

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΟΥ ΑΠΟΧΩΡΙΣΜΟΥ ΤΩΝ
ΣΤΡΩΣΕΩΝ ΣΤΟΝ ΛΥΓΙΣΜΟ ΙΝΩΔΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ**

Επιβλέπων : Ν. Τσούβαλης



ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2010

ΚΟΥΣΑΘΑΝΑΣ ΑΝΔΡΕΑΣ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	4
Εισαγωγή στην επίδραση του αποχωρισμού των στρώσεων πολύστρωτων υλικών στο λυγισμό	4
1.1 Εισαγωγή	4
1.2 Περιγραφή του φαινομένου του αποχωρισμού των στρώσεων	5
1.2.1 Βασικά στοιχεία και ιδιότητες σύνθετων υλικών	5
1.2.2 Πολύστρωτα.....	10
1.2.3 Το φαινόμενο του αποχωρισμού των στρώσεων ενός πολύστρωτου (delamination).....	12
1.2.4 Λυγισμός πολύστρωτων δοκών	14
1.3 Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	15
1.4 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας.....	18
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	20
Ανάλυση μοντελοποίησης με πεπερασμένα στοιχεία.....	20
2.1 Εισαγωγή	20
2.2 Προεπεξεργασία (Preprocessing).....	20
2.2.1 Επιλογή τύπου στοιχείων.....	21
2.2.2 Ορισμός μηχανικών ιδιοτήτων	23
2.2.3 Σχεδίαση της δοκού	24
2.2.4 Κατασκευή του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων.....	27
2.2.4.1 Επιλογή των διαστάσεων των στοιχείων του μοντέλου.....	32
2.3 Επίλυση.....	41
2.3.1 Ορισμός συνοριακών συνθηκών και φόρτισης.....	41
2.3.2 Τύπος ανάλυσης.....	43
2.4 Μεταεπεξεργασία	45
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	46
Σχεδιασμός πειραματικών δοκιμών	46
3.1 Εισαγωγή	46
3.2 Επιλογή γεωμετρικών χαρακτηριστικών των δοκιμίων.....	46
3.3 Επιλογή γεωμετρικών χαρακτηριστικών αποκόλλησης (delamination).....	47
3.4 Προμελέτη των πειραμάτων και συμπεριφοράς των δοκιμίων κατά το πείραμα του λυγισμού με τη βοήθεια του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων.....	49
3.4 Συμπεράσματα και παρατηρήσεις για τη σχεδίαση των πειραματικών δοκιμών	56
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	57

Πειραματικές δοκιμές	57
4.1 Εισαγωγή	57
4.2 Υλικά	57
4.3 Κατασκευή δοκιμίων	59
4.3.1 Προετοιμασία πλάκας.....	60
4.3.1.1 Προετοιμασία στρώσεων υαλοϋφάσματος.....	60
4.3.1.2 Προετοιμασία τεχνητού αποχωρισμού	62
4.3.2 Κατασκευή πλάκας από GRP	63
4.3.3 Κοπή δοκιμίων και τελική μορφοποίηση	67
4.4 Επιτευχθείσες ιδιότητες πολυστρώτου	71
4.5 Διεξαγωγή πειραματικών δοκιμών και παρουσίαση αποτελεσμάτων	73
4.5.1 Διεξαγωγή Πειραμάτων	74
4.5.2 Αποτελέσματα πειραμάτων	77
4.5.2.1 Σειρά δοκιμών A-100	77
4.5.2.2 Σειρά δοκιμών A-200	80
4.5.2.3 Σειρά δοκιμών A-300	84
4.5.2.4 Σειρά δοκιμών B-100.....	87
4.5.2.5 Σειρά δοκιμών B-200.....	90
4.5.2.6 Σειρά δοκιμών B-300.....	94
4.5.2.7 Σειρά δοκιμών Intact.....	97
4.5.2.8 Συγκεντρωτικά διαγράμματα.....	100
4.6 Συμπεράσματα και παρατηρήσεις των αποτελεσμάτων	104
4.6.1 Παρατηρήσεις.....	104
4.6.2 Συμπεράσματα	105
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	106
Μοντελοποίηση Πειραμάτων	106
5.1 Εισαγωγή	106
5.2 Αποτελέσματα κώδικα και σύγκριση αποτελεσμάτων	106
5.2.1 Σειρά Δοκιμών A-100.....	107
5.2.1.1 Παρατηρήσεις.....	107
5.2.2 Σειρά δοκιμών A-200	108
5.2.2.1 Παρατηρήσεις.....	109
5.2.3 Σειρά Δοκιμών A-300.....	109
5.2.3.1 Παρατηρήσεις.....	111

5.2.4 Σειρά δοκιμών B-100.....	111
5.2.4.1 Παρατηρήσεις.....	112
5.2.5 Σειρά δοκιμών B-200.....	113
5.2.5.1 Παρατηρήσεις.....	113
5.2.6 Σειρά δοκιμών B-300.....	114
5.2.6.1 Παρατηρήσεις.....	115
5.2.7: Σειρά δοκιμών Intact	116
5.2.7.1 Παρατηρήσεις.....	117
5.3 Συμπεράσματα για το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων	117
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	118
ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΒΑΣΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	118
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	119

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή στην επίδραση του αποχωρισμού των στρώσεων πολύστρωτων υλικών στο λυγισμό

1.1 Εισαγωγή

Η συνεχής προσπάθεια μεγιστοποίησης του κέρδους και της απόδοσης χαρακτηρίζει κάθε κατασκευαστικό τομέα. Ο στόχος αυτός έχει σαν αποτέλεσμα την ασταμάτητη αναζήτηση νέων τεχνολογιών και την επένδυση υπέρογκων ποσών στην έρευνα. Συγκεκριμένα στον τομέα της ναυπηγικής όπως και στους περισσότερους κατασκευαστικούς τομείς σημαντικοί παράμετροι είναι το βάρος και η αντοχή της κατασκευής. Στην ναυπηγική είτε πρόκειται για πλωτές κατασκευές είτε για πλοία και μικρά σκάφη, η μείωση του βάρους συνεπάγεται πιθανή ελάττωση του κόστους κατασκευής. Παράλληλα, παρέχει τη δυνατότητα μεγαλύτερης μεταφορικής ικανότητας, αυξάνοντας έτσι την εμπορική εκμεταλλευσιμότητά τους. Επιπλέον, τα ελαφρύτερα σκάφη έχουν χαμηλότερες απαιτήσεις σε ισχύ, ενώ η πιθανή μείωση της αντίστασης των γαστρών τους οδηγεί σε αύξηση της ταχύτητας.

Ο πλέον παραδοσιακός τρόπος μείωσης του βάρους της κατασκευής είναι η μείωση του πάχους των ελασμάτων και η χρήση ενισχυτικών όπως επίσης και η πρακτική των συγκολλήσεων. Όμως, η εξέλιξη της τεχνολογίας υλικών χαμηλότερου ειδικού βάρους από εκείνο του παραδοσιακού ναυπηγικού χάλυβα προσέφερε νέες κατασκευαστικές λύσεις. Σύντομα, το αλουμίνιο αντικατέστησε το χάλυβα σε τμήματα σκαφών και πλοίων, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις αποτέλεσε το βασικό υλικό κατασκευής. Παρόλα αυτά, η μεγάλη ανάπτυξη που γνώρισαν τις τελευταίες δεκαετίες τα σύνθετα υλικά, ιδίως τα ινώδη, διέυρνε τα περιθώρια μείωσης του βάρους και αύξησης της απόδοσης των σκαφών.

Ο όρος «σύνθετος» σημαίνει «αποτελείται από δύο ή περισσότερα διακριτά μέρη». Επομένως ένα υλικό το οποίο διαθέτει δύο ή περισσότερα συνιστώσα υλικά ή φάσεις μπορεί να θεωρηθεί ως σύνθετο υλικό. Ειδικότερα ως σύνθετα αναγνωρίζονται σήμερα εκείνα τα υλικά, των οποίων τα συνιστώσα μέρη έχουν σημαντικά διαφορετικές μηχανικές και φυσικές ιδιότητες μεταξύ τους, έτσι ώστε και το ίδιο σύνθετο υλικό να έχει σημαντικά διαφορετικές ιδιότητες από εκείνες των συνιστούντων μερών (Τσούβαλης -1998).

Τα κριτήρια κατάταξης ενός υλικού στα σύνθετα υλικά είναι πρώτον να αποτελούν συνδυασμό συστατικών μερών και δεύτερο οι ιδιότητες του ενός από τα μέρη να είναι σημαντικά μεγαλύτερες από του άλλου. Βέβαια τα σύνθετα υλικά μπορούν να υποδιαιρεθούν σε πολλές κατηγορίες. Μία από αυτές που είναι και η πιο συνηθισμένη μορφή είναι τα ινώδη σύνθετα υλικά ή ενισχυμένα με ίνες

πλαστικά. Τα ενισχυμένα με ίνες πλαστικά (Fibre Reinforced Plastics, FRP's) πλεονεκτούν σημαντικά έναντι των συμβατικών υλικών (χάλυβας, αλουμίνιο, ξύλο). Λόγω του αξιοσημείωτα χαμηλού ειδικού βάρους τους, χαρακτηρίζονται από υψηλές τιμές της ειδικής αντοχής και της ειδικής δυσκαμψίας, ενώ παράλληλα, παρουσιάζουν εξαιρετική αντοχή σε διάβρωση. Τα παραπάνω, σε συνδυασμό με τις σχετικά εύκολες διαδικασίες παραγωγής και το χαμηλό κόστος συντήρησης, έχουν οδηγήσει στη διαρκώς αυξανόμενη χρήση των υλικών αυτών σε πλήθος θαλάσσιων και όχι μόνο εφαρμογών.

Βέβαια έκτος των πολλών πλεονεκτημάτων που έχουν εντοπιστεί σε αυτά τα υλικά υπάρχουν και μειονεκτήματα και το μεγαλύτερο από αυτά είναι το γεγονός ότι ακόμα δεν έχουν κατανοηθεί πλήρως οι μηχανισμοί, οι τρόποι και οι λόγοι για τους οποίους αστοχούν τα συγκεκριμένα υλικά. Η παρούσα εργασία κινείται στα πλαίσια της κατανόησης της μηχανικής συμπεριφοράς κατασκευών από ινώδη σύνθετα υλικά που έχουν ήδη μερικώς αστοχήσει. Αντικείμενό της αποτελεί ο αποχωρισμός των στρώσεων, ένας συνήθης τρόπος αστοχίας κατασκευών από τέτοια υλικά, και ειδικότερα, η επίδραση αυτού στο λυγισμό πλακών. Η μελέτη αυτή παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τα κατασκευαστικά στοιχεία σκαφών από FRP's, οι καταπονήσεις των οποίων είναι δυνατόν να οδηγήσουν τόσο σε αστοχία υπό τη μορφή του αποχωρισμού των στρώσεων όσο και σε λυγισμό.

1.2 Περιγραφή του φαινομένου του αποχωρισμού των στρώσεων

1.2.1 Βασικά στοιχεία και ιδιότητες σύνθετων υλικών

Τα συστατικά μέρη των ινώδων σύνθετων υλικών είναι η μήτρα (matrix) και οι ενισχυτικές ίνες (fibres). Η τοποθέτηση των ινών στη μήτρα είναι απόλυτα ελεγχόμενη και υπάρχει ευχέρεια επιλογής του προσανατολισμού τους ως προς όλη την κατασκευή αλλά και ως προς τις υπόλοιπες ίνες. Οι ίνες είναι το συστατικό μέρος με τις αυξημένες μηχανικές ιδιότητες ως προς τη μήτρα αλλά και λόγω κατασκευής τους ως προς το υλικό που είναι κατασκευασμένες. Η μήτρα λειτουργεί ως μέσο σταθεροποίησης των ινών και ταυτοχρόνως τις προστατεύει και τις υποστηρίζει. Μία πολύ σημαντική λειτουργία της μήτρας είναι η μεταφορά των φορτίων μέσω διατμητικών τάσεων. Αυτό προσφέρει ένα μεγάλο πλεονέκτημα στα ινώδη σύνθετα υλικά διότι σε περίπτωση αστοχίας μίας ίνας η κατασκευή δεν αστοχεί ολικά, απλά γίνεται μεταφορά του επιπλέον φορτίου σε άλλο σημείο της ίνας και στις γειτονικές ίνες. Έτσι οι ιδιότητες του ινώδους σύνθετου υλικού καθορίζονται κατά κύριο λόγο από τις μηχανικές ιδιότητες των ινών και λιγότερο από αυτές της μήτρας.

Οι ενισχυτικές ίνες λόγω κατασκευής διαθέτουν μεγάλη αντοχή και δυσκαμψία στη διεύθυνση του μήκους ενώ μπορούν να παραλάβουν μόνο εφελκυστικά φορτία. Βέβαια αυτό δεν σημαίνει ότι δεν συνεισφέρουν και στις

υπόλοιπες τάσεις που μπορεί να δεχτεί το υλικό όπως θλιπτικές, διατμητικές και καμπτικές.

Τα περισσότερο διαδεδομένα υλικά για ενισχυτικές ίνες στην ναυπηγική βιομηχανία είναι το γυαλί, ο άνθρακας και aramid. Στον παρακάτω πίνακα 1.1 παρουσιάζονται τυπικές ιδιότητες των διαφόρων ενισχυτικών ινών(Τσούβαλης 1998).

Πίνακας 1.1: Τυπικές ιδιότητες ενισχυτικών ινών.

Είδος ίνας	γ ¹	E ²	ν ³	σ_t ⁴	ϵ_t ⁵	α ⁶	κόστος ⁷
		GPa		MPa	%	10 ⁶ °C	
Γυαλί-E	2,55	72	0,2	2400	3,0	5,0	1,1
	2,50	88	0,2	3400	3,5	5,6	5,0
Άνθρακας Υ. Α. ^α (Thornell T-40)	1,74	297	-	4100	1,4	-	13,3
Άνθρακας Υ. Α. ^α (Thornell T-700)	1,81	248	-	4500	1,8	-	12,0
Άνθρακας Υ. Α. ^α (Fortafil F-5)	1,80	345	-	3100	0,9	-0,5	13,3
Άνθρακας Υ. Μ. ^β (P-75S)	2,00	520	-	2100	0,4	-1,2	67,0
Άνθρακας Υ. Μ. ^β (P-120)	2,18	826	-	2200	0,3	-	720,0
Aramid (Kevlar® 49)	1,45	124	-	2800	2,5	-2	20

^α Υψηλής αντοχής

^β Υψηλού μέτρου ελαστικότητας

¹ Ειδικό βάρος

² Μέτρο ελαστικότητας του Young

³ Λόγος του Poisson

⁴ Αντοχή σε εφελκυσμό

⁵ Παραμόρφωση μέχρι τη θραύση σε εφελκυσμό

⁶ Συντελεστής γραμμικής θερμικής διαστολής

⁷ Τιμές 1995.

Στη ναυπηγική βιομηχανία τα πιο διαδεδομένα υλικά που χρησιμοποιούνται ως μήτρες των ινωδών σύνθετων υλικών είναι ως επί το πλείστον θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες, ενώ σε εξειδικευμένες περιπτώσεις γίνεται χρήση

θερμοπλαστικών. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει τις πολυεστερικές, τις εποξικές, τις βινυλεστερικές και τις φαινολικές ρητίνες. Οι θερμοπλαστικές ρητίνες είναι πολυμερή τα οποία, σε αυξημένες θερμοκρασίες της τάξεως των 150-200 °C μαλακώνουν και μπορούν να μορφοποιηθούν και δεν είναι προς το παρόν κατάλληλα για την κατασκευή μεγάλων σκαφών. Οι πολυεστερικές ρητίνες ιδίως οι ακόρεστες, είναι οι περισσότερο χρησιμοποιούμενες σε ναυπηγικές εφαρμογές εξαιτίας του λογικού κόστους, της ευκολίας χρήσης και εφαρμογής τους και της καλής συμπεριφοράς που παρουσιάζουν στο θαλάσσιο περιβάλλον. Οι μηχανικές ιδιότητες των ρητινών (Πίνακας 1.2, Τσουβάλης - 1998) είναι αρκετά χαμηλές, καθιστώντας απαραίτητη την ενίσχυσή τους. Στον αντίποδα, παρουσιάζουν εξαιρετική αντοχή σε διαβρωτικά περιβάλλοντα και υψηλές θερμοκρασίες.

Πίνακας 1.2: Τυπικές ιδιότητες θερμοσκληρυνόμενων ρητινών.

Ρητίνη	γ ¹	E ²	ν ³	σ_t ⁴	ϵ_t ⁵	σ_c ⁶	κόστος ⁷
	g/cm ³	GPa		MPa	%	MPa	\$/lb
Πολυεστερική (ορθοφθαλική)	1,23	3,2	0,36	65	2	130	1,05
Πολυεστερική (ισοφθαλική)	1,21	3,6	0,36	60	2,5	130	1,19
Βινυλεστερική (Derekane 411-45)	1,12	3,4	-	83	5	120	1,74
Εποξική	1,20	3,0	0,37	85	5	130	3,90
Φαινολική	1,15	3,0	-	50	2	-	1,10

¹ Ειδικό βάρος

² Μέτρο ελαστικότητας του Young

³ Λόγος του Poisson

⁴ Αντοχή σε εφελκυσμό

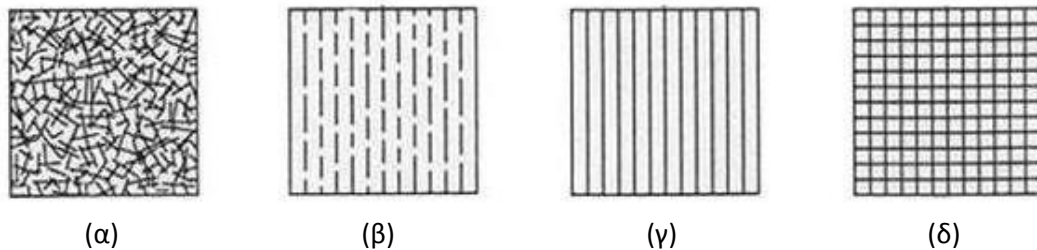
⁵ Παραμόρφωση μέχρι τη θραύση σε εφελκυσμό

⁶ Αντοχή σε θλίψη

⁷ Τιμές 1995.

Αφού έγινε μερική ανάλυση των συστατικών μερών ενός ινώδους σύνθετου υλικού πρέπει να αναφέρουμε ότι τα συστατικά αυτά μέρη ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής διαμορφώνονται με κατάλληλο τρόπο. Οι βασικές μορφές διαμόρφωσης των ενισχυτικών ινών είναι το υαλοπίλημα (Chopped Strand Mat,

CSM), οι πλεξίδες νημάτων (rovings), το υαλοϋφασμα (Woven Roving, WR), τα πεπλεγμένα υφάσματα (woven fabrics, clothes) και τα μονοαξονικά υφάσματα (Uni - Directional rovings, UD). Το υαλοπίλημα είναι ένα «χαλαρό» ύφασμα τυχαίου προσανατολισμού που κατασκευάζεται από κοντές ίνες, συνδεδεμένες μεταξύ τους με τη βοήθεια ενός ειδικού συνδετικού υλικού. Αντίθετα, τα μονοαξονικά υφάσματα προκύπτουν από την παράλληλη σύνδεση πολλών μακριών ινών, προσανατολισμένων σε μία διεύθυνση. Οι πλεξίδες αποτελούνται από περιορισμένο αριθμό παράλληλα συνδεδεμένων μακριών ινών (1-100) και χρησιμοποιούνται ως έχουν ή συνηθέστερα, πλέκονται κάθετα μεταξύ τους δίνοντας ένα «τραχύ και χοντροκομμένο» ύφασμα (υαλοϋφασμα).¹ Τέλος, η πλέξη με απλές ίνες που έχουν υποστεί περιστροφή έχει ως αποτέλεσμα πεπλεγμένα υφάσματα ή υφάσματα «πυκνής πλέξης». Ορισμένοι τύποι υφασμάτων φαίνονται στα σχήματα 1.1 - 1.5.



Σχήμα 1.1: Τύποι διάταξης ινών: (α) υαλοπίλημα, (β) μονοαξονικό ύφασμα με κοντές ίνες, (γ) μονοαξονικό ύφασμα με μακριές ίνες και (δ) υαλοϋφασμα.



Σχήμα 1.2: Υαλοπίλημα (Chopped Strand Mat, CSM).

¹ Τα υαλοϋφάσματα διακρίνονται σε ισοσταθμισμένα (balanced) και μη, ανάλογα με τον αριθμό των ινών στις δύο διευθύνσεις πλέξης. Όταν ο αριθμός είναι περίπου ίδιος, τα υαλοϋφάσματα καλούνται ισοσταθμισμένα.



Σχήμα 1.3: Πλεξίδες (rovings).



Σχήμα 1.4: Υαλοϋφασμα (Woven Roving, WR).



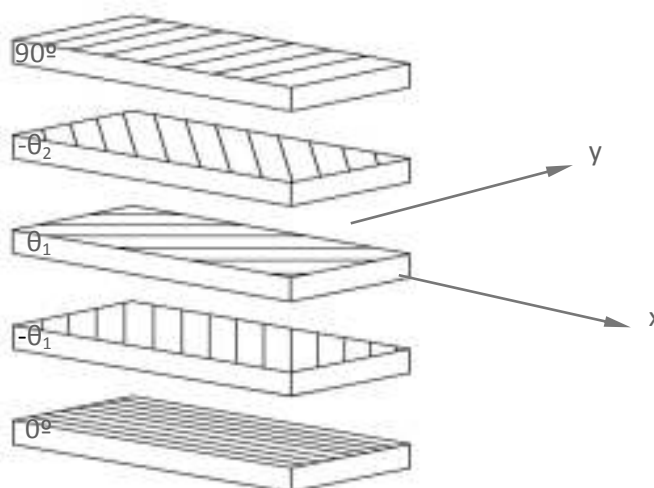
Σχήμα 1.5: Υφασμα πυκνής πλέξης (woven fabric, cloth).

Το στοιχειώδες κατασκευαστικό στοιχείο μίας κατασκευής από ινώδη σύνθετα υλικά είναι η στρώση (lamina). Στρώση είναι μία επίπεδη διαμόρφωση ινών σε μία μήτρα. Οι ενισχυτικές ίνες μπορούν να διαταχθούν με οποιονδήποτε από τους παραπάνω τρόπους. Κάθε στρώση χαρακτηρίζεται από ένα σύστημα κυρίων αξόνων (1, 2, 3), παράλληλων ή κάθετων στις ίνες. Οι άξονες 1 και 2 βρίσκονται στο επίπεδο

της, ενώ ο άξονας 3 είναι κάθετος σε αυτό. Επιπλέον, ο άξονας 1 είναι συνήθως παράλληλος στη διεύθυνση με τις υψηλότερες μηχανικές ιδιότητες και ο άξονας 2 είναι κάθετος σε αυτήν. Σε μία μονοαξονική στρώση, ο άξονας 1 είναι παράλληλος στις ίνες. Στην περίπτωση υαλοϋφάσματος, συμπίπτει με τη λεγόμενη warp διεύθυνση, την παράλληλη στο μήκος του ρολού ενίσχυσης, ενώ η κάθετη σε αυτήν καλείται fill. Το σύστημα κυρίων αξόνων μίας στρώσης είναι δυνατόν να μη συμπίπτει με εκείνο των γεωμετρικών αξόνων της. Συνεπώς, ο άξονας 1 μπορεί να σχηματίζει γωνία με τον άξονα x, η οποία είναι θετική αντίστροφα με τη φορά των δεικτών του ρολογιού. Ο προσανατολισμός των κυρίων αξόνων της στρώσης έχει ιδιαίτερη σημασία κατά τη φόρτισή της. Ένα φορτίο στη διεύθυνση ενός κύριου άξονα συνεπάγεται την ορθοτροπική συμπεριφορά της, δηλαδή το μέγεθος της παραμόρφωσής της εξαρτάται από τη διεύθυνση της φόρτισης. Αντίθετα, όταν η στρώση φορτίζεται μη παράλληλα με κάποιον από τους κύριους άξονές της, παρουσιάζει ανισοτροπικό χαρακτήρα, δηλαδή εκτός της μεταβολής του μεγέθους της παραμόρφωσής της συναρτήσει της διεύθυνσης, παρατηρούνται συζεύξεις έκτασης - διάτμησης και κάμψης - στρέψης. Ως εκ τούτου, ο προσανατολισμός των στρώσεων είναι καθοριστικός παράγοντας της μηχανικής συμπεριφοράς των σύνθετων διαμορφώσεων, όπως τα πολύστρωτα.

1.2.2 Πολύστρωτα

Όπως αναπτύχθηκε στην παραπάνω παράγραφο το βασικότερο κατασκευαστικό στοιχείο που διαμορφώνει μια κατασκευή από σύνθετα υλικά είναι η στρώση. Τα πολύστρωτα είναι υλικά κατασκευασμένα από επάλληλες στρώσεις από FRPs όπου η κάθε στρώση μπορεί να έχει διάφορους προσανατολισμούς των κύριων διευθύνσεων υλικού σε σχέση με τα γεωμετρικά άκρα του πολύστρωτου (Σχήμα 1.6). Τα συστήματα συντεταγμένων που χαρακτηρίζουν ένα πολύστρωτο είναι δύο, το γεωμετρικό σύστημα αξόνων x,y,z που χαρακτηρίζει ολόκληρο το πολύστρωτο και έχει άξονες παράλληλους με τα άκρα του και το σύστημα αξόνων κύριων αντοχών (ή κύριες διευθύνσεις υλικού) 1,2,3 που χαρακτηρίζει κάθε στρώση ξεχωριστά και οι άξονες του είναι παράλληλοι με την διεύθυνση των ινών της κάθε στρώσης. Τα πολύστρωτα διακρίνονται βάσει της διεύθυνσης των ινών των στρώσεών τους σε εκείνα με διασταυρούμενες (cross - ply) και εκείνα με διαγώνιες στρώσεις (angle - ply). Στην πρώτη περίπτωση, οι ίνες των στρώσεων ευθυγραμμίζονται με τα γεωμετρικά άκρα του πολύστρωτου, ενώ στη δεύτερη, μία τουλάχιστον στρώση δεν ικανοποιεί τη συνθήκη αυτή. Το πολύστρωτο του σχήματος 1.6 έχει διαγώνιες στρώσεις. Επιπρόσθετα, ένα πολύστρωτο είναι συμμετρικό όταν για κάθε στρώση στο μισό πάχος του υπάρχει στο άλλο μισό πάχος μία άλλη, συμμετρική ως προς το μέσο επίπεδο στρώση, ίδιου υλικού και προσανατολισμού των ινών. Αν όμως τα πρόσημα της γωνίας προσανατολισμού σε κάθε ζεύγος συμμετρικών στρώσεων είναι αντίθετα, τότε είναι αντισυμμετρικό. Τα πολύστρωτα των παραπάνω τύπων είναι εν γένει ανισοτροπικά, αλλά με αύξηση του αριθμού των στρώσεών τους (μεγαλύτερου από περίπου οκτώ) τείνουν να αποκτήσουν ορθοτροπικό χαρακτήρα (Τσούβαλης - 1998).



Σχήμα 1.6: Ανεπτυγμένη όψη ενός πολύστρωτου με στρώσεις διαφορετικών προσανατολισμών.

Τα ινώδη σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούνται σε ναυπηγικές εφαρμογές ανήκουν στην κατηγορία των πολύστρωτων. Το χαμηλό ειδικό βάρος τους και οι συνεπαγόμενες υψηλές ειδικές ιδιότητές τους (λόγοι των τιμών των ιδιοτήτων προς το βάρος) αποτελούν σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των συμβατικών ναυπηγικών υλικών καθώς συμβάλλουν στην κατασκευή ελαφρύτερων σκαφών, ανάλογου ή και ανώτερου επιπέδου αντοχής. Οι ιδιότητες των πολύστρωτων είναι στη διεύθυνση των ινών ή κάθετα σε αυτές. Οι τιμές τους σε άλλες διευθύνσεις μπορεί να είναι σημαντικά μικρότερες εξαιτίας της ανισοτροπικότητας ή συχνότερα, της ορθοτροπικότητας των υλικών αυτών. Το φαινόμενο αυτό αντισταθμίζεται από τη δυνατότητα προσανατολισμού των ενισχυτικών ινών των στρώσεων, άρα και της επίτευξης υψηλής αντοχής και δυσκαμψίας, στις διευθύνσεις των φορτίων. Επίσης τα πολύστρωτα εκτός από την παραπάνω ευελιξία που διαθέτουν έχουν και κάποια άλλα βασικά πλεονεκτήματα που τα κάνουν πολύ ανταγωνιστικά και υποσχόμενα υλικά στην ναυπηγική βιομηχανία. Μεταξύ αυτών ξεχωρίζουν η μεγάλη αντίσταση σε διαβρωτικά περιβάλλοντα, όπως το θαλάσσιο, και η εξαιρετική συμπεριφορά έναντι χημικών ενώσεων, όπως τα οξειδωτικά μέσα και οι οργανικές ενώσεις. Επιπλέον, τα υλικά αυτά παρέχουν ευελιξία στην κατασκευή, με αποτέλεσμα μεγάλες και πολύπλοκες κατασκευές να αποτελούνται συχνά από ένα κομμάτι. Άλλα σημαντικά πλεονεκτήματα είναι η δυνατότητα επίτευξης χαμηλών τιμών του συντελεστή γραμμικής θερμικής διαστολής, η χαμηλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα, η εξαιρετική αντοχή σε κόπωση, η απουσία ραφών και ενώσεων, τα πολύ καλά χαρακτηριστικά απόσβεσης, η εύκολη επισκευή τους και η μικρή συντήρηση που απαιτούν, ιδίως οι μικρές κατασκευές. Επιπλέον χαρακτηριστικά των FRPs είναι το χαμηλό μέτρο ελαστικότητας του Young και η μικρή δυσκαμψία τους. Επίσης, μειονεκτήματα των πολύστρωτων είναι η δυσκολία και η μεγάλη διάρκεια της επιθεώρησής τους λόγω των μη σταθερών συνθηκών κατασκευής, η πολυπλοκότητα και οι αυξημένες απαιτήσεις των μεθόδων παραγωγής τους, το φαινόμενο του

ερπυσμού, η μειωμένη αντοχή σε τριβή και η ευπάθεια σε φωτιά. Η χρήση τους στη ναυπηγική περιλαμβάνει την κατασκευή υπερκατασκευών, δεξαμενών και βοηθητικών οργάνων (θόλοι προστασίας οργάνων πλοήγησης, υδροδυναμικά πτερύγια) μεγάλων πλοίων. Επίσης, αποτελούν το βασικό υλικό κατασκευής μικρών σκαφών (βάρκες, σκάφη αναψυχής, σωσίβιες λέμβοι), αλιευτικών, μικρών φορτηγών και επιβατηγών (50m), πολεμικών σκαφών (ναρκαλιευτικά, περιπολικά, αποβατικά) και σκαφών υψηλής απόδοσης, όπως τα ιστιοπλοϊκά και τα ταχύπλοα.

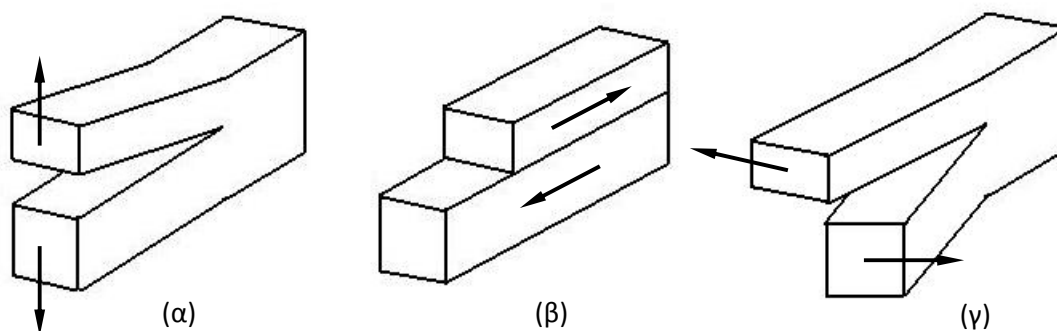
1.2.3 Το φαινόμενο του αποχωρισμού των στρώσεων ενός πολύστρωτου (delamination).

Ο αποχωρισμός των στρώσεων ενός πολύστρωτου είναι ένας συνήθης τρόπος αστοχίας του. Το αίτιο αποχωρισμού των στρώσεων είναι μία ή περισσότερες τοπικές θραύσεις της μήτρας. Οι λόγοι για τους οποίους συμβαίνει αυτή η τοπική θραύση μπορεί να είναι διάφοροι. Αρχικά είναι γεγονός ότι οι στρώσεις ενός πολύστρωτου χαρακτηρίζονται εν γένει από διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες λόγω συνήθως των διαφορετικών μεταξύ τους προσανατολισμών. Αυτό έχει ως συνέπεια την τάση κάθε στρώσης να παραμορφωθεί ανεξάρτητα από τις υπόλοιπες υπό την επίδραση ενός φορτίου, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη ορθών και διατμητικών τάσεων μεταξύ των στρώσεων. Οι διαστρωματικές αυτές τάσεις μεγιστοποιούνται στα άκρα του πολύστρωτου και είναι δυνατόν να υπερβούν το όριο αντοχής του συνδετικού υλικού τους, δηλαδή του υλικού της μήτρας, το οποίο χαρακτηρίζεται από χαμηλές μηχανικές ιδιότητες. Βέβαια οι τυχόν κατασκευαστικές ατέλειες συντελούν στην επιτάχυνση και υποβοήθηση του φαινομένου.

Ο μοναδικός παράγοντας που προκαλεί τον αποχωρισμό των στρώσεων μακριά από τα άκρα, όπου οι διαστρωματικές τάσεις είναι αμελητέες, είναι οι διάφορες κατασκευαστικές ατέλειες. Η παρουσία κενών αέρα είναι το πιο συνηθισμένο παράδειγμα κατασκευαστικής ατέλειας. Οι ατέλειες αυτές αποτελούν την απαρχή αστοχίας του πολύστρωτου, καθώς η καταπόνησή του με εναλλασσόμενα ή κρουστικά φορτία οδηγεί σε αύξηση του μεγέθους αυτών, στην ένωσή τους με άλλες και τελικά, στον τοπικό αποχωρισμό των στρώσεων. Ο αποχωρισμός δύο στρώσεων συμβαίνει σε μία περιοχή της διεπιφάνειας μεταξύ αυτών με τη δημιουργία δύο ξεχωριστών τμημάτων του πολύστρωτου εκατέρωθεν αυτής. Η περιοχή αυτή είναι διαφόρων σχημάτων και μεγεθών και μπορεί να βρίσκεται σε διάφορες θέσεις κατά το μήκος, το πλάτος και το πάχος του πολύστρωτου. Επιπλέον, μία κατασκευή είναι δυνατόν να αστοχήσει με αυτόν τον τρόπο σε περισσότερες από μία περιοχές. Σε κάθε περίπτωση, το αρχικό πολύστρωτο χωρίζεται σε δύο υποπολύστρωτα (sublaminates) στην περιοχή του αποχωρισμού, τα οποία αποτελούνται από μικρότερο αριθμό στρώσεων. Οι λιγότερες στρώσεις των υποπολύστρωτων προκαλούν μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων και αύξηση της ανισοτροπικότητας τους, καθιστώντας πιθανές τις μεγαλύτερες και εντονότερα συζευγμένες παραμορφώσεις αυτών. Η ελευθερία παραμόρφωσής τους μπορεί να οδηγήσει σε φορτίσεις μεταξύ αυτών, λόγω της παρεμπόδισης της παραμόρφωσης του ενός από το άλλο, ή στην περαιτέρω θραύση

της μήτρας και τη διεύρυνση της επιφάνειας του αποχωρισμού. Οι βασικοί τύποι αστοχίας των υποπολύστρωτων είναι τρεις και φαίνονται στο σχήμα 1.7. Αυτοί είναι το άνοιγμα, το σχίσιμο και το γλίστρημα. Το άνοιγμα είναι η απομάκρυνση των δύο υποπολύστρωτων μεταξύ τους που έχει και σαν αποτέλεσμα να γίνεται και διεύρυνση του αποχωρισμού. Χαρακτηριστικό μέγεθος της διεύρυνσης της επιφάνειας του αποχωρισμού των στρώσεων είναι ο ρυθμός απελευθέρωσης της ενέργειας παραμόρφωσης (strain energy release rate) και εξαρτάται από τον τύπο της σχετικής παραμόρφωσης των πολύστρωτων. Το σχίσιμο ορίζεται ως η περίπτωση που τα δύο υποπολύστρωτα κινούνται σε αντίθετη κατεύθυνση παράλληλα στο y άξονα ενώ το γλίστρημα ως προς τον x άξονα. Συχνά τρόπος αστοχίας ενός πολύστρωτου είναι και συνδυασμός των παραπάνω περιπτώσεων. Τα παραπάνω, σε συνδυασμό με τη μικρότερη διασπορά των τάσεων διαμέσου της μήτρας λόγω της τοπικής θραύσης της, οδηγούν στην εξασθένηση της αντοχής του πολύστρωτου. Σε αυτό συμβάλλει επίσης η συγκέντρωση τάσεων στα όρια της επιφάνειας του αποχωρισμού.

Στις ναυπηγικές κατασκευές η κόπωση λόγω κυματισμών και τα κρουστικά φορτία λόγω σφυρόκρουσης και ατυχημάτων, όπως πτώσεις αντικειμένων, συγκρούσεις και προσαράξεις, είναι δυνατόν να προκαλέσουν αποχωρισμό των στρώσεων σε πολύστρωτα που χρησιμοποιούνται στον πυθμένα, στο κατάστρωμα και στις φρακτές ενός σκάφους. Στις ναυπηγικές κατασκευές ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης η επίδραση του αποχωρισμού στο λυγισμό, φαινόμενο που χαρακτηρίζει τη συμπεριφορά των κατασκευαστικών στοιχείων της γάστρας ενός σκάφους.



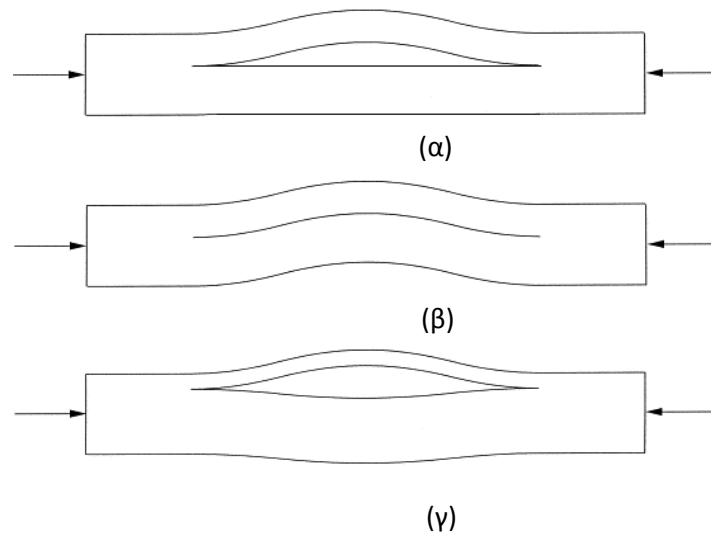
Σχήμα 1.7: Σχηματική αναπαράσταση των βασικών τύπων παραμόρφωσης των υποπολύστρωτων: (α) άνοιγμα, (β) γλίστρημα και (γ) σχίσιμο.

1.2.4 Λυγισμός πολύστρωτων δοκών

Ο λυγισμός αποτελεί φαινόμενο μη ευσταθούς ισορροπίας μίας κατασκευής, η οποία υπόκειται σε αξονική ή επίπεδη καταπόνηση. Για μικρά φορτία, η κατάσταση ισορροπίας είναι ευσταθής, οπότε η κατασκευή επιστρέφει στην αρχική μορφή της μετά την αποφόρτιση, ενώ η απόκρισή της είναι γραμμική. Όταν όμως τα φορτία γίνουν αρκετά μεγάλα, η κατάσταση ισορροπίας παύει να είναι ευσταθής και η κατασκευή υφίσταται παραμορφώσεις κάθετα στη διεύθυνση ή στο επίπεδο της φόρτισης. Επιπλέον, η συμπεριφορά της γίνεται μη γραμμική, ενώ είναι πιθανή η μείωση της αντοχής της λόγω των μόνιμων παραμορφώσεων. Το σημείο έναρξης της απόκλισης της κατασκευής από την αρχική επίπεδη μορφή της αντιστοιχεί σε μία συγκεκριμένη τιμή του φορτίου, το κρίσιμο φορτίο λυγισμού (critical buckling load), το οποίο είναι εν γένει μικρότερο από το μέγιστο φορτίο που μπορεί να παραλάβει η κατασκευή. Ως επί το πλείστον, τάση προς λυγισμό παρουσιάζουν κατασκευές με μία ή δύο διαστάσεις σημαντικά μικρότερες από την τρίτη, όπως οι δοκοί. Στις δοκούς οι διαστάσεις του πάχους και του πλάτους είναι σημαντικά μικρότερες από αυτή του μήκους. Μία κατασκευή θεωρείται δοκός όταν ο λόγος L/B είναι ίσος με 10. Η διάσταση του πάχους θεωρείται αμελητέα. Στη ναυπηγική βιομηχανία στην μελέτη της διαμήκου αντοχής, για την εξαγωγή των πρωτευουσών τάσεων, το πλοίο αναπαρίσταται σαν μία δοκός. Έτσι είναι κατανοητό ότι η μελέτη λυγισμού πολύστρωτων δοκών και η κατανόηση των τρόπων αστοχίας τους είναι βασικό βήμα για την κατασκευή σκαφών από υλικά τέτοιας κατηγορίας.

Η σχετική ελευθερία παραμόρφωσης που έχουν τα πολύστρωτα λόγω του σχετικά με τα παραδοσιακά υλικά χαμηλού μέτρου ελαστικότητας του Young και της μειωμένης δυσκαμψίας τους, όπως επίσης και τα κρουστικά και θλιπτικά φορτία στα οποία υπόκεινται έχει σαν αποτέλεσμα την συχνή εμφάνιση του φαινομένου του λυγισμού όπως επίσης και του φαινομένου του αποχωρισμού των στρώσεων. Λυγισμός μπορεί να εμφανιστεί με τρεις μορφές. Αυτές οι μορφές είναι ο γενικός, ο τοπικός και ο μικτής μορφής λυγισμός.

Ο γενικός λυγισμός (global buckling) εμφανίζεται όταν τα δύο υποπολύστρωτα λυγίζουν προς την ίδια κατεύθυνση με ίσα βέλη κάμψης, ο τοπικός λυγισμός (local buckling) όταν μόνο το ένα λυγίζει, ενώ το άλλο δεν παραμορφώνεται και ο μικτής μορφής (mixed mode buckling), όταν το καθένα λυγίζει ξεχωριστά προς την ίδια ή την αντίθετη κατεύθυνση (Σχήμα 1.8).



Σχήμα 1.8: Σχηματική αναπαράσταση διαφόρων τύπων λυγισμού μίας πλάκας: (α) τοπικός (local mode), (β) γενικός (global mode) και (γ) μεικτής μορφής (mixed mode).

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω, το φαινόμενο του λυγισμού μίας δοκού που έχει υποστεί αποχωρισμό των στρώσεών της είναι ιδιαίτερα κρίσιμο για την ασφάλεια σκαφών από πολύστρωτα υλικά. Η δυνατότητα επιμέρους λυγισμού των εύκαμπτων υποπολύστρωτών της καθιστά πιθανή την αστοχία της για σχετικά χαμηλά επίπεδα καταπονήσεων, λόγω υπέρβασης των επιτρεπόμενων ορίων παραμόρφωσης. Επιπλέον, στην περίπτωση τοπικού λυγισμού, είναι δυνατόν να υπάρξει περαιτέρω διεύρυνση της επιφάνειας του αποχωρισμού, ενώ οι μόνιμες παραμορφώσεις και η πιθανή αστοχία των υποπολύστρωτων, εξαιτίας των υψηλών τάσεων που αναπτύσσονται κατά το λυγισμό, έχουν ως αποτέλεσμα την εξασθένιση της αντίστασης της δοκού σε νέες καταπονήσεις. Συνεπώς, η γνώση του τρόπου με τον οποίο επιδρούν οι παράμετροι του αποχωρισμού των στρώσεων στο λυγισμό των δοκών αποτελεί βασική προϋπόθεση για την ασφαλή σχεδίαση σκαφών από πολύστρωτα υλικά.

1.3 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Τα πλεονεκτήματα των ινωδών σύνθετων υλικών έναντι των συμβατικών είναι γνωστά από τις πρώτες δεκαετίες του προηγούμενου αιώνα. Η δυνατότητα παραγωγής κατασκευών πολύπλοκων μορφών με μικρότερο κόστος και ικανοποιητική αντοχή οδήγησε από νωρίς (1936) στη χρησιμοποίησή τους στην αεροναυπηγική. Σύντομα, ακολούθησαν η ναυπηγική και η αεροδιαστημική, επιτυγχάνοντας την παραγωγή ελαφρύτερων και αποδοτικότερων τμημάτων των κατασκευών. Η χρήση των FRP's σε ναυπηγικές εφαρμογές χρονολογείται από τις αρχές της δεκαετίας του 1950, οπότε πραγματοποιήθηκε μαζική παραγωγή μικρών σκαφών από πολυεστερική ρητίνη με ενίσχυση ινών γυαλιού (Strong - 2002). Έκτοτε παρατηρείται μία τάση αντικατάστασης των παραδοσιακών υλικών από αυτά, με αποτέλεσμα σκάφη από FRP's να περιλαμβάνονται στους στόλους όλων των

μεγάλων χωρών. Ενδεικτικά, αναφέρεται ότι στις αρχές της προηγούμενης δεκαετίας το 60% των νηολογημένων στην Ιαπωνία αλιευτικών σκαφών ήταν από πλαστικά ενισχυμένα με ίνες γυαλιού (Glass fibre Reinforced Plastics, GRP's), συμπεριλαμβανομένων των σκαφών με μήκος μέχρι 45m (Τσούβαλης - 1998).

Καθοριστικός παράγοντας της ευρείας και διαρκώς αυξανόμενης χρήσης των ινωδών σύνθετων υλικών είναι η κατανόηση και η πρόβλεψη της συμπεριφοράς κατασκευών από τέτοια υλικά υπό διάφορες συνθήκες φόρτισης που αναμένεται να συναντήσουν κατά τη λειτουργία τους. Όπως έχει αναφερθεί στα προηγούμενα εδάφια, τα κατασκευαστικά στοιχεία της γάστρας ενός σκάφους, κατασκευασμένης από FRP's, υπόκεινται σε σύνθετες καταπονήσεις, ικανές να προκαλέσουν το λυγισμό αυτών, αλλά και αστοχία με τη μορφή του αποχωρισμού των στρώσεών τους. Συνεπώς, η διερεύνηση του λυγισμού πολύστρωτων δοκών και πλακών και της επίδρασης του παραπάνω τρόπου αστοχίας σε αυτόν είναι ζωτικής σημασίας για την ασφαλή σχεδίαση και λειτουργία των σκαφών.

Ένα πολύστρωτο από ινώδη σύνθετα υλικά μπορεί υπό διάφορες συνθήκες φόρτισης να αστοχήσει λόγω θραύσης των ινών ή της μήτρας του, αποσύνδεσης αυτών ή αποχωρισμού των στρώσεών του. Σημαντικές προσπάθειες έχουν γίνει για την κατανόηση των μηχανισμών έναρξης αυτών των τρόπων αστοχίας (Hassan - 2007) (Craig-2004). Ο αποχωρισμός των στρώσεων που εμφανίζεται συχνότερα σε κατασκευές από πολύστρωτα και πιο συγκεκριμένα η επίδραση του αποχωρισμού των στρώσεων στο κρίσιμο φορτίο λυγισμού είναι αντικείμενο εκτενούς μελέτης. Η έρευνα αρχικά ξεκίνησε προσπαθώντας να εξηγήσει κατά πόσο αυτό το φαινόμενο επηρεάζει το κρίσιμο φορτίο λυγισμού με τους (Williams 1996) (Short 2001) και συνεχίστηκε με την μελέτη των διαφόρων παραμέτρων του αποχωρισμού που επηρεάζουν το κρίσιμο φορτίο λυγισμού. Οι μελέτες αυτές έγιναν αναλυτικά και πειραματικά. Οι περισσότερες από αυτές χρησιμοποιούσαν τα πειραματικά αποτελέσματα για την επαλήθευση του αναλυτικού τους μοντέλου. Στο πλαίσιο αυτό, έχουν αναπτυχθεί απλές μεθοδολογίες υπολογισμού του κρίσιμου φορτίου λυγισμού ενός πολύστρωτου και των υποπολύστρωτων αυτού (Bull - 1995). Αντίστοιχες μεθοδολογίες είναι εκείνες των Καρδοματέα και Shan, όπου μέσω απλών μαθηματικών τύπων προκύπτει το κρίσιμο φορτίο τοπικού και γενικού λυγισμού απλά εδρασμένων ή πακτωμένων μακριών πλακών, οι οποίες φορτίζονται μονοαξονικά (Kardomateas - 1989, Shan - 2003). Η συνέχεια ήταν η κατάτμηση του προβλήματος όπως προαναφέρθηκε σε παραμέτρους. Οι παράμετροι αυτοί είναι η θέση του αποχωρισμού των στρώσεων κατά πάχος, κατά πλάτος και κατά μήκος, το μέγεθος του αποχωρισμού και η συσχέτιση των φαινομένων τοπικού και ολικού λυγισμού. Βρέθηκε ότι όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος του αποχωρισμού τόσο μικρότερο είναι το κρίσιμο φορτίο λυγισμού (Shaw-1988, Shan-2003, Short-2001, Naik-2001, Wee-2006, Kharazi 2008). Ο τελευταίος δεν ακολούθησε πειραματική διαδικασία αλλά μοντελοποίηση μέσω του πακέτου πεπερασμένων στοιχείων ANSYS. Όσον αφορά την θέση του αποχωρισμού των στρώσεων, βρέθηκε ότι όσο πιο βαθιά βρίσκετε ο αποχωρισμός δηλαδή όσο αυξάνεται το πάχος του

υποπολύστρωτου, αρχικά το κρίσιμο φορτίο λυγισμού αυξάνεται (Naik-2001). Επίσης βρέθηκε ότι η αστοχία λόγω αποχωρισμού των στρώσεων δεν είναι λόγω ολικού λυγισμού μόνο αλλά είναι μία σειρά γεγονότων όπου ξεκινάει με αξονική θλίψη συνεχίζει σε τοπικό λυγισμό στην περιοχή του αποχωρισμού μετά έχουμε κάμψη της βάσης και τέλος ολικό λυγισμό (Shan-2003). Αφού εξετάζονται εκτενώς ακόμα και σήμερα αυτές οι παράμετροι η ανάγκη κατανόησης αυτού του προβλήματος οδήγησε στην ρεαλιστικότερη αντιμετώπιση. Στο υπό εξέταση μοντέλο υπάρχουν παραπάνω από ένας αποχωρισμός των στρώσεων και εξετάζεται η επίδραση τους στο κρίσιμο φορτίο λυγισμού αλλά και στην αλληλεπίδραση που έχουν μεταξύ τους (Kyoung-1999, Wang-2003, Sang-Youl Lee-2003). Οι αναλυτικές και πειραματικές έρευνες έδειξαν ότι η ύπαρξη περισσότερων αποχωρισμών μειώνει ακόμα πιο πολύ το κρίσιμο φορτίο αλλά επίσης έδειξαν ότι οι αποχωρισμοί επιδρούν ο ένας στον άλλο στο φαινόμενο της διεύρυνσης του αποχωρισμού ανάλογα με τις σχετικές θέσεις τους. Εκτός των αναλυτικών μεθόδων, το φαινόμενο του λυγισμού πολύστρωτων πλακών που έχουν υποστεί αποχωρισμό των στρώσεών τους μπορεί να προσεγγιστεί ικανοποιητικά με χρήση μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων. Ο Hwang έχει κατασκευάσει ένα τέτοιο μοντέλο μίας πλάκας με πολλαπλούς αποχωρισμούς διαφόρων μεγεθών, με σκοπό τη μελέτη της επίδρασης αυτών στο λυγισμό της (Hwang - 2001). Συγκεκριμένα, έχει μοντελοποιήσει μία διατομή της πλάκας, κατά το πάχος αυτής και παράλληλα στη διεύθυνση του φορτίου, με χρήση επίπεδων στοιχείων, ενώ οι αποχωρισμοί χαρακτηρίζονται από μία διάσταση, το μήκος τους. Τα μοντέλα της μορφής αυτής αναπαριστούν με ικανοποιητική ακρίβεια αποχωρισμούς υπό μορφή λωρίδας, το πλάτος των οποίων ισούται με εκείνο της πλάκας. Η αντίστοιχη παραμετρική μελέτη δείχνει ότι το κρίσιμο φορτίο λυγισμού επηρεάζεται ως επί το πλείστον από τον αποχωρισμό με το μεγαλύτερο μήκος, όταν αυτός βρίσκεται κοντά στην εξωτερική επιφάνεια της πλάκας, ενώ η επίδραση των υπολοίπων εντείνεται όταν αυτός πλησιάζει το μέσο του πάχους της.

Τα τρισδιάστατα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων παρέχουν τη δυνατότητα ανάλυσης πλακών με αποχωρισμούς διαφόρων σχημάτων στο εσωτερικό τους. Ο Kyoung έχει χρησιμοποιήσει ένα τέτοιο μοντέλο για τη μελέτη της επίδρασης πολλαπλών αποχωρισμών, κυκλικών ή υπό μορφή λωρίδας και διαφόρων μεγεθών, στο λυγισμό μίας πολύστρωτης πλάκας με διασταυρούμενες στρώσεις (Kyoung et al - 1999). Προκύπτει δε, ότι αν και το κρίσιμο φορτίο λυγισμού της πλάκας είναι μικρότερο σε κάθε περίπτωση, η τιμή του δεν επηρεάζεται από τον τύπο διανομής των αποχωρισμών κατά το πάχος της. Αντίθετα, η παράμετρος αυτή επιδρά σημαντικά στην ικανότητα του πολύστρωτου να παραλαμβάνει φορτία μετά το λυγισμό, ιδιαίτερα στην περίπτωση αποχωρισμών υπό μορφή λωρίδας.

