



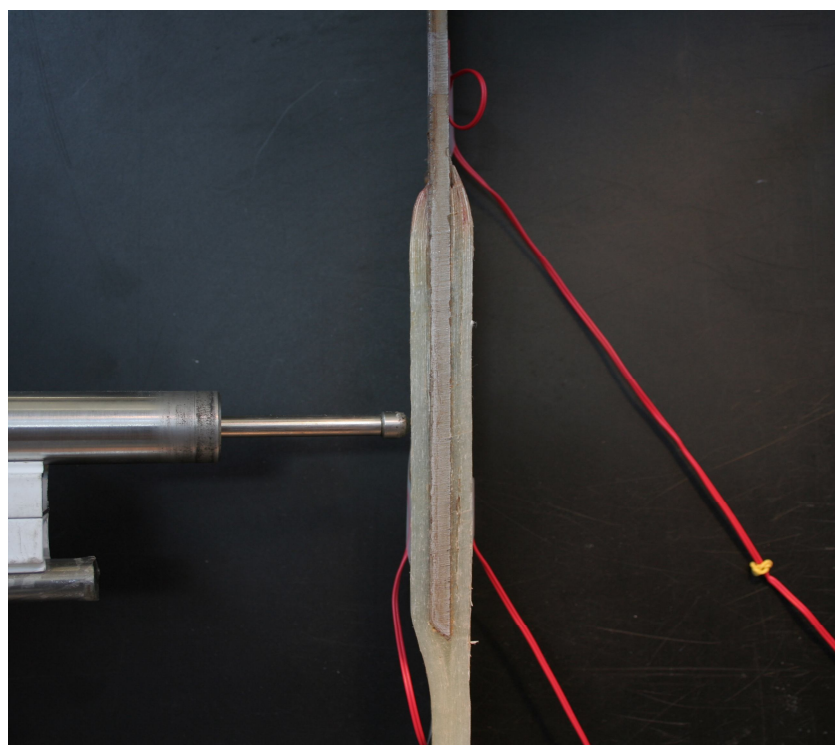
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΝΩΣΕΩΝ
ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ**



ΚΑΡΑΤΖΑΣ Α. ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

Επιβλέπων : Αναπλ. Καθ. ΝΙΚΟΛΑΟΣ Γ. ΤΣΟΥΒΑΛΗΣ

Αθήνα, Ιούλιος 2009

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Τσούβαλη για την υπομονή του και τις συμβουλές του κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας, τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Ανυφαντή για την πολύτιμη βοήθεια του στο θέμα των πεπερασμένων στοιχείων, τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Χατζηδούρο για τη βοήθεια του με τη μέθοδο ακουστικής εκπομπής καθώς και το τεχνικό προσωπικό του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας για την βοήθεια τους κατά τις πειραματικές δοκιμές.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1 σελ.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΟΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥΣ ΣΤΗΝ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗ

1.1	Εισαγωγή	1
1.2	Βιβλιογραφική ανασκόπηση	4
1.3	Σκοπός της διπλωματικής εργασίας	10

Κεφάλαιο 2

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

2.1	Εισαγωγή στα πεπερασμένα στοιχεία	12
2.2	Περιγραφή της προς μοντελοποίηση σύνδεσης	13
2.3	Ιδιότητες υλικών	14
2.4	Μοντελοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία	16
2.5	Επιλογή φόρτισης και οριακών συνθηκών	19
2.6	Ανάλυση ευαισθησίας	20
2.7	Ανάλυση αποτελεσμάτων του ελαστοπλαστικού μοντέλου 60-29.658-12.76	52
2.8	Σύγκριση γραμμικά ελαστικού με ελαστοπλαστικό μοντέλο	60
2.9	Παραμετρική μελέτη γεωμετρίας σύνδεσης	61
2.10	Σχολιασμός αποτελεσμάτων - συμπεράσματα	63

Κεφάλαιο 3

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ

3.1	Εισαγωγικά	65
3.2	Περιγραφή σύνδεσης	66
3.3	Περιγραφή δοκιμών	67
3.4	Υλικά και πειραματικός προσδιορισμός των ιδιοτήτων τους	75
3.4.1	Πειραματικός προσδιορισμός ιδιοτήτων χάλυβα	75
3.4.2	Πειραματικός προσδιορισμός ιδιοτήτων σύνθετου υλικού	76
3.4.2.A	Πειράματα στο πλαίσιο του προγράμματος MARSTRUCT	79
3.4.2.B	Πειράματα προσδιορισμού ιδιοτήτων του σύνθετου υλικού	83

3.5	Μέθοδος κατασκευής των δοκιμίων σύνδεσης	86
3.5.1	Επιφανειακή κατεργασία της μεταλλικής επιφάνειας	87
3.5.2	Τρόπος κατασκευής της σύνδεσης	88
3.6	Επιτευχθείσες ιδιότητες του πολύστρωτου	97
3.7	Διεξαγωγή πειραμάτων, παρουσίαση αποτελεσμάτων	100
3.7.1	Διεξαγωγή πειραμάτων	100
3.7.2	Μέθοδος ακουστικής εκπομπής, ακουστικές μετρήσεις	103
3.7.3	Αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών	106
3.8	Σχολιασμός αποτελεσμάτων	115

Κεφάλαιο 4

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

4.1	Εισαγωγή	117
4.2	Περιγραφή μοντέλων	117
4.3	Σύγκριση πειραματικών μετρήσεων με τα αποτελέσματα των πεπερασμένων στοιχείων	122
4.4	Ανάλυση ευαισθησίας	131

Κεφάλαιο 5

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.1	Ανασκόπηση	133
5.2	Προτάσεις για περαιτέρω μελέτη και επέκταση της εργασίας	134

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

- A : Διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων των υλικών
- B : Κώδικας μοντελοποίησης πειραμάτων σε ANSYS

Κεφάλαιο 1^ο

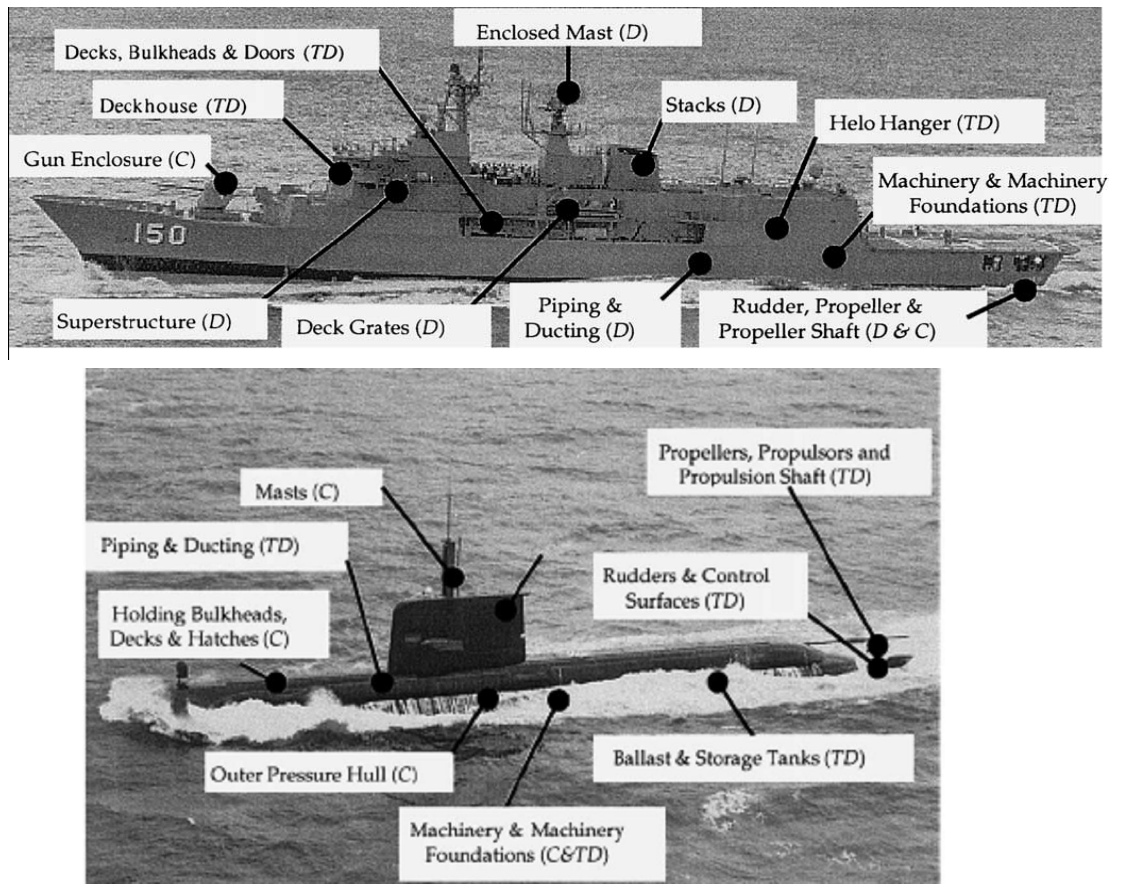
ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΟΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥΣ ΣΤΗΝ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

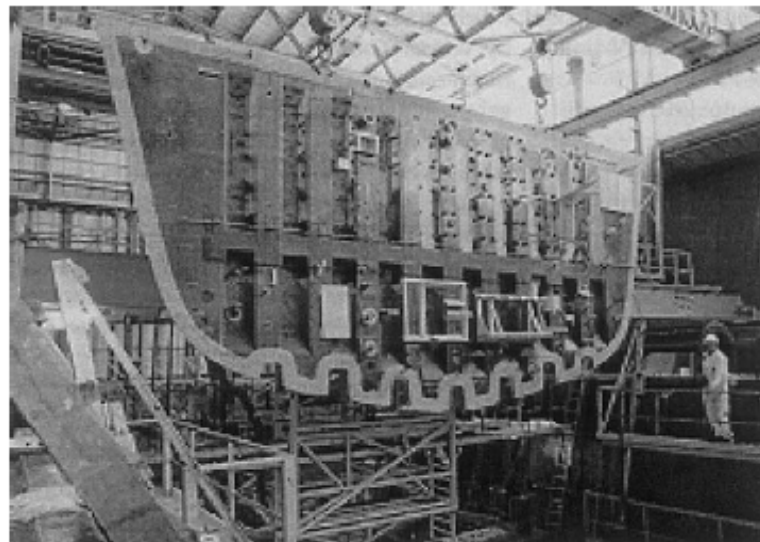
Τα σύνθετα υλικά καθώς και οι κατασκευαστικές συνδέσεις τους βρίσκονται υπό συνεχή εξέλιξη σε ένα ευρύ φάσμα ναυπηγικών, αεροναυπηγικών και αεροδιαστημικών εφαρμογών, εξαιτίας της ευελιξίας και των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν. Τα πλεονεκτήματα αυτά συνοψίζονται στην υψηλή ειδική αντοχή, την υψηλή ειδική δυσκαμψία, το υψηλό όριο κόπωσης, την υψηλή δυσθραυστότητα, την ικανοποιητική αντίσταση σε πυρκαγιά και στο περιβάλλον, και κυρίως στο μειωμένο βάρος. Επιπρόσθετα μπορούν να παραχθούν σε πολύπλοκες μορφές, ενώ χάρη στην μεγάλη ποικιλία ινών, ρητινών και στις διάφορες μεθόδους κατασκευής δίνεται η δυνατότητα στο σχεδιαστή να επιλέξει το πιο κατάλληλο σύστημα υλικών για να καλύψει τις απαιτήσεις του. Κάθε σύστημα έχει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και ιδιότητες που πολλές φορές είναι μοναδικά.

Στη ναυπηγική τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται κυρίως για την κατασκευή πλοίων μικρότερων των 100 m, όπως για παράδειγμα σκάφη αναψυχής και αλιευτικά, και σε δευτερεύουσες εφαρμογές, όπως στις υπερκατασκευές. Σταδιακά η χρήση τους επεκτείνεται σε μεγαλύτερου μήκους σκάφη με στόχο να αντικαταστήσουν μεγάλα τμήματα μεταλλικής κατασκευής μειώνοντας έτσι το συνολικό βάρος του πλοίου. Μερικά από τα πλεονεκτήματα της μείωσης του κατασκευαστικού βάρους είναι η μείωση της κατανάλωσης καυσίμου, η αύξηση της μεταφορικής ικανότητας και η μείωση της θέσης του κέντρου βάρους στα πλοία, που επιδρά θετικά στην ευστάθεια σε διατοιχισμό.

Τα μεταλλικά τμήματα του πλοίου που μπορούν να αντικατασταθούν με χρήση σύνθετων υλικών είναι ενδεικτικά: οι υπερκατασκευές του πλοίου, οι ιστοί, η έλικα, οι φρακτές είτε ακόμα και ένα ολόκληρο κατάστρωμα, όπως βλέπουμε στα Σχήματα 1.1 και 1.2. (Mouritz – 2004), (Shenoi – 2005).



Σχήμα 1.1: Εφαρμογές κατασκευών από σύνθετα υλικά σε πλοία και υποβρύχια. Τα σύμβολα C,TD και D σημαίνουν ότι η εφαρμογή είναι σε θεωρητικό στάδιο, σε στάδιο δοκιμών και σε υπηρεσία.



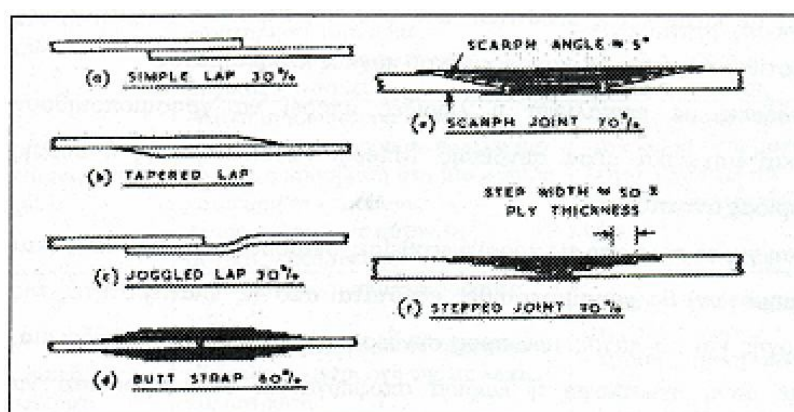
Σχήμα 1.2: Φρακτή από σύνθετα υλικά που προσαρμόζεται σε μεταλλικό σκάφος.

Για την αποδοτική και σωστή λειτουργία της κατασκευής επιβάλλεται να κατασκευαστούν οι κατάλληλες μηχανικές συνδέσεις μεταξύ μεταλλικών και σύνθετων υλικών ανάλογα με τη χρήση, την εφαρμογή αλλά και τα επιμέρους

τμήματα αυτής. Ταυτόχρονα μια τέτοιου είδους μηχανική σύνδεση θα πρέπει να ικανοποιεί κάποιες βασικές αρχές και απαιτήσεις, με βάση τις οποίες θα γίνεται η σχεδίαση και η παραγωγή αυτών των συνδέσεων. Η καλή μηχανική συμπεριφορά είναι απαραίτητη, ώστε να διασφαλίζεται η ακεραιότητα και η αξιοπιστία της κατασκευής κάτω από κάθε είδους καταπόνηση που ενδέχεται να δεχθούν οι συνδέσεις του πλοίου. Σημαντικοί παράγοντες για την ευρεία χρήση τέτοιων συνδέσεων είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής καθώς και η εύκολη παραγωγή των συνδέσεων από τα ναυπηγεία, η ευκολία εφαρμογής τους στο πλοίο και η όσο το δυνατόν μεγαλύτερη αυτοματοποίηση αυτών των διαδικασιών. Επίσης οι συνδέσεις θα πρέπει να είναι εύκολα επιθεωρήσιμες και να έχουν χαμηλό κόστος επισκευής και συντήρησης.

Με βάση τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά έχουν δημιουργηθεί πολλοί τύποι συνδέσεων, ανάλογα με τις απαιτήσεις που πρέπει να πληρούν. Οι βασικότεροι τύποι συνδέσεων μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σύμφωνα με τα παρακάτω κριτήρια:

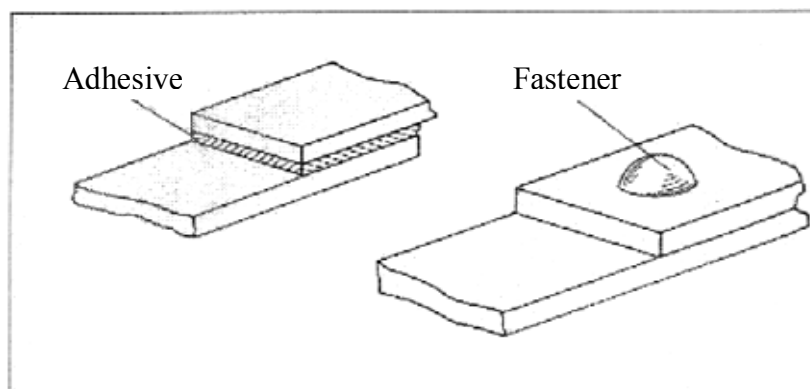
1. Με κριτήριο τη δυνατότητα κίνησης και αποσυναρμολόγησης τους, σε:
 - Σταθερές συνδέσεις
 - Προσωρινές συνδέσεις
 - Ελαστικές συνδέσεις
2. Με κριτήριο τον χώρο που καταλαμβάνει μία σύνδεση, σε
 - Συνεπίπεδες (in-plane joints) ή μετωπικές συνδέσεις (butt-joints) (Σχήμα 1.3)
 - Μη συνεπίπεδες συνδέσεις (out-of-plane joints)



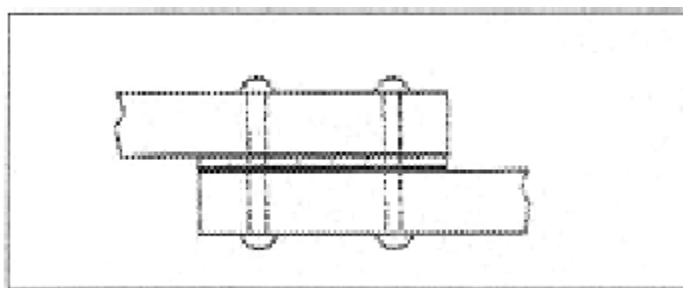
Σχήμα 1.3: Τυπικές διατάξεις και αποδόσεις συνεπίπεδων συνδέσεων

3. Με κριτήριο τα μέσα σύνδεσης, που αποτελεί και την πιο συνήθη κατηγοριοποίηση, σε:
 - Συνδέσεις με μηχανικά μέσα

- Συνδέσεις με κολλητικά μέσα (Σχήμα 1.4)
- Σύνθετες συνδέσεις (Σχήμα 1.5)



Σχήμα 1.4: Σύνδεση με κολλητικό μέσο , σύνδεση με μηχανικό μέσο



Σχήμα 1.5: Σύνθετη σύνδεση

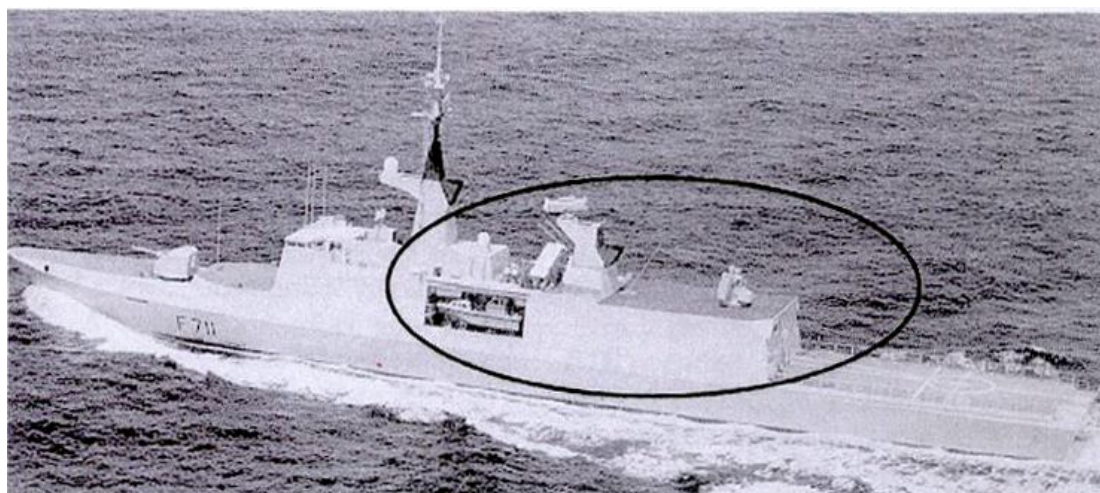
1.2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Η ανάπτυξη των ινωδών σύνθετων υλικών κατά τη διάρκεια των τελευταίων 30 ετών αποτέλεσε μία έκρηξη της τεχνολογίας. Του γεγονότος αυτού προηγήθηκε η ανάπτυξη των υψηλής αντοχής ινών, καθώς και η ισχυρή επιθυμία της αεροδιαστημικής να αυξηθεί η απόδοση και να ελαττωθεί το βάρος των αεροσκαφών και των διαστημοπλοίων. Τις πρώτες εφαρμογές υβριδικών συνδέσεων σύνθετων υλικών τις συναντούμε στην αεροδιαστημική βιομηχανία με τη χρήση συνθετικών επιθεμάτων για την επισκευή αλουμινένιων νομέων από τον Baker (1984 και 1993). Η χρήση τους επεκτάθηκε τόσο στις επίγειες μεταφορές όσο και στη ναυπηγική βιομηχανία με αρχικό πεδίο εφαρμογών κυρίως τα πολεμικά σκάφη και μετέπειτα και τα εμπορικά, (Wright-2001), (Mouritz-2001), (Clifford-2002) και (Grenestedt-2003).

Οι πρώτες μελέτες που προχώρησαν από τη θεωρία στην πράξη στην ναυπηγική βιομηχανία αφορούσαν ναυπηγικές υπερκατασκευές και ξεκίνησαν στις αρχές της δεκαετίας του 80 (Mouritz-2001). Ένα τέτοιο παράδειγμα εφαρμογής υβριδικών συνδέσεων και εκτεταμένης χρήσης των σύνθετων υλικών σε συνδυασμό με μεταλλικά υλικά αποτελεί η γαλλική φρεγάτα La Fayette που φαίνεται παρακάτω

στο Σχήμα 1.6 όπου φέρει υπερκατασκευές κατασκευασμένες από σύνθετα υλικά με στόχο τη μείωση της καθ' ύψος θέσης του κέντρου βάρους του πλοίου.

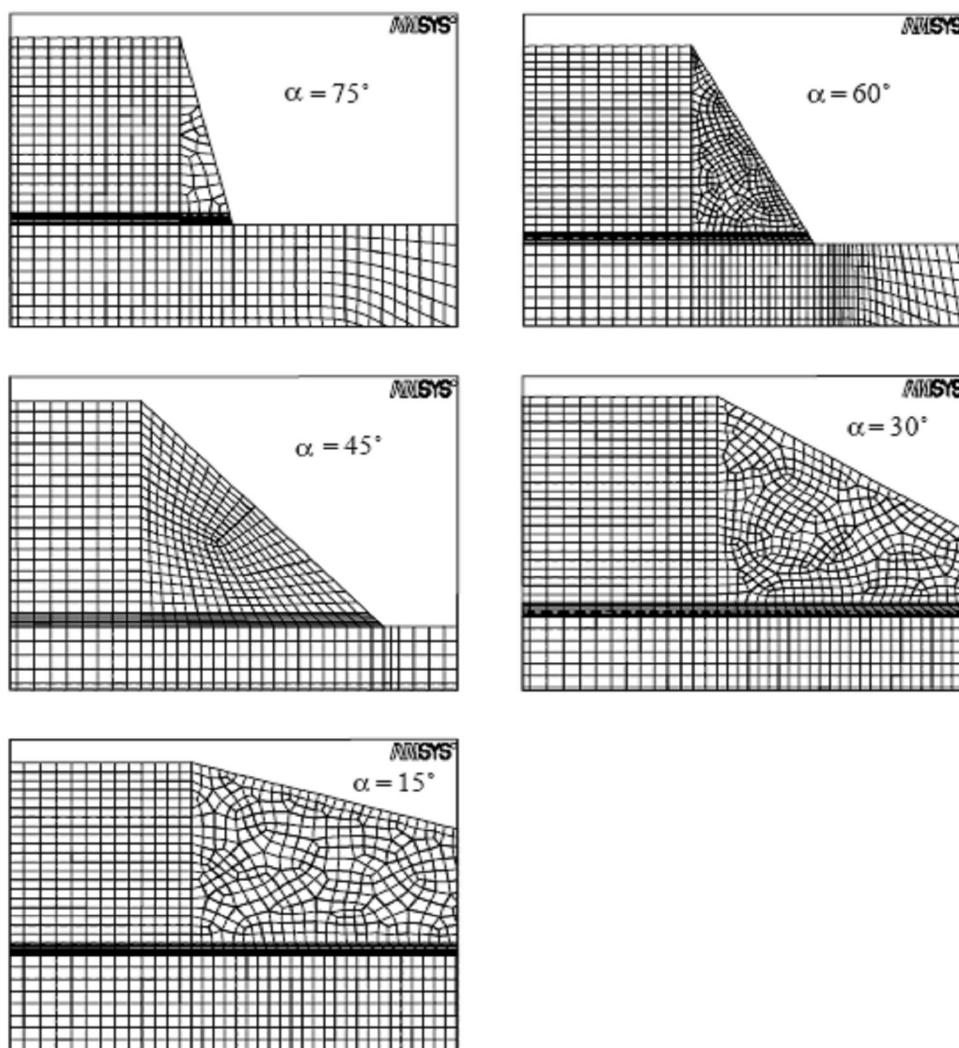
Επιπρόσθετα η μείωση του βάρους του πλοίου μπορεί να επιτευχθεί με την ενσωμάτωση τμημάτων από σύνθετα υλικά στην κύρια μεταλλική κατασκευή της γάστρας. Τέτοια τμήματα μπορούν να είναι οι εγκάρσιες φρακτές που υποδιαίρουν το πλοίο σε μικρότερα διαμήκη τμήματα, είτε ολόκληρα καταστρώματα που δεν συνεισφέρουν στη διαμήκη αντοχή του πλοίου και βρίσκονται κατά κύριο λόγο κοντά στον ουδέτερο άξονα. Υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον ανάπτυξης και έρευνας τέτοιων συνδέσεων από τους Wright (2000), Clifford (2002), Cao και Grenestedt (2003) και McGeorge (2005) με στόχο την εκτεταμένη χρήση συνθέτων υλικών στην κατασκευή του πλοίου. Τέτοιες εφαρμογές χρησιμοποιούνται κυρίως σε τύπους πλοίων όπου το βάρος της μεταλλικής κατασκευής είναι πολύ κρίσιμος παράγοντας όσον αφορά τη σχεδίαση του σκάφους. Τέτοια σκάφη είναι τα πολεμικά και τα ταχύπλοα επιβατηγά, όπου οι κατασκευές γίνονται με εκτεταμένη χρήση αλουμινίου και συνθέτων υλικών.



Σχήμα 1.6: Η φρεγάτα La Fayette με υπερκατασκευές από σύνθετα υλικά.

Έντονη ερευνητική δραστηριότητα έχει σημειωθεί τα τελευταία χρόνια σχετικά με τις συνδέσεις σύνθετων υλικών, με χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων πειραμάτων και αναλυτικών μεθόδων. Μεγάλο κομμάτι της ερευνητικής δραστηριότητας στρέφεται στην παραμετρική ανάλυση απλών σχετικά ειδών συνδέσεων όπως έκαναν οι Kelly (2004) για λοξές συνδέσεις και οι Rues, Antunes και Ferreira (2004) που σύγκριναν 4 διαφορετικά μήκη αλληλοεπικάλυψης (15, 30, 45 και 60 χιλιοστά) ενός single-lap joint σύνθετου με σύνθετο με τη χρήση κολλητικών μέσων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι αύξηση του μήκους αλληλοεπικάλυψης δεν μεταφράζεται αναγκαστικά σε αύξηση της αντοχής του συνδέσμου, δεδομένου ότι τα δοκίμια με overlap 30 mm ήταν αυτά που είχαν τις χαμηλότερες κατανομές τάσεων. Μία άλλη μελέτη που πραγματοποιήθηκε από τους Belingardi, Goglio και Tarditi (2001) με χρήση πεπερασμένων στοιχείων αφορούσε

την επίδραση που έχει η διαμόρφωση των άκρων της αλληλοεπικάλυψης (overlap) σε συνδέσεις μεταξύ συνθέτων αλλά και μεταξύ μεταλλικών και σύνθετων υλικών (Σχήμα 1.7). Τα συμπεράσματα της μελέτης συνοψίζονται στο ότι η διαμόρφωση των άκρων εξομαλύνει το τασικό πεδίο μειώνοντας τις τάσεις στα άκρα, ενώ συγκεκριμένα η βέλτιστη κατανομή προέκυψε για διαμόρφωση γωνίας 45° .

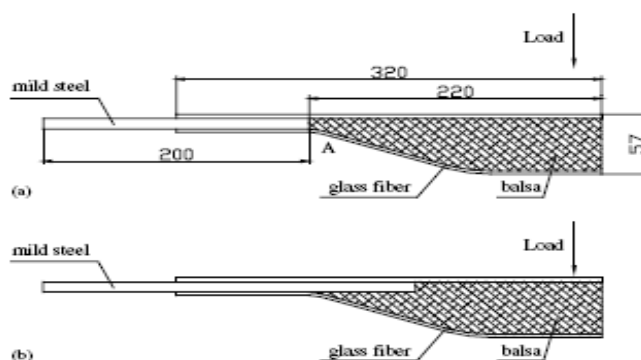


Σχήμα 1.7: Παραμετρική μελέτη της διαμόρφωσης των άκρων συνδέσεως με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων

Σχετικά με τις συνδέσεις μεταλλικών και σύνθετων υλικών, ένα από τα πρώτα ερωτήματα που έπρεπε να απαντηθεί είναι για το είδος των συνδέσεων που θα έπρεπε να χρησιμοποιηθούν. Συγκεκριμένα αν θα έπρεπε οι συνδέσεις να κατασκευάζονται με κολλητικά μέσα, με μηχανικά, ή με συνδυασμό των δύο μέσων (σύνθετες συνδέσεις). Η μελέτη τέτοιου είδους προβλημάτων από τους Kweon, Choi (2006), Hentinen (2005) και Grenestedt (2004), κατέληξε ότι η χρήση συνδέσεων με κολλητικά μέσα είναι πιο αποτελεσματική σε τέτοιου είδους εφαρμογές.

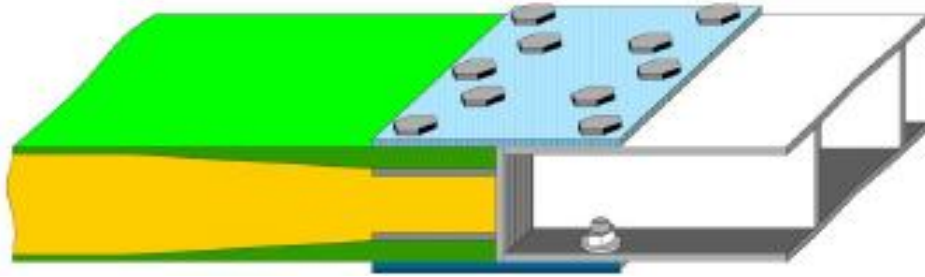
Οι Clifford (2003), Cao J. και Grenestedt L.(2003) μελέτησαν παρόμοιους τύπους συνδέσεων (Σχήμα 1.8), όπου το μεταλλικό αριστερό άκρο της σύνδεσης

ήταν πακτωμένο και στην δεξιά μεριά της σύνδεσης, όπου αποτελείται από sandwich υλικό, επιβαλλόταν καμπτικό φορτίο με μέγιστη τιμή της καμπτικής τάσης στο σημείο σύνδεσης των δύο διαφορετικών υλικών (μετάλλου – συνθέτου). Κατέληξαν ότι μικρές αλλαγές στην αρχική γεωμετρία και στα υλικά, όπως για παράδειγμα την αύξηση του μήκους του μετάλλου που εισέρχεται στον πυρήνα του sandwich, βελτιώνουν κατά πολύ την αντοχή της κατασκευής. Επίσης, μία σημαντική παρατήρηση ήταν ότι αυξάνοντας την τραχύτητα του μετάλλου στη διεπιφάνεια μετάλλου-συνθέτου μέχρι μία ορισμένη τιμή, αυξανόταν η αντοχή της σύνδεσης. Η αύξηση της τραχύτητας γινόταν με επιφανειακή κατεργασία του μετάλλου με αμμοβολή (sand-blasting SA 2,5).

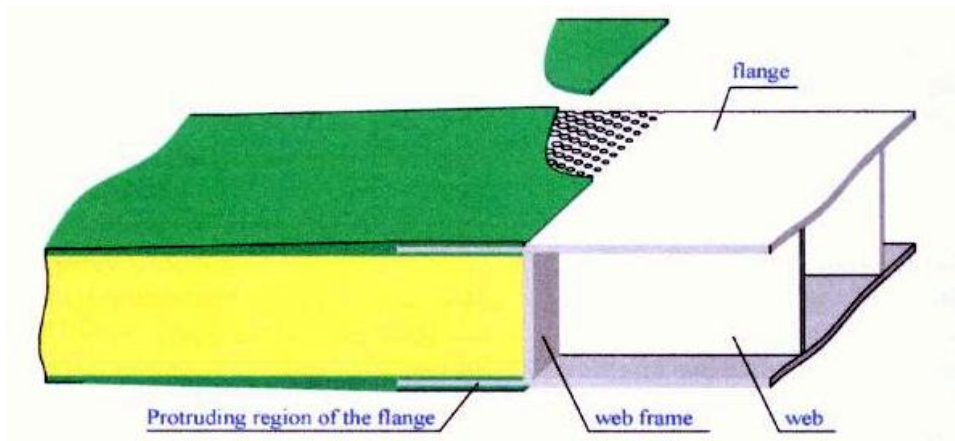


Σχήμα 1.8

Οι Cao και Grenestedt (2004) πρότειναν και μελέτησαν επίσης δύο άλλους τύπους συνδέσεων που φαίνονται στα Σχήματα 1.9 και 1.10 μεταξύ μετάλλου και sandwich. Οι δύο τύποι συνδέσεων διέφεραν στη χρησιμοποίηση βιδών ή κολλητικών μέσων σε συνδυασμό με διάτρηση του χάλυβα για σύνδεση και καταπονήθηκαν κατά την πειραματική διαδικασία σε κάμψη τεσσάρων σημείων. Ο πρώτος τύπος συνδέσεων παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.9 και χρησιμοποιεί για την σύνδεση μεταξύ συνθέτου και μετάλλου βίδες και μεταλλικές επικαλύψεις. Ο δεύτερος τρόπος σύνδεσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.10, όπου έχουμε μια πλήρως συγκολλητή σύνδεση. Για τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων της σύνδεσης χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της διάτρησης του μετάλλου με κυκλικές οπές. Τα συμπεράσματα ήταν ανάλογα με τα προηγούμενα. Δηλαδή η σύνδεση με συνδυασμό της διάτρησης στο χάλυβα μαζί με κολλητικά μέσα είναι δυνατότερη σε σχέση με αυτήν με τις βίδες. Η αστοχία παρατηρήθηκε εκεί όπου το πάχος του σύνθετου αυξανόταν τοπικά και όχι στην περιοχή της σύνδεσης.

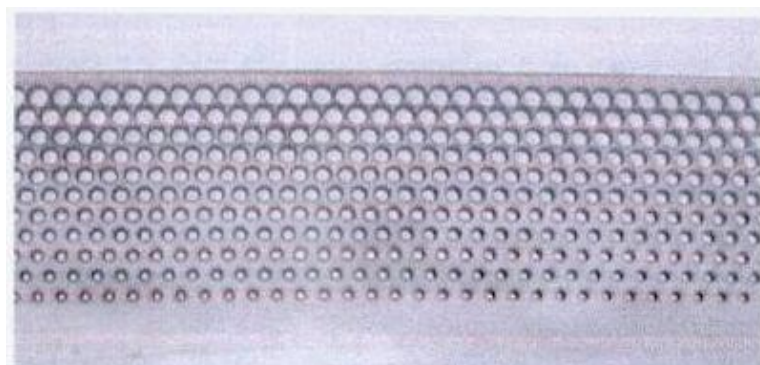


Σχήμα 1.9

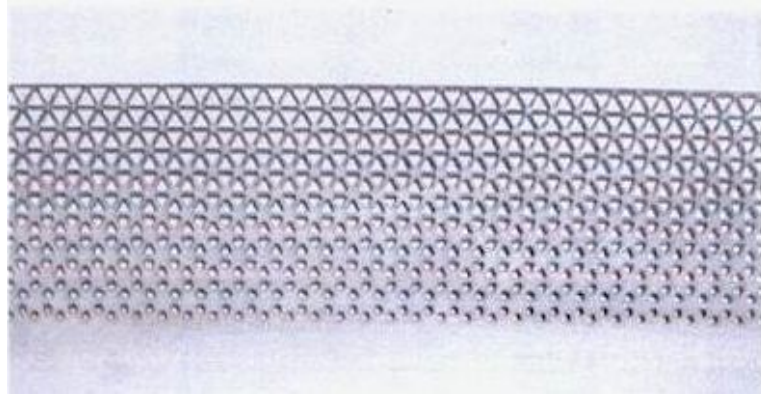


Σχήμα 1.10

Μία αξιοπρόσεκτη πρόταση για ενώσεις απλής επικάλυψης με κόλλα είναι αυτή των Melogranaa και Grenestedt (2002). Προτείνεται η διάτρηση του μετάλλου στην περιοχή επικάλυψης με το σύνθετο υλικό με σκοπό τη σταδιακή μείωση της ακαμψίας του μετάλλου. Αυτή η μέθοδος έχει ως αποτέλεσμα να έχουμε ομαλότερη μετάβαση όσον αφορά τις ακαμψίες από το μέταλλο προς το σύνθετο. Χρησιμοποιήθηκαν κυκλικές, τριγωνικές και εξαγωνικές οπές και τα αποτελέσματα ήταν σε κάθε περίπτωση καλύτερα σε σχέση με τις απλές διαμορφώσεις (Σχήματα 1.11 και 1.12).

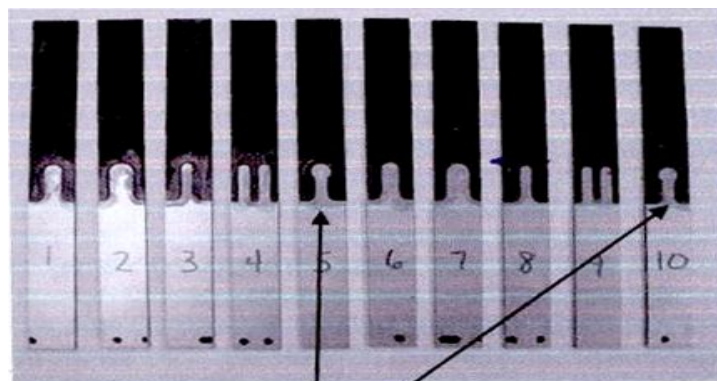


Σχήμα 1.11: Κυκλικές οπές



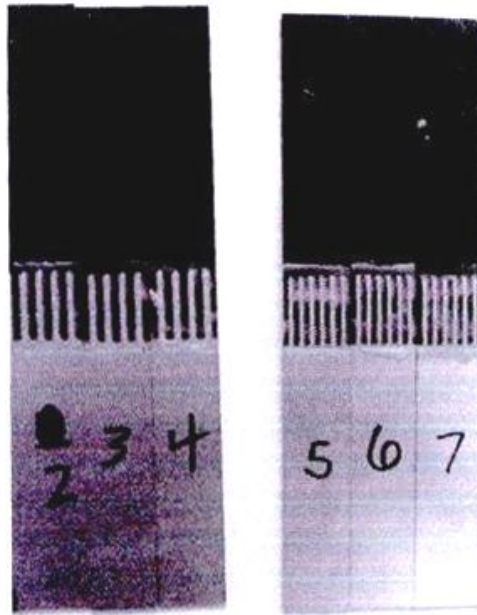
Σχήμα 1.12: Τριγωνικές οπές

Μία νέα πρόταση για να αντικατασταθεί η σύνδεση απλής επικάλυψης με κολλητικά μέσα είναι αυτή που μελέτησε αρχικά ο Dvorak (2001) και κατόπιν εξέλιξαν οι Melogranaa και Grenestedt (2003). Αυτή η σύνδεση στην περιοχή επικάλυψης του μετάλλου με το σύνθετο έχει προεξέχουσες λωρίδες μετάλλου και πτυχές ώστε να μεγαλώσει η επιφάνεια σύνδεσης των δύο και να μην χρειάζεται να αυξηθεί το πάχος της σύνδεσης τοπικά (Σχήματα 1.13 και 1.14). Τα αποτελέσματα των πειραμάτων που διεξήχθησαν έδειξαν ότι αυτή η μέθοδος σύνδεσης παράγει πολύ δυνατώτερες συνδέσεις από τη σύνδεση μονής επικάλυψης. Σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της σύνδεσης είναι ότι δεν αυξάνεται το πάχος της στην περιοχή σύνδεσης. Εξίσου σημαντικό μειονέκτημα αποτελεί το κόστος διαμόρφωσης των άκρων που είναι πολύ υψηλό.



“Lollipop” joints

Σχήμα 1.13



Σχήμα 1.14

1.3 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η παραμετρική μελέτη και η διεξαγωγή πειραμάτων για μια σύνδεση μεταξύ μετάλλου και συνθέτου υλικού με σκοπό να προσδιοριστεί το φορτίο αστοχίας της. Οι παράμετροι που εξετάστηκαν ήταν το μήκος αλληλοεπικάλυψης μεταξύ του μετάλλου και του σύνθετου και η κατεργασία της μεταλλικής επιφάνειας σε αυτήν την περιοχή. Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία αποτελεί τη συνέχεια της διπλωματικής εργασίας του κ. Γ. Πετράκη (2007) που ασχολήθηκε με το ίδιο θέμα χωρίς όμως τη διεξαγωγή πειραμάτων. Για τη μελέτη της σύνδεσης έγινε αρχικά χρήση των πεπερασμένων στοιχείων με τη βοήθεια του προγράμματος ANSYS. Στη συνέχεια ακολούθησε η κατασκευή των δοκιμίων της σύνδεσης με διαφορετικό μήκος αλληλοεπικάλυψης και επιφανειακής κατεργασίας και πειραματικές δοκιμές αυτών. Τέλος μοντελοποιήθηκε η σύνδεση με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων βάσει των ιδιοτήτων που επιτεύχθηκαν κατά την κατασκευή των δοκιμίων και τις πειραματικές μετρήσεις που συγκεντρώθηκαν, με σκοπό τη σύγκριση των θεωρητικών και των πειραματικών αποτελεσμάτων.

Στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας έγινε μία βιβλιογραφική ανασκόπηση και αναφέρονται ορισμένα εισαγωγικά γενικά χαρακτηριστικά των συνδέσεων μεταξύ μετάλλων και σύνθετων υλικών. Επίσης παραθέτουμε περίληψη σημαντικών δημοσιεύσεων με παρεμφερές θέμα μελέτης.

Στο δεύτερο κεφάλαιο της εργασίας αναφέρεται ο τρόπος μοντελοποίησης της υπό μελέτη σύνδεσης. Έπειτα, περιγράφονται τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν με τη

χρήση πεπερασμένων στοιχείων και συγκρίνονται μεταξύ τους για να εξακριβωθεί η επίδραση διαφορετικών παραμέτρων.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται εκτενής περιγραφή των πειραμάτων. Συγκεκριμένα περιγράφονται αναλυτικά τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν και οι δοκιμές για τον χαρακτηρισμό των μηχανικών τους ιδιοτήτων, η γεωμετρία των δοκιμών καθώς και ο τρόπος παρασκευής τους, η προετοιμασία τους, και οι συνθήκες δοκιμών. Στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα που συγκεντρώθηκαν.

Το τέταρτο κεφάλαιο αναφέρεται στη μοντελοποίηση των πειραμάτων με πεπερασμένα στοιχεία με βάση τις πραγματικές επιτευχθείσες ιδιότητες που μετρήθηκαν κατά τις πειραματικές δοκιμές. Συγκεκριμένα εξηγείται ο τρόπος μοντελοποίησης και συγκρίνονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την μοντελοποίηση με τα πειραματικά.

Το πέμπτο κεφάλαιο περιλαμβάνει τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από τα αποτελέσματα και τις συγκρίσεις που προηγήθηκαν κατά τη διάρκεια της μελέτης, αλλά και προτάσεις για τη βελτίωση της σύνδεσης και την περαιτέρω διερεύνηση αυτής.

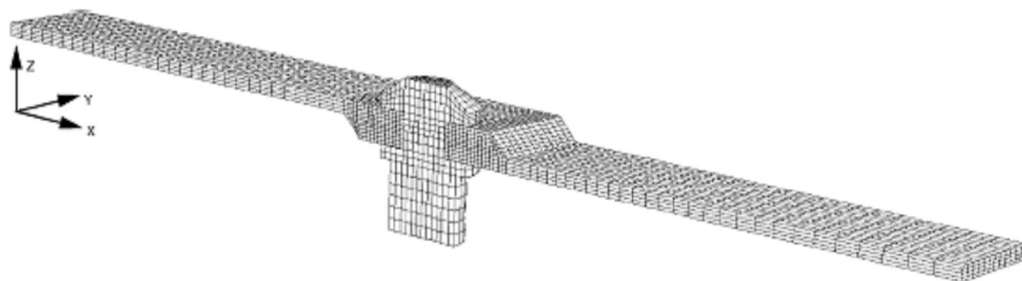
Κεφάλαιο 2^ο

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Τα τελευταία χρόνια ο κλάδος της προσομοίωσης κερδίζει όλο και περισσότερο έδαφος. Οι αναλυτικές μέθοδοι δυσκολεύονται να αντιμετωπίσουν προβλήματα των οποίων η γεωμετρία είναι περίπλοκη. Παράλληλα η πολυπλοκότητα που απορρέει από την πεπλεγμένη μορφή των εξισώσεων φαίνεται πολύ σημαντικό πρόβλημα, που δεν έχει ακόμα αντιμετωπιστεί. Επιπρόσθετα δεν έχουν καταστρωθεί εξισώσεις που να μπορούν να συμπεριλάβουν όλα τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα. Η πεπλεγμένη δομή απορρέει τόσο από την αδυναμία χειρισμού σε δύο ή τρεις διαστάσεις, όπως επίσης και από το ότι οι μεγάλες μετατοπίσεις της κατασκευής επηρεάζουν τις αναπτυσσόμενες τάσεις.

Οι κύριες διαφορές μεταξύ των κλασσικών αναλυτικών μεθόδων και των πεπερασμένων στοιχείων είναι ο τρόπος με τον οποίο αντιμετωπίζουν την κατασκευή και ο τρόπος τον οποίο ακολουθούν στη διαδικασία επίλυσης. Οι κλασσικές μέθοδοι θεωρούν την κατασκευή συνεχή και η συμπεριφορά αυτής περιγράφεται από τμηματικές ή συνεχείς κοινές εξισώσεις. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων θεωρεί την κατασκευή ως άθροισμα πολλών μικρών δομικών μονάδων που καλούνται στοιχεία. Η συμπεριφορά αυτών των στοιχείων και όλης της κατασκευής βρίσκεται καταστρώνοντας ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων οι οποίες μπορούν να επιλυθούν εύκολα μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή. Τα στοιχεία αυτά της κατασκευής καλούνται πεπερασμένα στοιχεία. Τα σημεία στα οποία τα πεπερασμένα στοιχεία συνδέονται καλούνται κόμβοι και η διαδικασία για την επιλογή και ορισμό των κόμβων καλείται μοντελοποίηση. Ένα παράδειγμα τέτοιου μοντέλου με χρήση πεπερασμένων στοιχείων φαίνεται στο Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1 : Μοντελοποίηση σύνδεσης με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων

Η εξάπλωση και η αύξηση της υπολογιστικής ισχύος των ηλεκτρονικών υπολογιστών αφήνει ελπιδοφόρα μηνύματα ότι μπορεί να διαχειριστεί πολύπλοκες μορφές και γεωμετρίες, όπως και να επιλύσει όσο πεπλεγμένες και αν είναι τις

μητρικές εξισώσεις. Τα πακέτα πεπερασμένων στοιχείων έχουν εξοπλιστεί με πληθώρα βιβλιοθηκών για υλικά, φορτίσεις και συνθήκες περιορισμού ή στήριξης της κατασκευής. Το σημαντικότερο πλεονέκτημά τους είναι οι σύντομοι χρόνοι που χρειάζονται για να επιλύσουν ένα πρόβλημα.

Μια τυπική ανάλυση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων περιλαμβάνει επτά βήματα στα οποία πρέπει να παρθούν κάποιες αποφάσεις από τον μελετητή. Τα υπόλοιπα βήματα που απαιτούνται για την ολοκλήρωση της μελέτης εκτελούνται αυτόματα από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Τα επτά βήματα που προαναφέραμε είναι:

- Μοντελοποίηση της κατασκευής. Η κατασκευή διαιρείται σε μικρότερα στοιχεία που είναι τα πεπερασμένα στοιχεία. Το στάδιο αυτό είναι από τα κρισιμότερα όλων γιατί ο σωστός ορισμός καθορίζει την ακρίβεια της λύσης που θα λάβουμε. Η γεωμετρία της κατασκευής θεωρείται δεδομένη.
- Ορισμός του τύπου των στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν. Σε αυτό το βήμα ο χρήστης πρέπει να ορίσει τον τύπο των στοιχείων έχοντας ως κριτήριο τις ιδιότητες τους. Ο ορισμός πρέπει να γίνει έτσι ώστε να έχουμε ένα μοντέλο όσο το δυνατόν πιο κοντά στο φυσικό μοντέλο που θέλουμε να προσομοιάσουμε.
- Ορισμός των φυσικών ιδιοτήτων των υλικών που θα χρησιμοποιήσουμε.
- Εφαρμογή των φορτίων που δέχεται η κατασκευή. Αυτά μπορεί να είναι συγκεντρωμένα φορτία, κατανεμημένα φορτία, ροπές, κρουστικά φορτία και μετατοπίσεις.
- Ορισμός οριακών συνθηκών. Οι οριακές συνθήκες πρέπει να ορίζονται σύμφωνα με την φύση του προβλήματος με γνώμονα την σωστή αναπαράσταση του προβλήματος.
- Επίλυση του συστήματος των εξισώσεων.
- Εξαγωγή και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

2.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΡΟΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΝΔΕΣΗΣ

Η σύνδεση υπό μοντελοποίηση αποτελείται από τρία διαφορετικά υλικά:

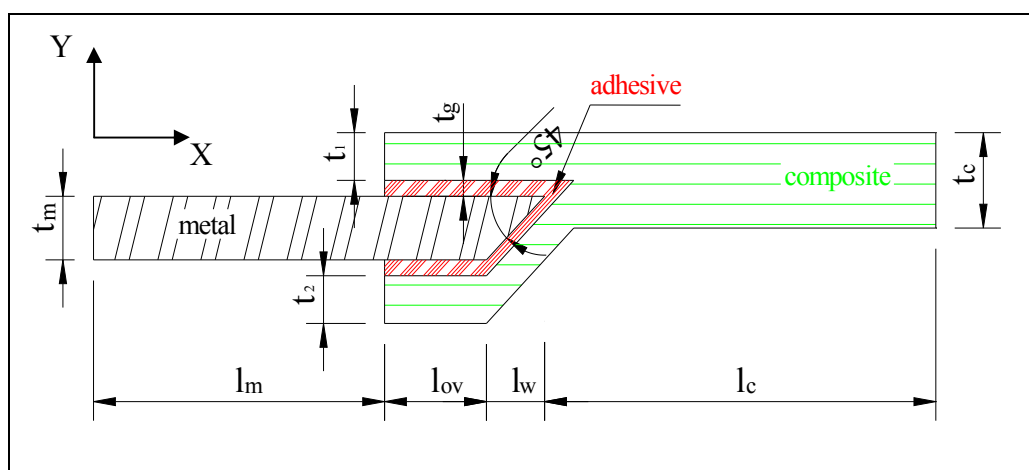
1. Από μέταλλο (metal)
2. Από το σύνθετο υλικό (composite)
3. Από το κολλητικό μέσο (adhesive)

όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.2. Το δεξιό άκρο του μετάλλου έχει υποστεί μια διαμόρφωση γωνίας 45 μοιρών. Στο Κεφάλαιο 3 αναλύονται όλες οι γεωμετρικές παράμετροι της σύνδεσης και περιγράφεται αναλυτικά ο τρόπος κατασκευής αυτής.

Η λογική πάνω στην οποία στηρίχθηκε η επιλογή της συγκεκριμένης γεωμετρίας της σύνδεσης του Σχήματος 2.2 είναι ότι πρέπει να δημιουργηθεί μια

απλή στον τρόπο κατασκευής σύνδεση, που να παρέχει τη δυνατότητα να συνδεθεί μέταλλο με σύνθετο. Η επίτευξη σύνδεσης μετάλλου με σύνθετο υλικό παρέχει τη δυνατότητα δημιουργίας μιας προκατασκευασμένης από σύνθετο υλικό φρακτής πλοίου, που φέρει περιμετρικά στα άκρα τη διαμόρφωση του Σχήματος 2.2. Αυτή η φρακτή, έχοντας στα άκρα της την συγκεκριμένη διαμόρφωση, μπορεί να προσαρτηθεί στο μεταλλικό πλοίο. Είναι αντιληπτή η χρησιμότητα μιας τέτοιας εφαρμογής, μιας και γίνεται δυνατή η προκατασκευή τμημάτων του πλοίου που μπορούν να προσαρτηθούν αργότερα στην κατασκευή αυτού. Με αυτή τη μεθοδολογία μειώνεται ο συνολικός χρόνος παραγωγής ενός πλοίου. Επίσης η ενδεχόμενη τυποποίηση και προκατασκευή τέτοιου είδους φρακτών και υπερκατασκευών, ανάλογα με τον τύπο πλοίου, θα επιφέρει σημαντική μείωση στο κόστος.

Η συγκεκριμένη σύνδεση αποτελεί μια τροποποίηση ενός τύπου σύνδεσης μεταξύ μετάλλου και υλικού sandwich (Σχήμα 1.8). Ο σχεδιασμός είναι τέτοιος που παρέχει ευελιξία στον σχεδιαστή όσον αφορά τις ιδιότητές της ανάλογα με τα υλικά που θα επιλεγθούν. Το αρχικό κόστος της είναι χαμηλό χάρη στην απλότητά της, ενώ η κατασκευή της δεν απαιτεί εξειδικευμένο εξοπλισμό.



Σχήμα 2.2

2.3 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ

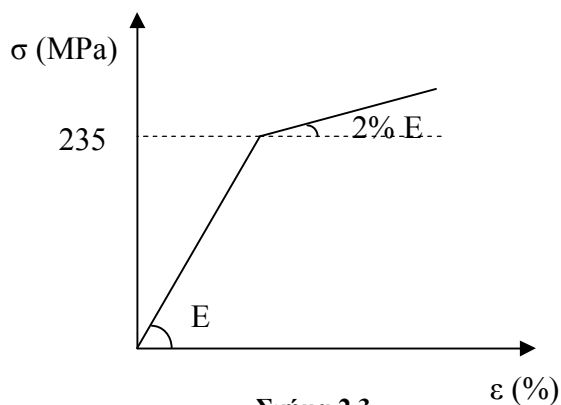
Το στάδιο προσδιορισμού συγκεκριμένων τιμών για τις ιδιότητες των υλικών περιελάμβανε τη συλλογή όλων των ιδιοτήτων των υλικών που απαρτίζουν την σύνδεση. Ως μέταλλο, επιλέχθηκε κοινός χάλυβας διότι είναι ο πλέον συνηθέστερος στην κατασκευή πλοίων και υπήρχε διαθέσιμος για τη διεξαγωγή των πειραματικών δοκιμών. Οι ιδιότητες του κολλητικού μέσου επιλέχθηκαν ίδιες με αυτές του Araldite 2015. Το Araldite 2015 είναι ένα κολλητικό μέσο δύο συστατικών που χρησιμοποιείται για την σύνδεση GRP αλλά και διαφορετικών μεταξύ τους υλικών. Ως σύνθετο υλικό επιλέχθηκε πολύστρωτο μονοαξονικού υαλοϋφάσματος γυαλιού τύπου E σε εποξική μήτρα. Οι ιδιότητες του πολύστρωτου μοντελοποιήθηκαν με

βάση τα αποτελέσματα των πειραμάτων που διεξήχθησαν κατά το ερευνητικό πρόγραμμα MARSTRUCT (δεδομένου ότι αυτό προηγήθηκε της μοντελοποίησης) σε συνδυασμό με τιμές από την βιβλιογραφία για τις ιδιότητες που δεν μπόρεσαν να μετρηθούν πειραματικά.

Ιδιότητες Χάλυβα:

- Μέτρο Ελαστικότητας: $E_{11} = E_{22} = E_{33} = 207 \text{ GPa}$
- Λόγος Poisson: $\nu_{12} = \nu_{13} = \nu_{23} = 0.3$
- Όριο Διαρροής: $\sigma_{\text{YIELD}} = 235 \text{ MPa}$

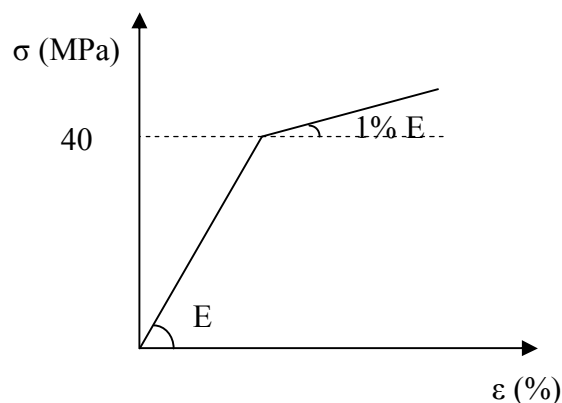
με μέτρο κράτυνσης $E_T = 2\% \cdot E$ δηλαδή $E_T = 4.14 \text{ GPa}$ όταν μοντελοποιείται ως ελαστοπλαστικό υλικό (Σχήμα 2.3). Αυτό γίνεται με σκοπό να προσεγγιστεί καλύτερα η πραγματική συμπεριφορά του υλικού και να υπερπηδηθούν τυχόν προβλήματα σύγκλισης.



Ιδιότητες Κολλητικού μέσου :

- Μέτρο Ελαστικότητας: $E = 1800 \text{ MPa}$
- Λόγος Poisson: $\nu = 0.25$
- Όριο Διαρροής: $\sigma_{\text{YIELD}} = 40 \text{ MPa}$

Με $E_T = 1\% \cdot E$ δηλαδή $E_T = 18 \text{ MPa}$ στα μοντέλα που μοντελοποιείται ως ελαστοπλαστικό υλικό (Σχήμα 2.4)



Σχήμα 2.4

Ιδιότητες σύνθετου :

- Μέτρα Ελαστικότητας : $E_{11} = 29658 \text{ MPa}$
 $E_{22} = E_{33} = 6563 \text{ MPa}$
- Λόγοι Poison: $\nu_{13} = \nu_{12} = 0.29$
 $\nu_{23} = 0.02$
- Μέτρο Διάτμησης: $G_{13} = G_{12} = 2034 \text{ MPa}$
 $G_{23} = 1350 \text{ MPa}$

Το σύνθετο μοντελοποιήθηκε ως ορθοτροπικό υλικό σε κάθε μοντέλο.

2.4 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η σύνδεση του Σχήματος 2.2 έχει μοντελοποιηθεί με χρήση του υπάρχοντος πλέγματος (Πετράκης 2007) που παρουσιάζεται στα Σχήματα 2.5 έως 2.7. Η ανάλυση που γίνεται είναι δύο διαστάσεων. Το πλέγμα έγινε με χρήση δισδιάστατων οκτάκομβων τετράπλευρων στερεών στοιχείων (Plane 82) με την παραδοχή της επίπεδης παραμόρφωσης (plane strain).

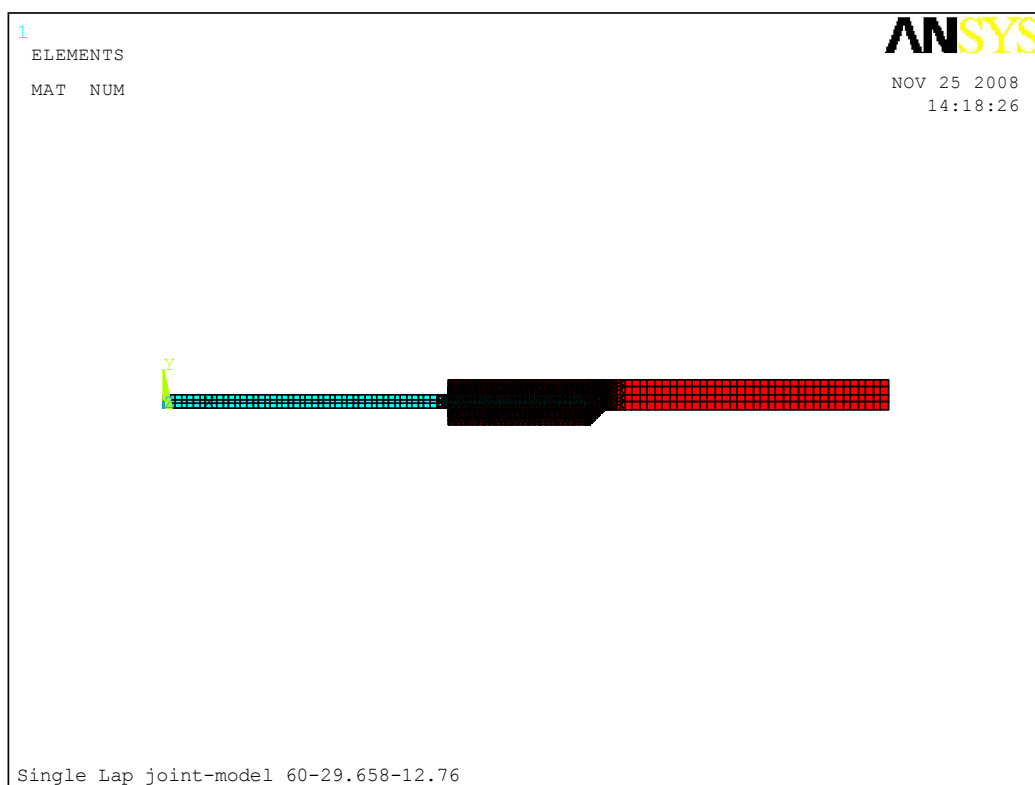
Έχουν χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη τέσσερα στοιχεία κατά την έννοια του πάχους του κολλητικού μέσου, τέσσερα κατά την έννοια του πάχους του μετάλλου και τέσσερα επίσης κατά την έννοια του πάχους του σύνθετου. Στα κρίσιμα σημεία (σημεία όπου έχουμε έντονη αλλαγή γεωμετρίας και επομένως υψηλές συγκεντρώσεις τάσεων), όπου αναμένεται η αστοχία, έχουν αναλυθεί επιπλέον τα στοιχεία. Σε αυτές τις θέσεις έχει γίνει υποδιαίρεση του κάθε στοιχείου σε τρία μικρότερα στοιχεία. Η έκταση της υποδιαίρεσεως επιβάλλεται να γίνεται σε τρία γειτονικά στοιχεία από αυτό που έχει επιλεγεί να αναλυθεί επιπλέον. Τέτοια σημεία επιπρόσθετης ανάλυσης είναι τα γωνιακά σημεία της σύνδεσης και όπου υπάρχει αλλαγή της γεωμετρίας.

Στην περίπτωση της ανάλυσης μιας μη συμμετρικής σύνδεσης όπως στην συγκεκριμένη περίπτωση, πρέπει να ληφθεί υπόψη η γεωμετρική μη γραμμικότητα που παρουσιάζεται (θεώρηση μεγάλων παραμορφώσεων) δεδομένου ότι λόγω της ασυμμετρίας της σύνδεσης δημιουργείται βέλος κάμψης κατά τη φόρτιση της. Για να

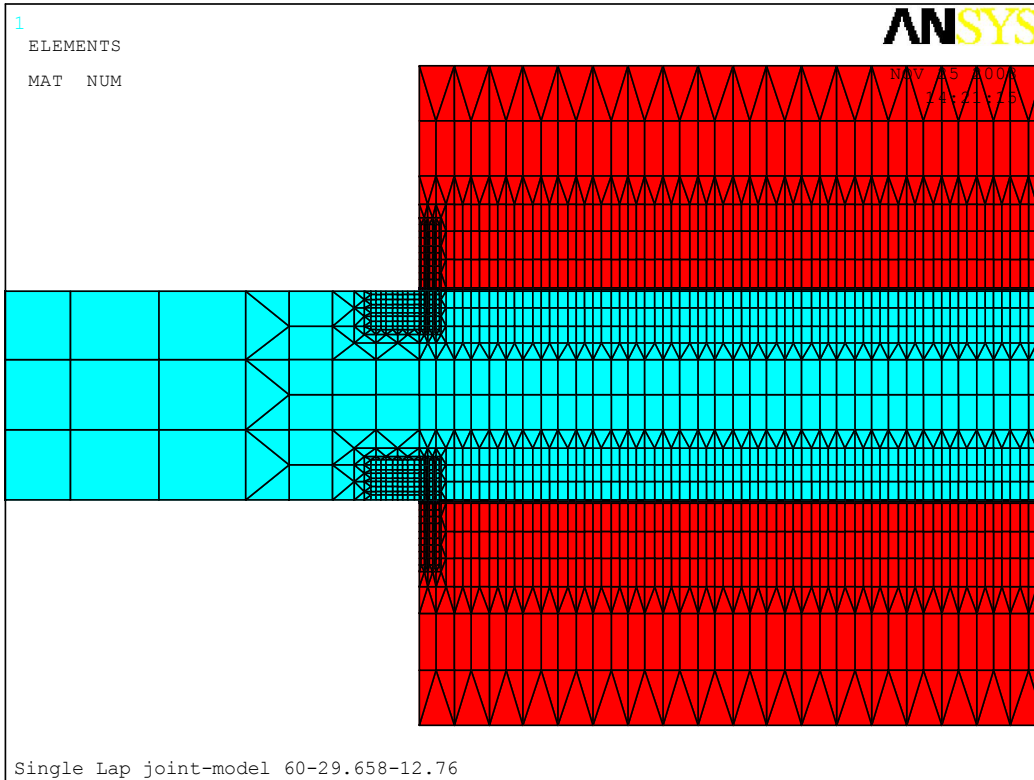
ληφθεί υπόψη η γεωμετρική μη γραμμικότητα εκτελούνται μη γραμμικοί υπολογισμοί που θα δώσουν σαφέστερα αποτελέσματα για το φαινόμενο.

