



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

«Σύνθετα υλικά : ιδιότητες κατασκευής – κατεργασίες βελτίωσης»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ Α. ΧΡΗΣΤΟΣ

(ΑΜ 02102628)

Επιβλέπων : Δρ. Μανωλάκος Δημήτριος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2009

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	4
1 ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ.....	6
1.1 Εισαγωγή.....	6
1.2 Ιδιότητες σύνθετων υλικών από ινοπλισμένα πολυμερή.....	8
1.3 Υλικά ινών.....	8
1.4 Μήτρες Σύνθετων Υλικών.....	10
1.5 Ιδιότητες Σύνθετου Υλικού.....	12
1.6 Μικρομηχανική των σύνθετων υλικών.....	12
2 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ/ΕΛΑΤΤΩΜΑΤΑ.....	14
2.1 Εισαγωγή.....	14
2.2 Διαγράμματα αστοχίας σύνθετων σάντουιτς πλαισίων που υπόκεινται σε ανεμοπίεση.....	15
2.2.1 Αστοχίες σε πλαίσια σάντουιτς.....	15
2.2.2 Ιδιότητες πυρήνα και επιφανειακού ελάσματος.....	18
2.2.3 Δημιουργία διαγραμμάτων αστοχίας.....	19
2.2.4 Ανάλυση ανεμοπίεσης σάντουιτς πάνελ.....	20
2.3 Στρέψη δοκών από σάντουιτς από υβριδικά Ινοπλισμένα Πολυμερή (Honeycomb FRP) με ημιτονοειδή σύνθεση πυρήνα.....	27
2.3.1 Μοντελοποίηση επιφανειακών ελασμάτων.....	28
2.3.2 Μοντελοποίηση των υβριδικών πυρήνων.....	30
2.3.3 Στρέψη σε δοκούς σάντουιτς.....	34
2.3.4 Μοντέλο πεπερασμένου στοιχείου και πειραματική δοκιμή.....	37
2.3.5 Αποτελέσματα στρέψης.....	46
2.4 Πειραματική διερεύνηση της αντίδρασης σε πρόσκρουση σύνθετων πολυστρωματικών υλικών.....	47
2.4.1 Κατασκευή στρωμάτων (fabrication of laminates).....	47
2.4.2 Τεστ πρόσκρουσης (impact testing).....	47
2.4.3 Μέθοδος "προφίλ ενέργειας" (Energy Profiling Method).....	47
2.4.4 Αποτελέσματα.....	49
2.5 Κάμψη τριών σημείων μονοδιευθυντικών CFRP στρωμάτων – επίδραση διάτμησης 55.....	56
2.5.1 Θεωρητική ανάλυση.....	56
2.5.2 Μέθοδοι δοκιμής και υλικά.....	59
2.5.3 Πειραματικά αποτελέσματα.....	60
2.5.4 Ανάλυση πεπερασμένου στοιχείου.....	63
2.5.5 Αποτελέσματα.....	67
2.6 Εσωτερικές τάσεις σε ινοπλισμένα πολυμερή (FRP) – ενισχυμένων δοκών οπλισμένου σκυροδέματος (Reinforced Concrete).....	68
2.6.1 Μέθοδος επίλυσης.....	70
2.6.2 Σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα.....	81
2.6.3 Αποτελέσματα.....	82
2.6.4 Μελέτη παραμέτρων.....	84
3 ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ.....	88
3.1 Εισαγωγή.....	88
3.2 Εφαρμογή θερμοπλαστικών υβριδικών στρώσεων σε διφασικό χάλυβα DP500 – κατασκευαστικές και μηχανικές ιδιότητες.....	89
3.2.1 Πειραματική μέθοδος.....	91
3.2.2 Αποτελέσματα.....	94

3.3	Σχηματισμός αναδίπλωσης οιονεί-ισοτροπικών θερμοπλαστικών σύνθετων στρωμάτων κατά την διάρκεια μορφοποίησης ελάσματος.....	101
3.3.1	Πειράματα.....	101
3.3.2	Μοντελοποίηση μορφοποίησης ελάσματος	101
3.3.3	Πειράματα μορφοποίησης μεμβράνης.....	106
3.3.4	Αριθμητικές αναλύσεις και αποτελέσματα	110
3.4	Ο «σχεδιασμός κατασκευής» ινοπλισμένων θερμοπλαστικών συνεχών ινών στην κατασκευή αεροσκαφών.....	115
3.4.1	Επιλογή συστατικών στοιχείων.....	115
3.4.2	Επιλογή υλικού.....	116
3.4.3	Βελτιστοποίηση σχεδίασης.....	116
3.4.4	Κατεργασία.....	119
4	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ	124
5	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α	129
6	Βιβλιογραφία	130

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Συμβατικά υλικά όπως ο χάλυβας και το αλουμίνιο ήδη χρησιμοποιούνται στην αυτοκινητοβιομηχανία και στις εναέριες κατασκευές. Ωστόσο, οι ευμετάβλητες τιμών καυσίμων και οι αυστηροί περιβαλλοντικοί κανονισμοί έχουν επιφέρει νέες προτεραιότητες για τις μεταφορικές βιομηχανίες. Ορισμένες από αυτές τις προτεραιότητες περιλαμβάνουν αύξηση της απόδοσης των οχημάτων, δηλαδή μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και βλαβερών εκπομπών καθώς και μείωση του βάρους σε συνδυασμό με βελτίωση της παθητικής ασφάλειας των εξεταζόμενων υλικών. Ενισχυμένα ινώδη πολυμερή χρησιμοποιούνται για να μειώσουν το βάρος στην αυτοκινητοβιομηχανία για πολλά χρόνια. Πρόσφατη ανακοίνωση εστιάστηκε σε θερμοπλαστικά σύνθετα υλικά καθώς έχουν πλεονεκτήματα γρήγορης κατασκευής και ανακύκλωσης. Επιπλέον μια από τις πιο ραγδαίες εξελίξεις των τελευταίων χρόνων στον κατασκευαστικό κλάδο ήταν η εξέλιξη της χρήση των σύνθετων υλικών (γνωστά ως ινοπλισμένα πολυμερή – Fiber Reinforced Polymers) στα τεχνικά έργα. Τα σύνθετα υλικά είναι γνωστά για τις εξαιρετικές τους μηχανικές ιδιότητες, το χαμηλό τους βάρος και την καλή ανθεκτικότητα σε περιβαλλοντικές επιδράσεις. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά είχαν ως αποτέλεσμα την σταδιακή εισαγωγή των σύνθετων υλικών και στα έργα του πολιτικού μηχανικού με κύριο επίπεδο εφαρμογής αυτό των ενισχύσεων, όπου τα υλικά εφαρμόζονται στις εξωτερικές επιφάνειες δομικών μελών μέσω επικόλλησης. Η χρήση λοιπόν των σύνθετων υλικών καλύπτει μία μεγάλη σειρά εφαρμογών όπως είναι η αυτοκινητοβιομηχανία, η αεροναυπηγική, η ναυσιπλοΐα, τα τεχνικά έργα και ορισμένες βιομηχανίες καταναλωτικών ειδών (π.χ. είδη σπορ).

Οι θεωρητικές διερευνήσεις γύρω από την συμπεριφορά των σύνθετων υλικών διαρκώς εξελίσσονται, με σκοπό την πρόβλεψη της συμπεριφοράς τους κάτω από ποικίλα είδη φορτίσεων. Επιπλέον η σύγκριση με πειραματικά αποτελέσματα αποτελεί βασικό παράγοντα στον σχεδιασμό και στην εξέλιξη των κατασκευών από σύνθετα υλικά.

Σε αυτήν την εργασία παρουσιάζονται πειραματικές και θεωρητικές έρευνες των προβλημάτων – αστοχιών ποικίλων σύνθετων υλικών από ινοπλισμένα πολυμερή. Παρατίθενται θεωρητικά μοντέλα ανάλυσης της συμπεριφοράς τους και ακολουθούν συγκρίσεις με πειραματικά αποτελέσματα με σκοπό την κατανόηση των μηχανισμών συμπεριφοράς αυτών των υλικών. Επιπλέον παρουσιάζονται κατεργασίες βελτίωσης της συμπεριφοράς σύνθετων υλικών που αποτελούν και σημαντικό στοιχείο περαιτέρω έρευνας.

Για την εκπόνηση της εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον υποψήφιο Διδάκτορα κο Νίκο Γαλάνη για την καθοδήγηση και επιμέλεια των κειμένων, καθώς επίσης και την σύζυγό μου για την κατανόησή της και συνεχή υποστήριξη. Κλείνοντας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών κο Δημήτρη Μανωλάκο για την εμπιστοσύνη του ώστε να ολοκληρώσω την παρούσα διπλωματική εργασία.

Abstract

Conventional materials like steel and aluminum are already used in the automotive and in the aerospace constructions. However, the unstable prices of fuel and the strict environmental regulations have brought forth new priorities to the transport industries. Certain of these priorities include increase of the efficiency of the vehicles, namely reduce of the fuel consumption and the malign emissions as well as reduce of the weight in conjunction with improvement of the passive safety of the examined materials. Amplified fibroid polymers are used to reduce the weight in the automotive for many years. A recent announcement was focused on thermoplastic composite materials as they have the advantages of prompt manufacture and recycle. Furthermore one of the most rapid advancements of the late years in manufacturing industry was the advancement of the use of composite materials (known as Fiber Reinforced Polymers) in engineering works. The composite materials are known for their exceptional mechanical capacities, their low weight and their good resistance to the environmental influences. The above characteristics had as a result the gradual import of the composite materials in the work of the civil engineer as well mainly in the reinforcement application field, where the materials are applied on the external surfaces of construction's parts through pasting. The use then of the composite materials covers a great range of applications such as the automotive, aviation, navigation, engineering projects and certain industries of consumable items (for example sports' items).

The theoretical researches around the behaviour of the composite materials are constantly developed, aiming at the prediction of their behaviour under several kinds of load. Furthermore the comparison with experimental results composes a basic factor in the design and the development of manufactures made of composite materials.

In this work are presented experimental and theoretical researches of the problems – failures of several composite materials consisted of fiber reinforced polymers. Theoretical analysis models of their behaviour are cited and comparisons with experimental results aiming at the understanding of the behaviour mechanisms of these materials follows. Furthermore are presented processes of improvement of the behaviour of composite materials, which constitute an important object of further research.

For the preparation of this work I would like to warmly thank the nominee Doctor Mr. Nikos Galanis for his guidance and the edit of the texts, as well as my wife for her understanding and her constant support. Finally I would like to thank my professor in the Field of the Processes' Technology Mr. Dimitris Manolakos for his trust in finishing the present diploma work.

1 ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

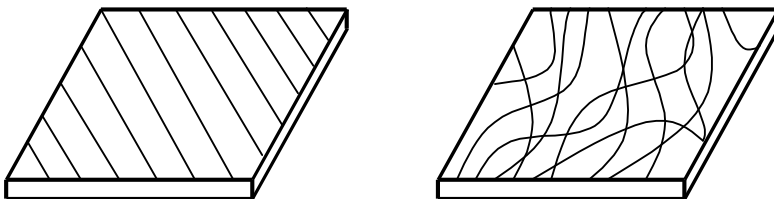
1.1 Εισαγωγή

Με την ευρύτερη χρήση του όρου, συνδυασμός δύο ή περισσότερων υλικών συνιστά ένα στοιχείο από σύνθετο υλικό. Τα σύνθετα υλικά από ινοπλισμένα πολυμερή, έχουν ως συστατικά τους στοιχεία ίνες υψηλής αντοχής και υψηλού μέτρου ελαστικότητας σε παχύρρευστη σκληρυμένη μήτρα. Σε αυτή τη μορφή, τόσο οι ίνες όσο και η μήτρα διατηρούν τις φυσικές και χημικές τους ιδιότητες ενώ ταυτόχρονα παράγουν ένα συνδυασμό ιδιοτήτων που δεν είναι δυνατόν να επιτευχθεί με κανένα από τα συστατικά στοιχεία όταν δρα μόνο του. Η συγκόλληση των προσανατολισμένων ινών πάνω στο μαλακότερο υλικό της μήτρας έχει ως αποτέλεσμα ένα σύνθετο υλικό ινοπλισμένου πολυμερούς με σαφώς καλύτερες ιδιότητες στη διεύθυνση των ινών. Ανάλογα με το συνδυασμό των υλικών, τα σύνθετα υλικά διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες

- Σύνθετα υλικά ινών (fibrous composites) αποτελούμενα από ίνες εμποτισμένες σε ρητίνη ή μη.
- Σύνθετα υλικά στρωμάτων (laminated composites) αποτελούμενα από επίπεδα διαφόρων υλικών.
- Σύνθετα υλικά σωματιδίων (particulate composites) αποτελούμενα από σωματίδια διαφόρων υλικών σε ένα σώμα.

Βάσει του προσανατολισμού των ινών υπάρχουν δύο γενικές κατηγορίες σύνθετων υλικών ινών:

- Προσανατολισμένα (directional), των οποίων οι ίνες είναι συνεχείς και έχουν όλες την ίδια διεύθυνση (Σχήμα 6.3α).
- Μη προσανατολισμένα (random), των οποίων οι ίνες είναι τυχαία τοποθετημένες στο συνδετικό υλικό (Σχήμα 6.3β).



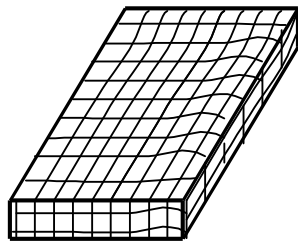
(α) Προσανατολισμένο σύνθετο υλικό. (β) Μη προσανατολισμένο σύνθετο υλικό.

Σχήμα 1.1: Γενικοί τύποι σύνθετων υλικών ινών.

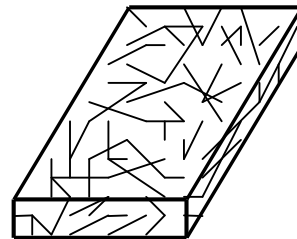
Οι ίνες των σύνθετων υλικών τοποθετούνται με διάφορους τρόπους ανάλογα με τις ανάγκες της κάθε εφαρμογής. Βάσει του τρόπου τοποθέτησης και του συνδυασμού των ινών στο συνδετικό υλικό, τα σύνθετα υλικά ινών

κατατάσσονται στις ακόλουθες τέσσερις κατηγορίες:

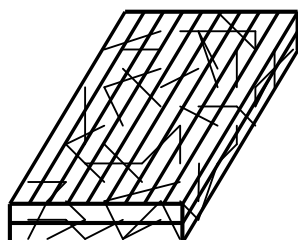
- Πλεκτών ινών (woven fiber), τα οποία αποτελούν συνεχές σώμα χωρίς επιμέρους στρώματα, οπότε και δεν παρουσιάζουν πιθανότητες αποκόλλησης (Σχήμα 6.4α). Η αντοχή τους όμως, είναι μειωμένη εξαιτίας της μεγάλης συγκέντρωσης τάσεων, αλλά και της χρήσης υψηλού ποσοστού ρητίνης.
- Ασυνεχών ινών (chopped fiber), τα οποία έχουν κοντές ίνες διάσπαρτες μέσα στο συνδετικό υλικό (Σχήμα 6.4β). Οι μηχανικές τους αντοχές είναι κατά κανόνα κατώτερες των αντίστοιχων με συνεχείς ίνες.
- Υβριδικά (hybrid), τα οποία αποτελούνται είτε από συνεχείς και ασυνεχείς ίνες (Σχήμα 6.4γ) είτε από περισσότερους του ενός τύπους ινών (π.χ. ύαλο και γραφίτη). Χρησιμοποιούνται όταν το σύνθετο υλικό ινών μόνο του δεν έχει τις επιθυμητές ιδιότητες.
- Συνεχών ινών (continuous fiber) όπου στρώματα συνεχών ινών-ρητίνης τοποθετούνται στην επιθυμητή διεύθυνση και συνδέονται αποτελώντας ένα σώμα (Σχήμα 6.4δ). Παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή, αλλά αποκόλληση μεταξύ των στρωμάτων είναι πιθανή.



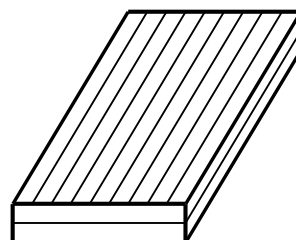
(α) Σύνθετο υλικό πλεκτών ινών.



(β) Σύνθετο υλικό ασυνεχών ινών.



(γ) Υβριδικό σύνθετο υλικό.



(δ) Σύνθετο υλικό συνεχών ινών.

Σχήμα 1.2.: Τύποι σύνθετων υλικών ινών.

1.2 Ιδιότητες σύνθετων υλικών από ινοπλισμένα πολυμερή

Όπως προαναφέρθηκε, οι τυπικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών περιλαμβάνουν το χαμηλό ειδικό βάρος, τον υψηλό λόγο αντοχής προς βάρος και τον υψηλό λόγο μέτρου ελαστικότητας προς βάρος. Επίσης τα περισσότερα σύνθετα υλικά από ινοπλισμένα πολυμερή είναι εξαιρετικά ανθεκτικά σε ηλεκτροχημική διάβρωση.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό των σύνθετων υλικών από ινοπλισμένα πολυμερή είναι η σχεδόν γραμμική καμπύλη έντασης – παραμόρφωσης έως την αστοχία τους. Παρόλο που τα υλικά που συνθέτουν τις μήτρες επιδέχονται πλαστική παραμόρφωση, οι ίνες γενικά συμπεριφέρονται μόνο ελαστικά. Καθώς όμως η συμπεριφορά του σύνθετου υλικού καθορίζεται κυρίως από τη συμπεριφορά των ινών, οι οποίες αποτελούν και τον κύριο φορέα μεταφοράς του φορτίου, πολύ σπάνια τα ινοπλισμένα πολυμερή που χρησιμοποιούνται για την επισκευή και ενίσχυση κατασκευών παρουσιάζουν πλαστική παραμόρφωση ή έστω διαρροή. Αντίθετα η θραύση είναι η τυπική μορφή αστοχίας ενός σύνθετου υλικού που καταπονείται από οριακή τιμή τάσης.

1.3 Υλικά ινών

Οι τρεις συνηθέστεροι τύποι ινών που χρησιμοποιούνται σε σύνθετα υλικά ινοπλισμένων πολυμερών είναι τα υαλονήματα, τα ανθρακονήματα και οι ίνες πολυαραμιδής.

(α) Ίνες Υάλου. Τα υαλονήματα εμφανίστηκαν για πρώτη φορά στο εμπόριο το 1939. Παράγονται με μηχανικό τρόπο από ύαλο που τήκεται. Το κύριο χαρακτηριστικό του υάλου είναι ότι δεν παρουσιάζει ούτε πλήρως κρυσταλλική δομή αλλά ούτε και ιδιότητες ρευστού. Ανάλογα με το είδος της εφαρμογής για το οποίο αναπτύχθηκαν, υπάρχουν έξι διαφορετικοί τύποι υαλονημάτων. Από αυτούς, οι δύο τύποι που χρησιμοποιούνται για την επισκευή και ενίσχυση κατασκευών είναι ο ύαλος-E και ο ύαλος-S. Αν και, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.1, ο ύαλος-S έχει μεγαλύτερη εφελκυστική αντοχή και μέτρο ελαστικότητας από τον ύαλο-E, λόγω του υψηλού του κόστους έχει περιορισμένη εφαρμογή σε σχέση με το δεύτερο.

Πίνακας 2.1
Ιδιότητες υάλου –E και υάλου-S

Είδος υαλονήματος	Εφελκυστική αντοχή (MPa)	Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	Επιμήκυνση θραύσης (%)	Πυκνότητα (gr/cm ³)
Ύαλος – E	2000-3000	70-75	3.0-4.5	2.54
Ύαλος – S	3500-4800	85-90	4.5-5.5	2.48

Οι ίνες υάλου, αν και είναι ανθεκτικές στους περισσότερους διαλύτες, αντιδρούν με ορισμένες αλκαλικές ενώσεις και ισχυρά οξέα. Ο ύαλος παρέχει εξαιρετική θερμική και ηλεκτρική μόνωση. Τα φύλλα υάλου έχουν μικρότερη αντοχή σε κόπωση από τα φύλλα άνθρακα ή πολυαραμιδής, αλλά μεγαλύτερη από τα περισσότερα μέταλλα. Όπως και ο άνθρακας, ο ύαλος δεν παρουσιάζει ερπυστικές παραμορφώσεις, είναι όμως ευπαθής σε διάβρωση. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι παραπάνω ιδιότητες επηρεάζονται σημαντικά από τις περιβαλλοντικές συνθήκες

καθώς και τη μήτρα που επιλέγεται για την παραγωγή του σύνθετου υλικού.

(β) Ίνες Άνθρακα. Οι ίνες άνθρακα διατίθενται στο εμπόριο από τα τέλη της δεκαετίας του 1950. Ο άνθρακας παράγεται από πολυακρυλονιτρίλιο, πίσσα (υποπροϊόν της διύλισης του πετρελαίου) ή ρεγιόν με πυρόλυση σε πολύ υψηλή θερμοκρασία (συχνά έως 3000°C). Μέσω της πυρόλυσης απομακρύνονται από το πολυμερές του άνθρακα διάφορες ενώσεις κυανίου και άτοκα υδρογόνου. Τα κρυσταλλικά φύλλα άνθρακα που σχηματίζονται εντείνονται έτσι ώστε να προσανατολιστούν παράλληλα προς τον άξονα της ίνας. Με τον τρόπο αυτό οι κρύσταλλοι στερεοποιούνται σε μία βέλτιστη διάταξη. Θεωρητικά, οι ίνες άνθρακα είναι δυνατό να αποκτήσουν μηχανικές ιδιότητες που προσεγγίζουν τα 100 GPa ελκυστικής αντοχής και 1000 GPa μέτρου ελαστικότητας. Πάντως, οι τιμές αυτές κατά κανόνα δεν αναπτύσσονται πλήρως λόγω ατελειών που παρουσιάζονται στη κρυσταλλική δομή.

Οι ίνες άνθρακα που διατίθενται στο εμπόριο έχουν ελκυστική αντοχή που κυμαίνεται από 2100 MPa έως 6800 MPa με συνήθη για τις εφαρμογές τιμή της τάξης των 3500 MPa και μέτρο ελαστικότητας από 215 GPa έως 700 GPa. Η επιμήκυνση θραύσης κυμαίνεται από 0.2 έως 2.5%, ανάλογα με το είδος του νήματος και τη μέθοδο κατασκευής.

Οι ίνες άνθρακα είναι χημικά αδρανείς στους περισσότερους διαλύτες, είτε αυτή είναι όξινοι είτε βασικοί, και επιπλέον έχουν μεγάλη αντοχή στις υψηλές θερμοκρασίες. Τα φύλλα από ανθρακονήματα και εποξική ρητίνη είναι ανθεκτικά σε κόπωση, ερπυσμό και διάβρωση. Λόγω της δράσης του ως ευγενές μέταλλο, ο άνθρακας έχει υψηλή αγωγιμότητα και μπορεί να προκαλέσει γαλβανική διάβρωση των μετάλλων που έρχονται σε επαφή μαζί του. Για το λόγο αυτό πρέπει να αποφεύγεται η απευθείας επαφή του χάλυβα ή του αλουμινίου με τις ίνες άνθρακα. Αξίζει να σημειωθεί ότι το κόστος των ανθρακονημάτων, παρότι παραμένει αρκετά υψηλό σε σχέση με τα άλλα είδη ινών, ωστόσο έχει μειωθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια.

(γ) Ίνες Πολυαραμιίδης. Η εμπορική ονομασία των πρώτων ινών πολυαραμιίδης που κυκλοφόρησαν στην αγορά στις αρχές της δεκαετίας του 1970 είναι Kevlar. Η χρήση των σύνθετων υλικών από ίνες πολυαραμιίδης σε δομικά έργα είναι περιορισμένη σε σχέση με τα υαλονήματα και τα ανθρακονήματα. Κύρια εφαρμογή τους αποτελεί η θωράκιση κατασκευών από κρουστικά φορτία.

Λόγω της χημικής δομής του πολυμερούς από το οποίο παράγονται, οι ίνες πολυαραμιίδης έχουν μεγάλο μέτρο ελαστικότητας και υψηλή πυκνότητα. Παρόλο που ορισμένες από τις ίνες της κατηγορίας αυτής παρουσιάζουν ελκυστική αντοχή από 3500 έως 4100 MPa και μέτρο ελαστικότητας της τάξης των 175 GPa, που σε εξαιρετικές περιπτώσεις μπορεί να φτάσει έως τα 210 GPa, η συνήθης τιμή της ελκυστικής αντοχής είναι 3800 MPa, ενώ το μέτρο ελαστικότητας κυμαίνεται από 70 έως 130 GPa. Η επιμήκυνση θραύσης είναι μεταξύ 2.5 και 5.0%. Επιπλέον έχουν μεγάλη αντοχή σε κόπωση και τριβή και είναι ανθεκτικές στους διαλύτες, με εξαίρεση τα ισχυρά οξέα και τις βάσεις. Επειδή είναι υδρόφιλες, παρουσιάζουν μερική απώλεια αντοχής σε θερμό περιβάλλον με υψηλό ποσοστό

υγρασίας. Η θλιπτική τους αντοχή είναι σημαντικά μικρότερη από την αντίστοιχη ελκυστική (περίπου το 20%), ενώ ακόμα, υπό δεδομένη τάση, παρουσιάζουν ερπυστικές παραμορφώσεις.

Εκτός από τις παραπάνω τρεις κύριες κατηγορίες, άλλοι τύποι ινών που χρησιμοποιούνται σε ορισμένες εφαρμογές πολιτικού μμηχανικού είναι οι ακόλουθες:

- Ίνες γραφίτη: παράγονται όπως και οι ίνες άνθρακα με πυρόλυση. Οι ίνες γραφίτη περιέχουν κατά τουλάχιστον 99% άνθρακα, ενώ το ποσοστό άνθρακα των ανθρακονημάτων είναι λιγότερο από 95%.
- Ίνες βορίου: έχουν τη μεγαλύτερη διάμετρο (0.05-0.2 mm) σε σχέση με τις άλλες ίνες. Η αντοχή και η ακαμψία τους είναι μεγαλύτερες από αυτές των ινών γραφίτη.
- Ίνες από καρβίδιο του πυριτίου: έχουν υψηλή αντοχή σε οξείδωση και ανθεκτικότητα στις υψηλές θερμοκρασίες.

1.4 Μήτρες Σύνθετων Υλικών

Ρητίνες χρησιμοποιούνται συνήθως ως μήτρες για την παραγωγή σύνθετων υλικών ινών. Η ρητίνη αποτελεί τη συνδετική ύλη μεταξύ των ινών και, ταυτόχρονα, συνεισφέρει στην ανθεκτικότητα και στην ηλεκτρική μόνωση του σύνθετου υλικού. Προκειμένου να αναπτυχθεί ισχυρή μηχανική και χημική σύνδεση μεταξύ ινών και ρητίνης, είναι απαραίτητη η ύπαρξη συνάφειας μεταξύ τους. Επιπλέον πρέπει να υπάρχει χημική συμβατότητα έτσι ώστε να μη λάβουν χώρα ανεπιθύμητες αντιδράσεις κατά τη σύνδεσή τους.

Οι ρητίνες από τη φύση τους είναι τουλάχιστον μία τάξη μεγέθους ασθενέστερες από τις ίνες στις οποίες εμποτίζονται. Είναι περισσότερο ευπαθείς στη θερμότητα και στην πυρκαγιά και γενικά εμφανίζουν μεγαλύτερη ευαισθησία στους χημικούς διαλύτες, τα οξέα, τις βάσεις και το νερό σε σχέση με τις ίνες. Όλα τα είδη των ρητινών παρουσιάζουν επίσης σημαντικές ερπυστικές παραμορφώσεις σε σχέση με τα παραδοσιακά δομικά υλικά. Παρόλα αυτά, τα σύνθετα υλικά ινοπλισμένων πολυμερών δεν θα μπορούσαν να υπάρξουν χωρίς τις ρητίνες, καθώς αυτές είναι που μεταφέρουν τα φορτία και κατανέμουν τις τάσεις στις ίνες κάθε στρώσης του πολυμερούς. Με τον τρόπο αυτό επιτρέπουν στο ινοπλισμένο πολυμερές να συμπεριφέρεται σχεδόν σαν ομογενές υλικό.

Η μεγάλη διάρκεια ζωής που χαρακτηρίζει τις μήτρες πολυμερών σχετίζεται με την προοδευτική αλλαγή των φυσικών τους ιδιοτήτων, η οποία λαμβάνει χώρα με την πάροδο του χρόνου και τη φόρτιση. Η προένταση των σύνθετων υλικών μπορεί να έχει εξαιρετικά σημαντική επίδραση στη διάρκεια ζωής της μήτρας πολυμερούς. Η διάρρηξη λόγω ερπυσμού που αποτελεί τυπική μορφή αστοχίας των ινοπλισμένων πολυμερών οφείλεται στην ιξωδοπλαστική συμπεριφορά της μήτρας από πολυμερές και όχι στις ίνες.

Οι ρητίνες που χρησιμοποιούνται συνήθως για την παραγωγή σύνθετων υλικών για την επισκευή και ενίσχυση κατασκευών είναι οι εποξικές, οι πολυεστερικές και οι βινυλεστερικές. Οι σημαντικότερες μηχανικές ιδιότητες των τριών αυτών

κατηγοριών ρητινών παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.2.

Πίνακας 2.2 : Ιδιότητες ρητινών

Είδος ρητίνης	Εφελκυστική αντοχή	Μέτρο ελαστικότητας	Επιμήκυνση θραύσης	Πυκνότητα
	(MPa)	(GPa)	(%)	(gr/cm ³)
Εποξική	55-130	2.0-4.5	4.0-14.0	1.2-1.30
Πολυεστερική	35-104	2.1-4.1	<5.0	1.10-1.46
Βινυλεστερική	73-81	3.0-3.6	3.5-5.5	1.12-1.32

(α) Εποξικές Ρητίνες. Οι εποξικές ρητίνες θεωρούνται γενικά οι καλύτερες μήτρες για χρήση σε ινοπλισμένα πολυμερή λόγω της μεγάλης αντοχής, συγκολλητικής ικανότητας, ανθεκτικότητας σε κόπωση και χημική διάβρωση, καθώς και της χαμηλής συστολής ξηράνσεως που παρουσιάζουν. Όπως συμβαίνει και με τα άλλα είδη ρητινών, οι εποξικές ιδιότητες ποικίλουν σημαντικά ανάλογα με τη ρητίνη βάσης και τις χημικές ενώσεις που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή τους.

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

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

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

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

(γ) Βινυλεστερικές Ρητίνες. Πρόκειται για υβριδικές ρητίνες που παράγονται με αλυσιδωτές αντιδράσεις ενός εποξικού πολυμερούς με ακρυλικές ή μεθακρυλικές ενώσεις. Λόγω της παρουσίας του εποξικού πολυμερούς, οι βινυλεστερικές ρητίνες είναι περισσότερο εύκαμπτες, σκληρότερες, πιο ανθεκτικές σε κόπωση και λιγότερο χημικά ενεργές σε σχέση με τις πολυεστερικές. Οι υδροξυλικές ενώσεις που περιέχονται στο εποξικό πολυμερές σχηματίζουν δεσμούς υδρογόνου με αντίστοιχες ενώσεις στην επιφάνεια των ινών υάλου. Με τον τρόπο αυτό βελτιώνεται σημαντικά

η σύνδεση της ρητίνης με τις ίνες, αν και δεν φτάνει στο επίπεδο της συγκολλησιμότητας των εποξικών ρητινών. Αυτό οφείλεται κυρίως στη μεγάλη απώλεια όγκου των βινυλεστερικών ρητινών λόγω συστολής ξηράνσεως.

Αντιθέτως, οι βινυλεστερικές ρητίνες δεν έχουν τόσο υψηλή αντοχή και ανθεκτικότητα σε κόπωση όσο οι εποξικές. Λόγω της χημικής τους σύστασης, αντιμετωπίζουν επίσης το ίδιο πρόβλημα δυσσομίας με τις πολυεστερικές ρητίνες. Η συστολή ξηράνσεως είναι γενικά της τάξης του 5 με 10%. Το κόστος τους είναι συνήθως μεταξύ του κόστους των εποξικών και των πολυεστερικών ρητινών.

1.5 Ιδιότητες Σύνθετου Υλικού

Οι ιδιότητες του σύνθετου υλικού προκύπτουν ως συνδυασμός των ιδιοτήτων των διακριτών συστατικών του υλικών, δηλαδή των ινών και της μήτρας. Στον Πίνακα 2.3 παρουσιάζονται η εφελκυστική αντοχή, το μέτρο ελαστικότητας και το πάχος μίας στρώσης των δύο συνηθέστερων τύπων ινοπλισμένων πολυμερών υγρής εφαρμογής που χρησιμοποιούνται για ενίσχυση δομικών στοιχείων. Οι τύποι αυτοί προκύπτουν με συνδυασμό είτε υαλονημάτων και εποξικής ρητίνης είτε ανθρακονημάτων και εποξικής ρητίνης.

Πίνακας 2.3 Ενδεικτικές ιδιότητες σύνθετων υλικών ινοπλισμένων πολυμερών

Τύπος σύνθετου υλικού	Εφελκυστική αντοχή (MPa)	Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	Πάχος στρώσης (mm)
Υαλονήματα και εποξική ρητίνη	1800-4300	65-80	0.30-1.30
Ανθρακονήματα υψηλής αντοχής και εποξική ρητίνη	2200-4300	200-145	0.12-0.60

1.6 Μικρομηχανική των σύνθετων υλικών

Όπως προαναφέρθηκε, τα χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες ενός σύνθετου υλικού καθορίζονται από τα αντίστοιχα των συστατικών του. Από τη σκοπιά της μικρομηχανικής, προκειμένου να καθοριστούν οι ιδιότητες του σύνθετου υλικού θα πρέπει να είναι γνωστό το ποσοστό με το οποίο συμμετέχει το κάθε υλικό στο τελικό προϊόν.

Ο Νόμος της Σύνθεσης (Rule of Mixtures) χρησιμοποιεί τα ποσοστά συμμετοχής ινών και ρητίνης στο τελικό προϊόν για την πρόβλεψη των μηχανικών ιδιοτήτων του σύνθετου υλικού. Ο νόμος της σύνθεσης περιγράφεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$v_f + v_m + v_u = 1 \quad (2.1)$$

$$w_f + w_m = 1 \quad (2.2)$$

$$\rho_c = \rho_f v_f + \rho_m v_m \quad (2.3)$$

όπου v_f , v_m και v_u είναι οι λόγοι όγκου των ινών, της ρητίνης και των κενών, αντίστοιχα και ισούνται με $v_i = V_i/V$, όπου V ο συνολικός όγκος του σύνθετου υλικού και V_i με $i = f, m, u$ ο όγκος των ινών, της ρητίνης και των κενών, αντίστοιχα. Επίσης, w_f και w_m είναι οι λόγοι βάρους των ινών και της ρητίνης και ισούνται με $w_i = W_i/W$, όπου W το συνολικό βάρος του σύνθετου υλικού και W_i με i

= f, m το βάρος του αντίστοιχου συστατικού στοιχείου. Τέλος, ρ_f, ρ_m και ρ_c είναι οι πυκνότητες των ινών, της ρητίνης και η συνολική του σύνθετου υλικού, αντίστοιχα.

Επίσης η σχέση που συνδέει το μέτρο ελαστικότητας του σύνθετου υλικού E με το μέτρο ελαστικότητας των ινών E_f και το μέτρο ελαστικότητας της μήτρας E_m είναι η ακόλουθη:

$$E = E_f v_f + E_m v_m \quad (2.4)$$

Όσον αφορά στην εφελκυστική αντοχή του σύνθετου υλικού, αυτή εξαρτάται από την εφελκυστική αντοχή των ινών, δεδομένου ότι η αντοχή τους είναι μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από αυτή του συνδετικού υλικού. Πρακτικά αστοχία της ίνας συνεπάγεται αστοχία του σύνθετου υλικού.

Εάν s, s_f και s_{mf} είναι η εφελκυστική αντοχή του σύνθετου υλικού, η εφελκυστική αντοχή της ίνας και η εφελκυστική τάση της μήτρας κατά την αστοχία της ίνας αντίστοιχα, τότε ισχύει

$$s = s_f v_f + s_{mf} (1 - v_f) \quad (2.5)$$

2 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ/ΕΛΑΤΤΩΜΑΤΑ

2.1 Εισαγωγή

Σύνθετες κατασκευές, με πλαίσια (σάντουιτς) από σύνθετα επιφανειακά ελάσματα και αφρώδη πυρήνα, προσφέρουν μία ποικιλία δυνατοτήτων στην χρήση μεταλλικών κατασκευών πολεμικών πλοίων. Αυτό το κεφάλαιο περιλαμβάνει αναλυτικές πληροφορίες για δυναμική ανάλυση πλαισίων (σάντουιτς), με μεταλλικά επιφανειακά στρώματα και κυψελωτό (αραιό) πυρήνα, καθώς επίσης και μία μελέτη για πλαίσια (σάντουιτς) με σύνθετα επιφανειακά στρώματα και μεταλλικό αφρώδη πυρήνα. Τα είδη αστοχίας που συνήθως συμβαίνουν είναι αστοχία λόγω διάτμησης του πυρήνα και επιφανειακό τσαλάκωμα (wrinkling) των ελασμάτων. Στην δυναμική ανάλυση συμπεριλαμβάνεται η μοντελοποίηση των πλαισίων σαν απλό σύστημα ελατηρίου με έναν βαθμό ελευθερίας. Στα σάντουιτς πλαίσια υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός σχεδιαστικών μεταβλητών όπως το πάχος του πλαισίου, το πάχος του πυρήνα και η πυκνότητα του πυρήνα.

Με δεδομένο ότι υπάρχει ένα αυξανόμενο ενδιαφέρον, ιδιαίτερα τις τελευταίες δεκαετίες, σχετικά με την χρήση των σύνθετων υλικών σε κατασκευαστικές εφαρμογές, από τις κατασκευές αεροπλάνων και διαστημοπλοίων έως την αυτοκινητοβιομηχανία και τις θαλάσσιες κατασκευές στο κεφάλαιο αυτό εξετάζεται η συμπεριφορά τους κάτω από πρόσκρουση. Ειδικότερα, λόγω του ότι οι πολυδιευθυντικές πολύστρωτες πλάκες είναι εξαιρετικά ευπαθής σε εγκάρσια πρόσκρουση, δίδοντας αποτελέσματα σημαντικά επικίνδυνα όπως ράγισμα της μήτρας, αποκόλληση των στρωμάτων και διάσπαση των ινών αρκετές μελέτες, έχουν γίνει προκειμένου να μας βοηθήσουν να καταλάβουμε και να βελτιώσουμε την αντίδραση σε πρόσκρουση των σύνθετων υλικών και κατασκευών. Εξετάζεται η συμπεριφορά σε πρόσκρουση στρωμάτων [0/90/0/90] για εγκάρσια στρώση, και η σειρά [0/90+45/-45]s για στρώση με κλίση.

Εξ αιτίας της χαμηλής αντοχής διάσπασης μεταξύ των στρώσεων των πολυδιευθυντικών στρωμάτων, οι κίνδυνοι πρόσκρουσης συχνά καταλήγουν σε μεγάλες περιοχές αποκόλλησης, αυξάνοντας την χαμηλή απόδοση λόγω πρόσκρουσης. Για να βελτιωθεί η αντίδραση των στρωμάτων, έχουν προταθεί διαφορετικές μέθοδοι, μια εκ των οποίων είναι ο σχηματισμός ενδιάμεσης στρώσης (interleaving) η οποία μπορεί να επιτευχθεί χωρίς σημαντικές μετατροπές των παρόντων μεθόδων κατασκευής. Παρουσιάζονται λοιπόν δοκιμές κάμψης τριών σημείων μονοδιευθυντικών δοκιμίων ενισχυμένων πλαστικών με ανθρακονήματα.

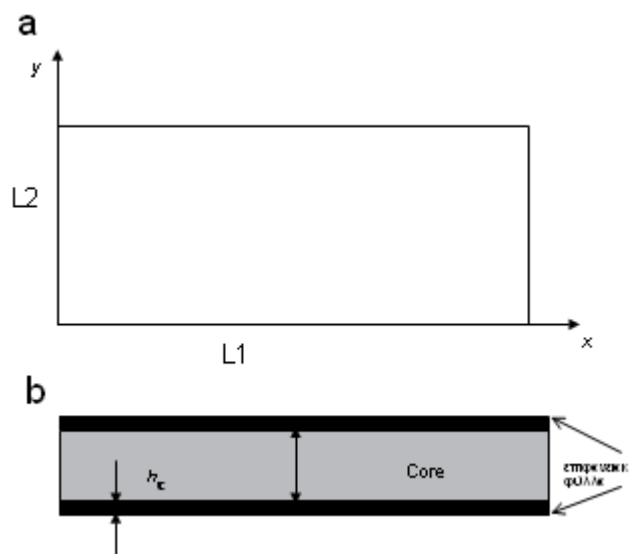
Τέλος μια πρόσφατη δημοφιλής μέθοδος ενίσχυσης οπλισμένου σκυροδέματος (Reinforced Concrete) είναι η τοποθέτηση ινοπλισμένων ελασμάτων πολυμερών (FRP) στις επιφάνειες εφελκυσμού. Ένα σημαντικό είδος αστοχίας τέτοιων ενισχυμένων δοκών είναι η αποκόλληση των ελασμάτων ινοπλισμένων πολυμερών από το σκυρόδεμα, εξ αιτίας της υψηλής συγκέντρωσης τάσης στην συγκολλητική ουσία στα άκρα του FRP ελάσματος. Παρουσιάζεται μια μελέτη παραμέτρων που επηρεάζουν τις συγκεντρώσεις τάσης στα άκρα των λωρίδων FRP. Η εκτίμηση των τάσεων είναι πολύ σημαντική για το σχεδιασμό τέτοιων κατασκευών.

2.2 Διαγράμματα αστοχίας σύνθετων σάντουιτς πλαισίων που υπόκεινται σε ανεμοπίεση.

2.2.1 Αστοχίες σε πλαίσια σάντουιτς.

2.2.1.1 Γενικά

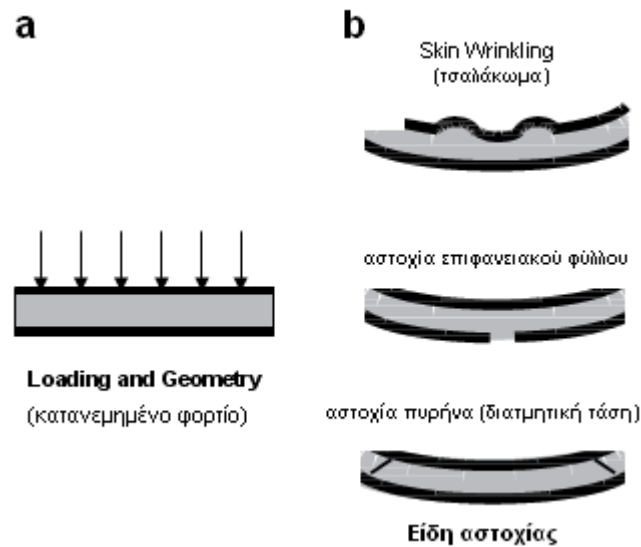
Το πρόβλημα που παρουσιάζεται είναι ένας ελαφρύς πυρήνας σάντουιτς πλαισίου, στηριγμένος στα άκρα του, που δέχεται ριπή ανέμου. Η γεωμετρία απεικονίζεται στο σχήμα 1. Το πάνελ έχει διαστάσεις στο κύριο (xy) επίπεδο L1 και L2. Τα επιφανειακά ελάσματα έχουν πάχος h_f και ο πυρήνας πάχος h_c . Θεωρείται ότι και τα επιφανειακά ελάσματα έχουν το ίδιο πάχος. Επιπροσθέτως θεωρείται ότι τα επιφανειακά ελάσματα και ο πυρήνας έχουν γνωστά μέτρα ελαστικότητας E_f και E_c , μέτρο Poisson ν_f και ν_c και μέτρα διάτμησης G_f και G_c . Όσο φορτίζεται το πάνελ, η ανεμοπίεση θεωρείται ομοιόμορφη στην επιφάνεια του πάνελ. Αυτό προϋποθέτει ότι το μέσο προσβολής είναι πολύ μεγαλύτερο από τις διαστάσεις του πάνελ. Αυτό είναι μία αληθής προσέγγιση για πολλές περιπτώσεις, η οποία και απλοποιεί το πρόβλημα σημαντικά. Για πολύ μικρές διαστάσεις μέσου προσβολής η πίεση μπορεί να μην είναι ομοιόμορφη και αυτή η υπόθεση να μην ευσταθεί.



Σχήμα 1. Γεωμετρία πλαισίου σάντουιτς

Υπάρχει αρκετή βιβλιογραφία που ασχολείται με δοκούς από πλαίσια, με γεωμετρία στην οποία μία από τις διαστάσεις του εσωτερικού επιπέδου (L1 και L2) είναι σημαντικά μικρότερη από τις άλλες. Εδώ εξετάζονται πλαίσια σάντουιτς όπου το L1 και L2 είναι ισάξια και οι οριακές συνθήκες εφαρμόζονται και στις τέσσερις πλευρές. Για πλαίσια, το βασικό είδος αστοχίας αναμένεται να είναι παρόμοιο με δοκούς παρόλο που οι κυρίαρχες εξισώσεις είναι λίγο διαφορετικές. Κάτω από φόρτιση εφαρμοζόμενη στην επιφάνεια του πλαισίου, το πλαίσιο μπορεί να αστοχήσει με διάφορους τρόπους. Φαίνεται στο σχήμα 2 το φορτίο και η γεωμετρία, και επίσης φαίνονται τα διάφορα είδη αστοχίας. Παρακάτω αναλύεται καθένα από τα είδη αστοχίας. Δεν παρουσιάζονται άλλα είδη αστοχίας, όπως το σπάσιμο του πυρήνα που μπορεί να συμβεί για πολύ έντονο φορτίο ανέμου, ή η αποκόλληση που μπορεί να συμβεί όταν η συνένωση ανάμεσα στον πυρήνα και το επιφανειακό έλασμα είναι

σχετικά αδύναμη. Συμπερασματικά, αυτή η ανάλυση δεν μπορεί να εφαρμοσθεί για καταστάσεις όπου εμφανίζονται άλλα είδη αστοχίας εκτός από τα συγκεκριμένα που αναφέρονται παρακάτω.



Σχήμα 2. (a): απεικόνιση φόρτισης, (b) τρία είδη αστοχίας

2.2.1.2 Αστοχία επιφανειακού ελάσματος.

Κάτω από τάσεις λόγω κάμψης του πλαισίου τα επιφανειακά ελάσματα μπορεί να αστοχήσουν από εφελκυσμό ή σύνθλιψη. Η μέγιστη τάση κάμψης και η πιθανή θέση αυτής της αστοχίας ξεκινά από το κέντρο του πάνελ ($x=L1/2$, $y=L2/2$). Η μέγιστη καμπτική ροπή ανά μονάδα μήκους M στο πλαίσιο δίδεται από την σχέση :

$$M = f_1(L1/L2)p_0^2L_2^2 \quad (1)$$

Όπου

- p_0 η πίεση που εφαρμόζεται στο πάνελ
- $f_1(L1/L2)$ μία συνάρτηση που χαρακτηρίζει την διακύμανση της μέγιστης τάσης κάμψης για λόγο μηκών ($L1 / L2$). Για διευκόλυνση, στο εξής θα αναφέρεται ως f_1 .

Η τάση κάμψης σ στα επιφανειακά ελάσματα μπορεί να εκφρασθεί κατά την διάρκεια της καμπτικής ροπής M ως εξής

$$\sigma = \frac{M}{h_f d} \quad (2)$$

Όπου d το άθροισμα $h_f + h_c$. Θεωρείται ότι το επιφανειακό έλασμα αστοχεί όταν η τάση φθάνει μία κρίσιμη τιμή σ_f .

Από τις σχέσεις (1) και (2) θέτοντας $\sigma = \sigma_f$ και $p_0=p_f$ προκύπτει η πίεση αστοχίας για το επιφανειακό έλασμα ως εξής :

$$p_f = \frac{\sigma_f h_f d}{L_2^2 f_1} \quad (3)$$

2.2.1.3 Συρρικνώσεις (skin wrinkling) επιφανειακών φύλλων

Όταν το πάνελ κάμπτεται, το ένα επιφανειακό έλασμα συνθλίβεται. Κάτω από συνεχή σύνθλιψη το επιφανειακό έλασμα μπορεί να «τσαλακώσει» εάν η τάση συμπίεσης υπερβεί μία κρίσιμη τιμή σ_w . Το πρόβλημα προϋποθέτει ακαμψία πυρήνα ίδια με του επιφανειακού ελάσματος. Η κρίσιμη τάση σ_w για «τσάκισμα» δίδεται από την σχέση

$$\sigma_w = 0.79 E_f^{1/3} E_c^{1/3} G_c^{1/3} \quad (4)$$

Για ανισοτροπικούς πυρήνες όπως ελαφρόξύλο, χρησιμοποιείται το μέτρο ελαστικότητας E_C . Παρόμοιες εκφράσεις, διαφέρουν μόνο στους σταθερούς όρους. Για πυρήνες που είναι σίγουρα ισοτροπικοί, είναι δυνατόν να αντικατασταθεί το G_c με το E_c (υποθέτοντας μέτρο Poisson 1/3) και θα δώσει την εξής σχέση :

$$\sigma_w = 0.79 E_f^{1/3} E_c^{2/3} \quad (5)$$

Η γενική μορφή από τις δύο αυτές εκφράσεις παρουσιάζει την σημαντικότητα της σκληρότητας του πυρήνα. Από την σχέση (2) δίνεται μία έκφραση της τάσης στο επιφανειακό έλασμα όταν κάμπτεται. Εάν τεθεί στην σχέση (2) $\sigma = \sigma_w$ και $p = p_w$ προκύπτει η πίεση αστοχίας για επιφανειακό τσάκισμα ελάσματος ως εξής :

$$p_w = \frac{0.79 E_f^{1/3} E_c^{1/3} G_c^{1/3} h_f d}{L_2^2 f_1} \quad \text{γενική περίπτωση} \quad (6)$$

$$p_w = \frac{0.79 E_f^{1/3} E_c^{2/3} h_f d}{L_2^2 f_1} \quad \text{ισοτροπική περίπτωση} \quad (7)$$

2.2.1.4 Αστοχία πυρήνα – διατμητική τάση

Ο πυρήνας δέχεται διατμητική φόρτιση. Η διατμητική τάση θα είναι μεγαλύτερη στα όρια του πάνελ, ($x = L_1/2, y = 0$ ή L_2). Η μέγιστη διατμητική τάση τ στο εσωτερικό του πυρήνα δίδεται από την σχέση:

$$\tau = \frac{p_0 f_2 (L_1/l_2) l_2}{h_c} \quad \text{μέγιστη διατμητική τάση πυρήνα} \quad (8)$$

Όπου $f_2(L_2/L_1)$ είναι η χαρακτηριστική συνάρτηση της διακύμανσης της μέγιστης εγκάρσιας φόρτισης για λόγο διαστάσεων (L_2/L_1) . Για χάριν συντομίας στις επόμενες εξισώσεις θα αναφέρεται απλώς ως f_2 . Θέτοντας αυτήν την διατμητική τάση ίση με την διατμητική αντοχή του πυρήνα τ_c και επιλύοντας ως προς την πίεση όπου ο πυρήνας αστοχεί λόγω διάτμησης (που συμβολίζεται ως p_s) προκύπτει ότι :

$$p_s = \frac{\tau_c h_c}{L_2 f_2} \quad \text{πίεση αστοχίας πυρήνα σε διάτμηση} \quad (9)$$

Οι τρεις εξισώσεις δίνουν την ασκούμενη πίεση σε περίπτωση βλάβης από τρία διαφορετικά είδη αστοχίας. Στην συνέχεια περιγράφεται πώς να χρησιμοποιηθούν αυτές οι εξισώσεις ώστε να αναπτυχθούν τα διαγράμματα αστοχίας των πάνελ. Ωστόσο πρώτα θα αναπτυχθούν κάποιες από τις βασικές μηχανικές ιδιότητες που χρειάζονται στην παρούσα ανάλυση.

2.2.2 Ιδιότητες πυρήνα και επιφανειακού ελάσματος.

2.2.2.1 Γενικά

Άπαξ οι εξισώσεις αστοχίας είναι διαθέσιμες, για την ανάλυση ειδικών περιπτώσεων χρειάζεται σαν δεδομένο η ιδιότητα υλικού για τα ελάσματα και τους πυρήνες. Ένα κοινό υλικό πυρήνα είναι αφρός από πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC). Για παράδειγμα, οι οικογένεια των διβινυλίων με κλειστούς πυρήνες από αφρώδες PVC από την ομάδα των DIAB χρησιμοποιείται σε ποικίλες εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένων θαλάσσιων κατασκευών. Αφροί από PVC είναι ελκυστικοί λόγω του ότι έχουν καλές μηχανικές ιδιότητες, χαμηλή απορροφητικότητα νερού, καλή χημική αντίσταση, και καλό δείκτη πυραντίστασης. Ένα άλλο πιθανό υλικό πυρήνα είναι το ελαφρόξυλο.

2.2.2.2 Διακυμάνσεις πυκνότητας πυρήνα.

Τα υλικά των πυρήνων για σάντουιτς πάνελ έχουν μεγάλο εύρος πυκνότητας. Για παράδειγμα, το Divinycell /H βαθμού (πυρήνας διβινυλίου) παρουσιάζει πυκνότητα από περίπου 45kg/m³ έως περίπου 250kg/m³. Για να κατασκευαστούν τα διαγράμματα αστοχίας χρειάζονται οι εκφράσεις της μεταβολής του μέτρου ελαστικότητας E_c και του μέτρου διάτμησης G_c του πυρήνα σε σχέση με την πυκνότητα του ρ_c . Το μέτρο ελαστικότητας του πυρήνα χρειάζεται για αναλύσεις στην αστοχία «τσακίσματος» του επιφανειακού ελάσματος, και το μέτρο διάτμησης του πυρήνα και η αντοχή διάτμησης του πυρήνα, για αναλύσεις αστοχίας διάτμησης του πυρήνα. Για πολλούς κοινούς πυρήνες υλικών το μέτρο συμπίεσης (compressive) και το μέτρο ολκιμότητας διαφέρουν, χρησιμοποιείται το μέτρο συμπίεσης στην παρούσα ανάλυση ενώ είναι τυπικά μικρότερο από το μέτρο ολκιμότητας και μ' αυτόν τον τρόπο λαμβάνονται ασφαλείς υπολογισμοί για την αντοχή και την ακαμψία. Επιπροσθέτως, στην περίπτωση πυρήνα ελαφρόξυλου, επειδή είναι ανισότροπο υλικό απαιτείται η μεταβολή του μέτρου διάτμησης με την πυκνότητα. Παραθέτονται οι μεταβολές αυτών των ιδιοτήτων στις εξής εξισώσεις :

$$E_c = C_E \rho_C^A \quad (10)$$

$$\tau_c = C_\tau \rho_c^B \quad (11)$$

$$G_c = C_G \rho_c^C \quad (12)$$

όπου C_E, C_τ, C_G, A, B , είναι σταθερές που προσδιορίζονται από τα στοιχεία του πειράματος. Στις παραπάνω εξισώσεις οι μονάδες της τάσης και του μέτρου ελαστικότητας είναι σε MPa και της πυκνότητας σε Kg/m³. Χρησιμοποιώντας δεδομένα υλικά ελασμάτων η μεταβολή αυτών των ιδιοτήτων με την πυκνότητα του πυρήνα για δύο πυρήνες υλικών ίδιας χρήσης παρουσιάζονται στις εξισώσεις 10-12, όπου εφαρμόζονται στα πειραματικά δεδομένα και οι τιμές των σταθερών C_E, C_τ, C_G, A, B , που υπολογίστηκαν. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο πίνακα 1 [3].

Πίνακας 1
Σταθερές πυρήνα σάντουιτς υλικών

	Divinycell (H-Grade)	Balsa
C_E	0.859	2.56
A	1.07	1.46
C_τ	4.44×10^{-3}	8.78×10^{-3}
B	1.26	1.16
C_G	A	1.02
C	A	1.01

Τα επιφανειακά ελάσματα θεωρείται ότι είναι ιστροπικά υαλώδη ινώδη υλικά. Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση είναι: $E_f=20$ GPa, όριο αντοχής $\sigma_f=300$ MPa, και πυκνότητα $\rho_f=1900$ kg/m³. Ανθρακονήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν και γενικά θα έχουν υψηλότερη σκληρότητα και αντοχή καθώς και μικρότερη πυκνότητα.

2.2.3 Δημιουργία διαγραμμάτων αστοχίας.

Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις αστοχίας και τις ιδιότητες των υλικών που παρουσιάστηκαν παραπάνω, είναι εφικτό να αναπτυχθούν τα διαγράμματα αστοχίας για αυτά τα σύνθετα πλαίσια. Για όλα τα είδη αστοχίας που αναφέρθηκαν παραπάνω, ενδιαφέρει ποιο θα συμβεί στην χαμηλότερη πίεση. Τα διαγράμματα αστοχίας δείχνουν γραφικά το πιθανό είδος αστοχίας, για πιθανά πλαίσια σχεδιάζοντας τα όρια ανάμεσα στα διαφορετικά είδη αστοχίας. Στα διαγράμματα σχεδιάζεται η πυκνότητα του πυρήνα ρ_c με πάχος του επιφανειακού ελάσματος προς το μήκος του πλαισίου h_f / L_2 , και αναγνωρίζεται το κύριο είδος αστοχίας για κάθε σημείο στο διάγραμμα. Το πάχος του πυρήνα h_f , δεν επηρεάζει τα όρια του διαγράμματος, παρόλο που επηρεάζει την υπολογιζόμενη πίεση αστοχίας. Επίσης θεωρήθηκε ότι το πάχος του επιφανειακού ελάσματος h_f είναι μικρό συγκριτικά με το πάχος του πυρήνα h_c , οπότε προσεγγιστικά χρησιμοποιήθηκε το h_c . Τα όρια μεταξύ των ειδών αστοχίας βρέθηκαν επιλύοντας τις εξισώσεις αστοχίας για δύο είδη αστοχίας, και λύνοντας ως προς την πυκνότητα του πυρήνα ρ_c . Στην περίπτωση ενός ορίου στο διάγραμμα (face

wrinkling – face failure), η πυκνότητα είναι σταθερή, δίδοντας μία οριζόντια γραμμή στο διάγραμμα. Για τις άλλες δύο περιπτώσεις, η πυκνότητα του πυρήνα ρ_c δίδεται συνάρτηση του αδιάστατου μεγέθους h_f / L_2 .