Παρόμοια μελέτη έχει πραγματοποιήσει ο Lee, με τη διαφορά ότι οι υπό εξέταση περιπτώσεις είναι πολύστρωτες πλάκες, διασταυρούμενων ή διαγώνιων στρώσεων, με αποχωρισμούς υπό μορφή λωρίδας ή τετραγωνικούς (Lee - 2007). Η μοντελοποίηση των πλακών αυτών γίνεται με χρήση μίας στρώσης τρισδιάστατων στοιχείων για κάθε στρώση του υλικού, οι οποίες ενώνονται μεταξύ τους στις περιοχές εκτός των

αποχωρισμών. Το βασικό συμπέρασμα που προκύπτει από τη μελέτη είναι ότι για μικρά μεγέθη του αποχωρισμού, το κρίσιμο φορτίο λυγισμού μειώνεται απότομα, ενώ τείνει να αποκτήσει μία σταθερή τιμή για μεγαλύτερα μεγέθη. Συνεπώς, μπορεί να θεωρηθεί ότι ένα αποδεκτό μέγεθος αποχωρισμού είναι αυτό που αντιστοιχεί σε λόγο του μήκους του αποχωρισμού προς εκείνου της πλάκας ίσο με 0.2. Επιπλέον, προκύπτει ότι η αντίσταση σε λυγισμό ενός πολύστρωτου με διαγώνιες στρώσεις επηρεάζεται σημαντικά από τη γωνία προσανατολισμού των ινών, με την περίπτωση των $\pm 30^\circ$ να εμφανίζει τις υψηλότερες τιμές του κρίσιμου φορτίου λυγισμού

Μία άλλη παράμετρος του προβλήματος του αποχωρισμού των στρώσεων είναι αυτή της διεύρυνσης της επιφάνειας αποχωρισμού. Ο Sallam έχει κατασκευάσει ένα μοντέλο που μέσω απλών μαθηματικών τύπων υπολογίζει το κρίσιμο φορτίο λυγισμού υπό μονοαξονική θλίψη και προβλέπει τη διεύρυνση της επιφάνειας του αποχωρισμού στην περίπτωση μίας πακτωμένης πολύστρωτης πλάκας (Sallam - 1985). Μία παραμετρική μελέτη βάσει του μοντέλου αυτού έχει οδηγήσει στο συμπέρασμα ότι ο λυγισμός επέρχεται για μικρότερα φορτία στην περίπτωση που ο αποχωρισμός βρίσκεται κοντά στην εξωτερική επιφάνεια της πλάκας και χαρακτηρίζεται από μεγάλο μήκος.

1.4 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία εντάσσεται στα πλαίσια της μελέτης του φαινομένου αποχωρισμού των στρώσεων ενός πολύστρωτου και της επίδρασης αυτού το φαινομένου στο κρίσιμο φορτίο λυγισμού. Η επίδραση του φαινομένου του αποχωρισμού διερευνήθηκε με την αλλαγή παραμέτρων όπως το μέγεθος του αποχωρισμού και η κατά πάχος θέση του αποχωρισμού.

Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές λυγισμού σε δοκίμια από σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες γυαλιού τα οποία περιείχαν ένα τεχνητό αποχωρισμό των στρώσεων διαφορετικού μήκους και σε διαφορετική κατά το πάχος θέση. Επίσης πραγματοποιήθηκε και ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία, δηλαδή μοντελοποίηση των πειραμάτων με πεπερασμένα στοιχεία και σύγκριση των αποτελεσμάτων των πειραμάτων με αυτά των πεπερασμένων στοιχείων.

Αρχικά, στο πρώτο κεφάλαιο, πραγματοποιείται μία εισαγωγή στο αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας. Στο πλαίσιο αυτό, γίνεται μια σύντομη αναφορά στα ινώδη σύνθετα υλικά και τα πολύστρωτα που προκύπτουν από αυτά. Ακολουθεί η αναλυτική περιγραφή του φαινομένου του αποχωρισμού των στρώσεων, που χαρακτηρίζει κατασκευές από τέτοια υλικά, καθώς και του λυγισμού πλακών, άθικτων ή μη, που παρουσιάζει μεγάλη πιθανότητα εμφάνισης στα κατασκευαστικά στοιχεία της γάστρας ενός σκάφους. Εν συνεχεία, γίνεται μία παράθεση ορισμένων εργασιών που έχουν κατά καιρούς εκπονηθεί σχετικά με το λυγισμό πλακών, τον αποχωρισμό των στρώσεων και κυρίως, την αλληλεπίδραση μεταξύ αυτών. Το κεφάλαιο κλείνει με την περιγραφή του σκοπού της εργασίας

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή της μοντελοποίησης με πεπερασμένα στοιχεία. Η περιγραφή αυτή περιέχει τη λογική με την οποία γίνεται η μοντελοποίηση

και ο καθορισμός των διαφόρων παραμέτρων του κώδικα όπως επίσης και η παραμετρική μελέτη για τον καθορισμό αυτών των παραμέτρων. Αυτές οι παράμετροι αφορούν κυρίως τη διάταξη του γενικού κώδικα χωρίς να λαμβάνονται υπόψη τα πειράματα αλλά το κύριο κριτήριο είναι η σύγκλιση των λύσεων σε σχέση με το μέγεθος του στοιχείου του κατασκευαζόμενου μοντέλου και τον χρόνο επίλυσης. Επίσης γίνεται μελέτη γραμμικής και μη γραμμικής λύσης του προβλήματος όπως επίσης και συνδυασμός αυτών.

Αφού έχει γίνει η παραπάνω μελέτη, στο τρίτο κεφάλαιο αναλύεται ο σχεδιασμός των δοκιμών με βάση τα αποτελέσματα των αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία. Στην προκειμένη περίπτωση οι αναλύσεις και η παραμετρική μελέτη του κώδικα γίνεται με κύριες παραμέτρους το μέγεθος, την κατά το πάχος θέση του αποχωρισμού και το μέγεθος των στοιχείων του μοντέλου. Όσον αφορά το σχήμα, γίνεται η υπόθεση ενός ορθογωνικού αποχωρισμού, οπότε ουσιαστικά εξετάζεται η επίδραση του λόγου μεταξύ του μήκους του αποχωρισμού προς το ολικό μήκος της δοκού. Η επίλυση του προβλήματος έγκειται στον υπολογισμό του κρίσιμου φορτίου λυγισμού της πλάκας και πραγματοποιείται με διάφορους τρόπους (γραμμική, μη γραμμική ανάλυση). Με αυτό τον τρόπο γίνεται επιλογή των πειραματικών παραμέτρων, δηλαδή των βασικών γεωμετρικών διαστάσεων του κάθε δοκιμίου και των παραμέτρων του αποχωρισμού.

Στο τέταρτο κεφάλαιο της διπλωματικής γίνεται περιγραφή των πειραματικών δοκιμών αλλά και παρουσίαση των αποτελεσμάτων τους. Αναλύεται πλήρως η διαδικασία κατασκευής των δοκιμίων, η προετοιμασία των δοκιμών, οι συνθήκες των δοκιμών και τα αποτελέσματα τους, συνοδευόμενα από φωτογραφίες.

Τέλος στο πέμπτο κεφάλαιο αναλύεται η μοντελοποίηση των δοκιμών με πεπερασμένα στοιχεία, όπου σε αυτήν την περίπτωση η μοντελοποίηση γίνεται με τις πραγματικές παραμέτρους των δοκιμών, τις τελικές γεωμετρικές διαστάσεις των δοκιμίων και του αποχωρισμού και τέλος γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου με εκείνα των πειραμάτων και αναλύονται οι λόγοι τυχόν διαφορών στα αποτελέσματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Ανάλυση μοντελοποίησης με πεπερασμένα στοιχεία

2.1 Εισαγωγή

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method, FEM) αποτελεί μία αριθμητική τεχνική προσέγγισης της συμπεριφοράς μίας κατασκευής. Σύμφωνα με αυτήν, η κατασκευή αναπαρίσταται από ένα σύνολο επιμέρους στοιχείων (elements) που συνδέονται μεταξύ τους με εξισώσεις συνέχειας. Μέσω της επίλυσης των εξισώσεων αυτών, σε συνδυασμό με τις εξισώσεις ισορροπίας κάθε στοιχείου, μπορούν να υπολογιστούν τα ζητούμενα μεγέθη σε οποιοδήποτε σημείο της κατασκευής. Επομένως, κατά την ανάλυση ενός προβλήματος με πεπερασμένα στοιχεία, λαμβάνεται υπόψη ολόκληρη η κατασκευή και όχι ένα στοιχειώδες τμήμα αυτής, όπως συμβαίνει με τις αναλυτικές μεθόδους, γεγονός που επιτρέπει τη μελέτη πολύπλοκων κατασκευών. Επιπρόσθετα, η ακρίβεια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι ικανοποιητική και συχνά συγκρίσιμη εκείνης των πειραματικών μεθόδων και εξαρτάται από τις διάφορες παραμέτρους που υπεισέρχονται κατά την εφαρμογή της. Οι παράμετροι αυτές καθορίζονται βάσει του επιθυμητού συνδυασμού της ακρίβειας και της ταχύτητας της ανάλυσης, με τις αντίστοιχες επιλογές να περιορίζονται από τις δυνατότητες του εκάστοτε υπολογιστή. Σε γενικές γραμμές πάντως, η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων συνδυάζει τη μικρή διάρκεια της ανάλυσης με την υψηλή αξιοπιστία των αντίστοιχων αποτελεσμάτων και συνεπώς, αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο για ένα μεγάλο αριθμό μελετών.

Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται με τη βοήθεια διάφορων προγραμματιστικών πακέτων και χωρίζεται σε τρία βασικά στάδια. Το πρώτο στάδιο (preprocessing) αποτελείται από τον ορισμό της γεωμετρίας και των πεπερασμένων στοιχείων. Το δεύτερο στάδιο (solution) αποτελείται από τις εντολές και τις παραμέτρους επίλυσης του προβλήματος και το τρίτο στάδιο (post processing) αποτελείται από την εξαγωγή και επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία το υπολογιστικό πακέτο που χρησιμοποιείται είναι το ANSYS, το οποίο συνδυάζει τις υψηλές δυνατότητες προσομοίωσης με την ευκολία χειρισμού από το χρήστη. Στο πλαίσιο αυτό, καταγράφονται τα προβλήματα που προέκυψαν κατά τη μοντελοποίηση του προβλήματος και παρατίθενται οι κώδικες των μοντέλων που χρησιμοποιούνται στην παραμετρική μελέτη.

2.2 Προεπεξεργασία (Preprocessing)

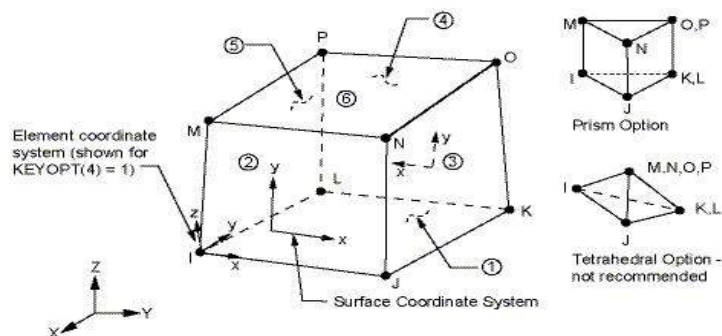
Το πρώτο στάδιο της ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία ονομάζεται προεπεξεργασία και αποτελείται από τον καθορισμό της γεωμετρίας του μοντέλου, την κατάλληλη διακριτοποίηση αυτής της γεωμετρίας για την δημιουργία των στοιχείων, την επιλογή του είδους των στοιχείων και την εφαρμογή των ιδιοτήτων τους. Το στάδιο αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για την περαιτέρω επίλυση του προβλήματος διότι τυχόν λάθη

στον καθορισμό των διαφόρων παραμέτρων θα έχει επίδραση στα εξαγόμενα αποτελέσματα αλλά και στο χρόνο επίλυσης του προβλήματος.

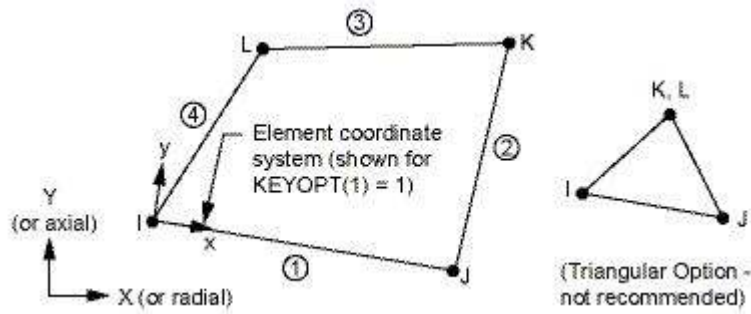
2.2.1 Επιλογή τύπου στοιχείων

Η μοντελοποίηση μίας δοκού ή στην γενικότερη περίπτωση μιας πλάκας με αποχωρισμό των στρώσεων μπορεί να γίνει με την χρήση δισδιάστατων αλλά και τρισδιάστατων στοιχείων (solid elements). Στην παρούσα διπλωματική έχει επιλεγεί η δεύτερη περίπτωση, η οποία υστερεί μεν σε υπολογιστικό χρόνο επειδή αποτελείται από πολύ περισσότερα στοιχεία αλλά και κόμβους που έχουν άμεση επίδραση στην απαιτούμενη υπολογιστική ισχύ άρα και στον χρόνο επίλυσης αλλά εξάγει πιο ακριβή και ρεαλιστικά αποτελέσματα. Για την τρισδιάστατη μοντελοποίηση το τρισδιάστατο μοντέλο της δοκού χωρίζεται σε δύο τμήματα εκατέρωθεν του επιπέδου του αποχωρισμού, τα οποία ενώνονται στην άθικτη περιοχή. Έτσι το μοντέλο που κατασκευάζεται για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας αποτελείται από δύο στρώσεις στοιχείων κατά το πάχος της πλάκας, μία για κάθε τμήμα αυτής εκατέρωθεν του επιπέδου του αποχωρισμού, οι οποίες ενώνονται στην άθικτη περιοχή (Short et al - 2001). Ο τύπος των στοιχείων του μοντέλου επιλέγεται από τη σχετική βιβλιοθήκη του ANSYS, το οποίο προσφέρει μία μεγάλη ποικιλία τρισδιάστατων στοιχείων.

Το στοιχείο που έχει επιλεγεί για την παρούσα μοντελοποίηση είναι το SOLID45. Αυτό το στοιχείο είναι κατάλληλο για τρισδιάστατη μοντελοποίηση και αποτελείται από 8 κόμβους. Οι κόμβοι καταλαμβάνουν τις κορυφές ενός εξάεδρου και έχουν τρεις βαθμούς ελευθερίας. Οι βαθμοί ελευθερίας είναι οι μετατοπίσεις στις διευθύνσεις των αξόνων του συστήματος συντεταγμένων του στοιχείου (Σχήμα 2.1). Επίσης επειδή γίνεται μελέτη του φαινομένου του λυγισμού επιλέγεται στοιχείο που υποστηρίζει μεγάλες μετατοπίσεις. Σε ρόλο βοηθητικού στοιχείου χρησιμοποιείται το δισδιάστατο PLANE42 που αποτελείται από τέσσερις κόμβους, οι οποίοι καταλαμβάνουν τις γωνίες ενός τετραπλεύρου και επιπλέον χαρακτηρίζονται από δύο βαθμούς ελευθερίας, δηλαδή τις μετατοπίσεις στις διευθύνσεις των αξόνων x και y του συστήματος συντεταγμένων του στοιχείου (Σχήμα 2.2). Η χρήση του περιγράφεται παρακάτω.

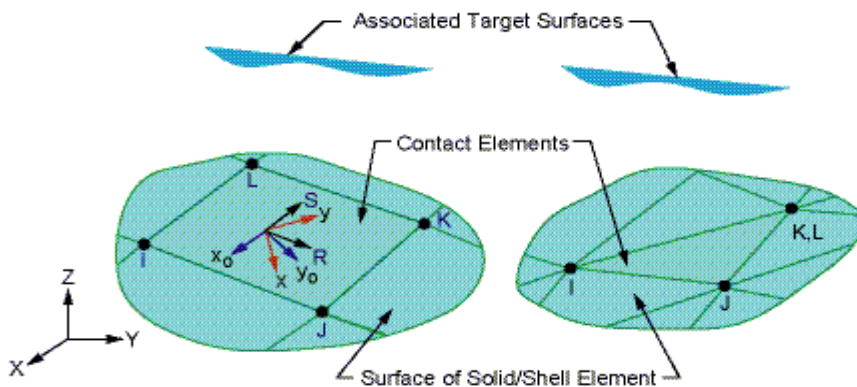


Σχήμα 2.1: Σχηματική αναπαράσταση του τρισδιάστατου στοιχείου SOLID45.



Σχήμα 2.2: Σχηματική αναπαράσταση του δισδιάστατου στοιχείου PLANE42.

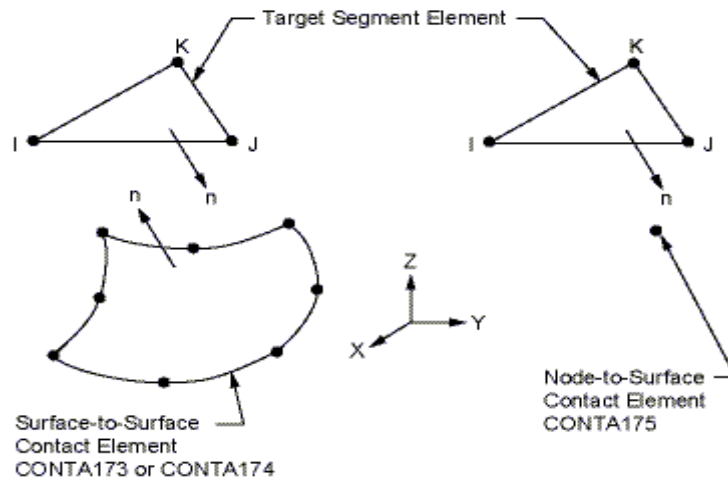
Εκτός των παραπάνω στοιχείων είναι απαραίτητος και ο προσδιορισμός και κάποιων στοιχείων επαφής στη διεπιφάνεια του αποχωρισμού. Αυτό γίνεται γιατί έχει παρατηρηθεί ότι σε πολλές περιπτώσεις υπάρχει ανεπίτρεπτη διείσδυση του ενός υποπολύστρωτου στο άλλο, γεγονός το οποίο δεν είναι φυσικά αποδεκτό. Έτσι τα στοιχεία επαφής εξασφαλίζουν ότι η διείσδυση δε θα ξεπεράσει τα μικρά όρια που έχει θέσει ο χρήστης. Η επιλογή του τύπου τους καθορίζεται βάσει του τύπου των στοιχείων που μοντελοποιούν την πλάκα, οπότε δεδομένης της χρήσης του τρισδιάστατου, οκτάκομβου στοιχείου SOLID45, επιλέγεται το στοιχείο CONTA173 (σχήμα 2.3, ANSYS - 2007), το οποίο αποτελείται από τέσσερις κόμβους. Επιπρόσθετα, επιλέγεται η τετράκομβη εκδοχή του στοιχείου - στόχου (target element) TARG170 (σχήμα 2.4, ANSYS - 2007), το οποίο συνδυάζεται με το CONTA173 για τη μοντελοποίηση των εσωτερικών επιφανειών των τμημάτων της πλάκας, στην περιοχή του αποχωρισμού.



- R = Element x-axis for isotropic friction
- x_0 = Element axis for orthotropic friction if **ESYS** is not supplied (parallel to global X-axis)
- x = Element axis for orthotropic friction if **ESYS** is supplied

Σχήμα 2.3: Σχηματική αναπαράσταση του στοιχείου επαφής CONTA173.

Figure 170.1 TARGE170 Geometry



Σχήμα 2.4: Σχηματική αναπαράσταση του στοιχείου - στόχου TARGE170.

2.2.2 Ορισμός μηχανικών ιδιοτήτων

Μετά την επιλογή του κατάλληλου στοιχείου για τη μοντελοποίηση γίνεται καθορισμός των μηχανικών ιδιοτήτων του μοντέλου. Οι μηχανικές ιδιότητες στην πρώτη φάση της μοντελοποίησης δεν ήταν αυτές των δοκιμών των πειραμάτων γιατί δεν γνωρίζαμε τις ιδιότητες αυτές αρχικά οπότε έγινε επιλογή των μηχανικών ιδιοτήτων από προηγούμενα πειράματα του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας σε αυτό το υλικό (Καραντζάς-2009) . Οι ιδιότητες που απαιτούνται για τον πλήρη καθορισμό του μοντέλου υλικών εξαρτώνται από τον τύπο αυτού. Έτσι, δεδομένης της επιλογής του γραμμικά ελαστικού, ορθοτροπικού μοντέλου, και δεδομένου ότι το υλικό θα ήταν UD600 απαιτείται ο ορισμός των μέτρων ελαστικότητας της πλάκας στις διευθύνσεις των γεωμετρικών αξόνων αυτής (E_x , E_y και E_z), τα μέτρα διάτμησης στα επίπεδα που ορίζονται από τους παραπάνω άξονες (G_{xy} , G_{yz} και G_{zx}) και οι αντίστοιχοι λόγοι του Poisson (ν_{xy} , ν_{yz} και ν_{zx}). Έτσι οι αρχικές ιδιότητες παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1: Μηχανικές ιδιότητες υλικού που ορίστηκαν αρχικά στο ANSYS.

Μηχανικές ιδιότητες	Τιμές (MPa)
E_1	38671
E_2	8501
E_3	8501
G_{12}	2034
G_{23}	1017
G_{13}	1017
ν_{xy}	0.29
ν_{yz}	0.29
ν_{zx}	0.29

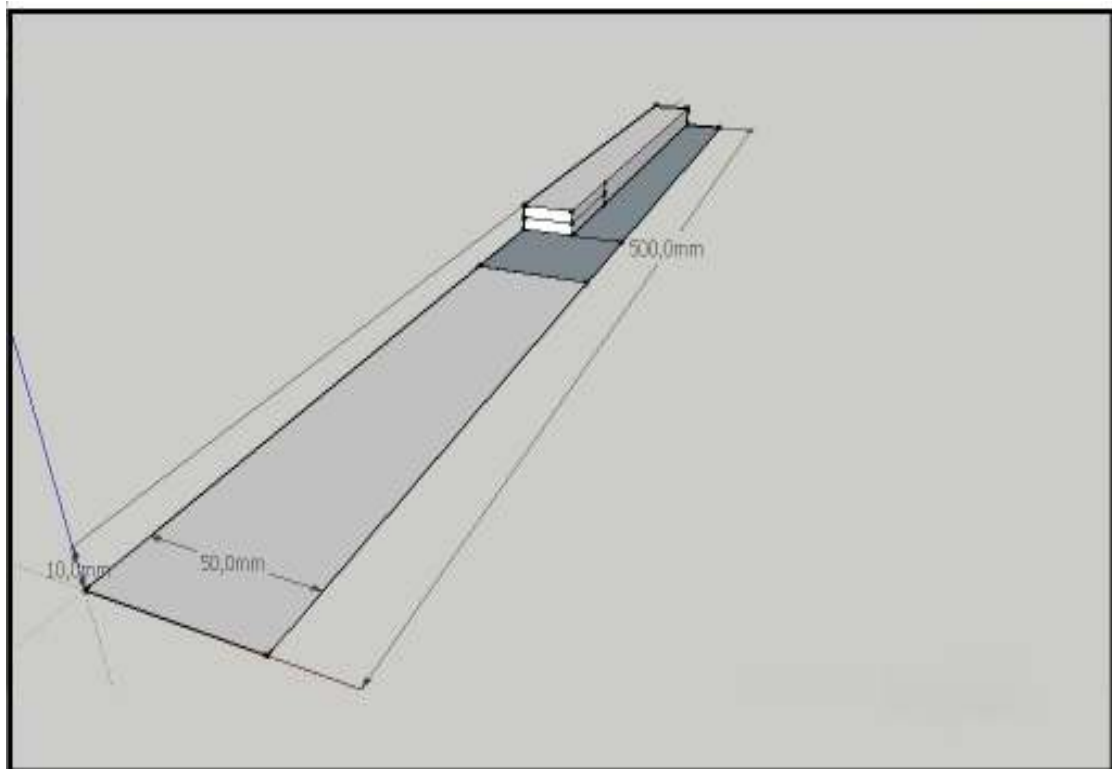
Οι παραδοχές που γίνονται στον παραπάνω καθορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων είναι ότι τα μέτρα ελαστικότητας κατά τους κάθετους στην φόρτιση άξονες είναι ίσα, τα μέτρα διάτμησης στα επίπεδα κάθετα στο επίπεδο του αποχωρισμού είναι ίσα με το μισό του μέτρου διάτμησης στο παράλληλο επίπεδο του αποχωρισμού και ότι οι λόγοι του Poisson είναι όλοι ίσοι. Οι παραδοχές αυτές γίνονται στα πλαίσια του προβλήματος λυγισμού δοκού όπου οι ιδιότητες στις διαστάσεις του πλάτους και του πάχους σε σχέση με το μήκος θεωρείται ότι έχουν αμελητέα επίδραση στο αποτέλεσμα της επίλυσης.

2.2.3 Σχεδίαση της δοκού

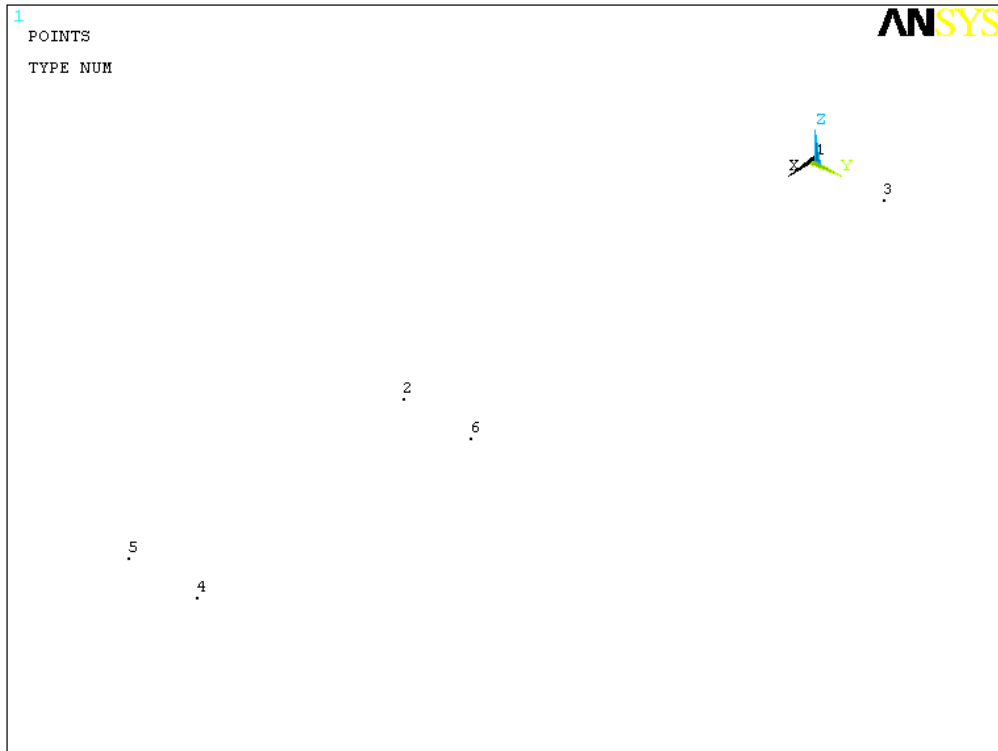
Για τις ανάγκες του μοντέλου είναι απαραίτητη η τρισδιάστατη σχεδίαση της δοκού και αυτό γίνεται με τις αντίστοιχες εντολές που έχει το ANSYS.

Σε πρώτη φάση θα γίνει μοντελοποίηση του $\frac{1}{4}$ της δοκού όπως φαίνεται στο σχήμα 2.5. Έτσι το πρώτο βήμα για το σχεδιασμό είναι ο ορισμός των σημείων που οριοθετούν αυτό το $\frac{1}{4}$ και τον αποχωρισμό που του αντιστοιχεί όπως φαίνεται στο σχήμα 2.6. Τα σημεία αυτά τοποθετούνται με συντεταγμένες ανάλογες με το σύστημα αξόνων που έχουμε ορίσει.

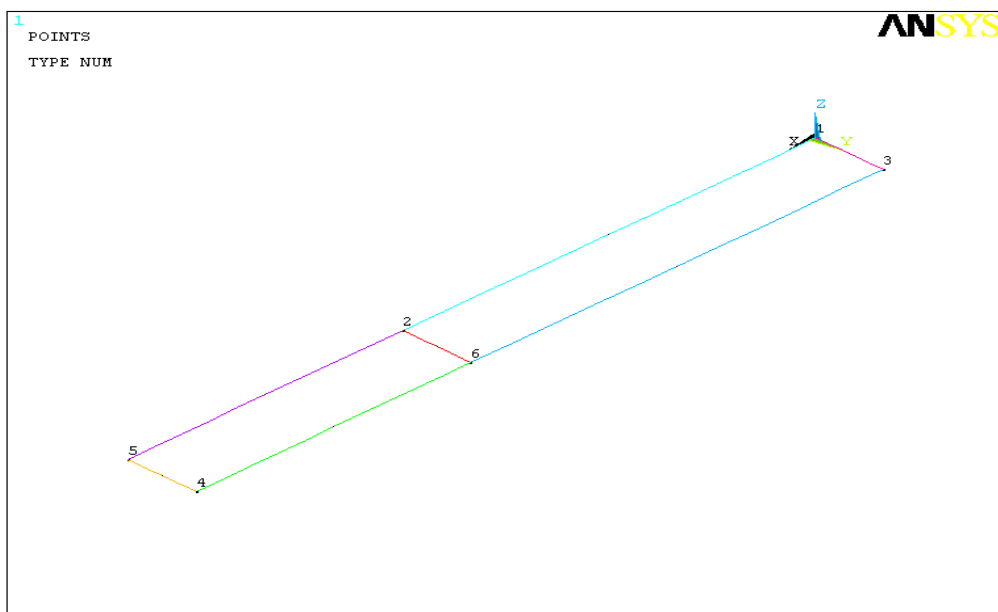
Το δεύτερο βήμα είναι η σχεδίαση των γραμμών που οριοθετούν την προβολή αυτού του τμήματος της δοκού στο επίπεδο x-y (σχήμα 2.7). και τη συμφωνία μεταξύ αυτού και του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων.



Σχήμα 2.5: Γεωμετρία της δοκού που θα μοντελοποιηθεί και το $\frac{1}{4}$ αυτής που μοντελοποιείται αρχικά.



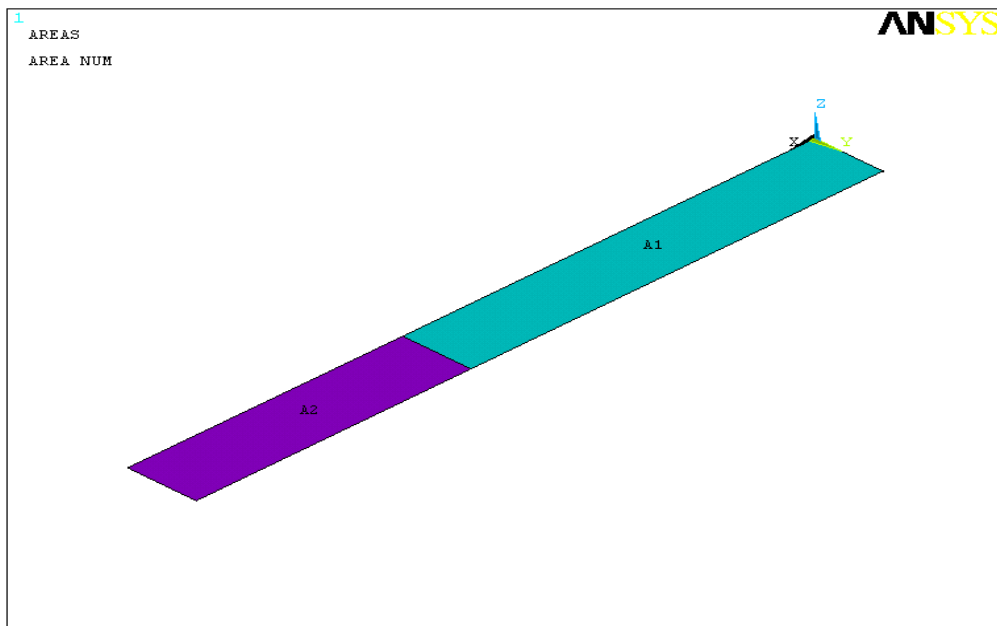
Σχήμα 2.6: Ορισμός των σημείων που οριοθετούν το μοντέλο



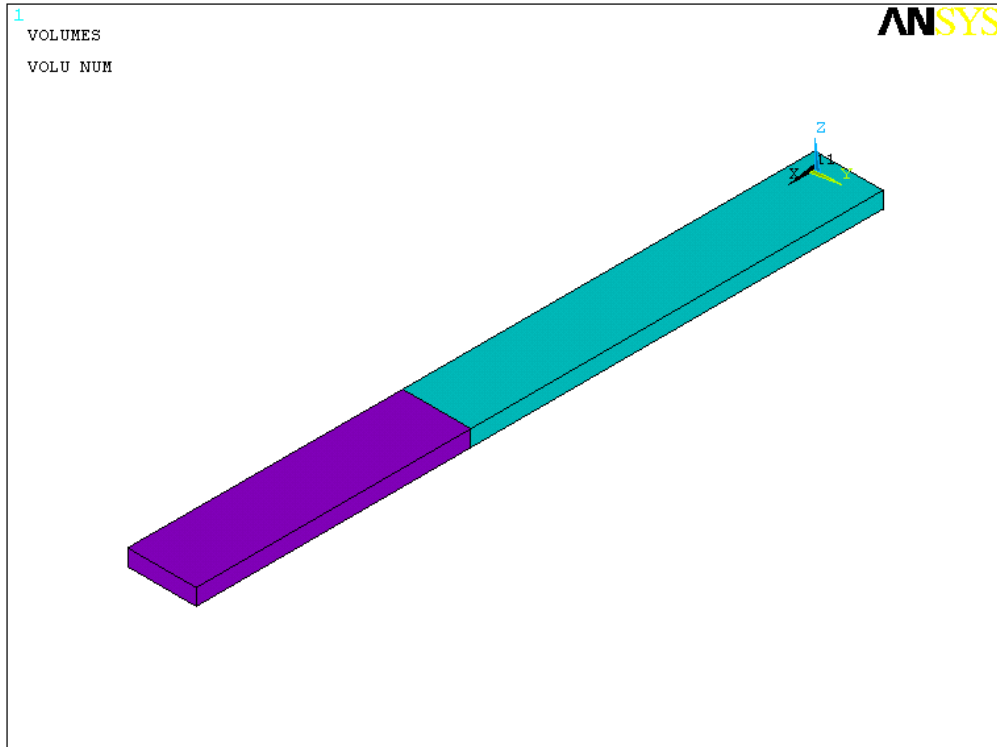
Σχήμα 2.7: Σχεδίαση γραμμών

Μετά από αυτό το βήμα ακολουθεί ο ορισμός των επιφανειών που ορίζουν οι γραμμές (σχήμα 2.8). Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να επισημάνουμε ότι θα οριστούν διαφορετικές επιφάνειες για την άθικτη περιοχή και διαφορετικές για την περιοχή του αποχωρισμού. Το επόμενο βήμα είναι η προεκβολή των επιφανειών αυτών κατά το πάχος για τον σχηματισμό των όγκων (σχήμα 2.9). Το πάχος των

όγκων που προκύπτουν είναι ίσο με εκείνο του κατώτερου υποπολύστρωτου κάτω από το επίπεδο του αποχωρισμού. Η διαδικασία της σχεδίασης ολοκληρώνεται με την ένωση των δύο όγκων στα κοινά σημεία τους, ώστε να λειτουργούν σαν ένα σώμα.



Σχήμα 2.8: Σχεδίαση επιφανειών



Σχήμα 2.9: Προεκβολή όγκων από επιφάνειες

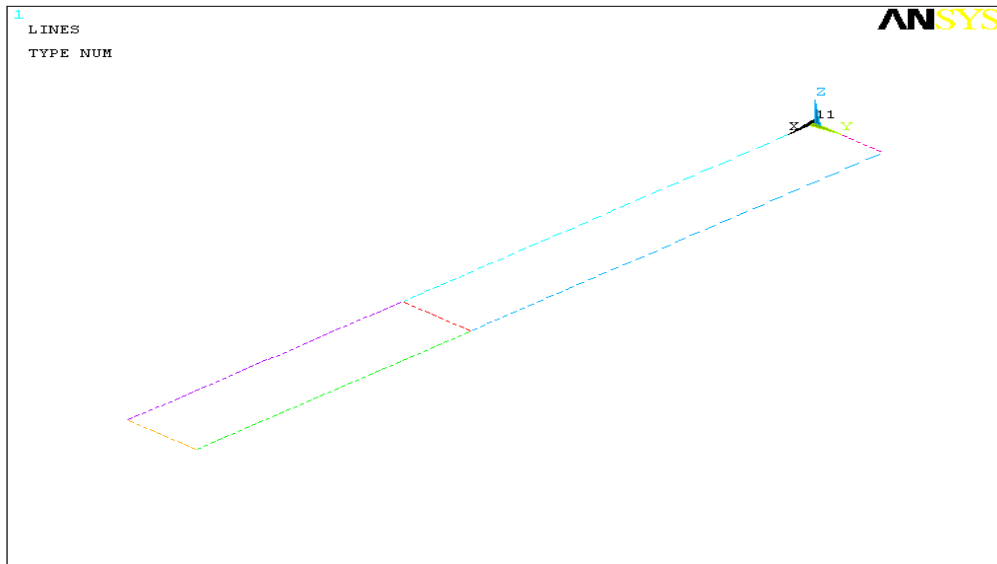
Το γεωμετρικό μοντέλο της δοκού αποτελεί τη βάση για την κατασκευή του τελικού μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων, εξασφαλίζοντας έτσι την επαρκή αναπαράσταση του αποχωρισμού των στρώσεων. Μέσω της σχεδίασης αυτής, πραγματοποιείται μία σαφής διάκριση μεταξύ της άθικτης περιοχής και της περιοχής του αποχωρισμού, η οποία απαιτείται για την τμηματική ένωση των στρώσεων των στοιχείων του τελικού μοντέλου. Επιπρόσθετα, εξασφαλίζεται η ύπαρξη ενός ελάχιστου αριθμού σημείων για το τελικό γεωμετρικό μοντέλο, στο επίπεδο του αποχωρισμού και στην περιοχή αυτού. Τα σημεία αυτά είναι απαραίτητα στο πλαίσιο της εφαρμογής της εντολής *nummrg* για την τμηματική ένωση των στρώσεων των στοιχείων, καθώς μέσω αυτής, ενώνονται τόσο οι κοινοί κόμβοι των στοιχείων όσο και τα αντίστοιχα σημεία του γεωμετρικού μοντέλου (ANSYS - 2007). Επομένως, η απαίτηση για ένωση των κοινών σημείων, εκτός εκείνων που βρίσκονται στην περιοχή του αποχωρισμού, εξασφαλίζει την τμηματική ένωση του γεωμετρικού μοντέλου και τη συμφωνία μεταξύ αυτού και του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων.

2.2.4 Κατασκευή του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων

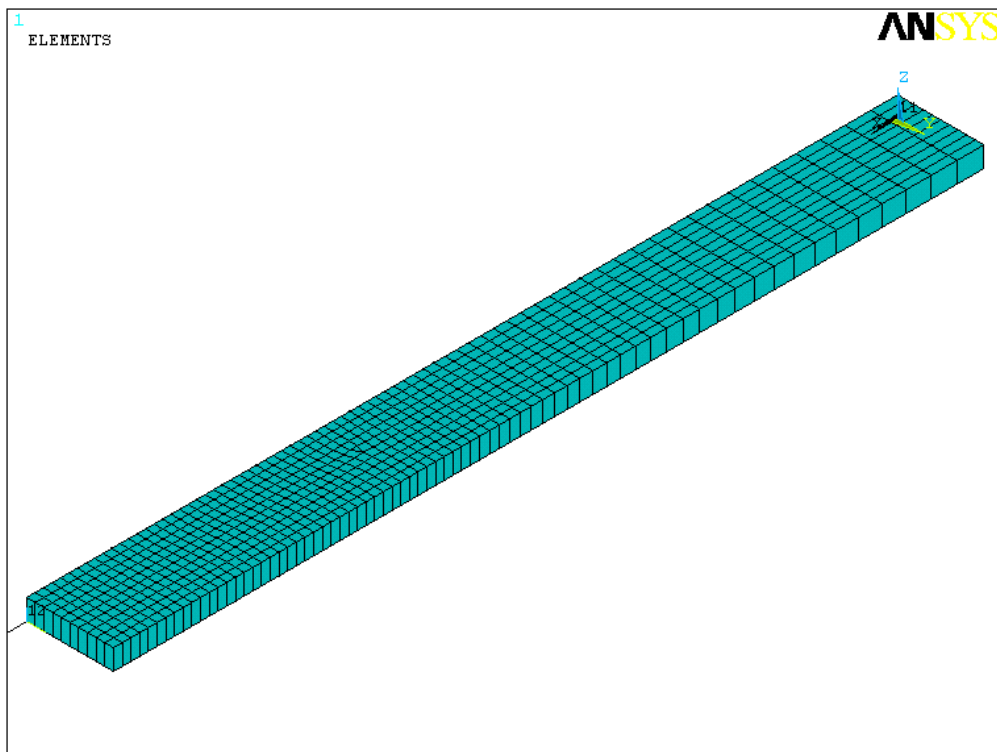
Το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων κατασκευάζεται σε δύο φάσεις. Στην πρώτη φάση καθορίζονται το σχήμα και το πλήθος των στοιχείων του μοντέλου και με βάση αυτά σχηματίζεται ο τρισδιάστατος κάρναβος του τμήματος της δοκού που σχεδιάζουμε. Το δεύτερο στάδιο είναι η κατασκευή του τελικού μοντέλου που θα χρησιμοποιηθεί για τις αναλύσεις με βάση τον παραπάνω κάρναβο.

Αρχικά ο σχεδιασμός του κάρναβου ακολουθεί μία συγκεκριμένη διαδικασία η οποία στην πρώτη φάση της γίνεται στο δισδιάστατο επίπεδο. Για να γίνει αυτό πρέπει πρώτα οι γραμμές που ορίζουν το μοντέλο να χωριστούν σε τμήματα έτσι ώστε να οριστούν τα στοιχεία. Αυτό γίνεται με τη βοήθεια της εντολής *lesize* στην οποία μας δίνεται η δυνατότητα να ορίσουμε ένα σταθερό μήκος στοιχείου αλλά και μεταβαλλόμενο. Στην προκειμένη περίπτωση επιλέξαμε μεταβαλλόμενο μήκος το οποίο θα είναι σταθερό στην περιοχή του αποχωρισμού και αυξανόμενο όσο απομακρυνόμαστε από αυτήν την περιοχή. Η λογική όμως πίσω από αυτό είναι ότι στην περιοχή του αποχωρισμού και κοντά σε αυτή χρειαζόμαστε όσο το δυνατόν ακριβέστερα αποτελέσματα. Για αυτό στην περιοχή του αποχωρισμού έχουμε την διαμέριση του μοντέλου σε πολλά στοιχεία. Όσο απομακρυνόμαστε η διαμέριση γίνεται με μεγαλύτερα στοιχεία με αποτέλεσμα να υπάρχει μικρή απόκλιση των αποτελεσμάτων αλλά ταυτόχρονη μείωση του υπολογιστικού χρόνου. Η απόκλιση αυτή είναι αποδεκτή για την παρούσα μελέτη, έτσι συνδυάζονται η ακρίβεια της ανάλυσης με το μικρό υπολογιστικό χρόνο. Παράλληλα όμως, λόγω των λεπτών όγκων που σχηματίζονται κατά την αναπαράσταση μίας δοκού με λεπτά υποπολύστρωτα, τα δισδιάστατα στοιχεία θα πρέπει να είναι αρκετά μικρά, ώστε κατά την προεκβολή τους, να αποφευχθεί ο σχηματισμός στοιχείων με λόγο ακμών μεγαλύτερο του 20, η χρησιμοποίηση των οποίων δεν ενδείκνυται. Συνέπεια των απαιτήσεων αυτών είναι ο κατακερματισμός των γραμμών της βάσης του μοντέλου σε πολύ μικρά τμήματα, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.10. Στην συνέχεια γίνεται η

δημιουργία των όγκων που θα χωριστούν στα στοιχεία με την εντολή voffst. Οι όγκοι αυτοί είναι προεκβολή των αντίστοιχων επιφανειών σε συγκεκριμένο πάχος όπου αυτό το πάχος είναι αυτό του υποπολύστρωτου κάτω από τον αποχωρισμό. Στην συνέχεια με την βοήθεια της εντολής vsweep και με καθορισμό του αριθμού των στοιχείων κατά το πάχος δημιουργείται ο τρισδιάστατος κάνναβος που φαίνεται στο σχήμα 2.11.



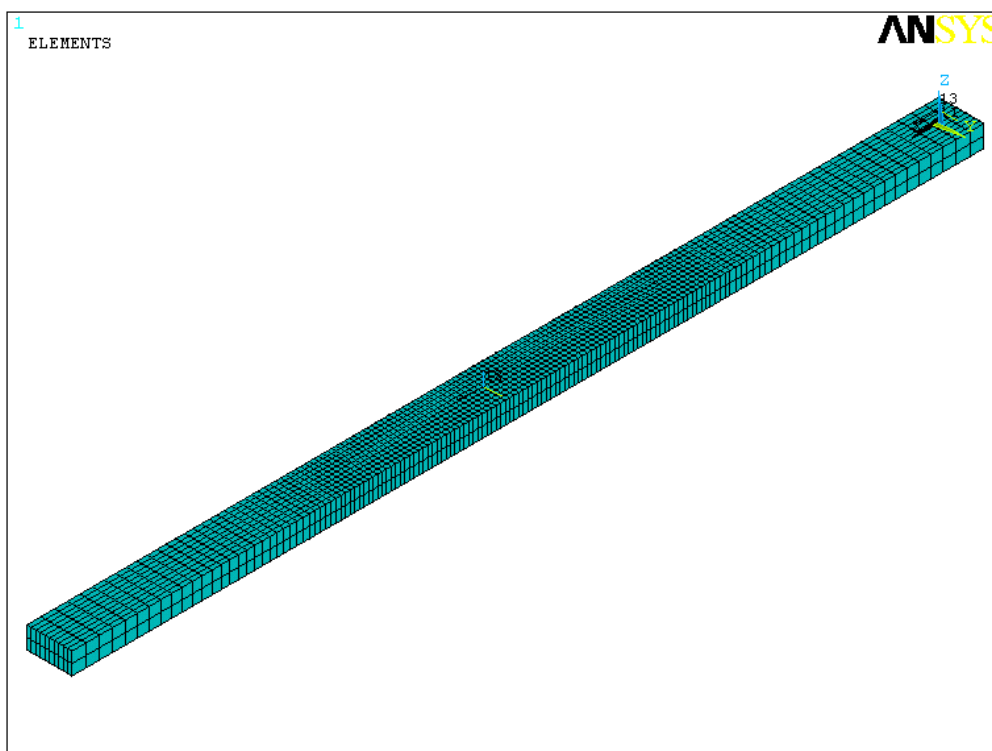
Σχήμα 2.10: Διακριτοποίηση των γραμμών της βάσης του γεωμετρικού μοντέλου



Σχήμα 2.11: Τρισδιάστατη αναπαράσταση του καννάβου του τμήματος της δοκού.

Βέβαια για την εκτέλεση της εντολής *vsweep* πρέπει πρώτα να καθοριστούν διάφορες παράμετροι. Επομένως, μέσω της εντολής *vatt*, ορίζονται ο τύπος, οι μηχανικές ιδιότητες και το σύστημα συντεταγμένων που θα αποδοθούν στα τρισδιάστατα στοιχεία μετά την προεκβολή (ANSYS - 2007). Οι τιμές των παραμέτρων αυτών είναι εκείνες που έχουν ήδη επιλεγεί στα προηγούμενα βήματα, ενώ όσον αφορά στο σύστημα συντεταγμένων, αυτό θα πρέπει να είναι παράλληλο με εκείνο του γεωμετρικού μοντέλου προς αποφυγή λαθών κατά τον ορισμό των οριακών συνθηκών και των φορτίων της πλάκας. Επιπλέον, μέσω της εντολής *esize* (ANSYS - 2007), καθορίζεται ο αριθμός των στοιχείων κατά το πάχος του τρισδιάστατου καννάβου. Τέλος, τα υπολογιστικά λάθη που είναι πιθανόν να προκληθούν λόγω της συνύπαρξης του επιφανειακού και του τρισδιάστατου καννάβου καθιστούν απαραίτητο το σβήσιμο των δισδιάστατων στοιχείων μετά την προεκβολή. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της εντολής *extort*, η οποία επίσης καθορίζει τον τρόπο επιλογής του επιφανειακού καννάβου (αυτόματα ή από το χρήστη, ANSYS - 2007). Εν προκειμένω, η επιλογή γίνεται αυτόματα, ώστε να προεκβάλλονται ταυτόχρονα τα τμήματα του καννάβου της βάσης του μοντέλου.

Το μοντελοποιημένο μέρος της δοκού μέχρι αυτή την στιγμή φαίνεται στο Σχήμα 2.12. Έχει πραγματοποιηθεί η μοντελοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία στο $\frac{1}{4}$ της δοκού. Έτσι για να δημιουργηθεί το υπόλοιπο συμμετρικό $\frac{1}{4}$ ορίζουμε ένα νέο σύστημα συντεταγμένων παράλληλο με το αρχικό αλλά στο μέσο του αποχωρισμού και μέσω της επιλογής *vsymm* δημιουργούμε τον συμμετρικό όγκο όπως φαίνεται στο σχήμα 2.12. Αυτή η εντολή όμως έχει δημιουργήσει κάποιους κοινούς κόμβους οι οποίοι συγχωνεύονται έτσι ώστε να προκύψει ένας ενιαίος κάνναβος.

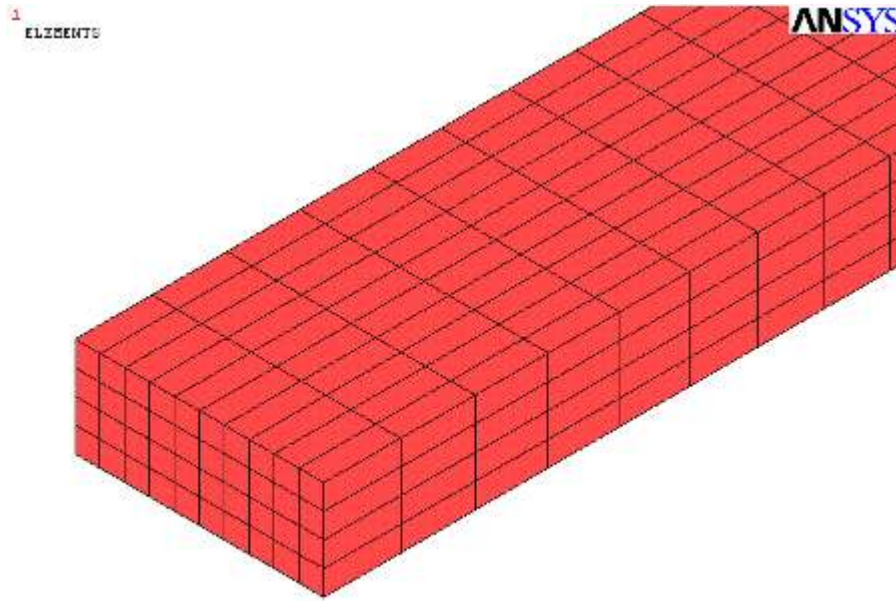


Σχήμα 2.12: Δημιουργία συμμετρικού αντίγραφου (εντολή *vsymm*).

