



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΔΟΚΩΝ ΑΠΟ ΣΥΝΘΕΤΑ
ΥΛΙΚΑ ΜΕ ΑΠΟΧΩΡΙΣΜΟ ΣΤΡΩΣΕΩΝ, ΥΠΟΒΑΛΛΟΜΕΝΩΝ ΣΕ
ΚΑΜΨΗ ΤΡΙΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
Του
ΣΚΑΜΠΗ ΕΡΗ**

Επιβλέπων

Νικόλαος Γ. Τσούβαλης, Αναπλ. Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2013

Ευχαριστίες

Η εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας αυτής θα ήταν αδύνατη χωρίς την πολύτιμη υποστήριξη του επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Νικόλαο Τσούβαλη. Του εκφράζω ένα βαθύ ευχαριστώ για τις γνώσεις και την βοήθεια που μου προσέφερε όλο αυτό το διάστημα. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον κ. Βασίλη Καραντζά για την αμέριστη βοήθειά του και για τον χρόνο που αφιέρωσε για να μου δώσει σημαντικά στοιχεία και εξηγήσεις στα προβλήματα που αντιμετώπισα στα πλαίσια της εργασίας αυτής.

Ευχαριστώ πολύ, τον κ. Αθανάσιο Μαρκουλή και τον κ. Χάρη Ξάνθη για την άψογη συνεργασία μας στο πλαίσιο της εκτέλεσης των πειραματικών δοκιμών.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω πολύ τους γονείς μου, Μαριέττα Σκαμπή και Βασίλειο Σκαμπή, οι οποίοι υπήρξαν πάντα ένα ανεκτίμητο στήριγμα για μένα και στους οποίους οφείλω όλη την διαδρομή των σπουδών μου μέχρι σήμερα.

Αθήνα, Ιούνιος 2013

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	5
1.1 Γενικά για ατέλειες στα σύνθετα υλικά.....	5
1.2 Αποχωρισμός των στρώσεων & Επίδραση σε Κάμψη.....	11
1.2.1 Ο αποχωρισμός των στρώσεων.....	11
1.2.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	12
1.3 Σκοπός.....	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	17
2.1 Εισαγωγή.....	17
2.2 Προ-επεξεργασία (Preprocessing).....	17
2.2.1 Επιλογή τύπου στοιχείων.....	18
2.2.2 Ορισμός μηχανικών ιδιοτήτων.....	20
2.2.3 Γεωμετρία του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων.....	21
2.2.4 Μοντελοποίηση της διάδοσης του αποχωρισμού των στρώσεων με Cohesive Elements.....	23
2.2.5 Κατασκευή μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων.....	26
2.3 Επίλυση (Solution)	35
2.3.1 Ορισμός συνοριακών συνθηκών και φόρτισης.....	35
2.3.2 Τύπος Ανάλυσης.....	37
2.4 Μετ-επεξεργασία (Post-processing).....	38
2.5 Αρχικοί υπολογισμοί.....	38
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ.....	44
3.1 Εισαγωγή.....	44
3.2 Σχεδιασμός Πειραματικών Δοκιμών.....	44
3.2.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δοκιμών.....	44
3.2.2 Επιλογή γεωμετρικών χαρακτηριστικών του αποχωρισμού.....	45
3.2.3 Μετρούμενα μεγέθη κατά τη πειραματική διαδικασία.....	47
3.3 Υλικά.....	48
3.4 Κατασκευή των δοκιμών.....	50
3.4.1 Προετοιμασία.....	50
3.4.2 Κατασκευή πλακών.....	54
3.4.3 Κοπή, μορφοποίηση και τελικές διαστάσεις και ιδιότητες.....	61
3.5 Παράμετροι και διαδικασία πειραματικών δοκιμών.....	66
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ.....	68
4.1 Αποτελέσματα Πειραμάτων.....	68
4.1.1 Σειρά Δοκιμών A_80.....	68
4.1.2 Σειρά Δοκιμών A_140.....	70
4.1.3 Σειρά Δοκιμών A_200.....	71
4.1.4 Σειρά Δοκιμών B_80.....	73
4.1.5 Σειρά Δοκιμών B_140.....	75
4.1.6 Σειρά Δοκιμών B_200.....	76
4.1.7 Σειρά Δοκιμών C_80.....	78
4.1.8 Σειρά Δοκιμών C_140.....	80
4.1.9 Σειρά Δοκιμών C_200.....	81
4.1.10 Σειρά Άθικτων Δοκιμών Intact.....	84
4.1.11 Συγκεντρικά στοιχεία πειραματικών δοκιμών.....	86
4.2 Συγκριτικά Διαγράμματα	86
4.2.1 Αναγωγή αποτελεσμάτων.....	86
4.2.2 Συγκριτικά Διαγράμματα.....	88

4.3 Παρατηρήσεις και συμπεράσματα	92
4.3.1 Παρατηρήσεις.....	92
4.3.2 Συμπεράσματα.....	93
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ–ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	94
5.1 Εισαγωγή.....	94
5.2 Αρχική σύγκριση.....	94
5.3 Διερεύνηση ιδιοτήτων συνεκτικής περιοχής.....	103
5.3.1 Σταθεροποίηση της ανάλυσης.....	103
5.3.2 Περιπτώσεις που διερευνήθηκαν.....	105
5.3.3 Συγκριτικά διαγράμματα διερεύνησης.....	106
5.4 Τελική σύγκριση.....	114
5.5 Ανάλυση της επίδρασης του αποχωρισμού βάση του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων.....	127
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	133
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	135

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά για ατέλειες στα σύνθετα υλικά

Τα τελευταία 30-40 χρόνια η χρήση σύνθετων υλικών έχει γίνει ιδιαίτερα δημοφιλής σε πολλούς βιομηχανικούς κλάδους. Το γεγονός αυτό οφείλεται σε πολλά πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν τα υλικά αυτά (όσον αφορά τις μηχανικές τους ιδιότητες) σε σχέση με τα παραδοσιακά κατασκευαστικά υλικά όπως ο χάλυβας, το αλουμίνιο και το ξύλο. Ιδιότητες όπως η αυξημένη ειδική αντοχή, η αυξημένη ειδική δυσκαμψία, το αυξημένο όριο κόπωσης, η δυσθραυστότητα, η αντίσταση στο περιβάλλον (π.χ. θαλάσσιο διαβρωτικό περιβάλλον) και κυρίως το μειωμένο βάρος έχουν καταστήσει τα σύνθετα υλικά πολύ ελκυστικά για κλάδους όπως η αεροδιαστημική, η αεροναυπηγική, η ναυπηγική, η αυτοκινητοβιομηχανία κλπ.

Στοιχείο κλειδί στη σχεδίαση κατασκευών, όπου το κόστος και το βάρος είναι κρίσιμα, αποτελεί η ανάγκη της εκμετάλλευσης των προαναφερθέντων πλεονεκτημάτων σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο βαθμό. Για να καταστεί αυτό εφικτό, πρέπει να κατανοήσουμε σε βάθος τις ιδιότητες και τον τρόπο συμπεριφοράς τέτοιων υλικών υπό την επίδραση διαφόρων φορτίσεων καθώς και τους μηχανισμούς αστοχίας τους. Η αστοχία μπορεί να προέλθει από την ύπαρξη ατελειών (defects) που δημιουργούνται κατά τη φάση της κατασκευής των υλικών αυτών (manufacturing defects) ή από βλάβες και ατέλειες (damage) που δημιουργούνται ή επεκτείνονται κατά τη λειτουργία (in-service damage) των κατασκευών αυτών.

Η ανάπτυξη ενός συστήματος, ενός συνόλου κριτηρίων, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται επαρκής δομική ασφάλεια και αξιοπιστία χωρίς τη χρήση μεγάλων συντελεστών ασφαλείας, που θα επιτρέψει τη βέλτιστη χρήση και εκμετάλλευση των σύνθετων υλικών, προϋποθέτει την σε βάθος κατανόηση του πως επιδρούν οι ατέλειες στην αντοχή και στη συμπεριφορά των σύνθετων υλικών. Στο πλαίσιο αυτό αναπτύσσεται και η εργασία αυτή, καθώς αντικείμενό της αποτελεί η κατανόηση της επίδρασης του αποχωρισμού των στρώσεων στα ινώδη σύνθετα υλικά.

Ως ατέλεια μπορεί να οριστεί η οποιαδήποτε απόκλιση από το ιδανικό ή από τη προδιαγραφόμενη γεωμετρία. Η εμφάνιση ατελειών σε ένα σύνθετο υλικό είναι αναπόφευκτη. Οι ατέλειες αυτές έχουν να κάνουν με τις ίνες, με την ρητίνη και με τον δεσμό μεταξύ ρητίνης και ινών.

Συνήθεις ατέλειες που εμφανίζονται στα σύνθετα υλικά κατά τη κατασκευή ή την επεξεργασία τους είναι:

- Εγκλείσματα ξένων σωματιδίων (Inclusions)
- Σπάσιμο των ενισχυτικών ινών (Fiber breakage)
- Συστροφή ινών η ρυτίδιασμα αυτών (Fiber wrinkling or kinking)
- Μη καλή ευθυγράμμιση, παραμόρφωση, δημιουργία κόμβων ή σπειρών στις ίνες (Fiber misalignment, distortion, knots/whorls)
- Τοποθέτηση στρώσεων με λανθασμένη σειρά με αποτέλεσμα άλλες μηχανικές ιδιότητες.

- Πορώδες (Porosity), εγκλείσματα αέρα ή άλλων στοιχείων πιθανώς κατά την ανάμιξη της ρητίνης. Μπορούν να λειτουργήσουν ως σημεία συγκέντρωσης τάσης και να μειώσουν κάποιες μηχανικές ιδιότητες. Το πορώδες μπορεί να θεωρηθεί αμελητέο εάν είναι της τάξης έως 1-2%
- Μη ικανοποιητικός εμποτισμός ρητίνης
- Αποχωρισμός στρώσεων (Delamination). Αυτού του είδους η ατέλεια μπορεί να προκύψει και κατά τη διάρκεια κατασκευής αλλά και κατά τη λειτουργία, και μπορεί να έχει αποφασιστική επίδραση στις μηχανικές ιδιότητες, ιδίως υπό θλίψη.
- Ατέλειες λόγω μη σωστής διαδικασίας πολυμερισμού και σκλήρυνσης της ρητίνης
- Παραμένουσες τάσεις. Κατά τον πολυμερισμό της ρητίνης αναπτύσσεται θερμοκρασία (όχι παντού η ίδια) η οποία μπορεί να προκαλεί ανομοιογενή διαστολή και συστολή (όταν επανέλθει πλέον σε θερμοκρασία περιβάλλοντος το υλικό) στις ενισχυτικές ίνες .

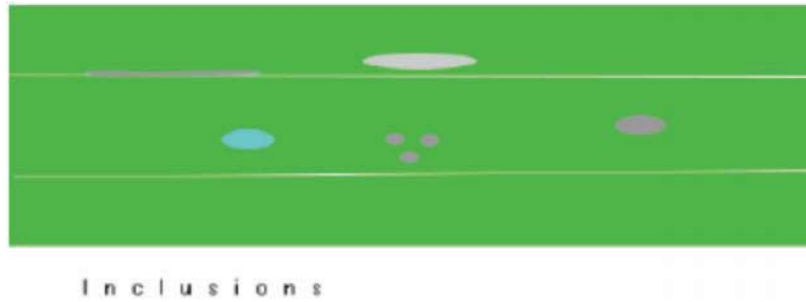
Ατέλειες όμως δημιουργούνται και κατά τη λειτουργία των κατασκευών αυτών. Υπερβολικό στατικό φορτίου, κρουστικά φορτία, κόπωση, υπερθέρμανση και φαινόμενα ερπυσμού μπορούν να δημιουργήσουν ατέλειες. Οι πιο συνήθεις είναι:

- Αποχωρισμός στρώσεων (delamination)
- Ρωγμές (cracks)
- Είσοδος υγρασίας (ingress of moisture)
- Σπάσιμο ή λυγισμός των ινών (fracture or buckling of fibers)
- Αστοχία στη διεπιφάνεια ίνας και μήτρας (failure of the interface between the fibers and matrix)

Παρακάτω θα δούμε με περισσότερη λεπτομέρεια κάποιες από τις παραπάνω ατέλειες.

Εγκλείσματα ξένων σωματιδίων (Inclusions)

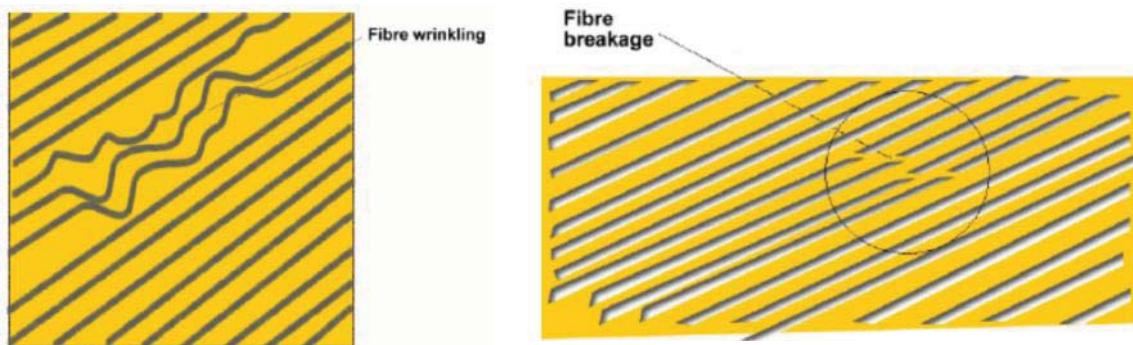
Τα εγκλείσματα ξένων σωματιδίων μπορούν να προκύψουν κατά τη διαδικασία κατασκευής των σύνθετων εξαιτίας της ύπαρξης τέτοιων σωματιδίων (κατά λάθος) μέσα στα υλικά που χρησιμοποιούνται π.χ. να πέσουν σωματίδια μέσα στη ρητίνη κατά την ανάμιξή της με τον σκληρυντή. Τα εγκλείσματα αυτά μπορούν να υποβαθμίσουν τις μηχανικές ιδιότητες και μπορεί να λειτουργήσουν και σαν σημεία εκκίνησης και δημιουργίας άλλων, πιο σοβαρών, ατελειών όπως είναι ο αποχωρισμός στρώσεων. Αυτού του είδους οι ατέλειες είναι περισσότερο πιθανές να εμφανιστούν στη μέθοδο επίστρωσης με το χέρι (hand lay-up) παρά σε πιο σύγχρονες μεθόδους όπως η μέθοδος έκχυσης ρητίνης (resin transfer moulding, RTM). Η επίδραση των εγκλεισμάτων αυτών στην ακεραιότητα και στην αντοχή εξαρτάται από τη θέση και τη φύση του κάθε εγκλεισματος. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 1.1, εγκλείσματα μπορούν να υπάρξουν στο εσωτερικό της ρητίνης και στη διεπιφάνεια των δύο στρώσεων. Τα εγκλείσματα μπορούν να εντοπιστούν από διάφορους μη καταστρεπτικούς ελέγχους όπως η μέθοδος υπέρηχων (ultrasonic C-scan) και με ραδιογραφία (X-radiography).



Εικόνα 1.1 : Εγκλείσματα ξένων σωματιδίων

Συστροφή ινών η ρυτίδιασμα αυτών και θραύση (fiber wrinkling or kinking & breakage)

Η ατέλεια αυτού του είδους αναφέρεται στο φαινόμενο όπου τμήμα των ινών έχει υποστεί συστροφή στο επίπεδο της στρώσης, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στην εικόνα 1.2 (α). Τέτοιες ατέλειες απασχολούν κυρίως κλάδους όπου η ακεραιότητα και η συμμόρφωση με τις προδιαγραφές είναι ιδιαίτερης σημασίας όπως η αεροδιαστημική και η αμυντική βιομηχανία. Άλλο ένα πρόβλημα που μπορεί να παρουσιάζουν οι ίνες, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.2 (β), είναι να έχουν σπάσει τοπικά, γεγονός που οδηγεί σε μεγάλο περιορισμό της αντοχής του υλικού. Συνήθως αυτές οι ατέλειες στα υφάσματα έχουν δημιουργηθεί πριν τη παράδοσή τους από την εταιρεία παραγωγής στους οργανισμούς που θα τα χρησιμοποιήσουν για τη κατασκευή σύνθετων υλικών.



(α)

(β)

Εικόνα 1.2: Σχηματική αναπαράσταση (α) συστροφής των ινών και (β) θραύσης των ινών

Μη καλή ευθυγράμμιση, παραμόρφωση, δημιουργία κόμβων ή σπειρών στις ίνες (Fiber misalignment, distortion, knots/whorls)

Η μη καλή ευθυγράμμιση των ινών μπορεί να είναι τοπική ή και πιο γενικευμένη, όπως φαίνεται και στην εικόνα 1.3, αυτό έχει ως συνέπεια την τοπική αλλαγή του ποσοστού περιεκτικότητας σε ίνες κατά όγκο δημιουργώντας έτσι ανομοιογένειες. Επιπλέον μπορεί να υπάρξει και λάθος ευθυγράμμιση στρώσεων. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε λάθος κατά τη

διαδικασία επίστρωσης με το χέρι. Το γεγονός αυτό μπορεί να επηρεάσει τη συνολική ακαμψία και αντοχή του πολύστρωτου. Οι προαναφερθείσες ατέλειες είναι εν δυνάμει καταστροφικές ατέλειες, παρ' όλα αυτά συναντώνται σπάνια στις κατασκευές καθώς λαμβάνει χώρα ποιοτικός έλεγχος. Συνήθως, εξετάζεται ένα ρετάλι από το υλικό για να επιβεβαιωθεί και να εξασφαλιστεί πως η ποιότητα του υλικού είναι σύμφωνη με τις προδιαγραφές και πως έχουν αποφευχθεί οι παραπάνω ατέλειες.



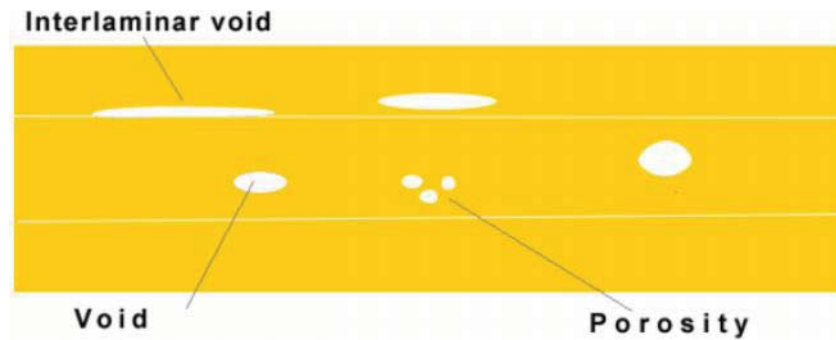
Εικόνα 1.3: Λάθος ευθυγράμμιση των ινών μιας στρώσης

Πορώδες (porosity) και κενά αέρα

Το πορώδες μπορεί να περιγραφεί ως ένα μεγάλο σύνολο από μικρό-κενά, κάθε ένα από τα οποία είναι τόσο μικρό που σαν μονάδα ούτε μπορεί να εντοπιστεί ούτε έχει ιδιαίτερη σημασία και επίδραση στη συμπεριφορά του υλικού, τα οποία όμως συλλογικά μπορούν να υποβαθμίσουν τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού σε μη αποδεκτά επίπεδα. Το πορώδες δημιουργείται συνήθως κατά τον πολυμερισμό και την σκλήρυνση της ρητίνης από φυσαλίδες εγκλωβισμένου αέρα. Το φαινόμενο αυτό είναι αρκετά συχνό στη μέθοδο επίστρωσης με το χέρι σε αντίθεση με άλλες μεθόδους π.χ. μέθοδο έκχυσης ρητίνης.

Οι μεγάλες απομονωμένες φυσαλίδες αέρα αναφέρονται συνήθως ως κενά (voids). Είναι αρκετά μεγάλες ώστε να μπορούν να εντοπιστούν (μέσω υπερήχων). Όταν τέτοια "επίπεδα" κενά εμφανιστούν πολλά μαζί μεταξύ δύο στρώσεων οδηγούν στο φαινόμενο αποχωρισμού των στρώσεων. Η διαφοροποίηση μεταξύ πορώδους και κενών αέρα δεν είναι απόλυτη, συνήθως θεωρούμε το πορώδες ότι αποτελείται από κενά της τάξης του δέκατου του χιλιοστού ενώ πως τα κενά (voids) ότι είναι της τάξης μερικών χιλιοστών. Στην εικόνα 1.4 μπορούμε να δούμε την αναπαράσταση των ατελειών αυτών σε ένα σύνθετο υλικό.

Το πορώδες μπορεί να λειτουργήσει ως σημείο συγκέντρωσης τάσεων και επιδρά αρνητικά σε κάποιες από τις μηχανικές ιδιότητες του πολύστρωτου. Καθώς η θλιπτική και η διατμητική αντοχή στα ινώδη σύνθετα υλικά εξαρτώνται κυρίως από τη μήτρα, οι ιδιότητες αυτές επηρεάζονται αρκετά από τη ύπαρξη του πορώδους. Από την άλλη, η αντοχή σε εφελκυσμό, η οποία εξαρτάται αποκλειστικά από τις ίνες μένει σχεδόν ανεπηρέαστη από το πορώδες. Πορώδες μέχρι 1-2% μπορεί να θεωρηθεί αποδεκτό.

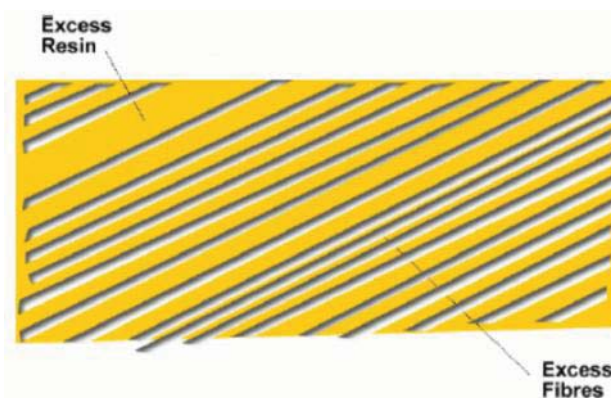


Εικόνα 1.4: Σχηματική αναπαράσταση πορώδους και κενών αέρα

Μη ομοιόμορφη κατανομή ρητίνης (περίσσεια ή έλλειψη ρητίνης)

Οι μέθοδοι κατασκευής των σύνθετων υλικών είναι έτσι σχεδιασμένες ώστε να εξασφαλίζεται όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφη κατανομή από ίνες και ρητίνη σε όλη την έκταση του σύνθετου υλικού. Είναι όμως φυσικό επόμενο, ειδικά στις μεθόδους που δεν είναι πλήρως αυτοματοποιημένες και ο ανθρώπινος παράγοντας παίζει σημαντικό ρόλο, να μην επιτυγχάνεται αυτή η ζητούμενη ομοιομορφία. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 1.5, συνέπεια της μη ομοιόμορφης κατανομής της ρητίνης είναι η δημιουργία περιοχών με διαφορετική περιεκτικότητα σε ίνες κατ' όγκο.

Στην περίπτωση περίσσειας ινών έχουμε τοπική αύξηση της αντοχής και της ακαμψίας, ενώ στη περίπτωση περίσσειας ρητίνης έχουμε μείωση της αντοχής και της ακαμψίας. Παρατηρούμε λοιπόν πως σε κάθε περίπτωση τοπικά δημιουργούνται ανομοιομορφίες στην κατανομή των τάσεων, φαινόμενο που μπορεί να οδηγήσει στην εκκίνηση άλλων, πιο επικίνδυνων μηχανισμών αστοχίας όπως είναι ο αποχωρισμός των στρώσεων.



Εικόνα 1.5: Μη ομοιόμορφη κατανομή της ρητίνης

Ρωγμές (cracks)

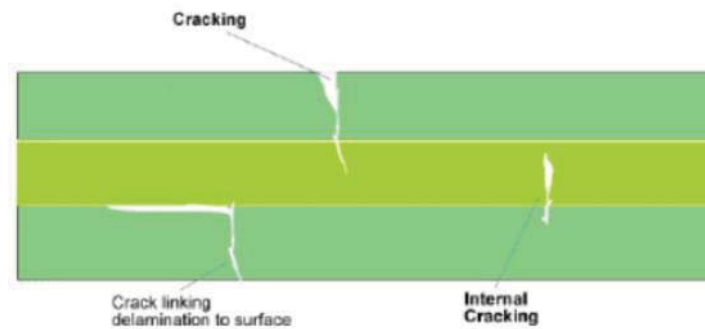
Οι ρωγμές είναι μια συνηθισμένη μορφή ατέλειας που εμφανίζεται στα σύνθετα υλικά και κατά τη κατασκευή τους αλλά και κατά τη λειτουργία τους.

Κατά τη κατασκευή τους, ρωγμές μπορούν να δημιουργηθούν κατά τον πολυμερισμό και τη σκλήρυνση της ρητίνης λόγω ανάπτυξης θερμικών τάσεων και ίσως λόγω παραμενουσών τάσεων. Το φαινόμενο αυτό είναι πιο πιθανό να συμβεί σε περιοχές συγκέντρωσης τάσεων

όπως είναι οι οπές ή περιοχές όπου αλλάζει η γεωμετρία (π.χ. η εγκάρσια διατομή). Οι ενέργειες όπως η δημιουργία οπών ή η κοπή μπορούν να προξενήσουν ρωγμές μέσα στις στρώσεις (interlaminar crack, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.5).

Κατά τη λειτουργία τέτοιων κατασκευών από σύνθετα υλικά μπορούν να προκληθούν ρωγμές λόγω κρουστικών φορτίων ή λόγω της διάδοσης, επέκτασης και ένωσης άλλων ατελειών.

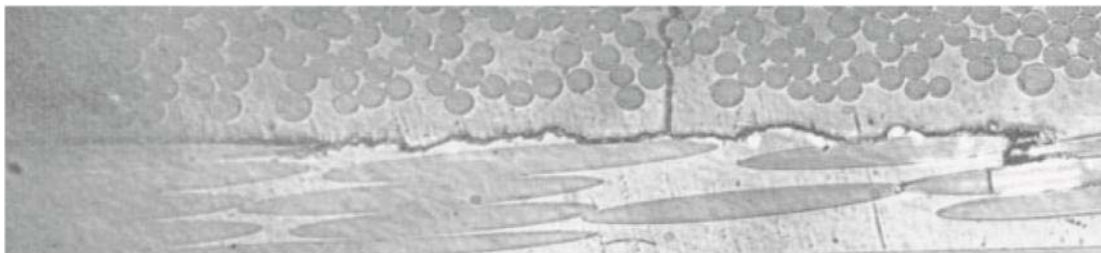
Οι ρωγμές επηρεάζουν και τη μήτρα και τις ίνες, και έχουν σημαντική επίπτωση στην ακεραιότητα του σύνθετου καθώς επιτρέπουν στα στοιχεία του περιβάλλοντος λειτουργίας του σύνθετου να διεισδύσουν στο υλικό και να το υποβαθμίσουν μηχανικά. Οι ρωγμές σχετίζονται με τα τελευταία στάδια αστοχίας των σύνθετων υλικών κατά τη λειτουργία τους.



Εικόνα 1.6: Διάφοροι τύποι ρωγμών

Αποχωρισμός στρώσεων (delamination)

Ο αποχωρισμός στρώσεων (delamination) αναφέρεται σε περιπτώσεις όπου η αστοχία (ή ο ανεπαρκής δεσμός) συμβαίνει σε ένα επίπεδο μεταξύ δύο παρακείμενων στρώσεων ενός πολύστρωτου, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στην εικόνα 1.7. Αυτού του είδους η αστοχία επηρεάζεται (κυριαρχείται) κυρίως από τις ιδιότητες της μήτρας, και καθώς οι ιδιότητες της μήτρας είναι χαμηλές, τα πολύστρωτα σύνθετα υλικά έχουν τη τάση να εμφανίζουν ατέλειες αυτού του είδους. Ο αποχωρισμός των στρώσεων είναι ιδιαίτερα σημαντικό για την ακεραιότητα και την αντοχή όλου του υλικού καθώς η διάδοση του μπορεί να οδηγήσει σε πιο σοβαρές ατέλειες π.χ. ρωγμές ή και σε ολοκληρωτική κατάρρευση της κατασκευής.



Εικόνα 1.7: Αποχωρισμός των στρώσεων σε σύνθετο υλικό.

Ακριβώς λόγω της σημασίας τους αυτής πρέπει η φύση και οι επιδράσεις αυτών των ατελειών να μελετηθούν περεταίρω. Στην επόμενη παράγραφο ακολουθεί μια αναλυτική περιγραφή της αποκόλλησης στρώσεων (delamination).

1.2 Αποχωρισμός των Στρώσεων και Επίδραση σε Κάμψη

1.2.1 Ο Αποχωρισμός των Στρώσεων

Ο αποχωρισμός των στρώσεων είναι ένας από τους πιο συνηθισμένους και πιο σημαντικούς τρόπους αστοχίας των ινωδών πολύστρωτων υλικών. Το είδος αυτό ατέλειας, το οποίο μπορεί να εμφανιστεί είτε κατά την κατασκευή των υλικών αυτών είτε λόγω των καταπονήσεων που υφίσταται κατά την λειτουργία της κατασκευής, είναι στην ουσία η θραύση της μήτρας στη διεπιφάνεια μεταξύ δυο στρώσεων και οδηγεί στη δημιουργία δυο ξεχωριστών τμημάτων του πολύστρωτου εκατέρωθεν της περιοχής θραύσης της μήτρας.

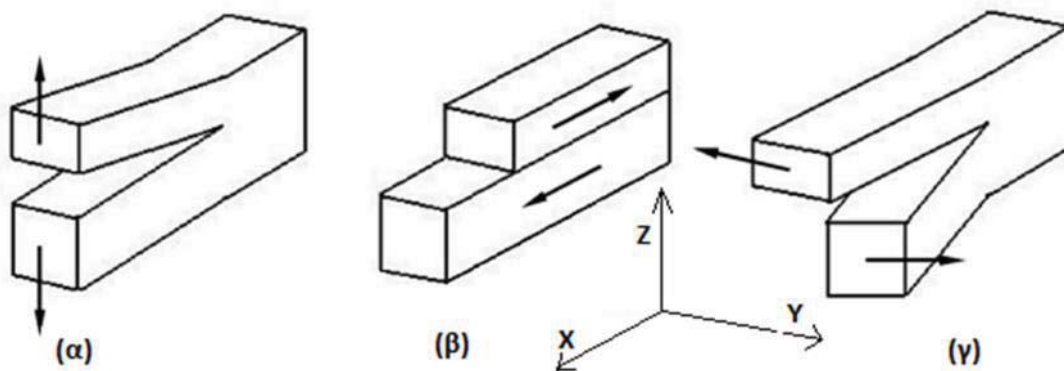
Οι στρώσεις ενός πολύστρωτου χαρακτηρίζονται εν γένει από διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες λόγω συνήθως των διαφορετικών μεταξύ τους προσανατολισμών. Αυτό έχει ως συνέπεια την τάση κάθε στρώσης να παραμορφωθεί ανεξάρτητα από τις υπόλοιπες υπό την επίδραση ενός φορτίου, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη ορθών και διατμητικών τάσεων μεταξύ των στρώσεων. Οι διαστρωματικές τάσεις αυτές μεγιστοποιούνται στα άκρα του πολύστρωτου και είναι δυνατόν να υπερβούν το όριο αντοχής του συνδετικού υλικού τους, δηλαδή του υλικού της μήτρας, το οποίο χαρακτηρίζεται από χαμηλές μηχανικές ιδιότητες. Η συνεπαγόμενη θραύση της μήτρας και ο αποχωρισμός των στρώσεων ευνοούνται από τυχόν κατασκευαστικές ατέλειες, όπως τα κενά αέρα.

Μακριά από τα άκρα όπου οι διαστρωματικές τάσεις είναι αμελητέες, πιθανές κατασκευαστικές ατέλειες (π.χ. κενά αέρα), οι οποίες είναι πιο συχνές σε μεθόδους όπου η παρουσία του ανθρώπινου παράγοντα είναι σημαντική (π.χ. μέθοδος επίστρωσης με το χέρι – hand lay-up method), υπό την επίδραση εναλλασσόμενων (κόπωση) ή κρουστικών φορτίων μεγεθύνονται ή και ενώνονται μεταξύ τους οδηγώντας στη θραύση της μήτρας και στον τοπικό αποχωρισμό των στρώσεων. Για τις ναυπηγικές κατασκευές όπου το περιβάλλον λειτουργίας τους είναι η θάλασσα αντιλαμβανόμαστε πως τέτοια φορτία επιδρούν συνεχώς στην κατασκευή. Η πλεύση μέσα σε κυματισμούς, κρουστικά φορτία λόγω σφυρόκρουσης και ατυχημάτων (π.χ. συγκρούσεις και προσαράξεις) μπορούν εύκολα να προκαλέσουν αποχωρισμό των στρώσεων.

Ο αποχωρισμός δύο στρώσεων συμβαίνει σε μια περιοχή της διεπιφάνειας μεταξύ αυτών, με τη δημιουργία δύο ξεχωριστών τμημάτων του πολύστρωτου εκατέρωθεν αυτής. Η περιοχή αυτή είναι διαφόρων σχημάτων και μεγεθών και μπορεί να βρίσκεται σε διάφορες θέσεις κατά το μήκος, το πλάτος και το πάχος του πολύστρωτου. Επιπλέον μια κατασκευή είναι δυνατόν να αστοχήσει με αυτόν τον τρόπο σε περισσότερες από μία περιοχές. Σε κάθε περίπτωση το αρχικό πολύστρωτο χωρίζεται σε δύο υποπολύστρωτα (sublaminates) με μικρότερο αριθμό στρώσεων. Σε κάθε υποπολύστρωτο οι λιγότερες στρώσεις οδηγούν σε μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων και αύξηση της ανισοτροπικότητάς τους και πιθανώς σε πιο έντονη σύζευξη των παραμορφώσεων. Επιπλέον στη περιοχή αυτή τα υποπολύστρωτα έχουν τη τάση να παραμορφώνονται ανεξάρτητα το ένα από το άλλο, η

ύπαρξη του άλλου όμως λειτουργεί ως φυσικό εμπόδιο, που μπορεί να οδηγήσει σε περεταίρω θραύση της μήτρας.

Οι βασικοί τύποι αστοχίας των υποπολύστρωτων είναι τρεις και φαίνονται στην εικόνα 1.8 . Αυτοί είναι το άνοιγμα (mode 1), το σχίσσιμο (mode 2) και το γλίστρημα (mode 3). Το άνοιγμα είναι η απομάκρυνση των δύο υποπολύστρωτων μεταξύ τους που έχει και σαν αποτέλεσμα να γίνεται και διεύρυνση του αποχωρισμού. Χαρακτηριστικό μέγεθος της διεύρυνσης της επιφάνειας του αποχωρισμού των στρώσεων αποτελεί ο ρυθμός απελευθέρωσης της ενέργειας παραμόρφωσης (strain energy release rate) και εξαρτάται από τον τύπο της σχετικής παραμόρφωσης των πολύστρωτων. Το γλίστρημα ορίζεται ως η περίπτωση που τα δύο υποπολύστρωτα κινούνται σε αντίθετη κατεύθυνση παράλληλα στον Χ-άξονα ενώ το σχίσσιμο ως προς τον Υ-άξονα. Ένα πολύστρωτο μπορεί να αστοχήσει είτε καθαρά με έναν από τους παραπάνω τρόπους (mode) είτε με κάποιο συνδυασμό των τρόπων αυτών.



Εικόνα 1.8: Σχηματική αναπαράσταση των βασικών τύπων παραμόρφωσης των υποπολύστρωτων : (α) άνοιγμα, τύπος I (β) γλίστρημα, τύπος II (γ) σχίσσιμο, τύπος III

Τα παραπάνω σε συνδυασμό με τη μικρότερη διασπορά των τάσεων διαμέσου της μήτρας λόγω τοπικής θραύσης της, οδηγούν στην υποβάθμιση της αντοχής του πολύστρωτου. Η συγκέντρωση τάσεων στα όρια της επιφάνειας του αποχωρισμού είναι ένας επιπλέον λόγος που εντείνει την υποβάθμιση της αντοχής του υλικού.

Όπως έχουμε αναφέρει και νωρίτερα, ο αποχωρισμός των στρώσεων είναι ένας σύνθετος τρόπος αστοχίας και ιδιαίτερης σημασίας για τη συμπεριφορά του υλικού. Για να μπορέσουμε να "εμπιστευτούμε" σε μεγαλύτερο βαθμό τα υλικά αυτά και να επωφεληθούμε από τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν σε σχέση με τα συμβατικά κατασκευαστικά υλικά είναι απαραίτητη η κατανόηση της επίδρασης του αποχωρισμού των στρώσεων.

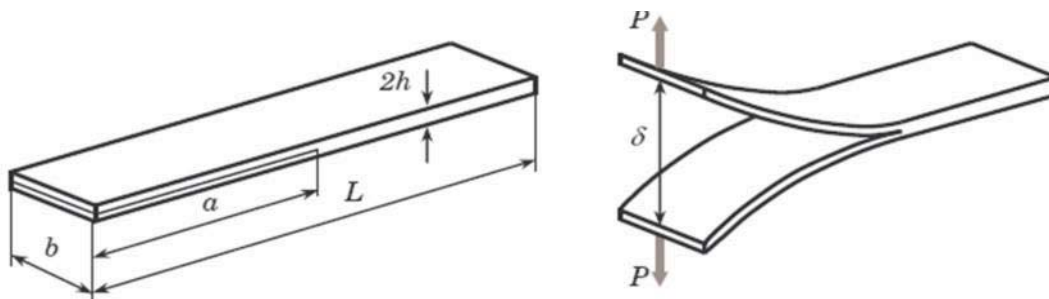
1.2.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Στην προσπάθεια καλύτερης κατανόησης των υλικών αυτών, έχουν γίνει πολλές έρευνες οι οποίες προσπαθούν να εκτιμήσουν την επίδραση του αποχωρισμού των στρώσεων στη συμπεριφορά και στον τρόπο αστοχίας των ινωδών σύνθετων υλικών υπό την επίδραση διαφόρων φορτίσεων. Το αντικείμενο της εργασίας αυτής είναι η επίδραση του αποχωρισμού των στρώσεων σε σύνθετα υποβαλλόμενα σε καμπτικά φορτία. Υπό καμπτικά φορτία το είδος της αποκόλλησης που μπορεί να συμβεί είναι συνδυασμός των δύο

βασικών τρόπων άνοιγμα (τύπου I) και γλίστρημα (τύπου II) που από εδώ και πέρα το αναφέρουμε ως αποχωρισμός τύπου I-II. Εργασίες που περιλαμβάνουν είτε πειραματικές μελέτες είτε αριθμητικές προσομοιώσεις με χρήση πακέτων πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Methods) έχουν γίνει για να δούμε ποιες είναι οι κύριες παράμετροι που διέπουν τέτοια προβλήματα και πως επηρεάζουν την μηχανική συμπεριφορά των ινωδών σύνθετων υλικών. Στη συνέχεια ακολουθεί μια σύντομη παρουσίαση ευρημάτων και συμπερασμάτων εργασιών που πραγματεύονται τον αποχωρισμό των στρώσεων υπό κάμψη και το mixed-mode delamination.

Αποχωρισμός Τύπου I

Η πιο συνηθισμένη πειραματική μέθοδος υπολογισμού της αντοχής σε θραύση κατά τύπο I (Davies , 1998) είναι η DCB (double cantilever beam). Στη δοκιμή αυτή χρησιμοποιείται μια δοκός η οποία φέρει ένα αρχικό τεχνητό αποχωρισμό (ASTM D 5528-01 , 2003 ; Davies , 1992) και έχει τη μορφή που φαίνεται στην εικόνα 1.9 .



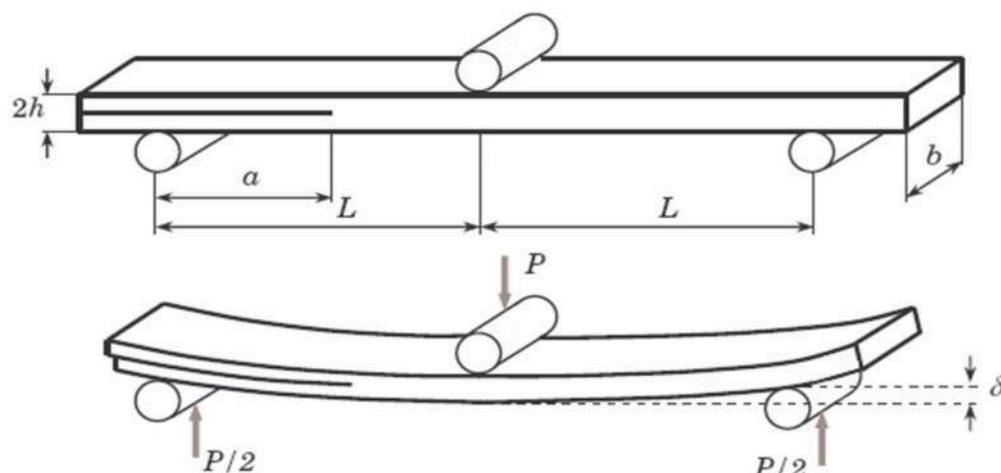
Εικόνα 1.9: Πειραματική δοκιμή DCB χωρίς φόρτιση και υπό φόρτιση .

Ο τεχνητός αποχωρισμός των στρώσεων τοποθετείται στο μέσο του πάχους του πολύστρωτου και είναι κατασκευασμένος από κάποιο πολυμερές. Στην εργασία των Li , Thouless , Waas , Schroeber και Zavattieri (2004) αναλύθηκε η επίδραση που έχει η χρήση μιας περιοχής συνεκτικότητας (cohesive-zone) στη μοντελοποίηση της αστοχίας κατά τύπο I δύο σύνθετων πλακών που είναι ενωμένες με κολλητικό υλικό. Η χρήση της περιοχής συνεκτικότητας έδωσε τη δυνατότητα να εξηγηθούν κάποιοι μηχανισμοί που λαμβάνουν χώρα στη διεπιφάνεια μεταξύ των δύο στρώσεων και δεν μπορούν να εξηγηθούν πλήρως από συμβατικές μεθόδους μηχανικής των θραύσεων. Περιγράφηκαν σε πολύ καλό βαθμό οι δυνάμεις και οι προκύπτουσες παραμορφώσεις αλλά και η μετάβαση από κατάρρευση του σύνθετου σε κατάρρευση του κολλητικού υλικού της διεπιφάνειας.

Επιπλέον, σε εργασία των Τσούβαλη και Ανυφαντή (2011) μοντελοποιήθηκε ο τρόπος αστοχίας σύνθετων πλακών από ίνες γυαλιού που αστοχούν κατά mode I. Στα μοντέλα που δημιουργήθηκαν με χρήση του υπολογιστικού πακέτου ABAQUS , επιχειρείται η προσομοίωση της γεφυρωποιού (bridging-law) δράσης που αναπτύσσουν οι ίνες του πολύστρωτου στο μέτωπο διάδοσης της ρωγμής.

Αποχωρισμός Τύπου II

Για την ανάλυση της αντοχής σε θραύση κατά τύπο II χρησιμοποιείτε κατά κόρον η δοκιμή κάμψης τριών σημείων δοκιμίων με αποχωρισμό των στρώσεων στο ένα τους άκρο (end-notched flexural specimen – ENF) όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 1.10: ENF test method.

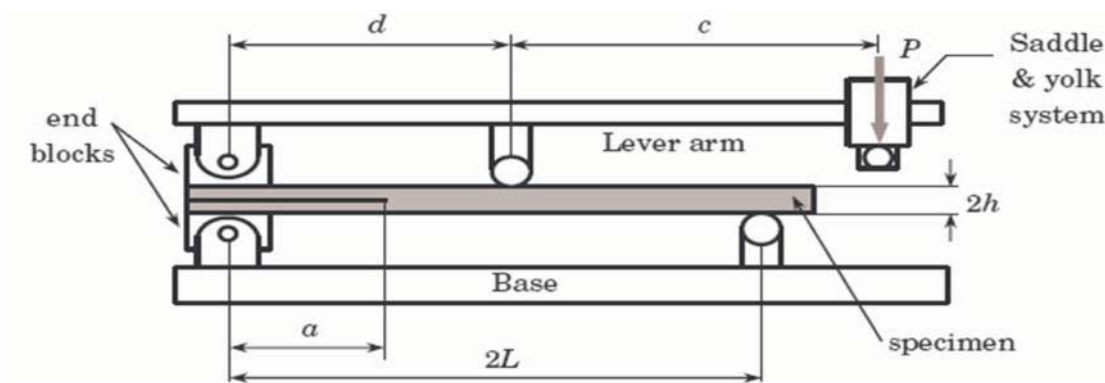
Η πιο απλή αναλυτική έκφραση του ρυθμού απελευθέρωσης ενέργειας παραμόρφωσης G_{II} για τύπο II αναπτύχθηκε από τους Russell και Street (1982) [16] βασισμένη στην κλασική θεωρία δοκού. Καθώς όμως στην προσέγγιση αυτή αμελείται η εγκάρσια διατμητική παραμόρφωση, οδηγούμαστε σε σημαντική υποεκτίμηση του G_{II} . Αρκετές αναλυτικές διορθώσεις της κλασικής θεωρίας έχουν προταθεί, όπως οι Carlsson et al. χρησιμοποίησαν τη θεωρία δοκού 1^{ης} τάξης [17], δηλ. τη θεωρία δοκού Timoshenko, για να συνυπολογίσουν την επίδραση της εγκάρσιας διατμητικής παραμόρφωσης. Στη συνέχεια ο Whitney [18] ανέλυσε περεταίρω τα ENF δοκίμια χρησιμοποιώντας τη θεωρία δοκών ανώτερης τάξης (higher-order beam theory-HOBT) και την αρχή διακύμανσης του Reissner (Reissner's variational principle). Οι Wang και Williams [19] προσάρμοσαν την έκφραση του G_{II} εισάγοντας έναν συντελεστή διόρθωσης στο μήκος της ρωγμής, a .

Πιο πρόσφατα, οι Corleto και Hogan [13] εκτίμησαν το G_{II} για τα ENF δοκίμια κάνοντας υπέρθεση της λύσης μιας γενικευμένα ελαστικής δοκού ώστε να ενσωματώσει την επίδραση της παραμόρφωσης της άκρης της ρωγμής, με τη λύση της δοκού-Timoshenko ώστε να ενσωματώσει και την επίδραση της εγκάρσιας διατμητικής παραμόρφωσης. Από την εργασία αυτή συμπεράναν πως το G_{II} εξαρτάται κυρίως από τη παραμόρφωση της άκρης της ρωγμής και είναι ουσιαστικά ανεξάρτητο της εγκάρσιας διατμητικής παραμόρφωσης. Εφόσον είχαν προηγηθεί διάφορες πειραματικές δοκιμές από πλήθος ερευνητών ήταν επόμενο να ακολουθήσουν αρκετές δημοσιεύσεις που προσπαθούσαν να μοντελοποιήσουν αριθμητικά τον τρόπο αστοχίας κατά mode II. Μία αναλυτική δημοσίευση έγινε από τους Τσούβαλη και Ανυφαντή (2011), όπου επιχειρείται η "κατασκευή" ενός νόμου που θα ερμηνεύει τη γεφυροποιό δύναμη των ινών στη περιοχή ανάπτυξης της αστοχίας σε σύνθετα που αστοχούν κατά τύπο II. Προσομοιώθηκαν τόσο η

ύπαρξη μιας περιοχής ύπαρξης της γεφυροποιού δύναμης (bridging zone) των ινών ακριβώς μπροστά από το άκρο της ρωγμής, όσο και η ύπαρξη μιας συνεκτικής περιοχής.

Αποχωρισμός συνδυαστικού τύπου I-II

Κατά τη λειτουργία του οι κατασκευές μπορεί να λειτουργούν υπό τέτοιες συνθήκες και τέτοια φορτία ώστε ο τρόπος αστοχίας να μην είναι καθαρά τύπου I ή τύπου II αλλά συνδυασμός των δύο αυτών τρόπων αστοχίας (τύπου I-II). Έτσι λοιπόν προκύπτει η ανάγκη για πειραματικές δοκιμές που θα μελετούν την διαστρωματική αντοχή σε τέτοιες περιπτώσεις. Δύο είναι οι βασικές μέθοδοι για τη διερεύνηση των μορφών αστοχίας τύπου I-II, οι MMB (mixed-mode bending) και MMELS (mixed-mode end load split). Η μέθοδος MMB, που προτάθηκε από τους Reeder και Crews (1990&1992) [9] φέρει ένα αρχικό τεχνητό αποχωρισμό, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.11, κατά παρόμοιο τρόπο με τη δοκιμή DCB και επιτρέπει τον υπολογισμό της ενέργειας που απαιτείται για θραύση. Τροποποιώντας κατάλληλα διάφορες παραμέτρους της πειραματικής διαδικασίας είναι εφικτή η απόδοση διαφόρων αναλογιών μεικτής αστοχίας (σχετικά με την επιρροή που έχει η mode I και η mode II στο τρόπο αστοχίας).



Εικόνα 1.11: MMB test method.

1.3 Σκοπός

Η διπλωματική εργασία αυτή εντάσσεται στο πλαίσιο της μελέτης του φαινομένου του αποχωρισμού των στρώσεων ενός πολύστρωτου και της επίδρασης του στην συμπεριφορά και στην αντοχή του πολύστρωτου υπό διάφορα φορτία. Στο πλαίσιο αυτό έχουν αναπτυχθεί και άλλες διπλωματικές εργασίες όπως η διπλωματική εργασία του κ. Κουσαθανά με τίτλο «Πειραματική και Αριθμητική Μελέτη της Επίδρασης του Αποχωρισμού των Στρώσεων στον Λυγισμό Ινωδών Σύνθετων Υλικών», η οποία μελετά την επίδραση του αποχωρισμού σε λυγισμό. Στην παρούσα εργασία μελετάται η επίδραση του αποχωρισμού σε δοκούς υπό κάμψη τριών σημείων. Η επίδραση του φαινομένου του αποχωρισμού των στρώσεων διερευνήθηκε με την αλλαγή παραμέτρων όπως το μέγεθος του και η κατά το πάχος θέση του αποχωρισμού.

Πραγματοποιήθηκαν πειραματικές δοκιμές κάμψης τριών σημείων από σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες γυαλιού τα οποία περιείχαν έναν τεχνητό αποχωρισμό στρώσεων διαφορετικού μήκους και σε διαφορετική κατά το πάχος θέση. Ύστερα κατασκευάστηκε μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων με σκοπό τη μοντελοποίηση και προσομοίωση των πειραμάτων με πεπερασμένα στοιχεία και σύγκριση των αποτελεσμάτων των πειραματικών δοκιμών με αυτά των πεπερασμένων στοιχείων.

Το πρώτο κεφάλαιο αποτελεί μια εισαγωγή στο αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας. Στο πλαίσιο αυτό, αρχικά γίνεται μια γενική αναφορά στις ατέλειες (defects) που μπορούν να εμφανιστούν στα σύνθετα υλικά. Στη συνέχεια αναπτύσσεται με λεπτομέρεια το φαινόμενο του αποχωρισμού των στρώσεων και παρατίθενται κάποια στοιχεία από παλαιότερες μελέτες για τους τρόπους αστοχίας κατά mode I, mode II και mixed-mode (I-II). Τέλος, γίνεται μια σύντομη περιγραφή του σκοπού της διπλωματικής εργασίας αυτής.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή της μοντελοποίησης με πεπερασμένα στοιχεία. Εδώ περιγράφεται πως χτίζεται ο κώδικας, όπως η γεωμετρία, το πλέγμα, το είδος ανάλυσης και ο καθορισμός των συνοριακών συνθηκών καθώς και πως επιλέγονται οι βασικές παράμετροι, όπως το είδος των στοιχείων, το βήμα (step) της ανάλυσης και οι ιδιότητες για τα διάφορα στοιχεία επαφής (contact elements). Τέλος παρουσιάζονται οι αρχικοί υπολογισμοί με τις αρχικές ιδιότητες (μηχανικές ιδιότητες του πολύστρωτου και ιδιότητες του cohesive zone). Μέχρι το σημείο αυτό δε λαμβάνονται υπόψη τα πειράματα αλλά το κύριο κριτήριο είναι η σύγκλιση των λύσεων σε σχέση με το μέγεθος των στοιχείων και το χρόνο επίλυσης.

Στο τρίτο κεφάλαιο, και αφού έχει προηγηθεί η ανάλυση του δευτέρου κεφαλαίου, είμαστε σε θέση να αναλύσουμε τον σχεδιασμό (επιλογή των βασικών παραμέτρων) των πειραματικών δοκιμών. Στη συνέχεια περιγράφονται με λεπτομέρεια τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των δοκιμών και τα χαρακτηριστικά τους, καθώς και όλα τα στάδια της κατασκευής τους. Τέλος περιγράφεται η επιλογή των παραμέτρων του πειράματος (π.χ. ρυθμός επιβολής φορτίου-μετατόπισης) και η διαδικασία των πειραματικών δοκιμών αυτών κάθε αυτών.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται όλα τα πειραματικά αποτελέσματα. Παρουσιάζονται οι καμπύλες F-δ και ε-δ, δύναμης-μετατόπισης και παραμόρφωσης-μετατόπισης αντίστοιχα, για όλα τα δοκίμια και σχολιάζονται προς εξαγωγή συμπερασμάτων.

Τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η σύγκριση μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και των αποτελεσμάτων του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων. Στην αρχή γίνεται σύγκριση με το αρχικό σετ ιδιοτήτων, ύστερα ακολουθεί η διερεύνηση και τέλος καταλήγουμε στο τελικό σετ ιδιοτήτων και παρουσιάζονται τα τελικά συγκριτικά διαγράμματα και ερμηνεύονται οι τυχόν αποκλίσεις μεταξύ τους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

2.1 Εισαγωγή

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method, FEM) αποτελεί μια αριθμητική διαδικασία προσομοίωσης της συμπεριφοράς μιας κατασκευής. Η λογική που ακολουθεί είναι πως η κατασκευή 'κατακερματίζεται' σε επιμέρους στοιχεία (elements), πεπερασμένου πλήθους, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με εξισώσεις συνέχειας. Η μέθοδος μέσω της επίλυσης των εξισώσεων αυτών σε συνδυασμό με τις εξισώσεις ισορροπίας και τις συνοριακές συνθήκες (οι οποίες επιβάλλονται από τον χρήστη) μπορεί να υπολογίσει τα ζητούμενα μεγέθη (π.χ. τάσεις, παραμορφώσεις κλπ.) σε όλα τα σημεία της κατασκευής. Η μέθοδος αυτή μας δίνει τη δυνατότητα ανάλυσης όλης της κατασκευής και όχι μόνο ενός μεμονωμένου τμήματος της. Η ποιότητα των αποτελεσμάτων που παίρνουμε εξαρτάται από τις διάφορες παραμέτρους που ορίζει ο χρήστης και έχουν να κάνουν με το πόσο λεπτομερής θα είναι η ανάλυση (π.χ. time step, element size κλπ.) και με το αν στο πρόβλημα υπάρχουν μη γραμμικότητες. Οι παράμετροι αυτοί καθορίζονται βάση του επιθυμητού συνδυασμού ακρίβειας-χρόνου επίλυσης. Γενικά, η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (FEM) αποτελεί ένα ιδιαίτερα ισχυρό εργαλείο και για τους μελετητές αλλά και για τις βιομηχανίες καθώς μπορεί να προσφέρει αξιόπιστα αποτελέσματα με αναλύσεις σχετικά μικρής διάρκειας (σημαντικό ρόλο παίζουν και οι δυνατότητες του υπολογιστικού συστήματος που χρησιμοποιείται).

Η ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία χωρίζεται σε τρία βασικά στάδια. Το πρώτο στάδιο ονομάζεται προ-επεξεργασία (preprocessing). Στο στάδιο αυτό ορίζονται η γεωμετρία της κατασκευής (του προβλήματος γενικά), οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών και τα πεπερασμένα στοιχεία. Το δεύτερο στάδιο ονομάζεται επίλυση (solution). Στο στάδιο αυτό ορίζονται οι συνοριακές συνθήκες του προβλήματος καθώς και ο τύπος της ανάλυσης. Το τρίτο στάδιο ονομάζεται μετ-επεξεργασία (post processing) και αποτελεί την εξαγωγή και την επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

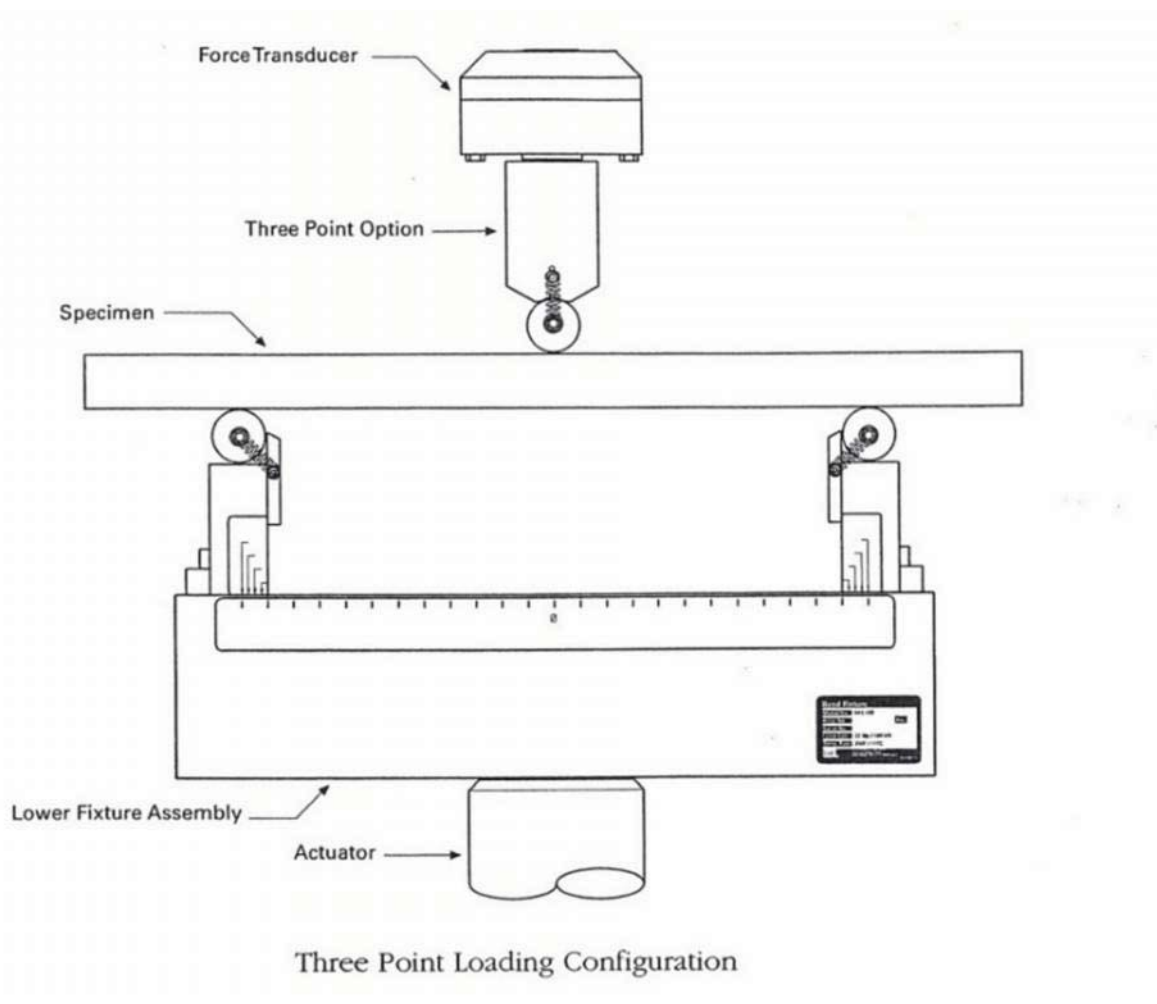
Στα πλαίσια της εργασίας αυτής χρησιμοποιήθηκε το υπολογιστικό πακέτο ANSYS, το οποίο συνδυάζει τις υψηλές δυνατότητες προσομοίωσης με την ευκολία χειρισμού από τον χρήστη.

2.2 Προ-επεξεργασία (Preprocessing)

Το πρώτο στάδιο είναι το στάδιο της προ-επεξεργασίας. Το στάδιο αυτό είναι ιδιαίτερης σημασίας καθώς εδώ επιλέγονται οι βασικές παράμετροι του προβλήματος. Συγκεκριμένα στο στάδιο αυτό γίνεται η επιλογή του τύπου των στοιχείων, ο ορισμός των μηχανικών ιδιοτήτων, ορίζεται η γεωμετρία και κατασκευάζεται το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων.

2.2.1 Επιλογή τύπου στοιχείων

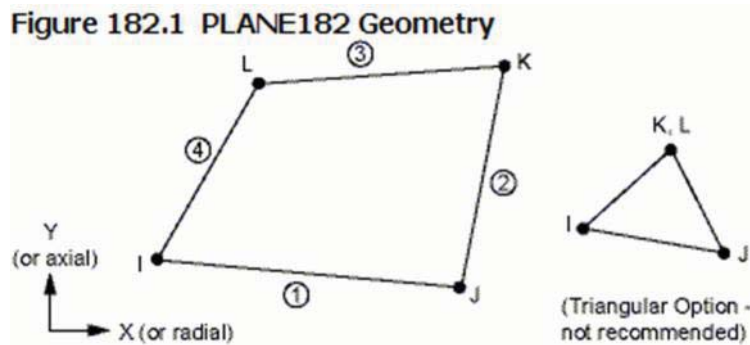
Το ζητούμενο είναι να μοντελοποιήσουμε μια δοκό η οποία θα έχει έναν αποχωρισμό σε διάφορες θέσεις και θα υποβάλλεται σε κάμψη τριών σημείων. Το μοντέλο πρέπει να έχει τέτοια στοιχεία που να επιτρέπουν μεγάλες παραμορφώσεις καθώς κατά την κάμψη της δοκού θα αναπτυχθούν μεγάλες μετατοπίσεις και παραμορφώσεις. Η γεωμετρία του προβλήματος φαίνεται στην εικόνα 2.1, όπου φαίνεται η διάταξη της δοκιμής κάμψης τριών σημείων. Καθώς η γεωμετρία και οι ιδιότητες της δοκού και του αποχωρισμού δεν διαφοροποιούνται κατά το πλάτος της δοκού, μπορούμε να μοντελοποιήσουμε το πρόβλημα σε δύο διαστάσεις (2D). Η 2D ανάλυση έχει το πλεονέκτημα ότι αποτελείται από σχετικά λίγα στοιχεία και κόμβους με συνέπεια οι απαιτήσεις σε υπολογιστική δύναμη να είναι μικρές και ο χρόνος που απαιτείται για να ολοκληρωθεί η ανάλυση να είναι λίγος. Για τη δισδιάστατη λοιπόν μοντελοποίηση το μοντέλο της δοκού που θέλουμε να προσομοιάσουμε χωρίζεται σε δυο τμήματα εκατέρωθεν της περιοχής του τεχνητού αποχωρισμού, τα οποία ενώνονται στην άθικτη περιοχή.



Εικόνα 2.1: Διάταξη δοκιμής κάμψης τριών σημείων

Το στοιχείο που επιλέγεται είναι το PLANE182 το στοιχείο ορίζεται από τέσσερις κόμβους με τον κάθε ένα να έχει δύο βαθμούς ελευθερίας (τις κινήσεις στη Χ και Υ διεύθυνση). Το

στοιχείο αυτό μπορεί να υποστεί μεγάλες μετατοπίσεις και παραμορφώσεις. Η γεωμετρία και οι θέσεις των κόμβων για το στοιχείο αυτό ορίζονται στην εικόνα 2.2 .

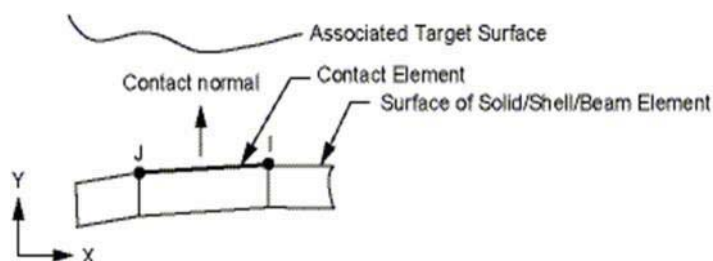


Εικόνα 2.2: Ορισμός της γεωμετρίας του στοιχείου PLANE182

Παρόλο που η ανάλυση είναι δισδιάστατη, επειδή κατά την έννοια του πλάτους της δοκού δεν υπάρχει καμία αλλαγή στη φόρτιση, τη γεωμετρία, και στις ιδιότητες, το στοιχείο μας δίνει τη δυνατότητα να ορίσουμε ως μια σταθερά το “πάχος” (thickness, KEYOPT(3)=3) του στοιχείου το οποίο στην πραγματικότητα είναι το πλάτος της δοκού που μελετάμε. Με αυτόν τον τρόπο τα αποτελέσματα (π.χ. η δύναμη αντίδρασης) που παίρνουμε είναι η συνολική και όχι ανά μονάδα πλάτους.

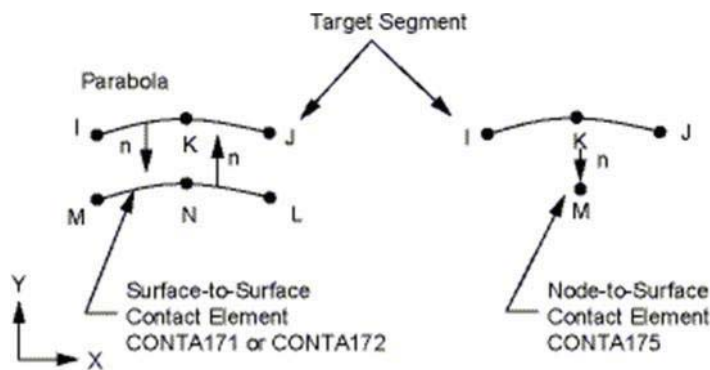
Επιπλέον, πρέπει να ορίσουμε και κάποια στοιχεία επαφής στη διεπιφάνεια της ρωγμής και στις στηρίξεις (rollers), τα οποία δε θα επιτρέπουν τη διείσδυση (στη πραγματικότητα θα την περιορίσουν σε πολύ μικρά όρια που ορίζει ο χρήστης) του ενός υποπολύστρωτου στο άλλο, στην πρώτη περίπτωση, και στη δεύτερη τη διείσδυση των στηρίξεων και του σημείου επιβολής του φορτίου στο πολύστρωτο. Η επιλογή των στοιχείων αυτών γίνεται βάσει του τύπου των στοιχείων που μοντελοποιούν τη δοκό. Το βασικό μας στοιχείο όπως έχει αναφερθεί παραπάνω είναι το PLANE182, αυτό μπορεί να συνεργαστεί με το ζεύγος στοιχείων επαφής CONTA171 και TARGE169.

Το στοιχείο CONTA171 χρησιμοποιείται για να προσομοιώνει την επαφή και το “γλίστρημα” μεταξύ δύο 2D επιφανειών, της επιφάνειας “στόχο” (target surface) και μιας παραμορφώσιμης επιφάνειας ορισμένης από τα στοιχεία αυτά (conta171). Επαφή έχουμε όταν ένα τέτοιο στοιχείο εισχωρήσει (βρεθεί σε απόσταση μικρότερη από την ορισμένη) σε ένα ή περισσότερα στοιχεία στόχους. Καθώς τα στοιχεία αυτά επιτρέπουν τον αποχωρισμό ενωμένων επιφανειών (debonding) είναι κατάλληλα για τη μοντελοποίηση του φαινομένου του αποχωρισμού των στρώσεων (delamination). Το στοιχείο CONTA171 αποτελείται από δύο κόμβους. Στην εικόνα 2.3 φαίνεται πως ορίζεται η γεωμετρία του στοιχείου.



