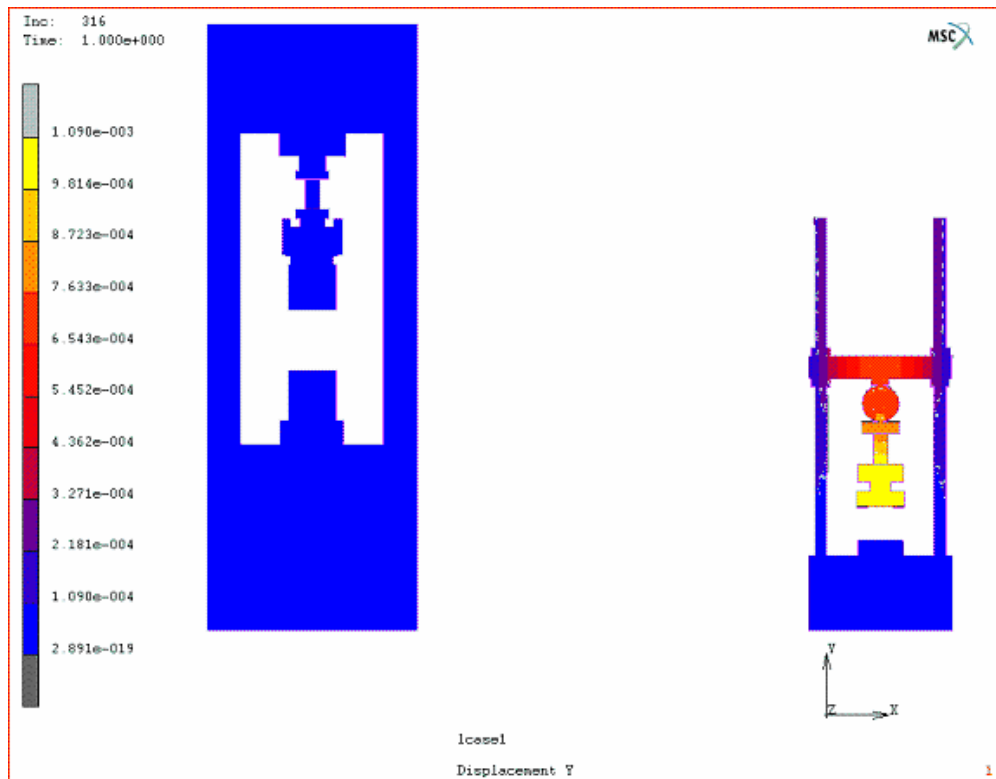




ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

**«ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΚΕΥΩΝ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΠΟΥ
ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΣΕ ΔΟΚΙΜΕΣ ΑΝΕΜΠΟΛΙΣΤΗΣ ΘΛΙΨΗΣ»**



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΖΩΓΡΑΦΙΑ Χ. ΠΑΠΑΔΑΚΗ

Εξεταστική Επιτροπή

Ζαχαρίας Αγιουτάντης, Καθηγητής (Επιβλέπων)
Γεώργιος Εξαδάκτυλος, Καθηγητής
Κωνσταντίνος Προβιδάκης, Αναπληρωτής Καθηγητής

Χανιά
Οκτώβριος, 2007

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μοντελοποίηση της άκαμπτης συσκευής φόρτισης MTS 1600kN και της μη άκαμπτης Triscan 50 kN που βρίσκονται στο Εργαστήριο Μηχανικής Πετρωμάτων του Πολυτεχνείου Κρήτης (ΕΜΠΠΚ) σε δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης. Η μελέτη των δοκιμών πραγματοποιήθηκε τόσο πειραματικά όσο και αριθμητικά με την Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων και χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια από Διονυσιακό Μάρμαρο.

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η αριθμητική προσομοίωση των δυο συσκευών ώστε να διερευνηθεί κατά πόσο διαφέρουν οι μετρήσεις (π.χ μετατοπίσεις) των μηχανών κατά την διαδικασία ανεμπόδιστης θλίψης σε ίδιες συνθήκες φόρτισης, με το ίδιο υλικό και με τις ίδιες παραμέτρους. Για την επίλυση του προβλήματος αυτού σε δυο διαστάσεις χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό πακέτο Marc-Mentat 2005r3 το οποίο χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Τα αποτελέσματα της επίλυσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων συγκρίθηκαν έπειτα με τα πειραματικά αποτελέσματα.

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία δεν θα είχε ολοκληρωθεί με επιτυχία χωρίς την αμέριστη υποστήριξη και συμπαράσταση ορισμένων προσώπων του ιδρύματος τα οποία και θα ήθελα να ευχαριστήσω:

Πολλές ευχαριστίες οφείλω στον επιβλέποντα μου, στην παρούσα εργασία, Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης κ. Ζαχαρία Αγιουτάντη για την επιλογή του πολύ ενδιαφέροντος θέματος, την άριστη συνεργασία που είχαμε, την πολύτιμη βοήθεια του όποτε την χρειαζόμουν, την αμέριστη συμπαράσταση του, καθώς επίσης και για τις συμβουλές και τα εύστοχα σχόλια που έκανε κατά την διόρθωση της εργασίας αυτής.

Τον Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης κ. Γεώργιο Εξαδάκτυλο, για τη συμμετοχή του στην εξεταστική μου επιτροπή και την αξιολόγηση της εργασίας μου.

Τον Αναπληρωτή Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης κ. Κωνσταντίνο Προβιδάκη, για τη συμμετοχή του στην εξεταστική μου επιτροπή και την αξιολόγηση της εργασίας μου.

Τον Μηχανικό Μεταλλείων κ. Στυλιανό Μαυριγιαννάκη για την υπομονή που έδειξε και την βοήθεια σε οποιοδήποτε πρόβλημα προέκυπτε.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την κ. Ειρήνη Καλογήρου για τα σχόλια και τις διορθώσεις της παρούσας εργασίας καθ' όλη την διάρκεια της παραμονής της στο Πολυτεχνείο Κρήτης καθώς και για την ουσιαστική συμπαράσταση της.

Τέλος ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στους γονείς μου Χαράλαμπο και Βαρβάρα και τον αδελφό μου Δημήτρη που με στήριξαν ψυχολογικά και ηθικά καθ' όλη τη διάρκεια φοίτησής μου στο Πολυτεχνείο Κρήτης και τέλος στον Ντίνο για την ουσιαστική του συμπαράσταση κυρίως στις δύσκολες στιγμές.

Πίνακας Περιεχομένων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

Εισαγωγή.....	1
---------------	---

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

Τεχνικά χαρακτηριστικά συσκευών φόρτισης.....	4
2.1 Γενικά.....	4
2.2 Συσκευή φόρτισης MTS 815	4
2.2.1 Σύστημα φόρτισης	4
2.2.2 Σύστημα ελέγχου	6
2.2.3 Συστήματα μέτρησης	8
2.2.4 Συστήματα καταγραφής.....	8
2.2.4.1 Κάρτα PCL816 και DASyLab	9
2.2.4.2 Κάρτα Kyowa PCD-200A και Λογισμικό	12
2.2.4.3 Συσκευή Microlink 770 και Λογισμικό Windmill.....	12
2.3 Συσκευή φόρτισης Tri-Scan 50kN.....	16
2.3.1. Σύστημα φόρτισης	16
2.3.2. Σύστημα ελέγχου	18
2.3.3 Σύστημα μέτρησης φορτίου.....	18
2.3.4 Σύστημα μέτρησης μετατόπισης.....	19
2.3.5 Σύστημα καταγραφής	20

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

Εργαστηριακά Πειράματα Δοκιμής Μονοαξονικής Θλίψης σε Μάρμαρο Διονύσου..	21
3.1 Σκοπός της Δοκιμής.....	21
3.2 Προδιαγραφές της δοκιμής Μονοαξονικής θλίψης	21
3.2.1 Εξοπλισμός	21
3.2.2 Προετοιμασία των Δοκιμών	22
3.2.3 Διαδικασία	23
3.3 Ιδιότητες Μαρμάρου Διονύσου	25
3.3.1. Φυσικές Ιδιότητες	25
3.3.2 Μηχανικές Ιδιότητες	26
3.4 Δοκιμές θλίψης στις συσκευές MTS και Triscan	26

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

Αριθμητική Προσομοίωση της Δοκιμής Ανεμπόδιστης Θλίψης με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων	33
4.1 Γενικά.....	33
4.2 Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων	33
4.2.1 Αρχή της ΜΠΣ.....	34
4.2.2 Επίλυση με Θεώρηση Επίπεδης Τάσης	35
4.2.3 Επίλυση με Θεώρηση Επίπεδης Παραμόρφωσης.....	36
4.2.4 Φόρτιση και Επιβολή των Συνοριακών Συνθηκών.....	37
4.3 Περιγραφή Μοντέλων.....	39
4.3.1 Γεωμετρία και Διακριτοποίηση των Μοντέλων	39

4.3.2 Συνοριακές Συνθήκες.....	40
4.3.3 Ιδιότητες Υλικών	41
4.3.4 Στοιχεία Επαφής	43
4.3.4.1 Προβλήματα Επαφής	43
4.3.4.2 Αριθμητικές μέθοδοι επίλυσης προβλημάτων επαφής	44
4.3.5 Γεωμετρικές Ιδιότητες	48
4.3.6 Αποτελέσματα Αριθμητικής Επίλυσης.....	48
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5°	
Σύγκριση Αποτελεσμάτων Μεταξύ Αριθμητικής Επίλυσης και Πειραματικής Ανάλυσης	52
5.1 Αριθμητικά και Πειραματικά Αποτελέσματα για την Συσκευή MTS.....	52
5.2 Αριθμητικά και Πειραματικά Αποτελέσματα για την Συσκευή Triscan	54
5.3 Σύγκριση Αριθμητικών και Πειραματικών Αποτελεσμάτων MTS-Triscan.....	56
5.3.1 Σύγκριση Αριθμητικών Αποτελεσμάτων στο Δοκίμιο	56
5.3.2 Σύγκριση Αριθμητικών Αποτελεσμάτων στη Μηχανή	57
5.3.3 Σύγκριση Πειραματικών Αποτελεσμάτων στο Δοκίμιο	58
5.3.4 Σύγκριση Πειραματικών Αποτελεσμάτων στη Μηχανή	59
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6°	
Συμπεράσματα-Προτάσεις.....	61
6.1 Εισαγωγή.....	61
6.2 Συμπεράσματα	61
6.3 Προτάσεις	63
<i>Βιβλιογραφία</i>	65

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1:Ελαστικό ισοδύναμο συστήματος δυνάμεων κατά την δοκιμή σε θλίψη,(Αγιουτάντης, 2002)	2
Σχήμα 2.1: Άκαμπτη συσκευή φόρτισης MTS Model 315.01 (MTS, 2004).....	5
Σχήμα 2.2: Σκαρίφημα και πίνακας διαστάσεων του συστήματος φόρτισης MTS Model 315.01 (MTS, 2004).....	6
Σχήμα 2.3: Σχηματικό διάγραμμα λήψης δεδομένων συστήματος φόρτισης MTS (Εργαστήριο Μηχανικής Πετρωμάτων, 2005)	8
Σχήμα 2.4: Απεικόνιση κάρτας PCL-816 (Advantech, 2007)	10
Σχήμα 2.5: Σχεδιάγραμμα λογισμικού DASYLab (Dasylab, 2007).....	11
Σχήμα 2.6: Απεικόνιση αποτελεσμάτων σε καταλόγους (Dasylab, 2007)	12
Σχήμα 2.7: Βάση προσαρμογής ηλεκτρικών μηχανομετρών	13
Σχήμα 2.8: Απεικόνιση κάρτας KYOWA PCD-200A (KYOWA, Instruction Manual) ..	13
Σχήμα 2.9: Απεικόνιση μονάδας Microlink 770.....	14
Σχήμα 2.10: Λογισμικό πρόγραμμα Windmill	16
Σχήμα 2.11: Πρόγραμμα του Windmill λογισμικού απεικόνισης διαγραμμάτων	16
Σχήμα 2.12: Συσκευή φόρτισης Tri-scan 50 kN.....	17
Σχήμα 2.13: Σκαρίφημα και τεχνικά χαρακτηριστικά συσκευής φόρτισης Tri-scan 50kN	18
Σχήμα 2.14: Κονσόλα ελέγχου της συσκευής φόρτισης Triscan 50kN.....	19
Σχήμα 2.15: Εξωτερικό κελί φορτίου 50kN και σφαιρική κεφαλή	19
Σχήμα 2.16: Σχηματική παράσταση του εσωτερικού LVDT (Wikipedia, 2007).	21
Σχήμα 2.17: Σχηματικό διάγραμμα λήψης δεδομένων συστήματος φόρτισης Triscan....	21
Σχήμα 3.1: Σχηματική παράσταση αξονικής φόρτισης σε κυλινδρικό δοκίμιο	25
Σχήμα 3.2: α) Εργαστηριακός πυρηνολήπτης δοκιμίων, β)Εργαστηριακός δίσκος κοπής δοκιμίων, γ)Εργαστηριακός λειαντής δοκιμίων.	26
Σχήμα 3.3: Δοκιμή Μονοαξονικής Θλίψης σε μάρμαρο Διονύσου στη συσκευή φόρτισης MTS	28
Σχήμα 3.4: Δοκιμή Μονοαξονικής Θλίψης σε Μάρμαρο Διονύσου στη συσκευή φόρτισης Triscan.....	30
Σχήμα 3.5: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων Y(mm) συναρτήσει των σταδίων φόρτισης για τις συσκευές φόρτισης MTS-Triscan για σημεία πάνω στο δοκίμιο. .	31
Σχήμα 3.6: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων Y (mm) συναρτήσει των σταδίων φόρτισης των συσκευών φόρτισης MTS-Triscan για σημεία πάνω στην μηχανή. ..	31
Σχήμα 3.7: Διάγραμμα τάσης σ (MPa) παραμόρφωσης ε MTS-Triscan για το δοκίμιο ..	32
Σχήμα 4.1: Παραδοχή επίπεδης τάσης (Αγιούταντης, 2002)	36
Σχήμα 4.2: Παραδοχή επίπεδης παραμόρφωσης (Αγιουτάντης, 2002).....	36
Σχήμα 4.3: Φυσική σημασία μητρώου ακαμψίας τετραλειτουργικού στοιχείου (Αγιουτάντης, 2002)	37

Σχήμα 4.4: Συνοριακές συνθήκες και αξιοποίηση συμμετρίας επίπεδου μοντέλου (Αγιουτάντης, 2002)	38
Σχήμα 4.5: Συμβολισμός συνοριακών συνθηκών (Αγιουτάντης, 2002)	39
Σχήμα 4.6: Διακριτοποίηση των συσκευών φόρτισης MTS-Triscan	40
Σχήμα 4.7: Σχηματική παράσταση συνοριακών συνθηκών	41
Σχήμα 4.8: Ιδιότητες υλικού χάλυβα	42
Σχήμα 4.9: Ιδιότητες υλικού μαρμάρου	42
Σχήμα 4.10: Απεικόνιση των μοντέλων όπου διακρίνονται οι ιδιότητες των υλικών	43
Σχήμα 4.11: Περιοχές έμφασης της διακριτοποίησης (Felippa, 2003).....	46
Σχήμα 4.12: Στοιχεία επαφής μεταξύ της άνω και κάτω χαλύβδινης πλάκας και του δοκιμίου της συσκευής φόρτισης MTS	47
Σχήμα 4.13: Στοιχεία επαφής μεταξύ της άνω και κάτω χαλύβδινης πλάκας και του δοκιμίου της συσκευής φόρτισης Triscan.....	47
Σχήμα 4.14: Κόμβοι ελέγχου MTS	49
Σχήμα 4.15: Κόμβοι ελέγχου Triscan	49
Σχήμα 4.16: Κατανομή της κατακόρυφης μετατόπισης dy στην συσκευή φόρτισης Triscan.....	50
Σχήμα 4.17: Κατανομή της κατακόρυφης μετατόπισης dy στην συσκευή φόρτισης MTS	50
Σχήμα 4.18: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων $Y(mm)$ συναρτήσεων των σταδίων φορτίσεων στους κόμβους 23033 και 29694 των MTS και Triscan αντίστοιχα	51
Σχήμα 4.19: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων $Y(mm)$ συναρτήσεων των σταδίων φορτίσεων στους κόμβους 4057 και 49176 των MTS και Triscan αντίστοιχα.	52
Σχήμα 5.1: Πειραματικά και αριθμητικά αποτελέσματα κατακόρυφης μετατόπισης y (mm) σε συνάρτηση με τα στάδια φόρτισης της μηχανής MTS πάνω στο δοκίμιο.	54
Σχήμα 5.2: Πειραματικά και αριθμητικά αποτελέσματα κατακόρυφης μετατόπισης y (mm) σε συνάρτηση με τα στάδια φόρτισης της μηχανής MTS πάνω στην μηχανή.	55
Σχήμα 5.3: Πειραματικά και αριθμητικά αποτελέσματα κατακόρυφης μετατόπισης y (mm) σε συνάρτηση με τα στάδια φόρτισης της μηχανής Triscan σε σημείο πάνω στο δοκίμιο	56
Σχήμα 5.4: Πειραματικά και αριθμητικά αποτελέσματα κατακόρυφης μετατόπισης y (mm) σε συνάρτηση με τα στάδια φόρτισης της μηχανής Triscan σε σημείο πάνω στην μηχανή	57
Σχήμα 5.5: Διόρθωση κατακόρυφης μετατόπισης ΔY Triscan (Δοκιμίου-Μηχανής) για την πειραματική και αριθμητική δοκιμή σε συνάρτηση με τα στάδια φόρτισης.....	57
Σχήμα 5.6: Σύγκριση αριθμητικών αποτελεσμάτων MTS-Triscan για σημείο πάνω στο δοκίμιο.	58
Σχήμα 5.7: Σύγκριση αριθμητικών αποτελεσμάτων MTS-Triscan για σημείο πάνω στην μηχανή.....	59
Σχήμα 5.8: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων MTS-Triscan για σημείο πάνω στο δοκίμιο.	60
Σχήμα 5.9: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων MTS-Triscan για σημείο πάνω στην μηχανή.....	61

Σχήμα 6.1: Διάγραμμα διορθωμένης κατακόρυφης μετατόπισης των συσκευών φόρτισης MTS-Triscan σε mm σε συνάρτηση με την τάση MPa	64
---	----

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά συσκευής MTS (MTS, 2004).....	6
Πίνακας 3.1: Πειραματικά αποτελέσματα συσκευής φόρτισης.....	28
Πίνακας 5.1: Συνοπτικός πίνακας καταγραφής αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων συσκευών φόρτισης Triscan και MTS	53

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

Εισαγωγή

Η δοκιμή μονοαξονικής θλίψης σε πετρώματα (η οποία συχνά αναφέρεται με τον όρο δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης) είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη δοκιμή για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του ακεραίου πετρώματος.

Η πειραματική διαδικασία προβλέπει την διαμόρφωση κυλινδρικών ή κυβικών δοκιμίων με ύψος μεγαλύτερο από την διάμετρο ή το πλάτος και την φόρτιση των δοκιμίων αυτών μέχρι την αστοχία. Κατά την διάρκεια της δοκιμής καταγράφονται δεδομένα που αφορούν το εντατικό πεδίο και παραμορφωσιακό πεδίο από τα οποία μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα όσον αφορά τις μέγιστες τάσεις που μπορεί να λάβει το ακέραιο υλικό αλλά και το τρόπο με τον οποίο παραμορφώνεται σε δεδομένο εντατικό πεδίο. Από τις διεθνείς προδιαγραφές που θέσπισε η Διεθνής Ένωσης της Μηχανικής των Πετρωμάτων (International Society for Rock Mechanics) (Brown, 1981) προκύπτει ότι οι δοκιμές σε μονοαξονική θλίψη πρέπει να γίνονται σε άκαμπτες μηχανές ούτως ώστε η παραμόρφωση του σκελετού της μηχανής να είναι η ελάχιστη δυνατή κατά την σταδιακή φόρτιση του δοκιμίου. Η διαφορά της άκαμπτης μηχανής από την μη άκαμπτη οφείλεται στο ότι η δεύτερη παραμορφώνεται κατά την φόρτιση ενός δοκιμίου και αποθηκεύει στα φέροντα στοιχεία της μια ενέργεια παραμόρφωσης. Το ελαστικό σύστημα δοκιμίου-συσκευής μπορεί να θεωρηθεί ισοδύναμο με δυο γραμμικά (ή μη γραμμικά) ελατήρια συνδεδεμένα παράλληλα (Σχήμα 1.1) και αποθηκεύει ενέργεια που δίνεται από την σχέση (Brady and Brown, 1985) :

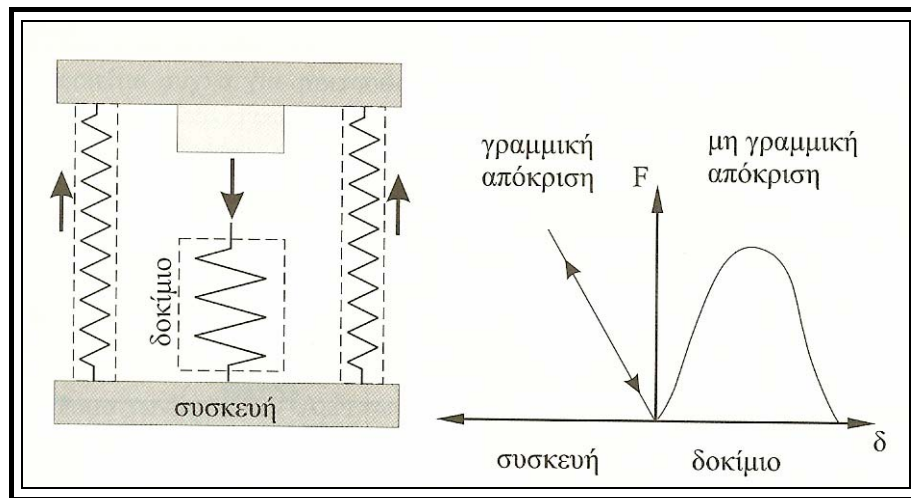
$$U = \frac{1}{2} P^2 (K_{\Delta} + K_M) \quad (1.1)$$

Όπου

K_{Δ} = η σταθερά ελαστικότητας του δοκιμίου

K_M = η σταθερά ελαστικότητας της μηχανής θλίψης

P = η μέγιστη δύναμη που αναπτύσσεται κατά την αστοχία του υλικού και που αντιστοιχεί στη μέγιστη παραμόρφωση



Σχήμα 1.1:Ελαστικό ισοδύναμο συστήματος δυνάμεων κατά την δοκιμή σε θλίψη,(Αγιουτάντης, 2002)

Καθώς το κόστος απόκτησης και χρήσης άκαμπτων μηχανών είναι πολύ μεγαλύτερο σε σχέση με αυτό των μη άκαμπτων μηχανών είναι ευνόητο ότι οι άκαμπτες μηχανές χρησιμοποιούνται μόνο όταν χρειάζεται να υπολογίσει κανείς με ακρίβεια και το παραμορφωσιακό πεδίο το οποίο προκύπτει κατά την δοκιμή. Εάν το ενδιαφέρον εστιάζεται μόνο στο εντατικό πεδίο τότε τα αποτελέσματα που δίνουν οι άκαμπτες και οι μη άκαμπτες μηχανές είναι παρόμοια.

Στόχος της διπλωματικής αυτής είναι η συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που λαμβάνονται κατά την εκτέλεση μιας δοκιμής μονοαξονικής θλίψης τόσο από την άκαμπτη μηχανή τύπου MTS 810 όσο και από την μη άκαμπτη τύπου Triscan 50 που διαθέτει το (ΕΜΠΠΚ). Στην συνέχεια γίνεται μια προσπάθεια μοντελοποίησης των δυο συσκευών σε δυο διαστάσεις χρησιμοποιώντας την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Η επίλυση των μοντέλων αυτών κάτω από πραγματικές συνθήκες φόρτισης δίνει ως αποτελέσματα τις αναμενόμενες παραμορφώσεις του πλαισίου αλλά και του δοκιμίου για τις δεδομένες φορτίσεις. Από την βαθμονόμηση των δυο μοντέλων είναι δυνατό να προσδιοριστεί ένα νομόγραμμα για τον ανάδρομο υπολογισμό των διορθωμένων παραμορφώσεων από τις μη άκαμπτες μηχανές σε σχέση με τις παραμορφώσεις που θα λαμβάνονταν εάν οι δοκιμές γινόντουσαν σε άκαμπτες μηχανές φόρτισης

Η διάρθρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας έχει ως εξής:

Στο Κεφάλαιο 2, γίνεται μια αναφορά στα τεχνικά χαρακτηριστικά των συσκευών φόρτισης που διαθέτει το Εργαστήριο Μηχανικής Πετρωμάτων του Πολυτεχνείου Κρήτης (ΕΜΠΠΚ) και με τις οποίες έγιναν οι δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης.

Στο Κεφάλαιο 3, περιγράφονται τα εργαστηριακά πειράματα δοκιμής ανεμπόδιστης θλίψης, οι προδιαγραφές με τις οποίες έγιναν, καθώς και οι ιδιότητες του μαρμάρου Διονύσου που χρησιμοποιήθηκε και τέλος τα πειραματικά αποτελέσματα που εξήφθηκαν.

Στο Κεφάλαιο 4, αναφέρεται η αριθμητική προσομοίωση της δοκιμής ανεμπόδιστης θλίψης με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, γίνεται μια περιγραφή των μοντέλων και τέλος παρατίθενται τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης.

Στο Κεφάλαιο 5, συγκρίνονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα εργαστηριακά πειράματα και την αριθμητική προσομοίωση .

Στο Κεφάλαιο 6, εξάγονται συμπεράσματα και γίνονται προτάσεις για βελτίωση της εργασίας αλλά και την περαιτέρω διερεύνηση της.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

Τεχνικά χαρακτηριστικά συσκευών φόρτισης

2.1 Γενικά

Το Εργαστήριο Μηχανικής Πετρωμάτων του Πολυτεχνείου Κρήτης (ΕΜΠΠΚ) διαθέτει ένα σύνολο συσκευών για την εργαστηριακή μέτρηση της αντοχής διαφόρων υλικών (π.χ. αντοχή σε ανεμπόδιση θλίψη, αντοχή σε εφελκυσμό κ.τ.λ.). Στην παρούσα εργασία εξετάζονται οι συσκευές που χρησιμοποιούνται για την πραγματοποίηση δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης. Οι συσκευές φόρτισης για τις οποίες γίνεται λόγος είναι οι: α) *MTS 815* με πλαίσιο φόρτισης τύπου *315.01* της *MTS* με δυνατότητα φόρτισης μέχρι 1600kN, και β) *Tri-Scan* με δυνατότητα φόρτισης μέχρι 50kN. Αποτελούνται γενικά από τα ακόλουθα κύρια μέρη:

- Σύστημα φόρτισης (άκαμπτο ή παραμορφούμενο).
- Σύστημα ελέγχου.
- Σύστημα μέτρησης των παραμέτρων.
- Σύστημα καταγραφής των αποτελεσμάτων.

