



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
Επίβλεψη **Αν. Καθ. Νικόλαος Τσούβαλης**

Αριθμητική Μοντελοποίηση Ρωγματωμένων Και Διαβρωμένων Χαλύβδινων Ελασμάτων, Ενισχυμένων Με Επίθεμα Από Σύνθετα Υλικά

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΙΩΑΝΝΗΣ ΚΟΥΛΟΥΚΟΥΡΑΣ

ΑΘΗΝΑ, Οκτώβριος 2008

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Εισαγωγή

-Τεχνολογία Επιθεμάτων από Σύνθετα Υλικά.....	1
-Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	3
-Σκοπός Διπλωματικής Εργασίας	14

Κεφ. 1 Αριθμητική Μοντελοποίηση της Επισκευής

Εισαγωγή.....	16
1.1 Τεχνικές Υπολογισμού με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων στοιχείων.....	17
1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση Σχετικά με τις Μεθόδους Αριθμητικής Μοντελοποίησης...26	
1.3 Επαλήθευση του Τρόπου Μοντελοποίησης	31

Κεφ. 2 Παρουσίαση Πειραματικών Μετρήσεων

Εισαγωγή.....	37
2.1 Περιγραφή Στατικών Δοκιμών των Ρωγματωμένων Πλακών Χάλυβα	
2.1.1 Υλικά.....	38
2.1.2 Γεωμετρία Δοκιμίων.....	41
2.1.3 Προετοιμασία και Κατασκευή των Δοκιμίων.....	43
2.1.4 Παράμετροι Δοκιμής	46
2.1.5 Αποτελέσματα και Σχολιασμός	48
2.2 Περιγραφή Στατικών Δοκιμών των Διαβρωμένων Πλακών Χάλυβα	
2.2.1 Υλικά.....	59
2.2.2 Γεωμετρία Δοκιμίων.....	61
2.2.3 Προετοιμασία και Κατασκευή των Δοκιμίων.....	64
2.2.4 Παράμετροι Δοκιμής	70
2.2.5 Αποτελέσματα και Σχολιασμός	72

Κεφ. 3 Αριθμητική Μοντελοποίηση Πειραματικών Δοκιμών και Σύγκριση Αποτελεσμάτων

Εισαγωγή.....	82
3.1 Περιγραφή της Αριθμητικής Μοντελοποίησης των Ρωγματωμένων Πλακών Χάλυβα	
3.1.1 Μηχανικές Ιδιότητες Υλικών.....	83
3.1.2 Γεωμετρία Μοντέλου.....	88
3.1.3 Επιλογή Στοιχείων- Διακριτοποίηση	94
3.1.4 Συνοριακές Συνθήκες- Είδος Φόρτισης.....	100
3.1.5 Είδος ανάλυσης	104
3.1.6 Εξαγωγή Αποτελεσμάτων	106
3.1.7 Σύγκριση Αποτελεσμάτων και Σχολιασμός.....	109
3.2 Περιγραφή της Αριθμητικής Μοντελοποίησης των Διαβρωμένων Πλακών Χάλυβα	
3.2.1 Μηχανικές Ιδιότητες Υλικών.....	123
3.2.2 Γεωμετρία Μοντέλου.....	124
3.2.3 Επιλογή Στοιχείων- Διακριτοποίηση	128
3.2.4 Συνοριακές Συνθήκες- Είδος Φόρτισης	131
3.2.5 Είδος ανάλυσης	133
3.2.6 Εξαγωγή Αποτελεσμάτων	134
3.2.7 Σύγκριση Αποτελεσμάτων και Σχολιασμός.....	136

Κεφ. 4 Επίλογος, Συμπεράσματα και Προτάσεις για Μελλοντική Εργασία

Επίλογος.....	149
4.1 Συμπεράσματα της Πειραματικής Μελέτης των Ρωγματωμένων Πλακών Χάλυβα.....	150
4.2 Συμπεράσματα της πειραματικής μελέτης των Διαβρωμένων Πλακών Χάλυβα.....	150
4.3 Συμπεράσματα της Συνδυασμένης Πειραματικής και Αριθμητικής Μελέτης.....	152
4.4 Κατευθύνσεις Μελλοντικής Εργασίας και Ανάπτυξης της Αριθμητικής Μεθόδου.....	153
Βιβλιογραφία.....	155

Τεχνολογία Επιθεμάτων από Σύνθετα Υλικά

Η επισκευή αντικειμένων όπως μια σαμπρέλα ή το ρύγχος ενός αεροσκάφους με τη χρήση «επιθεμάτων», έχει μακρά ιστορία και θεωρείται ένας από τους γρηγορότερους και αποτελεσματικούς τρόπους επίλυσης των προβλημάτων που συνεπάγεται μια πιθανή διάρρηξή τους! Λόγω των πολύ «ευέλικτων» ιδιοτήτων εφαρμογής και αποκατάστασης που εμφανίζουν ειδικά σε επείγουσες περιπτώσεις αποκατάστασης, τα σύνθετα υλικά με ενισχυτικές ίνες, όχι μόνο έχουν μετασχηματίσει τον τρόπο εφαρμογής επιθεμάτων, αλλά έχουν οδηγήσει σε μια εξ' ολοκλήρου νέα επιστήμη ανθεκτικών επισκευών για τις μεταλλικές κατασκευές οι οποίες σε κάποιες περιπτώσεις επεκτείνουν τη ζωή τους πέρα από το όριο για το οποίο είχαν αρχικά σχεδιαστεί. Μερικά τυπικά παραδείγματα εφαρμογών έχουν αναφερθεί στην αεροπορική βιομηχανία, σε πολεμικά πλοία, στη γεφυροποιία σε μεγάλες κτιριακές κατασκευές και φυσικά στη ναυπηγική βιομηχανία.

Τέτοιου είδους επισκευές δεν είναι σε κάθε περίπτωση μόνιμες, άλλα μπορούν να εξασφαλίσουν την ασφαλή επιστροφή ενός σκάφους στη ναυπηγική κλίνη για μόνιμη επισκευή, δεδομένου ότι προς το παρόν η χρήση παρόμοιων επισκευών με μόνιμο χαρακτήρα δεν έχει εγκριθεί από τους αρμόδιους νηογνώμονες.

Οι παραδοσιακές επισκευές της μεταλλικής κατασκευής των πλοίων συνίστανται στην εφαρμογή νέων ελασμάτων σε περιοχές όπου εντοπίζονται οι αστοχίες με ηλεκτροσυγκόλληση. Στον αντίποδα, η ενίσχυση με επιθέματα από σύνθετα υλικά που αποτελούνται από ίνες άνθρακα (CFRP) είναι μια σχετικά πρόσφατη μέθοδος στη ναυπηγική και υπόσχεται ελκυστικότερες μηχανικές, θερμικές και φυσικές ιδιότητες, λόγω της ευκολίας τοποθέτησης του επιθέματος και των άριστων ιδιοτήτων των σύνθετων υλικών με ενισχυτικές ίνες άνθρακα. Αυτά τα σύνθετα υλικά προσδίδουν και ορισμένα πολύ ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά στην περιοχή τοποθέτησης που ενδιαφέρουν καίρια τη ναυπηγική επιστήμη όπως, χαμηλό βάρος, αντίσταση στη διάβρωση, χαμηλές απαιτήσεις συντήρησης, ανθεκτικότητα-αντοχή μακράς διάρκειας σε συνθήκες υπηρεσίας θαλασσίου

περιβάλλοντος, επίσης ανθίστανται σθεναρά σε θραύση από κόπωση. Η τελευταία ιδιότητα είναι ιδιαίτερος σημαντική στις ναυπηγικές εφαρμογές διότι αυτές καταπονούνται εντονότατα σε περιοδικά φορτία (π.χ. λόγω κυματισμών) και οι επισκευές με επιθέματα από σύνθετα υλικά παρεμποδίζουν την διάδοση ρωγμών, παρέχοντας εναλλακτικές γεωμετρικές διαδρομές αποφόρτισης των τάσεων, ανακουφίζοντας έτσι τη μεταλλική κατασκευή.

Ένα άλλο σύμφυτο χαρακτηριστικό των ναυπηγικών κατασκευών είναι ότι αυτές υποφέρουν από δομικές αστοχίες όταν είναι σε υπηρεσία και μάλιστα στις περισσότερες περιπτώσεις όταν βρίσκονται δεκάδες χιλιάδες ναυτικά μίλια μακριά από τους πιθανούς τόπους επισκευής τους. Αμέσως μόλις εντοπιστεί η αστοχία η μόνη επιτρεπόμενη ενέργεια είναι αυτή να επισκευαστεί, πράγμα που μπορεί να οδηγήσει σε επιχειρησιακή ανετοιμότητα της κατασκευής με σημαντικές παραπέρα οικονομικές επιπτώσεις. Οι επισκευές με επίθεμα από σύνθετα υλικά φαίνονται ιδανικές σε αυτές τις καταστάσεις και έχουν αναφερθεί αρκετές περιπτώσεις επιτυχημένης επισκευής [1,2,3]. Σε περιπτώσεις προγραμματισμένων δεξαμενισμών, από την άλλη, τέτοιου είδους επισκευές αποδεικνύονται σημαντικά οικονομικότερες σε σχέση με τις παραδοσιακές, επειδή δεν απαιτείται θερμική κατεργασία του επιθέματος σε υψηλές θερμοκρασίες, αποφεύγοντας πιθανό άδειασμα γειτονικών δεξαμενών του σκάφους ή της αναγκαίας-υποχρεωτικής διαδικασίας της αδρανοποίησης δεξαμενών φορτίου καυσίμων (gas free) που επιβάλλεται και προβλέπεται σε περίπτωση αποκοπής και συγκόλλησης χαλύβδινων ελασμάτων.

Επιπροσθέτως, σε αρκετές περιπτώσεις, οι υφιστάμενες κατασκευές οφείλουν να συμμορφωθούν είτε με αυστηρότερες απαιτήσεις νέων κανονισμών είτε να ανταποκριθούν σε δυσμενέστερα φορτία από αυτά για τα οποία αρχικά σχεδιάστηκαν. Η χρήση επιδιορθωτικών ή και ενισχυτικών επιθεμάτων, ειδικά για μεταλλικά κελύφη (π.χ. Ship's hull) φαντάζει κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις ιδεατή.

Αν και σε πρώτο χρόνο τοποθετήθηκαν επιθέματα με χρήση μεταλλικών συνδέσμων (κοχλίες, ήλοι κ.λ.π.) σταδιακά και καθώς αναπτύχθηκε η τεχνογνωσία των ρητινών χρησιμοποιούνται επιθέματα τα οποία προσκολλώνται στην προς ενίσχυση περιοχή. Προς αυτήν την κατεύθυνση έχουν καταρτιστεί και υλοποιηθεί εκτεταμένα προγράμματα πειραματικών δοκιμών, ενώ παράλληλα προωθείται (για προφανείς λόγους) και η ανάπτυξη των σχετικών αριθμητικών μοντέλων για την προσομοίωση της συμπεριφοράς της συνολικής επισκευασμένης διατομής. Προς την κατεύθυνση αυτή στο επόμενο εδάφιο θα παραθέσουμε μια σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση των μεθόδων και των εργασιών που έχουν δημοσιευθεί, με απώτερο στόχο να τοποθετήσουμε το πλαίσιο εντός του οποίου θα κινηθεί η παρούσα εργασία και να διασαφηνίσουμε το σκοπό για τον οποίο έχει εκπονηθεί.

Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Στο εδάφιο αυτό θα παρουσιαστεί μια σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση επιστημονικών εργασιών που παρουσιάζουν τεχνικές και μεθόδους αντιμετώπισης προβλημάτων που σχετίζονται με την ενίσχυση μεταλλικών κατασκευών με χρήση επιθεμάτων από σύνθετα υλικά, είτε πειραματικές, είτε αριθμητικές, και οι οποίες σε μεγάλο βαθμό έχουν κάποια συνάφεια με το περιεχόμενο αυτής της εργασίας.

Σε ότι αφορά την περιοχή των πειραματικών δοκιμών επισκευαστικών διατάξεων που μας αφορούν, μπορούμε να διακρίνουμε τρεις μεγάλες οικογένειες προγραμμάτων πειραματικών δοκιμών:

α) δοκιμές στις οποίες μεταλλικά δοκίμια ποικίλων διατομών, με την παρουσία ατελειών (π.χ. οπών, ρωγμών) ή όχι, έχουν ενισχυθεί με επίθεμα από σύνθετα υλικά και ελέγχεται η συμπεριφορά τους σε κλασσικά στατικά φορτία.

β)δοκιμές στις οποίες σε ενισχυμένα ως ανωτέρω δοκίμια ελέγχεται η συμπεριφορά τους σε κόπωση.

γ) δοκιμές στις οποίες ελέγχονται συνδυασμοί των περιπτώσεων (α) και (β), στις οποίες έχει προηγηθεί προετοιμασία των μεταλλικών δοκιμών ώστε να αντιστοιχούν στο περιβάλλον που λειτουργούν, π.χ. διαβρωμένα δοκίμια.

Επειδή η αεροπορική βιομηχανία, η οποία ήταν η πρώτη που ενίσχυσε μεταλλικές κατασκευές με χρήση επιθεμάτων από σύνθετα υλικά, έχει ως μέταλλο βάσης το αλουμίνιο (σε αντίθεση με τη ναυπηγική ή την επιστήμη του πολιτικού μηχανικού, όπου μέταλλο βάσης στη συντριπτική πλειονότητα των περιπτώσεων είναι ο χάλυβας) θα παρουσιάσουμε πρώτη μια εισαγωγική στο θέμα εργασία [4], όπου διενεργήθηκαν πειραματικές δοκιμές σε δοκίμια χάλυβα ενισχυμένα με επίθεμα από σύνθετα υλικά ινών άνθρακα, με απώτερο στόχο τη χρήση τους στη γεφυροποιία. Ο τρόπος διενέργειας της συγκεκριμένης πειραματικής διαδικασίας μας επιτρέπει να την χαρακτηρίσουμε ως πείραμα αναφοράς στην περιοχή ενδιαφέροντος μας, και εντάσσεται στην πρώτη από τις παραπάνω οικογένειες.

Σκοπός της εργασίας αυτής ήταν να διενεργήσει δοκιμές επί διαφορετικών τύπων ενίσχυσης ή γεωμετρίας ενίσχυσης και να εξετάσει τη συμπεριφορά του κολλητικού μέσου. Στις δοκιμές χρησιμοποιήθηκαν δύο συνεχή δοκίμια ενισχυμένα και στις δύο όψεις τους, ένα δοκίμιο με οπή, τρία δοκίμια όπου υπήρχε κενό μεταξύ δύο χαλύβδινων πλακών και τέλος, δύο δοκίμια στα οποία το επίθεμα συνδέθηκε με κοχλίες, η γεωμετρία των οποίων φαίνεται στο Σχήμα 0.1. Εξετάστηκε η συμπεριφορά του τασικού πεδίου κοντά στα άκρα του επιθέματος από σύνθετα υλικά ή κοντά στις οπές (πιθανές συγκεντρώσεις τάσεων) καθώς και η συμπεριφορά

δύο τύπων κολλητικών μέσων. Για το σκοπό αυτό έγινε εκτεταμένη χρήση ηλεκτρικών επιμηκυσιομέτρων πάνω και γύρω από την επιφάνεια του επιθέματος. Σε κάθε περίπτωση η εκκίνηση της αστοχίας εντοπίστηκε με ικανοποιητική ακρίβεια.

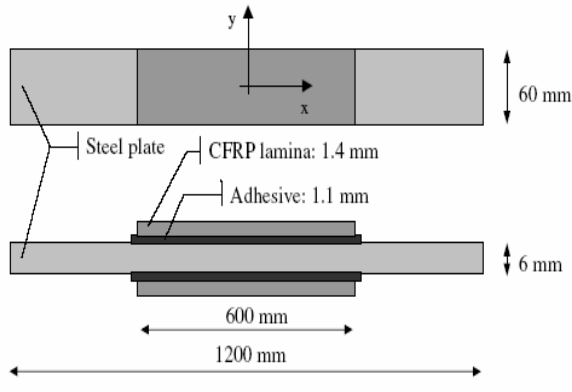


Fig. 1. Double side reinforcement of a steel plate (specimen R1 in Table 1).

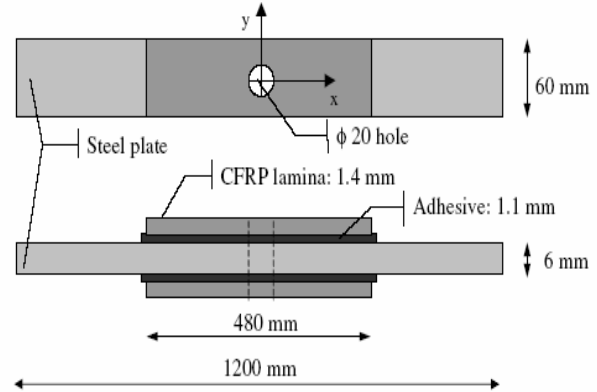


Fig. 3. Drilled double side reinforcement (specimen H1 in Table 1).

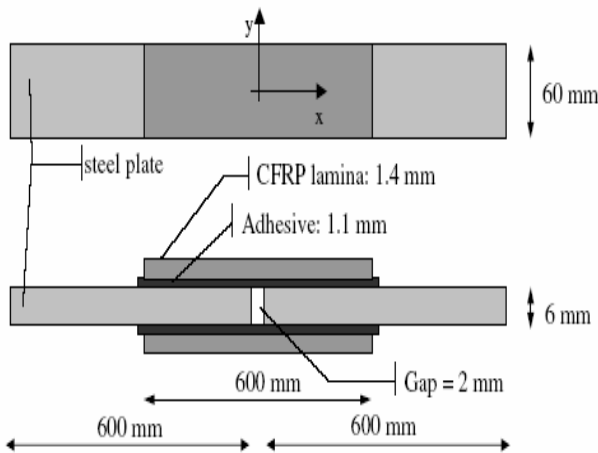


Fig. 14. Double lap joint (specimen J1).

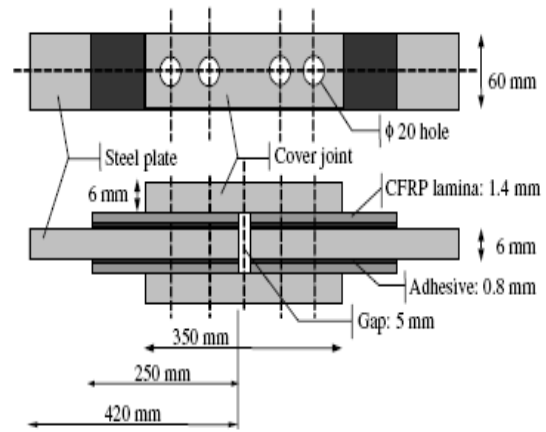


Fig. 22. Bolted joint reinforcement (specimen B1 in Table 1).