Το φορτίο αστοχίας θεωρήθηκε ίσο με τα φορτία πρώτης εμφάνισης διαρροής. Η έναρξη της αστοχίας σημειώθηκε στο κολλητικό μέσο σε κάθε μοντέλο.

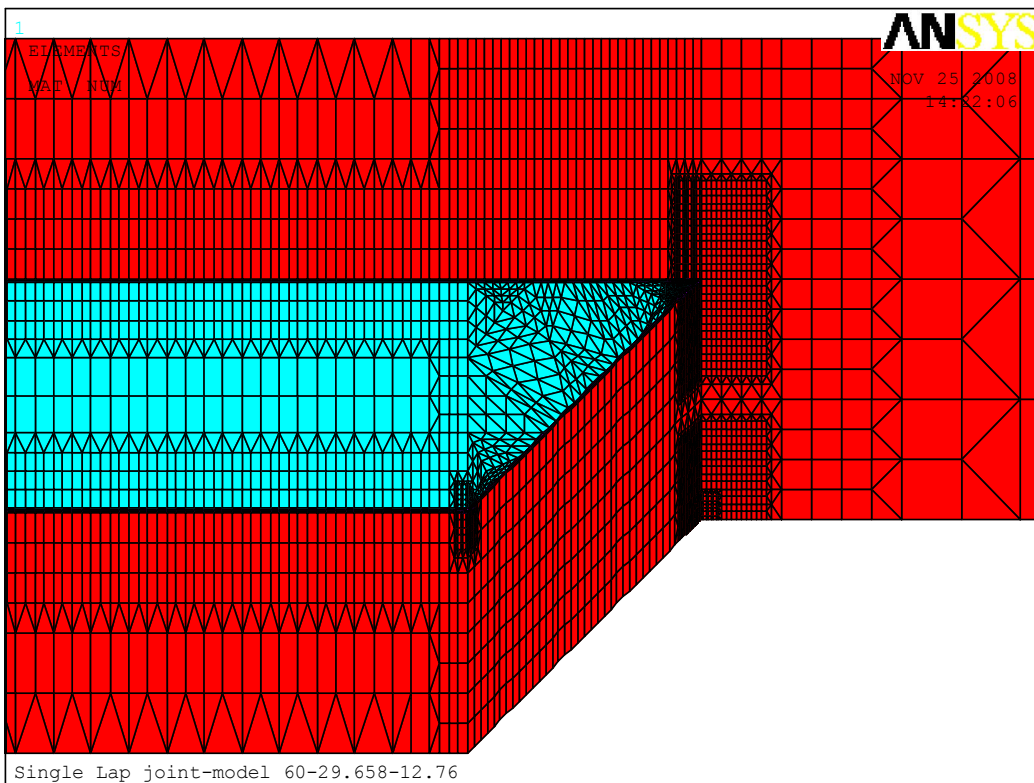
Οι ονομασίες που δόθηκαν στα μοντέλα έχουν ως πρώτο συνθετικό το μήκος επικάλυψης, ως δεύτερο το μέτρο ελαστικότητας του σύνθετου υλικού στην κύρια διεύθυνση και τελευταίο συνθετικό το πάχος του σύνθετου. Για παράδειγμα το μοντέλο με τίτλο 60-29.658-12.76 έχει μήκος αλληλοεπικάλυψης $l_{ov} = 60$ mm, μέτρο ελαστικότητας του σύνθετου ίσο με $E_1 = 29.658$ GPa και πάχος του σύνθετου ίσο με $t_c = 12.76$ mm (Σχήμα 2.2)



Σχήμα 2.5



Σχήμα 2.6

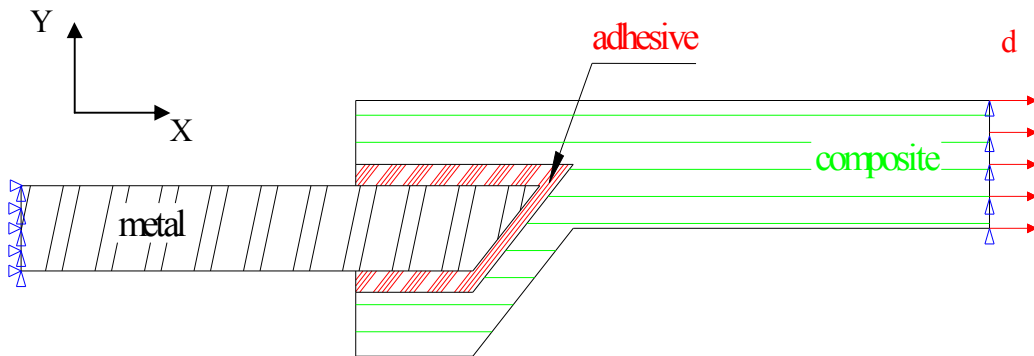


Σχήμα 2.7

2.5 ΕΠΙΛΟΓΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΚΑΙ ΟΡΙΑΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ

Στην περίπτωση της σύνδεσης του Σχήματος 2.2 έχει επιλεγεί να επιβληθεί ομοιόμορφη μετατόπιση 'd' στο δεξιό άκρο του συνθέτου. Η επιλογή εφαρμογής μετατόπισης στο δεξιό άκρο του συνθέτου έχει ως συνέπεια να μην είναι γνωστή η τιμή του φορτίου που επιβάλλεται κάθε φορά. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίστηκε διότι το ANSYS έχει τη δυνατότητα να υπολογίζει την αντίδραση που προκαλείται στο αριστερό άκρο εξαιτίας της επιβολής της μετατόπισης. Επομένως έμμεσα εξάγεται το φορτίο που έχει επιβληθεί.

Στην σύνδεση έχουν επιβληθεί οι παρακάτω οριακές συνθήκες. Στο αριστερό άκρο του μετάλλου επιβάλλαμε τον περιορισμό της κίνησης κατά τον άξονα X και Y (Σχήμα 2.2). Στο δεξιό άκρο του συνθέτου (εκεί που επιβάλλαμε την μετατόπιση) επιβάλλαμε τον περιορισμό της κίνησης κατά τον Y άξονα. Όλα τα παραπάνω φαίνονται στο Σχήμα 2.8.



Σχήμα 2.8: Φόρτιση και οριακές συνθήκες σύνδεσης

Η μετατόπιση 'd' κατά την προσομοίωση λάμβανε τιμές ίσες με 0.3 mm ή με 1 mm ανάλογα με την εφαρμογή. Η επιβολή της μετατόπισης έγινε με τη χρήση δύο διαφορετικών μεθόδων:

- Με τη μέθοδο σταθερού βήματος.

Όπως υπονοεί το όνομα της μεθόδου ο χρήστης ορίζει κατά την ανάπτυξη του κώδικα τον αριθμό των βημάτων επιβολής της μετατόπισης.

- Με την μέθοδο μεταβλητού βήματος

Στην μέθοδο μεταβλητού βήματος το μήκος βήματος και συνεπώς και το ασκούμενο φορτίο προσδιορίζονται αυτόματα συναρτήσει της συγκεκριμένης φάσης στην οποία βρίσκεται η ανάλυση υπό εξέλιξη. Με άλλα λόγια το μέγεθος του μήκους βήματος συνεχώς υπόκειται σε πιθανές τροποποιήσεις. Η μέθοδος χαρακτηρίζεται

από δύο βασικά χαρακτηριστικά. Το πρώτο σχετίζεται με την ικανότητα της μεθόδου να εκτιμά το μέγεθος του επόμενου μήκους βήματος συναρτήσει των προηγηθέντων συνθηκών ανάλυσης και να εκτιμά το φορτίο που θα εφαρμοστεί. Το δεύτερο χαρακτηριστικό της μεθόδου είναι ότι μπορεί και εκτιμά το αν πρέπει ή όχι να μειωθεί το επόμενο μήκος βήματος κατά την ανάλυση.

Πρέπει να τονιστεί στο σημείο αυτό ότι οι δύο προαναφερθείσες μέθοδοι δεν επιδρούν στα αποτελέσματα του προγράμματος αλλά μόνο στην ταχύτητα επίλυσης.

2.6 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ

Στο στάδιο της μοντελοποίησης με χρήση πεπερασμένων στοιχείων πραγματοποιήθηκε μία ανάλυση ευαισθησίας για να εξακριβωθεί η επίδραση των ιδιοτήτων του σύνθετου στη σύνδεση. Οι μεταβολές που διερευνήθηκαν ήταν οι ακόλουθες:

- Αύξηση του μέτρου ελαστικότητας κατά τον Y άξονα κατά 50%
- Αύξηση του μέτρου διάτμησης κατά το επίπεδο XY κατά 50%

Ο χάλυβας μοντελοποιήθηκε ως ελαστοπλαστικό υλικό με τις ιδιότητες που προαναφέρθηκαν ενώ το συνδετικό μέσο μοντελοποιήθηκε ως γραμμικά ελαστικό υλικό. Το πλέγμα ήταν το ίδιο για κάθε μοντέλο όπως και η ασκούμενη μετατόπιση που λήφθηκε ίση με $d=0.3$ mm. Οι υπολογισμοί έγιναν σε είκοσι στάδια επιβολής της μετατόπισης με χρήση της μεθόδου σταθερού βήματος.

Η γεωμετρία για κάθε μοντέλο ήταν η ακόλουθη:

- $t_m = 6$ mm πάχος του μεταλλικού τμήματος της σύνδεσης
- $t_c = 12.76$ mm συνολικό πάχος του πολύστρωτου
- $t_1 = t_c/2$ πάχος του πρώτου τμήματος από σύνθετο υλικό
- $t_2 = t_c/2$ πάχος του δεύτερου τμήματος του σύνθετου
- $t_g = 0.1$ mm πάχος του κολλητικού μέσου
- $l_m = 120$ mm ελεύθερο μήκος του μετάλλου
- $l_{ov} = 60$ mm μήκος αλληλοεπικάλυψης
- $l_w = 6$ mm μήκος μεταλλικής ακμής
- $l_c = 120$ mm ελεύθερο μήκος του σύνθετου υλικού
- $\alpha = 45^\circ$ Γωνία διαμόρφωσης

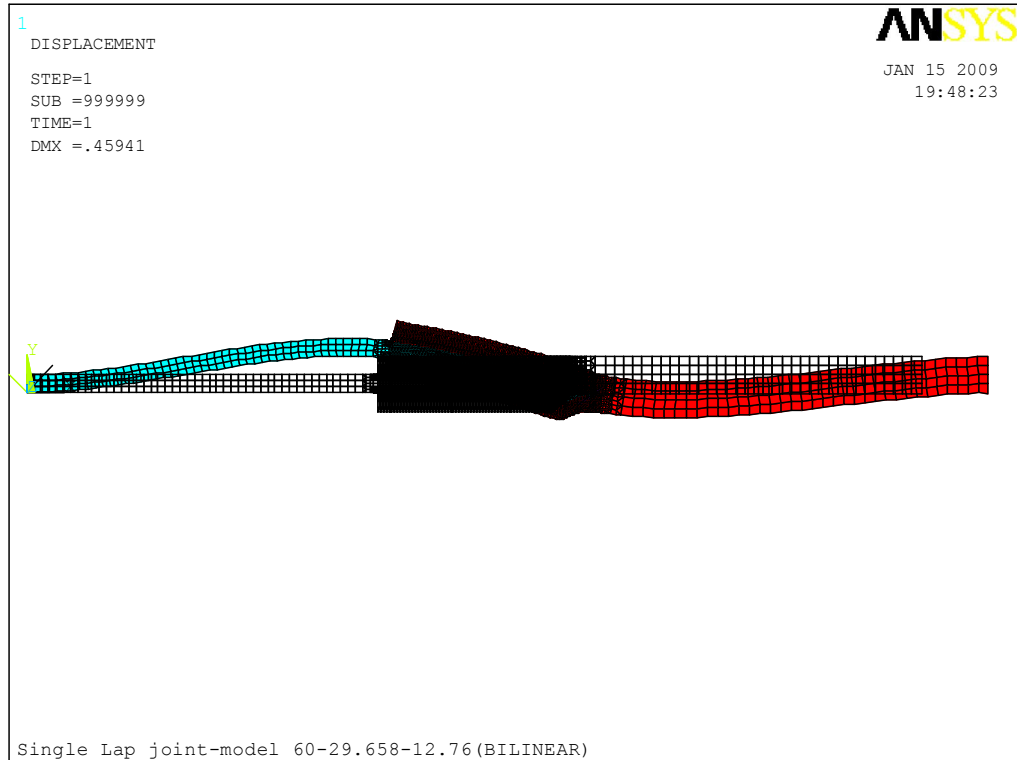
Υπάρχουν άπειροι συνδυασμοί παχών των δύο τμημάτων του συνθέτου $t_c = t_1 + t_2$ αλλά έχει επιλεγεί να ισχύει η σχέση :

$$t_1 = t_2 = \frac{t_c}{2} \quad (4.1)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις είναι προφανές ότι υπάρχει μεγάλο πεδίο διερεύνησης με παράμετρο το πάχος του συνθέτου. Το μήκος της μεταλλικής σφήνας επιλέχθηκε $l_w = 0.006 \text{ m} = 6 \text{ mm}$, ώστε να σχηματίζεται γωνία 45 μοιρών στο δεξιό άκρο του μετάλλου. Το πάχος του μετάλλου είναι ένα τυπικό πάχος χαλύβδινου ελάσματος. Επίσης, το πάχος του μετάλλου είναι σύμφωνο με τις δημοσιεύσεις στις οποίες βασιστήκαμε για τον προσδιορισμό των γεωμετρικών μεγεθών και των υλικών. Το πάχος του κολλητικού μέσου $t_g = 0.0001 \text{ m} = 0.1 \text{ mm}$ εκλέχθηκε με γνώμονα ότι στις δημοσιεύσεις αναφέρεται ότι το βέλτιστο πάχος της κόλλας είναι μεταξύ 0.10 – 0.25 mm (Osnes H. and Andersen A.(2003), Hildebrand M., Reis P. N. B. (1994) , Antunes F.J.V. , Ferreira J. A. M. (2004)). Το πάχος του πολύστρωτου επιλέχθηκε $t_c = 12.76 \text{ mm}$ έτσι ώστε να επιτευχθεί λόγος ακαμψίας (stiffness ratio) ίσος με 0.3

$$SR_T = \frac{E_c \cdot t_c}{E_m \cdot t_m} = 0.3$$

Για να διερευνηθεί η επίδραση των μεγεθών που εξετάζουμε, επιλέξαμε κόμβους σε συγκεκριμένες θέσεις για κάθε μοντέλο. Στους κόμβους αυτούς μετρήσαμε την τιμή της τάσης von Mises και την μετατόπιση κατά τον Y άξονα η οποία έχει τη μορφή που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.9 λόγω της γεωμετρικής ασυμμετρίας της σύνδεσης. Ως φορτίο αστοχίας κατά τη μοντελοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία ορίσαμε το φορτίο πρώτης έναρξης διαρροής.



Σχήμα 2.9

Για το μέταλλο επιλέχθηκαν οι κόμβοι:

- 1129, γιατί βρίσκεται στην περιοχή που εμφανίζεται το μέγιστο βέλος κάμψης του μετάλλου (Σχήμα 2.10)
- 8663, επειδή βρίσκεται κοντά στην περιοχή της αλληλοεπικάλυψης (Σχήμα 2.11)

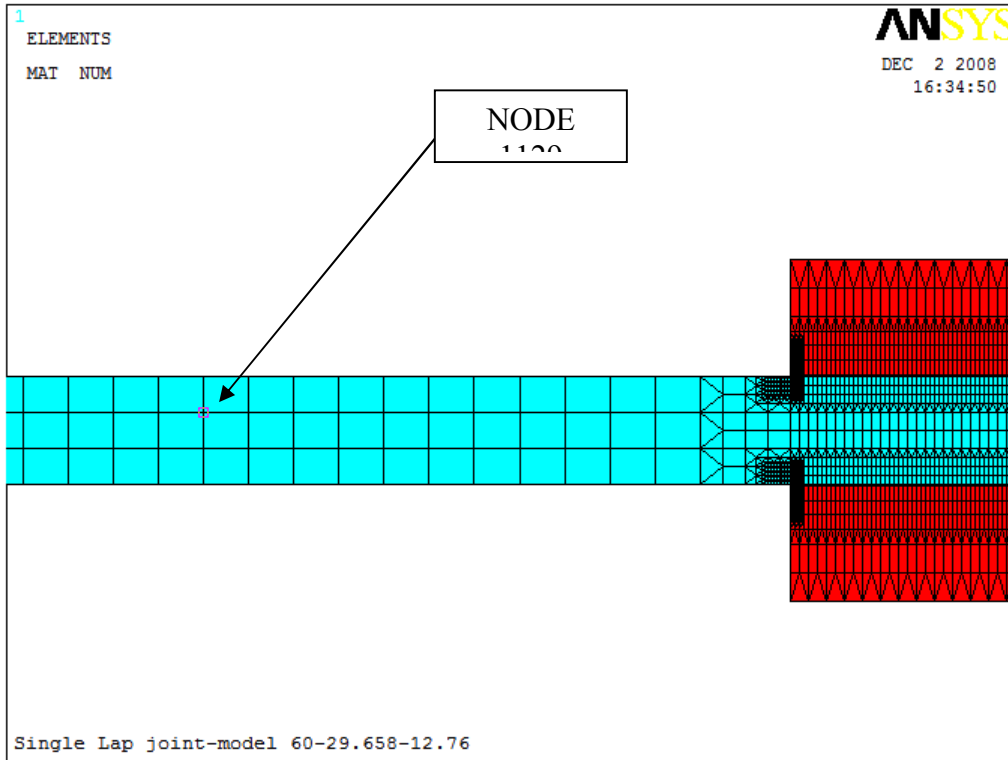
Για το σύνθετο οι κόμβοι:

- 2063, κοντά στην περιοχή της αλληλοεπικάλυψης (Σχήμα 2.12)
- 2095, στο μέσο του μήκους του σύνθετου (Σχήμα 2.13)

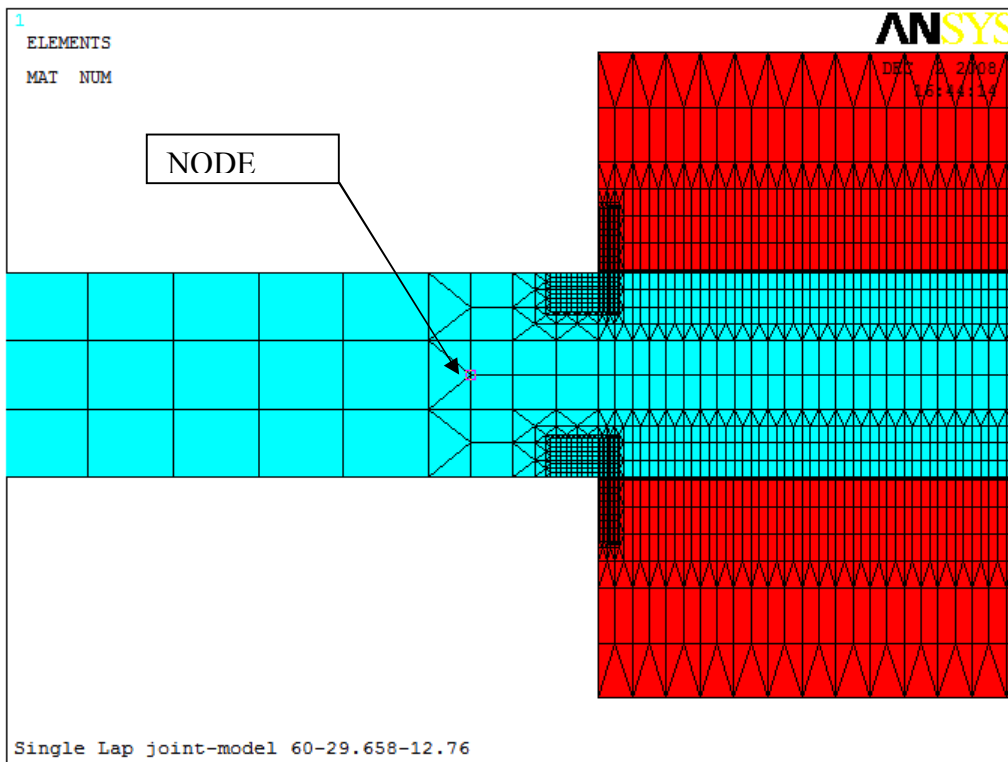
Για το συνδετικό μέσο οι κόμβοι:

- 1 (Σχήμα 2.14)
- 31771 (Σχήμα 2.15)
- 304 (Σχήμα 2.16)
- 318 (Σχήμα 2.17)
- 24648 (Σχήμα 2.18)
- 5934 που βρίσκεται στο μέσο της αλληλοεπικάλυψης (Σχήμα 2.19)
- 7699 που βρίσκεται στο μέσο της αλληλοεπικάλυψης (Σχήμα 2.20)

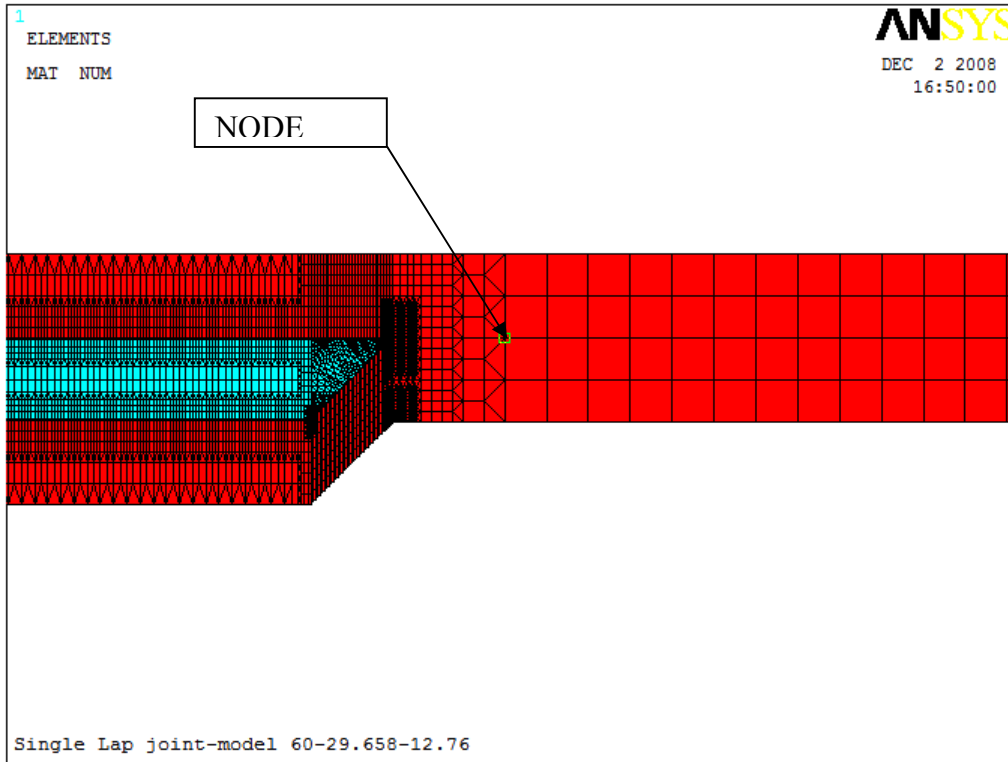
Οι κόμβοι βρίσκονται σε διαφορετικά σημεία του μήκους της αλληλοεπικάλυψης τόσο στο μέσο του πάχους του συνδετικού μέσου αλλά και στη διεπιφάνεια αυτού με τα υπόλοιπα υλικά. Αναλυτικά η θέση των κόμβων παρουσιάζεται στα σχήματα που ακολουθούν.



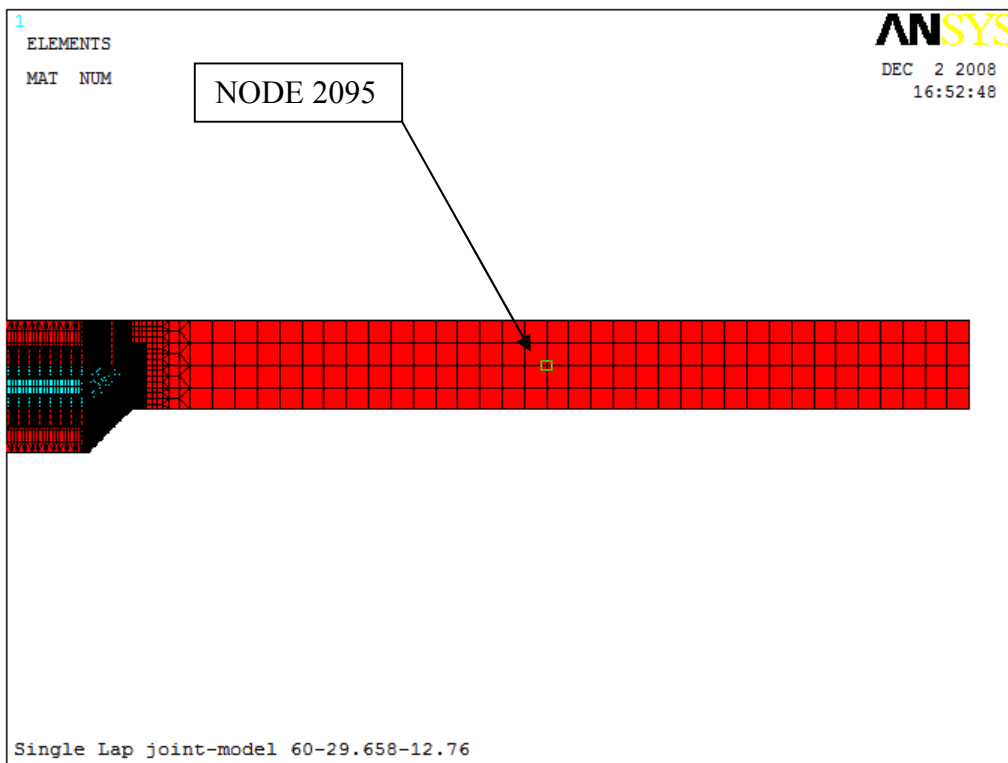
Σχήμα 2.10



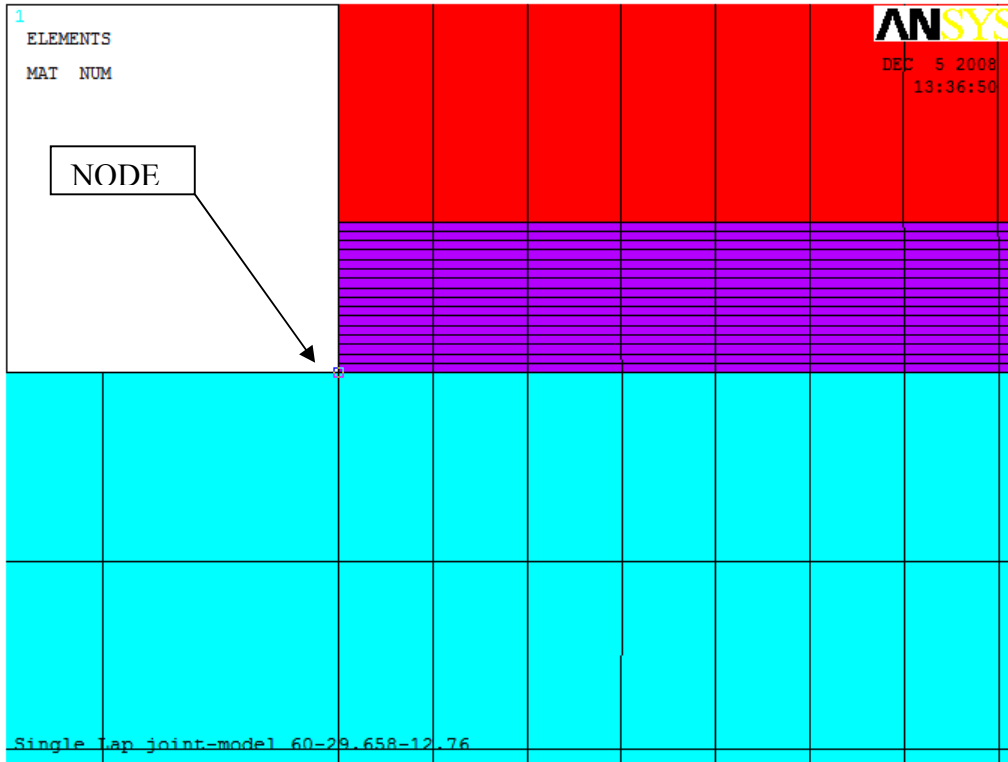
Σχήμα 2.11



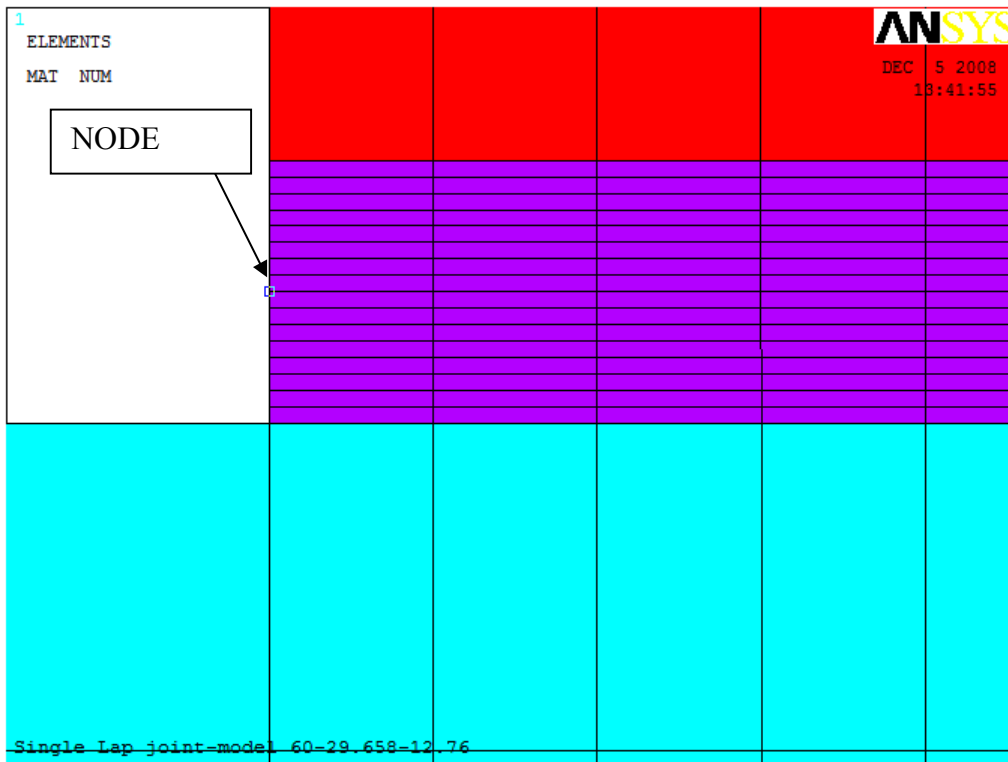
Σχήμα 2.12



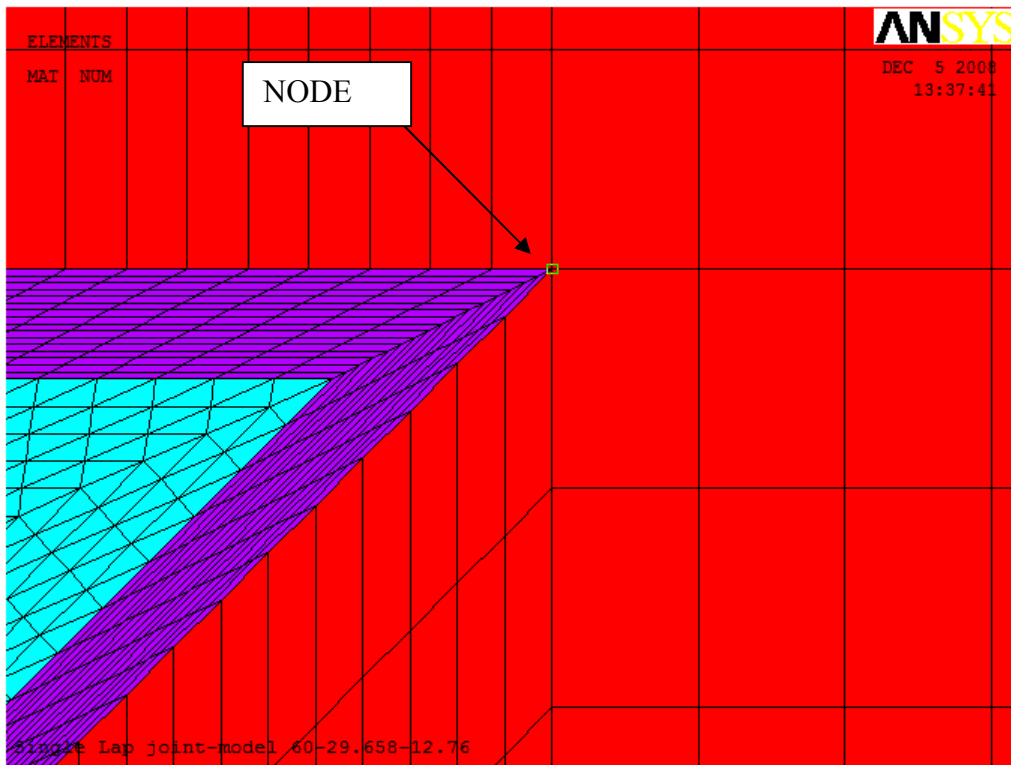
Σχήμα 2.13



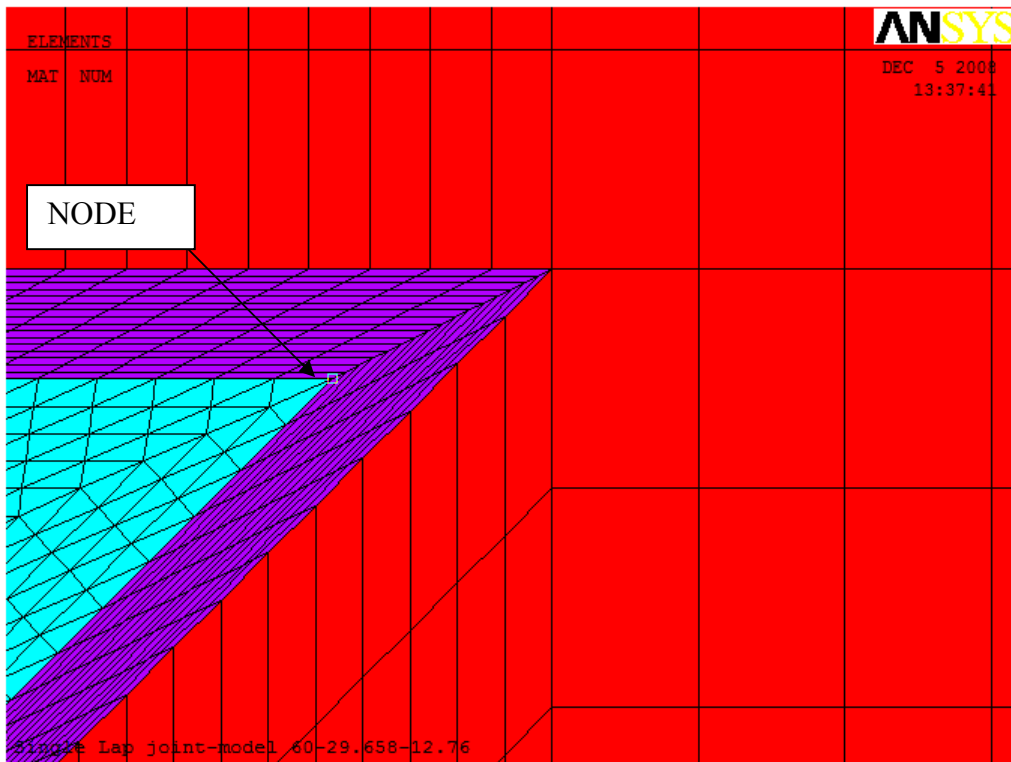
Σχήμα 2.14



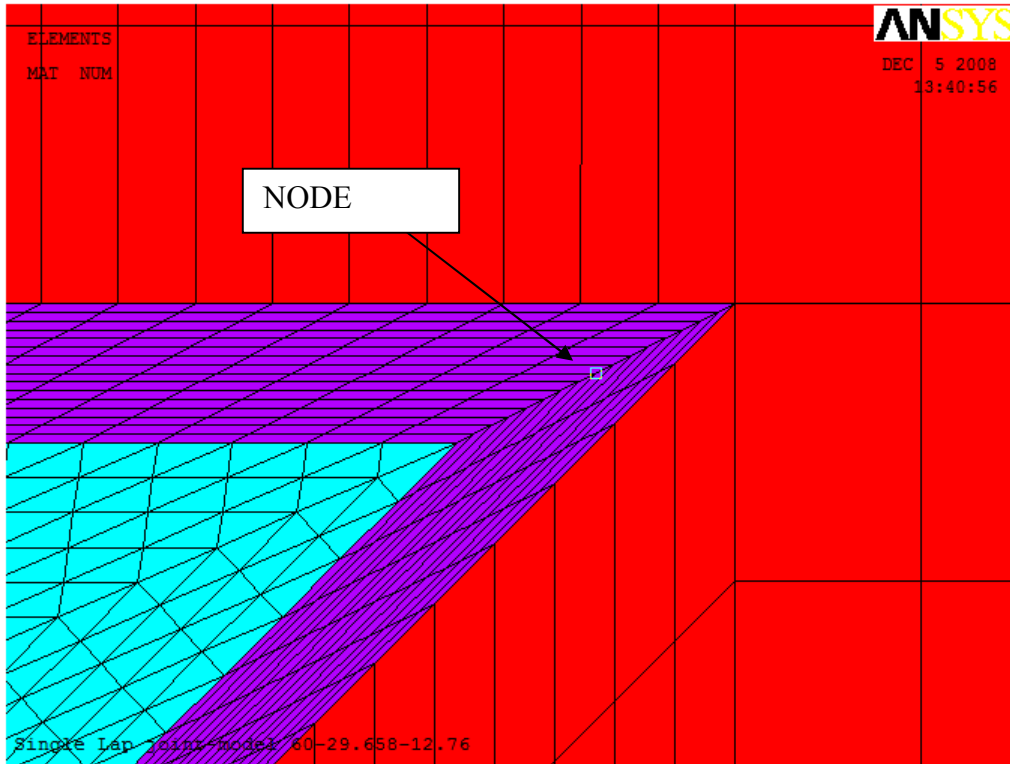
Σχήμα 2.15



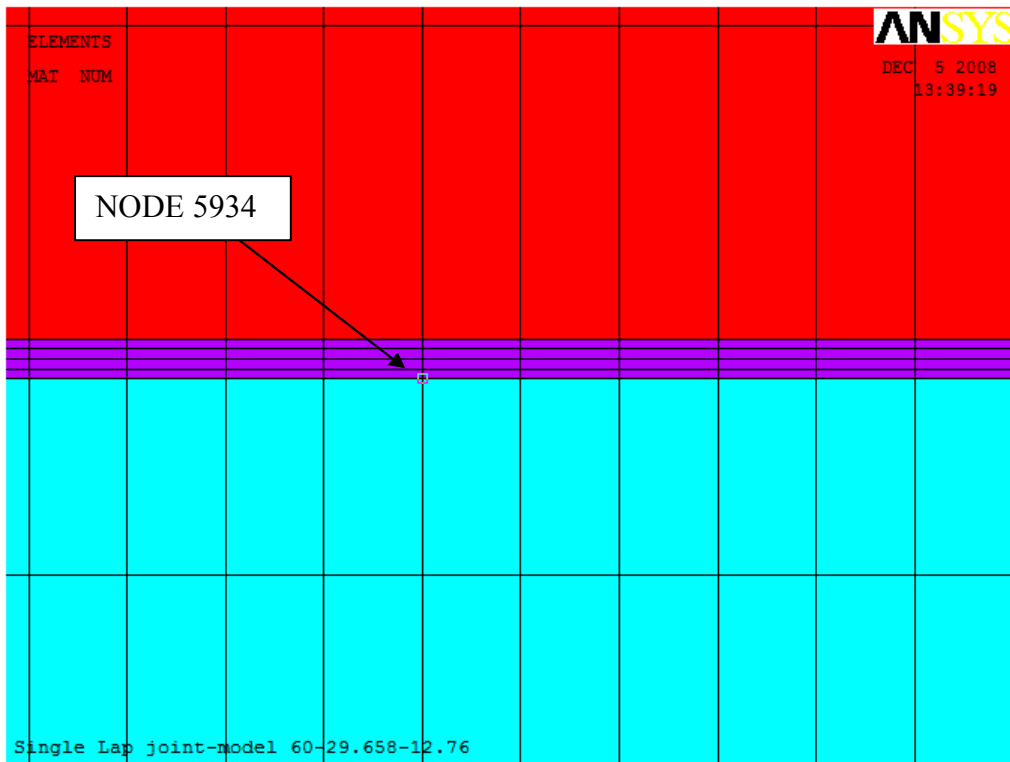
Σχήμα 2.16



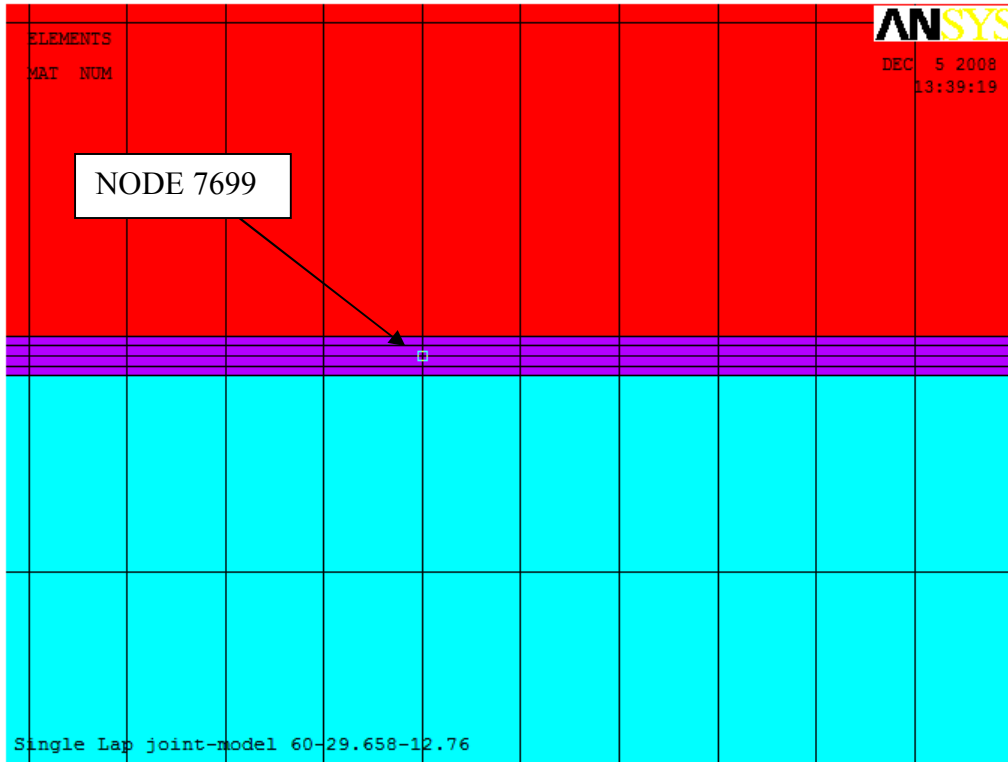
Σχήμα 2.17



Σχήμα 2.18



Σχήμα 2.19



Σχήμα 2.20

Στους Πίνακες 2.1 έως 2.11 συγκεντρώνονται οι τιμές των τάσεων von Mises που προέκυψαν από την ανάλυση ευαισθησίας σε κάθε κόμβο καθώς και η επί τοις εκατό διαφορά τους για κάθε σενάριο με το αρχικό μοντέλο. Αντίστοιχα στους πίνακες 2.12 έως 2.22 παρουσιάζονται οι τιμές του βέλους κάμψης κατά την διεύθυνση Y και η επί τοις εκατό διαφορά τους για κάθε σενάριο με το αρχικό μοντέλο. Οι τιμές των τάσεων και του βέλους κάμψης μετρήθηκαν σε κάθε βήμα επιβολής της φόρτισης. Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι η παραμετρική μελέτη και η ανάλυση ευαισθησίας πραγματοποιήθηκαν για να μας βοηθήσουν στο σχεδιασμό των πειραματικών δοκιμών.

Πίνακας 2.1: Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας τάσεων για τον κόμβο 1129

1129 Node					
Substep	σ_{vm} (MPa)	σ_{vm} (+50% E_y) (MPa)	σ_{vm} (+50% G_{xy}) (MPa)	Διαφορά σ_{vm} (%) (+50% E_y)	Διαφορά σ_{vm} (%) (+50% G_{xy})
1	5,447	5,448	5,464	0,030	0,323
2	10,880	10,883	10,915	0,030	0,323
3	16,299	16,304	16,351	0,030	0,321
4	21,705	21,712	21,775	0,030	0,321
5	27,098	27,107	27,185	0,030	0,320
6	32,479	32,489	32,583	0,030	0,319
7	37,848	37,859	37,968	0,030	0,318
8	43,205	43,217	43,342	0,030	0,318
9	48,550	48,564	48,703	0,030	0,317
10	53,883	53,899	54,054	0,030	0,316
11	59,206	59,224	59,393	0,030	0,316
12	64,518	64,537	64,721	0,030	0,315
13	69,819	69,840	70,039	0,030	0,314
14	75,110	75,132	75,346	0,029	0,313
15	80,391	80,415	80,643	0,029	0,313
16	85,662	85,688	85,930	0,029	0,312
17	90,924	90,951	91,207	0,029	0,312
18	96,176	96,204	96,476	0,029	0,311
19	101,419	101,449	101,734	0,030	0,311
20	106,653	106,685	106,984	0,030	0,310

Πίνακας 2.2: Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας τάσεων για τον κόμβο 8663

8663 Node					
Substep	σ_{vm} (MPa)	σ_{vm} (+50%Ey) (MPa)	σ_{vm} (+50%Gxy) (MPa)	Διαφορά σ_{vm} (%) (+50%Ey)	Διαφορά σ_{vm} (%) (+50%Gxy)
1	4,710	4,712	4,724	0,026	0,292
2	9,425	9,427	9,452	0,026	0,292
3	14,143	14,147	14,185	0,026	0,291
4	18,865	18,870	18,920	0,026	0,291
5	23,591	23,597	23,660	0,025	0,290
6	28,320	28,328	28,402	0,025	0,290
7	33,053	33,061	33,149	0,025	0,289
8	37,789	37,798	37,898	0,025	0,289
9	42,528	42,539	42,650	0,025	0,288
10	47,270	47,282	47,406	0,025	0,288
11	52,015	52,028	52,164	0,025	0,287
12	56,762	56,777	56,925	0,025	0,287
13	61,513	61,528	61,689	0,025	0,286
14	66,266	66,282	66,455	0,025	0,286
15	71,021	71,039	71,224	0,025	0,286
16	75,779	75,798	75,996	0,025	0,286
17	80,539	80,559	80,769	0,025	0,285
18	85,302	85,323	85,545	0,025	0,285
19	90,067	90,089	90,323	0,025	0,285
20	94,834	94,857	95,103	0,025	0,284

Πίνακας 2.3: Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας τάσεων για τον κόμβο 2063

2063 Node					
Substep	σ_{vm} (MPa)	σ_{vm} (+50% E_y) (MPa)	σ_{vm} (+50% G_{xy}) (MPa)	Διαφορά σ_{vm} (%) (+50% E_y)	Διαφορά σ_{vm} (%) (+50% G_{xy})
1	2,563	2,563	2,536	0,018	-1,057
2	5,129	5,130	5,074	0,018	-1,062
3	7,697	7,698	7,615	0,018	-1,066
4	10,268	10,270	10,158	0,018	-1,070
5	12,842	12,844	12,704	0,018	-1,075
6	15,418	15,421	15,252	0,018	-1,079
7	17,997	18,000	17,802	0,017	-1,083
8	20,577	20,581	20,354	0,017	-1,087
9	23,161	23,165	22,908	0,017	-1,092
10	25,746	25,750	25,464	0,017	-1,095
11	28,334	28,338	28,022	0,017	-1,099
12	30,923	30,928	30,582	0,017	-1,103
13	33,515	33,521	33,144	0,017	-1,107
14	36,109	36,115	35,708	0,017	-1,111
15	38,704	38,711	38,273	0,017	-1,114
16	41,302	41,308	40,840	0,016	-1,118
17	43,901	43,908	43,409	0,016	-1,122
18	46,502	46,510	45,979	0,016	-1,125
19	49,105	49,113	48,550	0,016	-1,129
20	51,709	51,717	51,123	0,016	-1,132

Πίνακας 2.4: Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας τάσεων για τον κόμβο 2095

2095 Node					
Substep	σ_{vm} (MPa)	σ_{vm} (+50%Ey) (MPa)	σ_{vm} (+50%Gxy) (MPa)	Διαφορά σ_{vm} (%) (+50%Ey)	Διαφορά σ_{vm} (%) (+50%Gxy)
1	2,416	2,416	2,423	0,019	0,284
2	4,833	4,834	4,847	0,019	0,283
3	7,253	7,254	7,274	0,019	0,283
4	9,675	9,676	9,702	0,019	0,282
5	12,098	12,100	12,132	0,018	0,282
6	14,523	14,526	14,564	0,018	0,281
7	16,950	16,953	16,998	0,018	0,281
8	19,379	19,382	19,433	0,018	0,280
9	21,809	21,813	21,870	0,018	0,280
10	24,240	24,245	24,308	0,018	0,280
11	26,673	26,678	26,748	0,018	0,280
12	29,108	29,113	29,189	0,018	0,279
13	31,544	31,549	31,632	0,018	0,279
14	33,981	33,987	34,076	0,018	0,279
15	36,419	36,426	36,521	0,018	0,278
16	38,859	38,866	38,967	0,017	0,278
17	41,300	41,307	41,415	0,017	0,278
18	43,742	43,750	43,864	0,017	0,278
19	46,186	46,194	46,314	0,017	0,278
20	48,630	48,638	48,765	0,017	0,277

Πίνακας 2.5: Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας τάσεων για τον κόμβο 1

1 Node					
Substep	σ_{vm} (MPa)	σ_{vm} (+50%Ey) (MPa)	σ_{vm} (+50%Gxy) (MPa)	Διαφορά σ_{vm} (%) (+50%Ey)	Διαφορά σ_{vm} (%) (+50%Gxy)
1	6,740	6,773	6,837	0,480	1,432
2	13,434	13,499	13,627	0,481	1,431
3	20,083	20,180	20,370	0,482	1,431
4	26,688	26,817	27,069	0,484	1,431
5	33,249	33,411	33,725	0,486	1,430
6	39,769	39,963	40,337	0,487	1,430
7	46,247	46,473	46,908	0,489	1,429
8	52,686	52,944	53,439	0,490	1,429
9	59,086	59,376	59,930	0,492	1,429
10	65,447	65,770	66,382	0,493	1,428
11	71,771	72,126	72,796	0,495	1,428
12	78,059	78,446	79,173	0,496	1,427
13	84,311	84,730	85,514	0,497	1,427
14	90,528	90,980	91,819	0,499	1,426
15	96,712	97,195	98,090	0,500	1,425
16	102,862	103,377	104,327	0,501	1,424
17	108,979	109,527	110,532	0,503	1,425
18	115,065	115,644	116,703	0,503	1,424
19	121,119	121,731	122,843	0,505	1,423
20	127,143	127,786	128,952	0,506	1,423

Πίνακας 2.6: Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας τάσεων για τον κόμβο 304

304 node					
Substep	σ_{vm} (MPa)	σ_{vm} (+50% Ey) (MPa)	σ_{vm} (+50% Gxy) (MPa)	Διάφορα σ_{vm} (+50% Ey) (MPa)	Διάφορα σ_{vm} (+50% Gxy) (MPa)
1	2.438	2.496	2.289	2.379	-6.087
2	4.881	4.997	4.582	2.377	-6.110
3	7.328	7.502	6.879	2.374	-6.133
4	9.781	10.013	9.179	2.371	-6.155
5	12.239	12.528	11.483	2.369	-6.177
6	14.701	15.049	13.789	2.367	-6.200
7	17.167	17.573	16.099	2.364	-6.221
8	19.639	20.102	18.413	2.362	-6.243
9	22.114	22.636	20.729	2.359	-6.264
10	24.595	25.174	23.049	2.357	-6.286
11	27.079	27.717	25.371	2.354	-6.307
12	29.568	30.263	27.697	2.352	-6.327
13	32.061	32.814	30.026	2.349	-6.348
14	34.558	35.369	32.357	2.346	-6.369
15	37.059	37.928	34.691	2.344	-6.389
16	39.565	40.491	37.029	2.341	-6.410
17	42.072	43.057	39.368	2.339	-6.429
18	44.583	45.625	41.708	2.337	-6.449
19	47.083	48.182	44.036	2.336	-6.471
20	49.580	50.738	46.361	2.336	-6.492

Πίνακας 2.7: Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας τάσεων για τον κόμβο 318

318 Node					
Substep	σ_{vm} (MPa)	σ_{vm} (+50% E_y) (MPa)	σ_{vm} (+50% G_{xy}) (MPa)	Διαφορά σ_{vm} (%) (+50% E_y)	Διαφορά σ_{vm} (%) (+50% G_{xy})
1	10,307	10,296	10,305	-0,103	-0,015
2	20,625	20,604	20,619	-0,102	-0,032
3	30,955	30,924	30,940	-0,101	-0,048
4	41,296	41,254	41,269	-0,101	-0,065
5	51,646	51,595	51,604	-0,100	-0,081
6	62,006	61,945	61,946	-0,099	-0,097
7	72,375	72,304	72,293	-0,098	-0,113
8	82,752	82,672	82,646	-0,097	-0,128
9	93,138	93,048	93,004	-0,097	-0,144
10	103,530	103,431	103,365	-0,096	-0,159
11	113,929	113,821	113,731	-0,095	-0,174
12	124,335	124,217	124,100	-0,095	-0,189
13	134,746	134,620	134,472	-0,094	-0,203
14	145,163	145,028	144,846	-0,093	-0,218
15	155,584	155,441	155,222	-0,092	-0,233
16	166,010	165,858	165,601	-0,092	-0,246
17	165,659	165,271	164,832	-0,234	-0,499
18	176,403	175,986	175,500	-0,236	-0,512
19	159,924	159,876	159,811	-0,030	-0,071
20	163,536	163,413	163,288	-0,075	-0,152

Πίνακας 2.8: Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας τάσεων για τον κόμβο 5934

5934 Node					
Substep	σ_{vm} (MPa)	σ_{vm} (+50% E_y) (MPa)	σ_{vm} (+50% G_{xy}) (MPa)	Διαφορά σ_{vm} (%) (+50% E_y)	Διαφορά σ_{vm} (%) (+50% G_{xy})
1	2,576	2,575	2,574	-0,003	-0,053
2	5,149	5,149	5,147	-0,003	-0,050
3	7,721	7,721	7,717	-0,003	-0,046
4	10,291	10,291	10,287	-0,003	-0,043
5	12,859	12,859	12,854	-0,003	-0,040
6	15,425	15,425	15,420	-0,003	-0,036
7	17,990	17,989	17,984	-0,003	-0,033
8	20,553	20,552	20,546	-0,003	-0,030
9	23,114	23,113	23,107	-0,003	-0,026
10	25,673	25,672	25,667	-0,003	-0,023
11	28,230	28,229	28,225	-0,004	-0,020
12	30,786	30,785	30,781	-0,004	-0,017
13	33,340	33,339	33,336	-0,003	-0,013
14	35,893	35,891	35,889	-0,004	-0,010
15	38,443	38,442	38,441	-0,003	-0,007
16	40,993	40,991	40,991	-0,004	-0,003
17	43,540	43,539	43,540	-0,004	0,000
18	46,086	46,084	46,087	-0,004	0,003
19	48,630	48,628	48,633	-0,004	0,006
20	51,173	51,171	51,178	-0,004	0,010

Πίνακας 2.9: Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας τάσεων για τον κόμβο 7699

7699 Node					
Substep	σ_{vm} (MPa)	σ_{vm} (+50% E_y) (MPa)	σ_{vm} (+50% G_{xy}) (MPa)	Διαφορά σ_{vm} (%) (+50% E_y)	Διαφορά σ_{vm} (%) (+50% G_{xy})
1	0,130	0,130	0,121	-0,164	-6,587
2	0,261	0,260	0,244	-0,164	-6,587
3	0,393	0,392	0,367	-0,164	-6,587
4	0,525	0,524	0,491	-0,165	-6,587
5	0,659	0,658	0,615	-0,165	-6,587
6	0,793	0,792	0,741	-0,165	-6,587
7	0,928	0,927	0,867	-0,165	-6,587
8	1,064	1,063	0,994	-0,165	-6,587
9	1,201	1,199	1,122	-0,166	-6,587
10	1,339	1,337	1,251	-0,166	-6,587
11	1,477	1,475	1,380	-0,166	-6,586
12	1,616	1,614	1,510	-0,166	-6,586
13	1,756	1,753	1,641	-0,167	-6,586
14	1,897	1,894	1,772	-0,167	-6,586
15	2,038	2,035	1,904	-0,167	-6,585
16	2,180	2,177	2,037	-0,167	-6,585
17	2,323	2,319	2,170	-0,167	-6,585
18	2,467	2,462	2,304	-0,168	-6,585
19	2,611	2,606	2,439	-0,168	-6,584
20	2,756	2,751	2,574	-0,168	-6,584

Πίνακας 2.10: Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας τάσεων για τον κόμβο 24648

24648 Node					
Substep	σ_{vm} (MPa)	σ_{vm} (+50%Ey) (MPa)	σ_{vm} (+50%Gxy) (MPa)	Διαφορά σ_{vm} (%) (+50%Ey)	Διαφορά σ_{vm} (%) (+50%Gxy)
1	1,981	1,959	1,962	-1,135	-0,981
2	3,966	3,921	3,926	-1,135	-1,001
3	5,953	5,885	5,892	-1,135	-1,021
4	7,943	7,853	7,861	-1,135	-1,040
5	9,936	9,823	9,831	-1,135	-1,060
6	11,931	11,796	11,803	-1,136	-1,080
7	13,929	13,771	13,776	-1,135	-1,098
8	15,929	15,749	15,752	-1,136	-1,117
9	17,932	17,728	17,728	-1,135	-1,135
10	19,937	19,710	19,707	-1,135	-1,154
11	21,944	21,695	21,687	-1,135	-1,172
12	23,953	23,681	23,668	-1,135	-1,190
13	25,964	25,669	25,650	-1,135	-1,207
14	27,976	27,659	27,634	-1,135	-1,225
15	29,991	29,651	29,618	-1,135	-1,242
16	32,007	31,644	31,604	-1,135	-1,260
17	34,023	33,637	33,589	-1,133	-1,274
18	36,037	35,629	35,571	-1,132	-1,291
19	38,022	37,593	37,524	-1,128	-1,308
20	39,995	39,547	39,467	-1,120	-1,321

Πίνακας 2.11: Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας τάσεων για τον κόμβο 31771

31771 Node					
Substep	σ_{vm} (MPa)	σ_{vm} (+50%Ey) (MPa)	σ_{vm} (+50%Gxy) (MPa)	Διαφορά σ_{vm} (%) (+50%Ey)	Διαφορά σ_{vm} (%) (+50%Gxy)
1	1,967	2,070	1,929	5,231	-1,967
2	3,923	4,128	3,846	5,233	-1,964
3	5,866	6,173	5,751	5,235	-1,962
4	7,798	8,206	7,645	5,236	-1,960
5	9,719	10,228	9,528	5,238	-1,957
6	11,628	12,238	11,401	5,240	-1,955
7	13,527	14,236	13,263	5,241	-1,952
8	15,416	16,224	15,115	5,243	-1,950
9	17,294	18,201	16,957	5,245	-1,948
10	19,162	20,167	18,789	5,246	-1,946
11	21,020	22,123	20,612	5,248	-1,943
12	22,869	24,070	22,425	5,249	-1,941
13	24,709	26,006	24,230	5,251	-1,939
14	26,539	27,933	26,025	5,252	-1,936
15	28,360	29,850	27,812	5,253	-1,934
16	30,173	31,759	29,590	5,255	-1,932
17	31,977	33,658	31,360	5,257	-1,930
18	33,773	35,549	33,122	5,258	-1,927
19	35,560	37,430	34,876	5,259	-1,925
20	37,340	39,304	36,622	5,261	-1,923

Πίνακας 2.12: Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας βέλους κάμψης για τον κόμβο 1129

1129 Node					
Substep	u _y (mm)	u _y (mm) (+50%Ey)	u _y (mm) (+50%Gxy)	Διαφορά u _y (%) (+50%Ey)	Διαφορά u _y (%) (+50%Gxy)
1	0,010739	0,010728	0,010800	-0,102	0,570
2	0,021247	0,021226	0,021400	-0,102	0,720
3	0,031532	0,031500	0,031800	-0,101	0,851
4	0,041600	0,041558	0,042000	-0,100	0,962
5	0,051457	0,051407	0,051900	-0,099	0,860
6	0,061111	0,061051	0,061600	-0,098	0,800
7	0,070567	0,070498	0,071200	-0,097	0,898
8	0,079830	0,079753	0,080500	-0,096	0,840
9	0,088906	0,088822	0,089700	-0,095	0,893
10	0,097801	0,097709	0,098600	-0,094	0,817
11	0,106520	0,106421	0,107444	-0,093	0,867
12	0,115067	0,114961	0,116066	-0,092	0,868
13	0,123448	0,123335	0,124521	-0,092	0,869
14	0,131666	0,131548	0,132812	-0,090	0,870
15	0,139728	0,139603	0,140945	-0,089	0,871
16	0,147635	0,147505	0,148923	-0,088	0,872
17	0,155394	0,155258	0,156750	-0,088	0,873
18	0,163007	0,162866	0,164431	-0,086	0,874
19	0,170479	0,170333	0,171970	-0,086	0,875
20	0,177814	0,177662	0,179369	-0,085	0,875

Πίνακας 2.13: Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας βέλους κάμψης για τον κόμβο 8663

8663 Node					
Substep	u _y (mm)	u _y (mm) (+50%Ey)	u _y (mm) (+50%Gxy)	Διαφορά u _y (%) (+50%Ey)	Διαφορά u _y (%) (+50%Gxy)
1	0,011800	0,011778	0,011900	-0,185	0,847
2	0,023300	0,023309	0,023600	0,039	1,288
3	0,034700	0,034601	0,035000	-0,286	0,865
4	0,045700	0,045660	0,046200	-0,087	1,094
5	0,056600	0,056495	0,057100	-0,185	0,883
6	0,067200	0,067112	0,067900	-0,131	1,042
7	0,077600	0,077518	0,078400	-0,106	1,031
8	0,087900	0,087719	0,088700	-0,206	0,910
9	0,097900	0,097721	0,098800	-0,183	0,919
10	0,107705	0,107529	0,108747	-0,163	0,967
11	0,117341	0,117151	0,118478	-0,162	0,969
12	0,126794	0,126590	0,128024	-0,161	0,970
13	0,136071	0,135853	0,137391	-0,160	0,970
14	0,145175	0,144944	0,146585	-0,159	0,971
15	0,154111	0,153868	0,155609	-0,158	0,972
16	0,162885	0,162629	0,164470	-0,157	0,973
17	0,171501	0,171233	0,173170	-0,156	0,973
18	0,179962	0,179683	0,181716	-0,155	0,975
19	0,188274	0,187983	0,190110	-0,155	0,975
20	0,196440	0,196138	0,198357	-0,154	0,976

Πίνακας 2.14: Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας βέλους κάμψης για τον κόμβο 2063

2063 Node					
Substep	u_y (mm)	u_y (mm) (+50% E_y)	u_y (mm) (+50% G_{xy})	Διαφορά u_y (%) (+50% E_y)	Διαφορά u_y (%) (+50% G_{xy})
1	-0,001990	-0,001992	-0,001660	0,101	-16,583
2	-0,004020	-0,004027	-0,003370	0,162	-16,169
3	-0,006080	-0,006100	-0,005130	0,332	-15,625
4	-0,008190	-0,008210	-0,006930	0,243	-15,385
5	-0,010300	-0,010353	-0,008770	0,513	-14,854
6	-0,012500	-0,012526	-0,010700	0,207	-14,400
7	-0,014700	-0,014727	-0,012600	0,182	-14,286
8	-0,016900	-0,016953	-0,014500	0,314	-14,201
9	-0,019200	-0,019202	-0,016500	0,011	-14,063
10	-0,021400	-0,021472	-0,018500	0,338	-13,551
11	-0,023700	-0,023761	-0,020500	0,258	-13,502
12	-0,026000	-0,026067	-0,022600	0,258	-13,077
13	-0,028300	-0,028388	-0,024700	0,311	-12,721
14	-0,030700	-0,030723	-0,026800	0,074	-12,704
15	-0,033000	-0,033069	-0,028900	0,209	-12,424
16	-0,035400	-0,035426	-0,031000	0,073	-12,429
17	-0,037700	-0,037792	-0,033200	0,243	-11,936
18	-0,040100	-0,040165	-0,035400	0,163	-11,721
19	-0,042500	-0,042545	-0,037500	0,107	-11,765
20	-0,044900	-0,044931	-0,039700	0,068	-11,581

Πίνακας 2.15: Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας βέλους κάμψης για τον κόμβο 2095