Εικόνα 2.3: Ορισμός γεωμετρίας του στοιχείου CONTA171

Τα στοιχεία TARGE169 χρησιμοποιούνται για να ορίσουν την επιφάνεια στόχο (target surface). Στην εικόνα 2.4 φαίνεται πως ορίζεται η γεωμετρία του στοιχείου αυτού.



Εικόνα 2.4: Ορισμός γεωμετρίας του στοιχείου TARGE 169

2.2.2 Ορισμός μηχανικών ιδιοτήτων

Τα σύνθετα υλικά που κατασκευάσαμε αποτελούνται από μονοδιευθυντικές ίνες γυαλιού και εποξική ρητίνη. Η επιλογή των υλικών αυτών έγινε επειδή προηγούμενες εργασίες όπως του κ. Κουσαθανά [5] έχουν χρησιμοποιήσει ίδια υλικά και επειδή τα υλικά αυτά ήταν άμεσα διαθέσιμα στο εργαστήριο. Η μοντελοποίηση του πολύστρωτου θα είναι μακροσκοπική, δηλαδή δεν θα γίνει μοντελοποίηση της κάθε στρώσης αλλά το υλικό θα θεωρηθεί ως γραμμικά ελαστικό, ορθοτροπικό υλικό. Ως τέτοιο υλικό λοιπόν, οι απαραίτητες ιδιότητες που πρέπει να οριστούν είναι τα μέτρα ελαστικότητας (E_x, E_y, E_z) στις διευθύνσεις των γεωμετρικών αξόνων, τα μέτρα διάτμησης στα επίπεδα που ορίζονται από τους παραπάνω άξονες (G_{xy}, G_{yz}, G_{xz}) και οι αντίστοιχοι λόγοι Poisson ($\nu_{xy}, \nu_{yz}, \nu_{xz}$). Οι ιδιότητες αυτές, αρχικά, ελήφθησαν από την αναφορά «Experimental Round-Robin Measurement of Material Properties for UD Laminates Applied in Composite Plate Tests» [21] που εκπονήθηκε στα πλαίσια του MARSTRUCT και εκπονήθηκε σε συνεργασία του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (NTUA) και του Πολυτεχνείου της Δανίας (DTU). Στην εργασία αυτή όπως και στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας κατασκευάστηκαν δοκίμια από τα ίδια υλικά (μονοδιευθυντικό ύφασμα από ίνες γυαλιού με το ίδιο επιφανειακό βάρος και εποξική ρητίνη) και με την ίδια μέθοδο (vacuum bag moulding). Ακολουθεί ο πίνακας με τις αρχικές μηχανικές ιδιότητες.

Πίνακας 2.1: Αρχικές μηχανικές ιδιότητες του υλικού

Μηχανική Ιδιότητα	Τιμή
E_x	31000 MPa
E_y	8501 MPa
E_z	8501 MPa
G_{xy}	2034 MPa
G_{yz}	1017 MPa
G_{xz}	1017 MPa
ν_{xy}	0.29
ν_{yz}	0.29
ν_{xz}	0.29

Οι παραδοχές που γίνονται στον παραπάνω καθορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων είναι ότι τα μέτρα ελαστικότητας στη Y και Z διεύθυνση είναι ίσα μεταξύ τους, ότι τα μέτρα διάτμησης στα επίπεδα κάθετα στο επίπεδο του αποχωρισμού είναι ίσα με το μισό του μέτρου διάτμησης στο παράλληλο επίπεδο του αποχωρισμού και πως όλοι οι λόγοι Poisson είναι ίσοι μεταξύ τους.

2.2.3 Γεωμετρία του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων

Προσπαθούμε να μοντελοποιήσουμε ένα πείραμα κάμψης τριών σημείων. Γενικά η διάταξη ενός τέτοιου πειράματος φαίνεται στην εικόνα 2.1 .

Καθώς το πρόβλημα παρουσιάζει συμμετρία (και φόρτιση και ιδιότητες) ως προς άξονα κάθετο στο μήκος της δοκού που διέρχεται από το μέσον της, κρίθηκε σκόπιμο να μοντελοποιηθεί μονάχα η μισή δοκός. Η συμμετρία θα ληφθεί υπόψη και θα εφαρμοστεί στο μοντέλο ως μια επιπλέον συνοριακή συνθήκη. Έτσι οδηγούμαστε σε ένα πιο “ελαφρύ” μοντέλο με λιγότερα στοιχεία (τα μισά) και κόμβους, το οποίο απαιτεί λιγότερο υπολογιστικό χρόνο.

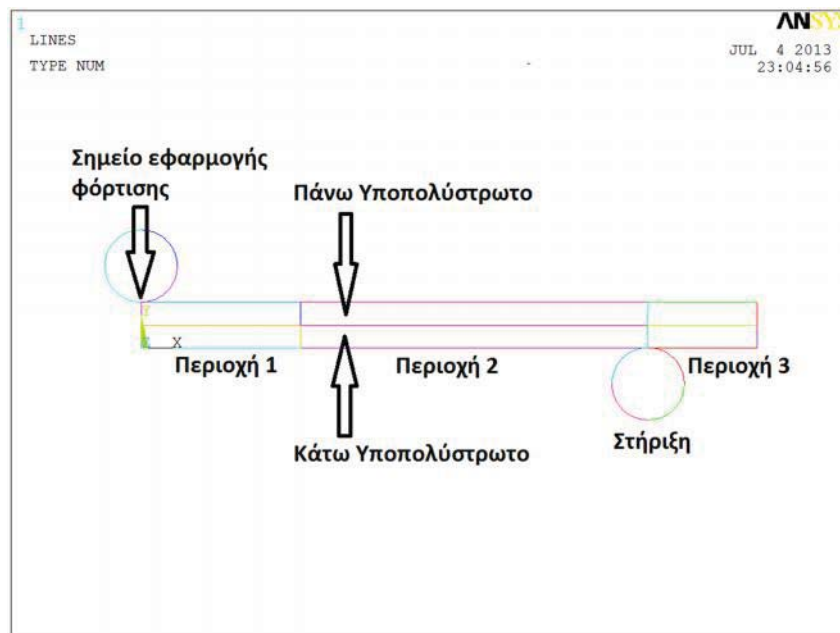
Η γεωμετρία που θα περιγραφεί στο κεφάλαιο αυτό έχει να κάνει περισσότερο με τη μορφή, τη δομή και τη διάταξη του μοντέλου και όχι τόσο με τις διαστάσεις. Αρκετές από τις διαστάσεις στο στάδιο αυτό της ανάλυσης είναι διαφορετικές από τις τελικές. Το μοντέλο είναι παραμετρικό, δηλαδή όλες οι διαστάσεις και ιδιότητες έχουν δοθεί στον κώδικα ως παράμετροι, ως μεταβλητές, οπότε η αλλαγή των διαστάσεων δεν είναι ιδιαίτερο πρόβλημα.

Οι στηρίξεις είναι κύλινδροι ακτίνας $R=10\text{mm}$ και μοντελοποιούνται ως 2 κύκλοι ακτίνας $R=10\text{mm}$. Η δοκός είναι στην ουσία ένα ορθογώνιο παραλληλόγραμμο. Βέβαια σε κάποια θέση κατά το πάχος και μέχρι ενός συγκεκριμένου μήκος υπάρχει ο αποχωρισμός των στρώσεων, του οποίου την επίδραση επιζητούμε να μελετήσουμε. Η ύπαρξη του αποχωρισμού χωρίζει καταρχάς τη δοκό σε δύο μέρη, εκατέρωθεν αυτού. Το ένα μέρος πάνω από τον αποχωρισμό (πάνω υποπολύστρωτο) και σε αυτό κάτω του (κάτω υποπολύστρωτο). Επίσης η δοκός χωρίζεται σε τρία μέρη και κατά την έννοια του μήκους. Στη περιοχή 1 όπου βρίσκεται ο αποχωρισμός, όπου οι περιοχές του πάνω και κάτω υποπολύστρωτου έχουν ξεκολλήσει, στη περιοχή 2 έξω από τον αποχωρισμό και μέσα στο ανυποστήρικτο μήκος όπου οι περιοχές του πάνω και κάτω υποπολύστρωτου της δοκού είναι κολλημένες μεταξύ τους και λειτουργούν ως ένα σώμα και τέλος στη περιοχή 3 δεξιά της στήριξης. Προσοχή, στη περιοχή 2 και 3 αρχικά τα δύο τμήματα της δοκού (πάνω και κάτω υποπολύστρωτα) είναι κολλημένα αλλά έχουν τη δυνατότητα να αποχωριστούν καθώς ο αποχωρισμός διαδίδεται (crack propagation). Οι περιοχές αυτές φαίνονται χαρακτηριστικά στην εικόνα 2.5 . Η μοντελοποίηση του φαινομένου αυτού γίνεται μέσω στοιχείων που ορίζουν μια συνεκτική περιοχή (cohesive zone elements), και περιγράφεται αναλυτικά στο εδάφιο 2.2.4 .

Άρα λοιπόν υπάρχουν έξι περιοχές που πρέπει να οριστούν από τα τέσσερα σημεία (KEYPOINTS) η κάθε μία. Η εντολή για να εισάγουμε ένα τέτοιο σημείο είναι η “ K,NPT,X,Y,Z ” όπου ορίζεται ο αριθμός του keypoint και οι συντεταγμένες του ως προς τους κύριους γεωμετρικούς άξονες. Κάποια από αυτά έχουν τις ίδιες συντεταγμένες αλλά χρειάζονται για να μοντελοποιηθεί ο αποχωρισμός και η διάδοση του.

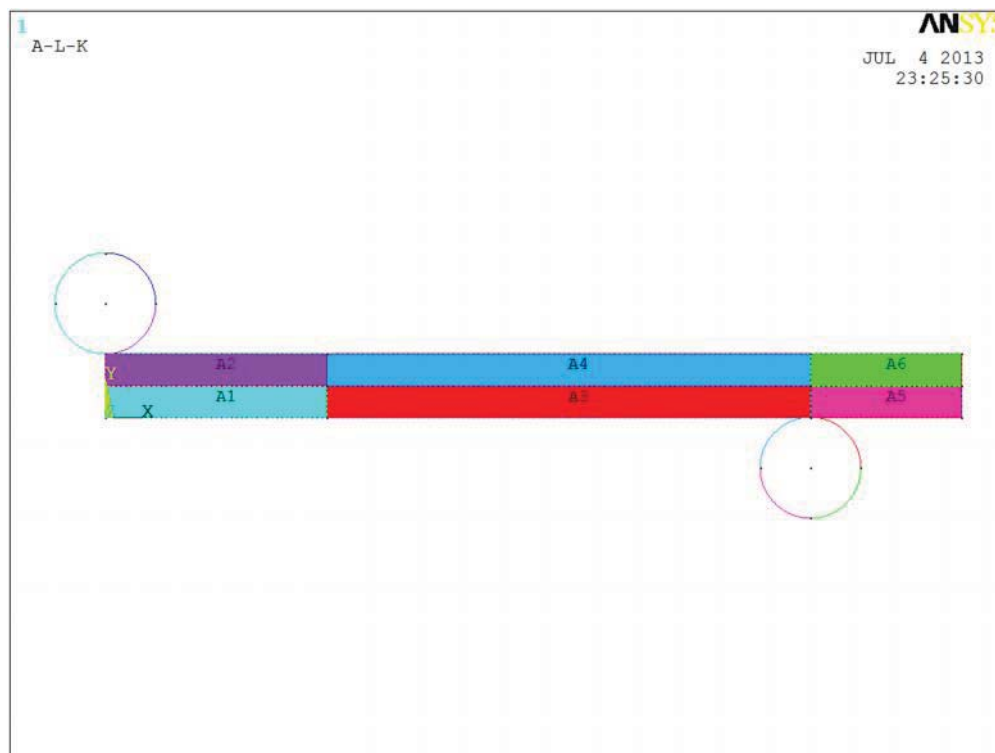
Ύστερα τα σημεία ενώνονται με γραμμές και φέρονται οι κύκλοι για τα rollers, οι αντίστοιχες εντολές είναι “ L,P1,P2 ” όπου δίνουμε τα δύο σημεία από όπου θα περνά η

γραμμή και “ CIRCLE,PCENT,RAD ” όπου ορίζουμε το κέντρο και την ακτίνα του κύκλου, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.5.



Εικόνα 2.5 : Ορισμός γραμμών του μοντέλου.

Στη συνέχεια διακριτοποιούνται οι γραμμές και δημιουργούνται οι επιφάνειες και το πλέγμα (mesh). Η επιλογή του μεγέθους των στοιχείων, η πυκνότητα δηλαδή που θα έχει το πλέγμα είναι ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας και εξετάζεται στο εδάφιο 2.2.5 . Όπως φαίνεται και στην εικόνα που ακολουθεί ορίζονται έξι επιφάνειες. Στη διεπιφάνεια των επιφανειών A1 και A2 υπάρχει ο αρχικός αποχωρισμός των στρώσεων.



Εικόνα 2.6: Ορισμός επιφανειών που απαρτίζουν το μοντέλο.

2.2.4 Μοντελοποίηση της διάδοσης του αποχωρισμού των στρώσεων με Cohesive Elements

Στο σημείο αυτό θα αναλύσουμε πως προσομοιώνεται ο αποχωρισμός και η διάδοσή του. Με τη χρήση τεχνικών οι οποίες εισάγουν άμεσα τη μηχανική των θραύσεων στο πρόβλημα, με το να υιοθετούν σχέσεις χαλάρωσης μεταξύ των ελκτικών τάσεων και των προκυπτόντων αποχωρισμών. Με αυτό τον τρόπο έρχεται στο προσκήνιο το μέγεθος της κρίσιμης ενέργειας θραύσης (critical fracture energy) η οποία είναι η απαραίτητη ενέργεια που χρειάζεται για να "σπάσει" ο κολλητικός δεσμός. Η συγκεκριμένη τεχνική είναι ευρέως γνωστή ως cohesive zone material (CZM) model. Το μοντέλο CZM αποτελείται από μία καταστατική σχέση μεταξύ της ελκτικής δύναμης T που ασκείται στην διεπιφάνεια και του προκύπτοντος διεπιφανειακού αποχωρισμού δ . Το ANSYS μας δίνει την δυνατότητα να μοντελοποιήσουμε την διεπιφάνεια με στοιχεία επαφής «Contact Elements».

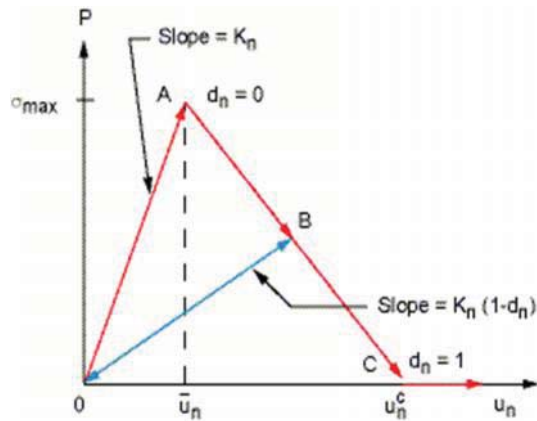
Η προσομοίωση του αποχωρισμού των στρώσεων με «contact elements» αναφέρεται συνήθως και ως «debonding». Ο αποχωρισμός που δημιουργείται μεταξύ των δύο μερών που απαρτίζουν το κολλητικό δεσμό ορίζεται με όρους όπως κενό (contact gap), διείσδυση (penetration) αλλά και απόσταση εφαπτομενικής ολίσθησης (tangential slip distance). Ο διγραμμικός νόμος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη συμπεριφορά της συνεκτικής περιοχής βασίζεται στο μοντέλο που ανέπτυξαν οι Alafano και Crisfield (2001).

Με το μοντέλο αυτό μπορούμε να μοντελοποιήσουμε τους εξής τρόπους αστοχίας της συνεκτικής περιοχής mode I (άνοιγμα), mode II (γλίστρημα) και mixed-mode I-II (συνδυασμός των δύο προηγούμενων).

Αποχωρισμός Τύπου I (Mode I)

Ο αποχωρισμός τύπου, ορίζεται ως ένα είδος αποχωρισμού των δύο επιφανειών στη συνεκτική περιοχή, όπου ο χωρισμός κάθετα στην διεπιφάνεια κυριαρχεί της εφαπτομενικής ολίσθησης στη διεπιφάνεια.

Η σχέση μεταξύ των ορθών τάσεων και του ανοίγματος που υφίσταται η περιοχή φαίνεται στο σχήμα (2.5). Το μοντέλο αυτό έχει γραμμική ελαστική συμπεριφορά από το σημείο O έως το σημείο A (ευθύγραμμο τμήμα OA) ακολουθούμενο από μια γραμμική αποφόρτιση από το σημείο A έως το σημείο C (ευθύγραμμο τμήμα AC). Η μέγιστη ορθή τάση εμφανίζεται στο σημείο A. Η αποκόλληση ξεκινά στο σημείο A και ολοκληρώνεται στο σημείο C όταν οι ορθές τάσεις φτάσουν στο μηδέν. Οποιοσδήποτε περαιτέρω αποχωρισμός λαμβάνει χώρα χωρίς την ύπαρξη ορθών τάσεων. Το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη (OAC) είναι η ενέργεια που απελευθερώθηκε λόγω του αποχωρισμού και ονομάζεται κρίσιμη ενέργεια θραύσης (critical fracture energy). Η κλίση της ευθείας OA καθορίζει το κενό (άνοιγμα) τη στιγμή που εμφανίζεται η μέγιστη ορθή τάση, οπότε χαρακτηρίζει το πως η ορθή τάση μειώνεται σε σχέση με το περαιτέρω άνοιγμα ή αλλιώς χαρακτηρίζει το εάν η θραύση είναι ψαθυρή ή όλκιμη. Από την εκκίνηση του αποχωρισμού και μετά (δηλ. το σημείο A και πέρα) εάν το μοντέλο αποφορτιστεί τότε σε τυχόν επαναφόρτιση του θα συμπεριφέρεται και πάλι γραμμικά ελαστικά και θα ακολουθεί την ευθεία OB (η οποία έχει πιο ομαλή κλίση από την OA).



Εικόνα 2.7: Διγραμμικός νόμος, σχέση τάσης - ανοίγματος

Η μαθηματική έκφραση της καμπύλης OAC είναι

$$P = K_n * u_n * (1 - d_n) \quad , \quad \text{όπου}$$

- P , η ορθή τάση επαφής έλξη
- σ_{\max} = μέγιστη ορθή τάση επαφής
- K_n = μέτρο ακαμψίας έναντι της ορθής τάσης επαφής
- u_n = κενό-άνοιγμα επαφής
- u_n^c = άνοιγμα επαφής στο τέλος της αποκόλλησης
- d_n = συντελεστής αποκόλλησης

Ο συντελεστής αποκόλλησης d_n για mode I ισούται με :

$$d_n = \left(\frac{u_n - \bar{u}_n}{u_n} \right) * \left(\frac{u_n^c}{u_n^c - \bar{u}_n} \right)$$

όπου για

$$\Delta_n \leq 1 \Rightarrow d_n = 0$$

και για

$$\Delta_n > 1 \Rightarrow 0 < d_n \leq 1$$

με το $\Delta_n = \frac{u_n}{u_n}$

Η κρίσιμη ενέργεια θραύσεως (G_{cn}) που ισούται με το εμβαδό του τριγώνου OAC εκφράζεται από την ακόλουθη σχέση :

$$G_{cn} = \frac{1}{2} * \sigma_{\max} * u_n^c$$

Αποχωρισμός Τύπου II (Mode II)

Ο αποχωρισμός με mode II, ορίζεται ως ένα είδος αποχωρισμού των δύο επιφανειών στη συνεκτική περιοχή, όπου η επαπτομενική ολίσθησή της στη διεπιφάνεια κυριαρχεί επί του χωρισμού κάθετα στη διεπιφάνεια. Και στον τρόπο αυτό αστοχίας το μοντέλο που ακολουθείται είναι αντίστοιχο με αυτό για mode I δηλαδή έχουμε ακριβώς το ίδιο τρίγωνο μόνο που αντί για την ορθή τάση στον άξονα y πλέον έχουμε τη διατμητική (εφαπτομενική στη διεπιφάνεια) τάση τ_{\max} . Η σχέση που συνδέει την επαπτομενική τάση με την αντίστοιχη μετατόπιση λόγω γλιστρήματος είναι η ακόλουθη :

$$\tau_t = K_t * u_t * (1 - d_t)$$

όπου τα μεγέθη K_t , u_t και d_t είναι τα αντίστοιχα των K_n, u_n και d_n που είχαμε για mode I. Η σχέση που δίνει το d_t είναι η ακόλουθη:

$$d_t = \left(\frac{u_t - \bar{u}_t}{u_t} \right) * \left(\frac{u_t^c}{u_t^c - \bar{u}_t} \right)$$

όπου για

$$\Delta_t \leq 1 \Rightarrow d_t = 0$$

και για

$$\Delta_t > 1 \Rightarrow 0 < d_t \leq 1$$

$$\text{με το } \Delta_t = \frac{u_t}{u_t}$$

Η κρίσιμη ενέργεια θραύσεως (G_{ct}) που ισούται με το εμβαδό του τριγώνου OAC εκφράζεται από την ακόλουθη σχέση :

$$G_{ct} = \frac{1}{2} * t_{\max} * u_t^c$$

Αποχωρισμός Συνδυαστικού Τύπου I-II (Mixed-Mode I-II)

Ο αποχωρισμός με mixed-mode I-II, ορίζεται ως ένα είδος αποχωρισμού των δύο επιφανειών στη συνεκτική περιοχή, όπου υπάρχει συνδυασμός των δύο παραπάνω τρόπων αστοχίας καθώς τόσο η ορθή τάση όσο και η επαπτομενική συμβάλουν αρκετά στη διαδικασία αστοχίας του κολλητικού δεσμού. Ο συντελεστής αποκόλλησης d_m για mixed-mode ισούται με :

$$\mathbf{d}_n = \left(\frac{\Delta_m - 1}{\Delta_m} \right) * \mathbf{x}$$

όπου για

$$\Delta_m \leq 1 \Rightarrow \mathbf{d}_m = 0$$

και για

$$\Delta_m > 1 \Rightarrow 0 < \mathbf{d}_m \leq 1$$

$$\text{με το } \Delta_m = \sqrt{\Delta_n^2 + \Delta_t^2}$$

$$\text{και το } \mathbf{x} = \left(\frac{\mathbf{u}_n^c}{\mathbf{u}_n^c - \mathbf{u}_n} \right) = \left(\frac{\mathbf{u}_t^c}{\mathbf{u}_t^c - \mathbf{u}_t} \right).$$

Όταν ο αποχωρισμός είναι μεικτού τύπου, τόσο η ορθή τάση όσο και η εφαπτομενική συμβάλουν στην ενέργεια που απαιτείται για την εκκίνηση και εξέλιξη της θραύσης. Αποτέλεσμα αυτού είναι να έχει αστοχήσει οριστικά ο κολλητικός δεσμός πριν φτάσουμε τις κρίσιμες ενέργειες θραύσεως G_{cn} και G_{ct} . Για αυτόν το λόγο στη περίπτωση που έχουμε mixed-mode ο νόμος που θα εκφράζει την ενέργεια που απαιτείται για τη θραύση θα είναι ο ακόλουθος :

$$\left(\frac{G_t}{G_{ct}} \right) + \left(\frac{G_n}{G_{cn}} \right) = 1$$

όπου

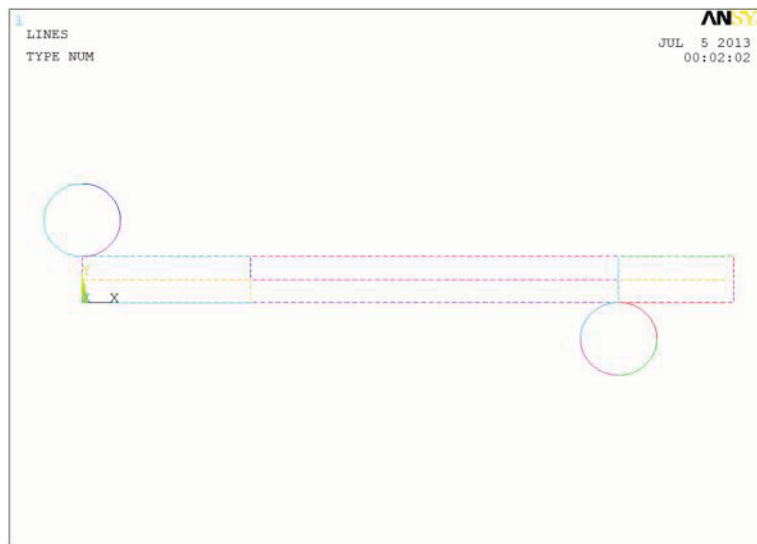
$$G_n = \int P du_n \quad \text{και} \quad G_t = \int P du_t$$

2.2.5 Κατασκευή μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων

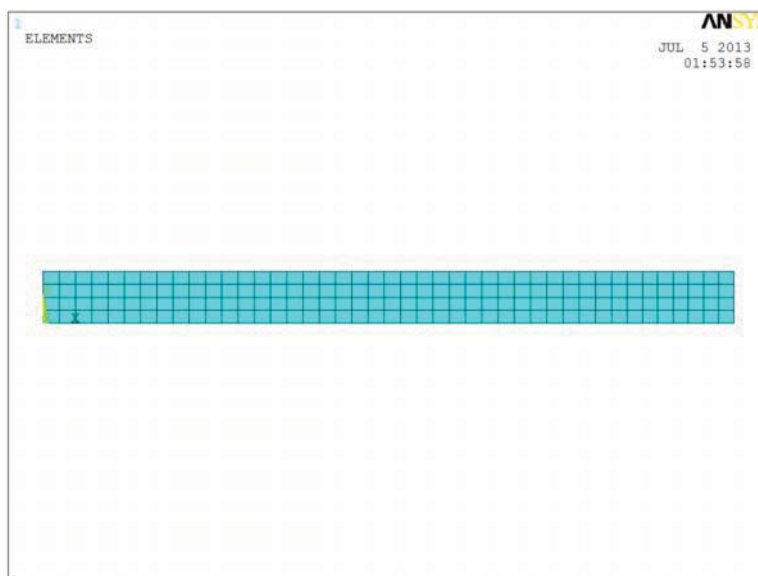
Το πρώτο βήμα στην κατασκευή του μοντέλου είναι η δημιουργία των σημείων των ευθειών, των rollers και των επιφανειών. Στο εδάφιο 2.2.3 ορίστηκε και περιγράφηκε η γεωμετρία του προβλήματος αναλυτικά. Το επόμενο βήμα για την κατασκευή του μοντέλου είναι η επιλογή του τύπου των στοιχείων και ο ορισμός της συμπεριφοράς τους (material type) καθώς και οι μηχανικές ιδιότητες. Το βήμα αυτό αναλύθηκε στο εδάφιο 2.2.1 και 2.2.2.

Κατασκευή του πλέγματος (mesh)

Το επόμενο πολύ σημαντικό βήμα στην κατασκευή του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων είναι η δημιουργία του πλέγματος (mesh). Πρώτα πρέπει να γίνει η διακριτοποίηση των γραμμών που ορίζουν τις επιφάνειες. Η διακριτοποίηση μπορεί να είναι σταθερή σε όλο το μήκος της γραμμής ή μεταβαλλόμενη, ώστε να μπορεί να πυκνώσει στις περιοχές όπου χρειάζεται. Η διακριτοποίηση μπορεί να γίνει με δύο τρόπους, είτε δίνοντας το πλήθος των στοιχείων που θέλουμε να έχει η γραμμή είτε ορίζοντας το μήκος του κάθε στοιχείου. Η διακριτοποίηση γίνεται με την εντολή "LESIZE,NL1,SIZE,,,,,1" όπου επιλέγεται η γραμμή προς διακριτοποίηση και δίνεται το μήκος του κάθε στοιχείου, ή με την εντολή "LESIZE,NL1,,,NDIV,,,,,1" όπου επιλέγεται η γραμμή προς διακριτοποίηση και δίνεται το πλήθος των στοιχείων, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.8 . Ύστερα με την εντολή "AMESH,NA1,NA2,NINC " επιλέγοντας από ποιά έως ποιά επιφάνεια, περνά η διακριτοποίηση από τις γραμμές στις επιφάνειες. Έτσι κατασκευάζεται το πλέγμα, εικόνα 2.9 .



Εικόνα 2.8 : Διακριτοποίηση ευθειών για να κατασκευαστεί το πλέγμα



Εικόνα 2.9: Πλέγμα

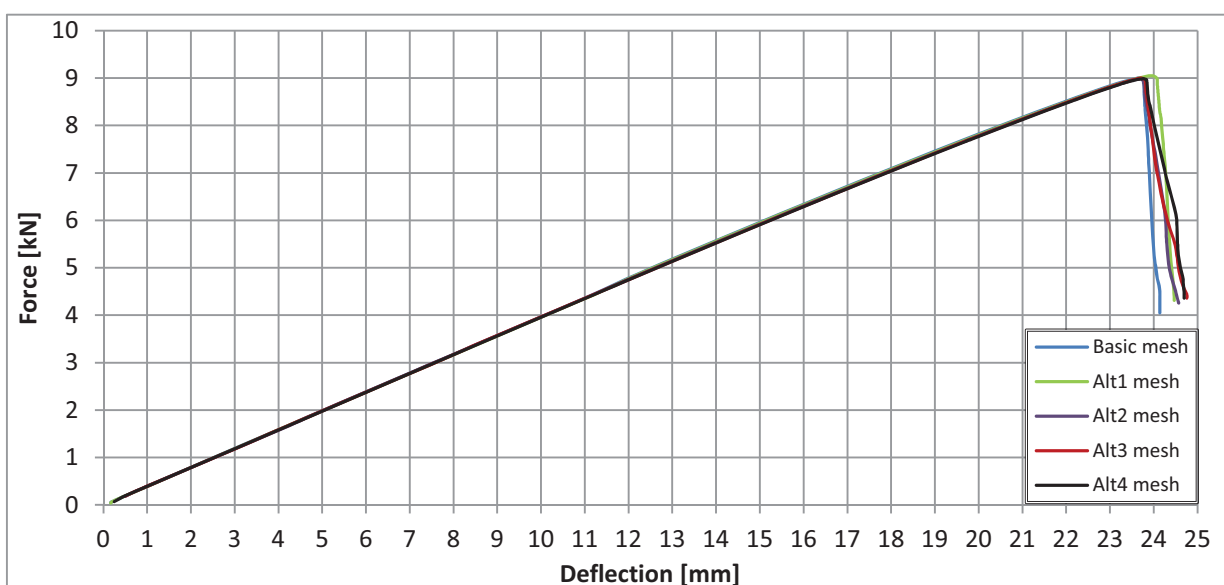
Για να καταλήξουμε σε ποιο πλέγμα θα επιλέξουμε πρέπει να εφαρμόσουμε μια διαδικασία που λέγεται διαδικασία σύγκλισης καννάβου (mesh convergence). Το μέγεθος των στοιχείων, δηλαδή η πυκνότητα του καννάβου, είναι πολύ σημαντική παράμετρος, καθώς επηρεάζει την ποιότητα των αποτελεσμάτων και τον απαιτούμενο υπολογιστικό χρόνο. Όσο πιο πυκνή η διαμέριση τόσο πιο αξιόπιστα είναι τα αποτελέσματα αλλά τόσο μεγαλύτερος ο υπολογιστικός χρόνος. Μέσα από αυτή τη διαδικασία θα επιλέξουμε εκείνο το μέγεθος που θα μας παρέχει ποιοτικά αποτελέσματα με απαίτηση ενός λογικού υπολογιστικού χρόνου. Από ένα σημείο και πέρα όσο πυκνώνουμε το πλέγμα δε κερδίζουμε σε ακρίβεια παρά μόνο αυξάνουμε τον υπολογιστικό χρόνο. Για να καταλήξουμε στις διαστάσεις αυτές των στοιχείων θα τρέξουμε το μοντέλο για διάφορα πλέγματα και παίρνοντας τις καμπύλες δύναμης αντίδρασης και μετατόπισης (deflection) του πάνω roller.

Θα εξετάσουμε τη σύγκλιση του καννάβου με δύο μοντέλα που έχουν τον αποχωρισμό στο μέσον του πάχους και μήκος αποκόλλησης 25% και 50% του υποστηριζόμενου μήκους. Οι βασικές διαστάσεις των μοντέλων στο στάδιο αυτό είναι $L_{\text{support}}=280\text{mm}$, $B=72\text{mm}$ και $t=10\text{mm}$ (η επιλογή τους περιγράφεται στο κεφάλαιο 3). Ξεκινάμε από ένα βασικό, σχετικά αραιό πλέγμα, όπου κάθε υποπολύστρωτο έχει 2 στοιχεία κατά το πάχος του, σύνολο δηλαδή 4 στοιχεία κατά το πάχος με μήκος 2.5mm το καθένα και κατά το μήκος κάθε στοιχείο έχει μήκος 2.5mm. Στον πίνακα 2.2 παρουσιάζονται οι περιπτώσεις που εξετάσαμε.

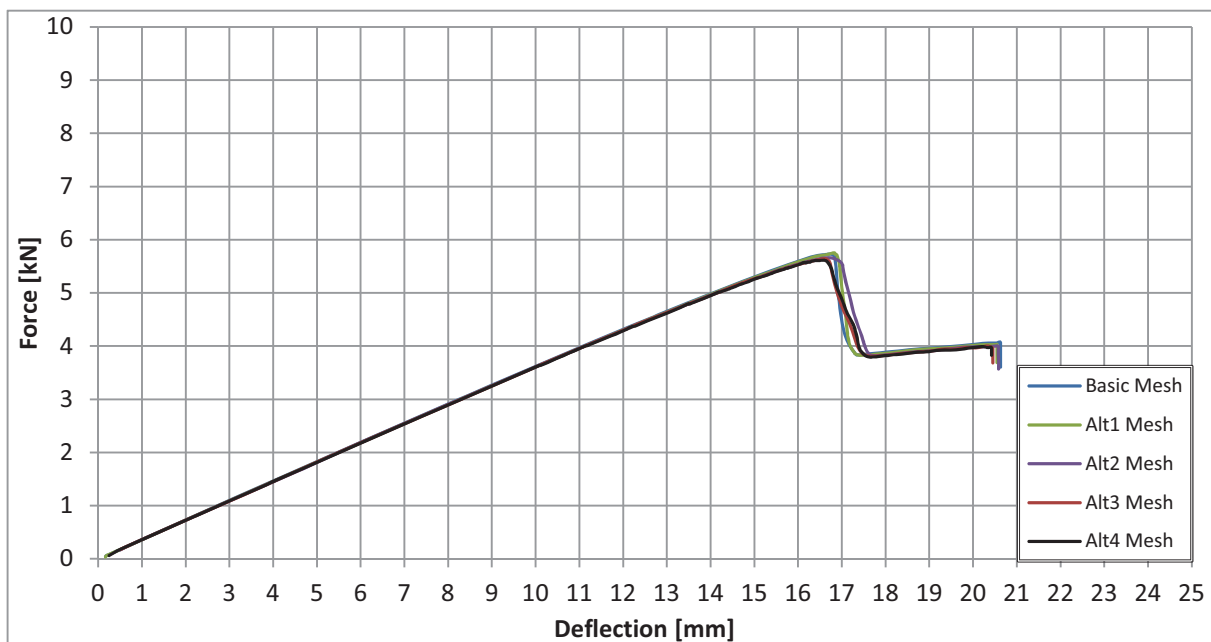
Πίνακας 2.2: Περιπτώσεις πλέγματος

Περίπτωση	Διάσταση κατά το μήκος	Διάσταση κατά το πάχος
Basic Mesh	2.5mm	2.5mm (4 elements)
Alternate Mesh 1	2.5mm	1.25mm (8 elements)
Alternate Mesh 2	1.25mm	1.25mm (8 elements)
Alternate Mesh 3	1mm	0.83mm (12 elements)
Alternate Mesh 4	0.5mm	0.5mm (20 elements)

Από κάθε ανάλυση παίρνουμε τις καμπύλες δύναμης βέλους κάμψης (F-δ) για το μοντέλο με αποχωρισμό στρώσεων 25% και 50% του ανυποστήρικτου μήκους αντίστοιχα.



Εικόνα 2.10: Καμπύλες δύναμης-μετατόπισης, διερεύνηση για τη σύγκλιση του καννάβου, μήκος αποχωρισμού 25% του span



Εικόνα 2.11: Καμπύλες δύναμης-μετατόπισης, διερεύνηση για τη σύγκλιση του καννάβου, μήκος αποχωρισμού 25% του ανυποστήρικτου μήκους

Στους πίνακες 2.3 και 2.4 συγκεντρώνονται για κάθε περίπτωση πλέγματος η μέγιστη δύναμη (Max F) που έφερε η δοκός, η ποσοστιαία απόκλιση της μέγιστης δύναμης κάθε εναλλακτικού πλέγματος ως προς το βασικό πλέγμα και παρουσιάζεται επίσης και ο χρόνος που χρειάζεται για να ολοκληρωθεί η ανάλυση.

Πίνακας 2.3 : Σύνοψη αποτελεσμάτων για την περίπτωση 25% delamination

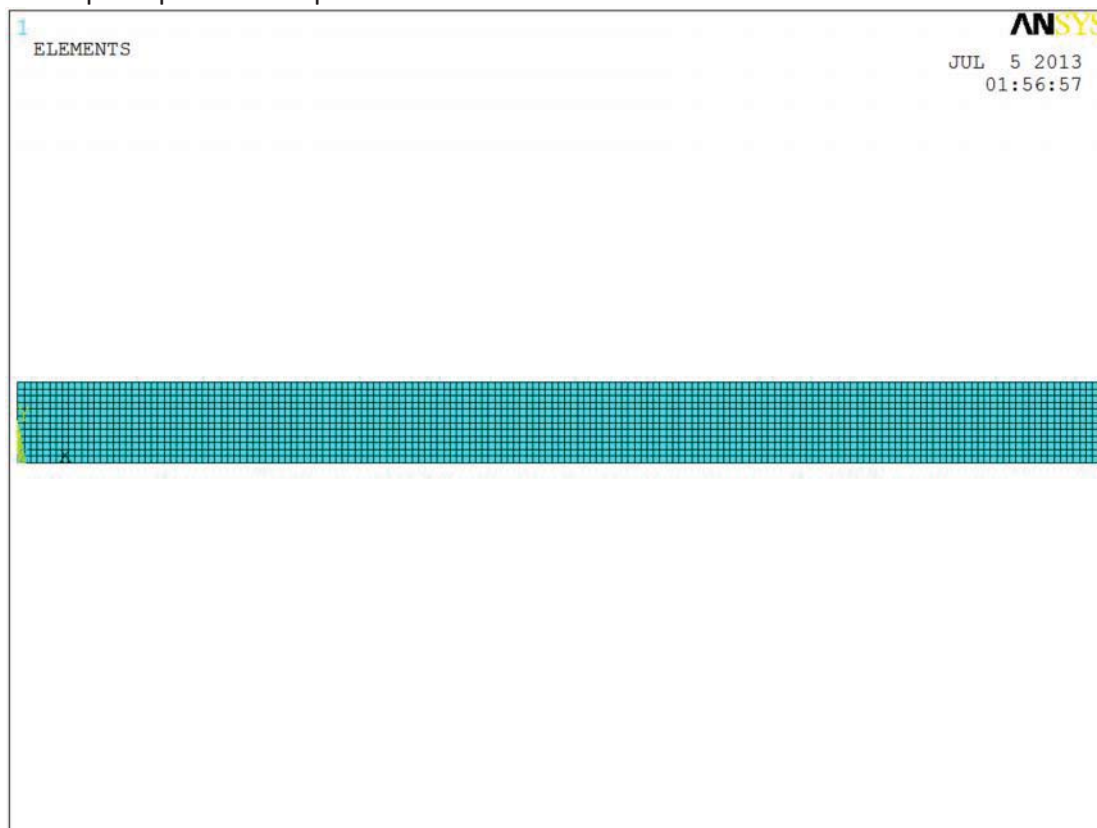
Case	Max F [kN]	% Deviation from Basic mesh	Time [s]
Basic mesh	9.00		50s
Alternate mesh 1	9.05	0.56 %	1m 40s
Alternate mesh 2	8.98	0.23 %	3m 50s
Alternate mesh 3	9.00	0.03 %	5m 45s
Alternate mesh 4	8.98	0.18 %	25m

Πίνακας 2.4 : Σύνοψη αποτελεσμάτων για την περίπτωση 50% delamination

Case	Max F [kN]	% Deviation from Basic mesh	Time [s]
Basic mesh	5.73		50s
Alternate mesh 1	5.75	0.42 %	1m 20s
Alternate mesh 2	5.66	1.20 %	3m 10s
Alternate mesh 3	5.64	1.50 %	5m 5s
Alternate mesh 4	5.61	2.05 %	20m

Από τη διαδικασία που προηγήθηκε μπορούμε να βγάλουμε το συμπέρασμα πως το πύκνωμα του πλέγματος έχει σχεδόν αμελητέα επίδραση στην καμπτική ακαμψία που παρουσιάζει το μοντέλο όπως και στο μέγιστο φορτίο. Λαμβάνοντας υπόψη ότι το Alternate mesh 4 και το Alternate mesh 3 έχουν πολύ κοντινά αποτελέσματα, και από άποψη αριθμητική αλλά και από άποψη μορφής των καμπυλών, καθώς και ότι ο χρόνος για να ολοκληρωθεί η ανάλυση σχεδόν πενταπλασιάζεται επιλέγουμε το Alternate mesh 3.

Άρα το πλέγμα (mesh) θα απαρτίζεται από 12 στοιχεία κατά το πάχος και το κάθε στοιχείο θα έχει διάσταση 1mm κατά την έννοια του μήκους. Η τελική μορφή του καννάβου φαίνεται στην εικόνα 2.12 .



Εικόνα 2.12: Τελικό πλέγμα

Δημιουργία των επιφανειών επαφής (Contact Pairs)

Υπάρχουν τρία είδη επιφανειών επαφής (contacts) που πρέπει να ορίσουμε και να μοντελοποιήσουμε στο πρόβλημά μας. Το πρώτο είδος βρίσκεται μεταξύ των στηρίξεων (rollers) και της δοκού. Τα rollers είναι κατασκευασμένα από χάλυβα που είναι πολύ πιο σκληρός και άκαμπτος από τη δοκό μας που είναι κατασκευασμένη από σύνθετο υλικό (ίνες γυαλιού με εποξική ρητίνη) οπότε το contact που θα οριστεί θα είναι τύπου “rigid to flexible”. Στην περίπτωση αυτή πρέπει οπωσδήποτε η target επιφάνεια να είναι το rigid body δηλαδή το roller και η flexible επιφάνεια πρέπει να είναι η δοκός. Το δεύτερο είδος contact που πρέπει να ορίσουμε είναι στην περιοχή του αποχωρισμού. Εκεί έρχονται σε επαφή τμήματα του ίδιου σύνθετου υλικού οπότε το είδος του contact είναι “flexible to flexible”. Εδώ δεν έχει σημασία ποια από τις επιφάνειες θα είναι η target και ποια η contact. Τέλος πρέπει να οριστεί η επαφή στο τμήμα της δοκού έξω από τον αποχωρισμό, όπου πρέπει να δοθεί η δυνατότητα να διαδίδεται ο αποχωρισμός. Αυτό επιτυγχάνεται δημιουργώντας μια επιφάνεια επαφής με cohesive στοιχεία (CZM).

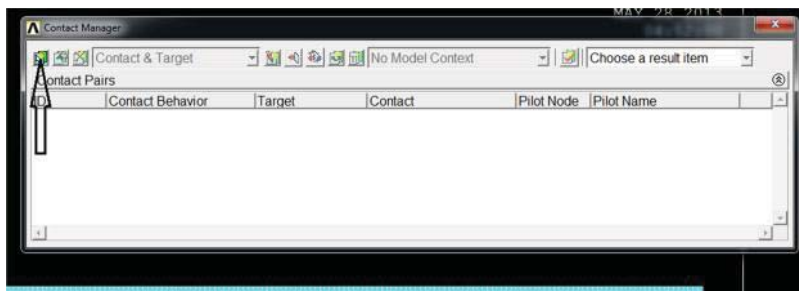
Καθώς η δημιουργία του κώδικα που μοντελοποιεί μια επιφάνεια επαφής είναι ιδιαίτερα πολύπλοκος, θα χρησιμοποιήσουμε τον οδηγό δημιουργίας των “contact pairs” που έχει ενσωματωμένο το ANSYS, και στη συνέχεια από το αρχείο όπου το

ίδιο το πρόγραμμα αποθηκεύει σε μορφή script όλες τις εντολές που δόθηκαν μέσα από το GUI (graphic user interface, γραφικό περιβάλλον για τον χρήστη), θα αποσπάσουμε το τμήμα του κώδικα που δημιουργεί τα contact pairs για να τον ενσωματώσουμε στους δικούς μας κώδικες.

Ακολουθεί αναλυτικά η περιγραφή δημιουργίας των contact pairs.

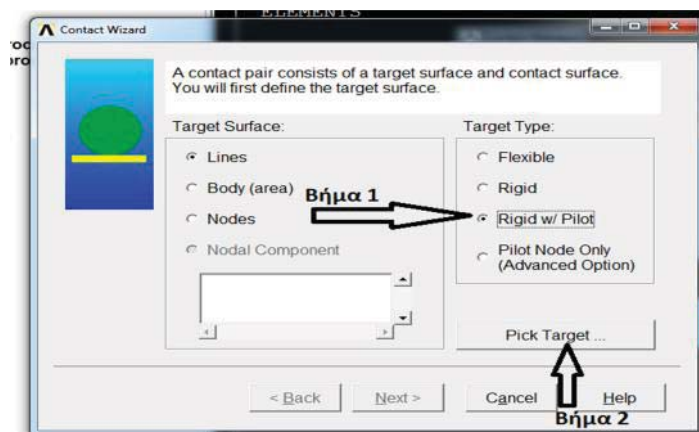
Δημιουργία Rigid to Flexible contact pair

Μέσα από το Contact Manager επιλέγουμε το Contact wizard.



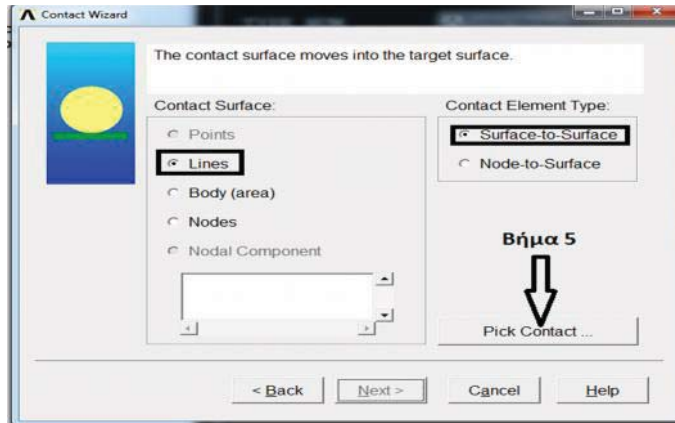
Εικόνα 2.13: Επιλογή του οδηγού δημιουργίας επιφανειών επαφής

Στη συνέχεια ορίζουμε το είδος της target επιφάνειας, ότι θα είναι δηλαδή γραμμή (line) και επιλέγουμε rigid with Pilot Node, και επιλέγουμε τον κόμβο που θα λειτουργήσει ως οδηγός-πιλότος για όλο το «rigid body» και θα μας επιτρέψει να το μετακινήσουμε αργότερα στο χώρο. Προφανώς ο κόμβος που θα λειτουργήσει ως τέτοιος θα είναι το κέντρο του κύκλου που μοντελοποιεί την στήριξη.



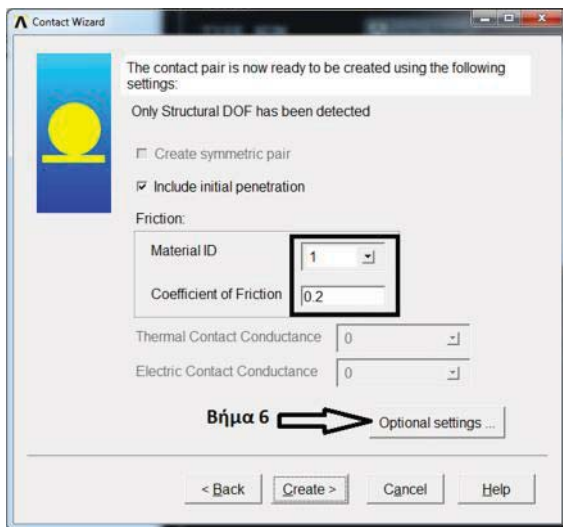
Εικόνα 2.14: Επιλογή της επιφάνειας στόχο «Target»

Μετά ορίζουμε την Contact επιφάνεια, που θα είναι στη δοκό.

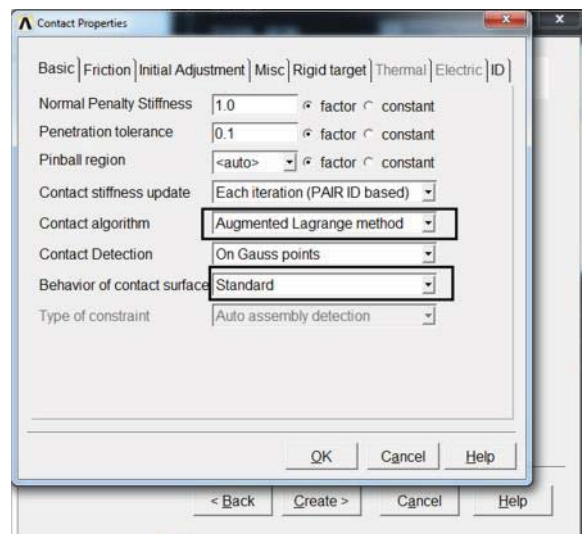


Εικόνα 2.15: Ορισμός της επιφάνειας επαφής «Contact»

Ύστερα επιλέγουμε το είδος των στοιχείων που θα μοντελοποιούν την διεπιφάνεια (material ID) και ορίζεται ο συντελεστής τριβής (παρακάτω παρουσιάζεται πως επιλέχθηκε αυτός ο συντελεστής). Τέλος ορίζεται ο αλγόριθμος (Augmented Lagrange method) που χρησιμοποιείται για την ανάλυση των contact και ορίζεται η ο τρόπος συμπεριφοράς τους ως “Standard”.



Εικόνα 2.16: Ορισμός είδους στοιχείων της διεπιφάνειας

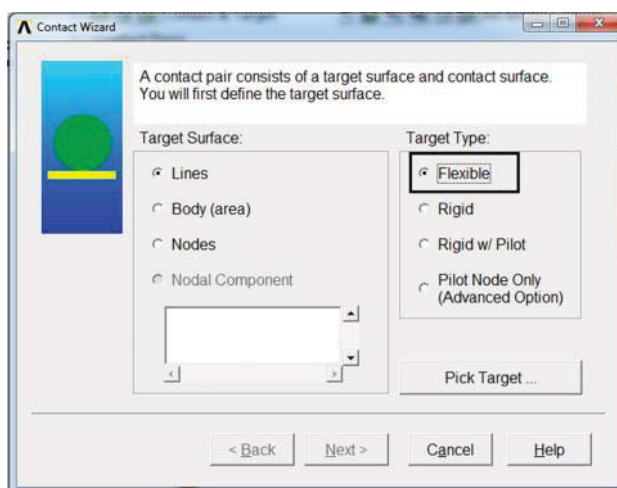


Εικόνα 2.17: Ορισμός αλγόριθμου επίλυσης

Η διαδικασία αυτή ακολουθείται και για τις δύο στηρίξεις.

Δημιουργία Flexible to Flexible contact pair

Η διαδικασία για να οριστεί αυτού του είδους η επιφάνεια επαφής είναι αντίστοιχη με την διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω. Η μόνη διαφορά είναι πως στο σημείο που ορίζουμε τη επιφάνεια target αντί να επιλέξουμε “rigid with pilot node” επιλέγουμε “Flexible”.



Εικόνα 2.18: Επιλογής είδους της επιφάνειας επαφής

Ακολουθώντας κατά όμοιο τρόπο τα επόμενα βήματα δημιουργούμε την επιφάνεια επαφής.

Δημιουργία Flexible to Flexible contact pair με Cohesive Elements

Για να μπορέσουμε να ορίσουμε την συνεκτική περιοχή (cohesive zone) πρέπει πρώτα να ορίσουμε το είδος των στοιχείων (cohesive elements) και των ιδιοτήτων τους, που θα μοντελοποιούν τη διεπιφάνεια και θα δίνουν τη δυνατότητα στον αποχωρισμό να διαδοθεί.

Οι ιδιότητες που πρέπει να οριστούν είναι οι παρακάτω :

σ_{max} = μέγιστη ορθή τάση επαφής

G_{cn} = κρίσιμη ενέργεια θραύσεως για mode I

τ_{max} = μέγιστη εφαπτομενική τάση επαφής

G_{ct} = κρίσιμη ενέργεια θραύσεως για mode II

η = artificial damping coefficient

β = flag for tangential slip under compressive normal contact stress

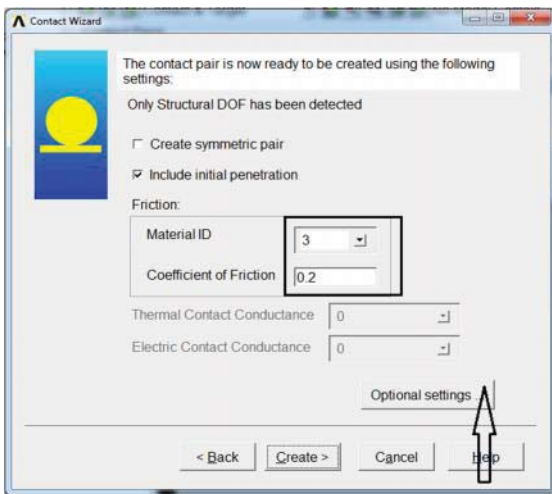
Ο κώδικας για να οριστούν οι ιδιότητες αυτές είναι ο παρακάτω. Οι τιμές που λαμβάνονται έχουν ληφθεί από παλαιότερες πειραματικές δοκιμές του εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας, πάνω σε δοκίμια ενισχυμένα με ίνες γυαλιού.

```

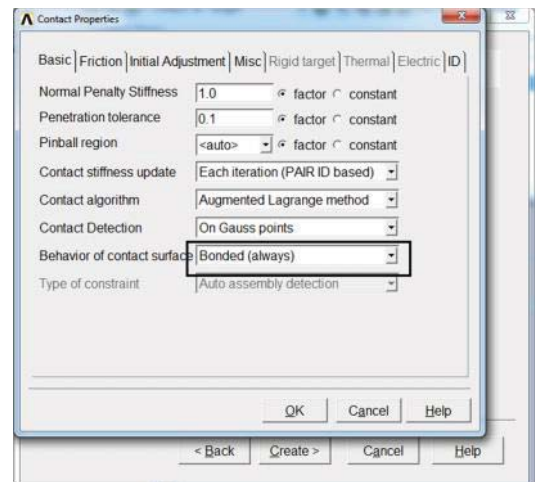
!           * _ * COHESIVE * _ *
!
!TB, Lab, MAT, NTEMP, NPTS, TBOPT,
!TBDATA, STLOC, C1, C2, C3, C4, C5, C6
!
Smax = 0.66 !maximum normal contact stress [MPa]
Gcn = 1.16   !critical fracture energy for normal seperation [N/mm]
Tmax = 15.3  !maximum equivalent tangential xontact stress [MPa]
Gct = 1.72   !Critical fracture energy for tangential slip [N/mm]
hta = 1e-8   !artificial damping coefficient
beta = 1     !flag for tangential slip under compressive normal contact stress
!
TB,CZM,3,1,1,CBDE
TBDATA,1,Smax,Gcn,Tmax,Gct,hta,beta
!           * _ * end of COHESIVE * _ *

```

Ύστερα για την κατασκευή της συνεκτικής ζώνης αυτής κάθε αυτής ακολουθείται η ίδια διαδικασία που ακολουθήθηκε στη δημιουργία του Flexible to Flexible contact με τη διαφορά πως πλέον για material ID θα επιλέξουμε τον τύπο 3, ο οποίος ορίστηκε παραπάνω, και στις ιδιότητες της επιφάνειας θα επιλέξουμε “Bonded (always)”, όπως φαίνεται αντίστοιχα στις επόμενες εικόνες.



Εικόνα 2.19: Ορισμός είδους των στοιχείων

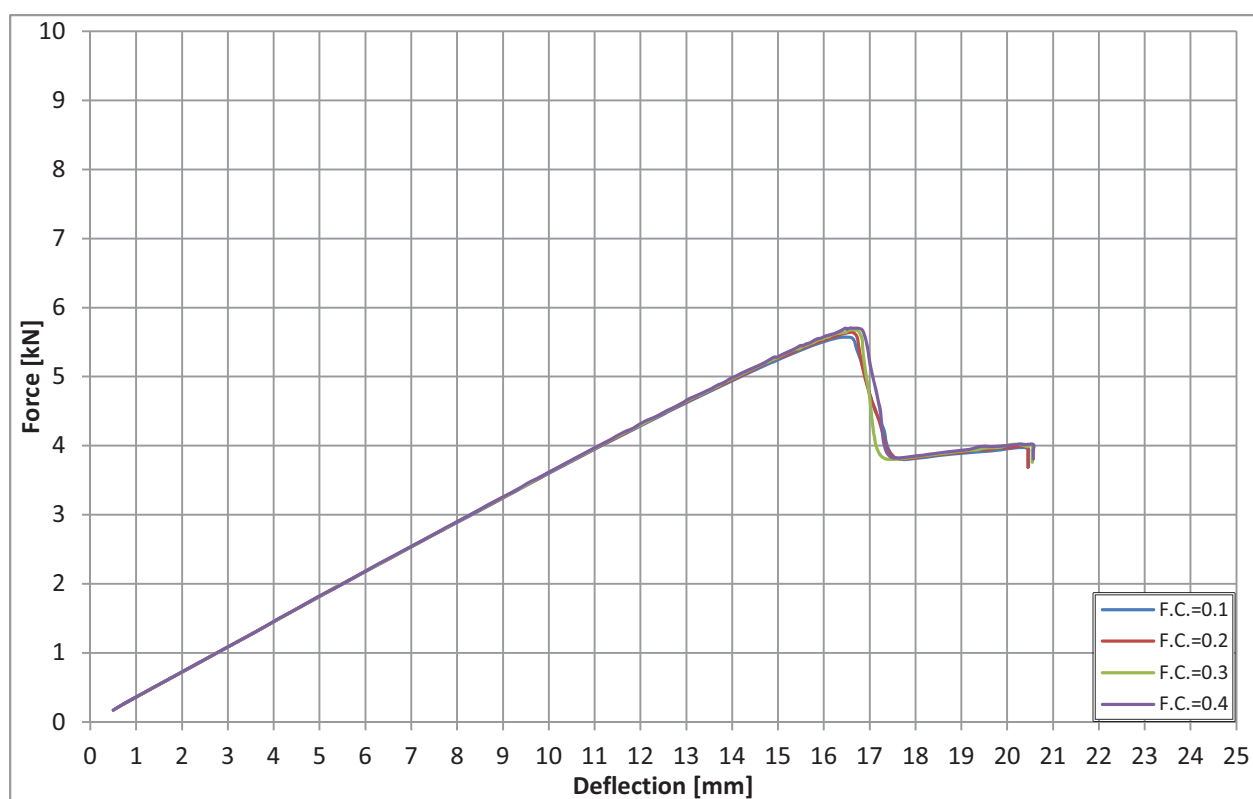


Εικόνα 2.20: Ορίζεται ο τρόπος συμπεριφοράς των στοιχείων επαφής

Επιλογή συντελεστή τριβής (Friction Coefficient)

Πρέπει να ορισθεί ο συντελεστής τριβής μεταξύ της δοκού και των στηρίξεων καθώς και στη διεπιφάνεια των δύο υποπολύστρωτων στην περιοχή του αποχωρισμού των στρώσεων. Από δοκιμές που έχουν γίνει στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας στα πλαίσια προηγούμενων εργασιών έχει υπολογιστεί συντελεστής τριβής ίσο με 0.3 . Επιπλέον εξετάζεται η επίδραση της παραμέτρου αυτής ώστε να αξιολογηθεί η ευαισθησία του μοντέλου ως προς αυτήν.

Η επίδραση της παραμέτρου, εξετάζεται μέσω των καμπυλών δύναμης αντίδρασης στο σημείο εφαρμογής της δύναμης σε σχέση με το βέλος κάμψης, F- δ .



Εικόνα 2.21: Εξέταση της επίδρασης του συντελεστή τριβής

Ο αποχωρισμός στο μοντέλο αυτό βρίσκεται στη μέση κατά το πάχος και έχει μήκος ίσο με το 50% του υποστηριζόμενου μήκους της δοκού. Όπως βλέπουμε η παράμετρος αυτή δεν έχει ιδιαίτερη σημασία στη συμπεριφορά της δοκού. Οπότε επιλέγουμε μια ενδιάμεση τιμή για τον συντελεστή τριβής, άρα F.C.=0.2 .

2.3 Επίλυση (Solution)

Η επίλυση (solution) αποτελεί το δεύτερο στάδιο της ανάλυσης. Έως τώρα έχουμε ορίσει τη γεωμετρία και τις ιδιότητες του μοντέλου και του αποχωρισμού. Στη φάση αυτή της ανάλυσης ορίζονται οι συννοριακές συνθήκες (εδράσεις, συμμετρία, περιορισμός βαθμών ελευθερίας) του προβλήματος και επιβάλλεται η φόρτιση. Επιπλέον, ένα σημαντικό στοιχείο που καθορίζεται στο σημείο αυτό είναι ο τύπος της ανάλυσης (γραμμική, μη γραμμική) και οι βασικές παράμετροί της (όπως το βήμα επιβολής φορτίου δηλαδή το time step και οι μέθοδοι υποβοήθησης της σύγκλισης).

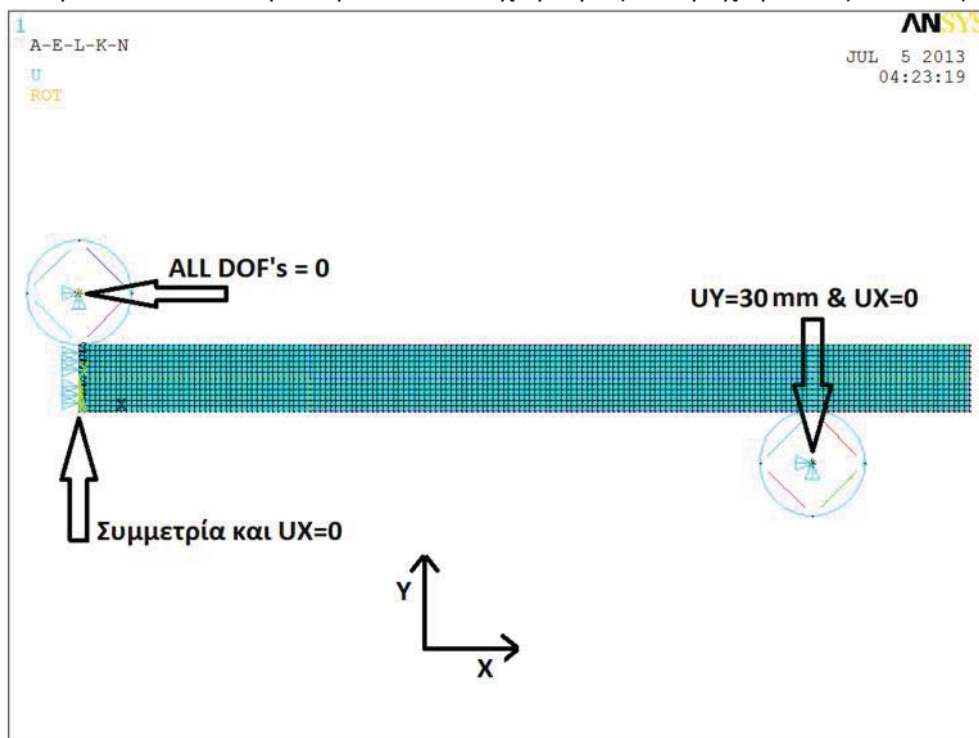
2.3.1 Ορισμός συνοριακών συνθηκών και φόρτισης

Όπως έχουμε αναφέρει το πρόβλημα που μοντελοποιούμε είναι ένα πείραμα κάμψης τριών σημείων. Εμείς μοντελοποιούμε το μισό (το συμμετρικό) πρόβλημα.

Η πρώτη συνοριακή συνθήκη πρέπει να είναι ακριβώς η ύπαρξη της συμμετρίας αυτής. Πρέπει το πρόγραμμα να γνωρίζει πως έχει μοντελοποιηθεί η μισή δοκός και ποιος είναι ο άξονας της συμμετρίας. Αφού επιλέξουμε τις γραμμές που είναι ο άξονας συμμετρίας του προβλήματος με την εντολή "DL,ALL,,SYMM" ορίζουμε τη συμμετρία.

Η ανάγκη επιβολής της επόμενης συνοριακής συνθήκης γεννιέται από το γεγονός ότι κάποια στιγμή ο αποχωρισμός θα διαδοθεί πέρα έως πέρα και τα δύο υποπολύστρωτα εκατέρωθεν του αποχωρισμού θα χωριστούν τελείως, οπότε για να αποφύγουμε το φαινόμενο της μετακίνησης ολόκληρου του σώματος ως αστήρικτου, πρέπει να περιορίσουμε τις γραμμές αυτές (που είναι ο άξονας συμμετρίας) κατά τη διεύθυνση του άξονα X, δηλαδή $UX=0$ αυτό γίνεται με την εντολή "DL,ALL,,UX,0" αφού πρώτα έχουμε επιλέξει τις γραμμές αυτές.

Στη συνέχεια πρέπει να εφαρμόσουμε τις απαραίτητες συνοριακές συνθήκες επί των στηρίξεων ώστε να ελέγχουμε τις κινήσεις τους. Πρώτα πρέπει να περιορίσουμε όλους τους βαθμούς ελευθερίας του σημείου εφαρμογής της δύναμης στο μηδέν (ALL DOF'S=0) ακριβώς όπως συμβαίνει και στη πραγματική δοκιμή. Η εντολή που το ορίζει αυτό είναι η εξής "D,1384,,0,,,,ALL,,,,". Η επιβολή του φορτίου δεν θα είναι μέσω της επιβολής δύναμης αλλά μέσω της επιβολής μετατόπισης στη στήριξη, όπως συμβαίνει και στη πραγματική δοκιμή. Άρα στο κάτω roller επιβάλλεται μετατόπιση στον άξονα Y (προς τα θετικά) και περιορίζεται στο μηδέν η μετατόπιση του στη X-διεύθυνση, αυτά γίνονται με τις εντολές "D,1381,,0,,,,UX,,,,," και "D,1381,,30,,,UY,,,,,". Η μετατόπιση στη Y-διεύθυνση δεν είναι συγκεκριμένη, απλά πρέπει να είναι αρκετή ώστε ο αποχωρισμός να προχωρά έως το τέλος.