Σχήμα 0.1: Γεωμετρία των δοκιμών της βιβλιογραφικής αναφοράς [4].

Το γενικό αδιαμφισβήτητο συμπέρασμα της ανωτέρω εργασίας ήταν, ότι η ενίσχυση χαλύβδινων πλακών με επιθέματα σύνθετων υλικών με ίνες άνθρακα, αξίζει να διερευνηθεί τόσο σε εκτενές πειραματικό, όσο και αριθμητικό επίπεδο, η δε μηχανική συμπεριφορά των δοκιμών υπόσχεται επίτευξη λογικής αύξησης των φορτίων αστοχίας. Όπως είναι λογικό, τελικά συμπεράσματα που να αφορούν στην συνολική αποτελεσματικότητα τέτοιων ενισχύσεων δεν μπορούσαν να εξαχθούν από την συγκεκριμένη εργασία μόνο, αν και σε κάποιες περιπτώσεις όπως έχει ήδη υποσημειωθεί, μια λογική αύξηση των φορτίων αστοχίας είναι εφικτή.

Ο μηχανισμός μεταφοράς των δυνάμεων και ο μηχανισμός αστοχίας αποτιμήθηκε με την ανάπτυξη τόσο αναλυτικών μοντέλων, όσο και αριθμητικών. Πιο συγκεκριμένα, μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων χρειάστηκε στην περίπτωση των δοκιμών με την οπή καθώς οι αναλυτικές εξισώσεις δεν παρουσίαζαν σαφή αποτελέσματα. Συμπερασματικά, οι δύο τύποι μοντέλων προέβλεψαν με μεγάλη ακρίβεια την κατανομή των τάσεων και τον τρόπο αστοχίας των δοκιμών κατά τη διάρκεια της πειραματικής δοκιμής. Λεπτομέρειες για τη μέθοδο μοντελοποίησης της συγκεκριμένης δημοσίευσης δίνονται στο εδάφιο 1.2.

Άλλες εργασίες, οι οποίες θα μπορούσαν να ενταχθούν στην κατηγορία (α) είναι:

1) Η εργασία [5], όπου η πειραματική διαδικασία είναι παρόμοια με την προηγούμενη, μόνο που η διατομή των δοκιμών ήταν χαλύβδινα H-profiles ενισχυμένα στην κάτω φλάντζα τους με επίθεμα από CFRP και το φορτίο σημειακό προκαλώντας καθαρή κάμψη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 0.2.

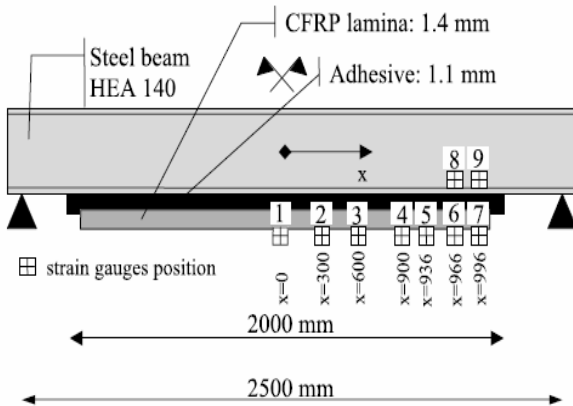


Fig. 3. Strains gages locations for beams TR1 and TR2.

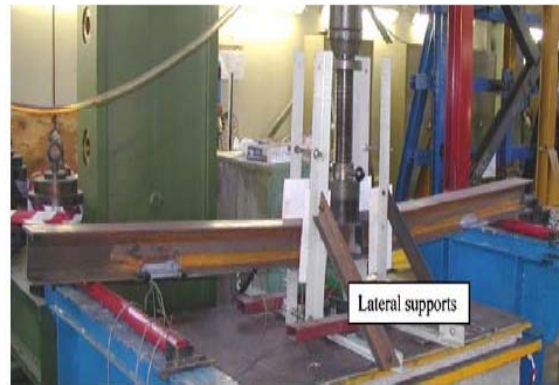


Fig. 6. Lateral supports setup for specimens TR2 and TR3.

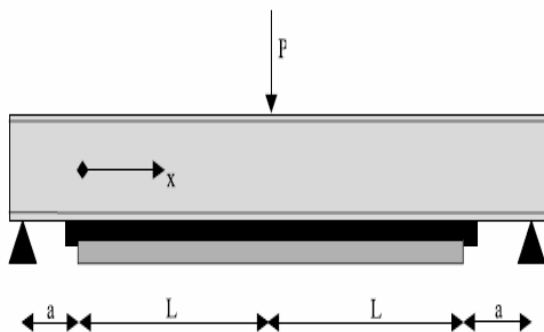


Fig. 7. Reinforced beam loaded with point loading.

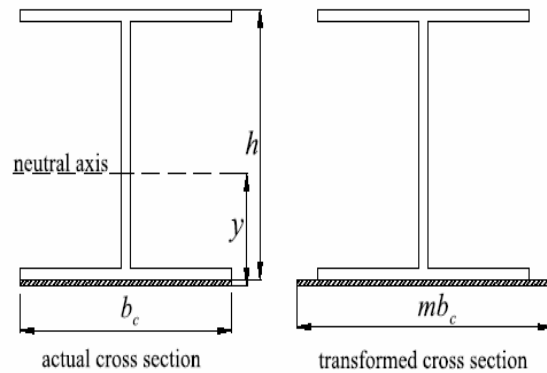


Fig. 8. The transformed section approach.

Σχήμα 0.2: Γεωμετρία των δοκιμών και μορφή του φορτίου της βιβλιογραφικής αναφοράς [5].

Το γενικό συμπέρασμα και αυτής της εργασίας υπήρξε το γεγονός ότι παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση στα επιμέρους φορτία (ελαστικά και πλαστικά) που μπορεί να φέρει η ενισχυμένη πλέον δοκός, ενώ ο τρόπος ενίσχυσης αποδείχθηκε πολλά υποσχόμενος. Όπως και στην προηγούμενη αναφορά, αναπτύχθηκε ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, παράλληλα με το πειραματικό πρόγραμμα, για να ελεγχθεί η αξιοπιστία του ενώ ταυτόχρονα έγινε προσέγγιση μέσω αναλυτικών εξισώσεων. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι δύο μέθοδοι συμβαδίζουν και το αριθμητικό μοντέλο συμφωνεί με τις πειραματικές μετρήσεις όσον αφορά στις τάσεις που ασκούνται στο επίθεμα.

II) Η εργασία [6] εξέτασε ένα υβριδικό ως προς την επιθεματική ενίσχυση σύστημα το οποίο αποτελείται από συνδυασμό CFRP και GFRP για την ενίσχυση χαλύβδινης δοκού ορθογωνικής διατομής με δύο τρόπους, είτε ενισχύοντας την μια οριζόντια πλευρά είτε εφαρμόζοντας ενισχυτικό επίθεμα διατομής-U, όπου οι κατακόρυφες πλευρές εκτείνονται έως το ύψος του ουδέτερου άξονα της χαλύβδινης δοκού. Το συγκριτικό αποτέλεσμα των φορτίων αστοχίας στις δυο περιπτώσεις κατέδειξε καθαρή υπεροχή της γεωμετρίας της δεύτερης ενισχυτικής διάταξης.

Το επόμενο κρίσιμο βήμα στην διερεύνηση των ιδιοτήτων τέτοιου είδους επισκευών-ενισχύσεων, είναι η εξέταση της μηχανικής συμπεριφοράς των δοκιμών σε κόπωση.

Μια πρώτη βασική αναφορά που υπάρχει στη βιβλιογραφία είναι στην εργασία [7] όπου, απλά συνεχή ορθογωνικά χαλύβδινα δοκίμια ενισχυμένα αμφίπλευρα με επίθεμα από CFRP, εξετάστηκαν κάτω από κυκλικά φορτία (κόπωση). Η γεωμετρία των δοκιμών και το είδος της φόρτισης παρουσιάζονται στο Σχήμα 0.3.

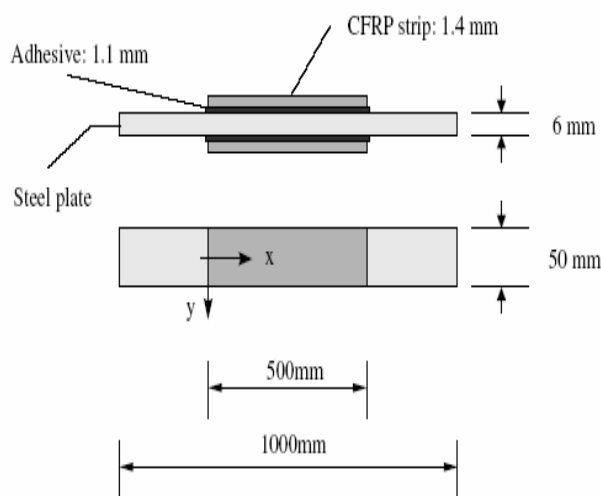


Fig. 1. Double side reinforcements (not to scale).

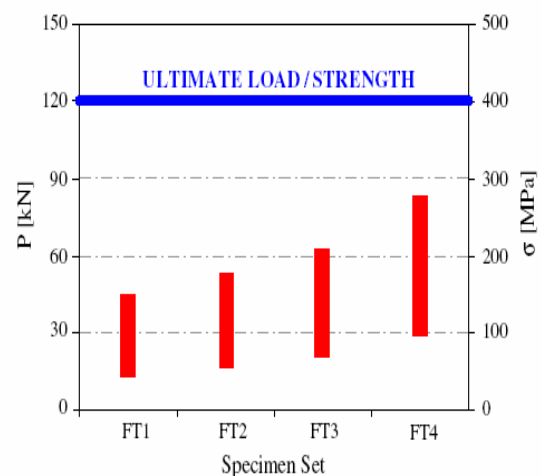


Fig. 3. Minimum and maximum load levels and corresponding stresses in the steel section for each specimen set.

Σχήμα 0.3: Γεωμετρία των δοκιμών και μορφή του φορτίου της βιβλιογραφικής αναφοράς [7].

Εντοπίστηκε και παρατηρήθηκε εκτενώς ο μηχανισμός της αστοχίας κατά τον οποίο εμφανίστηκε σταδιακή αποκόλληση των ενισχυτικών επιθεμάτων, εκεί όπου το πάχος του κολλητικού μέσου ήταν μικρότερο. Σε όλες τις περιπτώσεις εμφανίστηκε ραγδαία αστοχία έπειτα από την αποκόλληση του επιθέματος, ενώ επιπρόσθετα, ο κύκλος ζωής των δοκιμών ήταν πολλές φορές μεγαλύτερος από τα αντίστοιχα μη ενισχυμένα, αποδεικνύοντας για πολλοστή φορά τις δυνατότητες της επισκευαστικής μεθόδου.

Πρίν προχωρήσουμε σε πιο περίπλοκες θεωρήσεις του φαινομένου της κόπωσης για ενισχυμένα δοκίμια με επίθεμα από CFRP, θα παρεμβάλουμε στο σημείο αυτό μια ναυπηγικού ενδιαφέροντος εργασία [8] στην οποία, με βάση κάποιες δεδομένες ιστορικές περιπτώσεις τέτοιου είδους επισκευών, καταρτίστηκε και αναπτύχθηκε σύντομο πειραματικό πρόγραμμα μελέτης της συμπεριφοράς αντίστοιχων δοκιμών. Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης μελέτης επεξεργάστηκαν και παρουσιάστηκαν στο πρότυπο της απλής θεωρίας κόπωσης και χρησιμοποιήθηκαν αναλυτικοί τύποι για την εύρεση του ρυθμού διάδοσης της ρωγμής (Νόμος του Paris).

Ιστορικές περιπτώσεις βάσης για την συγκεκριμένη μελέτη είναι οι φρεγάτες του βασιλικού πολεμικού ναυτικού του Ηνωμ. Βασ. στη δεκαετία του '80, στις οποίες η εταιρεία QinetiQ εφάρμοσε επιθέματα από FRP με ικανοποιητικά αποτελέσματα και η περίπτωση μονάδων FPSO (επιπλέουσες αγκυρωμένες μονάδες παραγωγής και αποθήκευσης πετρελαίου) στις οποίες το 2002 εφαρμόστηκαν επίσης επιθέματα από CFRP.

Κατόπιν της εφαρμογής και της παρατήρησης των συγκεκριμένων επισκευών αναπτύχθηκε από την QinetiQ, υποστηριζόμενο από το ναυτικό της Μ. Βρετανίας και της Γαλλίας καθώς και το Lloyd's Register, ερευνητικό πρόγραμμα διερεύνησης των πρακτικών δυνατοτήτων δημιουργίας διαδικασιών πιστοποιημένης επισκευής των ανωτέρω τύπων σκαφών με ενισχυτικά επιθέματα από CFRP.

Ειδικότερα, σκοπούς του προγράμματος αποτελούσαν:

- η απόδειξη ότι τα επιθέματα από CFRP μπορούν να ελέγξουν το ρυθμό διάδοσης των ρωγμών λόγω κόπωσης και την συνεπαγόμενη διάρκεια ζωής.
- η δημιουργία δοκιμαστικών μη καταστρεπτικών μεθόδων ελέγχου της συμπεριφοράς των επιθεμάτων.
- η ανάπτυξη και επιβεβαίωση προγνωστικών μεθόδων συμπεριφοράς.
- και η ανάπτυξη μεθόδων επιλογής επιθεμάτων που ικανοποιούν συγκεκριμένα σχεδιαστικά κριτήρια.

Ένας συνολικός αριθμός τεσσάρων απλών ρωγματωμένων δοκιμών, ενισχυμένων στην μια τους όψη με επίθεμα από CFRP δοκιμάστηκε σε φορτία κόπωσης. Τα πειραματικά

αποτελέσματα αναλύθηκαν στη βάση της κλασσικής θεωρίας κόπωσης και προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- δεν υφίσταται βεβαιότητα ως προς το πόσο παχύ πρέπει να είναι το επίθεμα, πόσο θα παραμείνει ενεργό στην αποτροπή της διάδοσης της ρωγμής και κατά πόσο είναι εφικτή η παρατήρηση της περαιτέρω διάδοσής της μετά την εφαρμογή του επιθέματος.
- γενικά οι δοκιμές έχουν μέχρι τη στιγμή της μελέτης (2003) αποδείξει ότι αυτή η τεχνική επισκευής είναι πολύ αποτελεσματική, με το ίδιο το επίθεμα εξαιρετικά ανθεκτικό και χωρίς να εμφανίζει σημάδια αστοχίας λόγω κόπωσης ή αποχωρισμό των στρώσεών του (delamination).
- παρόλα αυτά πρέπει να σημειωθεί ότι το επίθεμα δεν σταματά τελείως την ανάπτυξη της ρωγμής, παρά μόνο την επιβραδύνει.

Από τη μεριά των εφαρμογών στις επισκευές γεφυρών από πολιτικούς μηχανικούς έρχεται το επόμενο σημαντικό αποτέλεσμα για την εφαρμογή της επισκευαστικής μεθόδου με τη χρήση προεντεταμένων επιθεμάτων από CFRP τα οποία μεγαλώνουν περαιτέρω και σε αρκετά σημαντικό βαθμό τον κύκλο ζωής της επισκευής που υπόκειται σε φορτίο κόπωσης. Στην εργασία [9] παρουσιάζονται πειραματικές ενδείξεις του σπουδαίου αυτού γεγονότος αλλά και μια θεωρητική αντιμετώπιση του ζητήματος βασισμένη σε πλαστική ανάλυση της διάδοσης της ρωγμής, η οποία συμφωνεί σχεδόν απόλυτα με τις πειραματικές μετρήσεις. Σημειώνουμε ότι αντίστοιχη μελέτη για το φαινόμενο της κόπωσης και επισκευές με επιθέματα από CFRP δεν έχει διενεργηθεί για ναυπηγικού ενδιαφέροντος εφαρμογές. Πρέπει να σημειωθεί ότι η σημαντική αυτή αύξηση του κύκλου ζωής των δοκιμών (η οποία συνοδεύεται και από εκτενή-αναλυτική θεωρητική επιβεβαίωση) εμφανίζεται αν η φόρτιση δεν αλλάζει κατεύθυνση (πρόσημο) με το χρόνο, όπως φαίνεται ενδεικτικά στο Σχήμα 0.4.

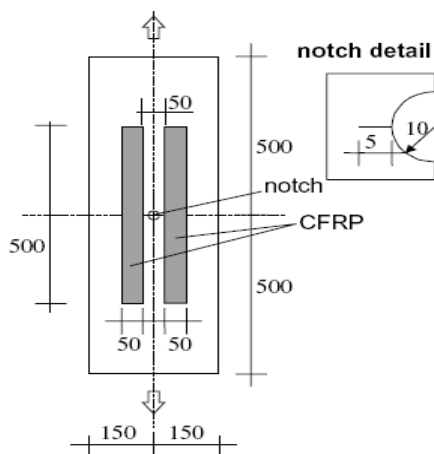


Fig. 1. Notched steel plate specimen (lengths in [mm]).

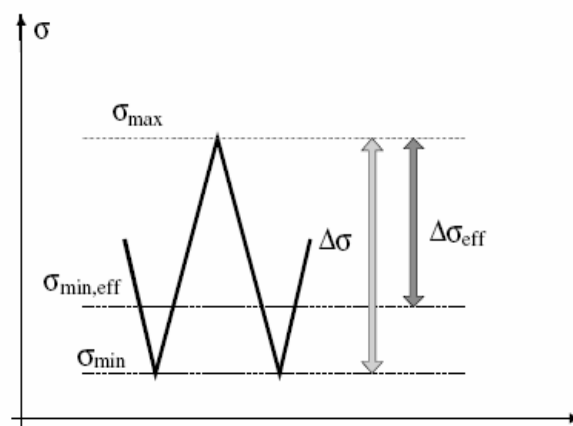


Fig. 3. Effective stress range concept.

Σχήμα 0.4: Γεωμετρία των δοκιμών και μορφή του φορτίου της βιβλιογραφικής αναφοράς [11-9].

Στο Σχήμα 0.5 παρουσιάζεται η μεταβολή του μήκους της ρωγμής συναρτήσει του αριθμού των κύκλων επανάληψης του φορτίου, για τις περιπτώσεις του επιθέματος, με και χωρίς προένταση, καθώς και του καθαρού χάλυβα, με σαφή υπεροχή και αύξηση του κύκλου ζωής του δοκιμίου στο οποίο το επίθεμα έχει εφαρμοστεί με προένταση.