Πρώτα παρουσιάζεται υαλώδες έλασμα με πυρήνα από divinycell H-grade. Σχεδιάζονται δύο χάρτες αστοχίας στο *σχήμα 3* και *σχήμα 3^α* στην περίπτωση όπου $L_1/L_2=1$ (τετράγωνο πάνελ) και στην περίπτωση όπου $L_1/L_2=2$. Στην συνέχεια παρουσιάζεται η περίπτωση πυρήνα από ελαφρόξύλο με επιφανειακά ελάσματα από υαλόνημα όπως πριν. Παρουσιάζονται δύο χάρτες αστοχίας στο *σχήμα 4* και στο *σχήμα 4^α* στην περίπτωση όπου $L_1/L_2=1$ (τετράγωνο πάνελ) και στην περίπτωση όπου $L_1/L_2=2$. Σε περίπτωση που χρησιμοποιήθηκαν ίνες άνθρακα στα επιφανειακά ελάσματα οι χάρτες θα ήταν παρόμοιοι, η κύρια διαφορά είναι ότι αυτό εφαρμόζεται για υψηλότερη αντοχή επιφανειακών ελασμάτων και το όριο μεταξύ των περιοχών «τσακίσματος» και «επιφανειακής αστοχίας» μεγαλώνει.

Στους χάρτες μία πιθανή αύξηση του λόγου L_1/L_2 έχει σαν αποτέλεσμα την μετατόπιση των ορίων μεταξύ των περιοχών «τσακίση επιφανειακή»- διάτμηση πυρήνα και επιφανειακή αστοχία ελάσματος-διάτμηση πυρήνα προς τα δεξιά στον χάρτη. Μία άλλη παρατήρηση είναι οι πολύ μικρές περιοχές όπου το επιφανειακό «τσακίση» του ελάσματος παρουσιάζεται στην περίπτωση πυρήνα από ελαφρόξύλο. Αυτό οφείλεται στην υψηλή σκληρότητα του πυρήνα όπου περιορίζει την περίπτωση «τσακίσματος» του επιφανειακού ελάσματος. Στην πραγματικότητα, το φαινόμενο του «τσακίσματος» του επιφανειακού ελάσματος δεν είναι αναμενόμενο για εμπορικά διαθέσιμους πυρήνες ελαφρόξύλου.

2.2.4 Ανάλυση ανεμοπίεσης σάντουιτς πάνελ.

Στις παραπάνω παραγράφους έγινε περιγραφή της ανάλυσης των ποικίλων ειδών αστοχίας ενός σάντουιτς πάνελ κάτω από στατική πίεση. Σε αυτήν την παράγραφο περιγράφονται οι θεωρητικές βάσεις σχετικά με στατική και δυναμική καταπόνηση των σάντουιτς πάνελ.

2.2.4.1 Φυσική συχνότητα σάντουιτς πάνελ.

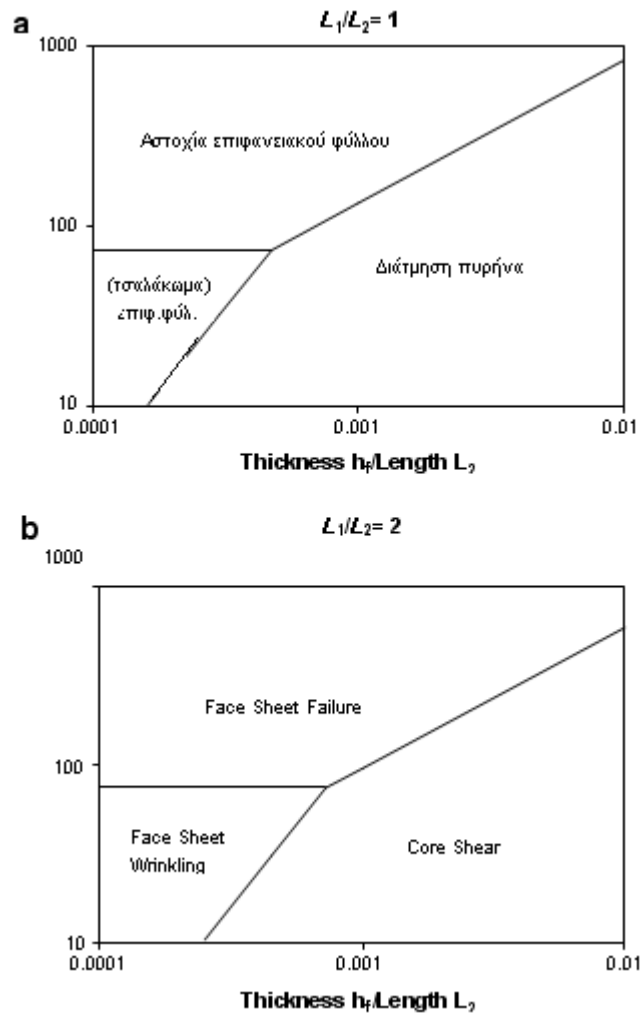
Για την ανάλυση απαιτείται η φυσική συχνότητα του πάνελ. Για να προσδιοριστεί η φυσική συχνότητα ω χρησιμοποιείται η σχέση :

$$\omega = \pi^2 \left[\left(\frac{L_2}{L_1} \right)^2 + 1 \right] \sqrt{\frac{E_f h_f d^2}{2\rho^* L_2^4 (1 - \nu_f^2)}} \sqrt{1 + \pi^2 \theta \left[\left(\frac{L_2}{L_1} \right)^2 + 1 \right]} \quad (13)$$

$$\text{Όπου } \theta = \frac{E_f h_f h_c}{2G_c L_2^2 (1 - \nu_f^2)} \quad (14)$$

Και η πυκνότητα ρ^* ορίζεται από την σχέση:

$$\rho^* = \rho_c h_c + 2\rho_f h_f \quad (15)$$



Σχήμα 3. Διαγράμματα αστοχίας πλαισίων σάντουιτς με επιφανειακά φύλλα από υαλωνήματα και αφρώδη πυρήνα Divinycell H- grade

2.2.4.2 Υποχώρηση (compliance) σάντουιτς πάνελ

Είναι χρήσιμο να υπάρχουν εκφράσεις για την υποχώρηση του σάντουιτς πάνελ. Με τον όρο υποχώρηση εδώ εννοείται η σχέση μεταξύ της μετατόπισης του πάνελ και μίας εφαρμοζόμενης πίεσης, η οποία καλείται p_0 . Υπάρχουν δύο εκφράσεις για την συνολική μετατόπιση w_t : το όριο κάμψης w_b και το όριο διάτμησης w_s . Υποθέτοντας πλαίσιο με λεπτές επιφάνειες ($h_f \ll h_c$) τα όρια κάμψης και διάτμησης δίδονται από τις σχέσεις:

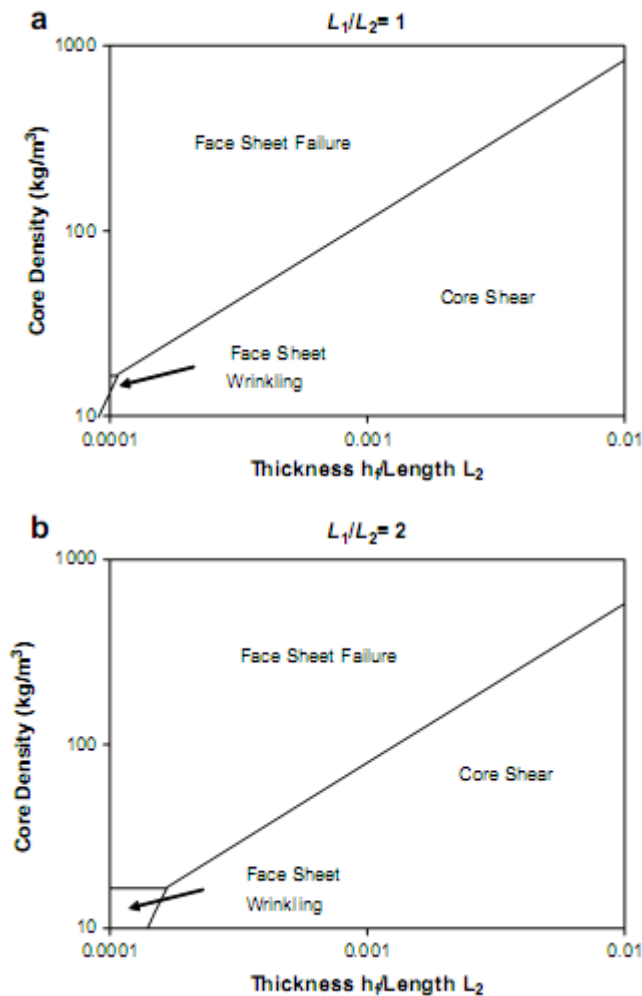
$$w_b = \frac{2p_0 L_2^4}{E_f h_f d^2} f_3(L_1 / L_2) \quad (16)$$

$$w_s = \frac{p_0 L_2^2 h_c}{G_c d^2} f_4(L_1 / L_2) \quad (17)$$

Όπου $f_3(\frac{L_1}{L_2})$ και $f_4(\frac{L_1}{L_2})$ εξισώσεις που χαρακτηρίζουν την μεταβολή της κεντρικής μετατόπισης του πλαισίου για λόγο $(\frac{L_1}{L_2})$. Για λόγους συντομίας στην συνέχεια απλά θα αναγράφονται f_3 και f_4 . Χρησιμοποιώντας αυτές τις εκφράσεις προσδιορίζεται μία πραγματική υποχώρηση για πλαίσια, η οποία συμβολίζεται C_p :

$$C_p = \frac{w_t}{p_0} = \left[\frac{2f_3 L_2^4}{E_f h_f d^2} + \frac{f_4 L_2^2 h_c}{G_c d^2} \right] \quad (18)$$

Στην συνέχεια θα χρησιμοποιείται η παραπάνω έκφραση ώστε να εκτιμηθεί η υποχώρηση του πλαισίου, και θα χρησιμοποιηθεί το αποτέλεσμα ώστε να προσδιοριστεί η τελική μετατόπιση του πλαισίου κάτω από συνθήκες ισχυρής ανεμοπείσης (ριπής ανέμου).



Σχήμα 4. Διαγράμματα αστοχίας πλαισίων σάντουιτς με επιφανειακά φύλλα από υαλονημάτα και πυρήνα ελαφρόξυλου

2.2.4.3 Εξίσωση κύματος ανέμου

Ένας κοινός τρόπος να παρουσιαστεί η πίεση από ριπή ανέμου είναι να θεωρηθεί ότι όταν το κύμα αέρα φτάνει στο πλαίσιο στιγμιαία ανέρχεται σε μία μέγιστη τιμή και στην συνέχεια εξασθενεί με εκθετική μορφή, π.χ. η πίεση συνάρτηση του χρόνου μπορεί να γραφεί :

$$P(t) = P_{\max} e^{-\frac{t}{T}} \quad (19)$$

Όπου P_{\max} η μέγιστη πίεση,
 t ο χρόνος και
 T ο χρόνος που χαρακτηρίζει την εξασθένιση της ανεμοπίεσης.

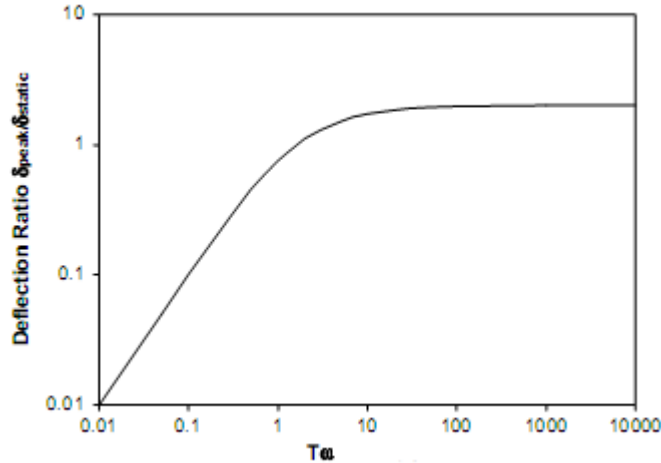
Η ώθηση του ανέμου ορίζεται σαν ο χρόνος που απαιτείται (από $t=0$ έως $t=\infty$) όπου η κατανομή της πίεσης είναι ίση με $P_{\max} T$.

2.2.4.4 Σύστημα ελατηρίου με ένα βαθμό ελευθερίας. (Single Degree Of Freedom)

Θεωρείται ότι το πλαίσιο μπορεί να μοντελοποιηθεί σαν σύστημα ελατηρίου με έναν βαθμό ελευθερίας. Αναπαρίσταται το πλαίσιο από σάντουιτς με αυτό το απλό σύστημα για να εκτιμηθεί η αντίδρασή του σε δυναμική καταπόνηση. Από την ανάλυση των διαφορετικών εξισώσεων που διέπουν αυτό το απλό σύστημα μπορεί να φανεί ότι η μέγιστη μετατόπιση δ_{peak} του πλαισίου κάτω από δυναμική καταπόνηση είναι ίση με την στατική μετατόπιση όταν βρίσκεται κάτω από την μέγιστη πίεση P_{\max} , πολλαπλασιασμένη με μία συνάρτηση η οποία εξαρτάται με το μέγεθος $T\omega$, όπου T ο χαρακτηριστικός χρόνος της ριπής ανέμου και ω η φυσική συχνότητα του πλαισίου. Η στατική μετατόπιση, συμβολίζεται δ_{static} , και μπορεί να προσδιορισθεί από την υποχώρηση του πλαισίου και την γνωστή πίεση P_{\max} . Οπότε σημειώνεται :

$$\delta_{peak} = \delta_{static} f(T\omega) \quad (20)$$

Το αδιάστατο μέγεθος $\delta_{peak} / \delta_{static}$ απεικονίζεται σε σχέση με το μέγεθος $T\omega$ στο σχήμα 5. Από το διάγραμμα φαίνεται ότι για εκρηκτικό κύμα (blast) μεγάλης διάρκειας όσο αφορά την φυσική περίοδο του συστήματος ($T\omega$ μεγάλο) η μετατόπιση την στιγμή της μέγιστης πίεσης αποκτά μια σταθερή τιμή η οποία ισούται με δύο φορές την στατική μετατόπιση. Για μικρές τιμές $T\omega$ το αδιάστατο μέγεθος της μετατόπισης ισούται με $T\omega$, και μπορεί να γίνει πολύ μικρότερο απ' ότι η σταθερή τιμή που έχει για μεγάλες τιμές $T\omega$. Αυτό δείχνει ότι μεγάλες πιέσεις μπορούν να εφαρμοσθούν εφόσον η διάρκεια είναι μικρή. Για να υπολογιστεί εάν το πλαίσιο θα αστοχήσει συγκρίνεται η προβλεπόμενη μέγιστη μετατόπιση με την μετατόπιση αμέσως μετά την οποία συμβαίνει αστοχία.



Σχήμα 5. Χαρακτηριστικό διάγραμμα συστήματος SDOF ανεμοπίεσης

2.2.4.5 Βήματα ανάλυσης

Χρησιμοποιώντας όσα παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους, μπορεί να αναπτυχθεί ένας κώδικας FORTRAN σχετικά με το φαινόμενο της έντονης ανεμοπίεσης σε πλαίσια από σαντουιτς. Ο κώδικας χρησιμοποιεί ένα δεδομένο πλαίσιο, με λεπτομέρειες από τον χρήστη (του προγράμματος), και εξετάζεται εάν μπορεί να επιβιώσει για δεδομένη ανεμοπίεση, η οποία ορίζεται από τον χρήστη. Τα βήματα που ακολουθεί ο κώδικας είναι τα εξής :

- από τα δεδομένα του πλαισίου που ορίζονται από τον χρήστη, αναγνωρίζονται τα αναμενόμενα είδη αστοχίας και υπολογίζεται η πίεση που σχετίζεται με την αστοχία
- εκτιμάται η υποχώρηση του πλαισίου και στην συνέχεια υπολογίζεται η στατική μετατόπιση κάτω από την υπολογιζόμενη πίεση αστοχίας
- από τα δεδομένα του πλαισίου που ορίζονται από τον χρήστη, υπολογίζεται η φυσική συχνότητα του πλαισίου ω
- εισάγουμε την μέγιστη πίεση και την ώθηση I (η οποία ορίζεται από τον χρήστη) και υπολογίζουμε τον χαρακτηριστικό χρόνο T
- από την υπολογιζόμενη υποχώρηση του πλαισίου υπολογίζουμε την μετατόπιση του πλαισίου δ_{static} κάτω από μέγιστη πίεση P_{max}
- εκτιμούμε την ποσότητα $T\omega$ και υπολογίζουμε τη μετατόπιση δ_{peak}
- υπολογίζουμε τον λόγο $\delta_{peak} / \delta_{static}$ όταν το πλαίσιο αστοχεί. Αυτό ορίζει τον δείκτη αστοχίας. Εάν ο δείκτης αστοχίας είναι μεγαλύτερος ή ίσος της μονάδας το πλαίσιο προβλέπεται να αστοχήσει. Εάν είναι μικρότερος της μονάδας το πλαίσιο δεν θα αστοχήσει.

Ο Zenker^[3] δίνει τιμές για τις συναρτήσεις f_1, f_2, f_3 και f_4 σε μορφή πίνακα για διάφορα πλαίσια και λόγους L_1 / L_2 . Οποτεδήποτε αυτές οι συναρτήσεις απαιτούν, χρησιμοποιείται γραμμική παρεμβολή ανάμεσα στα αποτελέσματα του πίνακα για πλαίσια οποιουδήποτε λόγου διαστάσεων.

Σε μία τυπική φόρτιση έντονης ανεμοπίεσης μπορεί να θεωρηθεί μία παραγόμενη ρεαλιστική επικίνδυνη δύναμη του αέρα περίπου 91kg (200pounds) έκρηξη τρινιτροτολουόλης (TNT) σε απόσταση 9.15m (40feet) από το εξεταζόμενο πλαίσιο.

Από πίνακες της TNT βρίσκεται ότι μία αντιπροσωπευτική πίεση και ώθηση στο πλαίσιο αναμένεται να είναι 279kPa και 698kPa αντίστοιχα. Για παράδειγμα, θα εξεταστούν μερικά ρεαλιστικά πλαίσια και θα εκτιμηθεί η αντίστασή τους σε αυτήν την φόρτιση.

L_1 / L_2	f_1	f_2	f_3	f_4
1.0	0.0479	0.338	0.00406	0.0737
1.2	0.0626	0.380	0.00564	0.0868
1.4	0.0753	0.411	0.00705	0.0967
1.6	0.0862	0.435	0.00830	0.1042
1.8	0.0948	0.452	0.00931	0.1098
2.0	0.1017	0.465	0.01013	0.1139
3.0	0.1189	0.493	0.01223	0.1227
4.0	0.1235	0.498	0.01282	0.1245
5.0	0.1246	0.500	0.01297	0.1249
∞	0.1250	0.500	0.01302	0.1250

Πίνακας Α1
(τιμές συναρτήσεων $f_1 - f_4$)

2.2.4.5.1 1^η περίπτωση

Σε αυτήν την πρώτη περίπτωση, εξετάστηκε ένα πλαίσιο με πυρήνα ελαφρόξυλου (πυκνότητα 155kg/m³) και επιφανειακά στρώματα από υαλώδη νήματα. Οι εσωτερικές διαστάσεις του πλαισίου είναι 3.05 m επί 3.05 m με πάχος πυρήνα 76.2 mm και πάχος επιφανειακών στρωμάτων 7.6mm. Για το εν λόγω πλαίσιο, το προβλεπόμενο είδος αστοχίας είναι η διάτμηση του πυρήνα με πίεση αστοχίας 222kPa και προβλεπόμενη μετατόπιση αστοχίας (central deflection at failure) στο κέντρο 14.2cm. Η δυναμική ανάλυση προβλέπει μετατόπιση την στιγμή του peak 9.8cm. Ο δείκτης αστοχίας $\delta_{peak} / \delta_{static}$ είναι 0.69 και κατά συνέπεια το πλαίσιο αναμένεται να μην αστοχήσει σε ανεμοπίεση.

2.2.4.5.2 2^η περίπτωση

Εξετάζεται άλλη περίπτωση στην οποία όλα είναι ίδια με την προηγούμενη περίπτωση με εξαίρεση την αύξηση του πάχους των επιφανειακών στρωμάτων σε 10mm από 7.6mm. Γι' αυτό το πλαίσιο, το προβλεπόμενο είδος αστοχίας είναι πάλι η διάτμηση του πυρήνα σε πίεση αστοχίας 222kPa και αντίστοιχη μετατόπιση αστοχίας στο κέντρο είναι 10.3cm. Η δυναμική ανάλυση προβλέπει μία μετατόπιση την στιγμή του peak σε 7.4cm. Ο δείκτης αστοχίας είναι 0.72 και το πλαίσιο αναμένεται να μην αστοχήσει σε ανεμοπίεση. Σημειώνεται ότι παρόλο που το πάχος των επιφανειακών ελασμάτων (και το βάρος του πάνελ) αυξήθηκαν, η απόδοση σε εκρηκτικό κύμα δεν βελτιώθηκε, στην πραγματικότητα είναι λίγο μικρότερη (ο δείκτης αστοχίας αυξήθηκε από 0.69 σε 0.72). Μπορεί να υπάρχουν άλλοι λόγοι για την αύξησης του πάχους των επιφανειακών στρωμάτων, αλλά δεν βοηθά την αντίδραση σε ριπή ανέμου σε αυτήν την περίπτωση.

2.2.4.5.3 3^η περίπτωση

Σε αυτήν την περίπτωση ισχύουν τα ίδια με την πρώτη περίπτωση εκτός του πυρήνα, τώρα χρησιμοποιείται PVC αφρώδης πυρήνας με μικρότερο βάρος (Divinycell H-80, πυκνότητας 80kg/m³) σε αντικατάσταση του πυρήνα από ελαφρόξυλο. Για αυτό το πλαίσιο, το προβλεπόμενο είδος αστοχίας είναι η διάτμηση του πυρήνα με πίεση αστοχίας 74kPa και η αντίστοιχη μετατόπιση αστοχίας στο κέντρο είναι 6.2 cm. Η δυναμική ανάλυση προβλέπει μία μετατόπιση την στιγμή του peak σε 12.0cm. Ο δείκτης αστοχίας είναι 1.94>1 και έτσι το πλαίσιο τώρα αναμένεται να αστοχήσει. Η αλλαγή σε ελαφρότερο πυρήνα έχει σαν αποτέλεσμα την σημαντική υποβάθμιση της επίδοσης του πλαισίου.

2.2.4.5.4 4^η περίπτωση

Στην πρώτη περίπτωση που εξετάστηκε, η πίεση αστοχίας του πλαισίου είναι 222kPa και ακόμα δεν αστοχεί για εκρηκτική πίεση 279kPa. Αυτό είναι συνέπεια της δυναμικής του προβλήματος, όπως φαίνεται στο σχ.5. Επιπροσθέτως, φαίνεται ότι αυτό το σημείο, εξετάζει τον αρχικό πυρήνα ελαφρόξυλου στο πλαίσιο της πρώτης περίπτωσης, αλλά τώρα υποτίθεται ότι αυτό εξετάζεται σε επικίνδυνη έκρηξη 910kg (2000pounds) TNT σε απόσταση 25.9cm (85feets) από το πλαίσιο. Όπως πριν, χρησιμοποιώντας τους πίνακες TNT βρίσκεται ότι για το πλαίσιο η αντιπροσωπευτική πίεση και ώθηση αναμένονται να είναι 288kPa και 1532Kpa-ms αντίστοιχα. Συγκρίνοντας τις προηγούμενες επικίνδυνες εκρήξεις, η πίεση είναι σχεδόν η ίδια ενώ η ώθηση διπλασιάζεται. Η δυναμική ανάλυση προβλέπει μετατόπιση την στιγμή του peak σε 16.8cm. Ο δείκτης αστοχίας είναι 1.18 και έτσι το πλαίσιο αναμένεται να αστοχήσει. Αυτό σημαίνει ότι σε μία ανεμοπίεση με σχεδόν ίδια πίεση αλλά μεγαλύτερη διάρκεια το πλαίσιο αστοχεί, απεικονίζοντας ότι η δυναμική συμπεριλαμβάνεται στο μοντέλο. Τα αποτελέσματα για τις τέσσερις περιπτώσεις συνοψίζονται στον πίνακα 2.

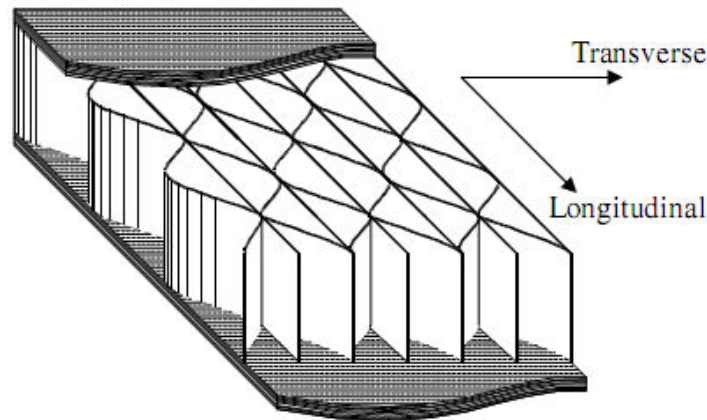
Πίνακας 2

(σύνοψη αποτελεσμάτων ανωτέρω περιπτώσεων)

Περίπτωση	1	2	3	4
Υλικό πάντοις: (E-glass επιφανειακό έλασμα και 76.2mm πυρήνας σε όλες τις περιπτώσεις)				
Τύπος πυρήνα	Balsa	Balsa	Divinycell H-80	Balsa
Πυκνότητα πυρήνα (Kg m ⁻³)	155	155	80	155
Πάχος επιφανειακού ελάσματος	7.6	10.0	7.6	7.6
Ανεμοπίεση				
Πίεση (KPa)	279	279	279	288
Ωθηση (impulse KPa-ms)	698	698	698	1532
Αστοχία σε στατική ανάλυση : διάτμηση πυρήνα σε όλες τις περιπτώσεις				
Πίεση αστοχίας (KPa)	222	222	74	222
Μετατόπιση (cm)	14.2	10.3	6.2	14.2
Δυναμική ανάλυση				
Μετατόπιση (την στιγμή του peak) (cm)	9.8	7.4	12.0	16.8
Δείκτης αστοχίας (-)	0.69	0.72	1.94	1.18
Πρόβλεψη αστοχίας	OXI	OXI	NAI	NAI

2.3 Στρέψη δοκών από σάντουιτς από υβριδικά Ινοπλισμένα Πολυμερή (Honeycomb FRP) με ημιτονοειδή σύνθεση πυρήνα.

Λόγω της καλής γεωμετρίας και της ικανότητας απορρόφησης της ενέργειας, οι κατασκευές από υβριδικά σάντουιτς χρησιμοποιούνται ευρέως στην αεροδιαστημική και στην αυτοκινητοβιομηχανία. Ιδιαίτερα για δάπεδα γεφυρών προτείνεται η χρήση ενός ελαφρού και ινοπλισμένου υβριδικού FRP πλαισίου με ημιτονοειδή σύνθεση πυρήνα, εκτεινόμενου κάθετα ανάμεσα στα επιφανειακά ελάσματα (σχήμα 1).



Σχήμα 1. Γεωμετρία πυρήνα υβριδικού σάντουιτς πλαισίου

Στην συνέχεια παρουσιάζεται ένας συνδυασμός αναλυτικής, αριθμητικής και πειραματικής διερεύνησης δειγμάτων δοκών από σάντουιτς από υβριδικά Ινοπλισμένα Πολυμερή (Honeycomb Fiber Reinforced Polymer) με ημιτονοειδή σύνθεση πυρήνα που δοκιμάζονται σε στρέψη. Το πλαίσιο (σάντουιτς) που παρουσιάζεται σε αυτήν την μελέτη έχει μοναδική ημιτονοειδή γεωμετρία πυρήνα στο κύριο επίπεδο (xy), ο οποίος εκτείνεται κάθετα ανάμεσα στα επιφανειακά φύλλα, και χρησιμοποιείται κυρίως σαν δάπεδο σε γέφυρες οδικής κυκλοφορίας. Υπολογίσθηκε η ισοδύναμη ιδιότητα πυρήνα υλικού για υβριδικό πυρήνα χρησιμοποιώντας μία μέθοδο ομογενοποίησης και μηχανικής προσέγγισης των υλικών, ενώ οι ιδιότητες των υλικών των επιφανειακών ελασμάτων αντλήθηκαν από την μικρο/μακρομηχανική. Οι ισοδύναμες ιδιότητες υλικών του πυρήνα και των επιφανειακών ελασμάτων χρησιμοποιούνται ακολούθως στην εκτίμηση της επίδρασης της στρεπτικής ακαμψίας (torsional stiffness) των HFRP πλαισίων. Η στρεπτική ανάλυση περιλαμβάνει την εκτίμηση ισοδύναμων ιδιοτήτων διάτμησης κύριου (xy) και εξωτερικού επιπέδου, και τις ιδιότητες της σχετικής στρεπτικής ακαμψίας πλαισίου. Μοντέλα πεπερασμένου στοιχείου χρησιμοποιώντας επίπεδα στοιχεία χρησιμοποιήθηκαν για να συγκρίνουν τα αναλυτικά και πειραματικά αποτελέσματα των HFRP δοκών που δοκιμάζονται σε στρέψη. Δύο τύποι στοιχείων παρουσιάζονται στην προσομοίωση πεπερασμένων στοιχείων : ένα πραγματικό γεωμετρικό μοντέλο, όπου η γεωμετρία του πυρήνα και των εξωτερικών ελασμάτων ορίζονται από επίπεδο εξωτερικό στοιχείο, και ένα ισοδύναμο μοντέλο ελάσματος, για το οποίο χρησιμοποιούνται οι ισοδύναμες ιδιότητες των υλικών του πυρήνα και των επιφανειακών φύλλων. Προκειμένου να εξακριβωθεί η ακρίβεια των αναλυτικών και αριθμητικών προβλέψεων, δοκιμάζονται πειραματικά σε στρέψη πολλά δείγματα υβριδικών δοκών με ημιτονοειδή πυρήνα κυματοειδούς προσανατολισμού κατά μήκος της διαμήκου ή εγκάρσιας ή κάθετης διεύθυνσης και με διαφορετικής σύνθεσης επιφανειακά στρώματα. Η παρούσα ανάλυση μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε σχεδιαστικές εφαρμογές και βελτιστοποιήσεις υβριδικών κατασκευών, και μπορεί να

χρησιμοποιηθεί για την επαλήθευση ή την βελτιστοποίηση της διάτμησης στο κύριο και εγκάρσιο επίπεδο, υλικών με αντίστοιχες ιδιότητες για τα παρόντα ή άλλα υβριδικά πλαίσια FRP.

Σε προηγούμενες μελέτες και πειράματα όπου εξετάστηκαν οι μηχανικές ιδιότητες και η συμπεριφορά σε κάμψη HFRP πλαισίων με ημιτονοειδή πυρήνα, δεν διερευνήθηκαν οι ιδιότητες λόγω στρεπτικής ακαμψίας (torsional stiffness). Έτσι το αντικείμενο αυτής της μελέτης είναι να χαρακτηρίσει την στρεπτική αντίδραση σάντουιτς δοκών HFRP. Αρχικά δίδεται μια σφαιρική εικόνα των ιδιοτήτων των υλικών, συμπεριλαμβανοντας μία βελτιωμένη διατύπωση για την επίδραση του μέτρου διάτμησης στο κύριο (xy) και εγκάρσιο επίπεδο (xy, xz), τα οποία αποκομίστηκαν από την μηχανική προσέγγιση των υλικών και την διαδικασία διάσπασης μορίων. Μετά, μία αναλυτική στρεπτική επίλυση για προβλεπόμενη γωνία στρέψης των HFRP δοκιμίων δοκών επαληθεύεται με μοντέλο πεπερασμένου στοιχείου και πειραματικών δοκιμών δοκιμίων δοκών με διαφορετικής διεύθυνσης ημιτονοειδή πυρήνα.

2.3.1 Μοντελοποίηση επιφανειακών ελασμάτων

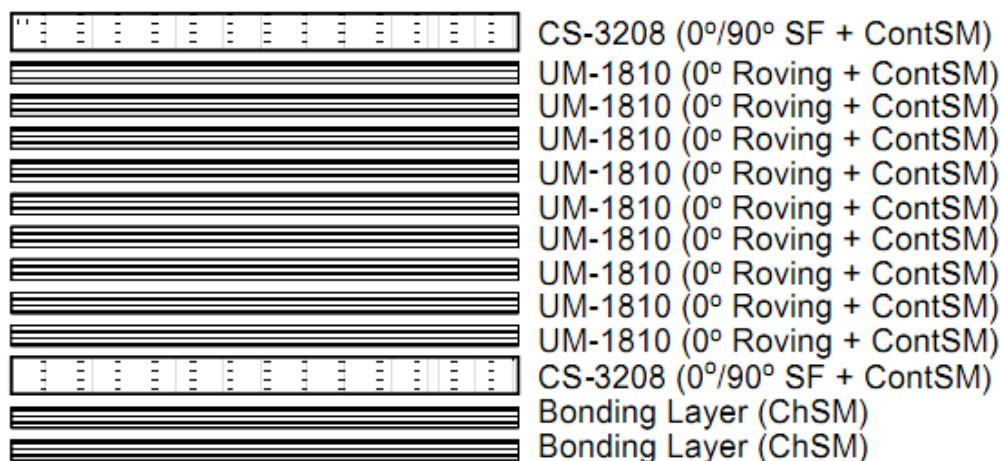
Η γεωμετρία των HFRP σάντουιτς πλαισίων φαίνεται στο *σχήμα 1* απεικονίζοντας τα ημιτονοειδή και τα επίπεδα στοιχεία του πυρήνα. Οι μηχανικές ιδιότητες των επιφανειακών φύλλων των σάντουιτς πλαισίων βρίσκονται μέσα από μία σύνθετη μικρο/μακρομηχανική προσέγγιση. Με βάση την πληροφορία των επιπέδων που δίδεται από την κατασκευή, οι ιδιότητες των φύλλων μπορούν να προβλεφθούν από μικρομηχανικά μοντέλα, όπου κάθε φύλλο εξετάζεται σαν ομογενές, γραμμικώς ελαστικό και ορθοτροπικό υλικό. Η ακαμψία του πλαισίου μπορεί να υπολογισθεί από κλασσικές θεωρίες φυλλώσεων στηριζόμενοι στις ιδιότητες των φύλλων.

2.3.1.1 Επίπεδα επιφανειακών ελασμάτων

Ένα τυπικό επιφανειακό φύλλο σάντουιτς πλαισίου (*Σχήμα 1*) συνήθως αποτελείται από τέσσερις τύπους στρώματα ινών (*Σχήμα 2*) :

- (1) **Chopped Strand Mat (ChSM)** ασυνεχών ινών φτιαγμένα από λεπτές ίνες τυχαία κατανομημένες και δεμένες μαζί σε μορφή ενιαίου τάπητα, ο οποίος έχει σχεδόν ισοτροπικές ιδιότητες στο κύριο επίπεδο,
- (2) **Continuous Strand Mat (ContSM)** (συνεχείς πλεγμένα νήματα) αποτελούμενα από συνεχείς τυχαίου προσανατολισμό ίνες παρόμοιες με ισοτροπικού υλικού,
- (3) **Stitched Fabrics (SF)**, (ραμμένες ίνες), οι οποίες έχουν ισοσταθμισμένες κλειστές γωνίες πολυδιευθυντικών ινών (π.χ. $0^0/90^0$ ή $\pm 45^0$) παρουσιάζοντας ορθοτροπικές ιδιότητες,
- (4) **Μονοδιευθυντικά επίπεδα (unidirectional layer)** από ελεύθερες ίνες σε πακέτα (rovings fiber) οι οποίες είναι περισσότερες κατά μήκος της διαμήκους τους διεύθυνσης.

Οι στρώσεις στο άνω και κάτω επιφανειακό φύλλο είναι συμμετρικές σε σχέση με το μέσο του πλαισίου. Τα δοκίμια έχουν είτε 12.7mm πάχος επιφανειακών ελασμάτων ή λεπτά επιφανειακά ελάσματα. Τα λεπτά επιφανειακά ελάσματα αποτελούνται από δύο επίπεδα ChSM. Το ανάπτυγμα επιπέδων για τα 12.7mm πάχους επιφανειακού ελάσματος από την εξωτερική επιφάνεια του πυρήνα έχει ως εξής (*σχ.2*) : δύο 85Kg ChSM, ένα CS-3208, εννέα επίπεδα UM-1810, και ένα επίπεδο CS-308. Οι λεπτομέρειες των επιπέδων πάχους 12.7 mm φαίνονται στον *πίνακα 1*.



Σχήμα 2 : Επίπεδα επιφανειακών στρώσεων φύλλων πάχους 12.7mm

Πίνακας 1

Στρώση επιφανειακού ελάσματος πάχους 12.7mm

Layer	Type	Weight (Kg/mm ²)	Thickness (mm)	Number of layers	Total thickness (mm)
Bonding layer	ChSM	0.915	1.524	2	3.05
CS-3208	0 ⁰	0.534	0.546	1	1.422
	90 ⁰	0.61	0.622		
	ContSM	0.26	0.254		
UM-1810	0 ⁰	0.61	0.508	9	6.858
	ContSM	0.305	0.254		
CS-3208	0 ⁰	0.534	0.546	1	1.422
	90 ⁰	0.61	0.622		
	ContSM	0.26	0.254		

2.3.1.2 Κλάσμα όγκου ίνας

Η ακαμψία των ελασμάτων εξαρτάται από τον σχετικό όγκο της ίνας (V_f), η οποία για κοινούς ιστούς γράφεται :

$$V_f = \frac{\omega}{\rho \times t} \tag{1}$$

Όπου ω είναι το κανονικό βάρος του ιστού ανά μονάδα επιφάνειας, ρ η μη διαστρωματική πυκνότητα των ινών, και t είναι το πάχος του ιστού που δίδεται από τον κατασκευαστή. Για τα επιφανειακά φύλλα των 12.7 mm πάχους, ο σχετικός όγκος της ίνας υπολογίζεται από την παραπάνω εξίσωση και δίδεται στον πίνακα 2.

2.3.1.3 Ακαμψία ελασμάτων

Με βάση τις πληροφορίες αναπτυγμάτων των φύλλων και τους σχετικούς όγκους των στρώσεων, μπορεί να προβλεφθεί η ακαμψία για κάθε στρώση από μικρομηχανικά μοντέλα. Το μοντέλο που χρησιμοποιείται εδώ είναι τα σύνθετα υλικά με περιοδική μικροσύνθεση και τα υπολογιζόμενα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 2.

Πίνακας 2

Μηχανικές ιδιότητες επιφανειακών ελασμάτων και πυρήνα

Component	Layer	E_1 (MPa)	E_2 (MPa)	G_{12} (MPa)	G_{23} (MPa)	ν_{12}	ν_{23}	V_f
Bonding layer and core wall	ChSM	11,755.6	11,755.6	4192.0	2358.0	0.402	0.400	0.235
CS-3208	0°	30,364.5	8611.6	3337.0	3109.5	0.293	0.385	0.382
	90°	8632.2	30,433.5	334.0	3116.4	0.293	0.385	0.382
UM-1810	ChSM	17,388.6	17,388.6	6163.9	3220.0	0.410	0.383	0.399
	0°	36,301.0	10,259.4	3509.4	3744.0	0.287	0.371	0.469
	ChSM	20,029.3	20,029.3	7101.6	3744.0	0.289	0.371	0.469

2.3.1.4 Φαινόμενες ακαμψίες επιφανειακών ελασμάτων

Χρησιμοποιώντας τις ιδιότητες των στρωμάτων που αντλήθηκαν από την μικρομηχανική (Πίνακας 2) [1], μπορεί να προσδιορισθεί μία σειρά από ισοδύναμες ιδιότητες στρωμάτων. Παραβλέποντας την συνδυαστική επίδραση της επιμήκυνσης-κάμψης (extension-bending) και θεωρώντας ισοσκελισμένα συμμετρικά επίπεδα (όχι συνδυασμός επιμήκυνσης-διάτμησης και κάμψης-συστροφής), οι ιδιότητες των $E_x, E_y, G_{xy}, \nu_{xy}$ των επιφανειακών ελασμάτων των φυλλωμάτων υπολογίζονται από την κλασική θεωρία των φυλλώσεων. Οι ιδιότητες G_{xz}, G_{yz} υπολογίζονται χρησιμοποιώντας κωδικοποιημένες θεωρίες διατμητικής παραμόρφωσης. Τέτοιες ισοδύναμες τιμές αντιπροσωπεύουν τις ελαστικές ακαμψίες των ορθοτροπικών πλακών οι οποίες συμπεριφέρονται σαν την πραγματική στρώση κάτω από φόρτιση στο κύριο επίπεδο (in-plane). Οι ισοδύναμες ιδιότητες στρωμάτων επιφανειακών ελασμάτων δίδονται στον πίνακα 3.

Πίνακας 3

Μηχανικές ιδιότητες επιφανειακών ελασμάτων

E_x (Mpa)	E_y (Mpa)	G_{xy} (Mpa)	G_{xz} (Mpa)	G_{yz} (Mpa)	ν_{xy}
22,456.2	14,975.4	4578.0	3923.0	3819.7	0.400

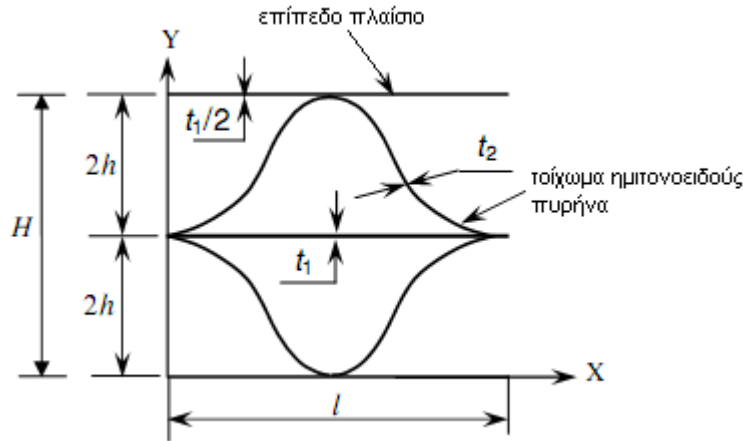
2.3.2 Μοντελοποίηση των υβριδικών πυρήνων.

Η ισοδύναμη ελαστική ανάλυση των υβριδικών πυρήνων βασίστηκε σε μία μέθοδο ομογενοποίησης (homogenization process) σε συνδυασμό με μία μέθοδο ενέργειας και μηχανικής των υλικών. Η μέθοδος ομογενοποίησης προϋποθέτει αντιπροσωπευτικό στοιχείο όγκου (Represent Volume Element, RVE), όπως φαίνεται στο Σχήμα 3, στο οποίο οι συνολικές ιδιότητες μπορούν να αποκτηθούν από περιοδικές συνθήκες και κινηματικές υποθέσεις. Σε αυτό το μέρος παρουσιάζονται επιλύσεις για ισοδύναμες διατμητικές ιδιότητες.

2.3.2.1 Μέτρο διάτμησης κύριου επιπέδου (G_{xy}^e)

Για να υπολογισθεί το πραγματικό μέτρο διάτμησης (G_{xy}^e) χρησιμοποιούνται οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών. Μία απλή μακροσκοπική παραμόρφωση διάτμησης επιβάλλεται σε στοιχείο πυρήνα (σχήμα. 4a). Για να υπολογισθεί η διατμητική δύναμη χρειάζεται να δημιουργηθεί τεχνητή διατμητική παραμόρφωση σε ένα στοιχείο

πυρήνα. Οι εσωτερικές δυνάμεις υπολογίζονται σε ένα τετραγωνικό στοιχείο πυρήνα, συμμετρικό ως προς το αντιπροσωπευτικό στοιχείο όγκου (σχήμα 3).



Σχήμα 3. Αντιπροσωπευτικό στοιχείο όγκου υβριδικού πυρήνα (RVE)

Το διάγραμμα ελευθέρου σώματος σε μισό τμήμα καμπύλου πυρήνα παρουσιάζεται στο σχήμα 4b, όπου P, F , και M_0 είναι οι δυνάμεις που αντιστοιχούν στην μακροσκοπική διατμητική παραμόρφωση γ . (shear strain). Η ενέργεια παραμόρφωσης (strain energy) σε ένα τετραγωνικό τμήμα στο σχήμα 4b δίδεται από την σχέση

$$U = \int_0^s \left(\frac{a_M M^2}{2} + \frac{a_N N^2}{2} + \frac{a_v V^2}{2} \right) ds + \frac{2F^2 b}{E_1 t_1} \quad (2)$$

Όπου a_M, a_N , και a_v είναι οι ισοδύναμοι συντελεστές υποχώρησης για ChSM πυρήνα και ορίζονται :

$$a_M = \frac{12}{E_1 t_2^3}, \quad a_N = \frac{1}{E_1 t_1}, \quad a_v = \frac{1}{KG_{13} t_2} \quad (3)$$

Και M, N , και V , είναι η καμπτική ροπή, η αξονική δύναμη και η εγκάρσια διατμητική δύναμη που δρουν στο καμπύλο τμήμα, οι οποίες υπολογίζονται από τις συνθήκες ισορροπίας :

$$M = -P(b-x) + Fh \left(1 + \cos\left(\frac{\pi x}{b}\right) \right) + M_0 \quad (4a)$$

$$N = \frac{Fb + Ph\pi \sin(\pi x/b)}{b \sqrt{1 + \left(\frac{h\pi}{b}\right)^2 \sin^2\left(\frac{\pi x}{b}\right)}} \quad (4b)$$

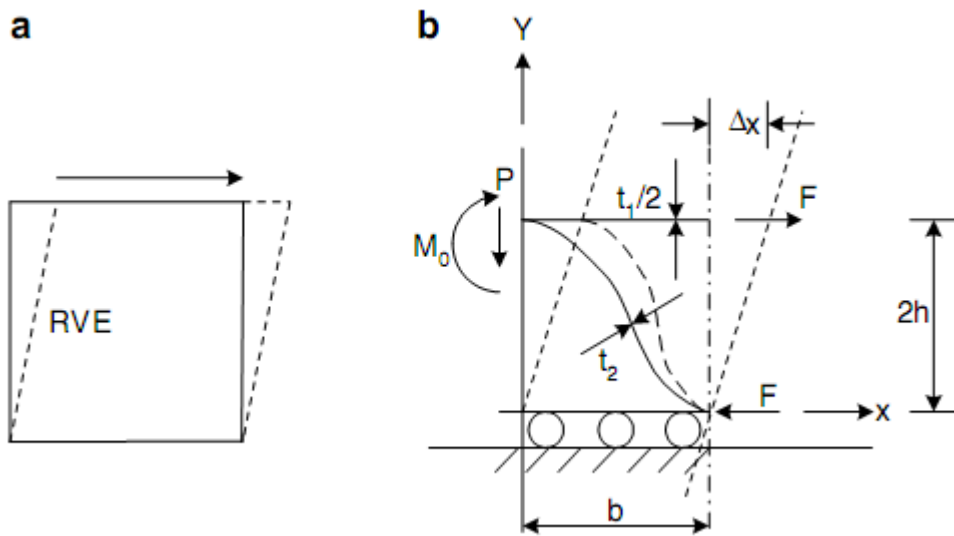
$$V = \frac{Fh\pi \sin(\pi x/b) - Pb}{b \sqrt{1 + \left(\frac{h\pi}{b}\right)^2 \sin^2\left(\frac{\pi x}{b}\right)}} \quad (4c)$$

Εφαρμόζοντας το θεώρημα Castigliano

$$\frac{\partial U}{\partial M_0} = 0, \frac{\partial U}{\partial P} = 0, \frac{\partial U}{\partial F} = \Delta_x$$

Και επιλύοντας τις εξισώσεις (4), η έκφραση της οριζόντιας δύναμης F ορίζεται σε σχέση με το Δ_x . Τελικά, το μέτρο διάτμησης (G_{xy}^e), γράφεται ως εξής:

$$G_{xy}^e = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{F/b}{\Delta_x/2h} = \frac{2Fh}{b\Delta_x} \quad (6)$$



Σχήμα 4. Μοντελοποίηση μέτρου διάτμησης (G_{xy}^e) πραγματικού πυρήνα

Το ισοδύναμο μέτρο διάτμησης του κύριου επιπέδου του ημιτονοειδούς πυρήνα των υλικών που χρησιμοποιούνται στο παρόν παρουσιάζονται στον πίνακα 4, με βάση την προσέγγιση που περιγράφηκε ανωτέρω.

Πίνακας 4

Ισοδύναμο μέτρο διάτμησης ημιτονοειδούς πυρήνα

Μέθοδος		G_{xy}^c (MPa)	G_{yz}^c (MPa)	G_{xz}^c (MPa)
Μηχανική των υλικών	Επάνω όριο	$2.01 \times E_1^s$	$0.061G_{12}^s$	$0.1143G_{12}^s$
	Κάτω όριο	-	$0.028G_{12}^s$	$0.0639G_{12}^s$
Ομογενοποίησης		-	$0.307G_{12}^s$	$0.0756G_{12}^s$

Σημείωση : Η γεωμετρία του ημιτονοειδούς πυρήνα είναι: $h=25.4\text{mm}$, $b=50.8\text{mm}$, $t_1=t_2=2.28\text{mm}$. Οι μηχανικές ιδιότητες του πυρήνα (τοιχώ) είναι : $E_1^s=E_2^s=11.76\text{GPa}$, $G_{12}^s=4.19\text{GPa}$.

2.3.2.2 Μέτρο διάτμησης εγκάρσιων επιπέδων xz , yz (G_{xz}^e , G_{yz}^e)

Η μέθοδος ομογενοποίησης και η μέθοδος μηχανικής των υλικών χρησιμοποιούνται αθροιστικά για να παρουσιαστεί το ισοδύναμο μέτρο διάτμησης εγκάρσιου επιπέδου

του ημιτονοειδούς πυρήνα. Η μέθοδος της μηχανικής των υλικών, σε συνδυασμό με την μέθοδο της ελάχιστης ενέργειας παρέχει τα ανώτερα και κατώτερα όρια για τις σταθερές δυσκαμψίας στηριζόμενη στα μοντέλα του Voigt και Reuss αντίστοιχα. Απ' την άλλη πλευρά, η χρήση της θεωρίας της ομοιογένειας, προκειμένου να προκύψουν ιδιότητες δυσκαμψίας, παρέχει μοναδικές επιλύσεις για περιοδικές υβριδικές κατασκευές.

(α) Μέθοδος ομογενοποίησης

Το ισοδύναμο ελαστικό εγκάρσιο μέτρο διάτμησης υβριδικού πυρήνα με ημιτονοειδή σύνθεση χρησιμοποιώντας μέθοδο ομογενοποίησης, μελετήθηκε από τον Xu και άλλους. Οι εκφράσεις των μέτρων διάτμησης εγκάρσιων επιπέδων υβριδικού ημιτονοειδούς πυρήνα δίδονται ως εξής [1] :

$$G_{xz}^e = \left(\frac{t_1}{2h} + \frac{bt_2}{B} \right) G_{12}^s \quad (7a)$$

$$2h \int_A ds$$

$$G_{yz}^e = \left(\frac{2ht_2}{B} \right) G_{12}^s \quad (7b)$$

$$b \int_A ds$$

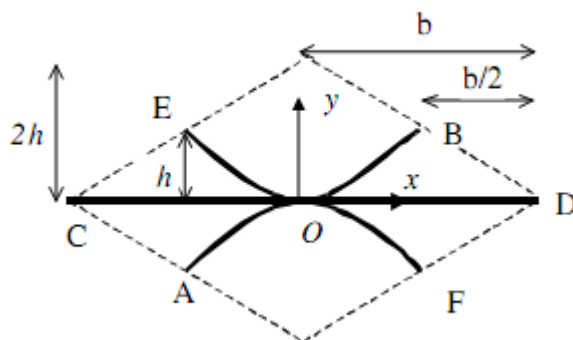
Όπου $\int_A^B ds$ είναι το μήκος καμπύλου τμήματος (Σχήμα 5), και G_{12}^s το μέτρο διάτμησης της συμπαγής επιφάνειας.

(β) μέθοδος μηχανικής των υλικών

Κάθε μία εγκάρσια διατμητική δύναμη ή παραμόρφωση (*strain*) εφαρμόστηκε σε στοιχειώδες τμήμα για να προκληθεί παραμόρφωση σε κάθε τείχος του πυρήνα, εξ αιτίας της χωρικής μη ομοιόμορφης υβριδικής κατασκευής. Χρησιμοποιώντας την ενεργειακή μέθοδο, οι επιλύσεις για κατώτερες και ανώτερες οριακές συνθήκες μπορούν να παρουσιαστούν στη βάση των παράλληλων και σε σειρά μοντέλων σύμφωνα με τους Voigt και Reuss, όπου το κατώτερο όριο συνήθως προσφέρει μία συντηρητική τιμή για λόγους σχεδιασμού. Τα ανώτερα και κατώτερα όρια των εξωτερικών επιπέδων μέτρων διάτμησης δίδονται :

$$\left(\frac{2t_1}{H} + \frac{2bt_2}{H} \right) G_{12}^s \leq G_{xz}^e \leq \left(\frac{2t_1}{H} + \frac{2t_2}{Hb} \int_0^s \cos^2 \theta ds \right) G_{12}^s \quad (8a)$$

$$\frac{8h^2 t_2}{bH} G_{12}^s \leq G_{yz}^e \leq \frac{2t_2 \int_0^s \sin^2 \theta ds}{Hb} G_{12}^s \quad (8b)$$



Σχήμα 5: Μοναδιαίο κύτταρο ημιτονοειδούς πυρήνα για xz, yz μέτρα διάτμησης

Με βάση τις εξισώσεις (7) και (8), τα ισοδύναμα μέτρα διάτμησης των εγκάρσιων επιπέδων υβριδικού ημιτονοειδούς πυρήνα παρουσιάζονται στον πίνακα 4. Επιπροσθέτως στον πίνακα 5 παρουσιάζονται ισοδύναμες μηχανικές ιδιότητες πυρήνα, και χρησιμοποιούνται αργότερα στο ισοδύναμο πεπερασμένο στοιχείο του ημιτονοειδούς πυρήνα.

Πίνακας 5

Επιπρόσθετες ισοδύναμες ιδιότητες υλικών ημιτονοειδούς πυρήνα

E_x^e (Mpa)	E_y^e (Mpa)	E_z^e (Mpa)	ν_{xy}^e	ν_{xz}^e	ν_{yz}^e
22,456.2	14,975.4	4578.0	3923.0	3819.7	0.400

2.3.3 Στρέψη σε δοκούς σάντουιτς

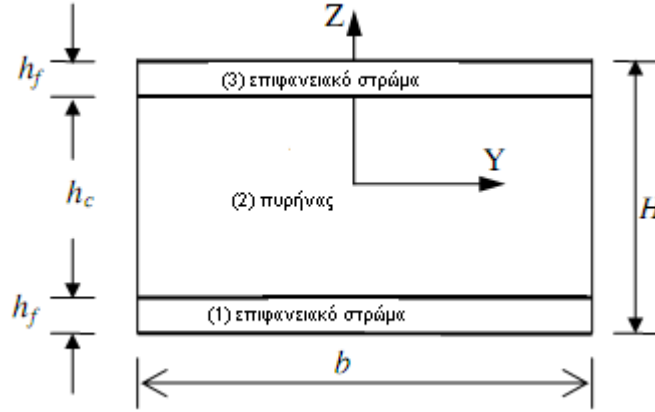
Ως συνήθως χρησιμοποιούνται στην ανάλυση προβλημάτων ομοιόμορφης στρέψης οι ακόλουθες προϋποθέσεις που ισχύουν στην ανάλυση στρέψης δοκών σάντουιτς: (α) ένα εγκάρσιο στοιχείο παραμένει χωρίς παραμόρφωση στο επίπεδο (β) η αξονική παραμόρφωση συμπεριλαμβάνεται και είναι σταθερή κατά μήκος της δοκού. Έτσι το πεδίο μετατόπισης εκφράζεται ως εξής:

$$\begin{aligned}
 u^{(k)} &= [yz + U^{(k)}(y, z)]\theta \\
 v &= -xz\theta \\
 w &= xy\theta
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

Όπου θ η γωνία της σχετικής συστροφής, και $U^{(k)}$ ($k=1$ για τα κάτω επιφανειακά φύλλα, 2 για πυρήνα, και 3 για τα επάνω επιφανειακά φύλλα) είναι η εξίσωση της στρεπτικής παραμόρφωσης του k επιπέδου (σχήμα 6). Έτσι η διατμητική τάση δίδεται :

$$\tau_{xy}^{(k)} = G_{xy}^{(k)} (u_y^{(k)} + v_x) = G_{xy}^{(k)} \theta U_y^{(k)}
 \tag{10a}$$

$$\tau_{xz}^{(k)} = G_{xz}^{(k)} (u_z^{(k)} + w_x) = G_{xy}^{(k)} \theta (U_z^{(k)} + 2y)
 \tag{10b}$$



Σχήμα 6. Εγκάρσια τομή σάντουιτς

Η κυρίαρχη εξίσωση μετασχηματισμού Laplace του k επιπέδου παρουσιάζεται ως εξής :

$$G_{xy}^{(k)} U_{yy}^{(k)} + G_{xz}^{(k)} U_{zz}^{(k)} = 0 \sigma \varepsilon \Omega^{(k)} \quad (11)$$

Όπου $\Omega^{(k)}$ είναι η επιφάνεια του k επιπέδου.

