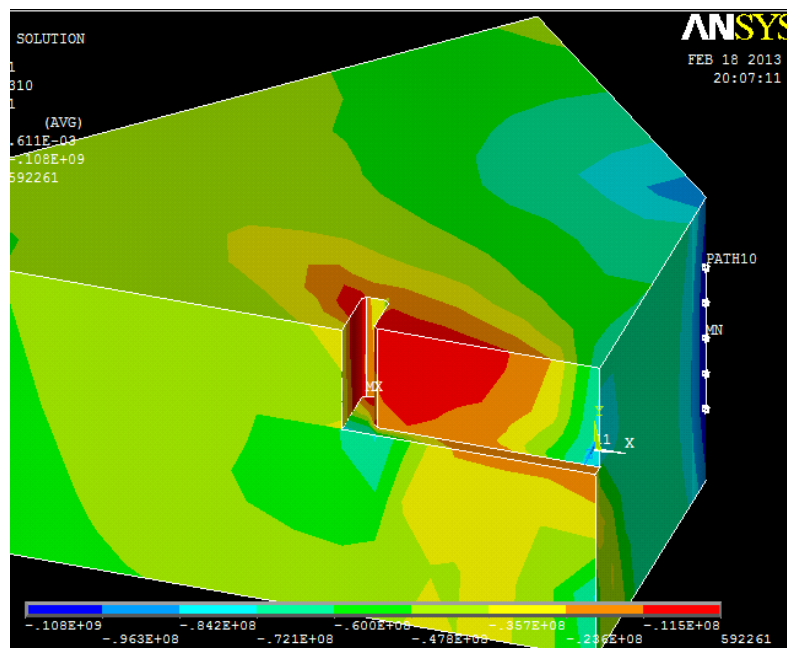
Εικόνα 5.36: Μεταβολή των τάσεων σ_1 και σ_3 κατά τον άξονα z στη διαδρομή PATH 8.

Η κατανομή των τάσεων μελετάται επίσης και κατά μήκος συγκεκριμένων διαδρομών σε τμήματα του μαρμάρου (PATH9 και PATH10) όπου παρουσιάζεται η ελάχιστη κύρια τάση. Η διαδρομή PATH9 βρίσκεται στο δεξιά διεπιφάνεια του μαρμάρου με το κονίαμα (Εικόνα 5.37), ενώ η διαδρομή PATH10 καθορίζεται στην πάνω επιφάνεια των μαρμαρίνων ογκοτεμαχίων (Εικόνα 5.38). Η κατανομή της

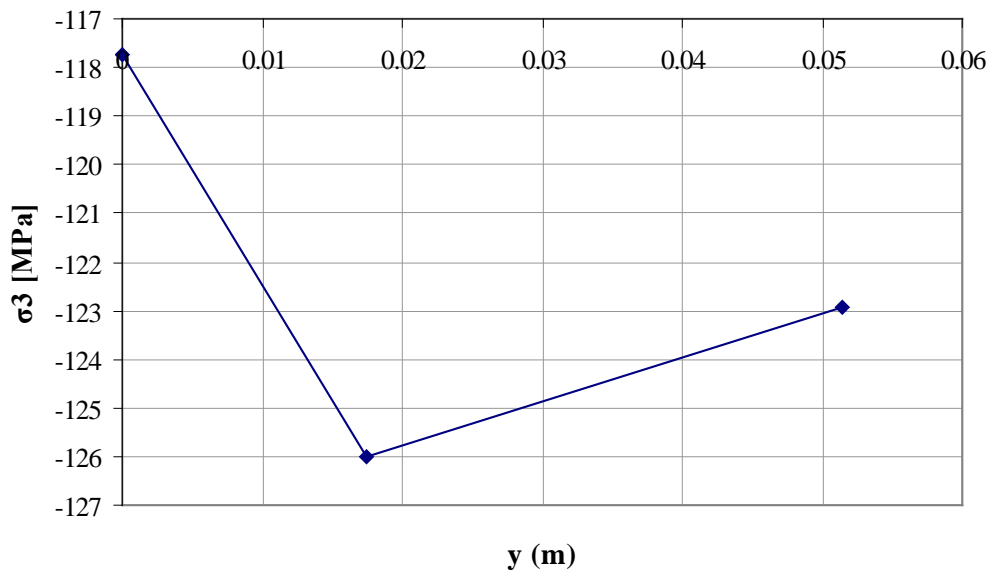
κύριας τάσης σ_3 κατά τον άξονα y στις διαδρομές αυτές, παρουσιάζεται στις *Εικόνα 5.39, 5.40*. Και στις δύο αυτές περιπτώσεις το μάρμαρο υφίσταται καθαρή θλίψη.



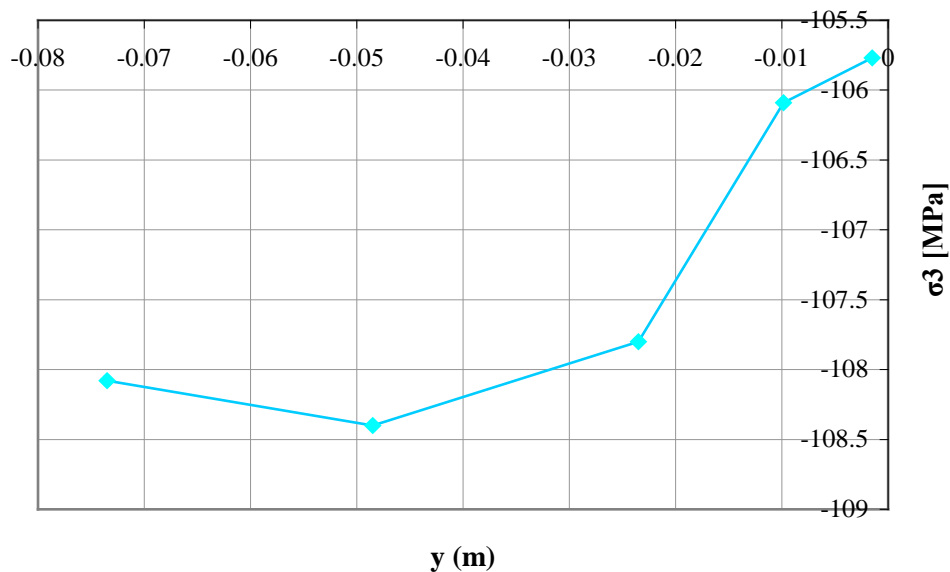
Εικόνα 5.37: Διαδρομή PATH9 στη διεπιφάνεια του μαρμάρου με το κονίαμα, στην οποία περιλαμβάνονται κόμβοι με την ελάχιστη κύρια τάση.



Εικόνα 5.38: Διαδρομή PATH10 στη διεπιφάνεια των δύο μαρμάρινων ογκοτεμαχίων



Εικόνα 5.39: Μεταβολή της κύριας τάσης σ_3 κατά τον άξονα y στη διαδρομή PATH9



Εικόνα 5.40: Μεταβολή της κύριας τάσης σ_3 κατά τον άξονα y στη PATH10

5.2.9 Συζήτηση αποτελεσμάτων

Στην ενότητα 5.2 του κεφαλαίου 5 μελετήθηκε αριθμητικά με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων η περιοχή των τάσεων και των παραμορφώσεων σε μαρμάρινα επιστήλια που ενώνονται με σύνδεσμο τιτανίου. Η θέση της εγκοπής του συνδέσμου κυμαινόταν μεταξύ τριών θέσεων γι' αυτό και εξετάστηκαν διαφορετικά μοντέλα. Από αυτά προέκυψε ότι η μετατόπιση που λαμβάνουν τα μοντέλα μειώνεται σταδιακά καθώς μικραίνει η απόσταση της εγκοπής από την εξωτερική γωνία

συναρμογής των επιστυλίων. Επομένως, τη μέγιστη μετατόπιση μπορεί να δεχθεί το μοντέλο M8, ενώ τη μικρότερη το μοντέλο M12. Σαν συμπέρασμα προκύπτει ότι για τη συγκεκριμένη περίπτωση φόρτισης των επιστυλίων προτείνεται για την τοποθέτηση του συνδέσμου τιτανίου η θέση I.

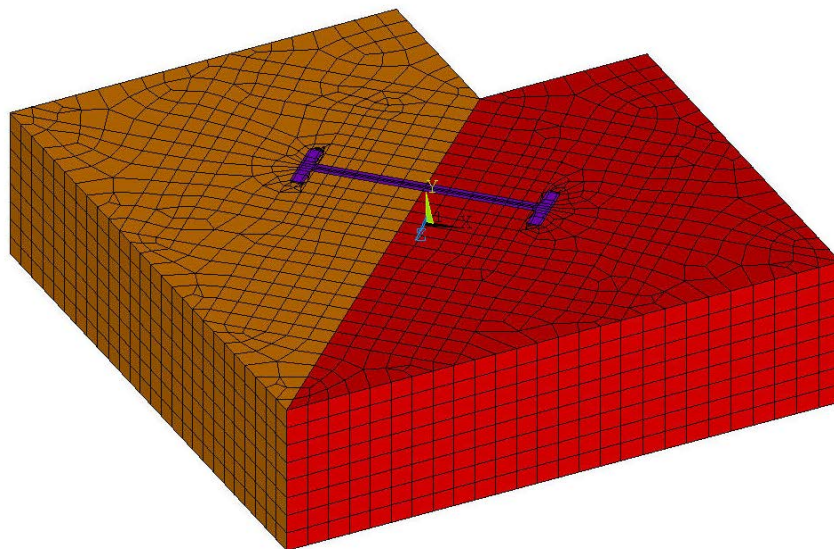
Τα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης του μοντέλου M8, το οποίο μπορεί να λάβει τη μεγαλύτερη μετατόπιση έδειξαν ότι η περιοχή όπου αναπτύσσονται οι μέγιστες εφελκυστικές τάσεις είναι στον σύνδεσμο τιτανίου, ενώ το μάρμαρο και το κονίαμα υφίστανται υψηλές θλιπτικές τάσεις κάτω από τριαξονικές συνθήκες. Τα μοντέλα έτρεξαν κάτω από έλεγχο μετατόπισης και φορτίστηκαν μέχρι την αστοχία του υλικού. Η μέγιστη μετατόπιση που μπορεί να εφαρμοστεί κάθετα στην γωνία συναρμογής 45° είναι της τάξης των 0.6 mm. Τυπικές μέγιστες και ελάχιστες τιμές θλιπτικών τάσεων για το μάρμαρο είναι της τάξεως των 125 και 40 MPa αντίστοιχα, ενώ οι αντίστοιχες τιμές για το κονίαμα είναι 57 και 35 MPa.

5.3 Αριθμητική διερεύνηση της περίπτωσης χρήσης συμβατού μαρμάρου ως ένα από τα γωνιακά επιστύλια.

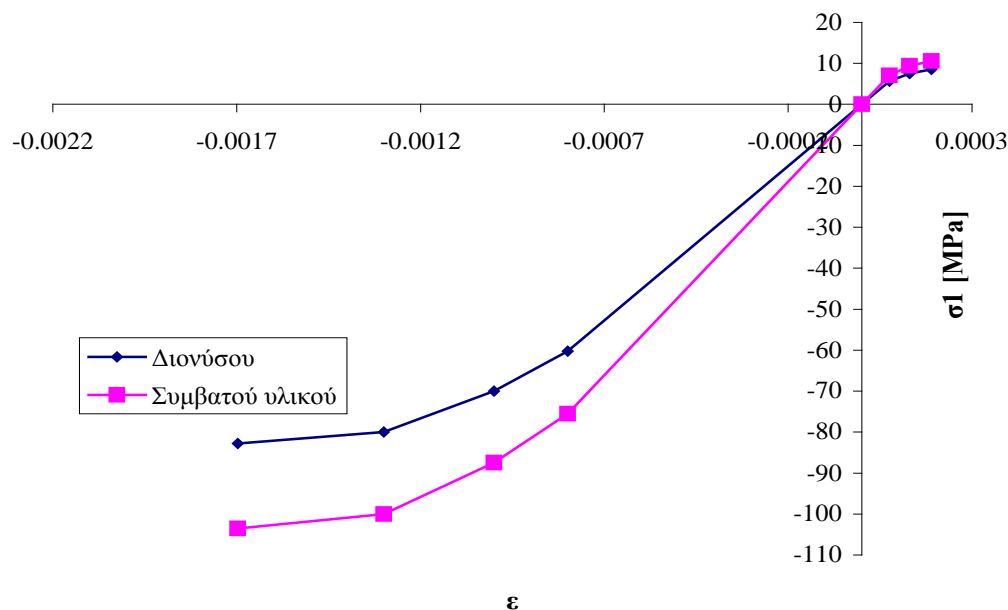
Στην ενότητα αυτή μελετήθηκε η περίπτωση όπου αντικαθίσταται ένα τεμάχιο μαρμάρου με κάποιο το οποίο θεωρείται μεν συμβατό αλλά έχει διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες. Συγκεκριμένα, επαναλαμβάνεται η μεθοδολογία επίλυσης του προβλήματος της μηχανικής καταπόνησης των γωνιακών μαρμάρινων επιστηλίων του Παρθενώνα της Ακρόπολης των Αθηνών, που μελετήθηκαν στις παραγράφους 5.2-5.3 με αντικατάσταση όμως το δεξιού μαρμάρινου ογκοτεμαχίου από ένα νέο μάρμαρο με παρόμοιες μηχανικές ιδιότητες. Στην *Εικόνα 5.41* παρουσιάζεται ένα τέτοιο μοντέλο στο οποίο το αριστερό ογκοτεμάχιο είναι μάρμαρο Διονύσου και συμβολίζεται με χρώμα κίτρινο, ενώ το δεξί ογκοτεμάχιο είναι ένα συμβατό με το προαναφερόμενο μάρμαρο και συμβολίζεται με χρώμα κόκκινο, έτσι ώστε να είναι διακριτή η διαφορά των δύο υλικών. Η πυκνότητα του νέου υλικού είναι $\rho=2.70 \text{ g/cm}^3$ και ο λόγος Poisson $\nu=0.26$ όπως ακριβώς και του μαρμάρου Διονύσου, όμως το μέτρο ελαστικότητας του είναι $E=94.4 \text{ GPa}$. Για την προσομοίωση της συμπεριφοράς του νέου υλικού χρησιμοποιήθηκαν θεωρητικές καμπύλες μονοαξονικής θλίψης και εφελκυσμού, οι οποίες διαφέρουν από αυτές του μαρμάρου Διονύσου κατά 25%. Οι καμπύλες των δύο υλικών παρουσιάζονται συγκριτικά στην

Εικόνα 5.42. Τα σημεία τάσεως σ - ανηγμένης παραμόρφωσης ε που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή αυτών των πειραματικών καμπυλών σ - ε δίνονται στον Πίνακα 5.11 (το μείον δείχνει θλίψη, ενώ το συν εφελκυσμό στη μηχανική του στερεού σώματος).

Η διακριτοποίηση του μοντέλου ήταν ομοιόμορφη, με βήμα διακριτοποίησης ίσο με $e = 0.03$ m, αφού για πύκνωση και αραίωση του πλέγματος για βήμα διακριτοποίησης $e = 0.01$ m στο τιτάνιο και το κονίαμα και $e = 0.03$ m για τα μάρμαρα, η βελτίωση που προέκυπτε ήταν της τάξης μόλις του 2.5%. Τα στοιχεία επαφής ήταν ακριβώς τα ίδια με αυτά των μοντέλων που προαναφέρθηκαν στην ενότητα 5.2.5. Οι συνοριακές συνθήκες, ήταν ίδιες με αυτές που εφαρμόστηκαν στα προηγούμενα μοντέλα, όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 5.2.6. Αναλυτικά στο μοντέλο εφαρμόστηκε διατμητική φόρτιση με επιβολή κύλισης σε μία πλευρά του δεξιού μαρμάρινου όγκου, ενώ ταυτόχρονα πακτώθηκε η ακμή 2352, ενώ μετατοπίστηκε το αριστερό μαρμάρινο ογκοτεμάχιο, στο οποίο επιβλήθηκε μετατόπιση έως 0.39 mm κατά τη διεύθυνση x και z των επιφανειών του. Πρέπει ακόμα να σημειωθεί ότι και σε αυτό το μοντέλο η βαρύτητα δεν χρησιμοποιήθηκε ως συνοριακή συνθήκη.



Εικόνα 5.41: Συναρμογή δύο διαφορετικών μαρμάρινων επιστυλίων με γωνία 45°.



Εικόνα 5.42: Συγκριτικές καμπύλες τάσης - ανηγμένης παραμόρφωσης του μαρμάρου Διονύσου (Vardoulakis and Kourkoulis, 1997) και η θεωρητική καμπύλη του νέου υλικού.

Πίνακας 5.11: Δεδομένα σ-ε για τις πειραματικές καμπύλες του μαρμάρου Διονύσου (Kourkoulis and Vardoulakis, 1997) και του νέου μαρμάρου

Μάρμαρο								
Διονύσου								
σ [Mpa]	8.5	7.5	5.6475	0.0	-60.24	-70	-80	-82.8
ε	0.00019	0.00013	0.000075	0.0	-0.0008	-0.001	-0.0013	-0.001697
Νέο								
μάρμαρο								
σ [Mpa]	10.6	9.4	7.08	0	-75.52	-87.5	-100	-103.5
ε	0.00019	0.00013	0.000075	0.0	-0.0008	-0.001	-0.0013	-0.001697

Η επίλυση των μοντέλων ήταν στατική αφού δεν καθορίστηκε κανένας δυναμικός παράγοντας. Για τη μη γραμμική ανάλυση των καταστατικών μοντέλων χρησιμοποιήθηκε από το λογισμικό πακέτο του ANSYS12.0 η επαναληπτική μέθοδος επίλυσης Newton-Raphson.

5.3.1 Αριθμητικά αποτελέσματα

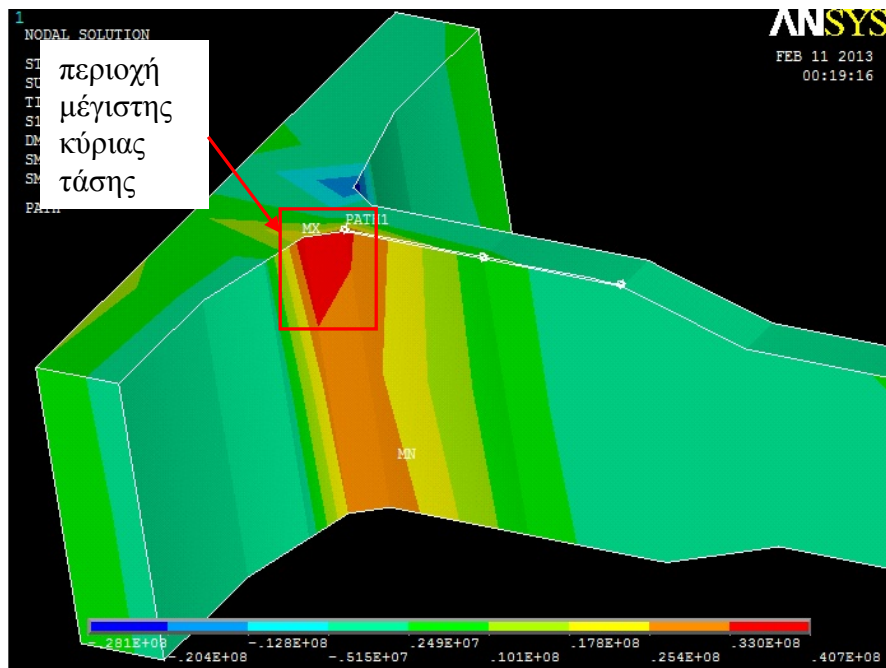
Ζεύγη των κύριων τάσεων για τους κόμβους που παρουσιάζουν την υψηλότερη τιμή της μέγιστης και τη χαμηλότερη τιμή της ελάχιστης κύριας τάσης αντίστοιχα παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.12, όπου φαίνεται ότι στο τιτάνιο αναπτύχθηκε ο

μέγιστος εφελκυσμός, ενώ το μάρμαρο και το κονίαμα υφίστανται υψηλές τιμές θλίψης.