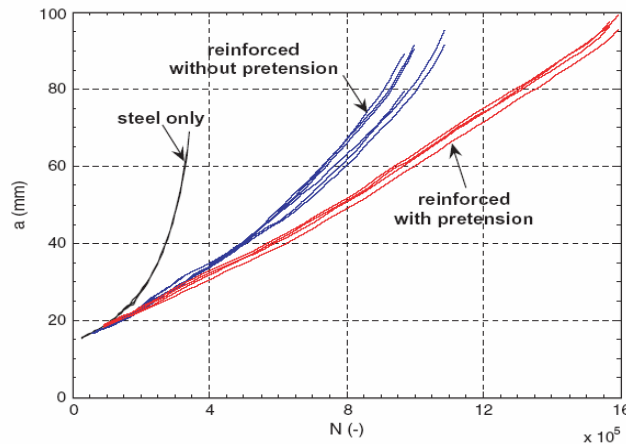


Fig. 2. Crack length vs. number of cycles for different patch configuration.

Σχήμα 0.5: Μεταβολή του μήκους της ρωγμής συναρτήσει του αριθμού των κύκλων της φόρτισης.

Η φυσική εξήγηση του σημαντικού αυτού θεωρητικού αλλά και πειραματικού ευρήματος, συνοψίζεται στο γεγονός ότι, λόγω της μεγάλης στιβαρότητας του επιθέματος από CFRP και της ανθεκτικότητάς του σε κόπωση, είναι δυνατόν πριν την κόλλησή του στο χάλυβα να του εφαρμοστεί προένταση, η οποία σε τασικό επίπεδο μειώνει το εφαρμοζόμενο εύρος καταπόνησης από $\Delta\sigma$ σε $\Delta\sigma_{eff}$. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, τη μείωση του λόγου q που ισούται με $\sigma_{min,eff}/\sigma_{max}$ συνεπαγόμενης με τον τρόπο αυτό της περαιτέρω ανακούφισης της περιοχής του χαλύβδινου υποστρώματος επί του οποίου διαδίδεται η ρωγμή, σε σχέση με την απλή χωρίς προένταση εφαρμογή του, όπως φαίνεται στο Σχήμα 0.6.

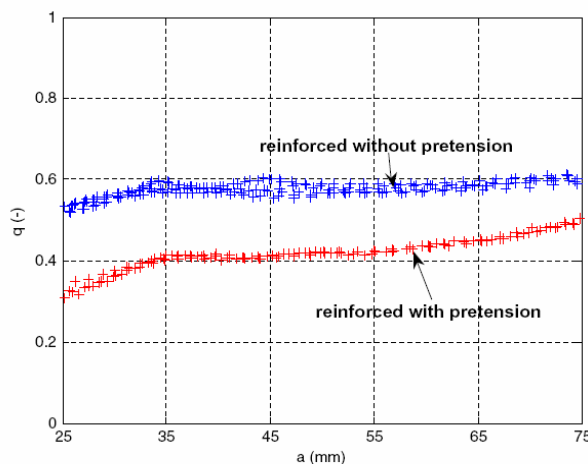


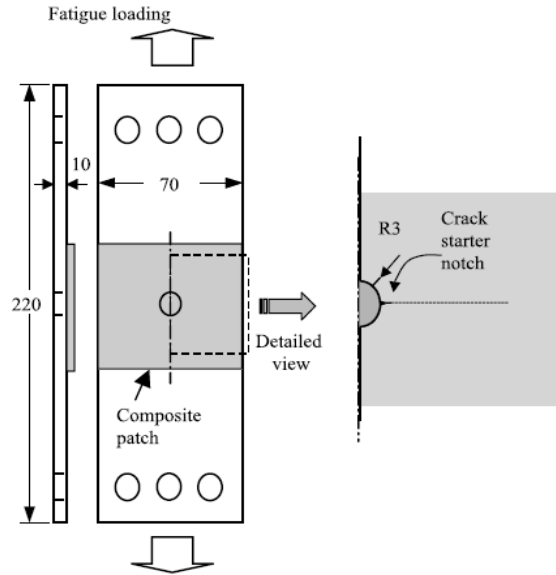
Fig. 6. Effective stress ratio q vs. crack length for different patch configuration.

Σχήμα 0.6: Μεταβολή του λόγου q συναρτήσει του μήκους ρωγμής για επίθεμα με και χωρίς προένταση.

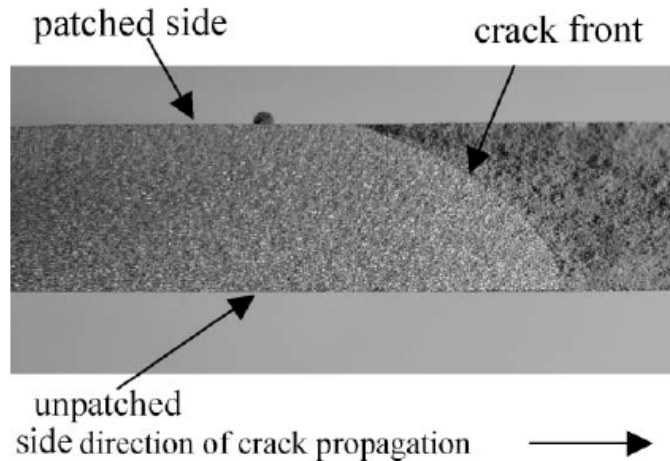
Άλλες εργασίες που ασχολούνται με την εφαρμογή επιθέματος από σύνθετα υλικά σε συνθήκες κόπωσης απασχολούν κυρίως την αεροπορική βιομηχανία, η οποία θεωρείται πρωτοπόρος στην τεχνολογία αυτή. Η αναφορά της γίνεται τελευταία καθώς διαφέρει σε μεγάλο βαθμό από τις ναυπηγικές εφαρμογές, τόσο στο μέταλλο βάσης (αλουμίνιο έναντι χάλυβα) όσο και στις γεωμετρίες των μεταλλικών κατασκευών, ενώ οι υπόλοιπες που αναφέρθηκαν έως τώρα μπορούν να χαρακτηριστούν περισσότερο συγγενικές.

Στην εργασία [10] αντλώντας συμπεράσματα από την αντοχή των επιθεμάτων από σύνθετα υλικά που έχουν εφαρμοστεί στην αεροπορία της Αυστραλίας, προτείνονται δύο μέθοδοι που στοχεύουν να χρησιμοποιηθούν για την πιστοποίηση της συγκεκριμένης τεχνολογίας. Οι μέθοδοι αυτοί περιλαμβάνουν α) την ικανότητα για πρόβλεψη της συμπεριφοράς του επιθέματος σε κόπωση, βεβαιώνοντας την αντοχή του στις περιβαλλοντολογικές συνθήκες και β) την παρακολούθηση της κατάστασης του επιθέματος ώστε η αποδοτικότητά του να ελέγχεται αυτόματα. Οι παραπάνω μέθοδοι θεωρείται ότι ικανοποιούν τις απαιτήσεις των κανονισμών πιστοποίησης και θα επιτρέψουν τη χρήση των ενισχυτικών επιθεμάτων από σύνθετα υλικά.

Η συμπεριφορά ελασμάτων αλουμινίου μεγάλου πάχους (10 mm) που παρουσιάζουν κεντρική ρωγμή και είναι ενισχυμένα με μονόπλευρο επίθεμα από σύνθετα υλικά που αποτελείται από ίνες γραφίτη και εποξειδική ρητίνη εξετάστηκε στην εργασία [11]. Για το σκοπό αυτό διενεργήθηκαν πειραματικές δοκιμές σε δοκίμια με τα παραπάνω χαρακτηριστικά και διερευνήθηκε το εύρος του συντελεστή έντασης τάσης (ΔK) σε φορτίο κόπωσης και η διάδοση της ρωγμής στις ίδιες συνθήκες (da/dN). Παράλληλα, αναπτύχθηκε τρισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων απ' όπου υπολογίστηκε ο συντελεστής έντασης τάσης και συγκρίθηκαν τα αριθμητικά αποτελέσματα με τις αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις για λοξό και ευθύ μέτωπο ρωγμής. Στο Σχήμα 0.7 παρουσιάζεται η γεωμετρία των δοκιμών που χρησιμοποιήθηκαν ενώ στο Σχήμα 0.8 παρουσιάζεται η μορφή του μετώπου της ρωγμής σε δοκίμιο που διαθέτει ενισχυτικό επίθεμα στη μία του όψη. Πρέπει να σημειωθεί ότι λεπτομέρειες για την αριθμητική προσομοίωση της εργασίας αυτής δίνονται στο εδάφιο 1.2.

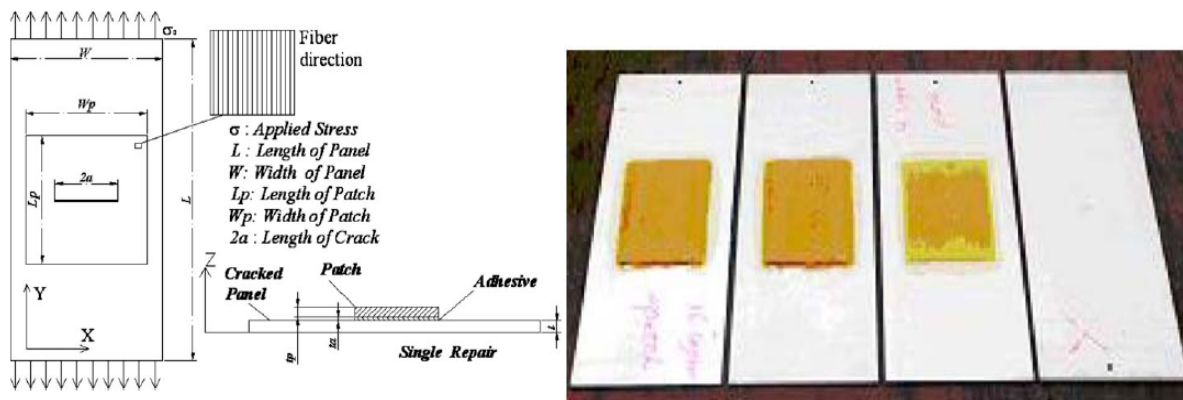


Σχήμα 0.7: Γεωμετρία των δοκιμών της βιβλιογραφικής αναφοράς [11].



Σχήμα 0.8: Μέτωπο της ρωγμής σε δοκίμιο με μονόπλευρο ενισχυτικό επίθεμα.

Επίσης, η μορφή του μετώπου της ρωγμής σε δοκίμια από αλουμίνιο με μονόπλευρο επίθεμα από σύνθετα υλικά που υπόκεινται σε συνθήκες κόπωσης απασχόλησε την εργασία [12] καταλήγοντας, τόσο από πειραματικά, όσο και από αριθμητικά αποτελέσματα, στο συμπέρασμα ότι το μέτωπο της ρωγμής αναπτύσσεται ανομοιόμορφα στη διεύθυνση του πάχους του επισκευασμένου ελάσματος. Στο Σχήμα 0.9 παρουσιάζεται η γεωμετρία των δοκιμών που χρησιμοποιήθηκαν στις παραπάνω πειραματικές δοκιμές .



Σχήμα 0.9: Γεωμετρία των δοκιμών της βιβλιογραφικής αναφοράς [12].

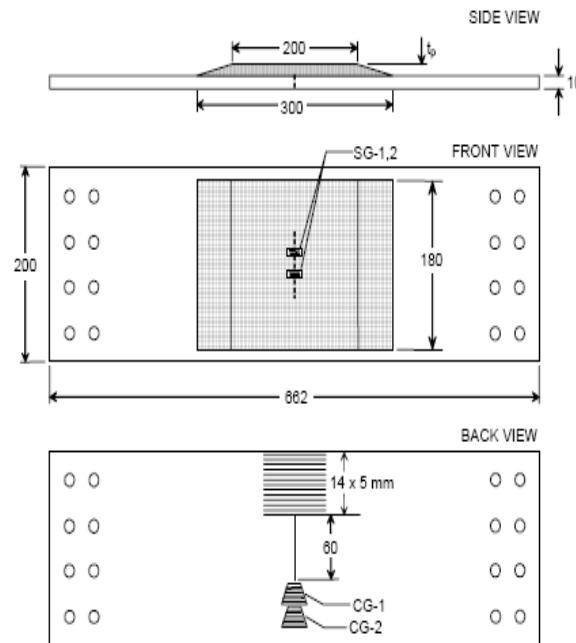
Τέλος, απομένει η κατηγορία περαμάτων (γ) στην οποία περιλαμβάνονται πειραματικές δοκιμές που προσπαθούν να προσομοιώσουν τις συνθήκες λειτουργίας των μεταλλικών κατασκευών, για τις οποίες προορίζονται και θα βρουν εφαρμογή τα εξαγόμενα συμπεράσματα από τις πειραματικές μετρήσεις. Όπως αναφέρθηκε αρχικά στον ορισμό των κατηγοριών, για να μπορέσει να γίνει πιστότερη αναπαράσταση των πραγματικών συνθηκών λειτουργίας απαιτείται η ταυτόχρονη θεώρηση των κατηγοριών που ορίστηκαν. Θεωρώντας σαν αντικείμενο ενδιαφέροντός το σύστημα πλοίο και θαλάσσιο περιβάλλον, αδιαμφισβήτητα σε αυτό, περιλαμβάνονται συνθήκες που ευνοούν την εμφάνιση και τη διάδοση ρωγμών, οι οποίες μπορούν να εμφανιστούν είτε χωρίς προφανή αιτία, είτε υπό το καθεστώς φορτίσεων της μεταλλικής κατασκευής σε συνθήκες κόπωσης, είτε από την εμφάνιση διαβρωμένων περιοχών, λόγω των συνθηκών που επικρατούν στο θαλάσσιο περιβάλλον.

Στην κατηγορία αυτή (γ) εντάσσονται οι πειραματικές δοκιμές που διενεργήθηκαν στις εγκαταστάσεις του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας (ΕΝΤ) της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και αφορούν σε χαλύβδινα δοκίμια τα οποία υπέστησαν τις συνηθέστερες καταπονήσεις που δέχεται η μεταλλική κατασκευή ενός πλοίου, δηλαδή ρωγματωμένα σε στατικό εφελκυσμό [13], ρωγματωμένα σε συνθήκες κόπωσης [14] και διαβρωμένα σε στατικό εφελκυσμό [15] τα οποία είναι ενισχυμένα στη μία τους όψη με επίθεμα από σύνθετα υλικά αποτελούμενα από ίνες άνθρακα και εποξειδική ρητίνη.

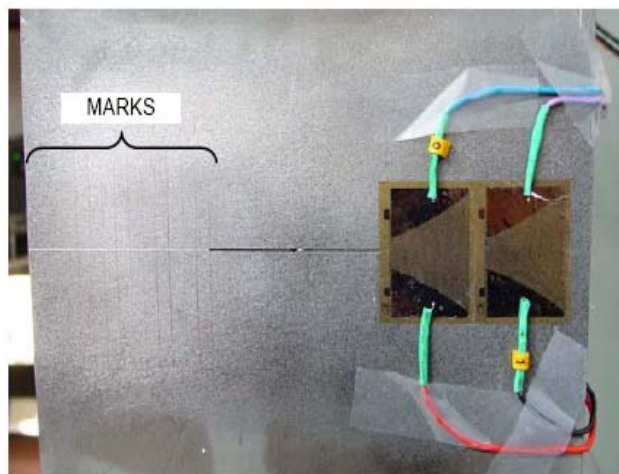
Όσον αφορά στα ρωγματωμένα δοκίμια τα οποία υποβλήθηκαν σε συνθήκες κόπωσης οι πειραματικές μετρήσεις είναι πολύ ενθαρρυντικές καθώς υποδεικνύουν τη θετική επίδραση του επιθέματος στην καθυστέρηση της διάδοσης της ρωγμής και στην αύξηση της ζωής του δοκιμίου μέχρι και δύο φορές σε σχέση με τα δοκίμια χωρίς επίθεμα, ενώ η αστοχία σε όλα τα δοκίμια επήλθε λόγω αποκόλλησης του επιθέματος. Η καταγραφή των μεγεθών κατά τη διάρκεια της δοκιμής έγινε με τη χρήση ηλεκτρικών επιμηκυνσιομέτρων αλλά και με οπτική

παρατήρηση με τη λήψη κοντινών φωτογραφιών υψηλής ανάλυσης σε τακτά χρονικά διαστήματα. Στο Σχήμα 0.10 παρουσιάζεται η γεωμετρία των δοκιμίων και η θέση των ηλεκτρικών επιμηκυνσιομέτρων, ενώ στο Σχήμα 0.11 παρουσιάζεται φωτογραφία της περιοχής της ρωγμής με τα ηλεκτρικά επιμηκυνσιομέτρα και τα σημάδια για την οπτική μέτρηση.

Οι υπόλοιπες δύο πειραματικές δοκιμές αποτελούν αναπόσπαστο και θεμέλιο κομμάτι της παρούσας εργασίας οπότε παρουσιάζονται εκτενώς στο Κεφάλαιο 2.



Σχήμα 0.10: Γεωμετρία των δοκιμίων και θέση επιμηκυνσιομέτρων της βιβλιογραφικής αναφοράς [14].



Σχήμα 0.11: Όργανα και σημάδια οπτικής μέτρησης.

Στην παραπάνω σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση καταγράφουμε και υποσημειώνουμε το γεγονός ότι *τα περισσότερα πειραματικά προγράμματα θεωρούνται ολοκληρωμένα εφόσον έχει διενεργηθεί ταυτόχρονα αντίστοιχη αναλυτική ή αριθμητική προσομοίωση της πειραματικής διάταξης*, με παράθεση των αντίστοιχων αποτελεσμάτων έτσι ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα επιβεβαίωσης.

Καταλήγουμε, λοιπόν, σ' ένα σημείο στο οποίο είναι σαφείς οι λόγοι και η αναγκαιότητα της ύπαρξης μιας ολοκληρωμένης αριθμητικής προσομοίωσης των πειραμάτων που διενεργήθηκαν στο ENT, σύμφωνα πάντα προς τις επιταγές της σύγχρονης επιστημονικής και ερευνητικής πρακτικής. Στο επόμενο και καταληκτικό εδάφιο της εισαγωγής παρατίθεται και αναλύεται το περιεχόμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται η διαδικασία ανάπτυξης αριθμητικών μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων (FEM) για την προσομοίωση των πειραματικών δοκιμών που διενεργήθηκαν στο ENT και έχουν ήδη συνοπτικά παρουσιασθεί στο προηγούμενο εδάφιο της εισαγωγής (βλέπε βιβλιογραφική ανασκόπηση [13,14,15]).

