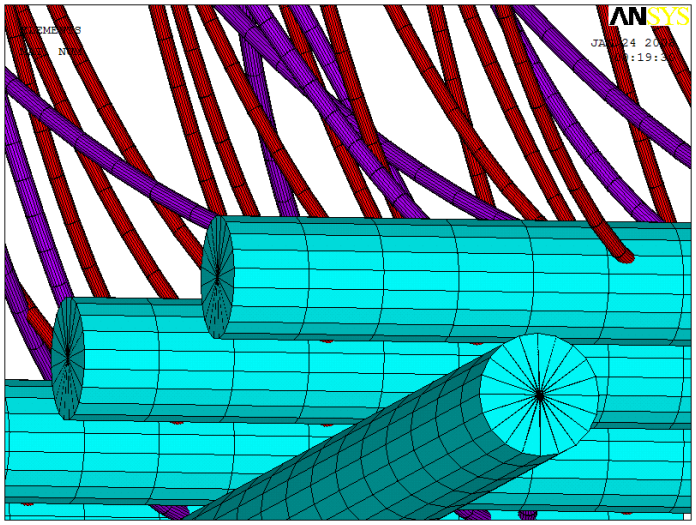
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΚΑΙ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

στο πλαίσιο του μαθήματος

Ανάλυση Μηχανολογικών Κατασκευών Ι

ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΥ ΥΦΑΣΜΑΤΟΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ



Επιμέλεια

ΚΑΒΑΓΙΑ ΧΡΥΣΟΥΛΑ

Επιβλέπων Καθηγητής

Χρ. Προβατίδης

Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ
ΜΑΡΤΙΟΣ 2007

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η ανάγκη του ανθρώπου για ανάπτυξη και εξέλιξη ήταν και είναι το εφαλτήριο για συνεχή πρόοδο σε όλους τους τομείς. Οι σημερινοί ρυθμοί ζωής, καθώς και το επίπεδο εξέλιξης της επιστήμης και της τεχνολογίας απαιτούν την άμεση παραγωγή και παράδοση στην αγορά προϊόντων με άρτια ποιότητα και απόδοση. Το αποτέλεσμα της δημιουργίας και ανάπτυξης κάθε νέου προϊόντος αξιολογείται με βάση το κόστος παραγωγής του, την ποιότητά του και το χρόνο που χρειάζεται για να παραχθεί. Η ταχύτατη κάλυψη των αναγκών και των απαιτήσεων του κοινού επιτυγχάνεται μέσω διαφόρων υπολογιστικών συστημάτων, όπως CAD (computer aided design), CAE (computer aided engineering) κ.α. Σημαντικό επιμέρους κομμάτι της ολοκληρωμένης παραγωγικής διαδικασίας είναι η μοντελοποίηση κάθε νέου προϊόντος με σκοπό την πρόβλεψη όλων των μηχανικών ιδιοτήτων του και γεωμετρικών χαρακτηριστικών του. Το παραπάνω στάδιο παρέχει τη δυνατότητα παραγωγής σειρών κατασκευής επιτρέποντας έτσι την προσαρμογή στις εκάστοτε συνθήκες της αγοράς. Επιπλέον συντελεί στην μείωση του κόστους και του χρόνου παραγωγής.

Παρόλο που η διαδικασία της μοντελοποίησης θεωρείται τόσο σημαντικό στάδιο για την παραγωγή ενός προϊόντος, δυστυχώς δεν έχει αναπτυχθεί ακόμα, κατάλληλα σε όλους τους τεχνολογικούς τομείς. Ένας τέτοιος τομέας είναι αυτός της κλωστοϋφαντουργίας. Η μοντελοποίηση υφασμάτων είναι δύσκολο να υλοποιηθεί λόγω της ιδιαίτερης πολυπλοκότητας των ινών, των νημάτων και των υφασμάτων. Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με ένα συγκεκριμένο τμήμα της κλωστοϋφαντουργίας, τα τεχνητά τριδιάστατα υφάσματα. Γίνεται προσπάθεια μοντελοποίησης ενός τρισδιάστατου υφάσματος διατήρησης κενού με εφαρμογή στην ενίσχυση σκυροδέματος. Σκοπός είναι η συμβολή στην ανάπτυξη υπολογιστικών μοντέλων τέτοιων δομών καθώς και η κατανόηση της σημασίας της μοντελοποίησης στην διαδικασία παραγωγής.

Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Χριστόφορο Προβατίδη, Αναπληρωτή Καθηγητή της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας και για την καθοδήγησή του στην εκπόνηση της διπλωματικής. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Σάββα Βασιλειάδη , Επίκουρο Καθηγητή στο Τ.Ε.Ι Πειραιά και την Υποψήφια Διδάκτορα Αργυρώ Καλλιβρετάκη για τη πολύτιμη βοήθεια τους κατά τη διάρκεια της εργασίας. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω μερικούς πολύ καλούς μου φίλους και δικούς μου ανθρώπους που με στήριξαν με τον δικό τους τρόπο όλη αυτή την περίοδο.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πρόλογος.....i
Περιεχόμενα.....ii
Λίστα σχημάτων.....iv
Λίστα πινάκων.....vi
Λίστα διαγραμμάτων.....vi
Κεφάλαιο 1°: Εισαγωγή στη δομή των spacer fabrics.....1
1.1 Εισαγωγή.....2
1.2 Τρισδιάστατα κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα.....4
1.2.1 Γενικά χαρακτηριστικά των 3D κλωστοϋφαντουργικών δομών.....4
1.3 Υφάσματα Δημιουργίας Κενού (spacer fabrics).....6
1.3.1 Μέθοδοι παραγωγής των υφασμάτων διατήρησης απόστασης (spacer fabrics).....7
1.3.1.1 Υφαντά υφάσματα διατήρησης απόστασης.....7
1.3.1.2 Πλεκτά υφάσματα διατήρησης απόστασης.....8
1.3.1.3 Στημονοπλεκτά υφάσματα διατήρησης απόστασης.....11
1.3.2 Ιδιότητες των υφασμάτων διατήρησης απόστασης.....13
1.3.3 Πεδίο εφαρμογών των υφασμάτων διατήρησης απόστασης.....14
1.3.4 Στημονοπλεκτά υφάσματα διατήρησης απόστασης ως στοιχεία ενίσχυσης σκυροδέματος.....15
1.3.4.1 Δομή στημονοπλεκτών υφασμάτων διατήρησης απόστασης για ενίσχυση σκυροδέματος.....17
1.3.4.2 Μέθοδος παραγωγής στημονοπλεκτών υφασμάτων διατήρησης απόστασης για ενίσχυση σκυροδέματος.....19
1.3.4.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την συμπεριφορά σε συμπίεση των στημονοπλεκτών υφασμάτων διατήρησης απόστασης για ενίσχυση σκυροδέματος.....20
Κεφάλαιο 2°: Περιγραφή πειραματικής διάταξης.....21
Κεφάλαιο 3°: Προσομοίωση της δοκιμής συμπίεσης δείγματος υφάσματος διατήρησης απόστασης κάνοντας χρήση των πεπερασμένων στοιχείων.....25
3.1 Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων.....26
3.1.1 Η Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων με το μοντέλο των μετατοπίσεων.....27
3.1.2 Δοκός (Beam) ως πεπερασμένο στοιχείο.....28
3.1.2.1 Υπολογισμός του μητρώου δυσκαμψίας του πεπερασμένου στοιχείου.....30
3.2 Γεωμετρική Απεικόνιση Της Επαναλαμβανόμενης Δομικής Μονάδας.....33
3.2.1. Προσδιορισμός Της Γεωμετρίας Των Εσωτερικών Ινών.....46
3.3. Προσδιορισμός Ελαστικών Ιδιοτήτων Νημάτων.....50
3.3.1. Μέτρο Ελαστικότητας Υαλονημάτων Εξωτερικών Επιφανειών.....50

3.3.2. Μέτρο Ελαστικότητας Spacer Νημάτων 1 και 2.....51
3.4. Δημιουργία Πλέγματος.....54
3.4.1. Επιλογή Πεπερασμένου Στοιχείου.....54
3.4.2. Επιλογή Πλέγματος.....55
3.5. Καθορισμός Οριακών Συνθηκών.....56
3.6. Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων.....58
Κεφάλαιο 4°: Παραμετρική ανάλυση της δομής του δείγματος διατήρησης απόστασης.....67
4.1. Επίδραση της ύπαρξης στην εσωτερική επιφάνεια μόνο του ενός εκ των δύο τύπων.....69
4.2. Επίδραση του λόγου των μέτρων ελαστικότητας των εσωτερικών ινών.....72
4.3. Επίδραση των ακτινών των εσωτερικών ινών.....74
Κεφάλαιο 5°: Σύνοψη και συμπεράσματα.....78
Παράρτημα Α: Σύγκριση των αποτελεσμάτων και του χρόνου επίλυσης της προσομοίωσης της δομικής μονάδας σε δοκιμή συμπίεσης σε μοντέλο πλεγματοποιημένο με beam και σε μοντέλο πλεγματοποιημένο με solid-beam.....87
Α.1 Σχέσεις Hertz για την επαφή μεταξύ δύο κάθετων κυλίνδρων.....88
Α.2 Επαφή μεταξύ δύο κυλίνδρων με ασύμβατους κάθετους άξονες κάνοντας χρήση του λογισμικού πακέτου ANSYS.....89
Παράρτημα Β: Πολυώνυμα παρεμβολής.....100
Παράρτημα Γ: Κώδικες.....103
Βιβλιογραφία.....174

Λίστα Σχημάτων

Σχήμα 1.1: 3D κ/υ προϊόντα για τεχνικές εφαρμογές.....5
Σχήμα 1.2: Απεικόνιση δομής υφαντών υφασμάτων διατήρησης απόστασης.....7
Σχήμα 1.3: Υφαντά υφάσματα διατήρησης απόστασης.....8
Σχήμα 1.4: Υφαδοπλεκτά υφάσματα διατήρησης απόστασης από επίπεδες μηχανές.....9
Σχήμα 1.5: Υφαδοπλεκτά υφάσματα διατήρησης απόστασης από κυκλικές μηχανές.....10
Σχήμα 1.6: Δείγματα υφαδοπλεκτών υφασμάτων διατήρησης απόστασης από κυκλικές μηχανές Jacquard.....10
Σχήμα 1.7: Μπάρες οδηγών για την παραγωγή πλεκτών υφασμάτων με δημιουργία κενού σε μηχανές Raschel.....11
Σχήμα 1.8: Δείγματα εξωτερικών στρωμάτων στημονοπλεκτών με δημιουργία κενού.....12
Σχήμα 1.9: Δείγμα στημονοπλεκτού υφάσματος spacer με δύο τιμές πάχους.....12
Σχήμα 1.10: Διαπερατότητα αέρα και υγρασίας των υφασμάτων spacer.....14
Σχήμα 1.11: Διαφορετικές δομές για την κατασκευή υφασμάτων διατήρησης απόστασης.....16
Σχήμα 1.12: Δομή στημονοπλεκτού υφάσματος διατήρησης απόστασης για ενίσχυση σκυροδέματος (φωτογραφία).....18
Σχήμα 1.13: Δομή στημονοπλεκτού υφάσματος διατήρησης απόστασης για ενίσχυση σκυροδέματος (σχηματική αναπαράσταση).....18
Σχήμα 1.14: Πλεκτική διαδικασία στημονοπλεκτών υφασμάτων διατήρησης απόστασης για ενίσχυση σκυροδέματος.....19
Σχήμα 2.1: Διαστάσεις κυκλικής επιφάνειας προσαρμογής του δείγματος για τη δοκιμή συμπίεσης.....22
Σχήμα 2.2: Μηχανή συμπίεσης στην οποία πραγματοποιούνται οι δοκιμές συμπίεσης.....23
Σχήμα 2.3: Δείγμα του οποίου μελετήθηκε η αντίσταση σε συμπίεση με τη δοκιμή συμπίεσης.....24
Σχήμα 3.1: Φορτία δοκού.....29
Σχήμα 3.2: Ελαστική γραμμή δοκού.....30
Σχήμα 3.3: Κατανομή τάσεων στη δοκό.....30
Σχήμα 3.4: Κομβικές μετατοπίσεις και στροφές στο στοιχείο 1.....31
Σχήμα 3.5: Κομβικές δυνάμεις και ροπές στο στοιχείο 1.....31
Σχήμα 3.6: Το υπό εξέταση δείγμα σε εμπρόσθια όψη.....34
Σχήμα 3.7: Το υπό εξέταση δείγμα σε πλάγια όψη.....34
Σχήμα 3.8: Σχεδιαστικές παράμετροι του δείγματος a και b.....35

Σχήμα 3. 9: Σχεδιαστική παράμετρο w.....35
Σχήμα 3. 10: Ορισμός κελιού.....36
Σχήμα 3. 11: Τρόπος πλέξης εσωτερικών νημάτων.....37
Σχήμα 3.12: Σχηματική απεικόνιση του τρόπου πλέξης των εσωτερικών νημάτων.....37
Σχήμα 3.13: Επαναλαμβανόμενη πλέξη κατά το επίπεδο x-z.....38
Σχήμα 3.14: Επαναλαμβανόμενη πλέξη κατά το επίπεδο y-z.....38
Σχήμα 3.15: Spacer νήμα 2 σε διαμόρφωση "x" στις τρεις διαστάσεις.....39
Σχήμα 3.16: Spacer νήμα 2 σε διαμόρφωση "x" στο επίπεδο x-y.....39
Σχήμα 3.17: Spacer νήμα 2 σε διαμόρφωση "x" στο επίπεδο y-z.....40
Σχήμα 3.18: Spacer νήμα 2 σε διαμόρφωση "( )" στο επίπεδο x-y.....40
Σχήμα 3.19: Spacer νήμα 2 σε διαμόρφωση "( )" στο επίπεδο x-z.....41
Σχήμα 3.20: Spacer νήμα 2 σε διαμόρφωση "( )" στο επίπεδο y-z.....41
Σχήμα 3.21: Spacer νήμα 1 σε διαμόρφωση "( )" στο επίπεδο x-y.....42
Σχήμα 3.22: Spacer νήμα 1 σε διαμόρφωση "( )" στο επίπεδο x-z.....42
Σχήμα 3.23: Spacer νήμα 1 σε διαμόρφωση "( )" στο επίπεδο x-z.....43
Σχήμα 3.24: Δομική μονάδα κατά το επίπεδο x-z.....43
Σχήμα 3.25: Δομική μονάδα κατά το επίπεδο y-z.....44
Σχήμα 3. 26: Δομική μονάδα κατά το επίπεδο y-z.....45
Σχήμα 3.27: Εσωτερικά νήματα 1 και 2 (εστίαση στο επίπεδο x-z).....45
Σχήμα 3.28: Εσωτερικά νήματα 1 και 2 (εστίαση στις τρεις διαστάσεις).....46
Σχήμα 3.29: Σύνολο spacer νημάτων 2 με διαμόρφωση "x" με πραγματικό μήκος.....47
Σχήμα 3.30: Σύνολο spacer νημάτων 2 με διαμόρφωση "( )" με πραγματικό μήκος.....47
Σχήμα 3.31: Σύνολο spacer νημάτων 1 με διαμόρφωση "( )" με πραγματικό μήκος.....48
Σχήμα 3.32: Οριακές συνθήκες της 1ης περίπτωσης.....57
Σχήμα 3.33: Οριακές συνθήκες της 2ης περίπτωσης.....58
Σχήμα 3.34: Μήκος δομικής μονάδας στο επίπεδο x-z.....59
Σχήμα 3.35: Πλάτος δομικής μονάδας στο επίπεδο y-z.....59
Σχήμα 3.36: Παραμόρφωση της δομικής μονάδας για την περίπτωση 1 γραμμικού υλικού κατά το επίπεδο x-z 61
Σχήμα 3.37: Παραμόρφωση της δομικής μονάδας για την περίπτωση 1 γραμμικού υλικού κατά το επίπεδο y-z.....62
Σχήμα 3.38: Παραμόρφωση δομικής μονάδας για την περίπτωση 2 γραμμικού υλικού κατά το επίπεδο x-z.....62

Σχήμα 3.39: Παραμόρφωση της δομικής μονάδας για την περίπτωση 2 γραμμικού υλικού κατά το επίπεδο y-z.....63

Σχήμα 3.40: Παραμόρφωση της δομικής μονάδας για την περίπτωση 1 μη γραμμικού υλικού κατά το επίπεδο x-z.....64
Σχήμα 3.41: Παραμόρφωση της δομικής μονάδας για την περίπτωση 1 μη γραμμικού υλικού κατά το επίπεδο y-z.....64
Σχήμα 3.42: Παραμόρφωση της δομικής μονάδας για την περίπτωση 2 μη γραμμικού υλικού κατά το επίπεδο x-z.....65
Σχήμα 3.43: Παραμόρφωση της δομικής μονάδας για την περίπτωση 2 μη γραμμικού υλικού κατά το επίπεδο y-z.....65

Σχήμα 4.1: Μοντέλο δομικής μονάδας μόνο με εσωτερικά νήματα τύπου 1.....69

Σχήμα 4.2: Τρισδιάστατη απεικόνιση του μοντέλου μόνο με εσωτερικά νήματα τύπου 1.....69

Σχήμα 4.3: Τρισδιάστατη απεικόνιση της δομικής μονάδας μόνο με εσωτερικά νήματα τύπου 2.....70

Σχήμα 4.4: Δομική μονάδα μόνο με εσωτερικά νήματα τύπου 2.....70

Σχήμα α. 1: Μοντέλο δομικής μονάδας μετά την πλεγματοποίησή του κατά το επίπεδο x-z.....86

Σχήμα α.2: Τριδιάστατη απεικόνιση του μοντέλου της δομικής μονάδας (εστίαση).....87

Σχήμα α.3: Τα μοντέλο των δύο κυλίνδρων μετά τη δημιουργία πλέγματος.....89

Σχήμα α.4: Το μοντέλο των δύο κυλίνδρων μετά την επιβολή του φορτίου.....90

Σχήμα α.5: Πυκνότητα πλέγματος στην περιοχή επαφής των δύο κυλίνδρων του μοντέλου (εστίαση).....91

Σχήμα α.6: Κατανομή των τάσεων στην περιοχή επαφής του μοντέλου των δύο κυλίνδρων.....92

Σχήμα α.7: Κατανομή των τάσεων στο συνολικό μοντέλο.....92

Σχήμα α.8: Οριακές συνθήκες περίπτωσης 2 στο μοντέλο της δομικής μονάδας.....94

Σχήμα α.9: Παραμορφωμένο μοντέλο με πλεγματοποίηση με στοιχεία solid και beam στα επίπεδα x-z.....95

Σχήμα α.10: Παραμορφωμένο μοντέλο με πλεγματοποίηση με στοιχεία solid και beam στα επίπεδα y-z.....96

Σχήμα α.11: Παραμορφωμένο μοντέλο με πλεγματοποίηση με στοιχεία beam στα επίπεδα x-z.....96

Σχήμα α. 12: Παραμορφωμένο μοντέλο με πλεγματοποίηση με στοιχεία beam στα επίπεδα y-z.....97

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 3.1: Αποτελέσματα προσομοίωσης δοκιμής συμπίεσης νημάτων 2 με διαμόρφωση "x"....49
Πίνακας 3.2: Αποτελέσματα προσομοίωσης δοκιμής συμπίεσης νημάτων 2 με διαμόρφωση "( )"....49
Πίνακας 3.3: Αποτελέσματα προσομοίωσης δοκιμής συμπίεσης νημάτων 1 με διαμόρφωση "( )"....50
Πίνακας 3.4: Ιδιότητες των spacer νημάτων....51
Πίνακας 3.5: Ιδιότητες των spacer νημάτων....52
Πίνακας 3.6: Αποτελέσματα από την προσομοίωση κάμψης προβόλου....56
Πίνακας α.1: Τιμές των παραμέτρων α, β και λ για διαφορετικές τιμές του λόγου D_1 / D_2....89
Πίνακας α.2: Αποτελέσματα προσομοίωσης δύο κυλίνδρων με ασύμβατους κάθετους άξονες στο λογισμικό πακέτο ANSYS....91

Λίστα Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 2.1: Καμπύλη που προκύπτει από την πειραματική δοκιμή συμπίεσης....24
Διάγραμμα 3.1: Σύγκριση αποτελεσμάτων με τέσσερα διαφορετικά Eglass....51
Διάγραμμα 3.2: Διάγραμμα δύναμης – παραμόρφωσης του spacer νήματος 2....52
Διάγραμμα 3.3: Διάγραμμα δύναμης - παραμόρφωσης του spacer νήματος 1....53
Διάγραμμα 3.4.: Παρουσίαση όλων των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης....60
Διάγραμμα 4.1: Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου με νήματα τύπου 1-2 και μοντέλου με νήματα τύπου 1....71
Διάγραμμα 4.2: Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου με νήματα τύπου 1-2 και μοντέλου με νήματα τύπου 2....71
Διάγραμμα 4.3: Σύγκριση μοντέλου με νήματα 1 και μοντέλου με νήματα τύπου 2....72
Διάγραμμα 4.4: Αποτελέσματα προσομοίωσης σε μοντέλα με διαφορετικούς λόγους μέτρων ελαστικότητας....73
Διάγραμμα 4.5: Σύγκριση αποτελεσμάτων σε μοντέλα με διαφορετικούς λόγους μέτρων ελαστικότητας....73
Διάγραμμα 4.6: Αποτελέσματα μοντέλου με αύξηση των τιμών της ακτίνας διατομής των νημάτων 1 έως 20%....75
Διάγραμμα 4.7: Αποτελέσματα μοντέλου με μείωση της τιμής της ακτίνας της διατομής των νημάτων 1 έως 20%....75

Διάγραμμα 4.8: Αποτελέσματα μοντέλου με αύξηση της τιμής της ακτίνας της διατομής των νημάτων 2 έως 20%.....76

Διάγραμμα 4.9: Αποτελέσματα μοντέλου με μείωση της τιμής της ακτίνας της διατομής των νημάτων 2 έως 20%.....76

Διάγραμμα 5.1: Συνολικό διάγραμμα σύγκρισης πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων προσομοίωσης.....80

Διάγραμμα 5.2: Εμβαδό πειραματικής καμπύλης.....81

Διάγραμμα 5.3: Εμβαδό καμπύλης γραμμικού υλικού περίπτωση 1.....81

Διάγραμμα 5.3: Εμβαδό καμπύλης γραμμικού υλικού περίπτωση 2.....82

Διάγραμμα 5.4: Εμβαδό καμπύλης μη γραμμικού υλικού περίπτωση 1.....82

Διάγραμμα 5.5: Εμβαδό καμπύλης μη γραμμικού υλικού περίπτωση 2.....83

Διάγραμμα α.1: Σύγκριση μέγιστης πίεσης επαφής του μοντέλου στο πρόγραμμα ANSYS και των θεωρητικών τύπων του Hertz.....93

Διάγραμμα α.2: Σύγκριση μέγιστης μετατόπισης κατά τον άξονα y του μοντέλου στο πρόγραμμα ANSYS και των θεωρητικών τύπων του Hertz.....93

Διάγραμμα α.3: Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης δοκιμής συμπίεσης σε μοντέλα με πλεγματοποίηση με διαφορετικά στοιχεία.....95

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΔΟΜΗ ΤΩΝ SPACER FABRICS

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα υφάσματα για τεχνικές εφαρμογές αποτελούν τον πιο γρήγορα αναπτυσσόμενο τομέα στον χώρο της κλωστοϋφαντουργίας τα τελευταία χρόνια. Λόγω των ιδιαίτερων ιδιοτήτων τους έχουν διεισδύσει σε σημαντικούς τομείς από την ιατρική, την περιοχή του πολιτικού μηχανικού, το στρατό έως το διάστημα και τις υποθαλάσσιες εφαρμογές. Καθημερινή χρήση των υφασμάτων για τεχνικές εφαρμογές συναντάτε σε μεταφορές, σε ενισχύσεις, σε διυλίσεις, σε μονώσεις, σε εξοπλισμούς προστασίας κ.α. Για το λόγο αυτό τα τελευταία χρόνια δίνεται μεγαλύτερη προσοχή και υπάρχει μεγαλύτερο ενδιαφέρον για τις έρευνες των υφασμάτων για τεχνικές εφαρμογές.

Κατά μία γενική άποψη μπορεί να ειπωθεί ότι όλες οι μέθοδοι της παραγωγής υφασμάτων μπορούν να θεωρηθούν κατάλληλες για την παραγωγή υφασμάτων για τεχνικές εφαρμογές. Δεδομένου όμως των επιθυμητών ιδιοτήτων τους που σχετίζονται περισσότερο με ιδιότητες όπως η μηχανική συμπεριφορά, η χημική αντίδραση, η ακουστική κ.α. και ελάχιστα με ιδιότητες που αφορούν στην εμφάνιση και τον σχεδιασμό, ορισμένες διαδικασίες παραγωγής θεωρούνται καταλληλότερες για την συγκεκριμένη κατηγορία υφασμάτων. Νέες μέθοδοι όπως τριδιάστατη ύφανση (3D weaving), πλεκτική στημονιού με εισαγωγή υφαδιού (warp knitting with weft insertion), πολυαξονική πολυεπίπεδη παραγωγή υφάσματος (multi-axial multi-ply fabric production), πλεκτική στημονιού με διπλή μπάρα βελονών με εισαγωγή υφαδιού (double needle bar warp knitting with weft insertion), συγκόλληση σωληνοειδών υφασμάτων (ultrasonic welding of tubular fabrics), παραγωγή σχηματισμών πλεξιδών τριών διαστάσεων (3D-braiding), πολύπλοκες διαδικασίες ραψίματος και επικάλυψης, αποτελούν βελτιωμένες τεχνολογίες για την παραγωγή υφασμάτων τεχνικών εφαρμογών.

Όλες οι μέθοδοι παραγωγής υφασμάτων όπως και αυτές των συμβατικών υφασμάτων προσφέρουν ένα πλήθος από πλεονεκτήματα. Η τεχνική πλεκτικής στημονιού, παρόλα αυτά προσφέρει μεγάλο αριθμό θετικών χαρακτηριστικών, τα οποία είναι ιδιαιτέρως ωφέλιμα για τις τεχνικές εφαρμογές. Ανάλογα με τις απαιτήσεις της τελικής χρήσης, τα στημονοπλεκτά παράγονται σε ποικιλία δομών όπως κλειστές ή ανοιχτές, ελαστικές ή σταθερές, τριδιάστατες και σωληνοειδής. Μια από τις δυνατότητες της τεχνολογίας της πλεκτικής στημονιού είναι η παραγωγή **τριδιάστατων υφασμάτων διατήρησης απόστασης** (**spacer fabrics**). Στην παρούσα εργασία εξετάζονται τα spacer υφάσματα που παράγονται από την πλεκτική στημονιού σε μηχανές Raschel διπλής μπάρας οδηγών βελονών. Ανάλογα με την περιοχή εφαρμογής τους τα spacer υφάσματα αποτελούνται από ποικιλία υλικών.

Τα ιδιαίτερα πλεονεκτήματα των spacer υφασμάτων όπως η δημιουργία της τρισδιάστατης δομής σε ένα στάδιο παραγωγής και η αεριζόμενη - αναπνέουσα ενδιάμεση ζώνη μεταξύ δύο στρωμάτων, παρέχουν ένα ευρύ πεδίο εφαρμογών. Χάρη στα πλεονεκτήματα τους τα spacer υφάσματα, εισήχθησαν στην αγορά σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα και με μεγάλη

επιτυχία ως υποκατάστατα πολυστρωματικών υλικών, στην ενδυμασία άθλησης και προστασίας, ως κατασκευαστικά στοιχεία για σύνθετα υλικά, για φίλτρα, καθώς και στον τομέα της ιατρικής. Τα spacer fabrics πλέον αποτελούν τις state-of-the-art δομές για την ενίσχυση σύνθετων υλικών λόγω της δυνατότητας παραγωγής "load tailored structures". Σε αυτές τις δομές τα νήματα, μιας ή πολλών ινών, φορτίζονται κατά μήκος των διαμηκών αξόνων τους. Πρόκειται για ιδιαίτερα ελαφριές δομές αφού δεν περιλαμβάνουν περιττό υλικό. Για τους παραπάνω λόγους η μελέτη των spacer υφασμάτων για ενίσχυση σκυροδέματος αποτελεί πόλο έλξης τα τελευταία χρόνια. Ο προσδιορισμός των ιδιοτήτων είναι πολύ σημαντικός για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του υφάσματος καθώς και του πεδίου εφαρμογών του.

Η συμπεριφορά των υφασμάτων spacer σε συμπίεση έχει καθοριστική σημασία για την σταθερότητά τους, ειδικά στις εφαρμογές σκυροδέματος. Γι' αυτό η παρούσα εργασία εστιάζει στην μελέτη της συμπεριφοράς αυτών σε συμπίεση. Επιπλέον θα διερευνηθεί η επίδραση των χαρακτηριστικών των εσωτερικών νημάτων (ιδιότητες, γεωμετρικά χαρακτηριστικά) στην συμπεριφορά των υφασμάτων spacer σε συμπίεση.

1.2. ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΑ ΚΛΩΣΤΟΫΦΑΝΤΟΥΡΓΙΚΑ ΠΡΟΪΟΝΤΑ

Η ιστορία των τρισδιάστατων κλωστοϋφαντουργικών (κ/υ) προϊόντων αρχίζει τον 19ο αιώνα. Ήδη από το 1898 αναγνωρίστηκε ότι οι διελασματικές ιδιότητες διάτμησης των ιμάντων κίνησης θα μπορούσαν να βελτιωθούν με την προσθήκη των ενισχύσεων, φτιαγμένων από πολυστρωματικά υφάσματα. Εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιήθηκαν τα πολυστρωματικά υφάσματα είναι ο ιμάντας μεταφορών, λουριά, τάπητες, ξηρά πιλήματα για την κατασκευή χάρτου και τα περιλαίμια πουκάμισων. Στο τέλος της δεκαετίας του '60, η αεροδιαστημική βιομηχανία άρχισε να αναζητεί σύνθετες δομές βασισμένες σε ίνες που θα μπορούσαν να αντισταθούν στις πολλών κατευθύνσεων πιέσεις στις ακραίες θερμικές συνθήκες. Στη Γαλλία και αργότερα στις Ηνωμένες Πολιτείες και την Ιαπωνία, αναπτύχθηκαν τα σύνθετα υλικά από ίνες άνθρακα των οποίων τα συστήματα ινών τακτοποιήθηκαν πολυδιαστατικά [1].

Σήμερα οι τριδιάστατες κλωστοϋφαντουργικές (κ/υ) δομές είναι μία από τις κύριες κατηγορίες των υφασμάτων για τεχνικές εφαρμογές. Η παραγωγή των τριδιάστατων αυτών δομών μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε σε ένα είτε σε περισσότερα στάδια. Όταν η παραγωγή πραγματοποιείται σε περισσότερα του ενός στάδια αποτελείται από σειρά διαδικασιών όπως κοπή, ράψιμο και τοποθέτηση τα οποία γίνονται χειρονακτικά με αποτέλεσμα να χρειάζονται περισσότερο χρόνο και προσπάθεια για να ολοκληρωθούν. Οι τεχνολογίες παραγωγής των 3D δομών είναι ακόμα σε εμβρυϊκό στάδιο και λόγω της χαμηλής ταχύτητας παραγωγής όπως επίσης και της χαμηλής ανάπτυξης λογισμικού σχεδιασμού για την κατασκευή τόσο πολύπλοκων υφασμάτων δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποδοτικά σε πρακτικές εφαρμογές. Παρόλο αυτά η στρατηγική σημασία των 3D κ/υ δομών έχει αναγνωριστεί από την επιστημονική και βιομηχανική κοινότητα.

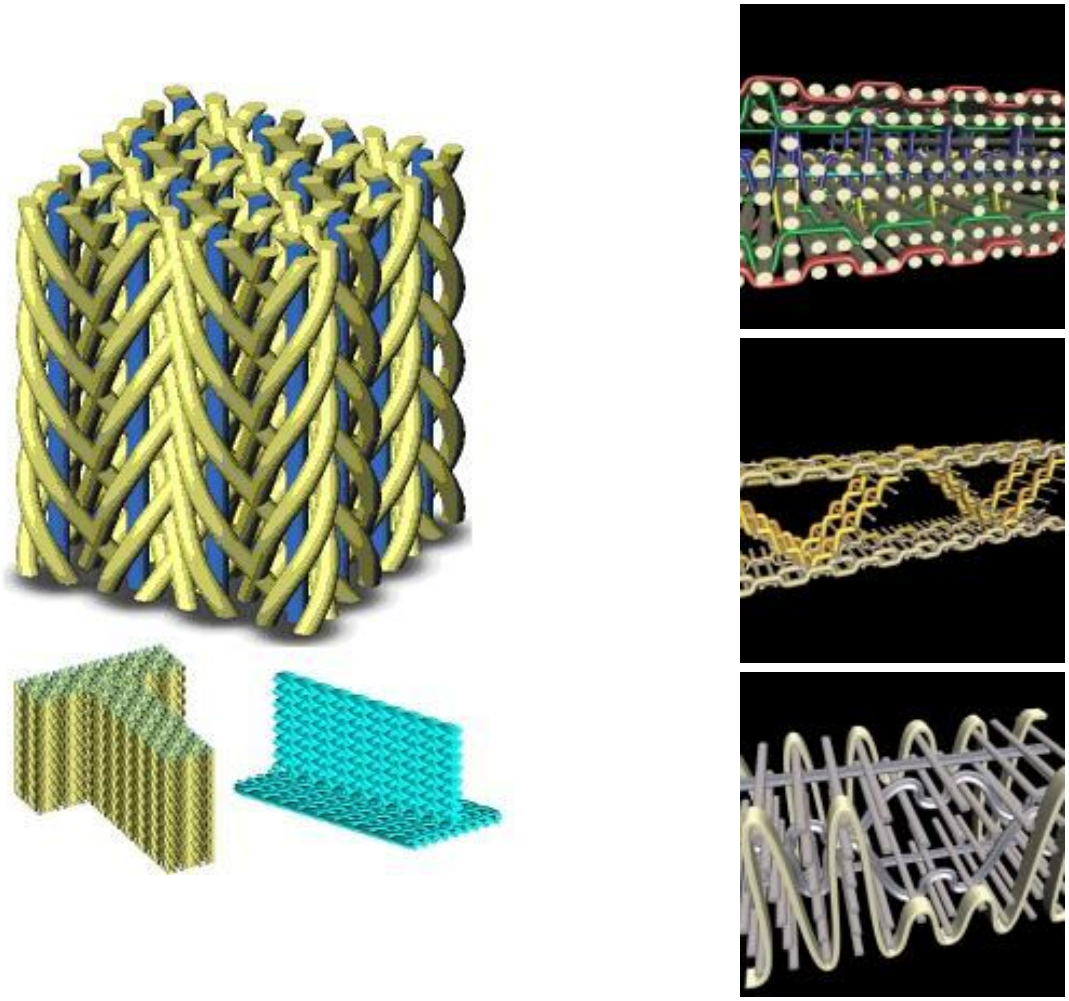
1.2.1 Γενικά χαρακτηριστικά των 3D κλωστοϋφαντουργικών δομών

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα τρισδιάστατα κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα μπορούν να παραχθούν μέσα από διαδικασία ενός ή πολλών βημάτων. Κάποιοι από τους ερευνητές καθόρισαν τα 3D κ/υ προϊόντα ανάλογα με τα βήματα παραγωγής τους ή/και την εσωτερική δομή τους. Κάποιοι από τους ερευνητές έχουν δεχτεί όλα τα κ/υ προϊόντα, τα οποία έχουν τρεις διαστάσεις, X, Y και Z, στις δομές τους, ως 3D κ/υ προϊόντα αδιαφορώντας για τα βήματα παραγωγής τους, ενώ άλλοι δέχτηκαν μόνο τα κ/υ προϊόντα που παρήχθησαν σε ένα στάδιο ως 3D κ/υ προϊόντα ή ως "πραγματικά 3D κ/υ προϊόντα". Οι σχετικοί ορισμοί που υπάρχουν είναι οι εξής:

- Τα κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα ή υφάσματα είναι τρισδιάστατα όταν εμφανίζονται με τριδιάστατη γεωμετρία χωρίς οποιοδήποτε βήμα μετασχηματισμού ή/και όταν αποτελούνται τουλάχιστον από τρία διαφορετικά στρώματα των συστημάτων νημάτων που προσανατολίστηκαν και στις τρεις κατευθύνσεις (τριδιάστατη δομή). [2]

- Τριδιάστατο θεωρείται το κ/υ προϊόν που παρουσιάζει τρεις διευθύνσεις στην αρχιτεκτονική του ή/και του νήματος, ανεξάρτητα από τον αριθμό των σταδίων παραγωγής του (ένα ή πολλαπλά στάδια). [3]
- Τα πραγματικά τριδιάστατα υφάσματα αποτελούνται από νήματα ασυνεχών, συνεχών ινών, μονόινα ή συνδυασμούς αυτών, έχουν τουλάχιστον ένα ορθογώνιο σετ νημάτων στις διευθύνσεις x, y, z και παράγονται σε αυτοματοποιημένες μηχανές χωρίς χειροκίνητη λειτουργία.[4]

Τριδιάστατα κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα μπορούν να παραχθούν με τα νέα αναπτυγμένα συστήματα παραγωγής καθώς και με προσαρμογή των συμβατικών μηχανών. Οι συμβατικές μέθοδοι προσαρμόζονται και βελτιώνονται σύμφωνα με τις απαιτήσεις. Εντούτοις, η ταχύτητα παραγωγής τριδιάστατων κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων αποτελεί ακόμα πρόβλημα. Ορισμένοι τύποι τριδιάστατων κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων για τεχνικές εφαρμογές παρουσιάζονται στο σχήμα 1.1.



Σχήμα 1.1: 3D κ/υ προϊόντα για τεχνικές εφαρμογές

1.3. ΥΦΑΣΜΑΤΑ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΚΕΝΟΥ (SPACER FABRICS)

Τα υφάσματα διατήρησης απόστασης (spacer) έχουν τριδιάστατη δομή η οποία περιλαμβάνει δύο εξωτερικά υποστρώματα τα οποία συνδέονται μεταξύ τους (στρώμα σύνδεσης) μέσω των νημάτων διατήρησης απόστασης (spacer yarn) ή των δομών διατήρησης απόστασης. Η κατασκευή των spacer υφασμάτων οδηγεί στη δημιουργία ενός χάσματος στη μέση της δομής του. Λόγω της ειδικής κατασκευής τους τα spacer υφάσματα παρουσιάζουν ιδιαίτερες ιδιότητες που δεν συναντώνται στα συμβατικά κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα. Επιπλέον η δυνατότητα παραγωγής τους από σειρά υλικών μεγάλου εύρους ιδιοτήτων αυξάνουν το πεδίο εφαρμογής τους. Σήμερα τα spacer υφάσματα έχουν λάβει μερίδιο της αγοράς ως υποκατάστατα πολυστρωματικών υλικών, στην ενδυμασία άθλησης και προστασίας, ως κατασκευαστικά στοιχεία για σύνθετα υλικά, για φίλτρα, καθώς και στον τομέα της ιατρικής. Παράλληλα αποτελούν ελκυστικό πεδίο έρευνας για την επιστημονική και βιομηχανική κοινότητα.

Τα spacer υφάσματα μπορούν να παραχθούν μέσω της διαδικασίας ύφανσης, της πλεκτικής υφαδιού και της πλεκτικής στημονιού. Εντούτοις η πλεκτική στημονιού είναι η συνηθέστερα γνωστή και εφαρμοσμένη τεχνολογία για την παραγωγή των spacer υφασμάτων.

Ερευνητές που εργάζονται στα υφάσματα spacer απέδωσαν ορισμούς για την δομή τους και τα χαρακτηριστικά τους. Εντούτοις, οι περισσότεροι από τους ορισμούς που χρησιμοποιούνται από τους ερευνητές δεν αντιπροσωπεύουν όλους τους τύπους υφασμάτων spacer αλλά σε πλειοψηφία περιγράφουν τα στημονοπλεκτά υφάσματα spacer. Γενικά τα υφάσματα spacer μπορούν να οριστούν ως ακολούθως:

"Το ύφασμα διατήρησης απόστασης είναι ένας ειδικός τύπος τριδιάστατου κλωστοϋφαντουργικού προϊόντος, με τριδιάστατη αρχιτεκτονική νήματος και τριδιάστατη αρχιτεκτονική υφάσματος" [5].

Η αρχιτεκτονική νήματος που χρησιμοποιείται στον ορισμό αντιστοιχεί στον προσανατολισμό των νημάτων στο επίπεδο του υφάσματος. Η αρχιτεκτονική νήματος θεωρείται τριδιάστατη όταν τρία ή περισσότερα συστήματα νημάτων (ή βασικοί προσανατολισμοί νημάτων) δημιουργούν το ύφασμα, επιτρέποντας ένα ορθογώνιο σύστημα αξόνων να συμπίπτει με τον προσανατολισμό των νημάτων με τέτοιο τρόπο ώστε ο ένας άξονας να σχηματίζει ορθή γωνία με καθένα από τους προσανατολισμούς νημάτων. [2].

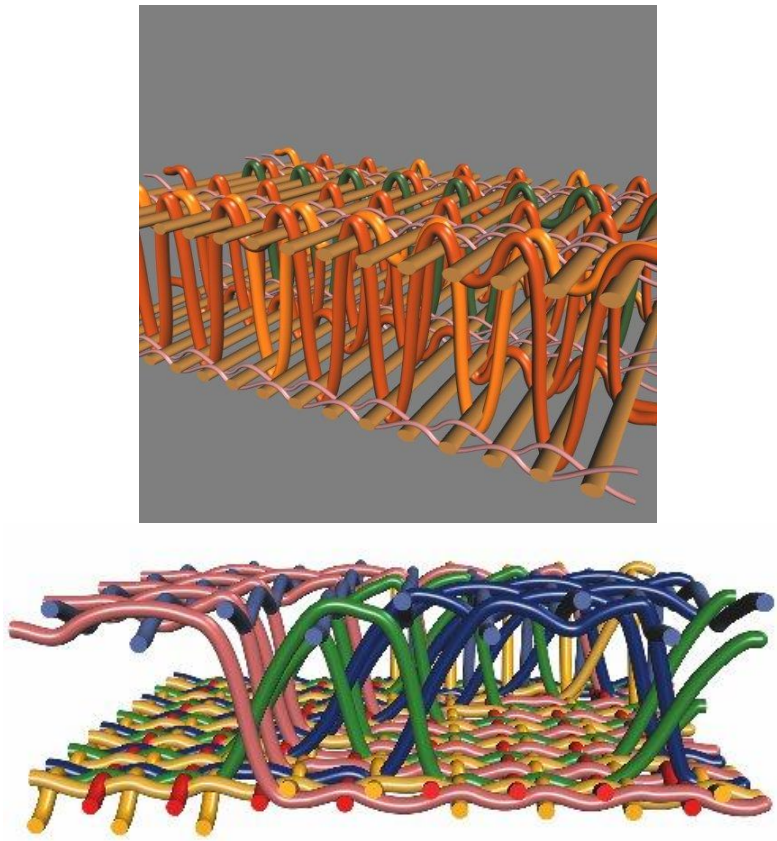
Η αρχιτεκτονική υφάσματος είναι η γεωμετρία του κλωστοϋφαντουργικού προϊόντος. Η αρχιτεκτονική υφάσματος ορίζεται ως τρισδιάστατη, όταν διαμορφώνεται όγκος από το κλωστοϋφαντουργικό προϊόν, ανεξάρτητα από τον αριθμό των συστημάτων του νήματος και της αρχιτεκτονικής του νήματος. [5].

1.3.1 Μέθοδοι παραγωγής των υφασμάτων διατήρησης απόστασης (spacer fabrics)

Τα υφάσματα spacer μπορούν να παραχθούν σε διάφορες διαδικασίες, όπως είναι η ύφανση, η πλεκτική στημονιού και η πλεκτική υφαδιού. Εντούτοις, η τεχνική πλεκτικής στημονιού αποτελεί μια από τις πιο προκλητικές τεχνικές για την παραγωγή τριδιάστατων υφασμάτων spacer. Στη συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά οι μέθοδοι παραγωγής τριδιάστατων υφασμάτων spacer.

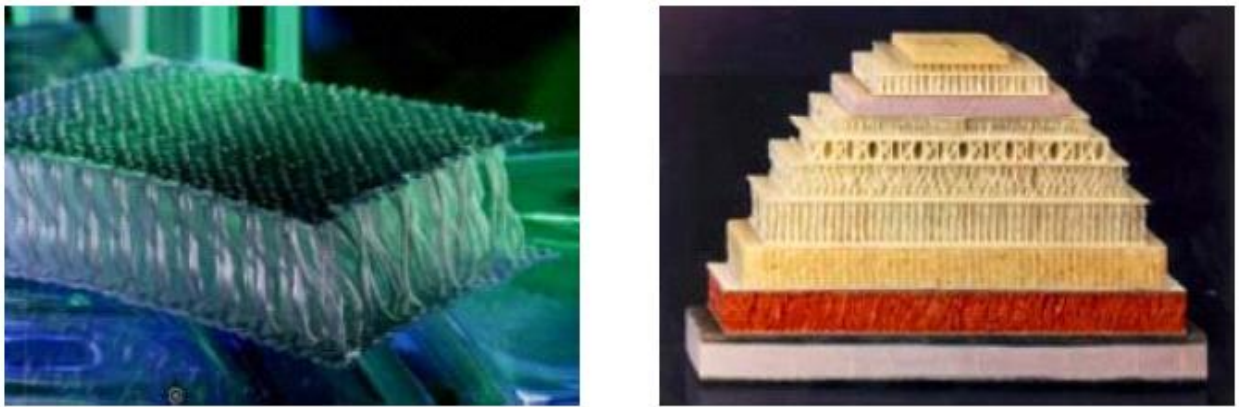
1.3.1.1 Υφαντά υφάσματα διατήρησης απόστασης

Τα υφαντά υφάσματα spacer παράγονται σε υφαντικές μηχανές. Κατά την διαδικασία παραγωγής τους δημιουργούνται δύο εξωτερικά παράλληλα υποστρώματα τα οποία κρατούνται σε απόσταση μεταξύ τους και συνδέονται σε μορφή sandwich. Οι κατασκευές περιλαμβάνουν μεγάλο αριθμό στημονιών και υφαδιών τα οποία δημιουργούν την δομή σε ένα ενιαίο βήμα. Το σχήμα 1.2 παρουσιάζει δύο τύπους δομής υφαντού υφάσματος spacer.



Σχήμα 1.2: Απεικόνιση δομής υφαντών υφασμάτων διατήρησης απόστασης (www.Scot weave.com)

Το πάχος του spacer υφάσματος που είναι δυνατό να παραχθεί με την υπό εξέταση τεχνική κυμαίνεται στο ευρύ πεδίο τιμών από 10 mm έως 100 mm. Ο προσανατολισμός και το μήκος των εσωτερικών νημάτων (spacer yarn) αποτελούν καθοριστικά στοιχεία για την αντοχή και την δυσκαμψία του υφάσματος. Επιπλέον είναι δυνατή η δημιουργία λείων επιφανειών και στις δύο πλευρές του υφάσματος. Στιβαρές κατασκευές sandwich, καθώς και κατασκευές sandwich των οποίων το εσωτερικό στρώμα πληρώνεται με λειτουργικά συστατικά (όπως αφρός) αποτελούν χαρακτηριστικά προϊόντα της παρούσης διαδικασίας παραγωγής. Η παραγωγική διαδικασία υφαντών υφασμάτων spacer παρουσιάζει δύο βασικά πλεονεκτήματα, την υψηλή ταχύτητα παραγωγής καθώς και την δυνατότητα χρήσης μονόινων νημάτων διαφόρων υλικών. Τα υφαντά υφάσματα spacer χρησιμοποιούνται ως εσωτερικά τμήματα αυτοκινήτων, χαλιά ηχομόνωσης, χειρουργικά μοσχεύματα κ.λ.π. Υφαντά υφάσματα spacer παρουσιάζονται ενδεικτικά στο σχήμα 1.3.



Σχήμα 1.3: Υφαντά υφάσματα διατήρησης απόστασης.

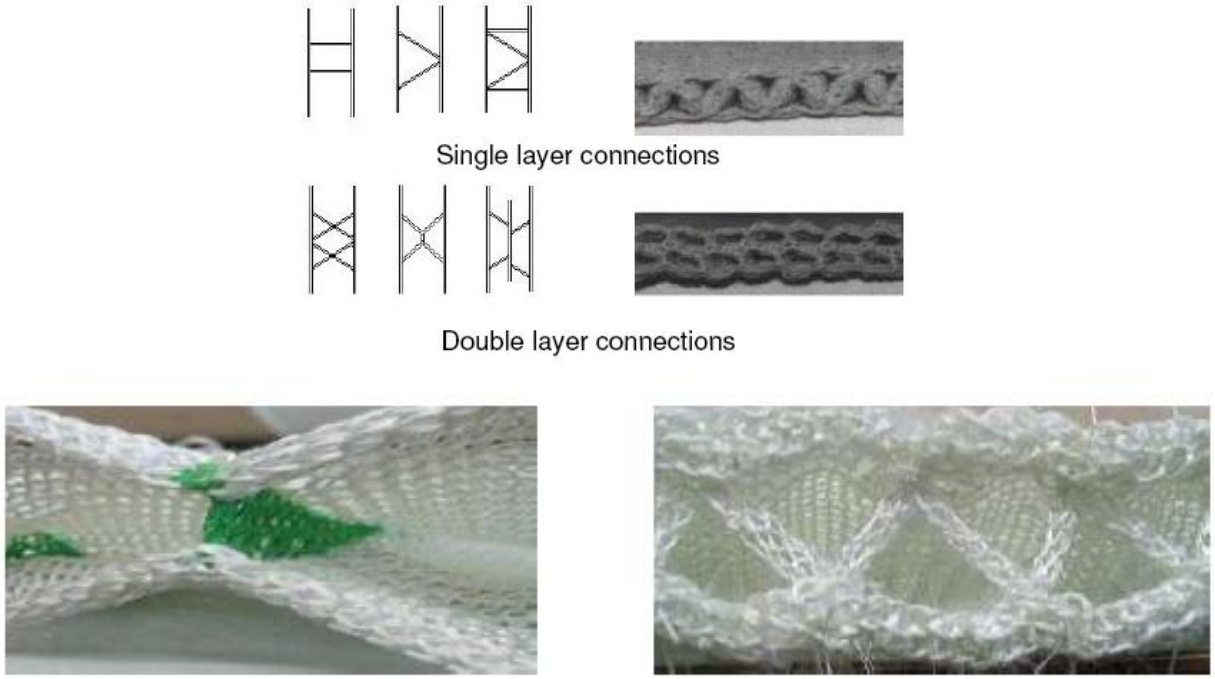
1.3.1.2 Πλεκτά υφάσματα διατήρησης απόστασης

Η πλεκτική είναι η συνηθέστερα χρησιμοποιημένη μέθοδος παραγωγής των υφασμάτων spacer. Τα τριδιάστατα πλεκτά υφάσματα είναι ευρέως γνωστά για το μεγάλο πλήθος των πρακτικών χαρακτηριστικών τους. Τόσο η πλεκτική υφαδιού όσο και η πλεκτική στημονιού μπορούν να χρησιμοποιηθούν για παραγωγή των υφασμάτων spacer. Εντούτοις, δεδομένου ότι με την πλεκτική στημονιού είναι δυνατή η παραγωγή σταθερών δομών, τα προϊόντα αυτά χρησιμοποιούνται σε ευρύ φάσμα εφαρμογών.

Αναφορικά με τα υφαδοπλεκτά υφάσματα spacer, η παραγωγή πραγματοποιείται σε επίπεδες και κυκλικές πλεκτομηχανές. Οι συμβατικές πλεκτομηχανές βέβαια βελτιώνονται με πρόσθετα μέρη και διαφορετικές ρυθμίσεις. Οι επίπεδες πλεκτομηχανές εξοπλίζονται με δύο σειρές βελονών. Η παραγωγή των δύο εξωτερικών στρωμάτων πραγματοποιείται στις εμπρόσθιες και οπίσθιες βελόνες. Τα νήματα σύνδεσης (spacer yarns) που είναι συνήθως μονόινα ενώνουν και κρατούν σε απόσταση τα δύο στρώματα, αλλά δεν συνδέονται μεταξύ τους. Η εξεταζόμενη τεχνική παρουσιάζει πρακτικές δυσκολίες και απαιτεί ιδιαίτερη

προσοχή ώστε να μην εξέλθουν τα νήματα σύνδεσης από τις κεφαλές των βελονών. Παρά την χαμηλή παραγωγικότητα της μεθόδου αντιπροσωπεύει μια εφαρμόσιμη εναλλακτική για ειδικές περιπτώσεις.

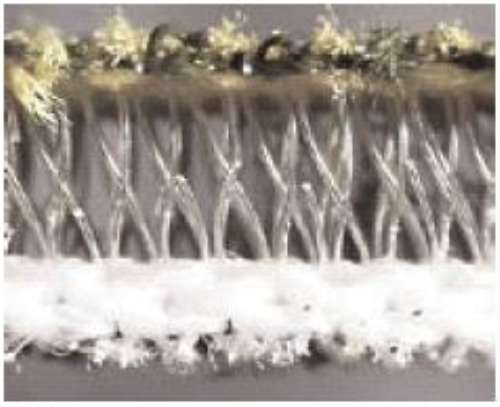
Η αρχή για την παραγωγή spacer υφασμάτων με δομή sandwich περιλαμβάνει το πλέξιμο των δύο εξωτερικών υφασμάτων από τις δύο σειρές βελονών, το οποίο σταματάει σε ένα ορισμένο σημείο όπου αρχίζει το πλέξιμο του στρώματος σύνδεσης σε επιλεγμένες βελόνες. Αυτές οι βελόνες μπορούν να χρησιμοποιούνται για το πλέξιμο των εξωτερικών υφασμάτων ή αποκλειστικά για την παραγωγή του στρώματος σύνδεσης. Το στρώμα σύνδεσης μπορεί να πλεχτεί με δύο τρόπους, ενιαίο ή διπλό στρώμα σύνδεσης. Για την παραγωγή των διπλών στρωμάτων σύνδεσης, τα δύο στρώματα πλέκονται χωριστά στις δύο σειρές βελονών και συνδέονται σε ένα ορισμένο σημείο από μια σειρά rib (δίπλακο πλεκτό). Εάν σ' αυτό το στάδιο, παραχθεί ένας συγκεκριμένος αριθμός σειρών στα εξωτερικά στρώματα, η σύνδεση που σχηματίζεται θα είναι της μορφής "Χ". Μερικοί τύποι υφαδοπλεκτών υφασμάτων spacer, καθώς και τύποι σύνδεσης παρουσιάζονται ενδεικτικά στο σχήμα 1.4.



