

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

«Αριθμητική διερεύνηση συμπεριφοράς λίθων εμποτισμένων με
στερεωτικές ρητίνες»

Διπλωματική Εργασία

Κωνσταντίνος Π. Ιεροδιακόνου

Εξεταστική επιτροπή

Ζαχαρίας Αγιουτάντης, Καθηγητής (επιβλέπων)
Γεώργιος Εξαδάκτυλος, Καθηγητής
Μαραβελάκη Παγώνα Επικ. Καθηγήτρια

Χανιά
Νοέμβριος 2009

Ευχαριστίες

Η παρούσα προπτυχιακή διατριβή δεν θα είχε ολοκληρωθεί χωρίς τη βοήθεια και την υποστήριξη ορισμένων ανθρώπων, τους οποίους θα ήθελα να ευχαριστήσω.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Αγιουτάντη Ζαχαρία για την πολύτιμη και συνεχή βοήθεια που μου παρείχε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας αυτής και για την κατανόηση που έδειξε σε όλες τις απρόβλεπτες καθυστερήσεις που προέκυψαν από την ανάθεση της εργασίας μέχρι την ολοκλήρωση της.

Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω τους επιστημονικούς συνεργάτες του Εργαστηρίου Μηχανικής Πετρωμάτων τον Μεταλλειολόγο Μηχανικό κ. Μαυριγιαννάκη Στέλιο και την Μηχανικό Ορυκτών Πόρων κ. Παπαδάκη Ζωγραφιά που μου παρείχαν πολύτιμες συμβουλές όπου αυτές χρειάστηκαν.

Τέλος, θα ήταν παράλειψη να μην ευχαριστήσω τον κ. Καθηγητή Εξαδάκτυλο Γεώργιο και την κ. Επίκουρη Καθηγήτρια Νόνη Μαραβελάκη που δέχτηκαν να συμμετάσχουν στην τριμελή εξεταστική επιτροπή για την αξιολόγηση της εργασίας.

Πίνακας Περιεχομένων

Εισαγωγή

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο	1
Ιστορική αναφορά Απτέρας-Αρχαιολογικά Έργα	1
1.1 Ιστορική Αναφορά Απτέρας	1
1.2 Γενικά Στοιχεία Έργων	3
1.3 Τρίκλιτη Ρωμαϊκή Δεξαμενή	5
1.4 Δεξαμενή σε Σχήμα Γ	7
1.5 Δυο Λουτρικά Συγκροτήματα.....	9
1.6 Ελληνιστική Οχύρωση.....	12
1.7 Οικία με Περίστυλη Αυλή	13
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο	14
Γενικές αρχές συντήρησης μνημείων με ρητίνες.....	14
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	14
2.1 Ορισμοί	14
2.1.1 Ορισμός Μνημείου	14
2.1.2 Ορισμός Ιστορικού Μνημείου	14
2.1.3 Ορισμός Συντήρησης.....	15
2.1.4 Ορισμός αναστήλωσης	16
2.2 Γενικές Αρχές Συντήρησης.....	16
2.2.1 Αναγκαιότητα Σχεδιασμού Υλικών Επέμβασης.....	17
2.2.2 Προβλήματα που συναντώνται στα έργα αποκατάστασης μνημείων.....	18
2.2.3 Τοιχοποιίες.....	18
2.3 Ρητίνες	21
2.4 Κατηγορίες Συνθετικών Ρητινών.....	22
2.4.1 Εποξειδικές ρητίνες	23
2.4.2 Πολυεστερικές ρητίνες	24
2.4.3 Βινυλεστερικές ρητίνες.....	25
2.5. Εφαρμογές	25
2.5.1 Χρώματα και επικαλυπτικά	25
2.5.2 Συγκολλητικά.....	26
2.5.3 Βιομηχανικά εργαλεία παραγωγής και σύνθετα υλικά.....	26
2.5.4 Ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά συστήματα.....	26
2.5.5 Ναυτιλιακές εφαρμογές	27
2.5.6 Αεροδιαστημικές εφαρμογές	27
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο	28
Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων	28
3.1 Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων	28
3.1.1 Επίλυση με Θεώρηση Επίπεδης Τάσης	37
3.1.2 Επίλυση με Θεώρηση Επίπεδης Παραμόρφωσης.....	38
3.2 Κριτήριο Mohr- Coulomb.....	39
3.3 Κριτήρια Αστοχίας - Έναρξη Διαρροής	39
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο	43
Αριθμητική διερεύνηση εντατικής κατάστασης πετρώματος στερεωμένου με ρητίνη	43

4.1 Γενικά.....	43
4.2 Περιγραφή Μοντέλων.....	44
4.2.1 Γεωμετρία και Διακριτοποίηση των Μοντέλων	44
4.2.2 Συνοριακές Συνθήκες.....	46
4.2.3 Ιδιότητες των Υλικών	48
4.2.4 Γεωμετρικές ιδιότητες.....	61
4.3 Αποτελέσματα.....	61
4.3.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων κατακόρυφης τάσης σ_y για τα μοντέλα 1 και 2	61
4.3.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων οριζόντιας τάσης σ_x για τα μοντέλα 1 και 2...63	
4.3.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων κατακόρυφης παραμόρφωσης ϵ_y για τα μοντέλα 1 και 2	64
4.3.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων οριζόντιας παραμόρφωσης ϵ_x για τα μοντέλα 1 και 2	66
4.3.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων κατακόρυφης τάσης σ_y για τα μοντέλα 3 και 4	67
4.3.6 Σύγκριση αποτελεσμάτων οριζόντιας τάσης σ_x για τα μοντέλα 3 και 4...69	
4.3.7 Σύγκριση αποτελεσμάτων κατακόρυφης παραμόρφωσης ϵ_y για τα μοντέλα 3 και 4	70
4.3.8 Σύγκριση αποτελεσμάτων οριζόντιας παραμόρφωσης ϵ_x για τα μοντέλα 3 και 4	72
4.3.9 Σύγκριση αποτελεσμάτων κατακόρυφης τάσης σ_y για τα μοντέλα 5 και 6	73
4.3.10 Σύγκριση αποτελεσμάτων οριζόντιας τάσης σ_x για τα μοντέλα 5 και 6	75
4.3.11 Σύγκριση αποτελεσμάτων κάθετης παραμόρφωσης ϵ_y για τα μοντέλα 5 και 6	76
4.3.12 Σύγκριση αποτελεσμάτων οριζόντιας παραμόρφωσης ϵ_x για τα μοντέλα 5 και 6	78
4.4 Σύγκριση Μοντέλων	79
4.5 Διερεύνηση ως προς τον λόγο Poisson “ ν ” για το Μοντέλο 5	85
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο	89
Συμπεράσματα-Προτάσεις.....	89
5.1 Συμπεράσματα	89
5.2 Προτάσεις	91
Βιβλιογραφία και αναφορές.....	92
Ελληνική Βιβλιογραφία	92
Διεθνής Βιβλιογραφία.....	92
Ιστότοποι.....	93

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Περιοχή Απτέρας.....	3
Σχήμα 1.2: Άποψη του αρχαιολογικού χώρου Απτέρας από δορυφορική φωτογραφία (Google Earth, 2009)	4
Σχήμα 1.3: Κάτοψη του κάστρου της περιοχής Απτέρας από δορυφορική φωτογραφία (Google Earth, 2009)	4
Σχήμα 1.4: Εξωτερική άποψη τρίκλιτης ρωμαϊκής δεξαμενής.....	5

Σχήμα 1.5: Εσωτερικό Τρίκλιτης Ρωμαϊκής δεξαμενής με εμφανή τα σημεία συντήρησης.....	6
Σχήμα 1.6: Δεξαμενή σε σχήμα Γ.....	7
Σχήμα 1.7: Φθορές στην τοιχοποιία και στον θόλο.....	8
Σχήμα 1.8: Συμπλήρωση τοιχοποιίας.....	9
Σχήμα 1.9: Δωμάτιο του λουτρικού συγκροτήματος.....	10
Σχήμα 1.10: Ανάκτηση της τοιχοποιίας και συμπλήρωση με υδραυλικό κονίαμα ρωγμών.....	11
Σχήμα 1.11: Υποστύλωση σε άνοιγμα του λουτρικού συγκροτήματος.....	11
Σχήμα 1.12: Τμήμα της Ελληνιστικής οχύρωσης.....	12
Σχήμα 1.13: Άποψη οικίας με στύλους οι οποίοι είναι πεσμένοι στο εσωτερικό της αυλής.....	13
Σχήμα 3.1: Είδη στοιχείων μιας διάστασης.....	31
Σχήμα 3.2: Είδη στοιχείων δυο διαστάσεων (Εξαδάκτυλος & Σταυροπούλου, 2006).	31
Σχήμα 3.3: Είδη στοιχείων τριών διαστάσεων (Εξαδάκτυλος & Σταυροπούλου, 2006).....	32
Σχήμα 3.4: Γραφική παράσταση της ακρίβειας της λύσης συναρτήσει του αριθμού των στοιχείων (Εξαδάκτυλος & Σταυροπούλου, 2006).....	33
Σχήμα 3.5: Επιβολή συνωριακών συνθηκών σε μοντέλο σήραγγας και αξιοποίηση της συμμετρίας ως προς τον άξονα των y (Εξαδάκτυλος & Σταυροπούλου, 2006).	35
Σχήμα 3.6: Παραδοχή επίπεδης τάσης (Αγιούταντης, 2002).....	38
Σχήμα 3.7: Παραδοχή επίπεδης παραμόρφωσης (Αγιουτάντης, 2002).....	38
Σχήμα 3.8 Γενική μορφή επιφάνειας αστοχίας (www.pisa.ab.ca, 2008).....	41
Σχήμα 3.9: Συμμετρία επιφάνειας αστοχίας (www.msm.cam.ac.uk, 2008).....	41
Σχήμα 4.1: Διακριτοποίηση πετρώματος.....	45
Σχήμα 4.2: Διακριτοποίηση πετρώματος και ρητίνης.....	45
Σχήμα 4.3: Σχηματική παράσταση συνωριακών συνθηκών πετρώματος.....	47
Σχήμα 4.4: Σχηματική παράσταση συνωριακών συνθηκών.....	47
Σχήμα 4.5: Γραφική απεικόνιση κριτηρίου αστοχίας Coulomb πετρώματος και ρητίνης.....	49
Σχήμα 4.6: Γραφική απεικόνιση κριτηρίου αστοχίας Coulomb (Marc-MENTAT, 2003).....	49
Σχήμα 4.7: Απεικόνιση ιδιοτήτων των υλικών (πετρώματος).....	51
Σχήμα 4.8: Απεικόνιση ιδιοτήτων των υλικών (πετρώματος-ρητίνης).....	52
Σχήμα 4.9: Ιδιότητες υλικού πετρώματος.....	53
Σχήμα 4.10: Ιδιότητες υλικού πετρώματος.....	53
Σχήμα 4.11: Κριτήριο αστοχίας πετρώματος.....	54
Σχήμα 4.12: Ιδιότητες υλικού πετρώματος.....	54
Σχήμα 4.13: Ιδιότητες υλικού ρητίνης.....	55
Σχήμα 4.14: Ιδιότητες υλικού πετρώματος.....	55
Σχήμα 4.15: Ιδιότητες υλικού ρητίνης.....	56
Σχήμα 4.16: Κριτήριο αστοχίας ρητίνης.....	56
Σχήμα 4.17: Ιδιότητες υλικού πετρώματος.....	57
Σχήμα 4.18: Κριτήριο αστοχίας πετρώματος.....	57
Σχήμα 4.19: Ιδιότητες υλικού ρητίνης.....	58
Σχήμα 4.20 :Ιδιότητες υλικού πετρώματος.....	58
Σχήμα 4.21: Κριτήριο αστοχίας πετρώματος.....	59
Σχήμα 4.22 Ιδιότητες υλικού ρητίνης.....	59
Σχήμα 4.23: Κριτήριο αστοχίας ρητίνης.....	60

Σχήμα 4.24: Ιδιότητες των υλικών (εστίαση κυλινδρικής οπής)	60
Σχήμα 4.25: Κατανομή κατακόρυφης τάσης σ_y στο μοντέλο 1	62
Σχήμα 4.26 Κατανομή κατακόρυφης τάσης σ_y στο μοντέλο 2	62
Σχήμα 4.27:Κατανομή οριζόντιας τάσης σ_x στο μοντέλο 1	63
Σχήμα 4.28:Κατανομή οριζόντιας τάσης σ_x στο μοντέλο 2	64
Σχήμα 4.29 Κατανομή κάθετης παραμόρφωσης ϵ_y στο μοντέλο 1	65
Σχήμα 4.30 Κατανομή κάθετης παραμόρφωσης ϵ_y στο μοντέλο 2	65
Σχήμα 4.31 Κατανομή οριζόντιας παραμόρφωσης ϵ_x στο μοντέλο 1	66
Σχήμα 4.32 Κατανομή οριζόντιας παραμόρφωσης ϵ_x στο μοντέλο 2	67
Σχήμα 4.33: Κατανομή κατακόρυφης τάσης σ_y στο μοντέλο 3	68
Σχήμα 4.34 Κατανομή κατακόρυφης τάσης σ_y στο μοντέλο 4	68
Σχήμα 4.35:Κατανομή οριζόντιας τάσης σ_x στο μοντέλο 3	69
Σχήμα 4.36 Κατανομή οριζόντιας τάσης σ_x στο μοντέλο 4	70
Σχήμα 4.37 Κατανομή κάθετης παραμόρφωσης ϵ_y στο μοντέλο 3	71
Σχήμα 4.38 Κατανομή κάθετης παραμόρφωσης ϵ_y στο μοντέλο 4	71
Σχήμα 4.39 Κατανομή οριζόντιας παραμόρφωσης ϵ_x στο μοντέλο 3	72
Σχήμα 4.40 Κατανομή οριζόντιας παραμόρφωσης ϵ_x στο μοντέλο 4	73
Σχήμα 4.41 Κατανομή κατακόρυφης τάσης σ_y στο μοντέλο 5	74
Σχήμα 4.42 Κατανομή κατακόρυφης τάσης σ_y στο μοντέλο 6	74
Σχήμα 4.43: Κατανομή οριζόντιας τάσης σ_x στο μοντέλο 5	75
Σχήμα 4.44 Κατανομή οριζόντιας τάσης σ_x στο μοντέλο 6	76
Σχήμα 4.45: Κατανομή κάθετης παραμόρφωσης ϵ_y στο μοντέλο 5	77
Σχήμα 4.46: Κατανομή κάθετης παραμόρφωσης ϵ_y στο μοντέλο 6	77
Σχήμα 4.47 Κατανομή οριζόντιας παραμόρφωσης ϵ_x στο μοντέλο 5	78
Σχήμα 4.48 Κατανομή οριζόντιας παραμόρφωσης ϵ_x στο μοντέλο 6	79
Σχήμα 4.49: Κόμβοι ελέγχου	80
Σχήμα 4.50: Αποτελέσματα κατακόρυφης τάσης συναρτήσει κατακόρυφης παραμόρφωσης σε σημείο πάνω στα μοντέλα	81
Σχήμα 4.51: Αποτελέσματα κατακόρυφης τάσης συναρτήσει κατακόρυφης παραμόρφωσης σε σημείο πάνω στα μοντέλα	82
Σχήμα 4.52: Αποτελέσματα οριζόντιας τάσης συναρτήσει οριζόντιας παραμόρφωσης σε σημείο πάνω στα μοντέλα	83
Σχήμα 4.53: Αποτελέσματα οριζόντιας τάσης συναρτήσει οριζόντιας παραμόρφωσης σε σημείο πάνω στα μοντέλα	83
Σχήμα 4.54:Αποτελέσματα οριζόντιας τάσης συναρτήσει οριζόντιας παραμόρφωσης σε σημείο πάνω στα μοντέλα	84
Σχήμα 4.55: Αποτελέσματα κατακόρυφης τάσης συναρτήσει κατακόρυφης παραμόρφωσης σε σημείο πάνω στα μοντέλα	85
Σχήμα 4.56: Διαγράμματα οριζόντιας τάσης συναρτήσει οριζόντιας παραμόρφωσης σε σημείο πάνω στο μοντέλο για διαφορετικές τιμές του λόγου Poisson	86
Σχήμα 4.57: Διαγράμματα κατακόρυφης τάσης συναρτήσει κατακόρυφης παραμόρφωσης σε σημείο πάνω στο μοντέλο για διαφορετικές τιμές του λόγου Poisson	86
Σχήμα 4. 58: Διαγράμματα οριζόντιας τάσης συναρτήσει οριζόντιας παραμόρφωσης σε σημείο πάνω στο μοντέλο για διαφορετικές τιμές του λόγου Poisson	87
Σχήμα 4.59: Διαγράμματα κατακόρυφης τάσης συναρτήσει κατακόρυφης παραμόρφωσης σε σημείο πάνω στο μοντέλο για διαφορετικές τιμές του λόγου Poisson	88

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2. 1: Ιδιότητες ρητινών (Μπαβέλλας & Μπουζούκου, 2005).....	23
Πίνακας 4.1: Συνοπτικός πίνακας μοντέλων με διαφορετικές ιδιότητες τόσο στο πέτρωμα όσο και στην ρητίνη.....	49
Πίνακας 4.2: Ιδιότητες υλικών.....	49
Πίνακας 4.3: Παράμετροι κριτηρίου αστοχίας Mohr Coulomb των υλικών.....	49

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μοντελοποίηση ενός πορώδους πετρώματος στερεωμένου με ρητίνη. Πιο συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκε αριθμητική προσομοίωση με την Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων της φόρτισης δισδιάστατων μοντέλων πετρώματος με κυκλικές οπές πληρωμένες εν μέρει με στερεωτικές ρητίνες.

Από την διερεύνηση προκύπτουν συμπεράσματα σχετικά με την μηχανική συμπεριφορά του στερεωμένου πετρώματος σε σχέση με το μη στερεωμένο και ιδιαίτερα για το κατά πόσον η επικάλυψη του πορώδους του πετρώματος (μέσω του ως άνω ιδεατού μοντέλου) μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την μηχανική συμπεριφορά του στερεωμένου υλικού. Για την επίλυση του προβλήματος αυτού σε δυο διαστάσεις χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό πακέτο Marc-Mentat με χρήση ελαστοπλαστικών καταστατικών εξισώσεων για τη ρητίνη και το πέτρωμα.

Εισαγωγή

Η Ελλάδα έχει πάρα πολλά αρχαία και νεότερα μνημεία κατασκευασμένα από λίθους που είναι τοποθετημένοι με ή χωρίς συνδετικό υλικό για τους οποίους γίνεται προσπάθεια συντήρησης και αποκατάστασης. Ένας τρόπος συντήρησης των λίθινων αυτών μνημείων είναι με επάλειψη με συνθετικές ρητίνες ώστε να προστατευθούν από τη διάβρωση. Γίνεται ιδιαίτερη αναφορά στην Αρχαία Απτέρα (Νομός Χανίων) διότι γίνεται πολύ δουλειά με στερεώσεις λίθων στην περιοχή αυτή και ορισμένα δείγματα που εξετάστηκαν μακροσκοπικά στα πλαίσια της παρούσας διερεύνησης προέρχονταν από την Αρχαία Απτέρα. Η δουλειά αυτή σήμερα γίνεται εκτενώς από την ΚΕ Εφορεία Προϊστορικών και Κλασσικών Αρχαιοτήτων και τεκμηριώνεται από διάφορες δημοσιεύσεις (Maravelaki, et al., 2006, Maravelaki, et al., 2008).

Συνήθως η εξέταση της συμβατότητας των πρόσθετων αυτών ρητινών με τους λίθους γίνεται βάσει της χημικής τους συνάφειας. Προτιμώνται ρητίνες που έχουν ιδιότητες παραπλήσιες με αυτές του πετρώματος ώστε κάτω από διαφορετικές συνθήκες καταπόνησης να μην δημιουργούν διαφορικές τάσεις και να μην συντελούν στην περαιτέρω καταστροφή λίθου σε σχέση με την επέμβαση. Ένας τρόπος για να διερευνήσει κανείς το κατά πόσο είναι συμβατή η επικάλυψη αρχαίων λίθων με ρητίνες ή ακόμα η προσρόφηση ρητινών στα πρώτα χιλιοστά στην εξωτερική στοιβάδα των λίθων αυτών με στόχο το κλείσιμο των πόρων και επομένως την αδιαβροχοποίηση του αρχαίου λίθου ιδιαίτερα όταν αυτός βρίσκεται κοντά σε διαβρωτικά περιβάλλοντα. Ένας τρόπος λοιπόν για να διερευνήσει κανείς τη μηχανική συμπεριφορά του στερεωμένου πια λίθου είναι με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων καθώς η γεωμετρία του προβλήματος είναι αρκετά πολύπλοκη για να μπορεί να λυθεί με αναλυτικές μεθόδους.

Η διάρθρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας έχει ως εξής:

Στο *Κεφάλαιο 1*, γίνεται μία ιστορική αναφορά στην περιοχή της Απτέρας και γενικά στα αρχαιολογικά έργα της περιοχής.

Στο *Κεφάλαιο 2*, αναφέρεται στις γενικές αρχές συντήρησης μνημείων με ρητίνες καθώς και στις κατηγορίες ρητινών και στις χρήσεις αυτών.

Στο *Κεφάλαιο 3*, αναφέρεται γενικά στοιχεία για τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και γίνεται αναφορά για τα κριτήρια αστοχίας

Στο *Κεφάλαιο 4* παρουσιάζεται η αριθμητική διερεύνηση της εντατικής κατάστασης του πετρώματος με ρητίνη, η περιγραφή των μοντέλων που εξετάστηκαν και συγκρίνονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την αριθμητική προσομοίωση.

Στο *Κεφάλαιο 5*, εξάγονται συμπεράσματα και γίνονται προτάσεις για βελτίωση της εργασίας αλλά και την περαιτέρω διερεύνηση του προβλήματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

Ιστορική αναφορά Απτέρας-Αρχαιολογικά Έργα

1.1 Ιστορική Αναφορά Απτέρας

Η επικρατέστερη άποψη για την προέλευση του ονόματος της αρχαίας Απτέρας είναι ότι πήρε το όνομα της από το χαρακτηριστικό γνώρισμα της Άρτεμης. Μία άλλη άποψη είναι ότι προήλθε από τον επώνυμο ήρωα από τους Δελφούς τον Πτέρας ή Απτέρας, ο οποίος και έδωσε το όνομα του στην πόλη.

Η αρχαία Απτέρα (Σχήμα 1.1 και 1.3) ήταν μία πόλη κράτος που καταλάμβανε τον περιτειχισμένο λόφο νοτιοανατολικά του κόλπου της Σούδας στον Νομό Χανίων ενώ διασχίζεται νότια και ανατολικά της από τον ποταμό Κοίλιαρη. Στα Άπτερα υπάρχουν ελληνικά, ρωμαϊκά και βυζαντινά ευρήματα καθώς κι ένα τουρκικό φρούριο. Στην κορυφή θα δείτε ένα πέραςμα στα δεξιά που οδηγεί στα βυζαντινά και τα ρωμαϊκά ερείπια.

Αν σταθεί στο κάστρο της, που έχει την καλύτερη θέα, θα αναγνωρίσει από κάτω το άλλο φρούριο της περιοχής, το Ιτζεδίν, το οποίο οι περισσότεροι γνωρίζουν για τις φυλακές που λειτουργούσαν εκεί μέχρι τη δεκαετία του '70. Το έχτισε το 1867 ο Τούρκος Ρεούφ πασάς και του έδωσε το όνομα του γιου του. Τα δύο αυτά κάστρα ενώνονται με τη μυθολογική ερμηνεία του ονόματος Απτέρα που μας παρέδωσε ο Στέφανος Βυζάντιος. Η περιοχή του λόφου ονομάστηκε Απτέρα (χωρίς φτερά) και τα νησάκια του όρμου της Σούδας, Λευκές. Τα ονόματα αυτά έχουν και σήμερα.

Πέρα από το φρούριο όμως, η Απτερα ή Απτέρα αναγνωρίζεται ως μία από τις σπουδαιότερες πόλεις-κράτη της Κρήτης. Αν και αναφέρεται σε πινακίδες Γραμμικής Γραφής Β' (14ος-13ος αι. π.Χ.), ιδρύεται στη θέση αυτή τον 8ο αιώνα π.Χ. και ακμάζει τον 4ο και τον 3ο αι. π.Χ.

Είναι εύκολα κατανοητό το μέγεθος και η σημασία της απλώς κοιτώντας το τείχος της, κομμάτι του οποίου σώζεται μέχρι σήμερα και έχει μήκος που φθάνει τα 4 χιλιόμετρα. Η εξουσία της πόλης τότε έφθανε από τα σημερινά Χανιά μέχρι το ακρωτήριο Δρέπανο. Στην περίοδο της Ρωμαιοκρατίας, η Απτερα αρχίζει και συρρικνώνεται σε πολιτικό επίπεδο, αλλά χτίζονται μερικά από τα εντυπωσιακότερα οικοδομήματα, όπως οι τεράστιες δεξαμενές που με δέος αντικρίζει ο επισκέπτης (Σχήμα 1.2).

Η κατοίκησή της συνεχίστηκε στα βυζαντινά χρόνια και λίγο πριν από τον ισχυρό σεισμό του 7ου αιώνα μ.Χ. χτίζεται το μοναστήρι του Αγίου Ιωάννη του Θεολόγου, που έπαυσε να λειτουργεί το 1964.

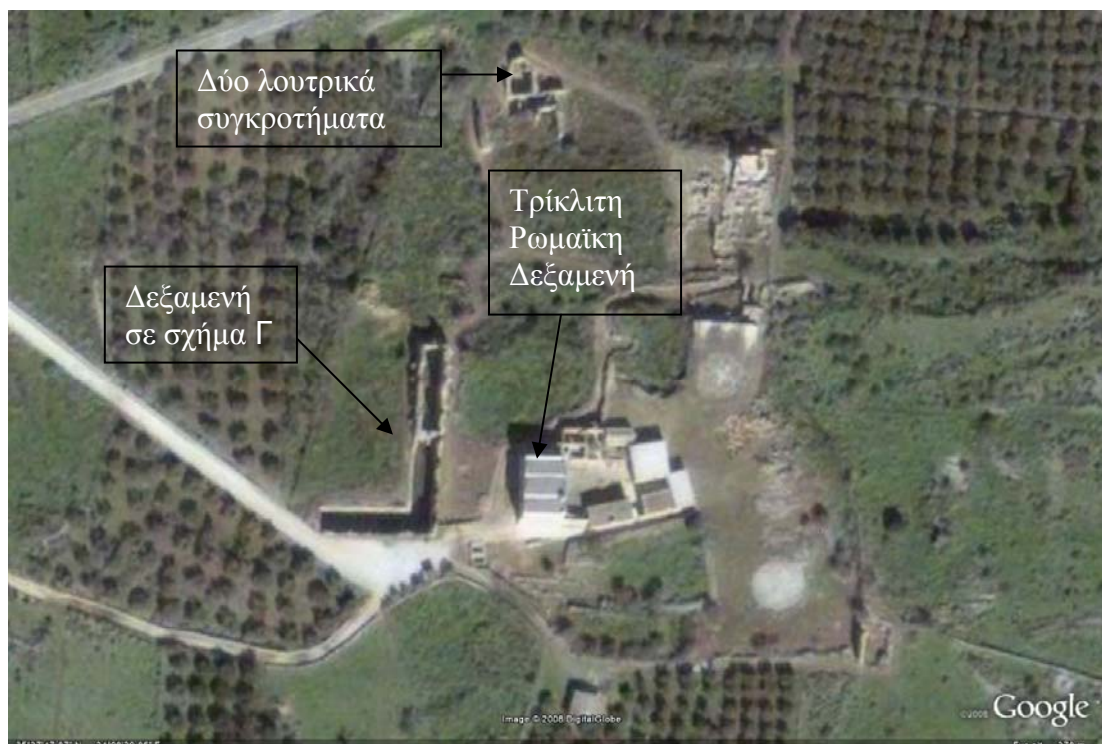
Η τοποθεσία της ευνοεί την ανάπτυξη της ελέγχοντας τον φυσικό κόλπο με τα δύο φυσικά λιμάνια που περικλείει του Μίνωα και της Κίσσαμου στην είσοδο του κόλπου. Για το λόγο αυτό ο ιστορικός Σβορόνος χαρακτήρισε την Απτέρα σαν την πιο εμπορική πόλη της Κρήτης. Με την κατάκτηση της από τους Ρωμαίους η Απτέρα, χάνει τον πολιτικό της ρόλο και ακολουθεί τη μορφή του κατακτημένου που εξυπηρετεί σε οικονομικό επίπεδο τις βλέψεις της Ρώμης. Καθώς ο βασικός τομέας της οικονομίας ήταν αγροτικός πρέπει να υποτεθεί ότι και η Απτέρα μετατράπηκε σε πόλη με τέτοιο χαρακτήρα. Η εγκατάλειψη της τοποθετείται στον 7^ο αιώνα μ.Χ, φυσικό επόμενο των δύο μεγάλων σεισμών του 365 μ.Χ και του 670 μ.Χ που είχαν σαν αποτέλεσμα την ερήμωση των περισσότερων πόλεων (Νινιού-Κινδελή, 1999) .



Σχήμα 1.1: Περιοχή Απτέρας

1.2 Γενικά Στοιχεία Έργων

Θέτονται ορισμένοι περιορισμοί στον αρχαιολογικό χώρο όπως: αυθεντικότητα, ελάχιστη επέμβαση και ‘αναστρεψιμότητα’ κάτω από το γενικό τίτλο της συντήρησης – διατήρησης του αρχαίου υλικού. Από την άλλη πλευρά όμως δημιουργείται η ανάγκη της αναγνωσιμότητας –κατανόησης αφού χωρίς εργασίες ανακτήσεων, αναδείξεων και αναστηλώσεων ορισμένα κτίρια θα παρέμεναν είτε κατακερματισμένα είτε σωρός ερειπίων.



Σχήμα 1.2: Άποψη του αρχαιολογικού χώρου Απτέρας από δορυφορική φωτογραφία (Google Earth, 2009)



Σχήμα 1.3: Κάτοψη του κάστρου της περιοχής Απτέρας από δορυφορική φωτογραφία (Google Earth, 2009)

Έτσι όλες οι επεμβάσεις βασίστηκαν στα στοιχεία της λεπτομερούς αποτύπωσης κάθε μνημείου χωριστά ως προς την κατασκευή, τη γεωμετρία, τη παθολογία και τη δομή

καθώς και τα εργαστηριακά δεδομένα σχετικά με την σύνθεση και την αντοχή των κονιαμάτων, ώστε αυτά των επεμβάσεων να είναι συμβατά με τα αρχικά. Ακολουθείται μία διαδικασία στερέωσης στηριγμένη σε παραδοσιακές μεθόδους, με πρωταρχικό σκοπό την προστασία των επικίνδυνα ετοιμόρροπων τμημάτων των κτιρίων.

1.3 Τρίκλιτη Ρωμαϊκή Δεξαμενή

Η Τρίκλιτη Ρωμαϊκή Δεξαμενή (Εικόνα 1.2) στο μεγαλύτερο μέρος της είναι υπόσκαφη ενώ με το νερό των δεξαμενών γενικά εξασφαλιζόταν το νερό για δημόσια χρήση, αφού κάθε οικιστική, γεωργική ή κτηνοτροφική μονάδα διέθετε τη δική της λαξευτή υπόγεια δεξαμενή.



Σχήμα 1.4: Εξωτερική άποψη τρίκλιτης ρωμαϊκής δεξαμενής

Η τοιχοποιία της δεξαμενής αυτής αποτελείται από μικρούς αργούς λίθους με μεγάλη ποσότητα ισχυρού συνδετικού κονιάματος ενώ το εσωτερικό και εξωτερικό μέτωπο αποτελείται από τριγωνικές πλίνθους στο $\frac{1}{4}$ των διαστάσεων μίας πλίνθου. Εσωτερικά, οι πλίνθοι αυτοί είναι επιχρισμένοι με ισχυρό υδραυλικό κονίαμα πάχους 4 εκατοστών. Εξωτερικά, παραμένουν ανεπίχριστοι ενώ στις περιοχές με υπόσκαφο τμήμα δεν υπάρχει το εξωτερικό μέτωπο των πλίνθων. Τέλος το δάπεδο έχει διαστρωθεί με υδραυλικό

κονίαμα ενώ η κατασκευή των τριών θόλων έχει γίνει από ημίεργες πέτρες με συνδετικό κονίαμα.

Όσον αφορά τη φθορά της δεξαμενής αυτή εντοπίζεται κυρίως στα «κενά» στην τοιχοποιία της, όπου κατά το μεγαλύτερο μέρος λείπει το εξωτερικό μέτωπο των επιχρισμένων τούβλων και σε μεμονωμένα σημεία η φθορά έχει προχωρήσει μέχρι το γέμισμα των τοίχων. Ακόμα οι θόλοι έχουν καταρρεύσει κοντά στην είσοδο της δεξαμενής και σε πολλά σημεία υπήρξε έντονη μετακίνηση λίθων, ορισμένοι δε είχαν αποκολληθεί πλήρως.

Η συντήρηση που έγινε υπό την αιγίδα της ΚΕ Εφορίας Αρχαιοτήτων το 1999 περιλάμβανε αρχικά την επιχωμάτωση στο εσωτερικό της και προσεκτικό καθαρισμό του δαπέδου της. Στη συνέχεια ακολούθησαν ανακτήσεις της τοιχοποιίας στο εσωτερικό της (Εικόνα 1.3), σε τμήματα που είχαν έντονες φθορές και μεγάλα «κενά». Ακόμα έγινε γέμισμα με λίθους ενώ οι τελικές επιφάνειες συμπλήρωσης από συμπαγείς πλίνθους έμειναν ανεπίχριστες. Το συνδετικό κονίαμα ήταν κοντά στη σύνθεση του αρχικού κονιάματος με προσθήκη μικρής ποσότητας λευκού τσιμέντου. Η αποκατάσταση των τριών θόλων έγινε στα τμήματα που έχουν καταρρεύσει ή είχαν έντονη μετακίνηση, από ημίεργες πέτρες και κονίαμα όπως στην αρχική κατασκευή.