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι να προσαρτήσει στη μελέτη των πειραματικών δοκιμών του ENT, την αντίστοιχη αριθμητική μελέτη της συμπεριφοράς δοκιμίων ενισχυμένων με επίθεμα από σύνθετα υλικά που αποτελείται από ίνες άνθρακα και εποξειδική ρητίνη (CFRP), για την ανάπτυξη αξιόπιστων μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων όπως αυτά αξιολογούνται από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων που δίνουν σε σχέση με τις αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις.

Η εργασία αυτή έχει δυσπόστατο χαρακτήρα, αφενός μεν παρουσιάζει σύντομες βιβλιογραφικές ανασκοπήσεις σε κάθε επιμέρους θεματική ενότητα ενδιαφέροντος, αφετέρου εκπληρώνει σε μεγάλο βαθμό το σκοπό της εκπόνησής της. Κατά συνέπεια έχει βιβλιογραφικό και αριθμητικό εφαρμοσμένο χαρακτήρα.

Ειδικότερα, στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται μια σύντομη αλλά περιεκτική βιβλιογραφική ανασκόπηση των τρόπων υπολογισμού επισκευών με τη χρήση επιθεμάτων από σύνθετα υλικά με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, καθώς παρουσιάζεται και μια επιβεβαίωση του τρόπου μοντελοποίησης που ακολουθείται.

Στη συνέχεια, στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται αναλυτική παρουσίαση των πειραματικών μετρήσεων που ελήφθησαν κατά τη διάρκεια των δοκιμών στο εργαστήριο (ENT). Πιο

συγκεκριμένα παρουσιάζονται πειραματικές μετρήσεις για δύο βασικές κατηγορίες δοκιμών, ρωγματωμένων και διαβρωμένων πλακών χάλυβα που έχουν υποβληθεί σε δοκιμή στατικού εφελκυσμού και είναι ενισχυμένα με επίθεμα από CFRP. Τα υλικά και η γεωμετρία των δοκιμών, η προετοιμασία και η κατασκευή τους καθώς και οι παράμετροι της δοκιμής παρουσιάζονται αναλυτικά για λόγους σύνδεσης με το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, έτσι ώστε να δημιουργηθεί κοινός συμβολισμός των μεγεθών, κοινή βαθμονόμηση των διαδικασιών προσομοίωσης αλλά και κοινός τρόπος παρουσίασης των αποτελεσμάτων που θα καταστήσουν τη σύγκρισή τους εύκολη και εφικτή.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται και αναλύεται η βασική συνεισφορά της ανάπτυξης και υλοποίησης του αριθμητικού μοντέλου για τη συνδυασμένη μελέτη των επισκευών με επίθεμα από CFRP. Σε αυτήν την ενότητα συνοψίζονται οι προσπάθειες και τα αποτελέσματα της εργασίας του υποφαινόμενου στο «πρόβλημα» και γίνεται συστηματική σύγκριση με τις αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις. Αναλυτικότερα, χρησιμοποιώντας τις δοκιμές χαρακτηρισμού των ιδιοτήτων των υλικών, τη γεωμετρία των δοκιμών αλλά και τη συμπεριφορά τους όπως προέκυψε από τη μελέτη των πειραματικών αποτελεσμάτων, γίνεται η επιλογή των στοιχείων και η διακριτοποίηση του μοντέλου, επιλέγεται το είδος της ανάλυσης για την επίλυση και παρουσιάζονται τα συναφή αποτελέσματα, τόσο ως προς τον τρόπο εξαγωγής τους όσο και παρουσίασής τους με ταυτόχρονη παράθεση των αντίστοιχων πειραματικών μετρήσεων.

Στο καταληκτικό τέταρτο κεφάλαιο δίνεται ένας επίλογος και μια αποτίμηση του έργου συνοψίζοντας τα συμπεράσματα της συνδυασμένης πειραματικής και αριθμητικής μελέτης και προτείνονται κατευθύνσεις μελλοντικής εργασίας.

Στο τέλος της εργασίας παρατίθεται η σχετική βιβλιογραφία στην οποία παραπέμπεται ο αναγνώστης εντός του κυρίως σώματος του κειμένου με όλες τις δυνατές πληροφορίες αναζήτησης των εργασιών.

Κεφάλαιο 1

Αριθμητική Μοντελοποίηση της Επισκευής

Εισαγωγή

Όπως φάνηκε από τη σύντομη εισαγωγική βιβλιογραφική ανασκόπηση εργασιών που αναφέρονται σε πειραματικές δοκιμές, κανένα πρόγραμμα μελέτης της συμπεριφοράς επισκευαστικών διατάξεων που χρησιμοποιούν επίθεμα από σύνθετα υλικά δε θεωρείται ολοκληρωμένο εάν δε συμπεριλαμβάνει και αριθμητικές προσομοιώσεις-επαληθεύσεις της μηχανικής συμπεριφοράς τους, σε κάποια ποικιλία χαρακτηριστικών και συχνά απαντούμενων φορτίσεων. Στο κεφάλαιο που ακολουθεί, παρουσιάζονται κάποιες επιλεγμένες προς την κατεύθυνση αυτή δημοσιεύσεις, οι οποίες κατά κύριο λόγο ασχολούνται με τη μοντελοποίηση στο πλαίσιο της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Η παρουσίασή τους κρίνεται σκόπιμη διότι κινούνται στο πνεύμα της συγκεκριμένης εργασίας αλλά και για λόγους σύγκρισης και επαλήθευσης της μεθοδολογίας. Καταληκτικά, το πρώτο κεφάλαιο περιλαμβάνει και ένα υπολογιστικό συγκριτικό πείραμα (benchmark) για την ποιοτική, αλλά και ποσοτική επαλήθευση της υιοθετούμενης αριθμητικής μεθόδου. Εκ των προτέρων, για τα συμπεράσματα του πρώτου κεφαλαίου μπορεί να ειπωθεί ότι κυρίαρχη μέθοδος επίλυσης τέτοιων προβλημάτων είναι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων και με κάποια έννοια, που σχετίζεται με την περιπλοκότητα των γεωμετρικών διατάξεων, αποτελεί και μονόδρομο επί των διατιθέμενων επιλογών.

1.1 Τεχνικές Υπολογισμού με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων

Στην παράγραφο αυτή αναλύονται οι πιο γνωστές και ευρύτερα χρησιμοποιούμενες τεχνικές υπολογισμού των επισκευών και των ενισχύσεων μεταλλικών δομών με επιθέματα από σύνθετα υλικά, με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Οι κυριότερες τέτοιες τεχνικές, όπως συνοψίζονται στη διδακτορική διατριβή [16] (2000) και τις αντίστοιχες δημοσιεύσεις στις οποίες αυτή παραπέμπει, είναι οι ακόλουθες:

1. Η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων με τη χρήση τρισδιάστατων στοιχείων τύπου h (h-version elements).
2. Η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων με τη χρήση τρισδιάστατων στοιχείων τύπου p (p-version elements).
3. Η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων με τη χρήση τρισδιάστατων και δισδιάστατων στοιχείων στο ίδιο μοντέλο.
4. Η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων με τη χρήση δισδιάστατων συνεπίπεδων στοιχείων με ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας.
5. Η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων με τη χρήση συνεπίπεδων ειδικών στρωσιγενών στοιχείων.
6. Η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων με τη χρήση στοιχείων κελύφους σε διαφορετικά επίπεδα, συνδεδεμένα με εξισώσεις περιορισμού των μετατοπίσεων.
7. Η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων με τη χρήση στοιχείων κελύφους σε διαφορετικά επίπεδα, συνδεδεμένα με στοιχεία ελατηρίου.
8. Η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων με τη χρήση ειδικών στοιχείων Mindlin σε διαφορετικά επίπεδα, συνδεδεμένα με εξισώσεις περιορισμού των μετατοπίσεων.
9. Υπολογισμός επισκευής με τη χρήση υβριδικών μοντέλων αναλυτικών εξισώσεων και πεπερασμένων στοιχείων (Τροποποιημένες εξισώσεις Rose).

Βεβαίως και όπως τονίζεται και στην [16] υφίστανται και άλλες ειδικότερες προσεγγίσεις της μεθόδου, αλλά και σε επίπεδο προγραμμάτων ηλεκτρονικού υπολογιστή πληθώρα εκδοχών και εφαρμογών της. Στα επόμενα υποεδάφια δίδεται μια σύντομη περιγραφή των στοιχείων 1 έως 9 της ανωτέρω κατηγοριοποίησης.

Η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων με τη χρήση τρισδιάστατων στοιχείων τύπου h (h-version elements)

Η ευρύτερα γνωστή και χρησιμοποιούμενη αριθμητική μέθοδος για την ανάλυση και τον υπολογισμό δομών είναι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων με τη χρήση τρισδιάστατων στοιχείων (τύπου h). Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, τα πολυώνυμα βάσης σε κάθε πεπερασμένο στοιχείο είναι σταθερού βαθμού και η (χωρική) διάμετρος του μεγαλύτερου στοιχείου, μπορεί να μικραίνει οσοδήποτε, προσεγγίζοντας στο αναλυτικό όριο του μηδενός, επιτυγχάνοντας έτσι τη σύγκλιση της αριθμητικής στη θεωρητική λύση. Η μέθοδος αυτή έχει τη δυνατότητα προσομοίωσης οσοδήποτε περίπλοκης γεωμετρίας και ενός εκτεταμένου φάσματος επιβαλλόμενων φορτίσεων με αρκετά καλή ακρίβεια και σχετικά περιορισμένο υπολογιστικό κόστος.

Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει τη χρήση μιας σειράς τρισδιάστατων στερεών στοιχείων (π.χ. κοινά τρισδιάστατα στερεά στοιχεία είκοσι κόμβων) για την προσομοίωση κάθε διαφορετικού υλικού και στρώσης. Σημειώνεται ότι ο τύπος αυτός των στοιχείων έχει τη δυνατότητα προσομοίωσης ορθοτροπικών υλικών, όπως συμβαίνει στην περίπτωση του επιθέματος, καθώς και τη δυνατότητα προσομοίωσης της επιβολής θερμικών φορτίσεων, οι οποίες αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια πολυμερισμού του κολλητικού μέσου ή/και του επιθέματος.

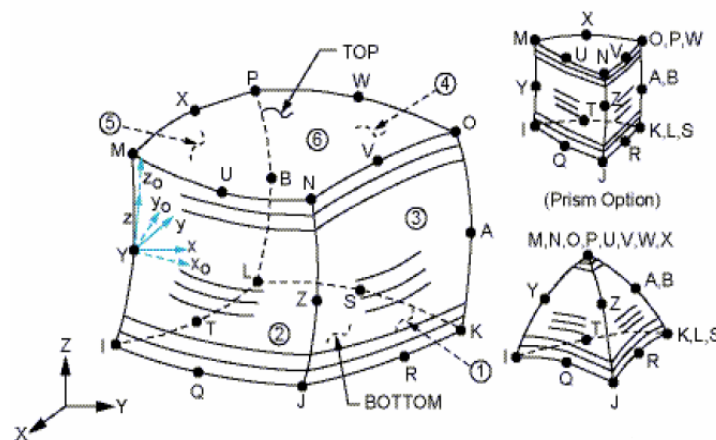
Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι στην παρούσα εργασία προτιμήθηκαν τα συγκεκριμένα στοιχεία για τη δημιουργία του αριθμητικού μοντέλου που αναπτύχθηκε. Κατά συνέπεια, δεδομένα που αφορούν στη γεωμετρία και στα χαρακτηριστικά των στοιχείων, αλλά ακόμη περισσότερο, πληροφορίες για τον τρόπο δημιουργίας και διακριτοποίησης του μοντέλου, την προσομοίωση και τον τρόπο διακριτοποίησης της ρωγμής και άλλα συναφή ζητήματα, περιγράφονται με λεπτομέρειες στο Κεφάλαιο 3.

Εάν η διαστρωμάτωση του επιθέματος είναι πολύπλοκη περιλαμβάνοντας στρώσεις διαφορετικών προσανατολισμών και απαιτείται η ακριβής γνώση του τασικού πεδίου σε κάθε μία από αυτές, υπάρχουν δύο τρόποι δημιουργίας του αριθμητικού μοντέλου:

- i. Με τη χρήση περισσότερων του ενός στρωμάτων κοινών τρισδιάστατων στερεών στοιχείων για την προσομοίωση του επιθέματος, με το κάθε στρώμα πεπερασμένων στοιχείων να αντιστοιχεί σε μια ομάδα στρώσεων σύνθετου υλικού.
- ii. Με τη χρήση ειδικών τρισδιάστατων στρωσιγενών στοιχείων, τα οποία έχουν τη δυνατότητα παράστασης των διαφόρων στρώσεων του σύνθετου υλικού. Ένα παράδειγμα τέτοιου στοιχείου παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.1.1.

Συμπερασματικά, η δημιουργία μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων με τη χρήση στοιχείων τύπου h είναι μία από τις πιο ακριβείς και αξιόπιστες αριθμητικές μεθόδους για τον

υπολογισμό οποιασδήποτε περίπτωσης επισκευής ή ενίσχυσης μεταλλικών δομών με τη χρήση επιθεμάτων από σύνθετα υλικά. Επιπλέον, έχει τη δυνατότητα υπολογισμού των τάσεων κατά το πάχος των στρώσεων, η οποία είναι πολύ σημαντική σε περιπτώσεις δομών με σημαντικό πάχος ή με μονόπλευρη ενίσχυση, οπότε εμφανίζονται φαινόμενα μετατόπισης έξω από το επίπεδο της κατασκευής, όπως ακριβώς συμβαίνει με τα προβλήματα αυτής της εργασίας. Επιπροσθέτως, με τη μέθοδο αυτή είναι δυνατός ο συνυπολογισμός των παραμενουσών τάσεων λόγω του πολυμερισμού που λαμβάνει χώρα στην περιοχή και των διαφορετικών συντελεστών θερμικής διαστολής των υλικών. Εντούτοις, έχει δύο βασικά μειονεκτήματα, τα οποία είναι το σχετικό υπολογιστικό κόστος που απαιτείται για την επίλυση των μοντέλων, καθώς και η αρκετά επίπονη δημιουργία του καννάβου επί του γεωμετρικού μοντέλου, συγκριτικά με άλλες μεθόδους.



Σχήμα 1.1.1: Γεωμετρία τρισδιάστατου στρωσιγενούς στοιχείου.

Η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων με τη χρήση τρισδιάστατων στοιχείων τύπου p (p -version elements)

Με τη χρήση των τρισδιάστατων στοιχείων τύπου p αποφεύγονται τυχόν λάθη διακριτοποίησης της κατασκευής με την αύξηση του πολυωνυμικού βαθμού των συναρτήσεων βάσης κάθε πεπερασμένου στοιχείου (θεωρητικά προσεγγίζοντας το άπειρο), ενώ ο κάνναβος των πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να παραμένει σταθερός και σχετικά αραιός. Ο σχηματισμός του καννάβου είναι πολύ πιο εύκολος τόσο στην περίπτωση των ενισχύσεων όσο και στην περίπτωση των επισκευών, αν και στις τελευταίες απαιτείται μια σχετική πύκνωση του καννάβου γύρω από την κορυφή της ρωγμής. Αντίθετα, στην υπόλοιπη δομή ο κάνναβος μπορεί να είναι αρκετά αραιός. Τα εν λόγω στοιχεία δεν επιβάλλουν σοβαρούς περιορισμούς εξαιτίας της μορφής τους (λόγος μήκους πλευρών κ.λ.π) και απαιτούν σχετικά μικρότερη υπολογιστική ισχύ σε σχέση με τα στοιχεία τύπου h , δεδομένου ότι γίνεται ακριβέστερος υπολογισμός των τάσεων και των παραμορφώσεων μόνο στις περιοχές του υλικού που απαιτείται και ειδικότερα εντός του κάθε στοιχείου.

Η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων με τη χρήση τρισδιάστατων και δισδιάστατων στοιχείων στο ίδιο μοντέλο

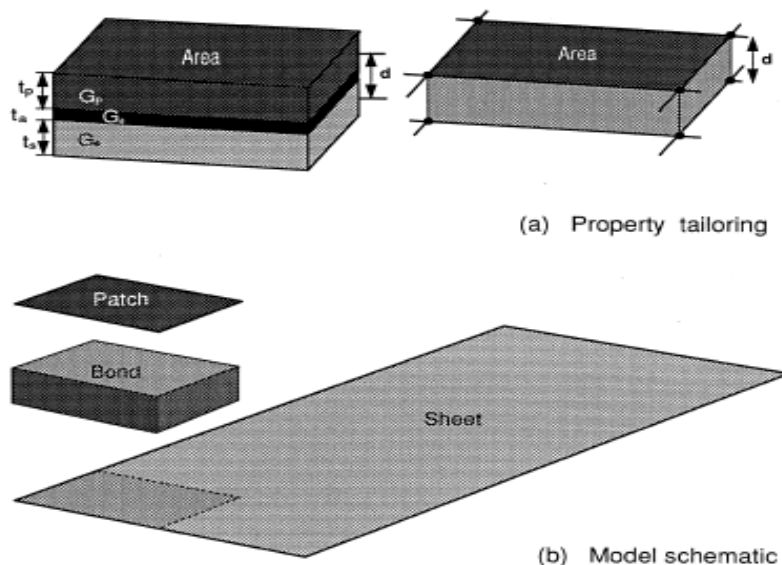
Στις περιπτώσεις που απαιτείται η ανάλυση επίπεδων κατασκευών, είναι δυνατή η χρήση ενός συνδυασμού στοιχείων προκειμένου να μειωθεί η απαιτούμενη υπολογιστική ισχύς [17]. Έτσι, τόσο η μεταλλική δομή όσο και το επίθεμα προσομοιώνονται με τη χρήση δισδιάστατων στοιχείων κελύφους, τα οποία τοποθετούνται σε συντεταγμένες που αντιστοιχούν στο μέσο του πάχους τους, ενώ το στρώμα του κολλητικού μέσου προσομοιώνεται με τη χρήση τρισδιάστατων στοιχείων, με πάχος που αντιστοιχεί στο πάχος της πραγματικής στρώσης.

Για την κατασκευή τέτοιων μοντέλων χρησιμοποιούνται συνήθως επίπεδα στοιχεία κελύφους με έξι βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο (προσομοίωση μετάλλου-επιθέματος) ενώ για την προσομοίωση του στρώματος του κολλητικού μέσου χρησιμοποιούνται τρισδιάστατα στοιχεία έξι κόμβων, προκειμένου να εξασφαλίζεται η σωστή μεταφορά των τάσεων και των παραμορφώσεων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.1.2.