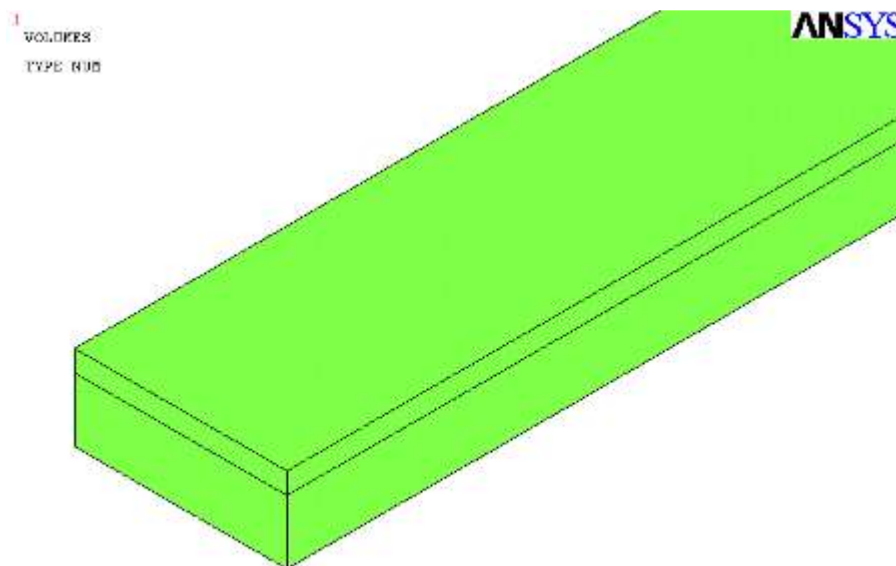
Μέρι στιγμής έχει αναλυθεί η κατασκευή του μοντέλου που περιλαμβάνει το υποπολύστρωτο κάτω από τον αποχωρισμό. Για τη δημιουργία του πάνω υποπολύστρωτου αρχικά δημιουργείται πάλι ένας πανομοιότυπος όγκος με τον προηγούμενο, του κάτω υποπολύστρωτου, με την εντολή *vgen* σε σημείο τέτοιο όπου η κάτω επιφάνεια του ενός να συμπίπτει με την πάνω του άλλου. Στην συνέχεια ακολουθείται η παραπάνω διαδικασία για την δημιουργία των στοιχείων (σχήμα 2.13, 2.14) ,όμως το πάχος αυτού του όγκου πρέπει να αλλάξει ανάλογα με την θέση που βρίσκεται ο αποχωρισμός κατά το πάχος της δοκού. Αυτό πραγματοποιείται με την εντολή *vlscale* (ANSYS - 2007), οπότε το μοντέλο που προκύπτει αποτελείται από δύο στρώσεις στοιχείων εκατέρωθεν του επιπέδου του αποχωρισμού, με πάχη ίσα με εκείνα των αντίστοιχων υποπολύστρωτων (σχήμα 2.15). Η κατασκευή του τελικού μοντέλου ολοκληρώνεται με την ένωση των κοινών κόμβων των στρώσεων εκτός της περιοχής του αποχωρισμού και στα όρια αυτής, μέσω της εντολής *nummrg*. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι παράλληλα με το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων της δοκού, σχηματίζεται το αντίστοιχο γεωμετρικό μοντέλο (σχήμα 2.16), καθώς η εφαρμογή των εντολών *vsymm*, *vgen* και *vscale* αφορά τόσο στον κάρναβο όσο και στους όγκους που αναπαριστούν το εκάστοτε τμήμα της (ANSYS - 2007). Κατά συνέπεια, η εντολή *nummrg* εφαρμόζεται στους κόμβους και στα αντίστοιχα σημεία των δύο μοντέλων, οπότε εξασφαλίζεται η συμφωνία μεταξύ αυτών. Τέλος, για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, απαιτείται η κατασκευή του μοντέλου της άθικτης πολύστρωτης δοκού. Η διαδικασία κατασκευής είναι ανάλογη εκείνης που έχει ήδη περιγραφεί, με τη διαφορά ότι τα τμήματα του μοντέλου εκατέρωθεν του επιπέδου του αποχωρισμού ενώνονται σε όλη την έκταση της κοινής επιφάνειας.



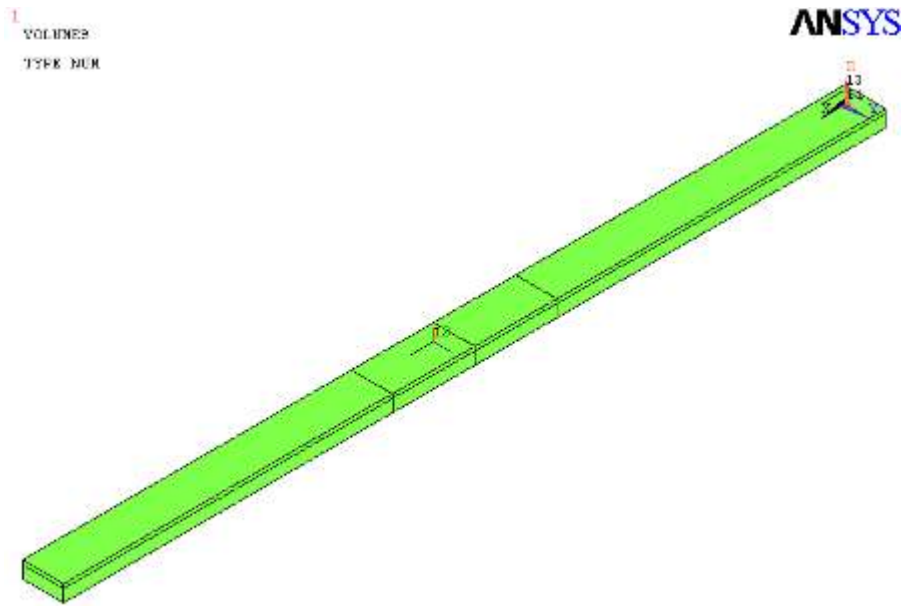
Σχήμα 2.13: Δημιουργία απλού αντίγραφου κατά το πάχος (εντολή *vgen*).



Σχήμα 2.14: Μεγέθυνση του καννάβου που προκύπτει μετά την εφαρμογή της εντολής *vgen*.



Σχήμα 2.15: Μετασχηματισμός του πάχους (εντολή *vscale*).



Σχήμα 2.16: Τελικό γεωμετρικό μοντέλο.

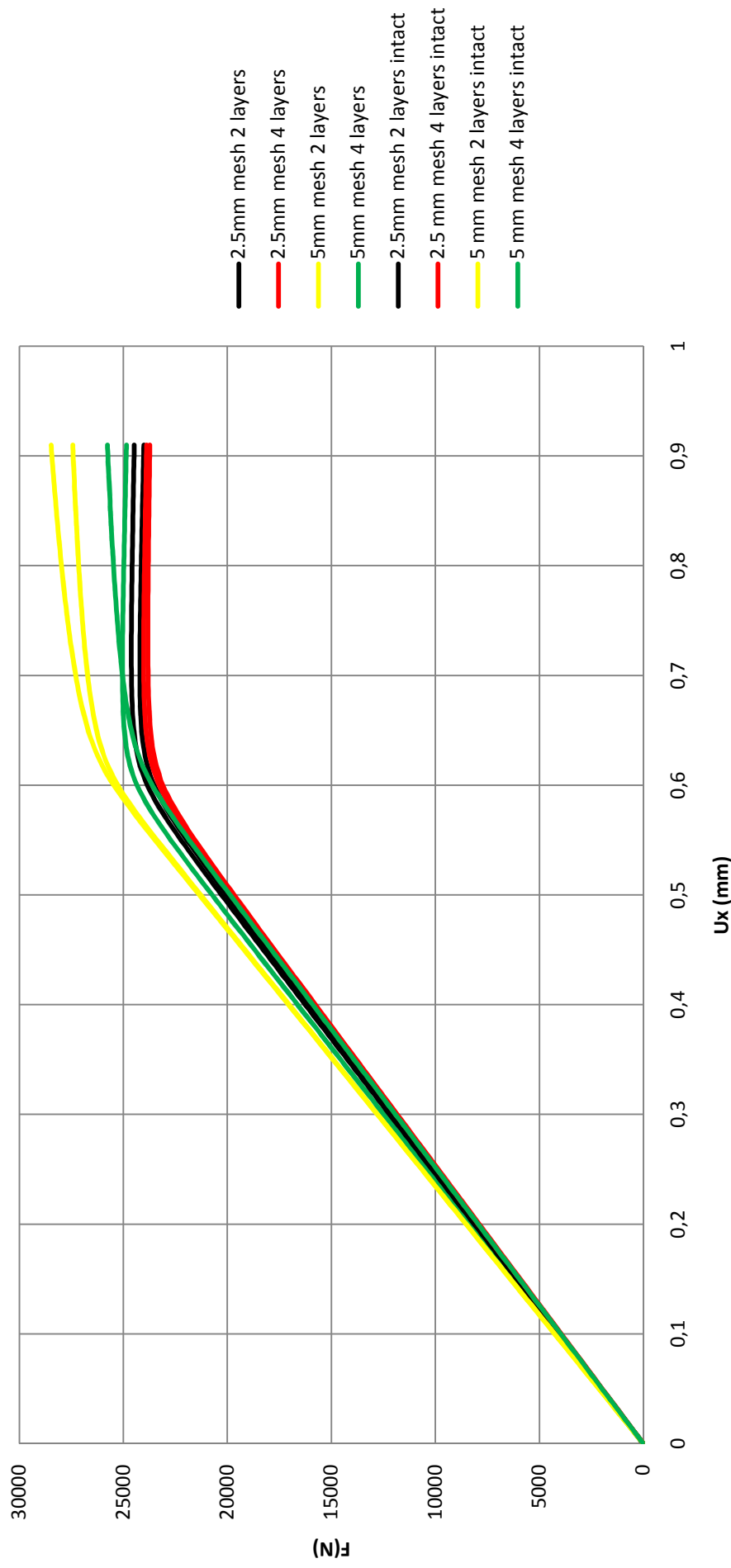
2.2.4.1 Επιλογή των διαστάσεων των στοιχείων του μοντέλου

Η επιλογή των διαστάσεων των στοιχείων του μοντέλου είναι μια διαδικασία πολύ μεγάλης σημασίας για την δημιουργία του μοντέλου διότι είναι ο παράγοντας που καθορίζει την ορθότητα αλλά και τη σύγκλιση της ανάλυσης. Αυτό συμβαίνει διότι οι διαστάσεις των στοιχείων καθορίζουν και τον αριθμό των στοιχείων ενός μοντέλου. Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των στοιχείων του μοντέλου τόσο η επίλυση του συγκλίνει στην πραγματική τιμή. Βέβαια όσο αυξάνεται ο αριθμός των στοιχείων τόσο αυξάνεται ο χρόνος της ανάλυσης. Έτσι οι διαστάσεις των στοιχείων πρέπει να επιλεγούν με βάση την υπάρχουσα υπολογιστική δύναμη των συστημάτων, τον χρόνο επίλυσης αλλά και τη σύγκλιση των αποτελεσμάτων.

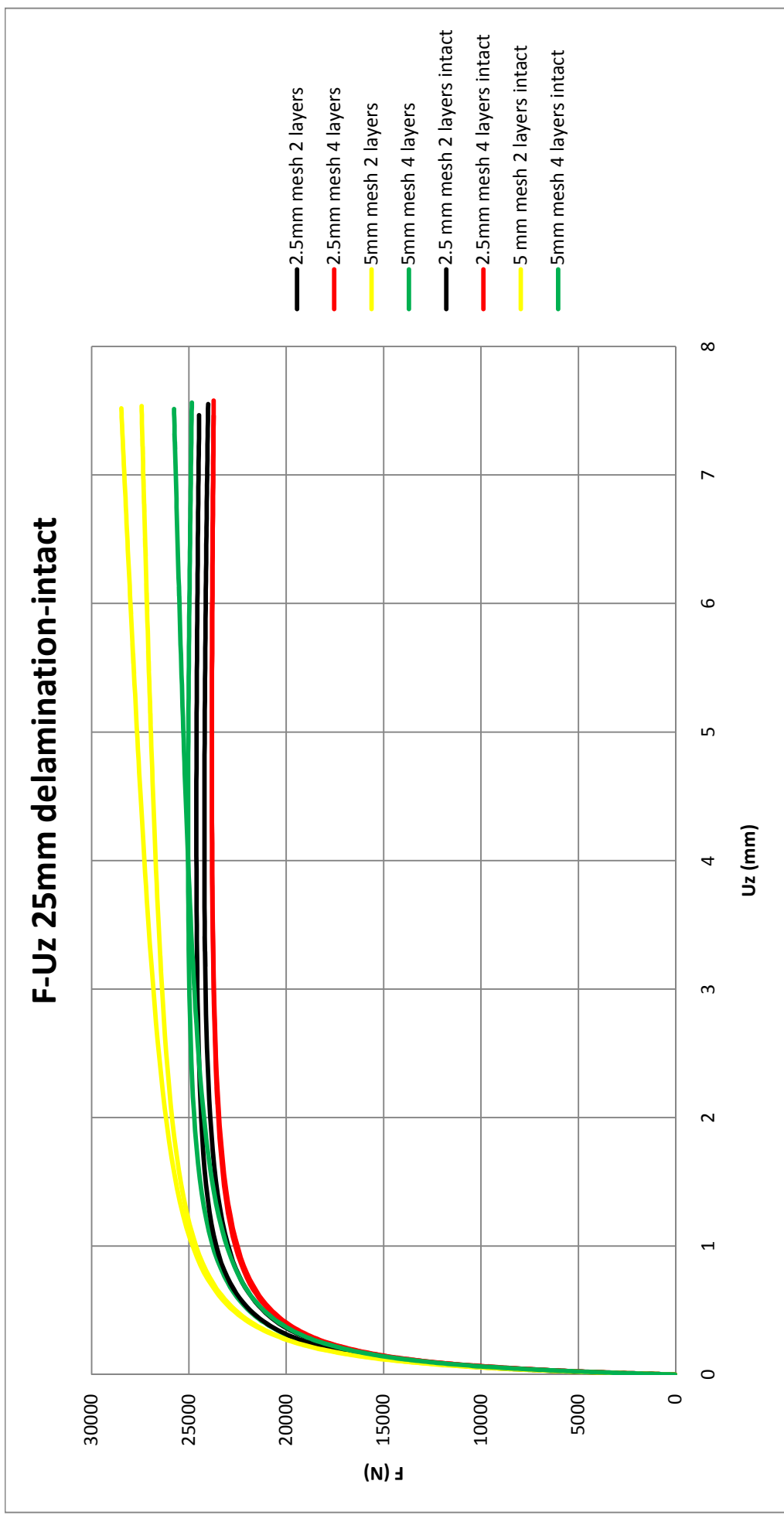
Θεωρώντας ότι πρόκειται για ένα μοντέλο με διαστάσεις 500x50x10 mm οι διαστάσεις του στοιχείου θα είναι υποπολλαπλάσιο αυτών των διαστάσεων. Έτσι αρχικά έγινε διερεύνηση με βάση το μήκος της αποκόλλησης των στρώσεων δηλαδή έγινε διερεύνηση για μήκος στοιχείου ίσο με 0.05c, 0.1c, 0.2c και 0.5c όπου c στην περίπτωση του κώδικα είναι ίσο με το 1/2 του μήκους του αποχωρισμού. Αυτό όμως είχε σαν αποτέλεσμα σε κάθε ανάλυση να μην έχουμε στοιχεία ίδιων διαστάσεων οπότε δεν γινόταν να αποφανθούμε για σύγκλιση της λύσης διότι γινόταν σύγκριση ανόμοιων πραγμάτων. Δηλαδή στην περίπτωση όπου καταλήγαμε σε μήκος στοιχείου ίσο με 0.1c αυτό θα σήμαινε ότι για τις περιπτώσεις 50, 100, 200 και 300mm μήκος αποχωρισμού θα είχαμε 2.5, 5, 10 και 15 mm μήκος στοιχείου αντίστοιχα. Έτσι αποφασίστηκε το μήκος του στοιχείου να επιλεγθεί μέσα από

σταθερά μήκη και αυτά ήταν τα 2.5 και 5 mm. Στην περίπτωση του πάχους, αυτό καθορίζεται από τον διαμερισμό του μοντέλου κατά το πάχος. Έτσι η επιλογή με δεδομένο πάχος ίσο με 10mm ήταν μεταξύ 2 και 4 διαμερισμών δηλαδή 5 και 2.5mm αντίστοιχα. Η διαδικασία που θα ακολουθηθεί αποτελείται από μη γραμμικές αναλύσεις αλλά και αναλύσεις ιδιοτιμών έτσι ώστε να επιλεγθούν οι κατάλληλες διαστάσεις των στοιχείων. Οι αναλύσεις αυτές αφορούν 3 περιπτώσεις δοκιμίων, άθικτο δοκίμιο και δοκίμιο με μήκος αποχωρισμού 25 και 100mm. Σε κάθε μία από αυτές τις περιπτώσεις εξετάζονται οι υποπεριπτώσεις με μήκος στοιχείου 2.5 και 5 mm και για κάθε μήκος στοιχείου εξετάζονται οι περιπτώσεις 2 και 4 διαμερισμών κατά το πάχος. Η διαδικασία ονομάζεται ανάλυση σύγκλισης καννάβου (mesh convergence) και από αυτήν εξήχθησαν τα παρακάτω διαγράμματα. Σε κάθε διάγραμμα παρουσιάζονται με ίδιο χρώμα οι καμπύλες που αντιπροσωπεύουν ίδιο μήκος στοιχείου. Τα σχήματα είναι συγκριτικά μεταξύ άθικτου δοκιμίου και δοκιμίου που έχει αποχωρισμό των στρώσεων 25 ή 50mm. Τα διαγράμματα παρουσιάζουν καμπύλες δύναμης-αξονικής μετατόπισης και δύναμης-εγκάρσιας μετατόπισης. Στην ανάλυση σύγκλισης καννάβου έγινε επίλυση του μοντέλου με δύο τρόπους. Τα διαγράμματα εξήχθησαν μετά από μη γραμμική ανάλυση ενώ τα ο Πίνακας 2.2 πρόκυψε από ανάλυση ιδιοτιμών. Εκτός των διαγραμμάτων στον Πίνακα 2.2 φαίνεται το κρίσιμο φορτίο λυγισμού του μοντέλου σε κάθε περίπτωση αλλά και η διαφορά στο αποτέλεσμα της επίλυσης του μοντέλου μεταξύ των περιπτώσεων που έχουμε 2 και 4 διαμερίσεις κατά το πάχος με ίδιο μέγεθος στοιχείου αλλά και η διαφορά της λύσης όταν έχουμε ίδια διαμέριση κατά το πάχος αλλά διαφορετικό μέγεθος στοιχείου.

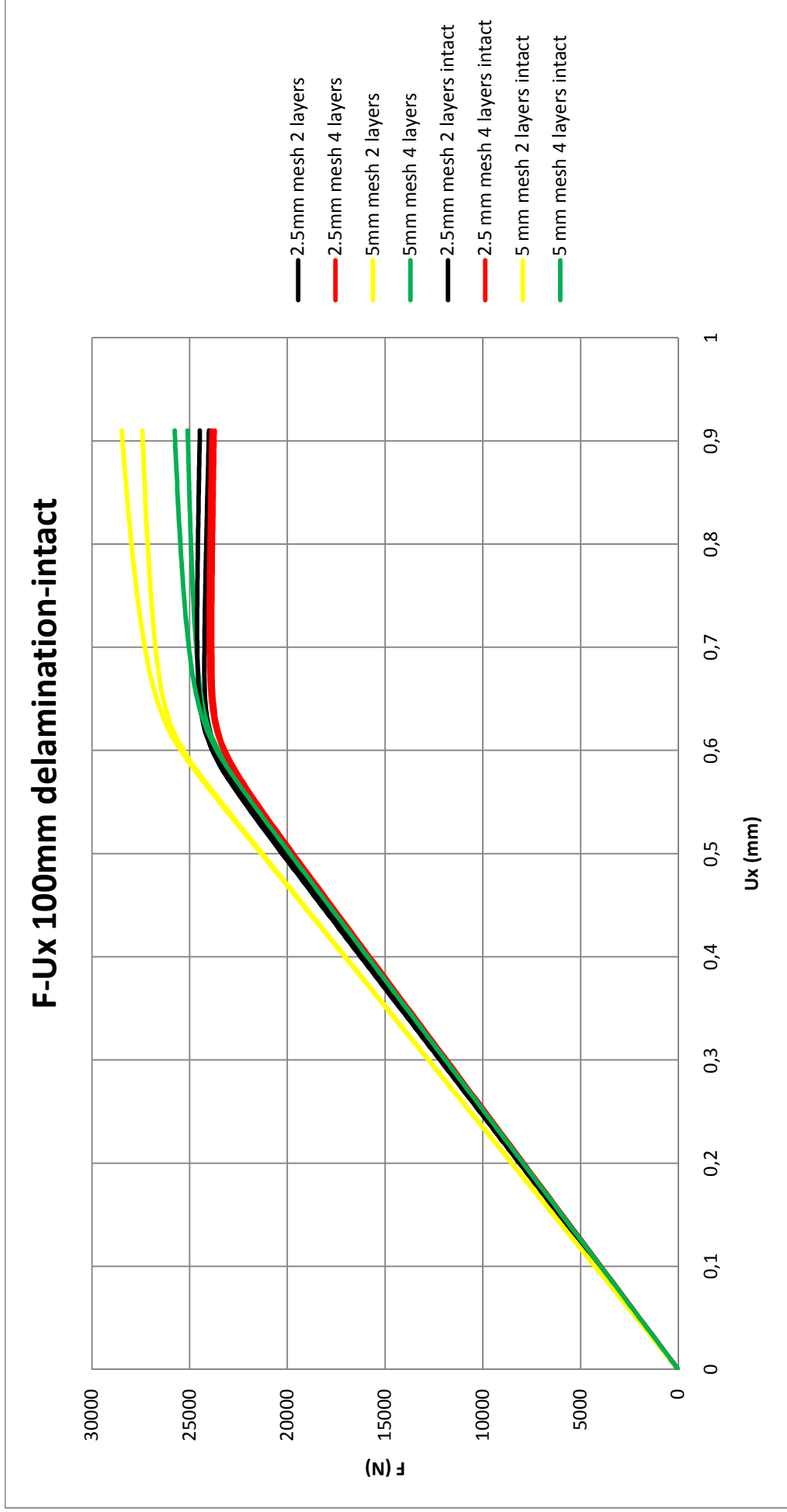
F-Ux 25mm delamination-intact



Σχήμα 2.17 : Συγκριτικό διάγραμμα δύναμης-αξονικής μετατόπισης καννάβων για την περίπτωση αποχωρισμού μήκους 25mm.

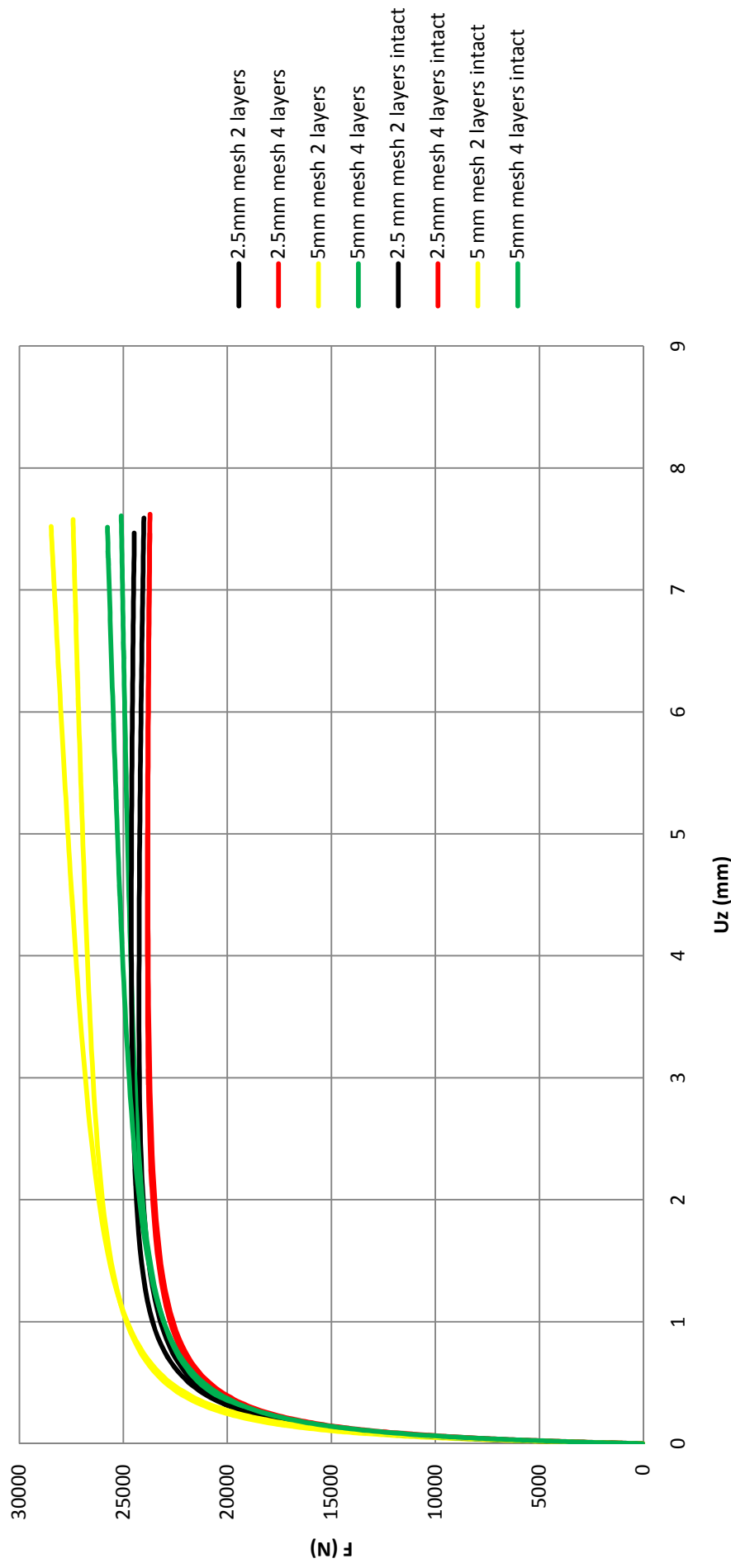


Σχήμα 2.18 : Συγκριτικό διάγραμμα δύναμης-εγκάρσιας μετατόπισης καννάβων για την περίπτωση αποχωρισμού μήκους 25mm.



Σχήμα 2.19 : Συγκριτικό διάγραμμα δύναμης-αξονικής μετατόπισης καννάβων για την περίπτωση αποχωρισμού μήκους 100mm.

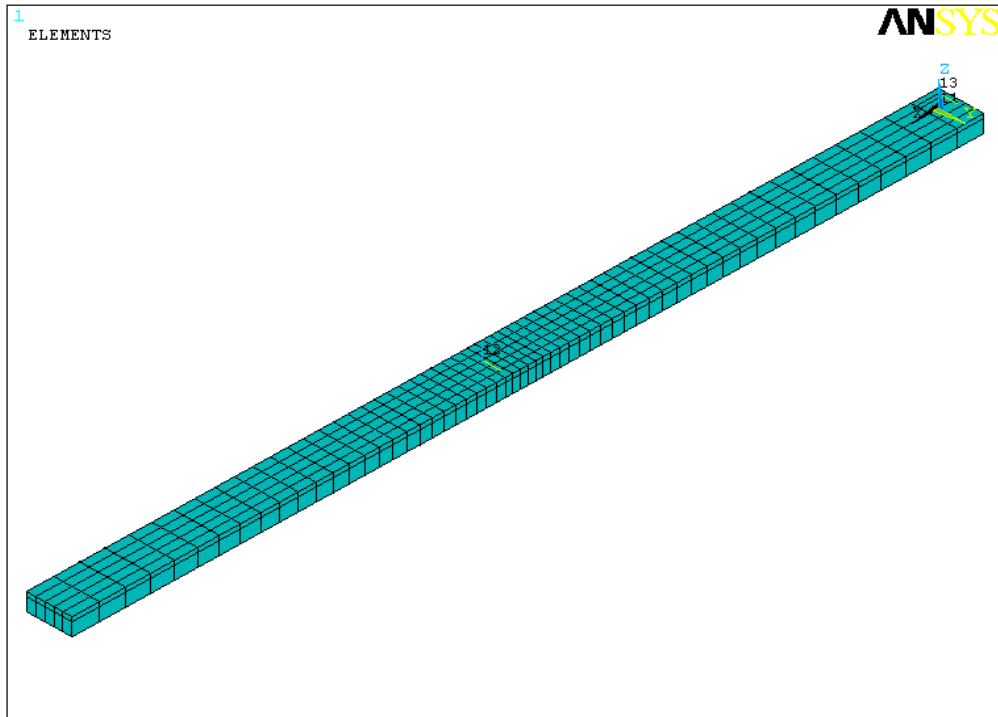
F-Uz 100mm delamination-intact



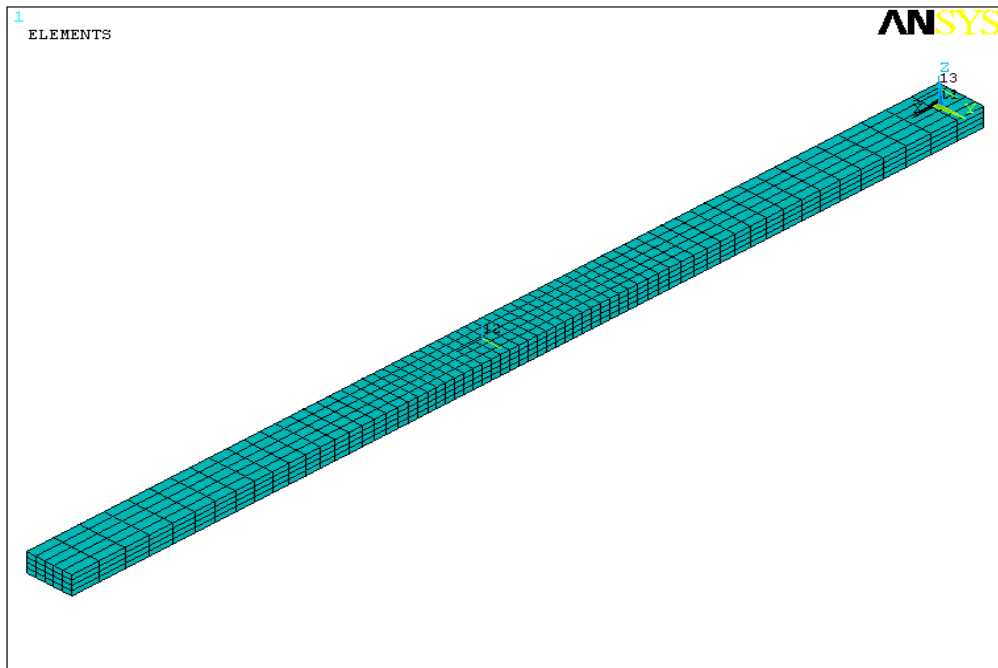
Σχήμα 2.20 : Συγκριτικό διάγραμμα δύναμης-εγκάρσιας μετατόπισης καννάβων για την περίπτωση αποχωρισμού μήκους 100mm.

Πίνακας 2.2: Ανάλυση ιδιοτιμών για κάθε περίπτωση καννάβου

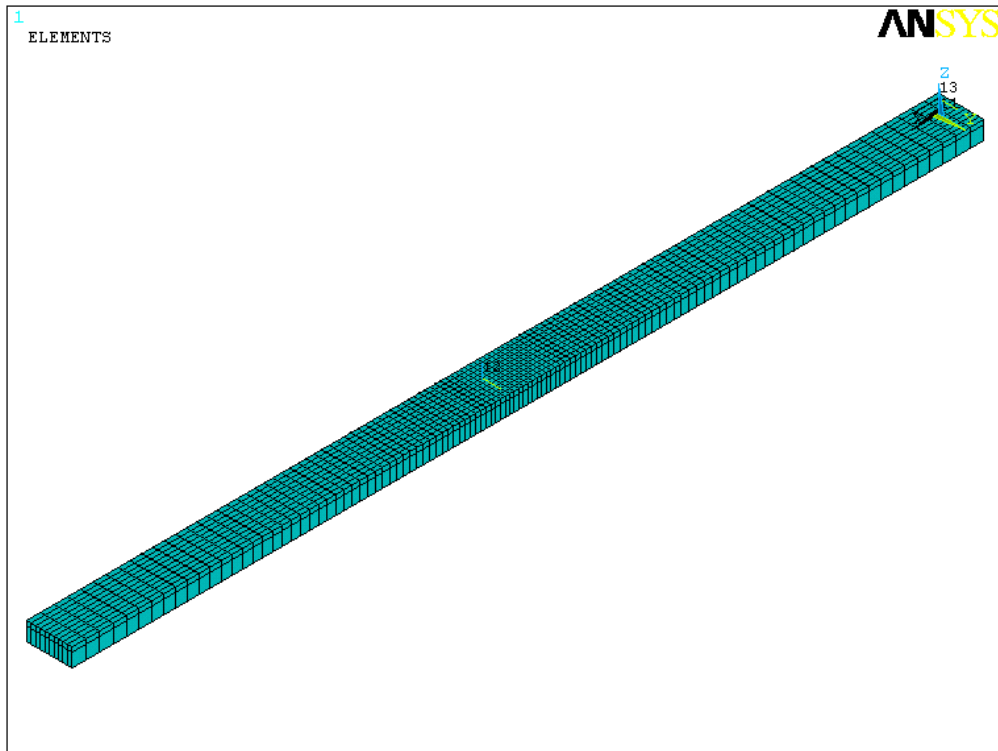
EIGENVALUE ANALYSIS						
Delamination length	# of layers	Element size	Pcrit (N)	D %(2-4 layers)	D % (element size)	
<i>25 mm delamination</i>	2 layers	2.5mm mesh	24199	0,27%		
		5 mm mesh	24217	0,08%	0,07%	
	4 layers	2.5mm mesh	24132			
		5 mm mesh	24196			0,26%
<i>100 mm delamination</i>	2 layers	2.5mm mesh	23832	0,46%		
		5 mm mesh	23894	0,45%	0,26%	
	4 layers	2.5mm mesh	23721			
		5 mm mesh	23788			0,28%
<i>Intact</i>	2 layers	2.5mm mesh	24264	-0,04%		
		5 mm mesh	24321	-0,09%	0,23%	
	4 layers	2.5mm mesh	24274			
		5 mm mesh	24342			0,28%



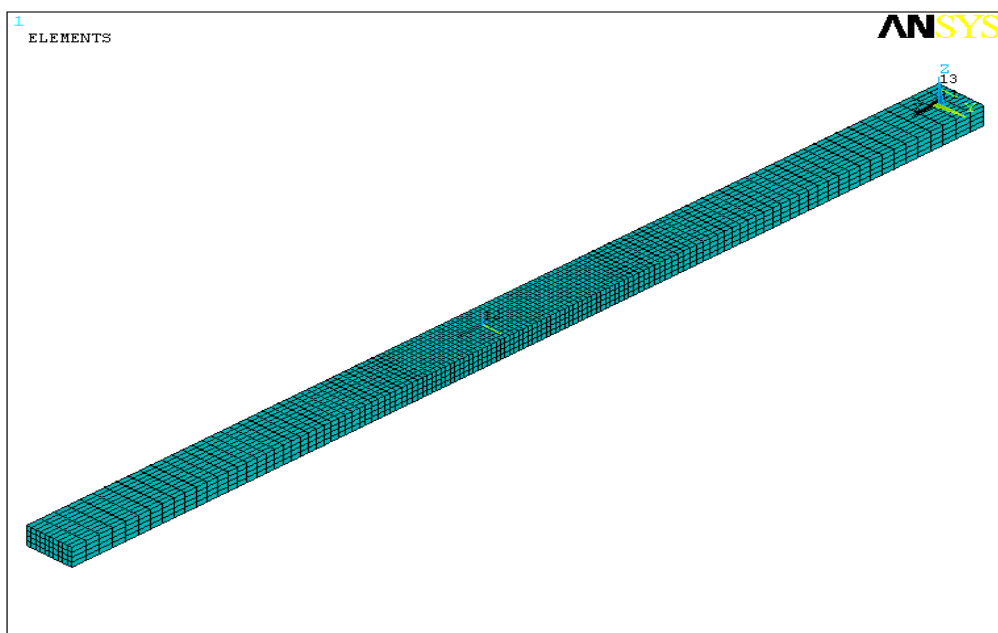
Σχήμα 2.21: Πλέγμα με Στοιχεία μήκους 5mm στην περιοχή του αποχωρισμού, με 2 στοιχεία κατά το πάχος



Σχήμα 2.22: Πλέγμα με στοιχεία μήκους 5mm στην περιοχή του αποχωρισμού με 4 στοιχεία κατά το πάχος



Σχήμα 2.23: Πλέγμα με στοιχεία μήκους 2,5 mm στην περιοχή του αποχωρισμού με 2 στοιχεία κατά το πάχος



Σχήμα 2.24: Πλέγμα με στοιχεία μήκους 2,5mm στην περιοχή του αποχωρισμού με 4 στοιχεία κατά το πάχος

Όπως φαίνεται και από τα παραπάνω διαγράμματα, η περίπτωση μήκους στοιχείου ίσο με 5mm και με 2 στοιχεία κατά το πάχος είναι αυτή που παρουσιάζει την μεγαλύτερη

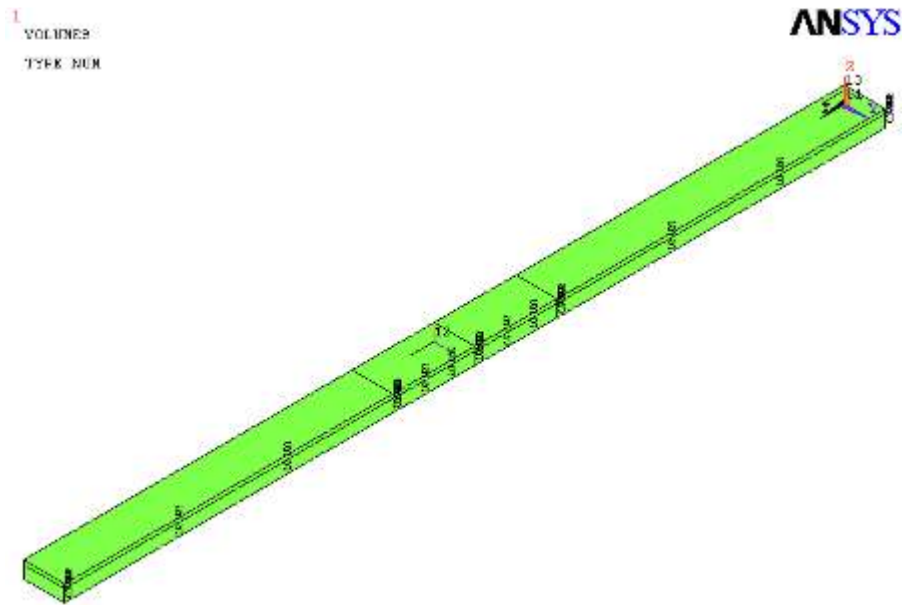
απόκλιση σε σχέση με τις υπόλοιπες περιπτώσεις. Στην συνέχεια παρατηρούμε ότι όσο μειώνετε το μήκος στοιχείου η αυξάνονται τα στοιχεία κατά το πάχος αυξάνεται η σύγκλιση της λύσης. Λαμβάνοντας υπόψη τον χρόνο επίλυσης και την σύγκλιση της λύσης γίνεται επιλογή του λεπτότερου κάρναβου δηλαδή μήκος στοιχείου 2.5mm με 4 στοιχεία κατά το πάχος.

2.3 Επίλυση

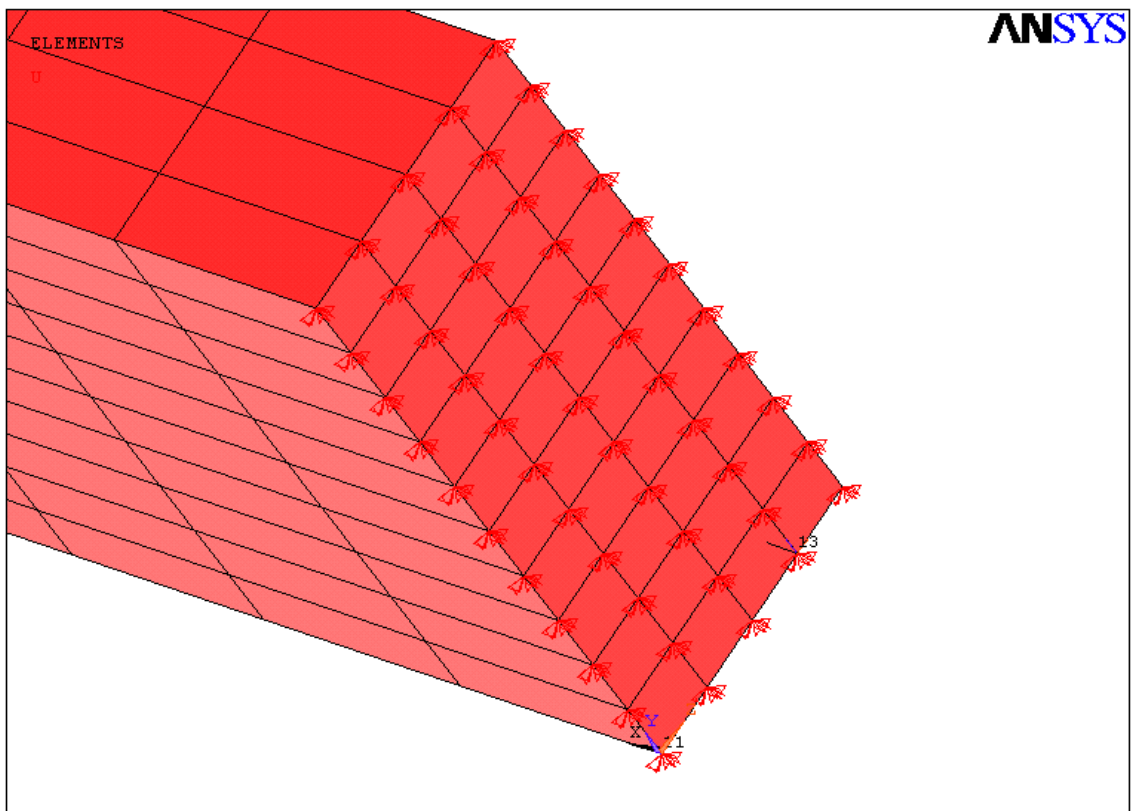
Σε αυτό το στάδιο της ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία έχει κατασκευαστεί το γεωμετρικό μοντέλο και το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων. Αυτό που απομένει είναι ο προσδιορισμός ορισμένων παραμέτρων όχι για το μοντέλο αλλά για την επίλυση του προβλήματος. Αυτές οι παράμετροι είναι οι συνοριακές συνθήκες του προβλήματος δηλαδή οι συνθήκες έδρασης και φόρτισης της δοκού, το φαινόμενο που εξετάζεται αλλά και ο τρόπος επίλυσης του (γραμμικός, μη γραμμικός).

2.3.1 Ορισμός συνοριακών συνθηκών και φόρτισης

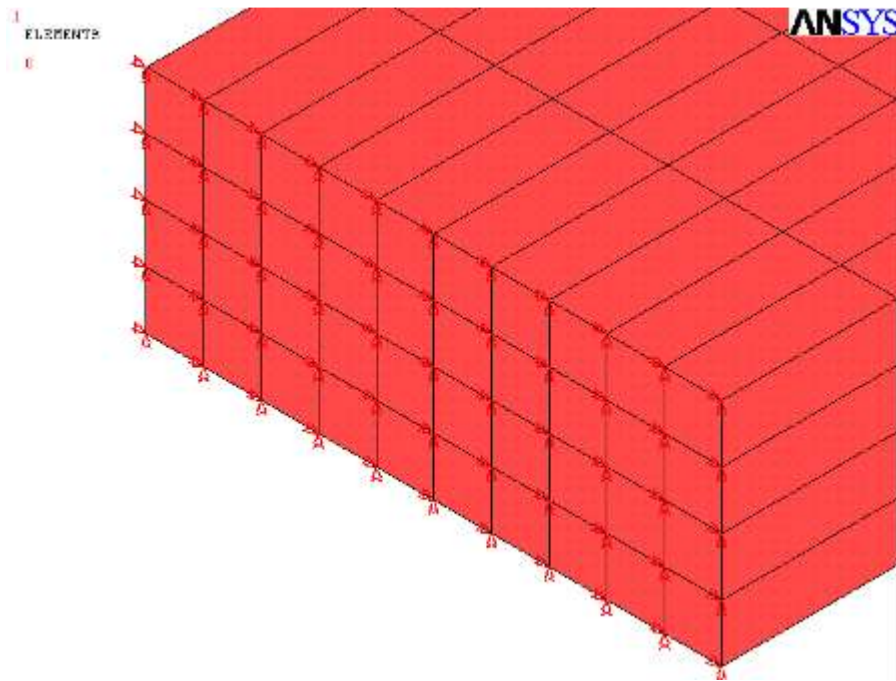
Όπως προαναφέρθηκε κατά την προεπεξεργασία έγινε η μοντελοποίηση της δοκού έως το μισό πλάτος του κανονικού μοντέλου, για λόγους ταχύτητας επίλυσης. Αυτό καθιστά απαραίτητη την επιβολή ορισμένων περιορισμών στο μοντέλο, ώστε κατά την ανάλυση να λαμβάνεται υπόψη η επίδραση του συμμετρικού τμήματος που παραλείπεται. Οι περιορισμοί αυτοί επιβάλλονται στις επιφάνειες του μοντέλου που βρίσκονται στο επίπεδο συμμετρίας $x'z'$ (σχήμα 2.25) και αφορούν όλους τους βαθμούς ελευθερίας. Επιπρόσθετα, λόγω της επίλυσης του προβλήματος της μονοαξονικής θλίψης της δοκού, το μοντέλο θα πρέπει να περιορίζεται έτσι, ώστε η πλευρά του, απέναντι από την πλευρά που φορτίζεται, να μη μετατοπίζεται και να μην υπάρχει περιστροφή σε καμία διεύθυνση. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω του περιορισμού των αντίστοιχων βαθμών ελευθερίας ($u_x, u_y, u_z, \text{rot}_x, \text{rot}_y, \text{rot}_z = 0$) των κόμβων της πλευράς αυτής (σχήμα 2.26). Οι κόμβοι των πλαϊνών πλευρών δεν περιορίζονται καθόλου με καμία συνοριακή συνθήκη. Μετά την εφαρμογή των παραπάνω επιβάλλονται τα φορτία τα οποία θα εφαρμόζονται στην μία πλευρά της δοκού. Το φορτίο μπορεί να είναι υπό την μορφή πίεσης ή υπό την μορφή μετατόπισης. Στην συγκεκριμένη εργασία προτιμάται η επιβολή μετατόπισης. Αυτό γίνεται επειδή κατά την επιβολή δύναμης υπάρχει παραμόρφωση της επιφάνειας στην οποία επιβάλλεται η δύναμη και αυτό δεν αναπαριστά με ακρίβεια της συνθήκες της εργαστηριακής δοκιμής. Έτσι επιβάλλεται μία θλιπτική μετατόπιση ($u_x < 0$) και στην πλευρά επιβολής της μετατόπισης περιορίζονται όλοι οι υπόλοιποι βαθμοί ελευθερίας (σχήμα 2.27).



Σχήμα 2.25: Επιφάνειες όπου επιβάλλονται οι περιορισμοί συμμετρίας.



Σχήμα 2.26: Περιορισμός όλων των βαθμών ελευθερίας στην μία πλευρά



Σχήμα 2.27: Περιορισμός όλων των βαθμών ελευθερίας εκτός από την διεύθυνση u_x που γίνεται εφαρμογή της μετατόπισης

2.3.2 Τύπος ανάλυσης

Ο τύπος ανάλυσης του προβλήματος λυγισμού μίας δοκού με αποχωρισμό των στρώσεων μπορεί να είναι γραμμικός και μη γραμμικός. Το παραπάνω πρόβλημα αντιμετωπίζεται ως στατικό από την στιγμή που δεν υπάρχει διάνοιξη του αποχωρισμού. Έτσι με την βοήθεια του ANSYS έχουμε την επιλογή της γραμμικής ανάλυσης του προβλήματος (ανάλυση ιδιοτιμών, eigenvalue analysis, EIG) είτε μη γραμμικά (nonlinear analysis, N-L), οπότε η επιλογή του τύπου της ανάλυσης καθορίζεται από τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα κάθε περίπτωσης. Στην πρώτη περίπτωση ο υπολογιστικός χρόνος είναι πολύ μικρός και εξάγεται μία τιμή για το κρίσιμο φορτίο λυγισμού. Στη δεύτερη περίπτωση ο υπολογιστικός χρόνος είναι μεγαλύτερος και το κρίσιμο φορτίο λυγισμού εξάγεται από επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

Η εφαρμογή της ανάλυσης ιδιοτιμών έχει σαν συνέπεια την επίλυση του προβλήματος κατ'αντιστοιχία με τις αναλυτικές προσεγγίσεις, ενώ παράλληλα, δεν απαιτεί τον καθορισμό πολλών παραμέτρων. Επομένως, εφόσον επιλεγεί αυτή η μέθοδος επίλυσης, καθορίζεται ο αριθμός των μορφών λυγισμού (buckling modes) που θα υπολογιστούν. Αντίθετα, στο πλαίσιο της μη γραμμικής ανάλυσης, εφαρμόζεται η θεωρία μεγάλων παραμορφώσεων, οπότε η προσέγγιση του προβλήματος γίνεται σε βήματα. Έτσι, η επιβαλλόμενη παραμόρφωση κατακερματίζεται σε τμήματα, καθένα από τα οποία επιβάλλεται στο μοντέλο ανά βήμα. Σε κάθε βήμα επιχειρείται η σύγκλιση των κριτηρίων που έχουν τεθεί, ενώ μετά την ολοκλήρωση αυτού, το μητρώο δυσκαμψίας της πλάκας προσαρμόζεται στη νέα παραμορφωσιακή κατάσταση, ώστε να χρησιμοποιηθεί στο επόμενο βήμα. Η

ακρίβεια της ανάλυσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον αριθμό των βημάτων και το μέγεθος τους, έτσι ορίζεται ένα ελάχιστο βήμα στην συγκεκριμένη περίπτωση ίσο με 0.001s και αυτό μεταβάλλεται από το ANSYS με τέτοιο τρόπο ώστε να έχουμε μείωση του υπολογιστικού χρόνου. Το μέγεθος του βήματος οριοθετείται με ένα μέγιστο και ένα ελάχιστο βήμα που είναι 0.005 και 0.0001 αντίστοιχα. Τα όρια αυτά πρέπει να τοποθετηθούν έχοντας υπόψη τον υπολογιστικό χρόνο αλλά και την ακρίβεια της ανάλυσης. Η εντολή που καθορίζει το μέγεθος του βήματος είναι η *deltim* (ANSYS - 2007).

Στο πλαίσιο της μη γραμμικής ανάλυσης μία άλλη παράμετρος που παίζει σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη και ανάλυση του προβλήματος είναι η αναγκαιότητα ύπαρξης μίας αρχικής γεωμετρικής ατέλειας του μοντέλου, ώστε να εκκινήσει το φαινόμενο του λυγισμού. Αυτή η ατέλεια μπορεί να εφαρμοστεί με τη μεταβολή της γεωμετρίας στην αρχή της μη γραμμικής ανάλυσης. Αυτή η ατέλεια δημιουργείται με τον εξής τρόπο. Πριν τη μη γραμμική ανάλυση, πραγματοποιείται εκείνη των ιδιοτιμών και εν συνεχεία, μέσω της εντολής *urgeom* (ANSYS - 2007) και βάσει της πρώτης κυματομορφής (*eigenmode*), σε συνδυασμό με ένα συντελεστή σμίκρυνσης, σχηματίζεται η επιθυμητή γεωμετρική ατέλεια. Η επιλογή της πρώτης κυματομορφής οφείλεται στο γεγονός ότι αποτελεί τη δυσμενέστερη περίπτωση λυγισμού, ενώ η μετατόπιση που θα καθορίσει τον συντελεστή σμίκρυνσης λαμβάνεται ίση με το ένα εκατοστό του πάχους της δοκού, ώστε να μη μεταβάλλεται σημαντικά η γεωμετρία του μοντέλου. Επιπλέον, όσον αφορά την επιβαλλόμενη φόρτιση για τη μη γραμμική ανάλυση, αυτή προκύπτει από την επιβαλλόμενη παραμόρφωση κατά την ανάλυση ιδιοτιμών ($ux=-1$), πολλαπλασιασμένη με την ιδιοτιμή λ_1 της παραπάνω κυματομορφής καθώς επίσης και με έναν κατάλληλο συντελεστή, ώστε η ανάλυση να ολοκληρωθεί μετά το σημείο λυγισμού. Επιπροσθέτως, στη μη γραμμική ανάλυση υπάρχει η παράμετρος των στοιχείων επαφής που πρέπει να ληφθεί υπόψη. Στο πλαίσιο της χρήσης των παραπάνω στοιχείων καθορίζονται ορισμένες παράμετροι σχετικά με τις συνθήκες επαφής που θα επιβληθούν στο μοντέλο. Έτσι, αρχικά καθορίζονται οι βαθμοί ελευθερίας των κόμβων των στοιχείων, ώστε αυτοί να αφορούν στις μετατοπίσεις στις διευθύνσεις των αξόνων του συστήματος συντεταγμένων των στοιχείων, κατ'αντιστοιχία με τους βαθμούς ελευθερίας των κόμβων των τρισδιάστατων στοιχείων. Επιπρόσθετα, μέσω κατάλληλης ρύθμισης, λαμβάνεται υπόψη η πιθανή αρχική διείσδυση μεταξύ των τμημάτων της δοκού, οφειλόμενη σε γεωμετρική ατέλεια. Παράλληλα, ορίζεται ένα κατώτερο και ένα ανώτερο όριο, εντός των οποίων η αρχική διείσδυση είναι αποδεκτή, οπότε αν αυτή βρίσκεται εκτός των ορίων, το ANSYS επιχειρεί να την ελαχιστοποιήσει πριν την έναρξη της ανάλυσης. Τα όρια αυτά είναι 10^{-11} mm και 10^{-4} mm αντίστοιχα.

2.4 Μεταεπεξεργασία

Μετά την ολοκλήρωση της κάθε ανάλυσης γίνεται επεξεργασία των αποτελεσμάτων που μας δίνονται. Στη γραμμική ανάλυση υπολογίζεται το κρίσιμο φορτίο λυγισμού πολλαπλασιάζοντας την πρώτη ιδιοτιμή λ_1 με την συνολική δύναμη αντίδρασης στην απέναντι πλευρά από αυτή που εφαρμόζεται η μετατόπιση. Η δύναμη αυτή υπολογίζεται με την εντολή `fsum` η οποία στην ουσία αθροίζει τη δύναμη που εφαρμόζεται σε κάθε κόμβο της παραπάνω πλευράς.