2.2 Συσκευή φόρτισης MTS 815

2.2.1 Σύστημα φόρτισης

Το σύστημα φόρτισης αποτελείται από τα ακόλουθα τμήματα (Αγιουτάντης και Γαβαλάκη, 1998):

Πλαίσιο φόρτισης: Το πλαίσιο φόρτισης είναι τύπου MTS 315.01 (σχήματα 2.1 και 2.2). Στη βάση του πλαισίου φόρτισης είναι ενσωματωμένο υδραυλικό έμβολο για την επιβολή δυνάμεων. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της συσκευής φόρτισης φαίνονται στον πίνακα 2.1 Το μέγιστο φορτίο, που μπορεί να επιβάλει το έμβολο, είναι $\pm 1600\text{kN}$ (σε θλίψη ή σε εφελκυσμό). Η μέγιστη μετατόπιση του εμβολού είναι

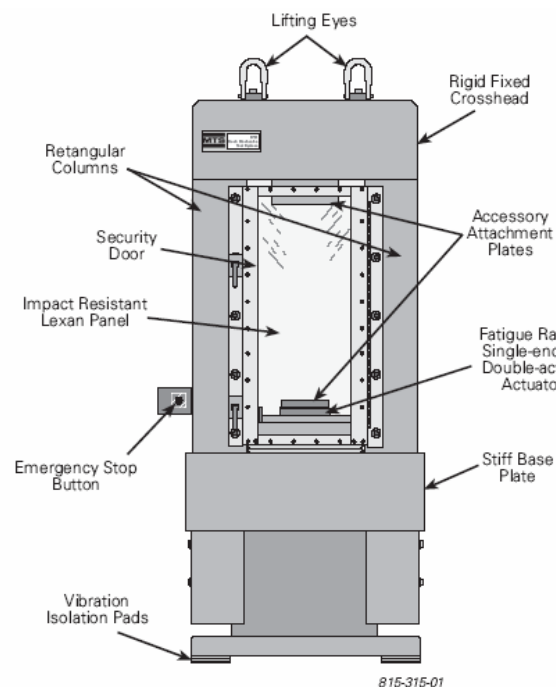
100 mm ή ± 50 mm από μια θέση ισορροπίας. Το έμβολο αυτό οδηγείται από υδραυλικό ενεργοποιητή μέσω σερβοβαλβίδων που τροφοδοτούνται από υδραυλική αντλία με τυπική πίεση εξόδου 20,7 MPa.

Μορφοτροπείς μέτρησης φορτίου/μετατόπισης: Οι μορφοτροπείς αυτοί είναι ενσωματωμένοι στο έμβολο φόρτισης.

Άνω και κάτω πλάκες φόρτισης: Οι πλάκες αυτές τοποθετούνται στο άνω μέρος του πλαισίου και επάνω στο έμβολο αντίστοιχα, και αποτελούν τις βάσεις για τοποθέτηση πρόσθετου εξοπλισμού.

Ενδιάμεσες πλάκες φόρτισης: Οι πλάκες αυτές χρησιμεύουν για να μειώσουν το άνοιγμα ανάμεσα στις άνω και κάτω πλάκες για δοκιμές με δοκίμια μικρού ύψους.

Σφαιρική κεφαλή έδρασης: Η κεφαλή στερεώνεται στην άνω πλάκα και έχει σκοπό τη μεταφορά φορτίων ακόμη και σε επιφάνειες που δεν είναι απολύτως κάθετες στον άξονα φόρτισης.

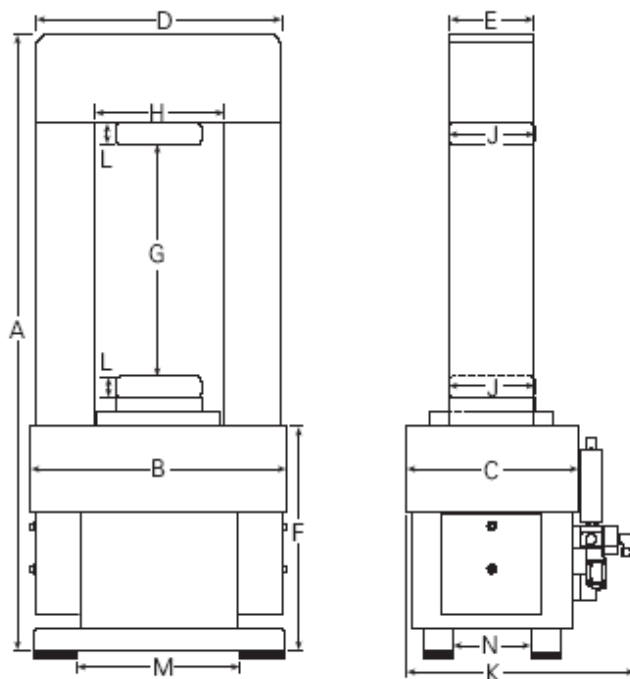


Σχήμα 2.1: Άκαμπτη συσκευή φόρτισης MTS Model 315.01 (MTS, 2004)

Στο Σχήμα 2.2 απεικονίζεται ένα σκαρίφημα του συστήματος φόρτισης MTS Model 315.01 (πρόσοψη και πλάγια όψη) και ένας πίνακας όπου δίνονται οι διαστάσεις των επιμέρους τμημάτων αυτού.

Πίνακας 2.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά συσκευής MTS (MTS, 2004).

Μέγιστη φόρτιση	1600kN
Μέγιστη δύναμη	1050kN
Μετατόπιση	100mm
Βάρος	2359kg



Διαστάσεις	(mm)
A	2184
B	711
C	483
D	686
E	305
F	635
G	868min 970max
H	457
J	191
K	640
L	74
M	432
N	229

Σχήμα 2.2: Σκαρίφημα και πίνακας διαστάσεων του συστήματος φόρτισης MTS Model 315.01 (MTS, 2004)

2.2.2 Σύστημα ελέγχου

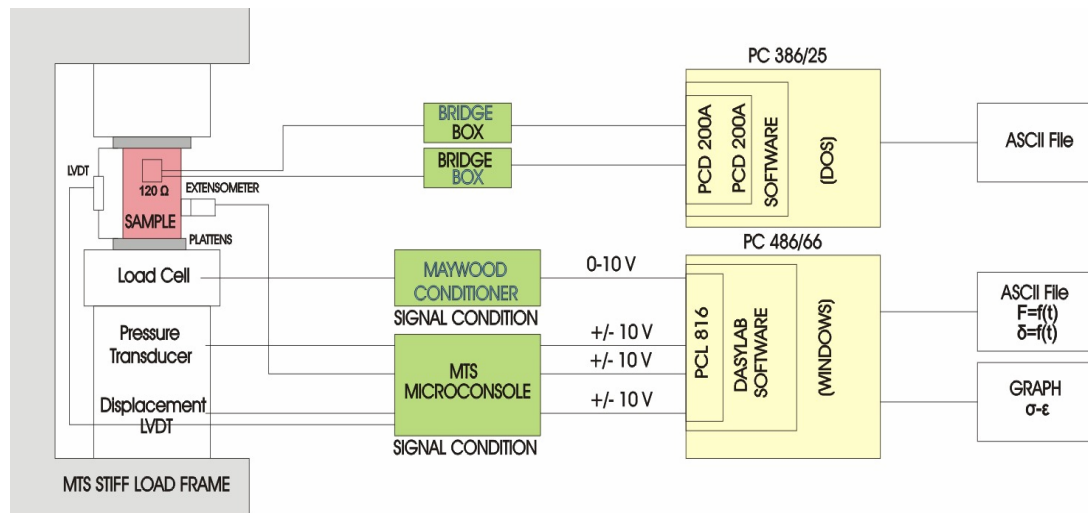
Ο έλεγχος γίνεται από κατάλληλη μικροκονσόλα και περιλαμβάνει τη Μικρογεννήτρια Παλμών (Μ.Π.) και τους ελεγκτές. Οι ελεγκτές (controllers) είναι μονάδες (ηλεκτρονικές, ηλεκτρομηχανικές κ.τ.λ.), οι οποίες παραλαμβάνουν ένα σήμα καθοδήγησης ή ελέγχου μιας δοκιμής, όπως μια γραμμική (ramp) ή περιοδική (periodic) κυμα-

τομορφή, και το μετατρέπουν στην αντίστοιχη μεταβλητή ελέγχου (δύναμη, μετατόπιση κ.τ.λ.). Οι λειτουργίες, που εκτελούνται από τους ελεγκτές δύναμης/μετατόπισης, είναι οι εξής:

- ρύθμιση και επεξεργασία του σήματος των μοροτροπέων (transducer conditioning),
- επεξεργασία εντολών (command conditioning),
- ρυθμίσεις σερβοβρόχου (servoloop adjustments),
- ανίχνευση σφάλματος (error detection), δηλαδή ανίχνευση απόκλισης της κατάστασης φόρτισης από την επιθυμητή,
- ρύθμιση ανώτατου και κατώτατου ορίου λειτουργίας με τυπικές τιμές 100% και 10% της πλήρους κλίμακας αντίστοιχα, και
- ανίχνευση ανώτατου ή κατώτατου ορίου και στο επιβαλλόμενο φορτίο και στη μετατόπιση (limit detection).

Και οι δύο ελεγκτές του συστήματος (ελεγκτής μετατόπισης και ελεγκτής δύναμης) οδηγούνται με τη σειρά τους από ένα χωριστό υποσύστημα παραγωγής κυματομορφών που ονομάζεται μικρογεννήτρια παλμών. Το υποσύστημα αυτό περιέχει μικροεπεξεργαστή και εξάγει αναλογικό σήμα με εύρος στην πλήρη κλίμακα ± 10 mm.

Αξίζει να σημειωθεί ότι το σύστημα φόρτισης περιλαμβάνει ένα υποσύστημα σερβοελέγχου. Με τον όρο σερβοέλεγχος εννοείται η διαδικασία της ενίσχυσης του σήματος δράσης με κατάλληλο μηχανισμό, ιδιαίτερα για συστήματα όπου αναπτύσσονται μεγάλα μεγέθη στις πειραματικές μεταβλητές, όπως π.χ. στα συστήματα επιβολής υψηλών τάσεων (θλιπτικών ή εφελκυστικών).



Σχήμα 2.3: Σχηματικό διάγραμμα λήψης δεδομένων συστήματος φόρτισης MTS (Εργαστήριο Μηχανικής Πετρωμάτων, 2005)

2.2.3 Συστήματα μέτρησης

Τα συστήματα μέτρησης διακρίνονται σε εσωτερικά και εξωτερικά. Το εσωτερικό σύστημα μέτρησης περιλαμβάνει κυρίως τους μορφοτροπείς μέτρησης (δυνάμεων μετατοπίσεων). Πρόκειται για υποσυστήματα, τα οποία ανιχνεύουν μεταβαλλόμενες φυσικές ποσότητες και τις μετατρέπουν σε ηλεκτρικά ή άλλου τύπου σήματα, τα οποία είναι αποδεκτά από το σύστημα μέτρησης δεδομένων. Στις περισσότερες εφαρμογές πρόκειται για συσκευές που μετατρέπουν ένα μονοδιάστατο μέγεθος (π.χ. τη θερμοκρασία, την πίεση, το μήκος, τη θέση κτλ.), σε διαφορά δυναμικού, συχνότητα ρεύματος, παλμούς ρεύματος κτλ. Η μέτρηση του αξονικού φορτίου και της αξονικής μετατόπισης στο σύστημα αυτό του ΕΜΠΠΚ γίνεται μέσω γραμμικών μεταβλητών διαφορικών μορφοτροπέων (Linear Variable Differential Transducer, LVDT) που είναι ενσωματωμένοι στη βάση του εμβόλου φόρτισης από την κατασκευάστρια εταιρεία. Τα εξωτερικά συστήματα που είναι εγκατεστημένα είναι ένα κελί φορτίου (load cell) των 500 kN και δυο LVDT, ένα με εύρος 0-10 mm και ένα με εύρος 0-25mm (βλέπε ενότητα 2.3.5).

2.2.4 Συστήματα καταγραφής

Το πρωτογενές σήμα, το οποίο λαμβάνεται από ένα μορφοτροπέα, μπορεί να είναι αναλογικό ή ψηφιακό. Τα αναλογικά σήματα μπορούν να διοχετευθούν απευθείας σε συ-

σήματα αναλογικής επεξεργασίας ή καταγραφής ή να ψηφιοποιηθούν. Τα ψηφιακά σήματα μπορούν να διοχετευθούν σε συστήματα ψηφιακής επεξεργασίας ή καταγραφής. Η επεξεργασία των σημάτων αναφέρεται συνήθως στα ακόλουθα:

- βαθμονόμηση,
- φιλτράρισμα,
- σύγκριση με κάποιο σήμα αναφοράς και
- μετασχηματισμός.

Ένα από τα συνήθη συστήματα, που χρησιμοποιούνται σήμερα για τη συλλογή και ψηφιοποίηση αναλογικών δεδομένων καθώς και την αποθήκευση των ψηφιακών τιμών, είναι οι Η/Υ γραφείου. Οι υπολογιστές αυτοί εξοπλίζονται με κατάλληλες μονάδες επέκτασης, οι οποίες μπορούν να ψηφιοποιούν ένα σήμα με τις επιθυμητές παραμέτρους και στη συνέχεια να αποθηκεύσουν τα ψηφιοποιημένα δεδομένα στον Η/Υ. Το εργαστήριο διαθέτει 3 συστήματα καταγραφής, τα οποία ξεκινώντας από το παλαιότερο, παρατίθενται στη συνέχεια:

- Το *Kyowa PCD-200A* για την καταγραφή αναλογικών σημάτων από ηλεκτρικά μκυκυσιόμετρα.
- Το *PCL-816* της εταιρίας Advantech σε συνδυασμό με το λογισμικό *DASYLab* για την καταγραφή αναλογικών σημάτων δύναμης-μετατόπισης με εύρος 0-10Volt.
- Το *Microlink 770* σε συνδυασμό με το λογισμικό *Windmill* για την καταγραφή αναλογικών σημάτων δύναμης-μετατόπισης και ηλεκτρικών μκυκυσιόμετρων.

2.2.4.1 Κάρτα PCL816 και DASYLab

Η κάρτα PCL-816 της εταιρίας Advantech (Σχήμα 2.4) χρησιμοποιείται για την ψηφιοποίηση και καταγραφή αναλογικών σημάτων. Η κάρτα διαθέτει μια μονάδα 100kHz για να έχει την δυνατότητα δειγματοληψίας ρυθμου μέχρι 100kHz. Επίσης διαθέτει 16 κανάλια που δέχονται διαφορικό αναλογικό σήμα και το κάθε κανάλι μπορεί να παράγει σήμα με διακριτική ικανότητα 16-bits.



Σχήμα 2.4: Απεικόνιση κάρτας PCL-816 (Advantech, 2007)

Η μονάδα της μετατροπής αναλογικού σήματος σε ψηφιακή μετατροπή καλύπτεται με μεταλλικό κάλυμμα για την μόνωση του ηλεκτρικού θορύβου, ενώ ένα καλώδιο DB-37 μεταφέρει τα σήματα από την κάρτα προς την εξωτερική μονάδα καλωδίωσης του συστήματος.

Η κάρτα επίσης διαθέτει μια μονάδα των 16-bit για μετατροπή ψηφιακών σημάτων σε αναλογικά από την οποία μπορούν να βγουν δυο κανάλια εξόδου.

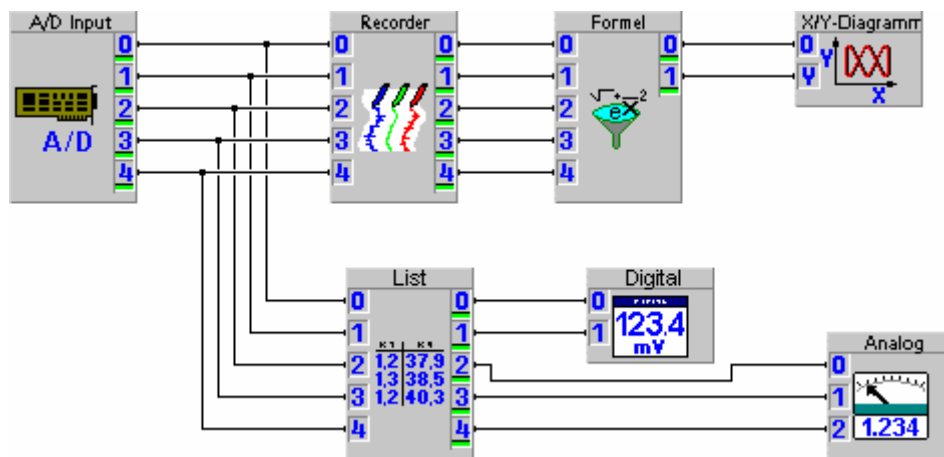
Χαρακτηριστικά γνωρίσματα

- Αναλογικός σε ψηφιακό μετατροπέα με ακρίβεια 16-bits.
- Συχνότητα δειγματοληψίας μέχρι 100 kHz.
- Αναλογική είσοδος με 16 κανάλια με διαφορεικό αναλογικό σήμα με χωριστή ενίσχυση ανά κανάλι.
- Προγραμματιζόμενο κανάλι DMA.
- Προγραμματιζόμενο επίπεδο IRQ.
- Μονάδα A/D με μεταλλική προστασία.
- Αυτόματο κύκλωμα ανίχνευσης καναλιών.
- Υπορουτίνες για C/C ++, PASCAL και BASIC.
- Προαιρετική έξοδος για ψηφιακή σε αναλογική μετατροπή.

DASYLab

Το λογισμικό DASYLab (Σχήμα 2.5) επιτρέπει τον χειρισμό και την καταγραφή αναλογικών και ψηφιακών δεδομένων. Τα δεδομένα αυτά συλλέγονται από χωριστές μονάδες εισαγωγής όπως είναι οι κάρτες A/D ή οι κάρτες D/A οι οποίες συνδέονται με τον υπολογιστή και οι οποίες οδηγούνται μέσα από το λογισμικό DasyLab (DasyLab, 2007)

Το DasyLab προσφέρει ένα γραφικό περιβάλλον το οποίο απλοποιεί και τις πιο σύνθετες διαδικασίες απεικόνισης και καταγραφής δεδομένων. Μέσω του γραφικού περιβάλλοντος εισάγονται τα κατάλληλα σύμβολα στο φύλλο εργασίας και συνδέονται με καλώδια. Τα σύμβολα αυτά αντιπροσωπεύουν είτε μονάδες εισαγωγής, είτε μονάδες επεξεργασίας, είτε μονάδες απεικόνισης, είτε μονάδες προσομοίωσης οργάνων ενώ οι συνδετήριοι αγωγοί αντιπροσωπεύουν την ροή των σημάτων.



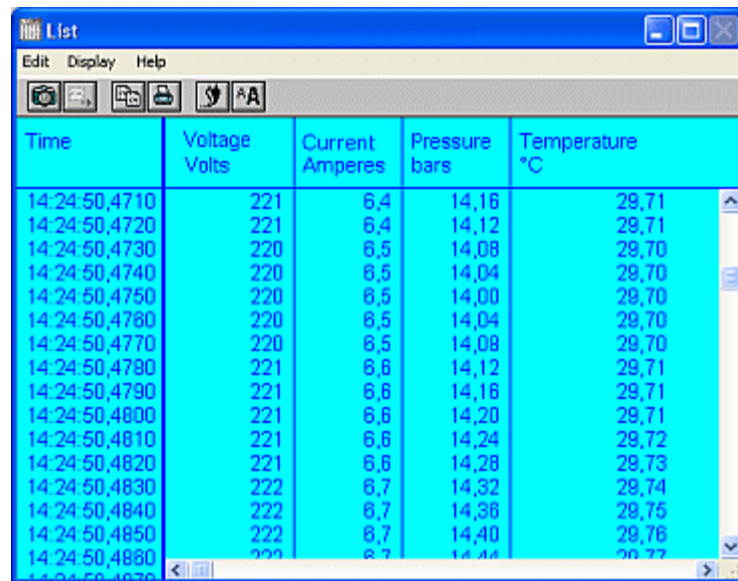
Σχήμα 2.5: Σχεδιάγραμμα λογισμικού DASYLab (DasyLab, 2007)

Το DasyLab μπορεί να ικανοποιήσει και τις πιο σύνθετες απαιτήσεις όσο αφορά τον έλεγχο και την καταγραφή σημάτων και υποστηρίζει περισσότερους από 250 τρόπους εισαγωγής δεδομένων. Επίσης επιτρέπει γρήγορους ρυθμούς δειγματοληψίας ακόμα κάτω από λειτουργικό σύστημα Windows.

Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Το DasyLab μπορεί να απεικονίσει στην οθόνη τα δεδομένα που λαμβάνει ταυτόχρονα από ένα ή περισσότερα κανάλια με μορφή καταλόγων χρησιμοποιώντας την μπάρα κύ-

λίσης μπορεί ο χρήστης να ανατρέξει σε ήδη καταγεγραμμένες τιμές καθώς συνεχίζονται οι μετρήσεις από το σύστημα καταγραφής.

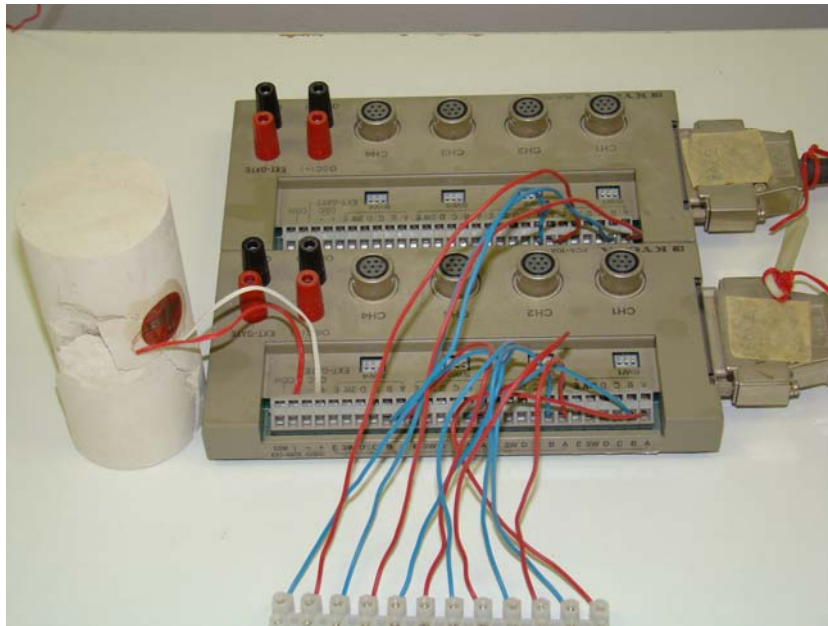


Time	Voltage Volts	Current Amperes	Pressure bars	Temperature °C
14:24:50,4710	221	6,4	14,16	29,71
14:24:50,4720	221	6,4	14,12	29,71
14:24:50,4730	220	6,5	14,08	29,70
14:24:50,4740	220	6,5	14,04	29,70
14:24:50,4750	220	6,5	14,00	29,70
14:24:50,4760	220	6,5	14,04	29,70
14:24:50,4770	220	6,5	14,08	29,70
14:24:50,4780	221	6,6	14,12	29,71
14:24:50,4790	221	6,6	14,16	29,71
14:24:50,4800	221	6,6	14,20	29,71
14:24:50,4810	221	6,6	14,24	29,72
14:24:50,4820	221	6,6	14,28	29,73
14:24:50,4830	222	6,7	14,32	29,74
14:24:50,4840	222	6,7	14,36	29,75
14:24:50,4850	222	6,7	14,40	29,76
14:24:50,4860	222	6,7	14,44	29,77

Σχήμα 2.6: Απεικόνιση αποτελεσμάτων σε καταλόγους (Dasylab, 2007)

2.2.4.2 Κάρτα Kyowa PCD-200A και Λογισμικό

Η κάρτα PCD-200A (Σχήμα 2.8) είναι μια κάρτα καταγραφής αναλογικών σημάτων από ηλεκτρικά μυκηνσιόμετρα από 4 καναλιών που παρεμβάλλεται κατευθείαν στην θύρα επέκτασης (slot) ενός IBM-PC/AT H/Y ή ένα συμβατό πρότυπο. Έτσι χρησιμοποιώντας την κάρτα αυτή είναι δυνατή η άμεση καταγραφή φυσικών ποσοτήτων που προέρχονται από ηλεκτρικά μυκηνσιόμετρα ή ηλεκτρικά LVDT. Η κάρτα PCD-200A οδηγείται από λογισμικό που για την περίπτωση του συστήματος που είναι εγκατεστημένο στο Εργαστήριο Μηχανικής Πετρωμάτων αποτελείται από ρουτίνες που είναι γραμμένες σε γλώσσα Quick BASIC. Η κάρτα επικοινωνεί μέσω ειδικού καλωδίου με την βάση προσαρμογής των ηλεκτρικών μυκηνσιομέτρων στις οποίες βάσεις καταλήγουν οι απολήξεις των ηλεκτρικών καλωδίων των αντίστοιχων μυκηνσιομέτρων (Σχήμα 2.7)



Σχήμα 2.7: Βάση προσαρμογής ηλεκτρικών μυκηνοσιόμετρων.

Το Εργαστήριο Μηχανικής Πετρωμάτων διαθέτει 2 τέτοιες κάρτες τοποθετημένες στον ίδιο υπολογιστή και κατά συνέπεια έχει την δυνατότητα ταυτόχρονης μέτρησης μέχρι 8 καναλιών σημάτων που προέρχονται από ηλεκτρικά μυκηνοσιόμετρα.