Τα τρισδιάστατα στοιχεία έχουν επιπλέον τη δυνατότητα εισαγωγής ιδιοτήτων ορθοτροπικού ή ανισοτροπικού υλικού, επιτυγχάνοντας με τον τρόπο αυτό καλύτερη προσομοίωση του πραγματικού προβλήματος. Οι μηχανικές ιδιότητες που εισάγονται, υπολογίζονται με τις παρακάτω εξισώσεις [17], όπου τα εμφανιζόμενα μεγέθη είναι όπως ορίζονται στο Σχήμα 1.1.2:

$$G_{12} = G_a \frac{t_a}{d}, \quad E_1 E_2 = E_a \frac{t_a}{d} \quad (1.1.1)$$

$$G_{13}, G_{23} = K_{shear} \cdot d, \quad E_3 = K_{axial} \cdot d \quad (1.1.2)$$



Σχήμα 1.1.2: Συνδυασμός τρισδιάστατων και δισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων.

Η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων με τη χρήση δισδιάστατων συνεπίπεδων στοιχείων με ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας

Η διαδικασία αυτή συνίσταται στη συμβατική προσομοίωση μιας κατασκευής με τη δημιουργία ενός δισδιάστατου μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων. Χρησιμοποιούνται επίπεδα στοιχεία κελύφους τεσσάρων ή οχτώ κόμβων για την προσομοίωση των μηχανικών ιδιοτήτων και του πάχους της μεταλλικής κατασκευής. Η περιοχή στην οποία τοποθετείται το επίθεμα προσομοιώνεται με την εισαγωγή του ισοδύναμου μέτρου ελαστικότητας από τις διαφορετικές στρώσεις των υλικών καθώς και του συνολικού πάχους της περιοχής.

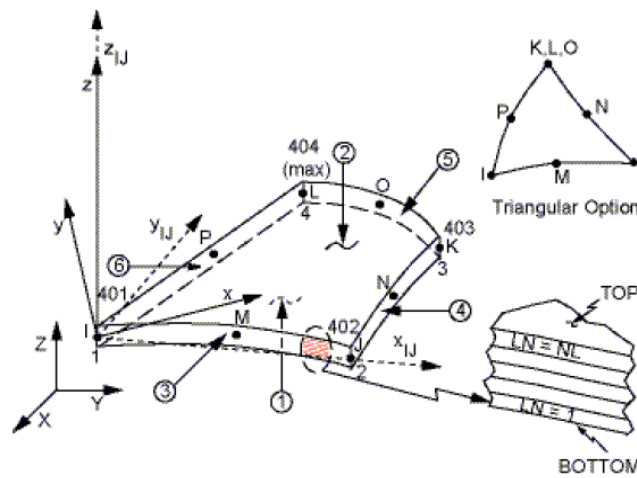
Είναι ευνόητο ότι η μέθοδος αυτή δεν επαρκεί από μόνη της για τον υπολογισμό μιας επισκευής ή μιας ενίσχυσης με τη χρήση επιθέματος από σύνθετα υλικά, δεδομένου ότι δεν μπορεί να εξάγει διαφορετικά αποτελέσματα για καθένα από τα εμπλεκόμενα υλικά. Παρόλα αυτά, σε περίπτωση που η περιοχή ενδιαφέροντος αποτελεί τμήμα μιας μεγαλύτερης κατασκευής (π.χ. τμήμα ναυπηγικής κατασκευαστικής λεπτομέρειας), είναι δυνατός με τον τρόπο αυτό ο υπολογισμός της συνολικής ακαμψίας και της συμπεριφοράς της συνολικής κατασκευής, μετά την τοποθέτηση του επιθέματος. Επιπλέον, με την τεχνική αυτή είναι δυνατός ο υπολογισμός των αναπτυσσόμενων τάσεων στα όρια της περιοχής του επιθέματος, όπου γενικά παρατηρείται αύξηση των τάσεων. Τέλος, ένα ακόμα πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής, είναι η δυνατότητα απλοποίησης των διαδικασιών κατασκευής του μοντέλου με τη χρήση υφιστάμενων δισδιάστατων μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων, τα οποία υπάρχουν συνήθως από τη φάση ανάπτυξης και σχεδιασμού της συνολικής κατασκευής.

Η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων με τη χρήση συνεπίπεδων ειδικών στρωσιγενών στοιχείων

Τα ειδικά στρωσιγενή στοιχεία χρησιμοποιούνται κυρίως για την προσομοίωση σύνθετων υλικών, καθώς ο χαρακτήρας τους αγγίζει σε μεγάλο βαθμό τη μορφολογία των πολύστρωτων. Τα στοιχεία αυτά είναι συνήθως δισδιάστατα και εκτός από τον ορισμό της γεωμετρίας τους απαιτούν την εισαγωγή του πάχους, των μηχανικών ιδιοτήτων και του προσανατολισμού των ινών για κάθε στρώση του πραγματικού σύνθετου υλικού, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.1.3. Τα στοιχεία αυτά διέπονται από την κλασική θεωρία στρωσιγενών πλακών, η οποία αποτελεί μια επέκταση της θεωρίας πλακών του Kirchhoff για λεπτές ισότροπες πλάκες σε στρωσιγενείς [18]. Οι υποθέσεις της θεωρίας πλακών του Kirchhoff είναι οι ακόλουθες:

- i. Το μέσο επίπεδο της πλάκας παραμένει απαραμόρφωτο.
- ii. Ευθεία γραμμή κάθετη στο μέσο επίπεδο παραμένει απαραμόρφωτη και κάθετη.
- iii. Οι κάθετες τάσεις στη μέση επιφάνεια είναι πολύ μικρές ($\sigma_{xz} = \sigma_{yz} = \sigma_{zz} = 0$).

Ο παραπάνω τύπος στοιχείων μπορεί εύκολα να χρησιμοποιηθεί και για την προσομοίωση επισκευών με τη χρήση επιθεμάτων από σύνθετα υλικά, δεδομένου ότι και στην περίπτωση αυτή εμπλέκεται δομή με διαφορετικές στρώσεις. Έτσι, είναι δυνατή η προσομοίωση και των τριών διαφορετικών υλικών με τη χρήση ενός μόνο στοιχείου κατά το πάχος. Ο αριθμός των στρωμάτων κάθε στοιχείου θα πρέπει να είναι ίσος με το συνολικό αριθμό των στρώσεων στην περιοχή της ενίσχυσης. Τα στοιχεία που είναι έξω από την περιοχή της επισκευής μπορεί να είναι είτε κοινά στοιχεία κελύφους, για την εξοικονόμηση υπολογιστικής ισχύος, είτε στρωσιγενή στοιχεία με μία μόνο στρώση και πάχος ίσο με το πάχος της πραγματικής δομής.



Σχήμα 1.1.3: Γεωμετρία και αλληλουχία στρώσεων για ένα τυπικό στρωσιγενές στοιχείο.

Το κυριότερο μειονέκτημα της ανάλυσης με δισδιάστατα ειδικά στρωσιγενή πεπερασμένα στοιχεία είναι ότι μόνο επίπεδες δομές μπορούν αξιόπιστα να προσομοιωθούν, καθώς και ότι οι αποκολλητικές τάσεις, οι οποίες μπορεί να λαμβάνουν σημαντικές τιμές κοντά στα όρια του επιθέματος, δεν μπορούν να υπολογισθούν. Επιπλέον, είναι πιθανό να υπάρχουν σημαντικές αποκλίσεις σε περιπτώσεις επιθεμάτων με σημαντικό πάχος συγκριτικά με τη μεταλλική δομή. Τέλος, τονίζεται ότι η χρήση της μεθόδου αυτής είναι δυνατή μόνο στις περιπτώσεις ενισχυτικών επισκευών, επειδή δεν είναι δυνατό να αφεθούν ελεύθεροι συγκεκριμένοι μόνο κόμβοι κατά το πάχος των στρώσεων για την προσομοίωση της ρωγμής (βλέπε εδάφιο 3.1.4). Τέλος, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η διαδικασία προσομοίωσης είναι ιδιαίτερα απλή καθώς και ότι απαιτείται σχετικά περιορισμένη υπολογιστική ισχύς για την επίλυση των αριθμητικών μοντέλων.

Η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων με τη χρήση στοιχείων κελύφους σε διαφορετικά επίπεδα, συνδεδεμένα με εξισώσεις περιορισμού των μετατοπίσεων

Στις περιπτώσεις ανάλυσης επίπεδων δομών, είναι δυνατή η χρήση μιας απλοποιημένης μεθόδου προσομοίωσης για τη μείωση της απαιτούμενης υπολογιστικής ισχύος. Έτσι, τόσο η

μεταλλική δομή όσο και το επίθεμα προσομοιώνονται με τη χρήση δισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων, τα οποία τοποθετούνται σε συντεταγμένες που αντιστοιχούν στο μέσο του πάχους των πραγματικών στρωμάτων.

Η τεχνική αυτή παρέχει τη δυνατότητα εισαγωγής διαφορετικών ιδιοτήτων για κάθε στρώμα καθώς και προσομοίωσης της ρωγμής, δεδομένου ότι τα δύο στρώματα βρίσκονται σε διαφορετικά επίπεδα μεταξύ τους και ορίζονται από διαφορετικούς κόμβους. Συνήθως χρησιμοποιούνται δύο στρώσεις στοιχείων κελύφους στις περιπτώσεις μονόπλευρης ενίσχυσης και τρεις όταν πρόκειται για αμφίπλευρη ενίσχυση. Το στρώμα του κολλητικού μέσου πρακτικά παραλείπεται, το οποίο υποκαθίσταται από εξισώσεις περιορισμού των μετατοπίσεων, οι οποίες εξασφαλίζουν, ουσιαστικά, τη μεταφορά των φορτίων από και προς το επίθεμα.

Οι ιδιότητες που υιοθετούνται για το επίθεμα αντιστοιχούν στις ισοδύναμες μηχανικές ιδιότητες αυτού, μετά τον συνυπολογισμό τυχόν στρώσεων διαφορετικού προσανατολισμού ή αποτελούμενων από διαφορετικά υλικά. Εάν το επίθεμα δεν είναι μονοδιάστατο, τότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν ειδικά στρωσιγενή στοιχεία για την προσομοίωση του επιθέματος, εισάγοντας το πάχος, το υλικό, και τον προσανατολισμό κάθε στρώσης χωριστά. Η σύνδεση των στρώσεων των στοιχείων επιτυγχάνεται με την επιβολή των ίδιων μετατοπίσεων στους κόμβους με τις ίδιες συντεταγμένες x , y αλλά με διαφορετικό z σε κάθε στρώση, με τη χρήση των κατάλληλων εξισώσεων περιορισμού ή άκαμπτων στοιχείων.

Η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων με τη χρήση στοιχείων κελύφους σε διαφορετικά επίπεδα, συνδεδεμένα με στοιχεία ελατηρίου

Η τεχνική αυτή αποτελεί ουσιαστικά μια παραλλαγή της μεθόδου προσομοίωσης με τη χρήση δύο στρώσεων πεπερασμένων στοιχείων που συνδέονται με εξισώσεις περιορισμού των μετατοπίσεων, που περιγράφεται παραπάνω. Τόσο η μεταλλική δομή όσο και το επίθεμα θεωρούνται ως πλάκες και προσομοιώνονται με τη χρήση στοιχείων κελύφους στις συντεταγμένες του μέσου επιπέδου των πραγματικών στρώσεων [17]. Έτσι η απόσταση μεταξύ των στρώσεων είναι:

$$d = \frac{1}{2}t_s + t_a + \frac{1}{2}t_p \quad (1.1.3)$$

Η σύνδεσή τους εξασφαλίζεται με τη χρήση στοιχείων ελατηρίου, τα οποία συνδέουν κάθε κόμβο των στοιχείων κελύφους, που προσομοιώνουν το μέταλλο, με τον αντίστοιχο κόμβο των στοιχείων του επιθέματος που έχει τις ίδιες συντεταγμένες x , y αλλά διαφορετικά z .

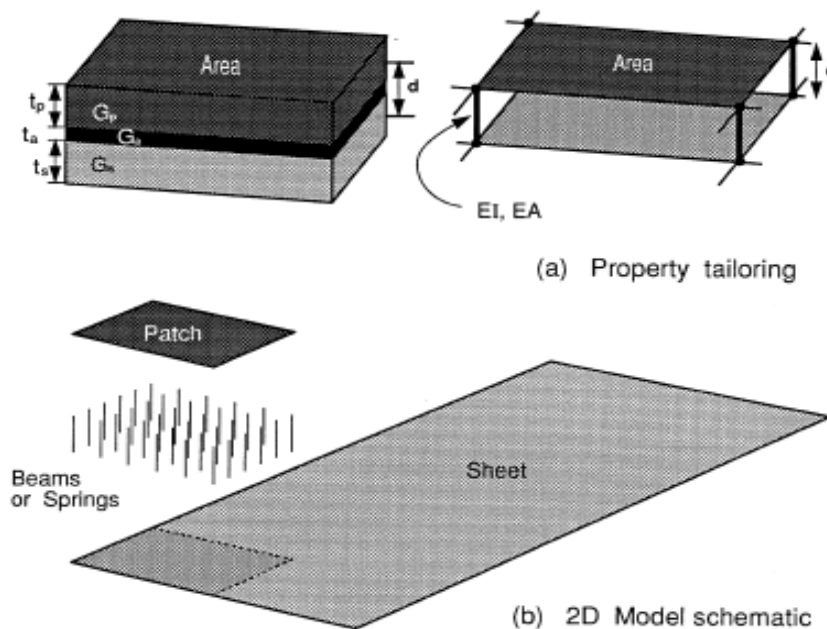
Οι σταθερές του ελατηρίου (K_{shear} και K_{axial}) θεωρώντας το μέτρο διάτμησης G και μέτρο ελαστικότητας E και των τριών στρώσεων (μέταλλο (s), κολλητικό μέσο (a) και επίθεμα (p)) υπολογίζονται από τις παρακάτω εξισώσεις [17], όπου τα σχετικά πάχη t ορίζονται στο Σχήμα 1.1.4:

$$\frac{1}{K_{shear}} = \frac{t_a}{G_a} + \frac{3}{8} \left(\frac{t_s}{G_s} + \frac{t_p}{G_p} \right), \quad \frac{1}{K_{axial}} = \frac{t_a}{E_a} + \frac{1}{2} \left(\frac{t_s}{E_s} + \frac{t_p}{E_p} \right) \quad (1.1.4)$$

Σε περίπτωση απουσίας κατάλληλου μη γραμμικού στοιχείου ελατηρίου από το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων, είναι δυνατή η χρήση στοιχείων δοκού με κατάλληλες μηχανικές ιδιότητες EI και EA για την προσομοίωση των στοιχείων ελατηρίου, που υπολογίζονται από τις παρακάτω εξισώσεις [17]:

$$EI = \frac{1}{12} K_{shear} \cdot d^3 \cdot area, \quad EA = K_{axial} \cdot d \cdot area \quad (1.1.5)$$

Με τον όρο "area" συμβολίζεται το πηλίκο των στοιχείων της επιφάνειας του μετάλλου προς το επίθεμα, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Τα υπολογιζόμενα μεγέθη EI και EA είναι ισοδύναμα κατανομημένα στους τέσσερις κόμβους που βρίσκονται στα άκρα κάθε στοιχείου. Οι ιδιότητες των στοιχείων δοκού για καθένα από τους κόμβους υπολογίζονται από το άθροισμα των ακαμψιών από όλα τα εμπλεκόμενα στοιχεία, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.1.4.



Σχήμα 1.1.4: Συνδυασμός διδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων συνδεόμενα με στοιχεία ελατηρίου.

Η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων με τη χρήση ειδικών στοιχείων Mindlin σε διαφορετικά επίπεδα, συνδεδεμένα με εξισώσεις περιορισμού των μετατοπίσεων

Η τεχνική αυτή χρησιμοποιεί τρία διαφορετικά στρώματα ειδικών επιπέδων πεπερασμένων στοιχείων τεσσάρων κόμβων τύπου Mindlin [19,20] για την προσομοίωση των στρωμάτων του μετάλλου, του κολλητικού μέσου και του επιθέματος. Η υπόθεση Mindlin, η οποία καθορίζει ένα γραμμικά μεταβαλλόμενο πεδίο μετατοπίσεων και παραμορφώσεων κατά το πάχος του στοιχείου, ισχύει και για τα τρία στρώματα των υλικών που προσομοιώνονται. Η σύνδεση των στρώσεων εξασφαλίζεται με τη χρήση εξισώσεων περιορισμού των μετατοπίσεων.

Οι μηχανικές ιδιότητες του επιθέματος αντιστοιχούν στις ισοδύναμες μηχανικές ιδιότητες του υλικού με τη συγκεκριμένη διαστρωμάτωση. Το στρώμα του κολλητικού μέσου προσομοιώνεται ως ένα ελαστικό συνεχές μέσο προκειμένου να επιτευχθεί μια οικονομική, από πλευράς υπολογιστικής ισχύος, δισδιάστατη απεικόνισή του, με τις μικρότερες διαφορές από τα αντίστοιχα τρισδιάστατα μοντέλα και να προσομοιωθούν καλύτερα τα χαρακτηριστικά του σε σχέση με τα μοντέλα που χρησιμοποιούν στοιχεία ελατηρίου ή δοκούς. Ο υπολογισμός του συντελεστή έντασης των τάσεων επιτυγχάνεται με τον προσδιορισμό του ρυθμού έκλυσης ελαστικής ενέργειας, G , και τη χρήση γραμμικής ελαστικής μηχανικής των θραύσεων.

Το σημαντικότερο μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι απαιτείται ιδιαίτερη προσπάθεια για τη σωστή σύνδεση κάθε ζεύγους κόμβων. Επιπλέον, η χρήση των στοιχείων κελύφους επιτρέπεται μόνο όταν πρόκειται για σχετικά λεπτές κατασκευές και σε περιοχές όπου δεν αναμένεται σημαντική μεταβολή της εντατικής κατάστασης κατά το πάχος τους. Αντίθετα, η τεχνική αυτή παρέχει τη δυνατότητα υπολογισμού κάμψης έξω από το επίπεδο των στρώσεων που εμφανίζεται λόγω της μετατόπισης του ουδέτερου άξονα εξαιτίας της διαφοράς μεταξύ των συντελεστών θερμικής διαστολής του μετάλλου και του επιθέματος.