Στην περίπτωση της μη γραμμικής ανάλυσης το αποτέλεσμα της μεταεπεξεργασίας δεν είναι μία τιμή για το κρίσιμο φορτίο λυγισμού αλλά είναι ένα διάγραμμα στο οποίο παρουσιάζεται η σχέση δύναμης αντίδρασης με την μετατόπιση, για αυτό τον σκοπό επιλέγεται ένας κόμβος της πλευράς όπου εφαρμόζεται η μετατόπιση, για την εύρεση της αξονικής μετατόπισης της δοκού στη διεύθυνση του φορτίου (άξονας x). Επίσης επιλέγονται όλοι οι κόμβοι του μοντέλου που αντιστοιχούν στην κορυφή του ημικύματος, για την εύρεση της εκτός επιπέδου μετατόπισης για κάθε βήμα της ανάλυσης, τόσο για το κάτω όσο και για το πάνω υποπολύστρωτο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Σχεδιασμός πειραματικών δοκιμών

3.1 Εισαγωγή

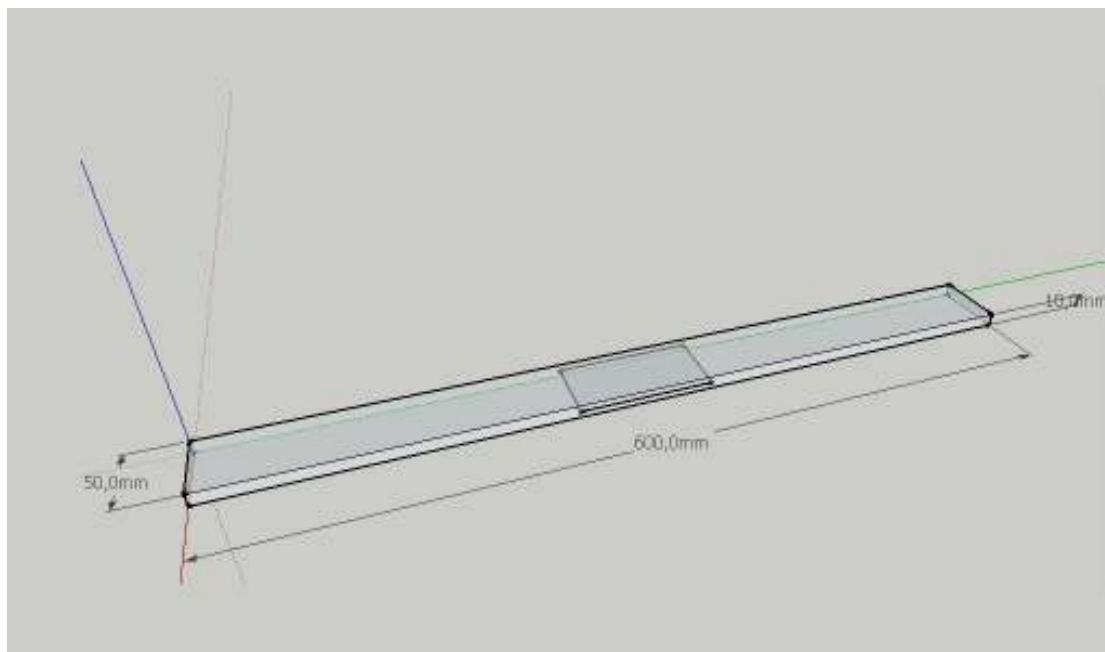
Πριν την κατασκευή των δοκιμών και την εκτέλεση των πειραματικών δοκιμών πρέπει να γίνει καθορισμός ορισμένων παραμέτρων. Αυτές οι παράμετροι αφορούν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δοκιμών, δηλαδή το μήκος, το πλάτος και το πάχος, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της αποκόλλησης δηλαδή το μήκος, το πλάτος και η θέση της κατά το πάχος και τέλος πρέπει να γίνει μία προμελέτη των πειραμάτων μέσω των πεπερασμένων στοιχείων για να γνωρίζουμε εκ των προτέρων το εύρος των φορτίων και την εν γένει συμπεριφορά του δοκιμίου κατά τη διάρκεια του πειράματος. Στις παρακάτω παραγράφους θα αναλυθεί κάθε παράμετρος ξεχωριστά και θα προσδιοριστούν οι τρόποι και οι λόγοι επιλογής των τελικών παραμέτρων.

3.2 Επιλογή γεωμετρικών χαρακτηριστικών των δοκιμών

Τα δοκίμια όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.1 είναι δοκοί συνολικού μήκους 600 mm ενεργού μήκους 500 mm, πλάτους 50 mm και πάχους 10 mm. Η πρώτη διάσταση του μήκους επιλέχθηκε με βάση το γεγονός ότι χρειαζόμασταν δοκίμια μεγάλου μεγέθους έτσι ώστε να μπορούμε να δημιουργήσουμε αντίστοιχα αποκόλληση μεγάλου μεγέθους, αντίστοιχου με αυτό που θα μπορούσε να εμφανιστεί σε μία ναυπηγική κατασκευή. Αυτό είναι σημαντικό επειδή τα αποτελέσματα θα μπορούν να είναι άμεσα εφαρμόσιμα χωρίς να χρειάζεται να γίνει κάποια αναγωγή με τη χρήση κλίμακας, πράγμα που θα είχε σαν αποτέλεσμα την αύξηση της πιθανότητας λάθους και απόκλισης από τα πραγματικά αποτελέσματα. Ένας δεύτερος παράγοντας για την επιλογή του συγκεκριμένου μήκους ήταν η διάσταση του καλουπιού που θα γινόταν η κατασκευή των δοκιμών. Ένας από τους στόχους ήταν να εξαχθούν όλα τα δοκίμια με αποκόλληση από την ίδια πλάκα, επειδή έτσι θα είχαμε όσο το δυνατόν παρόμοιες ιδιότητες σε όλα τα δοκίμια, όπως περιεκτικότητα σε ίνες και γεωμετρικές διαστάσεις αλλά και ευκολία στην κατασκευή από την άποψη του χρόνου και του χώρου. Έτσι το καλούπι, που στην προκειμένη περίπτωση ήταν ένα ορθογωνικό γυαλί περιόριζε το ολικό μήκος δοκιμίου στα 600 mm. Ένας τρίτος λόγος που επιλέγει σαν ενεργό μήκος τα 500 mm ήταν το γεγονός ότι το δοκίμιο θα ήταν δοκός, πράγμα που μας περιόριζε ως προς την αναλογία των διαστάσεων B/L που έπρεπε να είναι το πολύ 1/10.

Η δεύτερη διάσταση του πλάτους επιλέχθηκε με βάση καθαρά πρακτικούς λόγους. Ο πρώτος και πιο σημαντικός λόγος είναι το γεγονός ότι αυτό είναι το μέγιστο πλάτος που έχουν οι αρπάγες της μηχανής. Έτσι το πλάτος του δοκιμίου δεν θα μπορούσε να ξεπεράσει τα 50 mm. Ο δεύτερος λόγος είναι ότι το συγκεκριμένο πλάτος είναι πολύ συνηθισμένο σαν πλάτος δοκιμών στην βιβλιογραφία και ο τρίτος λόγος είναι για να διατηρηθούν οι απαραίτητες αναλογίες διαστάσεων για να θεωρείται το δοκίμιο δοκός. Τέλος το πάχος επιλέχθηκε ίσο με 10 mm γιατί αποτελεί τυπικό πάχος που μπορεί να συναντηθεί σε μία ναυπηγική κατασκευή και είναι

ανάλογο των υπόλοιπων διαστάσεων . Η διάσταση του πάχους ήταν σημαντική διότι έτσι καθορίστηκε και ο αριθμός των στρώσεων του πολύστρωτου όπως επίσης και για το γεγονός ότι η αποκόλληση επειδή θα βρισκόταν σε διαφορετικές θέσεις κατά το πάχος θα έπρεπε το πάχος να είναι ικανοποιητικό για μεγαλύτερη ευκολία στην κατασκευή και για να υπάρχει αισθητή διαφορά μεταξύ των υποπολύστρωτων που θα δημιουργούνταν στις δύο περιπτώσεις.



Σχήμα 3.1: Γεωμετρία δοκιμίων

3.3 Επιλογή γεωμετρικών χαρακτηριστικών αποκόλλησης (delamination)

Όπως προαναφέρθηκε, τα δοκίμια θα είχαν μία τεχνητή αποκόλληση που κάθε φορά θα άλλαζε ή το μήκος της ή η κατά το πάχος θέση της ή και τα δύο. Έτσι, όσον αφορά την αποκόλληση το ερώτημα αφορά δύο παραμέτρους, ο λόγος μήκους αποκόλλησης προς το ενεργό μήκος του δοκιμίου και η θέση της κατά το πάχος. Το πλάτος της αποκόλλησης είναι ίδιο με το πλάτος του δοκιμίου και κατά το μήκος είναι πάντα τοποθετημένη συμμετρικά ως προς το μέσο του δοκιμίου. Η αρχική επιλογή του λόγου μήκους αποκόλλησης προς μήκος δοκιμίου έγινε με βάση τους λόγους που είχαν χρησιμοποιηθεί σε παρόμοια πειράματα στην βιβλιογραφία. Δηλαδή αρχικά το μήκος της αποκόλλησης επιλέχτηκε να είναι 50mm, 100mm, 200mm και 300mm. Επίσης η θέση της αποκόλλησης κατά το πάχος επιλέχτηκε στο μισό και στα $\frac{3}{4}$ αυτού.

Με βάση αυτές τις παραδοχές έγινε η αρχική μοντελοποίηση των πειραμάτων και τα τρεξίματα με πεπερασμένα στοιχεία. Αρχικά έγινε ανάλυση ιδιοτιμών για την εύρεση του κρίσιμου φορτίου λυγισμού στην κάθε περίπτωση. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 3.1.

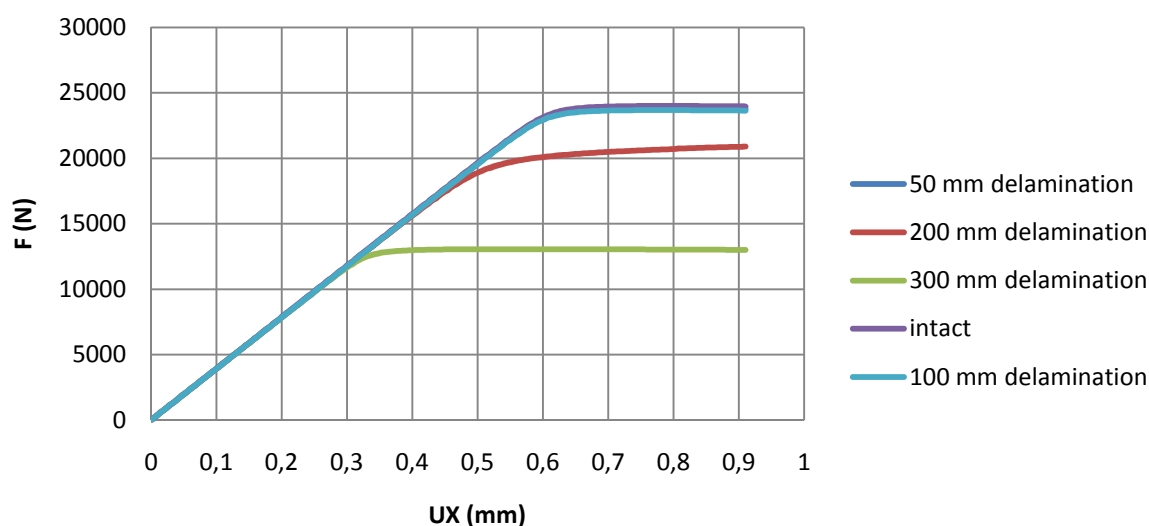
Πίνακας 3.1: Κρίσιμο φορτίο λυγισμού δοκιμίου με βάση την ανάλυση ιδιοτιμών και με ονομαστικές διαστάσεις.

a/L ¹	P _{crit} (N)		Δ%(0.5t) ³	Δ%(0.75t) ⁴	Δ%(0.5t-0.75t) ⁵
	0.5t ²	0.75t ²			
intact	24324	24324	-	-	-
0.1	24113	24110	0.87%	0.88%	0.01%
0.2	24000	23712	1.33%	2.52%	1.20%
0.4	20430	9013	16.01%	62.95%	55.88%
0.6	13250	4165	45.53%	82.88%	68.57%

- 1: Λόγος μήκους αποκόλλησης προς ενεργό μήκος δοκιμίου
- 2: Θέση αποκόλλησης κατά το πάχος του δοκιμίου
- 3: Ποσοστιαία διαφορά κρίσιμου φορτίου λυγισμού αυξανόμενου του μήκους και σταθερής θέσης της αποκόλλησης στο ήμισι του πάχους.
- 4: Ποσοστιαία διαφορά κρίσιμου φορτίου λυγισμού αυξανόμενου του μήκους και σταθερής θέσης της αποκόλλησης στα 3/4 του πάχους
- 5: Ποσοστιαία διαφορά κρίσιμου φορτίου λυγισμού μεταξύ ίδιων περιπτώσεων όπου η αποκόλληση βρίσκεται σε διαφορετική θέση κατά το πάχος

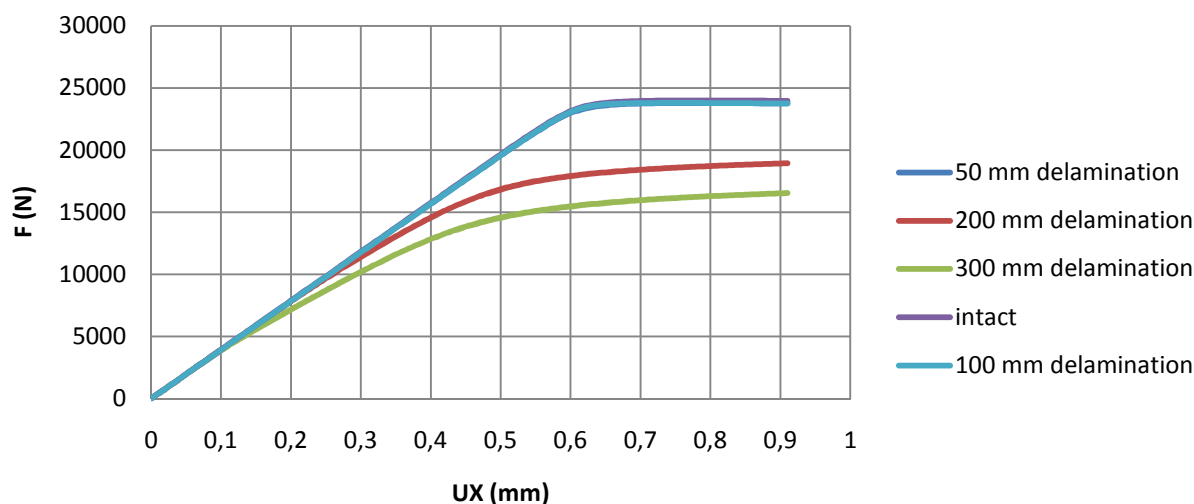
Επίσης μετά την ανάλυση ιδιοτιμών έγιναν και μη γραμμικές αναλύσεις για την εξαγωγή των διαγραμμάτων δύναμης-μετατόπισης για κάθε περίπτωση όπως φαίνεται παρακάτω (Σχήμα 3.2, 3.3). Με βάση αυτά τα διαγράμματα έγινε και η τελική επιλογή του μήκους αποκόλλησης αλλά και του αριθμού των δοκιμίων.

F-UX @ 0.5t



Σχήμα 3.2: Διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης όταν η αποκόλληση βρίσκεται στο μισό του πάχους

F-UX @ 0.75t



Σχήμα 3.3: Διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης όταν η αποκόλληση βρίσκεται στα $\frac{3}{4}$ του πάχους

Όπως βλέπουμε από τα διαγράμματα και τον πίνακα υπάρχει και η περίπτωση αναφοράς της άθικτης δοκού. Φαίνεται ότι η περίπτωση αποκόλλησης των 50 mm δεν έχει ιδιαίτερη επίπτωση και έχει σχεδόν ίδια αποτελέσματα με αυτή των 100 mm όποτε μέσα από αυτά τα αποτελέσματα καταλήξαμε στα τελικά μήκη αποκόλλησης των πειραμάτων. Αυτά ήταν 100, 200, 300 mm. Τα κριτήρια για αυτήν την επιλογή δεν ήταν μόνο το κρίσιμο φορτίο λυγισμού αλλά και η συμπεριφορά του δοκιμίου κατά τον λυγισμό όπως, θα αναλυθεί παρακάτω.

3.4 Προμελέτη των πειραμάτων και συμπεριφοράς των δοκιμίων κατά το πείραμα του λυγισμού με τη βοήθεια του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων.

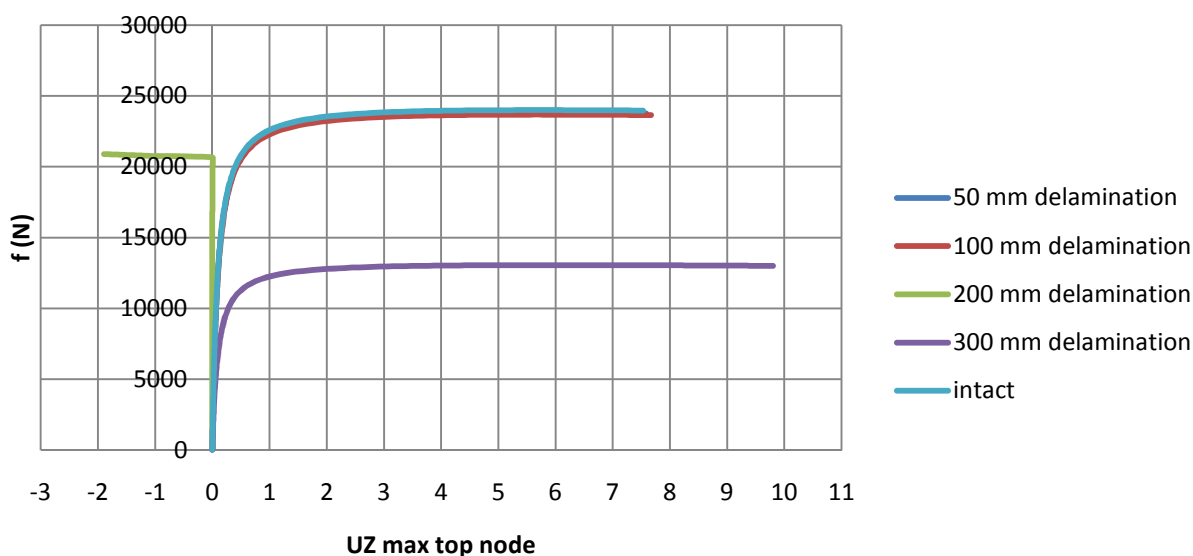
Πριν τη διεξαγωγή των πειραμάτων έγιναν αναλύσεις με το ήδη κατασκευασμένο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για όλες τις πιθανές πειραματικές περιπτώσεις, δηλαδή για όλα τα μήκη και θέσεις κατά το πάχος της αποκόλλησης. Οι αναλύσεις αυτές βοήθησαν στην καλύτερη προετοιμασία των πειραμάτων και στην πιο αποδοτική διεξαγωγή τους όπως θα εξηγηθεί παρακάτω.

Στις αναλύσεις αυτές εκτός από διαγράμματα δύναμης-αξονικής μετατόπισης έγινε και ανάλυση διαγραμμάτων δύναμης-εγκάρσιας μετατόπισης και παραμόρφωσης-αξονικής μετατόπισης. Με την βοήθεια αυτών των διαγραμμάτων αλλά και με την οπτική εικόνα του μοντέλου κατά τη διάρκεια της ανάλυσης μπορούμε να εξάγουμε πολλά συμπεράσματα για τον τρόπο λυγισμού της κάθε περίπτωσης, για τις μέγιστες δυνατές αξονικές και εγκάρσιες μετατοπίσεις που θα συναντηθούν όπως επίσης και για τα μέγιστα φορτία που θα χρειαστεί να εφαρμοστούν.

Όπως έχει προαναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων αποτελείται από πεπερασμένα στοιχεία τα οποία το καθένα έχει συγκεκριμένο αριθμό κόμβων ανάλογα με το πώς είναι ορισμένα. Στην προκειμένη περίπτωση έχουμε οκτάκομβα στοιχεία. Έτσι τα διαγράμματα που θα παρουσιαστούν

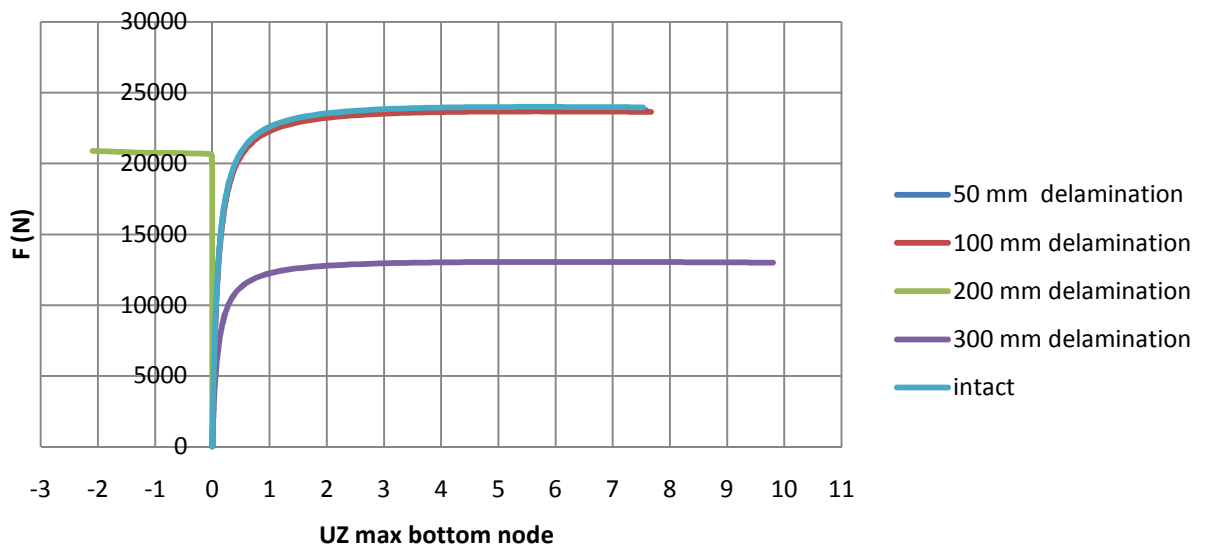
παρακάτω αφορούν τα αποτελέσματα της ανάλυσης για κάποιους συγκεκριμένους κόμβους. Έτσι κάθε φυσικό μέγεθος μετράται σε συγκεκριμένους κόμβους. Το πρώτο από αυτά είναι η δύναμη. Η δύναμη ορίζεται ως η δύναμη αντίδρασης στους κόμβους του μοντέλου που δεν μετατοπίζονται αξονικά, αλλά είναι περιορισμένοι σε όλους τους βαθμούς ελευθερίας. Το άθροισμα αυτή της δύναμης για κάθε κόμβο μας δίνει τη συνολική αξονική δύναμη. Η αξονική μετατόπιση υπολογίζεται από οποιονδήποτε κόμβο στην πλευρά που δέχεται την αξονική μετατόπιση. Η εγκάρσια μετατόπιση λαμβάνεται από δύο κόμβους και αποθηκεύεται σε δύο μεταβλητές. Έτσι για κάθε περίπτωση έχουμε δύο διαγράμματα που περιέχουν εγκάρσια μετατόπιση, το ένα αναφέρεται στον κόμβο που βρίσκεται στην πλευρά του δοκιμίου που εφελκύεται και συγκεκριμένα στο μέσο αυτής της πλευράς και κατά τον άξονα x και κατά τον άξονα y και το άλλο αναφέρεται στο ακριβώς συμμετρικό σημείο του πρώτου στην απέναντι πλευρά. Στους άξονες των διαγραμμάτων αναφερόμαστε στους κόμβους σαν top node και bottom node, ο πρώτος αφορά τον κόμβο που βρίσκεται στην πλευρά που στην περίπτωση της αποκόλλησης στα $\frac{3}{4}$ του πάχους είναι πιο κοντά στην αποκόλληση και ο δεύτερος για τον άλλο. Η αξονική παραμόρφωση λαμβάνεται και αυτή από δύο κόμβους τους ίδιους ακριβώς με αυτούς που λαμβάνεται η εγκάρσια μετατόπιση. Στην συνέχεια παρουσιάζονται αυτά τα διαγράμματα που αφορούν την προμελέτη των πειραμάτων και θα σχολιαστούν για κάθε περίπτωση. Ένα σημαντικό στοιχείο σε αυτή την μελέτη μέσω των πεπερασμένων στοιχείων είναι το γεγονός ότι μπορούμε να έχουμε εικόνα όχι μόνο για την κατάληξη του πειράματος αλλά και εικόνα της συμπεριφοράς του δοκιμίου καθ'όλη τη διάρκεια της δοκιμής.

F-UZ @ 0.5t



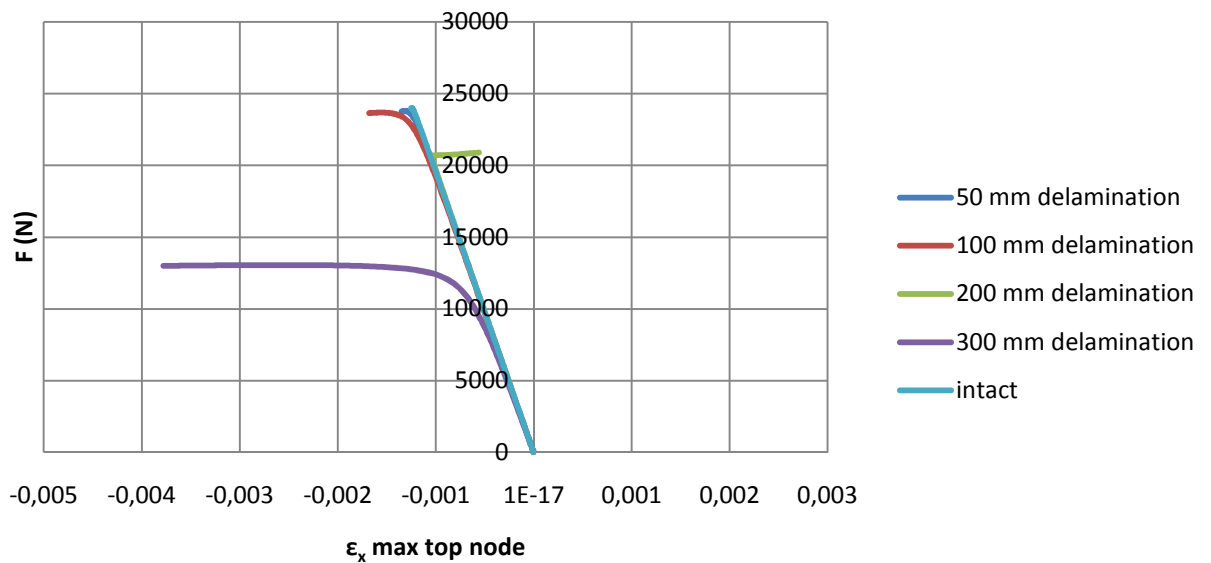
Σχήμα 3.4: Διάγραμμα δύναμης-εγκάρσιας μετατόπισης όταν η αποκόλληση βρίσκεται στο μισό του πάχους

F-UZ @ 0.5t

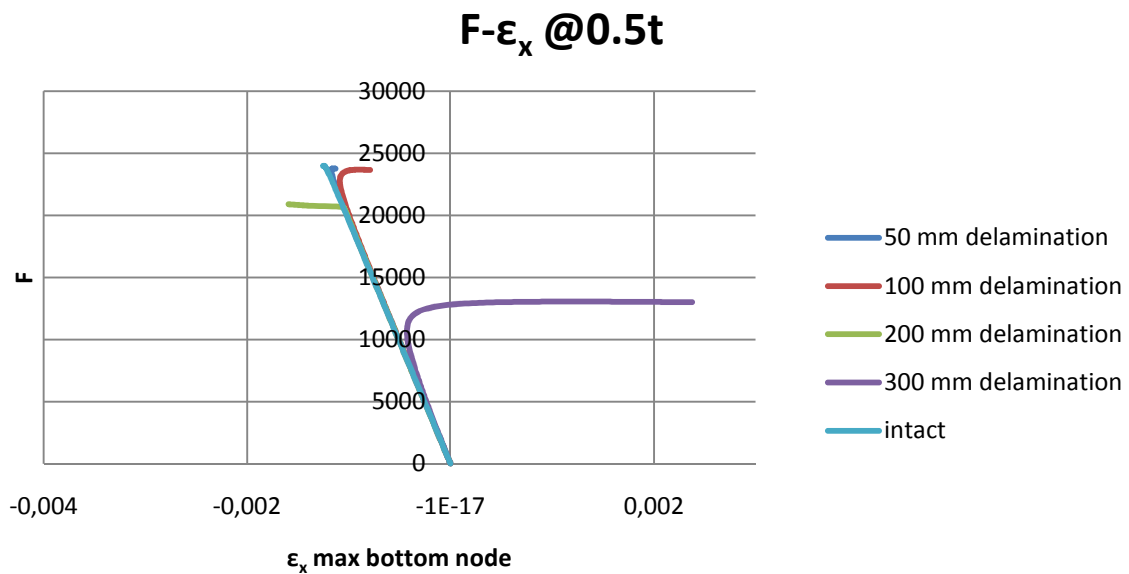


Σχήμα 3.5: Διάγραμμα δύναμης-εγκάρσιας μετατόπισης όταν η αποκόλληση βρίσκεται στο μισό του πάχους

F-ε_x @0.5t

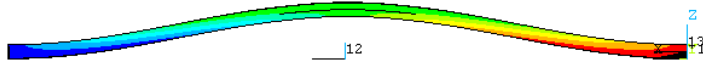


Σχήμα 3.6: Διάγραμμα αξονικής παραμόρφωσης-αξονικής μετατόπισης όταν η αποκόλληση βρίσκεται στο μισό του πάχους



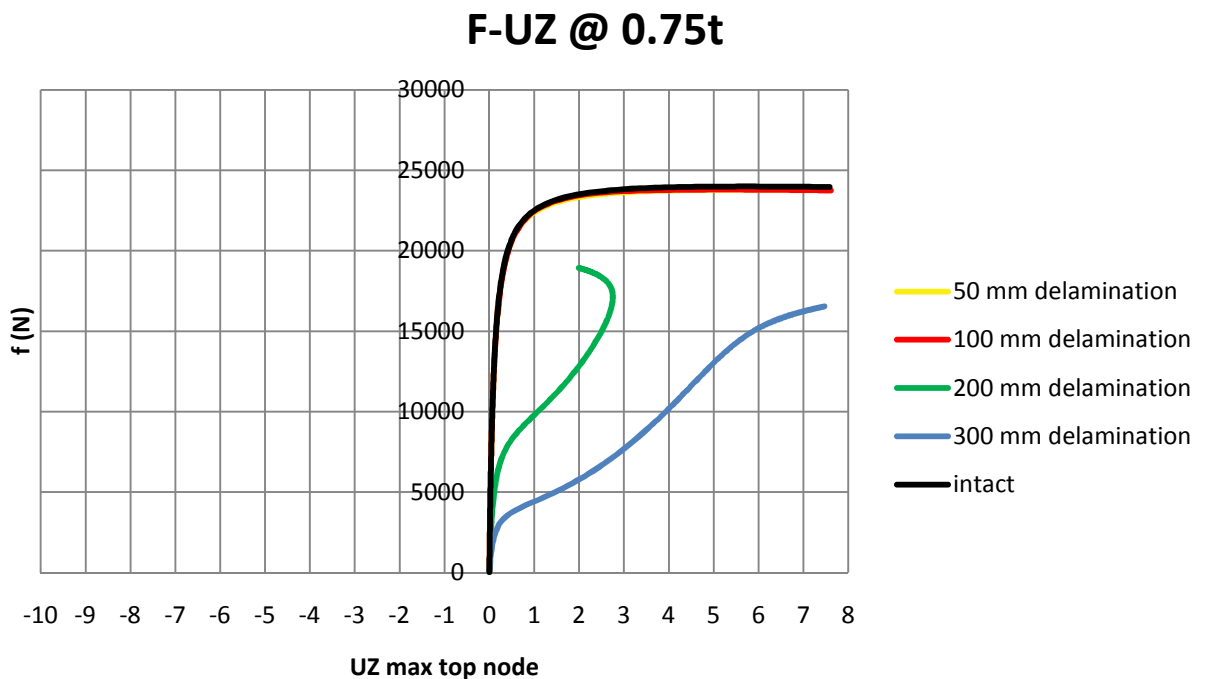
Σχήμα 3.7: Διάγραμμα αξονικής παραμόρφωσης-αξονικής μετατόπισης όταν η αποκόλληση βρίσκεται στο μισό του πάχους

Στα διαγράμματα 3.4 και 3.5 παρουσιάζεται η σχέση μεταξύ δύναμης και εγκάρσιας μετατόπισης στους αντίστοιχους κόμβους για την περίπτωση όπου η αποκόλληση βρίσκεται στο μέσο του πάχους. Στα διαγράμματα 3.6 και 3.7 παρουσιάζεται η σχέση αξονικής παραμόρφωσης και αξονικής μετατόπισης. Αυτό που μπορούμε να παρατηρήσουμε είναι το γεγονός ότι σε όλες τις περιπτώσεις η εγκάρσια μετατόπιση είναι προς την ίδια κατεύθυνση επειδή έχει το ίδιο πρόσημο όπως επίσης και η παραμόρφωση στον ένα κόμβο είναι εφελκυστική ενώ στον άλλο θλιπτική. Τα συμπεράσματα από αυτά τα στοιχεία όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.8 είναι ότι το δοκίμιο λύγισε προς την μία πλευρά και η αποκόλληση δεν το έκανε να ανοίξει στην μέση δηλαδή τα δύο κομμάτια να αποκτήσουν ετερόσημη εγκάρσια μετατόπιση. Εάν είχε γίνει αυτό εκτός από την αντίθετης κατεύθυνσης εγκάρσια μετατόπιση θα είχαμε και εφελκυστική παραμόρφωση και στους δύο κόμβους. Ένα άλλο συμπέρασμα που μπορούμε να εξάγουμε είναι το γεγονός ότι το κρίσιμο φορτίο λυγισμού μειώνεται όσο αυξάνεται το μήκος της αποκόλλησης. Στις περιπτώσεις των 50 και 100 mm δηλαδή στους λόγους μήκους αποκόλλησης προς μήκους δοκιμίου 0.1 και 0.2 η διαφορά είναι σχεδόν ασήμαντη, αλλά από 0.4 και άνω γίνεται αισθητή όπως φαίνεται και στα διαγράμματα.

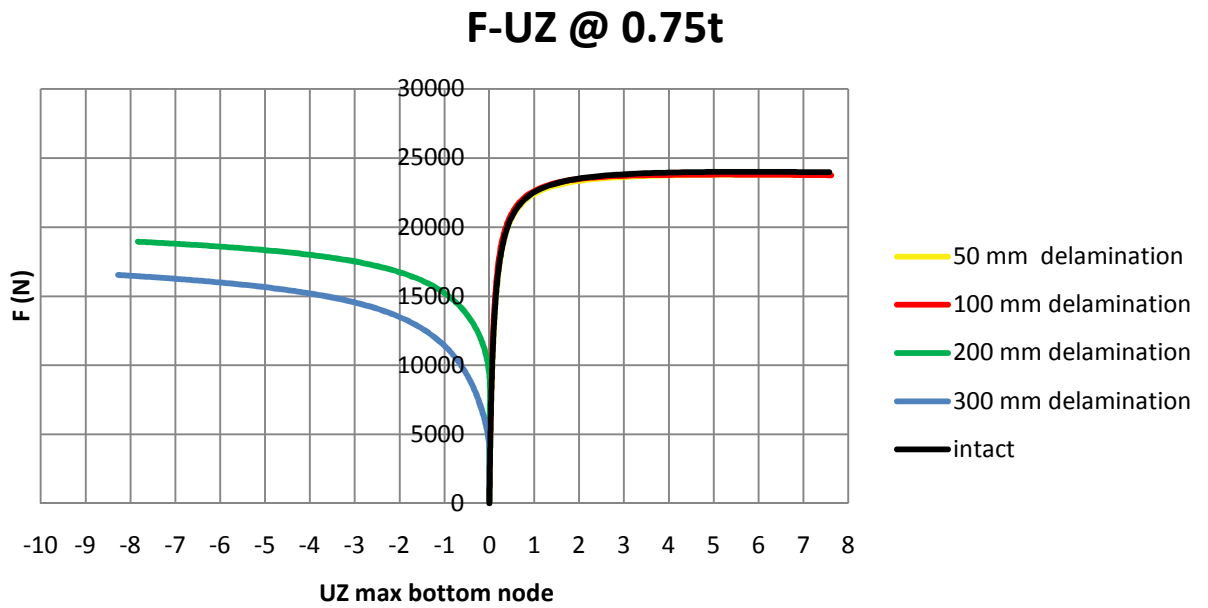


Σχήμα 3.8: Μορφή δοκιμίου μετά το πέρας της ανάλυσης όπου η αποκόλληση βρίσκεται στο 0,5t.

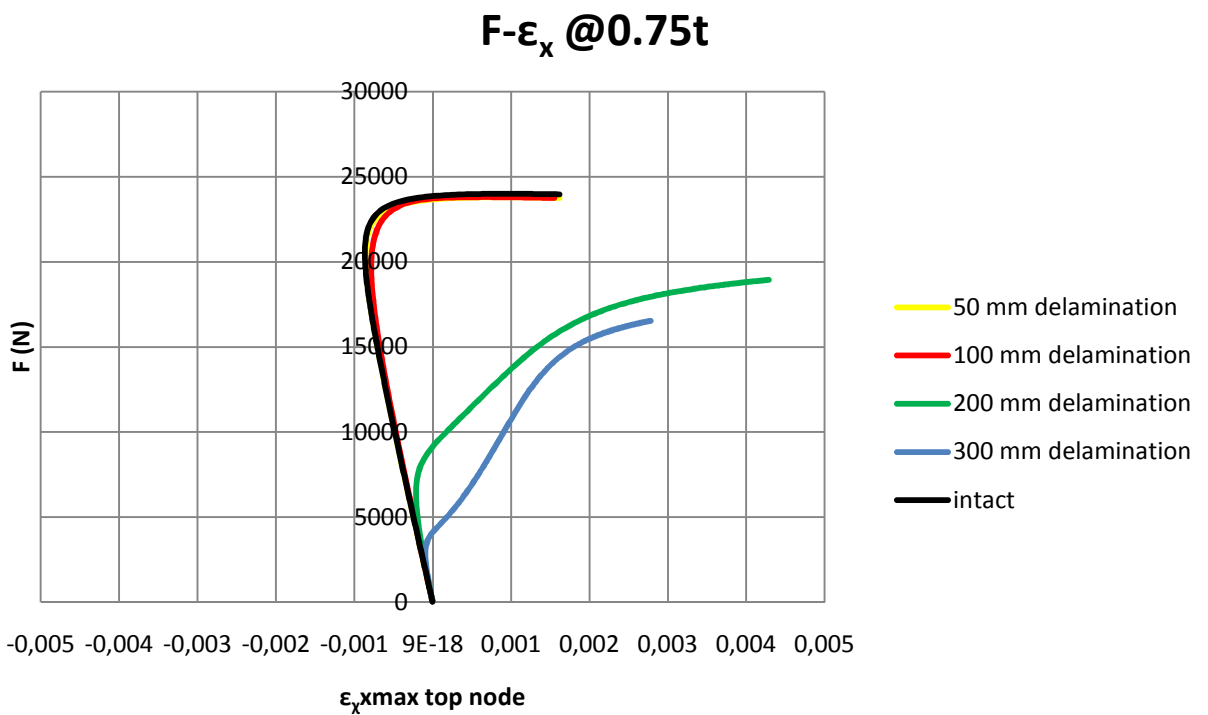
Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα για την περίπτωση όπου η αποκόλληση βρίσκεται στα $\frac{3}{4}$ του πάχους.



Σχήμα 3.9: Διάγραμμα δύναμης-εγκάρσιας μετατόπισης όταν η αποκόλληση βρίσκεται στα $\frac{3}{4}$ του πάχους

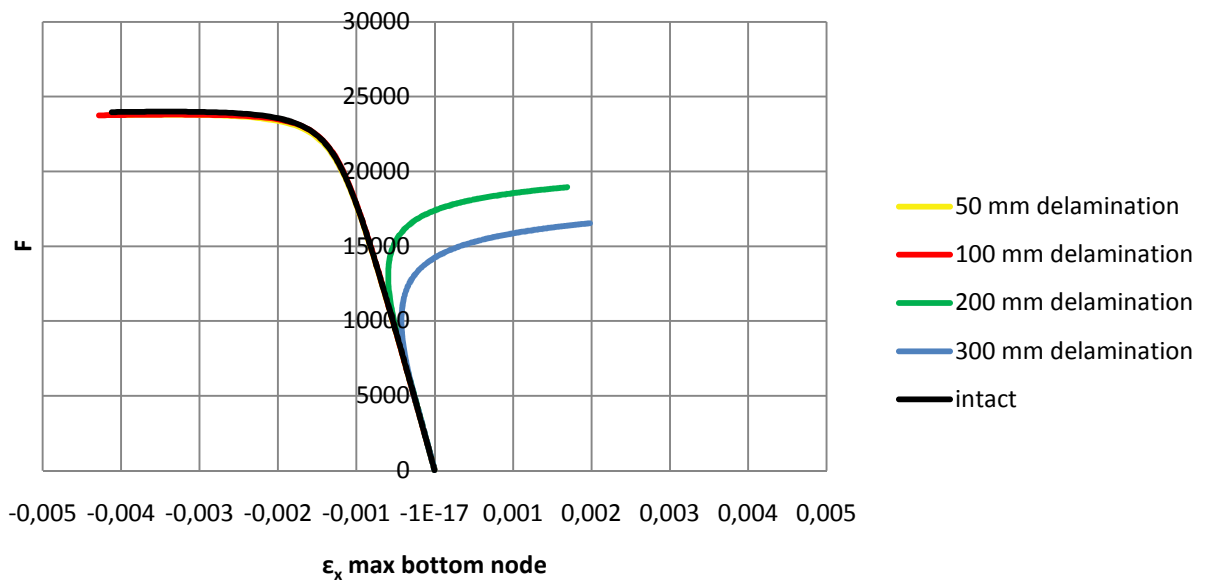


Σχήμα 3.10: Διάγραμμα δύναμης-εγκάρσιας μετατόπισης όταν η αποκόλληση βρίσκεται στα $\frac{3}{4}$ του πάχους



Σχήμα 3.11: Διάγραμμα δύναμης-παραμόρφωσης όταν η αποκόλληση βρίσκεται στα $\frac{3}{4}$ του πάχους

F- ϵ_x @0.75t



Σχήμα 3.12: Διάγραμμα δύναμης-παραμόρφωσης όταν η αποκόλληση βρίσκεται στα $\frac{3}{4}$ του πάχους

Στα παραπάνω διαγράμματα διακρίνουμε μία διακύμανση στην συμπεριφορά των δοκιμίων για αυτό τον λόγο θα αναλύσουμε κάθε δοκίμιο ξεχωριστά. Αρχικά το μοντέλο που δεν έχει καμία αποκόλληση συμπεριφέρεται όπως αναμένεται, δηλαδή έχουμε ένα ομαλό φαινόμενο λυγισμού όπου το μοντέλο μετά από ένα κρίσιμο φορτίο λυγίζει και ο ρυθμός αύξησης της εγκάρσιας μετατόπισης γίνεται πολύ μεγαλύτερος. Επίσης έχουμε τον εφελκόμενο και το θλιβόμενο κόμβο, με αποτέλεσμα στα διαγράμματα δύναμης-παραμόρφωσης να έχουμε καμπύλες που αρχικά έχουν αρνητικές τιμές λόγω του φαινομένου της θλίψης και μετά από ένα κρίσιμο φορτίο η μία αποκτά θετικές τιμές λόγω του εφελκυσμού και η άλλη αρνητικές λόγω της θλίψης.

Το μοντέλο με την μικρότερη αποκόλληση και αυτό με την αμέσως μεγαλύτερη, δηλαδή 50 και 100mm αντίστοιχα έχουν παρόμοια συμπεριφορά με αυτό που δεν έχει καμία αποκόλληση, δηλαδή ακολουθούν την ίδια μορφή καμπυλών. Ακόμα και το κρίσιμο φορτίο λυγισμού όπως φαίνεται από τα διαγράμματα είναι παρόμοιο, οπότε η παρατήρηση από τις προηγούμενες περιπτώσεις που η αποκόλληση ήταν στο μισό του πάχους, ότι λόγοι μήκους αποκόλλησης προς ολικό μήκος μέχρι 0.2 δεν έχουν ιδιαίτερη επίδραση στο μοντέλο, επαληθεύεται και σε αυτές τις περιπτώσεις.

Το μοντέλο με την αποκόλληση μήκους 200 mm παρουσιάζει διαφορετική συμπεριφορά από τα προηγούμενα. Παρατηρώντας αρχικά το διάγραμμα δύναμης-εγκάρσιας μετατόπισης του κόμβου που βρίσκεται κοντά στην αποκόλληση παρατηρούμε ότι ενώ αρχικά έχουμε αύξηση της μετατόπισης, από ένα σημείο και μετά έχουμε τάση επαναφοράς του μοντέλου προς το αρχικό διάμηκες επίπεδο. Αυτό δείχνει ότι από ένα φορτίο περίπου στα 10 kN και μετά το μεγαλύτερο σε πάχος υποπολύστρωτο παρασύρει το άλλο προς την αντίθετη κατεύθυνση.

Στο διάγραμμα 3.10 που φαίνεται ο τρόπος λυγισμού του μεγαλύτερου σε πάχος υποπολύστρωτου διακρίνουμε ότι έχουμε πολύ μεγαλύτερη εγκάρσια μετατόπιση προς την αντίθετη πλευρά από αυτά του άλλου υποπολύστρωτου (διάγραμμα 3.9). Αυτός ο τρόπος λυγισμού φαίνεται και στα διαγράμματα δύναμης-παραμόρφωσης όπου και στις δύο περιπτώσεις έχουμε θετικές τιμές παραμόρφωσης οπότε συμπεραίνουμε ότι έχουμε εφελκυσμό και στους δύο κόμβους.

Τέλος το μοντέλο με την αποκόλληση μήκους 300 mm παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά με το προηγούμενο αλλά σε αυτή την περίπτωση δεν παρατηρούμε τάση επαναφοράς του λεπτού υποπολύστρωτου προς το αρχικό διάμηκες επίπεδο.

3.4 Συμπεράσματα και παρατηρήσεις για τη σχεδίαση των πειραματικών δοκιμών

Μετά από τις παραπάνω αναλύσεις με πεπερασμένα στοιχεία αλλά και λαμβάνοντας υπόψη τους τους τυχόν περιορισμούς, εξήχθησαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Τα δοκίμια των πειραματικών δοκιμών θα είναι ορθογωνικές δοκοί με ενεργό μήκος τα 500 mm, πλάτος 50 mm και πάχος 10 mm.
- Η επίδραση της αποκόλλησης θα μελετηθεί με βάση δύο παραμέτρους, την θέση της κατά το πάχος και τον λόγο του μήκους της προς το ενεργό μήκος.
- Στην πρώτη παράμετρο οι δύο περιπτώσεις που θα μελετηθούν θα είναι όταν η αποκόλληση βρίσκεται στο μισό του πάχους και στα $\frac{3}{4}$ του πάχους
- Στην δεύτερη παράμετρο θα γίνουν πειράματα για τέσσερις συνολικά περιπτώσεις, αυτές θα είναι για λόγους 0.2, 0.4, 0.6 και για την περίπτωση άθικτης δοκού. Αναλυτικότερα τα εξεταζόμενα μήκη αποκόλλησης θα είναι 100, 200 και 300 mm. Τα μήκη αυτά ελέγχθησαν με βάση τις αναλύσεις των πεπερασμένων στοιχείων που έδειξαν αμελητέα διαφορά στα αποτελέσματα μεταξύ των περιπτώσεων της άθικτης δοκού και της δοκού με αποκόλληση 50mm.
- Τα μεγέθη που θα μετρηθούν στις δοκιμές θα είναι το επιβαλλόμενο φορτίο, η αξονική μετατόπιση, η εγκάρσια μετατόπιση και η αξονική παραμόρφωση.
- Στην περίπτωση της εγκάρσιας μετατόπισης, αυτή θα μετρηθεί και στις δύο πλευρές του δοκιμίου και σε σημείο που θα βρίσκεται στο κέντρο της κάθε επιφάνειας.
- Στην περίπτωση της μέτρησης της παραμόρφωσης αυτή θα μετρηθεί επίσης και από τις δύο πλευρές ακριβώς στα ίδια σημεία
- Στα δοκίμια που έχουν την αποκόλληση στο μέσο του πάχους αναμένουμε λυγισμό με τα δύο υποπολύστρωτα να λυγίζουν προς την ίδια κατεύθυνση ενώ σε αυτά που έχουν την αποκόλληση στα $\frac{3}{4}$ του πάχους περιμένουμε τα υποπολύστρωτα να λυγίσουν προς αντίθετες κατευθύνσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Πειραματικές δοκιμές

4.1 Εισαγωγή

Στο τέταρτο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα γίνει εκτενής αναφορά και περιγραφή των πειραματικών δοκιμών. Στο πλαίσιο αυτής της περιγραφής θα αναλυθούν τα βασικά βήματα που ακολουθήθηκαν για την εκτέλεση των πειραματικών δοκιμών όπως επίσης και οι βασικές παράμετροι που εξετάστηκαν. Αρχικά θα γίνει μία αναφορά στα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν. Στη συνέχεια θα περιγραφούν η μέθοδος κατασκευής των δοκιμών και όλες οι παράμετροι που εξετάστηκαν για να γίνει αυτό, ο τρόπος προετοιμασίας των πειραμάτων, οι συνθήκες κάτω από τις οποίες διεξήχθησαν τα πειράματα και τέλος θα γίνει παράθεση των αποτελεσμάτων και σχολιασμός τους.

4.2 Υλικά

Αρχικά θα γίνει μία πλήρης περιγραφή των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των δοκιμών όπως επίσης και παράθεση των ιδιοτήτων τους. Τα υλικά και οι ιδιότητες τους, όπως δίνονται από τον κατασκευαστή, που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του σύνθετου υλικού είναι τα εξής:

1. Ρητίνη : D.E.R. 353 Liquid Epoxy Resin της εταιρείας DOW.

CURED PHYSICAL PROPERTIES

Typical Starting Point Formulation	Parts By Weight
D.E.R. 353 Liquid Epoxy Resin	195
Polyamide (I.e. Ancamide 350A ex.Air Products	95
Tensile Strength (MPa)	44.8
Tensile Modulus (GPa)	2.03
Elongation @ Break (%)	6.1
Flexural Strength (MPa)	65
Flexural Modulus (GPa)	1.98

2. Σκλήρυντής : EPAMINE PC13 της εταιρείας PO.INT.ER S.r.l.

CHEMICAL - PHYSICAL PROPERTIES

Appearance	Clear
Active content	100%
Colour Gardner	2 max
Brookfield Viscosity (mPa.s a 25°C)	70-140
Amine value	325-345 mg KOH/g
Average Hydrogen equivalent	95
PHR in combination with liquid epoxy resin (EE 190)	50
Pot life 150 g at 25°C with liquid epoxy resin (EE 190)	50'
TMF	10°C

CURING PROPERTIES

Take free time low thickness	5h1/2 : 6h1/2
Take free time high thickness	3h1/2 : 4h

3. Ίνες : UNIE600 Glass της εταιρείας OWENS CORNING.

TECHNICAL SPECIFICATION

Product	Legend		Fiber	Weight of layers				Sticing	Total weight
	E	Glass		0°	90°	45°	-45°		
UNIE600	E	Glass	E	600	-	-	-	gr/m ²	gr/m ²
								4	604

TYPICAL PROPERTIES FOR THE GLASS FIBER TYPES

Material	Density, bulk annealed, g/cm ²	Tensile Strength (Mpa)				Young Modulus of Elasticity (GPa)	Elongation (%)
		At 190 °C	At 23 °C	At 371 °C	At 538 °C		
E-glass	2.62	5310	3445	2620	1725	At 538 °C	4.88
						813	

Για την κατασκευή των δοκιμών εκτός των συστατικών του σύνθετου υλικού χρησιμοποιήθηκε και film Teflon για την κατασκευή της τεχνητής αποκόλλησης των στρώσεων. Το film αυτό είχε ονομαστική τιμή πάχους 80 μm αλλά στο εργαστήριο μετρήθηκε πάχος 60 +/- 5 μm.

Οι λόγοι επιλογής αυτών των υλικών είναι οι ακόλουθοι:

- απαντώνται ευρέως σε ναυπηγικές εφαρμογές
- έχουν χαμηλό κόστος
- η παρασκευή-προετοιμασία τους είναι σχετικά απλή
- ήταν άμεσα διαθέσιμα στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών
- έχουν μελετηθεί και χρησιμοποιηθεί από το προσωπικό του εργαστηρίου σε ποικίλες εφαρμογές

4.3 Κατασκευή δοκιμών

Πριν την κατασκευή των δοκιμών έγινε αρχικά μία μελέτη για τα επιθυμητά χαρακτηριστικά των δοκιμών όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Έτσι ο στόχος ήταν να κατασκευαστούν ορθογωνικά δοκίμια από σύνθετο υλικό ενισχυμένο με ίνες γυαλιού με διαστάσεις 500x50x10 mm. Επίσης αυτά τα δοκίμια θα πρέπει να περιέχουν μία τεχνητή αποκόλληση των στρώσεων η οποία θα είναι τοποθετημένη συμμετρικά ως προς το μέσο των δοκιμών και θα μεταβάλλεται ως προς δύο παραμέτρους. Αυτές οι παράμετροι είναι το μήκος της αποκόλλησης και η θέση της κατά το πάχος του δοκιμίου.

Έτσι για την επίτευξη του επιθυμητού αποτελέσματος η κατασκευή των δοκιμών χωρίζεται σε τρεις φάσεις. Η πρώτη φάση είναι η προετοιμασία, η δεύτερη φάση είναι η κατασκευή της πλάκας του σύνθετου υλικού από την οποία θα προκύψουν τα δοκίμια και η τρίτη είναι η κοπή των δοκιμών και η τελική τους μορφοποίηση.