2095 Node					
Substep	u_y (mm)	u_y (mm) (+50% E_y)	u_y (mm) (+50% G_{xy})	Διαφορά u_y (%) (+50% E_y)	Διαφορά u_y (%) (+50% G_{xy})
1	-0,003460	-0,003462	-0,003210	0,050	-7,225
2	-0,006890	-0,006896	-0,006410	0,083	-6,967
3	-0,010300	-0,010302	-0,009580	0,016	-6,990
4	-0,013700	-0,013679	-0,012700	-0,152	-7,299
5	-0,017000	-0,017028	-0,015900	0,166	-6,471
6	-0,020300	-0,020348	-0,019000	0,238	-6,404
7	-0,023600	-0,023640	-0,022000	0,169	-6,780
8	-0,026900	-0,026902	-0,025100	0,009	-6,691
9	-0,030100	-0,030136	-0,028100	0,119	-6,645
10	-0,033300	-0,033340	-0,031200	0,121	-6,306
11	-0,036500	-0,036516	-0,034100	0,043	-6,575
12	-0,039700	-0,039662	-0,037100	-0,095	-6,549
13	-0,042800	-0,042780	-0,040100	-0,047	-6,308
14	-0,045900	-0,045868	-0,043000	-0,069	-6,318
15	-0,048900	-0,048928	-0,045900	0,058	-6,135
16	-0,051900	-0,051960	-0,048700	0,115	-6,166
17	-0,055000	-0,054962	-0,051600	-0,068	-6,182
18	-0,057900	-0,057937	-0,054400	0,064	-6,045
19	-0,060900	-0,060883	-0,057200	-0,028	-6,076
20	-0,063800	-0,063801	-0,060000	0,002	-5,956

Πίνακας 2.16: Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας βέλους κάμψης για τον κόμβο 1

1 Node					
Substep	u _y (mm)	u _y (mm) (+50%E _y)	u _y (mm) (+50%G _{xy})	Διαφορά u _y (%) (+50%E _y)	Διαφορά u _y (%) (+50%G _{xy})
1	0,011500	0,011516	0,011700	0,143	1,739
2	0,022800	0,022790	0,023100	-0,043	1,316
3	0,033900	0,033829	0,034200	-0,208	0,885
4	0,044700	0,044641	0,045200	-0,131	1,119
5	0,055300	0,055233	0,055900	-0,121	1,085
6	0,065700	0,065611	0,066400	-0,135	1,065
7	0,075900	0,075782	0,076700	-0,155	1,054
8	0,085900	0,085753	0,086800	-0,171	1,048
9	0,095700	0,095529	0,096700	-0,179	1,045
10	0,105302	0,105116	0,106352	-0,177	0,997
11	0,114721	0,114519	0,115866	-0,176	0,998
12	0,123962	0,123745	0,125200	-0,175	0,999
13	0,133029	0,132798	0,134359	-0,174	1,000
14	0,141928	0,141683	0,143348	-0,173	1,001
15	0,150663	0,150404	0,152172	-0,172	1,002
16	0,159239	0,158967	0,160835	-0,171	1,002
17	0,167661	0,167376	0,169342	-0,170	1,003
18	0,175932	0,175635	0,177698	-0,169	1,004
19	0,184057	0,183747	0,185905	-0,168	1,004
20	0,192039	0,191718	0,193969	-0,167	1,005

Πίνακας 2.17: Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας βέλους κάμψης για τον κόμβο 304

304 Node					
Substep	u _y (mm)	u _y (mm) (+50%E _y)	u _y (mm) (+50%G _{xy})	Διαφορά u _y (%) (+50%E _y)	Διαφορά u _y (%) (+50%G _{xy})
1	-0,000380	-0,000380	-0,000048	0,081	-87,447
2	-0,000829	-0,000829	-0,000171	0,001	-79,373
3	-0,001340	-0,001342	-0,000366	0,158	-72,687
4	-0,001920	-0,001916	-0,000629	-0,213	-67,240
5	-0,002550	-0,002547	-0,000956	-0,125	-62,510
6	-0,003240	-0,003232	-0,001340	-0,261	-58,642
7	-0,003970	-0,003967	-0,001790	-0,078	-54,912
8	-0,004760	-0,004750	-0,002290	-0,212	-51,891
9	-0,005590	-0,005578	-0,002840	-0,218	-49,195
10	-0,006460	-0,006448	-0,003430	-0,187	-46,904
11	-0,007380	-0,007358	-0,004080	-0,301	-44,715
12	-0,008330	-0,008305	-0,004760	-0,301	-42,857
13	-0,009310	-0,009287	-0,005490	-0,245	-41,031
14	-0,010300	-0,010303	-0,006260	0,024	-39,223
15	-0,011400	-0,011349	-0,007060	-0,449	-38,070
16	-0,012500	-0,012424	-0,007890	-0,607	-36,880
17	-0,013600	-0,013527	-0,008760	-0,538	-35,588
18	-0,014700	-0,014655	-0,009660	-0,306	-34,286
19	-0,015900	-0,015807	-0,010600	-0,586	-33,333
20	-0,017000	-0,016981	-0,011500	-0,111	-32,353

Πίνακας 2.18: Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας βέλους κάμψης για τον κόμβο 318

318 Node					
Substep	u_y (mm)	u_y (mm) (+50% E_y)	u_y (mm) (+50% G_{xy})	Διαφορά u_y (%) (+50% E_y)	Διαφορά u_y (%) (+50% G_{xy})
1	-0,000383	-0,000384	-0,000052	0,174	-86,475
2	-0,000836	-0,000836	-0,000180	0,052	-78,469
3	-0,001360	-0,001354	-0,000381	-0,418	-71,985
4	-0,001940	-0,001934	-0,000650	-0,333	-66,495
5	-0,002570	-0,002571	-0,000983	0,022	-61,751
6	-0,003270	-0,003262	-0,001380	-0,244	-57,798
7	-0,004010	-0,004005	-0,001830	-0,131	-54,364
8	-0,004810	-0,004796	-0,002340	-0,295	-51,351
9	-0,005650	-0,005632	-0,002900	-0,313	-48,673
10	-0,006530	-0,006512	-0,003500	-0,282	-46,401
11	-0,007450	-0,007431	-0,004160	-0,252	-44,161
12	-0,008410	-0,008389	-0,004850	-0,253	-42,331
13	-0,009410	-0,009382	-0,005590	-0,299	-40,595
14	-0,010400	-0,010409	-0,006370	0,082	-38,750
15	-0,011500	-0,011467	-0,007180	-0,289	-37,565
16	-0,012600	-0,012555	-0,008030	-0,360	-36,270
17	-0,013700	-0,013670	-0,008910	-0,218	-34,964
18	-0,014900	-0,014812	-0,009820	-0,591	-34,094
19	-0,016000	-0,015975	-0,010800	-0,159	-32,500
20	-0,017200	-0,017159	-0,011700	-0,236	-31,977

Πίνακας 2.19: Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας βέλους κάμψης για τον κόμβο 5934

5934 Node					
Substep	u _y (mm)	u _y (mm) (+50%E _y)	u _y (mm) (+50%G _{xy})	Διαφορά u _y (%) (+50%E _y)	Διαφορά u _y (%) (+50%G _{xy})
1	0,005980	0,005970	0,006210	-0,166	3,846
2	0,011800	0,011790	0,012300	-0,086	4,237
3	0,017500	0,017465	0,018200	-0,198	4,000
4	0,023100	0,023002	0,023900	-0,426	3,463
5	0,028500	0,028405	0,029500	-0,335	3,509
6	0,033800	0,033678	0,035000	-0,360	3,550
7	0,038900	0,038828	0,040400	-0,184	3,856
8	0,044000	0,043859	0,045600	-0,321	3,636
9	0,048900	0,048774	0,050700	-0,257	3,681
10	0,053700	0,053579	0,055800	-0,226	3,911
11	0,058400	0,058276	0,060600	-0,212	3,767
12	0,063000	0,062870	0,065400	-0,206	3,810
13	0,067500	0,067364	0,070100	-0,201	3,852
14	0,071900	0,071762	0,074700	-0,192	3,894
15	0,076200	0,076067	0,079200	-0,174	3,937
16	0,080400	0,080282	0,083600	-0,146	3,980
17	0,084600	0,084411	0,087900	-0,224	3,901
18	0,088600	0,088455	0,092100	-0,164	3,950
19	0,092600	0,092418	0,096200	-0,196	3,888
20	0,096500	0,096303	0,100270	-0,204	3,907

Πίνακας 2.20: Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας βέλους κάμψης για τον κόμβο 7699

7699 Node					
Substep	u _y (mm)	u _y (mm) (+50%E _y)	u _y (mm) (+50%G _{xy})	Διαφορά u _y (%) (+50%E _y)	Διαφορά u _y (%) (+50%G _{xy})
1	0,005980	0,005970	0,006210	-0,176	3,846
2	0,011800	0,011789	0,012300	-0,095	4,237
3	0,017500	0,017464	0,018200	-0,208	4,000
4	0,023100	0,023000	0,023900	-0,435	3,463
5	0,028500	0,028402	0,029500	-0,345	3,509
6	0,033700	0,033675	0,035000	-0,074	3,858
7	0,038900	0,038824	0,040400	-0,194	3,856
8	0,043900	0,043854	0,045600	-0,104	3,872
9	0,048900	0,048769	0,050700	-0,268	3,681
10	0,053700	0,053573	0,055700	-0,237	3,724
11	0,058400	0,058270	0,060600	-0,223	3,767
12	0,063000	0,062863	0,065400	-0,217	3,810
13	0,067500	0,067357	0,070100	-0,212	3,852
14	0,071900	0,071754	0,074700	-0,203	3,894
15	0,076200	0,076059	0,079200	-0,186	3,937
16	0,080400	0,080273	0,083600	-0,158	3,980
17	0,084600	0,084401	0,087900	-0,235	3,901
18	0,088600	0,088445	0,092100	-0,175	3,950
19	0,092600	0,092407	0,096200	-0,208	3,888
20	0,096500	0,096291	0,100259	-0,216	3,895

Πίνακας 2.21: Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας βέλους κάμψης για τον κόμβο 24648

24648 Node					
Substep	u_y (mm)	u_y (mm) (+50% E_y)	u_y (mm) (+50% G_{xy})	Διαφορά u_y (%) (+50% E_y)	Διαφορά u_y (%) (+50% G_{xy})
1	-0,000368	-0,000368	-0,000035	-0,058	-90,543
2	-0,000806	-0,000804	-0,000146	-0,212	-81,886
3	-0,001310	-0,001306	-0,000329	-0,340	-74,885
4	-0,001870	-0,001868	-0,000579	-0,120	-69,037
5	-0,002490	-0,002487	-0,000895	-0,104	-64,056
6	-0,003170	-0,003161	-0,001270	-0,279	-59,937
7	-0,003900	-0,003886	-0,001700	-0,363	-56,410
8	-0,004670	-0,004658	-0,002190	-0,246	-53,105
9	-0,005500	-0,005476	-0,002730	-0,431	-50,364
10	-0,006360	-0,006337	-0,003320	-0,369	-47,799
11	-0,007260	-0,007237	-0,003950	-0,319	-45,592
12	-0,008210	-0,008175	-0,004630	-0,430	-43,605
13	-0,009180	-0,009148	-0,005340	-0,350	-41,830
14	-0,010200	-0,010154	-0,006100	-0,448	-40,196
15	-0,011200	-0,011192	-0,006890	-0,071	-38,482
16	-0,012300	-0,012259	-0,007720	-0,333	-37,236
17	-0,013400	-0,013354	-0,008580	-0,346	-35,970
18	-0,014500	-0,014474	-0,009470	-0,180	-34,690
19	-0,015700	-0,015618	-0,010400	-0,524	-33,758
20	-0,016900	-0,016784	-0,011300	-0,686	-33,136

Πίνακας 2.22: Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας βέλους κάμψης για τον κόμβο 31771

31771 Node					
Substep	u_y (mm)	u_y (mm) (+50%E_y)	u_y (mm) (+50%G_{xy})	Διαφορά u_y (%) (+50%E_y)	Διαφορά u_y (%) (+50%G_{xy})
1	0,011600	0,011568	0,011700	-0,275	0,862
2	0,022900	0,022893	0,023200	-0,029	1,310
3	0,034000	0,033984	0,034400	-0,048	1,176
4	0,044900	0,044846	0,045400	-0,120	1,114
5	0,055600	0,055488	0,056100	-0,201	0,899
6	0,066000	0,065916	0,066700	-0,127	1,061
7	0,076300	0,076137	0,077000	-0,213	0,917
8	0,086300	0,086157	0,087200	-0,166	1,043
9	0,096100	0,095982	0,097100	-0,123	1,041
10	0,105781	0,105618	0,106836	-0,154	0,997
11	0,115247	0,115070	0,116396	-0,154	0,997
12	0,124534	0,124344	0,125777	-0,153	0,998
13	0,133647	0,133444	0,134982	-0,152	0,999
14	0,142591	0,142377	0,144017	-0,150	1,000
15	0,151371	0,151146	0,152886	-0,149	1,001
16	0,159993	0,159756	0,161595	-0,148	1,001
17	0,168459	0,168211	0,170147	-0,147	1,002
18	0,176774	0,176516	0,178547	-0,146	1,003
19	0,184943	0,184675	0,186800	-0,145	1,004
20	0,192970	0,192692	0,194908	-0,144	1,004

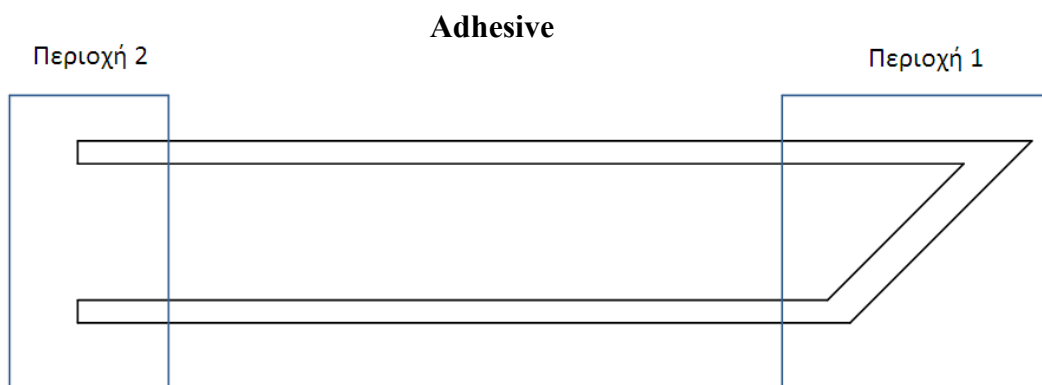
Εξετάζοντας τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας παρατηρούμε ότι δεν σημειώθηκαν ουσιαστικές μεταβολές στην τιμή των τάσεων στους κόμβους όπου έγιναν οι μετρήσεις. Οι μεγαλύτερες μεταβολές των τάσεων σημειώθηκαν στους κόμβους 31771 (Σχήμα 2.15) όπου αυξάνοντας κατά 50% το E_Y του σύνθετου υλικού έχουμε αύξηση της τιμής των τάσεων von Mises κατά 5% και στους κόμβους 304 (Σχήμα 2.17) και 7699 (Σχήμα 2.20) του κολλητικού μέσου όπου σημειώθηκε μείωση των τάσεων von Mises κατά περίπου 6% όταν αυξήθηκε το μέτρο διάτμησης G_{XY} κατά 50%.

Σχετικά με τα αποτελέσματα που προέκυψαν για το βέλος κάμψης κατά τη Y διεύθυνση παρατηρούμε ότι το μέγεθος αυτό δεν επηρεάζεται από την αύξηση του μέτρου ελαστικότητας του σύνθετου κατά τη διεύθυνση Y . Αντίθετα η αύξηση του μέτρου διάτμησης G_{XY} κατά 50% μείωσε σημαντικά τις τιμές του βέλους κάμψης στους κόμβους του σύνθετου και σε ορισμένους κόμβους του κολλητικού μέσου. Συγκεκριμένα στον κόμβο 2063 (Σχήμα 2.12) το βέλος κάμψης είναι μειωμένο κατά περίπου 16% στα πρώτα στάδια της φόρτισης και σταδιακά το ποσοστό μειώνεται στο 11% στα τελευταία στάδια της φόρτισης. Στον κόμβο 2095 (Σχήμα 2.13) το ποσοστό μείωσης είναι μικρότερο συγκριτικά με τον κόμβο 2063 και κυμαίνεται από 7% έως 6% περίπου. Σημαντική μείωση παρουσιάζεται στους κόμβους 304, 318, 24648 (Σχήματα 2.16, 2.17 και 2.18 αντίστοιχα) οι οποίοι βρίσκονται στο κολλητικό μέσο κοντά στην περιοχή της διαμορφωμένης μεταλλικής ακμής. Το ποσοστό μείωσης κυμαίνεται από περίπου 90% για τα πρώτα στάδια της φόρτισης και σταδιακά μειώνεται στο 33% για τα τελευταία στάδια της φόρτισης. Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι το μέτρο διάτμησης επιδρά στο βέλος κάμψης του ίδιου του σύνθετου αλλά κυρίως στην περιοχή του μήκους αλληλοεπικάλυψης που είναι γειτονική σε αυτό ειδικά στα πρώτα στάδια επιβολής του φορτίου γεγονός που δηλώνει ότι στα σημεία αυτά αναπτύσσονται διατμητικές τάσεις. Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι η τάξη μεγέθους των τιμών του βέλους κάμψης είναι ιδιαίτερα μικρή.

Τέλος το φορτίο αστοχίας για τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν κατά την ανάλυση ευαισθησίας σημειώθηκε στο συνδετικό μέσο και ήταν ίσο με $F_x = 254.8$ N/mm πλάτους. Επομένως το φορτίο έναρξης διαρροής δεν επηρεάζεται από την αλλαγή αυτών των ιδιοτήτων.

2.7 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΟΥ ΕΛΑΣΤΟΠΛΑΣΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ 60 – 29.658 – 12.76

Στη συνέχεια για το μοντέλο με γεωμετρία 60-29.658-12.76 αναπτύχθηκαν δύο διαφορετικοί κώδικες. Στον πρώτο ο χάλυβας και το συνδετικό μέσο μοντελοποιήθηκαν ως γραμμικά ελαστικά υλικά και το σύνθετο ως ορθοτροπικό υλικό. Αντίθετα, στο δεύτερο κώδικα ο χάλυβας και το κολλητικό μέσο μοντελοποιήθηκαν ως ελαστοπλαστικά υλικά. Υπενθυμίζουμε στο σημείο αυτό ότι κατά την ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία το φορτίο αστοχίας ορίστηκε ως το φορτίο πρώτης εμφάνισης διαρροής. Σε κάθε μοντέλο η κατανομή των τάσεων και των παραμορφώσεων είχε τα ίδια χαρακτηριστικά. Η αστοχία εμφανιζόταν στο κολλητικό μέσο ενώ ο χάλυβας δεν ξεπέρασε το όριο διαρροής. Ενδεικτικά παρουσιάζουμε ορισμένα από τα αποτελέσματα που προέκυψαν για το μοντέλο 60-29.658-12.76 όπου το κολλητικό μέσο και ο χάλυβας μοντελοποιήθηκαν ως ελαστοπλαστικά υλικά. Στα Σχήματα 2.22 – 2.27 φαίνεται η κατανομή των τάσεων κατά von Mises για 3 διαφορετικά επιβαλλόμενα φορτία στις περιοχές 1 και 2 του κολλητικού μέσου (Σχήμα 2.21).

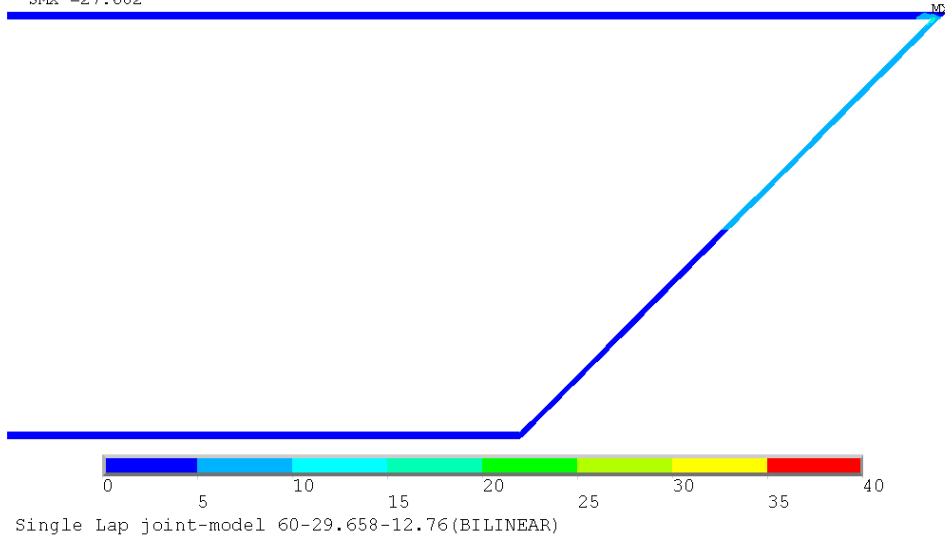


Σχήμα 2.21

Τα επιβαλλόμενα φορτία για τα Σχήματα 2.22 και 2.23 είναι $d = 0.035 \text{ mm}$ και οι αντιδράσεις ίσες με $F_x = 71 \text{ N/mm}$ πλάτους

ELEMENT SOLUTION
STEP=1
SUB =3
TIME=.035
SEQV (NOAVG)
DMX =.024187
SMN =.086003
SMX =27.602

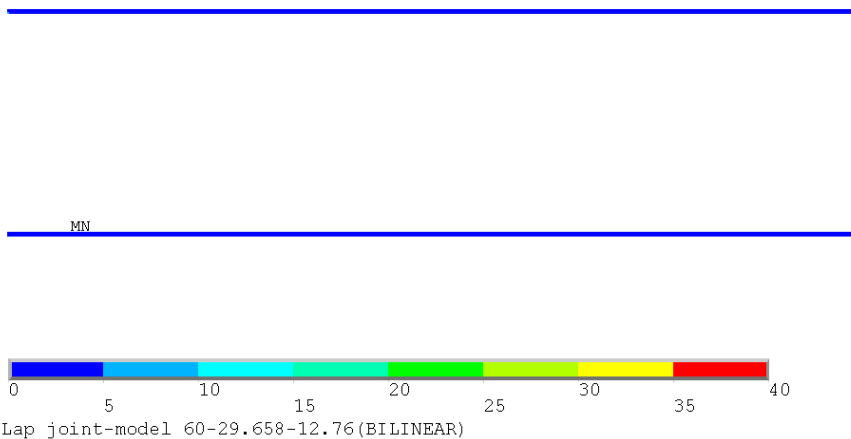
ANSYS
JUN 26 2009
18:08:02



Σχήμα 2.22: Κατανομή τάσεων von Mises στην περιοχή 1 στο κολλητικό μέσο για επιβαλλόμενο φορτίο $\delta = 0.035$ mm

ELEMENT SOLUTION
STEP=1
SUB =3
TIME=.035
SEQV (NOAVG)
DMX =.024187
SMN =.086003
SMX =27.602

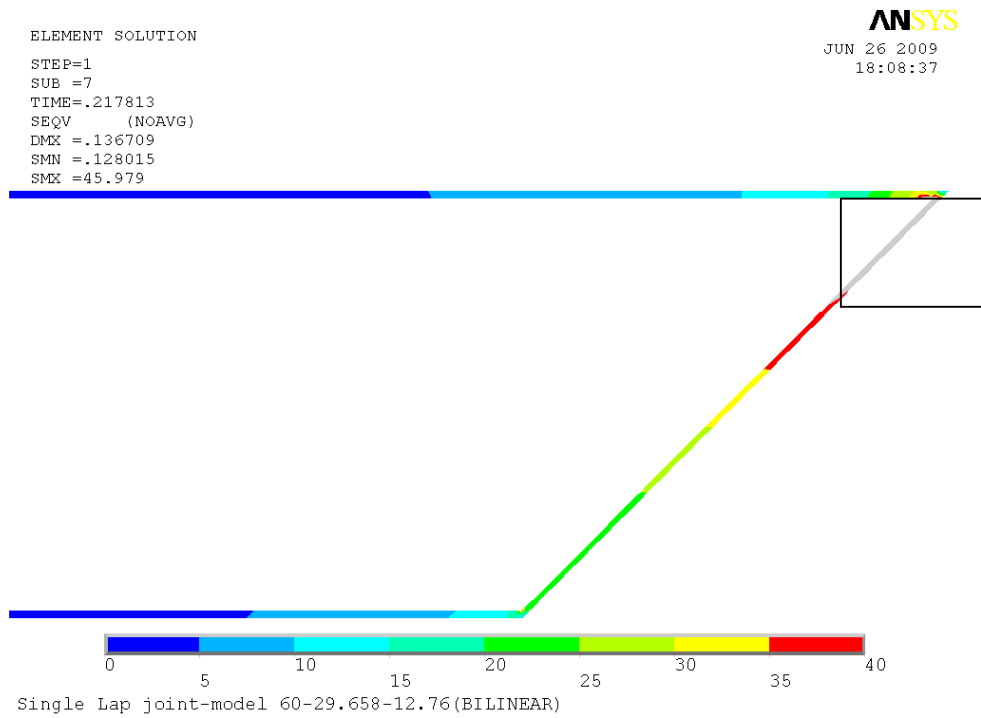
ANSYS
JUN 26 2009
18:11:22



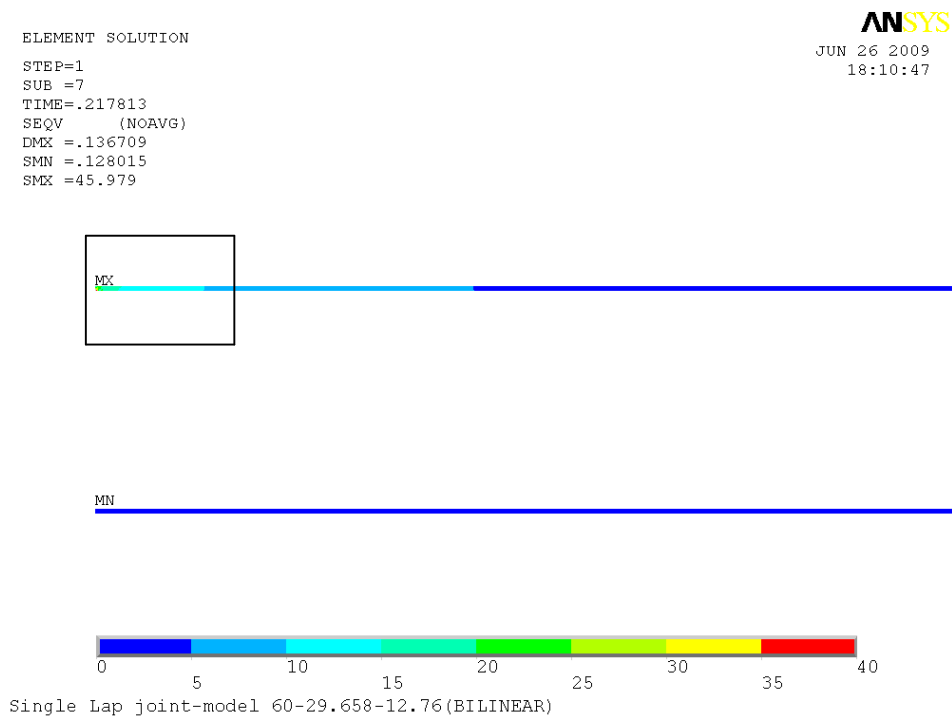
Σχήμα 2.23: Κατανομή τάσεων von Mises στην περιοχή 2 στο κολλητικό μέσο για επιβαλλόμενο φορτίο $\delta = 0.035$ mm

Εξετάζοντας τα Σχήματα 2.22 και 2.23 παρατηρούμε ότι οι μέγιστες τιμές των τάσεων αναπτύσσονται στην περιοχή 1 και οι τιμές τους δεν ξεπερνούν τα 15 MPa. Στην περιοχή 2 οι αναπτυσσόμενες τάσεις δεν ξεπερνούν τα 5 MPa.

Τα επιβαλλόμενα φορτία για τα Σχήματα 2.24 και 2.25 είναι $d = 0.218 \text{ mm}$ και οι αντιδράσεις ίσες με $F_x = 446 \text{ N/mm}$ πλάτους



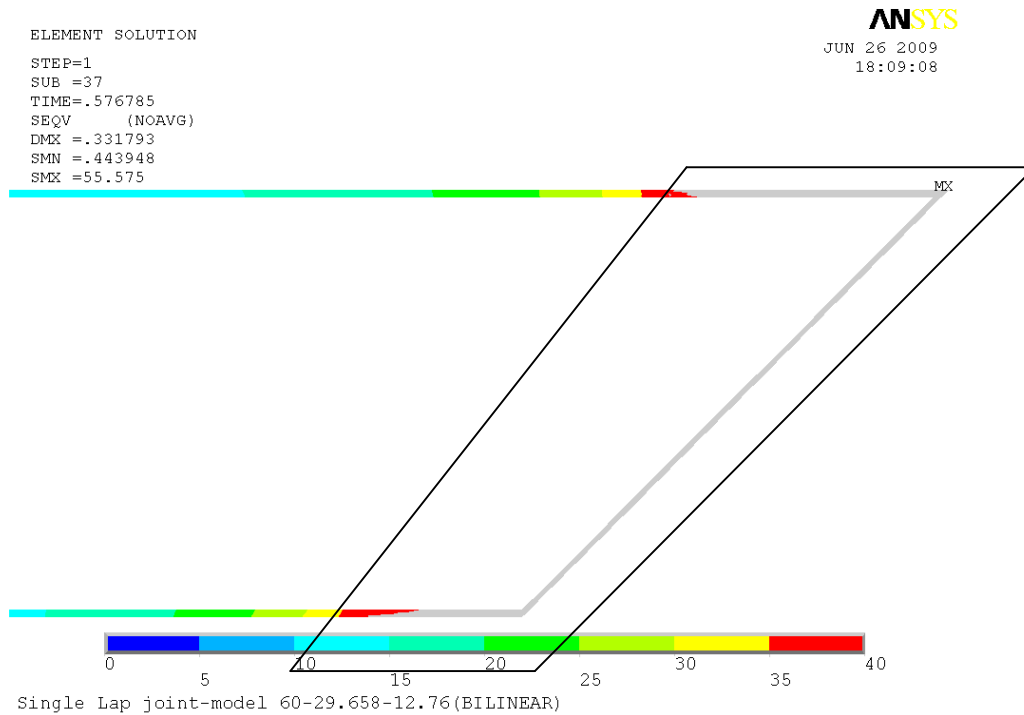
Σχήμα 2.24: Κατανομή τάσεων von Mises στην περιοχή 1 στο κολλητικό μέσο για επιβαλλόμενο φορτίο $\delta = 0.218 \text{ mm}$



Σχήμα 2.25: Κατανομή τάσεων von Mises στην περιοχή 2 στο κολλητικό μέσο για επιβαλλόμενο φορτίο $\delta = 0.218 \text{ mm}$

Εξετάζοντας τα Σχήματα 2.24 και 2.25 παρατηρούμε ότι το κολλητικό μέσο στην περιοχή 1 έχει περάσει την τάση διαρροής (γκρι περιοχή Σχήμα 2.24) ενώ στην περιοχή 2 έχει αυξηθεί η τιμή των τάσεων μόνο στο άνω τμήμα χωρίς όμως να ξεπερνάει το όριο διαρροής.

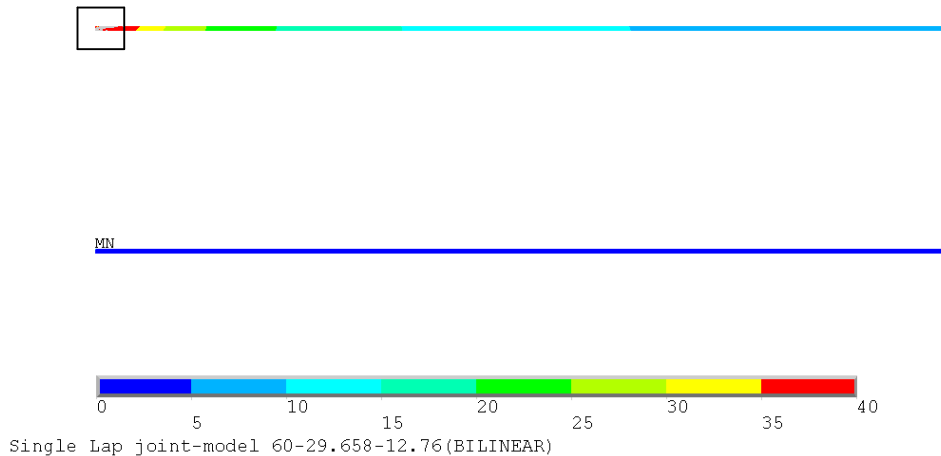
Τα επιβαλλόμενα φορτία για τα Σχήματα 2.26 και 2.27 είναι $d = 0.577 \text{ mm}$ και οι αντιδράσεις ίσες με $F_x = 1166 \text{ N/mm}$ πλάτους.



Σχήμα 2.26: Κατανομή τάσεων von Mises στην περιοχή 1 στο κολλητικό μέσο για επιβαλλόμενο φορτίο $\delta = 0.577 \text{ mm}$

ELEMENT SOLUTION
STEP=1
SUB =37
TIME=.576785
SEQV (NOAVG)
DMX =.331793
SMN =.443948
SMX =55.575

ANSYS
JUN 26 2009
18:10:09



Σχήμα 2.27: Κατανομή τάσεων von Mises στην περιοχή 2 στο κολλητικό μέσο για επιβαλλόμενο φορτίο $\delta = 0.577$ mm

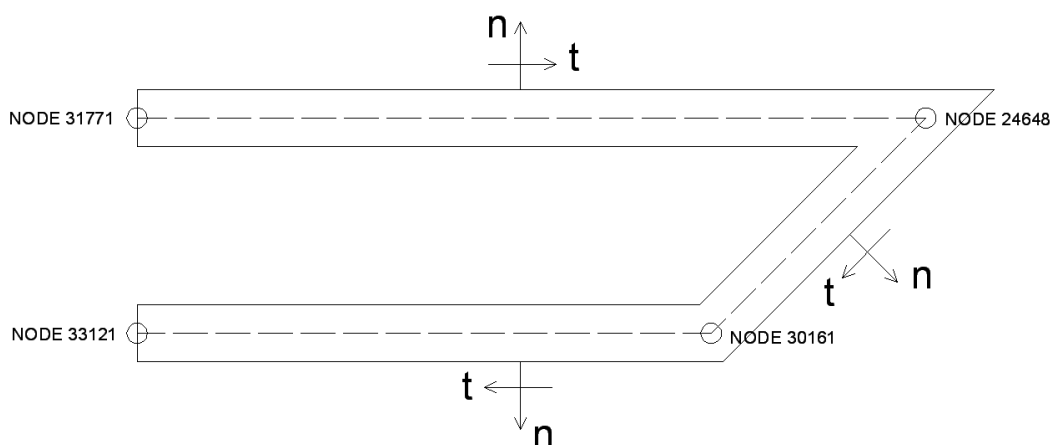
Στο στάδιο αυτό παρατηρούμε ότι στην περιοχή 1 έχει περάσει το όριο διαρροής ακόμα μεγαλύτερο τμήμα του κολλητικού μέσου (Σχήμα 2.26). Όσον αφορά στην περιοχή 2 παρατηρείται ότι μία μικρή περιοχή στο άνω τμήμα του κολλητικού μέσου έχει περάσει και αυτή το όριο διαρροής. Αντίθετα στο κάτω τμήμα του κολλητικού μέσου στην περιοχή 2 οι τιμές των τάσεων να παραμένουν μικρότερες των 5 MPa.

Από τις μοντελοποιήσεις παρατηρούμε ότι η περιοχή όπου ξεκινάει η διαρροή είναι στην πάνω γωνία του κολλητικού μέσου της περιοχής 1. Σε δεύτερη φάση αυξανόμενου του φορτίου πλαστικοποιείται όλη η περιοχή που βρίσκεται υπό γωνία ενώ με βραδύτερο ρυθμό αρχίζουν να αναπτύσσονται τάσεις τοπικά στην άνω ακμή της περιοχής 2. Με την περαιτέρω αύξηση του φορτίου παρατηρείται η σταδιακή πλαστικοποίηση περιοχών στα παράλληλα τμήματα του κολλητικού μέσου στην περιοχή 1. Ο ρυθμός διαρροής των τμημάτων αυτών είναι βραδύτερος απ' ότι στην κεκλιμένη περιοχή. Επιπρόσθετα στην περιοχή 2 ένα μικρό τμήμα περνάει και αυτό το όριο διαρροής. Σχετικά με την κάτω περιοχή της περιοχής 2 παρατηρούμε ότι παραλαμβάνει ένα πολύ μικρό ποσοστό της φόρτισης και η τάση von Mises δε ξεπερνάει την τιμή των 5 MPa.

Η κρίσιμη περιοχή της σύνδεσης είναι το κολλητικό μέσο. Για το λόγο αυτό εξετάστηκε η κατανομή των τάσεων που αναπτύσσονται σε αυτό κατά την επιβολή φόρτισης της σύνδεσης. Για να μπορέσουν να εξεταστούν οι τάσεις σε όλο το μήκος

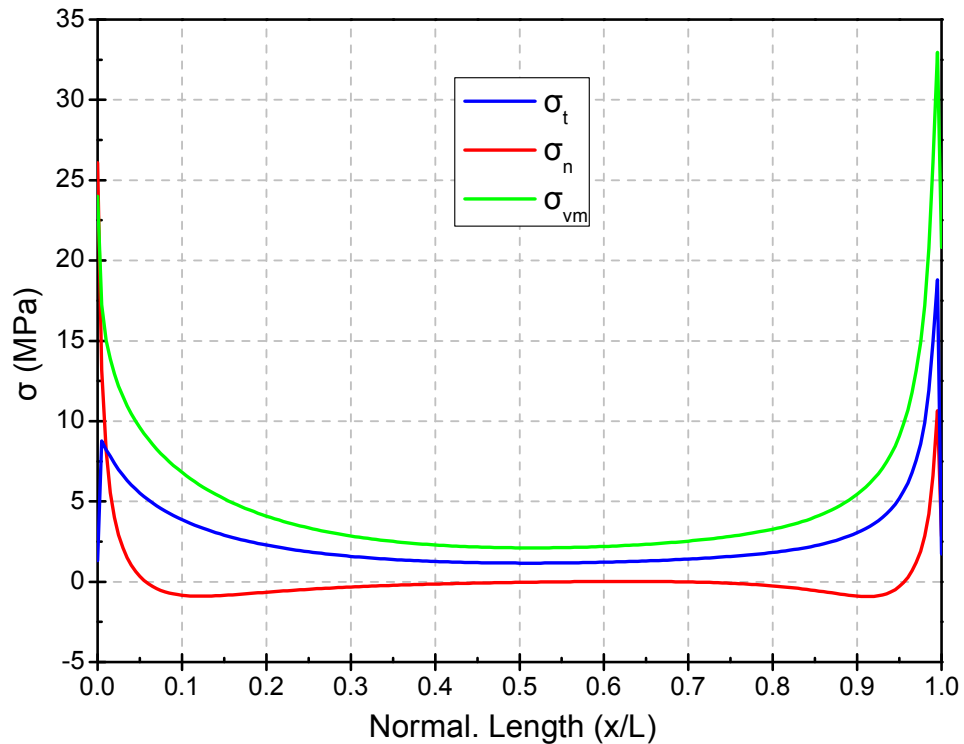
του κολλητικού μέσου ορίστηκαν τρία μονοπάτια (Σχήμα 2.28) στο μέσο του πάχους του. Τα μονοπάτια ήταν τα ακόλουθα:

- Μεταξύ των κόμβων 31771 και 24648 με φορά από τον 31771 προς τον 24648 (μονοπάτι Α)
- Μεταξύ των κόμβων 24648 και 30161 με φορά από τον 24648 προς τον 30161 (μονοπάτι Β)
- Μεταξύ των κόμβων 30161 και 33121 με φορά από τον 30161 προς τον 33121 (μονοπάτι Γ)



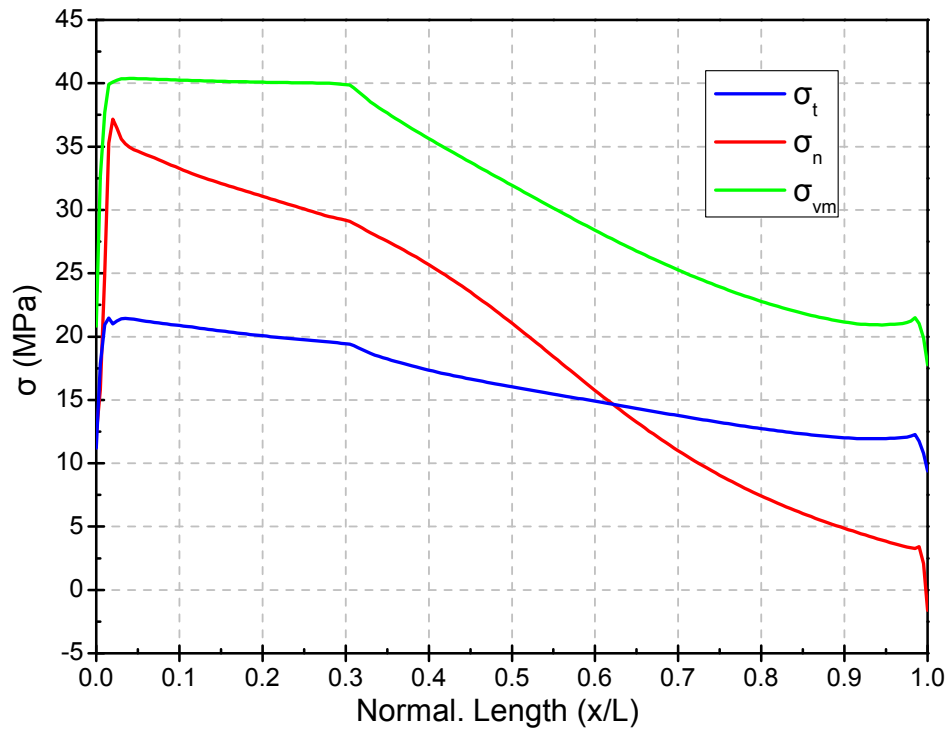
Σχήμα 2.28

Σε κάθε μονοπάτι ορίστηκε ένα σωματοπαγές σύστημα με βάση το οποίο παρουσιάζονται οι τάσεις. Οι τάσεις έχουν μετασχηματιστεί με βάση τα δύο ορθοκανονικά μοναδιαία διανύσματα κατεύθυνσης n και t για κάθε μονοπάτι. Η επιβαλλόμενη φόρτιση ήταν ίση με $d = 0.218 \text{ mm}$. Οι αντιδράσεις για την συγκεκριμένη φόρτιση είναι $F_x = 446 \text{ N/mm}$ πλάτους. Στη συνέχεια ακολουθούν τα διαγράμματα τάσεων – αδιάστατου μήκους για κάθε μονοπάτι (Σχήματα 2.29 – 2.31), όπου η καμπύλη με μπλε χρώμα αναπαριστά την κατανομή των τάσεων παράλληλων στο διάνυσμα t , η κόκκινη καμπύλη την κατανομή των τάσεων παράλληλων στο διάνυσμα n και η πράσινη την τάση von Mises. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονιστεί ότι κατά τη μοντελοποίηση των κολλητικών μέσων με χρήση πεπερασμένων στοιχείων θεωρείται ότι το κολλητικό μέσο παραλαμβάνει μόνο ορθές τάσεις παράλληλες στο κάθετο σε αυτό ορθοκανονικό μοναδιαίο διάνυσμα (n) και διατμητικές τάσεις (t).



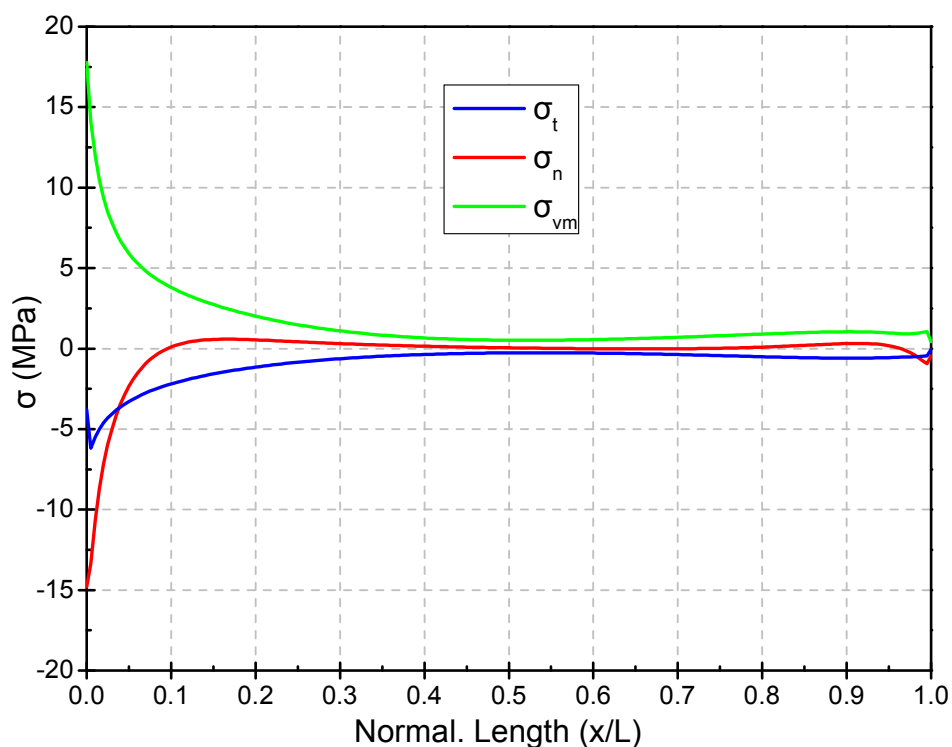
Σχήμα 2.29: Διάγραμμα τάσεων – αδιάστατου μήκους για το μονοπάτι A

Εξετάζοντας το Σχήμα 2.29 παρατηρούμε ότι στα άκρα του μονοπατιού A αναπτύσσονται και διατμητικές αλλά και ορθές τάσεις. Συγκεκριμένα στην αρχή του μονοπατιού εμφανίζονται οι μέγιστες ορθές τάσεις με τιμή περίπου 26 MPa στη συνέχεια αυτές εμφανίζουν απότομη πτώση και αποκτούν αρνητικές τιμές που δεν ξεπερνούν όμως κατ' απόλυτο τιμή τα 2 MPa (διάστημα 0.0 έως 0.3). Στο διάστημα 0.3 έως 0.8 παρατηρούμε ότι δεν αναπτύσσονται ορθές τάσεις ενώ στο διάστημα 0.8 έως 0.95 σημειώνονται αρνητικές ορθές τάσεις με τιμή μικρότερη από 2 MPa κατ' απόλυτο ενώ στο διάστημα 0.95 έως 1 παρατηρούμε την συγκέντρωση ορθών τάσεων που δεν ξεπερνούν τα 12 MPa. Οι διατμητικές τάσεις εμφανίζουν μία πιο ομοιόμορφη κατανομή κατά το μήκος του μονοπατιού, ξεκινώντας από 8 MPa. Έπειτα οι τάσεις σταθεροποιούνται στο διάστημα 0.3 έως 0.8 ενώ στο διάστημα 0.8 έως 1.0 αυξάνονται απότομα εμφανίζοντας μέγιστη τιμή 18 MPa στο τέλος του μονοπατιού. Εξετάζοντας τις τάσεις von Mises παρατηρούμε ότι ακόμα δεν έχει περάσει το όριο διαρροής κανένα σημείο που βρίσκεται πάνω στο μονοπάτι A γεγονός που επαληθεύεται και από το Σχήμα 2.24.



Σχήμα 2.29: Διάγραμμα τάσεων – αδιάστατου μήκους για το μονοπάτι B

Εξετάζοντας το Σχήμα 2.29 παρατηρούμε ότι έχουμε την ανάπτυξη υψηλών τιμών ορθών τάσεων γεγονός που οφείλεται στην κλίση της γεωμετρίας του κολλητικού μέσου στο μονοπάτι που εξετάζουμε. Σταδιακά οι τιμές των τάσεων αυτών μειώνονται. Οι διατμητικές τάσεις εμφανίζουν και αυτές μέγιστη τιμή στην αρχή του μονοπατιού B. έπειτα η τιμή τους μειώνεται σταδιακά έως την τιμή των 10 MPa. Η τιμή των τάσεων von Mises ξεπερνά το όριο διαρροής στο διάστημα 0.0 έως 0.3 (βλ. και Σχήμα 2.24)



Σχήμα 2.30: Διάγραμμα τάσεων – αδιάστατου μήκους για το μονοπάτι Γ

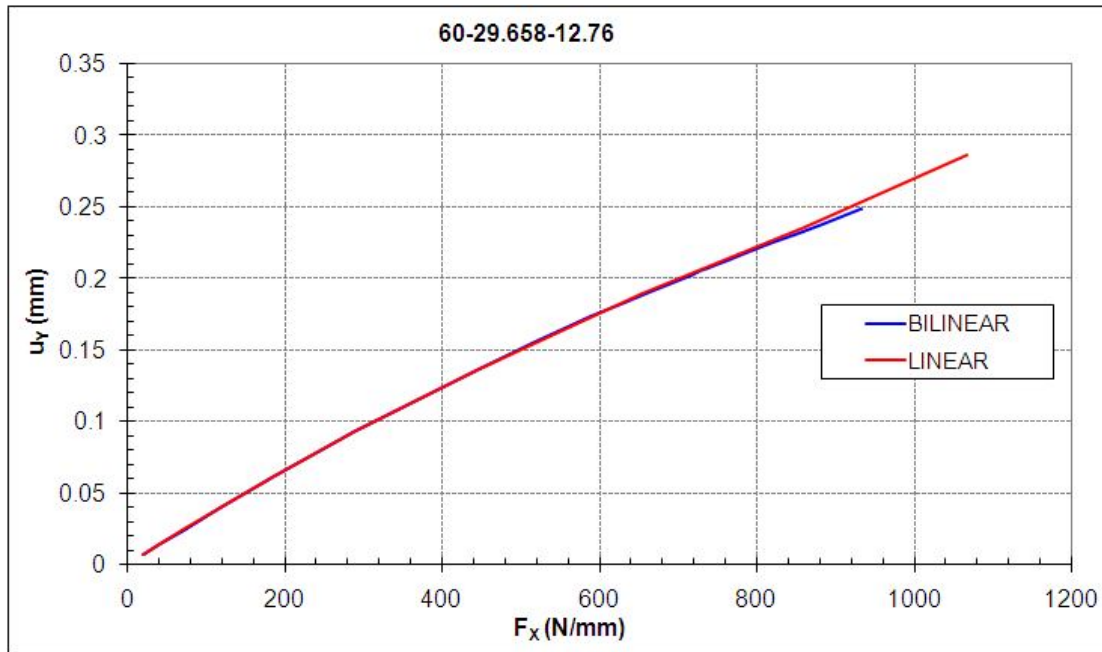
Το σχήμα 2.30 παρουσιάζει την κατανομή των τάσεων στο μονοπάτι Γ. Από το διάγραμμα παρατηρούμε ότι τόσο οι διατμητικές όσο και οι ορθές τάσεις αναπτύσσονται στην αρχή του μονοπατιού στην περιοχή και σε ένα μικρό διάστημα (από 0.0 έως 0.1) στο υπόλοιπο μήκος του μονοπατιού οι τιμές αυτών είναι σταθερές.

2.8 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΓΡΑΜΜΙΚΑ ΕΛΑΣΤΙΚΟΥ ΜΕ ΕΛΑΣΤΟΠΛΑΣΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Συγκρίνοντας το γραμμικά ελαστικό μοντέλο με το ελαστοπλαστικό παρατηρήσαμε ότι δεν σημειώθηκαν διαφορές στο φορτίο αστοχίας από τον τρόπο μοντελοποίησης των υλικών για τη σύνδεση που μελετάμε. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα φορτία έναρξης διαρροής για τα δύο μοντέλα, ενώ στο Σχήμα 2.31 συγκεντρώνονται οι μέγιστες τιμές του βέλους κάμψης συναρτήσει της επιβαλλόμενης φόρτισης

Πίνακας 2.23: Φορτία αστοχίας γραμμικά ελαστικού και ελαστοπλαστικού

Μοντέλο υλικού	$F_{X,max}$ (N/mm πλάτους)
Χάλυβας, Κολλητικό μέσο τέλεια ελαστικά υλικά	204.8
Χάλυβας, Κολλητικό μέσο ελαστοπλαστικά υλικά	204.8



Σχήμα 2.31: Διάγραμμα βέλους κάμψης κατά τον Y άξονα συναρτήσει της επιβαλλόμενης δύναμης στον κόμβο όπου εμφανίζεται η μέγιστη τάση

2.9 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ

Κατά το στάδιο της μοντελοποίησης με πεπερασμένα στοιχεία αναπτύχθηκαν σε κώδικα ANSYS τρία μοντέλα με διαφορετική γεωμετρία, με στόχο τη μεταξύ τους σύγκριση. Τα γεωμετρικά στοιχεία που αλλάζουν είναι το μήκος αλληλοεπικάλυψης και η σχέση του μήκους αυτού με τα μήκη του μετάλλου και του σύνθετου. Σε κάθε μοντέλο ασκήθηκε μετατόπιση ίση με $d = 1 \text{ mm}$. Οι ιδιότητες των υλικών που απαρτίζουν τη σύνδεση ήταν ίδιες με αυτές που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 2.3. Και στα τρία σενάρια το συνδετικό μέσο και ο χάλυβας μοντελοποιήθηκαν ως ελαστοπλαστικά υλικά.

Και στα τρία μοντέλα τα ακόλουθα γεωμετρικά στοιχεία ήταν ίδια:

- $t_m = 6 \text{ mm}$ πάχος του μεταλλικού τμήματος της σύνδεσης
- $t_c = 12.76 \text{ mm}$ συνολικό πάχος του πολύστρωτου
- $t_1 = t_c/2$ πάχος του άνω τμήματος από σύνθετο υλικό
- $t_2 = t_c/2$ πάχος του κάτω τμήματος του σύνθετου
- $t_g = 0.1 \text{ mm}$ πάχος του κολλητικού μέσου
- $l_w = 6 \text{ mm}$ μήκος μεταλλικής ακμής
- $\alpha = 45^\circ$ Γωνία διαμόρφωσης

Ενώ τα μοντέλα διέφεραν μεταξύ τους στα ακόλουθα γεωμετρικά χαρακτηριστικά:

1. 60-29.658-12.76

- $l_m = 120$ mm ελεύθερο μήκος του μετάλλου
- $l_{ov} = 60$ mm μήκος αλληλοεπικάλυψης
- $l_c = 120$ mm ελεύθερο μήκος του σύνθετου υλικού

2. 120*-29.658-12.76

- $l_m = 120$ mm ελεύθερο μήκος του μετάλλου
- $l_{ov} = 120$ mm μήκος αλληλοεπικάλυψης
- $l_c = 120$ mm ελεύθερο μήκος του σύνθετου υλικού

3. 120-29.658-12.76

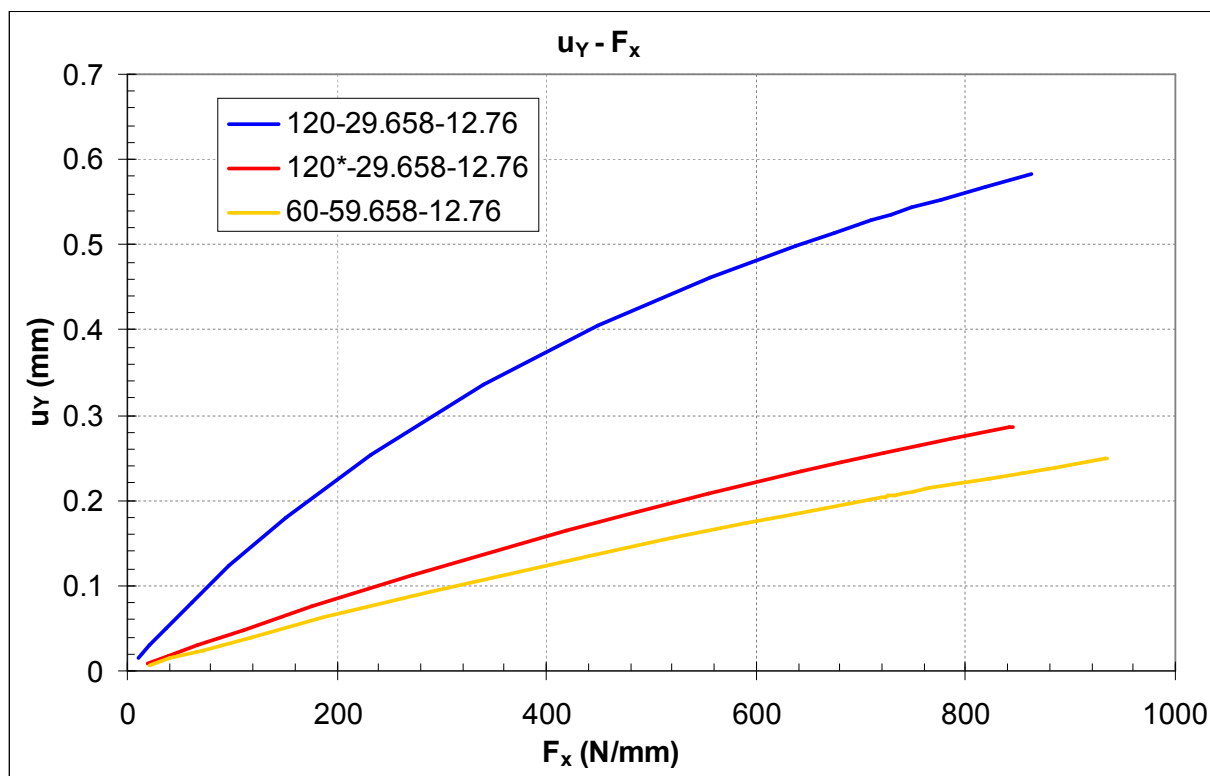
- $l_m = 240$ mm ελεύθερο μήκος του μετάλλου
- $l_{ov} = 120$ mm μήκος αλληλοεπικάλυψης
- $l_c = 240$ mm ελεύθερο μήκος του σύνθετου υλικού

Όπως παρατηρούμε στα μοντέλα 60-29.658-12.76 και 120-29.658-12.76 ισχύει η σχέση $2 \times l_{ov} = l_c = l_m$ σε αντίθεση με το μοντέλο 120*-29.658-12.76 όπου ισχύει $l_{ov} = l_c = l_m$ (Σχήμα 2.2). Από τα μοντέλα υπολογίστηκαν τα φορτία έναρξης αστοχίας, η μέγιστη τιμή της μετατόπισης κατά τον Y άξονα. Τα φορτία έναρξης αστοχίας για τα μοντέλα είναι τα ακόλουθα :

Πίνακας 2.24: Φορτία αστοχίας των μοντέλων

Model	F_x (N/mm) πλάτους
60 - 29.658 - 12.76	204.8
120 - 29.658 - 12.76	340.5
120* - 29.658 - 12.76	486.5

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το συγκριτικό διάγραμμα μέγιστης μετατόπισης κατά τον Y άξονα – φορτίου των μοντέλων.



Σχήμα 2.32: Συγκριτικό διάγραμμα βέλους κάμψης- ασκούμενου φορτίου

Εξετάζοντας το Σχήμα 2.32 παρατηρούμε ότι η τιμή του βέλους κάμψης κατά τον Y άξονα είναι ανάλογη του ολικού μήκους του δοκιμίου.

2.10 ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις μοντελοποιήσεις με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων μπορούμε να εξάγουμε τα εξής συμπεράσματα:

- Εξετάζοντας τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας παρατηρούμε ότι δεν σημειώθηκαν ουσιαστικές μεταβολές στην τιμή των τάσεων στους κόμβους όπου έγιναν οι μετρήσεις καθώς η αύξηση των τάσεων von Mises κυμαινόταν για την πλειοψηφία των κόμβων που εξετάστηκαν κάτω από 5%.
- Σχετικά με το βέλος κάμψης κατά τη Y διεύθυνση παρατηρούμε από τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας ότι το μέγεθος αυτό δεν επηρεάζεται από την αύξηση του μέτρου ελαστικότητας του σύνθετου κατά τη διεύθυνση Y. Αντίθετα η αύξηση του μέτρου διάτμησης G_{xy} κατά 50% μείωσε σημαντικά τις τιμές του βέλους κάμψης στους κόμβους του σύνθετου και σε ορισμένους κόμβους του κολλητικού μέσου. Το ποσοστό μείωσης ήταν μεγαλύτερο στα αρχικά στάδια της φόρτισης.
- Η αστοχία και στα τρία μοντέλα που δημιουργήθηκαν κατά την ανάλυση ευαισθησίας σημειώθηκε στο συνδετικό μέσο με φορτίο αστοχίας ίσο με $F_x = 254.8$

N/mm πλάτους. Επομένως το φορτίο έναρξης διαρροής δεν επηρεάζεται από την αλλαγή αυτών των ιδιοτήτων.

- Η κρίσιμη περιοχή της σύνδεσης είναι το κολλητικό μέσο. Η κεκλιμένη περιοχή αυτού ξεπερνάει πρώτη το όριο διαρροής ενώ ακολουθεί η γύρω σε αυτή περιοχή αλλά με πιο βραδύ ρυθμό.
- Συγκρίνοντας το τέλεια ελαστικό με το ελαστοπλαστικό μοντέλο παρατηρούμε ότι το φορτίο αστοχίας ήταν το ίδιο.
- Από την σύγκριση των τριών διαφορετικών γεωμετριών για τη σύνδεση παρατηρούμε ότι το μεγαλύτερο φορτίο αστοχίας σημειώνεται για το μοντέλο 120*-29.658-12.76 με $F_x = 486.6 \text{ N/mm}$ πλάτους ενώ το μικρότερο για το μοντέλο 60-29.658-12.76 με $F_x = 290.8 \text{ N/mm}$ πλάτους
- Σχετικά με το βέλος κάμψης παρατηρούμε ότι όσο μεγαλύτερο είναι το συνολικό μήκος της σύνδεσης τόσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του βέλους κάμψης.

Κεφάλαιο 3^ο

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται το πειραματικό μέρος της διπλωματικής εργασίας. Σε πρώτη φάση γίνεται μία ανάλυση της γεωμετρίας της σύνδεσης, των δοκιμίων και των τελικών, πραγματικών τους διαστάσεων. Στη συνέχεια παρατίθενται τα αναλυτικά στοιχεία και οι ιδιότητες των υλικών που επιλέχθηκαν για την κατασκευή των δοκιμίων καθώς και οι πειραματικές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν για τον χαρακτηρισμό των ιδιοτήτων τους. Τα διαγράμματα που δημιουργήθηκαν για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων των υλικών επισυνάπτονται στο παράρτημα Α.

Σε δεύτερη φάση περιγράφεται ο τρόπος κατασκευής των δοκιμίων, περιλαμβάνοντας την κατεργασία του μετάλλου, τις μεθόδους κατασκευής των δοκιμίων, και την τελική προετοιμασία αυτών έτσι ώστε να διεξαχθούν οι πειραματικές δοκιμές.

Στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζονται οι μετρήσεις που συγκεντρώθηκαν από τις πειραματικές δοκιμές και γίνεται σύγκριση μεταξύ αυτών για την εξαγωγή συμπερασμάτων.

3.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΝΔΕΣΗΣ

Το αντικείμενο μελέτης της διπλωματικής εργασίας, όπως προαναφέρθηκε, είναι η κατασκευή μιας υβριδικής σύνδεσης μεταξύ μετάλλου και σύνθετου υλικού με τη χρήση κολλητικών μέσων. Η λογική πάνω στην οποία στηρίχθηκε η επιλογή της γεωμετρίας της σύνδεσης είναι ότι πρέπει να δημιουργηθεί μια απλή στον τρόπο κατασκευής της σύνδεση, που να παρέχει τη δυνατότητα σύνδεσης μετάλλου με σύνθετο. Η σύνδεση αποτελείται από τρία διακριτά μέρη:

- Το μεταλλικό τμήμα (metal)
- Το κολλητικό μέσο (adhesive)
- Το τμήμα από σύνθετο υλικό (composite)

Για τον πειραματικό προσδιορισμό της αντοχής της σύνδεσης κατασκευάστηκαν συνολικά έντεκα δοκίμια. Όλα τα δοκίμια σχεδιάστηκαν με σκοπό να ικανοποιούνται οι παρακάτω σχέσεις :

1. $t_1 = t_2$
2. $t_c = t_1 + t_2$
3. $I_m = I_c = 2 I_{ov}$

Όπως είναι προφανές η σύνδεση μπορεί να κατασκευαστεί από πολλαπλούς συνδυασμούς υλικών έτσι ώστε να ικανοποιούνται κάθε φορά τα κριτήρια που θέτει ο σχεδιαστής. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας ως επιμέρους τμήματα της κατασκευής επιλέχθηκαν τα εξής:

- κοινός ναυπηγικός χάλυβας (Grade A steel)
- μονοαξονικό υαλοϋφασμα σε εποξική μήτρα ως σύνθετο υλικό (GFRP)
- εποξική ρητίνη ως κολλητικό μέσο. (Epoxy resin)

Οι λόγοι επιλογής αυτών των υλικών είναι οι ακόλουθοι:

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

3.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Για τη διεξαγωγή των δοκιμών κατασκευάστηκαν δύο σειρές δοκιμών με τα ίδια υλικά αλλά για δύο διαφορετικές γεωμετρίες της σύνδεσης, με σκοπό να διερευνηθεί η επίδραση του μήκους αλληλοεπικάλυψης στην αντοχή της σύνδεσης (Σχήματα 3.1 και 3.2) .

Ως προς τη γεωμετρία τους, τα δοκίμια κατηγοριοποιούνται ως εξής :

1. **60** : δοκίμια με $l_{ov} = 60$ mm
2. **120** : δοκίμια με $l_{ov} = 120$ mm

Επιπρόσθετα, κατά την κατασκευή των δοκιμών πραγματοποιήθηκαν δύο διαφορετικές κατεργασίες της μεταλλικής επιφάνειας στην περιοχή της αλληλοεπικάλυψης. Οι διαφορετικές κατεργασίες πραγματοποιήθηκαν για να μελετηθεί η επίδραση της τραχύτητας στην πρόσφυση του κολλητικού μέσου με το μέταλλο και κατά συνέπεια στην αντοχή της σύνδεσης.