Υπολογισμός επισκευής με τη χρήση υβριδικών μοντέλων αναλυτικών εξισώσεων και πεπερασμένων στοιχείων (Τροποποιημένες εξισώσεις Rose)

Οι εξισώσεις του Rose αποτελούν αναλυτική μέθοδο για τον υπολογισμό του συντελεστή έντασης των τάσεων [16] στη μεταλλική δομή κάτω από μια επισκευή με τη χρήση επιθεμάτων από σύνθετα υλικά, με περιορισμό το αποκλειστικά ελλειπτικό σχήμα του. Ο συνδυασμός τους με δισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία έρχεται να καλύψει τη συγκεκριμένη αδυναμία, με αποτέλεσμα τον υπολογισμό επισκευών με επιθέματα οποιουδήποτε σχήματος, αρκεί αυτά να είναι συμμετρικά ως προς τον άξονα που είναι κάθετος στη ρωγμή και διέρχεται από το κέντρο της.

1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση Σχετικά με τις Μεθόδους Αριθμητικής Μοντελοποίησης

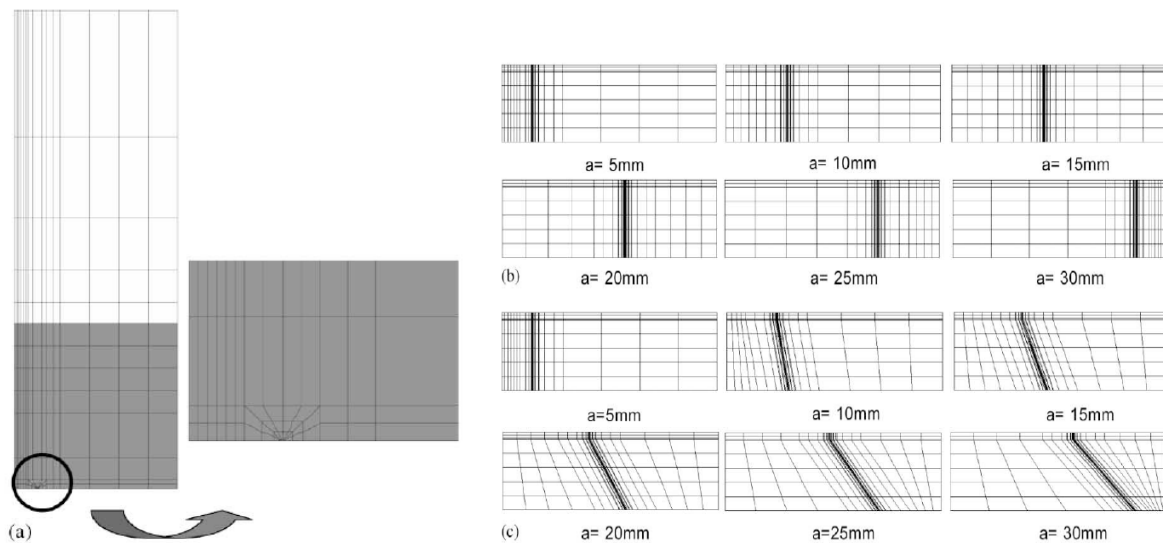
Σε αυτό το εδάφιο θα παρουσιαστούν επιλεκτικά κάποιες συγκεκριμένες δημοσιεύσεις οι οποίες κινούνται ακριβώς πάνω στον άξονα της παρούσας εργασίας. Ειδικότερα θα εξεταστούν σε κάποια έκταση εργασίες που υλοποιούν αριθμητικές επιλύσεις για τις γεωμετρικές που μας ενδιαφέρουν αλλά και για τους ίδιους τρόπους επισκευής τους. Κοινή στις ανωτέρω εργασίες είναι και η αριθμητική μέθοδος υπολογισμού, δηλαδή η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων όπου τα στοιχεία είναι τρισδιάστατα στερεά.

Πρώτη προς αναφορά εργασία επιλέγεται για λόγους σύνδεσης με την εισαγωγή η [4], αλλά και η προέκταση της η [5], κί αυτό διότι σε αυτή την εργασία παρουσιάζεται όπως έχει ήδη τονιστεί ένα ολοκληρωμένο πρόγραμμα πειραματικών δοκιμών, άλλα και η σχετική αριθμητική τους επιβεβαίωση, με αποτέλεσμα να παρουσιάζεται εκτενώς στο επόμενο εδάφιο που αφορά στην επαλήθευση της μεθόδου (βλέπε εδάφιο 1.3). Ειδικότερα, στην [5] και σε ότι αφορά τη μοντελοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία, συνοψίζονται τα εξής:

1. οι συγγραφείς παραθέτουν τη γενική διαπίστωση ότι, λύσεις σε κλειστή μορφή για την κατανομή των τάσεων σε γενικές επισκευαστικές διατάξεις, σαν κι αυτές που μας ενδιαφέρουν και έχουν εκτενώς περιγραφεί στην εισαγωγή, ή ελαστοπλαστικών συμπεριφορών για το χαλύβδινο υπόστρωμα, είναι πολύ δύσκολο να εξαχθούν κι επομένως είναι αναγκαία η χρήση αριθμητικών μεθόδων.
2. η αριθμητική μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε ήταν αυτή των πεπερασμένων στοιχείων, επί τη βάσει του εμπορικού πακέτου ABAQUS, όπου για να ελαχιστοποιηθεί το υπολογιστικό φορτίο η χαλύβδινη δοκός προσομοιώθηκε χρησιμοποιώντας τα συνήθη στοιχεία δοκού (beam elements) δυο κόμβων, ενώ το κολλητικό μέσο και το ενισχυτικό επίθεμα μοντελοποιήθηκαν από τα συνήθη δισδιάστατα στοιχεία επίπεδης εντατικής κατάστασης οχτώ κόμβων (8-node plain stress elements).
3. ο χάλυβας θεωρήθηκε ως διγραμμικό ελαστοπλαστικό υλικό, ενώ περισσότερες πληροφορίες επ' αυτού δίνονται στο εδάφιο 3.1.1. Το κολλητικό μέσο και το επίθεμα από CFRP μοντελοποιήθηκαν ως γραμμικά ελαστικά υλικά.

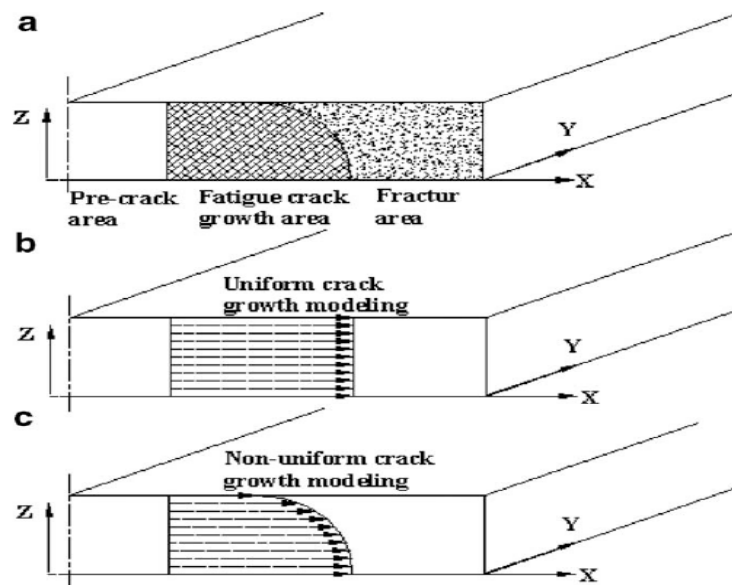
Η επόμενη εργασία η οποία έχει ήδη αναφερθεί στην εισαγωγή και χρησιμοποιεί την ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία είναι η [11] όπου, σε ότι αφορά στην αριθμητική προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν ισοπαραμετρικά είκοσι κόμβων (20-node) τρισδιάστατα στερεά στοιχεία, ενώ για την προσομοίωση της ρωγμής χρησιμοποιήθηκαν ιδιόμορφα στοιχεία. Η χαλύβδινη πλάκα μοντελοποιήθηκε με πέντε στοιχεία κατά το πάχος, το κολλητικό μέσο με ένα, ενώ το ενισχυτικό επίθεμα με δύο, χρησιμοποιώντας κατά την κοινή πρακτική αξιοποίησης της συμμετρίας, ακριβώς τη μισή. Η μέθοδος υλοποιήθηκε χρησιμοποιώντας το εμπορικό πακέτο ABAQUS. Τέλος, υποτέθηκαν δύο διαφορετικοί τύποι

για την ανάπτυξη του μετώπου της ρωγμής, στην απλή περίπτωση ομοιόμορφου σχήματος που διαδίδεται εγκάρσια στην επιφάνεια της πλάκας και ενός λοξού όπως διακριτοποιημένα φαίνονται στο Σχήμα 1.2.1.



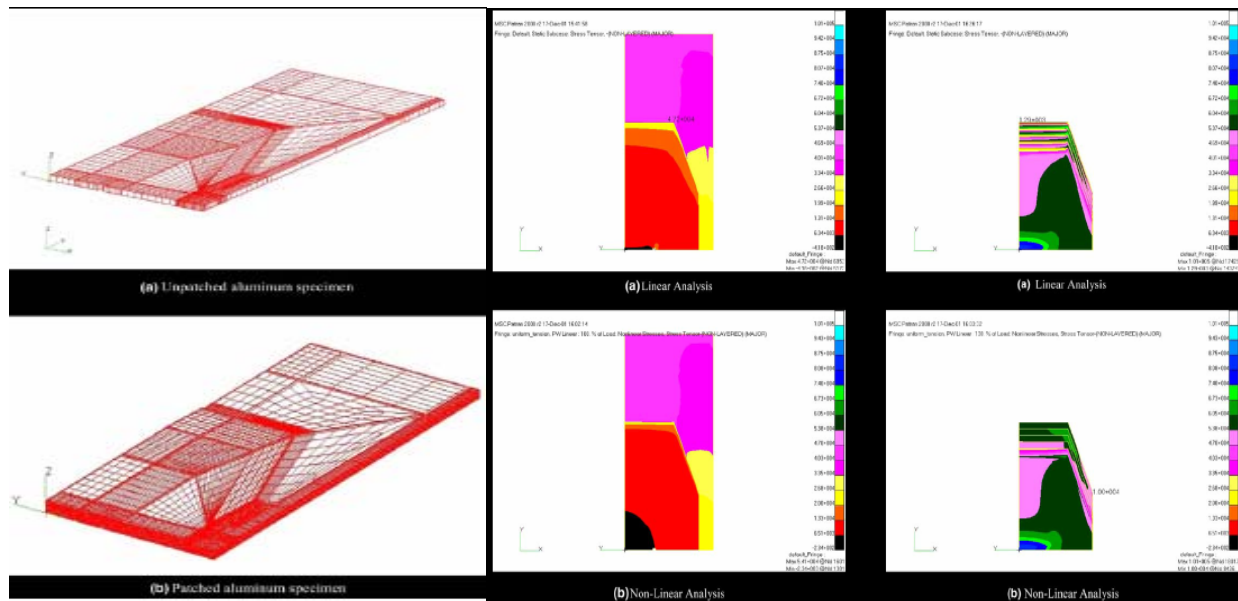
Σχήμα 1.2.1: Μοντελοποίηση του μετώπου της ρωγμής (a) άκρο της ρωγμής (b) ομοιόμορφο μέτωπο ρωγμής (c) λοξό μέτωπο ρωγμής.

Στην εργασία [12] έγινε συγκεκριμένη και επισταμένη προσπάθεια να μοντελοποιηθεί με ακρίβεια η διάδοση ρωγμών εντός του σώματος της αλουμινένιας πλάκας και για το σκοπό αυτό καταρτίστηκε πρόγραμμα υπολογισμών βασισμένο στο πακέτο ANSYS. Πιο συγκεκριμένα η γεωμετρία των δοκιμίων, οι ιδιότητες των υλικών, ο τύπος και η αναδημιουργία του καννάβου αλλά και εντοπισμένα μεγέθη που αφορούν στη διάδοση της ρωγμής και έπρεπε να υπολογιστούν σε κάθε χρονικό βήμα προγραμματισθήκαν με την γλώσσα APDL του πακέτου. Τέλος, υποτέθηκαν δύο διαφορετικοί τύποι για την ανάπτυξη του μετώπου της ρωγμής, στην απλή περίπτωση ομοιόμορφου σχήματος που διαδίδεται εγκάρσια στην επιφάνεια της πλάκας και ενός συνθετότερου μη ομοιόμορφου μετώπου που καμπυλώνει τη μορφή του ανάλογα με τις μεταβολές των τάσεων κατά τη διάρκεια της διάδοσης. Στο Σχήμα 1.2.2 φαίνονται τα προφίλ των μετώπων της ρωγμής για τις δυο ανωτέρω περιπτώσεις.



Σχήμα 1.2.2: Μορφή του μετώπου της ρωγμής κατά την ανάπτυξή του μετά την επισκευή (a) πραγματική επιφάνεια θραύσης (b) ομοιόμορφο μέτωπο ρωγμής (c) μη ομοιόμορφο μέτωπο ρωγμής.

Περαιτέρω στην δημοσίευση [21], εφαρμόσθηκε ένα πρόγραμμα μοντελοποίησης πεπερασμένων στοιχείων για ρωγματωμένα δοκίμια αλουμινίου τα οποία είχαν ενισχυθεί με επίθεμα από σύνθετα υλικά (boron epoxy). Ειδικότερα, αρχικά μοντελοποιήθηκε το ενισχυτικό επίθεμα χρησιμοποιώντας το λογισμικό CRAS, στη συνέχεια δημιουργήθηκε το γεωμετρικό μοντέλο με το λογισμικό PatchGen και τέλος χρησιμοποιήθηκε ο επίλυτής του Nastran για την εξαγωγή αποτελεσμάτων που αφορούν στις τάσεις, παραμορφώσεις και επιμηκύνσεις που αναπτύσσονται στο δοκίμιο. Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν ήταν 8 κόμβων και 24 βαθμών ελευθερίας, εξαγωγικά και διενεργήθηκαν αναλύσεις στατικές τόσο γραμμικές ελαστικές όσο και μη γραμμικές, μοντελοποιώντας το $\frac{1}{4}$ της γεωμετρίας λόγω συμμετρίας. Στις περιπτώσεις των μη γραμμικών αναλύσεων, οι μη γραμμικότητες ενσωματώθηκαν στο μοντέλο υποθέτοντας το κολλητικό μέσο ως ελαστικό τελείως πλαστικό υλικό, ενώ το αλουμίνιο υποτέθηκε ως ελαστικό γραμμικά κρατυνόμενο υλικό. Στο Σχήμα 1.2.3 παρουσιάζονται αριστερά τα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων που δημιουργήθηκαν, ενώ στο κέντρο η κατανομή των τάσεων στο αλουμινένιο υπόστρωμα και δεξιά στο επίθεμα.

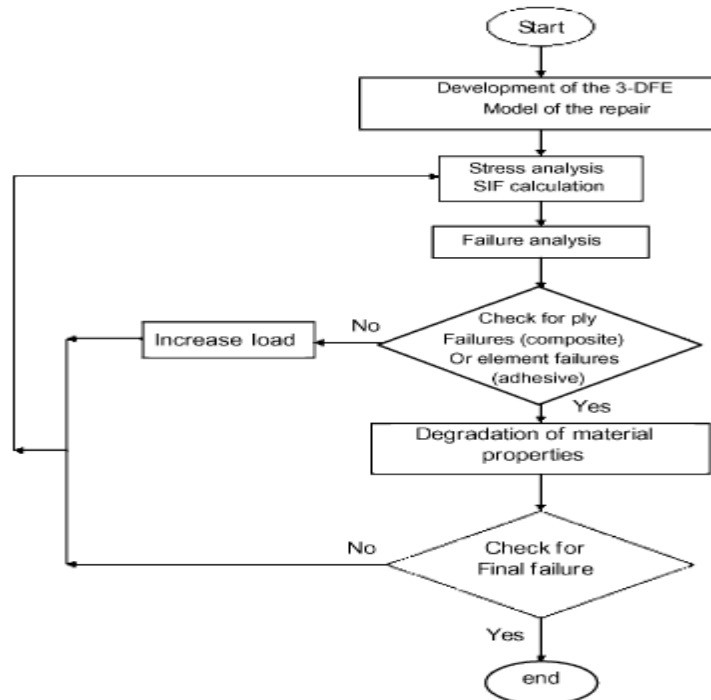


Σχήμα 1.2.3: Μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων (αριστερά), κατανομή των τάσεων στο αλουμινένιο υπόστρωμα (κέντρο) και στο επίθεμα (δεξιά).

Στην εργασία [22] διερευνάται η ενδεχόμενη βελτίωση της συμπεριφοράς σε κόπωση χαλύβδινων ρωγματωμένων ελασμάτων ενισχυμένων με επίθεμα από CFRP, με τη δημιουργία δισδιάστατων μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων με τη βοήθεια του λογισμικού ABAQUS, εξάγοντας αποτελέσματα σχετικά με το Συντελεστή Έντασης Τάσης και αποδεικνύοντας ότι το επίθεμα από σύνθετα υλικά είναι αποδοτικό. Το μοντέλο αποτελείται από συνεχή στοιχεία (continuum elements) οχτώ κόμβων, ενώ στο άκρο της ρωγμής χρησιμοποιούνται ιδιόμορφα στοιχεία οχτώ κόμβων. Γύρω από το άκρο της ρωγμής θεωρήθηκαν τέσσερα στοιχεία για το μοντέλο χωρίς επίθεμα και οχτώ γι' αυτό με το επίθεμα. Πρέπει να σημειωθεί ότι για να προσομοιωθεί η περιοχή αυτή υιοθετήθηκαν συνθήκες διαρροής μικρής κλίμακας σε συνδυασμό με την ταυτόχρονη κατάρρευση των ιδιόμορφων στοιχείων που είναι τοποθετημένα γύρω από το άκρο της ρωγμής. Επιπλέον, αξιοποιήθηκε η ύπαρξη συμμετρίας στη δεδομένη γεωμετρία, με αποτέλεσμα να μοντελοποιηθεί μόνο η μισή.