Σχήμα 1.5: Εσωτερικό Τρίκλιτης Ρωμαϊκής δεξαμενής με εμφανή τα σημεία συντήρησης

1.4 Δεξαμενή σε Σχήμα Γ

Η κατασκευή της δεξαμενής σε σχήμα Γ (Εικόνα 1.4) είναι ίδια με αυτή της τρίκλιτης ενώ θεμελιώνεται κατά το μεγαλύτερο μέρος της στον λαξευμένο βράχο και κατά το άλλο στο επικλινές έδαφος. Κατά τις πρόσφατες εργασίες καθαρισμού και στερέωσης στην ίδια δεξαμενή εντοπίστηκε φρεάτιο καθίζησης και κλειστός αγωγός εξόδου μικρής διατομής, με πιθανό σύστημα καθαρισμού.



Σχήμα 1.6: Δεξαμενή σε σχήμα Γ

Οι φθορές της δεξαμενής επικεντρώνονται στην τοιχοποιία και στον θόλο (Εικόνα 1.5), ο οποίος έχει καταρρεύσει στο σύνολο του και σώζεται μικρό τμήμα του στη γένεση του.



Σχήμα 1.7: Φθορές στην τοιχοποιία και στον θόλο

Αρχικά η ΚΕ Εφορεία Αρχαιοτήτων το 1999 προχώρησε σε αποχωμάτωση της δεξαμενής και των φερτών που είχαν ύψος επίχωσης 5 μέτρα και εν συνεχεία σε συμπλήρωση στα τμήματα της τοιχοποιίας (Εικόνα 1.6), όπου υπήρχαν μεγάλα κενά. Ακόμα ιδιαίτερη φροντίδα δόθηκε στον καθαρισμό των τοίχων από βλάστηση στο πάνω μέρος τους αφού οι ρίζες και το νερό είχαν εισχωρήσει στη μάζα της τοιχοποιίας, προκαλώντας κατάρρευση τμημάτων και αποκόλληση άλλων.



Σχήμα 1.8: Συμπλήρωση τοιχοποιίας

1.5 Δύο Λουτρικά Συγκροτήματα

Πρόκειται για δύο συγκροτήματα της ρωμαιοκρατίας, δημοσίου χαρακτήρα, η ανασκαφή των οποίων δεν έχει ολοκληρωθεί. Τμήματα και των δύο (Εικόνα 1.7) σώζονται σε μεγάλο ύψος.

Η κατασκευή τους έγινε κατά ένα μεγάλο μέρος με μικρές ακατέργαστες πέτρες και μεγάλη ποσότητα συνδετικού κονιάματος. Οι επιφάνειες στο εσωτερικό των δωματίων είναι επιχρισμένες με υδραυλικό κονίαμα μεγάλου πάχους.



Σχήμα 1.9: Δωμάτιο του λουτρικού συγκροτήματος

Οι φθορές που παρουσιάζονται στα δύο συγκροτήματα είναι ρωγμές, κατάρρευση ορόφων και μεγάλων τμημάτων της παράπλευρης επιφάνειας, καταστροφή μέρους των επιχρισμάτων των τοίχων, χαλάρωση του συνδετικού υλικού των λίθων σε πολλά σημεία και κυρίως στα ψηλότερα σημεία λόγω βλάστησης και τέλος ασυνέχειες και μεγάλα κενά κατά τόπους στη στάθμη θεμελίωσης.

Οι επεμβάσεις στα κτίρια περιελάμβαναν αρχικά προσεκτικό καθαρισμό από την βλάστηση σε όλες τις επιφάνειες, αρμολόγημα στα υψηλότερα σημεία για την αποφυγή περαιτέρω διάβρωσης και στην συνέχεια ανακτήσεις τοιχοποιίας επιλεκτικά και μόνο στα σημεία που κινδύνευαν άμεσα από κατάρρευση (Εικόνα 1.8), εξασφαλίζοντας και το «δέσιμο» των τοίχων μεταξύ τους.



Σχήμα 1.10: Ανάκτηση της τοιχοποιίας και συμπλήρωση με υδραυλικό κονίαμα ρωγμών

Στο στάδιο των ανακτήσεων έχουν γίνει μόνιμες υποστυλώσεις σε ανοίγματα (Εικόνα 1.9), αντικατάσταση αποσαθρωμένων παραστάδων και συρραφή των μεγαλύτερων ρωγμών.



Σχήμα 1.11: Υποστύλωση σε άνοιγμα του λουτρικού συγκροτήματος

1.6 Ελληνιστική Οχύρωση

Η οχύρωση (Εικόνα 1.10) περικλείει το ισόπεδο του λόφου με μήκος 3.480 μέτρα, περικλείοντας μία επιφάνεια 586 στρεμμάτων και σώζεται σε πολύ καλή κατάσταση.



Σχήμα 1.12: Τμήμα της Ελληνιστικής οχύρωσης

Μέχρι τώρα έχει ολοκληρωθεί ο καθαρισμός από τη βλάστηση σε όλο το μήκος του, ενώ βρίσκεται σε εξέλιξη αποχωμάτωση στο βορειοδυτικό άκρο της οχύρωσης, όπου εντοπίζεται μία από τις πύλες της πόλης καθώς και ένας από τους οχυρωματικούς πύργους. Στην δυτική πλευρά, που υπάρχουν και τα μεγαλύτερα σε ύψος σωζόμενα τμήματα, έχει ξεκινήσει η καταγραφή της παθολογίας του τείχους. Στο τμήμα με τις έντονες φθορές πραγματοποιούνται περιορισμένες ανακτήσεις, διευθέτηση και απορροή των ομβρίων, με την προσπάθεια όμως να επικεντρώνεται στη βελτίωση της δομής του τείχους με την εφαρμογή αρμολογημάτων αλλά και ενεμάτων.

Στο τμήμα που έχει καταρρεύσει το εξωτερικό μέτωπο, λόγω της διάταξης των πεσμένων λίθων, είναι δυνατή η ταύτιση τόσο των στρώσεων όσο και των θέσεων, έτσι η κατεύθυνση προστασίας θα επικεντρωθεί στην επανατοποθέτηση τους στην αρχική τους θέση.

Τέλος στα υπόλοιπα τμήματα με λιγότερα προβλήματα, οι επεμβάσεις επικεντρώνονται σε περιορισμένες ανακτήσεις και διευθέτηση ομβρίων.

1.7 Οικία με Περίστυλη Αυλή

Η Οικία με Περίστυλη Αυλή πρόκειται για ένα κτίριο η ανασκαφή του οποίου δεν έχει ολοκληρωθεί ακόμα.

Σε επιμελημένο στυλοβάτη από μεγάλους δομούς, εδράζονται αράβδωτοι κίονες, οι περισσότεροι από τους οποίους είναι πεσμένοι στο εσωτερικό της αυλής (Εικόνα 1.11).



Σχήμα 1.13: Άποψη οικίας με στύλους οι οποίοι είναι πεσμένοι στο εσωτερικό της αυλής

Στόχος είναι αφού ταυτιστούν τα μέλη και αφού ολοκληρωθεί η ανασκαφή, να συνταχθεί μελέτη αναστήλωσης που θα γίνει με βάση κυρίως το αρχαίο υλικό, ώστε να επιτευχθεί μερική ανασύνθεση του μνημείου αλλά και η καλύτερη προστασία του αρχαίου υλικού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

Γενικές αρχές συντήρησης μνημείων με ρητίνες

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η στερεοποίηση θεωρείται μία από τις κυριότερες παρεμβάσεις συντήρησης για τους λίθους που χρησιμοποιούνται στα κτίρια, τα γλυπτά και τις διακοσμητικές επιφάνειες των αρχιτεκτονικών μνημείων, σε μια προσπάθεια να διατηρηθούν τα εξωτερικά στρώματα της πέτρας και να μειωθεί το ποσοστό διάβρωσης. Οι ιδιότητες των υλικών είναι σταδιακά τροποποιημένες από το βάθος του υγιούς πυρήνα μέχρι την πλήρως υποβαθμισμένη επιφάνεια. Τα κύρια χαρακτηριστικά αυτών των στρωμάτων είναι η απώλεια υλικού, η ενίσχυση της τραχύτητας και το αυξημένο πορώδες.

2.1 Ορισμοί

2.1.1 Ορισμός Μνημείου

Μνημείο είναι: «κατασκεύασμα, ίδρυμα εις μνήμην τινός, μεγαλοπρεπής τάφος, μνήμα, μασωλείον, παν ό,τι διεσώθη εκ της αρχαιότητος, το μαρτυρούν αρχαίον βίον, λείψανο της αρχαιότητος, παν ό,τι κείται εις ανάμνησιν».

«Ετυμολογικά, η λέξη προέρχεται από το ρήμα μνάομαι-μimνήσκω, που σημαίνει θυμάμαι κάτι, προειδοποιώ για κάτι, αφήνω υποθήκη στους επερχόμενους» (Μεγάλη Ελληνική Εγκυκλοπαίδεια, Πυρσός).

2.1.2 Ορισμός Ιστορικού Μνημείου

Ιστορικά μνημεία είναι: «τα αρχαιολογικής και ιστορικής καθόλου σημασίας μνημεία, ειδικότερον: εκείνα άτινα, λόγω υπερόχου αξίας, ανεγνωρισμένης, απέβαλον ούτως ειπείν συν τω χρόνω εις την κοινήν συνείδησιν των πεπολιτισμένων λαών την εθνότητά των και απέβησαν πνευματική κληρονομία όλων πάντα ανεξαιρέτως τα έργα της αρχιτεκτονικής, γλυπτικής, γραφικής και οιασδήποτε καθόλου τέχνης, οίον παντοία οικοδομήματα και αρχιτεκτονικά μνημεία, λίθοι μετά

γλυφής τινος εκ των μνημείων τούτων προερχόμενοι, και βάθρα, υδραγωγεία, οδοί, τείχη, τάφοι, λαξεύματα, αγάλματα, ανάγλυφα, ειδώλια, επιγραφαί, ζωγραφίαι, ψηφοθετήματα, αγγεία, όπλα, κοσμήματα και άλλα ες οιασδήποτε ύλης έργα και σκεύη, δακτυλιόλιθοι, νομίσματα από των αρχαιοτάτων χρόνων και εφεξής...» (Μεγάλη Ελληνική Εγκυκλοπαίδεια, Πυρσός).

Συνεπώς ο χαρακτηρισμός ενός δημιουργήματος ως ιστορικού μνημείου εξαρτάται από:

- την ιστορική αξία του,
- την ηλικία του,
- τον προορισμό του,
- την αισθητική,
- τη συμβολική,
- την τεχνολογική και
- την τεχνική αξία του.

Δεν είναι απαραίτητο να ισχύουν συγχρόνως όλα αυτά τα κριτήρια και, επίσης, δεν απαιτείται να ισχύει αναγκαστικά ο παράγων της ηλικίας του. Έτσι, περιλαμβάνονται σ' αυτόν τον ορισμό και νεώτερα δημιουργήματα, που κρίνονται ως διατηρητέα γιατί ικανοποιούν κάποιον από τους άλλους παράγοντες και κυρίως την ιστορική ή και τη συμβολική του σημασία (Σκουλικίδης, 2000).

2.1.3 Ορισμός Συντήρησης

Η συντήρηση (conservation) περιλαμβάνει τις εξής σωστικές επεμβάσεις:

- Τη «δομική συντήρηση» (εννοούνται οι στατικές επεμβάσεις), και
- Τη «συντήρηση της επιφάνειας», η οποία περιλαμβάνει:
- Τον καθαρισμό (cleaning),
- Τη στερέωση (consolidation),
- Τη προστασία (protection), και
- Την τεχνητή πατίνα (artificial patina).

2.1.4 Ορισμός αναστήλωσης

Η αναστήλωση αποτελεί έμμεση σωστική στατική δομική επέμβαση, και θα μπορούσε να θεωρηθεί ως έμμεση σωστική επέμβαση και της επιφάνειας. «Αναστήλωση σημαίνει επανατοποθέτηση στοιχείων ενός κτίσματος, που έχουν καταπέσει, ή ανασύνθεση ενός μνημείου από τα αυθεντικά κομμάτια του». (Σκουλικίδης, 2000).

2.2 Γενικές Αρχές Συντήρησης

Η συντήρηση των μνημείων, είναι έργο συνεργασίας πολλών ειδικοτήτων, όπως χημικών μηχανικών, χημικών, συντηρητών και ειδικευμένων μαρμαροτεχνητών, ως προς τις μεθόδους τα υλικά και την εκτέλεση, με την σύμφωνη γνώμη αρχαιολόγων ή ειδικευμένων αρχιτεκτόνων, μόνο ως προς την τελική υφή της επιφάνειας και την αισθητική και ιστορική συνέπεια. Ως προς τον χαρακτηρισμό των πετρωμάτων, χρειάζεται επίσης Γεωλόγος, και βέβαια η καταπολέμηση των μικροοργανισμών πρέπει να γίνεται από βιολόγους (Σκουλικίδης, 2000).

Για όποιες από τις ενέργειες δομικής συντήρησης ή συντήρησης της επιφάνειας κι αν πρόκειται, θα πρέπει τα υλικά που επιλέγονται, να είναι τα λιγότερο βλαβερά. Θα πρέπει λοιπόν οι μέθοδοι και τα υλικά που επιλέγονται, να πληρούν τις εξής αρχές (Σκουλικίδης, 2000):

- Τα υλικά πρέπει να μπορούν εύκολα να αφαιρεθούν, όποτε εμφανιστεί κάποια περενέργεια, χωρίς να αφήνουν φθορές στην επιφάνεια.
- Τα υλικά δεν πρέπει να αλλάζουν το χρώμα, την αρχαιολογική αξία, και γενικότερα την εμφάνιση του μνημείου.
- Τα υλικά πρέπει να είναι ανθεκτικά στο χρόνο, δηλαδή να μην διαβρώνονται εύκολα, να μην αλλάζει το χρώμα τους, να μην ρηγματώνονται, και να μην χάνουν τη συνάφειά τους με τα γειτονικά νέα ή παλιά υλικά.
- Τα υλικά αυτά θα πρέπει να είναι απολύτως συμβατά με τα υπόλοιπα δομικά υλικά, προκειμένου να μην τους δημιουργούν παρενέργειες, με τους εξής τρόπους:
- Πρέπει να έχουν ουδέτερο PH=7.

- Διότι εάν το PH των υλικών < 7 , είναι όξινα και θα διαλύσουν όλα τα δομικά υλικά., ενώ
- Εάν το PH των υλικών > 8 , είναι αλκαλικά θα διαλύσουν πολλά φυσικά υλικά ή προσμίξεις, π.χ. Al_2O_3 , Fe_2O_3 .
- Δεν πρέπει να υδρολύονται γιατί δημιουργούν όξινο ή αλκαλικό περιβάλλον, ούτε πρέπει να υδρολύονται τα προϊόντα αντίδρασής τους με το γύψο.
- Δεν πρέπει να διογκώνονται.
- Πρέπει ο συντελεστής θερμικής διαστολής τους να είναι παραπλήσιος με το συντελεστή θερμικής διαστολής των παρακείμενων υλικών.
- Δεν πρέπει να προσβάλλονται από το υπεριώδες φως.
- Δεν πρέπει να έλκουν αιωρούμενα σωματίδια.
- Δεν πρέπει να αποτελούν ευνοϊκό περιβάλλον για την ανάπτυξη αποικιών μικροοργανισμών.
- Πρέπει να έχουν τις κατάλληλες μηχανικές αντοχές και σκληρότητα, που να είναι όμως παραπλήσιες με των παρακείμενων δομικών υλικών.
- Δεν πρέπει να προσβάλλονται εύκολα από τους ρυπαντές.
- Δεν πρέπει να είναι επιβλαβή κατά την τοποθέτησή τους για την υγεία των συντηρητών και των επισκεπτών.
- Πρέπει να είναι φιλικά προς το περιβάλλον.

2.2.1 Αναγκαιότητα Σχεδιασμού Υλικών Επέμβασης

Ενώ στις σύγχρονες κατασκευές το κόστος των υλικών είναι κατά προσέγγιση 20-30% του συνολικού κόστους του έργου, σε έργα επισκευών μνημειακών κατασκευών αυτό είναι σημαντικά μεγαλύτερο λόγω:

- ειδικών απαιτήσεων που πρέπει να πληρούνται
- μη διαθεσιμότητας στην αγορά (παραγωγή κατά παραγγελία)

Επιπλέον πολύ συχνά παρατηρούνται αστοχίες μετά την επισκευή που δεν συνδέονται πάντα με το υλικό καθ' αυτό αλλά με τον τρόπο που εφαρμόστηκε το υλικό ή από δευτερογενή προβλήματα που δημιουργήθηκαν σε σχέση με το φορέα / υπόβαθρο στο οποίο εφαρμόστηκε ή από την έλλειψη πρόβλεψης της συμπεριφοράς του υλικού στις συγκεκριμένες συνθήκες (περιβάλλοντος του μνημείου) (Παπαγιάννη, 2007).

Ο σχεδιασμός των υλικών επέμβασης αποτελεί ορθολογική απαίτηση για τη βελτίωση της ποιότητας των έργων αποκατάστασης που έχει ως επακόλουθο τη μείωση του ολικού κόστους.

Ο σχεδιασμός υλικών επέμβασης σε μνημειακές κατασκευές (το θέμα αντιμετωπίζεται κυρίως σε κατασκευές από τοιχοποιία) αποτελεί πρόβλημα γιατί (Παπαγιάννη, 2007):

- Τα υλικά επέμβασης δεν πρέπει μακροπρόθεσμα να επιδεινώνουν τα προβλήματα φθοράς ή βλαβών για την αποφυγή των οποίων έγινε η επέμβαση ή να προκαλούν νέα άλλου τύπου.
- Θα πρέπει στο σχεδιασμό να λαμβάνεται υπόψη η διατήρηση των αξιών του μνημείου όπως είναι π.χ. τα αισθητικά στοιχεία.
- Αυτά αναφέρονται ή υπονοούνται και στις διεθνείς συμβάσεις ή διακηρύξεις (Χάρτες) που έχουν ισχύ για τέτοιου είδους επεμβάσεις.

2.2.2 Προβλήματα που συναντώνται στα έργα αποκατάστασης μνημείων

- Μη πρόβλεψη ή διάθεση περιορισμένου προϋπολογισμού για την τεκμηρίωση της υπάρχουσας κατάστασης.
- Έλλειψη εξειδικευμένων εργολάβων /κατασκευαστών.
- Έλλειψη εξειδικευμένων τεχνιτών.
- Δυσκολία εύρεσης κατάλληλων υλικών στη σύγχρονη αγορά.
- Δυσκολία ελέγχου της καταλληλότητας υλικών.
- Σχετικά μεγάλο κόστος των «παραδοσιακών υλικών».

2.2.3 Τοιχοποιίες

Οι τοιχοποιίες των ιστορικών κατασκευών χαρακτηρίζονται (Παπαγιάννη, 2007):

- Από τη χαμηλή θλιπτική αντοχή εν σχέση με το σκυρόδεμα (25-50MPa). Γι' αυτό και έχουν μεγάλα πάχη
- Την αδυναμία μεταφοράς οριζόντιων τάσεων. Μεταφέρουν κυρίως θλιπτικά φορτία και η αντοχή εξαρτάται από το πάχος των αρμών

- Τη σχετικά καλή συνάφεια πλίνθου – κονιάματος που επηρεάζει την εφελκυστική αντοχή της τοιχοποιίας.

Οι παλαιοί οικοδόμοι λόγω της έλλειψης ισχυρών υδραυλικών κονιών στοχεύανε στη δημιουργία δομικού ιστού που να μη συγκρατεί το νερό αλλά να επιτρέπει την ελεύθερη αναπνοή και ταχεία ξήρανση. Αυτό αποτελεί στοιχείο της παλαιάς φιλοσοφίας δόμησης το οποίο πρέπει να λαμβάνεται υπόψη σε κάθε επέμβαση σε ιστορικό κτίσμα και να καθορίζει τη συμβατότητα παλαιού – νέου υλικού.

Τα κυριότερα προβλήματα που συναντάμε στις ιστορικές τοιχοποιίες είναι (Παπαγιάννη, 2007):

- Ρηγματώσεις (συνήθως διαμπερείς) λόγω υπερφορτίσεων, διαφορικών καθιζήσεων σεισμών
- Αποκολλήσεις τμημάτων ή αποκλίσεις από την κατακόρυφο συνήθως σε μεγάλου ύψους τοιχοποιίες λόγω σεισμών ή κατολισθήσεων ή ανεπαρκούς αντιστήριξης
- Φθορά λόγω του χρόνου (από θερμοϋγρασιακές μεταβολές). Εμφανίζονται μικρορωγμές στα υλικά και έλλειψη σταθερότητας όγκου με απώλεια μάζας, χαλάρωση συνδετικού υλικού.
- Φθορά λόγω μηχανισμού κρυστάλλωσης αλάτων κυρίως κοντά στην επιφάνεια της τοιχοποιίας.

Οι πιο συχνές επεμβάσεις επισκευής αφορούν (Παπαγιάννη, 2007):

- Αρμολογήματα
- Ανακατασκευές
- Ενισχύσεις τοιχοποιιών με ενέματα πλήρωσης με και χωρίς ελκυστήρες ή ραφές
- Διαμορφώσεις δαπέδων
- Επιχρίσεις (εσωτερικά ή εξωτερικά)

Στερέωση είναι η εφαρμογή ενός υλικού, το οποίο διεισδύοντας μέσω του πορώδους της πέτρας, βελτιώνει (Μαρινάκη, 2004):

- τη συνοχή,
- τα μηχανικά χαρακτηριστικά, και επίσης
- τη προσκόλληση των στρωμάτων που έχουν υποστεί αλλαγές, στο μη αλλαγμένο υπόστρωμα.

Οι κύριες μέθοδοι σταθεροποίησης, βασίζονται σε τρεις διαδικασίες (Μαρινάκη, 2004):

1. Αντικατάσταση εκείνων των συστατικών του υποστρώματος που είναι επιρρεπή στην επίθεση παραγόντων της ατμόσφαιρας, και τη διείσδυση χημικά ανθεκτικών υλικών μέσα από το πορώδες, προκειμένου να συνενωθούν οι κόκκοι .
2. Εισχώρηση πυριτίου (που προέρχεται από τους εστέρες σιλικόνης) μέσα στους πόρους της πέτρας.
3. Διαπότιση της πέτρας με οργανικά πολυμερή, προκειμένου να συγκολληθούν οι κόκκοι που έχουν υποστεί αλλαγές, και να στεγανοποιηθεί και να προστατευθεί η πέτρα από χημικές, βιολογικές, κ.α. επιθέσεις.

Τα κύρια χαρακτηριστικά των στερεωτικών, είναι: η τιμή τους, το βάθος της διείσδυσης, η τροποποίηση του πορώδους, η συμβατότητα με την πέτρινη στήριξη. Τα στερεωτικά έχουν διαφορετική χημική σύνθεση, και μπορούν να ταξινομηθούν με τον ακόλουθο τρόπο (Μαρινάκη, 2004):

1. **Ανόργανα στερεωτικά.** Έχουν χρησιμοποιηθεί από την αρχαιότητα. Βασικά είναι: $\text{Ba}(\text{OH})_2$, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, αλκαλικά πυριτικά άλατα και μερικές ενώσεις φθορίου (φθοριούχα πυριτικά άλατα).
2. **Οργανο-πυριτικά στερεωτικά ή αλκοξύ-σιλάνες (alcoxi-silanes).** Η δράση τους ως στερεωτικά, έγκειται στο σχηματισμό μιας δομής παρόμοιας με αυτήν του πυριτίου. Είναι ταξινομημένα κάτω από την ακόλουθη ονοματολογία: αλκυλικές-σιλάνες (alkyl-silanes), αλκοξύ-σιλάνες (alcoxi-silanes), αλκυλικές-αλκοξύ-σιλάνες

(alkyl-alcoxi-silanes), siliconates, poly-alkyl-alcoxisilanes και alkyl-aril poly-siloxanes.

3. Οργανικά στερεωτικά προϊόντα ή συνθετικά πολυμερή. Είναι τα προϊόντα που χρησιμοποιούνται εκτενέστερα από τη δεκαετία του '60. Τα κύρια οργανικά στερεωτικά είναι τα κεριά, τα ακρυλικά πολυμερή, **οι εποξειδικές ρητίνες**, ρητίνες του πολυεστέρα estirene, τα πολυμερή του βινυλίου, πολυουρεθάνες, νάυλον, κ.λ.π. (Μαρινάκη, 2004)

2.3 Ρητίνες

Η ρητίνη είναι ένα φυσικό ή συνθετικό μίγμα που αρχίζει από μία κατάσταση υψηλού ιξώδους και σκληραίνει με την χρήση. Συνήθως, η ρητίνη είναι διαλυτή στο αλκοόλ, αλλά δεν είναι σε νερό. Υπάρχουν πολλές διαφορετικές κατηγορίες ρητίνης, ανάλογα με ακριβή χημική σύνθεση και τις πιθανές χρήσεις. Υπάρχουν πολλές εφαρμογές για τις ρητίνες, που κυμαίνονται από την τέχνη μέχρι σε παραγωγή πολυμερών, ενώ πολλοί καταναλωτές σε καθημερινή βάση, έρχονται σε επαφή με τα προϊόντα που περιέχουν ρητίνη.

Η φυσική ρητίνη προέρχεται από τα φυτά. Ένα κλασικό παράδειγμα είναι η ρητίνη που προέρχεται από το πεύκο. Μια σειρά από άλλα φυτά παράγουν ρητίνες οι οποίες έχουν χρησιμοποιηθεί από τον άνθρωπο για χιλιάδες χρόνια. Η κόλλα αυτή τείνει να είναι πιο ήπια και περισσότερο πλαστική από την ρητίνη. Ορισμένα φυτά παράγουν μια παρόμοια ουσία που ονομάζεται κόλλα ή κόλλα ρητίνης η οποία αλληλεπιδρά με το νερό.

Η ρητίνη που προέρχεται από τα φυτά μπορεί να είναι διάφανη έως σκούρα καφέ, και διαφέρει ανάλογα με την αδιαφάνεια και την σκληρότητα. Ορισμένες φυτικές ρητίνες είναι επίσης εξαιρετικά ασταθείς, καθώς περιλαμβάνουν ασταθείς ενώσεις. Τα δημοφιλή διακοσμητικά υλικά κεχριμπάρι είναι απολιθώματα φυτικής ρητίνης. Το πλούσιο σε χρυσό χρώμα του κεχριμπαριού είναι μια κοινή σκιά για τις φυτικές ρητίνες, αλλά κεχριμπάρι μπορεί επίσης να βρεθεί σε πιο σπάνια χρώματα, όπως γαλάζιο.

Ως επί το πλείστον, τα πολυμερή που φτιάχνονται απο "ρητίνες" στην πραγματικότητα φτιάχνονται από συνθετική ρητίνη, η οποία είναι φθηνότερη και ευκολότερη στο να βελτιώσει. Η Συνθετική ρητίνη είναι πολύ πιο σταθερή, προβλέψιμη, και ενιαία από την φυσική ρητίνη, καθώς γίνεται κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες, χωρίς τη δυνατότητα της εισαγωγής των προσμείξεων. Οι ρητίνες αυτές φτιάχνονται από τα χημικά προϊόντα που συνδυάζονται στο εργαστήριο για την τόνωση της αντίδρασης που έχει ως αποτέλεσμα τη διαμόρφωση μίας συνθετικής ρητίνης (<http://www.wisegeek.com>, 2009).

Οι συνθετικές ρητίνες είναι υλικά με παρόμοιες ιδιότητες με τις φυσικές. Η κλασική ποικιλία είναι η εποξειδική ρητίνη, που κατασκευάζεται μέσω των αντιδράσεων πολυμερισμού ή πολυσυμπύκνωσης, που χρησιμοποιείται ως πολυμερές σώμα για τις κόλλες και τα σύνθετα. Η εποξειδική ρητίνη είναι δύο φορές ισχυρότερη από το τσιμέντο, άνευ ραφής και αδιάβροχη. Συνεπώς, ήταν κυρίως σε λειτουργία για βιομηχανικούς λόγους δαπέδων από τη δεκαετία του '60. Από το 2000, εντούτοις, οι εποξειδικές ρητίνες πολυουρεθάνιου χρησιμοποιούνται στο εσωτερικό επίσης, κυρίως στη δυτική Ευρώπη.

Μια ακόμη κατηγορία, που αποτελεί 75% των ρητινών που χρησιμοποιούνται, είναι ακόρεστη ρητίνη πολυεστέρα. Η ρητίνη ιονικής ανταλλαγής είναι μια άλλη σημαντική κατηγορία με την εφαρμογή στον καθαρισμό νερού και την κατάλυση των οργανικών αντιδράσεων. Ακόμα δύο σημαντικές κατηγορίες ρητινών είναι οι *Πολυεστερικές ρητίνες* και *Βινυλεστερικές ρητίνες* (www.en.wikipedia.org, 2009).

2.4 Κατηγορίες Συνθετικών Ρητινών

Οι ρητίνες που χρησιμοποιούνται συνήθως για την παραγωγή συνθέτων υλικών είναι οι εποξειδικές, οι πολυεστερικές και οι βινυλεστερικές. Οι σημαντικότερες μηχανικές ιδιότητες τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2. 1: Ιδιότητες ρητινών (Μπαβέλλας & Μπουζούκου, 2005)

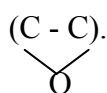
Είδος ρητίνης	Εφελκυστική αντοχή (MPa)	Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	Πυκνότητα (g/cm ³)
Εποξειδική	55 – 130	1.0 – 4.5	1.20 – 1.30
Πολυεστερική	35 – 104	2.1 – 4.1	1.10 – 1.46
Βινυλεστερική	73 – 81	3.0 – 3.6	1.12 – 1.32

2.4.1 Εποξειδικές ρητίνες

Όπως συμβαίνει και με τα άλλα είδη ρητινών, οι εποξειδικές ιδιότητες ποικίλουν σημαντικά ανάλογα με τη ρητίνη βάσης και τις χημικές ενώσεις, που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή τους.

Ο συντελεστής ιξώδους των εποξειδικών ρητινών είναι γενικά μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο συντελεστή, τόσο των πολυεστερικών όσο και των βινυλεστερικών ρητινών. Χρειάζονται επίσης περισσότερο χρόνο για να αναπτύξουν πλήρως τις μηχανικές τους ιδιότητες και έχουν υψηλό κόστος, σε σχέση με τις άλλες δύο κατηγορίες ρητινών.

Εποξειδικό ή πολυεποξειδικό είναι ένα θερμοσκληρυνόμενο πολυμερές. Οι εποξειδικές ρητίνες αποτελούνται από αλυσίδες που έχουν τουλάχιστον δύο επόξυ ομάδες



Οι συνηθέστερες εποξειδικές ρητίνες παράγονται από την αντίδραση επιχλωρυδρίνης και διφαινόλης Α, όπου παράγονται διγλυκιδυλαιθέρες της διφαινόλης Α. Από πλευράς σύστασης οι εποξειδικές ρητίνες μπορεί να στερεές ή ρευστές, οι οποίες τελικά μετατρέπονται σε θερμοσκληρυνόμενο προϊόν με την προσθήκη ενός «σκληρυντή».

Οι εποξειδικές ρητίνες μπορούν να πολυμερισθούν από ένα ευρύ φάσμα σκληρυντών. Η επιλογή του κατάλληλου σκληρυντή εξαρτάται από τις τεχνικές εφαρμογής, τον απαιτούμενο «χρόνο ζωής σε δοχείο» (pot life), τις συνθήκες σκλήρυνσης και τις επιδιωκόμενες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες.

Στην πράξη τα διάφορα συστήματα εποξειδικής ρητίνης – μέσω σκλήρυνσης τροποποιούνται συνήθως με διάφορα πρόσθετα, τα οποία μπορεί να είναι αδρανή ή δραστικά, δηλαδή να αντιδρούν με την έποξυ ομάδα. Η σύνθεση των συστημάτων αυτών κρατείται μυστική από τους παραγωγούς τους.

Γενικώς, τα εποξειδικά είναι γνωστά για την εξαιρετική τους πρόσφυση, χημική και θερμική αντίσταση, καλές έως εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες και πολύ καλές ιδιότητες ηλεκτρικής μόνωσης, αλλά σχεδόν κάθε ιδιότητα τους μπορεί να τροποποιηθεί (πχ. εποξειδικά με πληρωτικό υλικό τον άργυρο έχουν καλή ηλεκτρική αγωγιμότητα, παρόλο που τα εποξειδικά γενικώς είναι ηλεκτρικοί μονωτές) (Μοίρα, 2009).

2.4.2 Πολυεστερικές ρητίνες

Οι ρητίνες αυτές αποτελούν τον κύριο όγκο των πολυμερών, που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία παραγωγής συνθέτων υλικών. Πρόκειται για ακόρεστους πολυεστέρες, που παράγονται από την αντίδραση γλυκόζης, είτε με διβασικά οξέα είτε με ανυδρίτες. Λόγω της μεγάλης ποικιλίας των συστατικών τους στοιχείων, οι ιδιότητες των πολυεστερικών ρητινών μπορούν να διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους.

Η χημική αντίδραση, με την οποία παράγονται οι πολυεστέρες είναι σημαντικά εξώθερμη. Για τον λόγο αυτό απαιτείται μεγάλη προσοχή στη χρήση της ποσότητας της μάζας των αντιδρώντων. Εάν η μάζα είναι μεγάλη, το φύλλο πολυεστέρα μπορεί να αναφλεγεί ή να ρηγματωθεί. Αντίθετα εάν η μάζα είναι μικρή, η θερμότητα που εκλύεται δεν επαρκεί για την ολοκλήρωση της αντίδρασης.

Οι πολυεστέρες παρουσιάζουν μέτρια ανθεκτικότητα στους διαλύτες και τα οξέα, ενώ είναι ευπαθείς στις βάσεις και στο νερό υψηλής θερμοκρασίας. Είναι γενικά λιγότερο ανθεκτικοί σε κόπωση, συγκριτικά με τις εποξειδικές και τις βινυλεστερικές ρητίνες. Η παραμόρφωση θραύσης είναι κατά κανόνα της τάξης του 1%. Ωστόσο το κυριότερο μειονέκτημα των πολυεστερικών ρητινών, για χρήση τους σε κατασκευές που κατοικούνται, είναι η δυσάρεστη οσμή, λόγω της χημικής τους σύστασης. (Μπαβέλλας & Μπουζούκου 2005).