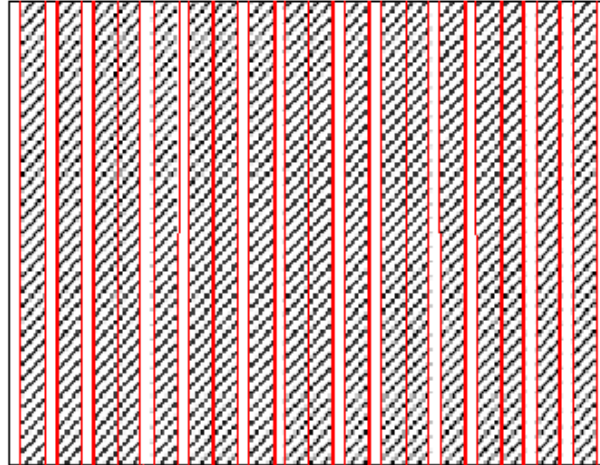
4.3.1 Προετοιμασία πλάκας

4.3.1.1 Προετοιμασία στρώσεων υαλοϋφάσματος

Το πρώτο στάδιο της κατασκευής των δοκιμίων περιλαμβάνει τον υπολογισμό των στρώσεων που θα χρειαστούν και την κατάλληλη κοπή και επεξεργασία των ενισχυτικών ινών για τη δημιουργία του σύνθετου υλικού με τις επιθυμητές ιδιότητες. Ο υπολογισμός του αριθμού των στρώσεων που θα χρειάζοντουσαν καθορίστηκε από το επιθυμητό τελικό πάχος του δοκιμίου που ήταν τα 10 mm. Έτσι με βάση δεδομένα από προηγούμενη διπλωματική εργασία (Καραντζας-2009) είχε υπολογιστεί ότι στο Εργαστήριο Σύνθετων υλικών με τη μέθοδο της επίστρωσης με το χέρι επιτυγχάνεται περιεκτικότητα ινών κατά μέσο όρο 53% και με βάση το πάχος δοκιμίων ίδιου υλικού από παλαιότερα πειράματα υπολογίστηκε μία μέση τιμή πάχους στρώσης ίση με $t_i=0.65\text{mm}$. Άρα για την επίτευξη του επιθυμητού πάχους θα χρειαζόμασταν 15 με 16 στρώσεις. Τελικά έγινε επιλογή 16 στρώσεων για τον λόγο ότι στις 15 στρώσεις δεν θα μπορούσαμε να τοποθετήσουμε την τεχνητή αποκόλληση ακριβώς στο 50% του πάχους πράγμα που γίνεται με τις 16 στρώσεις. Οπότε αρχικά το υπολογιζόμενο πάχος ήταν 10.4 mm.

Το επόμενο βήμα στην διαδικασία ήταν ο υπολογισμός των διαστάσεων κάθε στρώσης ενίσχυσης, δηλαδή των διαστάσεων της πλάκας του πολύστρωτου. Το επιθυμητό ήταν να κατασκευαστούν όλα τα δοκίμια από την ίδια πλάκα αλλά αυτό δεν ήταν δυνατό γιατί οι διαστάσεις του καλουπιού ήταν μικρότερες από τις επιθυμητές. Έτσι τα δοκίμια κατασκευάστηκαν από δύο πλάκες, η μία για όλα τα δοκίμια με αποκόλληση των στρώσεων και η άλλη για τα δοκίμια χωρίς αποκόλληση. Έτσι από τη μία πλάκα θα έχουμε 18 δοκίμια και από την άλλη 3 διότι για κάθε περίπτωση μήκους αποκόλλησης και θέσεως κατά το πάχος κατασκευάστηκαν 3 δοκίμια για λόγους επαναληψιμότητας. Οπότε η μία πλάκα με τα 18 δοκίμια θα έχει διαστάσεις 900x1250 mm. Η πρώτη διάσταση (900mm) είναι η διάσταση που θα είναι παράλληλα στις ενισχυτικές ίνες και άρα θα αποτελεί και την διάσταση από την οποία θα προκύψει και το τελικό μήκος των δοκιμίων επειδή θέλουμε η φόρτιση τους να είναι παράλληλη με την διεύθυνση των ινών. Το τελικό μήκος των δοκιμίων, θα είναι τα 600 mm έτσι ώστε να επιτευχθεί ενεργό μήκος ίσο με 500mm διότι η περιοχή εφαρμογής των αρπάγων της μηχανής έχει μήκος 50mm σε κάθε πλευρά. Τα υπόλοιπα 300 mm δηλαδή 150 mm σε κάθε πλευρά είναι μία απόσταση ασφαλείας τόσο για την ευθυγράμμιση των δοκιμίων ως προς την αποκόλληση όπως θα εξηγηθεί αργότερα αλλά και ένας δεύτερος λόγος ύπαρξης της απόστασης αυτής είναι το γεγονός ότι κατά την επίστρωση με το χέρι τα άκρα της πλάκας κόβονται για τον σχηματισμό του δοκιμίου, επειδή η συγκέντρωση ρητίνης στα άκρα είναι μεγάλη και γιατί η επιφάνεια δεν είναι η επιθυμητή γιατί παρουσιάζει ανωμαλίες. Η δεύτερη διάσταση (1250mm) προκύπτει όπως φαίνεται και από το σχήμα 4.1 με τον εξής τρόπο:

- Έχουμε 18 δοκίμια με 50 mm πλάτος το καθένα δηλαδή συνολικό πλάτος δοκιμίων 900 mm.
- Ανάμεσα στα δοκίμια για λόγους ευθυγράμμισης τους και σαν προστατευτικό μέτρο στην περίπτωση λάθους κατά την κοπή τους έτσι ώστε το ένα να είναι ανεξάρτητο από το άλλο υπολογίζεται ένα περιθώριο των 25 mm

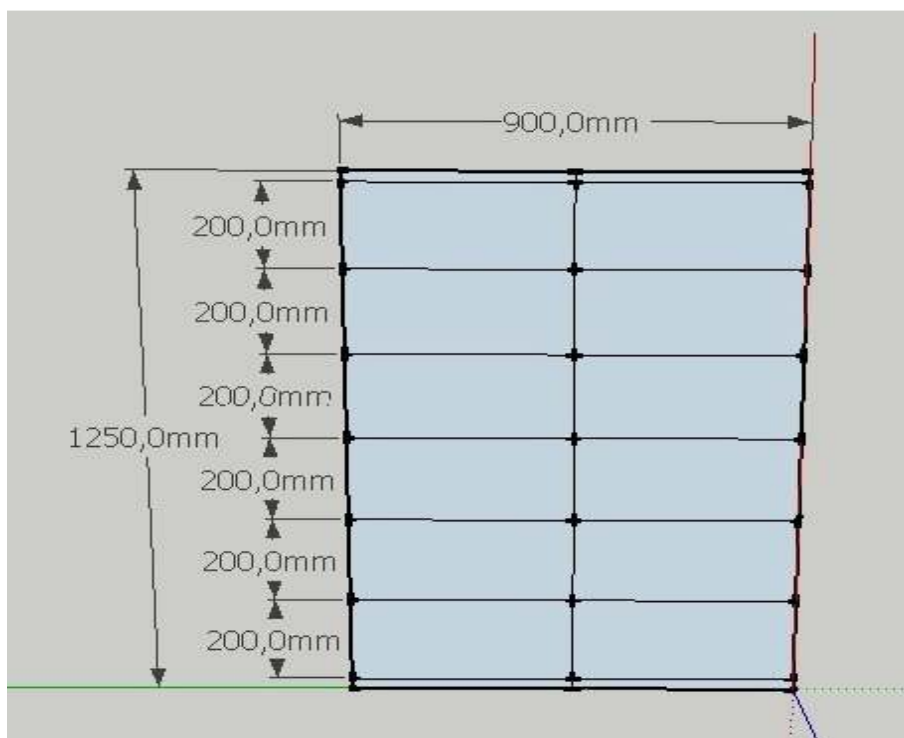


Σχήμα 4.1: Διαχωρισμός δοκιμίων πριν την κοπή τους.

Η δεύτερη πλάκα θα έχει διαστάσεις 900x300mm και όπως προαναφέρθηκε από αυτήν θα προκύψουν τα 3 δοκίμια που δεν έχουν τεχνητό αποχωρισμό. Με την ίδια ακριβώς λογική κατασκευής της πρώτης πλάκας προκύπτουν και οι διαστάσεις της δεύτερης, με ένα μεγαλύτερο περιθώριο ασφαλείας για την διάσταση των 300 mm.

Έχοντας όλα αυτά τα δεδομένα, αρχικά χρειάστηκε να κοπούν 16 στρώσεις με διαστάσεις 900x1250mm με την πρώτη διάσταση να είναι παράλληλη στις ενισχυτικές ίνες. Σε δεύτερο στάδιο κόπηκαν άλλες 16 στρώσεις 900x300mm.

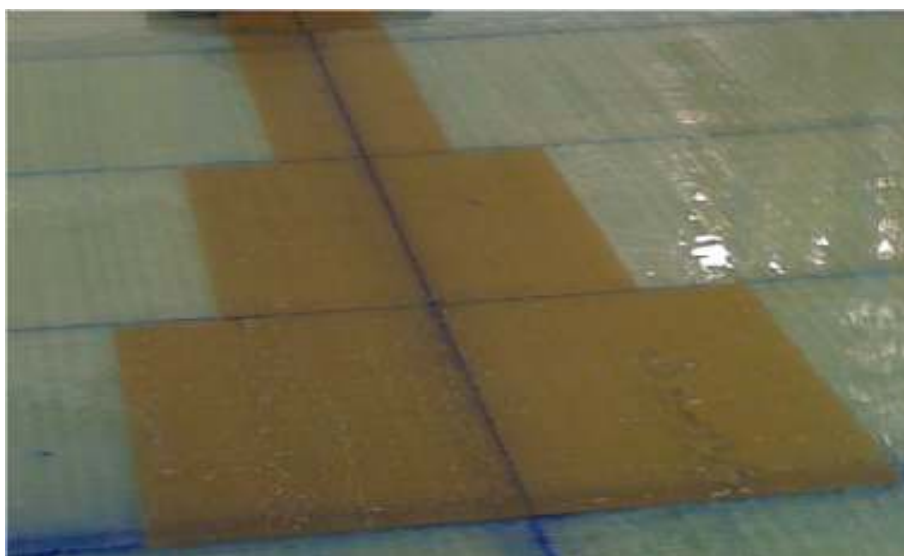
Μετά το κόψιμο των στρώσεων ακολούθησε το σημάδεμα τους. Το σημάδεμα γίνεται με ανεξίτηλο μαρκαδόρο και οριοθετούνται τα ορθογώνια παραλληλόγραμμα διαστάσεων 900x200mm από τα οποία θα προκύψει κάθε τριάδα δοκιμίων (Σχήμα 4.2). Επίσης κατά το σημάδεμα επισημαίνονται οι αξονικές γραμμές της κάθε στρώσης για την καλύτερη και ευκολότερη μεταξύ τους αλλά και με τον τεχνητό αποχωρισμό ευθυγράμμιση. Οι αποστάσεις για τη σχεδίαση των αξονικών γραμμών μετρούνται κατά μήκος και κάθετα στις ενισχυτικές ίνες. Αυτή η μέθοδος εξασφαλίζει την ελαχιστοποίηση της γωνίας απόκλισης της μίας στρώσης από την άλλη. Δηλαδή η ιδανική γωνία μεταξύ των ινών των στρώσεων (0°) προσεγγίζεται πολύ καλά.



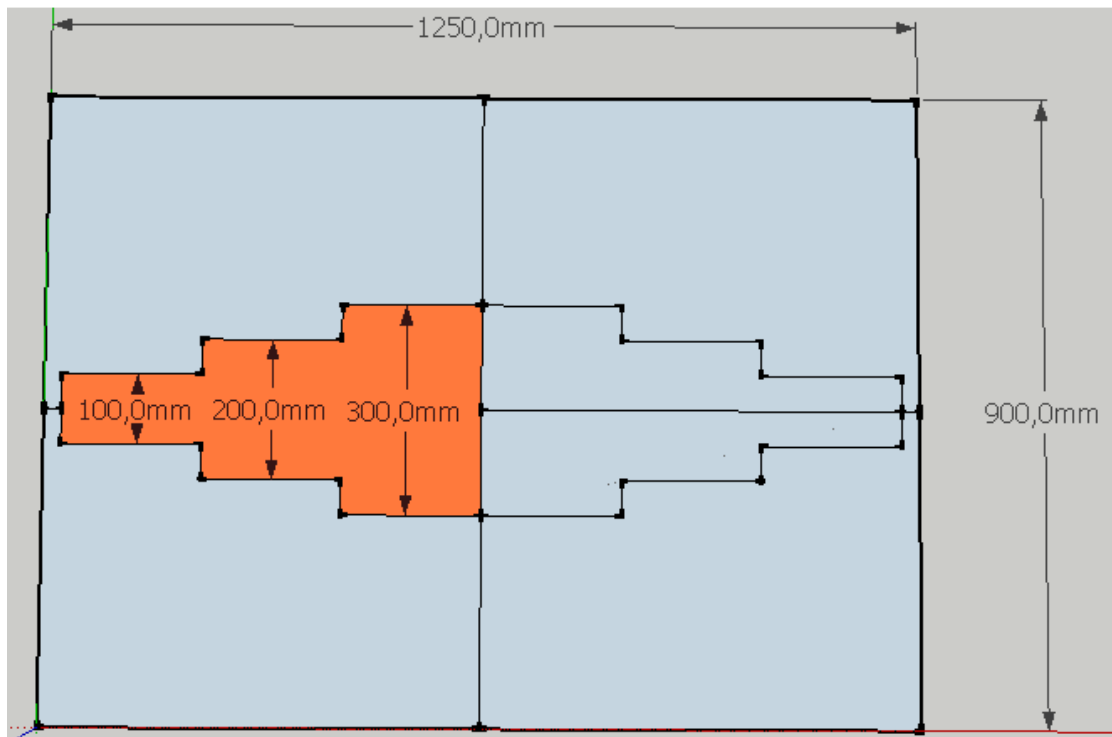
Σχήμα 4.2: Οριοθέτηση ορθογώνιων παραλληλογράμων 900x200mm

4.3.1.2 Προετοιμασία τεχνητού αποχωρισμού

Όπως έχει προαναφερθεί τα πειράματα θα είναι δοκιμές λυγισμού σε δοκίμια από GRP με έναν τεχνητό αποχωρισμό των στρώσεων. Ο τρόπος με τον οποίο θα επιτευχθεί αυτός ο τεχνητός αποχωρισμός θα είναι με την τοποθέτηση Teflon ανάμεσα στις στρώσεις πολύστρωτου. Το υλικό αυτό επιτρέπει τη δημιουργία αυτού του τεχνητού αποχωρισμού επειδή η ρητίνη δεν μπορεί να διεισδύσει μέσα από τις ίνες του. Έτσι κατά την τοποθέτησή του δημιουργεί ένα τεχνητό κενό ανάμεσα στις στρώσεις. Η προετοιμασία του Teflon αποτελείται από το κόψιμο 2 φύλλων Teflon και από το σημάδεμά του. Το Teflon κόπηκε και σημάδεύτηκε σε 2 φύλλα πανομοιότυπα μεταξύ τους στο σχήμα που φαίνεται στην φωτογραφία 4.2.



Σχήμα 4.3: Σχήμα κοπής και σημάδεμα Teflon.



Σχήμα 4.4: Διάταξη Teflon σε σχέση με την πλάκα

Όπως βλέπουμε το Teflon σχηματίζει τρεις περιοχές 100, 200, 300 mm και έχει σηματοδοτεί με μαρκαδόρο η αξονική γραμμή για την ευθυγράμμιση του με τις στρώσεις έτσι ώστε να τοποθετηθεί συμμετρικά ως προς το μέσο του δοκιμίου αλλά και παράλληλα ως προς τις πλευρές του.

4.3.2 Κατασκευή πλάκας από GRP

Η κατασκευή των σύνθετων υλικών κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας έγινε με την μέθοδο επίστρωσης με το χέρι (Hand lay-up). Αρχικά γίνεται προετοιμασία του καλουπιού που στην προκειμένη περίπτωση ήταν ένα κομμάτι Plexiglas® ορθογωνικού σχήματος. Η προετοιμασία αυτή περιλαμβάνει καθαρισμό της επιφάνειας με Acetone για την απομάκρυνση τυχόν ακαθαρσιών και των υπολειμμάτων λίπους. Στην συνέχεια γυαλίζεται καλά με κεριά και απλώνεται σε αυτήν μία λεπτή στρώση αποκολλητικού μέσου (release film). Αυτό γίνεται για την αποφυγή καταστροφής του καλουπιού αλλά και της πλάκας κατά την αποκόλλησή της. Στην συνέχεια σηματοδεύτηκαν τα μέσα κάθε πλευράς του καλουπιού και σχεδιάστηκαν οι αξονικές γραμμές του όπως επίσης και ένα περίγραμμα των στρώσεων που επρόκειτο να επιστρωθούν . Αυτό έγινε για την ευκολότερη ευθυγράμμιση των αξονικών γραμμών των στρώσεων αλλά και για την οριοθέτηση του χώρου που θα εναποτεθεί αρχικά η ρητίνη πριν την πρώτη στρώση.

Κατά την διάρκεια της προετοιμασίας του καλουπιού γινόταν και προετοιμασία της ρητίνης. Η αναλογία μεταξύ του βάρους των ενισχύσεων και του βάρους του μίγματος ρητίνης – σκληρυντή πρέπει να είναι 2:1, με στόχο την κατασκευή σύνθετου υλικού με κατά βάρος περιεκτικότητα σε ίνες $W_f = 66\%$. Κατά την κατασκευή όμως παρασκευάστηκε μεγαλύτερη ποσότητα μίγματος για να είμαστε σίγουροι ότι θα έχουμε επαρκή ποσότητα αυτού. Όσον αφορά το μίγμα, η

αναλογία μεταξύ των βαρών της ρητίνης και του σκληρυντή είναι και αυτή 2:1. Ο χρόνος στερεοποίησης του μίγματος ήταν περίπου 50 λεπτά. Αναλυτικά τα βάρη των ενισχύσεων, της ρητίνης, του σκληρυντή και του μίγματος και για τις δύο γεωμετρίες παρουσιάζονται στον πίνακα 4.1:

Πίνακας 4.1: Βάρη συνιστώντων μερών του πολύστρωτου

ΒΑΡΗ	
Πλάκα διαστάσεων 900x1250mm	
Βάρος ενισχύσεων (gr)	12354
Βάρος ρητίνης (gr)	4118
Βάρος σκληρυντή (gr)	2059
Βάρος μίγματος (gr)	6177
Πλάκα διαστάσεων 900x300mm	
Βάρος υαλοϋφασμάτων (gr)	2856
Βάρος ρητίνης (gr)	952
Βάρος σκληρυντή (gr)	476
Βάρος μίγματος (gr)	1428

Μετά από την προετοιμασία του μίγματος ρητίνης-σκληρυντή αλλά και του καλουπιού άρχισε η διαδικασία κατασκευής της πλάκας που όμως έπρεπε να γίνει σε χρόνο λιγότερο από 50 λεπτά γιατί μετά το πέρας του χρόνου στερεοποίησης η ρητίνη δεν θα μπορούσε να επιστρωθεί. Η διαδικασία επίστρωσης με το χέρι απαιτεί εμπειρία στην κατανομή της ρητίνης σε κάθε στρώση αλλά και κατά την επίστρωση. Έτσι ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία. Ποσότητα μίγματος ρητίνης-σκληρυντή εναποτίθεται στο ήδη σχεδιασμένο περίγραμμα των στρώσεων στο καλούπι. Στην συνέχεια τοποθετείται η πρώτη στρώση. Τα σημεία που πρέπει να προσεχθούν κατά την τοποθέτηση είναι η ευθυγράμμιση των αξονικών γραμμών των στρώσεων με τις αξονικές γραμμές του καλουπιού και η τοποθέτηση της στρώσης με τέτοιο τρόπο ώστε να έρθει σε επαφή ολόκληρη η επιφάνειά της με την προηγούμενη στρώση και να μην δημιουργηθούν πτυχώσεις. Μετά την προσεκτική τοποθέτηση της στρώσης και με την βοήθεια ειδικών ρολών ή πινέλου γίνεται επίστρωσή της δηλαδή κατανέμεται η ρητίνη ομοιόμορφα στην στρώση αλλά και με την βοήθεια του ρολού και την εφαρμογή πίεσης απαλείφονται τυχόν κενά αέρος που υπάρχουν. Η διαδικασία αυτή είναι ίδια για όλες τις στρώσεις. Έτσι αφού γίνει επίστρωση των 8 πρώτων στρώσεων δηλαδή είμαστε στο 50% του τελικού μας πάχους τοποθετείται το πρώτο κομμάτι Teflon στην μισή πλάκα έτσι ώστε τα μισά δοκίμια να έχουν τον τεχνητό αποχωρισμό στο 50% του πάχους τους. Το Teflon πρέπει και αυτό να ευθυγραμμιστεί πολύ καλά με τις αξονικές γραμμές. Εκτός της ευθυγράμμισης το Teflon σταθεροποιείται στη θέση που έχει τοποθετηθεί με βαράκι όπως φαίνεται και στην φωτογραφία 4.5. Στην συνέχεια γίνεται επίστρωση 4 επιπλέον στρώσεων οπότε και βρισκόμαστε στο 75% του πάχους και τοποθετούμε το δεύτερο κομμάτι Teflon στο υπόλοιπο μισό. Τέλος επιστρώνονται και οι 4 τελευταίες στρώσεις και κατανέμεται ομοιόμορφα η επιπλέον ποσότητα ρητίνης που υπάρχει στην επιφάνεια και έτσι ολοκληρώνεται η διαδικασία της επίστρωσης. Η όλη διαδικασία ολοκληρώθηκε οριακά στα 55 λεπτά δηλαδή η ρητίνη μόλις είχε αρχίσει να

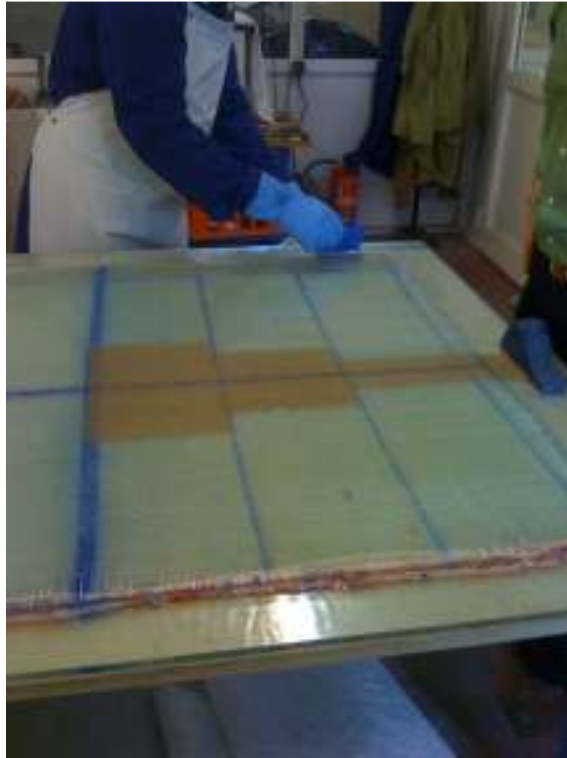
στερεοποιήται. Η καθυστέρηση αυτή των 5 λεπτών θεωρήθηκε αμελητέα. Το τελικό στάδιο κατασκευής της πλάκας είναι η διαδικασία του curing για 2 μέρες σε θερμοκρασία 25 °C. Παρακάτω παρουσιάζονται φωτογραφίες από την παραπάνω διαδικασία.



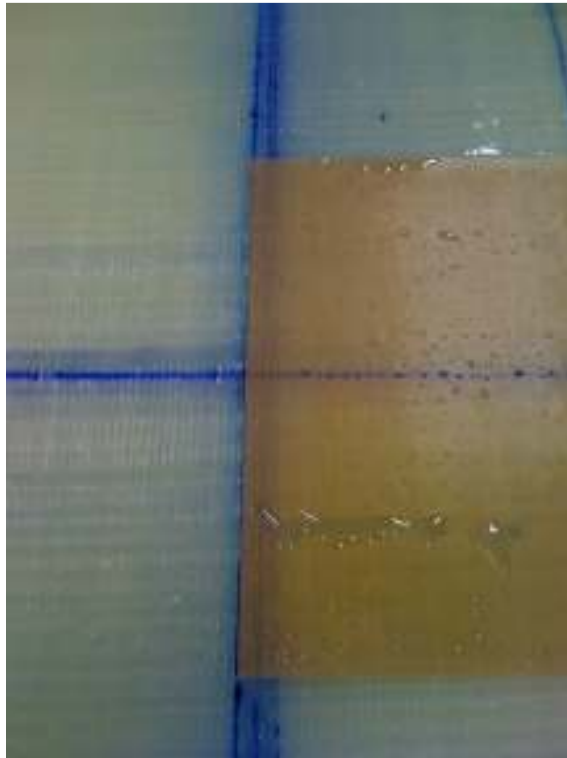
Σχήμα 4.5: Μίγμα ρητίνης σκληρυντή και αναδευτήρας



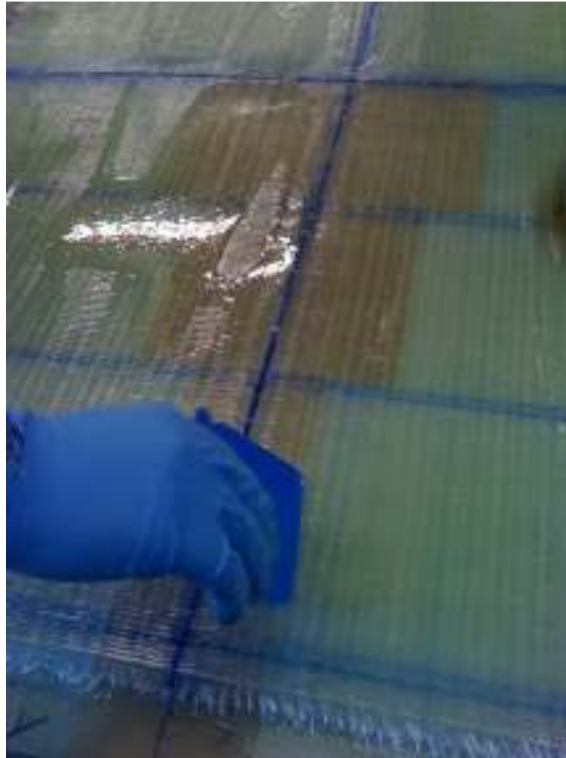
Σχήμα 4.6: Επίστρωση με ρολό



Σχήμα 4.7: Τοποθέτηση και διατήρηση θέσης Teflon με βαράκι.



Σχήμα 4.8: Ευθυγράμμιση αξονικών γραμμών Teflon.



Σχήμα 4.9: Τελική κατανομή ρητίνης με την βοήθεια σπάτουλας



Σχήμα 4.10: Τελική μορφή πλάκας

4.3.3 Κοπή δοκιμίων και τελική μορφοποίηση

Μετά την τελική φάση κατασκευής των πλακών κόπηκαν με υδροψυχώμενο δίσκο κοπής σε επιμέρους κομμάτια διαστάσεων 900x200 mm και στην συνέχεια με

waterjet τα δοκίμια αρχικά σε διαστάσεις 900x50 mm. Όμως η τελική διάσταση των δοκιμίων είναι 600x50mm. Πριν την κοπή τους στις τελικές τους διαστάσεις έγινε ταυτοποίηση της θέσης του Teflon δηλαδή σε κάθε δοκίμιο βρέθηκε το μέσο του Teflon και στην συνέχεια από αυτό το μέσο μετρήθηκαν και σηματοδεύθηκαν τα άκρα των δοκιμίων 300 mm εκατέρωθεν αυτού. Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίστηκε ότι το Teflon θα βρίσκεται στο μέσο του δοκιμίου και συμμετρικά ως προς αυτό. Μετά το σημάδεμα των άκρων των δοκιμίων κόπηκαν με υδροψυχώμενο δίσκο κοπής σε διάσταση 600 mm.

Στην συνέχεια έγινε αρίθμηση των δοκιμίων με τον ακόλουθο τρόπο. Εφόσον τα δοκίμια θα διέφεραν μεταξύ τους κατά δύο παραμέτρους και σε κάθε περίπτωση θα είχαμε 3 δοκίμια, το όνομα κάθε δοκιμίου θα αποτελείται από τρία στοιχεία. Το πρώτο στοιχείο θα αναφέρεται στην θέση του αποχωρισμού κατά το πάχος το δεύτερο στο μήκος του αποχωρισμού και το τρίτο θα ξεχωρίζει το δοκίμιο από την τριάδα ίδιων δοκιμίων. Έτσι έχουμε τον παρακάτω πίνακα 4.2.

Πίνακας 4.2: Μέθοδος αρίθμησης δοκιμίων

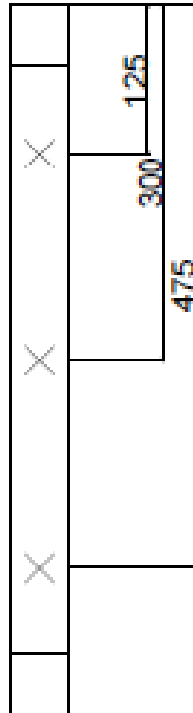
Θέση αποχωρισμού κατά το πάχος	Μήκος αποχωρισμού (mm)	Αριθμός δοκιμίου
A (50% του πάχους)	100	1
		2
		3
	200	1
		2
		3
	300	1
		2
		3
B (75% του πάχους)	100	1
		2
		3
	200	1
		2
		3
	300	1
		2
		3

Οπότε στην περίπτωση που θέλουμε να αναφερθούμε στο δεύτερο δοκίμιο από την τριάδα που ο αποχωρισμός έχει μήκος 300mm και βρίσκεται στο 75% του πάχους το όνομα θα είναι B-300-2.

Μετά την αρίθμηση των δοκιμίων έγινε διαστασιολόγηση των δοκιμίων με ηλεκτρονικό παχύμετρο και έγινε εξαγωγή και των μέσων όρων των διαστάσεών τους. Η διάσταση του πλάτους μετρήθηκε σε τρεις θέσεις και του πάχους σε τρεις θέσεις για κάθε θέση πλάτους όπως φαίνετε στον πίνακα 4.3. Οι θέσεις μέτρησης φαίνονται στο σχήμα 4.10.

Θέση μέτρησης κατά μήκος	B (mm)			t (mm)						M.O (δοκιμίου)	M.O (τριάδας)	cov										
	125	300	475	125		300		475														
				M.O (τριάδας)	M.O (δοκιμίου)	M.O (τριάδας)	M.O (δοκιμίου)	M.O (τριάδας)	M.O (δοκιμίου)													
A-100-1	49,5	49,4	49,6	49,5	49,5	49,5	49,5	49,5	49,5	49,5	49,5	49,5	11,2	11,3	11,3	11,0	11,0	11,0	11,1	11,1	2%	
A-100-2	49,6	49,5	49,6	49,5	49,5	49,5	49,5	49,5	49,5	49,5	49,5	49,5	49,5	11,6	11,6	11,6	11,2	11,3	11,3	11,4	11,4	1%
A-100-3	49,6	49,6	49,7	49,6	49,5	49,6	49,6	49,6	49,6	49,6	49,6	49,6	49,6	11,6	11,7	11,8	11,3	11,5	11,4	11,5	11,5	1%
A-200-1	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	11,9	12,0	11,9	11,6	11,7	11,7	11,8	11,8	1%
A-200-2	49,7	49,7	49,6	49,7	49,7	49,6	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	12,0	12,0	12,0	11,7	11,7	11,7	11,7	11,7	2%
A-200-3	49,5	49,5	49,6	49,5	49,6	49,6	49,5	49,6	49,6	49,6	49,6	49,6	49,6	12,0	12,0	12,0	11,7	11,6	12,0	11,9	11,9	2%
A-300-1	49,6	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	12,0	12,0	12,0	11,5	11,6	11,8	11,9	11,8	2%
A-300-2	49,6	49,6	49,7	49,6	49,6	49,7	49,6	49,6	49,6	49,6	49,6	49,6	49,6	12,2	12,1	12,2	11,6	11,8	12,2	12,0	12,2	2%
A-300-3	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	12,5	12,4	12,6	12,0	11,9	12,2	12,4	12,4	2%
B-100-1	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	11,4	11,3	11,6	11,2	11,0	11,2	11,5	11,7	2%
B-100-2	49,6	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	11,2	11,3	11,3	11,0	11,1	11,0	11,3	11,4	1%
B-100-3	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	11,3	11,3	11,3	11,0	11,0	11,4	11,4	11,2	2%
B-200-1	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	11,6	11,5	11,6	11,5	11,4	11,5	11,8	11,9	2%
B-200-2	49,6	49,6	49,6	49,6	49,6	49,6	49,6	49,6	49,6	49,6	49,6	49,6	49,6	11,5	11,5	11,5	11,4	11,4	11,9	11,9	11,6	2%
B-200-3	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	11,4	11,5	11,5	11,3	11,3	11,9	12,1	11,9	3%
B-300-1	49,7	49,8	49,8	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	12,4	12,4	12,7	12,2	12,1	12,9	13,1	13,7	4%
B-300-2	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	12,0	12,0	12,2	11,8	11,7	12,0	12,3	12,7	3%
B-300-3	49,7	49,7	49,8	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	11,8	11,7	11,9	11,5	11,4	11,6	12,1	12,2	2%
INTACT 1	49,7	49,6	49,5	49,6	49,6	49,6	49,6	49,6	49,6	49,6	49,6	49,6	49,6	10,7	10,7	11	10,3	10,6	10,7	10,6	10,5	2%
INTACT 2	49,7	49,6	49,6	49,6	49,6	49,6	49,6	49,6	49,6	49,6	49,6	49,6	49,6	10,7	10,7	10,7	10,3	10,3	10,5	10,5	10,6	2%
INTACT 3	49,6	49,5	49,5	49,5	49,5	49,5	49,5	49,5	49,5	49,5	49,5	49,5	49,5	10,6	10,7	11,3	10,3	10,5	10,2	10,6	10,4	3%

Πίνακας 4.3 :Αναλυτικές Διαστάσεις δοκιμίων



Σχήμα 4.11: Θέσεις μέτρησης διαστάσεων

Μετά τη μέτρηση των διαστάσεων των δοκιμίων έγινε σημάδεμα των περιοχών που θα τοποθετηθούν στις αρπάγες της μηχανής. Όπως έχει προαναφερθεί το ενεργό μήκος θα είναι ίσο με 500 mm. Για αυτό τον λόγο μετρήθηκαν εκατέρωθεν του μέσου του τεχνητού αποχωρισμού αποστάσεις ίσες με 250 mm. Αφού μετρήθηκαν οι αποστάσεις αυτές έγινε προσεκτικό σημάδεμα των αποστάσεων με γραμμές κάθετες στις πλευρές του δοκιμίου. Δόθηκε μεγάλη σημασία σε αυτή την καθετότητα γιατί θα διευκολύνει την τοποθέτηση του δοκιμίου στις αρπάγες της μηχανής σε απόλυτα κατακόρυφη θέση.

Στη συνέχεια σημαδεύτηκαν τα άκρα του τεχνητού αποχωρισμού στα σόκορα του δοκιμίου. Αυτό έγινε για την περαιτέρω επεξεργασία του δοκιμίου έτσι ώστε να γίνει και μελέτη της διεύρυνσης του αποχωρισμού κατά τον λυγισμό το οποίο δεν είναι αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής. Το τελικό στάδιο επεξεργασίας των δοκιμίων ήταν το σημάδεμα των θέσεων όπου θα τοποθετηθούν τα επιμηκυνσιόμετρα. Το σημάδεμα γινόταν και στις δύο πλευρές του δοκιμίου εκατέρωθεν του αποχωρισμού. Το σημάδεμα γινόταν με προσεκτική μέτρηση και εύρεση του μέσου κατά το μήκος και κατά το πλάτος του δοκιμίου. Το σημείο αυτό σημαδευόταν με έναν σταυρό ο οποίος όριζε την θέση του επιμηκυνσιομέτρου. Στην συνέχεια έγινε επικόλληση των επιμηκυνσιομέτρων και σε κάθε σημείο η επιφάνεια είχε προηγουμένως καθαριστεί με acetone.

4.4 Επιτευχθείσες ιδιότητες πολύστρωτου

Όπως προαναφέρθηκε πριν την κοπή των δοκιμίων σε διαστάσεις 900x50mm έγινε κοπή της πλάκας σε επιμέρους πλακίδια διαστάσεων 900x200mm. Από αυτά προήλθαν και τα τελικά δοκίμια. Όμως από τα ρετάλια που έμειναν κόπηκαν δύο τετραγωνικά δοκίμια από κάθε ρετάλι το ένα από την περιοχή του τεχνητού αποχωρισμού των στρώσεων και το άλλο από την άθικτη περιοχή. Λόγω της διαφορετικής περιεκτικότητας ινών κατά βάρος, της ύπαρξης teflon αλλά και την μεταβολή των διαστάσεων κατά μήκος και κατά το πάχος των δοκιμίων οι διαστάσεις των δοκιμίων προς κάυση υπολογίστηκαν με τον ακόλουθο τρόπο. Αρχικά μετρήθηκε το βάρος των άθικτων δοκιμίων που κατά μέσο όρο ζύγιζαν 758gr. Στην συνέχεια έγινε μέτρηση των διαστάσεων τους για την εξαγωγή του εμβαδού τους και την τελική εξαγωγή του βάρους τους ανά μονάδα επιφάνειας που βρέθηκε ίσο με 1,74 gr/cm². Με βάση τα παραπάνω έχοντας δεδομένα τα σημεία που θα κοπούν τα δοκίμια προς καύση οπότε και δεδομένο πάχος και πλάτος γινόταν υπολογισμός του μήκους τους με βάση το πρότυπο που προκαθορίζει βάρος δοκιμίου προς καύση ίσο με 5 gr. Τα δοκίμια αυτά κόπηκαν προς καύση με σκοπό τον προσδιορισμό της περιεκτικότητας σε ίνες των πολύστρωτων σύμφωνα με το πρότυπο ISO 1172:1996. Με την καύση των δοκιμίων γίνεται προσδιορισμός της μεταβολής της μάζας του δοκιμίου μετά την καύση της ρητίνης και με αυτό τον τρόπο και με τους ακόλουθους τύπους γίνεται πρώτα προσδιορισμός της περιεκτικότητας σε ίνες και στην συνέχεια διόρθωση των ιδιοτήτων ως προς την περιεκτικότητα.

Στον πίνακα 4.4 φαίνεται η περιεκτικότητα σε ίνες κάθε σειράς δοκιμίων συγκεκριμένου μήκους και θέσης αποχωρισμού καθώς και η διαφορά των αποτελεσμάτων μεταξύ των δοκιμίων που κόπηκαν προς καύση από την ίδια σειρά.

Πίνακας 4.4 : Περιεκτικότητες κατά βάρος ινών δοκιμίων

	Wf	Δwf
A-100	57%	0,670%
A-200	53%	0,501%
A-300	53%	0,899%
B-100	54%	2,763%
B-200	54%	0,789%
B-300	52%	0,174%
Intact	58%	0,581%

Όπως παρατηρούμε η περιεκτικότητα σε ίνες στα δοκίμια είναι ομοιόμορφη και δεν υπάρχουν μεγάλες διαφορές. Η μεγαλύτερη διαφορά παρατηρείται στα άθικτα

δοκίμια τα οποία όμως κατασκευάστηκαν από διαφορετική πλάκα από όλα τα υπόλοιπα.

Στην συνέχεια με βάση τις παραπάνω μετρήσεις έγινε διόρθωση των ιδιοτήτων του σύνθετου υλικού. Ο υπολογισμός βασίζεται στον “νόμο των αναμίξεων” (rule of mixtures) και στους παρακάτω τύπους της μικρομηχανικής:

$$E_X = E_f V_f + E_m V_m \quad (4.1)$$

$$V_f = W_f \frac{\rho_c}{\rho_f} \quad (4.2)$$

$$V_m = W_m \frac{\rho_c}{\rho_m} \quad (4.3)$$

$$E_X = E_f W_f \frac{\rho_c}{\rho_f} + E_m W_m \frac{\rho_c}{\rho_m} \quad (4.4)$$

Όπου:

- E_X είναι το μέτρο ελαστικότητας κατά τη διεύθυνση του X άξονα
- E_f είναι το μέτρο ελαστικότητας των ινών
- E_m είναι το μέτρο ελαστικότητας της ρητίνης
- V_f και V_m είναι οι περιεκτικότητες κατά όγκο των ινών και της ρητίνης αντίστοιχα
- W_f και W_m είναι οι περιεκτικότητες κατά βάρος των ινών και της ρητίνης αντίστοιχα
- ρ_c είναι η πυκνότητα της μάζας του σύνθετου
- ρ_f είναι η πυκνότητα της μάζας των ινών
- ρ_m είναι η πυκνότητα της μάζας της ρητίνης

Επομένως το μέτρο ελαστικότητας E_X ενός πολύστρωτου με διαφορετική περιεκτικότητα σε ίνες W_f μπορεί να υπολογιστεί με βάση την αντίστοιχη γνωστή τιμή του μέτρου ελαστικότητας E_X αντικαθιστώντας στον παρακάτω λόγο:

$$\frac{E_X}{E_X} = \frac{E_f W_f \frac{\rho_c}{\rho_f} + E_m W_m \frac{\rho_c}{\rho_m}}{E_f W_f \frac{\rho_c}{\rho_f} + E_m W_m \frac{\rho_c}{\rho_m}} \quad (4.5)$$

Θεωρώντας ότι $\rho_c = \rho_c$ ο λόγος 4.5 μετασχηματίζεται ως εξής :

$$\frac{E_X}{E_X} = \frac{E_f W_f \frac{1}{\rho_f} + E_m W_m \frac{1}{\rho_m}}{E_f W_f \frac{1}{\rho_f} + E_m W_m \frac{1}{\rho_m}} \quad (4.6)$$

Οι τιμές των μεγεθών συγκεντρώνονται στον παρακάτω πίνακα (4.5):

Πίνακας 4.5: Τιμές των μεγεθών της εξίσωσης

E_X (GPa)	38.671
E_f (GPa)	81.03
E_m (GPa)	2.03
W_f	68%
W_m	32%
ρ_f (g/cm³)	1.12
ρ_m (g/cm³)	2.62

Οπότε οι τελικές τιμές του μέτρου ελαστικότητας για κάθε σειρά δοκιμών παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (4.6) :

Πίνακας 4.6: Τελικές τιμές των μέτρων ελαστικότητας των πολύστρωτων

	W _m	W _f	E1
A_100	43%	57%	32,34
A-200	47%	53%	30,33
A-300	47%	53%	30,43
B-100	46%	54%	30,98
B-200	46%	54%	30,87
B-300	48%	52%	29,55
Intact	42%	58%	32,96

4.5 Διεξαγωγή πειραματικών δοκιμών και παρουσίαση αποτελεσμάτων

Τα δοκίμια δοκιμάστηκαν πειραματικά σε θλίψη στην υδραυλική μηχανή δοκιμών MTS του εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών. Κατά τα πειράματα μετρήθηκαν οι παραμορφώσεις των επιμηκυνσιομέτρων, η μετατόπιση και η δύναμη που ασκήθηκε από τη μηχανή,

καθώς και το βέλος κάμψης του δοκιμίου κατά τον Y άξονα. Για την καταγραφή του βέλους κάμψης χρησιμοποιήθηκαν δύο γραμμικά μεταβλητοί διαφορικοί μετασχηματιστές (LVDT). Οι μετρήσεις έγιναν στο μέσο του αποχωρισμού των στρώσεων και το κάθε LVDT που κατέγραφε το βέλος κάμψης κατά τον άξονα Y αντιστοιχούσε σε ένα υποπολύστρωτο . Επίσης για την καταγραφή της μετατόπισης που ασκούσε η μηχανή χρησιμοποιήθηκε και ένα τρίτο LVDT. Η μηχανή συνδέθηκε με μία συσκευή ενίσχυσης σήματος για την καλύτερη καταγραφή των μετρήσεων των επιμηκυνσιομέτρων, της μετατόπισης και της ασκούμενης δύναμης.

4.5.1 Διεξαγωγή Πειραμάτων

Μετά τη διάταξη των μετρητικών οργάνων τα δοκίμια εφαρμόστηκαν και ευθυγραμμίστηκαν στην μηχανή δοκιμών. Η ευθυγράμμιση έγινε με δύο τρόπους. Ο πρώτος τρόπος ήταν η ευθυγράμμιση των άκρων του δοκιμίου που είχαν σημαδευτεί με μαρκαδόρο και μετά γινόταν επαλήθευση με τον δεύτερο τρόπο όπου γινόταν χρήση αλφαδιού. Μετά την εφαρμογή των δοκιμίων στην μηχανή και τον έλεγχο της συνδεσμολογίας των μετρητικών οργάνων ξεκινούσε το πείραμα. Ο ρυθμός μεταβολής της μετατόπισης δεν ήταν ίδιος σε όλα τα πειράματα. Οι διάφοροι ρυθμοί μετατόπισης παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (4.7):

Πίνακας 4.7: Ρυθμοί μεταβολής ασκούμενης μετατόπισης για κάθε δοκίμιο

Αριθμός δοκιμίου	Χρόνος	Ρυθμός μεταβολής μετατόπισης
A-100-1 B-300-1 A-300-1 Intact-1 B-100-1	0-τέλος πειράματος	0,1 mm/min
A-300-2	0-15' 15'-τέλος πειράματος	0,1mm/min 0,5mm/min
A-100-2 A-100-3 A-200-1 A-200-2 A-200-3 A-300-3 B-100-2 B-100-3 B-200-1 B-200-2 B-200-3 B-300-2 B-300-3 Intact-2 Intact-3	0-10' 10-12' 12-14' 14'-τέλος πειράματος	0,1mm/min 0,2mm/min 0,4mm/min 0.5mm/min

Όπως παρατηρούμε από τον παραπάνω πίνακα οι ρυθμός επιβολής της μετατόπισης δεν είναι ίδιος σε όλα τα δοκίμια. Αρχικά ο ρυθμός αποφασίστηκε σταθερός στο 0,1mm/min με βάση προηγούμενα πειράματα θλίψης σε ίδιο υλικό. Στην συνέχεια

όμως παρατηρήθηκε ότι ο χρόνος του πειράματος ήταν πολύ μεγάλος και επειδή παρατηρήθηκε ότι κατά μέσο όρο το φαινόμενο του λυγισμού είχε επέλθει μέσα στα πρώτα 10' αποφασίστηκε με ένα περιθώριο ασφαλείας δηλαδή στα 15' να αλλάζει ο ρυθμός επιβολής μετατόπισης και από 0,1 να γίνεται 0,5mm/min. Όμως τελικά ούτε αυτό ικανοποιούσε τις απαιτήσεις του πειράματος διότι αυτή η απότομη αλλαγή στον ρυθμό επιβολής μετατόπισης θα μπορούσε να επηρεάζει την εξέλιξη του πειράματος έτσι αποφασίστηκε η αλλαγή του ρυθμού να γίνει με πιο ομαλό τρόπο όπως φαίνεται και στον πίνακα 4.7.

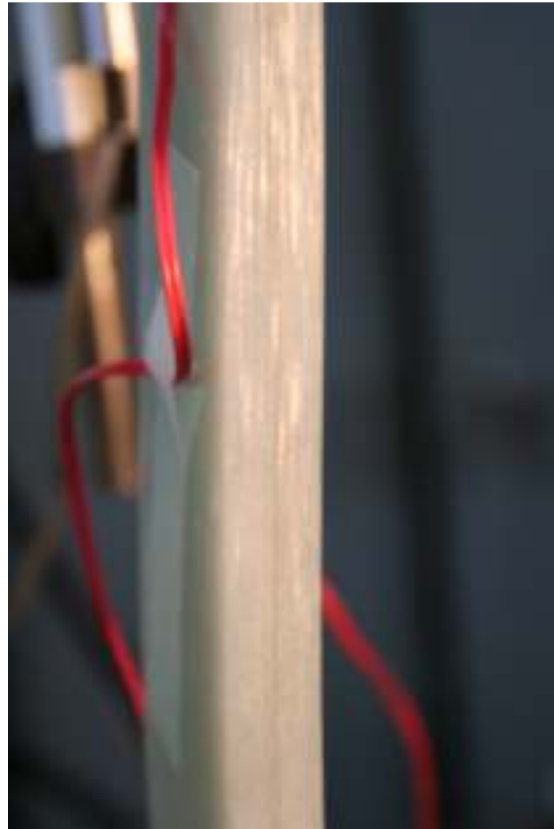
Κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων γινόταν λήψη φωτογραφιών για τον εντοπισμό των σημείων αστοχίας του δοκιμίου αλλά και για την παρακολούθηση της προχώρησης του τεχνητού αποχωρισμού των στρώσεων. Η αρχική διάταξη μίας δοκιμής φαίνεται στο Σχήμα 4.10 ενώ η τελική διάταξη στην φωτογραφία 4.11. Η διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι στην πρώτη βιντεοσκοπείται ενώ στην δεύτερη φωτογραφίζεται ο αποχωρισμός των στρώσεων.



Σχήμα 4.12: Αρχική διάταξη πειράματος



Σχήμα 4.13: Τελική διάταξη πειραμάτων



Σχήμα 4.14: Τεχνητός αποχωρισμός των στρώσεων

Μερικά επιπλέον τεχνικά χαρακτηριστικά των πειραμάτων είναι η συχνότητα δειγματοληψίας που ήταν 2Hz όπως επίσης και οι συναρτήσεις μεταφοράς της μηχανής όπου για την μετατόπιση ήταν 0,7mm/V και για το φορτίο 3 KN/V.

4.5.2 Αποτελέσματα πειραμάτων

Στην συνέχεια θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα κάθε περίπτωσης δοκιμίου με την βοήθεια διαγραμμάτων δύναμης-μετατόπισης αξονικής και εγκάρσιας καθώς και παραμόρφωσης-μετατόπισης. Στα τελευταία δύο τύπους έχουμε δύο καμπύλες για κάθε περίπτωση δοκιμίου, η μία συμβολίζεται με 1 και η άλλη 2 στο τέλος του ονοματος περιγραφής του δοκιμίου. Ο αριθμός αυτός καθορίζει σε ποιο επιμηκυνσιόμετρο και σε ποιο LVDT αναφερόμαστε κάθε φορά για λόγους σύγκρισης ομοίων δεδομένων. Τα διαγράμματα αυτά αρχικά θα παρουσιαστούν μεμονωμένα για κάθε περίπτωση και στην συνέχεια θα παρουσιαστούν συγκριτικά διαγράμματα και πίνακες μεταξύ των διαφόρων περιπτώσεων.