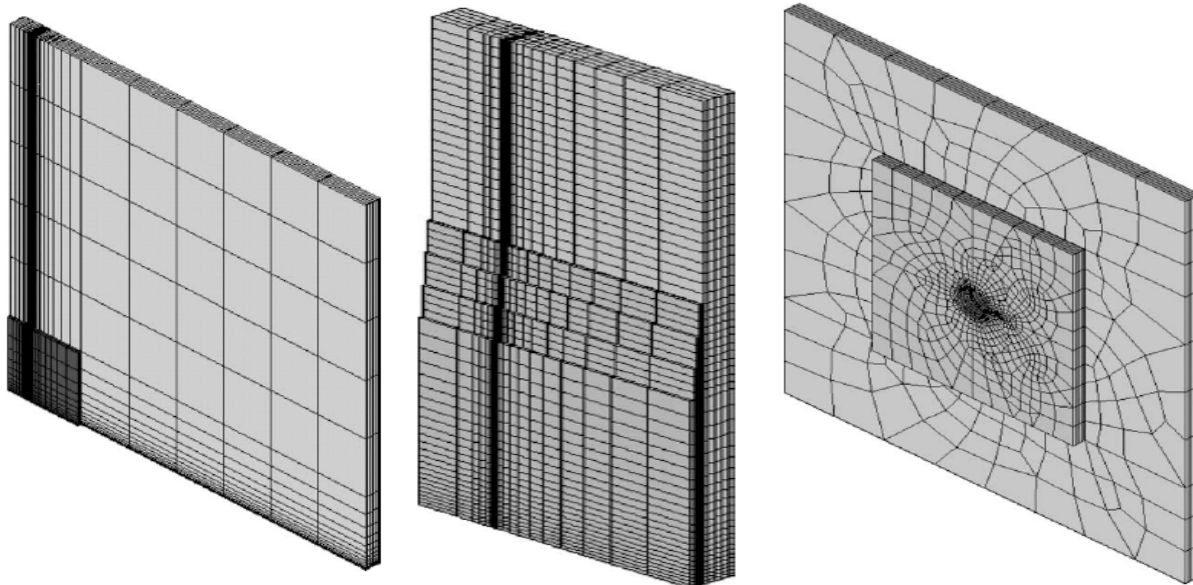
Τέλος, στην εργασία [23] αναπτύσσεται ένα τρισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων που αποτιμά τη μηχανική συμπεριφορά ενός ενισχυτικού επιθέματος διπλής όψεως από σύνθετα υλικά (CFRP) σε μια ρωγματωμένη μεταλλική πλάκα (αλουμίνιο), ενώ περιλαμβάνει την προοδευτική μοντελοποίηση της αστοχίας της επισκευής (progressive damage modeling) συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου. Η μέθοδος περιλαμβάνει τον υπολογισμό των αναπτυσσόμενων τάσεων στο μοντέλο (stress analysis) που πραγματοποιήθηκε δημιουργώντας ένα τρισδιάστατο παραμετρικό μοντέλο με τη βοήθεια του λογισμικού ANSYS, την επιβολή των κριτηρίων αστοχίας που υπολογίζονται σύμφωνα με τις τάσεις που αναπτύσσονται στο μοντέλο (failure analysis) και τέλος λαμβάνεται υπ' όψη η υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων των υφιστάμενων υλικών με τη χρήση των

κατάλληλων κανόνων (material property degradation), προγραμματίζοντάς τα να δρουν αλληλένδετα με τη μορφή ρουτίνας στο λογισμικό (ANSYS). Στο Σχήμα 1.2.4 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής των στοιχείων που αναφέρθηκαν παραπάνω.



Σχήμα 1.2.4: Διάγραμμα ροής μοντέλου προοδευτικής αστοχίας.

Το αλουμίνιο και το κολλητικό μέσο μοντελοποιήθηκαν ως ιστροπικά υλικά με τη χρήση τρισδιάστατων στοιχείων οχτώ κόμβων 8-node (SOLID45), ενώ για το ενισχυτικό επίθεμα χρησιμοποιήθηκαν στρωσιγενή στοιχεία οχτώ κόμβων 8-node (SOLID46) μοντελοποιώντας το ως ορθοτροπικό υλικό. Για το αλουμίνιο θεωρήθηκαν οχτώ στοιχεία κατά το πάχος, δύο για το κολλητικό μέσο και οχτώ για το επίθεμα, ένα για κάθε στρώση του επιθέματος, αριθμός που θεωρήθηκε αναγκαίος για την πρόβλεψη της αποκόλλησής του και των υπόλοιπων αστοχιών του κολλητικού μέσου και του επιθέματος. Οι αναλύσεις που διενεργήθηκαν ήταν γραμμικές, ενώ εξαιτίας της συμμετρίας της γεωμετρίας και του φορτίου μόνο το $\frac{1}{4}$ μοντελοποιήθηκε. Επίσης, δημιουργήθηκε μοντέλο με επικλινή διαμόρφωση του επιθέματος μόνο κατά το $\frac{1}{8}$ της συνολικής γεωμετρίας και μοντέλο που περιελάμβανε κεντρική διαμπερή οπή κατά το $\frac{1}{2}$ του συνόλου, όπου στο Σχήμα 1.2.5 παρουσιάζονται τα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων που δημιουργήθηκαν.



Σχήμα 1.2.5: Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων τυπικής διάταξης (αριστερά), με επικλινή διαμόρφωση επιθέματος (κέντρο), με κεντρική διαμπερή σπή (δεξιά).

1.3 Επαλήθευση του Τρόπου Μοντελοποίησης

Για να επιβεβαιωθεί η ορθότητα του τρόπου μοντελοποίησης που θα ακολουθηθεί στην παρούσα εργασία, κρίθηκε απαραίτητη η δημιουργία ενός μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων από τη βιβλιογραφία και η σύγκριση των αποτελεσμάτων. Η διαδικασία ανάπτυξης του μοντέλου θα ακολουθήσει τις γενικές κατευθύνσεις που ορίζονται και εφαρμόζονται για τις υφιστάμενες ανάγκες, διατηρώντας ταυτόχρονα τις ιδιότητες και όσο το δυνατόν περισσότερα από τα χαρακτηριστικά μοντελοποίησης κοινά με τις πηγές. Για την πραγματοποίηση της σύγκρισης αυτής αναζητήθηκε μια εργασία στην οποία τα αποτελέσματα που εξάγονται μοιάζουν με αυτά που μοντελοποιούνται στην παρούσα, δηλαδή ασχολούνται με τασικά χαρακτηριστικά (τάσεις και παραμορφώσεις), σε παρεμφερή πειραματικά δοκίμια. Τέτοιου είδους εργασία είναι (χωρίς να ήταν τυχαία η επιλογή της από την αρχή) η εργασία [4], στην οποία μοντελοποιούνται δοκίμια τα οποία διαθέτουν διαμπερή σπή, ενισχυμένα με επίθεμα από σύνθετα υλικά (CFRP) και στις δυο πλευρές τους (βλέπε Σχήμα 0.1) υπό δοκιμή στατικού εφελκυσμού και εξάγονται αποτελέσματα που αφορούν στις τάσεις που αναπτύσσονται στο ενισχυτικό επίθεμα. Πρέπει να σημειωθεί ότι χρησιμοποιήθηκε και η [24], η οποία είναι μέρος της [4] και δημοσιεύθηκε χρονικά νωρίτερα, καθώς αναγράφει στοιχεία τα οποία αφορούν στις μηχανικές ιδιότητες των υλικών.

Το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε στην [4] είναι το ABAQUS, το οποίο υποστηρίζει τρισδιάστατα στοιχεία, ενώ ο τρόπος δημιουργίας του μοντέλου μοιάζει με αυτόν του ANSYS. Η ανάγνωση της εργασίας άφησε πολλά κενά στον τρόπο

μοντελοποίησης που ακολουθήθηκε με αποτέλεσμα αρκετά στοιχεία να παρθούν από τη βιβλιογραφία ενώ άλλα να μείνουν όμοια με αυτά που υιοθετήθηκαν στην παρούσα εργασία. Στη συνέχεια, θα αναφερθούν τα στοιχεία που αντλήθηκαν από την [4] έτσι ώστε να αναπτυχθεί το αριθμητικό μοντέλο.

Ο χάλυβας μοντελοποιήθηκε ως γραμμικά ελαστικό, ιστροπικό υλικό μέτρου ελαστικότητας E και λόγου Poisson ν με τιμές που δίνονται στον Πίνακα 1.3.1. Το ενισχυτικό επίθεμα από CFRP μοντελοποιήθηκε ως γραμμικά ελαστικό υλικό με τα μέτρα ελαστικότητας E_y και E_z να είναι ίσα με το $\frac{1}{10}$ του μέτρου ελαστικότητας E_x και μέτρο διάτμησης G . Οι τιμές που υιοθετήθηκαν στο μοντέλο αναγράφονται στον Πίνακα 1.3.2. Τέλος, το κολλητικό μέσο θεωρήθηκε επίσης γραμμικά ελαστικό υλικό με μέτρο διάτμησης G . Λαμβάνοντας από τη βιβλιογραφία μια τιμή για το μέτρο ελαστικότητας E και χρησιμοποιώντας τον τύπο

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}$$

προκύπτει η τιμή για το λόγο Poisson ν , ενώ οι τιμές που προέκυψαν

αναγράφονται στον Πίνακα 1.3.3. Πρέπει να σημειωθεί ότι στους πίνακες που αναφέρθηκαν παραπάνω, οι τιμές που αντλήθηκαν από την [4] αναγράφονται με έντονο χρώμα, ενώ οι υπόλοιπες προέρχονται από τη βιβλιογραφία.

Οι διαστάσεις του μοντέλου αναγράφονται στο Σχήμα 0.1 (Fig.3), για το δοκίμιο που περιλαμβάνει την κεντρική διαμετρική οπή. Όπως και στη βιβλιογραφική αναφορά, μοντελοποιήθηκε μόνο το $\frac{1}{8}$ της συνολικής γεωμετρίας, ενώ οι τιμές των γεωμετρικών διαστάσεων ακολουθούν τη συγκεκριμένη μοντελοποίηση. Στα Σχήματα 1.3.1 και 1.3.2 παρουσιάζονται τα δύο μοντέλα που δημιουργήθηκαν με το ABAQUS και το ANSYS, αντίστοιχα. Χρησιμοποιήθηκε γραμμική ανάλυση για την επίλυση και η σύγκριση έγινε με τη μορφή διαγραμμάτων εξάγοντας τις ορθές τάσεις που αναπτύσσονται στο ενισχυτικό επίθεμα με ταυτόχρονη παράθεσή τους στις αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις. Η φόρτιση που εφαρμόστηκε στο μοντέλο ισούται με 60 kN, καθώς η σύγκριση με τις πειραματικές μετρήσεις και τα ανάλογο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων (ABAQUS) αντιστοιχούν στο συγκεκριμένο φορτίο.

Πίνακας 1.3.1: Μηχανικές Ιδιότητες Χάλυβα.

Υλικό	E (MPa)	ν
Χάλυβας	210000	0.30

Πίνακας 1.3.2: Μηχανικές Ιδιότητες CFRP.

Υλικό	E_x (MPa)	E_y (MPa)	E_z (MPa)	ν_{xy}	ν_{yz}	ν_{xz}	G_{xy} (MPa)	G_{yz} (MPa)	G_{xz} (MPa)
CFRP	197100	19710	19710	0.30	0.05	0.30	76000	9400	76000

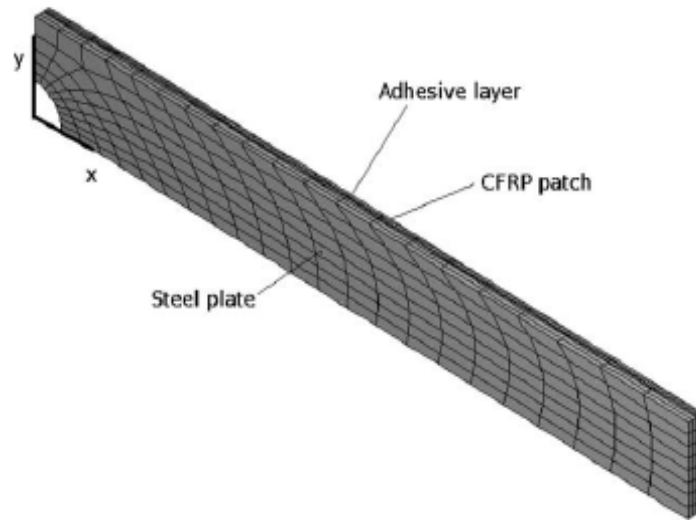
Πίνακας 1.3.3: Μηχανικές Ιδιότητες Κολλητικού Μέσου.

Υλικό	E (MPa)	ν	G (MPa)
Κολλητικό Μέσο	4500	0.5	1500

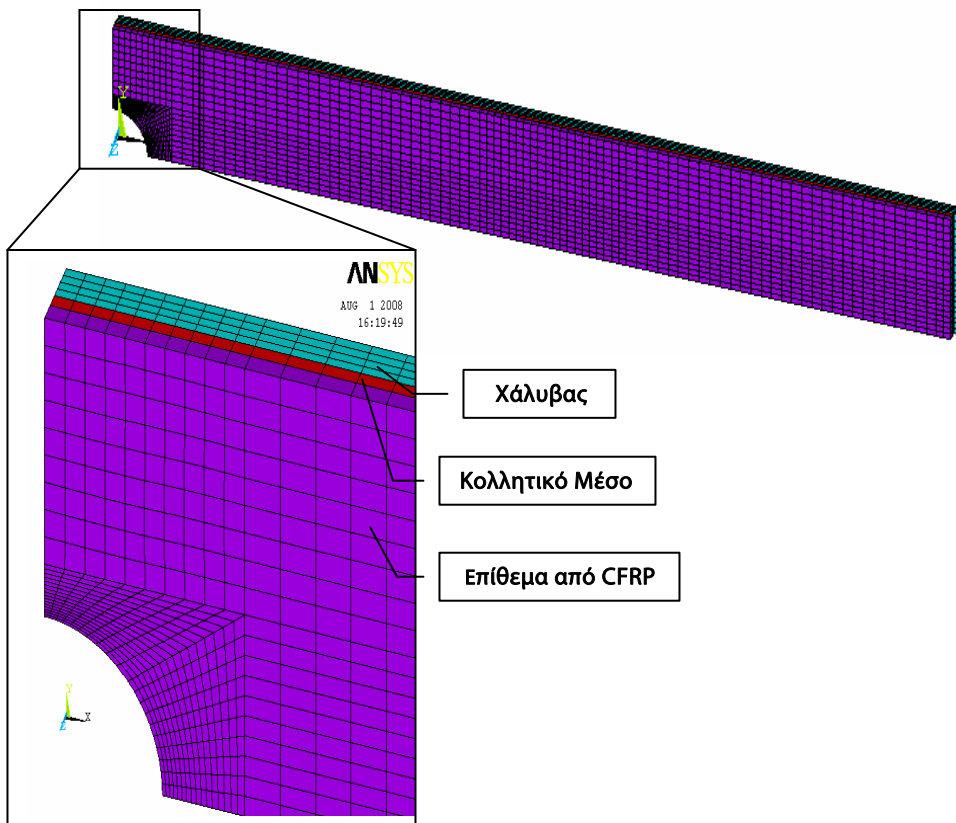
Στο σημείο αυτό θα αναφερθούν τα στοιχεία που υιοθετήθηκαν στο αριθμητικό μοντέλο και προέρχονται από τη μελέτη που έχει διεξαχθεί στην παρούσα εργασία. Για την πλήρωση του μοντέλου με πεπερασμένα στοιχεία χρησιμοποιήθηκαν τρισδιάστατα στερεά στοιχεία είκοσι κόμβων (20-node) SOLID95, ενώ ο αριθμός των στοιχείων κατά το πάχος κάθε υλικού θεωρήθηκε ίσος με τέσσερα για το χάλυβα, ένα για το κολλητικό μέσο και ένα για το ενισχυτικό επίθεμα. Η διακριτοποίηση του μοντέλου πραγματοποιήθηκε με τέτοια ακρίβεια κατά μήκος του ενισχυτικού επιθέματος και στην περιοχή που βρίσκεται η κεντρική οπή ώστε να καθοριστούν επακριβώς οι σχετικές συγκεντρώσεις των τάσεων που αναπτύσσονται. Το μέγεθος των στοιχείων κατά τις x και y διευθύνσεις, περιμετρικά της οπής, κυμαίνεται από 0.15 mm έως 0.8 mm, ενώ στην περιοχή γύρω από την οπή κυμαίνονται από 1.2 mm έως 6.6 mm.

Τα συγκριτικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στα Σχήματα 1.3.3 και 1.3.4. Στο Σχήμα 1.3.3 παρουσιάζεται η κατανομή των ορθών τάσεων κατά μήκος (διεύθυνση x) του ενισχυτικού επιθέματος από CFRP ακριβώς επί των θέσεων των ηλεκτρικών επιμηκυσιομέτρων (strain gages) που χρησιμοποιήθηκαν στις πειραματικές μετρήσεις, η θέση των οποίων προσδιορίζεται στο Σχήμα 1.3.5 ($y=0$). Η κατακόρυφη θέση τους ήταν στην επιφάνεια του επιθέματος $z=5.5$ mm, και για φορτίο της τάξης των 60 kN, όπως προκύπτει από τις πειραματικές μετρήσεις (**Experimental**) και τα αριθμητικά αποτελέσματα στο **ABAQUS** και στο **ANSYS**.

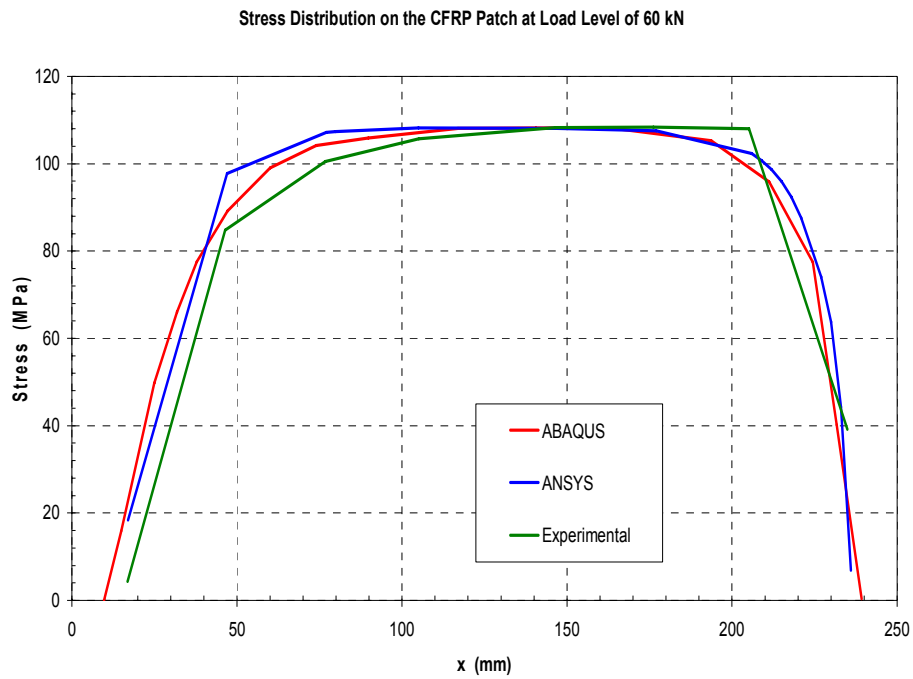
Στο Σχήμα 1.3.4 παρουσιάζεται η συγκέντρωση των ορθών τάσεων ακριβώς επί των θέσεων των ηλεκτρικών επιμηκυσιομέτρων (strain gages) που χρησιμοποιήθηκαν στις πειραματικές μετρήσεις, κατανομή κατά τη διεύθυνση y η οποία διέρχεται από το κέντρο της οπής και είναι εγκάρσια στο διαμήκη άξονα του δοκιμίου όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.3.5 στο επίθεμα από CFRP σε φορτίο της τάξης των 60 kN, όπως προκύπτει από τις πειραματικές μετρήσεις (**Experimental**) και τα αριθμητικά αποτελέσματα από το **ABAQUS** και από το **ANSYS**. Σε κάθε περίπτωση η αρχή των αξόνων ορίζεται στο κέντρο της οπής όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.3.5.