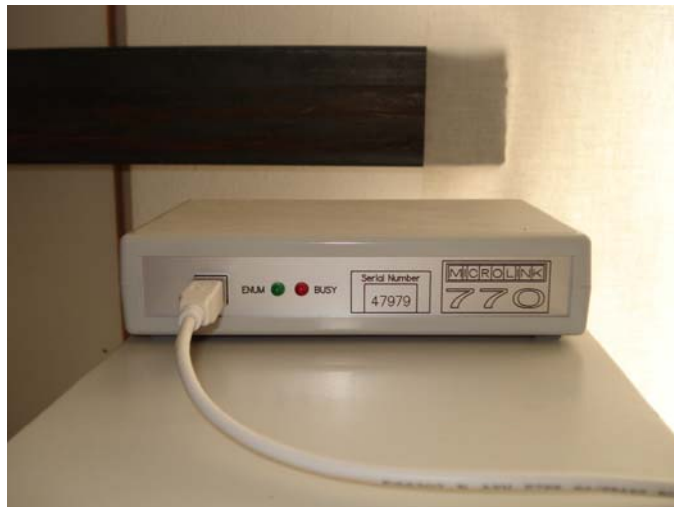


Σχήμα 2.8: Απεικόνιση κάρτας KYOWA PCD-200A (KYOWA, Instruction Manual)

2.2.4.3 Συσκευή Microlink 770 και Λογισμικό Windmill

Microlink 770

Η μονάδα Microlink 770 (Σχήμα 2.9) συνδέεται με μια θύρα USB ενός υπολογιστή και παρέχει μέχρι 16 διαφορεικά κανάλια εισαγωγής αναλογικών σημάτων. Υποστηρίζεται από το λογισμικό Windmill και Streamer, το οποίο λειτουργεί σε περιβάλλον Windows και στην συγκεκριμένη περίπτωση σε περιβάλλον Windows xp Professional (Microlink, 2007).



Σχήμα 2.9: Απεικόνιση μονάδας Microlink 770

Χαρακτηριστικά Γνωρίσματα

Στα πλεονεκτήματα της μονάδας αυτής περιλαμβάνονται τα ακόλουθα:

- Γρήγορη και εύκολη στην εγκατάσταση.
- Έχει την δυνατότητα ταυτόχρονων διαφορετικών τύπων μετρήσεων.
- Έχει την δυνατότητα εύκολης επιλογής της συχνότητας δειγματοληψίας.
- Έχει την δυνατότητα συγχρονισμού με εξωτερικό ρολόι αντί για το ρολόι του υπολογιστή.

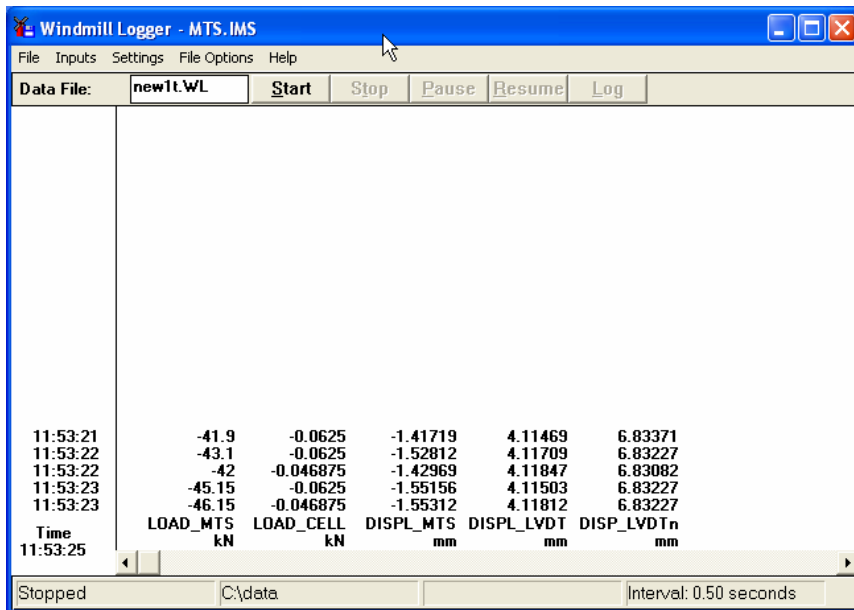
Windmill

Το λογισμικό Windmill συνδέεται άμεσα με την μονάδα Microlink 770 και επιτρέπει τον προγραμματισμό της μονάδας και στην συνέχεια την καταγραφή και απεικόνιση

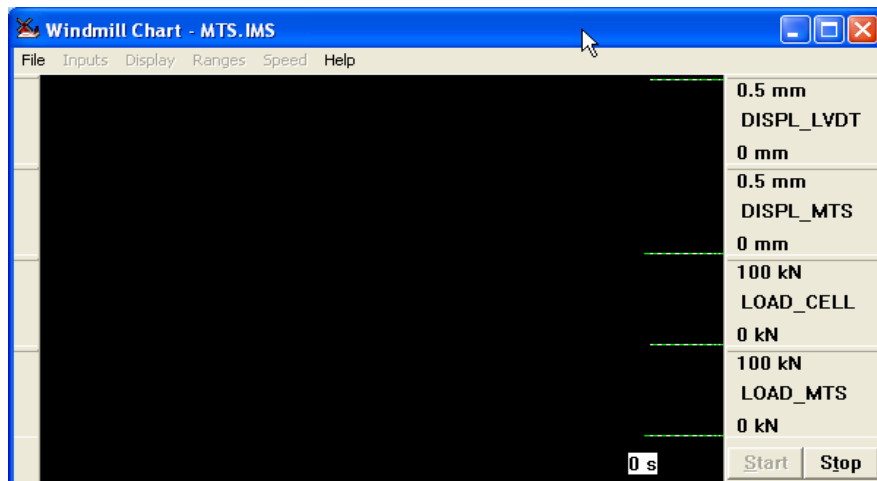
των δεδομένων των μετρήσεων. Στα σχήματα 2.10 και 2.11 φαίνονται οι τυπικές ομαδοποιήσεις καναλιών μετρήσεων ανάλογα με τις ανάγκες των δοκιμών που διεξάγονται στο Εργαστήριο Μηχανικής Πετρωμάτων. Επίσης στο σχήμα 2.10 φαίνεται ένα τυπικό αρχείο καταγραφής δεδομένων από μια τέτοια δοκιμή.

Χαρακτηριστικά γνωρίσματα

- Εύκολο στην χρήση δεν απαιτείται κανένας προγραμματισμός .
- Καταγραφή δεδομένων: θερμοκρασία, παραμόρφωση, πίεση, θέση, τάση, ρεύμα, ροή, υγρασία, συγκέντρωση, κ.λ.π.
- Κατασκευή διαγραμμάτων σε πραγματικό χρόνο
- Ψηφιακά αποτελέσματα
- Έλεγχος αναλογικών αποτελεσμάτων
- Ένδειξη συναγερμών σε όλες τις εισαγωγές
- Καταγραφή δεδομένων ενός πειράματος σε Excel, ή σε άλλο λογισμικό Windows, σε πραγματικό χρόνο
- Ο ρυθμός δειγματοληψίας μπορεί να μεταβάλλεται από λιγότερο από ένα ανά ώρα μέχρι 10 δείγματα ανά δευτερόλεπτο ανά κανάλι, ενώ είναι δυνατή η καταγραφή 200 δειγμάτων ανά δευτερόλεπτο από 20 ή περισσότερα κανάλια.



Σχήμα 2.10: Λογισμικό πρόγραμμα Windmill



Σχήμα 2.11: Πρόγραμμα του Windmill λογισμικού απεικόνισης διαγραμμάτων

2.3 Συσκευή φόρτισης Tri-Scan 50kN

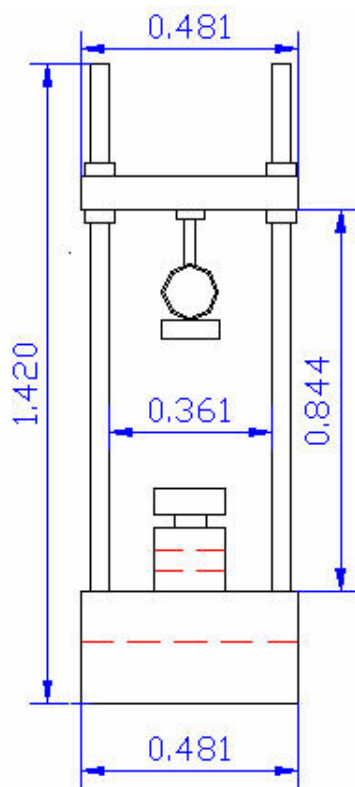
2.3.1. Σύστημα φόρτισης

Η συσκευή Tri-Scan 50kN (Σχήμα 2.12) έχει σχεδιαστεί ειδικά για εργαστηριακές δοκιμές μονοαξονικής ή τριαξονικής φόρτισης εδάφους ή σκυροδέματος. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της συσκευής φόρτισης που υπάρχει στο Εργαστήριο Μηχανικής Πετρωμάτων του Πολυτεχνείου Κρήτης δίνονται παρακατω:

- Εύρος ταχύτητας φόρτισης 0-10.00000mm/min
- Ρύθμιση της ταχύτητας της πλάκας φόρτισης έως 99.99mm/min
- Ενσωματωμένος μικροεπεξεργαστής
- Οθόνη LCD 75x 125 mm
- Πληκτρολόγιο χειρισμού με 20 πλήκτρα
- Σφαιρική κεφαλή



Σχήμα 2.12: Συσκευή φόρτισης Tri-scan 50 kN



Μέγιστη φόρτιση (kN)	50
Εύρος ταχύτητας φόρτισης (mm/min)	0-10.00000
Κατακόρυφο άνοιγμα (cm)	100
Ρύθμιση πλάκας (mm/min)	0-99.99999
Βάρος (kg)	110
Τροφοδοσία (V)	110-240
Διαστάσεις (cm) (Μήκος x Πλάτος x Ύψος)	43 x 48 x 142
Διάμετρος πλάκας φόρτισης (cm)	15.8
Οριζόντιο άνοιγμα (cm)	36

Σχήμα 2.13: Σκαρίφημα και τεχνικά χαρακτηριστικά συσκευής φόρτισης Tri-scan 50kN

2.3.2. Σύστημα ελέγχου

Ο έλεγχος της Triscan γίνεται από την ενσωματωμένη κονσόλα ελέγχου (Σχήμα 2.14). Η κονσόλα αυτή, μπορεί να επιβάλλει μόνο έλεγχο μετατόπισης δηλαδή να προσδιορίζει τον ρυθμό κίνησης του εμβόλου σε mm/sec. Το σύστημα ανατροφοδοτείται δηλαδή ελέγχει το κατά πόσο η επιβαλλόμενη μετατόπιση διαφέρει από την εφαρμοζόμενη στο δοκίμιο



Σχήμα 2.14: Κονσόλα ελέγχου της συσκευής φόρτισης Triscan 50kN

2.3.3 Σύστημα μέτρησης φορτίου

Η μέτρηση του φορτίου γίνεται με εξωτερικό κελί φορτίου των 50 kN της εταιρίας Applied Measurements Limited τύπου DBBSE-5T (Σχήμα 2.15). Η καταγραφή της μετατόπισης γίνεται έμμεσα ή/και άμεσα. Με τον έμμεσο τρόπο ανάγεται ο χρόνος εκτέλεσης του πειράματος σε γραμμική μεταβολή μετατόπισης ενώ άμεσα γίνεται με LVDT.



Σχήμα 2.15: Εξωτερικό κελί φορτίου 50kN και σφαιρική κεφαλή

2.3.4 Σύστημα μέτρησης μετατόπισης

Ο γραμμικός μεταβλητός διαφορικός μορφοτροπέας (LVDT, Linear Variable Differential Transducer) είναι ένας τύπος ηλεκτρικού μορφοτροπέα που χρησιμοποιείται για την μέτρηση της γραμμικής μετατόπισης. Ο μορφοτροπέας έχει τρεις σωληνοειδής σπείρες που τοποθετούνται δίπλα-δίπλα γύρω από ένα σωλήνα. Η κεντρική σπείρα είναι η πρωτεύουσα και οι δυο εξωτερικές σπείρες είναι οι δευτερεύουσες. Ένας κυλινδρικός σιδη-

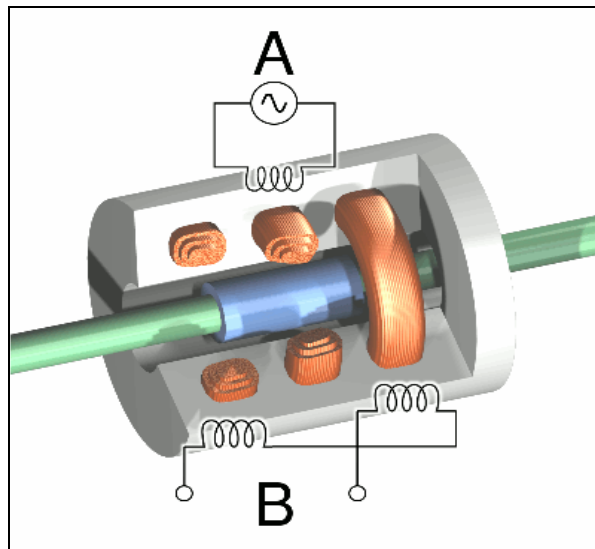
ρομαγνητικός πυρήνας, που συνδέεται με το αντικείμενο του οποίου η θέση πρόκειται να μετρηθεί, ολισθαίνει κατά μήκος του άξονα του σωλήνα (Wikipedia, 2007)

Ένα εναλλασσόμενο ρεύμα οδηγείται μέσω της αρχικής σπείρας, προκαλώντας μια τάση σε κάθε δευτερεύουσα σπείρα ανάλογη προς την αμοιβαία αυτεπαγωγή της με την αρχική. Η συχνότητα είναι συνήθως της τάξεως από 1 έως 10 kHz.

Καθώς κινείται ο πυρήνας, αυτές οι αμοιβαίες αυτεπαγωγές αλλάζουν, με συνέπεια να μεταβάλλονται οι τάσεις στις δευτερεύουσες σπείρες. Οι σπείρες συνδέονται σε αντίθετες σειρές, έτσι ώστε η τάση παραγωγής να είναι η διαφορά μεταξύ των δύο δευτερευόντων τάσεων. Όταν ο πυρήνας είναι στην κεντρική θέση του, ισαπέχοντας μεταξύ των δύο δευτερευόντων, ίσες αλλά αντίθετες τάσεις προκαλούνται σε αυτές τις δύο σπείρες, έτσι η τάση παραγωγής είναι μηδέν.

Όταν ο πυρήνας μετατοπίζεται σε μια κατεύθυνση, η τάση στην μια σπείρα αυξάνεται ενώ στην άλλη μειώνεται, αναγκάζοντας την τάση παραγωγής να αυξηθεί από μηδέν σε μια μέγιστη τιμή. Αυτή η τάση είναι σε φάση με την αρχική τάση. Όταν ο πυρήνας κινείται προς την άλλη κατεύθυνση, η τάση παραγωγής αυξάνεται επίσης από μηδέν σε μια μέγιστη τιμή, αλλά η φάση της είναι αντίθετη από την αρχική. Το μέγεθος της τάσης παραγωγής είναι ανάλογο προς την απόσταση που κινείται ο πυρήνας ως εκ τούτου αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο η συσκευή περιγράφεται ως "γραμμική". Η φάση της τάσης δείχνει την κατεύθυνση της μετατόπισης.

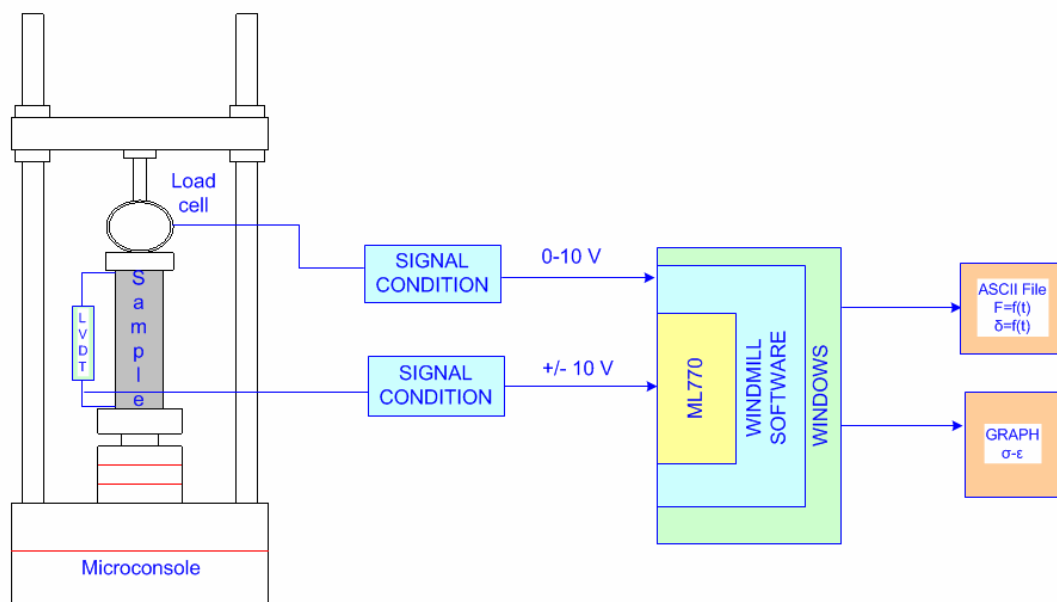
Επειδή ο ολισθαίνοντας πυρήνας δεν αγγίζει το εσωτερικό του σωλήνα, μπορεί να κινηθεί χωρίς τριβή, συνεπώς το LVDT αποτελεί μια ιδιαίτερα αξιόπιστη συσκευή. Η απουσία οποιωνδήποτε ολισθαινόντων ή περιστρεφόμενων επαφών επιτρέπει στο LVDT να είναι εντελώς μονωμένο απέναντι στο περιβάλλον.



Σχήμα 2.16: Σχηματική παράσταση του εσωτερικού LVDT (Wikipedia, 2007).

2.3.5 Σύστημα καταγραφής

Τα αναλογικά σήματα μετατόπισης και φορτίου παραλαμβάνονται από την συσκευή *ML770* και καταγράφονται στον υπολογιστή μέσω του λογισμικού *WINDMILL LOG-GER* (βλέπε ενότητα 2.2.4).



Σχήμα 2.17: Σχηματικό διάγραμμα λήψης δεδομένων συστήματος φόρτισης Triscan

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

Εργαστηριακά Πειράματα Δοκιμής Μονοαξονικής Θλίψης σε Μάρμαρο Διονύσου

Το κεφάλαιο αυτό περιγράφει τις εργαστηριακές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο Μηχανικής Πετρωμάτων του Τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων στα πλαίσια της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας και συγκεκριμένα, τον τρόπο κατασκευής/μορφοποίησης των δοκιμίων, τη διαδικασία που ακολουθείται, τους αναγκαίους υπολογισμούς και τέλος, τα αποτελέσματα.

3.1 Σκοπός της Δοκιμής

Αντικείμενο της δοκιμής της μονοαξονικής θλίψης είναι ο προσδιορισμός της αντοχής της μονοαξονικής θλίψης ενός πετρώματος χρησιμοποιώντας δοκίμια κανονικής γεωμετρίας.

3.2 Προδιαγραφές της δοκιμής Μονοαξονικής θλίψης

Η Διεθνής Ένωση για τη Μηχανική των Πετρωμάτων (ISRM) έχει προτείνει μια σειρά διαδικασιών πειραματικής μεθοδολογίας για τον προσδιορισμό διαφόρων φυσικών ιδιοτήτων στα πετρώματα, όπως είναι η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη. Η διαδικασία αυτή πρέπει να εφαρμόζεται, όπου είναι δυνατόν, ώστε οι μετρήσεις να είναι τυποποιημένες και τα αποτελέσματα να είναι συγκρίσιμα μ'αυτά που αναφέρονται στη βιβλιογραφία (Αγιουτάντης, 2002).

3.2.1 Εξοπλισμός

Ο εξοπλισμός πρέπει να περιλαμβάνει τα ακόλουθα όργανα και συσκευές (Αγιουτάντης, 2002):

1. **Συσκευή Δόκιμης:** Η συσκευή πρέπει να μπορεί να επιβάλλει σταθερό ρυθμό φόρτισης στο δοκίμιο και συγχρόνως να έχει τη δυνατότητα να μετρήσει ή/και

να καταγράψει το επιβαλλόμενο φορτίο. Στην διπλωματική αυτή όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 2 εξετάζονται οι συσκευές φόρτισης MTS 315 και Triscan 50kN.

2. **Πλάκες φόρτισης:** Οι πλάκες φόρτισης χρησιμεύουν στο να μεταφέρουν το φορτίο στο δοκίμιο και πρέπει να είναι παράλληλες μεταξύ τους. Στην περίπτωση που υπάρχει σφαιρική κεφαλή έδρασης που δεν πληροί τις προδιαγραφές πρέπει να αφαιρεθεί ή να στερεωθεί στην οριζόντια θέση.
3. **Χαλύβδινοι Δίσκοι:** Οι δίσκοι τοποθετούνται ανάμεσα στις πλάκες φόρτισης και στο δοκίμιο και αποσκοπούν στο να ελαττώσουν την υπερβολική πλευρική παραμόρφωση του δοκιμίου λόγω δυνάμεων τριβής στα σημεία επαφής. Η σκληρότητα των δίσκων πρέπει να είναι μεγαλύτερη από HRC58 και η διάμετρος τους πρέπει να είναι μεταξύ D και D+2 mm, όπου D η διάμετρος του δοκιμίου. Το πάχος των δίσκων πρέπει να είναι τουλάχιστον 15 mm ή D/3 και οι παράλληλες επιφάνειες τους πρέπει να έχουν ανοχή μικρότερη από 0.005mm.
4. **Σφαιρική Κεφαλή Έδρασης :** Η σφαιρική κεφαλή έδρασης πρέπει να βρίσκεται στο πάνω μέρος του δοκιμίου και ο άξονας της πρέπει να είναι ευθυγραμμισμένος με τον άξονα του δοκιμίου και το κέντρο της πλάκας φόρτισης. Αν η μηχανή δοκιμής δεν διαθέτει σφαιρική κεφαλή έδρασης (η οποία είναι ενσωματωμένη συνήθως στην επάνω πλάκα φόρτισης), τότε ο ένας από τους δυο χαλύβδινους δίσκους πρέπει να έχει αυτή τη δυνατότητα. Η κεφαλή πρέπει να λιπανθεί με ελαφρό ορυκτέλαιο

3.2.2 Προετοιμασία των Δοκιμίων

Οι προδιαγραφές αναφέρουν ότι :

1. Τα δοκίμια πρέπει να είναι κυλινδρικά με διάμετρο κατά προτίμηση μεγαλύτερη ή ίση με NX (δηλαδή περίπου 54 mm) και ύψος 2.5-3 φορές τη διάμετρο τους.
2. Τα δοκίμια πρέπει να προετοιμασθούν χρησιμοποιώντας μόνον καθαρό νερό (στα κοπτικά και λειαντικά εργαλεία) και όχι να γίνεται χρήση πρόσθετων υλικών για ενίσχυση ή κατεργασία των άκρων του δοκιμίου. Οι κυλινδρικές επιφάνειες πρέπει να είναι λείες με ανοχή 0.025 mm.

3. Οι βάσεις του κυλινδρικού δοκιμίου πρέπει να είναι παράλληλες μεταξύ τους με ανοχή περίπου 0.02 mm και ορθογώνιες ως προς τον άξονα συμμετρίας του δοκιμίου με ανοχή 0.001 ακτίνα.
4. Τα δοκίμια πρέπει να φυλάσσονται κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να μην επηρεάζεται η φυσική τους υγρασία και συνήθως το διάστημα το οποίο φυλάσσονται δεν υπερβαίνει τις 30 ημέρες.

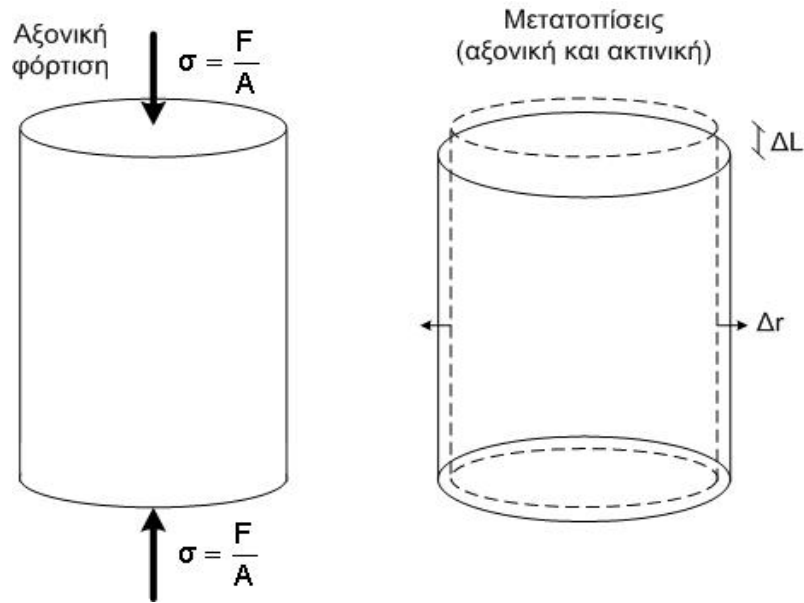
3.2.3 Διαδικασία

1. Η διάμετρος του δοκιμίου μετρείται συνολικά 5 φορές με ακρίβεια 0.1 mm και υπολογίζεται ο μέσος όρος. Η μεση διάμετρος χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του εμβαδού της επιφάνειας φόρτισης. Το ύψος του δοκιμίου μετρείται με ακρίβεια 1.0 mm.
2. Ο ελάχιστος αριθμός δοκιμών που απαιτείται για τη δόκιμη είναι 6.
3. Οι σφαιρικές κεφαλές έδρασης πρέπει να λιπανθούν με ελαφρύ ορυκτέλαιο.
4. Το φορτίο κατά τη διάρκεια της δοκιμής πρέπει να επιβάλλεται χωρίς διακοπές με σταθερό ρυθμό φόρτισης μεταξύ 0.5-1.0 MPa/sec.