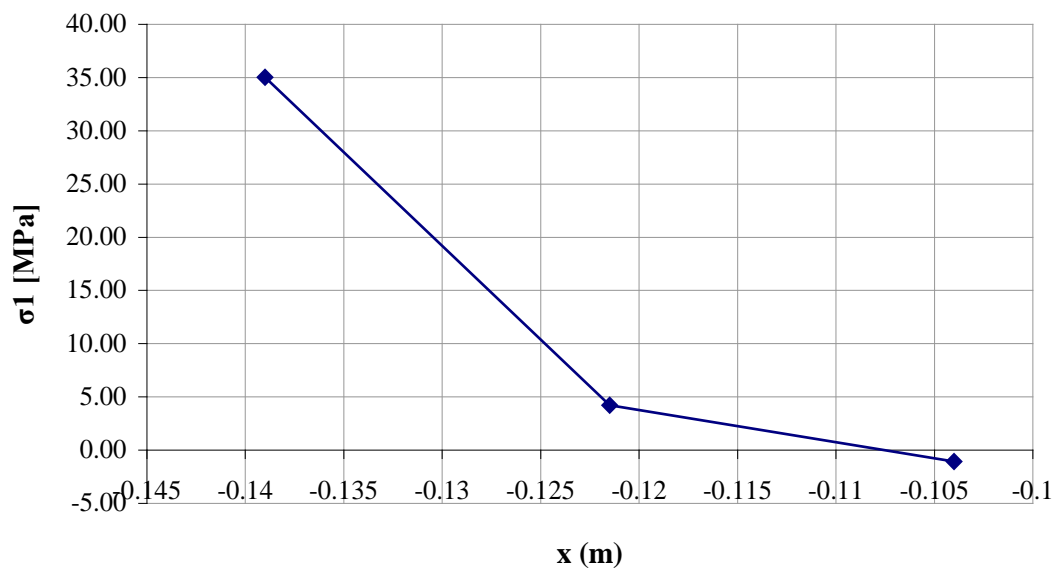
Πίνακας 5.12: Ζεύγη τιμών τάσεων στους κόμβους όπου αναπτύσσεται η υψηλότερη και χαμηλότερη τιμή για την μέγιστη και ελάχιστη κύρια τάση σ_1 , σ_3 .

	Υψηλότερες τάσεις	μέγιστες	κύριες	Μικρότερες τάσεις	ελάχιστες	κύριες
	σ_1 [MPa]	σ_3 [MPa]	σ_{eq} [MPa]	σ_3 MPa]	σ_1 MPa]	σ_{eq} [MPa]
Τιτάνιο	35.04	-35.50	62.89	-119.32	1.98	113.14
Κονίαμα Νέο	4.88	-4.56	8.70	-53.407	-30.76	20.37
μάρμαρο	10.60	-30.23	38.08	-145.02	-39.20	101.97
Μάρμαρο Διονύσου	8.50	-20.46	25.13	-115.95	-30.51	79.01

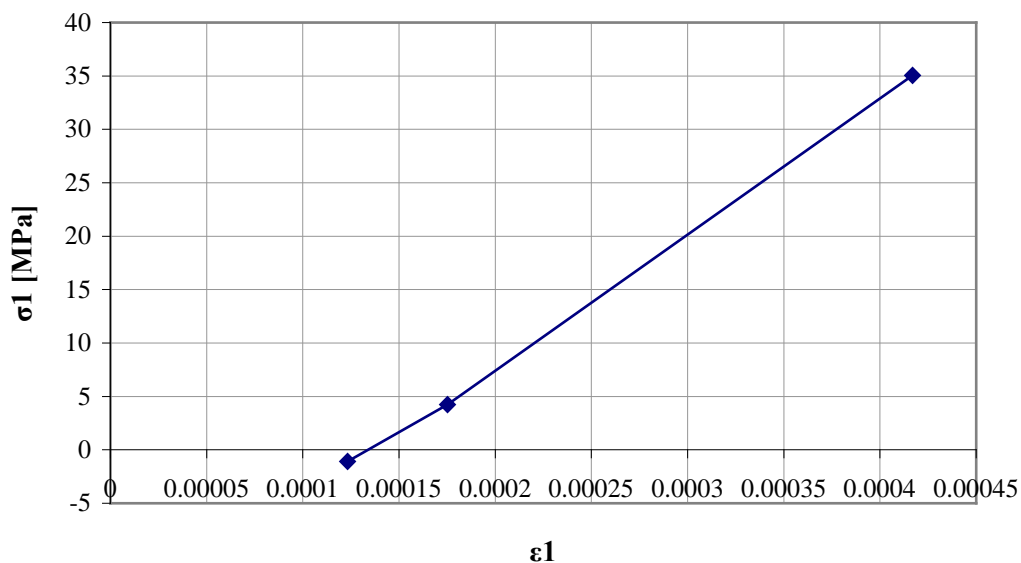
Στην *Εικόνα 5.43* φαίνεται η κατανομή της μέγιστης κύριας τάσης στο τιτάνιο και πάνω σε αυτή έχει σχεδιαστεί η διαδρομή PATH1. Στην *Εικόνα 5.44* παρουσιάζεται η κατανομή της σ_1 στη διαδρομή αυτή. Από αυτές τις εικόνες φαίνεται ότι ο σύνδεσμος τιτανίου παρουσίασε εφελκυσμό με μέγιστες τιμές από 33 έως 35.04 MPa. Στην *Εικόνα 5.45* παρουσιάζεται το διάγραμμα τάσης σ_1 - ανηγμένης παραμόρφωσης ϵ_1 για PATH1 όπου φαίνεται ότι η παραμόρφωση αυξάνεται καθώς αυξάνεται η τάση. Αντίστοιχα αποτελέσματα για σ_x - ϵ_x που αντιστοιχεί στο PATH1 παρουσιάζονται στην *Εικόνα 5.46*.



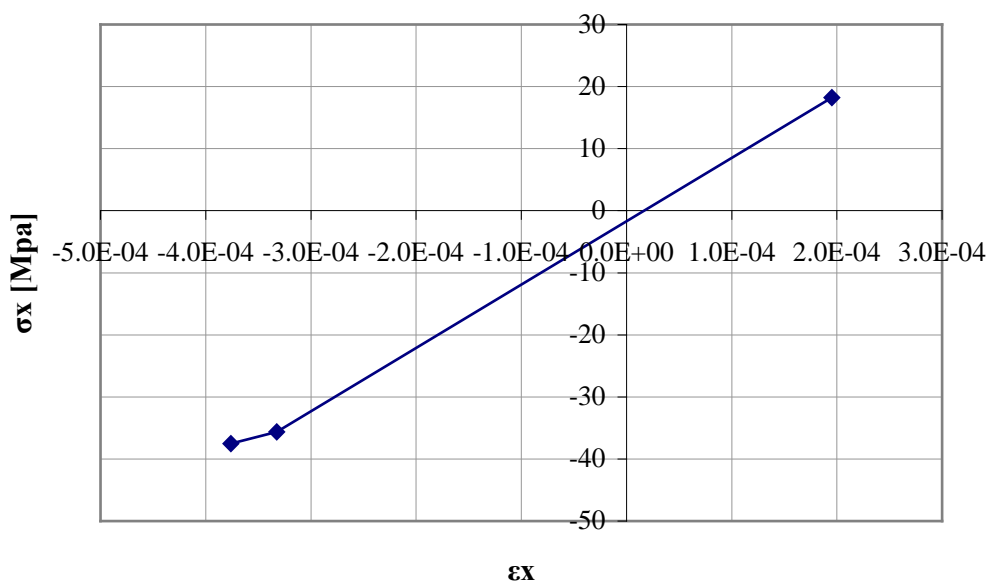
Εικόνα 5.43: Μέγιστη κύρια τάση στο τιτάνιο και διαδρομή PATH1



Εικόνα 5.44: Μεταβολή της σ_1 στο PATH1 κατά τον άξονα x



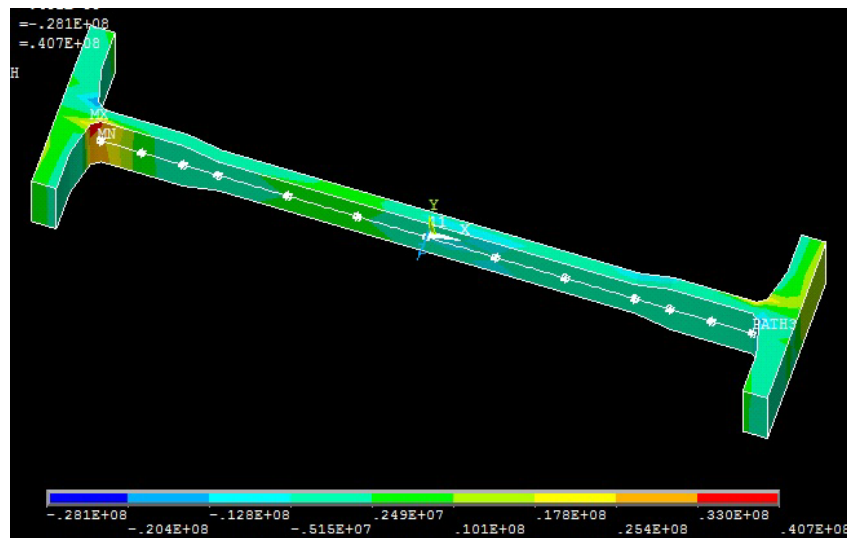
Εικόνα 5.45: Τάση σ_1 - ανηγμένη παραμόρφωση ϵ_1 για το PATH1.



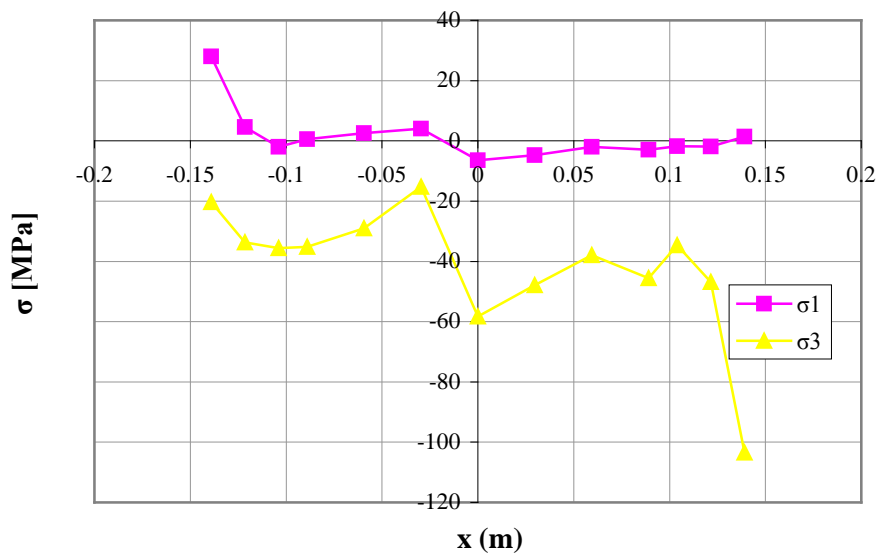
Εικόνα 5.46: Τάση σ_x - ανηγμένη παραμόρφωση ϵ_x για το

Στη συνέχεια σχεδιάζεται στον κορμό του τιτανίου, κατά τον άξονα x, η διαδρομή PATH3 (Εικόνα 5.47) και στην Εικόνα 5.48 παρουσιάζεται η μεταβολή των κύριων τάσεων σ_1 και σ_3 που αντιστοιχούν σε αυτή τη διαδρομή. Η μεταβολή της σ_1 δείχνει αρχικά εφελκυσμό όμως πλησιάζοντας το κέντρο του συνδέσμου μετατρέπεται σε θλίψη. Αντίθετα η σ_3 δείχνει καθαρή θλίψη του κορμού του συνδέσμου τιτανίου. Στην Εικόνα 5.49 παρουσιάζεται η μετατόπιση U_x που παρουσιάζεται στη

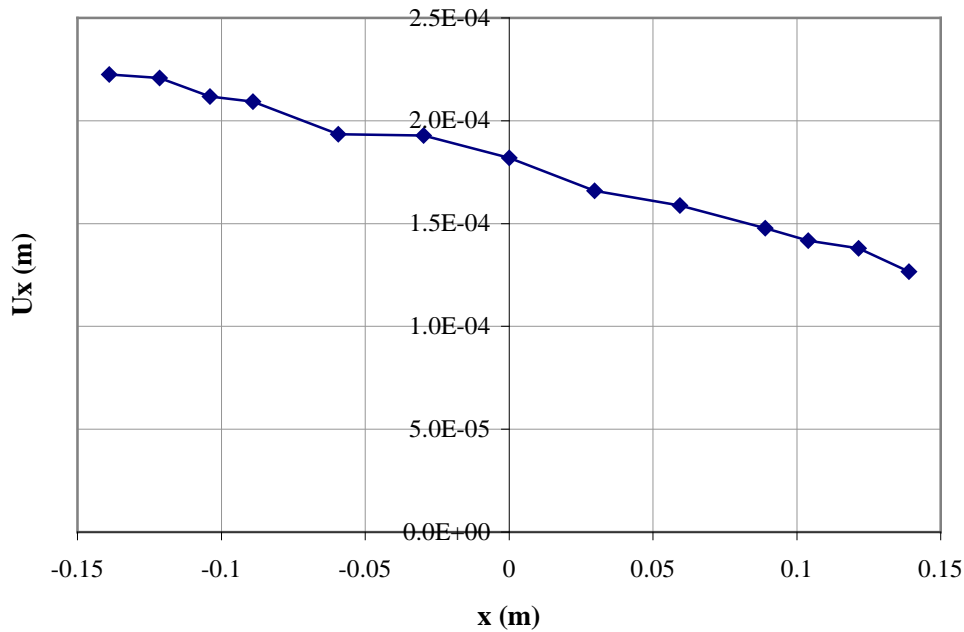
συγκεκριμένη διαδρομή, όπου φαίνεται ότι καθώς ο σύνδεσμος κινείται προς τα δεξιά μειώνεται η μετατόπιση που μπορεί να λάβει.



Εικόνα 5.47: Διαδρομή πάνω στο σύνδεσμο τιτανίου (PATH 3)



Εικόνα 5.48: Διάγραμμα κύριων τάσεων πάνω στον άξονα x της διαδρομής PATH 3.



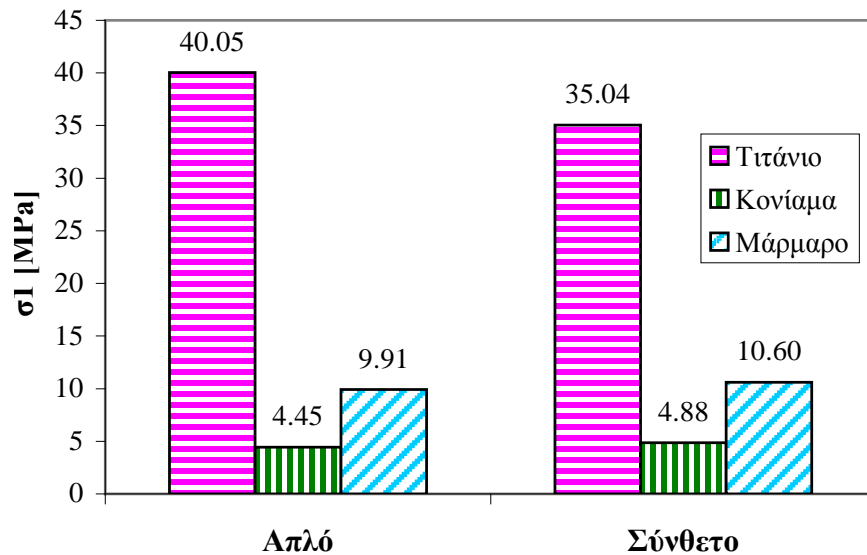
Εικόνα 5.49: Μετατόπιση U_x στη διαδρομή PATH 3.

5.3.2 Συγκριτικά αριθμητικά αποτελέσματα

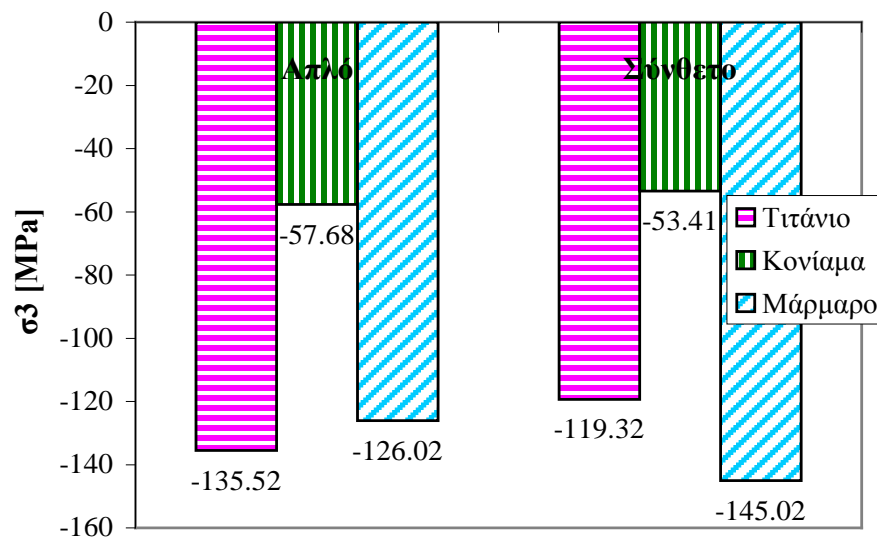
Στη συνέχεια παρατίθενται συγκριτικά αποτελέσματα τάσεων και παραμορφώσεων που αναπτύσσονται σε δύο διαφορετικά μοντέλα. Το ένα από τα δύο μοντέλα είναι το M8, το οποίο αναλύθηκε στην ενότητα 5.2 και στο οποίο τα μαρμάρινα επιστύλια αποτελούνται από το ίδιο μάρμαρο (μάρμαρο Διονύσου) και ορίζεται στις εικόνες που παρατίθενται στη συνέχεια ως "απλό μοντέλο", ενώ το δεύτερο μοντέλο είναι αυτό στο οποίο το δεξί μαρμάρινο ογκοτεμάχιο αντικαταστάθηκε από διαφορετικό υλικό και στις εικόνες χαρακτηρίζεται ως "σύνθετο μοντέλο". Σκοπός για αυτή την σύγκριση αποτελεσμάτων είναι η διερεύνηση της επίπτωσης του νέου υλικού στο εντατικό και παραμορφωσιακό πεδίο του μοντέλου. Σε αυτή την περίπτωση η μελέτη αφορά την επίδραση του νέου συμβατού μαρμάρου στη θέση των διεπιφανειών των τριών υλικών (μάρμαρο, κονίαμα, τιτάνιο) καθώς και στη θέση όπου παρατηρείται συγκέντρωση κρίσιμων τάσεων.

Αρχικά παρατίθενται ιστογράμματα των μέγιστων και ελάχιστων κύριων τάσεων των δύο μοντέλων (Εικόνες 5.50 και 5.51) και το αντίστοιχα ιστόγραμμα των ισοδύναμων τάσεων von Mises (Εικόνα 5.52). Από τα ιστογράμματα αυτά προκύπτει ότι η μέγιστη κύρια τάση και η ισοδύναμη τάση von Mises αναπτύσσονται στο τιτάνιο και

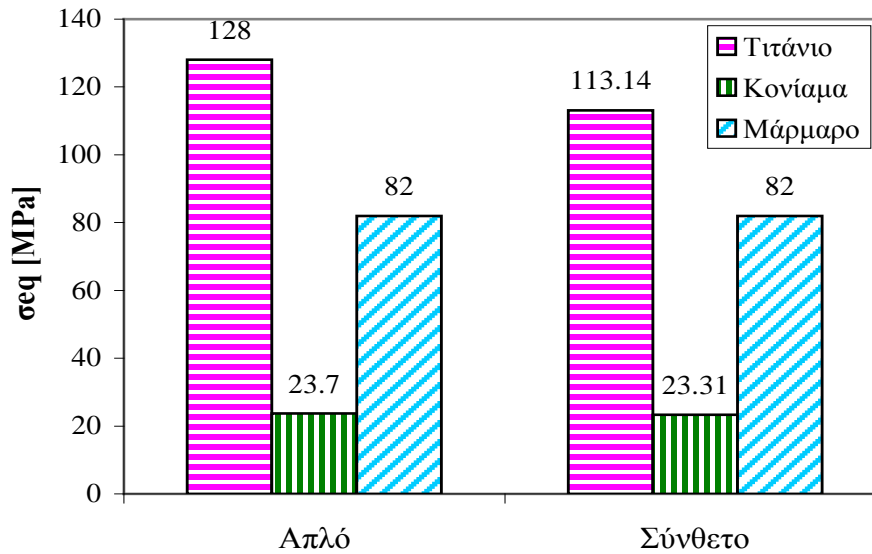
στις δύο περιπτώσεις. Η ελάχιστη κύρια τάση στο "απλό μοντέλο" αναπτύσσεται στο τιτάνιο, ενώ στο "σύνθετο μοντέλο" αναπτύσσεται στο μάρμαρο Διονύσου. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι η μέγιστη αριθμητική τιμή της seq για το μάρμαρο του "σύνθετου μοντέλου" αντιστοιχεί στο μάρμαρο που αντικατέστησε το μάρμαρο Διονύσου.