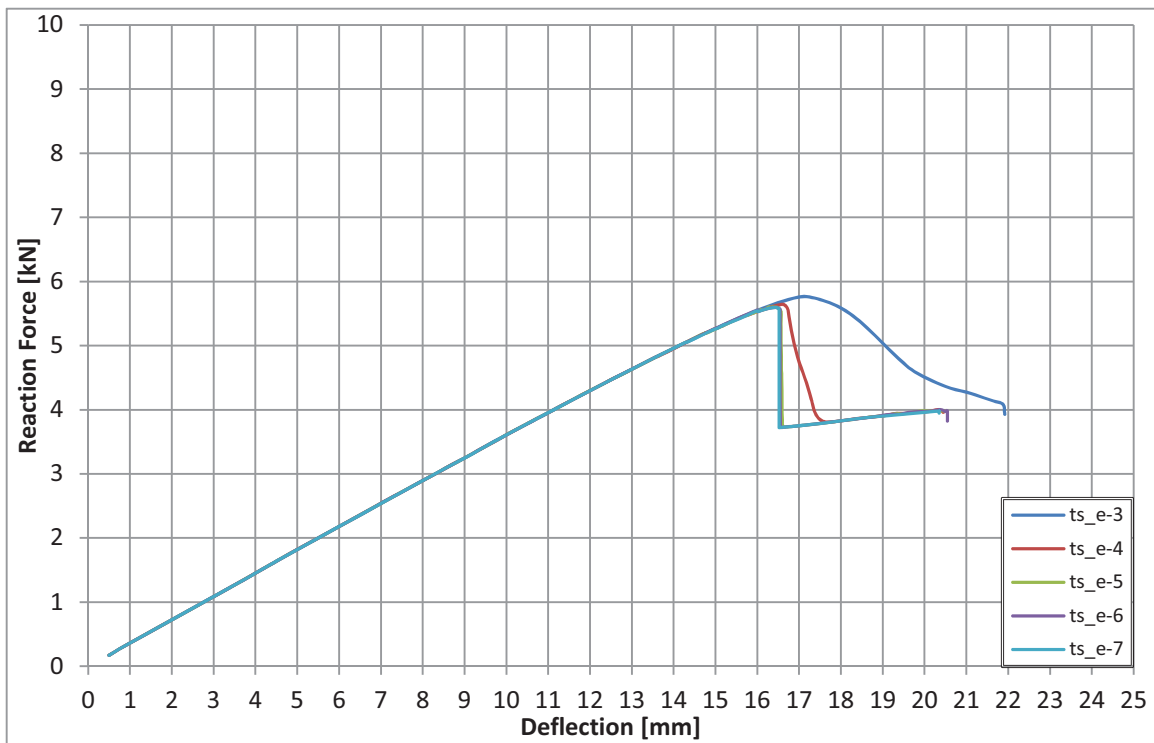
Εικόνα 2.22: Ορισμός συνοριακών συνθηκών

2.3.2 Τύπος Ανάλυσης

Μια ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να είναι γραμμική ή μη γραμμική. Καθώς στο μοντέλο μας έχουμε φαινόμενα επαφής και τη διάδοση της ρωγμής (cohesive elements), η ανάλυση μας θα είναι μη γραμμική. Επειδή το μοντέλο αναμένεται να λάβει μεγάλες μετατοπίσεις και παραμορφώσεις, στα πλαίσια της ανάλυσης εφαρμόζεται η θεωρία μεγάλων παραμορφώσεων, οπότε το πρόβλημα προσεγγίζεται σε βήματα. Ως φορτίο έχει δοθεί μετατόπιση της στήριξης. Αυτό που συμβαίνει είναι πως η μετατόπιση αυτή κατακερματίζεται σε τμήματα και στο μοντέλο επιβάλλεται ένα τέτοιο τμήμα σε κάθε βήμα. Σε κάθε βήμα λοιπόν γίνονται οι απαιτούμενοι υπολογισμοί και επιχειρείται η σύγκλιση των κριτηρίων που έχουν οριστεί. Στο πέρας κάθε βήματος γίνεται ενημέρωση του μητρώου δυσκαμψίας της δοκού σύμφωνα με τη νέα παραμορφωσιακή κατάσταση της, ώστε να αποτελέσει τη βάση για το επόμενο βήμα. Η ακρίβεια της ανάλυσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον αριθμό και το μέγεθος των βημάτων αυτών. Ορίζουμε μια βασική τιμή για το βήμα, καθώς και μια ελάχιστη και μια μέγιστη τιμή. Όταν το μοντέλο “δυσκολεύεται” να συγκλίνει τότε αυτόματα το βήμα μικραίνει και η επιβολή του φορτίου γίνεται σε μικρότερα τμήματα. Όσο μικραίνει το βήμα είναι προφανές πως ο αριθμός των πράξεων και των υπολογισμών που λαμβάνουν χώρα αυξάνεται με αποτέλεσμα να αυξάνει και ο απαιτούμενος υπολογιστικός χρόνος για την περάτωση της ανάλυσης. Πρέπει να βρεθεί εκείνο το βήμα το οποίο θα μας εξασφαλίζει ακριβή και ποιοτικά αποτελέσματα σε ένα λογικό χρονικό διάστημα. Πρέπει να βρούμε εκείνο το βήμα το οποίο εάν το μικρύνουμε περεταίρω δε θα κερδίσουμε σε ακρίβεια παρά θα χάσουμε μόνο σε υπολογιστικό χρόνο.

Λόγω της σημαντικότητας της παραμέτρου αυτής έγινε διερεύνηση για την επίδραση της στην ανάλυση. Για το ελάχιστο βήμα επιβολής φορτίου εξετάστηκαν οι τιμές 10^{-3} , 10^{-4} , 10^{-5} , 10^{-6} , 10^{-7} . Στην εικόνα 2.23 φαίνονται οι καμπύλες δύναμης-βέλους κάμψης (F-δ) για το μοντέλο με αποχωρισμό στη μέση κατά το πάχος και μήκος ίσο με 50% του υποστηριζόμενου μήκους της δοκού. Από το διάγραμμα προκύπτει πως το βέλτιστο ελάχιστο βήμα για την ανάλυση μας είναι το $\text{min_timestep}=10^{-5}$, αφού τα ακόμη μικρότερα βήματα προκαλούν μόνο αύξηση του υπολογιστικού χρόνου και όχι της ακρίβειας και της ποιότητας της λύσης.

Τέλος, το πρόβλημα που θα αναφερθεί εν συντομία στο σημείο αυτό θα περιγραφεί αναλυτικά στο Κεφάλαιο 5. Στα μοντέλα ο αποχωρισμός δεν διαδίδεται μέχρι τέλους και τα υποπολύστρωτα δεν χωρίζουν τελείως. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι όταν φτάνει ο αποχωρισμός και είναι έτοιμος να χωρίσει τα υποπολύστρωτα το μοντέλο υφίστατο μεγάλες παραμορφώσεις σε πολύ μικρό βήμα επιβολής φορτίου, οπότε το πρόβλημα από στατικό (όπως έχει οριστεί) να γίνεται δυναμικό και η ανάλυση να μην συγκλίνει. Βέβαια η ανάλυση μέχρι το σημείο αυτό είναι απόλυτα αξιόπιστη και αποδεκτή. Για να ξεπεράσουμε το πρόβλημα αυτό αναγκαστήκαμε να ενεργοποιήσουμε τη μέθοδο “σταθεροποίησης” (Stabilization ON). Λεπτομέρειες για την επιλογή αυτή (ποια είναι η αρχή λειτουργίας) και για την επιλογή των παραμέτρων (είδος και ένταση) που τη διέπουν παρουσιάζονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 5.



Εικόνα 2.23: Εξέταση της παραμέτρου του ελάχιστου βήματος της ανάλυση

2.4 Μετ-επεξεργασία (Post-processing)

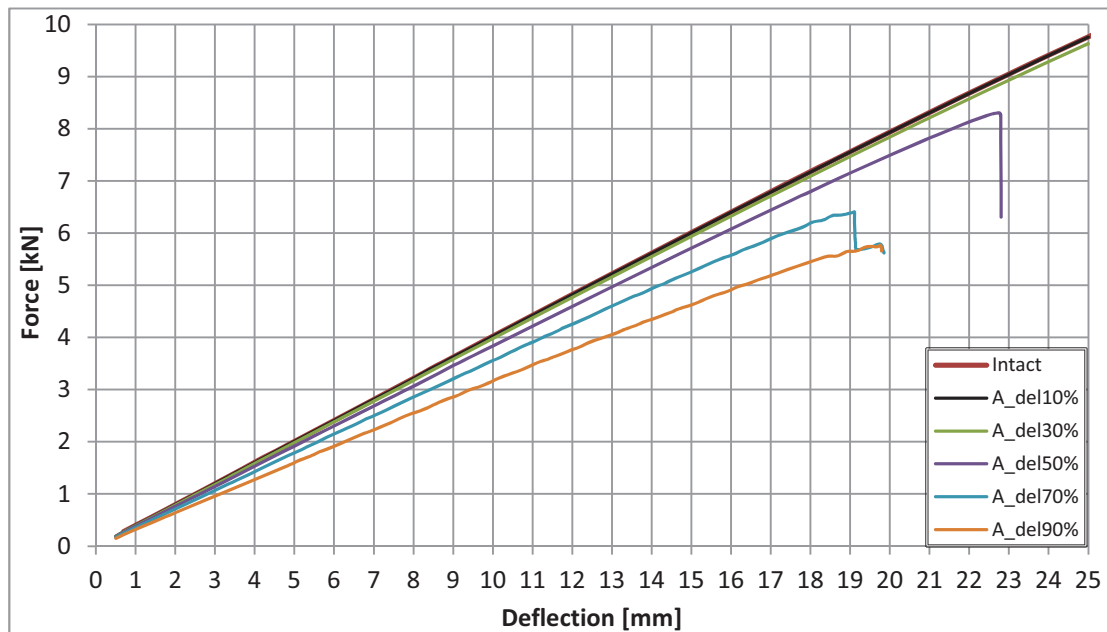
Η μετ-επεξεργασία (post-processing) είναι το τρίτο και τελευταίο στάδιο της ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία. Αφού στο πρώτο στάδιο ορίσαμε τη γεωμετρία και τα στοιχεία για το μοντέλο και στο δεύτερο στάδιο ορίσαμε τον τρόπο επίλυσης και τις βασικές της παραμέτρους, στο σημείο αυτό μπορούμε να πάρουμε και να επεξεργαστούμε τα αποτελέσματα για τα μεγέθη που μας ενδιαφέρουν. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής μας ενδιαφέρει να μελετήσουμε τον τρόπο συμπεριφοράς της δοκού και την επίδραση του αποχωρισμού των στρώσεων ως προς την ακαμψία και τη μέγιστη δύναμη που μπορεί να φέρει η δοκός και ως προς τις παραμορφώσεις. Στη προσπάθεια αυτή θα εξετάσουμε τα διαγράμματα δύναμης – βέλους κάμψης (F-δ) καθώς και διαγράμματα παραμορφώσεων – βέλους κάμψης (ε-δ) για διάφορα σημεία της δοκού.

2.5 Αρχικοί υπολογισμοί

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αρχικά αποτελέσματα που εξάγονται από το μοντέλο. Στα αποτελέσματα αυτά θα βασιστεί και ο σχεδιασμός των πειραματικών δοκιμών. Το μοντέλο έχει πάχος $t=10\text{mm}$ και πλάτος $b=72\text{mm}$. Στις εικόνες 2.24 μέχρι 2.29 παρουσιάζονται διαγράμματα δύναμης – βέλους κάμψης και παραμόρφωσης- βέλους κάμψης για τις εξής περιπτώσεις: ο αποχωρισμός να βρίσκεται σε απόσταση 25% του πάχους από την εφελκόμενη πλευρά (θέση A), στο μέσο του πάχους (θέση B) και σε απόσταση 75% του πάχους από την εφελκόμενη πλευρά (θέση C). Σε κάθε

μία θέση εκ των A, B και C εξετάζεται αποχωρισμός με μήκος 10%, 30%, 50%, 70% και 90% του υποστηριζόμενου μήκους.

ΘΕΣΗ Α



Εικόνα 2.24: Σχέση δύναμης – μετατόπισης για διάφορα μήκη αποχωρισμού στη θέση Α

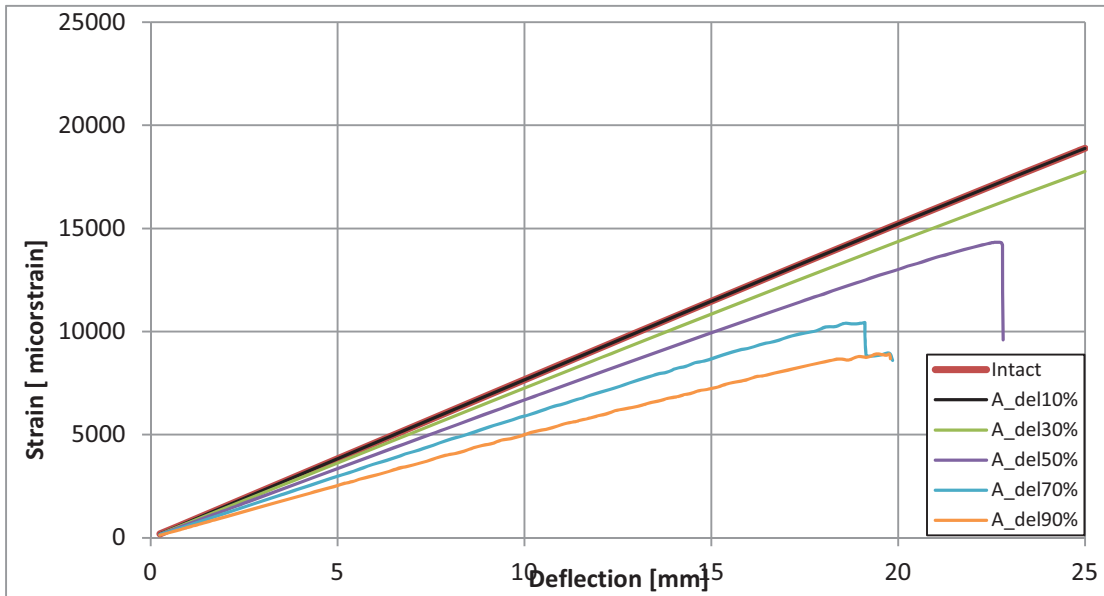
Παρατηρήσεις

- Η σχέση δύναμης-βέλους κάμψης είναι γραμμική μέχρι την στιγμή όπου διαδίδεται ο αποχωρισμός.
- Οι περιπτώσεις του αποχωρισμού 10% και 30% του υποστηριζόμενου μήκους δεν διαφέρουν σχεδόν καθόλου από την άθικτη περίπτωση. Ο αποχωρισμός δεν επηρεάζει τη συμπεριφορά της δοκού.
- Στις υπόλοιπες περιπτώσεις όσο μεγαλώνει ο αποχωρισμός τόσο πέφτει η ακαμψία της δοκού.
- Η αύξηση του μήκους του αποχωρισμού προκαλεί τη μείωση της μέγιστης δύναμης που μπορεί να φέρει το δοκίμιο, στον πίνακα 2.5 φαίνεται αυτή η πτώση.

Πίνακας 2.5: Μέγιστη δύναμη για διάφορα μήκη αποχωρισμού.

Case	Max F [kN]
Intact	-
Delamination 10%	9.757
Delamination 30%	9.631
Delamination 50%	8.304
Delamination 70%	6.409
Delamination 90%	5.768

Οι παραμορφώσεις στο μέσο της δοκού στην εφελκόμενη πλευρά φαίνονται στην εικόνα 2.25 .

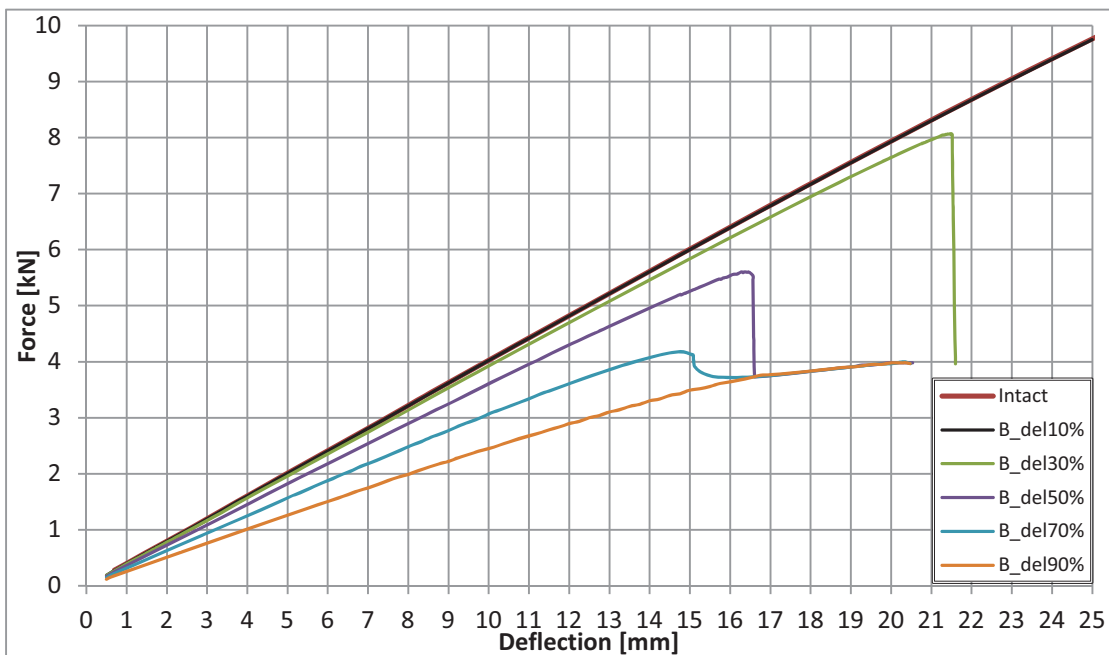


Εικόνα 2.25: Σχέση παραμόρφωσης – μετατόπισης για διάφορα μήκη αποχωρισμού στη θέση A

Παρατηρήσεις

- Οι παραμορφώσεις είναι γραμμικές μέχρι τη διάδοση του αποχωρισμού
- Όσο μεγαλώνει ο αποχωρισμός οι παραμορφώσεις που παρουσιάζει το μοντέλο πέφτουν.

ΘΕΣΗ Β



Εικόνα 2.26: Σχέση δύναμης – μετατόπισης για διάφορα μήκη αποχωρισμού στη θέση B

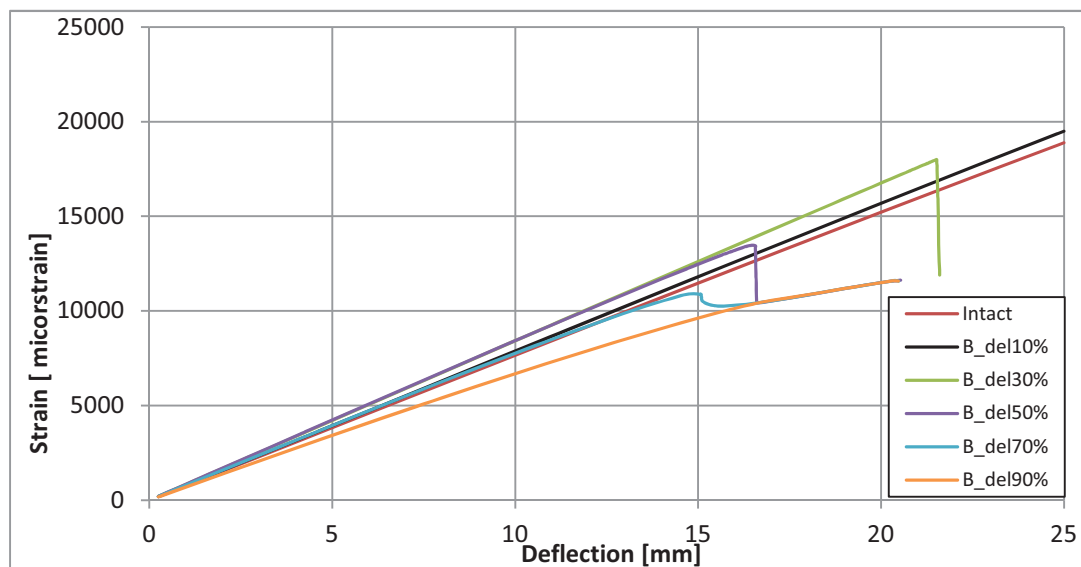
Παρατηρήσεις

- Η σχέση δύναμης-βέλους κάμψης είναι γραμμική μέχρι την στιγμή όπου διαδίδεται ο αποχωρισμός
- Η περίπτωση αποχωρισμού 10% δεν διαφέρει καθόλου από την άθικτη δοκό. Ο αποχωρισμός όπως και στη Θέση Α δεν επιδρά ούτε στην ακαμψία ούτε στο μέγιστο φορτίο.
- Στη Θέση Β ο αποχωρισμός μήκους 30% φαίνεται πως μειώνει την ακαμψία και μειώνει αρκετά τη μέγιστη δύναμη σε αντίθεση με τη Θέση Α.
- Όπως και πριν, όσο συνεχίζει και μεγαλώνει ο αποχωρισμός τόσο πέφτει και η ακαμψία και η μέγιστη δύναμη.
- Φαίνεται πως η περίπτωση αποχωρισμού 90% φαίνεται να έχει υποβαθμίσει τόσο την ακαμψία, ώστε η δοκός να συμπεριφέρεται σχεδόν σαν τα υποπολύστρωτα να έχουν χριστεί τελείως.
- Η μείωση της μέγιστης δύναμης με την αύξηση του μήκους του αποχωρισμού στη θέση αυτή είναι πιο έντονη από ότι στη Θέση Α, όπως προκύπτει από τον παρακάτω πίνακα

Πίνακας 2.6: Μέγιστη δύναμη για διάφορα μήκη αποχωρισμού

Case	Max F [kN]
Intact	-
Delamination 10%	9.749
Delamination 30%	8.067
Delamination 50%	5.604
Delamination 70%	4.180
Delamination 90%	-

Οι παραμορφώσεις στο μέσο της δοκού στην εφελκυσμένη πλευρά φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα.



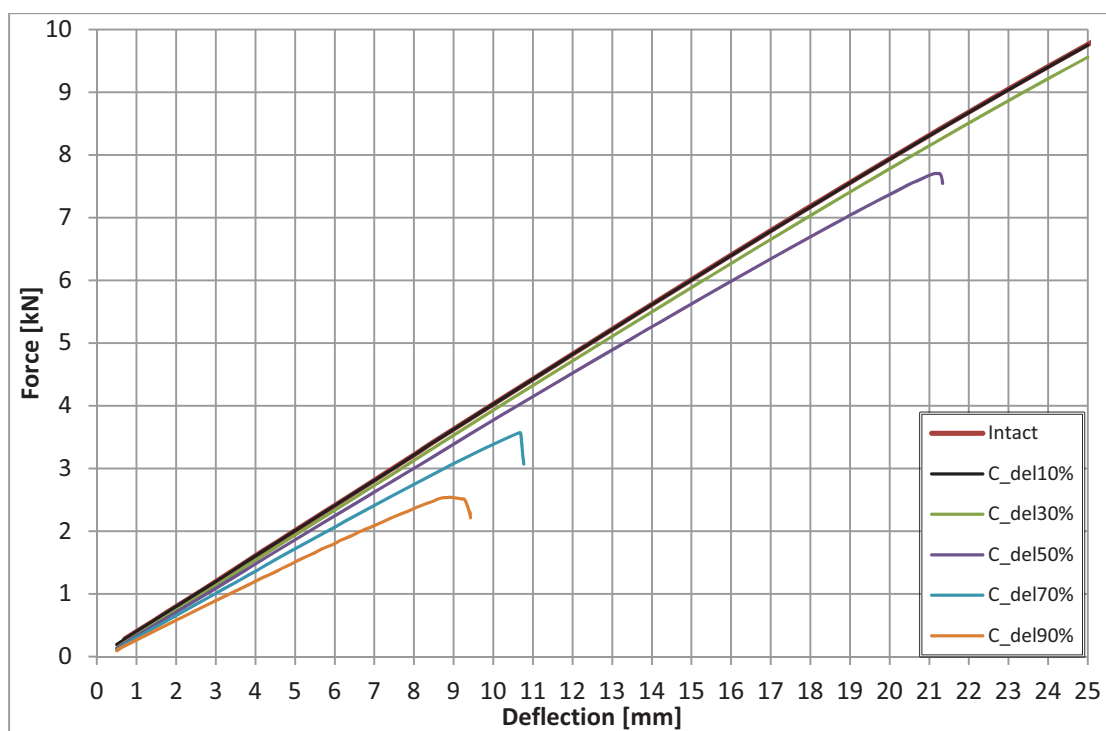
Εικόνα 2.27: Σχέση

παραμόρφωσης – μετατόπισης για διάφορα μήκη αποχωρισμού στη θέση Β

Παρατηρήσεις

- Οι παραμορφώσεις είναι γραμμικές μέχρι τη διάδοση του αποχωρισμού
- Παρατηρείται πως για αποχωρισμούς 10% έως και 50% του ανυποστήρικτου μήκους οι παραμορφώσεις είναι υψηλότερες από την άθικτη περίπτωση.
- Για αποχωρισμούς μεγαλύτερους από 70% του ανυποστήρικτου μήκους οι παραμορφώσεις είναι μικρότερες από την άθικτη περίπτωση.

ΘΕΣΗ C



Εικόνα 2.28: Σχέση δύναμης – μετατόπισης για διάφορα μήκη αποχωρισμού στη θέση C.

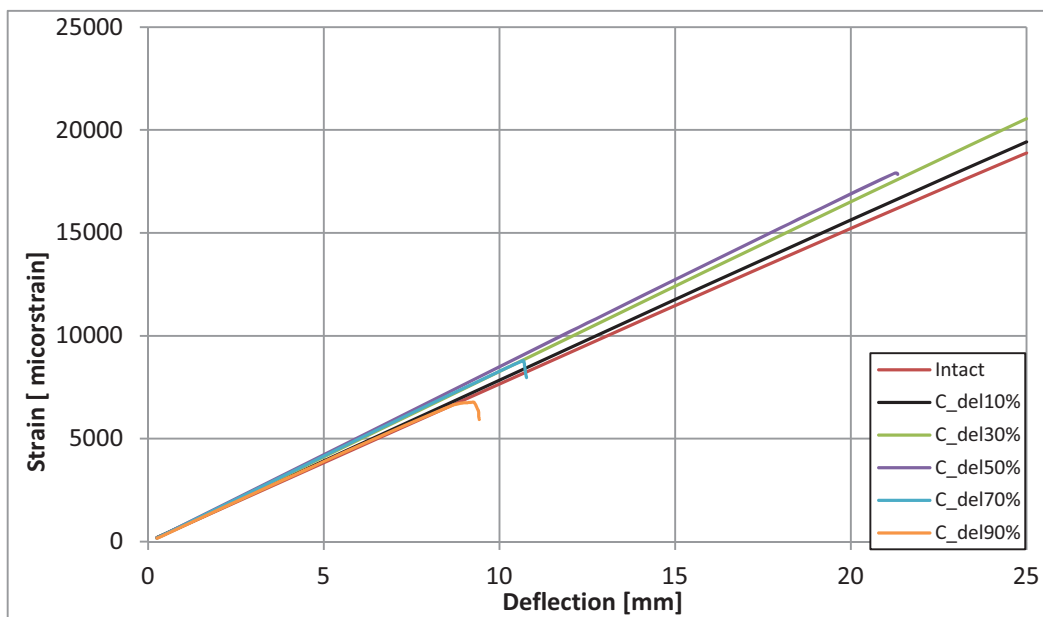
Παρατηρήσεις

- Η σχέση δύναμης-βέλους κάμψης είναι γραμμική μέχρι την στιγμή όπου διαδίδεται ο αποχωρισμός
- Η επίδραση του αποχωρισμού στη Θέση αυτή φαίνεται να είναι παρόμοια με την επίδραση στη Θέση A. Δηλαδή, ο αποχωρισμός 10% δεν επηρεάζει καθόλου και ο αποχωρισμός 30% επηρεάζει λίγο την ακαμψία (τη μειώνει).
- Όπως και στη Θέση A και Θέση B η περεταίρω αύξηση του μήκους του αποχωρισμού επιφέρει περεταίρω μείωση της ακαμψίας και του μέγιστου φορτίου.

Πίνακας 2.7: Μέγιστη δύναμη για διάφορα μήκη αποχωρισμού.

Case	Max F [kN]
Intact	-
Delamination 10%	9.754
Delamination 30%	9.559
Delamination 50%	7.704
Delamination 70%	3.570
Delamination 90%	2.537

Οι παραμορφώσεις στο μέσο της δοκού στην εφελκυσόμενη πλευρά φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα.



Εικόνα 2.29: Σχέση

παραμόρφωσης – μετατόπισης για διάφορα μήκη αποχωρισμού στη θέση C.

Παρατηρήσεις

- Οι παραμορφώσεις είναι γραμμικές μέχρι τη διάδοση του αποχωρισμού
- Παρατηρείται πως για αποχωρισμούς 10% έως και 70% του ανυποστήρικτου μήκους οι παραμορφώσεις είναι υψηλότερες από την άθικτη περίπτωση.
- Για αποχωρισμό 90% του ανυποστήρικτου μήκους οι παραμορφώσεις συμπίπτουν με αυτές της άθικτης περίπτωσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ

3.1 Εισαγωγή

Στο πλαίσιο της μελέτης της επίδρασης του αποχωρισμού στη συμπεριφορά ινωδών σύνθετων υλικών υπό καμπτικά φορτία εκτελέστηκαν δοκιμές κάμψης τριών σημείων. Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται ο σχεδιασμός των πειραματικών δοκιμών, δηλαδή η επιλογή των βασικών διαστάσεων των δοκιμών (μήκος, πλάτος, πάχος και υποστηριζόμενο μήκος) και των βασικών χαρακτηριστικών του αποχωρισμού όπως το μήκος και η θέση του. Στη συνέχεια γίνεται περιγραφή των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για τη κατασκευή των πλακών καθώς και της μεθόδου κατασκευής τους. Τέλος περιγράφεται η διαδικασία των πειραματικών δοκιμών και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αυτών.

3.2 Σχεδιασμός Πειραματικών Δοκιμών

3.2.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δοκιμών

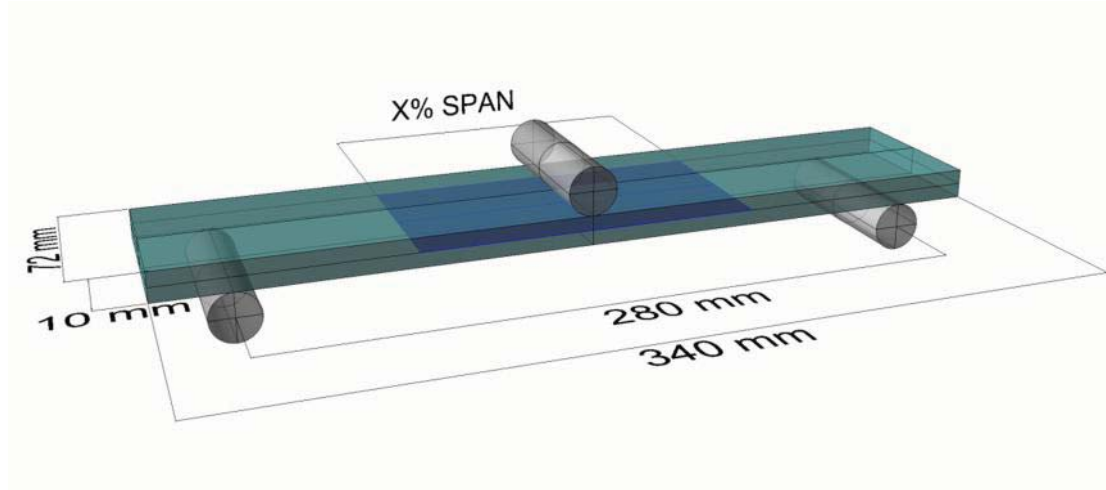
Η μηχανή που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση των πειραμάτων είναι η MTS μέγιστου φορτίου 100kN του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας. Για να μπορέσουμε να εκτελέσουμε πειράματα κάμψης τριών σημείων θα ενσωματώσουμε στη μηχανή την κεφαλή κάμψης τύπου 642.10.B MTS Bend Fixture. Οι στηρίξεις (rollers), μπορεί να είναι διαμέτρου 10mm ή 20mm. Επιλέγεται roller διαμέτρου 20mm ώστε να περιοριστεί το φαινόμενο συγκέντρωσης τάσεων στη περιοχή της επαφής της στήριξης με το δοκίμιο.

Τα δοκίμια θα έχουν ανυποστήρικτο μήκος (span) 280mm και θα εξέχουν από την στήριξη κατά 30mm από τη κάθε πλευρά. Θέλαμε να έχουμε όσο το δυνατόν μεγαλύτερα δοκίμια έτσι ώστε και ο τεχνητός αποχωρισμός να είναι αρκετά μεγάλος ώστε να πλησιάζει πραγματικές περιπτώσεις που μπορούν να προκύψουν σε ναυπηγικές κατασκευές και όχι μόνο. Άρα σύμφωνα με τη κεφαλή της κάμψης που έχουμε επιλέγουμε $L_{\text{support}}=280\text{mm}$ και σύμφωνα με το πρότυπο της κάμψης D 790-03 (Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulation Materials) το ανυποστήρικτο μήκος πρέπει να είναι τουλάχιστον 10% του L_{support} (παράγραφος 7.2.1) άρα 28mm από κάθε πλευρά, οπότε επιλέγουμε 'overhang' = 30mm. Άρα τελικά $L=340\text{mm}$ και $L_{\text{support}}(\text{span})=280\text{mm}$.

Η δεύτερη διάσταση που επιλέγεται είναι το πλάτος των δοκιμών. Το πλάτος των δοκιμών επιλέγεται να είναι ίσο με το μήκος των στηρίξεων (rollers) έτσι ώστε να εξασφαλίζεται εύκολα και με ακρίβεια η ευθυγράμμιση των δοκιμών πάνω στη μηχανή. Καθώς το μήκος των στηρίξεων είναι 72mm επιλέγεται για τα δοκίμια πλάτος $B=72\text{mm}$.

Η επόμενη διάσταση είναι το πάχος των δοκιμών. Το πάχος είναι ιδιαίτερα σημαντικό αφού από αυτό θα καθοριστεί ο αριθμός των στρώσεων και επιπλέον πρέπει να είναι τέτοιο ώστε το δοκίμιο να αστοχεί μέσα στις δυνατότητες της μηχανής. Επιπλέον θα θέλαμε να είχαμε δοκίμια τα οποία να είναι σε διαστάσεις περίπου ίδια με δοκίμια που έχουν χρησιμοποιηθεί παλιότερα σε άλλες διπλωματικές εργασίες σε άλλα πειράματα όπως του κ. Κουσαθανά (2010). Για τους παραπάνω λόγους επιλέγεται πάχος $t=10\text{mm}$. Το πάχος αυτό όπως φαίνεται και από τα αποτελέσματα του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων οδηγεί σε

αστοχία για φορτίο της τάξης των 10kN οπότε είμαστε σίγουροι πως το max φορτίο της μηχανής (100kN) είναι αρκετό. Επιπλέον σύμφωνα με το «Project MARSTRUCT» όπου είχαν κατασκευασθεί σύνθετα υλικά με τα ίδια υλικά και την ίδια μέθοδο με τα δικά μας το μέσο πάχος κάθε στρώσης ήταν 0.5mm οπότε καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι για να πετύχουμε το πάχος των 10mm θα χρειαστούμε 20 στρώσεις.



Εικόνα 3.1 : Βασικές διαστάσεις των πειραματικών δοκιμών

3.2.2 Επιλογή γεωμετρικών χαρακτηριστικών του αποχωρισμού

Ο επόμενος πολύ σημαντικός παράγοντας για τον σχεδιασμό των πειραματικών δοκιμών είναι η επιλογή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του αποχωρισμού. Όπως έχουμε αναφέρει θέλουμε να μελετήσουμε την επίδραση του αποχωρισμού των στρώσεων στη συμπεριφορά σύνθετων υλικών υπό καμπτικά φορτία. Όλοι οι αποχωρισμοί βρίσκονται στο μέσο της δοκού κατά την έννοια του μήκους της. Τα βασικά χαρακτηριστικά του αποχωρισμού είναι το μήκος, το πλάτος του και η θέση του κατά το πάχος του δοκιμίου.

Όταν μία δοκός λαμβάνει καμπτικά φορτία μπορούμε να διακρίνουμε τρία βασικά τμήματα στη διατομή της, την εφελκυσόμενη και τη θλιβόμενη περιοχή και τον ουδέτερο άξονα. Οπότε θέλοντας να μελετήσουμε την επίδραση του αποχωρισμού σε κάθε μια από της παραπάνω περιοχές αποφασίσαμε να ίσο-μοιράσουμε το πάχος με αποτέλεσμα οι περιπτώσεις που θα μελετήσουμε όσον αφορά τη θέση του αποχωρισμού να είναι τρεις. Η πρώτη θέση (position A) είναι σε απόσταση 25% του πάχους από την εφελκυσόμενη πλευρά δηλαδή στο εφελκυσόμενο τμήμα, η δεύτερη θέση (position B) είναι στο μέσο του πάχους δηλαδή εκεί που βρίσκεται ο ουδέτερος άξονας (εάν δεν υπάρχουν γεωμετρικές ατέλειες στο δοκίμιο) της διατομής και τέλος η τρίτη θέση (position C) είναι στο 75% του πάχους από την εφελκυσόμενη πλευρά δηλαδή στο θλιβόμενο τμήμα. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι αφού το δοκίμιο αποτελείται από 20 στρώσεις, πως για τη θέση A ο αποχωρισμός τοποθετείται μεταξύ της 5^{ης} και της 6^{ης} στρώσης, για τη θέση B ο αποχωρισμός τοποθετείται μεταξύ της 10^{ης} και της 11^{ης} στρώσης και τέλος για τη θέση C ο αποχωρισμός τοποθετείται μεταξύ της 15^{ης} και της 16^{ης} στρώσης. Το πλάτος του αποχωρισμού επιλέγεται να είναι ίσο με το πλάτος του δοκιμίου, δηλαδή $B_{delamination}=72\text{mm}$. Τέλος για την επιλογή των περιπτώσεων του μήκους του αποχωρισμού που θα μελετήσουμε θα βασιστούμε στην αρχική ανάλυση με το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 2 και στα διαγράμματα δύναμης – βέλους κάμψης που παρουσιάζουν του αρχικούς υπολογισμούς. Στα

διαγράμματα αυτά στο κεφάλαιο 2, πήραμε τη σχέση δύναμης – μετατόπισης για τις θέσεις A,B,C όπως ορίστηκαν προηγουμένως για τις παρακάτω περιπτώσεις μήκος αποχωρισμού:

- Άθικτη (Intact, no delamination)
- Del_10% (delamination=10%* $L_{support}$ =28mm)
- Del_30% (delamination=30%* $L_{support}$ =84mm)
- Del_50% (delamination=50%* $L_{support}$ =140mm)
- Del_70% (delamination=70%* $L_{support}$ =196mm)
- Del_90% (delamination=90%* $L_{support}$ =252mm)

Μέσω της ανάλυσης αυτής (βλέπε εδάφιο 2.5) είχε προκύψει πως η περίπτωση αποχωρισμού 10% του υποστηριζόμενου μήκους δεν διαφέρει από την άθικτη περίπτωση και πως ένας αποχωρισμός τέτοιας τάξης μεγέθους δεν έχει ιδιαίτερη επίδραση στη συμπεριφορά του δοκιμίου όσον αφορά την ακαμψία του. Επιπλέον φαίνεται πως το δοκίμιο αστοχεί πριν τη διάδοση του αποχωρισμού, φαινόμενο που είναι ανεπιθύμητο γιατί έτσι δεν παίρνουμε πληροφορία για την επίδραση του αποχωρισμού. Όσον αφορά την περίπτωση του αποχωρισμού 90% φαίνεται να έχουν υποβαθμιστεί ιδιαίτερα οι μηχανικές ιδιότητες του δοκιμίου, σε τέτοιο βαθμό που η μελέτη της περίπτωσης αυτής να μη παρουσιάζει ενδιαφέρον καθώς η συμπεριφορά του δοκιμίου προσεγγίζει τη συμπεριφορά σαν η δοκός να έχει σπάσει σε δύο διαφορετικά υποπολύστρωτα τα οποία απλά βρίσκονται σε επαφή. Άρα επιλέγουμε να εξετάσουμε τους αποχωρισμούς μήκους 30%, 50% και 70% του υποστηριζόμενου μήκους. Για λόγους πρακτικούς επιλέξαμε μήκη αποχωρισμού 80mm, 140mm και 200mm τα οποία είναι πολύ κοντά στο 30%, 50% και 70%. Ένας ακόμη λόγος που μας οδήγησε στην επιλογή αυτή είναι πως και από άποψη κόστους αλλά και χρόνου δε μπορούσαμε να εκτελέσουμε πολύ μεγάλο αριθμό πειραματικών δοκιμών, έπρεπε να κινηθούμε σε έναν αριθμό από 25 έως 35 πειράματα.

Τέλος για κάθε περίπτωση θέσης και μήκους θα κατασκευασθούν 3 δοκίμια ώστε να μπορούμε να αξιολογήσουμε την επαναληψιμότητα των πειραματικών δοκιμών και την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Άρα συνοψίζοντας έχουμε τρεις περιπτώσεις αποχωρισμού 30%, 50% και 70% του υποστηριζόμενου μήκους σε τρεις διαφορετικές θέσεις κατά το πάχος 25%, 50% και 75% από την εφελκυστική πλευρά. Άρα στο σύνολο τα πειράματα που θα εκτελεστούν θα είναι 30 (9 διαφορετικές περιπτώσεις μήκους και θέσης αποχωρισμού x 3 = 27 συν 3 άθικτα δοκίμια). Στον πίνακα 3.1 συνοψίζονται τα παραπάνω και παρουσιάζεται και η ονοματολογία που χρησιμοποιηθεί για τα δοκίμια. Το πρώτο συνθετικό του ονόματος αναφέρεται στη θέση κατά το πάχος (A,B ή C), το δεύτερο συνθετικό αναφέρεται στο μήκος του αποχωρισμού (80, 140 ή 200) και τέλος το τρίτο συνθετικό θα αναφέρεται στο δοκίμιο της σειράς είναι δηλαδή 1,2 ή 3. Για παράδειγμα το δοκίμιο A_200_2 είναι το δεύτερο δοκίμιο με αποχωρισμό στην εφελκυστική πλευρά (25% του πάχους) μήκους 200mm.

Πίνακας 3.1: Κατηγοριοποίηση και ονοματολογία δοκιμίων

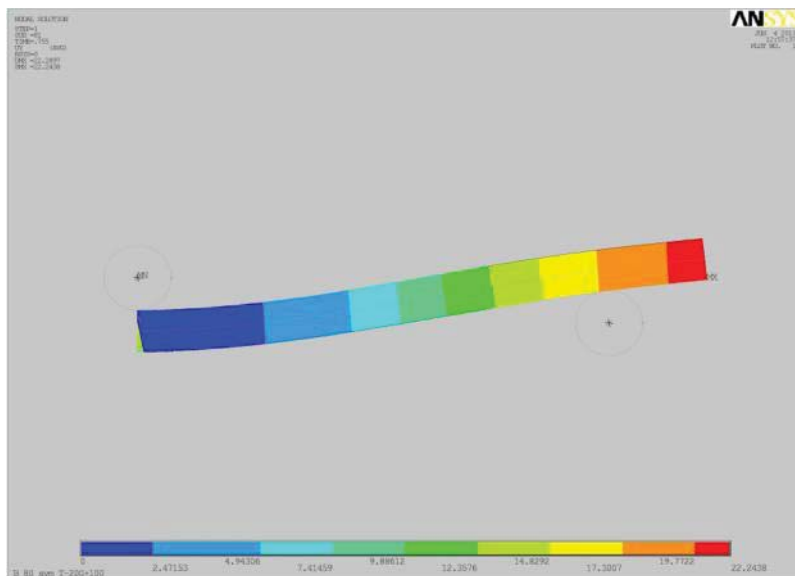
POSITION	Delamination Length	Specimen
INTACT	-	1
		2
		3
A	80	1
		2
		3
	140	1
		2
		3
	200	1
		2
		3
B	80	1
		2
		3
	140	1
		2
		3
	200	1
		2
		3
C	80	1
		2
		3
	140	1
		2
		3
	200	1
		2
		3

3.2.2 Μετρούμενα μεγέθη κατά την πειραματική διαδικασία

Τα μεγέθη στα οποία θα βασίσουμε την ανάλυσή μας είναι στην ουσία η δύναμη που πρέπει να ασκήσουμε για να κάμψουμε το κάθε δοκίμιο και οι παραμορφώσεις σε διάφορα σημεία ενδιαφέροντος. Άρα λοιπόν σε κάθε ένα από τα πειράματα πρέπει να πάρουμε τη καμπύλη δύναμης – μετατόπισης (των roller) (F-δ) και τις καμπύλες παραμόρφωσης – μετατόπισης (ϵ_x -δ).

Τη δύναμη και το βέλος κάμψης μπορούμε να τα πάρουμε απευθείας από τη μηχανή (MTS) που εκτελεί το πείραμα, παρ' όλα αυτά τοποθετήσαμε και έναν γραμμικά μεταβλητό διαφορικό μετασχηματιστή (LVDT) ώστε να είμαστε σίγουροι πως οι μετατοπίσεις που μετράμε είναι σωστές.

Όσον αφορά τις παραμορφώσεις, θα μετρήσουμε σε όλα τα δοκίμια στο μέσο του δοκιμίου κατά το μήκος και το πλάτος στην εφελκυσμένη πλευρά για να πιάσουμε τον εφελκυσμό, η θέση αυτή θα είναι η θέση 1. Από το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων παρατηρήσαμε το εξής φαινόμενο. Όταν ο αποχωρισμός αρχίζει και διαδίδεται, τότε κοντά στη περιοχή του κάτω roller η ελαστική γραμμή αλλάζει καμπυλότητα. Όπως φαίνεται στη παρακάτω εικόνα, μπορούμε να δούμε το “κύμα” στα δεξιά..



Εικόνα 3.2: Αλλαγή της καμπυλότητας στο κάτω roller όταν διαδίδεται η ρωγμή

Για να επιβεβαιώσουμε το παραπάνω φαινόμενο, τοποθετήσαμε ένα strain gauge στη θλιβόμενη πλευρά της δοκού, σε απόσταση 20mm αριστερά από το κάτω roller, θέση 2. Καθώς το φαινόμενο αυτό είναι πιο εμφανές για μεγάλα μήκη αποχωρισμού όπου η διάδοση του είναι πιο εύκολη και καθώς το κόστος των gauge είναι υψηλό στη θέση 2 τοποθετήθηκαν gauges μόνο στα δοκίμια με μήκος αποχωρισμού 200mm.

3.3 Υλικά

Τα σύνθετα υλικά που κατασκευάσαμε θα αποτελούνται από μονοδιευθυντικές ίνες γυαλιού και εποξική ρητίνη. Παρακάτω ακολουθούν τα στοιχεία και οι ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήσαμε όπως δίνονται από την κατασκευάστρια εταιρεία.

Ίνες Γυαλιού

Οι ίνες που χρησιμοποιούμε είναι οι UNI CD 600 NX 127cm code:425372 της εταιρίας OWENS CORNING. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά φαίνονται στο παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 3.2: Τεχνικά χαρακτηριστικά για τις ίνες γυαλιού

Product	Fiber	Weight of layers				Total Weight	Thicknes s
		0°	90°	45°	-45°		
UNI CD600	GLASS					gr/m ²	mm
		566	50	-	-	624	0.56

Για τον τεχνητό αποχωρισμό χρησιμοποιήθηκε Teflon με πάχος 50μm, που ήταν διαθέσιμο στο εργαστήριο.

Ρητίνη

Η ρητίνη που χρησιμοποιήσαμε ήταν η EPICOTE™ Resin MGS® LR385 της εταιρείας HEXION. Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά και οι μηχανικές ιδιότητες της ρητίνης αυτής.

Πίνακας 3.3: Τεχνικά χαρακτηριστικά για την ρητίνη

Mechanical data of neat resin		
Density	[g/cm ³]	1,18 - 1,20
Flexural strength	[N/mm ²]	120 - 130
Modulus of elasticity	[kN/mm ²]	3,3 - 3,6
Tensile strength	[N/mm ²]	75 - 85
Compressive strength	[N/mm ²]	120 - 140
Elongation of break	[%]	6 - 8
Impact strength	[KJ/m ²]	45 - 60
Water absorption at 23°C	24 h [%]	0,01
	7 d [%]	0,2 - 0,6
Fatigue strength under reversed bending stresses acc. to BAM Berlin	10 %	2 * 10 ⁴
	90 %	2 * 10 ⁶
Curing: 24 h at 23 °C (74 °F) + 15 h at 60 °C (140 °F)		
Typical data according to WL 5.3203 Parts 1 and 2 of the German Aviation Materials Manual.		

Σκληρυντής

Ο σκληρυντής που χρησιμοποιήσαμε ήταν ο EPICURE™ CURING AGENT MGS® LH386 της εταιρείας HEXION. Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του σκληρυντή.

Πίνακας 3.3: Τεχνικά χαρακτηριστικά για τον σκληρυντή

		Hardener LH 386
Density	[g/cm ³]	0,93 - 0,97
Viscosity	[mPas]	40 - 90
Amine value	[mg KOH/g]	480 - 550
Refractory index		1,462 - 1,51

Τα παραπάνω υλικά επιλέχθηκαν καθώς απαντώνται ευρέως σε ναυπηγικές κατασκευές, η παρασκευή και προετοιμασία τους είναι απλή και έχουν σχετικά χαμηλό κόστος. Επιπλέον, πέραν του ότι ήταν άμεσα διαθέσιμα στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας, έχουν χρησιμοποιηθεί και μελετηθεί από άλλες διπλωματικές εργασίες αλλά και διάφορα projects.

3.4 Κατασκευή των δοκιμών

Πριν την κατασκευή των δοκιμών έχει γίνει μια ανάλυση βάσει της οποίας καθορίστηκε η γεωμετρία των δοκιμών και του αποχωρισμού. Έτσι ο στόχος είναι να κατασκευαστούν ορθογωνικά δοκίμια από σύνθετο υλικό ενισχυμένο με ίνες γυαλιού με διαστάσεις 340x72x10 mm. Στα δοκίμια θα έχει τοποθετηθεί ένας τεχνητός αποχωρισμός στρώσεων συμμετρικά ως προς το μέσο του μήκους των δοκιμών και θα μεταβάλλεται ως προς το μήκος και τη θέση του κατά το πάχος.

Η κατασκευή χωρίζεται σε τρεις φάσεις. Η πρώτη φάση είναι η προετοιμασία, η δεύτερη είναι η κατασκευή της πλάκας του σύνθετου υλικού και η τρίτη είναι η κοπή των δοκιμών και η τελική τους μορφοποίηση. Στην παράγραφο αυτή αναλύονται οι παραπάνω φάσεις και τέλος παρουσιάζονται οι επιτευχθείσες διαστάσεις και ιδιότητες των δοκιμών.

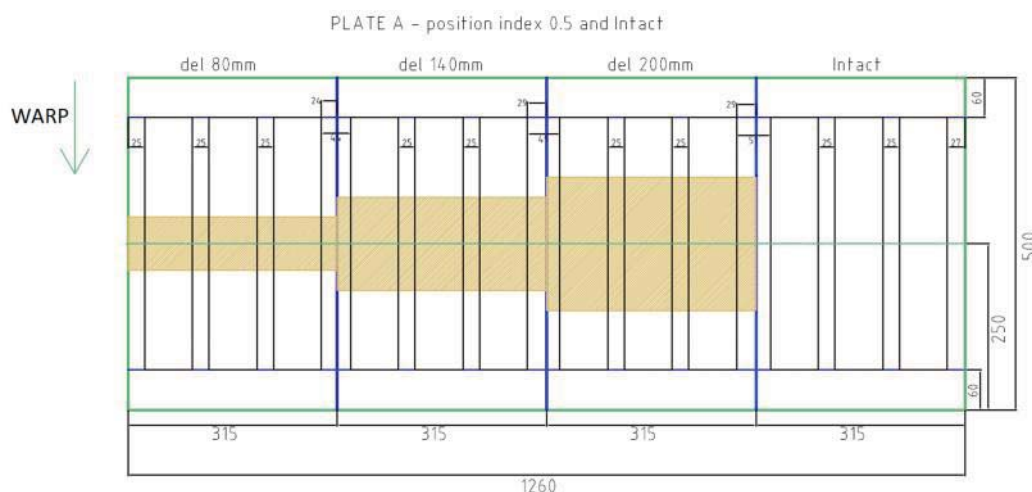
3.4.1 Προετοιμασία

Όπως έχουμε αναφέρει προηγουμένως το επιθυμητό πάχος των δοκιμών είναι 10mm. Σύμφωνα με το Project MARSTRUCT [21] το πάχος κάθε στρώσης που επιτυγχάνεται με τη μέθοδο vacuum bagging είναι 0.5mm. Άρα ο αριθμός των στρώσεων που θα χρειαστούμε είναι 20. Ο αριθμός 20 μας βολεύει καθώς μπορούμε να τοποθετήσουμε τον αποχωρισμό με ακρίβεια στη θέση κατά το πάχος όπως έχει σχεδιαστεί.

Στη συνέχεια έπρεπε να γίνει ο υπολογισμός των διαστάσεων κάθε στρώσης ενίσχυσης, δηλαδή της πλάκας από σύνθετο υλικό από το οποίο θα κοπούν τα τελικά δοκίμια. Το βέλτιστο θα ήταν όλα τα δοκίμια να μπορέσουν να κοπούν από την ίδια πλάκα, καθώς όμως οι διαστάσεις του καλουπιού ήταν μικρότερες, αναγκαστήκαμε να κατασκευάσουμε δύο πλάκες. Λαμβάνοντας υπόψη όλους τους περιοριστικούς παράγοντες όπως π.χ. την απαιτούμενη απόσταση από δοκίμιο σε δοκίμιο ώστε η κοπή τους να είναι εφικτή στον τροχό, την απαιτούμενη περιοχή όπου θα τοποθετηθεί η αναρρόφηση της ρητίνης ώστε να αποφευχθούν ανωμαλίες στην επιφάνεια των δοκιμών, καταλήξαμε στις παρακάτω πλάκες.

Σχεδιασμός πλακών

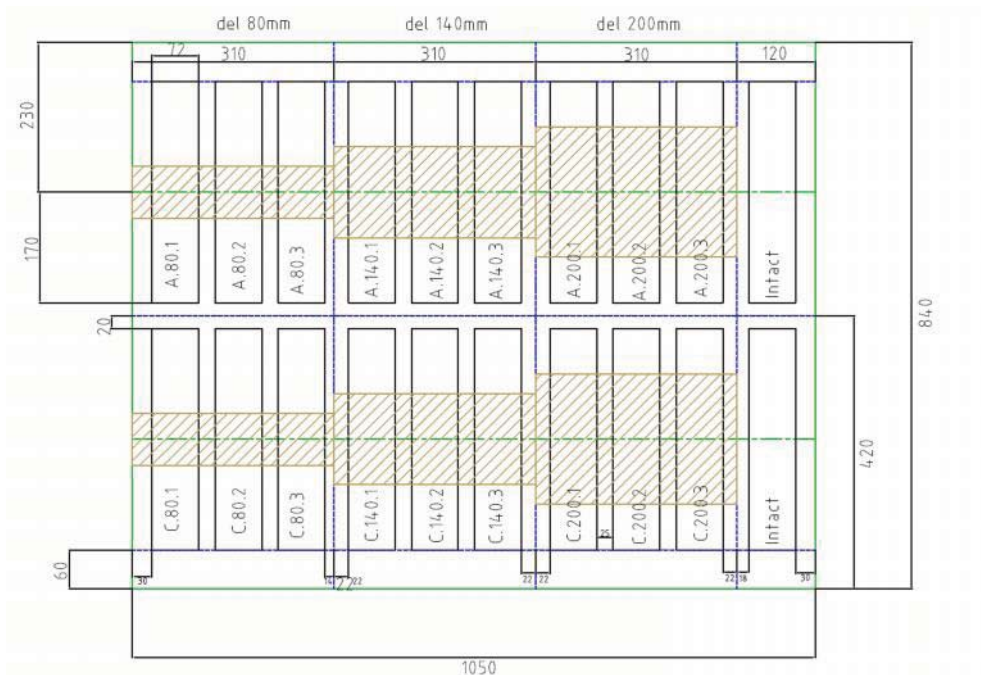
Η πλάκα Α έχει διαστάσεις 1260x500 mm, και από αυτή θα προκύψουν τα δοκίμια που περιέχουν τον τεχνητό αποχωρισμό στο μέσο του πάχους (position B) και τα Intact δοκίμια. Καθώς για κάθε περίπτωση θέλουμε 3 δοκίμια το σύνολο των δοκιμών που θα παραχθούν από τη πλάκα αυτή είναι 12. Όπως φαίνεται και στο σχήμα που ακολουθεί ανάμεσα σε κάθε δοκίμιο υπάρχει απόσταση 25mm και η απόσταση από τις μεγάλες πλευρές είναι 60mm ώστε να γίνει καλύτερα η αναρρόφηση.



Εικόνα 3.3: Σχεδιασμός της πλάκας Α.

Οι πράσινες γραμμές οριοθετούν τη πλάκα, οι μπλε γραμμές ορίζουν τις βασικές διαφορετικές περιοχές οι οποίες θα σημαδευτούν και πάνω σε κάθε ενισχυτική στρώση ώστε να είναι εύκολη η τοποθέτηση της στη σωστή θέση και να είναι όσο το δυνατόν πιο ευθυγραμμισμένες οι ίνες μεταξύ τους στις 0° καθώς επίσης και για να είναι ευκολότερη η κοπή της πλάκας. Οι μαύρες γραμμές δείχνουν το πως θα κοπούν τα δοκίμια μετά τη κατασκευή της πλάκας. Η καφέ περιοχή συμβολίζει τον τεχνητό αποχωρισμό ο οποίος θα αναλυθεί στην επόμενη παράγραφο.

Η πλάκα Β έχει διαστάσεις 1050x840 mm. Από την πλάκα αυτή θα προκύψουν τα δοκίμια στα οποία ο τεχνητός αποχωρισμός βρίσκεται στο 25% και στο 75% του πάχους. Καθώς για κάθε περίπτωση έχουμε 3 δοκίμια, ο αριθμός των δοκιμών θα είναι 18. Επειδή σε ένα από τα άθικτα δοκίμια τα οποία τα πήραμε από τη πλάκα Α έγινε κάποιο λάθος κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας του χρειάστηκε να εξάγουμε ένα ακόμη άθικτο δοκίμιο από τη πλάκα Β. Όπως φαίνεται στην εικόνα 3.4 οι αποστάσεις μεταξύ των δοκιμών και από τα πλευρά της πλάκας από τα οποία θα γίνει η αναρρόφηση είναι ίδια με τη πλάκα Α.



Εικόνα 3.4: Σχεδιασμός της πλάκας Β

Οι γραμμές συμβολίζουν ακριβώς τα ίδια με το προηγούμενο σχήμα.

Προετοιμασία τεχνητού αποχωρισμού

Τα πειράματα θα είναι δοκιμές κάμψης σε δοκίμια από GRP με έναν τεχνητό αποχωρισμό στρώσεων. Ο τρόπος με τον οποίο επιτυγχάνεται ο τεχνητός αποχωρισμός είναι με τη τοποθέτηση Teflon ανάμεσα στις στρώσεις του πολύστρωτου. Το υλικό αυτό δεν επιτρέπει στη ρητίνη να περάσει μέσα του με αποτέλεσμα η ρητίνη να μη μπορεί να ποτίσει μεταξύ των στρώσεων των ινών που βρίσκονται εκατέρωθεν του Teflon. Έτσι η τοποθέτηση του δημιουργεί ένα κενό ανάμεσα στις στρώσεις. Για να έχουμε όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια, δημιουργήθηκε ένα καλούπι για τον τεχνητό αποχωρισμό, βάσει του οποίου κόψαμε όλα τα απαραίτητα κομμάτια Teflon. Έτσι λοιπόν κόπηκαν τρία κομμάτια Teflon, ένα για κάθε θέση κατά το πάχος. Το κάθε κομμάτι αποτελούνταν από 3 περιοχές, οι οποίες ήταν τα τρία μήκη που θα εξετάσουμε, δηλαδή 80mm, 140mm και 200mm. Η γεωμετρία του φαίνεται στα σχήματα που προηγήθηκαν.

Μετά το σχεδιασμό των πλακών έπρεπε να κοπούν τα υφάσματα, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.5, να σχεδιαστούν επάνω τους σημάδια ώστε να μπορούν να ευθυγραμμιστούν εύκολα και τέλος έπρεπε να κοπεί ο τεχνητός αποχωρισμός και να σχεδιαστεί η περιοχή όπου θα τοποθετηθεί, όπως φαίνεται στις εικόνες 3.6 και 3.7.



Εικόνα 3.5: Οι 20 στρώσεις των ενισχυτικών ινών της Β πλάκα



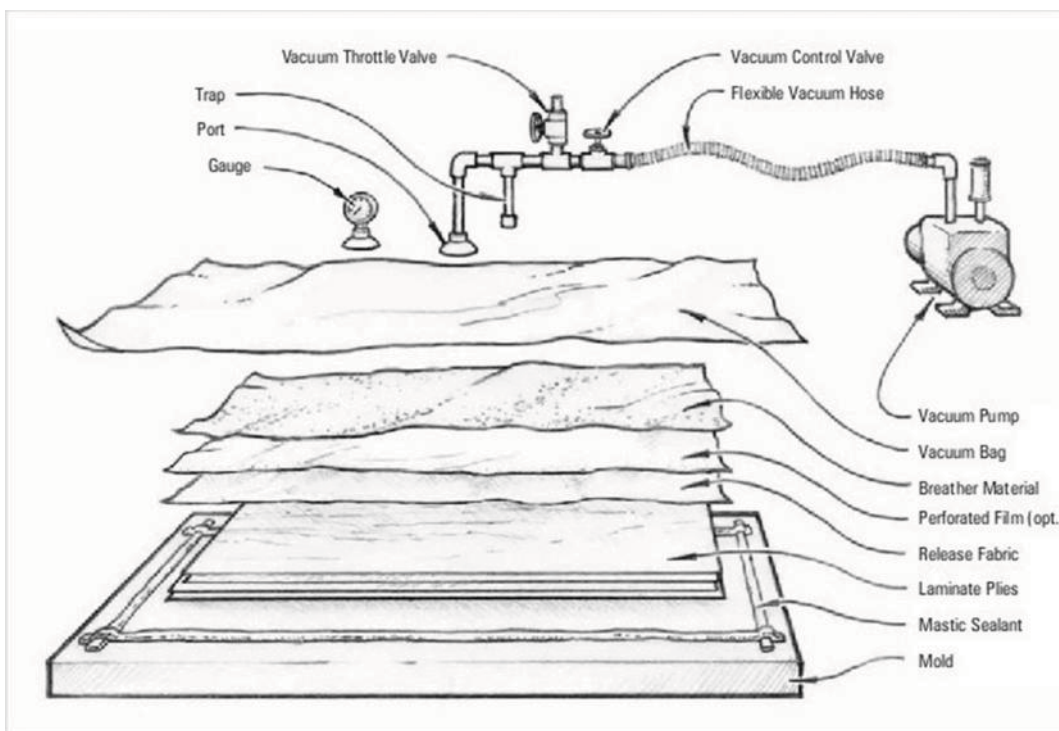
Εικόνα 3.6: Σχεδιασμός αποχωρισμού και γραμμών ευθυγράμμισης στη πλάκα Β



Εικόνα 3.7: Σχεδιασμός αποχωρισμού και γραμμών ευθυγράμμισης στη πλάκα Α

3.4.2 Κατασκευή πλακών

Στην παράγραφο αυτή θα περιγραφεί η διαδικασία κατασκευής. Η μέθοδος που χρησιμοποιήσαμε είναι η μέθοδος “χύτευσης θαλάμου πίεσης” ή αλλιώς “vacuum bagging”. Στην αρχή ετοιμάζεται το καλούπι και τοποθετούνται οι στρώσεις μία-μία και εμποτίζονται με ρητίνη με το χέρι έτσι ώστε η ρητίνη να είναι όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφη και σε όλη την επιφάνεια των στρώσεων. Στη συνέχεια μπαίνει πάνω τους ένα ειδικό ύφασμα το οποίο δε κολλά με τη ρητίνη (peel ply), ένα ύφασμα το οποίο θα οδηγεί την ρητίνη να απορροφάται όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφα από όλη την επιφάνεια (perforated film), ένα ύφασμα που θα απορροφά τη ρητίνη που περισσεύει (breather) και μια ειδική σακούλα νάιλον που κλείνει με ειδική κολλητική ταινία (tucky tape) πάνω στο καλούπι. Στη σακούλα αυτή ανάλογα με τις ανάγκες (πόσο μεγάλη είναι η πλάκα) προσαρμόζονται ένας ή παραπάνω σωλήνες που συνδέονται με αντλία κενού. Όταν η αντλία ξεκινήσει τη λειτουργία της δημιουργείται κενό μέσα στη σακούλα με αποτέλεσμα η σακούλα να πιέζει τη ρητίνη και τα υφάσματα των ενισχυτικών ινών. Αυτό οδηγεί τη ρητίνη να ποτίσει καλύτερα τα υφάσματα και τυχόν εγκλείσματα αέρα να περιοριστούν. Η μέθοδος αυτή μας δίνει πλάκες με μεγαλύτερο ποσοστό περιεκτικότητας κατά βάρος σε γυαλί καθώς η περίσσεια ρητίνης απορροφάται και από το breather αλλά και από το κενό που δημιουργεί η αντλία.



Εικόνα 3.8: Σχηματική διάταξη της μεθόδου vacuum bagging

Στη συνέχεια ακολουθεί περιγραφή της μεθόδου κατασκευής αναλυτικά βήμα προς βήμα και παρουσίαση φωτογραφικού υλικού.

Προετοιμασία του καλουπιού

Τα υφάσματα και ο τεχνητός αποχωρισμός έχουν κοπεί σύμφωνα με τον σχεδιασμό που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Στη συνέχεια γίνεται προετοιμασία του καλουπιού το οποίο είναι ένα γυαλί ορθογωνικού σχήματος. Η προετοιμασία αυτή περιλαμβάνει τον καθαρισμό της επιφάνειας με Acetone για την απομάκρυνση τυχόν ακαθαρσιών και των υπολειμμάτων λίπους. Στη συνέχεια γυαλίζεται η επιφάνεια με κεριά και απλώνεται σε αυτή μια ομοιόμορφη στρώση από κεριά, η οποία θα λειτουργήσει ως αποκολλητικός παράγοντας. Αυτό είναι σημαντικό γιατί έτσι αποφεύγεται και η καταστροφή του καλουπιού αλλά και της πλάκας κατά τη διάρκεια της αποκόλλησής της από το καλούπι. Στη συνέχεια με τη βοήθεια μιας στρώσης οριοθετείται η περιοχή του καλουπιού δηλαδή η περιοχή στην οποία θα γίνει η τοποθέτηση των στρώσεων και της ρητίνης. Τα όρια του καλουπιού ορίζονται από μια ειδική μαστίχα (tucky tape) πάνω στην οποία θα κολλήσει στο τέλος το νάιλον για να επιτύχουμε το κενό.



Εικόνα 3.9: Προετοιμασία και οριοθέτηση του καλουπιού

Προετοιμασία μίγματος

Το επόμενο βήμα είναι να ετοιμάσουμε το μίγμα ρητίνης και σκληρυντή με το οποίο θα εμποτίσουμε τα υφάσματα των ενισχυτικών ινών. Η παρακάτω διαδικασία ακολουθήθηκε και για τις δύο πλάκες. Αρχικά ζυγίζουμε τα υφάσματα. Θέλουμε βάρος μίγματος ίσο με το βάρος των υφασμάτων ώστε το μίγμα να είναι 50% του συνολικού βάρους. Ο κατασκευαστής της ρητίνης και του σκληρυντή μας ορίζει με ποια αναλογία πρέπει να αναμειχτούν μεταξύ τους, στη συγκεκριμένη περίπτωση η αναλογία αυτή είναι $W_{\text{RESIN}} / W_{\text{HARDENER}} = 100/35$ και από τη σχέση ότι $W_{\text{RESIN}} + W_{\text{HARDENER}} = W_{\text{MIX,TOTAL}} = W_{\text{GLASS}}$ μπορούμε να υπολογίσουμε το βάρος της ρητίνης και του σκληρυντή που πρέπει να χρησιμοποιήσουμε. Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται τα νούμερα αυτά για τις δύο πλάκες.