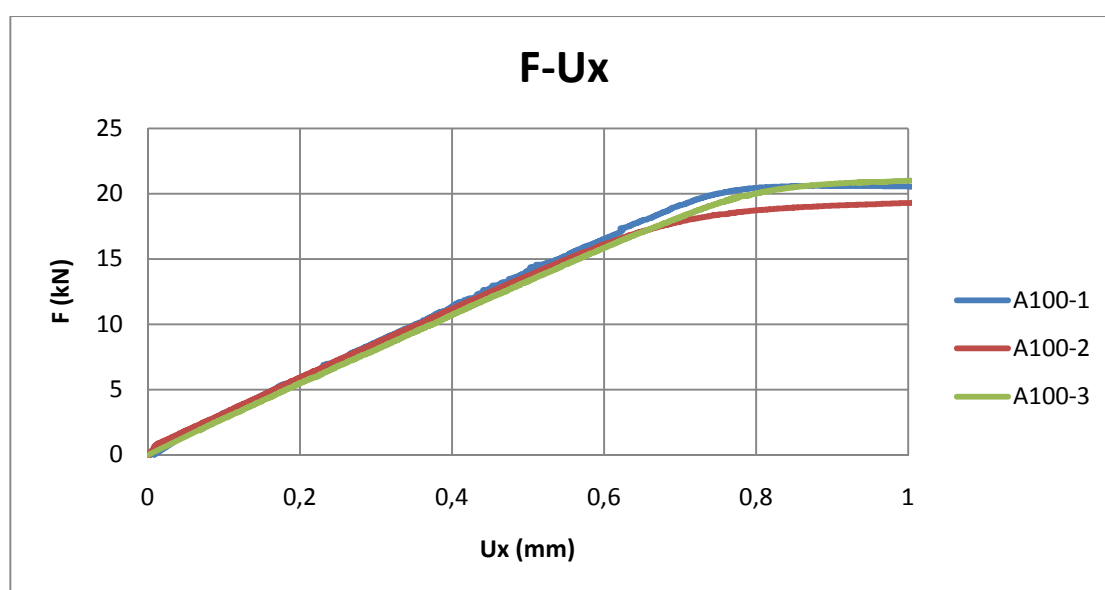
4.5.2.1 Σειρά δοκιμών A-100

Τα δοκίμια της σειράς A-100 έχουν μήκος αποχωρισμού των στρώσεων 100mm που βρίσκεται στο 50% του πάχους του δοκιμίου. Οι μέσοι όροι των διαστάσεων και το μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη με βάση την κατά βάρος περιεκτικότητα σε ίνες της σειράς αυτής είναι οι εξής:

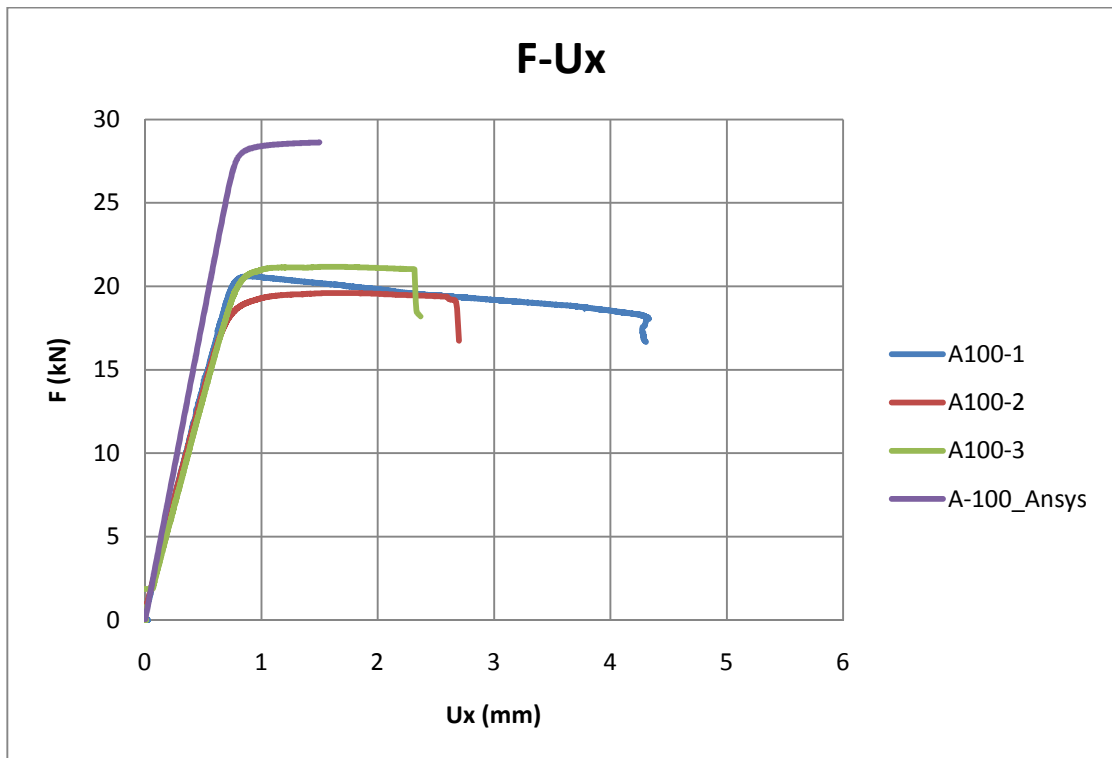
Πίνακας 4.8: Διαστάσεις και ιδιότητες δοκιμίων σειράς A-100

L (mm)	600
B (mm)	49,5
t (mm)	11,3
E _x (GPa)	32,34

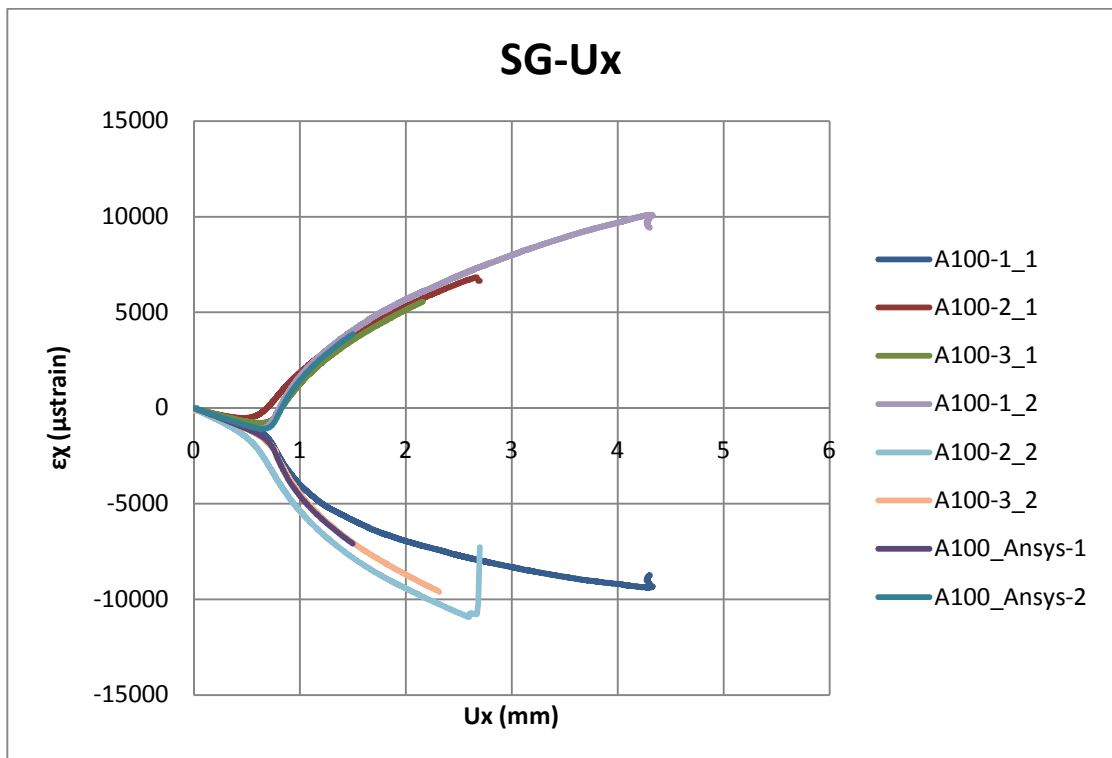
Τα διαγράμματα που εξήχθησαν από την πειραματική διαδικασία είναι τα εξής:



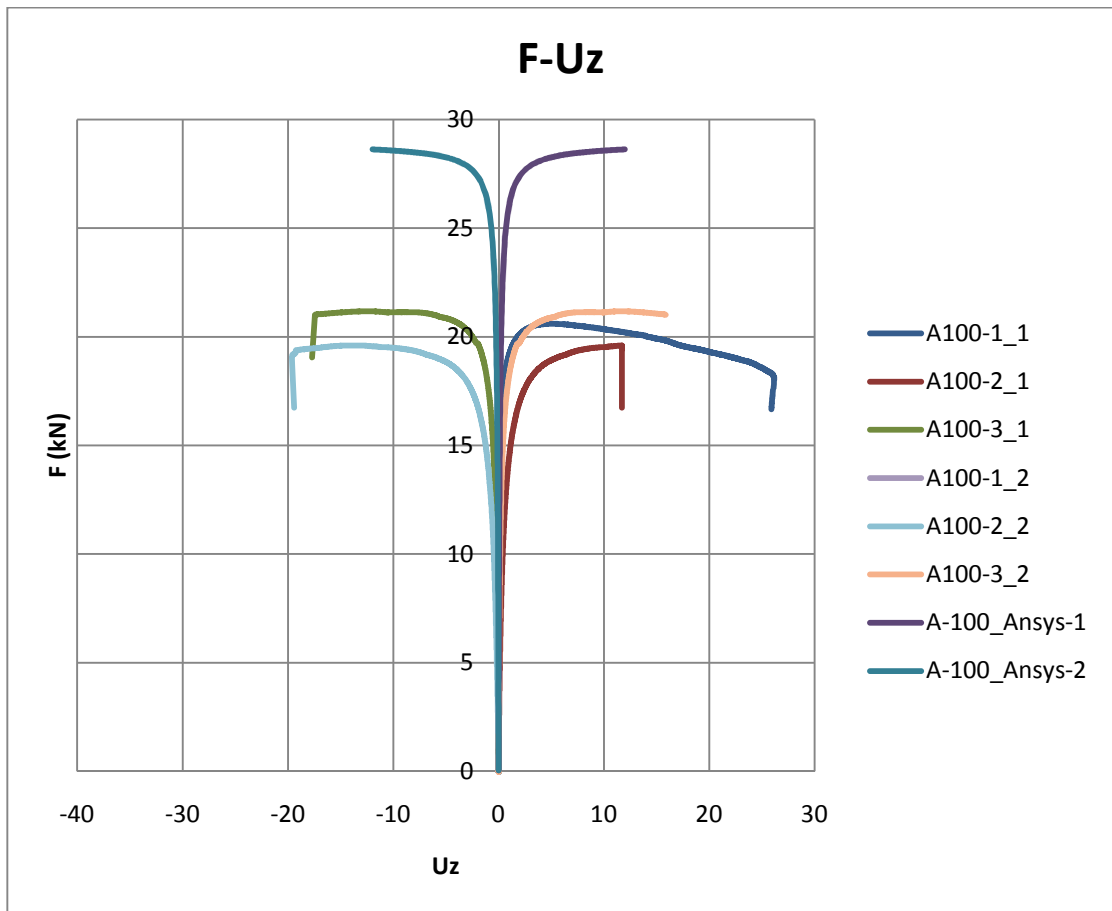
Σχήμα 4.15: Διάγραμμα δύναμης-αξονικής μετατόπισης για Ux από 0 έως 1 mm.



Σχήμα 4.16: Συγκριτικό διάγραμμα συνολικής δύναμης-αξονικής μετατόπισης



Σχήμα 4.17: Συγκριτικό διάγραμμα παραμόρφωσης-αξονικής μετατόπισης



Σχήμα 4.18: Συγκριτικό διάγραμμα δύναμης-εγκάρσιας μετατόπισης



Σχήμα 4.19: Δοκίμιο σειράς A-100 μετά το πέρας του πειράματος

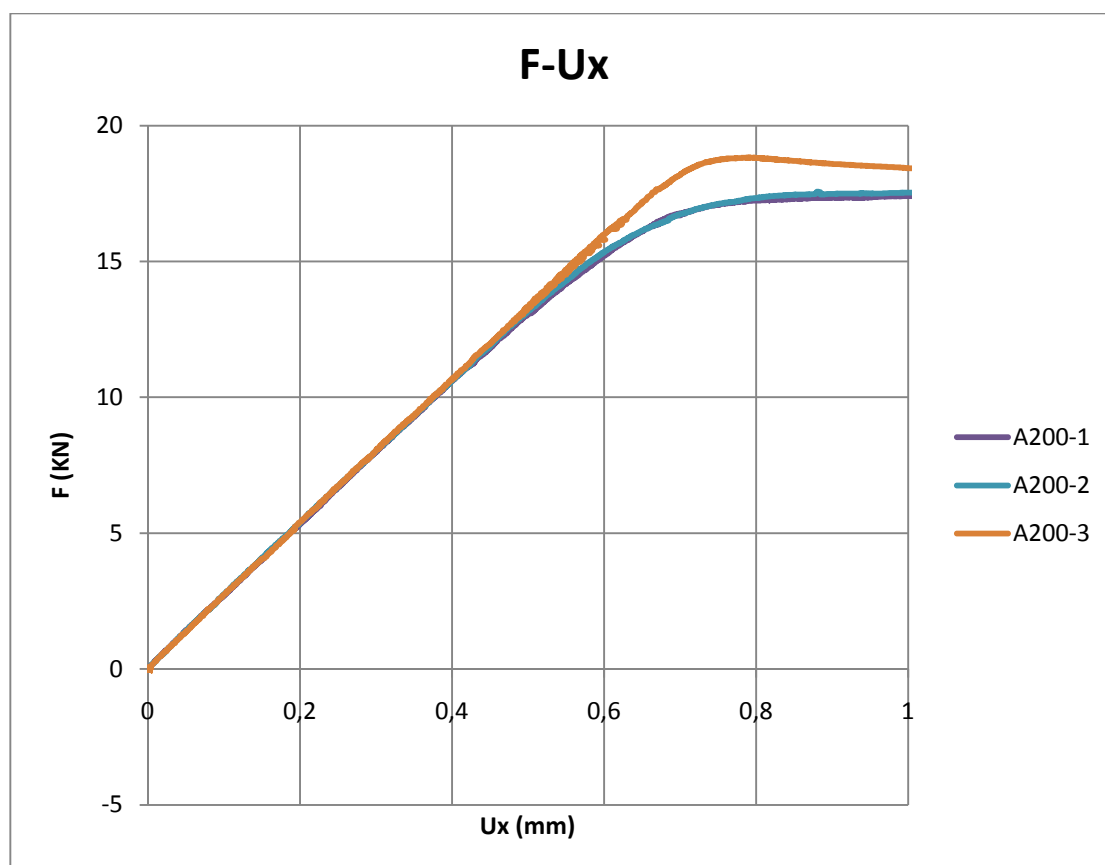
4.5.2.2 Σειρά δοκιμών A-200

Τα δοκίμια της σειράς A-200 έχουν μήκος αποχωρισμού των στρώσεων 200mm που βρίσκεται στο 50% του πάχους του δοκιμίου. Οι μέσοι όροι των διαστάσεων και το μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη με βάση την κατά βάρος περιεκτικότητα σε ίνες της σειράς αυτής είναι οι εξής:

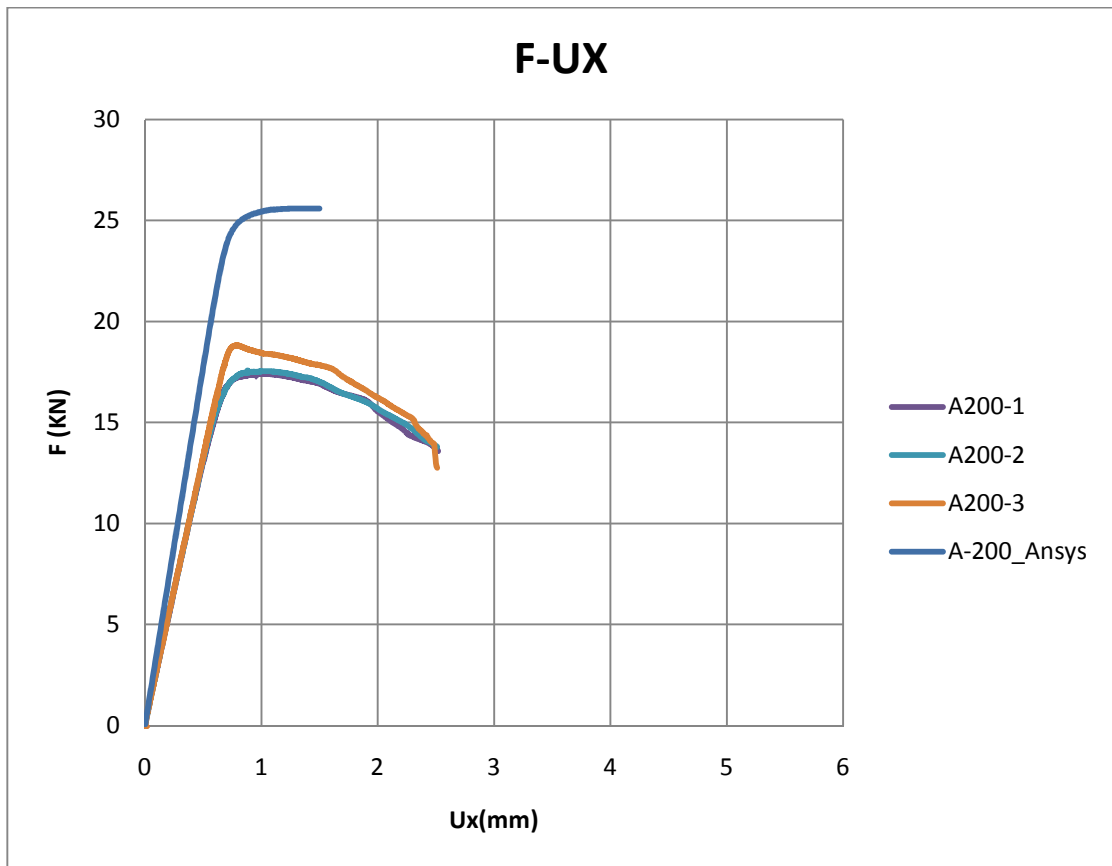
Πίνακας 4.9: Διαστάσεις και ιδιότητες δοκιμών σειράς A-200

L (mm)	600
B (mm)	49,6
t (mm)	11,8
E _x (GPa)	30,33

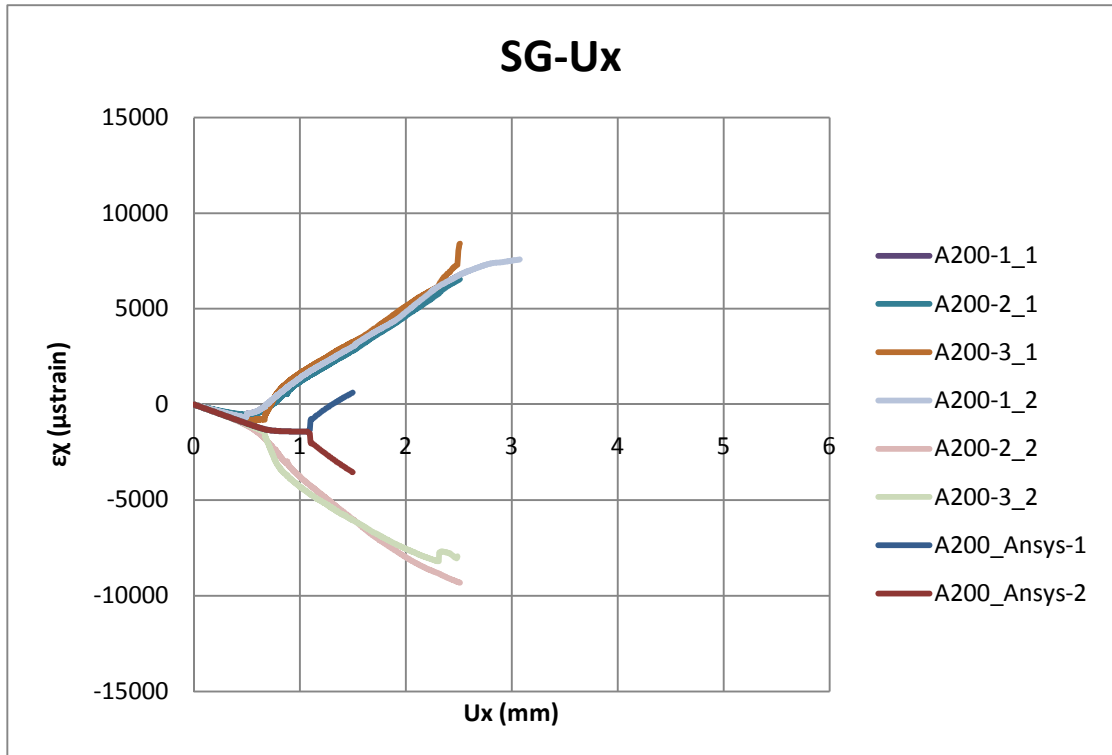
Τα διαγράμματα που εξήχθησαν από την πειραματική διαδικασία είναι τα εξής:



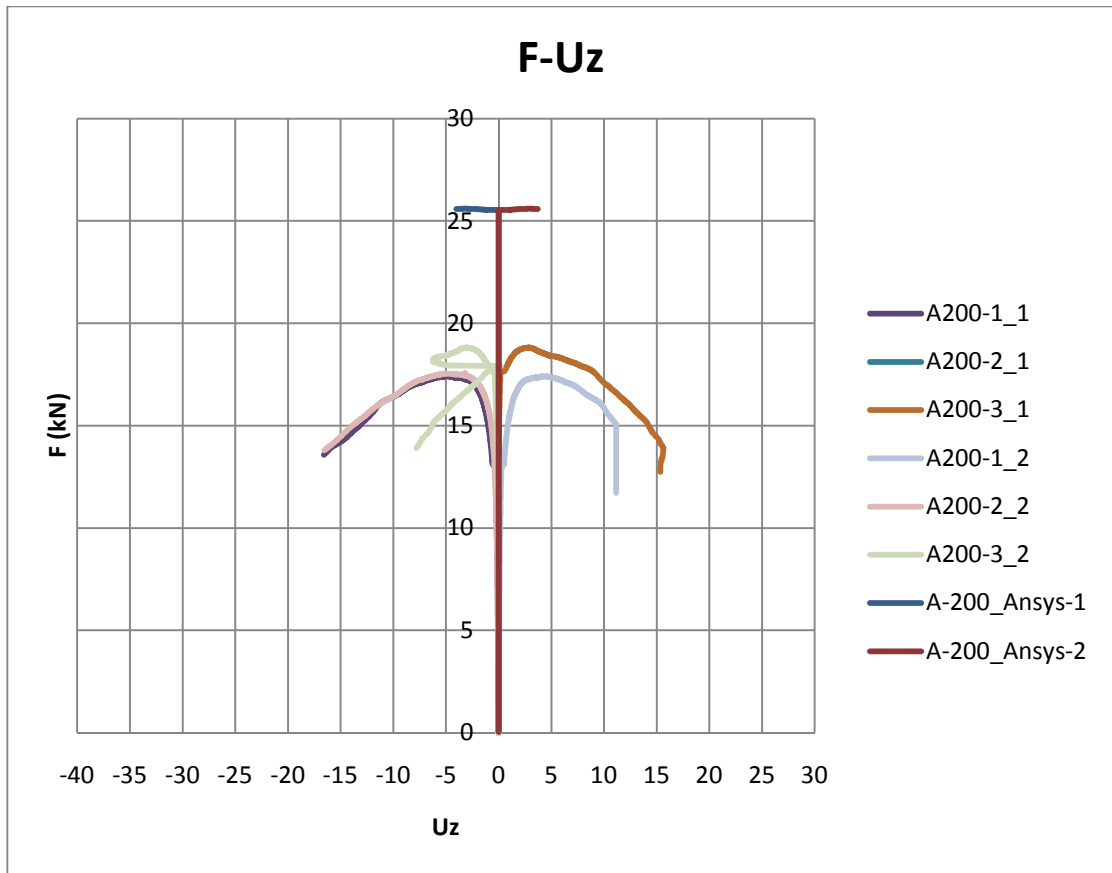
Σχήμα 4.20: Διάγραμμα δύναμης-αξονικής μετατόπισης για U_x από 0 έως 1 mm.



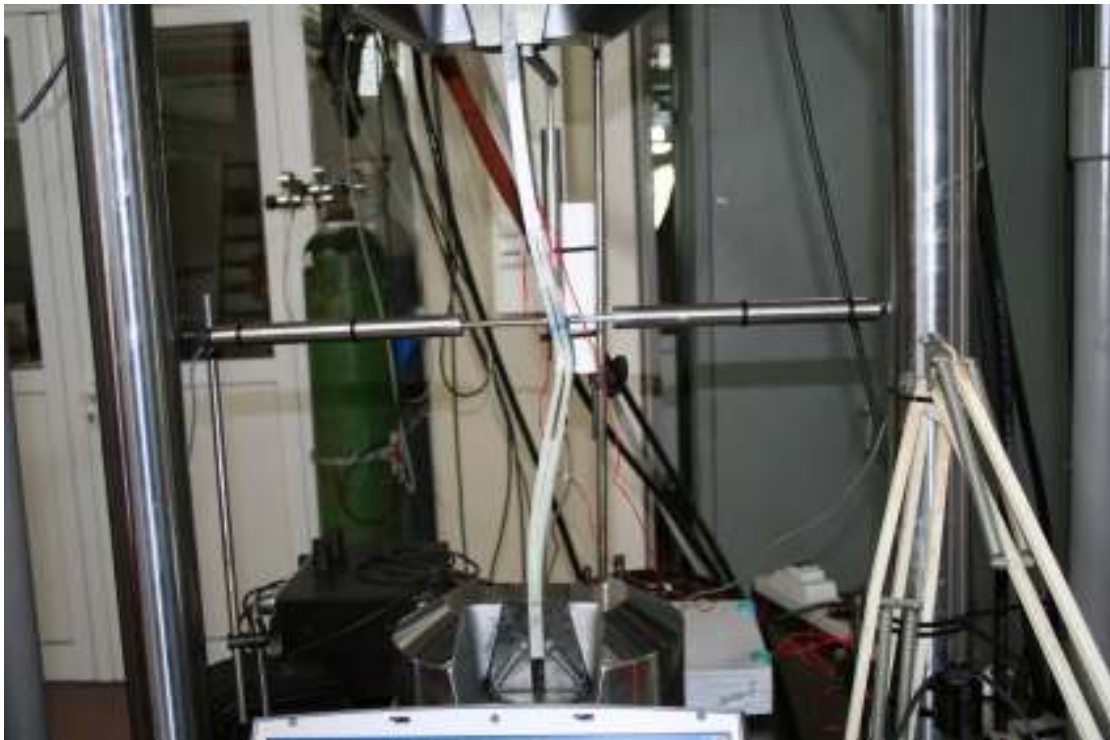
Σχήμα 4.21: Συγκριτικό διάγραμμα συνολικής δύναμης-αξονικής μετατόπισης



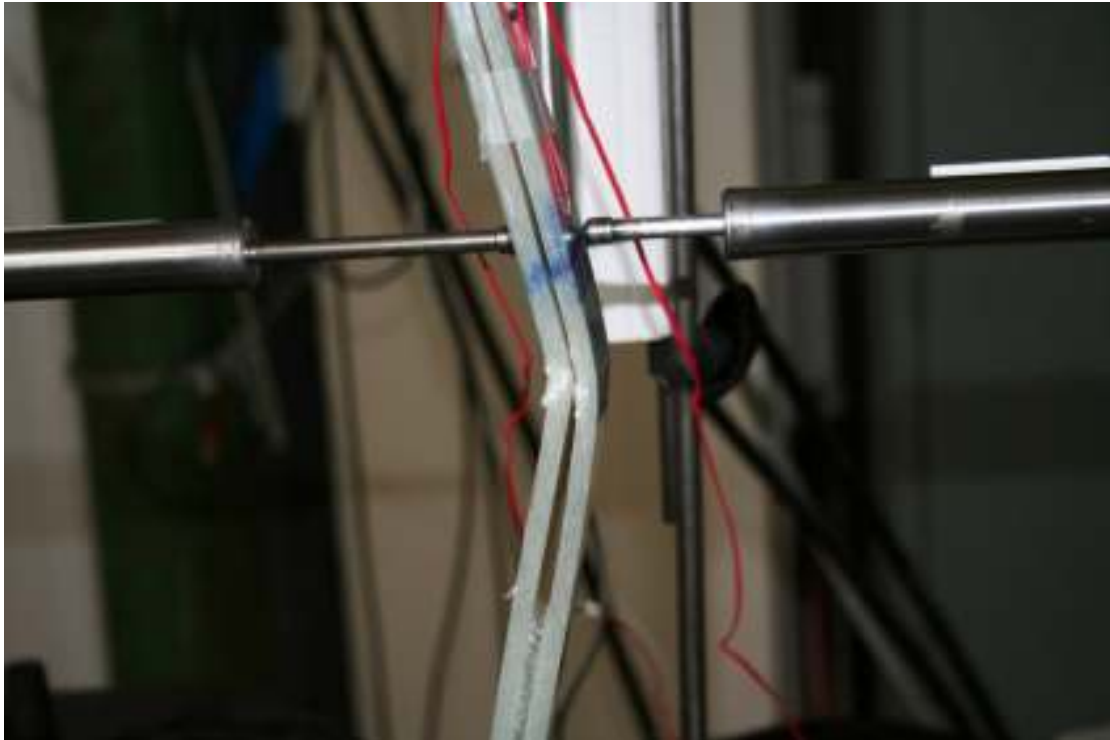
Σχήμα 4.22: Συγκριτικό διάγραμμα παραμόρφωσης -αξονικής μετατόπισης



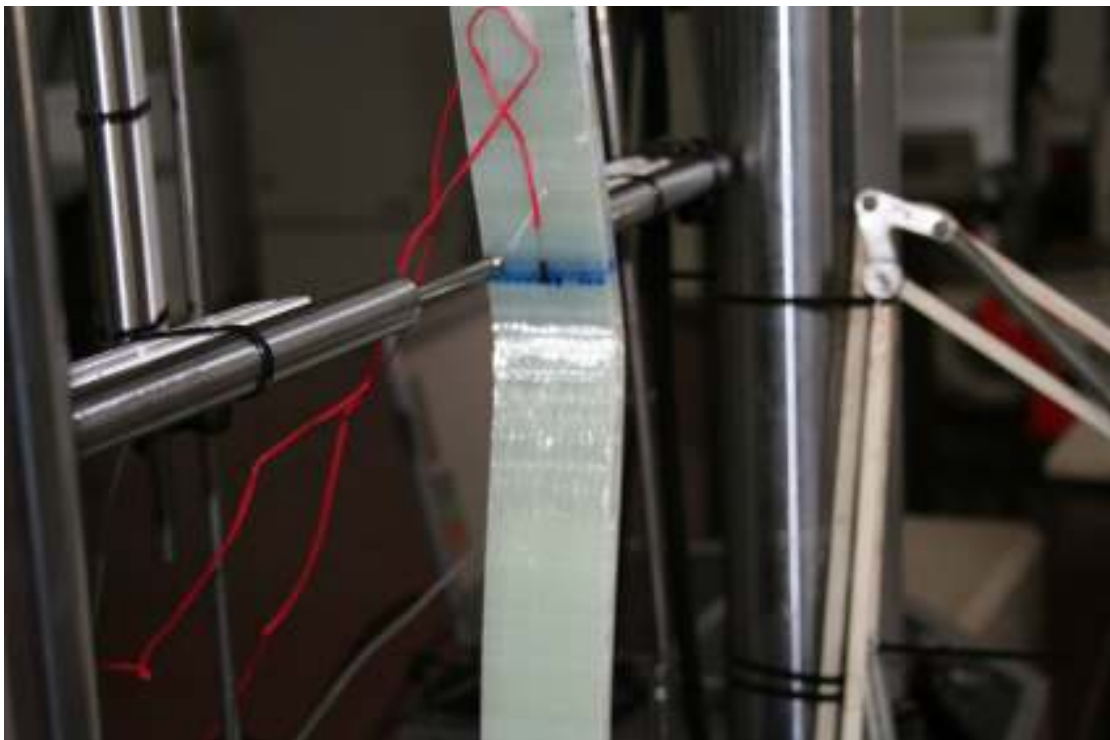
Σχήμα 4.23: Συγκριτικό διάγραμμα δύναμης-εγκάρσιας μετατόπισης



Σχήμα 4.24: Δοκίμιο σειράς A-200 μετά το πέρας του πειράματος



Σχήμα 4.25: Μορφή αστοχίας δοκιμίου σειράς A-200 μετά το πέρας του πειράματος



Σχήμα 4.26: Θραύση υποπολύστρωτου από λυγισμό

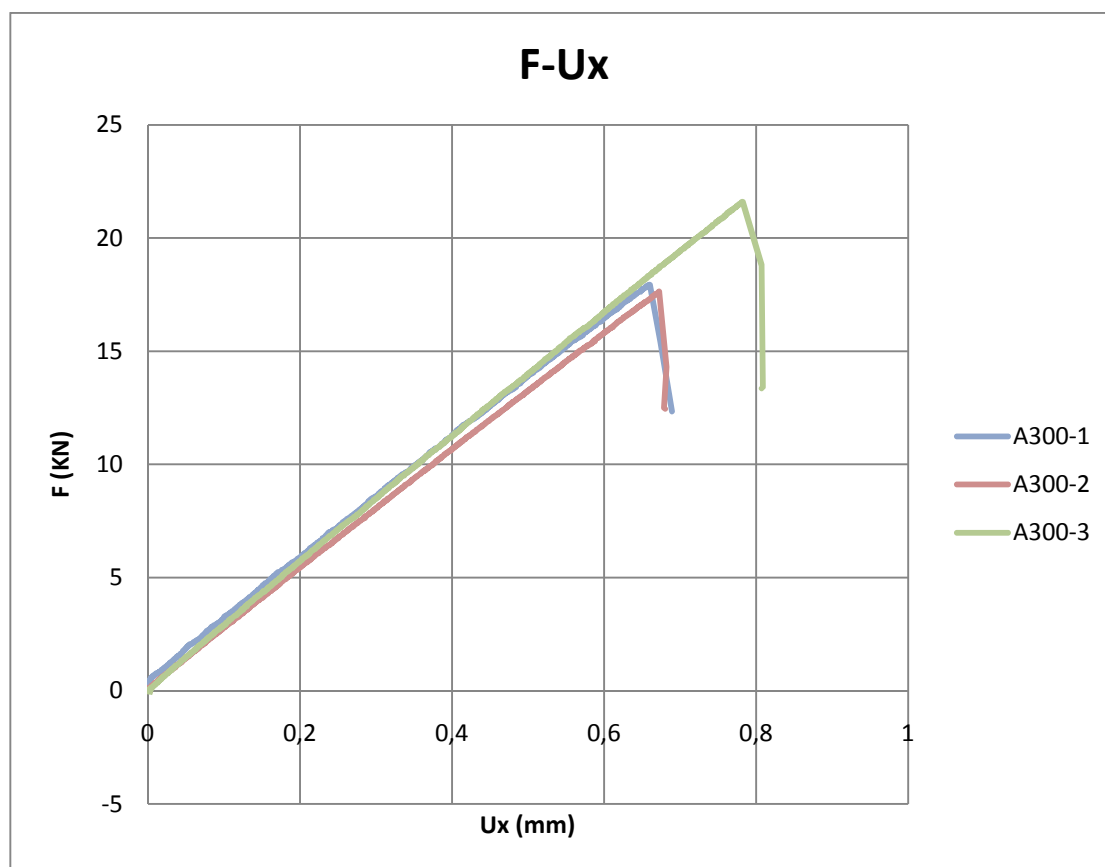
4.5.2.3 Σειρά δοκιμών A-300

Τα δοκίμια της σειράς A-300 έχουν μήκος αποχωρισμού των στρώσεων 300mm που βρίσκεται στο 50% του πάχους του δοκιμίου. Οι μέσοι όροι των διαστάσεων και το μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη με βάση την κατά βάρος περιεκτικότητα σε ίνες της σειράς αυτής είναι οι εξής:

Πίνακας 4.10: Διαστάσεις και ιδιότητες δοκιμών σειράς A-300

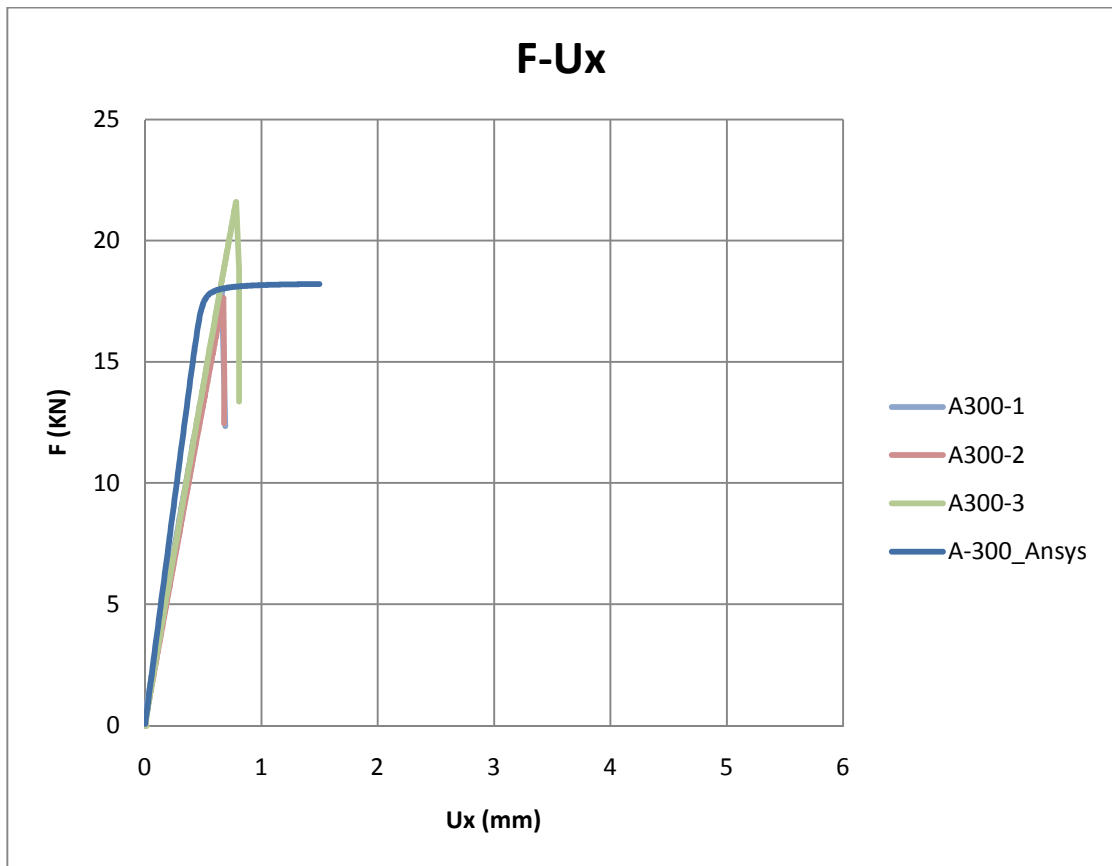
L (mm)	600
B (mm)	49,7
t (mm)	12,1
E_x (GPa)	30,43

Τα διαγράμματα που εξήχθησαν από την πειραματική διαδικασία παρουσιάζονται είναι τα εξής:

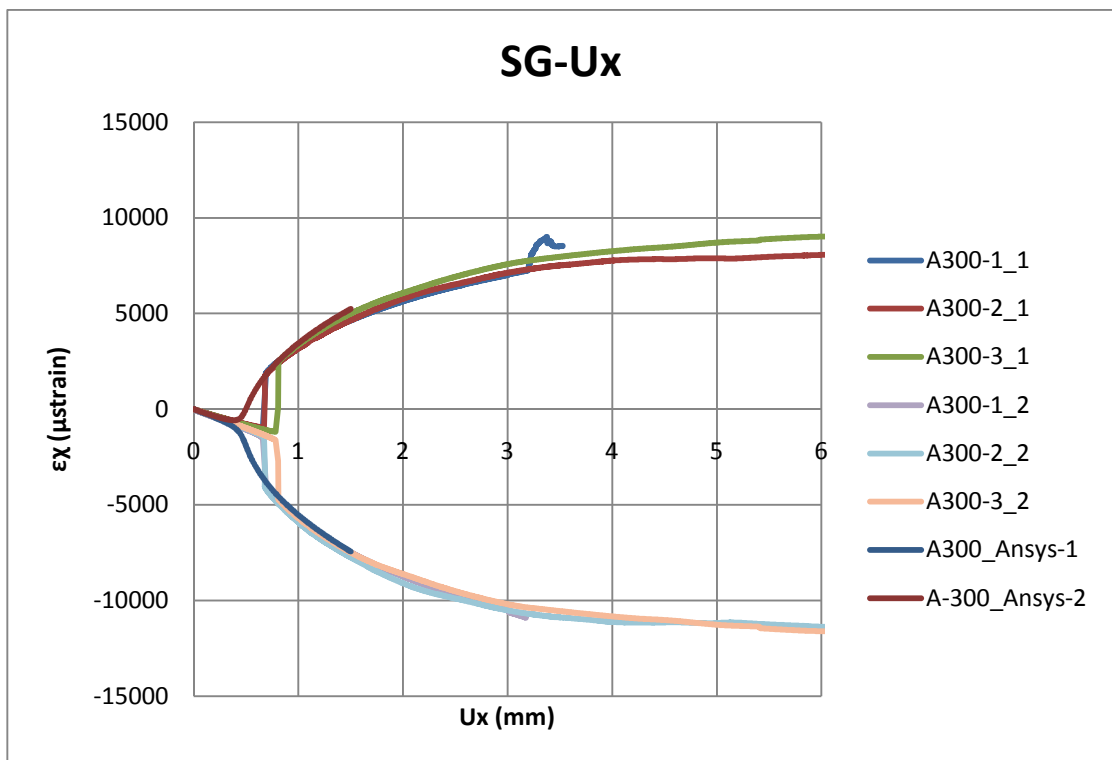


Σχήμα 4.27: Διάγραμμα δύναμης-αξονικής μετατόπισης για U_x από 0 έως 1 mm.

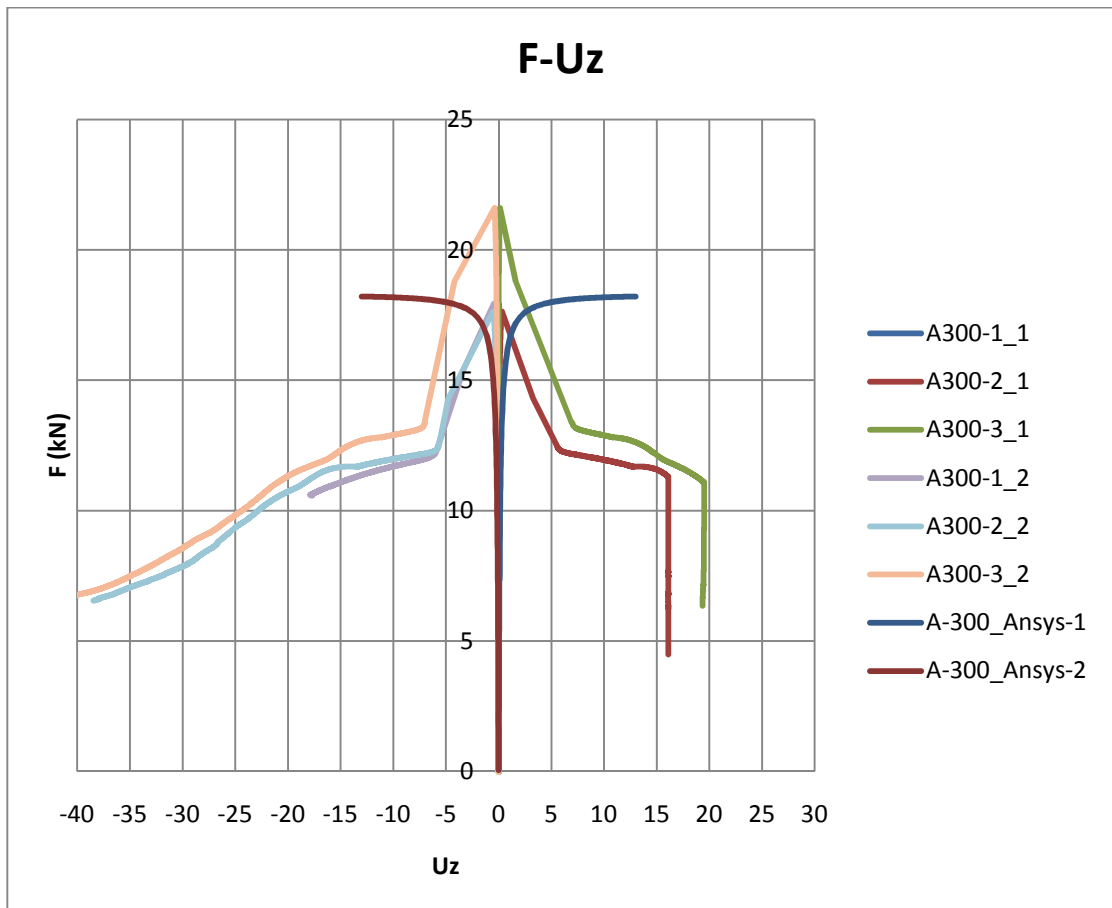
Σε αυτή την περίπτωση ο λυγμός επέρχεται πριν η επιβαλλόμενη μετατόπιση φτάσει το 1 mm οπότε το επόμενο διάγραμμα τοποθετείται για λόγους οπτικής και μόνο σύγκρισης με τα προηγούμενα .



Σχήμα 4.28: Συγκριτικό διάγραμμα συνολικής δύναμης-αξονικής μετατόπισης



Σχήμα 4.29: Συγκριτικό διάγραμμα παραμόρφωσης-αξονικής μετατόπισης



Σχήμα 4.30: Συγκριτικό διάγραμμα δύναμης-εγκάρσιας μετατόπισης



Σχήμα 4.31: Δοκίμα σειράς A-300 μετά το πέρας της πειραματικής διαδικασίας.

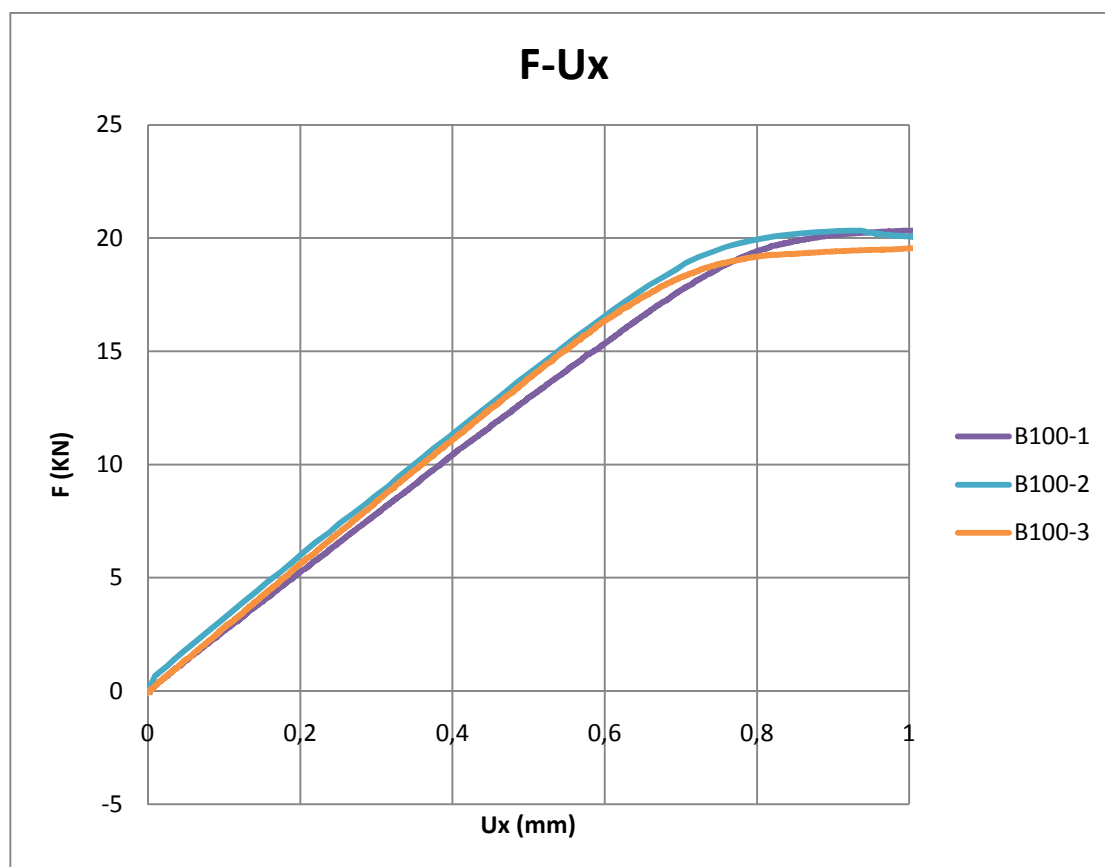
4.5.2.4 Σειρά δοκιμών B-100

Τα δοκίμια της σειράς B-100 έχουν μήκος αποχωρισμού των στρώσεων 100mm που βρίσκετε στο 75% του πάχους του δοκιμίου. Οι μέσοι όροι των διαστάσεων και το μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη με βάση την κατά βάρος περιεκτικότητα σε ίνες της σειράς αυτής είναι οι εξής:

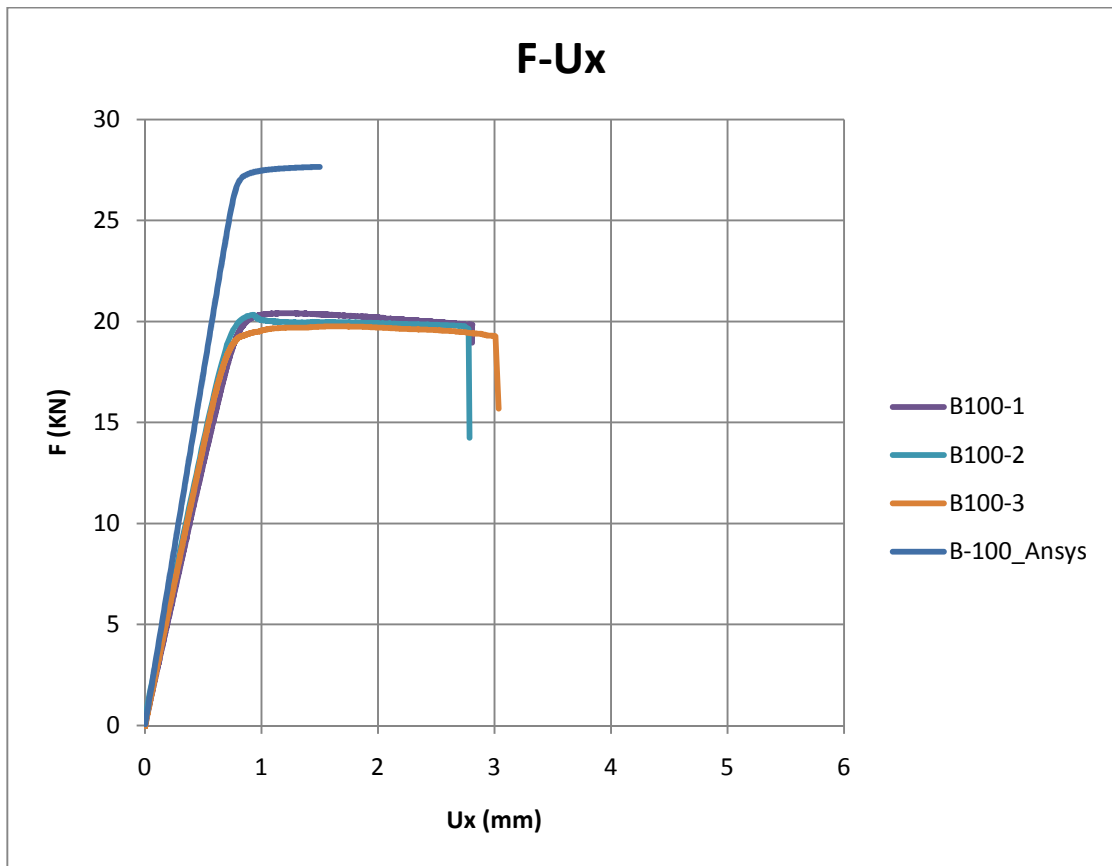
Πίνακας 4.11: Διαστάσεις και ιδιότητες δοκιμών σειράς B-100

L (mm)	600
B (mm)	49,7
t (mm)	11,3
E _x (GPa)	30,98

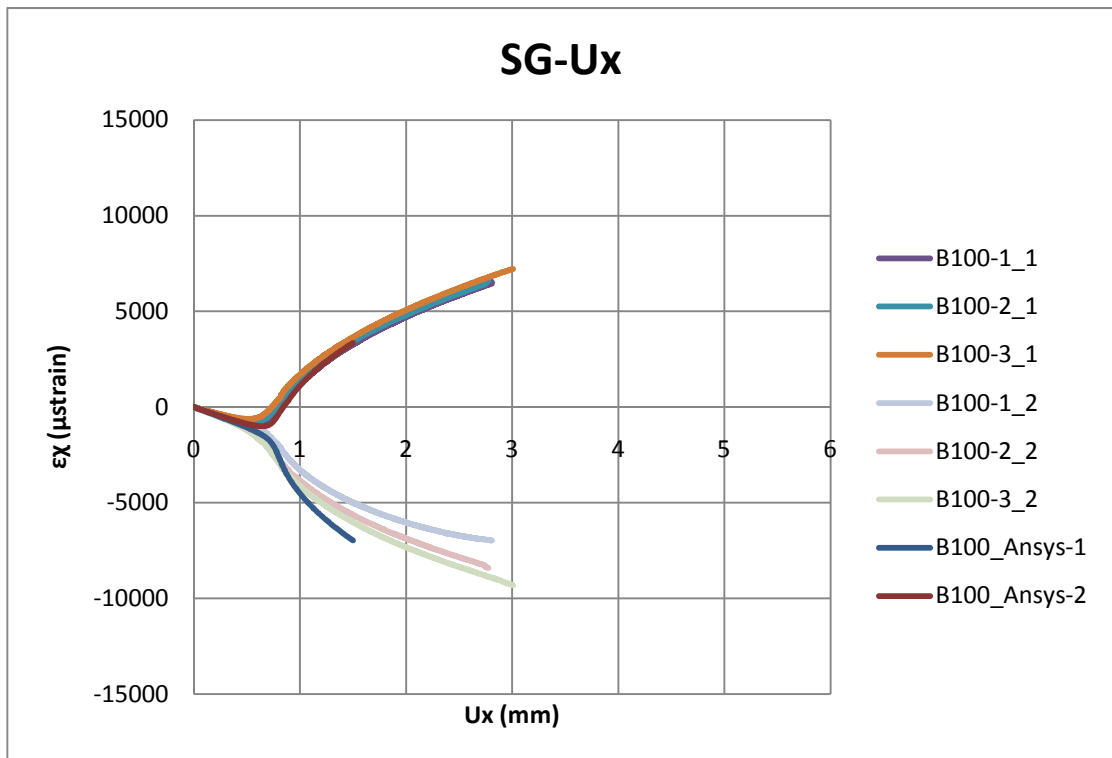
Τα διαγράμματα που εξήχθησαν από την πειραματική διαδικασία παρουσιάζονται είναι τα εξής:



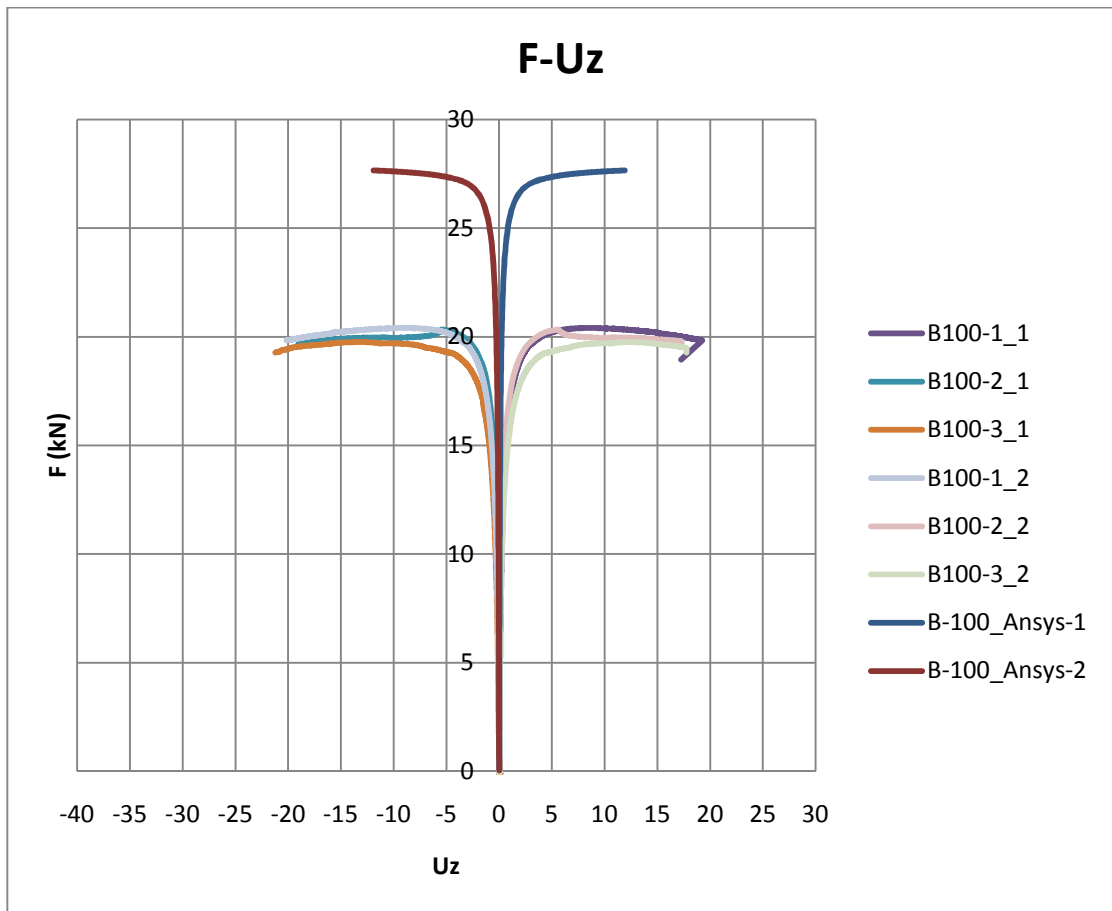
Σχήμα 4.32: Διάγραμμα δύναμης-αξονικής μετατόπισης για Ux από 0 έως 1 mm.