Τα αποτελέσματα που καταγράφονται στον ηλεκτρονικό υπολογιστή(H/Y) είναι το φορτίο F σε kN και η μετατόπιση ΔL σε mm. Από τις τιμές υπολογίζεται το μέτρο ελαστικότητας E (Young's modulus) από τον λόγο τάσης (stress) σ προς παραμόρφωσης (strain) ε:

$$Y = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/A_0}{\Delta L/L_0} = \frac{F \cdot L_0}{A_0 \cdot \Delta L} \quad (2.1)$$

όπου E το μέτρο ελαστικότητας, F η δύναμη που εφαρμόζεται στο δοκίμιο, A₀ η αρχική επιφάνεια του δοκιμίου όπου εφαρμόζεται η F, ΔL η μετατόπιση που υφίσταται το δοκίμιο κατά την φόρτιση και L₀ το αρχικό μήκος του δοκιμίου. Μετατρέποντας τις τιμές του φορτίου σε αξονική τάση (σ) όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1 και τις μετατοπίσεις σε ανηγμένη παραμόρφωση (ε) όπως παραπάνω κατασκευάζεται ένα διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης (σ-ε) όπως στο Σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.1: Σχηματική παράσταση αξονικής φόρτισης σε κυλινδρικό δοκίμιο

Για την προπαρασκευή των δοκιμίων στο εργαστήριο προτείνονται τα εξής στάδια (Αγιουτάντης, 2002):

1. Διάτρηση του ακανόνιστου δείγματος και λήψη πυρήνων υλικού, σύμφωνα με τις αντίστοιχες προδιαγραφές, Γι' αυτό το σκοπό, το δείγμα στερεώνετε σε κατάλληλη βάση διάτρησης (drill press).
2. Κοπή των άκρων των κυλίνδρων (πυρήνων) σε κατάλληλο δισκοπρίονο με αδμαντοτροχό (diamond saw).
3. Λείανση των βάσεων των κυλίνδρων σε κατάλληλο λειαντικό μηχάνημα (grinding machine).
4. Μέτρηση των διαστάσεων των δοκιμίων με τις ανοχές που προβλέπει η σχετική διαδικασία.

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν για το σκοπό αυτής της εργασίας, προέκυψαν από κύβους μαρμάρου με προσανατολισμένες τις πλευρές τους που ελήφθησαν από τα Λατομεία Αττικής της εταιρίας Μάρμαρα Διονύσου ΑΕΒΕ.



Σχήμα 3.2: α) Εργαστηριακός πυρηνολήπτης δοκιμίων, β) Εργαστηριακός δίσκος κοπής δοκιμίων, γ) Εργαστηριακός λειαντής δοκιμίων.

3.3 Ιδιότητες Μαρμάρου Διονύσου

Το μάρμαρο που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα εξορύσσεται τόσο με υπόγεια όσο και με υπαίθρια εκμετάλλευση σε λατομείο που βρίσκεται σε απόσταση περίπου 30 km βόρεια από το κέντρο της Αθήνας. Οι μηχανικές και φυσικές του ιδιότητες, (κυρίως λόγω της δομής, των χαρακτηριστικών των κρυστάλλων του ασβεστίτη και του συνδετικού υλικού, της απουσίας ελαττωμάτων στη δομή και της καθαρότητας του), είναι υψηλές και το καθιστούν ποιοτικά ως το καλύτερο μάρμαρο της χώρας και από τα καλύτερα του κόσμου.

Χρησιμοποιείται σήμερα εκτεταμένα για την αποκατάσταση του Παρθενώνα, καθώς επιδεικνύει συγκρίσιμη συμπεριφορά με το Πεντελικό μάρμαρο, το οποίο είχε χρησιμοποιηθεί από τους αρχαίους Αθηναίους για την κατασκευή του εν λόγω μνημείου.

3.3.1. Φυσικές Ιδιότητες

Το Διονυσιακό μάρμαρο αποτελείται από 98% ασβεστίτη, 0.5% μοσχοβίτη, 0.3% σερίκίτη, 0.2% χαλαζία και 0.1% χλωρίτη. Έχει πυκνότητα 2717 kg/m^3 , φαινόμενη πυκνότητα 2717 kg/m^3 και συντελεστή απορρόφησης κατά βάρος περίπου 0.11%. ο συντελεστής θερμικής διαστολής είναι περίπου $9 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ μεταξύ 15°C και 100°C . Το πορώδες είναι ιδιαίτερα χαμηλό και κυμαίνεται μεταξύ 0.3% στην παρθενική κατάσταση και

0.7% μετά την επίδραση διαφόρων φυσικών ή και τεχνητών διαβρωτικών παραγόντων. Το μέγεθος των κόκκων είναι της τάξεως των 0.43×10^{-3} m, οι κρύσταλλοι του έχουν πολυγωνικό σχήμα με διαστάσεις μεταξύ 900 μm x 650 μm και 959 μm x 874 μm και είναι σχεδόν ομοιόμορφοι όσον αφορά τις διαστάσεις τους.

Το χρώμα του Διονυσιακού μαρμάρου είναι λευκό με λίγες σταχτόχρωμες φλέβες κατά τη διεύθυνση της σχιστότητας του υλικού. Λόγω της παρουσίας μικρών ποσοτήτων μοσχοβίτη και χλωρίτη εντοπίζονται τοπικά ασημόχρωμες περιοχές (Βαρδουλάκης κ.α., 2002).

3.3.2 Μηχανικές Ιδιότητες

Σχετικά με τις μηχανικές ιδιότητες του μαρμάρου Διονύσου, τα δεδομένα που αναφέρονται στην ελληνική και διεθνή βιβλιογραφία, ποικίλουν εντός ευρέων ορίων. Οι τιμές της εφελκυστικής αντοχής κυμαίνονται μεταξύ 2.4 και 19.4 MPa, ενώ για το μέτρο ελαστικότητας μεταξύ 23 και 90 GPa. Η διακύμανση αυτή, οφείλεται κυρίως στις διαφορετικές συνθήκες υπό τις οποίες εκτελούνται τα πειράματα, αλλά και στην ανισοτροπία η οποία χαρακτηρίζει το Διονυσιακό Μάρμαρο και επηρεάζει τη μηχανική συμπεριφορά του. Το Διονυσιακό μάρμαρο μπορεί να θεωρείται ως εγκαρσίως ισότροπο υλικό με έναν άξονα ελαστικής συμμετρίας απείρου τάξεως, (Βαρδουλάκης κ.α., 2002).

3.4 Δοκιμές θλίψης στις συσκευές MTS και Triscan

Το δοκίμιο του Μαρμάρου Διονύσου που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα αρχικά επαλείφθηκε με βαζελίνη στις πλευρές που ακουμπάνε στις πλάκες φόρτισης. Το δοκίμιο τοποθετήθηκε μεταξύ των πλακών φόρτισης της συσκευής MTS (Σχήμα 3.3) έτσι ώστε το δοκίμιο να φορτιστεί μέσα στην ελαστική του περιοχή. Στην συνέχεια το ίδιο το δοκίμιο τοποθετήθηκε στην συσκευή Triscan και φορτίστηκε πάλι με έλεγχο μετατόπισης στα ίδια επίπεδα όπως και στην MTS.

Τα μεγέθη που μετρήθηκαν από την δοκιμή είναι ο χρόνος (sec), η μετατόπιση των πλακών φόρτισης (mm), το φορτίο (kN) και η μετατόπιση (mm) τόσο στο δοκίμιο που ονομάστηκε mg209 όσο και στο άνω τμήμα κάθε συσκευής φόρτισης όπως φαίνεται ενδεικτικά στο σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3: Δοκιμή Μονοαξονικής Θλίψης σε μάρμαρο Διονύσου στη συσκευή φόρτισης MTS

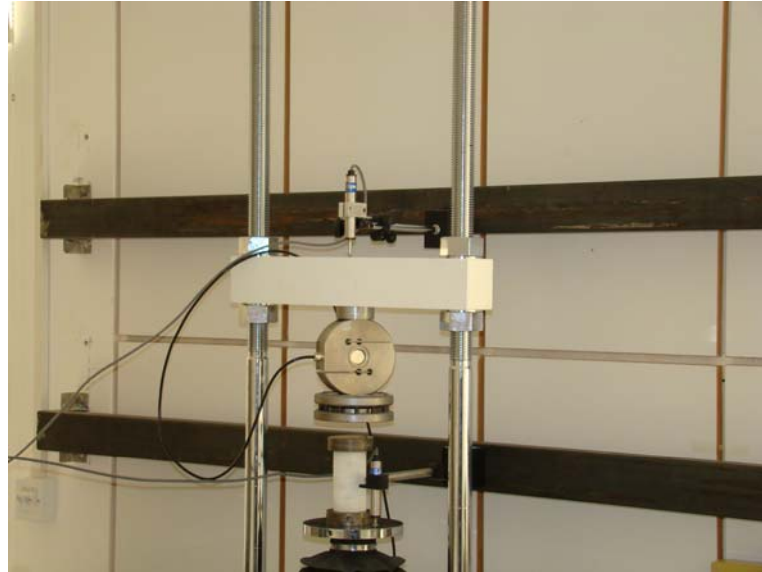
Στον πίνακα 3.1 παρουσιάζεται ενδεικτικά μέρος των πρωτογενών δεδομένων για το δοκίμιο mg209 για την συσκευή φόρτισης Triscan. Το βήμα φόρτισης για τις δοκιμές αυτές ορίστηκε σε 0.005 mm/step ούτως ώστε η διαδικασία φόρτισης να είναι αργή και να μπορεί να πάρει κανείς με ακρίβεια τις μεταβολές της μετατόπισης σε κάθε βήμα φόρτισης και επιπρόσθετα ο ρυθμός φόρτισης να μπορεί να είναι εύκολα προγραμματιζόμενος και στις δυο μηχανές φόρτισης.

Πίνακας 3.1: Πειραματικά αποτελέσματα συσκευής φόρτισης

Time	Load Triscan	LVDT Δοκίμιο	LVDT Μηχανή
(Sec)	(kN)	(mm)	(mm)
11:37:27	0,0000	5,4753	5,7642
11:37:28	0,0000	5,4794	5,7627
11:37:29	0,0000	5,4873	5,7627

11:37:30	0,0109	5,4959	5,7642
11:37:31	0,0281	5,4986	5,7656
11:37:32	0,0891	5,5041	5,7642
11:37:33	0,1203	5,5086	5,7656
11:37:34	0,1609	5,5089	5,7685
11:37:35	0,1984	5,5113	5,7671
11:37:36	0,2266	5,5179	5,7685
11:37:37	0,2875	5,5199	5,7685
11:37:38	0,3297	5,5275	5,7728
.....
11:42:17	40,5500	6,5656	6,1375

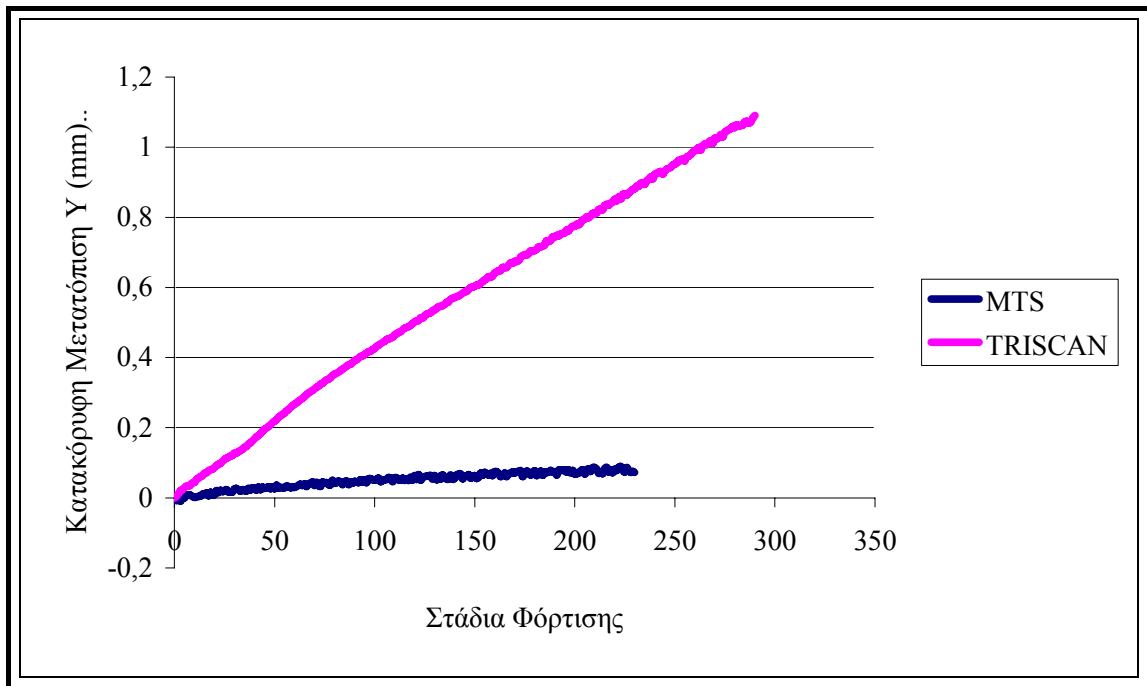
Στο σχήμα 3.5, παρουσιάζεται το διάγραμμα της βράχυνσης του δοκιμίου σαν συνάρτηση των σταδίων φόρτισης και για τις δυο δοκιμές. Τα αποτελέσματα για την δοκιμή στη συσκευή MTS δείχνουν ότι η μέγιστη βράχυνση είναι της τάξεως του 0,073mm ενώ τα αποτελέσματα για την δοκιμή στη συσκευή Triscan δείχνουν ότι η βράχυνση πλησιάζει τα 1,09mm δηλαδή είναι περίπου 10 φορές μεγαλύτερη. Οι δοκιμές ολοκληρώθηκαν όταν επιτεύχθηκε σε κάθε περίπτωση στο φορτίο των 45 kN. Όπως φαίνεται στα σχήματα 3.5 και 3.6 η δοκιμή στην άκαμπτη μηχανή (MTS) ολοκληρώνεται σε μικρότερο χρονικό διάστημα (λιγότερα στάδια φόρτισης, 230) από την αντίστοιχη μη άκαμπτη (Triscan, 290 στάδια φόρτισης). Αυτό ερμηνεύεται από το γεγονός ότι με την άσκηση της μετατόπισης στο δοκίμιο παραμορφώνεται η μηχανή με συνέπεια την εκτόνωση του εντατικού πεδίου που δημιουργείται στο δοκίμιο και επομένως την ανάγκη περισσότερων βημάτων μετατόπισης για την επίτευξη του ίδιου τελικού φορτίου.



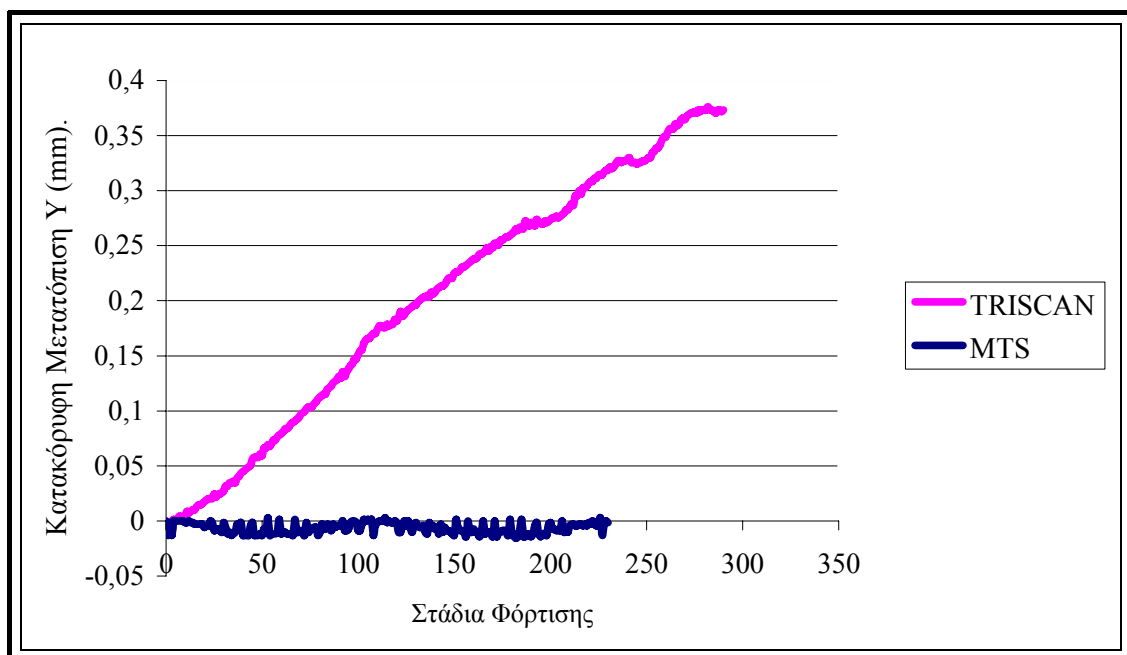
Σχήμα 3.4: Δοκιμή Μονοαξονικής Θλίψης σε Μάρμαρο Διονύσου στη συσκευή φόρτισης Triscan

Παράλληλα με τις μετρήσεις βράχυνσης του δοκιμίου με την χρήση LVDT έγινε και μια προσπάθεια μέτρησης της παραμόρφωσης του πλαισίου των μηχανών με ιδιαίτερη έμφαση στην παραμόρφωση του πλαισίου της μηχανής Triscan. Στην φωτογραφία (Σχήμα 3.4) φαίνεται το σύστημα που προσαρμόστηκε στον τοίχο του εργαστηρίου ούτως ώστε να υπάρξει ένα σταθερό σημείο ανάρτησης του LVDT μέσω του οποίου να μπορεί να γίνει παρακολούθηση της παραμόρφωσης του σκελετού της άκαμπτης μηχανής. Στο σχήμα 3.6 φαίνεται το διάγραμμα που προκύπτει από τις μετρήσεις μετατόπισης σαν συνάρτηση των σταδίων φόρτισης για σημείο επάνω στο οριζόντιο στέλεχος του πλαισίου φόρτισης της μηχανής MTS (σχήμα 3.3) και το αντίστοιχο σημείο της μηχανής Triscan (σχήμα 3.4). Παρατηρείται ότι MTS έχει μηδενική παραμόρφωση ενώ η Triscan παρουσιάζει παραμόρφωση της τάξεως των 0,37mm.

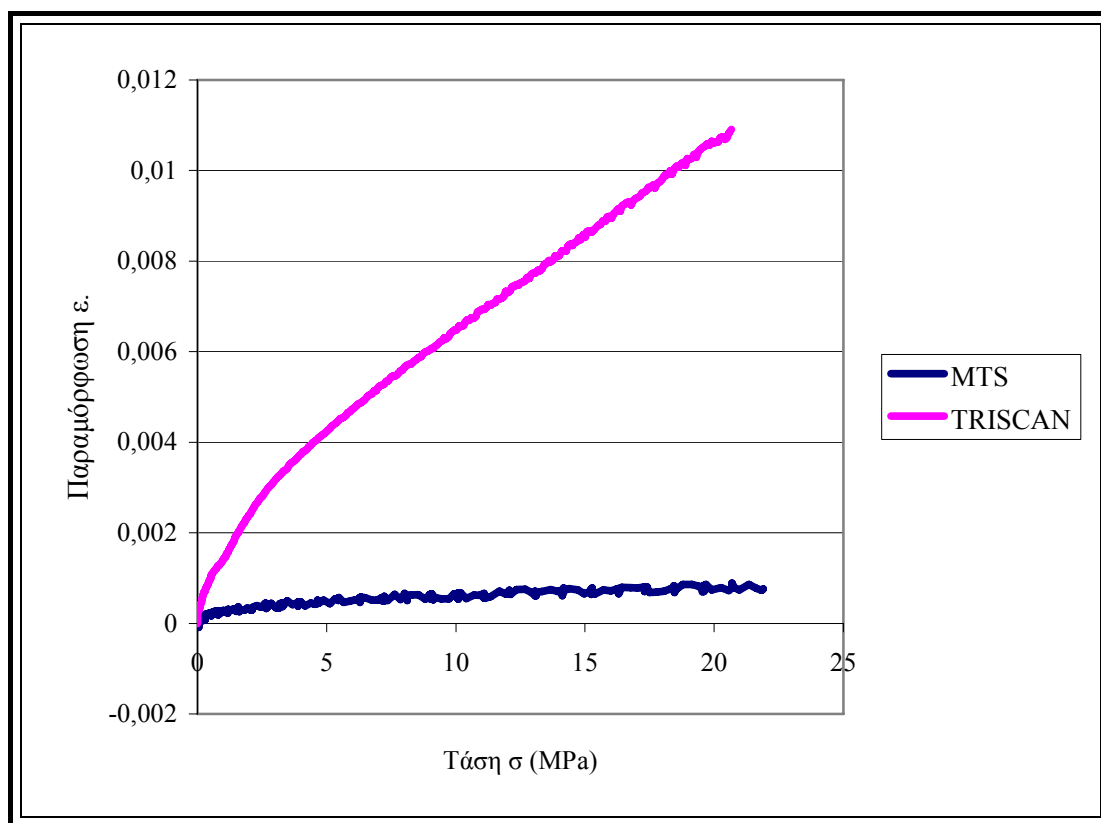
Στο σχήμα 3.7 φαίνεται το διάγραμμα της τάσης (MPa) σε συνάρτηση με την παραμόρφωση για τα δύο πειράματα που εκτελέστηκαν στις συσκευές φόρτισης MTS και Triscan. Όπως είναι φανερό η MTS παρουσιάζει σταθερή παραμόρφωση καθώς αυξάνεται η τάση και είναι της τάξεως των 0,0007 ενώ στην Tristan η παραμόρφωση συνεχώς αυξάνεται καθώς αυξάνεται η επιβολή τάσης και φτάνει σε μέγιστη τιμή 0,011.



Σχήμα 3.5: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων Y (mm) συναρτήσει των σταδίων φόρτισης για τις συσκευές φόρτισης MTS-Triscan για σημεία πάνω στο δοκίμιο.



Σχήμα 3.6: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων Y (mm) συναρτήσει των σταδίων φόρτισης των συσκευών φόρτισης MTS-Triscan για σημεία πάνω στην μηχανή.



Σχήμα 3.7: Διάγραμμα τάσης σ (MPa) παραμόρφωσης ϵ MTS-Triscan για το δοκίμιο

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

Αριθμητική Προσομοίωση της Δοκιμής Ανεμπόδιστης Θλίψης με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων

4.1 Γενικά

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται προσομοίωση της δοκιμής ανεμπόδιστης θλίψης με την Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων με το πρόγραμμα Marc Mentat 2005 της εταιρίας MSC

4.2 Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων

Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων (ΜΠΣ) είναι μια σχετικά νέα τεχνική η οποία βρίσκεται σε συνεχή εξέλιξη αφού συνδέεται με την ραγδαία εξέλιξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών (Fagan, 1992).

Η ευρύτατη χρήση της μεθόδου από τους μηχανικούς και τους επιστήμονες βασίζεται στην ικανότητα των πεπερασμένων στοιχείων να περιγράφουν και να αναλύουν προβλήματα που είναι εξαιρετικά πολύπλοκα και πολλές φορές, αδύνατο να επιλυθούν αναλυτικά. Η αναλυτική επίλυση ενός προβλήματος βασίζεται στην ανάπτυξη ενός μαθηματικού μοντέλου το οποίο μπορεί να αποδώσει τις ζητούμενες μεταβλητές σε οποιοδήποτε σημείο του υπό ανάλυση σώματος. Δυστυχώς η επίλυση αυτή μπορεί να γίνει μόνο για ορισμένα υπεραπλουστευμένα μοντέλα. Προβλήματα που αφορούν περίπλοκη γεωμετρία, ιδιότητες και συννοριακές συνθήκες είναι αδύνατον να επιλυθούν με αναλυτικές μεθόδους. Σε αυτή την περίπτωση οι αναλυτές πρέπει να καταφύγουν στη χρήση αριθμητικών μεθόδων μία εκ των οποίων είναι και αυτή των πεπερασμένων στοιχείων (Αγιουτάντης, 2002).

4.2.1 Αρχή της ΜΠΣ

Με τη ΜΠΣ, υπολογίζονται τα άγνωστα μεγέθη στους κόμβους, οι οποίοι δημιουργούνται από τη διαίρεση του πεδίου σε στοιχεία. Στη συνέχεια, με τη θεώρηση κατάλληλων συναρτήσεων, οι οποίες συνδέουν την κατανομή των μεγεθών στα εσωτερικά σημεία κάθε στοιχείου, είναι δυνατόν να υπολογιστεί η τιμή των μεγεθών αυτών σε κάθε σημείο του πεδίου μέσω των τιμών στους κόμβους του στοιχείου αυτού (Αγιουτάντης, 2002).

Οι βασικές αρχές που διέπουν τη ΜΠΣ στοιχείων δεν είναι ιδιαίτερα περίπλοκες. Η ΜΠΣ αποτελεί μια αριθμητική μέθοδο επίλυσης διαφορικών εξισώσεων σε συγκεκριμένο πεδίο ορισμού και με συγκεκριμένους περιορισμούς. Για να γίνει κατανοητή η μέθοδος, έστω ένα σώμα του οποίου ζητείται να βρεθεί η κατανομή μιας άγνωστης μεταβλητής όπως για παράδειγμα η μετατόπιση.

Αρχικά, το σώμα διαιρείται σε σύνολο μικρότερων γεωμετρικών μορφών (Σχήμα 3.1) γνωστών ως «στοιχεία» (elements). Τα στοιχεία αυτά θεωρούνται συνδεδεμένα μεταξύ τους σε συγκεκριμένα σημεία τα οποία ονομάζονται «κόμβους» (nodes). Η διαδικασία του διαμερισμού του σώματος σε μικρότερα στοιχεία ονομάζεται διακριτοποίηση.

Αναλυτικότερα, τα βήματα που ακολουθούνται κατά την εφαρμογή της ΜΠΣ είναι τα εξής (Αγιουτάντης, 2002):

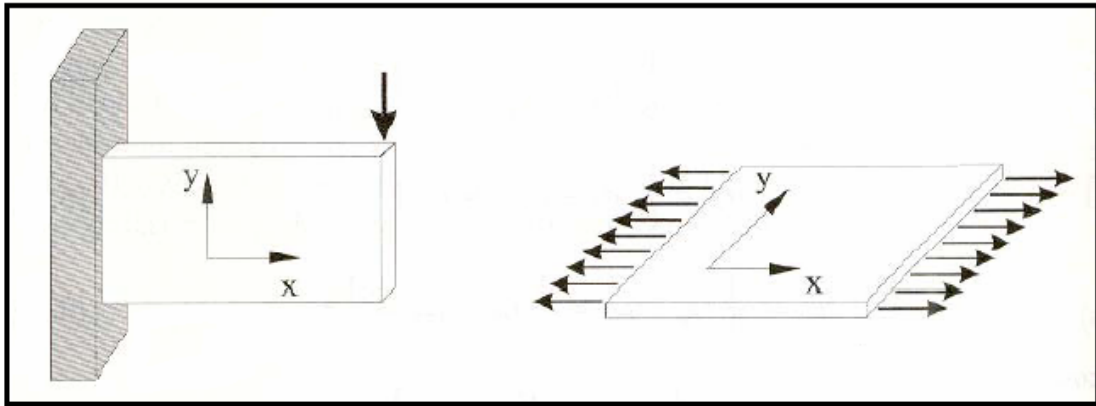
- Διακριτοποίηση (Discretisation) του μέσου ή διαίρεση του μέσου σε στοιχεία ή τμήματα (elements) με τη βοήθεια ιδεατών γραμμών ή επιφανειών (σχημα). Τα στοιχεία αυτά αποτελούνται από δυο ή περισσότερους κόμβους, οι οποίοι συνδέονται με ευθύγραμμο ή καμπύλο τμήματα (σχ). Οι κορυφές των στοιχείων ορίζουν τους κόμβους (nodes) του πλέγματος ή καννάβου διακριτοποίησης του προβλήματος (grid ή mesh).