Η επίλυση της εξίσωσης (9) για μία περιοχή $\Omega^{(k)}$ δίδεται από τον Whitney :

$$u^{(k)} = [yz + bh \sum_{m=1}^{\infty} (A_{mk} \cosh \lambda_{mk} \bar{z} + B_{mk} \sinh \lambda_{mk} \bar{z}) \cos m\pi \bar{y}] \theta \quad (12)$$

Όπου

$$\bar{y} = \frac{y + L/2}{L}, \quad \bar{z} = \frac{z}{H_t}, \quad \lambda_{mk} = m\pi \left(\frac{H_t}{L} \right) \sqrt{\frac{G_{12}^{(k)}}{G_{13}^{(k)}}}$$

Αντικαθιστώντας την (12) στην (10) προκύπτει:

$$\tau_{xz}^{(k)} = G_{xz}^{(k)} L \theta \sum_{m=1,3,5..}^{\infty} \left[\lambda_{mk} (A_{mk} \sinh \lambda_{mk} \bar{z} + B_{mk} \cosh \lambda_{mk} \bar{z}) - \frac{8}{m^2 \pi^2} \right] \cos m\pi \bar{y} \quad (13a)$$

$$\tau_{xy}^{(k)} = G_{xy}^{(k)} L H_1 \theta \sum_{m=1}^{\infty} [m (A_{mk} \cosh \lambda_{mk} \bar{z} + B_{mk} \sinh \lambda_{mk} \bar{z}) \sin m\pi \bar{y}] \quad (13b)$$

Εξαιτίας της συμμετρικής δομής των επιπέδων (σχήμα 6) οι συντελεστές μπορούν να απλοποιηθούν:

$$A_{m2} = 0, \quad A_{m1} = -A_{m3}, \quad B_{m1} = B_{m3} \quad (14)$$

Σημειώνεται ότι οι οριακές συνθήκες στην αριστερή και δεξιά πλευρά, επάνω και κάτω του σάντουιτς δίνουν :

$$\tau_{xy}^{(k)}(\pm L/2, z) = 0 \quad (15a)$$

$$\tau_{xz}^{(k)}(y, \pm H_t/2) = 0 \quad (15b)$$

Η συνέχιση συνθηκών στο εσωτερικό των επιφανειακών φύλλων και του πυρήνα προϋποθέτει:

$$u^{(1)}(y, -h_c/2) = u^{(2)}(y, -h_c/2), \quad (16a)$$

$$u^{(2)}(y, h_c/2) = u^{(3)}(y, h_c/2)$$

$$\tau_{xz}^{(1)}(y, -h_c/2) = \tau_{xz}^{(2)}(y, -h_c/2) \quad (16b)$$

$$\tau_{xz}^{(2)}(y, h_c/2) = \tau_{xz}^{(3)}(y, h_c/2)$$

Αντικαθιστώντας τις (16a) και (16b) στις (12) και (13a) και δεδομένου της (15b) προκύπτει:

$$-A_{m1} \sinh \frac{\lambda_{m1}}{2} + B_{m1} \cosh \frac{\lambda_{m1}}{2} - \frac{8}{\lambda_{m1} m^2 \pi^2} = 0 \quad (17a)$$

$$G_{xz}^{(1)} \left[\lambda_{m1} \left(-A_{m1} \sinh \frac{\lambda_{m1} h_c}{2H_t} + B_{m1} \cosh \frac{\lambda_{m1} h_c}{2H_t} \right) - \frac{8}{m^2 \pi^2} \right] = G_{xz}^{(2)} \left[\lambda_{m2} \left(B_{m2} \cosh \frac{\lambda_{m2} h_c}{2H_t} \right) - \frac{8}{m^2 \pi^2} \right] \quad (17b)$$

$$A_{m1} \cosh \frac{\lambda_{m1} h_c}{2H_t} - B_{m1} \sinh \frac{\lambda_{m1} h_c}{2H_t} = -B_{m2} \sinh \frac{\lambda_{m2} h_c}{2H_t} \quad (17c)$$

Έτσι οι άγνωστοι συντελεστές που εμφανίστηκαν στην επίλυση της τάσης μπορούν να βρεθούν :

$$A_{m1} = \frac{\frac{8}{\lambda_{m1} (m\pi)^2} \left(1 - \lambda_{m1} \frac{\cosh \frac{\lambda_{m1} h_c}{2H_t}}{\cosh \frac{\lambda_{m1}}{2}} + \frac{G_{xz}^{(2)}}{G_{xz}^{(1)}} \left(\lambda_{m2} \frac{\sinh \frac{\lambda_{m2} h_c}{2H_t}}{\cosh \frac{\lambda_{m1}}{2} \tanh \frac{\lambda_{m2} h_c}{2H_t}} \right) \right)}{\lambda_{m1} \left(-\sinh \frac{\lambda_{m1} h_c}{2H_t} + \tanh \frac{\lambda_{m1}}{2} \cosh \frac{\lambda_{m1} h_c}{2H_t} \right) - \lambda_{m2} \frac{G_{xz}^{(2)}}{G_{xz}^{(1)}} \frac{-\cosh \frac{\lambda_{m2} h_c}{2H_t} + \tanh \frac{\lambda_{m2}}{2} \sinh \frac{\lambda_{m2} h_c}{2H_t}}{\tanh \frac{\lambda_{m2} h_c}{2H_t}}} \quad (18a)$$

$$B_{m1} = \tanh \frac{\lambda_{m1}}{2} A_{m1} + \frac{8}{\lambda_{m1} \cosh \left(\frac{\lambda_{m1}}{2} \right) (m\pi)^2} \quad (18b)$$

$$B_{m2} = -\frac{\cosh \frac{\lambda_{m1} h_c}{2H_t} - \tanh \frac{\lambda_{m1}}{2} \sinh \frac{\lambda_{m1} h_c}{2H_t}}{\sinh \frac{\lambda_{m2} h_c}{2H_t}} A_{m1} + \frac{8}{\lambda_{m1} (m\pi)^2} \frac{\sinh \frac{\lambda_{m1} h_c}{2H_t}}{\sinh \frac{\lambda_{m2} h_c}{2H_t} \cosh \frac{\lambda_{m1}}{2}} \quad (18c)$$

Η καμπτική ροπή δίδεται από την εξίσωση :

$$T = \int_{-L/2-H_T/2}^{L/2-H_T/2} \int_{-H_t/2}^{H_t/2} (y \tau_{xz} - z \tau_{xy}) dz dy \quad (19)$$

Αντικαθιστώντας την επίλυση της τάσης των (13a) και (13b) στην (19) προκύπτει:

$$\frac{T}{\theta} = \frac{1}{3} G_{xz}^{(2)} \left(\frac{G_{xz}^{(1)}}{G_{xz}^{(2)}} \frac{H_t - h_c}{H_t} - \frac{h_c}{H_t} - 192(\Delta_1 + \Delta_2) \right) \quad (20)$$

Όπου

$$\Delta_1 = \frac{\Re}{n_1} \sum_{m=1,3,\dots}^{\infty} \left\{ \frac{1 + \chi(2\Re - 1) \tanh(\beta_{1m}/2) \tanh\left(\frac{\beta_{2m}\lambda_2}{2}\right)}{a_m^5 \left[1 + \chi\Re \tanh(\beta_{1m}\lambda_1) \tanh \frac{\beta_{2m}\lambda_1}{2} \right]} \tanh(\beta_{1m}\lambda_1) \right\}$$

$$\Delta_2 = \frac{\chi}{n_1} \sum_{m=1,3,\dots}^{\infty} \left\{ \frac{1 - \Re + \frac{\Re}{\cosh(\beta_{1m}\lambda_1)}}{a_m^5 \left[1 + \chi\Re \tanh(\beta_{1m}\lambda_1) \tanh \frac{\beta_{2m}\lambda_2}{2} \right]} \tanh(\beta_{2m}\lambda_2/2) \right\}$$

$$\Re = \frac{G_{xz}^{(1)}}{G_{xz}^{(2)}}, \quad \chi = \frac{\mu_1}{\mu_2}, \quad \mu_k = \sqrt{\frac{G_{xy}^{(k)}}{G_{xz}^{(k)}}}, k = 1, 2$$

$$\eta_1 = \mu_1 \frac{H_t}{L}, \quad \eta_2 = \mu_2 \frac{H_t}{L}, \quad \lambda_1 = \frac{h_1}{H_t}, \quad \lambda_2 = \frac{h_2}{H_t},$$

$$\beta_{1m} = a_m \eta_1, \quad \beta_{2m} = a_m \eta_2, \quad \alpha_m = m\pi (m = 1, 3, 5, \dots, \infty)$$

Η εξίσωση (20) εκφράζει την στρεπτική ακαμψία της δοκού από σάντουιτς, και η πρόβλεψή της συγκρίνεται αργότερα με τα πειραματικά αποτελέσματα και τα αποτελέσματα πεπερασμένων στοιχείων υβριδικών FRP δειγμάτων δοκών.

2.3.4 Μοντέλο πεπερασμένου στοιχείου και πειραματική δοκιμή

Για να επαληθευτεί η ακρίβεια των δεδομένων επίλυσης στρέψης και μεταγενέστερα η ισοδύναμη ορθοτροπική ιδιότητα υλικού, ακολουθεί ένα μοντέλο πεπερασμένου

στοιχείου και μία πειραματική δοκιμή δειγμάτων δοκών σε στρέψη. Αυτή η μελέτη πραγματοποιήθηκε λαμβάνοντας υπόψη πολλά δείγματα, όπου έχουν καθένα 12.7mm(1/2") επιφανειακό φύλλο ή ένα λεπτό επιφανειακό φύλλο με πάχος 3.05mm(0,12in), και διαφορετικό βάθος πυρήνα.. Οι υβριδικοί δοκοί δοκιμάστηκαν στις ακόλουθες τέσσερις κρίσιμες συνθήκες :

(1) διαμήκης-κάθετη (longitudinal-vertical) (σχ. 7a) όπου ο ημιτονοειδής κυματοειδής πυρήνας είναι κατά μήκος της δοκού και αναπτύσσεται κάθετα μεταξύ των δύο επιφανειακών στρωμάτων,

(2) εγκάρσια-κάθετα (transverse-vertical) (σχ. 7b), όπου ο ημιτονοειδής κυματοειδής πυρήνας στοιχίζεται κατά το πλάτος της δοκού (εγκάρσια στο μήκος της δοκού) και έτσι εκτείνεται στην κάθετη διεύθυνση ανάμεσα στις δύο επιφανειακές πλάκες,

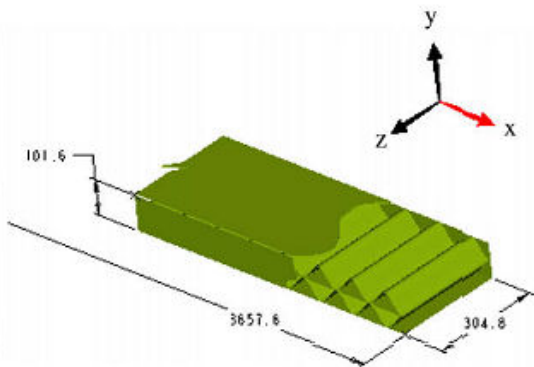
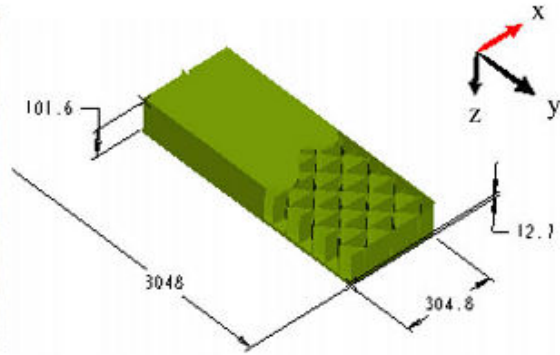
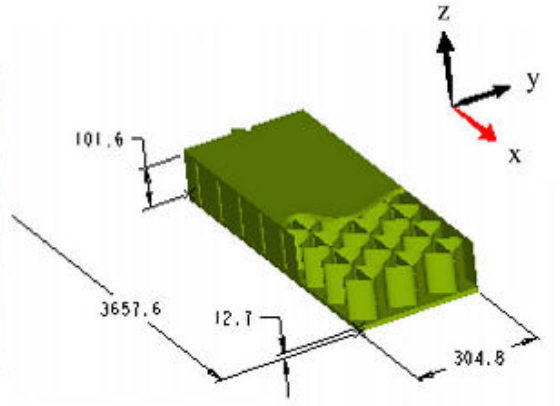
(3) διαμήκης-εγκάρσια (longitudianal-transverse) (σχ. 7c) όπου ο ημιτονοειδής πυρήνας αναπτύσσεται κατά μήκος της δοκού και εκτείνεται εγκάρσια ανάμεσα στο πάχος,

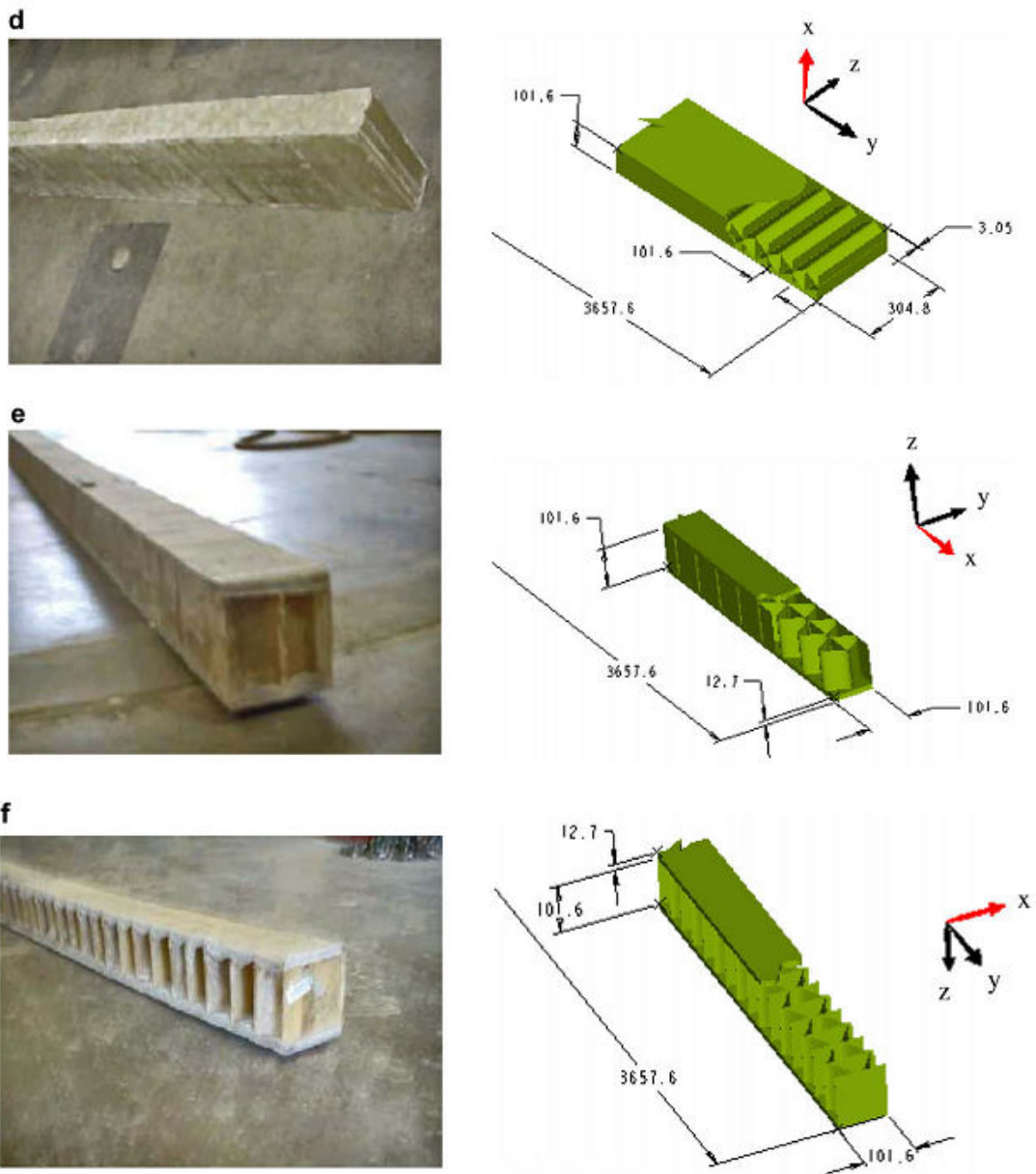
(4)κάθετα – εγκάρσια (vertical-trasverse) σχ. 7d, όπου ο ημιτονοειδής κυματοειδής πυρήνας αναπτύσσεται κατά μήκος του ύψους της δοκού (στην κάθετη διεύθυνση) και εκτείνεται εγκάρσια διαμέσου του πλάτους. Δείγματα υβριδικών πυρήνων στοιχειωδών τμημάτων πλάτους δοκιμάζονται σε δύο κατευθύνσεις, διαμήκης (Longitudinal LU) σχ.7e και εγκάρσια (trasverse TU) σχ.7f. Μία επακριβής χαρακτηριστική περιγραφή των δοκιμίων δοκών με τα γεωμετρικά τους στοιχεία δίδεται στο *πίνακα 6*.

Πίνακας 6

Λίστα δειγμάτων

Δείγμα	Διεύθυνση πυρήνα	Width (mm)	Length (mm)	Core height (mm)	Face thickness (mm)	Παρατηρήσεις
A	LV (fig 7a)	305	3.05	102	12.7	Edge wrapped with 89 oz ChSM of 1.5mm
B	TV (fig 7b)	305	3.65	102	12.7	>> >>
C	TV (fig 7b)	305	3.65	102	3.05	Face sheet-two bond layers of 3.05mm
D	LV (fig 7a)	305	3.65	102	3.05	Face sheet-two bond layers of 3.05mm
E	LV (fig 7a)	305	3.65	102	12.7	No ChSM wrappings
F	TV (fig 7b)	305	3.65	102	12.7	No ChSM wrapping
G	LV (fig 7c)	305	3.65	102	3.05	Edge wrapped with 89 oz ChSM of 1.5mm
H	VT (fig 7d)	305	3.65	102	3.05	Edge wrapped with 89 oz ChSM of 1.5mm
I	LU (fig 7e)	102	3.65	102	12.7	-
J	TU (fig7e)	102	3.65	102	12.7	-





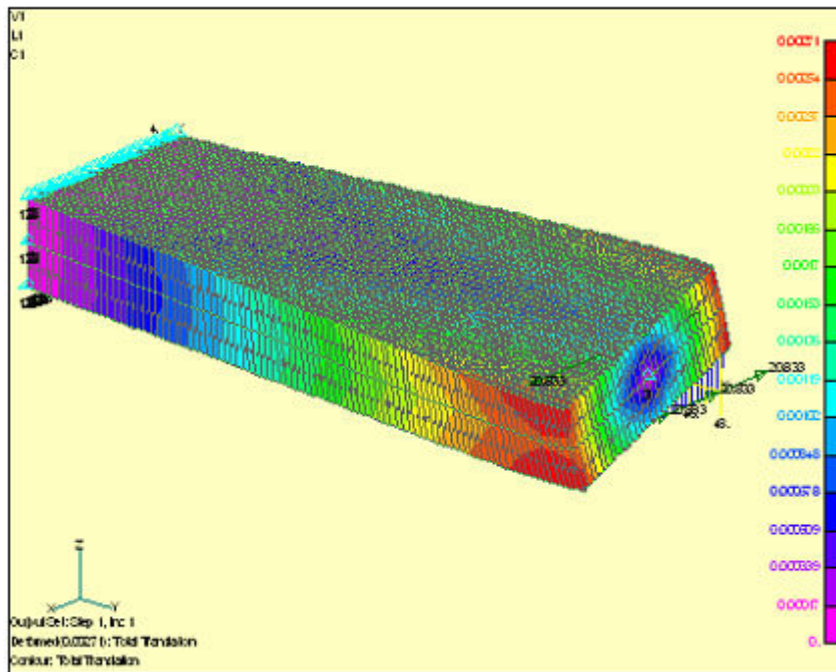
Σχήμα 7 : Χαρακτηρισμός υβριδικών δειγμάτων δοκών (διαστάσεις σε mm)

2.3.4.1 Μοντέλο πεπερασμένου στοιχείου

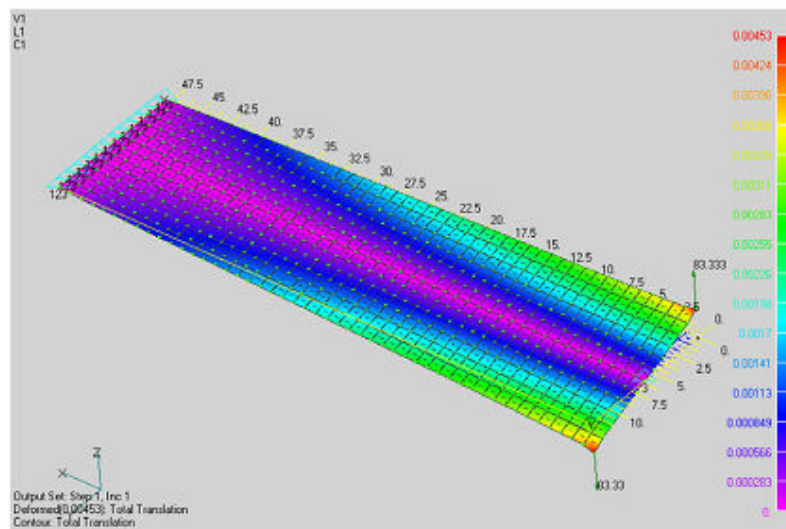
Το μοντέλο του πεπερασμένου στοιχείου σε δείγματα δοκών σε στρέψη χρησιμοποιείται για σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων και αναλυτικών προβλέψεων. Χρησιμοποιήθηκε το εμπορικό software ABAQUS για την διεξαγωγή της ανάλυσης. Η μοντελοποίηση πεπερασμένου στοιχείου υλοποιήθηκε με τους ακόλουθους δύο τρόπους : πραγματικά γεωμετρικά μοντέλα και μοντέλα με ισοδύναμες ιδιότητες. Πραγματικά γεωμετρικά μοντέλα αποτελούμενα από τέσσερις κόμβους επιπέδων στοιχείων αναπαράγοντας την πραγματική γεωμετρία του πυρήνα για κάθε επίπεδο (σχ.8). Τα επιφανειακά φύλλα συνήθως μοντελοποιούνται χρησιμοποιώντας τρεις και τέσσερις κόμβους επιπέδων στοιχείων. Οι μηχανικές ιδιότητες του πυρήνα και των επιφανειακών φύλλων φαίνονται στον πίνακα 2. Μοντέλα με ισοδύναμες ιδιότητες πλαισιωμένα με ένα απλοποιημένο επίπεδο δοκού όπου οι ισοδύναμες ιδιότητες χρησιμοποιούνται για τα επιφανειακά φύλλα και τον πυρήνα (σχ.9). Οι μηχανικές ιδιότητες των επιφανειακών πολυστρωματικών φύλλων

και οι αντίστοιχες του πυρήνα που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο πεπερασμένου στοιχείου φαίνονται στους πίνακες 3-5.

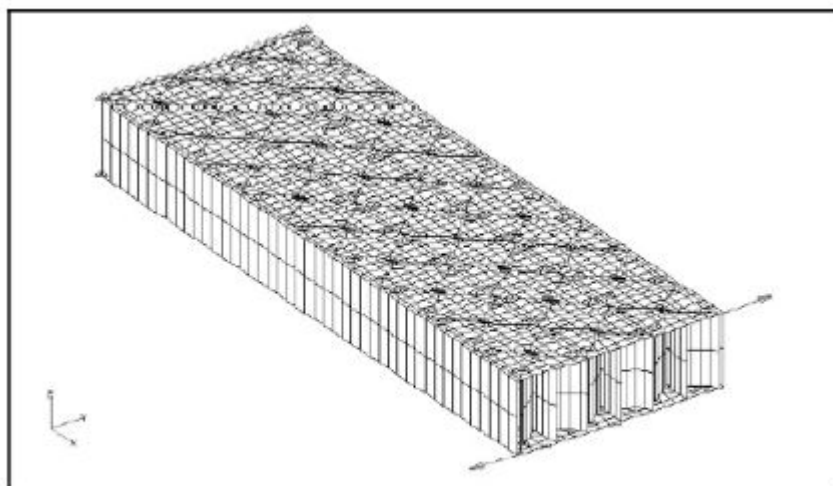
Ο σκοπός της ανάλυσης πεπερασμένου στοιχείου είναι να προβλέψει τις αντιδράσεις των δειγμάτων που δοκιμάζονται πειραματικά χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικά μοντέλα. Έτσι, κάθε μοντέλο είναι μία προσομοίωση του πειράματος. Το μήκος κάθε μοντέλου πεπερασμένου στοιχείου είναι το ενάμισο του αντίστοιχου πειραματικού μήκους. Εξ αιτίας των μηχανισμών των πειραματικών συσκευών εφαρμόστηκαν ίσες στρεπτικές ροπές στο τέλος κάθε δοκιμίων, θεωρήθηκε ότι υπάρχει ένα σταθερό σημείο στο κέντρο των δοκών κατά την διεύθυνση του μήκους. Η στρεπτική ροπή εφαρμόστηκε στο ελεύθερο άκρο χρησιμοποιώντας ζεύγος δυνάμεων. Το ελεύθερο άκρο του μοντέλου έχει την δυνατότητα να παραμορφωθεί αξονικά. Ένα σχήμα της πραγματικής γεωμετρίας μοντέλου πεπερασμένου στοιχείου φαίνεται στο *σχ.10*.



Σχήμα 8: Παραμόρφωση λόγω στρέψης πραγματικού μοντέλου (δείγμα Α)



Σχήμα 9. Παραμόρφωση λόγω στρέψης ισοδύναμου μοντέλου (δείγματος Α)



Σχήμα 10. Μοντελοποίηση πεπερασμένου στοιχείου δείγματος A

Τα αποτελέσματα από την μοντελοποίηση πεπερασμένου στοιχείου περιλαμβάνουν τιμές διατμητικής παραμόρφωσης (shear strain) και γωνίας περιστροφής, και τα στοιχεία που προκύπτουν συμπίπτουν με αυτά της πειραματικής διερεύνησης. Δεδομένου ότι τα πραγματικά γεωμετρικά μοντέλα είναι σύνθετα, η κατανομή διατμητικής παραμόρφωσης (shear strain) κατά μήκος των στοιχείων στα επιφανειακά φύλλα είναι μερικές φορές ανομοιόμορφη. Έτσι, ένας μέσος όρος των γειτονικών στοιχείων διατμητικής καταπόνησης, εμποδίζει τις συνεργασίες από στοιχεία πυρήνα, όπου λαμβάνει χώρα στην εν λόγω περιοχή. Δεδομένα διατμητικής καταπόνησης για μοντέλα ισοδύναμης ιδιότητας προσδιορίζονται με τον ίδιο τρόπο, παρόλο που εκείνα τα μοντέλα είναι πολύ απλούστερα με μειωμένες ασυνέχειες καταπόνησης. Τιμές της γωνίας στρέψης για τα μοντέλα πεπερασμένου στοιχείου χρησιμοποιούνται σε κάθετες μετατοπίσεις στο σημείο τομής του ελεύθερου άκρου. Η αναφερόμενη τιμή είναι απλά η γωνία στρέψης διαιρεμένη με το μήκος του μοντέλου, δίδοντας την γωνία στρέψης ανά μονάδα μήκους. Αποτελέσματα της ανάλυσης πεπερασμένου στοιχείου συνοψίζονται στον πίνακα 7.

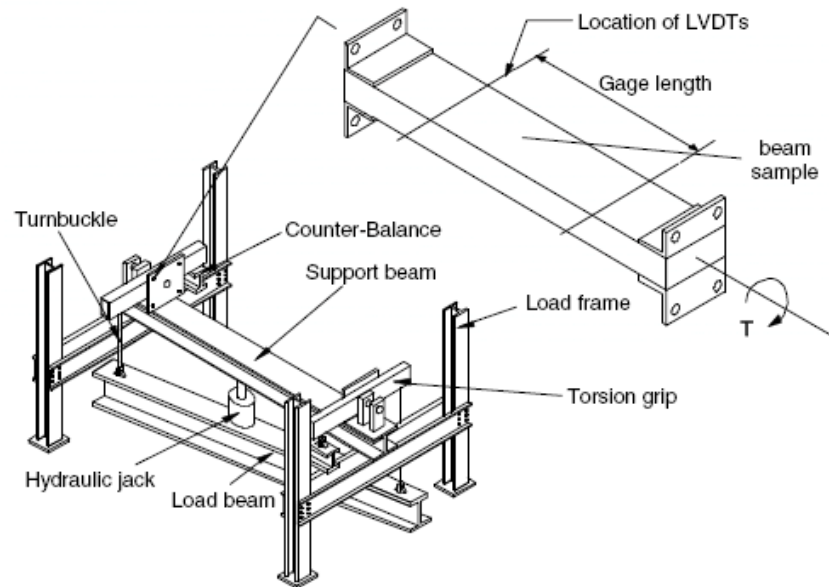
Πίνακας 7

Αποτελέσματα δειγμάτων με μέθοδο: Αναλυτική, πεπερασμένου στοιχείου(FE) και πειραματική

Δείγμα	Γωνία στρέψης, degree/N-mm/m			Παραμόρφωση διάτμησης /N-mm			
	Αναλυτικά $\times 10^{-6}$	FE $\times 10^{-6}$		Πειραματικά	FE $\times 10^{-6}$		Πειραματικά
		Πραγματικό	Ισοδύναμο		Πραγματικό	Ισοδύναμο	
A(LV)	0.285984	0.197861	0.285984	0.199524	336	389	319
B(TV)	0.365794	0.294298	0.359143	0.257719	372	416	372
C(TV)	0.929449	1.168878	0.962703	2.417566	1443	1664	1841
D(LV)	0.894533	0.748215	0.931112	0.841326	1319	1584	1354
E(LV)	0.319238	0.269357	0.276008	0.284322	345	416	442
F(TV)	1.077429	0.508786	0.329215	1.145600	451	407	832
G(LV)	0.565318	1.104033	1.454863	0.686695	1664	1513	1381
H(VT)	0.666743	0.236103	1.356763	2.061748	1124	1496	1540
I(LU)	5.106152	2.701888	3.691194	2.490725	1186	1159	1319
J(TU)	8.760766	12.66977	6.334887	13.66573	2965	1151	4434

2.3.4.2 Πειραματικές δοκιμές.

Πειραματικές δοκιμές δειγμάτων δοκών σε στρέψη πραγματοποιήθηκαν ώστε να επαληθεύσουν τις προβλέψεις από αναλυτικές μεθόδους και μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων. Τα διαμήκη και εγκάρσια δείγματα δοκών μετρούνται και ερευνώνται σε στρέψη. Οι πειραματικές δοκιμές έγιναν σε τυποποιημένη μηχανή στρέψης. Η μηχανή επιτρέπει δοκιμές μήκους δειγμάτων που κυμαίνονται από 2.5m έως 4.3m και αντλούνται ακριβή αποτελέσματα για δείγματα με σχετικά χαμηλή ακαμψία στρέψης. Ένα σχήμα της μηχανής στρέψης φαίνεται στο *σχήμα 11*.



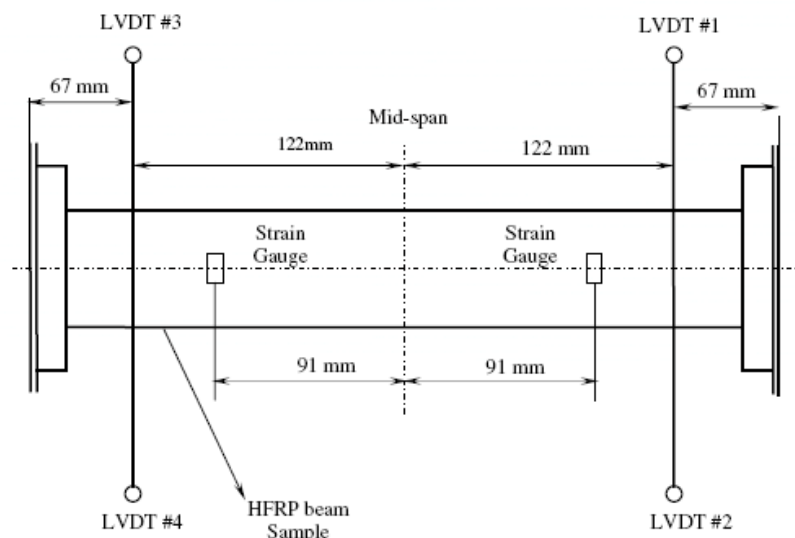
Σχήμα 11. Μηχανή στρέψης



Σχήμα 12. Δοκιμή στρέψης σε HFRP σάντουιτς δοκό

Συνολικά δέκα διαφορετικά δείγματα υβριδικών FRP δοκών με αρίθμηση A-J (πίνακας 6) δοκιμάστηκαν, με μήκη από 3.05m έως 3.65m. Κάθε δοκίμιο ήταν εφοδιασμένο με δύο επιμηκυστόμετρα ($\pm 45^\circ$ για καταγραφή της διατμητικής παραμόρφωσης) και τέσσερις γραμμικούς μετατροπείς διαφοράς δυναμικού (LVDTs) με δύο στο τέλος κάθε δείγματος, όπου χρησιμοποιούνταν για να προσδιορίσουν την γωνία συστροφής (*σχήμα 12*). Τα δύο LVDTs εγκαθίστανται σε κάθε πλευρά της δοκού σε μεταξύ τους απόσταση 91mm ή 122mm από το κέντρο της δοκού (*σχήμα*

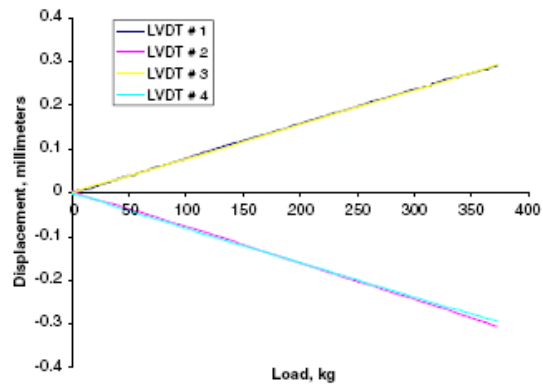
14), αναλόγως του μήκος του δείγματος. Η στρεπτική ροπή εφαρμοζόταν στο δείγμα από υδραυλικό γρύλλο, ο οποίος ασκούσε μία δύναμη στην δοκό φόρτισης, αντίθετα της αντίδρασης δοκού υποστήριξης. (σχ.11-15). Η φόρτιση μεταφέρεται διαγώνια στους στροφείς (turnbuckles), οι οποίοι στρέφονται, με αποτέλεσμα τα άκρα των δοκών να περιστραφούν αντίθετα μεταξύ τους. Ιδανικά, το κέντρο της δοκού θα έχει μηδενική περιστροφή, έτσι προσομοιώνεται μια σταθερή οριακή κατάσταση στο κέντρο της δοκού. Οι καταγραφόμενες τιμές είναι το φορτίο και οι μετατοπίσεις, οι οποίες στην συνέχεια μετατρέπονται στην εφαρμοζόμενη στρεπτική ροπή. Τα πειραματικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 7.



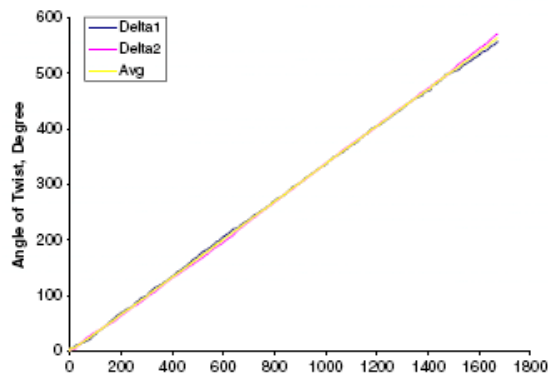
Σχήματα 13-14. Τυπικές διατάξεις μετρήσεων και διαστάσεις για δοκιμή στρέψης

Η σχέση των μετατοπίσεων (από του τέσσερις LVDTs μετατροπείς βλέπε σχ.14) έναντι του φορτίου για την δοκιμή στρέψης του διαμήκους δείγματος φαίνεται στο σχ. 15. Βασισμένη στο σχ.15 η σχέση μεταξύ στρεπτικής ροπής και γωνίας συστροφής προκύπτει και φαίνεται στο σχ.16, το οποίο δείχνει ότι οι δύο γωνίες συστροφής αποκτήθηκαν από δύο διαφορετικές ομάδες μετατροπέων LVDTs που είναι σχετικά κοντά η μία στην άλλη. Έτσι, λαμβάνεται η μέση τιμή της γωνίας συστροφής από τα δύο άκρα για κάθε δείγμα. Παρομοίως, η σχέση ανάμεσα στην στρεπτική ροπή και την

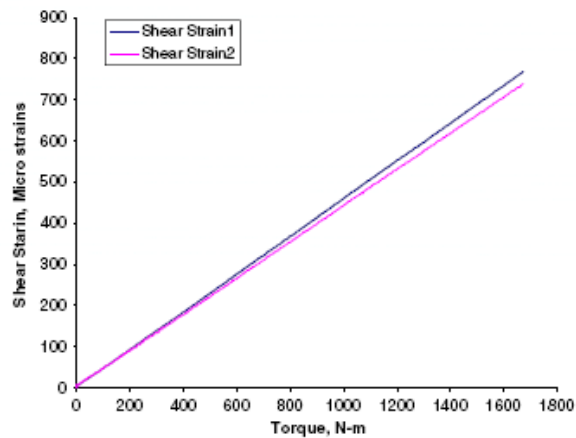
διατμητική παραμόρφωση για ένα διαμήκες δοκίμιο απεικονίζεται στο σχ. 17, δείχνοντας μία στενή συσχέτιση ανάμεσα στις δύο τιμές.



Σχήμα 15. Διάγραμμα μετατόπισης – φόρτισης (διαμήκης δείγμα)



Σχήμα 16. Σχέση μεταξύ γωνίας συστροφής και στρεπτικής ροπής (διαμήκες δείγμα)



Σχήμα 17. Διάγραμμα διατμητικής παραμόρφωσης – στρεπτικής ροπής (διαμήκες δείγμα)

2.3.5 Αποτελέσματα στρέψης

Τα αποτελέσματα των αναλυτικών προβλέψεων, προσομοίωσης πεπερασμένου στοιχείου και πειραματικών εκτιμήσεων συνοψίζονται στον πίνακα 7. Η γωνία συστροφής δίδεται σε μοίρες / N-mm της στρεπτικής ροπής ανά μονάδα μήκους. Η στρεπτική παραμόρφωση δίδεται ως μικροπαραμόρφωση ανά N-mm της στρεπτικής ροπής. Ο υπολογισμός της διατμητικής παραμόρφωσης δεν είναι άμεσος για την αναλυτική στρεπτική επίλυση.

Εξ αιτίας της φυσικής της στρέψης μίας ορθογωνικής διατομής, η στρεπτική παραμόρφωση εξαρτάται σημαντικά από την θέση των μηκυνσιομέτρων, ειδικότερα για υβριδικούς πυρήνες σάντουιτς πλαισίων. Για τα λεπτά επιφανειακά φύλλα δειγμάτων, τα τοιχώματα του πυρήνα μπορούν να έχουν ένα αξιόλογο αποτέλεσμα στην πραγματική πειραματική παραμόρφωση, όπως αυτό φαίνεται καθαρά στην μοντελοποίηση του πεπερασμένου στοιχείου.

Υπάρχει μία καλή συσχέτιση για τα περισσότερα δεδομένα που παρουσιάζονται, εκτός από την γωνία συστροφής των δειγμάτων Η. Αυτό το δείγμα (το VT δείγμα, σχήμα 7d) έχει γεωμετρία πυρήνα με κάθετο ημιτονοειδή πυρήνα εκτεινόμενο εγκάρσια διαμέσου του πλάτους (102mm x 305mm εγκάρσια διατομή). Εξ αιτίας του ελαττώματος των αρμών ανάμεσα στις πλευρές των πλαισίων και των σύνθετων ημιτονοειδών, τόσο τα αναλυτικά μοντέλα όσο και τα μοντέλα πεπερασμένου στοιχείου που χρησιμοποιούν αντίστοιχες ιδιότητες δεν μπορούν να προβλέψουν την στρεπτική ακαμψία με ακρίβεια. Οι συγκρίσεις διατμητικής παραμόρφωσης για τέτοιο δείγμα, αντιθέτως, δείχνουν μία πολύ καλύτερη συσχέτιση.

Τα δείγματα Α έχουν ομοιότητες με τα δείγματα Ε, εφόσον πρακτικά είναι τα ίδια, εκτός ότι τα δείγματα Α κατασκευάστηκαν με τυλιχτές εξωτερικές επιφάνειες (edge wraps). Αυτές οι επιφάνειες προσφέρουν κάποιο βαθμό ακαμψίας στο δείγμα, όπως μπορούμε να συμπεράνουμε από την εξέταση των μοιρών συστροφής και παραμορφώσεων διάτμησης (πίνακας 7). Για όλα τα δείγματα, θα μπορούσε να σημειωθεί ότι οι αναλυτικές προβλέψεις των μοιρών συστροφής για τα δοκίμια με τα ημιτονοειδή κύματα κατά μήκος των δοκών (π.χ. δείγματα Α, D, Ε, G, και I) δίνουν μικρότερη τιμή ακαμψίας και περισσότερα συντηρητικά αποτελέσματα, ενώ αυτή η τάση είναι γενικώς αντίθετη για τα δείγματα με ημιτονοειδή κύματα στοιχισμένα εγκάρσια ή κάθετα στο μήκος της δοκού (π.χ. δείγματα Β, C, F, H και J). Εξ αιτίας της επίδρασης της κατασκευαστικής ατέλειας των συναρμογών ανάμεσα στα επίπεδα και ημιτονοειδή καμπύλα τοιχώματα, οι προβλέψεις των γωνιών συστροφής για δοκιμές δειγμάτων με TV (σχήμα 7b, δείγματα Β, C και F) και VT (σχήμα 7d, δείγμα Η) διάταξη πυρήνα έχουν κάποιες διαφορές στα αποτελέσματα. Γενικά, το μοντέλο πεπερασμένου στοιχείου που χρησιμοποιεί πραγματική γεωμετρία προσφέρει τις καλύτερες συσχετίσεις. Ωστόσο ενώ αυτά τα μοντέλα είναι περίπλοκα, και προϋποθέτουν έναν μεγάλο αριθμό στοιχείων, χρησιμοποιώντας μοντέλα με ισοδύναμες ιδιότητες θα μπορούσε να είναι ελκυστικά. Έτσι, θα μπορούσε να προκύψει το συμπέρασμα με βάση αυτές τις συγκρίσεις ότι το ισοδύναμο μοντέλο πεπερασμένου στοιχείου παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα για την πρόβλεψη αντίδρασης σε στρέψη.

2.4 Πειραματική διερεύνηση της αντίδρασης σε πρόσκρουση σύνθετων πολυστρωματικών υλικών

Τα μονοδιευθυντικά στρώματα που αποτελούνται από ίνες υάλου και εποξειδικής ρητίνης, μελετώνται λαμβάνοντας υπόψη το διάγραμμα "προφίλ ενέργειας" και την σχέση καμπυλών φορτίου- μετατόπισης. Παρουσιάζονται βλαβερές επιπτώσεις και διεργασίες φυλλώσεων κάτω από ποικίλες ενέργειες πρόσκρουσης. Για τα συγκριτικά tests χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικές σειρές πολυστρωματικών υλικών, [0/90/0/90]s και [0/90/+45/-45]s. Παρουσιάζεται μία εναλλακτική μέθοδος στηριζόμενη στην διακύμανση της περίσσειας ενέργειας (Ee : excessive energy) σε σχέση με την ενέργεια πρόσκρουσης (Ei : impact energy) με σκοπό να προσδιορίσει την οριακή τιμή διείσδυσης (penetration threshold). Το όριο διείσδυσης που προκύπτει για [0/90/+45/-45]s είναι αρκετά μικρότερο απ' ότι των [0/90/0/90]s. Το κυριότερο είδος βλάβης βρέθηκε να είναι το σπάσιμο της ίνας (fiber fracture) για υψηλές τιμές ενέργειας πρόσκρουσης, ενώ για χαμηλές τιμές ενέργειας πρόσκρουσης ο σχηματισμός κοιλότητας λόγω της αποκόλλησης και του ραγίσματος της μήτρας. Το περίγραμμα καμπυλών της συνολικής επικίνδυνης περιοχής απεικονίζεται για αρκετές ενέργειες πρόσκρουσης.

2.4.1 Κατασκευή στρωμάτων (fabrication of laminates)

Για την κατασκευή σύνθετων πλακών, χρησιμοποιήθηκαν ως ενισχυτικά υλικά, μονοδιευθυντικά υαλονήματα με καλές ηλεκτρικές ιδιότητες (E-glass), με πυκνότητα 509/g/m². Σαν μήτρα χρησιμοποιήθηκε μία εποξειδική ρητίνη με βάση το CY225 και HY225 για αύξηση της σκληρότητας. Για την κατασκευή των σύνθετων πλακών χρησιμοποιήθηκε θερμοκόλληση με πίεση (hot lamination press). Οι πλάκες διατηρούνται σε σταθερή πίεση (15Mpa) και θερμοκρασία 120C για δύο ώρες. Οι κατασκευασμένες πλάκες ήταν σε δύο διαφορετικές σειρές στρωμάτων, [0/90/0/90]s και [0/90/+45/-45]s. Το κανονικό τους πάχος ήταν περίπου 3mm. Το βάρος των ινών αποτελούσε το 65% της κατασκευασμένης πλάκας.

2.4.2 Τεστ πρόσκρουσης (impact testing)

Τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιούν ένα σύστημα tests ελεγχόμενης πτώσης βάρους, Instron-Dynatur 9250 HV. Είναι ένα σύστημα tests κατάλληλο για ευρέως διαφορετικές εφαρμογές το οποίο προϋποθέτει αυξανόμενες ενέργειες πρόσκρουσης. Χρησιμοποιήθηκε μία κεφαλή εισόδου η οποία ήταν θεωρητικά άκαμπτη με μία ημισφαιρική μύτη διαμέτρου 12,7 mm. Η δύναμη μορφοποίησης της μηχανής tests ήταν 22,24KNt. Η ολική μάζα του χρησιμοποιούμενου προσκρουστήρα (impactor) ήταν 6,22 Kg. Το δείγμα του σύνθετου υλικού διαστάσεων 100mm x 100mm συρρικνώθηκε μόνιμα σε μορφή κύκλου με διάμετρο 76,2 mm

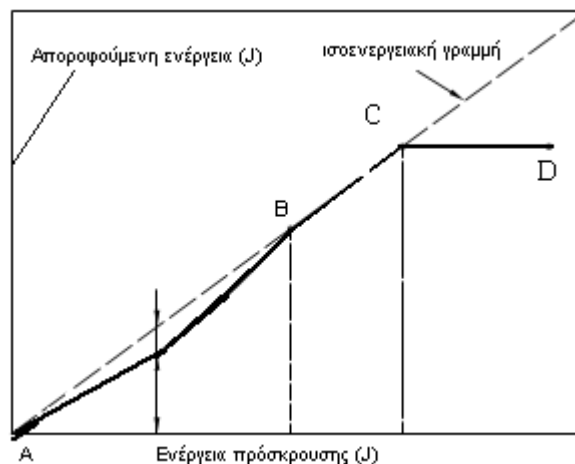
2.4.3 Μέθοδος "προφίλ ενέργειας" (Energy Profiling Method).

Η ενέργεια πρόσκρουσης (Ei) και η απορροφούμενη ενέργεια (Ea) είναι δύο σημαντικές παράμετροι ώστε να εκτιμηθεί η αντίδραση πρόσκρουσης και η αντίσταση της σύνθετης κατασκευής. Η αντίδραση πρόσκρουσης ορίζεται ως η ολική ποσότητα

ενέργειας που παρουσιάζει ένα σύνθετο υλικό. Η απορροφούμενη ενέργεια είναι η ενέργεια που απορροφάται από ένα σύνθετο δοκίμιο μέσω της πρόσκρουσης κατά την διαμόρφωση βλάβης στο δοκίμιο. Το διάγραμμα που δείχνει την σχέση μεταξύ E_i και E_a καλείται «προφίλ ενέργειας». Συγκρίνοντας την αντιστοιχία καμπυλών φορτίου – μετατόπισης, του διαγράμματος «προφίλ ενέργειας (EPD)» και τις εικόνες από βλάβες σε δοκίμια είναι δυνατό να παρουσιασθεί ο μηχανισμός βλάβης της κάθε στρώσης. Εφαρμόζοντας αυτήν τη μέθοδο «προφίλ ενέργειας» είναι δυνατόν να προσδιορισθούν κάποιες ιδιότητες πρόσκρουσης όπως το θεωρητικό όριο ελαστικότητας (pure elastic limit) καθώς και το όριο διείδυσης και διάτρησης.

Το σχήμα ενός διαγράμματος «προφίλ ενέργειας», γενικά, μπορεί να επηρεάζεται από έναν αριθμό συνδυαζόμενων παραγόντων μεταξύ του προσκρουστήρα και του στόχου (συνθετικού υλικού). Μεταξύ αυτών, η γεωμετρία των ινών, το πάχος και το πλήθος των φυλλωμάτων του στόχου, και το σχήμα του προσκρουστήρα αποτελούν κάποια παραδείγματα. Στο *σχήμα 1* δίδεται μία γενική εικόνα του διαγράμματος «προφίλ ενέργειας». Αποτελείται από τρεις περιοχές, AB, BC και CD. Η AB αντιπροσωπεύει μια περιοχή δειγμάτων που παραμένουν αδιαπέραστα (non penetrated). Όπως ήταν αναμενόμενο, η έκταση της βλάβης του δείγματος εξαρτάται από την ενέργεια πρόσκρουσης, π.χ. η συνολική επικίνδυνη περιοχή αυξάνεται με την αύξηση της προσκρουόμενης ενέργειας. Σε αυτήν την περιοχή, η καμπύλη είναι κάτω από την ισοενεργειακή γραμμή, υποδηλώνοντας ότι υπάρχει μια περίσσεια ενέργεια πρόσκρουσης (η διαφορά μεταξύ της καμπύλης και της ισοενεργειακής γραμμής). Η περίσσεια ενέργεια διατηρείται στον προσκρουστήρα και χρησιμοποιείται στην αναπήδηση του προσκρουστήρα από το δείγμα στο τέλος του τεστ πρόσκρουσης.

Η περιοχή BC αποκαλείται «περιοχή διείδυσης», όπου όλη η ενέργεια πρόσκρουσης πιθανόν απορροφάται από το δείγμα. Η περιοχή CD αναπαριστά δείγματα που διατρυπιούνται. Επιπροσθέτως τα σημεία B και C αναπαριστούν το όριο διείδυσης και διάτρησης αντίστοιχα. Το όριο διείδυσης μπορεί να ορισθεί σαν το σημείο όπου η απορροφούμενη ενέργεια ισούται με την προσκρουόμενη ενέργεια. Συγκεκριμένα, στο όριο διείδυσης, ο προσκρουστήρας καρφώνεται στα δείγματα και δεν αναπηδά. Από το όριο διάτρησης, η απορροφούμενη ενέργεια από τα δείγματα παραμένει σχεδόν σταθερή. Αυτό υπονοεί ότι ο προσκρουστήρας δεν αποτελεί περαιτέρω κίνδυνο για τα δοκίμια ακόμα και εάν η ενέργεια πρόσκρουσης αυξηθεί. Η διακεκομμένη διαγώνια γραμμή στο διάγραμμα αντιπροσωπεύει την ισότητα ενέργειας μεταξύ της ενέργειας πρόσκρουσης και της απορροφούμενης ενέργειας.



Σχήμα 1. Τυπικό διάγραμμα προφίλ ενέργειας σύνθετου στρώματος

2.4.4 Αποτελέσματα.

Πραγματοποιήθηκαν ένας αριθμός τεστ σε θερμοκρασία περιβάλλοντος κάτω από διαφορετικές προσκρουόμενες ενέργειες από 5J έως 80J με σκοπό να εξεταστεί η επικίνδυνη κατεργασία σε σειρά στρωμάτων [0/90/0/90]s και [0/90/+45/-45]s. Η συνολική επικίνδυνη περιοχή στα δείγματα μετά από πρόσκρουση αξιολογείται από οπτική επιθεώρηση. Ειδικότερα, είναι δυνατόν να αντληθούν χρήσιμες πληροφορίες για την συνολική επικίνδυνη περιοχή από την οπτική διαύγεια των σύνθετων συστατικών π.χ. διαύγεια υαλώδους/εποξειδικού στρώματος, εξετάζοντας τα έναντι κατάφωτου φόντου.

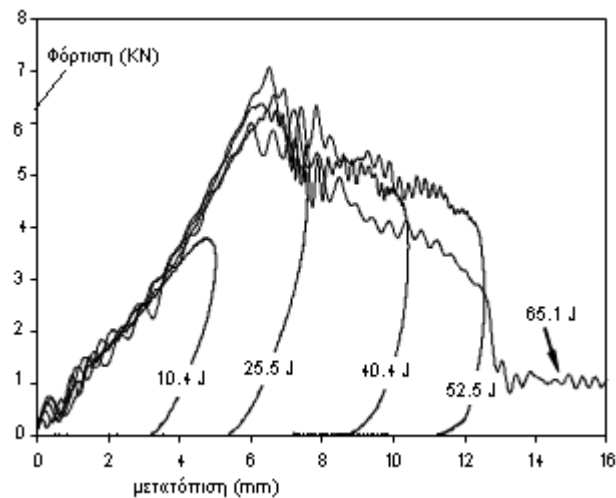
Η αποροφούμενη ενέργεια σε δοκιμή πρόσκρουσης μπορεί να υπολογισθεί από το διάγραμμα καμπυλών φορτίου –μετατόπισης το οποίο παρέχει χρήσιμες υποδείξεις στην αξιολόγηση επικίνδυνης μεθόδου στις κατασκευές σύνθετων. Συνεπώς παραθέτονται αρκετές χαρακτηριστικές καμπυλών φόρτισης- μετατόπισης δειγμάτων για ποικίλες ενέργειες πρόσκρουσης στο *Σχήμα 2*. Αφού έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά, στο σχήμα δίδονται μόνο οι καμπύλες δύναμης-απόκρισης [0/90/0/90]s.

Εφόσον προσδιορίζονται η E_i και η E_a , μπορεί να απεικονισθεί το διάγραμμα του "προφίλ ενέργειας" των χρησιμοποιούμενων σύνθετων υλικών. Το *σχήμα 3* δείχνει το διάγραμμα "προφίλ ενέργειας" πλήθους σειρών που εξετάζονται σε αυτήν την μελέτη. Οι μαύρες κλειστές κουκίδες εκφράζουν σημεία εγκάρσιων φύλων [0/90/0/90]s στρώσεων, ενώ οι ανοιχτές κουκίδες τα σημεία κεκλιμένων φύλων [0/90/+45/-45]s στρώσεων.

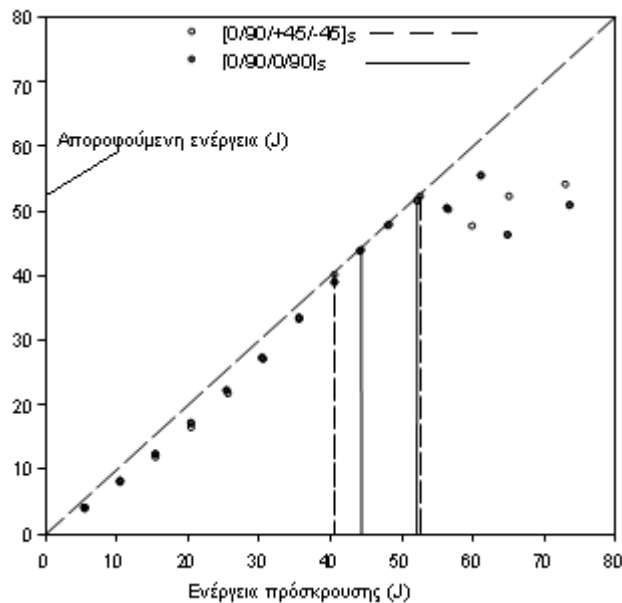
Όπως φαίνεται στο σχήμα, τα σημεία του κάθε πλήθους στρώσεων είναι σχεδόν επικαλυπτόμενα, με εξαίρεση αυτά που βρίσκονται στην μετα - διάτρητη ζώνη. Με άλλα λόγια, η περίσσεια ενέργειας για κάθε πλήθος σειρών βρίσκεται να είναι σχεδόν η ίδια. Η διαφορά μεταξύ E_i και E_a , στην περιοχή πριν την διείσδυση μπορεί να αποκαλεστεί ως η περίσσεια ενέργειας η οποία διατηρείται στον προσκρουστήρα και χρησιμοποιείται για αναπήδηση. Ωστόσο, παρατηρείται ότι η περιοχή και το σχήμα της βλάβης παρουσιάζουν ελαφρές διαφορές παρόλο που οι αποροφούμενες ενέργειες ήταν σχεδόν οι ίδιες και για τις δύο στρώσεις. Στο διάγραμμα, οι κάθετες συνεχείς γραμμές, χρησιμοποιούνται για να αναγνωρίζονται τα όρια τη διείσδυσης και της διάτρησης του [0/90/0/90]s, ενώ οι διακεκομμένες για τα [0/90/+45/-45]s. Φαίνεται ότι το φάσμα της διείσδυσης για [0/90/+45/-45]s και [0/90/0/90]s πολυστρωματικών υλικών, είναι 12J και 7,8J αντίστοιχα. Όμως αυτή η διαφορά (4,2J) προκύπτει ουσιαστικά από τα όρια της διείσδυσης παρά από τα όρια της διάτρησης. Τα όρια διείσδυσης του [0/90/+45/-45]s καθορίζονται περίπου στα 40,5J ενώ των [0/90/0/90]s στα 44,4J. Η διαφορά μεταξύ των ορίων διείσδυσης είναι 3,9J. Αυτές οι τιμές βασίζονται στα δεδομένα σημεία που λαμβάνονται στα τεστ πρόσκρουσης. Εναλλακτικά, μία πρωτότυπη μέθοδος παρουσιάζεται για να προσδιορίσει τα όρια διείσδυσης. Στην εν λόγω μέθοδο εξετάζεται η διακύμανση της περίσσειας ενέργειας (E_e) σε αντιπαράθεση με την ενέργεια πρόσκρουσης (E_i). Το *σχήμα 4* δείχνει τα σημεία μεταβολής E_e - E_i , και τα αντίστοιχα πολώνυμα. Οι ρίζες αυτών των εξισώσεων δίνουν τα σημεία ενέργειας όπου $E_i/E_a = 1$, π.χ. $E_e = 0$. Οι μεγαλύτερες ρίζες υποδηλώνουν όρια διείσδυσης και για τα δύο πολυστρωματικά υλικά. Αυτά υπολογίστηκαν 42,5J και 45,9J για [0/90/+45/-45]s και [0/90/0/90]s αντίστοιχα. Συγκεκριμένα η διαφορά μεταξύ τους είναι 3,4 J. Αυτό οφείλεται στην διαφορετικής

μορφής βλάβης στα εσωτερικά στρώματα του κάθε πολυστρωματικού υλικού. Από μελέτες έχει αποδειχθεί ότι η αποκόλληση στρωμάτων συμβαίνει εξαιτίας διαφορετικής κάμψης μεταξύ δύο όμορων στρώσεων.

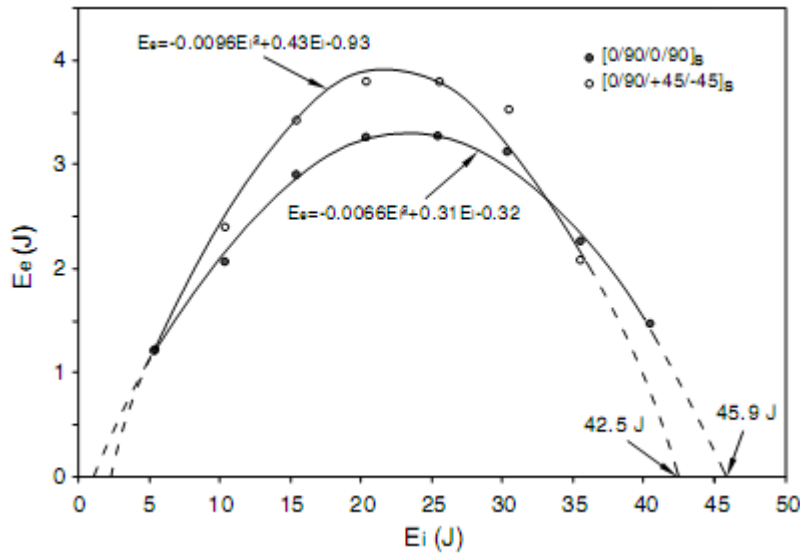
Ο παράγοντας αποτυχημένης σύνδεσης πιστεύεται ότι είναι υψηλότερος στις δύο δι-επιφάνειες 90/+45 και +45/90. Εξ' αιτίας αυτού, θεωρείται, ότι συμβαίνει γρηγορότερη διείδυση για [0/90/+45/-45] στρώματα, συγκριτικά με [0/90/0/90]. Αυτό συμβαίνει, διότι, καθώς η αποκόλληση στρωμάτων συνεχίζεται στα [0/90/0/90]_s, αρχίζει να λαμβάνει χώρα το σπάσιμο των ινών στα κάτω στρώματα των [0/90/+45/-45]_s με αποτέλεσμα την γρηγορότερη διείδυση του προσκρουστήρα μέσα στο δείγμα.