Πίνακας 3.4: Βάρος του κάθε υλικού που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των πλακών

ΒΑΡΗ	
Πλάκα Α	
Βάρος ενισχύσεων [gr]	8180
Βάρος ρητίνης [gr]	6074
Βάρος σκληρυντή [gr]	2126
Βάρος μίγματος [gr]	8200
Πλάκα Β	
Βάρος ενισχύσεων [gr]	11500
Βάρος ρητίνης [gr]	8888
Βάρος σκληρυντή [gr]	3112
Βάρος μίγματος [gr]	12000

Από τη στιγμή της ανάμειξης έχουμε περιορισμένο χρονικό διάστημα να ολοκληρώσουμε το στήσιμο και να επιβάλλουμε το κενό γιατί το μίγμα θα ξεκινήσει να “gel-άρει” δηλαδή θα ξεκινήσει η διαδικασία πολυμερισμού της ρητίνης. Ο χρόνος αυτός είναι περίπου 1.5 ώρα (working time). Για να δώσουμε στον εαυτό μας λίγο παραπάνω χρόνο καθώς οι πλάκες που θα κατασκευάζαμε ήταν σχετικά μεγάλες (ειδικά η πλάκα Β) δεν αναμίξαμε όλο το μίγμα κατευθείαν αλλά το σπάσαμε σε 2 δοχεία, έτσι το δεύτερο μισό του μίγματος αναμείχθηκε όταν τελείωνε το πρώτο μισό.



Εικόνα 3.10: Ανάμειξη ρητίνης με τον σκληρυντή

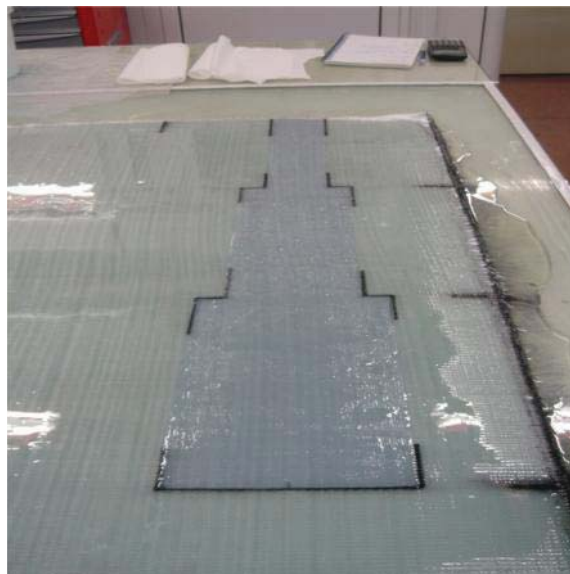
Τοποθέτηση των στρώσεων και εμποτισμός με ρητίνη

Έχοντας λοιπόν ετοιμάσει τα υφάσματα και τον τεχνητό αποχωρισμό, έχοντας προετοιμάσει το καλούπι και το μίγμα ρητίνης και σκληρυντή είμαστε σε θέση να ξεκινήσουμε την ουσιαστική επίστρωση και κατασκευή της πλάκας. Η κάθε στρώση τοποθετείται στο κέντρο του καλουπιού και ποτίζεται με ρητίνη η οποία απλώνεται ομοιόμορφα σε όλη την επιφάνεια του υφάσματος με ένα ρολό. Στη συνέχεια κάθε επόμενη στρώση τοποθετείται και ευθυγραμμίζεται με τις άλλες στρώσεις με τη βοήθεια των γραμμών που έχουμε σχεδιάσει κατά τη φάση της κοπής και προετοιμασίας των υφασμάτων.



Εικόνα 3.11: Τοποθέτηση και εμποτισμός των υφασμάτων με ρητίνη

Στη συνέχεια, με προσοχή, στη στρώση που απαιτείται τοποθετείται και ευθυγραμμίζεται ο τεχνητός αποχωρισμός.



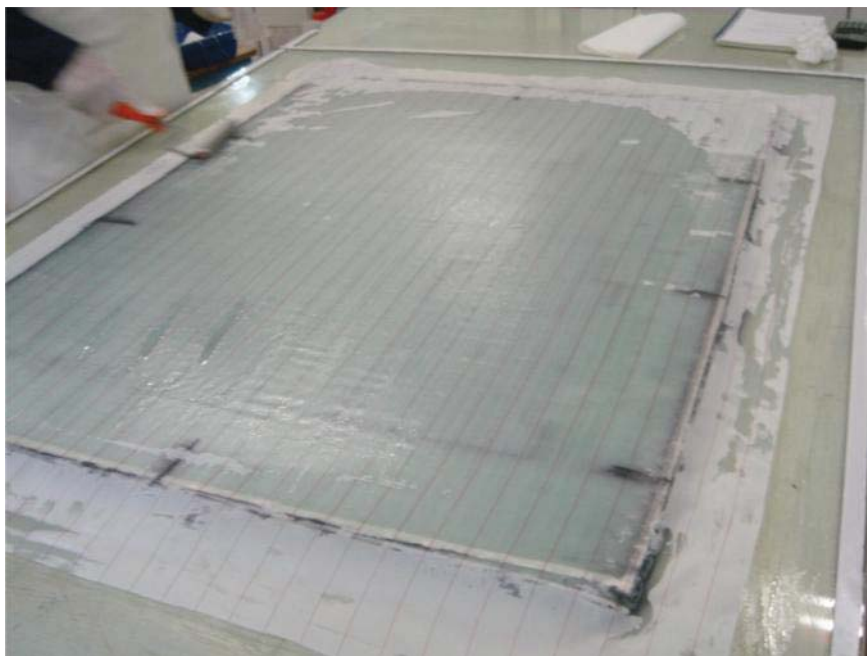
Εικόνα 3.12: Teflon, ο τεχνητός αποχωρισμός

Τοποθέτηση απαραίτητων υφασμάτων

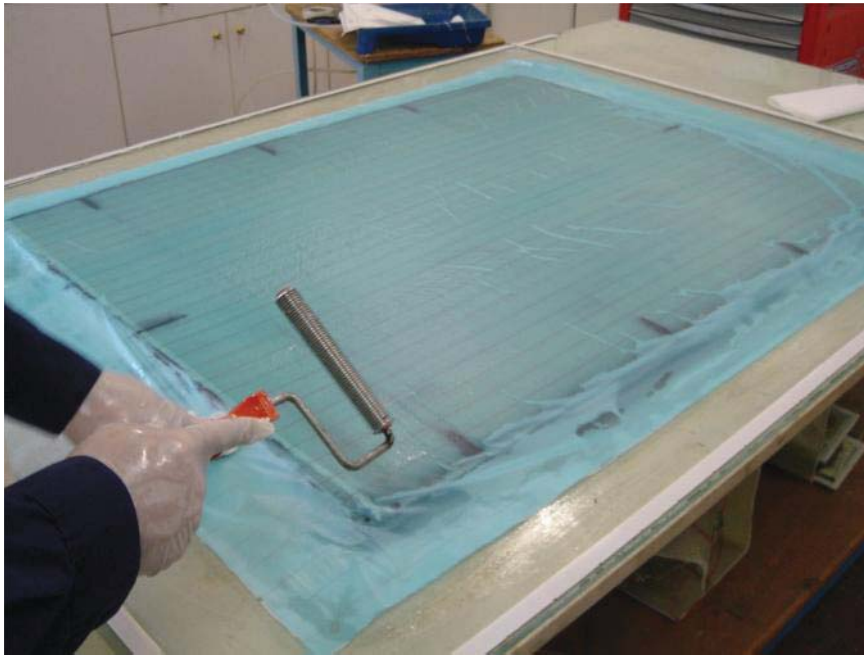
Μετά τον εμποτισμό των υφασμάτων με μίγμα ρητίνης και σκληρυντή τοποθετείται από πάνω ένα ειδικό ύφασμα το οποίο δεν κολλά με τη ρητίνη, ονομάζεται peel ply. Το ύφασμα αυτό χρησιμοποιείται για να μπορέσουμε να χωρίσουμε τη πλάκα από τα υπόλοιπα υφάσματα όπως το breather που ορίζεται παρακάτω και από το νάιλον που εξασφαλίζει το κενό. Το ύφασμα αυτό αποκολλάται εύκολα από την πλάκα και αφήνει μια ελαφρώς “σαγρέ” επιφάνεια (εικόνα 3.13).

Ύστερα τοποθετείται ένα “διάτρητο” ύφασμα που ονομάζεται perforated film το οποίο ρυθμίζει και οδηγεί την ρητίνη να απορροφάται όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφα από όλη την επιφάνεια, χωρίς να λιμνάζει σε συγκεκριμένες περιοχές (εικόνα 3.14).

Τέλος τοποθετείται ένα ύφασμα για να απορροφά τη περίσσεια ρητίνης το οποίο ονομάζεται breather (εικόνα 3.15). Για να μπορέσουμε να επιβάλουμε κενό στο εσωτερικό του καλουπιού πρέπει να τοποθετήσουμε μια αναρρόφηση. Με τον τρόπο αυτό μπορούμε να «συλλέξουμε» και την ρητίνη που περισσεύει. Ανάλογα με το μέγεθος της πλάκας τοποθετούμε 2 ή 3 αναρροφήσεις. Η αναρρόφηση αποτελείται από ένα σπιδάλ σωλήνα ο οποίος οδηγεί τη ρητίνη, η οποία περισσεύει και οδηγείται έξω λόγω του κενού, σε ένα σύστημα σωληνώσεων το οποίο συγκεντρώνει τη περίσσεια ρητίνης σε έναν μεταλλικό κουβά (εικόνα 3.16).



Εικόνα 3.13: Ύφασμα, Peel Ply



Εικόνα 3.14: Ύφασμα, Perforated Film



Εικόνα 3.15: Ύφασμα, Breather



Εικόνα 3.16: Σύστημα αναρρόφησης ρητίνης

Αεροστεγές κλείσιμο του καλουπιού και δημιουργία κενού

Το τελευταίο βήμα είναι να τοποθετήσουμε ένα νάιλον το οποίο θα κλείνει αεροστεγώς στο tuck tape. Ύστερα ενεργοποιούμε την αντλία η οποία μέσω των αναρροφήσεων της ρητίνης δημιουργεί κενό μέσα στο καλούπι. Η αντλία δημιούργησε κενό, κάνοντας τη πίεση μέσα στο καλούπι 0.6 bar και η θερμοκρασία στο χώρο του εργαστηρίου ήταν 17.9°C . Θέλαμε το κενό να μην είναι ιδιαίτερα ψηλό για να μη “στραγγαλίσουμε” τη ρητίνη και αναρροφήσουμε παραπάνω από όσο χρειαζόταν.



Εικόνα 3.17: Αντλία κενού

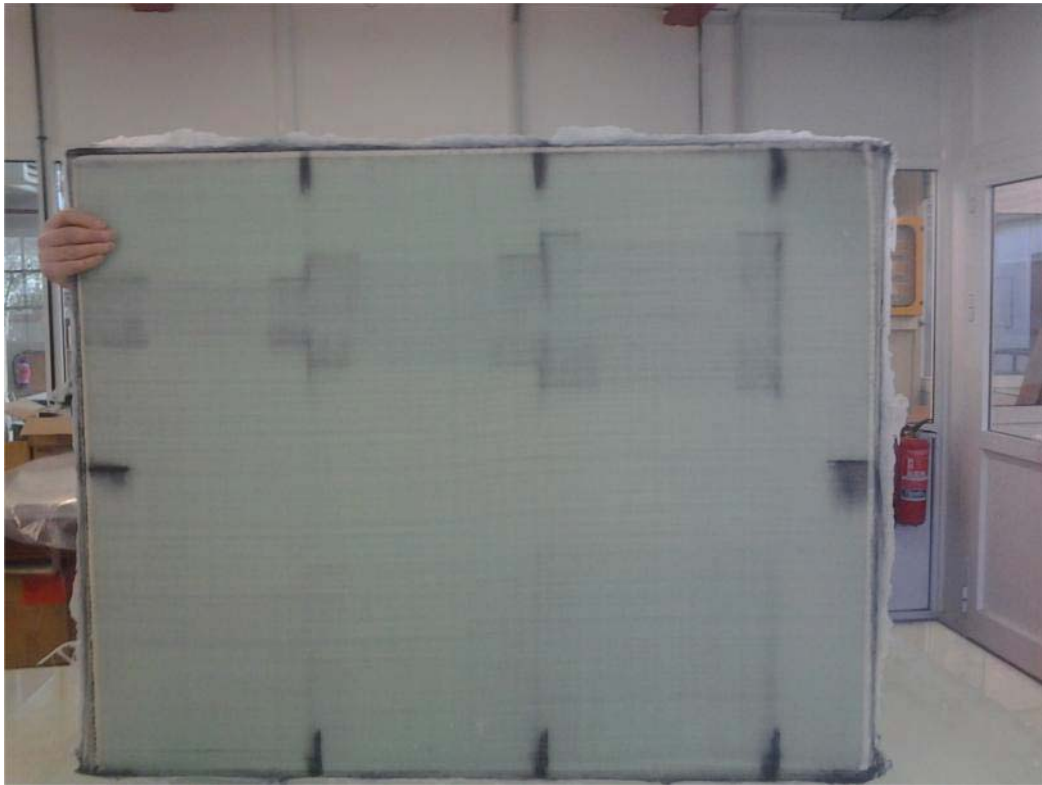


Εικόνα 3.18: Ολοκληρωμένη διάταξη της πλάκας

Όπως αναφέραμε από τη στιγμή που αναμείξαμε τη ρητίνη με τον σκληρυντή είχαμε περιορισμένο χρόνο για να ολοκληρώσουμε τη διαδικασία και να “κλείσουμε” τη πλάκα περίπου 1.5 ώρα, έκτοτε αρχίζει ο πολυμερισμός της ρητίνης. Ο πολυμερισμός της ρητίνης πρέπει να γίνει σε όσο το δυνατόν πιο σταθερές συνθήκες περιβάλλοντος (θερμοκρασία, υγρασία κλπ), για τον λόγο αυτό το air-conditioning δούλεψε σταθερά στους 25°C καθ’ όλη τη διάρκεια του πολυμερισμού. Τέλος ξεκαλουπώσαμε τις πλάκες.



Εικόνα 3.19: Η πλάκα Α



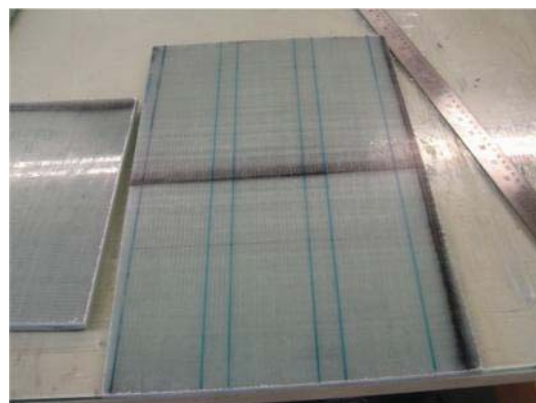
Εικόνα 3.20: Η πλάκα Β

3.4.2 Κοπή, μορφοποίηση και τελικές διαστάσεις και ιδιότητες

Από τις πλάκες που έχουν κατασκευαστεί πρέπει να κοπούν τα δοκίμια. Στην αρχή κάθε πλάκα χωρίζεται στις βασικές γραμμές που έχουν σχεδιαστεί και οριοθετούν κάθε περιοχή διαφορετικού μήκους αποχωρισμού (εικόνα 3.21). Επόμενο βήμα είναι σε κάθε τέτοιο τμήμα πλάκας να σχεδιαστούν τα 3 δοκίμια, ουσιαστικά εδώ μας ενδιαφέρει να χωρίσουμε τη πλάκα σε 3 λωρίδες πλάτους 72mm αφήνοντας το απαραίτητο κενό μεταξύ τους (εικόνα 3.22).



Εικόνα 3.21: Κοπή της πλάκας στις βασικές περιοχές



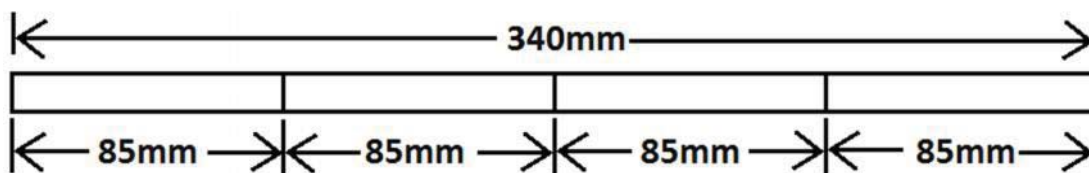
Εικόνα 3.22: Σχεδιασμός δοκιμίων σε κάθε τμήμα

Αφού κοπούν οι λωρίδες πλάτους 72mm τότε μπορούμε να εντοπίσουμε πιο εύκολα τον αποχωρισμό, να μετρήσουμε το πραγματικό του μήκος και να ορίσουμε το που θα κοπεί η λωρίδα ώστε το μήκος του κάθε δοκιμίου να είναι 340mm και παράλληλα ο αποχωρισμός να βρίσκεται συμμετρικά ως προς το μέσο του μήκος του δοκιμίου.



Εικόνα 3.23: Όλα τα δοκίμια

Πλέον έχουμε κόψει τα δοκίμια και έπρεπε να μετρήσουμε τις ακριβείς διαστάσεις και να προσδιορίσουμε την περιεκτικότητα σε ίνες γυαλιού κατά βάρος για τις δύο πλάκες. Η κάθε διάσταση μετρήθηκε σε τρία διαφορετικά σημεία όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα ώστε να εξαχθεί ένας μέσος όρος για το κάθε δοκίμιο. Οι μετρήσεις έγιναν με ηλεκτρονικό παχύμετρο και παρουσιάζονται στη συνέχεια.



Εικόνα 3.24: Θέσεις μέτρησης διαστάσεων

Πίνακας 3.5: Μετρήσεις των διαστάσεων των δοκιμίων

Δοκίμιο	t - thickness [mm]				b - breadth [mm]				L - length [mm]			
	t1	t2	t3	AVE	b1	b2	b3	AVE	L1	L2	L3	AVE
Intact 1	11.62	12.20	11.99	11.94	72.54	72.90	72.95	72.80	341.00	341.00	341.00	341.00
Intact 2	12.35	12.67	12.19	12.40	72.12	71.99	71.60	71.90	340.50	340.00	340.50	340.33
Intact 3	11.00	11.47	11.28	11.25	73.02	72.58	71.84	72.48	339.00	339.50	340.50	339.67
			AVE	11.86			AVE	72.39			AVE	340.33
A.80.1	11.52	11.67	11.17	11.45	72.86	72.61	72.30	72.59	340.50	340.50	340.50	340.50
A.80.2	11.61	11.77	11.50	11.63	72.11	72.31	73.25	72.56	340.00	339.50	340.00	339.83
A.80.3	11.95	12.16	11.90	12.00	73.08	73.36	73.34	73.26	340.50	341.00	340.50	340.67
			AVE	11.69			AVE	72.80			AVE	340.33

A.140.1	12.05	12.19	11.96	12.07	73.18	72.15	71.34	72.22	340.50	340.00	340.00	340.17
A.140.2	12.16	12.34	11.91	12.14	72.68	72.64	72.80	72.71	340.50	340.50	341.00	340.67
A.140.3	12.32	12.44	12.14	12.30	72.99	72.32	71.72	72.34	341.00	341.00	341.00	341.00
			AVE	12.17			AVE	72.42			AVE	340.61
A.200.1	12.05	12.33	12.11	12.16	73.26	73.51	73.50	73.42	340.00	340.00	340.50	340.17
A.200.2	11.85	12.17	12.02	12.01	73.37	73.46	73.24	73.36	341.00	341.00	341.00	341.00
A.200.3	11.80	11.96	11.93	11.90	73.73	73.98	73.96	73.89	340.00	340.00	340.50	340.17
			AVE	12.02			AVE	73.56			AVE	340.44
B.80.1	12.11	12.54	12.13	12.26	72.81	72.87	72.49	72.72	341.00	340.00	341.00	340.67
B.80.2	12.28	12.91	12.50	12.56	71.87	71.80	72.06	71.91	340.50	341.50	341.50	341.17
B.80.3	12.59	13.04	13.04	12.89	72.37	72.72	72.50	72.53	341.00	341.50	341.50	341.33
			AVE	12.57			AVE	72.39			AVE	341.06
B.140.1	13.18	13.23	12.75	13.05	73.61	73.25	73.07	73.31	341.00	341.50	341.50	341.33
B.140.2	12.66	13.01	13.12	12.93	72.67	72.39	72.01	72.36	341.00	341.00	341.00	341.00
B.140.3	12.68	12.96	12.93	12.86	72.53	72.46	72.36	72.45	341.00	341.00	341.00	341.00
			AVE	12.95			AVE	72.71			AVE	341.11
B.200.1	12.55	13.11	12.75	12.80	71.82	71.20	71.97	71.66	341.00	341.00	341.00	341.00
B.200.2	12.59	12.89	12.78	12.75	72.48	72.10	71.97	72.18	341.00	341.00	340.50	340.83
B.200.3	12.70	13.17	12.95	12.94	72.23	72.40	72.45	72.36	341.00	341.50	341.50	341.33
			AVE	12.83			AVE	72.07			AVE	341.06
C.80.1	12.60	12.41	11.97	12.33	73.12	73.24	73.27	73.21	341.00	341.00	340.50	340.83
C.80.2	12.20	12.14	11.75	12.03	73.32	73.86	73.54	73.57	341.00	341.50	341.00	341.17
C.80.3	11.44	11.61	11.50	11.52	73.01	72.21	71.91	72.38	341.00	341.00	341.00	341.00
			AVE	11.96			AVE	73.05			AVE	341.00
C.140.1	13.09	12.80	12.34	12.74	72.73	73.13	73.38	73.08	341.00	341.00	341.00	341.00
C.140.2	13.14	12.77	12.35	12.75	73.14	72.76	72.86	72.92	341.50	341.00	341.50	341.33
C.140.3	13.01	12.57	12.09	12.56	73.26	73.40	72.60	73.09	341.00	341.00	340.50	340.83
			AVE	12.68			AVE	73.03			AVE	341.06
C.200.1	12.27	12.60	12.94	12.60	72.83	73.20	73.43	73.15	341.50	341.50	342.00	341.67
C.200.2	12.29	12.56	12.84	12.56	72.94	73.25	73.25	73.15	340.00	340.50	340.50	340.33
C.200.3	11.98	12.35	12.57	12.30	73.00	72.62	72.94	72.85	340.50	341.00	341.00	340.83
			AVE	12.49			AVE	73.05			AVE	340.94

Πίνακας 3.6: Μέσος όρος των διαστάσεων

Specimen	t-thickness [mm]	b-breadth [mm]	L-length [mm]
INTACT	11.86	72.39	340.33
A.80	11.69	72.80	340.33
A.140	12.17	72.42	340.61
A.200	12.02	73.56	340.44
B.80	12.57	72.39	341.06
B.140	12.95	72.71	341.11
B.200	12.83	72.07	341.06
C.80	11.96	73.05	341.00
C.140	12.68	73.03	341.06
C.200	12.49	73.05	340.94

Οι διαστάσεις του αποχωρισμού όπως μετρήθηκαν ήταν

Πίνακας 3.7: Πραγματικά μήκη του αποχωρισμού

Specimen	Delamination Length	Specimen	Delamination Length	Specimen	Delamination Length
A.80.1	83	B.80.1	88	C.80.1	83
A.80.2	82	B.80.2	89	C.80.2	83
A.80.3	82	B.80.3	88	C.80.3	82
A.140.1	143	B.140.1	147	C.140.1	140
A.140.2	142	B.140.2	148	C.140.2	141
A.140.3	141	B.140.3	149	C.140.3	142
A.200.1	200	B.200.1	206	C.200.1	200
A.200.2	200	B.200.2	207	C.200.2	200
A.200.3	200	B.200.3	207	C.200.3	200

Βλέπουμε πως υπάρχουν κάποιες αποκλίσεις στις διαστάσεις, αυτό είναι λογικό καθώς η κοπή και η μορφοποίηση έγιναν με το χέρι. Είχαμε σχεδιάσει να έχουμε πάχος 10mm, τα τελικά δοκίμια έχουν πάχος περίπου 12mm. Για την επιλογή του αριθμού των στρώσεων είχαμε βασιστεί στο project MARSTRUCT το οποίο έλεγε πως ο μέσος όρος πάχους μιας στρώσης με τη μέθοδο vacuum bagging και ίνες γυαλιού επιφανειακού βάρους 600gr/m² είναι 0.5mm. Η απόκλιση στη δική μας περίπτωση μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι στο MARSTRUCT οι πλάκες είχαν 2 ή 4 στρώσεις, ενώ εμείς είχαμε 20 στρώσεις πράγμα που μπορεί να οδήγησε τη πλάκα να κρατήσει παραπάνω ρητίνη και να έχει αυξημένο πάχος. Σύμφωνα με τα δικά μας δοκίμια λοιπόν ο μέσος όρος πάχους κάθε στρώσης είναι 12mm/20 στρώσεις δηλαδή $t_{\text{στρώσης}} = 0.6\text{mm}$

Τέλος έπρεπε να υπολογιστεί η περιεκτικότητα σε ίνες κατά βάρος W_f σύμφωνα με τη μέθοδο A του προτύπου ISO 1172:1996 «Textile glass reinforced plastics – Prepregs, moulding compounds and laminates – Determination of the textile-glass and mineral-filler

content – Calcination methods». Κόψαμε από κάθε πλάκα δύο μικρά τετραγωνικά κομμάτια, τα οποία και κάψαμε στο φούρνο. Η διαδικασία είναι η εξής:

- Κόβουμε τα τμήματα προς καύση
- Ζυγίζουμε το δοχείο που θα βάλουμε το τμήμα της πλάκας μόνο του (m_1)
- Ζυγίζουμε το δοχείο μαζί με το τμήμα της πλάκας (m_2)
- Τοποθετήσαμε το δοχείο στο φούρνο για τουλάχιστον 1 ώρα στους 620°C
- Μετά τη καύση μετράμε ξανά το βάρος του δοχείου (m_3)
- Από τον τύπο $W_f = (m_3 - m_1) / (m_2 - m_1) * 100$



Εικόνα 3.25: Δοχείο και τμήμα της πλάκας έτοιμα για καύση

Πλάκα A

Δοχείο 1

$m_1 = 77.413 \text{ gr}$

$m_2 = 86.813 \text{ gr}$

$m_3 = 82.784 \text{ gr} \implies W_f = 57.14\%$, περιεκτικότητα σε ίνες κατά βάρος

Δοχείο A-A

$m_1 = 41,627 \text{ gr}$

$m_2 = 51,085 \text{ gr}$

$m_3 = 47,027 \text{ gr} \implies W_f = 57.09\%$, περιεκτικότητα σε ίνες κατά βάρος

Η περιεκτικότητα βγαίνει σχεδόν ίδια, ο μέσος όρος είναι $W_f = 57.12\%$

Πλάκα B

Δοχείο A-A

$m_1 = 41.599 \text{ gr}$

$m_2 = 49.220 \text{ gr}$

$m_3 = 46.286 \text{ gr} \implies W_f = 61.501\%$, περιεκτικότητα σε ίνες κατά βάρος

Δοχείο 03

$m_1 = 76.892 \text{ gr}$

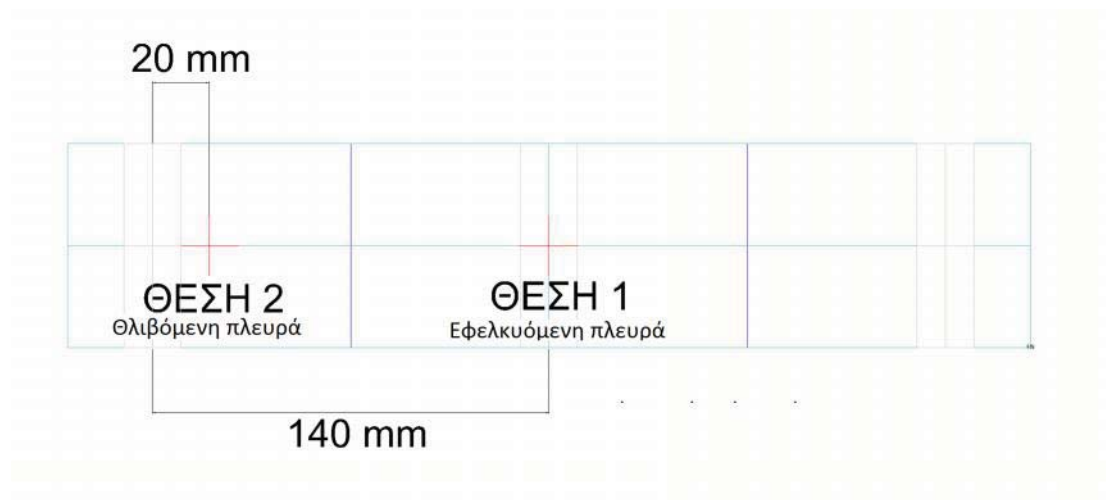
$m_2 = 86.096 \text{ gr}$

$m_3 = 82.516 \text{ gr} \implies W_f = 61.103\%$, περιεκτικότητα σε ίνες κατά βάρος

Η περιεκτικότητα βγαίνει πολύ κοντά, ο μέσος όρος είναι $W_f = 61.30\%$

3.5 Παράμετροι και διαδικασία πειραματικών δοκιμών

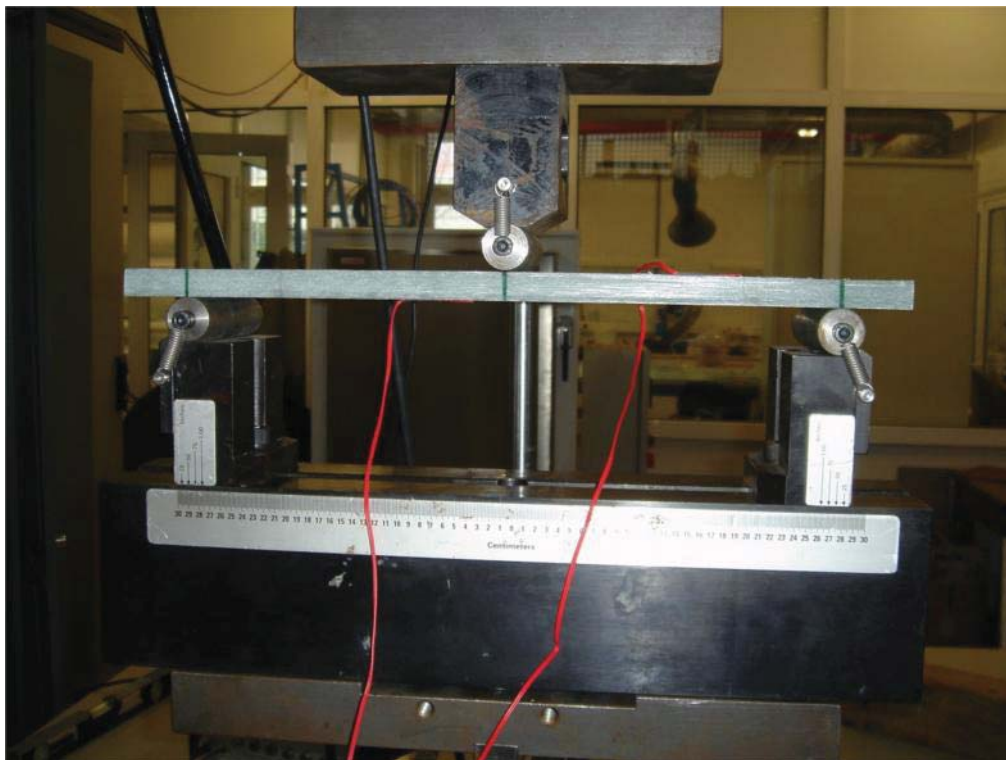
Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε πειράματα κάμψης τριών σημείων στην υδραυλική μηχανή δοκιμών MTS του εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών. Κατά τη διαδικασία των πειραμάτων μετρήθηκαν οι παραμορφώσεις των επιμηκυνσιομέτρων (strain gauges) τα οποία γενικά είχαν τοποθετηθεί σε 2 σημεία πάνω στη δοκό, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.26, η μετατόπιση και η δύναμη που ασκήθηκαν από τη μηχανή. Για τη μέτρηση της μετατόπισης και την επιβεβαίωση των αριθμών που δίνει η μηχανή τοποθετήθηκε και ένα LVDT.



Εικόνα 3.26: Θέσεις μέτρησης των παραμορφώσεων

Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν στη μηχανή και με προσοχή ευθυγραμμίστηκαν με τα roller της μηχανής. Στις περισσότερες δοκιμές τοποθετήθηκε βιντεοκάμερα για τη καταγραφή της συμπεριφοράς των δοκιμών και του τρόπου αστοχίας. Η μηχανή επέβαλλε μετατόπιση στο κάτω μέρος της μηχανής. Ένας ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας είναι ο ρυθμός επιβολής της μετατόπισης αυτής. Ο ρυθμός επιβολής της μετατόπισης δε μπορεί να είναι πολύ χαμηλός γιατί τα δοκίμια ήταν πολλά (30) και ο χρόνος μας περιορισμένος αλλά βέβαια πρέπει να είναι τέτοιος που να μας επιτρέπει να αναλύσουμε ικανοποιητικά το φαινόμενο. Για το πρώτο δοκίμιο το οποίο εξετάσαμε, το οποίο ήταν το A_200_1, ο ρυθμός που επιβλήθηκε ήταν $\text{rate} = 2\text{mm} / 1\text{ minute}$. Επειδή με αυτό το ρυθμό ο χρόνος ολοκλήρωσης κάθε δοκιμής ήταν σχετικά μεγάλος αποφασίστηκε οι επόμενες δοκιμές να διεξαχθούν με ρυθμό $\text{rate} = 3\text{mm} / 1\text{ minute}$. Η συχνότητα δειγματοληψίας ήταν ίση με 10Hz.

Στην εικόνα 3.27 φαίνεται η διάταξη των δοκιμών καθώς επίσης και των επιμηκυνσιομέτρων (strain gauges).



Εικόνα 3.27: Πειραματική διάταξη

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

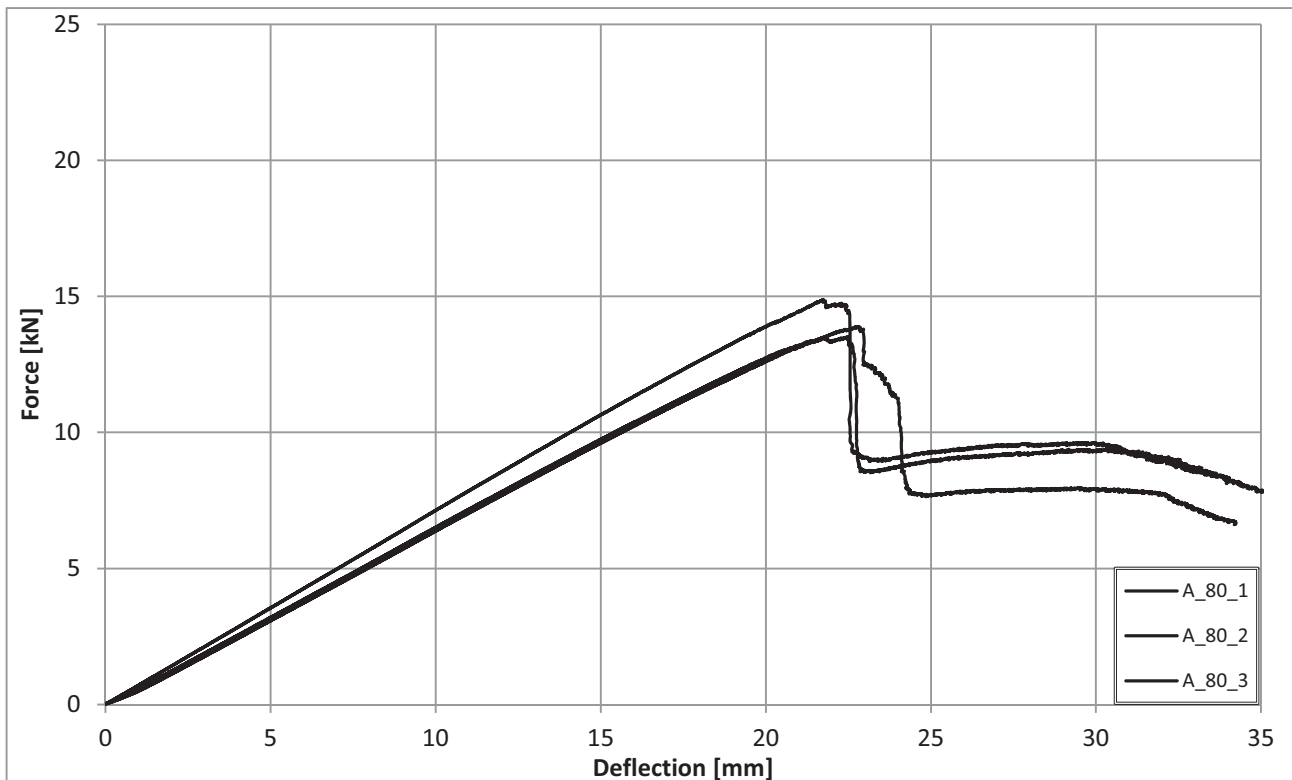
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

4.1 Αποτελέσματα Πειραμάτων

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών. Στις παραγράφους 4.1.1 έως 4.1.10 θα παρουσιαστούν τα διαγράμματα δύναμης – βέλους κάμψης ($F-\delta$) και παραμόρφωσης – βέλους κάμψης ($\epsilon-\delta$) στη θέση 1 και στη θέση 2 όπως ορίζονται στην εικόνα 3.26, για τις τριάδες της κάθε “περίπτωσης”. Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν συγκριτικά διαγράμματα και πίνακες μεταξύ των διαφόρων περιπτώσεων.

4.1.1 Σειρά Δοκιμών A_80

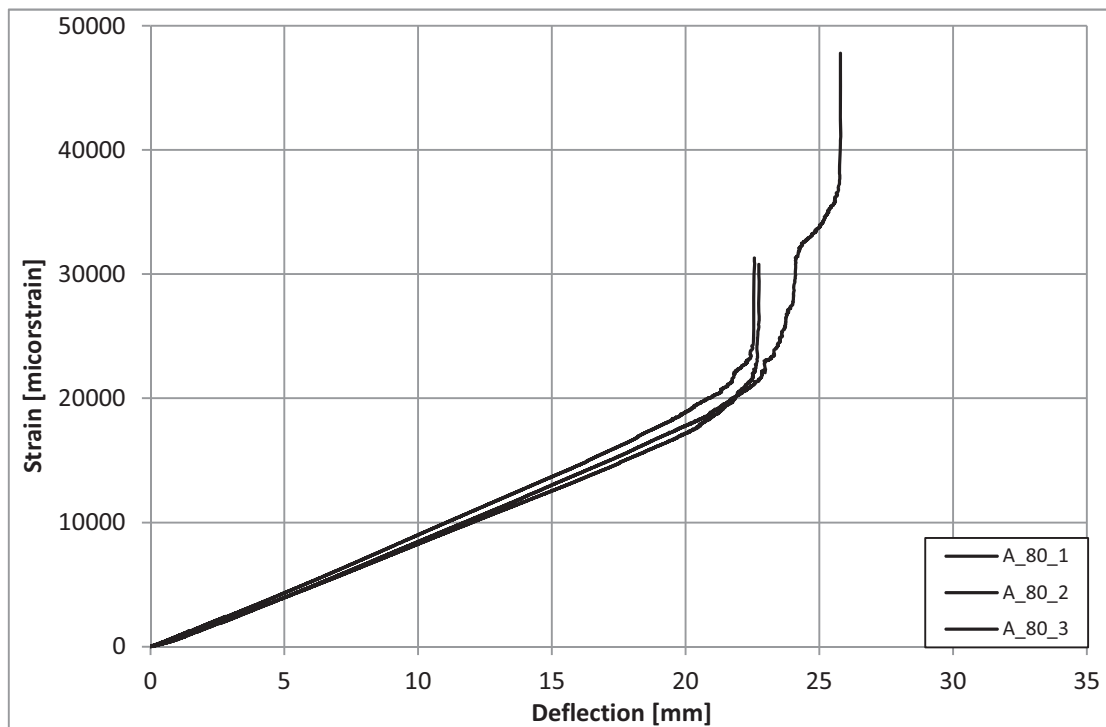
Τα δοκίμια της σειράς A_80 έχουν μήκος αποχωρισμού των στρώσεων κατά μέσο όρο 82mm και η θέση του κατά το πάχος είναι στο 25% από την εφελκυόμενη πλευρά.



Εικόνα 4.1: Διάγραμμα Δύναμης – Βέλους Κάμψης για τα δοκίμια A_80

Παρατηρήσεις

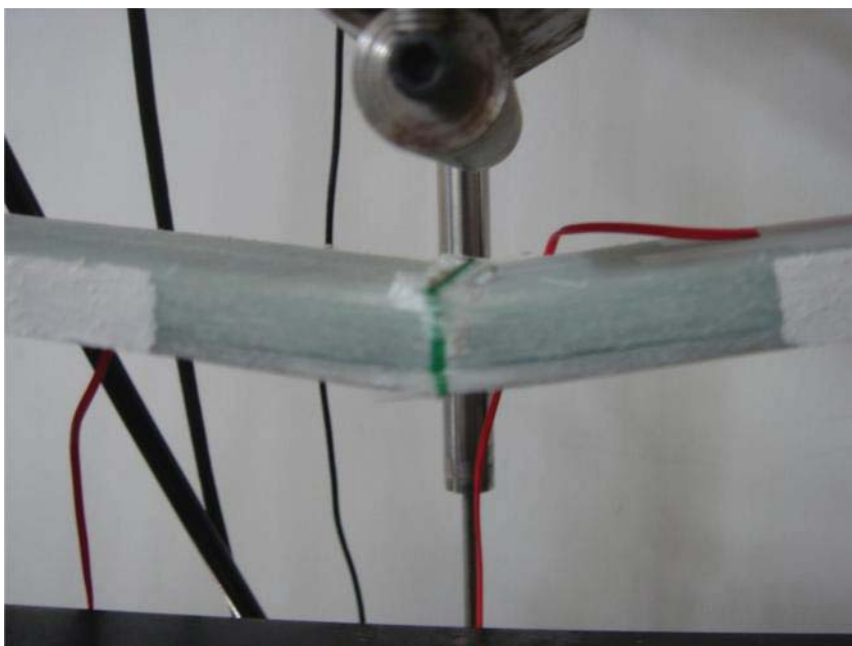
- Πολύ καλή επαναληψιμότητα για τα μοντέλα A_80_1 και A_80_2 και ως προς την καμπτική ακαμψία και το μέγιστο φορτίο
- Η σχέση δύναμης – βέλους κάμψης είναι γραμμική μέχρι τη στιγμή όπου εμφανίζεται αστοχία και το φορτίο πέφτει απότομα



Εικόνα 4.2: Διάγραμμα Παραμόρφωσης – Βέλους Κάμψης στη θέση 1 για τα δοκίμια A_80

Παρατηρήσεις

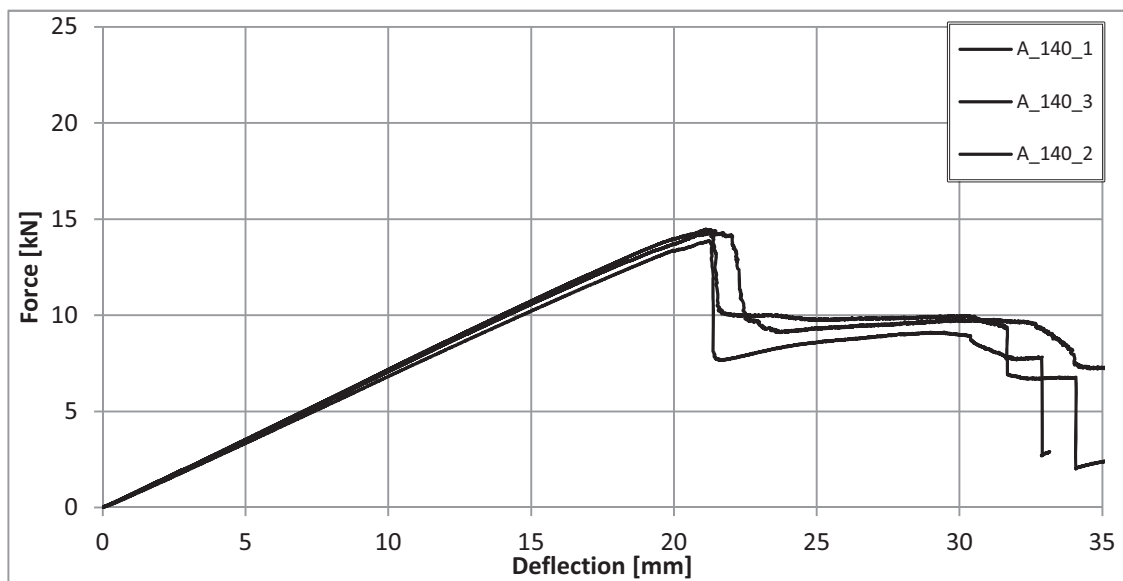
- Πολύ καλή επαναληψιμότητα
- Γραμμική συμπεριφορά μέχρι τα 21mm
- Μετά τα 21mm παρατηρείται απότομη αύξηση των παραμορφώσεων. Αυτό είναι στοιχείο το οποίο επιβεβαιώνει την τοπική αστοχία λόγω εφελκυσμού, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά και στην εικόνα 4.3



Εικόνα 4.3 : Τοπική αστοχία του δοκίμιου A_80_1

4.1.2 Σειρά Δοκιμών A_140

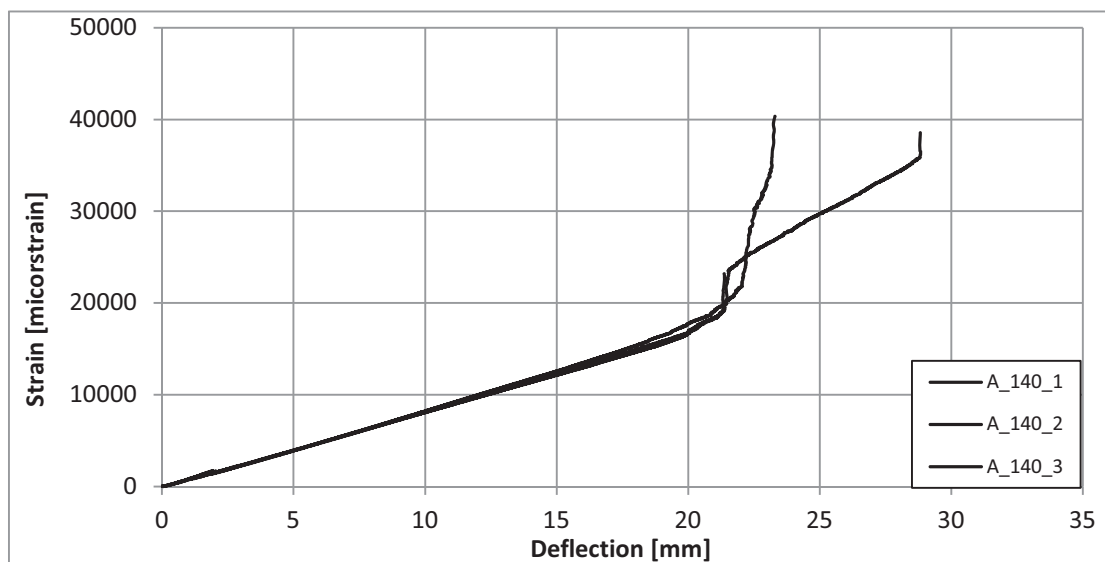
Τα δοκίμια της σειράς A_140 έχουν μήκος αποχωρισμού των στρώσεων κατά μέσο όρο 142mm και η θέση του κατά το πάχος είναι στο 25% από την εφελκυσμένη πλευρά.



Εικόνα 4.4: Διάγραμμα Δύναμης – Βέλους Κάμψης για τα δοκίμια A_140

Παρατηρήσεις

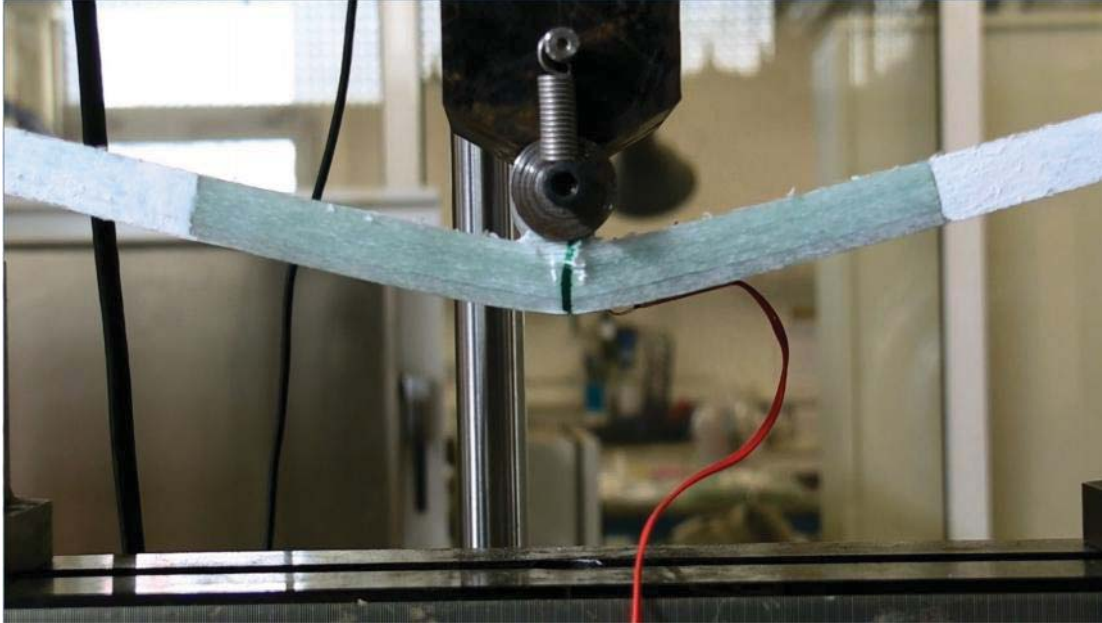
- Εξαιρετική επαναληψιμότητα και όσον αφορά την μέγιστη δύναμη και την ακαμψία
- Η σχέση δύναμης – βέλους κάμψης είναι γραμμική μέχρι τη στιγμή όπου εμφανίζεται αστοχία και το φορτίο πέφτει απότομα



Εικόνα 4.5: Διάγραμμα Παραμόρφωσης – Βέλους Κάμψης στη θέση 1 για τα δοκίμια A_140

Παρατηρήσεις

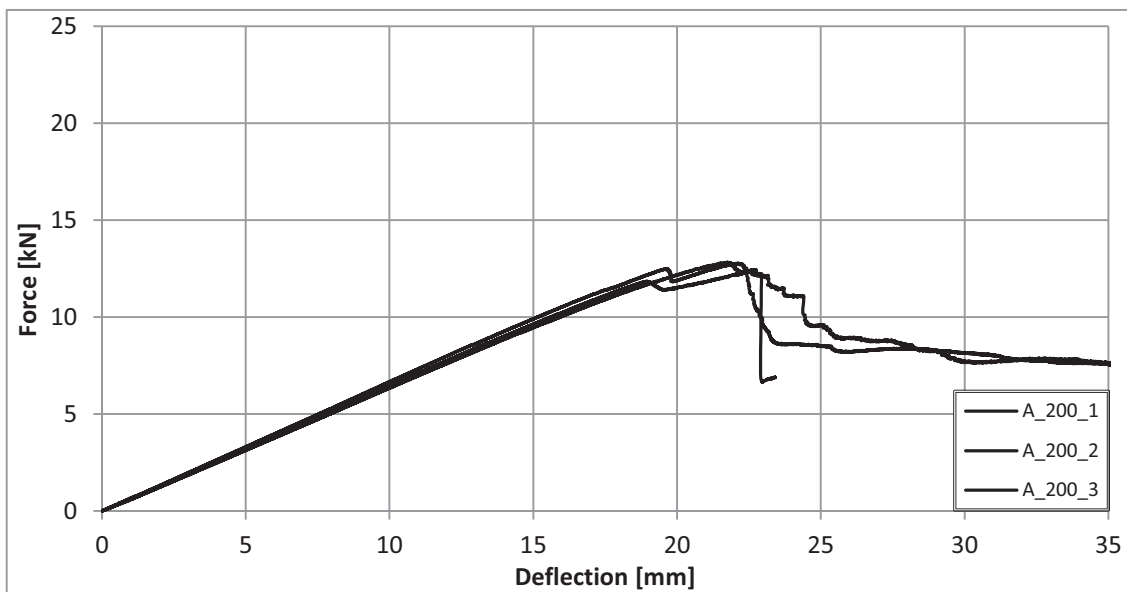
- Οι παρατηρήσεις για τις παραμορφώσεις των δοκιμών της σειράς A_140 είναι αντίστοιχες με αυτές των δοκιμών της σειράς A_80.



Εικόνα 4.6: Τοπική αστοχία του δοκιμίου A_140_1

4.1.3 Σειρά Δοκιμών A_200

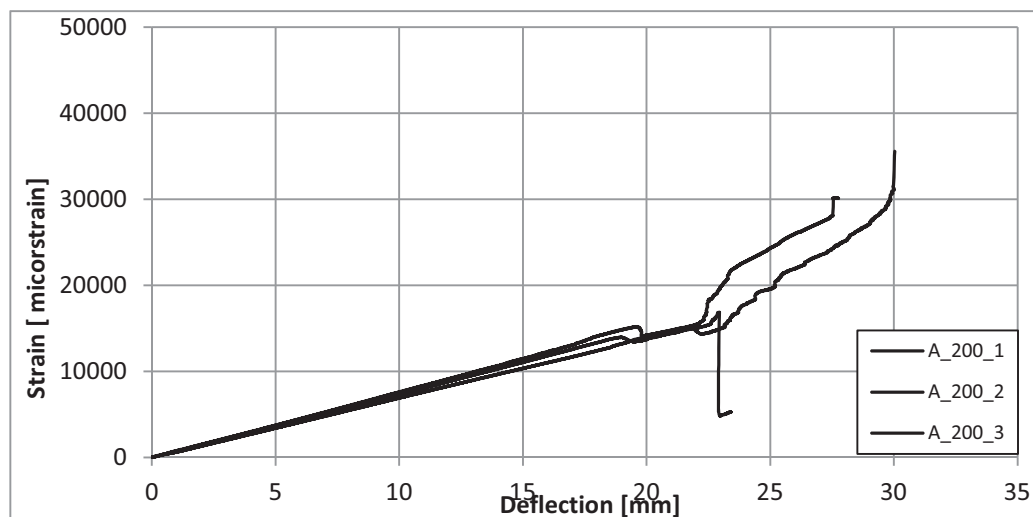
Τα δοκίμια της σειράς A_200 έχουν μήκος αποχωρισμού των στρώσεων κατά μέσο όρο 200mm και η θέση του κατά το πάχος είναι στο 25% από την εφελκόμενη πλευρά.



Εικόνα 4.7: Διάγραμμα Δύναμης – Βέλους Κάμψης για τα δοκίμια A_200

Παρατηρήσεις

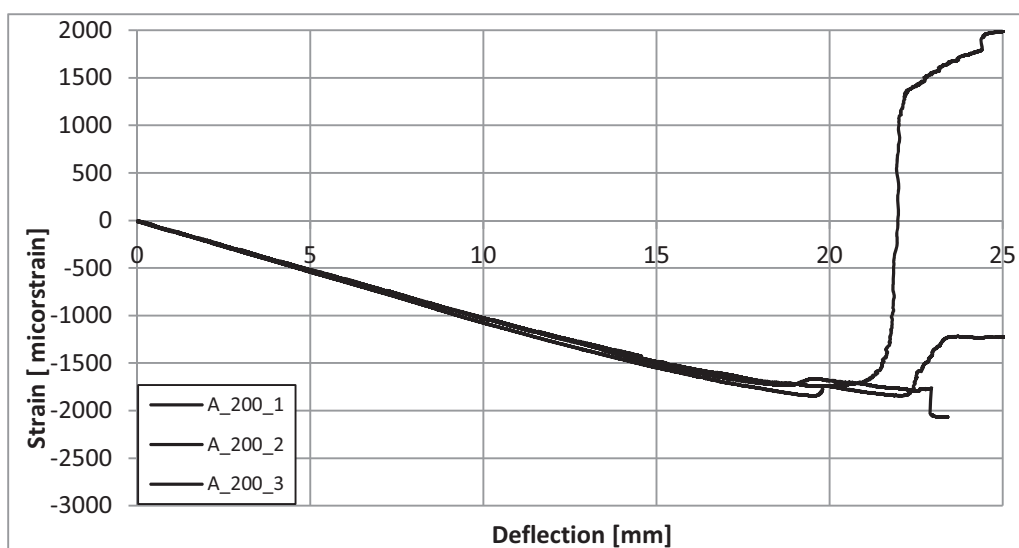
- Ισχύουν τα ίδια με τη σειρά A_140



Εικόνα 4.8: Διάγραμμα Παραμόρφωσης – Βέλους Κάμψης στη θέση 1 για τα δοκίμια A_200

Παρατηρήσεις

- Πολύ καλή επαναληψιμότητα
- Μέχρι να εμφανιστεί διάδοση του αποχωρισμού ή κάποια αστοχία η σχέση των παραμορφώσεων και του βέλους κάμψης είναι γραμμική
- Λίγο πριν τα 20mm παρατηρείται μια μείωση των παραμορφώσεων. Αυτό συμβαίνει γιατί είτε τα δοκίμια αστοχούν τοπικά λόγω θλίψης ή διαδίδεται ο αποχωρισμός.
- Φαίνεται πως το δοκίμιο A_200_2 αστοχεί λόγω διάδοσης του αποχωρισμού αντίθετα από τα δοκίμια A_200_1 και A_200_3.



Εικόνα 4.9: Διάγραμμα Παραμόρφωσης – Βέλους Κάμψης στη θέση 2 για τα δοκίμια A_200

Παρατηρήσεις

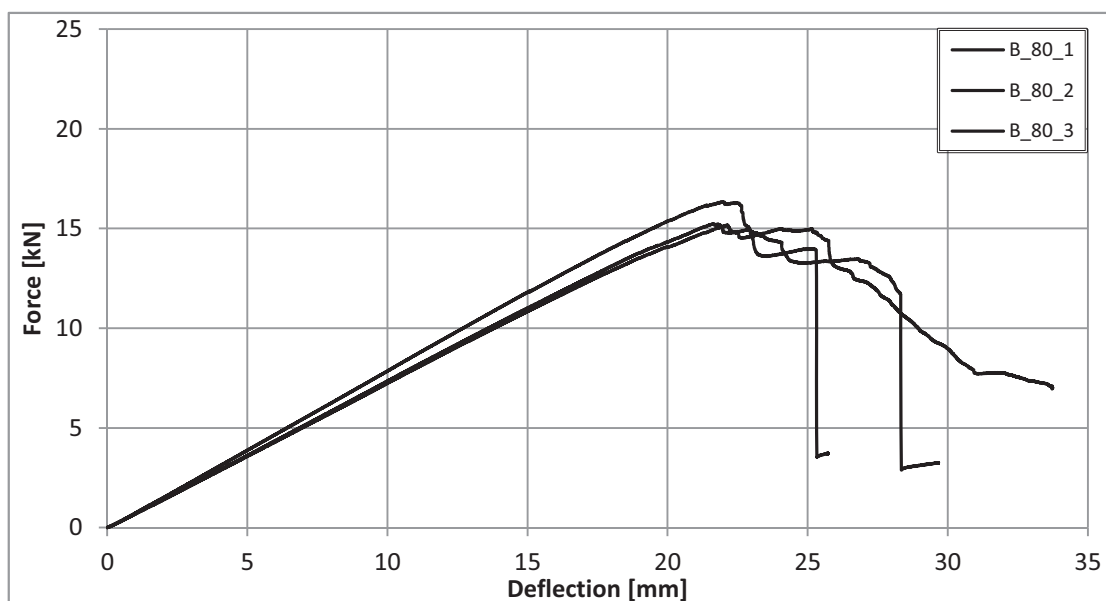
- Πολύ καλή επαναληψιμότητα
- Μέχρι να εμφανιστεί διάδοση του αποχωρισμού ή κάποια αστοχία η σχέση των παραμορφώσεων και του βέλους κάμψης είναι γραμμική
- Παρατηρούμε πως στα δοκίμια A_200_1 και A_200_3 από θλίψη περνάμε σε εφελκυσμό. Το φαινόμενο αυτό το έχει προβλέψει και το μοντέλο στους αρχικού υπολογισμούς (Κεφάλαιο 3, Εικόνα 3.2)



Εικόνα 4.10: Αστοχία με διάδοση του αποχωρισμού, δοκίμιο A_200_2

4.1.4 Σειρά Δοκιμών B_80

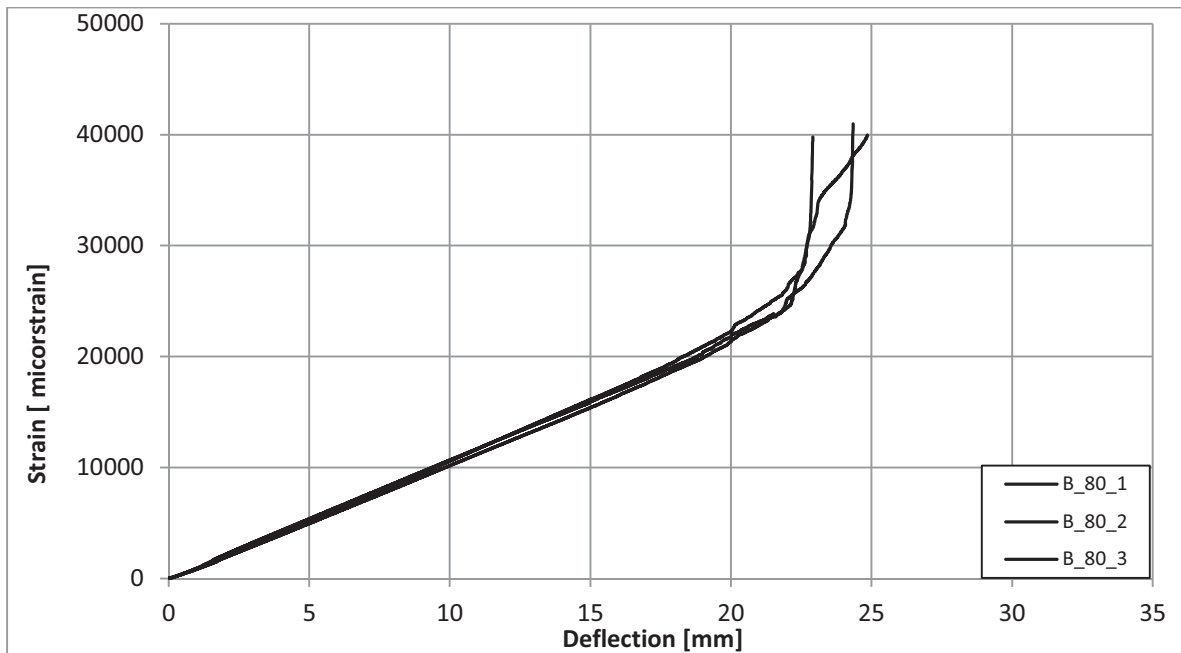
Τα δοκίμια της σειράς B_80 έχουν μήκος αποχωρισμού των στρώσεων κατά μέσο όρο 88mm και η θέση του κατά το πάχος είναι στο μέσο του πάχους δηλαδή στο 50% από την εφελκυσμένη πλευρά.



Εικόνα 4.11: Διάγραμμα Δύναμης – Βέλους Κάμψης για τα δοκίμια B_80

Παρατηρήσεις

- Ισχύουν τα ίδια με τη σειρά δοκιμών A_80



Εικόνα 4.12: Διάγραμμα Παραμόρφωσης – Βέλους Κάμψης στη θέση 1 για τα δοκίμια B_80

Παρατηρήσεις

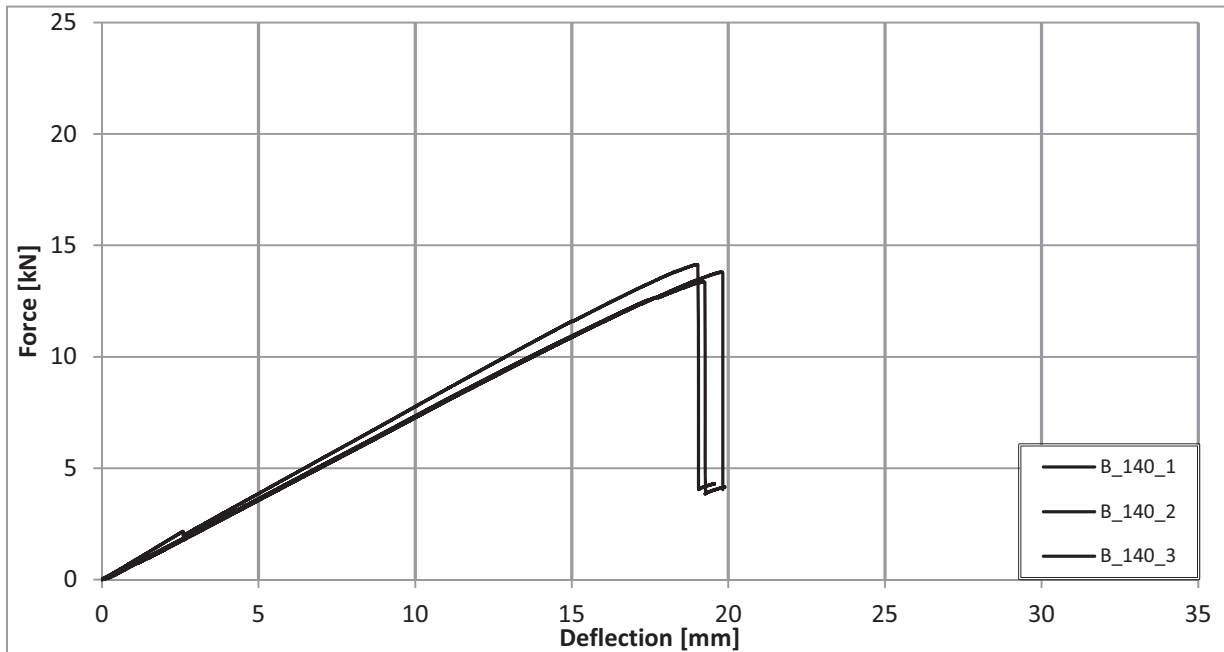
- Για τις παραμορφώσεις ισχύουν τα ίδια με τη σειρά δοκιμών A_80



Εικόνα 4.13 : Τοπική αστοχία του δοκιμίου B_80_1

4.1.5 Σειρά Δοκιμών B_140

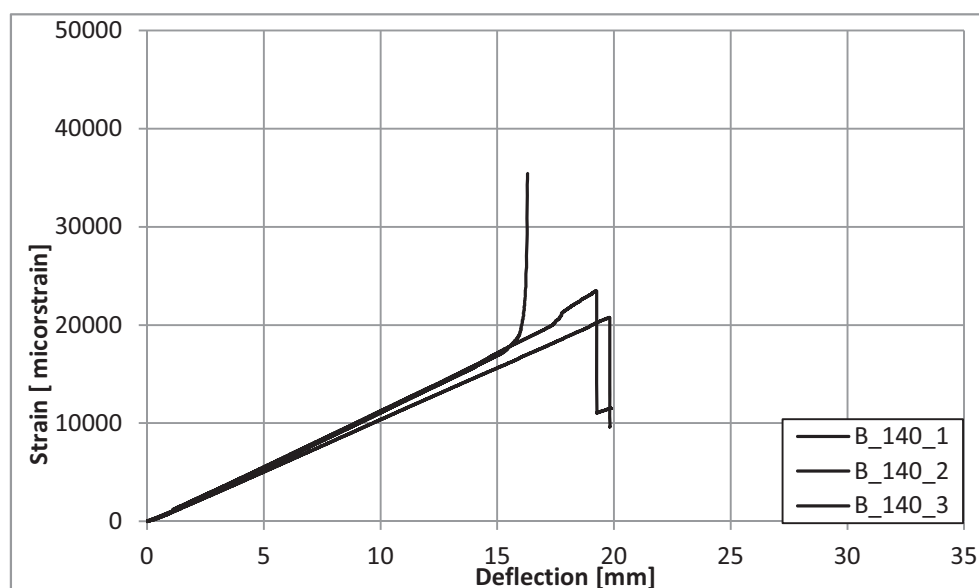
Τα δοκίμια της σειράς B_140 έχουν μήκος αποχωρισμού των στρώσεων κατά μέσο όρο 148mm και η θέση του κατά το πάχος είναι στο μέσο του πάχους δηλαδή στο 50% από την εφελκυσμένη πλευρά.