Με βάση την κατεργασία της μεταλλικής επιφάνειας τα δοκίμια οργανώνονται στις παρακάτω κατηγορίες :

1. **B** : δοκίμια που υπέστησαν αμμοβολή (sand-blasting)
2. **H** : δοκίμια που κατεργάστηκαν με αεροματσάκονο (air-hammer)

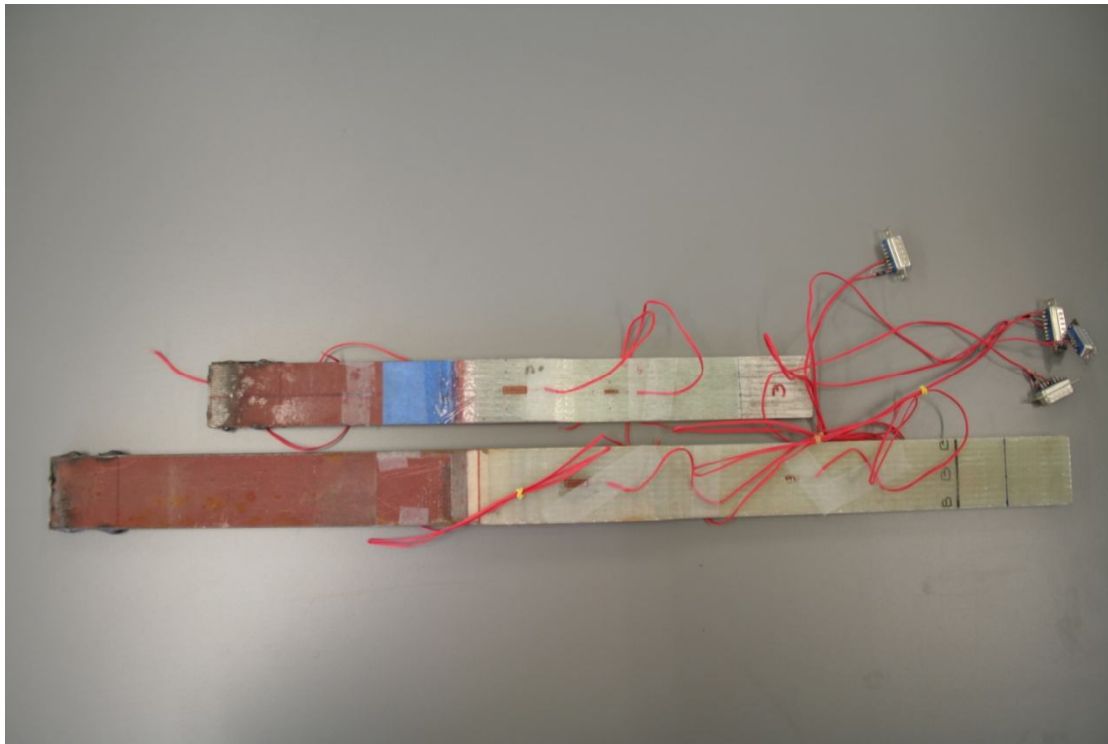
Σύμφωνα με τις ανωτέρω κατηγοριοποιήσεις προέκυψε η ονοματολογία των δοκιμών όπου:

- το πρώτο μέρος αναφέρεται στο είδος της κατεργασίας της μεταλλικής επιφάνειας **B** ή **H**
- το δεύτερο μέρος στο μήκος αλληλοεπικάλυψης του δοκιμίου **60** ή **120**
- το τρίτο μέρος αναφέρεται στον αριθμό του δοκιμίου με τους λατινικούς αριθμούς **I**, **II** ή **III**

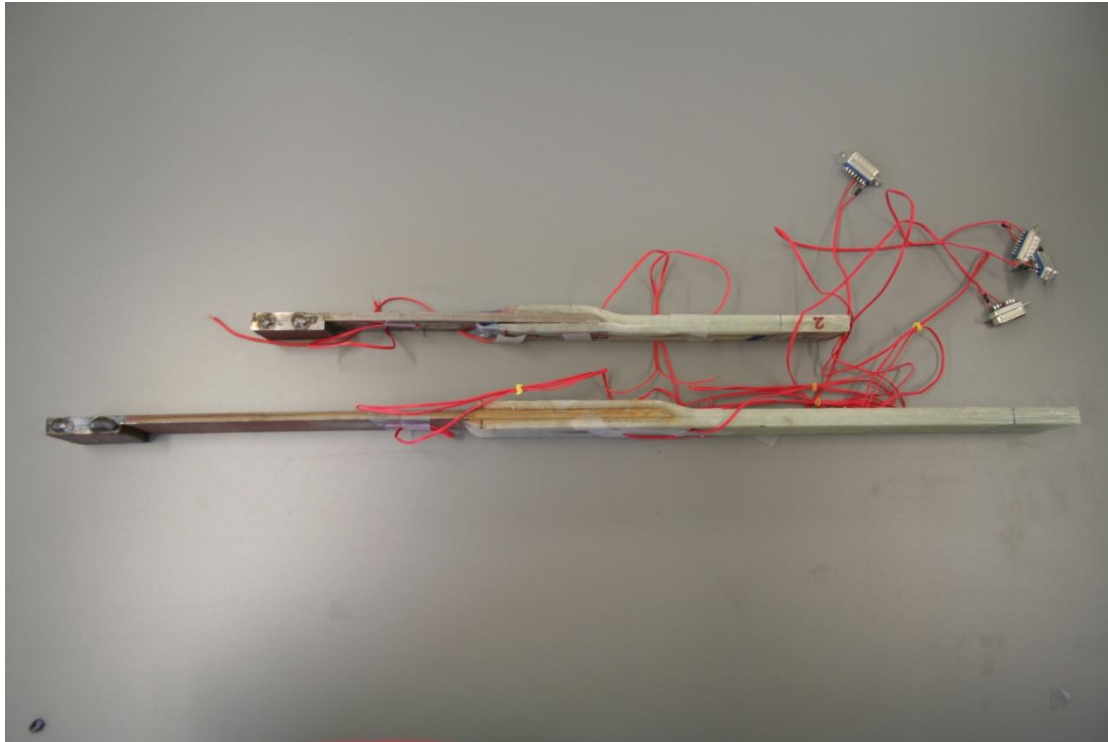
Η ονοματολογία των δοκιμών είναι η ακόλουθη :

Πίνακας 3.1: Ονοματολογία δοκιμών

B-60-I	B-120-I
B-60-II	B-120-II
B-60-III	
H-60-I	H-120-I
H-60-II	H-120-II
H-60-III	H-120-III



Σχήμα 3.1: Γεωμετρία δοκιμών με $l_{ov}=60$ mm και $l_{ov}=120$ mm (κάτοψη)



Σχήμα 3.2: Γεωμετρία δοκιμίων με $l_{ov}=60$ mm και $l_{ov}=120$ mm (πλάγια όψη)

Κύρια παράμετρος για την επιλογή του πάχους του σύνθετου υλικού ήταν η τιμή του λόγου ακαμψίας της σύνδεσης. Ο λόγος αυτός ορίζεται ως :

$$SR_T = \frac{E_c \times t_c}{E_m \times t_m} \quad (3.1)$$

Όπου:

- E_c = το μέτρο ελαστικότητας του πολύστρωτου στον X άξονα
- E_m = το μέτρο ελαστικότητας του μετάλλου
- t_c = το πάχος του πολύστρωτου
- t_m = το πάχος του μετάλλου

Η τιμή του λόγου επιλέχθηκε να είναι ίση με 0.3 για τα δοκίμια. Οι τιμές των μέτρων ελαστικότητας για το σύνθετο και το μέταλλο επιλέχθηκαν με βάση ονομαστικές τιμές αυτών από τη βιβλιογραφία, ενώ το πάχος του χάλυβα επιλέχθηκε ίσο με έξι χιλιοστά. Γνωρίζοντας αυτά τα στοιχεία υπολογίστηκε το απαιτούμενο πάχος του σύνθετου υλικού από τον τύπο

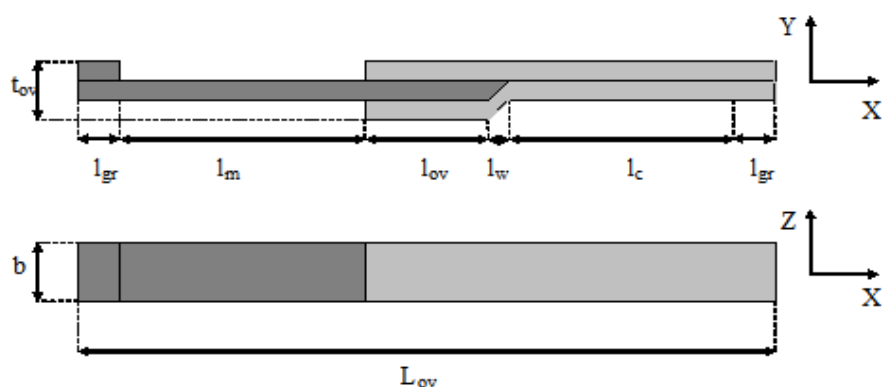
$$t_c = \frac{E_m}{E_c} \times t_m \times SR_T \quad (3.2)$$

Τα ονομαστικά μεγέθη παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2

Πίνακας 3.2: Ονομαστικά μεγέθη

SR_T	0.3
E_m (GPa)	207
E_c (GPa)	30
t_m (mm)	6
t_c (mm)	12.4

Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρούμε ότι αν επιλέγαμε μεγαλύτερη τιμή για τον λόγο ακαμψίας το απαιτούμενο πάχος του πολύστρωτου θα αυξανόταν. Η κατασκευή πολύστρωτων αυξημένου πάχους αποφεύγεται καθώς πέραν των κατασκευαστικών δυσκολιών που προκύπτουν υπάρχουν εναλλακτικές επιλογές που μπορούν να γίνουν κατά τον σχεδιασμό που οδηγούν στο επιθυμητό αποτέλεσμα (για παράδειγμα αλλαγή του είδους των ινών του σύνθετου). Το επόμενο σκαρίφημα παρουσιάζει τη γεωμετρία των δοκιμίων



Σχήμα 3.3

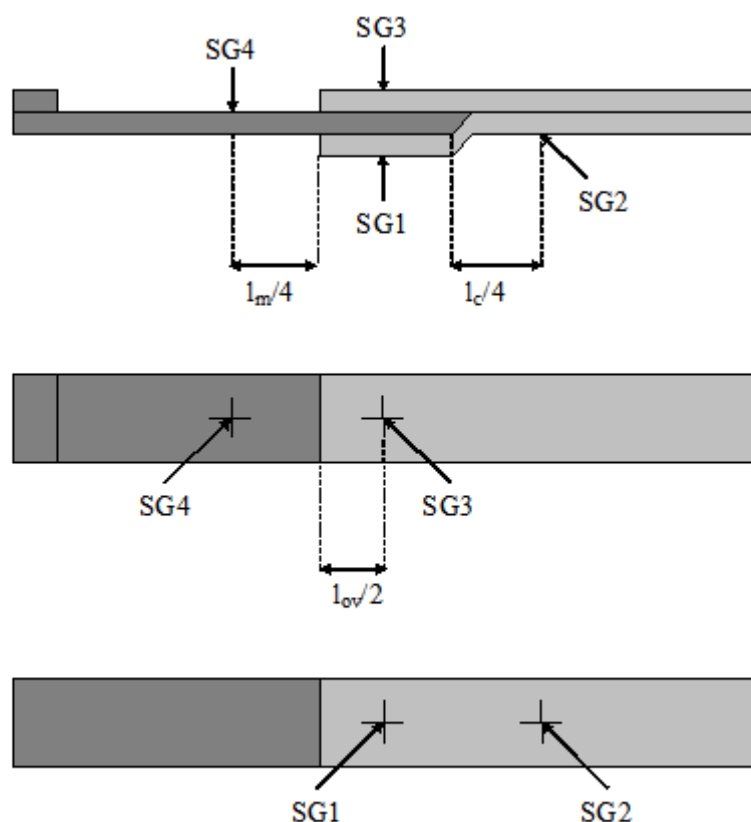
Όπου:

- b = πλάτος δοκιμίου
- l_{gr} = μήκος που εισέρχεται στις αρπάγες της μηχανής δοκιμών
- $L_{ov} = 2 \times l_{gr} + l_m + l_{ov} + l_w + l_c$ = το ολικό μήκος του δοκιμίου
- $t_{ov} = t_m + t_1 + t_2 + 2 \times t_g$, είναι το πάχος του δοκιμίου στην περιοχή της αλληλοεπικάλυψης

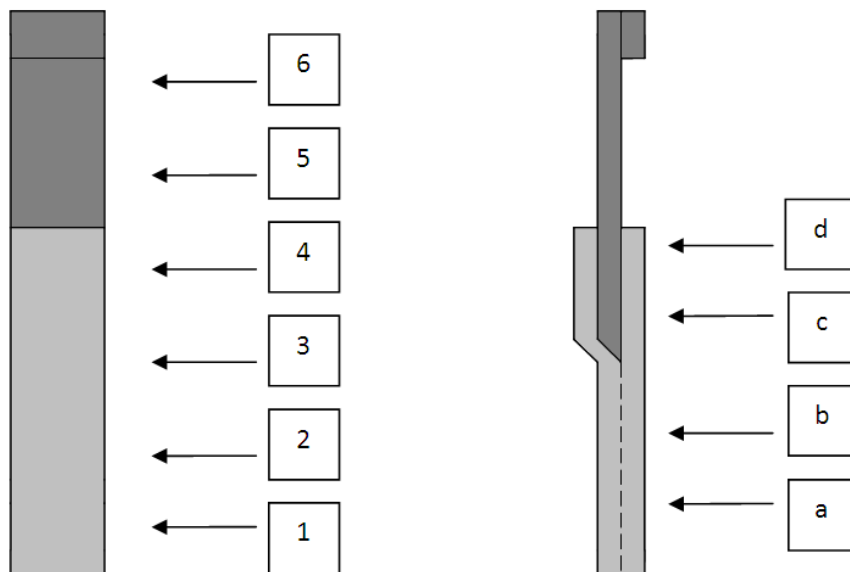
Το πλάτος των δοκιμίων επιλέχθηκε ίσο με 50 mm με βάση στοιχεία που συλλέχθηκαν από τη βιβλιογραφία για πειράματα αντίστοιχα με τα δικά μας. Όπως φαίνεται στο σκαρίφημα, το μήκος του μετάλλου και του σύνθετου έχει προσανυξηθεί κατά 50 mm για τη σωστή εφαρμογή των δοκιμίων στις αρπάγες. Για να αποφευχθεί

έκκεντρη φόρτιση κατά τις δοκιμές, τοποθετήθηκε στο μεταλλικό τμήμα της σύνδεσης ένα χαλύβδινο επιθέμα μήκους 50 mm και πάχους 5 mm, ενώ στο σύνθετο δεν κρίθηκε απαραίτητη η προσθήκη επιθέματος. Στα σημεία του μετάλλου που συγκολλήθηκαν τα επιθέματα είχε αφαιρεθεί το αστάρι και η επιφάνεια είχε καθαριστεί με ακετόνη για να απομακρυνθούν σκόνη και ίχνη από λίπη και σκουριά. Σε κάθε δοκίμιο έγιναν παχυμετρήσεις σε τέσσερα σημεία για να προσδιοριστεί το πραγματικό πάχος του σύνθετου υλικού αλλά και το συνολικό πάχος στην περιοχή αλληλοεπικάλυσης. Με το ίδιο σκεπτικό μετρήθηκε και το πλάτος σε κάθε δοκίμιο σε έξι σημεία (Σχήμα 3.6, Πίνακες 3.3 και 3.4). Στον Πίνακα 3.5 αναγράφονται οι ονομαστικές διαστάσεις των δοκιμίων, οι πραγματικές διαστάσεις καθώς και ο μέσος όρος των πραγματικών διαστάσεων.

Σε κάθε δοκίμιο κολλήθηκαν τέσσερα επιμηκυνσιόμετρα (strain gauges) στις θέσεις που φαίνονται στο Σχήμα 3.5. Τα strain gauges που κολλήθηκαν στη μέση της αλληλοεπικάλυσης (strain gages 1,3) ήταν δέκα χιλιοστών ενώ τα υπόλοιπα (strain gages 2,4) πέντε χιλιοστών. Στο χάλυβα αφαιρέθηκε το αστάρι στο σημείο που κολλήθηκαν τα strain gauges ενώ σε κάθε σημείο η επιφάνεια είχε προηγουμένως καθαριστεί με acetone. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των επιμηκυνσιομέτρων αναφέρονται στον Πίνακα 3.6:



Σχήμα 3.5: Θέσεις των επιμηκυνσιομέτρων στα δοκίμια



Σχήμα 3.6: Θέσεις στις οποίες έγιναν οι μετρήσεις πλάτους και πάχους αντίστοιχα

Πίνακας 3.3: Μετρήσεις πλάτους και πάχους για τα δοκίμια με μήκος αλληλοεπικάλυψης 60 mm.

$I_{ov} = 60 \text{ mm}$						
Μετρήσεις Πλάτους (mm)						
Θέση μέτρησης/δοκίμιο	B-60-I	B-60-II	B-60-III	H-60-I	H-60-II	H-60-III
1	49.85	48.75	48.80	48.90	48.80	48.80
2	48.70	48.85	48.80	48.95	48.90	48.75
3	48.80	48.80	48.70	49.30	48.80	48.65
4	49.10	48.80	48.85	48.70	48.80	48.60
5	49.10	48.95	49.05	49.10	48.95	48.80
6	49.00	48.90	49.10	49.00	49.00	48.85
Μέσος όρος	49.09	48.84	48.88	48.99	48.88	48.74
Συνολικός μέσος όρος	48.90					
Μετρήσεις Πάχους (mm)						
Θέση μέτρησης/δοκίμιο	B-60-I	B-60-II	B-60-III	H-60-I	H-60-II	H-60-III
a	11.90	11.95	12.15	11.95	11.95	11.85
b	12.00	11.55	11.95	12.20	11.65	11.70
c	17.55	17.00	17.15	17.50	17.50	17.60
d	16.85	16.50	16.90	16.95	16.85	17.00
Μέσος όρος πάχους σύνθετου	11.95	11.75	12.05	12.08	11.80	11.78
Μέσος όρος πάχους στην αλληλοεπικάλυψη	17.20	16.75	17.03	17.23	17.18	17.30
Συνολικός μέσος όρος πάχους σύνθετου	11.90					
Συνολικός μέσος όρος πάχους στην αλληλοεπικάλυψη	17.11					

Πίνακας 3.4: Μετρήσεις πλάτους και πάχους για τα δοκίμια με μήκος αλληλοεπικάλυψης 120 mm.

$I_{ov} = 120$ mm					
Μετρήσεις Πλάτους (mm)					
Θέση μέτρησης\δοκίμιο	B-120-I	B-120-II	H-120-I	H-120-II	H-120-III
1	49.00	48.90	48.60	48.75	49.00
2	49.55	48.75	48.50	48.55	48.80
3	48.90	48.65	48.40	48.45	48.55
4	48.65	48.70	48.15	48.45	48.55
5	49.30	49.30	48.70	49.30	49.25
6	49.25	49.35	48.30	49.25	49.25
Μέσος όρος	49.11	48.94	48.44	48.79	48.90
Συνολικός μέσος όρος	48.84				
Μετρήσεις Πάχους (mm)					
Θέση μέτρησης\δοκίμιο	B-120-I	B-120-II	H-120-I	H-120-II	H-120-III
a	12.50	12.00	11.60	11.50	11.80
b	12.50	11.80	11.60	11.45	11.60
c	18.00	17.65	18.90	17.90	17.25
d	18.40	17.10	19.35	18.15	18.00
Μέσος όρος πάχους σύνθετου	12.50	11.90	11.60	11.48	11.70
Μέσος όρος πάχους στην αλληλοεπικάλυψη	18.20	17.38	19.13	18.03	17.63
Συνολικός μέσος όρος πάχους σύνθετου	11.84				
Συνολικός μέσος όρος πάχους στην αλληλοεπικάλυψη	18.07				

Πίνακας 3.5: Ονοματικές και πραγματικές διαστάσεις δοκιμίων

$l_{ov} = 60 \text{ mm}$										
	$l_{ov} \text{ (mm)}$	$l_m \text{ (mm)}$	$l_c \text{ (mm)}$	$l_w \text{ (mm)}$	$L_g \text{ (mm)}$	$L_{total} \text{ (mm)}$	$b \text{ (mm)}$	$t_m \text{ (mm)}$	$t_c \text{ (mm)}$	$t_{overlap} \text{ (mm)}$
Θεωρητικές Τιμές	60.00	120.00	120.00	6.00	50.00	406.00	50.00	6.00	12.42	18.62
B-60-I	60.00	120.00	120.00	6.00	50.00	406.00	49.90	5.81	11.95	17.20
B-60-II	60.00	120.00	120.00	6.00	50.00	406.00	48.84	5.79	11.75	16.75
B-60-III	60.00	120.00	120.00	6.00	50.00	406.00	48.88	5.79	12.05	17.03
H-60-I	60.00	120.00	120.00	6.00	50.00	406.00	48.99	5.75	12.08	17.23
H-60-II	60.00	120.00	120.00	6.00	50.00	406.00	48.88	5.78	11.80	17.18
H-60-III	60.00	120.00	120.00	6.00	50.00	406.00	48.74	5.79	11.78	17.30
Μέσος όρος	60.00	120.00	120.00	6.00	50.00	406.00	49.04	5.79	11.90	17.12
$l_{ov} = 120 \text{ mm}$										
	$l_{ov} \text{ (mm)}$	$l_m \text{ (mm)}$	$l_c \text{ (mm)}$	$l_w \text{ (mm)}$	$L_g \text{ (mm)}$	$L_{total} \text{ (mm)}$	$b \text{ (mm)}$	$t_m \text{ (mm)}$	$t_c \text{ (mm)}$	$t_{overlap} \text{ (mm)}$
Θεωρητικές Τιμές	120.00	240.00	240.00	6.00	50.00	706.00	50.00	6.00	12.42	18.62
B-120-I	120.00	240.00	240.00	6.00	50.00	706.00	49.11	5.79	12.50	18.20
B-120-II	120.00	240.00	240.00	6.00	50.00	706.00	48.94	5.77	11.90	17.38
H-120-I	120.00	240.00	240.00	6.00	50.00	706.00	48.44	5.78	11.60	19.13
H-120-II	120.00	240.00	240.00	6.00	50.00	706.00	48.79	5.79	11.48	18.03
H-120-III	120.00	240.00	240.00	6.00	50.00	706.00	48.90	5.79	11.70	17.63
Μέσος όρος	120.00	240.00	240.00	6.00	50.00	706.00	48.84	5.78	11.84	18.07

Πίνακας 3.6: Τεχνικά χαρακτηριστικά επιμηκυνσιομέτρων

KYOWA STRAIN GAUGES		
TYPE	KFG-10-120-C1-11L1M2R	KFG-5-120-C1-11L1M2R
GAUGE LENGTH (mm)	10	5
GAUGE RESISTANCE (24°C,50%RH) (Ω)	119.6 ± 0.4	120.4 ± 0.4
GAGE FACTOR (24°C,50%RH)	2.10 ±1.0%	2.09 ± 0,4%
APPLICABLE GAGE CEMENT	CC-33A,EP-34B	CC-33A,EP-34B
LOT No	Y3071S	Y33625
BATCH	294A	768A

3.4 ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΟΥΣ

Πριν την κατασκευή της σύνδεσης προηγήθηκαν πειραματικές δοκιμές εφελκυσμού για τον προσδιορισμό των πραγματικών ιδιοτήτων τόσο του χάλυβα όσο και του σύνθετου υλικού. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στην υδραυλική μηχανή δοκιμών MTS του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας της σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών.

3.4.1 Πειραματικός προσδιορισμός ιδιοτήτων χάλυβα

Στην περίπτωση του χάλυβα κόπηκαν τρία δοκίμια από τη χαλύβδινη πλάκα που χρησιμοποιήθηκε αργότερα για την κατασκευή των δοκιμών της σύνδεσης. Τα δοκίμια είχαν τη μορφή παραλληλεπίπεδου. Για το πλάτος και το πάχος αυτών πραγματοποιήθηκαν έξι μετρήσεις, οι διαστάσεις των οποίων παρατίθενται στον Πίνακα 3.7

Πίνακας 3.7: Διαστάσεις δοκιμών χάλυβα

Δοκίμια χάλυβα	Δοκίμιο 1	Δοκίμιο 2	Δοκίμιο 3
Πλάτος (mm)	24.82	24.83	24.88
	24.80	24.86	24.86
	24.87	24.80	24.88
	24.80	24.83	24.87
	24.83	24.92	24.88
Μ.Ο. Πλάτους (mm)	24.82	24.85	24.87
Πάχος (mm)	5.86	5.81	5.78
	5.79	5.79	5.74
	5.70	5.79	5.77
	5.75	5.80	5.79
	5.77	5.77	5.75
Μ.Ο. Πάχους (mm)	5.77	5.79	5.77
Μήκος (mm)	150.00	150.00	150.00
Επιφάνεια Διατομής (mm²)	143.33	143.92	143.42

Κατά τον εφελκυσμό των δοκιμίων μετρήθηκαν οι τιμές της ασκούμενης δύναμης. Διαιρώντας τη δύναμη με τη διατομή του εκάστοτε δοκιμίου υπολογίστηκε η ασκούμενη τάση. Η παραμόρφωση μετρήθηκε με τη χρήση επιμηκυνσιόμετρου. Τα αποτελέσματα συγκεντρώθηκαν σε φύλλα του προγράμματος EXCEL και χαράχθηκαν τα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης (σ - ϵ) (Παράρτημα Α, Σχήματα Α1 - Α3). Το μέτρο ελαστικότητας προκύπτει από την κλίση της καμπύλης σ - ϵ στη γραμμική περιοχή, περί τα 2200 με δηλαδή, σύμφωνα με τα αποτελέσματα των πειραμάτων. Στον πίνακα 3.8 παρουσιάζονται το μέτρο ελαστικότητας και το όριο διαρροής των δοκιμίων.

Πίνακας 3.8: Μέτρο ελαστικότητας-όριο διαρροής δοκιμίων χάλυβα

Χάλυβας	E (GPa)	σ_y (MPa)	ϵ_y (μϵ)
Δοκίμιο 1	189.127	363.160	2034.200
Δοκίμιο 2	177.493	368.840	2094.880
Δοκίμιο 3	171.791	372.760	2146.550
Μέσος όρος	179.470	368.253	2091.877

3.4.2 Πειραματικός προσδιορισμός ιδιοτήτων σύνθετου υλικού

Για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων του σύνθετου υλικού διεξήχθησαν αρχικά πειράματα στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος MARSTRUCT. Τα αποτελέσματα όμως που εξήχθησαν δεν θεωρήθηκαν έγκυρα, καθώς διαπιστώθηκε ότι η ρητίνη που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των δοκιμίων δεν πληρούσε τις κατάλληλες προδιαγραφές, με αποτέλεσμα τη διεξαγωγή νέων πειραμάτων. Για λόγους πληρότητας θα παρατεθούν τα αποτελέσματα και των δύο ομάδων πειραμάτων, οι ιδιότητες όμως που μετρήθηκαν από τις δοκιμές στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος MARSTRUCT δεν λήφθηκαν υπόψη.

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του σύνθετου υλικού και των δοκιμίων αυτού είναι τα ακόλουθα:

1. **Ρητίνη : D.E.R. 353 Liquid Epoxy Resin**

CURED PHYSICAL PROPERTIES

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

2. **Σκληροντής : EPAMINE PC13**

CHEMICAL - PHYSICAL PROPERTIES

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

CURING PROPERTIES

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

3. **Ίνες : UNIE600 Glass της εταιρείας Gavazzi Tessuti Technici S.p.A.**

TECHNICAL SPECIFICATION

Product	legend		Fiber	Weight of Layers				Stitcing gr/m ²	Total weight gr/m ²
				0°	90°	45°	-45°		
UNIE600	E	Glass	E	600	-	-	-	4	604

TYPICAL PROPERTIES FOR THE GLASS FIBER TYPES

Material	Density,bulk annealed, g/cm ²	Tensile Strength (MPa)				Young's Modulus of Elasticity (GPa)	Elongation (%)
		at -190°C	at 23°C	at 371°C	at 538°C	at 538°C	
E-glass	2.62	5310	3445	2620	1725	81.3	4.88

Η κατασκευή των σύνθετων υλικών κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας έγινε με τις ακόλουθες μεθόδους:

- **Μέθοδος επίστρωσης με το χέρι (Hand lay-up)**

Μακράν όλων η πιο συνηθισμένη μέθοδος κατασκευής σκαφών όλων των μεγεθών από FRP είναι η μορφοποίηση με απλή επαφή (contact moulding) χρησιμοποιώντας ρητίνη που στερεοποιείται εν ψυχρώ και ίνες γυαλιού E. Αρχικά η επιφάνεια πάνω στην οποία θα γίνει η επίστρωση γυαλίζεται καλά με κεριά και απλώνεται σε αυτήν μία λεπτή στρώση αποκολλητικού μέσου (release film). Έπειτα υγρή ρητίνη αναμεμιγμένη με καταλύτη και επιταχυντή εναποτίθεται ελεύθερα πάνω στην επιφάνεια ή σε προηγούμενη στρώση με τη βοήθεια ενός πινέλου ή ενός πιστολιού ψεκασμού. Κάθε στρώση ενισχυτικών ινών, είτε σε μορφή υαλοπλήματος (chopped strand mat, CSM), είτε σε μορφή υαλοϋφάσματος (woven roving, WR), ξετυλίγεται από ένα ρολό, πλάτους συνήθως 1 έως 1.5 m και απλώνεται πάνω στην υγρή ρητίνη, διαβρεχόμενο πλήρως από αυτήν με τη βοήθεια ενός ειδικού ρολού ή ενός πινέλου. Εάν το πλάτος της κατασκευής είναι μεγαλύτερο από το πλάτος του ρολού, μπορούν να τοποθετηθούν περισσότερες από μία λωρίδες ενισχυτικών ινών, η μία δίπλα στην άλλη, συνήθως με μία μικρή επικάλυψη. Στην περίπτωση που συμβαίνει κάτι τέτοιο, δεν πρέπει σε καμία περίπτωση οι επάλληλες ενώσεις να βρίσκονται η μία επάνω από την άλλη, αλλά να κατανέμονται ομοιόμορφα στην επιφάνεια του πολύστρωτου, για να μην δημιουργούνται σημεία συγκέντρωσης τάσεων.

- **Μέθοδος μορφοποίησης με σάκο κενού (Vacuum bag moulding)**

Οι μέθοδοι μορφοποίησης με πίεση (compression moulding) περιλαμβάνουν την άσκηση πίεσης συνοδευόμενη συνήθως και από θερμότητα, στην επιφάνεια του μη στερεοποιημένου ακόμη πολύστρωτου, με σκοπό την αύξηση της περιεκτικότητας σε ίνες και τη μείωση των κενών αέρα. Αυτό επιτυγχάνεται με την απομάκρυνση δια της πίεσης της περίσσιας ρητίνης και των κενών αέρα και, στην περίπτωση που επιβάλλεται και θερμότητα, με την επιτάχυνση του πολυμερισμού και της σκλήρυνσης που οδηγεί στην ανάπτυξη της πλήρους αντοχής και δυσκαμψίας του υλικού. Οι διαδικασίες μορφοποίησης με πίεση είναι κατάλληλες για την παραγωγή μεγάλου αριθμού μικρών κατασκευών. Η μέθοδος μορφοποίησης με σάκο κενού αποτελεί εξέλιξη της μεθόδου μορφοποίησης με επαφή. Σύμφωνα με αυτή τοποθετείται στο μη στερεοποιημένο πολύστρωτο ένα κομμάτι αποκολλητικής φόδρας (peel-ply), μία διάτρητη μεμβράνη (perforated foil) και ένα κομμάτι απορροφητικού υφάσματος. Έπειτα τοποθετείται ένα ελαστικό διάφραγμα (μεμβράνη, σάκος), στεγανοποιούνται αεροστεγώς τα άκρα με τη χρήση

στεγανοποιητικής ταινίας (sealing tape) και αναρροφάται ο αέρας από το χώρο κάτω από το διάφραγμα έτσι ώστε το πολύστρωτο να φορτιστεί από πίεση που φτάνει μέχρι και 1 bar. Η αποκολλητική φόδρα (peel-ply) βοηθάει στην αποκόλληση του στεγανοποιητικού σάκου από το στερεοποιημένο πολύστρωτο. Η διάτρητη μεμβράνη επιτρέπει τη διέλευση της περίσσειας ρητίνης από αυτό προς το απορροφητικό ύφασμα το οποίο την κατακρατεί.

3.4.2.A Πειράματα στο πλαίσιο του προγράμματος MARSTRUCT

Για τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος MARSTRUCT δοκιμάστηκαν συνολικά δέκα δοκίμια σε εφελκυσμό (Σχήμα 3.6) με ρυθμό επιβολής φορτίου ίσο με 1 mm/min. Τα μισά από αυτά εφελκύστηκαν στην διεύθυνση των ινών (T-0 Specimens) ενώ τα υπόλοιπα στην διεύθυνση κάθετα στις ίνες (T-90 Specimens). Όλα τα δοκίμια κατασκευάστηκαν με τη μέθοδο μορφοποίησης με σάκο κενού (vacuum bag moulding) και με τη χρήση των προαναφερθέντων υλικών. Τα δοκίμια που εφελκύστηκαν παράλληλα στη διεύθυνση των ινών αποτελούνταν από δύο στρώσεις ενώ αυτά που εφελκύστηκαν κάθετα σε αυτήν από τέσσερις. Στο σχήμα 3.7 περιγράφεται αναλυτικά η γεωμετρία αυτών. Οι επιτευχθείσες διαστάσεις συγκεντρώνονται στον Πίνακα 3.9



Σχήμα 3.7: Φωτογραφία δοκιμίων μετά τα πειράματα (T-0 αριστερά , T-90 δεξιά)

Panels for compressive, tensile and shear tests

Comments: the red rectangle represents one specimen to be cut in the panel. The width of the cutting wheel is 2,6 mm, but a width of 3 mm has been used.

	NTUA	DTU / Risø	Minimum plate overview
Plate thickness	1 mm		
Test purpose	Tension at 0°		
Standard	ASTM D3039M		
Number of specimens	10		
Specimen dimensions	250*15		
Minimum plate size	250*177		
Tab length	56 mm		
Tab thickness	2 mm		
Tab material	Eglass- Epoxy (not tapered)		
Plate thickness	2 mm		
Test purpose	Tension at 90°		
Standard	ASTM D3039M		
Number of specimens	10		
Specimen dimensions	175*25		
Minimum plate size	277*175		
Tab length	25 mm		
Tab thickness	2 mm		
Tab material	Eglass- Epoxy (not tapered)		

Σχήμα 3.7: Γεωμετρία των δοκιμίων T-0, T-90

Πίνακας 3.9: Διαστάσεις των δοκιμίων χαρακτηρισμού T-0 και T-90

Διαστάσεις δοκιμίων εφελκυσμού					
Εφελκυσμός στις 0° - T-0					
Μέτρηση\δοκίμιο	T-0-6	T-0-7	T-0-8	T-0-9	T-0-10
Πλάτος (mm)	15.45	14.57	14.28	14.84	15.16
	14.57	14.32	14.57	13.98	15.50
	14.65	14.32	15.05	13.64	15.80
Μέσο Πλάτος (mm)	14.89	14.40	14.63	14.15	15.49
Πάχος (mm)	1.10	1.17	1.14	1.13	1.16
	1.10	1.12	1.09	1.17	1.11
	1.17	1.18	1.09	1.19	1.17
Μέσο Πάχος (mm)	1.12	1.16	1.11	1.16	1.15
Μήκος (mm)	137.06	138.00	137.66	137.10	137.76
Εφελκυσμός στις 90° - T-90					
Μέτρηση\δοκίμιο	T-90-6	T-90-7	T-90-8	T-90-9	T-90-10
Πλάτος (mm)	24.82	25.46	25.60	25.60	24.60
	24.70	25.40	26.19	26.19	25.10
	24.89	25.40	25.60	25.60	25.05
Μέσο Πλάτος (mm)	24.80	25.42	25.80	25.80	24.92
Πάχος (mm)	2.25	2.39	2.26	2.37	2.19
	2.25	2.32	2.36	2.25	2.26
	2.19	2.30	2.30	2.21	2.28
Μέσο Πάχος (mm)	2.23	2.34	2.31	2.28	2.24
Μήκος (mm)	123.74	124.22	123.84	124.00	124.00

Όπως παρατηρούμε στο Σχήμα 3.6 σε έξι συνολικά δοκίμια (τρία από κάθε σειρά) κολλήθηκαν στο κέντρο τους επιμηκυσσιόμετρα προσανατολισμένα παράλληλα στη διεύθυνση εφελκυσμού έτσι ώστε να μετρηθεί με ακρίβεια η

παραμόρφωση των δοκιμίων κατά τα πειράματα. Στα υπόλοιπα τέσσερα κολλήθηκε ροζέτα επιμηκυνσιομέτρων. Η διάταξη αυτή μετράει με ακρίβεια την παραμόρφωση κατά τη διεύθυνση του εφελκυσμού αλλά και στην κάθετη σε αυτόν διεύθυνση. Από τα πειράματα υπολογίστηκαν: το μέτρο ελαστικότητας, το όριο θραύσης και ο λόγος Poisson, όπου αυτό ήταν δυνατό, βασιζόμενοι στο πρότυπο ASTM D 3039/ D3039 – 95a “Standard Test Method of Polymer Matrix Composite Materials”. Σύμφωνα με το πρότυπο το μέτρο ελαστικότητας ορίζεται ως η κλίση της ευθείας που ορίζουν οι μετρήσεις μεταξύ 1000 με και 3000 με. Στην περίπτωση των δοκιμίων T-90 όμως παρατηρήθηκε μια αλλαγή της κλίσης της ευθείας στην περιοχή των 2000 με, που οφείλεται στην αλλοίωση της ρητίνης όπως διαπιστώθηκε μετέπειτα. Για το λόγο αυτό, η περιοχή που επιλέχθηκε για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας διαφέρει για τα T-90. Στους Πίνακες 3.10 και 3.11 παρουσιάζονται αναλυτικά οι ιδιότητες των δοκιμίων χαρακτηρισμού στο πλαίσιο του προγράμματος Marstruct. Στο Παράρτημα Α (Σχήμα Α4) παρουσιάζεται το συγκεντρωτικό διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης αυτών.

Πίνακας 3.10: Διαστάσεις-ιδιότητες δοκιμίων T-0

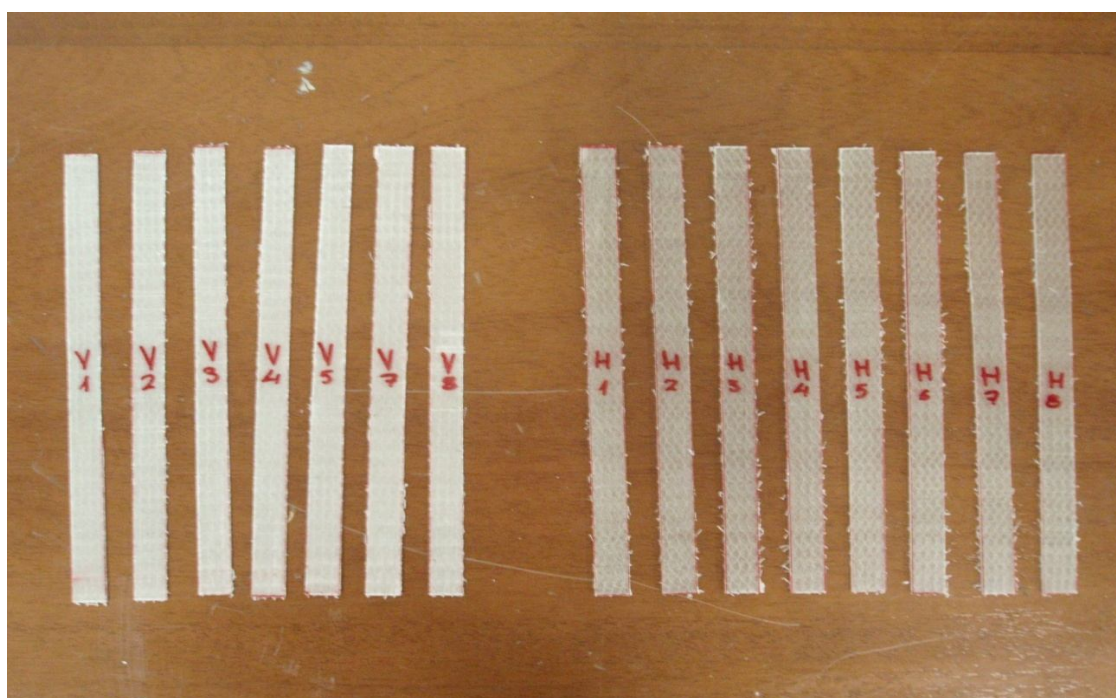
Specimen Code	Width (mm)	Thickness (mm)	A (mm ²)	E ₁ (GPa)		σ _{1max} (MPa)		ε _{1max} (%)	
T-0-6	14.890	1.123	16.721	33.430	E AVER	644.802	σ _{1max} AVER	3.530	ε _{1max} AVER
T-0-7	14.403	1.156	16.650	26.834	29.658	434.965	559.406	3.626	3.447
T-0-8	14.630	1.106	16.181	32.433	E SDV	471.505	σ _{1max} SDV	3.634	ε _{1max} SDV
T-0-9	14.153	1.163	16.460	26.093	0.664	706.699	114.689	2.734	0.404
T-0-10	15.630	1.146	17.912	29.498	E COV	539.057	σ _{1max} COV	3.710	ε _{1max} COV
-	-	-	-	-	2.239	-	20.502	-	11.708

Πίνακας 3.11: Διαστάσεις-ιδιότητες δοκιμίων T-90

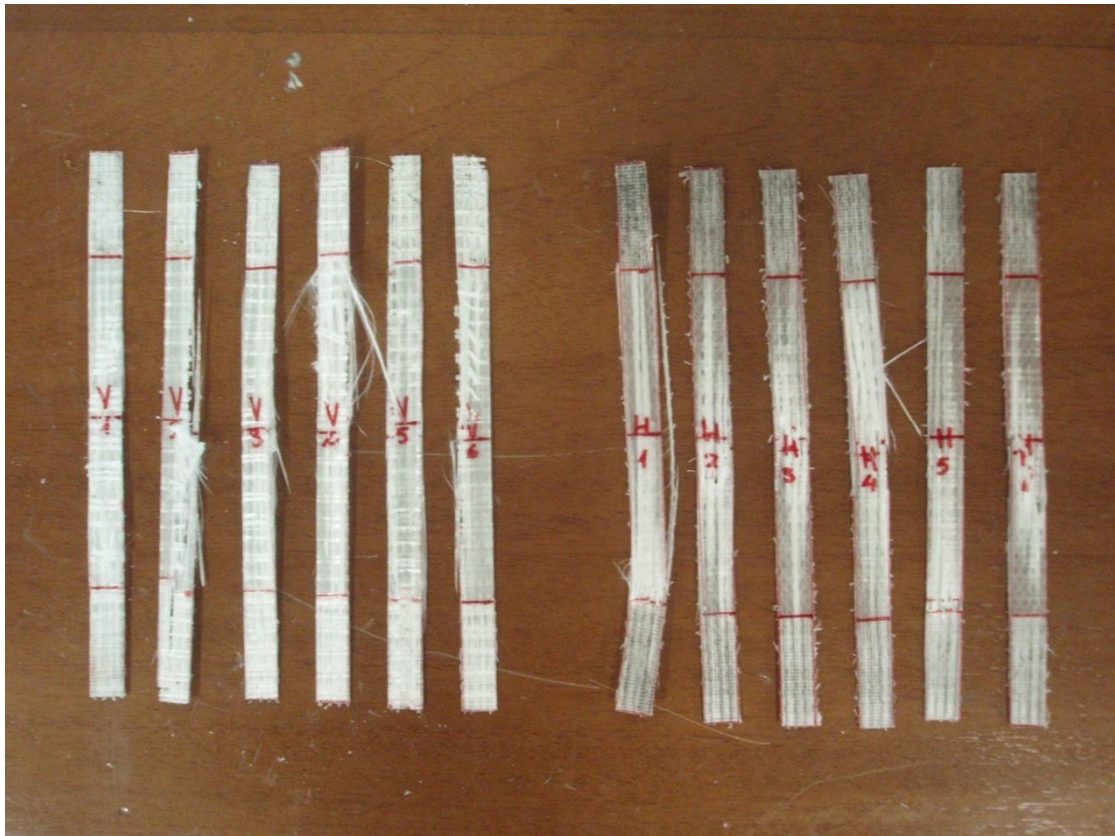
Specimen Code	Width (mm)	Thickness (mm)	A (mm ²)	E (GPa)		σ _{1max} (MPa)		ε _{1max} (%)	
T-90-6	24.800	2.563	63.562	4.973	E AVER	46.983	σ _{1max} AVER	3.731	ε _{1max} AVER
T-90-7	25.420	2.336	59.381	7.675	6.563	69.459	60.816	1.674	2.833
T-90-8	25.083	2.306	57.841	5.231	E SDV	53.071	σ _{1max} SDV	3.656	ε _{1max} SDV
T-90-9	25.896	2.276	58.939	8.529	1.535	75.152	11.549	3.081	0.941
T-90-10	24.926	2.243	55.909	6.409	E COV	59.416	σ _{1max} COV	2.025	ε _{1max} COV
-	-	-	-	-	23.391	-	18.990	-	33.208

3.4.2.B Πειράματα προσδιορισμού ιδιοτήτων του σύνθετου υλικού

Για τη διεξαγωγή της δεύτερης σειράς πειραμάτων κατασκευάστηκαν συνολικά δεκαέξι δοκίμια εκ των οποίων δοκιμάστηκαν τελικά τα δώδεκα. Όλα τα δοκίμια αποτελούνταν από δύο στρώσεις UNIE600 σε D.E.R. 353 Liquid Epoxy Resin. Τα μισά από αυτά κατασκευάστηκαν με τη μέθοδο μορφοποίησης με σάκο κενού (vacuum bag moulding) ενώ τα υπόλοιπα κατασκευάστηκαν με τη μέθοδο επίστρωσης με το χέρι (hand lay-up). Οι επιτευχθείσες διαστάσεις συγκεντρώνονται στον Πίνακα 3.12. Με το γράμμα V αναφερόμαστε στα δοκίμια που κατασκευάστηκαν με τη μέθοδο μορφοποίησης με σάκο κενού (vacuum bag moulding) ενώ με H στα δοκίμια που κατασκευάστηκαν με τη μέθοδο επίστρωσης με το χέρι (hand lay-up). Οι ιδιότητές τους μετρήθηκαν μόνο κατά την διεύθυνση X μέσω πειραμάτων εφελκυσμού με ρυθμό επιβολής φορτίου ίσο με 1 mm/min, σύμφωνα με το πρότυπο EN ISO 527 – 5 “Plastics – Determination of tensile properties”. Στα Σχήματα 3.8 και 3.9 παρουσιάζονται τα δοκίμια χαρακτηρισμού πριν και μετά τις πειραματικές δοκιμές. Στο Παράρτημα Α παρουσιάζονται αναλυτικά τα διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης των δοκιμίων και ο τρόπος υπολογισμού του μέτρου ελαστικότητας τους (Σχήματα A5 – A28).



Σχήμα 3.8: Δοκίμια H – V για τον χαρακτηρισμό των ιδιοτήτων του σύνθετου



Σχήμα 3.9: Δοκίμια Η - V μετά τα πειράματα

Πίνακας 3.12: Διαστάσεις δοκιμίων Vacuum, Hand lay-up

Διαστάσεις δοκιμίων εφελκυσμού								
Vacuum Specimens								
Μέτρηση\δοκίμιο	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8
Πλάτος (mm)	14.73	14.10	13.65	13.43	13.65	15.16	15.84	14.95
	14.31	14.59	14.05	14.07	14.15	15.00	15.37	14.65
	15.20	14.55	14.67	14.89	14.75	15.15	15.49	14.76
Μέσο Πλάτος (mm)	14.75	14.41	14.12	14.13	14.18	15.10	15.57	14.79
Πάχος (mm)	0.91	0.95	0.84	0.89	0.90	0.86	0.88	0.82
	0.90	0.89	0.94	0.90	0.88	0.90	0.87	0.83
	1.02	0.90	0.86	0.83	0.88	0.96	0.93	0.81
Μέσο Πάχος (mm)	0.94	0.91	0.88	0.87	0.89	0.91	0.89	0.82
Μήκος (mm)	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00
Hand lay-up Specimens								
Μέτρηση\δοκίμιο	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8
Πλάτος (mm)	16.27	15.24	15.70	15.76	16.04	16.14	14.82	16.03
	15.79	15.46	15.52	15.45	15.72	16.09	14.58	15.88
	15.84	15.97	15.71	16.00	16.12	15.97	15.12	16.07
Μέσο Πλάτος (mm)	15.97	15.56	15.64	15.74	15.96	16.07	14.84	15.99
Πάχος (mm)	1.20	1.39	1.19	1.38	1.26	1.27	1.30	1.22
	1.49	1.38	1.39	1.38	1.33	1.36	1.37	1.37
	1.31	1.43	1.36	1.26	1.31	1.40	1.39	1.28
Μέσο Πάχος (mm)	1.33	1.40	1.31	1.34	1.30	1.34	1.35	1.29
Μήκος (mm)	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00

Πίνακας 3.13: Ιδιότητες δοκιμών Vacuum

Specimen Code	Width (mm)	Thickness (mm)	A (mm ²)	E ₁ (MPa)		σ _{1max} (MPa)		ε _{1max} (%)	
V1	14.75	0.94	13.87	39.000	E AVER	625.391	σ _{1max} AVER	1.710	ε _{1max} AVER
V2	14.41	0.91	13.11	39.800	39.217	706.811	689.752	1.955	1.963
V3	14.12	0.88	12.43	36.900	E SDV	637.519	σ _{1max} SDV	1.919	ε _{1max} SDV
V4	14.13	0.87	12.29	41.300	1.439	818.970	72.163	2.406	0.249
V5	14.18	0.89	12.62	38.800	E COV	704.391	σ _{1max} COV	2.032	ε _{1max} COV
V6	15.10	0.91	13.74	39.500	3.668	645.432	10.462	1.756	12.679

Πίνακας 3.14: Ιδιότητες δοκιμών Hand lay-up

Specimen Code	Width (mm)	Thickness (mm)	A (mm ²)	E ₁ (GPa)		σ _{1max} (MPa)		ε _{1max} (%)	
H1	15.97	1.33	21.24	31.200	E AVER	652.399	σ _{1max} AVER	2.275	ε _{1max} AVER
H2	15.56	1.40	21.78	25.900	27.433	551.981	574.036	2.393	2.397
H3	15.64	1.31	20.49	28.600	E SDV	535.941	σ _{1max} SDV	2.442	ε _{1max} SDV
H4	15.74	1.34	21.09	25.700	2.127	551.972	44.102	2.455	0.204
H5	15.96	1.30	20.75	26.200	E COV	599.965	σ _{1max} COV	2.716	ε _{1max} COV
H6	16.07	1.34	21.53	27.000	7.752	551.960	7.683	2.103	8.511

Στη συνέχεια μετρήθηκε η περιεκτικότητα σε ίνες των δοκιμίων σύμφωνα με τη μέθοδο του προτύπου ISO/DIS 1183-1.2:1999 “Plastics – Methods for determining the density of non-cellular plastics”. Αρχικά κόπηκαν από τα δοκίμια συνολικά οχτώ τεμάχια, τέσσερα από κάθε σειρά δοκιμίων. Ακολούθως ζυγίστηκε με τη χρήση ηλεκτρονικής ζυγαριάς ακριβείας η μάζα κάθε δοχείου, η μάζα του δοχείου μαζί με το τεμάχιο και τέλος η μάζα του δοχείου μαζί με το τεμάχιο μετά την καύση αυτού στον κλίβανο. Η περιεκτικότητα σε ίνες υπολογίζεται από τον τύπο:

$$W_f(\%) = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \times 100 \quad (3.3)$$

Όπου :

- W_f = περιεκτικότητα σε ίνες κατά μάζα (%)
- m_1 = μάζα δοχείου
- m_2 = μάζα δοχείου + μάζα τεμαχίου πριν την καύση
- m_3 = μάζα δοχείου + μάζα τεμαχίου μετά την καύση

Πίνακας 3.15: Μάζες τεμαχίων, περιεκτικότητα σε ίνες

Περιεκτικότητα σε ίνες δοκιμίων εφελκυσμού				
Vacuum Specimens				
	m_1 (gr)	m_2 (gr)	m_3 (gr)	W_f (%)
Τεμάχιο 1	43.3661	44.4464	44.1998	77.1730
Τεμάχιο 2	46.3922	47.4803	47.2298	76.9780
Τεμάχιο 3	40.6464	41.6600	41.4291	77.2200
Τεμάχιο 4	38.5129	39.6540	39.3958	77.3730
Μέσος όρος	42.2294	43.3102	43.0636	77.1860
Hand lay-up Specimens				
	m_1 (gr)	m_2 (gr)	m_3 (gr)	W_f (%)
Τεμάχιο 1	40.8559	42.4180	41.6650	51.7960
Τεμάχιο 2	44.2980	45.8061	45.1058	53.5640
Τεμάχιο 3	45.5680	47.2494	46.4730	53.8240
Τεμάχιο 4	41.9380	43.4119	42.7052	52.0520
Μέσος όρος	43.1650	44.7214	43.9873	52.8090

3.5 ΜΕΘΟΔΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΥΝΔΕΣΗΣ

Σε αυτό το εδάφιο θα περιγραφεί αναλυτικά ο τρόπος με τον οποίο κατασκευάστηκαν οι πλάκες από τις οποίες κόπηκαν τα δοκίμια σύνδεσης για τα πειράματα. Συνολικά κατασκευάστηκαν δύο διαφορετικές συνδέσεις με βάση την επιθυμητή γεωμετρία.

3.5.1 Επιφανειακή κατεργασία της μεταλλικής επιφάνειας

Προτού γίνουν οι επιστρώσεις του πολύστρωτου πραγματοποιήθηκαν οι κατεργασίες στην επιφάνεια του μετάλλου που βρίσκεται στην περιοχή αλληλοεπικάλυσης. Οι δύο χαλύβδινες πλάκες υπέστησαν αμμοβολή (SA 2 ½) στο μισό τους πλάτος, ενώ το άλλο μισό χτυπήθηκε με αεροματσάκονο. Στη συνέχεια μετρήθηκε η τραχύτητα της επιφάνειας μετά την αμμοβολή. Στην περιοχή που έγινε κατεργασία με αεροματσάκονο δεν ήταν δυνατή η μέτρηση της τραχύτητας. Οι τραχυμετρήσεις έγιναν με χρήση ηλεκτρονικού ταχύμετρου (TR100 SURFACE ROUGHNESS TESTER) και στις δύο πλευρές της μεταλλικής επιφάνειας. Στο κέντρο της επιφάνειας έγιναν τέσσερις μετρήσεις παράλληλα, κάθετα και σε γωνίες $\pm 45^\circ$ ως προς τη διαμήκη διάσταση, σύμφωνα με το πρότυπο ISO 4287-97 “Geometrical Product Specifications (GPS) – surface texture: Profile method – Terms, definitions and surface parameters”.



Σχήμα 3.10: Επιφανειακή κατεργασία χάλυβα με αμμοβολή και αεροματσάκονο αντίστοιχα

Οι τραχυμετρήσεις έγιναν για δύο διαφορετικά μήκη αποκοπής ίσα με :

- $\lambda = 0.8 \text{ mm}$ (ρύθμιση Ra)
- $\lambda = 2.5 \text{ mm}$ (ρύθμιση Rz)

Σε κάθε περίπτωση το μήκος δειγματοληψίας ήταν ίσο με τέσσερα χιλιοστά. Οι μέσες τραχύτητες οι οποίες μετρήθηκαν καθώς και η μέση τιμή τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.16.

Πίνακας 3.16: Αποτελέσματα τραχυμετρήσεων.

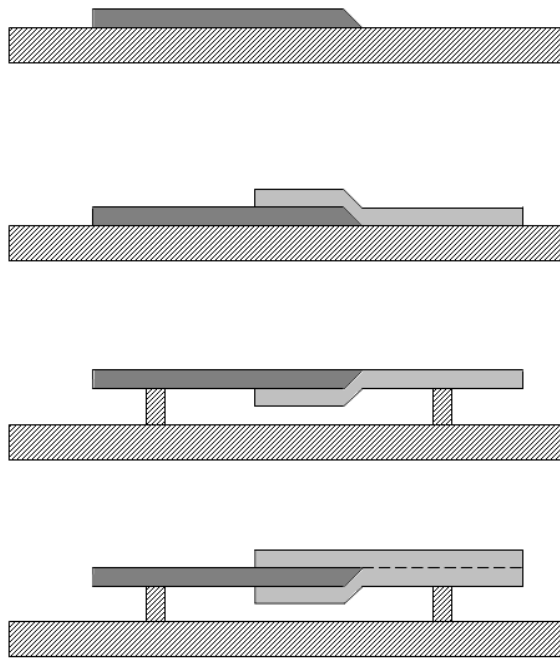
Τραχυμετρήσεις (μm)				
Χαλύβδινη Πλάκα για $l_{ov} = 120\text{mm}$				
Γωνία μέτρησης \ Μήκος αποκοπής	$\lambda = 0.8\text{ mm}$		$\lambda = 2.5\text{ mm}$	
0°	5.32	2.90	37.70	28.40
45°	5.08	3.83	37.10	32.10
90°	6.31	5.48	45.50	49.10
-45°	5.52	5.00	33.00	42.80
Μέσος όρος	Ra = 4.93		Ra = 38.21	
Χαλύβδινη Πλάκα για $l_{ov} = 60\text{mm}$				
Γωνία μέτρησης \ Μήκος αποκοπής	$\lambda = 0.8\text{ mm}$		$\lambda = 2.5\text{ mm}$	
0°	8.45	3.54	-	-
45°	7.62	4.31	-	-
90°	8.08	6.17	-	-
-45°	5.87	3.51	-	-
Μέσος όρος	Ra = 5.94		-	

Στην περίπτωση της μικρής πλάκας δεν πραγματοποιήθηκε η μέτρηση της τραχύτητας με μήκος αποκοπής ίσο με 2.5 mm, για τεχνικούς λόγους.

3.5.2 Τρόπος κατασκευής της σύνδεσης

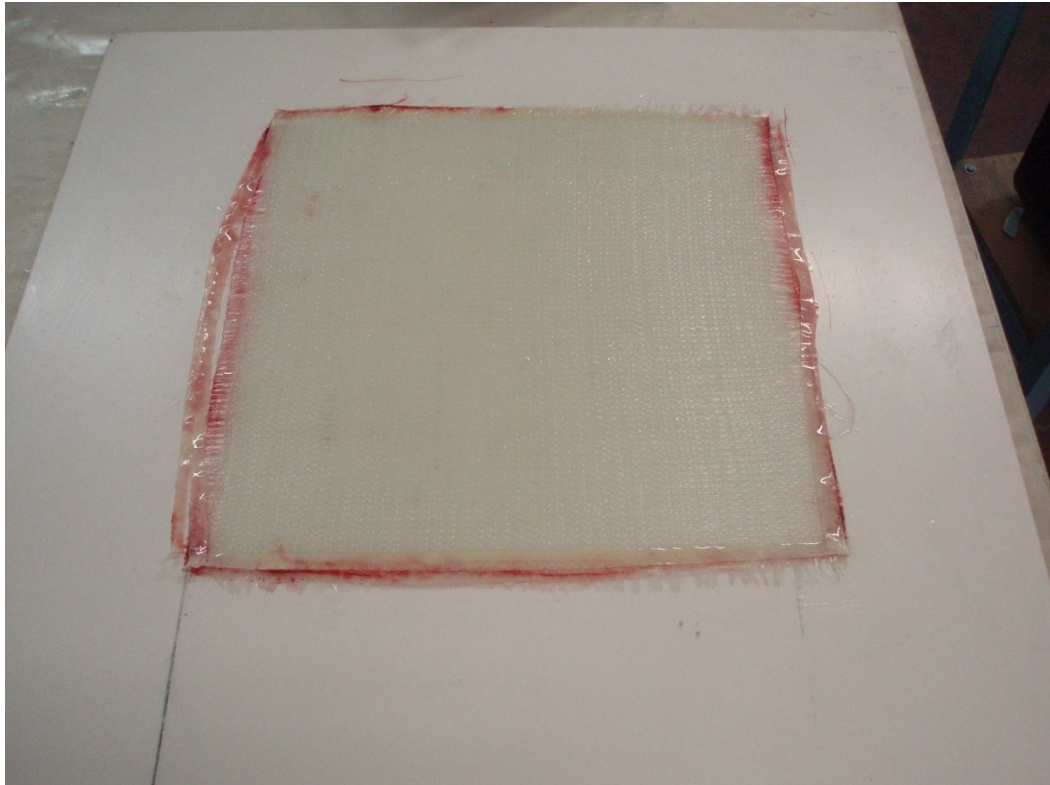
Για την κατασκευή των συνδέσεων ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία (Σχήμα 3.11):

- κατάλληλη προετοιμασία της μεταλλικής επιφάνειας και επίστρωση του πρώτου μέρους του σύνθετου υλικού
- επίστρωση του δεύτερου μέρους του σύνθετου υλικού μετά τον πλήρη πολυμερισμό του άνω μέρους του πολύστρωτου.



Σχήμα 3.11: Στάδια κατασκευής της σύνδεσης

Πριν την παρασκευή της σύνδεσης κρίθηκε αναγκαίο να διερευνηθεί η τυχόν ύπαρξη προβλημάτων συνάφειας μεταξύ του πρώτου και του δεύτερου μέρους του σύνθετου. Για το λόγο αυτό κατασκευάστηκε μία μικρή πλάκα τεσσάρων στρώσεων με τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν και για τη σύνδεση με την μέθοδο vacuum bagging moulding (Σχήμα 3.12). Στη συνέχεια αφού είχε στερεοποιηθεί πλήρως η ρητίνη αφαιρέθηκαν κατά σειρά ο στεγανοποιητικός σάκος, το απορροφητικό ύφασμα η διάτρητη μεμβράνη και η αποκολλητική φόδρα και επιστρώθηκαν πάνω στο πολύστρωτο άλλες τέσσερις στρώσεις. Μετά τη στερεοποίηση του πολύστρωτου, ελέγχθηκε οπτικά η συνάφεια μεταξύ του πρώτου και του δεύτερου τμήματος. Από τον έλεγχο αυτόν διαπιστώθηκε ότι η μέθοδος επίστρωσης του πολύστρωτου σε δύο φάσεις είναι αποδεκτή.