2.4.3 Βινυλεστερικές ρητίνες

Πρόκειται για υβριδικές ρητίνες, που παράγονται με αλυσιδωτές αντιδράσεις ενός εποξειδικού πολυμερούς, με ακρυλικές ή μεθακρυλικές ενώσεις. Εξαιτίας της παρουσίας του εποξειδικού πολυμερούς, οι βινυλεστερικές ρητίνες, σε σχέση με τις πολυεστερικές, είναι περισσότερο εύκαμπτες, σκληρότερες, πιο ανθεκτικές σε κόπωση και λιγότερο χημικά ενεργές. Οι υδροξυλικές ενώσεις, που περιέχονται στο εποξειδικό πολυμερές, σχηματίζουν δεσμούς υδρογόνου με αντίστοιχες ενώσεις στην επιφάνεια των ινών γυαλιού. Με τον τρόπο αυτό βελτιώνεται σημαντικά η σύνδεση της ρητίνης με τις ίνες, αν και δε φτάνει στο επίπεδο της συγκολλησιμότητας των εποξειδικών ρητινών. Αυτό οφείλεται κυρίως στη μεγάλη απώλεια όγκου των βινυλεστερικών ρητινών, λόγω συστολής ξηράνσεως.

Από την άλλη πλευρά όμως, οι βινυλεστερικές ρητίνες δεν έχουν τόσο υψηλή αντοχή και ανθεκτικότητα σε κόπωση, όσο οι εποξειδικές. Λόγω της χημικής τους σύστασης, αντιμετωπίζουν επίσης το ίδιο πρόβλημα δυσσομίας με τις πολυεστερικές ρητίνες. Η συστολή ξηράνσεως είναι γενικά της τάξεως του 5 με 10%. Το κόστος τους είναι συνήθως μεταξύ του κόστους των εποξειδικών και των πολυεστερικών ρητινών (Μπαβέλλας & Μπουζούκου, 2005).

2.5. Εφαρμογές

Οι εποξειδικές ρητίνες οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν και σε αυτή την εργασία βρίσκουν αξιόλογη χρήση σε εφαρμογές όπως (<http://en.wikipedia.org/wiki/Epoxy>, 2009):

2.5.1 Χρώματα και επικαλυπτικά

Η ευρύτερη εφαρμογή των εποξειδικών ρητινών γίνεται στον τομέα των επικαλυπτικών με καλές ηλεκτρικές ιδιότητες και αντοχή σε χημικά μέσα. Περιλαμβάνονται τα επικαλυπτικά σε μορφή σκόνης για πλυντήρια, στεγνωτήρια και άλλες ηλεκτρικές συσκευές κουζίνας. Τα επικαλυπτικά με βάση τα εποξειδικά σε σκόνη, που η συγκόλληση τους γίνεται με τήξη, χρησιμοποιούνται ευρέως για αντιδιαβρωτική προστασία χαλύβδινων σωλήνων και εξαρτημάτων που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία ελαίων και αερίων, σε σωληνώσεις (χαλύβδινες) για τη μεταφορά πόσιμου νερού, σε ράβδους οπλισμού σκυροδέματος κλπ.

Εποξειδικά επικαλυπτικά χρησιμοποιούνται επίσης ευρέως ως αστάρια για τη βελτίωση της πρόσφυσης των θαλασσιών χρωμάτων και της αυτοκινητοβιομηχανίας. Μεταλλικά δοχεία κονσέρβας και άλλα δοχεία για τρόφιμα, όπως π.χ. τομάτες που είναι όξινες συνήθως επικαλύπτονται με εποξειδικά για να αποτραπεί η διάβρωση τους. Οι εποξειδικές ρητίνες χρησιμοποιούνται επίσης για δάπεδα υψηλών απαιτήσεων και για διακοσμητικά δάπεδα.

2.5.2 Συγκολλητικά

Τα εποξειδικά συγκολλητικά ανήκουν στα συγκολλητικά εκείνα που ονομάζονται «δομικά συγκολλητικά» (που περιλαμβάνουν επίσης πολυουρεθάνες, ακρυλικά, κυανοακρυλικά κλπ.). Τα υψηλών απαιτήσεων αυτά εποξειδικά χρησιμοποιούνται στην κατασκευή αεροσκαφών, αυτοκινήτων, ποδηλάτων κλπ όπου απαιτούνται υψηλές αντοχές πρόσφυσης. Τα εποξειδικά συγκολλούν ξύλο, μέταλλο, γυαλί, πέτρα και κάποια πλαστικά.

Μπορεί να είναι εύκαμπτα ή δύσκαμπτα, διαφανή ή αδιαφανή/έγχρωμα, σκληρυνόμενα γρήγορα ή πολύ αργά και είναι γενικώς ασυγκρίτως καλύτερα από τα κοινά συγκολλητικά όσον αφορά την αντίστασή τους στη θερμότητα και στα χημικά.

2.5.3 Βιομηχανικά εργαλεία παραγωγής και σύνθετα υλικά

Τα εποξειδικά χρησιμοποιούνται για την παραγωγή καλουπιών, μοντέλων, αντικολλητών φύλλων, στη χύτευση και στη βιομηχανική παραγωγή βοηθημάτων. Τα εποξειδικά χρησιμοποιούνται επίσης στην παραγωγή στοιχείων ενισχυμένων με ίνες ή από σύνθετα υλικά. Είναι πιο ακριβά από τις πολυεστερικές ρητίνες και τις ρητίνες από βινυλεστέρα, αλλά γενικώς παράγουν ισχυρότερα και πιο ανθεκτικά στη θερμοκρασία σύνθετα υλικά.

2.5.4 Ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά συστήματα

Οι εποξειδικές ρητίνες εφαρμόζονται στη βιομηχανία των ηλεκτρονικών, σε κινητήρες, γεννήτριες, μετασχηματιστές, στον εξοπλισμό διανομής μεγάλων ηλεκτρικών φορτίων, στους μονωτήρες μετασχηματιστών και στους μονωτήρες. Οι εποξειδικές ρητίνες είναι εξαιρετικοί ηλεκτρικοί μονωτές και προστατεύουν τα ηλεκτρικά στοιχεία από μικρά κυκλώματα, σκόνη και υγρασία.

2.5.5 Ναυτιλιακές εφαρμογές

Τα εποξειδικά πωλούνται σε καταστήματα σιδηρικών, σε σετ δύο συστατικών. Μπορεί όμως να πωλούνται σε καταστήματα με ναυτιλιακά είδη για θαλάσσιες εφαρμογές. Τα εποξειδικά δεν χρησιμοποιούνται ως εξωτερική στρώση ενός σκάφους γιατί επηρεάζονται από τις υπεριώδους (UV) ακτίνες. Συνήθως χρησιμοποιούνται κατά την επισκευή και συναρμολόγηση σκαφών, και κατόπιν επικαλύπτονται από ένα πολυουρεθανικό χρώμα ή βερνίκι θαλάσσης που παρέχουν προστασία από τις υπεριώδους ακτίνες.

2.5.6 Αεροδιαστημικές εφαρμογές

Στην αεροδιαστημική βιομηχανία, οι εποξειδικές ρητίνες εφαρμόζονται ως το υλικό της δομικής μήτρας το οποίο μετά ενισχύεται με ίνες, όπως υάλου, άνθρακος, Kevlar και βορίου. Επίσης χρησιμοποιούνται ως δομική κόλλα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων

3.1 Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μια αριθμητική μέθοδος, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση περίπλοκων προβλημάτων μηχανικής. Στην μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, η λύση του εκάστοτε προβλήματος προκύπτει από την διατύπωση συστημάτων εξισώσεων σε υποπεριοχές του πεδίου στο οποίο έγκειται το πρόβλημα και την κατόπιν συναρμολόγησή τους σε ένα καθολικό σύστημα για όλο το πεδίο που θα δώσει την τελική λύση του προβλήματος. Οι εξισώσεις που διατυπώνονται σε επίπεδο στοιχείου, καθώς και ο τρόπος συναρμολόγησης αυτών αναφέρονται εκτενώς στις επόμενες παραγράφους.

Χρονική αναδρομή στην ανάπτυξη της μεθόδου

Τα πεπερασμένα στοιχεία, με την σύγχρονη μορφή τους, πρωτοεμφανίστηκαν το 1943, σε μια μελέτη του Γάλλου Courant (Desai & Abel, 1972) με χρήση συνεχών εξισώσεων κλαδικής μορφής σε τριγωνικά στοιχεία. Η πρώτη εφαρμογή της μεθόδου πραγματοποιήθηκε το 1956 από τους Turner, Clough, Martin και Topp, για την ανάλυση στατικών και δυναμικών προβλημάτων στην αεροναυπηγική. Έκτοτε, σε διάστημα μιας δεκαετίας, η εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, με την ονομασία που τους έδωσε ο Clough το 1960, επεκτάθηκε και σε άλλα πεδία της θεωρητικής και εφαρμοσμένης μηχανικής.

Με την πάροδο των χρόνων, η μεθοδολογία των πεπερασμένων στοιχείων υπέστη σημαντικές βελτιώσεις. Ο Przemieniecki το 1968 έδειξε ότι η μέθοδος είναι εφαρμόσιμη σε προβλήματα ανάλυσης τάσεων. Οι Zienkiewicz και Cheung διατύπωσαν το 1967 μια

εκτεταμένη ερμηνεία της μεθόδου και απέδειξαν την εφαρμοσιμότητά της σε κάθε γενικό πρόβλημα πεδίου. Η θεώρηση αυτή των πεπερασμένων στοιχείων οδήγησε στην κατασκευή των εξισώσεων, που χρησιμοποιούνται στην μέθοδο, με την βοήθεια μεθόδων σταθμισμένων υπολοίπων (weighted residual methods) όπως είναι η μέθοδος Galerkin, η μέθοδος Petrov- Galerkin, καθώς και η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων (Εξαδάκτυλος & Σταυροπούλου, 2006).

Τα περισσότερα των βιβλίων, δημοσιεύσεων και συνεδρίων που έχουν ως κύριο αντικείμενο τα πεπερασμένα στοιχεία περιέχουν την βασική θεωρία της μεθόδου, τις εξισώσεις που διέπουν τα πεπερασμένα στοιχεία, εφαρμογές αυτών σε προβλήματα γεωμηχανικής, ρευστομηχανικής, θερμοδυναμικής κ.α., καθώς και αλγόριθμους επίλυσης διαφόρων προβλημάτων σε γλώσσες προγραμματισμού H/Y (Fortran 77).

Σήμερα, η συγκεκριμένη μέθοδος θεωρείται μια από τις καλύτερες αριθμητικές μεθόδους, σημαντικά γρήγορη και εφαρμόσιμη σε ένα ευρύτατο πεδίο προβλημάτων της μηχανικής.

Θεμελιώδη βήματα της ΜΠΣ

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων βασίζεται σε τρία βασικά βήματα (Εξαδάκτυλος & Σταυροπούλου, 2006) :

- Πρώτο βήμα είναι η διαίρεση του πεδίου μιας, δύο, ή τριών διαστάσεων, σε επιμέρους μικρότερα τμήματα, κατά τρόπο τέτοιο ώστε να αντιπροσωπεύεται με την μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια η γεωμετρία του προβλήματος σε συνάρτηση με την επικείμενη λύση αυτού.
- Δεύτερο βήμα είναι η προσέγγιση της λύσης, σε κάθε τμήμα του πεδίου, σαν γραμμικός συνδυασμός των τιμών σε συγκεκριμένα σημεία (κόμβοι) και των συναρτήσεων μορφής (shape functions) που ορίζονται για κάθε κόμβο.
- Τρίτο βήμα είναι η παραγωγή αλγεβρικής σχέσης μεταξύ των τιμών στους κόμβους (nodes) κατά την επίλυση σε κάθε τμήμα και η συνένωση των επιμέρους τμημάτων για να επιτευχθεί η επίλυση του.

Διαίρεση του πεδίου

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το κύριο χαρακτηριστικό της μεθόδου είναι η υποδιαίρεση ενός δεδομένου πεδίου ορισμού (domain) σε απλούστερης γεωμετρίας υποπεδία. Τα υποπεδία αυτά καλούνται ‘στοιχεία’ (elements) και αποτελούν το βασικό χαρακτηριστικό της μεθόδου. Η διαίρεση του πεδίου έχει δύο πλεονεκτήματα (IGE, 2003):

- Επιτρέπει την αντιπροσώπευση, με μεγάλη ακρίβεια, περίπλοκων γεωμετρικών σχημάτων και δίνει την δυνατότητα συνυπολογισμού των ιδιοτήτων ανόμοιων υλικών.
- Επιτρέπει την προσέγγιση της λύσης σε κάθε στοιχείο, σε ένα συνεχές κλειστής μορφής πολύγωνο, και ως εκ τούτου, την γνώση του αριθμητικού αποτελέσματος των παραμέτρων σε κάθε στοιχείο, άρα σε οποιοδήποτε μέρος, του πεδίου ορισμού του προβλήματος.

Η διαίρεση ενός πεδίου με απροσδιόριστο αριθμό βαθμών ελευθερίας σε στοιχεία βοηθά επίσης στον προσδιορισμό πεπερασμένων βαθμών ελευθερίας, οι οποίοι είναι το σύνολο των άγνωστων μεταβλητών που αντιστοιχούν σε κάθε στοιχείο. Ωστόσο, η κατάλληλη εκλογή του τύπου των στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν για την διαίρεση του πεδίου εξαρτάται από διάφορους παράγοντες που, όμως, σαν κοινό παρανομαστή έχουν την καλύτερη δυνατή προσομοίωση του πεδίου από τα στοιχεία αυτά (Εξαδάκτυλος & Σταυροπούλου, 2006).

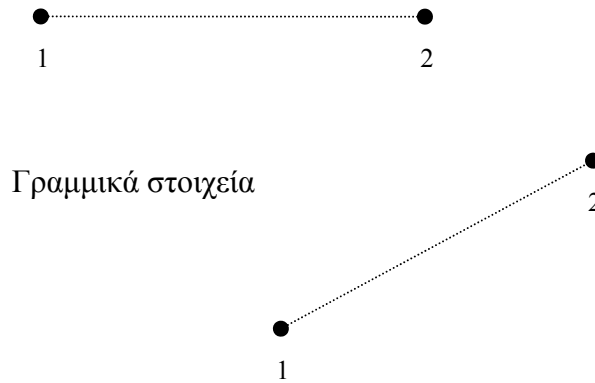
Είδη στοιχείων

Το είδος των στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν εξαρτάται κύρια από την διαστασιολόγηση του προβλήματος και τις διαστάσεις που απαιτούνται για την περιγραφή του προβλήματος. Ορισμένα από τα βασικότερα είδη στοιχείων που χρησιμοποιούνται στην μέθοδο παρουσιάζονται στα επόμενα σχήματα.

Στοιχεία σε μια διάσταση

Όταν η γεωμετρία του προβλήματος ή το υλικό ή και άλλες παράμετροι (όπως η τάση, η παραμόρφωση, η θερμοκρασία) μπορούν να περιγραφούν στα πλαίσια μιας κύριας

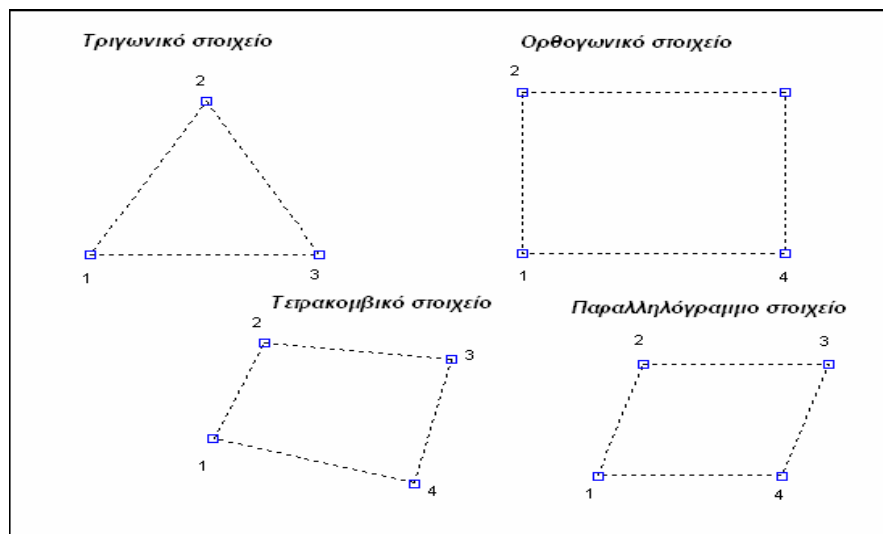
διάστασης, τότε για την διακριτοποίηση μπορούν να χρησιμοποιηθούν μονοδιάστατα ή γραμμικά στοιχεία (σχήμα 3.1)



Σχήμα 3.1: Είδη στοιχείων μιας διάστασης

Στοιχεία σε δυο διαστάσεις

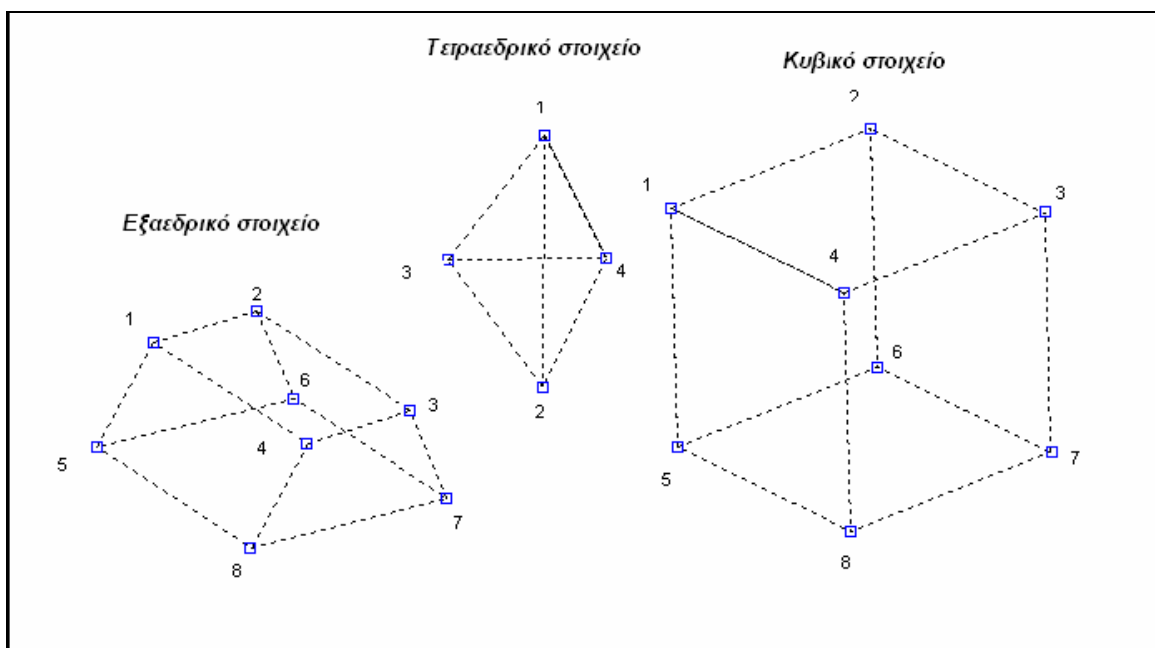
Αντίστοιχα, σε προβλήματα στα οποία είναι ενδεδειγμένη η χρήση δυο διαστάσεων, η σε γεωμετρίες στις οποίες η τρίτη διάσταση είναι σημαντικά μικρότερη των υπολοίπων δύο, τότε χρησιμοποιούνται δισδιάστατα στοιχεία (βλ. σχ. 3.2). Τα ευρέως χρησιμοποιούμενα στοιχεία σε αυτήν την κατηγορία είναι τα τριγωνικά. Ωστόσο, χρησιμοποιούνται αρκετά και τα ορθογωνικά αλλά και τα τετρακομβικά και τα παραλληλόγραμμα, τα οποία, αν και μπορούν να προκύψουν από δυο ή τέσσερα τριγωνικά στοιχεία εφόσον ενωθούν, μπορούν να αποδειχτούν καλύτερη επιλογή σε ορισμένες περιπτώσεις.



Σχήμα 3.2: Είδη στοιχείων δυο διαστάσεων (Εξαδάκτυλος & Σταυροπούλου, 2006).

Στοιχεία σε τρεις διαστάσεις

Τέλος, αν το πρόβλημα προς επίλυση πρέπει να αντιμετωπιστεί σε πεδίο τριών διαστάσεων, χρησιμοποιούνται τα αντίστοιχα τρισδιάστατα στοιχεία (βλ. σχ. 3.3), όπως κυβικά, τετραεδρικά ή εξαεδρικά στοιχεία. Η χρήση τρισδιάστατου χωρίου είναι δυσκολότερη σε σχέση με το γραμμικό ή το δισδιάστατο πεδίο, παρόλα αυτά σε ορισμένα προβλήματα γεωμηχανικής πλησιάζει πιο πολύ στην πραγματική λύση του προβλήματος και αποφεύγει παραδοχές που στις άλλες δυο περιπτώσεις αυξάνουν τις πιθανότητες εσφαλμένων αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων.



Σχήμα 3.3: Είδη στοιχείων τριών διαστάσεων (Εξαδάκτυλος & Σταυροπούλου, 2006)

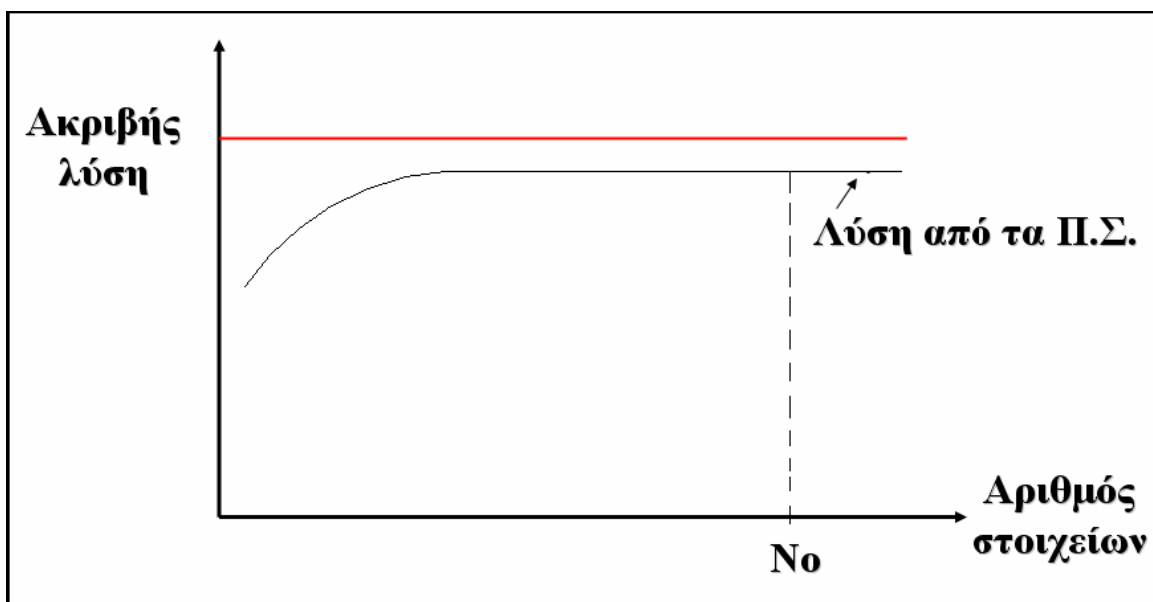
Μέγεθος των στοιχείων

Το μέγεθος των στοιχείων στα οποία διακριτοποιείται το πρόβλημα είναι πλέον σημαντικό για την βέλτιστη προσέγγιση της λύσης του εκάστοτε προβλήματος. Όσο πιο μικρό το μέγεθος των στοιχείων, τόσο πιο ακριβή είναι τα αποτελέσματα που επιτυγχάνονται. Ωστόσο, δεν πρέπει να παραγνωριστεί το γεγονός ότι μικρότερα στοιχεία, άρα και περισσότερα τον αριθμό, οδηγούν σε μεγαλύτερο χρόνο υπολογισμού. Θεμιτή, άρα, είναι η χρήση στοιχείων διαφορετικού μεγέθους μεταξύ των μέσα σε ένα πρόβλημα (Εξαδάκτυλος & Σταυροπούλου, 2006).

Αριθμός των στοιχείων

Ο αριθμός των στοιχείων που χρησιμοποιούνται στην διακριτοποίηση του προβλήματος είναι από τις πιο σημαντικές παραμέτρους της διακριτοποίησης. Μεγάλος αριθμός στοιχείων κάνει ακριβέστερη την προσέγγιση στην λύση του προβλήματος, αυξάνει όμως και τον χρόνο υπολογισμού των εξισώσεων που διέπουν το πρόβλημα, οι οποίες είναι πολλαπλάσιες των κόμβων των στοιχείων.

Για κάθε πρόβλημα, όμως, αποδεικνύεται ότι πέρα από κάποιον βέλτιστο αριθμό στοιχείων, η ακρίβεια της λύσης δεν αλλάζει σημαντικά με την περαιτέρω αύξηση των στοιχείων (σχήμα 3.4). Έτσι σε κάθε πρόβλημα ξεχωριστά προσδιορίζεται ο βέλτιστος αριθμός πεπερασμένων στοιχείων που θα δώσει την ακριβέστερη λύση.



Σχήμα 3.4: Γραφική παράσταση της ακρίβειας της λύσης συναρτήσει του αριθμού των στοιχείων (Εξάδακτυλος & Σταυροπούλου, 2006)

Θα πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι, για λογιστικούς λόγους, τόσο τα στοιχεία, όσο και οι κόμβοι αριθμούνται. Ωστόσο η αρίθμηση τους δεν διέπεται από κάποιον κανόνα, αλλά είναι τελείως αυθαίρετη. Όμως, ανάλογα με την αρίθμηση, διαμορφώνεται και η χρήση υπολογιστικής μνήμης.

Φόρτιση των υλικών, αρχικές και συνοριακές συνθήκες

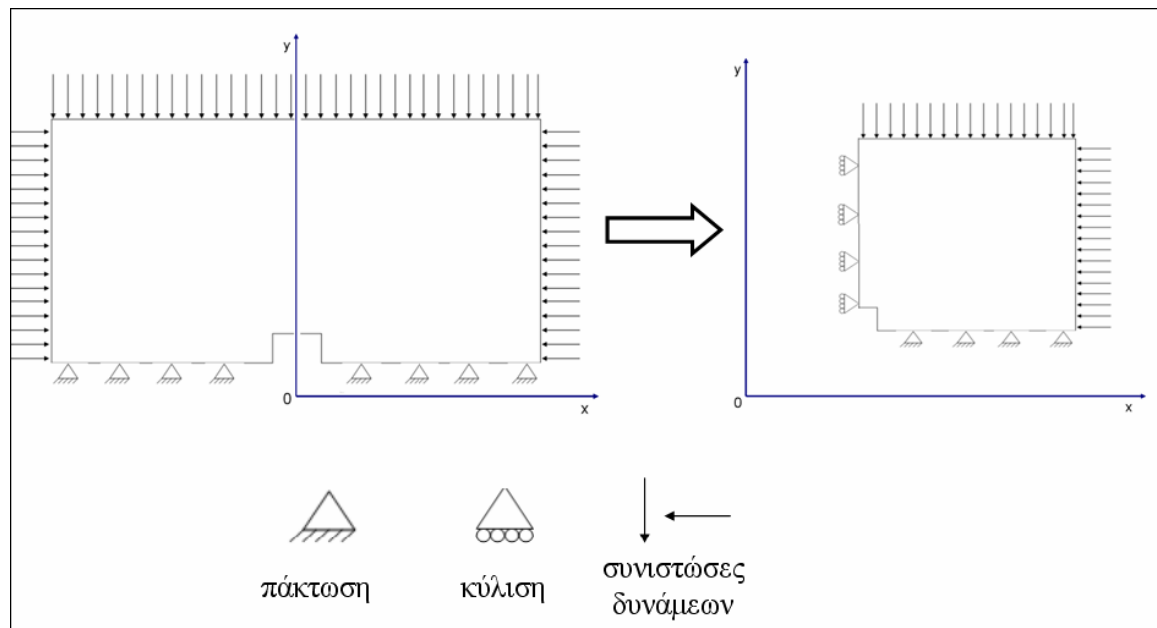
Μετά την διαίρεση του χωρίου σε υποπεδιά και την δημιουργία των καταστατικών εξισώσεων που τα διέπουν, προσαρτώνται στο μοντέλο που έχει κατασκευαστεί οι αρχικές

και συνοριακές συνθήκες (boundary conditions). Η εισαγωγή των αρχικών και συνοριακών συνθηκών είναι απαραίτητη για την επίλυση του προβλήματος πεδίου.

Σε ένα πρόβλημα επίλυσης πεδίου ροής απαιτούνται τόσο οι τιμές της συνάρτησης Φ σε όλο το πεδίο για χρόνο $t=0$ (αρχική συνθήκη), όσο και οι συναρτήσεις που δίνουν τις τιμές αυτής ή της καθετης βαθμίδας της στους συνοριακούς κόμβους του πεδίου για κάθε χρονική στιγμή t (συνοριακές συνθήκες). Σε αυτή την περίπτωση όπου απαιτούνται αρχικές και συνοριακές συνθήκες, το πρόβλημα χαρακτηρίζεται ως πρόβλημα αρχικών-συνοριακών τιμών.

Αντίθετα, αν ο χρόνος δεν επηρεάζει την λύση του προβλήματος (δηλαδή δεν υπάρχει χρονοεξαρτώμενος όρος στη διαφορική εξίσωση), τότε απαιτούνται μόνο συνοριακές συνθήκες και το πρόβλημα είναι συνοριακών τιμών.

Σκοπός της εφαρμογής των συνοριακών συνθηκών είναι καταρχήν να αποδοθούν δυνάμεις και τάσεις στο μοντέλο που έχει κατασκευαστεί, και κατά δεύτερον να επιβληθούν περιοριστικές δυνάμεις, ώστε να κρατηθεί το μοντέλο σε ισορροπία. Η εφαρμογή αυτών διαφέρει από μοντέλο σε μοντέλο ανάλογα με την γεωμετρία, τον τρόπο φόρτισης και το επιθυμητό αποτέλεσμα του προβλήματος. Στο σχήμα 3.5 φαίνονται οι συνοριακές συνθήκες που επιβάλλονται σε ένα μοντέλο σήραγγας δυο διαστάσεων με τετραγωνικό άνοιγμα, όπου, με κατάλληλη χρήση συνοριακών συνθηκών, μπορεί να αξιοποιηθεί η συμμετρία ορθογωνικού μοντέλου. Η αξιοποίηση της συμμετρίας καθίσταται σημαντική διότι δύναται να λυθεί το μισό πρόβλημα, αντί όλου, με επακόλουθη την μείωση κατά το ήμισυ των πράξεων και του χρόνου επίλυσης του προβλήματος (Εξαδάκτυλος & Σταυροπούλου, 2006).



Σχήμα 3.5:Επιβολή συνοριακών συνθηκών σε μοντέλο σήραγγας και αξιοποίηση της συμμετρίας ως προς τον άξονα των y (Εξαδάκτυλος & Σταυροπούλου, 2006).

Η φόρτιση του διαιρεμένου πεδίου, που αντιπροσωπεύει το υλικό, δύναται να επιτευχθεί με έναν ή περισσότερους από τους ακόλουθους τρόπους (Εξαδάκτυλος & Σταυροπούλου, 2006):

- επιβολή δυνάμεων πεδίου στην μάζα του στοιχείου (πχ. βαρυτικές δυνάμεις, body forces).
- επιβολή σημειακών δυνάμεων στους κόμβους του στοιχείου (κομβικές δυνάμεις, nodal forces).
- επιβολή κατανεμημένων δυνάμεων στις πλευρές του στοιχείου (επιφανειακές δυνάμεις, traction forces).
- επιβολή μετατοπίσεων στους κόμβους του στοιχείου.

Οι βαρυτικές δυνάμεις εφαρμόζονται σε περιπτώσεις βραχομάζας, υπόγειων ανοιγμάτων και λοιπών προβλημάτων γεωμηχανικής. Από την άλλη, οι κομβικές δυνάμεις εφαρμόζονται σε μοντέλα υλικών όπου η φόρτιση είναι σημειακή. Οι δυνάμεις επιφάνειας έχουν εφαρμογή σε δοκίμια υλικών ή όπου αλλού δεν μπορούν να εφαρμοστούν οι προαναφερθέντες τρόποι φόρτισης.

Η επιβολή μετατοπίσεων στους συνοριακούς κόμβους εφαρμόζεται όταν υφίσταται ενδεδωμένη συμμετρία στο μοντέλο (σχήμα 3.5), όπου κατά την περίπτωση αυτή οι μετατοπίσεις είναι μηδενικές στην διάσταση που είναι κάθετη στο σύνορο. Εφόσον δηλαδή υπάρχει συμμετρία του μοντέλου ως προς τον άξονα y , τότε, επάνω στο σύνορο η μετατόπιση ως προς την διάσταση x θα είναι μηδενική ($dx=0$) και αντιστρόφως. Η αξιοποίηση της συμμετρίας, όπως έχει προαναφερθεί, και η κατάλληλη χρήση συνοριακών συνθηκών, δύναται να μειώσει σε σημαντικό βαθμό τον αριθμό των στοιχείων, κατά συνέπεια και των κόμβων στο χωρίο, με αποτέλεσμα να μειωθεί αισθητά και ο χρόνος επίλυσης του προβλήματος. Επίσης η επιβολή μηδενικών μετατοπίσεων στα σύνορα του χωρίου έχει εφαρμογή και στην περίπτωση κατά την οποία το μοντέλο εκτείνεται προς το άπειρο. Για παράδειγμα, σε ένα υπόγειο άνοιγμα όπου οι διαστάσεις του μοντέλου ως προς τον άξονα x εκτείνονται στο άπειρο, προκείμενου να μην δημιουργηθεί ένα μοντέλο άπειρων διαστάσεων, το οποίο δεν θα έχει δυνατότητα λύσης, εφαρμόζονται μηδενικές μετατοπίσεις ως προς τον άξονα y , όπως και προηγουμένως, σε μια απόσταση από το άνοιγμα αρκετά μεγάλη, σε σχέση με τις διαστάσεις του ίδιου του ανοίγματος. Αποτέλεσμα αυτής της ιδιότητας των συνοριακών συνθηκών, είναι να μειωθεί και σε αυτή την περίπτωση ο χρόνος επίλυσης του προβλήματος (Εξαδάκτυλος & Σταυροπούλου, 2006).

Στην περίπτωση κατά την οποία φορτιστεί ένα σώμα και όλοι του οι κόμβοι είναι ελεύθεροι να κινηθούν, τότε δεν υφίσταται παραμόρφωση, αλλά απλή μετακίνηση (ή στροφή). Σε αυτή την περίπτωση δεν είναι δυνατή η επίλυση του προβλήματος, διότι το φαινόμενο δεν υπακούει στην ίδια καταστατική εξίσωση (Εξαδάκτυλος & Σταυροπούλου, 2006).