Εικόνα 5.50: Συγκριτικό διάγραμμα μέγιστης κύριας τάσης στα δύο μοντέλα



Εικόνα 5.51: Συγκριτικό διάγραμμα μέγιστης κύριας τάσης στα δύο μοντέλα



Εικόνα 5.52: Συγκριτικό διάγραμμα ισοδύναμης τάσης κατά von Mises στα δύο μοντέλα

Στη συνέχεια παρατίθενται συγκριτικά για τα δύο μοντέλα τα ζεύγη των κύριων τάσεων για τους κόμβους που παρουσιάζουν την υψηλότερη τιμή της μέγιστης και τη χαμηλότερη τιμή της ελάχιστης κύριας τάσης αντίστοιχα (Πίνακα 5.13, 5.14). Από τα αριθμητικά αυτά αποτελέσματα προκύπτει ότι και στις δύο περιπτώσεις το τιτάνιο υφίσταται εφελκυσμό, ενώ το κονίαμα και το μάρμαρο υψηλές τιμές θλίψης. Το "σύνθετο μοντέλο" παρουσιάζει γενικά χαμηλότερες τάσεις από το "απλό μοντέλο", που αντιστοιχούν σε μείωση 11.4% και 8% για τη μέγιστη και την ελάχιστη κύρια τάση αντίστοιχα.

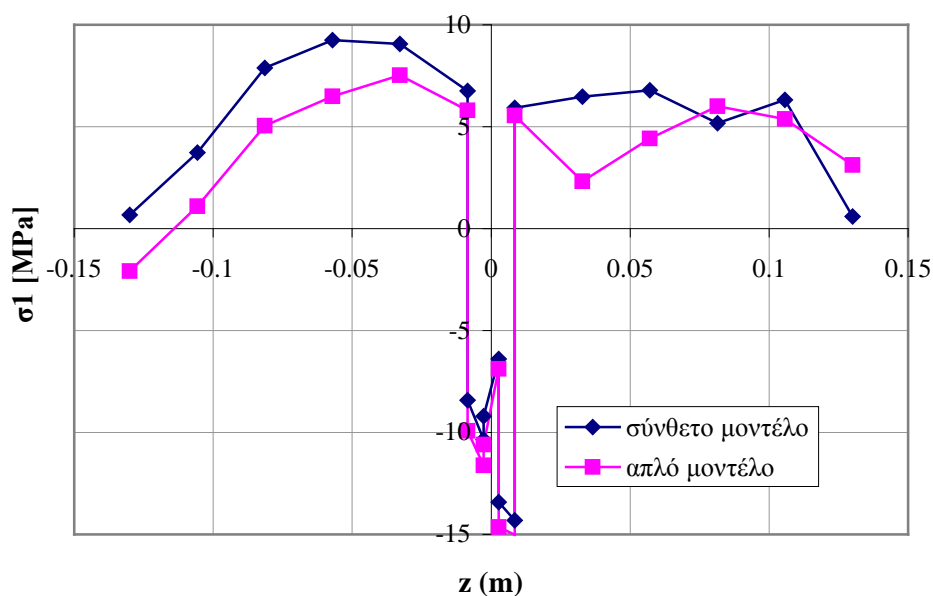
Πίνακας 5.13: Ζεύγη τιμών τάσεων στους κόμβους όπου αναπτύσσεται η υψηλότερη τιμή για την μέγιστη κύρια τάση σ_1 .

	Υψηλότερες μέγιστες κύριες τάσεις			
	Απλό μοντέλο		Σύνθετο μοντέλο	
	σ_1 [MPa]	σ_3 [MPa]	σ_1 [MPa]	σ_3 [MPa]
Τιτάνιο	40.05	-40.98	35.04	-35.50
Κονίαμα	4.45	-5.17	4.88	-4.56
Μάρμαρο				
Διονύσου	9.91	-82.87	8.50	-20.46
Νέο μάρμαρο			10.60	-30.23

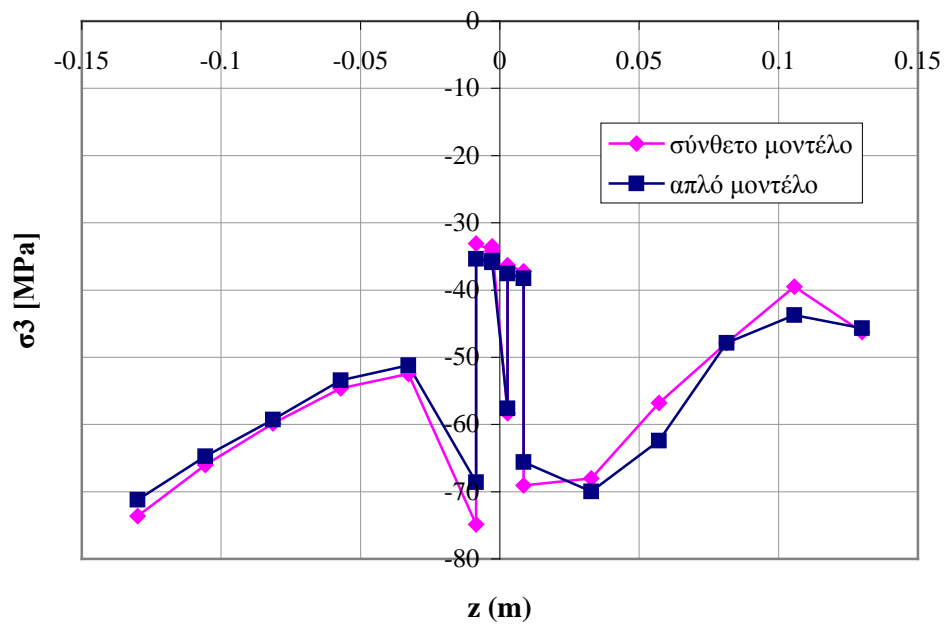
Πίνακας 5.14: Ζεύγη τιμών τάσεων στους κόμβους όπου αναπτύσσεται η χαμηλότερη τιμή για την κύρια τάση σ_3 .

	Χαμηλότερες μέγιστες κύριες τάσεις			
	Απλό μοντέλο		Σύνθετο μοντέλο	
	σ_3 [MPa]	σ_1 [MPa]	σ_3 [MPa]	σ_1 [MPa]
Τιτάνιο	-135.52	2.39	-119.32	1.97
Κονίαμα	-57.68	-35.08	-53.41	-30.76
Μάρμαρο				
Διονύσου	-126.02	-39.23	-115.95	-30.51
Νέο μάρμαρο			-145.02	-39.20

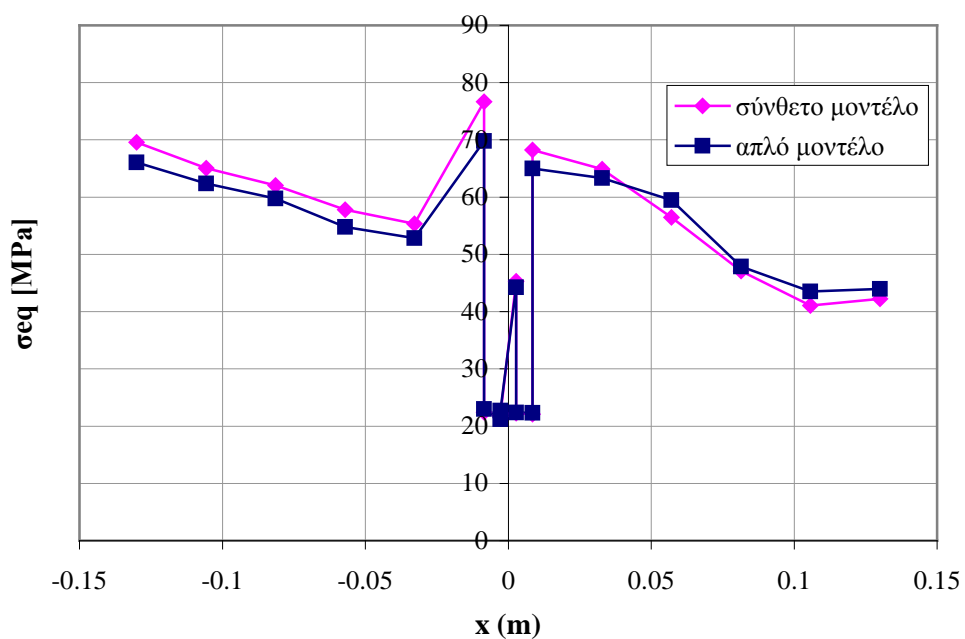
Έπειτα, παρατίθενται συγκριτικά διαγράμματα μεταβολής της τάσης κατά τον άξονα z στη διεπιφάνεια ένωσης των δύο μαρμαρίνων ογκοτεμαχίων. Αυτή η σύγκριση διαγραμμάτων γίνεται για να προσδιοριστεί η επίπτωση της διαφορετικότητας του υλικού στο εντατικό πεδίο που αναπτύσσεται στη διεπιφάνεια του παλιού και του νέου υλικού. Στις Εικόνες 5.53, 5.54 δίνεται η μεταβολή της μέγιστης και της ελάχιστης κύριας τάσης αντίστοιχα κατά τον άξονα z όπου φαίνεται ότι και στα δύο μοντέλα το τιτάνιο και το κονίαμα υφίστανται θλίψη (αντιστοιχούν στα τμήματα του διαγράμματος όπου η τάση αλλάζει απότομα), ενώ το μάρμαρο εφελκυσμό. Στην Εικόνα 5.55 παρουσιάζεται ενδεικτικά ένα διάγραμμα μεταβολής της ισοδύναμης τάσης von Mises.



Εικόνα 5.53: Μεταβολή της μέγιστης κύριας τάσης κατά τον άξονα z στη διεπιφάνεια των τριών υλικών στα δύο μοντέλα.

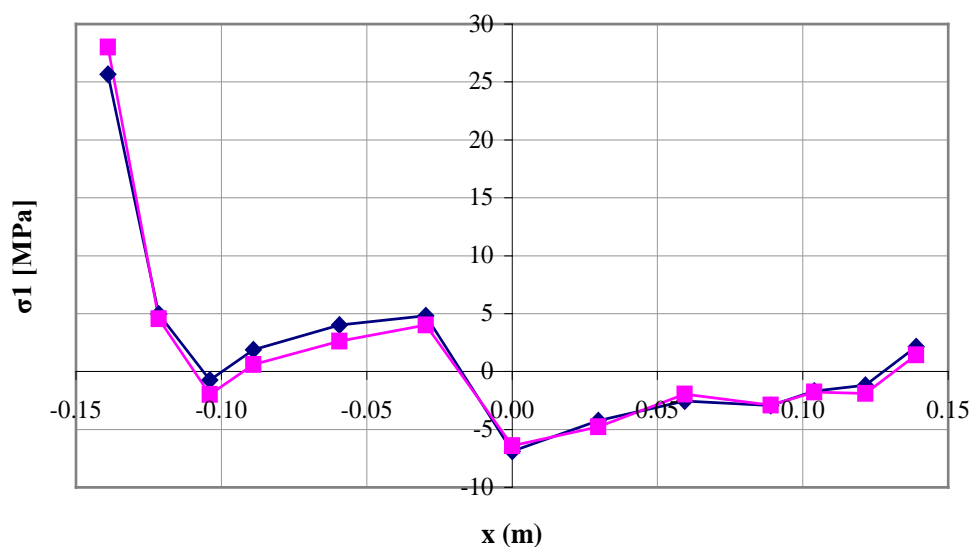


Εικόνα 5.54: Μεταβολή της ελάχιστης κύριας τάσης κατά τον άξονα z στη διεπιφάνεια των τριών υλικών στα δύο μοντέλα

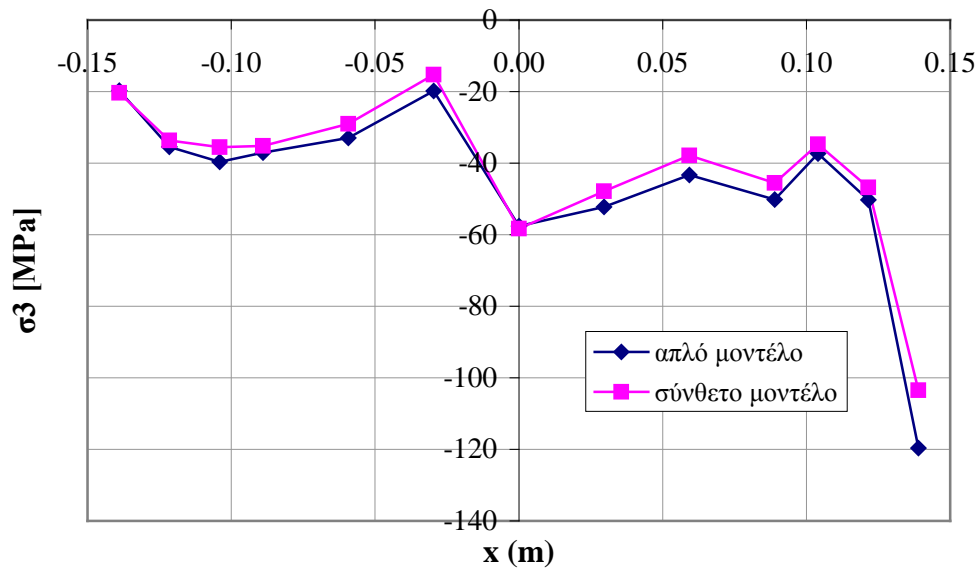


Εικόνα 5.55: Μεταβολή της ισοδύναμης τάσης von Mises κατά τον άξονα z στη διεπιφάνεια των τριών υλικών στα δύο μοντέλα

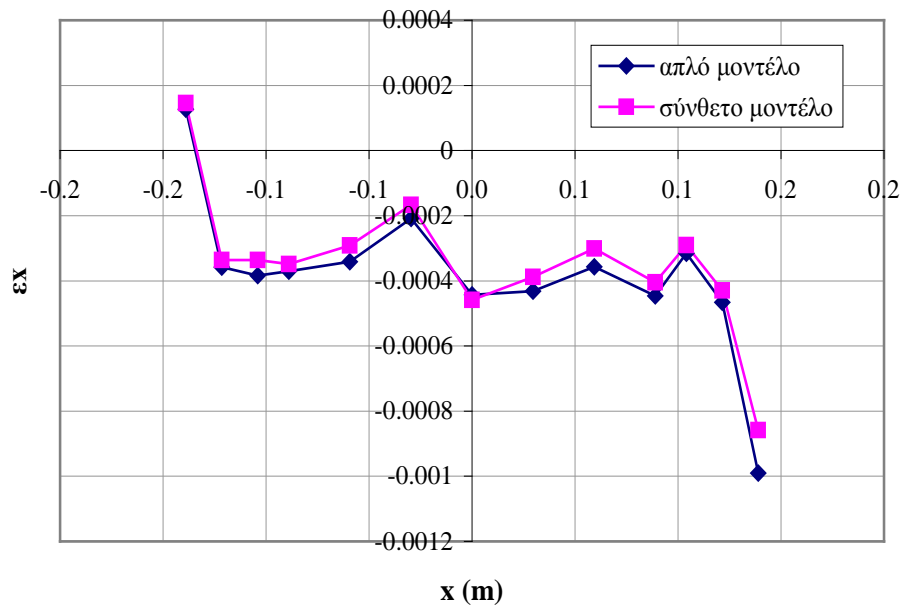
Στη συνέχεια παρατίθενται συγκριτικά διαγράμματα μεταβολής των τάσεων και των παραμορφώσεων κατά μήκος του άξονα x στο σύνδεσμο τιτανίου, όπως αυτή παρουσιάστηκε προηγουμένως στην *Εικόνα 5.47 (PATH3)*. Οι τιμές των μέγιστων κύριων τάσεων κατά μήκος του συνδέσμου στα δύο μοντέλα παρουσιάζεται στην *Εικόνα 5.56* και φαίνεται ότι οι τιμές της σ_1 είναι μεγαλύτερες στο μοντέλο όπου τα μαρμάρινα ογκοτεμάχια αποτελούνται από ένα υλικό. Στην *Εικόνα 5.57* η ελάχιστη κύρια τάση είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση του σύνθετου μοντέλου. Το μοντέλο στο οποίο τα μαρμάρινα ογκοτεμάχια είναι διαφορετικού υλικού παρουσίασε μεγαλύτερη ανηγμένη παραμόρφωση ε_x (*Εικόνα 5.58*).



Εικόνα 5.56: Μεταβολή της τάσης σ_1 στον κορμό του συνδέσμου στα δύο μοντέλα

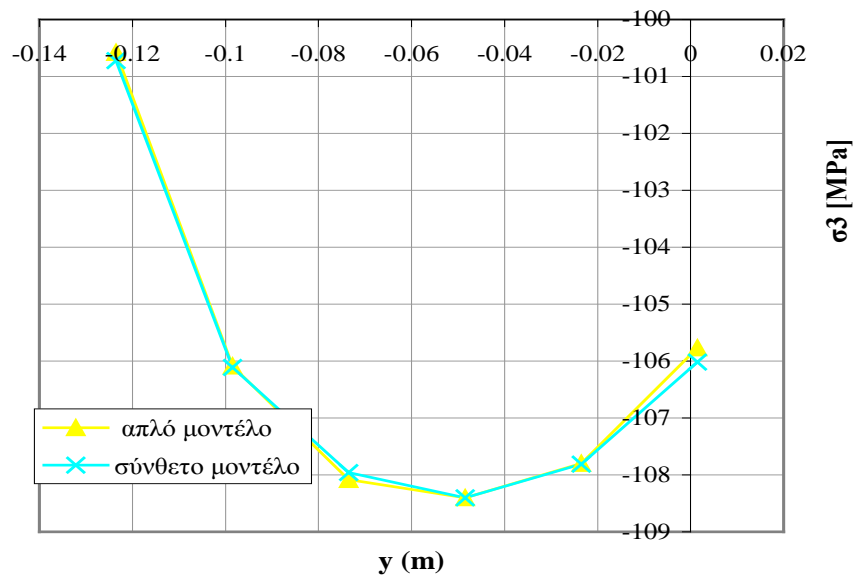


Εικόνα 5.57: Μεταβολή της τάσης σ_3 στον κορμό του συνδέσμου στα δύο μοντέλα



Εικόνα 5.58: Παραμόρφωση ε_x στον άξονα x στα δύο μοντέλα για διαδρομή πάνω στο σύνδεσμο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.71

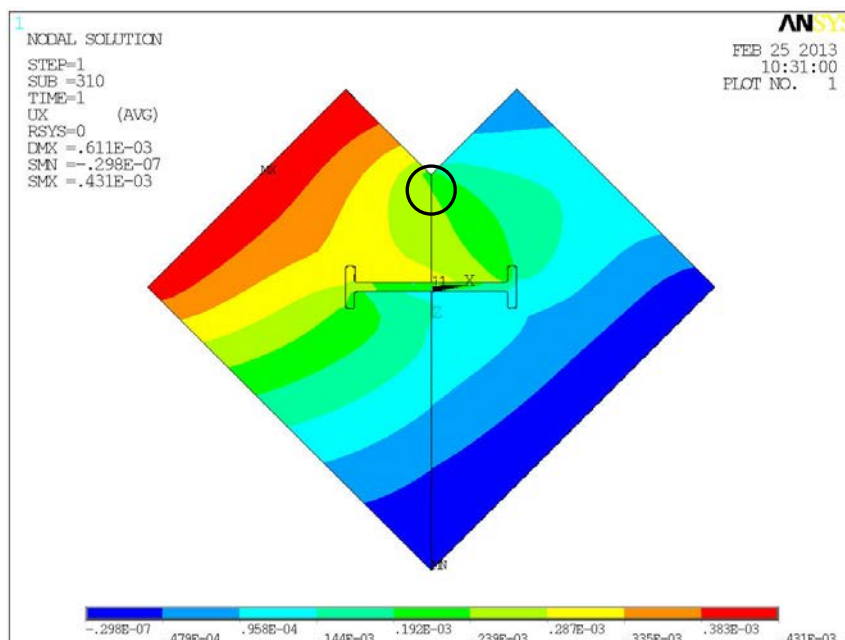
Χαμηλές τιμές ελάχιστων κύριων τάσεων αναπτύσσονται και στη διεπιφάνεια των δύο μαρμάρινων ογκοτεμαχίων, στην εσωτερική γωνία συναρμογής τους. Στην Εικόνα 5.59 παρατίθενται οι μεταβολές των ελάχιστων κύριων τάσεων στη θέση αυτή και συγκεκριμένα στη διαδρομή PATH10 όπως αυτή απεικονίζεται στην Εικόνα 5.38. Στη συγκεκριμένη περιοχή το μάρμαρο υφίσταται θλίψη.



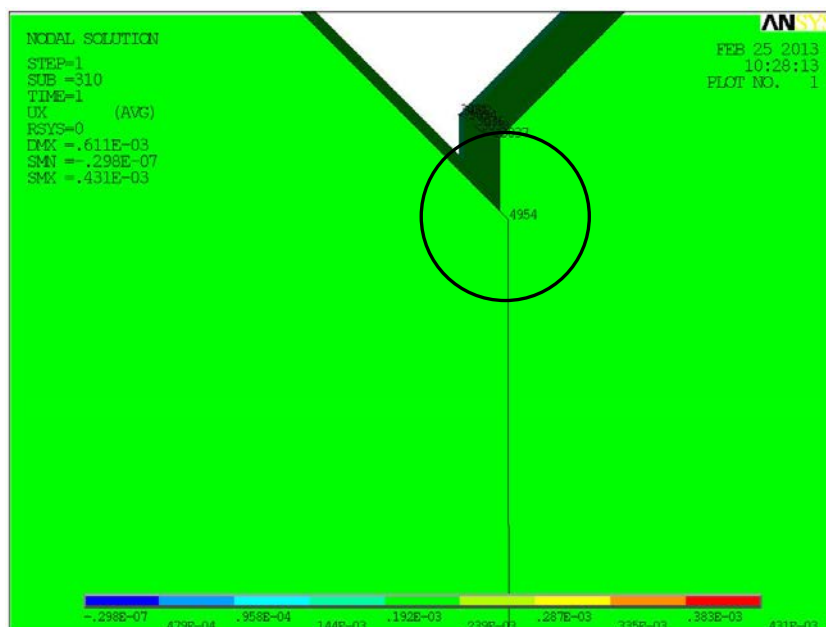
Εικόνα 5.59: Μεταβολή των κύριων τάσεων σ_1 και σ_3 στον άξονα y , στη διεπιφάνεια των μαρμάρων που βρίσκεται στην εσωτερική γωνία συναρμογής στα δύο μοντέλα τους όπως ακριβώς παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.38.