Σχήμα 1.4: Υφαδοπλεκτά υφάσματα διατήρησης απόστασης από επίπεδες μηχανές.

Οι συμβατικές κυκλικές πλεκτομηχανές με τις απαραίτητες ρυθμίσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή υφαδοπλεκτών υφασμάτων spacer. Ιδιαίτερα στις κυκλικές πλεκτομηχανές Jacquard είναι δυνατό να παραχθούν με διάφορα σχέδια. Είναι λίγες οι έρευνες που έχουν εστιάσει στο συγκεκριμένο πεδίο. Μια από αυτές επικεντρώνεται σε πλεκτομηχανές rib 1x1, με τρία συστήματα νημάτων, τα οποία μπορούν να πλέξουν ανεξάρτητα. Εντούτοις η τεχνική αυτή εγκυμονεί τον κίνδυνο εξαγωγής των εσωτερικών

νημάτων από τις βελόνες, ειδικά όταν χρησιμοποιούνται δύσκαμπτα μονόινα νήματα. Τον κίνδυνο αυτό περιορίζει το πλέξιμο των εσωτερικών ινών με υψηλή τιμή τάνυσης.



Σχήμα 1.5: Υφαδοπλεκτά υφάσματα διατήρησης απόστασης από κυκλικές μηχανές.

Τα υφαδοπλεκτά υφάσματα spacer από κυκλικές μηχανές έχουν ήδη υιοθετηθεί σε πρακτικές εφαρμογές ως μήτρες σύνθετων υλικών. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ως ανακυκλώσιμα καλύμματα καθισμάτων, ορθοπεδικά κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα, και για την δημιουργία ενδυμάτων άθλησης και προστασίας. Δύο δείγματα υφαδοπλεκτών υφασμάτων spacer από κυκλικές μηχανές Jacquard παρουσιάζονται στο σχήμα 1.6.

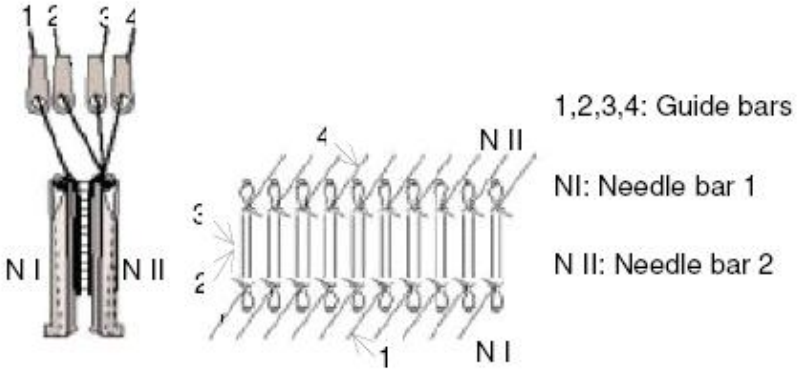
Σχήμα 1.6: Δείγματα υφαδοπλεκτών υφασμάτων διατήρησης απόστασης από κυκλικές μηχανές Jacquard.

Συμπερασματικά οι πλεκτομηχανές υφαδιού είναι κατάλληλες για την παραγωγή πλεκτών υφασμάτων spacer με επίπεδη δομή και σχετικά χαλαρές και ελαστικές δομές. Ρύθμιση του πάχους του spacer υφάσματος είναι δυνατή στις επίπεδες πλεκτομηχανές. Βασικό μειονέκτημα της παραγωγής spacer υφασμάτων σε επίπεδες πλεκτομηχανές είναι η χαμηλή ταχύτητα παραγωγής. Αντίθετα υψηλή παραγωγικότητα παρουσιάζουν οι κυκλικές πλεκτομηχανές υφαδιού. Το μειονέκτημα αυτών όμως εντοπίζεται στην απαίτηση υψηλών τινών τάνυσης κατά το πλέξιμο των spacer νημάτων.

1.3.1.3 Στημονοπλεκτά υφάσματα διατήρησης απόστασης

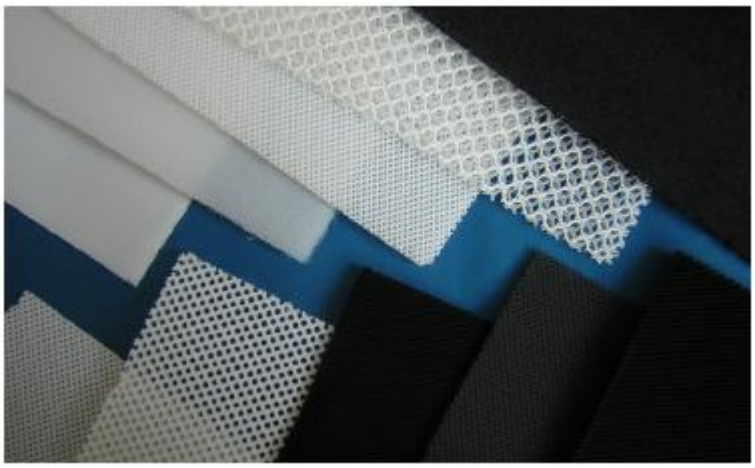
Η πλεκτική στημονιού προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα όσον αφορά στην παραγωγή των υφασμάτων spacer. Το εύρος των φυσικών και λειτουργικών ιδιοτήτων των υφασμάτων spacer που παράγονται από την πλεκτική στημονιού είναι αρκετά ευρύ έναντι των κλασικών υφαντών ή πλεκτών δομών. Για τον λόγο αυτό η πλεκτική στημονιού αποτελεί την πλέον διαδεδομένη μέθοδο παραγωγής των υφασμάτων spacer.

Για την πλεκτική διαδικασία χρησιμοποιούνται μηχανές Raschel δύο μπαρών οδηγών. Η διαδικασία περιλαμβάνει την παραγωγή δύο χωριστών υφασμάτων σε κάθε μία πλευρά της μηχανής και την σύνδεσή τους με ένα κατάλληλο σύστημα νήματος (spacer yarn). Η παραγωγή των χωριστών υφασμάτων (εξωτερικά στρώματα) πραγματοποιείται στις εμπρόσθιες και οπίσθιες μπάρες οδηγών (μπάρα 1 και μπάρα 4). Στο σχήμα 1.7 παρουσιάζεται διαγραμματικά η βασική αρχή της πλεκτικής διαδικασίας. Οι μπάρες 1 και 4 χρησιμοποιούνται για την παραγωγή των εξωτερικών στρωμάτων του υφάσματος σύμφωνα με το επιθυμητό σχέδιο (ανοιχτό, κλειστό). Ενώ οι μπάρες οδηγών 2 και 3 χρησιμοποιούνται για το πλέξιμο των εσωτερικών νημάτων.



Σχήμα 1.7: Μπάρες οδηγών για την παραγωγή πλεκτών υφασμάτων με δημιουργία κενού σε μηχανές Raschel.

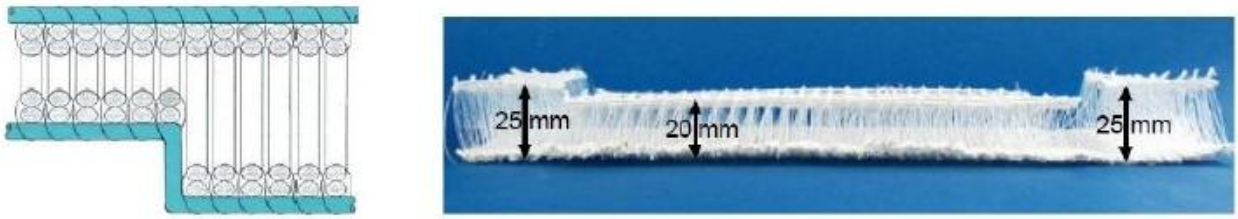
Τα εξωτερικά στρώματα είναι δυνατόν να είναι ίδια ή διαφορετικά, πυκνής ή αραιής δομής, απλής δομής ή με μικρά σχέδια ή ακόμα και χνουδωτά στην μια πλευρά. Το ένα ή και τα δύο εξωτερικά στρώματα μπορούν να είναι ανοιχτής δομής ανάλογα με την εφαρμογή, π.χ. για τελική χρήση σε ιατρικούς επιδέσμους επιλέγονται ανοιχτές δομές για βελτίωση της ικανότητας αναπνοής. Μερικά δείγματα εξωτερικών στρωμάτων παρουσιάζονται στο σχήμα 1.8. Για το εσωτερικό στρώμα σύνδεσης (spacer yarn) χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο μονόινα νήματα (filaments) επειδή παρουσιάζουν μεγαλύτερη δυσκαμψία και κατ' επέκταση αυξάνουν την σταθερότητα των παραγόμενων υφασμάτων. Ανάλογα με τις απαιτήσεις της τελικής χρήσης όμως είναι δυνατή η χρήση νημάτων πολλαπλών ινών συνεχών ή ασυνεχών.



Σχήμα 1.8: Δείγματα εξωτερικών στρωμάτων στημονοπλεκτών με δημιουργία κενού.

Για την παραγωγή υφασμάτων spacer με τα εξωτερικά στρώματα σε δομή δικτύου η μηχανή Raschel εξοπλίζεται επιπλέον με σύστημα εισαγωγής υφαδιού και στημονιού. Τα υφάσματα που παράγονται με αυτόν τον τρόπο χρησιμοποιούνται σε ειδικές τεχνικές εφαρμογές ως δομές ενίσχυσης. Αναλυτικότερη περιγραφή θα ακολουθήσει στην επόμενη ενότητα.

Το πάχος των υφασμάτων spacer που μπορεί να επιτευχθεί με τις μηχανές Raschel κυμαίνεται στο εύρος 1.5 mm – 160 mm. Το πάχος του υφάσματος προκύπτει από την ρύθμιση αντίστοιχης απόστασης μεταξύ των μπαρών οδηγών βελονών. Τα υφάσματα πάχους μέχρι 20 mm παράγονται χωρίς τροποποίηση της πλεκτομηχανής. Αντίθετα τα υφάσματα μεγαλύτερου πάχους απαιτούν κατάλληλη τροποποίηση της μηχανή. Είναι δυνατή επίσης η παραγωγή υφάσματος μεταβλητού πάχους. Στο σχήμα 1.9 παρουσιάζεται δείγμα στημονοπλεκτού υφάσματος spacer με δύο τιμές πάχους.



Σχήμα 1.9: Δείγμα στημονοπλεκτού υφάσματος spacer με δύο τιμές πάχους.

Η πλεκτική στημονιού προσφέρει μεγάλη ευελιξία αναφορικά με τις ιδιότητες των τελικών προϊόντων. Η δομή του εσωτερικού και των εξωτερικών στρωμάτων, το μεγάλο πεδίο τιμών πάχους υφάσματος καθώς και η επιλογή του είδος των νημάτων και του υλικού αυτών συνιστούν το μεγάλο εύρος ιδιοτήτων του τελικού προϊόντος. Υπό μια γενική άποψη το

πεδίο εφαρμογών των στημονοπλεκτών spacer υφασμάτων εκτείνεται από υφάσματα εσώρουχων έως στοιχεία ενίσχυσης σύνθετων υλικών. Το διάστημα μεταξύ των εξωτερικών στρωμάτων προσδίδει λειτουργική άνεση στα spacer υφάσματα η οποία είναι ιδιαίτερα επιθυμητή σε ιατρικές εφαρμογές. Επιπλέον το ενδιάμεσο στρώμα αποσβένει φορτία συμπίεσης κατ' επέκταση ανάλογες εφαρμογές που χαρακτηρίζονται από φορτία συμπίεσης αποτελούν το κύριο πεδίο εφαρμογών τους.

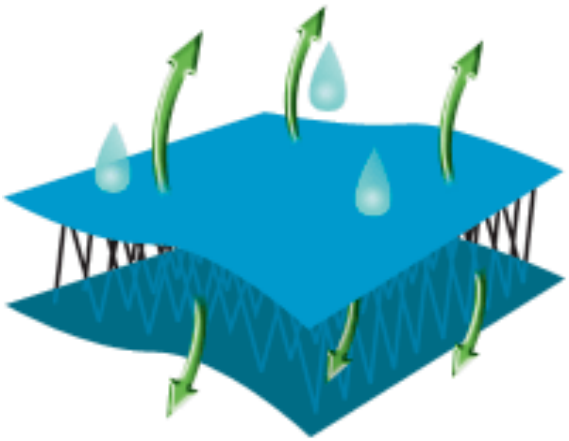
1.3.2 Ιδιότητες των υφασμάτων διατήρησης απόστασης

Η τριδιάστατη δομή των spacer υφασμάτων συνεπάγεται ιδιαίτερες ιδιότητες που δεν συναντώνται στα συμβατικά κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα. Συνοπτικά αναφέρονται οι σημαντικότερες από αυτές:

- Αεροδιαπερατότητα και ικανότητα αναπνοής
- Ενυδάτωση, μεταφορά και απορρόφηση θερμότητας
- Πολύ καλή λειτουργική και θερμική άνεση
- Αντίσταση συμπίεσης
- Δυνατότητα ενσωμάτωσης λειτουργικών υλικών (π.χ. αφρός)
- Καλή αντίσταση επιφάνειας
- Ελαφριά κατασκευή

Τα υφάσματα spacer παρουσιάζουν καλή αεροδιαπερατότητα και ικανότητα αναπνοής που οφείλεται στο ενδιάμεσο κενό. Τα χαρακτηριστικά αυτά βελτιώνονται αν έχουν χρησιμοποιηθεί μονόινα συνθετικά νήματα στο ενδιάμεσο στρώμα. Λόγω των ιδιοτήτων τους έχουν ήδη αντικαταστήσει τους αφρούς σε πολλές εφαρμογές. Μεγάλο εύρος εφαρμογών συναντούν επίσης στον ιατρικό τομέα. Η αεροδιαπερατότητα και η μεταφορά θερμότητας και υγρασίας επηρεάζεται σημαντικά από τον αριθμό, το υλικό των νημάτων του εσωτερικού στρώματος καθώς και το πάχος του στρώματος.

Την καλή φυσιολογική/λειτουργική άνεση των υφασμάτων spacer συνθέτουν η μεταφορά θερμότητας, υγρασίας και η αεροδιαπερατότητα. Ο συνδυασμός αυτών των ιδιοτήτων χαρακτηρίζεται ως φαινόμενο μικροκλίματος (microclimate effect) των υφασμάτων spacer. Τα χαρακτηριστικά αυτά σε συνδυασμό με την αντίσταση στη συμπίεση προσδίδουν στα υφάσματα spacer κατάλληλη απόδοση για χρήση στην αθλητική ένδυση, σε στρώματα και ιατρικές εφαρμογές.



Σχήμα 1.10: Διαπερατότητα αέρα και υγρασίας των υφασμάτων spacer (www.baltex.co.uk)

Μια από τις βασικές ιδιότητες των υφασμάτων spacer είναι η αντίσταση στη συμπίεση καθώς και η επαναφορά μετά την απομάκρυνση του φορτίου συμπίεσης. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου απαιτείται απόσβεση φορτίων συμπίεσης.

Τα υφάσματα spacer συνδυασμένα με άλλα λειτουργικά υλικά παράγουν πολυλειτουργικά προϊόντα. Την δυνατότητα ενσωμάτωσης άλλων υλικών στην δομή τους διασφαλίζει η παρουσία ενδιάμεσου κενού στη δομή τους. Στην ως υλικά πλήρωσης χρησιμοποιούνται αντιβακτηριακά, αντιστατικά, επιβραδυντές φλόγας κ.α. ανάλογα με την τελική χρήση.

Το χαμηλό ειδικό βάρος των spacer υφασμάτων, τους δίνει επίσης υψηλό προβάδισμα σε εφαρμογές ως συστατικά ενίσχυσης έναντι των συμβατικών υλικών ενίσχυσης.

Είναι σημαντικό τέλος να σημειωθεί ότι τα spacer υφάσματα είναι ως επί το πλείστον ανακυκλώσιμα, δεδομένου ότι τα χρησιμοποιούμενα νήματα είναι κατά κύριο λόγο συνθετικά.

1.3.3 Πεδίο εφαρμογών των υφασμάτων διατήρησης απόστασης

Η δυνατότητα παραγωγής spacer υφασμάτων από υλικά μεγάλου εύρους ιδιοτήτων σε συνδυασμό με τις πολλαπλές τριδιάστατες γεωμετρικές δομές που μπορούν να επιτευχθούν διασφαλίζουν στα spacer υφάσματα μεγάλο φάσμα εφαρμογών. Συνοπτικά αναφέρονται ορισμένες εφαρμογές.

- στον τομέα ένδυσης: τμήματα εσώρουχων, π.χ. σε στηθόδεσμους και ενδύματα κολύμβησης, υλικά μόνωσης σε ρούχα, στην αθλητική ένδυση για την κατασκευή υποδημάτων
- σε ιατρικές εφαρμογές: επίδεσμοι, θεραπευτικές ενισχύσεις, στρώματα νοσοκομείων για την πρόληψη των ελκών λόγω κατάκλισης, μαξιλάρια αναπηρικών καρεκλών.

- προστατευτικός εξοπλισμός: επιβράδυνση φλογών χρησιμοποιώντας κατάλληλες ίνες ή ενσωματώνοντας κατάλληλο υλικό
- στην αυτοκινητοβιομηχανία: καλύμματα καθισμάτων, θερμαινόμενα καθίσματα, λασπωτήρες.
- στον τομέα μεταφορών: εμπορευματοκιβώτια, δεξαμενές, σε πλωτά και αεροσκάφη
- τομέα πολιτικού μηχανικού: ελαφριές κατασκευές τοίχων, πρώτη ύλη για δομές Τ
- γεωτεχνικά κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα
- συστήματα φίλτρων
- ενίσχυση για σύνθετες δομές (sandwich)

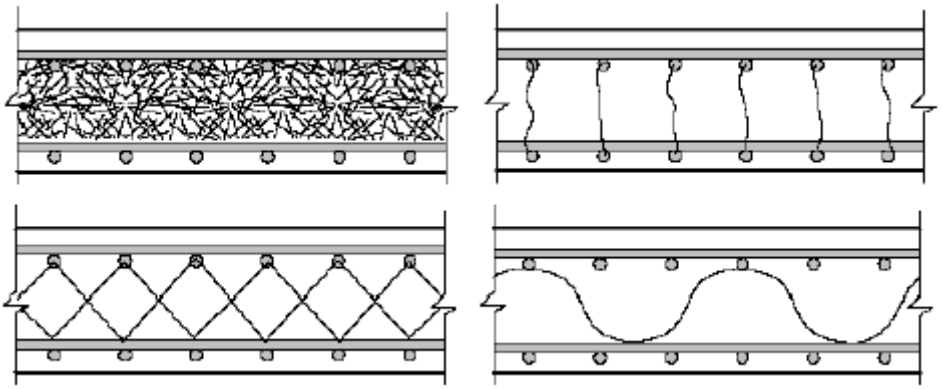
1.3.4 Στημονοπλεκτά υφάσματα διατήρησης απόστασης ως στοιχεία ενίσχυσης σκυροδέματος

Η τριδιάστατη δομή των στημονοπλεκτών υφασμάτων spacer, η δυνατότητα παραγωγής τους από τεχνικές ίνες καθώς και η παραγωγή τους σε διάφορους σχηματισμούς σε ένα στάδιο, τα καθιστούν ιδιαίτερα προνομιακά σε ορισμένες εφαρμογές ενίσχυσης δομών. Τα τελευταία χρόνια εντείνονται οι έρευνες για την υιοθέτηση στημονοπλεκτών υφασμάτων spacer ως ενισχύσεις σκυροδέματος.

Τα βασισμένα στο τσιμέντο υλικά έχουν γενικά αντοχή στην συμπίεση, ενώ η αντοχή τους σε εφελκυσμό είναι χαμηλή. Για το λόγο αυτό σε πολλές περιπτώσεις συνδυάζονται με ενισχύσεις για την βελτίωση των ιδιοτήτων τους. Ως υλικό ενίσχυσης χρησιμοποιείται κυρίως ο χάλυβας καθώς επίσης και ορισμένοι τύποι ινών [6]. Τα τελευταία χρόνια μάλιστα μελετάται η χρήση υφασμάτων για την ενίσχυση των προϊόντων τσιμέντου [7], [8], [9]. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα αυτών των ερευνών, διαπιστώθηκε ότι υφάσματα κατάλληλης δομής θα μπορούσαν να βελτιώσουν τη μηχανική απόδοση των σύνθετων προϊόντων του τσιμέντου σε μεγαλύτερο βαθμό από ότι τα ευθέα νήματα (που δεν αποτελούν σχηματισμένο ύφασμα). Το γεγονός αυτό οφείλεται στο αυξημένο δέσιμο τσιμέντου – υφάσματος ενίσχυσης. Το μηχανικό δέσιμο προφανώς εξαρτάται από την δομή του υφάσματος και των χρησιμοποιούμενων νημάτων [10]. Τα προϊόντα τσιμέντου που ενισχύονται με τα υφάσματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε αρκετές εφαρμογές όπως η προηγμένη ενίσχυση και μετασκευή σκυροδέματος και η παραγωγή λεπτότοιχων σύνθετων δομών τσιμέντου υψηλής απόδοσης για προηγμένες μεθόδους κατασκευής. Οι λεπτότοιχες σύνθετες δομές τσιμέντου μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πλαίσια τοίχων, εξωτερική επίστρωση τοίχων, συστήματα προστατευτικών φραγμών όπως τα κτιριακά συστήματα εξόδων κινδύνου από πυρκαγιές, μόνιμα υλικά κατασκευής κεραμιδιών σκεπής.

Η πλειοψηφία των λεπτότοιχων σύνθετων κατασκευών επιτυγχάνεται προς το παρόν από κοντές ασυνεχής ίνες. Η χρήση υφασμάτων για τέτοιες εφαρμογές είναι αρκετά ελκυστική δεδομένου ότι τα υφάσματα επιτρέπουν ευκολότερο χειρισμό ρυθμίζοντας τον ακριβή προσανατολισμό των νημάτων κατά τον σχεδιασμό τους, σε συνδυασμό με την ευελιξία

σχεδιασμού και την υψηλή ταχύτητα παραγωγής τους μέσω αυτοματοποιημένης διαδικασίας.
Ειδικά για τις εφαρμογές στο σκυρόδεμα τα υφάσματα spacer αποτελούν πόλο έλξης, δεδομένου ότι παρέχουν ενίσχυση στην τρίτη κατεύθυνση (κάθετη στο ευρύ επίπεδο) και καθορισμένη τοποθέτηση των δύο εξωτερικών στρωμάτων. Η τριδιάστατη κατασκευή των υφασμάτων spacer οδηγεί σε έναν τριδιάστατο τύπο πλέγματος στον οποία η ενσωμάτωση υλικού στο πλήρες πάχος του επιτυγχάνεται εύκολα σε ένα βήμα. Στο σχήμα 1.11 παρουσιάζονται τέσσερις διαφορετικές δομές για τη γενική κατασκευή των υφασμάτων spacer.



Σχήμα 1.11: Διαφορετικές δομές για την κατασκευή υφασμάτων διατήρησης απόστασης.

Όταν η ενίσχυση που χρησιμοποιείται σε προϊόντα τσιμέντου συνδυάζει υψηλή αντοχή και υψηλό μέτρο ελαστικότητας, η αστοχία του σύνθετου υλικού οφείλεται συχνά στην διάτμηση ή σε διελασματική διάτμηση (μεταξύ των στρωμάτων των ενισχύσεων) έναντι της κάμψης. Επομένως η ενίσχυση (ενίσχυση διάτμησης) στην τρίτη διεύθυνση είναι απαραίτητη. Αυτό επιτυγχάνεται από τα εσωτερικά νήματα στη δομή των υφασμάτων spacer. Επιπλέον λόγω της ευκολότερης κατασκευής των υφασμάτων spacer είναι δυνατή η μείωση των δαπανών παραγωγής τους.

Για την παραγωγή στημονοπλεκτών υφασμάτων spacer για ενίσχυση σκυροδέματος, οι μηχανές Raschel έχουν εξοπλιστεί με συστήματα εισαγωγής στημονιού και υφαδιού. Έτσι επιτυγχάνεται η παραγωγή υφασμάτων spacer με δομή τύπου πλέγματος.

Η συμπεριφορά των υφασμάτων διατήρησης απόστασης σε συμπίεση έχει καθοριστική σημασία για την σταθερότητά τους, ειδικά σε εφαρμογές σκυροδέματος. Γι΄ αυτό η παρούσα εργασία εστιάζει στην μελέτη της συμπεριφοράς αυτών σε συμπίεση. Επιπλέον θα διερευνηθεί η επίδραση των χαρακτηριστικών των εσωτερικών νημάτων (ιδιότητες, γεωμετρικά χαρακτηριστικά) στην συμπεριφορά των υφασμάτων διατήρησης απόστασης σε συμπίεση.

1.3.4.1 Δομή στημονοπλεκτών υφασμάτων διατήρησης απόστασης για ενίσχυση σκυροδέματος

Τα υφάσματα spacer αποτελούνται από δύο εξωτερικές επιφάνειες, την ανώτερη και την κατώτερη επιφάνεια, οι οποίες συνδέονται μεταξύ τους από ένα σύνολο νημάτων (εσωτερικό στρώμα). Επομένως έχουν τριδιάστατη δομή, άξονες x, y και z, όπως έχει ήδη αναφερθεί. Οι εξωτερικές επιφάνειες των υφασμάτων εντοπίζονται στο επίπεδο x-y ενώ τα εσωτερικά νήματα στην διεύθυνση z.

Ανώτερη επιφάνεια των υφασμάτων διατήρησης απόστασης είναι η επιφάνεια που παράγεται στην εμπρόσθια μπάρα βελονών της πλεκτομηχανής και εντοπίζεται στο x-y επίπεδο.

Κατώτερη επιφάνεια των υφασμάτων διατήρησης απόστασης είναι η επιφάνεια που παράγεται μπάρα βελονών της πλεκτομηχανής και εντοπίζεται στο x-y επίπεδο.

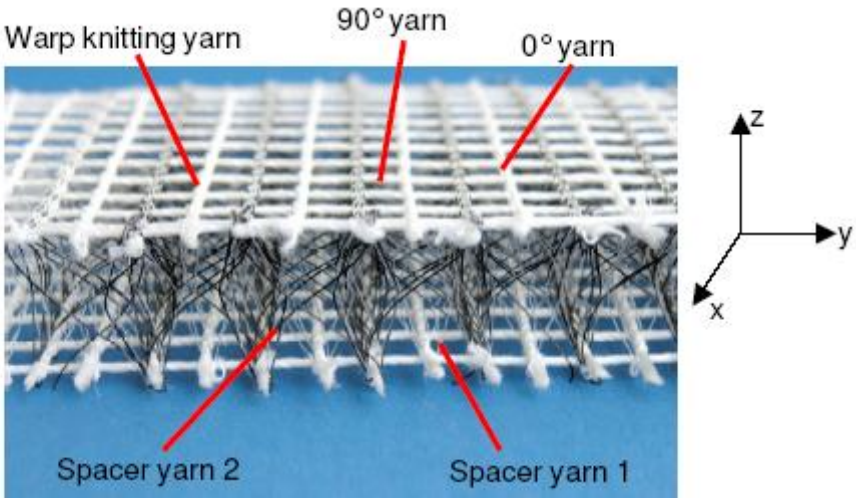
Εσωτερικό στρώμα των υφασμάτων διατήρησης απόστασης βρίσκεται μεταξύ δύο εξωτερικών επιφανειών των υφασμάτων. Αποτελείται από τα συστήματα εσωτερικών νημάτων ή/και τα υλικά πλήρωσης της δομής τους.

Τα υφάσματα spacer που παράγονται για ενίσχυση σκυροδέματος αποτελούνται από τα μεμονωμένα στοιχεία: νήματα 0°, νήματα 90°, νήματα πλέξης στημονιού και συστήματα εσωτερικών νημάτων (spacer yarns). Οι ορισμοί και τα χαρακτηριστικά των στοιχείων δίνονται στη συνέχεια.

Νήματα 0° είναι τα ευθέα νήματα που τοποθετούνται στην διεύθυνση στημονιού (διεύθυνση x) και δεν συμμετέχουν στο σχηματισμό θηλιών κατά τη διάρκεια της πλεκτικής διαδικασίας.

Νήματα 90° είναι τα ευθέα νήματα που τοποθετούνται στην διεύθυνση υφαδιού (διεύθυνση y) και δεν συμμετέχουν στο σχηματισμό θηλιών κατά τη διάρκεια της πλεκτικής διαδικασίας.

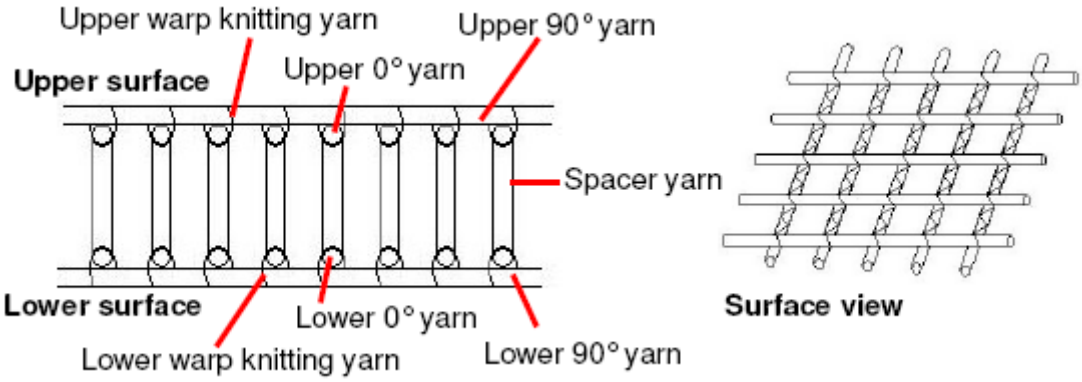
Εσωτερικά νήματα (spacer yarns) είναι τα συστήματα νημάτων που συνδέουν τις δύο εξωτερικές επιφάνειες του υφάσματος μεταξύ τους και εντοπίζονται στην διεύθυνση z.
Νήματα πλέξης στημονιού είναι τα νήματα που εκτελούν την σύνδεση των συστημάτων των νημάτων μέσω της πλεκτικής διαδικασίας για την συνολική διαμόρφωση του υφάσματος spacer.



Σχήμα 1.12: Δομή στημονοπλεκτού υφάσματος διατήρησης απόστασης για ενίσχυση σκυροδέματος (φωτογραφία).

Η ανώτερη και κατώτερη επιφάνεια των υφασμάτων spacer αποτελείται από τα νήματα 0° και 90° και νήματα πλέξης στημονιού. Τα υφάσματα spacer μπορούν να έχουν ανοικτές ή κλειστές δομές επιφανειών, ή δομή τύπου πλέγματος. Με μεταβολή των αποστάσεων μεταξύ των νημάτων 90° και 0°, είναι δυνατή η παραγωγή δομών διαφορετικού πλέγματος. Για εφαρμογές σκυροδέματος απαιτούνται ανοιχτές δομές επιφανειών για καλύτερη έγχυση του μείγματος σκυροδέματος στη δομή του υφάσματος.

Τα ίδια ή διαφορετικά υλικά μπορούν να επιλεχτούν για την ανώτερη και κατώτερη επιφάνεια. Με τη χρησιμοποίηση διαφορετικών υλικών στις επιφάνειες, μπορούν να παραχθούν υφάσματα με τα διαφορετικά χαρακτηριστικά. Επιπλέον κάνοντας χρήση ενός ή δύο συστημάτων εσωτερικών νημάτων μπορούν να παραχθούν υφάσματα διαφορετικών δομών.



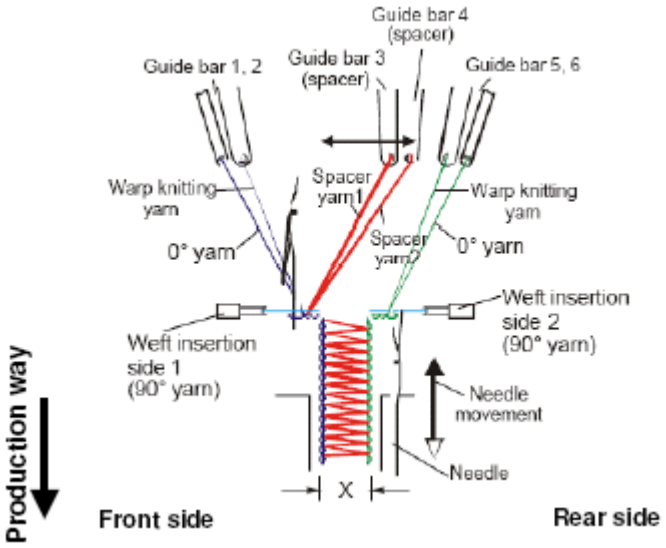
Σχήμα 1.13: Δομή στημονοπλεκτού υφάσματος διατήρησης απόστασης για ενίσχυση σκυροδέματος (σχηματική αναπαράσταση).

Για τα συστήματα νημάτων των υφασμάτων spacer χρησιμοποιούνται συνήθως διαφορετικά υλικά. Τα νήματα 0° και 90° είναι κατά κύριο λόγο υαλονήματα, υβριδικά νήματα και πολυϊνικά νήματα συνεχών ινών. Ως νήματα πλέξης στημονιού χρησιμοποιούνται κυρίως πολυϊνικά νήματα συνεχών ινών ιδιαίτερης λεπτότητας για την εισαγωγή τους στις βελόνες. Ως εσωτερικά νήματα χρησιμοποιούνται κυρίως μονόινα με ιδιότητες που επιλέγονται σύμφωνα με την εφαρμογή.

1.3.4.2 Μέθοδος παραγωγής στημονοπλεκτών υφασμάτων διατήρησης απόστασης για ενίσχυση σκυροδέματος

Τα υφάσματα spacer που χρησιμοποιούνται για ενίσχυση σκυροδέματος παράγονται σε πλεκτομηχανή Rachel διπλής μπάρας βελονών, βάσει του Karl Mayer HDR 6-7 DPLM. Η μηχανή εξοπλίστηκε με πρόσθετα συστήματα από την Cetex Textilmaschinenentwicklung GmbH, Γερμανία. Τα πρόσθετα συστήματα είναι: σύστημα εισαγωγής υφαδιού 90° ελεγχόμενο από υπολογιστή και στις δύο πλευρές, μπάρα οδηγών ελεγχόμενη από υπολογιστή, δύο catchers των εισερχόμενων υφαδιών ανά πλευρά.

Οι δύο εξωτερικές επιφάνειες του υφάσματος παράγονται συγχρόνως, μία σε κάθε πλευρά της μηχανής. Η παραγωγή τους στηρίζεται στην εισαγωγή των στημονιών μέσα στις θηλιές και το δέσιμο τους με τα νήματα υφαδιού. Μ' αυτόν τον τρόπο παράγονται οι δομές τύπου πλέγματος. Οι δύο δομές στημονοπλεκτού συνδέονται μεταξύ τους από τα εσωτερικά νήματα διαμορφώνοντας το τριδιάστατο ύφασμα. Το μήκος των εσωτερικών νημάτων μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ 12 mm – 160 mm. Το ελάχιστο πάχος της συνολικής δομής καθορίζεται από την απόσταση μεταξύ των δύο μπαρών βελονών.



Σχήμα 1.14: Πλεκτική διαδικασία στημονοπλεκτών υφασμάτων διατήρησης απόστασης για ενίσχυση σκυροδέματος

1.3.4.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την συμπεριφορά σε συμπίεση των στημονοπλεκτών υφασμάτων διατήρησης απόστασης για ενίσχυση σκυροδέματος

Η συμπεριφορά των υφασμάτων spacer σε συμπίεση έχει καθοριστική σημασία για την σταθερότητά τους, ειδικά σε εφαρμογές σκυροδέματος. Είναι επομένως σημαντικό να καθοριστούν οι παράγοντες που επηρεάζουν την συμπεριφορά τους σε συμπίεση:

- Το πάχος του υφάσματος
- Το ποσοστό των εσωτερικών νημάτων ανά cm^2
- Οι ιδιότητες των εσωτερικών νημάτων (ιδιότητες και γεωμετρικά χαρακτηριστικά)
- Το σχέδιο του εσωτερικού στρώματος (γωνίες των εσωτερικών νημάτων)
- Το δέσιμο των νημάτων πλέξης στημονιού

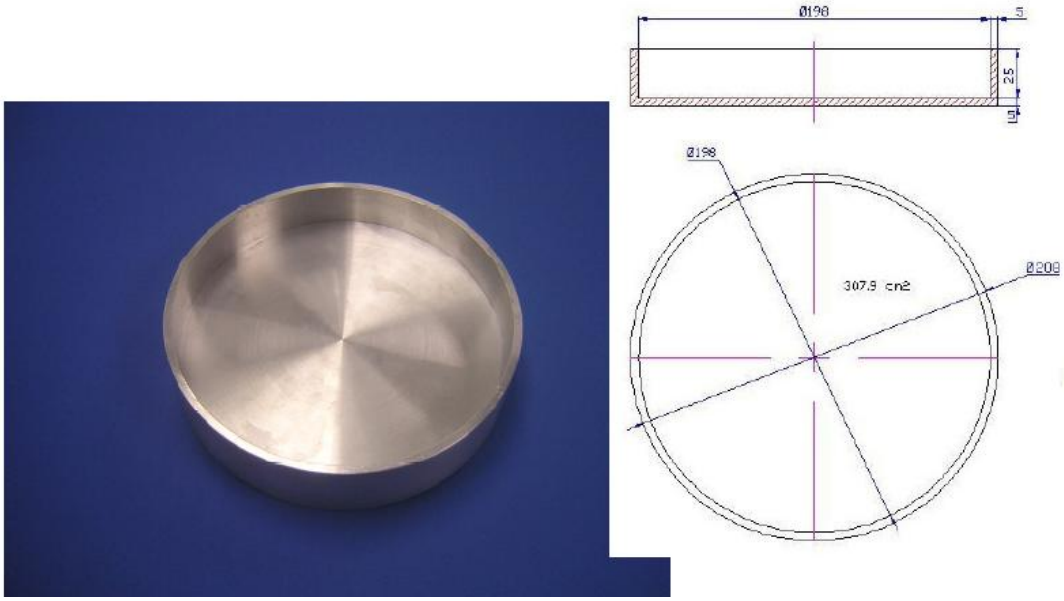
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

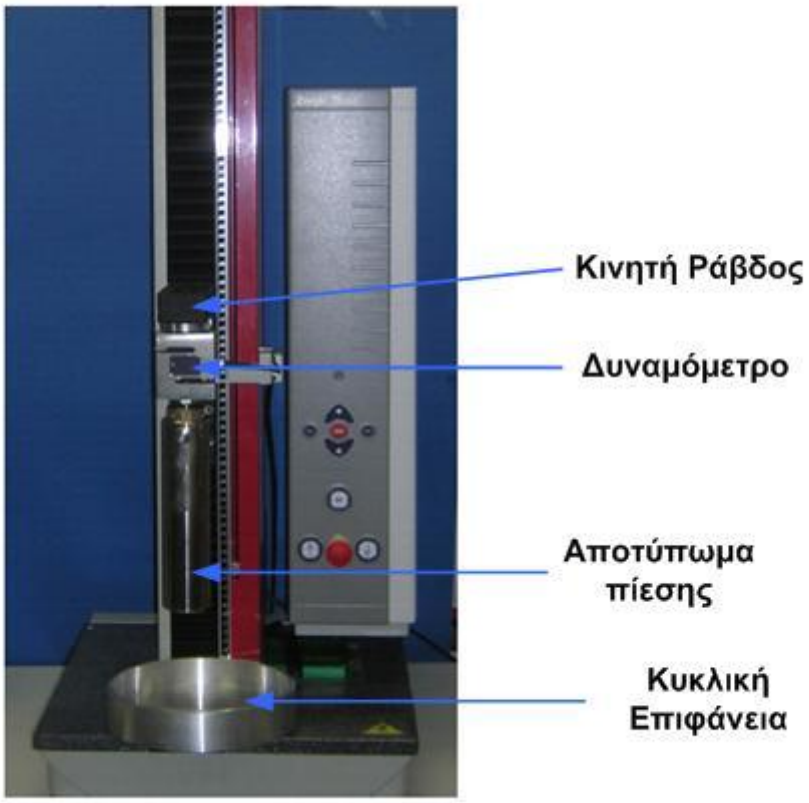
Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει περιγραφή της πειραματικής διάταξης που έγιναν οι δοκιμές σε συμπίεσης του δείγματος διατήρησης απόστασης και του τρόπου με τον οποίο προέκυψαν τα αποτελέσματα.

Η δοκιμή του υφάσματος σε συμπίεση εκτελείται σε συσκευή τύπου Zwick/Roell 2.5. Η συγκεκριμένη συσκευή χρησιμοποιείται για την μελέτη ιδιοτήτων διαφόρων υλικών. Οι δυνατότητες του συγκεκριμένου οργάνου επιτρέπουν μεγάλο εύρος μετρήσεων. Όσον αφορά στα κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα η συσκευή Zwick/Roell 2.5 χρησιμοποιείται για την μέτρηση για δοκιμή εφελκυσμού ινών, νημάτων, ταινιών, σχοινιών και υφασμάτων, ή για δοκιμές συμπίεσης των καλυμμάτων των δαπέδων ή των υλικών μόνωσης. [11]

Στη δοκιμή της συμπίεσης τα εργαλεία που απαρτίζουν τη μηχανή είναι τα εξής: μία στάμπα πίεσης με διάμετρο 50 mm, ένα δυναμόμετρο, μια κινούμενη ράβδος, μια επιφάνεια πάνω στη οποία τοποθετείται το δείγμα και ένας ηλεκτρονικός υπολογιστής που συνδέεται με τη μηχανή και εμφανίζει τα αποτελέσματα του πειράματος μέσω του λογισμικού προγράμματος. Όσον αφορά την επιφάνεια της δοκιμής, όπου τοποθετείται το δείγμα, είναι κυκλική με διάμετρο 198 mm και επιφάνεια 307.9 cm^2. Παρακάτω παρουσιάζεται η μηχανή της συμπίεσης, η επιφάνεια δοκιμής καθώς και οι πλήρεις διαστάσεις της. [11]



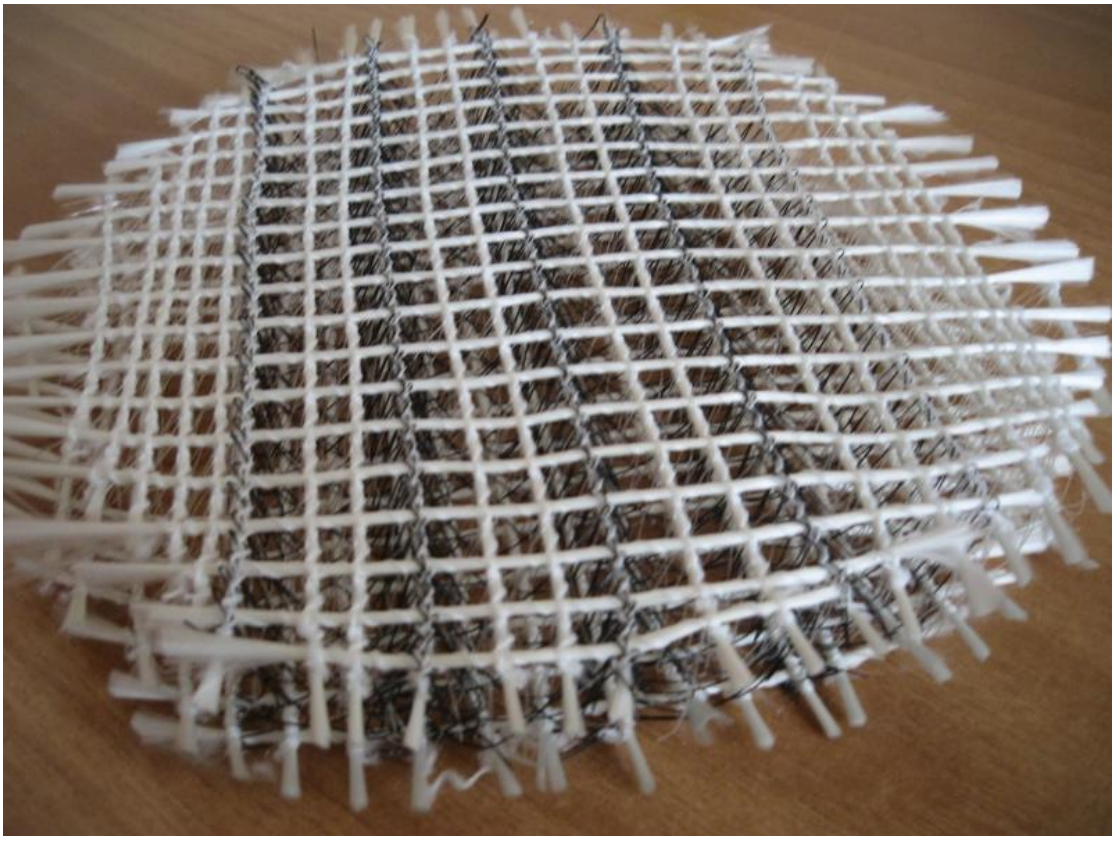
Σχήμα 2.1: Διαστάσεις κυκλικής επιφάνειας προσαρμογής του δείγματος για τη δοκιμή συμπίεσης



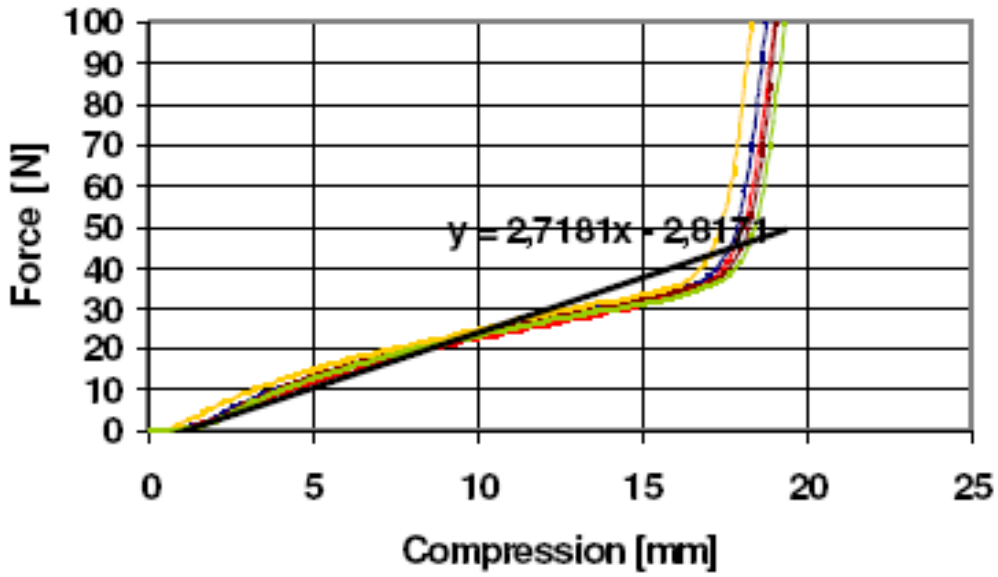
Σχήμα 2.2: Μηχανή συμπίεσης στην οποία πραγματοποιούνται οι δοκιμές συμπίεσης

Η διαδικασία του πειράματος έχει ως εξής: στο λογισμικό του υπολογιστή εισάγονται οι παράμετροι όπως η ταχύτητα κίνησης της στάμπας ή η επιβαλόμενη δύναμη. Τα όρια των παραμέτρων καθορίζονται αυτόματα από το λογισμικό σε σχετικές τιμές με αυτές που εισήχθησαν. Η στάμπα πίεσης προσαρμόζεται πάνω στο δυναμόμετρο, ενώ η κινούμενη ράβδος καταγράφει την μετατόπιση της στάμπας. Η αρχική θέση της στάμπας μαζί με το δυναμόμετρο βρίσκεται σε ένα σημείο πολύ κοντά στο δείγμα, χωρίς όμως να το ακουμπάει. Το σημείο αυτό ονομάζεται σημείο αναφοράς. Το πείραμα ξεκινάει και η ομάδα στάμπα - δυναμόμετρο αρχίζουν και μετατοπίζονται κατακόρυφα προς το δείγμα. Το λογισμικό καταγράφει την δύναμη που αντιστοιχεί σε κάθε μετατόπιση της στάμπας και στο τέλος της διαδικασίας εξάγει ένα διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης. [11]

Το δείγμα που χρησιμοποιήθηκε για την συγκεκριμένη δοκιμή και η καμπύλη που προκύπτει παρουσιάζονται παρακάτω. Με βάση την παρακάτω καμπύλη γίνεται η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την προσομοίωση της δοκιμής συμπίεσης στο λογισμικό πρόγραμμα ANSYS.



Σχήμα 2. 3: Δείγμα του οποίου μελετήθηκε η αντίσταση σε συμπίεση με τη δοκιμή συμπίεσης



Διάγραμμα 2.2: Καμπύλη που προκύπτει από την πειραματική δοκιμή συμπίεσης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ ΥΦΑΣΜΑΤΟΣ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ ΚΑΝΟΝΤΑΣ ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Η μοντελοποίηση αποτελεί καθοριστικό στάδιο για την διαδικασία σχεδιασμού των βιομηχανικών προϊόντων. Οι ιδιότητες της πρώτης ύλης και τα δομικά χαρακτηριστικά του προϊόντος (γεωμετρία, πιθανοί σύνδεσμοι κ.λ.π) επιλέγονται σύμφωνα με την επιθυμητή συμπεριφορά (πχ μηχανικές ιδιότητες) του προϊόντος σε συγκεκριμένες εφαρμογές. Όπως είναι ήδη γνωστό στον τομέα της μοντελοποίησης, έχει υπάρξει σημαντική πρόοδος στα σχεδιαστικά και υπολογιστικά προγράμματα, όπως CAD (computer aided design), CAE (computer aided engineering), και κατ' επέκταση στην διαδικασία σχεδιασμού των βιομηχανικών προϊόντων. Με αυτόν τον τρόπο εξοικονομείται χρόνος και παράλληλα μειώνεται το κόστος σχεδίασης και παραγωγής. Οι μέθοδοι μηχανικής ανάλυσης που χρησιμοποιούνται είναι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, των πεπερασμένων διαφορών, των πεπερασμένων όγκων και των συνοριακών στοιχείων. Η χρήση λογισμικών πακέτων με πεπερασμένα στοιχεία όπως ANSYS, ABAQUS, DYTRAN, NASTRAN, MARC, COSMOS κ.α. επιτρέπει ταχύτατη ανάπτυξη των μοντέλων, άμεση εφαρμογή των μεθόδων ανάλυσης και έλεγχο της διαδικασίας επίλυσης του συστήματος.

Σκοπός λοιπόν της παρούσας εργασίας είναι η μοντελοποίηση και μηχανική ανάλυση μιας κατηγορίας τριδιάστατων υφασμάτων διατήρησης απόστασης που χρησιμοποιείται σε εφαρμογές σκυροδέματος. Πιο συγκεκριμένα τα υπό εξέταση υφάσματα με ενσωμάτωση μπετόν σχηματίζουν λεπτότοιχες σύνθετες δομές κατάλληλες για ελαφρές κατασκευές. Καθοριστική ιδιότητα των υφασμάτων διατήρησης απόστασης τόσο για την ενσωμάτωση του μπετόν όσο και κατά τη χρήση τους είναι η αντίσταση σε συμπίεση. Συνεπώς αντικείμενο μελέτης της εργασίας είναι η συμπεριφορά των εξεταζόμενων δομών σε συμπίεση, η οποία πραγματοποιείται με προσομοίωση της δοκιμής. Η μοντελοποίηση του δείγματος υφάσματος διατήρησης απόστασης και η προσομοίωση της δοκιμής συμπίεσης επιτυγχάνεται με εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων στο λογισμικό πακέτο ANSYS.

3.1 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Στα τέλη του 19ου αιώνα η μαθηματική θεωρία ελαστικότητας είχε πλέον θεμελιωθεί, όμως δεν μπορούσε να δώσει αναλυτική λύση, παρά μόνο σε ελάχιστα προβλήματα. Οι επιστήμονες άρχισαν να ασχολούνται με τις προσεγγιστικές μεθόδους, οι οποίες όμως με τη σειρά τους δεν μπορούσαν να δώσουν λύση σε σύνθετα προβλήματα λόγω έλλειψης υπολογιστικών δυνατοτήτων. Για όλους τους παραπάνω λόγους οι ερευνητές έστρεψαν την προσοχή τους σε κατασκευές που η μορφή τους διευκολύνει την απλοποίηση του προβλήματος της ελαστικότητας. Τέτοιες είναι οι ραβδωτές, όπου περιλαμβάνουν κατασκευές αποτελούμενες από ράβδους / δοκούς που συνδέονται μεταξύ τους στα άκρα τους με κόμβους και σχηματίζουν δικτυώματα, συνεχείς δοκούς, διδιάστατα ή τρισδιάστατα πλαίσια κ.α.