Τύποι συνοριακών συνθηκών

Δεδομένων των προαναφερθέντων, υπάρχουν τρεις τύποι συνοριακών συνθηκών:

- Προσδιορισμός της ζητούμενης παραμέτρου (μετατόπισης). Οι συνθήκες αυτές ονομάζονται γεωμετρικές (geometric or forced boundary conditions) και είναι γνωστές ως συνθήκες Dirichlet.
- Προσδιορισμός της μεταβολής της ζητούμενης παραμέτρου (παράγωγος της μετατόπισης). Οι συνθήκες αυτές ονομάζονται φυσικές συνοριακές συνθήκες (slope or gradient, natural boundary conditions) και είναι γνωστές ως συνθήκες Neumann.
- Προσδιορισμός και των δυο παραπάνω παραμέτρων ή μικτές συνθήκες

Ιδιότητες Υλικών

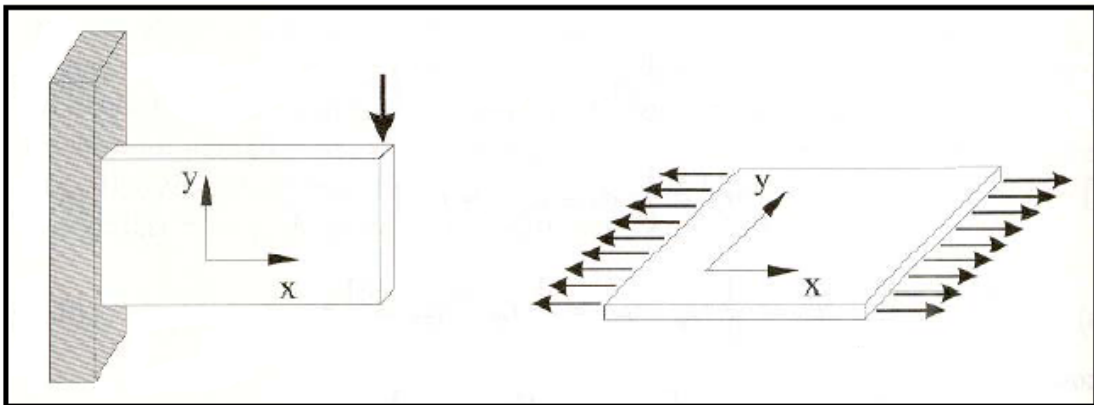
Κατά την εφαρμογή των ιδιοτήτων του υλικού, επιλέγονται οι τιμές των σταθερών του μοντέλου με το οποίο προσομοιώνεται το υλικό. Το απλούστερο μοντέλο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι το γραμμικό ελαστικό μοντέλο (παρόλο που το μοντέλο αυτό δεν θεωρείται το πλέον κατάλληλο για την περιγραφή της συμπεριφοράς πετρωμάτων και εδαφικών υλικών) σε μια, δυο ή τρεις διαστάσεις.

Γεωμετρικές ιδιότητες

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).

3.1.1 Επίλυση με Θεώρηση Επίπεδης Τάσης

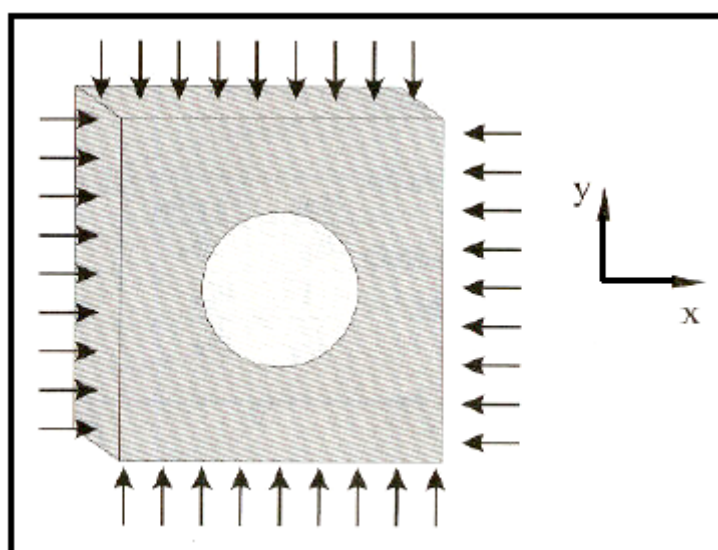
Σύμφωνα με τη θεώρηση επίπεδης τάσης, όταν η τρίτη διάσταση (z) ενός σώματος είναι πολύ μικρή σε σχέση με τις άλλες δυο και τα φορτία που δέχεται το σώμα ανήκουν στο επίπεδο των δυο σημαντικών διαστάσεων (επίπεδο x, y), μπορεί να θεωρηθεί ότι οι συνιστώσες τάσης κατά τον τρίτο άξονα είναι πολύ μικρές σε σύγκριση με τις συνιστώσες κατά το επίπεδο φόρτισης (Σχήμα 3.6) (Αγιουτάντης, 2002).



Σχήμα 3.6: Παραδοχή επίπεδης τάσης (Αγιούτάντης, 2002)

3.1.2 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 3.7). 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 3.7: Παραδοχή επίπεδης παραμόρφωσης (Αγιουτάντης, 2002)

Προκειμένου να αξιολογηθεί η μηχανική συμπεριφορά της ρητίνης και του συνολικού μείγματος, κατασκευάστηκαν αρκετά δισδιάστατα μοντέλα προσομοίωσης της μικροδομής της ρητίνης και του συνολικού μείγματος με τη χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων

3.2 Κριτήριο Mohr- Coulomb

Η τάση διαρροής συνήθως καθορίζεται με ένα κριτήριο διαρροής όπως το κριτήριο Mohr-Coulomb το οποίο είναι το απλούστερο που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της αστοχίας των γεωυλικών. Η αστοχία συμβαίνει όταν η διατμητική τάση τ σε ένα οποιοδήποτε επίπεδο ενός σώματος ξεπεράσει τη διατμητική αντοχή, που είναι γραμμική συνάρτηση της ορθής τάσης σ στο επίπεδο αυτό. Αν θεωρηθεί ότι η αντοχή είναι ανεξάρτητη της διεύθυνσης φόρτισης, τότε το πέτρωμα θεωρείται ισότροπο ως προς την αντοχή.

Λόγω της γραμμικότητας του κριτηρίου, η αντοχή καθορίζεται από δύο παραμέτρους. Αυτές, στο επίπεδο (σ, τ) είναι η κλίση ϕ και η τεταγμένη επί την αρχή c . Η γωνία θραύσης δίνεται από τη σχέση :

$$\tau = c + \sigma_n \cdot \tan \phi$$

$$\sigma_1 = \sigma_c + \sigma_3 \cdot \tan \psi$$

Όπου ψ η κλίση και σ_c η τεταγμένη επί την αρχή στο επίπεδο σ_1 - σ_3 . η τετμημένη (στον άξονα των σ) της περιβάλλουσας επί την αρχή, είναι θεωρητικά η εφελκυστική αντοχή του πετρώματος. Εν τούτοις, τα πειραματικά δεδομένα έχουν δείξει ότι η εφελκυστική αντοχή είναι, κατ' απόλυτη τιμή, μικρότερη από την προσδιοριζόμενη από την παραπάνω τετμημένη. Για το σκοπό αυτό γίνεται απότμηση της περιβάλλουσας στην τιμή της προσδιορισμένης εφελκυστικής αντοχής T_0 του πετρώματος.

3.3 Κριτήρια αστοχίας - Έναρξη διαρροής

Έστω υλικό ελαστικό - τελείως πλαστικό το οποίο υποβάλλεται σε τριαξονική ένταση που περιγράφεται από τον τανυστή τάσεων σ_{ij} . Έστω μία συνάρτηση του τανυστή των τάσεων $f(\sigma_{ij})$, το πεδίο τιμών της οποίας είναι το σύνολο των πραγματικών αρνητικών αριθμών και το μηδέν. Αυτή η συνάρτηση καλείται εφεξής συνάρτηση διαρροής για κάποιο υλικό αν ισχύουν:

- Το υλικό έχει ελαστική συμπεριφορά αν $f(\sigma_{ij}) < 0$ ή $f(\sigma_{ij}) = 0$ και $f'(\sigma_{ij}) < 0$
- Το υλικό έχει πλαστική συμπεριφορά (διαρρέει) αν $f(\sigma_{ij}) = 0$ και $f'(\sigma_{ij}) \geq 0$

Η έκφραση $f(\sigma_{ij}) = 0$ ορίζει μία “επιφάνεια διαρροής” στον χώρο των τάσεων, ενώ η παράγωγος της f αν είναι μεγαλύτερη από το μηδέν δείχνει φόρτιση ενώ αν είναι μικρότερη από το μηδέν δείχνει αποφόρτιση. Η f δύναται να γραφεί είτε συναρτήσει των τάσεων: $f = f(\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{zx})$, είτε συναρτήσει των κυρίων τάσεων και του προσανατολισμού του κύριου συστήματος: $f = f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$.

Στα υλικά που ισχύει η ισοτροπία, τότε η συνάρτηση διαρροής δύναται να γραφτεί συναρτήσει μόνο των κυρίων τάσεων: $f = f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$. Τώρα η επιφάνεια διαρροής ανήκει στον χώρο των τριών διαστάσεων και μπορεί να απεικονιστεί σε ένα τρισσορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ως μια τρισδιάστατη επιφάνεια. Εφόσον το υλικό είναι ισότροπο μπορούν να αλλάξουν τα $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ στην συνάρτηση f χωρίς να αλλάζει η τιμή της, δηλαδή: $f = f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = f(\sigma_2, \sigma_1, \sigma_3) = f(\sigma_2, \sigma_3, \sigma_1) = \dots$ (Κοζάνης, 1996).

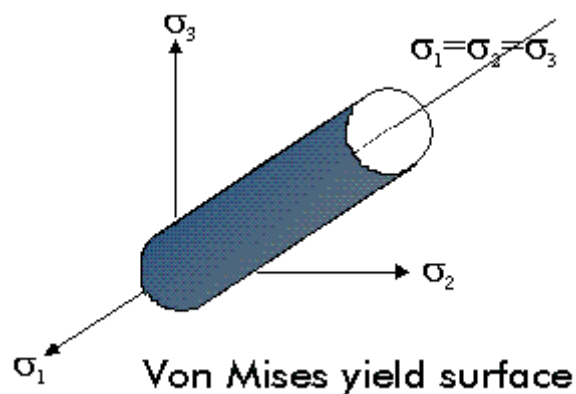
Επειδή δε οι κύριες τάσεις ορίζονται μονοσήμαντα με τις τρεις αναλλοίωτες του τανυστή των τάσεων μπορεί να γραφτεί η συνάρτηση διαρροής συναρτήσει των αναλλοίωτων: $f = f(I_1, I_2, I_3)$

Στην περίπτωση που η διαρροή είναι ανεξάρτητη της υδροστατικής πίεσης (μπορεί να θεωρηθεί σωστό για ορισμένα μέταλλα) τότε η συνάρτηση διαρροής δύναται να γραφτεί συναρτήσει των αποκλίνουσων κυρίων τάσεων, ή των αναλλοίωτων του αποκλίνοντος τανυστή τάσεων: $f = f(s_1, s_2, s_3) = f(J_2, J_3)$, όπου εξ ορισμού $J_1 = 0$.

Αναφέρεται τέλος ότι σε πολλά κριτήρια αστοχίας θεωρείται ίδια συμπεριφορά σε θλίψη και εφελκυσμό. Αυτή η θεώρηση βέβαια απέχει από την πραγματικότητα ακόμη και στα υλικά που έχουν σχεδόν τέλεια κρυσταλλική δομή, αλλά βάση αυτής αναπτύχθηκαν τα ποιο “ιστορικά” κριτήρια αστοχίας στην πλαστικότητα όπως αυτό του Von Mises.

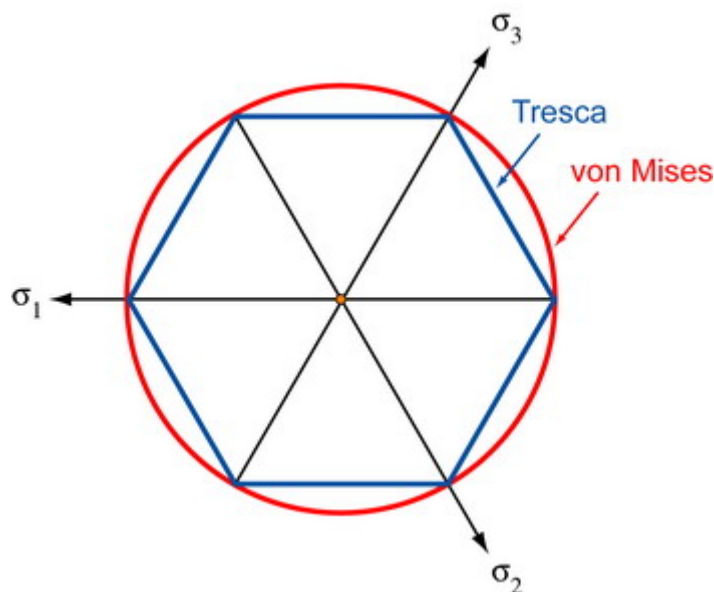
Στον χώρο $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ η επιφάνεια αστοχίας έχει κάποια συγκεκριμένη μορφή βάση των παραδοχών που έγιναν. Επειδή η εργασία αυτή ασχολείται με ισότροπα υλικά και ισχύει η ιδιότητα της αλλαγής της σειράς των μεταβλητών, η επιφάνεια αστοχίας είναι παράλληλη με την ευθεία $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ η οποία ονομάζεται βέβαια υδροστατική ευθεία (σχήμα 3.8) (αυτό

ισχύει μόνο όταν το κριτήριο είναι ανεξάρτητο της υδροστατικής πίεσης, και η επιφάνεια είναι κυλινδρική) (Κοζάνης, 1996).



Σχήμα 3.8 Γενική μορφή επιφάνειας αστοχίας (www.pisa.ab.ca, 2008)

Ακόμα λόγω της ισοτροπίας η επιφάνεια πρέπει να παρουσιάζει συμμετρία περί της υδροστατικής ευθείας σε τομείς των 60 και 30 μοιρών όπως φαίνεται στο σχήμα 3.9.



Σχήμα 3.9: Συμμετρία επιφάνειας αστοχίας (www.msm.cam.ac.uk, 2008)

Το επίπεδο που ορίζεται από την σχέση $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = 0$ ονομάζεται αποκλίνον επίπεδο και η τομή του με την επιφάνεια αστοχίας ορίζει μία αποκλίνουσα καμπύλη.

Όταν το κριτήριο αστοχίας είναι ανεξάρτητο από την υδροστατική πίεση τότε η επιφάνεια αστοχίας είναι κυλινδρική επιφάνεια με οδηγό καμπύλη την αποκλίνουσα και γενέτειρα

διεύθυνση αυτήν της υδροστατικής ευθείας. Σε αυτήν την περίπτωση η διαρροή γίνεται λόγω αποκλίνουσων τάσεων με σύνολο μεταβολή (χωρίς μεταβολή όγκου, αλλά με μεταβολή σχήματος).

Όταν το κριτήριο αστοχίας εξαρτάται από την υδροστατική πίεση, δηλαδή από την αναλλοίωτη I_1 , τότε η επιφάνεια αστοχίας είναι κωνική επιφάνεια και περιέχει την αποκλίνουσα καμπύλη. Ο κώνος περιστρέφεται περί της υδροστατικής ευθείας και η γωνία σύγκλισης του εξαρτάται από την επίδραση της υδροστατικής πίεσης (π.χ. με την παράμετρο φ στο κριτήριο Mohr-Coulomb) (Κοζάνης, 1996).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

Αριθμητική διερεύνηση εντατικής κατάστασης πετρώματος στερεωμένου με ρητίνη

4.1 Γενικά

Η δοκιμή της μονοαξονικής θλίψης είναι η πιο συνηθισμένη δοκιμή για τον μηχανικό χαρακτηρισμό πετρωμάτων καθώς και τεχνητών υλικών με ιδιότητες παρόμοιες με αυτές των πετρωμάτων. Στην δοκιμή μονοαξονικής θλίψης εξετάζεται η αντοχή ενός δοκιμίου σε συνθήκες μονοαξονικής καταπόνησης. Καθώς το δοκίμιο είναι συνήθως ένα ανομοιογενές υλικό με πόρους, μικρές διακλάσεις, ασυνέχειες στην δομή του κατά την διάρκεια της δοκιμής αυτής εμφανίζονται φαινόμενα συγκέντρωσης τάσεων γύρω από ατέλειες της δομής τα οποία ενδεχόμενα οδηγούν σε ανάπτυξη ρωγμών και στην συνέχεια σε αστοχία του υλικού.

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με τη στερέωση δομικών λίθων, οι οποίοι έχουν χρησιμοποιηθεί σε μνημεία, με σύγχρονα συνθετικά υλικά όπως οι ελαστομερείς ρητίνες. Το ερώτημα που προκύπτει κατά την εφαρμογή τέτοιων πρόσθετων υλικών στα πετρώματα είτε με μεθόδους επάλειψης είτε με μεθόδους προσρόφησης είναι το κατά πόσο η στερεοποίηση των ρητινών αυτών εντός του ενεργού πορώδους του πετρώματος είναι δυνατόν να δημιουργήσει συνθήκες συγκέντρωσης τάσεων κατά τη μηχανική καταπόνηση των συντηρημένων δοκιμίων.

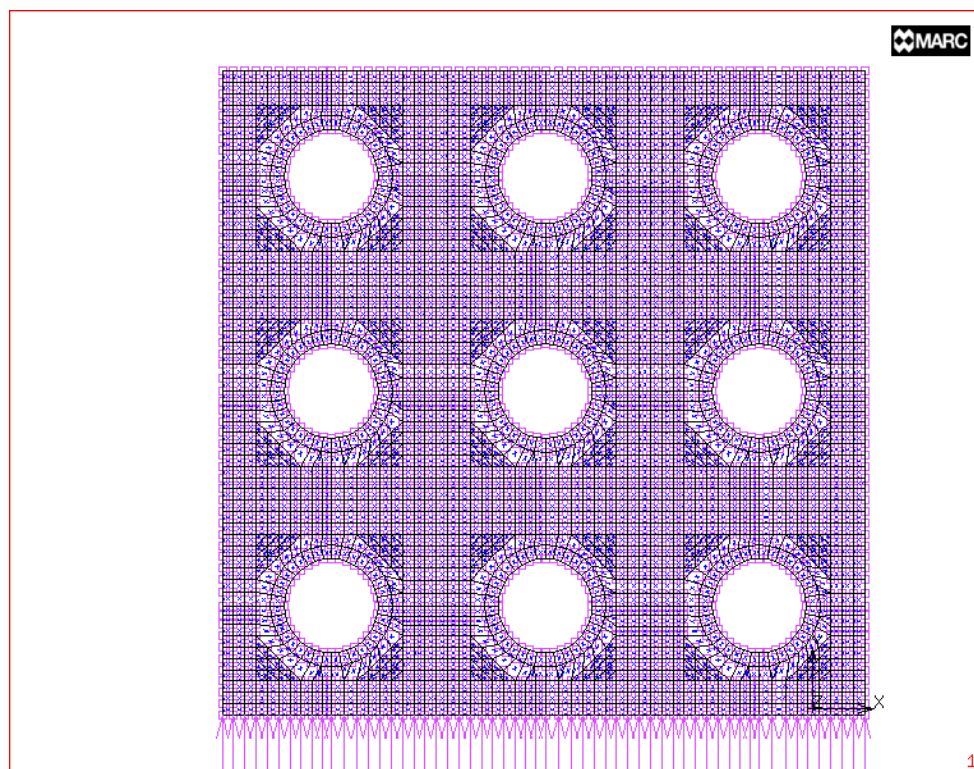
Καθώς το πρόβλημα είναι σύνθετο και αναφέρεται ουσιαστικά στη μικροδομή του υλικού η μέθοδος η οποία επιλέχτηκε για να μελετηθεί το πρόβλημα είναι η αριθμητική ανάλυση με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Η ανάλυση πραγματοποιείται για ένα τμήμα του υλικού αυτού το οποίο για τους σκοπούς της αριθμητικής αυτής ανάλυσης θεωρήθηκε ομοιογενές, ελαστικό και ισότροπο και με κανονική γεωμετρία ενεργού πορώδους.

Επομένως στην ενότητα αυτή θεωρείται τομή δοκιμίου από ασβεστόλιθο με ενεργό πορώδες. Ο κάθε δίαυλος του ενεργού πορώδους στην υπόψη τομή προσομοιώθηκε ως κυκλική οπή όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1. Στην εργασία αυτή η γεωμετρία αυτή προσομοιώθηκε σε συνθήκες μονοαξονικής φόρτισης με διάφορες παραδοχές και γεωμετρικές συνθήκες με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το πακέτο MARC-MENTAT που είναι ένα πακέτο μη γραμμικής ανάλυσης δομικών στοιχείων. Πιο συγκεκριμένα μελετήθηκαν οι κατανομές τάσεων, μετατοπίσεων και παραμορφώσεων σε διάφορα μοντέλα με ή χωρίς ρητίνη και με διαφορετική καταστατική συμπεριφορά όσον αφορά το πέτρωμα και την ρητίνη. Η παραμετρική ανάλυση αναπτύσσεται στην συνέχεια.

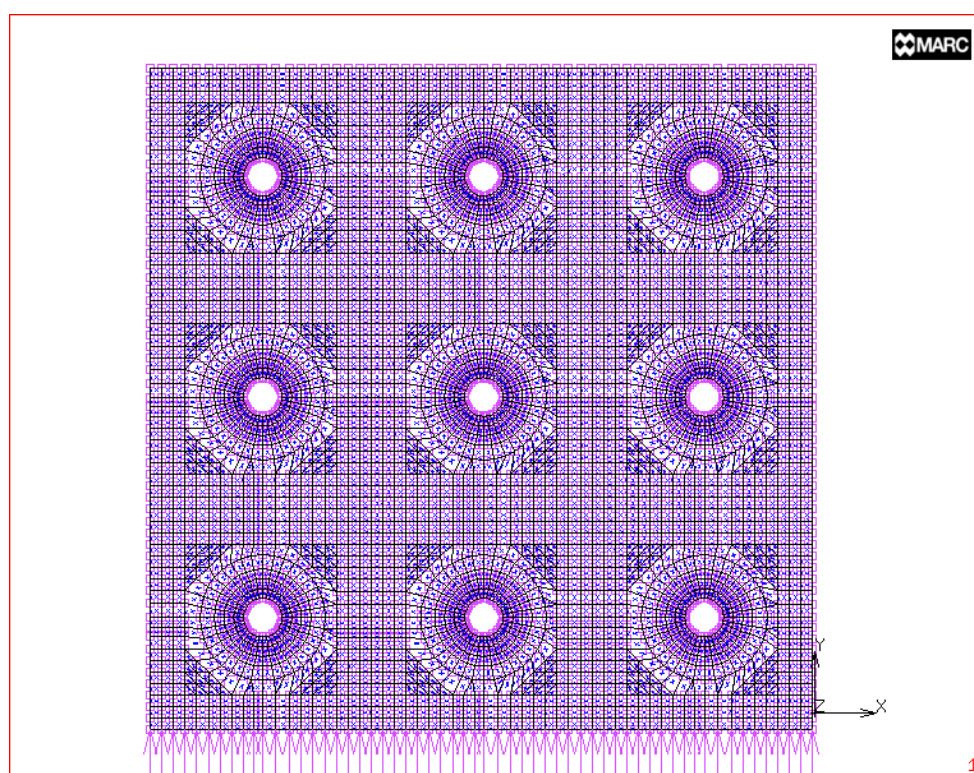
4.2 Περιγραφή Μοντέλων

4.2.1 Γεωμετρία και Διακριτοποίηση των Μοντέλων

Για την προσομοίωση της θλιπτικής δοκιμής σε ένα τετραγωνικό τμήμα του δοκιμίου το οποίο περιλαμβάνει 9 κυκλικές οπές. Η διάμετρος των οπών είναι περίπου 15 φορές μικρότερη από την διάσταση του μοντέλου και οι οπές ισαπέχουν μεταξύ τους. Η διακριτοποίηση του μοντέλου αυτού έγινε σε δύο διαστάσεις όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1 χρησιμοποιώντας το λογισμικό MSC. MENTAT. Το μοντέλο αποτελείται συνολικά από 972 στοιχεία ρητίνης, 2970 στοιχεία πετρώματος και 3904 συνολικά κόμβους. Αυτό το οποίο θα εξεταστεί είναι η μεταφορά τάσεων μεταξύ κόκκου του πετρώματος και ρητίνης διότι το τμήμα το οποίο προσομοιάζετε είναι πολύ μικρό σε σχέση με την συνολικό του όγκο. Στα σχήματα 4.1 και 4.2 παρουσιάζεται η διακριτοποίηση του πετρώματος και του πετρώματος με ρητίνη αντίστοιχα.



Σχήμα 4.1: Διακριτοποίηση πετρώματος



Σχήμα 4.2: Διακριτοποίηση πετρώματος και ρητίνης

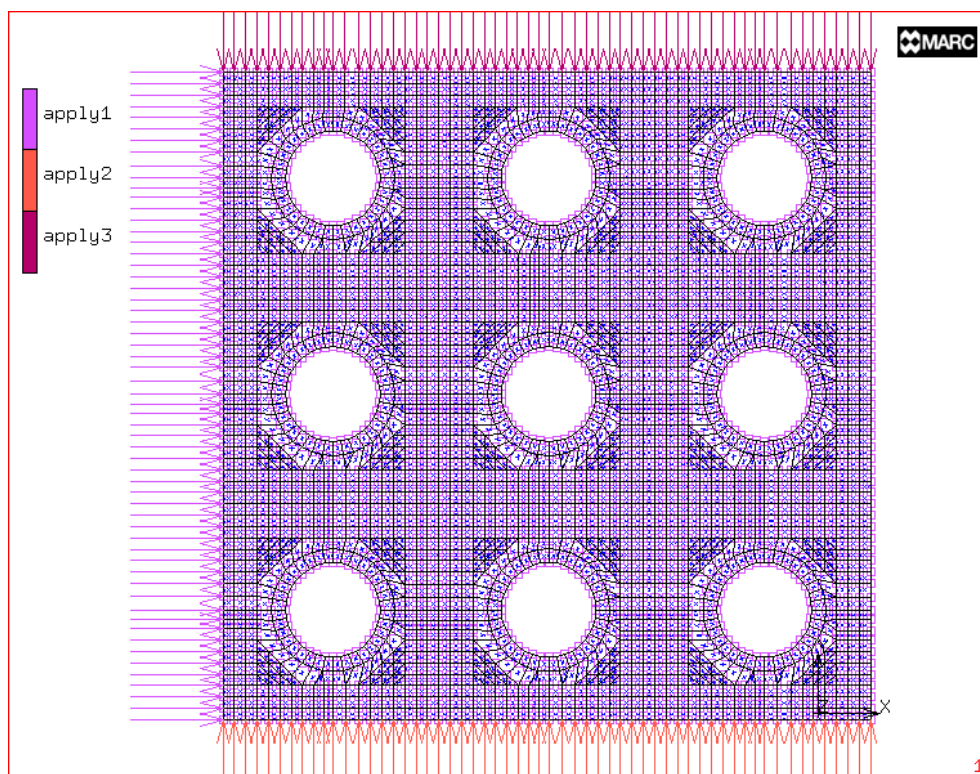
4.2.2 Συνοριακές Συνθήκες

Οι συνοριακές συνθήκες που εφαρμόστηκαν (σχήμα 4.2) για την επίλυση του παραπάνω μοντέλου είναι οι εξής:

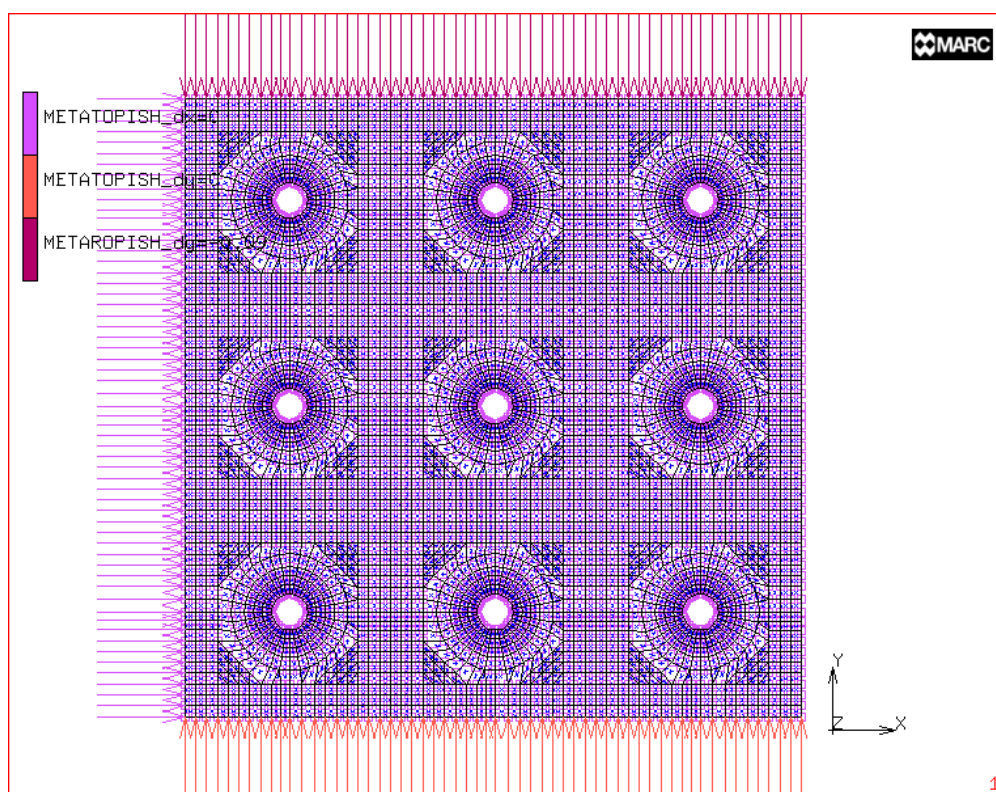
- Κύλιση μόνο στον άξονα y ($dx=0$) για τους κόμβους του πετρώματος που βρίσκονται στην πρώτη αριστερή κατακόρυφη γραμμή.
- Κύλιση μόνο στον άξονα x ($dy=0$)
- Επιβολή κομβικής μετατόπισης (fixed displacement) στο πέτρωμα **-0.0275 mm**/ στάδιο φόρτισης σε σύνολο 80 σταδίων φόρτισης, στους κόμβους της πρώτης οριζόντιας γραμμής από πάνω προς τα κάτω.

Αρχικά είχε χρησιμοποιηθεί η επιβολή κομβικής φόρτισης με φορτίο που αντιστοιχεί σε ένα μέσο φορτίο καταπόνησης ενός στερεωμένου δοκιμίου σε μονοαξονική θλίψη. Καθώς όμως τα μοντέλα επιλύονται βάσει ελαστοπλαστικών κριτηρίων αστοχίας (είτε γραμμικών είτε μη γραμμικών) όταν το μοντέλου υλικού έφτανε στην αστοχία τότε δεν μπορούσε να επιτευχθεί ισορροπία στους κόμβους και το μοντέλο δεν μπορούσε να συγκλίνει και να επιλυθεί. Μετά από αυτήν την διαπίστωση ότι δηλαδή ανεξάρτητα από τον τύπο του μοντέλου αστοχίας που χρησιμοποιείται, οι συνοριακές συνθήκες κομβικής φόρτισης μπορούν εν δυνάμει να οδηγήσουν σε μη επίτευξη σύγκλισης του μοντέλου επιλέχθηκε η φόρτιση του μοντέλου να γίνει με ένα εναλλακτικό τρόπο και μάλιστα με την επιβολή ισοδύναμης κομβικής μετατόπισης. Για τον σκοπό αυτό έγινε ένας σύντομος υπολογισμός της αναμενόμενης κομβικής μετατόπισης στο επιθυμητό επίπεδο φόρτισης του υλικού με βάση το μέσο μέτρο ελαστικότητας του.

Οι συνοριακές συνθήκες κύλισης στον οριζόντιο και κατακόρυφο άξονα υποδηλώνουν συμμετρία πράγμα που σημαίνει ότι ουσιαστικά μοντελοποιείται ένα δοκίμιο πετρώματος το οποίο περιέχει 36 κυλινδρικές οπές με συμμετρία και στους δύο άξονες. Η σχηματική παράσταση των συνοριακών συνθηκών του μοντέλου χωρίς ρητίνη αλλά και του μοντέλου με ρητίνη φαίνεται στα σχήματα 4.3 και 4.4 αντίστοιχα.