Η διαίρεση του πεδίου γίνεται κατά τέτοιο τρόπο, ώστε το μέγεθος των στοιχείων να είναι μικρό στα σημεία όπου απαιτείται μεγάλη ακρίβεια στους υπολογισμούς, ή εκεί που αναμένεται έντονη μεταβολή του ζητούμενου μεγέθους, ενώ το μέγεθος των στοιχείων μπορεί να είναι μεγαλύτερο στις υπόλοιπες περιοχές του πεδίου.

- Συνοριακές συνθήκες (boundary conditions). Η εισαγωγή συνοριακών συνθηκών είναι απαραίτητη για την επίλυση του προβλήματος (π.χ. αγκύρωση των κατώτερων ή/και πλευρικών κόμβων, κλπ). Η φόρτιση του υλικού αποτελεί επίσης μια συνοριακή συνθήκη, καθώς, σε αντίθετη περίπτωση, η υπολογιζόμενη παραμόρφωση είναι μηδενική. Στην περίπτωση που φορτιστεί ένα σώμα και 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 με την προαναφερόμενη μέθοδο, διότι το φαινόμενο δεν υπακούει στην ίδια καταστατική εξίσωση.
- Ιδιότητες υλικών (material properties). Κατά την εφαρμογή των ιδιοτήτων του υλικού, επιλέγονται οι τιμές των σταθερών του μοντέλου με το οποίο προσομοιώνεται το υλικό. Το απλούστερο μοντέλο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι το γραμμικό ελαστικό μοντέλο (παρόλο που το μοντέλο αυτό δεν θεωρείται το πλέον κατάλληλο για την περιγραφή της συμπεριφοράς πετρωμάτων και εδαφικών υλικών) σε μια, δυο ή τρεις διαστάσεις.
- Γεωμετρικές ιδιότητες (geometric properties). Στις γεωμετρικές ιδιότητες επιλέγεται αν το μοντέλο είναι μιας, δυο ή τριών διαστάσεων. Στην περίπτωση επίλυσης σε δυο διαστάσεις, επιλέγεται αν η επίλυση του μοντέλου θα πραγματοποιηθεί με θεώρηση επίπεδης τάσης (plane stress) ή με θεώρηση επίπεδης παραμόρφωσης (plane strain).

4.2.2 Επίλυση με Θεώρηση Επίπεδης Τάσης

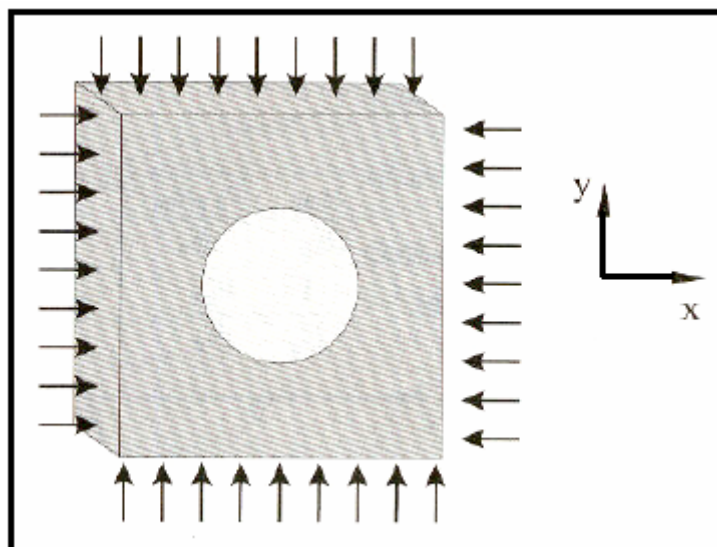
Σύμφωνα με τη θεώρηση επίπεδης τάσης, όταν η τρίτη διάσταση (z) ενός σώματος είναι πολύ μικρή σε σχέση με τις άλλες δυο και τα φορτία που δέχεται το σώμα ανήκουν στο επίπεδο των δυο σημαντικών διαστάσεων (επίπεδο x, y), μπορεί να θεωρηθεί ότι οι συνιστώσες τάσης κατά τον τρίτο άξονα είναι πολύ μικρές σε σύγκριση με τις συνιστώσες κατά το επίπεδο φόρτισης (Σχήμα 3.1) (Αγιουτάντης, 2002).



Σχήμα 4.1: Παραδοχή επίπεδης τάσης (Αγιούτάντης, 2002)

4.2.3 Επίλυση με Θεώρηση Επίπεδης Παραμόρφωσης

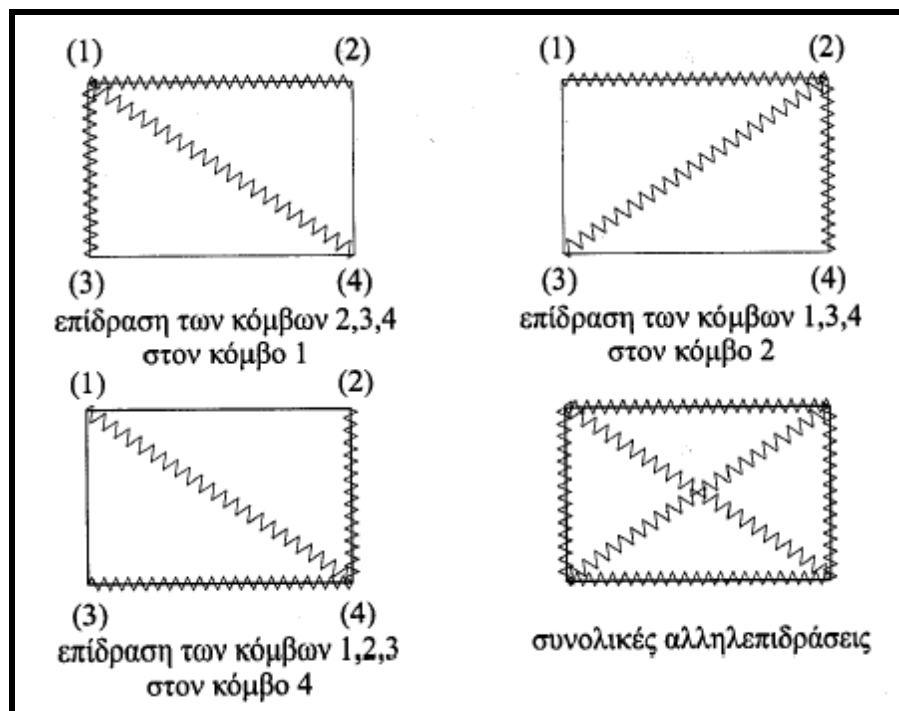
Στην περίπτωση που η τρίτη διάσταση (z) ενός σώματος δεν είναι μικρή, σε σύγκριση με τις άλλες δύο (x , y), και τα φορτία που δέχεται το σώμα είναι πάνω στο επίπεδο (x , y), τότε μπορεί να θεωρηθεί ότι η συνιστώσα του διανύσματος μετατοπίσεων (u) είναι μηδενική κατά την τρίτη διάσταση ($u_z = 0$ και επομένως $\epsilon_z = 0$) (Σχήμα 3.2). Επίσης, τα διανύσματα μετατόπισης στο επίπεδο (x , y) είναι ανεξάρτητα από την τρίτη διάσταση, δηλαδή $u_x = f(x,y)$ και $u_y = f(x,y)$. Η θεώρηση αυτή ονομάζεται θεώρηση της επίπεδης παραμόρφωσης (Αγιουτάντης, 2002).



Σχήμα 4.2: Παραδοχή επίπεδης παραμόρφωσης (Αγιουτάντης, 2002)

4.2.4 Φόρτιση και Επιβολή των Συνοριακών Συνθηκών

Από τη στιγμή που οι καταστατικές εξισώσεις των στοιχείων έχουν δημιουργηθεί και έχουν συσχετιστεί, για το σχηματισμό του συστήματος των εξισώσεων όλου του μοντέλου και για να περιγραφεί πλήρως το πρόβλημα πρέπει να ενσωματωθούν και οι συνοριακές συνθήκες που εφαρμόζονται στο σώμα. Το σύστημα των εξισώσεων δεν είναι δυνατόν να επιλυθεί χωρίς την εφαρμογή τους, γιατί τότε το μητρώο ακαμψίας δεν μπορεί να αντιστραφεί. Πρέπει δηλαδή να εφαρμοστούν περιοριστικές δυνάμεις ώστε να κρατούν το μοντέλο σε ισορροπία.



Σχήμα 4.3: Φυσική σημασία μητρώου ακαμψίας τετραπλευρικού στοιχείου (Αγιουντάντης, 2002)

Η φόρτιση των υλικών ή αντίστοιχα η φόρτιση του διαιρεμένου πεδίου που αντιπροσωπεύει το υλικό, είναι δυνατόν να επιτευχθεί με έναν ή περισσότερους από τους παρακάτω τρόπους (Αγιουντάντης, 2002):

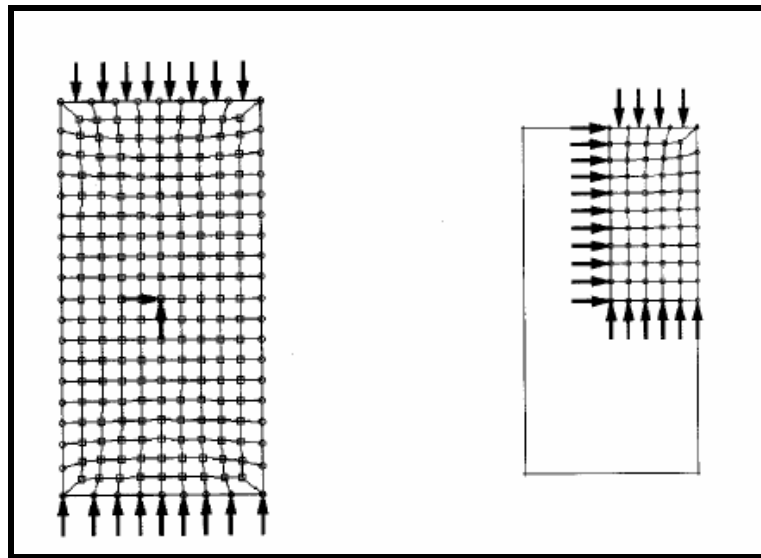
- επιβολή δυνάμεων πεδίου στη μάζα του στοιχείου (π.χ. βαρυτικές),
- επιβολή σημειακών δυνάμεων στους κόμβους του στοιχείου (κομβικές δυνάμεις),

- επιβολή κατανεμημένων δυνάμεων στις πλευρές του στοιχείου (επιφανειακές δυνάμεις),
- επιβολή μετατοπίσεων στους κόμβους του στοιχείου.

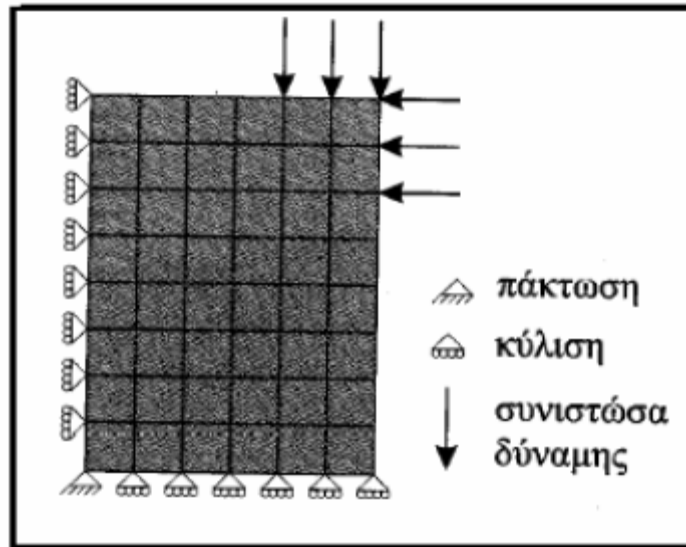
Όλες οι δυνάμεις πρέπει να αναλυθούν κατάλληλα σε κομβικές, οι οποίες συμμετέχουν στην επίλυση κάθε προβλήματος. Στο Σχήμα 3.4 φαίνονται οι συνοριακές συνθήκες που επιβάλλονται κατά την προσομοίωση φόρτισης κυλινδρικού δοκιμίου σε δύο διαστάσεις, όπου με την κατάλληλη χρήση συνοριακών συνθηκών, μπορεί να αξιοποιηθεί η συμμετρία του ορθογωνικού μοντέλου (Αγιουτάντης, 2002).

Υπάρχουν τρεις τύποι συνοριακών συνθηκών:

- Προσδιορισμός της ζητούμενης παραμέτρου (μετατόπισης). Οι συνθήκες αυτές ονομάζονται γεωμετρικές και είναι γνωστές και ως συνθήκες Dirichlet.
- Προσδιορισμός της μεταβολής της ζητούμενης παραμέτρου (παράγωγος της μετατόπισης). Οι συνθήκες αυτές ονομάζονται φυσικές συνοριακές συνθήκες και είναι γνωστές και ως συνθήκες Neumann.
- Προσδιορισμός και των δύο παραπάνω παραμέτρων ή μικτές συνθήκες.



Σχήμα 4.4: Συνοριακές συνθήκες και αξιοποίηση συμμετρίας επίπεδου μοντέλου (Αγιουτάντης, 2002)

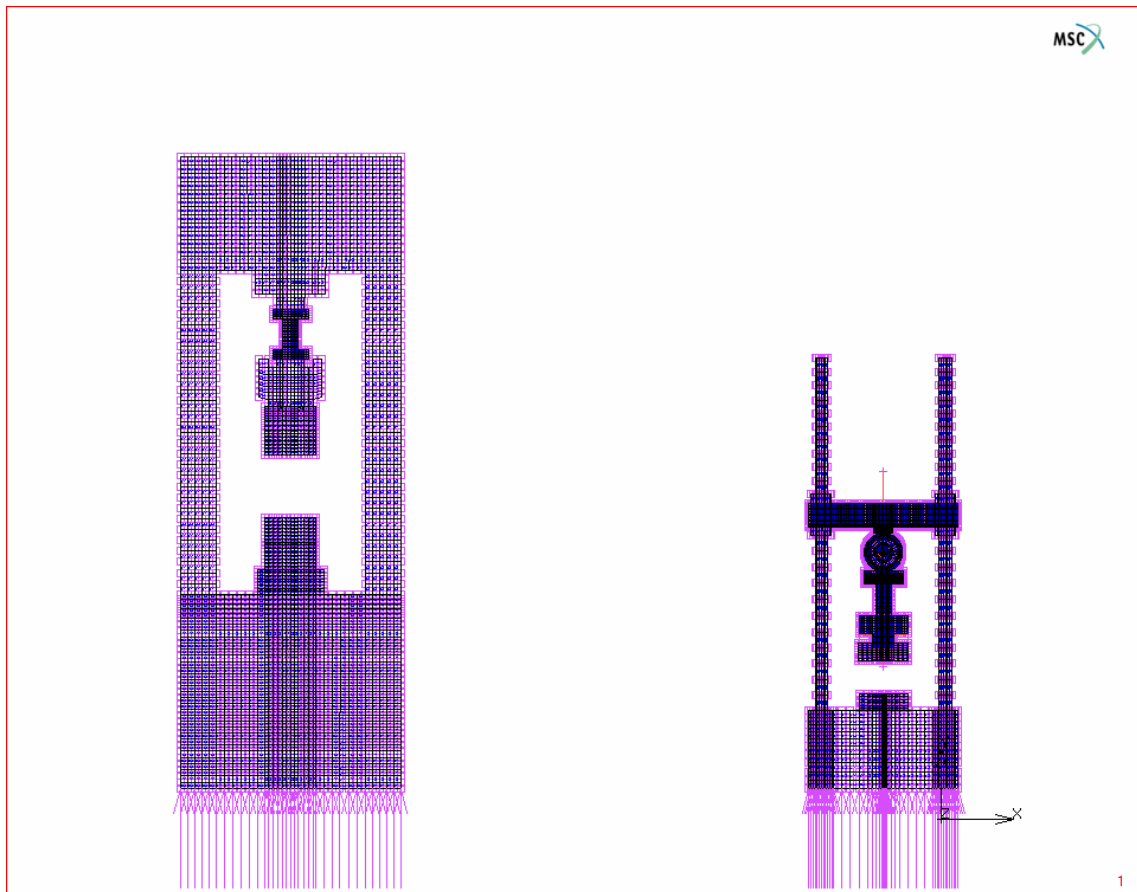


Σχήμα 4.5: Συμβολισμός συνοριακών συνθηκών (Αγιουτάντης, 2002)

4.3 Περιγραφή Μοντέλων

4.3.1 Γεωμετρία και Διακριτοποίηση των Μοντέλων

Η δοκιμή της ανεμπόδιστης θλίψης κυλινδρικών δοκιμίων Διονυσιακού μαρμάρου προσομοιώθηκε όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως στο λογισμικό MSC, Marc-Mentat σε δυο διαστάσεις. Μοντελοποιήθηκαν και τα δοκίμια μαρμάρου και οι συσκευές φόρτισης MTS και Triscan 50kN των οποίων τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά δίνονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 2. Αρχικά σχεδιάστηκαν οι συσκευές φόρτισης σε πραγματικές διαστάσεις στο σχεδιαστικό πρόγραμμα AutoCAD και εν συνεχεία τα σκαριφήματα τους τοποθετήθηκαν στο λογισμικό Msc, Marc-Mentat και έγινε η διακριτοποίησή τους όπως φαίνεται στο σχήμα 4.6. Τα μοντέλα αποτελούνται συνολικά 5946 στοιχεία και 5978 κόμβους.

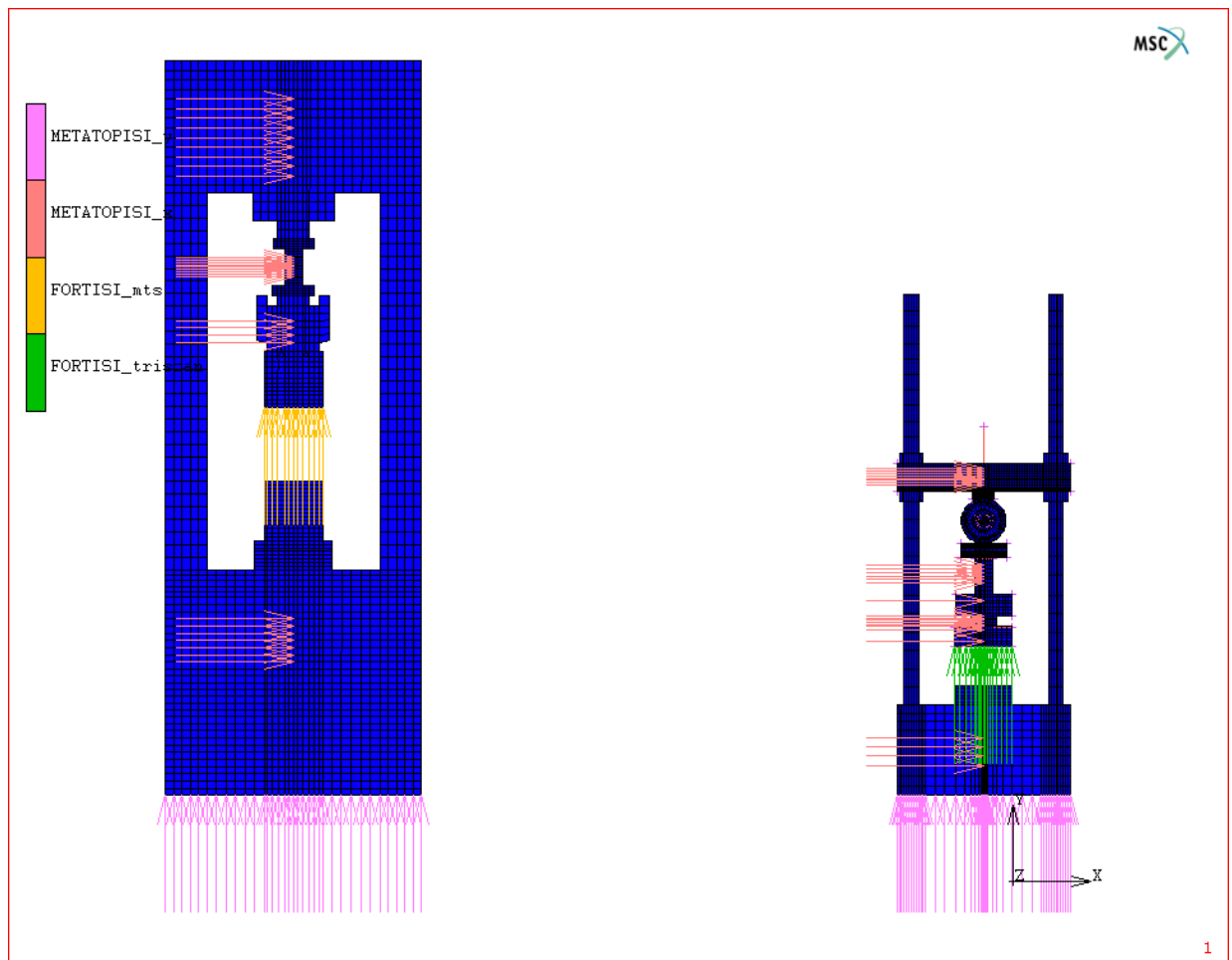


Σχήμα 4.6: Διακριτοποίηση των συσκευών φόρτισης MTS-Triscan

4.3.2 Συνοριακές Συνθήκες

Οι συνοριακές συνθήκες που εφαρμόστηκαν (σχήμα 4.7) για την επίλυση των μοντέλων είναι οι εξής:

- Κύλιση μόνο στον άξονα y ($dx=0$) για τους κόμβους και των δυο συσκευών φόρτισης του χάλυβα και του δοκιμίου που βρίσκονται στην κεντρική κατακόρυφη γραμμή.
- Κύλιση μόνο στον άξονα x ($dy=0$)
- Επιβολή κομβικής μετατόπισης (Fixed Displacement) στην συσκευή φόρτισης MTS 0.000317 mm/ στάδιο φόρτισης σε σύνολο 230 σταδίων φόρτισης, σε επιλεγμένους κόμβους.
- Επιβολή κομβικής μετατόπισης (Fixed Displacement) στη συσκευή φόρτισης Triscan 0.0037 mm/ στάδιο φόρτισης σε σύνολο 290 σταδίων φόρτισης, σε επιλεγμένους κόμβους



Σχήμα 4.7: Σχηματική παράσταση συνοριακών συνθηκών

4.3.3 Ιδιότητες Υλικών

Ο χάλυβας (steel) προσομοιώθηκε σαν ελαστικό ισότροπο υλικό με ελαστικές σταθερές $E=210 \text{ GPa}$ και $\nu=0.3$, ενώ το μάρμαρο (rock) σαν ισότροπο ελαστοπλαστικό υλικό $E=40 \text{ GPa}$ και $\nu=0.25$ όπως φαίνεται και στα σχήματα 4.8 και 4.9.

ISOTROPIC PROPERTIES

YOUNG'S MODULUS	2.1e+011	TABLE	
POISSON'S RATIO	0.3	TABLE	
MASS DENSITY	1		
ACTIVATION ENERGY	0		
COST / VOLUME	0		
COST / MASS	0		

☐ DAMPING

PLASTICITY
☒ ELASTIC-PLASTIC
☒ RIGID-PLASTIC

☐ THERMAL EXP.
☐ CURE SHRINKAGE

RATE EFFECTS
☒ VISCOELASTIC
☒ CREEP

DAMAGE EFFECTS
☒ CRACKING
☒ DAMAGE
☒ FAILURE

☐ FORMING LIMIT
☐ GRAIN SIZE

Σχήμα 4.8: Ιδιότητες υλικού χάλυβα

ISOTROPIC PROPERTIES

YOUNG'S MODULUS	4e+010	TABLE	
POISSON'S RATIO	0.25	TABLE	
MASS DENSITY	0.5		
ACTIVATION ENERGY	0		
COST / VOLUME	0		
COST / MASS	0		

☐ DAMPING

PLASTICITY
☒ ELASTIC-PLASTIC
☒ RIGID-PLASTIC

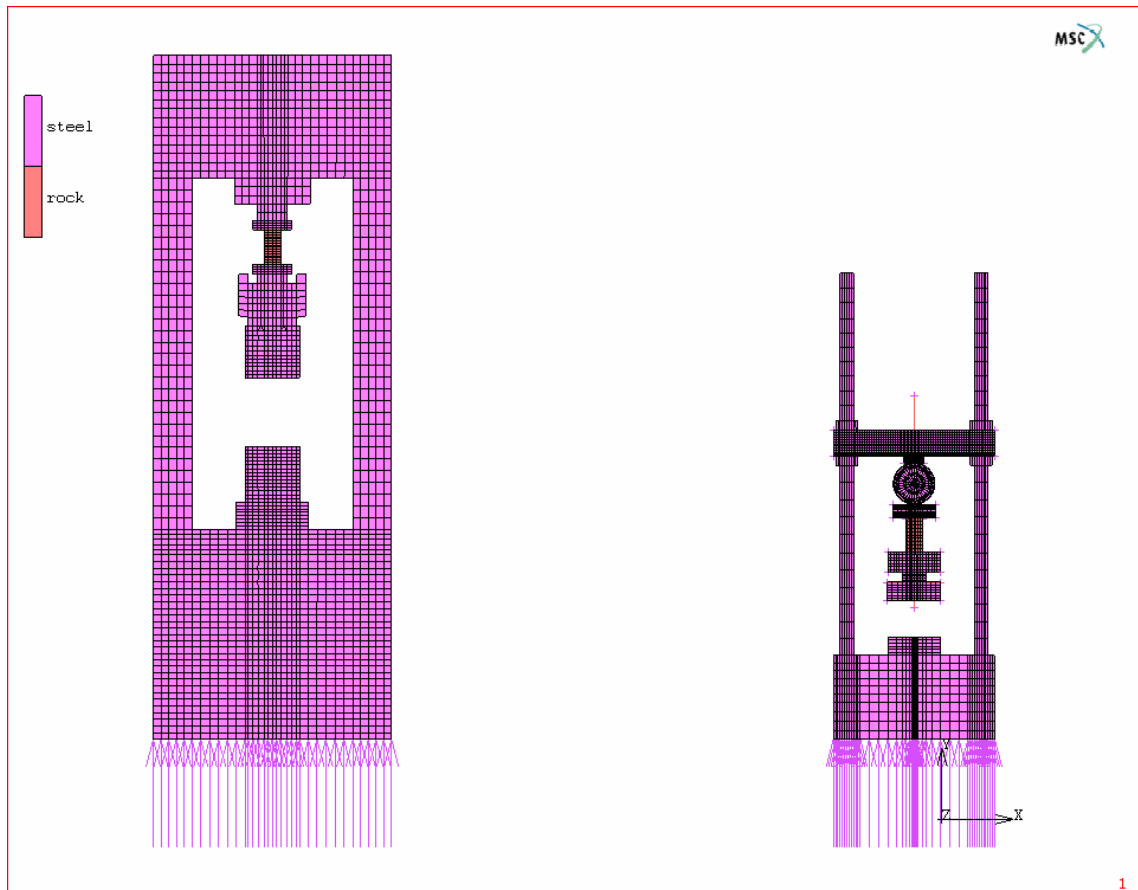
☐ THERMAL EXP.
☐ CURE SHRINKAGE

RATE EFFECTS
☒ VISCOELASTIC
☒ CREEP

DAMAGE EFFECTS
☒ CRACKING
☒ DAMAGE
☒ FAILURE

☐ FORMING LIMIT
☐ GRAIN SIZE

Σχήμα 4.9: Ιδιότητες υλικού μαρμάρου



Σχήμα 4.10: Απεικόνιση των μοντέλων όπου διακρίνονται οι ιδιότητες των υλικών

4.3.4 Στοιχεία Επαφής

Μεταξύ του μαρμάρου και του χάλυβα χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία επαφής (σχήματα 4.12 και 4.13). Ο συντελεστής τριβής μεταξύ του μαρμάρου και των χαλύβδινων πλακών τέθηκε ίσος με 0.4.