Σχήμα 2. Καμπύλες φόρτισης-μετατόπισης για στρώματα [0/90/0/90]_s



Σχήμα 3. Διάγραμμα προφίλ ενέργειας δύο πολυστρωματικών υλικών



Σχήμα 4. Προσδιορισμός ορίου διείσδυσης (E_i : ενέργεια πρόσκρουσης, E_e : περίσσια ενέργειας)

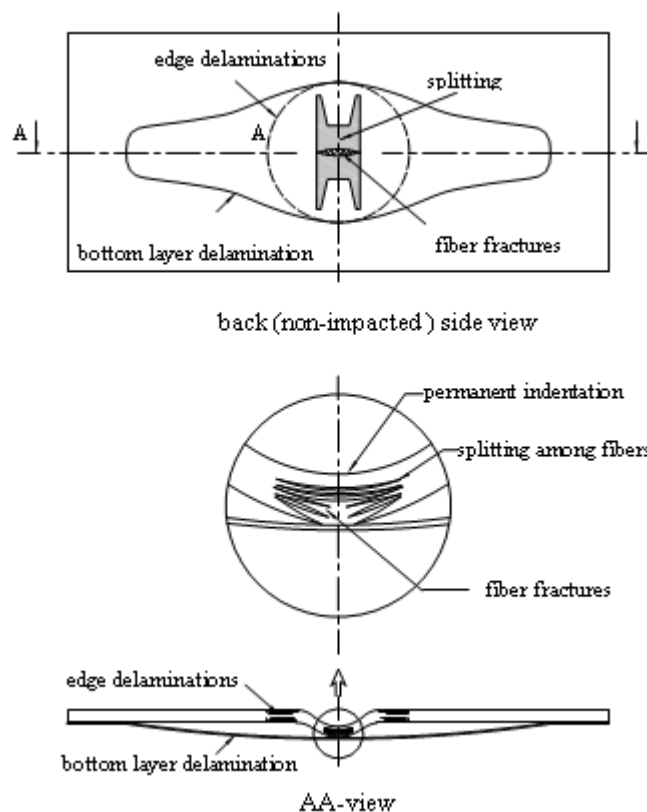
2.4.4.1 Επικίνδυνοι μηχανισμοί.

Όταν ένα εξωτερικό αντικείμενο προσκρούει σε ένα στρώμα, συμβαίνουν αρκετές επικίνδυνες καταστάσεις στην σύνθετη κατασκευή όπως αποκόλληση στρωμάτων, σπάσιμο ινών και σπάσιμο της μήτρας. Για το ποιος κίνδυνος είναι επικρατέστερος εξαρτάται γενικά από τις παραμέτρους πρόσκρουσης του προσκρουστήρα και τις ιδιότητες των σύνθετων υλικών. Για παράδειγμα, ή ίνα άνθρακα ή του υάλου ενισχυμένων σύνθετων είναι ευπαθής σε κίνδυνο πρόσκρουσης διότι στα εύθραστα χαρακτηριστικά τους προστίθεται η χαμηλή ενέργεια πρόσκρουσης συγκριτικά με σύνθετα ινών αραμιδίου (Kevlar composites). Συνεπώς, ο πρωτεύον μηχανισμός είναι το είδος θραύσης των ινών, για ενισχυμένα σύνθετα από ίνες υάλου και άνθρακα, λαμβάνοντας υπόψη ότι συμβαίνει κυρίως αποκόλληση στρωμάτων για σύνθετα ινών αραμιδίου. Με προσεκτική εξέταση των δειγμάτων, σε αυτήν την μελέτη, ο αρχικός κίνδυνος παρατηρήθηκε καθώς η ίνα έσπασε συνοδευμένη από αποκόλληση των στρωμάτων και σπάσιμο της μήτρας.

Για χαμηλότερες ενέργειες πρόσκρουσης (μικρότερες από 25J), διαπιστώθηκε ότι ο πρωτεύον κίνδυνος αφορά την αποκόλληση των στρώσεων και το σπάσιμο της μήτρας και όχι τη διάσπαση της ίνας. Ωστόσο, για υψηλότερες ενέργειες πρόσκρουσης, η διάσπαση μεταξύ ίνας και μήτρας και η διάσπαση της ίνας ήταν ο επικρατέστερος κίνδυνος γύρω από το σημείο πρόσκρουσης. Επιπροσθέτως, παρατηρήθηκε ένα είδος αποκόλλησης σαν αποτέλεσμα της τοπικής παραμόρφωσης των ινών παρά την διαφορά ακαμψίας μεταξύ των δύο κάτω στρώσεων στο σημείο της πρόσκρουσης. Μία εικόνα που αντιπροσωπεύει αυτόν τον κίνδυνο φαίνεται στο σχήμα 5. Σε αυτό το σχήμα απεικονίζονται μία πίσω όψη (χωρίς πρόσκρουση) και μία τομή επικίνδυνων δειγμάτων. Για καλύτερη κατανόηση, παρατίθενται περισσότερα σχήματα επικίνδυνων δειγμάτων στις επόμενες σελίδες.

Συνεπώς, επικίνδυνοι μηχανισμοί σε μονοδιευθυντικά στρώματα, μπορούν να συνοψιστούν ως εξής[2]:

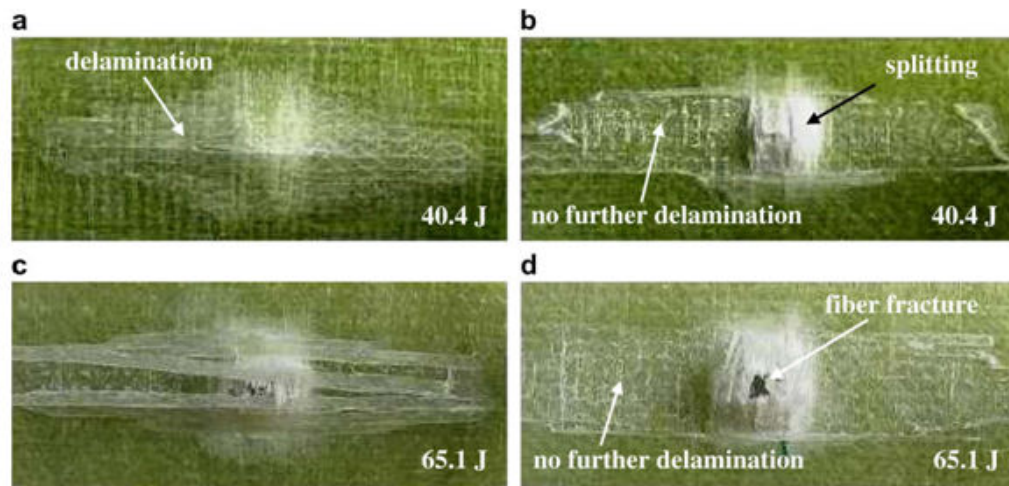
- Μόνιμες «κοιλότητες» (*permanent indentation*) με ημισφαιρικό σχήμα κάτω από τον προσκρουστήρα, κατά μήκος των ενδοστρωμάτων και εσωτερικών ραγισμάτων της μήτρας.
- Αποκόλληση στις εσωτερικές δι-επιφάνειες (*delaminations*) οφειλόμενη στον διαφορετικό προσανατολισμό των ινών όμορων στρωμάτων, για χαμηλές ενέργειες πρόσκρουσης περίπου 25J.
- Διάσπαση (*splitting*) μεταξύ ινών οφειλόμενες σε παραμόρφωση γύρω από το σημείο πρόσκρουσης
- Σπάσιμο (*fracture*) ινών σαν αποτέλεσμα κάμψης και / ή εφελκυσμού των ινών. Με εξαίρεση των κατώτερων στρωμάτων, αυτό αρχίζει να λαμβάνει χώρα στα στρώματα που δεν δέχονται πρόσκρουση και εκτείνονται προς τα στρώματα που δέχονται πρόσκρουση
- Όριο αποκόλλησης (*edge delamination*) το οποίο συμβαίνει γύρω από το σημείο πρόσκρουσης
- Αποκόλληση στο κατώτερο στρώμα, σαν αποτέλεσμα της κάθετης μετατόπισης των σπασμένων και μη ινών.



Σχήμα 5. Σχηματικές απεικονίσεις επικίνδυνων βλαβών λόγω πρόσκρουσης

Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, η κύρια επικίνδυνη μέθοδος είναι το σπάσιμο της ίνας παρά η αποκόλληση, εκτός του κατώτερου επιπέδου. Στο σχήμα 6a-d, η εικόνα από δύο αντιπροσωπευτικά δείγματα διάτρητα και μη διάτρητα βοηθά να γίνει κατανοητή αυτή η περίπτωση. Συνεπώς οι επικίνδυνοι μηχανισμοί των επιλεγμένων πολυστρωματικών υλικών είναι αρκετά παρόμοιοι για υψηλότερες ενέργειες πρόσκρουσης (πάνω από 25J), οι απεικονίσεις των [0/90/+45/-45]_s, δίδονται στο παραπάνω σχήμα. Όπως φαίνεται στο σχ.6a, η

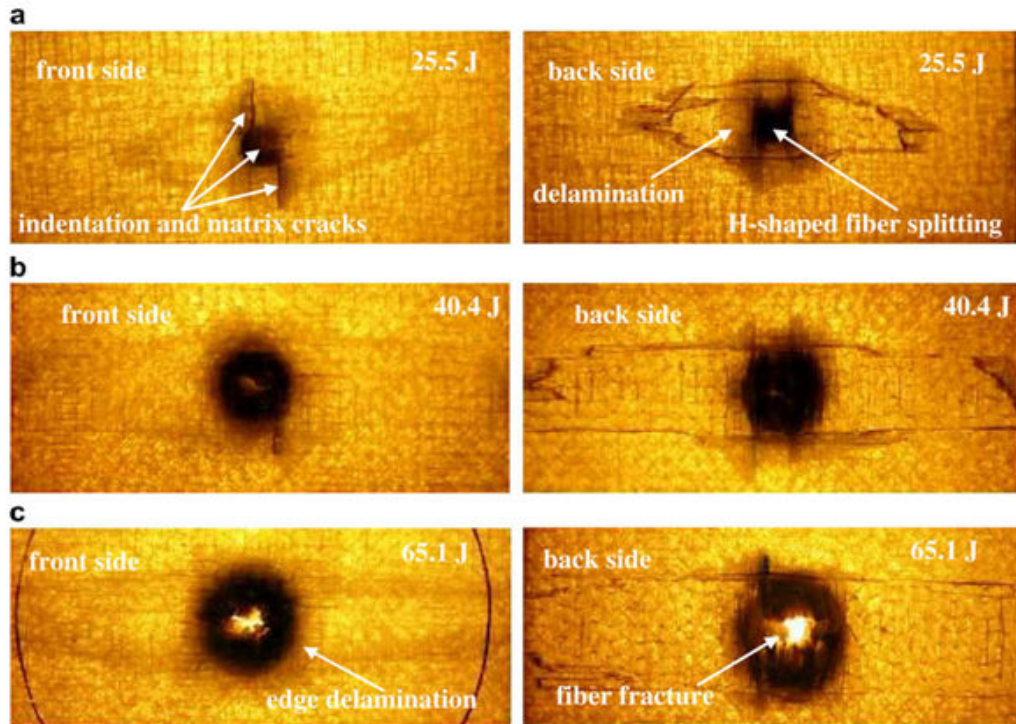
αποκόλληση φαίνεται να παίρνει μία μεγάλη επιφάνεια. Εν τούτοις, καθώς το κατώτερο επίπεδο μετατοπίζεται σε κάποια έκταση π.χ. από την αποκολλημένη περιοχή, αυτό δείχνει ότι δεν υπάρχει επιπρόσθετη αποκόλληση στα εσωτερικά στρώματα. Το σχήμα 6c δείχνει ένα διάτρητο σχήμα. Μετά την μετατόπιση της αποκολλημένης περιοχής, φαίνεται ο διαχωρισμός των ινών (6b) και το σπάσιμο των ινών (6d) που εξαρτάται από την ενέργεια πρόσκρουσης.



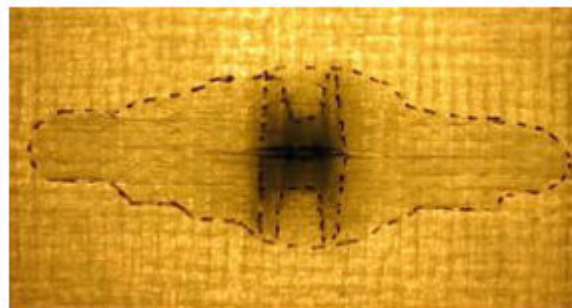
Σχήμα 6. Παραμόρφωση κάτω επιπέδου και αστοχίες ινών

Με σκοπό να παρουσιασθούν διαφορετικά είδη βλαβών, ελήφθησαν με ισχυρό πίσω φωτισμό, ορισμένες αντιπροσωπευτικές φωτογραφίες επικίνδυνων σχημάτων από εμπρός (προσκρούμενα) και πίσω (μη προσκρούμενα) όψη (σχήμα 7.). Ομοίως με το σχ.6, οι φωτογραφίες απεικονίζουν μόνο ένα πολυστρωματικό υλικό [0/90/+45/-45]_s. Οι προσκρούμενες ενέργειες των αντιπροσωπευτικών δειγμάτων δίδονται στο σχήμα 7a, και b και c ήταν αντιστοίχως 25.5, 40.5 και 65.1J. Όπως βλέπουμε στο σχήμα 7a, η αποκόλληση στα εσωτερικά στρώματα αρχίζει να φαίνεται μετά τον πίσω φωτισμό. Από τα σχήματα, φαίνεται ότι οι συνολικά κατεστραμμένες ίνες και η γενικά επικίνδυνη περιοχή γίνεται μεγαλύτερη. Αυτό συμβαίνει διότι -για υψηλότερες ενέργειες πρόσκρουσης- η αποκόλληση γύρω από το σημείο πρόσκρουσης περιορίζεται από την επίδραση της ελεύθερης επιφάνειας παρά από την διαφορά ακαμψίας ομόρων στρώσεων.

Το πεδίο της συνολικής επικίνδυνης περιοχής διαφόρων ενεργειών πρόσκρουσης παρουσιάζεται από την εξωτερική καμπύλη στο σχήμα 8. Σε αυτήν την μέθοδο, το όριο των συνολικών επικίνδυνων περιοχών συμπεριλαμβανομένου ειδικότερα της αποκόλλησης των κάτω επιπέδων, ήταν χαραγμένο με διαρκή μαρκαδόρο, και μετά την φωτογράφιση η αποκολλημένη περιοχή αναλύθηκε με σκοπό την χάραξη και άλλων βλαβών. Στην συνέχεια όλες οι εξωτερικές γραμμές συνδυάστηκαν στο ίδιο σχήμα για χωριστά αντιπροσωπευτικά δείγματα.

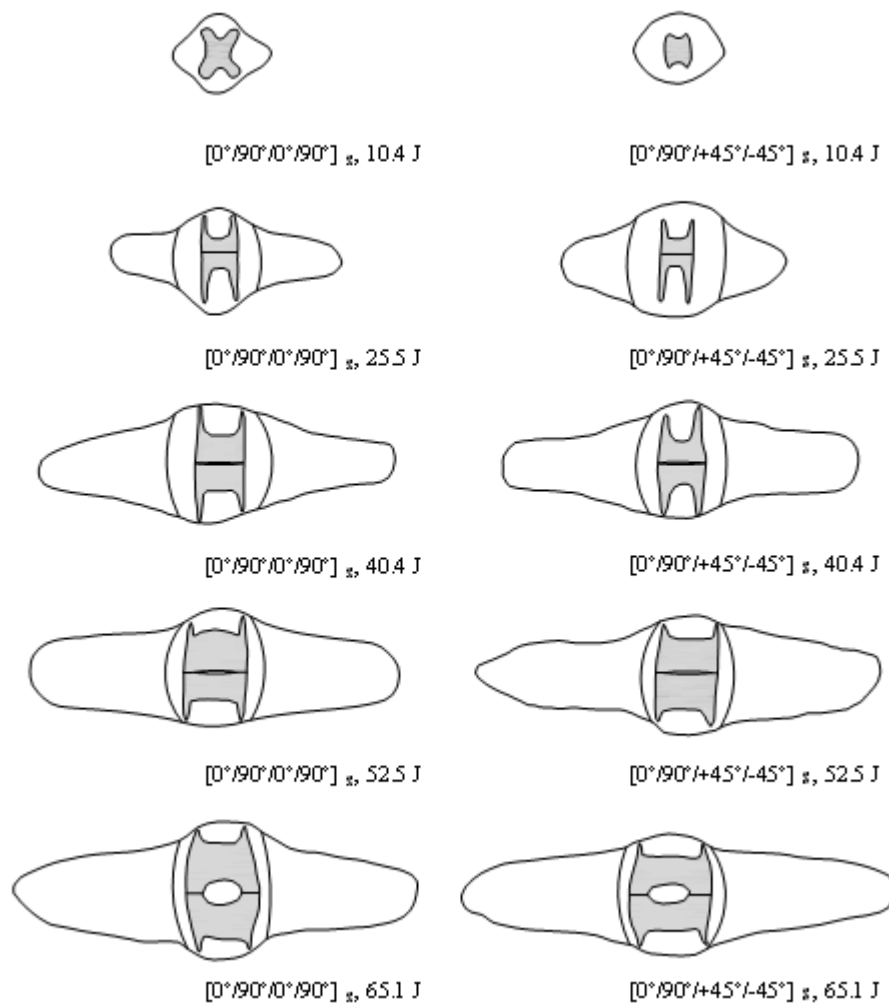


Σχήμα 7. Αντιπροσωπευτικές φωτογραφίες αστοχιών από πρόσκρουση (με ισχυρό πίσω φωτισμό)



Σχήμα 8. Περίγραμμα συνολικής επικίνδυνης περιοχής και αστοχίες ινών

Στο Σχήμα 9 παρουσιάζονται οι εξωτερικές γραμμές για πολλά επικίνδυνα δοκίμια κάτω από ποικίλες ενέργειες πρόσκρουσης. Όπως φαίνεται στα σχήματα, παρά τις μικρότερες ενέργειες πρόσκρουσης όπως 10.4J, υπάρχουν μικρές διαφορές επικίνδυνης περιοχής ανάμεσα των δύο [0/90/+45/-45]_s και [0/90/0/90]_s πολυστρωματικών. Για εκατέρωθεν πολυστρωματικά, γενικά, η έκταση της συνολικά επικίνδυνης περιοχής και αστοχίας της ίνας αυξάνεται σημαντικά με την αύξηση της ενέργειας πρόσκρουσης, δεδομένου ότι το όριο αποκόλλησης από 25.5J δεν δείχνει σημαντικές αλλαγές.



Σχήμα 9. Περίγραμμα αστοχιών

2.5 Κάμψη τριών σημείων μονοδιευθυντικών CFRP στρωμάτων – επίδραση διάτμησης

Στο σχηματισμό ενδιάμεσης στρώσης (interleaving), λεπτά επίπεδα σκληρής ρητίνης ενσωματώνονται μεταξύ των στρωμάτων των φύλλων. Μερικές φορές, η αντοχή διάσπασης μεταξύ των στρωμάτων βελτιώνεται χρησιμοποιώντας θερμοπλαστική ρητίνη στις διεπιφάνειες. Σε άλλες περιπτώσεις, επιλέγεται η εφαρμογή μίας υβριδοποίησης της μήτρας σύνθετου, με την τοπική διασπορά εντός αυτής ενός συγκεκριμένου θερμοπλαστικού πολυμερούς. Το T800H/3900-2 σύστημα διαμόρφωσης ανήκει στην τελευταία κατηγορία, κατασκευασμένο από επίπεδα γραφίτη/εποξειδικού των οποίων οι επιφάνειες καλύπτονται με δύο λεπτά στρώματα ρητίνης, μέσα στα οποία η μήτρα αναμιγνύεται με μόρια πολυαμίδης.

Η παρουσία της ρητίνης, που διαχέεται πλούσια λίγο πιο κάτω της συνολικής περιεκτικότητας της ίνας στο σύνθετο, επηρεάζει δυσμενώς τις αρχικές τους μηχανικές ιδιότητες. Ωστόσο, αυτή η μέθοδος έχει αποδειχθεί αποτελεσματική στην αύξηση της αντοχής διάσπασης μεταξύ των στρωμάτων, και στην συμπεριφορά λόγω πρόσκρουσης των στρωμάτων.

Σπάνια ένα σύνθετο υπόκειται αποκλειστικά σε φορτίσεις στο κύριο (xy) επίπεδο. Τις πιο πολλές φορές, εφαρμόζονται φορτίσεις στο εγκάρσιο (xz, yz) επίπεδο, δημιουργώντας – μέσω του πάχους - διατμητικές παραμορφώσεις. Όταν ο λόγος λεπτότητας (slenderness ratio - δηλαδή ο λόγος των διαστάσεων του κυρίου επιπέδου προς το πάχος) είναι υψηλός, η κατασκευή μπορεί να θεωρηθεί «λεπτή», και η συμβολή της εγκάρσιας διάτμησης στην συνολική παραμόρφωση είναι αμελητέα. Ωστόσο, ο λόγος του εγκάρσιου μέτρου διάτμησης προς το μέτρο διάτμησης του κυρίου επιπέδου για ένα στρώμα είναι συνήθως πολύ χαμηλότερος από ότι στα μέταλλα. Επομένως, μια κατασκευή σύνθετου μπορεί να ταξινομηθεί σαν «λεπτή», και η εγκάρσια παραμόρφωση διάτμησης περιλαμβάνεται στους υπολογισμούς, για λόγους λεπτότητας αρκετά μεγαλύτερους από ότι της περίπτωσης των μετάλλων.

Με την επέκταση της εφαρμογής των σύνθετων σε κατασκευές με έντονες φορτίσεις, είναι όλο πιο πολύ απαραίτητη η αύξηση του πάχους των σύνθετων ώστε να καλύψουν τις απαιτήσεις αντοχής και ακαμψίας. Συνεπώς, η επίδραση παραμορφώσεων στο εγκάρσιο επίπεδο είναι σημαντική, και η γνώση των εγκάρσιων ιδιοτήτων είναι απαραίτητη στην διεξαγωγή ακριβής ανάλυσης σε τρεις διαστάσεις.

Μεταξύ των σταθερών κατά μήκος της διεύθυνσης του πάχους, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα μέτρα διάτμησης G_{12} και G_{23} , που ευθύνονται για την διάτμηση των συστατικών στοιχείων από την παραμόρφωση λόγω εγκάρσιων φορτίσεων των δοκών. Μελέτες μικρομηχανικής εισηγούνται ότι ο σχηματισμός ενδιάμεσων στρωμάτων (interleaves) θα μειώσει αυτά τα μέτρα. Δυστυχώς, οι διαθέσιμες χαρακτηριστικές δοκιμές για την μέτρηση αυτών, καθώς και των εγκάρσιων μέτρων, δεν είναι αξιόπιστες, κυρίως εξ αιτίας της δυσκολίας εφαρμογής μίας ομοιόμορφης κατανομής τάσης στα δείγματα. Πράγματι, στην βιβλιογραφία, μία πλήρης πειραματική διερεύνηση στις εγκάρσιες ελαστικές σταθερές του T300H/3900-2 δεν έχει ακόμα πραγματοποιηθεί, ωστόσο έχουν δημιουργηθεί κάποια δεδομένα σχετικά με το αντικείμενο ή χρησιμοποιούνται θεωρητικοί υπολογισμοί.

Στην παρούσα εργασία, παρουσιάζονται δοκιμές κάμψης τριών-σημείων στην ελαστική περιοχή σε μονοδιευθυντικά δοκίμια T300H/3900-2 ενισχυμένων πλαστικών με ανθρακονήματα. Για να δοθεί έμφαση στον ρόλο που έχει η εγκάρσια διατμητική παραμόρφωση, ο λόγος λεπτότητας μεταβλήθηκε κατάλληλα. Επιπρόσθετες τοπικές δοκιμές ακαμψίας πραγματοποιήθηκαν, με σκοπό να λογαριάσουν την βύθιση (indentation-λόγω πλαστικής παραμόρφωσης) από τα σημεία της εισαγωγής φόρτισης στην ακαμψία. Τα πειραματικά δεδομένα συλλέχθηκαν χρησιμοποιώντας την θεωρία δοκών του Timoshenko's[4], όπως επίσης την δισδιάτατη και τρισδιάτατη ανάλυση πεπερασμένου στοιχείου (FEA)[4].

2.5.1 Θεωρητική ανάλυση

Σύμφωνα με την θεωρία του Timoshenko η μετατόπιση w μιας μονοδιάστατης ισοτροπικής δοκού με ορθογωνική εγκάρσια διατομή σε κάμψη τριών-σημείων δίδεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$w = \frac{PL^3}{4Ebt^3} + \frac{PL}{4k_s Gbt} \quad (1)$$

Όπου P είναι η εφαρμοζόμενη φόρτιση, L το μήκος (span), b το πλάτος, t το πάχος και E, G τα μέτρα ελαστικότητας και διάτμησης αντίστοιχα. Το σύμβολο k_s ονομάζεται «συντελεστής διόρθωσης διάτμησης (shear correction factors)» ή «συντελεστής διάτμησης», λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι η διατμητική τάση δεν κατανέμεται ομοιόμορφα διαμέσου του πάχους. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία, $k_s = 5/6 = 0.833$

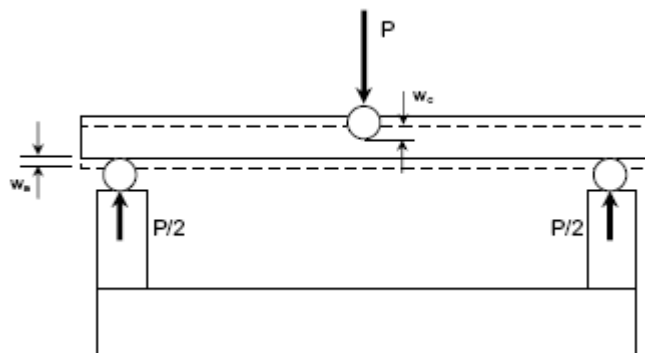
Στην εξίσωση (1) ισχύει το κύριο πλεονέκτημα για ένα μονοδιευθυντικό στρώμα, όταν ο διαμήκης άξονας της δοκού συμπίπτει με την διεύθυνση της ίνας. Σε αυτήν την περίπτωση, $E = E_{11}$, και το G συμπίπτει με το G_{13} , προϋποθέτοντας το πάχος της δοκού να είναι κάθετο στο πλάτος της.

Στην εξίσωση (1) υποτέθηκε ότι η αντικλαστική καμπυλότητα στο επίπεδο 1-2 εξ αιτίας του μέτρου Poisson's είναι μηδέν, όπου στην πραγματικότητα συμβαίνει όταν το πλάτος της δοκού είναι μικρό σχετικά με το L . Όταν αυτή η συνθήκη δεν επαληθεύεται, πρέπει να εισαχθεί η θεωρία ελάσματος (plate theory), με αποτέλεσμα την αντικατάσταση του E_{11} με την ποσότητα $E_{11} / (1 - \nu_{12}\nu_{21})$ στην αναλυτική επίλυση.

Στην πράξη, το διαμήκης μέτρο ελαστικότητας για ένα μονοδιευθυντικό CFRP είναι κοντά στο $E_{11} / (1 - \nu_{12}\nu_{21})$, διότι ο λόγος Poisson's είναι συνήθως μικρός. Παρόλα αυτά, η επίδραση της καμπυλότητας στα επίπεδα 1-2 στην ακαμψία της δοκού που μελετάται, πρέπει να ληφθεί μέσω υπολογισμού, όταν η επενέργεια της παραμόρφωσης συμβαίνει από τα σημεία που εισάγεται η φόρτιση.

Στο *σχήμα 1*, παρουσιάζεται η εγκάρσια μετατόπιση δοκιμίου εξαιτίας τοπικής παραμόρφωσης. Εξ αιτίας της ακμής των στηρίξεων, η δοκός (διακεκομμένη γραμμή στο σχήμα 1) και ο κύλινδρος φόρτισης υφίστανται κάθετη μεταφορά w_a . Ο κύλινδρος στο κέντρο της φόρτισης επιφέρει μία πρόσθετη μετατόπιση w_c , και η τελική μετατόπιση δίδεται από την σχέση :

$$w_i = w_a + w_c \quad (2)$$



Σχήμα 1: Εγκάρσια μετατόπιση εξ αιτίας της βύθισης (indentation) στα σημεία εισαγωγής της φόρτισης.

Όταν η παραμόρφωση δοκού μετράται από την μηχανή δοκιμής μετατόπισης w_m , η προφανής ακαμψία της K_m δίδεται από την σχέση :

$$K_m = \frac{P}{w_m} \quad (3)$$

Δεδομένου ότι η πραγματική ακαμψία K θα είναι:

$$K = \frac{P}{w} = \frac{P}{w_m - w_i} \quad (4)$$

Η εξίσωση (4) λαμβάνεται από τις υποθέσεις της παρούσας εργασίας, ότι η ακαμψία της μηχανής δοκιμής είναι άπειρη. Από τις εξισώσεις (2) και (4) προκύπτει:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{K_m} - \left(\frac{1}{K_a} + \frac{1}{2K_c} \right) \quad (5)$$

Όπου

$$K_a = \frac{P}{W_a} \quad (6)$$

$$K_c = \frac{P}{2W_c} \quad (7)$$

όπου K_a, K_c οι τοπικές ακαμψίες στην φόρτιση στο κέντρο και στις στηρίξεις αντίστοιχα. Ο συντελεστής $\frac{1}{2}$ στην εξίσωση (7) απλά υπολογίζει την αντίδραση από την στήριξη, η οποία είναι η μισή από την εφαρμοζόμενη φόρτιση (σχήμα 1).

Σύμφωνα με την θεωρία του Hertzian, η βύθιση για ισοτροπικούς κυλίνδρους σε επαφή με ημι-άπειρο ισοτροπικό επίπεδο δίδεται από την ακόλουθη εξίσωση[9] :

$$\delta = \frac{F}{l} (\alpha_1 + \alpha_2) \left\{ 1 + \ln \left[\frac{8l^3}{(\alpha_1 + \alpha_2)FD} \right] \right\} \quad (8)$$

όπου F η δύναμη επαφής, l το μήκος της επαφής κατά μήκος του άξονα του κυλίνδρου, D η διάμετρος του κυλίνδρου, και

$$\alpha_i = \frac{1 - \nu_i^2}{\pi E_i} \quad (9)$$

όπου $i = 1, 2, \dots$ χαρακτηρίζει τα συστατικά υλικά, και E, ν το μέτρο ελαστικότητας και ο λόγος Poisson αντίστοιχα.

Η εξίσωση (8) δείχνει ότι η σχέση μεταξύ F και δ δεν είναι γραμμική, έτσι τα K_a και K_c στις εξισώσεις (6) και (7) διαφέρουν ως προς την εξίσωση της εφαρμοζόμενης φόρτισης. Τα πειραματικά αποτελέσματα όμως δείχνουν η απόκλιση από την γραμμικότητα στο διάγραμμα $F - \delta$ να είναι αμελητέα, έτσι το σφάλμα έγινε στην υπόθεση μικρών τιμών για τις K_a και K_c . Επιπροσθέτως, εάν η διάμετρος των κυλίνδρων στην επαφή με το δοκίμιο (σχήμα 1) είναι ίδια, τότε $K_a = K_c$ και η εξίσωση (5) γίνεται:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{K_m} - \frac{3}{2K_a} \quad (10)$$

όπου χρησιμοποιείται για την προσέγγιση της ακαμψίας της δοκού K από τις μετρούμενες τιμές K_m και K_a .

2.5.2 Μέθοδοι δοκιμής και υλικά

Τα μονοδιευθυντικά στρώματα (κατασκευάστηκαν από την Alenia Aeronautica, Romigliano d'Agro), από χειροποίητες στρώσεις είκοσι επίπεδων Toray T800/3900-2. Η βασική στρώση, περίπου 0.193mm συνολικού πάχους, κατασκευάστηκε από δύο σκληρά επίπεδα, πάχους 0.015mm, φτιάχνοντας σάντουιτς με έναν πυρήνα γραφίτη/εποξεικού. Ο μηχανισμός αύξησης της δυσθραυστότητας οφείλεται στα λεπτά μόρια θερμοπλαστικού πολυαμιδίου που διασκορπίστηκαν στην βάση της εποξειδικής ρητίνης.

Η κατ'όγκον σύσταση της ίνας μετά την κατεργασία των πραγματικών τετράγωνων πλαίσιων, περίπου 1000mm μέγεθος και 3.86mm ονομαστικού πάχους, ήταν περίπου 55%. Από τα πλαίσια, ορθογώνια δοκίμια μήκους 300mm και 38mm πλάτους κόπηκαν (με διαμάντι), ρυθμιζόμενο από υπερηχητικό σαρωτή για πιθανή εσωτερική βλάβη, και υποβλήθηκαν σε κάμψη τριών σημείων. Τα δείγματα στηρίχθηκαν απλά σε δύο κυλινδρικές χαλύβδινες ράβδους διαμέτρου 5mm, και φορτίστηκαν από κύλινδρο, που είχε τις ίδιες διαστάσεις με τις στηρίξεις. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε μηχανή MTS RT50 με ελεγχόμενη μετατόπιση. Χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά μήκη L , μεταξύ 40mm και 250mm. Η εγκάρσια ταχύτητα μεταβαλλόταν στην περιοχή 0.5-2mm/min: με αύξηση της ταχύτητας αυξανόταν και το L ώστε να διατηρηθεί ο ρυθμός παραμόρφωσης περίπου σταθερός. Η φόρτιση ολοκληρώθηκε όταν τα δεδομένα ήταν αρκετά να εκτιμήσουν αξιόπιστα την κλίση της καμπύλης φόρτισης – μετατόπισης στην γραμμική ελαστική περιοχή η οποία καταγράφηκε. Η διαδικασία ολοκληρώθηκε στην περιοχή 100-400Nt, εξαρτώμενο από το επιλεγμένο L .

Για να καθοριστεί η τοπική ακαμψία, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές βύθισης (indentation). Τα δοκίμια απλά στηρίχθηκαν σε ένα χαλύβδινο πλαίσιο 30mm πάχους, και φορτίστηκαν από την ίδια κυλινδρική μύτη που χρησιμοποιήθηκε στις δοκιμές κάμψης, καταγράφοντας την καμπύλη φόρτισης-μετατόπισης μέχρις ότου εφαρμόστηκε σταθερή δύναμη 400Nt.

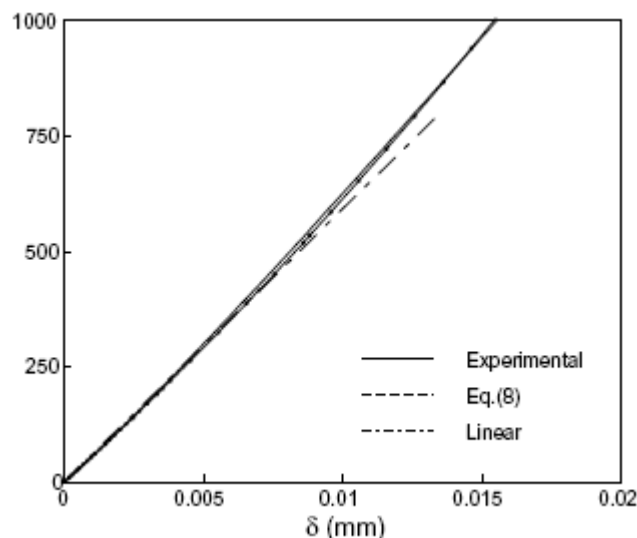
2.5.3 Πειραματικά αποτελέσματα

2.5.3.1 Δοκιμές βύθισης (indentation)

Μία τυπική καμπύλη δύναμης-μετατόπισης που καταγράφηκε κατά την διάρκεια δοκιμής βύθισης φαίνεται στο *σχήμα 2*. Σημειώθηκε μία μικρή καμπυλότητα, με αυξανόμενη κλίση όταν αυξάνεται η εξ επαφής δύναμη F .

Η διακεκομμένη γραμμή στο *σχήμα 2* είναι η γραφική απεικόνιση της εξίσωσης (8), στην οποία οι τιμές χρησιμοποιήθηκαν $E = 210GPa$, $\nu = 0.33$ για κυλινδρικό χάλυβα. Η θεωρητική καμπύλη σχεδόν συμπίπτει με την πειραματική, αποκαλύπτοντας την χρησιμότητα της ισοτροπικής επίλυσης όμοια για τα ορθοτροπικά CFRP. Από την εξίσωση (9), βρέθηκε ότι $E_i / (1 - \nu_i^2) = 8.79GPa$, κοντά στο μέτρο εγκάρσιας ελαστικότητας που αναμένεται για σύστημα T800H/3900-2.

Η τρίτη ευθεία γραμμική (linear) αξονική γραμμή στο *σχήμα 2* σχεδιάστηκε με παρεμβολή της πειραματικής καμπύλης στην περιοχή των $F = 0 - 400Nt$ (η μέγιστη φόρτιση εφαρμόστηκε στις δοκιμές κάμψης τριών σημείων). Παρατηρείται ότι υπάρχει συμφωνία μεταξύ γραμμικής προσέγγισης και πραγματικής για αυτήν την περιοχή φόρτισης. Στην πραγματικότητα, σε καμία από τις διαθέσιμες καμπύλες ο συντελεστής συσχέτισης δεν ήταν μικρότερος από 0.99. Επομένως, $K_a = 63.3KN/mm$, είναι η μέση τιμή που βρέθηκε από την κλίση της ευθείας γραμμής σχεδιασμένη για κάθε δοκιμή, και χρησιμοποιήθηκε στην εξίσωση (10) να διορθώσει τις προφανής ακαμψίες μετρούμενες στην κάμψη.



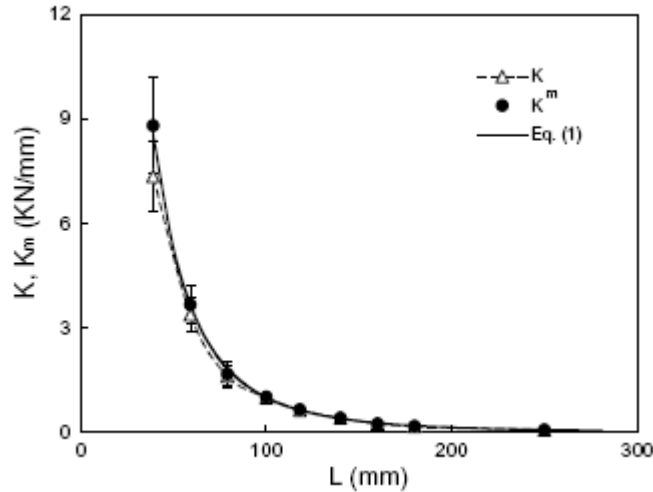
Σχήμα 2: Τυπικές καμπύλες δύναμης-μετατόπισης καταγεγραμμένες για δοκιμές βύθισης

2.5.3.2 Ακαμψίες λόγω κάμψης τριών σημείων - επίδραση διάτμησης.

Οι προφανής ακαμψίες K_m λόγω κάμψης τριών σημείων, εκτιμάται από την μετατόπιση της μηχανής δοκιμής, φαίνεται στο *σχήμα 3* (ανοικτά τρίγωνα) σε σχέση με το μήκος L της δοκού. Οι κάθετες μπάρες στο *σχήμα 3* αντιπροσωπεύουν την πρότυπη απόκλιση, ενώ η διακεκομμένη γραμμή σχεδιάστηκε με το χέρι, να

φανερώσουν την γενική πειραματική τάση. Οι γεμάτοι κύκλοι είναι οι τιμές K , δηλαδή οι σωστές ακαμψίες υπολογισμένες από την εξίσωση 10.

Προφανώς, τα φαινόμενα βύθισης επιδρούν περισσότερο στην ακρίβεια της μετρούμενης της δοκού ακαμψίας όσο μικρότερο είναι το μήκος L . Το σφάλμα έγινε στην αμέλεια της τοπικής επίδρασης, η οποία είναι περίπου 4% όταν $L = 80\text{mm}$, γίνεται μεγαλύτερο από 7% για $L = 60\text{mm}$, και περίπου 18% για $L = 40\text{mm}$.



Σχήμα 3 : Προφανής ακαμψία K_m , πραγματική ακαμψία K , σε τριών σημείων δοκιμή κάμψης σε σχέση με το μήκος της δοκού

Από το σχήμα 3, η επίδραση της παραμόρφωση διάτμησης σε κάμψη δοκού δεν είναι άμεσα κατανοητή. Ένας απλός τρόπος να φανεί η επίδραση της διάτμησης επιτυγχάνεται εισάγοντας το προφανές μέτρο ελαστικότητας, E_a , που ορίζεται ως εξής :

$$E_a = \frac{PL^3}{4wbt^3} \quad (11)$$

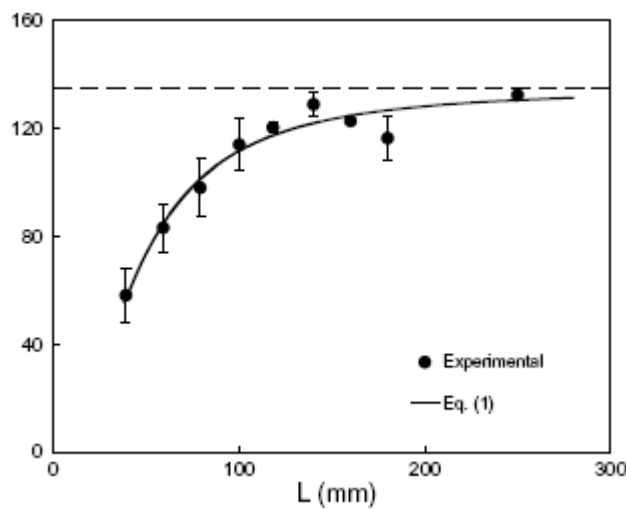
Συγκρίνοντας τις εξισώσεις (1) και (11), το E_a είναι το μέτρο ελαστικότητας από ένα ισοδύναμο υλικό, έχοντας άπειρο μέτρο διάτμησης, έχοντας την ίδια ακαμψία K με το υλικό που εξετάζεται.

Στο σχήμα 4, επανασχεδιάζεται η διορθωμένη ακαμψία των δεδομένων του σχήματος 3 για μέτρο ελαστικότητας E_a . Για χαμηλά L , το προφανές μέτρο ελαστικότητας E_a αυξάνεται σταθερά, δείχνοντας ότι η διάτμηση επιδρά σημαντικά. Αυξάνοντας τον λόγο λεπτότητας, η διάτμηση των συστατικών στοιχείων μειώνεται, και το προφανές μέτρο ελαστικότητας προσεγγίζει ασυμπτωτικά το πραγματικό μέτρο ελαστικότητας του σύνθετου E_{11} . Για την εύρεση του E_{11} και G_{13} , διευκολύνει να ξαναγραφτεί η εξίσωση (1) στην μορφή:

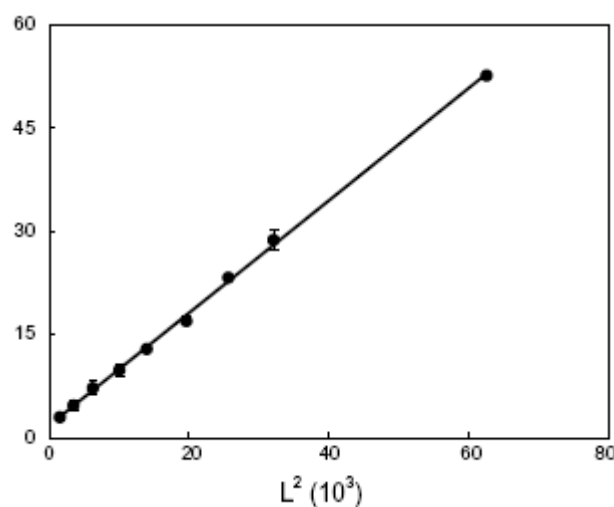
$$\frac{w}{PL} = \frac{L^2}{4E_{11}bt^3} + \frac{1}{4K_s G_{13}bt} \quad (12)$$

Επομένως, το διάγραμμα της ποσότητας w/pL συναρτήσει του L^2 είναι ευθεία γραμμή, όπου η κλίση και η τομή με τον y άξονα θα μας δώσει τους επιθυμητούς συντελεστές. Από το *σχήμα 5*, όπου τα πειραματικά αποτελέσματα επανασχεδιάζονται ακολουθώντας την εξίσωση (12), ακολουθείται με ικανοποιητική ακρίβεια γραμμική σχέση. Για $k_s = 0.833$ στην εξίσωση (12) η συνεχής γραμμή στο σχήμα δίνει $E_{11} = 135.1GPa$ $k_s = 0.833GPa$ (οριζόντια διακεκομμένη γραμμή στο σχήμα 4) και $G_{13} = 1.14GPa$. Αυτές οι τιμές χρησιμοποιήθηκαν στην εξίσωση (1) για τον σχεδιασμό των συνεχών γραμμών στα σχήματα 3 και 4.

Το διαμήκες μέτρο ελαστικότητας υπολογίστηκε πολύ κοντά με αυτό που αναμένεται για ένα τυπικό μονοδιευθυντικό CFRP ($E_{11} = 140GPa$). Αντιθέτως, η τιμή G_{13} είναι πολύ χαμηλότερη από ότι αναφέρεται στην βιβλιογραφία ($G_{13} = 3.4GPa$ ή $4.5GPa$) [9].



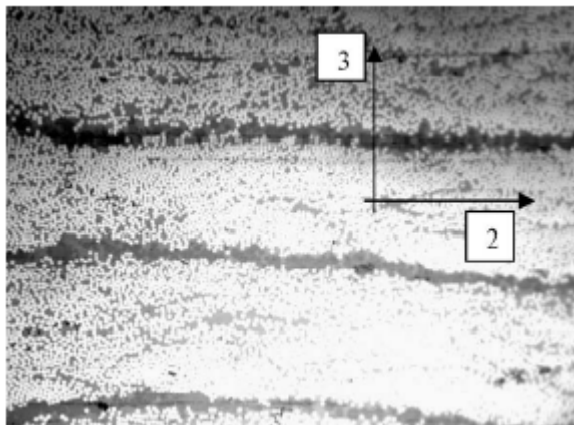
Σχήμα 4: Μέτρο ελαστικότητας E_a σε σχέση με το μήκος της δοκού L



Σχήμα 5: Διάγραμμα εκτίμησης ελαστικών σταθερών E_{11} , και G_{13} CFRP.

Πράγματι, φαίνεται από την μικροσκοπική κατασκευή του στρώματος (σχήμα 6) ότι το υλικό δεν μπορεί να θεωρηθεί εγκάρσια ισοτροπικό, εξ αιτίας του σχηματισμού της ενδιάμεσης στρώσης που εκτείνεται κατά μήκος των επιπέδων 1-2. Για να εξετάσουμε τη επίδραση της ενδιάμεσων στρώσεων στην αντοχή διάτμησης διαμέσου του πάχους των T800H/3900-2, το τελευταίο μοντελοποιήθηκε σαν μία ίνα – πλούσιου CFRP στρώματος με δύο εποξειδικά/πολυαμιδίου λεπτά φιλμ στην επιφάνειά τους. Μικρομηχανικά εργαλεία χρησιμοποιήθηκαν, θεωρώντας $G_{13} = 4.55GPa$ για το εσωτερικό CFRP στρώμα, και $E = 2.71GPa$, $\nu = 0.38$ για το φιλμ εποξειδικού/πολυαμιδίου, το οποίο θεωρήθηκε ισοτροπικό. Από αυτήν την ανάλυση, της οποίας λεπτομέρειες αναφέρονται στο παράρτημα Α, υπολογίσθηκε από το σύστημα κατόπιν μελέτης το $G_{13} = 2.9GPa$, περίπου 2.5 φορές της πειραματικής σταθερής τιμής.

Όπως αναμενόταν, υπάρχουν μερικοί λόγοι να είναι αβέβαιη η ακρίβεια της εξίσωσης (1) στην σωστή ερμηνεία των προηγούμενων πειραματικών δεδομένων. Ιδιαίτερα, όταν το μήκος είναι μικρό, οι συνθήκες περιορισμού για ένα επίπεδο, από ότι για μία δοκό, προσεγγίζονται προοδευτικά. Αυτό μπορεί να αποτελέσει πιθανά σφάλματα, όπου ο φορέας δεν μπορεί εύκολα να υπολογισθεί. Για να εξασφαλισθεί το καλύτερο δυνατό σε αυτό το θέμα, εξετάζεται FEA (ανάλυση πεπερασμένου στοιχείου). Τα αποτελέσματα συζητούνται παρακάτω.



Σχήμα 6: Μικροσκοπική κατασκευή στρώματος σε 2-3 επίπεδο

2.5.4 Ανάλυση πεπερασμένου στοιχείου

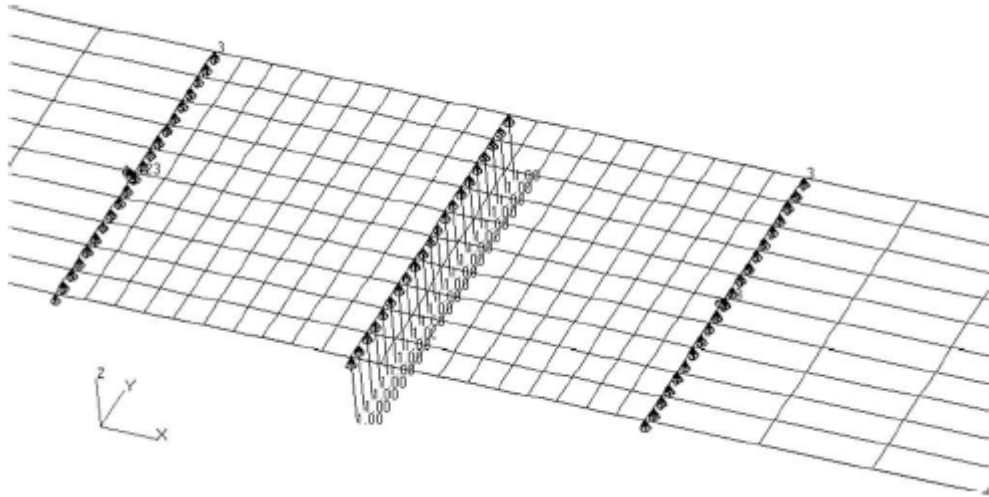
Η ανάλυση πεπερασμένου στοιχείου πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον MSC/NASTRAN. Αναπτύχθηκαν τρεις τύποι μοντέλων, χαρακτηριζόμενα σαν “2D”, “3D-2” και “3D-5”.

Στην ανάλυση “2D”, το τμήμα του δοκιμίου εντός της μήκος της δοκού μοντελοποιήθηκε από δέκα γραμμές από τετράγωνα επίπεδα στοιχεία COUAD4 ομαλά κατανεμημένα κατά μήκος του πάχους. Οι δύο προβολές δημιουργήθηκαν από προσέγγιση ορθογωνίων στοιχείων CQUAD4 (σχήμα 7).

Στο μοντέλο 3D-2 (3D-5), κάθε στοιχείο CQUAD4 της 2D ανάλυσης αντικαταστάθηκε από δύο δομημένα στοιχεία CHEXA8 τοποθετημένα επάνω στην κατά μήκος του πάχους διεύθυνση. Η ανάλυση 3D-5 οριοθετήθηκε στο μήκος του

πειραματικού προγράμματος, για το οποίο, εξ αιτίας της επίδρασης διάτμησης, η μεγαλύτερη διαφορά αντοχής που αναμενόταν συγκρίθηκε με τα απλά μοντέλα.

Για μεγάλα μήκη, το αποτέλεσμα των δυνάμεων στους κόμβους στις δύο πλευρές της γραμμής φόρτισης είναι θετικό (εφελκυσμός) φανερώνοντας ασυμφωνία με την πραγματική αλληλεπίδραση δοκιμίου-μύτης φόρτισης. Όταν αυτό το φαινόμενο, αποδίδει την αντικλαστική καμπυλότητα (anticlastic curvature), το πρόγραμμα «τρέχει» εκ νέου, βάζοντας ελεύθερους τους κόμβους σε εφελκυσμό (tension). Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου επιτευχθεί μια βάσιμη επίλυση.



Σχήμα 7: 2D μοντέλο πεπερασμένου στοιχείου

Στον πίνακα 1, φαίνονται οι ελαστικές σταθερές που χρησιμοποιήθηκαν στην μοντελοποίηση πεπερασμένου στοιχείου. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι, ενώ πολλές από τις τιμές είναι τυπικές των CFRPs, το E_{11} και G_{13} είναι αυτά που προέκυψαν από τα πειραματικά αποτελέσματα του σχήματος 5.

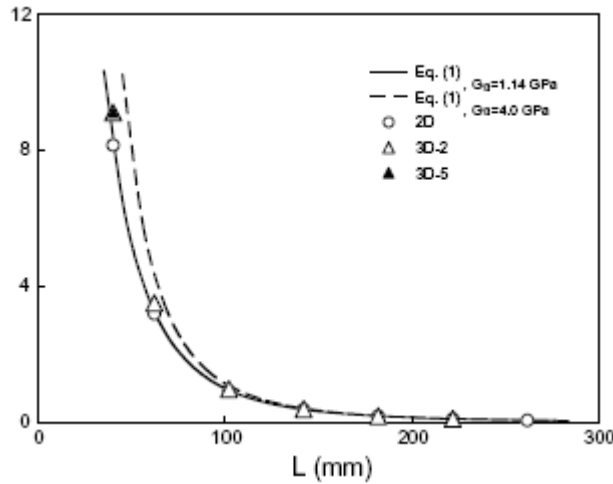
Οι ακαμψίες στην κάμψη υπολογίστηκαν από αριθμητικές αναλύσεις και συγκεντρώθηκαν στο σχήμα 8, και τα αντίστοιχα προφανή μέτρα ελαστικότητας φαίνονται στο σχήμα 9. Οι συνεχείς γραμμές στα σχήματα είναι οι προβλεπόμενες παραγόμενες από την εξίσωση (1).

Σε πολύ μικρό span ($L = 40mm$), βρέθηκε μία διαφορά περίπου 10% ανάμεσα στις τιμές K υπολογιζόμενες με μοντέλα 2D και 3D, ασχέτως του γεγονότος εξέτασης με ανάλυση 3D-2 ή 3D-5. Η συμφωνία με την εξίσωση (1) είναι σημαντική, δικαιολογώντας την δυνατότητα εφαρμογής της θεωρίας δοκού του Timoshenko στην περίπτωση που εξετάζεται.

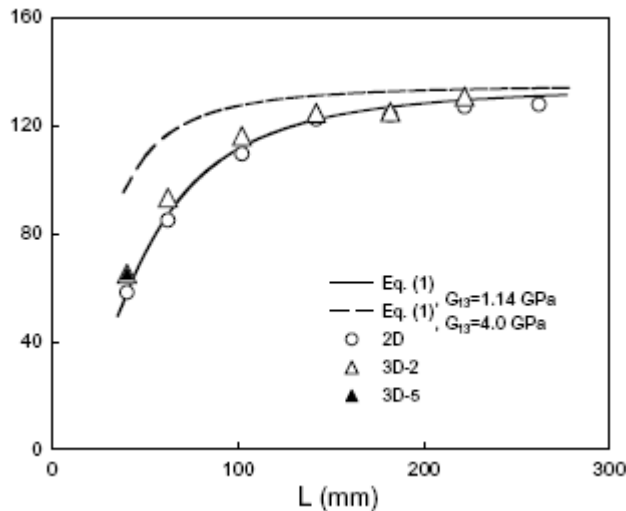
Οι διακεκομμένες γραμμές στα σχήματα (8) και (9) σχηματίστηκαν από την εξίσωση (1), στην οποία χρησιμοποιήθηκε $G_{13} = 4.0GPa$. Θεωρώντας αυτό το μέτρο διάτμησης αντί για $G_{13} = 1.14GPa$, το αποτέλεσμα του φαινόμενου μέτρου ελαστικότητας E_a είναι περίπου 70% υψηλότερο όταν $L = 40mm$ (σχήμα 9).

Επομένως, οι χρησιμοποιούμενες συνθήκες δοκιμών είναι κατάλληλες να αποδώσουν την επίδραση του μέτρου διάτμησης στην αντίδραση της δοκού.

Επιπρόσθετα FEA πραγματοποιήθηκαν να εκτιμήσουν την εξίσωση (1) για $G_{13} = 4.0\text{GPa}$. Τα αποτελέσματα, τα οποία δεν συμπεριλαμβάνονται στα σχήματα 8 και 9 για να αποφευχθούν πλήθη δεδομένων, επιβεβαιώνουν πλήρως τα παραπάνω συμπεράσματα.



Σχήμα 8: Ακαμψία λόγω κάμψης τριών σημείων, $K(L)$, σύγκριση μεταξύ πεπερασμένου στοιχείου και εξίσωσης (1)

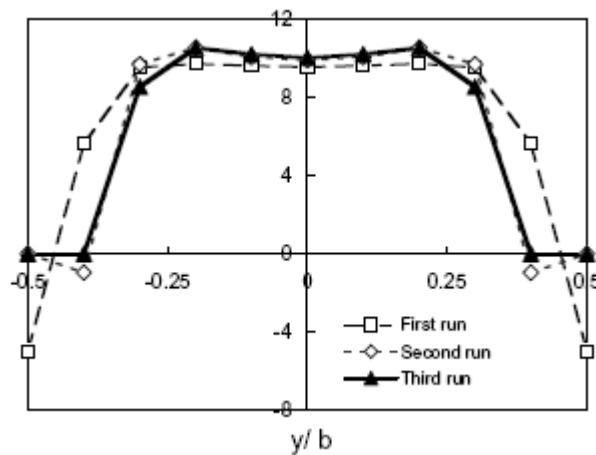


Σχήμα 9: Φαινόμενο μέτρο E_a , έναντι μήκους L , σύγκριση μεταξύ πεπερασμένου στοιχείου και εξίσωσης (1)

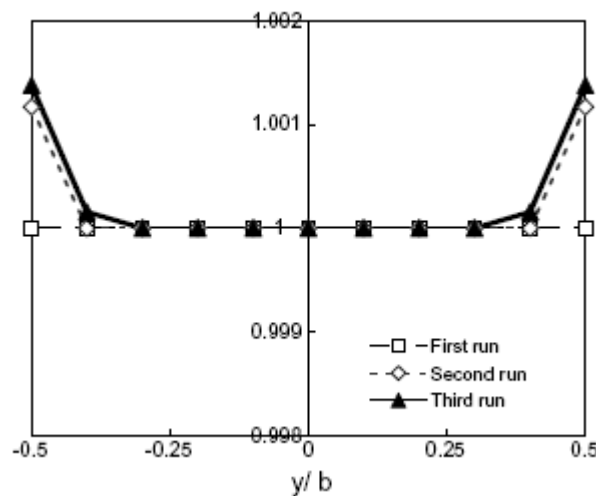
Στο *σχήμα 10* παρουσιάζονται οι δυνάμεις κόμβων κατά μήκος της μύτης-δοκιμίου (συνεχής γραμμή), όπως αποδίδεται από FEA 2D. Στο σχήμα το οποίο αναφέρεται σε τμήμα $L = 262\text{mm}$, μία θετική ένδειξη είναι συμβατικά συνδυασμένη με δυνάμεις συμπίεσης. Μετά τον πρώτο κύκλο, ο υπολογιστικός κώδικας του computer προβλέπει δυνάμεις εφελκυσμού να δρουν στα δύο ακραία σημεία των πλευρών του δοκιμίου. Τοποθετώντας ελεύθερους αυτούς τους κόμβους, και ξανά-επαναλαμβάνοντας το NASTRAN, πραγματοποιήθηκε μία νέα επίλυση, ακόμα μη ικανή να καλύψει τις οριακές συνθήκες. Η τελική επίλυση (συνεχής γραμμή στο *σχήμα 10*) πραγματοποιήθηκε στο τρίτο «τρέξιμο». Η συμβατότητα με τις πραγματικές

δεσμευτικές συνθήκες μύτης-δοκού με τις περιοχές μετατόπισης φαίνονται στο *σχήμα 11*.