Οι ερευνητές κατάφεραν να προσδιορίσουν τις σχέσεις ανάμεσα στις γενικευμένες μετατοπίσεις στα άκρα των ράβδων και στις αντίστοιχες δυνάμεις στα άκρα. Όμως λόγω έλλειψης υπολογιστικών μέσων η μεθοδολογία αυτή δεν μπόρεσε να προχωρήσει.
Η πρόοδος των υπολογιστών γύρω στο 1950 και η γραμμική άλγεβρα έφερε ξανά στην επιφάνεια τη προηγούμενη μεθοδολογία και δημιούργησε μια νέα μέθοδο που ονομάζεται **μητρωϊκή ανάλυση κατασκευών**. Η διαδικασία επίλυσης ραβδωτών φορέων γίνεται με δύο μοντέλα:

- **Μοντέλο μετατοπίσεων** (ή δυσκαμψίας ή ισορροπίας): οι γενικευμένες δυνάμεις που δρουν στα άκρα κάθε ράβδου της κατασκευής που μελετάται συνδέονται με τις μετατοπίσεις μέσω του μητρώου δυσκαμψίας k^e της ράβδου (e). Η ισορροπία των δυνάμεων σε κάθε κόμβο δίνει το τελικό γραμμικό σύστημα με άγνωστες τις μετατοπίσεις των κόμβων και γνωστές τις εφαρμοσμένες δυνάμεις. Το συνολικό μητρώο δυσκαμψίας **K** αποτελεί τη σύνθεση των επιμέρους μητρώων δυσκαμψιών k^e.
- **Μοντέλο δυνάμεων** (ή ευκαμψίας ή συμβιβαστότητας): οι μετατοπίσεις στα άκρα των ράβδων εκφράζονται συναρτήσει αντίστοιχων γενικευμένων δυνάμεων με τη βοήθεια του μητρώου ευκαμψίας f^e της ράβδου (e) (ισχύει $f^e = (k^e)^{-1}$). Το τελικό γραμμικό σύστημα προκύπτει από τη συμβιβαστότητα των μετατοπίσεων των άκρων των ράβδων που συντρέχουν σε κάθε κόμβο. Εδώ άγνωστες είναι οι δυνάμεις, ενώ το συνολικό μητρώο ευκαμψίας **F** προκύπτει από τη σύνθεση των επιμέρους μητρώων f^e. [12]

3.1.1 Η Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων με το μοντέλο των μετατοπίσεων

Συνέχεια της μεθόδου της μητρωϊκής ανάλυσης είναι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, η οποία εφαρμόστηκε σε απλοϊκή μορφή γύρω στο 1950 στον τομέα αεροναυπηγικής και αποτέλεσε επέκταση στην μελέτη των κατασκευών στις μη ραβδωτές κατασκευές, δηλαδή τις ολόσωμες. Ως μεταβλητές του προβλήματος μπορούν να επιλεγούν είτε οι κομβικές μετατοπίσεις (μοντέλο μετατοπίσεων), είτε οι κομβικές δυνάμεις (μοντέλο δυνάμεων), είτε και τα δύο (μικτό μοντέλο). Εδώ εξετάζεται το μοντέλο των μετατοπίσεων.
Τα βήματα της μεθόδου είναι τα εξής:

i. Διακριτοποίηση της κατασκευής: υποδιαίρεση της κατασκευής σε στοιχεία (γένεση πλέγματος)
ii. Υπολογισμός του μητρώου δυσκαμψίας του στοιχείου: $f^e = k^e \cdot q^e$, όπου f είναι οι γενικευμένες κομβικές δυνάμεις και q είναι οι γενικευμένες κομβικές μετατοπίσεις του στοιχείου.
iii. Διαμόρφωση του τελικού συστήματος δυσκαμψίας: $F = K \cdot Q$, όπου F είναι δυνάμεις και Q οι μετατοπίσεις που δρουν στους N μη πακτωμένους κόμβους της κατασκευής.

iv. Επίλυση του συστήματος δυσκαμψίας
v. Υπολογισμός εντατικών και παραμορφωσιακών μεγεθών

Πιο αναλυτικά η διαδικασία είναι η εξής: Αρχικά ορίζεται ένα καθολικό (χωρόδετο) σύστημα συντεταγμένων στο οποίο τοποθετείται το προς μελέτη σώμα. Στη συνέχεια γίνεται διακριτοποίηση του σώματος σε πεπερασμένα στοιχεία. Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των πεπερασμένων στοιχείων τόσο πιο ακριβής είναι η λύση του προβλήματος. Ακολουθεί ο προσδιορισμός των μετατοπίσεων **u** των κόμβων κάθε στοιχείου με βάση ένα τοπικό σύστημα συντεταγμένων που ορίζεται σε κάθε πεπερασμένο στοιχείο. Η εύρεση των κομβικών μετατοπίσεων γίνεται με τις συναρτήσεις μορφής. Αυτές είναι πολυωνυμικές συναρτήσεις και συνδέουν τις μετατοπίσεις ενός τυχαίου σημείου του στοιχείου με τις κομβικές. Όσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός του πολυωνύμου τόσο πιο ακριβής είναι η λύση. Γίνεται υπολογισμός του μητρώου δυσκαμψίας του κάθε στοιχείου με την αρχή των δυνατών έργων. Το συγκεκριμένο μητρώο δίνεται από τον τύπο: $k^e = \int_{V^e} B^{\mathrm{T}} \cdot D \cdot B dV$, με **B** το μητρώο αντιστοιχίας μεταξύ τοπικού και ολικού συστήματος συντεταγμένων, **D** το μητρώο ελαστικότητας και **e** το κάθε στοιχείο. Έπεται η σύνθεση του ολικού μητρώου δυσκαμψίας **K**, ο υπολογισμός των μητρώων μάζας **M** και εξωτερικών δυνάμεων **F** [13]. Η μορφή της προς επίλυση εξίσωσης είναι:

$$\delta u^{\mathrm{T}} \cdot \left[M \cdot \ddot{u} + K \cdot u \right] = F$$

3.1.2 Δοκός (Beam) ως πεπερασμένο στοιχείο

Για το στοιχείο της δοκού γίνονται οι παρακάτω παραδοχές [14]:

1) Η διατομή της δοκού έχει ένα άξονα συμμετρίας που περιέχεται στο επίπεδο της φόρτισης,
2) όλα τα φορτία ενεργούν κάθετα στον άξονα της δοκού και βρίσκονται μέσα στο επίπεδο φόρτισης στον οποίο περιέχεται ο άξονας συμμετρίας της δοκού,
3) κάθε διατομή επίπεδη και κάθετη στον άξονα της δοκού πριν την παραμόρφωση παραμένει επίπεδη και κάθετη μετά την παραμόρφωση,
4) οι αναπτυσσόμενες τάσεις είναι μικρότερες από το όριο αναλογίας του υλικού και
5) οι παραμορφώσεις είναι μικρές.

Από τη θεωρία της δοκού για ισότροπο υλικό ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

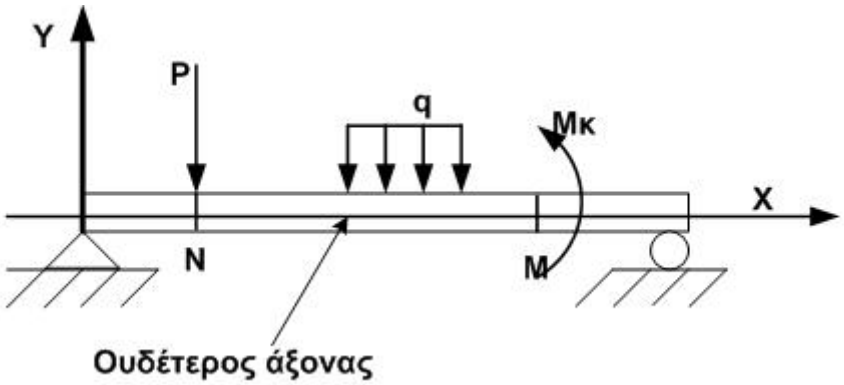
$$\sigma = \mathrm{E}\varepsilon \qquad (1)$$

$$\sigma = \frac{\mathrm{M}}{\mathrm{I}} y \qquad (2)$$

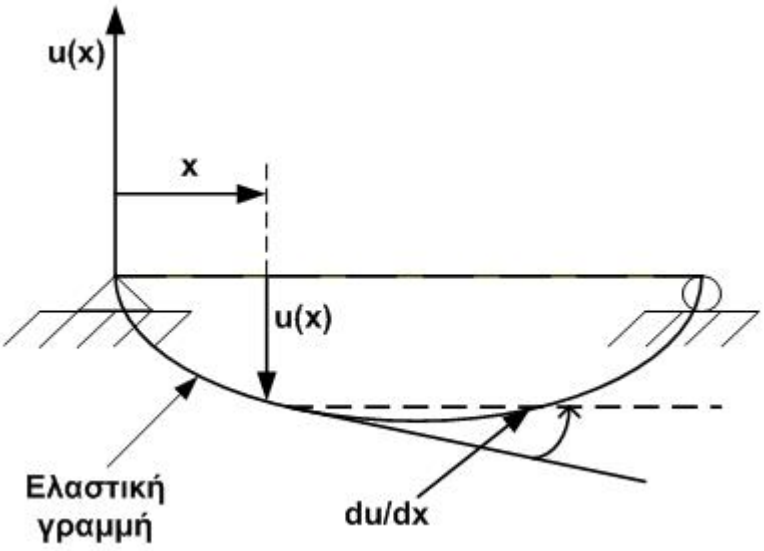
$$\frac{d^2\upsilon}{dx^2} = -\frac{\mathrm{M}}{\mathrm{EI}} \text{ Εξίσωση ελαστικής γραμμής} \qquad (3)$$

όπου: υ είναι το βέλος κάμψης ή κατακόρυφη μετατόπιση ενός σημείου της ελαστικής γραμμής. Ο ουδέτερος άξονας περνά από το κέντρο βάρους της διατομής.
Μ είναι η καμπτική ροπή
Ε είναι το μέτρο ελαστικότητας
$\mathrm{I} = \mathrm{I}_z$ είναι η ροπή αδρανείας της διατομής ως προς τον άξονα z που είναι και η ουδέτερη γραμμή
σ είναι η ορθή τάση
y είναι η απόσταση από την ουδέτερη γραμμή
ε είναι η παραμόρφωση
Ελαστική γραμμή ονομάζεται ο ουδέτερος άξονας της δοκού μετά την παραμόρφωσή της.

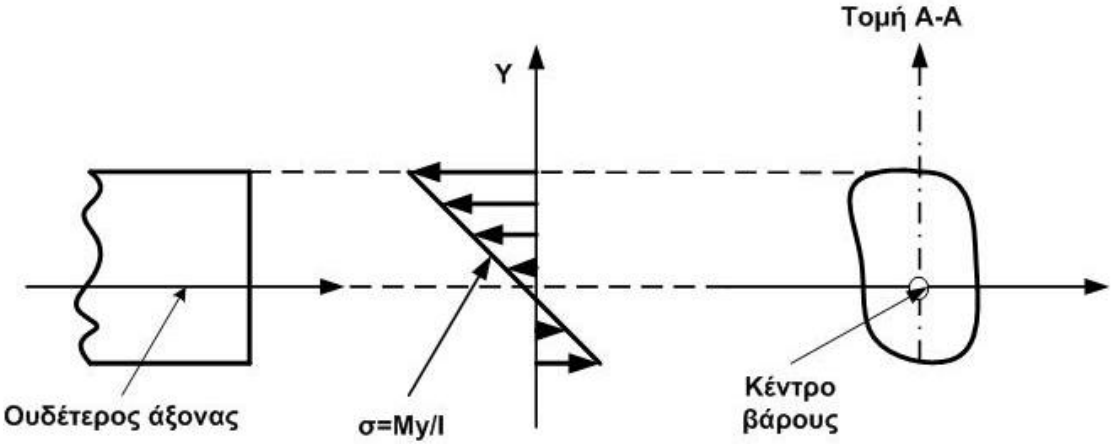
Στα σχήματα 3.1, 3.2 και 3.3 παρουσιάζονται τα φορτία που μπορεί να παραλάβει η δοκός, η ελαστική γραμμή και η κατανομή των τάσεων.



Σχήμα 3.40: Φορτία δοκού



Σχήμα 3.41: Ελαστική γραμμή δοκού

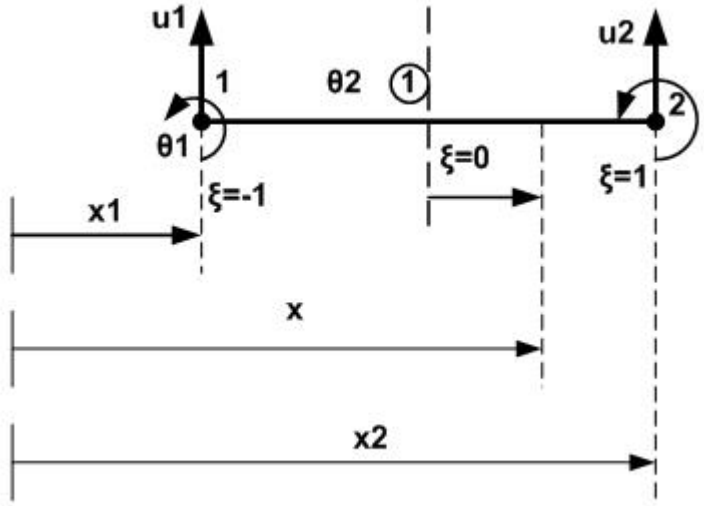


Σχήμα 3.42: Κατανομή τάσεων στη δοκό

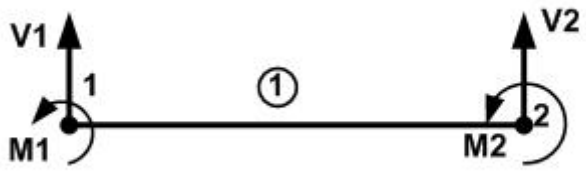
3.1.2.1 Υπολογισμός του μητρώου δυσκαμψίας του πεπερασμένου στοιχείου

Το πεπερασμένο στοιχείο της δοκού αποτελείται από δύο κόμβους, σχήμα 3.4. Ο κάθε κόμβος έχει δύο βαθμούς ελευθερίας, το βέλος κάμψης ή την κατακόρυφη μετατόπιση u και τη στροφή du/dx.

Λόγω της παραδοχής ότι οι παραμορφώσεις της δοκού είναι μικρές θεωρείται ότι η κλίση du/dx είναι ίση με την στροφή θ, δηλαδή: du/dx = θ. Το στοιχείο έχει συνολικά τέσσερεις βαθμούς ελευθερίας, σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.43: Κομβικές μετατοπίσεις και στροφές στο στοιχείο 1



Σχήμα 3.44: Κομβικές δυνάμεις και ροπές στο στοιχείο 1

Το διάνυσμα των κομβικών μετατοπίσεων είναι:

$$d = \begin{Bmatrix} u1 \\ \theta 1 \\ u2 \\ \theta 2 \end{Bmatrix} \tag{4}$$

και το διάνυσμα των κομβικών δυνάμεων είναι:

$$F = \begin{Bmatrix} V1 \\ \mathrm{M}1 \\ V2 \\ \mathrm{M}2 \end{Bmatrix} \tag{5}$$

Στη συνέχεια ορίζονται τις συναρτήσεις μορφής ή συναρτήσεις παρεμβολής, που είναι πολυώνυμο τρίτου βαθμού της μορφής:

$$\mathrm{N}_i = a_i + b_i \cdot \xi + c_i \cdot \xi^2 + d_i \cdot \xi^3 \text{ για i = 1, 2 ,3 ,4.} \tag{6}$$

Οι σταθερές a_i, b_i, c_i, και d_i για i = 1, 2 ,3 ,4 θα ορισθούν παρακάτω. Η παράγωγος του N_i ως προς ξ είναι:

$$\frac{dN_i}{d\xi} = b_i + 2c_i \cdot \xi + 3d_i \cdot \xi^2 \tag{7}$$

Το βέλος u σε ένα τυχαίο ξ του στοιχείου 1-2, ορίζεται με την χρήση των συντεταγμένων μορφής:

$$u(\xi) = N_1 \cdot u_1 + N_2 \left(\frac{du}{d\xi}\right)_1 + N_3 \cdot u_2 + \mathrm{N}_4 \left(\frac{du}{d\xi}\right)_2 \tag{8}$$

Η παράγωγος της παραπάνω σχέσης ως προς ξ είναι:

$$\frac{du}{d\xi} = N_{1,\xi} \cdot u_1 + N_{2,\xi} \cdot \left(\frac{du}{d\xi}\right)_1 + N_{3,\xi} \cdot u_2 + N_{4,\xi} \cdot \left(\frac{du}{d\xi}\right) \tag{9}$$

Από τις εξισώσεις 8 και 9 προκύπτει ένα σύστημα εξισώσεων 16x16 με αγνώστους τους συντελεστές a_i, b_i, c_i, και d_i για i = 1, 2 ,3 ,4. Από τη λύση του συστήματος και με αντικατάσταση των συντελεστών στη σχέση 6 οι συναρτήσεις μορφής γίνονται:

$$\left.\begin{aligned} N_1 &= \frac{1}{4}(1-\xi)^2 \cdot (1+\xi) \\ N_2 &= \frac{1}{4}(1-\xi)^2 \cdot (\xi+1) \\ N_3 &= \frac{1}{4}(1+\xi)^2 \cdot (2-\xi) \\ N_4 &= \frac{1}{4}(1+\xi)^2 \cdot (\xi-1) \end{aligned}\right\} \tag{10}$$

Η σχέση καρτεσιανής συντεταγμένης x και φυσικής συντεταγμένης ξ η οποία $-1 \le \xi \le 1$, είναι: $x = \frac{x_1 + x_2}{2} + \frac{L}{2}\xi$, όπου L είναι το μήκος του πεπερασμένου στοιχείου. Ύστερα από παραγώγιση της προηγούμενης σχέσης ως προς ξ προκύπτει $\frac{dx}{d\xi} = \frac{L}{2}$. Επίσης ισχύει:

$$\frac{du}{d\xi} = \frac{\mathrm{du}}{\mathrm{dx}}\frac{dx}{d\xi} = \frac{du}{dx}\frac{L}{2} = \theta\frac{L}{2}, \text{ όπου } \theta = \frac{du}{dx}. \tag{11}$$

Αντικαθιστώντας στη σχέση 8 όπου $\frac{du}{d\xi} = \theta \frac{L}{2}$ προκύπτει:

$$u = \underbrace{\begin{bmatrix} N_1 & \frac{L}{2}N_2 & N_3 & \frac{L}{2}N_4 \end{bmatrix}}_{N} \underbrace{\begin{Bmatrix} u_1 \\ \theta_1 \\ u_2 \\ \theta_2 \end{Bmatrix}}_{d} = N \cdot \mathrm{d} \tag{12}$$

Η ολική ενέργεια παραμόρφωσης δίνεται από τον τύπο:

$$U = \frac{1}{2} EI \int \left(\frac{d^2 u}{d\mathrm{x}^2} \right)^2 dx \tag{13}$$

Από τη σχέση 11 και με παραγώγιση ως προς ξ προκύπτει τελικά:

$$\frac{d^2 u}{d\xi^2} = \frac{L^2}{4} \frac{d^2 u}{dx^2} \Rightarrow \frac{d^2 u}{dx^2} = \frac{4}{L^2} \frac{d^2 N}{d\xi^2} d \tag{14}$$

Τελικά η σχέση 13 μέσω της σχέσης 14 γίνεται: $U = \frac{1}{2} d^{\mathrm{T}} k \mathrm{d}$, όπου k είναι το μητρώο δυσκαμψίας του πεπερασμένου στοιχείου στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων. Μετά την ολοκλήρωση γίνεται τελικά:

$$k = \frac{EI}{L^3} \begin{bmatrix} 12 & 6L & -12 & 6L \\ 6L & 4L^2 & -6L & 2L^2 \\ -12 & -6L & 12 & -6L \\ 6L & 2L^2 & -6L & 4L^2 \end{bmatrix}$$

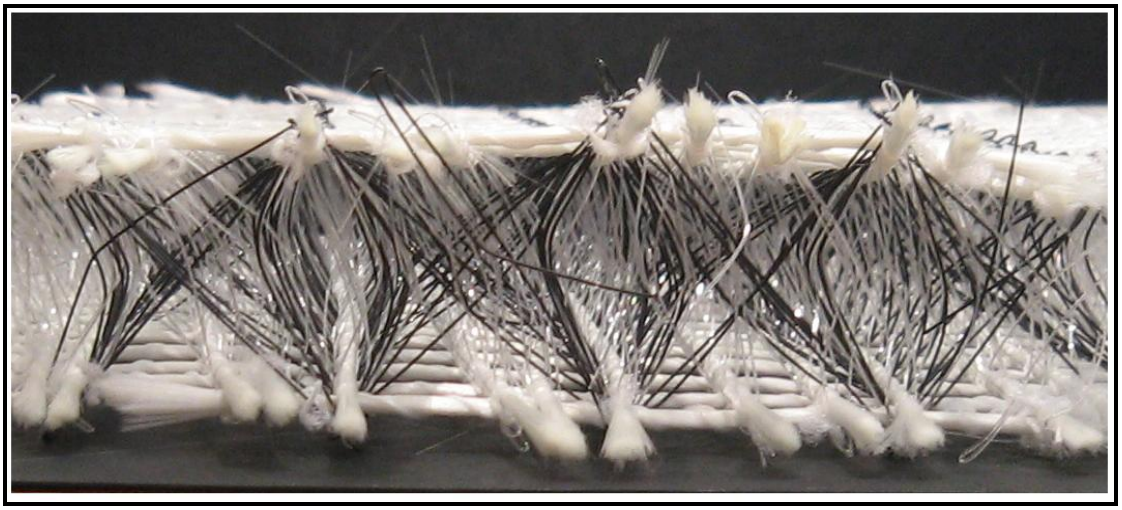
, το οποίο είναι συμμετρικό ως προς την κύρια διαγώνιο και είναι διαστάσεων 4x4 [15].

3.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΗΣ ΕΠΑΝΑΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΗΣ ΔΟΜΙΚΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ

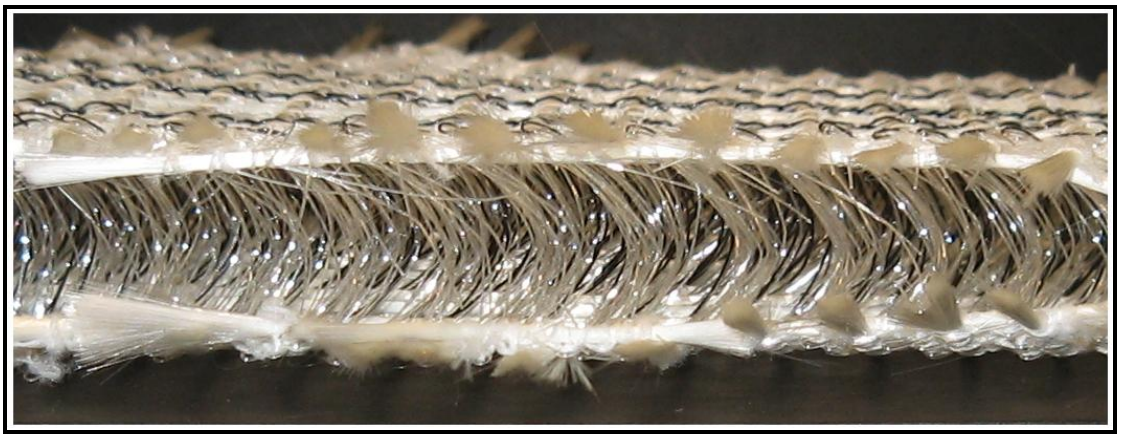
Απαραίτητα στοιχεία για την επιτυχή προσομοίωση δοκιμής συμπίεσης ενός δείγματος αποτελούν η ακριβής απόδοση της γεωμετρίας και των ιδιοτήτων του υλικού του δείγματος καθώς και η ρεαλιστική απόδοση των συνθηκών της δοκιμής (επιλογή οριακών συνθηκών). Όσον αφορά στις οριακές συνθήκες η εφαρμογή τους εξαρτάται άμεσα από το τμήμα της

δομής που επιλέγεται για μοντελοποίηση, το οποίο πιθανόν να αντιστοιχεί στην συνολική δομή ή τμήμα αυτής (πχ επαναλαμβανόμενη δομική μονάδα).

Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο το δείγμα που μελετάται ανήκει στην κατηγορία των υφασμάτων διατήρησης απόστασης (spacer fabrics) και αποτελείται από δύο εξωτερικές επιφάνειες υφασμάτων οι οποίες συνδέονται μεταξύ τους με κατάλληλο πλέξιμο μονόινων νημάτων (spacer yarns). Στο εσωτερικό στρώμα έχουν χρησιμοποιηθεί νήματα δύο τύπων (spacer yarn1 και spacer yarn2) τα οποία διαφέρουν ως προς το υλικό και τη διάμετρο. Η κάθε επιφάνεια υφάσματος αποτελείται από στημόνια και υφάδια τα οποία έχουν εισαχθεί με κατάλληλη μέθοδο ώστε να συνδεθούν σχηματίζοντας δίχτυ. Η προσομοίωση της δοκιμής της συμπίεσης πραγματοποιήθηκε στη δομική μονάδα του δείγματος με σκοπό τη μείωση του υπολογιστικού κόστους. Στα σχήματα 3.6 και 3.7 που ακολουθούν παρουσιάζεται το υπό εξέταση δείγμα σε εμπρόσθια και πλάγια όψη.



Σχήμα 3.45: Το υπό εξέταση δείγμα σε εμπρόσθια όψη

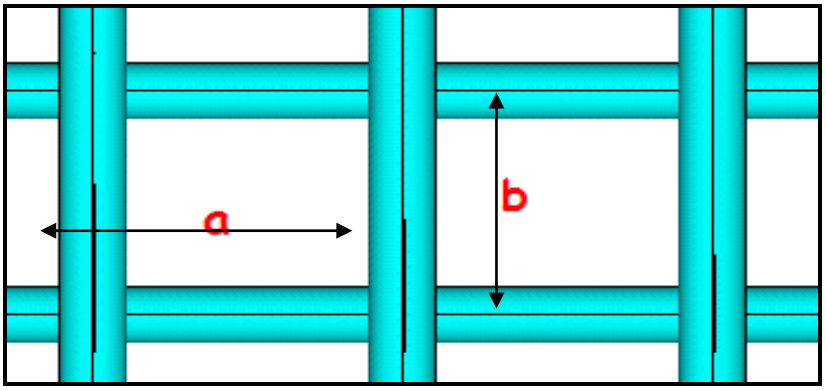


Σχήμα 3.46: Το υπό εξέταση δείγμα σε πλάγια όψη

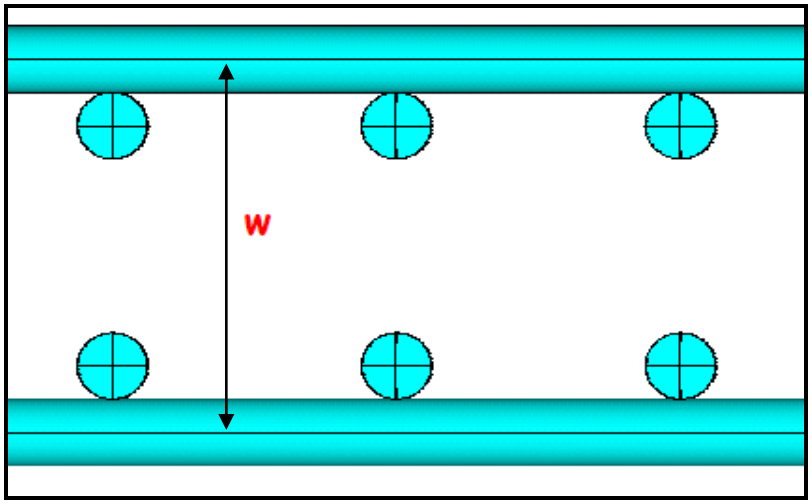
Για την γεωμετρική απεικόνιση χρησιμοποιήθηκαν οι εξής σχεδιαστικές παράμετροι:

- **a**: η απόσταση των αξόνων μεταξύ δύο στημονιών
- **b**: η απόσταση των αξόνων μεταξύ δύο υφαδιών και
- **w**: το πάχος του δείγματος, το οποίο μετράται από τους άξονες των νημάτων της πάνω και της κάτω επιφάνειας.

Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται η προαναφερθείσες αποστάσεις.



Σχήμα 3.47: Σχεδιαστικές παράμετροι a και b



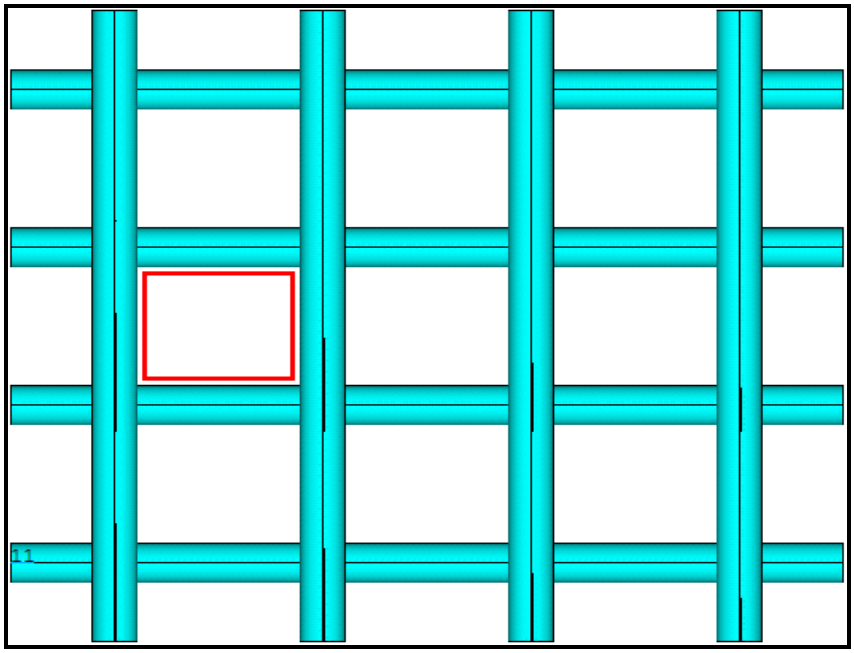
Σχήμα 3.48: Σχεδιαστική παράμετρο w

Οι τιμές των συγκεκριμένων μεγεθών καθώς και των ακτινών των στημονιών και των υφαδιών των εξωτερικών επιφανειών του υφάσματος και των εσωτερικών μονόινων νημάτων είναι:

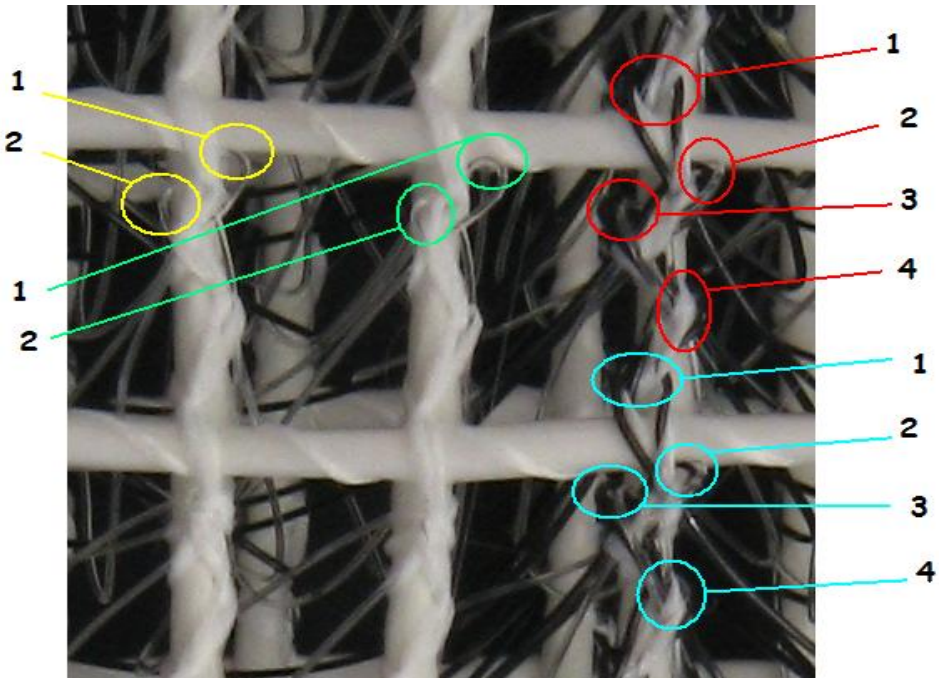
- **a = 8.33 mm**
- **b = 10 mm**
- **w = 19 mm**
- **r = 1 mm**
- **r_1 = 0.15 mm**
- **r_2 = 0.125 mm**

όπου r είναι η ακτίνα των στημονιών και των υφαδιών, r_1 είναι η ακτίνα των μονόινων νημάτων 1 (spacer yarn2) και r_2 είναι η ακτίνα των μονόινων νημάτων 2 (spacer yarn1).

Για τον καθορισμό των σημείων πρόσδεσης των εσωτερικών μονόινων νημάτων στις εξωτερικές επιφάνειες του υφάσματος σημειώνονται τα παρακάτω: παρατηρήθηκε πως οι εσωτερικές ίνες του δείγματος δεν πλέκονται μόνο στα σημεία επαφής των στημονιών και των υφαδιών των δύο εξωτερικών επιφανειών αλλά και σε ενδιάμεσα σημεία των υφαδιών. Πιο συγκεκριμένα ανάμεσα σε δύο υφάδια πλέκονται τέσσερα spacer νήματα 2 και δύο spacer νήματα 1. Επίσης είναι εμφανές πως η πλέξη των εσωτερικών νημάτων γίνεται εναλλάξ με αντίθετες κατευθύνσεις. Αν ορισθεί ως κελί το ορθογώνιο που σχηματίζεται από δύο υφάδια και δύο στημόνια τότε τα εσωτερικά νήματα πλέκονται εναλλάξ μέσα και έξω από το κελί. Στις επόμενες εικόνες φαίνεται γραφικά τι ορίζεται με τον όρο κελί και ο τρόπος πλέξης των εσωτερικών νημάτων αντίστοιχα.

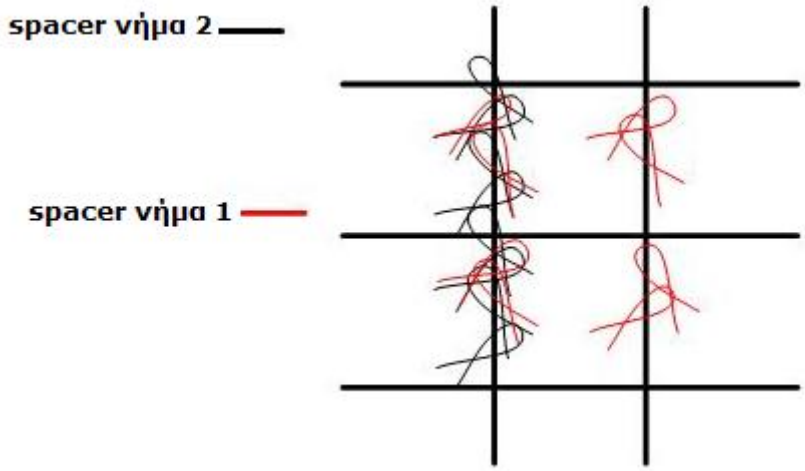


Σχήμα 3.49: Ορισμός κελιού



Σχήμα 3.50: Τρόπος πλέξης εσωτερικών νημάτων

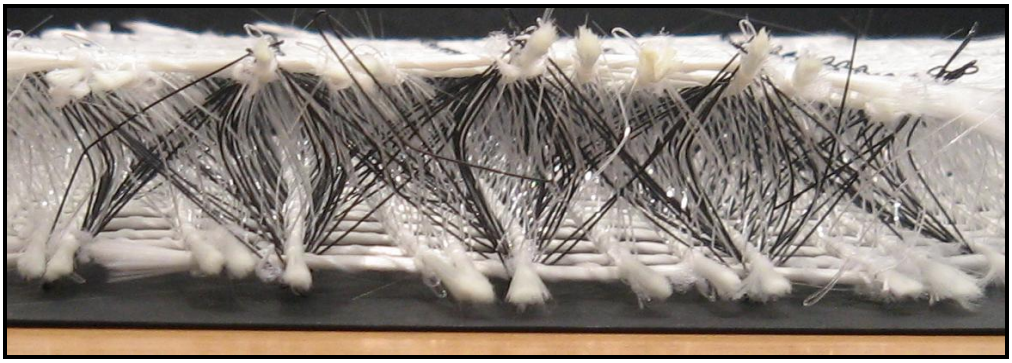
Σύμφωνα με όλα τα προηγούμενα για μεγαλύτερη διευκόλυνση στη μοντελοποίηση της δομικής μονάδας θεωρούμε πως η απόσταση ανάμεσα σε δύο υφάδια χωρίζεται σε τέσσερα ίσα μέρη. Σχηματικά για το spacer νήμα 1 και το spacer νήμα 2 είναι:



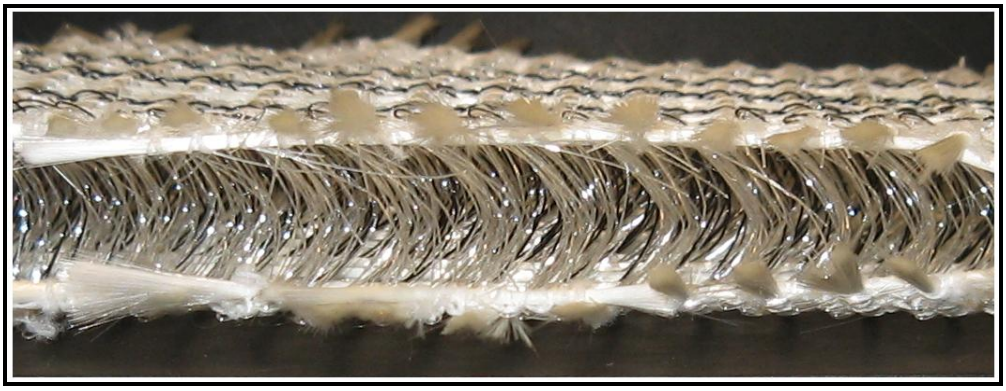
Σχήμα 3.51: Σχηματική απεικόνιση του τρόπου πλέξης των εσωτερικών νημάτων

Η δομική μονάδα προκύπτει από τον τρόπο που πλέκονται τα εσωτερικά νήματα στο δείγμα. Η επαναλαμβανόμενη πλέξη των νημάτων υπάρχει σε δύο επίπεδα.

Παρακάτω παρουσιάζονται δύο εικόνες του δείγματος σε κάθε ένα από τα επίπεδα όπου παρατηρείται επαναλαμβανόμενο βήμα στην πλέξη.



Σχήμα 3.52: Επαναλαμβανόμενη πλέξη κατά το επίπεδο x-z



Σχήμα 3.53: Επαναλαμβανόμενη πλέξη κατά το επίπεδο y-z

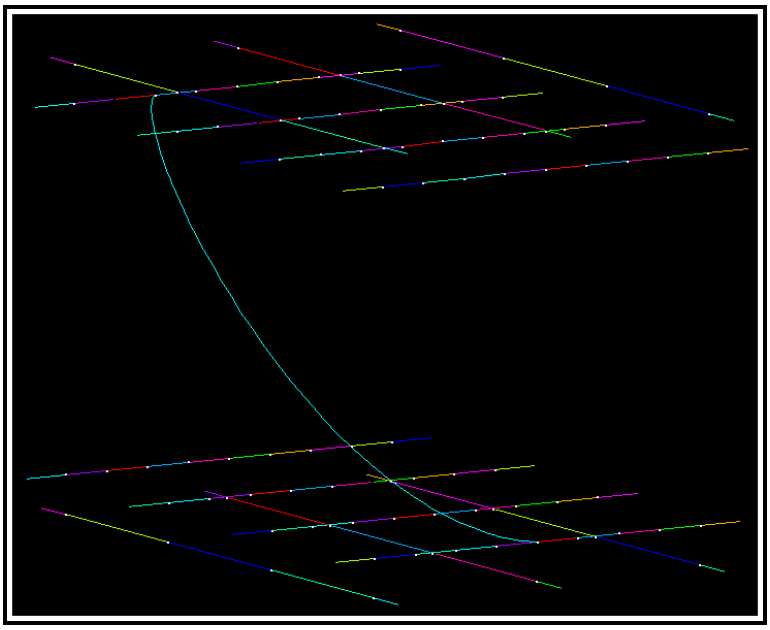
Στο σχήμα 3.13 φαίνεται ότι υπάρχουν τρεις ομάδες ινών με βάση τη γεωμετρία και το υλικό :

- spacer νήμα 2 σε διαμόρφωση "x"
- spacer νήμα 2 σε διαμόρφωση "( )" και
- spacer νήμα 1 σε διαμόρφωση "( )"

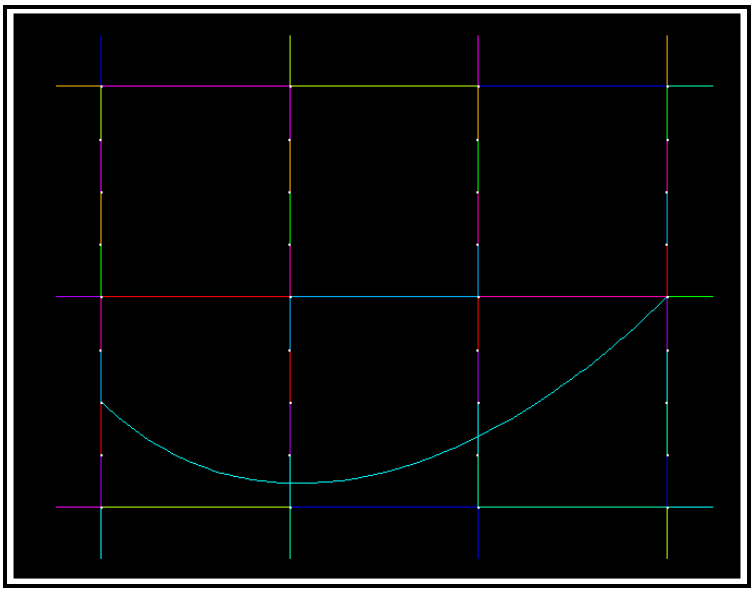
Για τον σχηματισμό των εσωτερικών νημάτων έχουν χρησιμοποιηθεί spline καθορισμένου μήκους, διανύσματος αρχής και πέρατος. Για τη δημιουργία των spline αρχικά προσδιορίστηκαν οι θέσεις των εσωτερικών νημάτων (σημείο αρχής και πέρατος). Ο προσδιορισμός των σημείων αρχής και πέρατος έγινε χωριστά για τις τρεις προαναφερθείσες ομάδες νημάτων.

Αν απομονωθεί ένα ζεύγος spacer νημάτων 2 σε διαμόρφωση "x" κατά μήκος του επιπέδου παρατηρείται πως το ένα νήμα ξεκινά από την πάνω επιφάνεια από ένα συγκεκριμένο

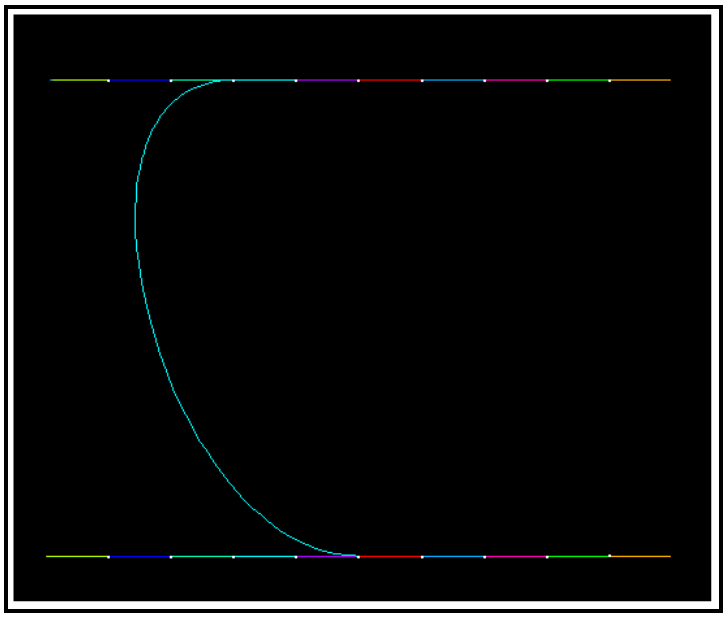
στημόνι και πλέκεται στην από κάτω επιφάνεια στο τρίτο στημόνι, μετά από το αντιδιαμετρικό στημόνι της πάνω επιφάνειας. Κατά το επίπεδο y-z η πλέξη γίνεται ως εξής: το νήμα ξεκινά από ένα σημείο της πάνω επιφάνειας υφάσματος και καταλήγει σε ένα σημείο της κάτω επιφάνειας με βήμα το ½ της απόστασης ανάμεσα σε δύο υφάδια. Στα σχήματα που έπονται φαίνεται σχηματικά η τρισδιάστατη πλέξη των εσωτερικών νημάτων με διαμόρφωση "x".



Σχήμα 3.54: Spacer νήμα 2 σε διαμόρφωση "x" στις τρεις διαστάσεις

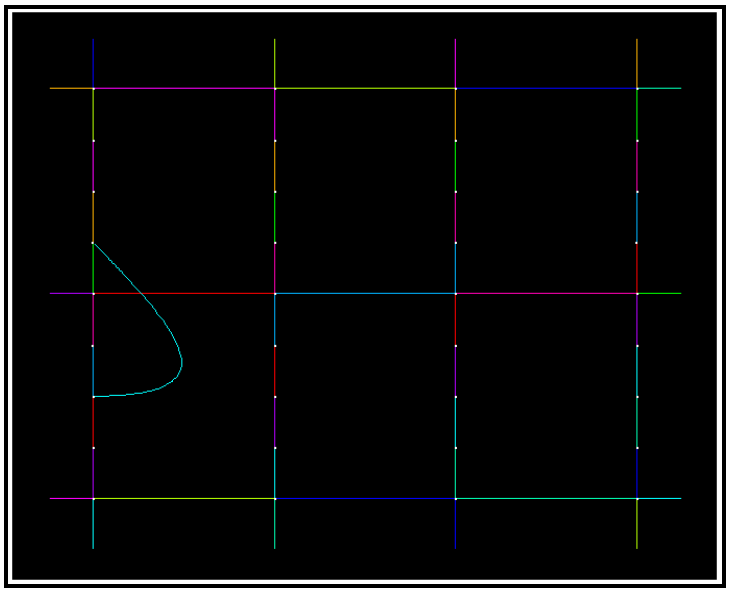


Σχήμα 3.55: Spacer νήμα 2 σε διαμόρφωση "x" στο επίπεδο x-y

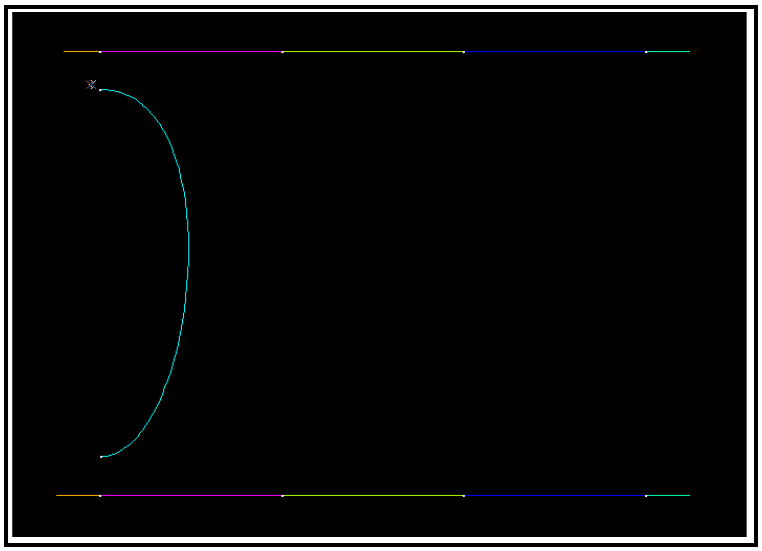


Σχήμα 3.56: Spacer νήμα 2 σε διαμόρφωση "x" στο επίπεδο y-z

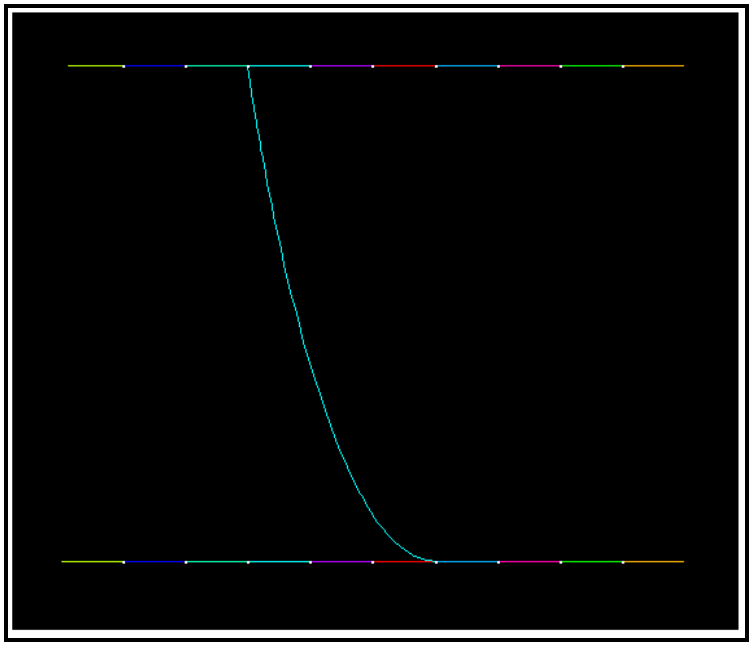
Η πλέξη των spacer νημάτων 2 που είναι σε διαμόρφωση "( )" γίνεται στο επίπεδο yz με βήμα ¾ της απόστασης μεταξύ των αξόνων δύο υφαδιών. Το νήμα ξεκινά από την πάνω επιφάνεια και καταλήγει με βήμα ¾ στην κάτω επιφάνεια. Στα spacer νήματα 2 δεν υπάρχει βήμα πλέξης κατά το επίπεδο x-z. Στα επόμενα σχήματα εικονίζεται η πλέξη ενός spacer νήματος 2 στα τρία επίπεδα.



Σχήμα 3.57: Spacer νήμα 2 σε διαμόρφωση "( )" στο επίπεδο x-y

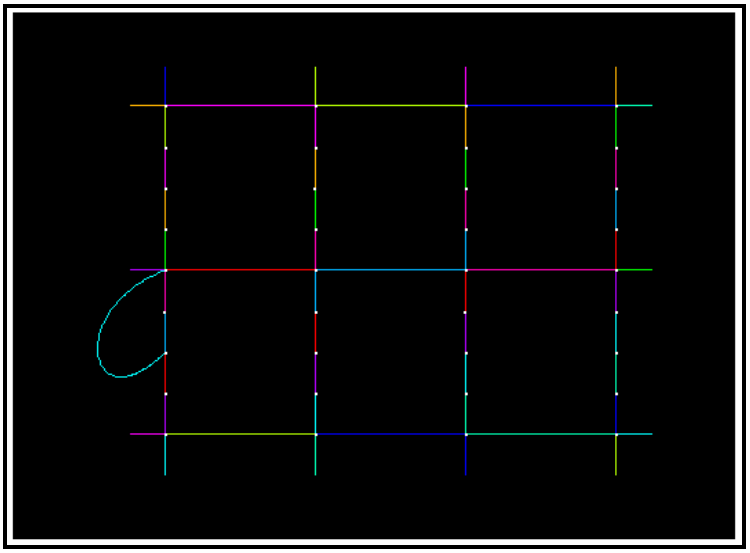


Σχήμα 3.58: Spacer νήμα 2 σε διαμόρφωση "( )" στο επίπεδο x-z

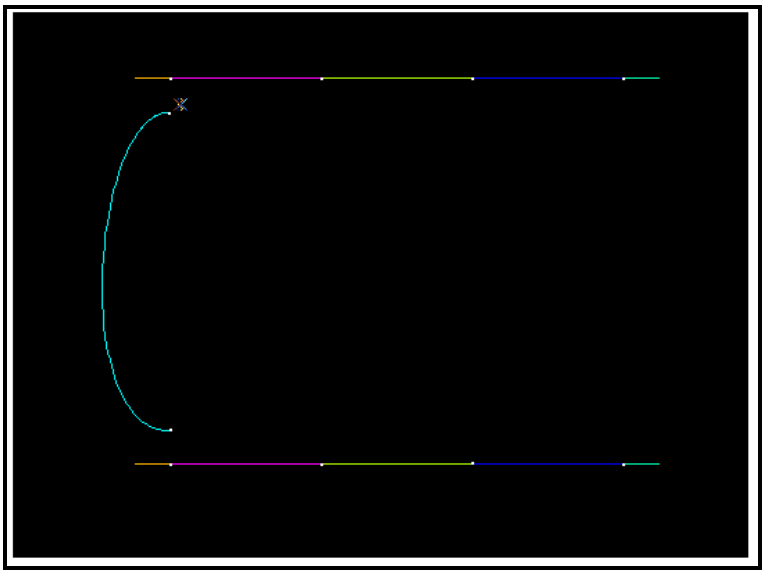


Σχήμα 3.59: Spacer νήμα 2 σε διαμόρφωση "( )" στο επίπεδο y-z

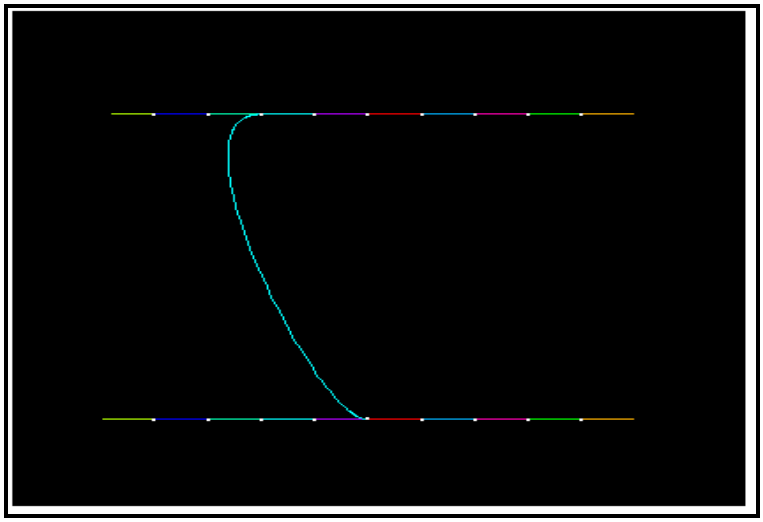
Η πλέξη των spacer νημάτων 1 σε διαμόρφωση "( )" διαφέρει από αυτή των spacer νημάτων 2 σε διαμόρφωση "( )" μόνο κατά το βήμα. Εδώ το βήμα είναι το ½ της απόστασης των αξόνων μεταξύ δύο υφαδιών. Παρακάτω παρουσιάζεται στα επίπεδα xy, xz και yz το πλέξιμο των spacer νημάτων 1 σε διαμόρφωση "( )".