4.3.4.1 Προβλήματα Επαφής

Πολλά φυσικά προβλήματα απαιτούν την αριθμητική μοντελοποίηση επαφής σωμάτων. Τέτοιου είδους προβλήματα παρουσιάζονται σε γεωτεχνικά προβλήματα, όπως για παράδειγμα κατά την αλληλεπίδραση υπογείου ανοίγματος υποστήριξης.

Η ανάλυση προβλημάτων επαφής είναι αρκετά περίπλοκη διαδικασία γιατί απαιτείται ο ακριβής εντοπισμός της κίνησης πολλαπλών γεωμετρικών σωμάτων. Επίσης, απαιτείται η ανάλυση της κίνησης λόγω της αλληλεπίδρασης αυτών των σωμάτων μετά το

στάδιο επαφής τους. Η αναπαράσταση της επαφής περιλαμβάνει την περιγραφή της τριβής μεταξύ των επιφανειών, την μεταφορά θερμότητας μεταξύ σωμάτων, κλπ.

Η αριθμητική προσομοίωση προβλημάτων επαφής απαιτεί την ανίχνευση της κίνησης των σωμάτων, ανίχνευση επαφής, επιβολή κατάλληλων περιορισμών ώστε να αποφεύγονται φαινόμενα διείσδυσης και τέλος επιβολή κατάλληλων συνοριακών συνθηκών ώστε να περιγραφούν τα φαινόμενα τριβής και μετάδοσης θερμότητας.

Τα προβλήματα επαφής παρουσιάζουν ευρύ φάσμα διακύμανσης με μορφές που κυμαίνονται από επαφή χωρίς τριβή με μικρές μετατοπίσεις, έως προβλήματα με τριβή επαφής και μεγάλες ανελαστικές παραμορφώσεις. Παρόλο που ο μαθηματικός προσδιορισμός των συνθηκών επαφής παρουσιάζει την ίδια περίπου μορφή σε όλα τα προβλήματα, η επίλυση αυξάνει σε δυσκολία ανάλογα με το βαθμό μη γραμμικότητας του προβλήματος. Η μη γραμμικότητα της ανάλυσης στην περίπτωση προβλημάτων επαφής εξαρτάται από τη γεωμετρία και τη συμπεριφορά του υλικού καθώς και από τις συνθήκες επαφής. Είναι φανερό ότι τέτοιου είδους προβλήματα παρουσιάζουν μη γραμμικές συμπεριφορές σε πολλά σημεία του υπό μελέτη προβλήματος, όπου η κάθε κατάσταση επηρεάζει την άλλη (Marc, 2000)

4.3.4.2 Αριθμητικές μέθοδοι επίλυσης προβλημάτων επαφής

1) Πολλαπλασιαστές Lagrange:

Κατά την ανάλυση προβλημάτων επαφής απαιτείται η επίλυση ελαχιστοποίησης των περιορισμών (constrain), στο πρόβλημα. Οι περιορισμοί στην περίπτωση των προβλημάτων επαφής αποτελούν την διαδικασία προσομοίωσης της απουσίας διείσδυσης.

Η τεχνική των πολλαπλασιαστών Lagrange παρουσιάζει την μεγαλύτερη ευκολία στην επιβολή των περιορισμών σε κάποιο σύστημα σωμάτων με μαθηματική έκφραση. Με αυτή την τεχνική αν οι περιορισμοί είναι σωστά εφαρμοσμένοι, δεν εμφανίζονται φαινόμενα διείσδυσης. Δυστυχώς η τεχνική αυτή παρουσιάζει ορισμένες δυσκολίες στην αριθμητική επίλυση. Η αντιμετώπιση αυτών των δυσκολιών επιτυγχάνεται με την εφαρμογή επιπρόσθετων αριθμητικών τεχνικών. Οι τεχνικές αυτές δεν θα αναλυθούν

εδώ, αλλά λόγω αυτών πολλές φορές ο υπολογιστικός χρόνος επίλυσης προβλημάτων επαφής με τη μέθοδο των πολλαπλασιαστών Lagrange.

Ένα μεγάλο μειονέκτημα που παρουσιάζει αυτή η μέθοδος, είναι η αδυναμία υπολογισμού φορτίων πεδίου, όπως το βάρος της μάζας. Σε περιπτώσεις δυναμικής ανάλυσης ή άλλες αναλύσεις που απαιτείται η χρήση μάζας του υλικού, δεν μπορεί να εφαρμοστεί η μέθοδος των πολλαπλασιαστών Lagrange (Marc 2000).

2) Μέθοδος Ποινών (Penalty Methods)

Οι μέθοδοι ποινών αποτελούν εναλλακτική μορφή της μαθηματικής εφαρμογής περιορισμών της επαφής. Με την τεχνική αυτή, περιορίζεται η κίνηση του σώματος με την επιβολή ποινών στο μέγεθος της διείσδυσης που εμφανίζεται.

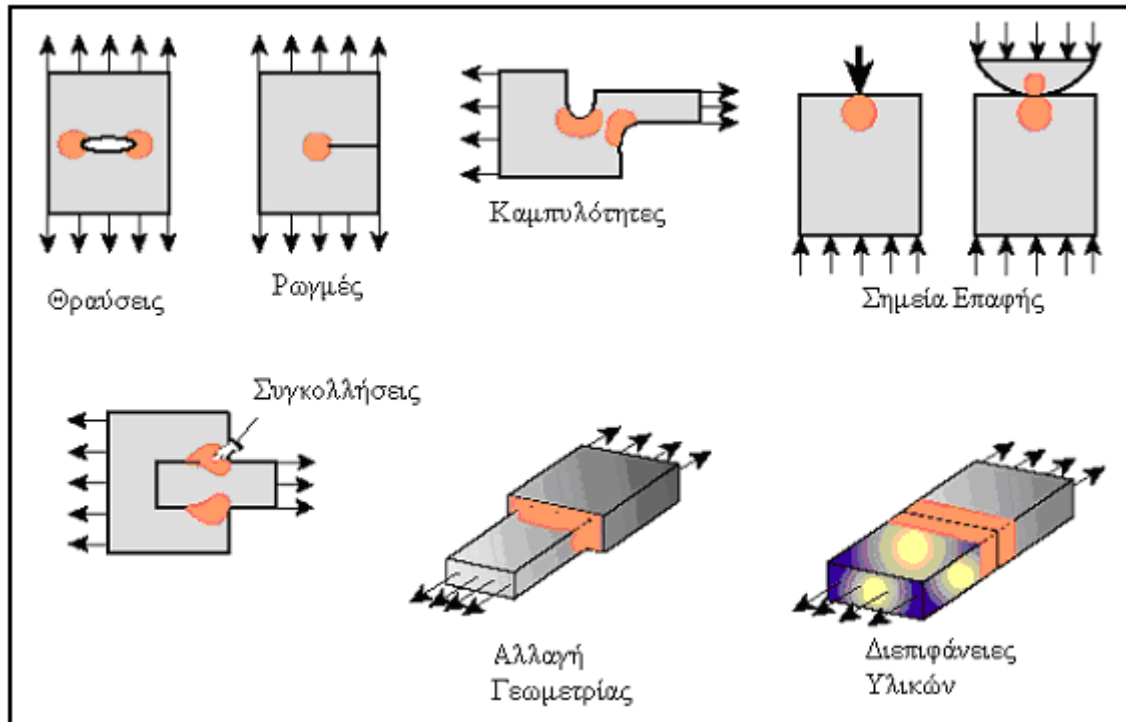
Η μέθοδος αυτή μπορεί να θεωρηθεί ως ανάλογο ενός μη γραμμικού ελατηρίου μεταξύ των δύο σωμάτων, που έρχονται σε επαφή. Σε αυτή την τεχνική εμφανίζεται διείσδυση των σωμάτων κατά την επαφή (σχήμα 4.11), το μέγεθος αυτής της διείσδυσης καθορίζεται από τις σταθερές της συνάρτησης ποινών. Η επιλογή των κατάλληλων τιμών ποινών έχουν μεγάλη σημασία για την αριθμητική σταθερότητα του ολικού συστήματος εξισώσεων.

Η μέθοδος αυτή είναι σχετικά εύκολη στην εφαρμογή της και χρησιμοποιείται ευρέως στην δυναμική ανάλυση. Προσοχή πρέπει να δίνεται σε περιπτώσεις επαφής παραμορφώσιμων - παραμορφώσιμων σωμάτων ώστε να μην παρουσιάζεται υπερβολικά άκαμπτο σύστημα. Αυτό οφείλεται στην υπόθεση ότι η πίεση επαφής είναι ανάλογη του βαθμού διείσδυσης (Marc 2000).

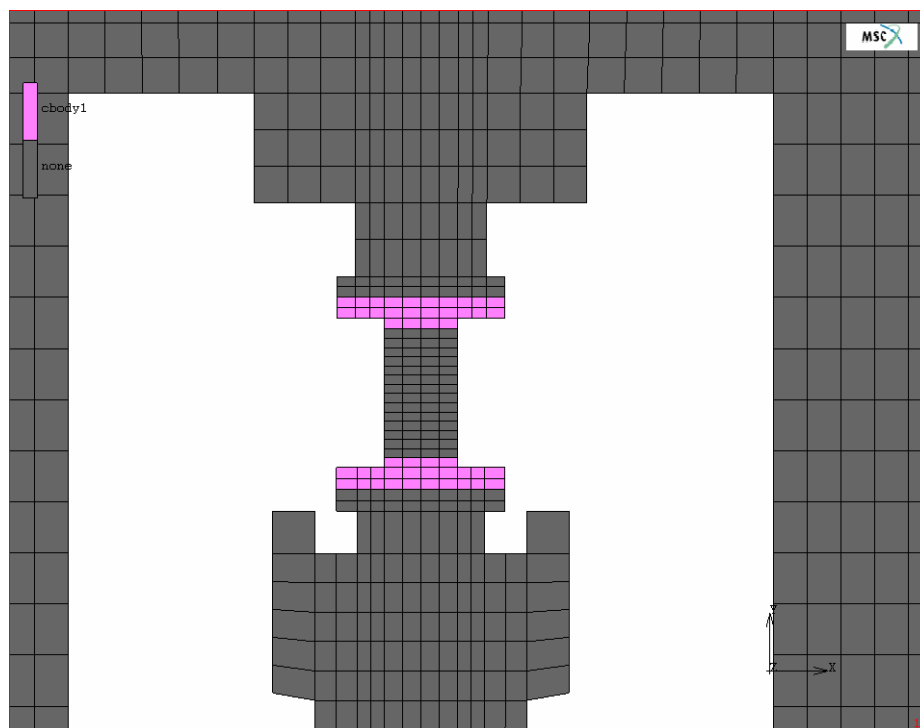
3) Μέθοδος απευθείας περιορισμών

Μια άλλη μέθοδος επίλυσης των προβλημάτων επαφής είναι η απευθείας επιβολή περιορισμών. Σε αυτή τη τεχνική η κίνηση των σωμάτων εντοπίζεται και όταν παρουσιαστεί επαφή, εφαρμόζονται απευθείας περιορισμοί στην κίνηση με τη χρήση συνοριακών συνθηκών. Αυτές αποτελούνται από κινηματικούς περιορισμούς στους βαθμούς ελευθερίας, καθώς και δυνάμεις στους κόμβους. Αυτή η μέθοδος είναι εξαιρετικά α-

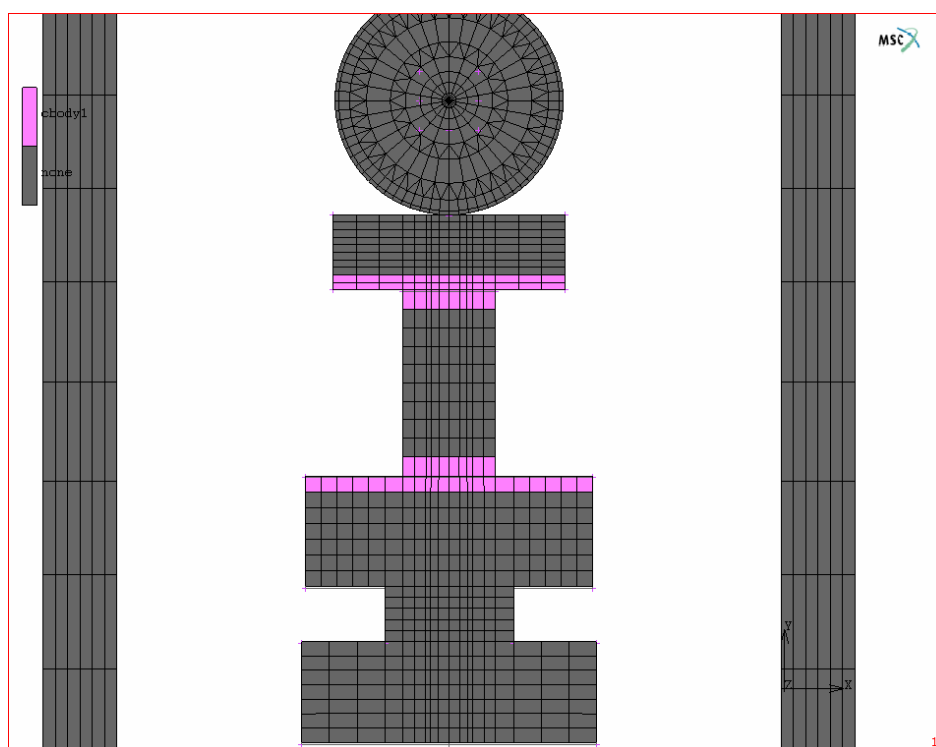
κριβής στην περίπτωση που το πρόγραμμα μπορεί να προβλέψει πότε εμφανίζεται επαφή των σωμάτων. Το μεγάλο πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η αποφυγή της εκ των προτέρων γνώσης των σημείων επαφής των σωμάτων (Marc 2000).



Σχήμα 4.11: Περιοχές έμφασης της διακριτοποίησης (Felippa, 2003)



Σχήμα 4.12: Στοιχεία επαφής μεταξύ της άνω και κάτω χαλύβδινης πλάκας και του δοκιμίου της συσκευής φόρτισης MTS



Σχήμα 4.13: Στοιχεία επαφής μεταξύ της άνω και κάτω χαλύβδινης πλάκας και του δοκιμίου της συσκευής φόρτισης Triscan

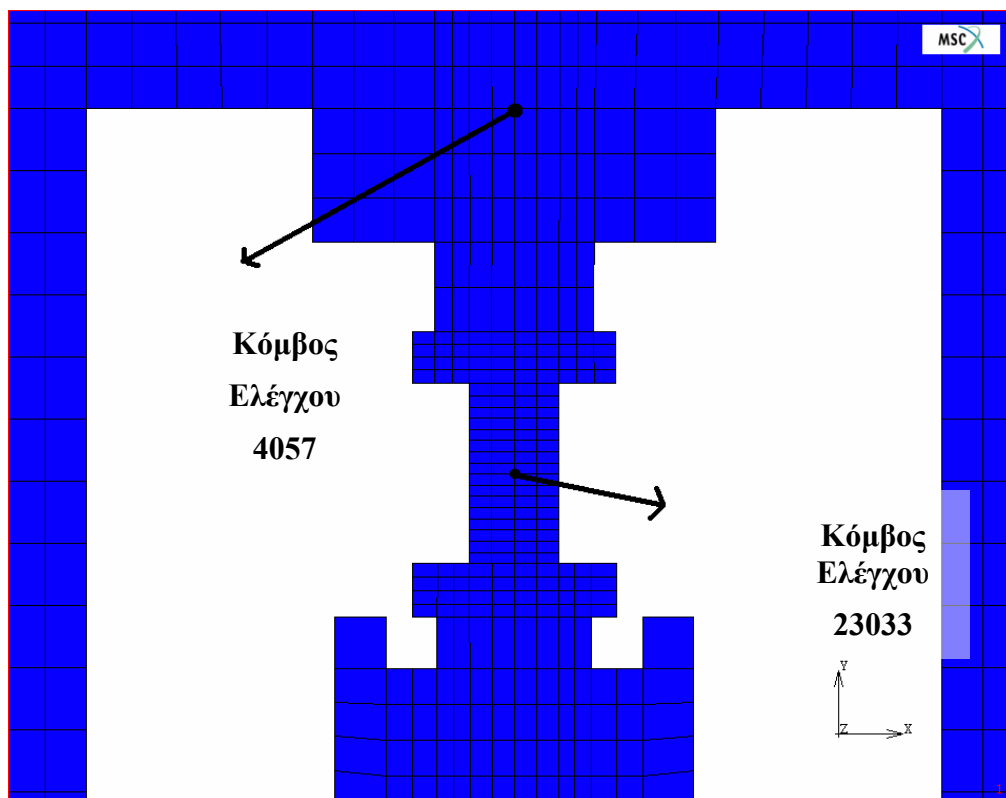
4.3.5 Γεωμετρικές Ιδιότητες

Η επίλυση των μοντέλων έγινε με θεώρηση επίπεδης τάσης (plane stress).

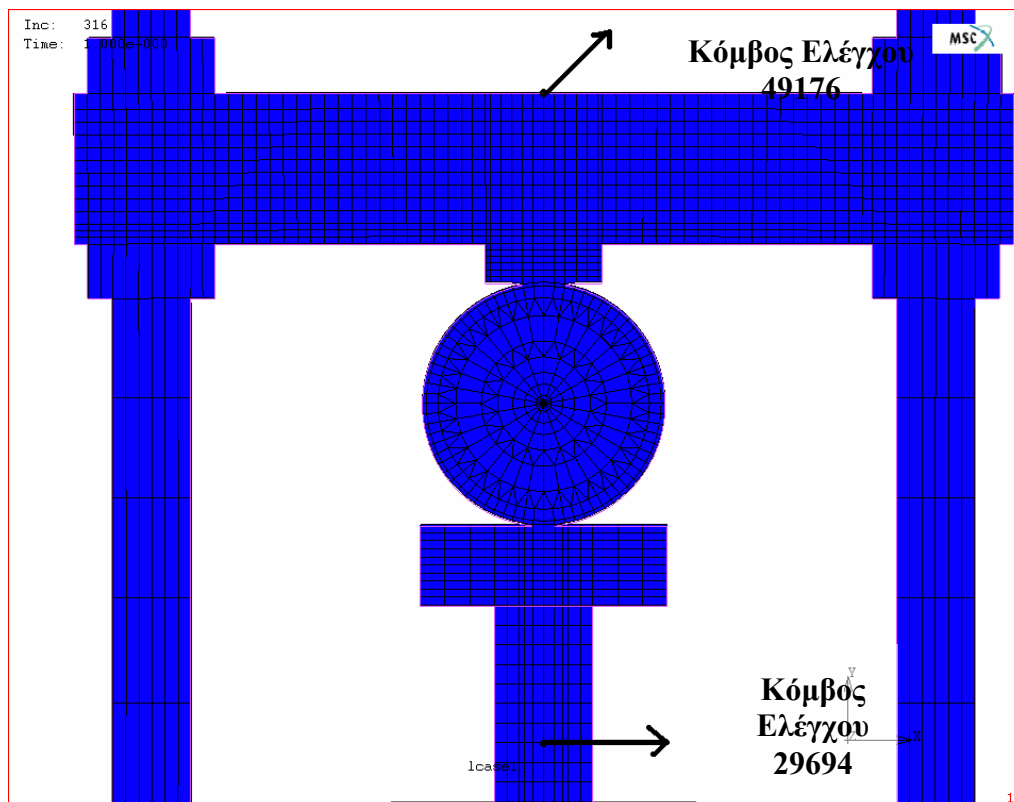
4.3.6 Αποτελέσματα Αριθμητικής Επίλυσης

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται κάποια από τα αποτελέσματα της αριθμητικής επίλυσης, σχετικά με τις κατακόρυφες μετατοπίσεις. Στα σχήματα 4.12 και 4.13 διακρίνονται οι κόμβοι των μοντέλων που επιλέχθηκαν. Σε κάθε μοντέλο επιλέχθηκαν δυο κόμβοι ελέγχου. Επιλέχθηκαν οι κεντρικοί κόμβοι (κόμβοι 4057 και 49176) πάνω στην άνω έδρα του χάλυβα της συσκευής φόρτισης MTS και της συσκευής φόρτισης Triscan αντίστοιχα, και οι κεντρικοί κόμβοι (κόμβοι 23033 και 29694) πάνω στο δοκίμιο του μαρμάρου για κάθε συσκευή φόρτισης αντίστοιχα. Από τον κάθε κόμβο εξάγονται τα αποτελέσματα για να κατασκευαστούν τα διαγράμματα που δίνουν τις κατακόρυφες μετατοπίσεις σε κάθε κόμβο για κάθε στάδιο φόρτισης. Τα διαγράμματα αυτά ονομάζονται history plot. Τα αποτελέσματα δίνονται αναλυτικά στα σχήματα (4.18, 4.19). στα σχήματα 4.14 και 4.15 φαίνονται οι κόμβοι από τους οποίους εξήχθησαν τα αριθμητικά αποτελέσματα και στα σχήματα 4.16 και 4.17 απεικονίζονται τα ποιοτικά αποτελέσματα.

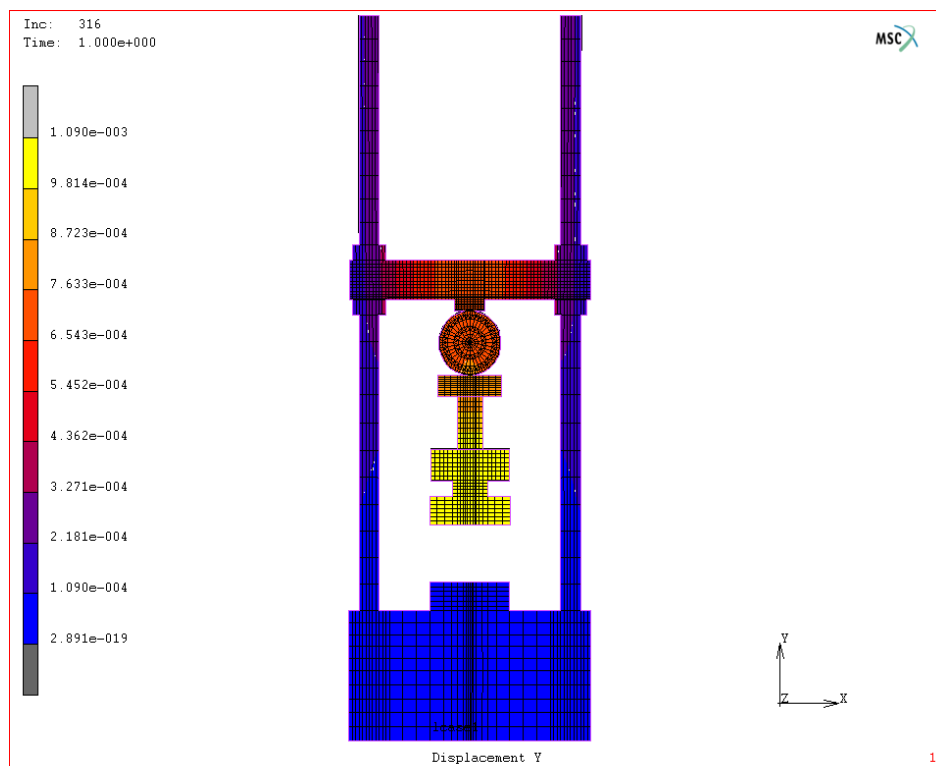
Με βάση τα διαγράμματα των σχημάτων 4.18 και 4.19 παρατηρείται ότι οι μετατοπίσεις οι οποίες επιβάλλονται στο δοκίμιο στη μηχανή MTS είναι περίπου 9 φορές μικρότερες από αυτές που καταγράφονται για το δοκίμιο μέσω της μηχανής Triscan. Αντίστοιχα η μηχανή MTS παρουσιάζεται άκαμπτη ενώ στην στέψη της μηχανής Triscan παρατηρείται μια μετατόπιση της τάξεως των 0.73mm.