Εικόνα 4.14: Διάγραμμα Δύναμης – Βέλους Κάμψης για τα δοκίμια B_140

Παρατηρήσεις

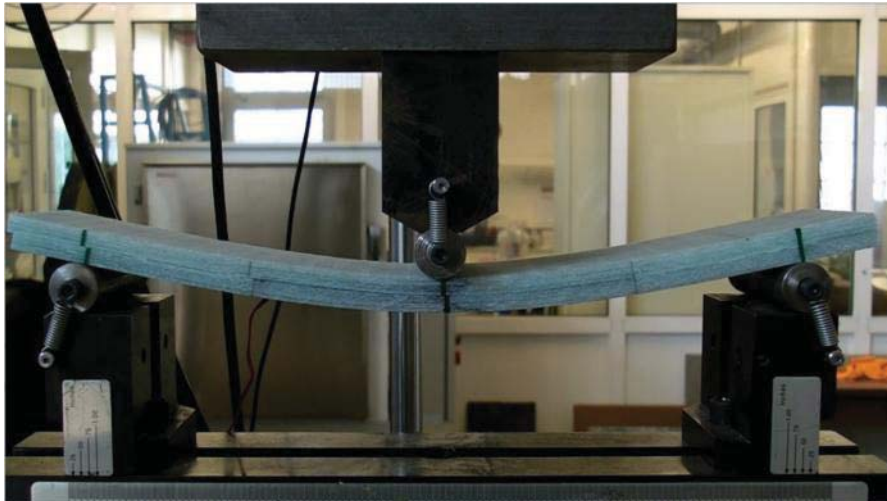
- Ισχύουν τα ίδια με τη σειρά δοκιμών B_80



Εικόνα 4.15: Διάγραμμα Παραμόρφωσης – Βέλους Κάμψης στη θέση 1 για τα δοκίμια B_140

Παρατηρήσεις

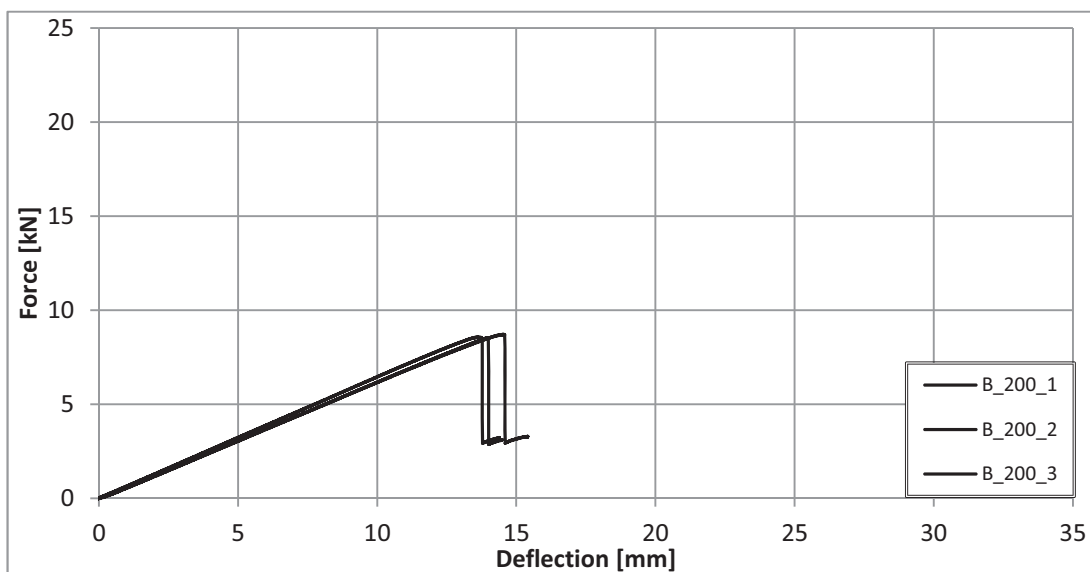
- Παρατηρείται καλή επαναληψιμότητα
- Το δοκίμιο B_140_1 παρουσιάζει διαφορετική μορφή σε σχέση με τα άλλα δοκίμια της ίδιας σειράς. Μετά τα 15mm οι παραμορφώσεις μεγαλώνουν απότομα (ένδειξη τοπικής αστοχίας)
- Στα άλλα δοκίμια της σειράς παρατηρείται πως για βέλος κάμψης 19mm οι παραμορφώσεις πέφτουν απότομα. Αυτό συμβαίνει λόγω της διάδοσης του αποχωρισμού. Η διάδοση του αποχωρισμού φαίνεται χαρακτηριστικά στην εικόνα 4.16



Εικόνα 4.16 : Αστοχία με διάδοση του αποχωρισμού, δοκίμιο B_140_1

4.1.6 Σειρά Δοκιμών B_200

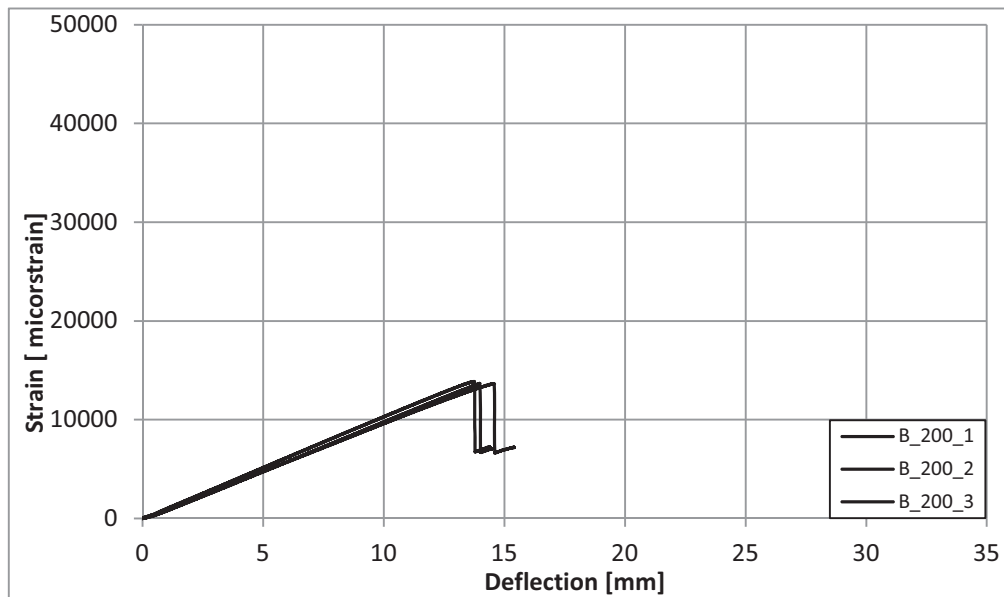
Τα δοκίμια της σειράς B_200 έχουν μήκος αποχωρισμού των στρώσεων κατά μέσο όρο 207mm και η θέση του κατά το πάχος είναι στο μέσο του πάχους δηλαδή στο 50% από την εφελκυσόμενη πλευρά.



Εικόνα 4.17: Διάγραμμα Δύναμης – Βέλους Κάμψης για τα δοκίμια B_200

Παρατηρήσεις

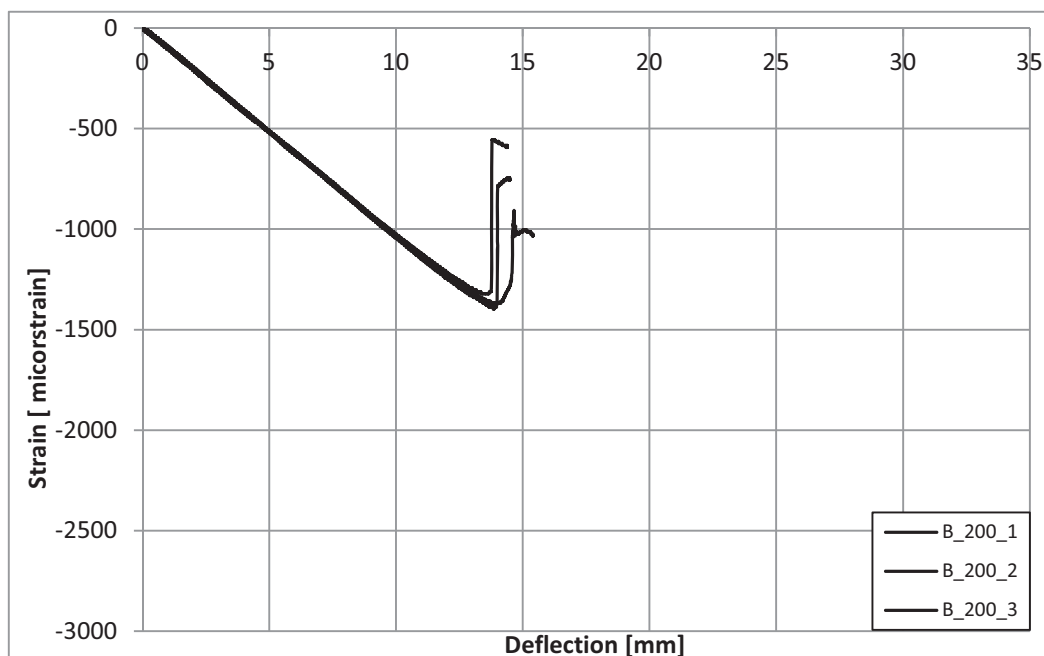
- Ισχύουν τα ίδια με τη σειρά δοκιμών A_140



Εικόνα 4.18: Διάγραμμα Παραμόρφωσης – Βέλους Κάμψης στη θέση 1 για τα δοκίμια B_200

Παρατηρήσεις

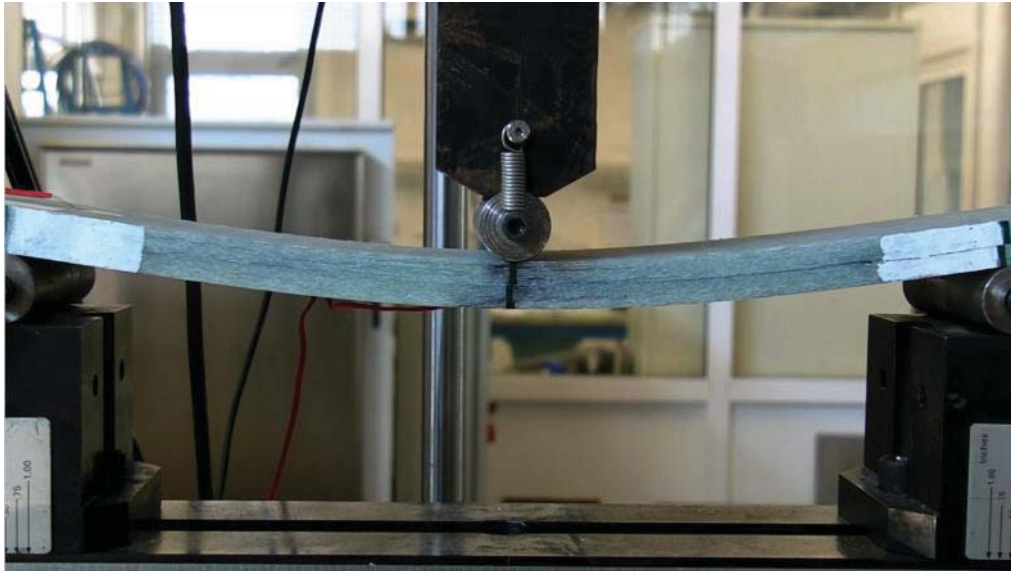
- Ισχύουν τα ίδια με τη σειρά δοκιμών A_200



Εικόνα 4.19: Διάγραμμα Παραμόρφωσης – Βέλους Κάμψης στη θέση 2 για τα δοκίμια B_200

Παρατηρήσεις

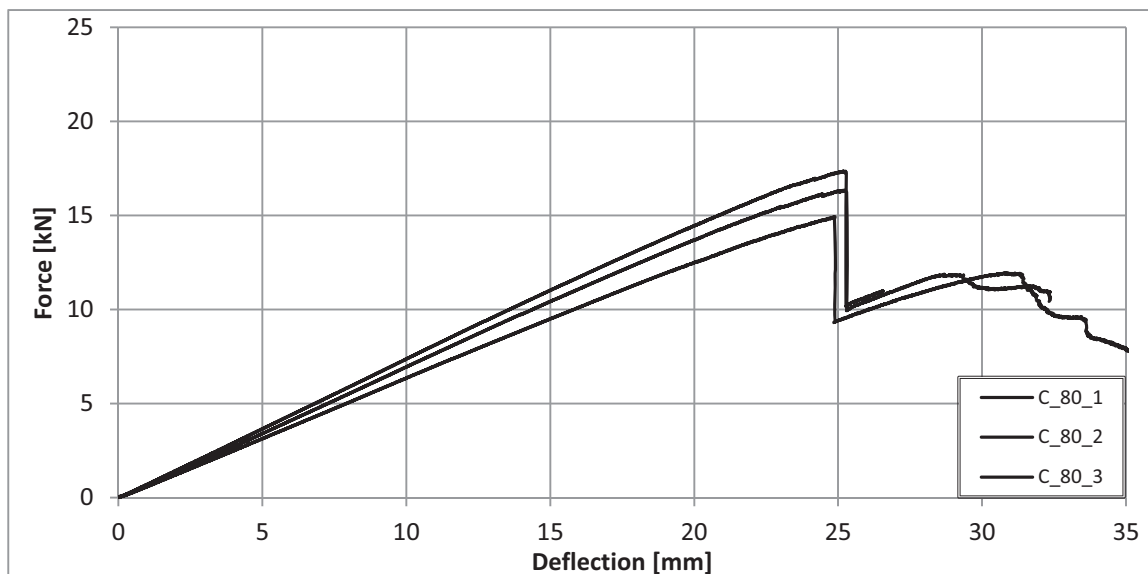
- Ισχύουν τα ίδια με τη σειρά δοκιμών B_80
- Όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.20, στην περίπτωση αυτή δεν παρατηρείται η μεταβολή από θλιπτικές παραμορφώσεις σε εφελκυστικές παραμορφώσεις καθώς ο αποχωρισμός διαδόθηκε προς την αντίθετη κατεύθυνση από εκείνη που είχε τοποθετηθεί το «strain gauge».



Εικόνα 4.20: Αστοχία με διάδοση του αποχωρισμού, δοκίμιο B_200_1

4.1.7 Σειρά Δοκιμών C_80

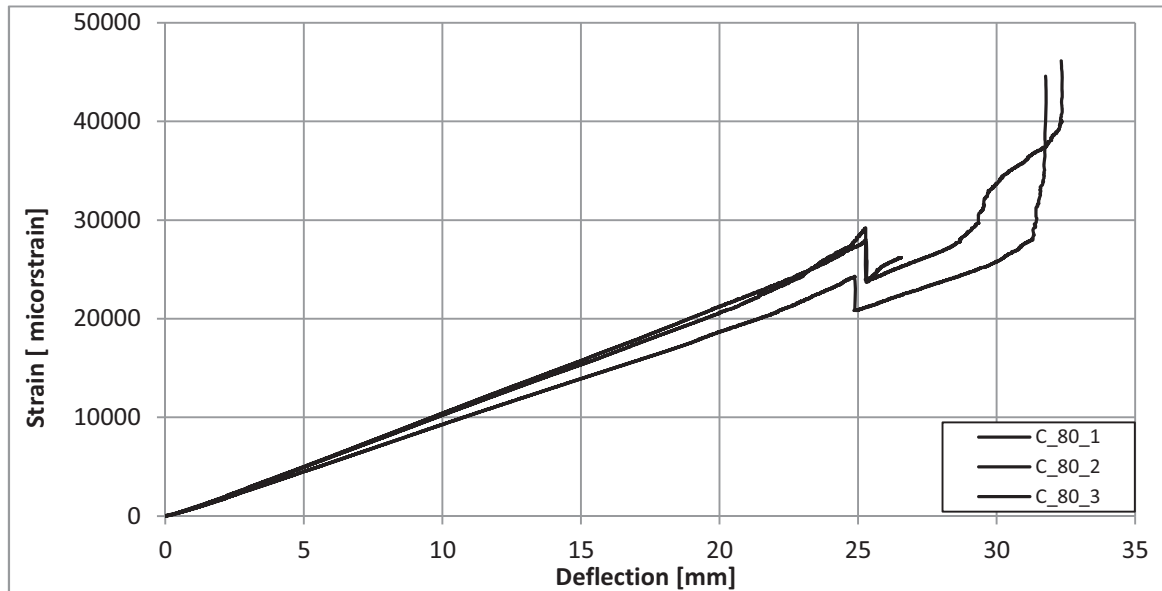
Τα δοκίμια της σειράς C_80 έχουν μήκος αποχωρισμού των στρώσεων κατά μέσο όρο 83mm και η θέση του κατά το πάχος είναι στο 75% από την εφελκυσόμενη πλευρά.



Εικόνα 4.21: Διάγραμμα Δύναμης – Βέλους Κάμψης για τα δοκίμια C_80

Παρατηρήσεις

- Η σχέση δύναμης – βέλους κάμψης είναι γραμμικής μέχρι τη στιγμή όπου εμφανίζεται αστοχία και το φορτίο πέφτει απότομα
- Όχι ιδιαίτερα καλή επαναληψιμότητα



Εικόνα 4.22: Διάγραμμα Παραμόρφωσης – Βέλους Κάμψης στη θέση 1 για τα δοκίμια C_80

Παρατηρήσεις

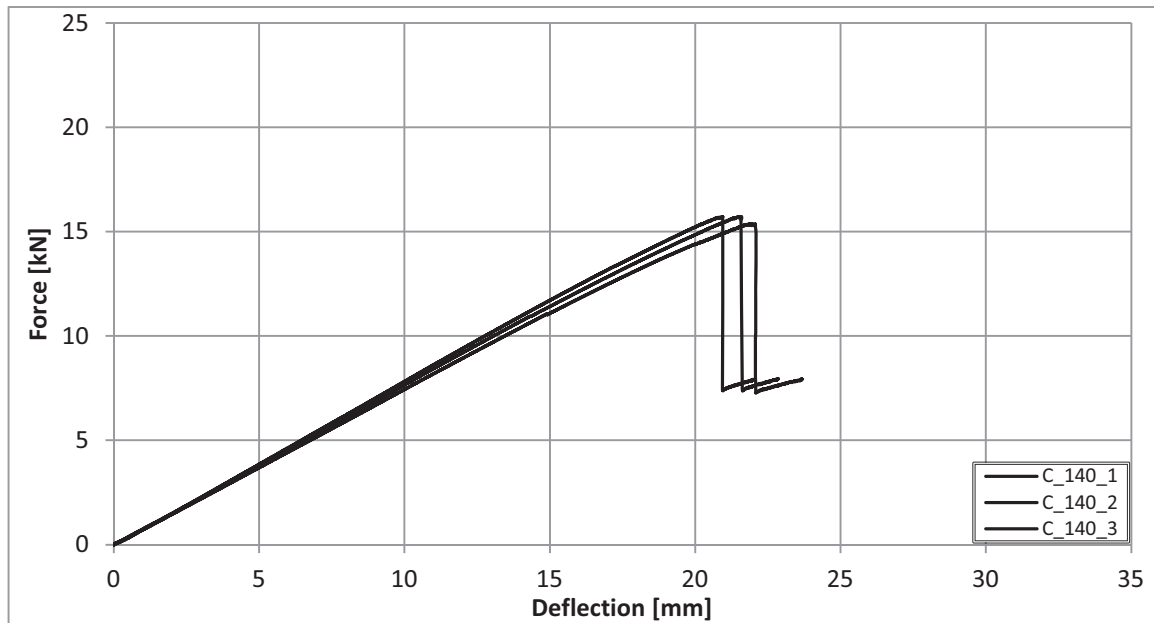
- Καλή επαναληψιμότητα.
- Στα 25mm παρατηρείται πτώση της παραμόρφωσης λόγω τοπικής αστοχίας σε θλίψη (εικόνα 4.23). Ύστερα, όσο μεγαλώνει το βέλος κάμψης αστοχεί και η εφελκυστική πλευρά (αύξηση των παραμορφώσεων)



Εικόνα 4.23: Τοπική αστοχία του δοκίμιο C_80_1

4.1.8 Σειρά Δοκιμών C_140

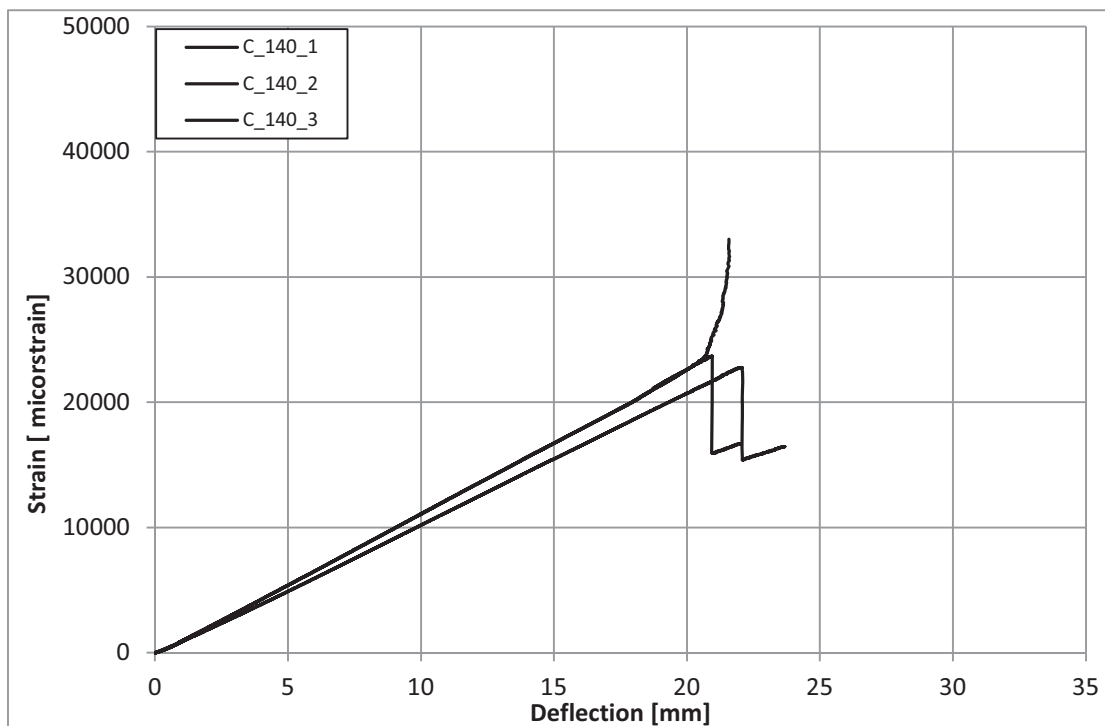
Τα δοκίμια της σειράς C_140 έχουν μήκος αποχωρισμού των στρώσεων κατά μέσο όρο 141mm και η θέση του κατά το πάχος είναι στο 75% από την εφελκυσμένη πλευρά.



Εικόνα 4.24: Διάγραμμα Δύναμης – Βέλους Κάμψης για τα δοκίμια C_140

Παρατηρήσεις

- Ισχύουν τα ίδια με τη σειρά δοκιμών A_140



Εικόνα 4.25: Διάγραμμα Παραμόρφωσης – Βέλους Κάμψης στη θέση 1 για τα δοκίμια C_140

Παρατηρήσεις

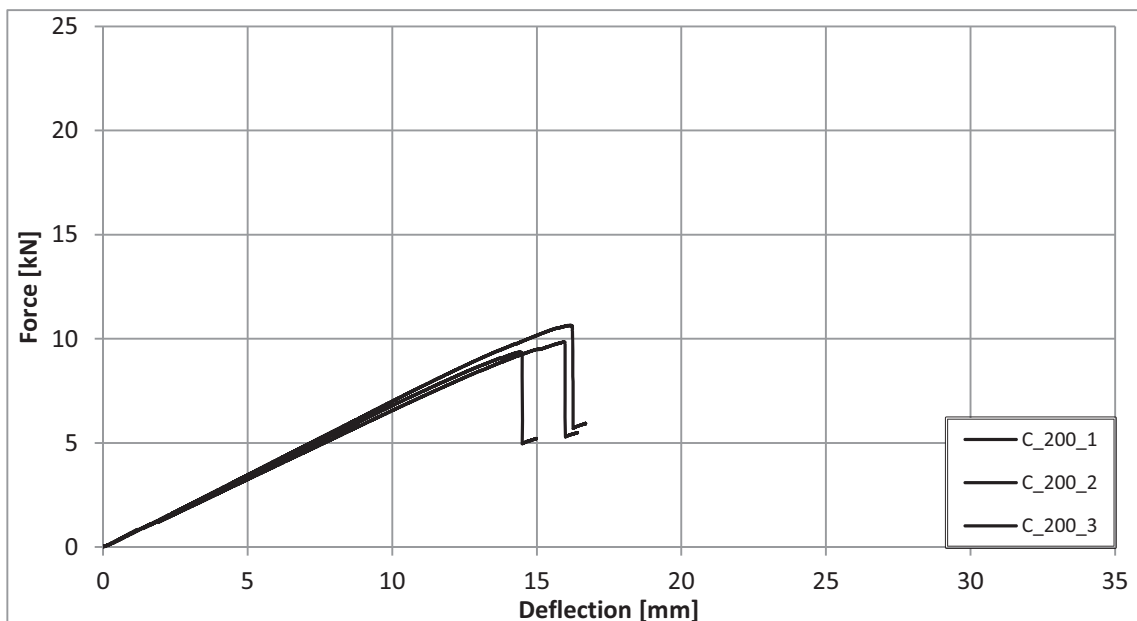
- Καλή επαναληψιμότητα.
- Στα 21mm παρατηρείται πτώση της παραμόρφωσης λόγω διάδοσης του αποχωρισμού. Το δοκίμιο C_140_2 παρουσιάζει διαφορετική μορφή, οι παραμορφώσεις αυξάνουν απότομα, πράγμα που σημαίνει ότι ο τρόπος αστοχίας του δοκιμίου αυτού τοπικός λόγω εφελκυσμού.



Εικόνα 4.26 : Αστοχία με διάδοση του αποχωρισμού, δοκίμιο C_140_1

4.1.9 Σειρά Δοκιμών C_200

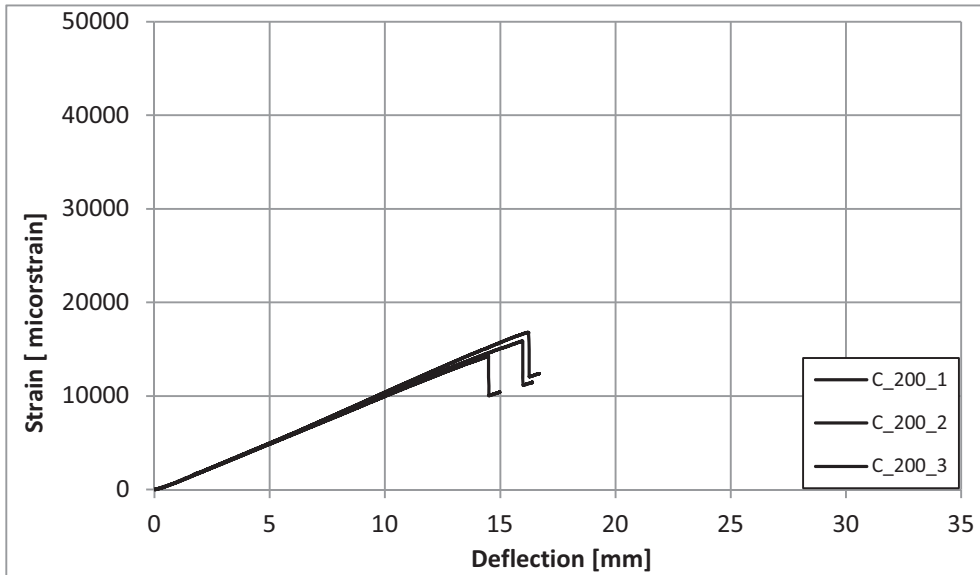
Τα δοκίμια της σειράς C_200 έχουν μήκος αποχωρισμού των στρώσεων κατά μέσο όρο 200mm και η θέση του κατά το πάχος είναι στο 75% από την εφελκυσόμενη πλευρά. Και στα τρία δοκίμια της σειράς είχαμε αστοχία λόγω διάδοσης του αποχωρισμού.



Εικόνα 4.27: Διάγραμμα Δύναμης – Βέλους Κάμψης για τα δοκίμια C_200

Παρατηρήσεις

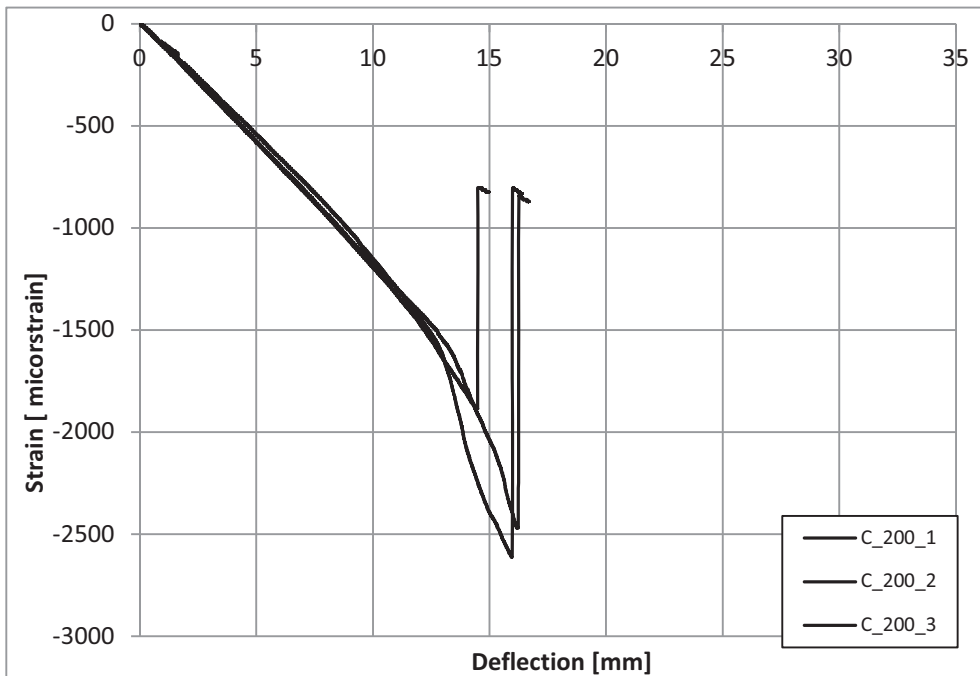
- Καλή επαναληψιμότητα όσον αφορά την ακαμψία, αλλά ύπαρξη διαφορών όσον αφορά την μέγιστη δύναμη.
- Η σχέση δύναμης – βέλους κάμψης μέχρι να εμφανιστεί αστοχία είναι γραμμική.



Εικόνα 4.28: Διάγραμμα Παραμόρφωσης – Βέλους Κάμψης στη θέση 1 για τα δοκίμια C_200

Παρατηρήσεις

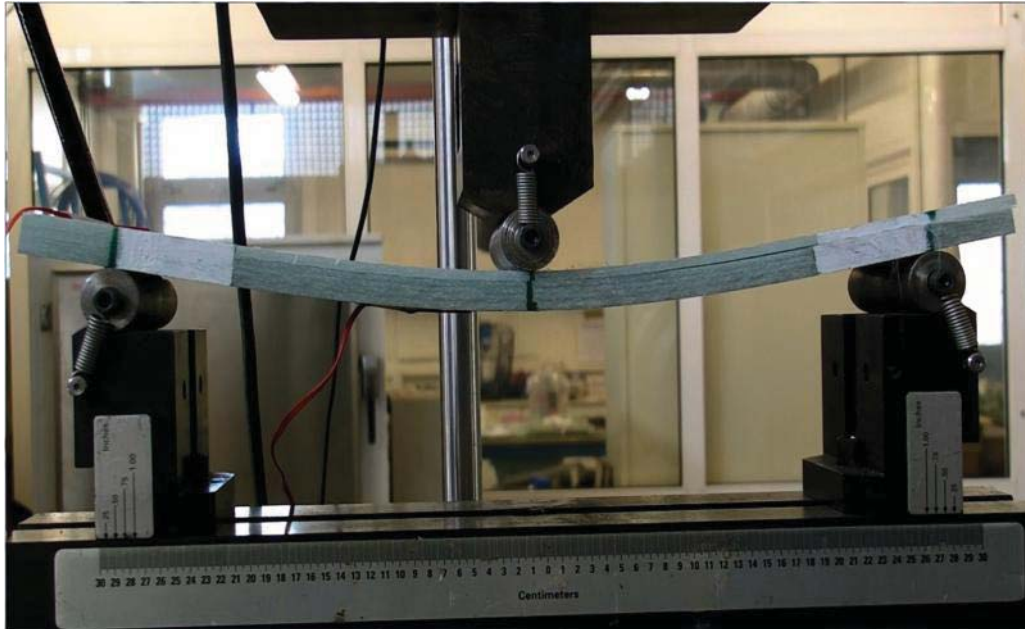
- Ισχύουν τα ίδια με τη σειρά δοκιμών B_200



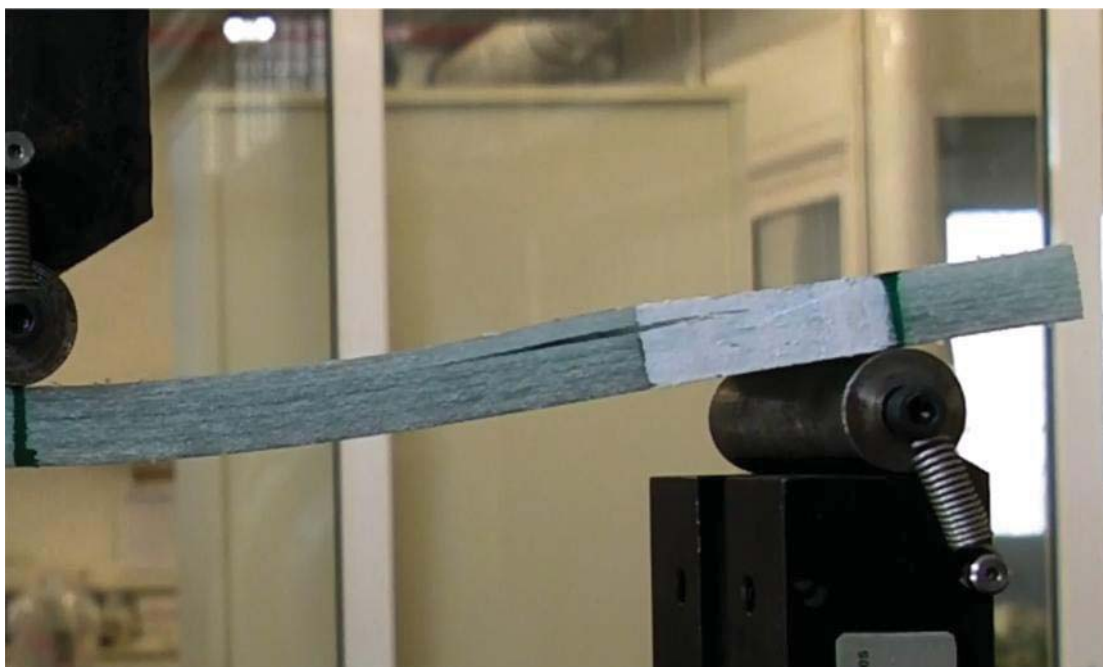
Εικόνα 4.29: Διάγραμμα Παραμόρφωσης – Βέλους Κάμψης στη θέση 2 για τα δοκίμια B_200

Παρατηρήσεις

- Ισχύουν τα ίδια με τη σειρά δοκιμών B_200
- Επιπλέον, η απότομη αύξηση των παραμορφώσεων οφείλεται στο φαινόμενο του λυγισμού



Εικόνα 4.30: Αστοχία με διάδοση του αποχωρισμού, δοκίμιο C_200_1

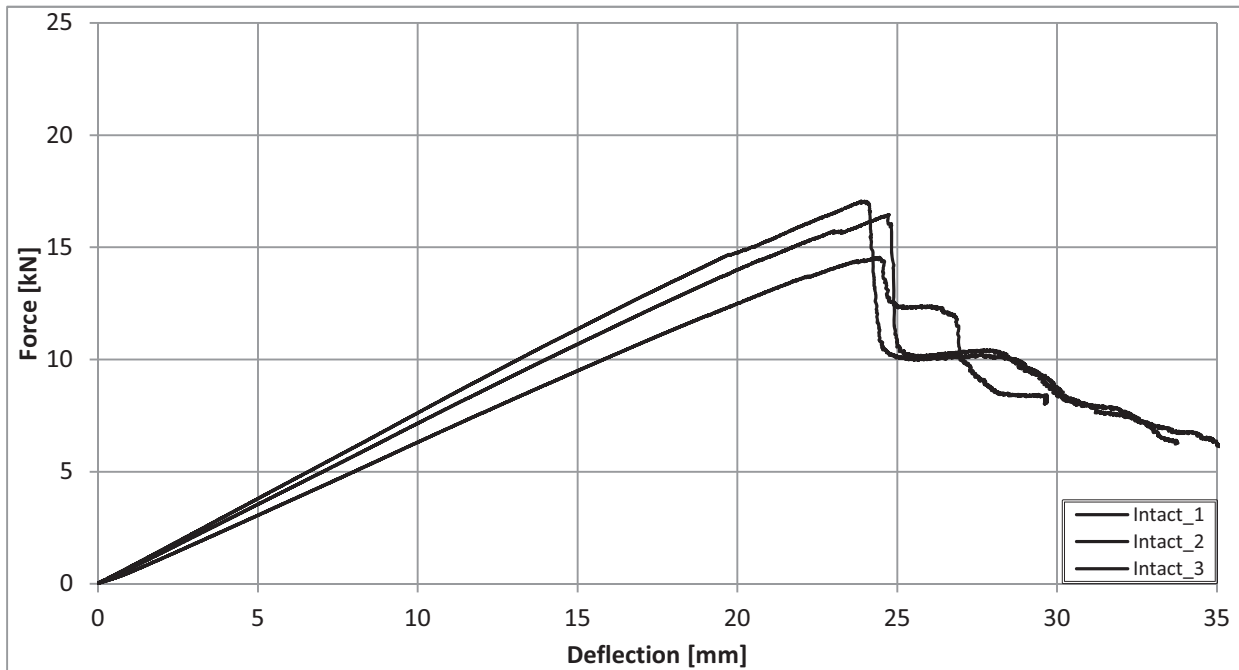


Εικόνα 4.31: Λυγισμός στη θλιβόμενη πλευρά πριν την αστοχία, δοκίμιο C_200_1

Το φαινόμενο που συμβαίνει στα δοκίμια αυτά, επιβεβαιώνεται και από το μοντέλο και θα σχολιασθεί παρακάτω.

4.1.10 Σειρά Άθικτων Δοκιμών Intact

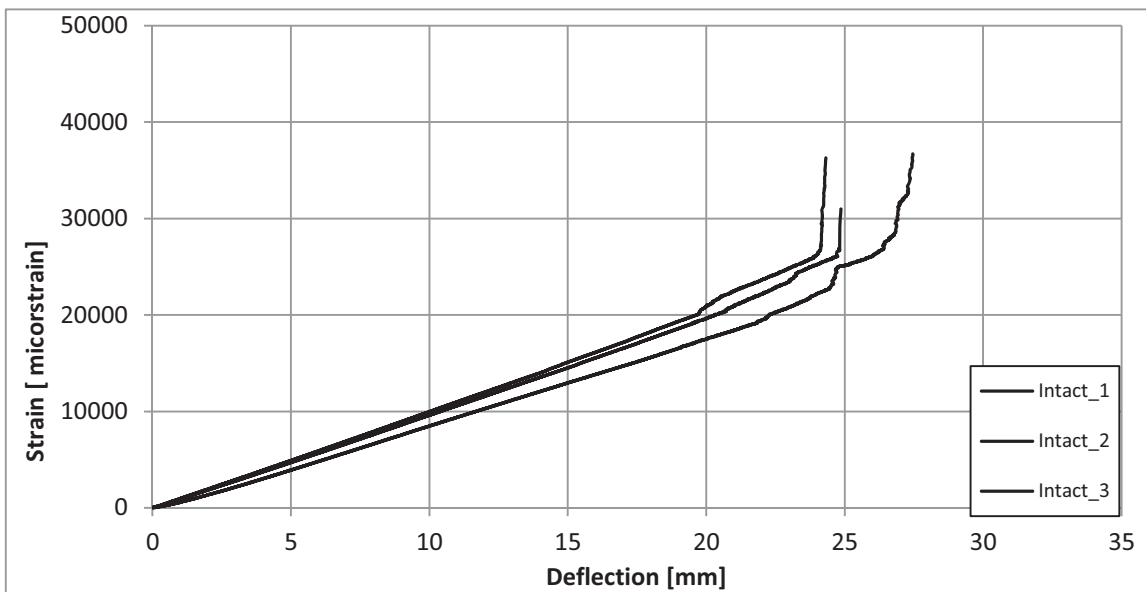
Τα δοκίμια της σειράς Intact είναι άθικτα, δηλαδή δεν περιέχουν τεχνητό αποχωρισμό στρώσεων. Ο λόγος κατασκευής τους ήταν για να αποτελέσουν μια αναφορά για τα υπόλοιπα δοκίμια τα οποία περιέχουν τεχνητό αποχωρισμό. Έτσι, θα μπορέσουμε να συγκρίνουμε τα δοκίμια με τα άθικτα και να μελετήσουμε την επίδραση του αποχωρισμού ως προς την ακαμψία, τη μέγιστη δύναμη που μπορούν να φέρουν και τις παραμορφώσεις.



Εικόνα 4.32: Διάγραμμα Δύναμης – Βέλους Κάμψης για τα δοκίμια Intact

Παρατηρήσεις

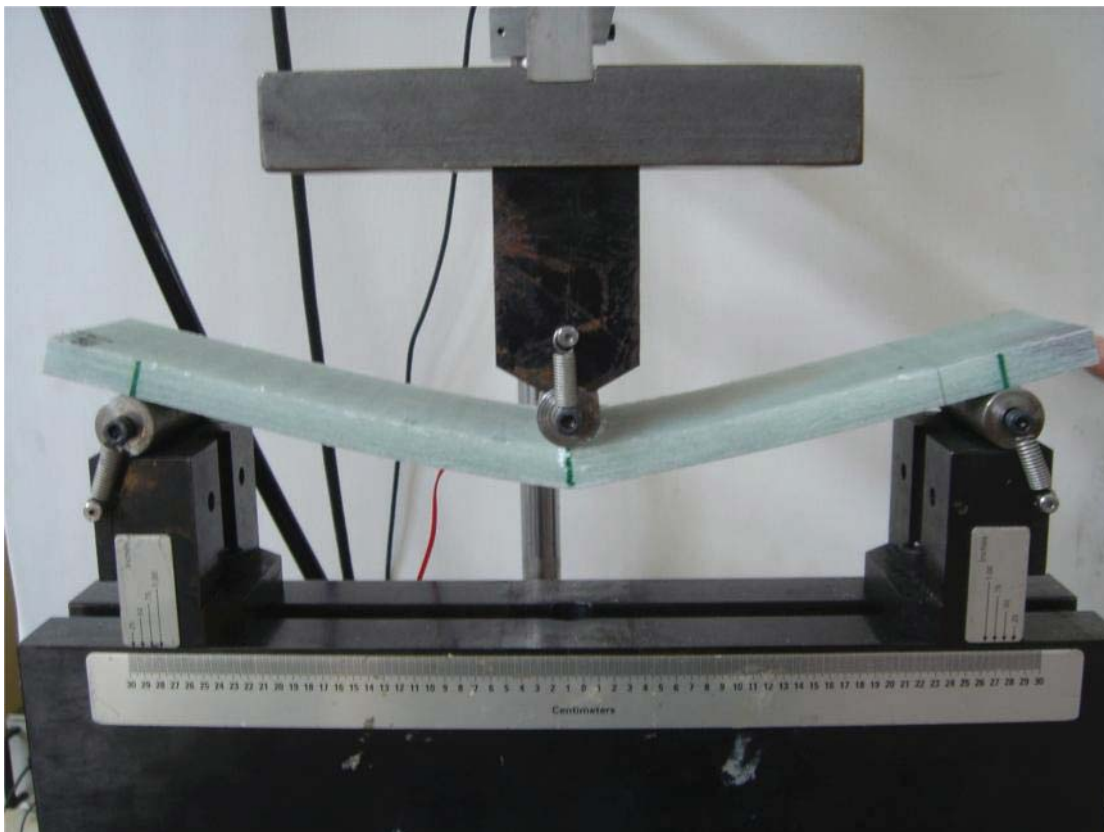
- Αρκετά καλή επαναληψιμότητα, η απόκλιση που παρουσιάζει το δοκίμιο Intact_3 οφείλεται στο μειωμένο του πάχος (παράχθηκε από τη πλάκα Β)
- Η σχέση δύναμης – βέλους κάμψης μέχρι να εμφανιστεί αστοχία είναι γραμμική.



Εικόνα 4.33: Διάγραμμα Παραμόρφωσης – Βέλους Κάμψης στη θέση 1 για τα δοκίμια Intact

Παρατηρήσεις

- Η σχέση παραμόρφωσης – βέλους κάμψης μέχρι να εμφανιστεί αστοχία είναι γραμμική.
- Η αστοχία είναι προφανώς τοπική



Εικόνα 4.34 : Αστοχία του δοκίμιο Intact_1

4.1.11 Συγκεντρωτικά στοιχεία πειραματικών δοκιμών

Στο σημείο αυτό συνοψίζονται τα βασικά στοιχεία των διαγραμμάτων που παρουσιάστηκαν προηγουμένως. Ακολουθούν οι πίνακες που παρουσιάζουν τα μέγιστα φορτία και την αντίστοιχη μετατόπιση για κάθε ένα από τα δοκίμια.

Πίνακας 4.1: Μέγιστα φορτία

Maximum Force [kN]						
	1	2	3	Average	Standard Deviation	CV [σ/μ %]
Intact	16.456	17.056	14.548	16.020	1.069	6.68
A_80	13.512	13.880	14.872	14.088	0.574	4.08
A_140	13.864	14.396	14.476	14.245	0.272	1.91
A_200	12.812	12.388	12.824	12.675	0.203	1.60
B_80	15.168	15.224	16.328	15.573	0.534	3.43
B_140	14.140	13.364	13.796	13.767	0.317	2.31
B_200	8.708	8.536	8.568	8.604	0.075	0.87
C_80	17.356	16.352	14.928	16.212	0.996	6.15
C_140	15.716	15.720	15.376	15.604	0.161	1.03
C_200	10.652	9.366	9.852	9.957	0.530	5.33

Πίνακας 4.2: Μετατοπίσεις που αντιστοιχούν στα μέγιστα φορτία

Displacement at Maximum Force [mm]						
	1	2	3	Average	Standard Deviation	CV [σ/μ %]
Intact	24.744	23.876	24.452	24.357	0.361	1.48
A_80	22.492	22.768	21.752	22.337	0.429	1.92
A_140	21.200	21.436	21.128	21.255	0.132	0.62
A_200	22.108	22.592	21.744	22.148	0.347	1.57
B_80	22.128	21.632	21.952	21.904	0.205	0.94
B_140	18.956	19.200	19.800	19.319	0.355	1.84
B_200	14.556	13.968	13.596	14.040	0.395	2.82
C_80	25.188	25.256	24.880	25.108	0.164	0.65
C_140	20.936	21.580	21.920	21.479	0.408	1.90
C_200	16.164	14.440	15.920	15.508	0.762	4.91

4.2 Συγκριτικά Διαγράμματα

4.2.1 Αναγωγή αποτελεσμάτων

Στην παράγραφο αυτή θα παρουσιαστούν συγκριτικά διαγράμματα μεταξύ των διαφόρων περιπτώσεων έτσι ώστε να εξετάσουμε την επίδραση της θέσης και του μήκους του αποχωρισμού στην ακαμψία και τη μέγιστη δύναμη. Κατά την κατασκευή των δοκιμών είναι αδύνατη η επίτευξη ίδιων διαστάσεων σε όλα τα δοκίμια όπως φαίνεται και στον

Πίνακα 3.4 . Εάν απλά συγκρίνουμε τις καμπύλες που παρουσιάστηκαν προηγουμένως λοιπόν είναι πολύ πιθανόν να οδηγηθούμε σε λανθασμένα συμπεράσματα, καθώς συγκρίνουμε ανόμοιες διατομές με διαφορετικές διαστάσεις. Για το λόγο αυτό κατασκευάστηκε μια συνάρτηση αναγωγής η οποία μετασχηματίζει το μέγιστο φορτίο (το πειραματικά μετρούμενο) του κάθε δοκιμίου σε ένα ισοδύναμο φορτίο το οποίο θα εφαρμοζόταν στο δοκίμιο εάν η διατομή του είχε τις μέσες διαστάσεις των άθικτων δοκιμίων. Με άλλα λόγια προσπαθούμε να εξαλείψουμε την επίδραση της διαφοράς των διαστάσεων ώστε να έχουμε μια κοινή βάση για όλα τα δοκίμια. Στα διαγράμματα που ακολουθούν και στον πίνακα 4.3 έχει γίνει η αναγωγή του μέγιστου φορτίου στις ιδιότητες και στις διαστάσεις των άθικτων δοκιμίων.

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

$$\frac{P_{an}}{P_{exp}} = \left(\frac{E_{int} * B_{int} * t_{int}^3}{12} \right) / \left(\frac{E_{exp} * B_{exp} * t_{exp}^3}{12} \right)$$

$$E_{int} = E_{exp}$$

$$P_{an} = \frac{B_{int} * t_{int}^3}{B_{exp} * t_{exp}^3} * P_{exp}$$

Όπου: P_{an} : Φορτίο μετά την αναγωγή

P_{exp} : Φορτίο πειράματος

E: Μέτρο ελαστικότητας

B: Πλάτος δοκιμίου

t: Πάχος δοκιμίου

Ο δείκτης “int” αναφέρεται στις ιδιότητες των άθικτων δοκιμίων ενώ ο δείκτης “exp” αναφέρεται στις ιδιότητες του εκάστοτε δοκιμίου. Ο πίνακας 4.3 είναι αντίστοιχος του πίνακα 4.1, και μας δείχνει τα μέγιστα φορτία για κάθε δοκίμιο μετά την αναγωγή. Στους πίνακες 4.4 και 4.5 συγκεντρώνονται οι μέσοι όροι των φορτίων αυτών και οι ποσοστιαίες αποκλίσεις τους από τον μέσο όρο των άθικτων δοκιμίων .

Πίνακας 4.3: Μέγιστα φορτία μετά την αναγωγή του φορτίου

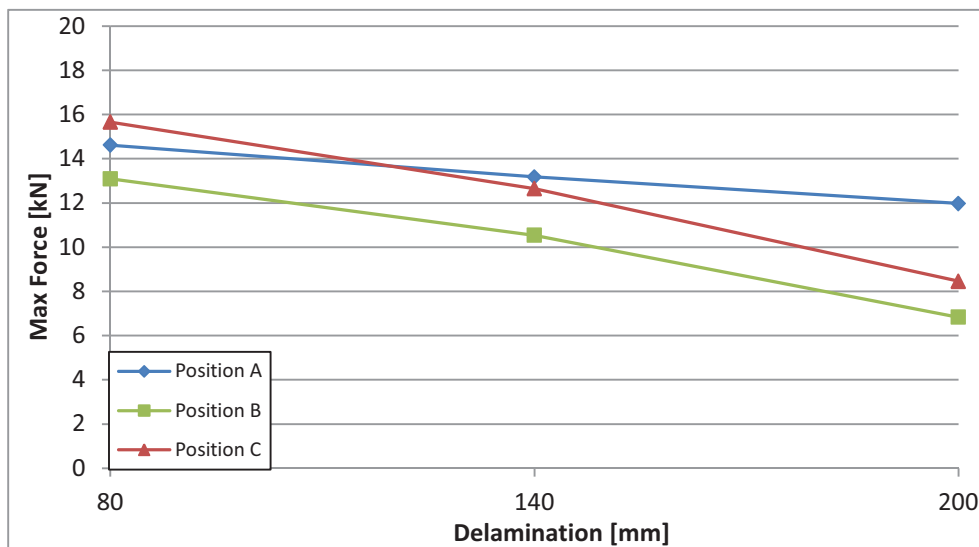
Maximum Force [kN]-Αναγωγή στα Intact						
	1	2	3	Average	Standard Deviation	CV [σ/μ %]
Intact	16.456	17.056	14.548	16.020	1.069	6.675
A_80	14.975	14.685	14.187	14.616	0.325	2.226
A_140	13.184	13.364	12.986	13.178	0.154	1.169
A_200	11.720	11.772	12.437	11.976	0.327	2.727
B_80	13.669	12.903	12.694	13.089	0.419	3.202
B_140	10.481	10.318	10.812	10.537	0.206	1.954
B_200	6.998	6.890	6.599	6.829	0.168	2.462
C_80	15.273	15.417	16.291	15.661	0.450	2.873
C_140	12.559	12.561	12.822	12.647	0.123	0.976
C_200	8.791	7.804	8.776	8.457	0.462	5.463

Πίνακας 4.4: Μέσος όρος μέγιστων φορτίων

Experimental Pmax			
Del	Pos. A	Pos. B	Pos. C
80	14.616	13.089	15.661
140	13.178	10.537	12.647
200	11.976	6.829	8.457

Πίνακας 4.5: Ποσοστό απόκλισης σε σχέση με τα άθικτα δοκίμια

Pmax Difference (%)			
Del	Pos. A	Pos. B	Pos. C
80	8.77	18.30	2.24
140	17.74	34.23	21.05
200	25.24	57.37	47.21



Εικόνα 4.35: Συγκριτικό διάγραμμα μέγιστων φορτίων όλων των περιπτώσεων

4.2.2 Συγκριτικά Διαγράμματα

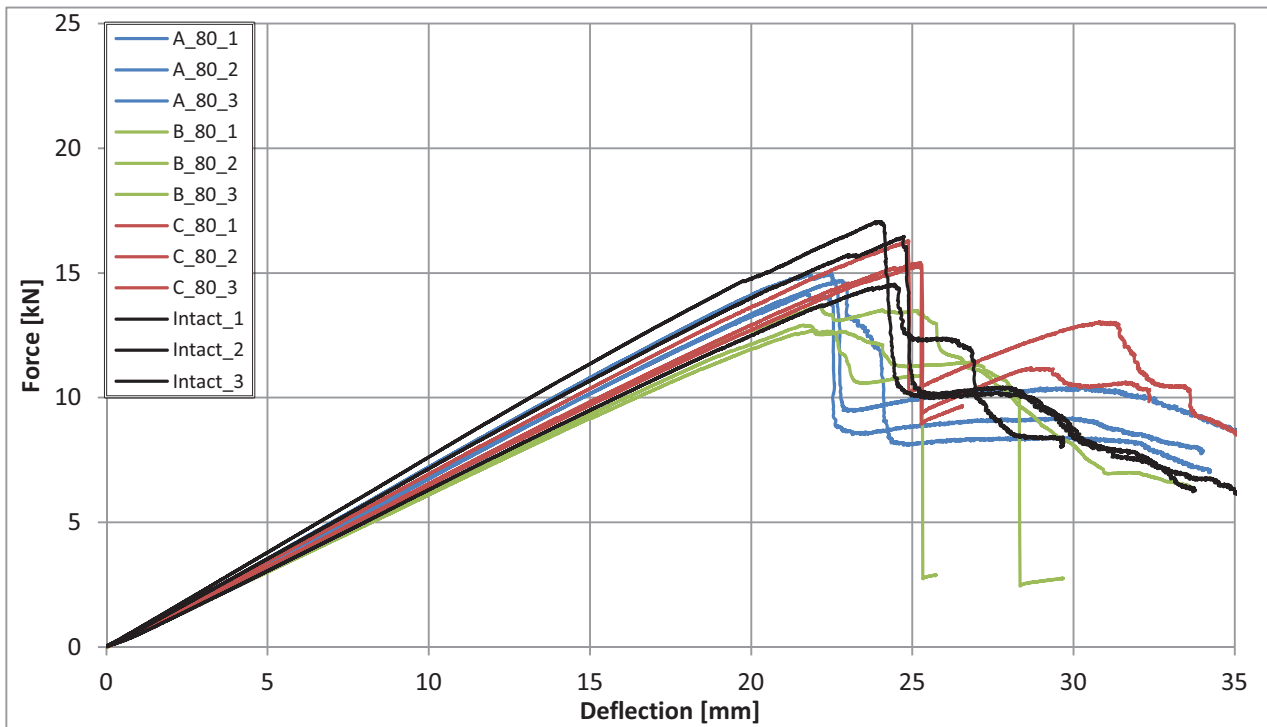
Για να αναλύσουμε (από τα πειραματικά αποτελέσματα) την επίδραση που έχει η θέση και το μήκος του αποχωρισμού των στρώσεων στη συμπεριφορά ενός σύνθετου υλικού από μονοδιευθυντικές ίνες γυαλιού φτιάξαμε 2 ομάδες διαγραμμάτων δύναμης – μετατόπισης (F-δ).

Η πρώτη ομάδα αποτελείται από 3 διαγράμματα όπου στο κάθε ένα διατηρείται σταθερό το μήκος του αποχωρισμού των στρώσεων και αλλάζει η θέση του αποχωρισμού κατά το πάχος. Έτσι λοιπόν έχουμε τα διαγράμματα “Delamination 80 mm”, “Delamination 140 mm”, “Delamination 200 mm”. Μέσα από τα διαγράμματα αυτά μπορούμε να δούμε ποιά είναι η επίδραση της θέσης του αποχωρισμού κατά το πάχος για κάθε ένα μήκος αποχωρισμού.

Η δεύτερη ομάδα αποτελείται από 3 διαγράμματα όπου στο κάθε ένα διατηρείται σταθερή η θέση του αποχωρισμού κατά το πάχος και αλλάζει το μήκος του αποχωρισμού. Έτσι λοιπόν έχουμε τα διαγράμματα “Position A”, “Position B”, “Position C”. Μέσα από τα διαγράμματα αυτά μπορούμε να δούμε ποιά είναι η επίδραση του μήκους του αποχωρισμού για κάθε μία θέση κατά το πάχος.

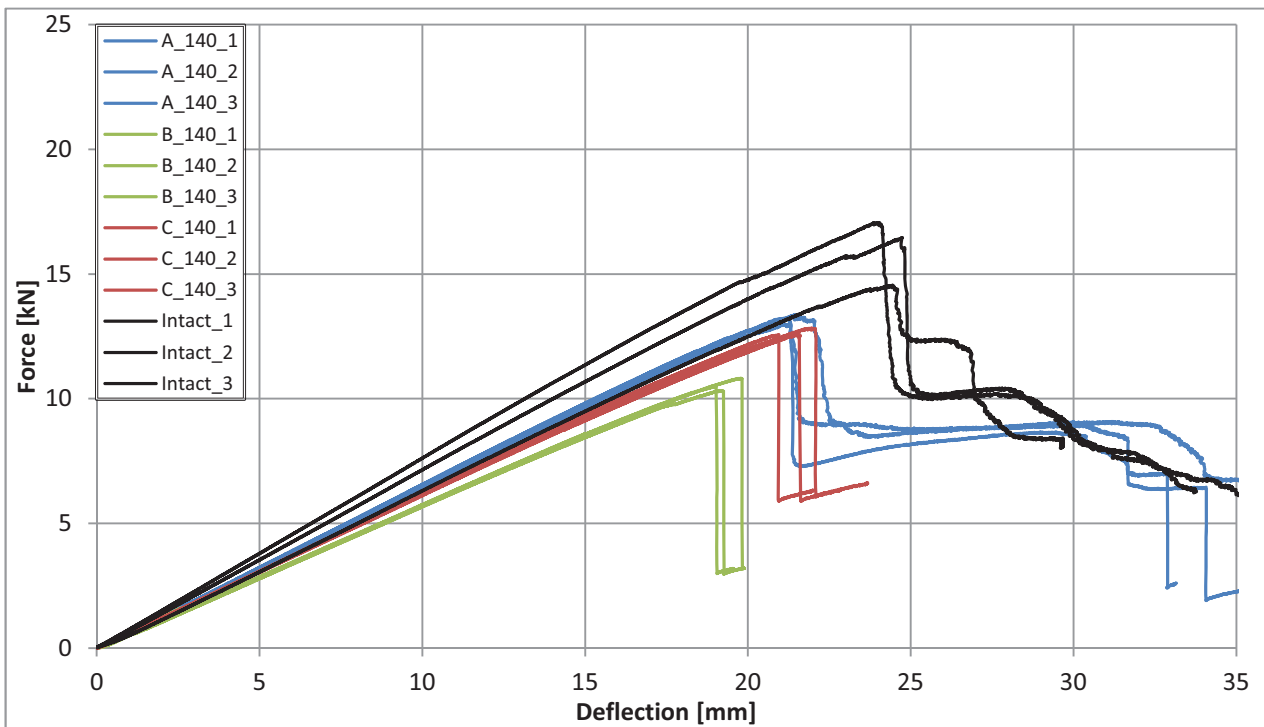
Σε όλα τα διαγράμματα συμπεριλαμβάνονται και τα αποτελέσματα για τα άθικτα δοκίμια ως σημείο αναφοράς.