Σχήμα 3.60: Spacer νήμα 1 σε διαμόρφωση "( )" στο επίπεδο x-y

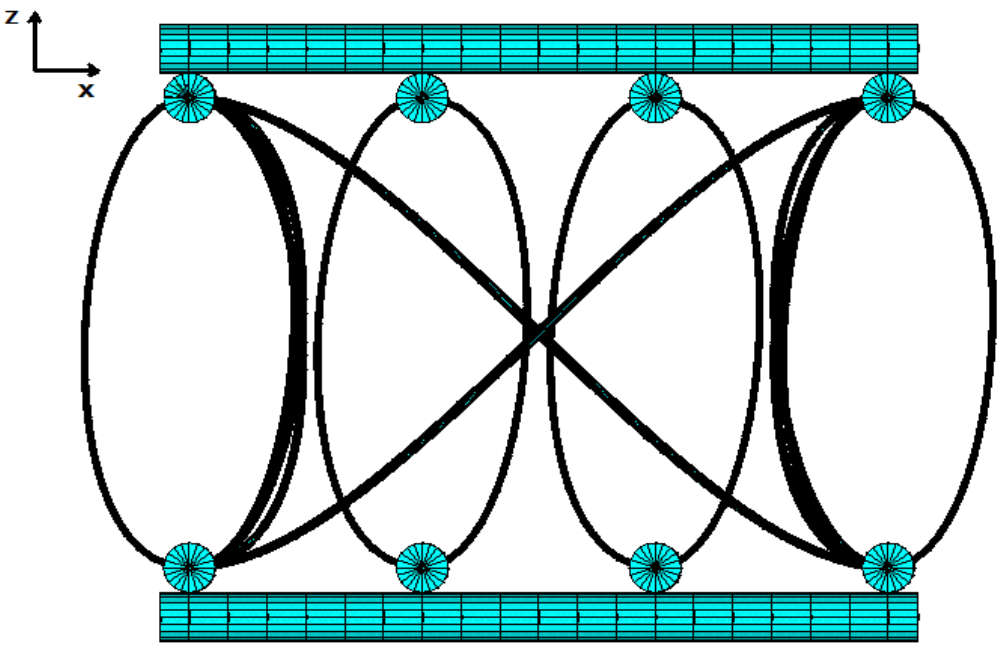


Σχήμα 3.61: Spacer νήμα 1 σε διαμόρφωση "( )" στο επίπεδο x-z



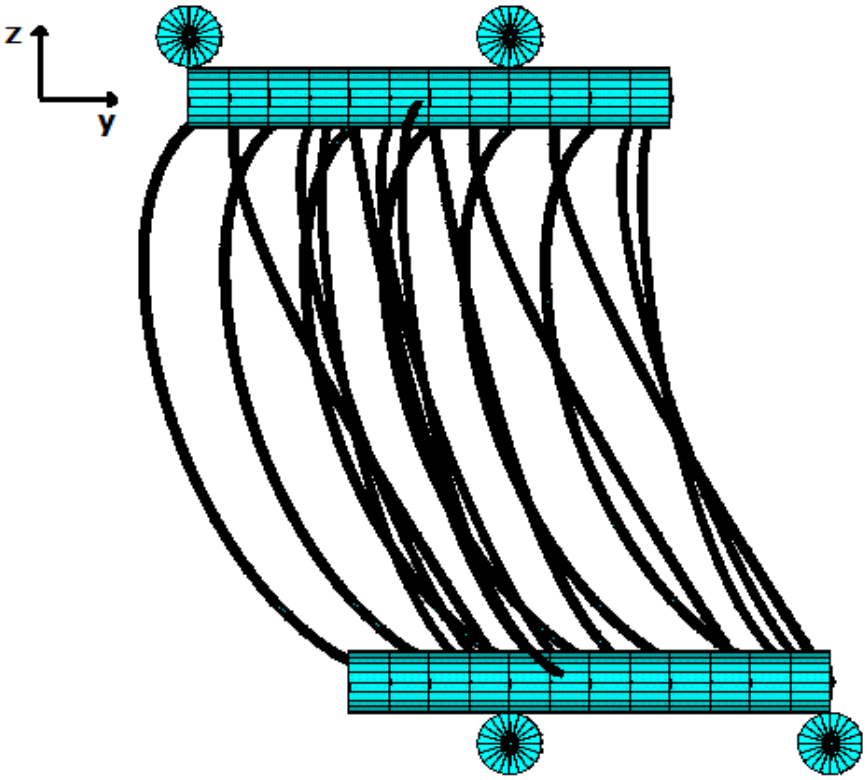
Σχήμα 3.62: Spacer νήμα 1 σε διαμόρφωση "( )" στο επίπεδο x-z

Με βάση τα προηγούμενα προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα για τη δομική μονάδα: κατά το επίπεδο x-z η εύρεσή της εξαρτάται από τα νήματα σε διαμόρφωση "x". Η δομική μονάδα στο επίπεδο x-z θα αποτελείται από ένα ζεύγος spacer νημάτων 2 σε διαμόρφωση "x", από δύο spacer νήματα 2 σε διαμόρφωση "( )", και έξι spacer νημάτων 1 σε διαμόρφωση "( )".. Στο κάτωθι σχήμα φαίνεται η δομική μονάδα κατά το επίπεδο x-z.



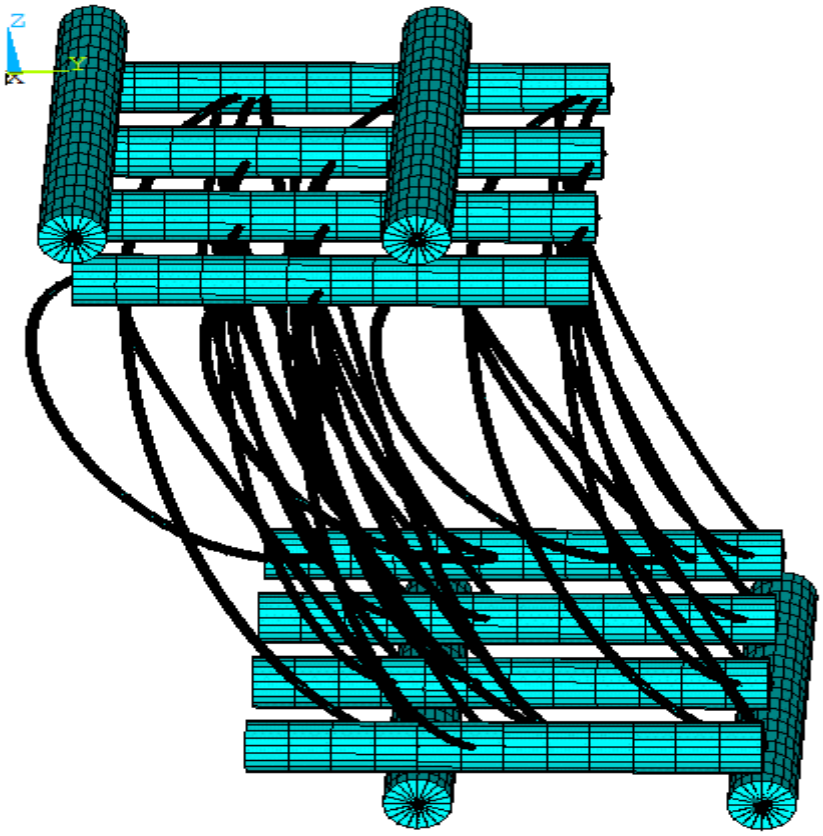
Σχήμα 3.63: Δομική μονάδα κατά το επίπεδο x-z

Όσον αφορά στο επίπεδο y-z η δομική μονάδα του προς μελέτη υφάσματος διατήρησης απόστασης αποτελείται από τρία ζεύγη spacer νημάτων 2 σε διαμόρφωση "x", έξι spacer νημάτων 2 σε διαμόρφωση "( )" και δεκαοχτώ spacer νημάτων 1 σε διαμόρφωση "( )". Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η δομική μονάδα στο επίπεδο y-z.

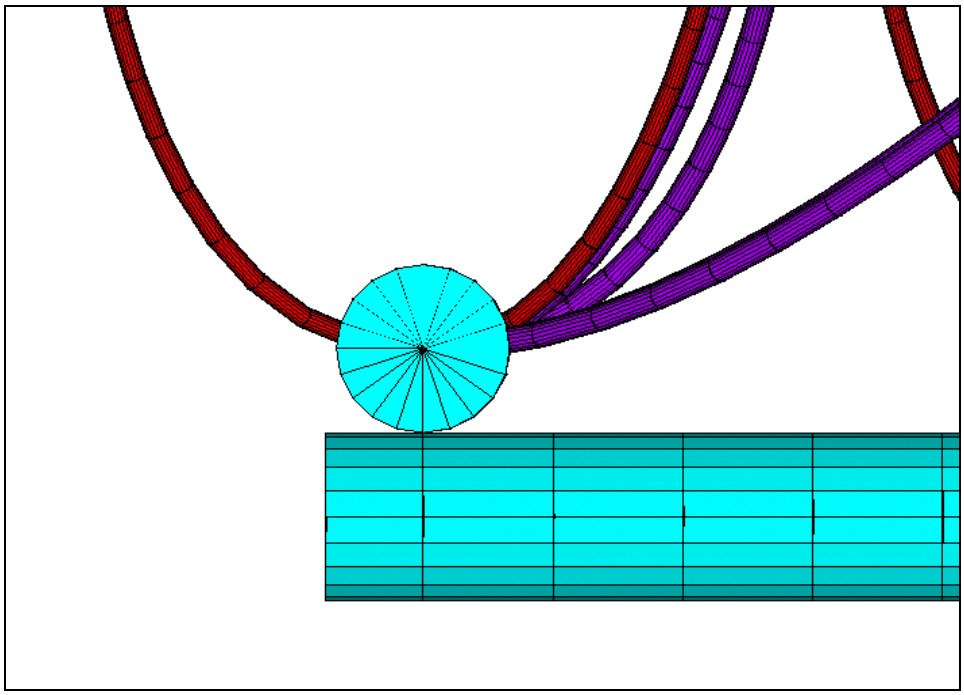


Σχήμα 3.64: Δομική μονάδα κατά το επίπεδο y-z

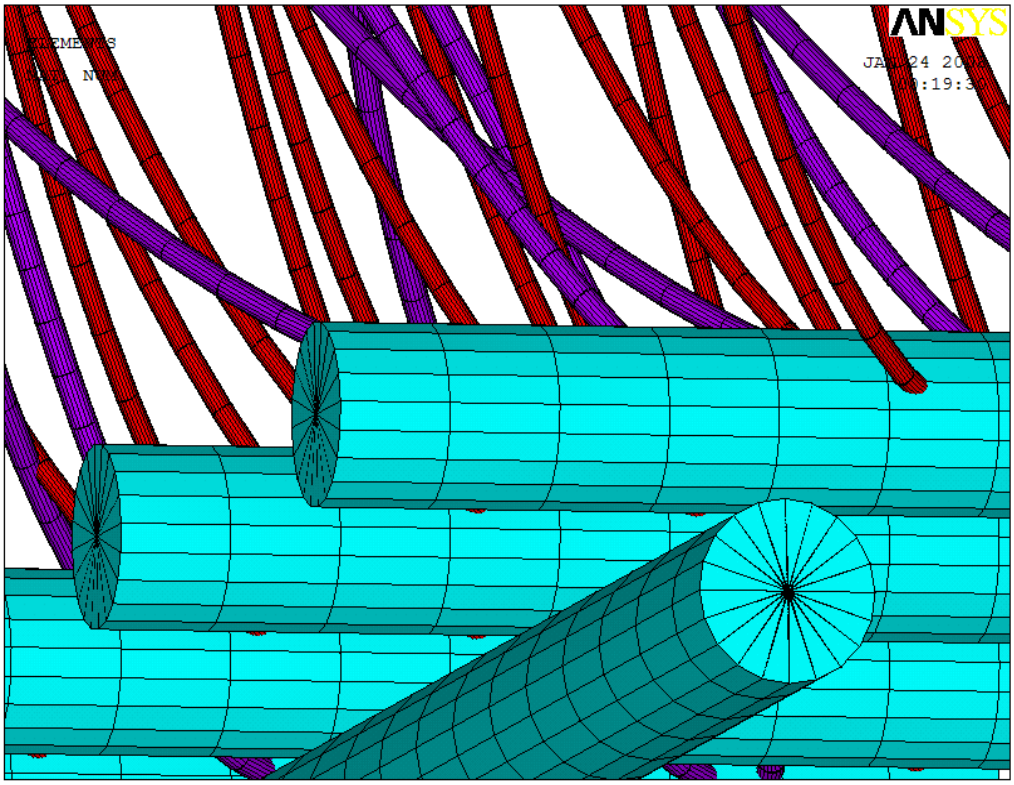
Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζεται η τελική δομική μονάδα. Στα σχήματα 3.27 και 3.28 παρουσιάζονται σε εστίαση τα εσωτερικά νήματα της δομικής μονάδας. Με κόκκινο χρώμα εικονίζονται τα νήματα 1 σε διαμόρφωση "( )" και με μωβ χρώμα εικονίζονται τα νήματα 2 σε διαμόρφωση "x" και σε διαμόρφωση "( )".



Σχήμα 3.65: Δομική μονάδα κατά το επίπεδο y-z



Σχήμα 3.66: Εσωτερικά νήματα 1 και 2 (εστίαση στο επίπεδο x-z)



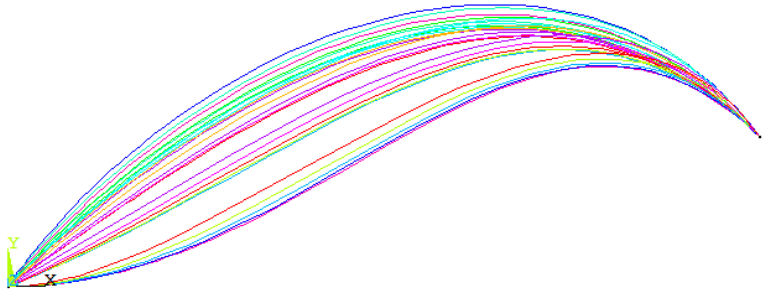
Σχήμα 3.67: Εσωτερικά νήματα 1 και 2 (εστίαση στις τρεις διαστάσεις)

3.2.1. Προσδιορισμός Της Γεωμετρίας Των Εσωτερικών Ινών

Για τον προσδιορισμό της γεωμετρίας των εσωτερικών ινών (μήκος, διάνυσμα αρχής και πέρατος) έχει ληφθεί υπόψη η παραγωγική διαδικασία του υφάσματος, για την οποία σημειώνονται τα εξής: τα εξωτερικά στρώματα κατά τη διάρκεια παραγωγής του υφάσματος βρίσκονται σε απόσταση 25 mm. Τα εσωτερικά νήματα, που πραγματοποιούν την σύνδεση των δύο επιφανειών λόγω τάνυσης, σχηματίζουν ευθύγραμμα τμήματα. Μετά την απομάκρυνση του υφάσματος από την πλεκτομηχανή η απόσταση μεταξύ των δύο επιφανειών μειώνεται στα 19 mm και οι εσωτερικές ίνες αποκτούν κεκαμένη μορφή. Επιπλέον για την παρατήρηση και τη διαμόρφωση τους σε ελεύθερη κατάσταση, κόπηκαν ενδεικτικά εσωτερικές ίνες και απομακρύνθηκαν από το δείγμα. Από την εξέταση τους δεν διαπιστώθηκε αλλαγή της γεωμετρίας τους. Προκύπτει το συμπέρασμα πως το υπό εξέταση δείγμα δεν εμφανίζει παραμένουσες τάσεις, αλλά μόνο παραμένουσες παραμορφώσεις στα εσωτερικά νήματα.

Σύμφωνα με τα παραπάνω η πορεία που ακολουθήθηκε για τον προσδιορισμό της γεωμετρίας των εσωτερικών νημάτων είναι η ακόλουθη. Για τις δεδομένες θέσεις αρχής και πέρατος των ινών (στο επίπεδο του υφάσματος) και αρχική απόσταση εξωτερικών στρωμάτων 25 mm υπολογίστηκαν τα μήκη των νημάτων ls ως ευθύγραμμα τμήματα. Στη

συνέχεια δημιουργήθηκαν όλα spline μήκους ls για τις δεδομένες θέσεις κατά το επίπεδο του υφάσματος και απόσταση εξωτερικών επιφανειών 19 mm. Για την δημιουργία των spline καθορίστηκε διάνυσμα αρχής και πέρατος. Στα ακόλουθα σχήματα φαίνονται όλα τα spline μήκους ls 35.7 mm, 25 mm και 24 mm για το νήμα με διαμόρφωση "x", το νήμα 2 με διαμόρφωση "( )" και το νήμα 1 με διαμόρφωση "( )" αντίστοιχα. Στα σχήματα 3.29, 3.30 και 3.31 εικονίζονται όλα τα spline που προέκυψαν για δεδομένο μήκος ls των νημάτων 2 με διαμόρφωση "x", των νημάτων 2 με διαμόρφωση "( )" και των νημάτων 1 με διαμόρφωση "( )" αντίστοιχα.



Σχήμα 3.68: Σύνολο spacer νημάτων 2 με διαμόρφωση "x" με πραγματικό μήκος

Σχήμα 3.69: Σύνολο spacer νημάτων 2 με διαμόρφωση "( )" με πραγματικό μήκος

Σχήμα 3.70: Σύνολο spacer νημάτων 1 με διαμόρφωση "( )"
με πραγματικό μήκος

Το εύρος τιμών των γωνιών των νημάτων 2 και νημάτων 1 με διαμόρφωση "( )" είναι 0 – 90° και για τις δύο γωνίες. Για την ομάδα των νημάτων 2 σε διαμόρφωση "x" το εύρος για την γωνία στο επίπεδο y-z είναι ίδιο με το προηγούμενο, ενώ για τη γωνία στο επίπεδο x-z το εύρος είναι 0 – 45°.

Τα spline που προέκυψαν, αποτέλεσαν στη συνέχεια την υπό εξέταση γεωμετρία σε δοκιμή συμπίεσης. Για το σκοπό αυτό, τους προσδόθηκαν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και οι ελαστικές ιδιότητες των αντίστοιχων νημάτων και υποβλήθηκαν σε δοκιμή όμοια με αυτήν που υπόκεινται ως εσωτερικές ίνες του υφάσματος διατήρησης απόστασης σε δοκιμή συμπίεσης. Η δοκιμή της συμπίεσης έγινε με την επιβολή φορτιού, το οποίο για τα νήματα τύπου 2 σε διαμόρφωση "x" είναι 0,0005 N και για τα νήματα τύπου 1 και 2 με διαμόρφωση "( )" είναι 0,002 N. Η διαφορά στην τιμή των φορτίων υπάρχει λόγω, της γεωμετρίας των νημάτων. Τα νήματα σε διαμόρφωση "x" είναι λιγότερο δύσκαμπτα από αυτά με διαμόρφωση "( )", επομένως χρειάζεται μικρότερη δύναμη για να τα κάμψει απ' ότι τα νήματα με διαμόρφωση "x". Στους πίνακες 3.1, 3.2 και 3.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Πίνακας 3.1: Αποτελέσματα προσομοίωσης δοκιμής συμπίεσης νημάτων 2 με διαμόρφωση "x"

	Spacer νήμα 2 με διαμόρφωση "x"				
Αριθμός Γραμμής	**Φορτίο P (N)**	**Βέλος Κάμψης Dz (mm)**	**Παραμόρφωση dz/dis**	**Γωνία xz (rad)**	**Γωνία yz (rad)**
1	0,0005	2,678	0,1409	0	0
6	0,0005	2,738	0,1441	0,196	0
11	0,0005	2,937	0,1546	0,392	0
16	0,0005	3,320	0,1747	0,589	0
21	0,0005	3,954	0,2080	0,785	0
22	0,0005	3,311	0,1743	0,785	0,392
Μέση Τιμή			0,1661		
Τυπική απόκλιση			0,0251		

Πίνακας 3.2: Αποτελέσματα προσομοίωσης δοκιμής συμπίεσης νημάτων 2 με διαμόρφωση "( )"

	Spacer νήμα 2 με διαμόρφωση "( )"				
Αριθμός Γραμμής	**Φορτίο P (N)**	**Βέλος Κάμψης Dz (mm)**	**Παραμόρφωση dz/dis**	**Γωνία xz (rad)**	**Γωνία yz (rad)**
1	0,002	2,134	0,1123	0	0
2	0,002	2,142	0,1127	0	0,392
3	0,002	2,159	0,1136	0	0,785
4	0,002	2,146	0,1129	0	1,178
5	0,002	2,009	0,1057	0	1,570
6	0,002	2,128	0,1120	0,392	0
7	0,002	2,032	0,1069	0,392	0,392
11	0,002	2,094	0,1120	0,785	0
16	0,002	2,037	0,1072	1,178	0
21	0,002	2,002	0,1053	1,570	0
Μέση Τιμή			0,1010		
Τυπική απόκλιση			0,0033		

Πίνακας 3.3: Αποτελέσματα προσομοίωσης δοκιμής συμπίεσης 1 νημάτων με διαμόρφωση "( )"

	Spacer νήμα 1 με διαμόρφωση "( )"				
Αριθμός Γραμμής	**Φορτίο P (N)**	**Βέλος Κάμψης Dz (mm)**	**Παραμόρφωση dz/dis**	**Γωνία xz (rad)**	**Γωνία yz (rad)**
1	0,002	2,706	0,1424	0	0
2	0,002	2,711	0,1427	0	0,392
3	0,002	2,715	0,1429	0	0,785
4	0,002	2,667	0,1404	0	1,178
5	0,002	2,469	0,1299	0	1,570
6	0,002	2,704	0,1423	0,392	0
7	0,002	2,606	0,1372	0,392	0,392
8	0,002	2,480	0,1305	0,392	0,785
11	0,002	2,680	0,1414	0,785	0
12	0,002	2,434	0,1281	0,785	0,392
16	0,002	2,654	0,1397	1,178	0
21	0,002	2,635	0,1387	1,570	0
Μέση Τιμή			0,1380		
Τυπική απόκλιση			0,0054		

Η απόκλιση των τιμών της παραμόρφωσης για κάθε μία ομάδα νημάτων έτσι όπως παρουσιάζονται στους παραπάνω πίνακες είναι αντίστοιχα 15%, 3% και 4%. Έτσι επιλέχθηκε μία γωνία που αντιστοιχεί σε μέση τιμή παραμόρφωσης για κάθε ομάδα νημάτων, με σκοπό την μείωση του σφάλματος.

3.3. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΝΗΜΑΤΩΝ

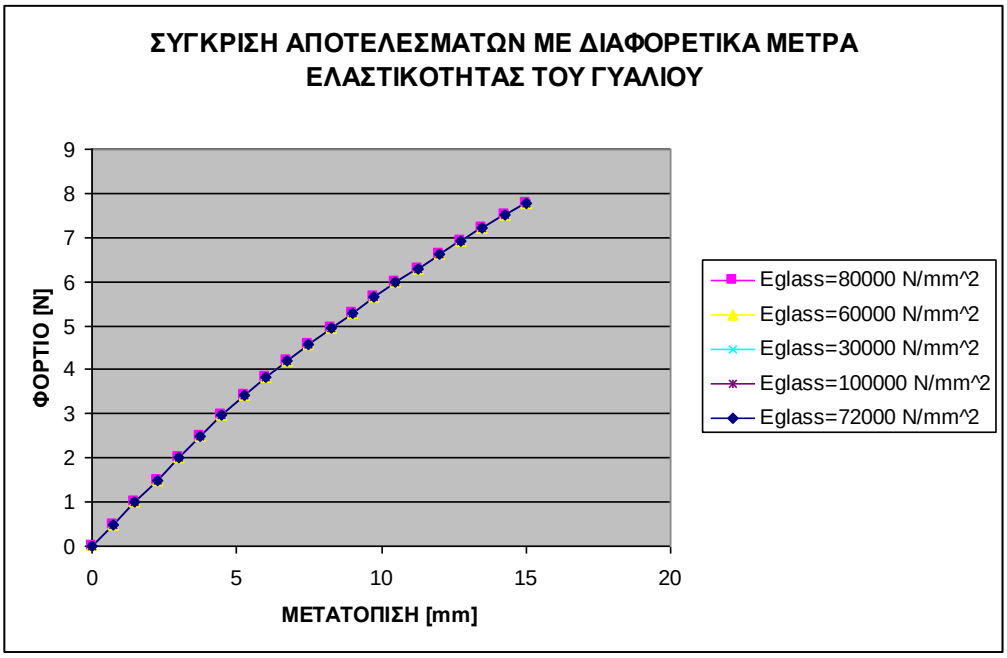
Το υπό εξέταση δείγμα αποτελείται από τρία διαφορετικά υλικά. Αυτά είναι:

- γυαλί, υλικό των νημάτων της πάνω και της κάτω επιφάνειας υφάσματος.
- PES (πολυεστέρας), υλικό των εσωτερικών spacer νημάτων 2 και
- PES (πολυεστέρας), υλικό των εσωτερικών spacer νημάτων 1 [16].

3.3.1. Μέτρο Ελαστικότητας Υαλονημάτων Εξωτερικών Επιφανειών

Λόγω έλλειψης πειραματικών δεδομένων σχετικών με τον εφελκυσμό των νημάτων των εξωτερικών επιφανειών το μέτρο ελαστικότητας αυτών αναζητήθηκε στο διαδύκτιο. Από την αναζήτηση προέκυψε για το μέτρο ελαστικότητας πεδίο τιμών 60000-100000 MPa. Για την τελική τιμή του μέτρου ελαστικότητας εισήχθησαν στο μοντέλο 4 τιμές μέτρου ελαστικότητας από το πεδίο τιμών και από την προσομοίωση της δοκιμής συμπίεσης διερευνήθηκε η επίδραση του μέτρου ελαστικότητας. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η

επίδραση του υλικού των εξωτερικών επιφανειών στα αποτελέσματα της προσομοίωσης συμπίεσης.



Διάγραμμα 3.4: Σύγκριση αποτελεσμάτων με τέσσερα διαφορετικά Eglass

Από το παραπάνω διάγραμμα γίνεται φανερό πως η επιλογή του υλικού των εξωτερικών επιφανειών δεν μεταβάλλει την καμπύλη φορτίου – μετατόπισης στην προσομοίωση της δοκιμής συμπίεσης. Τελικά για τη μοντελοποίηση επιλέχθηκε η τιμή 72000 MPa.

3.3.2. Μέτρο Ελαστικότητας Spacer Νημάτων 1 και 2

Ο υπολογισμός των μέτρων ελαστικότητας των δύο νημάτων έγινε με βάση την πειραματική καμπύλη δύναμης – παραμόρφωσης και τα εργαστηριακά δεδομένα για κάθε ομάδα νημάτων, τα οποία παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες.

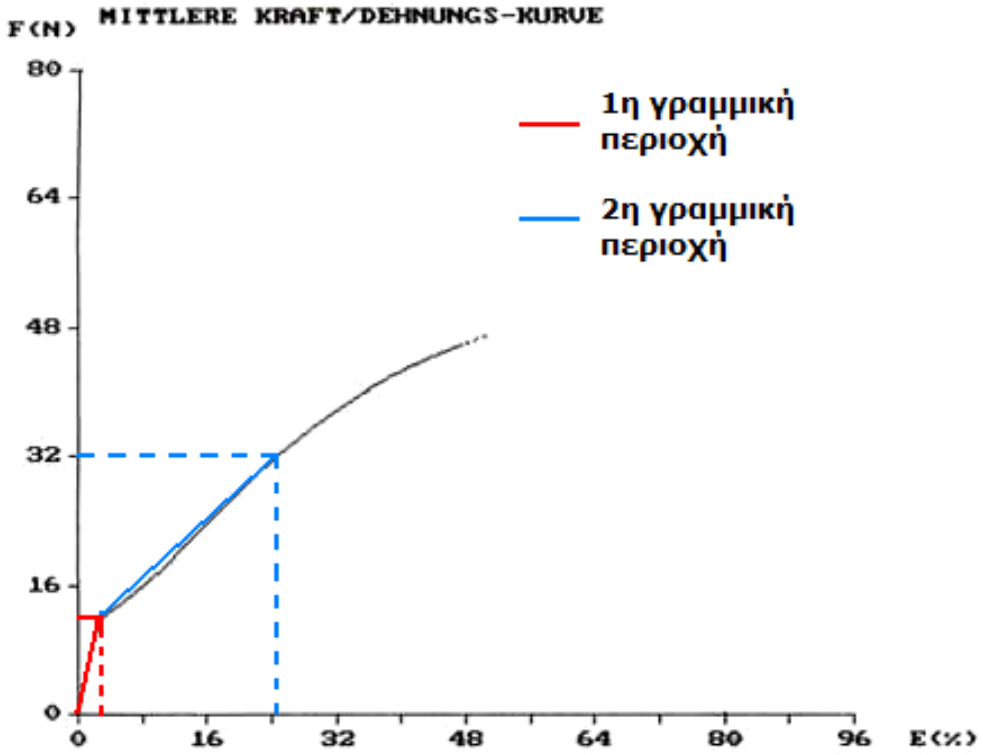
Πίνακας 3.4: Ιδιότητες των spacer νημάτων

	Υλικό	**Διάμετρος [mm]**	**Λεπτότητα Υφάσματος [dtex]**	**Συρρίκνωση [%]**
Εσωτερική ίνα 1 (άσπρη)	PES	0.25	643	18.02
Εσωτερική ίνα 2 (μαύρη)	PES	0.30	1140.8	7.63

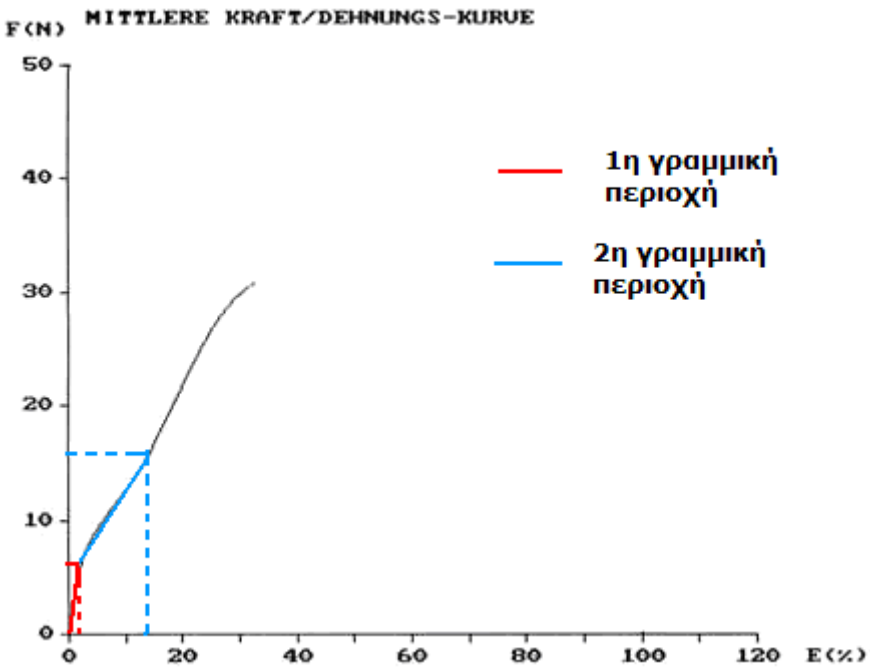
Πίνακας 3.5: Ιδιότητες των spacer νημάτων

	Αντοχή [cN/tex]	**Επιμήκυνση [%]**
Εσωτερική ίνα 1	48.20	32.92
Εσωτερική ίνα 2	41.10	50.46

Στη συνέχεια παρουσιάζονται και οι καμπύλες δύναμης – παραμόρφωσης για κάθε τύπο νήματος.



Διάγραμμα 3.5: Διάγραμμα δύναμης – παραμόρφωσης του spacer νήματος 2



Διάγραμμα 3.6: Διάγραμμα δύναμης - παραμόρφωσης του spacer νήματος 1

Στους πίνακες οι τιμές της δύναμης αντιστοιχούν στο σημείο θραύσης του κάθε υλικού. Για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας θα χρησιμοποιηθεί η πρώτη περιοχή των καμπύλων. Όπως φαίνεται στα διαγράμματα η περιοχή αυτή μπορεί να θεωρηθεί συνδυασμός δύο γραμμικών περιοχών. Θα χρησιμοποιηθεί επομένως διγραμμικό υλικό. Ο υπολογισμός του μέτρου ελαστικότητας προκύπτει από τα παρακάτω. Από τον νόμο του Hooke ισχύει ότι:

$$\boxed{\sigma = \mathrm{E} \cdot \varepsilon \Rightarrow \mathrm{E} = \frac{\sigma}{\varepsilon}} \qquad (15)$$

Από τα παραπάνω διαγράμματα, στα οποία είναι προσημασμένη η γραμμική περιοχή, λαμβάνονται οι τιμές της παραμόρφωσης και της αντίστοιχης δύναμης. Γνωρίζοντας την διάμετρο της κάθε ομάδας ινών υπολογίζεται η διατομή από τον τύπο:

$$\boxed{\mathrm{A}[mm^2] = \frac{\pi \cdot d^2}{4}} \qquad (16)$$

Στη συνέχεια και έχοντας υπολογίσει την δύναμη και τη διατομή είναι εύκολο να προσδιορίσουμε και την τάση από τον γνωστό τύπο:

$$\boxed{\sigma[N/mm^2] = \frac{F[N]}{\mathrm{A}[mm^2]}} \qquad (17)$$

Συνδυάζοντας τελικά τις σχέσεις 1,2,3 προκύπτει το μέτρο ελαστικότητας, η τιμή του οποίου για τους δύο τύπους νημάτων είναι:

- $E_1 = 4876\, N/mm^2$
- $E_2 = 5141\, N/mm^2$

Από τα παραπάνω πειραματικά διαγράμματα παρατηρείται πως η καμπύλη δύναμης – μετατόπισης είναι διγραμμική. Προκειμένου να υπάρχει μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα της προσομοίωσης της δοκιμής συμπίεσης υπολογίσθηκε για κάθε τύπο νήματος η τάση διαρροής και το δεύτερο μέτρο ελαστικότητας. Για το νήμα 1 και το νήμα 2 προκύπτουν αντίστοιχα οι παρακάτω τιμές:

$$\begin{cases} \sigma_1 = 167{,}24 N/mm^2 \\ (E_2)_1 = 2252 N/mm^2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \sigma_2 = 151{,}67 N/mm^2 \\ (E_2)_2 = 1792{,}34 N/mm^2 \end{cases}$$

3.4. ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

3.4.1. Επιλογή Πεπερασμένου Στοιχείου

Ως πεπερασμένο στοιχείο για τη μοντελοποίηση της δομικής μονάδας επιλέχθηκε η δοκός (beam). Αναφορά στο πεπερασμένο στοιχείο beam έχει προηγηθεί σε προηγούμενη παράγραφο του κεφαλαίου. Στο λογισμικό πακέτο ANSYS η ονομασία του στοιχείου είναι beam188. Οι λόγοι που προτιμήθηκε αυτό το πεπερασμένο στοιχείο είναι οι εξής: το σχήμα του είναι αντιπροσωπευτικό για τη γεωμετρία που μελετάται η οποία αποτελείται από νήματα, καθώς και της διατομής που έχουν τα νήματα. Επιπλέον τα συγκεκριμένα πεπερασμένα στοιχεία λόγω τεμνουσών δυνάμεων ή ροπών, έχουν τη δυνατότητα παραλαβής κάμψης. Όσον αφορά στο συγκεκριμένο στοιχείο του λογισμικού πακέτου, παρέχει τη δυνατότητα εισαγωγής στις ιδιότητες του διγραμμικού μέτρου ελαστικότητας, όπως έχουν τα εσωτερικά νήματα 1 και 2 της δομικής μονάδας. Ακόμα ο χρόνος επίλυσης είναι πολύ μικρός.

Στο μοντέλο της δομικής μονάδας του προς μελέτη υφάσματος χρησιμοποιήθηκαν δύο ακόμα πεπερασμένα στοιχεία τα οποία σχετίζονται με τη επαφή των σωμάτων. Στις δύο εξωτερικές επιφάνειες υφασμάτων του δείγματος τα στημόνια και τα υφάδια συγκρατώνται μεταξύ τους με πλέξιμο αποκλείοντας την ανεξάρτητη κίνηση τους. Κατά τη διαδικασία της μοντελοποίησης η επαφή δύο σωμάτων ορίζεται με το ζεύγος επαφών, δηλαδή τις περιοχές (εδώ γραμμές) στις οποίες τοποθετούνται τα στοιχεία contact και target. Τα στοιχεία που επιλέχθηκαν είναι τα contact176 και τα target170, τα οποία είναι κατάλληλα για την επαφή σωμάτων πλεγματοποιημένων με στοιχεία beam. Δεδομένου ότι τα beam επιτρέπουν περιορισμένες μεταβολές στην διατομή τους είναι προφανές ότι η ανάλυση επαφών σε κατασκευές beam επιτρέπει μόνο την μεταφορά φορτίων μεταξύ των στοιχείων και αγνοεί τα φαινόμενα επαφής. Επιλέγεται επαφή bonded, δηλαδή δεν επιτρέπει την ολίσθηση μεταξύ των κόμβων που είναι σε επαφή [17].

3.4.2. Επιλογή Πλέγματος

Για να ελεγχθεί ποια είναι η καταλληλότερη πυκνότητα πλέγματος για το μοντέλο, πραγματοποιήθηκε σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την προσομοίωση κάμψης προβόλου στο λογισμικό πακέτο ANSYS (εδώ μετράμε μέγιστη μετατόπιση κατά τον άξονα y) για διάφορες πυκνότητες πλέγματος. Είναι προφανές ότι όσο αυξάνεται η πυκνότητα του πλέγματος αυξάνεται η ακρίβεια των αποτελεσμάτων αλλά και το υπολογιστικό κόστος. Κατάλληλο θεωρείται το πλέγμα κατά το δυνατόν χαμηλού υπολογιστικού κόστους στο οποίο η επιπλέον αύξηση της πυκνότητας του θα επέφερε ασήμαντη αύξηση στην ακρίβεια. Παρουσιάζεται επίσης η τιμή του βέλος κάμψης που προκύπτει θεωρητικά για την περίπτωση του προβόλου. Ο θεωρητικός τύπος του βέλους κάμψης προβόλου είναι [18]:

$$\boxed{y_{\max} = \frac{P \cdot l^3}{3 \cdot E \cdot I}} \qquad (18)$$

όπου $P(N)$: είναι το συγκεντρωμένο φορτίο που ασκείται στο μη πακτωμένο άκρο του προβόλου

$l(mm)$: είναι το μήκος του προβόλου

$E(N/mm^2)$: είναι το μέτρο ελαστικότητας του υλικού της δοκού

$I(mm^4)$: είναι η ροπή αδράνειας της διατομής

Στη συγκεκριμένη περίπτωση επειδή η διατομή του προβόλου είναι κυκλική η ροπή αδράνειας είναι:

$$\boxed{I_x = I_y = \frac{\pi \cdot r^4}{4}} \qquad (19)$$

όπου r είναι η ακτίνα της κυκλικής διατομής.
Τα παραπάνω μεγέθη έχουν τις παρακάτω τιμές:

$$\boxed{\begin{aligned} &P = 0.00005N \\ &l = 25mm \\ &E = 1917N/mm^2 \\ &r = 0.125mm \\ &I = 1.91748 \cdot 10^{-4} mm^4 \end{aligned}}$$

Επομένως από τις σχέσεις (1), (2) η θεωρητική τιμή του βέλους κάμψης είναι:

$$\boxed{y_{\max} = 3.5mm}$$

Παρακάτω παρουσιάζεται σε έναν πίνακα η τιμή του βέλους κάμψης του προβόλου για διάφορες τιμές διαμερίσεων έτσι όπως προέκυψαν από το ANSYS. Φαίνεται η σύγκλιση των τιμών μετά τις 10 διαμερίσεις.

Πίνακας 3.6: Αποτελέσματα από την προσομοίωση κάμψης προβόλου

	ANSYS
Αριθμός Διαμερίσεων	**y_{max} (mm)**
1	2.8
10	3.47
20	3.47
25	3.47

3.5. ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΟΡΙΑΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ

Για την επίλυση της δομικής μονάδας χρησιμοποιήθηκαν δύο περιπτώσεις όσον αφορά στον καθορισμό των οριακών συνθηκών. Οι δύο περιπτώσεις είναι οι εξής:

Α. περίπτωση 1
Στην περίπτωση 1 οι οριακές συνθήκες του προβλήματος είναι:

- Πάκτωση των υφαδιών της κάτω εξωτερικής επιφάνειας. Αυτό σημαίνει περιορισμό όλων των βαθμών ελευθερίας των στοιχείων, δηλαδή των κομβικών μετατοπίσεων και στροφών. Με τον τρόπο αυτό αποδίδεται όσο το δυνατόν

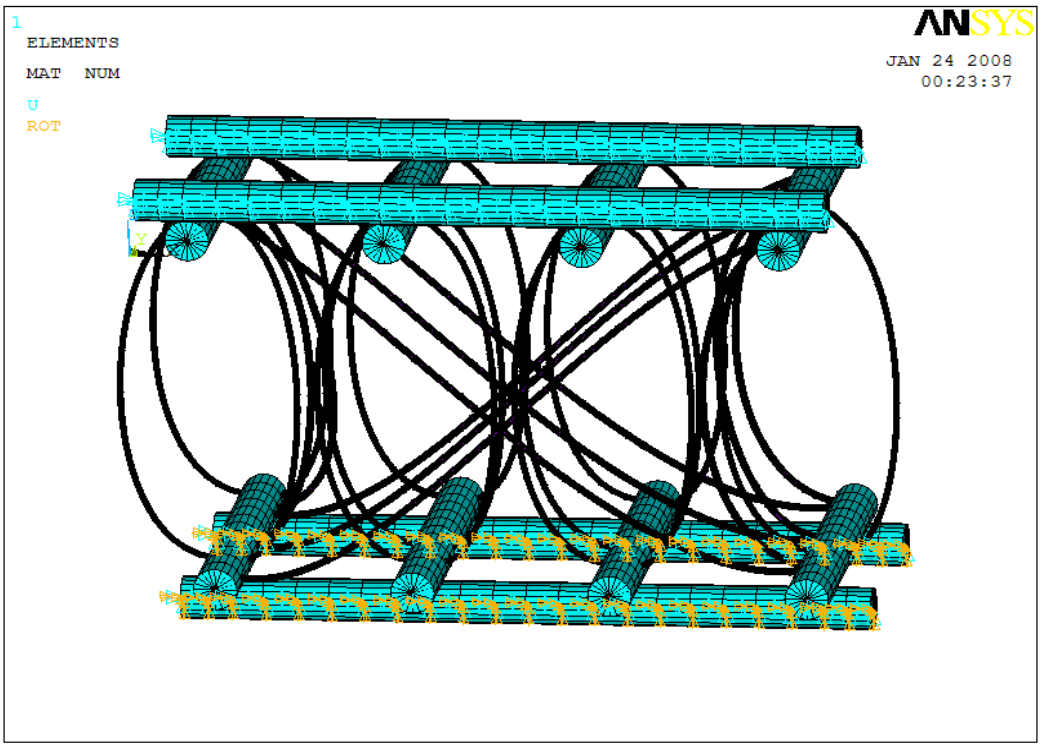
καλύτερα η συγκράτηση του δείγματος πάνω στην κυκλική επιφάνεια της μηχανής κατά τη διάρκεια του πειράματος.

- Επιβολή μετατόπισης κατά τον κατακόρυφο άξονα z και περιορισμός των κομβικών μετατοπίσεων στους άξονες x και y στα υφάδια της πάνω εξωτερικής επιφάνειας. Με αυτό τον τρόπο προσομοιώνεται η κατακόρυφη μετατόπιση του δείγματος λόγω του απείρου μήκους.

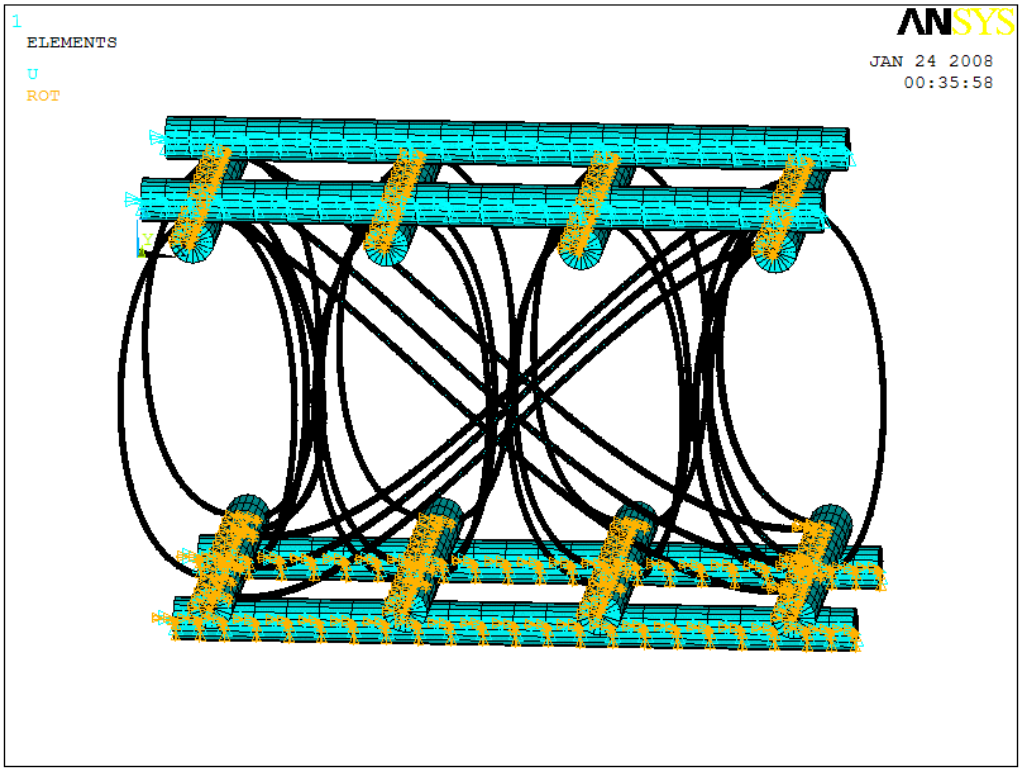
Β. περίπτωση 2

Στην περίπτωση 2 οι οριακές συνθήκες του προβλήματος είναι:

- Πάκτωση των υφαδιών της κάτω εξωτερικής επιφάνειας.
- Επιβολή μετατόπισης κατά τον κατακόρυφο άξονα z.
- Περιορισμός των στροφικών βαθμών ελευθερίας κατά x και y όλων των εσωτερικών νημάτων στους κόμβους αρχής και πέρατος. Ο παραπάνω περιορισμός εφαρμόζεται για την αποφυγή της διείσδυσης των νημάτων της εσωτερικής επιφάνειας στα νήματα των δύο εξωτερικών επιφανειών. Ο στροφικός βαθμός ελευθερίας κατά z δεν περιορίστηκε γιατί δεν επηρεάζει στη διείσδυση στα εξωτερικά στρώματα.



Σχήμα 3.71: Οριακές συνθήκες της 1ης περίπτωσης



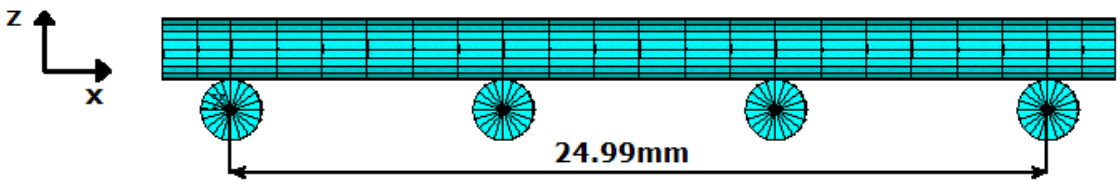
Σχήμα 3.72: Οριακές συνθήκες της 2ης περίπτωσης

3.6. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

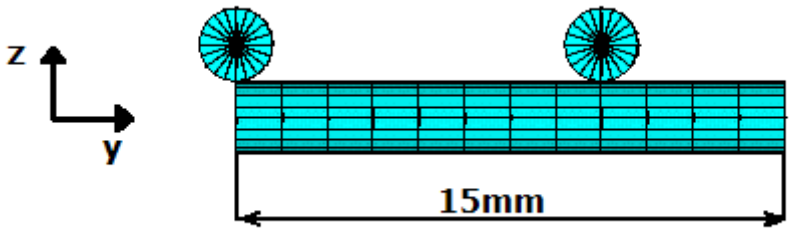
Η αξιολόγηση της προσομοίωσης βασίστηκε στη σύγκριση της καμπύλης φορτίου – μετατόπισης που προκύπτει από την προσομοίωση με την αντίστοιχη πειραματική καμπύλη. Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα για την προσομοίωση της δοκιμής συμπίεσης μοντελοποιήθηκε η δομική μονάδα του υφάσματος. Η συμπίεση της δομικής μονάδας επιτυγχάνεται με πάκτωση της κατώτερης εξωτερικής επιφάνειας και κατακόρυφη μετακίνηση της ανώτερης εξωτερικής επιφάνειας η οποία πραγματοποιείται με επιβολή ίσης μετατόπισης στους περιλαμβανόμενους κόμβους. Για τον υπολογισμό του φορτίου που προκύπτει από την επιβαλλόμενη μετατόπιση αθροίζονται οι κατακόρυφες αντιδράσεις που αναπτύσσονται στους κόμβους την πακτωμένης επιφάνειας. Στη συνέχεια η δύναμη που αναπτύσσεται στην δομική μονάδα ανάγεται στην δύναμη που αντιστοιχεί στη συμπίεση του δοκιμίου. Για την αναγωγή προφανώς λαμβάνονται υπόψη τα εμβαδά δομικής μονάδας και εμβόλου συμπίεσης.

Η επιφάνεια του εμβόλου, γνωρίζοντας τη διάμετρό του, υπολογίσθηκε και έχει την τιμή $E_{\varepsilon\mu} = 1963.5mm^2$. Για τον υπολογισμό του εμβαδού της δομικής μονάδας χρησιμοποιήθηκε η διάσταση των εξωτερικών επιφανειών κατά το επίπεδο x-z και η διάστασή τους κατά το

επίπεδο y-z. Το μήκος (διάσταση στο επίπεδο x-z) ορίζεται ως η απόσταση ανάμεσα στους άξονες των δύο ακριανών στημονιών. Το πλάτος (διάσταση στο επίπεδο y-z) είναι $1.5 \cdot b$, όπου η παράμετρος b αναφέρεται στην § 5.2. Σύμφωνα με τα παραπάνω η επιφάνεια της δομικής μονάδας έχει τιμή $E_{\Delta.M} = 374.85mm^2$. Παρατηρείται πως η τιμή της επιφάνειας του εμβόλου είναι πενταπλάσια της τιμής της επιφάνειας της δομικής μονάδας. Στα σχήματα 5.34 και 5.35 φαίνονται οι διαστάσεις της επιφάνειας του μοντέλου κατά τα δύο επίπεδα.



Σχήμα 3.73: Μήκος δομικής μονάδας στο επίπεδο x-z



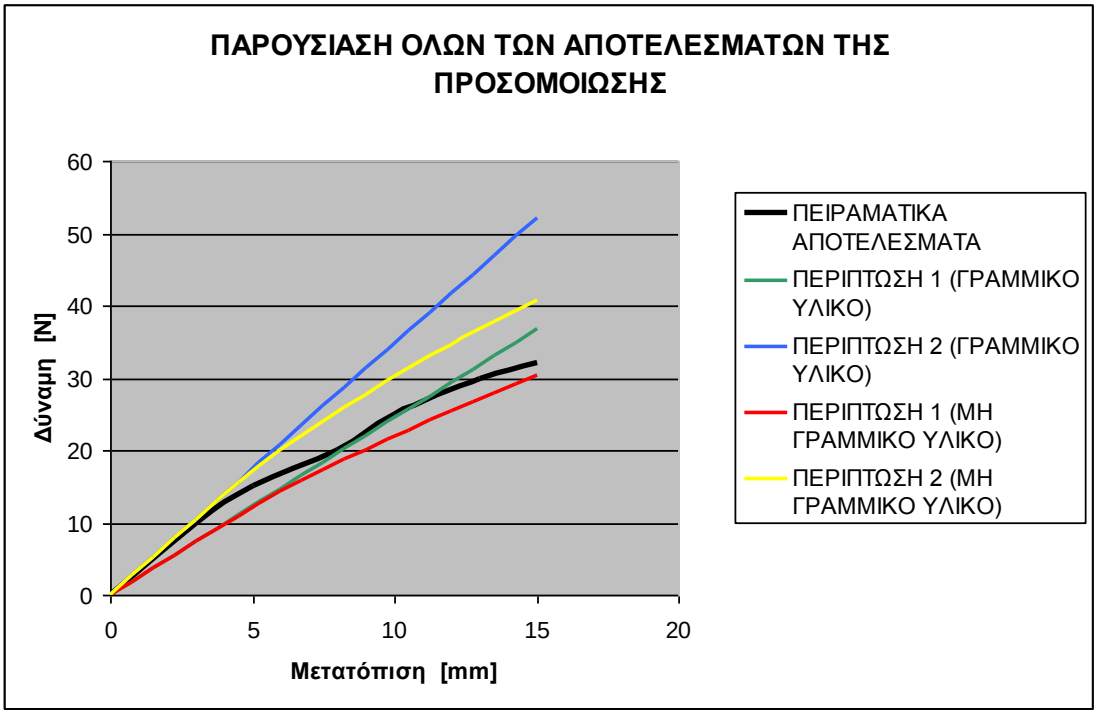
Σχήμα 3.74: Πλάτος δομικής μονάδας στο επίπεδο y-z

Για την προσομοίωση της συμπίεσης θεωρήθηκαν δύο περιπτώσεις οριακών συνθηκών. Στην πρώτη περίπτωση προβλέπονται η πάκτωση της κατώτερης εξωτερικής επιφάνειας και η κατακόρυφη μετατόπιση της ανώτερης επιφάνειας. Στην δεύτερη περίπτωση επιβάλλονται επιπλέον περιορισμοί στους κόμβους σύνδεσης των εσωτερικών ινών με τα εξωτερικά στρώματα οι οποίοι αποτρέπουν την υπέρβαση των εξωτερικών στρωμάτων από τα εσωτερικά νήματα κατά την παραμόρφωσή τους. Οι περιορισμοί εφαρμόζονται στην περιστροφή των κόμβων κατά τους άξονες x,y δηλαδή τους παράλληλους στο επίπεδο του υφάσματος. Αναμένεται η επιβολή αυτής της επιπλέον συνθήκης να προκαλεί αντιδράσεις υψηλότερες αυτών που αντιστοιχούν από την καθαυτή επίδραση των εξωτερικών στρωμάτων στις εσωτερικές ίνες, η οποία επιτρέπει μερική περιστροφή των ινών στα σημεία

σύνδεσης. Στην πραγματικότητα δηλαδή τα εσωτερικά νήματα κατά την συμπίεση του υφάσματος είναι δυνατόν να περιστραφούν γύρω από τα σημεία σύνδεσης μέχρι να έρθουν σε επαφή με τα νήματα των εξωτερικών στρωμάτων. Επομένως η επιπλέον συνθήκη αποτελεί μια τεχνική αντικατάστασης της αλληλεπίδρασης εσωτερικού – εξωτερικού στρώματος νημάτων, η οποία αυξάνει τις προκύπτουσες αντιδράσεις αλλά μειώνει το υπολογιστικό κόστος έναντι της εισαγωγής ανάλυσης επαφών.