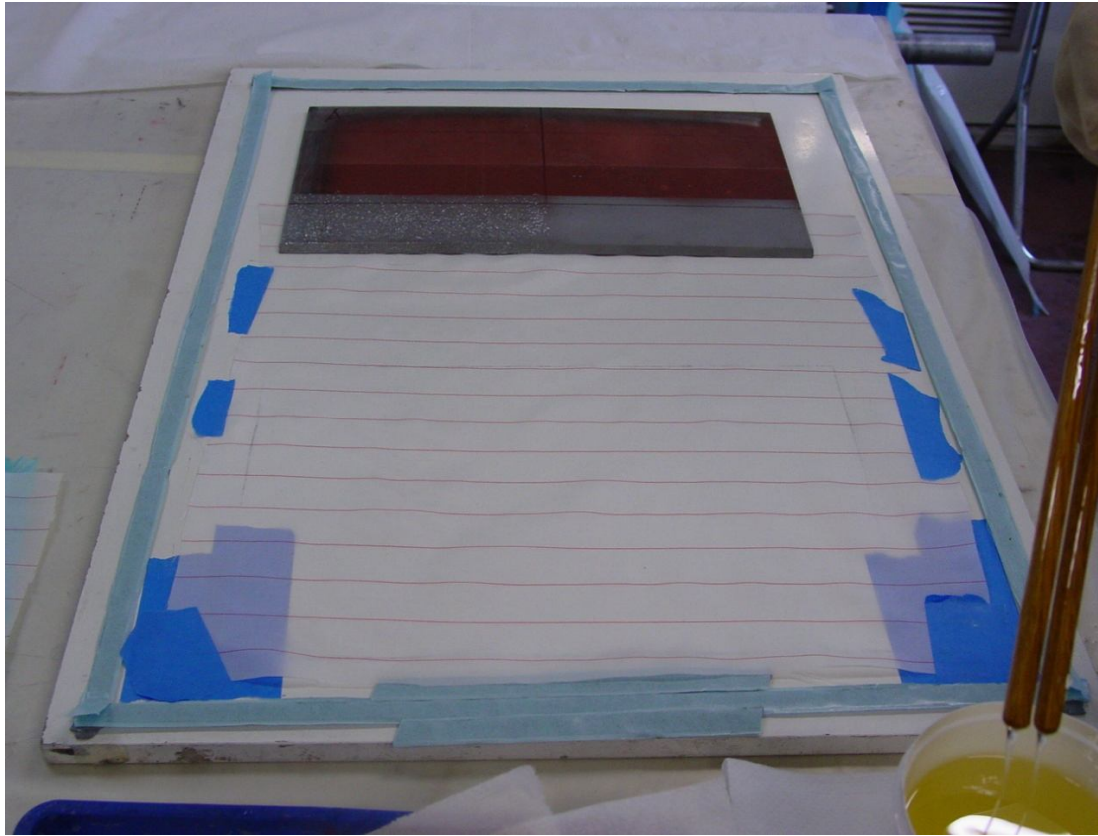
Σχήμα 3.12: Κατασκευή πολύστρωτου για οπτικό έλεγχο

Η αναλογία μεταξύ του βάρους των υαλοϋφασμάτων και του βάρους του μίγματος ρητίνης – σκληρυντή πρέπει να είναι 2:1, με στόχο την κατασκευή Σύνθετου υλικού με κατά βάρος περιεκτικότητα σε ίνες $W_f = 66\%$. Κατά την κατασκευή της σύνδεσης όμως παρασκευάσθηκε μεγαλύτερη ποσότητα μίγματος για να είμαστε σίγουροι ότι θα έχουμε επαρκή ποσότητα αυτού. Όσον αφορά το μίγμα, η αναλογία μεταξύ των βαρών της ρητίνης και του σκληρυντή είναι και αυτή 2:1. Ο χρόνος στερεοποίησης του μίγματος ήταν περίπου 50 λεπτά. Αναλυτικά τα βάρη του υαλοϋφάσματος, της ρητίνης, του σκληρυντή και του μίγματος και για τις δύο γεωμετρίες παρουσιάζονται στον πίνακα:

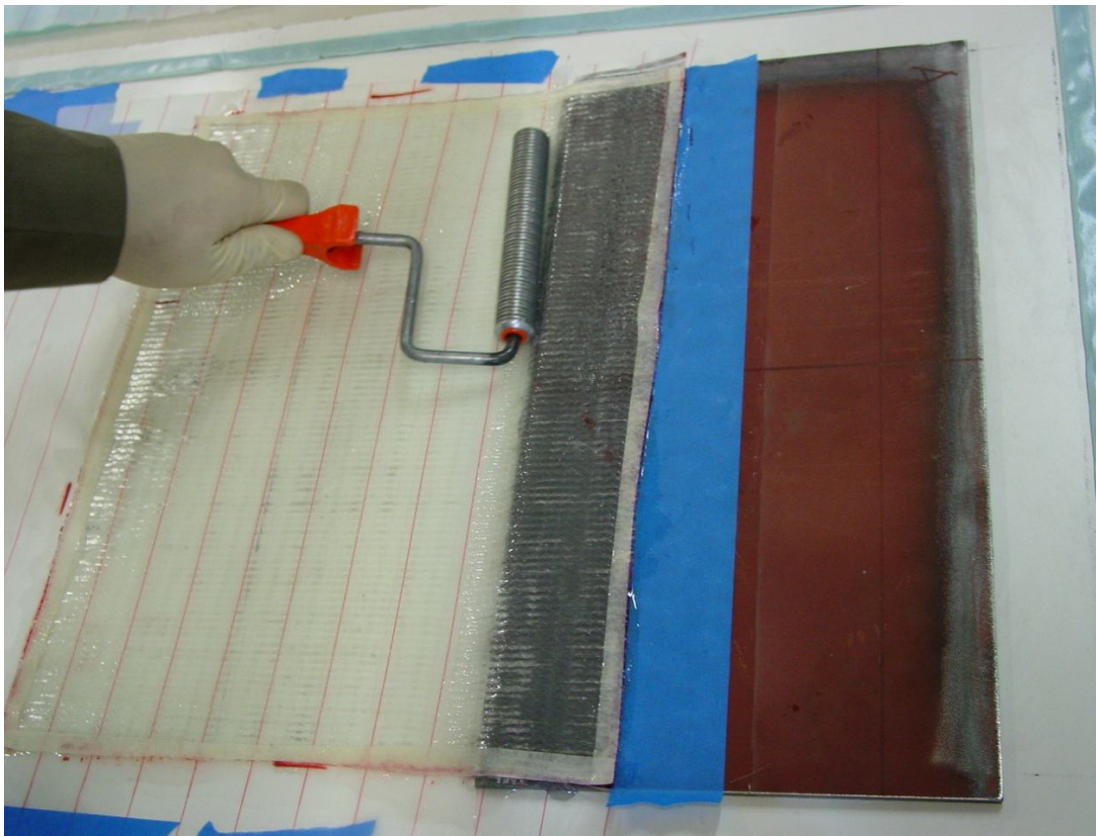
Πίνακας 3.17: Βάρη υαλοϋφασμάτων, ρητίνης, σκληρυντή

Βάρη	
$l_{ov} = 60\text{mm}$	
Βάρος υαλοϋφασμάτων (gr)	1980
Βάρος ρητίνης (gr)	804
Βάρος σκληρυντή (gr)	399
Βάρος μίγματος (gr)	1203
$l_{ov} = 120\text{mm}$	
Βάρος υαλοϋφασμάτων (gr)	3036
Βάρος ρητίνης (gr)	1292
Βάρος σκληρυντή (gr)	641
Βάρος μίγματος (gr)	1933

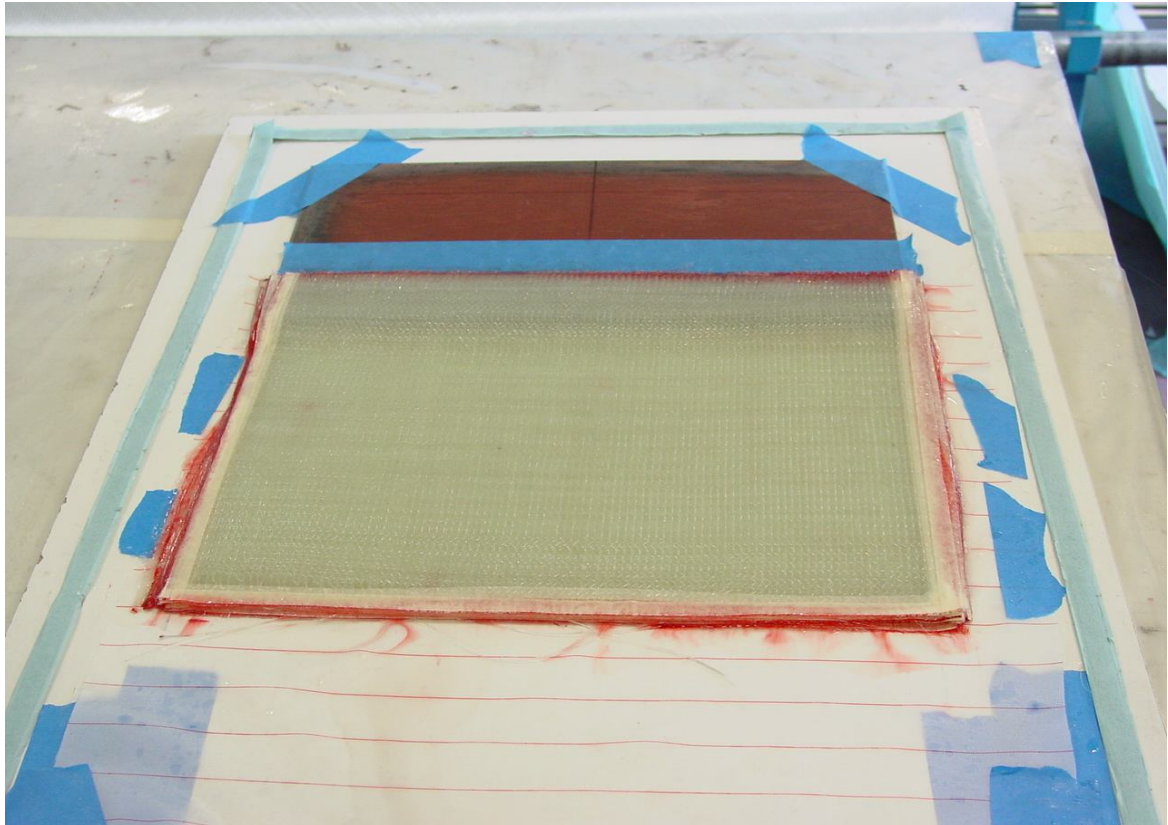
Η κατασκευή της σύνδεσης, και για τις δύο γεωμετρίες, έγινε πάνω σε μία πλάκα μελαμίνης η οποία αφού είχε προηγουμένως καθαριστεί με ακετόνη, γυαλίστηκε καλά με κεριό δημιουργώντας έτσι μία λεπτή στρώση αποκολλητικού μέσου (release film). Στη συνέχεια τοποθετήθηκε ένα φύλλο αποκολλητικού υφάσματος ανάμεσα στη μελαμίνη και στην υπό κατασκευή σύνδεση με στόχο να επιτευχθεί τραχιά επιφάνεια στο πολύστρωτο για να έχουμε καλύτερη συνάφεια μεταξύ του πρώτου και του δεύτερου μέρους του πολύστρωτου (Σχήμα 3.14 και 3.15). Η επιφάνεια του χάλυβα στην περιοχή αλληλοεπικάλυψης καθαρίστηκε με τη χρήση διαλύματος Loctite 7063 για να αφαιρεθούν τα ίχνη από σκόνη λίπη και σκουριά. Έπειτα υγρή ρητίνη αναμεμιγμένη με καταλύτη και επιταχυντή εναποτέθηκε ελεύθερα πάνω στην επιφάνεια της μελαμίνης και στο μέρος του χάλυβα που συμμετέχει στην αλληλοεπικάλυψη και ξεκίνησε η επίστρωση του άνω μέρους του πολύστρωτου. Μετά την επίστρωση των έντεκα στρώσεων προστέθηκε η αποκολλητική φόδρα (peel-ply), η διάτρητη μεμβράνη (perforated foil) και το απορροφητικό ύφασμα. Ακολούθως πριν στερεοποιηθεί ακόμη το πολύστρωτο τοποθετήθηκε ένα ελαστικό διάφραγμα (μεμβράνη, σάκος), και στεγανοποιήθηκαν αεροστεγώς τα άκρα με την χρήση μονωτικής ταινίας (sealing tape). Έπειτα τέθηκε σε λειτουργία η αντλία κενού δημιουργώντας πίεση -0,6 bar στον στεγανοποιημένο χώρο απομακρύνοντας την περίσσεια ρητίνης που με ένα σύστημα σωλήνων αναρρόφησης οδηγείτο σε ένα δοχείο συγκράτησης αυτής (Σχήμα 3.16). Μετά την στερεοποίηση του πολύστρωτου αφαιρέθηκαν ο σάκος, η αποκολλητική φόδρα η διάτρητη μεμβράνη και το απορροφητικό ύφασμα. Οι συνθήκες περιβάλλοντος κατά την επίστρωση ήταν θερμοκρασία 23°C και υγρασία 45%.



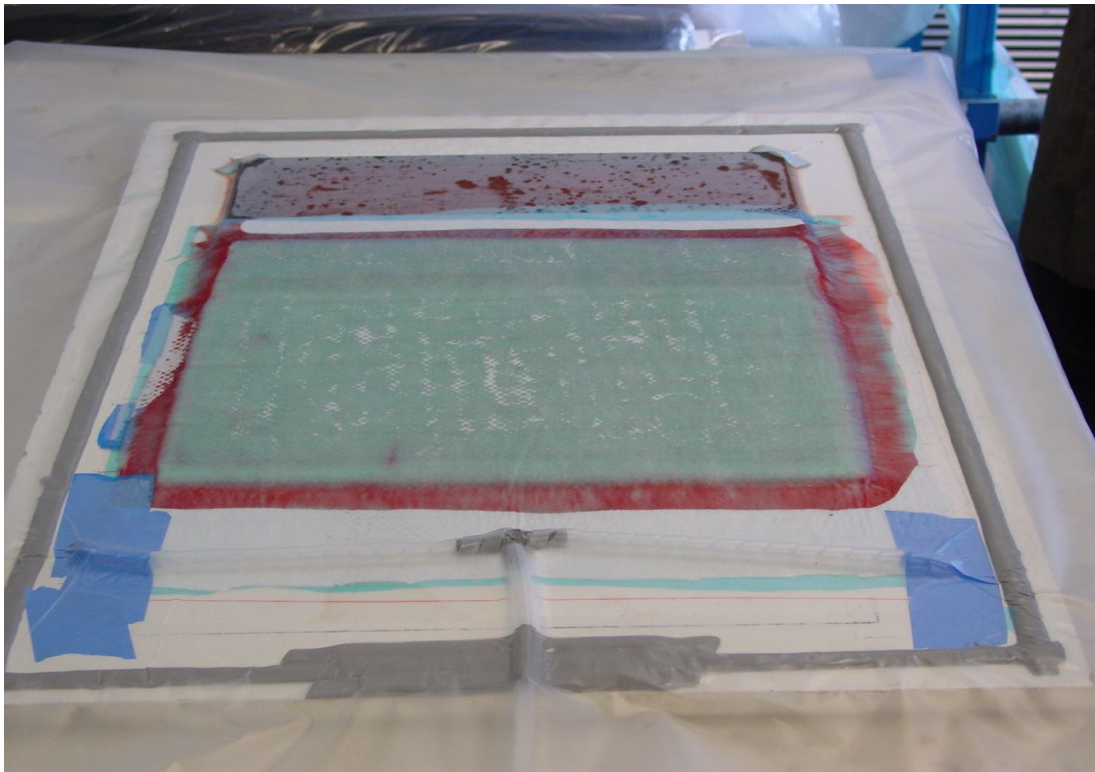
Σχήμα 3.13: Πρώτη φάση κατασκευής της σύνδεσης



Σχήμα 3.14: Επίστρωση με το χέρι



Σχήμα 3.15: Ολοκλήρωση επίστρωσης του πρώτου μέρους του πολύστρωτου



Σχήμα 3.16: Μορφοποίηση με σάκο κενού

Εξετάζοντας τη σύνδεση πριν την επίστρωση του δεύτερου τμήματος του πολύστρωτου διαπιστώθηκε ότι υπήρξε διαρροή ρητίνης κατά το vacuum bagging

στην επιφάνεια του χάλυβα. Επίσης η γωνία διαμόρφωσης του χάλυβα (45°) σε συνδυασμό με το υψηλό βάρος του υαλοϋφάσματος δεν εξασφάλισαν την πλήρη επαφή τους στο σημείο αυτό με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί κενό σε αυτή την περιοχή (Σχ. 3.17).



Σχήμα 3.17: Κενό μεταξύ πολυστρωτου και χάλυβα

Η επίστρωση των υπόλοιπων έντεκα στρώσεων (βλέπε Σχήμα 3.11) έγινε πάνω στην στερεοποιημένη πλέον επιφάνεια του πολυστρωτου ακολουθώντας την ίδια διαδικασία (Σχήμα 3.18)

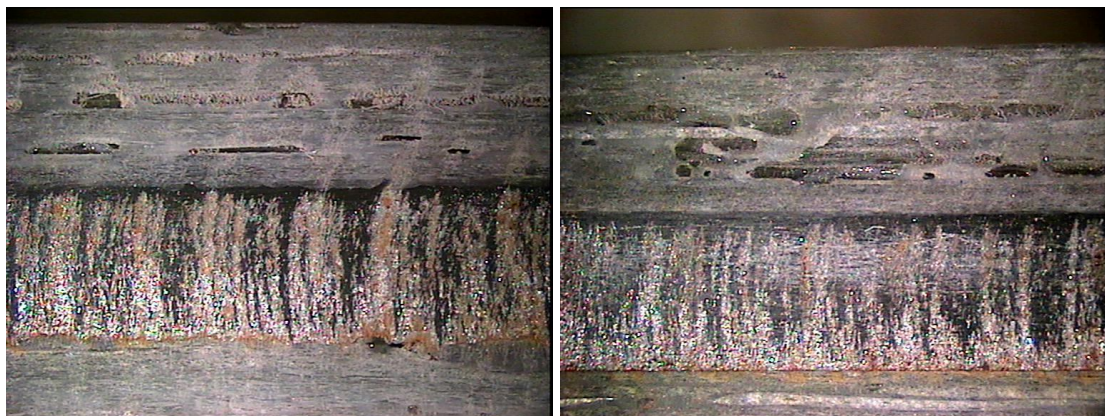


Σχήμα 3.18: Μορφοποίηση με σάκο κενού του δεύτερου τμήματος του πολύστρωτου



Σχήμα 3.19: Κατασκευασμένη σύνδεση

Μετά την κατασκευή και των δύο γεωμετριών της σύνδεσης κόπηκαν με υδροκοπή τα δοκίμια. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε έλεγχος της ποιότητας της εγκάρσιας επιφάνειας των πολύστρωτων με την χρήση στερεοσκοπίου. Από την εξέταση της επιφάνειας με το στερεοσκόπιο καταλήξαμε ότι το πρώτο μέρος του σύνθετου ήταν καλύτερης ποιότητας από το δεύτερο μέρος και στις δύο περιπτώσεις. Συγκρίνοντας τις επιφάνειες μεταξύ των δύο γεωμετριών συμπεράναμε ότι στο πολύστρωτο των δοκιμίων με μήκος αλληλοεπικάλυψης 120 mm επιτεύχθηκε καλύτερη ποιότητα. Ενδεικτικά στα Σχήματα 3.20 και 3.21 παρουσιάζονται εικόνες που λήφθηκαν με το στερεοσκόπιο. Η ύπαρξη του κενού στην ακμή του χαλύβδινου τμήματος στην περίπτωση της αλληλοεπικάλυψης των 60 mm είναι εμφανής στη δεξιά φωτογραφία του Σχήματος 3.21.



Σχήμα 3.20: Σύγκριση ποιότητας μεταξύ δοκιμίων των σειρών 120 και 60 αντίστοιχα



Σχήμα 3.21: Σύγκριση ποιότητας μεταξύ δοκιμίων των σειρών 120 και 60 αντίστοιχα

Στο Σχήμα 3.22 φαίνεται μία πλήρης πλάγια όψη της σύνδεσης για μήκος αλληλοεπικάλυψης ίσο με 60 mm.



Σχήμα 3.22: Πλάγια όψη δοκιμίου

3.6 ΕΠΙΤΕΥΧΘΕΙΣΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΠΟΛΥΣΤΡΩΤΟΥ

Μετά την κατασκευή των δοκιμίων κόπηκαν τέσσερα τεμάχια από το σύνθετο υλικό κάθε σύνδεση προς καύση με σκοπό τον προσδιορισμό της περιεκτικότητας σε ίνες των πολύστρωτων σύμφωνα με το πρότυπο ISO/DIS 1183-1.2:1999. Η περιεκτικότητα σε ίνες επί τοις εκατό υπολογίστηκε με βάση την εξίσωση (3.3) και τα

αποτελέσματα συγκεντρώνονται στον Πίνακα 3.18. Παρατηρείται πολύ καλή ομοιότητα των δύο πολύστρωτων που κατασκευάστηκαν.

Πίνακας 3.18: Περιεκτικότητα σε ίνες των πολύστρωτων

Περιεκτικότητα σε ίνες του πολύστρωτου				
$l_{ov} = 60\text{mm}$				
	m_1 (gr)	m_2 (gr)	m_3 (gr)	W_f (%)
Τεμάχιο 1	45.5640	51.1132	49.3740	68.659
Τεμάχιο 2	43.3661	49.1440	47.2385	67.361
Τεμάχιο 3	41.9536	48.9175	46.7093	68.373
Τεμάχιο 4	76.5667	81.4978	79.9560	68.740
Μέσος όρος	51.8626	57.6681	55.8195	68.283
$l_{ov} = 120\text{mm}$				
	m_1 (gr)	m_2 (gr)	m_3 (gr)	W_f (%)
Τεμάχιο 1	76.5656	83.1647	81.0103	67.353
Τεμάχιο 2	78.0863	85.0599	82.7204	66.453
Τεμάχιο 3	77.3664	84.2635	81.9030	65.775
Τεμάχιο 4	77.6514	83.2966	81.4481	67.257
Μέσος όρος	77.4174	83.9462	81.7705	66.710

Για τα πολύστρωτα που κατασκευάστηκαν δεν ήταν δυνατή η διεξαγωγή πειραματικών δοκιμών για τη μέτρηση των ιδιοτήτων τους. Το μέτρο ελαστικότητας στον X άξονα για το καθένα υπολογίστηκε θεωρητικά, βασιζόμενοι στη μετρηθείσα περιεκτικότητά τους σε ίνες και στα αποτελέσματα των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν σε προηγούμενη φάση για τον χαρακτηρισμό των ιδιοτήτων των δοκιμίων που είχαν κατασκευαστεί με τη μέθοδο μορφοποίησης με σάκο κενού (material characterisation - vacuum specimens). Ο υπολογισμός βασίζεται στον “νόμο των αναμίξεων” (rule of mixtures) και στους παρακάτω τύπους της μικρομηχανικής:

$$E_X = E_f V_f + E_m V_m \quad (3.4)$$

$$V_f = W_f \frac{\rho_c}{\rho_f} \quad (3.5)$$

$$V_m = W_m \frac{\rho_c}{\rho_m} \quad (3.6)$$

$$E_X = E_f W_f \frac{\rho_c}{\rho_f} + E_m W_m \frac{\rho_c}{\rho_m} \quad (3.7)$$

Όπου:

- E_X είναι το μέτρο ελαστικότητας κατά τη διεύθυνση του X άξονα
- E_f είναι το μέτρο ελαστικότητας των ινών
- E_m είναι το μέτρο ελαστικότητας της ρητίνης
- V_f και V_m είναι οι περιεκτικότητες κατά όγκο των ινών και της ρητίνης αντίστοιχα

- W_f και W_m είναι οι περιεκτικότητες κατά βάρος των ινών και της ρητίνης αντίστοιχα
- ρ_c είναι η πυκνότητα της μάζας του σύνθετου
- ρ_f είναι η πυκνότητα της μάζας των ινών
- ρ_m είναι η πυκνότητα της μάζας της ρητίνης

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

$$\frac{E'_X}{E_X} = \frac{E_f W_f \frac{\rho_c}{\rho_f} + E_m W_m \frac{\rho_c}{\rho_m}}{E_f W_f \frac{\rho_c}{\rho_f} + E_m W_m \frac{\rho_c}{\rho_m}} \quad (3.8)$$

Θεωρώντας ότι $\rho'_c = \rho_c$ ο λόγος 3.8 μετασχηματίζεται ως εξής :

$$\frac{E'_X}{E_X} = \frac{E_f W_f \frac{1}{\rho_f} + E_m W_m \frac{1}{\rho_m}}{E_f W_f \frac{1}{\rho_f} + E_m W_m \frac{1}{\rho_m}} \quad (3.9)$$

Οι τιμές των μεγεθών συγκεντρώνονται στον παρακάτω πίνακα (βλέπε και Πίνακα 3.13):

Πίνακας 3.19: Τιμές των μεγεθών της εξίσωσης

E_X (GPa)	39.217
E_f (GPa)	81.03
E_m (GPa)	2.03
W_f	77.19
W_m	22.81
ρ_f (g/cm ³)	1.12
ρ_m (g/cm ³)	2.62

Σύμφωνα με το λόγο (3.9) και τον πίνακα 3.19 προκύπτει:

Πίνακας 3.20: Τελικές τιμές των μέτρων ελαστικότητας των πολύστρωτων

	W'_f (%)	W'_m (%)	E'_X (GPa)
$l_{ov} = 60$ mm	68.283	31.717	35.028
$l_{ov} = 120$ mm	66.710	39.290	34.932

Ο πραγματικός λόγος ακαμψίας για τις συνδέσεις με βάση τις πραγματικές μετρήσεις υπολογίζεται από την εξίσωση 3.1 ως εξής:

Πίνακας 3.21: Επιτευχθείς λόγος ακαμψίας

	E_c (GPa)	E_m (GPa)	t_c (mm)	t_m (mm)	SR_T
$I_{ov} = 60$ mm	35.028	179.470	11.90	5.79	0.401
$I_{ov} = 120$ mm	34.932	179.470	11.84	5.78	0.399

όπου t_c , t_m , E_m εισήγαμε τον μέσο όρο των μετρήσεων (Πίνακες 3.5, 3.6, 3.8).

3.7 ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ, ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

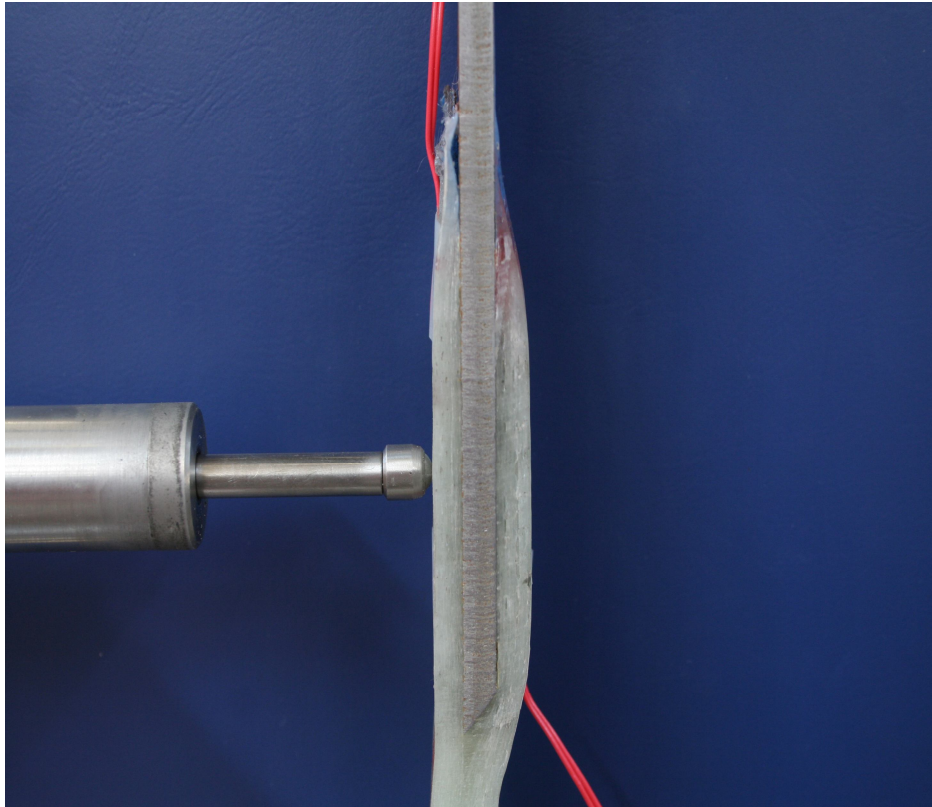
Τα δοκίμια της σύνδεσης δοκιμάστηκαν πειραματικά σε εφελκυσμό στην υδραυλική μηχανή δοκιμών MTS του εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών. Κατά τα πειράματα μετρήθηκαν οι παραμορφώσεις των επιμηκυνσιομέτρων, η μετατόπιση και η δύναμη που ασκήθηκε από τη μηχανή, καθώς και το βέλος κάμψης του δοκιμίου κατά τον Y άξονα. Για την καταγραφή του βέλους κάμψης χρησιμοποιήθηκε ένας γραμμικά μεταβλητός διαφορικός μετασχηματιστής (LVDT). Οι μετρήσεις έγιναν στο μέσο του μήκους αλληλοεπικάλυψης. Η μηχανή συνδέθηκε με μία συσκευή ενίσχυσης σήματος για την καλύτερη καταγραφή των μετρήσεων των επιμηκυνσιομέτρων, της μετατόπισης και της ασκούμενης δύναμης. Επίσης σε δύο δοκίμια πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ακουστικής εκπομπής με στόχο τον εντοπισμό τοπικών αστοχιών κατά τα πειράματα.

3.7.1 Διεξαγωγή πειραμάτων

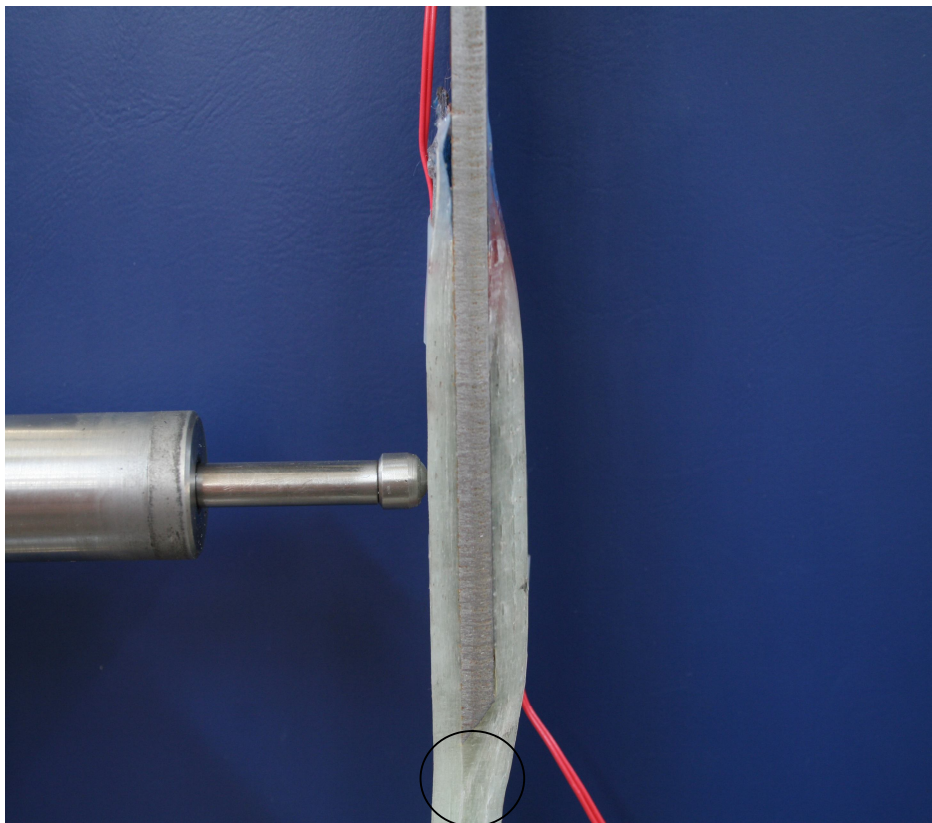
Μετά τη διάταξη των μετρητικών οργάνων τα δοκίμια εφαρμόστηκαν και ευθυγραμμίστηκαν στην μηχανή δοκιμών. Σε όλα τα πειράματα ο ρυθμός επιβολής του φορτίου ήταν 0.1 mm/min. Κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων γινόταν λήψη φωτογραφιών ανά πέντε δευτερόλεπτα με στόχο τον εντοπισμό τοπικών αστοχιών στο δοκίμιο. Η διάταξη μίας τυπικής δοκιμής φαίνεται στο Σχήμα 3.26. Ορισμένες από τις αστοχίες στο σύνθετο υλικό μπορούν να εντοπιστούν οπτικά από την αλλαγή χρώματος του πολύστρωτου στα σημεία αυτά. Στα Σχήματα 3.27 έως 3.29 βλέπουμε διαδοχικές εικόνες της εγκάρσιας διατομής της σύνδεσης. Η αλλαγή χρώματος στην εντός του κύκλου περιοχή στη δεύτερη εικόνα υποδηλώνει τοπική αστοχία, ενώ η τρίτη εικόνα δείχνει τη μορφή της τελικής αστοχίας της σύνδεσης.



Σχήμα 3.26: Διάταξη Πειράματος

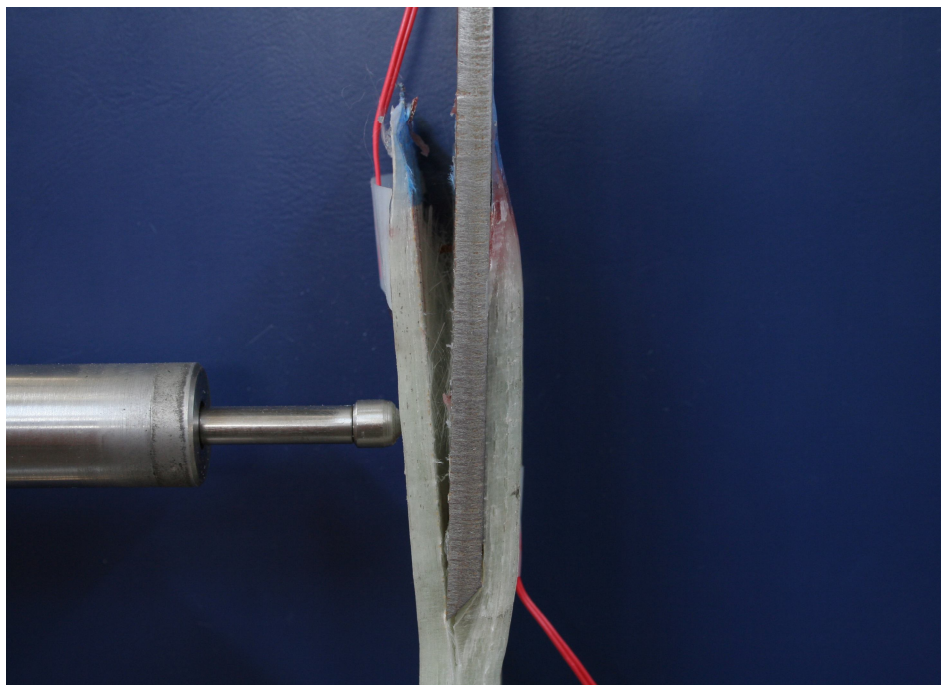


Σχήμα 3.27



Σχήμα 3.28

Όλα τα δοκίμια αστόχησαν με τον ίδιο τρόπο. από την διάδοση ρωγμής που ξεκίνησε από το άκρο της διεπιφάνειας μεταξύ του μετάλλου και του δεύτερου τμήματος του πολύστρωτου.



Σχήμα 3.29

3.7.2 Μέθοδος εντοπισμού θορύβου, ακουστικές μετρήσεις

Ο εντοπισμός θορύβου αποτελεί μία αποτελεσματική μέθοδο για την μελέτη υλικών που παραμορφώνονται υπό τάση. Η εκπομπή θορύβου ορίζεται σαν ένα παροδικό ελαστικό κύμα που δημιουργείται από τη στιγμιαία έκλυση ενέργειας σε ένα υλικό. Με τη χρήση της συγκεκριμένης μεθόδου μπορούμε να “ακούσουμε” τις τοπικές αστοχίες κατά τη διάρκεια ενός πειράματος. Με αυτόν τον τρόπο εντοπίζονται αστοχίες μικρής κλίμακας πολύ πριν την τελική αστοχία του υλικού.

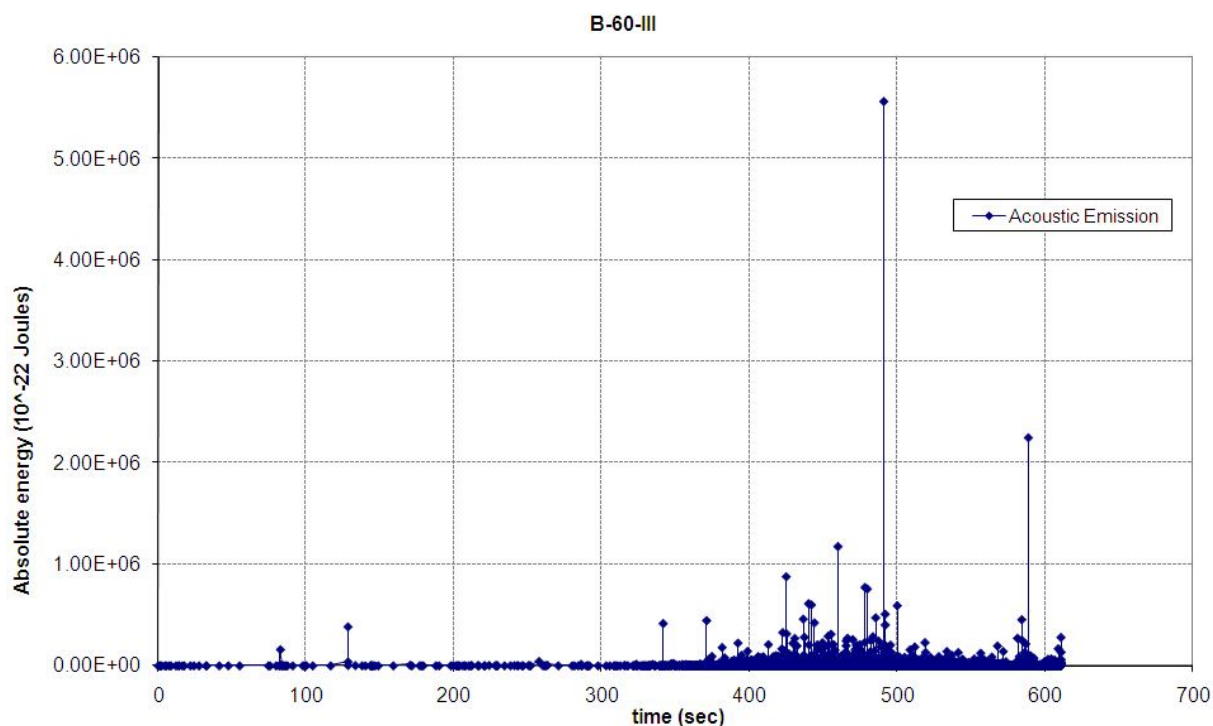
Η διάταξη αποτελείται από δύο πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες, οι οποίοι τοποθετούνται πάνω στην επιφάνεια. Πριν την τοποθέτησή τους, έχει προηγηθεί η επάλειψη μίας μικρής στρώσης γλυκερίνης η οποία εξασφαλίζει τη σωστή μετάδοση του ηχητικού σήματος από την επιφάνεια στους αισθητήρες. Οι αισθητήρες θα πρέπει να είναι ακίνητοι κατά τη διάρκεια των μετρήσεων και να βρίσκονται σε πλήρη επαφή με την επιφάνεια που τοποθετούνται.

Στη συνέχεια οι αισθητήρες συνδέονται μέσω καλωδίων σε μία κάρτα ενίσχυσης και επεξεργασίας σήματος. Η κάρτα που χρησιμοποιήθηκε κατά τα πειράματα ήταν μία δικάναλη PCI-2 η οποία συνδέεται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή.

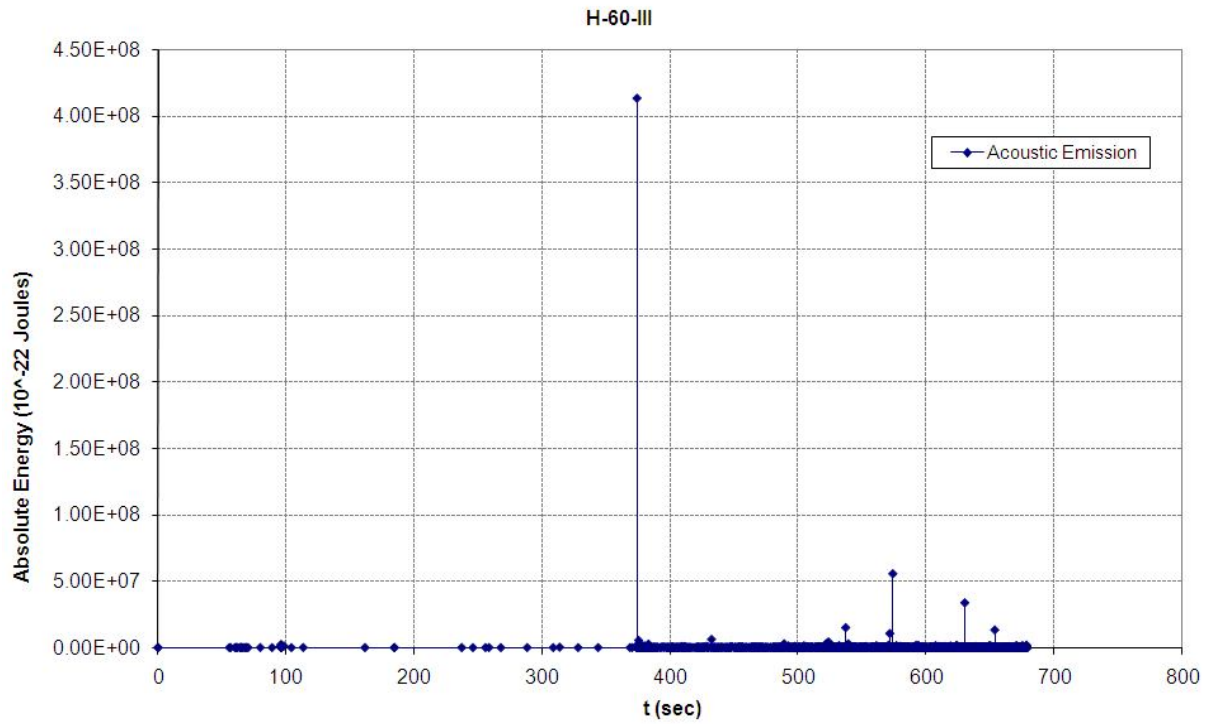
Στον υπολογιστή είναι εγκατεστημένο πρόγραμμα για την επεξεργασία των μετρήσεων.

Πριν τη διεξαγωγή του πειράματος πρέπει να οριστεί μέσω του προγράμματος ένα όριο έντασης για τα εισερχόμενα σήματα. Αυτό γίνεται για τον περιορισμό των δεδομένων καθώς όποιο σήμα έχει χαμηλότερη ένταση από την προκαθορισμένη τιμή δεν λαμβάνεται υπ' όψιν από το πρόγραμμα.

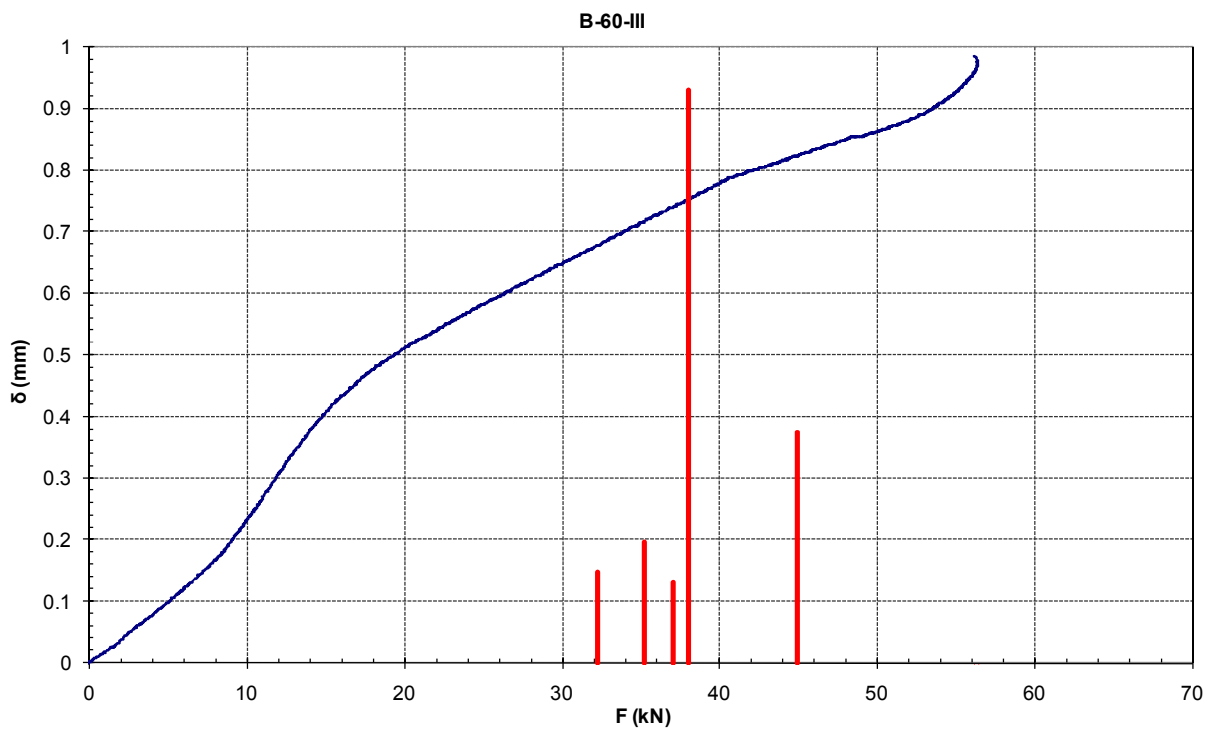
Το πρόγραμμα μετράει την απόλυτη ενέργεια των σημάτων συναρτήσει του χρόνου. Η μέθοδος εκπομπής θορύβου εφαρμόστηκε κατά τις πειραματικές δοκιμές των δοκιμίων B-60-III και H-60-III. Στα Σχήματα 3.30 και 3.31 παρουσιάζονται οι μετρήσεις που λήφθηκαν κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων, πριν την τελική αστοχία των δοκιμίων. Οι μεγαλύτερες τιμές που μετρήθηκαν μαζί με τις μετρήσεις λόγω της τελικής αστοχίας των δοκιμίων χαράχθηκαν μαζί με το βέλος κάμψης κατά τον Υ άξονα για κάθε δοκίμιο για να εξακριβωθεί η επίδραση των αστοχιών στο βέλος κάμψης (Σχήματα 3.32 και 3.33).



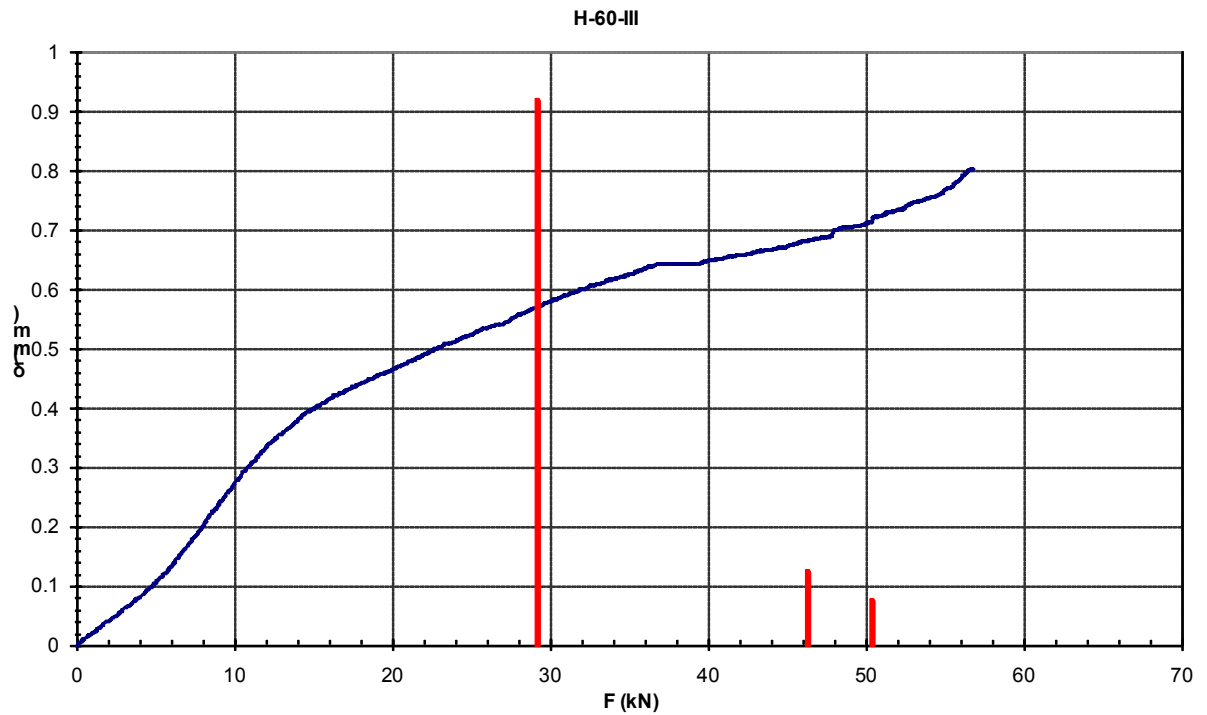
Σχήμα 3.30: Διάγραμμα ακουστικών μετρήσεων για το δοκίμιο B-60-III



Σχήμα 3.31: Διάγραμμα ακουστικών μετρήσεων για το δοκίμιο H-60-III



Σχήμα 3.32: Διάγραμμα ακουστικών μετρήσεων και βέλους κάμψης για το δοκίμιο B-60-III

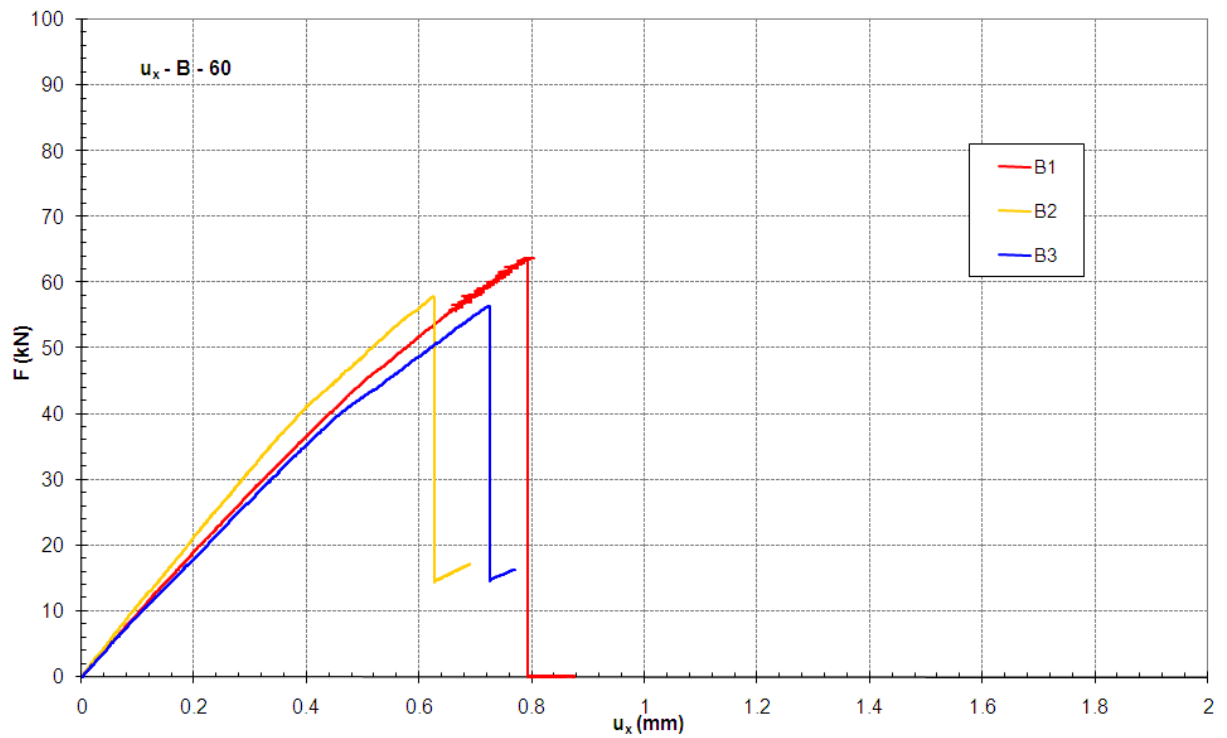


Σχήμα 3.33: Διάγραμμα ακουστικών μετρήσεων και βέλους κάμψης για το δοκίμιο H-60-III

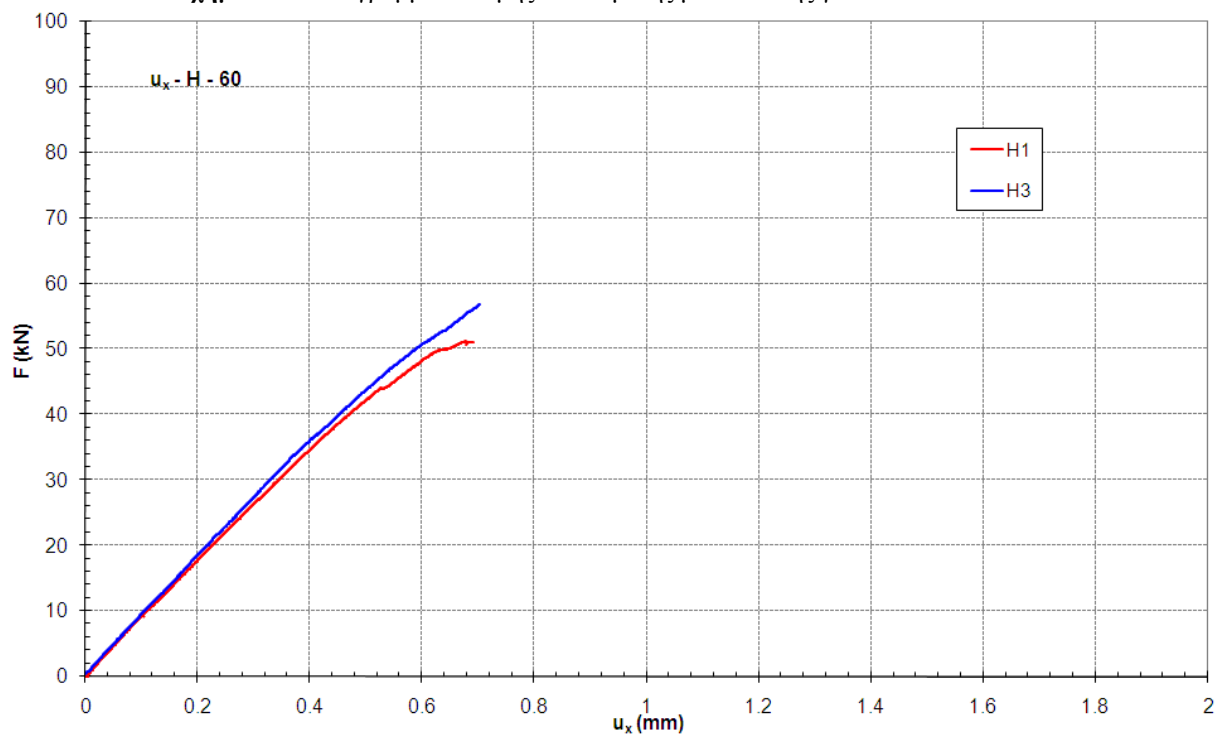
Η επίδραση των τοπικών αστοχιών που καταγράφηκαν με τη μέθοδο εντοπισμού θορύβου στο βέλος κάμψης των δοκιμίων δεν μπόρεσε να εξακριβωθεί.

3.7.3 Αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών

Τα Σχήματα 3.34 έως 3.37 παρουσιάζουν τα συγκεντρωτικά διαγράμματα δύναμης – αξονικής μετατόπισης για όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν.

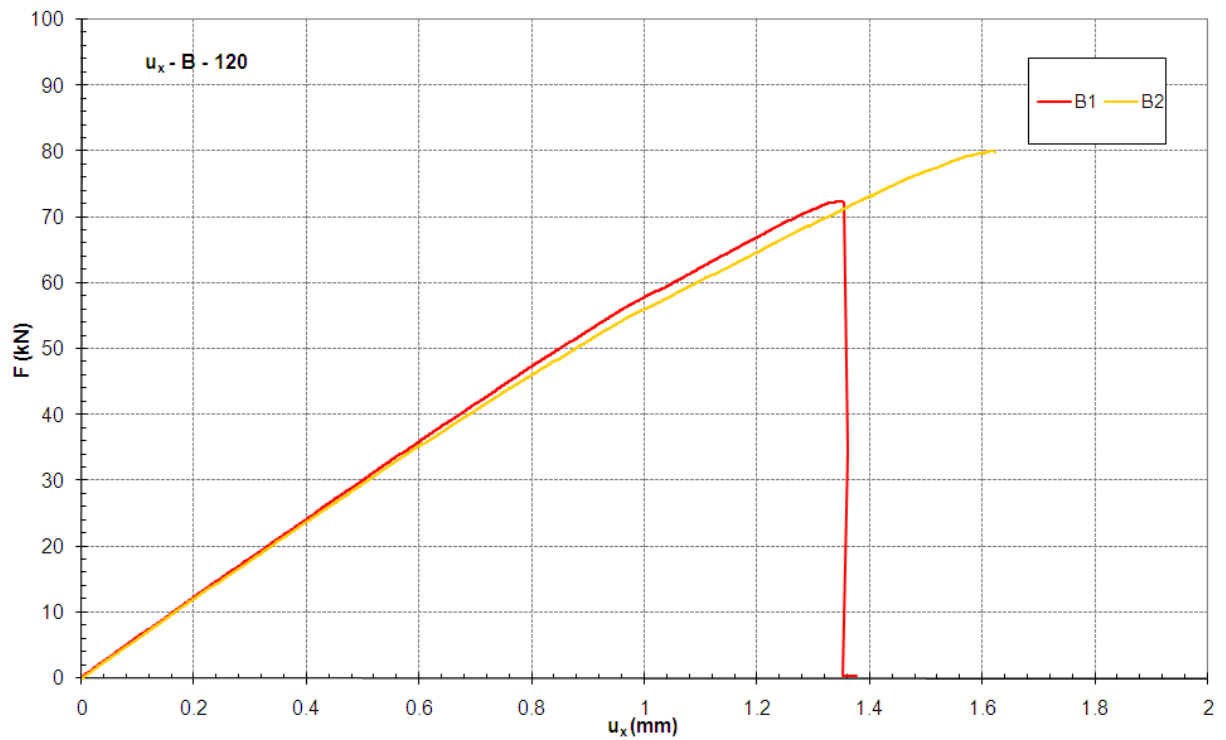


Σχήμα 3.34: Διάγραμμα δύναμης-ασκούμενης μετατόπισης για τα B-60

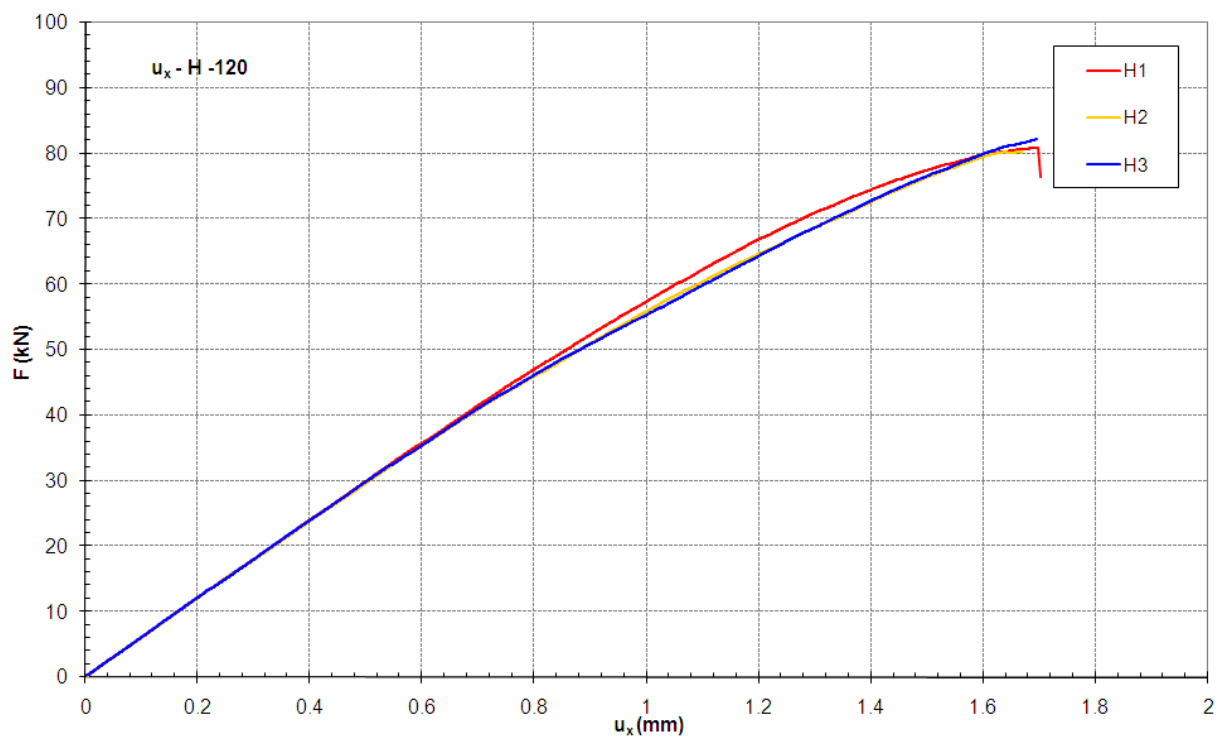


Σχήμα 3.35: Διάγραμμα δύναμης-ασκούμενης μετατόπισης για τα H-60

Η ασκούμενη μετατόπιση του δοκιμίου H-60-II δεν καταγράφηκε λόγω τεχνικής βλάβης.



Σχήμα 3.36: Διάγραμμα δύναμης-ασκούμενης μετατόπισης για τα B-120

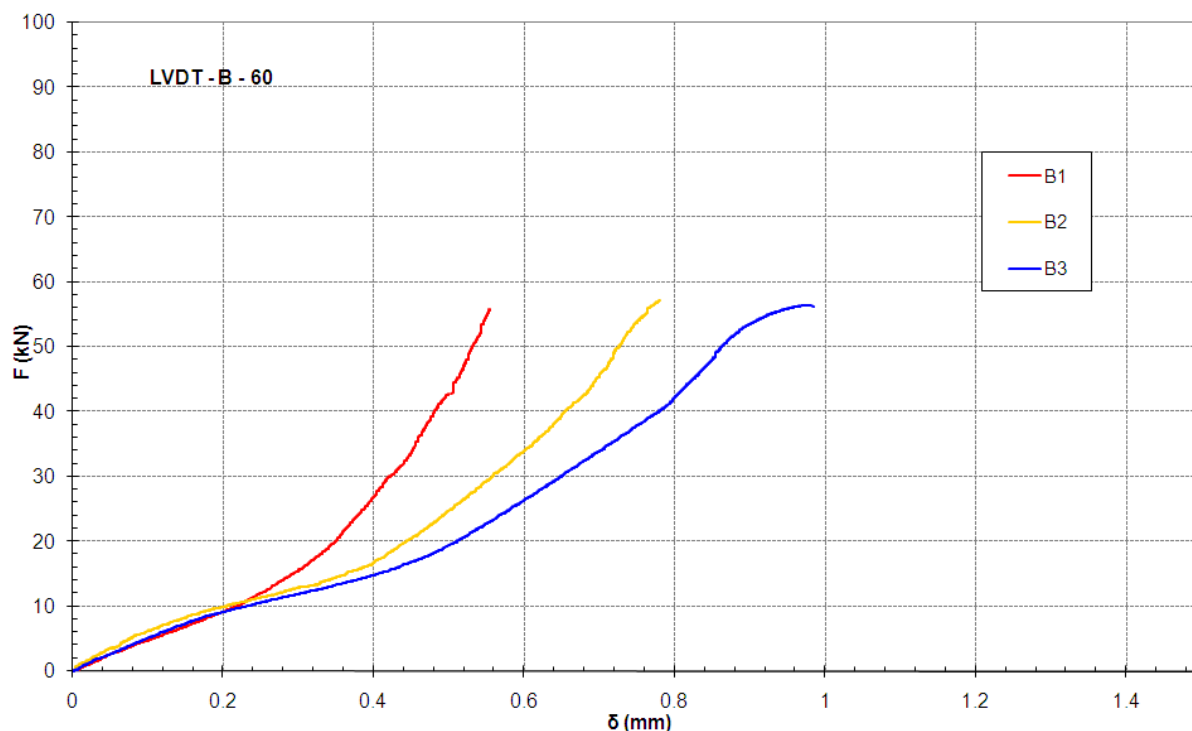


Σχήμα 3.37: Διάγραμμα δύναμης-ασκούμενης μετατόπισης για τα H-120

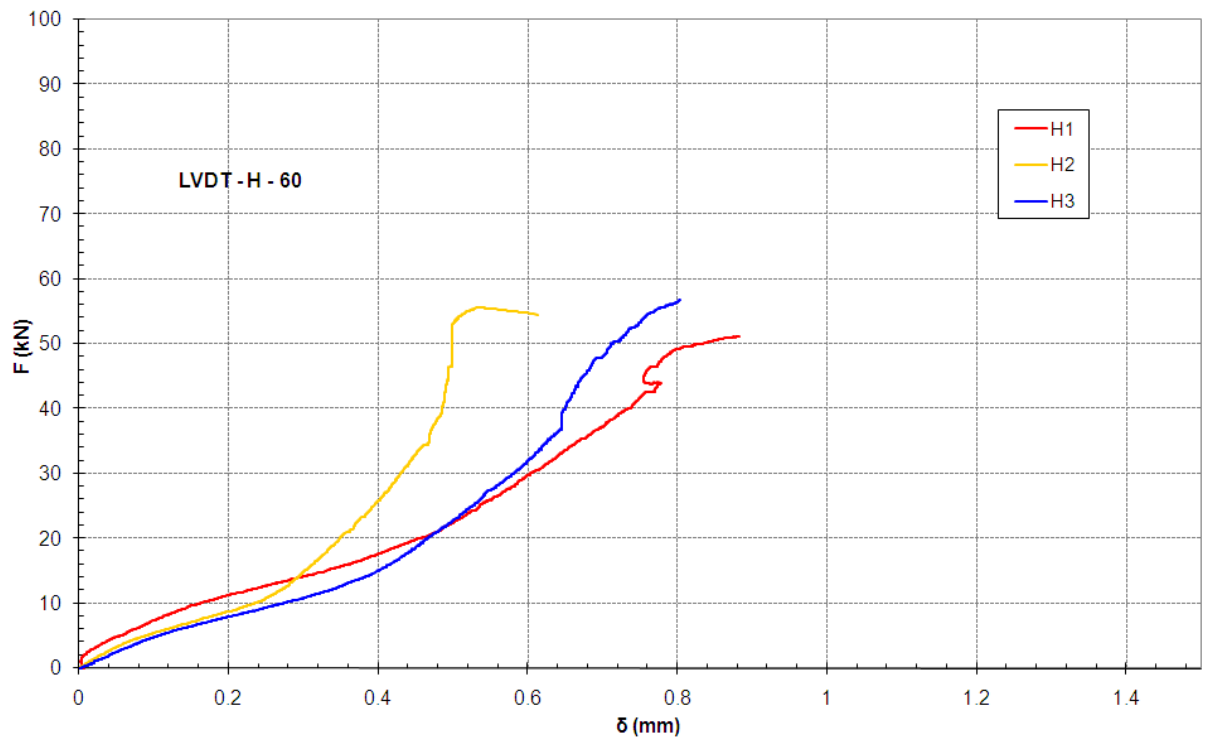
Εξετάζοντας τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι οι καμπύλες μεταξύ των δοκιμών κάθε σειράς ταυτίζονται. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει την πολύ καλή επαναληψιμότητα των μετρήσεων. Τα δοκίμια που υπέστησαν επιφανειακή κατεργασία του μετάλλου με αεροματσάκονο παρουσιάζουν καλύτερη σύγκλιση όσον αφορά το φορτίο θραύσης για την εκάστοτε γεωμετρία συγκριτικά με τα

δοκίμια που υπέστησαν αμμοβολή. Αυτό φαίνεται και από τα σχετικά αριθμητικά αποτελέσματα των φορτίων θραύσης που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.22. Ο πίνακας αυτός δείχνει επίσης ότι ο διπλασιασμός του μήκους αλληλοεπικάλυψης της σύνδεσης οδήγησε σε μία αύξηση του μέσου φορτίου θραύσης ίση με 28% περίπου για την περίπτωση της επεξεργασίας με αμμοβολή και ίση με 50% περίπου για την περίπτωση επεξεργασίας με αεροματσάκονο. Από τα Σχήματα 3.30 έως 3.33 φαίνεται επίσης ότι τα δοκίμια με μήκος αλληλοεπικάλυψης 60 mm παρουσιάζουν μεγαλύτερη αξονική ακαμψία από αυτά με μήκος αλληλοεπικάλυψης 120 mm. Το γεγονός αυτό οφείλεται βέβαια κατά κύριο λόγο στο μικρότερο συνολικό μήκος των πρώτων σε σχέση με τα δεύτερα. Συγκρίνοντας τέλος τα δοκίμια ίδιας γεωμετρίας ως προς το είδος της επιφανειακής κατεργασίας του μετάλλου, παρατηρούμε ότι αυτή δεν επιδρά στη συμπεριφορά των δοκιμίων.