Επίδραση της θέσης για αποχωρισμό 80mm



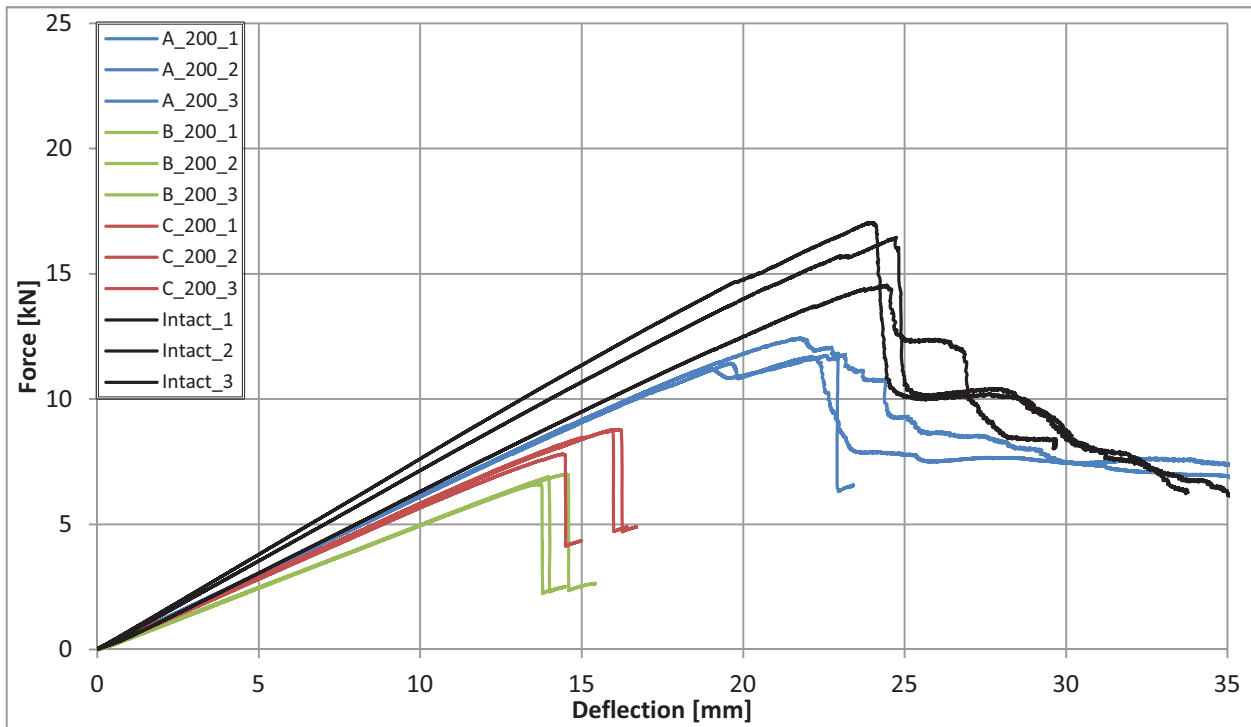
Εικόνα 4.36: Delamination 80mm, Επίδραση της θέσης για αποχωρισμό 80mm

Επίδραση της θέσης για αποχωρισμό 140mm



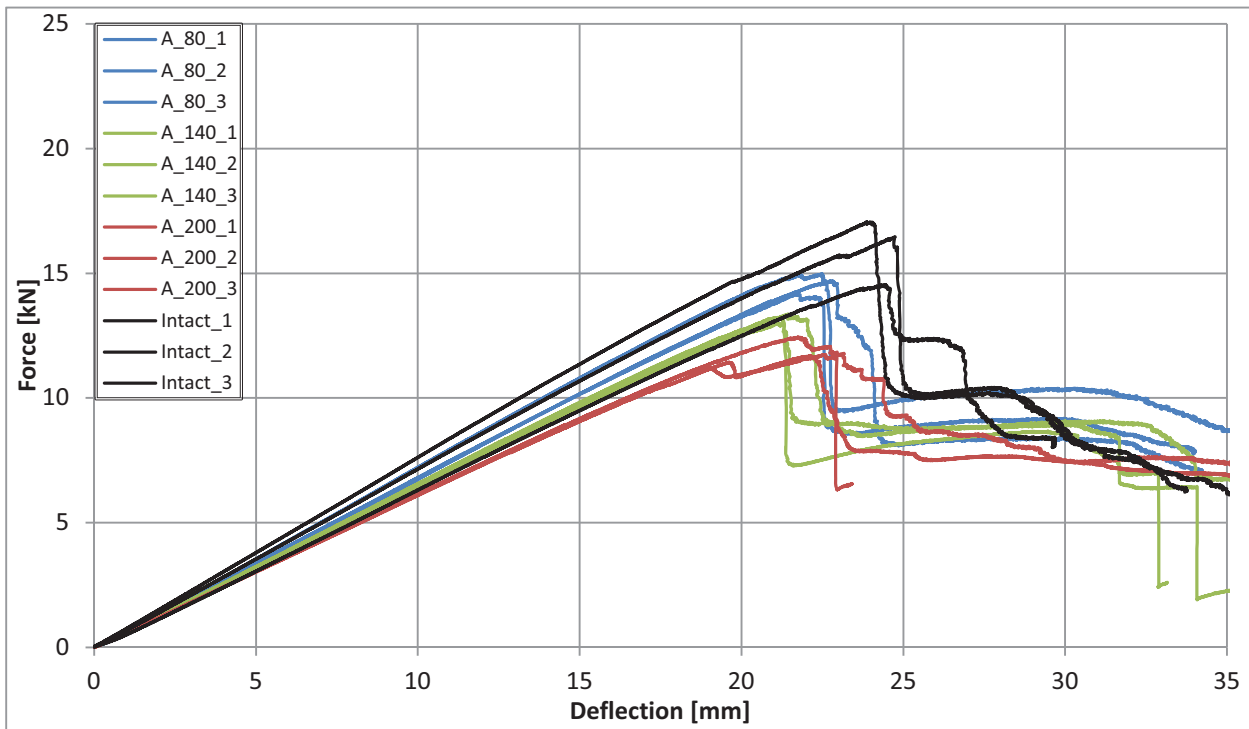
Εικόνα 4.37: Delamination 140mm, Επίδραση της θέσης για αποχωρισμό 140mm

Επίδραση της θέσης για αποχωρισμό 200mm



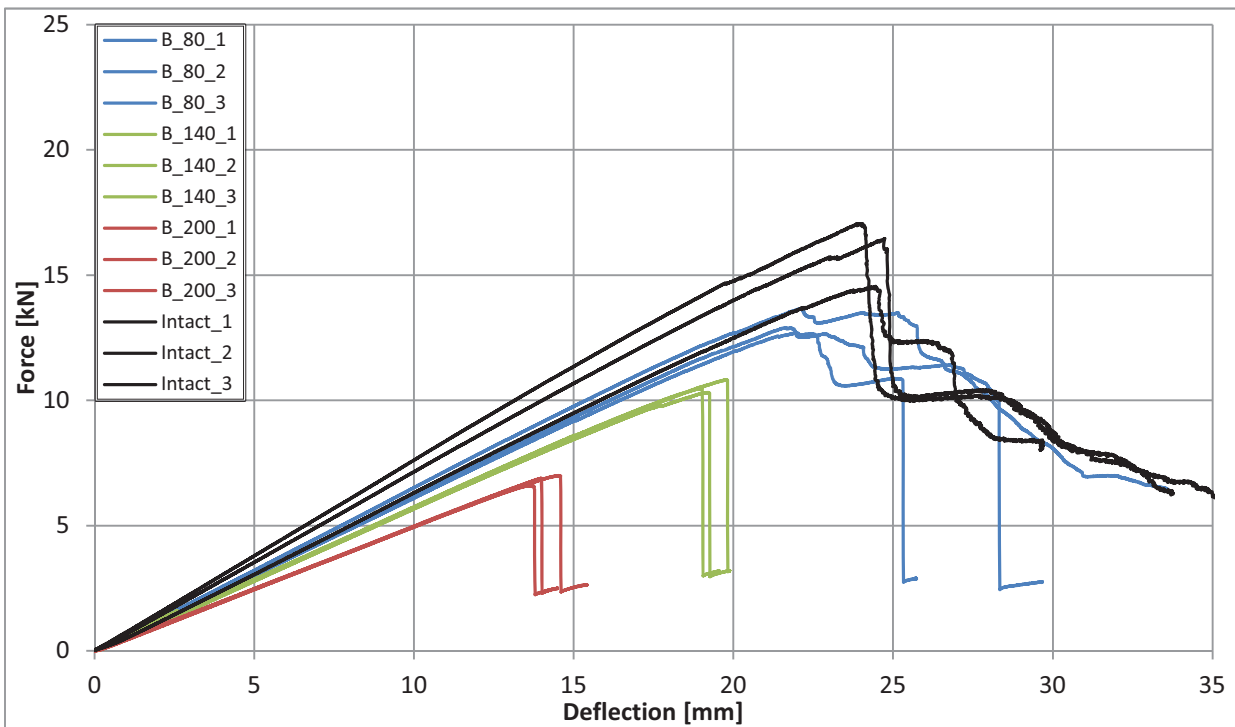
Εικόνα 4.38: Delamination 200mm, Επίδραση της θέσης για αποχωρισμό 200mm

Επίδραση του μήκους του αποχωρισμού στη θέση A



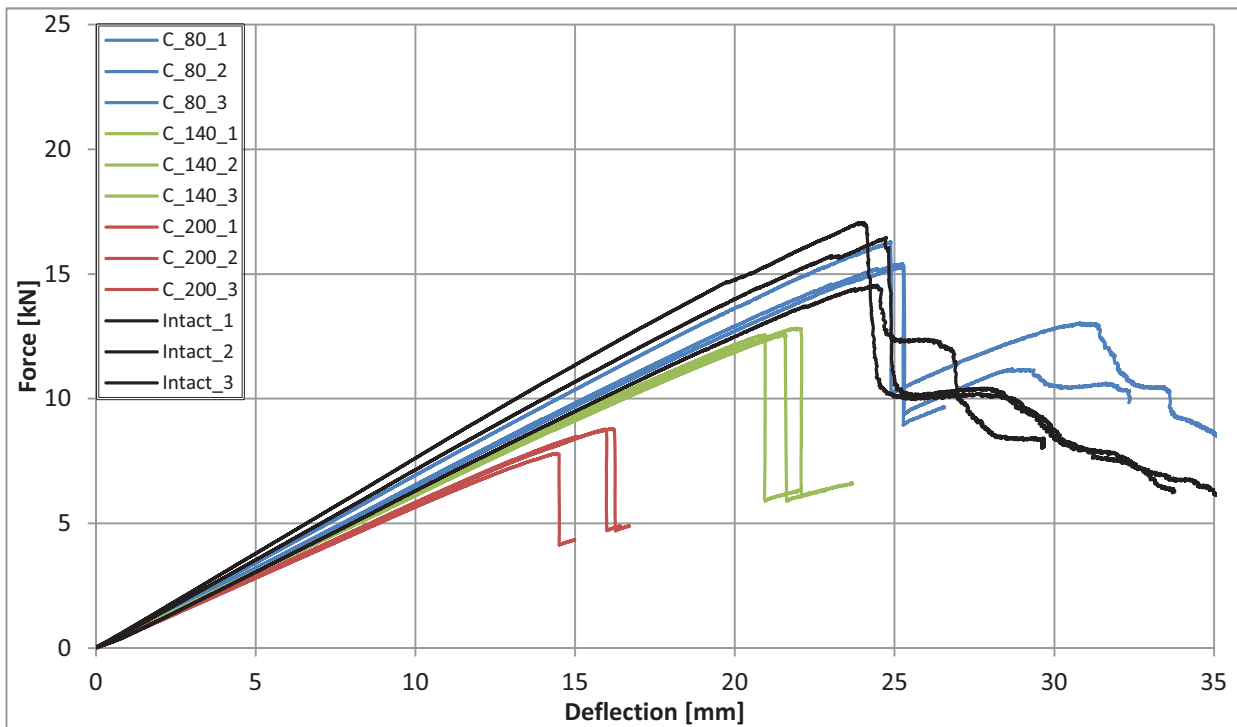
Εικόνα 4.39: Position A, Επίδραση του μήκους του αποχωρισμού στη θέση A

Επίδραση του μήκους του αποχωρισμού στη θέση B



Εικόνα 4.40: Position B, Επίδραση του μήκους του αποχωρισμού στη θέση B

Επίδραση του μήκους του αποχωρισμού στη θέση C



Εικόνα 4.41: Position C, Επίδραση του μήκους του αποχωρισμού στη θέση C

4.3 Παρατηρήσεις και συμπεράσματα

4.3.1 Παρατηρήσεις

- Από τα διαγράμματα F-δ παρατηρείται για κάθε σειρά δοκιμών πολύ καλή επαναληψιμότητα των πειραματικών δοκιμών όσον αφορά την καμπτική ακαμψία. Οι διαφορές που υπάρχουν οφείλονται στη μικρή διαφοροποίηση των διαστάσεων των διατομών.
- Από τους πίνακες 4.1 και 4.2 παρατηρείται πως η επαναληψιμότητα όσον αφορά τη μέγιστη δύναμη και μετατόπιση είναι καλή με συντελεστή διακύμανσης (coefficient of variation) κατά μέσο όρο 3.3% για το φορτίο και 1.9% για τη μετατόπιση. Οι διαφορές που υπάρχουν οφείλονται στη μικρή διαφοροποίηση των διαστάσεων των διατομών.
- Τα δοκίμια κάθε σειράς παρουσιάζουν εξαιρετική επαναληψιμότητα όσον αφορά τις παραμορφώσεις.
- Στα δοκίμια της σειράς C_200 παρατηρήθηκε ένα πολύ ενδιαφέρον φαινόμενο. Το πάνω υποπολύστρωτο το οποίο βρίσκεται υπό θλίψη όταν διαδίδεται η ρωγμή παθαίνει λυγισμό (buckling), όπως φαίνεται στην εικόνα 4.31 . Σε αυτό οφείλεται ίσως και η απότομη μείωση του μέγιστου φορτίου των δοκιμών αυτών. Ίσως το φαινόμενο αυτό να συμβαίνει και στα δοκίμια της σειράς C_140 αλλά σε βαθμό που να μην είναι ορατό με το μάτι ή με τη βιντεοκάμερα.
- Από την εικόνα 4.35 και τον πίνακα 4.5 παρατηρείται πως η αύξηση του αποχωρισμού έχει μεγαλύτερη επίπτωση στις περιπτώσεις όπου ο αποχωρισμός βρίσκεται στις θέσεις B και C, ενώ στη θέση A έχει μεν επίδραση αλλά όχι τόσο έντονη. Παρατηρείται πως όσο αυξάνει το μήκος του αποχωρισμού τόσο πέφτει το μέγιστο φορτίο.
- Από την εικόνα 4.36 παρατηρούμε πως για τόσο μικρούς αποχωρισμούς (80mm) η καμπτική ακαμψία των δοκιμών δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα. Όταν ο αποχωρισμός βρίσκεται στη θλιβόμενη πλευρά (Θέση C) η συμπεριφορά προσεγγίζει εκείνη των άθικτων δοκιμών, η διαφορά στο μέγιστο φορτίο είναι 2.24%. Όταν ο αποχωρισμός βρίσκεται στο μέσο του πάχους (Θέση B) και στην εφελκυσόμενη πλευρά (Θέση C) το φορτίο πέφτει κατά 18.3% και 8.77% αντίστοιχα σε σχέση με τα άθικτα δοκίμια
- Για αποχωρισμό μήκους 140mm η μείωση της καμπτικής ακαμψίας και του μέγιστου φορτίου είναι πιο έντονη με τις περιπτώσεις Θέση A και Θέση C να είναι πολύ κοντά, με μείωση 17.74% και 21.05% στο μέγιστο φορτίο αντίστοιχα σε σχέση με τα άθικτα δοκίμια. Στη περίπτωση της Θέσης B η καμπτική ακαμψία μειώνεται αισθητά και το μέγιστο φορτίο μειώνεται κατά 34,23% σε σχέση με τα άθικτα δοκίμια.
- Για μήκος αποχωρισμού ίσο με 200mm παρατηρούμε πιο έντονα τις καμπτικές ακαμψίες να μειώνονται, αυτό είναι πιο έντονο όταν η θέση του αποχωρισμού βρίσκεται στο μέσο του πάχους αντί στα άκρα. Όσον αφορά τα μέγιστα φορτία η περίπτωση Θέση A παρουσιάζει μείωση 25.24%. Επιπλέον λόγω του λυγισμού η περίπτωση Θέση C με μείωση του μέγιστου φορτίου κατά 47,21% προσεγγίζει τη δυσμενέστερη περίπτωση Θέση B που έχει μείωση 57.37% σε σχέση με τα άθικτα δοκίμια.
- Όταν ο αποχωρισμός βρίσκεται στην εφελκυσόμενη πλευρά (Θέση A) η ακαμψία δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα, βέβαια το μέγιστο φορτίο μειώνεται με την αύξηση του

μήκους του αποχωρισμού. Η μείωση αυτή είναι 8.77% για 80mm αποχωρισμό, 17.74% για 140mm αποχωρισμό και 25.24% για 200mm αποχωρισμό.

- Όταν ο αποχωρισμός βρίσκεται στο μέσο του πάχους (Θέση Β) τόσο η ακαμψία όσο και το μέγιστο φορτίο μειώνονται με την αύξηση του μήκους του αποχωρισμού. Η μείωση αυτή για το μέγιστο φορτίο είναι 18.30% για 80mm αποχωρισμό, 34.23% για 140mm αποχωρισμό και 57.37% για 200mm αποχωρισμό.
- Όταν ο αποχωρισμός βρίσκεται στη θλιβόμενη πλευρά (Θέση C) και είναι μικρός (80mm) προσεγγίζει τη περίπτωση των άθικτων δοκιμίων και σε ακαμψία και σε μέγιστο φορτίο, μείωση κατά 2.24%. Όσο μεγαλώνει το μήκος του αποχωρισμού τόσο πιο έντονο γίνεται το φαινόμενο του λυγισμού του λεπτού υποπολύστρωτου το οποίο βρίσκεται υπό θλίψη με αποτέλεσμα να υπάρχει σημαντική μείωση της ακαμψίας και της μέγιστης δύναμης, κατά 21.05% για αποχωρισμό 140mm και κατά 47.21% για αποχωρισμό 200mm.

4.3.2 Συμπεράσματα

1. Όσο μεγαλώνει το μήκος του αποχωρισμού τόσο περισσότερο μειώνεται το μέγιστο φορτίο. Συγκεκριμένα:
 - Θέση Α
Αποχωρισμός $\cong 30\%$ => Μείωση κατά $\cong 9\%$
Αποχωρισμός $\cong 50\%$ => Μείωση κατά $\cong 18\%$
Αποχωρισμός $\cong 70\%$ => Μείωση κατά $\cong 25\%$
 - Θέση Β
Αποχωρισμός $\cong 30\%$ => Μείωση κατά $\cong 18\%$
Αποχωρισμός $\cong 50\%$ => Μείωση κατά $\cong 34\%$
Αποχωρισμός $\cong 70\%$ => Μείωση κατά $\cong 57\%$
 - Θέση C
Αποχωρισμός $\cong 30\%$ => Μείωση κατά $\cong 2\%$
Αποχωρισμός $\cong 50\%$ => Μείωση κατά $\cong 21\%$
Αποχωρισμός $\cong 70\%$ => Μείωση κατά $\cong 47\%$
2. Όσο μεγαλώνει το μήκος του αποχωρισμού τόσο περισσότερο μειώνεται η καμπτική ακαμψία.
3. Η θέση Β είναι η πιο δυσμενής περίπτωση, παρουσιάζει τα μικρότερα μέγιστα φορτία και τις χαμηλότερες ακαμψίες, για όλες τις διάφορες περιπτώσεις μήκους αποχωρισμού.
4. Ο αποχωρισμός φαίνεται να έχει τη μικρότερη επίδραση, ως προς τη μείωση του μέγιστου φορτίου, όταν βρίσκεται στην εφελκυστική πλευρά.
5. Όταν ο αποχωρισμός βρίσκεται στη θλιβόμενη πλευρά, εάν το μήκος του αποχωρισμού είναι σχετικά υψηλό (>50% ανυποστήρικτου μήκους της δοκού) τότε μπορεί να εμφανιστεί λυγισμός του λεπτού υποπολύστρωτου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ–ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

5.1 Εισαγωγή

Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν και σχολιάστηκαν τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών. Βάσει της επεξεργασίας των αποτελεσμάτων των δοκιμών μελετήθηκε η επίδραση της θέσης κατά το πάχος και του μήκους του αποχωρισμού. Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως η επίδραση του αποχωρισμού θα μελετηθεί και αριθμητικά μέσω της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων. Στο Κεφάλαιο 2 περιγράφηκε η ανάπτυξη του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων και ορίστηκαν οι αρχικές ιδιότητες.

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μια αρχική σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων και των πειραματικών δοκιμών, ώστε να αξιολογήσουμε την ποιότητα και την ακρίβεια του μοντέλου. Στη συνέχεια ακολουθεί διερεύνηση των ιδιοτήτων που διέπουν τον μηχανισμό διάδοσης του αποχωρισμού και στο τέλος παρουσιάζονται τα συγκριτικά διαγράμματα με το τελικό σύνολο ιδιοτήτων. Για να μπορέσουμε να εξετάσουμε, βάσει του μοντέλου πλέον, την επίδραση της θέσης κατά το πάχος και του μήκους του αποχωρισμού έγιναν τρεξίματα των μοντέλων, όλα με τις ίδιες διαστάσεις ώστε τα αποτελέσματα να είναι συγκρίσιμα.

5.2 Αρχική σύγκριση

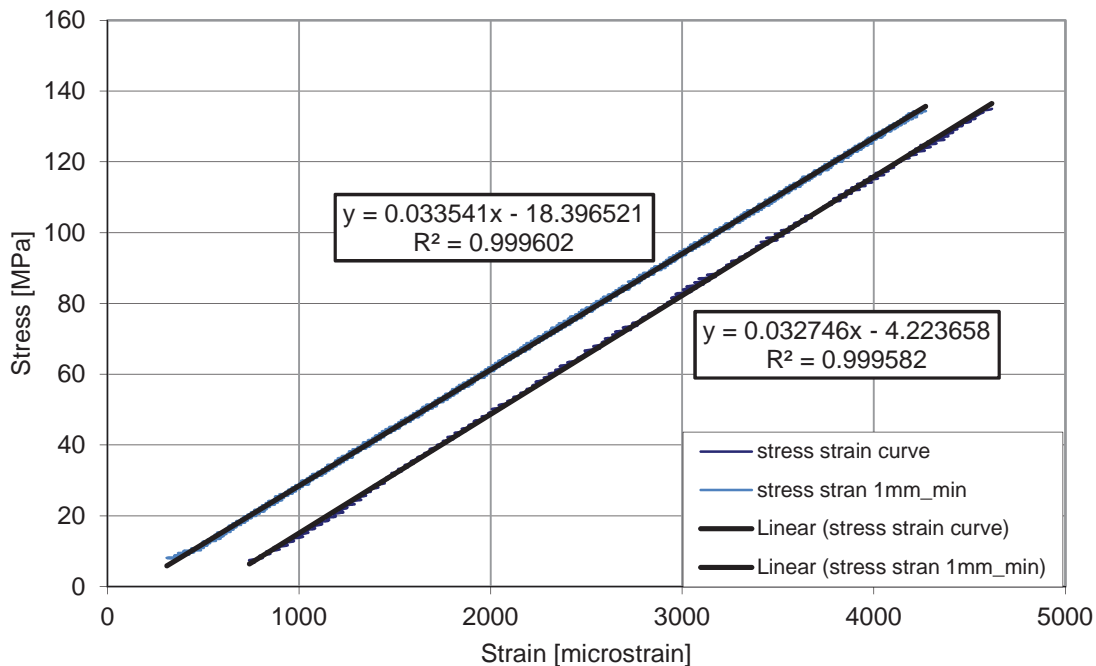
Σε κάθε ένα από τα μοντέλα ορίζονται οι πραγματικές διαστάσεις όπως μετρήθηκαν για κάθε σειρά δοκιμών ώστε να γίνει η σύγκριση πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων. Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες ιδιοτήτων που χαρακτηρίζουν το μοντέλο. Η πρώτη κατηγορία αφορά τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού που προσομοιάζουμε, ενώ η δεύτερη κατηγορία ιδιοτήτων έχει να κάνει με τον μηχανισμό διάδοσης του αποχωρισμού. Οι αρχικές ιδιότητες έχουν επιλεγεί από παλαιότερες διπλωματικές εργασίες και projects που έχει εκτελέσει το εργαστήριο καθώς και από τη βιβλιογραφία.

Για ένα συμβατικό κατασκευαστικό υλικό όπως είναι ο χάλυβας ή το αλουμίνιο οι μηχανικές του ιδιότητες είναι ευρέως γνωστές και οι αποκλίσεις στις ιδιότητες που μπορεί να παρουσιάζει ένα δοκίμιο από χάλυβα από τις αναγραφόμενες στη βιβλιογραφία είναι πολύ μικρές. Αυτό δε συμβαίνει με τα σύνθετα υλικά, καθώς η μηχανική συμπεριφορά (ισοτροπικό, ορθοτροπικό, ανισοτροπικό) και οι μηχανικές ιδιότητες εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες, όπως είναι ο προσανατολισμός των στρώσεων, η μέθοδος κατασκευής και οι συνθήκες που επικρατούσαν κατά την κατασκευή κλπ. με αποτέλεσμα οι μηχανικές ιδιότητες που επετεύχθησαν στη πραγματικότητα να είναι αρκετά διαφορετικές από τις προβλεπόμενες. Οι αρχικές μηχανικές ιδιότητες που χρησιμοποιήσαμε αναγράφονται στον πίνακα 5.1 .

Πίνακας 5.1: Αρχικές μηχανικές ιδιότητες

Μηχανική Ιδιότητα	Τιμή
E_x	31000 MPa
E_y	8501 MPa
E_z	8501 MPa
G_{xy}	2034 MPa
G_{yz}	1017 MPa
G_{xz}	1017 MPa
ν_{xy}	0.29
ν_{yz}	0.29
ν_{xz}	0.29

Καθώς όμως παρατηρήθηκε πως το μέτρο ελαστικότητας στη διεύθυνση X οδηγούσε στο να έχουν κάποια από τα μοντέλα μικρότερη καμπτική ακαμψία από τα πειραματικά, αναγκαστήκαμε να κάνουμε κάποιες δοκιμές χαρακτηρισμού του υλικού μας και να μετρήσουμε το μέτρο ελαστικότητας στη διεύθυνση X (E_x). Δύο κομμάτια από την πλάκα τα οποία είχαν περισσέψει δοκιμάστηκαν σε εφελκυσμό. Στο πρώτο το φορτίο επιβαλλόταν με ρυθμό 1mm/1min και στο δεύτερο με ρυθμό 2mm/1min. Το διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης (σ - ϵ) για κάθε περίπτωση φαίνονται στην εικόνα 5.1. Τα δοκίμια δεν τα υποβάλλαμε σε εφελκυσμό μέχρι την αστοχία τους, αυτό που θέλαμε ήταν να δούμε την κλίση της καμπύλης σ - ϵ στη γραμμική της περιοχή.



Εικόνα 5.1: Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης για την εύρεση του E_x

Από τις κλίσεις των ευθειών έχουμε τα εξής:

$$E_{x1}=33541 \text{ MPa}$$

$$E_{x2}=32746 \text{ MPa}$$

$$E_{x\text{average}}=33143.5 \text{ MPa}$$

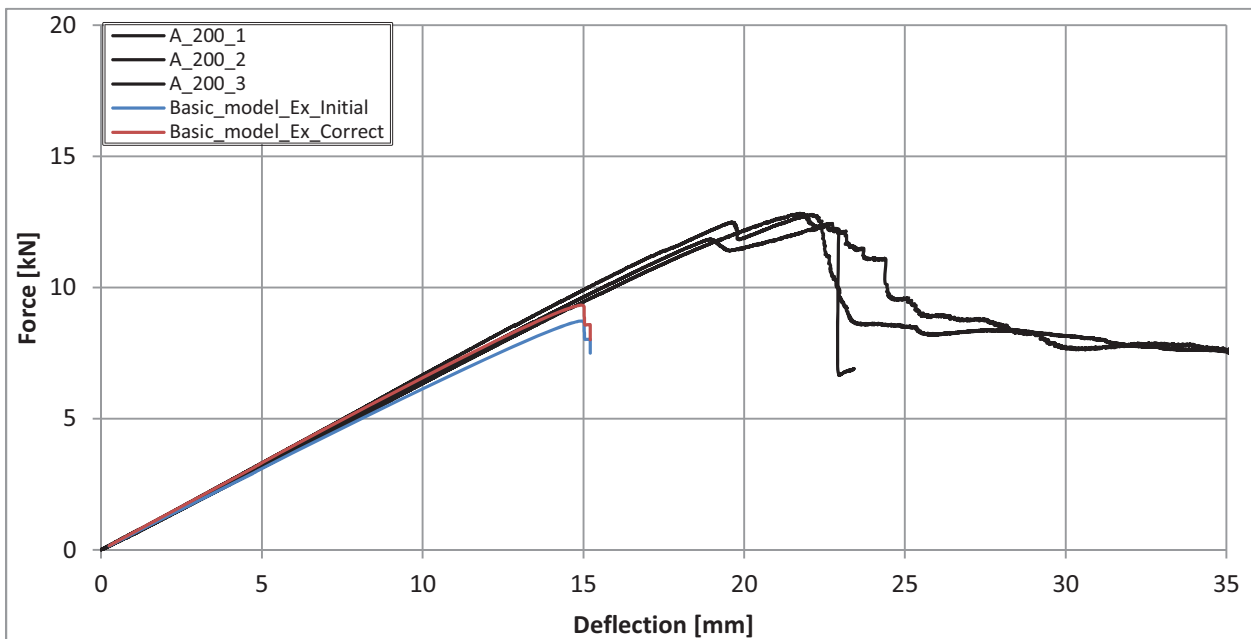
Παρατηρούμε λοιπόν πως το μέτρο ελαστικότητας στη πραγματικότητα ήταν υψηλότερο από το μέτρο ελαστικότητας που είχαμε αρχικά υποθέσει (Πίνακας 5.1), όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στην εικόνα 5.2 .

Όσον αφορά τις αρχικές ιδιότητες της συνεκτικής περιοχής (cohesive zone properties) είχαμε να διαλέξουμε ένα από σύνολα ιδιοτήτων που αναγράφονται στον πίνακα 5.2 [22].

Πίνακας 5.2: Ιδιότητες συνεκτικής περιοχής

Mode I			
Method	CBT	ECM	MCC
G_I [N/mm]	1.16	1.28	1.4
σ_{cI} [MPa]	0.66	1.47	0.6
Mode II			
Method	CCM	CBT	CBBM
G_{II} [N/mm]	2.03	1.72	1.85
σ_{cII} [MPa]	16.97	15.3	13.9

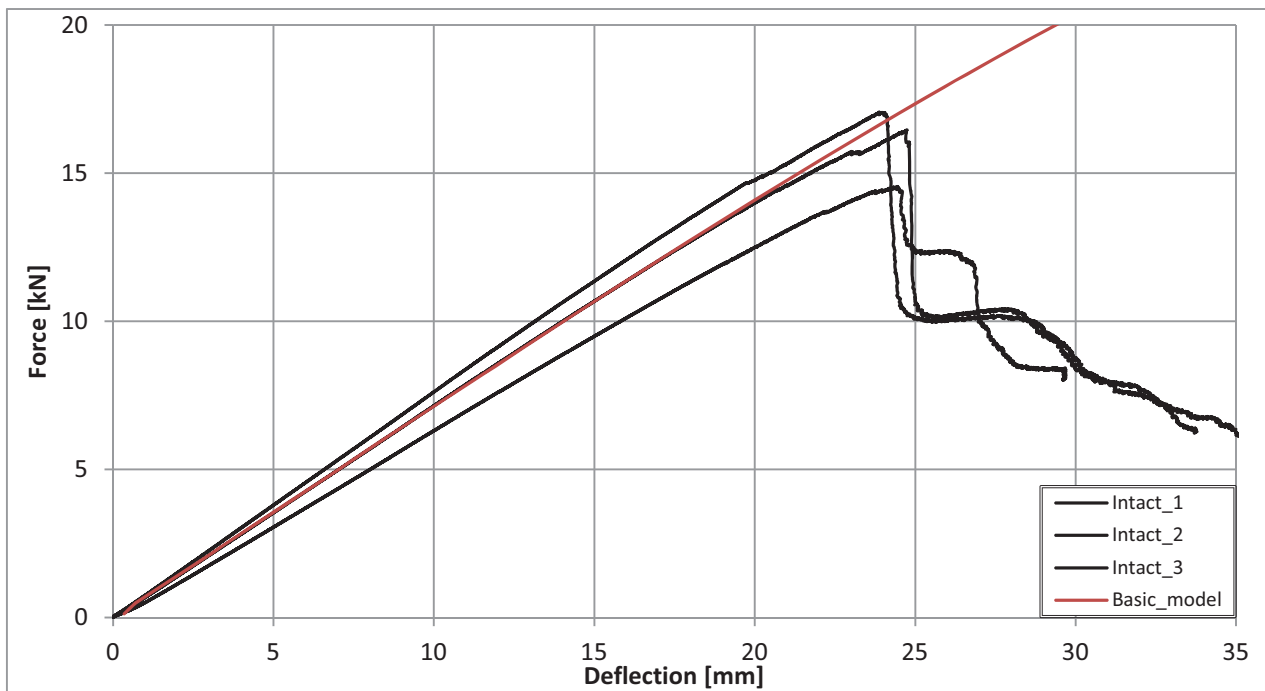
Επιλέγησαν αρχικά οι ιδιότητες από τη μέθοδο CBT, οι οποίες οδήγησαν σε μεγάλη υποεκτίμηση του μέγιστου φορτίου, οπότε για το βασικό μοντέλο επιλέγονται οι ιδιότητες MCC για Mode I και οι ιδιότητες CCM για Mode 2.



Εικόνα 5.2: Σύγκριση μοντέλου με το αρχικό E_x και με το πειραματικά μετρούμενο E_x σε σχέση με τα πειραματικά αποτελέσματα της σειράς A_200.

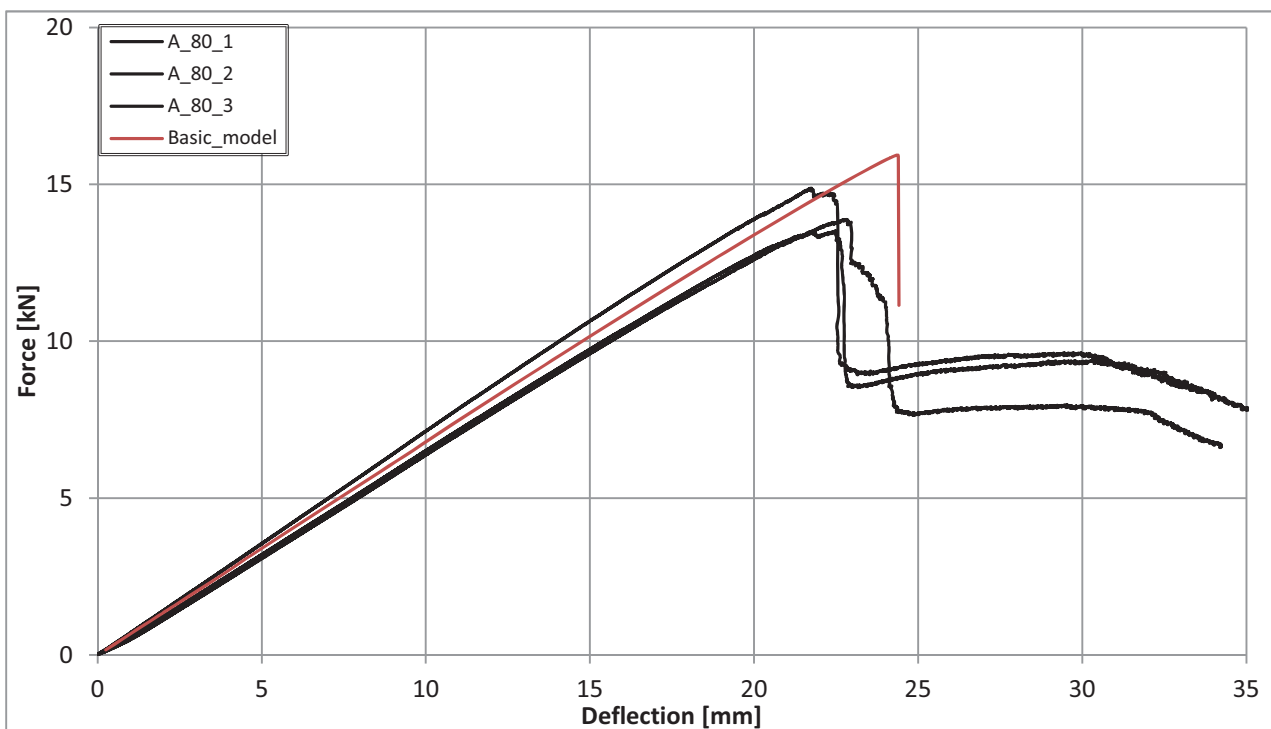
Ακολουθούν τα συγκριτικά διαγράμματα δύναμης – βέλους κάμψης μεταξύ του αρχικού μοντέλου και των πειραματικών αποτελεσμάτων.

Intact



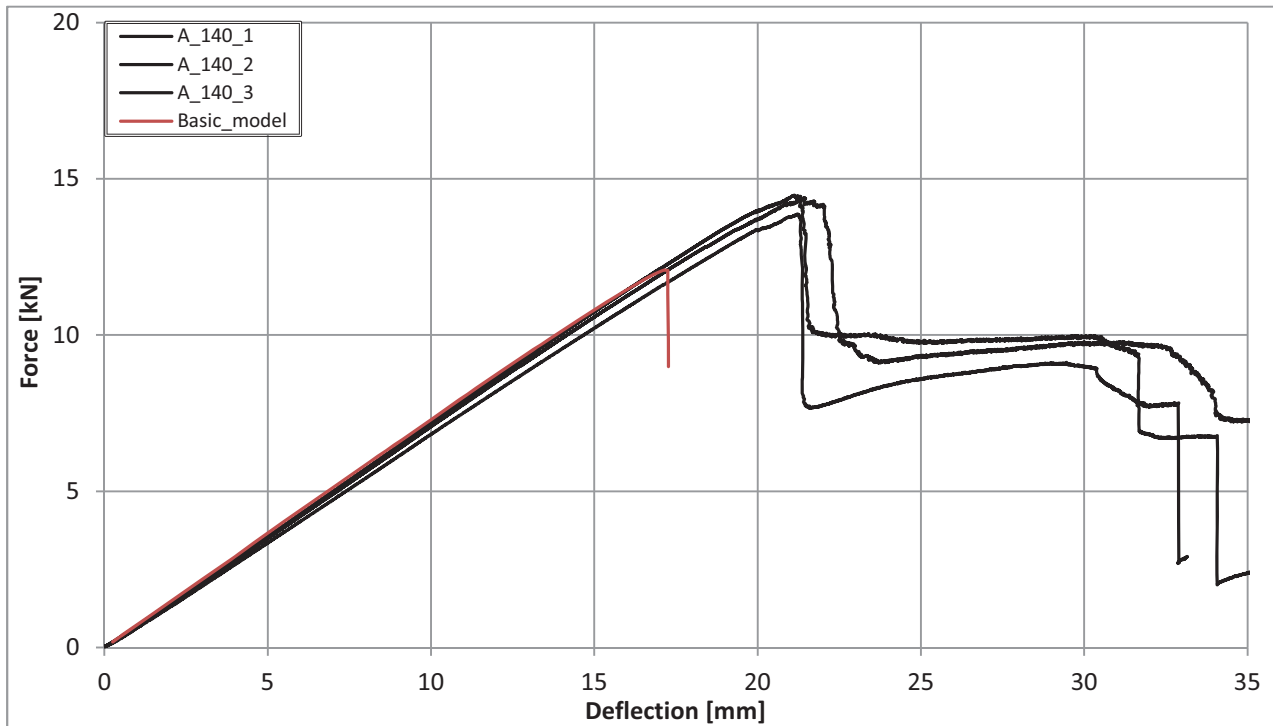
Εικόνα 5.3: Συγκριτικό διάγραμμα μεταξύ πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων για τα δοκίμια της σειράς Intact.

A-80



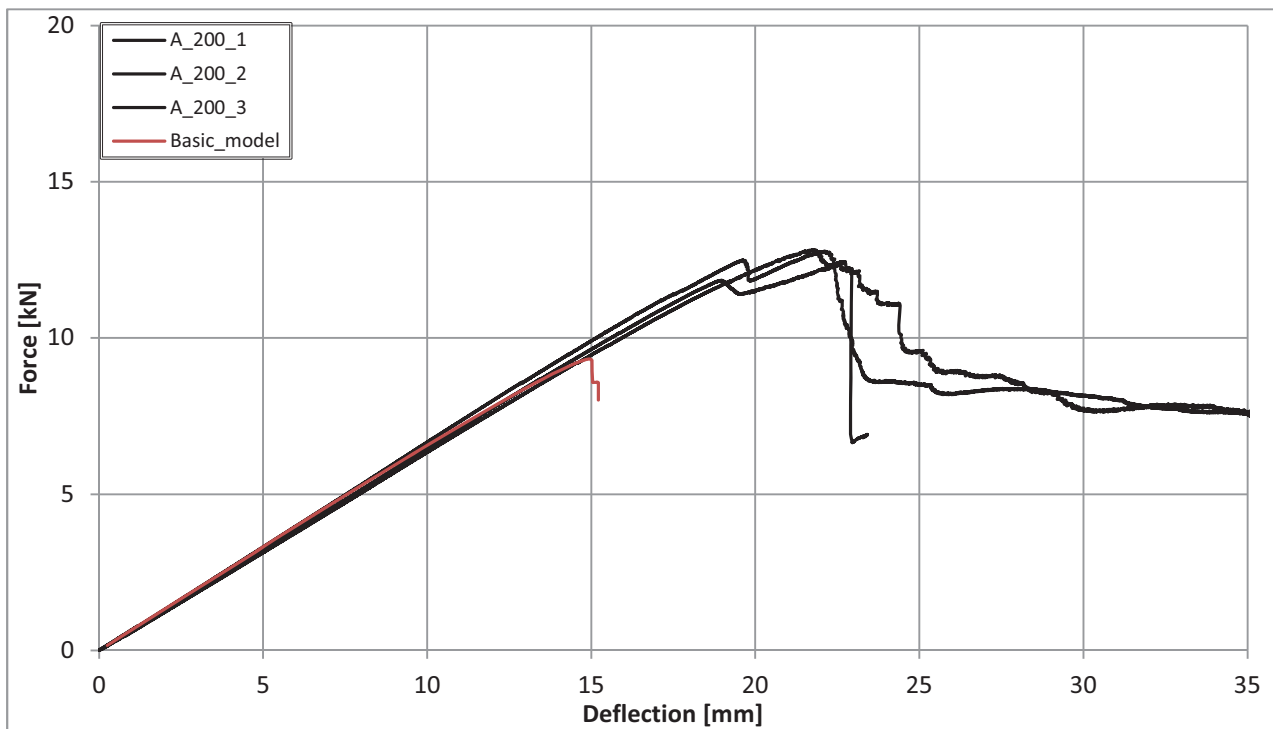
Εικόνα 5.4: Συγκριτικό διάγραμμα μεταξύ πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων για τα δοκίμια της σειράς A-80.

A-140



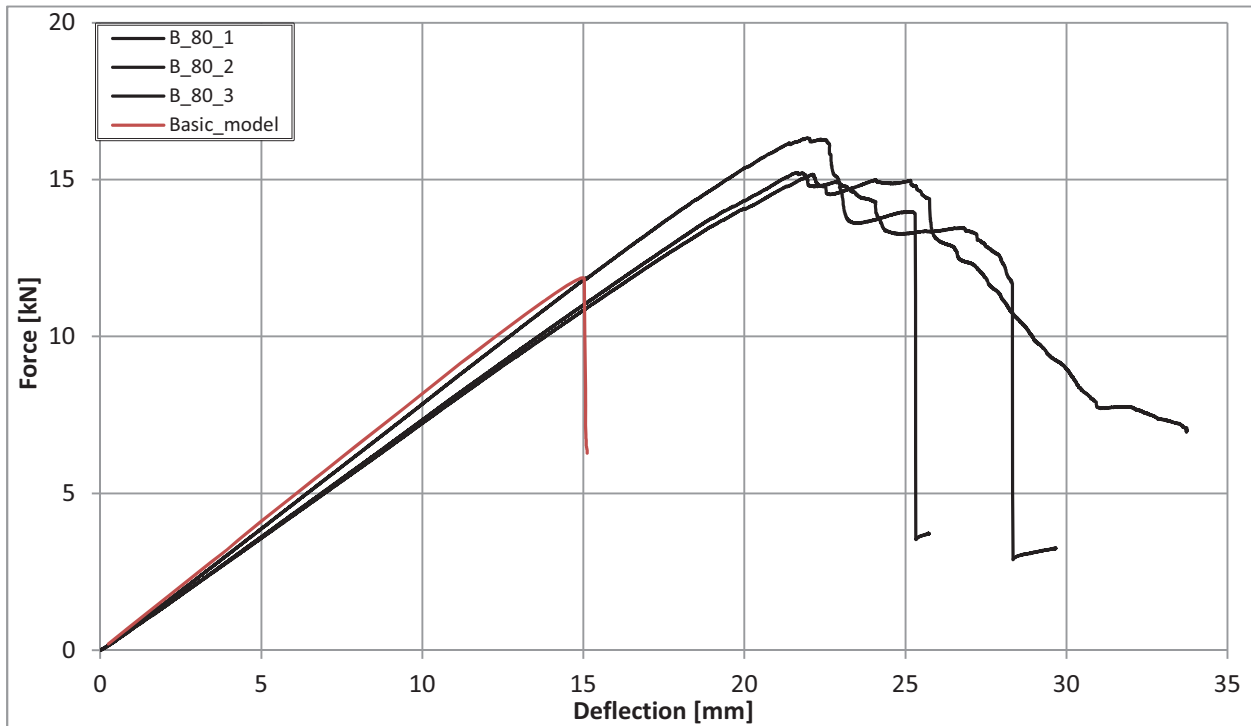
Εικόνα 5.5: Συγκριτικό διάγραμμα μεταξύ πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων για τα δοκίμια της σειράς A-140.

A-200



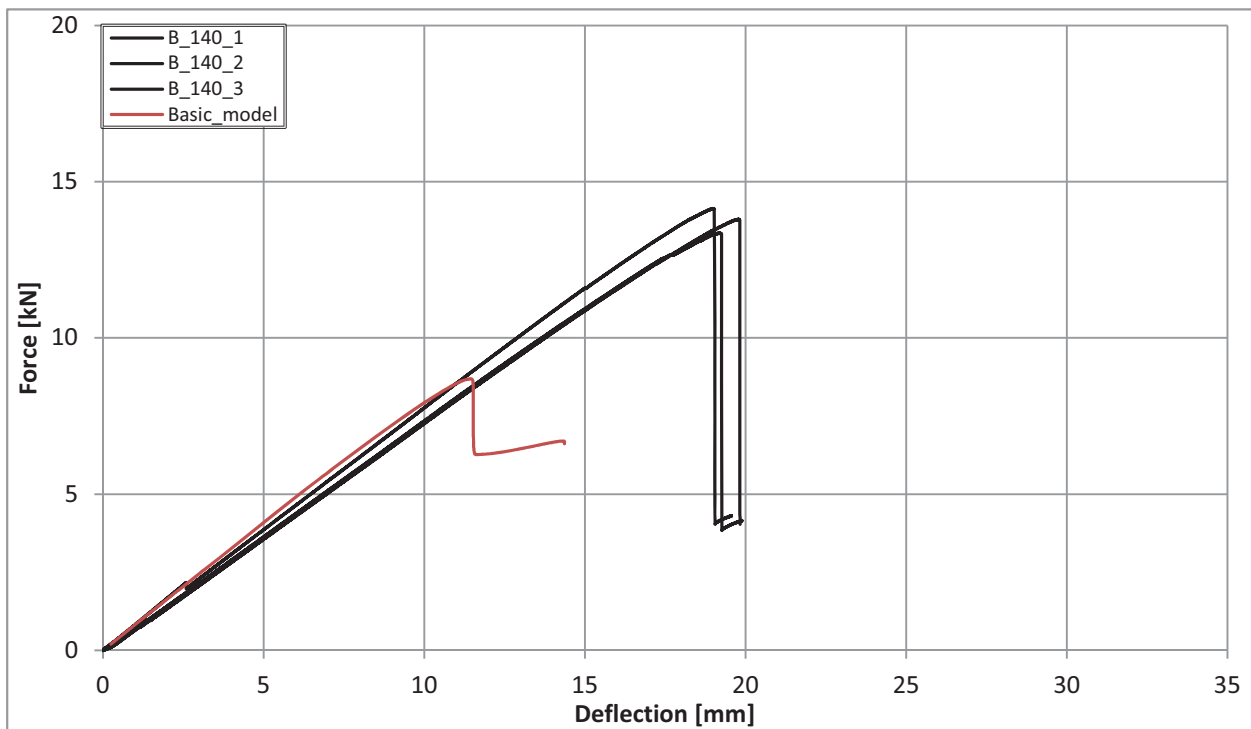
Εικόνα 5.6: Συγκριτικό διάγραμμα μεταξύ πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων για τα δοκίμια της σειράς A-200.

B-80



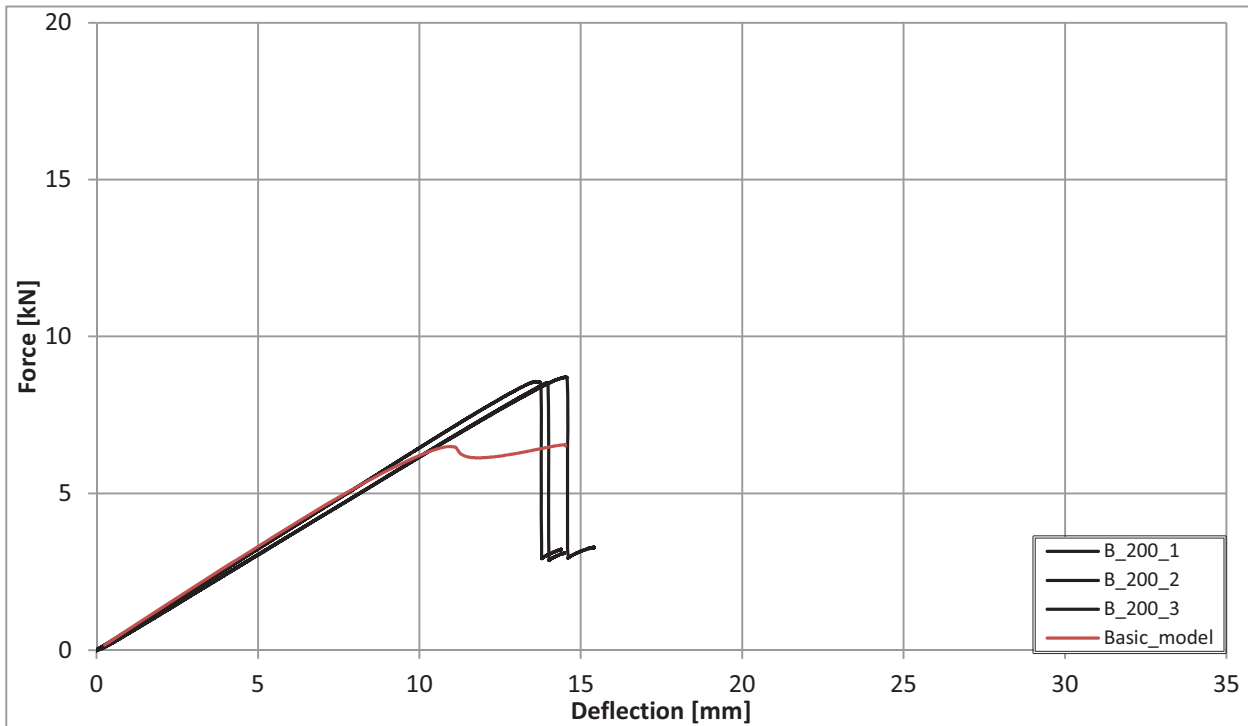
Εικόνα 5.7: Συγκριτικό διάγραμμα μεταξύ πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων για τα δοκίμια της σειράς B-80.

B-140



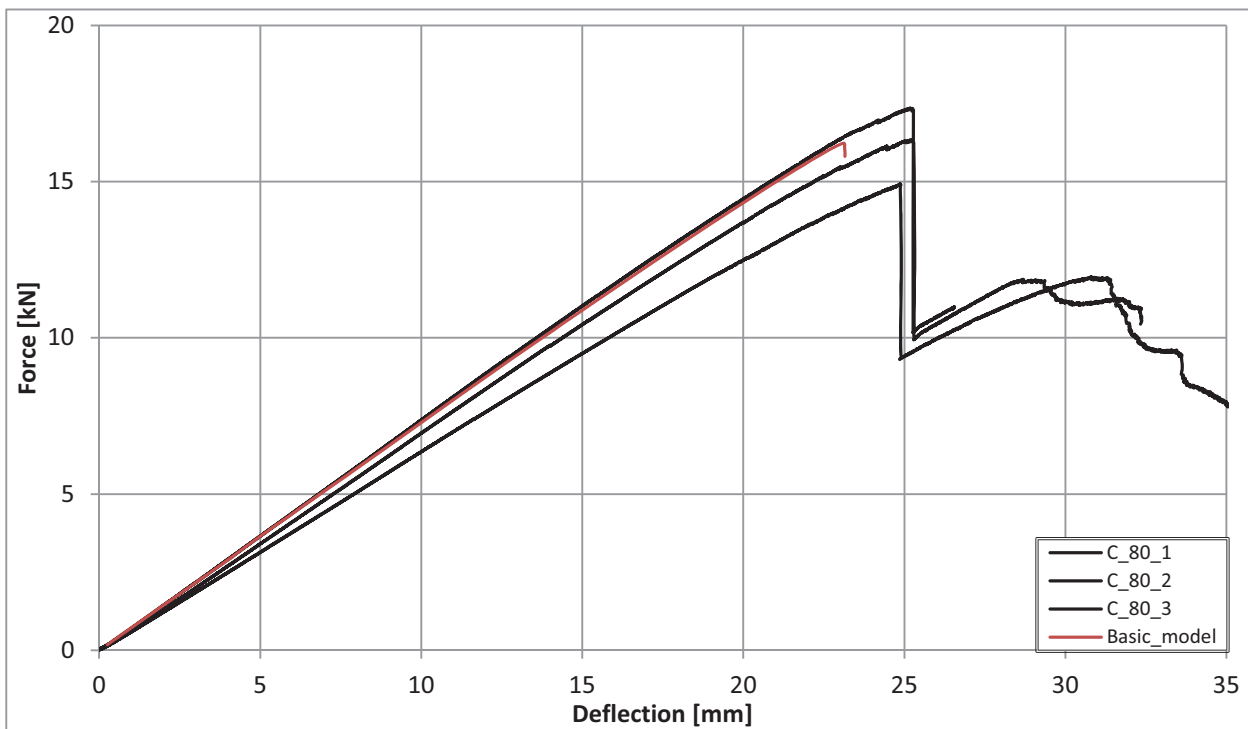
Εικόνα 5.8: Συγκριτικό διάγραμμα μεταξύ πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων για τα δοκίμια της σειράς B-140.

B-200



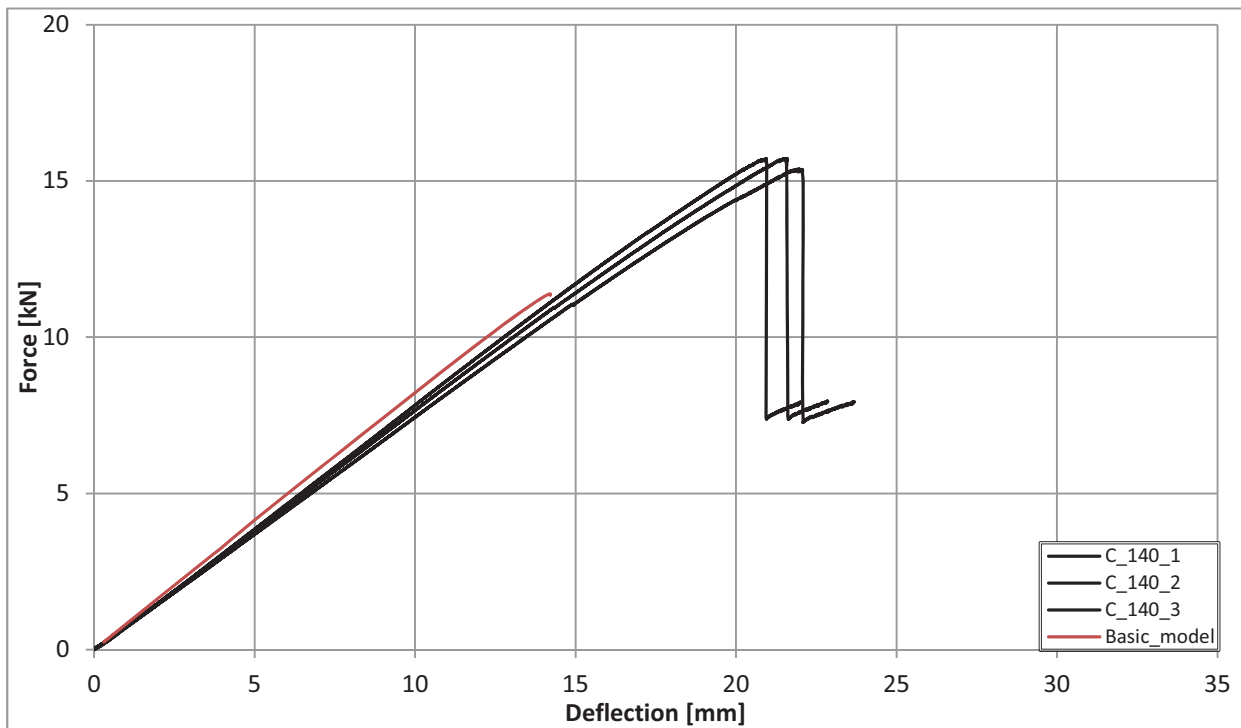
Εικόνα 5.9: Συγκριτικό διάγραμμα μεταξύ πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων για τα δοκίμια της σειράς B-200.

C-80



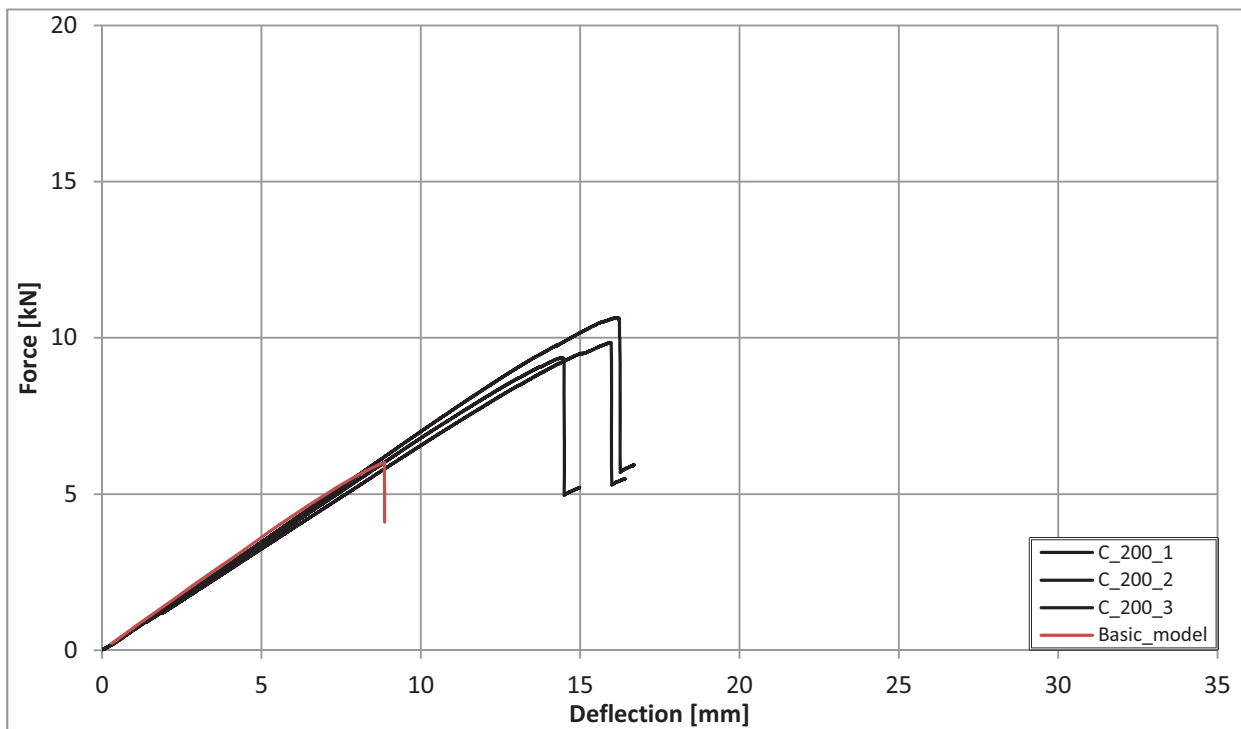
Εικόνα 5.10: Συγκριτικό διάγραμμα μεταξύ πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων για τα δοκίμια της σειράς C-80.

C-140



Εικόνα 5.11: Συγκριτικό διάγραμμα μεταξύ πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων για τα δοκίμια της σειράς C-140.

C-200



Εικόνα 5.12: Συγκριτικό διάγραμμα μεταξύ πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων για τα δοκίμια της σειράς C-200.

Παρατηρήσεις - Αξιολόγηση

- Παρατηρείται πολύ καλή σύμπτωση της καμπτικής ακαμψίας των μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων και των πειραματικών δοκιμών σε όλες τις περιπτώσεις.
- Το άθικτο μοντέλο έχει εξαιρετική συμπεριφορά, η καμπτική ακαμψία είναι συμβατή με τις πειραματικές καμπύλες.
- Εκτός από την περίπτωση A-80 και C- 80 σε όλες τις άλλες περιπτώσεις, όπου υπάρχει αποχωρισμός, το μοντέλο υποεκτιμά τη μέγιστη δύναμη F_{MAX} που μπορεί να φέρει το δοκίμιο. Αυτό φαίνεται αναλυτικά στο πίνακα 5.3 .

Πίνακας 5.3: Μέγιστα φορτία πειραματικών δοκιμών και βασικού μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων.

Specimen	Experimental	Basic model
A_80	14.088	15.933
A_140	14.245	12.074
A_200	12.675	9.325
B_80	15.573	11.870
B_140	13.767	8.688
B_200	8.604	6.549
C_80	16.212	16.228
C_140	15.604	11.384
C_200	9.957	6.008
Intact	16.020	-

Πρέπει να προσέξουμε πως το μοντέλο μοντελοποιεί μόνο την αστοχία λόγω διάδοσης του αποχωρισμού. Η αστοχία λόγω θλίψης και εφελκυσμού καθώς και η σταδιακή αστοχία των στοιχείων δεν μοντελοποιήθηκαν. Λόγω της γεωμετρίας του προβλήματος, δηλαδή της άσκησης της δύναμης σε πολύ μικρή επιφάνεια (ένα μόνο στοιχείο), παρουσιάστηκαν έντονα φαινόμενα συγκέντρωσης τάσεων στην περιοχή άσκησης της δύναμης. Το γεγονός αυτό οδήγησε στο να ικανοποιούνται πολύ πρόωρα τα κριτήρια αστοχίας (κριτήριο μέγιστης τάσης και κριτήριο Tsai-Wu).

Όπως είδαμε λοιπόν και στο Κεφάλαιο 4, κάποια δοκίμια αστόχησαν τοπικά λόγω θλίψης ή εφελκυσμού. Οι περιπτώσεις αυτές λοιπόν δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αξιολογηθεί το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων όσον αφορά την μέγιστη δύναμη που προβλέπει. Για να εκτιμήσουμε την συμπεριφορά του μοντέλου ως προς την μέγιστη δύναμη την οποία προβλέπει θα βασιστούμε μοναχά στα δοκίμια στα οποία η αστοχία οφείλεται στη διάδοση του αποχωρισμού. Βέβαια, για να αξιολογηθεί η μορφή των καμπυλών, που παράγονται από το μοντέλο, όσον αφορά την καμπτική ακαμψία μπορούν να χρησιμοποιηθούν όλα τα δοκίμια.

Οι ποσοστιαίες αποκλίσεις ως προς την μέγιστη δύναμη μεταξύ πειραματικών δοκιμών και του μοντέλου για κάθε περίπτωση συνοψίζονται στον πίνακα 5.4 .

Πίνακας 5.4: Απόλυτη και ποσοστιαία διαφορά μέγιστων φορτίων μεταξύ πειραματικών δοκιμών και βασικού μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων.

Specimen	Basic model	
	Difference	% Diff.
A_80	-	-
A_140	-	-
A_200	-3.350	-26.4
B_80	-	-
B_140	-5.078	-36.9
B_200	-2.055	-23.9
C_80	-	-
C_140	-4.220	-27.0
C_200	-3.949	-39.7

- Σε όλα τα μοντέλα με αποχωρισμό στρώσεων, ο αποχωρισμός δεν διαδίδεται μέχρι τέλους. Στα μοντέλα C-80 και C-140 η ανάλυση σταματά τη στιγμή που ο αποχωρισμός ξεκινά να διαδίδεται. Η συμπεριφορά αυτή του μοντέλου αποτελεί μειονέκτημα.

Οι αποκλίσεις, στα μέγιστα φορτία είναι σχετικά μεγάλες και οφείλονται στις ιδιότητες που έχουμε ορίσει για τον μηχανισμό με τον οποίο διαδίδεται ο αποχωρισμός των στρώσεων (CZM properties). Η διαδικασία προσδιορισμού των ιδιοτήτων αυτών είναι ιδιαίτερα δύσκολη και τα αποτελέσματα της αφορούν τα συγκεκριμένα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν κατά την διαδικασία των δοκιμών μέτρησης και είναι πολύ πιθανό να διαφοροποιούνται για τα δικά μας δοκίμια.

Για το λόγο αυτό στην επόμενη παράγραφο γίνεται μια διερεύνηση της επίδρασης των ιδιοτήτων αυτών έτσι ώστε να πλησιάσουμε όσο το δυνατόν περισσότερο τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών. Επιπλέον αναλύεται η μέθοδος με την οποία ξεπεράσαμε το πρόβλημα μη σύγκλισης της ανάλυσης (δηλαδή της μη διάδοσης του αποχωρισμού έως το τέλος).

Τέλος, επιλέγεται το τελικό σύνολο ιδιοτήτων με κριτήριο τον ελάχιστο μέσο όρο αποκλίσεων του μέγιστου φορτίου για όλες τις περιπτώσεις.

5.3 Διερεύνηση ιδιοτήτων συνεκτικής περιοχής

5.3.1 Σταθεροποίηση της ανάλυσης

Στο σημείο αυτό θα αναλυθεί το πρόβλημα της μη σύγκλισης των αναλύσεων. Αυτό που παρατηρήθηκε από την επεξεργασία των μοντέλων είναι πως όταν ο αποχωρισμός πλησίαζε το άκρο της δοκού και η δοκός ήταν έτοιμη να σπάσει σε δύο διαφορετικά τμήματα κάποια στοιχεία στο άκρο του αποχωρισμού είχαν τη τάση να αποκτήσουν πολύ μεγάλες μετατοπίσεις και να παραμορφωθούν σε υπερβολικό βαθμό. Με αποτέλεσμα το πρόβλημα που μοντελοποιούμε, το οποίο έχει οριστεί ως στατικό και το φορτίο επιβάλλεται σε μικρά τμήματα, να γίνεται απότομα δυναμικό με συνέπεια η ανάλυση να σταματά στο σημείο αυτό.

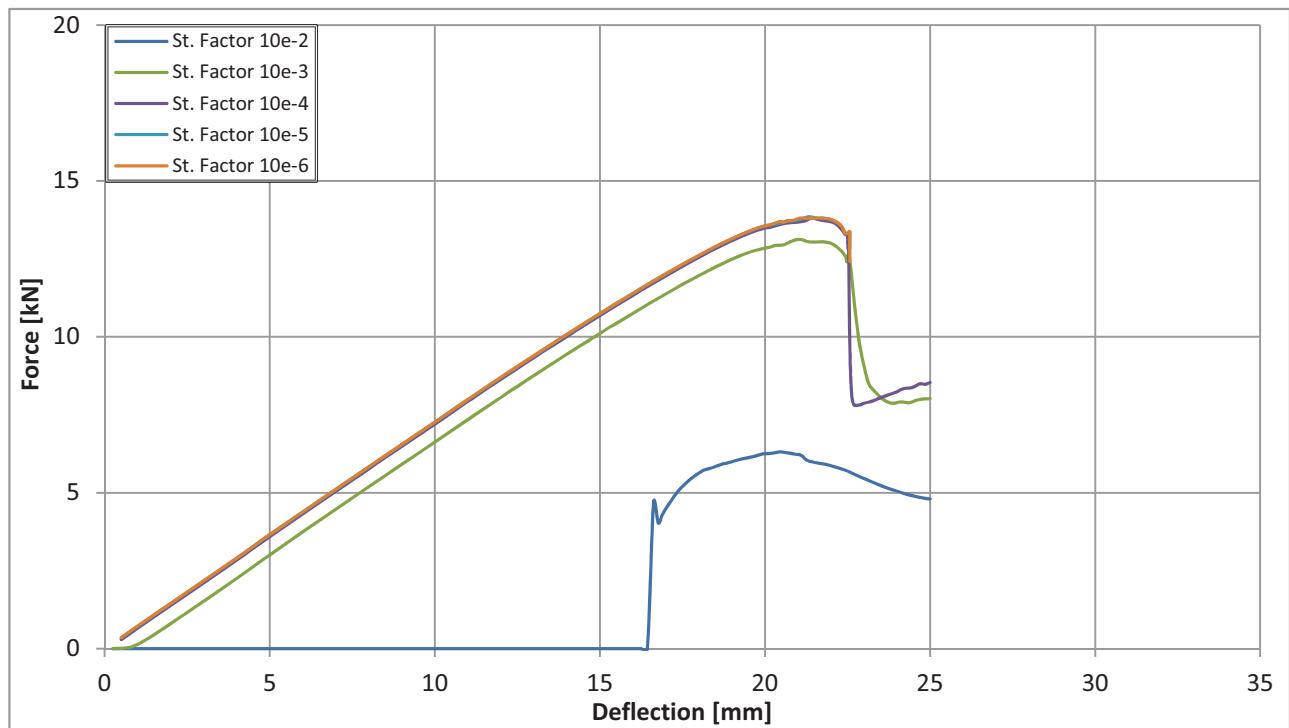
Είναι σύνηθες φαινόμενο η μεγάλη και απότομη παραμόρφωση στοιχείων να προκαλεί προβλήματα σύγκλισης και αστάθειας σε ένα μοντέλο. Το ANSYS μας δίνει τη δυνατότητα μέσω της εντολής “STABILIZE, Key, Method, VALUE, SubStpOpt, FORCELIMIT” να σταθεροποιήσουμε την ανάλυση και να ξεπεράσουμε τις όποιες αστάθειες.

Η μη γραμμική σταθεροποίηση μπορεί να γίνει αντιληπτή σαν μια μέθοδος όπου σε κάθε κόμβο τοποθετούμε μια τεχνητή απόσβεση. Για να αντιληφθούμε καλύτερα τη λειτουργία αυτή σε κάθε κόμβο, φανταστείτε πως σε κάθε θέση υπάρχουν δύο κόμβοι, ένας κόμβος ανήκει στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων το οποίο κατασκευάζει ο σχεδιαστής και ο δεύτερος κόμβος βρίσκεται στην ίδια θέση αλλά είναι πακτωμένος στο χώρο. Το πρόγραμμα υπολογίζει την δύναμη απόσβεσης έτσι ώστε να είναι ανάλογη της σχετικής “ψεύδο-ταχύτητας” μεταξύ των δύο προαναφερθέντων κόμβων. Η “ψεύδο-ταχύτητα” υπολογίζεται ως η ποσότητα αύξησης της μετατόπισης διαιρούμενη από το βήμα επιβολής φορτίου (timester). Οπότε, οποιοσδήποτε βαθμός ελευθερίας έχει την τάση να είναι ασταθής έχει και μεγάλη αύξηση της ποσότητας μετατόπισης προκαλώντας έτσι έντονη δύναμη απόσβεσης, η δύναμη αυτή, κατά συνέπεια, μειώνει τις μετατοπίσεις στον συγκεκριμένο βαθμό ελευθερίας ώστε να επιτευχθεί σταθεροποίηση. Για τους βαθμούς ελευθερίας εκείνους που δεν παρουσιάζουν αστάθειες, η επίδραση της σταθεροποίησης είναι αμελητέα καθώς οι δυνάμεις απόσβεσης που αναπτύσσονται σε τέτοιες περιπτώσεις είναι πολύ μικρότερες από τις φυσικές δυνάμεις που εμφανίζονται στο πρόβλημα.