Για κάθε περίπτωση επιβολής οριακών συνθηκών επιλύθηκαν δύο μοντέλα της δομικής μονάδας, τα οποία διαφέρουν ως προς τις ελαστικές ιδιότητες των εσωτερικών νημάτων. Στο πρώτο μοντέλο θεωρείται πως τα εσωτερικά νήματα αποτελούνται από γραμμικά ελαστικό υλικό, ενώ στο δεύτερο μοντέλο θεωρείται διγραμμικό ελαστικό υλικό. Στο πρώτο μοντέλο το μέτρο ελαστικότητας υπολογίζεται από την πρώτη γραμμική περιοχή της καμπύλης τάσης – παραμόρφωσης των νημάτων, ενώ στο δεύτερο θεωρούνται δύο μέτρα ελαστικότητας τα οποία έχουν προκύψει από τις πρώτες δύο γραμμικές περιοχές.

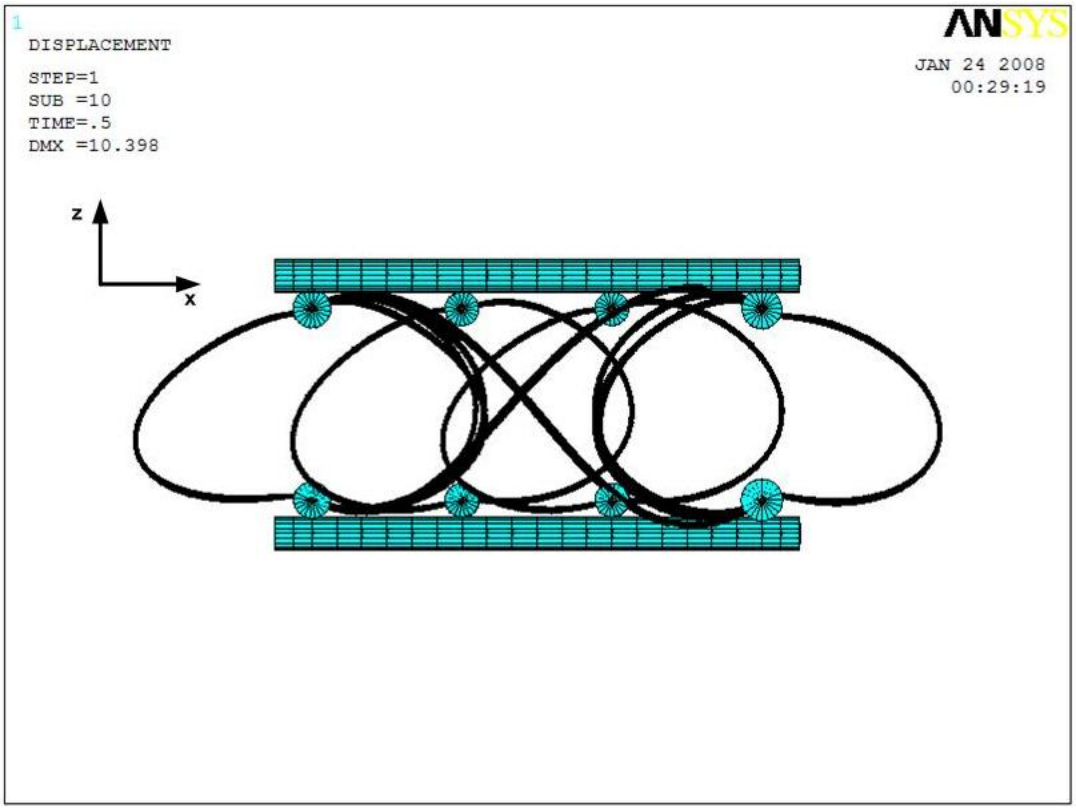
Παρακάτω παρουσιάζονται οι καμπύλες δύναμης - μετατόπισης έτσι όπως προέκυψαν από τις δύο περιπτώσεις οριακών συνθηκών για γραμμικά και διγραμμικά ελαστικό υλικό εσωτερικών ινών.



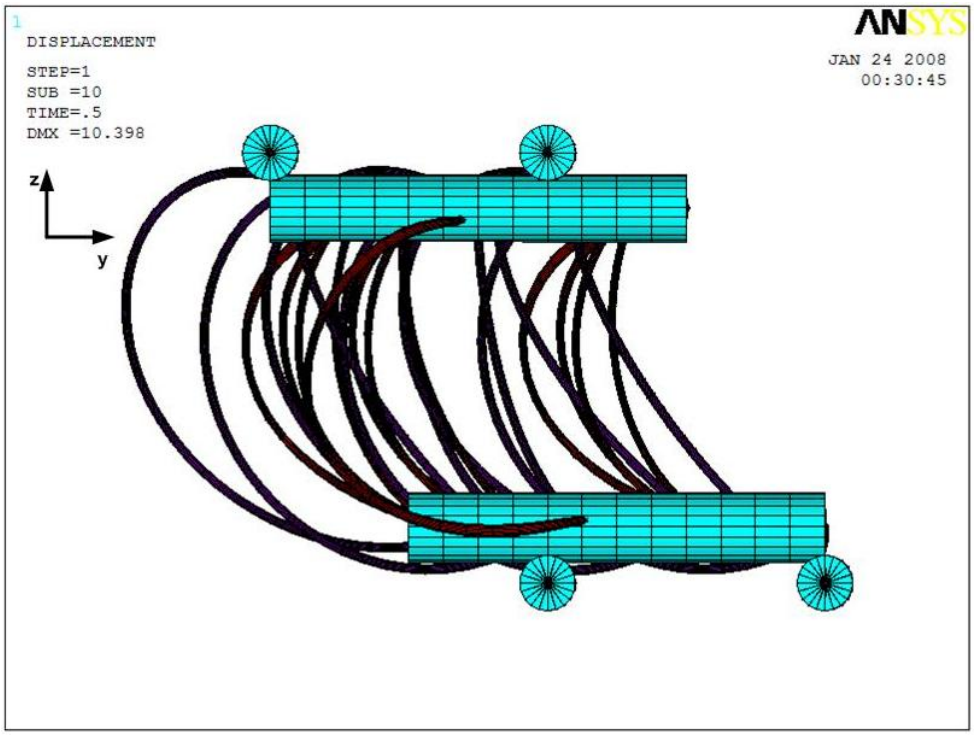
Διάγραμμα 3.4.: Παρουσίαση όλων των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης

Με βάση το παραπάνω διάγραμμα αναφέρονται τα εξής όσον αφορά στην αξιολόγηση των καμπύλων που προέκυψαν από την προσομοίωση της δοκιμής συμπίεσης στο ANSYS:

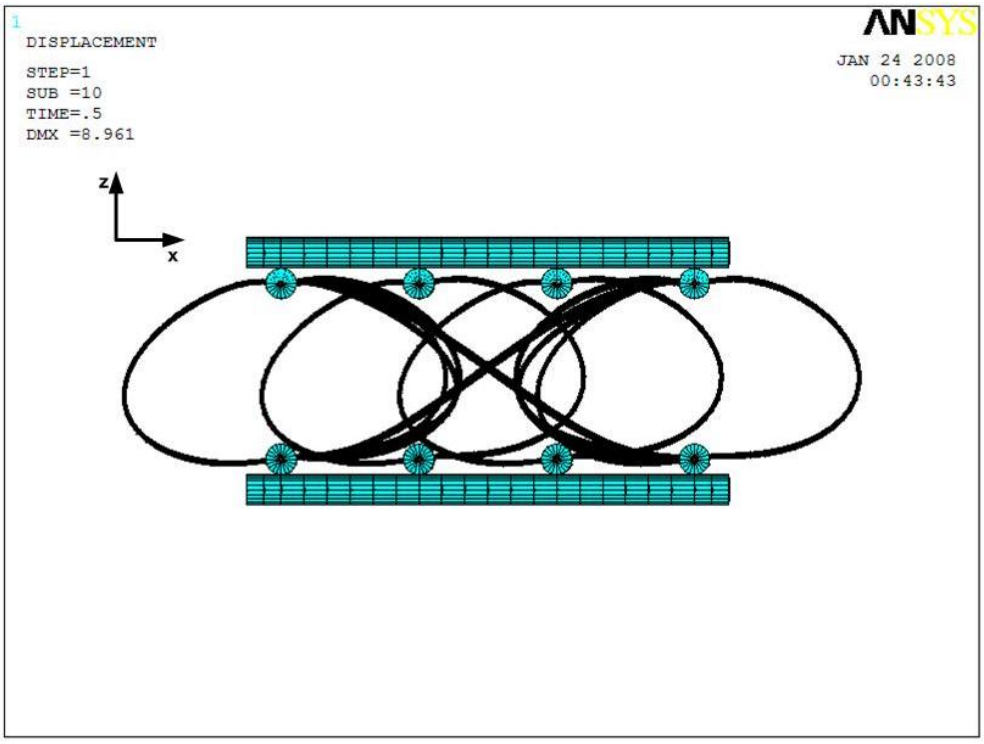
Οι καμπύλες που αντιστοιχούν στις περιπτώσεις 1 και 2 για γραμμικά ελαστικό υλικό δεν προσεγγίζουν το σχήμα της πειραματικής καμπύλης, όπως ήταν αναμενόμενο εφόσον αναπτύσσονται υψηλές τάσεις στις εσωτερικές ίνες κατά την συμπίεση. Παρόλα αυτά η καμπύλες που αντιστοιχούν στο γραμμικά ελαστικό υλικό θα χρησιμοποιηθούν προς σύγκριση στην παραμετρική ανάλυση του μοντέλου για έλεγχο της επίδρασης του μέτρου ελαστικότητας. Η γραμμική συμπεριφορά των καμπύλων 1 και 2 οφείλεται στο ότι το υλικό των εσωτερικών ινών θεωρήθηκε γραμμικό. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως η περίπτωση 2 συνεπάγεται αύξηση της αντίστασης του δοκιμίου σε συμπίεση. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι παραμορφώσεις του μοντέλου για τις περιπτώσεις 1 και 2 αντίστοιχα γραμμικού υλικού.



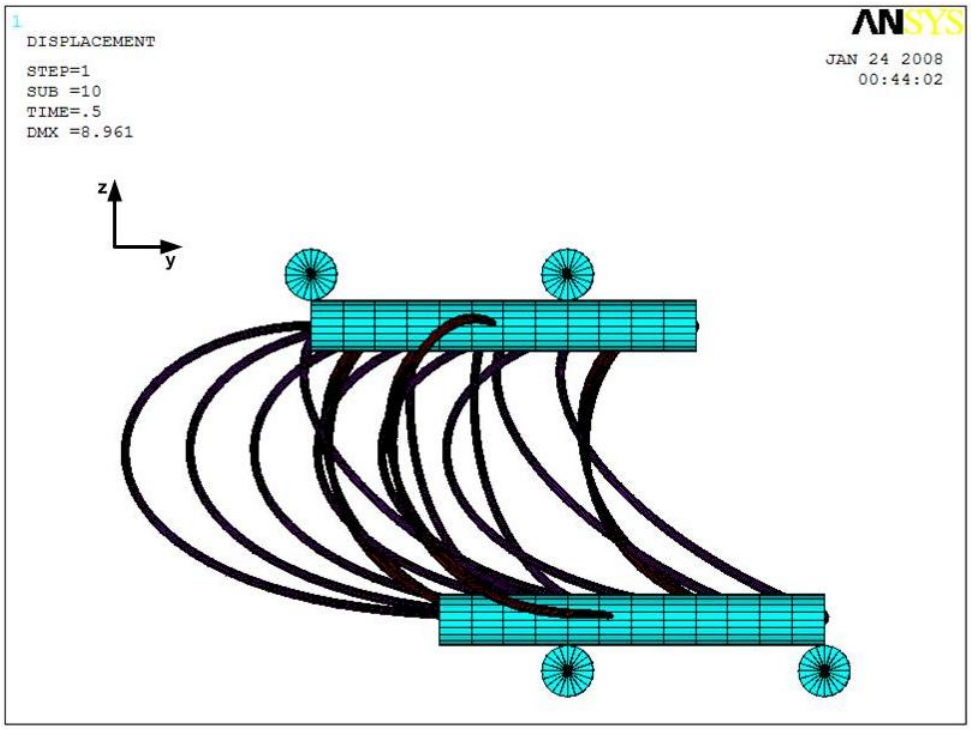
Σχήμα 3.75: Παραμόρφωση της δομικής μονάδας για την περίπτωση 1 γραμμικού υλικού κατά το επίπεδο x-z



Σχήμα 3.76: Παραμόρφωση της δομικής μονάδας για την περίπτωση 1 γραμμικού υλικού κατά το επίπεδο y-z

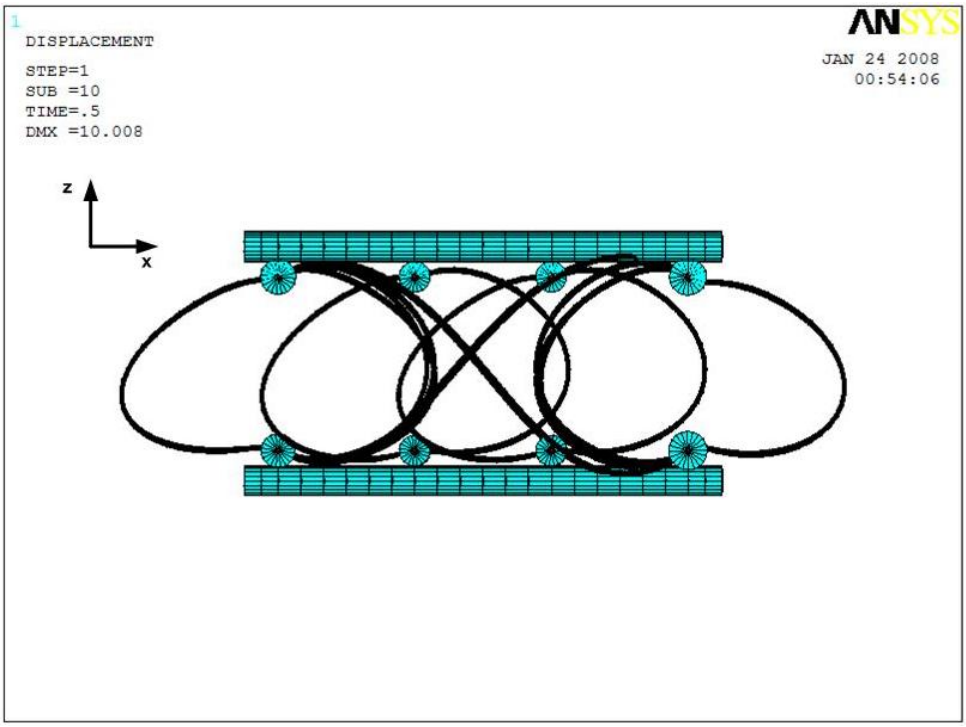


Σχήμα 3.77: Παραμόρφωση της δομικής μονάδας για την περίπτωση 2 γραμμικού υλικού κατά το επίπεδο x-z

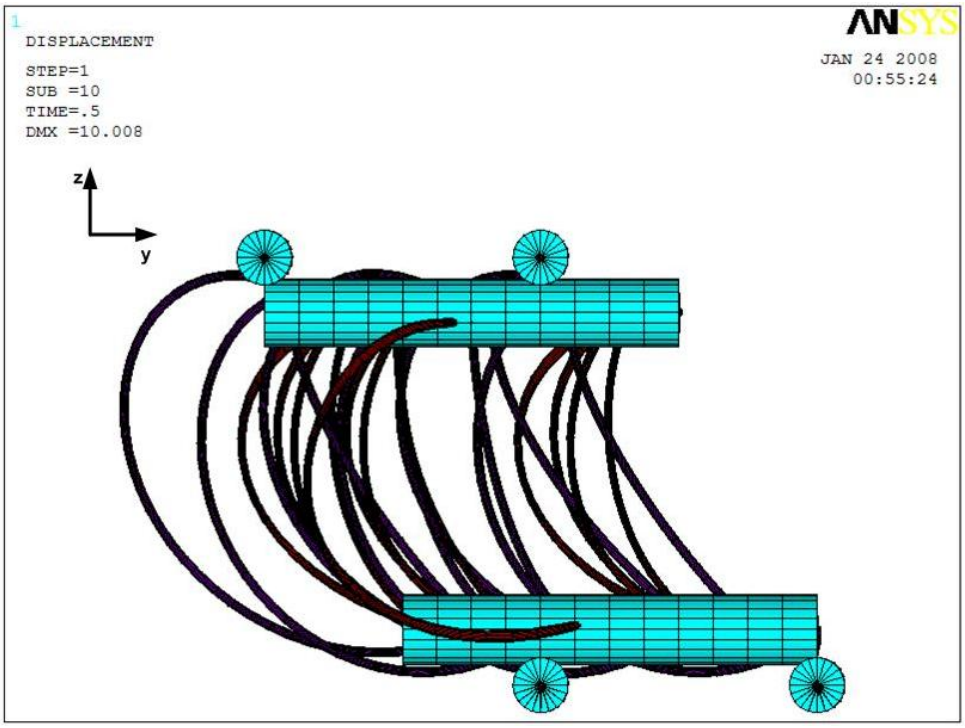


Σχήμα 3.78: Παραμόρφωση της δομικής μονάδας για την περίπτωση 2 γραμμικού υλικού κατά το επίπεδο y-z

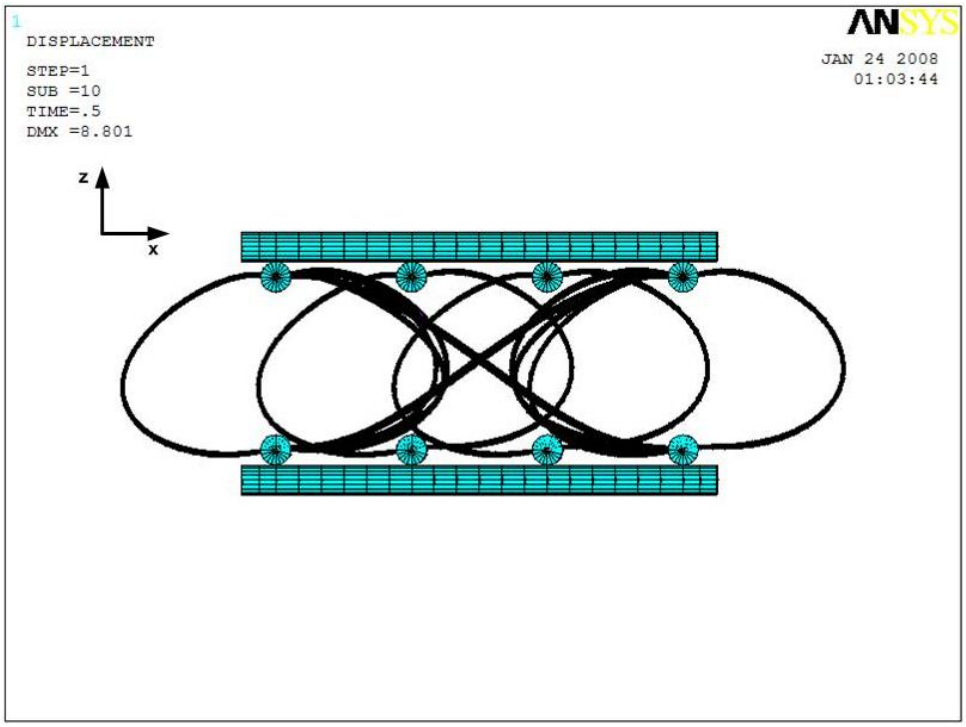
Οι δύο περιπτώσεις επιβολής οριακών συνθηκών εξετάστηκαν επίσης για διγραμμικό ελαστικό υλικό των εσωτερικών ινών. Παρατηρώντας το διάγραμμα 5.4 διαπιστώνεται ότι οι καμπύλες για διγραμμικό υλικό προσεγγίζουν πολύ καλύτερα την κλίση της πειραματικής. Όσον αφορά στις επιβαλλόμενες οριακές συνθήκες παρατηρείται ότι η πειραματική καμπύλη βρίσκεται ανάμεσα στις δύο αναφερόμενες καμπύλες, γεγονός αναμενόμενο όπως εξηγήθηκε παραπάνω. Στα σχήματα 5.38 και 5.39 φαίνεται η παραμόρφωση του μοντέλου για τις περιπτώσεις 1 και 2 μη γραμμικού υλικού.



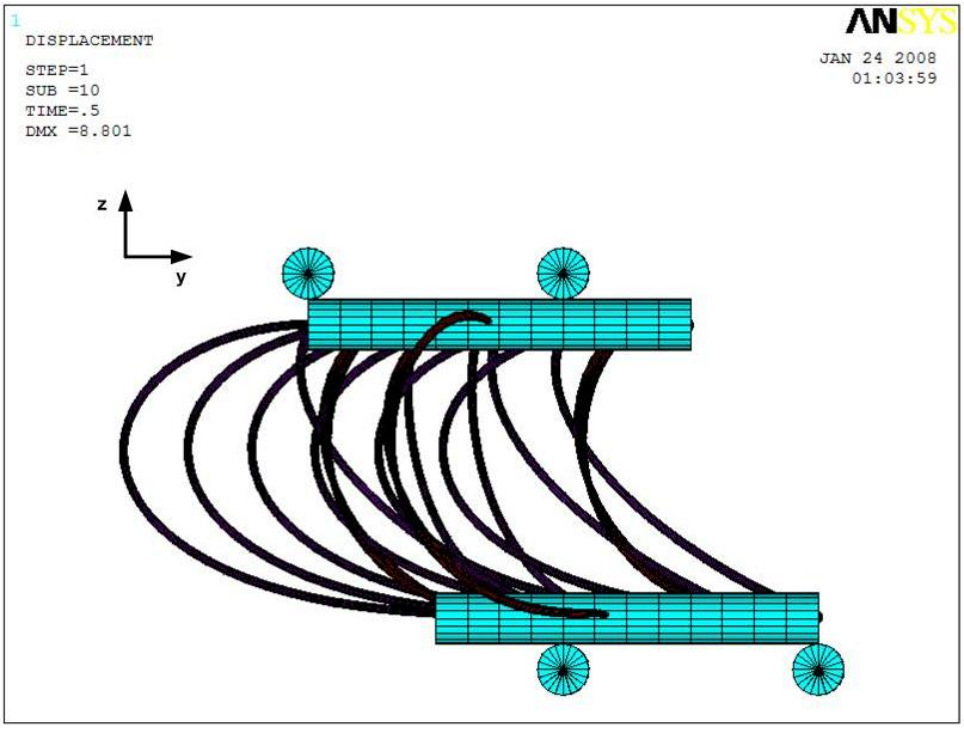
Σχήμα 3.40: Παραμόρφωση της δομικής μονάδας για την περίπτωση 1 μη γραμμικού υλικού κατά το επίπεδο x-z



Σχήμα 3.41: Παραμόρφωση της δομικής μονάδας για την περίπτωση 1 μη γραμμικού υλικού κατά το επίπεδο y-z



Σχήμα 3.42: Παραμόρφωση της δομικής μονάδας για την περίπτωση 2 μη γραμμικού υλικού κατά το επίπεδο x-z



Σχήμα 3.43: Παραμόρφωση της δομικής μονάδας για την περίπτωση 2 μη γραμμικού υλικού κατά το επίπεδο y-z

Θεωρώντας λοιπόν τις δύο καμπύλες που προκύπτουν για την περίπτωση 2 επιβολής οριακών συνθηκών (για διγραμμικά ελαστικό υλικό εσωτερικών ινών) διαπιστώνεται η ικανοποιητική προσέγγιση της πειραματικής καμπύλης. Η προτεινόμενη μοντελοποίηση και μηχανική ανάλυση, επομένως, μπορεί να θεωρηθεί αρκετά ακριβής για τον προσδιορισμό της αντίστασης των υφασμάτων δημιουργίας απόστασης σε συμπίεση. Εξάλλου μικρές αποκλίσεις στα αποτελέσματα πειράματος – προσομοίωσης οφείλονται στα εξής:

1. στις παραδοχές που θεωρήθηκαν για την γεωμετρική απεικόνιση του μοντέλου,

2. στον υπολογισμό των μέτρων ελαστικότητας των εσωτερικών νημάτων κάνοντας χρήση της καμπύλης τάσης – παραμόρφωσης κατά τον εφελκυσμό τους, αγνοώντας την επίδραση της πλαστικής παραμόρφωσής τους στην υπό εξέταση δομή στις ελαστικές τους ιδιότητες,

3. αμελήθηκε η επίδραση του τμήματος του υφάσματος που δεν συμπιέζεται από το έμβολο. Κατά τη δοκιμή της συμπίεσης το έμβολο συμπιέζει το δείγμα σε μία περιοχή ίση με το εμβαδό του (1963,5 mm^2) ενώ το δείγμα που χρησιμοποιείται στη δοκιμή έχει εμβαδό 30000 mm^2.

Με βάση την περίπτωση 1 μη γραμμικού υλικού πραγματοποιείται η παραμετρική ανάλυση που ακολουθεί στο επόμενο κεφάλαιο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^{ο}

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΔΟΜΗΣ ΤΟΥ ΥΦΑΣΜΑΤΟΣ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ

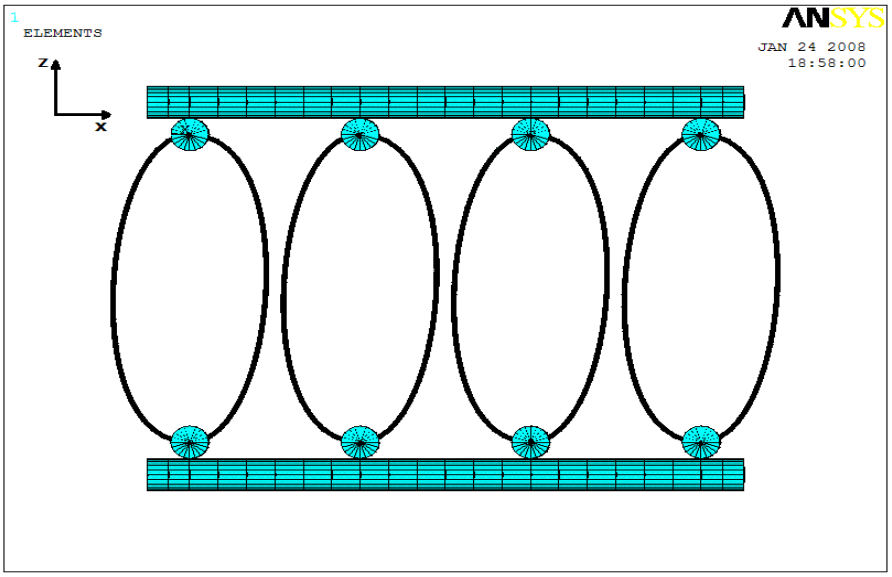
Η ικανοποιητική προσέγγιση της πειραματικής καμπύλης δύναμης – μετατόπισης από την προσομοίωση της συμπίεσης διασφαλίζει την εγκυρότητα της προτεινόμενης μεθόδου για τον υπολογισμό της αντίστασης του υφάσματος σε συμπίεση καθώς και για περαιτέρω μελέτη της κατασκευής. Στο παρόν κεφάλαιο διεξάγεται η παραμετρική ανάλυση της κατασκευής με σκοπό την διερεύνηση της επίδρασης συγκεκριμένων παραμέτρων σχετικών με την δομή και το υλικό της εξεταζόμενης κατασκευής στην αντίσταση συμπίεσης του υφάσματος. Τις προς εξέταση παραμέτρους συνιστούν οι ακτίνες διατομής των εσωτερικών νημάτων καθώς και το υλικό παραγωγής τους (εξετάζεται ως το μέτρο ελαστικότητας των εσωτερικών νημάτων). Μελετάται επιπλέον το ποσοστό συμμετοχής του κάθε τύπου εσωτερικών νημάτων στην αντίσταση του υφάσματος σε συμπίεση.

Τόσο το μέτρο ελαστικότητας όσο και η ακτίνα διατομής των εσωτερικών νημάτων υπεισέρχονται στη δυσκαμψία των νημάτων ($B = \{E \cdot (\pi \cdot r^4)\}/4$). Από τον τύπο της δυσκαμψίας φαίνεται πως η δυσκαμψία είναι ανάλογη του μέτρου ελαστικότητας και ανάλογη της τέταρτης δύναμης της ακτίνας. Επομένως στην απλή περίπτωση κάμψης δοκού η επίδραση των αναφερόμενων παραμέτρων υπολογίζεται άμεσα. Στην εξεταζόμενη κατασκευή όμως η πολυπλοκότητα της γεωμετρίας καθώς και η ύπαρξη δύο υλικών στο εσωτερικό στρώμα του υφάσματος καθιστά αδύνατη την άμεση εκτίμηση της επίδρασης των παραμέτρων στην αντίσταση την κατασκευής σε συμπίεση.

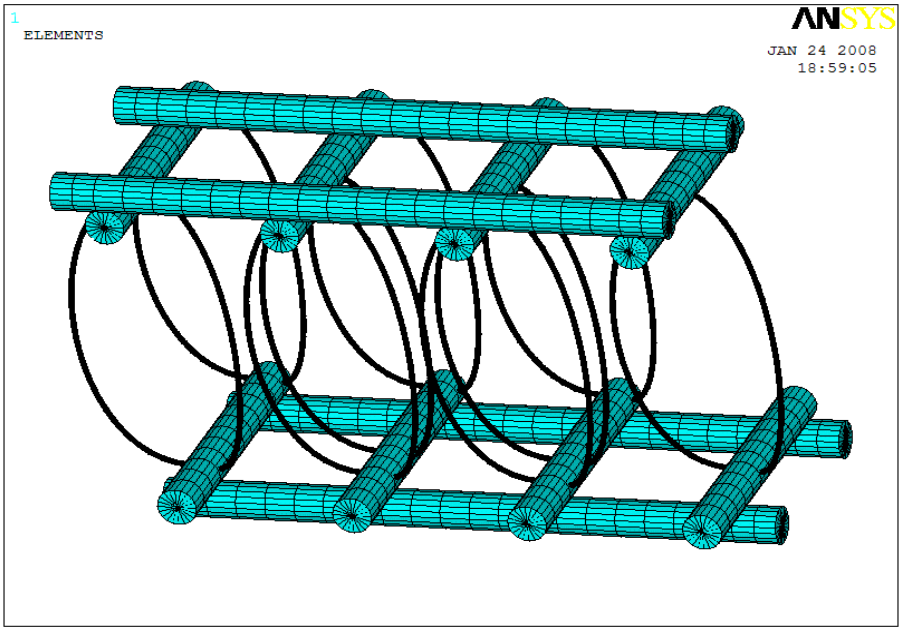
Στη συνέχεια παρουσιάζεται η μελέτη του ποσοστού συμμετοχής του κάθε τύπου εσωτερικών νημάτων στην αντίσταση του υφάσματος σε συμπίεση καθώς και η επίδραση της ακτίνας διατομής και του μέτρου ελαστικότητας των εσωτερικών νημάτων.

4.1. ΜΕΛΕΤΗ ΠΟΣΟΣΤΟΥ ΣΥΜΜΕΤΟΧΗΣ ΚΑΘΕ ΤΥΠΟΥ ΕΣΩΤΕΡΙΚΩΝ ΝΗΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΥΦΑΣΜΑΤΟΣ ΣΕ ΣΥΜΠΙΕΣΗ

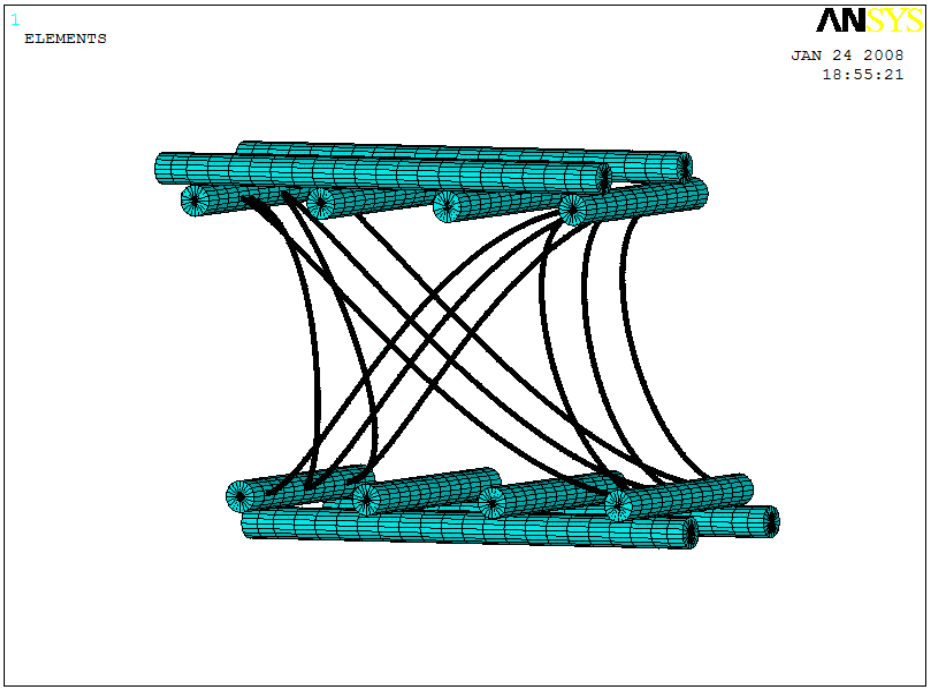
Αρχικά μελετήθηκε η συμπεριφορά του μοντέλου, μόνο με την ύπαρξη των spacer νημάτων 1 και στη συνέχεια μόνο με νήματα 2. Στα σχήματα 6.1, 6.2, 6.3 και 6.4 παρουσιάζεται το μοντέλο στην πρώτη και στην δεύτερη περίπτωση αντίστοιχα.



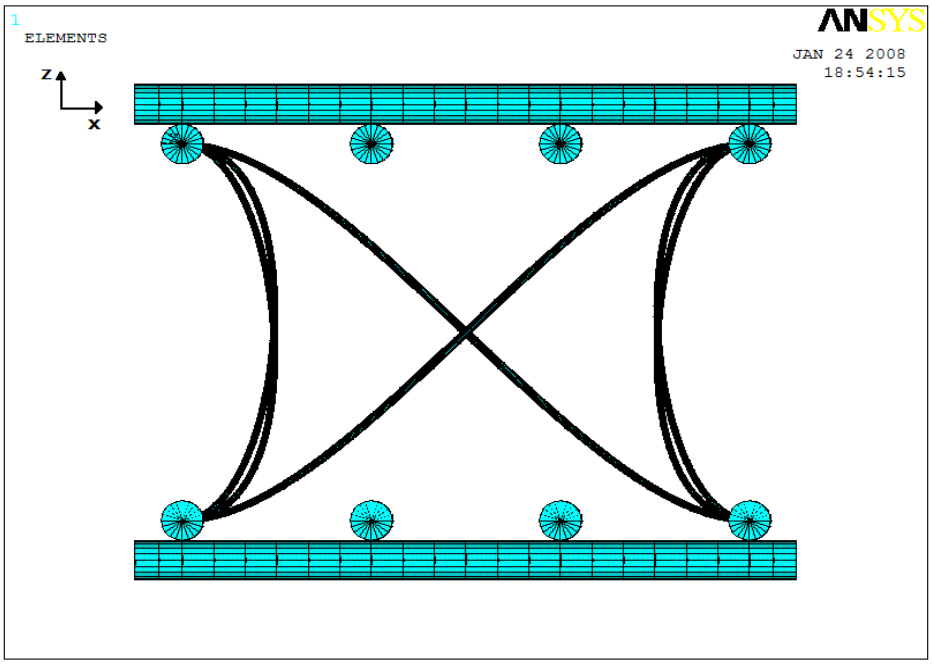
Σχήμα 4.5: Μοντέλο δομικής μονάδας μόνο με εσωτερικά νήματα τύπου 1



Σχήμα 4.6: Τρισδιάστατη απεικόνιση του μοντέλου μόνο με εσωτερικά νήματα τύπου 1

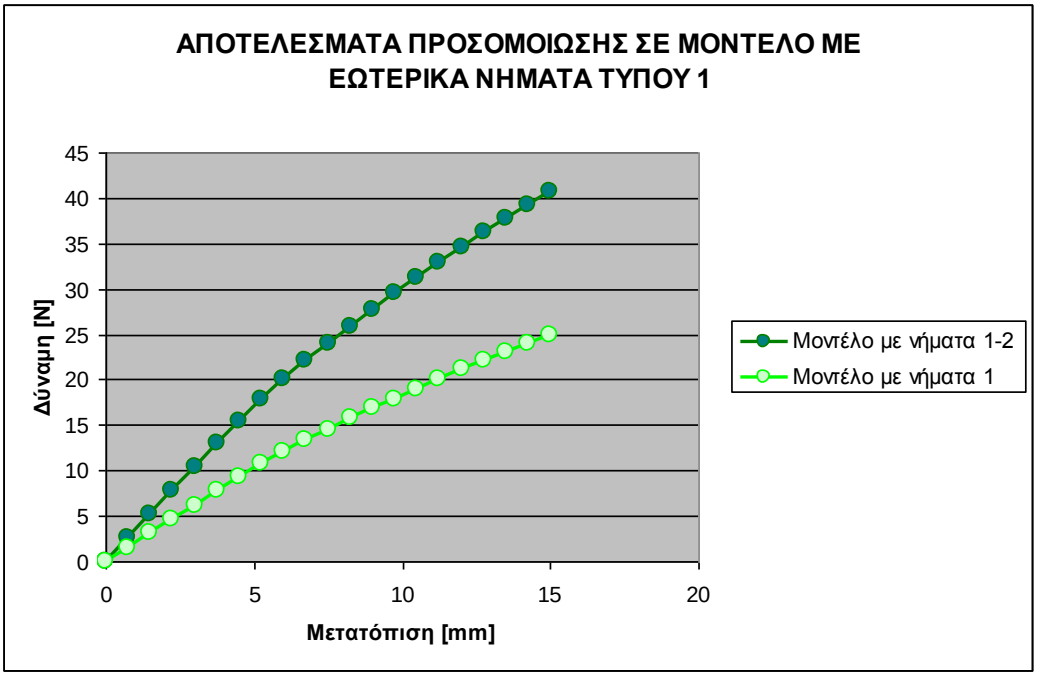


Σχήμα 4.7: Τρισδιάστατη απεικόνιση της δομικής μονάδας μόνο με εσωτερικά νήματα τύπου 2

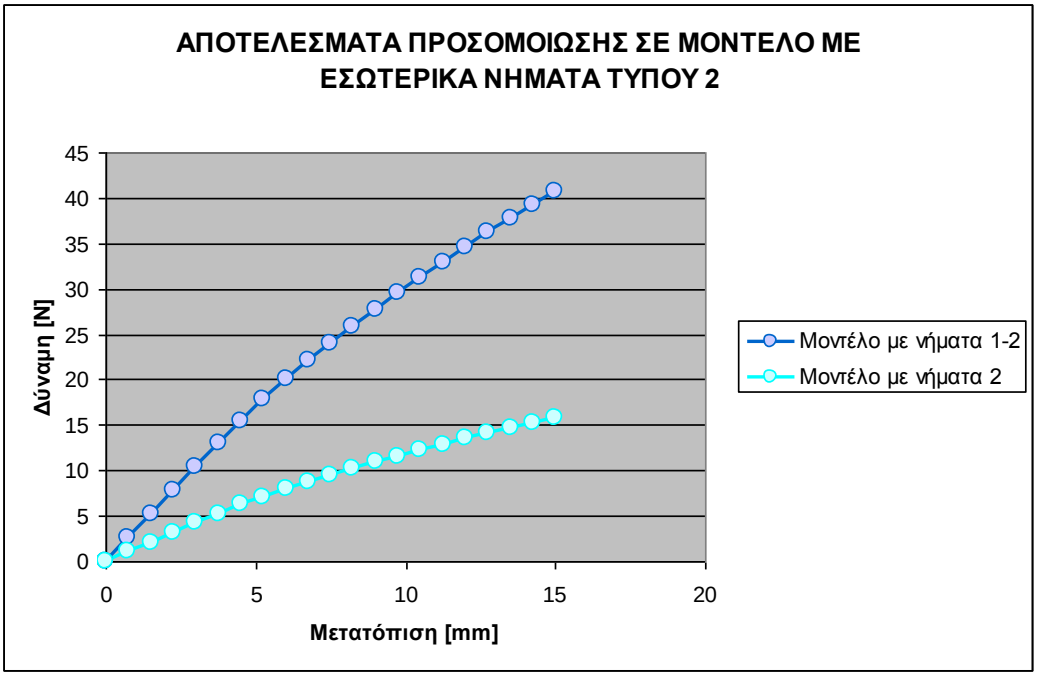


Σχήμα 4.8: Δομική μονάδα μόνο με εσωτερικά νήματα τύπου 2

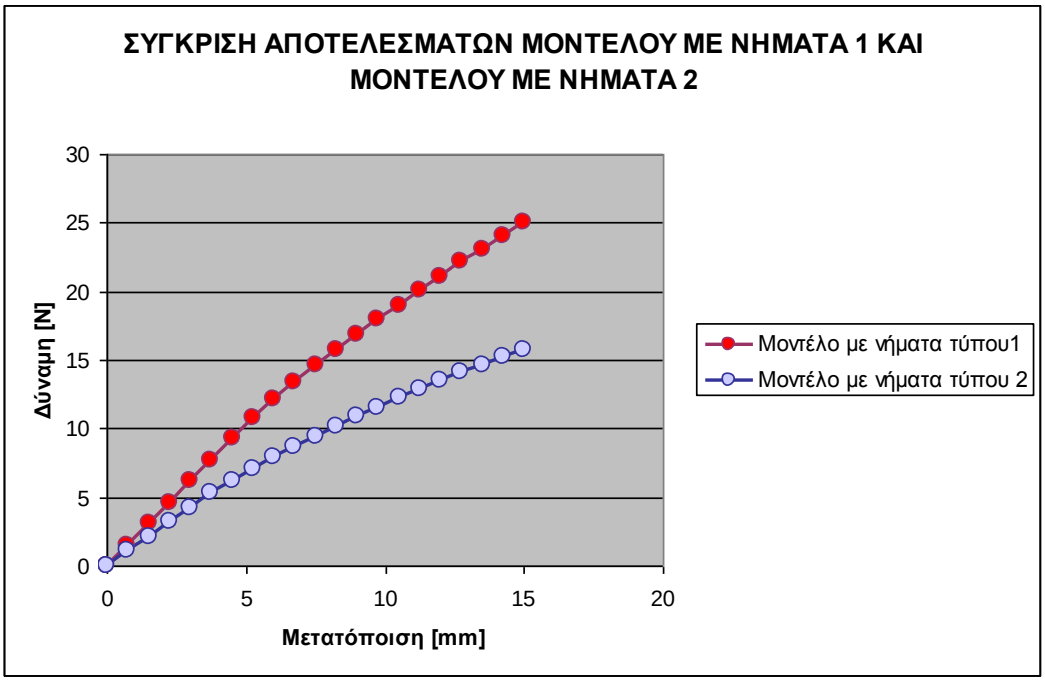
Από τη μέχρι τώρα μελέτη του μοντέλου αναμένεται πως η συμμετοχή των εσωτερικών νημάτων τύπου 1 στα αποτελέσματα θα είναι μεγαλύτερη από τα νήματα τύπου 2, λόγω του ότι τα νήματα 1 είναι σε πλήθος περισσότερα από τα νήματα 2. Στα διαγράμματα που έπονται παρουσιάζονται για κάθε ένα τύπο νημάτων τα αποτελέσματα από την προσομοίωση της συμπίεσης, καθώς και η σύγκριση ανάμεσα στους δύο τύπους νημάτων 1 και 2 αντίστοιχα.



Διάγραμμα 4.10: Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου με νήματα τύπου 1-2 και μοντέλου με νήματα τύπου 1



Διάγραμμα 4.11: Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου με νήματα τύπου 1-2 και μοντέλου με νήματα τύπου 2

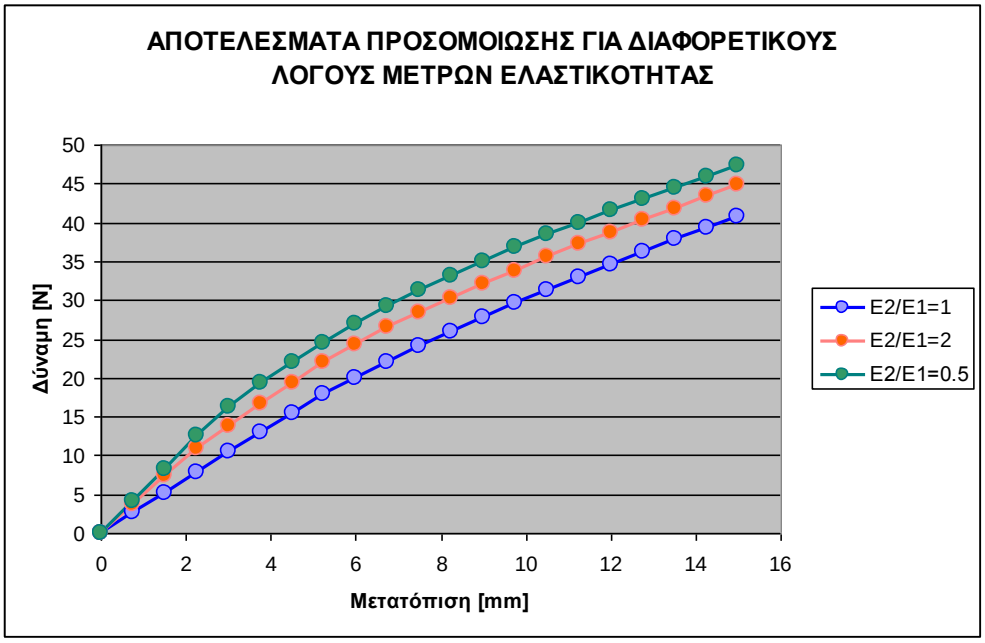


Διάγραμμα 4.12: Σύγκριση μοντέλου με νήματα 1 και μοντέλου με νήματα τύπου 2

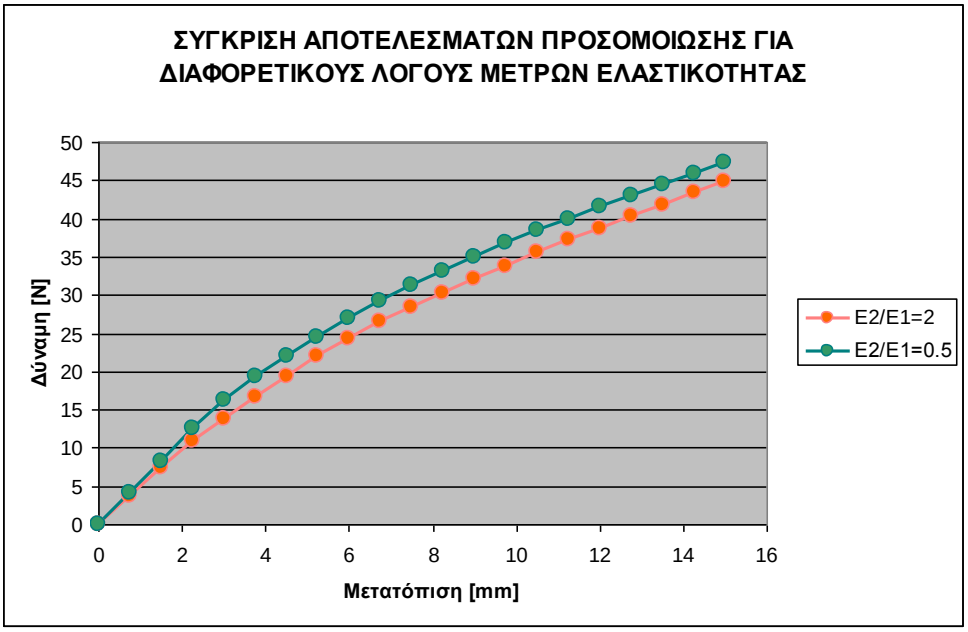
Από τη ανάλυση των διαγραμμάτων 1, 2 και 3 προκύπτουν τα εξής: είναι λογικό το έμβολο στη δοκιμή συμπίεσης να πρέπει να ασκήσει μικρότερη δύναμη για να προκαλέσει την παραμόρφωση ενός δείγματος που περιέχει στην εσωτερική επιφάνεια τον ένα μόνο τύπο νημάτων σε σχέση με ένα δείγμα που έχει και τα δύο. Επιπροσθέτως από το διάγραμμα 4.3 διαπιστώνεται πως η αρχική υπόθεση επαληθεύτηκε. Αν ληφθεί υπόψη το μέτρο ελαστικότητας των δύο τύπων των spacer νημάτων πρέπει το νήμα με το μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας, δηλαδή το νήμα τύπου 2 να είναι περισσότερο δύσκαμπτο, άρα το δείγμα που περιέχει μόνο νήματα τύπου 2 να έχει μεγαλύτερη αντίσταση στη συμπίεση. Στην συγκεκριμένη περίπτωση όμως παρατηρείται πως συμβαίνει το αντίθετο. Αυτό οφείλεται στο ότι τα νήματα με μικρότερο μέτρο ελαστικότητας (νήματα τύπου 1) είναι σε πλήθος περισσότερα από τα νήματα τύπου2. Επομένως έχουν μεγαλύτερη συμμετοχή στο αποτέλεσμα της προσομοίωσης.

4.2. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΡΩΝ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΕΣΩΤΕΡΙΚΩΝ ΙΝΩΝ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο τα μέτρα ελαστικότητας των εσωτερικών νημάτων τύπου 1 και 2 είναι $E_1 = 4876\, N/mm^2$ και $E_2 = 5141\, N/mm^2$ αντίστοιχα. Ο λόγος τους E_2 / E_1 είναι περίπου ίσος με μονάδα. Η παραμετρική ανάλυση που ακολουθεί έγινε για λόγους μέτρων ελαστικότητας 2 και 0.5 αντίστοιχα. Ο λόγος E_2 / E_1 = 2 προκύπτει με διπλασιασμό της τιμής του μέτρου ελαστικότητας των νημάτων τύπου 2, η οποία είναι 10282 N/mm^2. Ο λόγος E_2 / E_1 = 0.5 προκύπτει με διπλασιασμό της τιμής του μέτρου ελαστικότητας των νημάτων τύπου 1, η οποία είναι 9752 N/mm^2. Στην μία και στην άλλη περίπτωση αναμένεται τα αντίστοιχα μοντέλα να έχουν μεγαλύτερη αντίσταση στη συμπίεση από το μοντέλο με λόγο μέτρων ελαστικότητας ίσο με τη μονάδα. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης και η μεταξύ τους σύγκριση.



Διάγραμμα 4.13: Αποτελέσματα προσομοίωσης σε μοντέλα με διαφορετικούς λόγους μέτρων ελαστικότητας



Διάγραμμα 4.14: Σύγκριση αποτελεσμάτων σε μοντέλα με διαφορετικούς λόγους μέτρων ελαστικότητας

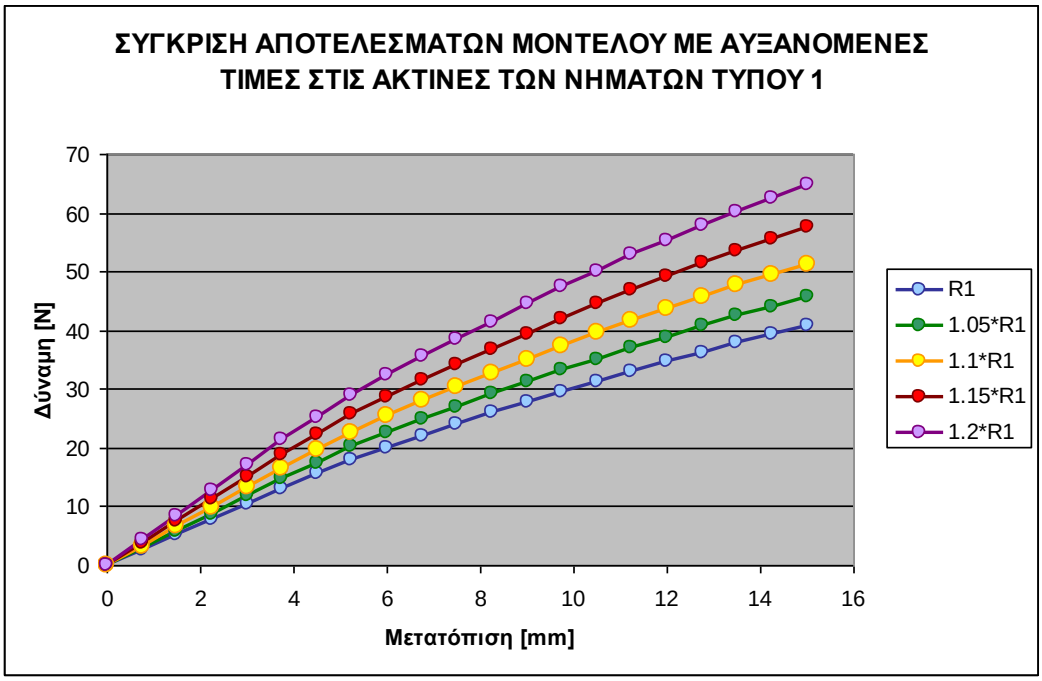
Παρατηρείται ότι οι τιμές των καμπύλων με λόγο E_2 / E_1 διαφορετικό της μονάδας είναι μεγαλύτερες από τις τιμές της καμπύλης με λόγο 1, αφού και στις δύο περιπτώσεις αυξήθηκε το μέτρο ελαστικότητας. Λόγω της αναφερθείσας αύξησης της τιμής του μέτρου ελαστικότητας για κάθε τύπο νημάτων είναι αναμενόμενη η αύξηση της αντίστασης σε συμπίεση της δομικής μονάδας. Επιπλέον για λόγο E_2 / E_1 ίσο με 0.5 παρατηρείται μεγαλύτερη αύξηση της αντίστασης σε συμπίεση της δομικής μονάδας, απ' ότι για λόγο E_2 / E_1 ίσο με 2. Οι λόγοι που το προκαλούν αυτό έχουν σχέση με τη γεωμετρία, την ακτίνα και το πλήθος των εσωτερικών ινών. Ορισμένα από τα νήματα τύπου 2 που είναι σε διαμόρφωση "x" είναι λιγότερο δύσκαμπτα από τα νήματα τύπου 1 που είναι σε διαμόρφωση "( )". Η ακτίνα της διατομής όσο μεγαλύτερη είναι, τόσο πιο δύσκαμπτο είναι το νήμα άρα αυξάνεται η αντίσταση της δομής σε συμπίεση. Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω και για πλήθος νημάτων τύπου 1 μεγαλύτερο από τα νήματα τύπου 2, οι τιμές της καμπύλης που αντιστοιχεί σε λόγο E_2 / E_1 ίσο με 0.5 είναι μεγαλύτερες από τις τιμές της καμπύλης με λόγο E_2 / E_1 ίσο με μονάδα.