Σχήμα 4.3: Σχηματική παράσταση συνοριακών συνθηκών πετρώματος



Σχήμα 4.4: Σχηματική παράσταση συνοριακών συνθηκών

4.2.3 Ιδιότητες των Υλικών

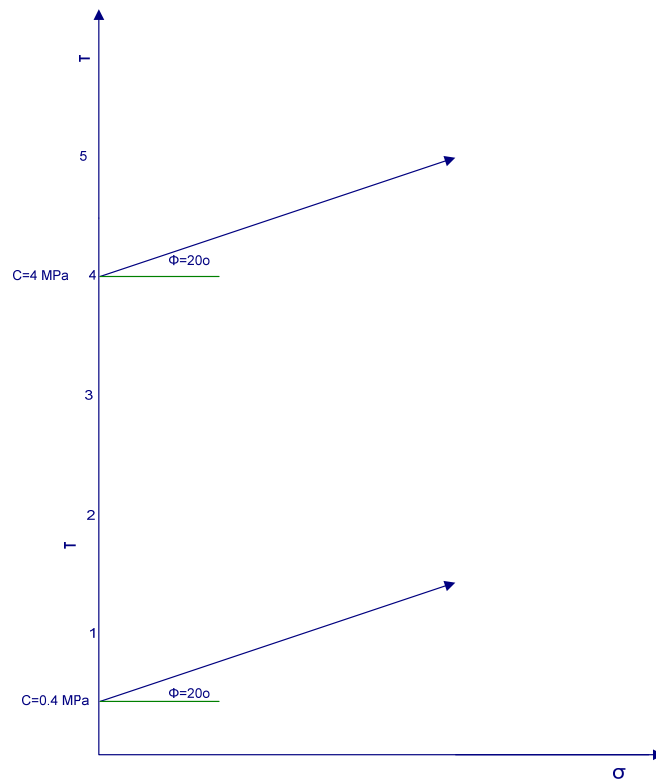
Στο λογισμικό MARC-MENTAT το ελαστοπλαστικό κριτήριο Mohr-Coulomb ορίζεται με βάση δύο ή τρεις παραμέτρους (γραμμικό και παραβολικό αντίστοιχα) οι οποίες εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του υλικού όπως η γωνία εσωτερικής τριβής (ϕ), η συνοχή (c). Με την βοήθεια των παραμέτρων οποίων προσδιορίζονται οι παράμετροι όριο διαρροής (σ) και συντελεστής (α) από τους παρακάτω τύπους:

$$c = \frac{\bar{\sigma}}{3} * (1 - 12 * \alpha^2)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{εξίσωση 1})$$

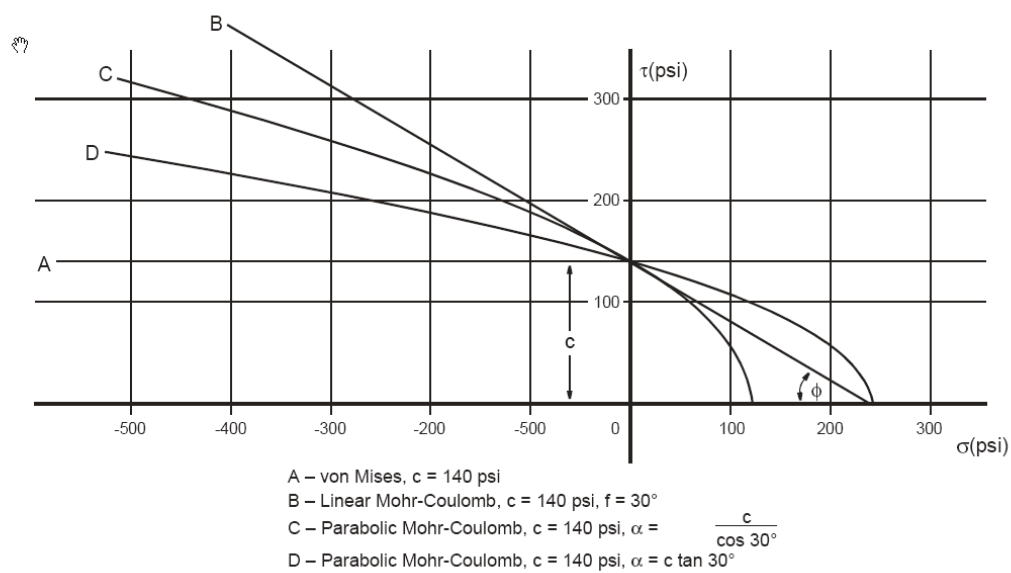
$$\sin \phi = \frac{3 * \alpha}{(1 - 3 * \alpha^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (\text{εξίσωση 2})$$

Το πέτρωμα (rock) προσομοιώθηκε και σαν ελαστικό ισότροπο υλικό με μέτρο ελαστικότητας $E=10\text{GPa}$ και λόγο Poisson $\nu=0.1$ έως και $\nu=0.4$ αλλά και σαν ελαστοπλαστικό ισότροπο υλικό με όριο διαρροής $\sigma=6.639$ και $\alpha=0.112$. Η ρητίνη (resin) προσομοιώθηκε σαν ελαστικό ισότροπο υλικό με μέτρο ελαστικότητας $E=1\text{MPa}$ και λόγο Poisson $\nu=0.3$ αλλά και σαν ελαστοπλαστικό υλικό με όριο διαρροής $\sigma=0.669$ και $\alpha=0.112$.

Για να οριστεί το κριτήριο Mohr-Coulomb που διέπει την ελαστοπλαστική συμπεριφορά του πετρώματος χρησιμοποιήθηκαν οι παράμετροι συνοχή $c=4\text{MPa}$ και γωνία εσωτερικής τριβής $\phi=20^\circ$ ενώ για να οριστεί το κριτήριο Mohr-Coulomb που διέπει την ελαστοπλαστική συμπεριφορά της ρητίνης χρησιμοποιήθηκαν οι παράμετροι συνοχή $c=0.4\text{MPa}$ και γωνία εσωτερικής τριβής $\phi=20^\circ$. Από την χρήση αυτών των παραμέτρων προκύπτουν οι παράμετροι $\alpha=0.112$ και $\sigma=6.388\text{MPa}$ για το πέτρωμα και $\alpha=0.112$ και $\sigma=0.639$. Η σχηματική απεικόνιση του κριτηρίου αστοχίας για το πέτρωμα και την ρητίνη σε άξονες τ, σ φαίνεται στο σχήμα 4.3. Στο σχήμα 4.4 φαίνεται η θεωρητική καμπύλη του κριτηρίου η οποία δομείται από το λογισμικό Marc-Mentant.



Σχήμα 4.5: Γραφική απεικόνιση κριτηρίου αστοχίας Coulomb πετρώματος και ρητίνης



Σχήμα 4.6: Γραφική απεικόνιση κριτηρίου αστοχίας Coulomb (Marc-MENTAT, 2003)

Επιλέχθηκε να γίνει παραμετρική ανάλυση έξι μοντέλων τα οποία ήταν είτε με ρητίνη είτε χωρίς ρητίνη και είτε ελαστικά είτε ελαστοπλαστικά. Ο συνδυασμός των έξι αυτών καταστάσεων για τα δύο υλικά παρουσιάζεται στον πίνακα 4.1 μαζί με τις αντίστοιχες ονομασίες των μοντέλων. Ο πίνακας 4.2 παρουσιάζει τις ιδιότητες των υλικών πετρώματος και ρητίνης οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε ένα από τα μοντέλα. Στην συνέχεια τα σχήματα 4.7 και 4.8 παρουσιάζουν την απεικόνιση του προσομοιωμένου δοκιμίου χωρίς ρητίνη αλλά και με ρητίνη αντίστοιχα όσον αφορά τις ιδιότητες των υλικών.

Πίνακας 4.1: Συνοπτικός πίνακας μοντέλων με διαφορετικές ιδιότητες τόσο στο πέτρωμα όσο και στην ρητίνη

Μοντέλο	1	2	3	4	5	6
Πέτρωμα	Ελαστικό	Ελαστο-πλαστικό	Ελαστικό	Ελαστικό	Ελαστο-πλαστικό	Ελαστο-πλαστικό
Ρητίνη	—	—	Ελαστικό	Ελαστο-πλαστικό	Ελαστικό	Ελαστο-πλαστικό

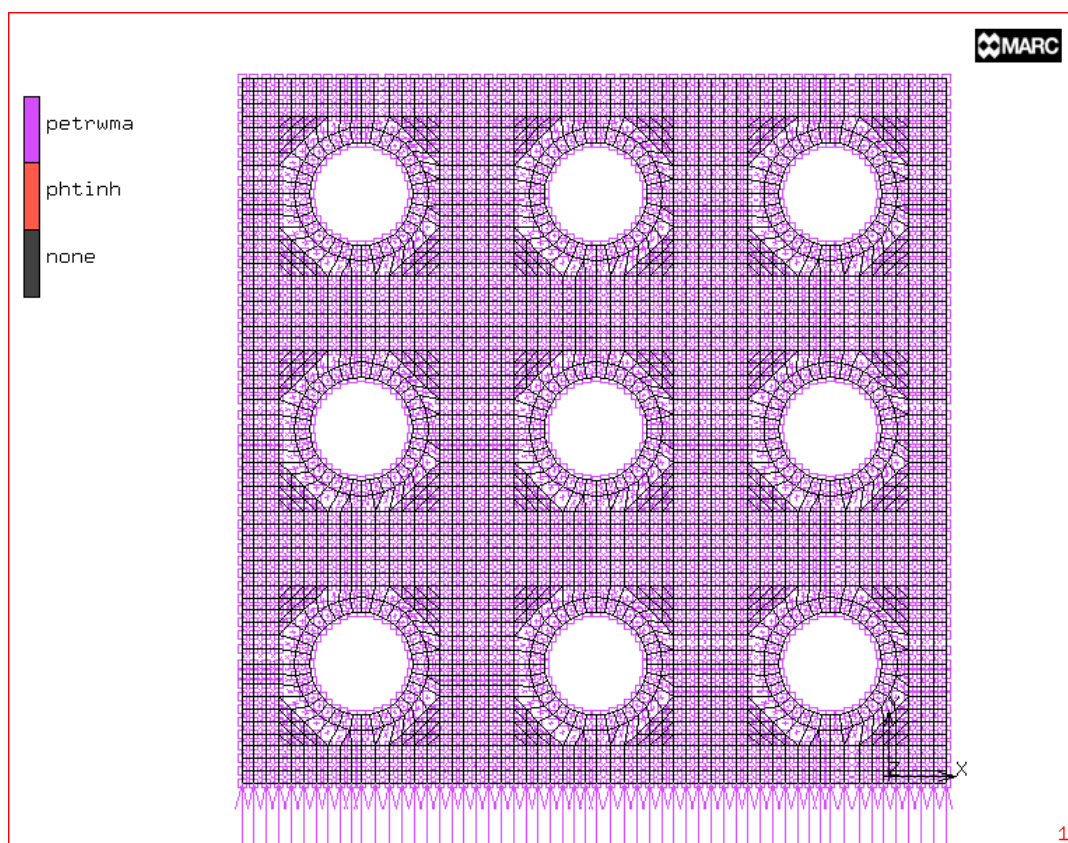
Στον πίνακα 4.2 δίδονται οι ιδιότητες του μέτρου ελαστικότητας και του Λόγου Poisson για το πέτρωμα και την ρητίνη ενώ στον πίνακα 4.3 δίδονται οι παράμετροι για το κριτήριο αστοχίας Linear-Mohr Coulomb που χρησιμοποιήθηκε τόσο για το πέτρωμα όσο και για τη ρητίνη.

Πίνακας 4.2: Ιδιότητες υλικών

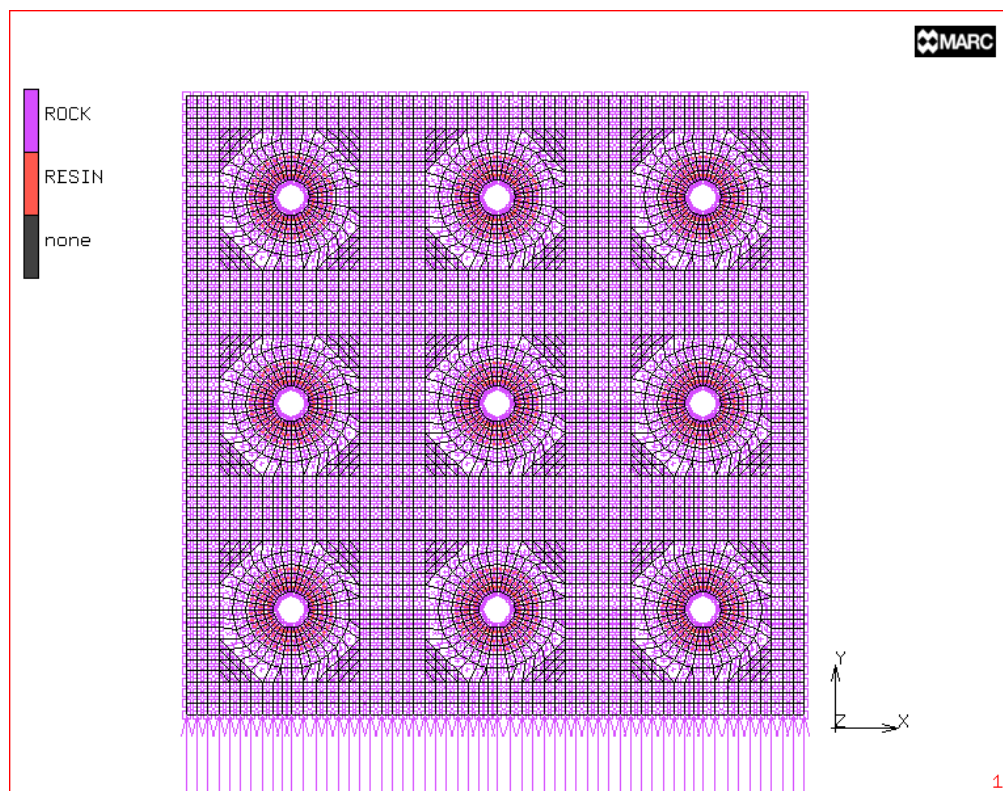
	Πέτρωμα	Ρητίνη
Μέτρο Ελαστικότητας (MPa)	10000	1
Λόγος Poisson (ν)	0.3	0.3

Πίνακας 4.3: Παράμετροι κριτηρίου αστοχίας Mohr Coulomb των υλικών

Κριτήριο Αστοχίας – Linear Mohr Coulomb	Πέτρωμα	Ρητίνη
Όριο Διαρροής (σ) MPa	6.388	0.639
Συντελεστής (α)	0.112	0.112
Συνοχή (c) MPa	4	0.4
Γωνία Εσωτερικής Τριβής (ϕ) Μοίρες	20	20



Σχήμα 4. 7: Απεικόνιση ιδιοτήτων των υλικών (πετρώματος)



Σχήμα 4.8: Απεικόνιση ιδιοτήτων των υλικών (πετρώματος-ρητίνης)

Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται οι φόρμες εισαγωγής των παραμέτρων και για τα έξι μοντέλα. Το σχήμα 4.9 δείχνει την φόρμα εισαγωγής των παραμέτρων για το ελαστικό πέτρωμα του μοντέλου 1 ενώ τα σχήματα 4.10 και 4.11 δείχνει το δείχνουν την φόρμα παραμέτρων για το ελαστοπλαστικό πέτρωμα αντίστοιχα για το μοντέλο 2. Τα σχήματα 4.12 και 4.13 δείχνουν την φόρμα εισαγωγής των παραμέτρων για το ελαστικό πέτρωμα και την ελαστική ρητίνη του μοντέλου 3, αντίστοιχα. Το σχήμα 4.14, δείχνει την φόρμα παραμέτρων για το ελαστικό πέτρωμα του μοντέλου 4 ενώ τα σχήματα 4.15 και 4.16 απεικονίζουν τις παραμέτρους της ελαστοπλαστικής ρητίνης για το ίδιο μοντέλο. Στη συνέχεια τα σχήματα 4.17, 4.18 απεικονίζουν την φόρμα εισαγωγής των παραμέτρων για το ελαστοπλαστικό πέτρωμα του μοντέλου 5 ενώ το σχήμα 4.19 απεικονίζει την φόρμα εισαγωγής των παραμέτρων της ελαστοπλαστικής ρητίνης του ίδιου μοντέλου. Τέλος τα σχήματα 4.20 και 4.21 αποδίδουν τις παραμέτρους για το ελαστοπλαστικό πέτρωμα ενώ τα σχήματα 4.22 και 4.23 αποδίδουν τις παραμέτρους για την ελαστοπλαστική ρητίνη του μοντέλου 6.

Μοντέλο 1

ISOTROPIC PROPERTIES

YOUNG'S MODULUS	10000	TABLE
POISSON'S RATIO	0.3	TABLE
MASS DENSITY	1	
COST / VOLUME	0	
COST / MASS	0	

◆ DAMPING ◆ PLASTICITY ◆ THERMAL EXP. ◆

RATE EFFECTS	DAMAGE EFFECTS
◆ VISCOELASTIC ◆	◆ CRACKING ◆
◆ CREEP ◆	◆ DAMAGE ◆
	◆ FAILURE ◆

RESET REMOVE OK

Σχήμα 4. 9: Ιδιότητες υλικού πετρώματος

Μοντέλο 2

ISOTROPIC PROPERTIES

YOUNG'S MODULUS	10000	TABLE
POISSON'S RATIO	0.3	TABLE
MASS DENSITY	1	
COST / VOLUME	0	
COST / MASS	0	

◆ DAMPING ◆ ◆ PLASTICITY ◆ ◆ THERMAL EXP. ◆

RATE EFFECTS	DAMAGE EFFECTS
◆ VISCOELASTIC ◆	◆ CRACKING ◆
◆ CREEP ◆	◆ DAMAGE ◆
	◆ FAILURE ◆

RESET REMOVE OK

Σχήμα 4. 10: Ιδιότητες υλικού πετρώματος

ISOTROPIC PLASTICITY PROPERTIES

METHOD

- ENTERED VALUES
- USER SUB. WKSPL
- VISCOPLASTICITY (USER SUB. UVSCPL)
- MATERIALS DATABASE

YIELD SURFACE

- VON MISES
- LINEAR MOHR-COULOMB
- PARABOLIC MOHR-COULOMB
- BUYUKOZTURK CONCRETE
- GENERALIZED PLASTICITY

HARDENING RULE

- ISOTROPIC
- KINEMATIC
- COMBINED

INITIAL YIELD STRESS

6.388

TABLE 1

2

3

DAK RIDGE NATIONAL LAB MODEL

10TH CYCLE YIELD STRESS

0

TABLE 1

2

MOHR-COULOMB & BUYUKOZTURK

ALPHA/BETA

0.112

RESET

REMOVE

OK

Σχήμα 4. 11: Κριτήριο αστοχίας πετρώματος

Μοντέλο 3

ISOTROPIC PROPERTIES

YOUNG'S MODULUS

10000

TABLE

POISSON'S RATIO

0.3

TABLE

MASS DENSITY

1

COST / VOLUME

0

COST / MASS

0

DAMPING

PLASTICITY

THERMAL EXP.

RATE EFFECTS

- VISCOELASTIC
- CREEP

DAMAGE EFFECTS

- CRACKING
- DAMAGE
- FAILURE

RESET

REMOVE

OK

Σχήμα 4.12: Ιδιότητες υλικού πετρώματος

ISOTROPIC PROPERTIES

YOUNG'S MODULUS	1	TABLE
POISSON'S RATIO	0.3	TABLE
MASS DENSITY	1	
COST / VOLUME	0	
COST / MASS	0	

◇ DAMPING ◇ PLASTICITY ◇ THERMAL EXP.

RATE EFFECTS

◇ VISCOELASTIC ◇ CREEP

DAMAGE EFFECTS

◇ CRACKING ◇ DAMAGE ◇ FAILURE

RESET REMOVE OK

Σχήμα 4.13: Ιδιότητες υλικού ρητίνης

Μοντέλο 4

ISOTROPIC PROPERTIES

YOUNG'S MODULUS	10000	TABLE
POISSON'S RATIO	0.3	TABLE
MASS DENSITY	1	
COST / VOLUME	0	
COST / MASS	0	

◇ DAMPING ◇ PLASTICITY ◇ THERMAL EXP.

RATE EFFECTS

◇ VISCOELASTIC ◇ CREEP

DAMAGE EFFECTS

◇ CRACKING ◇ DAMAGE ◇ FAILURE

RESET REMOVE OK

Σχήμα 4.14: Ιδιότητες υλικού πετρώματος

ISOTROPIC PROPERTIES

YOUNG'S MODULUS	1	TABLE	
POISSON'S RATIO	0.3	TABLE	
MASS DENSITY	1		
COST / VOLUME	0		
COST / MASS	0		

☒ DAMPING
 ☒ PLASTICITY
 ☒ THERMAL EXP.

RATE EFFECTS

☒ VISCOELASTIC

☒ CREEP

DAMAGE EFFECTS

☒ CRACKING

☒ DAMAGE

☒ FAILURE

Σχήμα 4.15: Ιδιότητες υλικού ρητίνης

ISOTROPIC PLASTICITY PROPERTIES

METHOD

☒ ENTERED VALUES
☒ USER SUB. WKSPL
☒ VISCOPLASTICITY (USER SUB. UVSC)
☒ MATERIALS DATABASE

YIELD SURFACE

☒ VON MISES
☒ LINEAR MOHR-COULOMB
☒ PARABOLIC MOHR-COULOMB
☒ BUYUKOZTURK CONCRETE
☒ GENERALIZED PLASTICITY

HARDENING RULE

☒ ISOTROPIC
☒ KINEMATIC
☒ COMBINED

INITIAL YIELD STRESS 0.639

TABLE 1

2

3

OAK RIDGE NATIONAL LAB MODEL

10TH CYCLE YIELD STRESS

TABLE 1

2

MOHR-COULOMB & BUYUKOZTURK

ALPHA/BETA 0.112

Σχήμα 4.16: Κριτήριο αστοχίας ρητίνης

Μοντέλο 5

ISOTROPIC PROPERTIES

YOUNG'S MODULUS	10000	TABLE
POISSON'S RATIO	0.3	TABLE
MASS DENSITY	1	
COST / VOLUME	0	
COST / MASS	0	

☒ DAMPING
 ☒ PLASTICITY
 ☒ THERMAL EXP.

RATE EFFECTS

☒ VISCOELASTIC

☒ CREEP

DAMAGE EFFECTS

☒ CRACKING

☒ DAMAGE

☒ FAILURE

Σχήμα 4.17: Ιδιότητες υλικού πετρώματος

ISOTROPIC PLASTICITY PROPERTIES

METHOD

☒ ENTERED VALUES
☐ USER SUB. WKSLP
☐ VISCOPLASTICITY (USER SUB. UVSCPL)
☐ MATERIALS DATABASE

YIELD SURFACE

☐ VON MISES
☒ LINEAR MOHR-COULOMB
☐ PARABOLIC MOHR-COULOMB
☐ BUYUKOZTURK CONCRETE
☐ GENERALIZED PLASTICITY

HARDENING RULE

☒ ISOTROPIC
☐ KINEMATIC
☐ COMBINED

☐ OAK RIDGE NATIONAL LAB
☐ 2-1/4 CR-MO ORNL
☐ REVERSED PLASTICITY
☐ FULL ALPHA RESET ORNL

INITIAL YIELD STRESS: 6.388

TABLE 1

2

3

OAK RIDGE NATIONAL LAB MODEL

10TH CYCLE YIELD STRESS: 0

TABLE 1

2

MOHR-COULOMB & BUYUKOZTURK

ALPHA/BETA: 0.112

Σχήμα 4.18: Κριτήριο αστοχίας πετρώματος

ISOTROPIC PROPERTIES

YOUNG'S MODULUS	1	TABLE
POISSON'S RATIO	0.3	TABLE
MASS DENSITY	1	
COST / VOLUME	0	
COST / MASS	0	

◇ DAMPING ◇ PLASTICITY ◇ THERMAL EXP.

RATE EFFECTS

◇ VISCOELASTIC ◇ CREEP

DAMAGE EFFECTS

◇ CRACKING ◇ DAMAGE ◇ FAILURE

RESET REMOVE OK

Σχήμα 4.19: Ιδιότητες υλικού ρητίνης

Μοντέλο 6

ISOTROPIC PROPERTIES

YOUNG'S MODULUS	10000	TABLE
POISSON'S RATIO	0.3	TABLE
MASS DENSITY	1	
COST / VOLUME	0	
COST / MASS	0	

◇ DAMPING ◆ PLASTICITY ◇ THERMAL EXP.

RATE EFFECTS

◇ VISCOELASTIC ◇ CREEP

DAMAGE EFFECTS

◇ CRACKING ◇ DAMAGE ◇ FAILURE

RESET REMOVE OK

Σχήμα 4.20 :Ιδιότητες υλικού πετρώματος

ISOTROPIC PLASTICITY PROPERTIES

METHOD

- ENTERED VALUES
- USER SUB. WKSPL
- VISCOPLASTICITY (USER SUB. UVSCPL)
- MATERIALS DATABASE

YIELD SURFACE

- VON MISES
- LINEAR MOHR-COULOMB
- PARABOLIC MOHR-COULOMB
- BUYUKOZTURK CONCRETE
- GENERALIZED PLASTICITY
- OAK RIDGE NATION. LAB
- 2-1/4 CR-MO ORNL
- REVERSED PLASTICITY
- FULL ALPHA RESET ORNL

HARDENING RULE

- ISOTROPIC
- KINEMATIC
- COMBINED

INITIAL YIELD STRESS 6.388

TABLE 1

2

3

OAK RIDGE NATIONAL LAB MODEL

10TH CYCLE YIELD STRESS 0

TABLE 1

2

MOHR-COULOMB & BUYUKOZTURK

ALPHA/BETA 0.112

RESET REMOVE OK

Σχήμα 4.21: Κριτήριο αστοχίας πετρώματος

ISOTROPIC PROPERTIES

YOUNG'S MODULUS 1

POISSON'S RATIO 0.3

MASS DENSITY 1

COST / VOLUME 0

COST / MASS 0

DAMPING

PLASTICITY

THERMAL EXP.

RATE EFFECTS

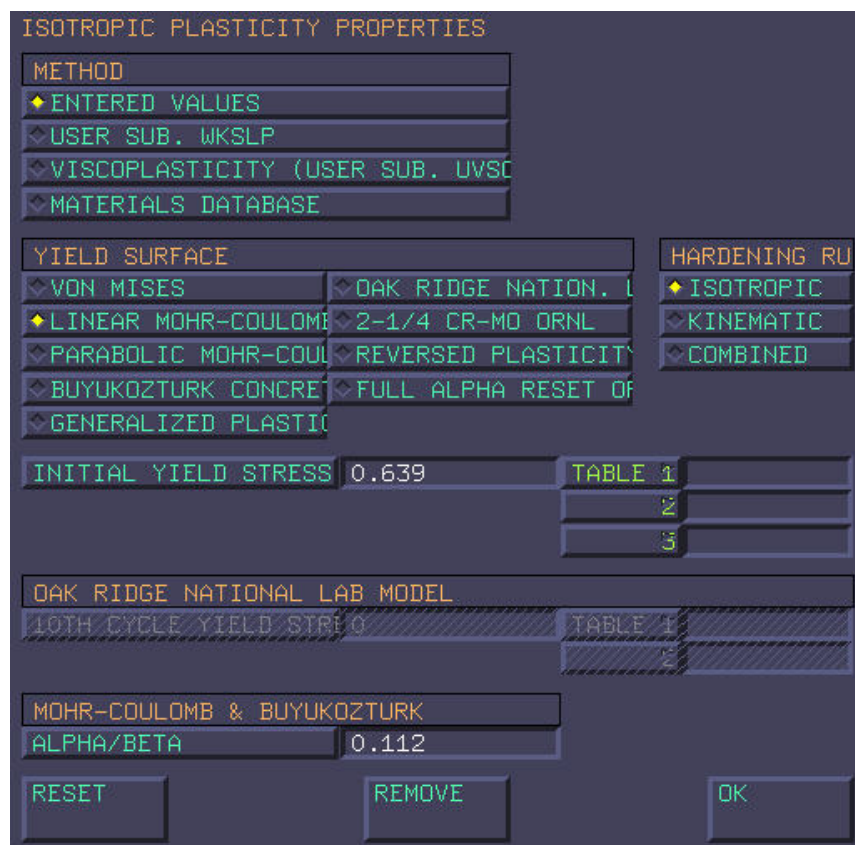
- VISCOELASTIC
- CREEP

DAMAGE EFFECTS

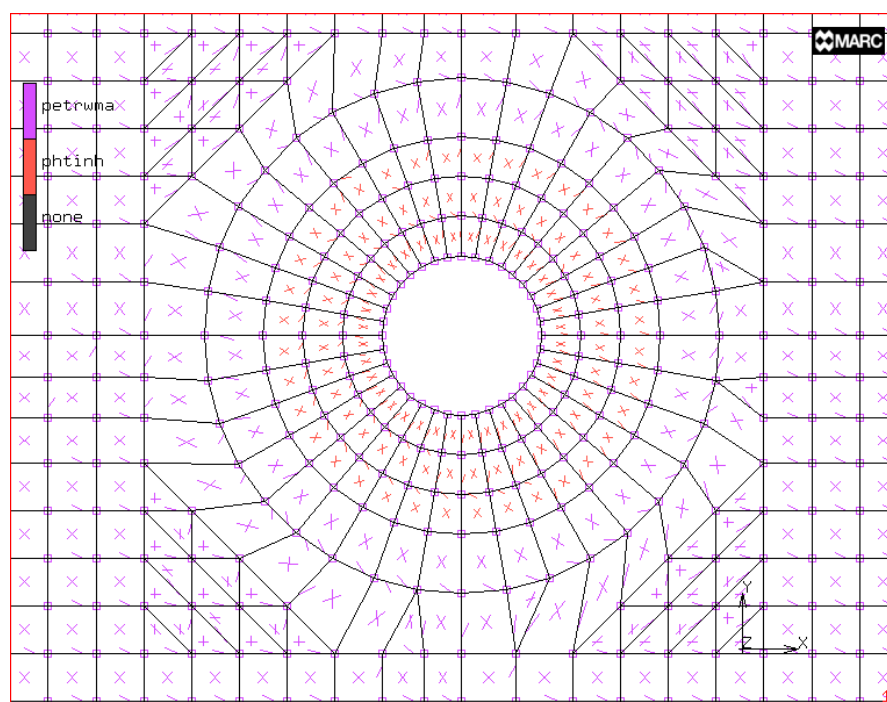
- CRACKING
- DAMAGE
- FAILURE

RESET REMOVE OK

Σχήμα 4.22 Ιδιότητες υλικού ρητίνης



Σχήμα 4.23: Κριτήριο αστοχίας ρητίνης



Σχήμα 4.24: Ιδιότητες των υλικών (εστίαση κυλινδρικής οπής)

4.2.4 Γεωμετρικές ιδιότητες

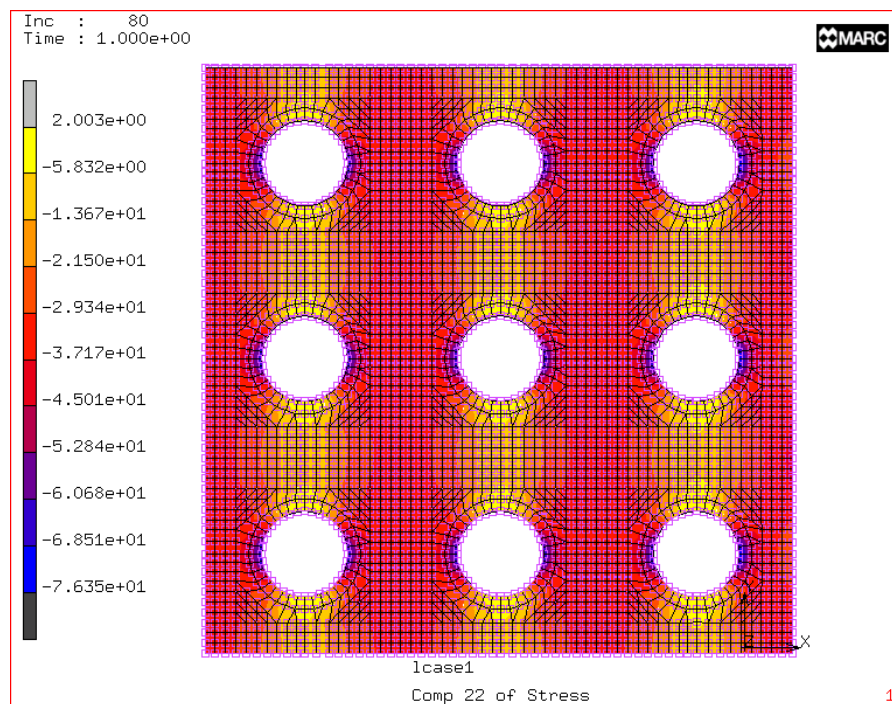
Η επίλυση των μοντέλων έγινε με την θεώρηση της επίπεδης παραμόρφωσης (plane strain).

4.3 Αποτελέσματα

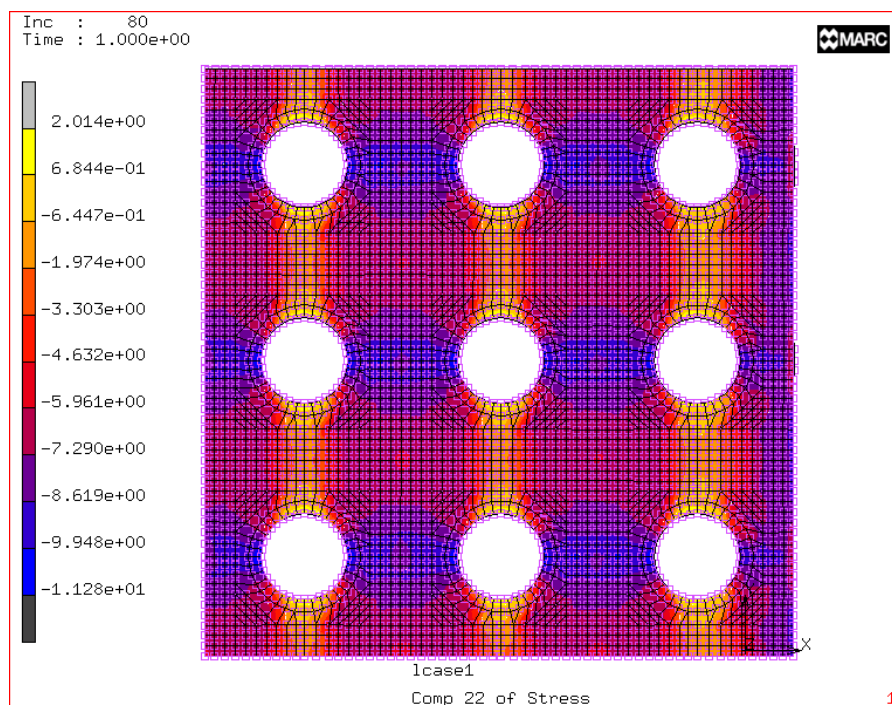
Μετά από την επίλυση των μοντέλων ελήφθησαν διάφορες παραμετρικές καμπύλες σχετικά με την εντατική κατάσταση, τις μετατοπίσεις των κόμβων, καθώς και την παραμορφωσιακή κατάσταση του κάθε μοντέλου. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συγκριτικά για τα έξι μοντέλα σε σχέση με τις εξεταζόμενες παραμέτρους.

4.3.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων κατακόρυφης τάσης σ_y για τα μοντέλα 1 και 2

Στα σχήματα 4.25 και 4.26 παρατηρείται η κατανομή της κατακόρυφης τάσης σ_y για τα μοντέλα 1 και 2. Και για τα δύο μοντέλα διαπιστώνεται ότι οι μέγιστες τιμές της κατακόρυφης τάσης είναι στα αριστερά και δεξιά της κυκλικής οπής. Οι τιμές κυμαίνονται από 29.34 MPa έως και 52.84 MPa για το μοντέλο 1 και από 9.94 MPa έως και 11.28 MPa για το μοντέλο 2. Πάνω και κάτω από την κυκλική οπή οι τιμές παρουσιάζουν τις μικρότερες τιμές και στα δύο μοντέλα.