Σημαντικό ρόλο στη σύγκριση των δύο μοντέλων κατέχει η μετατόπιση των κόμβων στο σημείο συναρμογής των δύο μαρμάρινων ογκοτεμαχίων. Στις Εικόνες, 5.60, 5.61 5.62 και 5.63 παρουσιάζονται τα τμήματα των μοντέλων τα οποία μετατοπίστηκαν. Από τις εικόνες αυτές φαίνεται ότι και στα δύο μοντέλα το αριστερό ογκοτεμάχιο μετακινήθηκε προς τα δεξιά και προς τα κάτω, ενώ το δεξί ογκοτεμάχιο είναι πιο σταθερό. Στους Πίνακες 5.15,16 δίνονται ενδεικτικές τιμές ορισμένων κόμβων που μετατοπίστηκαν κατά τον άξονα x και z και για τα δύο μοντέλα.

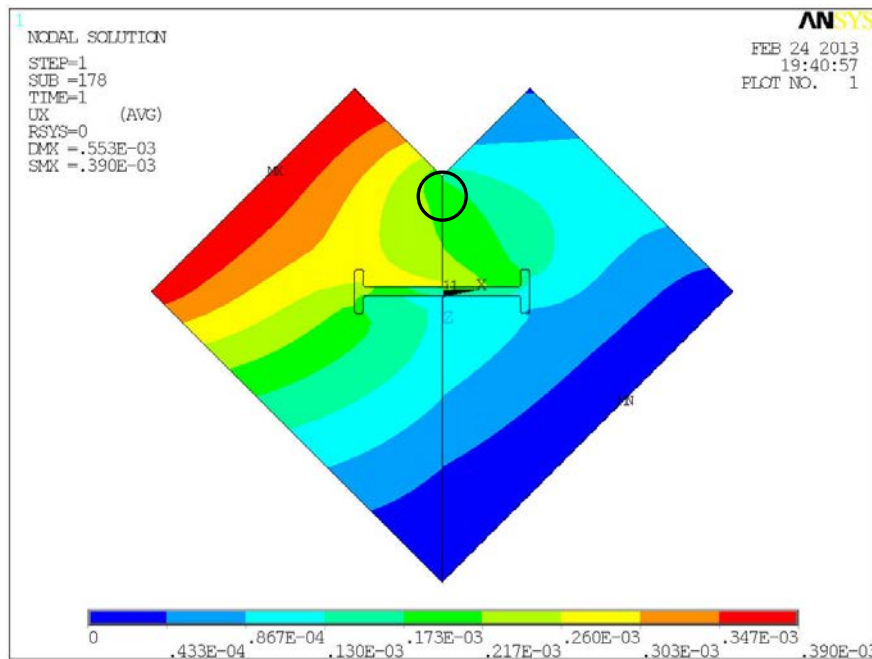
Συγκρίνοντας τα αριθμητικά αποτελέσματα των δύο μοντέλων προκύπτει ότι το σύνθετο μοντέλο μετατοπίστηκε κατά τον άξονα x 0.19 μm περισσότερο από το απλό μοντέλο, ενώ κατά τον άξονα z μετατοπίστηκε 0.41 μm λιγότερο από το απλό μοντέλο.



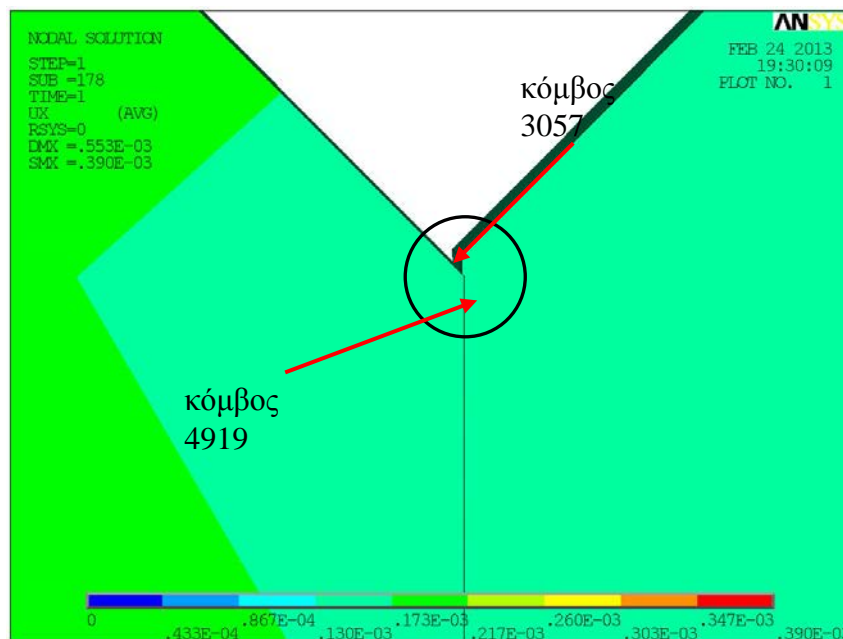
Εικόνα 5.60: Κάτοψη μοντέλου όπου χρησιμοποιήθηκε ένα είδος μαρμάρου, στο οποίο καθορίζονται με κύκλο οι κόμβοι που μετατοπίστηκαν κατά τον άξονα x και z .



Εικόνα 5.61: Τμήμα 3Δ όπου χρησιμοποιήθηκε ένα είδος μαρμάρου, στο οποίο καθορίζονται με κύκλο οι κόμβοι που μετατοπίστηκαν κατά τον άξονα x και z .



Εικόνα 5.62: Κάτοψη μοντέλου όπου χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικά μάρμαρα, στο οποίο καθορίζονται με κύκλο οι κόμβοι που μετατοπίστηκαν κατά τον άξονα x και z .



Εικόνα 5.63: Τμήμα 3Δ μοντέλου όπου χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικά μάρμαρα, στο οποίο καθορίζονται με κύκλο οι κόμβοι που μετατοπίστηκαν κατά τον άξονα x και z .

Πίνακας 5.15: Μετατόπιση κόμβων στο μοντέλο όπου χρησιμοποιήθηκε ένα είδος μαρμάρου

Κόμβος	Μετατόπιση U_x (mm)	Μετατόπιση U_z (mm)
4954	0.21449	0.28100
3037	0.21008	0.23884
Διαφορά	0.00441	0.04216

Πίνακας 5.16: Μετατόπιση κόμβων στο μοντέλο όπου χρησιμοποιήθηκαν δύο είδη μαρμάρου

Κόμβοι	Μετατόπιση U_x (mm)	Μετατόπιση U_z (mm)
4919	0.17236	0.23589
3057	0.16776	0.19414
Διαφορά	0.00460	0.04175

5.3.2 Συζήτηση Αποτελεσμάτων

Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την αριθμητική επίλυση δύο μοντέλων γωνιακών επιστυλίων προέκυψαν τα ακόλουθα. Στο ένα μοντέλο για τα ογκοτεμάχια χρησιμοποιήθηκαν οι ιδιότητες ενός μόνο μαρμάρου (μάρμαρο Διονύσου), ενώ στο άλλο μοντέλο το ένα από τα δύο ογκοτεμάχια αντικαταστάθηκε από υλικό συμβατό με το μάρμαρο Διονύσου. Συγκεκριμένα τα δύο υλικά διαφοροποιούνταν αναφορικά με τις πειραματικές καμπύλες μονοαξονικής θλίψης και εφελκυσμού οι οποίες στο νέο υλικό ήταν αυξημένες κατά 25%.

Τα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης και των δύο μοντέλων έδειξαν ότι η περιοχή όπου αναπτύσσονται οι μέγιστες εφελκυστικές τάσεις είναι στον σύνδεσμο τιτανίου, ενώ το μάρμαρο και το κονίαμα υφίστανται υψηλές θλιπτικές τάσεις κάτω από τριαξονικές συνθήκες. Παρατηρήθηκε ακόμα ότι στο "σύνθετο μοντέλο" οι αναπτυσσόμενες κύριες τάσεις σ_1 και σ_3 είχαν μικρότερες και μεγαλύτερες αντίστοιχα αριθμητικές τιμές. Επίσης, πρέπει να σημειωθεί ότι στο "σύνθετο μοντέλο" το νέο υλικό παρουσίασε υψηλότερες τιμές για τη μέγιστη κύρια τάση και χαμηλότερες τιμές για την ελάχιστη κύρια τάση σε σχέση με το μάρμαρο Διονύσου στην περίπτωση του ίδιου του μοντέλου αλλά και σε σχέση με τις τάσεις του μαρμάρου Διονύσου στο "απλό μοντέλο".

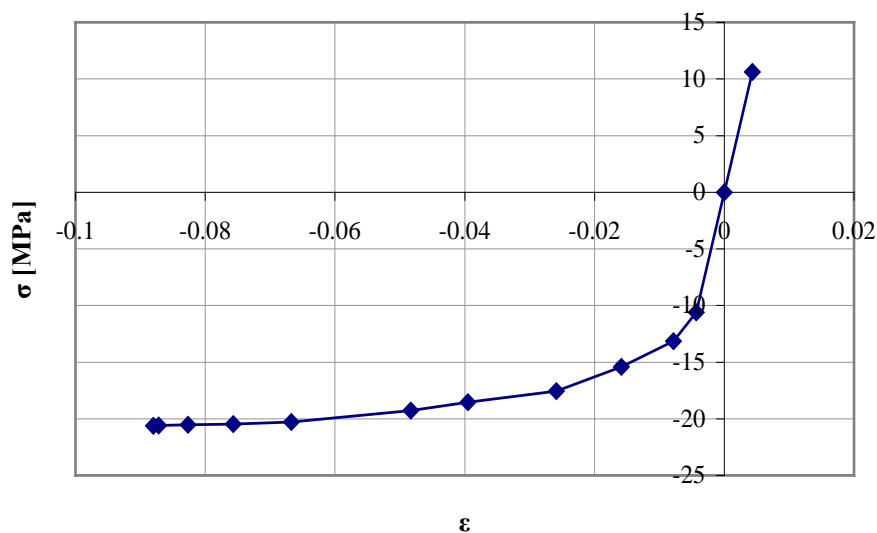
Τα μοντέλα έτρεξαν κάτω από έλεγχο μετατόπισης και φορτίστηκαν μέχρι την αστοχία του υλικού. Η μέγιστη μετατόπιση που μπορεί να εφαρμοστεί κατά τους άξονες x και z είναι της τάξης των 0.4 mm στο σύνθετο μοντέλο, η οποία είναι μικρότερη από αυτή που λαμβάνει το αρχικό μοντέλο κατά 0.041 mm που αντιστοιχεί σε ποσοστό 10%. Και στα δύο μοντέλα το αριστερό ογκοτεμάχιο μετατοπίστηκε κατά τα δεξιά και προς τα κάτω, ενώ το αριστερό ογκοτεμάχιο ήταν περισσότερο σταθερό. Επίσης, η ανηγμένη παραμόρφωση στον κορμό του συνδέσμου ήταν μεγαλύτερη κατά 16% στο σύνθετο μοντέλο.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι υψηλές θλιπτικές τάσεις αναπτύσσονται στο μάρμαρο κάτι που δεν είναι επιθυμητό κατά τις αναστηλώσεις γιατί έρχεται σε αντίθεση με το Χάρτη της Βενετίας σύμφωνα με τον οποίο κατά την αναστήλωση πρέπει να θυσιάζεται το νέο υλικό για χάρη του παλαιού. Γι' αυτό πρέπει να διερευνηθούν τα υλικά που χρησιμοποιούνται κατά την αναστήλωση (κονίαμα και τιτάνιο). Μία προσπάθεια ελαχιστοποίησης των κρίσιμων τάσεων που αναπτύσσονται στο εξεταζόμενο μοντέλο γίνεται στην επόμενη ενότητα, με τη χρήση ενός νέου κονιάματος περισσότερο πλαστικού από αυτό που χρησιμοποιείται σήμερα στις αναστηλώσεις.

5.4 Αριθμητική διερεύνηση της περίπτωσης χρήσης ποζολανικού κονιάματος

Επόμενο στάδιο στη διερεύνηση της μηχανικής καταπόνησης γωνιακών μαρμάρινων επιστηλίων αρχαίων ναών κάτω από διατμητική καταπόνηση αποτελεί η αλλαγή του αρχικού κονιάματος από ένα νέο. Για αυτό το λόγο αρχικά εξετάστηκε το μοντέλο με χρήση του κονιάματος που χρησιμοποιείται στις αναστηλωτικές εργασίες του Παρθενώνα και τα αποτελέσματά του παρουσιάστηκαν στις ενότητες 5.2 και 5.3. Στη συνέχεια στο μοντέλο που παρουσιάστηκε στην ενότητα 5.2 αντικαταστάθηκε το αρχικό κονίαμα από το ποζολανικό κονίαμα που μελετήθηκε πειραματικά στο εργαστήριο μηχανικής του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής και το οποίο περιγράφηκε στο κεφάλαιο 4. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση του συγκεκριμένου προβλήματος είναι τα ίδια με αυτά που αναλύθηκαν στην ενότητα 5.2 και 5.3 με μόνη διαφορά την αλλαγή της συμπεριφοράς του κονιάματος. Τα δεδομένα για την πειραματική καμπύλη θλίψης του νέου κονιάματος προήλθαν από δοκιμή

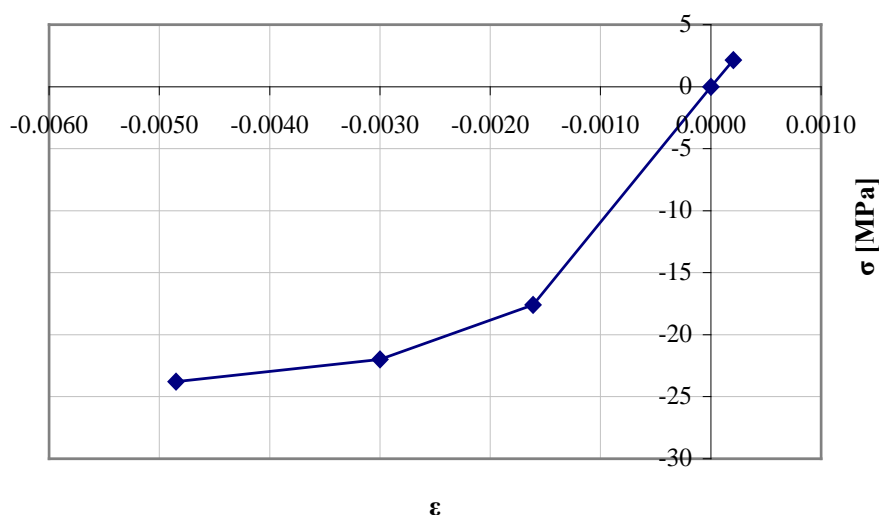
τριαξονικής φόρτισης. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι το λογισμικό πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε, δηλαδή το ANSYS 12, δεν μπορεί να επιλύσει το μοντέλο με χρήση δεδομένων μόνο για την καμπύλη θλίψης του κάθε υλικού, είναι απαραίτητα και τα δεδομένα για την καμπύλη εφελκυσμού. Επιπλέον, δεν γίνεται οι δύο αυτές καμπύλες να έχουν διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας γιατί και σε αυτή την περίπτωση το μοντέλο δεν επιλύεται. Στην παρούσα εργασία για την προσομοίωση του μηχανικού προβλήματος δεν υπήρχαν δεδομένα για άμεσο ή έμμεσο εφελκυσμό του εξεταζόμενου κονιάματος. Όμως, ακόμα και στην περίπτωση ύπαρξης πειραματικών δεδομένων για την καμπύλη εφελκυσμού, αν το μέτρο ελαστικότητας της διαφέρει από αυτό που προκύπτει πειραματικά από την καμπύλη θλίψης, τότε το μοντέλο δεν επιλύεται. Στη συγκεκριμένη περίπτωση για να λυθεί το πρόβλημα έγινε η παραδοχή ότι η συμπεριφορά του κονιάματος σε εφελκυσμό αντιστοιχεί σε ένα σημείο, το οποίο προσδιορίζει το μέτρο ελαστικότητας που ελήφθη από τη δοκιμή σε τριαξονική φόρτιση και το οποίο είναι ίσο με 2.48 GPa, ενώ ο λόγος Poisson είναι ίσος με $\nu=0.2$. Οι χρησιμοποιούμενες καμπύλες για το ποζολανικό κονίαμα δίνονται στην *Εικόνα 5.64*, ενώ συγκριτικά δίνονται στην *Εικόνα 5.65* οι αντίστοιχες καμπύλες για το κονίαμα που χρησιμοποιείται στις αναστηλώσεις του Παρθενώνα και είναι τσιμεντοκονίαμα. Στον Πίνακα 5.17 παρουσιάζονται τα δεδομένα της καμπύλης τάσεως - ανηγμένης παραμόρφωσης του ποζολανικού κονιάματος που προήλθε από τριαξονικές δοκιμές θλίψης (το συν δείχνει εφελκυσμό, ενώ το πλην θλίψη).



Εικόνα 5.64: Καμπύλη θλίψης και καμπύλη εφελκυσμού ποζολανικού κονιάματος για $E=2.46$ GPa και $\nu=0.2$.

Πίνακας 5.3: Δεδομένα σ-ε για τις πειραματικές καμπύλες του ποζολανικού κονιάματος

σ [MPa]	ε
10.61975	0.00432
0	0
-10.6198	-0.00432
-13.1366	-0.00784
-15.417	-0.01587
-17.5444	-0.02588
-18.5482	-0.03952
-19.2834	-0.04832
-20.2797	-0.06674
-20.4688	-0.07571
-20.5315	-0.08264
-20.5807	-0.08716
-20.6214	-0.088



Εικόνα 5.65: Πειραματικές καμπύλες τάσης - ανηγμένης παραμόρφωσης του κονιάματος για $E=10.55 \cdot 10^3$ MPa και $\nu=0.26$ (Kourkoulis and Pasiou, 2011)

Η διακριτοποίηση του μοντέλου ήταν ομοιόμορφη, με βήμα διακριτοποίησης ίσο με $e=0.03$ m. Τα στοιχεία επαφής ήταν ακριβώς τα ίδια με αυτά των μοντέλων που προαναφέρθηκαν στην παράγραφο 5.2.5. Οι συνοριακές συνθήκες, ήταν ίδιες με αυτές που εφαρμόστηκαν στα προηγούμενα μοντέλα, όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 5.2.6. Ειδικότερα, στο μοντέλο εφαρμόστηκε διατμητική φόρτιση με επιβολή κύλισης σε μία πλευρά του δεξιού μαρμάρινου όγκου, ενώ ταυτόχρονα πακτώθηκε η ακμή 2352, ενώ μετατοπίστηκε το αριστερό μαρμαρίνο ογκοτεμάχιο, στο οποίο επιβλήθηκε μετατόπιση έως 0.47 mm κατά τη διεύθυνση x και z των επιφανειών του. Η βαρύτητα

δεν χρησιμοποιήθηκε ως συνοριακή συνθήκη. Πραγματοποιήθηκε στατική επίλυση των μοντέλων και χρησιμοποιήθηκε αυτόματα η μέθοδος Newton – Raphson.