4.3. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΑΚΤΙΝΩΝ ΤΩΝ ΕΣΩΤΕΡΙΚΩΝ ΙΝΩΝ

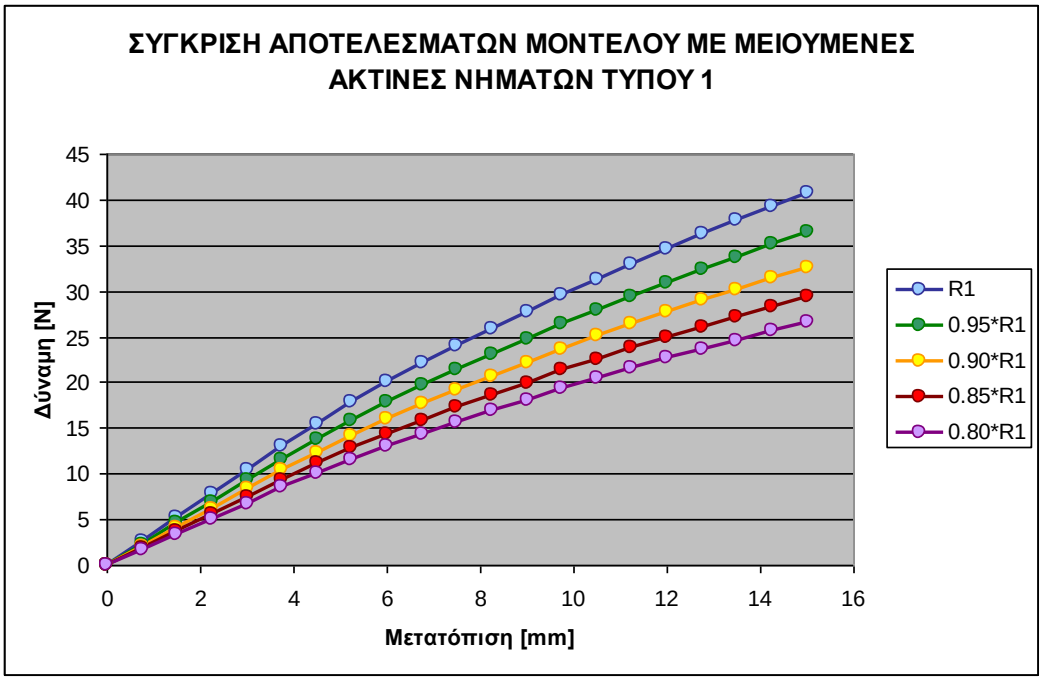
Διερευνήθηκαν τέσσερεις περιπτώσεις μοντέλων με διαφορετικές τιμές ακτινών των εσωτερικών νημάτων. Οι περιπτώσεις είναι :

- Αύξηση της ακτίνας των νημάτων τύπου 1 έως 20%,
- Μείωση της ακτίνας των νημάτων τύπου 1 έως 20%,
- Αύξηση της ακτίνας των νημάτων τύπου 2 έως 20% και
- Μείωση της ακτίνας των νημάτων τύπου 2 έως 20%.

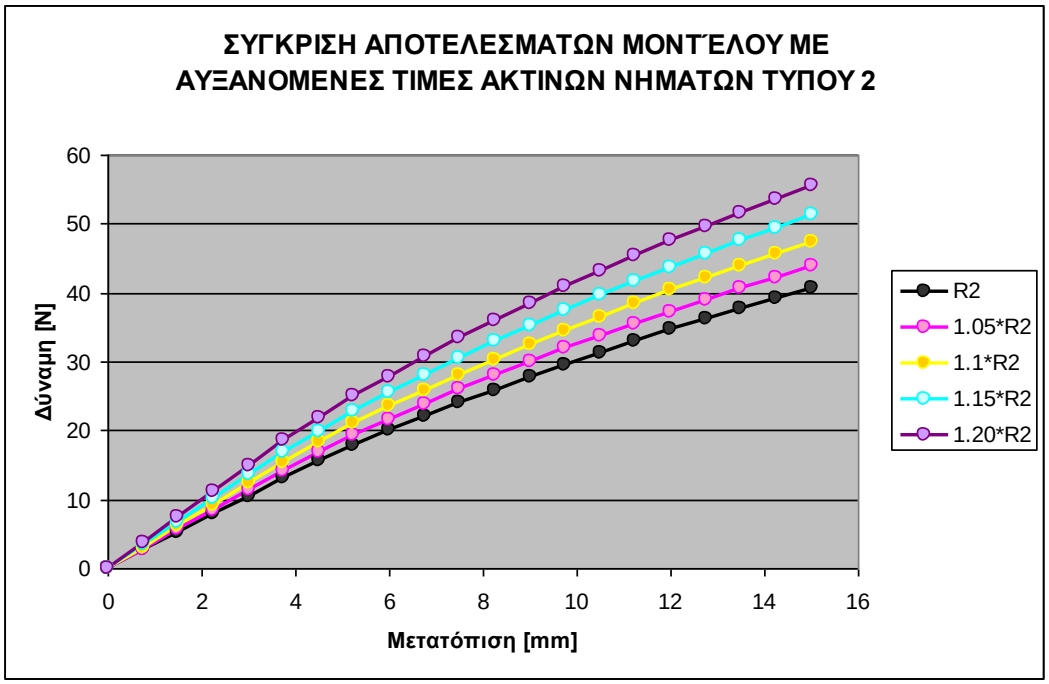
Στα επόμενα τέσσερα διαγράμματα που ακολουθούν φαίνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δοκιμής συμπίεσης σε μοντέλα με αυξανόμενες και μειούμενες τιμές ακτινών των νημάτων 1 και 2 αντίστοιχα έως και 20%.



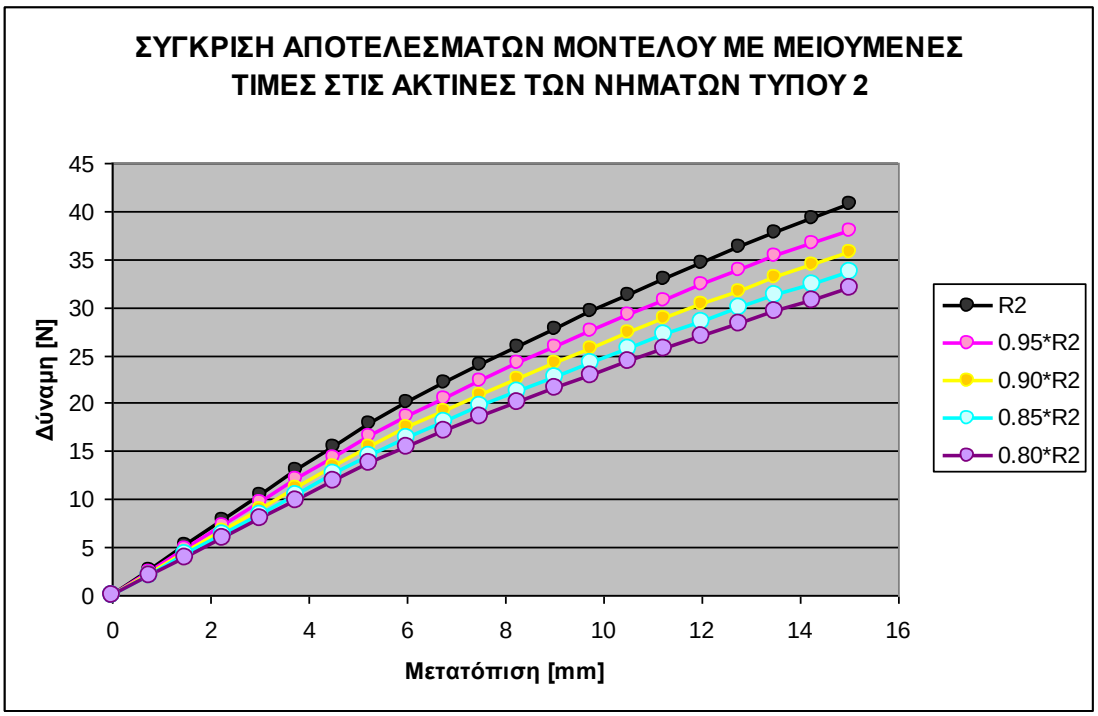
Διάγραμμα 4.15: Αποτελέσματα μοντέλου με αύξηση των τιμών της ακτίνας διατομής των νημάτων 1 έως 20%



Διάγραμμα 4.16: Αποτελέσματα μοντέλου με μείωση της τιμής της ακτίνας της διατομής των νημάτων 1 έως 20%



Διάγραμμα 4.17: Αποτελέσματα μοντέλου με αύξηση της τιμής της ακτίνας της διατομής των νημάτων 2 έως 20%



Διάγραμμα 4.18: Αποτελέσματα μοντέλου με μείωση της τιμής της ακτίνας της διατομής των νημάτων 2 έως 20%

Από τα ανωτέρω διαγράμματα διαπιστώνεται πως με αύξηση της ακτίνας της διατομής των νημάτων οι τιμές της αντίστασης σε συμπίεση αυξάνονται, ενώ με μείωση των τιμών της ακτίνας της διατομής των νημάτων οι τιμές της αντίστασης μειώνονται. Η ακτίνα υπεισέρχεται στον τύπο της ροπής αδράνειας και κατ' επέκταση στην δυσκαμψία των νημάτων. Ο τύπος της ροπής αδράνειας είναι [18]:

$$I_x = I_y = \frac{\pi \cdot d^4}{64} = \frac{\pi \cdot r^4}{4}$$

όπου d είναι η διάμετρος του νήματος και r η ακτίνα του.

Σύμφωνα λοιπόν, με τον παραπάνω τύπο αυξάνοντας την ακτίνα των εσωτερικών νημάτων αυξάνεται η δυσκαμψία των ινών και κατ' επέκταση η αντίσταση του υφάσματος σε συμπίεση. Αντίστοιχα αν μειωθεί η τιμή της ακτίνας των spacer νημάτων η δυσκαμψία των εσωτερικών νημάτων μειώνεται, άρα και η αντίσταση του υφάσματος σε συμπίεση. Το γεγονός ότι η τιμή της αντίστασης σε συμπίεση αυξάνεται περισσότερο με αύξηση της τιμής της ακτίνας της διατομής των νημάτων 1 σε σχέση με τα νήματα 2 οφείλεται στο μεγαλύτερο πλήθος των νημάτων 1 εν συγκρίσει με τα νήματα 2.

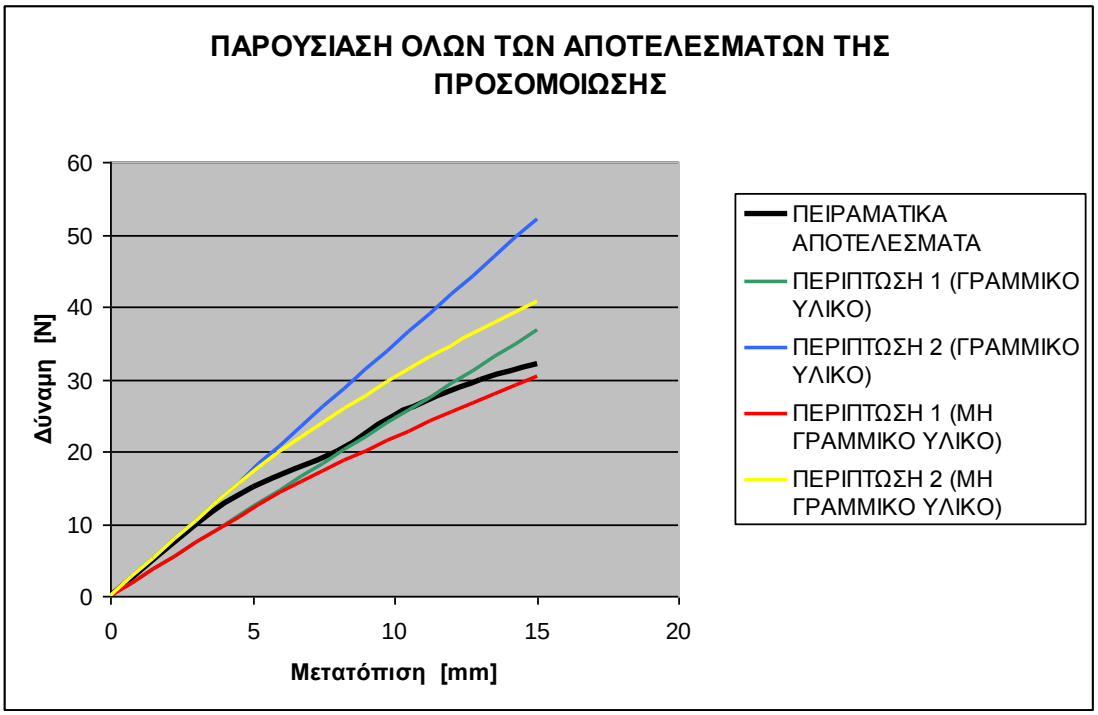
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^{ο}

ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε η μοντελοποίηση ενός τρισδιάστατου υφάσματος διατήρησης απόστασης και η προσομοίωση της δοκιμής συμπίεσης για τον προσδιορισμό της αντίστασης σε συμπίεση. Η μηχανική ανάλυση της δοκιμής συμπίεσης διεξήχθη στο λογισμικό πακέτο ANSYS με χρήση της θεωρίας των πεπερασμένων στοιχείων. Λόγω της πολυπλοκότητας της δομής επιλέχθηκε η μοντελοποίηση της δομικής μονάδας του δείγματος με σκοπό την μείωση του υπολογιστικού κόστους. Δεδομένου ότι η παραμόρφωση του υφάσματος λόγω συμπίεσης βασίζεται στον μηχανισμό κάμψης των νημάτων του εσωτερικού στρώματος, τα beam elements θεωρούνται κατάλληλα για την πλεγματοποίηση των εσωτερικών νημάτων.

Αρχικά υπολογίσθηκαν οι σχεδιαστικές παράμετροι που είναι απαραίτητες για την γεωμετρική απεικόνιση του μοντέλου, όπως αποστάσεις μεταξύ υφαδιών και στημονιών των εξωτερικών επιφανειών, απόσταση ανάμεσα στις δύο εξωτερικές επιφάνειες και διάμετροι των νημάτων των εξωτερικών στρωμάτων και των εσωτερικών μονόινων νημάτων. Επόμενο βήμα αποτέλεσε η κατανόηση του σχεδίου πλέξης των εσωτερικών νημάτων, η αναπαραγωγή της γεωμετρίας τους (μήκη και διανύσματα αρχής και πέρατος) και κατ' επέκταση η δημιουργία της δομικής μονάδας. Ακολούθησε ο υπολογισμός των μέτρων ελαστικότητας και η πλεγματοποίηση του μοντέλου, διαδικασία που περιλαμβάνει την επιλογή του πεπερασμένου στοιχείου και του αριθμού των διαμερίσεων. Ο υπολογισμός των μέτρων ελαστικότητας των νημάτων της εσωτερικής επιφάνειας έγινε αρχικά στην γραμμική περιοχή της καμπύλης τάσης – παραμόρφωσης για κάθε ένα από τους δύο τύπους spacer νημάτων και στη συνέχεια έγινε υπολογισμός του μέτρου ελαστικότητας με βάση τις δύο πρώτες γραμμικές περιοχές για κάθε υλικό. Ως πεπερασμένο στοιχείο επιλέχθηκε η δοκός, ενώ για τον αριθμό των διαμερίσεων, έγινε έλεγχος διαφόρων πυκνοτήτων πλέγματος για πρόβολο σε κάμψη. Λόγω της επαφής των νημάτων των εξωτερικών επιφανειών για την αποφυγή διείσδυσης του ενός σώματος στο άλλο επιβλήθηκαν οριακές συνθήκες επαφής (contact) στα σημεία επαφής των νημάτων. Τέλος επιβλήθηκαν οι οριακές συνθήκες που αντιστοιχούν σε δύο περιπτώσεις. Η πρώτη περίπτωση περιλαμβάνει πάκτωση της κάτω εξωτερικής επιφάνειας και κατακόρυφη μετατόπιση κατά τον άξονα z. Η δεύτερη περιλαμβάνει ότι και η προηγούμενη και περιορισμό των στροφικών βαθμών ελευθερίας κατά x και y των εσωτερικών νημάτων για περιορισμό των μετατοπίσεων των εσωτερικών νημάτων μεταξύ των δύο στρωμάτων.

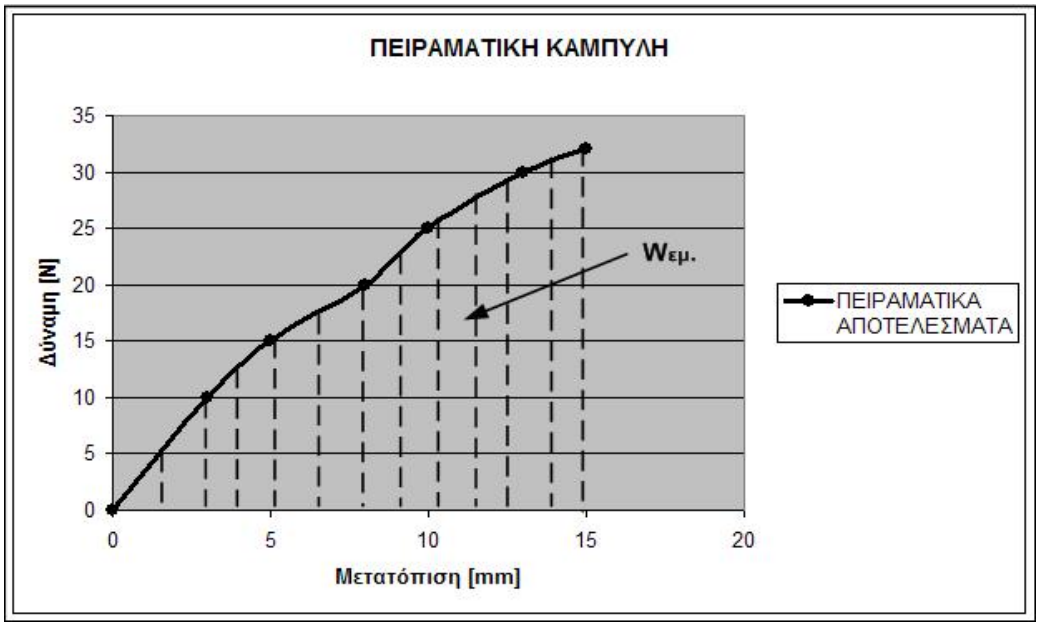
Πραγματοποιήθηκε προσομοίωση της δοκιμής συμπίεσης για τέσσερεις περιπτώσεις που αντιστοιχούν στην περίπτωση 1 γραμμικού και μη γραμμικού υλικού και στην περίπτωση 2 γραμμικού και μη γραμμικού υλικού. Από κάθε περίπτωση προσομοίωσης προέκυψε η καμπύλη δύναμης – μετατόπισης. Στη συνέχεια έγινε αναγωγή της δύναμης που αναπτύσσεται στην δομική μονάδα σε αυτήν του εξεταζόμενου δείγματος λαμβάνοντας υπόψη τα αντίστοιχα εμβαδά. Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η πειραματική καμπύλη καθώς και οι καμπύλες που προέκυψαν από την προσομοίωση των τεσσάρων περιπτώσεων.



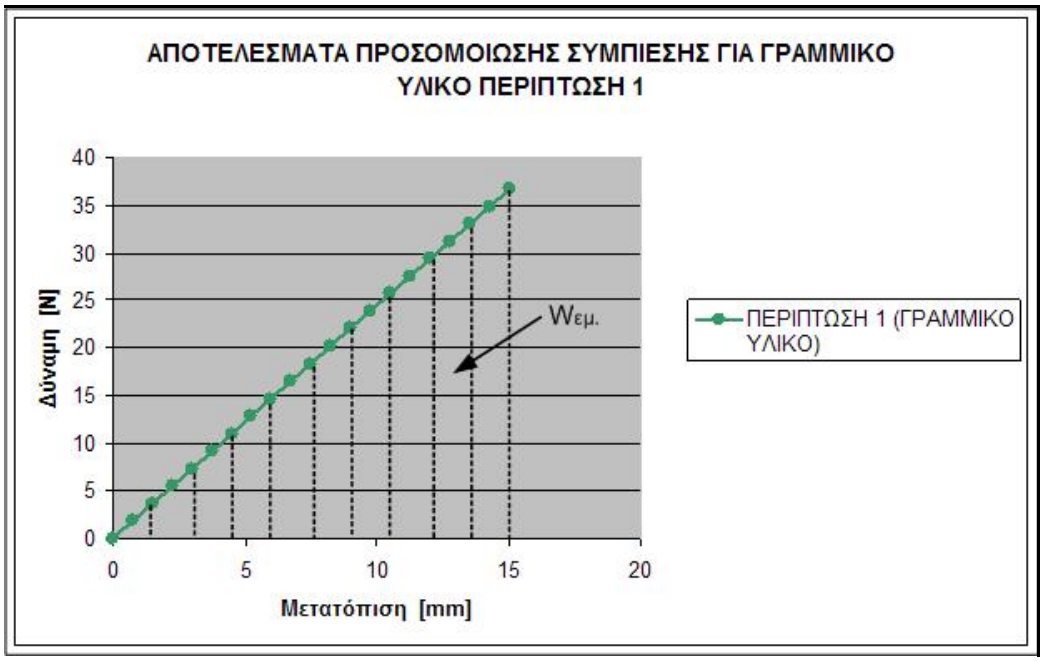
Διάγραμμα 5.6: Συνολικό διάγραμμα σύγκρισης πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων προσομοίωσης

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης είναι τα εξής: οι καμπύλες 1 και 2 για γραμμικό υλικό δεν προσεγγίζουν το σχήμα της πειραματικής καμπύλης, λόγω των υψηλών τάσεων που αναπτύσσονται στις εσωτερικές ίνες κατά τη διάρκεια της συμπίεσης. Η γραμμικότητα τους οφείλεται στη θεώρηση γραμμικού μέτρου ελαστικότητας για τα υλικά των εσωτερικών ινών.

Σε αντίθεση, οι καμπύλες 1 και 2 για μη γραμμικό υλικό προσεγγίζουν πολύ καλύτερα το σχήμα της πειραματικής καμπύλης, λόγω του ότι το μέτρο ελαστικότητας των υλικών των εσωτερικών νημάτων υπολογίστηκε με βάση τη διγραμμική περιοχή της καμπύλης τάσης – παραμόρφωσης. Επιπλέον η πειραματική καμπύλη βρίσκεται εντός των ορίων που θέτουν οι καμπύλες 1 και 2 του μη γραμμικού υλικού, γεγονός που οφείλεται στον καθορισμό των οριακών συνθηκών για την περίπτωση 1 και 2. Όπως έχει ειπωθεί και προηγουμένως δεν μπορεί να υπάρξει πλήρης ταύτιση μεταξύ των αποτελεσμάτων της δοκιμής συμπίεσης και της προσομοίωσης στο ANSYS. Από τα παραπάνω προκύπτει πως η μέθοδος μοντελοποίησης και η μηχανική ανάλυση για τη μελέτη της συμπεριφοράς των υφασμάτων διατήρησης απόστασης στην συμπίεση είναι ακριβής. Αυτό μπορεί να τεκμηριωθεί και από τη σύγκριση μεταξύ του εμβαδού της πειραματικής καμπύλης με το εμβαδό της κάθε μίας καμπύλης της προσομοίωσης χωριστά. Παρακάτω παρουσιάζονται οι πέντε καμπύλες και τα εμβαδά τους που αντιστοιχούν στο έργο του εμβόλου.

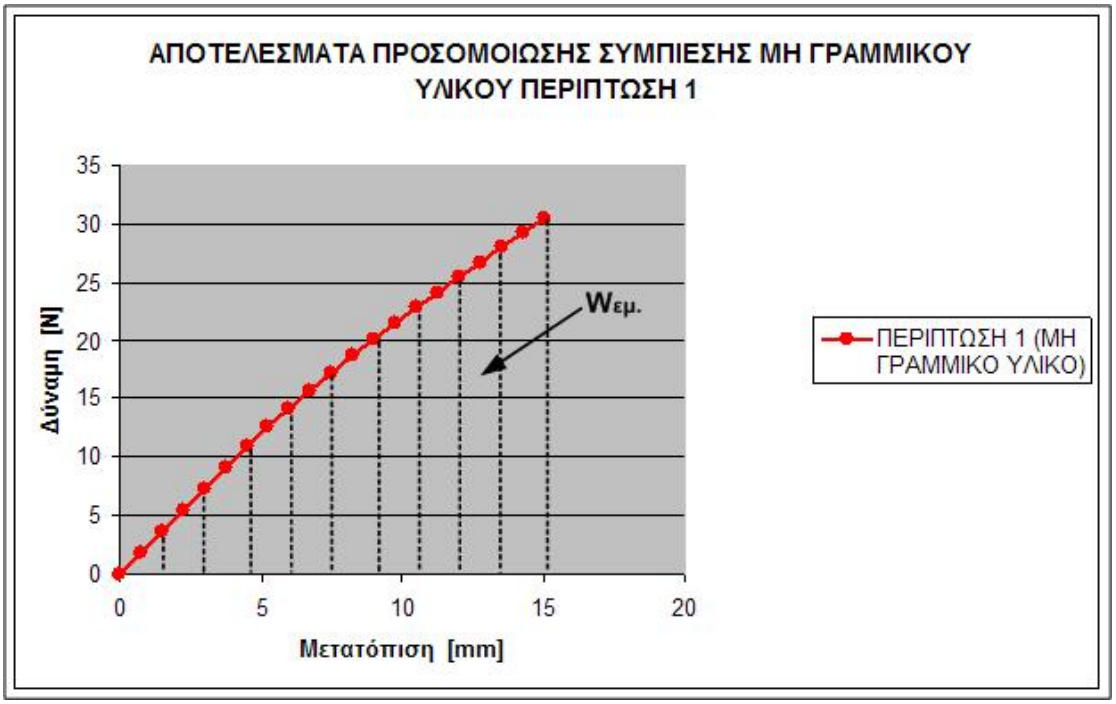


Διάγραμμα 5.7: Εμβαδό πειραματικής καμπύλης

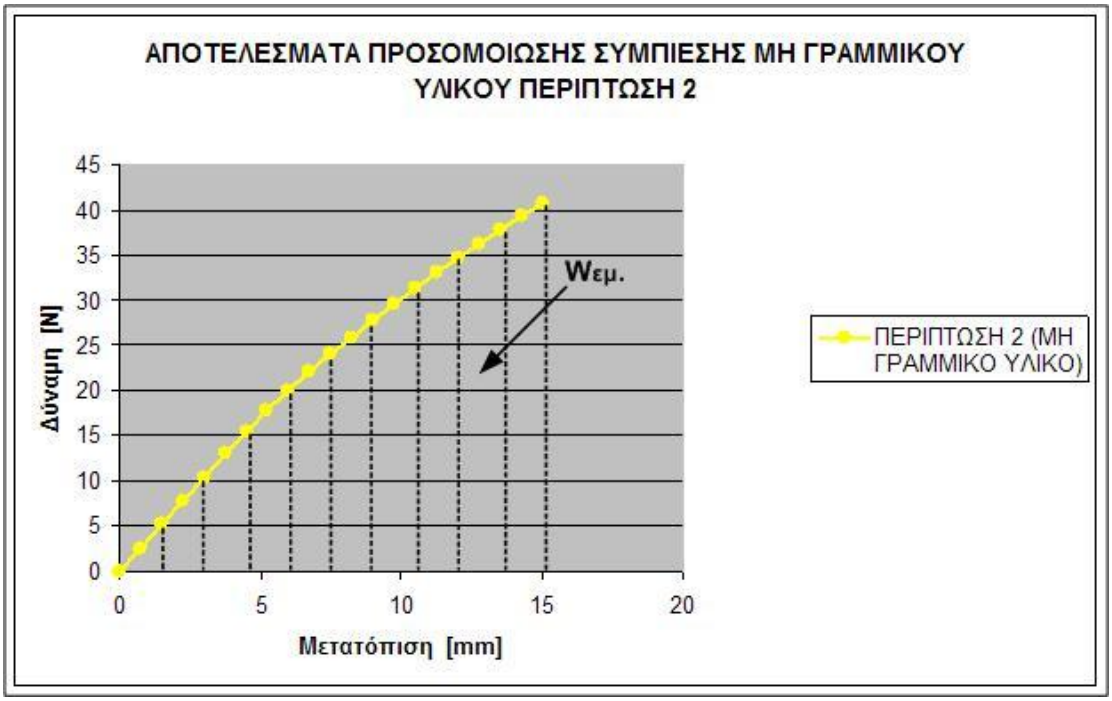


Διάγραμμα 5.8: Εμβαδό καμπύλης γραμμικού υλικού περίπτωση 1

Διάγραμμα 5.9: Εμβαδό καμπύλης γραμμικού υλικού περίπτωση 2



Διάγραμμα 5.10: Εμβαδό καμπύλης μη γραμμικού υλικού περίπτωση 1



Διάγραμμα 5. 11: Εμβαδό καμπύλης μη γραμμικού υλικού περίπτωση 2

Η απόκλιση των εμβαδών των καμπύλων της περίπτωσης 1 για γραμμικό και μη γραμμικό υλικό είναι 3% και 14% αντίστοιχα. Η απόκλιση των εμβαδών των καμπύλων της περίπτωσης 2 για γραμμικό και μη γραμμικό υλικό είναι 37% και 20% αντίστοιχα. Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό πως η λύση του προβλήματος βρίσκεται ανάμεσα στις δύο περιπτώσεις 1 (άρθρωση) και 2 (πάκτωση) και μάλιστα πιο κοντά στην άρθρωση. Επομένως τα αποτελέσματα της προσομοίωσης θεωρούνται αξιόπιστα.

Επόμενο βήμα αποτέλεσε η παραμετρική ανάλυση του δείγματος υφάσματος διατήρησης απόστασης. Ως παράμετροι προς μελέτη επιλέχθηκαν τα μέτρα ελαστικότητας και οι ακτίνες διατομής των εσωτερικών ινών. Έτσι ακολούθησε ανάλυση της συμπεριφοράς του δείγματος σε συμπίεση για κάθε μία παράμετρο χωριστά. Αρχικά μελετήθηκε η δομική μονάδα μόνο με έναν από τους δύο τύπους νημάτων κάθε φορά. Από τη μελέτη διαπιστώθηκε πως τη μεγαλύτερη συμμετοχή στα αποτελέσματα έχουν τα νήματα τύπου 1 που είναι σε διαμόρφωση "( )". Αυτό συμβαίνει λόγω του πλήθους των νημάτων τύπου 1 που είναι μεγαλύτερο από αυτό των νημάτων τύπου 2 και της διαμόρφωσης "x" που έχουν κάποια από τα νήματα τύπου 2. Η διαμόρφωση "x" προσδίδει λιγότερη δυσκαμψία στα νήματα σε σχέση με τη διαμόρφωση "( )". Στη συνέχεια έγινε προσομοίωση της δοκιμής συμπίεσης σε δομικές μονάδες δείγματος με διαφορετικούς λόγους μέτρων ελαστικότητας E_2 / E_1. Οι λόγοι που επιλέχθηκαν είναι E_2 / E_1 = 2 και E_2 / E_1 = 0.5. και προέκυψαν για E_2 = 10282 N/mm^2 και για E_1 = 9752 N/mm^2 αντίστοιχα. Η καμπύλη που αντιστοιχεί σε λόγο E_2 / E_1 = 0.5 παρουσιάζει μεγαλύτερη αντίσταση στην συμπίεση από ότι η καμπύλη που αντιστοιχεί σε λόγο E_2 / E_1 = 2. Η εξήγηση είναι όπως και πριν το μεγαλύτερο πλήθος των

νημάτων 1 και η διαμόρφωση τους "( )". Τέλος έγινε παραμετρική ανάλυση της δομικής μονάδας του δείγματος με διαφορετικές τιμές των ακτινών των εσωτερικών νημάτων. Προτιμήθηκε εύρος τιμών $\pm 20\%$ της κανονικής τιμής. Από τη ανάλυση προέκυψε πως με αύξηση της τιμής της ακτίνας και των δύο νημάτων το μοντέλο αποκτά μεγαλύτερη αντίσταση στη συμπίεση . Αντίστοιχα όταν η τιμή της ακτίνας των νημάτων μειώνεται, μειώνεται και η αντίσταση του μοντέλου στη συμπίεση. Παρατηρείται πως η δομική μονάδα γίνεται περισσότερο ανθεκτική στην αντίσταση κατά την συμπίεση όταν αυξάνεται η τιμή της ακτίνας των νημάτων τύπου 1, αφού όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως το πλήθος τους είναι περισσότερο από το πλήθος των νημάτων τύπου 2.

Ένα γενικό συμπέρασμα που προκύπτει από την παραμετρική ανάλυση είναι πως το πλήθος, η ακτίνα της διατομής, η τιμή του μέτρου ελαστικότητας του υλικού, ο τρόπος πλέξης των εσωτερικών νημάτων παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στην ανθεκτικότητα του υφάσματος διατήρησης απόστασης στη συμπίεση. Όπως έχει ειπωθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο, η ενίσχυση σε διάτμηση είναι πολύ σημαντική σε εφαρμογές του υφάσματος διατήρησης απόστασης στην ενίσχυση σκυροδέματος. Η ενίσχυση αυτή επιτυγχάνεται με τα νήματα που υπάρχουν στο εσωτερικό στρώμα του υφάσματος, πράγμα το οποίο προκύπτει και από τη προσομοίωση του συγκεκριμένου τύπου υφάσματος σε δοκιμή συμπίεσης με μέσω λογισμικού πακέτου με χρήση της θεωρίας των πεπερασμένων στοιχείων.

Επιπλέον ένα ακόμα συμπέρασμα που προκύπτει, το σημαντικότερο ίσως όλων είναι το πλήθος των δυνατοτήτων που προσφέρονται με τη μοντελοποίηση μιας κατασκευής ή ενός προϊόντος σε ένα υπολογιστικό πακέτο. Η ταχύτητα μοντελοποίησης και η μείωση του υπολογιστικού κόστους και κατ' επέκταση του χρόνου παραγωγής είναι από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα. Συγκεκριμένα στον τομέα της κλωστοϋφαντουργίας, στον οποίο τώρα γίνονται τα πρώτα βήματα για μοντελοποίηση υφασμάτων ή δομών ή μοντέλων που έχουν ως βάση τις ίνες και τα νήματα είναι πολύ σημαντική η δημιουργία υπολογιστικών μοντέλων τέτοιων δομών και η πρόβλεψη των μηχανικών, γεωμετρικών και ελαστικών ιδιοτήτων τους.

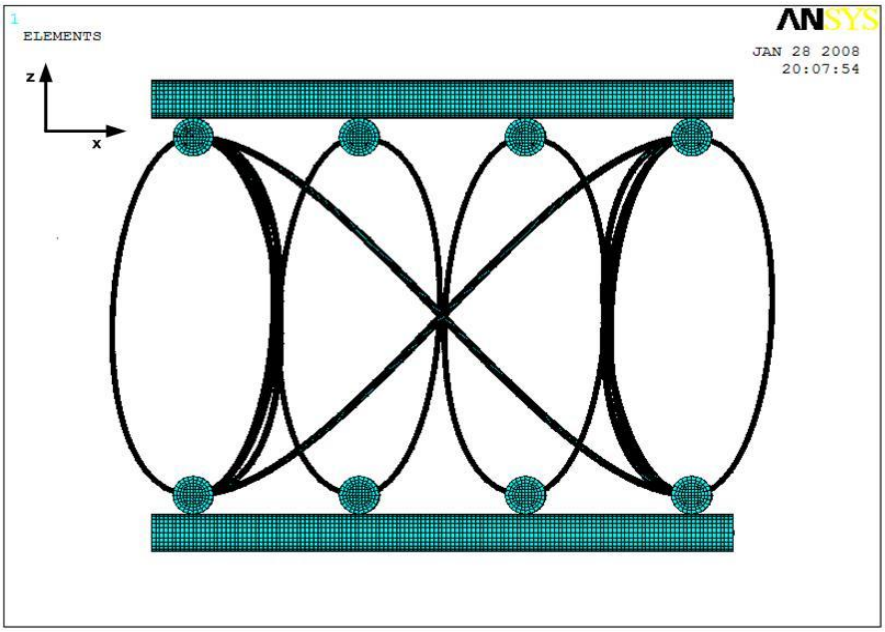
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

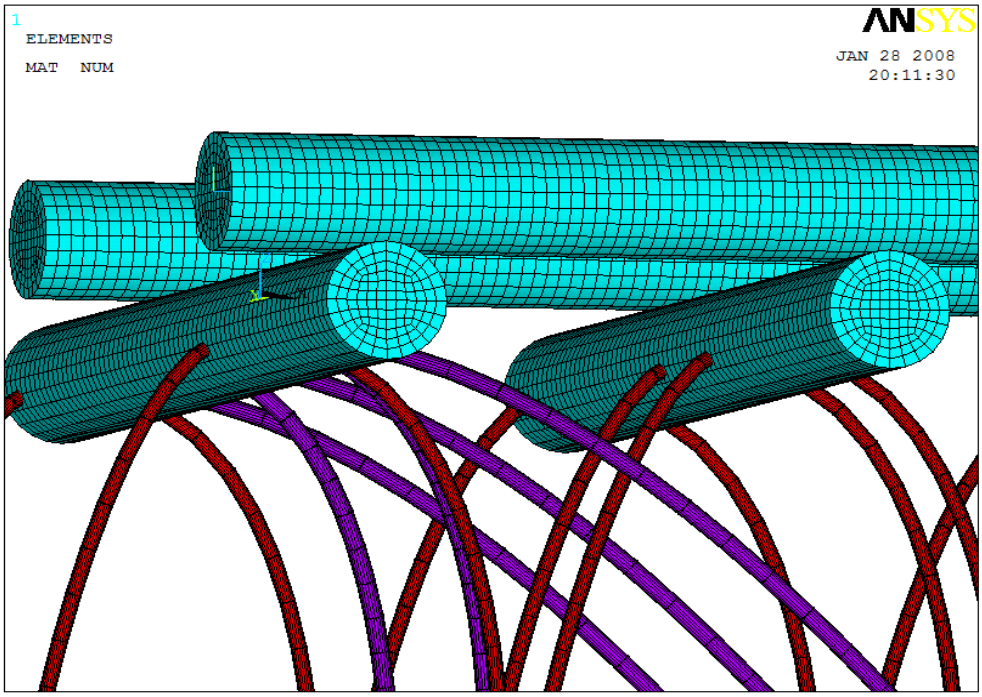
Σύγκριση των αποτελεσμάτων και του χρόνου επίλυσης της προσομοίωσης της δομικής μονάδας σε δοκιμή συμπίεσης σε μοντέλο πλεγματοποιημένο με beam και σε μοντέλο πλεγματοποιημένο με solid-beam

Στο παράρτημα αυτό γίνεται παρουσίαση ενός μοντέλου της δομικής μονάδας, στο οποίο για την πλεγματοποίηση των νημάτων, χρησιμοποιήθηκαν δύο είδη πεπερασμένων στοιχείων, το εξαεδρικό οχτακομβικό και η δοκός. Το οχτακομβικό εξαεδρικό (brick element) ή solid45 χρησιμοποιήθηκε για την πλεγματοποίηση των νημάτων των εξωτερικών επιφανειών. Η επιλογή αυτή έγινε δεδομένου ότι η συμπίεση των κάθετων νημάτων (υφάδια, στημόνια), η οποία αποτελεί την κύρια παραμόρφωση των εξωτερικών στρωμάτων, έχει αποτέλεσμα την μεταβολή των διατομών των νημάτων. Η πλεγματοποίηση των νημάτων των εξωτερικών στρωμάτων με εξαεδρικά στοιχεία, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα επιτρέπει την πλάτυνση των διατομών (δεδομένου ότι υιοθετείται θεωρία επαφής). Σκοπός της παρούσας ενότητας είναι η διερεύνηση της επίδρασης των φαινομένων επαφής στην ακρίβεια της προσομοίωσης της δοκιμής συμπίεσης και στην ταχύτητα της επίλυσης.

Για την πλεγματοποίηση των εσωτερικών νημάτων χρησιμοποιήθηκε το beam. Για τη γεωμετρική απεικόνιση της επαναλαμβανόμενης πλέξης, τον προσδιορισμό του τρόπου πλέξης των εσωτερικών νημάτων, τον προσδιορισμό της γεωμετρίας τους, και την εύρεση των ελαστικών ιδιοτήτων των νημάτων ισχύει ότι ακριβώς και για το μοντέλο της δομικής μονάδας του προς μελέτη υφάσματος διατήρησης απόστασης πλεγματοποιημένο μόνο με beam. Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζεται το μοντέλο μετά την πλεγματοποίησή του.



Σχήμα α.13: Μοντέλο δομικής μονάδας μετά την πλεγματοποίησή του κατά το επίπεδο x-z



Σχήμα α.14: Τριδιάστατη απεικόνιση του μοντέλου της δομικής μονάδας (εστίαση)

Στο σχήμα α.2 τα εσωτερικά νήματα με κόκκινο χρώμα είναι νήματα τύπου 1 και τα νήματα με μωβ χρώμα είναι νήματα τύπου 2.

Τα νήματα των δύο εξωτερικών επιφανειών του υφάσματος συγκρατώνται μεταξύ τους με πλέξιμο χωρίς να επιτρέπεται η οποιαδήποτε ανεξάρτητη κίνηση τους. Στο μοντέλο της δομικής μονάδας η επαφή των νημάτων ορίζεται με το ζεύγος επαφών (οριακές συνθήκες contact), δηλαδή των περιοχών, στη συγκεκριμένη περίπτωση επιφανειών, που τοποθετούνται τα στοιχεία contact και target. Τα στοιχεία επαφής που χρησιμοποιήθηκαν στο συγκεκριμένο μοντέλο είναι τα contact175 και target170, τα οποία είναι κατάλληλα για επαφή ανάμεσα σε επιφάνειες.

Λόγω της πολυπλοκότητας της δομής που μελετάται και του είδους των οριακών συνθηκών επαφής που χρησιμοποιούνται στο παρόν μοντέλο προτιμήθηκε η διερεύνηση της ορθότητας των αποτελεσμάτων του λογισμικού πακέτου ANSYS στο πρόβλημα επαφής κάνοντας χρήση των σχέσεων του Hertz για την επαφή κυλινδρικών σωμάτων. Έγινε χρήση μόνο κυλινδρικών σωμάτων με ασύμβατους κάθετους άξονες γιατί η παρούσα εργασία ασχολείται με τη μοντελοποίηση νημάτων με άξονες ασύμβατα κάθετους μεταξύ τους.

Α.1. Σχέσεις του Hertz για την επαφή μεταξύ δυο κάθετων κυλίνδρων

Θεωρούνται δύο κύλινδροι με ασύμβατους κάθετους άξονες σε επαφή όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα. Οι κύλινδροι έχουν διαμέτρους D_1 και D_2, μέτρα ελαστικότητας E_1 και E_2 και λόγους Poisson ν_1, ν_2 αντίστοιχα. Τους ασκείται δύναμη P όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

Σύμφωνα με τις σχέσεις του Hertz η μέγιστη πίεση στην περιοχή επαφής και η σχετική κίνηση προσέγγισης κάθε σημείου φόρτισης κατά τον άξονα φόρτισης δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\boxed{\begin{aligned} p_{\max} &= \frac{1.5 \cdot P}{\pi \cdot c \cdot d} \\ y &= \lambda \cdot \sqrt[3]{\frac{P^2 \cdot C_E^2}{K_D}} \end{aligned}} \qquad (1)$$

όπου

$$\boxed{\begin{aligned} K_D &= \frac{D_1 \cdot D_2}{D_1 + D_2}, C_E = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \\ c &= \alpha \cdot \sqrt[3]{P \cdot K_D \cdot C_E}, d = \beta \cdot \sqrt[3]{P \cdot K_D \cdot C_E} \end{aligned}} \qquad (2)$$

Τα α, β, λ εξαρτώνται από το λόγο D_1 / D_2. Για διάφορες τιμές αυτού του λόγου παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα και οι αντίστοιχες τιμές των α, β, λ:

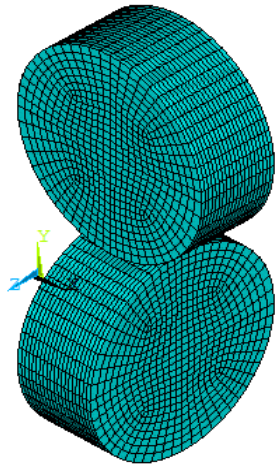
Πίνακας α.3: Τιμές των παραμέτρων α, β και λ για διαφορετικές τιμές του λόγου D_1 / D_2

D_1/D_2	1	1,5	2	3	4	6	10
α	0,908	1,045	1,158	1,350	1,505	1,767	2,175
β	0,908	0,799	0,732	0,651	0,602	0,544	0,481
λ	0,825	0,818	0,804	0,774	0,747	0,702	0,641

Σύμφωνα με τις σχέσεις του Hertz και με βάση την κατανομή των τάσεων κατά τον άξονα y, που είναι ο άξονας της φόρτισης προκύπτει ότι $\boldsymbol{\sigma_y = - p_{max}}$.

Α.2. Επαφή μεταξύ δύο κυλίνδρων με ασύμβατους κάθετους άξονες κάνοντας χρήση του λογισμικού πακέτου ANSYS

Χρησιμοποιούνται δύο κύλινδροι με ασύμβατους κάθετους άξονες που έχουν ίδιες διαμέτρους, ίδια μέτρα ελαστικότητας και ίδιους λόγους Poisson. Το μοντέλο μετά τη δημιουργία πλέγματος παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα α.15: Τα μοντέλο των δύο κυλίνδρων μετά τη δημιουργία πλέγματος

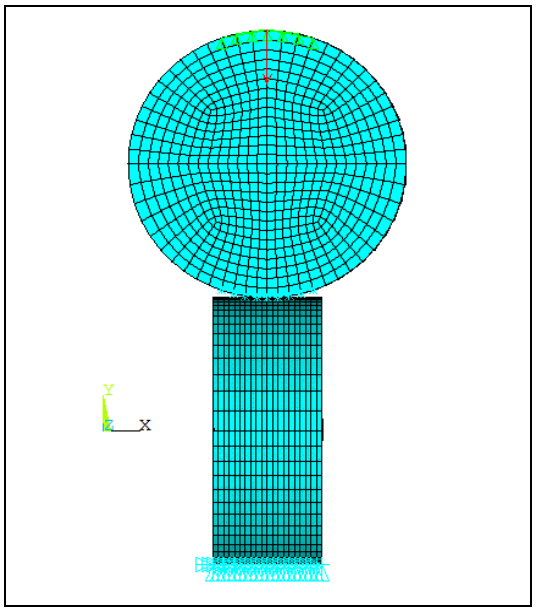
Οι τιμές των μεγεθών που χρησιμοποιήθηκαν είναι:

- $\mathbf{d_1 = d_2 = 2.55}$ **mm**
- **E=20000 N/mm²**
- **v=0.3**

Τα πεπερασμένα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την μοντελοποίηση των κυλίνδρων είναι το εξαεδρικό οχτακομβικό (brick element) ή solid45 σύμφωνα με το λογισμικό πακέτο

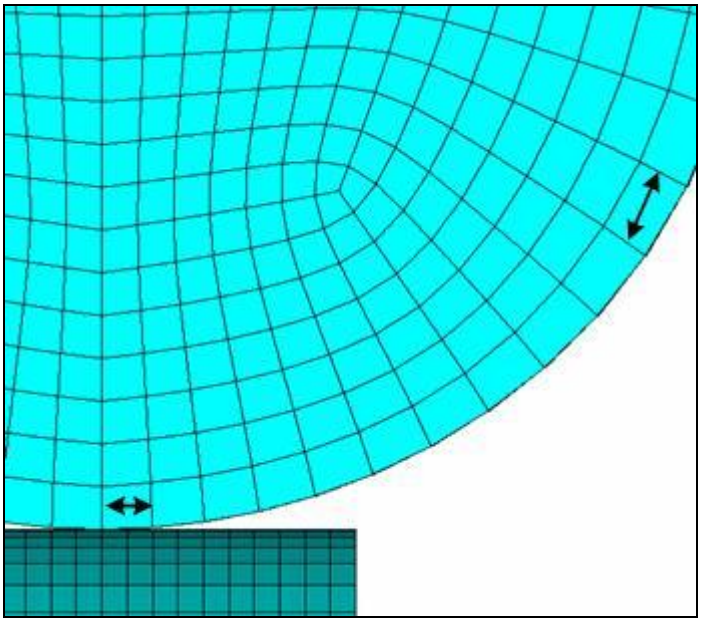
που χρησιμοποιείται. Επίσης τα πεπερασμένα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για τα ζεύγη επαφής των δύο κυλίνδρων είναι τα contact 175 και target170, για τους λόγους που έχουν αναφερθεί προηγουμένως.

Οι οριακές συνθήκες του προβλήματος είναι οι εξής: το μοντέλο έχει δύο επίπεδα συμμετρίας, το επίπεδο xy και το zy σύμφωνα πάντα με το παραπάνω σχήμα. Τα επίπεδα αυτά είναι επίπεδα γεωμετρικής συμμετρίας και συμμετρίας λόγω φόρτισης. Για το λόγο αυτό στους κόμβους αυτών των δύο επιπέδων δεσμεύουμε τον ένα βαθμό ελευθερίας που σχετίζεται με την κάθετη κίνηση ως προς το αντίστοιχο επίπεδο. Έτσι για το επίπεδο xy κάθετη κίνηση είναι αυτή που γίνεται στον άξονα z, άρα τοποθετήθηκε κύλιση στους κόμβους που ανήκουν στο επίπεδο (x = 1+1/2) .Για το επίπεδο zy η κάθετη κίνηση γίνεται κατά τον άξονα x, οπότε τοποθετήθηκε κύλιση στους κόμβους του επιπέδου (z = 0). Επίσης στους κόμβους της επιφάνειας του κάτω κυλίνδρου που έρχεται σε επαφή με το επίπεδο (y= -1,2732) περιορίστηκαν και οι τρεις βαθμοί ελευθερίας ώστε να αποτραπεί η κίνηση προς τις τρεις κατευθύνσεις. Τέλος, το φορτίο επιβλήθηκε στον πάνω κύλινδρο όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Στην πάκτωση του κάτω κυλίνδρου ασκείται η αντίδραση της δύναμης του πάνω κυλίνδρου και έτσι δημιουργείται το μοντέλο που περιγράφεται από τη θεωρία του Hertz.



Σχήμα α.16: Το μοντέλο των δύο κυλίνδρων μετά την επιβολή του φορτίου

Χρειάζεται βέβαια να τονισθεί ότι στην περιοχή επαφής το πλέγμα είναι πολύ πιο πυκνό σε σχέση με το υπόλοιπο μοντέλο γιατί εκεί θα αναπτυχθούν οι υψηλότερες τάσεις επομένως είναι απαραίτητη όσο το δυνατό μεγαλύτερη ακρίβεια των αποτελεσμάτων, τη οποία προσφέρει το πιο πυκνό πλέγμα. Αυτό φαίνεται καθαρά και από το παρακάτω σχήμα.



Σχήμα α.17: Πυκνότητα πλέγματος στην περιοχή επαφής των δύο κυλίνδρων του μοντέλου (εστίαση)

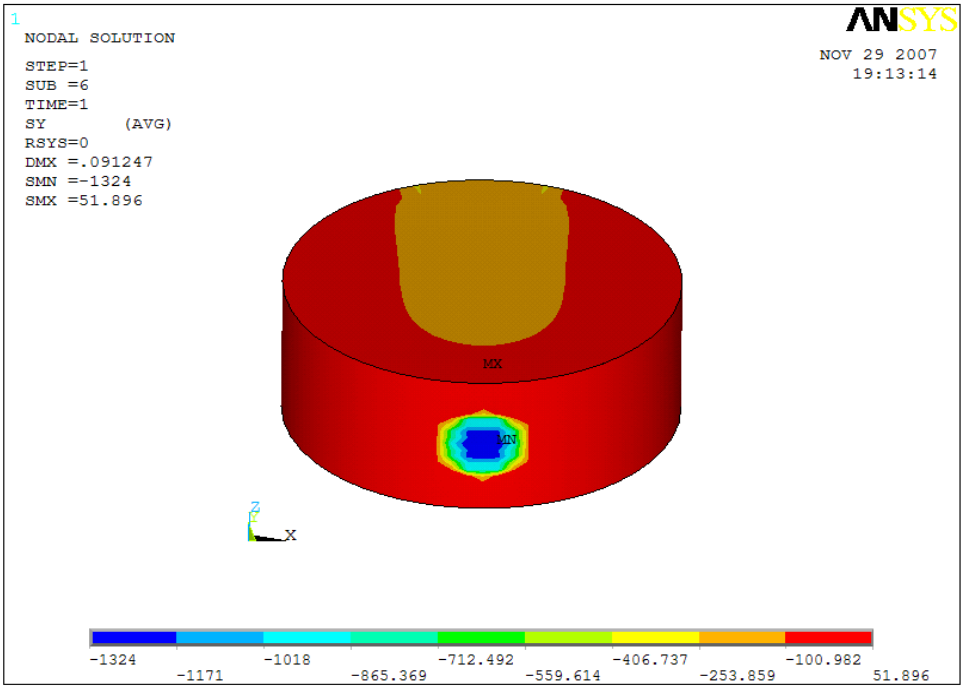
Η μέγιστη συνιστώσα των ορθών τάσεων σ_y, μετράται κάθε φορά, για την οποία ισχύει $\boldsymbol{\sigma_{ymax} = - p_{max} = - SMN}$, SMN είναι η μεγαλύτερη αρνητική τιμή της ορθής τάσης σ_y. Επιπλέον μετράται η μέγιστη μετατόπιση του ανώτερου σημείου του πάνω κυλίνδρου στο οποίο ασκείται η δύναμη. Επειδή εδώ η δύναμη ασκείται μόνο στον πάνω κύλινδρο, ενώ στον κάτω κύλινδρο οι αντίστοιχοι κόμβοι είναι πακτωμένοι, οι τιμές της μετατόπισης του λογισμικού πακέτου λογικά θα είναι διπλάσιες από αυτές του Hertz γιατί εμπερικλείεται μέσα σε αυτές και η μετατόπιση του ακίνητου σημείου του κάτω κυλίνδρου.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές της μέγιστης πίεσης επαφής και της μέγιστης μετατόπισης σύμφωνα με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης από το λογισμικό.