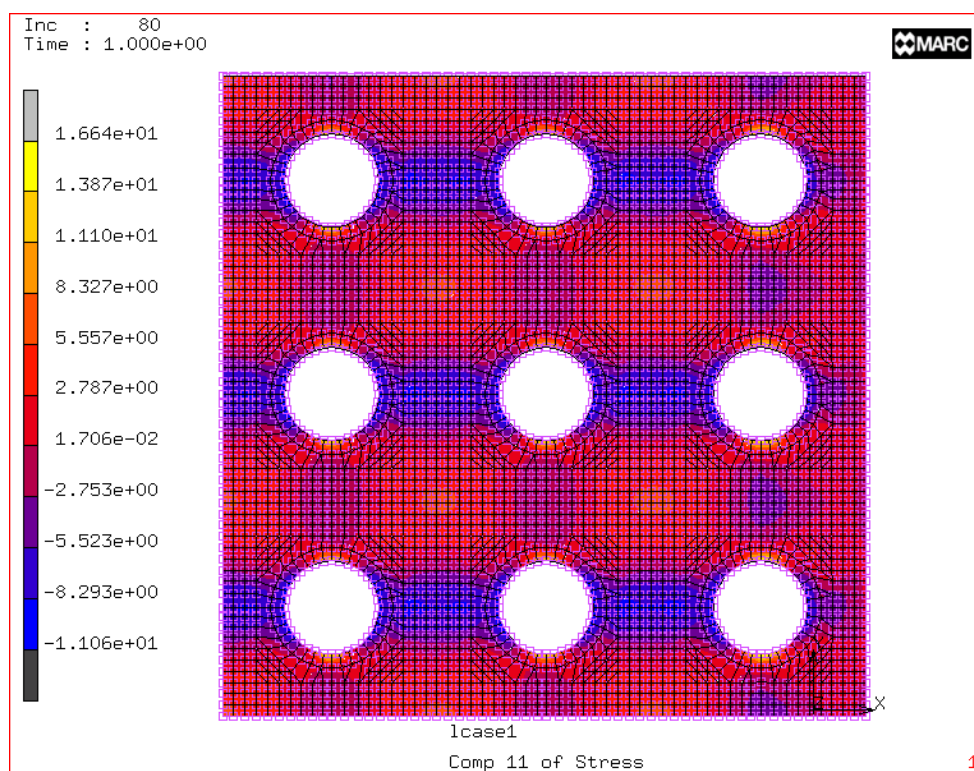
Σχήμα 4.25: Κατανομή κατακόρυφης τάσης σ_y στο μοντέλο 1



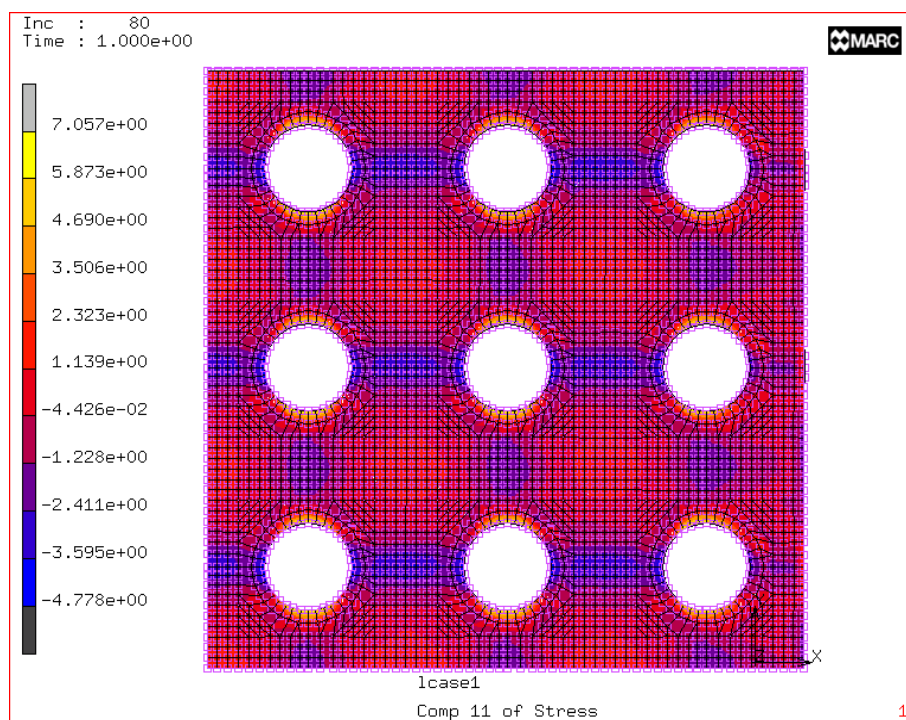
Σχήμα 4.26 Κατανομή κατακόρυφης τάσης σ_y στο μοντέλο 2

4.3.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων οριζόντιας τάσης σ_x για τα μοντέλα 1 και 2

Από τα σχήματα 4.27 και 4.28 παρατηρείται η κατανομή της οριζόντιας τάσης για τα μοντέλα 1 και 2. Αριστερά και δεξιά της κυκλικής οπής παρατηρούνται οι υψηλότερες τιμές της οριζόντιας τάσης. Στο μοντέλο 2 όμως που στο πέτρωμα έχουν προσδοθεί ελαστοπλαστικές ιδιότητες η μέγιστη τιμή της τάσης εμφανίζει χαμηλότερη τιμή από την μέγιστη τιμή τάσης που εμφανίζει το μοντέλο 1. Πιο συγκεκριμένα για το μοντέλο 1 η μέγιστη τιμή είναι 11.06 MPa ενώ για το μοντέλο 2 η μέγιστη τιμή είναι 4.77 MPa



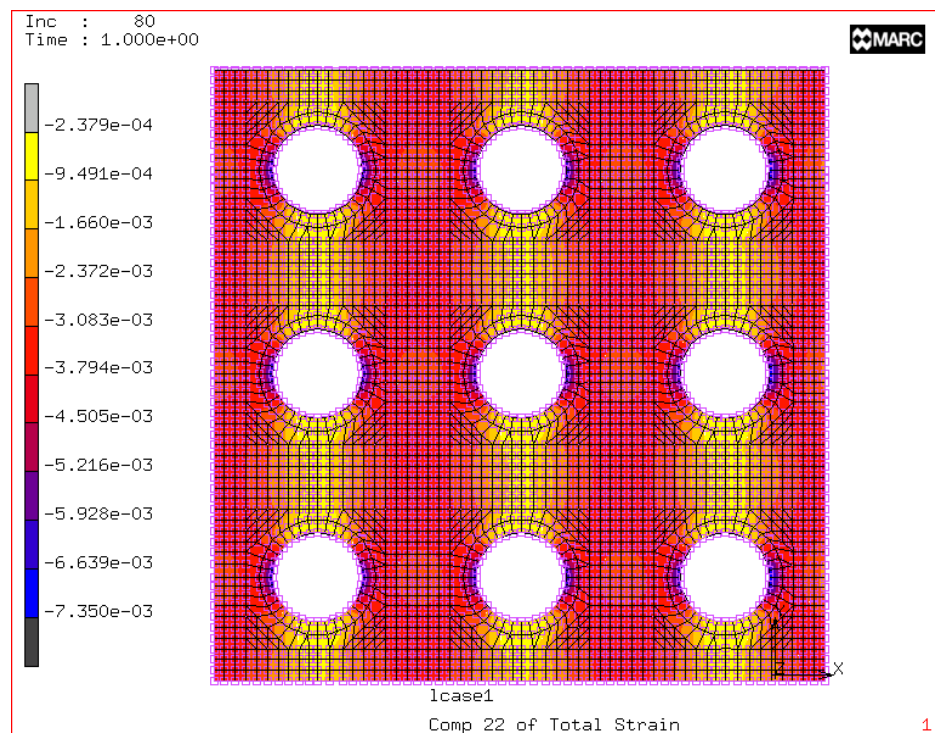
Σχήμα 4.27:Κατανομή οριζόντιας τάσης σ_x στο μοντέλο 1



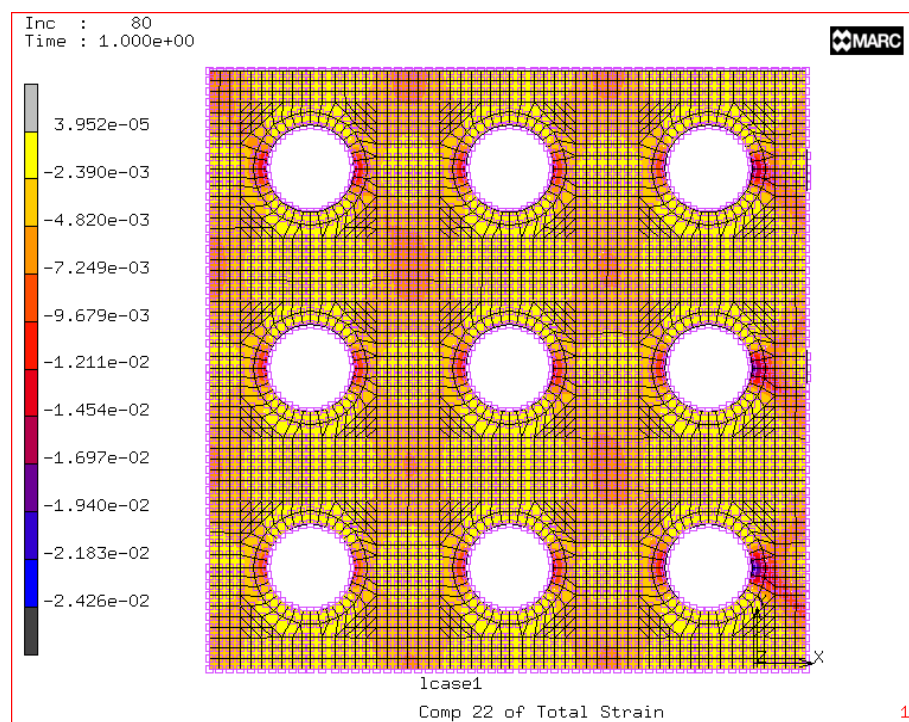
Σχήμα 4.28:Κατανομή οριζόντιας τάσης σ_x στο μοντέλο 2

4.3.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων κατακόρυφης παραμόρφωσης ϵ_y για τα μοντέλα 1 και 2

Η κατανομή της κατακόρυφης μετατόπισης ϵ_y παρατηρείται στα σχήματα 4.29 και 4.30. Οι μέγιστες παραμορφώσεις εμφανίζονται αριστερά και δεξιά της κυκλικής οπής με τιμές που κυμαίνονται από $37.94 \cdot 10^{-2}$ έως και $59.28 \cdot 10^{-2}$ για το μοντέλο 1 και από $12.11 \cdot 10^{-1}$ έως $14.53 \cdot 10^{-1}$ για το μοντέλο 2. Από τις παραπάνω τιμές διαπιστώνεται ότι οι παραμορφώσεις στο μοντέλο 1 είναι μία τάξη μεγέθους μικρότερες από αυτές του μοντέλου 2. Πάνω και κάτω από την κυκλική οπή οι τιμές των κατακόρυφων παραμορφώσεων εμφανίζουν τις μικρότερες τιμές και στα δύο μοντέλα.



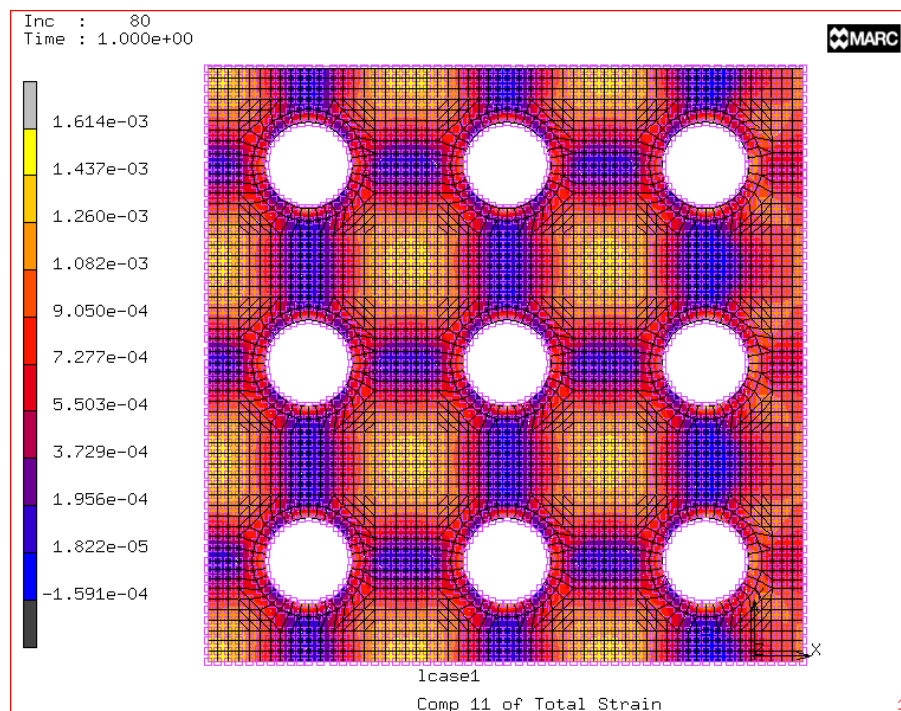
Σχήμα 4.29 Κατανομή κάθετης παραμόρφωσης ε_y στο μοντέλο 1



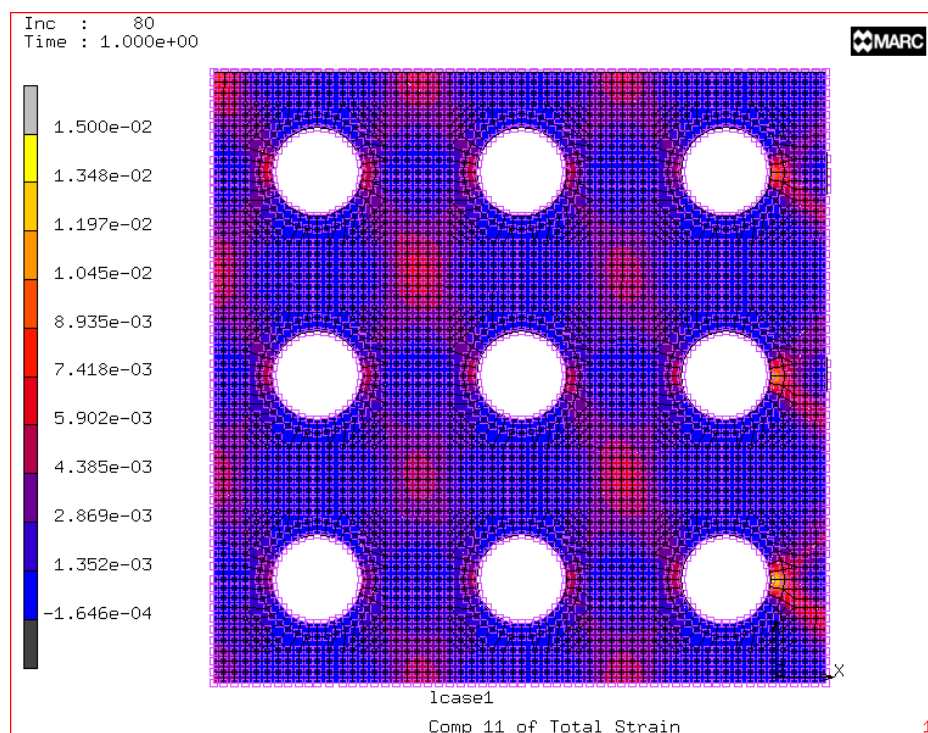
Σχήμα 4.30 Κατανομή κάθετης παραμόρφωσης ε_y στο μοντέλο 2

4.3.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων οριζόντιας παραμόρφωσης ϵ_x για τα μοντέλα 1 και 2

Στα σχήματα 4.31 και 4.32 παρατηρείται η κατανομή της οριζόντιας παραμόρφωσης ϵ_x που και για τα δύο μοντέλα κυμαίνονται σε παρα πολύ χαμηλές τιμές . Για το μοντέλο 1 οι τιμές ξεκινούν από $-16.14 \cdot 10^{-2}$ έως $15.91 \cdot 10^{-3}$ και $-15 \cdot 10^{-1}$ έως $16.46 \cdot 10^{-3}$ για το μοντέλο 2.



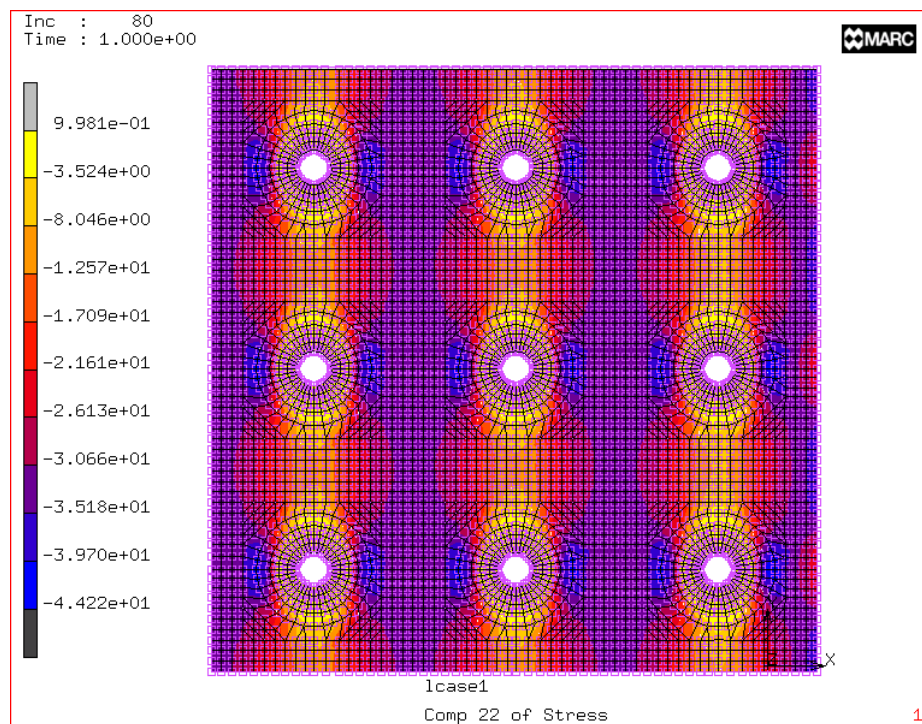
Σχήμα 4.31 Κατανομή οριζόντιας παραμόρφωσης ϵ_x στο μοντέλο 1



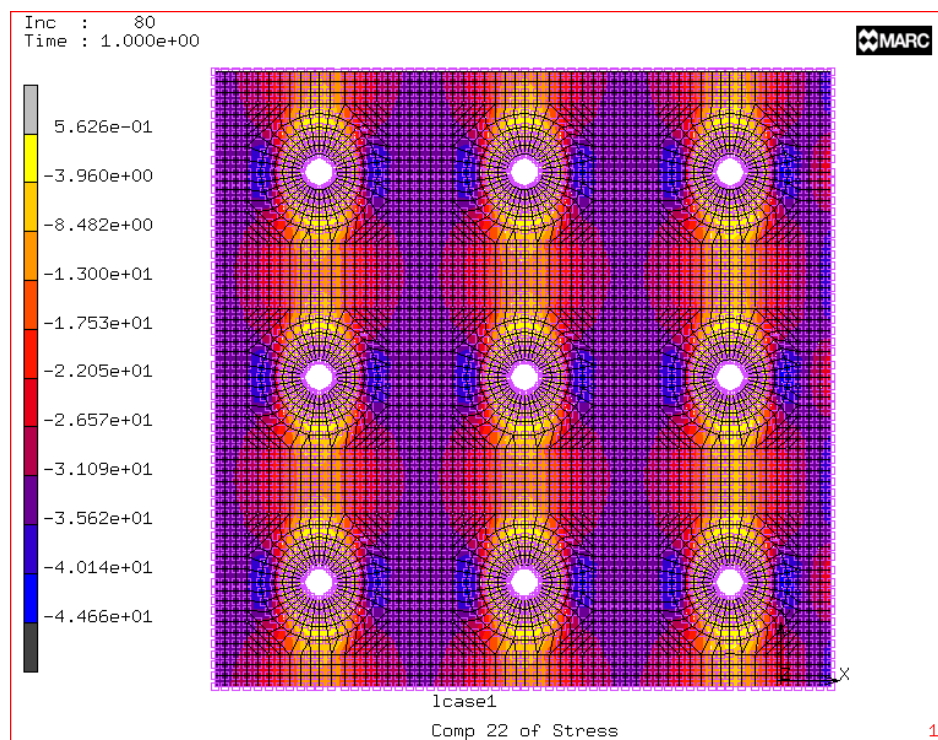
Σχήμα 4.32 Κατανομή οριζόντιας παραμόρφωσης ϵ_x στο μοντέλο 2

4.3.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων κατακόρυφης τάσης σ_y για τα μοντέλα 3 και 4

Στα σχήματα 4.33 και 4.34 παρατηρείται η κατανομή της κατακόρυφης τάσης σ_y για τα μοντέλα 3 και 4. Η συμπεριφορά των δύο μοντέλων είναι σχεδόν όμοια διότι παρόλο που στο μοντέλο 4 στην ρητίνη προσδόθηκαν ελαστοπλαστικές ιδιότητες, το μέτρο ελαστικότητας της είναι πολύ μικρότερο από αυτό του πετρώματος με αποτέλεσμα να μην επηρεάζεται σημαντικά η όλη συμπεριφορά του πετρώματος. Η τάση και για τα δύο μοντέλα λαμβάνει τις μικρότερες τιμές στα τρία στρώματα της ρητίνης με τιμές που κυμαίνονται από -1.00 MPa έως 3.53 MPa για το μοντέλο 3 και -0.53 MPa έως 4.00 MPa για το μοντέλο 4. Οι υψηλότερες τιμές της τάσης και για τα δύο μοντέλα εμφανίζονται αριστερά και δεξιά σε κάθε κυκλική οπή και αμέσως έξω από τα στρώματα της ρητίνης με τη μέγιστη τιμή να φτάνει τα 44.0 MPa για το μοντέλο 3 και 45.0 MPa για το μοντέλο 4. Πάνω και κάτω από τον πόρο η τιμή της τάσης λαμβάνει αισθητά μικρότερες τιμές και για τα δύο μοντέλα.



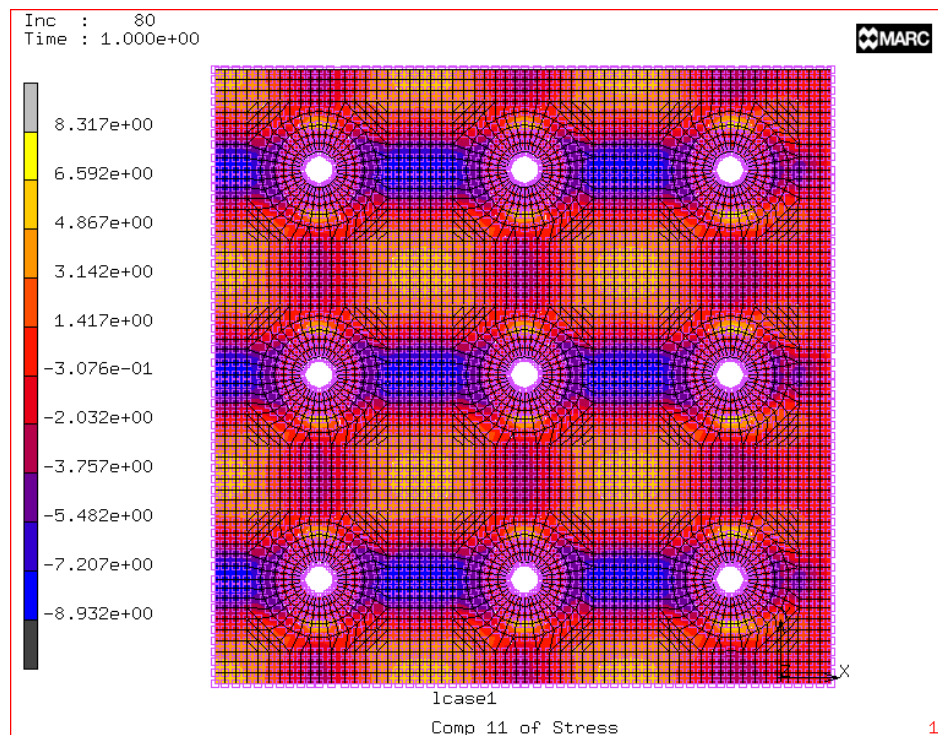
Σχήμα 4.33: Κατανομή κατακόρυφης τάσης σ_y στο μοντέλο 3



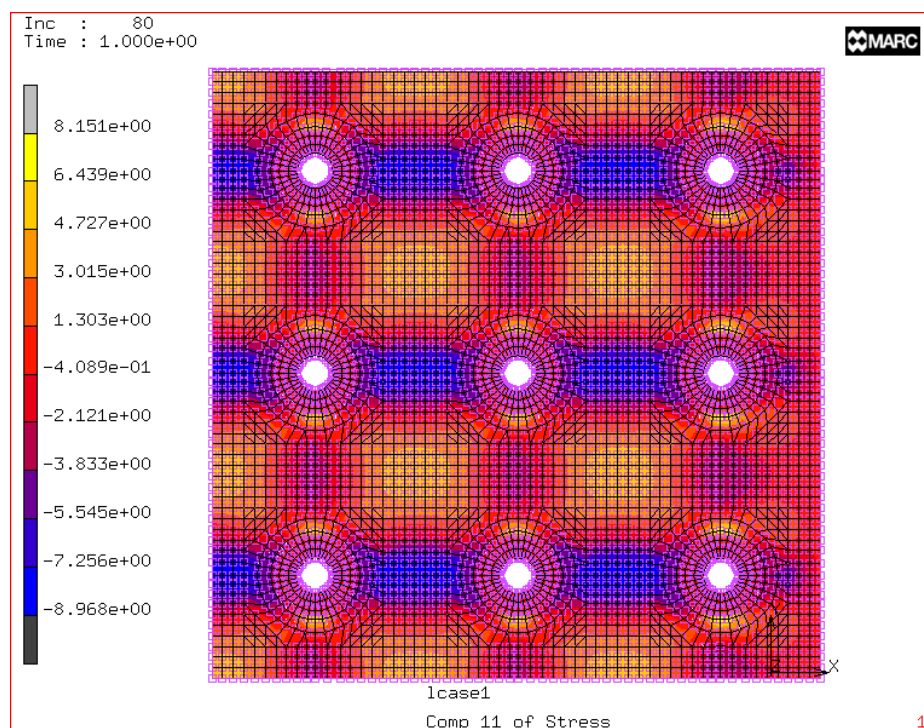
Σχήμα 4.34 Κατανομή κατακόρυφης τάσης σ_y στο μοντέλο 4

4.3.6 Σύγκριση αποτελεσμάτων οριζόντιας τάσης σ_x για τα μοντέλα 3 και 4

Παρόμοια συμπεριφορά στην κατανομή της οριζόντιας τάσης σ_x για τα μοντέλα 1 και 2 παρατηρείται από τα σχήματα 4.35 και 4.36 αντίστοιχα. Στα τρία στρώματα της ρητίνης παρατηρείται μία ομοιόμορφη κατανομή της οριζόντιας τάσης και για τα δύο μοντέλα. Οι τιμές κυμαίνονται από 2.00MPa έως 3.76MPa για το μοντέλο 3 και από -2.12MPa έως 3.83MPa για το μοντέλο 4. Υψηλές τιμές της οριζόντιας τάσης παρατηρούνται μεταξύ δύο διαδοχικών πόρων που βρίσκονται στην ίδια σειρά.



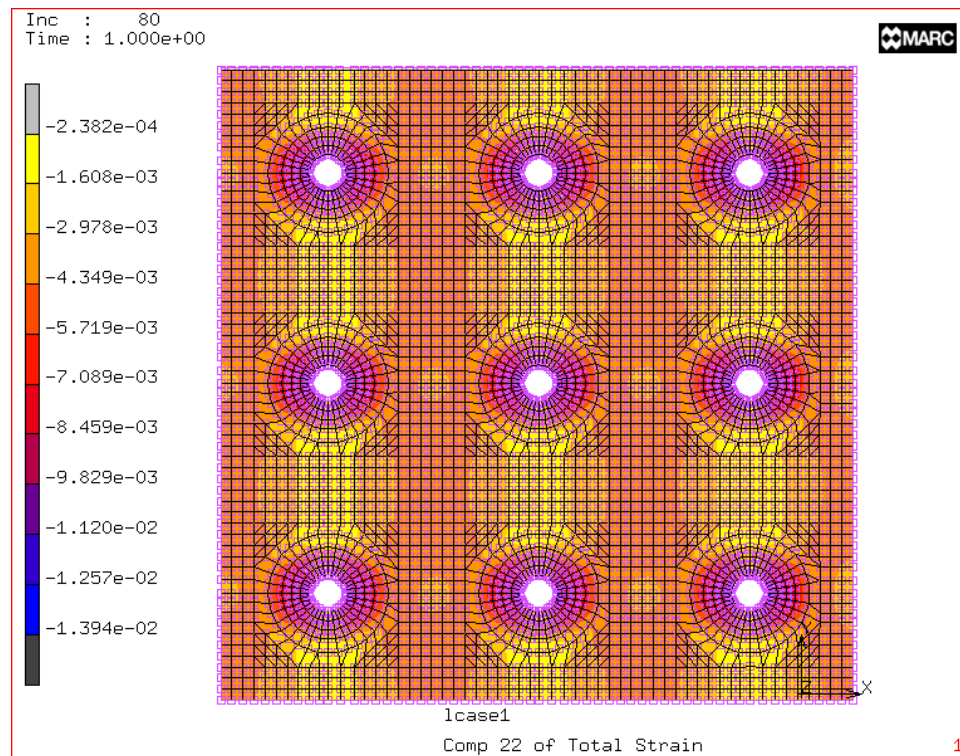
Σχήμα 4.35:Κατανομή οριζόντιας τάσης σ_x στο μοντέλο 3



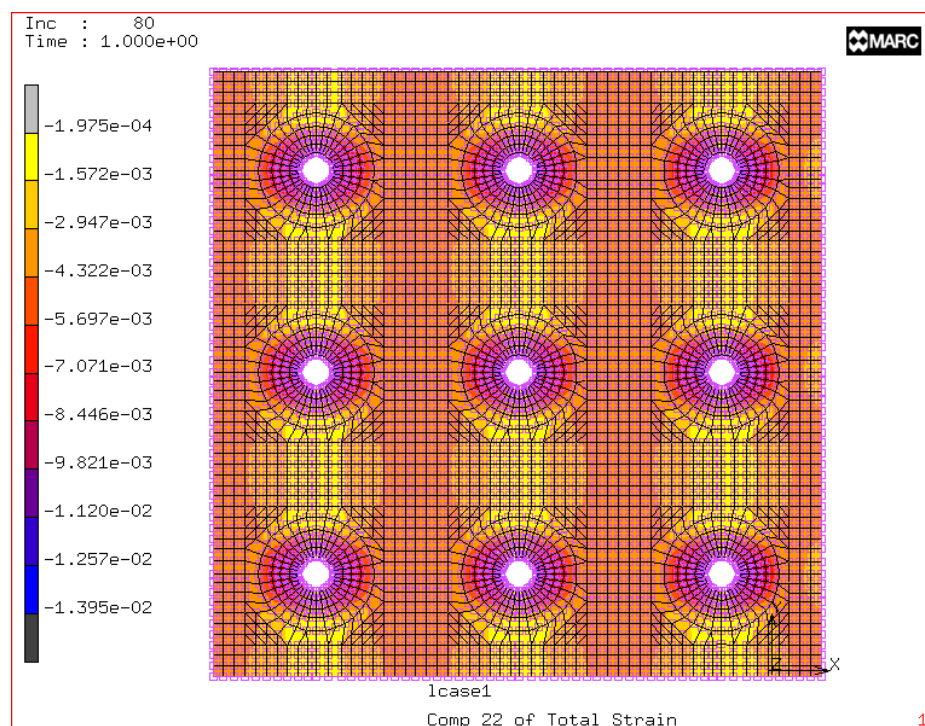
Σχήμα 4.36 Κατανομή οριζόντιας τάσης σ_x στο μοντέλο 4

4.3.7 Σύγκριση αποτελεσμάτων κατακόρυφης παραμόρφωσης ϵ_y για τα μοντέλα 3 και 4

Στα σχήματα 4.37 και 4.38 παρατηρείται η κατανομή της κάθετης παραμόρφωσης ϵ_y στα μοντέλα 3 και 4. Είναι φανερό ότι η συμπεριφορά τους είναι παρόμοια. Τα τρία στρώματα της ρητίνης παρουσιάζουν υψηλότερες παραμορφώσεις λόγω του μικρού μέτρου ελαστικότητας σε σχέση με το πέτρωμα και με τιμές που κυμαίνονται από $9.80 \cdot 10^{-3}$ έως $11.20 \cdot 10^{-3}$ για το μοντέλο 3 και από $9.80 \cdot 10^{-3}$ έως $11.20 \cdot 10^{-3}$ για το μοντέλο 4. Το πέτρωμα συνολικά δεν παρουσιάζει υψηλές παραμορφώσεις συγκριτικά με τα στρώματα της ρητίνης λόγω του υψηλού μέτρου ελαστικότητάς του.