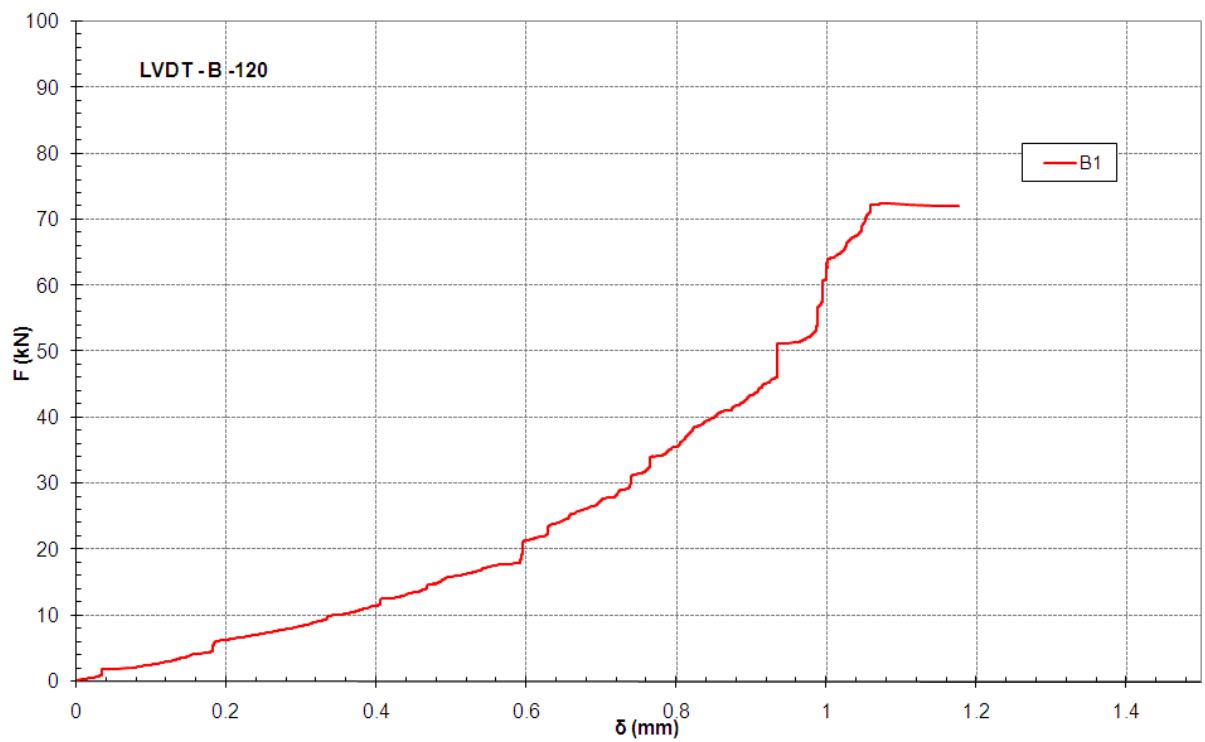
Τα Σχήματα 3.38 έως 3.41 παρουσιάζουν τη μεταβολή του πλάγιου βέλους κάμψης κατά τη διεύθυνση Y συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου.



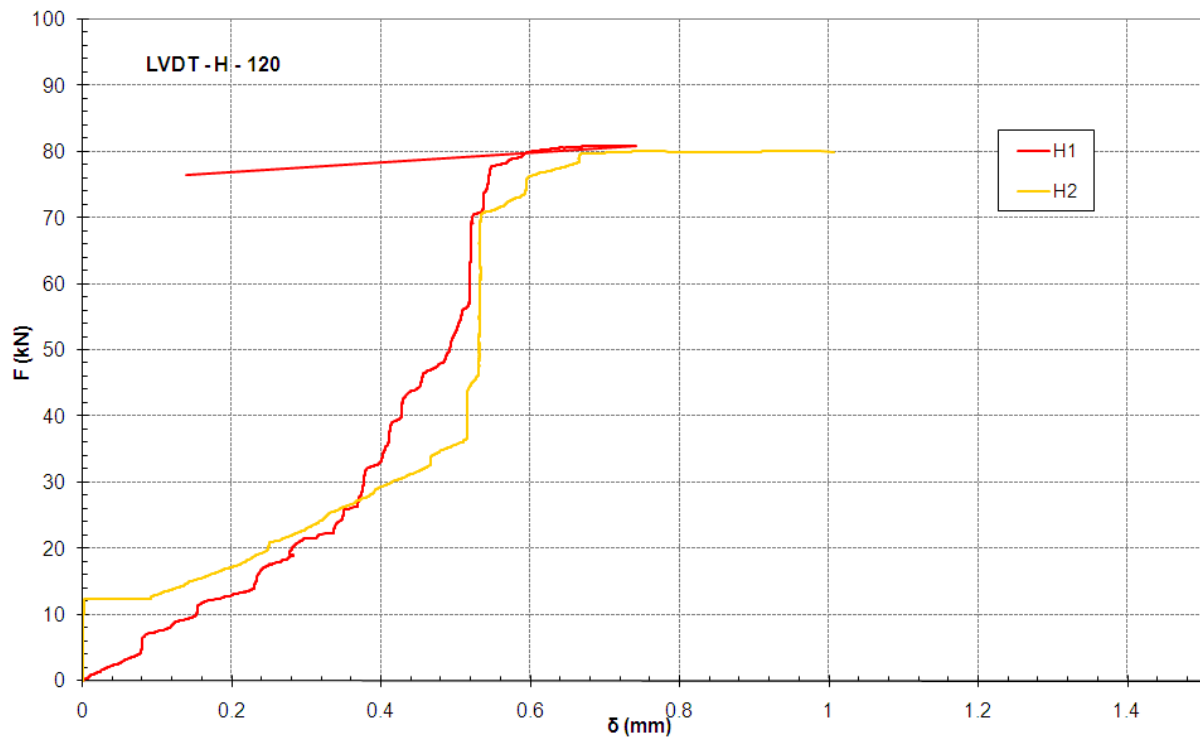
Σχήμα 3.38: Διάγραμμα δύναμης-βέλους κάμψης κατά τον Y άξονα για τα B-60



Σχήμα 3.39: Διάγραμμα δύναμης-βέλους κάμψης κατά τον Y άξονα για τα H-60



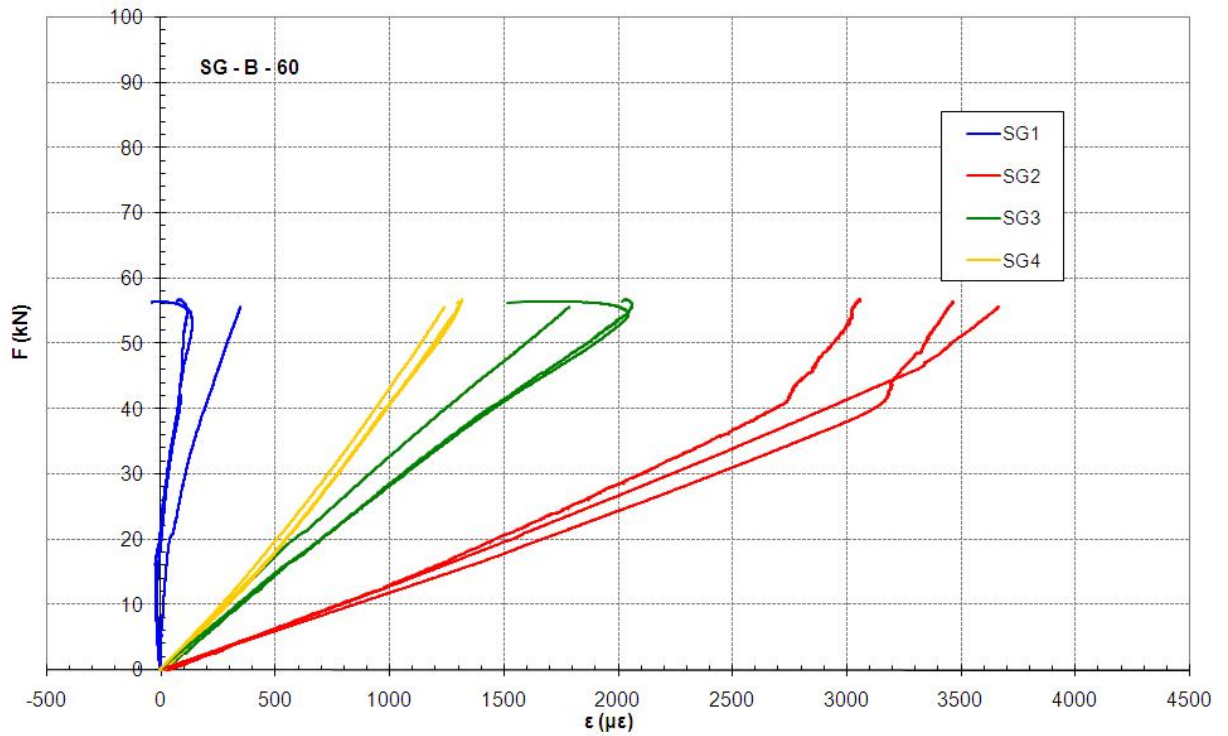
Σχήμα 3.40: Διάγραμμα δύναμης-βέλους κάμψης κατά τον Y άξονα για τα B-120



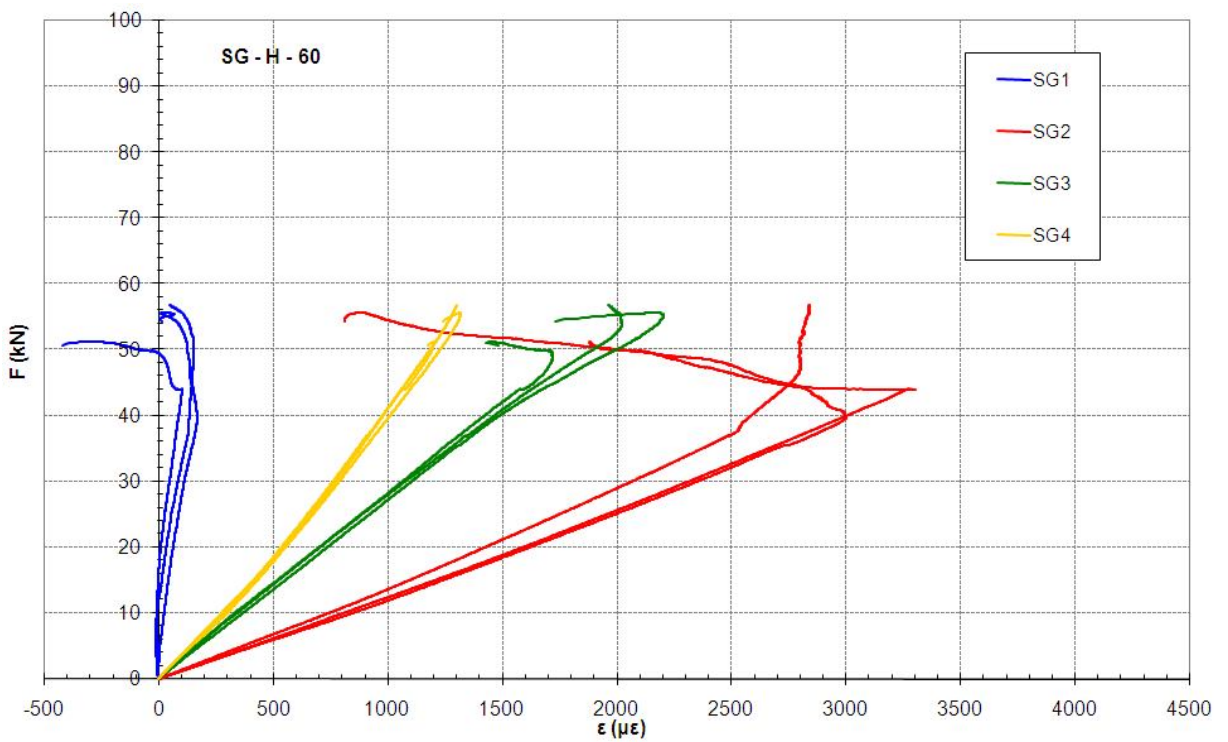
Σχήμα 3.41: Διάγραμμα δύναμης-βέλους κάμψης κατά τον Y άξονα για τα H-120

Από τα σχήματα αυτά παρατηρούμε ότι υπάρχει σημαντική απόκλιση μεταξύ των τιμών που μετρήθηκαν κατά τα πειράματα. Οι καμπύλες των δοκιμών με μήκος αλληλοεπικάλυψης ίσο με 60 mm για φορτία έως και 12 kN παρουσιάζουν την ίδια συμπεριφορά με μικρές αποκλίσεις. Στη συνέχεια, αυξανόμενου του επιβαλλόμενου φορτίου, οι καμπύλες αποκλίνουν. Στην περίπτωση των δοκιμών με μήκος αλληλοεπικάλυψης ίσο με 120 mm οι καμπύλες είναι λιγότερο ομαλές πιθανότατα εξαιτίας των μεγαλύτερων αξονικών μετατοπίσεων αυτής της σειράς των δοκιμών. Λόγω τεχνικής βλάβης δεν καταγράφηκαν οι τιμές του βέλους κάμψης του B-120-II. Από τα διαγράμματα επαληθεύεται ότι το βέλος κάμψης αυξάνεται αυξανόμενου του συνολικού μήκους της σύνδεσης.

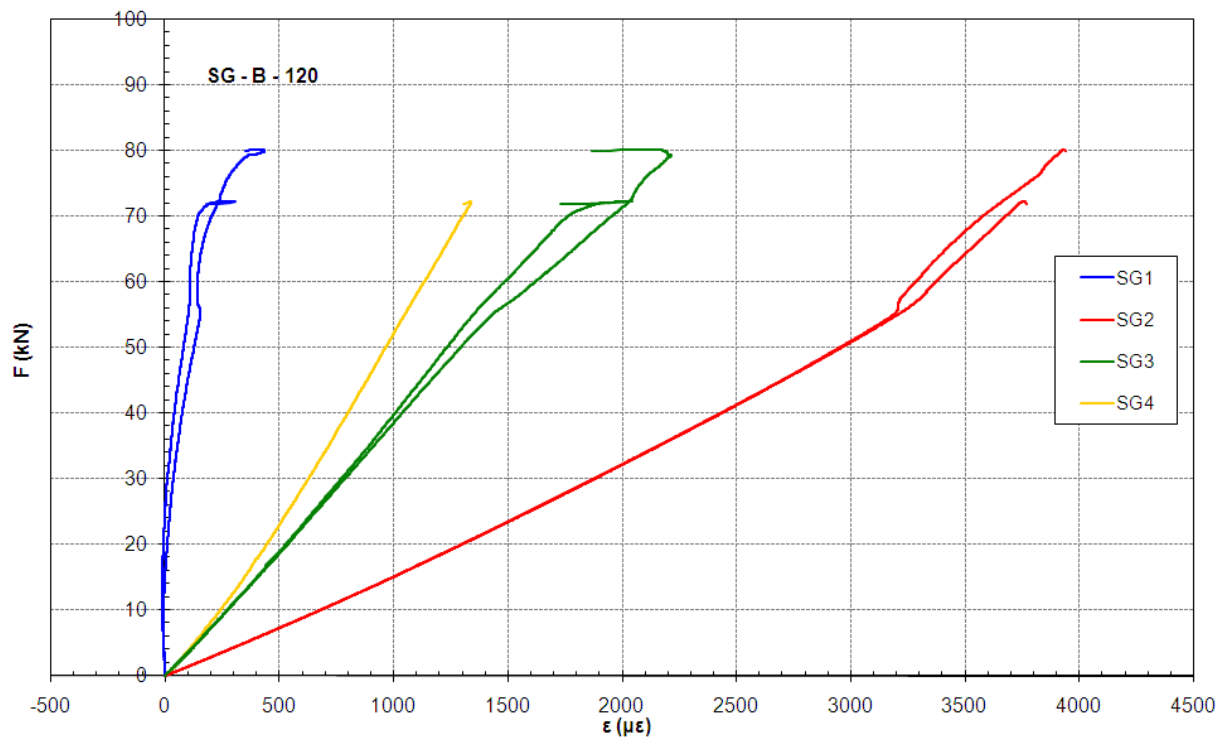
Στα Σχήματα 3.42 έως 3.45 παρουσιάζονται οι μεταβολές των μετρημένων παραμορφώσεων στις θέσεις 1 έως 4 (βλέπε Σχήμα 3.5) συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου.



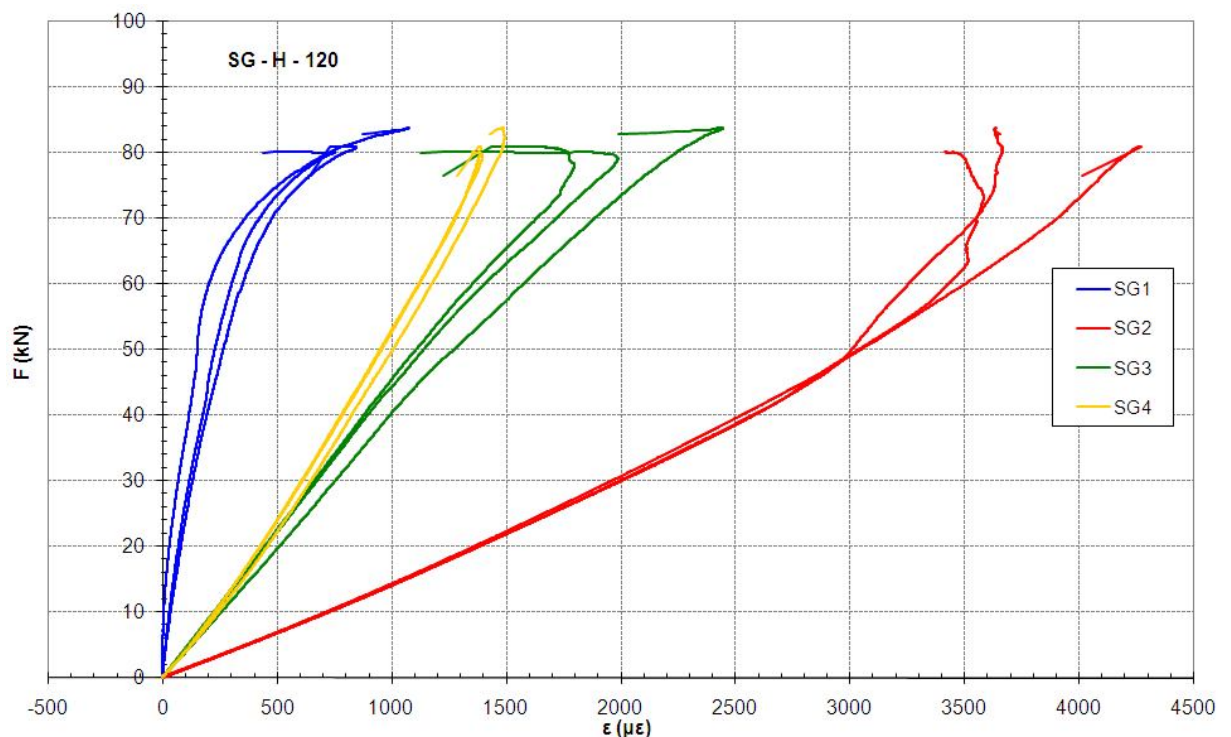
Σχήμα 3.42: Διάγραμμα δύναμης-παραμορφώσεων για τα B-60



Σχήμα 3.43: Διάγραμμα δύναμης-παραμορφώσεων για τα H-60



Σχήμα 3.44: Διάγραμμα δύναμης-παραμορφώσεων για τα B-120



Σχήμα 3.45: Διάγραμμα δύναμης-παραμορφώσεων για τα H-120

Για κάθε σειρά δοκιμών παρατηρείται αρκετά έως πολύ καλή επαναληψιμότητα μεταξύ των μετρήσεων. Συγκεκριμένα, για τα δοκίμια της σειράς 120 η σύγκριση μεταξύ των καμπυλών είναι λίγο καλύτερη συγκριτικά με τις καμπύλες των δοκιμών με μήκος αλληλοεπικάλυψης 60 mm ειδικά για τη θέση 2. Οι

υψηλότερες τιμές των παραμορφώσεων μετρήθηκαν για κάθε περίπτωση στο σύνθετο υλικό για κάθε πείραμα (θέση 2) όπως αναμενόταν λόγω του χαμηλότερου μέτρου ελαστικότητας. Στην περιοχή της αλληλοεπικάλυψης η κατανομή των παραμορφώσεων διαφέρει σημαντικά μεταξύ του πρώτου και του δεύτερου μέρους του σύνθετου. Στη θέση 1 καταγράφηκαν οι μικρότερες παραμορφώσεις οι οποίες στα αρχικά στάδια της φόρτισης είχαν αρνητικές τιμές αυτό οφείλεται στη δημιουργία βέλους κάμψης κατά τη φόρτιση λόγω ασυμμετρίας της σύνδεσης, το οποίο προκαλεί θλίψη σε αυτήν την περιοχή. Στην περίπτωση των δοκιμών με $l_{ov}=120$ mm οι τιμές αυξάνονται έως ότου επέλθει θραύση. Αντίθετα, στην περίπτωση των δοκιμών με $l_{ov}=60$ mm σημειώνεται πτώση των παραμορφώσεων πριν την οριστική αστοχία των δοκιμών. Σύγκριση των παραμορφώσεων μεταξύ των θέσεων 1 και 3 φανερώνει ότι το κύριο μέρος του φορτίου μεταφέρεται από το χάλυβα προς το σύνθετο υλικό μέσω του τμήματος εκείνου του πολύστρωτου που επιστρώνεται δεύτερο, καταπονώντας έτσι πολύ περισσότερο την αντίστοιχη διεπιφάνεια μετάλλου/πολύστρωτου. Αυτή είναι η αιτία για την οποία όλες οι αστοχίες παρουσιάστηκαν σ' αυτήν την διεπιφάνεια, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.29. Οι παραμορφώσεις στη θέση 3 ήταν επίσης μεγαλύτερες από αυτές που μετρήθηκαν στον χάλυβα (SG4) και μικρότερες από αυτές στη θέση 2. Κατά τα πειράματα λόγω τεχνικής βλάβης διεκόπησαν οι μετρήσεις των παραμορφώσεων του δοκιμίου B-60-I λίγο πριν τη θραύση.

Πίνακας 3.22: Φορτίο και αξονική μετατόπιση κατά την αστοχία

l _{ov} = 60mm							
	F (kN)	u _x (mm)	δ (mm)	SG1 (μ€)	SG2 (μ€)	SG3 (μ€)	SG4 (μ€)
B-60-I	63.473	0.792	0.792	-	-	-	-
B-60-II	57.600	0.626	0.800	73.706	3059.261	2021.005	1316.701
B-60-III	56.164	0.725	0.984	-37.308	3467.829	1517.801	1297.592
60-B Average	59.079	0.714	0.859	18.199	3263.545	1769.403	1307.147
SDV	3.873	0.084	0.108	78.499	288.901	355.819	13.512
COV	6.555	11.725	12.631	431.336	8.852	20.110	1.034
H-60-I	50.736	0.680	0.880	-416.758	1886.332	1486.863	1179.299
H-60-II	55.050	-	0.612	13.649	810.768	1730.730	1242.995
H-60-III	56.764	0.703	0.803	48.227	2480.872	1963.678	1303.052
60-H Average	54.183	0.691	0.765	-118.294	1725.991	1727.090	1241.782
SDV	3.106	0.017	0.138	259.055	846.519	238.429	61.886
COV	5.732	2.396	18.002	-218.993	49.045	13.805	4.984
l _{ov} = 120mm							
	F (kN)	u _x (mm)	δ (mm)	SG1 (μ€)	SG2 (μ€)	SG3 (μ€)	SG4 (μ€)
B-120-I	71.956	1.353	1.175	184.720	3770.844	1734.844	1310.332
B-120-II	79.848	1.622	-	354.882	3941.005	1871.773	-
120-B Average	75.902	1.488	1.175	269.801	3855.925	1803.309	1310.332
SDV	5.580	0.190	-	120.322	120.322	96.823	-
COV	7.352	12.776	-	44.597	3.120	5.369	-
H-120-I	80.816	1.697	0.742	642.427	4012.891	1225.706	1290.313
H-120-II	80.104	1.667	1.007	437.687	3416.872	1129.251	1348.550
H-120-III	83.012	1.842	-	869.915	3654.370	1992.796	1433.175
120-H Average	81.311	1.735	0.875	650.009	3694.711	1449.251	1357.346
SDV	1.516	0.094	0.187	216.214	300.050	473.188	71.836
COV	1.864	5.396	21.405	33.263	8.121	32.651	5.292

3.8 ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Εξετάζοντας τα αποτελέσματα των πειραμάτων καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα :

- Παρατηρούμε ότι είχαμε πολύ καλή επαναληψιμότητα της αξονικής ακαμψίας μεταξύ των δοκιμών κάθε γεωμετρίας.
- Για το βέλος κάμψης σημειώθηκε επαναληψιμότητα για ένα πολύ μικρό εύρος τιμών. Αυτό οφείλεται πιθανότατα στη διαφορετική θέση και φύση των τοπικών αστοχιών που προηγήθηκαν της θραύσης για κάθε δοκίμιο.
- Οι υψηλότερες τιμές των παραμορφώσεων μετρήθηκαν στο σύνθετο υλικό (θέση 2). Στην περιοχή της αλληλοεπικάλυψης η κατανομή των παραμορφώσεων διαφέρει σημαντικά μεταξύ του πρώτου και του δεύτερου μέρους του σύνθετου. Συγκεκριμένα στη θέση 1 καταγράφηκαν οι μικρότερες

παραμορφώσεις οι οποίες στα αρχικά στάδια της φόρτισης είχαν αρνητικές τιμές. Αυτό οφείλεται στην δημιουργία βέλους κάμψης κατά τη φόρτισή λόγω ασυμμετρίας της σύνδεσης το οποίο προκαλεί θλίψη σε αυτήν την περιοχή. Οι παραμορφώσεις στη θέση 3 ήταν μεγαλύτερες από αυτές που μετρήθηκαν στον χάλυβα (θέση 4) και μικρότερες από αυτές στην θέση 2. Τα αποτελέσματα είναι λογικά δεδομένου ότι το μέτρο ελαστικότητας του σύνθετου είναι μικρότερο από αυτό του χάλυβα.

- Κρίνοντας από την σύγκλιση των καμπυλών δύναμης παραμόρφωσης συμπεραίνουμε ότι το πολύστρωτο που κατασκευάστηκε για τα δοκίμια της σειράς 120 ήταν καλύτερης ποιότητας από αυτό που κατασκευάστηκε για τη σειρά 60.

- Τα δοκίμια με μήκος αλληλοεπικάλυσης 120 mm είχαν κατά 28% περίπου μεγαλύτερη αντοχή σε θραύση από αυτά των 60 mm.

- Σχετικά με το βέλος κάμψης επαληθεύεται ότι το βέλος κάμψης αυξάνεται με την αύξηση του συνολικού μήκους της σύνδεσης.

- Όσον αφορά στην επίδραση της επιφανειακής κατεργασίας του μετάλλου τα δοκίμια με $l_{ov}=60$ mm που είχαν κατεργαστεί με αμμοβολή παρουσίασαν περίπου 10% μεγαλύτερο φορτίο θραύσης. Αντίθετα, τα δοκίμια με $l_{ov}=120$ mm που είχαν κατεργαστεί με αεροματσάκονο αποδείχθηκαν κατά 6,7% πιο ανθεκτικά έναντι αυτών που είχαν κατεργαστεί με αμμοβολή.

- Όλα τα δοκίμια αστόχησαν με τον ίδιο τρόπο. Με αποκόλληση δηλαδή του πολύστρωτου από το μέταλλο στο άκρο της αλληλοεπικάλυσης του σύνθετου υλικού με τον χάλυβα. Επίσης σε όλα τα δοκίμια με βάση τις φωτογραφίες εντοπίστηκε στο σύνθετο κοντά στην διαμορφωμένη μεταλλική ακμή η σταδιακή δημιουργία και διάδοση μιας υπόλευκης περιοχής. Η αλλαγή χρώματος υποδηλώνει την μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων του πολύστρωτου σε εκείνη την περιοχή.

- Σχετικά με τη μέθοδο ακουστικής εκπομπής δεν ήταν δυνατός ο εντοπισμός του είδους των τοπικών αστοχιών και της συσχέτισης αυτών με τη συμπεριφορά των δοκιμίων κατά την πειραματική ανάλυση, δεδομένου ότι δεν γνωρίζουμε αναλυτικά τον τρόπο διάδοσης των ηχητικών κυμάτων σε υβριδικές κατασκευές.

Κεφάλαιο 4^ο

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Μετά τη διεξαγωγή των πειραμάτων κρίθηκε αναγκαία η μοντελοποίηση αυτών με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων με σκοπό τον έλεγχο της αξιοπιστίας των μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων που έχουν αναπτυχθεί. Οι ιδιότητες των υλικών καθώς και η γεωμετρία της σύνδεσης μοντελοποιήθηκαν με βάση τις πραγματικές τιμές αυτών, όπως προέκυψαν από τις πειραματικές μετρήσεις.

Οι πειραματικές μετρήσεις συγκρίθηκαν στη συνέχεια με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων που αναπτύχθηκε. Επίσης στα πλαίσια της μοντελοποίησης των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε μία ανάλυση ευαισθησίας σχετικά με τις ιδιότητες του πολύστρωτου.

Στο παράρτημα Β επισυνάπτεται ένας τυπικός κώδικας πεπερασμένων στοιχείων από αυτούς που αναπτύχθηκαν κατά τη μοντελοποίηση των πειραμάτων.

4.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

Συνολικά μοντελοποιήθηκαν έξι περιπτώσεις που μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

1. Μοντέλα με γεωμετρία που αντιστοιχεί σε μήκος αλληλοεπικάλυψης ίσο με 60 mm
 - Θεωρώντας γραμμική ελαστική συμπεριφορά και για τα τρία υλικά
 - Θεωρώντας γραμμική συμπεριφορά για το σύνθετο υλικό και το κολλητικό μέσο και ελαστοπλαστική για το χάλυβα
 - Θεωρώντας γραμμική ελαστική συμπεριφορά για το σύνθετο και ελαστοπλαστική για το χάλυβα και το κολλητικό μέσο
2. Μοντέλα με γεωμετρία που αντιστοιχεί σε μήκος αλληλοεπικάλυψης ίσο με 120 mm αντίστοιχα.

Η μοντελοποίηση της κατεργασίας του μετάλλου στην περιοχή της αλληλοεπικάλυψης δεν ήταν εφικτή.

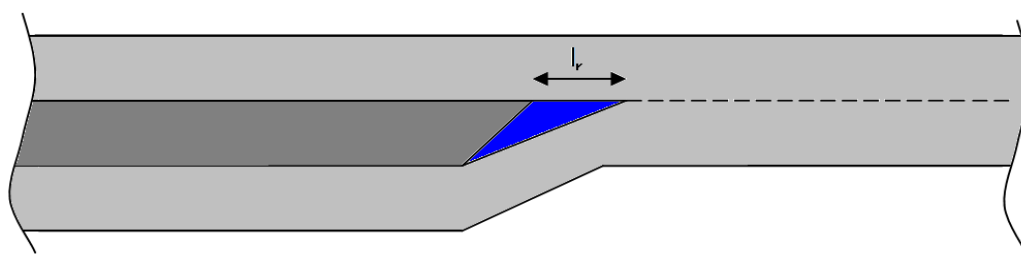
Οι ιδιότητες των υλικών και οι διαστάσεις αυτών προέκυψαν από τον μέσο όρο των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν κατά τα πειράματα, ενώ οι ιδιότητες που δεν μπόρεσαν να μετρηθούν πειραματικά υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας σχέσεις και ενδεικτικές τιμές από τη βιβλιογραφία. Αναλυτικά για τη σύνδεση με

μήκος αλληλοεπικάλυψης ίσο με 60 mm οι ιδιότητες και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά είχαν τις ακόλουθες τιμές:

Γεωμετρία:

- $t_m = 5.79$ mm πάχος του μεταλλικού τμήματος της σύνδεσης
- $t_c = 11.90$ mm συνολικό πάχος του πολύστρωτου
- $t_1 = t_c/2$ πάχος του άνω τμήματος από σύνθετο υλικό
- $t_2 = t_c/2$ πάχος του κάτω τμήματος του σύνθετου
- $t_g = 0.1$ mm πάχος του κολλητικού μέσου
- $l_m = 120$ mm ελεύθερο μήκος του μετάλλου
- $l_{ov} = 60$ mm μήκος αλληλοεπικάλυψης
- $l_w = 6$ mm μήκος μεταλλικής ακμής
- $l_c = 120$ mm ελεύθερο μήκος του σύνθετου υλικού
- $l_r = 7$ mm μήκος περίσσειας ρητίνης λόγω ύπαρξης κενού ανάμεσα στο πολύστρωτο και τον χάλυβα

Οι τιμές των t_m , t_c , αποτελούν τον μέσο όρο των τιμών των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στα δοκίμια. Το μέγεθος l_r εισάχθηκε για να έχουμε μία πιο ρεαλιστική μοντελοποίηση των πειραμάτων καθώς όπως προείπαμε στο Κεφάλαιο 3 δεν μπορέσαμε να εξασφαλίσουμε την πλήρη επαφή του πολύστρωτου με το διαμορφωμένο άκρο του χάλυβα με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί μία σφηνοειδής περιοχή η οποία πληρώθηκε από ρητίνη (Σχήμα 4.1).

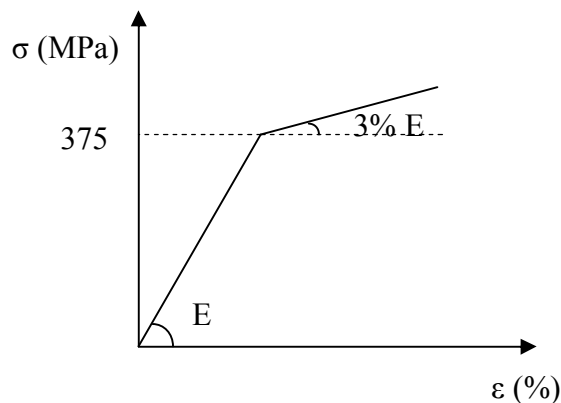


Σχήμα 4.1

Ιδιότητες Χάλυβα:

- Μέτρο Ελαστικότητας: $E = 179.47$ GPa
- Λόγος Poisson: $\nu = 0.3$
- Όριο Διαρροής: $\sigma_{YIELD} = 375$ GPa

Με μέτρο κράτνσης $E_T = 3\% \cdot E$ δηλαδή $E_T = 5.5 \text{ GPa}$ στις περιπτώσεις που ο χάλυβας μοντελοποιείται ως ελαστοπλαστικό υλικό (Σχήμα 4.2). Αυτό γίνεται με σκοπό να προσεγγιστεί καλύτερα η πραγματική συμπεριφορά του υλικού και να υπερπηδηθούν αριθμητικά προβλήματα.



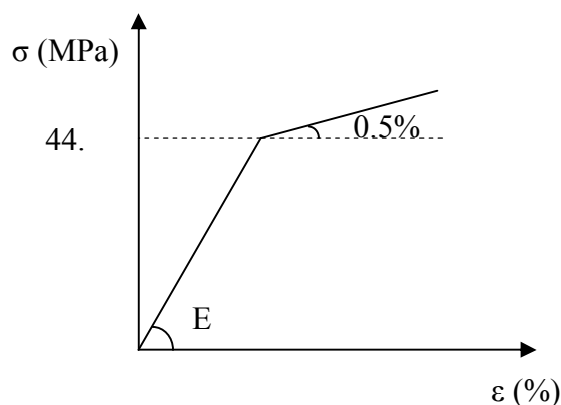
Σχήμα 4.2

Αντίστοιχα οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας και του όριου διαρροής προέκυψαν από τον μέσο όρο των τιμών που μετρήθηκαν κατά τον πειραματικό προσδιορισμό των ιδιοτήτων του χάλυβα.

Ιδιότητες Ρητίνης :

- Μέτρο Ελαστικότητας: $E = 2030 \text{ MPa}$
- Λόγος Poisson: $\nu = 0.35$
- Όριο Διαρροής: $\sigma_{\text{YIELD}} = 44.40 \text{ MPa}$

Η τιμή του λόγου Poisson επιλέχθηκε ίση με 0.35 που αποτελεί μία τυπική τιμή για τέτοιου είδους υλικά. Το όριο διαρροής επιλέχθηκε ίσο με 44.40 MPa λίγο μικρότερο δηλαδή από το πραγματικό όριο διαρροής που αναφέρει ο κατασκευαστής (βλέπε παράγραφο 3.4.2). Το μέτρο κράτνσης επιλέχθηκε ίσο με $E_T = 0.5\% \cdot E$ δηλαδή $E_T = 10 \text{ MPa}$ στις περιπτώσεις που αυτή μοντελοποιείται ως ελαστοπλαστικό υλικό (Σχήμα 4.3)



Σχήμα 4.3

Ιδιότητες σύνθετου :

- Μέτρα Ελαστικότητας : $E_{11} = 35028 \text{ MPa}$
 $E_{22} = E_{33} = 7751 \text{ MPa}$
- Λόγοι Poison: $\nu_{13} = \nu_{12} = 0.29$
 $\nu_{23} = 0.02$
- Μέτρο Διάτμησης: $G_{13} = G_{12} = 1819.00 \text{ MPa}$
 $G_{23} = 1207.30 \text{ MPa}$

Η τιμή του μέτρου ελαστικότητας του σύνθετου στην κύρια διεύθυνση υπολογίστηκε με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα και τον τύπο 3.9. Τα μέτρα ελαστικότητας στις διευθύνσεις 2 και 3 θεωρήθηκαν ίσα μεταξύ τους. Για τον υπολογισμό τους έγινε η θεώρηση ότι ο λόγος E_{11}/E_{22} είναι ο ίδιος με αυτόν που προέκυψε κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων για το MARSTRUCT.

$$\frac{E_{11}}{E_{22}} = \frac{29658}{6563} \Rightarrow \frac{E_{11}}{E_{22}} = 4.519$$

Δεδομένου ότι το πολύστρωτο της σύνδεσης με $l_{ov} = 60 \text{ mm}$ είχε μέτρο ελαστικότητας ίσο με : $E_{11} = 35028 \text{ MPa}$ προκύπτει ότι $E_{22} = E_{33} = 7751 \text{ MPa}$. Ο λόγος Poisson ν_{12} λήφθηκε ίσος με τον μέσο όρο των τιμών που προέκυψαν από τα πειράματα για το πρόγραμμα MARSTRUCT, θεωρώντας επιπρόσθετα ότι $\nu_{12} = \nu_{13}$. Τα μέτρα διάτμησης G_{13} , G_{12} λήφθηκαν ίσα μεταξύ τους και προέκυψαν από τον λόγο $E_{11}/G_{12} = 19.26$ από πειράματα διάτμησης που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος MARSTRUCT. Ομοίως υπολογίστηκε το μέτρο διάτμησης G_{23} με βάση τον λόγο $G_{13}/G_{23} = 1,507$.

Για το μοντέλο με $l_{ov} = 120 \text{ mm}$ οι ιδιότητες του χάλυβα και της ρητίνης ήταν οι ίδιες με αυτές του μοντέλου με $l_{ov} = 60 \text{ mm}$. Η γεωμετρία και οι ιδιότητες του σύνθετου είναι οι ακόλουθες:

Γεωμετρία:

- $t_m = 5.78 \text{ mm}$ πάχος του μεταλλικού τμήματος της σύνδεσης
- $t_c = 11.84 \text{ mm}$ συνολικό πάχος του πολύστρωτου
- $t_1 = t_c/2$ πάχος του άνω τμήματος από σύνθετο υλικό
- $t_2 = t_c/2$ πάχος του κάτω τμήματος του σύνθετου
- $t_g = 0.1 \text{ mm}$ πάχος του κολλητικού μέσου

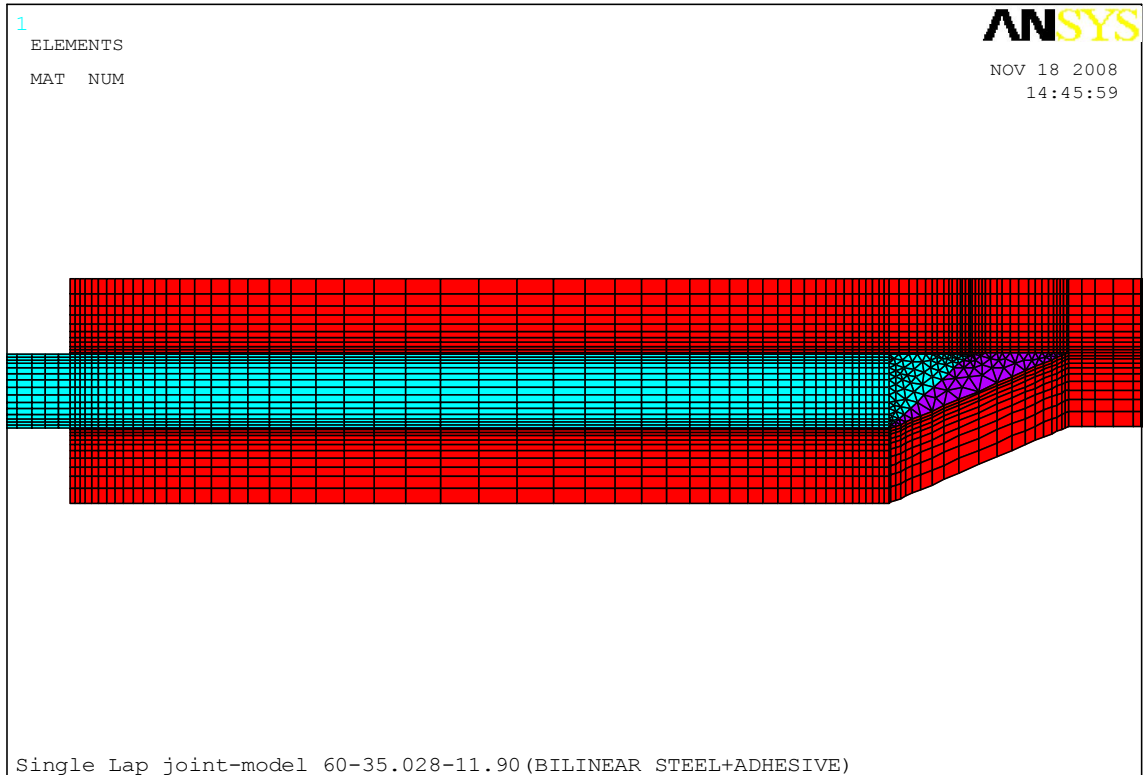
- $l_m = 240 \text{ mm}$ ελεύθερο μήκος του μετάλλου
- $l_{ov} = 120 \text{ mm}$ μήκος αλληλοεπικάλυψης
- $l_w = 6 \text{ mm}$ μήκος μεταλλικής ακμής
- $l_c = 240 \text{ mm}$ ελεύθερο μήκος του σύνθετου υλικού
- $l_r = 14 \text{ mm}$ μήκος περίσσειας ρητίνης λόγω ύπαρξης κενού ανάμεσα στο πολύστρωτο και τον χάλυβα

Ιδιότητες σύνθετου :

- Μέτρα Ελαστικότητας : $E_{11} = 34932 \text{ MPa}$
 $E_{22} = E_{33} = 7730 \text{ MPa}$
- Λόγοι Poison: $\nu_{13} = \nu_{12} = 0.29$
 $\nu_{23} = 0.02$
- Μέτρο Διάτμησης: $G_{13} = G_{12} = 1814.40 \text{ MPa}$
 $G_{23} = 1204.25 \text{ MPa}$

Οι ιδιότητες επιλέχθηκαν ακολουθώντας την ίδια λογική που περιγράφηκε για το μοντέλο με $l_{ov} = 60 \text{ mm}$.

Η ανάλυση που γίνεται είναι δύο διαστάσεων. Το πλέγμα έγινε με χρήση δισδιάστατων οκτάκομβων τετράπλευρων στερεών στοιχείων (Plane 82) με την παραδοχή της επίπεδης παραμόρφωσης (plane strain). Το πλέγμα βελτιστοποιήθηκε για να επιτευχθεί μεγαλύτερη ταχύτητα επίλυσης από το πρόγραμμα. Οι οριακές συνθήκες παραμένουν οι ίδιες.



Σχήμα 4.4: Μορφή πλέγματος

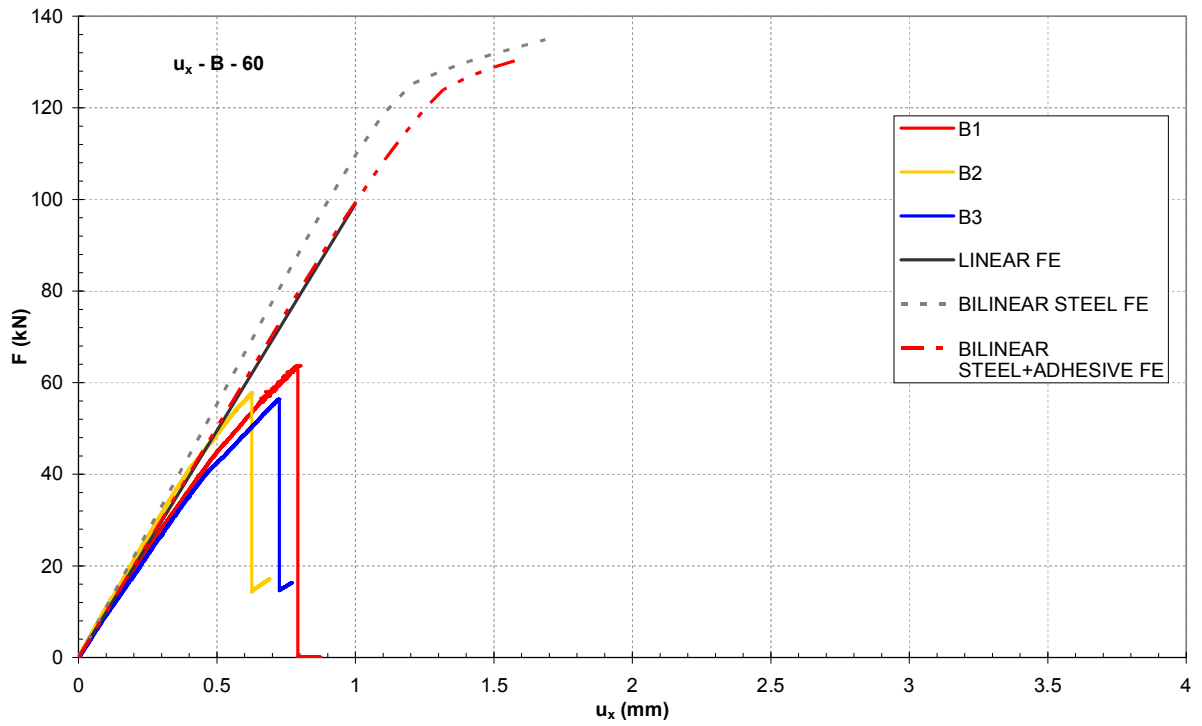
Η μέγιστη ασκούμενη αξονική μετατόπιση είναι ίση με :

- $d = 1.686 \text{ mm}$ για $l_{ov} = 60 \text{ mm}$
- $d = 3.741 \text{ mm}$ για $l_{ov} = 120 \text{ mm}$

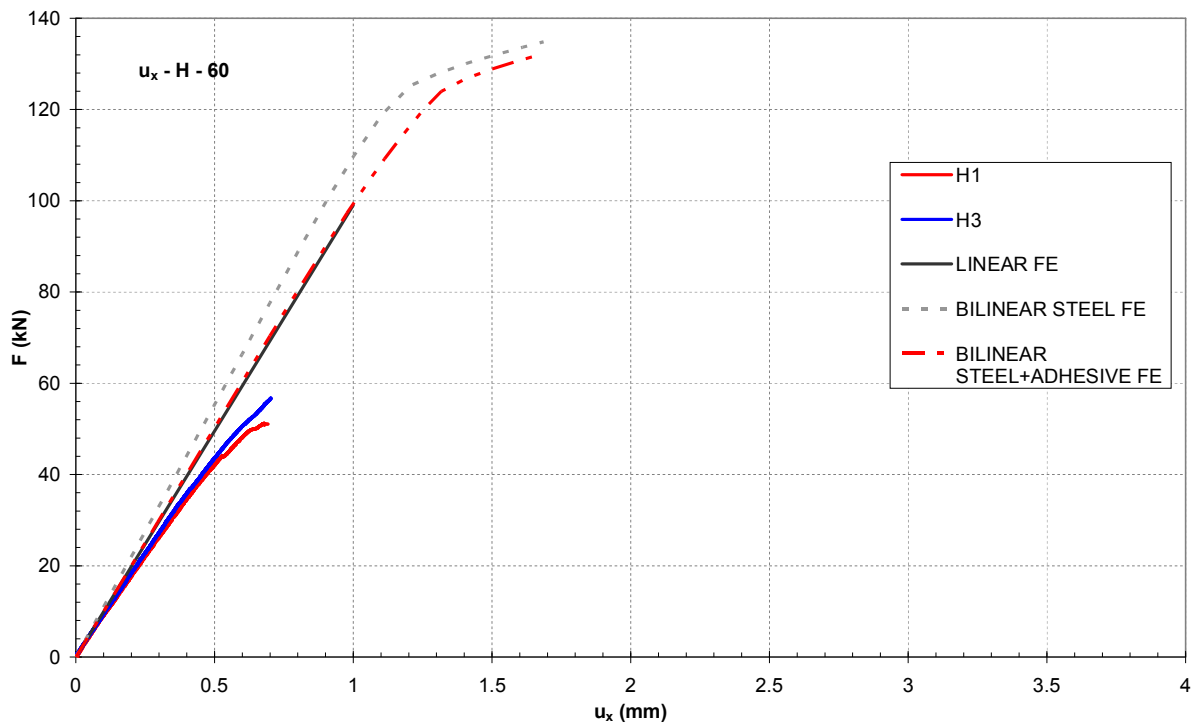
Οι τιμές αυτές αποτελούν τον μέσο όρο της μετατόπισης που ασκήθηκε κατά τις πειραματικές δοκιμές των δοκιμίων προσαυξημένη κατά 230 % για κάθε γεωμετρία. Τα αποτελέσματα από τα μοντέλα παρουσιάζονται στη συνέχεια μαζί με τα πειραματικά αποτελέσματα (Σχήματα 4.5 – 4.13).

4.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΜΕ ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

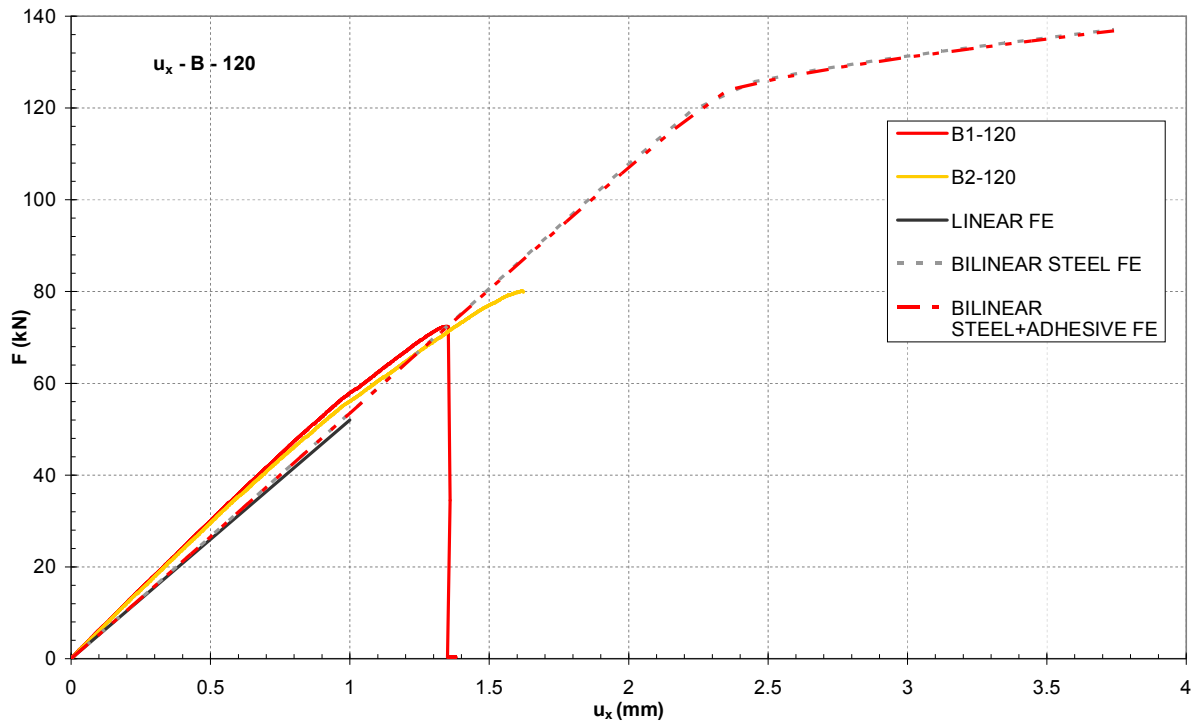
Τα Σχήματα 4.5 έως 4.8 παρουσιάζουν τα συγκεντρωτικά διαγράμματα δύναμης - αξονικής μετατόπισης για όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν.



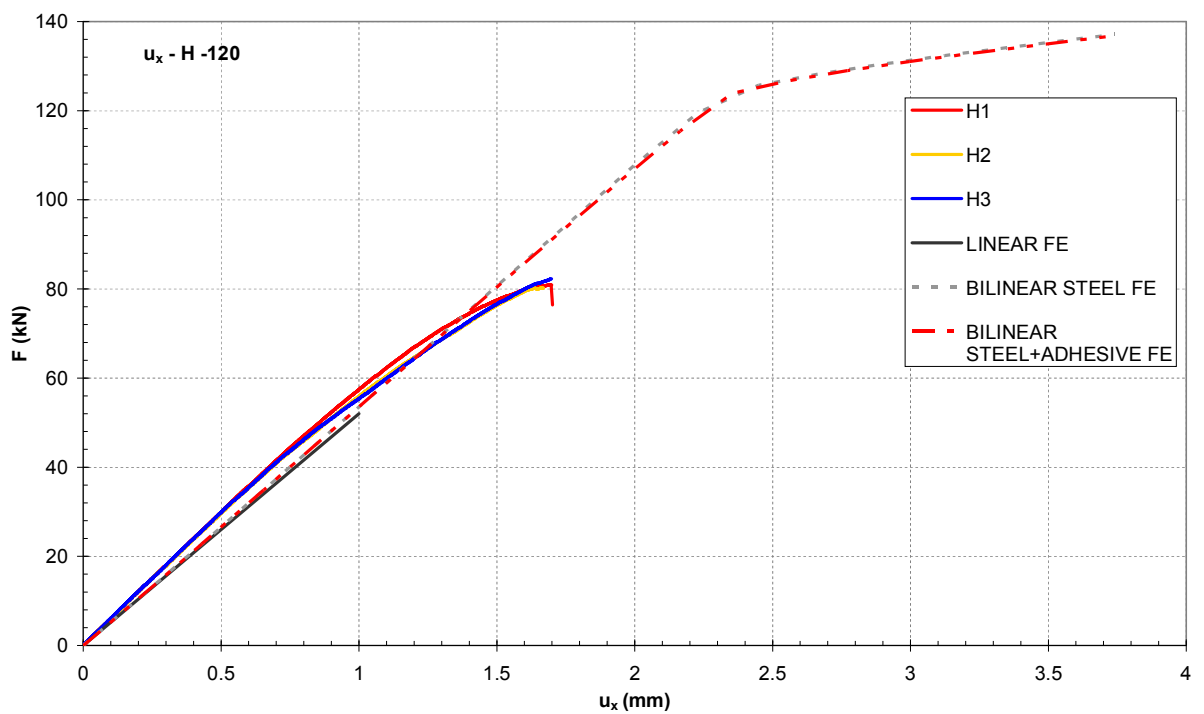
Σχήμα 4.5: Διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης των B-60



Σχήμα 4.6: Διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης των H-60



Σχήμα 4.7: Διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης των B-120

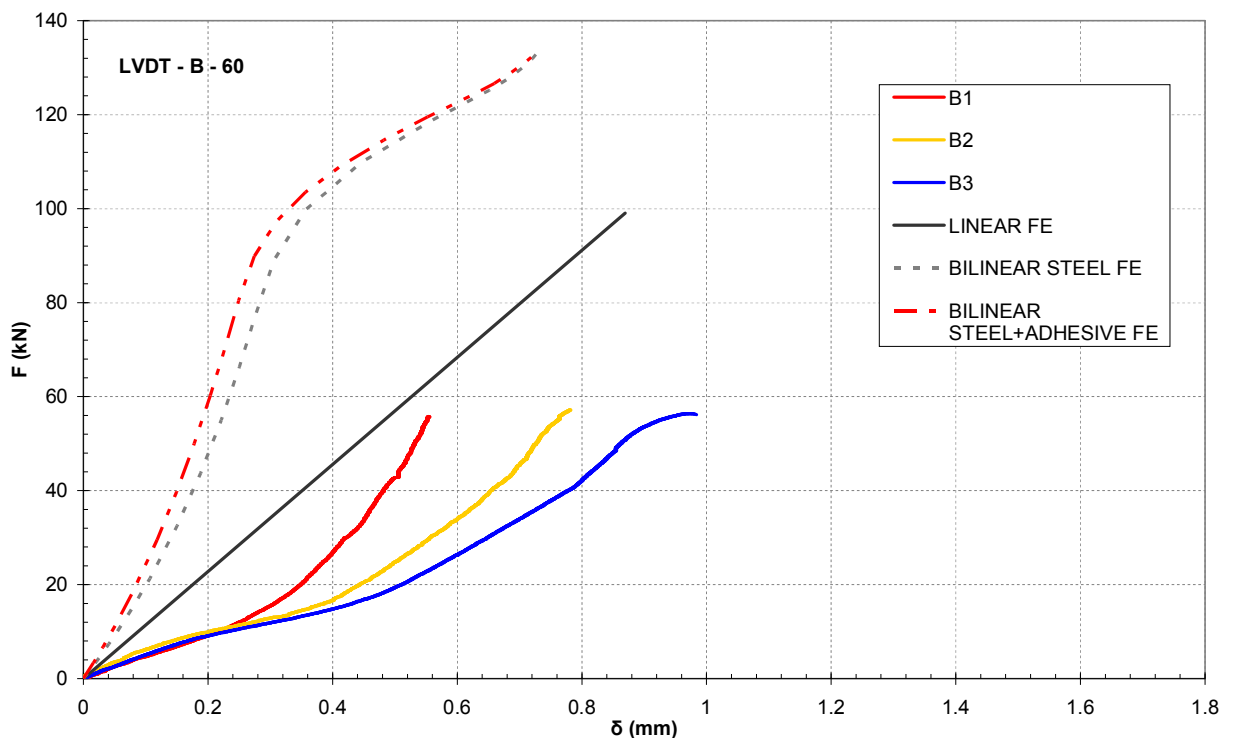


Σχήμα 4.8: Διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης των H-120

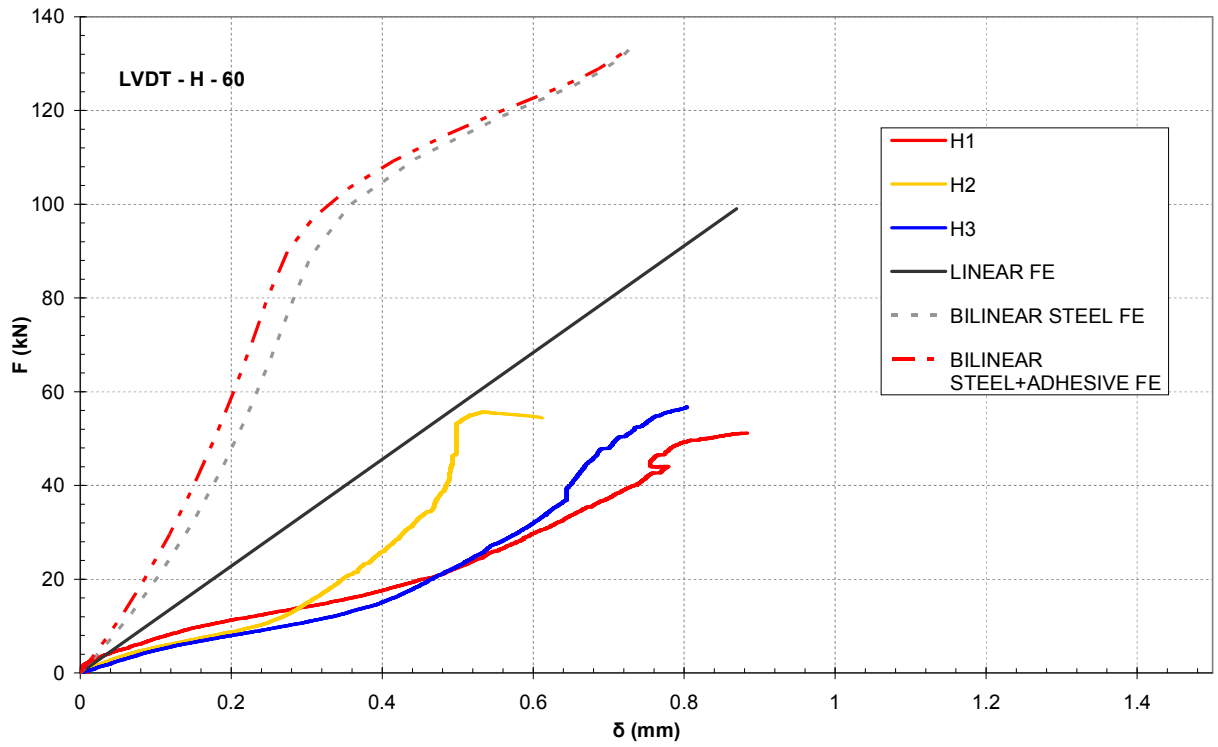
Εξετάζοντας τα διαγράμματα δύναμης – ασκούμενης αξονικής μετατόπισης παρατηρούμε κατ' αρχάς πολύ καλή σύμπτωση μεταξύ των αριθμητικών και των πειραματικών αποτελεσμάτων. Για τα δοκίμια με $l_{dv} = 60$ mm σημειώνεται μικρή απόκλιση της καμπύλης που προκύπτει από τη μοντελοποίηση μόνο του χάλυβα ως

ελαστοπλαστικού υλικού, τόσο από τις καμπύλες των υπόλοιπων δύο προσομοιώσεων, όσο και από τα πειραματικά αποτελέσματα. Αντίθετα το μοντέλο όπου θεωρήθηκαν ο χάλυβας και το συνδετικό μέσο ως ελαστοπλαστικά υλικά και το μοντέλο όπου τα υλικά αυτά θεωρήθηκαν ως γραμμικά τέλεια ελαστικά ταυτίζονται μεταξύ τους αλλά και με τα πειραματικά δεδομένα στη γραμμική περιοχή απόκρισης των συνδέσεων (μέχρι περίπου φορτίο 20 kN). Μετά το φορτίο αυτό παρατηρείται μία σταδιακή απόκλιση των πειραματικών αποτελεσμάτων από αυτά των πεπερασμένων στοιχείων. Αυτό είναι αναμενόμενο, αφού από το φορτίο αυτό και μετά πιθανότατα αρχίζουν οι τοπικές αστοχίες της σύνδεσης, οι οποίες δεν μοντελοποιούνται στα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων. Για τον ίδιο ακριβώς λόγο δεν είναι δυνατός ο υπολογισμός φορτίων αστοχίας από τα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων.

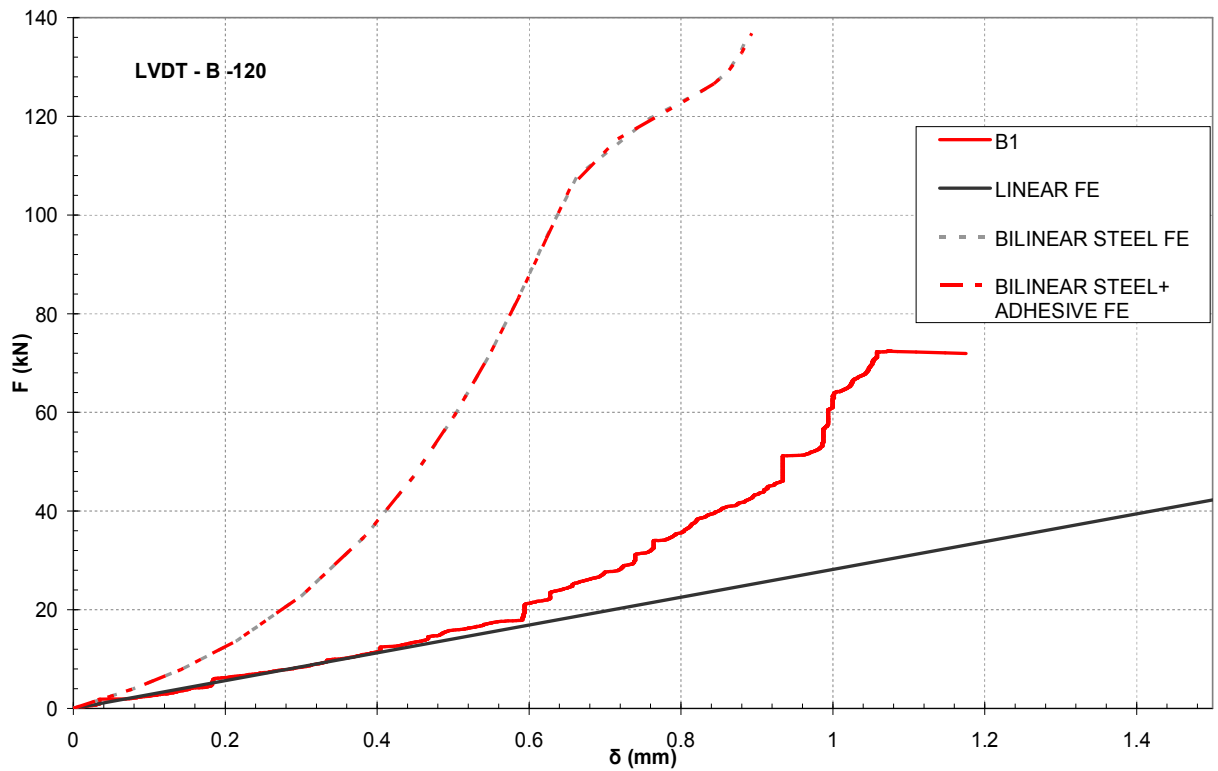
Τα Σχήματα 4.9 έως 4.12 παρουσιάζουν τη μεταβολή του πλάγιου βέλους κάμψης κατά τη διεύθυνση Y συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου.