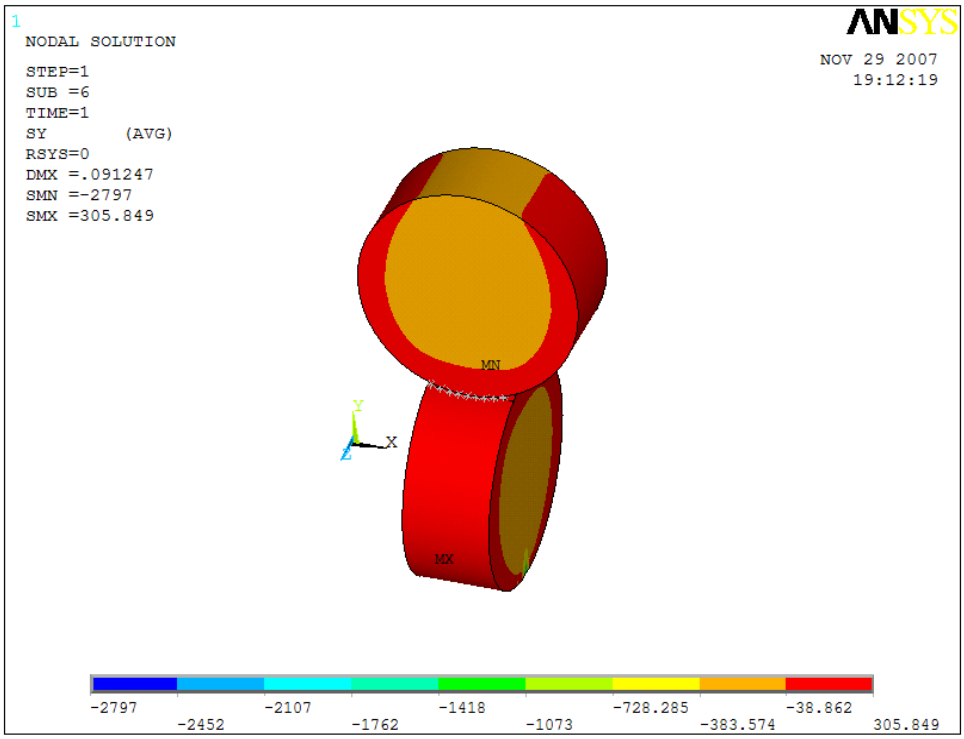
Πίνακας α.4: Αποτελέσματα προσομοίωσης δύο κυλίνδρων με ασύμβατους κάθετους άξονες στο λογισμικό πακέτο ANSYS

	ANSYS		
P(N/mm)	**Pmax(N/mm^2)**	**2y(mm)**	**y(mm)**
100	1019	0,0053	0,027
200	1324	0,0912	0,046
300	1560	0,125	0,063
400	1753	0,158	0,079
500	1922	0,189	0,095
600	2082	0,2206	0,11
700	2227	0,2511	0,1255

Παρακάτω παρουσιάζεται η κατανομή των τάσεων τόσο στην περιοχή επαφής μεταξύ ων δύο κυλίνδρων , όσο και στο συνολικό μοντέλο για φορτίο P= 200 N/mm.

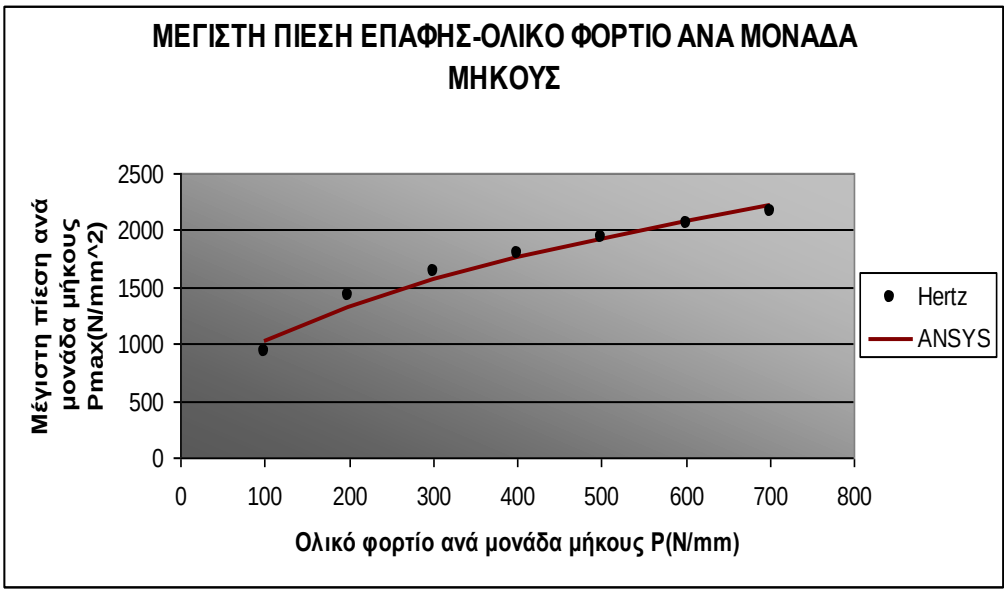


Σχήμα α.18: Κατανομή των τάσεων στην περιοχή επαφής του μοντέλου των δύο κυλίνδρων

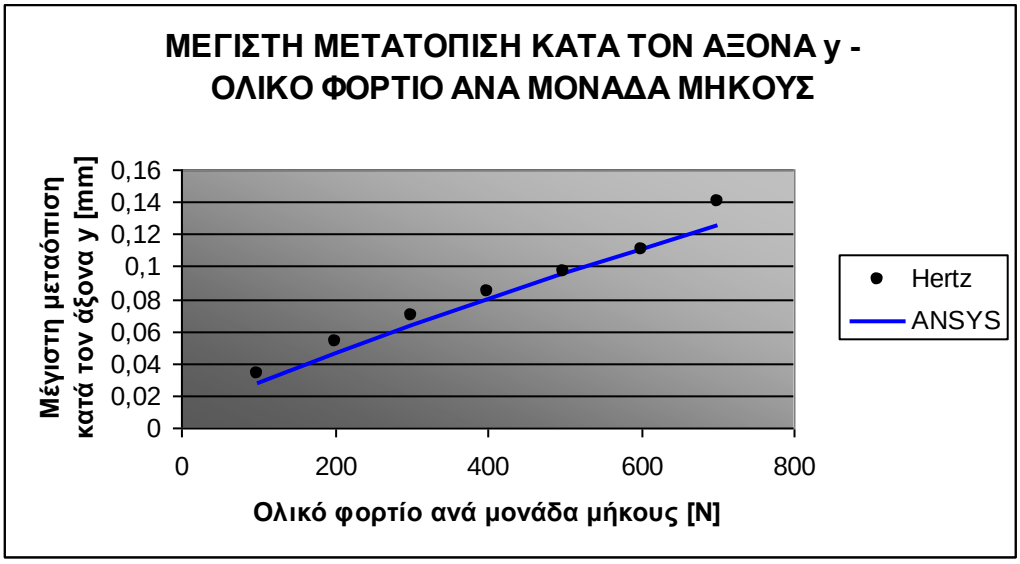


Σχήμα α.19: Κατανομή των τάσεων στο συνολικό μοντέλο

Ο προσδιορισμός των τάσεων και της μέγιστης μετατόπισης έγινε για διάφορες τιμές φορτίων και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω σε διαγράμματα. Ο μέσος χρόνος κάθε τριξίματος ήταν 30 λεπτά σε ηλεκτρονικό υπολογιστή με χαρακτηριστικά: Pentium(4), 2GB RAM και 3GHz CPU.



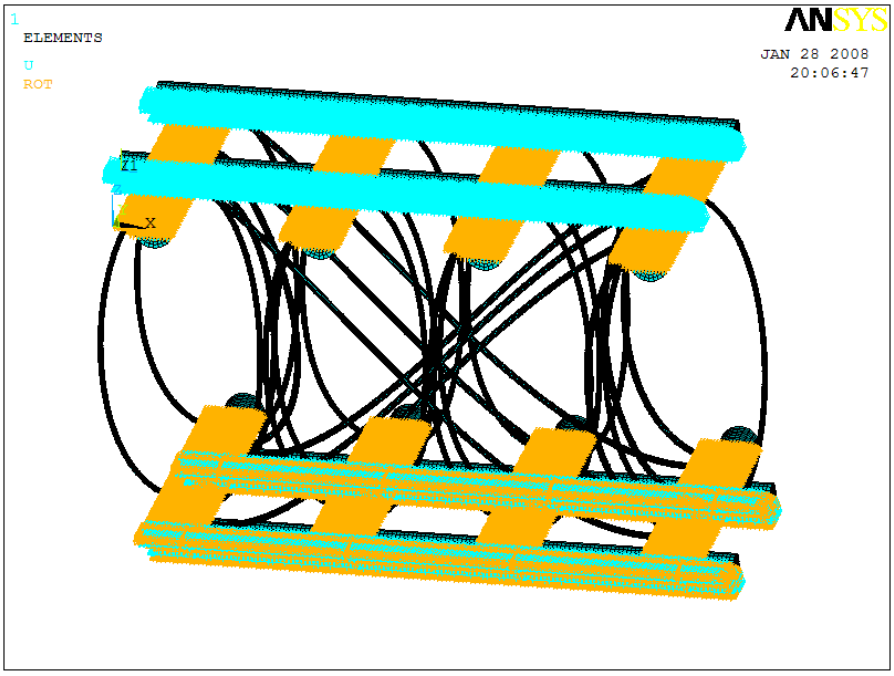
Διάγραμμα α.4: Σύγκριση μέγιστης πίεσης επαφής του μοντέλου στο πρόγραμμα ANSYS και των θεωρητικών τύπων του Hertz



Διάγραμμα α.5: Σύγκριση μέγιστης μετατόπισης κατά τον άξονα y του μοντέλου στο πρόγραμμα ANSYS και των θεωρητικών τύπων του Hertz

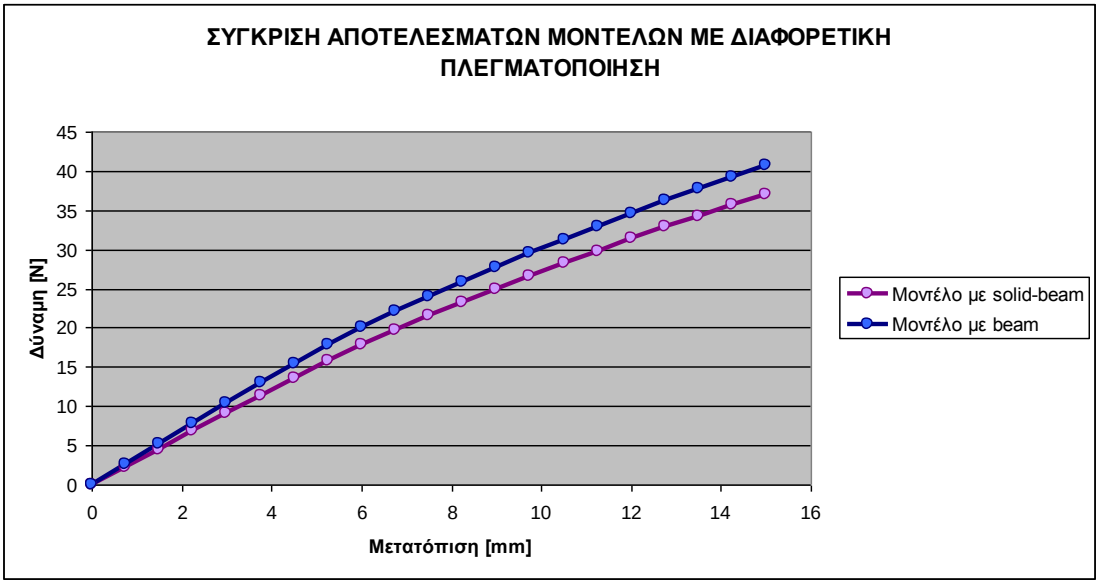
Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται πως υπάρχει πολύ καλή προσέγγιση ανάμεσα στα αποτελέσματα από τους τύπους του Hertz και στα αποτελέσματα από την προσομοίωση με το λογισμικό πακέτο ANSYS.

Για την επίλυση του μοντέλου της δομικής μονάδας οι επιβολή των οριακών συνθηκών έγινε με βάση την περίπτωση 2 μη γραμμικού υλικού, η οποία εξηγείται στην παράγραφο §5.5. Στο σχήμα α.8 που ακολουθεί παρουσιάζεται το μοντέλο της δομικής μονάδας μετά την επιβολή των οριακών συνθηκών.



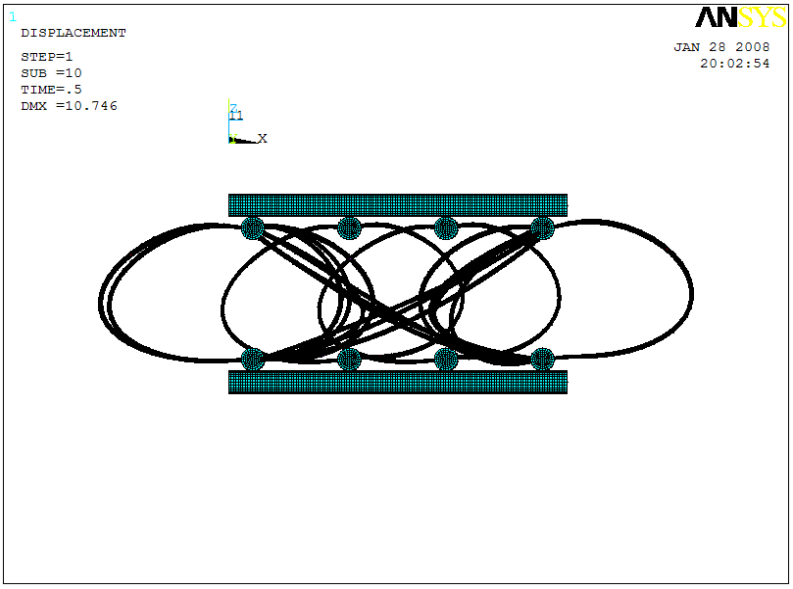
Σχήμα α.20: Οριακές συνθήκες περίπτωσης 2 στο μοντέλο της δομικής μονάδας

Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, του μοντέλου δομικής μονάδας με πλεγματοποίηση με στοιχεία solid και beam έγινε ως εξής: έγινε σύγκριση της καμπύλης δύναμης – φορτίου που προέκυψε από τη δεδομένη προσομοίωση με την αντίστοιχη καμπύλη που προέκυψε από το μοντέλο με πλεγματοποίηση με στοιχεία beam. Επιπλέον έγινε σύγκριση του παραμορφωμένου μοντέλου με πλέγμα από στοιχεία solid και beam με το παραμορφωμένο μοντέλο με πλέγμα από πεπερασμένα στοιχεία beam. Τέλος έγινε σύγκριση των χρόνων επίλυσης των δύο μοντέλων. Στο ακόλουθο διάγραμμα παρουσιάζονται οι καμπύλες δύναμης – φορτίου των δύο μοντέλων.

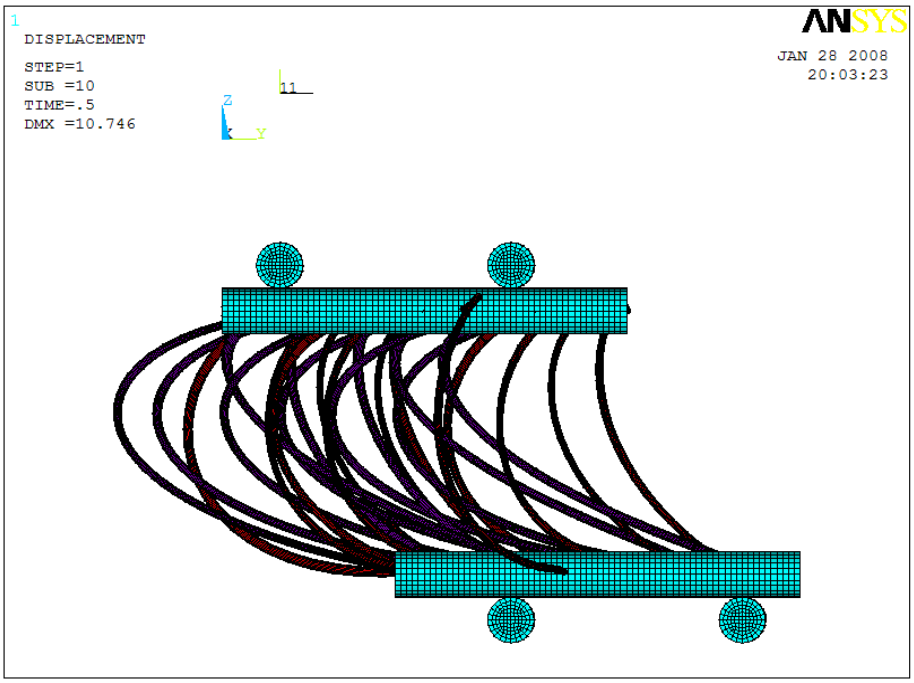


Διάγραμμα α.6: Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης δοκιμής συμπίεσης σε μοντέλα με πλεγματοποίηση με διαφορετικά στοιχεία

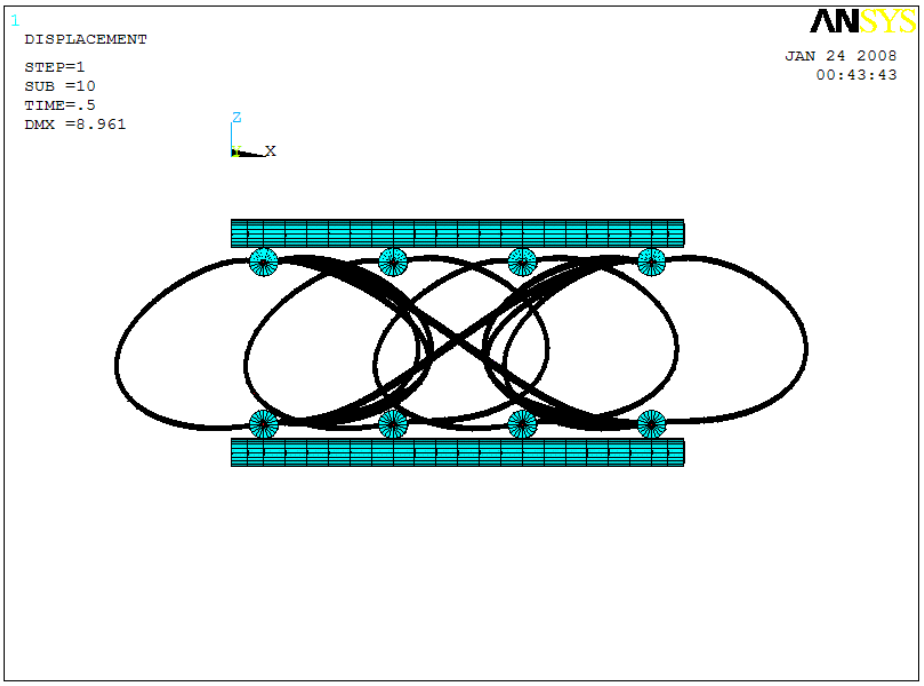
Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε πως υπάρχει πολύ μικρή απόκλιση μεταξύ των δύο καμπύλων όσον αφορά την αντίσταση σε συμπίεση του υφάσματος διατήρησης απόστασης. Επιπλέον παρατηρείται πως η μορφή των δύο καμπύλων δεν διαφέρει. Στη συνέχεια παρουσιάζονται δύο εικόνες από το παραμορφωμένο μοντέλο της δομικής μονάδας με πλεγματοποίηση με στοιχεία solid και beam, καθώς και δύο εικόνες από το παραμορφωμένο μοντέλο της δομικής μονάδας με πλεγματοποίηση με στοιχεία beam.



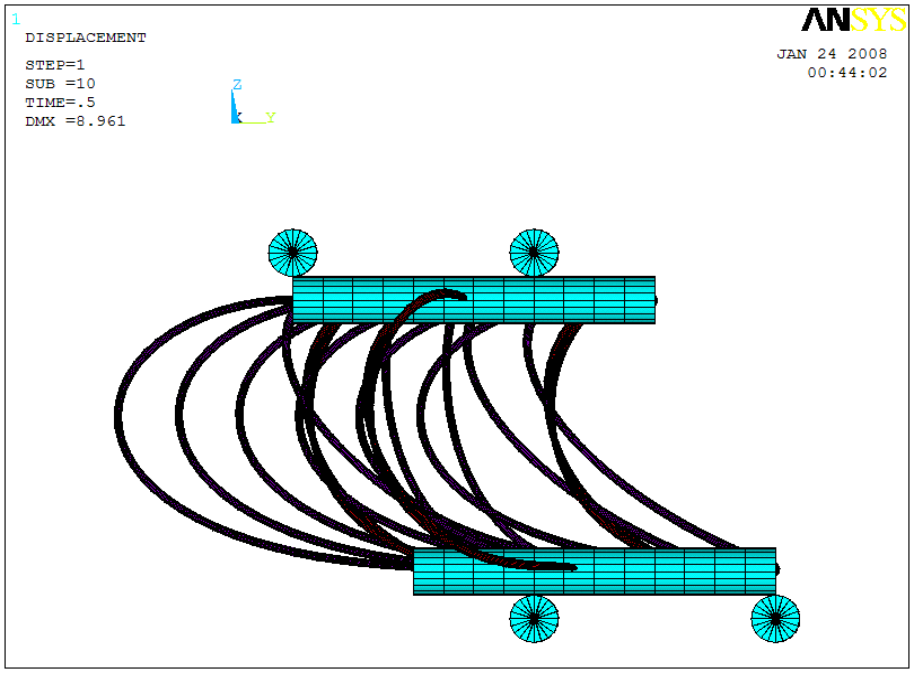
Σχήμα α.21: Παραμορφωμένο μοντέλο με πλεγματοποίηση με στοιχεία solid και beam στα επίπεδα x-z



Σχήμα α.22: Παραμορφωμένο μοντέλο με πλεγματοποίηση με στοιχεία solid και beam στα επίπεδα y-z



Σχήμα α.23: Παραμορφωμένο μοντέλο με πλεγματοποίηση με στοιχεία beam στα επίπεδα x-z



Σχήμα α. 24: Παραμορφωμένο μοντέλο με πλεγματοποίηση με στοιχεία beam στα επίπεδα y-z

Σύμφωνα με τα παραπάνω σχήματα δεν παρατηρείται διαφορά στα παραμορφωμένα μοντέλα των δύο περιπτώσεων πλεγματοποίησης. Ο χρόνος επίλυσης του μοντέλου με πλέγμα από στοιχεία solid και beam ήταν 5.5 ώρες, ενώ ο χρόνος επίλυσης του μοντέλου με πλέγμα από στοιχεία beam ήταν 5 min. Η διαφορά αυτή παρατηρείται λόγω των διαφορετικών οριακών συνθηκών επαφής που υπάρχουν στα δύο μοντέλα.

Σύμφωνα με τα συμπεράσματα της αξιολόγησης των δύο μοντέλων και λόγω του μεγάλου υπολογιστικού κόστους που έχει η επίλυση του μοντέλου με πλεγματοποίηση με στοιχεία solid και beam προτιμήθηκε τελικά για τη μελέτη της συμπεριφοράς της δομικής μονάδας σε δοκιμή συμπίεσης το μοντέλο με πλεγματοποίηση με στοιχεία beam.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Πολυώνυμα Παρεμβολής

Η χρήση των πολυωνύμων διάφορων βαθμών ως εργαλείο παρεμβολής παρουσιάζει ένα πλήθος πλεονεκτημάτων αλλά και ένα κύριο μειονέκτημα. Τα βασικότερα πλεονεκτήματα είναι:

- Τα πολυώνυμα έχουν απλές μαθηματικές εκφράσεις
- Ο υπολογισμός των άγνωστων - συντελεστών των πολυωνύμων ακολουθεί εύκολες και προφανείς διαδικασίες
- Η χρήση ενός πολυωνύμου του οποίου έχουν ήδη βρεθεί οι τιμές των συντελεστών του, ώστε να υπολογιστεί η τιμή απόκρισης y που αντιστοιχεί σε μια οποιαδήποτε τιμή εισόδου x, έχει πρακτικά μηδενικό υπολογιστικό κόστος
- Τα πολυώνυμα είναι συνεχώς διαφορίσιμες συναρτήσεις (πρακτικά, όσες φορές χρειαστεί)
- Τα πολυώνυμα έχουν ελεγχόμενο σφάλμα αριθμητικής παρεμβολής.

Το κύριο μειονέκτημά τους είναι ότι ανάλογα με τα κομβικά σημεία με τα οποία δημιουργείται το πολυώνυμο και το βαθμό του πολυωνύμου, εύκολα μπορούν να εμφανιστούν ταλαντωτικές συμπεριφορές που τις περισσότερες φορές δεν συμβαδίζουν με τη φυσική του αντίστοιχου προβλήματος [18].

Β.1. Αριθμητική παρεμβολή με κυβικές splines

Οι κυβικές splines χρησιμοποιούνται σήμερα ευρύτατα ως μέθοδος τμηματικά συνεχούς παρεμβολής. Τα δεδομένα κομβικά σημεία (x_i, y_i) αντιμετωπίζονται κατά ζεύγη (διαδοχικών σημείων) όπου μεταξύ τους εφαρμόζεται κυβική παρεμβολή.

Αν θεωρηθούν δύο διαδοχικά κομβικά σημεία (x_i, y_i) και (x_{i+1}, y_{i+1}) τότε τα πολυώνυμα παρεμβολής για τις συντεταγμένες x και y δίνονται παραμετρικά από τις σχέσεις:

$$\left.\begin{aligned} g_x(u) &= a_0 + a_1 u + \mathrm{a}_2 u^2 + a_3 u^3 \\ g_y(u) &= \mathrm{b}_0 + b_1 u + \mathrm{b}_2 u^2 + b_3 u^3 \end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

Με τους οχτώ συντελεστές a_0,….., b_3 να έχουν διαφορετικές τιμές στα επιμέρους διαστήματα. Ο υπολογισμός τους γίνεται ως εξής: αρχικά επιβάλλονται οι δύο προφανείς απαιτήσεις, δηλαδή

$$\left.\begin{aligned} g_x(0) &= \mathrm{a}_0 = \mathrm{x}_i \\ g_x(1) &= \mathrm{a}_0 + \mathrm{a}_1 + \mathrm{a}_2 + \mathrm{a}_3 = \mathrm{x}_{\mathrm{i+1}} \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

Οι τιμές τις δεύτερης παραγώγου δίνονται από τον τύπο:

$$\mathrm{M}_{\mathrm{i}} = (\ddot{g}_{\mathrm{x}}(u))_i = (\frac{d^2\mathrm{x}}{\mathrm{du}^2})_i \tag{3}$$

Στα N+1 δεδομένα κομβικά σημεία. Με βάση την μαθηματική έκφραση των συναρτήσεων 1 η δεύτερη παράγωγος της είναι

$$\ddot{g}_x(u) = 2\mathrm{a}_2 + 6\mathrm{a}_3 u$$

ενώ για τα κομβικά σημεία που βρίσκονται στα άκρα κάθε διαστήματος μπορεί να γραφτεί ότι

$$\left.\begin{aligned} \ddot{g}_x(0) &= M_i = 2\mathrm{a}_2 \\ \ddot{g}_x(1) &= M_{i+1} = 2\mathrm{a}_2 + 6\mathrm{a}_3 \end{aligned}\right\} \tag{4}$$

Οπότε $a_2 = M_i / 2$ και $M_{i+1} - M_i$, από τις οποίες προκύπτει εύκολα η (γραμμική ως προς u) έκφραση για τη δεύτερη παράγωγο, που είναι η

$$\ddot{g}_x(u) = M_i + (M_{i+1} - M_{\mathrm{i}})u \tag{5}$$

Ολοκληρώνοντας την σχέση 4 δύο φορές προκύπτει τελικά ότι

$$g_x(u) = \frac{1}{2}M_i u^2 + \frac{1}{6}(\mathrm{M}_{\mathrm{i+1}} - M_i)u^3 + A + \mathrm{Bu} \tag{6}$$

όπου στη σχέση (6) εμφανίζονται δύο σταθερές ολοκλήρωσης A και B. Ο υπολογισμός τους γίνεται από την ικανοποίηση των σχέσεων (2). Τελικά η εξίσωση (6) γίνεται:

$$g_x(u) = x_i + \left[(x_{i+1} - x_i) - \frac{1}{6}M_{i+1} - \frac{1}{3}M_i\right]u + \frac{1}{2}M_i u^2 + \frac{1}{6}(M_{\mathrm{i+1}} - M_i)u^3 \tag{7}$$

Αν ήταν γνωστές οι τιμές των παραγώγων M_i, i=0,…..,N θα μπορούσε να υλοποιηθεί το σχήμα. Για τη λύση του προβλήματος γίνεται θεώρηση συνεχών πρώτων παραγώγων των τμηματικά συνεχή πολυωνύμων στα εσωτερικά κομβικά σημεία, δηλαδή όλων των σημείων πλην των ακραίων. Προκύπτουν εξισώσεις, για όλους τους κόμβους εκτός των ακραίων, της μορφής:

$$M_{i-1} + 4M_i + M_{i+1} = 6(x_{i-1} - 2x_i + x_{i+1}) \quad (8)$$

Έχοντας τις εξισώσεις που προκύπτουν από τη σχέση (7) και τις εξισώσεις της μορφής (8) λείπουν δύο ακόμα εξισώσεις ώστε να μπορέσει να σχηματιστεί ένα σύστημα με N+1 εξισώσεις και N+1 αγνώστους. Οι εξισώσεις αυτές προκύπτουν από την επιβολή των οριακών συνθηκών στον πρώτο και τον τελευταίο κόμβο, οι οποίες μπορεί να είναι:

- Στα ακραία κομβικά σημεία οι δεύτερες παράγωγοι να είναι μηδενικές (φυσικές splines)
- Να είναι γνωστές οι πρώτες παράγωγοι (κλίσεις) στα κομβικά σημεία
- Να γίνεται η υπόθεση ότι υπάρχει σταθερή κλίση δεύτερης παραγώγου στα άκρα [18].

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

Κώδικες

Α. Υπολογιστικό μοντέλο με πλεγματοποίηση με στοιχεία beam

1) Υπολογιστικό μοντέλο με γραμμικό υλικό νημάτων

```
/CONFIG,NPROC,1
/PREP7

!************************
!          GEOMETRIA
!************************
a=9        !orizontia apostasi metaxi twn keliwn ths domikhs monadas (mm)
b=10          !katheth apostasi metaxi twn keliwn ths domikhs monadas (mm)
t=19          !paxos ths domikhs monadas (mm) , apostasi metaxi anw kai katw plexis
r=1           !diametros twn nhmatwn (mm), d=2*r=2mm
r1=0.15       !diametros twn esoterikwn maurwn inwn(sy2)  d=0.30mm
r2=0.125      !diametros twn esoterikwn asprwn inwn(sy1) d=0.25mm

ga=a/4          !apostash pou tha topothetithei h katheth ina apo ton axona y gb=b/4
c=(2*b)+(2*gb)   !mikos katheths inas
f=(3*a)+(2*ga)   !mikos orizontias inas
h=t+4*r          !apostash pou tha ginoun copy oi orizonties ines
pi=3.1415926536
*AFUN,RAD
PI=4*atan(1)

!******Dimiourgia 1ou kathetou ogkou****************
csys,0
k,1,ga,0,0
k,2,ga,gb,0
k,3,ga,2*gb,0
k,4,ga,3*gb,0
k,5,ga,4*gb,0
k,6,ga,gb+b,0
k,7,ga,b+(2*gb),0
k,8,ga,b+(3*gb),0
k,9,ga,2*b,0
k,10,ga,gb+(2*b),0
k,11,ga,c,0

l,1,2
```

```
l,2,3
l,3,4
l,4,5
l,5,6
l,6,7
l,7,8
l,8,9
l,9,10
l,10,11

lgen,4,1,10,1,a,,,11,,0

!**********Dimiourgia twn ogkwn ths 1hs orizontias inas***************
csys,0
k,45,0,gb,2*r
k,46,ga,gb,2*r
k,47,ga+a,gb,2*r
k,48,ga+(2*a),gb,2*r
k,49,ga+(3*a),gb,2*r
k,50,f,gb,2*r

l,45,46
l,46,47
l,47,48
l,48,49
l,49,50

lgen,3,41,45,1,,b,,10,,0

!**********ANTIGRAFI TWN KATHETWN INWN STON AXONA Z KATA t
lgen,2,1,40,1,,,-t,100,,0

!*ANTIGRAFI TWN ORIZONTIWN INWN STON AXONA Z KATA h
lgen,2,41,55,1,,,-h,100,,0

!************************
!     MATERIAL PROPERTIES
!************************

ET,1,BEAM188
ET,2,TARGE170
```

```
ET,3,CONTA176
ET,4,BEAM188
ET,5,BEAM188
KEYOPT,3,3,1      ! roughly cross beams
KEYOPT,3,4,1      ! force-distributed surface
KEYOPT,3,5,4      ! auto ICONT
KEYOPT,3,9,1      !Exclude both initial geometrical penetration or gap and offset
KEYOPT,3,12,5     !BONDEN NODES

R,10,r,r          ! real constant of contact elements
R,11,r,r

!MATERIAL PROPERTIES

MP,EX,1,72000                    !(N/mm^2)
MP,PRXY,1,0.30
MP,DENS,1,1*10**(-5)             ! Kgr/mm^3
MP,MU,1,0.2
R,1,pi*r**2,((pi*r**4)/4),((pi*r**4)/4),2*r,2*r,,

SECTYPE,1,BEAM,CSOLID,,0
SECDATA,r,20,1

SECTYPE,4,BEAM,CSOLID,,0
SECDATA,r1,20,1

SECTYPE,5,BEAM,CSOLID,,0
SECDATA,r2,20,1

!MATERIAL PROPERTIES gia to mauro
!!MP,EX,2,0.01
MP,EX,2,5141
MP,NUXY,2,0.30
MP,DENS,2,1*10**(-7)
R,4,pi*r1**2,((pi*r1**4)/4),((pi*r1**4)/4),2*r1,2*r1,,

!MATERIAL PROPERTIES gia to aspro
!!MP,EX,3,0.01
MP,EX,3,4876
MP,NUXY,3,0.30
MP,DENS,3,1*10**(-7)
```

```
R,5,pi*r2**2,((pi*r2**4)/4),((pi*r2**4)/4),2*r2,2*r2,,

!**********************
!        MESH
!**********************

!**PLEGMA NHMATWN****
etype,1
mat,1
secnum,1
real,1
lsel,s,line,,1,110
lesize,all,1.5
lmesh,all

!**PLEGMA MAYRWN INWN****
etype,4
MAT,2
REAL,4
secnum,4
lsel,s,line,,111,121
lesize,all,,,40
lmesh,all

!**PLEGMA ASPRWN INWN***
etype,5
secnum,5
mat,3
real,5
lsel,s,line,,122,139
lesize,all,,,30
lmesh,all

!**********************
!       CONTACT PAIRS
!**********************
!****1h plexi*************
! create contact pair  #1

lsel,s,line,,1,40
nsll,s,1
```

```
CM,KI1,NODE
REAL,10
TYPE,3
ESURF
ALLSEL

lsel,s,line,,41,55
nsll,s,1
CM,PI1,NODE
REAL,10
TYPE,2
ESURF
ALLSEL

! create contact pair  #2

lsel,s,line,,56,96
nsll,s,1
CM,KI2,NODE
REAL,11
TYPE,3
ESURF
ALLSEL

lsel,s,line,,96,110
nsll,s,1
CM,PI2,NODE
REAL,11
TYPE,2
ESURF
ALLSEL

!****************
!        LOADS
!****************

h1=t+(2*r)
nsel,r,loc,z,-h1
d,all,all,0
allsel
```

```
nsel,r,loc,z,2*r
d,all,uz,-15       !!epiboli metatopishs
d,all,uy,0
d,all,ux,0
ALLSEL,ALL

! constrain rotation
nsel,s,loc,z,0
nsel,a,loc,z,-t
d,all,rotx,0
d,all,roty,0
allsel

!********************
!        SOLVE
!********************

/SOLU
ANTYPE,STATIC
NSUBST,20,100,10
OUTRES,ALL,ALL
AUTOTS,OFF
NROPT,FULL,,ON
LNSRCH,ON
TIME,1
SOLVE
FINISH
```

2) Υπολογιστικό μοντέλο με μη γραμμικό υλικό νημάτων

```
/CONFIG,NPROC,1
/PREP7

!*************************
!        GEOMETRIA
!*************************
a=9        !orizontia apostasi metaxi twn keliwn ths domikhs monadas (mm)
b=10          !katheth apostasi metaxi twn keliwn ths domikhs monadas (mm)
t=19          !paxos ths domikhs monadas (mm) , apostasi metaxi anw kai katw plexis
r=1           !diametros twn nhmatwn (mm), d=2*r=2mm
r1=0.15        !diametros twn esoterikwn maurwn inwn(sy2)  d=0.30mm
```

```
r2=0.125       !diametros twn esoterikwn asprwn inwn(sy1) d=0.25mm
ga=a/4          !apostash pou tha topothetithei h katheth ina apo ton axona y
gb=b/4
c=(2*b)+(2*gb)   !mikos katheths inas
f=(3*a)+(2*ga)   !mikos orizontias inas
h=t+4*r          !apostash pou tha ginoun copy oi orizonties ines
pi=3.1415926536
*AFUN,RAD
PI=4*atan(1)

!**Dimiourgia 1ou kathetou ogkou*****
csys,0
k,1,ga,0,0
k,2,ga,gb,0
k,3,ga,2*gb,0
k,4,ga,3*gb,0
k,5,ga,4*gb,0
k,6,ga,gb+b,0
k,7,ga,b+(2*gb),0
k,8,ga,b+(3*gb),0
k,9,ga,2*b,0
k,10,ga,gb+(2*b),0
k,11,ga,c,0

l,1,2
l,2,3
l,3,4
l,4,5
l,5,6
l,6,7
l,7,8
l,8,9
l,9,10
l,10,11

lgen,4,1,10,1,a,,,11,,0

!**Dimiourgia twn ogkwn ths 1hs orizontias inas********
csys,0
k,45,0,gb,2*r
k,46,ga,gb,2*r
```

```
k,47,ga+a,gb,2*r
k,48,ga+(2*a),gb,2*r
k,49,ga+(3*a),gb,2*r
k,50,f,gb,2*r

l,45,46
l,46,47
l,47,48
l,48,49
l,49,50

lgen,3,41,45,1,,b,,10,,0

!**ANTIGRAFI TWN KATHETWN INWN STON AXONA Z KATA t*****
lgen,2,1,40,1,,,-t,100,,0

!**ANTIGRAFI TWN ORIZONTIWN INWN STON AXONA Z KATA h****
lgen,2,41,55,1,,,-h,100,,0

!***********************************
!    MATERIAL PROPERTIES
!***********************************

ET,1,BEAM188
ET,2,TARGE170
ET,3,CONTA176
ET,4,BEAM188
ET,5,BEAM188
KEYOPT,3,3,1      ! roughly cross beams
KEYOPT,3,4,1      ! force-distributed surface
KEYOPT,3,5,4      ! auto ICONT
KEYOPT,3,9,1      !Exclude both initial geometrical penetration or gap and offset
KEYOPT,3,12,5     !BONDEN NODES

R,10,r,r          ! real constant of contact elements
R,11,r,r

!MATERIAL PROPERTIES

MP,EX,1,72000                    !(N/mm^2)
MP,PRXY,1,0.30
```

```
MP,DENS,1,1*10**(-5)            ! Kgr/mm^3
MP,MU,1,0.2
R,1,pi*r**2,((pi*r**4)/4),((pi*r**4)/4),2*r,2*r,,

SECTYPE,1,BEAM,CSOLID,,0
SECDATA,r,20,1

SECTYPE,4,BEAM,CSOLID,,0
SECDATA,r1,20,1

SECTYPE,5,BEAM,CSOLID,,0
SECDATA,r2,20,1

!MATERIAL PROPERTIES gia to mauro
MP,EX,2,5141
MP,NUXY,2,0.30
MP,DENS,2,1*10**(-7)
R,4,pi*r1**2,((pi*r1**4)/4),((pi*r1**4)/4),2*r1,2*r1,,

!MATERIAL PROPERTIES gia to aspro
MP,EX,3,4876
MP,NUXY,3,0.30
MP,DENS,3,1*10**(-7)
R,5,pi*r2**2,((pi*r2**4)/4),((pi*r2**4)/4),2*r2,2*r2,,

!************************
!         MESH
!************************

!******PLEGMA NHMATWN***
type,1
mat,1
secnum,1
real,1
lsel,s,line,,1,110
lesize,all,1.5
lmesh,all

!***PLEGMA MAYRWN INWN*************
type,4
MAT,2
```

```
REAL,4
secnum,4
lsel,s,line,,111,121
lesize,all,,,40
lmesh,all

!******PLEGMA ASPRWN INWN************
type,5
secnum,5
mat,3
real,5
lsel,s,line,,122,139
lesize,all,,,30
lmesh,all

!************************************
!       CONTACT PAIRS
!************************************
!*******1h plexi************************
! create contact pair  #1

lsel,s,line,,1,40
nsll,s,1
CM,KI1,NODE
REAL,10
TYPE,3
ESURF
ALLSEL

lsel,s,line,,41,55
nsll,s,1
CM,PI1,NODE
REAL,10
TYPE,2
ESURF
ALLSEL

! create contact pair  #2

lsel,s,line,,56,96
nsll,s,1
```

```
CM,KI2,NODE
REAL,11
TYPE,3
ESURF
ALLSEL

lsel,s,line,,96,110
nsll,s,1
CM,PI2,NODE
REAL,11
TYPE,2
ESURF
ALLSEL

!*********************************
!                    LOADS
!*********************************

h1=t+(2*r)
nsel,r,loc,z,-h1
d,all,all,0
allsel

nsel,r,loc,z,2*r
d,all,uz,-15       !!epiboli metatopishs
d,all,uy,0
d,all,ux,0
ALLSEL,ALL

! constrain rotation
nsel,s,loc,z,0
nsel,a,loc,z,-t
d,all,rotx,0
d,all,roty,0
allsel

!*************************************
!                  SOLVE
!*************************************
```

```
/SOLU
ANTYPE,STATIC
NSUBST,20,100,10
OUTRES,ALL,ALL
AUTOTS,OFF
NROPT,FULL,,ON
LNSRCH,ON
TIME,1
SOLVE
FINISH
```

Β. Εύρεση γεωμετρίας εσωτερικών νημάτων

1) Νήματα τύπου 2 σε διαμόρφωση "x"

```
/prep7

*AFUN,RAD
pi=4*atan(1)

*dim,anglexz,table,50
*dim,angle1yz,table,50

!***** geometrical  parameters  ************************

L=35.7                    ! spline length - mm
dis=19                  ! vertical distance
dx=25                   ! horizontal distance
dy=5

csys,0
k,1,0
k,2,dx,dy,dis

axz=pi/10        ! with x axis (0-pi/4)
a1yz=pi/3       ! with y axis   (0-pi/4)
a2yz=pi/10        ! with y axis, constant

ti=1
```

```
sp=4
*do,i,0,sp,1            ! sp steps
axz=0.25*pi*i/sp

*do,k,0,sp,1            ! sp steps
a1yz=0.5*pi*k/sp

*get,LEN1,line,1,leng
  *IF,abs(L-len1),lt,0.5,THEN
anglexz(ti)=axz
angle1yz(ti)=a1yz
ti=ti+1

  *ENDIF

*ENDDO
*ENDDO

!! kartaei mono lines me to epilegmeno mikos

*do,i,1,25,1
*get,LEN1,line,i,leng
  *IF,abs(L-len1),gt,0.5,THEN
 ldele,i
  *ENDIF
*enddo
```

2) Νήματα τύπου 2 σε διαμόρφωση "( )"

```
/prep7

*AFUN,RAD
pi=4*atan(1)

*dim,anglexz,table,50
*dim,angle2yz,table,50

!***** geometrical  parameters  ************************

L=25.1                    ! spline length -  (26.1) mm
```

```
dz=25                    ! vertical distance
dx=0                    ! horizontal distance
dy=7.5

csys,0
k,1,dx,0,dz
k,2,0,dy,0

axz=pi/3       ! with x axis (0-pi/2)
a1yz=pi/50       ! with z axis   constant
a2yz=pi/3        ! with z axis, (0-pi/2)

ti=1

sp=4
*do,i,0,sp,1            ! sp steps
axz=0.5*pi*i/sp

*do,k,0,sp,1            ! sp steps
a2yz=0.5*pi*k/sp

*get,LEN1,line,1,leng
  *IF,abs(L-len1),lt,0.5,THEN
anglexz(ti)=axz
angle2yz(ti)=a2yz
ti=ti+1

  *ENDIF

*ENDDO
*ENDDO

!! kartaei mono lines me to epilegmeno mikos

*do,i,1,25,1
*get,LEN1,line,i,leng
  *IF,abs(L-len1),gt,0.5,THEN
 ldele,i
  *ENDIF
*enddo
```

3) Νήματα τύπου 1 σε διαμόρφωση "( )"

```
/prep7

*AFUN,RAD
pi=4*atan(1)


*dim,anglexz,table,50
*dim,angle2yz,table,50


!***** geometrical  parameters  ************************

L=24                  ! spline length -  (25.5) mm
dz=19                  ! vertical distance
dx=0                  ! horizontal distance
dy=5

csys,0
k,1,dx,0,dz
k,2,0,dy,0

axz=0.9*(pi/2)       ! with x axis (0-pi/2)
a1yz=pi/50       ! with z axis   constant
a2yz=pi/3        ! with z axis, (0-pi/2)

ti=1

sp=4
*do,i,0,sp,1            ! sp steps
axz=0.5*pi*i/sp

*do,k,0,sp,1            ! sp steps
a2yz=0.5*pi*k/sp

*get,LEN1,line,1,leng
  *IF,abs(L-len1),lt,0.5,THEN
anglexz(ti)=axz
angle2yz(ti)=a2yz
ti=ti+1
```

```
  *ENDIF

*ENDDO
*ENDDO

!! kartaei mono lines me to epilegmeno mikos

*do,i,1,25,1
*get,LEN1,line,i,leng
  *IF,abs(L-len1),gt,0.5,THEN
 ldele,i
  *ENDIF
*enddo
```

4) Συμπίεση στις ίνες με το πραγματικό μήκος (αποτελεί συνέχεια για κάθε έναν από τους τρεις προηγούμενους κώδικες)

```
P=0.002                ! Newton

lsel,u,line,,21
ldele,all
allsel

!**************** elements - material properties **********************
ET,1,BEAM4
MP,EX,1,1917.75                !(N/mm^2)
MP,PRXY,1,0.30

rf=0.125                 ! fibre radius - mm
D=2*rf
AREA=PI*(D/2)**2
IZZ=(PI/64)*(D**4)
IYY=(PI/64)*(D**4)
TKZ=D
TKY=D
R,1,AREA,IZZ, IYY,TKZ,TKY

!SECTYPE, 1, BEAM, CSOLID, , 0
!SECDATA,D/2,0,0
```

```
!**********  meshing ************************************
etype,1
mat,1
real,1
lesize,all,,,30
lmesh,all

! boundary conditions

ksel,s,kp,,2
nslk,s,1
d,all,ux,0
d,all,uy,0
d,all,uz,0
allsel

ksel,s,kp,,1
nslk,s,1
f,all,fZ,-P       ! Newton
d,all,ux,0
d,all,uY,0
allsel

/SOLU
ANTYPE,STATIC
NLGEOM,ON
NSUBST,20,100,10
!OUTRES,ALL,ALL
AUTOTS,ON
NROPT,FULL,,ON
LNSRCH,ON
TIME,1
SOLVE
FINISH
```

Γ. Παραμετρικά ανάλυση-επίδραση ακτινών στα αποτελέσματα της δοκιμής συμπίεσης

1) Επίδραση ακτίνας νημάτων τύπου 1

```
/CONFIG,NPROC,1
/PREP7
```

```
!********************
!        GEOMETRIA
!*********
a=9        !orizontia apostasi metaxi twn keliwn ths domikhs monadas (mm)
b=10          !katheth apostasi metaxi twn keliwn ths domikhs monadas (mm)
t=19          !paxos ths domikhs monadas (mm) , apostasi metaxi anw kai katw plexis
r=1           !diametros twn nhmatwn (mm), d=2*r=2mm
r1=0.15        !diametros twn esoterikwn maurwn inwn(sy2)  d=0.30mm
r2=0.125       !diametros twn esoterikwn asprwn inwn(sy1) d=0.25mm

rm=0.80*r1

ga=a/4          !apostash pou tha topothetithei h katheth ina apo ton axona y gb=b/4
c=(2*b)+(2*gb)   !mikos katheths inas
f=(3*a)+(2*ga)   !mikos orizontias inas
h=t+4*r          !apostash pou tha ginoun copy oi orizonties ines
pi=3.1415926536
*AFUN,RAD
PI=4*atan(1)

!***Dimiourgia 1ou kathetou ogkou***********
csys,0
k,1,ga,0,0
k,2,ga,gb,0
k,3,ga,2*gb,0
k,4,ga,3*gb,0
k,5,ga,4*gb,0
k,6,ga,gb+b,0
k,7,ga,b+(2*gb),0
k,8,ga,b+(3*gb),0
k,9,ga,2*b,0
k,10,ga,gb+(2*b),0
k,11,ga,c,0

l,1,2
l,2,3
l,3,4
l,4,5
l,5,6
l,6,7
l,7,8
```

```
l,8,9
l,9,10
l,10,11

lgen,4,1,10,1,a,,,11,,0

!***Dimiourgia twn ogkwn ths 1hs orizontias inas*********
csys,0
k,45,0,gb,2*r
k,46,ga,gb,2*r
k,47,ga+a,gb,2*r
k,48,ga+(2*a),gb,2*r
k,49,ga+(3*a),gb,2*r
k,50,f,gb,2*r

l,45,46
l,46,47
l,47,48
l,48,49
l,49,50

lgen,3,41,45,1,,b,,10,,0

!***ANTIGRAFI TWN KATHETWN INWN STON AXONA Z KATA t*******
lgen,2,1,40,1,,,-t,100,,0

!****ANTIGRAFI TWN ORIZONTIWN INWN STON AXONA Z KATA h***
lgen,2,41,55,1,,,-h,100,,0
!************************
!       MATERIAL PROPERTIES
!************************

ET,1,BEAM188
ET,2,TARGE170
ET,3,CONTA176
ET,4,BEAM188
ET,5,BEAM188
KEYOPT,3,3,1      ! roughly cross beams
KEYOPT,3,4,1      ! force-distributed surface
KEYOPT,3,5,4      ! auto ICONT
KEYOPT,3,9,1      !Exclude both initial geometrical penetration or gap and offset
```

```
KEYOPT,3,12,5     !BONDEN NODES

R,10,r,r          ! real constant of contact elements
R,11,r,r

!MATERIAL PROPERTIES

MP,EX,1,72000                    !(N/mm^2)
MP,PRXY,1,0.30
MP,DENS,1,1*10**(-5)             ! Kgr/mm^3
MP,MU,1,0.2
R,1,pi*r**2,((pi*r**4)/4),((pi*r**4)/4),2*r,2*r,,

SECTYPE,1,BEAM,CSOLID,,0
SECDATA,r,20,1

SECTYPE,4,BEAM,CSOLID,,0
SECDATA,rm,20,1

SECTYPE,5,BEAM,CSOLID,,0
SECDATA,r2,20,1

!MATERIAL PROPERTIES gia to mauro
MP,EX,2,5141
MP,NUXY,2,0.30
MP,DENS,2,1*10**(-7)
R,4,pi*rm**2,((pi*rm**4)/4),((pi*rm**4)/4),2*rm,2*rm,,


!MATERIAL PROPERTIES gia to aspro
MP,EX,3,4876
MP,NUXY,3,0.30
MP,DENS,3,1*10**(-7)
R,5,pi*r2**2,((pi*r2**4)/4),((pi*r2**4)/4),2*r2,2*r2,,

!****************************
!                      MESH
!****************************

!********PLEGMA NHMATWN********
type,1
```

```
mat,1
secnum,1
real,1
lsel,s,line,,1,110
lesize,all,1.5
lmesh,all

!*****PLEGMA MAYRWN INWN*************
type,4
MAT,2
REAL,4
secnum,4
lsel,s,line,,111,121
lesize,all,,,40
lmesh,all

!******PLEGMA ASPRWN INWN***********
type,5
secnum,5
mat,3
real,5
lsel,s,line,,122,139
lesize,all,,,30
lmesh,all

!*********************************
!       CONTACT PAIRS
!*********************************
!********1h plexi******************
! create contact pair  #1

lsel,s,line,,1,40
nsll,s,1
CM,KI1,NODE
REAL,10
TYPE,3
ESURF
ALLSEL

lsel,s,line,,41,55
nsll,s,1
```

```
CM,PI1,NODE
REAL,10
TYPE,2
ESURF
ALLSEL

! create contact pair  #2

lsel,s,line,,56,96
nsll,s,1
CM,KI2,NODE
REAL,11
TYPE,3
ESURF
ALLSEL

lsel,s,line,,96,110
nsll,s,1
CM,PI2,NODE
REAL,11
TYPE,2
ESURF
ALLSEL

!*************************
!       LOADS
!*************************

h1=t+(2*r)
nsel,r,loc,z,-h1
d,all,all,0
allsel

nsel,r,loc,z,2*r
d,all,uz,-15       !!epiboli metatopishs
d,all,uy,0
d,all,ux,0
ALLSEL,ALL
```

```
!****************************
!                SOLVE
!****************************
/SOLU
ANTYPE,STATIC
NSUBST,20,100,10
OUTRES,ALL,ALL
AUTOTS,OFF
NROPT,FULL,,ON
LNSRCH,ON
TIME,1
SOLVE
FINISH
```