Από το *σχήμα 10*, προκύπτει ότι η κατανομή της πίεσης κατά μήκος της γραμμής επαφής κυλίνδρου-υλικού είναι περίπου ομοιόμορφη, αναπαράγοντας εξαιρετική ακρίβεια των συνθηκών φόρτισης που λαμβάνουν χώρα κατά την διάρκεια δοκιμών τοπικής ακαμψίας. Ωστόσο, το μήκος της γραμμής επαφής είναι κοντότερο από το πάχος του δοκιμίου, δείχνοντας ότι ένα σφάλμα αναπαράγεται στην εξίσωση (8) όπου το l θεωρήθηκε με w .



Σχήμα 10: Κατανομή κομβικών δυνάμεων F_z κατά μήκος αδιάστατου μήκους y/d , $L = 262 \text{ mm}$

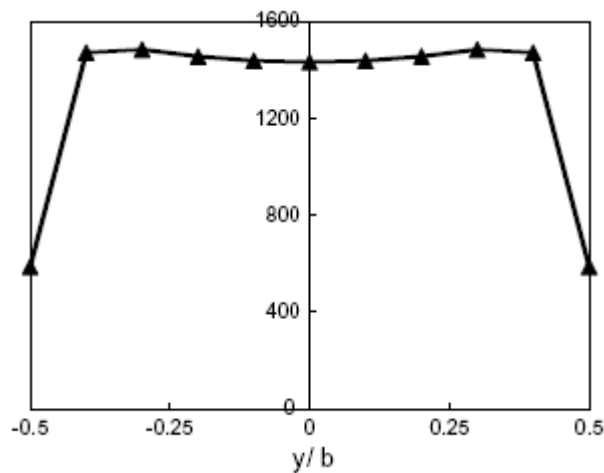


Σχήμα 11: Κατανομή κομβικών μετατοπίσεων W_z κατά μήκος αδιάστατου μήκους y/d , $L = 262 \text{ mm}$

Τα αριθμητικά αποτελέσματα δείχνουν ότι η επίδραση της αντικλαστικής καμπυλότητας γίνεται μικρότερη (εξαφανίζεται) όταν το μήκος της δοκού αυξάνεται. Αυτό είναι αναμενόμενο, διότι σε χαμηλά μήκη ένα μικρότερο τμήμα της συνολικής παραμόρφωσης αποδίδεται στην καμπτική ροπή, με την οποία η αντικλαστική συμπεριφορά είναι σχετική. Στο *σχήμα 12* σχεδιάζεται η διανομή των δυνάμεων κόμβων για $L = 40 \text{ mm}$. Σε αυτήν την περίπτωση, όλα τα πλάτη δοκιμίων περιείχαν την

επαφή με την ακμή φόρτισης, και η κατανομή της δύναμης είναι ουσιαστικά ομοιόμορφη κατά μήκος περίπου όλης της γραμμής επαφής.

Τελικά, πρέπει να σημειωθεί ότι, χρησιμοποιώντας την θεωρία δοκού του Timoshenko's, η άμεσα μετρούμενη ποσότητα δεν είναι η G_{13} αλλά το $k_s G_{13}$. Σε όλη την εργασία, θεωρήθηκε ότι ο συντελεστής διόρθωσης διάτμησης είναι $k_s = 0.833$. Κατά πόσο αυτή η υπόθεση είναι βάσιμη για μία κατασκευή με ενδιάμεσες στρώσεις είναι ένας λόγος για επιπλέον έρευνα, και θα μπορούσε να εξηγήσει γιατί το μετρούμενο G_{13} ήταν πολύ μικρότερο από το αναμενόμενο. Απαντώντας αυτήν την ερώτηση είναι ίσως ακόμα πιο σημαντικό για τα υλικά συστήματα να υιοθετήσουν χαμηλά-θερμοπλαστικά μέτρα ελαστικότητας, από ότι σχετικά σκληρά, υβριδικών θερμοπλαστικών/θερμοσκληρυνόμενων μήτρων σαν ενδιάμεσα φύλλα. Πράγματι, προβλέποντας την επίδραση διάτμησης είναι περισσότερο πολύπλοκο όταν οι ιδιότητες υλικού διαφέρουν σημαντικά κατά μήκος του πάχους.



Σχήμα 12: Κατανομή κομβικών δυνάμεων F_z κατά μήκος αδιάστατου μήκους y/d , $L = 40 \text{ mm}$

2.5.5 Αποτελέσματα

Σε αυτήν την ενότητα, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές κάμψης τριών σημείων σε μονοδιευθυντικά T800H/3900-2 στρώματα, με ποικίλους ρυθμούς λεπτότητας για προσδιορισμό της επίδρασης της παραμόρφωσης διάτμησης στην συνολική μετατόπιση. Οι τοπικές ακαμψίες υπολογίσθηκαν πειραματικά, και οι μετρούμενες ακαμψίες διορθώθηκαν για να αιτιολογήσουν την βύθιση (indentation) στα σημεία της εφαρμογής φόρτισης. Υπολογίσθηκαν από την θεωρία δοκού του Timoshenko's, το μέτρο ελαστικότητας E_{11} κατά μήκος της διεύθυνσης της ίνας και το μέτρο διάτμησης διαμέσου του πάχους G_{13} . Ενώ η τιμή του μέτρου Ελαστικότητας συμφωνούσε με το αναμενόμενο του υπό εξέταση υλικού, το μέτρο διάτμησης ήταν πολύ μικρότερο από το προβλεπόμενο.

Για να εκτιμηθεί η θεωρία του Timoshenko στην περίπτωση που εξετάζεται, πραγματοποιήθηκε μια ανάλυση πεπερασμένου στοιχείου. Από την αριθμητική μέθοδο, οι συντελεστές διορθώνουν πιθανές ανακρίβειες στην εκτίμηση του μέτρου διάτμησης μέσω κλειστών μεθόδων, τέτοιες όπως η αντικλαστική καμπυλότητα και οι τοπικές επιδράσεις στην ευθεία επαφή μεταξύ του δοκιμίου και της ακμής φόρτισης,

όπου εξετάζονται. Προφανώς, καμία από αυτές τις περιπτώσεις δεν ήταν ικανή να εξηγήσει το χαμηλό μέτρο διάτμησης που βρέθηκε.

Από την μικροσκοπική κατασκευή των T800H/3900-2, μικρομηχανικές αιτίες προτείνουν ένα μέτρο διάτμησης μέσω του πάχους χαμηλότερο από αυτό του αντίστοιχου κύριου (xy) επιπέδου, εξ αιτίας της παρουσίας της ενδιάμεσης εποξειδικού/πολυαμιδίου. Ωστόσο, το μέτρο προσδιορισμού στο ενδιάμεσο υλικό με σκοπό να συνδυασθεί η μετρούμενη τιμή G_{13} εμφανίζεται να είναι άτοπα χαμηλή.

Ένα άλλο αντικείμενο πρόσθετης έρευνας είναι η αληθινή τιμή στην υπόθεση του συντελεστή διόρθωσης διάτμησης, ο οποίος θα μπορούσε να επιδράσει σημαντικά στην ακρίβεια του εγκάρσιου μέτρου διάτμησης που συμπεραίνεται από τις πειραματικές δοκιμές, ειδικά όταν υπεισέρχονται χαμηλά μέτρα θερμοπλαστικών ενδιάμεσων στρώσεων.

2.6 Εσωτερικές τάσεις σε ινοπλισμένα πολυμερή (FRP) – ενισχυμένων δοκών οπλισμένου σκυροδέματος (Reinforced Concrete)

Η κατασκευαστική σχεδίαση δοκών ινοπλισμένου σκυροδέματος (RC) με στρώματα ινοπλισμένου πολυμερούς (FRP) παρουσιάζει μία νέα τεχνολογία στο πεδίο του πολιτικού μηχανικού. Πραγματικά, μέχρι σήμερα, η περισσότερο κοινή μέθοδος στην δομική ενίσχυση είναι η τεχνική Hermitian που χρησιμοποιεί την εφαρμογή χαλύβδινων ελασμάτων.

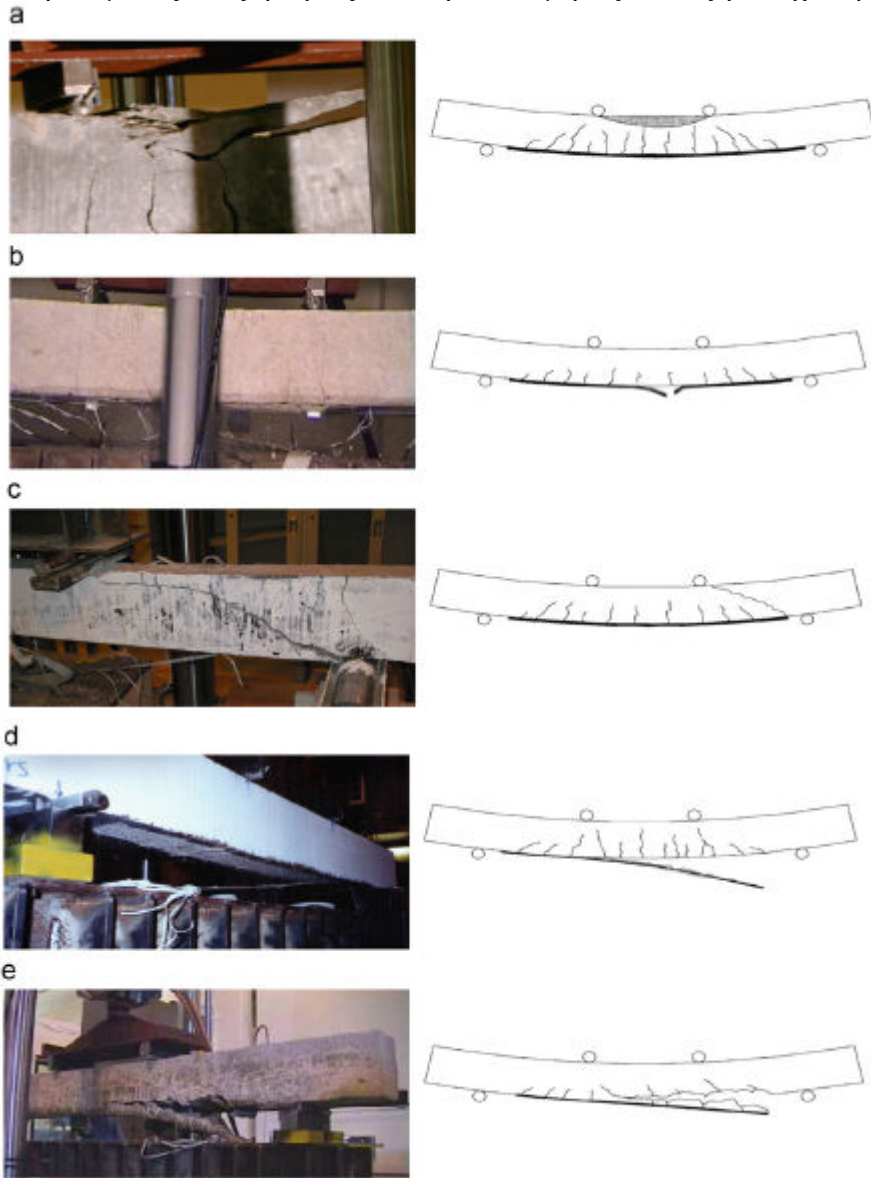
Η νέα μέθοδος έχει πολλά πλεονεκτήματα:

- υψηλή αντοχή σε λόγο βάρους
- ελαφρότητα (ελάχιστο προστιθέμενο βάρος)
- αντίσταση διάβρωσης

Η μεταφορά των τάσεων από το σκυρόδεμα στο FRP είναι πρωταρχικής σημασίας στις ενισχυμένες με FRP κατασκευές σκυροδέματος. Αυτό διότι οι τάσεις προκαλούν ανεπιθύμητες πρώιμες και ψαθυρές αστοχίες. Στην ενίσχυση των οπλισμένων δοκών σκυροδέματος με λωρίδες FRP έχουν παρατηρηθεί διαφορετικά ήδη αστοχίας. Μιλώντας γενικά υπάρχουν έξι ευδιάκριτα είδη αστοχίας (βλέπε *σχήμα 1*), που περιγράφονται ως εξής:

- I. *αστοχία σύνθλιψης σκυροδέματος (compression failure) πριν την διαρροή του χάλυβα (σχ.1a)*. Θραύση σκυροδέματος λόγω σύνθλιψης (δηλαδή η παραμόρφωση στο σκυρόδεμα υπερβαίνει την ανώτατη τιμή των 0.0035) πριν διαρρεύσει ο οπλισμός χάλυβα και σπάσουν οι λωρίδες FRP.
- II. *Αστοχία σύνθλιψης μετά την διαρροή του χάλυβα*. Ο χάλυβας ενίσχυσης διαρρέει εξ αιτίας του καμπτικού εφελκυσμού (flexure tensile). Αυτό συνοδεύεται από θρυμματισμό του σκυροδέματος στην ζώνη συμπίεσης, πριν ο εφελκυσμός κόψει τις λωρίδες FRP.
- III. *Κόψιμο (rupture) λωρίδων FRP (σχ. 1b)*. Οι λωρίδες FRP κόβονται στην μέγιστη παραμόρφωση, ακολουθώντας την διαρροή του χάλυβα ενίσχυσης

- IV. *Αστοχία διάτμησης (Shear failure σχ.1c)*. Τα διατμητικά ραγίσματα εκτείνονται από την περιοχή κοντά στην στήριξη έως το σημείο φόρτισης, όταν ξεπερνιέται η ικανότητα διάτμησης της δοκού.
- V. *Αποκόλληση (delamination) λωρίδων FRP σχ.1.d*. Αποκόλληση λωρίδων CFRP συμβαίνει και μάλιστα καταστροφική με ένα ευμετάβλητο τρόπο, με ένα λεπτό στρώμα σκυροδέματος συνδεδεμένο στα αποκολλημένα ελάσματα FRP. Το ράγισμα ξεκινά από το τέλος της λωρίδας FRP ή στο κάτω μέρος ενός μίας ρωγμής στο στοιχείο σκυροδέματος.
- VI. *Αποχωρισμός σκυροδέματος σχ.1e*. Μετά το αρχικό ράγισμα στο τέλος της λωρίδας CFRP, η λωρίδα CFRP είναι προοδευτικά αποσπασμένη με μάζα σκυροδέματος ανεξαρτήτως από την κατά μήκος διάταξη του χάλυβα.



Σχήμα 1: Είδη αστοχίας ενισχυμένης δοκού με FRP

Μέχρι σήμερα αρκετές μελέτες έχουν διεξαχθεί, για την πρόβλεψη της εσωτερικής τάσης, ωστόσο, δεν μελετούσαν ταυτόχρονα τις επιδράσεις αξονικών, καμπτικών και

διατμητικών παραμορφώσεων της δοκού και συνδεδεμένου ελάσματος, οι οποίες μπορούν να οδηγούν σε αποτελέσματα όχι σημαντικής ακρίβειας σε κάποιες περιπτώσεις. Ωστόσο, μπορεί να υποθεθεί ότι οι διατμητικές τάσεις, οι οποίες αναπτύσσονται στην συγκολλητική ουσία, είναι συνεχόμενες δια μέσου της συγκολλητικής ουσίας – προσκολλημένης επιφάνειας. Επιπροσθέτως, οι συνθήκες ισορροπίας προϋποθέτουν τις διατμητικές τάσεις να είναι μηδέν στην ελεύθερη επιφάνεια. Η σημασία της ένταξης της διατμητικής-καθυστερημένης επίδρασης των προσκολλημένων φαίνεται από πολλούς μελετητές όπως οι Adams και Wake.... Ο Tounsi επέκτεινε αυτήν την θεωρία στην μελέτη δοκών σκυροδέματος ενισχυμένων με επίπεδα FRP . Η βασική υπόθεση σε αυτές τις δύο μελέτες είναι μια γραμμική κατανομή των διατμητικών τάσεων δια μέσου του πάχους των προσκολλημένων. Ωστόσο, είναι γνωστό ότι, στην θεωρία δοκού αυτή η κατανομή είναι παραβολική δια μέσω του βάθους της δοκού. Ο αντικειμενικός στόχος της παρούσας διερεύνησης είναι να βελτιώσει τη μέθοδο που αναπτύχθηκε από τον Tounsi θεωρώντας μία παραβολική διατμητική τάση διαμέσου του βάθους των FRP ελασμάτων και των δοκών RC. Εν όψει αυτού, προκύπτει το γεγονός ότι μπορεί να αναπτυχθεί μία μεθοδολογία επίλυσης με ένα καλλίτερο τρόπο από ότι η ακρίβεια της επίλυσης των Tounsi's μπορεί να εκτιμήσει.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζεται μία βελτίωση της επίλυσης των Tounsi's επιτυγχάνοντας μία νέα κλειστή μορφής επίλυση, η οποία πρώτον, υπολογίζει την επίδραση παραβολικής διατμητικής παραμόρφωσης της σύνδεσης και στα δύο, στην δοκό και στο συνδεδεμένο έλασμα, και δεύτερον συγκρίνει ποσοτικά τις υπάρχουσες επιλύσεις σε σχέση με την νέα μέθοδο που αναπτύσσεται σε αυτό το φυλλάδιο χρησιμοποιώντας αριθμητικές απεικονίσεις.

2.6.1 Μέθοδος επίλυσης

2.6.1.1 Βασικές υποθέσεις

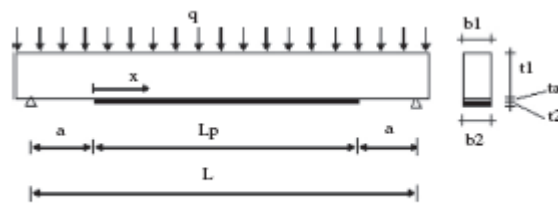
Οι ακόλουθες υποθέσεις χρησιμοποιήθηκαν στην αναλυτική μελέτη :

1. Όλα τα υλικά θεωρούνται γραμμικώς ελαστικά
2. Η δοκός στηρίζεται απλά, δηλαδή τα επίπεδα τμήματα παραμένουν επίπεδα στην κάμψη
3. Καμία ολίσθηση δεν επιτρέπεται στην διεπιφάνεια της σύνδεσης (δηλαδή, υπάρχει μία τέλεια σύνδεση του χάλυβα ή της διεπιφάνειας του FRP ελάσματος)
4. Παραμορφώσεις κάμψεις της συγκολλητικής ουσίας είναι αμελητέες
5. Οι τάσεις στο στρώμα της συγκολλητικής ουσίας δεν μεταβάλλονται με το πάχος.
6. Η ανάλυση διατμητικών τάσεων υποθέτει ότι οι καμπυλότητες στην δοκό και στο έλασμα είναι ίσες (δεδομένου ότι οι εξισώσεις διατμητικής τάσης και επιφανειακής τάσης (peel stress) είναι ανεξάρτητες). Ωστόσο, αυτή η υπόθεση δεν ισχύει στην επίλυση επιφανειακής τάσης. Όταν η δοκός φορτίζεται, συμβαίνει κάθετος διαχωρισμός μεταξύ δοκού RC και ελάσματος FRP. Ο διαχωρισμός δημιουργεί μία εσωτερική ορθή τάση στο επίπεδο συγκόλλησης. Σημειώνεται ότι αυτή η υπόθεση χρησιμοποιήθηκε σε πολλές εργασίες (Tounsi κ.α) ...

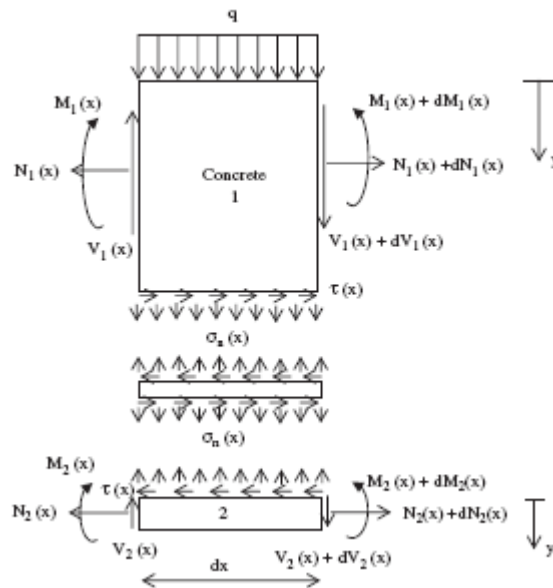
7. Θεωρείται μία παραβολική διανομή διατμητικής τάσης μέσω του βάθους και των δύο, της δοκού σκυροδέματος και του συνδεδεμένου ελάσματος.
8. Οι ιδιότητες της διατομής της RC δοκού στηριζόμενες στην χωρίς ρωγμές διατομή, δεν συμπεριλαμβάνουν την συμβατική ενίσχυση χάλυβα. Είναι γνωστό ότι για διατομή χωρίς ρωγμές, το σκυρόδεμα διατηρεί την τάνυση. Ωστόσο, για διατομή με ρωγμές, το σκυρόδεμα δεν μπορεί να διατηρήσει την τάνυση, αυτό διότι η επίδραση του χάλυβα ενίσχυσης στο σκυρόδεμα δεν είναι αμελητέα.

2.6.1.2 Διανομή Διατμητικών τάσεων κατά μήκος της διεπιφάνειας FRP-σκυροδέματος

Μία στοιχειώδης διατομή dx , μπορεί να σχηματισθεί από το σύστημα FRP-ενισχυμένης RC δοκού (σχήμα 2) όπως φαίνεται στο σχήμα 3.



Σχήμα 2: Απλή στήριξη δοκού ενισχυμένης με έλασμα FRP.



Σχήμα 3: Δυνάμεις σε απειροστό στοιχείο ενισχυμένης δοκού

Οι παραμορφώσεις στην δοκό RC κοντά στη διεπιφάνεια του μέσου συγκόλλησης και της ενίσχυσης εξωτερικού FRP μπορούν να εκφραστούν αντίστοιχα ως εξής:

$$\varepsilon_1(x) = \frac{du_1(x)}{dx} = \varepsilon_1^M(x) + \varepsilon_1^N(x) \quad (1)$$

$$\varepsilon_2(x) = \frac{du_2(x)}{dx} = \varepsilon_2^M(x) + \varepsilon_2^N(x) \quad (2)$$

όπου $u_1(x)$ και $u_2(x)$ είναι οι διαμήκεις μετατοπίσεις στην βάση του προσκολλημένου 1 και στην κορυφή του προσκολλημένου 2, αντίστοιχα. $\varepsilon_1^M(x)$ και $\varepsilon_2^M(x)$ είναι οι μετατοπίσεις προκαλούμενες από την ροπή κάμψης στα προσκολλημένα 1 και 2 αντίστοιχα, και γράφονται ως εξής :

$$\varepsilon_1^M(x) = \frac{y_1}{E_1 l_1} M_1(x) \quad \text{και} \quad \varepsilon_2^M(x) = \frac{-y_2}{E_2 l_2} M_2(x) \quad (3)$$

όπου E είναι το μέτρο ελαστικότητας και I η ροπή αδράνειας της διατομής. Οι δείκτες 1 και 2 υποδηλώνουν τις επιφάνειες 1 και 2 αντίστοιχα. $M(x)$ είναι η ροπή κάμψης ενώ y_1, y_2 είναι οι αποστάσεις από τον πυθμένα του προσκολλημένου 1 και την κορυφή του προσκολλημένου 2 του αντίστοιχου τους κέντρου. $\varepsilon_1^N(x)$ και $\varepsilon_2^N(x)$ είναι οι άγνωστες διαμήκεις παραμορφώσεις της RC δοκού και της ενίσχυσης FRP, αντίστοιχα, στην διεπιφάνεια συγκόλλησης και αυτές οφείλονται στις διαμήκεις δυνάμεις.

Αυτές οι παραμορφώσεις δίδονται ως εξής:

$$\varepsilon_1^N(x) = \frac{du_1^N(x)}{dx}, \quad \varepsilon_2^N(x) = \frac{du_2^N(x)}{dx} \quad (4)$$

όπου u_1^N, u_2^N αντιπροσωπεύουν την διαμήκη δύναμη – που προκαλεί μετατόπιση του μέσου συγκόλλησης στην διεπιφάνεια μεταξύ του ανώτερου (κατώτερου) προσκολλημένου και του μέσου συγκόλλησης.

Για τον προσδιορισμό των άγνωστων διαμηκών παραμορφώσεων $\varepsilon_1^N(x), \varepsilon_2^N(x)$, ενσωματώνονται σε αυτήν την ανάλυση οι παραμορφώσεις διάτμησης των προσκολλημένων. Είναι εύλογο να θεωρηθεί ότι οι τάσεις διάτμησης, οι οποίες αναπτύσσονται στην συγκολλητική ουσία, είναι συνεχόμενες εγκάρσια της συγκολλητικής ουσίας-προσκολλημένης επιφάνειας. Επιπροσθέτως, η ισορροπία προϋποθέτει την τάση διάτμησης να είναι μηδέν στην ελεύθερη επιφάνεια. Μία κυβική διακύμανση των διαμήκης μετατοπίσεων $U_1^N(x), U_2^N(x)$ στις δύο προσκολλήσεις δίδεται ως εξής:

$$U_1^N(x, y) = A_1(x)y^3 + B_1(x)y + C_1(x) \quad (5)$$

$$U_2^N(x, y') = A_2(x)y'^3 + B_2(x)y' + C_2(x) \quad (6)$$

όπου $y(y')$ είναι ένα τοπικό σύστημα συντεταγμένων με αρχή στην κορυφή επιφάνειας του ανώτερου (κατώτερου) προσκολλημένου (σχήμα 3).

Οι τάσεις διάτμησης στις δύο προσκολλήσεις δίδονται ως εξής:

$$\sigma_{xy(1)} = G_1 \gamma_{xy(1)} \quad (7)$$

$$\sigma_{xy'(2)} = G_1 \gamma_{xy'(2)} \quad (8)$$

$$\text{με } \gamma_{xy(i)} = \frac{\theta U_i^N}{\theta y} + \frac{\theta U_i^N}{\theta y}, i = 1, 2 \quad (9)$$

G_1, G_2 είναι τα εγκάρσια μέτρα διάτμησης των προσκολλημένων 1 και 2 αντίστοιχα. Αμελώντας τις διαφορές της εγκάρσιας μετατόπισης W_i^N (που προέρχονται από τις διαμήκεις δυνάμεις) κατά μήκους του άξονα x,

$$\gamma_{xy(i)} \approx \frac{\theta U_i^N}{\theta y} \quad (10)$$

Οι διατμητικές τάσεις δίδονται ως εξής:

$$\sigma_{xy(1)} = G_1 (3A_1(x)y^2 + B_1(x)) \quad (11)$$

$$\sigma_{xy(2)} = G_2 (3A_2(x)y^2 + B_2(x)) \quad (12)$$

Οι διατμητικές τάσεις πρέπει να ικανοποιούν τις ακόλουθες συνθήκες:

$$\sigma_{xy(1)}(x, t_1) = \sigma_{xy(2)}(x, 0) = \tau(x) = \tau_a \quad (13)$$

$$\sigma_{xy(1)}(x, 0) = 0 \quad \sigma_{xy(2)}(x, t_2) = 0 \quad (14)$$

όπου t_1, t_2 είναι το πάχος των επιφανειών 1 και 2 αντίστοιχα.

Η συνθήκη 13 ακολουθείται από την συνέχεια και την υπόθεση ομοιόμορφων διατμητικών τάσεων ($\tau(x) = \tau(\alpha)$) διαμέσου του πάχους της συγκολλητικής ουσίας. Η συνθήκη (14) δηλώνει ότι δεν υπάρχει διατμητική τάση στην επάνω επιφάνεια του προσκολλημένου 1 (δηλαδή, για $y=0$) και στην κάτω επιφάνεια του προσκολλημένου 2 (δηλαδή, για $y=0$). Έτσι θα είναι:

$$\sigma_{xy(1)} = \frac{\tau_a}{t_1^2} y^2 \quad (15)$$

$$\sigma_{xy(2)} = \left(1 - \frac{y^2}{t_2^2} \tau_a \right) \quad 2 \quad (16)$$

Στην συνέχεια, με μία γραμμική σχέση συστατικού υλικού, η διατμητική παραμόρφωση προσκόλλησης γ_1 για το προσκολλημένο 1, και γ_2 για το προσκολλημένο 2 γράφεται ως εξής:

$$\gamma_{xy(1)} = \gamma_1 = \frac{\tau_a}{G_1 t_1^2} y^2 \quad (17)$$

$$\gamma_{xy'(2)} = \gamma_2 = \frac{\tau_a}{G_2} \left(1 - \frac{y'^2}{t_2^2} \right) \quad (18)$$

Οι εξισώσεις διαμήκης μετατοπίσεων U_1^N για το άνω προσκολλημένο και U_2^N για το κάτω προσκολλημένο, εξ αιτίας των διαμήκης δυνάμεων, δίδονται ως εξής:

$$U_1^N(y) = U_1^N(0) + \int_0^y \gamma_1(y) dy = U_1^N(0) + \frac{\tau_a}{3G_1 t_1^2} y^3 \quad (19)$$

$$U_2^N(y') = u_2^N + \int_0^{y'} \gamma_2(y') dy' = u_2^N + \frac{\tau_a}{G_2} \left(y' - \frac{y'^3}{3t_2^2} \right) \quad (20)$$

όπου $U_1^N(0)$ αντιπροσωπεύει την μετατόπιση του ανώτατου σημείου του πάνω προσκολλημένου (εξ αιτίας των διαμήκης δυνάμεων) και u_2^N η διαμήκης δύναμη – που επιφέρει η συγκολλητική ουσία στην διεπιφάνεια μεταξύ της συγκολλητικής ουσίας και του κάτω προσκολλημένου.

Σημειώνεται ότι εξ αιτίας της πολύ καλής σύνδεσης των σημείων, οι μετατοπίσεις είναι συνεχής στις διεπιφάνειες μεταξύ της συγκολλητικής ουσίας και των προσκολλημένων. Σαν αποτέλεσμα, το u_2^N θα έπρεπε να είναι ισόποσο με την μετατόπιση του κάτω προσκολλημένου στην διεπιφάνεια, και το u_1^N (η μετατόπιση της συγκολλητικής ουσίας στην διεπιφάνεια μεταξύ συγκολλητικής ουσίας και άνω προσκολλημένου) θα πρέπει να είναι ίδιο με την μετατόπιση του άνω προσκολλημένου στην διεπιφάνεια. Με βάση την εξίσωση (19), το u_1^N μπορεί να εκφρασθεί ως εξής:

$$u_1^N = U_1^N(y = t_1) = U_1^N(0) + \frac{\tau_a t_1}{3G_1} \quad (21)$$

Εξισώνοντας τις εξισώσεις (21) και (19) προκύπτει:

$$U_1^N(y) = u_1^N + \frac{\tau_a}{3G_1 t_1^2} y^3 - \frac{\tau_a t_1}{3G_1} \quad (22)$$

Οι συνιστάμενες διαμήκης δυνάμεις N_1 και N_2 , για το ανώτερο και το κατώτερο προσκολλημένο θα είναι αντίστοιχα:

$$N_1 = b_1 \int_0^{t_1} \sigma_1^N(y) dy \quad (23)$$

$$N_2 = b_2 \int_0^{t_2} \sigma_2^N(y') dy' \quad (24)$$

όπου σ_1^N και σ_2^N είναι οι διαμήκης ορθές τάσεις για το ανώτερο και κατώτερο προσκολλημένο αντίστοιχα. Αντικαθιστώντας αυτές τις τάσεις στις εξισώσεις των μετατοπίσεων και υποκαθιστώντας τις εξισώσεις (20) και (22) στις μετατοπίσεις, οι εξισώσεις (23) και (24) μπορούν να γραφούν :

$$N_1 = E_1 b_1 \int_0^{t_1} \frac{dU_1^N}{dx} dy' = E_1 A_1 \left(\frac{du_1^N}{dx} - \frac{t_1}{4G_1} \frac{d\tau_\alpha}{dx} \right) \quad (25)$$

και

$$N_2 = E_2 b_2 \int_0^{t_2} \frac{dU_2^N}{dx} dy' = E_2 A_2 \left(\frac{du_2^N}{dx} + \frac{5t_2}{12G_2} \frac{d\tau_\alpha}{dx} \right) \quad (26)$$

Επομένως, οι διαμήκης παραμορφώσεις που προκαλούνται από τις διαμήκης δυνάμεις (εξίσωση (4)) μπορούν να εκφραστούν ως εξής:

$$\varepsilon_1^N(x) = \frac{du_1^N(x)}{dx} = \frac{N_1}{E_1 A_1} + \frac{t_1}{4G_1} \frac{d\tau_\alpha}{dx} \quad (27)$$

$$\varepsilon_2^N(x) = \frac{du_2^N(x)}{dx} = \frac{N_2}{E_2 A_2} - \frac{5t_2}{12G_2} \frac{d\tau_\alpha}{dx} \quad (28)$$

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (27), (28) και (3) στις εξισώσεις (1) και (2) αντίστοιχα, η εξίσωση (4) μπορεί να γραφεί :

$$\varepsilon_1(x) = \frac{du_1(x)}{dx} = \frac{y_1}{E_1 I_1} M_1(x) + \frac{N_1(x)}{E_1 A_1} + \frac{t_1}{4G_1} \frac{d\tau(x)}{dx} \quad (29)$$

$$\varepsilon_2(x) = \frac{du_2(x)}{dx} = \frac{-y_2}{E_2 I_2} M_2(x) + \frac{N_2(x)}{E_2 A_2} - \frac{5t_2}{12G_2} \frac{d\tau(x)}{dx} \quad (30)$$

όπου $N(x)$ είναι η αξονική δύναμη σε κάθε προσκολλημένο και A η εγκάρσια διατομή.

Η διατμητική τάση στην συγκολλητική ουσία μπορεί να γραφεί:

$$\tau_\alpha = \tau(x) = K_s [u_2(x) - u_1(x)] \quad (31)$$

όπου $k_s = G_a / \tau_\alpha$ είναι η διατμητική δυσκαμψία της συγκολλητικής ουσίας, G_a και t_α είναι το μέτρο διάτμησης και το πάχος της συγκολλητικής ουσίας αντίστοιχα, και $u_1(x)$ και $u_2(x)$ είναι οι διαμήκης μετατοπίσεις στην βάση του προσκολλημένου 1 και

στο ανώτατο σημείο του προσκολλημένου 2. Διαφορίζοντας την παραπάνω έκφραση έχουμε:

$$\frac{d\tau(x)}{dx} = K_s \left[\frac{du_2(x)}{dx} - \frac{du_1(x)}{dx} \right] \quad (32)$$

Υποθέτοντας ισορροπία στην οριζόντια διεύθυνση προκύπτει:

$$\frac{dN_1(x)}{dx} = -b_2\tau(x) \quad (33)$$

$$\frac{dN_2(x)}{dx} = b_2\tau(x) \quad (34)$$

όπου

$$N_2(x) = N(x) = b_2 \int_0^x \tau(x) \quad (35)$$

$$N_1(x) = -N(x) = -b_2 \int_0^x \tau(x) \quad (36)$$

και b_2 είναι το πάχος του ελάσματος FRP.

Υποθέτοντας ίση καμπυλότητα στην δοκό και στο έλασμα FRP, η σχέση μεταξύ της ροπής και των δύο προσκολλημένων μπορεί να γραφεί:

$$M_1(x) = RM_2(x) \quad (37)$$

με

$$R = \frac{E_1 I_1}{E_2 I_2} \quad (38)$$

Η ισορροπία ροπής διαφορικού τμήματος της δοκού με έλασμα του σχήματος 3 δίνει:

$$M_T(x) = M_1(x) + M_2(x) + N(x)[y_1 + y_2 + t_a] \quad (39)$$

όπου $M_T(x)$ είναι η συνολική εφαρμοζόμενη ροπή.

Η ροπή κάμψης σε κάθε προσκολλημένο, εκφράζεται σαν μία συνάρτηση της συνολικής εφαρμοζόμενης ροπής και της εσωτερικής διατμητικής τάσης, ως εξής:

$$M_1(x) = \frac{R}{R+1} \left[M_T(x) - b_2 \int_0^x \tau(x)(y_1 + y_2 + t_a) dx \right] \quad (40)$$

και

$$M_2(x) = \frac{1}{R+1} \left[M_T(x) - b_2 \int_0^x \tau(x)(y_1 + y_2 + t_a) dx \right] \quad (41)$$

Η πρώτη παράγωγος της καμπτικής ροπής σε κάθε προσκολλημένο δίνει:

$$\frac{dM_1(x)}{dx} = \frac{R}{R+1} [V_T(x) - b_2 \tau(x)(y_1 + y_2 + t_a)] \quad (42)$$

και

$$\frac{dM_2(x)}{dx} = \frac{1}{R+1} [V_T(x) - b_2 \tau(x)(y_1 + y_2 + t_a)] \quad (43)$$

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (29) και (30) στην εξίσωση (32) και διαφορίζοντας το αποτέλεσμα της εξίσωσης δίνει:

$$\frac{d^2 \tau(x)}{dx^2} = K_S \left(\frac{1}{E_2 A_2} \frac{dN_2(x)}{dx} - \frac{y_2}{E_2 I_2} \frac{dM_2(x)}{dx} - \frac{y_1}{E_1 I_1} \frac{dM_1(x)}{dx} - \frac{1}{E_1 A_1} \frac{dN_1(x)}{dx} \right) - K_S \left(\frac{5t_2}{12G_2} + \frac{t_1}{4G_1} \right) \frac{d^2 \tau(x)}{dx^2} \quad (44)$$

Αντικαθιστώντας τις διατμητικές δυνάμεις (εξισώσεις (42) και (43)) και τις αξονικές δυνάμεις (εξισώσεις 35 και 36) στην εξίσωση (44) προκύπτει η ακόλουθη διαφορική εξίσωση για τις εσωτερικές τάσεις:

$$\frac{d^2 \tau(x)}{dx^2} - K_1 b_2 \left(\frac{(y_1 + y_2)(y_1 + y_2 + t_a)}{E_1 I_1 + E_2 I_2} + \frac{1}{E_1 A_1} + \frac{1}{E_2 I_2} \right) \tau(x) + K_1 \left(\frac{y_1 + y_2}{E_1 I_1 + E_2 I_2} \right) V_T(x) = 0 \quad (45)$$

όπου

$$K_1 = \frac{1}{\left(\frac{t_a}{G_a} + \frac{t_1}{4G_1} + \frac{5t_2}{12G_2} \right)} \quad (46)$$

Για λόγους απλοποίησης, οι γενικές επιλύσεις που παρουσιάζονται παρακάτω περιορίζονται σε φορτίσεις είτε συγκεντρωμένες ή ομοιόμορφα κατανεμημένες σε κάθε τμήμα ή σε ολόκληρο το ανάπτυγμα της δοκού, ή και τα δύο. Για τέτοιες φορτίσεις $d^2 V_T(x)/dx^2 = 0$, και η γενική επίλυση της εξίσωσης (45) δίδεται ως εξής:

$$\tau(x) = B_1 \cosh(\lambda x) + B_2 \sinh(\lambda x) + m_1 V_T(x) \quad (47)$$

όπου

$$\lambda^2 = K_1 b_2 \left(\frac{(y_1 + y_2)(y_1 + y_2 + t_a)}{E_1 I_1 + E_2 I_2} \right) + \frac{1}{E_1 A_1} + \frac{1}{E_2 A_2} \quad (48)$$

$$\text{και } m_1 = \frac{K_1}{\lambda^2} \left(\frac{y_1 + y_2}{E_1 I_1 + E_2 I_2} \right) \quad (49)$$

και B_1, B_2 είναι σταθεροί συντελεστές προσδιοριζόμενοι από τις οριακές συνθήκες.

Στην παρούσα μελέτη, διερευνάται μία απλά στηριζόμενη δοκός η οποία υπόκειται σε ομοιόμορφα κατανομημένη φόρτιση.

Μελετώντας τις οριακές συνθήκες,

(1) εξ αιτίας της συμμετρίας, η διατμητική τάση στο κέντρο του αναπτύγματος είναι μηδέν, δηλαδή:

$$\tau \left(\frac{L_p}{2} \right) = B_1 \cosh \left(\lambda \frac{L_p}{2} \right) + B_2 \sinh \left(\lambda \frac{L_p}{2} \right) + m_1 V_T \left(\frac{L_p}{2} \right) = 0 \quad (50)$$

Όπου L_p είναι το μήκος του ελάσματος FRP (βλέπε σχήμα 2).

(2) Στο τέλος του ελάσματος FRP, η διαμήκης δύναμη [$N_1(0) = N_2(0)$] και η ροπή $M_2(0)$ είναι μηδέν. Σαν αποτέλεσμα, η ροπή στην διατομή του κομμένου ελάσματος αντιτίθεται από την δοκό και μπορεί να εκφραστεί:

$$M_1(0) = M_T(0) = \frac{qa}{2}(L - a) \quad (51)$$

Εφαρμόζοντας τις παραπάνω οριακές συνθήκες στην εξίσωση (32),

$$\frac{d\tau(x=0)}{dx} = -m_2 M_T(0) \quad \text{με } m_2 = \frac{K_1 y_1}{E_1 I_1} \quad (52)$$

Από τις παραπάνω τρεις εξισώσεις,

$$B_2 = \frac{-m_2 qa}{2\lambda}(L - a) + \frac{m_1}{\lambda} q \quad (53)$$

$$B_1 = -B_2 \tanh \left(\frac{\lambda L_p}{2} \right), \quad V_T \left(\frac{L_p}{2} \right) = 0 \quad (54)$$

Για περιπτώσεις εφαρμογής $\frac{\lambda L_p}{2} > 10$ και τότε $\tanh \left(\frac{\lambda L_p}{2} \right) \approx 1$. Έτσι η έκφραση για το

B_1 μπορεί να απλοποιηθεί:

$$B_1 = -B_2 \quad (55)$$

Αντικαθιστώντας τα B_1 και B_2 στην εξίσωση (47) δίδεται μία έκφραση για την εσωτερική διατμητική τάση σε κάθε σημείο:

$$\tau(x) = \left(\frac{m_2 a}{2} (L - a) - m_1 \right) \frac{q e^{-\lambda x}}{\lambda} + m_1 q \left(\frac{L}{2} - a - x \right), \quad 0 \leq x \leq L_p \quad (56)$$

όπου q είναι το ομοιόμορφο καταναμημένο φορτίο και x, a, L και L_p προσδιορίζονται στο σχήμα 2.

Στην περίπτωση που η RC δοκός υπόκειται σε δύο συμμετρικά σημεία φόρτισης όπως φαίνεται στο σχήμα 4, η γενική επίλυση για την εσωτερική διατμητική τάση δίδεται από τις ακόλουθες εκφράσεις [6]:

$$\tau(x) = \left\{ \begin{array}{l} \frac{m_2}{\lambda} P a e^{-\lambda x} + m_1 P \cosh(\lambda x) e^{-k}, 0 \leq x \leq (b - a) \\ \frac{m_2}{\lambda} P a e^{-\lambda x} + m_1 P \sinh(k) e^{-\lambda x}, (b - a) \leq x \leq \frac{L_p}{2} \end{array} \right\} \quad (57)$$

και για $a > b$

$$\tau(x) = \frac{m_2}{\lambda} P b e^{-\lambda x}, \quad 0 \leq x \leq L_p \quad (58)$$

όπου P είναι η συγκεντρωμένη δύναμη και $k = \lambda(b - a)$. Οι τιμές των m_1, m_2 λαμβάνονται μελετώντας την παραμόρφωση διάτμησης των προσκολλημένων.

2.6.1.3 Εσωτερική ορθή τάση καταναμημένη κατά μήκος της διεπιφάνειας FRP – σκυροδέματος.

Η εσωτερική ορθή τάση στην συγκολλητική ουσία μπορεί να εκφρασθεί ως εξής:

$$\sigma_n(x) = K_n \Delta w(x) = K_n [w_2(x) - w_1(x)] \quad (59)$$

όπου K_n είναι η δυσκαμψία της συγκολλητικής ουσίας ανά μονάδα μήκους και μπορεί να γραφεί:

$$K_n = \frac{\sigma_n(x)}{\Delta w(x)} = \frac{\sigma_n(x)}{\Delta w(x) / t_a} \left(\frac{1}{t_a} \right) = \frac{E_a}{t_a} \quad (60)$$

$w_1(x), w_2(x)$ είναι οι κάθετες μετατοπίσεις των προσκολλημένων 1 και 2, αντίστοιχα.

Διαφορίζοντας την εξίσωση (59) δύο φορές έχουμε:

$$\frac{d^2\sigma_n(x)}{dx^2} = K_n \left[\frac{d^2w_2(x)}{dx^2} - \frac{d^2w_1(x)}{dx^2} \right] \quad (61)$$

Μελετώντας τις σχέσεις ροπής-καμπυλότητας για την δοκό και την εξωτερική ενίσχυση, αντίστοιχα, έχουμε:

$$\frac{d^2w_1(x)}{dx^2} = -\frac{M_1(x)}{E_1I_1} \quad \text{και} \quad \frac{d^2w_2(x)}{dx^2} = -\frac{M_2(x)}{E_2I_2} \quad (62)$$

Η ισορροπία των προσκολλημένων 1 και 2, οδηγεί στις ακόλουθες σχέσεις:

Προσκολλημένο 1:

$$\frac{dM_1(x)}{dx} = V_1(x) - b_2y_1\tau(x) \quad \text{και} \quad \frac{dV_1(x)}{dx} = -b_2\sigma_n(x) - q \quad (63)$$

Προσκολλημένο 2:

$$\frac{dM_2(x)}{dx} = V_2(x) - b_2y_2\tau(x) \quad \text{και} \quad \frac{dV_2(x)}{dx} = -b_2\sigma_n(x) \quad (64)$$

Στηριζόμενοι στις ανωτέρω επιλύσεις ισορροπίας, οι κυρίαρχες διαφορικές επιλύσεις για την μετατόπιση των προσκολλημένων 1 και 2, σε αντιστοιχία με τις εσωτερικές διατμητικές και ορθές τάσεις, δίδονται ως ακολούθως :

Προσκολλημένο 1:

$$\frac{d^4w_1(x)}{dx^4} = \frac{1}{E_1I_1}b_2\sigma(x) + \frac{y_1}{E_1I_1}b_2\frac{d\tau(x)}{dx} + \frac{q}{E_1I_1} \quad (65)$$

Προσκολλημένο 2:

$$\frac{d^4w_2(x)}{dx^4} = \frac{-1}{E_2I_2}b_2\sigma(x) + \frac{y_2}{E_2I_2}b_2\frac{d\tau(x)}{dx} \quad (66)$$

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (65) και (66) στην τέταρτη παράγωγο της εσωτερικής ορθής τάσης αντλούμενη από την εξίσωση (59), δίνει την ακόλουθη κυρίαρχη διαφορική εξίσωση για την εσωτερική ορθή τάση:

$$\frac{d^4\sigma_n(x)}{dx^4} + \frac{E_a b_2}{t_a} \left(\frac{1}{E_1I_1} + \frac{1}{E_2I_2} \right) \sigma_n(x) + \frac{E_a b_2}{t_a} \left(\frac{y_1}{E_1I_1} - \frac{y_2}{E_2I_2} \right) \frac{d\tau(x)}{dx} + \frac{qE_a}{t_a E_1I_1} = 0 \quad (67)$$

Η γενική λύση αυτής της τέταρτης τάξεως διαφορικής εξίσωσης είναι :

$$\sigma_n(x) = e^{-\beta x} [C_1 \cos(\beta x) + C_2 \sin(\beta x)] + e^{\beta x} [C_3 \cos(\beta x) + C_4 \sin(\beta x)] - n_1 \frac{d\tau(x)}{dx} - n_2 q \quad (68)$$

Για μεγάλες τιμές x θεωρείται ότι η ορθή τάση προσεγγίζει το μηδέν, και τότε $C_3 = C_4 = 0$. Η γενική λύση τότε γίνεται:

$$\sigma_n(x) = e^{-\beta x} [C_1 \cos(\beta x) + C_2 \sin(\beta x)] - n_1 \frac{d\tau(x)}{dx} - n_2 q \quad (69)$$

όπου

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{E_a b_2}{4t_a} \left(\frac{1}{E_1 I_1} + \frac{1}{E_2 I_2} \right)}$$

$$n_1 = \left(\frac{y_1 E_2 I_2 - y_2 E_1 I_1}{E_1 I_1 + E_2 I_2} \right) \text{ και}$$

$$n_2 = \frac{E_2 I_2}{b_2 (E_1 I_1 + E_2 I_2)}$$

Όπως περιγράφεται από τον Tounsi, οι σταθερές C_1, C_2 στην εξίσωση (69) προσδιορίστηκαν χρησιμοποιώντας τις κατάλληλες οριακές συνθήκες και γράφονται ως ακολούθως :

$$C_1 = \frac{E_a}{2\beta^2 t_a E_1 I_1} [V_T(0) + \beta M_T(0)] - \frac{n_3}{2\beta^3} \tau(0) + \frac{n_1}{2\beta^3} \left(\frac{d^4 \tau(0)}{dx^4} + \beta \frac{d^3 \tau(0)}{dx^3} \right) \quad (73)$$

$$C_2 = \frac{-E_a}{2\beta^2 t_a E_1 I_1} M_T(0) - \frac{n_1}{2\beta^2} \frac{d^3 \tau(0)}{dx^3} \quad (74)$$

όπου

$$n_3 = \frac{E_a b_2}{t_a} \left(\frac{y_1}{E_1 I_1} - \frac{y_2}{E_2 I_2} \right) \quad (75)$$

Οι παραπάνω εκφράσεις για τις σταθερές C_1, C_2 έχουν παραλείψει την ροπή κάμψης $M_T(0)$ και την δύναμη διάτμησης $V_T(0)$ στην άκρη του ελάσματος. Με τον προσδιορισμό των σταθερών C_1, C_2 , η εσωτερική ορθή τάση μπορεί να υπολογισθεί από την εξίσωση (69).

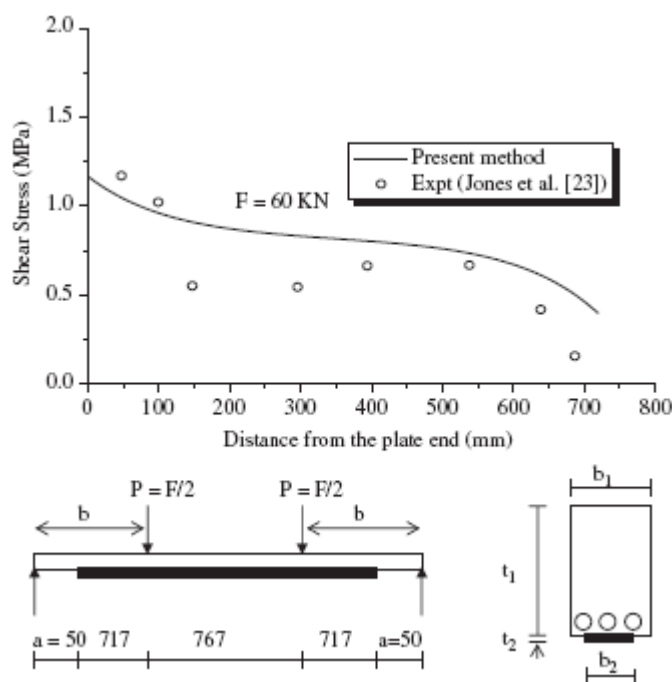
2.6.2 Σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα.

Μία δοκός συνδεδεμένη με έλασμα χάλυβα δοκιμασμένη από τον Jones, δοκός F31 παρουσιάζεται παρακάτω, χρησιμοποιώντας την παρούσα βελτιωμένη επίλυση. Η γεωμετρία και οι ιδιότητες των υλικών του δοκιμίου παρουσιάζονται στον πίνακα 1.

Πίνακας 1: Διαστάσεις και ιδιότητες υλικού

Σκυρόδεμα (concrete)	$b_1=155\text{mm}$	$t_1=225\text{mm}$	$E_1=31000 \text{ MPa}$
Χάλυβας (steel)	$b_2=125\text{mm}$	$t_2=6\text{mm}$	$E_2=200000 \text{ MPa}$
Συγκολλητική ουσία (adhesive)	$b_3=123\text{mm}$	$t_3=1.5\text{mm}$	$E_a=280 \text{ MPa}$
			$G_a=108\text{MPa}$

Οι κατανομές εσωτερικής διατμητικής τάσης στην δοκό σκυροδέματος που συνδέεται με έλασμα χάλυβα κάτω από εφαρμοζόμενη φόρτιση 60kN, π.χ. $P = 30\text{ kN}$ στο σχήμα 4, συγκρίνονται μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και εκείνων που προκύπτουν από την παρούσα μέθοδο (χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (57) και (58)). Όπως φαίνεται από το σχήμα 4, τα προβλεπόμενα θεωρητικά αποτελέσματα συμφωνούν με τα πειραματικά αποτελέσματα.



Σχήμα 4: Σύγκριση εσωτερικών διατμητικών τάσεων δοκού σκυροδέματος ενισχυμένης με έλασμα χάλυβα

2.6.3 Αποτελέσματα.

2.6.3.1 Χρησιμοποιούμενα υλικά

Τα χρησιμοποιούμενα υλικά για τις παρούσες μελέτες, είναι μία δοκός RC συνδεδεμένη με ενισχυμένο πλαστικό από υαλόνημα ή ανθρακόνημα (GFRP ή CFRP) ή με έλασμα χάλυβα. Οι δοκοί στηρίζονται απλά και υπόκεινται σε ομοιόμορφη καταναμημένη φόρτιση. Η γεωμετρία και οι ιδιότητες του υλικού δίδονται στον πίνακα 2. Το μήκος της RC δοκού είναι 3000mm, η απόσταση από την στήριξη έως το τέλος του ελάσματος είναι 300mm και το ομοιόμορφο καταναμημένο φορτίο (UDL) είναι 50kN/m.

2.6.3.2 Αριθμητικές συγκρίσεις.

Εξετάστηκε η επίδραση των παραμορφώσεων λόγω διάτμησης των συνδεδεμένων επιφανειών - υποθέτοντας παραβολική κατανομή διατμητικής τάσης διαμέσου του πάχους των προσκολλημένων - συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν με την παρούσα θεωρία και εκείνα που παρατηρήθηκαν από δύο άλλες θεωρίες. Η πρώτη λαμβάνει υπόψη την επίδραση διατμητικών παραμορφώσεων των προσκολλημένων

χρησιμοποιώντας την υπόθεση γραμμικής διατμητικής τάσης διαμέσου του πάχους, ενώ η δεύτερη θεωρία δεν λαμβάνει υπόψη αυτό το αποτέλεσμα.

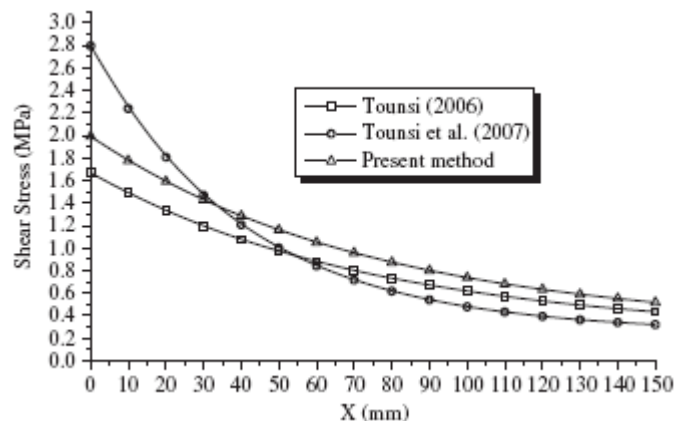
Πίνακας 2

Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και ιδιότητες υλικού

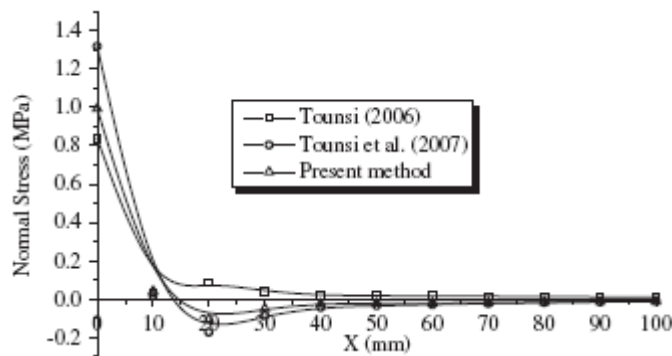
Συστατικό	Πλάτος (mm)	Βάθος (mm)	Μέτρο ελ/τας (MPa)	Λόγος Poisson	Μέτρο διάτμησης (Mpa)
Δοκός σκυροδέματος (RC beam)	$B_1=200$	$t_1 = 300$	$E_1 = 30.000$	0.18	-
Επίπεδο συγκόλλησης (adhesive layer)	$b_a=200$	$t_a = 4$	$E_a = 3.000$	0.35	-
Έλασμα υάλου GFRP	$B_2=200$	$t_2 = 4$	$E_2 = 50.000$	0.28	$G_{12} = 5000$
Έλασμα άνθρακα CFRP	$B_2=200$	$t_2 = 4$	$E_2 = 140.000$	0.28	$G_{12} = 5000$
Έλασμα χάλυβα (steel plate)	$b_2=200$	$t_2 = 4$	$E_2 = 200.000$	0.3	-

Στα σχήματα 5 και 6 απεικονίζονται οι εσωτερικές διατμητικές και ορθές τάσεις για κατανομές κοντά στο τέλος του ελάσματος για RC δοκό συνδεδεμένη με CFRP έλασμα σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Tounsi. Η παρούσα ανάλυση δίνει χαμηλότερες μέγιστες εσωτερικές διατμητικές και ορθές τάσεις από εκείνες που προβλέφθηκαν από τον Tounsi και Benyoucef, δείχνοντας ότι η συμπερίληψη της παραμόρφωσης διάτμησης της προσκόλλησης, επιδρά στην δοκό και στο έλασμα, οδηγώντας σε χαμηλότερες τιμές των τ_{max} και σ_{max} . Ωστόσο, οι μέγιστες εσωτερικές διατμητικές και ορθές τάσεις που δίδονται από την μέθοδο των Tounsi's είναι χαμηλότερες από τα αποτελέσματα που υπολογίσθηκαν από την παρούσα επίλυση. Αυτή η διαφορά οφείλεται στην χρησιμοποιούμενη υπόθεση της παρούσας θεωρίας η οποία συμφωνεί με την θεωρία δοκού (παραβολική κατανομή διατμητικών τάσεων διαμέσου του βάθους της δοκού).