Σχήμα 4.33: Συγκριτικό διάγραμμα συνολικής δύναμης-αξονικής μετατόπισης



Σχήμα 4.34: Συγκριτικό διάγραμμα παραμόρφωσης-αξονικής μετατόπισης



Σχήμα 4.35: Συγκριτικό διάγραμμα δύναμης-εγκάρσιας μετατόπισης



Σχήμα 4.36: Δοκίμια σειράς B-100 μετά το πέρας της πειραματικής διαδικασίας.



Σχήμα 4.37: Μορφή θραύσης δοκιμίου σειράς B-100 μετά το πέρας της πειραματικής διαδικασίας.

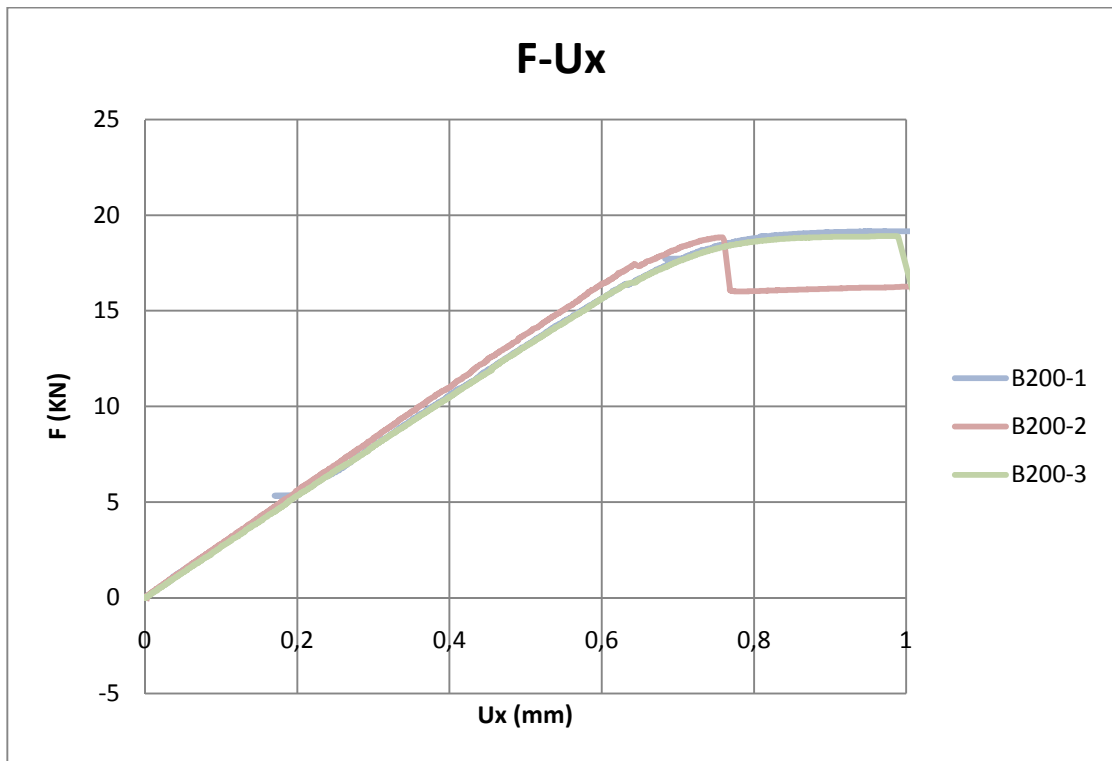
4.5.2.5 Σειρά δοκιμών B-200

Τα δοκίμια της σειράς B-200 έχουν μήκος αποχωρισμού των στρώσεων 200mm που βρίσκεται στο 75% του πάχους του δοκιμίου. Οι μέσοι όροι των διαστάσεων και το μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη με βάση την κατά βάρος περιεκτικότητα σε ίνες της σειράς αυτής είναι οι εξής:

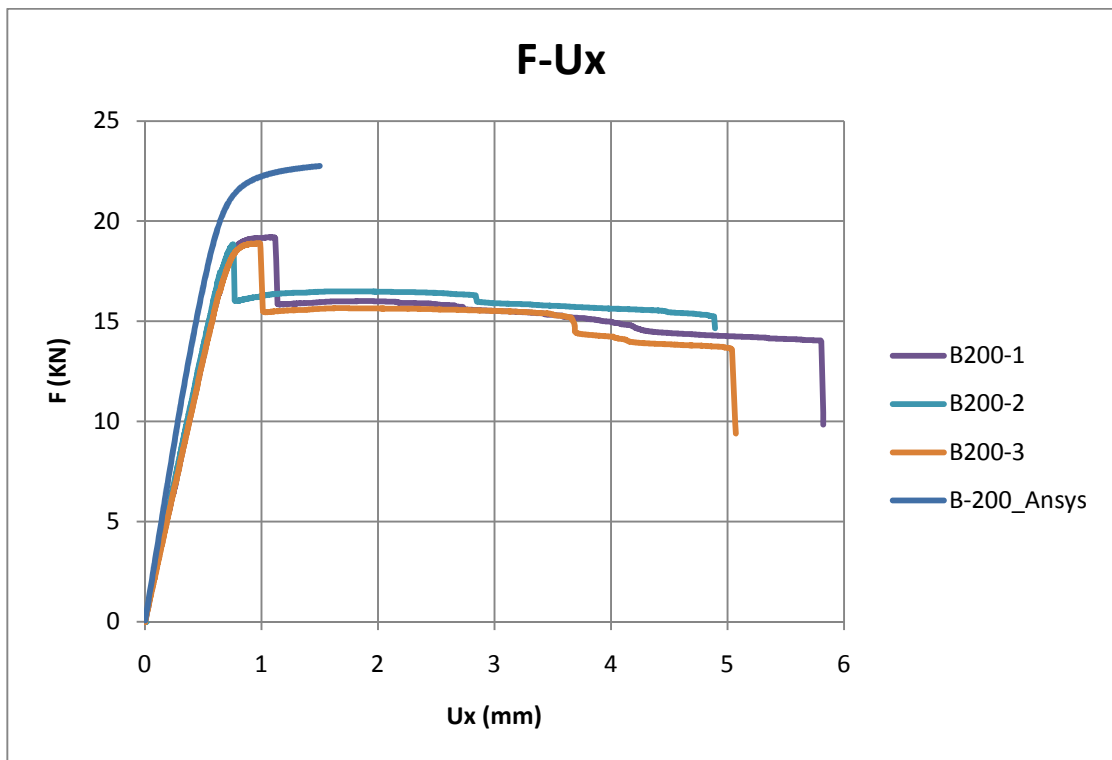
Πίνακας 4.12: Διαστάσεις και ιδιότητες δοκιμών σειράς B-200

L (mm)	600
B (mm)	49,7
t (mm)	11,6
E_x (GPa)	30,87

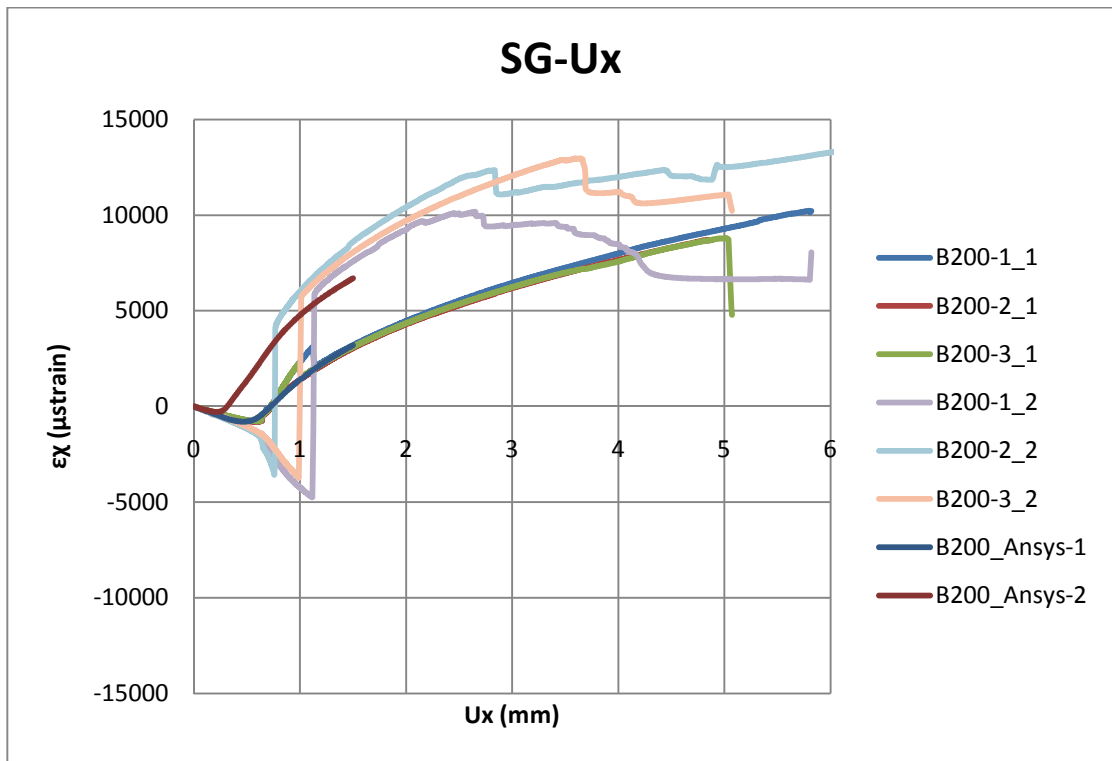
Τα διαγράμματα που εξήχθησαν από την πειραματική διαδικασία παρουσιάζονται είναι τα εξής:



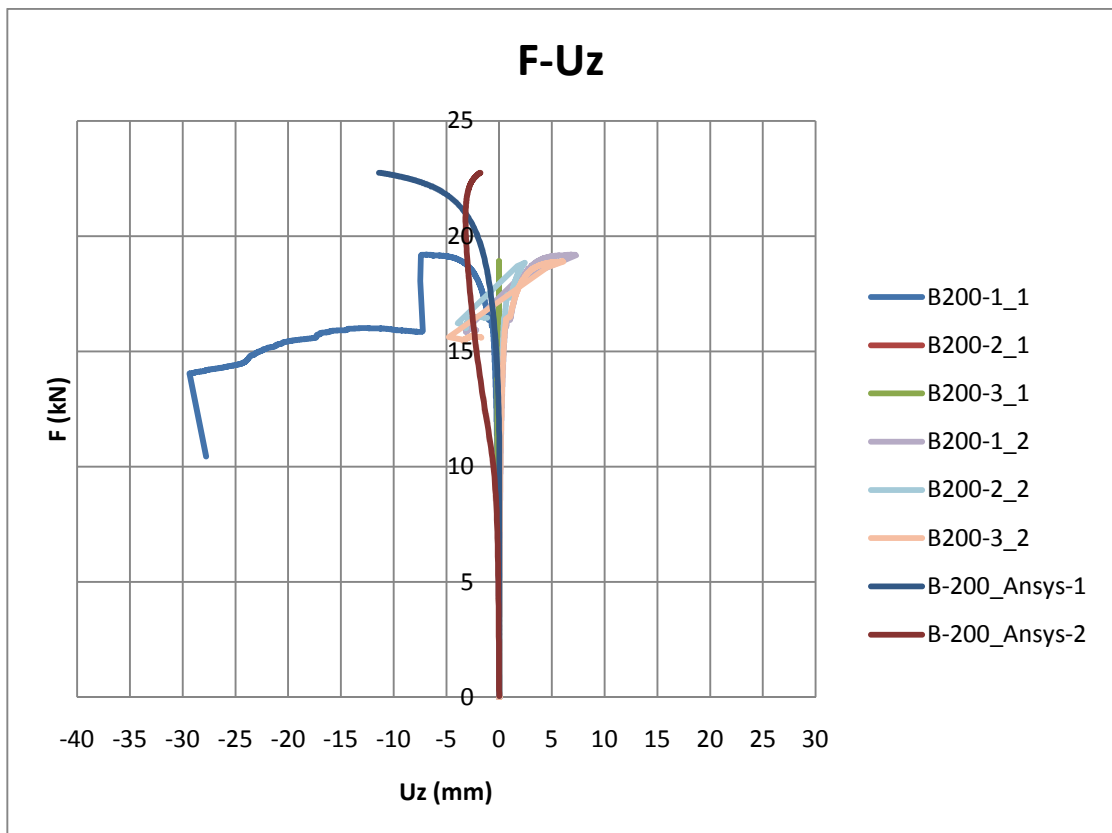
Σχήμα 4.38: Διάγραμμα δύναμης-αξονικής μετατόπισης για U_x από 0 έως 1 mm.



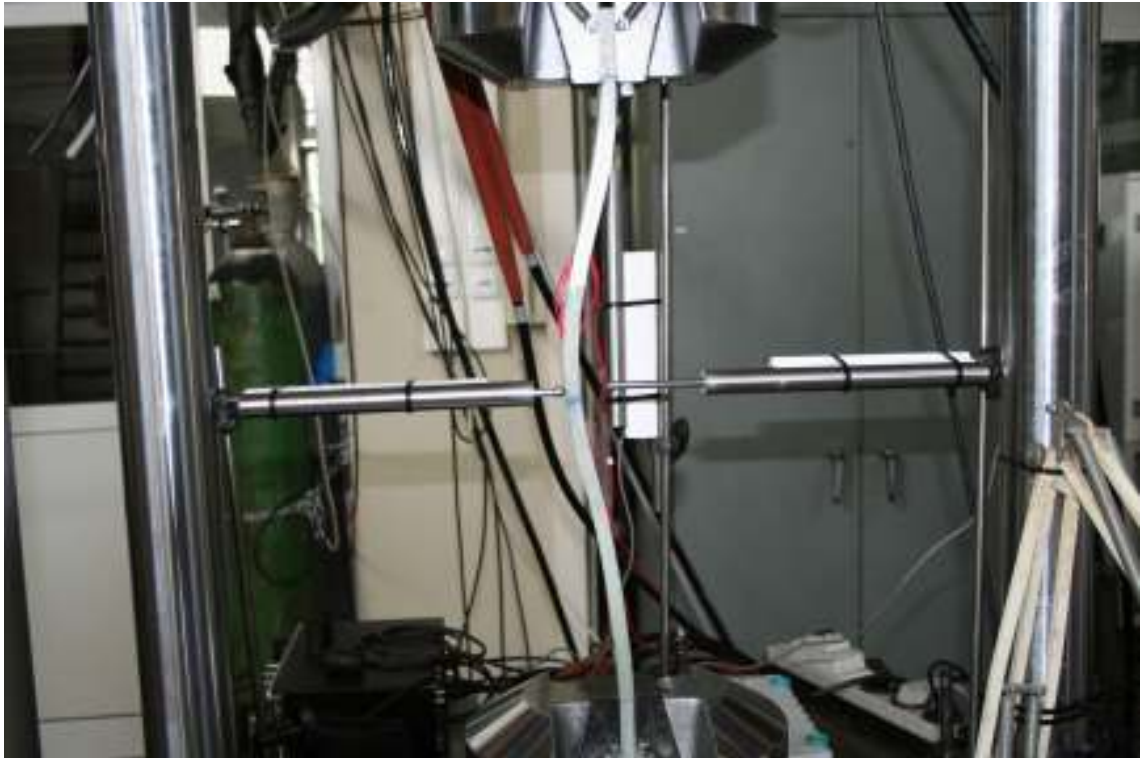
Σχήμα 4.39: Συγκριτικό διάγραμμα συνολικής δύναμης-αξονικής μετατόπισης



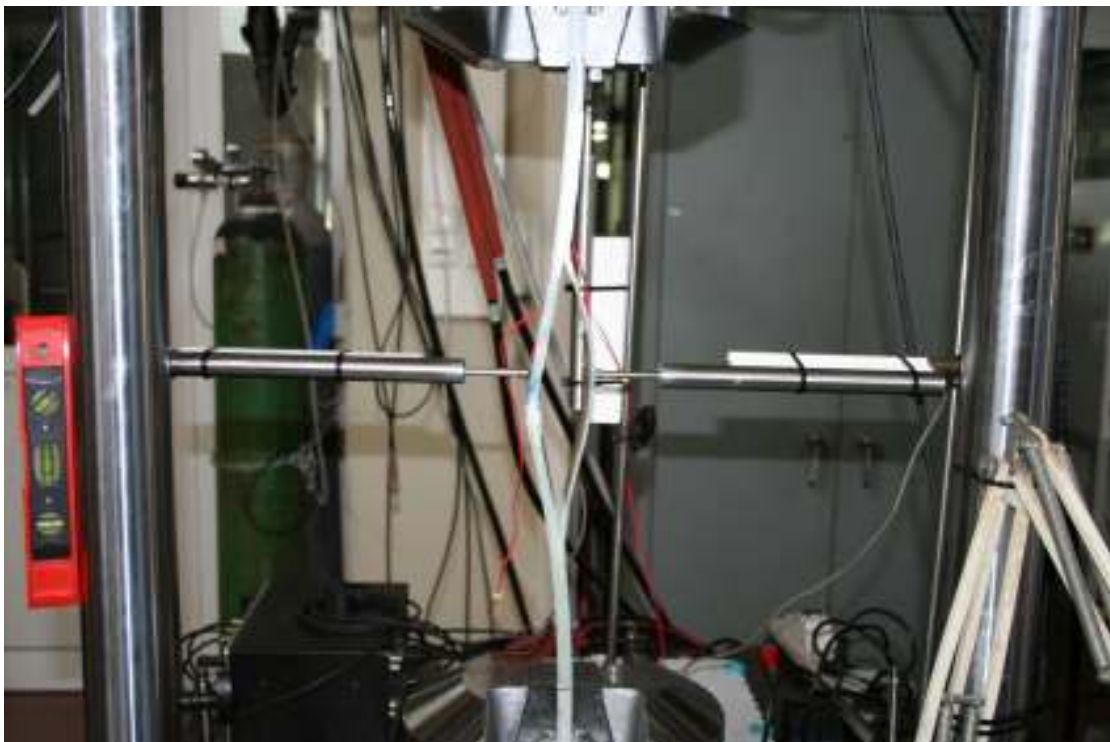
Σχήμα 4.40: Συγκριτικό διάγραμμα παραμόρφωσης αξονικής μετατόπισης



Σχήμα 4.41: Συγκριτικό διάγραμμα δύναμης-εγκάρσιας μετατόπισης



Σχήμα 4.42: Πρώτη φάση λυγισμού δοκιμίου σειράς B-200



Σχήμα 4.43: Δοκίμια σειράς B-200 μετά το πέρας της πειραματικής διαδικασίας.

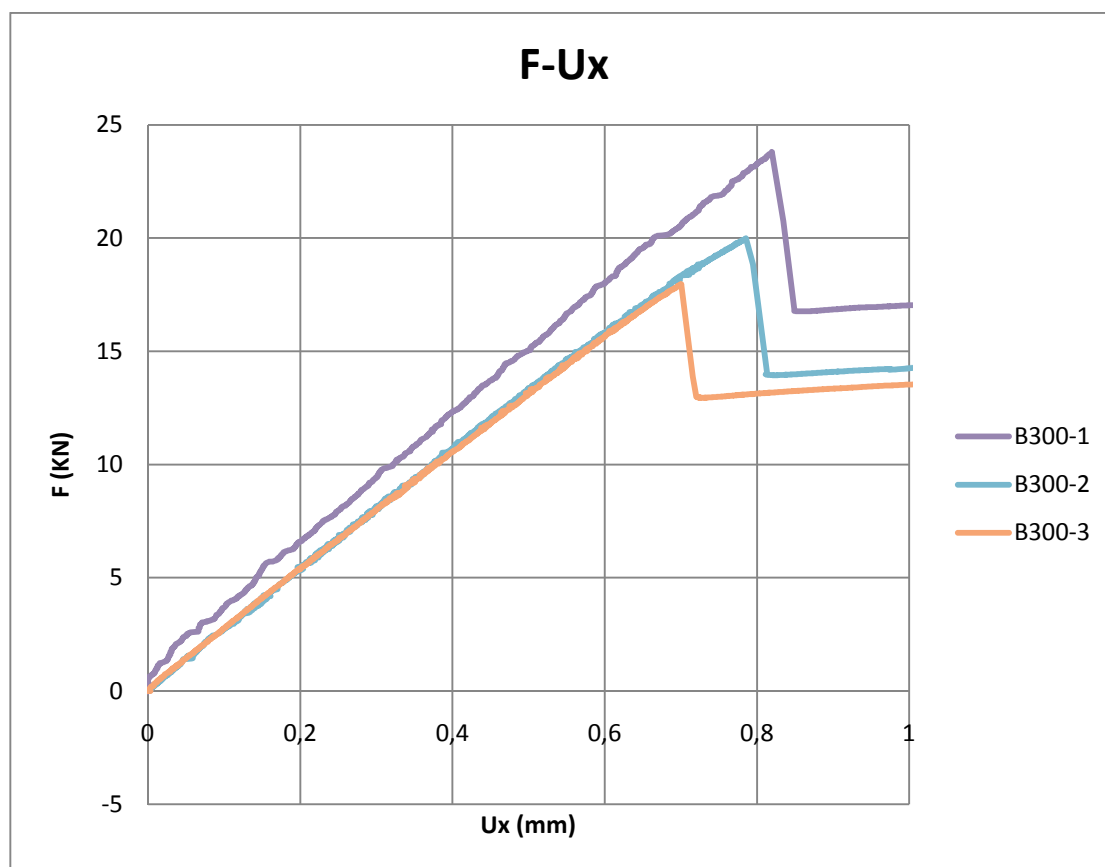
4.5.2.6 Σειρά δοκιμών B-300

Τα δοκίμια της σειράς B-300 έχουν μήκος αποχωρισμού των στρώσεων 300mm που βρίσκεται στο 75% του πάχους του δοκιμίου. Οι μέσοι όροι των διαστάσεων και το μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη με βάση την κατά βάρος περιεκτικότητα σε ίνες της σειράς αυτής είναι οι εξής:

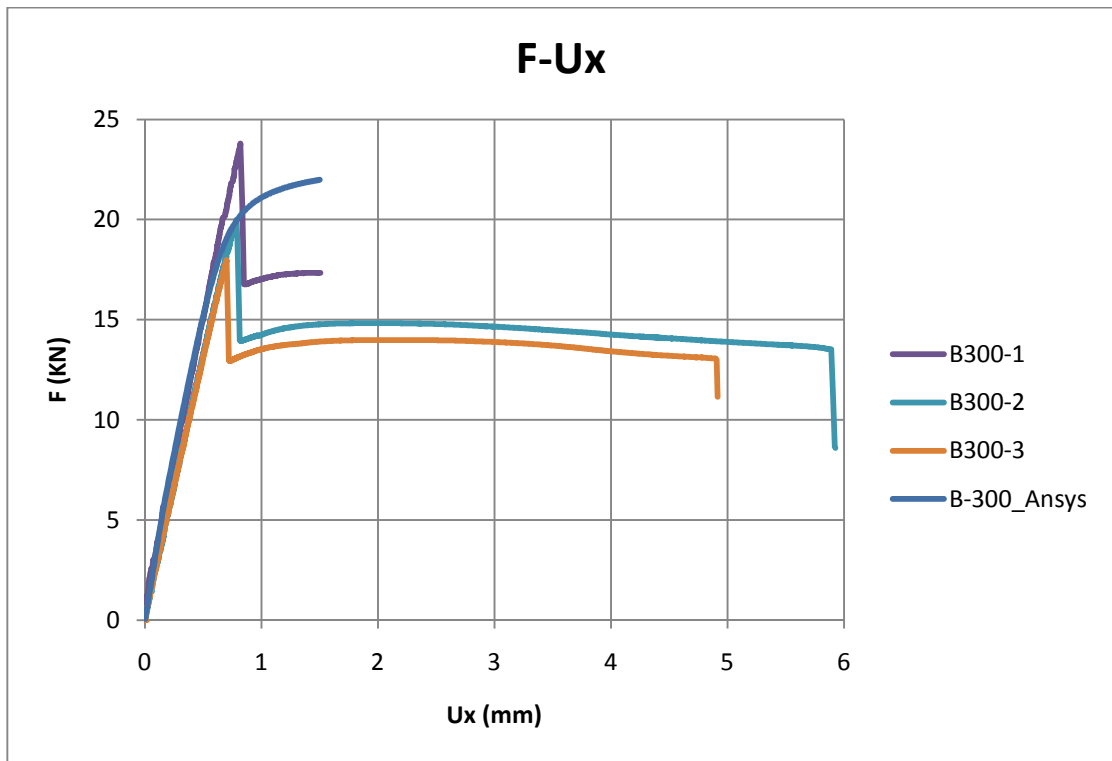
Πίνακας 4.13: Διαστάσεις και ιδιότητες δοκιμών σειράς B-300

L (mm)	600
B (mm)	49,7
t (mm)	12,2
E _x (GPa)	29,55

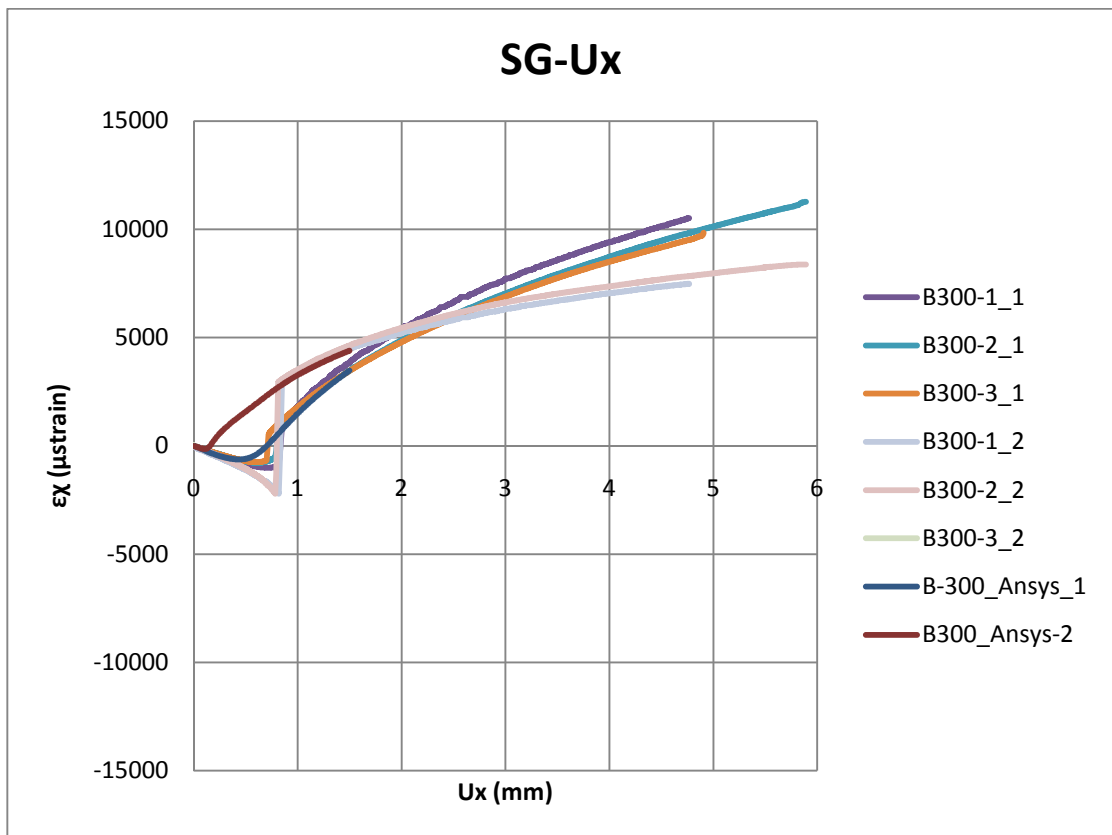
Τα διαγράμματα που εξήχθησαν από την πειραματική διαδικασία παρουσιάζονται είναι τα εξής:



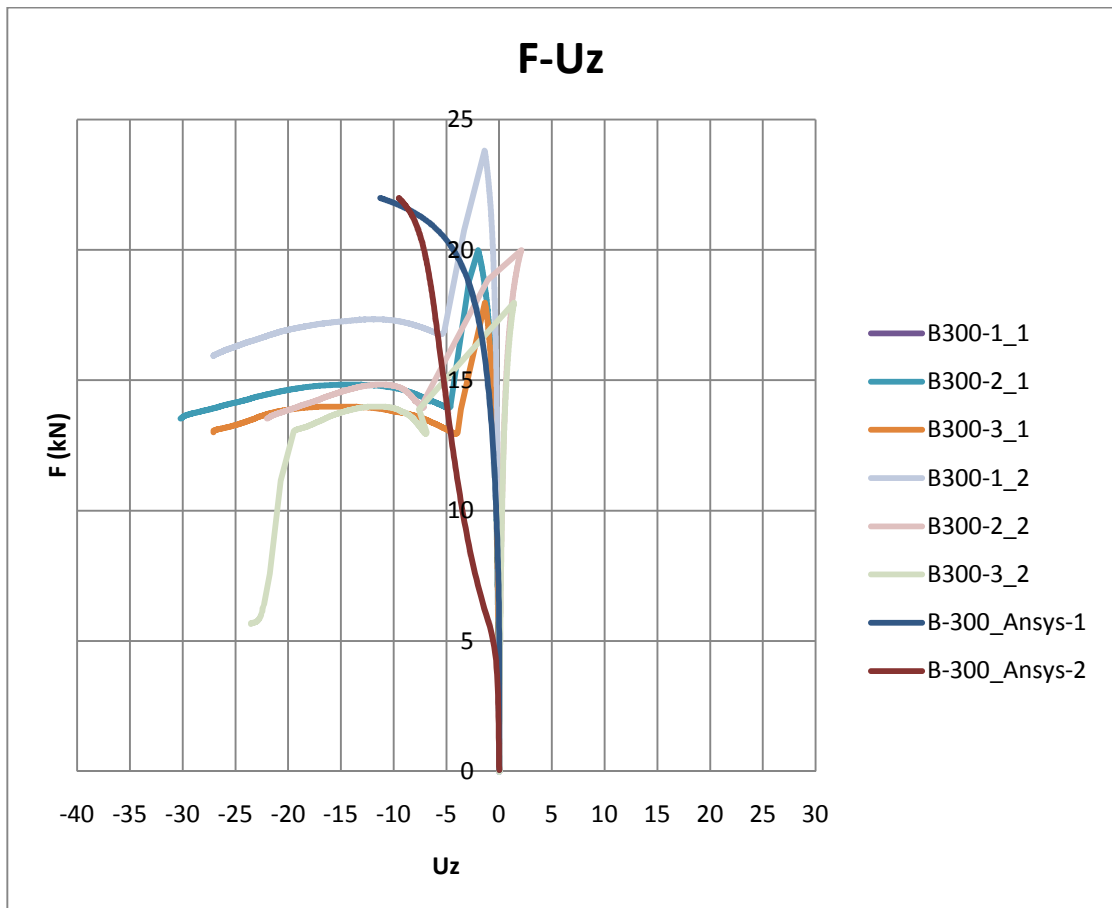
Σχήμα 4.44: Διάγραμμα δύναμης-αξονικής μετατόπισης για Ux από 0 έως 1 mm.



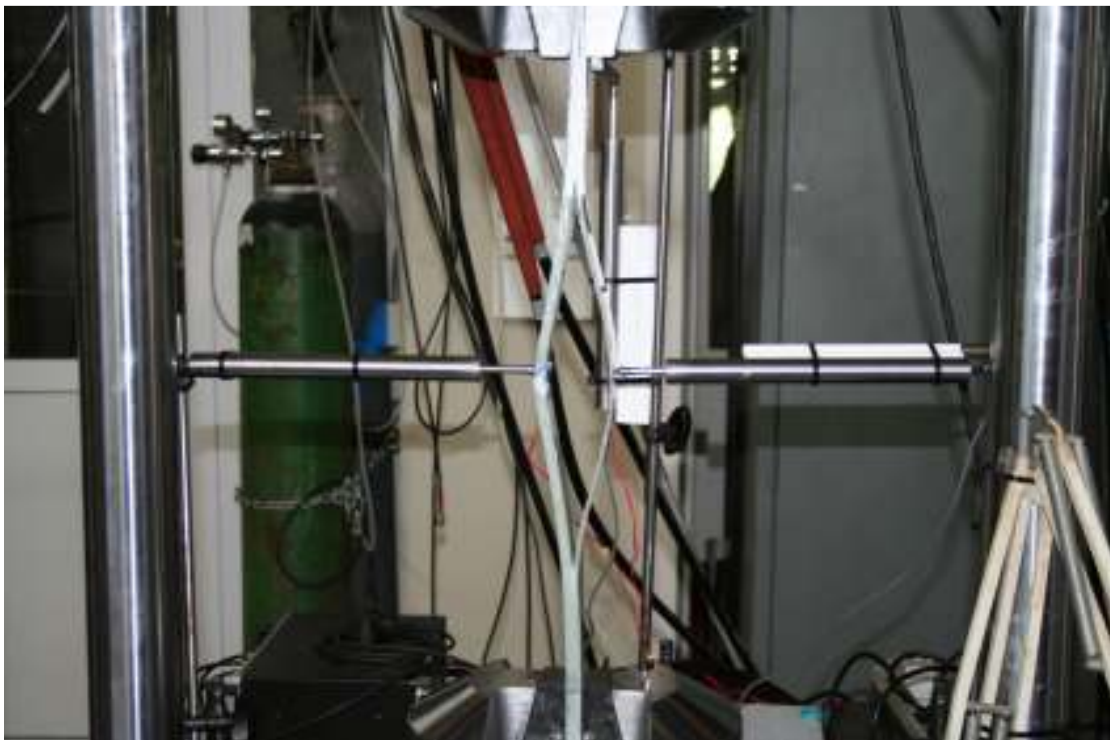
Σχήμα 4.45: Συγκριτικό διάγραμμα συνολικής δύναμης-αξονικής μετατόπισης



Σχήμα 4.46: Συγκριτικό διάγραμμα παραμόρφωσης-αξονικής μετατόπισης



Σχήμα 4.47: Συγκριτικό διάγραμμα δύναμης-εγκάρσιας μετατόπισης



Σχήμα 4.48: Δοκίμα σειράς B-300 μετά το πέρας της πειραματικής διαδικασίας.

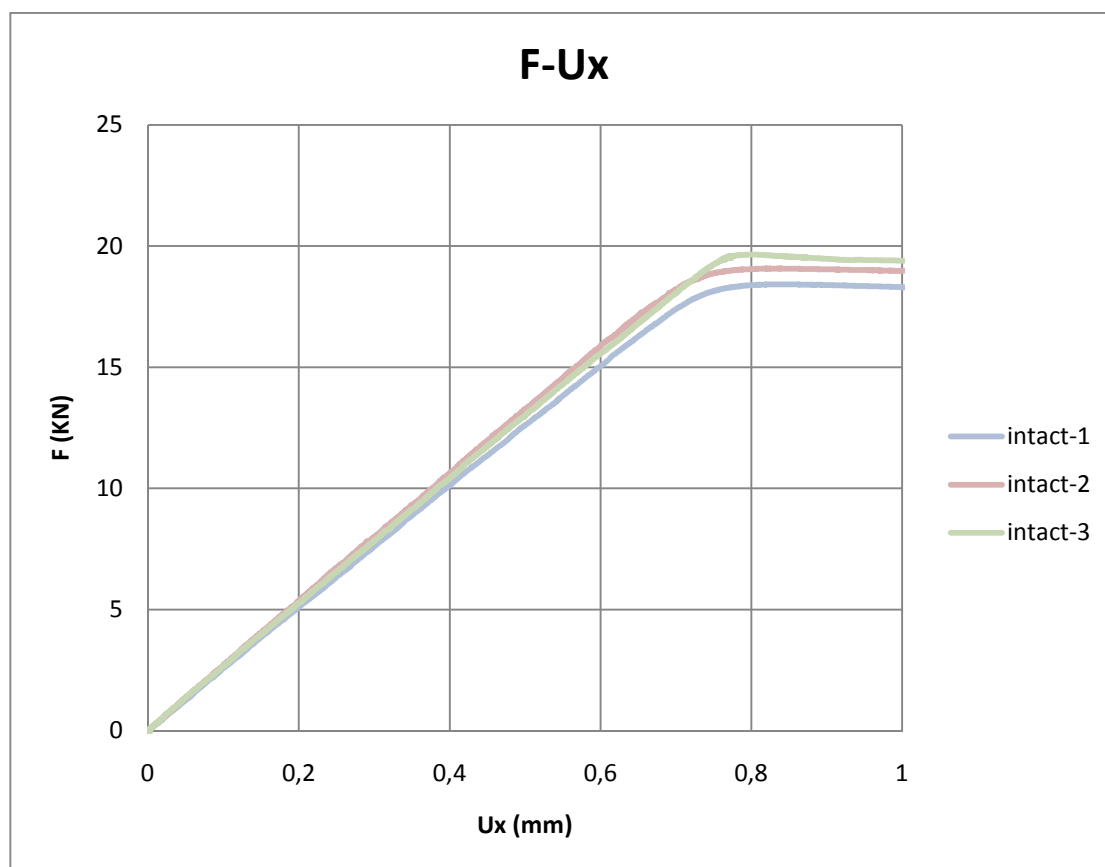
4.5.2.7 Σειρά δοκιμών Intact

Τα δοκίμια της σειράς Intact είναι άθικτα δοκίμια και έχουν κατασκευαστεί για λόγους σύγκρισης με αυτά που έχουν τεχνητό αποχωρισμό. Οι μέσοι όροι των διαστάσεων και το μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη με βάση την κατά βάρος περιεκτικότητα σε ίνες της σειράς αυτής είναι οι εξής:

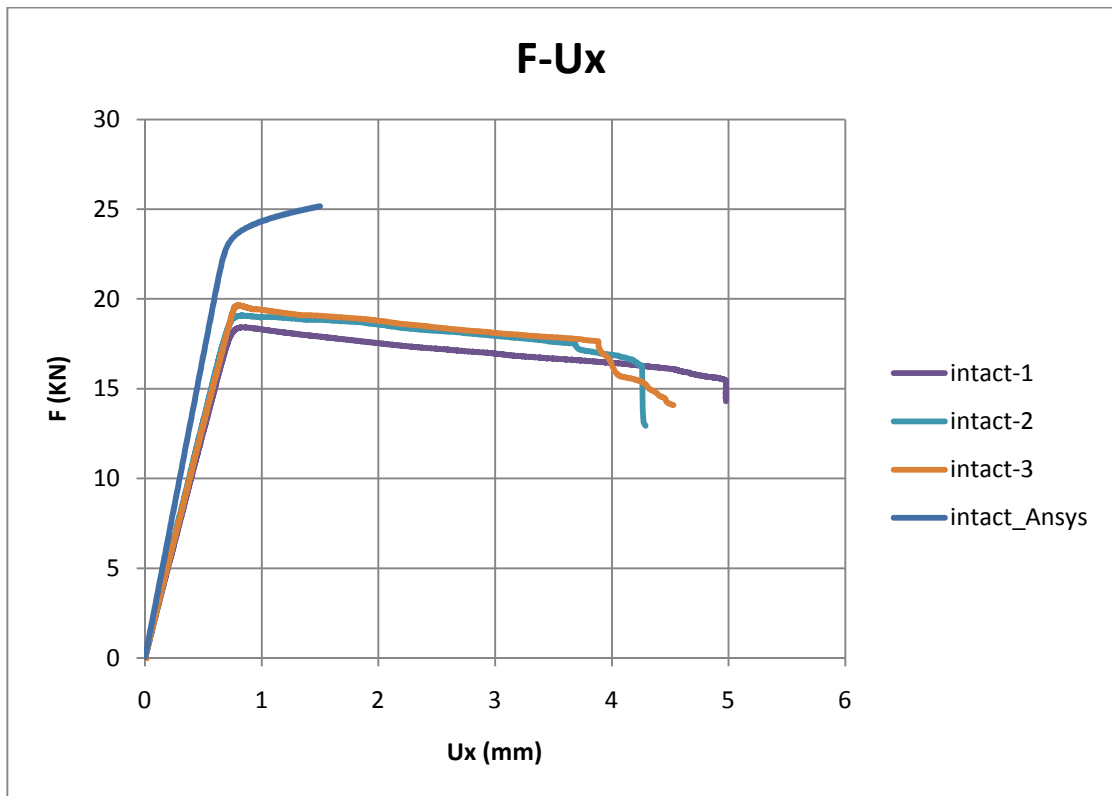
Πίνακας 4.14: Διαστάσεις και ιδιότητες δοκιμών σειράς Intact

L (mm)	600
B (mm)	49,57
t (mm)	10,54
E_x (GPa)	32,96

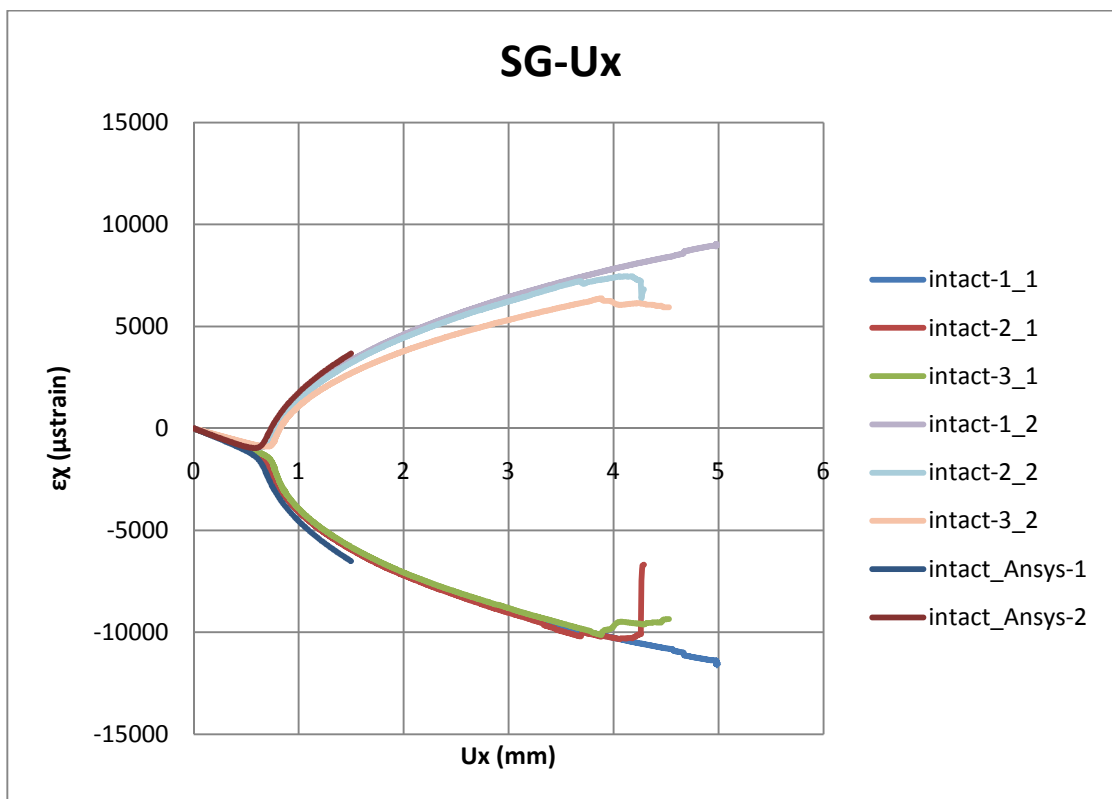
Τα διαγράμματα που εξήχθησαν από την πειραματική διαδικασία παρουσιάζονται είναι τα εξής:



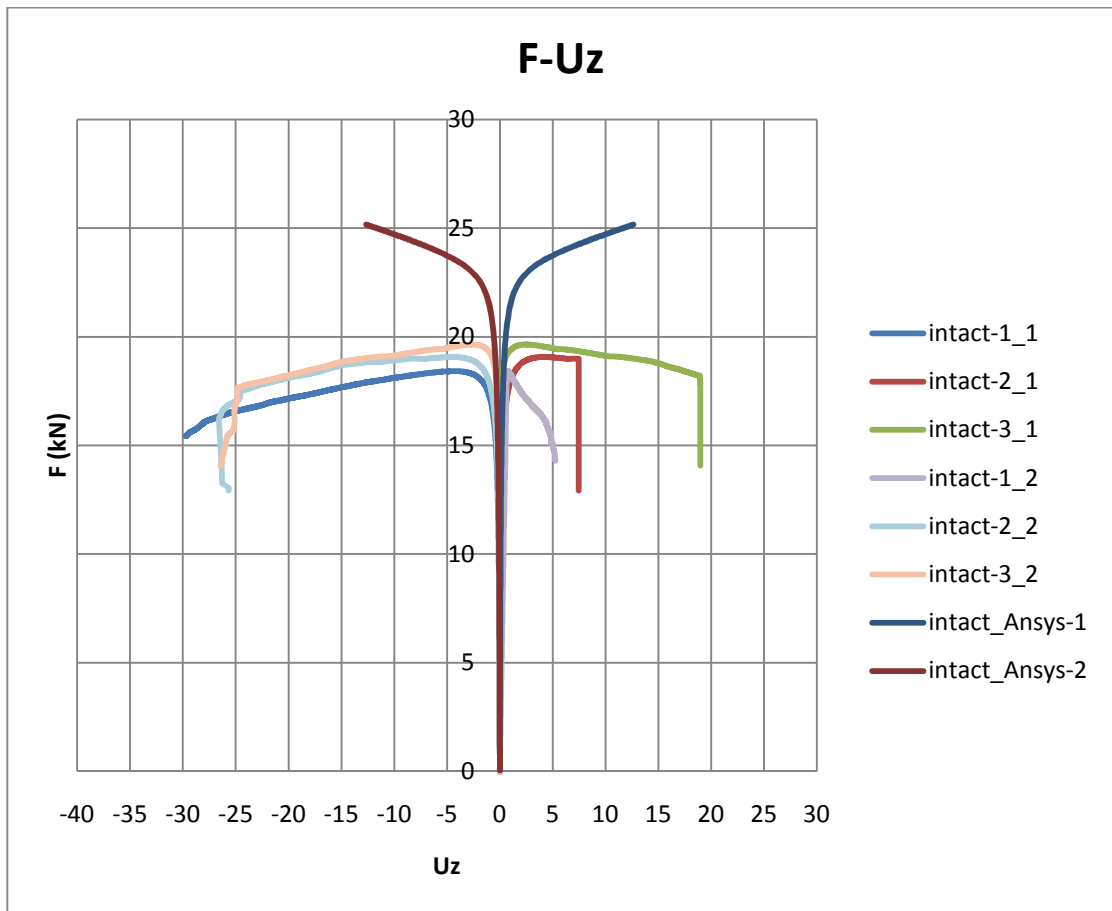
Σχήμα 4.49: Διάγραμμα δύναμης-αξονικής μετατόπισης για U_x από 0 έως 1 mm.



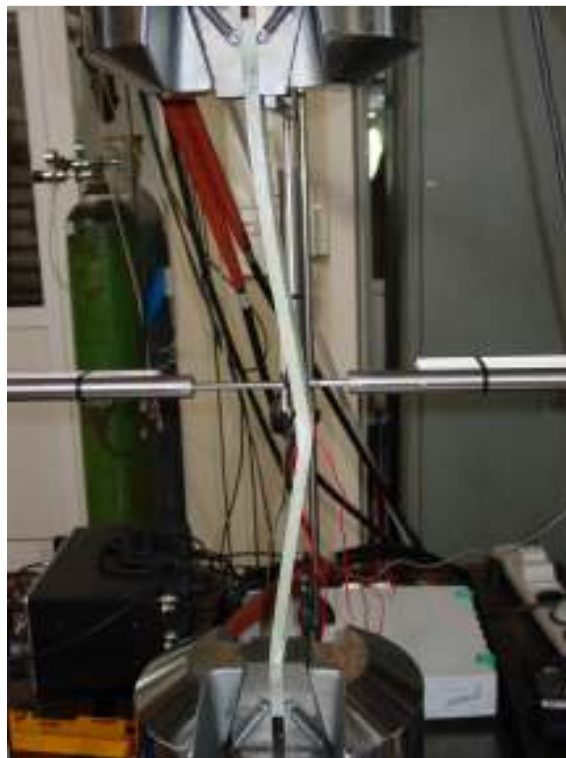
Σχήμα 4.50: Συγκριτικό διάγραμμα συνολικής δύναμης-αξονικής μετατόπισης



Σχήμα 4.51: Συγκριτικό διάγραμμα παραμόρφωσης-αξονικής μετατόπισης



Σχήμα 4.52: Συγκριτικό διάγραμμα δύναμης-εγκάρσιας μετατόπισης



Σχήμα 4.53: Δοκίμα σειράς Intact μετά το πέρας του πειράματος

4.5.2.8 Συγκεντρωτικά διαγράμματα

Κατά την κατασκευή των δοκιμίων είναι αδύνατη η επίτευξη ίδιων διαστάσεων και μηχανικών ιδιοτήτων σε όλα τα δοκίμια όπως φαίνεται και από τους πίνακες 4.3 και 4.8-14. Για αυτό το λόγο κατασκευάστηκε μία συνάρτηση αναγωγής του φορτίου που εφαρμόζεται στο πείραμα σε φορτίο που θα εφαρμοζόταν εάν όλα τα δοκίμια είχαν ακριβώς ίδιες διαστάσεις και μηχανικές ιδιότητες με τα άθικτα δοκίμια. Αυτό γίνεται για να μπορέσουμε να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα των πειραμάτων διότι διαφορετικά θα γινόταν σύγκριση ανόμοιων πραγμάτων και τα εξαγόμενα συμπεράσματα θα ήταν λανθασμένα. Στον πίνακα 4.14 και στο διάγραμμα 4.54 έχει γίνει αναγωγή του φορτίου στις ιδιότητες και στις διαστάσεις του άθικτου δοκιμίου. Αυτό έχει γίνει με τον εξής τρόπο:

Το φορτίο είναι ανάλογο του μέτρου ελαστικότητας σε θλίψη και της ροπής αδράνειας του δοκιμίου οπότε:

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{E_1 * B_1 * t_1^3}{12} \right) / \left(\frac{E_2 * B_2 * t_2^3}{12} \right) \quad (4.7)$$

$$B_1 = B_2 \quad (4.8)$$

$$P_1 = \frac{E_1 * t_1^3}{E_2 * t_2^3} * P_2 \quad (4.9)$$

P_1 : Επιβαλλόμενο φορτίο μετά την αναγωγή

P_2 : Φορτίο πειράματος

E_1 : Μέτρο ελαστικότητας δοκιμίου

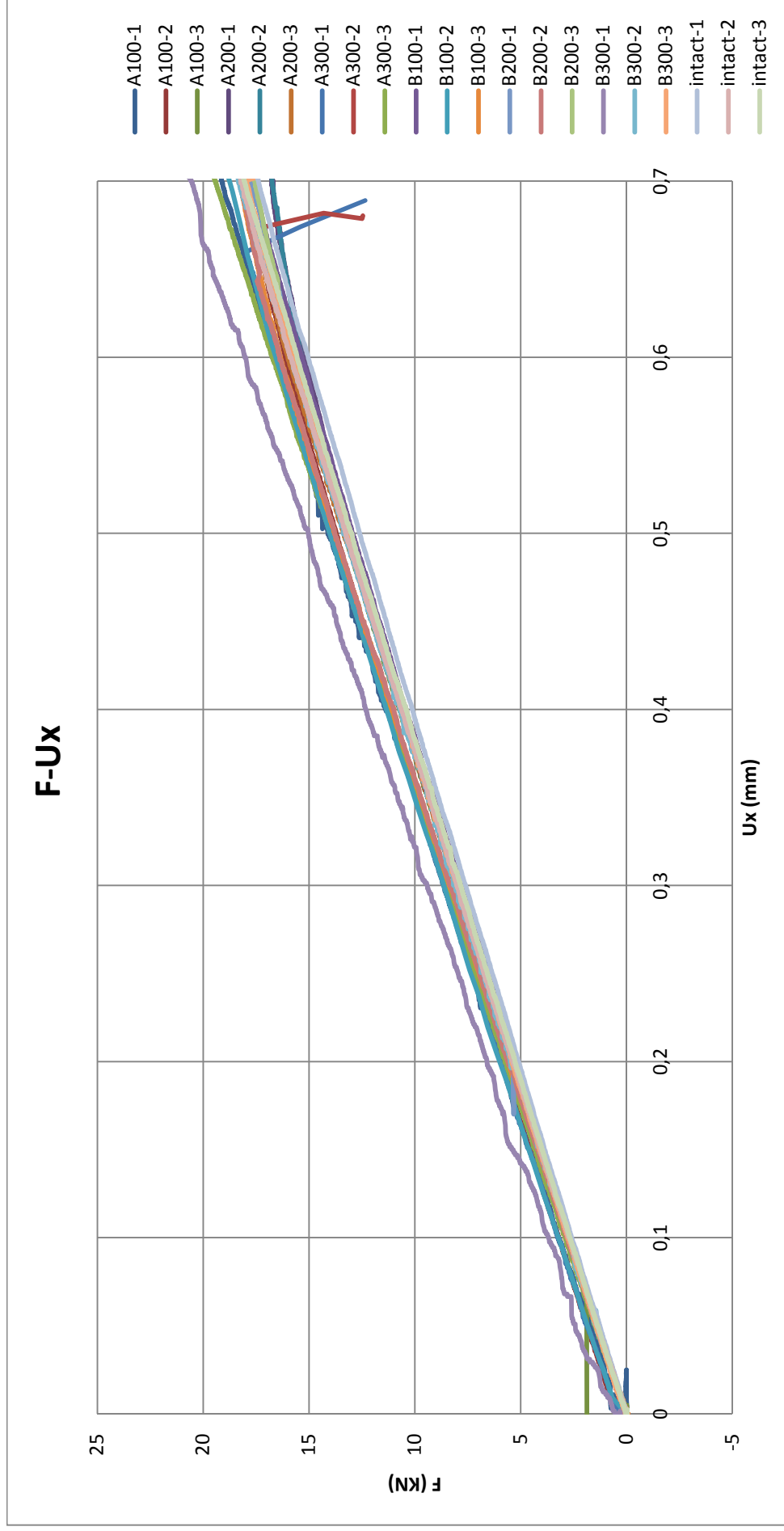
E_2 : Μέτρο ελαστικότητας άθικτου δοκιμίου

B_1 : Πλάτος δοκιμίου

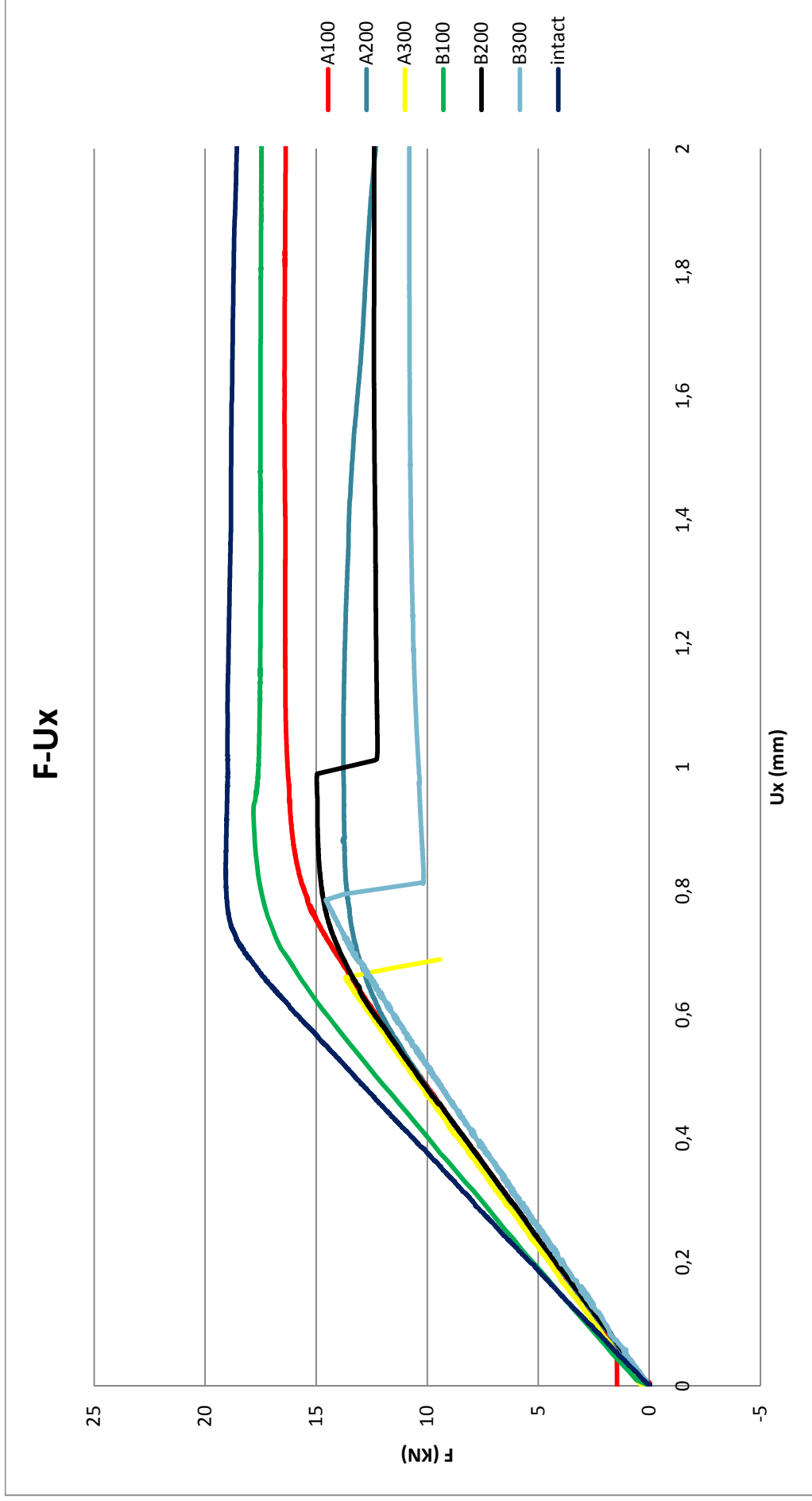
B_2 : Πλάτος άθικτου δοκιμίου

t_1 : Μέσο πάχος δοκιμίου

t_2 : Μέσο πάχος άθικτων δοκιμίων



Σχήμα 4.54: Διάγραμμα δύναμης-αξονικής μετατόπισης για Ux από 0 έως 0,7 mm.