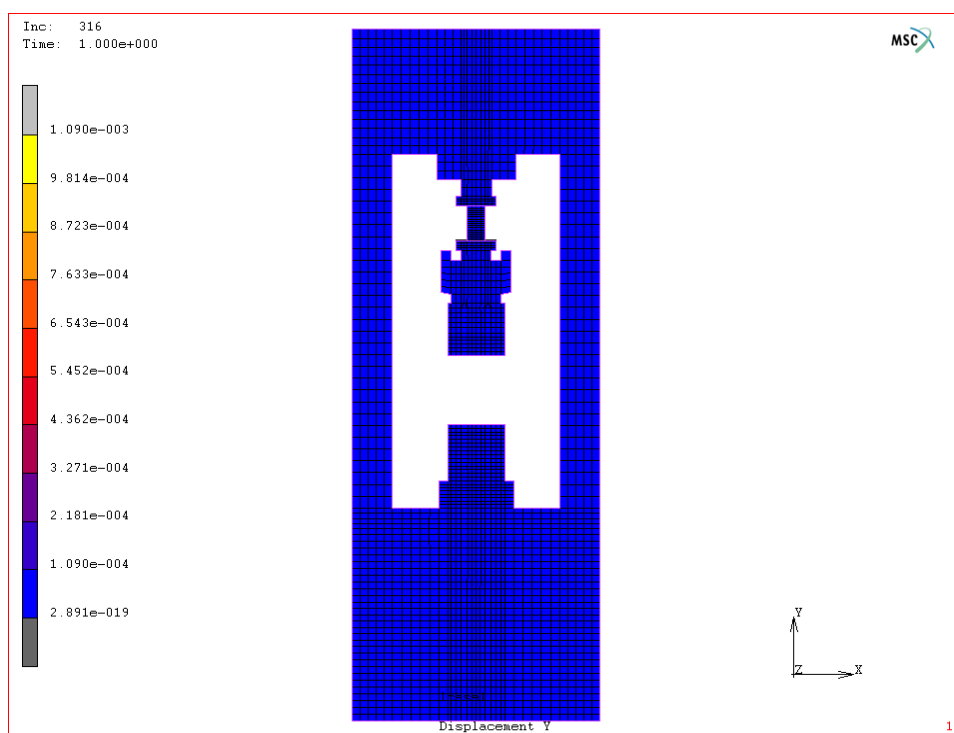
Σχήμα 4.14: Κόμβοι ελέγχου MTS



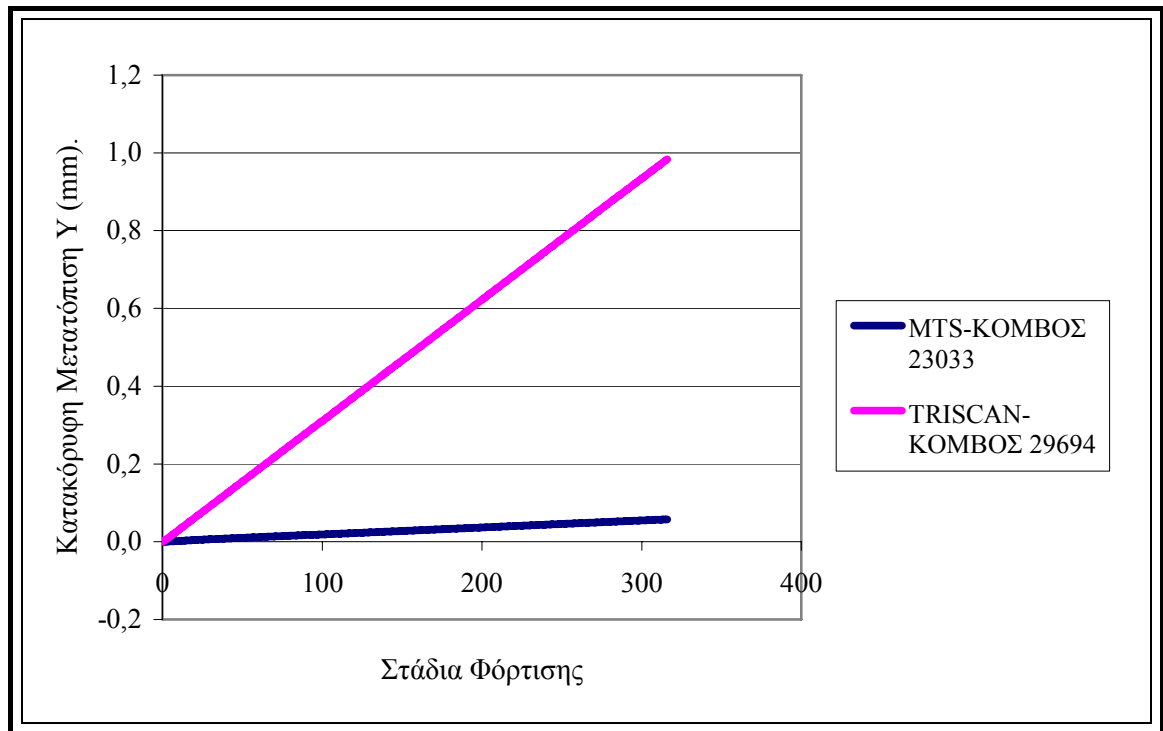
Σχήμα 4.15: Κόμβοι ελέγχου Triscan



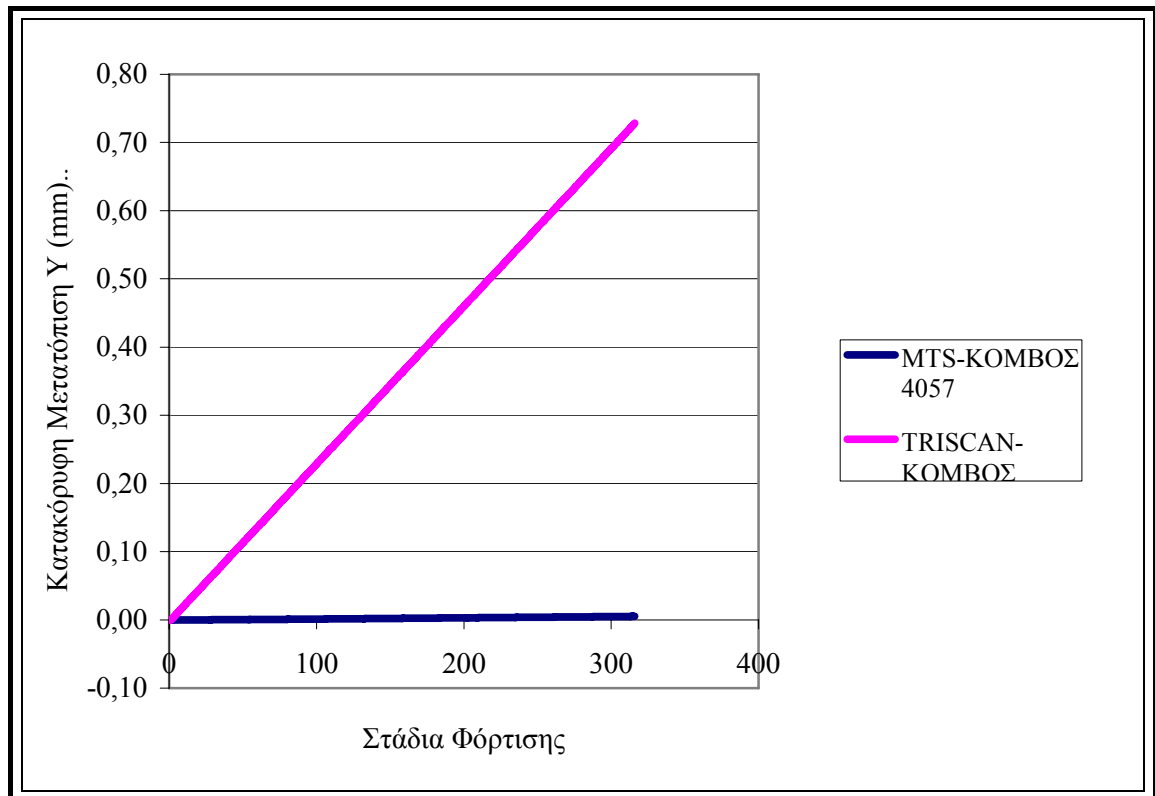
Σχήμα 4.16: Κατανομή της κατακόρυφης μετατόπισης dy στην συσκευή φόρτισης Triscan



Σχήμα 4.17: Κατανομή της κατακόρυφης μετατόπισης dy στην συσκευή φόρτισης MTS



Σχήμα 4.18: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων Y (mm) συναρτήσει των σταδίων φορτίσεων στους κόμβους 23033 και 29694 των MTS και Triscan αντίστοιχα



Σχήμα 4.19: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων Y (mm) συναρτήσει των σταδίων φορτίσεων στους κόμβους 4057 και 49176 των MTS και Triscan αντίστοιχα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

Σύγκριση Αποτελεσμάτων Μεταξύ Αριθμητικής Επίλυσης και Πειραματικής Ανάλυσης

Τα συγκριτικά αποτελέσματα μεταξύ της αριθμητικής επίλυσης και πειραματικής ανάλυσης για την περίπτωση της προσομοίωσης του Διονυσιακού Μαρμάρου σαν ισότροπο ελαστικό υλικό σε δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης, αφορούν την κατακόρυφη μετατόπιση Y (mm) του δοκιμίου μαρμάρου και των μηχανών MTS και Triscan συναρτήσει των σταδίων φόρτισης (time).

Στον Πίνακα 5.1 φαίνονται συνοπτικά για κάθε συσκευή φόρτισης τα στάδια φόρτισης, η μετατόπιση σε (mm) στο τελικό στάδιο φόρτισης και η δύναμη που επιτεύχθηκε τόσο πειραματικά όσο και αριθμητικά.

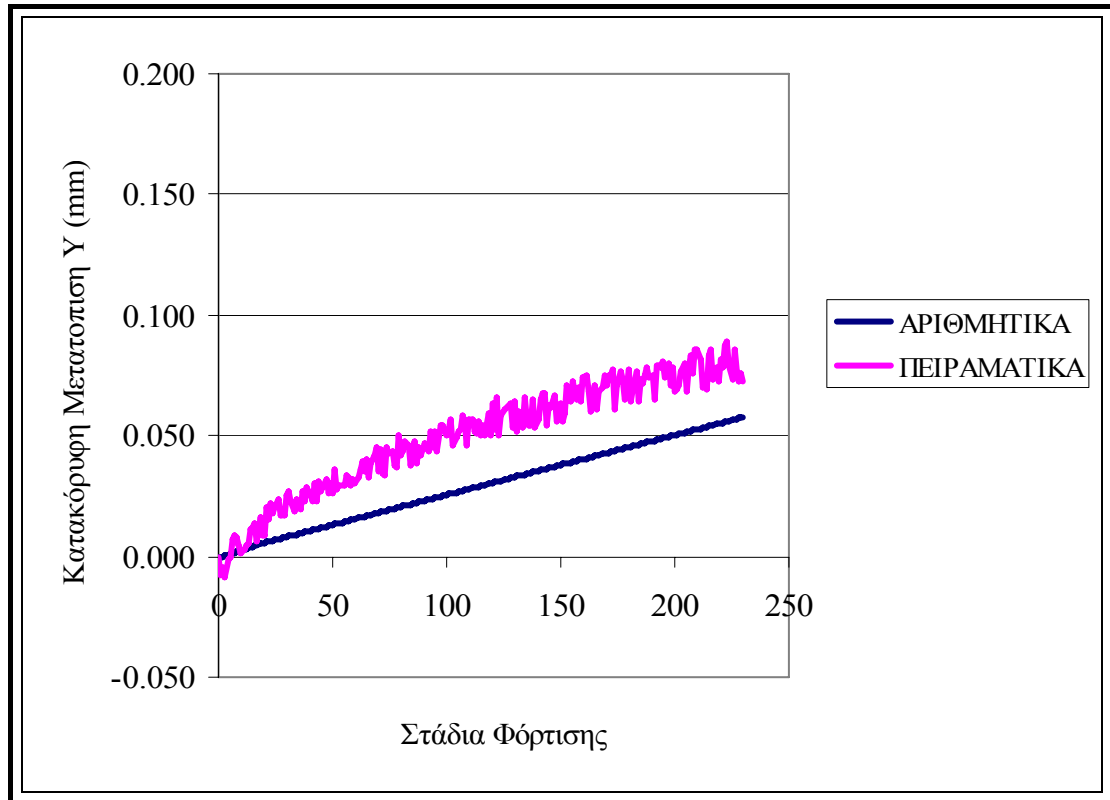
Πίνακας 5.1: Συνοπτικός πίνακας καταγραφής αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων συσκευών φόρτισης Triscan και MTS

	MTS			TRISCAN		
	Στάδια φόρτισης	Μετατόπιση (mm)	Δύναμη (kN)	Στάδια Φόρτισης	Μετατόπιση (mm)	Δύναμη (kN)
Πειραματικά	230	0.072	42	290	1.09	40
Αριθμητικά	230	0.057	42	290	0.98	40

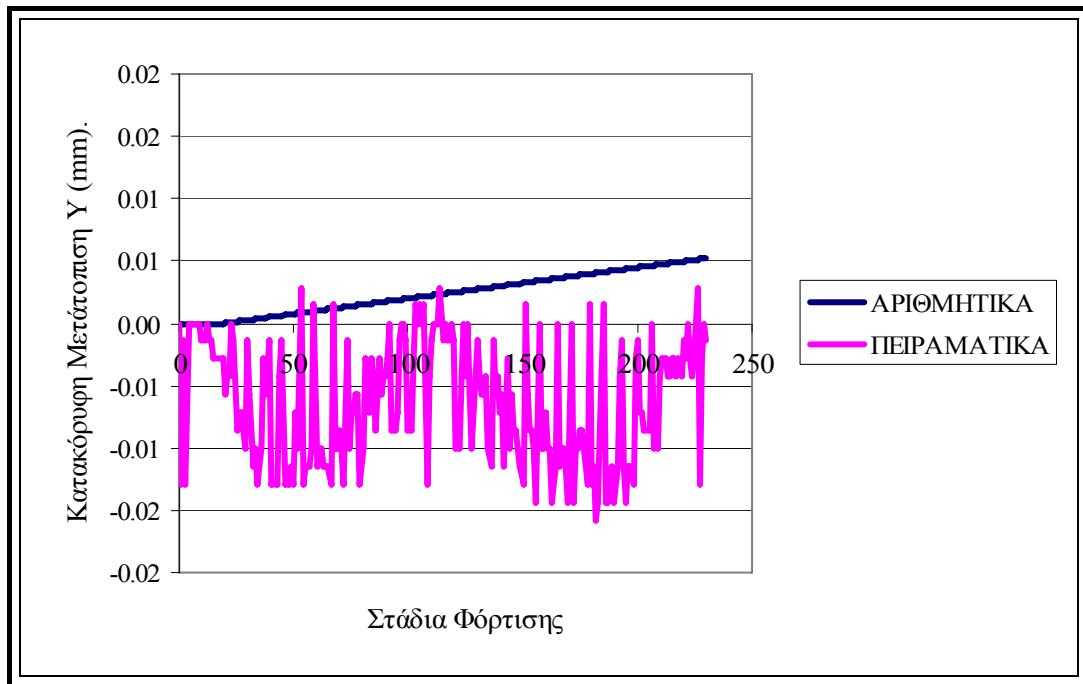
5.1 Αριθμητικά και Πειραματικά Αποτελέσματα για την Συσκευή MTS

Στα διαγράμματα των σχημάτων 5.1 και 5.2 παρουσιάζονται τα αριθμητικά (καμπύλη μπλε χρώματος) και πειραματικά (καμπύλη ροζ χρώματος) αποτελέσματα της Κατακόρυφης Μετατόπισης Y σε σύγκριση με τα στάδια φόρτισης για την μηχανή MTS για σημείο πάνω στο δοκίμιο και πάνω στην μηχανή αντίστοιχα. Οι τιμές της αριθμητικής επίλυσης είναι σχεδόν σε συμφωνία με τις αντίστοιχες πειραματικές δηλαδή στο τελικό

στάδιο φόρτισης. Στην μεν αριθμητική επίλυση για το δοκίμιο και την μηχανή παρατηρείται μετατόπιση 0,058mm και 0,005mm αντίστοιχα ενώ στην πειραματική επίλυση 0,072mm και σχεδόν μηδενική.



Σχήμα 5.1: Πειραματικά και αριθμητικά αποτελέσματα κατακόρυφης μετατόπισης y (mm) σε συνάρτηση με τα στάδια φόρτισης της μηχανής MTS πάνω στο δοκίμιο.



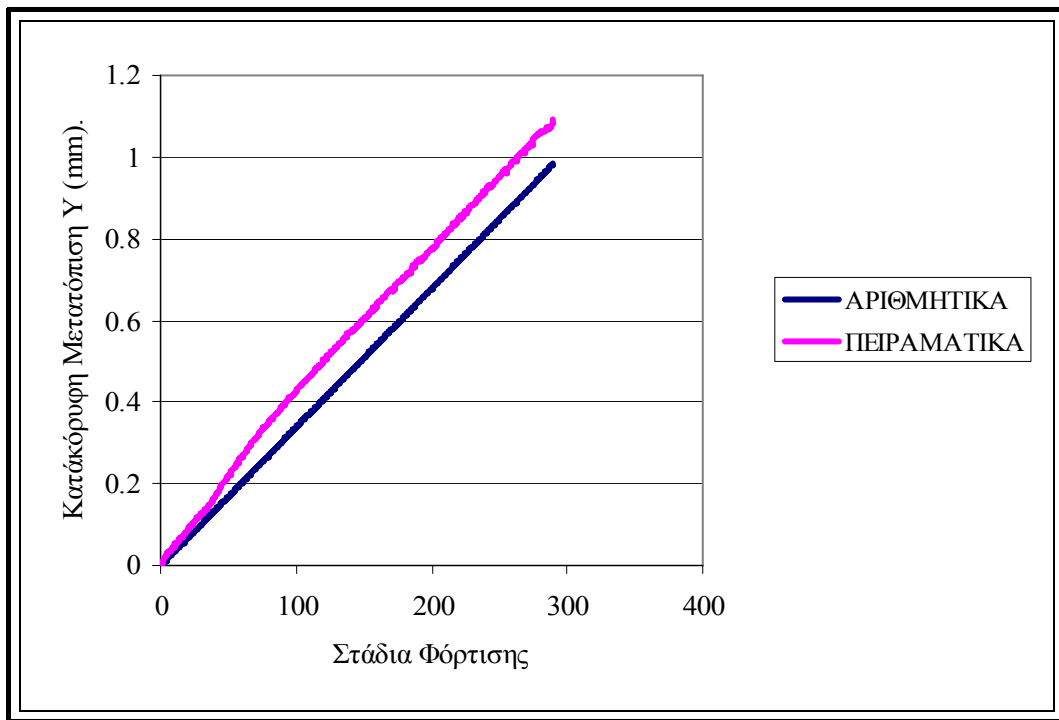
Σχήμα 5.2: Πειραματικά και αριθμητικά αποτελέσματα κατακόρυφης μετατόπισης y (mm) σε συνάρτησι με τα στάδια φόρτισης της μηχανής MTS πάνω στην μήχανη.

5.2 Αριθμητικά και Πειραματικά Αποτελέσματα για την Συσκευή Triscan

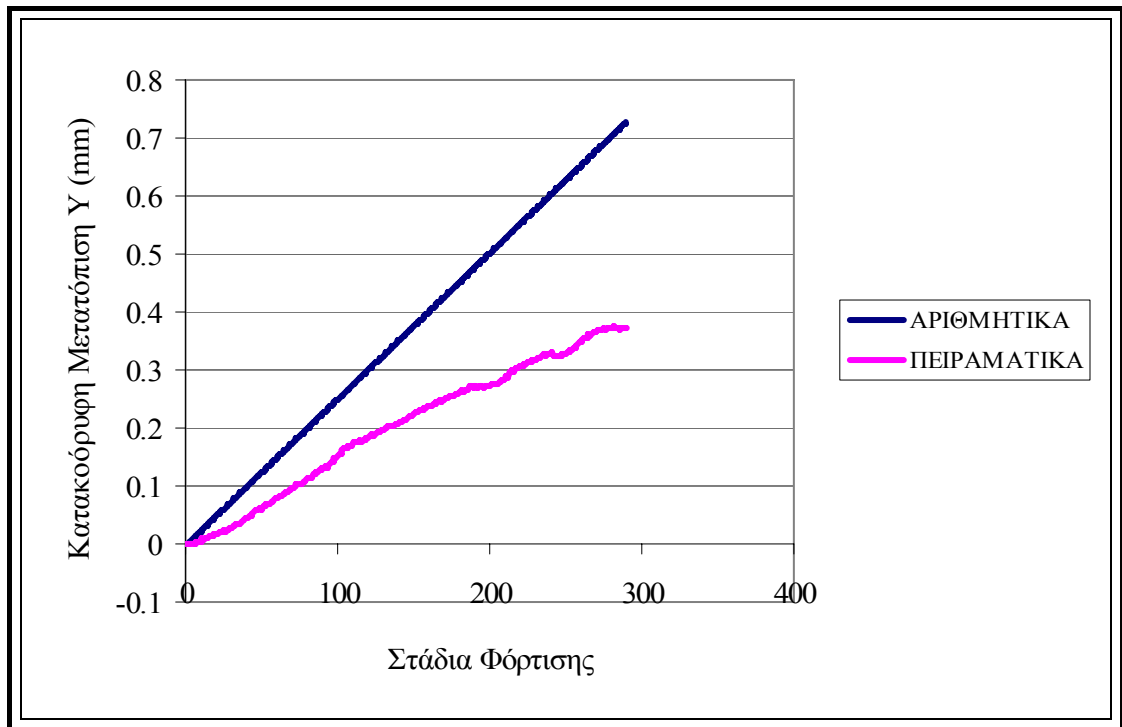
Στα διαγράμματα των σχημάτων 5.3 και 5.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αριθμητικής επίλυσης (καμπύλη μπλε χρώματος) και της πειραματικής μελέτης (καμπύλη ροζ χρώματος) σχετικά με την κατακόρυφη μετατόπιση y σε συνάρτηση με τα στάδια φόρτισης για την μηχανή Triscan 50kN για σημείο πάνω στο δοκίμιο μαρμάρου και σε σημείο πάνω στην μηχανή αντίστοιχα. Η τιμή της αριθμητικής επίλυσης για το δοκίμιο είναι 0.98mm ενώ η τιμή της πειραματικής δοκιμής είναι 1.09mm δηλαδή βρίσκονται σε καλή συμφωνία μεταξύ τους. Η τιμή της αριθμητικής επίλυσης για το σημείο πάνω στην μηχανή είναι 0.73mm ενώ η τιμή της πειραματικής δοκιμής είναι στο τελικό στάδιο φόρτισης 0.37mm, δηλαδή παρατηρείται μέγιστη απόκλιση της τάξεως του 50%.

Στο διάγραμμα του σχήματος 5.5 παρουσιάζεται η διαφορά της κατακόρυφης μετατόπισης που μετρήθηκε στο δοκίμιο σε σχέση με την κατακόρυφη μετατόπιση που μετρήθηκε στην συσκευή Triscan σαν συνάρτηση των σταδίων φόρτισης. Το διάγραμμα θεωρητικά παρουσιάζει την μετατόπιση στο δοκίμιο που είναι της τάξεως των 0,7mm για

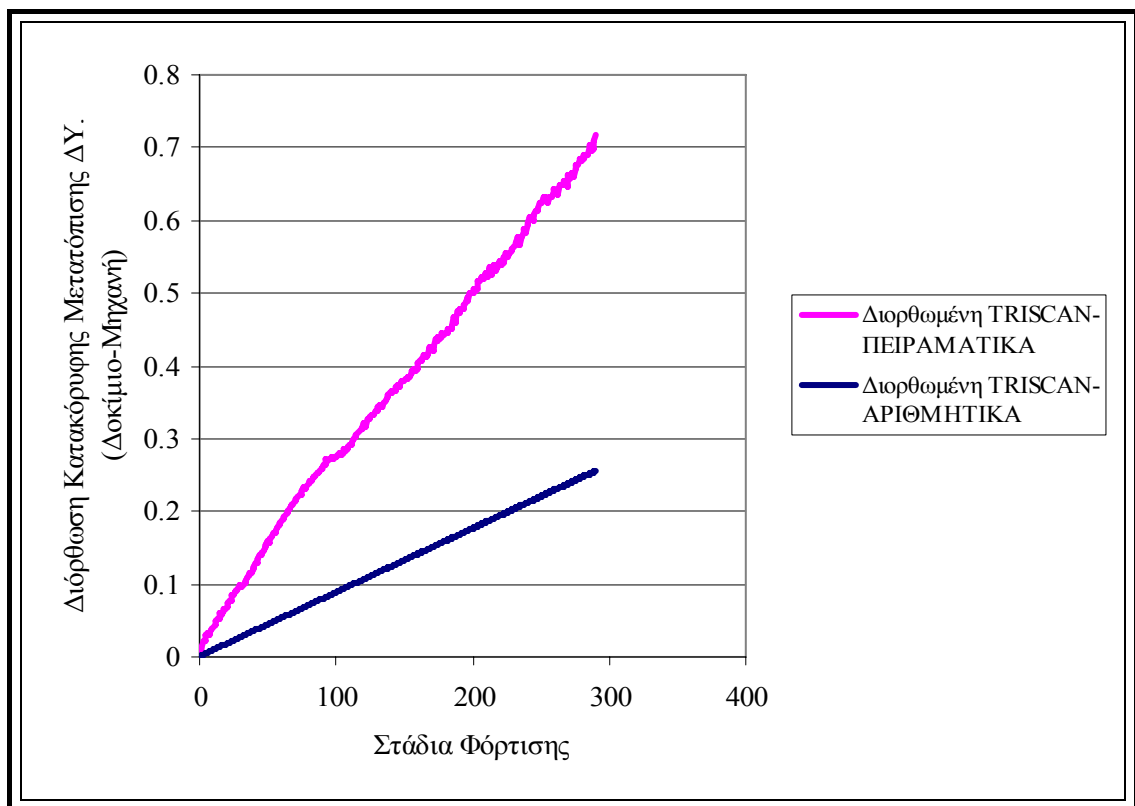
φορτίο περί τα 45 kN. Επίσης, δίνεται η αντίστοιχη καμπύλη διορθωμένης μετατόπισης όπως προκύπτει από τα αριθμητικά αποτελέσματα



Σχήμα 5.3: Πειραματικά και αριθμητικά αποτελέσματα κατακόρυφης μετατόπισης y (mm) σε συνάρτησι με τα στάδια φόρτισης της μηχανής Triscan σε σημείο πάνω στο δοκίμιο .