Άρα, είναι προφανές ότι η διατμητική παραμόρφωση της επένδυση μειώνει την συγκέντρωση εσωτερικών τάσεων και έτσι προσφέρει στην συγκολλητική ουσία κατανομή διάτμησης περισσότερο ομοιόμορφη. Η εσωτερική ορθή τάση φαίνεται να μεταβάλλεται σε μικρή απόσταση από το τέλος του ελάσματος.



Σχήμα 5: Σύγκριση εσωτερικών διατμητικών τάσεων CFRP-δοκού σκυροδέματος



Σχήμα 6: Σύγκριση εσωτερικών ορθών τάσεων CFRP-δοκού σκυροδέματος

2.6.4 Μελέτη παραμέτρων

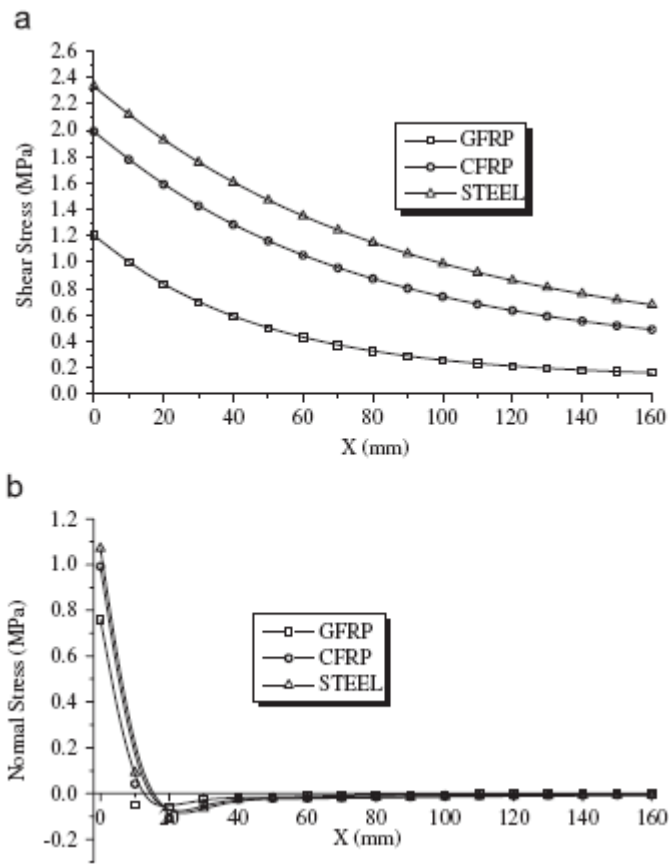
Με σκοπό την καλλίτερη κατανόηση της συμπεριφοράς αποκατάστασης των , συνδεδεμένων δοκών, η οποία θα βοηθήσει τους μηχανικούς στην βελτιστοποίηση των παραμέτρων σχεδιασμού, διερευνώνται οι επιδράσεις πολλών παραμέτρων.

2.6.4.1 Επίδραση ακαμψίας ελάσματος

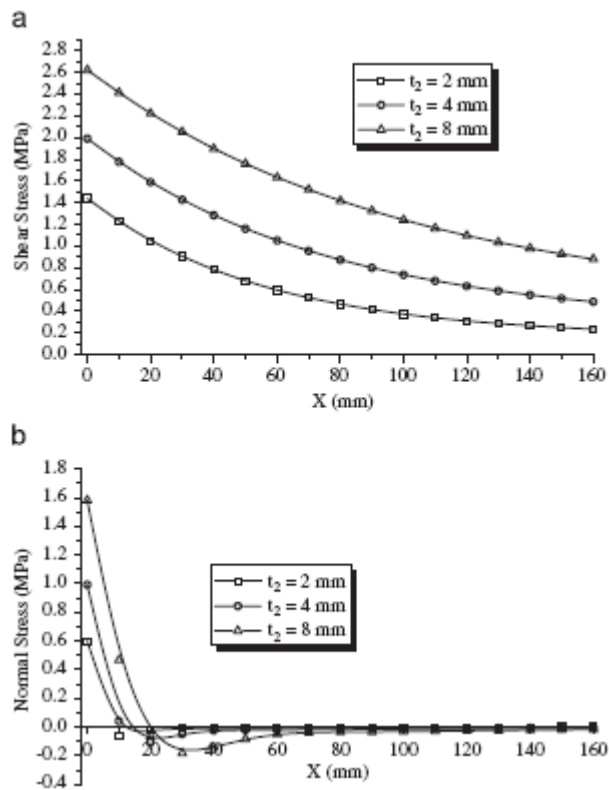
Στο *σχήμα 7* δίδονται οι εσωτερικές ορθές και διατμητικές τάσεις για δοκό RC συνδεδεμένες με έλασμα χάλυβα, έλασμα CFRP και έλασμα GFRP αντίστοιχα, στο οποίο αποδεικνύεται η επίδραση των ιδιοτήτων του υλικού του ελάσματος στις εσωτερικές τάσεις. Το μήκος του ελάσματος είναι $L_p = 2400mm$, και το πάχος του ελάσματος και του επιπέδου της συγκολλητικής ουσίας είναι 4mm σύνολο. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι, όσο το υλικό του ελάσματος γίνεται μαλακότερο (από χάλυβα σε CFRP και μετά GFRP), οι εσωτερικές τάσεις γίνονται μικρότερες, όπως αναμενόταν. Αυτό οφείλεται εξ αιτίας, κάτω από την ίδια φόρτιση, η αναπτυγμένη δύναμη τάνυσης στο έλασμα είναι μικρότερη, η οποία οδηγεί σε μείωση των εσωτερικών τάσεων. Η θέση της οριακής (peak) εσωτερικής διατμητικής τάσης μετακινείται πιο κοντά στο ελεύθερο άκρο καθώς το έλασμα γίνεται μαλακότερο.

2.6.4.2 Επίδραση του πάχους του ελάσματος.

Το πάχος του ελάσματος FRP είναι μία σημαντική μεταβλητή σχεδιασμού στην πράξη. Το *σχήμα 8* δείχνει την επίδραση του πάχους του ελάσματος FRP στις εσωτερικές τάσεις. Εδώ, μελετώνται τρεις τιμές του πάχους, 2,4 και 8mm. Φαίνεται ότι το επίπεδο και η συγκέντρωση εσωτερικής τάσης επηρεάζονται σημαντικά από το πάχος του ελάσματος FRP. Οι εσωτερικές τάσεις αυξάνονται καθώς το πάχος τους ελάσματος FRP αυξάνεται. Γενικά, τα πάχη των FRP ελασμάτων που χρησιμοποιούνται στην πράξη είναι μικρά, συγκριτικά με αυτά των χαλύβδινων ελασμάτων. Έτσι, το γεγονός του μικρότερου επιπέδου εσωτερικής τάσης και της συγκέντρωσης τάσης θα μπορούσε να είναι ένα από τα πλεονεκτήματα επανενίσχυσης με ελάσματα FRP συγκριτικά με ελάσματα χάλυβα.



Σχήμα 7: Επίδραση του υλικού ελάσματος στις εσωτερικές τάσεις σε ενισχυμένη δοκό CFRP (a) διατμητικές (b) ορθές



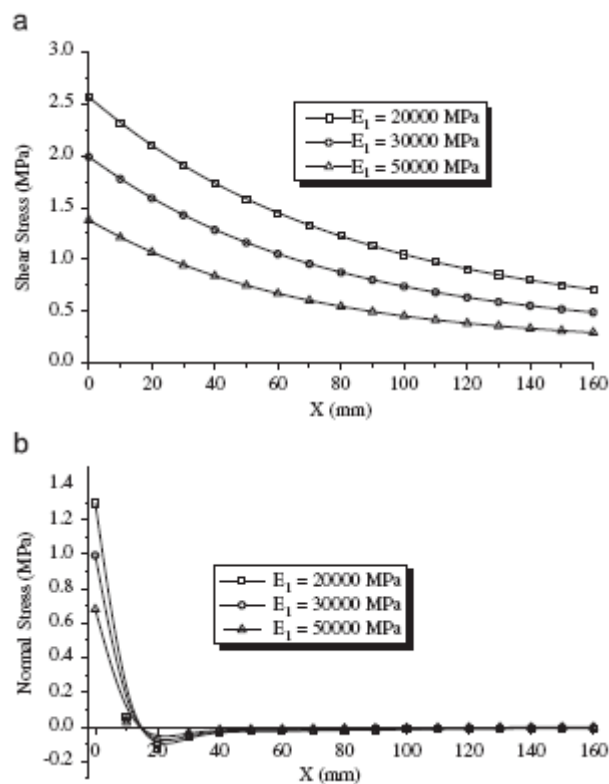
Σχήμα 8: Επίδραση του πάχους ελάσματος στις εσωτερικές τάσεις σε ενισχυμένη δοκό CFRP (a) διατμητικές (b) ορθές

2.6.4.3 Επίδραση του μέτρου ελαστικότητας δοκού RC

Στα σχήματα 9(a) και (b) φαίνονται οι εσωτερικές διατμητικές και ορθές τάσεις, αντίστοιχα, για διαφορετικά μέτρα ελαστικότητας της δοκού RC. Μελετώνται τρία μέτρα ελαστικότητας, π.χ. 20,30 και 50GPa της δοκού RC δοκού. Φαίνεται ότι τα μέτρα ελαστικότητας των RC επηρεάζουν την εσωτερική διατμητική τάση σημαντικά ενώ την εσωτερική ορθή τάση ελαφρά.

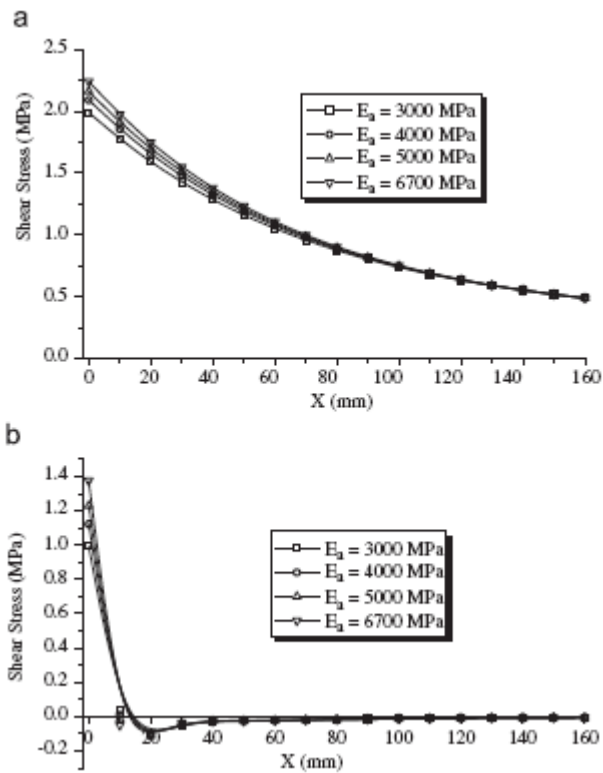
2.6.4.4 Επίδραση του μέτρου ελαστικότητας της συγκολλητικής ουσίας

Το επίπεδο συγκόλλησης είναι σχετικά μαλακό, ισοτροπικό υλικό, και έχει μικρότερη ακαμψία. Τα τέσσερα μέτρα ελαστικότητας που μελετώνται εδώ, είναι 3,4,5 και 6.7GPa. Οι λόγοι Poisson's διατηρούνται σταθεροί. Τα αριθμητικά αποτελέσματα στα σχήματα 10(a) και 10(b) δείχνουν ότι η ιδιότητα της συγκολλητικής ουσίας δύσκολα επηρεάζει το επίπεδο των εσωτερικών τάσεων, ορθής ή διατμητικής τάσης, αλλά οι συγκεντρώσεις τάσης στο τέλος του ελάσματος αυξάνουν καθώς το μέτρο ελαστικότητας της συγκόλλησης αυξάνεται.



Σχήμα 9: Επίδραση του μέτρου ελαστικότητας της δοκού στις εσωτερικές τάσεις σε ενισχυμένη δοκό CFRP

(a) διατμητικές (b) ορθές



Σχήμα 10: Επίδραση του μέτρου ελαστικότητας της συγκολλητικής ουσίας στις εσωτερικές τάσεις σε ενισχυμένη δοκό CFRP (a) διατμητικές (b) ορθές

3 ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ

3.1 Εισαγωγή

Λαμβάνοντας υπόψη την συμπεριφορά καθώς και τα είδη αστοχίας των σύνθετων υλικών κάτω από ποικίλες φορτίσεις όπως είδαμε στο δεύτερο κεφάλαιο, παρουσιάζονται στην συνέχεια είδη κατεργασίας για πολυστρωματικά σύνθετα υλικά με στόχο την οικονομικότερη κατασκευή, την εξοικονόμηση βάρους και το βέλτιστο αποτέλεσμα ιδιαίτερα όσο αφορά την σύνδεση μεταξύ των στρωμάτων.

Τα ινοπλισμένα πολυμερή χρησιμοποιούνται για να μειώσουν το βάρος στην αυτοκινητοβιομηχανία για πολλά χρόνια. Πρόσφατη ανακοίνωση εστιάστηκε σε θερμοπλαστικά σύνθετα υλικά καθώς έχουν πλεονεκτήματα γρήγορης κατασκευής και ανακύκλωσης. Σύνθετα υλικά με βάση το πολυπροπυλένιο (PP) παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον εξαιτίας του χαμηλού κόστους. Ωστόσο, το PP είναι δύσκολο να προσκολληθεί εξ αιτίας της υψηλής του συστολής σε φαινόμενα ψύξης σε επιφάνειες χαμηλής ποιότητας επιφάνειας. Επιπροσθέτως, τα σύνθετα υλικά είναι ευαίσθητα στην αποκόλληση ίνας-μήτρας όταν υπόκεινται σε χαμηλής ταχύτητας κρούσεις οι οποίες μειώνουν σημαντικά την απόδοση της κατασκευής.

Έτσι οι σύνθετες κατασκευές οδηγήθηκαν σε υψηλής απόδοσης υλικά με δυνατότητα ανάπτυξης ενός νέου φάσματος ελαφρών υλικών ονομαζόμενα ινώδη – μεταλλικά στρώματα (Fiber-Metal Laminates FML). Τα FML έχουν εξελιγμένα υβριδικά υλικά αποτελούμενα από μεταλλικά επίπεδα συνδεδεμένα με ινώδη ενισχυμένα επίπεδα πολυμερών. Τα ενισχυμένα στρώματα αλουμινίου με αραμίδιο αποτελούνται από λεπτό, υψηλής αντοχής κράμα φύλλων αλουμινίου συνδεδεμένα εναλλάξ με στρώματα ινώδους ενισχυμένης εποξειδικής ρυτίνης αραμιδίου. Το 1987 η δεύτερη γενιά των στρωματικών υλικών εμφανίσθηκε και ονομάστηκε Υαλώδη Ενισχυμένα.

Τα θερμοπλαστικά ινώδη μεταλλικά στρώματα (Thermoplastic Fiber Metal Laminates) συνήθως προσθέτουν πλεονεκτήματα στις θερμοπλαστικές αντίστοιχες ιδιότητες. Η χρήση ενός θερμοπλαστικού, εφαρμοζόμενου σε σύνθετο εξασφαλίζει την παραγωγή πλαισίων και σύνθετων τα οποία μπορούν να διαμορφωθούν σε καλούπι συνδέοντάς τα με ένα μεταλλικό υπόστρωμα και διαμορφώνοντάς τα με μία απλή κατασκευαστική κατεργασία. Η μέθοδος ολοφάνερα προσφέρει μία ελκυστική επιλογή για μείωση του χρόνου κατεργασίας και του κόστους κατασκευής. Επιπροσθέτως, η υψηλή ανακυκλωσιμότητα και η χαμηλή πτητικότητα που προσφέρουν τα θερμοπλαστικά είναι το κλειδί κατασκευής για κατασκευές οχημάτων· η χαμηλή πυκνότητα και το χαμηλό κόστος του πολυπροπυλενίου είναι ιδιαίτερα ελκυστικά.

Εντούτοις, ένας από τους σημαντικούς παράγοντες για την ανάπτυξη αυτών των TFML είναι η έλλειψη γνώσεων που σχετίζεται με τους μηχανισμούς διάσπασης τους, εφόσον οι ιδιότητες των στρωμάτων βασικά εξαρτώνται από την επιφανειακή κατά μήκος αντοχή σύνδεσης των υλικών με την μήτρα, και τις ιδιότητες των συντελεστών ενίσχυσης. Ένα λεπτό στρώμα βελτίωσης της επιφάνειας εφαρμόζεται στην επιφάνεια του μετάλλου, ώστε να επιτύχει ένα καλό επίπεδο προσκόλλησης κατά μήκος της επιφάνειας των δύο υλικών (σύνθετου – μετάλλου). Μέταλλο και σύνθετο συνδέονται χρησιμοποιώντας δύο επίπεδα από ρητίνη. Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τρεις κατεργασίες βελτίωσης της επιφάνειας του μετάλλου και εξετάζεται το επίπεδο

προσκόλλησης καθώς και τα είδη αστοχίας χρησιμοποιώντας πειραματικές δοκιμές πακτωμένων δοκών.

Επιπροσθέτως ένα σημαντικό φαινόμενο που παρουσιάζεται κατά την μορφοποίηση ελάσματος ενισχυμένων θερμοπλαστικών υλικών συνεχών ινών είναι η προδιάθεση των στρωμάτων να αναδιπλώνονται στο εξωτερικό επίπεδο (shear buckling) κάτω από γρήγορες συνθήκες μορφοποίησης. Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται μία μέθοδος που χρησιμοποιείται με σκοπό την πρόβλεψη της τάσης που προκαλεί την αναδίπλωση, και παρουσιάζονται πειραματικά αποτελέσματα τα οποία συγκρίνονται με θεωρητικές προβλέψεις. Χρησιμοποιείται ένα μοντέλο πεπερασμένου στοιχείου για ιδανικά ινοπλισμένα Νευτώνεια ρευστά, θεωρώντας δύο περιορισμούς, ασυμπίεστα υλικά και ίνες μη προεκτάσιμες. Για πολυστρωματικά επίπεδα φυλλώσεων κάθε φύλλο αναλύεται ξεχωριστά, και έτσι λαμβάνονται προβλέψεις του μέσου όρου τάσης για το στρώμα. Παρουσιάζεται μια αναλυτική σύγκριση μεταξύ προβλέψεων αριθμητικής τάσης και πειραματικών πρότυπων κάμψης για βύθιση (indentation – με πλαστική παραμόρφωση) στο κέντρο, κυκλικών μονοδιευθυντικών, προ-μορφοποιημένων εγκάρσιων στρωμάτων και οριζοντίων ισοτροπικών. Παράμετροι που επιδρούν στην σπουδαιότητα και τον εντοπισμό των μέγιστων εφαπτομενικών τάσεων συμπεριλαμβάνουν το εφαπτομενικό μήκος των ινών και το λόγο εσωτερικής τριβής μεμβράνης/ σύνθετου. Διερευνάται η επίδραση του πάχους και του σχήματος του ελάσματος στην αστάθεια των προτύπων για οριζοντίων ισοτροπικών στρώματα διαφορετικών σχημάτων, χρησιμοποιώντας αριθμητικές αναλύσεις και πειράματα. Από τα πειράματα φαίνεται η ευαισθησία των σύνθετων στρωμάτων στο φαινόμενο αναδίπλωσης (buckling) στο εξωτερικό επίπεδο, σε γωνία 45° της διεύθυνσης των ινών, οι οποίες χαρακτηρίζουν το φαινόμενο αναδίπλωση λόγω διάτμησης (shear buckling). Οι πολύ γρήγοροι ρυθμοί μορφοποίησης, αποδεικνύουν ότι οι τάσεις τριβής (viscous stresses) που δημιουργούνται από την μήτρα του υλικού είναι αρκετές να προκαλέσουν αναδίπλωση.

Τέλος παρουσιάζεται ο σχεδιασμός ενός υψηλής αντοχής συστατικού στοιχείου για θερμοπλαστικό σύνθετο υλικό με στόχο την καλλίτερη δομή στρωμάτων μεταξύ της περιοχής flange – web που χρησιμοποιείται στην κατασκευή αεροσκαφών. Δίδεται ιδιαίτερη έμφαση σε δύο παράγοντες, στην εύκολη κατασκευή και στην εξοικονόμηση του βάρους. Το αποτέλεσμα αυτό έγκειται στην παραγωγή οικονομικά ανταγωνιστικών συστατικών στοιχείων προερχόμενα από σύνθετα θερμοπλαστικά. Εξετάζεται ένα φάσμα παραγόντων όπως, η επιλογή συστατικού στοιχείου, η επιλογή υλικού, η βελτιστοποίηση σχεδιασμού, η μορφοποίηση, και η συνένωση. Παρουσιάζονται μορφοποιήσεις διπλού και απλού διαφράγματος ώστε να αποκτηθεί εικόνα για τα προβλήματα σύνδεσης των στρωμάτων στην διεπιφάνεια flange-web.

3.2 Εφαρμογή θερμοπλαστικών υβριδικών στρώσεων σε διφασικό χάλυβα DP500 – κατασκευαστικές και μηχανικές ιδιότητες.

Οι διφασικοί χάλυβες (Dual Phase) αποτελούν μια από τις σημαντικότερες εξελίξεις στα προϊόντα χάλυβα υψηλής αντοχής που αναπτύχθηκαν για την αυτοκινητοβιομηχανία. Η σύνθεσή τους αποτελείται από 80-90% πολυγωνικό φερρίτη και 10-20% μαρτενσίτη διασκορπισμένο ανάμεσα στην μήτρα του φερρίτη. Οι διφασικοί χάλυβες έχουν υψηλή αντοχή και σταθερή ελαστική συμπεριφορά, επομένως μορφοποιούνται όπως οι χάλυβες χαμηλής αντοχής, αλλά μπορούν επίσης

να παρέχουν υψηλή αντοχή στο τελικό σύνθετο υλικό, εξ αιτίας του υψηλού ρυθμού σκλήρυνσης ($\eta=0,15$). Οι DP 100 προορίζονται κυρίως για τα εξωτερικά πλαίσια (πόρτες, κουκούλες, φτερά κ.λ.π.). Λόγω της εξαιρετικής τους δυνατότητας διαμόρφωσης και της υψηλής σκληρότητας επιτρέπει στους σχεδιαστές να μειώσουν τα εξωτερικά πάχη των πλαισίων σημαντικά ενώ διατηρείται ή βελτιώνεται η αντίσταση του υλικού σε πρόσκρουση. Προσφέρει στους σχεδιαστές την ευκαιρία να μειώσουν ουσιαστικά το τελικό βάρος και πιθανόν να αποφύγουν την αντικατάσταση των περισσότερο δαπανηρών χαμηλής πυκνότητας υλικών.

Πολλές έρευνες έχουν προσανατολισθεί στην σύνδεση των χαλύβων. Οι χάλυβες είναι συνήθως επιστρωμένοι με ψευδάργυρο εξαιτίας της ικανότητας του να τους παρέχει καθοδική προστασία από το περιβάλλον. Υπάρχουν αρκετές μέθοδοι εφαρμογής επιστρώσεων ψευδάργυρου στον χάλυβα όπως «Θερμό γαλβάνισμα με εμβάπτιση (Hot Dip Galvanizing)», «Ηλεκτρογαλβάνισμα (Electrogalvanizing)» κ.λ.π. Έχει καθιερωθεί ότι με την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών για την μείωση επιφανειών μόλυνσης των δευτερευόντων στοιχείων, οι ιδιότητες προσκόλλησης του χάλυβα μπορούν να βελτιωθούν. Ο διαχωρισμός των στοιχείων π.χ. του Αλουμινίου και του Μολύβδου στα όρια των μορίων είναι η αιτία για την εσωτερική διάβρωση του ψευδάργυρου και διευκόλυνε την μορφοποίηση του αδύναμου οριακού επιπέδου.

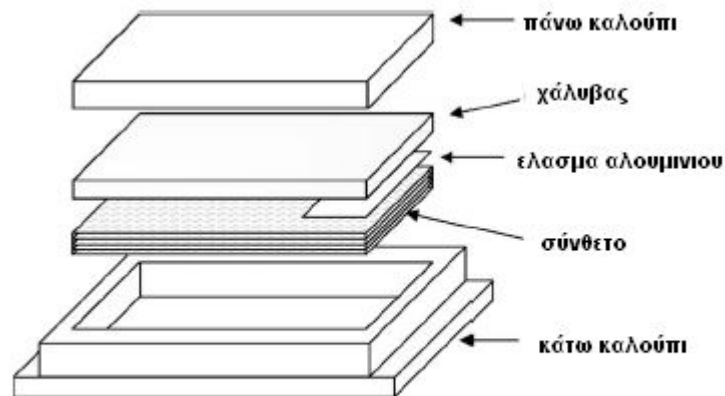
Με αναφορές στην βιομηχανία κατασκευών, η χρήση υβριδικών θερμοπλαστικών – ινωδών – μεταλλικών στρωμάτων μπορεί να εφαρμοσθεί στην ανάπτυξη νέων μηχανών. Αυτά τα υλικά προσφέρουν μία μεγάλη δυνατότητα για την μείωση του βάρους, του κατασκευαστικού χρόνου και του σχετικού κόστους συνδυασμένη με τη βελτίωση της ασφάλειας και των χαρακτηριστικών πρόσκρουσης και κραδασμών. Η διαθεσιμότητα του χαμηλού κόστους θερμοπλαστικών σύνθετων και νέων υψηλής αντοχής χαλύβων κάνει αυτόν τον συνδυασμό ελκυστικό.

Στην συνέχεια ερευνώνται οι κατασκευαστικές και μηχανικές ιδιότητες των θερμοπλαστικών σύνθετων μεταλλικών υβριδικών στρωμάτων πάνω στο χάλυβα DP 500. Αρχικά, δίδεται μεγάλη προσοχή στην εξασφάλιση ενός καλού επιπέδου προσκόλλησης κατά μήκος των υλικών της εσωτερικής επιφάνειας χρησιμοποιώντας έναν αριθμό εφαρμογών επεξεργασιών επιφάνειας στο μεταλλικό υπόστρωμα. Άπαξ αυτό επιτυγχάνεται, ελέγχονται η επίδραση του ρυθμού φόρτισης στους μηχανισμούς αστοχίας και οι ιδιότητες κατασκευής του επιστρωμένου χάλυβα. Ακολούθως, διερευνώνται οι ιδιότητες εφελκυσμού των υβριδικών συστημάτων και συγκρίνονται με τις προβλέψεις που δίδονται από την υπολογιστική ανάλυση. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται δοκιμές πρόβολων δοκών (Single Cantilever Beam) όπου δείχνουν ότι μπορεί να επιτευχθεί ένα καλό επίπεδο πρόσφυσης χρησιμοποιώντας κατεργασία θερμής εμβάπτισης ψευδαργύρου σε χάλυβα DP 500, ενσωματώνοντας ένα εσωτερικό επίπεδο στην διεπιφάνεια μεταξύ του σύνθετου και μεταλλικού φύλλου. Επιπροσθέτως, δοκιμές SCB δείχνουν ότι η ενέργεια θραύσης της διεπιφάνειας των υβριδικών στρωμάτων αυξάνεται με την αύξηση του ρυθμού εγκάρσιας μετατόπισης. Επιπλέον, από τις δοκιμές σε έναν αριθμό στρωμάτων φαίνεται ότι οι ιδιότητες εφελκυσμού αυτών των σύνθετων-μεταλλικών υβριδικών στρωμάτων εξαρτώνται αρκετά από τις ιδιότητες εφελκυσμού των συστατικών υλικών. Τέλος η χρήση του τροποποιημένου νόμου σύνθεσης υλικών χρησιμοποιείται στην πρόβλεψη κάποιων ιδιοτήτων.

3.2.1 Πειραματική μέθοδος

Τα υβριδικά συστήματα που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία βασίστηκαν σε δύο σύνθετα πολυπροπυλενίου και σε έναν προηγμένο υψηλής αντοχής χάλυβα. Το πρώτο είναι ένα ενισχυμένο υαλόνημα πολυπροπυλενίου προπαρασκευασμένο σε σύμμεικτο τύπο (Twintex[®] από Saint Gobain), όπου ίνες PP παράγονται και στην συνέχεια πλέκονται με υαλονήματα. Το αποτέλεσμα είναι ένας τύπος «υφάσματος» προπαρασκευασμένο με προφανή πλεονεκτήματα στην επεξεργασία και εφαρμοσιμότητα, συγκριτικά με τα παραδοσιακά θερμοπλαστικά τα οποία είναι επίπεδα και δύσκαμπτα. Το δεύτερο είναι ένα αυτοενισχυόμενο PP. Αυτό το σύνθετο αποτελείται από ενισχυμένη μήτρα πολυπροπυλενίου με ίνες πολυπροπυλενίου όπου τα μακρομόρια έχουν υψηλή ευθυγράμμιση με τον άξονα των ινών. Το τελευταίο είναι ένας προηγμένος υψηλής αντοχής χάλυβας που χρησιμοποιείται στην τρέχουσα παραγωγή οχημάτων σε εφαρμογές που απαιτούν εξαιρετικά υψηλής αντοχής τάνυση και επαρκή δυνατότητα μορφοποίησης (DP 500 από χάλυβα US).

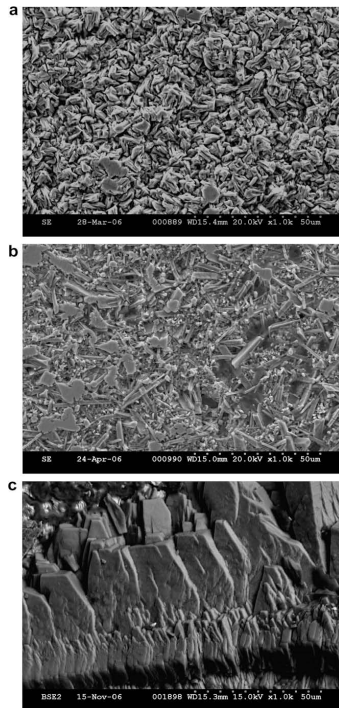
Για να διερευνηθεί το επίπεδο της προσκόλλησης ανάμεσα στα θερμοπλαστικά σύνθετα και στα μεταλλικά υλικά, κατασκευάστηκαν υβριδικά πλαίσια των 240mm x 200mm χρησιμοποιώντας μία ενός βήματος πίεση εν ψυχρώ διαδικασία καλουπώματος με συμπίεση. Μία 0,61 mm πάχους, μεταλλική πλάκα και στρώματα από σύνθετα υλικά τοποθετήθηκαν σε ένα καλούπι όπως φαίνεται στο *σχήμα 1*. Ένα λεπτό έλασμα αλουμινίου ενσωματώνεται στην επιφάνεια σύνθετου – μετάλλου.



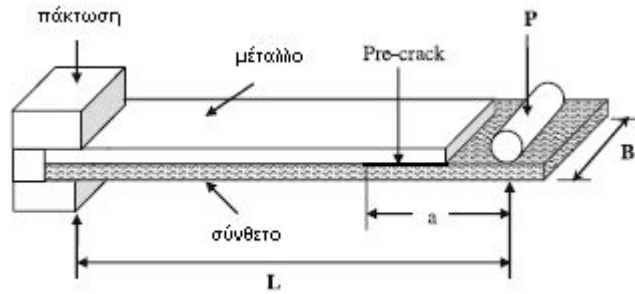
Σχήμα 1: Καλούπι σύνθετου - μετάλλου

Για να βοηθηθεί η προσκόλληση ανάμεσα στο σύνθετο και στον χάλυβα, πραγματοποιήθηκαν εργασίες βελτίωσης στο υπόστρωμα του χάλυβα πριν την κατασκευή οι οποίες συνοψίζονται ως εξής:

- (α) Θερμή εμβάπτιση ψευδαργύρου
- (β) Ηλεκτρογαλβάνισμα
- (γ) Εμβάπτιση ψευδαργύρου (Zinc Phosphating) βλέπε *σχήμα 2*.



Σχ.2 Φωτογραφίες βελτιωτικών επιστρώσεων σε χάλυβα



Σχήμα 3: Δοκιμή πακτωμένης δοκού

Επιπρόσθετα για να βελτιωθεί το επίπεδο της προσκόλλησης ανάμεσα στα ανόμοια υλικά, ενσωματώθηκε ένα φιλμ 40 gr/m^2 πολυπροπυλενίου στην επιφάνεια των δύο υλικών κατά την διάρκεια της διαδικασίας κατασκευής. Στην συνέχεια τα στρώματα θερμαίνονται (στον 165°C για τα αυτοενισχυόμενα PP συστήματα, και στους 185°C για τα υαλονήματα/PP συστήματα) σε φούρνο αέρα πριν επικολληθούν σε εν ψυχρώ πίεση $0,715 \text{ N/mm}^2$. Ακολουθεί ταχεία ψύξη των υβριδικών συστημάτων ώστε να επιτευχθεί ένας χαμηλότερος βαθμός της κρυσταλώδους υφής της πολυπροπυλενικής μήτρας. Μετά την κατασκευή, το πλαίσιο βγήκε από το καλούπι και εξετάστηκε οπτικά για βλάβες.

Ακολούθησαν δοκιμές δοκιμών απλής δοκού σε πρόβολο (SCB) με διαστάσεις $20 \times 200\text{mm}$. Η μηχανή δοκιμών διεθνών προδιαγραφών (screw driven Instron 4469) των SCB απεικονίζεται στο σχήμα 3. Τα δοκίμια πακτώθηκαν στο ένα άκρο του σώματος του χάλυβα και μετά φορτίστηκαν στο αντίθετο άκρο σε ένα εύρος ρυθμού μετατοπίσεων μεταξύ 1 και 100mm/min ώστε να δημιουργηθεί ρωγμή με σκοπό να μεταδοθεί από την κορυφή του προ-ραγίσματος (pre-crack).

Στους χαμηλούς ρυθμούς φόρτισης, η επέκταση του ραγίσματος παρακολουθούνταν με το μάτι με την βοήθεια χρωματισμού πλέγματος. Η σύνθετη ενέργεια θραύσης της διεπιφάνειας προσδιορίστηκε από μία μέθοδο βαθμονόμησης της υποχώρησης. Αυτή η τεχνική υπολογίζει την σχέση της υποχώρησης έναντι του κατά μήκος ραγίσματος από τον τύπο[7]:

$$C = C_0 + ma^3 \quad (1)$$

Όπου C_0 και m σταθερές που προσδιορίζονται πειραματικά. Στην συνέχεια, καταρτίζεται μια γραφική παράσταση ανάμεσα στην υποχώρηση έναντι του κύβου του

μήκος ραγίσματος και το m καθορίζεται από την κλίση του γραφήματος. Η σύνθετη ενέργεια θραύσης της διεπιφάνειας υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τον εξής τύπο:

$$G_{I/IIc} = \frac{3P^2ma^2}{2B} \quad (2)$$

Για εγκάρσιους ρυθμούς φόρτισης των 10 και 100mm/min εφαρμόστηκε μία αντίστροφη μέθοδος υποχώρησης. Εδώ τα αρχικά και τα τελικά ραγίσματα κατά μήκος καταγράφηκαν κατά την διάρκεια της δοκιμής ελέγχου. Επίσης η τιμή της υποχώρησης υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας φόρτιση P και η μετατόπιση d χρησιμοποιώντας διαθέσιμα δεδομένα από τις διεθνείς δοκιμές μηχανών.

$$C = d / P \quad (3)$$

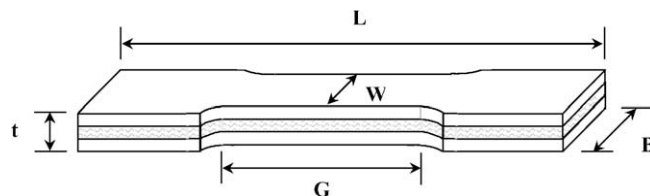
Η τιμή της υποχώρησης καταγράφηκε για τα αρχικά και τα τελικά μήκη ραγισμάτων και σχεδιάστηκε ένα διάγραμμα του C με το a^3 . Τα ενδιάμεσα μήκη ραγίσματος υπολογίστηκαν από την σχέση (1) λύνοντας ως προς a :

$$a = \sqrt[3]{\frac{C - C_0}{m}} \quad (4)$$

Όπου m είναι η κλίση της καμπύλης.

Οι ιδιότητες τάνυσης του χάλυβα, τα ενισχυμένα υαλονήματα προπυλενίου, τα αυτοενισχυόμενα PP και τα θερμοπλαστικά σύνθετα μεταλλικά υβριδικά στρώματα διερευνηθήκαν σε οριζόντιο ισοτροπικούς ρυθμούς φόρτισης. Εφελκόμενα δοκίμια κόπηκαν από τα πλαίσια παράλληλα στην κατεύθυνση της έλασης του χάλυβα. Ένα τυπικό δοκίμιο φαίνεται στο *σχήμα 4*, όπου

- G : το μήκος της εσωτερικής εσοχής
- W : περιοχή εργασίας (working section)
- t : το πάχος
- B: το πλάτος του δοκιμίου
- L : το συνολικό μήκος του δοκιμίου



Σχήμα 4 : απεικόνιση γεωμετρίας δείγματος εφελκυσμού

Στο πείραμα μας η περιοχή εργασίας του κάθε δείγματος ήταν 12,5 x 60 mm και το μήκος L ήταν 200mm. Τα δοκίμια ήταν τοποθετημένα στην μηχανή και οι δοκιμές διεξήχθησαν με ρυθμό εγκάρσιας φόρτισης 1mm/min με καταγραφή της δύναμης και της μετατόπισης. Μόλις τα δείγματα αστοχούσαν ακολουθούσε ο οπτικός έλεγχος.

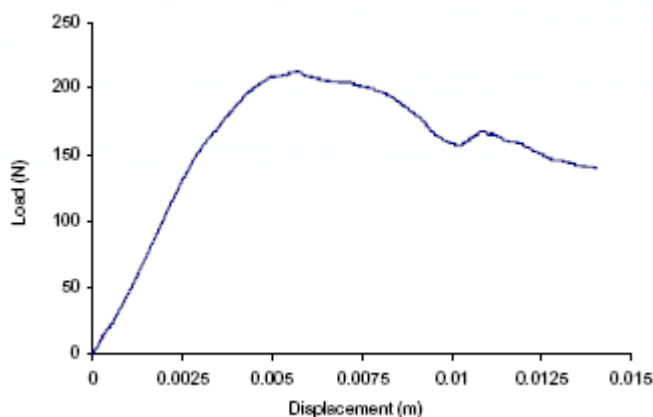
3.2.2 Αποτελέσματα

Παρουσιάστηκαν οι κατασκευαστικές και μηχανικές ιδιότητες θερμοπλαστικών υβριδικών στρωμάτων εφαρμοζόμενα σε χάλυβα DP 500 . Τα στρώματα από σύνθετο-υβριδικό μέταλλο συνδυάζουν τις συγκεκριμένες υψηλές ιδιότητες των σύνθετων με την ευκολία της κατασκευής και τις μηχανικές ιδιότητες των μετάλλων. Για να είναι αυτά τα υλικά αποτελεσματικά και να δουλεύουν σαν σύνολο, πρέπει να επιτευχθεί μία ισχυρή διεπιφάνεια. Αυτή η διεπιφάνεια έχει σημαντικό ρόλο στην μεταφορά της εφαρμοζόμενης φόρτισης από το ένα υλικό στο άλλο. Για να κατασκευαστεί στρώμα από σύνθετο-μέταλλο υβριδικό με δυνατή διεπιφάνεια δύο υλικών, απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στην διερεύνηση του επιπέδου προσκόλλησης μεταξύ της μεταλλικής και των βασισμένων στην θερμοπλαστική σύνθετων υλικών. Πριν την στρωματοποίηση, αρκετές κατεργασίες βελτίωσης επιφάνειας εφαρμόστηκαν στο μεταλλικό υπόστρωμα ώστε να επιτύχουν ένα καλό επίπεδο προσκόλλησης στα σύνθετα φύλλα. Αυτές είναι:

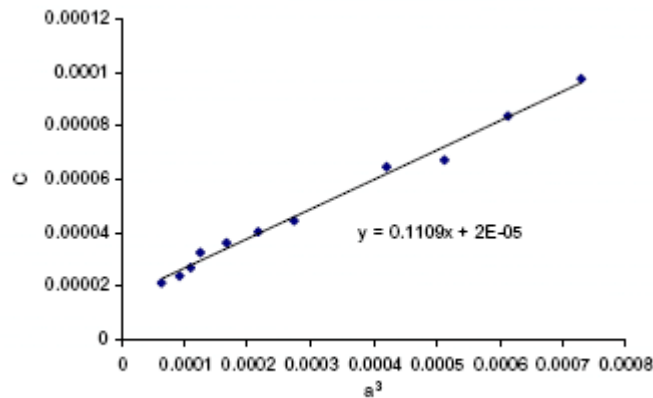
- (α) Θερμή εμβάπτιση ψευδαργύρου
- (β) Ηλεκτρογαλβάνισμα
- (γ) Εμβάπτιση ψευδαργύρου (Zinc Phosphating) βλέπε *σχήμα 2*.

Αυτές οι μέθοδοι χρησιμοποιούνται ευρέως ώστε να προστατεύσουν τον χάλυβα από το περιβάλλον. Απλές δοκιμές πακτωμένων δοκών πραγματοποιήθηκαν για διερεύνηση του επιπέδου προσκόλλησης ανάμεσα στην επιφάνεια των δύο υλικών.

Το *σχήμα 5* δείχνει μία τυπική καμπύλη φόρτισης – μετατόπισης για ένα δείγμα χάλυβα με θερμή εμβάπτιση ψευδαργύρου/Twintex όπου δοκιμάστηκε σε 1mm/min SCB συνθήκες φόρτισης. Μία εξέταση της καμπύλης δείχνει ότι η μετάδοση του σπασίματος συμβαίνει με ένα σταθερό τρόπο μετά την μέγιστη φόρτιση, που περίπου φθάνει τα 200 KN. Η ενέργεια θραύσης της διεπιφάνειας υπολογίζεται από την εξίσωση (2). Εδώ η τιμή της σταθεράς m υπολογίζεται από την κλίση της ευθείας C σε σχέση με a^3 . Το *σχήμα 6* δείχνει μία τυπική καμπύλη της υποχώρησης έναντι του κύβου του μήκους σπασίματος ενός δοκιμίου χάλυβα με θερμή εμβάπτιση ψευδαργύρου/Twintex όπου δοκιμάστηκε σε 1mm/min SCB συνθήκες φόρτισης. Από το σχήμα είναι προφανές ότι τα σημεία εκτείνονται σε μία ευθεία γραμμή. Με γραμμική προσέγγιση των σημείων του διαγράμματος προκύπτει η τιμή της σταθεράς $m = 0.1109$



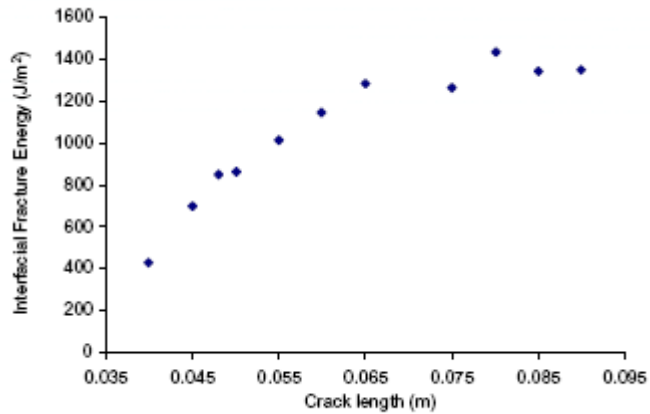
Σχήμα 5 : Τυπική καμπύλη φόρτισης-μετατόπισης για χάλυβα με θερμή εμβάπτιση ψευδαργύρου/Twintex σε 1mm/min SCB συνθήκες φόρτισης



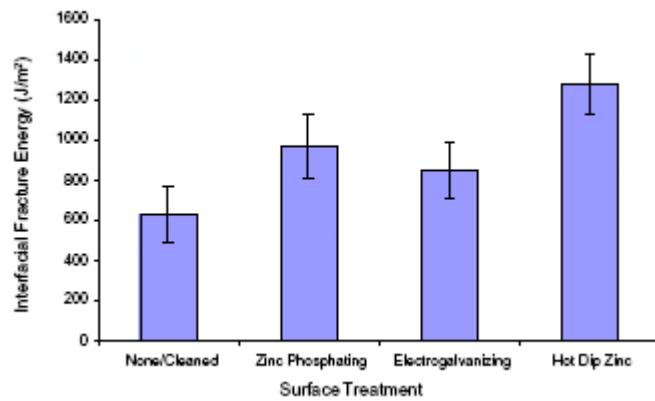
Σχήμα 6: Τυπική καμπύλη της υποχώρησης έναντι του κύβου του μήκους χάλυβα με θερμή εμβάπτιση ψευδαργύρου/Twintex σε 1mm/min SCB συνθήκες φόρτισης

Στο *σχήμα 7* φαίνεται μία τυπική καμπύλη αντίστασης για δείγμα SCB δοκιμασμένο σε 1mm/min. Από το *σχήμα* είναι προφανές ότι η ενέργεια θραύσης της διεπιφάνειας αυξάνει γρήγορα με αύξηση του μήκους σπασίματος πριν σταθεροποιηθεί σε μία τιμή περίπου σε 1400J/m². Μία εξέταση πολλών δειγμάτων κατά την διάρκεια δοκιμών έδειξε ότι η ανερχόμενη καμπύλη γενικά συσχετίζεται με την ανάπτυξη εκτεταμένων ανωμαλιών (crazing) της πολυπροπυλενικής μήτρας στην αρχή του ραγίσματος. Το *σχήμα 8* συνοψίζει την επίδραση των κατεργασιών βελτίωσης επιφάνειας που εφαρμόστηκαν στο μεταλλικό υπόστρωμα πάνω στις εσωτερικές ιδιότητες σπασίματος των υβριδικών συστημάτων. Από το διάγραμμα φαίνεται ότι τρεις από τις προβελτιωτικές κατεργασίες απέδωσαν εσωτερικές ενέργειες διάσπασης στην περιοχή των 850-1300J/m². Αυτές οι τιμές είναι ολοφάνερα εντυπωσιακές για ένα χάλυβα-θερμοπλαστικής εσωτερικής επιφάνειας, είναι πλησιέστερες στην εσωτερική ενέργεια διάσπασης διεπιφάνειας ενός αλουμινίου-εποξειδικού. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα δείγματα που προετοιμάστηκαν με θερμή εμβάπτιση ψευδαργύρου κατεργασία βελτίωσης, έχουν υψηλές τιμές G_c . Το *σχήμα 9* δείχνει χαμηλής μεγέθυνσης οπτικές φωτογραφίες δοκιμών χαλύβδινων δειγμάτων SCB. Από το *σχήμα* είναι προφανές ότι τα δείγματα που προετοιμάστηκαν με ηλεκτρογαλβάνισμα και εμβάπτιση ψευδαργύρου ως βελτιωτικές κατεργασίες επιφάνειας, δείχνουν μικρή ή όχι ανωμαλία μήτρας δείχνοντας ότι δεν έγινε μία δυνατή συγκόλληση ανάμεσα στα διαφορετικά υλικά. Μία εξέταση των θραυσμένων επιφανειών αποκαλύπτει ότι το ράγισμα αναπαράχθηκε κυρίως μέσα στο σύνολο της συγκόλλησης ανάμεσα στο μέταλλο και το επίπεδο συγκόλλησης.

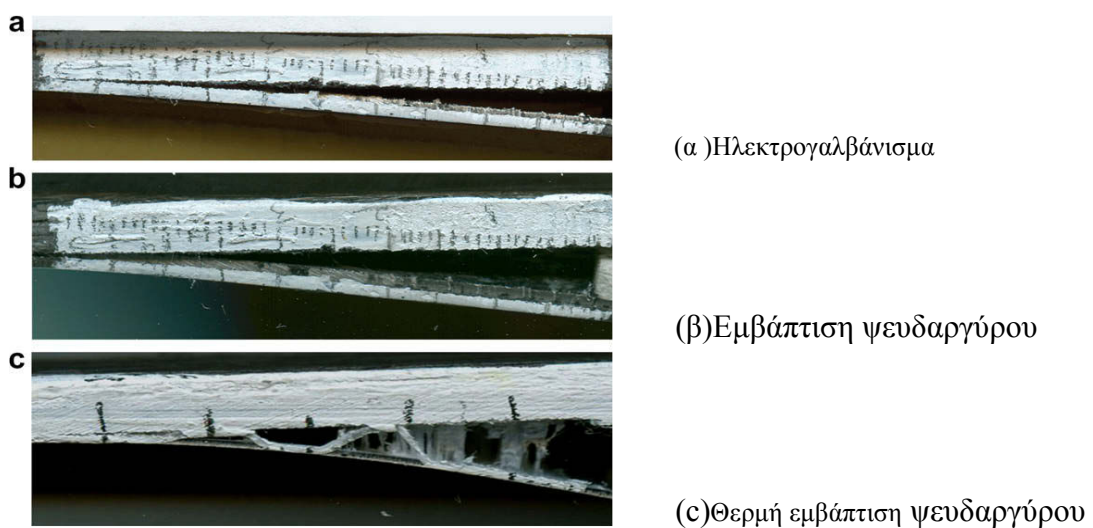
Αντιθέτως τα δείγματα που προετοιμάστηκαν με την βελτιωτική κατεργασία επιφάνειας θερμής εμβάπτισης ψευδαργύρου εμφάνισαν μεγάλες ποσότητες ανωμαλιών μήτρας δείχνοντας ότι έχει επιτευχθεί ένα καλό επίπεδο συγκόλλησης. Εδώ ο συνδυασμός της τοπογραφίας της επιφάνειας του μεταλλικού υποστρώματος παρείχε έναν αυξημένο αριθμό των σημείων αγκύρωσης ώστε να προάγουν τις μηχανικές αλληλοσυνδέσεις. Μία εξέταση των σπασμένων επιφανειών αποκάλυψε ότι το ράγισμα μεταδόθηκε κυρίως με ενιαίο τρόπο στα εσωτερικά υλικά.



Σχήμα 7: απεικόνιση αντίστασης (σε θραύση) για δείγμα χάλυβα με θερμή εμβάπτιση ψευδαργύρου/Twintex SCB δοκιμασμένο σε 1mm/min.



Σχήμα 8: επίδραση των κατεργασιών βελτίωσης της επιφάνειας σε χάλυβα στην ενέργεια θραύσης της διεπιφάνειας

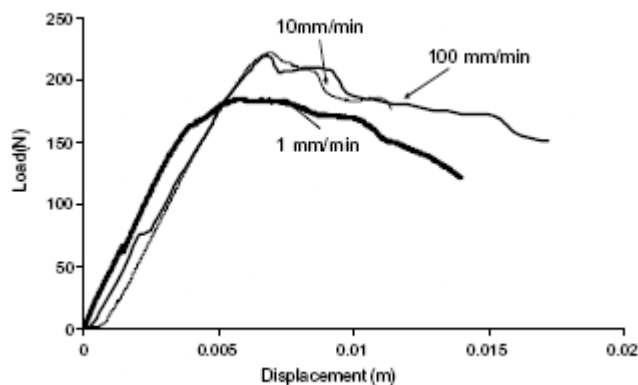


Σχήμα 9: Φωτογραφίες χαμηλής ανάλυσης δοκιμών SCB υβριδικών χάλυβδινων δειγμάτων

Με βάση αυτά τα αποτελέσματα, συμπεραίνεται ότι ένα καλό επίπεδο συγκόλλησης μπορούσε επίσης να επιτευχθεί στα βασισμένα σε Curoν συστήματα (αυτοενισχυόμενα PP), χρησιμοποιώντας έναν παρόμοιο συνδυασμό των επιπέδων συγκόλλησης και DP 500 κατεργασίες βελτίωσης επιφανειών. Σε θερμοκρασία 165°C η συγκόλληση των εσωτερικών στρωμάτων κρατήθηκε σε επαφή με το μεταλλικό υπόστρωμα κάτω από πίεση. Κατά την διάρκεια της φάσης ψύξης, η πίεση διατηρήθηκε ώστε να εξασφαλίσει την κατάλληλη ποιότητα συγκόλλησης. Εδώ, τα επίπεδα των αυτοενισχυόμενων PP συνδέθηκαν με το υπόστρωμα αλουμινίου χρησιμοποιώντας έναν αριθμό κατεργασιών βελτίωσης επιφάνειας εφαρμοσμένων στα φύλλα αλουμινίου και ενσωματώντας τα επίπεδα του τροποποιημένου PP. Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις το ράγισμα έχει διαδοθεί με ενιαίο τρόπο μέσα στο σύνθετο υλικό σαν αποτέλεσμα του εξαιρετικού επιπέδου συγκόλλησης στις διεπιφάνειες των υλικών.

Είναι γνωστό ότι ο ρυθμός με τον οποίο μία κατασκευή φορτίζεται επηρεάζει την μηχανική συμπεριφορά των υλικών όπως επίσης και την κατασκευαστική τους αντίδραση. Επομένως, άπαξ ένα καλό επίπεδο συγκόλλησης επιτυγχάνεται στα εσωτερικά υλικά είναι απαραίτητο να ερευνηθεί η επίδραση του ρυθμού φόρτισης πάνω στις εσωτερικές ιδιότητες διάσπασης εκείνων των σύνθετων μεταλλικών υβριδικών στρωμάτων.

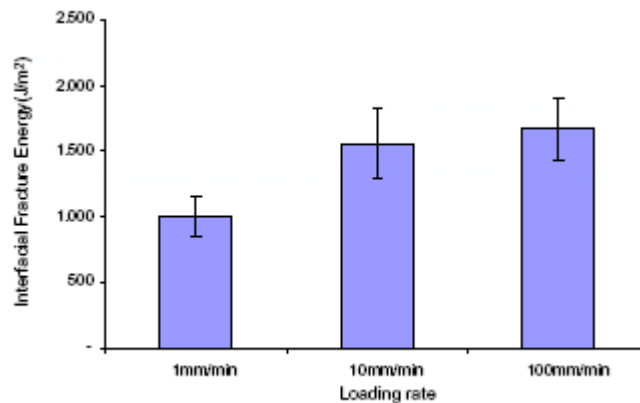
Το *σχήμα 10* δείχνει την τυπικές καμπύλες φόρτισης-μετατόπισης ακολουθώντας δοκιμές SCB πάνω σε δείγματα DP500/Twintex σε 1,10, και 100 mm/min. Από το σχήμα είναι προφανές ότι όλα τα δοκίμια εμφανίζουν αρχική γραμμική συμπεριφορά μέχρι το σημείο όπου ασκήθηκε το υψηλότερο φορτίο. Η συνεχόμενη φόρτιση είχε ως αποτέλεσμα στην μόνιμη παραμόρφωση ακολουθούμενη από σταθερή διάδοση ραγίσματος. Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι τα εξεταζόμενα δοκίμια στα 10 και 100mm/min έδειξαν υψηλότερες δυνατότητες συμπεριφοράς φόρτισης με τιμές που έφταναν πάνω από 200Nt. Αυτό υπονοεί ότι ο ρυθμός εγκάρσιας μετατόπισης επιδρά στις ιδιότητες θραύσης της διεπιφάνειας αυτών των υβριδικών συστημάτων.



Σχήμα 10: Καμπύλες φόρτισης-μετατόπισης δοκιμών SCB σε DP100/Twintex για διαφορετικές συνθήκες φόρτισης

Τα δεδομένα φόρτισης και μετατόπισης χρησιμοποιήθηκαν στον υπολογισμό των ιδιοτήτων θραύσης της διεπιφάνειας των υβριδικών συστημάτων (εξίσωση(2)). Οι μέσες τιμές ενέργειας εσωτερικής θραύσης για υβριδικά συστήματα δοκιμασμένα σε εγκάρσια μετατόπιση ρυθμού από 1, 10 και 100mm/min φαίνονται στο *σχήμα 11*. Από το σχήμα είναι προφανές ότι η ενέργεια θραύσης της διεπιφάνειας αυξάνεται από περίπου 1000 σε 1500 J/m² όταν η εγκάρσια μετατόπιση αυξάνεται από 1 σε

10mm/min. Οι τιμές ενέργειας θραύσης της διεπιφάνειας παραμένουν σχεδόν παρόμοιες στα 100mm/min υπονοώντας ένα εξαιρετικό επίπεδο πρόσφυσης η οποία θα μπορούσε να διατηρηθεί σε υψηλότερους ρυθμούς φόρτισης.



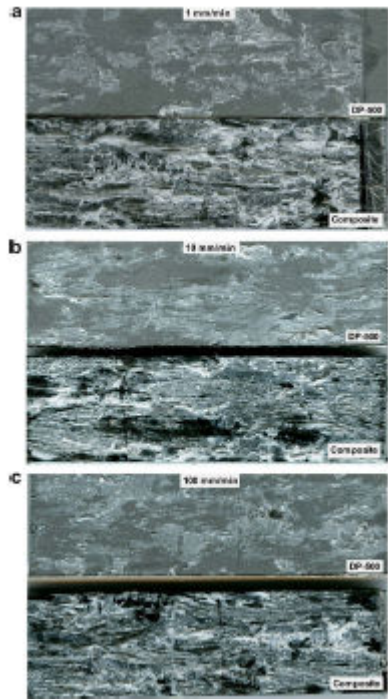
Σχήμα 11: επίδραση του ρυθμού φόρτισης στην ενέργεια θραύσης της διεπιφάνειας σε DP500/Twintex υβριδικό σύστημα

Το σχήμα 12 δείχνει χαμηλής μεγέθυνσης μικρογραφίες των επιφανειών διάσπασης υβριδικών συστημάτων μετά από δοκιμές SCB με ρυθμούς από 1, 10 και 100mm/min. Εδώ η μετάδοση του ραγίσματος είναι από δεξιά προς τα αριστερά. Είναι σαφές ότι σημαντικά ποσά της απαιτούμενης ενέργειας του ραγίσματος απορροφήθηκαν από την πλαστική παραμόρφωση του PP. Επιπρόσθετα, ίχνη πολυπροπυλενίου εμφανίζονται στα υποστρώματα του χάλυβα των εξεταζόμενων δειγμάτων στον πιο χαμηλό ρυθμό φόρτισης (σχήμα 12a). Όταν ο ρυθμός εγκάρσιας φόρτισης αυξήθηκε, μεγαλύτερες ποσότητες του εναπομείναντος πολυπροπυλενίου είναι εμφανή στις μεταλλικές επιφάνειες (σχήμα 12b και c). Τα αποτελέσματα φαίνονται στο σχήμα 11. Για την καλύτερη κατανόηση της διαδικασίας σπασίματος, πολλά από τα δείγματα εξετάστηκαν από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (Scanning Electron Microscope). Το σχήμα 13 δείχνει μικρογραφίες SEM σύνθετων επιφανειών των εξεταζόμενων δειγμάτων σε συνθήκες φόρτισης SCB στα 1, 10 και 100mm/min. Από το σχήμα είναι προφανές ότι το ράγισμα είχε μεταδοθεί σαν ενιαίο σύνολο και η πλαστική παραμόρφωση της μήτρας έπαιξε ένα σημαντικό ρόλο και συνεισέφερε στις ιδιότητες εσωτερικής διάσπασης των υβριδικών συστημάτων.