2) Επίδραση ακτίνας νημάτων τύπου 2

```
/CONFIG,NPROC,1
/PREP7

!************************
!        GEOMETRIA
!************************
a=9        !orizontia apostasi metaxi twn keliwn ths domikhs monadas (mm)
b=10        !katheth apostasi metaxi twn keliwn ths domikhs monadas (mm)
t=19        !paxos ths domikhs monadas (mm) , apostasi metaxi anw kai katw plexis
r=1         !diametros twn nhmatwn (mm), d=2*r=2mm
r1=0.15     !diametros twn esoterikwn maurwn inwn(sy2)  d=0.30mm
r2=0.125    !diametros twn esoterikwn asprwn inwn(sy1) d=0.25mm

ra=1.15*r2

ga=a/4          !apostash pou tha topothetithei h katheth ina apo ton axona y gb=b/4
c=(2*b)+(2*gb)   !mikos katheths inas
f=(3*a)+(2*ga)   !mikos orizontias inas
h=t+4*r         !apostash pou tha ginoun copy oi orizonties ines
pi=3.1415926536
*AFUN,RAD
PI=4*atan(1)
!***Dimiourgia 1ou kathetou ogkou**********
csys,0
```

```
k,1,ga,0,0
k,2,ga,gb,0
k,3,ga,2*gb,0
k,4,ga,3*gb,0
k,5,ga,4*gb,0
k,6,ga,gb+b,0
k,7,ga,b+(2*gb),0
k,8,ga,b+(3*gb),0
k,9,ga,2*b,0
k,10,ga,gb+(2*b),0
k,11,ga,c,0

l,1,2
l,2,3
l,3,4
l,4,5
l,5,6
l,6,7
l,7,8
l,8,9
l,9,10
l,10,11

lgen,4,1,10,1,a,,,11,,0

!******Dimiourgia twn ogkwn ths 1hs orizontias inas*****
csys,0
k,45,0,gb,2*r
k,46,ga,gb,2*r
k,47,ga+a,gb,2*r
k,48,ga+(2*a),gb,2*r
k,49,ga+(3*a),gb,2*r
k,50,f,gb,2*r

l,45,46
l,46,47
l,47,48
l,48,49
l,49,50

lgen,3,41,45,1,,b,,10,,0
```

```
!******ANTIGRAFI TWN KATHETWN INWN STON AXONA Z KATA t*****
lgen,2,1,40,1,,,-t,100,,0

!*****ANTIGRAFI TWN ORIZONTIWN INWN STON AXONA Z KATA h******
lgen,2,41,55,1,,,-h,100,,0

!*****************************************
!             MATERIAL PROPERTIES
!*****************************************

ET,1,BEAM188
ET,2,TARGE170
ET,3,CONTA176
ET,4,BEAM188
ET,5,BEAM188
KEYOPT,3,3,1      ! roughly cross beams
KEYOPT,3,4,1      ! force-distributed surface
KEYOPT,3,5,4      ! auto ICONT
KEYOPT,3,9,1      !Exclude both initial geometrical penetration or gap and offset
KEYOPT,3,12,5     !BONDEN NODES

R,10,r,r          ! real constant of contact elements
R,11,r,r

!MATERIAL PROPERTIES

MP,EX,1,72000                  !(N/mm^2)
MP,PRXY,1,0.30
MP,DENS,1,1*10**(-5)             ! Kgr/mm^3
MP,MU,1,0.2
R,1,pi*r**2,((pi*r**4)/4),((pi*r**4)/4),2*r,2*r,,

SECTYPE,1,BEAM,CSOLID,,0
SECDATA,r,20,1

SECTYPE,4,BEAM,CSOLID,,0
SECDATA,r1,20,1

SECTYPE,5,BEAM,CSOLID,,0
SECDATA,ra,20,1
```

```
!MATERIAL PROPERTIES gia to mauro
MP,EX,2,5141
MP,NUXY,2,0.30
MP,DENS,2,1*10**(-7)
R,4,pi*r1**2,((pi*r1**4)/4),((pi*r1**4)/4),2*r1,2*r1,,

!MATERIAL PROPERTIES gia to aspro
MP,EX,3,4876
MP,NUXY,3,0.30
MP,DENS,3,1*10**(-7)
R,5,pi*ra**2,((pi*ra**4)/4),((pi*ra**4)/4),2*ra,2*ra,,

!*************************************
!                    MESH
!*************************************

!********PLEGMA NHMATWN***************
type,1
mat,1
secnum,1
real,1
lsel,s,line,,1,110
lesize,all,1.5
lmesh,all
!***PLEGMA MAYRWN INWN***********
type,4
MAT,2
REAL,4
secnum,4
lsel,s,line,,111,121
lesize,all,,,40
lmesh,all

!*****PLEGMA ASPRWN INWN************
type,5
secnum,5
mat,3
real,5
lsel,s,line,,122,139
lesize,all,,,30
lmesh,all
```

```
!*************************************
!       CONTACT PAIRS
!*************************************
!*****1h plexi***************************
! create contact pair  #1

lsel,s,line,,1,40
nsll,s,1
CM,KI1,NODE
REAL,10
TYPE,3
ESURF
ALLSEL

lsel,s,line,,41,55
nsll,s,1
CM,PI1,NODE
REAL,10
TYPE,2
ESURF
ALLSEL

! create contact pair  #2

lsel,s,line,,56,96
nsll,s,1
CM,KI2,NODE
REAL,11
TYPE,3
ESURF
ALLSEL

lsel,s,line,,96,110
nsll,s,1
CM,PI2,NODE
REAL,11
TYPE,2
ESURF
ALLSEL
```

```
!****************************************
!                        LOADS
!****************************************

h1=t+(2*r)
nsel,r,loc,z,-h1
d,all,all,0
allsel

nsel,r,loc,z,2*r
d,all,uz,-15       !!epiboli metatopishs
d,all,uy,0
d,all,ux,0
ALLSEL,ALL

!*********************************
!                  SOLVE
!*********************************

/SOLU
ANTYPE,STATIC
NSUBST,20,100,10
OUTRES,ALL,ALL
AUTOTS,OFF
NROPT,FULL,,ON
LNSRCH,ON
TIME,1
SOLVE
FINISH
```

Δ. Παραμετρική ανάλυση – Επίδραση των μέτρων ελαστικότητας των εσωτερικών νημάτων στα αποτελέσματα της δοκιμής συμπίεσης

1) Λόγος E_2 = 10282 N / mm^2

```
/CONFIG,NPROC,1
/PREP7

!*********************************
!        GEOMETRIA
!*********************************
```

```
a=9         !orizontia apostasi metaxi twn keliwn ths domikhs monadas (mm)
b=10          !katheth apostasi metaxi twn keliwn ths domikhs monadas (mm)
t=19          !paxos ths domikhs monadas (mm) , apostasi metaxi anw kai katw plexis
r=1           !diametros twn nhmatwn (mm), d=2*r=2mm
r1=0.15       !diametros twn esoterikwn maurwn inwn(sy2)  d=0.30mm
r2=0.125      !diametros twn esoterikwn asprwn inwn(sy1) d=0.25mm

ga=a/4          !apostash pou tha topothetithei h katheth ina apo ton axona y gb=b/4
c=(2*b)+(2*gb)   !mikos katheths inas
f=(3*a)+(2*ga)   !mikos orizontias inas
h=t+4*r         !apostash pou tha ginoun copy oi orizonties ines
pi=3.1415926536
*AFUN,RAD
PI=4*atan(1)

!****Dimiourgia 1ou kathetou ogkou*********
csys,0
k,1,ga,0,0
k,2,ga,gb,0
k,3,ga,2*gb,0
k,4,ga,3*gb,0
k,5,ga,4*gb,0
k,6,ga,gb+b,0
k,7,ga,b+(2*gb),0
k,8,ga,b+(3*gb),0
k,9,ga,2*b,0
k,10,ga,gb+(2*b),0
k,11,ga,c,0

l,1,2
l,2,3
l,3,4
l,4,5
l,5,6
l,6,7
l,7,8
l,8,9
l,9,10
l,10,11

lgen,4,1,10,1,a,,,11,,0
```

```
!**********Dimiourgia twn ogkwn ths 1hs orizontias inas***************
csys,0
k,45,0,gb,2*r
k,46,ga,gb,2*r
k,47,ga+a,gb,2*r
k,48,ga+(2*a),gb,2*r
k,49,ga+(3*a),gb,2*r
k,50,f,gb,2*r
l,45,46
l,46,47
l,47,48
l,48,49
l,49,50

lgen,3,41,45,1,,b,,10,,0

!****ANTIGRAFI TWN KATHETWN INWN STON AXONA Z KATA t***
lgen,2,1,40,1,,,-t,100,,0

!***ANTIGRAFI TWN ORIZONTIWN INWN STON AXONA Z KATA h***
lgen,2,41,55,1,,,-h,100,,0

!****************************************
!       MATERIAL PROPERTIES
!****************************************

ET,1,BEAM188
ET,2,TARGE170
ET,3,CONTA176
ET,4,BEAM188
ET,5,BEAM188
KEYOPT,3,3,1      ! roughly cross beams
KEYOPT,3,4,1      ! force-distributed surface
KEYOPT,3,5,4      ! auto ICONT
KEYOPT,3,9,1      !Exclude both initial geometrical penetration or gap and offset
KEYOPT,3,12,5     !BONDEN NODES

R,10,r,r          ! real constant of contact elements
R,11,r,r

!MATERIAL PROPERTIES
```

```
MP,EX,1,72000                    !(N/mm^2)
MP,PRXY,1,0.30
MP,DENS,1,1*10**(-5)             ! Kgr/mm^3
MP,MU,1,0.2
R,1,pi*r**2,((pi*r**4)/4),((pi*r**4)/4),2*r,2*r,,

SECTYPE,1,BEAM,CSOLID,,0
SECDATA,r,20,1

SECTYPE,4,BEAM,CSOLID,,0
SECDATA,r1,20,1

SECTYPE,5,BEAM,CSOLID,,0
SECDATA,r2,20,1

!MATERIAL PROPERTIES gia to mauro
MP,EX,2,10282    !!! E2 = 10282 N/mm2
MP,NUXY,2,0.30
MP,DENS,2,1*10**(-7)
R,4,pi*r1**2,((pi*r1**4)/4),((pi*r1**4)/4),2*r1,2*r1,,

!MATERIAL PROPERTIES gia to aspro
MP,EX,3,4876
MP,NUXY,3,0.30
MP,DENS,3,1*10**(-7)
R,5,pi*r2**2,((pi*r2**4)/4),((pi*r2**4)/4),2*r2,2*r2,,


!*********************************
!                    MESH
!*********************************

!*****PLEGMA NHMATWN*************
type,1
mat,1
secnum,1
real,1
lsel,s,line,,1,110
lesize,all,1.5
lmesh,all
```

```
!*****PLEGMA MAYRWN INWN**********
type,4
MAT,2
REAL,4
secnum,4
lsel,s,line,,111,121
lesize,all,,,40
lmesh,all

!*****PLEGMA ASPRWN INWN***********
type,5
secnum,5
mat,3
real,5
lsel,s,line,,122,139
lesize,all,,,30
lmesh,all

!****************************************
!       CONTACT PAIRS
!*************************************
!*****1h plexi****************************
! create contact pair  #1

lsel,s,line,,1,40
nsll,s,1
CM,KI1,NODE
REAL,10
TYPE,3
ESURF
ALLSEL

lsel,s,line,,41,55
nsll,s,1
CM,PI1,NODE
REAL,10
TYPE,2
ESURF
ALLSEL
```

```
! create contact pair  #2
lsel,s,line,,56,96
nsll,s,1
CM,KI2,NODE
REAL,11
TYPE,3
ESURF
ALLSEL

lsel,s,line,,96,110
nsll,s,1
CM,PI2,NODE
REAL,11
TYPE,2
ESURF
ALLSEL

!*************************************
!                LOADS
!*************************************
h1=t+(2*r)
nsel,r,loc,z,-h1
d,all,all,0
allsel

nsel,r,loc,z,2*r
d,all,uz,-15       !!epiboli metatopishs
d,all,uy,0
d,all,ux,0
ALLSEL,ALL

!****************************************
!                   SOLVE
!****************************************

/SOLU
ANTYPE,STATIC
NSUBST,20,100,10
OUTRES,ALL,ALL
AUTOTS,OFF
NROPT,FULL,,ON
```

```
LNSRCH,ON
TIME,1
SOLVE
FINISH
```

2) Λόγος E_1 = 9752 N / mm^2

```
/CONFIG,NPROC,1
/PREP7

!******************************
!       GEOMETRIA
!******************************
a=9         !orizontia apostasi metaxi twn keliwn ths domikhs monadas (mm)
b=10          !katheth apostasi metaxi twn keliwn ths domikhs monadas (mm)
t=19          !paxos ths domikhs monadas (mm) , apostasi metaxi anw kai katw plexis
r=1           !diametros twn nhmatwn (mm), d=2*r=2mm
r1=0.15        !diametros twn esoterikwn maurwn inwn(sy2)  d=0.30mm
r2=0.125       !diametros twn esoterikwn asprwn inwn(sy1) d=0.25mm

!!rm=0.8*r1
!!ra=0.8*r2
ga=a/4          !apostash pou tha topothetithei h katheth ina apo ton axona gb=b/4
c=(2*b)+(2*gb)   !mikos katheths inas
f=(3*a)+(2*ga)   !mikos orizontias inas
h=t+4*r          !apostash pou tha ginoun copy oi orizonties ines
pi=3.1415926536
*AFUN,RAD
PI=4*atan(1)

!***Dimiourgia 1ou kathetou ogkou************
csys,0
k,1,ga,0,0
k,2,ga,gb,0
k,3,ga,2*gb,0
k,4,ga,3*gb,0
k,5,ga,4*gb,0
k,6,ga,gb+b,0
k,7,ga,b+(2*gb),0
k,8,ga,b+(3*gb),0
k,9,ga,2*b,0
```

```
k,10,ga,gb+(2*b),0
k,11,ga,c,0

l,1,2
l,2,3
l,3,4
l,4,5
l,5,6
l,6,7
l,7,8
l,8,9
l,9,10
l,10,11

lgen,4,1,10,1,a,,,11,,0

!**********Dimiourgia twn ogkwn ths 1hs orizontias inas*******
csys,0
k,45,0,gb,2*r
k,46,ga,gb,2*r
k,47,ga+a,gb,2*r
k,48,ga+(2*a),gb,2*r
k,49,ga+(3*a),gb,2*r
k,50,f,gb,2*r

l,45,46
l,46,47
l,47,48
l,48,49
l,49,50

lgen,3,41,45,1,,b,,10,,0

!*******ANTIGRAFI TWN KATHETWN INWN STON AXONA Z KATA t***
lgen,2,1,40,1,,,-t,100,,0

!*ANTIGRAFI TWN ORIZONTIWN INWN STON AXONA Z KATA h***
lgen,2,41,55,1,,,-h,100,,0
```

```
!*************************************
!       MATERIAL PROPERTIES
!*************************************

ET,1,BEAM188
ET,2,TARGE170
ET,3,CONTA176
ET,4,BEAM188
ET,5,BEAM188
KEYOPT,3,3,1      ! roughly cross beams
KEYOPT,3,4,1      ! force-distributed surface
KEYOPT,3,5,4      ! auto ICONT
KEYOPT,3,9,1      !Exclude both initial geometrical penetration or gap and offset
KEYOPT,3,12,5     !BONDEN NODES

R,10,r,r          ! real constant of contact elements
R,11,r,r
!MATERIAL PROPERTIES gia ta exwterika nhmata

MP,EX,1,72000                    !(N/mm^2)
MP,PRXY,1,0.30
MP,DENS,1,1*10**(-5)             ! Kgr/mm^3
MP,MU,1,0.2
R,1,pi*r**2,((pi*r**4)/4),((pi*r**4)/4),2*r,2*r,,

SECTYPE,1,BEAM,CSOLID,,0
SECDATA,r,20,1

SECTYPE,4,BEAM,CSOLID,,0
SECDATA,r1,20,1

SECTYPE,5,BEAM,CSOLID,,0
SECDATA,r2,20,1

!MATERIAL PROPERTIES gia to mauro
MP,EX,2,5141
MP,NUXY,2,0.30
MP,DENS,2,1*10**(-7)
R,4,pi*r1**2,((pi*r1**4)/4),((pi*r1**4)/4),2*r1,2*r1,,
```

```
!MATERIAL PROPERTIES gia to aspro
MP,EX,3,9752   !!E1 = 9752 N/mm2
MP,NUXY,3,0.30
MP,DENS,3,1*10**(-7)
R,5,pi*r2**2,((pi*r2**4)/4),((pi*r2**4)/4),2*r2,2*r2,,

!******************************
!        MESH
!******************************

!***PLEGMA NHMATWN*************
type,1
mat,1
secnum,1
real,1
lsel,s,line,,1,110
lesize,all,1.5
lmesh,all

!****PLEGMA MAYRWN INWN***********
type,4
MAT,2
REAL,4
secnum,4
lsel,s,line,,111,121
lesize,all,,,40
lmesh,all

!****PLEGMA ASPRWN INWN**************
type,5
secnum,5
mat,3
real,5
lsel,s,line,,122,139
lesize,all,,,30
lmesh,all

!*************************************
!       CONTACT PAIRS
!*************************************
!***1h plexi***************************
```

```
! create contact pair  #1

lsel,s,line,,1,40
nsll,s,1
CM,KI1,NODE
REAL,10
TYPE,3
ESURF
ALLSEL

lsel,s,line,,41,55
nsll,s,1
CM,PI1,NODE
REAL,10
TYPE,2
ESURF
ALLSEL

! create contact pair  #2

lsel,s,line,,56,96
nsll,s,1
CM,KI2,NODE
REAL,11
TYPE,3
ESURF
ALLSEL

lsel,s,line,,96,110
nsll,s,1
CM,PI2,NODE
REAL,11
TYPE,2
ESURF
ALLSEL

!************************************
!          LOADS
!************************************

h1=t+(2*r)
```

```
nsel,r,loc,z,-h1
d,all,all,0
allsel

nsel,r,loc,z,2*r
d,all,uz,-15       !!epiboli metatopishs
d,all,uy,0
d,all,ux,0
ALLSEL,ALL

!*********************************
!                 SOLVE
!*********************************

/SOLU
ANTYPE,STATIC
NSUBST,20,100,10
OUTRES,ALL,ALL
AUTOTS,OFF
NROPT,FULL,,ON
LNSRCH,ON
TIME,1
SOLVE
FINISH
```

Ε. Παραμετρική ανάλυση – επίδραση του ποσοστού συμμετοχής των εσωτερικών νημάτων στα αποτελέσματα της δοκιμής συμπίεσης

1) Μοντέλο μόνο με εσωτερικά νήματα τύπου 1

```
/CONFIG,NPROC,1
/PREP7

!*********************************
!          GEOMETRIA
!*********************************
a=9        !orizontia apostasi metaxi twn keliwn ths domikhs monadas (mm)
b=10          !katheth apostasi metaxi twn keliwn ths domikhs monadas (mm)
t=19          !paxos ths domikhs monadas (mm) , apostasi metaxi anw kai katw plexis
r=1           !diametros twn nhmatwn (mm), d=2*r=2mm
r1=0.15        !diametros twn esoterikwn maurwn inwn(sy2)  d=0.30mm
```

```
r2=0.125       !diametros twn esoterikwn asprwn inwn(sy1) d=0.25mm
ga=a/4          !apostash pou tha topothetithei h katheth ina apo ton axona y gb=b/4
c=(2*b)+(2*gb)   !mikos katheths inas
f=(3*a)+(2*ga)   !mikos orizontias inas
h=t+4*r          !apostash pou tha ginoun copy oi orizonties ines
pi=3.1415926536
*AFUN,RAD
PI=4*atan(1)

!*****Dimiourgia 1ou kathetou ogkou**********
csys,0
k,1,ga,0,0
k,2,ga,gb,0
k,3,ga,2*gb,0
k,4,ga,3*gb,0
k,5,ga,4*gb,0
k,6,ga,gb+b,0
k,7,ga,b+(2*gb),0
k,8,ga,b+(3*gb),0
k,9,ga,2*b,0
k,10,ga,gb+(2*b),0
k,11,ga,c,0

l,1,2
l,2,3
l,3,4
l,4,5
l,5,6
l,6,7
l,7,8
l,8,9
l,9,10
l,10,11

lgen,4,1,10,1,a,,,11,,0

!***Dimiourgia twn ogkwn ths 1hs orizontias inas******
csys,0
k,45,0,gb,2*r
k,46,ga,gb,2*r
k,47,ga+a,gb,2*r
```

```
k,48,ga+(2*a),gb,2*r
k,49,ga+(3*a),gb,2*r
k,50,f,gb,2*r

l,45,46
l,46,47
l,47,48
l,48,49
l,49,50

lgen,3,41,45,1,,b,,10,,0

!**ANTIGRAFI TWN KATHETWN INWN STON AXONA Z KATA t***
lgen,2,1,40,1,,,-t,100,,0

!*ANTIGRAFI TWN ORIZONTIWN INWN STON AXONA Z KATA h**
lgen,2,41,55,1,,,-h,100,,0

!*************************************
!    MATERIAL PROPERTIES
!*************************************

ET,1,BEAM188
ET,2,TARGE170
ET,3,CONTA176
ET,5,BEAM188
KEYOPT,3,3,1      ! roughly cross beams
KEYOPT,3,4,1      ! force-distributed surface
KEYOPT,3,5,4      ! auto ICONT
KEYOPT,3,9,1      !Exclude both initial geometrical penetration or gap and offset
KEYOPT,3,12,5     !BONDEN NODES

R,10,r,r          ! real constant of contact elements
R,11,r,r

!MATERIAL PROPERTIES

MP,EX,1,72000                    !(N/mm^2)
MP,PRXY,1,0.30
MP,DENS,1,1*10**(-5)             ! Kgr/mm^3
MP,MU,1,0.2
```

```
R,1,pi*r**2,((pi*r**4)/4),((pi*r**4)/4),2*r,2*r,,

SECTYPE,1,BEAM,CSOLID,,0
SECDATA,r,20,1

SECTYPE,5,BEAM,CSOLID,,0
SECDATA,r2,20,1

!MATERIAL PROPERTIES gia to aspro
MP,EX,3,4876
MP,NUXY,3,0.30
MP,DENS,3,1*10**(-7)
R,5,pi*r2**2,((pi*r2**4)/4),((pi*r2**4)/4),2*r2,2*r2,,

!***********************************
!                    MESH
!***********************************

!***PLEGMA NHMATWN*****************
type,1
mat,1
secnum,1
real,1
lsel,s,line,,1,110
lesize,all,1.5
lmesh,all

!******PLEGMA ASPRWN INWN***********
type,5
secnum,5
mat,3
real,5
lsel,s,line,,111,128
lesize,all,,,30
lmesh,all

!***************************
!      CONTACT PAIRS
!***************************
!****1h plexi*****************
! create contact pair  #1
```

```
lsel,s,line,,1,40
nsll,s,1
CM,KI1,NODE
REAL,10
TYPE,3
ESURF
ALLSEL

lsel,s,line,,41,55
nsll,s,1
CM,PI1,NODE
REAL,10
TYPE,2
ESURF
ALLSEL

! create contact pair  #2

lsel,s,line,,56,96
nsll,s,1
CM,KI2,NODE
REAL,11
TYPE,3
ESURF
ALLSEL

lsel,s,line,,96,110
nsll,s,1
CM,PI2,NODE
REAL,11
TYPE,2
ESURF
ALLSEL

!*****************************
!       LOADS
!*****************************

h1=t+(2*r)
nsel,r,loc,z,-h1
d,all,all,0
```

```
allsel

nsel,r,loc,z,2*r
d,all,uz,-15       !!epiboli metatopishs
d,all,uy,0
d,all,ux,0
ALLSEL,ALL

!**********************************
!                  SOLVE
!**********************************
/SOLU
ANTYPE,STATIC
NSUBST,20,100,10
OUTRES,ALL,ALL
AUTOTS,OFF
NROPT,FULL,,ON
LNSRCH,ON
TIME,1
SOLVE
FINISH
```

2) Μοντέλο μόνο με εσωτερικά νήματα τύπου 2

```
/CONFIG,NPROC,1
/PREP7

!***************************************
!              GEOMETRIA
!***************************************
a=9         !orizontia apostasi metaxi twn keliwn ths domikhs monadas (mm)
b=10          !katheth apostasi metaxi twn keliwn ths domikhs monadas (mm)
t=19          !paxos ths domikhs monadas (mm) , apostasi metaxi anw kai katw plexis
r=1           !diametros twn nhmatwn (mm), d=2*r=2mm
r1=0.15        !diametros twn esoterikwn maurwn inwn(sy2)  d=0.30mm
r2=0.125       !diametros twn esoterikwn asprwn inwn(sy1) d=0.25mm
ga=a/4          !apostash pou tha topothetithei h katheth ina apo ton axona y gb=b/4
c=(2*b)+(2*gb)   !mikos katheths inas
f=(3*a)+(2*ga)   !mikos orizontias inas
h=t+4*r         !apostash pou tha ginoun copy oi orizonties ines
```

```
pi=3.1415926536
*AFUN,RAD
PI=4*atan(1)

!****Dimiourgia 1ou kathetou ogkou************
csys,0
k,1,ga,0,0
k,2,ga,gb,0
k,3,ga,2*gb,0
k,4,ga,3*gb,0
k,5,ga,4*gb,0
k,6,ga,gb+b,0
k,7,ga,b+(2*gb),0
k,8,ga,b+(3*gb),0
k,9,ga,2*b,0
k,10,ga,gb+(2*b),0
k,11,ga,c,0

l,1,2
l,2,3
l,3,4
l,4,5
l,5,6
l,6,7
l,7,8
l,8,9
l,9,10
l,10,11

lgen,4,1,10,1,a,,,11,,0

!***Dimiourgia twn ogkwn ths 1hs orizontias inas***
csys,0
k,45,0,gb,2*r
k,46,ga,gb,2*r
k,47,ga+a,gb,2*r
k,48,ga+(2*a),gb,2*r
k,49,ga+(3*a),gb,2*r
k,50,f,gb,2*r

l,45,46
```

```
l,46,47
l,47,48
l,48,49
l,49,50

lgen,3,41,45,1,,b,,10,,0

!***ANTIGRAFI TWN KATHETWN INWN STON AXONA Z KATA t***
lgen,2,1,40,1,,,-t,100,,0

!***ANTIGRAFI TWN ORIZONTIWN INWN STON AXONA Z KATA h***
lgen,2,41,55,1,,,-h,100,,0

!*****************************************
!      MATERIAL PROPERTIES
!*****************************************

ET,1,BEAM188
ET,2,TARGE170
ET,3,CONTA176
ET,4,BEAM188
KEYOPT,3,3,1      ! roughly cross beams
KEYOPT,3,4,1      ! force-distributed surface
KEYOPT,3,5,4      ! auto ICONT
KEYOPT,3,9,1      !Exclude both initial geometrical penetration or gap and offset
KEYOPT,3,12,5     !BONDEN NODES

R,10,r,r          ! real constant of contact elements
R,11,r,r

!MATERIAL PROPERTIES

MP,EX,1,72000                    !(N/mm^2)
MP,PRXY,1,0.30
MP,DENS,1,1*10**(-5)             ! Kgr/mm^3
MP,MU,1,0.2
R,1,pi*r**2,((pi*r**4)/4),((pi*r**4)/4),2*r,2*r,,

SECTYPE,1,BEAM,CSOLID,,0
SECDATA,r,20,1
```

```
SECTYPE,4,BEAM,CSOLID,,0
SECDATA,r1,20,1

!MATERIAL PROPERTIES gia to mauro
MP,EX,2,5141
MP,NUXY,2,0.30
MP,DENS,2,1*10**(-7)
R,4,pi*r1**2,((pi*r1**4)/4),((pi*r1**4)/4),2*r1,2*r1,,

!**********************************
!                    MESH
!**********************************

!**************PLEGMA NHMATWN*****
type,1
mat,1
secnum,1
real,1
lsel,s,line,,1,110
lesize,all,1.5
lmesh,all

!*****PLEGMA MAYRWN INWN**************
type,4
MAT,2
REAL,4
secnum,4
lsel,s,line,,111,121
lesize,all,,,40
lmesh,all

!*********************************************
!      CONTACT PAIRS
!*********************************************
!******1h plexi*******************************
! create contact pair  #1

lsel,s,line,,1,40
nsll,s,1
CM,KI1,NODE
REAL,10
```

```
TYPE,3
ESURF
ALLSEL

lsel,s,line,,41,55
nsll,s,1
CM,PI1,NODE
REAL,10
TYPE,2
ESURF
ALLSEL

! create contact pair  #2

lsel,s,line,,56,96
nsll,s,1
CM,KI2,NODE
REAL,11
TYPE,3
ESURF
ALLSEL

lsel,s,line,,96,110
nsll,s,1
CM,PI2,NODE
REAL,11
TYPE,2
ESURF
ALLSEL

!*************************************
!                          LOADS
!*************************************

h1=t+(2*r)
nsel,r,loc,z,-h1
d,all,all,0
allsel

nsel,r,loc,z,2*r
d,all,uz,-15       !!epiboli metatopishs
```

```
d,all,uy,0
d,all,ux,0
ALLSEL,ALL

!****************************************
!                    SOLVE
!****************************************

/SOLU
ANTYPE,STATIC
NSUBST,20,100,10
OUTRES,ALL,ALL
AUTOTS,OFF
NROPT,FULL,,ON
LNSRCH,ON
TIME,1
SOLVE
FINISH
```

Ζ. Επιλογή πυκνότητας πλέγματος με πεπερασμένα στοιχεία beam

```
/CONFIG,NPROC,1
/PREP7

r1=0.05
pi=3.1415926536
P=0.00005
a=10
h=1

!******************************
!              GEOMETRIA
!******************************
csys,0
k,1,0,0,0
k,2,a,0,0
l,1,2
```

```
!*********************************************
!              MATERIAL PROPERTIES
!*********************************************
ET,1,BEAM4        !3-D elastic

!MATERIAL PROPERTIES gia to aspro

MP,EX,1,2000
MP,NUXY,1,0.30
R,1,pi*r1**2,((pi*r1**4)/4),((pi*r1**4)/4),r1,r1, ,

!*******************************
!                    MESH
!*******************************

mat,1
lsel,s,line,,1
lesize,all,,,h
lmesh,all

!****************************************
!        LOADS
!****************************************
d,1,all,0
F,2,FY,-P

!*****************************************
!          Solution
!*****************************************

/SOLU
ANTYPE,STATIC
NLGEOM,ON
NSUBST,4,8,1
OUTRES,ALL,ALL
AUTOTS,OFF
LNSRCH,ON
TIME,1
SOLVE
FINISH
```

ΣΤ. Διερεύνηση αποτελεσμάτων ANSYS στο πρόβλημα της επαφής

```
/CONFIG,NPROC,1
/PREP7

r=1.2732  !d=2.54648mm
a=1   !mm
pi=3.1415926536

P=100

!***********************************
!                GEOMETRIA
!***********************************
!1os kulindros- KATW
csys,0
k,1,1,0,0         !To simeio k1 apexei apo thn arxi twn axonwn apostash 1
k,2,a+1,0,0
l,1,2

csys,0
lwplan,,1,0
cswplan,11,1

k,3,r,270
k,4,r,0
k,5,r,90
k,6,r,180

l,3,4
l,4,5
l,5,6
l,6,3

csys,0
lgen,2,2,5,1,a,0,0,10,,0

csys,0
v,1,5,6,1,2,15,16,2
v,1,6,3,1,2,16,13,2
v,1,3,4,1,2,13,14,2
```

```
v,1,4,5,1,2,14,15,2

!*************************************************************
!2os kulindros- PANW
csys,0
k,8,(a/2)+1,2*r,a/2
k,9,(a/2)+1,2*r,-a/2
l,8,9

csys,0
lwplan,,22,0
cswplan,12,1
k,17,r,270
k,18,r,0
k,19,r,90
k,20,r,180

l,17,18
l,18,19
l,19,20
l,20,17

csys,0
lgen,2,23,26,1,,,-a,10,,0

v,8,17,20,8,9,27,30,9
v,8,20,19,8,9,30,29,9
v,8,19,18,8,9,29,28,9
v,8,18,17,8,9,28,27,9

!*********************************************
!                          MATERIAL PROPERTIES
!*********************************************
ET,1,SOLID45    ! 3-D SOLID ELEMENTS
ET,2,170          !TARGET
ET,3,175          !CONTACT

MP,EX,1,20000
MP,NUXY,1,0.3

g=20
```

```
h=14

!*********************************
!Diameriseis katw plakas

lesize,2,,,h,0.5
lesize,3,,,h,2
lesize,6,,,h,0.5
lesize,7,,,h,2

!*************************************
!Diameriseis panw plakas

lesize,28,,,h,0.5
lesize,29,,,h,2
lesize,24,,,h,0.5
lesize,25,,,h,2

vsel,all
allsel,below,volu
lsel,r,length,,0.001,1
lesize,all,,,g

allsel,below,volu
lsel,r,length,,1.001,(pi*r)/2
lesize,all,,,h

mat,1
vmesh,all

!**************************************
!                        LOADS
!***************************************

csys,0
nsel,s,loc,x,1+(a/2)   !Periorismos kinisis kata ton axona "x" sto epipedo xy
d,all,ux,0
allsel

nsel,s,loc,z,0          !Periorismos kinisis kata ton axona "z" sto epipedo yz
d,all,uz,0
```

```
allsel

NSEL,s,loc,y,-r     !Paktwsi tou katw kulindrou
d,all,all,0
allsel

!******************************
!                  SOLVE
!******************************

/SOLU
ANTYPE,STATIC
NLGEOM,ON
NSUBST,6,10,1
OUTRES,ALL,ALL
AUTOTS,OFF
NROPT,FULL,,ON
LNSRCH,ON
TIME,1
SOLVE
FINISH

/post1

nsel,,loc,y,3*r
*GET,D,NODE,BC,UY
ESEL,S,TYPE,,3
ETABLE,NSTAT,CONT,STAT
ESEL,R,ETAB,NSTAT,2,2
CMSEL,S,lina
NSLE,R
NSORT,LOC,X,1
*GET,B,SORT,,MAX
*STATUS,PARM
SAVE,TABLE_1
NSEL,ALL
ESEL,ALL
FINISH
```

Η. Υπολογιστικό μοντέλο με πλεγματοποίηση με στοιχεία solid και beam

```
/CONFIG,NPROC,1
/PREP7

!*************************************
!                GEOMETRIA
!*************************************
a=8.33        !orizontia apostasi metaxi twn keliwn ths domikhs monadas (mm)
b=10          !katheth apostasi metaxi twn keliwn ths domikhs monadas (mm)
t=19          !paxos ths domikhs monadas (mm) , apostasi metaxi anw kai katw plexis
r=1           !diametros twn nhmatwn (mm), d=2*r=2mm
r1=0.15       !diametros twn esoterikwn maurwn inwn(sy2)  d=0.30mm
r2=0.125      !diametros twn esoterikwn asprwn inwn(sy1) d=0.25mm
ga=a/4        !apostash pou tha topothetithei h katheth ina apo ton axona y gb=b/4
c=(2*b)+(2*gb)   !mikos katheths inas
f=(3*a)+(2*ga)   !mikos orizontias inas
h=t+4*r          !apostash pou tha ginoun copy oi orizonties ines
pi=3.1415926536
*AFUN,RAD
PI=4*atan(1)

!****Dimiourgia 1ou kathetou ogkou*************
csys,0
k,1,ga,0,0
k,2,ga,gb,0
k,3,ga,2*gb,0
k,4,ga,3*gb,0
k,5,ga,4*gb,0
k,6,ga,gb+b,0
k,7,ga,b+(2*gb),0
k,8,ga,b+(3*gb),0
k,9,ga,2*b,0
k,10,ga,gb+(2*b),0
k,11,ga,c,0

l,1,2
l,2,3
l,3,4
l,4,5
l,5,6
```

```
l,6,7
l,7,8
l,8,9
l,9,10
l,10,11

!***************************
!Dimiourgia topikou susthmatos sth basi tis 1hs grammis, peristrofi tou susthmatos gia na
!doulepsw sto epipedo !(xz) kai !dimioiurgia 1ou kuklou

csys,0
local,11,1,ga,0,0,-90,-90,-90

k,12,r,270
k,13,r,0
k,14,r,90
k,15,r,180

l,12,13
l,13,14
l,14,15
l,15,12

!*****************************************
!Antigrafi tou kuklou ths bashs sto telos kathe grammis

csys,0
lgen,11,11,14,1,,gb,,100,,0


!*******************************
!Dimiourgia ogkwn 1ou kathetos nhmatos

csys,0
v,1,12,15,1,2,112,115,2
v,1,15,14,1,2,115,114,2
v,1,14,13,1,2,114,113,2
v,1,13,12,1,2,113,112,2

csys,0
v,4,312,315,4,5,412,415,5
```

```
v,4,315,314,4,5,415,414,5
v,4,314,313,4,5,414,413,5
v,4,313,312,4,5,413,412,5

csys,0
v,5,412,415,5,6,512,515,6
v,5,415,414,5,6,515,514,6
v,5,414,413,5,6,514,513,6
v,5,413,412,5,6,513,512,6

csys,0
v,6,512,515,6,7,612,615,7
v,6,515,514,6,7,615,614,7
v,6,514,513,6,7,614,613,7
v,6,513,512,6,7,613,612,7

csys,0
v,7,612,615,7,8,712,715,8
v,7,615,614,7,8,715,714,8
v,7,614,613,7,8,714,713,8
v,7,613,612,7,8,713,712,8

csys,0
v,8,712,715,8,9,812,815,9
v,8,715,714,8,9,815,814,9
v,8,714,713,8,9,814,813,9
v,8,713,712,8,9,813,812,9

csys,0
v,9,812,815,9,10,912,915,10
v,9,815,814,9,10,915,914,10
v,9,814,813,9,10,914,913,10
v,9,813,812,9,10,913,912,10

csys,0
v,10,912,915,10,11,1012,1015,11
v,10,915,914,10,11,1015,1014,11
v,10,914,913,10,11,1014,1013,11
v,10,913,912,10,11,1013,1012,11
```

```
!*************************************
!Dimiourgia twn 4 nhmatwn me antigrafi tou 1ou

vgen,4,1,40,1,a,0,0,2000,,0


!****Dimiourgia twn ogkwn ths 1hs orizontias inas******
csys,0
k,16,0,gb,2*r
k,17,ga,gb,2*r
k,18,ga+a,gb,2*r
k,19,ga+(2*a),gb,2*r
k,20,ga+(3*a),gb,2*r
k,21,f,gb,2*r

l,16,17
l,17,18
l,18,19
l,19,20
l,20,21

!*************************************
!Dimiourgia kuklou sth arxi ths orizontias grammis

lwplan,,553,0
cswplan,11,1

k,22,r,270
k,23,r,0
k,24,r,90
k,25,r,180


l,22,23
l,23,24
l,24,25
l,25,22


!*****************************************
!Antigrafi tou kuklou ths vasis sto telos kathe grammis tou 1ou orizontiou nimatos
```

```
csys,0
lgen,2,558,561,1,ga,,,100,,0
lgen,4,562,565,1,a,,,100,,0
lgen,2,574,577,1,ga,,,100,,0

!****************************************
!Dimiourgia twn ogkwn toy 1ou orizontiou nhmatos

v,16,24,23,16,17,124,123,17
v,16,23,22,16,17,123,122,17
v,16,22,25,16,17,122,125,17
v,16,25,24,16,17,125,124,17

v,17,124,123,17,18,224,223,18
v,17,123,122,17,18,223,222,18
v,17,122,125,17,18,222,225,18
v,17,125,124,17,18,225,224,18

v,20,424,423,20,21,524,523,21
v,20,423,422,20,21,523,522,21
v,20,422,425,20,21,522,525,21
v,20,425,424,20,21,525,524,21

!*****************************************
!Antigrafi tou 1ou orizontiou nhmatos se alla 2 antigrafa

csys,0
vgen,3,161,180,1,,b,,1000,,0

!*************************************************
!Antigrafi twn kathetwn inwn kata ton axona z kata t (dimiourgia antidiametrikhs plakas)
csys,0
vgen,2,1,160,1,,,-t,10000,,0

!*****************************************************
!Antigrafi twn orizontiwn inwn kata twm axona z (dimiourgia antidiametrikhs plakas)
csys,0
vgen,2,161,220,1,,,-h,20000,,0
```

```
!****************************************
!                MATERIAL PROPERTIES
!****************************************

ET,1,SOLID45      !3-D solid elements
ET,2,BEAM188      !3-D elastic
ET,3,170          !target
ET,4,174          !contact
ET,5,BEAM188

KEYOPT,4,5,3        ! Either closes the gap or reduces initial penetration
KEYOPT,4,9,1        ! To ignore initial penetration from both effects
KEYOPT,1,4,1        ! activate element coordinate system
KEYOPT,4,12,5       !bonded always

!MATERIAL PROPERTIES GIA NHMATA
MP,EX,1,10000           ! transverse isotropic properties (N/mm^2)
MP,EY,1,10000
MP,EZ,1,72000         !(MPa=N/mm^2)
MP,NUXY,1,0.30
MP,NUYZ,1,0.30
MP,NUXZ,1,0.30
MP,GXY,1,3850
MP,GYZ,1,5000
MP,GXZ,1,5000
MP,MU,1,0.2

SECTYPE,2,BEAM,CSOLID,,0
SECDATA,r1,20,1

SECTYPE,5,BEAM,CSOLID,,0
SECDATA,r2,20,1

!MATERIAL PROPERTIES gia to mauro
MP,EX,2,5141
MP,NUXY,2,0.30
MP,DENS,2,1*10**(-7)
R,2,pi*r1**2,((pi*r1**4)/4),((pi*r1**4)/4),2*r1,2*r1,,

!MATERIAL PROPERTIES gia to aspro
MP,EX,3,4876
```

```
MP,NUXY,3,0.30
MP,DENS,3,1*10**(-7)
R,5,pi*r2**2,((pi*r2**4)/4),((pi*r2**4)/4),2*r2,2*r2,,

!*************************************
!                    MESH
!*************************************

vsel,all
allsel,below,volu
lsel,r,length,,0.001,0.5*r*pi
lesize,all,,,6

allsel,below,volu
lsel,r,length,,(0.5*r*pi)+0.001,ga
lesize,all,,,10

allsel,below,volu
lsel,r,length,,0.001+ga,gb
lesize,all,,,10

allsel,below,volu
lsel,r,length,,0.001+gb,a
lesize,all,,,40

allsel,below,volu
lsel,r,length,,0.001+a,b
lesize,all,,,40

mat,1
vmesh,all

!******PLEGMA MAYRWN INWN*************
type,2
MAT,2
REAL,2
secnum,2
lsel,s,line,,1543,1553
lesize,all,,,40
lmesh,all
```

```
!*********PLEGMA ASPRWN INWN*****************
type,5
secnum,5
mat,3
real,5
lsel,s,line,,1553,1571
lesize,all,,,30
lmesh,all

!****************************************
!       CONTACT PAIRS
!*****************************************
!**********1h plexi*************************
! create contact pair  #1

NSEL,ALL
ASEL,ALL
! create contact pair  #2

asel,s,area,,54,63,9
asel,a,area,,66,75,9
NSLA,,1
nsel,r,loc,y,(gb+b)-r,(gb+b)+r
CM,IK31,NODE
REAL,31
TYPE,4
ESURF

asel,s,area,,571,584,13
asel,a,area,,567,581,14
NSLA,,1
nsel,r,loc,x,ga-r,ga+r
CM,IO31,NODE
REAL,31
TYPE,3
ESURF

!*********************************

NSEL,ALL
ASEL,ALL
```

```
! create contact pair  #4

asel,s,area,,127,139,12
asel,a,area,,142,151,9
NSLA,,1
nsel,r,loc,y,gb-r,gb+r
CM,IK4,NODE
REAL,4
TYPE,4
ESURF

asel,s,area,,517,520,3
asel,a,area,,529,532,3
NSLA,,1
nsel,r,loc,x,(ga+a)-r,(ga+a)+r
CM,IO4,NODE
REAL,4
TYPE,3
ESURF

NSEL,ALL
ASEL,ALL
! create contact pair  #5

asel,s,area,,178,187,9
asel,a,area,,190,199,9
NSLA,,1
nsel,r,loc,y,(gb+b)-r,(gb+b)+r
CM,IK30,NODE
REAL,30
TYPE,4
ESURF

asel,s,area,,581,584,3
asel,a,area,,593,596,3
NSLA,,1
nsel,r,loc,x,(ga+a)-r,(ga+a)+r
CM,IO30,NODE
REAL,30
TYPE,3
ESURF
```

```
!**********************************

NSEL,ALL
ASEL,ALL

! create contact pair  #7

asel,s,area,,251,263,12
asel,a,area,,266,275,9
NSLA,,1
nsel,r,loc,y,gb-r,gb+r
CM,IK7,NODE
REAL,7
TYPE,4
ESURF

asel,s,area,,529,532,3
asel,a,area,,541,544,3
NSLA,,1
nsel,r,loc,x,(ga+2*a)-r,(ga+2*a)+r
CM,IO7,NODE
REAL,7
TYPE,3
ESURF

NSEL,ALL
ASEL,ALL
! create contact pair  #8

asel,s,area,,302,311,9
asel,a,area,,314,323,9
NSLA,,1
nsel,r,loc,y,(gb+b)-r,(gb+b)+r
CM,IK8,NODE
REAL,8
TYPE,4
ESURF

asel,s,area,,593,596,3
asel,a,area,,605,608,3
NSLA,,1
```

```
nsel,r,loc,x,(ga+2*a)-r,(ga+2*a)+r
CM,IO8,NODE
REAL,8
TYPE,3
ESURF

!*******************************

NSEL,ALL
ASEL,ALL
! create contact pair  #10

asel,s,area,,375,387,12
asel,a,area,,390,399,9
NSLA,,1
nsel,r,loc,y,gb-r,gb+r
CM,IK10,NODE
REAL,10
TYPE,4
ESURF

asel,s,area,,541,544,3
asel,a,area,,553,556,3
NSLA,,1
nsel,r,loc,x,(ga+3*a)-r,(ga+3*a)+r
CM,IO10,NODE
REAL,10
TYPE,3
ESURF

NSEL,ALL
ASEL,ALL

! create contact pair  #11

asel,s,area,,426,435,9
asel,a,area,,438,447,9
NSLA,,1
nsel,r,loc,y,(gb+b)-r,(gb+b)+r
CM,IK11,NODE
REAL,11
```

```
TYPE,4
ESURF

asel,s,area,,605,608,3
asel,a,area,,617,620,3
NSLA,,1
nsel,r,loc,x,(ga+3*a)-r,(ga+3*a)+r
CM,IO11,NODE
REAL,11
TYPE,3
ESURF

!******2h plexi***********
!*******************************

NSEL,ALL
ASEL,ALL
! create contact pair  #15

asel,s,area,,793,796,3
asel,a,area,,805,808,3
NSLA,,1
nsel,r,loc,y,(gb+2*b)-r,(gb+2*b)+r
CM,IK15,NODE
REAL,15
TYPE,4
ESURF

asel,s,area,,1315,1327,12
asel,a,area,,1330,1339,9
NSLA,,1
nsel,r,loc,x,ga-r,ga+r
CM,IO15,NODE
REAL,15
TYPE,3
ESURF

!**************************

NSEL,ALL
ASEL,ALL
```

```
! create contact pair  #17

asel,s,area,,869,872,3
asel,a,area,,881,884,3
NSLA,,1
nsel,r,loc,y,(gb+b)-r,(gb+b)+r
CM,IK17,NODE
REAL,17
TYPE,4
ESURF

asel,s,area,,1266,1275,9
asel,a,area,,1278,1287,9
NSLA,,1
nsel,r,loc,x,(ga+a)-r,(ga+a)+r
CM,IO17,NODE
REAL,17
TYPE,3
ESURF

NSEL,ALL
ASEL,ALL

! create contact pair  #18

asel,s,area,,917,920,3
asel,a,area,,929,932,3
NSLA,,1
nsel,r,loc,y,(gb+2*b)-r,(gb+2*b)+r
CM,IK18,NODE
REAL,18
TYPE,4
ESURF

asel,s,area,,1330,1339,9
asel,a,area,,1342,1351,9
NSLA,,1
nsel,r,loc,x,(ga+a)-r,(ga+a)+r
CM,IO18,NODE
REAL,18
TYPE,3
```

```
ESURF

!***************************

NSEL,ALL
ASEL,ALL
! create contact pair  #20

asel,s,area,,993,996,3
asel,a,area,,1005,1008,3
NSLA,,1
nsel,r,loc,y,(gb+b)-r,(gb+b)+r
CM,IK20,NODE
REAL,20
TYPE,4
ESURF
asel,s,area,,1278,1287,9
asel,a,area,,1290,1299,9
NSLA,,1
nsel,r,loc,x,(ga+2*a)-r,(ga+2*a)+r
CM,IO20,NODE
REAL,20
TYPE,3
ESURF

NSEL,ALL
ASEL,ALL

! create contact pair  #21

asel,s,area,,1041,1044,3
asel,a,area,,1053,1056,3
NSLA,,1
nsel,r,loc,y,(gb+2*b)-r,(gb+2*b)+r
CM,IK21,NODE
REAL,21
TYPE,4
ESURF

asel,s,area,,1342,1351,9
asel,a,area,,1354,1363,9
```

```
NSLA,,1
nsel,r,loc,x,(ga+2*a)-r,(ga+2*a)+r
CM,IO21,NODE
REAL,21
TYPE,3
ESURF

!*********************************************
NSEL,ALL
ASEL,ALL

! create contact pair  #23

asel,s,area,,1117,1120,3
asel,a,area,,1129,1132,3
NSLA,,1
nsel,r,loc,y,(gb+b)-r,(gb+b)+r
CM,IK23,NODE
REAL,23
TYPE,4
ESURF

asel,s,area,,1290,1299,9
asel,a,area,,1302,1311,9
NSLA,,1
nsel,r,loc,x,(ga+3*a)-r,(ga+3*a)+r
CM,IO23,NODE
REAL,23
TYPE,3
ESURF

NSEL,ALL
ASEL,ALL
! create contact pair  #24

asel,s,area,,1165,1168,3
asel,a,area,,1177,1180,3
NSLA,,1
nsel,r,loc,y,(gb+2*b)-r,(gb+2*b)+r
CM,IK24,NODE
REAL,24
```

```
TYPE,4
ESURF

asel,s,area,,1354,1363,9
asel,a,area,,1366,1375,9
NSLA,,1
nsel,r,loc,x,(ga+3*a)-r,(ga+3*a)+r
CM,IO24,NODE
REAL,24
TYPE,3
ESURF

NSEL,ALL
ASEL,ALL

!*************************************
!                  LOADS
!*************************************

h1=t+(2*r)
nsel,s,loc,z,-h1
d,all,all,0
allsel

nsel,r,loc,z,2*r
d,all,uz,-15       !!epiboli metatopishs
d,all,uy,0
d,all,ux,0
ALLSEL, ALL

!*****************************************
!       SOLVE
!*****************************************

/SOLU
ANTYPE,STATIC
NSUBST,20,100,10
OUTRES,ALL,ALL
AUTOTS,OFF
NROPT,FULL,,ON
LNSRCH,ON
```

```
TIME,1
SOLVE
FINISH
```

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] 3-D FABRICS – An Overview, Tanveer Malik and Shivendra Parmar, Department of Textile Technology Shri Vaishnav Institute of Technology and Science.

[2] Buesgen, W. A., Neue Verfahren zur Herstellung von dreidimensionalen Textilien für den Einsatz in Faserverbundwerkstoffen. Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 1993.

[3] Roye, A.; Stueve, J.; Gries Th., Definition for the differentation of 2D- and 3D- textiles – Part 1: production in one-step-processes, Technical Textiles 48 (2005), No. 3, p. 15-18.

[4] Seidl, R. 3-dimensionally produced fabrics-weaving, knitting or braiding. What is the future?, Techtextil-Symposium Asia 98, Osaka International Trade Fair Commission, Fair Band 1 (1998), p. 65-74.

[5] Roye, A.; Gries, Th. Design by application – customised, warp-knitted spacer fabrics for use in reinforcing concrete, Kettenwirk - praxis, 4/2004, p. 20-21.

[6] Roye, A.; Gries, Th.; Peled, A., Spacer fabrics for thin walled concrete, 6th RILEM Symposium on Fibre - Reinforced Concretes, BEFIB 2004, Verena Italy, p.1505-1514.

[7] Swamy, R.; Hussin, M. Continuous woven polypropylene mat reinforced cement composites for applications in building construction, In Textile Composites in Building Construction, Part 1,1990.

[8] Kruger, M.; Ozbolt, J.; Reinhardt, H.W. A New 3D Discrete Bond Model to Study The Influence of Bond on Structural Performance of Thin Reinforced and Prestressed Concrete Plates", Proceeding of the Fourth International RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC4), Ann Arbor, 2003.

[9] Meyer, C. Vilkner G. Glass Concrete Thin Sheets Prestressed with Aramid Fiber Mesh, Proceeding of the Fourth International RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC4), Ann Arbor, 2003.

[10] Peled A.; Bentur, A.; Yankelevsky, D. Flexural performance of cementitious composites reinforced by woven fabrics, Materials in Civil Engineering (ASCE), November 1999 Roye, A.; Gries, Th.; Peled, A. Spacer fabrics for thin walled concrete, 6th RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes, BEFIB 2004, Verena Italy, p.1505-1514.

[11] Development and defining of a characterization method for 3D spacer fabrics considering concrete applications, H. Diren Mecit, 2005.

[12] Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων Ι, Γ.Ι. Τσαμασφύρος, Ε.Ε. Θεοτόκογλου, Αθήνα 2000.

[13] Πεπερασμένα Στοιχεία Στη Μηχανολογία, Χρ. Προβατίδης Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π., Α. Κανάραχος Καθηγητής Ε.Μ.Π., εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 2000.

[14] Πεπερασμένα Στοιχεία, Δρ. Πασχάλης Κ. Γκότσης, εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη 2005.

[15] Ανάλυση Μηχανολογικών Κατασκευών ΙΙ, Πρόχειρες Σημειώσεις, Χρ. Προβατίδης Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π., Αθήνα 2004.

[16] Σύνθετα Υλικά, Γιώργος Παπανικολάου, Διονύσης Μουζάκης, εκδόσεις Κλειδάριθμος, Πάτρα 2007.

[17] Υπολογιστικές Μέθοδοι Στις Κατασκευές, Πρόχειρες σημειώσεις, Χ. Προβατίδης Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π., Ι. Αντωνιάδης Ε.Μ.Π., Αθήνα 2004.

[18] Τεχνική Μηχανική, Αντοχή των υλικών, Δρ. Π.Α. Βουθούνης, Αθήνα 2005.

[19] Αριθμητική Ανάλυση, Κ.Χ. Γιαννάκογλου, Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π, Ι. Αναγνωστόπουλος, Λέκτορας Ε.Μ.Π., Γ. Μπεργελές, Καθηγητής Ε.Μ.Π., Αθήνα 2003.

Πηγές στο διαδύκτιο

[1] www.3tex.com
[2] www.scotweave.com
[3] www.baltex.uk
[4] www.cem-fil.com