Σχήμα 5.4: Πειραματικά και αριθμητικά αποτελέσματα κατακόρυφης μετατόπισης y (mm) σε συνάρτησει με τα στάδια φόρτισης της μηχανής Triscan σε σημείο πάνω στην μηχανή .

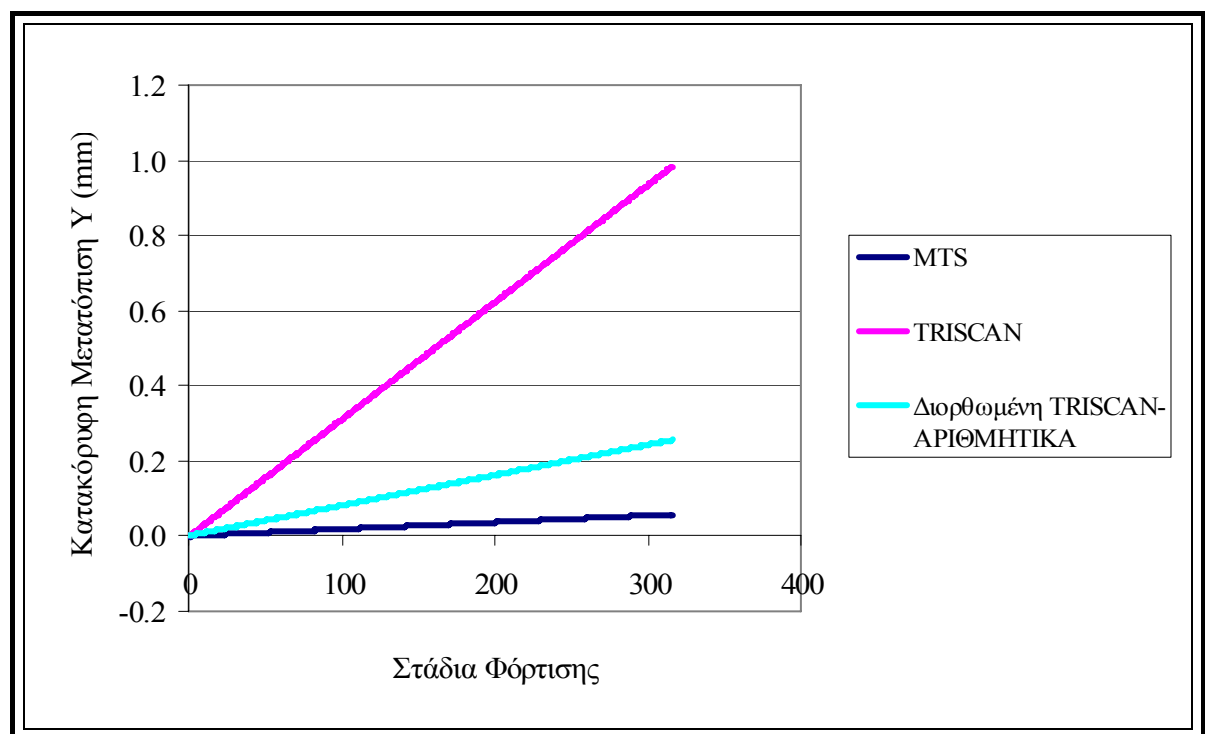


Σχήμα 5.5: Διόρθωση κατακόρυφης μετατόπισης ΔY Triscan (Δοκίμιου-Μηχανής) για την πειραματική και αριθμητική δοκιμή σε συνάρτηση με τα στάδια φόρτισης

5.3 Σύγκριση Αριθμητικών και Πειραματικών Αποτελεσμάτων MTS-Triscan

5.3.1 Σύγκριση Αριθμητικών Αποτελεσμάτων στο Δοκίμιο

Στο διάγραμμα του σχήματος 5.5 παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα για σημείο πάνω στο δοκίμιο μαρμάρου για τις μηχανές MTS (καμπύλη μπλε χρώματος) και Triscan (καμπύλη ροζ χρώματος) της κατακόρυφης μετατόπισης y σε συνάρτηση με τα στάδια φόρτισης. Παρατηρείται ότι η μέγιστη τιμή για την μηχανή MTS είναι 0,057mm ενώ για την Triscan είναι 0.98mm. Επομένως είναι φανερό ότι το δοκίμιο στην μεν MTS μηχανή υφίσταται μικρή μετατόπιση ενώ η Triscan υφίσταται μετατόπιση σχεδόν δεκαπλάσια από την MTS.

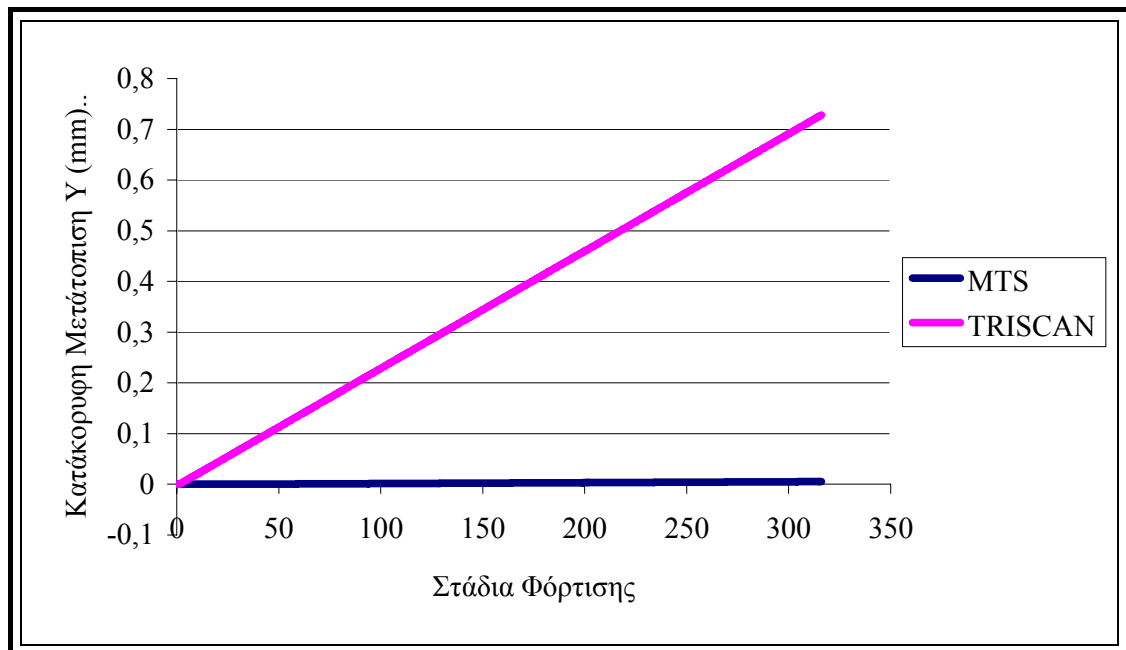


Σχήμα 5.6: Σύγκριση αριθμητικών αποτελεσμάτων MTS-Triscan για σημείο πάνω στο δοκίμιο.

5.3.2 Σύγκριση Αριθμητικών Αποτελεσμάτων στη Μηχανή

Στο διάγραμμα του σχήματος 5.7 παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα για σημείο πάνω στην μηχανή για τις μηχανές MTS (καμπύλη μπλε χρώματος) και Triscan (καμπύλη ροζ χρώματος) της κατακόρυφης μετατόπισης y σε συνάρτηση με τα στάδια

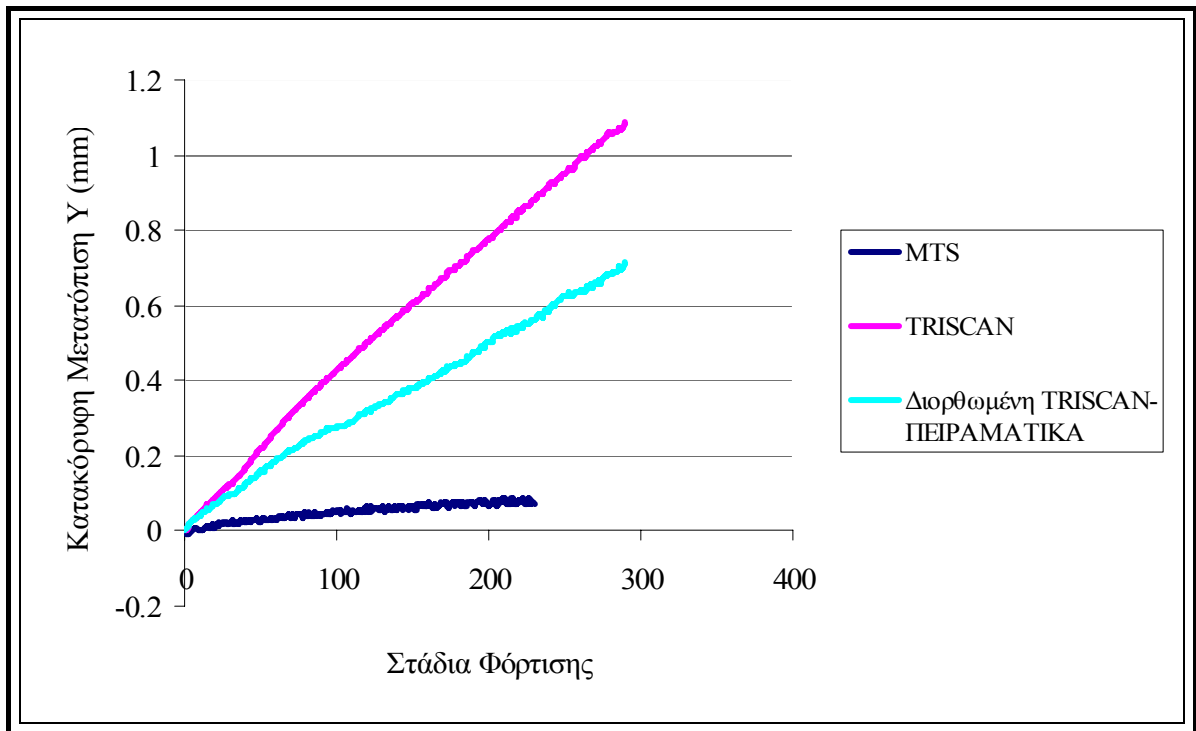
φόρτισης. Παρατηρείται ότι η μέγιστη τιμή για την μηχανή MTS είναι σχεδόν μηδενική ενώ για την Triscan είναι 0,73mm. Επομένως είναι φανερό ότι MTS δεν υφίσταται καμία παραμόρφωση ενώ η Triscan υφίσταται παραμόρφωση της τάξεως του 1mm.



Σχήμα 5.7: Σύγκριση αριθμητικών αποτελεσμάτων MTS-Triscan για σημείο πάνω στην μηχανή.

5.3.3 Σύγκριση Πειραματικών Αποτελεσμάτων στο Δοκίμιο

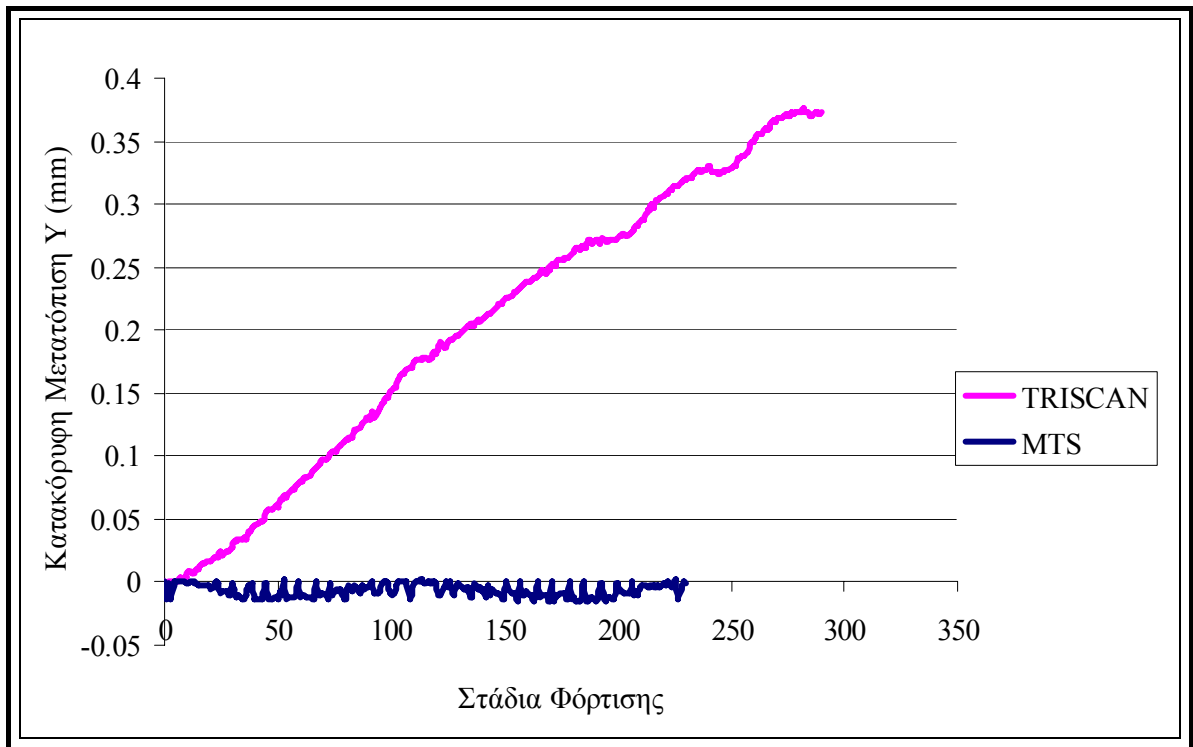
Στο διάγραμμα του σχήματος 5.8 παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα για σημείο πάνω στο δοκίμιο για τις μηχανές MTS (καμπύλη μπλε χρώματος) και Triscan (καμπύλη ροζ χρώματος) της κατακόρυφης μετατόπισης y σε συνάρτηση με τα στάδια φόρτισης. Η παραδοχή και στις δυο περιπτώσεις είναι ότι η μετατόπιση της κάτω πλάκας έδρασης δίνει την επιβαλλόμενη μετατόπιση στο δοκίμιο. Παρατηρείται ότι η μέγιστη τιμή για την μηχανή MTS είναι πολύ μικρή δηλαδή 0,073mm ενώ για την Triscan είναι 1,09mm. Η διορθωμένη πειραματική καμπύλη (καμπύλη γαλάζιου χρώματος) για την συσκευή Triscan δίνει μέγιστες μετατοπίσεις περί τα 0,7mm, σχετικά μειωμένες με τις αρχικές αλλά ακόμη περίπου επτά φορές μεγαλύτερες από τις μετρούμενες στην MTS.



Σχήμα 5.8: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων MTS-Triscan για σημείο πάνω στο δοκίμιο.

5.3.4 Σύγκριση Πειραματικών Αποτελεσμάτων στη Μηχανή

Στο διάγραμμα του σχήματος 5.9 παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα για σημείο πάνω στην μηχανή για τις μηχανές MTS (καμπύλη μπλε χρώματος) και Triscan (καμπύλη ροζ χρώματος) της κατακόρυφης μετατόπισης y σε συνάρτηση με τα στάδια φόρτισης. Παρατηρείται ότι η μέγιστη τιμή για την μηχανή MTS είναι σχεδόν μηδενική ενώ για την Triscan είναι 0,37mm. Επομένως είναι φανερό ότι MTS δεν υφίσταται σχεδόν καμία μετατόπιση ενώ η Triscan υφίσταται μετατόπιση με διαφορά από την MTS δυο τάξεων μεγέθους.



Σχήμα 5.9: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων MTS-Triscan για σημείο πάνω στην μηχανή.

Το γεγονός ότι τα πειραματικά στάδια φόρτισης στην MTS είναι λιγότερα απ' ότι στην Triscan έχει εξηγηθεί στο Κεφάλαιο 3 στην ενότητα 3.4.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο

Συμπεράσματα-Προτάσεις

6.1 Εισαγωγή

Από την παρούσα διπλωματική εργασία προέκυψαν κάποια ενδιαφέροντα συμπεράσματα, μερικά από αυτά έχουν ήδη αναφερθεί στα προηγούμενα κεφάλαια. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η προσπάθεια να συνοψισθούν όλα μαζί καθώς επίσης γίνονται και κάποιες προτάσεις για επέκταση και βελτίωση της παρούσας ανάλυσης.

6.2 Συμπεράσματα

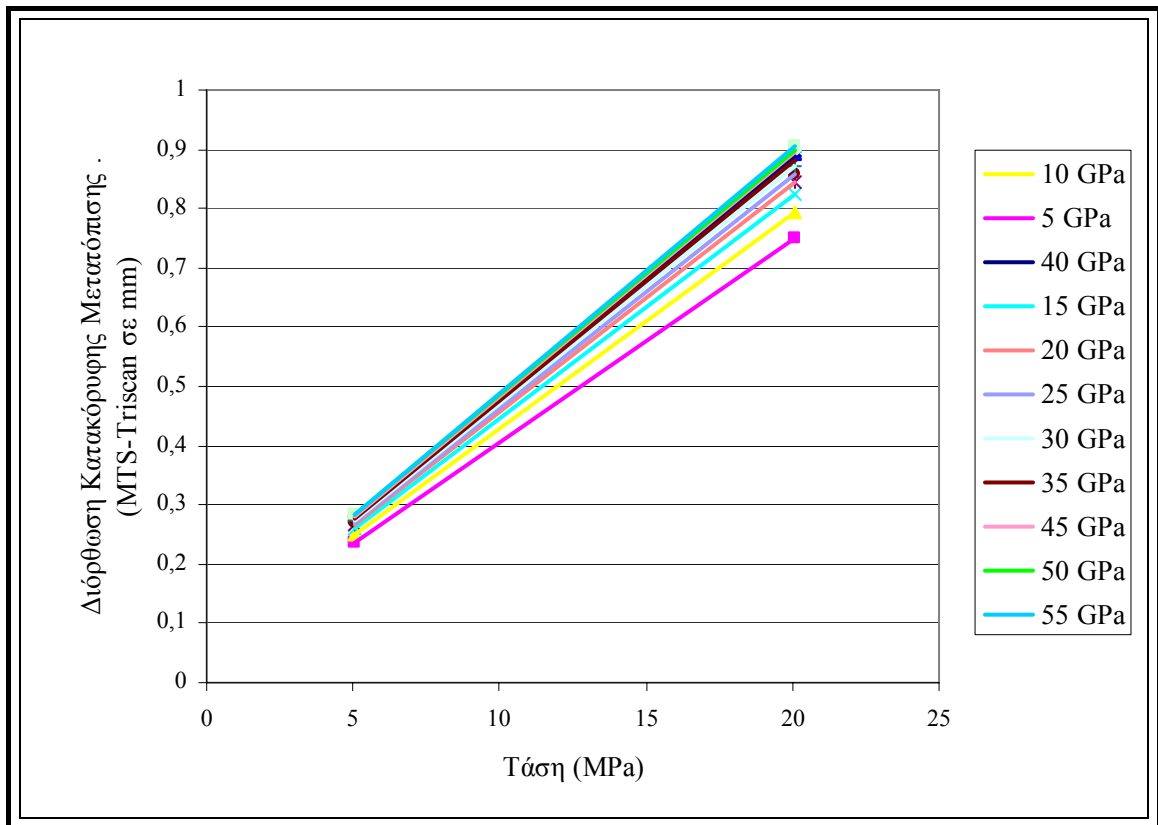
Από την πειραματική μελέτη της δοκιμής ανεμπόδιστης θλίψης που έγινε με τις δυο συσκευές φόρτισης MTS και Triscan και την αριθμητική επίλυση της με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων προέκυψαν όπως αναπτύχθηκαν παραπάνω συγκριτικά διαγράμματα της κατακόρυφης μετατόπισης σε mm σε συνάρτηση με τα στάδια φόρτισης. Συγκρίθηκαν τα πειραματικά και αριθμητικά αποτελέσματα τόσο για την MTS και την Triscan ξεχωριστά στο Κεφάλαιο 3 και Κεφάλαιο 4 αλλά και τα μεταξύ τους αριθμητικά και πειραματικά αποτελέσματα τόσο για το δοκίμιο όσο και για τις δύο συσκευές φόρτισης στο Κεφάλαιο 5.

Από την μελέτη και επεξεργασία των πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την επίλυση των μοντέλων εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

- Υπάρχει σχεδόν απόλυτη συμφωνία μεταξύ των αποτελεσμάτων της πειραματικής δοκιμής και της αριθμητικής τόσο για το δοκίμιο όσο και για το σημείο επάνω στις συσκευές φόρτισης. Μια διαφορά της τάξεως του 50% παρατηρείται στα αριθμητικά αποτελέσματα για την Triscan (επάνω στην μηχανή) η οποία μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι στο εργαστήριο τα εξωτερικά εξαρτήματα που συνδέονται με την Triscan δεν έχουν το ίδιο μέτρο ελαστικότητας. Αυτό

επηρεάζει τα αποτελέσματα διότι τα αριθμητικά αποτελέσματα προέκυψαν θεωρητικά από ένα μέτρο ελαστικότητας σε ολόκληρη της συσκευή φόρτισης.

- Επίσης στο διάγραμμα τάσης –παραμόρφωσης για τα πειραματικά αποτελέσματα των δυο συσκευών φόρτισης παρατηρείται μία παραμόρφωση στο δοκίμιο της Triscan δεκαπλάσια απ’ ότι στην MTS. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η Triscan ως μη άκαμπτη μηχανή παραμορφώνεται, και αυτό επηρεάζει και τα αποτελέσματα που λαμβάνονται στο δοκίμιο, ενώ αντίθετα η MTS επειδή είναι άκαμπτη μηχανή δεν υπάρχουν μεγάλες παραμορφώσεις στο δοκίμιο. Διορθώνοντας την τιμή αυτή με την μετρούμενη παραμόρφωση της μηχανής, προκύπτει μία παραμόρφωση περίπου επτά φορές μεγαλύτερη.
- Από το νομόγραμμα που προέκυψε από την διόρθωση της κατακόρυφης μετατόπισης των συσκευών φόρτισης MTS-Triscan σε συνάρτηση με την τάση (σχήμα 6.1) για δοκίμια με διαφορετικά μέτρα ελαστικότητας παρατηρείται ότι για επιβολή τάσης 5 MPa η διόρθωση που γίνεται για δοκίμιο με μέτρο ελαστικότητας 5-55 GPa είναι από 0,23-0,28mm ενώ για επιβολή τάσης 20MPa κυμαίνεται από 0,75-0,90mm αντίστοιχα. Είναι φανερό ότι η διαφορά ενός μαλακού υλικού με ένα σκληρό δεν είναι πολύ μεγάλη και ότι η διόρθωση είναι γραμμική δηλαδή όσο αυξάνεται η τάση αυξάνεται και η διόρθωση.
- Η μέγιστη τιμή της διορθωμένης κατακόρυφης μετατόπισης της Triscan για την πειραματική δοκιμή είναι 0,71mm ενώ η αντίστοιχη τιμή της αριθμητικής δοκιμής είναι 0,25mm, δηλαδή τα πειραματικά αποτελέσματα είναι σχεδόν τριπλάσια.



Σχήμα 6.1: Διάγραμμα διορθωμένης κατακόρυφης μετατόπισης των συσκευών φόρτισης MTS-Triscan σε mm σε συνάρτηση με την τάση MPa

6.3 Προτάσεις

Για τη βελτίωση της εργασίας αυτής που παρουσιάζει την αριθμητική και πειραματική σύγκριση των αποτελεσμάτων μονοαξονικής φόρτισης στις συσκευές MTS και Triscan του ΕΜΠΠΚ, θα μπορούσε επιπλέον να γίνουν τα ακόλουθα:

- Βελτίωση μοντελοποίησης της μηχανής Triscan.
- Προσομοίωση των μοντέλων σε τρεις διαστάσεις αντί για δυο διαστάσεις έτσι ώστε να προκύψει μια καλύτερη εικόνα των τάσεων και των παραμορφώσεων που υφίστανται οι δυο συσκευές φόρτισης αφού είναι γνωστή και η τρίτη διάσταση Z.

- Πειράματα με διαφορετικά υλικά εκτός του μαρμάρου, πιο μαλακά και πιο σκληρά, ώστε να ελεγχθεί πως συμπεριφέρονται (π.χ παραμορφώνονται) τόσο οι συσκευές φόρτισης όσο και τα δοκίμια.
- Καταγραφή της μετατόπισης που υφίστανται οι συσκευές φόρτισης σε περισσότερα σημεία για να προκύψει μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα με το τι παραμορφώσεις δέχονται οι συσκευές και τα δοκίμια, έτσι ώστε να προκύψουν διορθώσεις με μεγαλύτερη ακρίβεια.

Βιβλιογραφία

Διεθνής Βιβλιογραφία

1. Advantech, (1990), User's Manual.
2. DASyLab, (2007), (www.dasylab.com).
3. Fagan M. J., (1996), Finite Element Analysis Theory and Practice, Longman Group.
4. Felippa C. A., (2003), *An Introduction to Finite Element Method*, (Lecture notes), Department of Aerospace Engineering Sciences, Colorado University.
5. KYOWA, PCD-200A Instruction Manual.
6. Marc-Mentat (2000), User's Guide.
7. Microlink, (2007), (www.microlink.co.uk).
8. MTS System Corporation, (2006), User's Manual.
9. Wikipedia, (2007), (www.wikipedia.org).
10. Windmillsoft, (2007), (www.windmillsoft.com).
11. Triscan System Corporation, (2007), User's Manual, (www.vjtech.co.uk).

Ελληνική Βιβλιογραφία

1. Αγιούταντης, Ζ.Γ., (2002). "Στοιχεία Γεωμηχανικής, Μηχανική Πετρωμάτων", Εκδόσεις ΙΩΝ, Αθήνα, Ελλάδα.
2. Αγιούταντης, Ζ.Γ., Γαβαλάκη, Ε., (1998). "Αυτοματοποίηση και Έλεγχος των Πειραματικών Διαδικασιών σε Εργαστηριακές Δοκιμές Μηχανικής Πετρωμάτων", Τεχν. Χρον. Έπιστ. Έκδ. ΤΕΕ. V. τευχ. 1-2.
3. Βαρδουλάκης, Ι., Κουρκουλής, Σ., Εξαδάκτυλος, Γ., Ροζάκης, Α., (2002). "Μηχανικές Ιδιότητες και Συμβατότητα Φυσικών Δομικών Λίθων στα Αρχαία Μνημεία: Το διονυσιακό Μάρμαρο", Διεπιστημονική Ημερίδα "Ο Δομικός Λίθος στα Μνημεία", ΙΓΜΕ, Αθήνα, Ελλάδα.