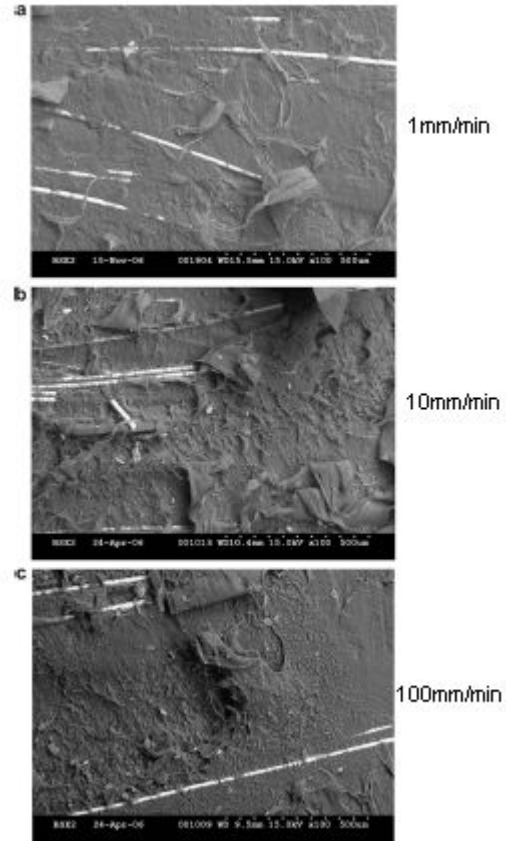
Οι ιδιότητες εφελκυσμού του χάλυβα, στα σύνθετα βασισμένα σε πολυπροπυλένιο και θερμοπλαστικά σύνθετα μεταλλικά υβριδικά στρώματα ερευνήθηκαν με οιονεί στατικούς ρυθμούς φόρτισης. Δοκίμια τοποθετήθηκαν στην μηχανή δοκιμής και οι δοκιμές διεξήχθησαν στην εγκάρσια παραμόρφωση με ρυθμό 1mm/min με καταγραφή αποτελεσμάτων φόρτισης μετατόπισης.

Στο σχήμα 14 φαίνεται μία τυπική καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης υβριδικού στρώματος σύνθετων ενισχυμένων με ίνες υάλου - μετάλλου. Περιλαμβάνονται στα διαγράμματα τυπικές καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης για χάλυβα DP500 και του υαλοπισμένου σύνθετου υλικού. Πρέπει να σημειωθεί ότι η παραμόρφωση καθορίστηκε από την μέση εγκάρσια μετατόπιση του μήκους εργασίας του δοκιμίου. Για αυτόν τον λόγο, η αναφερόμενη παραμόρφωση δεν είναι ακριβής, ωστόσο, είναι φανερό ότι η παρούσα καμπύλη παρουσιάζει ενδιαφέρον προβλέποντας την συμπεριφορά τάνυσης αυτών των πολυστρωματικών συστημάτων. Εδώ το μεταλλικό

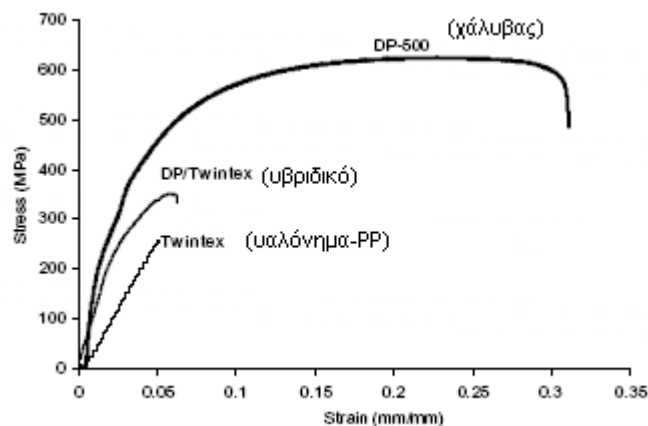
υλικό εμφανίζει όλκιμη συμπεριφορά χωρίς να δείχνει ιδιαίτερο σημείο διαρροής, το οποίο είναι ένα χαρακτηριστικό, συνδεδεμένο με διαφασικό χάλυβα. Τα αποτελέσματα συνεχόμενης φόρτισης για DP500 σταθεροποιούνται σε τιμή τάσης στα 600 MPa. Απ' την άλλη πλευρά τα Twintex^R παρουσιάζουν τυπική ψαθυρή συμπεριφορά με απότομη αστοχία σε περιοχές τάσης γύρω στα 250MPa και τιμές παραμόρφωσης 0.05.



Σχήμα 12: μικρογραφίες επιφάνειας θραύσης για DP500/Twintex για 1,10 και 100mm/min



Σχήμα 13: Μικρογραφίες (από μικροσκόπιο) επιφάνειας σύνθετου, δοκμών SCB σε 1, 10 και 100mm/min



Σχήμα 14: Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης για DP500/Twintex σε μεταλλικό στρώμα

Τα υβριδικά συστήματα δείχνουν ενδιαφέρουσα συμπεριφορά τάνυσης η οποία είναι αποτέλεσμα των χαρακτηριστικών εφελκυσμού των συστατικών υλικών. Εδώ, το

πρώτο μέρος της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης ακολουθεί μη γραμμική-ελαστική συμπεριφορά με αυξανόμενες τιμές της τάσης έως περίπου 350MPa. Έτσι, η παραμόρφωση αστοχίας του σύνθετου υλικού προσεγγίζει αποτελεσματικά τυπική αστοχία σπασίματος στο εσωτερικό επίπεδο του σύνθετου. Σημειώνεται ότι τα μεταλλικά με αντίστοιχες ιδιότητες δεν αστοχούσαν σε αυτήν την τιμή τάσης και η δοκιμή διακόπηκε. Διαρκής φόρτιση δοκιμών θα μπορούσε να είναι αποτελεσματική στην φόρτιση που μεταφέρεται σε μεταλλικά επίπεδα ώσπου να αστοχήσει σε κόπωση ο χάλυβας DP500.

Τα πειραματικά αποτελέσματα συγκρίνονται με τις προβλέψεις που δίδονται από τον απλό νόμο σύνθεσης λαμβάνοντας υπόψη τις μηχανικές ιδιότητες των συστατικών υλικών. Ο τυπικός κανόνας σύνθεσης δίδεται ως εξής:

$$\sigma_{FML} = \sigma_m V_m + \sigma_c V_c \quad (5)$$

Όπου σ η αντοχή τάνυσης, V το κλάσμα όγκου, FML :fiber-metal-laminate, m :metal και c :composite

Σημειώνεται ότι στην αντοχή σπασίματος του υβριδικού συστήματος, τα μεταλλικά υλικά (DP500) δεν έχουν φτάσει την μέγιστη αντοχή τάνυσης. Επομένως, οι νόμοι σύνθεσης τροποποιούνται να λάβουν υπόψη στην μελέτη την τάση του μετάλλου, σ'_m στην παραμόρφωση θραύσης του σύνθετου υλικού σχετικά με την μέγιστη αντοχή τάνυσης του μεταλλικού υλικού. Έτσι, η τελική αντοχή τάνυσης του θερμοπλαστικού σύνθετου-μεταλλικού υβριδικού στρωματικού υλικού δίδεται από την σχέση:

$$\sigma_{FML} = \sigma'_m V_m + \sigma_c V_c \quad (6)$$

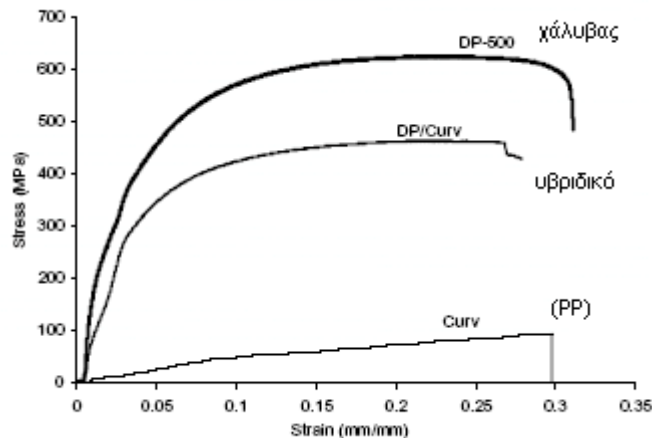
Οι προβλέψεις που δίδονται από την εξίσωση (6) και οι πειραματικές τιμές δίδονται στον πίνακα 1. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι υπάρχει σύγκλιση θεωρητικών και πειραματικών τιμών, υποδεικνύοντας ότι ένας αριθμός μηχανικών ιδιοτήτων των υβριδικών υλικών μπορεί εύκολα να προβλεφθεί από τον νόμο της σύνθεσης.

Πίνακας 1: Προβλεπόμενες –πειραματικές ιδιότητες DP500 με εφαρμογή υβριδικού συστήματος

Είδος συστήματος	Συνολικό πάχος στρώματος (mm)	Κλάσμα όγκου μετάλλου (V_m)	DP500 αντοχή τάνυσης (MPa)	Υπολογιζόμενη αντοχή τάνυσης (MPa)	Πειραματική αντοχή τάνυσης (MPa)
DP500/Twintex	2.54	0.4803	$\sigma_m=470$	356	351
DP500/Curv	1.62	0.7531	$\sigma_m=620$	488	464

Το σχήμα 15 δείχνει μία τυπική καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης για Curv^R – με βάση υβριδικό σύστημα. Στο ίδιο σχήμα συμπεριλαμβάνονται οι τυπικές καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης του καθαρού χάλυβα και του σύνθετου υλικού (Curv). Από το σχήμα είναι προφανές ότι το υβριδικό σύστημα παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά, όπως φαίνεται από την καμπύλη του χάλυβα, όπου η τάση αυξάνεται σε μία μη γραμμική συμπεριφορά μέχρις ότου η τελική αντοχή περίπου φτάνει τα 460Kpa. Η μείωση της αντοχής σχετίζεται με την χαμηλή αντοχή που παρουσιάζει το σύνθετο υλικό (Curv^R).

Ωστόσο, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η παραμόρφωση αστοχίας των υβριδικών υλικών είναι αρκετά εντυπωσιακή.



Σχήμα 15: Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης για DP500/Curv σε μεταλλικό στρώμα

3.3 Σχηματισμός αναδίπλωσης οιονεί-ισοτροπικών θερμοπλαστικών σύνθετων στρωμάτων κατά την διάρκεια μορφοποίησης ελάσματος

3.3.1 Πειράματα

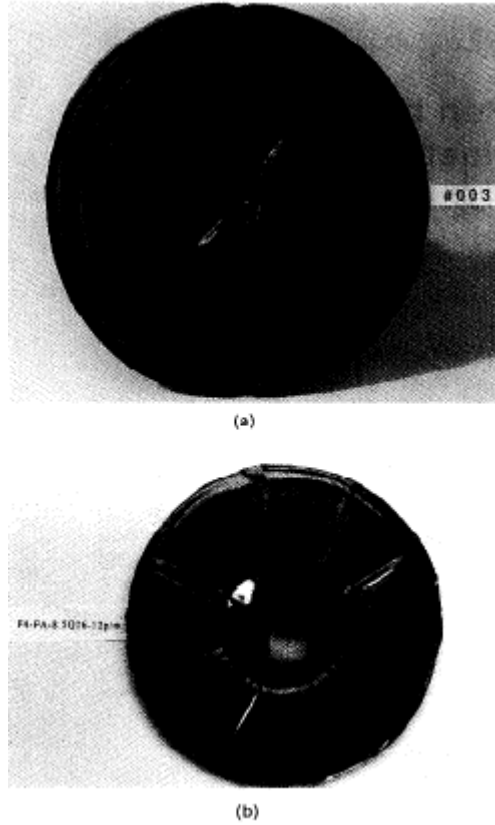
Προηγούμενες πειραματικές μελέτες, έχουν εστιασθεί σε μορφοποίηση μέσα σε ημισφαιρικά καλούπια με διαφορετικό βάθος και ακτίνα, χρησιμοποιώντας έναν αυτόματο θάλαμο συμπίεσης ή σταμπάρισμα (punch). Αρχικά, όλα τα πειράματα εμπεριέχουν κυκλικούς προσχηματισμούς. Από τα αποτελέσματα για μονοδιευθυντικά, εγκάρσια φύλλα και συνδυασμό οιονεί ισοτροπικών περιπτώσεων, παρατηρήθηκε ότι -για κάθε περίπτωση- αναδιπλώσεις σχηματίστηκαν σε γωνία 45° από την διεύθυνση των ινών. Για μονοδιευθυντικά και εγκάρσια φύλλα πολυστρωματικών, αυτό σημαίνει ότι εμφανίζονται τέσσερις αναδιπλώσεις, στις θέσεις που φαίνονται στο σχήμα 1a, και για συνδυασμό οιονεί ισοτροπικών στρωμάτων παρατηρούνται οκτώ αναδιπλώσεις (σχήμα 1b).

3.3.2 Μοντελοποίηση μορφοποίησης ελάσματος

3.3.2.1 Μοντέλο συνέχειας (continuum model) για μορφοποίηση ελάσματος σύνθετων.

Το χρησιμοποιούμενο μοντέλο συνέχειας που χρησιμοποιείται για να παρουσιάσει την συμπεριφορά των σύνθετων κατά την διάρκεια μορφοποίησης, είναι αυτό του ιδανικού ενισχυμένου με ίνες Νευτώνειου ρευστού [8]. Η σχέση που ανταποκρίνεται σε αυτό τον τύπο μοντέλων εμπεριέχει δύο κινηματικούς περιορισμούς, δηλαδή ασυμπιεστα υλικά και ίνες μη προεκτάσιμες και δίδεται από τον Rogers ως εξής:

$$\sigma_{ij} = -P\delta_{ij} + Ta_i a_j + 2\eta_T d_{ij} + 2(\eta_L - \eta_T)(\alpha_i a_k d_{kj} + a_j a_k d_{ki}) \quad (1)$$



Σχήμα 1 : Μονοδιευθυντικά (a) και οιονεί-ισοτροπικά (b) κυκλικά στρώματα που παρουσιάζουν αναδίπλωση διάτμησης (shear buckling).

Όπου σ_{ij} είναι ο τανυστής των τάσεων, η_L, η_T είναι το κατά μήκος και εγκάρσιο ιξώδες διάτμησης αντίστοιχα. P είναι η κρίσιμη υδροστατική πίεση που σχετίζεται με τον περιορισμό ασυμπίεστότητας, και το T εκφράζει την κρίσιμη τάνυση που σχετίζεται με τον περιορισμό της μη προεκτάσιμης ίνας. Το d είναι ο ρυθμός παραμόρφωσης τανυστή. Η εξίσωση (1) μπορεί να αναλυθεί στις επόμενες εξισώσεις όταν εφαρμόζονται συνθήκες επίπεδης τάσης:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} + D_{33} & D_{33} & D_{16} \\ D_{33} & D_{22} + D_{33} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} d_{11} \\ d_{22} \\ 2d_{12} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Tm^2 \\ Tn^2 \\ mnT \end{bmatrix} \quad (2)$$

Όπου $m = \cos \theta(t)$ και $n = \sin \theta(t)$, και οι όροι του ιξώδους των συστατικών μήτρας δίδονται ως εξής:

$$D_{11} = 2\eta_T(1 - 2m^2) + 4\eta_L m^2$$

$$D_{22} = 2\eta_T(1 - 2n^2) + 4\eta_L n^2$$

(3)

$$D_{33} = 2\eta_T$$

$$D_{16} = D_{26} = 2(\eta_L - \eta_T)mn$$

$$D_{66} = \eta_L$$

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι αυτό το σύστημα παρουσιάζει μόνο την κρίσιμη τάση εφελκυσμού. Ο περιορισμός ασυμπίεστου μπορεί να ικανοποιηθεί με ρύθμιση του ρυθμού παραμόρφωσης στην διεύθυνση μέσω του πάχους.

Το υλικό μεμβράνης παρουσιάζεται σαν ένα ισοτροπικό ημίρευστο υγρό, χρησιμοποιώντας την σχέση :

$$\sigma_{ij} = -P\delta_{ij} + 2\eta d_{ij} \quad (4)$$

όπου χαρακτηρίζεται από το απλό ιξώδες η . Για συνθήκες επίπεδης τάσης (plain stress conditions) εφαρμόζεται η εξής σχέση:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4\eta & 2\eta & 0 \\ 2\eta & 4\eta & 0 \\ 0 & 0 & \eta \end{bmatrix} \quad (5)$$

3.3.2.2 Μοντελοποίηση πεπερασμένου στοιχείου

Αναπτύσσεται μία διατύπωση πεπερασμένου στοιχείου για ιδανικά ινοπλισμένα Νευτώνια ρευστά συνεχές μοντέλου, εμπεριέχοντας ανεξάρτητες επιλύσεις της ταχύτητας και του εφελκυσμού [9]. Κατόπιν μελετών η τελική διατύπωση έχει την μορφή:

$$\{ \mathbf{K} + \alpha \mathbf{K}^t (\mathbf{M}^t)^{-1} (\mathbf{K}^t) \} \mathbf{a}^v = \mathbf{f} \quad (6)$$

Όπου οι μήτρες δίδονται :

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_{ij} &= \int_{\Omega} (\mathbf{B}_i^v)^T d\Omega & \mathbf{K}_{ij}^t &= \int_{\Omega} (\mathbf{B}_i^v)^T a \mathbf{N}_j^t d\Omega \\ \mathbf{f} &= \int_{\Gamma} (\mathbf{N}_i^v)^T t d\Gamma & \mathbf{M}_{ij}^t &= \int_{\Omega} \mathbf{N}_i^t \mathbf{N}_j^t d\Omega \end{aligned} \quad (7)$$

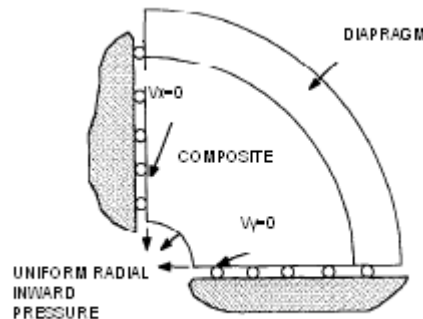
Όπου \mathbf{N}^v και \mathbf{N}^t δηλώνουν τις εξισώσεις παρεμβολής μεταξύ περιοχών εφελκυσμού και ταχύτητας αντίστοιχα, και a ο συντελεστής διόρθωσης. Η έκφραση για κομβικές ταχύσεις \mathbf{a}^t μπορούν να ληφθούν από την επίλυση κομβικών ταχυτήτων \mathbf{a}^v ως ακολούθως :

$$\mathbf{a}^t = \alpha (\mathbf{M}^t)^{-1} (\mathbf{K}^t)^T \mathbf{a}^v$$

3.3.2.3 Προγενέστερα αριθμητικά αποτελέσματα

Ανάλυση

Η μοντελοποίηση πεπερασμένου στοιχείου προϋποθέτει συνθήκες επίπεδης τάσης. Τα αναλυτικά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για να παρουσιάσουν τα προηγούμενα πειράματα είναι επομένως επίπεδα. Ένα σχήμα μοντέλου που χρησιμοποιείται για την ανάλυση μορφοποίησης κυκλικού ελάσματος μέσα σε κυκλική κοιλότητα παρουσιάζεται στο *σχήμα 2*. Εξετάζοντας την συμπεριφορά στην περιοχή της φλάντζας του στρώματος, παρατηρείται ότι εκεί είναι που συμβαίνει κάμψη διάτμησης (shear buckling), και επομένως τα διαφορετικά είδη στρωμάτων τα οποία έχουν εξετασθεί πειραματικά μπορούν εύκολα να ενσωματωθούν στο μοντέλο. Η εξωτερική περιοχή, η οποία σημειώνεται σαν το απεικονιζόμενο υλικό μεμβράνης (diaphragm), περιορίζεται στα εξωτερικά όρια, αντιπροσωπεύοντας την σύσφιξη της μεμβράνης σε πραγματικές συνθήκες μορφοποίησης.



Σχήμα 2: Μοντέλο τυπικής επίπεδης μορφοποίησης

Αντί για πειραματικό εργαλείο, εφαρμόζεται μία ομοιόμορφη υδροστατική πίεση στην εσωτερική ακτίνα του μοντέλου. Τα ιξώδη διάτμησης που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση είναι $\eta_L = 6000Pas$ $\eta_T = 4000Pas$.

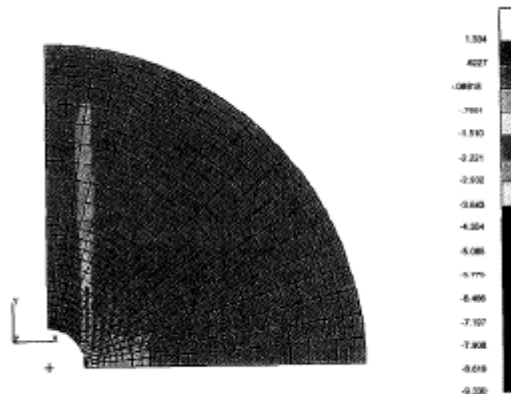
Μονοδιευθυντικά στρώματα.

Η ανάλυση των προβλημάτων αυτού του τύπου δείχνει ότι η μέγιστη διατμητική τάση παρατηρείται στην εσωτερική ακτίνα του μοντέλου, στο ή κοντά (εξαρτάται από το διατμητικό ιξώδες που χρησιμοποιήθηκε στο μοντέλο) στο σημείο των 45° όπου παρατηρείται αναδίπλωση, όπως φαίνεται στο *σχήμα 3*. Η μέγιστη διατμητική τάση για δεδομένο ιξώδες μεμβράνης εξαρτάται από τον λόγο της εξωτερικής διαμέτρου της περιοχής του σύνθετου προς την εσωτερική διάμετρο.



Σχήμα 3: Κατανομή διατμητικής τάσης

Η αύξηση του ιξώδους της μεμβράνης μειώνει την μέγιστη διατμητική τάση, ιδιαίτερα για μικρούς λόγους εξωτερικών προς εσωτερικών διαμέτρων. Για ένα υψηλό ιξώδες μεμβράνης, η μέγιστη διατμητική τάση αυξάνει καθώς αυξάνει ο λόγος των διαμέτρων. Σε διάφορα πειράματα παρατηρήθηκαν συγκεντρώσεις αξονικών τάσεων θλίψης, οι οποίες παρατηρούνται όπου οι ίνες είναι εφραπτόμενες στο περίγραμμα του καλουπιού (σχήμα 4), συμπίπτοντας με την περιοχή της εσωτερικής στρεβλωμένης ίνας.



Σχήμα 4: Κατανομή αξονικής τάσης

Μία αύξηση της διαμέτρου ελάσματος του σύνθετου, γενικά, θα έχει ως αποτέλεσμα μία μείωση στο μέγεθος της θλιπτικής αξονικής τάσης σε αυτό το σημείο. Μεγαλύτερα ιξώδη μεμβράνης επίσης τείνουν να μειώσουν το μέγεθος αυτής της τάσης, όπως θα αναμενόταν. Επίσης οι τάσεις οι οποίες προκαλούν αναδίπλωση της ίνας στο εσωτερικό επίπεδο είναι και εκείνες οι οποίες προκαλούν αναδίπλωσης διάτμησης στο εξωτερικό επίπεδο, και επηρεάζουν με διαφορετικό τρόπο την μεταβολή της διαμέτρου του ελάσματος.

Πολυδιευθυντικά στρώματα.

Έχει αποδειχθεί πειραματικά ότι όταν ένα στρώμα πλούσιας ρητίνης σχηματισθεί ανάμεσα σε δύο γειτονικά φύλλα κατά την διάρκεια της μορφοποίησης, διευκολύνει την ολίσθηση ανάμεσα στα φύλλα. Ωστόσο τα χωριστά φύλλα παραμορφώνονται ανεξάρτητα το ένα από το άλλο. Γι αυτόν τον λόγο το κάθε φύλλο αναλύθηκε ανεξάρτητα, και υπολογίσθηκε ένας μέσος όρος συνθηκών για το στρώμα.

Το μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η εφραπτόμενη τάση, η οποία δρα στην διεύθυνση της αναδίπλωσης όλων των περιοχών αναδίπλωσης. Άμεση σύγκριση ανάμεσα στις τιμές της εφραπτόμενης τάσης στις περιοχές αναδίπλωσης για διαφορετικά στρώματα, δεν είναι βάσιμη, εφόσον εκείνες οι τάσεις θα δράσουν πάνω στα στοιχεία του υλικού με διαφορετικές αντιστάσεις στο εξωτερικό επίπεδο αναδίπλωσης. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η σύγκριση της εφραπτόμενης τάσης στις διάφορες περιοχές αναδίπλωσης για διαφορετικούς προσχηματισμούς στο ίδιο επίπεδο, εφόσον οι ιδιότητες στρώματος σε εκείνα τα σημεία θα πρέπει να είναι οι ίδιες.

Εφόσον οι εφαπτόμενες τάσεις στις θέσεις 0° , 45° και 90° προκαλούν κάμψη διάτμησης στο εξωτερικό επίπεδο, προβλέπεται ότι το τετράγωνο και ο κύκλος αναμένεται να παρουσιάσουν το ίδιο επίπεδο αναδίπλωσης στις θέσεις 0° και 90° , αλλά το τετράγωνο θα είναι σημαντικά λιγότερο επιρρεπές στην αναδίπλωση στο σημείο των 45° απ' ό,τι ο κύκλος.

Παράγοντας σταθερότητας

Η ολοκληρωμένη ανάλυση του φαινομένου αναδίπλωσης που αναφέρθηκε παραπάνω θα προϋπέθετε μια σταθερή ανάλυση του σύνθετου στρώματος όταν αυτό παραμορφώνεται στο καλούπι. Στην περίπτωση της οιονεί ισοτροπικής στρώσης έχει παρατηρηθεί ότι η αναδίπλωση θα ξεκινά πάντα σε $0/+45/-45/90^{\circ}$ κατευθύνσεις ίνας, και για θηλυκό ημισφαιρικό καλούπι θα αρχίζει πάντα από το εξωτερικό περίγραμμα.

Εξετάζονται οι προβλέψεις της εφαπτόμενης τάσης γύρω από τη εσωτερική ακτίνα του μοντέλου μας, επειδή αυτή η τάση δρα στην κατεύθυνση της αναδίπλωσης στα πιθανά σημεία αναδίπλωσης. Σημειώνεται ότι, αν και οι τιμές επίλυσης για εφαπτόμενη τάση σε όλα τα σημεία διαμέσου της εσωτερικής ακτίνας φαίνονται, αυτές δεν είναι όλες της ίδιας σημαντικότητας, επειδή δρουν κατά μήκος των διευθύνσεων του υλικού το οποίο έχει διαφορετικές ευαισθησίες αναδίπλωσης. Ωστόσο, η σύγκριση ανάμεσα στις τιμές της εφαπτόμενης τάσης για διαφορετικά σημεία αναδίπλωσης (π.χ. $0/+45/-45/90^{\circ}$) προσφέρει μια χρήσιμη πληροφορία στην συμπεριφορά του υλικού, εφόσον οι ενισχύσεις του υλικού είναι στους ίδιους προσανατολισμούς στο κάθε σημείο. Πρέπει να σημειωθεί όμως ότι και άλλοι γεωμετρικοί παράγοντες μπορεί να επιδράσουν στην σταθερότητα του στρώματος.

3.3.3 Πειράματα μορφοποίησης μεμβράνης

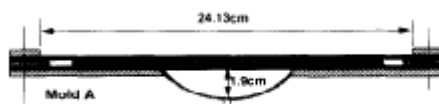
Εισαγωγή

Διεξήχθησαν μια σειρά πειραμάτων μορφοποίησης μεμβράνης χρησιμοποιώντας ένα θηλυκό ημισφαιρικό καλούπι ώστε να ερευνηθεί η επίδραση του προ-μορφοποιημένου σχήματος πάνω σε «πρότυπα» αναδίπλωσης που παρατηρήθηκαν κατά την διάρκεια μορφοποίησης σε οιονεί ισοτροπικά στρώματα. Ιδιαίτερη σημασία δόθηκε στο να εξετασθεί εάν ένα τετράγωνο στρώμα είναι λιγότερο επιρρεπές να αναδιπλώσει στο σημείο των 45° απ' ό,τι στα σημεία των 0 και 90° . Πραγματοποιήθηκαν επιπλέον πειράματα συμπεριλαμβάνοντας ορθογώνια και άλλα σχήματα στρωμάτων.

Εξοπλισμός

Τα περιγραφόμενα πειράματα μορφοποίησης μεμβράνης πραγματοποιήθηκαν σε έναν ελεγχόμενο με κομπιούτερ αυτόματο θάλαμο. Αυτός ο θάλαμος λειτουργεί σε πιέσεις πάνω από 2Mpa, και σε θερμοκρασίες πάνω από 450°C . Η θέρμανση και η ψύξη του κλίβανου μπορεί επίσης να ελέγχεται με PC.

Το χρησιμοποιούμενο καλούπι είναι ρηχό ημισφαιρικό, γνωστό ως Female – A mould (σχήμα 5) το οποίος έχει βάθος 19mm. Αυτό το ρηχό καλούπι επιλέγεται για να ελαχιστοποιήσει την επίδραση των ελαστικών τάσεων κάμψης εξ αιτίας της παραμόρφωσης των ινών μέσα στο καλούπι. Η διάμετρος της κοιλότητας είναι 89mm (3.5in) ενώ η συνολική διάμετρος του καλουπιού είναι 216mm (8.5in).

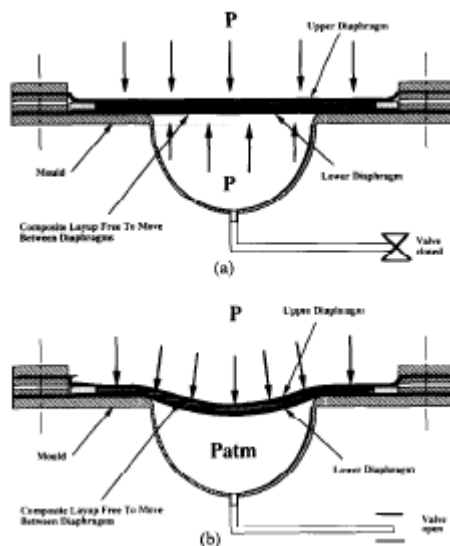


Σχήμα 5: Θηλυκό – Α καλούπι

Το σύνθετο υλικό που εξετάζεται στη παρούσα μελέτη είναι το APC-2 ανθρακόνημα – ενισχυμένο Poly(Ether Ether Ketone) PEEK. Η χρησιμοποιούμενη μεμβράνη είναι η Upilex R.

Μία αρχική σειρά πειραμάτων διεξήχθησαν ρυθμίζοντας την πίεση του θαλάμου ώστε να μορφοποιηθούν τα σύνθετα επίπεδα στο κοίλο καλούπι. Ο ρυθμός στον οποίο το σχήμα μορφοποιείται εξαρτάται από τον πιθανό ρυθμό μέγιστης ρυθμιζόμενης πίεσης από τον θάλαμο, έτσι μπορούν να επιτευχθούν μέγιστοι ρυθμοί μορφοποίησης των $\approx 2.5\text{mm s}^{-1}$. Πολλά από τα μορφοποιημένα τεμάχια με αυτόν τον τρόπο ήταν καλής ποιότητας παρουσιάζοντας μικρή αναδίπλωση. Έχει αποδειχθεί ότι η αναδίπλωση στο εξωτερικό επίπεδο στα σύνθετα μορφοποιημένα ελάσματα εξαρτάται από τον ρυθμό μορφοποίησης, έτσι οι γρηγορότεροι ρυθμοί μορφοποίησης θα πρέπει να αναμένεται ότι θα προκαλέσουν αναδιπλώσεις.

Οι κατάλληλες συνθήκες επιτεύχθηκαν ρυθμίζοντας την πίεση του θαλάμου και της κοιλότητας του καλουπιού σε 0.4 MPa στους 380°C. Το στρώμα συσφίχθηκε (για να ενοποιηθεί) πριν μορφοποιηθεί (σχήμα 5a). Στην συνέχεια η πίεση στο κοίλωμα του καλουπιού ελευθερώθηκε, επιτρέποντας την μέγιστη 0.4MPa πίεση του θαλάμου να μορφοποιήσει το στρώμα μέσα στο καλούπι (σχήμα 5b). Η μετατόπιση του κέντρου της κορυφής της μεμβράνης στο επίπεδο καταγράφηκε από LVDT. Τα στρώματα μορφοποιούνται με ρυθμό τουλάχιστον 5mm s⁻¹.



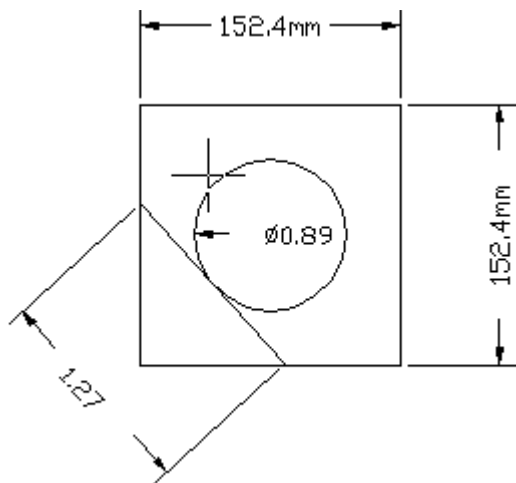
Σχήμα 5:

- (a) Ενοποίηση στρώματος πριν την μορφοποίηση
- (b) μορφοποίηση κοιλότητας με ελευθέρωση πίεσης

Πειράματα και αποτελέσματα

Ο σκοπός του πειραματικού προγράμματος ήταν να διερευνήσει τους βασικούς γεωμετρικούς παράγοντες επίδρασης, εάν και όπου ένα οιονεί ισοτροπικό έλασμα θα αναδιπλωθεί εάν μορφοποιηθεί σε διπλής καμπυλότητας σχήμα. Ιδιαίτερα οι δοκιμές σχεδιάστηκαν να διερευνήσουν την σχέση ανάμεσα στην αναδίπλωση και το μήκος των ινών που αναπτύσσονται εφαπτόμενα στο περίγραμμα του καλουπιού στην πιθανή αναδίπλωση. Το αρχικό πείραμα περιλάμβανε ένα τετράγωνο, με ενίσχυση παράλληλα στην κατεύθυνση των άκρων του και στις διαγώνιες διευθύνσεις. Η σχέση ανάμεσα στην γεωμετρία αυτού του ελάσματος και της κυκλικής κοιλότητας μέσα στην οποία αυτό μορφοποιείται φαίνεται στο *σχήμα 6*, μαζί με σχηματικές απεικονίσεις της εφαπτόμενης ίνας με μήκη που μας ενδιαφέρουν. Οι εφαπτόμενες ίνες οι οποίες αναπτύσσονται παράλληλα προς τις άκρες είναι βέβαια 152mm (6in) μήκος, αλλά εκείνες οι οποίες αναπτύσσονται παράλληλα προς τις διαγώνιες είναι μόνο 127mm (5in) περίπου στο μήκος. Το μορφοποιημένο σχήμα για αυτό το πείραμα φαίνεται στο *σχήμα 7*. Το στρώμα δείχνει προφανή εφαπτόμενη αναδίπλωση όταν μορφοποιείται σε ταχύτητα στην περιοχή των 10mm s^{-1} .

Στο τετράγωνο των 152mm (6in), οκτώ αναδιπλώσεις σχηματίζουν συμμετρία γύρω από το περίγραμμα του καλουπιού. Τέσσερις από αυτές είναι πολύ έντονες και τέσσερις είναι μικρότερες. Οι τέσσερις έντονες αναδιπλώσεις σχηματίζονται στο περίγραμμα του καλουπιού, στις 0 και 90° ως προς τον x άξονα. Οι μικρότερες αναδιπλώσεις σχηματίζονται στις $+45^\circ$ και -45° ως προς τον x άξονα όπου οι κοντότερες ίνες εφάπτονται. Σε κάθε περίπτωση, το έλασμα έχει αναδιπλωθεί κατά μήκος της διεύθυνσης μιας ίνας, εγκάρσια στην διεύθυνση της ίνας και στις $+45^\circ$ και -45° στην διεύθυνση της ίνας. Εάν η αντίσταση στην αναδίπλωση του στρώματος εξαρτάται μόνο από τις τοπικές ιδιότητες, τότε μπορούν να συνδεθούν οι τάσεις σε κάθε ένα από εκείνα τα σημεία αναδίπλωσης με την εμφάνιση ή το μέγεθος των παρατηρούμενων αναδιπλώσεων.



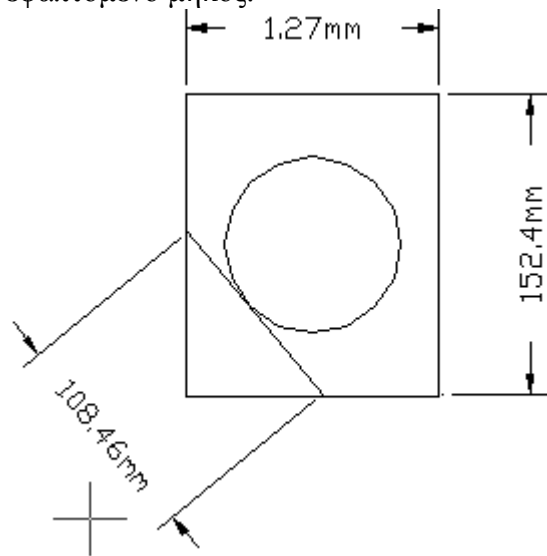
Σχήμα 6: Γεωμετρία τετράγωνου δοκιμίου 152mm



Σχήμα 7: Διαμορφωμένο τετραγωνικό στρώμα 152mm

Προηγούμενα πειράματα για κυκλικά οιονεί ισοτροπικά προ-σχηματισμένα αναφέρθηκαν σε οκτώ ισομεγέθεις αναδιπλώσεις στις ίδιες περιοχές αναδίπλωσης όπως για το τετράγωνο. Για έναν κύκλο φυσικά, όλες οι εφαπτόμενες ίνες έχουν το ίδιο μήκος. Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι το πρότυπο λυγίσματος στο τετράγωνο στρώμα είναι εκείνο που προβλέπεται από την βιβλιογραφία.

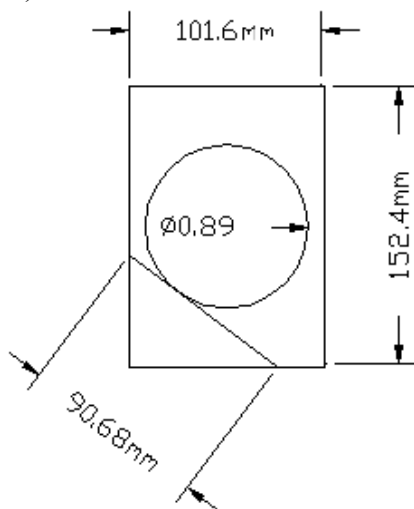
Παρουσιάζονται παρακάτω δύο πειράματα που αναφέρονται σε **ορθογώνια οιονεί ισοτροπικά στρώματα**. Πρώτα εξετάζεται δείγμα διαστάσεων 127mm (5in) x 152mm (6in). Είναι προφανές ότι οι ίνες που είναι παράλληλες στην πλευρά των 127mm έχουν κοντύνει, και έτσι οι διαγώνια εφαπτόμενες ίνες (108mm) έχουν μικρότερη έκταση. Η γεωμετρική απεικόνιση του στρώματος για το πείραμα φαίνεται στο *σχήμα 8* και το αποτέλεσμα στο *σχήμα 9*. Οι μεγαλύτερες αναδιπλώσεις είναι ολοφάνερα στις ίδιες θέσεις αλλά οι δευτερεύουσες αναδιπλώσεις, στις $+45^{\circ}$ και -45° ως προς τον άξονα x είναι τώρα είτε μικρότερες ή δεν υφίστανται, συμπίπτοντας με το κοντύτερο εφαπτόμενο μήκος.



Σχήμα 8: Γεωμετρία ορθογωνίου στρώματος 127mm X 152mm

Σχήμα 9: Ορθογώνιο μορφοποιημένο έλασμα 127mm X 152mm

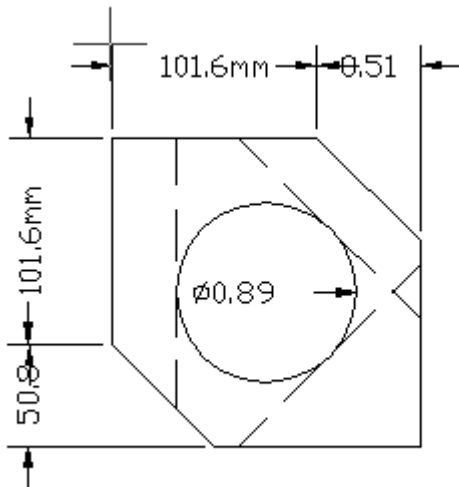
Το ορθογώνιο με διαστάσεις 102mm (4in) x 152mm (6in) απεικονίζεται γεωμετρικά στο *σχήμα 10*, και το αποτέλεσμα φαίνεται στο *σχήμα 11*. Μεγάλες αναδιπλώσεις μορφοποιούνται στις 0° του x άξονα όπου το μήκος των εφαπτόμενων ινών είναι ακόμη 152mm (6in), με τις πιο μικρές συρρικνώσεις στις 90° ως προς τον x άξονα (152mm, 4in) και καθόλου αναδιπλώσεις στα σημεία των $+45^{\circ}$ και -45° (91mm 3.57in).



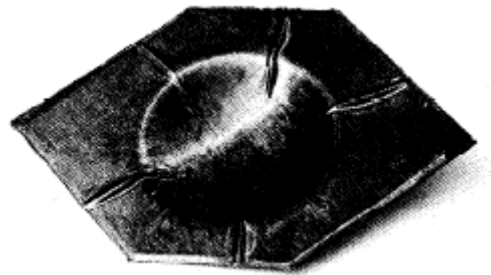
Σχήμα 10: Ορθογώνιο laminate 102mmX152mm

Σχήμα 11: Μορφοποιημένο laminate 102mmX152mm

Πραγματοποιήθηκε ένα επιπλέον πείραμα για να εκτιμήσει την επίδραση του εγκάρσιου κοψίματος δύο γωνιών του προσχηματισμένου τετραγώνου. Αυτή η μετατροπή στη γεωμετρία του στρώματος φαίνεται στο *σχήμα 12*, με αποτέλεσμα να κοντύνουν ελαφρά οι εφαπτόμενες ίνες στις 0^0 και 90^0 (από 152mm (6in) σε 125mm (5in)) ενώ, από την γεωμετρία οι διαγώνια εφαπτόμενες ίνες έχουν το ίδιο μήκος (περίπου 125mm (5in)). Το αναμενόμενο αποτέλεσμα αυτού του πειράματος με την υπόθεση ότι το μήκος της εφαπτόμενης ίνας ελέγχει το φαινόμενο, θα μπορούσε να είναι κατά προσέγγιση ότι οι αναδιπλώσεις έχουν ίσο μέγεθος σε κάθε ένα από τα οκτώ σημεία συρρίκνωσης. Το πραγματικό αποτέλεσμα του πειράματος φαίνεται στο *σχήμα 13* και η μεγάλη διαφορά είναι ότι αυτή η αναδίπλωση δεν συμβαίνει στις δύο διαγώνιες θέσεις όπου δεν έχουν κοπεί οι γωνίες. Αυτή η ενδιαφέρουσα παρατήρηση συζητιέται στην ακόλουθη ενότητα μαζί με τα αριθμητικά δεδομένα.



Σχήμα 12: Γεωμετρία κομμένου τετραγώνου



Σχήμα 13: Μορφοποιημένο κομμένο τετράγωνο

3.3.4 Αριθμητικές αναλύσεις και αποτελέσματα

Συνθήκες συμμετρίας

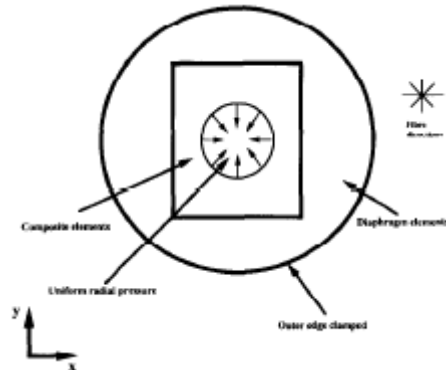
Θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι τα στρώματα συμπεριφέρονται ανεξάρτητα μεταξύ τους και επομένως αναλύονται χωριστά.

Εάν αναλυθεί ένα οιονεί ιστροπικό ορθογώνιο πολυστρωματικό υλικό, αυτό θα συμπεριλάβει μερικά $\pm 45^0$ φύλλα. Έστω και αν το πολυστρωματικό σαν σύνολο θα είναι συμμετρικό στους άξονες x και y, τα πεδία λύσης για τα ξεχωριστά φύλλα δεν θα είναι συμμετρικά. Άρα αναλύοντας απλά ένα τεταρτημόριο του προβλήματος δεν θα επιτευχθεί μία σωστή λύση, και θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί το πλήρες μοντέλο. Ένα σχήμα του τυπικού μοντέλου που χρησιμοποιείται φαίνεται στο *σχήμα 14*.

Πλέγμα ευαισθησίας.

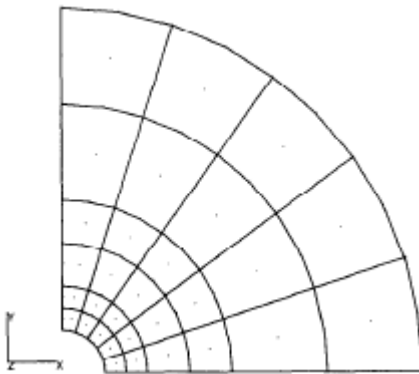
Για να καθορισθεί η πυκνότητα του πλέγματος χρειάστηκε να παρουσιασθούν οι αληθινές συνθήκες τάσης στα προβλήματα αυτού του είδους, και τελικά χρησιμοποιήθηκε ένα απλό πλέγμα του τεταρτημρίου του κύκλου (*σχήμα 15*). Η εσωτερική ακτίνα του μοντέλου είναι 12.7mm ενώ η εξωτερική ακτίνα της περιοχής

του σύνθετου υλικού είναι 50.8mm. Η εξωτερική ακτίνα της περιοχής της μεμβράνης είναι 107.95 mm. Αυτό το πλέγμα είναι τυπικό από εκείνα που χρησιμοποιήθηκαν και σε άλλες αναλύσεις και εφαρμόστηκαν οι ίδιες συμμετρικές και οριακές συνθήκες. Τέλος εφαρμόστηκε μία πίεση στην εσωτερική ακτίνα.

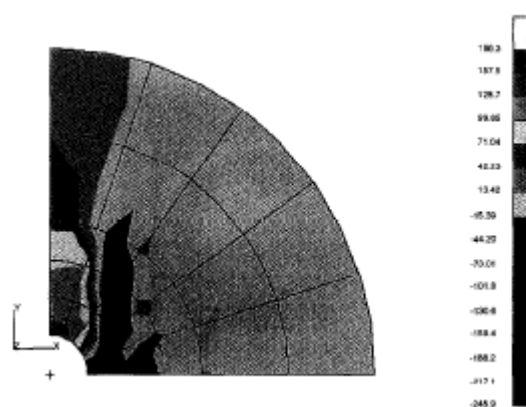


Σχήμα 14: Μοντέλο επίπεδης μορφοποίησης ορθογωνίου laminate

Ένα πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε έχει 143 κόμβους και 30 στοιχεία όπως φαίνεται στο *σχήμα 15*. Οι προβλέψεις της αξονικής τάσης για αυτό το πλέγμα φαίνονται στο *σχήμα 16*. Ο λόγος της μονοδιάστατης αξονικής τάσης προς την εφαρμοζόμενη πίεση προβλέπεται να είναι -219. Το *σχήμα 17* δείχνει την επίλυση για πιο πυκνό πλέγμα (2009 κόμβοι, 480 στίχοι που είναι ποιοτικά παρόμοιο με το αδρό πλέγμα. Η τιμή της μονοδιάστατης τάσης τάνυσης είναι τώρα -319. Εξέταση των δύο αποτελεσμάτων υποδεικνύει ότι το αδρό πλέγμα δουλεύει καλά και είναι μόνο σημαντικά ανακριβές στο σημείο της μιας διάστασης.



Σχήμα 15: 143κόμβοι, 30 στοιχεία για μορφοποίηση μονοδιευθυντικών κυκλικών ελασμάτων



Σχήμα 16: προβλέψεις αξονικών τάσεων για 143 κόμβους, 30 στοιχεία

Σχεδιασμός του πλέγματος.

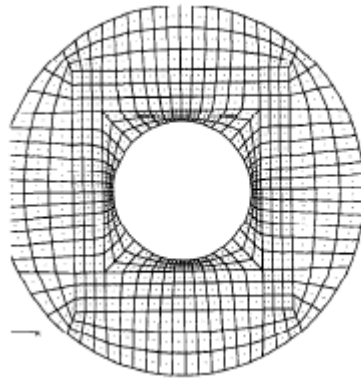
Οι παραπάνω περιγραφόμενες μελέτες εστιάστηκαν στον να οδηγήσουν στον σχεδιασμό του πλέγματος για την ανάλυση της μορφοποίησης ορθογώνιων στρωμάτων. Κάθε ένα από τα χρησιμοποιούμενα πλέγματα στο μοντέλο της μορφοποίησης του ορθογώνιου ιονεί ισοτροπικού στρώματος (π.χ. σχ.17) έχει μια ποικιλία στην πυκνότητα του πλέγματος γύρω από την εσωτερική ακτίνα. Αυτό οδήγησε στο να μειωθούν τα στοιχεία παραμόρφωσης σε αυτήν την περιοχή.

Παρόμοια πλέγματα εικονιζόμενων στρώματων πλάτους 106.6 mm (4in), 114.3 mm(4.5in), 139.7mm (5,5in) και 152.4mm (6in) έχουν επίσης κατασκευασθεί και χρησιμοποιούνται στην ανάλυση που ακολουθεί. Επιπλέον η ελαχιστοποίηση της πιθανότητας ανομοιόμορφης παραμόρφωσης πλέγματος, η σχέση ανάμεσα στην ανάλυση αποτελεσμάτων για διαφορετικά σχήματα, η κεντρική τετράγωνη περιοχή του πλέγματος είναι πανομοιότυπη για κάθε περίπτωση. Μόνο η εξωτερική περιοχή του κάθε πλέγματος διαφέρει.

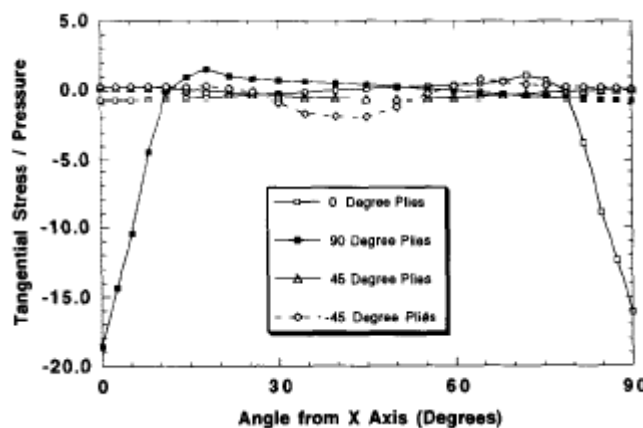
Αποτελέσματα

Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από παραδείγματα για μονοδιευθυντικά και πολυδιευθυντικά δείγματα, και ακολουθούν συγκρίσεις ανάμεσα στην θεωρητική ανάλυση και στα πειράματα. Αρχικά αναλύονται τα αποτελέσματα για το μονοδιευθυντικό δείγμα.

Πρώτα εξετάστηκε η περίπτωση του ορθογωνίου 114,3mm ώστε να διευκρινισθούν οι επιδράσεις των ποικίλων και διαφορετικών φύλλων, στον μέσο όρο τάσης που υπολογίζεται για το στρώμα. Οι διανομές εφαπτόμενης τάσης στην εσωτερική ακτίνα του μοντέλου για κάθε μία από τις τέσσερις διευθύνσεις ινών φαίνονται στο *σχήμα 18*.



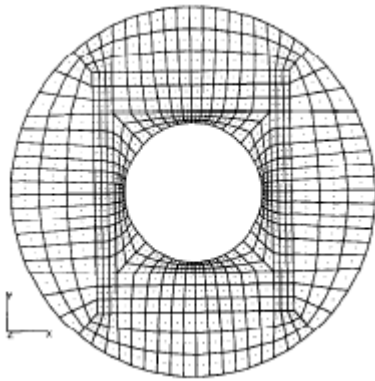
Σχήμα 17: Πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε στην ανάλυση 127mmX152mm laminate



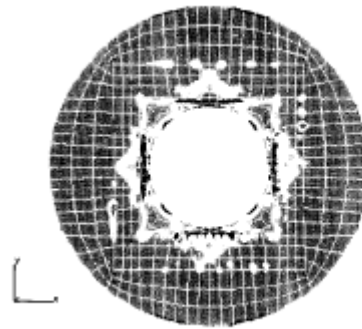
Σχήμα 18: Διανομή εφαπτομενικής τάσης για στρώματα (127mmx152mm)

Στο *σχήμα 19* φαίνεται το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε στην ανάλυση δείγματος πλάτους 139.7 mm (5.5 in), και ο μέσος όρος κατανομής της εφαπτόμενης τάσης για το στρώμα φαίνεται στο *σχήμα 20*. Το πρότυπο εφαπτόμενης τάσης επηρεάζεται καθαρά από τις ζώνες θλιπτικής αξονικής τάσης οι οποίες συμβαίνουν όπου οι

διευθύνσεις της ίνας αναπτύσσονται εφαπτόμενα στην εσωτερική ακτίνα του μοντέλου.



Σχήμα 19: πλέγμα για laminate
139.7μmX152.4mm

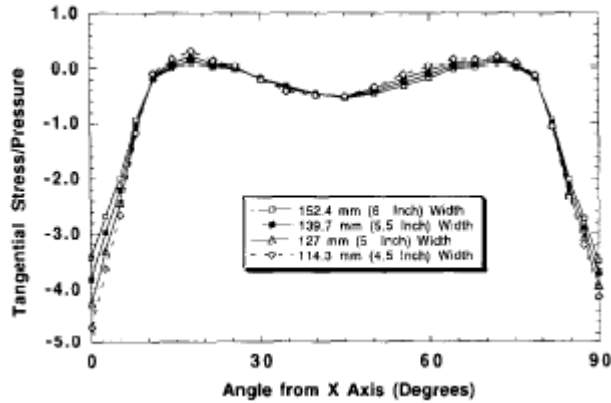


Σχήμα 20: Μέσος όρος εφαπτομενικής τάσης
στρωμάτων

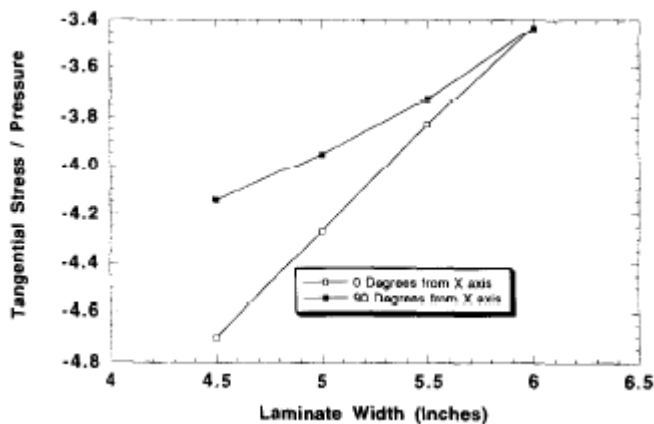
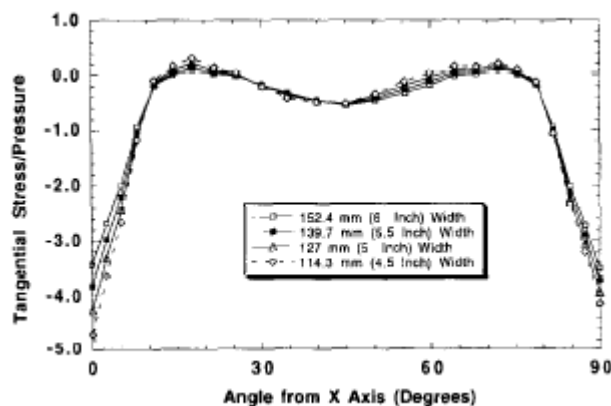
Με αναφορά πάλι στα πειράματα μορφοποίησης μεμβράνης είναι εφικτό να αντληθούν αριθμητικά αποτελέσματα τα οποία αντιστοιχούν με τα πειράματα. Μία σύγκριση ανάμεσα στα διαφορετικά πλάτη ελασμάτων φαίνεται στο *σχήμα 21* το οποίο δίνει τις διανομές εφαπτόμενης πίεσης στις εσωτερικές ακτίνες των μοντέλων, στο 1^ο τεταρτημόριο (0^ο έως 90^ο). Πρώτα εξετάστηκε το αποτέλεσμα για ένα τετράγωνο 152.4mm (6in) το οποίο αντιστοιχεί γεωμετρικά με ένα αναφερόμενο πείραμα στα «πειράματα μορφοποίησης μεμβράνης». Η εφαπτόμενη τάση στα σημεία των 0^ο και 90^ο είναι η ίδια όπως θα ήταν αναμενόμενο, δεδομένης της συμμετρίας του σχήματος. Εκείνες οι τάσεις είναι σημαντικά εκτός ορίων από εκείνες που αναφέρθηκαν στο σημείο των 45^ο το οποίο έχει μια κοντύτερη εφαπτόμενη ίνα. Αυτό εξηγεί τις σοβαρές αναδιπλώσεις οι οποίες μορφοποιήθηκαν στις 0^ο και 90^ο στα πειράματα, και τις ελαφρές αναδιπλώσεις οι οποίες εμφανίσθηκαν στο σημείο των 45^ο.

Στα ορθογώνια ελάσματα, καθώς το πλάτος των στρωμάτων μειώνεται, η εφαπτόμενη τάση η οποία μπορούσε να προκαλέσει αναδίπλωση αυξάνει, και στο σημείο των 0^ο και στο σημείο των 90^ο, αλλά σε κάθε περίπτωση το σημείο των 0^ο εμφανίζει την μεγαλύτερη τάση. Αυτό συμφωνεί με τα παραπάνω αναφερόμενα πειράματα όπου οι αναδιπλώσεις ήταν περισσότερο σοβαρές στην θέση των 0^ο. Η σχέση ανάμεσα στο πλάτος ελάσματος και στις προβλεπόμενες εφαπτόμενες τάσεις είναι υπεύθυνη για αναδιπλώσεις που είναι περίπου γραμμικές όπως περιγράφεται στο *σχήμα 22*.

Τέλος, εξετάστηκε η περίπτωση τετράγωνου στρώματος 152.4mm (6in) με δύο αντίθετες γωνίες κομμένες, και τα πειραματικά αποτελέσματα φαίνονται στο *σχήμα 12*. Το χρησιμοποιούμενο πλέγμα για αυτήν την ανάλυση δίνεται στο *σχήμα 23* και τα αποτελέσματα δίνονται σε πίνακα για ευκολία της σύγκρισης με τις προβλέψεις που ήδη αναφέρθηκαν για το τετράγωνο των 152.4mm (6in). Τα αποτελέσματα της εφαπτόμενης πίεσης σε κάθε θέση αναδίπλωσης και για δυο αυτές περιπτώσεις παρουσιάζονται στον *πίνακα 1* με γωνίες μετρημένες σε μοίρες από τον θετικό άξονα x.