5.4.1 Αριθμητικά αποτελέσματα

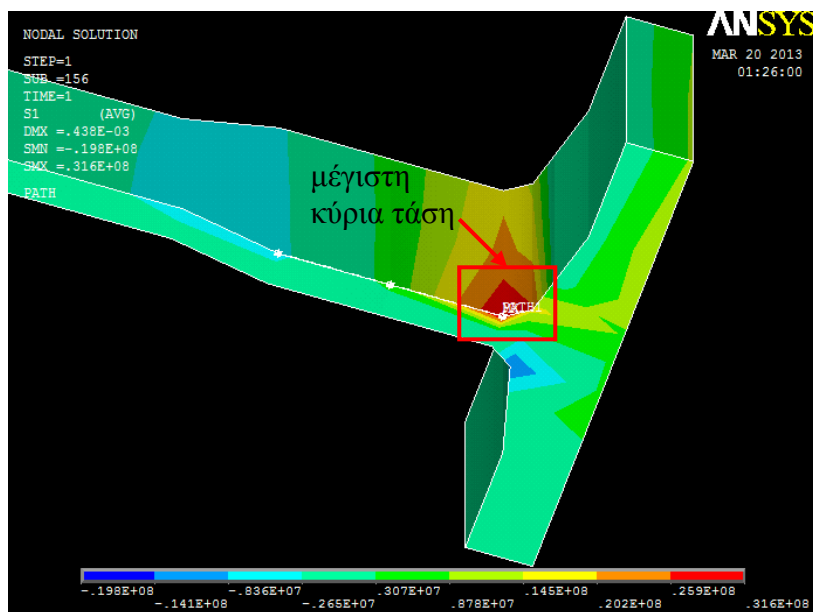
Με βάση τα αριθμητικά αποτελέσματα από την επίλυση του συγκεκριμένου μοντέλου προέκυψε ότι η μέγιστη μετατόπιση που μπορεί να επιβληθεί στο μοντέλο είναι 0.37 mm και αντιστοιχεί σε μείωση της τάξης του 14% σε σχέση με το αρχικό μοντέλο στο οποίο το κονίαμα ήταν αυτό που χρησιμοποιείται στις αναστηλωτικές εργασίες.

Στη συνέχεια παρατίθενται τα ζεύγη των κύριων τάσεων για τους κόμβους που παρουσιάζουν την υψηλότερη τιμή της μέγιστης και τη χαμηλότερη τιμή της ελάχιστης κύριας τάσης αντίστοιχα (Πίνακας 5.13).

Πίνακας 5.13: Ζεύγη τιμών τάσεων στους κόμβους όπου αναπτύσσεται η υψηλότερη και χαμηλότερη τιμή για την μέγιστη και ελάχιστη κύρια τάση σ_1 , σ_3

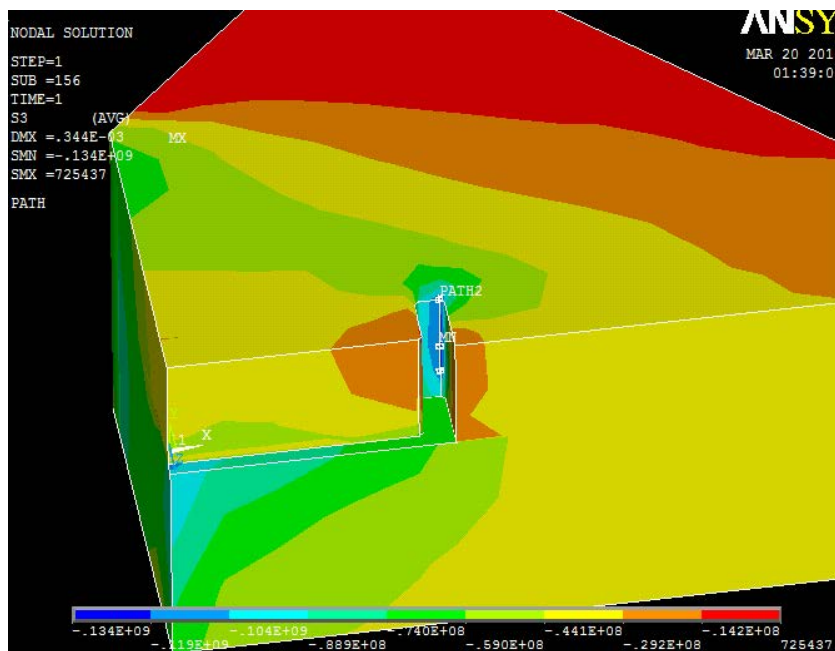
	Υψηλότερες μέγιστες κύριες τάσεις		Μικρότερες ελάχιστες κύριες τάσεις			
	σ_1 [MPa]	σ_3 [MPa]	σ_{eq} [MPa]	σ_3 MPa]	σ_1 MPa]	σ_{eq} [MPa]
Τιτάνιο	31.63	-16.50	41.92	-96.42	2.9017	91.6
Κονίαμα	4.95	-3.26	7.30	-25.99	-9.83	13.78
Μάρμαρο	9.07	-32.05	35.65	-131.94	-41.85	82.30

Από τα αριθμητικά αυτά αποτελέσματα προκύπτει ότι το τιτάνιο υφίσταται εφελκυσμό, ενώ το κονίαμα και το μάρμαρο παρουσιάζουν υψηλές τιμές θλίψης. Στην Εικόνα 5.66 παρουσιάζεται η κατανομή της μέγιστης κύριας τάσης στο τιτάνιο, η οποία κυμαίνεται από 25.9 έως 31.6 MPa και δείχνει εφελκυσμό, καθώς επίσης και η διαδρομή PATH1.



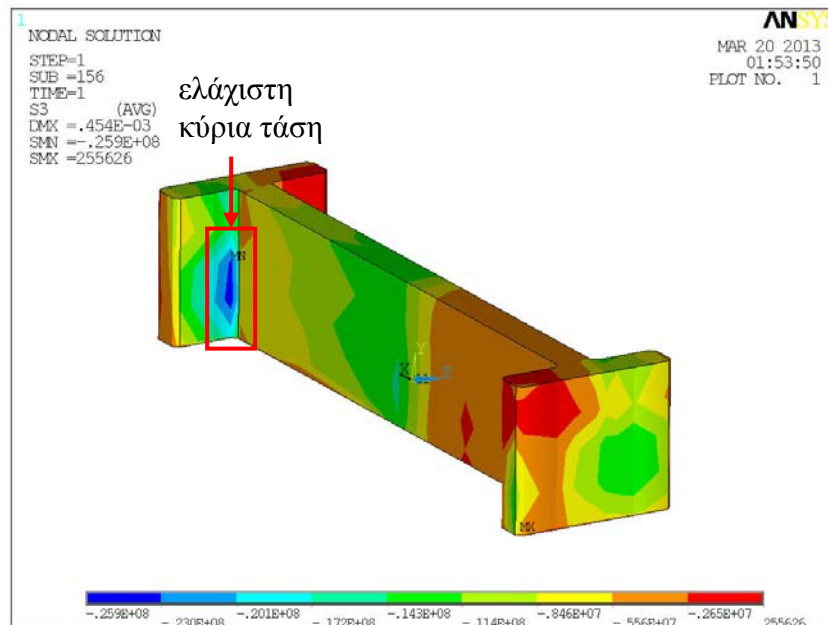
Εικόνα 5.66: Κατανομή της μέγιστης κύριας τάσης στο τιτάνιο και διαδρομή PATH1

Στην Εικόνα 5.67 παρουσιάζεται η κατανομή της ελάχιστης κύριας τάσης στο μάρμαρο, η οποία κυμαίνεται από -119 έως -131.94 MPa, καθώς επίσης και η διαδρομή PATH2.



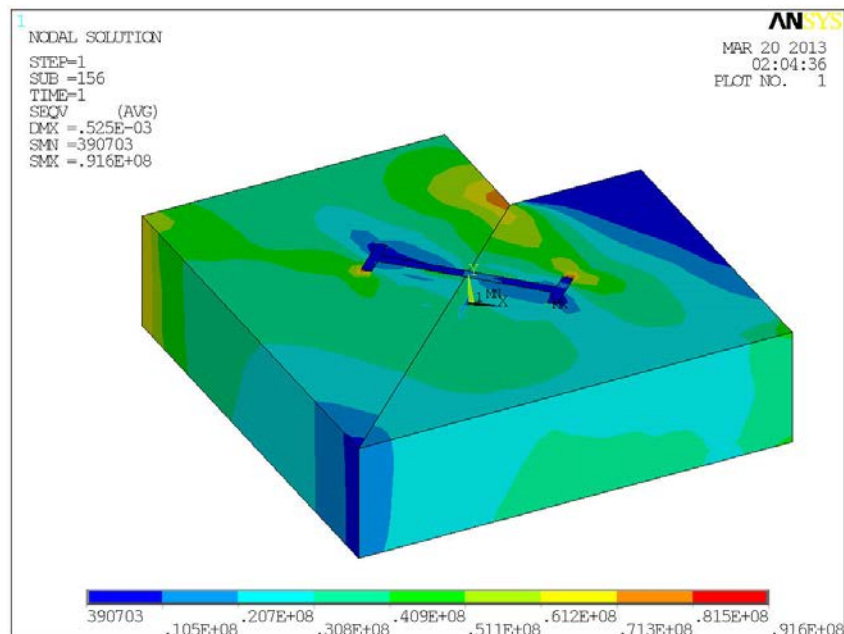
Εικόνα 5.67: Κατανομή της ελάχιστης κύριας τάσης στο μάρμαρο και διαδρομή PATH2

Στην Εικόνα 5.68 παρουσιάζεται η κατανομή της ελάχιστης κύριας τάσης στο κονίαμα, η οποία κυμαίνεται από -23 έως -24.99 MPa.



Εικόνα 5.68: Κατανομή της ελάχιστης κύριας τάσης στο κονίαμα

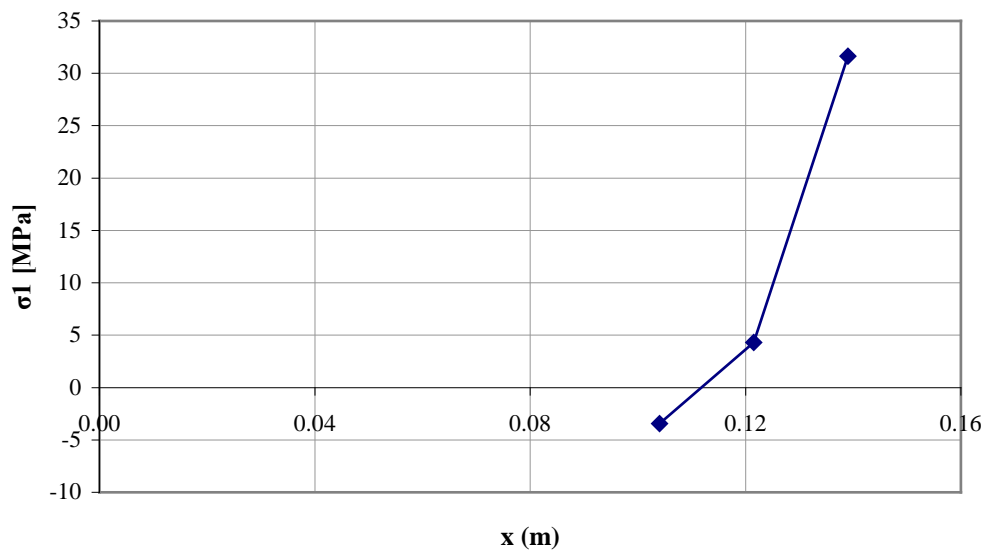
Στην Εικόνα 5.69 παρουσιάζεται ενδεικτικά η κατανομή της ισοδύναμης τάσης κατά von Mises σε ολόκληρο το μοντέλο, όπου οι τάσεις κυμαίνονται από 0.3 έως 91.6 MPa.



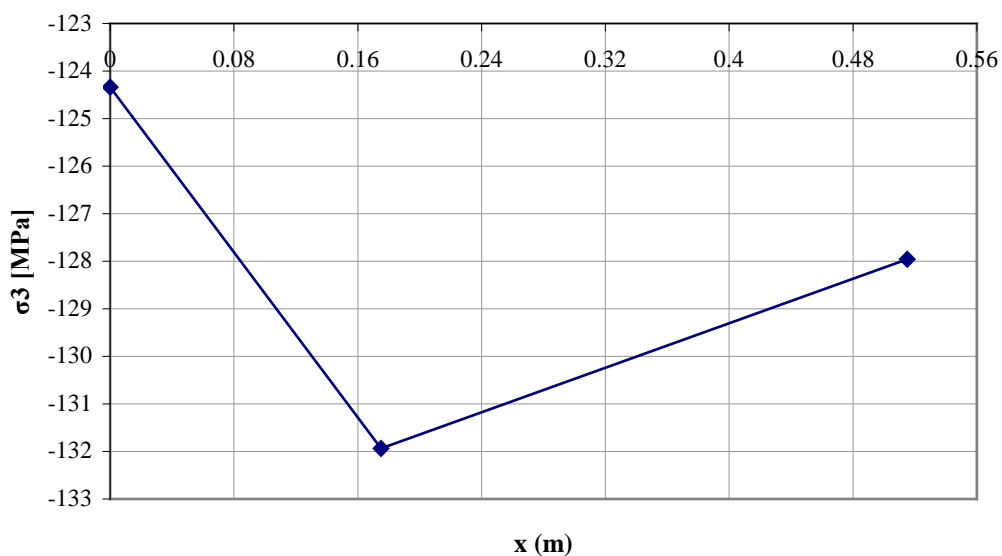
Εικόνα 5.69: Κατανομή ισοδύναμης τάσης κατά von Mises σε ολόκληρο το μοντέλο.

Στη συνέχεια παρατίθενται στις Εικόνες 5.70, 5.71 τα διαγράμματα μεταβολής της μέγιστης κύριας τάσης της διαδρομής PATH1 και της ελάχιστης κύριας τάσης της

διαδρομής *PATH2* που παρουσιάστηκαν στις *Εικόνες 5.66, 5.67* και τα οποία δείχνουν εφελκυσμό και θλίψη αντίστοιχα.

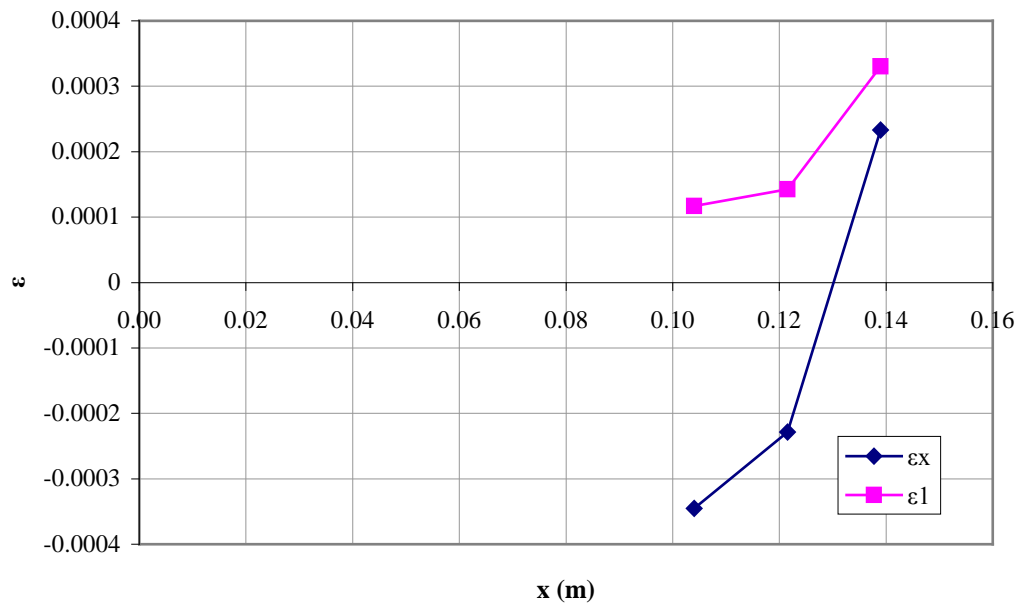


Εικόνες 5.70: Μεταβολή της σ_1 στο τιτάνιο, στη διαδρομή PATH1

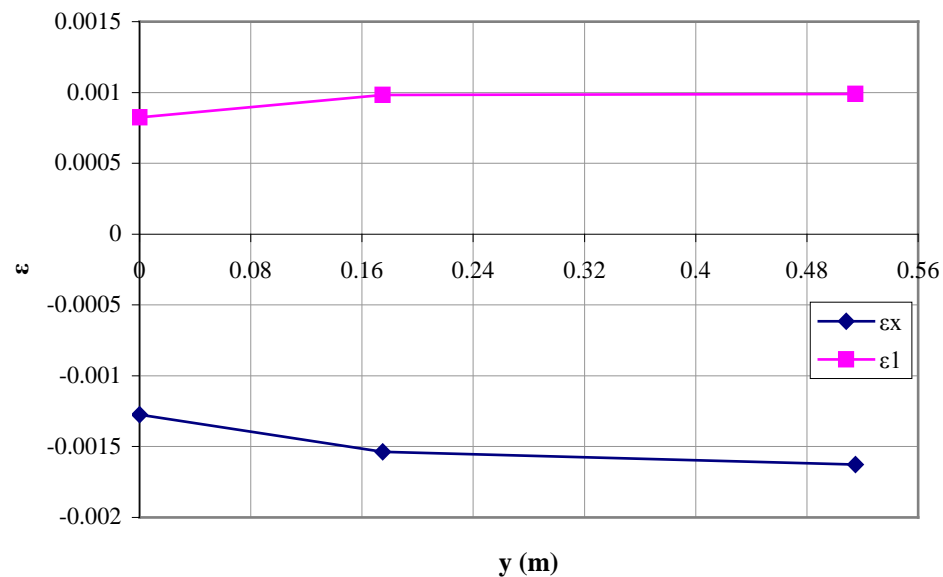


Εικόνες 5.71: Μεταβολή της σ_3 στο τιτάνιο, στη διαδρομή PATH2

Στις *Εικόνες 5.72* και *5.73* παρουσιάζονται οι ανηγμένες παραμορφώσεις ϵ_1 και ϵ_x κατά τη διαδρομή *PATH1* και τη διαδρομή *PATH2* αντίστοιχα. Και στα δύο διαγράμματα φαίνεται πως η ϵ_1 είναι μεγαλύτερη από την ϵ_x και η τιμή της αυξάνεται καθώς αυξάνεται η απόσταση στον άξονα x (m), ενώ η τιμή της ϵ_x στη διαδρομή *PATH2* ελαττώνεται αντίστοιχα.



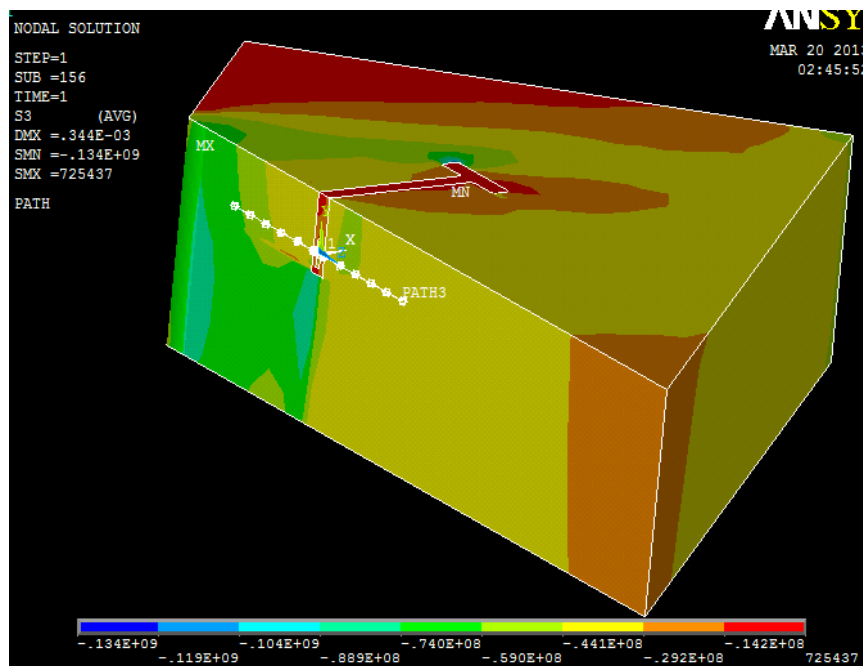
Εικόνα 5.72: Παραμόρφωση ε_1 και ε_x κατά τη διαδρομή PATH1 στο τιτάνιο



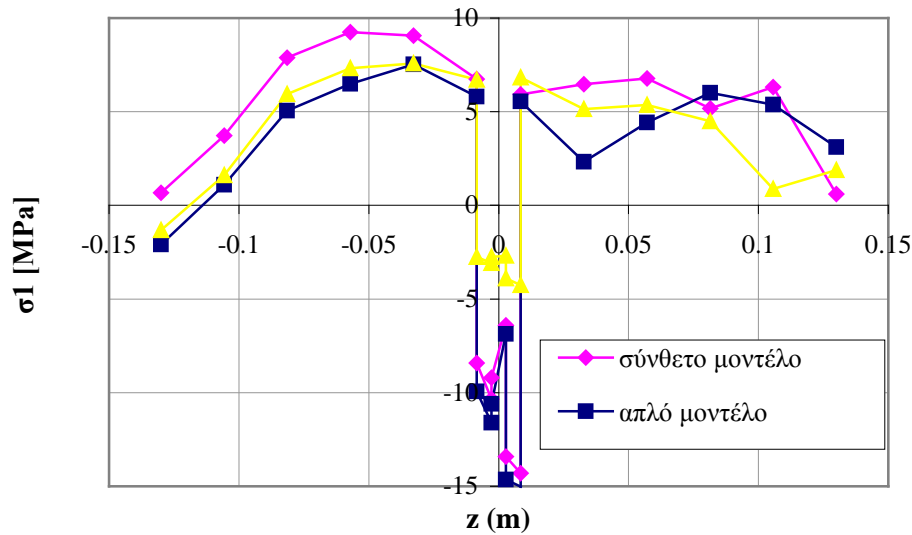
Εικόνα 5.73: Παραμόρφωση ε_1 και ε_x κατά τη διαδρομή PATH2 στο μάρμαρο