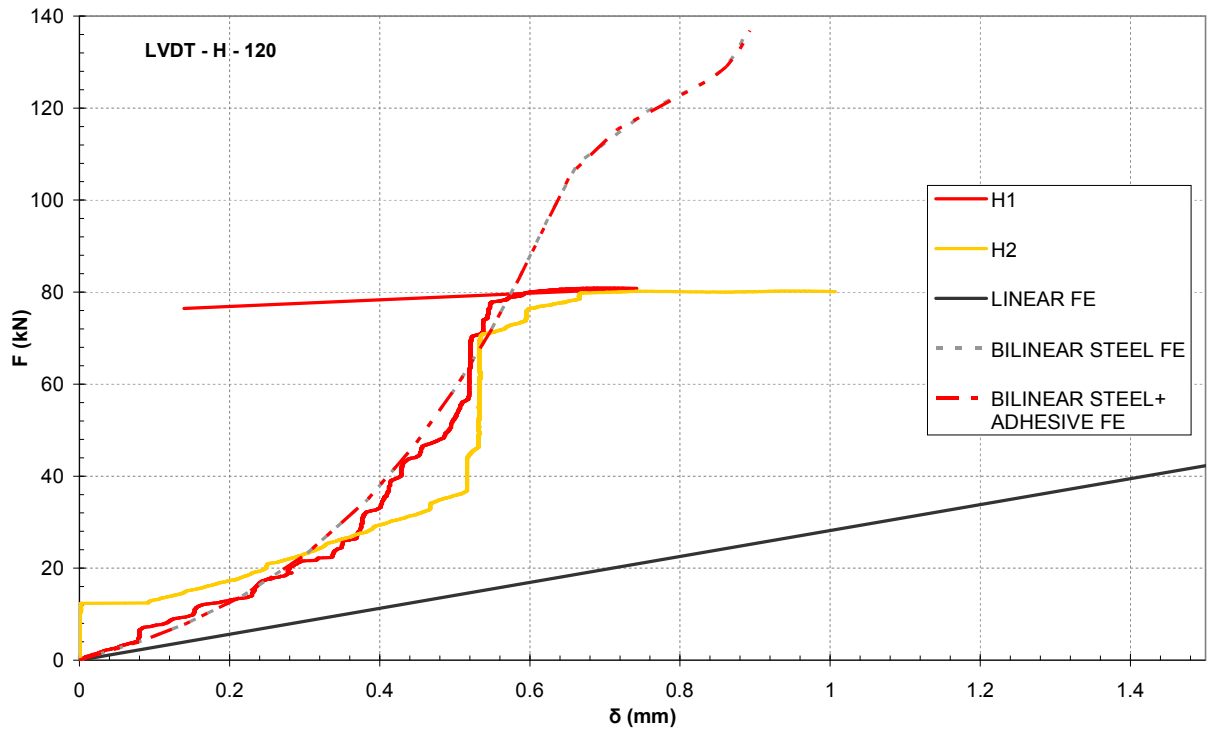
Σχήμα 4.9: Διάγραμμα δύναμης-βέλους κάμψης των B-60



Σχήμα 4.10: Διάγραμμα δύναμης-βέλους κάμψης των H-60



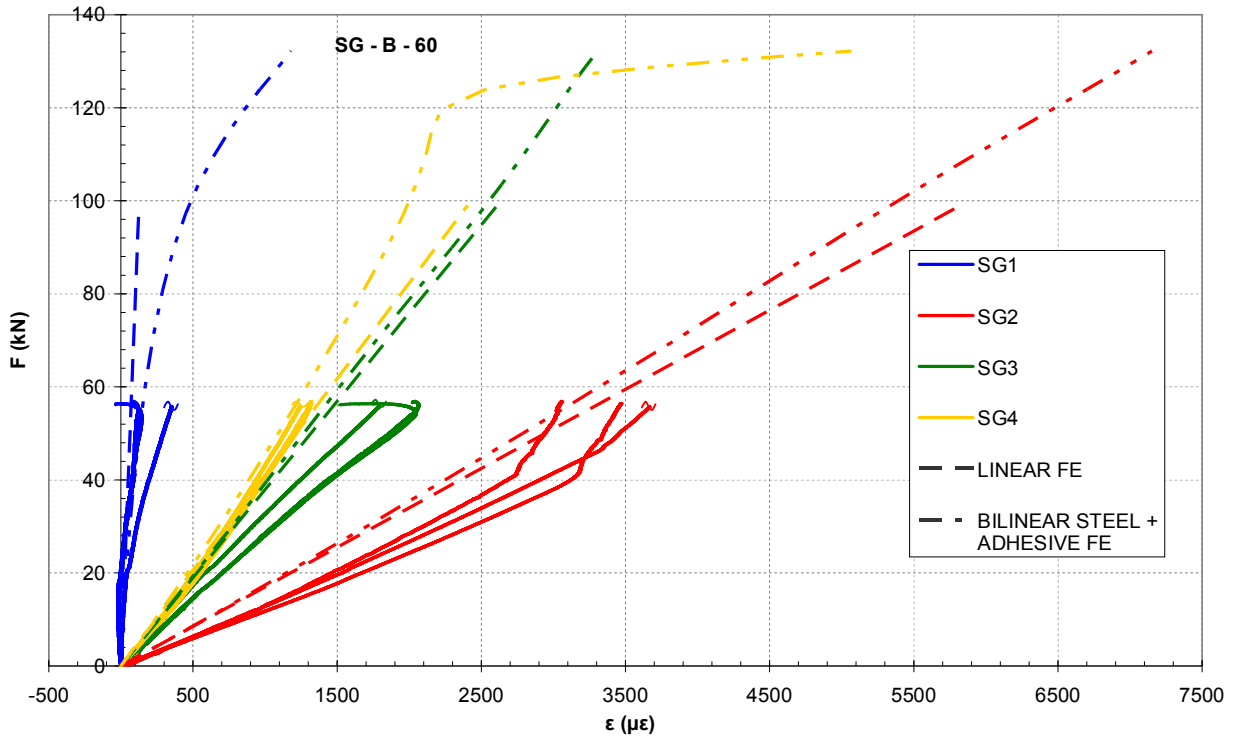
Σχήμα 4.11: Διάγραμμα δύναμης-βέλους κάμψης των B-120



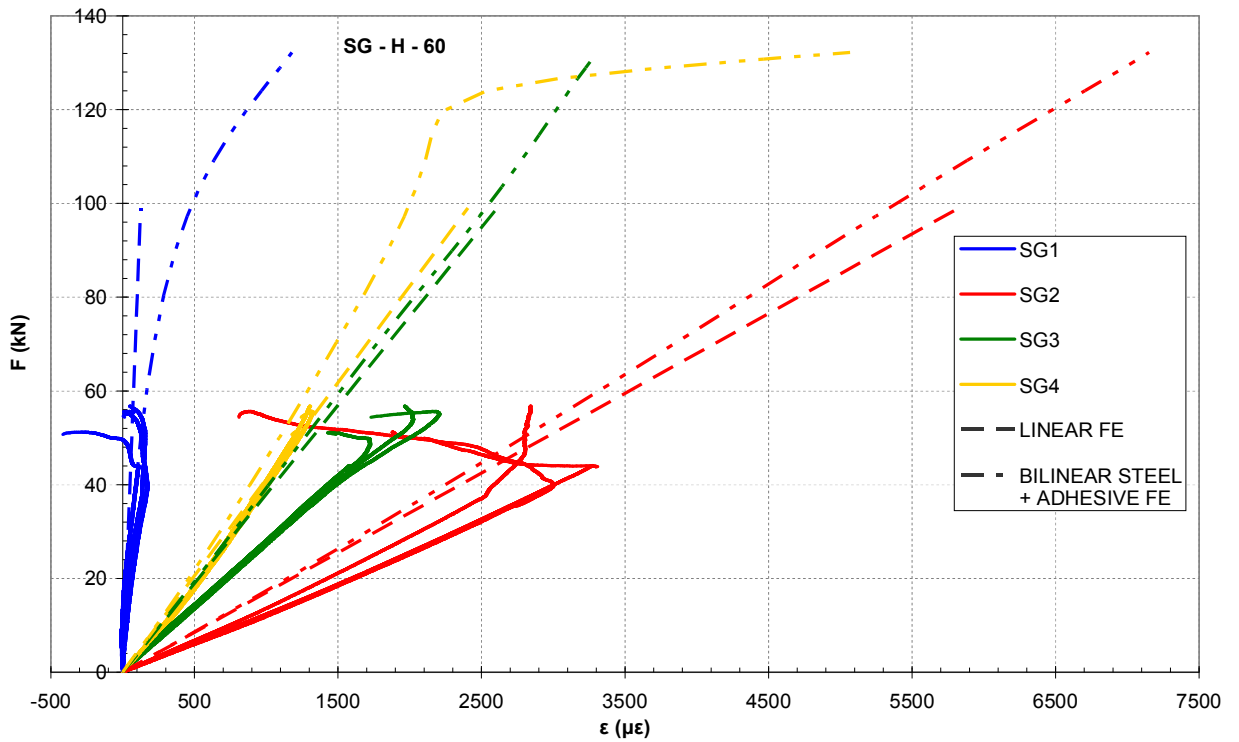
Σχήμα 4.12: Διάγραμμα δύναμης-βέλους κάμψης των H-120

Από τη μελέτη των Σχημάτων 4.9 έως 4.12 και με μόνη εξαίρεση το Σχήμα 4.12 προκύπτει ότι η αριθμητική μοντελοποίηση είναι ανίκανη να προβλέψει τα βέλη κάμψης στη διεύθυνση Y. Αυτό οφείλεται πιθανώς στο γεγονός ότι το μέγεθος αυτό (το βέλος κάμψης) είναι πολύ ευαίσθητο σε αποκλίσεις από την ονομαστική τέλεια γεωμετρία που μοντελοποιείται καθώς και στις τοπικές αστοχίες κατά τη διάρκεια της φόρτισης.

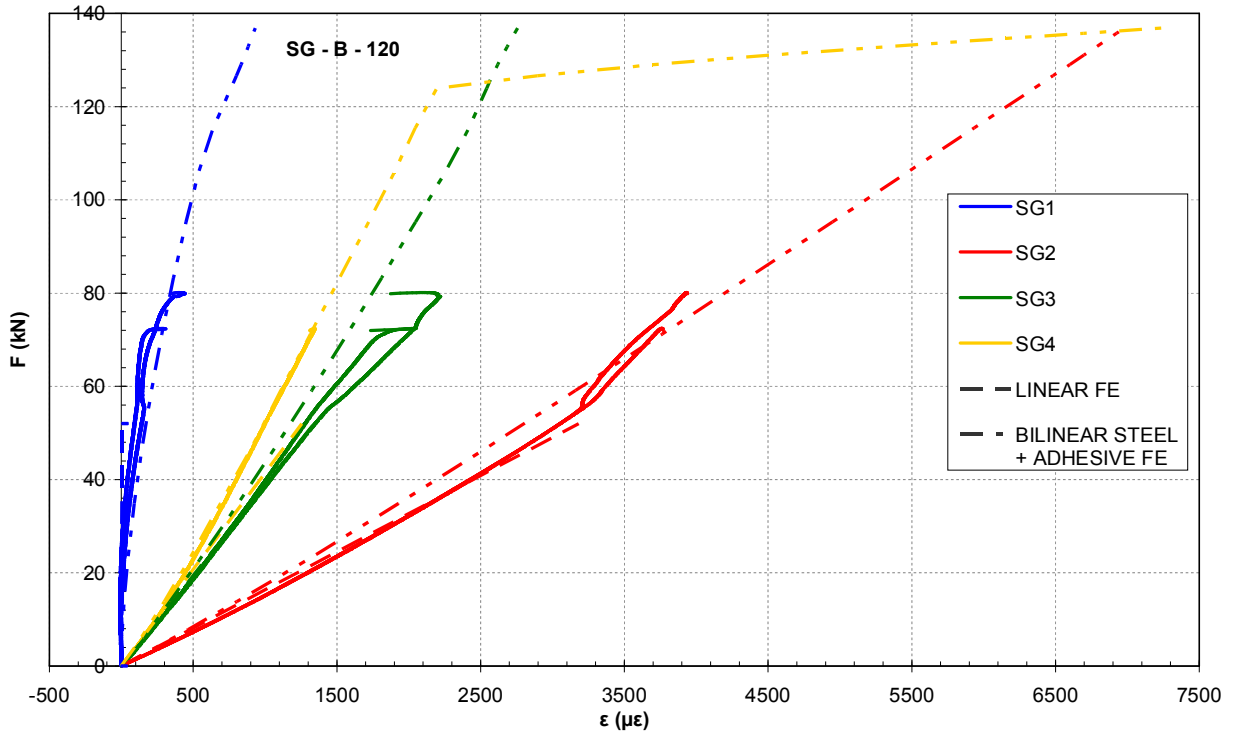
Στα Σχήματα 4.13 έως 4.16 παρουσιάζονται οι μεταβολές των μετρημένων παραμορφώσεων στις θέσεις 1 έως 4 (βλέπε Σχήμα 3.5) συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου.



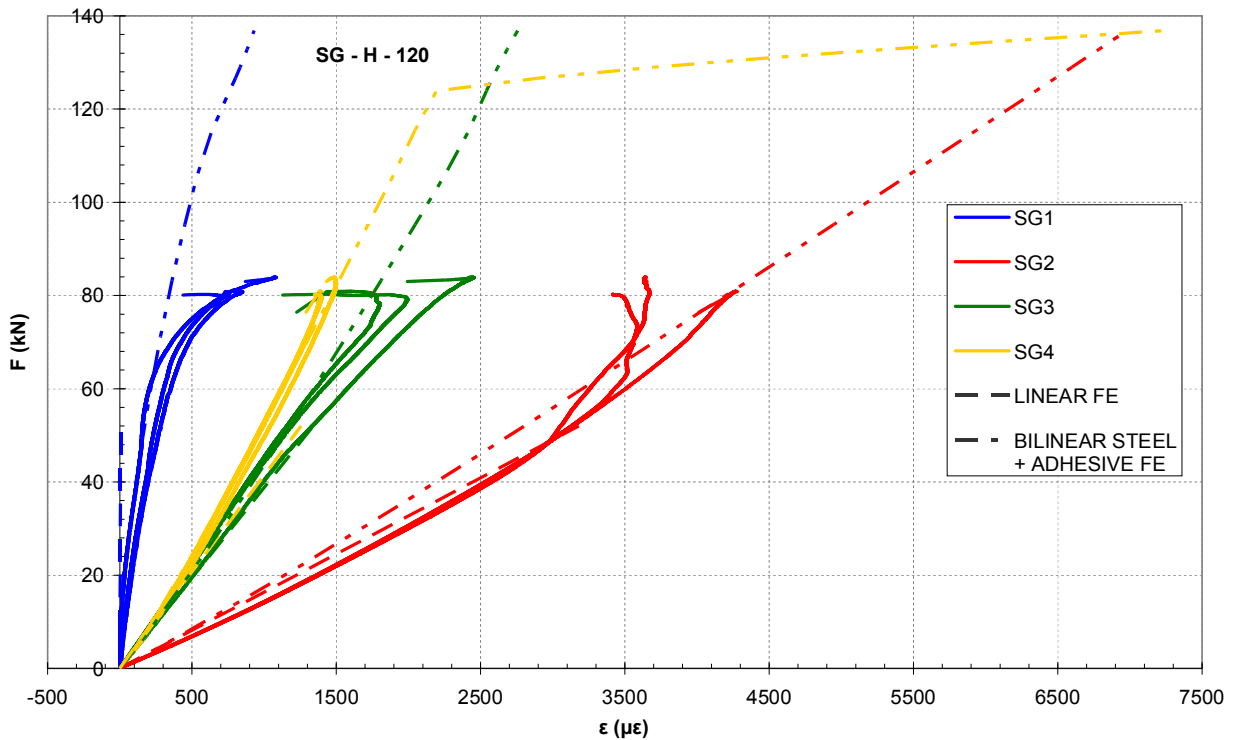
Σχήμα 4.13: Διάγραμμα δύναμης-παραμόρφωσης των B-60



Σχήμα 4.14: Διάγραμμα δύναμης-παραμόρφωσης των H-60



Σχήμα 4.15: Διάγραμμα δύναμης-παραμόρφωσης των B-120



Σχήμα 4.16: Διάγραμμα δύναμης-παραμόρφωσης των H-120

Εξετάζοντας τα Σχήματα 4.13 έως 4.16 μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων για τις αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις κυμαίνεται από ικανοποιητική στην περίπτωση των δοκιμών της σειρά 60 έως πολύ καλή στην περίπτωση των δοκιμών της σειράς 120. Φυσικά, για

τους λόγους που προαναφέρθηκαν δεν λαμβάνονται υπόψη αριθμητικά οι τοπικές αστοχίες και δεν υπολογίζεται το φορτίο αστοχίας. Για τη σειρά 60 οι μοντελοποιήσεις με πεπερασμένα στοιχεία προσομοιάζουν αρκετά καλά τα πειραματικά αποτελέσματα του SG1. Συγκεκριμένα το γραμμικά τέλεια ελαστικό μοντέλο συμπίπτει με τα πειραματικά μέχρι την τιμή των 20 kN περίπου, ενώ το ελαστοπλαστικό μοντέλο αρχίζει να αποκλίνει ουσιαστικά μετά την τιμή των 45 kN όπου αρχίζει η μείωση εκ νέου των τιμών των παραμορφώσεων. Σχετικά με το σύνθετο υλικό (SG 2) διαφαίνεται μία σημαντική απόκλιση μεταξύ των πειραματικών καμπυλών με αυτές των μοντέλων των πεπερασμένων στοιχείων που υπερεκτιμούν το μέτρο ελαστικότητας του πολύστρωτου. Το ίδιο παρατηρείται σε μεγαλύτερο βαθμό και για το άνω μέρος του σύνθετου (SG3). Στην περίπτωση του χάλυβα (SG4) σημειώνονται μικρότερες αποκλίσεις μεταξύ των καμπυλών των πειραμάτων και αυτών των μοντέλων, με το γραμμικό ελαστικό μοντέλο να προσεγγίζει καλύτερα τις πειραματικές τιμές.

Όσον αφορά στα δοκίμια με μήκος αλληλοεπικάλυψης 120 mm, σημειώνεται καλύτερη σύγκλιση των αποτελεσμάτων των μοντέλων με των πειραματικών σε σύγκριση με τα δοκίμια της σειράς 60. Στις περιπτώσεις των SG1, SG3 και SG4 το ελαστοπλαστικό μοντέλο αναπαριστά με μεγάλη ακρίβεια τα πειραματικά αποτελέσματα. Στις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο σύνθετο υλικό (SG2) σημειώνεται και πάλι απόκλιση μεταξύ των καμπυλών, η οποία όμως είναι μικρότερη συγκριτικά με αυτή που παρατηρείται $l_{ov}=60$ mm.

4.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ

Κατά το στάδιο της μοντελοποίησης πραγματοποιήθηκε μία ανάλυση ευαισθησίας για τις ιδιότητες του σύνθετου και της εποξικής ρητίνης. Σκοπός της ανάλυσης είναι να διαπιστωθεί εάν επηρεάζονται σημαντικά τα αποτελέσματα των πεπερασμένων στοιχείων από τις μεταβολές των ιδιοτήτων των προαναφερθέντων υλικών. Η ανάλυση έγινε και για τις δύο γεωμετρίες θεωρώντας γραμμική ελαστική συμπεριφορά για όλα τα υλικά. Οι οριακές συνθήκες, το πλέγμα και οι σχέσεις μεταξύ των ιδιοτήτων κρατήθηκαν οι ίδιες με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν για την μοντελοποίηση των πειραμάτων. Η ασκούμενη μετατόπιση είναι ίση με $d = 1 \text{ mm}$ για κάθε σενάριο. Οι προσομοιώσεις κατηγοριοποιούνται ως εξής:

1. Μοντέλα με γεωμετρία που αντιστοιχεί σε μήκος αλληλοεπικάλυψης ίσο με 60 mm
 - Με αύξηση του μέτρου ελαστικότητας του σύνθετου υλικού κατά 15% επί του πραγματικού
 - Με μείωση του μέτρου ελαστικότητας του σύνθετου υλικού κατά 15% επί του πραγματικού
 - Με αύξηση του μέτρου ελαστικότητας του συνδετικού μέσου κατά 15% επί του πραγματικού
 - Με μείωση του μέτρου ελαστικότητας του συνδετικού μέσου κατά 15% επί του πραγματικού
2. Μοντέλα με γεωμετρία που αντιστοιχεί σε μήκος αλληλοεπικάλυψης ίσο με 120 mm ομοίως.

Στον Πίνακα 4.1 συγκεντρώνονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας. Όπου u_x είναι η ασκούμενη αξονική μετατόπιση, F η δύναμη αντίδρασης, δ_{\max} η μέγιστη τιμή βέλους κάμψης κατά την διεύθυνση Y και $SG1_{\max}$, $SG2_{\max}$, $SG3_{\max}$, $SG4_{\max}$ οι μέγιστες τιμές των παραμορφώσεων στις αντίστοιχες θέσεις.

Πίνακας 4.1: Ανάλυση ευαισθησίας

SENSITIVITY ANALYSIS					
$l_{ov} = 60 \text{ mm}$					
	Real Properties	+15% E Adhesive	-15% E Adhesive	+15% Ex Composite	-15% Ex Composite
u_x (mm)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
F (kN)	99.025	99.267	98.712	108.925	88.280
δ_{max} (mm)	0.869	0.872	0.866	0.965	0.762
SG1 _{max} (μ€)	125.202	118.420	133.160	188.866	56.589
SG2 _{max} (μ€)	5826.260	5849.300	5798.920	5611.680	6066.770
SG3 _{max} (μ€)	2610.480	2606.290	2615.540	2612.230	2593.440
SG4 _{max} (μ€)	2406.320	2411.210	2400.440	2635.920	2156.670
$l_{ov} = 120 \text{ mm}$					
	Real Properties	+15% E Adhesive	-15% E Adhesive	+15% Ex Composite	-15% Ex Composite
u_x (mm)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
F (kN)	51.991	52.068	51.900	57.279	46.450
δ_{max} (mm)	1.845	1.849	1.841	2.033	1.641
SG1 _{max} (μ€)	5.773	5.376	6.285	61.018	-0.897
SG2 _{max} (μ€)	3182.840	3189.530	3174.870	3063.060	3311.740
SG3 _{max} (μ€)	1341.580	1342.200	1340.890	1357.860	1315.640
SG4 _{max} (μ€)	1256.540	1257.990	1254.820	1380.070	1126.770

Εξετάζοντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση ευαισθησίας παρατηρούμε τα εξής:

- Μεταβάλλοντας την τιμή του μέτρου ελαστικότητας του συνδετικού μέσου οι τιμές της δύναμης, του βέλους κάμψης και των παραμορφώσεων ουσιαστικά παραμένουν αμετάβλητες.
- Αυξάνοντας κατά 15% το μέτρο ελαστικότητας του σύνθετου υλικού παρατηρείται αύξηση της επαγόμενης δύναμης κατά 10% και του βέλους κάμψης κατά 11% και για τις δύο γεωμετρίες.
- Μειώνοντας κατά 15% το μέτρο ελαστικότητας του σύνθετου υλικού παρατηρείται μείωση της επαγόμενης δύναμης κατά 11% και του βέλους κάμψης κατά 12% και για τις δύο γεωμετρίες.
- Οι τιμές των παραμορφώσεων δεν μεταβλήθηκαν ουσιαστικά από την αλλαγή του μέτρου ελαστικότητας του σύνθετου υλικού.

Κεφάλαιο 5

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.1 ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Καθώς οι κατασκευές από σύνθετα υλικά στον τομέα των ναυπηγικών εφαρμογών πληθαίνουν ολοένα και περισσότερο, δημιουργείται η ανάγκη για ανάπτυξη νέων τεχνικών σύνδεσης, αλλά και εξέλιξη των ήδη υπαρχόντων. Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 1 της εργασίας, τα τμήματα του πλοίου που μπορούν να αντικατασταθούν με χρήση συνθέτων υλικών μπορούν ενδεικτικά να είναι οι υπερκατασκευές του πλοίου, η έλικα του, οι ιστοί του είτε ακόμα και ένα ολόκληρο κατάστρωμα αυτού. Επομένως, προκύπτει η ανάγκη συνδέσεως των σύνθετων υλικών με τα μεταλλικά μέρη του πλοίου, ώστε να μπορούν αυτά τα δύο διαφορετικά υλικά να συνυπάρχουν και να συνεργάζονται αρμονικά για την σωστή και απρόσκοπτη λειτουργία του σκάφους.

Μια σύνδεση, για την εκπλήρωση του ρόλου της, πρέπει να πληρεί μια πολύ σημαντική προϋπόθεση. Η ακεραιότητα της συνολικής κατασκευής θα πρέπει να μην τίθεται σε κίνδυνο λόγω της παρουσίας της σύνδεσης. Για τη διασφάλιση της ακεραιότητας της κατασκευής ο σχεδιαστής - μηχανικός, μετά τη χρήση των αναλυτικών μοντέλων, που τυχόν υπάρχουν, ακολουθεί την ανάλυση με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Η επιλογή της γεωμετρίας, η εκλογή των υλικών και όλων των απαραίτητων παραμέτρων της νέας σύνδεσης μεταξύ μετάλλου και συνθέτου έγινε στο Κεφάλαιο 2. Μετά τον ορισμό όλων των απαραίτητων παραμέτρων έγινε η μοντελοποίηση της σύνδεσης και η εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Στόχος μας ήταν με την βοήθεια του Ansys να προσδιοριστεί το φορτίο αστοχίας για την εκάστοτε γεωμετρία της σύνδεσης και να διερευνηθεί η επίδραση του μέτρου διάτμησης και του μετρου ελαστικότητας κατά τη διεύθυνση 2 του πολύστρωτου. Όπως αποδείχθηκε οι τιμές αυτών των παραμέτρων δεν επηρεάζουν σημαντικά την συμπεριφορά της σύνδεσης.

Από τις πειραματικές μετρήσεις που διεξήχθησαν επαναπροσδιορίστηκαν οι ιδιότητες των επιλεγθέντων υλικών οι οποίες αρχικά είχαν εκτιμηθεί θεωρητικά. Επίσης κατά την διεξαγωγή πειραμάτων αντιμετωπίστηκαν αρκετές τεχνικές δυσκολίες που αφορούσαν τόσο τον τρόπο κατασκευής της σύνδεσης αλλά και την επίτευξη των επιθυμητών ιδιοτήτων των υλικών και της γεωμετρίας των δοκιμίων. Από αυτό το στάδιο αντιλαμβανόμαστε τόσο τη δυσκολία της επίτευξης των θεωρητικών μεγεθών που τίθενται κάθε φορά, αλλά και το γεγονός ότι πολλές φορές ορισμένα από αυτά τα κριτήρια είναι ουσιαστικά μη εφαρμόσιμα στην πράξη, όπως ήταν στην περίπτωση μας η επίτευξη επαφής του πολύστρωτου με την διαμορφωμένη

μεταλλική ακμή γωνίας 45° καθώς και των αρχικά ορισμένων διαστάσεων των δοκιμίων.

Σχετικά με το μήκος αλληλοεπικάλυψης η σύνδεση με μήκος αλληλοεπικάλυψης ίσο με 120 mm είχαν κατά 28% περίπου μεγαλύτερη αντοχή σε θράυση από αυτά των 60 mm παρά το γεγονός ότι παρουσιάζουν σημαντικά μη γραμμική συμπεριφορά και έχουν μεγαλύτερο βέλος κάμψης από αυτά με $l_{ov}=60$ mm. Όσον αφορά το είδος της κατεργασίας δεν μπορεί να διεξαχθεί κάποιο γενικό συμπέρασμα δεδομένου ότι τα δοκίμια με $l_{ov}=60$ mm που είχαν υποστεί αμμοβολή παρουσίασαν υψηλότερο φορτίο θράυσης κατά περίπου 10 %. Αντίθετα, τα δοκίμια με $l_{ov}=120$ mm που είχαν κατεργαστεί με αεροματσάκωνο αποδείχθηκαν κατά περίπου 6,7% πιο ανθεκτικά έναντι αυτών που είχαν κατεργαστεί με αμμοβολή.

Ο τρόπος σύνδεσης με κολλητικά μέσα είναι μια τεχνική ιδιαίτερα συνήθης στην συναρμολόγηση σύνθετων υλικών με ίδια ή και με μεταλλικά υλικά. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην πληθώρα των πλεονεκτημάτων που προσφέρει αυτή η μέθοδος σε σχέση με άλλες μεθόδους. Η μελέτη μας έδειξε, ότι η σωστή επιλογή κολλητικού μέσου για την συγκεκριμένη εφαρμογή είναι ιδιαίτερα κρίσιμη. Αυτό συμβαίνει γιατί είναι το κολλητικό μέσο συνήθως αυτό που αστοχεί πρώτο στην σύνδεση. Επίσης, διαπιστώσαμε το πόσο σημαντικό ρόλο διαδραματίζει το μήκος επικάλυψης σε τέτοιου είδους συνδέσεις αλλά και οι ιδιότητες των υλικών που απαρτίζουν τη σύνδεση.

Μια άλλη προϋπόθεση, που θα πρέπει να λάβουμε υπόψη μας κατά το στάδιο του σχεδιασμού, είναι το κόστος της κατασκευής της σύνδεσης. Σε μεγάλες και πολύπλοκες κατασκευές, οι συνδέσεις μπορεί να αποτελούν ένα σημαντικότερο τμήμα του βάρους της κατασκευής και αυτό μπορεί να επιβαρύνει ιδιαίτερα το κόστος της κατασκευής. Είναι απαραίτητο να διασφαλίσουμε την ελαχιστοποίηση των χρησιμοποιούμενων υλικών, τις εργασιακές προϋποθέσεις και τη συμβατότητα της τεχνολογίας που χρησιμοποιείται για την κατασκευή της σύνδεσης, σε σχέση με αυτή που χρησιμοποιείται σε όλα τα τμήματα της κατασκευής. Επίσης, δεν θα πρέπει να παραβλέψουμε στο στάδιο του σχεδιασμού την παράμετρο της εύκολης κατασκευής της σύνδεσης. Μια εύκολα κατασκευάσιμη σύνδεση είναι προτιμότερη από μια πολύπλοκης μορφής. Οι οικονομικές απαιτήσεις μιας εύκολα κατασκευάσιμης σύνδεσης είναι μικρότερες.

5.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

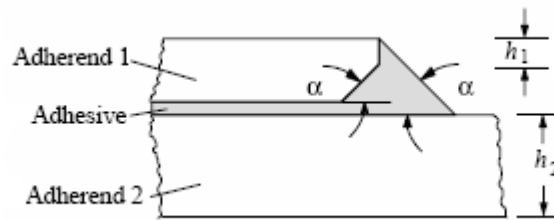
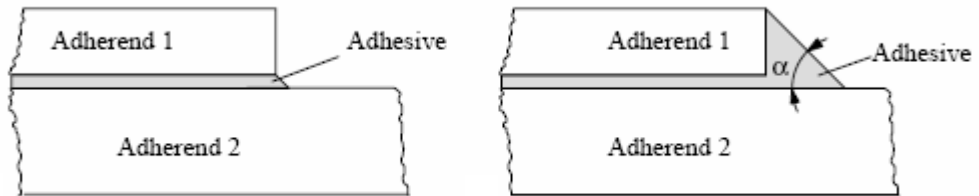
Όπως είναι εύκολα αντιληπτό από την παρούσα εργασία υπάρχει μία πληθώρα ιδιοτήτων και μεγεθών που ενδείκνυνται προς μελέτη. Κατά την διάρκεια των

σταδίων μελέτης που ολοκληρώσαμε και περιγράφηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια προέκυψαν παράμετροι που επιλέξαμε τις τιμές τους για τη διευκόλυνση της μελέτης. Επίσης, κατά την μελέτη της βιβλιογραφίας διαπιστώθηκαν πολλές καινοτομίες ή τυχόν αλλαγές που θα μπορούσαν να γίνουν στην παρούσα γεωμετρία. Μερικές από τις προτάσεις που έχουμε για περαιτέρω επέκταση της εργασίας θα γίνει προσπάθεια να αναφερθούν σε αυτή την παράγραφο.

- Στο στάδιο της επιλογής των παραμέτρων επιλέξαμε εκ των προτέρων τη χρήση χάλυβα. Αυτό έγινε για την διευκόλυνση μας κατά την διεξαγωγή πειραμάτων στην μονάδα του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας. Η διερεύνηση με τη χρήση αλουμινίου θα ήταν απαραίτητη καθώς πρόκειται για το δεύτερο πιο διαδεδομένο σε χρήση μέταλλο μετά τον χάλυβα στην ναυπηγική. Επιπρόσθετα τα περισσότερα σκάφη που χρησιμοποιούν μεικτές κατασκευές αποτελούνται κυρίως από αλουμίνιο.
- Η επιλογή του κολλητικού μέσου έγινε με στόχο την απλότητα και τη διευκόλυνση της κατασκευής της σύνδεσης. Η μελέτη διενεργήθηκε για ένα κολλητικό μέσο. Μια παράμετρος επιπλέον μελέτης θα μπορούσε να είναι η αλλαγή του κολλητικού μέσου.
- Αναγκαία κρίνεται επίσης μία διερεύνηση όσον αφορά τις τιμές του μέτρου ελαστικότητας του σύνθετου υλικού καθώς και το είδος του πολύστρωτου. Αντιλαμβανόμαστε ότι οι συνδυασμοί που μπορούν να επιτευχθούν αλλάζοντας τον προσανατολισμό, τον αριθμό των στρώσεων και των υλικών που επιλέγονται για την κατασκευή του πολύστρωτου είναι πάρα πολλοί.
- Μία άλλη παράμετρος που παρουσιάζει ενδιαφέρον είναι η σύγκριση της αντοχής της σύνδεσης για διαφορετικές μεθόδους κατασκευής του πολύστρωτου.
- Θα μπορούσαν να δημιουργηθούν κάποιες οπές στο μέταλλο στην περιοχή επικάλυψης του με το σύνθετο με σκοπό να υπάρξει μεγαλύτερη συνοχή μεταξύ των δύο υλικών. Καταλαβαίνουμε ότι ο αριθμός και η μορφή των οπών που μπορούν να γίνουν αποτελούν επιπλέον παράγοντες παραμετροποίησης της σύνδεσης.
- Το πάχος του συνθέτου υλικού στην παρούσα γεωμετρία υποδιαιρείται σε t_1 και t_2 , όπου η σχέση μεταξύ των δύο είναι πάντα $t_1 = t_2 = \frac{t_c}{2}$. Αυτή η αναλογία μπορεί να αλλάξει υπέρ του ενός ή του άλλου πάχους και να εξαχθούν συμπεράσματα για την καλύτερη κατανομή των στρώσεων του συνθέτου.
- Κατά την παρούσα διπλωματική εργασία η σχέση μεταξύ του μήκους αλληλοεπικάλυψης και του ελεύθερου μήκους του μετάλλου και του σύνθετου κρατήθηκε σταθερή ($l_m = l_c = 2l_{ov}$). Η αναλογία αυτή με τη σειρά της μπορεί

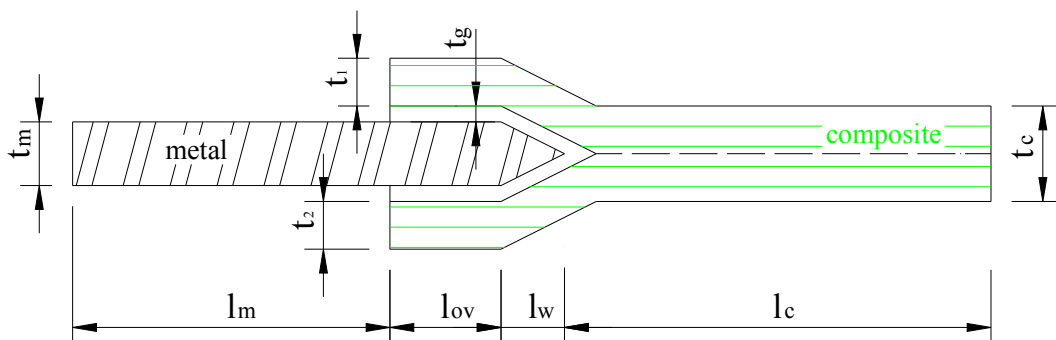
να διερευνηθεί έτσι ώστε να διαπιστωθεί ποια είναι η σχέση που βελτιστοποιεί την σύνδεση.

- Άλλες παράμετροι οι οποίες μπορούν να αποτελέσουν αντικείμενο μελέτης είναι η γωνία διαμόρφωσης του χάλυβα καθώς και πιθανές διαμορφώσεις του σύνδετικού μέσου στην περιοχή της αλληλοεπικάλυψης (Σχήμα 5.1)



Σχήμα 5.1

- Η σύνδεση, που περιγράφηκε στην παρούσα εργασία, παρουσιάζει γεωμετρική ασυμμετρία. Επομένως, η συμπεριφορά της σύνδεσης θα είναι γεωμετρικά μη γραμμική. Μπορούμε, αλλάζοντας την γεωμετρία, να παράγουμε σύνδεση συμμετρική όπως του Σχήματος 5.2 (Πετράκης 2007) και να διερευνήσουμε τα αποτελέσματα αυτής της αλλαγής στην γεωμετρία.



Σχήμα 5.2

- Διεξαγωγή επιπρόσθετων πειραμάτων με στόχο την επιβεβαίωση των συμπερασμάτων που διεξήχθησαν με στόχο την εξακρίβωση της επίδρασης της τραχύτητας της επιφάνειας του μετάλλου στην περιοχή της αλληλοεπικάλυψης στη συνολική αντοχή της σύνδεσης.
- Μοντελοποίηση αστοχιών με χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων (progressive failure).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική

- Παπάζογλου, Β. (1995), Ναυπηγική Τεχνολογία, Σημειώσεις Μαθήματος, Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Παντελής, Δ. και Χρυσουλάκης Γ. (1996), Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών, Παπασωτηρίου.
- Παντελής, Δ. (1996), Μη Μεταλλικά Τεχνικά Υλικά. Δομή, Ιδιότητες, Τεχνολογία, Εφαρμογές, Παπασωτηρίου.
- Πετράκη, Γ. (2007), Κατασκευαστική Μαλάτη Συνδέσεων Μεταλλικών με Σύνθετα Υλικά, Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Απρίλιος 2007.
- Τσούβαλης, Ν. (1998), Ανάλυση και Σχεδίαση Σκαφών από Σύνθετα Υλικά, Σημειώσεις Μαθήματος, Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Διεθνής

- ASTM D 3039 / D 3039 – 95a “Standard Test Method of Polymer Matrix Composite Materials”
- ANSYS Inc. Theory Reference, Ansys V.10
- Avila A. , Bueno P. , (2003) An Experimental and Numerical Study on Adhesive Joints for Composites, Elsevier Applied Science Publications, London.
- Baker A., (1984), Repair of Cracked or Defective Metallic Aircraft Components with Advanced Fibre Composites – an overview of Australian work, Composites Structures, Vol. 12, pp.153-181.
- Baker A., Chester R., Davis M., Roberts J. and Retchford J.,(1993), Reinforcement of F-111 Wing Pivot Fitting with Carbon/Epoxy Doubler System Materials Engineering Aspects, Composites Structures , Vol. 24, pp.511-521.
- Belingardi G., Goglio L. and Tarditi A., (2001), Investigating the Effect of Spew and Chamfer Size on the Stresses in Metal/Plastics Adhesive Joints, International Journal of Adhesion & Adhesives, Elsevier Applied Science Publications, London.

- Cao J. and Grenestedt L., (2004), Design and Testing of Joints for Composite Sandwich/Steel Hybridic Ship Hulls, Composites, Part A, Vol. 35, pp.1091-1105.
- Cao J. and Grenestedt L., (2003), Test of a Redesigned Glass-Fiber Reinforced Vinylester to Steel Joint for use between a Naval GRP Superstructure and a Steel Hull, Composites Structures, Vol. 60, pp.439-445.
- Clifford S. M., Manger C. I. C. and Clyne T.W. ,(2002), Characterisation of a Glass Fibre Reinforced Vinylester to Steel Joint for use between a Naval GRP Superstructure and a Steel Hull, Composites Structures , Vol. 57, pp.59-66.
- Dvorak G. J., Zhang J. and Canyurt O., (2001), Adhesively Tongue and Groove Joints for Thick Composites Laminates, Composites Science and Technology, Vol. 61, pp. 1123-1142.
- Fawzia S. , Al-Mahaidi R. , Zhao X. (2006) , Experimental and Finite Element Analysis of a Double Strap Joint between Steel Plates and Normal Modulus GFRP. Elsevier Applied Science Publications, London.
- Golubovic A., (2000), Analysis and Optimization of Adhesively Bonded Joints, McGill University, Quebec Canada, Department of Mechanical Engineering, Master of Engineering
- Hashim S. and Winkle I., (2005), Review of Long-Term Tests in the Durability of Adhesive Joints in a Marine Environment, Society of Adhesion and Adhesives, University of Glasgow and Strathclyde.
- Hentinen M., Hildebrand M. and Visuri M., (1997), Adhesively Bonded Joints between FRP Sandwich and Metal, Technical Research Center of Finland.
- Hildebrand M., (1994), Non-Linear Analysis and Optimisation of Adhesively Bonded Single Lap Joints between Fibre-Reinforced Plastics and Metals, Int. J. Adhesion and Adhesives, Vol. 14, No 4.
- ISO / DIS 1183 – 1.2, (1999) : “Plastics – Methods for determining the Density of Non-Cellular Plastics”
- ISO 527-5, (1997) : “Plastics – Determination of tensile properties”
- ISO 4587, (1979), Determination of tensile lap-strength of high-strength adhesive bonds (single lap).
- ISO 4587, (2003), Determination of tensile lap-shear of high-strength of rigid to rigid bonded assemblies.

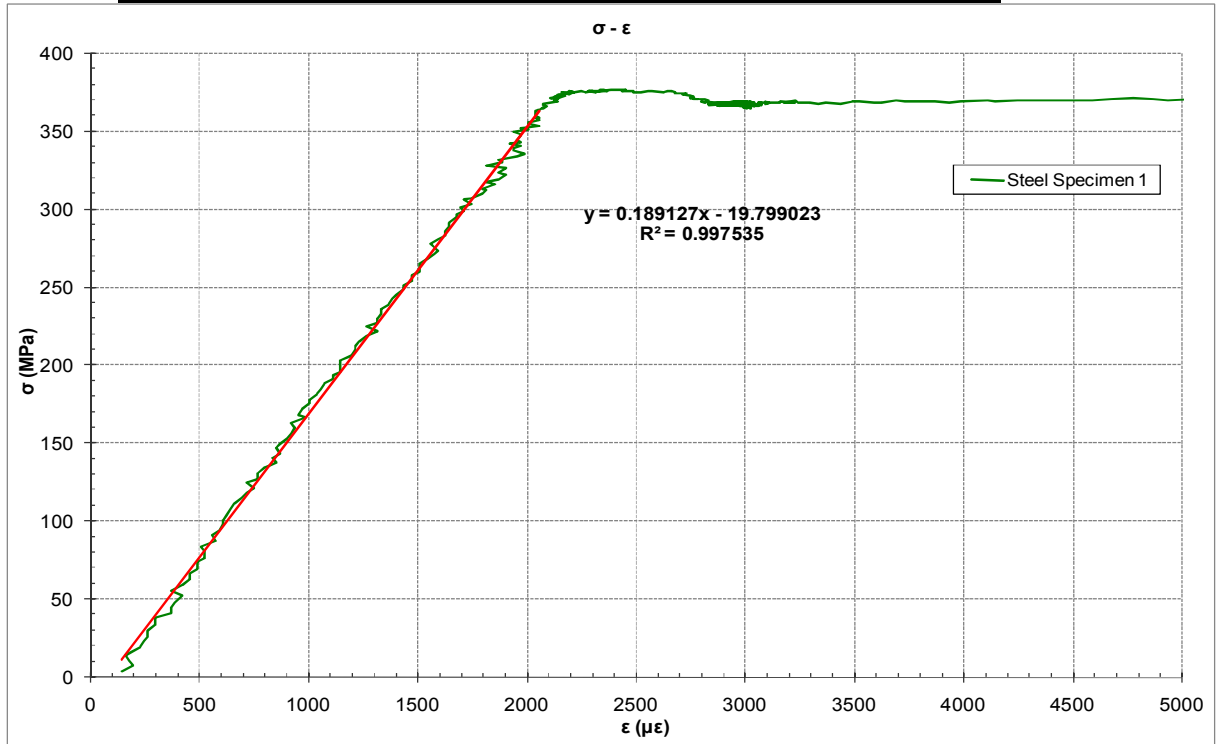
- ISO 4287-97 “Geometrical Product Specifications (GPS) – surface texture: Profile method – Terms, definitions and surface parameters”
- Ikegami K., Takeshita T., Matsuo K. and Sugibayashi T., (1990), Strength of Adhesively Bonded Scarf Joints between Glass Fibre-Reinforced Plastics and Metal, *Int. J. Adhesion and Adhesives*, Vol. 10, No 3
- Kim K. S. , Yi Y. M. , Cho G.R. & Kim C. G. , (2007) , Failure Prediction and Strength Improvement of Uni-Directional Composite Single Lap Bonded Joints , Elsevier Applied Science Publications, London.
- Lees W. A. , (1986) Bonding Composites, *Int. J. Adhesion and Adhesives*, Vol. 6, No4
- Li H. C. H., Dharmawan F., Herszberg I. and John S., (2006), Fracture Behaviour of Composite Maritime T-Joints, *Composites Structures* , Vol. 75, pp.339-350.
- Marcolefás S., Kostopoulos V. and Paipetis S. A., (1991), Non-Linear Analysis of a Metal-to-Composite Scarf Joint, *International Joints Mech. Sci.*, Vol. 33, No.12, pp.961-973, Great Britain.
- Matthews F.L., Kilty P.F. and Godwin E.W., (1982), A Review of the Strength of Joints in Fibre-Reinforced Plastics, Part 2 : Adhesively Bonded Joints, Composites, Butterworth & Co Publishers.
- Melogranaa D. J., Grenestedt L. J. and Maroun J. W., (2003), Adhesively Tongue and Groove Joints between Thin Carbon Fiber Laminates and Steel, *Composites, Part A*, Vol. 34, pp.119-124.
- Melogranaa D. J. and Grenestedt L., (2002), Improving Joints between Composites and Steel using Perforations, *Composites , Part A*, Vol. 33, pp.1253-1261.
- Mouritz A.P., Gellert E., Burchill P., Challis K., (2001), Review of Advanced Composite Structures for Naval Ships and Submarines, *Composite Structures* 53,21-41, Elsevier Applied Science Publications, London.
- Noury P. , Hayman B. Mc George P. & Weitzenbock J. Lightweight Construction for Advanced Shipbuilding – Recent Development.
- Osnes H. and Andersen A., (2003), Computational Analysis of Geometric Non-Linear effects in Adhesively Bonded Single Lap Composite Joints, *Composites, Part B*, Vol. 34, pp.417-427.
- Owens J. F. P. and Lee-Sullivan P., (1999 α), Stiffness Behaviour Due to Fracture in Adhesively Bonded Composite to Aluminium Joints, I. Theoretical model, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 20, pp. 39-45.

- Owens J. F. P. and Lee-Sullivan P., (1999 β), Stiffness Behaviour Due to Fracture in Adhesively Bonded Composite to Aluminium Joints, II. Experimental, International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol. 20, pp. 47-58.
- Reis P. N. B. , Antunes F.J.V. , Ferreira J. A. M. (2004) Influence of Superposition Length on Mechanical Resistance of Single-Lap Adhesive Joints, Elsevier Applied Science Publications, London.
- Shenoi R. A., (2005), Innovative Structural Components and Materials, University of Glasgow and Strathclyde.
- Shenoi R. A. and Wellicome J.F., (1993 α), Composite Materials in Maritime Structures, Volume 1 : Fundamental Aspects, Cambridge University Press, Great Britain.
- Structural Design of Polymer Composites, Eurocomp Design Code, The European Structural Polymeric Composite Group, edited John L. Clarke, 1996.
- Weitzenbock J. R. and McGeorge D , (2005), Bondship Project Guidelines, Technical Report No 2004-0134, Revision No2, Det Norske Veritas.
- Wright P.N.H., Wu Y. and Gibson A.G., (2001), Factors Affecting Mechanical Strength of Steel to Composite Connections for Warship Structures, Department of Marine Technology, University of Newcastle.
- Wright P.N.H., Stephen B. and Downes J., (2005), Tests on Composite to Steel Joints, Department of Marine Technology, University of Newcastle.
- Wu Z. J., Romeijn A. and Wardenier J., (1997), Stress Expressions of Single-Lap Adhesive Joints of Dissimilar Adherends, Composites Structures Vol. 38, No 1-4, pp. 273-280, Elsevier Applied Science Publications, London.

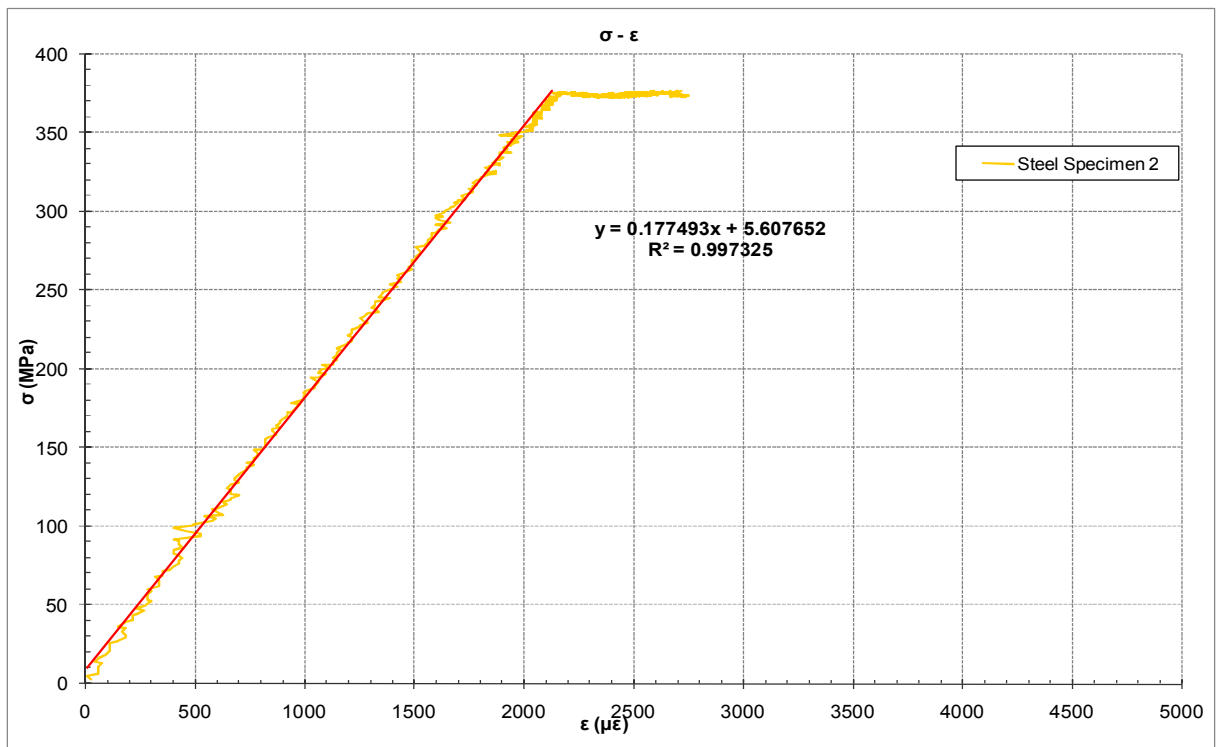
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων των υλικών

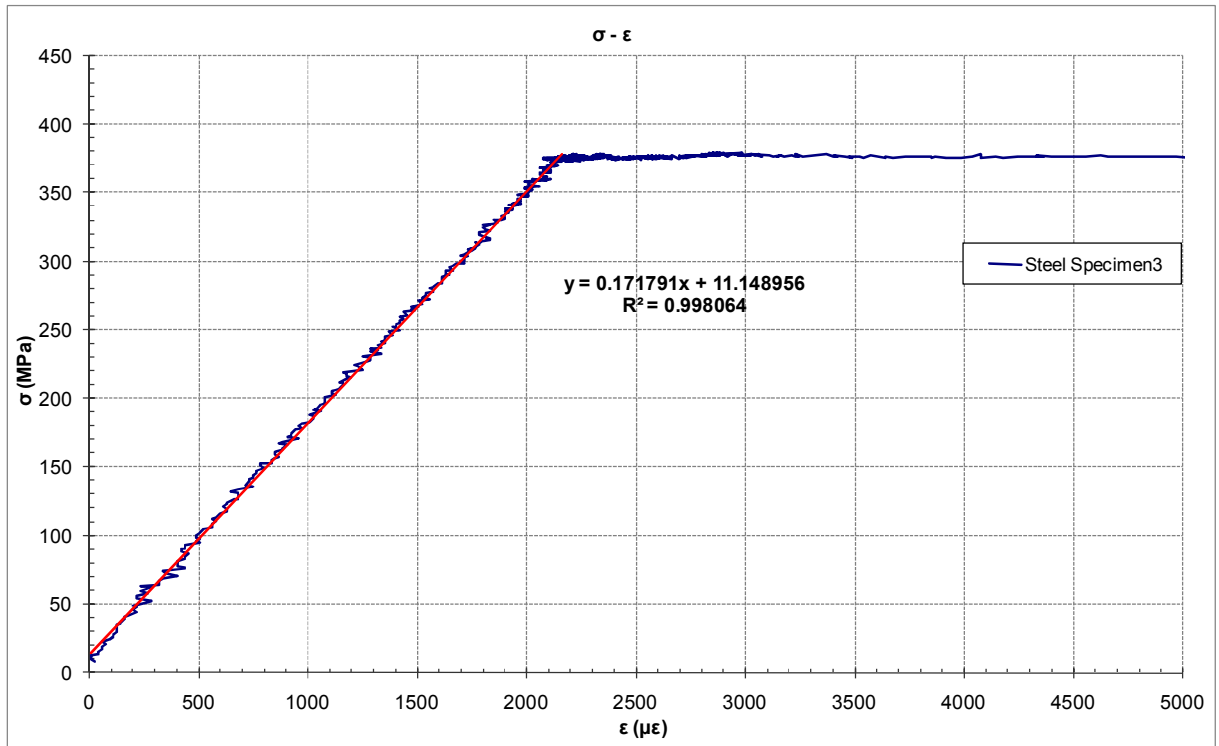
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΧΑΛΥΒΑ



A.1

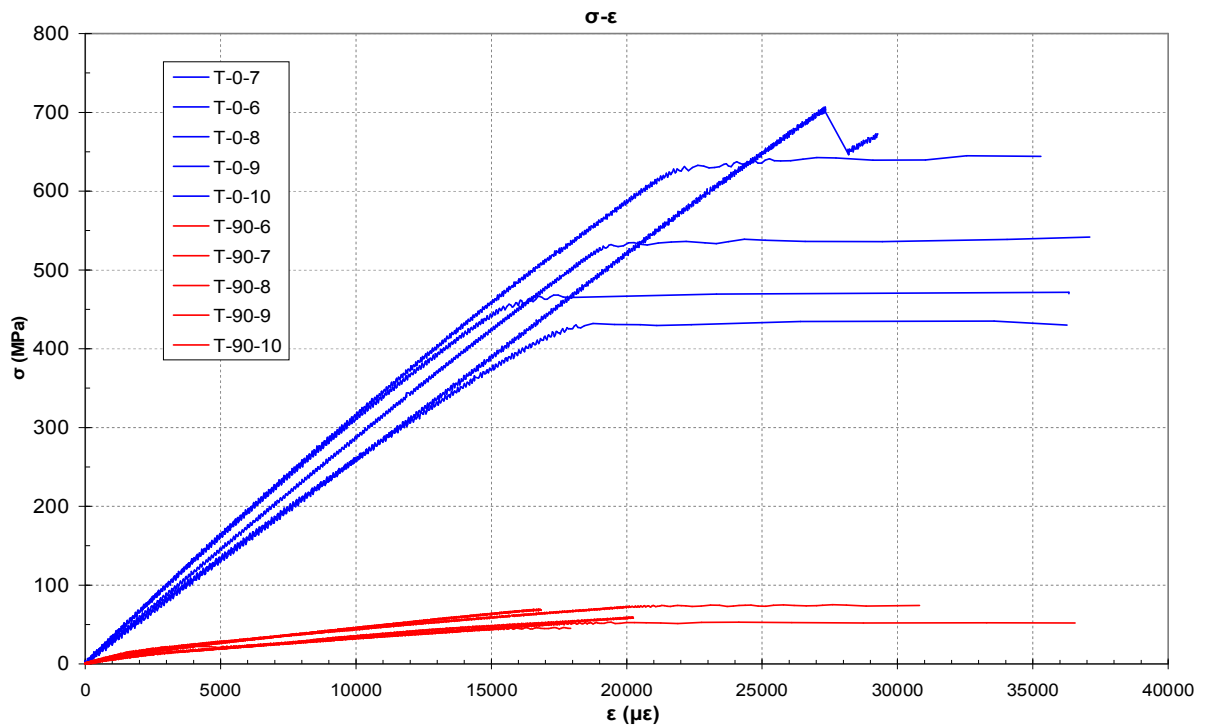


A.2



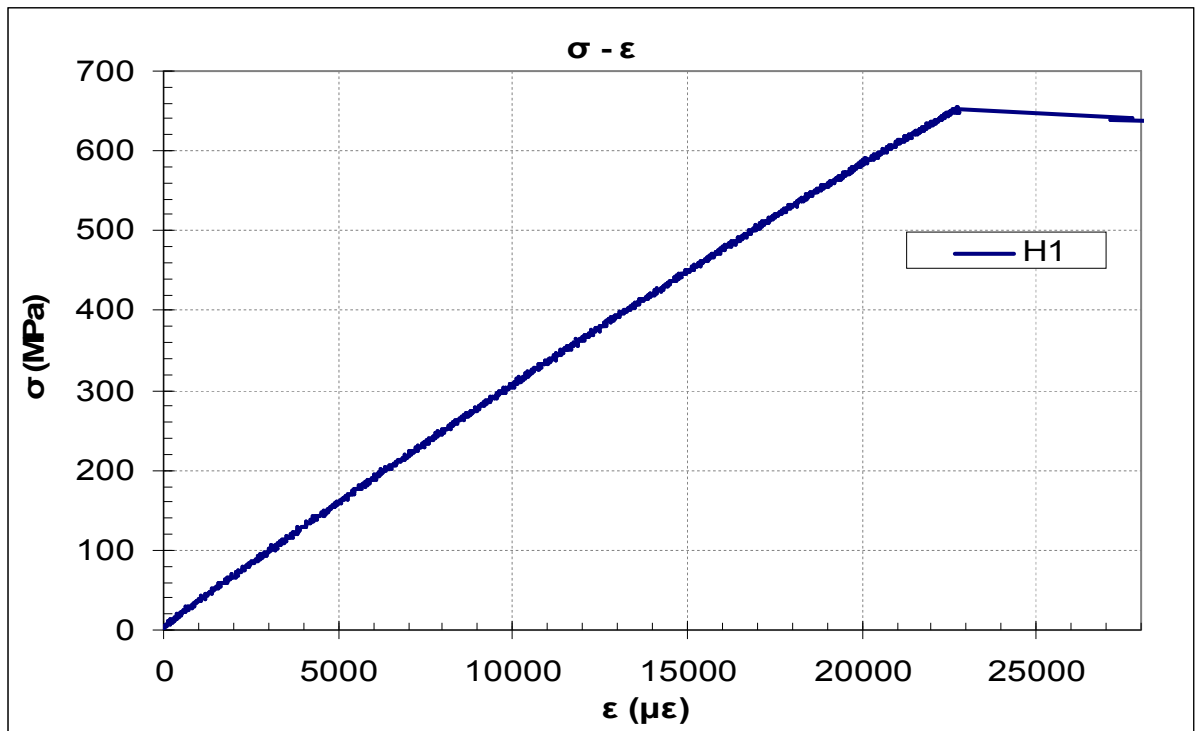
A.3

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΓΙΑ MARSTRUCT

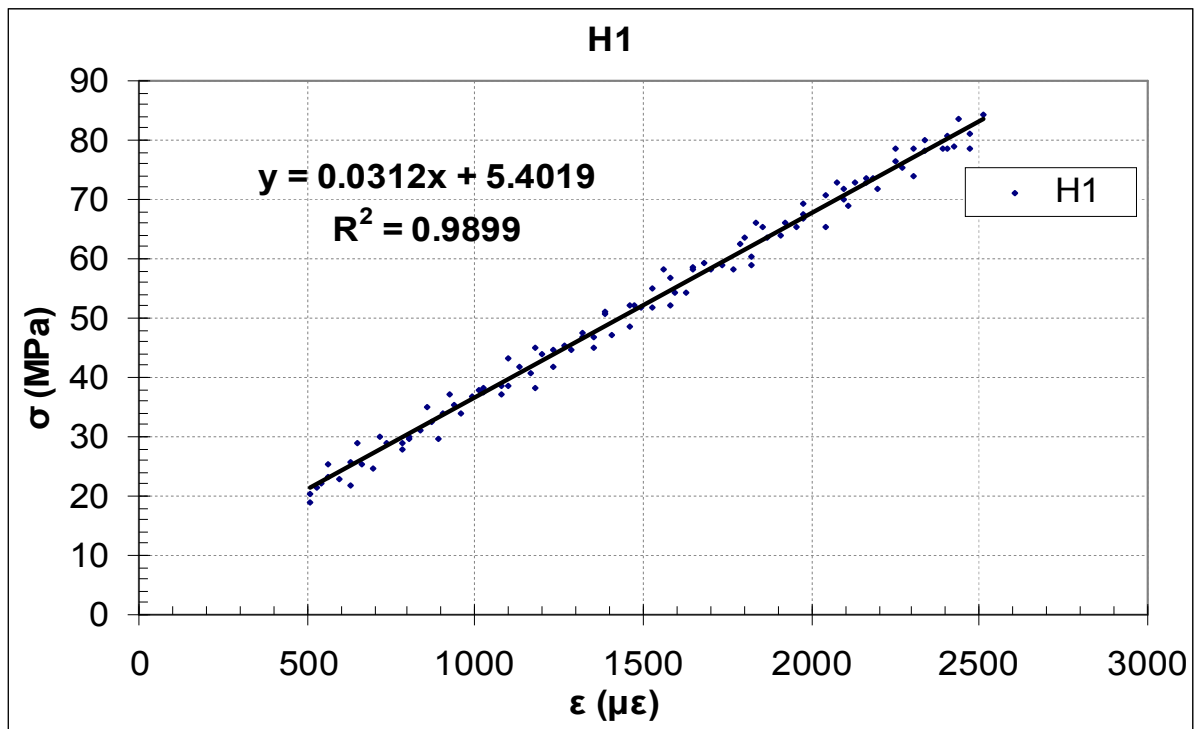


A.4

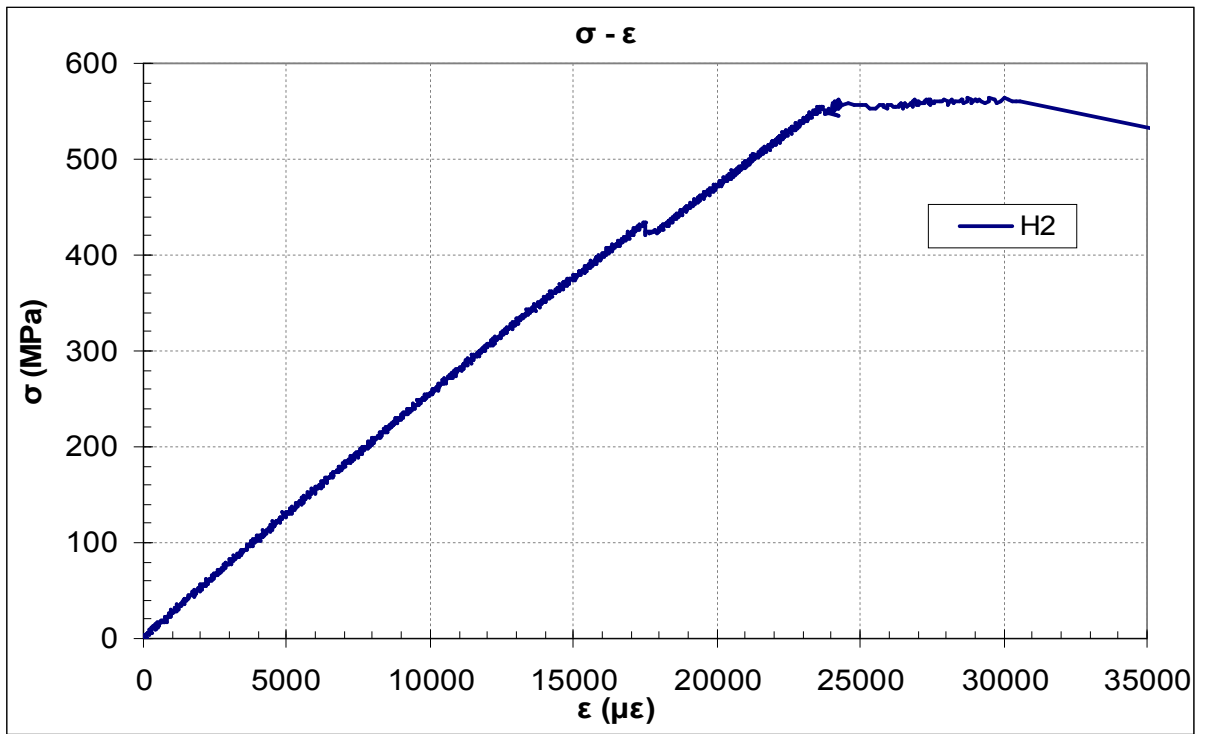
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΟΥ ΣΥΝΘΕΤΟΥ