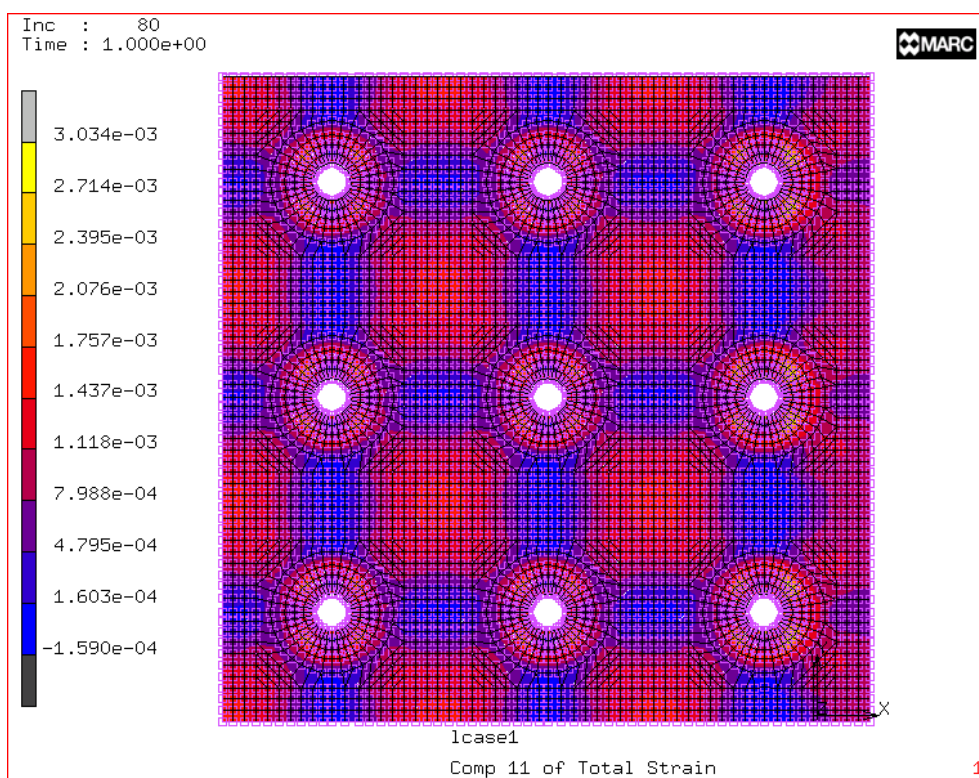
Σχήμα 4.37 Κατανομή κάθετης παραμόρφωσης ϵ_y στο μοντέλο 3



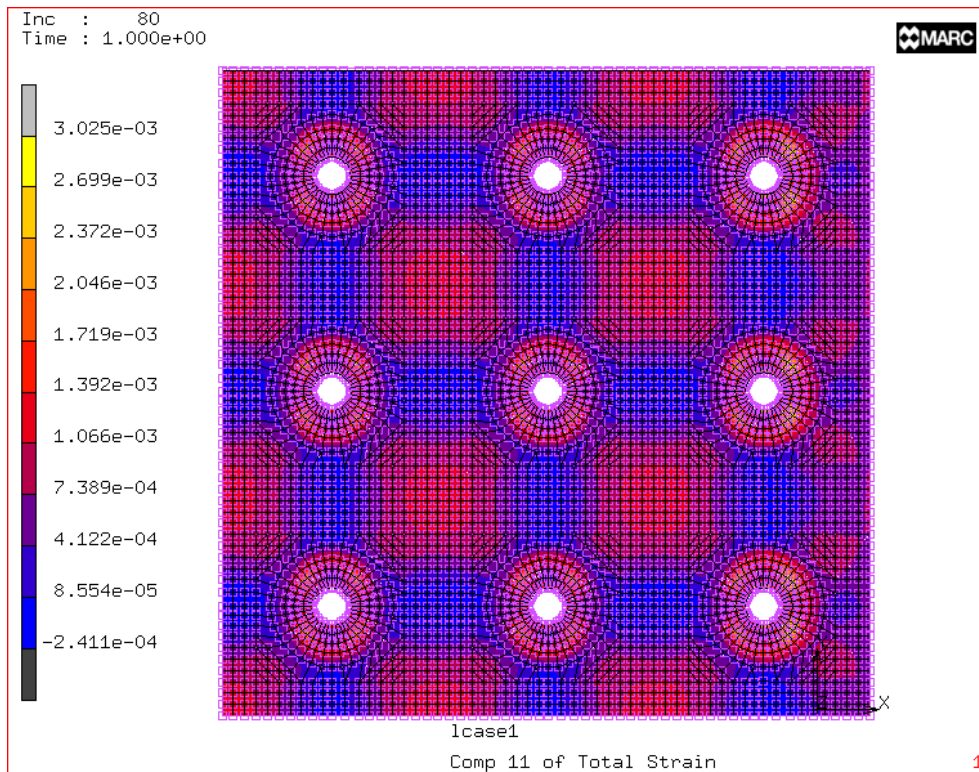
Σχήμα 4.38 Κατανομή κάθετης παραμόρφωσης ϵ_y στο μοντέλο 4

4.3.8 Σύγκριση αποτελεσμάτων οριζόντιας παραμόρφωσης ϵ_x για τα μοντέλα 3 και 4

Στα σχήματα 4.39 και 4.40 παρατηρείται η κατανομή της οριζόντιας παραμόρφωσης ϵ_x για τα μοντέλα 3 και 4. Διαπιστώνεται ότι η ελαστοπλαστικές ιδιότητες που προσδόθηκαν στη ρητίνη στο μοντέλο 4 δεν επηρέασαν την όλη συμπεριφορά του πετρώματος. Στα τρία στρώματα της ρητίνης παρατηρείται παραμόρφωση που κυμαίνεται από $-1.10 \cdot 10^{-3}$ έως $-1.40 \cdot 10^{-3}$ για το μοντέλο 3 και $-1.10 \cdot 10^{-3}$ έως $-1.40 \cdot 10^{-3}$ για το μοντέλο 4. Οι χαμηλότερες τιμές της οριζόντιας παραμόρφωσης και για τα δύο μοντέλα παρατηρούνται μεταξύ δύο διαδοχικών πόρων που βρίσκονται στην ίδια σειρά.



Σχήμα 4.39 Κατανομή οριζόντιας παραμόρφωσης ϵ_x στο μοντέλο 3



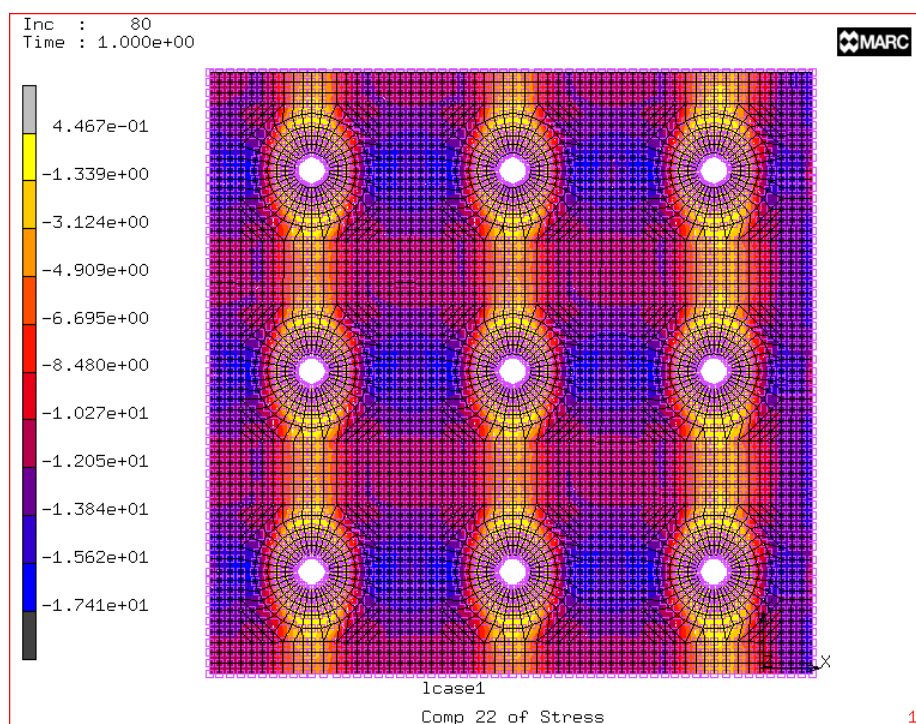
Σχήμα 4.40 Κατανομή οριζόντιας παραμόρφωσης ϵ_x στο μοντέλο 4

4.3.9 Σύγκριση αποτελεσμάτων κατακόρυφης τάσης σ_y για τα μοντέλα 5 και 6

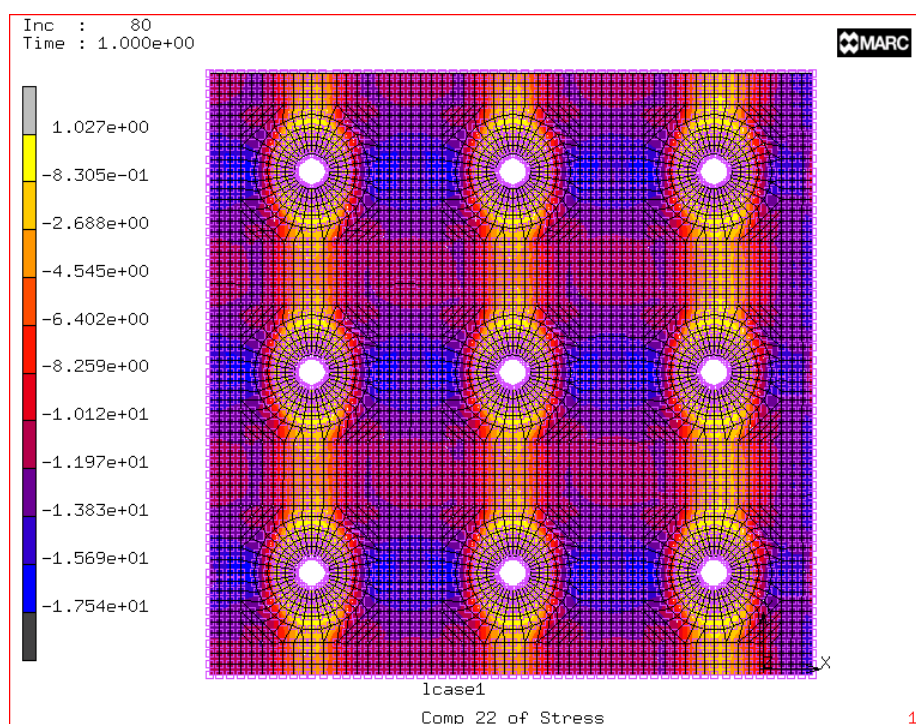
Τα μοντέλα 5 και 6, στα οποία έχουν προσδοθεί ελαστοπλαστικές ιδιότητες αφενός στο πέτρωμα στο μοντέλο 5 και αφετέρου στο πέτρωμα και στην ρητίνη στο μοντέλο 6, παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά στην επιβολή μετατόπισης -0.0275mm διότι το μέτρο ελαστικότητας της ρητίνης σε σχέση με αυτό του πετρώματος είναι πολύ μικρότερο με αποτέλεσμα οποιαδήποτε αλλαγή στις γεωμετρικές ιδιότητες της ρητίνης πέρα από την αλλαγή της πραγματικής τιμής του μέτρου ελαστικότητας να μην επιφέρει καμία αλλαγή στην συμπεριφορά του πετρώματος.

Από τα σχήματα 4.41 και 4.42 αντίστοιχα παρατηρείται ότι στα τρία στρώματα της ρητίνης, για τα μοντέλα 5 και 6, η κατανομή της κατακόρυφης τάσης σ_y παρουσιάζει τιμές που κυμαίνονται από 3.13MPa έως 4.91MPa για το μοντέλο 5 και από -2.69MPa έως 4.55MPa για το μοντέλο 6. Αμέσως έξω από τα στρώματα της ρητίνης, αριστερά και δεξιά από τον πόρο η κατακόρυφη τάση αυξάνει αισθητά με τιμές που

φτάνουν έως και 10.00MPa για το μοντέλο 5 και έως 10.12MPa για το μοντέλο 6. Στο ενδιάμεσο μεταξύ δύο διαδοχικών πόρων οι τιμές αυξάνουν ακόμα περισσότερο με τιμές που φτάνουν έως και 17.50MPa και για τα δύο μοντέλα



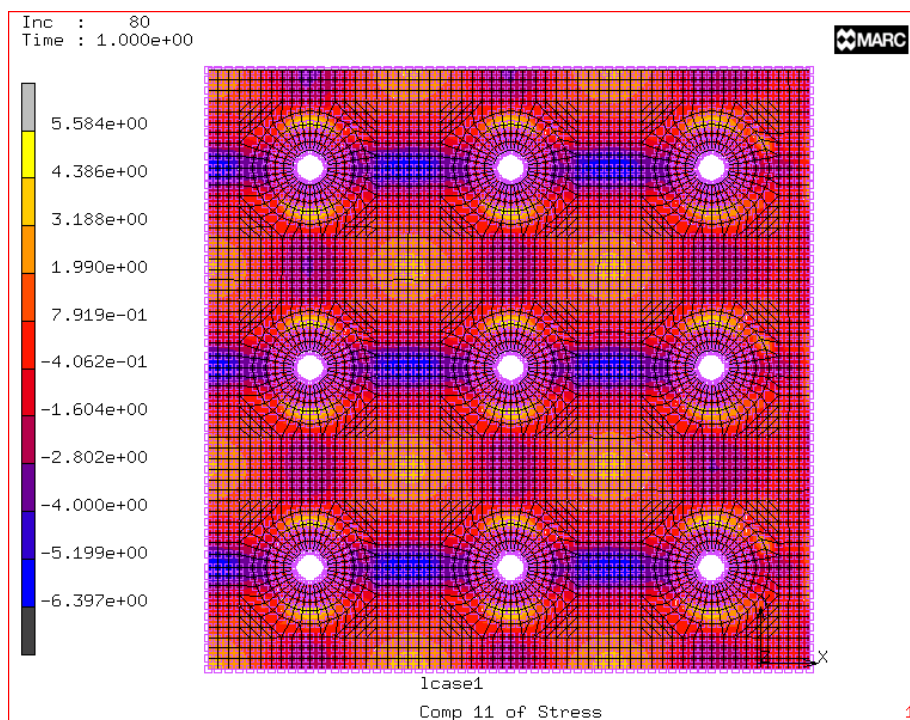
Σχήμα 4.41 Κατανομή κατακόρυφης τάσης σ_y στο μοντέλο 5



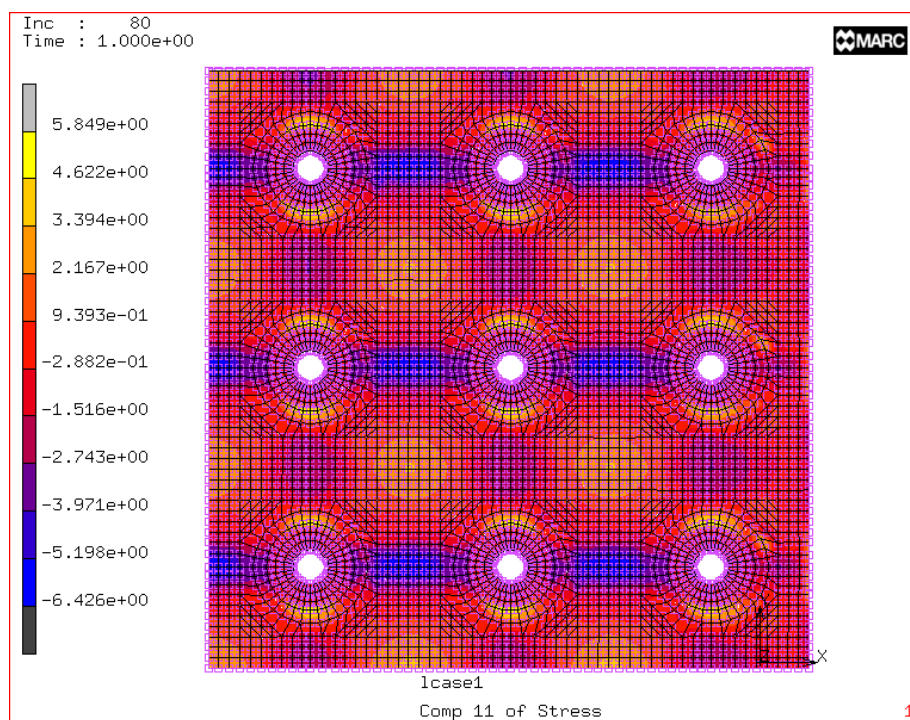
Σχήμα 4.42 Κατανομή κατακόρυφης τάσης σ_y στο μοντέλο 6

4.3.10 Σύγκριση αποτελεσμάτων οριζόντιας τάσης σ_x για τα μοντέλα 5 και 6

Η κατανομή της οριζόντιας τάσης σ_x παρατηρείται στα σχήματα 4.43 και 4.44 για τα μοντέλα 5 και 6 αντίστοιχα. Οι τιμές μέσα στα τρία στρώματα της ρητίνης κυμαίνονται από 0.04MPa έως και 1.60MPa για το μοντέλο 5 και από 0.29MPa έως 1.52MPa για το μοντέλο 6. Η μέγιστη τιμή της οριζόντιας τάσης και για τα δύο μοντέλα εμφανίζεται στο ενδιάμεσο μεταξύ δύο διαδοχικών πόρων με τιμή 6.43MPa περίπου και για τα δύο μοντέλα.



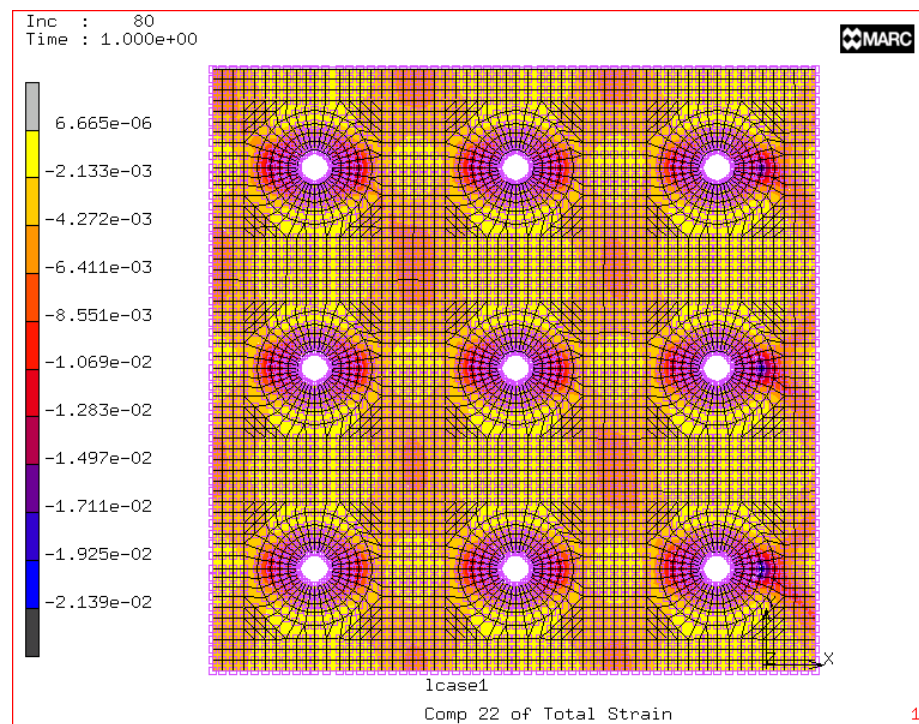
Σχήμα 4.43: Κατανομή οριζόντιας τάσης σ_x στο μοντέλο 5



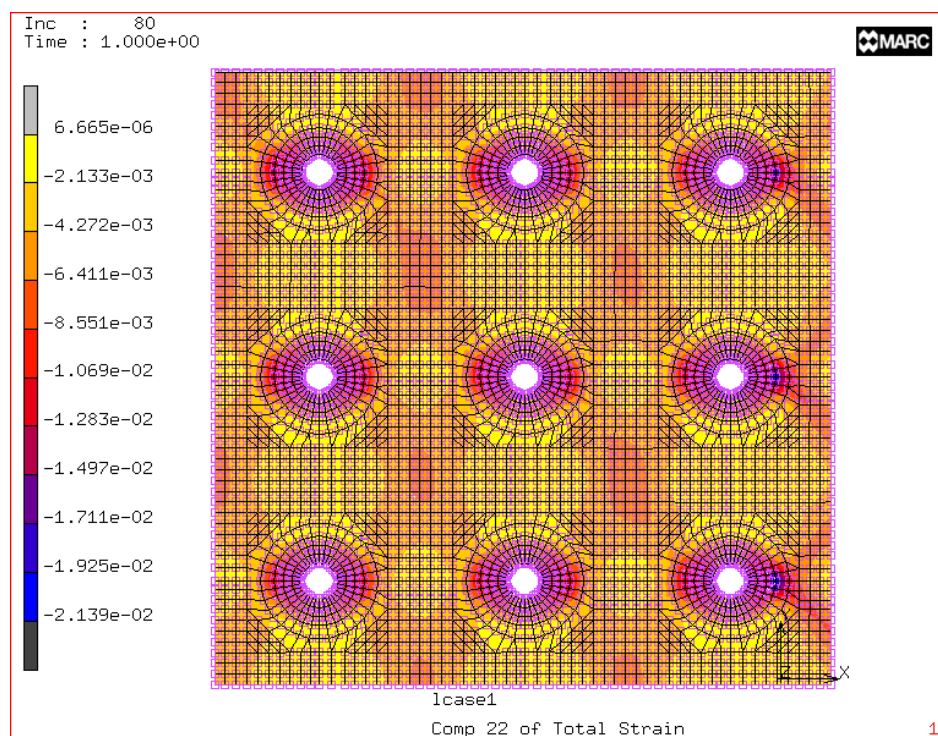
Σχήμα 4.44 Κατανομή οριζόντιας τάσης σ_x στο μοντέλο 6

4.3.11 Σύγκριση αποτελεσμάτων κάθετης παραμόρφωσης ϵ_y για τα μοντέλα 5 και 6

Στα σχήματα 4.45 και 4.46 παρατηρείται ότι οι κάθετη παραμόρφωση για τα μοντέλα 5 και 6 είναι ακριβώς ίδια. Τα τρία στρώματα της ρητίνης παρουσιάζουν έντονες παραμορφώσεις κατά τον άξονα ψ σε σχέση με την υπόλοιπη βραχομάζα. Οι τιμές κυμαίνονται από $1.50 \cdot 10^{-2} \text{MPa}$ έως $1.70 \cdot 10^{-2} \text{MPa}$ και για τα δύο μοντέλα.



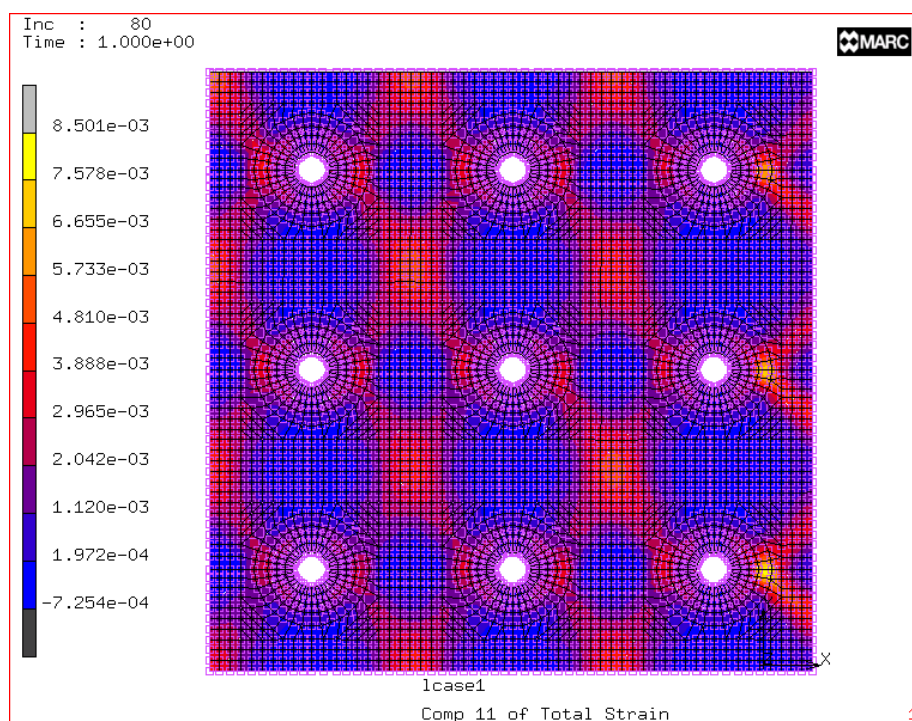
Σχήμα 4.45: Κατανομή κάθετης παραμόρφωσης ϵ_y στο μοντέλο 5



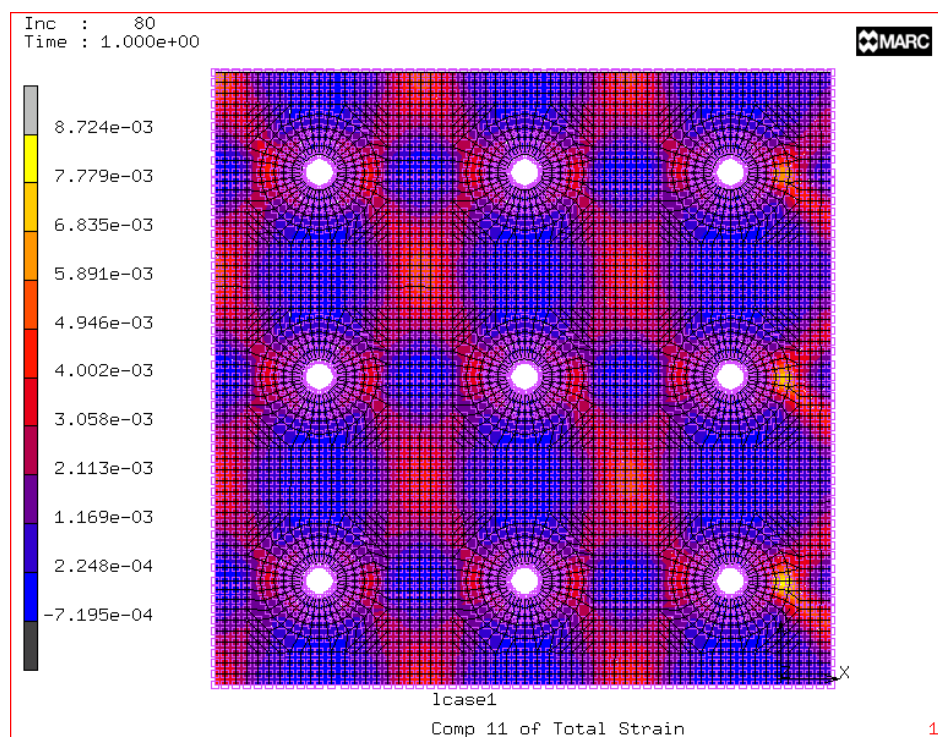
Σχήμα 4.46: Κατανομή κάθετης παραμόρφωσης ϵ_y στο μοντέλο 6

4.3.12 Σύγκριση αποτελεσμάτων οριζόντιας παραμόρφωσης ϵ_x για τα μοντέλα 5 και 6

Η κατανομή της οριζόντιας παραμόρφωσης για τα μοντέλα 3 και 4 παρατηρείται στα σχήματα 4.47 και 4.48 αντίστοιχα. Οι τιμές της σε όλη τη βραχομάζα παρουσιάζουν πολύ μικρές διακυμάνσεις και για τα δύο μοντέλα. Οι τιμές της οριζόντιας παραμόρφωσης στα τρία στρώματα της ρητίνης κυμαίνονται από $-3.88 \cdot 10^{-3}$ έως $-2.96 \cdot 10^{-3}$ για το μοντέλο 5 και από $-4.00 \cdot 10^{-3}$ έως $-3.06 \cdot 10^{-3}$ για το μοντέλο 6. Οι τιμές της οριζόντιας παραμόρφωσης στο ενδιάμεσο μεταξύ δύο διαδοχικών πόρων είναι μία τάξη μεγέθους χαμηλότερες και για τα δύο μοντέλα.



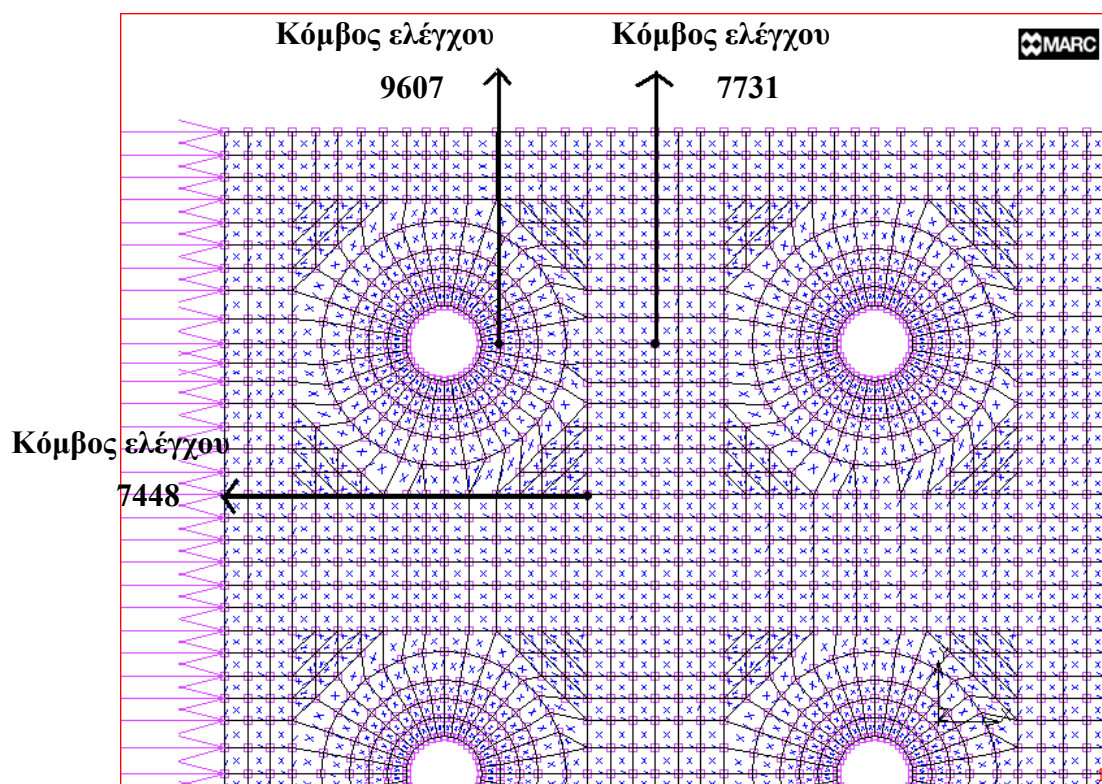
Σχήμα 4.47 Κατανομή οριζόντιας παραμόρφωσης ϵ_x στο μοντέλο 5



Σχήμα 4.48 Κατανομή οριζόντιας παραμόρφωσης ϵ_x στο μοντέλο 6

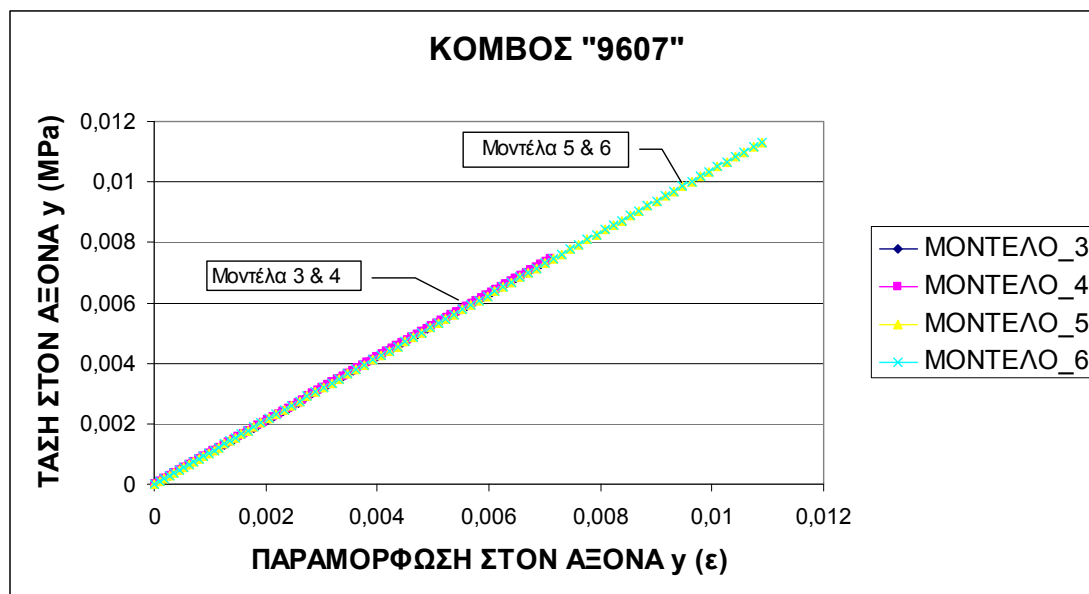
4.4 Σύγκριση Μοντέλων

Καθώς και τα έξι μοντέλα που επιλύθηκαν είχαν παρόμοια γεωμετρία η αρίθμηση των κόμβων του υλικού ήταν ίδια σε όλα τα μοντέλα. Κατόπιν αυτών επιλέχθηκαν συγκεκριμένοι κόμβοι και έγιναν γραφικές παραστάσεις τάσης- παραμόρφωσης κατά x και y για τους συγκεκριμένους αυτούς κόμβους ελέγχου οι οποίες περιλαμβάνουν την απόκριση όλων των μοντέλων. Έτσι επιλέχθηκαν οι κόμβοι ελέγχου 9607 και 7731, 7448 που αντιστοιχούν σε ρητίνη και πέτρωμα αντίστοιχα όπως φαίνεται στο σχήμα 4.49.



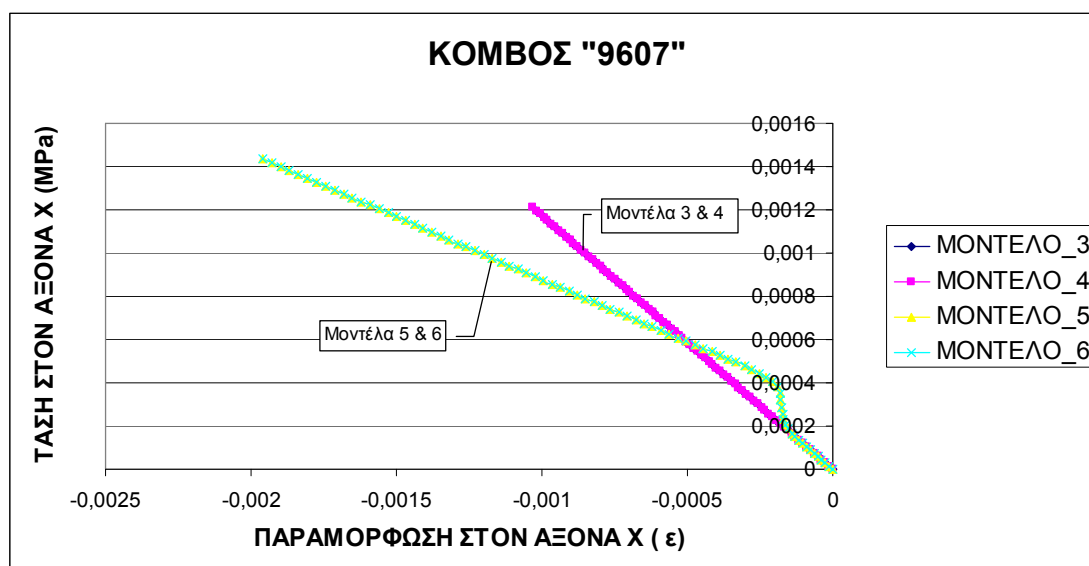
Σχήμα 4.49: Κόμβοι ελέγχου

Στο σχήμα 4.50 παρουσιάζεται η καμπύλη σ - ϵ για τον κόμβο ελέγχου 6907. Παρατηρείται ότι και τα τέσσερα μοντέλα συμπεριφέρονται ελαστικά. Η μόνη διαφορά είναι ότι τα μοντέλα 5 και 6 εμφανίζουν μεγαλύτερη παραμόρφωση και τάση στον άξονα y με τιμές 0.011 και 0.01 MPa αντίστοιχα. Ενώ οι αντίστοιχες τιμές για τα μοντέλα 3 και 4 είναι 0.007 και 0.008MPa. Οι τιμές αυτές είναι σημαντικά μικρότερες από τις τιμές τάσεων που αναπτύσσονται στο πέτρωμα καθώς το μέτρο ελαστικότητας της ρητίνης είναι τέσσερις τάξεις μεγέθους μικρότερο από το μέτρο ελαστικότητας του πετρώματος.