Στη συνέχεια παρουσιάζεται μία διαδρομή (PATH3) στη διεπιφάνεια των τριών υλικών (Εικόνα 5.74), η οποία είναι αντίστοιχη των διαδρομών που αναλύθηκαν στις προηγούμενες ενότητες 5.2-55. Σκοπός του σχεδιασμού αυτής της διαδρομής είναι ο έλεγχος της επίπτωσης του νέου κονιάματος στις τάσεις και τις παραμορφώσεις που παρουσιάζονται στα τρία υλικά (μάρμαρο, κονίαμα, τιτάνιο). Γι' αυτό και στις Εικόνες 5.75 έως 5.76 παρατίθενται συγκριτικά διαγράμματα τάσεων και

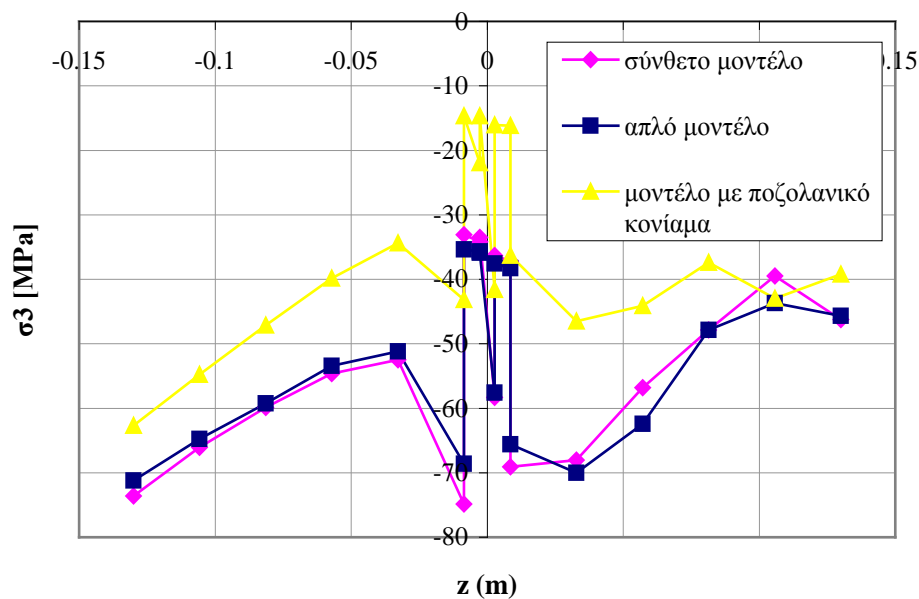
παραμορφώσεων τριών μοντέλων στην ίδια διαδρομή (διεπιφάνεια των τριών υλικό στη θέση συναρμογής των μαρμάρινων ογκοτεμαχίων), η διαφορά των οποίων έγκειται στο κονίαμα που χρησιμοποιείται. Το πρώτο μοντέλο είναι αυτό το οποίο ορίστηκε σαν "απλό μοντέλο" γιατί τα δύο ογκοτεμάχια είναι του ίδιου υλικού (μάρμαρο Διονύσου), το δεύτερο είναι το "σύνθετο μοντέλο" στο οποίο χρησιμοποιήθηκαν δύο ήδη μαρμάρων, στα οποία το κονίαμα είναι αυτό που χρησιμοποιείται στις αναστηλώσεις του Παρθενώνα. Τρίτο μοντέλο ορίζεται σαν "μοντέλο με ποζολανικό κονίαμα", στο οποίο το κονίαμα είναι αυτό που παρασκευάστηκε εργαστηριακά στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής και τα δύο ογκοτεμάχια του αποτελούνται από το ίδιο μάρμαρο (μάρμαρο Διονύσου). Από τις εικόνες αυτές προκύπτει ότι χρησιμοποιώντας το ποζολανικό κονίαμα οι μέγιστες κύριες τάσεις αυξάνουν και οι ελάχιστες κύριες τάσεις ελαττώνονται στο τμήμα του διαγράμματος στο οποίο οι τιμές των τάσεων αλλάζουν απότομα και το οποίο αντιστοιχεί στο τιτάνιο και το κονίαμα.



Εικόνα 5.74: Διαδρομή PATH3 στη διεπιφάνεια των τριών υλικών

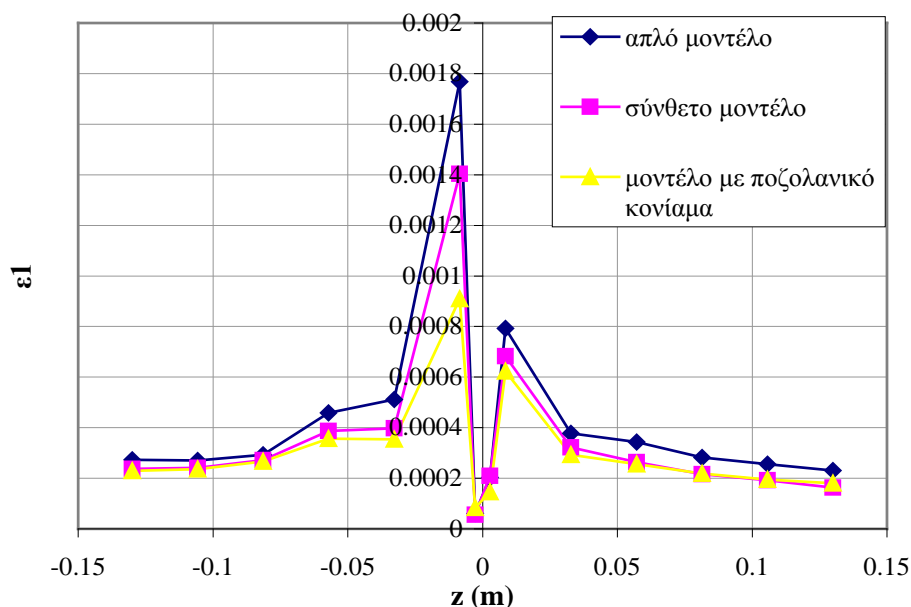


Εικόνα 5.75: Συγκριτικό διάγραμμα μεταβολής της μέγιστης κύριας τάσης στον άξονα z στα τρία μοντέλα



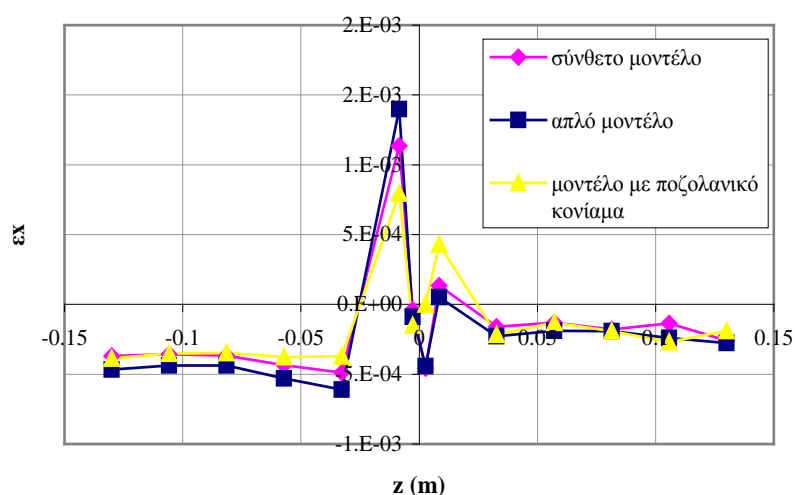
Εικόνα 5.76: Συγκριτικό διάγραμμα μεταβολής της ελάχιστης κύριας τάσης στον άξονα z στα τρία μοντέλα

Αναφορικά με την ανηγμένη παραμόρφωση ε_1 των τριών υλικών στην εξεταζόμενη διεπιφάνεια, παρατηρείται σε όλη τη διεπιφάνεια μία μείωση των τιμών, με μεγαλύτερες τιμές να παρουσιάζει το απλό μοντέλο και τις μικρότερες το μοντέλο με το ποζολανικό κονίαμα (Εικόνες 5.77).



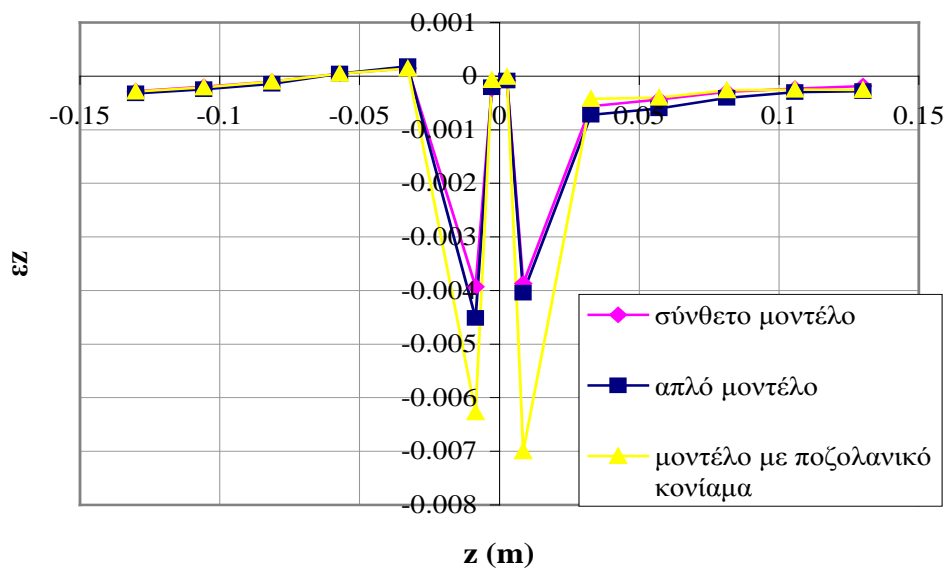
Εικόνα 5.77: Διάγραμμα μεταβολής της ανηγμένης παραμόρφωσης ε_1 στον άξονα z στα τρία μοντέλα

Η ανηγμένη παραμόρφωση ε_x των τριών υλικών στην εξεταζόμενη διεπιφάνεια, είναι μεγαλύτερη στο απλό μοντέλο, το οποίο έλαβε την μεγαλύτερη μετατόπιση και μικρότερη στο μοντέλο με το ποζολανικό κονίαμα όπου έλαβε αντίστοιχα τη μικρότερη μετατόπιση. Η μείωση των αριθμητικών τιμών παρατηρείται στους κόμβους του τιτανίου και του κονιάματος οι οποίοι αντιστοιχούν στα σημεία των διαγραμμάτων, όπου οι τιμές των ανηγμένων παραμορφώσεων αλλάζουν απότομα (Εικόνες 5.78).

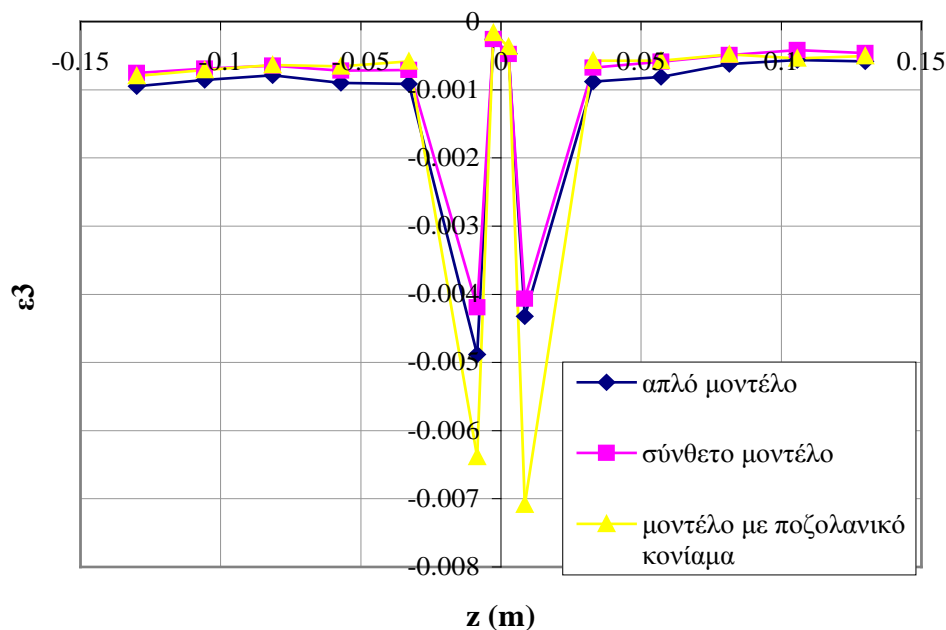


Εικόνα 5.78: Διάγραμμα μεταβολής της ανηγμένης παραμόρφωσης ε_x στον άξονα z στα τρία μοντέλα

Αναφορικά με την ανηγμένη παραμόρφωση ε_3 και ε_z των τριών υλικών στην εξεταζόμενη διεπιφάνεια, παρατηρείται μία μείωση των αριθμητικών τιμών των τριών μοντέλων, από τα οποία τις μικρότερες τιμές και μεγαλύτερες τιμές παρουσιάζουν αντίστοιχα το μοντέλο με το ποζολανικό κονίαμα και το σύνθετο μοντέλο για τους κόμβους του τιτανίου και του κονιάματος (Εικόνες 5.79, 5.80). οι οποίοι αντιστοιχούν στα σημεία των διαγραμμάτων, όπου οι τιμές των ανηγμένων παραμορφώσεων αλλάζουν απότομα.



Εικόνα 5.79: Συγκριτικό διάγραμμα μεταβολής της ανηγμένης παραμόρφωσης ε_z στον άξονα z στα τρία μοντέλα



Εικόνα 5.80: Συγκριτικό διάγραμμα μεταβολής της ανηγμένης παραμόρφωσης ε_3 στον άξονα z στα τρία μοντέλα

5.4.2 Συζήτηση αποτελεσμάτων

Από την ανάλυση του τασικού και παραμορφωσιακού πεδίου του μοντέλου στο οποίο χρησιμοποιήθηκε ένα ποζολανικό κονίαμα το οποίο παρασκευάστηκε εργαστηριακά στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής και παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 4, προέκυψε ότι η μετατόπιση που μπορεί να δεχθεί είναι μικρότερη από αυτή που λαμβάνει όταν χρησιμοποιείται το αρχικό κονίαμα που χρησιμοποιείται σήμερα στις αναστηλωτικές εργασίες του Παρθενώνα της Ακρόπολης,

Ειδικότερα, η μετατόπιση που μπορεί να δεχθεί το μοντέλο χρησιμοποιώντας το ποζολανικό κονίαμα, το οποίο έχει μέτρο ελαστικότητας $E = 2.46 \text{ GPa}$ και λόγο Poisson $\nu = 0.2$ είναι 0.37 mm , είναι μειωμένη κατά 14% συγκριτικά με το μοντέλο στο οποίο το κονίαμα είναι αυτό που χρησιμοποιείται στις αναστηλωτικές εργασίες.

Οι τάσεις για το μοντέλο με το ποζολανικό κονίαμα παρουσιάζονται εφελκυστικές στο τιτάνιο και θλιπτικές για το κονίαμα και το μάρμαρο. Στο τιτάνιο στις θέσεις όπου αναπτύσσονται οι μέγιστες κύριες τάσεις, οι οποίες όπως προαναφέρθηκε είναι εφελκυστικές, η ανηγμένη παραμόρφωση ε_1 είναι μεγαλύτερα από την ε_x . Αντίστοιχα

αποτελέσματα προέκυψαν για τις ανηγμένες παραμορφώσεις ε_1 και ε_x για το μάρμαρο στη θέση όπου αναπτύσσονται οι ελάχιστες κύριες τάσεις και οι οποίες είναι θλιπτικές.

Παρατηρήθηκε ακόμα ότι, μελετώντας μία κοινή διαδρομή για τα τρία εξεταζόμενα μοντέλα η οποία βρίσκονταν στη διεπιφάνεια σύνδεσης των δύο ογκοτεμαχίων, οι μέγιστες κύριες τάσεις αυξάνουν και οι ελάχιστες κύριες τάσεις ελαττώνονται στο τμήμα του διαγράμματος το οποίο αντιστοιχεί στο τιτάνιο και το κονίαμα. Οι ανηγμένες παραμορφώσεις ε_1 , ε_x , ε_3 , ε_z μειώνονται χρησιμοποιώντας το ποζολανικό κονίαμα ειδικά στο τμήμα που αντιστοιχεί στο τιτάνιο και το κονίαμα.

Κεφάλαιο 6: Γενικά συμπεράσματα και προτάσεις

6.1 Συμπεράσματα

Στο πρώτο μέρος της παρούσας διδακτορικής διατριβής διερευνήθηκε το κατά πόσο είναι δυνατόν να εκτιμηθεί η συμβατότητα παλαιών και νέων υλικών με μη καταστρεπτικές δοκιμές σε συνδυασμό με καταστρεπτικές. Ειδικότερα, ελέγχθηκαν πετρώματα τα οποία μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως συμβατά δομικά υλικά με ασβεστόλιθο ασθενών μηχανικών χαρακτηριστικών. Τα υλικά που εξετάστηκαν ήταν δύο ασβεστολιθικά πετρώματα προερχόμενα από την περιοχή των Χανίων της Νήσου Κρήτης, τα οποία χρησιμοποιούνται ως σύγχρονα δομικά υλικά. Διερευνήθηκε η δυνατότητα χαρακτηρισμού τους ειδικά στις περιπτώσεις ανομοιογένειας με χρήση μη καταστρεπτικών δοκιμών και ειδικότερα με τη μέθοδο των υπερήχων καθώς η τεχνική αυτή είναι μία από τις φθηνότερες, πλέον φορητές και ιδιαίτερα εύκολες και πρακτικές μεθόδους. Τα στοιχεία αυτά διασταυρώθηκαν με καταστρεπτικές δοκιμές και κυρίως δοκιμές μονοαξονικής θλίψης και έμμεσου εφελκυσμού έτσι ώστε να συσχετιστούν τα αποτελέσματα των ΜΚΔ με αυτά των συνήθων δοκιμών χαρακτηρισμού. Από τα αποτελέσματα των δοκιμών προκύπτει ότι με ΜΚΔ μπορεί να γίνει ένας πρώτος έλεγχος ενδεχόμενης ύπαρξης ανισοτροπίας στα υλικά. Σημειώνεται ότι στα πλαίσια της παρούσας διατριβής δεν πραγματοποιήθηκε χαρακτηρισμός των πετρωμάτων ως συμβατά υλικά.

Στο δεύτερο μέρος της διατριβής μελετήθηκε πειραματικά η μηχανική συμπεριφορά και οι μηχανικές ιδιότητες ποζολανικών ασβεστοκονιαμάτων τα οποία χρησιμοποιούνται ή μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πληρωτικών υλικό κατα την σύνδεση μαρμάρινων ογκοτεμαχίων με μεταλλικούς συνδέσμους. Ο μηχανικός χαρακτηρισμός έγινε με δοκιμές μονοαξονικής και τριαξονικής φόρτισης.

Συνδυαζόμενα τα αποτελέσματα των μοναξονικών και τριαξονικών δοκιμών δίδουν το κριτήριο αστοχίας του εν λόγω κονιάματος. Επιπλέον, διαπιστώθηκε ότι κάτω από συνθήκες αποκλεισμού των πόρων του δοκιμίου (λόγω της χρήσης λαδιού ή άλλων μη υδατοδιαλυτών μέσω στις μήτρες χύτευσης) δεν ήταν δυνατή η ολοκλήρωση των αντιδράσεων ενυδάτωσης πράγμα που άλλαζε εντελώς την συμπεριφορά των δοκιμίων. Συνιστάται η διευκόλυνση των αντιδράσεων ενυδάτωσης καθώς τότε το

κονίαμα αποκτά πλαστικότητα έναντι ψαθυρότητας που είναι επιθυμητή στην τριαξονική καταπόνηση.

Επιπλέον η χύτευση των ως άνω δοκιμίων ήταν μια επίπονη και χρονοβόρα διαδικασία. Μελετήθηκαν και δοκιμάστηκαν διάφοροι τρόποι χύτευσης που είχαν σχέση με τον σχεδιασμό της μήτρας, τη λίπανσή της (χωρίς λιπαντικό, με λάδι μηχανής, με βαζελίνη, με μίγμα ελαιόλαδου - υγρού σαπουνιού), τον τρόπο χύτευσης της οριζόντιο ή κατακόρυφο με ή χωρίς ταυτόχρονη χρήση δόνησης, καθώς και τις συνθήκες ωρίμανσης των δοκιμίων. Προτείνεται χύτευση σε μεταλλικές μήτρες που έχουν επαλειφθεί ελαφρώς με μίγμα ύδατος και ελαίου (σαπουνέλαιο) το οποίο είναι ουσιαστικά υδατοδιαλυτό.