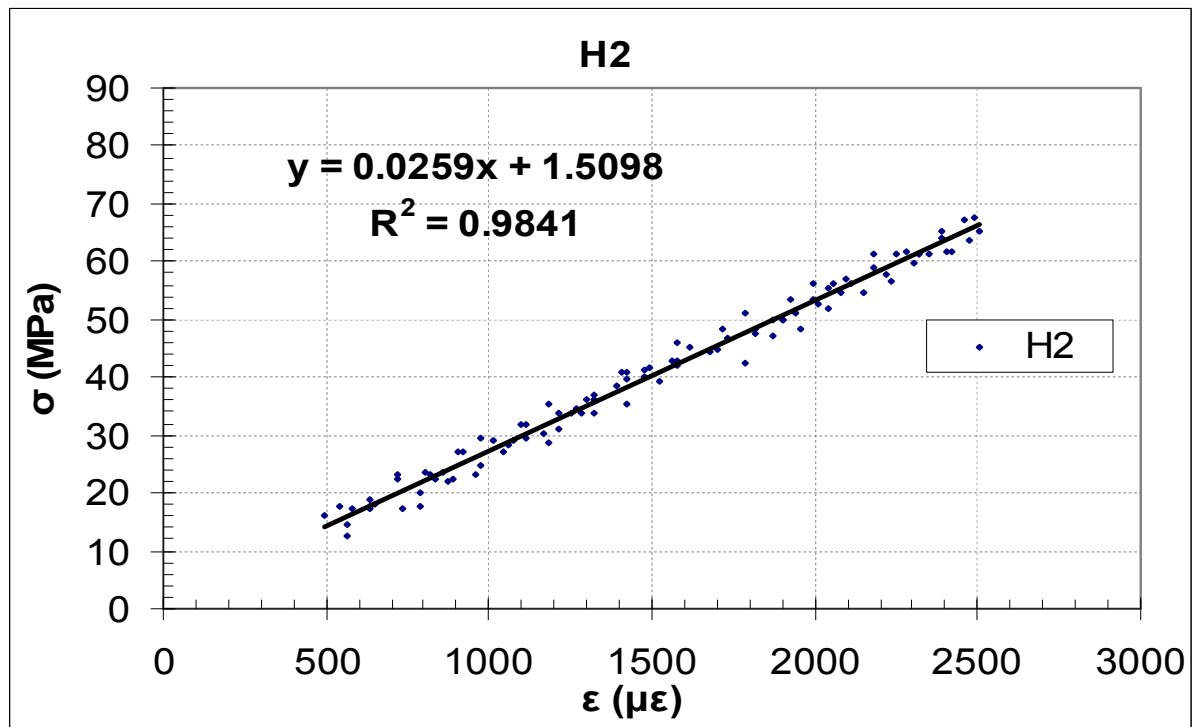
A.5



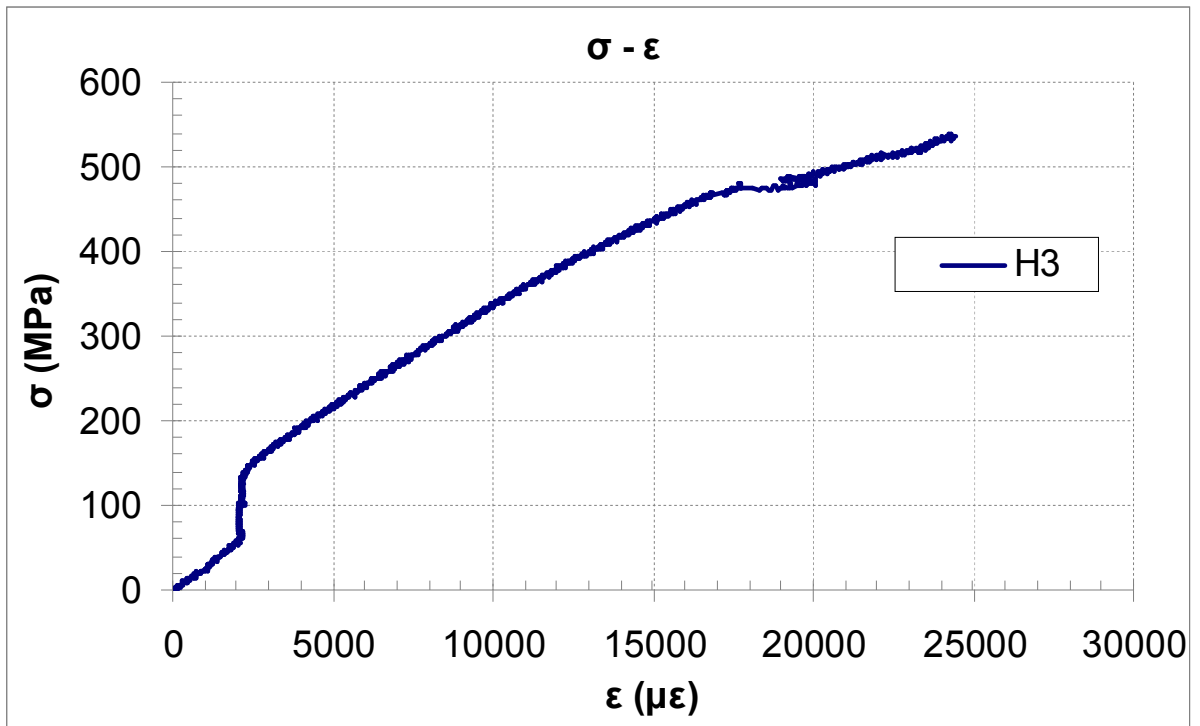
A.6



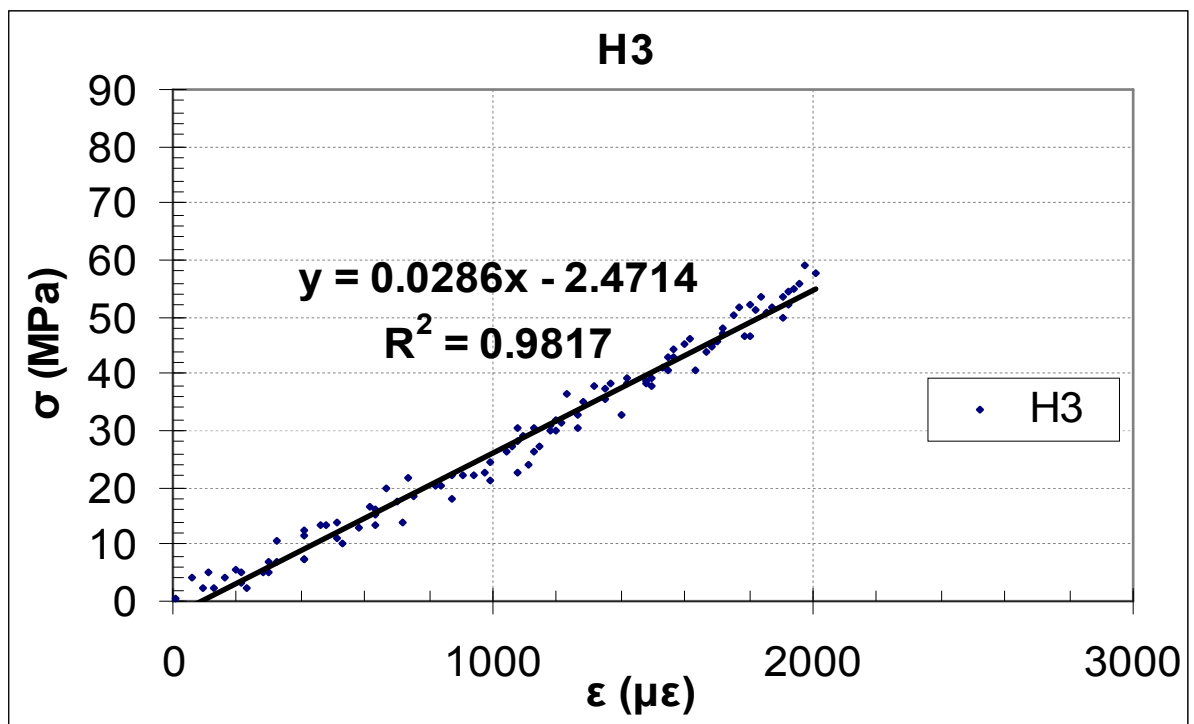
A.7



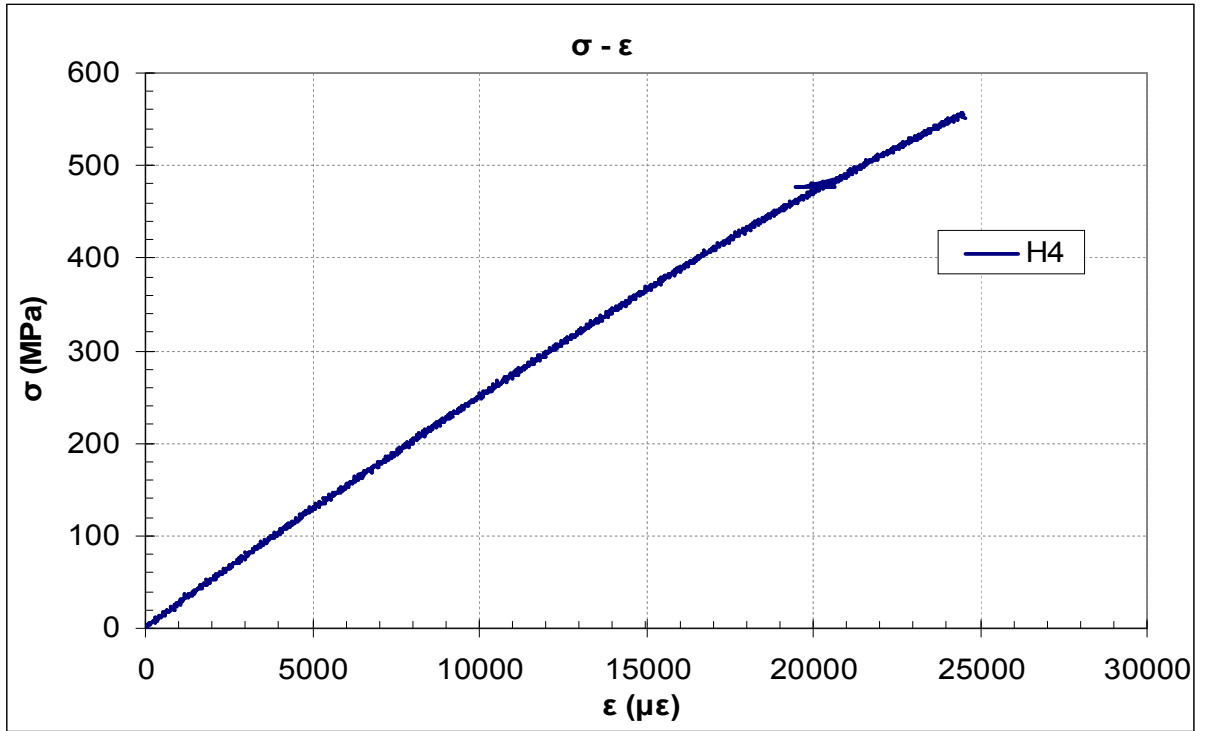
A.8



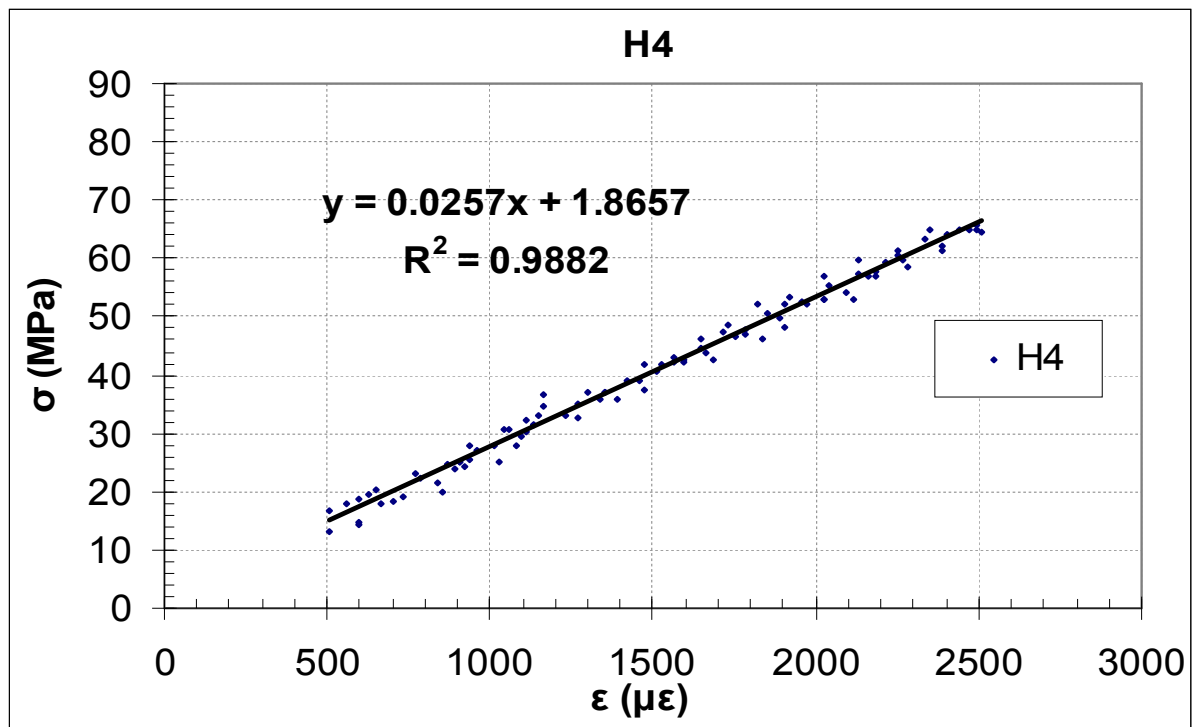
A.9



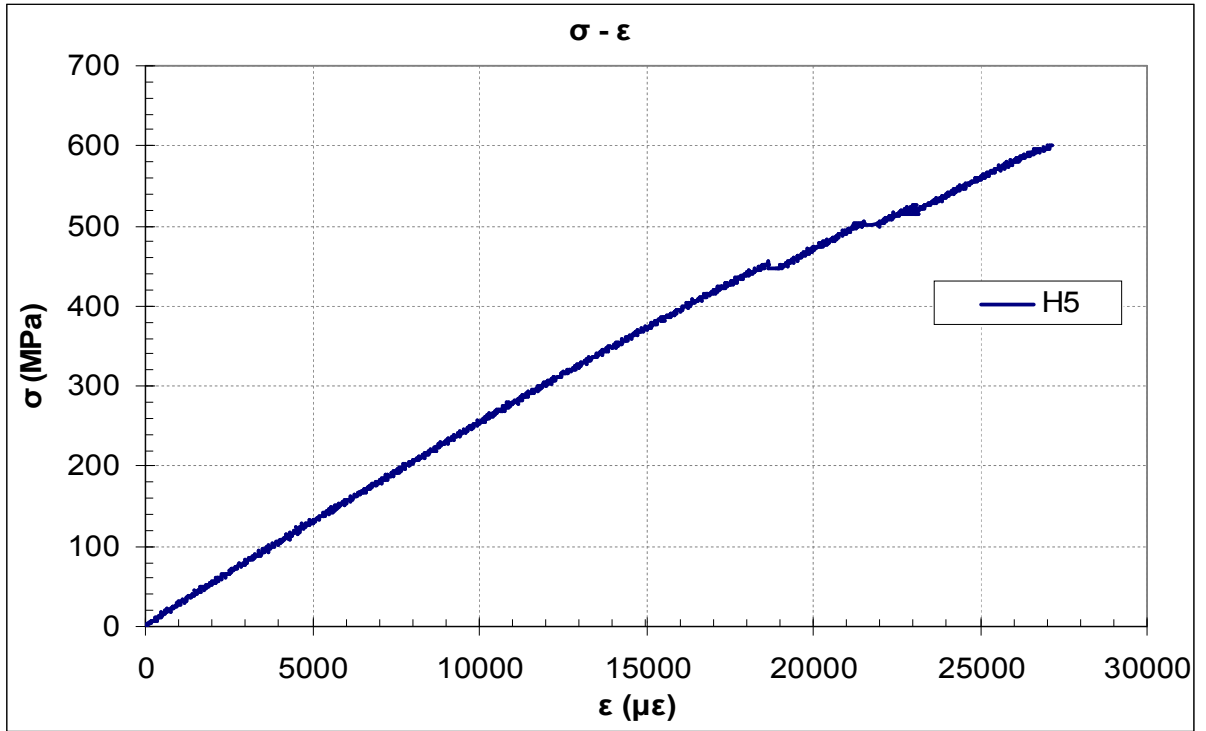
A.10



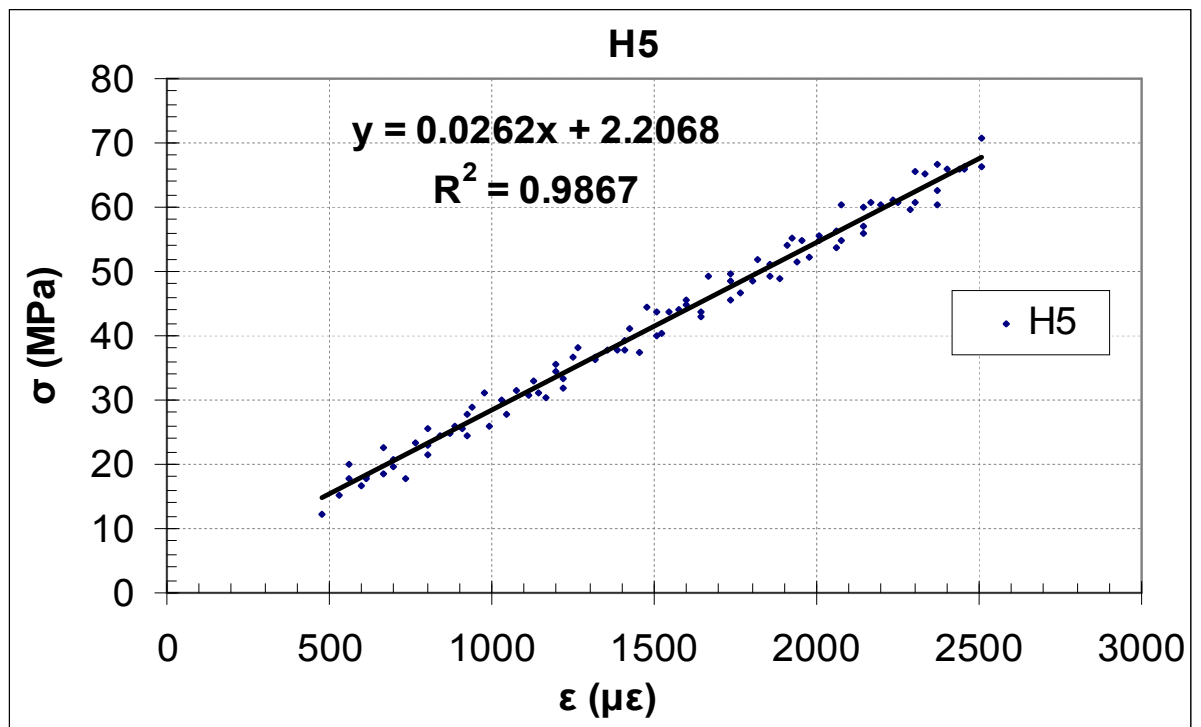
A.11



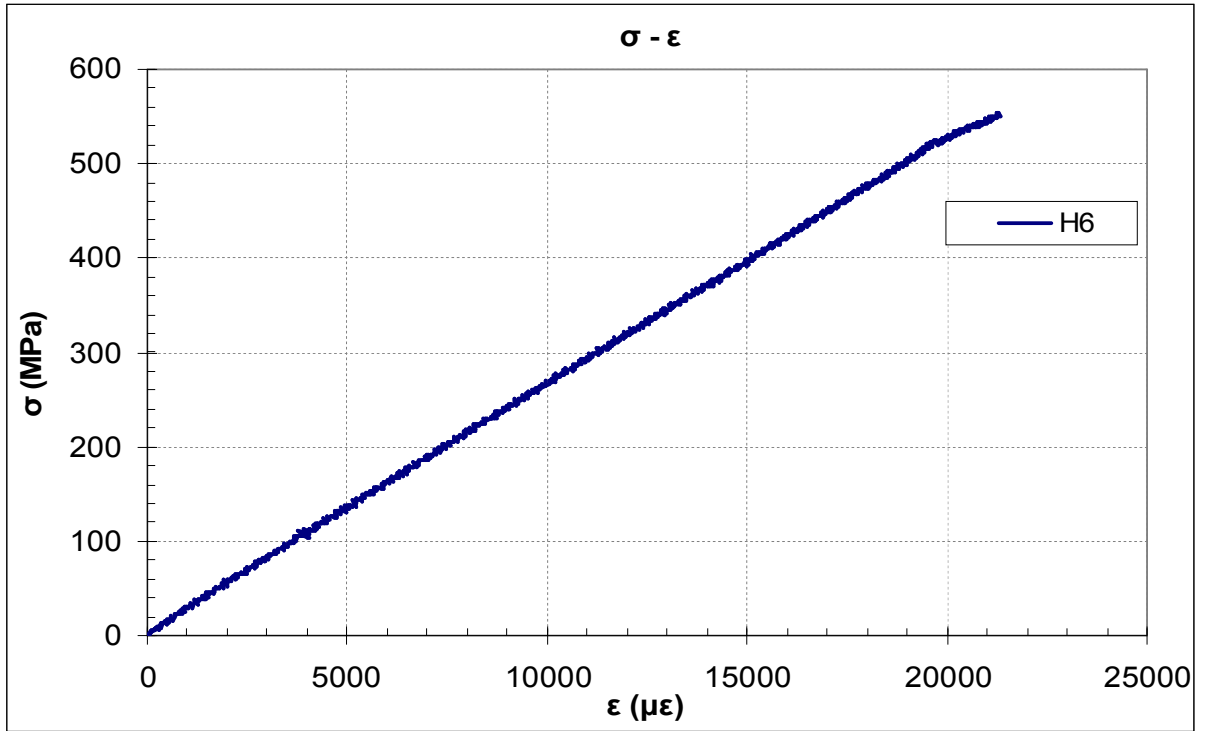
A.12



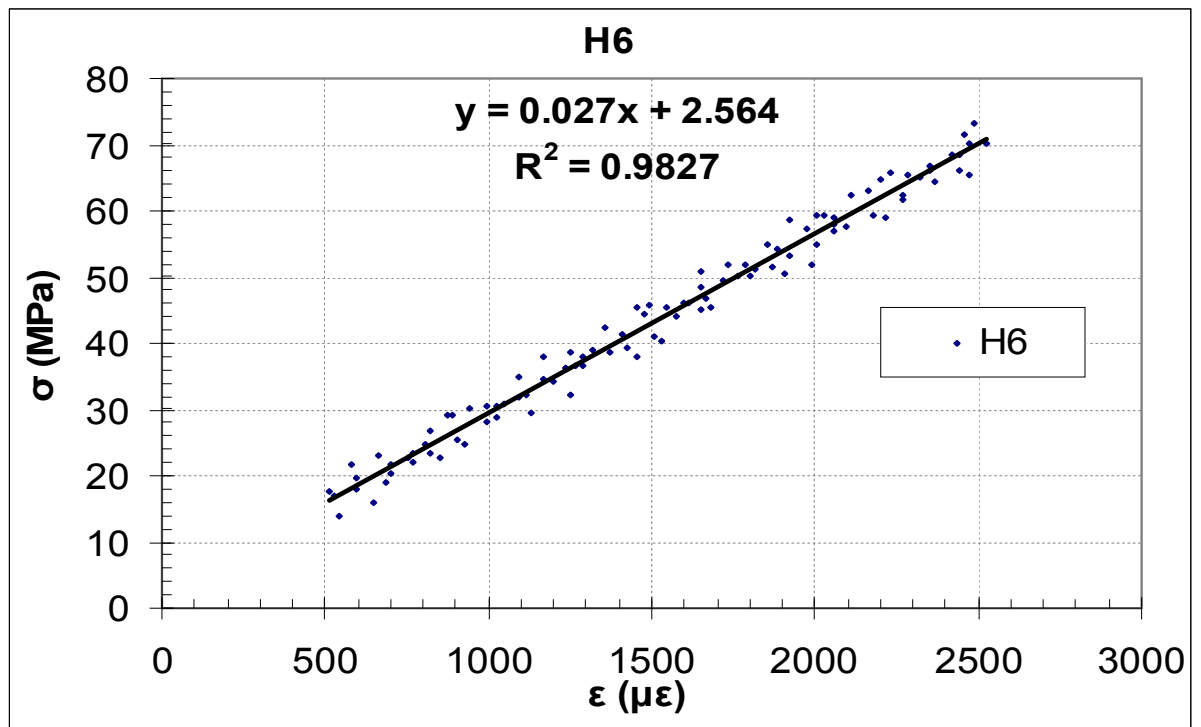
A.13



A.14

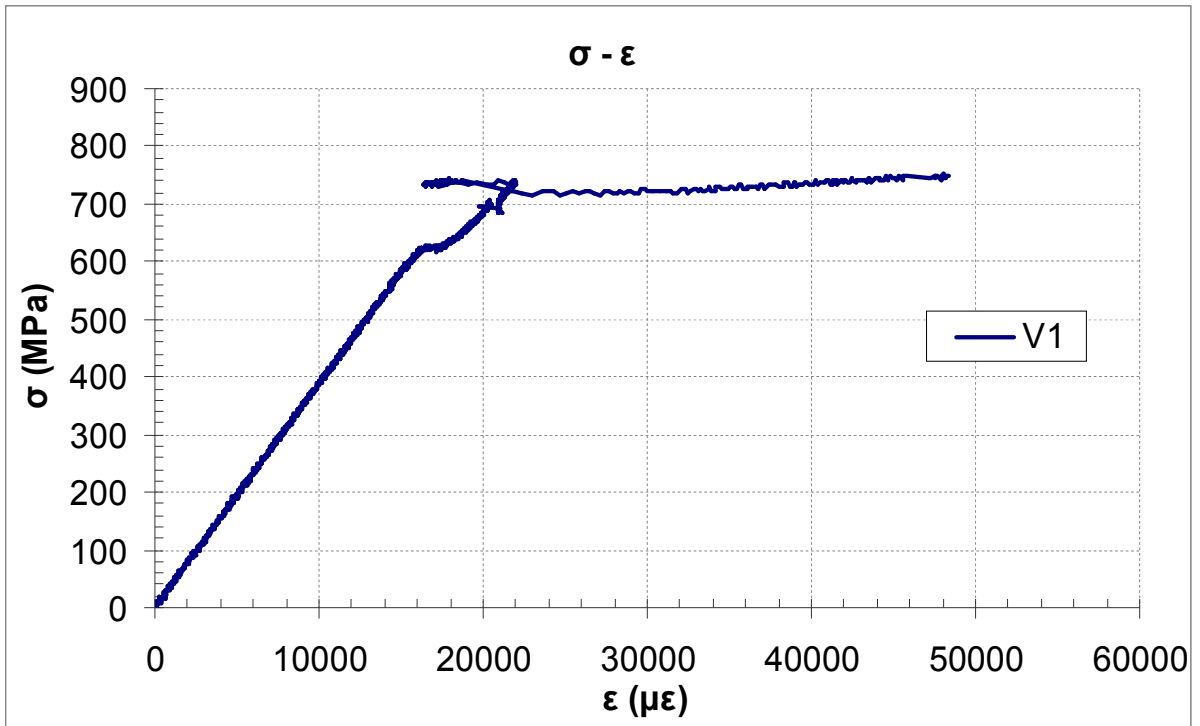


A.15

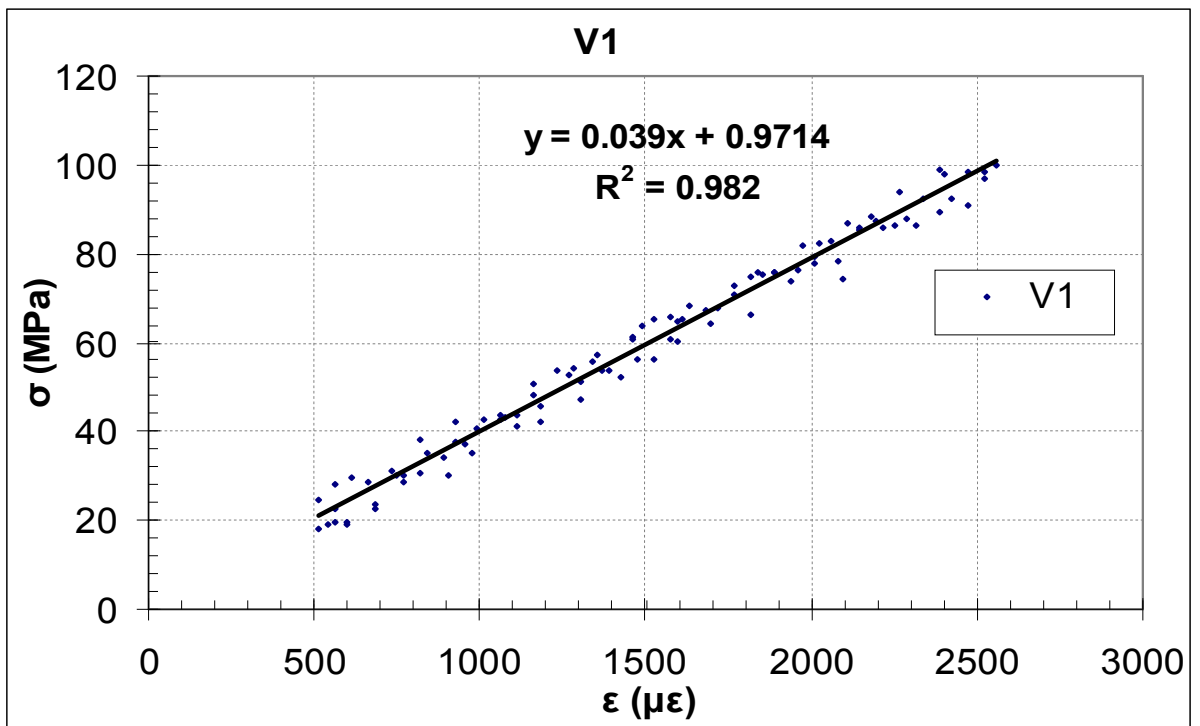


A.16

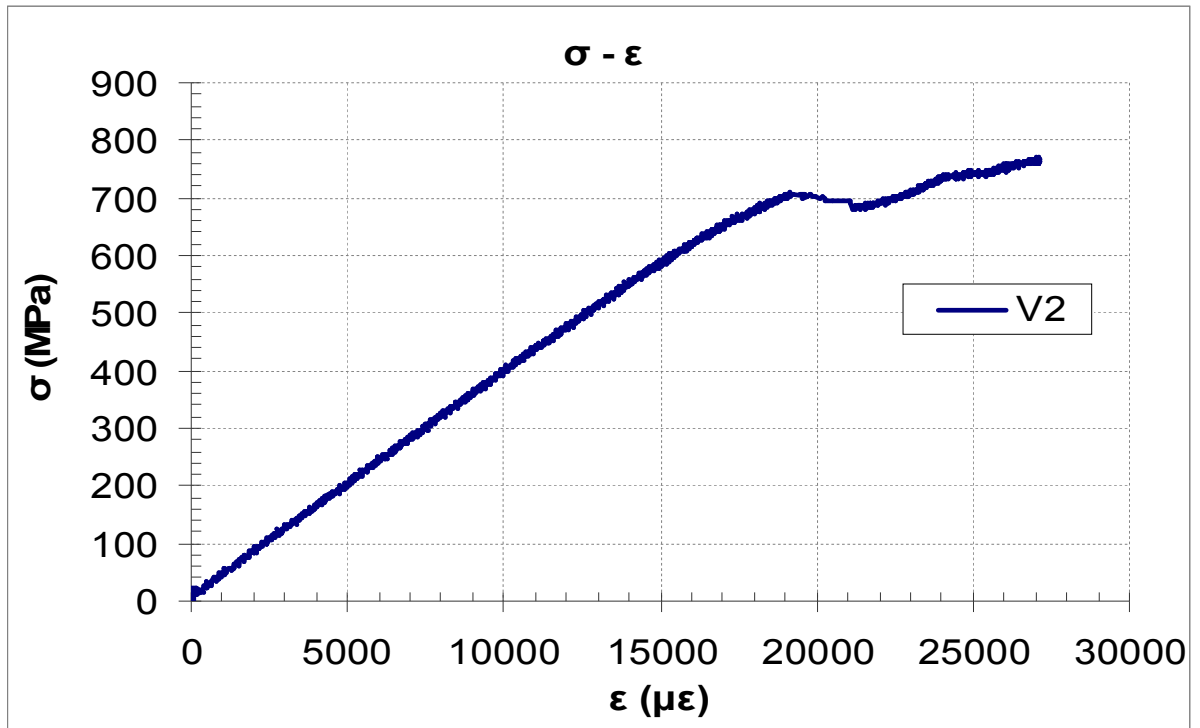
VACUUM SPECIMENS



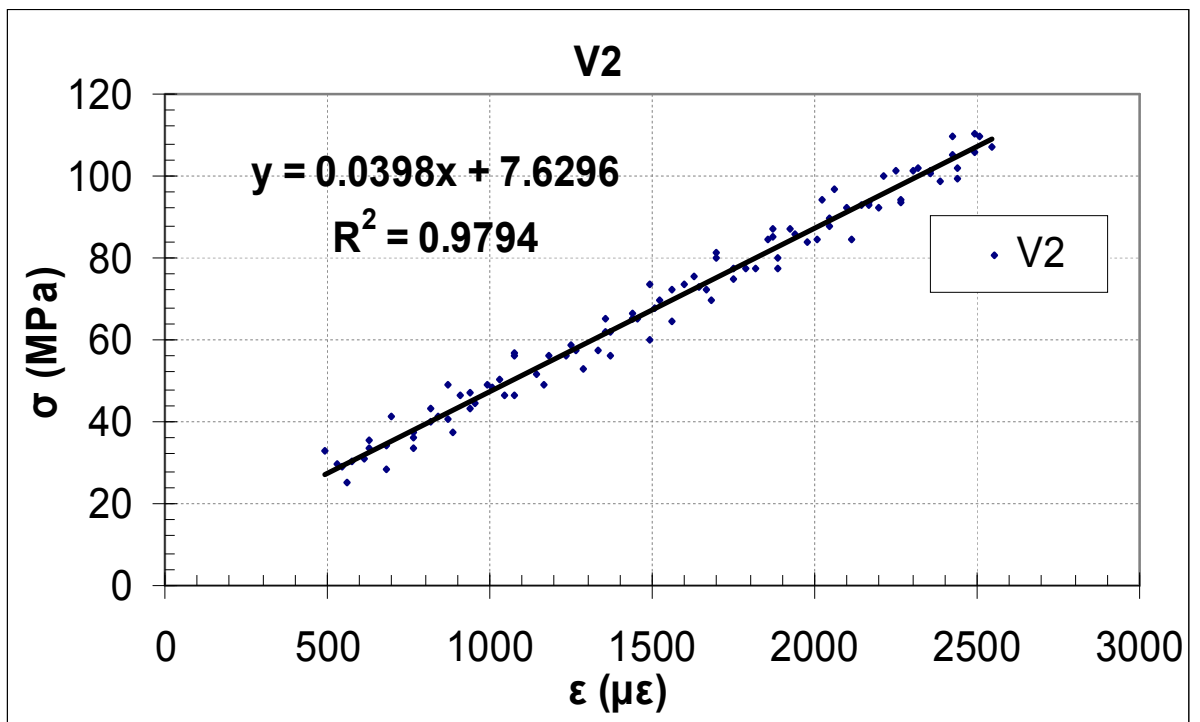
A.17



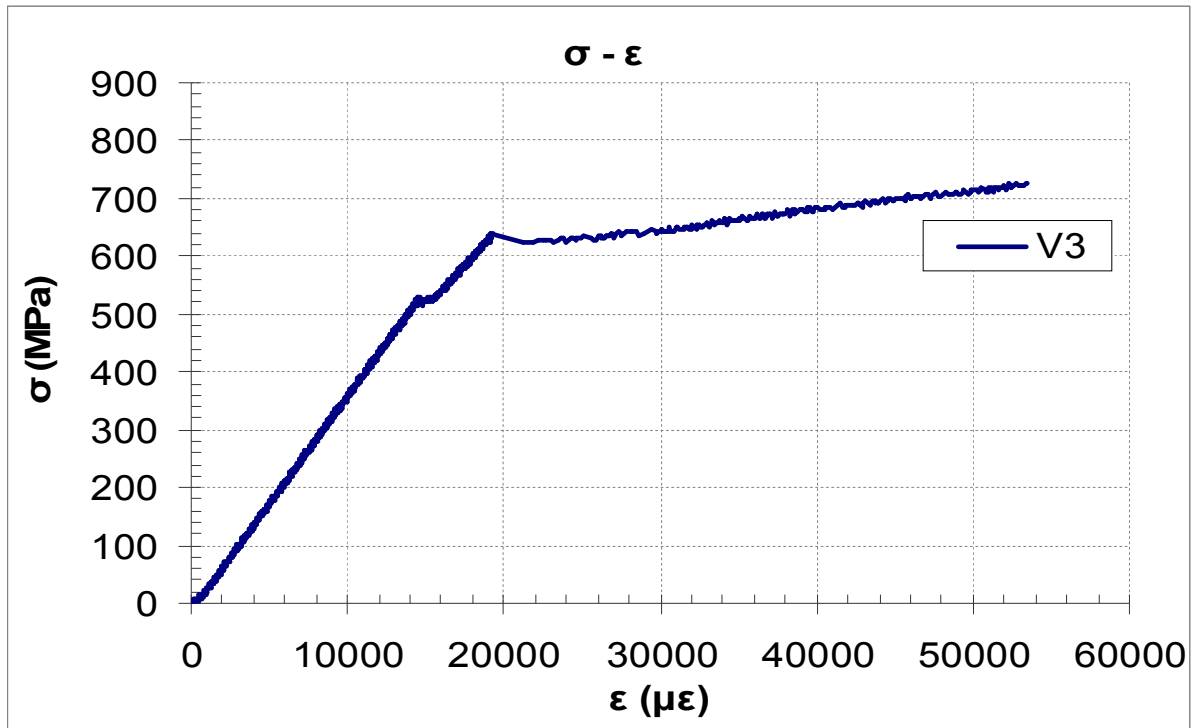
A.18



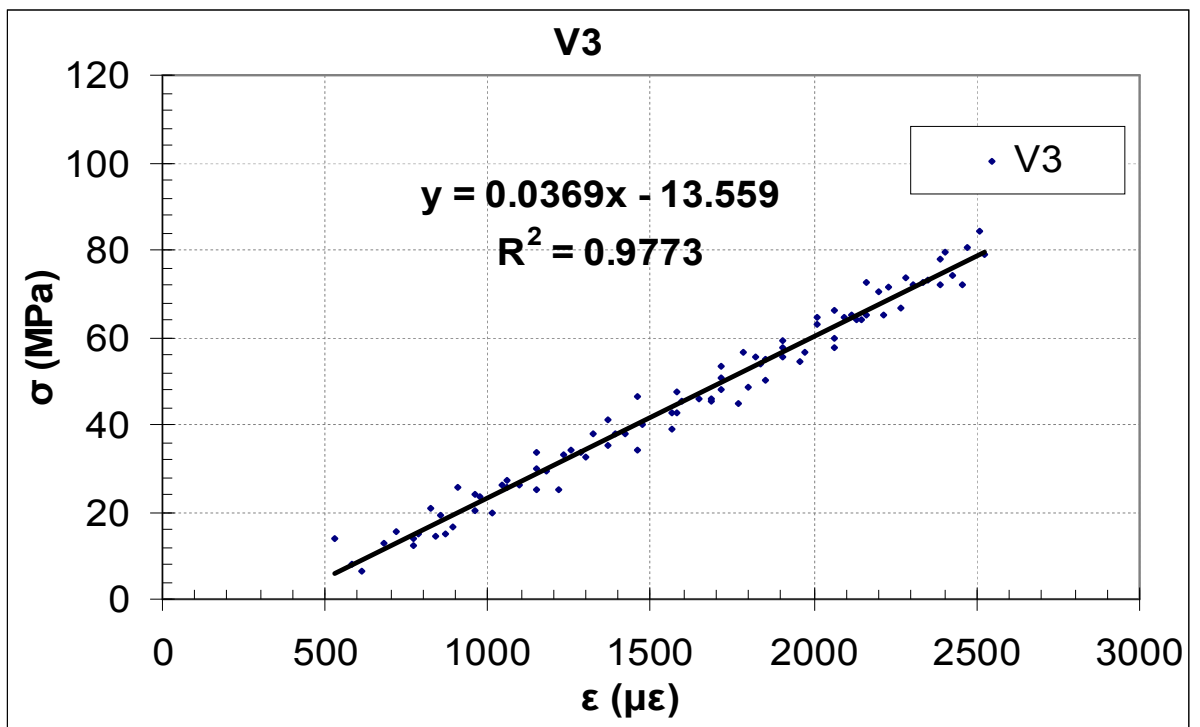
A.19



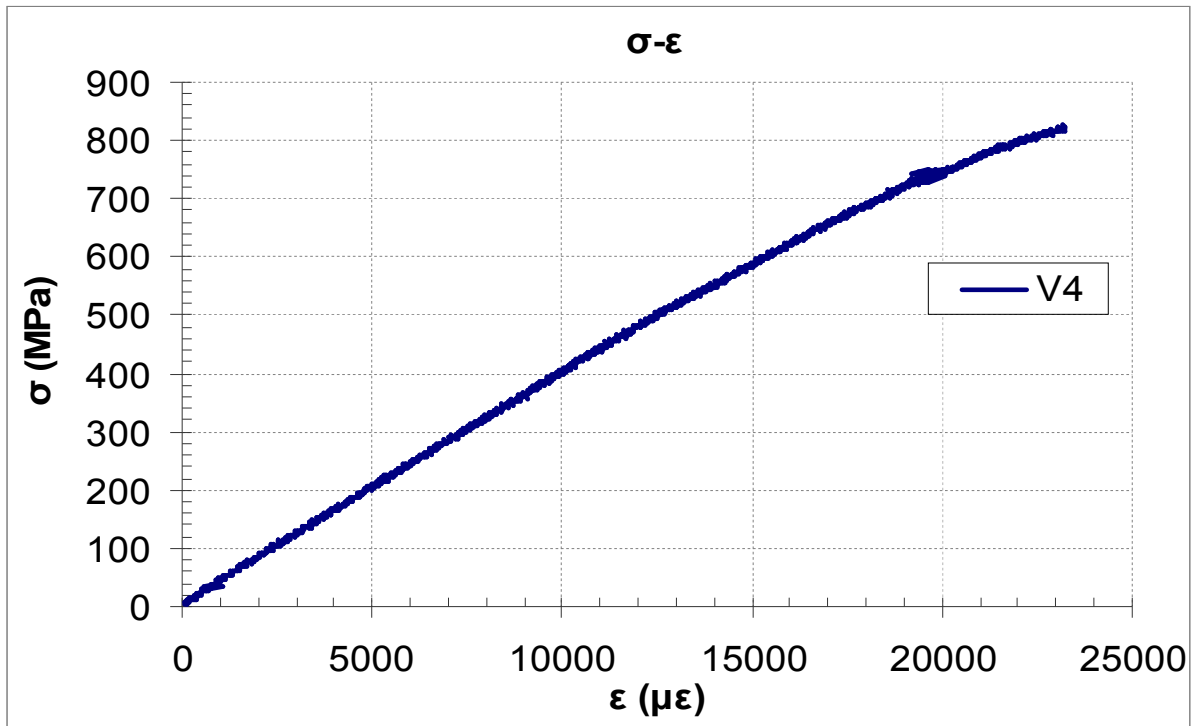
A.20



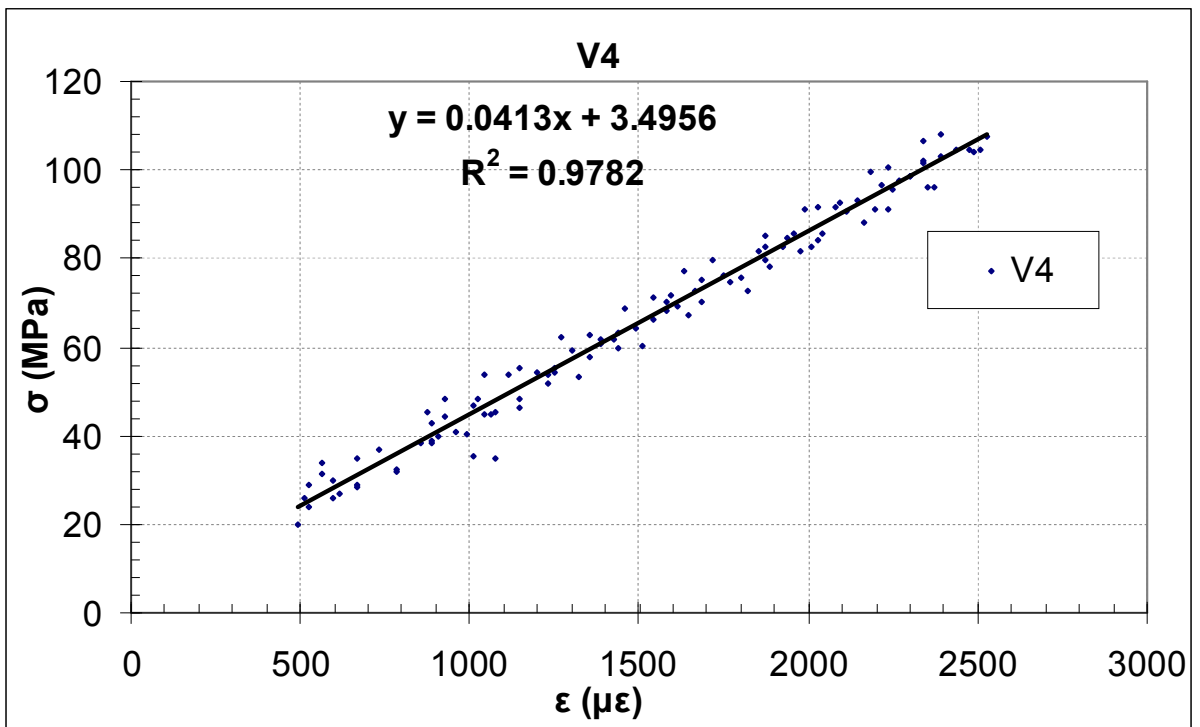
A.21



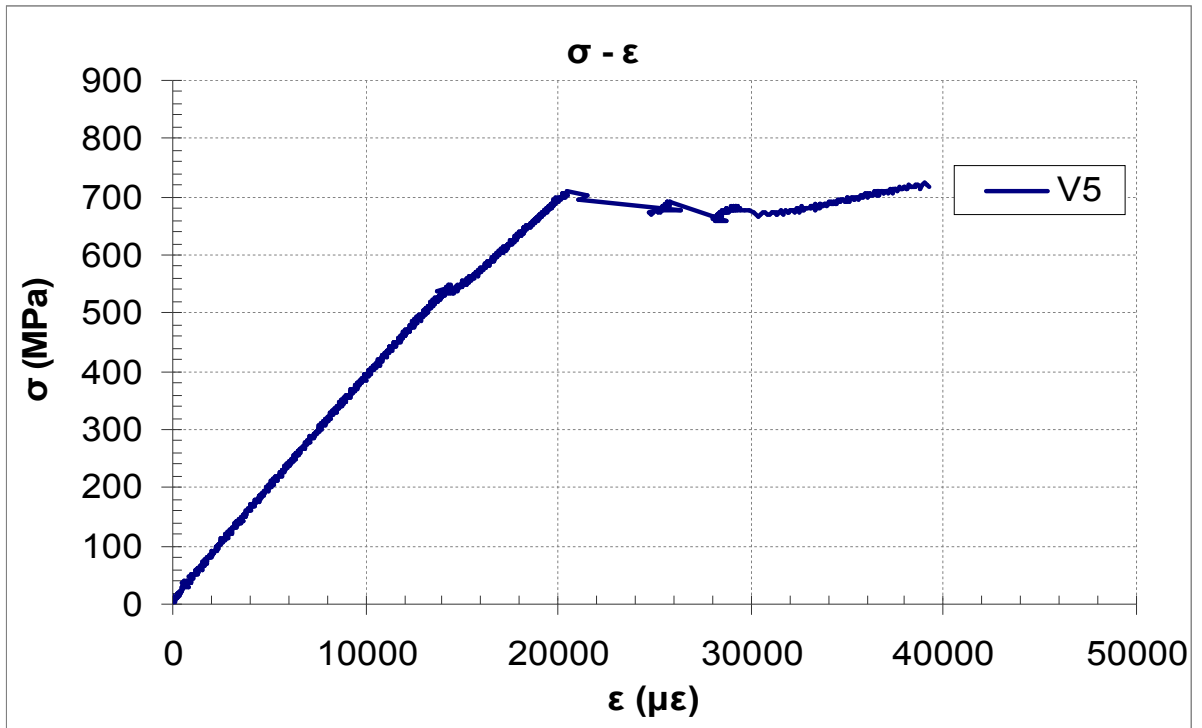
A.22



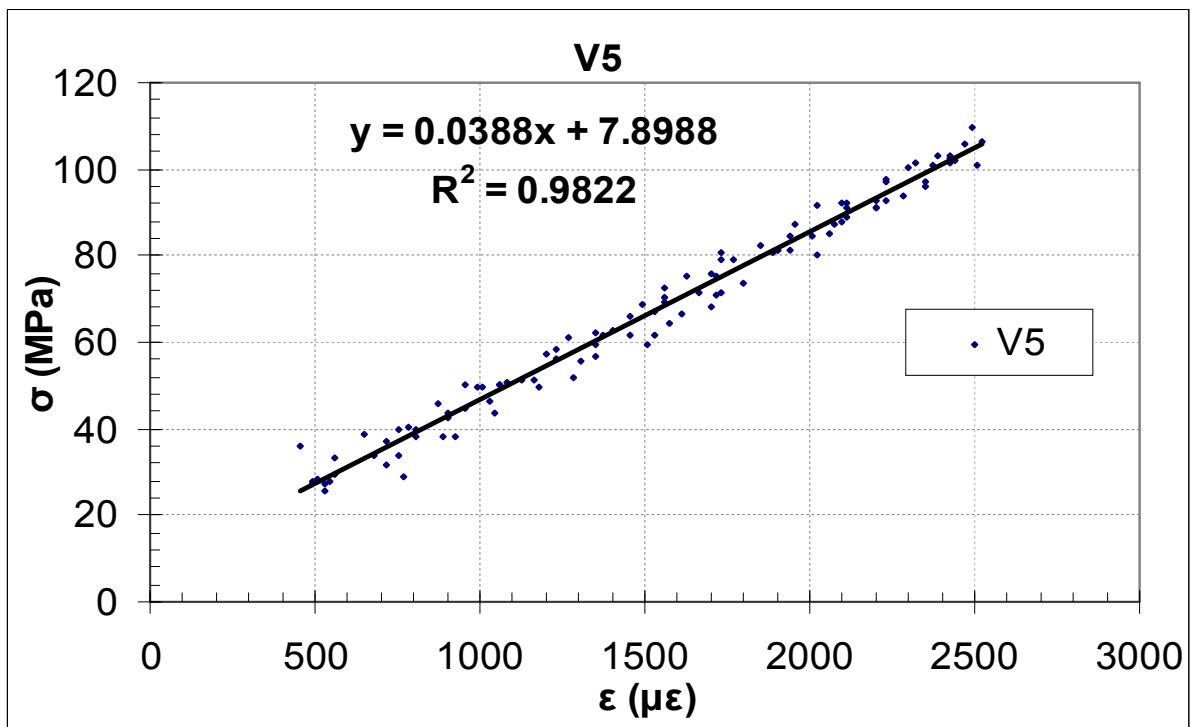
A.23



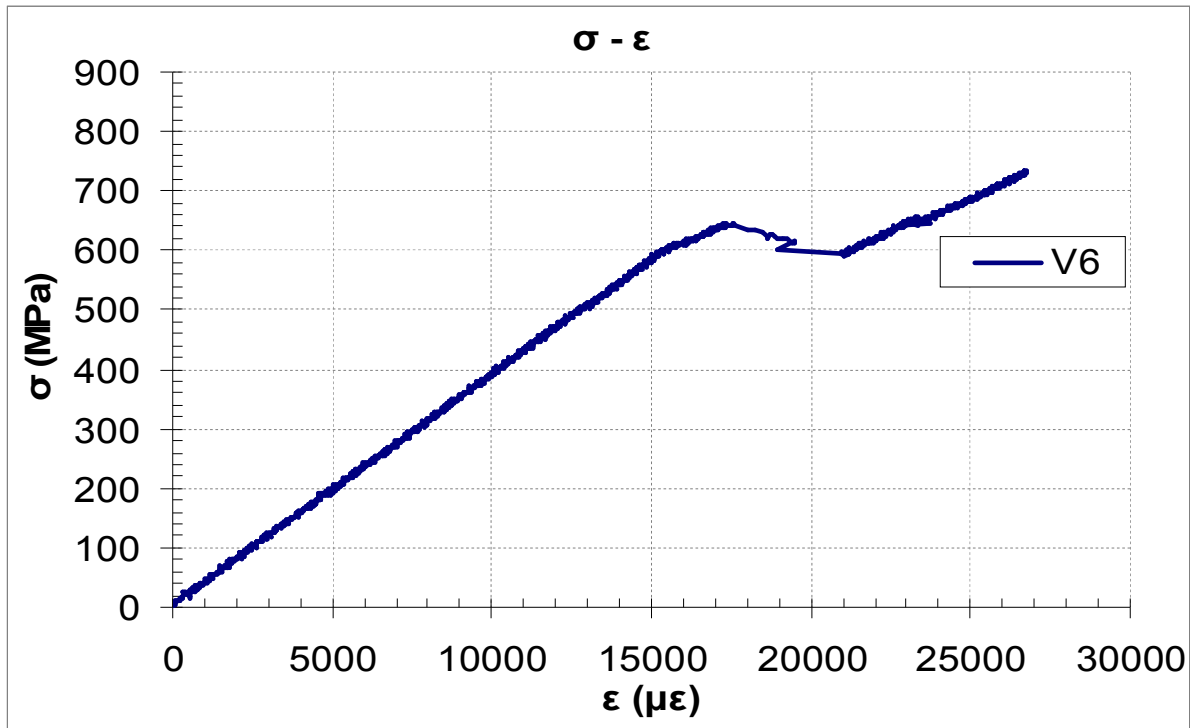
A.24



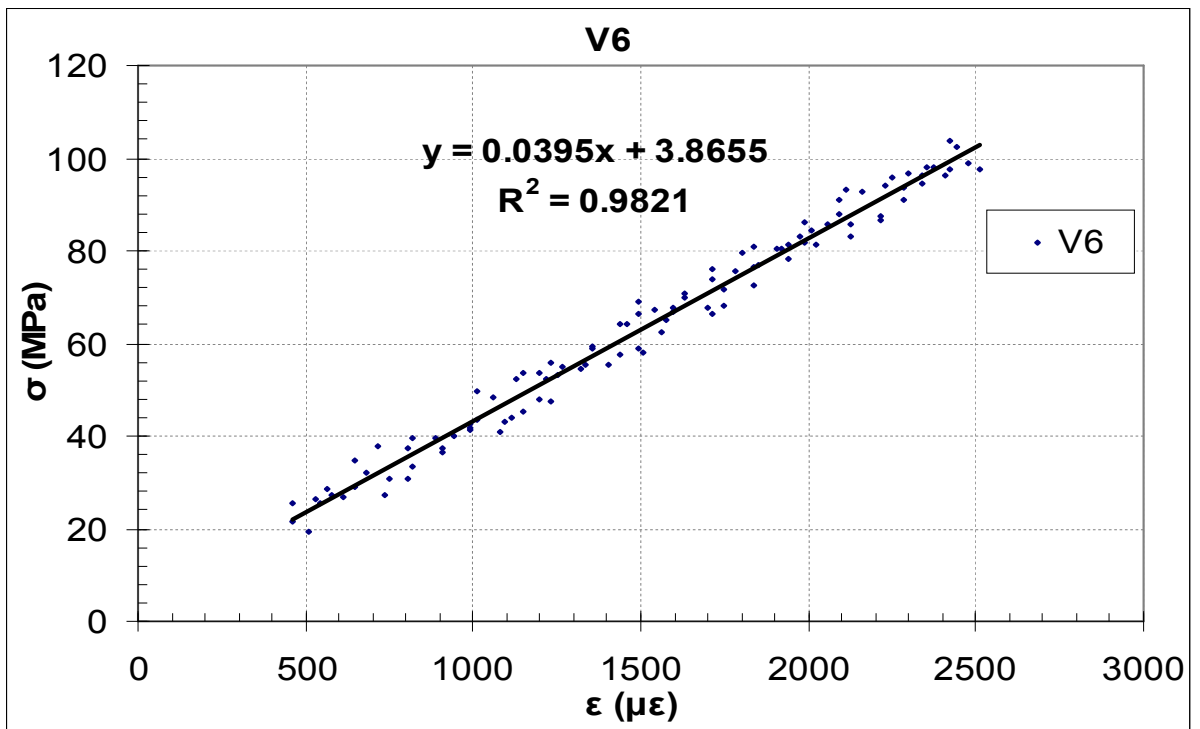
A.25



A.26



A.27



A.28

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Κώδικας μοντελοποίησης πειραμάτων σε ANSYS

```

!*-----
!*-----Single Lap joint - 2D Analysis-----
!*-----Model 60-35.028-11.84 - Karatzas-----
!*-----
/PREP7
/TITLE,Single Lap joint-model 60-35.028-11.92(BILINEAR STEEL+ADHESIVE)
/VIEW,1,0,0,1
/VUP,1,Y
/REPLOT

lc = 120          !*Length of composite without adhesive area (in mm)-Data
lm = 120          !*Length of metal without adhesive area (in mm)-Data
lov =60           !*Length of overlap adhesive area without wedge (in mm)-Data
lw = 6            !*Length of metallic wedge (in mm)-Data
tg = 0.1          !*Thickness of adhesive (in mm)-Data
tm = 6            !*Thickness of metal (in mm)-Data
t = 11.92         !*Thickness of composite (in mm)-Data t = t1 + t2
t1 = t/2          !*Thickness of upper composite (in mm)-Data
t2 = t/2          !*Thickness of down composite (in mm)-Data
d = 1.686         !*Applied Displacement (mm) - Data
lr = 7            !*Length of Adhesive Wedge (mm)

K,1,0,0,0        !*Definition of keypoints of metal
k,2,0,tm,0
k,3,lm,tm,0
k,4,lm,0,0
k,5,(lm+lov),0,0
k,6,(lm+lov),tm,0
k,7,(lm+lov+lw),tm,0

k,8,lm,(tg+tm),0      !*Definition of keypoints of adhesive
k,9,(lm+lov),(tg+tm),0
k,10,(lm+lov+lw),(tm+tg),0
k,11,(lm+lov+lw+2*tg+lr),(tg+tm),0
k,13,(lm+lov),(-tg),0
k,14,lm,(-tg),0

k,15,lm,(tg+tm+t1),0    !*Definition of keypoints of upper composite
k,16,(lm+lov),(tg+tm+t1),0
k,30,(lm+lov+lw),(tm+tg+t1),0
k,18,(lm+lov+lw+2*tg+lr),(tg+tm+t1),0
k,19,(lm+lov+lw+lc),(tg+tm+t1),0
k,20,(lm+lov+lw+lc),(tg+tm),0

K,21,(lm+lov+lw+lc),(tg+tm-t2),0    !*Definition of keypoints of Down composite
K,22,(lm+lov+lw+2*tg+lr),(tg+tm-t2),0
k,24,(lm+lov),(-tg-t2),0
k,25,lm,(-tg-t2),0
k,26,(lm+lov+lw+lr+2*tg+t1/3),(tg+tm+t1),0
k,27,(lm+lov+lw+lr+2*tg+t1/3),(tg+tm),0
k,28,(lm+lov+lw+lr+2*tg+t1/3),(tg+tm-t2),0

```



```

A,1,2,3,4
A,3,4,5,6
A,5,6,7

!*Definition Areas of Metal

A,3,8,9,6
A,6,9,10,7
A,11,10,7,5,13
A,4,5,13,14

!*Definition Areas of Adhesive

A,8,9,16,15
A,9,10,30,16
A,10,11,18,30
A,11,27,26,18
A,27,20,19,26

!*Definition Areas of Upper composite

A,13,14,25,24
A,13,24,22,11
A,22,28,27,11
A,28,21,20,27
/PNUM,AREA,1
APLOT

!* Definition of element type
!* 2-D Plane strain,8-node elements
!*
ET,1,PLANE82
!*
KEYOPT,1,3,2
KEYOPT,1,5,0
KEYOPT,1,6,0

!*Plane strain

!* Material Properties

MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,179.47e+3
MPDATA,PRXY,1,,0.3
TB,BISO,1,1,2,
TBTEMP,0
TBDATA,,375,5.5e+3,,,

!* Metal
!*Ex in MPa
!*Vxy
!*Yield Stress

MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,2,,2030
MPDATA,PRXY,2,,0.35
TB,BISO,2,1,2,
TBTEMP,0
TBDATA,,44.40,10,,,

!* Adhesive
!*Ex in MPa
!*Vxy
!*Yield Stress

MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,3,,35028
MPDATA,EY,3,,7751

!* Composite (Linear Elastic Orthotropic)
!*Ex in MPa
!*Ey in MPa

```

MPDATA,EZ,3,,7751	!*Ez in MPa
MPDATA,PRXY,3,,0.29	!*Vxy
MPDATA,PRYZ,3,,0.02	!*Vyz
MPDATA,PRXZ,3,,0.29	!*Vxz
MPDATA,GXY,3,,1818.99	!*Gxy in MPa
MPDATA,GYZ,3,,1207.30	!*Gyz in MPa
MPDATA,GXZ,3,,1818.99	!*Gxz in MPa

!*Definition of element size

```

LSEL,S,LINE,,1
LSEL,A,LINE,,3
LSEL,A,LINE,,6
LSEL,A,LINE,,9
LESIZE,ALL,,15,-3,0
LSEL,S,LINE,,10
LSEL,A,LINE,,14
LSEL,A,LINE,,16
LSEL,A,LINE,,12
LSEL,A,LINE,,19
LESIZE,ALL,,2,,0
LSEL,S,LINE,,17
LSEL,A,LINE,,36
LESIZE,ALL,,20,-6,0
LSEL,S,LINE,,26
LSEL,A,LINE,,15
LESIZE,ALL,,20,-4,0
LSEL,S,LINE,,5
LSEL,A,LINE,,34
LSEL,A,LINE,,11
LSEL,A,LINE,,21
LSEL,A,LINE,,7
LSEL,A,LINE,,18
LESIZE,ALL,,50,-8,0
LSEL,S,LINE,,2
LESIZE,ALL,,35,1/10,0
LSEL,S,LINE,,4
LESIZE,ALL,,35,10,0
LSEL,S,LINE,,24
LESIZE,ALL,,15,5,0
LSEL,S,LINE,,13
LSEL,A,LINE,,8
LESIZE,ALL,,15,1/5,0
LSEL,A,LINE,,31
LSEL,A,LINE,,28
LSEL,A,LINE,,25
LSEL,A,LINE,,23
LSEL,A,LINE,,20
LSEL,A,LINE,,33
LESIZE,ALL,,10,5,0
LSEL,S,LINE,,41
LSEL,A,LINE,,39
LSEL,A,LINE,,37
LSEL,A,LINE,,35
LSEL,A,LINE,,22

```

LESIZE,ALL,,10,1/5,0
LSEL,S,LINE,,30
LSEL,A,LINE,,40
LESIZE,ALL,,25,8
LSEL,S,LINE,,32
LESIZE,ALL,,25,1/8
ALLSEL,ALL,LINE

!*MESH AREAS

MSHAPE,0,2D !*METAL
MSHKEY,1
MAT,1
ESYS,0
AMESH,1,2,1

MSHAPE,1,2D
MSHKEY,0
ESYS,0
AMESH,3

MSHAPE,0,2D !*ADHESIVE
MSHKEY,1
MAT,2
ESYS,0
AMESH,4,5,1
AMESH,7

MSHAPE,1,2D
MSHKEY,0
MAT,2
ESYS,0
AMESH,6

MSHAPE,0,2D !*COMPOSITE
MSHKEY,1
MAT,3
ESYS,0
AMESH,8,13,1

AMESH,15,16,1
LOCAL,11,0,0,0,0,24.775 !*CHANGE OF COORDINATE SYSTEM FOR AREA 14
ESYS,11
AMESH,14
CSYS,0

/NUMBER,1
/PNUM,MAT,1
/REPLOT

ANTYPE,Static
NLGEOM,ON
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,1

```

NSUBST,100,100,100,
NEQIT,1000
AUTOTS,ON
DELTIM,0.02,0.01,0.06,ON          !*Time stepping

DL,1, ,UX,                          !* Boundary conditions at left
DL,1, ,UY,                          !* Boundary conditions at left

FLST,2,2,4,ORDER,2                 !*Boundary conditions at right end-join line 31 & 41
FITEM,2,31
FITEM,2,41
!*
/GO
DL,P51X, ,UY,

FLST,2,2,4,ORDER,2
FITEM,2,31
FITEM,2,41
/GO
!*
DL,P51X, ,UX,d                      !* Apply Displacement
!*
CSYS,0

FINISH

/SOL
SOLVE
FINISH

```