Σχήμα 4.55: Συγκεντρωτικό διάγραμμα δύναμης-αξονικής μετατόπισης με αναγωγή του φορτίου στις ιδιότητες του άθικτου δοκιμίου

	Max F (KN)	E1	E2	t1	t1 ³	t2	t2 ³	$(E1*t1^3)/E2*t2^3$	$1/\{(E1*t1^3)/E2*t2^3\}$	Final	M.O	cov	% Diff.
A100-1	20,60	32,34	32,96	11,10	1367,63	10,5	1157,63	1,16	0,86	17,77			
A100-2	19,60	32,34	32,96	11,40	1481,54	10,5	1157,63	1,26	0,80	15,61			
A100-3	21,17	32,34	32,96	11,50	1520,88	10,5	1157,63	1,29	0,78	16,43	16,6	7%	13%
A200-1	17,41	30,33	32,96	11,80	1643,03	10,5	1157,63	1,31	0,77	13,33			
A200-2	17,57	30,33	32,96	11,70	1601,61	10,5	1157,63	1,27	0,79	13,81			
A200-3	18,82	30,33	32,96	11,90	1685,16	10,5	1157,63	1,34	0,75	14,06	13,73	3%	28%
A300-1	17,94	30,43	32,96	11,80	1643,03	10,5	1157,63	1,31	0,76	13,69			
A300-2	17,64	30,43	32,96	12,00	1728,00	10,5	1157,63	1,38	0,73	12,80			
A300-3	21,60	30,43	32,96	12,40	1906,62	10,5	1157,63	1,52	0,66	14,21	13,56	5%	29%
B100-1	20,41	30,98	32,96	11,40	1481,54	10,5	1157,63	1,20	0,83	16,97			
B100-2	20,33	30,98	32,96	11,20	1404,93	10,5	1157,63	1,14	0,88	17,83			
B100-3	19,76	30,98	32,96	11,20	1404,93	10,5	1157,63	1,14	0,88	17,32	17,37	2%	9%
B200-1	19,20	30,87	32,96	11,60	1560,90	10,5	1157,63	1,26	0,79	15,20			
B200-2	18,84	30,87	32,96	11,60	1560,90	10,5	1157,63	1,26	0,79	14,92			
B200-3	18,91	30,87	32,96	11,60	1560,90	10,5	1157,63	1,26	0,79	14,97	15,03	1%	21%
B300-1	23,80	29,55	32,96	12,70	2048,38	10,5	1157,63	1,59	0,63	15,00			
B300-2	19,98	29,55	32,96	12,10	1771,56	10,5	1157,63	1,37	0,73	14,57			
B300-3	19,97	29,55	32,96	11,80	1643,03	10,5	1157,63	1,27	0,79	15,70	15,09	4%	21%
intact-1	18,42	32,96	32,96	10,50	1157,63	10,5	1157,63	1,00	1,00	18,42			
intact-2	19,07	32,96	32,96	10,50	1157,63	10,5	1157,63	1,00	1,00	19,07			
intact-3	19,65	32,96	32,96	10,50	1157,63	10,50	1157,63	1,00	1,00	19,65	19,05	3%	-

Πίνακας 4.15: Συγκεντρωτικός πίνακας μέγιστων φορτίων πειραμάτων και αναγωγή των φορτίων αυτών στις ιδιότητες και τις διαστάσεις του άθικτου δοκμίου.

4.6 Συμπεράσματα και παρατηρήσεις των αποτελεσμάτων

4.6.1 Παρατηρήσεις

- Από το διάγραμμα 4.53 παρατηρείται πολύ καλή επαναληψιμότητα της αξονικής ακαμψίας μεταξύ των δοκιμίων.
- Τα δοκίμια κάθε σειράς παρουσιάζουν πολύ καλή επαναληψιμότητα μεταξύ των παραμορφώσεων σε κάθε υποπολύστρωτο
- Τα δοκίμια κάθε σειράς παρουσιάζουν πολύ καλή επαναληψιμότητα στην μετατόπιση τους κάθετα στην εφαρμογή του φορτίου
- Τα δοκίμια κάθε σειράς παρουσιάζουν ίδια συμπεριφορά κατά την διάρκεια του πειράματος. Δηλαδή για τα δοκίμια των σειρών Intact, A-100, A-200 και B-100 έχουμε ομαλό λυγισμό των δοκιμίων χωρίς καμία απότομη μεταβολή του φορτίου, για τα δοκίμια της σειράς A-300 έχουμε λυγισμό με απότομη πτώση του φορτίου μετά το κρίσιμο φορτίο λυγισμού και για τα δοκίμια των σειρών B-200 και B-300 έχουμε διαφορετική συμπεριφορά, δηλαδή έχουμε απότομη πτώση του φορτίου συνοδευόμενο από snap through όπως φαίνεται και από τα αντίστοιχα διαγράμματα παραμόρφωσης μετατόπισης αλλά και δύναμης-εγκάρσιας μετατόπισης. Με τον όρο snap through περιγράφουμε τον τρόπο λυγισμού όπου ενώ αρχικά το δοκίμιο λυγίζει ενιαία προς μία πλευρά σε ένα κρίσιμο φορτίο ο αποχωρισμός άνοιξε συνοδευόμενος από έντονο ήχο και το ένα υποπολύστρωτο λύγισε προς την αντίθετη κατεύθυνση.
- Τα δοκίμια της σειράς A δηλαδή αυτά που έχουν τον τεχνητό αποχωρισμό των στρώσεων στο μέσο του πάχους παρουσιάζουν μείωση του φορτίου λυγισμού με την αύξηση του μήκους του αποχωρισμού
- Τα δοκίμια της σειράς A με αύξηση του μήκους του τεχνητού αποχωρισμού παρουσιάζουν αύξηση των παραμορφώσεων για συγκεκριμένη αξονική μετατόπιση.
- Τα δοκίμια της σειράς B δηλαδή αυτά που περιέχουν τον τεχνητό αποχωρισμό των στρώσεων στα $\frac{3}{4}$ του πάχους παρουσιάζουν μείωση του φορτίου λυγισμού με την αύξηση του μήκους του αποχωρισμού.
- Τα δοκίμια της σειράς B με αύξηση του μήκους του τεχνητού αποχωρισμού παρουσιάζουν αύξηση των παραμορφώσεων για συγκεκριμένη αξονική μετατόπιση.
- Τα δοκίμια της σειράς B σε σχέση με τα δοκίμια της σειράς A για ίδιο μήκος τεχνητού αποχωρισμού παρουσιάζουν μεγαλύτερα φορτία λυγισμού. Συγκεκριμένα τα δοκίμια A-100 παρουσίασαν μείωση της τάξεως του 13% του κρίσιμου φορτίου λυγισμού σε σχέση με το άθικτο δοκίμιο ενώ τα δοκίμια B-100 παρουσίασαν μείωση 9%. Επίσης όπως φαίνεται στον πίνακα 4.15 τα δοκίμια A-200 και A-300 παρουσιάζουν μείωση 28% και 29% αντίστοιχα και τα δοκίμια B-200 και B-300 παρουσιάζουν μείωση 21%.
- Τα υποπολύστρωτα των δοκιμίων της σειράς A λύγισαν όλα προς την ίδια κατεύθυνση όπως φαίνετε και από τις αντίστοιχες φωτογραφίες, αλλά με διαφορετική μετατόπιση στο επίπεδο που είναι κάθετο στην διεύθυνση επιβολής του φορτίου, δηλαδή μεταξύ των υποπολύστρωτων δημιουργήθηκε διάκενο.
- Τα υποπολύστρωτα των δοκιμίων της σειράς B δεν λύγισαν όλα προς την ίδια κατεύθυνση. Όπως φαίνετε από την φωτογραφία 4.35 τα δοκίμια της σειράς B-100 λύγισαν όλα προς την ίδια πλευρά αλλά στις περιπτώσεις B-200 και B-300 ο αποχωρισμός των στρώσεων άνοιξε και τα δύο υποπολύστρωτα λύγισαν προς αντίθετες κατευθύνσεις.

- Αμελητέα διαφορά (~1%) στο κρίσιμο φορτίο λυγισμού παρατηρείται μεταξύ των μηκών 200 και 300 mm δηλαδή για λόγους μήκους αποχωρισμού προς μήκος δοκιμίου ίσους με 0,4 και 0,6 ενώ διαφορά της τάξεως των 2-3 KN (~15%) μεταξύ 0,2 και 0,4.

4.6.2 Συμπεράσματα

- Το κρίσιμο φορτίο λυγισμού αυξάνεται όσο η θέση του αποχωρισμού πλησιάζει προς την εξωτερική επιφάνεια του πολύστρωτου.
- Το κρίσιμο φορτίο λυγισμού είναι αντιστρόφως ανάλογο με το μήκος του αποχωρισμού των στρώσεων.
- Το μήκος του αποχωρισμού των στρώσεων επηρεάζει την μορφή λυγισμού του δοκιμίου.
- Η σχέση της μείωσης του φορτίου λυγισμού με το λόγο μήκους αποχωρισμού προς ολικό μήκος δοκιμίου είναι γραμμική μέχρι τον λόγο 0.4 και μετά από αυτόν γίνεται μη γραμμική .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Μοντελοποίηση Πειραμάτων

5.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει χρήση του ήδη ανεπτυγμένου κώδικα σε περιβάλλον ANSYS για την μοντελοποίηση των πειραμάτων. Όπως έχει ήδη αναφερθεί έχει γίνει παραμετρική μελέτη για τον καθορισμό των παραμέτρων του κώδικα. Μερικές από αυτές είναι το μέγεθος των στοιχείων όπως επίσης και η κατανομή τους στον κάνναβο. Στην συνέχεια θα παρουσιαστούν συγκριτικά διαγράμματα για κάθε σειρά δοκιμίων μεταξύ των αποτελεσμάτων του κώδικα και των πειραμάτων. Επίσης θα παρουσιαστούν σχήματα με την μορφή λυγισμού που προέβλεψε ο κώδικας, θα σχολιαστούν και θα αιτιολογηθούν τυχόν διαφορές μεταξύ των αποτελεσμάτων. Τέλος θα γίνει μία γενικότερη αξιολόγηση του κώδικα και προτάσεις προς την βελτιστοποίησή του.

5.2 Αποτελέσματα κώδικα και σύγκριση αποτελεσμάτων

Όλες οι αναλύσεις έχουν γίνει με τις τελικές διαστάσεις των πειραματικών δοκιμίων και τις διορθωμένες ιδιότητες τους με βάση την περιεκτικότητα τους κατά βάρος σε ίνες γυαλιού. Οι υπόλοιπες ιδιότητες έχουν ληφθεί ίδιες σε όλα τα δοκίμια και είναι οι εξής:

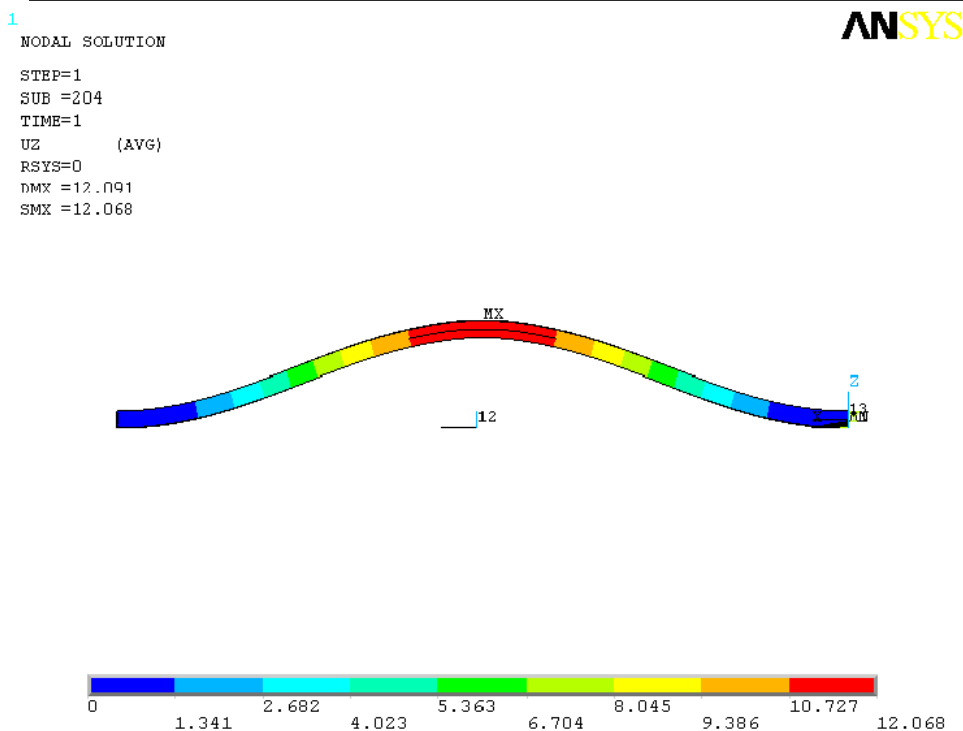
Πίνακας 5.1 : Λοιπές παράμετροι αναλύσεων που παραμένουν σταθερές για όλες τις αναλύσεις

E_y	8501
E_z	8501
ν_{xy}	0,29
ν_{yz}	0,29
ν_{xz}	0,29
G_{xy}	2034
G_{yz}	1017
G_{xz}	1017

5.2.1 Σειρά Δοκιμών A-100

Πίνακας 5.2: Παράμετροι ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων

Παράμετροι ανάλυσης	
L (mm)	500
B (mm)	49,5
t (mm)	11,3
E_x (GPa)	32,34
Average delamination Element size (lxbxt) (mm)	2,5x2,5x 2,83



Σχήμα 5.1: Μορφή λυγισμού μετά το πέρας της ανάλυσης

5.2.1.1 Παρατηρήσεις

- Όπως φαίνεται στο διάγραμμα 4.16 το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων παρουσιάζει μεγαλύτερη αξονική ακαμψία από αυτή των δοκιμών των πειραμάτων.
- Από το ίδιο διάγραμμα το μοντέλο έχει προβλέψει περίπου 28% μεγαλύτερο φορτίο λυγισμού από αυτό των πειραμάτων λόγω μη μοντελοποίησης των αστοχιών.

- Σε αντίθεση με τα παραπάνω στην περίπτωση του διαγράμματος 4.17 βλέπουμε ίδιες ακαμψίες μεταξύ μοντέλου και δοκιμίων
- Επίσης τα αποτελέσματα για την παραμόρφωση συμπίπτουν μεταξύ πειράματος και μοντέλου για ολόκληρη την ανάλυση
- Στην περίπτωση του διαγράμματος 4.18 το μοντέλο η πρόβλεψη του μοντέλου αποκλίνει από αυτή του πειράματος
- Από το σχήμα 5.1 και την φωτογραφία 4.19 βλέπουμε ότι η μορφή λυγισμού που προβλέπει το μοντέλο είναι ίδια με αυτή που όντως ακολούθησε το δοκίμιο.

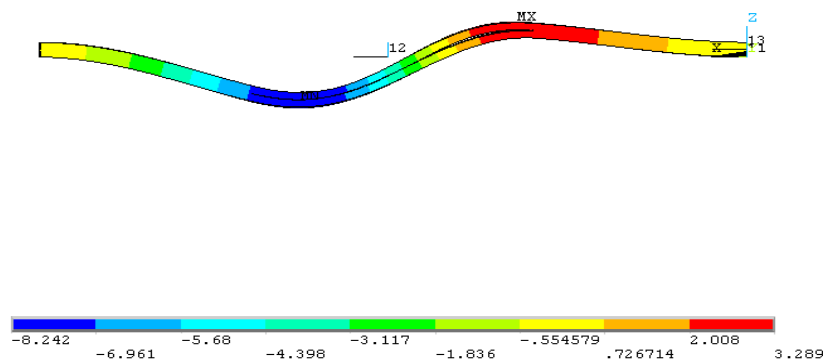
5.2.2 Σειρά δοκιμίων A-200

Πίνακας 5.3: Παράμετροι ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων

Παράμετροι ανάλυσης	
L (mm)	500
B (mm)	49,6
t (mm)	11,8
Ex (GPa)	30,33
Average delamination Element size (lxbxt) (mm)	2,5x2,5x 2,95

NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =204
 TIME=1
 UZ (AVG)
 RSYS=0
 DMX =8.321
 SMN =-8.242
 SMX =3.289

ANSYS



Σχήμα 5.2: Μορφή λυγισμού μετά το πέρας της ανάλυσης

5.2.2.1 Παρατηρήσεις

- Όπως φαίνεται στο διάγραμμα 4.21 το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων παρουσιάζει μεγαλύτερη ακαμψία από αυτή των δοκιμίων των πειραμάτων.
- Από το ίδιο διάγραμμα το μοντέλο έχει προβλέψει περίπου 30% μεγαλύτερο φορτίο λυγισμού από αυτό των πειραμάτων.
- Σε αντίθεση με τα παραπάνω στην περίπτωση του διαγράμματος 4.22 βλέπουμε ίδιες ακαμψίες μεταξύ μοντέλου και δοκιμίων
- Τα αποτελέσματα για την παραμόρφωση δεν συμπίπτουν μεταξύ πειράματος και μοντέλου για ολόκληρη την ανάλυση αλλά μόνο μέχρι 0.65mm αξονική μετατόπιση
- Στην περίπτωση του διαγράμματος 4.23 η πρόβλεψη του μοντέλου αποκλίνει από αυτή του πειράματος
- Από το σχήμα 5.2 και την φωτογραφία 4.24 βλέπουμε ότι η μορφή λυγισμού που προβλέπει το μοντέλο είναι ίδια με αυτή που όντως ακολούθησε το δοκίμιο.

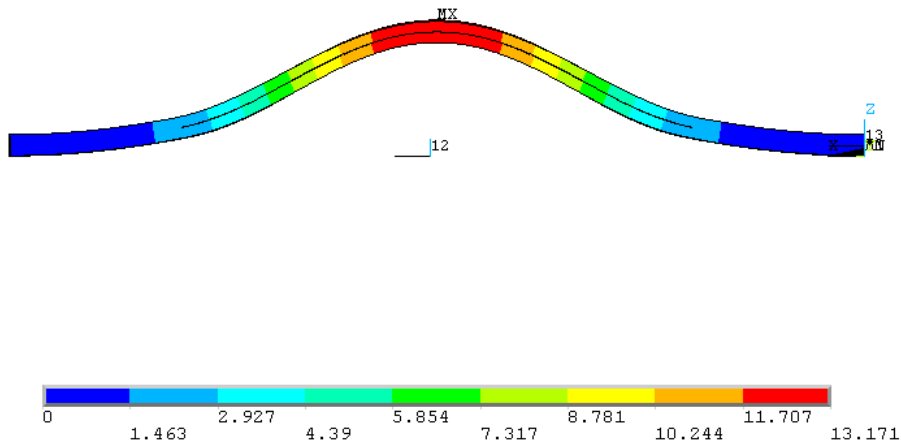
5.2.3 Σειρά Δοκιμίων A-300

Πίνακας 5.4: Παράμετροι ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων

Παράμετροι ανάλυσης	
L (mm)	600
B (mm)	49,7
t (mm)	12,1
Ex (GPa)	30,43
Average delamination Element size (lxbxt) (mm)	2,5x2,5x 3,025

NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =204
TIME=1
UZ (AVG)
RSYS=0
DMX =13.192
SMX =13.171

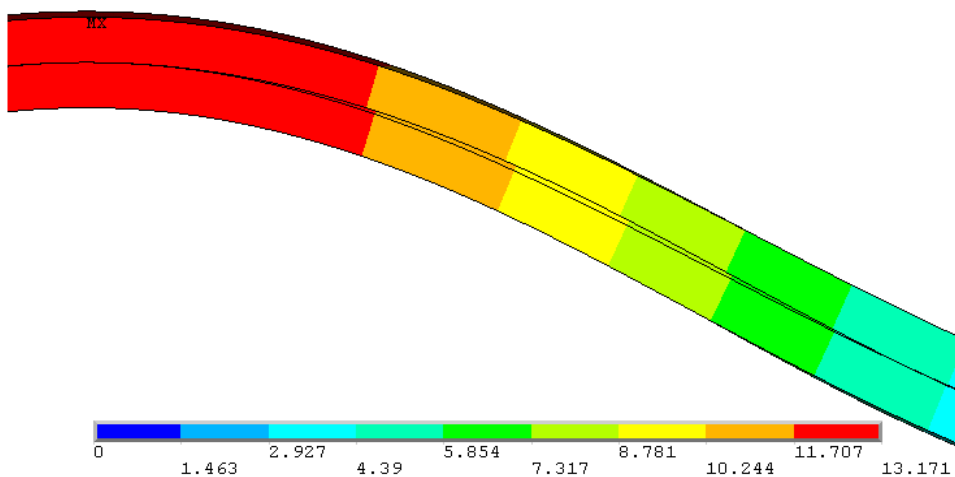
ANSYS



Σχήμα 5.3: Μορφή λυγισμού μετά το πέρας της ανάλυσης

1
NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =204
TIME=1
UZ (AVG)
RSYS=0
DMX =13.192
SMX =13.171

ANSYS



Σχήμα 5.4: Μεγέθυνση στην περιοχή του αποχωρισμού μετά το πέρας της ανάλυσης

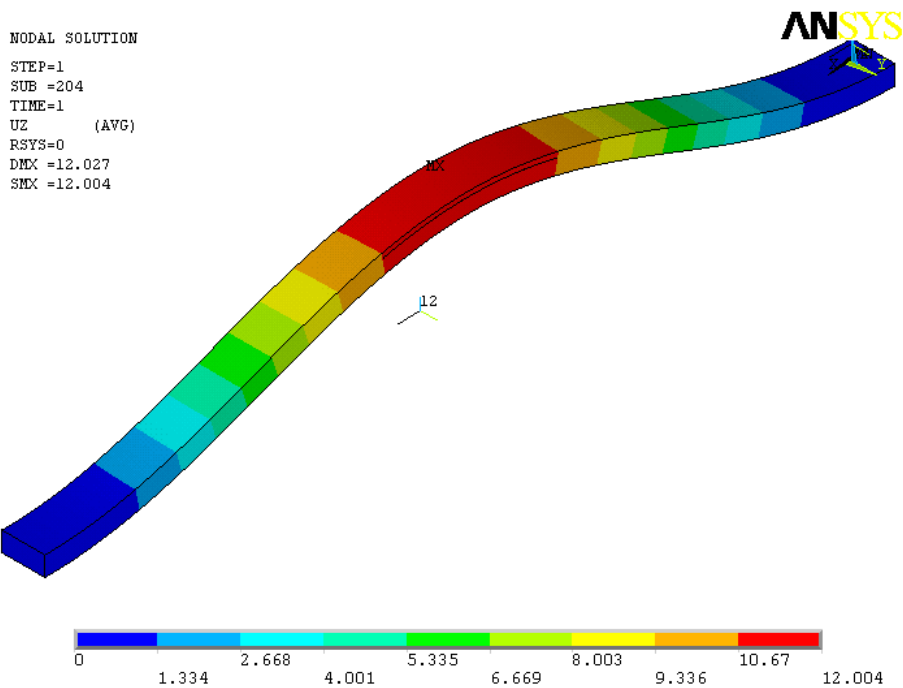
5.2.3.1 Παρατηρήσεις

- Όπως φαίνεται στο διάγραμμα 4.28 το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων παρουσιάζει μεγαλύτερη ακαμψία από αυτή των δοκιμίων των πειραμάτων.
- Από το ίδιο διάγραμμα η περιοχή λυγισμού του μοντέλου με το πείραμα συμπίπτει όσον αφορά το φορτίο αλλά όχι όσον αφορά την αξονική μετατόπιση.
- Επίσης από το διάγραμμα 4.28 παρατηρούμε διαφορετική συμπεριφορά των δοκιμίων του πειράματος όπου έχουμε απότομη πτώση του φορτίου ενώ στην περίπτωση του μοντέλου έχουμε ομαλές μεταβολές.
- Στην περίπτωση του διαγράμματος 4.29 βλέπουμε ίδιες ακαμψίες μεταξύ μοντέλου και δοκιμίων μέχρι τα 0.4mm αλλά στην συνέχεια έχουμε ομαλό λυγισμό του μοντέλου ενώ τα δοκίμια των πειραμάτων συνεχίζουν να θλίβονται μέχρι τα 0.65mm και μετά έχουμε απότομη μεταβολή σε λυγισμό όπου τα αποτελέσματα μετά από αυτό το σημείο μοντέλου και πειράματος συμπίπτουν.
- Στην περίπτωση του διαγράμματος 4.30 η πρόβλεψη του μοντέλου συμπίπτει αυτή με το πείραμα μέχρι τα 14 KN δηλαδή εάν ανατρέξουμε στο διάγραμμα 4.28 μέχρι τα 0.4mm όπως συμβαίνει και στο διάγραμμα 4.19 αλλά στην συνέχεια οι προβλέψεις μοντέλου αποκλίνουν από το πείραμα.
- Από το σχήμα 5.3 και 5.4 και την φωτογραφία 4.31 βλέπουμε ότι η μορφή λυγισμού που προβλέπει το μοντέλο είναι ίδια με αυτή που όντως ακολούθησε το δοκίμιο.

5.2.4 Σειρά δοκιμίων B-100

Πίνακας 5.4: Παράμετροι ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων

Παράμετροι ανάλυσης	
L (mm)	500
B (mm)	49,7
t (mm)	11,3
Ex (GPa)	30,98
Average delamination Element size (lxbxt) (mm)	2,5x2,5x 2,83



Σχήμα 5.5: Μορφή λυγισμού δοκιμίου μετά το πέρας της ανάλυσης

5.2.4.1 Παρατηρήσεις

- Όπως φαίνεται στο διάγραμμα 4.33 το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων παρουσιάζει μεγαλύτερη ακαμψία από αυτή των δοκιμίων των πειραμάτων.
- Από το ίδιο διάγραμμα το μοντέλο έχει προβλέψει περίπου 26% μεγαλύτερο φορτίο λυγισμού από αυτό των πειραμάτων.
- Σε αντίθεση με τα παραπάνω στην περίπτωση του διαγράμματος 4.34 βλέπουμε ίδιες ακαμψίες μεταξύ μοντέλου και δοκιμίων
- Επίσης τα αποτελέσματα για την παραμόρφωση συμπίπτουν μεταξύ πειράματος και μοντέλου για ολόκληρη την ανάλυση μέχρι αξονική μετατόπιση ίση με 1.5 mm όπου τελειώνει και η ανάλυση.
- Στην περίπτωση του διαγράμματος 4.35 η πρόβλεψη του μοντέλου αποκλίνει από αυτή του πειράματος
- Από το σχήμα 5.5 και την φωτογραφία 4.36 βλέπουμε ότι η μορφή λυγισμού που προβλέπει το μοντέλο είναι ίδια με αυτή που όντως ακολούθησε το δοκίμιο.

5.2.5 Σειρά δοκιμών B-200

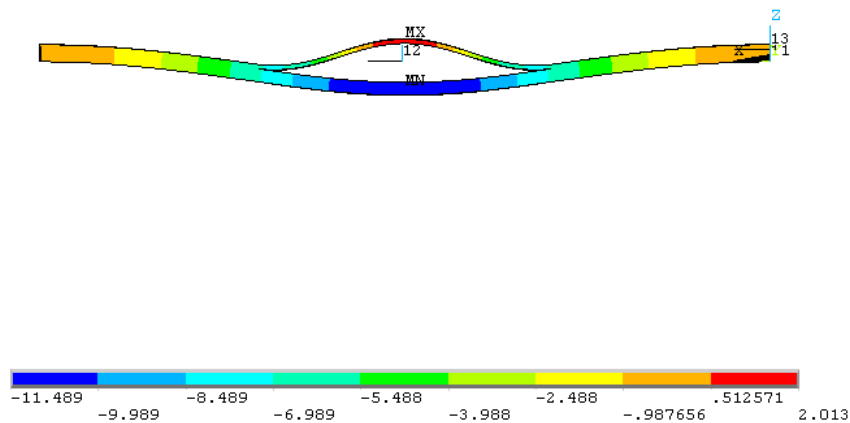
Πίνακας 5.5: Παράμετροι ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων

Παράμετροι ανάλυσης	
L (mm)	500
B (mm)	49,7
t (mm)	11,6
Ex (GPa)	30,87
Average delamination Element size (lxbxt) (mm)	2,5x2,5x 2,9

ANSYS

MODAL SOLUTION

STEP=1
SUB =204
TIME=1
UZ (AVG)
RSYS=0
DMX =11.514
SMN =-11.489
SMX =2.013



Σχήμα 5.6: Μορφή λυγισμού μετά το πέρας της ανάλυσης

5.2.5.1 Παρατηρήσεις

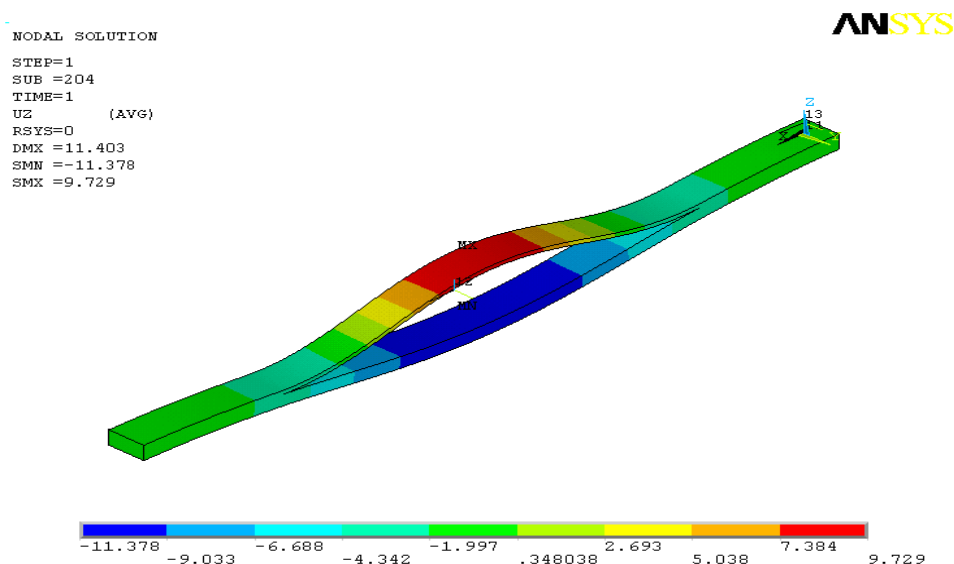
- Όπως φαίνεται στο διάγραμμα 4.39 το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων παρουσιάζει μεγαλύτερη ακαμψία από αυτή των δοκιμών των πειραμάτων.
- Από το ίδιο διάγραμμα το μοντέλο έχει προβλέψει περίπου 12% μεγαλύτερο φορτίο λυγισμού από αυτό των πειραμάτων.

- Σε αντίθεση με τα παραπάνω στην περίπτωση του διαγράμματος 4.40 βλέπουμε ίδιες ακαμψίες μεταξύ μοντέλου και δοκιμίων όμως το λεπτό υποπολυστρωτο αποκλίνει από τα 0.25mm και μετά ενώ στην περίπτωση του πειράματος το θλιπτικό μέρος συνεχίζει μέχρι τα 0.65mm. Το διάγραμμα για το παχύτερο υποπολύστρωτο συμπίπτει με αυτό του πειράματος μέχρι το τέλος της ανάλυσης.
- Στην περίπτωση του διαγράμματος 4.41 η πρόβλεψη του μοντέλου αποκλίνει από αυτή του πειράματος
- Από το σχήμα 5.6 και την φωτογραφία 4.43 βλέπουμε ότι η μορφή λυγισμού που προβλέπει το μοντέλο είναι ίδια με αυτή που όντως ακολούθησε το δοκίμιο.

5.2.6 Σειρά δοκιμίων B-300

Πίνακας 5.6: Παράμετροι ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων

Παράμετροι ανάλυσης	
L (mm)	500
B (mm)	49,7
t (mm)	12,2
Ex (GPa)	29,55
Average delamination Element size (lxbxt) (mm)	2,5x2,5x 3,05



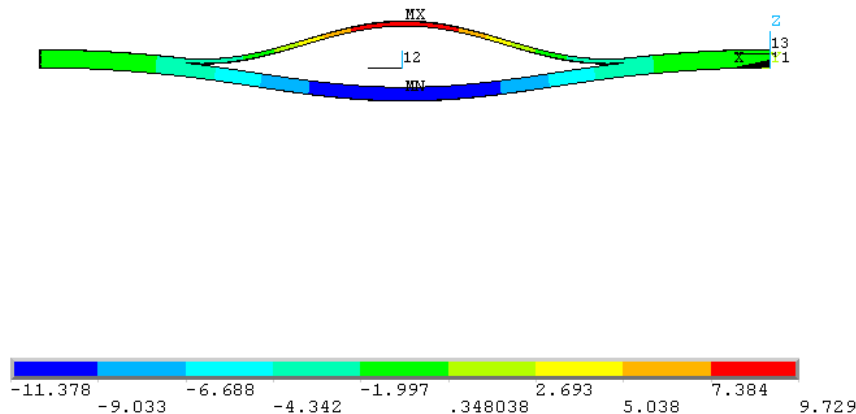
Σχήμα 5.7: Μορφή λυγισμού μετά το πέρας της ανάλυσης

```

1
NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =204
TIME=1
UZ      (AVG)
RSYS=0
DMX =11.403
SMN =-11.378
SMX =9.729

```

ANSYS



Σχήμα 5.8: Μορφή λυγισμού μετά το πέρας της ανάλυσης από διαφορετική οπτική γωνία

5.2.6.1 Παρατηρήσεις

- Όπως φαίνεται στο διάγραμμα 4.45 το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων παρουσιάζει ίδια ακαμψία με αυτή του δοκιμίου B-300-1 το οποίο αποκλίνει ελάφρως από τα υπόλοιπα 2 δοκίμια.
- Από το ίδιο διάγραμμα η περιοχή λυγισμού του μοντέλου με το πείραμα συμπίπτει.
- Επίσης από το διάγραμμα 4.45 παρατηρούμε διαφορετική συμπεριφορά των δοκιμίων του πειράματος όπου έχουμε απότομη πτώση του φορτίου ενώ στην περίπτωση του μοντέλου έχουμε ομαλές μεταβολές.
- Στην περίπτωση του διαγράμματος 4.46 βλέπουμε ίδιες ακαμψίες μεταξύ μοντέλου και δοκιμίων όσον αφορά το παχύτερο υποπολύστρωτο ενώ για το λεπτότερο η ακαμψία του μοντέλου με το πείραμα συμπίπτει μέχρι τα 0.15mm και μετά αποκλίνει διότι περνάει στην εφελκυστική περιοχή. Επίσης το διάγραμμα για το παχύτερο υποπολύστρωτο συμπίπτει για όλη την ανάλυση με αυτό των πειραμάτων ενώ για το λεπτότερο υποπολύστρωτο το διάγραμμα παραμόρφωσης συμπίπτει αφού γίνει το snap through και περάσει και το υποπολύστρωτο του δοκιμίου στην εφελκυστική περιοχή.
- Στην περίπτωση του διαγράμματος 4.47 η πρόβλεψη του μοντέλου συμπίπτει αυτή με το πείραμα μέχρι τα 4 KN για το λεπτό υποπολύστρωτο και μέχρι τα 13KN για το παχύτερο, δηλαδή εάν ανατρέξουμε στο διάγραμμα 4.45 μέχρι τα 0.15 mm και 0.5 mm

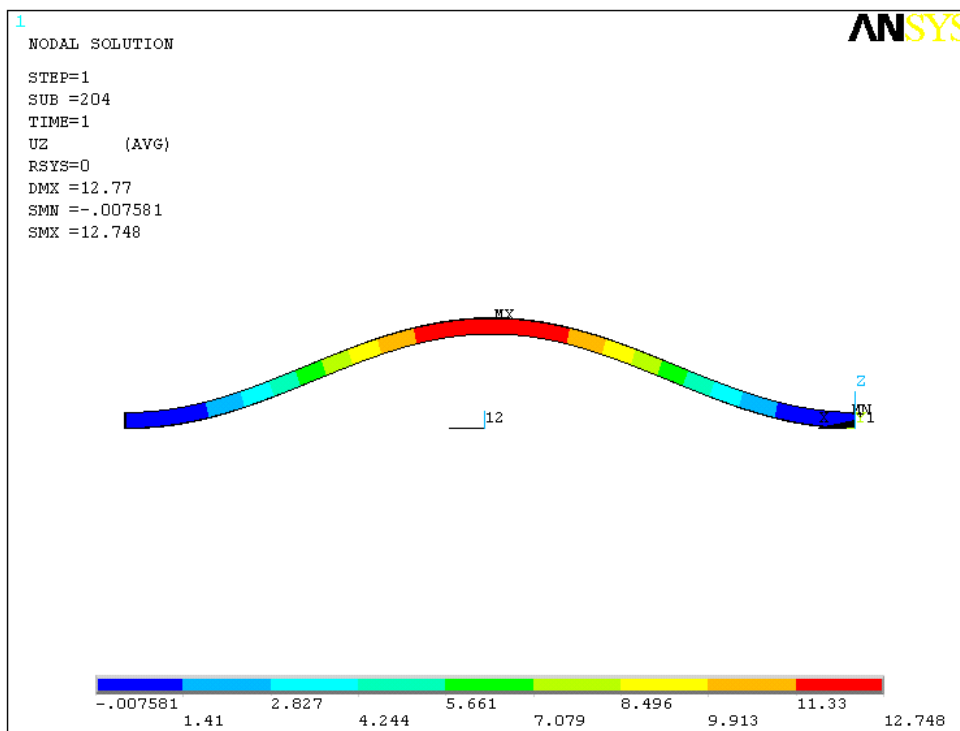
αντίστοιχα όπως συμβαίνει και στο διάγραμμα 4.46 αλλά στην συνέχεια οι προβλέψεις μοντέλου αποκλίνουν από το πείραμα.

- Από το σχήμα 5.7 και 5.8 και την φωτογραφία 4.48 βλέπουμε ότι η μορφή λυγισμού που προβλέπει το μοντέλο είναι ίδια με αυτή που όντως ακολούθησε το δοκίμιο.

5.2.7: Σειρά δοκιμών Intact

Πίνακας 5.6: Παράμετροι ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων

Παράμετροι ανάλυσης	
L (mm)	500
B (mm)	49,57
t (mm)	10,54
Ex (GPa)	32,96
Average delamination Element size (lxbxt) (mm)	2,5x2,5x 3,05



Σχήμα 5.9: Μορφή λυγισμού μετά το πέρας της ανάλυσης

5.2.7.1 Παρατηρήσεις

- Όπως φαίνεται στο διάγραμμα 4.50 το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων παρουσιάζει μεγαλύτερη ακαμψία από αυτή των δοκιμίων των πειραμάτων.
- Από το ίδιο διάγραμμα το μοντέλο έχει προβλέψει περίπου 19% μεγαλύτερο φορτίο λυγισμού από αυτό των πειραμάτων.
- Σε αντίθεση με τα παραπάνω στην περίπτωση του διαγράμματος 4.51 βλέπουμε ίδιες ακαμψίες μεταξύ μοντέλου και δοκιμίων
- Επίσης τα αποτελέσματα για την παραμόρφωση συμπίπτουν μεταξύ πειράματος και μοντέλου για ολόκληρη την ανάλυση μέχρι αξονική μετατόπιση ίση με 1.5 mm όπου τελειώνει και η ανάλυση.
- Στην περίπτωση του διαγράμματος 4.52 η πρόβλεψη του μοντέλου αποκλίνει από αυτή του πειράματος
- Από το σχήμα 5.9 και την φωτογραφία 4.53 βλέπουμε ότι η μορφή λυγισμού που προβλέπει το μοντέλο είναι ίδια με αυτή που όδως ακολούθησε το δοκίμιο.

5.3 Συμπεράσματα για το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων

- Το μοντέλο όσον αφορά την πρόβλεψη της εφαρμοζόμενης δύναμης σε σχέση με την μετατόπιση έχει μία μέση απόκλιση της τάξεως του 23% όσον αφορά την γραμμική περιοχή.
- Σε αντίθεση με το παραπάνω το μοντέλο συμπίπτει απόλυτα με τα πειράματα στην πρόβλεψη των παραμορφώσεων όπως φαίνεται στα αντίστοιχα διαγράμματα στην γραμμική περιοχή.
- Στις μη γραμμικές περιοχές συμπίπτει όταν ο λυγισμός δεν συνοδεύεται από snap through, φαινόμενο το οποίο ο κώδικας δεν μπορεί να προβλέψει. Ακόμα όμως και στην περίπτωση που υπάρχει snap through οι τιμές παραμόρφωσης που προβλέπονται λίγο πριν και λίγο μετά από αυτό είναι σωστές.
- Λόγω της απόκλισης του κώδικα στην πρόβλεψη της εφαρμοζόμενης δύναμης τα διαγράμματα δύναμης με μετατόπιση κάθετη στην διεύθυνση φόρτισης αποκλίνουν.
- Ο κώδικας συμπίπτει με τα πειράματα απόλυτα στην μορφή λυγισμού της κάθε περίπτωσης δοκιμίου.
- Ο κώδικας δεν λαμβάνει υπόψη του ούτε την διάδοση της ρωγμής του αποχωρισμού των στρώσεων ούτε την προοδευτική αστοχία του υλικού κατά την διάρκεια του πειράματος. Αυτό βέβαια όπως είδαμε δεν επηρεάζει καθόλου τα αποτελέσματα των παραμορφώσεων, αλλά επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα του φορτίου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΒΑΣΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η κατανόηση της συμπεριφοράς μίας τυπικής ναυπηγικής πολύστρωτης πλάκας με αποχωρισμένες στρώσεις, η οποία υπόκειται σε συνεπίπεδη θλιπτική φόρτιση. Στο πλαίσιο αυτό, εξετάζεται η επίδραση του αποχωρισμού και ορισμένων παραμέτρων αυτού στην αντοχή της πλάκας σε λυγισμό, χαρακτηριστικό μέγεθος της οποίας είναι το κρίσιμο φορτίο λυγισμού. Συγκεκριμένα διεξήχθησαν πειράματα λυγισμού σε ορθογώνικες πολύστρωτες δοκούς που περιείχαν έναν αποχωρισμό των στρώσεων (delamination). Στην συνέχεια έγινε μοντελοποίηση αυτών των πειραμάτων με την Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων. Γίνεται δηλαδή πειραματική και υπολογιστική μελέτη μίας πολύστρωτης πλάκας συγκεκριμένης γεωμετρίας (μήκος, πλάτος, πάχος) και μηχανικών ιδιοτήτων (μέτρα ελαστικότητας, μέτρα διάτμησης και λόγοι Poisson) με έναν κεντρικό αποχωρισμό, ορθογωνικού σχήματος και πραγματοποιείται μία παραμετρική μελέτη ως προς το μέγεθος (λόγος A_d/A_p) και την κατά το πάχος της δοκού θέση του αποχωρισμού αυτού. Τα συμπεράσματα που εξήχθησαν μετά την ανάλυση των αποτελεσμάτων των πειραμάτων και της Μεθόδου Πεπερασμένων στοιχείων είναι τα εξής:

1. Το κρίσιμο φορτίο λυγισμού αυξάνεται όσο η θέση του αποχωρισμού πλησιάζει προς την εξωτερική επιφάνεια του πολύστρωτου.
2. Το κρίσιμο φορτίο λυγισμού είναι αντιστρόφως ανάλογο με το μήκος του αποχωρισμού των στρώσεων.
3. Το μήκος του αποχωρισμού των στρώσεων επηρεάζει την μορφή λυγισμού του δοκιμίου.
4. Η σχέση της μείωσης του φορτίου λυγισμού με το λόγο μήκους αποχωρισμού προς ολικό μήκος δοκιμίου είναι γραμμική μέχρι τον λόγο 0.4 και μετά από αυτόν γίνεται μη γραμμική .
5. Οι διαφορές στο φορτίο λυγισμού μεταξύ των δοκιμίων με λόγο μήκους αποχωρισμού προς ολικό μήκος δοκιμίου 0.4 και 0.6 είναι αμελητέες.
6. Από τις διαφορές των αποτελεσμάτων των πειραμάτων και του μοντέλου φαίνεται ότι η διάδοση της ρωγμής και η προοδευτική αστοχία του δοκιμίου αποτελούν σημαντικοί παράγοντες στην πρόβλεψη και στην μοντελοποίηση της συμπεριφοράς του δοκιμίου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Τσούβαλης, Ν.Γ. 1998. Σημειώσεις για το μάθημα Ανάλυση και Σχεδίαση Σκαφών από Σύνθετα Υλικά. Τομέας Θαλάσσιων Κατασκευών, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
2. Strong, A.B. 2002. History of Composite Materials - opportunities and necessities. Brigham Young University.
3. Hassan, N.M. & Batra, R.C. 2008. Modelling damage in polymeric composites. *Composites Part B: Engineering*, Vol. 39, No. 1, pg. 66-82.
4. Craig A. Steeves, June 2005, “ Compressive strength of composite laminates with terminated internal plies” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Volume 36, Issue 6, Pages 798-805
5. Williams, T.O. & Addesio, F.L. 1997. A general theory for laminated plates with delaminations. *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 34, No 16, pg. 2003-2024.
6. Short, G.J., Guild, F.J. & Pavier, M.J. 2001. The effect of delamination geometry on the compressive failure of composite laminates. *Composite Science and Technology*, Vol. 61, No 14, pg. 2075-2086.
7. Bull, J.W. 1995. Numerical analysis and modelling of composite materials. Springer, edition 1, pg. 36-39.
8. Kardomateas, G.A. 1989. End fixity effects on the buckling and post - buckling of delaminated composites. *Composite Science and Technology*, Vol. 34, pg. 113-128.
9. Shan, B. & Pelegri, A.A. 2003. Approximate analysis of the buckling behavior of composites with delamination. *Journal of Composite Materials*, Vol. 37, No 8, pg. 673-685.
10. Shaw, D. & Tsai, M.Y. 1989. Analysis of delamination in compressively loaded laminates. *Composite Science and Technology*, Vol. 34, pg. 1-17.
11. N. K. Naik, R. Ramasimha, May 2001 Estimation of compressive strength of delaminated composites *Composite Structures*, Volume 52, Issue 2, Pages 199-204
12. Chun Wee Yap, Gin Boay Chai, September 2007, Analytical and numerical studies on the buckling of delaminated composite beams *Composite Structures*, Volume 80, Issue 2, Pages 307-319
13. M. Kharazi, H.R. Ovesy, July-September 2008, Postbuckling behavior of composite plates with through-the-width delaminations *Thin-Walled Structures*, Volume 46, Issues 7-9, Pages 939-946

14. Kyoung, W.M., Kim, C.G. & Hong, C.S. 1999. Buckling and postbuckling behavior of composite cross - ply laminates with multiple delaminations. *Composite Structures*, Vol. 43, No 4, pg. 257-274.
15. Wang, X.W., Pont - Lezica, I., Harris, J.M., Guild, F.J. & Pavier, M.J. 2005. Compressive failure of composite laminates containing multiple delaminations. *Composite Science and Technology*, Vol. 65, pg. 191-200.
16. Sang-Youl Lee, Dae-Yong Park, 1 December 2007, Buckling analysis of laminated composite plates containing delaminations using the enhanced assumed strain solid element International Journal of Solids and Structures, Volume 44, Issue 24, Pages 8006-8027
17. Hwang, S.F. & Liu, G.H. 2001. Buckling behavior of composite laminates with multiple delaminations under uniaxial compression. *Composite Structures*, Vol. 53, No 2, pg. 235-243.
18. Lee, S.Y. & Park, D.Y. 2007. Buckling analysis of laminated composite plates containing delaminations using the enhanced assumed strain solid method. *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 44, No 24, pg. 8006-8027.
19. Sallam, S. & Simitses, G.J. 1985. Delamination buckling and growth of flat cross - ply laminates. *Composite Structures*, Vol. 4, pg. 361-381.
20. ANSYS, Release 11.0 Documentation, 2007.
21. John M. Comiez, Anthony M. Waas, Khaled W. Shahwan, March-April 1995, Delamination buckling; Experiment and analysis International Journal of Solids and Structures, Volume 32, Issues 6-7, , Pages 767-782
22. G. J. Short, F. J. Guild, M. J. Pavier, November 2002, Delaminations in flat and curved composite laminates subjected to compressive load, *Composite Structures*, Volume 58, Issue 2, Pages 249-258
23. Madhusudhana R. Parlapalli, Kwok C. Soh, Dong W. Shu, Guowei Ma, September 2007, Experimental investigation of delamination buckling of stitched composite laminates, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Volume 38, Issue 9, Pages 2024-2033
24. M.S.R. Parlapalli, Dongwei Shu, Gin B. Chai, December 2008, Buckling of composite beams with two enveloped delaminations: Lower and upper bounds *Computers & Structures*, Volume 86, Issues 23-24, Pages 2155-2165
25. Züleyha Aslan, Mustafa Şahin, July 2009, Buckling behavior and compressive failure of composite laminates containing multiple large delaminations *Composite Structures*, Volume 89, Issue 3, Pages 382-390