Στο τρίτο μέρος της παρούσας διδακτορικής διατριβής μελετήθηκε αριθμητικά με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και τη χρήση του λογισμικού ANSYS 12.0 η γωνιακή συναρμογή μαρμάρινων όγκων με χρήση συνδέσμου τιτανίου μορφής διπλού T. Η γωνία συναρμογής των γωνιακών επιστυλίων ελήφθη ίση με 45° ώστε να ταυτίζεται με τη γωνία συναρμογής των επιστηλίων του Παρθενώνα. Η αριθμητική επίλυση των μοντέλων των γωνιακών αυτών επιστυλίων έγινε σε τρεις διαστάσεις χρησιμοποιώντας έλεγχο μετατόπισης ως μηχανισμό φόρτισης. Εφαρμόστηκαν διαφορετικά καταστατικά μοντέλα στα τρία υλικά, τα οποία περιλάμβαναν γραμμικώς ελαστική συμπεριφορά, τέλεια ελαστοπλαστική συμπεριφορά και κατά τμήματα κρατυνόμενη συμπεριφορά. Επίσης, για την καλύτερη προσομοίωση της επαφής μεταξύ των τριών υλικών που χρησιμοποιούνται για την αναστήλωση των επιστυλίων κατασκευάστηκε στην κάθε διεπιφάνεια ζεύγος τρισδιάστατων στοιχείων επαφής (contact elements). Η διερεύνηση εστιάστηκε σε τρία σημεία και συγκεκριμένα όσον αφορά α) στην θέση της εγκοπής για την ελαχιστοποίηση των τάσεων στο μάρμαρο, β) στη καταστατική συμπεριφορά των υλικών γ) στις ιδιότητες του κονιάματος και δ) στην συναρμογή ογκομαρμάρων με διαφορετικά μηχανικά χαρακτηριστικά.

Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι:

- Σχετικά με την θέση της εγκοπής όπου τοποθετείται ο σύνδεσμος προέκυψε ότι το μοντέλο μπορεί να παραλάβει μεγαλύτερες μετατοπίσεις όταν ο σύνδεσμος είναι σε απόσταση 53 cm από την εξωτερική γωνία συναρμογής των μαρμάρινων ογκοτεμαχίων. Η περιοχή όπου αναπτύσσονται οι μέγιστες

εφελκυστικές τάσεις είναι στον σύνδεσμο τιτανίου, ενώ το μάρμαρο και το κονίαμα υφίστανται υψηλές θλιπτικές τάσεις κάτω από τριαξονικές συνθήκες. Τα μοντέλα έτρεξαν κάτω από έλεγχο μετατόπισης και φορτίστηκαν μέχρι την αστοχία του υλικού. Η μέγιστη μετατόπιση που μπορεί να εφαρμοστεί κάθετα στην γωνία συναρμογής 45° είναι της τάξης των 0.6 mm. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι όπως υπολογίζεται από τα αριθμητικά μοντέλα η θλιπτική φόρτιση του μαρμάρου μπορεί να φτάσει τα 126 MPa με πλευρικό περιορισμό της τάξης των 39 MPa, ενώ η θλιπτική φόρτιση στο κονίαμα μπορεί να φτάσει τα 57 MPa με πλευρικό περιορισμό της τάξης των 35 MPa.

- Στην περίπτωση αντικατάστασης ενός ογκοτεμαχίου από διαφορετικό δομικό λίθο παρατηρήθηκε ότι η περιοχή όπου αναπτύσσονται οι μέγιστες εφελκυστικές τάσεις είναι στον σύνδεσμο τιτανίου, ενώ το μάρμαρο και το κονίαμα υφίστανται υψηλές θλιπτικές τάσεις κάτω από τριαξονικές συνθήκες. Σε σύγκριση με ένα μοντέλο που τα ογκοτεμάχιά του είναι του ιδίου υλικού το "σύνθετο μοντέλο" παραλαμβάνει μετατόπιση μικρότερη κατά περίπου 10%.
- Το καταστατικό μοντέλο για το κονίαμα προσομοιάζει με αυτό που μελετήθηκε πειραματικά σχετικά με την μορφή. Από τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης προέκυψε ότι το ποζολανικό κονίαμα παρουσιάζει μεγάλη πλαστικότητα και αυτό βοηθάει στην ομαλή μετάδοση των τάσεων στο σύστημα των υλικών. Παρουσιάζεται επίσης μείωση των εφελκυστικών τάσεων που αναπτύσσονται στο μάρμαρο, σε σχέση με το κονίαμα που χρησιμοποιείται ήδη στις αναστηλώσεις, που είναι και το ζητούμενο στη συγκεκριμένη περίπτωση που μελετάται.

6.2 Προτάσεις

Είναι σαφές ότι το πρόβλημα συναρμογής μαρμάρινων όγκων δεν εξαντλείται με την παρούσα εργασία. Υπάρχει πληθώρα γεωμετριών και εναλλακτικών λύσεων συναρμογής που θα μπορούσαν να μελετηθούν μελλοντικά, όπως το μέγεθος της εγκοπής, η γεωμετρία του συνδέσμου, κλπ.

Επίσης, είναι σημαντική η πειραματική διερεύνηση διαφορετικών συνθέσεων κονιαμάτων ώστε να μπορεί να επιτευχθεί ομαλότερη μετάδοση των τάσεων στα υλικά του συστήματος.

Κεφάλαιο 7:Βιβλιογραφία

7.1 Ελληνική βιβλιογραφία:

1. Αγιουτάντης, Ζ. (2002). *Στοιχεία Γεωμηχανικής, Μηχανική Πετρωμάτων*, Εκδοτικός Όμιλος Ίων, Αθήνα.
2. Αργυριάδης Μ. (2000). *Αποτίμηση της φθοράς και των επεμβάσεων στερέωσης στο εργαστήριο και επί τόπου στην κλίμακα των μνημείων βάσει των μηχανικών ιδιοτήτων των δομικών λίθων. Εφαρμογή σε παρόλιθους (Ρόδου, Κύπρου, Κρήτης)*. Μεταπτυχιακή εργασία, Ε.Μ.Π., Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Τομέας ΙΙΙ Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών.
3. Βαρδουλάκης, Ι., Κουρκουλής, Σ., Εξαδάκτυλος, Γ. και Ροζάκης, Α. (2002). Μηχανικές ιδιότητες και συμβατότητα φυσικών δομικών λίθων στα αρχαία μνημεία: Το διονυσιακό μάρμαρο, Διεπιστημονική ημερίδα "Ο δομικός λίθος στα μνημεία", 2002, ΙΓΜΕ: Αθήνα, Ελλάδα, σελ. 187-210.
4. Βαρουφάκης, Γ. (2010). Μεταλλουργική μελέτη σιδερένιων συνδέσμων του ναού της Τραπεζάς, υστεροαρχαϊκής εποχής, *Αρχαιολογία και τέχνες*, τεύχος 114, σελ. 83-85, <http://www.archaiologia.gr/wp-content/uploads/2011/07/114-9.pdf>.
5. Βενιέρης, Ι. (2007). Ακρόπολη Αθηνών, Υπουργείο Πολιτισμού και Τουρισμού, http://odysseus.culture.gr/h/3/gh351.jsp?obj_id=2384.
6. Βιάζης, Γ. (2007). Κονίες-Κονιάματα, Συλλογή γνώσεων Δομικά Υλικά - Οικοδομική, Αθήνα.
7. Βογιατζής, Δ., Χρηστάρας, Β., Φιλιππίδης, Α., Κασώλη-Φουρναράκη, Α., Καντηράνης, Ν., Μοροπούλου, Α. και Μπακόλας, Α. (2008). Αξιολόγηση της συμπαγοποίησης κονιαμάτων τσιμέντου-άμμου-ελληνικού φυσικού ζεολίθου με τεχνικές υπερήχων, 1^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Δομικών Υλικών και Στοιχείων, ΤΕΕ, Αθήνα, 23-31 Μαΐου, τ. 2, σελ. 1099-1110.
8. Γαννιάρη-Παπαγεωργίου, Ε. (2010). *Αποκατάσταση μονολιθικότητας δομικών μελών αρχαίων μνημείων κατασκευασμένων από φυσικούς δομικούς λίθους με χρήση ράβδων τιτανίου*, Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα.
9. ΓΤΣΥ, 2002
http://www.hellaskps.gr/min_requirements/docs/PE1/DGTSY/5Ktiriaka/TD-D-1080.0.htm#_Toc21240501

10. Δημοσθένους, Μ.Α. (2009). *Μέθοδοι και υλικά αποκατάστασης και ενίσχυσης διατηρητέων κτιρίων από φέρουσα τοιχοποιία*, Τ.Ε.Ε. / Τ.Κ.Μ, σελ.1-21
11. Ζάμπας, Κ. (2009). Η αποκατάσταση του αρχαίου πύργου του Δράκανου, Εταιρεία Ικαριακών Μελετών, Ιανουάριος-Μάρτιος 2009, Αρ.Φύλλου 7, σελ. 3-10.
12. Θεοδωρίδης, Χ. (2006). *Συμβατά Υλικά και Μέθοδοι Συντήρησης και Αποκατάστασης Ιστορικών Κτιρίων*, 15^ο Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, Αλεξανδρούπολη.
13. Ιωαννίδου, Μ. (2007). *Η Αποκατάσταση των Προπυλαίων της Αθηναϊκής Ακρόπολης*, ΕΡΓΟΝ IV Εκδόσεις Αρχιτεκτονικών Βιβλίων, σελ.13.
14. Ιωαννίδου, Μ. (2005). *Μια επέμβαση που διατηρεί στενή σχέση με την έρευνα και εκμεταλλεύεται τη σύγχρονη τεχνολογία Η αναστήλωση των μνημείων της Ακρόπολης*, Ε&Τ ΣΤΗΝ ΤΕΧΝΗ, Ιανουάριος 2005, σελ. 35-38.
15. Καραδέδος, Γ. (1994). *Ανάλυση εννοιών και εξέλιξη θεωρίας συντήρησης μνημείων και συνόλων*, Τόμος σεμιναρίου με τίτλο «Σεμιναρίου Διατήρηση - Αποκατάσταση –Αναστήλωση», Διοργανωτής Σύλλογος Αποφοίτων Πολυτεχνικής Σχολής Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, 1994, σελ. 15-47.
16. Καρύδης, Π. (2003). *Υπολογιστικές Μέθοδοι και Εφαρμογές σε Λεπτότοιχες Κατασκευές*, <http://users.ntua.gr/caridis/methodoi/keimena/chap%2003/Chapter%2003.pdf>
17. Λαμπρόπουλος, Β., Κότου, Μ. και Σαπουντζάκης, Α. <http://img.pathfinder.gr>.
18. Λαμπρόπουλος, Β. και Βομβογιάννη, Χ. (1999) *Ο ναός του Ηφαίστου στην Αρχαία Αγορά των Αθηνών: μορφές φθορών και προτάσεις προστασίας*, Αρχαιολογία και Τέχνες, Τεύχος 73, σελ. 83-90.
19. Κορωνάιος, Α. και Πουλάκος, Α. (2006). *Τεχνικά Υλικά*, Τόμος 1, Αθήνα.
20. Κούκης, Γ. και Σαμπατακάκης, Ν. (2002). *Τεχνική γεωλογία*, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα.
21. Κωτούζας, Κ.Μ. (2003). *Πιστοποίηση επαγγελματιών. Εφαρμογή στο προσωπικό μη καταστρεπτικών δοκιμών*, Ημερίδα ΤΕΕ, Αθήνα, 29 Σεπτεμβρίου, σελ. 1-11.
22. Μπούρας, Χ. και Ζάμπας, Κ. (2001). *Τα έργα της επιτροπής συντηρήσεως μνημείων Ακροπόλεως στην Αθηναϊκή Ακρόπολη*, Ταμείο Αρχαιολογικών Πόρων και Απαλλοτριώσεων Διεύθυνση Δημοσιευμάτων, σελ.7-34.

23. Μαλλούχου - Tufano, Φ. (2010). *Νέες επιστημονικές απαιτήσεις versus καθιερωμένες πρακτικές. Οι περιπτώσεις της αναστήλωσης του Ιερού της Σαμοθράκης και του Ωδείου του Ηρώδου του Αττικού*, Συντήρηση, Αναστήλωση και Αποκατάσταση Μνημείων στην Ελλάδα 1950-2000, Πολιτιστικό Ίδρυμα Ομίλου Πειραιώς, σελ. 131-148.
24. Μαλλούχου -Tufano, Φ. (2010). *Διεθνείς χάρτες, συστάσεις, διακηρύξεις και συμβάσεις για την προστασία της πολιτιστικής κληρονομιάς*, Συντήρηση, Αναστήλωση και Αποκατάσταση Μνημείων στην Ελλάδα 1950-2000, Πολιτιστικό Ίδρυμα Ομίλου Πειραιώς, σελ. 299-320.
25. Παλύβου, Κ. (2010). *Προϊστορικά συγκροτήματα. Προστασία, συντήρηση και ανάδειξη*, Συντήρηση, Αναστήλωση και Αποκατάσταση Μνημείων στην Ελλάδα 1950-2000, Πολιτιστικό Ίδρυμα Ομίλου Πειραιώς, σελ. 89-110.
26. Παπασταματίου, Κ. (2009). *Υλικά και τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν σε εκτεταμένες επεμβάσεις συντήρησης λίθινων μνημείων κατά τον 19^ο και στις αρχές του 20^{ου} αι. Τα πλεονεκτήματα, τα μειονεκτήματα και η σημασία τους για τις σημερινές επεμβάσεις συντήρησης*, σελ. 3-14.
27. Πενέλης, Γ. (2009). *Δομική αναστήλωση σε σεισμοπαθείς περιοχές*, <http://www.buildnet.gr/default.asp?pid=155&la=1&catid=120&artid=144>
28. Σκουλικίδης, Θ.Ν., (2000). *Διάβρωση και συντήρηση των δομικών υλικών των μνημείων*, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, Ηράκλειο, σελ. 9-12, 21-22.
29. Μαρινάκη, Α. (2004). *Αξιολόγηση πρώτων υλών και κονιαμάτων που χρησιμοποιούνται σε εργασίες συντήρησης και αναστήλωσης*, Μεταπτυχιακή διατριβή, Χανιά, σελ. 37, 46.
30. Μαρκόπουλος, Θ., Τριανταφύλλου, Γ. και Μαυριγιαννάκης, Σ. (2006). *Σύνθεση κονιαμάτων υδραυλικής ασβέστου που παρήχθησαν από ασβεστολιθικές πρώτες ύλες της Κρήτης και έλεγχος της μηχανικής τους συμπεριφοράς*, 15^ο Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, Αλεξανδρούπολη, 25-27 Οκτωβρίου, 2006, σελ. 1-9.
31. Μαρκόπουλος, Θ., Ρεπούσκου, Ε., Ροτόντο, Π., Τριανταφύλλου, Γ. και Αποστολάκη, Χ. (2008). *Σύνθεση και ποιοτικός έλεγχος δομικών κονιαμάτων από ασβεστολιθικές πρώτες ύλες της Κρήτης*, 1^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Δομικών Υλικών και Στοιχείων, ΤΕΕ, Αθήνα, 21-23 Μαΐου, 2008, σελ. 1-13.
32. Πάχτα, Β. (2011). *Μελέτη εξέλιξης τεχνολογίας κονιαμάτων*, Διδακτορική διατριβή στο τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του Α.Π.Θ., Κεφ. 4, σελ. 2, 97-99.

33. Σκουλικίδης, Θ.Ν., (2000). *Διάβρωση και συντήρηση των δομικών υλικών των μνημείων*, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, Ηράκλειο.
34. TEE, (2013).
http://portal.tee.gr/portal/page/portal/MATERIAL_GUIDES/P_KONIAMAT_A/ko1.htm#%CE%91%CE%94%CE%A1%CE%91%CE%9D%CE%97,
 τελευταία πρόσβαση 4 Μαρτίου 2013.
35. Τσιραμπίδης, Α. (1996). *Πετρολογία Ιζηματογενών Πετρωμάτων*, Α.Π.Θ. Έκδοση: Υπηρεσία Δημοσιευμάτων, Θεσσαλονίκη, σελ.113, 125.
36. Υπηρεσία Συντήρησης Μνημείων Ακρόπολης (ΥΣΜΑ), (2011).
<http://www.ysma.gr/>
37. ΦΕΚ, Αρ. Φύλλου 153, *Νόμος Υπ' Αριθ. 3028 Για την προστασία των Αρχαιοτήτων και εν γένει της Πολιτιστικής Κληρονομιάς*, 28 Ιουνίου 2002.
38. Χαλιορής, Κ. (2009). Έλεγχοι Εργαστηριακές-Δοκιμές-Αποτύπωση. Υλικά για επεμβάσεις σε κατασκευές, Ημερίδα: Ειδικά Θέματα Αντισεισμικού Σχεδιασμού Κτιρίων - Ενισχύσεις - Επισκευές, Ξάνθη, 20 Μαΐου, σελ. 6.
39. Υπηρεσία Συντήρησης Μνημείων Ακρόπολης (ΥΣΜΑ), (2009).
<http://www.ysma.gr/ysma/Default.aspx?id=71>

7.2 Διεθνής βιβλιογραφία:

1. Allison, R.J. (1988). A non-destructive method of determining rock strength, *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 13, Issue 8, pp. 729-736.
2. Al-Shayea, N.A. (2004). Effects of testing methods and conditions on the elastic properties of limestone rock, *Engineering Geology*, Vol. 74, pp. 139-156.
3. Ambroise, J., Maximilien, S. and Pera, J. (1994). Properties of metakaolin blended cements, *Advanced Cement Based Materials*, Vol. 1, pp. 161-168.
4. ANSYS 12.0, (2009). ANSYS Inc. Release Notes, SAS IP, Inc.
5. Bakolas, A., Aggelakopoulou, E. and Moropoulou, A. (2008). Evaluation of pozzolanic activity and physico-mechanical characteristics in ceramic powder - lime pastes, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 92, pp. 345–351.
6. Bakolas, A., Aggelakopoulou, E., Moropoulou, A. and Anagnostopoulou, S. (2006). Evaluation of pozzolanic activity and physico-mechanical

- characteristics in metakaolin - lime pastes, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 84, No. 1, pp. 157–163.
7. Bellopede, R. and Manfredotti, L. (2006). Ultrasonic sound test on stone: comparison of indirect and direct methods under various test conditions, Heritage, Weathering and Conservation Book of abstracts 8th Thematic Network on Cultural and Historic Heritage Scientific Meeting and Stone, Weathering and Atmospheric Pollution Network Scientific Meeting, CSIC, Rafael Fort y otros (Eds.), 21-24 June 2006, Madrid, Spain, pp. 16.
 8. Binde, L. (1998). MS.A.6.: Method for triaxial compression tests on mortar specimens taken from bed joints, *Materials and Structures/ Matériaux et Constructions*, Vol.31, pp. 363-377.
 9. Binda, L. and A. Saisi, (2001). Non destructive testing applied to historic buildings: The case of some Sicilian Churches, Historical Constructions, P.B. Lourenço, P. Roca (Eds.), Guimarães, pp. 29-46.
 10. Birgisson, B., Roque, R. and Page, G.C. (2003). Ultrasonic pulse wave velocity test for monitoring changes in hot-mix asphalt mixture from exposure to moisture. Transportation research record ISSN 0361-1981.CODEN TRREDM., pp. 173-181.
 11. Blitz, J. and Simpson, G. (1996). *Ultrasonic Methods of Non-destructive Testing*, (Eds) Chapman and Hall, London.
 12. Blair, D.P. (1990). Seismic pulse assessment of cracked and jointed rock, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 35, No 1/2/3/, pp. 447-455.
 13. Blanco-Varela, M. T. and Fortes-Revilla, C. (2004). Effect of chemical admixtures on lime-metakaolin mortars characteristics, *Coalition*, No 7, p.p. 8-11.
 14. Bodare, A. (1998). *Non destructive test methods of stone and rock*, Geo Texts and Publications, Stockholm, Sweden, pp. 19.
 15. Borchardt, J., (2003). *Reinforced plastics help preserve historic buildings*, *Journal of Reinforced plastics*, Vol. 47, Issue 11, p.p. 30-32.
 16. Brown, E.T. (1981). Suggested Methods for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials. Rock Characterization Testing & Monitoring. ISRM Suggested Methods, pp. 113-116, 107-110.