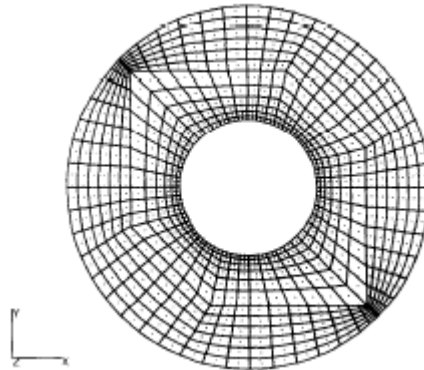
Σχήμα 21: Διανομή εφαπτομενικής τάσης στην εσωτερική ακτίνα, διαφορετικών πάχους laminate



Σχήμα 22: Διακύμανση εφαπτομενικής τάσης σε 0° και 90° σε σχέση με το πάχος του ελάσματος

Η πιο προφανής διαφορά ανάμεσα στις δυο περιπτώσεις είναι στα σημεία των 0° , 90° και 180° . Η τιμή της μονοδιάστατης τάσης σε εκείνα τα σημεία είναι σημαντικά χαμηλότερη για την περίπτωση του στρώματος με τις κομμένες γωνίες. Αυτό συμπίπτει με τα σημεία γύρω από την εσωτερική ακτίνα του μοντέλου όπου οι εφαπτόμενες ίνες έχουν κοντύνει. Οι συγκεντρωμένες τάσεις όπου οι ίνες είναι εφαπτόμενες στο περίγραμμα του καλουπιού στα φύλλα των 0° και 90° είναι σημαντικά μειωμένες. Υπάρχει μία μικρή επίδραση στις προβλεπόμενες τάσεις για τα φύλλα των $+45^\circ$ και -45° , δεδομένου ότι οι μονοδιάστατες ίνες σε εκείνες τις περιπτώσεις δεν έχουν κοντύνει καθόλου.

Πρέπει να σημειωθεί, ωστόσο, ότι με αυτό το αποτέλεσμα, για την νέα «κομμένη περίπτωση» θα αναμενόταν να μορφοποιούνται αναδιπλώσεις στο σημείο των 135° με την ίδια σοβαρότητα όπως στο σημείο των 45° . Αυτό δεν συμφωνεί με τα πειραματικά αποτελέσματα. Ο λόγος ίσως είναι ότι η ποσότητα των όμορων υλικών στο σημείο των 135° εμποδίζει την αναδίπλωση σε μεγαλύτερες μοίρες από την θέση των 45° .



Σχήμα 23: Πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε στην ανάλυση κομμένου τετραγώνου laminate 452.4mm

Πίνακας 1: Αποτελέσματα εφαπτομενικής τάσης σε διαφορετικές θέσεις λυγίσματος

	Μοίρες				
	0	45	90	135	180
152.4 mm τετράγωνο	-3.435	-0.547	-3.435	-0.574	-3.435
152.4mm τετράγωνο με κομμένες γωνίες	-1.242	-0.508	-1.259	-0.696	-1.242

3.4 Ο «σχεδιασμός κατασκευής» ινοπλισμένων θερμοπλαστικών συνεχών ινών στην κατασκευή αεροσκαφών

3.4.1 Επιλογή συστατικών στοιχείων.

Κατ' αρχήν είναι σημαντική η επιλογή ενός υπάρχοντος στοιχείου κατασκευής το οποίο θα έχει τα γνωστά πλεονεκτήματα των σύνθετων θερμοπλαστικών. Σκοπός είναι η κατασκευή μίας σύνθετης δοκού δαπέδου, ώστε να αντικαταστήσει μία αντίστοιχη αλουμινίου εμπορικού jet. Επίσης η εγκάρσια διατομή δοκού πρέπει να διατηρείται, έτσι ώστε η σύνθετη δοκός δαπέδου να μπορεί να ενσωματωθεί μέσα στο αρχικό δάπεδο με ελάχιστο επανασχεδιασμό των υπόλοιπων τμημάτων, μειώνοντας έτσι το ολικό κόστος κατασκευής.

Τα τελευταία χρόνια, αυξάνεται η ανάγκη για χρήση σύνθετων υλικών, έτσι ώστε να είναι οικονομικά ελκυστικά στην κατασκευή. Αρκετές πρόοδοι έγιναν σε σχέση με αυτό, με μία ποικιλία συστατικών στοιχείων όπου επιλέχθηκαν από αναπτυξιακά προγράμματα σύνθετων για στρατιωτικές και εμπορικές εφαρμογές. Η απόφαση των Boeing s να χρησιμοποιήσουν σύνθετους δοκούς δαπέδων σε νέα αεροσκάφη Boeing-777 είναι σημαντική, αφού θα χαρακτήριζε την πρώτη εμφάνιση των σύνθετων δοκών πατωμάτων σε μεγάλα πολιτικά αεροσκάφη. Με τα Boeing-777 να παρέχουν εγγύηση 500 αεροσκαφών με 74 δοκούς ανά αεροσκάφος, και την εγκαθίδρυση περισσότερων μεθόδων επίδρασης κόστους κατασκευής να καθιερώνονται, ο ανταγωνισμός ανάμεσα στις εταιρείες για το μοίρασμα της αγοράς είναι οξύς.

3.4.2 Επιλογή υλικού

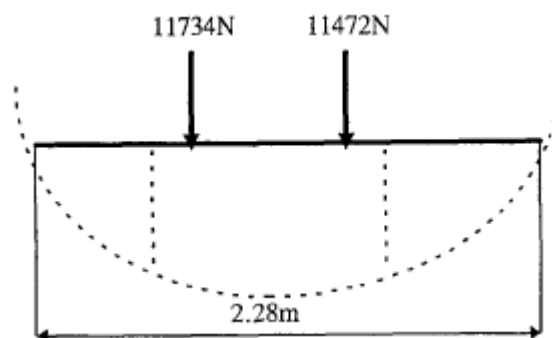
Ο καθορισμός σχεδίασης για μία σύνθετη δοκό πατώματος αριθμεί μία μεγάλη περιοχή απαιτήσεων, μερικές από τις οποίες κυρίως εξαρτώνται από την χρήση του υλικού στο σύστημα. Ο σχεδιασμός ιδιαίτερα αναπτύχθηκε στην σκιαγράφηση της θερμικής ισορροπίας, της χημικής αντίστασης και της αντίστασης σε φωτιά των χρησιμοποιούμενων υλικών. Παράγοντες όπως η αναφλεξιμότητα, και η αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες μειώνουν την λίστα των υποψήφιων υλικών σε θερμοπλαστικά σύνθετα με υψηλές επιδόσεις.

Ενώ οι τιμές της μηχανικής ιδιότητας για θερμοπλαστικά υψηλής επίδοσης είναι δεδομένη, τα μορφοποιημένα έχουν μεγαλύτερη ευαισθησία στην υγρασία του αέρα και μετέπειτα στην γήρανση μέσω υδροθεμικών φαινομένων. Ημικρυσταλλικά θερμοπλαστικά εμφανίζουν καλύτερη αντίσταση σε διαλύτες από άμορφα πολυμερή και ανταποκρίνονται επιτυχώς σε σκληρές περιβαλλοντικές συνθήκες. Αποτελέσματα έρευνας που δημοσιεύθηκαν από το European Space Agency δείχνουν ότι τα PEEK (Poly(Ether Ether Ketone)) διατηρούν υψηλή απόδοση εφελκυσμού και αντοχή συμπίεσης από εποξειδικά κατόπιν πρόσκρουσης.

3.4.3 Βελτιστοποίηση σχεδίασης

Στην βελτιστοποίηση της σχεδίασης σύνθετης δοκού, είναι αναγκαίο να υπάρχει μία ισορροπία μεταξύ πολλών μεταβλητών. Αρχικά διερευνήθηκε μια ποικιλία υπάρχοντων κατασκευαστικών κανόνων, όπως ο πιθανός συνδυασμός πρωτότυπων κατευθύνσεων ινών. Το βάρος της δοκού έπρεπε να ελαχιστοποιηθεί, επιπλέον η ευκολία της κατασκευής έπρεπε πάντα να λαμβάνεται υπόψη. Η απόλυτη επιτυχία του προγράμματος θα μπορούσε να ήταν η δημιουργία μίας μεθόδου οικονομικά αποτελεσματικής στην παραγωγή δοκών δαπέδου, οι οποίες προσφέρουν σημαντική εξοικονόμηση βάρους και συμπεριφέρονται όπως τα τωρινά εξαρτήματα όταν υποβάλλονται σε παρόμοιες φορτίσεις. Το σχήμα 1 δείχνει τον τρόπο φόρτισης των τωρινών εξαρτημάτων για τις δυσμενέστερες συνθήκες πρόσκρουσης.

Στον επανασχεδιασμό της εγκάρσιας δοκού πατώματος, υπήρχε μέριμνα στην εισαγωγή τέτοιων μετατροπών σχεδιασμού που να μην δημιουργούν βλαβερά αποτελέσματα σε όμορα σύνθετα. Το πλάτος του χείλους (flange) ήταν ποικίλο για να αυξήσει την αντοχή κάμψης της δοκού. Η ύπαρξη οπών και παρόμοια χαρακτηριστικά διατηρήθηκαν στην σύνθετη δοκό.



Σχήμα 1: Σχηματική απεικόνιση φόρτισης σημερινών τμημάτων

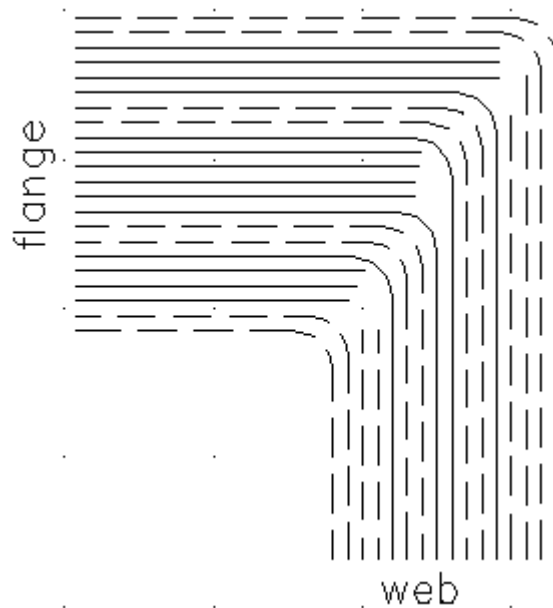
Στην βελτιστοποίηση της αντοχής της δοκού πατώματος, οι κύριες μεταβλητές ήταν οι διαμορφώσεις επιπέδων στο χείλος (flange) και στην κοιλότητα (Web). Η διαμόρφωση στρωμάτων στην κοιλότητα και στο χείλος των συστατικών δίνει την δυνατότητα μέγιστης αντοχής και ελάχιστου βάρους, ακόμα συντελεί στην κατασκευή ποικίλων διαφορετικών μεθόδων. Τοπικές στρώσεις αναπτύσσονται περισσότερο και διακόπτονται αναπτύσσοντας κάθε πιθανότητα να βελτιώσουν την εξοικονόμηση βάρους, αλλά όχι τόσο πολύ ώστε να επιβραδύνουν την κατασκευή.

Μονοδιευθυντικό (Uni directional UD) σχήμα χρησιμοποιήθηκε επειδή επιτρέπει στον σχεδιαστή περισσότερη ελευθερία στην επιλογή διαφορετικών στρωμάτων προσανατολισμών. UD σχήμα συνήθως προτιμάται από τους κατασκευαστές για την ικανότητά του να διαμορφώνεται γρήγορα σε σχετικά μικρές πιέσεις σε απλές και διπλές καμπυλότητες. Πολυάριθμοι σχηματισμοί μπορούν να σχεδιασθούν από UD σχήμα οι οποίοι δεν μπορούν να πραγματοποιηθούν με άλλη μορφοποίηση. Όταν σχεδιάζονται μονοδιευθυντικά σχήματα, η αντοχή σε διάτμηση μπορεί αμέσως να αυξηθεί από την πρόσθεση περισσότερων στρωμάτων $\pm 45^0$. Η χρήση στρωμάτων 0^0 είναι ελάχιστη, αλλά κάποια στρώματα διατηρούνται για να παρέχουν κατασκευαστική ακεραιότητα στην διεπιφάνεια web-flange.

Από τις μελέτες πολλών συνδυασμών στρωμάτων έχει αποδειχθεί ότι η σύνθεση στρώματος για την κατανομή της κοιλότητας που υποβάλλεται σε μέγιστες τάσεις θα έπρεπε να ήταν $[\pm/\pm/0/\pm/0]_s$ (\pm σημαίνει $\pm 45^0$) [9]. Άλλες κατανομές δοκών είχαν αντικείμενο χαμηλά επίπεδα διατμητικής τάσης που να παρέχει αποδεκτή αντοχή διάτμησης με δομή $[\pm/0/\pm/0]_s$. Το σχήμα 2 δείχνει την σύνθεση στρωμάτων στην περιοχή της κοιλότητας όταν υπόκεινται σε υψηλά επίπεδα διατμητικής τάσης.

Το χείλος (flange) υπόκειται σε απότομη αύξηση ακραίων φορτίσεων καθώς η δοκός κάμπτεται. Η αντοχή στο flange αυξάνεται με πρόσθεση στρωμάτων 0^0 . Ο ιδανικός σχεδιασμός flange θα μπορούσε να ενσωματώσει συνεχείς διακοπτόμενες στρώσεις. Αυτό το flange δεν θα ήταν εύκολο να κατασκευασθεί και θα μπορούσε να εμπεριέχει μία μεγάλη επιφάνεια στρωμάτων, έτσι το flange σχεδιάστηκε να έχει σταθερό πάχος. Το βέλτιστο flange έχει 22 στρώματα και σύνθεση $[\pm/0_4/\pm/0_3]_s$.

Η δομή των επιπέδων του χείλους και της κοιλότητας που υπόκεινται κάμψη, με σκοπό να παρέχουν την βέλτιστη διεπιφάνεια φαίνονται στο σχήμα 2, όπου τα περισσότερα από τα στρώματα της κοιλότητας (web) συνήθως αναπτύσσονται μέσω του χείλους (πίνακας 1).



Σχήμα 2: Απεικόνιση βέλτιστης διεπιφάνειας flange – web
(Συνεχής γραμμή: στρώμα 0°, διακεκομμένη γραμμή: στρώμα 45°)

Παρακάτω παρουσιάζεται μια σύγκριση ενός σύνθετου σχεδιασμένου με στρώματα διακοπτόμενα και μη, το οποίο αποτελείται από 16 επίπεδα web. Η εξοικονόμηση βάρους που χρησιμοποιεί αυτόν τον σχεδιασμό φαίνεται στον *πίνακα 2*. Στον *πίνακα 3* παρουσιάζεται η *εξοικονόμηση* βάρους που κερδίζεται από το κάθε μέρος της εγκάρσιας περιοχής. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η εξοικονόμηση βάρους που κερδίζεται εξ αιτίας του σύνθετου flange είναι μικρό συγκριτικά με την εξοικονόμηση βάρους web (βλέπε *πίνακα 2*). Εάν στρώματα διακοπτόμενα ενσωματώνονται στο σχεδιασμό των flange, η εξοικονόμηση βάρους θα μπορούσε να ήταν αρκετά υψηλή, περίπου 35%.

Πίνακας 1: Ποσοστό στρωμάτων αναπτυσσόμενα διαμέσου της διεπιφάνειας

	% στρωμάτων αναπτυσσόμενα διαμέσου της διεπιφάνειας
16 layer web	75,0
12 layer web	100,00
22 layer flange	54,50

Πίνακας 2: Σύγκριση βάρους 16 στρωμάτων (layer) σύνθετων δοκών με ή χωρίς dropp-offs

	APC2 σχέδιο χωρίς dropp-offs	APC2 σχέδιο με dropp-offs	TA 7075
Μάζα flange (kg)	0.228	0.228	0.265
Μάζα web (kg)	0.796	0.662	1.060
Συνολική μάζα (kg)	1.251	1.117	1.590
Συνολική εξοικονόμηση βάρους (%)	21.30	29.80	0.000

Πίνακας 3: Εξοικονόμηση βάρους κατασκευής για σύνθετη δοκό πατόματος με build-ups

Βέλτιστη κατασκευή	% εξοικονόμηση βάρους
Flange	14.2
Web	37.5
Beam	29.8

3.4.4 Κατεργασία

Ένας αριθμός πρότυπων διατομών δοκών κατασκευάστηκαν χρησιμοποιώντας διαφορετικές τεχνικές επεξεργασίας. Η πρότυπη διατομή δοκού συνήθως χαρακτηριζόταν από μία περιοχή ανεπτυγμένων στρωμάτων παρόμοια με εκείνα του πλήρους μήκους σύνθετου δαπέδου δοκού. Οι διατομές δοκών υπεβλήθησαν σε διάφορες τεχνικές δοκιμών συμπεριλαμβανομένων της φυσικής επιθεώρησης, εγκάρσιας ηλεκτρονικής εξέτασης, μικροσκοπικής εξέτασης και δοκιμές κάμψης τριών σημείων και συμπίεσης.

Δύο υψηλής επίδοσης θερμοπλαστικά υλικά χρησιμοποιήθηκαν σε αυτό το πρόγραμμα : μονοδιευθυντικός τύπος APC2/AS4 και ανθρακόνημα AS4

Για την μορφοποίηση μεμβράνης χρησιμοποιήθηκε μεμβράνη Upilex-R. Αυτός ο τύπος Upilex έχει επιμήκυνση 250%-300% σε εύρος θερμοκρασιών 315-425⁰C (600-800⁰F). Η Upilex-R, 0.13mm (0.005in) πάχους, έχει χαμηλό μέτρο ελαστικότητας από ότι άλλη μεμβράνη υλικού όπως το Supral 1.3mm (0.050in) πάχους.

Μορφοποίηση

Δύο μέθοδοι μορφοποίησης χρησιμοποιούνται: (1) απλή μορφοποίηση μεμβράνης και (2) διπλή μορφοποίηση μεμβράνης. Όταν χρησιμοποιείται διπλή μορφοποίηση μεμβράνης, το σύνθετο τοποθετείται μεταξύ δύο ελαστικών μεμβρανών. Οι μεμβράνες συμπίεζονται σε δακτύλιο κενού και στο εργαλείο, πριν το κενό σχηματισθεί μεταξύ των διαφραγμάτων. Η πλήρης σφράγιση γίνεται αυτόματα θερμαίνοντας στην θερμοκρασία της μεθόδου και συμπίεζοντας. Η μέθοδος απλής μορφοποίησης διαφράγματος είναι παρόμοια εκτός του ότι χρησιμοποιείται μόνο το ανώτερο επίπεδο Upilex. Η κατώτερη επιφάνεια του σύνθετου είναι απευθείας σε επαφή με το εργαλείο.

Καθώς είναι δύσκολο να μεταπηδήσει η κανονική πίεση προοδευτικά κάτω του κενού, ένα ελεγχόμενο αποτελεσματικό κενό επιτεύχθηκε αυξάνοντας την πίεση στην εξωτερική επιφάνεια του ανώτερου διαφράγματος σε 100Kpa, ενώ αφήνοντας την εσωτερική επιφάνεια ανοιχτή στην ατμόσφαιρα. Μία πλήρης λίστα των μορφοποιημένων τμημάτων φαίνεται στον *πίνακα 4*.

Πίνακας 4: Λίστα δειγμάτων δοκών

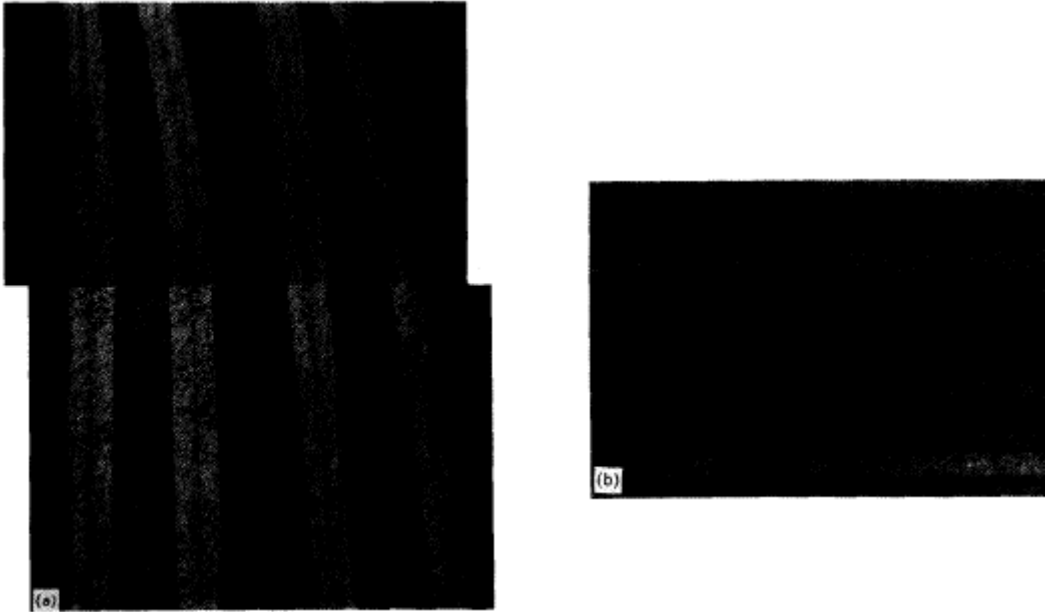
α/α	Μέθοδος μορφοποίησης	Μήκος (mm)	Δομή Web	Δομή Flange
1	Διπλό διάφραγμα, 450kpa, 390 ⁰ C	500	500mm [0/90] _{2s}	500mm [0/90] _{2s}
2	Διπλό διάφραγμα, 450kpa, 390 ⁰ C	500	300mm [±/±/0/±/0] _s 200mm [±/0/±/0] _s	500mm [±/0 ₄ /±/0 ₃] _s
3	Διπλό διάφραγμα, 450kpa, 390 ⁰ C	500	300mm [±/±/0/±] _s	500mm [±/0 ₄ /±/0 ₃] _s
4	Διπλό διάφραγμα, 450kpa, 390 ⁰ C	500	300mm [±/±/0/±/0] _s 200mm [±/0/±/0] _s	500mm [±/0 ₄ /±/0 ₃] _s
5 ^a	Διπλό διάφραγμα, 450kpa, 390 ⁰ C	500	500mm [±/±/0/±/0] _s	500mm [±/0 ₄ /±/0 ₃] _s
6	Απλό διάφραγμα, 450kpa, 390 ⁰ C	300	300mm [±/±/0/±/0] _s	300mm [±/0 ₄ /±/0 ₃] _s
7	Απλό διάφραγμα, κενό, 390 ⁰ C	300	300mm [±/±/0/±/0] _s	300mm [±/0 ₄ /±/0 ₃] _s
8	Απλό διάφραγμα, κενό, 390 ⁰ C	75	75mm [±/0/±/0] _s	75mm [±/0/±/0] _s
9	Διπλό διάφραγμα, 450kpa, 330 ⁰ C	500	500mm [±/0 ₄ /±/0 ₃] _s	500mm [±/0 ₄ /±/0 ₃] _s

^a Το δείγμα 5 χωρίστηκε σε δύο τμήματα 5^a, 5^b όπου και τα δύο δοκιμάστηκαν σε συμπίεση

Αποτελέσματα

Μορφοποίηση διπλής μεμβράνης

Η μορφοποίηση διπλής μεμβράνης σε θάλαμο συμπίεσης είναι μία μέθοδος ύφανσης ικανή να παράγει μέρη τα οποία είναι αρκετά συνενωμένα *σχήμα 3*. Ωστόσο υπάρχει ένα βέβαιο ποσό παραμόρφωσης στις διαστάσεις των τμημάτων, εξαιτίας της ροής σύσφιξης, αλλά οι διαστάσεις των τελικών τμημάτων είναι εντός των ορίων που προδιαγράφονται ($\pm 0.5\text{mm}$). Τα τμήματα μορφοποιούνται καλά στις web γωνίες, και η δομή των στρωμάτων των flange εφαρμόζουν ακριβώς με αυτές των web ώστε να παράγουν διατομές δοκών με εξαιρετική κατασκευαστική ακεραιότητα.



Σχήμα 3^α: Δείγμα Νο4 επίδραση ροής στις γωνίες

Σχήμα 3^β: Διατομή web

Μορφοποίηση απλής μεμβράνης

Η μορφοποίηση απλού διαφράγματος έχει το επακόλουθο της μείωσης της κανονικής πίεσης κατά την διάρκεια της μορφοποίησης, και τα τμήματα που παράγονται έχουν καλλίτερες διαστάσεις και χαμηλή ροή σύσφιξης. Οι μηχανικές ιδιότητες των μορφοποιημένων τμημάτων είναι περίπου ίδιες με εκείνα που παράγονται με μορφοποίηση διπλού διαφράγματος. Η εκτεθειμένη κατώτερη επιφάνεια κάθε τμήματος έχει κακή ποιότητα επιφάνειας από ότι η επιφάνεια που βρίσκεται σε επαφή με την μεμβράνη. Η μορφοποίηση υλικού με Upilex-R διάφραγμα πολυαμιδίου είναι αρκετά ακριβή και συμβάλει σημαντικά στο περιοδικό κόστος αυτής της μεθόδου. Έτσι υπάρχει πραγματικό ενδιαφέρον για μείωση του επαναλαμβανόμενου κόστους των αναλώσιμων Upilex-R όταν χρησιμοποιείται διάφραγμα μορφοποίησης εγκάρσιας διατομής με την χρήση ενός διαφράγματος.

Η πίεση κενού αυτή καθαυτή είναι ικανή να μορφοποιήσει τα τμήματα στο απαιτούμενο σχήμα, αλλά είναι ανεπαρκής να επιφέρει τέλεια σύνδεση (*σχήμα 5*). Μόνο οι γωνίες της εγκάρσιας διατομής που μορφοποιούνται με αυτήν την μέθοδο έχουν μικρά κενά, όπου τοπικές ενοποιήσεις συμβαίνουν πριν το τμήμα συμβαδίσει με το προφίλ του εργαλείου, και η πίεση σύσφιξης θεωρείται μικρότερη των 100Kpa. Μεγαλύτερες πιέσεις σύσφιξης (περίπου 450Kpa) είναι απαραίτητες όταν

μορφοποίηση UD APC2 πραγματοποιείται σε τμήματα με πολύ μικρά κενά. Παρόλα αυτά, όταν δοκιμάστηκαν σε συμπίεση επτά δείγματα αστόχησαν σε παρόμοια φόρτιση σε εκείνα τα μέρη με μικρά κενά.



Σχήμα 4^α: Δείγμα Νο6, επίδρασης ροής σύσφιξης στις γωνίες



Σχήμα 4β: Διατομή Web



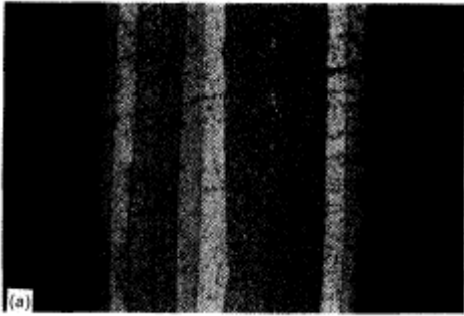
Σχήμα 5^α: Δείγμα Νο7, επίδραση ροής σύσφιξης στις γωνίες



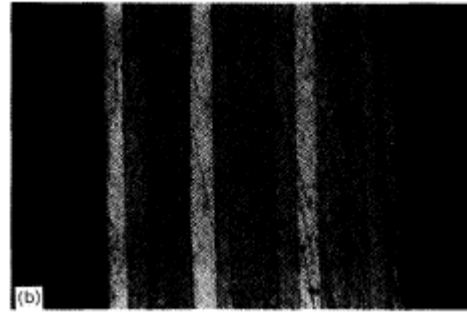
Σχήμα 5β: Διατομή Web

Όταν επίπεδα πλήρως προσυνδεδεμένων φύλλων μορφοποιήθηκαν σε εγκάρσια διατομή κάτω από πίεση κενού, συνέβη μειωμένη σύνδεση κατά την διάρκεια της επανά – τήξης (σχήμα 6). Παρόμοια διαδικασία στο δείγμα 7 (το οποίο ήταν ανεπαρκώς συνδεδεμένο) συμπεριφέρθηκε σωστά κάτω από δοκιμή πίεσης,

αναμένεται ότι η μηχανική συμπεριφορά του δείγματος 8 (το οποίο έχει μικρά κενά) να είναι καλύτερη. Τα πλεονεκτήματα αυτού είναι διπλάσια. Ο εξοπλισμός της μορφοποίησης κενού είναι σημαντικά λιγότερο ακριβός από άλλο εξοπλισμό θερμοπλαστικής μεθόδου. Συνεπώς, αυτή η δυνατότητα παρουσιάζει την κατασκευή με χαμηλού κόστους μέθοδο κατασκευής θερμοπλαστικών δοκών πατωμάτων, χωρίς να χρειάζεται μεγάλο κεφάλαιο επένδυσης σε ακριβό εξοπλισμό επεξεργασίας.

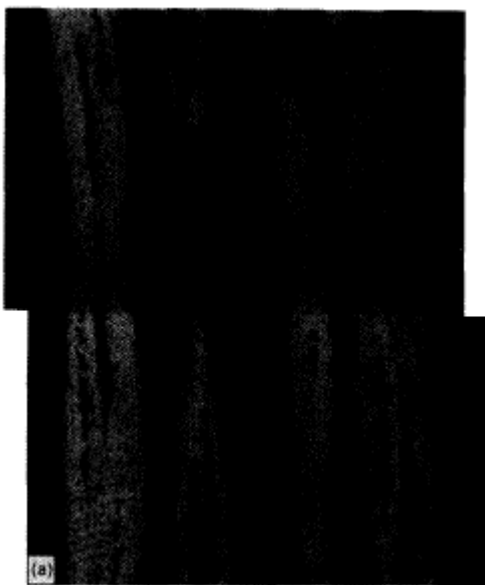


Σχήμα 6α: Διατομή web (δείγμα No 8)

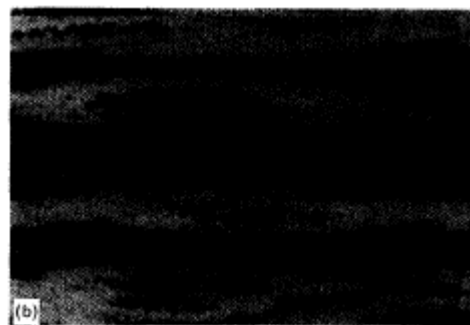


Σχήμα 6β: Διατομή flange (δείγμα No8)

Η ευκολία με την οποία το στρώμα που αποτελείται από απλή δομή ύφανσης και μονοδιευθυντικό τύπο, δείγμα 9, συμμορφώνεται στο τελικό του σχήμα χωρίς καμία ανεπιθύμητη αναδίπλωση ή τσάκισμα υποδεικνύει την χαμηλή πολυπλοκότητα του μηχανισμού μορφοποίησης εμπεριέχοντας την διαμόρφωση τέτοιας απλής καμπυλότητας (σχήμα 7). Δίδοντας την σχετική απλότητα των μηχανισμών ροής που εμπεριέχονται όταν διαμορφώνεται μία εγκάρσια διατομή, φαίνεται ότι η χρήση ακριβών διαφραγμάτων για ρύθμιση του εφελκυσμού των ινών κατά την διάρκεια της μορφοποίησης είναι κάπως πολυδάπανη. Έτσι υπάρχει δυνατότητα δημιουργίας τέτοιων εγκάρσιων διατομών δοκών πατωμάτων με λιγότερο εξεζητημένο εξοπλισμό.



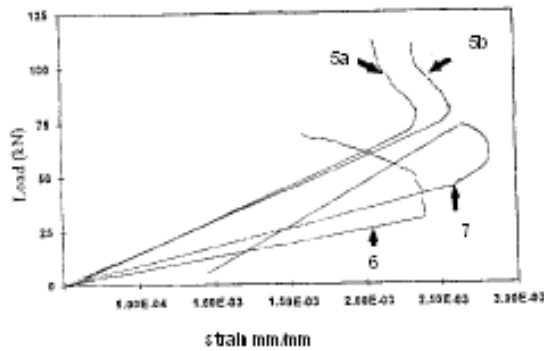
Σχήμα 7: Επίδραση ροής συμπίεσης στις γωνίες (δείγμα No9)



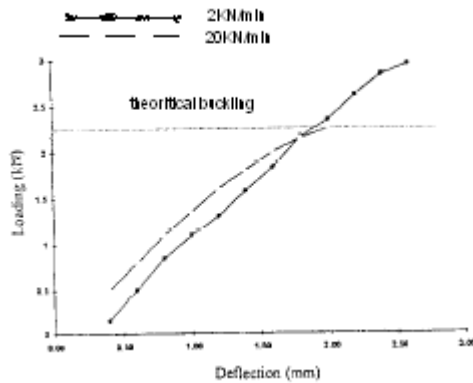
Σχήμα 7β: Διατομή flange (δείγμα No9)

Το σχήμα 8 δείχνει την συμπεριφορά των δειγμάτων όταν υπέστησαν συμπίεση. Η τάση κόπωσης που απεικονίζεται για δείγμα 7 δείχνει ένα διαφορετικό πρότυπο αστοχίας από τα άλλα δείγματα, δείχνοντας ότι το μεγάλο ποσοστό κενών χώρων δεν παρουσιάζει σημαντικό ρόλο στην αστοχία αυτού του τμήματος.

Όταν υπέστησαν σε κάμψη τριών σημείων, τα τμήματα έκαναν μία πλήρη ανάκτηση του σχήματος αμέσως μετά την αφαίρεση της φόρτισης, (βλέπε σχήμα 9). Κατόπιν συστροφής παραμορφώνοντας σε 20% το κάθε άκρο, τα τμήματα έδειξαν μόνο 40% απώλεια των μηχανικών ιδιοτήτων μετά την επαναφορά τους. Αυτό το χαρακτηριστικό επανάκτησης σχήματος είναι κοινό μόνο σε όλκιμα θερμοπλαστικά υλικά με πολύ υψηλό μέτρο ελαστικότητας. Αυτό είναι αποτέλεσμα της ικανότητας της ρητίνης να αποβάλλει και να απορροφά ενέργεια, και είναι ιδιαίτερα σημαντικό όταν μία κατασκευή υπόκειται σε περιστασιακές εξωτερικού επιπέδου ή στρεπτικές φορτίσεις. Έτσι όσον αφορά την αστοχία ασφάλειας της δοκού πατώματος, το κρίσιμο σημείο κάμψης (buckling critical point) μιας θερμοπλαστικής δοκού προσφέρει ένα επιπρόσθετο πλεονέκτημα έναντι αντίστοιχης ψαθυρής εποξειδικής μήτρας.



Σχήμα 8: Αποτελέσματα δοκιμών συμπίεσης



Σχήμα 9 : Αποτελέσματα κάμψης τριών σημείων

4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η συμπεριφορά σύνθετων υλικών κάτω από διάφορα είδη φορτίσεων. Παρατίθενται θεωρητικές και πειραματικές διερευνήσεις με σκοπό την κατανόηση των μηχανισμών και ειδών αστοχίας. Τέλος παρουσιάζονται είδη κατεργασίας στρωματικών σύνθετων υλικών λαμβάνοντας υπόψη τον βέλτιστο σχεδιασμό και την υψηλή αντοχή των υλικών. Ολοκληρώνοντας επισημαίνονται τα βασικά στοιχεία όπου συνοψίζονται παρακάτω:

Από τις αναλύσεις των πλαισίων (πάνελ) σάντουιτς με αφρώδη πυρήνα παρατηρήθηκε ότι η υψηλή σκληρότητα του πυρήνα περιορίζει την περίπτωση «συρρίκνωσης (wrinkling)» του επιφανειακού ελάσματος. Ωστόσο με την αύξηση του πάχους των επιφανειακών ελασμάτων διατηρώντας την ίδια πυκνότητα πυρήνα δεν αυξάνεται η αντοχή του πλαισίου όσο αφορά την διάτμηση του πυρήνα. Η αύξηση του πάχους των επιφανειακών ελασμάτων μπορεί να είναι απαραίτητη για άλλους λόγους π.χ. βαλλιστική θωράκιση, επιδρά όμως αρνητικά στην συνολική αντοχή του πλαισίου.

Ένας συνδυασμός αναλυτικής, αριθμητικής και πειραματικής προσέγγισης υιοθετήθηκε για να αξιολογήσει την στρεπτική ακαμψία υβριδικών FRP δοκών με διαφορετικούς προσανατολισμούς ημιτονοειδή πυρήνα. Οι ισοδύναμες διατμητικές ιδιότητες πυρήνα προσεγγίσθηκαν χρησιμοποιώντας την μηχανική των υλικών, ενώ η επίλυση στρέψης δοκών σάντουιτς αναπτύχθηκε να συμπεριλάβει την επίδραση στρέβλωσης. Οι ισοδύναμες ιδιότητες επιφανειακών ελασμάτων και του πυρήνα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να απλοποιήσουν τους υπολογισμούς, και χρησιμοποιήθηκαν στο αντίστοιχο μοντέλο πεπερασμένου στοιχείου. Παρουσιάστηκαν πειραματικές εκτιμήσεις δέκα διαφορετικών τύπων δειγμάτων δοκών με πυρήνες στοιχισμένους κατά μήκος, εγκάρσια ή κάθετα σε σχέση με το μήκος της δοκού, για να χαρακτηρίσουν πλήρως τις αντιδράσεις στρέψης υβριδικών FRP σάντουιτς. Η σχετικά καλή συσχέτιση της αναλυτικής μελέτης, της μελέτης πεπερασμένου στοιχείου και των πειραματικών δοκιμών πιστοποιούν την εγκυρότητα της προτεινόμενης προσέγγισης, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά για διερεύνηση των στρεπτικών και διατμητικών συμπεριφορών των υβριδικών σύνθετων κατασκευών γενικά. Από τα αποτελέσματα στρέψης για υβριδικά πλαίσια προκύπτει ότι ιδιαίτερη σημασία έχει ο προσανατολισμός του πυρήνα δίδοντας καλλίτερα αποτελέσματα για πλαίσια όπου τα ημιτονοειδή κύματα είναι κατά μήκος των δοκών (LV), όσο αφορά την συμπεριφορά στην ακαμψία (degrees/N-mm/m), σε σχέση με τα δείγματα όπου τα ημιτονοειδή κύματα είναι στοιχισμένα εγκάρσια ή κάθετα στο μήκος της δοκού.

Όσο αφορά την αντίδραση σε πρόσκρουση πολυδιευθυντικών σύνθετων στρωμάτων προκύπτουν ιδιαίτερης σημασίας συμπεράσματα σχετικά με την συμπεριφορά του σύνθετου υλικού. Παρατηρήθηκε λοιπόν ότι η συμπεριφορά του υλικού εξαρτάται από την γεωμετρία των ινών, το πάχος και το πλήθος των φυλλωμάτων του σύνθετου, και το σχήμα του προσκρουστήρα. Το μέγεθος της ενέργειας πρόσκρουσης επιδρά σημαντικά στην έκταση της βλάβης με αύξηση της συνολικής επικίνδυνης περιοχής όσο αυξάνεται η προσκρουόμενη ενέργεια. Η αποκόλληση στρωμάτων συμβαίνει εξαιτίας διαφορετικής κάμψης μεταξύ δύο όμορων στρώσεων. Παρατηρείται γρηγορότερη διείδυση για στρώματα με κλίση [0/90/+45/-45], συγκριτικά με στρώματα [0/90/0/90] λόγω σφαλμάτων σύνδεσης των επιπέδων +45/90, 90/+45. Ωστόσο το όριο διείδυσης πολυστρωματικών υλικών [0/90/+45/-45]s είναι μικρότερο

από των [0/90/0/90]_s, η διαφορά είναι περίπου 3.4J ή 3,9J. Για χαμηλότερες ενέργειες πρόσκρουσης (<25J), ο κύριος κίνδυνος είναι η αποκόλληση και το σπάσιμο της μήτρας. Επιπλέον, για υψηλότερες ενέργειες πρόσκρουσης, οι αστοχίες των ινών είναι ο επικρατέστερος κίνδυνος εξ αιτίας των ψαθυρών χαρακτηριστικών των υαλο-υφασμάτων. Σημαντική αποκόλληση παρουσιάζεται στο κατώτερο επίπεδο, σαν αποτέλεσμα της κάθετης μετατόπισης των σπασμένων και μη ινών στο σημείο της πρόσκρουσης παρά της αστοχίας λόγω κάμψης. Τέλος η συμπεριφορά σε πρόσκρουση βελτιώνεται με προσθήκη ενδιάμεσων στρώσεων (interleaves).

Επίσης παρουσιάστηκαν οι κατασκευαστικές και μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων θερμοπλαστικών-μεταλλικών υβριδικών στρωμάτων στηριζόμενες στα πλεονεκτήματα αντοχής του χάλυβα. Αυτά τα υβριδικά συστήματα αποτελούνται από περιοχές στρωμάτων φύλλων χάλυβα DP500 επενδυμένα με ενισχυμένα υαλονήματα ή αυτοενισχυόμενα πολυπροπυλενίου σύνθετα υλικά. Από τις δοκιμές απλής πακτωμένης δοκού (SCB) αξιολογήθηκε το επίπεδο της προσκόλλησης κατά μήκος της εσωτερικής επιφάνειας των δύο υλικών. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι μπορεί να επιτευχθεί ένα καλό επίπεδο προσκόλλησης ανάμεσα στο θερμοπλαστικό σύνθετο υλικό και στον χάλυβα DP500. Επιπροσθέτως, από τις δοκιμές πακτωμένης δοκού (SCB) φαίνεται ότι οι ενέργειες θραύσης της διεπιφάνειας των υβριδικών στρωμάτων αυξάνονται με την αύξηση του εγκάρσιου ρυθμού φόρτισης. Από τις δοκιμές SCB προκύπτει ότι οι ιδιότητες εφελκυσμού των υβριδικών στρωμάτων εξαρτώνται από αυτές των συστατικών υλικών. Επιπροσθέτως, φάνηκε ότι ο απλός νόμος της σύνθεσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προβλέψει κάποιες ιδιότητες. Αυτά τα υλικά θα μπορούσαν να προσφέρουν μία καλή δυνατότητα για μείωση του βάρους, του χρόνου κατασκευής και του σχετικού κόστους, το οποίο είναι ενδιαφέρον για τις μεταφορικές βιομηχανίες και θα μπορούσε να καθοδηγήσει την ανάπτυξη των οχημάτων.

Ένα σύνηθες φαινόμενο κατά την μορφοποίηση σύνθετου ελάσματος είναι η αναδίπλωση στο εξωτερικό επίπεδο (shear buckling). Από τις πειραματικές και θεωρητικές διερευνήσεις προκύπτει ότι το σχήμα του στρώματος έχει σημαντική επίδραση στην δημιουργία αναδιπλώσεων στο μορφοποιημένο σύνθετο έλασμα. Για μονοδιευθυντικά και εγκάρσια στρώματα, η τάση διάτμησης στις 45⁰ της διεύθυνσης της ίνας επηρεάζει το σχήμα της αναδίπλωσης, δεδομένου ότι για οιονεί ισοτροπικά στρώματα αυτό είναι η αξονική τάση θλίψης στις ίνες που αναπτύσσονται εφαπτόμενα στην θέση αναδίπλωσης. Το μέγεθος της εφαπτόμενης τάσης εξαρτάται από τα μήκη των εφαπτόμενων ινών, καθώς και από άλλα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ελάσματος. Παρουσιάστηκε ένας λεπτομερής συσχετισμός ανάμεσα στις πειραματικές και στις αριθμητικές προβλέψεις για κυκλικά, τετράγωνα, ορθογώνια και κομμένα τετράγωνα σχήματα, όλα από οιονεί ισοτροπικά στρώματα. Τα αριθμητικά αποτελέσματα προβλέπουν την περιοχή και την σχέση μεγέθους των ασταθειών στα κυκλικά και τετράγωνα στρώματα προβλέποντας επίσης την επίδραση πάνω στα παρατηρούμενα σχήματα αναδίπλωσης όταν το πλάτος του τετράγωνου ελάσματος μειώνεται σε ορθογώνιο.

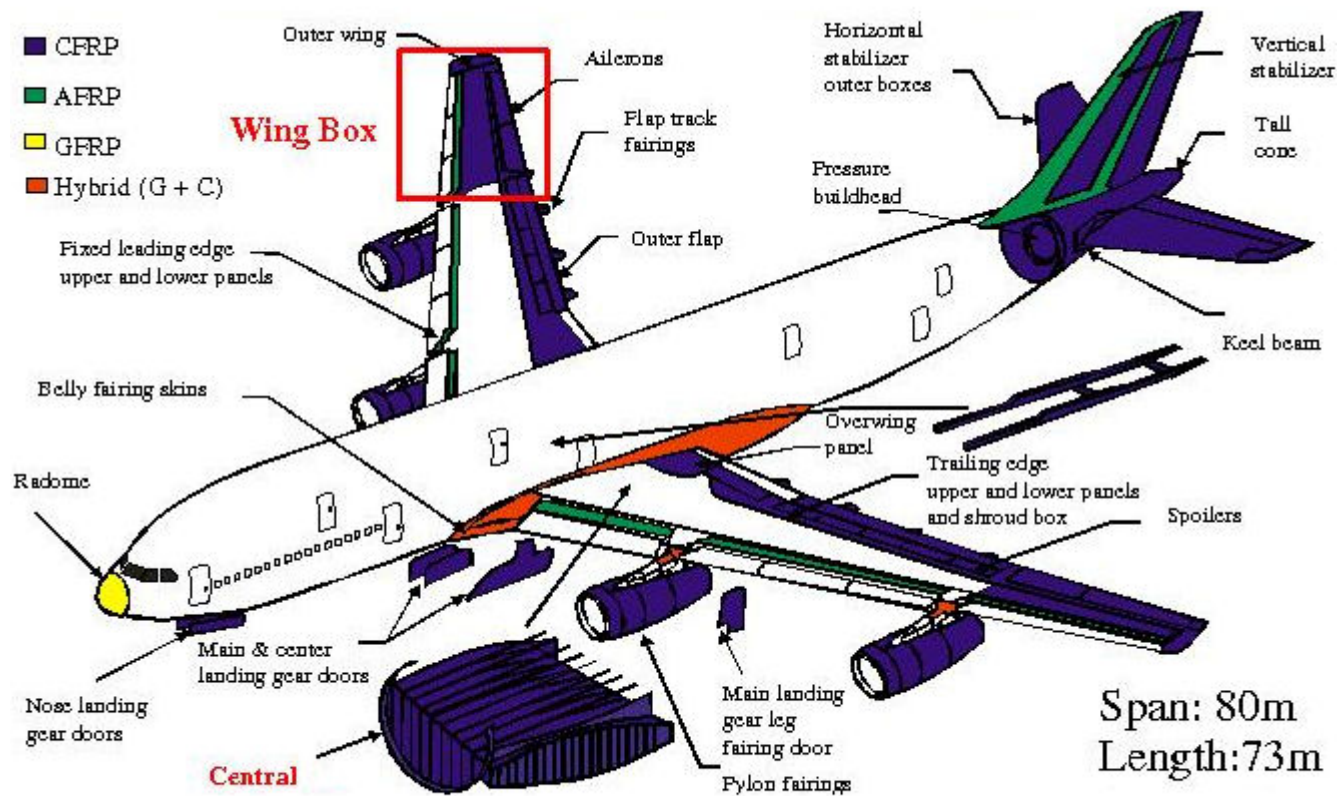
Στην κατασκευή αεροσκάφους φάνηκε ότι μία εγκάρσια διατομή δοκού πατώματος μπορεί να σχεδιασθεί από μονοδιευθυντική θερμοπλαστική ταινία με ανταγωνιστικό κόστος κατασκευής. Επιτυγχάνεται εξοικονόμηση βάρους 30%, ωστόσο, θα μπορούσε να θέσει σε κίνδυνο την αποτελεσματικότητα με την οποία το σύνθετο μπορούσε να κατασκευασθεί. Όλκιμα θερμοπλαστικά υλικά με πολύ υψηλό μέτρο ελαστικότητας

είναι ικανά να απορροφήσουν ενέργεια όταν υπόκεινται σε φόρτιση εξωτερικού επιπέδου. Μορφοποίηση πίεσης, μορφοποίηση κενού, μορφοποίηση ρολού και μορφοποίηση μεμβράνης, είναι όλες οι μέθοδοι παραγωγής θερμοπλαστικών δοκών πατωμάτων που προσφέρουν πλεονεκτήματα έναντι μεθόδων παραγωγής δοκών δαπέδου από αλουμίνιο.

Μία νέα θεωρητική ανάλυση εσωτερικής τάσης παρουσιάστηκε δοκούς σκυροδέματος συνδεδεμένες με ένα λεπτό σύνθετο ή χαλύβδινο έλασμα και υπόκεινται σε ομοιόμορφη κατανεμημένη φόρτιση κάμψης. Τα βασικά χαρακτηριστικά της νέας ανάλυσης περιλαμβάνουν την μελέτη της παραμόρφωσης λόγω διάτμησης των επιφανειών σύνδεσης, υποθέτοντας παραβολική τάση διάτμησης διαμέσου του πάχους και των δύο, της δοκού σκυροδέματος και του συνδεδεμένου ελάσματος. Η σύνδεση των λωρίδων γίνεται με ρητίνη ενώ η μεταφορά των τάσεων από το σκυρόδεμα στο FRP είναι πρωταρχικής σημασίας στις ενισχυμένες με FRP κατασκευές σκυροδέματος. Όσο το υλικό του ελάσματος γίνεται μαλακότερο (από χάλυβα σε CFRP και μετά GFRP), οι εσωτερικές τάσεις γίνονται μικρότερες ενώ οι εσωτερικές τάσεις αυξάνονται καθώς το πάχος τους ελάσματος FRP αυξάνεται. Η χρήση FRP έχει καλύτερη συμπεριφορά σε σχέση με ελάσματα χάλυβα διότι τα FRP έχουν μικρότερο πάχος και βάρος. Οι συγκεντρώσεις τάσεων εμφανίζονται στα άκρα της σύνδεσης του ελάσματος FRP. Μικρό μέτρο ελαστικότητας της δοκού σκυροδέματος αυξάνει τις εσωτερικές διατμητικές τάσεις (όχι τις ορθές). Το μέτρο ελαστικότητας της συγκολλητικής ουσίας δεν επηρεάζει την διανομή διατμητικών και ορθών τάσεων.

Τέλος μπορούμε να συμπεράνουμε ότι κατά την μορφοποίηση ελάσματος οι μέγιστες εφαπτομενικές τάσεις εξαρτώνται από το εφαπτομενικό μήκος των ινών και το λόγο εσωτερικής τριβής μεμβράνης/ σύνθετου. Τα μονοδιευθυντικά (UD) στρώματα συνήθως προτιμώνται από τους κατασκευαστές για την ικανότητά τους να διαμορφώνονται γρήγορα σε σχετικά μικρές πιέσεις. Σε μονοδιευθυντικά σχήματα, η αντοχή σε διάτμηση αυξάνεται με την πρόσθεση περισσότερων στρωμάτων $\pm 45^{\circ}$. Ο ρυθμός εγκάρσιας φόρτισης επιδρά στις ιδιότητες θραύσης της διεπιφάνειας των σύνθετων στρωμάτων ενώ η συνεχόμενη φόρτιση έχει ως αποτέλεσμα την μόνιμη παραμόρφωση ακολουθούμενη από σταθερή διάδοση ραγίσματος.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ



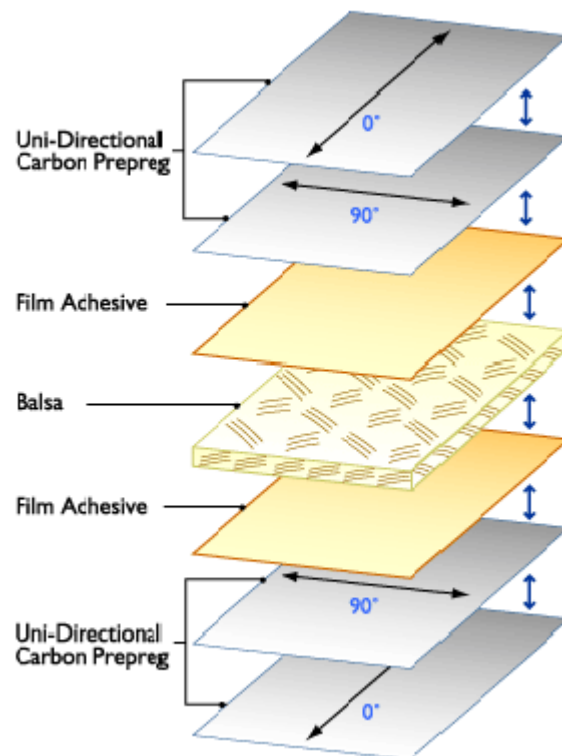
Σχήμα 1 : Χρήση σύνθετων στην κατασκευή αεροσκάφους



Ενίσχυση κατακόρυφου στοιχείου σκυροδέματος με χρήση ανθρακονημάτων



Ενίσχυση κόμβου σκυροδέματος με χρήση ανθρακονημάτων και μεταλλικών ελασμάτων



Σύνθετο υλικό με πυρήνα ελαφρόξυλου (balsa) της εταιρείας ACP (μονοδιευθυντική ίνα άνθρακα προσφέρει ακαμψία σε δύο διευθύνσεις)

5 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Υπολογισμός μέτρου διάτμησης G_{13} για T300H/9000-2 στρώμα.

Το στρώμα T300H/9000-2 μοντελοποιείται σαν γραφίτης/εποξειδικό (GE) εγκάρσια ισοτροπικό επίπεδο με διάχυση μεταξύ δύο λεπτών φιλμ εποξειδικού/πολυαμιδίου (Epoxy/Polyamide) (σχήμα A.1)

Όταν το στρώμα φορτίζεται σε διάτμηση εσωτερικά του 1-2 επιπέδου, όλα τα στρώματα παραμορφώνονται παράλληλα, και ισχύει ο νόμος της σύνθεσης :

$$G_{12} = G_{GE} \frac{t_{GE}}{t} + G_{EP} \frac{2t_{EP}}{t} \quad \text{A.1}$$

όπου G_{12} είναι το μέτρο διάτμησης του κύριου επιπέδου (xy) του στρώματος και t το συνολικό του πάχος.

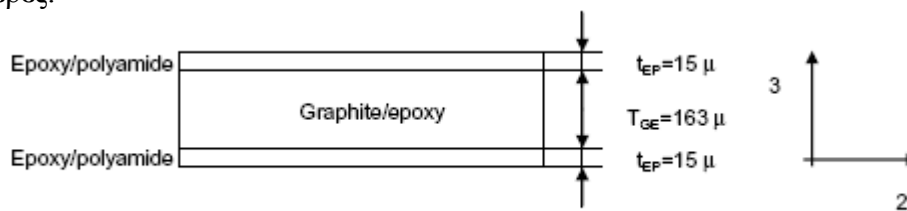
Υποθέτοντας $G_{GE} = 4.55GPa$, $E_{EP} = 2.71GPa$, $\nu_{EP} = 0.38$, η τιμή $G_{12} = 4.0GPa$ είναι λογική για μέτρο διάτμησης κύριου επιπέδου του CFRP στρώματος.

Όταν το στρώμα φορτίζεται σε διάτμηση κατά μήκος 1-3 επιπέδου, τα στρώματα παραμορφώνονται σε σειρά, και χρησιμοποιείται η ακόλουθη εξίσωση :

$$\frac{1}{G_{13}} = \frac{t_{GE}}{tG_{GE}} + \frac{2t_{EP}}{tG_{EP}} \quad \text{(A.2)}$$

από την οποία η τιμή $G_{13} = 2.9GPa$ απεικονίζεται.

Εάν το πειραματικό G_{13} που δίδεται από τις δοκιμές ($G_{13} = 1.14GPa$) αντικατασταθεί στην εξίσωση (A.2) μαζί με $G_{GE} = 4.55GPa$, το αποτέλεσμα δίνει $G_{EP} = 0.255$. Για ισοτροπικό εποξειδικό/πολυαμίδιο με μέτρο Poisson's $\nu = 0.38$ τότε $E_{EP} = 0.62GPa$, το οποίο δείχνει ότι είναι υπερβολικό χαμηλό για ένα εποξειδικό/πολυαμίδιο πολυμερές.



Σχήμα A.1: Μοντελοποίηση στρώματος T300H/9000-2

6 Βιβλιογραφία

- [1] **Torsion of honeycomb FRP sandwich beams with a sinusoidal core configuration**
Composite Structures 88 (2009) 97-111
- [2] **An experimental investigation of the impact response of composite laminates**
Composite Structures 87 (2009) 307-313
- [3] **Failure mode maps for composite sandwich panels subjected to air blast loading**
International Journal of Impact Engineering 36 (2009) 418-425
- [4] **The effect of shear on the rigidity in three-point bending of unidirectional CFRP laminates made of T800H/3900-2**
Composite structures 88 (2009) 360-366
- [5] **Ενίσχυση κατασκευών για σεισμικά φορτία –**
Κωνσταντίνος Σπυράκος 2004
- [6] **Interfacial stresses in FRP – plated RC beams :Effect of adherend shear deformations**
International Journal of Adhesion & Adhesives 29 (2009) 343-351
- [7] **Manufacturing and mechanical properties of thermoplastic hybrid laminates based on DP500 steel**
Composites: Part A 40 (2009) 176-183
- [8] **Effect of perform shape on buckling of quasi-isotropic thermoplastic composite laminates during sheet forming**
Composite Manufacturing 6 (1995) 269-280
- [9] **The “design for manufacture” of continuous fibre-reinforced thermoplastic products in primary aircraft structure**
Composite Manufacturing 6 (1995) 245-254
- [10] <http://www.acp-composites.com/home.php?cat=4707>
- [11] **Processing and mechanical properties of bi-directional performs for liquid composite moulding**
Composite structures 6 (1995) 211-219
- [12] **An explicit finite element solution for the forming prediction of continuous fibre-reinforced thermoplastic sheets**
Composite Manufacturing 6 (1995) 237-243
- [13] **Cutting forces and TEM analysis of the generated surface during machining meta matrix composites**
Journal of materials processing technology 209 (2009) 2260-2269

- [14] **Bearing strength of pinned joints in woven fabric composites with small weaving angles**
Composite Structures 88 (2009) 40-45
- [15] **Crack Deflection by Core Junctions in Sandwich Structures**
Engineering Fracture Mechanics J.Jakobsen, J.H.Andreasen, O.T. Thomsen
- [16] **Failure behaviour of honeycomb sandwich corner joints and inserts**
Composite structures 89 (2009) 575-588
- [17] **Ενισχύσεις Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος με Σύνθετα Υλικά**
Αθανάσιος Χ. Τριανταφύλλου
- [18] <http://www.composites-by-design.com/glossary.htm>
- [19] <http://www.sintecno.gr/StatikesEnisxiseisMeSinthetaYlikahtm.html>
- [20] **Μη μεταλλικά τεχνικά υλικά (Δομή – Ιδιότητες – Τεχνολογία – Εφαρμογές)**
Δημήτρης Ι. Παντελής (1996)
- [21] http://www.sika.gr/catalog/d_1.htm
- [22] **Characteristics of joining inserts for composite sandwich panels**
Composite Structures 86 (2008) 55-60
-