Ο τρόπος με τον οποίο ο χρήστης μπορεί να ορίσει την ένταση της απόσβεσης αυτής είναι μέσω ενός συντελεστή (dumbing factor). Ο συντελεστής αυτός εξαρτάται σε υψηλό βαθμό από το μέγεθος των στοιχείων, το σχήμα τους, το είδος του υλικού και άλλους παράγοντες συμπεριλαμβανομένου και του μεγέθους του βήματος επιβολής του φορτίου. Το μέγεθος δηλαδή του συντελεστή αυτού είναι διαφορετικό για κάθε πρόβλημα και δεν υπάρχει κάποια συνάρτηση που να μας δίνει την τάξη μεγέθους του για ένα συγκεκριμένο πρόβλημα. Ο μόνος τρόπος για τον προσδιορισμό του είναι να διερευνηθεί ένα μεγάλο εύρος τιμών και να αξιολογηθεί η επίδραση που έχει στο μοντέλο.

Ένας μεγάλος συντελεστής οδηγεί στην επιβολή μεγάλων δυνάμεων απόσβεσης με αποτέλεσμα να αλλοιώνονται τα αποτελέσματα και να παίρνουμε αποτελέσματα χωρίς φυσική σημασία. Βέβαια εάν ο συντελεστής είναι ιδιαίτερα μικρός τότε οι δυνάμεις απόσβεσης που θα ασκούνται στους κόμβους που παρουσιάζουν αστάθειες δεν θα είναι ικανές να περιορίσουν τις μεγάλες μετατοπίσεις των κόμβων αυτών, με αποτέλεσμα να μην επιτυγχάνεται σταθεροποίηση και να μην υπάρχει σύγκλιση. Άρα ουσιαστικά ψάχνουμε να βρούμε τον ελάχιστο συντελεστή ο οποίος σταθεροποιεί την ανάλυση, ώστε να έχουμε και σύγκλιση αλλά και την ελάχιστη δυνατή επίδραση πάνω στο μοντέλο.

Η παραπάνω προσπάθεια φαίνεται χαρακτηριστικά στην εικόνα 5.13. Εξετάστηκαν οι συντελεστές $10e-2$, $10e-3$, $10e-4$, $10e-5$ και $10e-6$. Ο συντελεστής $10e-2$ μας δίνει εντελώς λανθασμένα αποτελέσματα. Όσο μικραίνει ο συντελεστής η λύση γίνεται πιο λογική έως ότου για συντελεστή ίσο με $10e-5$ και $10e-6$ η ανάλυση να μη συγκλίνει. Άρα επιλέγεται $Stabilization_Factor=10e-4$.



Εικόνα 5.13: Διερεύνηση για τον συντελεστή σταθεροποίησης, μοντέλο A-140.

5.3.2 Περιπτώσεις που διερευνήθηκαν

Οι ιδιότητες που χαρακτηρίζουν τη συνεκτική περιοχή είναι οι παρακάτω:

σ_{max} = μέγιστη ορθή τάση επαφής

G_{cn} = κρίσιμη ενέργεια θραύσεως για mode I

τ_{max} = μέγιστη εφαπτομενική τάση επαφής

G_{ct} = κρίσιμη ενέργεια θραύσεως για mode II

Οι αρχικές τιμές που επιλέχθηκαν ήταν οι παρακάτω (βλέπε πίνακα 5.2)

$$S_{max} = 0.60 \text{ N/mm}^2$$

$$G_{cn} = 1.40 \text{ N/mm}$$

$$T_{max} = 16.97 \text{ N/mm}^2$$

$$G_{ct} = 2.03 \text{ N/mm}$$

Αρχικά μεταβάλαμε μια-μια τις ιδιότητες για Mode 2 (ο οποίος είναι ο κυρίαρχος τρόπος αστοχίας) ύστερα μεταβάλλαμε και τις δύο ιδιότητες. Πριν συνεχίσουμε εξετάστηκε η επίδραση των ιδιοτήτων για Mode I αστοχία. Η αλλαγή των ιδιοτήτων αυτών δεν είχε καμία ουσιαστική επίδραση σε όλα τα μοντέλα εκτός από το μοντέλο C-200 στο οποίο παρουσιάζεται λυγισμός. Η αύξηση του S_{max} κατά 100% οδήγησε σε πολύ καλύτερα αποτελέσματα οπότε και στη συνέχεια της διερεύνησης κρατήσαμε το αυξημένο S_{max} . Ακολουθεί αναλυτική περιγραφή των περιπτώσεων που εξετάσαμε και παρουσιάζονται διαγράμματα για κάθε μοντέλο. Τέλος συγκεντρώνονται και αξιολογούνται τα αποτελέσματα και επιλέγεται το βέλτιστο σύνολο ιδιοτήτων.

Περιπτώσεις που διερευνήθηκαν

- $G_{II}+10\%$: αυξάνουμε τη κρίσιμη ενέργεια θραύσεως για mode II κατά 10%
- $G_{II}+50\%$: αυξάνουμε τη κρίσιμη ενέργεια θραύσεως για mode II κατά 50%
- $T_{max}+10\%$: αυξάνουμε τη μέγιστη εφαπτομενική τάση επαφής κατά 10%
- $T_{max}+50\%$: αυξάνουμε τη μέγιστη εφαπτομενική τάση επαφής κατά 50%
- $G_{II}+50\%$ & $T_{max}+50\%$: ταυτόχρονη αύξηση της κρίσιμης ενέργειας θραύσεως για mode II κατά 50% και της μέγιστης εφαπτομενικής τάσης επαφής κατά 50%
- Mode I test 1 : αυξάνουμε τη μέγιστη ορθή τάση επαφής κατά 10%
- Mode I test 2 : αυξάνουμε τη κρίσιμη ενέργεια θραύσεως για mode I κατά 100%
- $G_I+100\%$: κρατώντας το $S_{max}=1.2$ αυξάνουμε τη κρίσιμη ενέργεια θραύσεως για mode II κατά 100%
- $T_{max}-20\%$ & $G_{II}+100\%$: μείωση της μέγιστης εφαπτομενικής τάσης επαφής κατά 20% και ταυτόχρονη αύξηση της κρίσιμης ενέργειας θραύσεως για mode II κατά 100%

Οι παραπάνω περιπτώσεις αναλύονται και στα διαγράμματα των εικόνων 5.14 έως 5.22 .

Πέρα από τις περιπτώσεις αυτές εξετάστηκαν και οι παρακάτω:

- $G_{II}+40\%$: αυξάνουμε τη κρίσιμη ενέργεια θραύσεως για mode II κατά 40%
- $G_{II}+60\%$: αυξάνουμε τη κρίσιμη ενέργεια θραύσεως για mode II κατά 60%
- $G_{II}+70\%$: αυξάνουμε τη κρίσιμη ενέργεια θραύσεως για mode II κατά 70%
- $G_{II}+80\%$: αυξάνουμε τη κρίσιμη ενέργεια θραύσεως για mode II κατά 80%
- $T_{max}-30\%$ & $G_{II}+100\%$: μείωση της μέγιστης εφαπτομενικής τάσης επαφής κατά 30% και ταυτόχρονη αύξηση της κρίσιμης ενέργειας θραύσεως για mode II κατά 100%

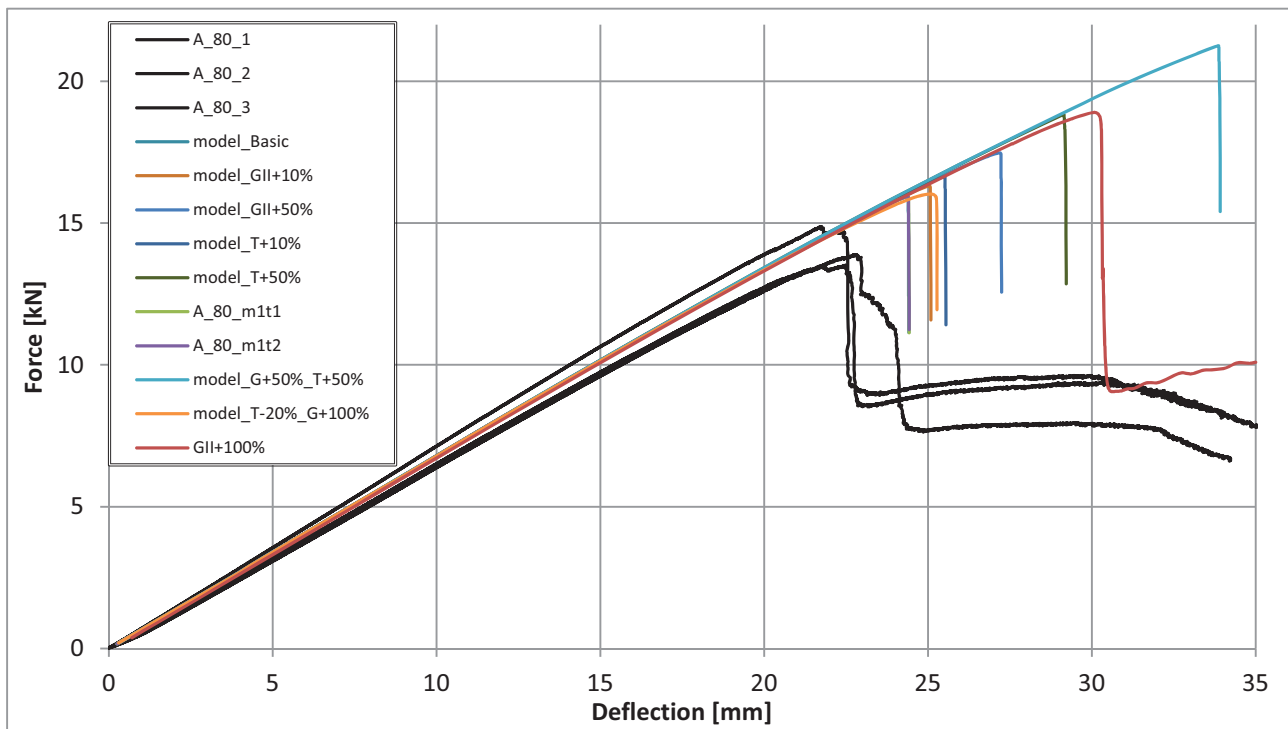
-

Για τις περιπτώσεις αυτές καταγράφεται το μέγιστο φορτίο αλλά δεν τοποθετούνται στα διαγράμματα που ακολουθούν καθώς θα επιβαρύνονταν τα διαγράμματα πολύ και θα ήταν δυσανάγνωστα.

5.3.3 Συγκριτικά διαγράμματα διερεύνησης

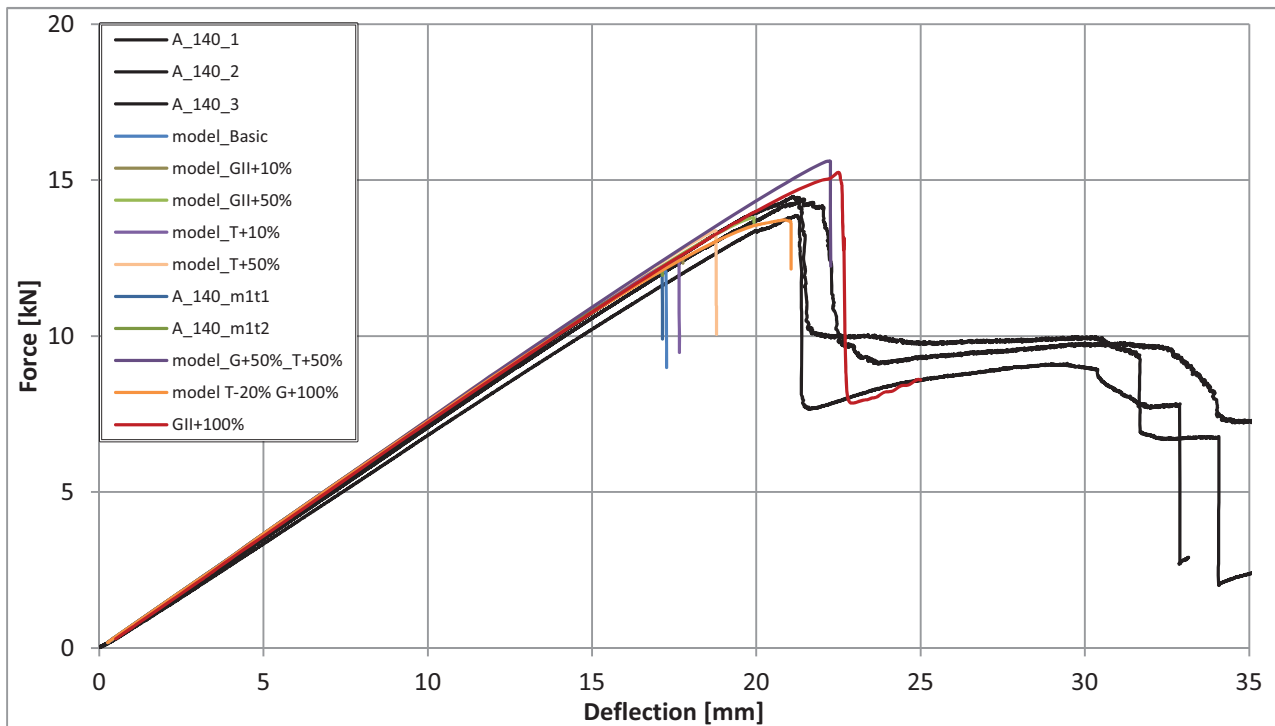
Στα διαγράμματα των εικόνων 5.14 έως 5.22 φαίνονται οι καμπύλες δύναμης – βέλους κάμψης για τα διάφορα σύνολα ιδιοτήτων της συνεκτικής ζώνης που διερευνήθηκαν. Στα διαγράμματα αυτά βασιστήκαμε για να επιλέξουμε το τελικό σύνολο ιδιοτήτων. Λήφθηκε υπόψη και η μέγιστη δύναμη (όπου ήταν δυνατή η σύγκριση) καθώς και η μορφή των καμπυλών. Παρατηρείται πως οι ιδιότητες αυτές δεν επηρεάζουν την ακαμψία των μοντέλων αλλά έχουν σημαντική επίδραση στο μέγιστο φορτίο που μπορεί να φέρει το μοντέλο.

A-80



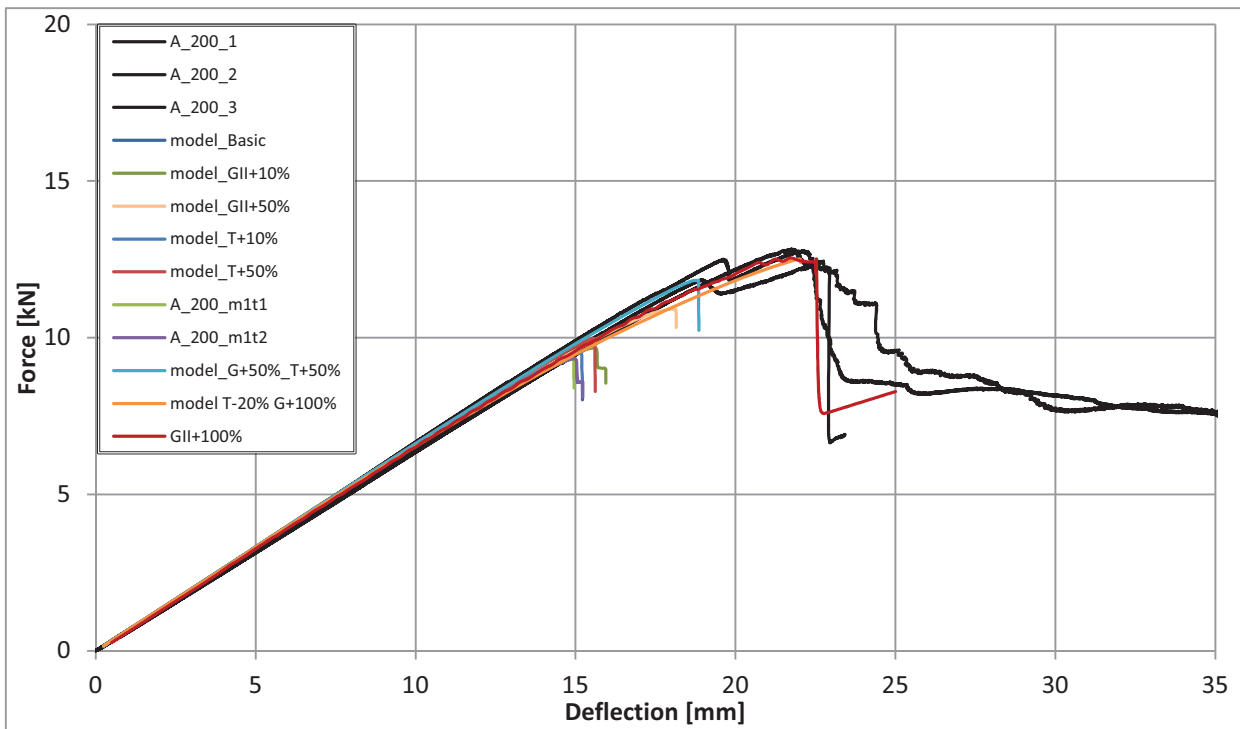
Εικόνα 5.14: Διερεύνηση για τις ιδιότητες της συνεκτικής περιοχής, A-80

A-140



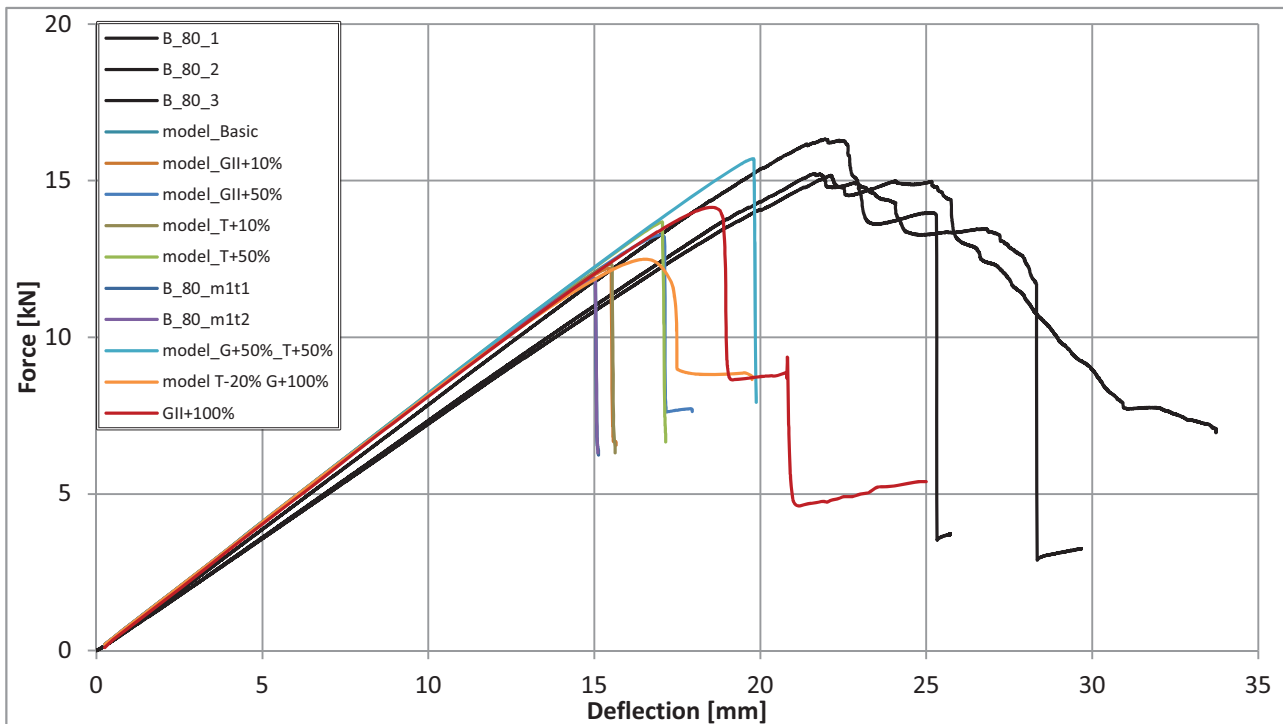
Εικόνα 5.15: Διερεύνηση για τις ιδιότητες της συνεκτικής περιοχής, A-140

A-200



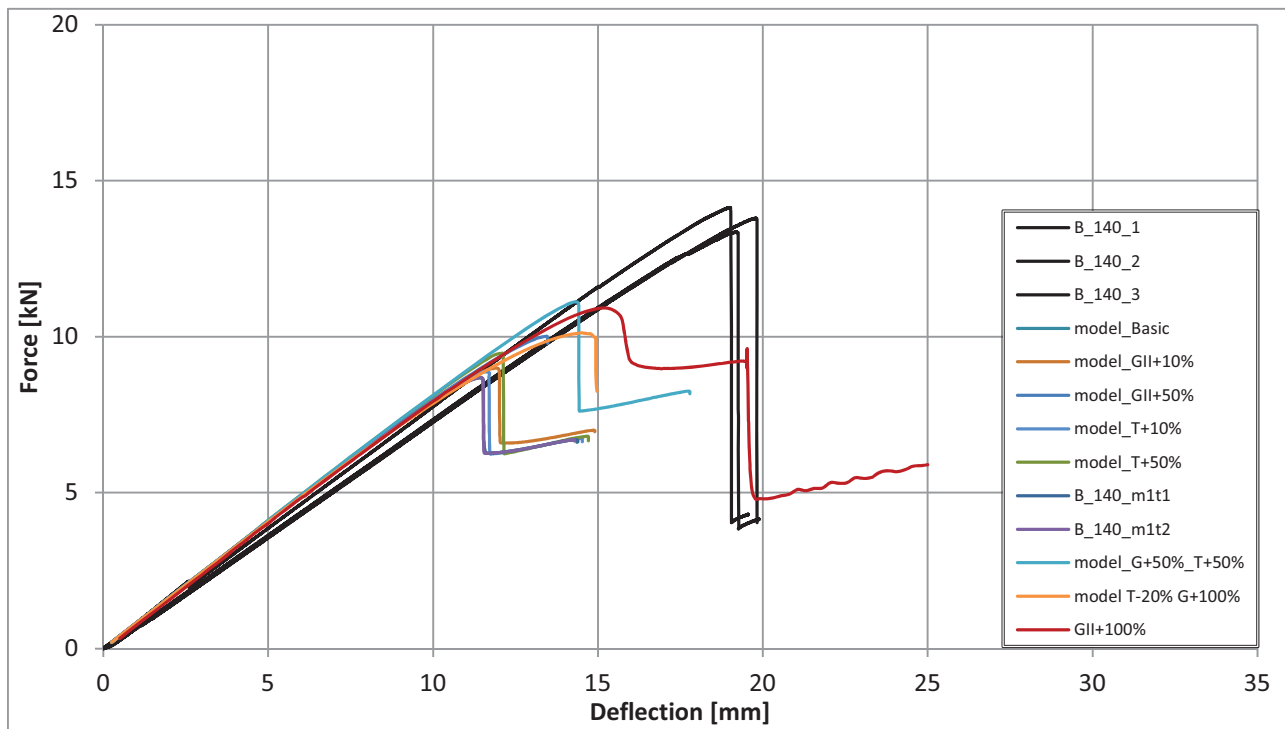
Εικόνα 5.16: Διερεύνηση για τις ιδιότητες της συνεκτικής περιοχής, A-200

B-80



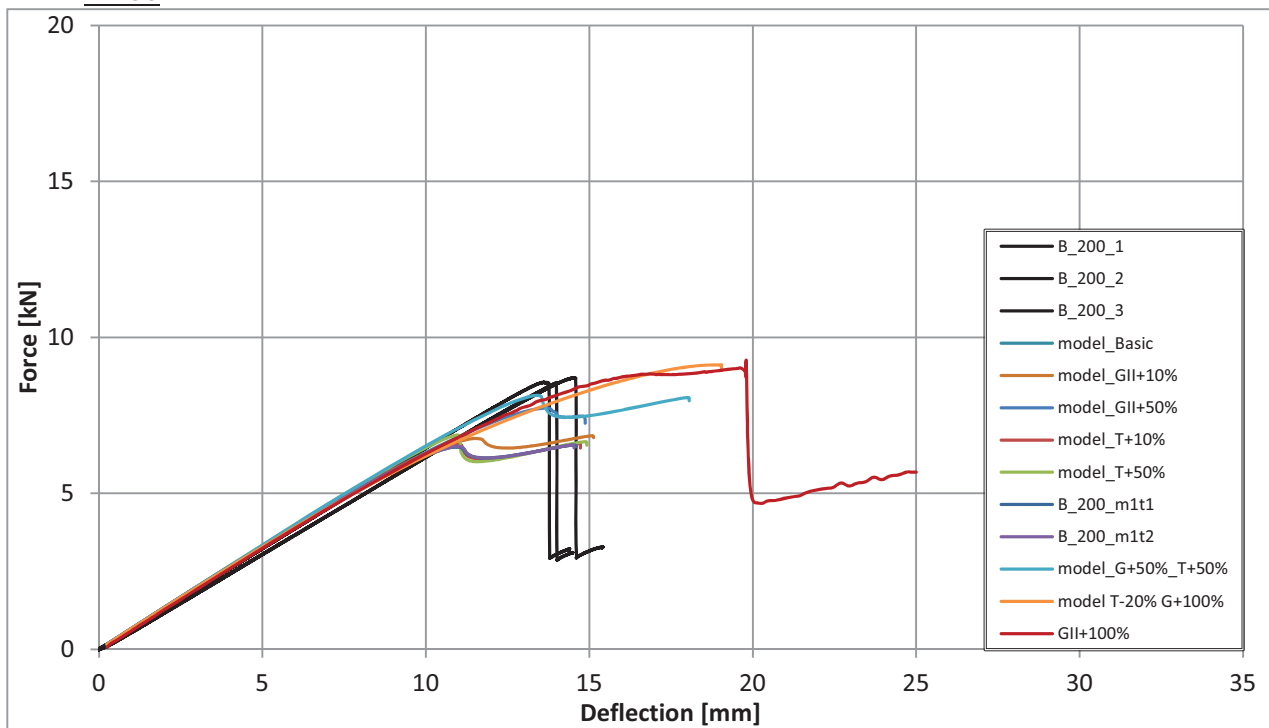
Εικόνα 5.17: Διερεύνηση για τις ιδιότητες της συνεκτικής περιοχής, B-80

B-140



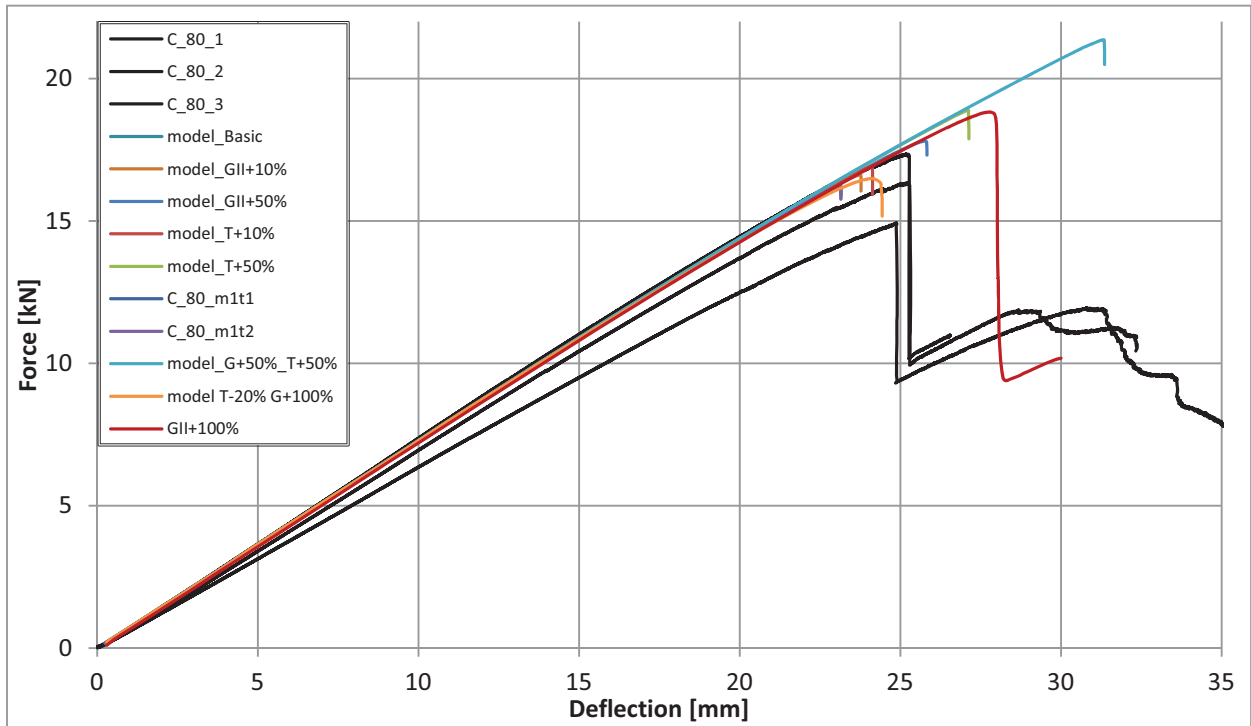
Εικόνα 5.18: Διερεύνηση για τις ιδιότητες της συνεκτικής περιοχής, B-140

B-200



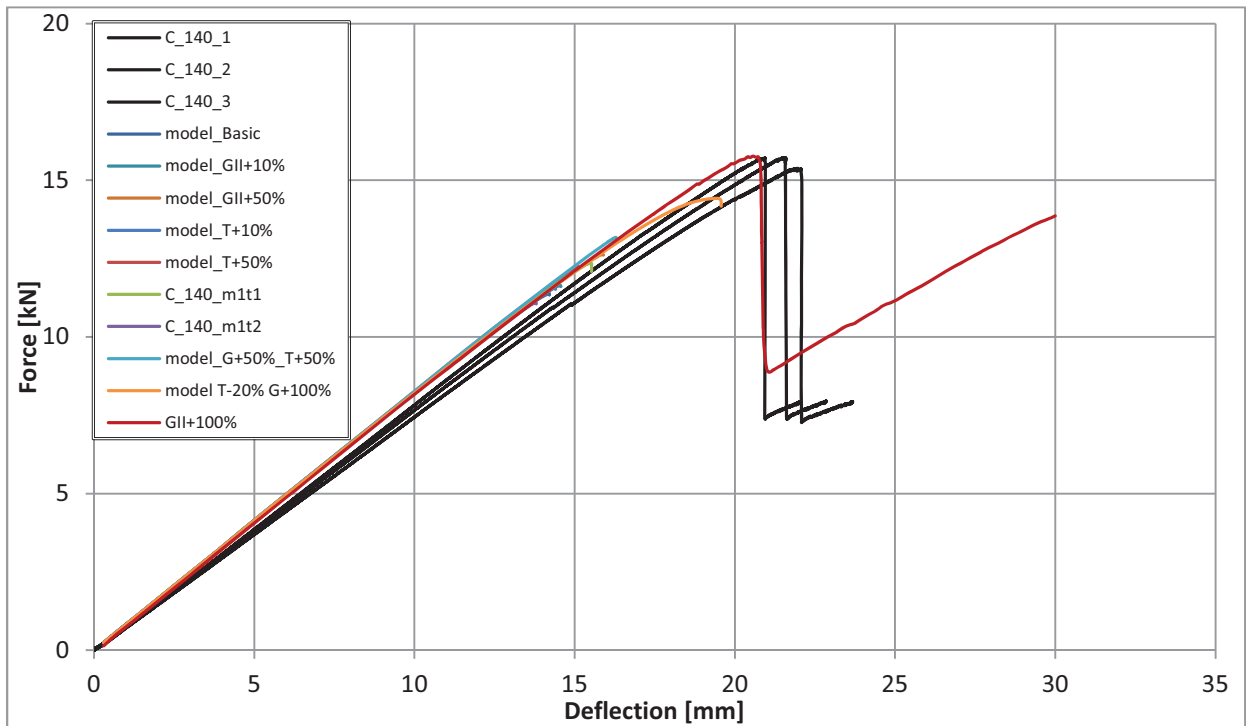
Εικόνα 5.19: Διερεύνηση για τις ιδιότητες της συνεκτικής περιοχής, B-200

C-80



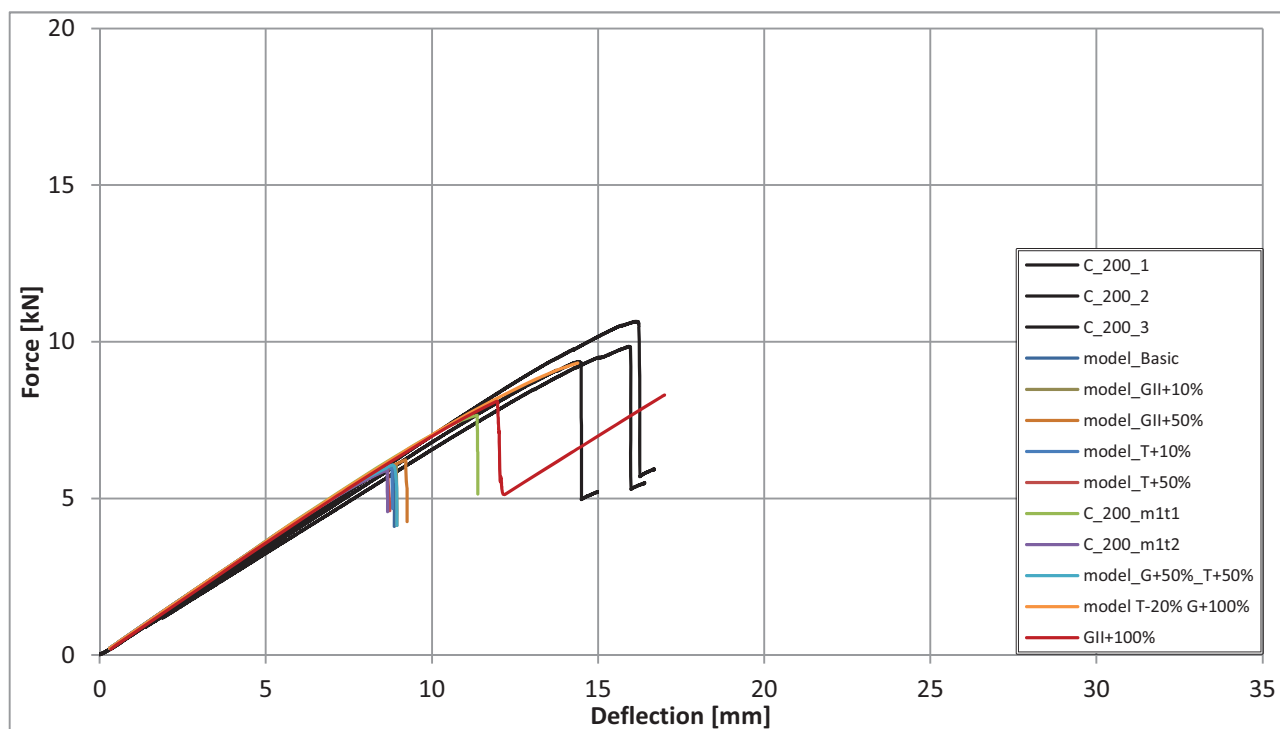
Εικόνα 5.20: Διερεύνηση για τις ιδιότητες της συνεκτικής περιοχής, C-80

C-140



Εικόνα 5.21: Διερεύνηση για τις ιδιότητες της συνεκτικής περιοχής, C-14

C-200



Εικόνα 5.22: Διερεύνηση για τις ιδιότητες της συνεκτικής περιοχής, C-200

Στο παρακάτω πίνακα συγκεντρώνονται τα μέγιστα φορτία για κάθε περίπτωση και για κάθε σύνολο ιδιοτήτων.

Πίνακας 5.5 : Συγκεντρωτικά μέγιστα φορτία

Specimen	Experimental	Basic	GII+10%	GII+50%	T+10%	T+50%
A_80	-	-	-	-	-	-
A_140	-	-	-	-	-	-
A_200	12.675	9.325	9.679	10.915	9.508	9.972
B_80	-	-	-	-	-	-
B_140	13.767	8.688	8.990	10.015	8.868	9.469
B_200	8.604	6.549	6.846	7.737	6.595	6.867
C_80	-	-	-	-	-	-
C_140	15.604	11.384	11.643	12.632	11.579	12.254
C_200	9.957	6.008	6.055	6.229	5.984	5.930
Intact	16.020	-	-	-	-	-

Specimen	GII+50%_T+50%	GII+40%	GII+60%	GII+70%	GII+80%
A_80	-	-	-	-	-
A_140	-	-	-	-	-
A_200	11.831	10.600	11.237	11.564	11.8889
B_80	-	-	-	-	-
B_140	11.119	9.786	10.256	10.444	10.6455
B_200	8.143	7.673	7.953	8.197	8.42632
C_80	-	-	-	-	-
C_140	13.176	13.908	14.620	14.929	15.2311
C_200	6.048	8.094	8.292	8.387	8.48344
Intact	-	-	-	-	-

Specimen	GII+100%	T-30%_GII+100%	T-20%_GII+100%
A_80	-	-	-
A_140	-	-	-
A_200	12.546	12.127	12.513
B_80	-	-	-
B_140	10.919	9.801	10.123
B_200	9.263	9.149	9.122
C_80	-	-	-
C_140	15.769	14.102	14.424
C_200	8.298	9.878	9.322
Intact	-	-	-

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι απόλυτες διαφορές και οι ποσοστιαίες διαφορές για κάθε σύνολο ιδιοτήτων.

Πίνακας 5.6: Απόλυτες και ποσοστιαίες αποκλίσεις του μέγιστου φορτίου από τις πειραματικές δοκιμές.

Specimen	Basic		GII+10%		GII+50%		T+10%	
	Difference	% Diff.	Difference	% Diff.	Difference	% Diff.	Difference	% Diff.
A_80	-	-	-	-	-	-	-	-
A_140	-	-	-	-	-	-	-	-
A_200	-3.350	-26.4	-2.995	-23.6	1.760	13.9	-3.167	-25.0
B_80	-	-	-	-	-	-	-	-
B_140	-5.078	-36.9	-4.777	-34.7	3.752	27.3	-4.899	-35.6
B_200	-2.055	-23.9	-1.758	-20.4	0.867	10.1	-2.009	-23.4
C_80	-	-	-	-	-	-	-	-
C_140	-4.220	-27.0	-3.961	-25.4	2.972	19.0	-4.025	-25.8
C_200	-3.949	-39.7	-3.902	-39.2	3.727	37.4	-3.972	-39.9
Intact	-16.020	-	-	-	-	-	-	-

Specimen	T+50%		GII+50%_T+50%		GII+40%	
	Difference	% Diff.	Difference	% Diff.	Difference	% Diff.
A_80	-	-	-	-	-	-
A_140	-	-	-	-	-	-
A_200	-2.702	-21.3	-0.843	-6.7	-2.075	-16.4
B_80	-	-	-	-	-	-
B_140	-4.298	-31.2	-2.648	-19.2	-3.981	-28.9
B_200	-1.737	-20.2	-0.461	-5.4	-0.931	-10.8
C_80	-	-	-	-	-	-
C_140	-3.350	-21.5	-2.428	-15.6	-1.696	-10.9
C_200	-4.027	-40.4	-3.908	-39.3	-1.863	-18.7
Intact	-	-	-	-	-	-

Specimen	GII+60%		GII+70%		GII+80%	
	Difference	% Diff.	Difference	% Diff.	Difference	% Diff.
A_80	-	-	-	-	-	-
A_140	-	-	-	-	-	-
A_200	-1.437	-11.3	-1.111	-8.8	-0.786	-6.2
B_80	-	-	-	-	-	-
B_140	-3.511	-25.5	-3.323	-24.1	-3.121	-22.7
B_200	-0.651	-7.6	-0.407	-4.7	-0.178	-2.1
C_80	-	-	-	-	-	-
C_140	-0.984	-6.3	-0.675	-4.3	-0.373	-2.4
C_200	-1.665	-16.7	-1.569	-15.8	-1.473	-14.8
Intact	-	-	-	-	-	-

Specimen	GII+100%		T-30%_GII+100%		T-20%_GII+100%	
	Difference	% Diff.	Difference	% Diff.	Difference	% Diff.
A_80	-	-	-	-	-	-
A_140	-	-	-	-	-	-
A_200	-0.129	-1.0	-0.548	-4.3	-0.162	-1.3
B_80	-	-	-	-	-	-
B_140	-2.848	-20.7	-3.966	-28.8	-3.643	-26.5
B_200	0.659	7.7	0.545	6.3	0.518	6.0
C_80	-	-	-	-	-	-
C_140	0.165	1.1	-1.502	-9.6	-1.180	-7.6
C_200	-1.659	-16.7	-0.079	-0.8	-0.635	-6.4
Intact	-	-	-	-	-	-

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει το κριτήριο με το οποίο θα επιλέξουμε το τελικό σύνολο ιδιοτήτων είναι ο ελάχιστη ποσοστιαία απόκλιση κατά μέσο όρο από τα μέγιστα φορτία των πειραματικών δοκιμών.

Πίνακας 5.7 : Μέσος όρος απόκλισης μέγιστου φορτίου για κάθε σύνολο ιδιοτήτων

Model	Average % Diff.
Basic	30.8
GII+10%	28.7
GII+50%	21.5
T+10%	29.9
T+50%	26.9
GII+50%_T+50%	17.2
GII+40%	17.1
GII+60%	13.5
GII+70%	11.5
GII+80%	9.6
GII+100%	9.4
T-30%_GII+100%	10.0
T-20%_GII+100%	9.5

Άρα το τελικό σύνολο ιδιοτήτων το οποίο έχει την ελάχιστη κατά μέσο όρο απόκλιση είναι το GII+100%. Στο σύνολο αυτό των ιδιοτήτων έχει αυξηθεί κατά 100% η μέγιστη ορθή τάση επαφής (S_{max}) και κατά 100% η κρίσιμη ενέργεια

$$S_{max} = 1.2 \text{ N/mm}^2$$

$$G_{cn} = 1.4 \text{ N/mm}$$

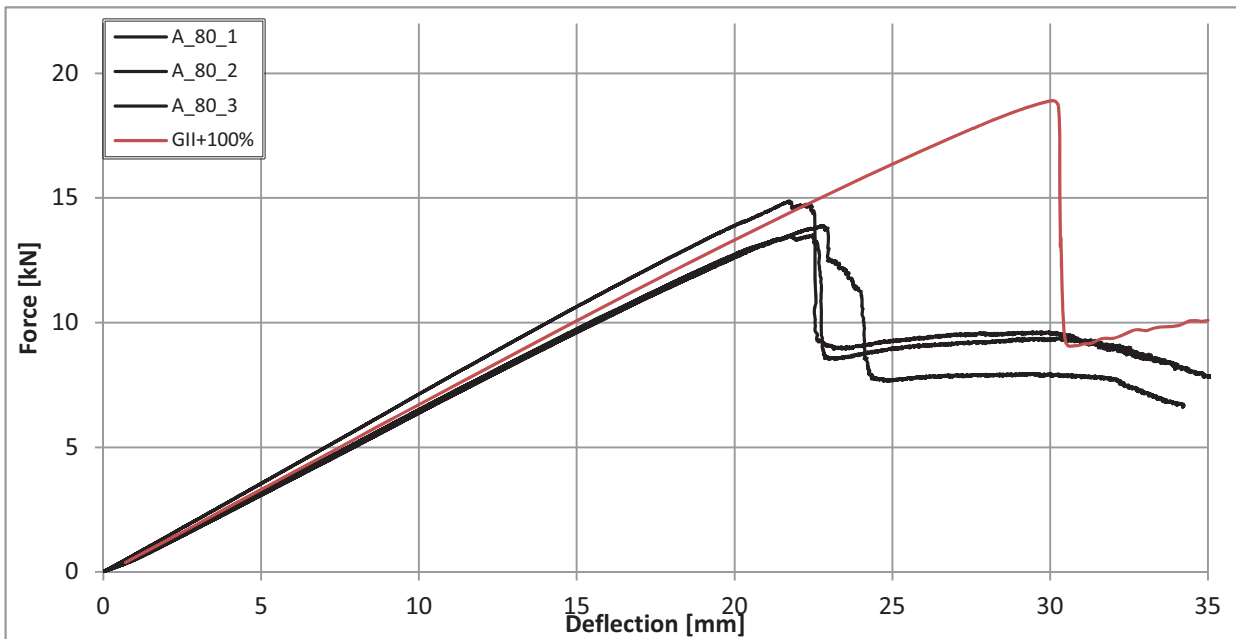
$$T_{max} = 13.576 \text{ N/mm}^2$$

$$G_{ct} = 4.06 \text{ N/mm}$$

5.4 Τελική σύγκριση

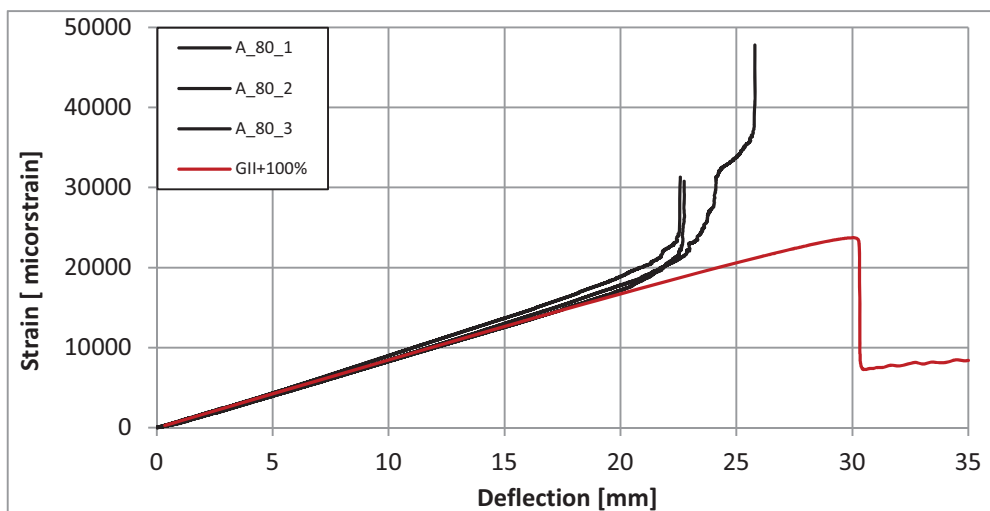
Στο σημείο αυτό εφόσον έχουμε καταλήξει στις τελικές παραμέτρους και ιδιότητες για το μοντέλο γίνεται η τελική σύγκριση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων με τα πειραματικά αποτελέσματα, έτσι ώστε να αξιολογηθεί η ποιότητα της προσομοίωσης με πεπερασμένα στοιχεία. Για κάθε περίπτωση παρουσιάζονται τα διαγράμματα δύναμης – βέλους κάμψης και παραμόρφωσης – βέλους κάμψης για τις θέσης 1 και 2.

A-80



Εικόνα 5.23: Διάγραμμα δύναμης – βέλους κάμψης, περίπτωση A-80

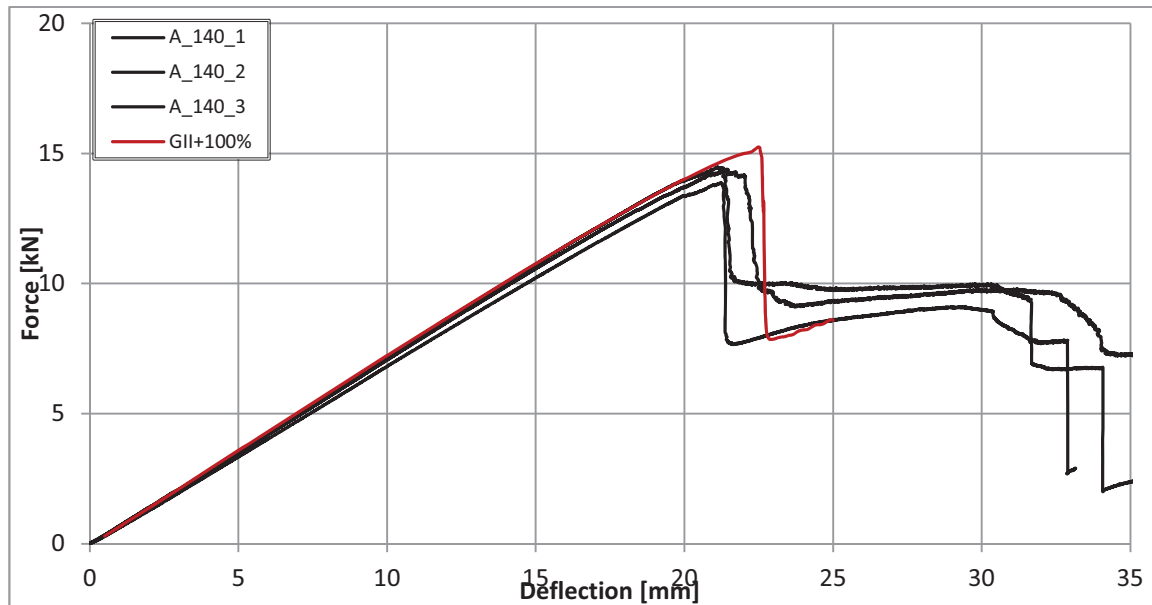
- Η καμπτική ακαμψία του μοντέλου συμπίπτει με αυτή των πειραματικών δοκιμών
- Τα δοκίμια της σειράς αυτής αστόχησαν τοπικά ενώ η πτώση στο μοντέλο οφείλεται σε διάδοση του αποχωρισμού. Άρα τα μέγιστα φορτία δεν είναι συγκρίσιμα.
- Το φορτίο στο οποίο το μοντέλο προβλέπει την διάδοση είναι μεγαλύτερο από το φορτίο στο οποίο επήλθε η τοπική αστοχία στις πειραματικές δοκιμές.



Εικόνα 5.24: Διάγραμμα παραμόρφωσης – βέλους κάμψης θέση 1, A-80

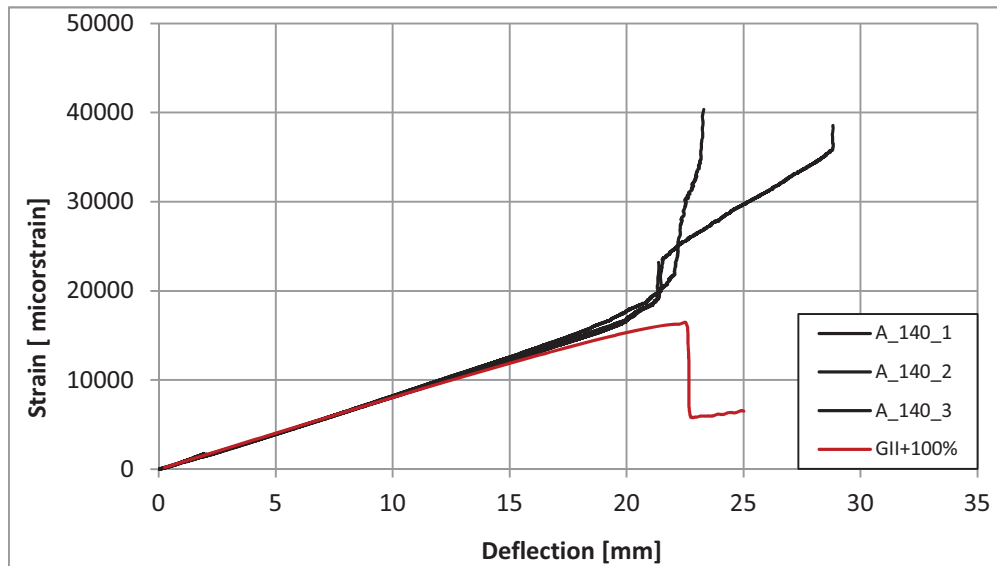
- Παρατηρούμε πως στη θέση 1 υπάρχει απόλυτη ταύτιση των προβλεπόμενων παραμορφώσεων και των πειραματικών για μετατόπιση μέχρι 20mm
- Η μορφή των καμπυλών διαφέρει για μετατοπίσεις άνω των 20mm, η διαφορά οφείλεται στο ότι τα δοκίμια αστοχούν τοπικά ενώ το μοντέλο μπορεί να προβλέψει μόνο αστοχία με διάδοση του αποχωρισμού

A-140



Εικόνα 5.25: Διάγραμμα δύναμης – βέλους κάμψης, περίπτωση A-140

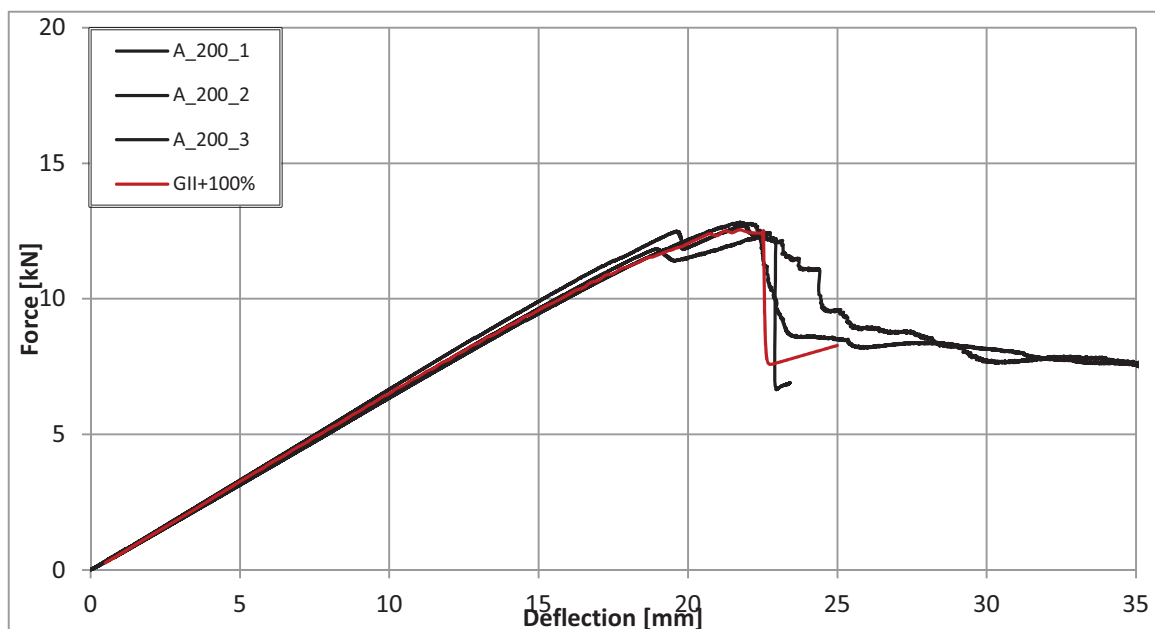
- Η καμπτική ακαμψία του μοντέλου συμπίπτει με αυτή των πειραματικών δοκιμών
- Τα δοκίμια της σειράς αυτής αστόχησαν τοπικά ενώ η πτώση στο μοντέλο οφείλεται σε διάδοση του αποχωρισμού. Άρα τα μέγιστα φορτία δεν είναι συγκρίσιμα.
- Το φορτίο στο οποίο το μοντέλο προβλέπει την διάδοση είναι μεγαλύτερο από το φορτίο στο οποίο επήλθε η τοπική αστοχία στις πειραματικές δοκιμές.



Εικόνα 5.26: Διάγραμμα παραμόρφωσης – βέλους κάμψης θέση 1, A-140

- Παρατηρούμε πως στη θέση 1 υπάρχει πολύ καλή σύμπτωση των προβλεπόμενων παραμορφώσεων και των πειραματικών για μετατόπιση μέχρι 17mm.
- Η μορφή των καμπυλών διαφέρει για μετατοπίσεις άνω των 17mm, η διαφορά οφείλεται στο ότι τα δοκίμια αστοχούν τοπικά ενώ το μοντέλο μπορεί να προβλέψει μόνο αστοχία με διάδοση του αποχωρισμού

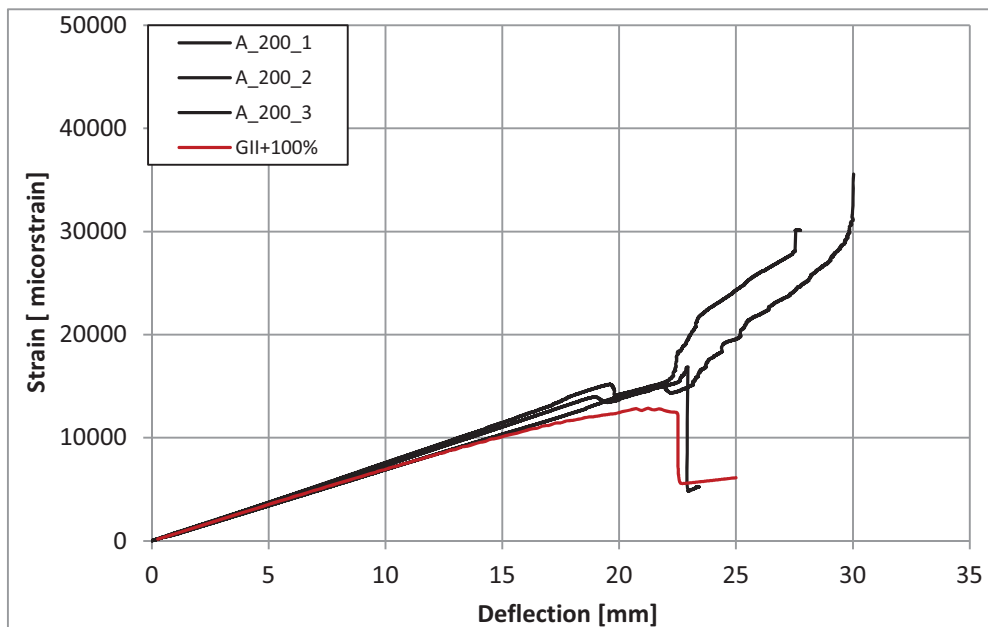
A-200



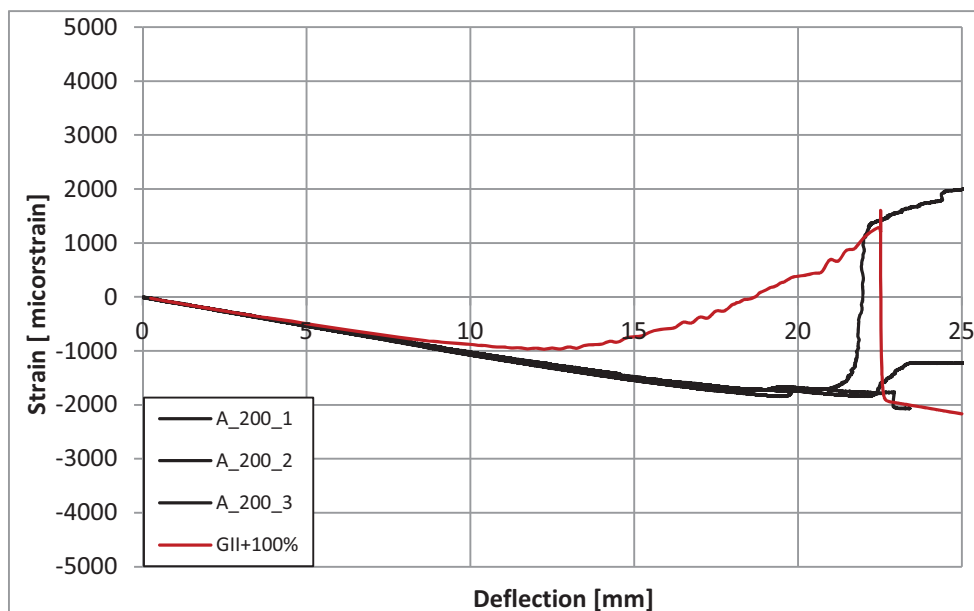
Εικόνα 5.27: Διάγραμμα δύναμης – βέλους κάμψης, περίπτωση A-200

- Η καμπτική ακαμψία του μοντέλου συμπίπτει με αυτή των πειραματικών δοκιμών.

- Το μοντέλο εκτιμά μέγιστο φορτίο πολύ κοντά στο μέσο όρο των πειραματικών δοκιμών, υποεκτιμά το φορτίο μόλις κατά 1%, τα φορτία εδώ είναι συγκρίσιμα καθώς η αστοχία των δοκιμών οφειλόταν σε διάδοση του αποχωρισμού.



Εικόνα 5.28: Διάγραμμα παραμόρφωσης – βέλους κάμψης θέση 1, A-200

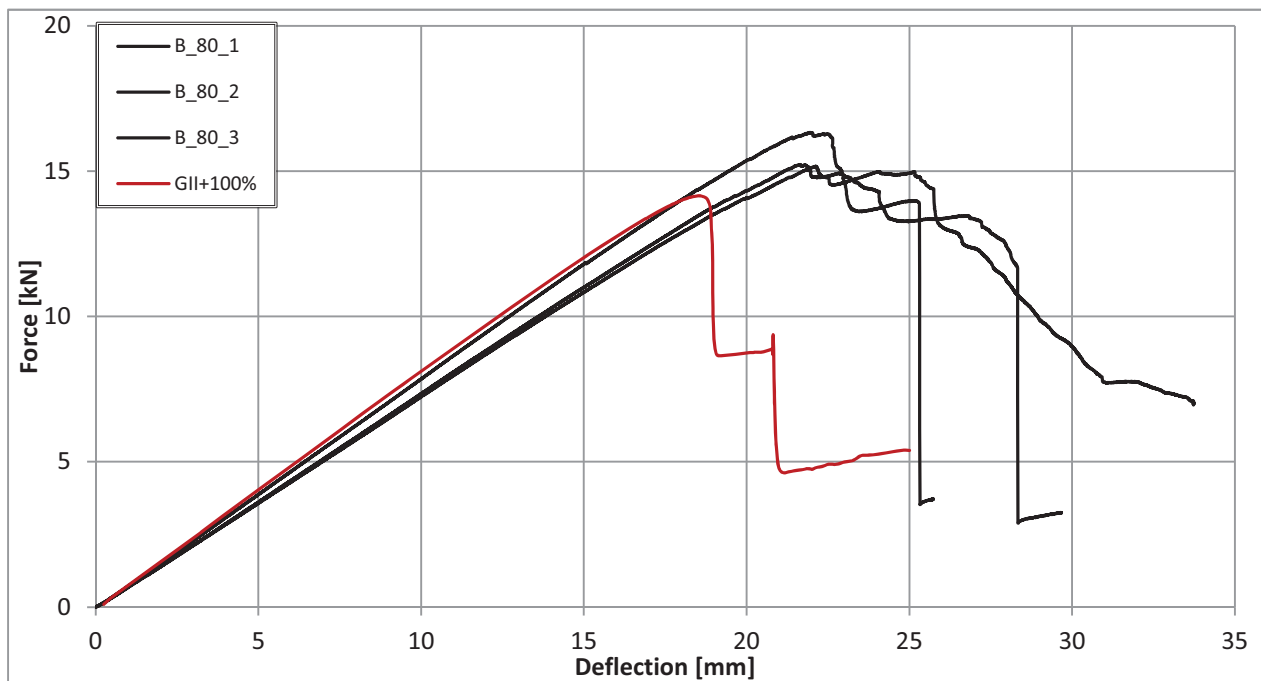


Εικόνα 5.29: Διάγραμμα παραμόρφωσης – βέλους κάμψης θέση 2, A-200

- Οι προβλεπόμενες παραμορφώσεις στη θέση 1 παρουσιάζουν πολύ καλή σύμπτωση έως τα 15mm

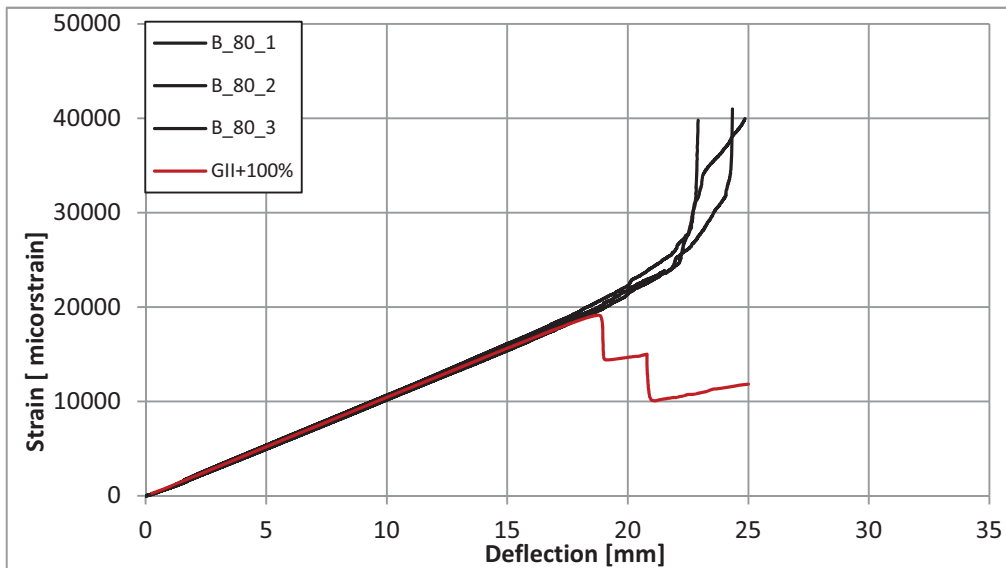
- Το μοντέλο έχει την ίδια μορφή με το δοκίμιο A_200_2
- Όσον αφορά τις παραμορφώσεις στη θέση 2, παρατηρούμε πως μέχρι τη μετατόπιση των 7mm περίπου υπάρχει ταύτιση μεταξύ πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων. Για μεγαλύτερες μετατοπίσεις παρουσιάζονται μεγάλες αποκλίσεις.
- Στα δοκίμια A_200_1 και A_200_3 παρατηρείται πως από θλίψη περνάμε σε εφελκυσμό, όπως φαίνεται και στο μοντέλο (δημιουργία του κύματος), βέβαια στο μοντέλο αυτό συμβαίνει πολύ νωρίτερα.

B-80



Εικόνα 5.30: Διάγραμμα δύναμης – βέλους κάμψης, περίπτωση B-80

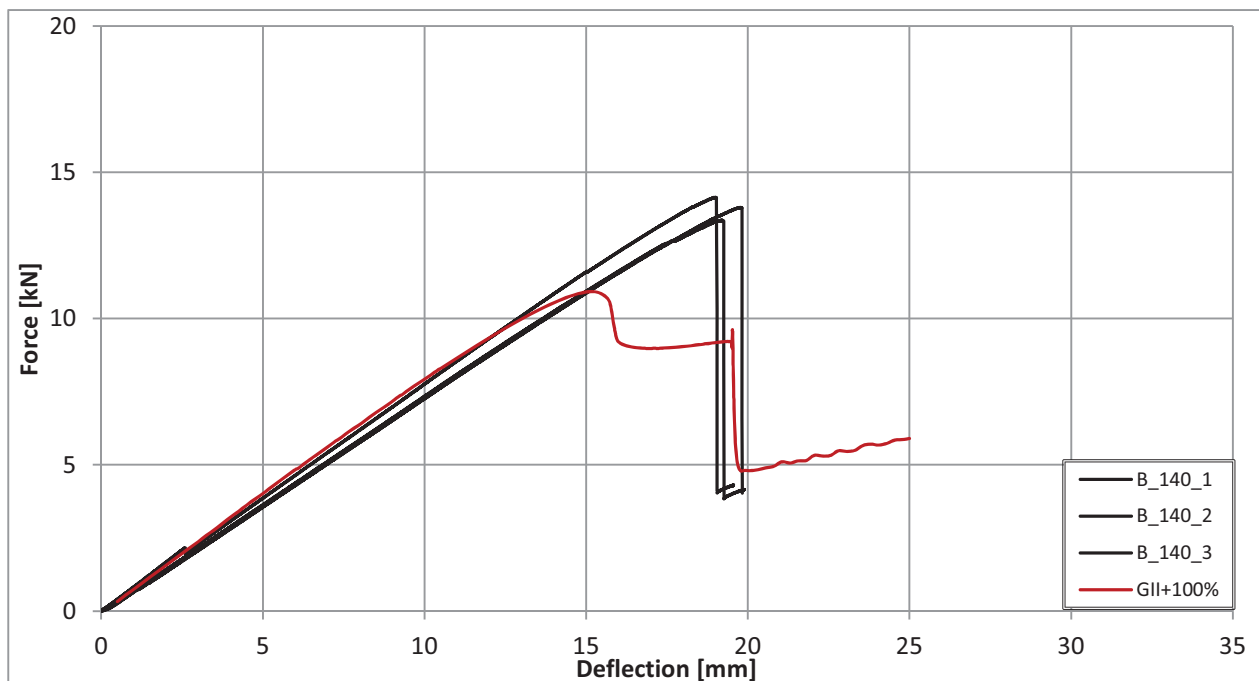
- Η καμπτική ακαμψία του μοντέλου συμπίπτει με αυτή των πειραματικών δοκιμών.
- Τα δοκίμια της σειράς αυτής αστόχησαν τοπικά ενώ η πτώση στο μοντέλο οφείλεται σε διάδοση του αποχωρισμού. Άρα τα μέγιστα φορτία δεν είναι συγκρίσιμα.
- Το φορτίο στο οποίο το μοντέλο προβλέπει την διάδοση είναι μικρότερο από το φορτίο στο οποίο επήλθε η τοπική αστοχία στις πειραματικές δοκιμές.