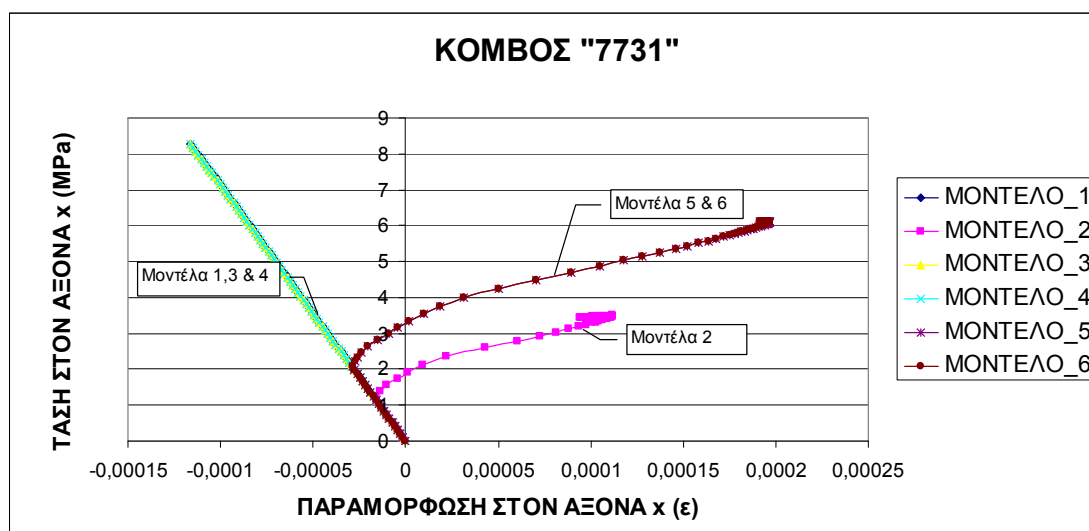
Σχήμα 4.50: Αποτελέσματα κατακόρυφης τάσης συναρτήσει κατακόρυφης παραμόρφωσης σε σημείο πάνω στα μοντέλα

Στο σχήμα 4.51 παρουσιάζεται η καμπύλη σ - ϵ ως προς τον άξονα x για τον κόμβο ελέγχου 9607. για τα τέσσερα μοντέλα που εμπεριέχουν ρητίνη. Από την καμπύλη φαίνεται ότι τα μοντέλα 3 και 4 συμπεριφέρονται ελαστικά. Τα μοντέλα 5 και 6 συμπεριφέρονται ελαστικά μέχρι το σημείο στο οποίο η τάση είναι $4 \cdot 10^{-3}$ MPa. Μετά παρουσιάζονται δύο σημεία καμπής για τάση 0,0004 και 0,0006 MPa και στη συνέχεια συμπεριφέρονται ξανά ελαστικά.



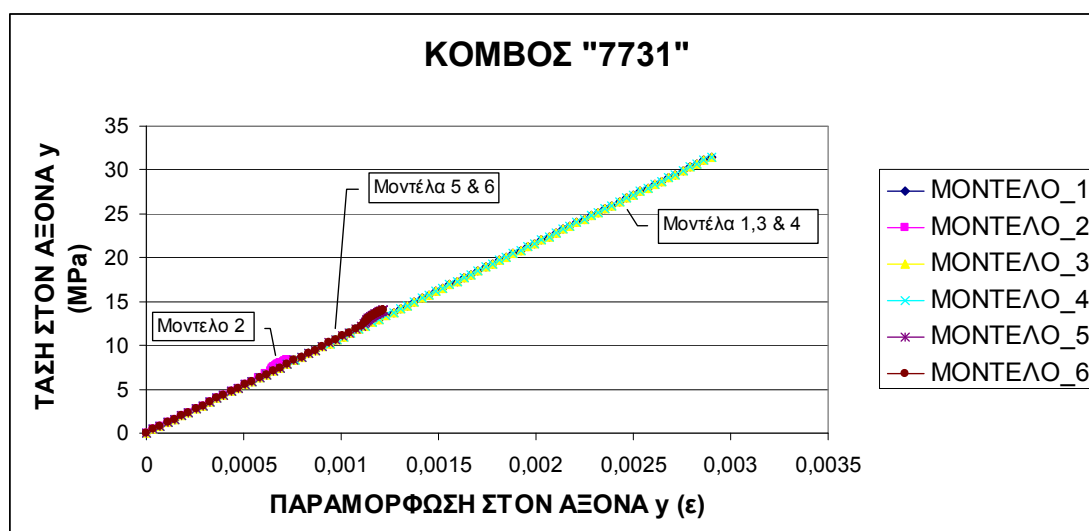
Σχήμα 4.51: Αποτελέσματα κατακόρυφης τάσης συναρτήσει κατακόρυφης παραμόρφωσης σε σημείο πάνω στα μοντέλα

Στον κόμβο 7731, όπως φαίνεται από το διάγραμμα της καμπύλης σ - ϵ ως προς τον άξονα x για τα έξι μοντέλα του σχήματος 4.52, προκύπτει ότι τα μοντέλα 1, 3 και 4 συμπεριφέρονται ελαστικά με μέγιστη τάση 8 MPa και μέγιστη παραμόρφωση $-0,00013$. Τα μοντέλα 5 και 6 έχουν παρόμοια συμπεριφορά μεταξύ τους. Αρχικά, μέχρι την τάση των 2 MPa, συμπεριφέρονται ελαστικά όμοια με τα μοντέλα 1 και 2. Ως εκείνο το σημείο εφελκούνται ενώ μετά αλλάζουν συμπεριφορά και για τάση μεγαλύτερη των 3,5 MPa παρουσιάζουν θλιπτική συμπεριφορά με μέγιστη τάση τα γ. Το μοντέλο 2 έχει παρόμοια συμπεριφορά με τα μοντέλα 5 και 6 με τη διαφορά ότι εμφανίζει μικρότερη τιμή στη τιμή της μέγιστης τιμής παραμόρφωσης και μικρότερη τιμή στη τιμή της μέγιστης τάσης στον άξονα x που είναι ίση με 3,5 MPa περίπου αντί για 6 MPa που εμφανίζουν τα μοντέλα 5 και 6.



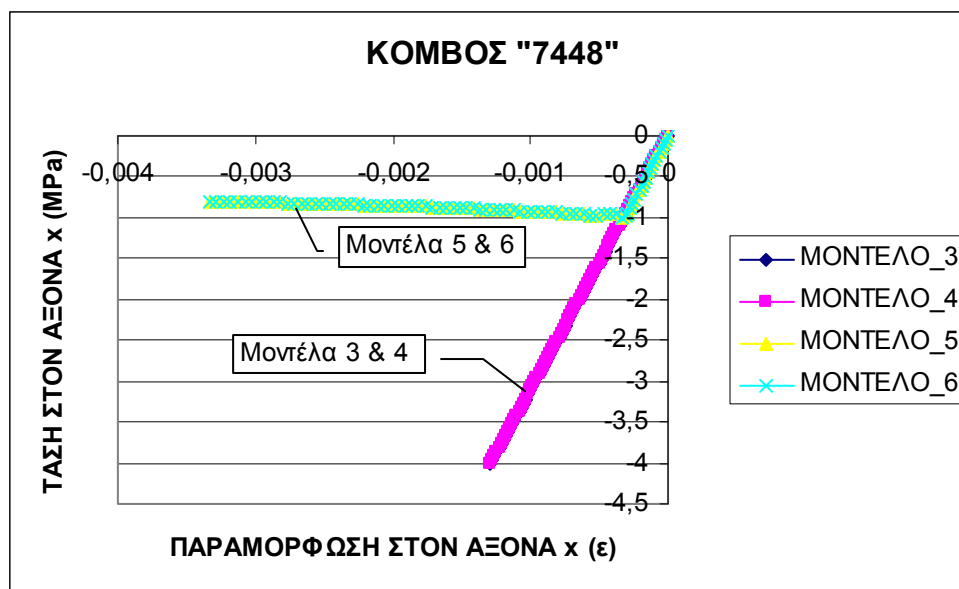
Σχήμα 4.52: Αποτελέσματα οριζόντιας τάσης συναρτήσει οριζόντιας παραμόρφωσης σε σημείο πάνω στα μοντέλα

Η απόκριση των μοντέλων 1, 3 και για τον κόμβο 7731 όπως παρουσιάζεται στο διάγραμμα σ - ϵ ως προς τον άξονα y του σχήματος 4.53 συμπεριφέρονται ελαστικά με ίδια μέγιστη τάση στον κατακόρυφο άξονα ίση με 33MPa και μέγιστη παραμόρφωση 0.003. Τα μοντέλα 5 και 6 παρουσιάζουν όμοια ελαστική συμπεριφορά με μικρότερη όμως μέγιστη κατακόρυφη τάση που είναι ίση με 14MPa και μικρότερη μέγιστη παραμόρφωση ίση με 0.0012. Το μοντέλο 2 παρουσιάζει όμοια ελαστική συμπεριφορά με τα μοντέλα 5 και 6 με μικρότερη όμως μέγιστη κατακόρυφη τάση που είναι ίση με 8 MPa και μικρότερη μέγιστη παραμόρφωση ίση με 0.0007.



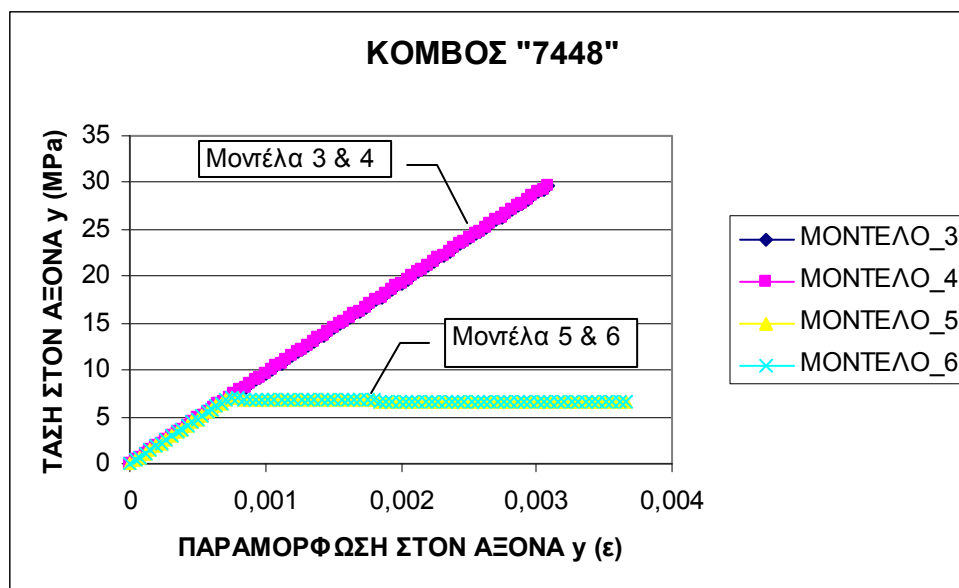
Σχήμα 4.53: Αποτελέσματα οριζόντιας τάσης συναρτήσει οριζόντιας παραμόρφωσης σε σημείο πάνω στα μοντέλα

Στο σχήμα 4.54 παρουσιάζεται η απόκριση των 3, 4, 5 και 6. Παρατηρείται από τις τέσσερις καμπύλες ότι τα μοντέλα 3 και 4 παρουσιάζουν όμοια ελαστική συμπεριφορά με μέγιστη τιμή τάσης ίση με 4 MPa και μέγιστη παραμόρφωση 0.0013. Τα μοντέλα 5 και 6 παρουσιάζουν όμοια ελαστοπλαστική συμπεριφορά με όριο διαρροής περίπου -1 MPa και μέγιστη παραμόρφωση -0.0032.



Σχήμα 4.54: Αποτελέσματα οριζόντιας τάσης συναρτήσει οριζόντιας παραμόρφωσης σε σημείο πάνω στα μοντέλα

Στο σχήμα 4.55 παρουσιάζεται η απόκριση των 3, 4, 5 και 6. Παρατηρείται από τις τέσσερις καμπύλες ότι τα μοντέλα 3 και 4 παρουσιάζουν όμοια ελαστική συμπεριφορά με μέγιστη τιμή τάσης ίση με 30 MPa και μέγιστη παραμόρφωση 0.0032. Τα μοντέλα 5 και 6 παρουσιάζουν όμοια ελαστοπλαστική συμπεριφορά με όριο διαρροής 6.388 MPa και μέγιστη παραμόρφωση 0.0037.

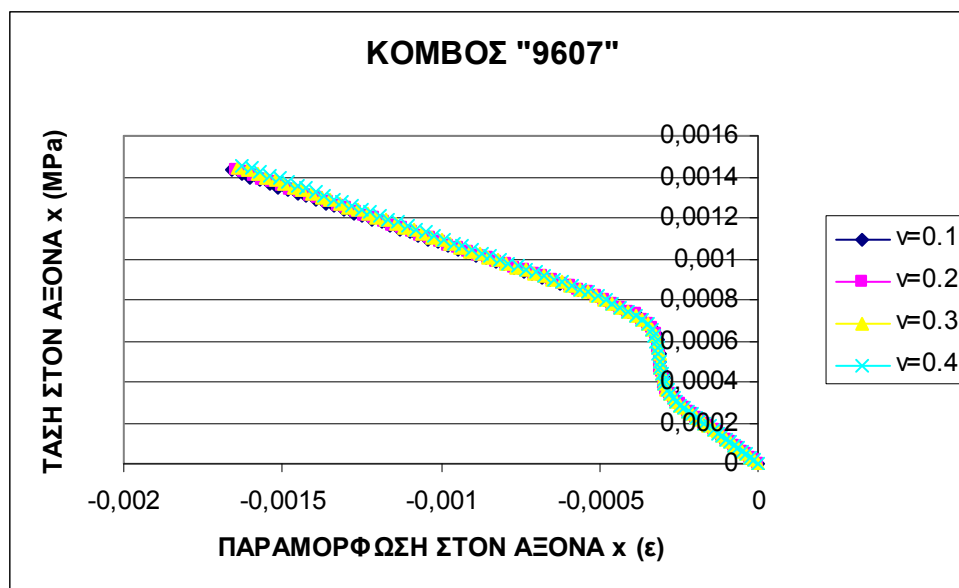


Σχήμα 4.55: Αποτελέσματα κατακόρυφης τάσης συναρτήσει κατακόρυφης παραμόρφωσης σε σημείο πάνω στα μοντέλα

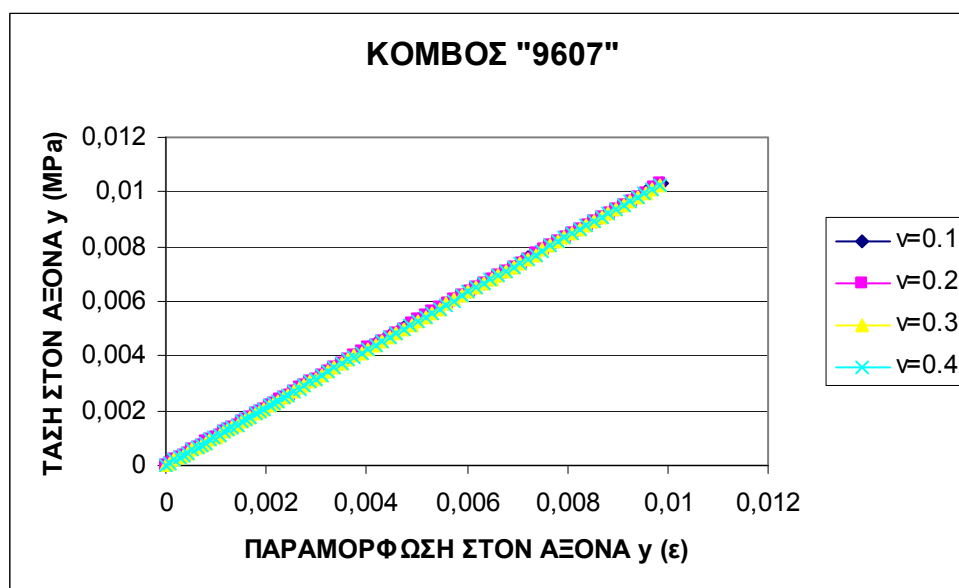
4.5 Διερεύνηση ως προς τον λόγο Poisson “ν” για το Μοντέλο 5

Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για διαφορετικές τιμές του λόγου Poisson της πειραματικής μελέτης για το μοντέλο 3 στους κόμβους ελέγχου 9607 (ρητίνη) και 7731 (πέτρωμα).

Για τον κόμβο 9607 το σχήμα 4.56 και 4.57 παρουσιάζουν τις καμπύλες σ-ε ως προς τον άξονα x για τιμές του $\nu=0.1$ έως 0.4 . Δεν παρατηρείται μεταβολή στην κλίση της καμπύλης για τις διαφορετικές τιμές του λόγου Poisson και ως προς την παραμόρφωση στον άξονα x αλλά και ως προς την παραμόρφωση στον άξονα y.



Σχήμα 4.56: Διαγράμματα οριζόντιας τάσης συναρτήσει οριζόντιας παραμόρφωσης σε σημείο πάνω στο μοντέλο για διαφορετικές τιμές του λόγου Poisson

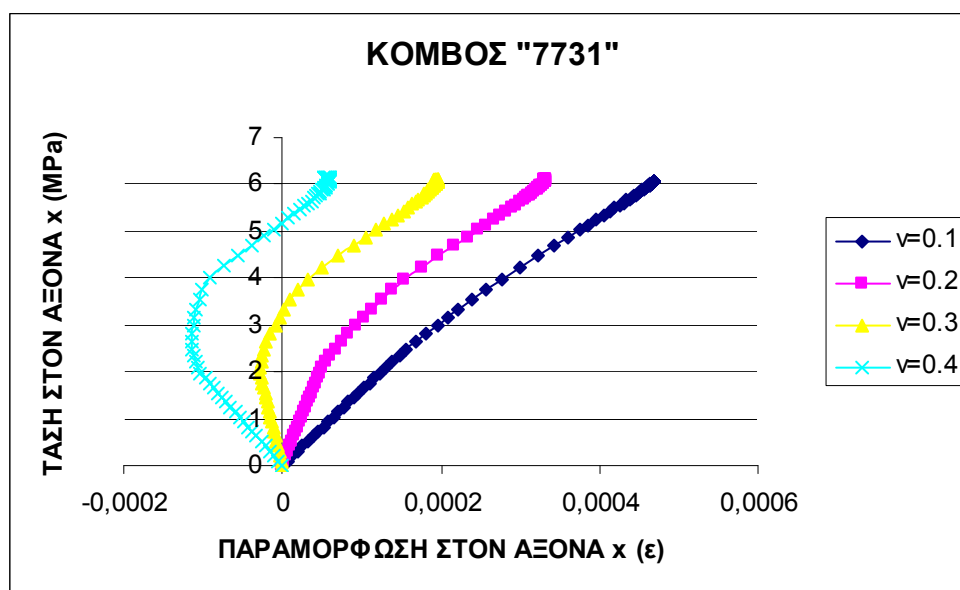


Σχήμα 4.57: Διαγράμματα κατακόρυφης τάσης συναρτήσει κατακόρυφης παραμόρφωσης σε σημείο πάνω στο μοντέλο για διαφορετικές τιμές του λόγου Poisson

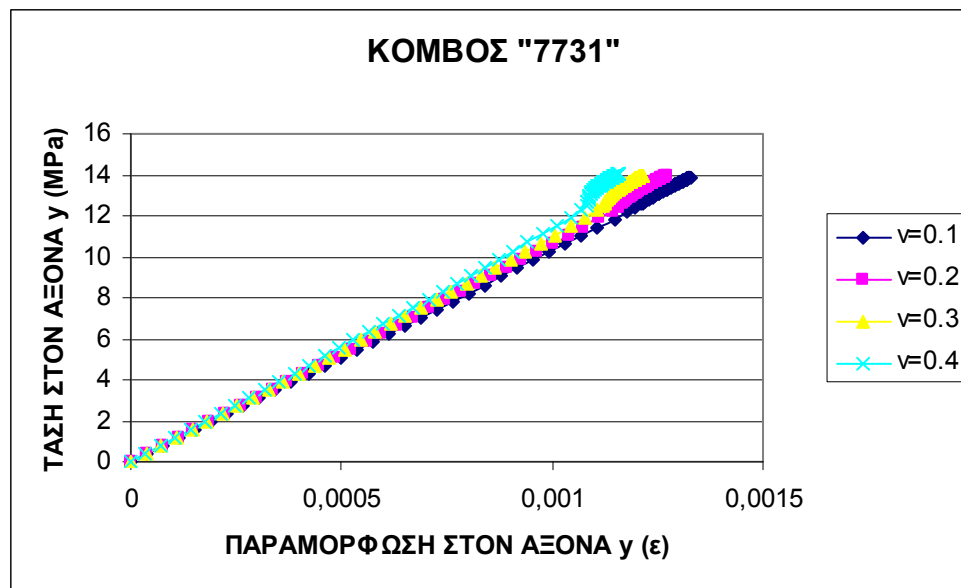
Στο σχήμα 4.58 παρουσιάζεται η απόκριση του μοντέλου 3 στον κόμβο του πετρώματος 7731 για διάφορες τιμές στο λόγο Poisson που κυμαίνονται από 0.1 έως και 0.4 σε διάγραμμα οριζόντιας παραμόρφωσης στον άξονα x συναρτήσει της οριζόντιας τάσης στον ίδιο άξονα. Διαπιστώνεται ότι και για τις τέσσερις τιμές στο

λόγο Poisson η μέγιστη τάση στον άξονα x παραμένει σταθερή και ίση περίπου με 6MPa. Επίσης από το ίδιο διάγραμμα προκύπτει ότι όσο αυξάνει ο λόγος Poisson η παραμόρφωση στο τελικό στάδιο της φόρτισης εμφανίζει μικρότερες τιμές. Επίσης διαπιστώνεται ότι για τιμές του λόγου Poisson 0.1 και 0.2 το μοντέλο 3 παρουσιάζει εφελκυστική συμπεριφορά και στα 80 στάδια της φόρτισης ενώ για τιμές 0.3 και 0.4 το μοντέλο 3 στα πρώτα στάδια της φόρτισης παρουσιάζει εφελκυστική συμπεριφορά και καταλήγει στα τελευταία στάδια της φόρτισης σε θλιπτική συμπεριφορά.

Στο σχήμα 4.59 και για τις τέσσερις τιμές του λόγου Poisson παρατηρείται ελαστική συμπεριφορά του μοντέλου. Η μέγιστη τάση στον άξονα τον y είναι περίπου ίση με 14MPa και στις τέσσερις καμπύλες ενώ η τελική παραμόρφωση στον άξονα y εμφανίζει μικρότερες τιμές όσο αυξάνει η τιμή στο λόγο Poisson με μικρές όμως διαφορές.



Σχήμα 4. 58: Διαγράμματα οριζόντιας τάσης συναρτήσει οριζόντιας παραμόρφωσης σε σημείο πάνω στο μοντέλο για διαφορετικές τιμές του λόγου Poisson



Σχήμα 4.59: Διαγράμματα κατακόρυφης τάσης συναρτήσει κατακόρυφης παραμόρφωσης σε σημείο πάνω στο μοντέλο για διαφορετικές τιμές του λόγου Poisson

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

Συμπεράσματα-Προτάσεις

5.1 Συμπεράσματα

Από την παρούσα διπλωματική εργασία προέκυψαν κάποια ενδιαφέροντα επί μέρους συμπεράσματα, μερικά από τα οποία έχουν ήδη αναφερθεί στα προηγούμενα κεφάλαια. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια προσπάθεια να συνοψισθούν όλα μαζί.

Στην εργασία αυτή έγινε μια αριθμητική προσομοίωση ενός πορώδους πετρώματος στερεωμένου με ρητίνη, όταν αυτό καταπονείται κάτω από συνθήκες θλίψης. Σε μια πρώτη προσέγγιση του θέματος επιλέχθηκε η φόρτιση του εξεταζόμενου δοκιμίου να γίνει μόνο κατά ένα άξονα (y). Για την παραμετρική διερεύνηση του προβλήματος δημιουργήθηκαν τέσσερα μοντέλα τα οποία διαφέρουν ως προς τις καταστατικές εξισώσεις των υλικών.

Η ανάλυση περιλαμβάνει συγκριτική αξιολόγηση της μηχανικής απόκρισης του πετρώματος και της ρητίνης όσον αφορά τις τάσεις και παραμορφώσεις που παρουσιάζει. Το ενδιαφέρον εστιάζεται στο γεγονός ότι και τα δύο υλικά προσομοιώθηκαν ως ελαστοπλαστικά υλικά με βάση το γραμμικό κριτήριο Mohr-Coulomb. Από την αριθμητική επίλυση προέκυψαν συγκριτικά διαγράμματα της κατακόρυφης παραμόρφωσης σε συνάρτηση με την κατακόρυφη τάση σε MPa, της οριζόντιας παραμόρφωσης σε συνάρτηση με την οριζόντια τάση σε MPa. Επίσης για το μοντέλο 3 αναπτύχθηκαν τα συγκριτικά διαγράμματα οριζόντιας παραμόρφωσης σε συνάρτηση με την οριζόντια τάση σε MPa και κάθετης παραμόρφωσης σε συνάρτηση με την κάθετη τάση σε MPa για διαφορετικές τιμές του λόγου Poisson.

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

1. Από τα διαγράμματα των σχημάτων 4.52 και 4.53 είναι εμφανές ότι με την προσθήκη ρητίνης τα μοντέλα παρουσιάζουν υψηλότερη αντοχή σε τάση και παραμόρφωση στον άξονα x και άξονα y αντίστοιχα. Στο διάγραμμα 4.52 το μοντέλο 2 χωρίς προσθήκη ρητίνης εμφανίζει μέγιστη τάση 3.5 MPa ενώ τα μοντέλα 5 και 6 με προσθήκη ρητίνης εμφανίζουν μέγιστη τάση περίπου ίση με 6 MPa. Το πέτρωμα και στα τρία μοντέλα έχει ελαστοπλαστικές ιδιότητες. Αντίστοιχα στο διάγραμμα 4.53 το μοντέλο 2 χωρίς προσθήκη ρητίνης εμφανίζει μέγιστη τάση 7.8 MPa ενώ τα μοντέλα 5 και 6 με προσθήκη ρητίνης εμφανίζουν μέγιστη τάση περίπου ίση με 14 MPa.
2. Στο διάγραμμα κατακόρυφης παραμόρφωσης – τάσης για τον κόμβο ρητίνης 9607 παρατηρείται ελαστική συμπεριφορά και για τα τέσσερα μοντέλα με τη διαφορά ότι τα μοντέλα 3 και 4 εμφανίζουν μικρότερες τιμές τάσεων και παραμορφώσεων από τις τιμές των τάσεων και παραμορφώσεων που εμφανίζουν τα μοντέλα 5 και 6. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στα υλικά των μοντέλων 5 και 6 έχουν προσδοθεί ελαστοπλαστικές ιδιότητες στο πέτρωμα αφενός για το μοντέλο 5, στο πέτρωμα και στη ρητίνη αφετέρου για το μοντέλο 4.
3. Στο διάγραμμα του σχήματος 4.38 οριζόντιας παραμόρφωσης – τάσης για τον κόμβο πετρώματος 7731 τα μοντέλα 3 και 4 έχουν παρόμοια συμπεριφορά μεταξύ τους. Αρχικά, μέχρι την τάση των 2 MPa, συμπεριφέρονται ελαστικά όμοια με τα μοντέλα 3 και 4. Ως εκείνο το σημείο εφελκούνται ενώ μετά αλλάζουν συμπεριφορά και για τάση μεγαλύτερη των 3,5 MPa παρουσιάζουν θλιπτική συμπεριφορά με μέγιστη τάση τα 6 MPa. Τα μοντέλα 3 και 4 στο ίδιο διάγραμμα εμφανίζουν την ίδια ελαστική συμπεριφορά διότι παρόλο που στο μοντέλο 4 η ρητίνη έχει ελαστοπλαστικές ιδιότητες το μέτρο ελαστικότητας της είναι δέκα τάξεις μεγέθους μικρότερο από αυτό του πετρώματος με αποτέλεσμα να μην επηρεάζεται η όλη συμπεριφορά του μοντέλου.
4. Στο διάγραμμα του σχήματος 4.41 τάσης-παραμόρφωσης κατά τον άξονα x και τάσης παραμόρφωσης κατά τον άξονα y για τον κόμβο ρητίνης 9607 για το μοντέλο 5 διαπιστώνεται ότι η μεταβολή στην τιμή του λόγου Poisson δεν επιφέρει καμία μεταβολή στην καμπύλη τάσης παραμόρφωσης και στις δύο περιπτώσεις. Αντιθέτως στο διάγραμμα του σχήματος 4.42 τάσης παραμόρφωσης

κατά τον άξονα x για τον κόμβο πετρώματος 7731 παρατηρείται μεταβολή στην καμπύλη τάσης παραμόρφωσης και διαπιστώνεται ότι για τις υψηλότερες τιμές του λόγου Poisson το μοντέλο εμφανίζει δύο συμπεριφορές στον κόμβο αυτό. Στα πρώτα στάδια της φόρτισης παρουσιάζει εφελκυστική συμπεριφορά ενώ στα τελευταία η συμπεριφορά μετατρέπεται σε θλιπτική.

5.2 Προτάσεις

Για τη βελτίωση της εργασίας αυτής που παρουσιάζει την αριθμητική προσομοίωση επίλυση της φόρτισης σε μονοαξονική θλίψη σε τομή δοκιμίου από ασβεστόλιθο μέσα στο οποίο υπήρχαν οπές κυκλικής διατομής οι οποίες εμπεριέχουν στρώμα ρητίνης, θα μπορούσε επιπλέον να γίνουν τα ακόλουθα:

1. Να επιλεγθούν ρητίνες με υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας, ώστε να ελεγχθεί αν επηρεάζουν σε μεγαλύτερο βαθμό την όλη συμπεριφορά του πετρώματος.
2. Προσομοίωση των μοντέλων σε τρεις διαστάσεις αντί για δυο διαστάσεις έτσι ώστε να προκύψει μια καλύτερη εικόνα των τάσεων και των παραμορφώσεων που υφίστανται τα τέσσερα μοντέλα αφού είναι γνωστή και η τρίτη διάσταση Z.
3. Προσθήκη στοιχείων επαφής ανάμεσα στο πέτρωμα και τη ρητίνη ώστε να προσομοιωθεί η συμπεριφορά του ως ασυνεχές μέσο.
4. Να εκτιμηθεί η μηχανική συμπεριφορά δοκιμίου με διαφορετική γεωμετρία κυκλικής οπής ή/και στρώσεων ρητίνης .

Βιβλιογραφία και αναφορές

Ελληνική Βιβλιογραφία

1. «Μεγάλη Ελληνική Εγκυκλοπαίδεια» του ΠΥΡΣΟΥ
2. Αγιουτάντης, Ζ. (2002), «Στοιχεία Γεωμηχανικής, Μηχανική Πετρωμάτων», Εκδόσεις Ίων.
3. Εξαδάκτυλος, Γ., Σταυροπούλου, Μ. (2006), «Κατασκευή και Μηχανική των Σηράγγων και των Υπογείων Έργων», Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Χανιά.
4. Κοζάνης, Σ. (1996), «Ανάπτυξη προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων με εφαρμογές σε τρισδιάστατα προβλήματα μη γραμμικής συμπεριφοράς».
5. Μαρινάκη, Α. (2004), «Αξιολόγηση πρώτων υλών και κονιαμάτων που χρησιμοποιούνται σε εργασίες συντήρησης και ανασύλωσης», Μεταπτυχιακή Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης.
6. Μπαβέλλας, Χ., Μπουζούκου, Μ. (2005), «Συγκριτική μελέτη ενισχύσεων τοιχοποιίας με συνθετικά υλικά οργανικής & ανόργανης μήτρας», Ιούνιος, 2005.
7. Νινιού-Κινδελή, Β. (1999), «Απτέρα», Υπουργείο Πολιτισμού. ΚΕ΄ Εφορεία Προϊστορικών και Κλασικών Αρχαιοτήτων.
8. Παπαγιάννη, Ι. (2007), Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας Ημερίδα: «Ενίσχυση Κτιρίων με σύγχρονα υλικά», Αθήνα.
9. Σκουλικίδης, Θ. Ν. (2000), «Διάβρωση και συντήρηση των δομικών υλικών των μνημείων», Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης.

Διεθνής Βιβλιογραφία

1. Maravelaki-Kalaitzaki, P., Kallithrakas-Kontos, N., Agioutantis, Z., Maurigiannakis, S., Korakaki, D. (2008), "A comparative study of porous limestones treated with silicon-based strengthening agents", Progress in Organic Coating, Vol.62, pp. 49-60, Elsevier.
2. Maravelaki-Kalaitzaki, P., Kallithrakas-Kontos, N., Korakaki, D., Agioutantis, Z., Maurigiannakis S. (2006), "Evaluation of silicon-

based strengthening agents on porous limestones”, Progress in Organic Coating, Vol. 57, pp.140-148, Elsevier.

Ιστότοποι

1. <http://www.wisegeek.com>, 2009
2. <http://www.en.wikipedia.org>, 2009
3. <http://www.pisa.ab.ca>, 2008
4. <http://www.msm.cam.ac.uk>, 2008
5. Google Earth, 2009
6. <http://en.wikipedia.org/wiki/Epoxy>