17. Burlion, N., Pijaudier-Cabot, G. and Dahan, N. (2001). Experimental analysis of compaction of concrete and mortar, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 25, pp. 1467-1486 (DOI: 10.1002/nag.178).
18. Cardani, G. and Meda, A. (1999). Flexural strength and notch sensitivity in natural building stones: Carrara and Dionysos marble, *Construction and Building Materials*, Vol. 13, pp. 393-403.
19. Chen, L., Duveau, G. and Shao, J. F. (2010). Modelling of plastic deformation and damage in cement-based material subjected to desiccation, *International Journal for Numerical Analytical Methods in Geomechanics*, Published online in Wiley Online Library, DOI: 10.1002/nag.985.
20. Christaras, B. (2003). P-wave velocity and quality of building materials, Proceedings International Symposium Industrial Minerals and Building Stones, IAEG, Istanbul, 2003, pp. 295-300.
21. Christaras, B., Mariolakos, I., Foundoulis, J., Athanasias, S. and Dimitriou, A. (1997). Geotechnical input for the protection of some Macedonian Tombs in Northern Greece, Proceedings 6th International Symposium Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin, Rhodes, 1999, pp. 125-132.
22. Christaras, B. (1997). Estimation of damage at the surface of stones using nondestructive techniques, STREMAH V (5th Int. Congr. Structural Studies, Repairs and Maintenance of Historical Buildings). San Sebastian. Advances in Architectural Series of Computational Mechanics Publications, Southampton, pp. 121-128.
23. Croci, G. (2000). *General methodology for the structural restoration of historical buildings: the cases of the Tower of Piza and Basilica of Assisi*, Journal of Cultural Heritage, Vol.1, pp. 7-18.
24. Drdácký, M., Mašín, D., Mekonone M.D. and Slížková, Z. (2008). Compression tests on non-standard historic mortar specimens, Proceedings of the Historical Mortars Conference - Characterization, Diagnosis, Conservation, Repair and Compatibility, Lisbon, Portugal, 24-26 September, 2008, pp. 24-26.
25. Dreezen, .R. and Musar M. (2004). *Historical building stones in the province of Limburg (NE Belgium): role of petrography in provenance and durability assessment*, Materials Characterization, Vol. 53, pp. 273-287.

26. Elert, K., Cultrone, G., Rodriguez-Navarro C., and Padro, E.S. (2003). *Durability of bricks used in the conservation of historic buildings-influence of composition and microstructure*, Journal of Cultural Heritage, Vol. 4, pp. 91-99.
27. Exadaktylos, G.E., Vardoulakis, I and Kourkoulis, S.K. (2001). Influence of nonlinearity and double elasticity on flexure of rock beams - II. Characterization of Dionysos marble, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 38, pp. 4119-4145.
28. Fabbrocino, G., Iervolino, I. and Manfredi, G. (2006). *Damage mitigation by innovative materials for Temple C at Selinunte*, Construction and Building Materials, Vol. 20, pp. 1040-1048.
29. Ferreira Pinto, A.P. and Rodrigues Delgado, J. (2007). *Journal of Cultural Heritage*, Vol. 9, pp. 38-53.
30. Fitzner, B. (2004). Documentation and evaluation of stone damage on monuments, 10th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Stockholm, 2004, pp. 677-690.
31. Fitzner, B. (2004). *Documentation and evaluation of stone damage on monuments*, 10th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Stockholm, pp. 677 - 690.
32. Fronteau, G. Moreau, C., Thomachot-Schneider and C. Barbin, V. (2010). Variability of some Lutetian building stones from the Paris Basin, from characterisation to conservation, *Engineering Geology*, Vol.115, pp. 158-166.
33. Gladwin, M.T. (1982). Ultrasonic stress monitoring in underground mining, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, Vol. 19, pp. 221-228.
34. Grinzato, E, Marinetti, S., Bison, P.G., Concas, M. and. Fais, S. (2004). Comparison of ultrasonic velocity and IR thermography for the characterization of stones, *Infrared Physics and Technology*, Vol. 46, pp. 63–68.
35. Griswold J. and Uricheck S. (1998). *Loss Compensation Methods For Stone*, Journal of the American Institute for Conservation, Vol. 37, No 1, pp. 89-110.
36. Hayen, R., Van Balen, K. and Van Gemert, D. (2009). Triaxial interaction of natural stone, brick and mortar in masonry constructions, 1st WTA -

- International Phd Symposium Building Materials and Building Technology for Preservation of the Build Heritage, Belgium, 8-9 October, 2009, pp. 333-352.
37. Hayen, R., Van Balen, D. and Van Gemert, D. (2003). Mechanical behaviour of mortars in triaxial compression. In F.H. Wittmann, A. Gerdes and Nuesch, R. (eds.), *Proceedings of the 6th International Conference on Materials Science and Restoration*, Karlsruhe, 2003, pp. 295-302.
 38. Ioannidou, M. (2007). *Principles and methodology of intervention for structural restoration*, XXI International CIPA Symposium, 01-06 October, Athens, Greece.
 39. ISRM (Co-ordinator: F. Ouchterlony), (1988). Suggested methods for determining the fracture toughness of rock, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, Vol. 25, pp. 71–96.
 40. Jacob, A. (2007). *Composites offer help in the conservation of historic buildings*, Reinforced plastics, Elsevier (Ltd), pp. 30-34.
 41. Kahraman, S. (2008). Determination of fracture depth of rock blocks from P-wave velocity, *Bulletin Engineering Geology*, Vol. 67, pp. 11–16.
 42. Kahraman, S. (2002). The effects of fracture roughness on P-wave velocity, *Engineering Geology*, Vol.63, pp. 347–350.
 43. Kahraman, S. (2001). A correlation between P-wave velocity, number of joints and Schmidt hammer rebound number, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol.38, pp. 729–733.
 44. Kaklis, K.N. and Vardoulakis, I. (2004). An experimental investigation of the size effect in indirect tensile test on Dionysos marble. In: Kounadis, A., Providakis, C., Exadaktylos, G. (Eds.), *Proc. 7th Nat. Congress on Mechanics*, vol. II. Technical University of Crete, Chania, Greece, pp. 151–157.
 45. Karpuz, C. and Paşamehmetoğlu, A.G. (1995). Field characterisation of weathered Ankara andesites, *Engineering Geology*, Vol.46, pp. 1-17.
 46. King, M.S., Chaudhry, N.A. and Shakeel, A. (1995). Experimental Ultrasonic Velocities and Permeability for Sandstones with Aligned Cracks, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, Vol. 32, No. 2, pp. 155-163

47. Konstantinidis, D. and Makris, N. (2005). Seismic response analysis of multidrum classical columns, *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 34, pp. 1243-1270.
48. Koroneos, E.G., Tassogiannopoulos, A. and Diamantopoulou, A. (1980). On the mechanical and physical properties of ten hellenic marbles, *Engineering Geology*, Vol. 16, p.p. 263-290.
49. Korres, M., Bouras, H. (1983), "Study for the Restoration of the Parthenon, Ministry of Culture and Science, Committee for the preservation of the Acropolis Monuments", Athens, Greece.
50. Kourkoulis, S.K., Panagiotopoulou, V. and Ganniari-Papageorgiou, E. (2012). The role of the fracture plane's inclination in the restoration of marble epistyles, *Journal of Cultural Heritage*, doi:10.1016/j.culher.2012.02.004.
51. Kourkoulis, S.K. and Pasiou, E.D., (2011). Mechanical Behaviour of Marble Epistyles Joined Together by a Titanium Connector Under Various Types of Loading, 2nd Ukrainian-Greek Symposium on Fracture Mechanics of Materials and Structures, Lviv, Ukraine, 03-07 October 2011, V.V. Panasyuk, E.E. Gdoutos and Yu.Ya. Bobalo (Eds), pp. 83-84.
52. Kourkoulis, S.K., Ganniari-Papageorgiou, E. and Mentzini, M. (2010). Dionysos marble beams under bending: A contribution towards understanding the fracture of the Parthenon architraves, *Engineering Geology*, Vol. 115, pp. 246-256.
53. Kourkoulis, S.K. and Pasiou, E. (2009). Epistyles connected with "I" connectors under pure shear, *Journal of the Serbian Society for Computational Mechanics*, Vol. 2, No. 2, pp. 81-99.
54. Kourkoulis S.K. (2006). *The mechanical behaviour of composite specimens made of two different stones*, Fracture and Failure of natural building stones, Application in the Restoration of Ancient Monuments, Springer, Athens, Greece, pp.93-106.
55. Kourkoulis S.K., Agioutantis Z., Ninis N., Latsiou V. and Papatheodorou S. (2004). *Mechanical Compatibility of Natural Building Stones*, ICEM12 - 12th International Conference on Experimental Mechanics, Politecnico di Bari, Italy, 29 August- 2 September.
56. Kourkoulis, S.K., Exadaktylos, G.E. and Vardoulakis, I. (1999). U-notched Dionysos-Pentelicon marble beams in three point bending: The effect of

- nonlinearity, anisotropy and microstructure, *International Journal of Fracture*, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, Vol. 98, pp. 369-392.
57. Lourenço, P. (2006). *Recommendations for restoration of ancient buildings and the survival of a masonry chimney*, Construction and Buildings Materials, Vol. 20, pp. 239-251
 58. Lourenço, P.B. (2002). Guidelines for the analysis of historical masonry structures , Finite Elements in Engineering and Science, M.A.N. Hendriks et al (Eds.), A. A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp. 241-247.
 59. Luciano, R. and Sacco E. (1997). *Damage of masonry panels reinforced by FRP sheets*, International Journal of Solids and Structures, Vol. 35, No. 15, pp. 1723-1741.
 60. Macdonald, S. (1995). *Modern Matters Principles & Practice in Conserving Recent Architecture*, Proceedings of the Conference held in London, U.K., 31 October-1 November, 1995, pp.89.
 61. Maravelaki-Kalaitzaki, P., Agioutantis, Z., Lionakis, E., Stavroulaki, M. and Perdikatsis, V. (2013). Physico-chemical and mechanical characterization of hydraulic mortars containing nano-titania for restoration applications, *Cement & Concrete Composites*, Vol, 36, pp. 33-41.
 62. Marinelli, A., Papanicolopoulos, S.A., Kourkoulis, S.K. and Vayas, I. (2009). The pull-out problem in restoring marble fragments: A design criterion based on experimental results, *Strain, An International Journal for Experimental Mechanics*, Vol. 45, pp. 433-444.
 63. Martínez-Martínez, J. Benavente, D., Ordóñez, S. and García-del-Cura, M.A. (2008). Multivariate statistical techniques for evaluating the effects of brecciated rock fabric on ultrasonic wave propagation, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 45, pp. 609-620.
 64. Meglis, I.L., Chow, T., Martin, C.D. and Young, R.P. (2005). Assessing in situ microcrack damage using ultrasonic velocity tomography, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 42, No 1, pp. 25–34.
 65. Moropoulou, A. and Polikreti K. (2009). *Principal Component Analysis in monument conservation: Tree application examples*, Journal of Cultural Heritage, Vol. 10, pp. 73-81.
 66. Moropoulou, A., Bakolas, A., Moundoulas, P., Aggelakopoulou, E. and Anagnostopoulou, S. (2005). Strength development and lime reaction in

- mortars for repairing historic masonries, *Cement & Concrete Composites*, Vol. 27, pp. 289–294.
67. Ngoma, A. (2009). *Characterisation and Consolidation of Historical Lime Mortars in Cultural Heritage Buildings and Associated Structures in East Africa*, Doctoral Thesis, pp. 20.
 68. Ninis, N. and Kourkoulis, S.K (2002). *On determining appropriate parameters of mechanical strength for numerical simulation of building stones*, 5th International Conference on Analysis of discontinuous Deformation, Beer-Sheva, Israel, 6-8 October.
 69. Ninis N., Kourkoulis S.K. and Sakellariou A. (2002). *Evaluation Criteria for building stones in the restoration of the Epidaurean Asklepieion*, The building stone in monuments, IGME Publishing, Vardi M. and Katsikis Y. (Ed), Athens, Greece, pp. 235-248.
 70. Ninis, N. and Kourkoulis, S.K. (2001). *On selecting a compatible substitute for the Kenhcreae poros stone used in the Epidaurean Asklepieion*, 6th National Congress of Mechanics, Hellenic Society of Theoretical and Applied Mechanics, Proceeding Vol. I, Thessaloniki, Greece, 19-21 July, pp. 348-356.
 71. Palomo, A., Blanco-Varela, M., Martinez-Ramirez, S., Puertas, F., Fortes, C. (2003). *Historic Mortars: Characterisation and Durability. New Tendencies for Research*, Advanced Research Centre for cultural heritage interdisciplinary projects, Fifth Framework Programme Workshop, from http://www.arcchip.cz/w09/w09_palomo.pdf.
 72. Papayianni, I. and Stefanidou, M. (2006). Strength–porosity relationships in lime–pozzolan mortars, *Construction and Buildings Materials*, Vol. 20, pp. 700-705.
 73. Papanikolaou A. (1994). *The restoration of the Erechtheion. In Acropolis restoration*, Academy Editions, Athens, pp.139-149.
 74. Papida, S., Murphy, W. and May, E. (2000). The use of sound velocity determination for the non-destructive estimation of physical and microbial weathering of limestones and dolomites, Proceedings of the 9th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Venice, 19-24 June, 2000, pp. 609-617.

75. Pecchioni E., Malesani P., Bellucci B. and Fratini F. (2005). *Artificial stones utilised in Florence historical palaces between the XIX and XX centuries*, Journal of Cultural Heritage, Vol.6, pp. 227-233.
76. Popovics, J.S. (2003). NDE techniques for concrete and masonry structures, *Progress in Structural Engineering and Materials*, Vol. 5, No 2, pp. 49–59.
77. Prassianakis, I.N. and N.I. Prassianakis (2004). Ultrasonic testing of non-metallic materials: concrete and marble, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 42, pp. 191-198.
78. Přikryl, R. and Török A. (2010). *Natural stones for monuments: their availability for restoration and evaluation*, Geological Society, Special Publications, London, Vol. 333, pp. 1-9.
79. Public Works and Government Services Canada (2000). *Guidelines for the seismic upgrading of stone-masonry structures*, pp. 21.
80. Quist, W.J. (2009). *Replacement of natural stone in conservation of historic buildings. Evaluation of replacement of natural stone at the church of Our Lady in Breda*, Heron, Vol.54, No.4, pp.251-278.
81. Raj, J.K. and H. Tayib (1996). Ultrasonic pulse velocities and elastic moduli of marble cores from the Kuala Lumpur limestone, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, Vol. 33, No 2, pp. 72A-72A(1).
82. Rodridues, D. J. and Grossi, A. (2007). *Indicators for the compatibility assessment of conservation actions*, Journal of Cultural Heritage, Vol. 8, pp. 32-43.
83. Rodridues, D.J. (1996). *In the search for tentative recommendations regarding compatible restoration mortars*, Proceedings of the 8th International congress on deterioration and conservation of stone, Vol. 3, pp. 141-147
84. Rozenbaum O., Barbanson L., Muller F and Bruand A. (2008). *Significance of a combined approach for replacement stones in the heritage buildings' conservation frame*, C. R. Geosciences, France, No 340, pp. 345-355
85. Rutland, A. C. and Wang, M. L. (1997) The effects of confinement on the failure orientation in cementitious materials experimental observations, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 19, pp. 149-160.

86. Sanders, L. and Keenan E. (2005). *Repair and Maintenance of Historic Marble and Limestone Structures Regular maintenance Key to Longevity*, Journal of Architectural technology, Hoffmann Architects, Inc., Vol. 22, Issue 1, No 1, pp.1-5.
87. Sáez-Pérez, M.P. and Rodríguez-Gordillo, J. (2009). Structural and compositional anisotropy in Macael marble (Spain) by ultrasonic, x-rd XRD and optical microscopy methods, *Construction and Building Materials*, Vol. 23, pp. 2121-2126.
88. Saka, M. and Uchikawa, T. (1995). Simplified NDE of a closed vertical crack using electronics, *NDT and E International*, Vol. 28, No 5, pp. 289–296.
89. Selonen, O., Luodes, H. & Ehlers, C. 2000. *Exploration for dimensional stone – implications and examples from the Precambrian of southern Finland*. Engineering Geology, 56, 275–291
90. Sharma, P.K. and Singh, T.N. (2007). A correlation between P-wave velocity, impact strength index and uniaxial compression strength, *Bulletin Engineering Geology*, Vol. 67, pp. 17-22.
91. Sheremeti-Kabashi, F. and Snethlage, R. (2000). Determination of structural anisotropy of Carrara marble with ultrasonic measurements, Proceedings of the 9th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Venice, 19-24 June, 2000, pp. 247-252.
92. Siegesmund, S., Kracke, T., Ruedrich, J., Schwarzburg, R. (2010). Jewish cemetery in Hamburg Altona (Germany): State of marble deterioration and provenance, *Engineering Geology*, doi:10.1016/j.enggeo.2009.07.008.
93. Surlis T. (1988). *Restoration of the John J. Glessner House*. In *Masonry: Materials design, construction and maintenance*, H. Harris (Ed.), American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 231-250.
94. Svahn, H. (2006). Final Report for the Research and Development Project. Non-Destructive Field Tests in Stone Conservation. Field and Laboratory Tests, Riksentikvarieämbetet (Ed.), Stockholm, Sweden, 2006, pp. 5-19.
95. Tringali, S., Benedictis, R., Rosa, R., Russo, C., Bramante, A., Gavarini, C., Valente, G., Ceradini, V., Tocci, C., Tobriner, S., Maugeri, M., Binda, L. and Baronio, G. 2003. *The restoration of the Cathedral of Noto*, Construction and Building Materials, Vol. 17, p.p. 573-578.

96. Török, Á. and Vásárhelyi B. (2010). *The influence of fabric and water content on selected rock mechanical parameters of travertine, examples from Hungary*, Engineering Geology, Vol. 115, pp. 237-245
97. Uchida, E., Ogawa, Y., Maeda, N. and Nakagawa, T. (1999). Deterioration of stone materials in the Angkor monuments, Cambodia, *Engineering Geology*, Vol. 55, pp. 101–112.
98. Valluzzi, M.R. (2007). On the vulnerability of historical masonry structures: analysis and mitigation, *Materials and Structures*, Vol. 40, pp. 723-743.
99. Valluzzi, M.R., Binda, M. and Modena, C. (2005). Mechanical behaviour of historic masonry structures strengthened by bed joints structural repointing, *Construction and Building Materials*, Vol. 19, Issue 1, pp. 63-73.
100. Vardoulakis I., Exadaktylos G., Kourkoulis S. and Papadopoulos C. (1997). *Characterization of mechanical properties and damage of natural building stones in historical monuments*, Proceedings of the 4th International Symposium on the Conservation in the Mediterranean, Technical Chamber of Greece, Rodos Island, Greece, 6-11 May, Vol. 2., pp. 193.
101. Vardoulakis, I., and Kourkoulis, S.K., (1997). Mechanical properties of Dionysos marble, Final report of the Environment Project EV5V-CT93-0300: Monuments Under Seismic Action, National Technical University of Athens, Greece
102. Vasconcelos, G., Lourenço, P.B., Alves, C.A.S. and Pamplona, J. (2008). Ultrasonic evaluation of the physical and mechanical properties of granites, *Ultrasonics*, Vol. 48, pp.453-466.
103. Vintzileou, E. and Papadopoulos, K. (2001). Dowel action of titanium bars connecting marble elements, International Symposium on Connections Between Steel and Concrete, Eligehausen, R. (Edt), RILEM Publications S.A.R.L., Germany, September 10-12, 2001, Vol. 2, pp. 900.
104. Watanabe, T. and Sassa, K. (1995). Velocity and amplitude of P-waves transmitted through fractured zones composed of multiple thin low-velocity layers, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics*, Vol. 32, No 4, pp. 313-324.
105. Watson, D.A., (1995). *Construction materials and processes third edition*, Glencoe, McGraw-Hill (Eds), pp. 103.

106. Weaver, M. (1997). *Conserving buildings A Manual of Techniques and Materials, Revised Edition*, Wiley J. & Sons, Inc. (Eds), pp. 73.
107. Wendehorst, R. (2009). Baustoffkunde, απόδοση στα ελληνικά Δομικά Υλικά, Τσουλάτος, Δ., Γκιούρδας (Εκ.), σελ. 265
108. Wolfram K. (1999). The use of ultrasonic analysis for damage assertion and quality control in restoration of cultural heritage, StonTec'99 German Stone Fair in Nuremberg, 3 June, 1999, pp. 1-11, <http://www.buildingstoneinstitute.org/technical-stone-info/restoration.html>.
109. Yasar, E. and Erdoğan, Y. (2004). Correlating sound velocity with density, compressive strength and Young modulus of carbonate rocks, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol.41, No 5, pp. 871–875.
110. Yurtdas, I., Peng, H., Burlion, N. and Skoczylas, F. (2006). Influences of water by cement ratio on mechanical properties of mortars submitted to drying, *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, pp. 1286–1293.
111. Zambas, C. (1992), “Structural Repairs to the Monuments of the Acropolis - The Parthenon,” Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Civil Engineering, Vol. 92, pp. 166-176.
112. Zezza, F. (1993). Evaluation criteria of the effectiveness of treatments by non destructive analysis, Proceedings 2nd Course of CUN University School of Monument Conservation, Heraklion, 1993, pp. 198-207.

7.3 Ιστοσελίδες:

1. <http://www.asnt.org/ndt/primer1.htm>
2. <http://el.wiktionary.org/wiki/μνημείο>
3. <http://www.dionyssomarble.com>
4. <http://www.dionyssomarble.gr>
5. http://www.oryktosploutos.net/2011/04/blog-post_15.html
6. <http://osme.8m.com/greekmarbleinanc.htm>
7. <http://www.technion.ac.il/~prohitec/>