Εικόνα 5.31: Διάγραμμα παραμόρφωσης – βέλους κάμψης θέση 1, B-80

- Παρατηρούμε πως στη θέση 1 υπάρχει πολύ καλή σύμπτωση των προβλεπόμενων παραμορφώσεων και των πειραματικών για μετατόπιση μέχρι 18.5mm
- Η μορφή των καμπυλών διαφέρει για μετατοπίσεις άνω των 18.5mm, η διαφορά οφείλεται στο ότι τα δοκίμια αστοχούν τοπικά ενώ το μοντέλο μπορεί να προβλέψει μόνο αστοχία με διάδοση του αποχωρισμού

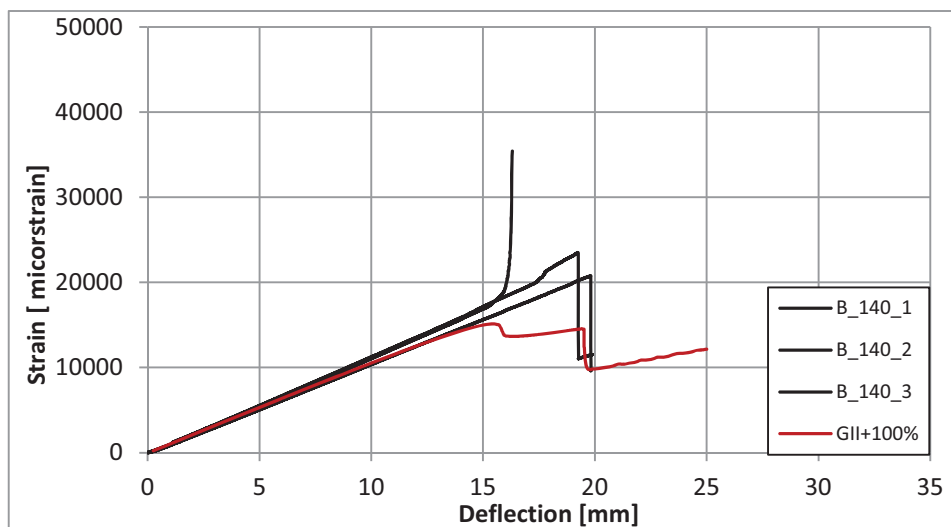
B-140



Εικόνα 5.32: Διάγραμμα δύναμης – βέλους κάμψης, περίπτωση B-140

- Η καμπτική ακαμψία του μοντέλου συμπίπτει με αυτή των πειραματικών δοκιμών.

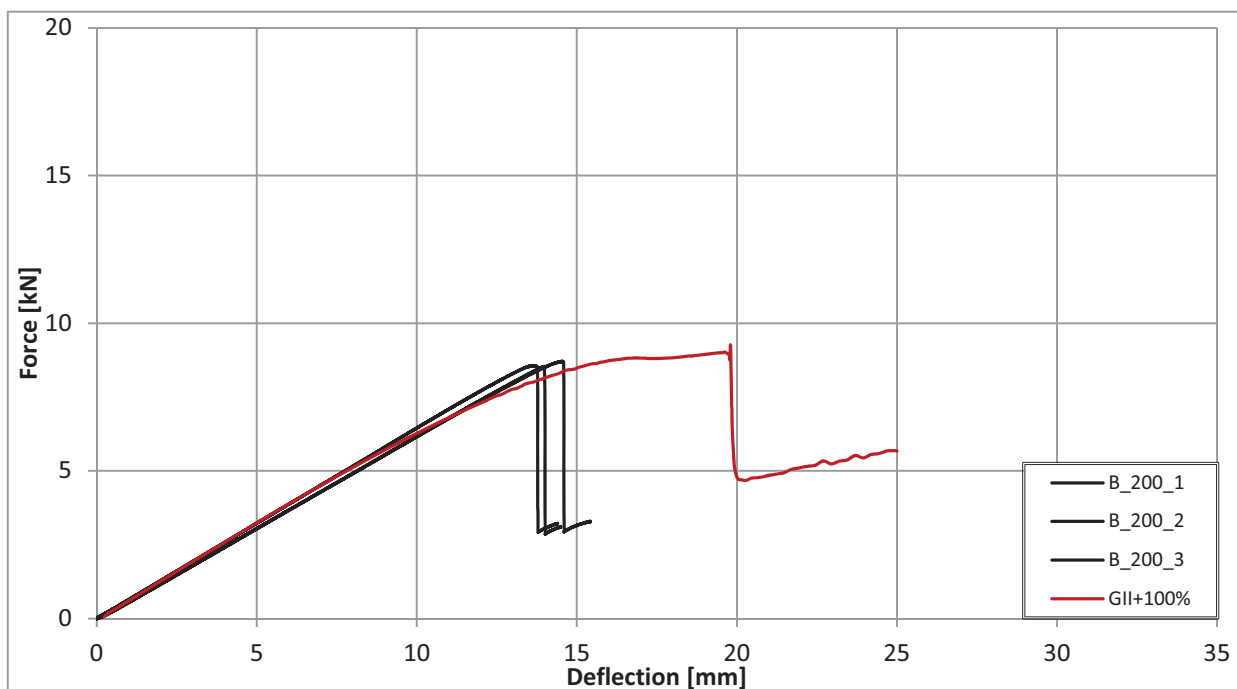
- Το μοντέλο υποεκτιμά το μέγιστο φορτίο κατά 20.7%, σχετικά μεγάλη απόκλιση



Εικόνα 5.33: Διάγραμμα παραμόρφωσης – βέλους κάμψης θέση 1, B-140

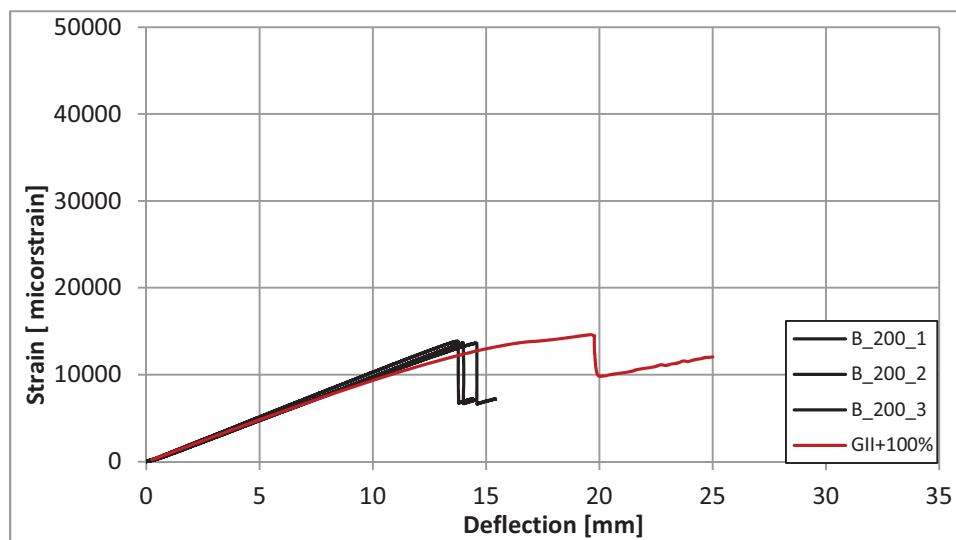
- Παρατηρούμε πως στη θέση 1 υπάρχει πολύ καλή σύμπτωση των προβλεπόμενων παραμορφώσεων και των πειραματικών για μετατόπιση μέχρι 14mm
- Το μοντέλο έχει την ίδια μορφή με δύο από τα τρία δοκίμια, οφείλεται στο ότι ο τρόπος αστοχίας είναι η διάδοση του αποχωρισμού

B-200

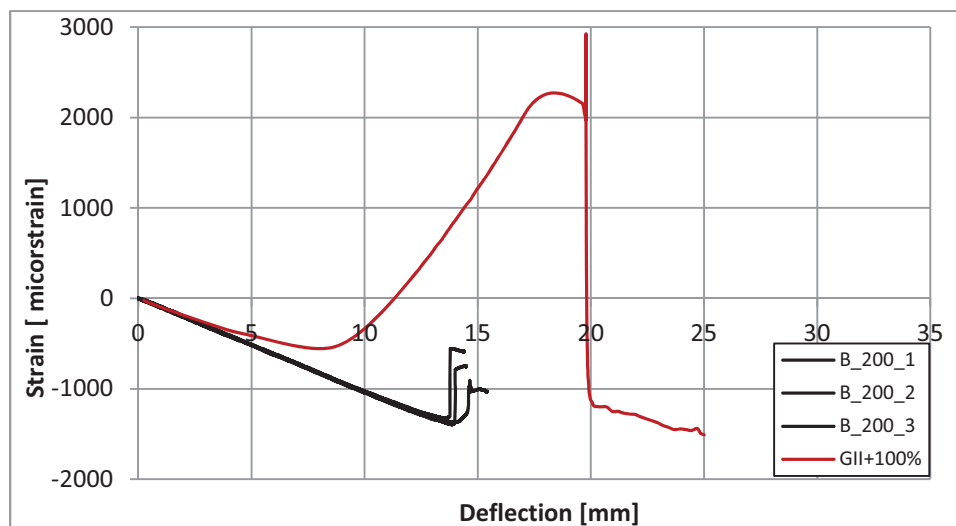


Εικόνα 5.34: Διάγραμμα δύναμης – βέλους κάμψης, περίπτωση B-200

- Πολύ καλή σύμπτωση της καμπτικής ακαμψίας μεταξύ πειραματικών δοκιμών και μοντέλου
- Η καμπύλη του μοντέλου έχει διαφορετική μορφή από αυτή των πειραματικών δοκιμών, εκτιμά μεγαλύτερο βέλος κάμψης για το ίδιο σχεδόν φορτίο.
- Από άποψη μέγιστου φορτίου το μοντέλο υπερεκτιμά το φορτίο κατά 7.7%
- Αυτό το απότομο άλμα του φορτίου για μετατόπιση 19.5mm οφείλεται στο ότι σε εκείνο το σημείο ενεργοποιείται η μέθοδος σταθεροποίησης.



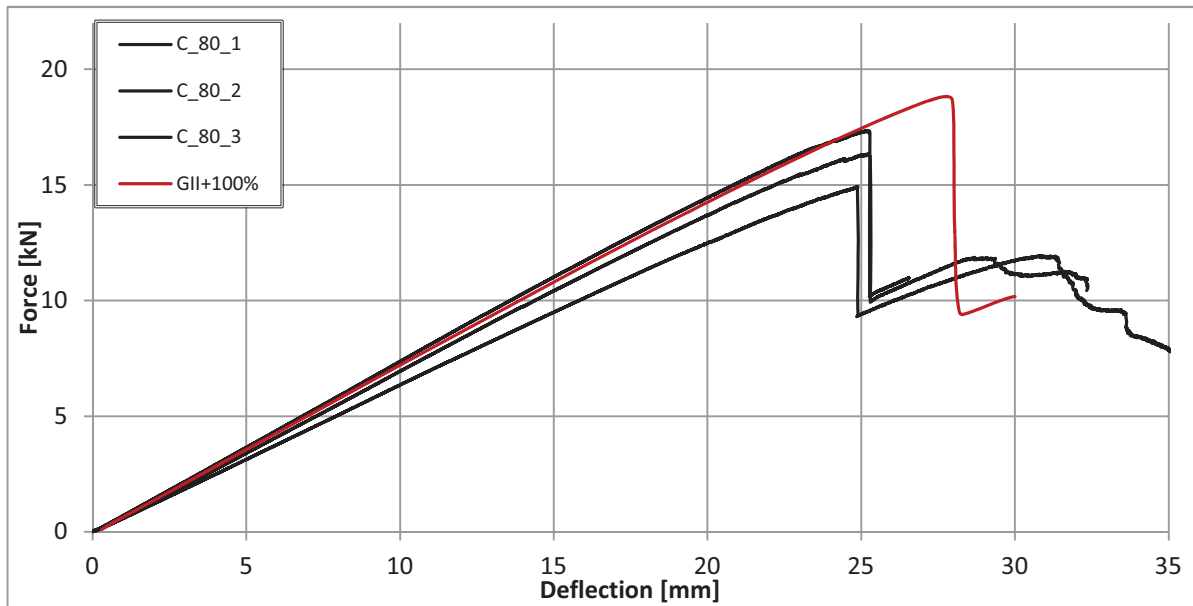
Εικόνα 5.35: Διάγραμμα παραμόρφωσης – βέλους κάμψης θέση 1, B-200



Εικόνα 5.36: Διάγραμμα παραμόρφωσης – βέλους κάμψης θέση 2, B-200

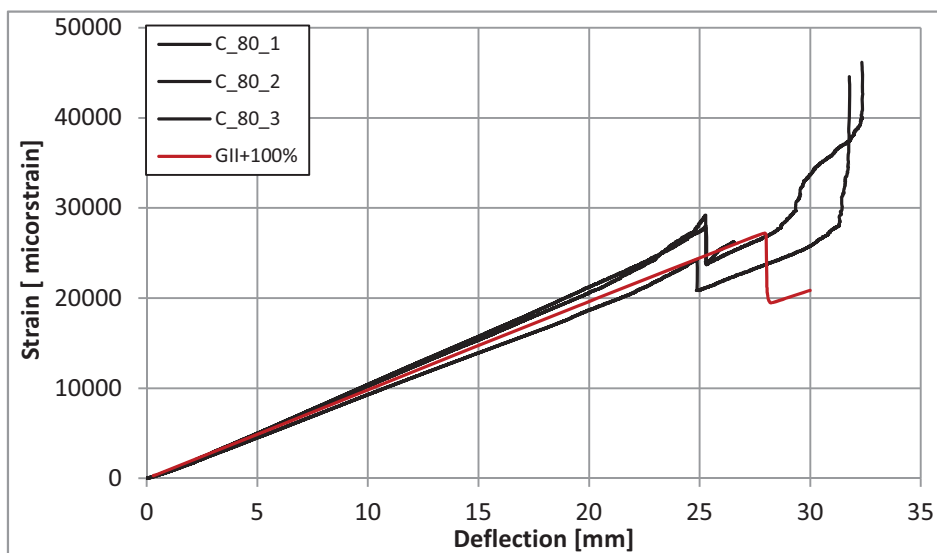
- Οι προβλεπόμενες παραμορφώσεις στη θέση 1 παρουσιάζουν πολύ καλή σύμπτωση, η μορφή των καμπυλών είναι ίδια
- Όσον αφορά τις παραμορφώσεις στη θέση 2, παρατηρούνται μεγάλες αποκλίσεις

C-80



Εικόνα 5.37: Διάγραμμα δύναμης – βέλους κάμψης, περίπτωση C-80

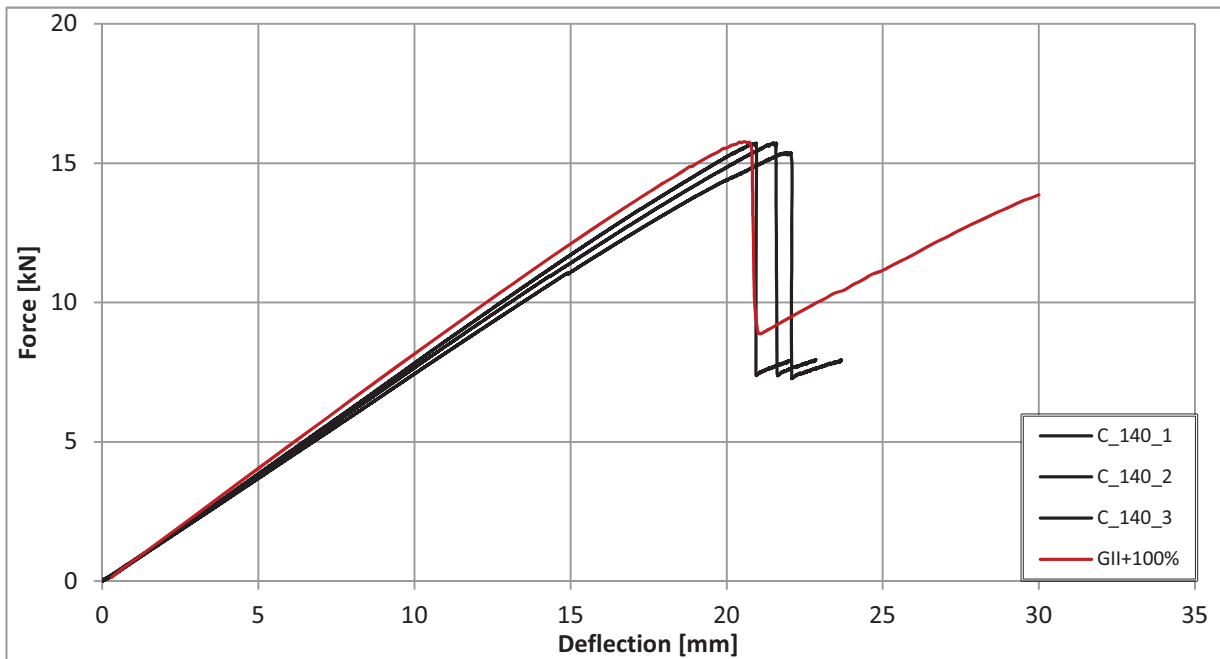
- Η καμπτική ακαμψία του μοντέλου συμπίπτει με αυτή των πειραματικών δοκιμών.
- Τα δοκίμια της σειράς αυτής αστόχησαν τοπικά ενώ η πτώση στο μοντέλο οφείλεται σε διάδοση του αποχωρισμού. Άρα τα μέγιστα φορτία δεν είναι συγκρίσιμα.
- Το φορτίο στο οποίο το μοντέλο προβλέπει την διάδοση είναι μεγαλύτερο από το φορτίο στο οποίο επήλθε η τοπική αστοχία στις πειραματικές δοκιμές.



Εικόνα 5.38: Διάγραμμα παραμόρφωσης – βέλους κάμψης θέση 1, C-80

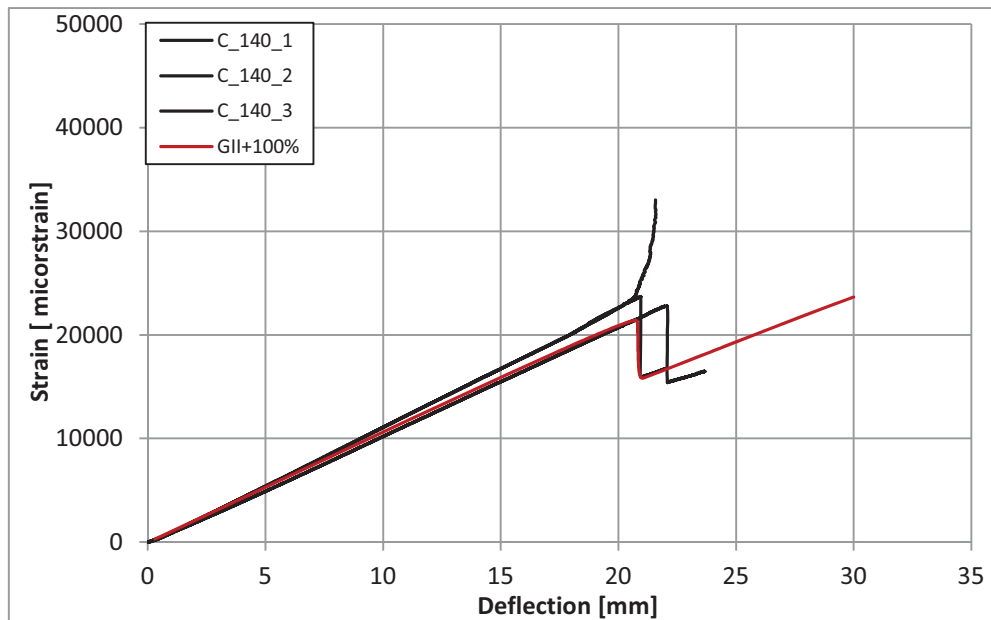
- Παρατηρούμε πως στη θέση 1 υπάρχει πολύ καλή σύμπτωση των προβλεπόμενων παραμορφώσεων και των πειραματικών για μετατόπιση μέχρι 24mm, η μορφή των καμπύλων είναι ίδια.

C-140



Εικόνα 5.39: Διάγραμμα δύναμης – βέλους κάμψης, περίπτωση C-140

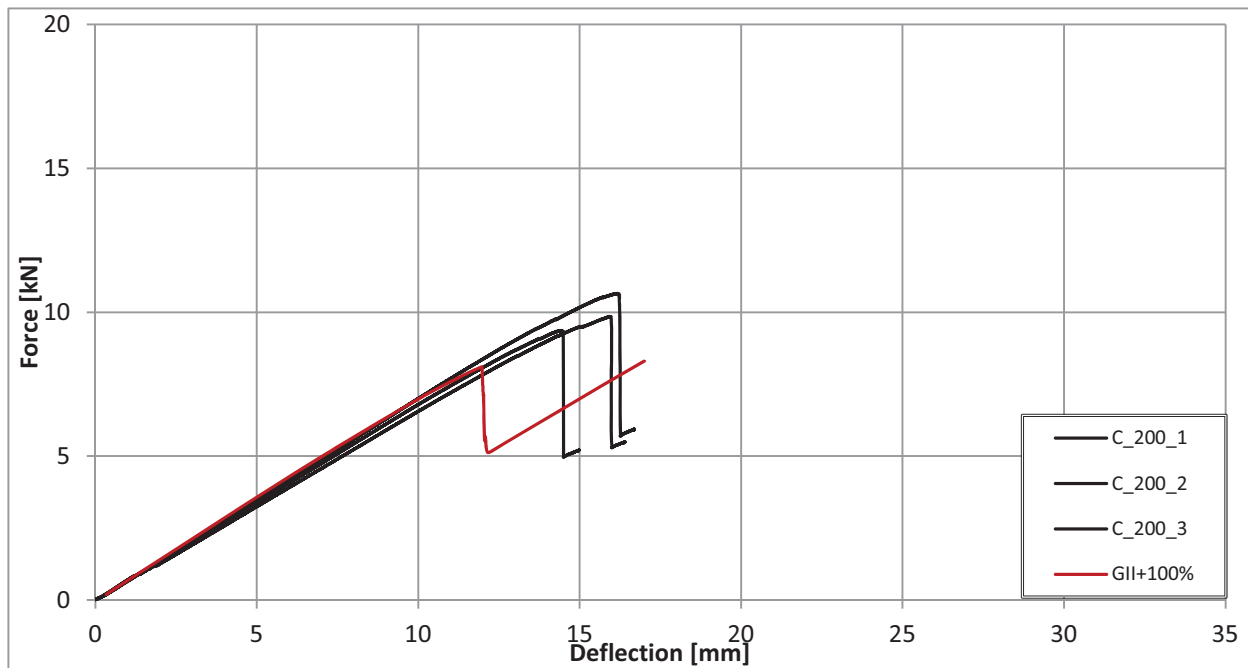
- Η καμπτική ακαμψία του μοντέλου συμπίπτει με αυτή των πειραματικών δοκιμών.
- Το μοντέλο υποεκτιμά το μέγιστο φορτίο κατά 7.6%



Εικόνα 5.40: Διάγραμμα παραμόρφωσης – βέλους κάμψης θέση 1, C-140

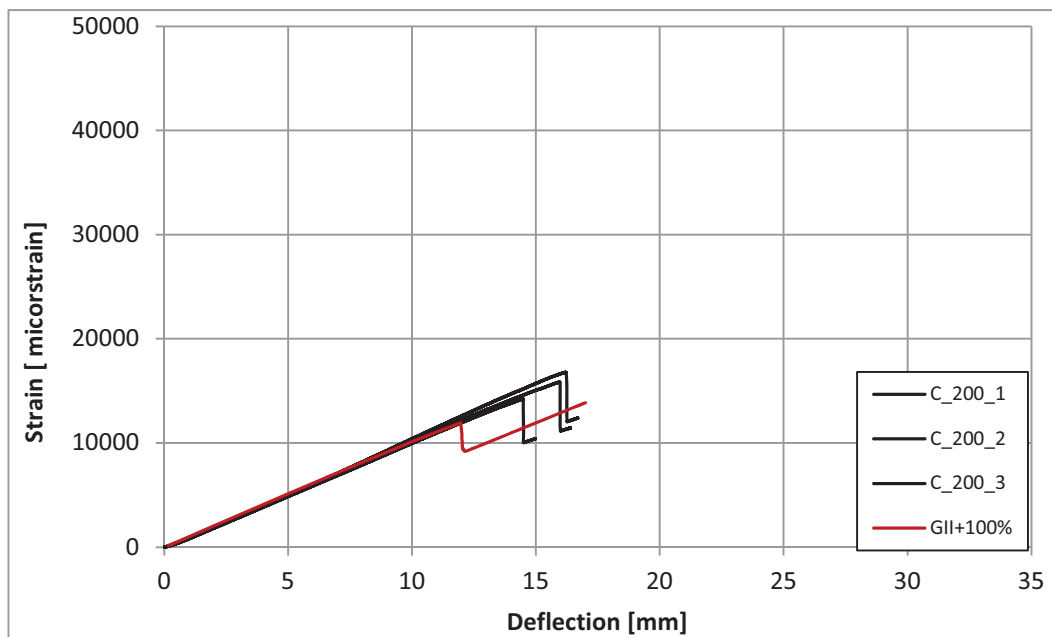
- Παρατηρούμε πως στη θέση 1 υπάρχει πολύ καλή σύμπτωση των προβλεπόμενων παραμορφώσεων και των πειραματικών για μετατόπιση μέχρι 20mm, η μορφή των δύο εκ των τριών καμπύλων είναι ίδια με του μοντέλου.
- Το δοκίμιο C_140_2 φαίνεται να αστοχεί τοπικά λόγω εφελκυσμού

C-200

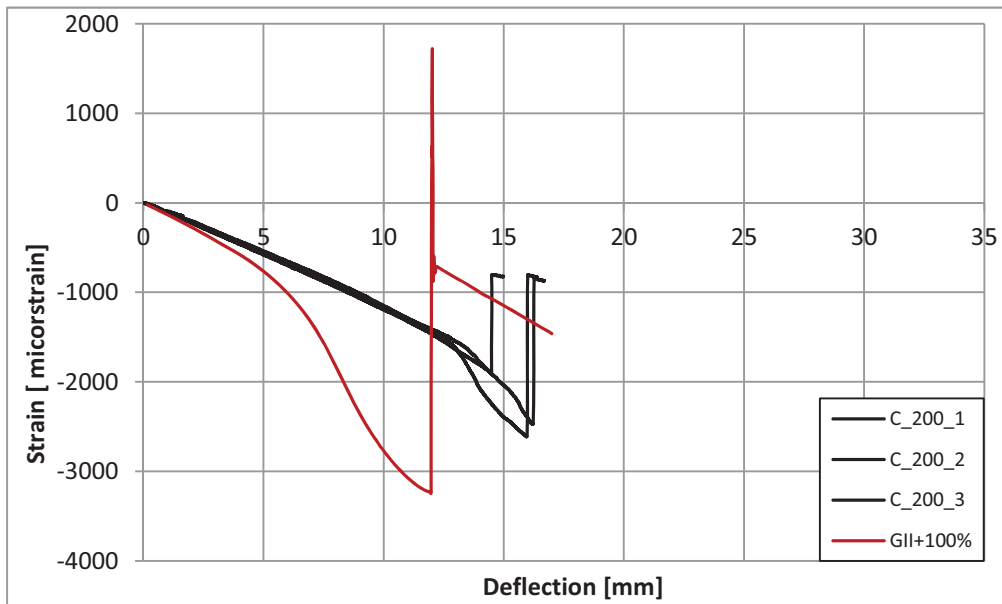


Εικόνα 5.41: Διάγραμμα δύναμης – βέλους κάμψης, περίπτωση C-200

- Η καμπτική ακαμψία του μοντέλου συμπίπτει με αυτή των πειραματικών δοκιμών.
- Το μοντέλο υποεκτιμά το μέγιστο φορτίο κατά 16.7%



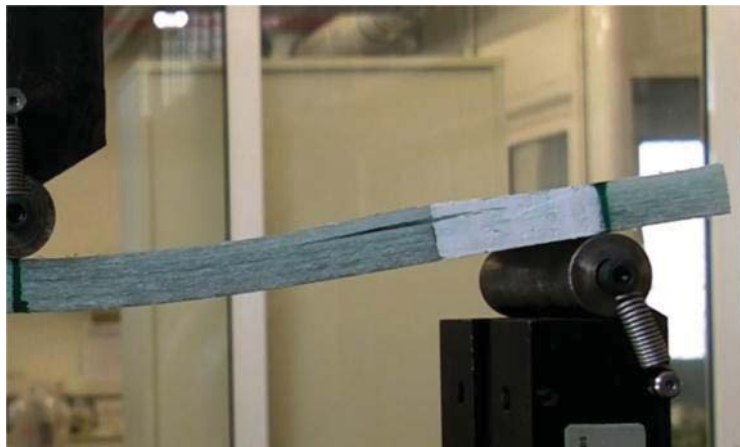
Εικόνα 5.42: Διάγραμμα παραμόρφωσης – βέλους κάμψης θέση 1, C-200



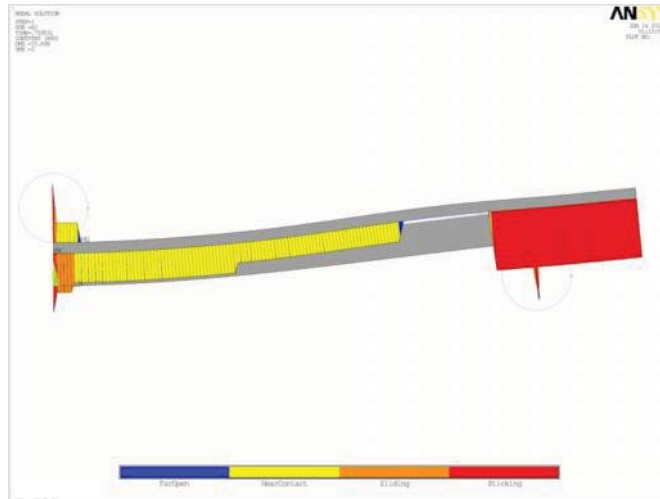
Εικόνα 5.43: Διάγραμμα παραμόρφωσης – βέλους κάμψης θέση 2, C-200

- Οι προβλεπόμενες παραμορφώσεις στη θέση 1 παρουσιάζουν πολύ καλή σύμπτωση
- Η μορφή των καμπύλων είναι ίδια
- Όσον αφορά τις παραμορφώσεις στη θέση 2, παρατηρούμε πως υπάρχει μεγάλη απόκλιση, αυτό οφείλεται στο φαινόμενο του λυγισμού του υποπολύστρωτο το οποίο βρίσκεται σε θλίψη, χαρακτηριστικά φαίνεται η απότομη αύξηση των παραμορφώσεων

Το μοντέλο προβλέπει ορθά πως για αποχωρισμό των στρώσεων σε απόσταση 75% από την εφελκυσμένη πλευρά και με μήκος 200mm εμφανίζεται λυγισμός στο υποπολύστρωτο που βρίσκεται υπό θλίψη.



Εικόνα 5.44 : Λυγισμός στη θλιβόμενη πλευρά πριν την τελική αστοχία, δοκίμιο C_200_1



Εικόνα 5.45 : Λυγισμός για το μοντέλο C_200

5.5 Ανάλυση της επίδρασης του αποχωρισμού βάσει του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων

Στην παράγραφο αυτή, χρησιμοποιώντας αποκλειστικά τα αποτελέσματα του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων, εξετάζεται η επίδραση του αποχωρισμού των στρώσεων όσον αφορά την καμπτική ακαμψία και τα μέγιστα φορτία που μπορεί να φέρει η δοκός. Τρέξαμε όλα τα μοντέλα με ίδιες διαστάσεις οι οποίες ήταν $t=12\text{mm}$, $b=72\text{mm}$ και $L=340\text{mm}$.

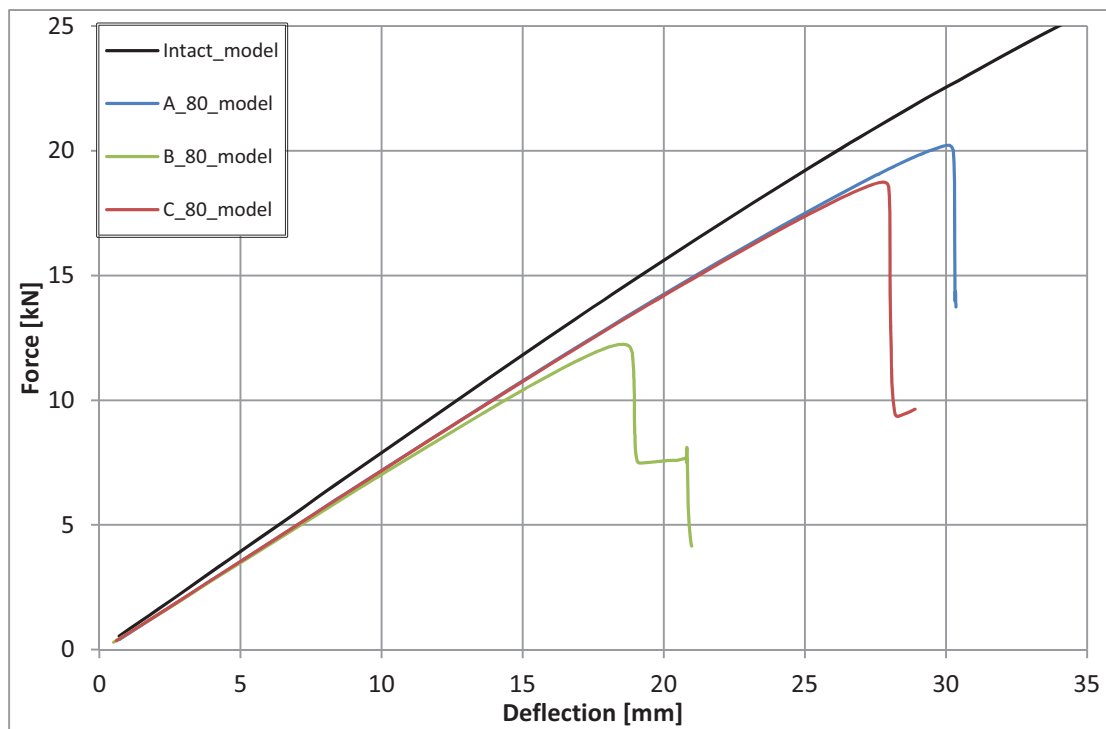
Για να εξετάσουμε λοιπόν την επίδραση αυτή, ακριβώς όπως κάναμε και με τα πειραματικά διαγράμματα, φτιάχνονται δύο ομάδες διαγραμμάτων.

Η πρώτη ομάδα αποτελείται από τρία διαγράμματα όπου στο κάθε ένα διατηρείται σταθερό το μήκος του αποχωρισμού των στρώσεων και αλλάζει η θέση του αποχωρισμού κατά το πάχος. Έτσι λοιπόν έχουμε τα διαγράμματα “Αποχωρισμός 80 mm”, “Αποχωρισμός 140 mm”, “Αποχωρισμός 200 mm”. Μέσα από τα διαγράμματα αυτά μπορούμε να δούμε ποιά είναι η επίδραση της θέσης του αποχωρισμού κατά το πάχος για κάθε ένα μήκος αποχωρισμού.

Η δεύτερη ομάδα αποτελείται από τρία διαγράμματα όπου στο κάθε ένα διατηρείται σταθερή η θέση του αποχωρισμού κατά το πάχος και αλλάζει το μήκος του αποχωρισμού. Έτσι λοιπόν, έχουμε τα διαγράμματα “Θέση Α”, “Θέση Β”, “Θέση C”. Μέσα από τα διαγράμματα αυτά μπορούμε να δούμε ποιά είναι η επίδραση του μήκους του αποχωρισμού για κάθε μία θέση κατά το πάχος.

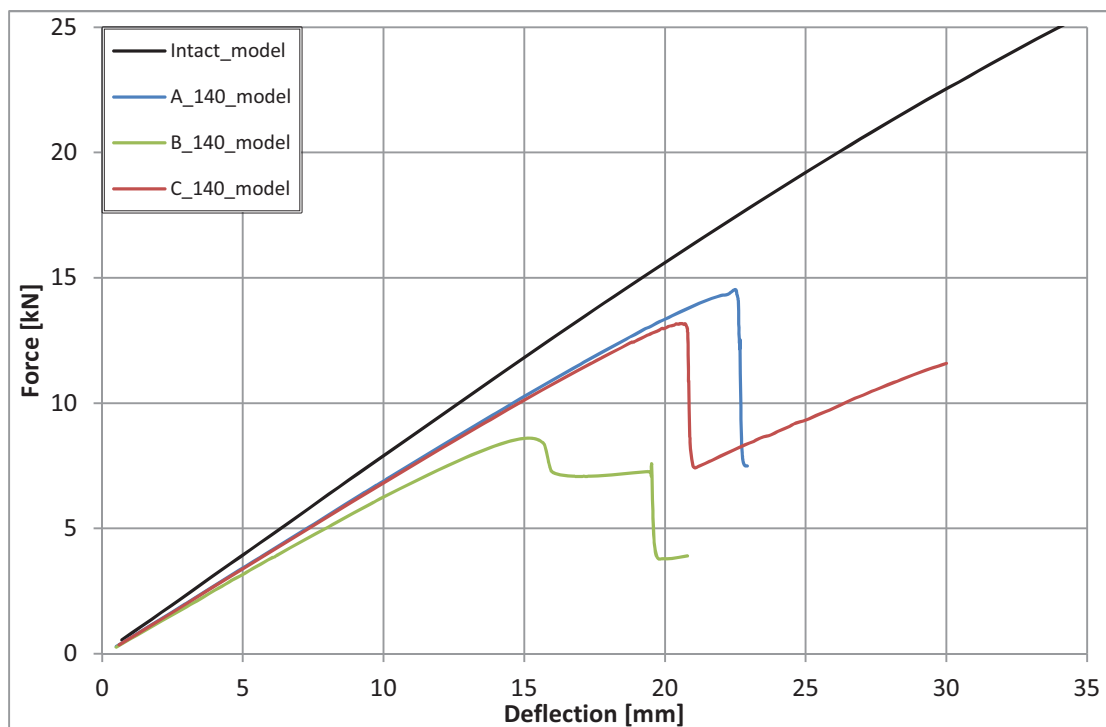
Σε όλα τα διαγράμματα συμπεριλαμβάνονται και τα αποτελέσματα για το άθικτο μοντέλο ως σημείο αναφοράς.

Επίδραση της θέσης για αποχωρισμό 80mm



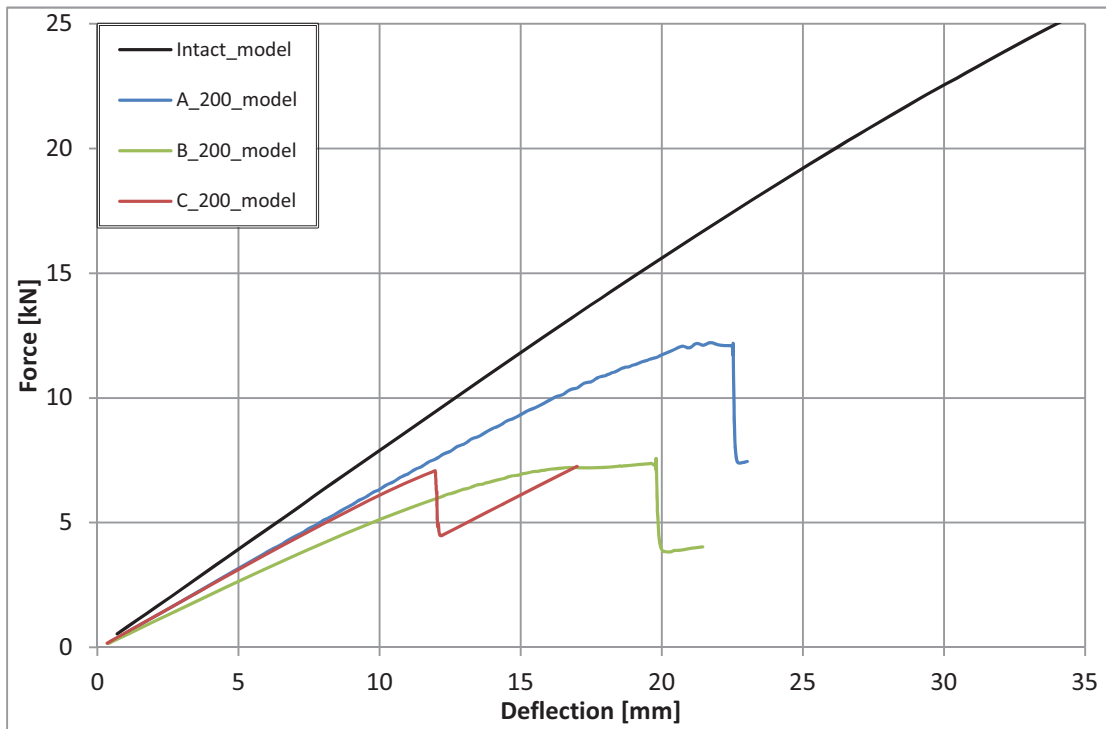
Εικόνα 5.46: Delamination 80mm, Επίδραση της θέσης για αποχωρισμό 80mm

Επίδραση της θέσης για αποχωρισμό 140mm



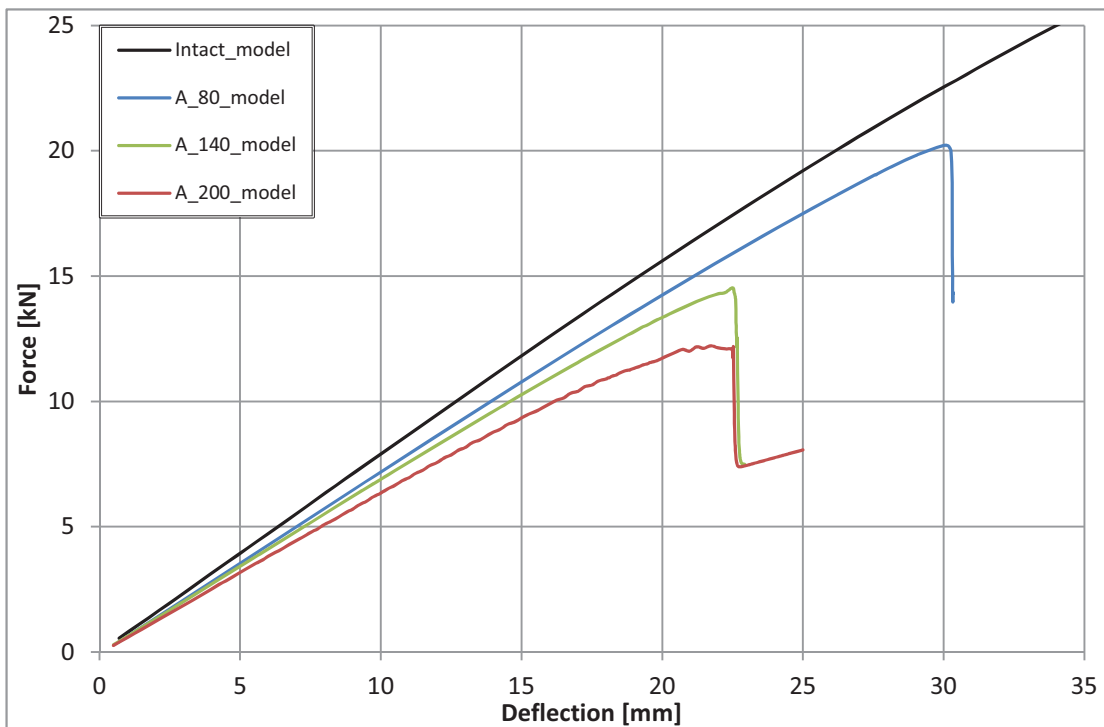
Εικόνα 5.47: Delamination 140mm, Επίδραση της θέσης για αποχωρισμό 140mm

Επίδραση της θέσης για αποχωρισμό 200mm



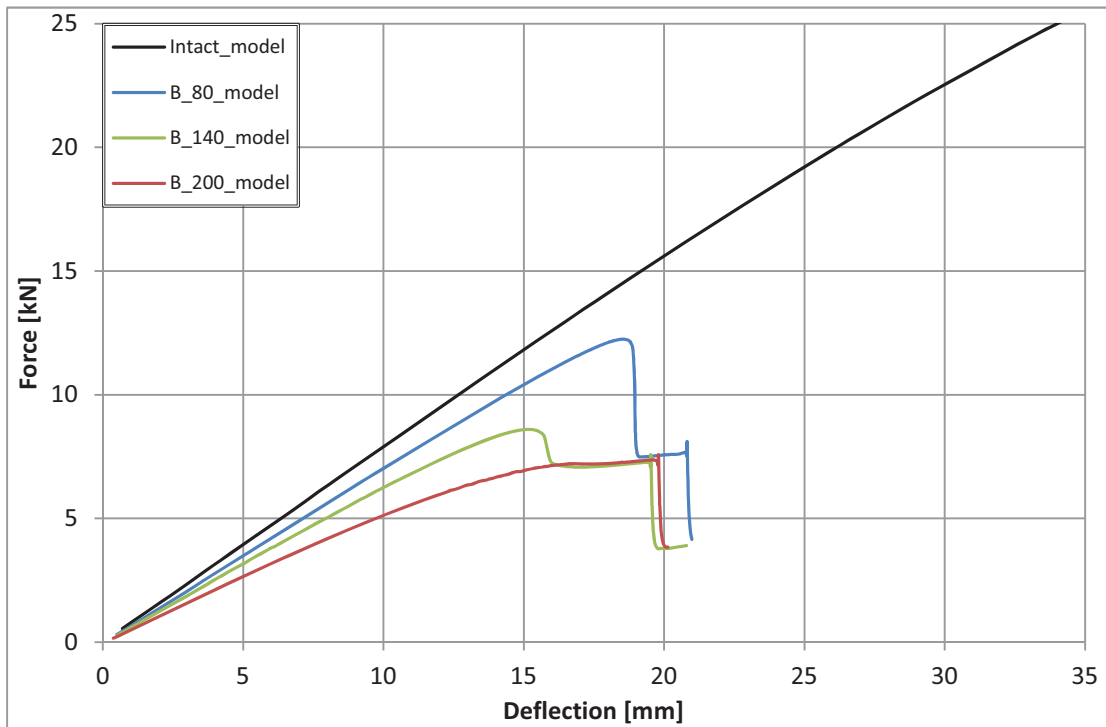
Εικόνα 5.48: Delamination 200mm, Επίδραση της θέσης για αποχωρισμό 200mm

Επίδραση του μήκους του αποχωρισμού στη θέση A



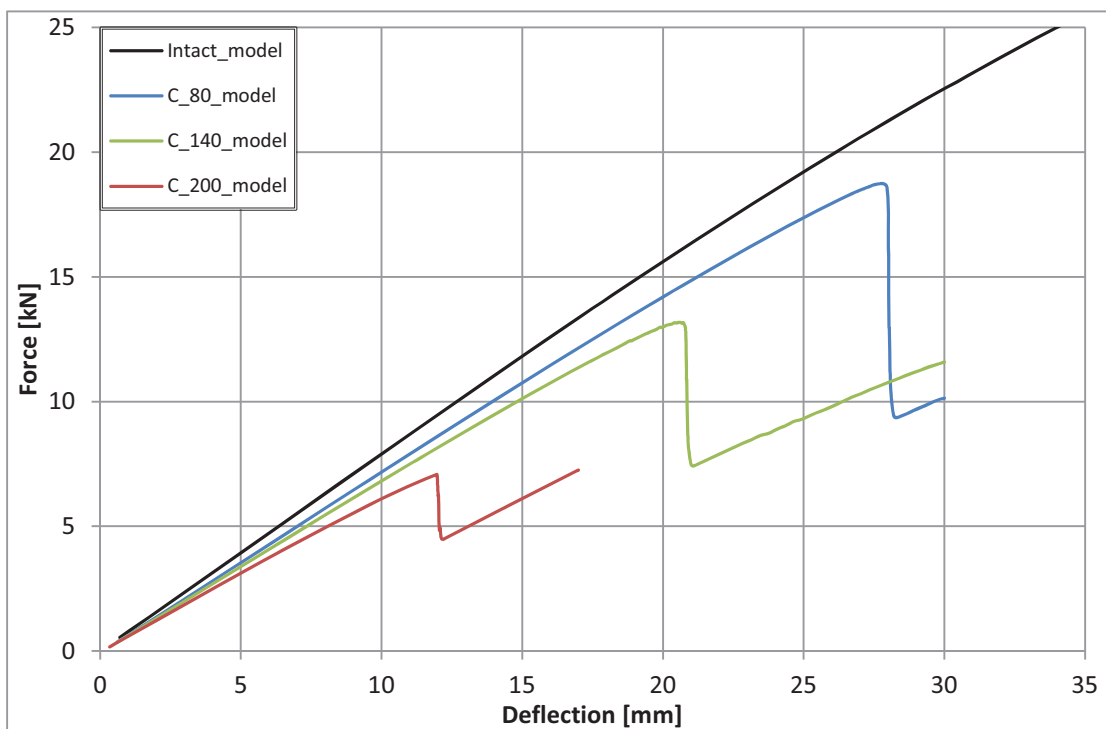
Εικόνα 5.49: Position A, Επίδραση του μήκους του αποχωρισμού στη θέση A

Επίδραση του μήκους του αποχωρισμού στη θέση B



Εικόνα 5.50: Position B, Επίδραση του μήκους του αποχωρισμού στη θέση B

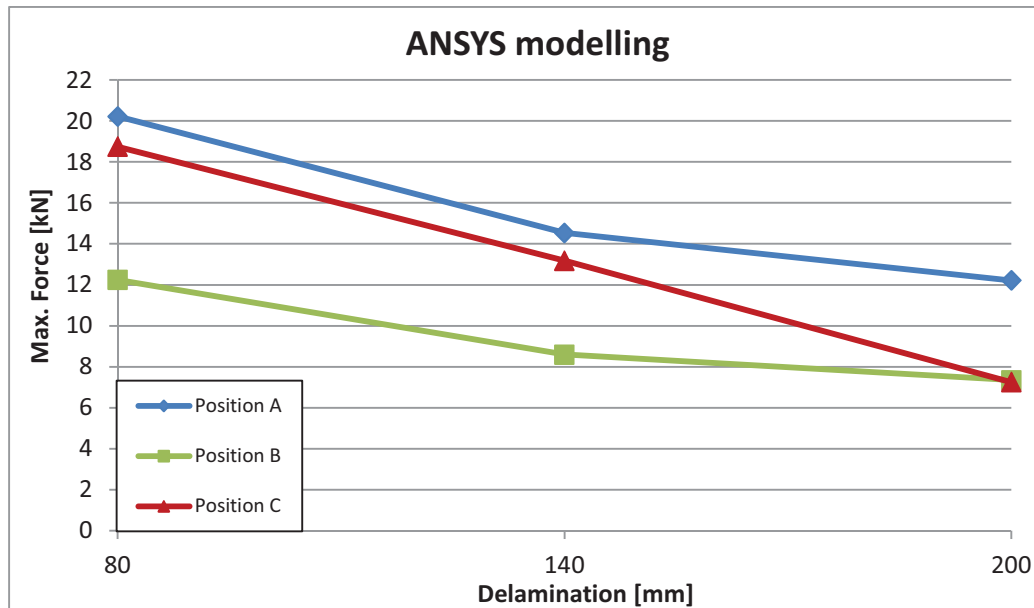
Επίδραση του μήκους του αποχωρισμού στη θέση C



Εικόνα 5.51: Position C, Επίδραση του μήκους του αποχωρισμού στη θέση C

Πίνακας 5.8: Μέγιστα φορτία των μοντέλων

ANSYS Modelling [kN]			
Del [mm]	Fmax - A	Fmax - B	Fmax - C
80	20.222	12.244	18.743
140	14.533	8.603	13.177
200	12.218	7.351	7.253



Εικόνα 5.52: Συγκριτικό γράφημα μέγιστων φορτίων όλων των περιπτώσεων

Συμπεράσματα – Σχόλια

- Από την Εικόνα 5.46 βλέπουμε πως για μήκος αποχωρισμού ίσο με 80mm η θέση δεν επηρεάζει την καμπτική ακαμψία. Το φορτίο πέφτει περισσότερο όταν ο αποχωρισμός είναι στο μέσο του πάχους, μείωση του μέγιστου φορτίου κατά 39.45% σε σχέση με τη θέση A και 34.67% σε σχέση με τη θέση C. Το μοντέλο συμπεριφέρεται σχεδόν με τον ίδιο τρόπο για αποχωρισμό στη θέση A και στη θέση B, γεγονός που επιβεβαιώνεται και από την εικόνα 5.52 . Τα συμπεράσματα που εξάγουμε από την Εικόνα 5.46, η οποία αφορά το μοντέλο, και από την Εικόνα 4.36, η οποία αφορά τις πειραματικές δοκιμές, είναι σε συμφωνία μεταξύ τους.
- Από την Εικόνα 5.47 βλέπουμε πως για αποχωρισμό μήκους 140mm η μείωση της καμπτικής ακαμψίας και του μέγιστου φορτίου είναι πιο έντονη, με τις περιπτώσεις Θέση A και Θέση C να παρουσιάζουν σχεδόν την ίδια ακαμψία και από άποψη φορτίου να είναι πολύ κοντά, γεγονός που επιβεβαιώνεται και από την εικόνα 5.52 . Στη περίπτωση της Θέσης B η καμπτική ακαμψία μειώνεται αισθητά και το μέγιστο φορτίο μειώνεται κατά 40.8% σε σχέση με τη Θέση A και κατά 34.71% σε σχέση με τη Θέση 2. Τα συμπεράσματα που εξάγουμε από την Εικόνα 5.47, το οποίο αφορά το μοντέλο, και από το διάγραμμα 4.37, το οποίο αφορά τις πειραματικές δοκιμές, είναι σε συμφωνία μεταξύ τους.

- Για μήκος αποχωρισμού ίσο με 200mm παρατηρούμε πιο έντονα τις καμπτικές ακαμψίες να μειώνονται, αυτό είναι πιο έντονο όταν η θέση του αποχωρισμού βρίσκεται στο μέσο του πάχους και στη θλιβόμενη πλευρά. Λόγω του φαινομένου του λυγισμού ο αποχωρισμός στη Θέση C προκαλεί μεγάλη πτώση του μέγιστου φορτίου.
- Όπως φαίνεται στην εικόνα 5.49, όταν ο αποχωρισμός βρίσκεται στην εφελκυστική πλευρά παρατηρείται πως με αύξηση του μήκους του αποχωρισμού μειώνεται η καμπτική ακαμψία και το μέγιστο φορτίο. Η μείωση αυτή είναι 28.14% για αύξηση του αποχωρισμού από $\approx 30\%$ σε $\approx 50\%$ του ανυποστήρικτου μήκους και υπάρχει επιπλέον μείωση κατά 15.92% όταν ο αποχωρισμός είναι $\approx 70\%$ του ανυποστήρικτου μήκους.
- Όπως φαίνεται στην εικόνα 5.50, όταν ο αποχωρισμός βρίσκεται στο μέσο του πάχους παρατηρείται πως με αύξηση του μήκους του αποχωρισμού μειώνεται η καμπτική ακαμψία και το μέγιστο φορτίο δραστικά. Ακόμη και για μικρά μήκη αποχωρισμού η μείωση της μέγιστης δύναμης είναι σημαντική. Η μείωση αυτή είναι 29.73% για αύξηση του αποχωρισμού από $\approx 30\%$ σε $\approx 50\%$ του ανυποστήρικτου μήκους και υπάρχει επιπλέον μείωση κατά 14.55% όταν ο αποχωρισμός είναι $\approx 70\%$ του ανυποστήρικτου μήκους.
- Όπως φαίνεται στην εικόνα 5.51, όταν ο αποχωρισμός βρίσκεται στην θλιβόμενη πλευρά παρατηρείται πως με αύξηση του μήκους του αποχωρισμού μειώνεται η καμπτική ακαμψία και το μέγιστο φορτίο. Η μείωση αυτή είναι 29.69% για αύξηση του αποχωρισμού από $\approx 30\%$ σε $\approx 50\%$ του ανυποστήρικτου μήκους και υπάρχει επιπλέον μείωση κατά 44.96% όταν ο αποχωρισμός είναι $\approx 70\%$ του ανυποστήρικτου μήκους. Η μεγάλη μείωση του φορτίου όταν ο αποχωρισμός είναι $\approx 70\%$ του ανυποστήρικτου μήκους οφείλεται στο φαινόμενο του λυγισμού.

Συνοψίζοντας, μπορούμε να πούμε πως όσον αφορά την επίδραση της θέσης και του μήκους του αποχωρισμού τα συμπεράσματα που εξάγουμε από την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων είναι ποιοτικά όμοια με τα συμπεράσματα που εξάγουμε από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων των πειραματικών δοκιμών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η κατανόηση της επίδρασης του αποχωρισμού των στρώσεων σε ινώδη σύνθετα υλικά τα οποία υποβάλλονται σε κάμψη 3 σημείων. Στο πλαίσιο αυτό γίνεται πειραματική και υπολογιστική μελέτη μιας πολύστρωτης δοκού συγκεκριμένης γεωμετρίας (μήκος, πλάτος, πάχος) και μηχανικών ιδιοτήτων (μέτρα ελαστικότητας, μέτρα διάτμησης και λόγοι Poisson) με έναν κεντρικό αποχωρισμό ορθογωνικού σχήματος. Πραγματοποιείται μια παραμετρική μελέτη ως προς το μέγεθος του αποχωρισμού (λόγος $L_{delamination}/L_{span}$) και ως προς την κατά το πάχος της δοκού θέση του αποχωρισμού αυτού. Τα συμπεράσματα που εξήχθησαν μετά την ανάλυση των αποτελεσμάτων των πειραματικών δοκιμών και της Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων είναι τα εξής:

1. Το μέγιστο φορτίο που μπορεί να φέρει η δοκός μειώνεται με την αύξηση του μήκους του αποχωρισμού.
2. Η καμπτική ακαμψία της δοκού μειώνεται με την αύξηση του μήκους του αποχωρισμού.
3. Ο αποχωρισμός στο μέσο του πάχους της δοκού είχε την πιο δυσμενή επίδραση, από όλες της άλλες θέσεις, όσον αφορά την αντοχή και την καμπτική ακαμψία της δοκού.
4. Για μικρά μήκη αποχωρισμού, της τάξης του 30% του ανυποστήρικτου μήκους, η αστοχία είναι τοπική λόγω θλίψης ή εφελκυσμού χωρίς να υπάρξει διάδοση του αποχωρισμού. Για μεγαλύτερα μήκη αποχωρισμού η αστοχία οφείλεται στην διάδοση του αποχωρισμού. Όταν ο αποχωρισμός βρίσκεται στη θλιβόμενη πλευρά της δοκού, για μεγάλα μήκη της τάξεως του 70% του ανυποστήρικτου μήκους εμφανίζεται λυγισμός του λεπτού υποπολύστρωτου.
5. Όσο δεν εμφανίζονται φαινόμενα λυγισμού, η ύπαρξη αποχωρισμού κοντά στην εφελκυσόμενη πλευρά έχει παρεμφερή επίδραση στην αντοχή και την ακαμψία με την ύπαρξη αποχωρισμού στη θλιβόμενη πλευρά. Όταν υπάρχουν φαινόμενα λυγισμού η περίπτωση αποχωρισμού στη θλιβόμενη πλευρά προσεγγίζει τη δυσμενέστερη περίπτωση του αποχωρισμού στο μέσο του πάχους
6. Για μικρά μήκη αποχωρισμού και για αποχωρισμό στην εφελκυσόμενη πλευρά η αστοχία είναι τοπική στη περιοχή του άνω roller χωρίς να παρατηρείται διάδοση του αποχωρισμού.

Τα συμπεράσματα αυτά είναι σε αντιστοιχία με τα συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας του κ. Κουσαθανά [5] η οποία αφορούσε την επίδραση του αποχωρισμού των στρώσεων στα ινώδη σύνθετα υλικά σε λυγισμό. Κάποια από τα βασικά συμπεράσματα της εργασίας αυτής ήταν πως :

- A. Το κρίσιμο φορτίο λυγισμού είναι αντιστρόφως ανάλογο με το μήκος του αποχωρισμού των στρώσεων.
- B. Το κρίσιμο φορτίο λυγισμού αυξάνεται όσο η θέση του αποχωρισμού πλησιάζει προς την εξωτερική επιφάνεια του πολύστρωτου.
- C. Το μήκος του αποχωρισμού των στρώσεων επηρεάζει την μορφή λυγισμού του δοκιμίου.

Το συμπέρασμα A είναι αντίστοιχο με τα συμπεράσματα 1 και 2 της παρούσας εργασίας. Το συμπέρασμα B είναι σε αντιστοιχία με το συμπέρασμα 3 της παρούσας εργασίας, με την έννοια πως η θέση B (αποχωρισμός στο μέσο του πάχους) αποτελεί την πιο δυσμενή περίπτωση. Τέλος το συμπέρασμα C είναι σε αντιστοιχία με το συμπέρασμα 4 της παρούσας εργασίας.

Προτάσεις για περαιτέρω μελέτη

Με βάση τα όσα προέκυψαν από την εργασία αυτή προτείνουμε για περαιτέρω μελέτη να:

- Αναπτυχθούν μοντέλα τα οποία να μοντελοποιούν τη σταδιακή αστοχία των ινών, η οποία φαίνεται να παίζει σημαντικό ρόλο στην ανάλυση
- Γίνουν πειράματα ώστε να μελετηθεί περαιτέρω το φαινόμενο του λυγισμού στα δοκίμια C_200
- Γίνει πιο εκτενής έρευνα για τις ιδιότητες που διέπουν τον μηχανισμό διάδοσης του αποχωρισμού (cohesive zone properties)
- Εξετασθεί η επίδραση πολλαπλών αποχωρισμών, η θέση των οποίων να μην περιορίζεται μονάχα στο μέσο κατά το μήκος της δοκού.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική

- [1] Τσούβαλης, Ν. (1998), Ανάλυση και Σχεδίαση Σκαφών από Σύνθετα Υλικά, Σημειώσεις Μαθήματος, Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- [2] Παπάζογλου, Β. (1995), Ναυπηγική Τεχνολογία, Σημειώσεις Μαθήματος, Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- [3] Τσούβαλης και Ανυφαντής, (2011), Determination of the fracture process zone under Mode I fracture in glass fiber composites, Journal of Composite Materials.
- [4] Τσούβαλης και Ανυφαντής, (2011), Experimental and numerical investigation of Mode II fracture in fibrous reinforced composites, Journal of Composite Materials.
- [5] Κουσαθανάς, Α. (2010), Πειραματική και Αριθμητική Μελέτη της Επίδρασης του Αποχωρισμού των Στρώσεων στον Λυγισμό Ινωδών Σύνθετων Υλικών, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- [6] Γαργανίδης, Γ. (2009), Η Επίδραση του Αποχωρισμού των Στρώσεων στο Λυγισμό Πλακών από Σύνθετα Υλικά, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Διεθνής

- [7] S.Li, M.D. Thouless, A.M. Waas, J.A. Schroeder, P.D. Zavattieri, (2005), Mixed mode cohesive-zone models for fracture of an adhesively bonded polymer-matrix composite, Engineering Fracture Mechanics, Elsevier.
- [8] Strong, A.B., (2002), History of Composite Materials - opportunities and necessities, Brigham Young University.
- [9] Reeder, J. & Crews, J., The mixed-mode bending method for delamination testing AIAA J., 28 (1990) 1270-6
- [10] A.J. Kinloch, Y. Wang, J.G. Williams, P. Yayla, The mixed-mode delamination of fibre composite materials, Composites Science and Technology, Volume 47, Issue 3, 1993, Pages 225-237
- [11] Schapery, R. A. & Davidson, B. D., Prediction of energy release rate for mixed mode delamination using classical plate theory. Appl. Mech. Rev., 43 (1990) S281-S287

- [12] P. Naghipour, J. Schneider, M. Bartsch, J. Hausmann, H. Voggenreiter, Fracture simulation of CFRP laminates in mixed mode bending, *Engineering Fracture Mechanics*, Volume 76, Issue 18, December 2009, Pages 2821-2833
- [13] C.T. Sun, S. Zheng, Delamination characteristics of double-cantilever beam and end-notched flexure composite specimens, *Composites Science and Technology*, Volume 56, Issue 4, 1996, Pages 451-459
- [14] H. Ullah, A.R. Harland, T. Lucas, D. Price, V.V. Silberschmidt, Finite-element modelling of bending of CFRP laminates: Multiple delaminations, *Computational Materials Science*, Volume 52, Issue 1, February 2012
- [15] Sailendra N. Chatterjee, William A. Dick, R. Byron Pipes, Mixed-mode delamination fracture in laminated composites, *Composites Science and Technology*, Volume 25, Issue 1, 1986, Pages 49-67
- [16] Russell AJ, Street KN. Factors Affecting the Interlaminar Fracture Energy of Graphite/Epoxy Laminates. *Progress in Science and Engineering of Composites (ICCM-IV)*, Tokyo, 1982:279–86
- [17] Carlsson LA, Gillespie Jr JW, Pipes RB. On the analysis and design of the end notched flexure (ENF) specimen for mode II testing. *Journal of Composite Materials* 1986;20:594–604
- [18] Whitney JM. Analysis of the End Notch Flexure Specimen Using a Higher Order Beam Theory Based on Reissner's Principle. *Proceedings of American Society for Composites, 3rd Technical Conference, Lancaster, Pennsylvania, 1988*
- [19] Wang Y, Williams JG. Corrections for mode II fracture toughness specimens of composite materials. *Composite Science and Technology* 1992;43:251–56
- [20] Corleto CR, Hogan HA. Energy release rate for the ENF specimen using a beam on an elastic foundation. *Journal of Composite Materials* 1995;29:1420–436
- [21] MARSTRUCT. Experimental Round-Robin Measurement of Material Properties for UD Laminates Applied in Composite Plate Tests - Task 4.3.4.3: Buckling of composite plates and columns in compression: Testing and analyses
- [22] Phd Thesis, Konstantinos N. Anyfantis, Analysis and design of composite-to-metal adhesively bonded joints, Athens, February 2012
- [23] Ansys Release 14 , (2011) , Basic Analysis Guide.
- [24] Ansys Release 14 , (2011) , Element Reference.
- [25] Ansys Release 14 , (2011) , ANSYS Mechanical APDL Contact Technology Guide.