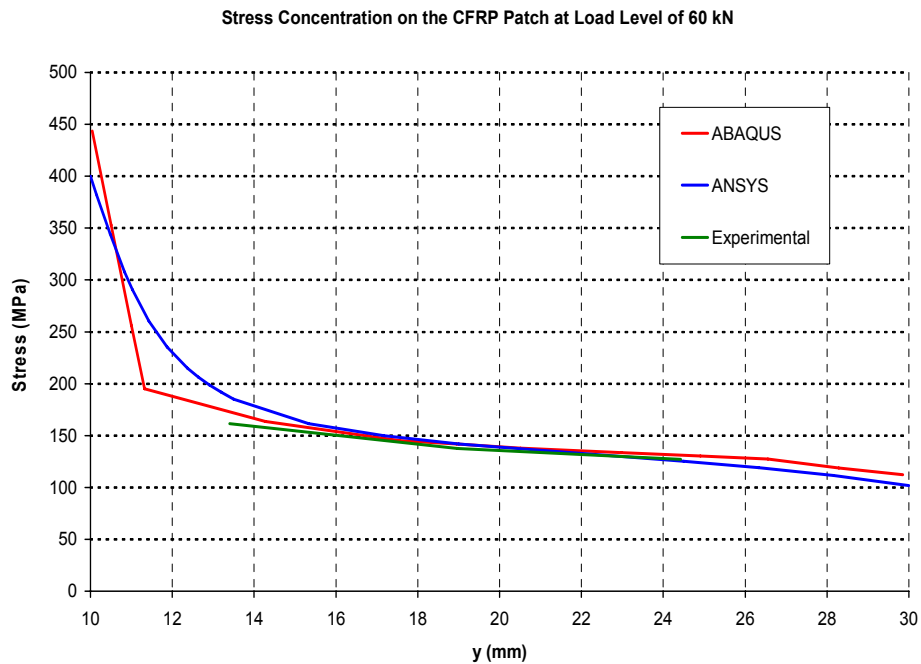
Σχήμα 1.3.1: Μοντελοποίηση με το ABAQUS.



Σχήμα 1.3.2: Μοντελοποίηση με το ANSYS.



Σχήμα 1.3.3: Κατανομή των τάσεων στο επίθεμα κατά τη διεύθυνση x για φορτίο 60 kN.



Σχήμα 1.3.4: Κατανομή των τάσεων στο επίθεμα κατά τη διεύθυνση y για φορτίο 60 kN.

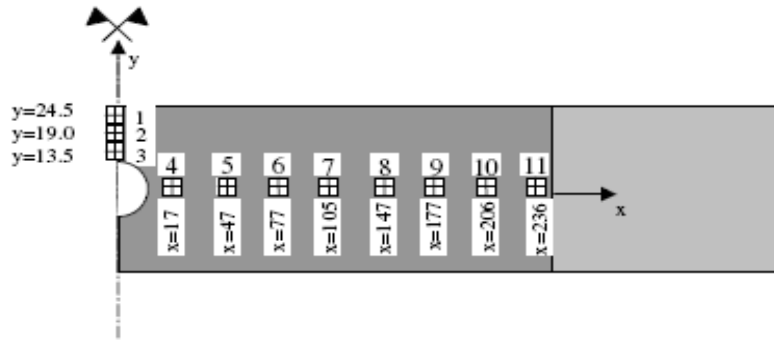


Fig. 4. Strain gauge positions in specimen H1 (length in mm).

Σχήμα 1.3.5: Θέσεις επιμηκνσιομέτρων στο Παράδειγμα Σύγκρισης.

Όπως φαίνεται και από τα παραπάνω διαγράμματα, οι μέγιστες αποκλίσεις των αποτελεσμάτων μεταξύ των δύο αριθμητικών προσομοιώσεων είναι αρκετά μικρές, και εμφανίζουν ικανοποιητικά ακριβή σύμπτωση τόσο για την κατανομή των τάσεων κατά τη διεύθυνση x όσο και κατά τη διεύθυνση y . Παράλληλα, αποτυπώνεται σε μεγάλο βαθμό και με αρκετή ακρίβεια το φαινόμενο που εξετάζεται, καθώς τα αριθμητικά αποτελέσματα που παράγονται από το ANSYS ακολουθούν τις αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις με ικανοποιητικά μικρό σφάλμα. Συμπεραίνεται λοιπόν ότι η διαδικασία προσομοίωσης που θα ακολουθηθεί είναι η ενδεδειγμένη και εξασφαλίζεται η ορθότητα των εξαγόμενων αποτελεσμάτων με βάση τόσο τα ποιοτικά χαρακτηριστικά όπως φαίνεται στα αντίστοιχα διαγράμματα, όσο και με την ικανοποιητική ακρίβεια των υπολογισμών σε επίπεδο απόλυτων σφαλμάτων.

Κεφάλαιο 2

Παρουσίαση Πειραματικών Μετρήσεων

Εισαγωγή

Τα διάφορα τμήματα και οι κατασκευαστικές λεπτομέρειες της μεταλλικής κατασκευής των χαλύβδινων πλοίων, υπόκεινται σε πληθώρα στατικών και δυναμικών φορτίσεων. Επόμενο είναι λοιπόν η εμφάνιση ρωγμών στην κατασκευή και η διάδοση αυτών καθώς το πλοίο λειτουργεί στο θαλάσσιο περιβάλλον. Η ταυτόχρονη ύπαρξη έντονα διαβρωτικών συνθηκών, προσθέτει έναν επιπλέον επιβαρυντικό παράγοντα που συμβάλλει στην περαιτέρω καταπόνηση της κατασκευής και την εμφάνιση πρόσθετων αστοχιών. Κατά συνέπεια, συχνά παρουσιάζεται η ανάγκη μιας είτε μόνιμης είτε προσωρινής τοπικής ενίσχυσης κάποιων τμημάτων της μεταλλικής κατασκευής. Μια διαδικασία, η οποία έχει ήδη εφαρμοστεί στην αεροπορική βιομηχανία όπως αναφέρθηκε στη βιβλιογραφική ανασκόπηση, και η οποία χρησιμοποιεί ως υλικό κατασκευής το αλουμίνιο, προβλέπει την ενίσχυση με επίθεμα από σύνθετα υλικά. Οι δοκιμές που θα παρουσιαστούν στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιήθηκαν με βασικό σκοπό τη μεταφορά της τεχνογνωσίας αυτής στις χαλύβδινες ναυπηγικές κατασκευές. Οι βασικές διαφοροποιήσεις που υπαγορεύουν την πρόσθετη μελέτη του θέματος είναι, το διαφορετικό υλικό βάσης, οι τελείως διαφορετικές γεωμετρίες, τα πολύ μεγαλύτερα πάχη ελασμάτων, οι διαφορετικές φορτίσεις και το διαφορετικό περιβάλλον λειτουργίας. Στόχος των πειραματικών δοκιμών είναι να διερευνηθεί το κατά πόσο η χρήση ενισχυτικών επιθεμάτων από σύνθετα υλικά, οδηγεί στην αποδοτική ενίσχυση ενός τμήματος της χαλύβδινης κατασκευής του πλοίου και να καθοριστεί και αξιολογηθεί το ποσοστό της ενίσχυσης αυτής. Τέλος, είναι επιθυμητή η ανάπτυξη μιας διαδικασίας σχεδιασμού και εφαρμογής τέτοιων ενισχύσεων σε ναυπηγικές κατασκευές. Συνεπώς, στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η διαδικασία και αναλύονται τα αποτελέσματα μιας σειράς στατικών πειραματικών δοκιμών που διεξήχθησαν στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας (ΕΝΤ) της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ, εκτός του πλαισίου της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Αφορούν σε μεγάλο μέγεθος δοκίμια από χάλυβα με **α**)κεντρική διαμπερή ρωγμή και **β**)κεντρική διαβρωμένη περιοχή και είναι ενισχυμένα στη μία τους όψη με επίθεμα από σύνθετα υλικά, τα οποία φορτίστηκαν από στατικό εφελκυστικό φορτίο.

2.1 Περιγραφή Στατικών Δοκιμών των Ρωγματομένων Πλακών Χάλυβα

2.1.1 Υλικά

Τα υλικά που εξετάστηκαν σε αυτή τη σειρά των δοκιμών περιλαμβάνουν:

1. Μεταλλικές πλάκες από κοινό ναυπηγικό χάλυβα
2. Ενισχυτικό επίθεμα από σύνθετο υλικό αποτελούμενο από ίνες άνθρακα και εποξειδική ρητίνη
3. Κολλητικό μέσο από εποξειδική ρητίνη

Οι χαλύβδινες πλάκες που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή και την τελική διαμόρφωση των δοκιμών αποτελούνται από κοινό ναυπηγικό χάλυβα Grade A. Δοκιμές εφελκυσμού δοκιμών από το χάλυβα αυτόν που πραγματοποιήθηκαν στο ENT είχαν ως αποτέλεσμα τον καθορισμό του μέτρου ελαστικότητας του Young E_s ίσο με 200 GPa και του ορίου διαρροής σ_o ίσο με 348 MPa.

Τα επιθέματα κατασκευάστηκαν από δύο διαφορετικούς τύπους υφασμάτων άνθρακα. Ο πρώτος τύπος ήταν ένα ύφασμα με προσανατολισμό ινών $0^\circ/90^\circ$, πλέξη Plain Weave και επιφανειακό βάρος 240 g/m^2 της εταιρείας R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH. Ο δεύτερος τύπος ήταν ένα μονοαξονικό (UniDirectional) ανθρακοϋφασμα με ίνες υψηλού μέτρου ελαστικότητας, επιφανειακό βάρος 300 g/m^2 και εμπορικό όνομα SikaWrap-300C HiMod NW, της εταιρείας SIKA.

Για την κατασκευή των πολύστρωτων επιθεμάτων από σύνθετα υλικά χρησιμοποιήθηκαν δύο μέθοδοι, η μέθοδος μορφοποίησης με το χέρι (Hand Lay-Up, HLU) και η μέθοδος έγχυσης ρητίνης υπό συνθήκες κενού (Vacuum Infusion, VI). Το ανθρακοϋφασμα Plain Weave χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή δοκιμών και με τις δύο μεθόδους, ενώ με το μονοαξονικό ύφασμα SikaWrap κατασκευάστηκαν δοκίμια μόνο με τη μέθοδο HLU.

Χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι ρητινών. Η πρώτη ρητίνη είναι η εποξειδική ρητίνη D.E.R. 358 της εταιρείας Dow, η οποία είναι λεπτόρρευστη (ιξώδες στους 25°C ίσο με 600– 750 mPa·s) και χρησιμοποιήθηκε σε συνδυασμό με το ύφασμα Plain Weave για την κατασκευή επιθεμάτων και με τις δύο μεθόδους κατασκευής (HLU και VI). Αυτό που διαφέρει στις δύο μεθόδους κατασκευής είναι ο σκληρυντής. Στη μέθοδο HLU απαιτείται μεγαλύτερος χρόνος σκλήρυνσης της ρητίνης απ' ό,τι στη μέθοδο VI και έτσι, στην πρώτη μέθοδο χρησιμοποιήθηκε «αργός» σκληρυντής, ενώ στη δεύτερη «γρήγορος». Ο «αργός» σκληρυντής είναι ο Eramine PC13 της εταιρείας PO.INT.ER S.r.l. (pot life ποσότητας 150 g στους 25°C = 50 min), ενώ ο «γρήγορος» είναι ο Eramine PA43 της ίδιας εταιρείας (pot life ποσότητας 150g στους 25°C = 18 – 20 min). Η δεύτερη ρητίνη χρησιμοποιήθηκε αποκλειστικά με το ύφασμα SikaWrap και τη μέθοδο HLU. Πρόκειται για την εποξειδική

ρητίνη Sikadur 300 της εταιρείας SIKA, η οποία συνοδεύεται από τον αντίστοιχο σκληρυντή της ίδιας εταιρείας και έχει pot life 4 ώρες στους 23°C. Το χρονικό διάστημα pot life ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται από τη στιγμή που προστίθεται ο καταλύτης στη ρητίνη μέχρι τη τελική σκλήρυνσή της, δηλαδή ο ωφέλιμος για εργασία χρόνος. Ο χρόνος αυτός εξαρτάται από την ποσότητα του καταλύτη και τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

Πριν κατασκευαστούν τα δοκίμια είχε προηγηθεί πλήρης χαρακτηρισμός των σύνθετων υλικών από τα οποία κατασκευάστηκαν τα επιθέματα [25], με αποτέλεσμα να καθοριστούν οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών. Οι τιμές των ιδιοτήτων αυτών αναγράφονται στον Πίνακα 2.1.1, όπου E_x είναι το μέτρο ελαστικότητας του Young σε εφελκυσμό κατά μήκος του επιθέματος (κατά τη x -διεύθυνση), σ_{ux} είναι η αντοχή του σύνθετου υλικού κατά την ίδια διεύθυνση, ϵ_{ux} είναι η αντίστοιχη παραμόρφωση, W_f είναι η περιεκτικότητα κατά βάρος σε ίνες άνθρακα και t_{ply} είναι το μέσο πάχος μιας στρώσης υλικού. Στον πίνακα αυτόν με PW υποδηλώνεται το ύφασμα Plain Weave, με UD-HM υποδηλώνεται το μονοαξονικό ύφασμα υψηλού μέτρου ελαστικότητας SikaWrap και με HLU και VI υποδηλώνονται οι δύο μέθοδοι κατασκευής

Πίνακας 2.1.1: Τιμές Μηχανικών Ιδιοτήτων των Επιθεμάτων από Σύνθετα Υλικά.

Υλικό	E_x (MPa)	σ_{ux} (MPa)	ϵ_{ux} (%)	W_f (%)	t_{ply} (mm)
PW / HLU	46300	658.9	1.36	56.0	0.30
PW / VI	58000	759.6	1.35	62.6	0.26
UD-HM / HLU	93000	321.2	0.33	23.8	0.99

Μετά το πέρας των δοκιμών, από κάθε αποκολλημένο επίθεμα, κόπηκαν δύο δοκίμια για δοκιμή εφελκυσμού κατά τη διεύθυνση του μήκους (διεύθυνση x) του επιθέματος. Τα δοκίμια δεν ακολουθούσαν τις προδιαγραφές των σχετικών διεθνών προτύπων ISO καθώς η γεωμετρία των επιθεμάτων δεν επέτρεψε τη λήψη σχετικών δοκιμών. Οι τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων καθώς και οι διαστάσεις που μετρήθηκαν αναγράφονται στον Πίνακα 2.1.2, όπου t_p είναι το συνολικό πάχος του επιθέματος ενώ τα υπόλοιπα μεγέθη έχουν εξηγηθεί παραπάνω. Πρέπει να σημειωθεί το γεγονός ότι στην περίπτωση των επιθεμάτων UD-HM/HLU δε διενεργήθηκαν δοκιμές καθώς τα δοκίμια που ελήφθησαν δεν είχαν σταθερή εγκάρσια διατομή κι έτσι δεν αναγράφονται τιμές στον πίνακα που αφορούν στις μηχανικές του ιδιότητες.

Πίνακας 2.1.2: Μετρημένες Τιμές Μηχανικών Ιδιοτήτων των Επιθεμάτων από Σύνθετα Υλικά.

Υλικό	E_x (MPa)	σ_{ux} (MPa)	ϵ_{ux} (%)	W_f (%)	t_p (mm)	t_{ply} (mm)
PW / HLU	42950	444.4	1.31	55.1	5.3	0.33
PW / VI	62750	661.3	1.19	66.5	3.6	0.24
UD-HM / HLU	-	-	-	42.2	11.6	0.72

Από τη Θεωρία Σύνθετων Υλικών [26] είναι γνωστό ότι η περιεκτικότητα κατά βάρος σε ίνες της στρώσης, W_f , ενός σύνθετου υλικού είναι αντιστρόφως ανάλογη του πάχους της συγκεκριμένης στρώσης. Αυτό συμβαίνει γιατί η αύξηση της περιεκτικότητας σε ίνες, συνεπάγεται αυτόματη μείωση της περιεκτικότητας σε ρητίνη, υλικό το οποίο καταλαμβάνει περισσότερο όγκο από τις ίνες (έχει μικρότερη πυκνότητα από αυτές). Επίσης, το μέτρο ελαστικότητας του επιθέματος E_x είναι ανάλογο της κατά βάρος περιεκτικότητας σε ίνες W_f σύμφωνα με το γνωστό «Νόμο των Αναμείξεων» [26]. Παρατηρώντας τις τιμές του Πίνακα 2.1.2 που μετρήθηκαν μετά τη διενέργεια των δοκιμών, στην περίπτωση του υλικού PW/HLU η επίτευξη μειωμένης κατά βάρος περιεκτικότητας σε ίνες W_f συνάδει με το αυξημένο πάχος στρώσης t_{ply} και το μειωμένο μέτρο ελαστικότητας E_x . Αντίθετα, στην περίπτωση του υλικού PW/VI το μειωμένο πάχος στρώσης και τα αυξημένο μέτρο ελαστικότητας ακολουθεί την επιτευχθείσα αυξημένη κατά βάρος περιεκτικότητα σε ίνες. Τέλος, στην περίπτωση του υλικού UD-HM/HLU η κατά βάρος περιεκτικότητα σε ίνες προέκυψε αυξημένη με αποτέλεσμα τη μείωση του πάχους της στρώσης καθώς δεν ήταν δυνατός ο προσδιορισμός του μέτρου ελαστικότητας και σύμφωνα με τα παραπάνω είναι αναμενόμενο να έχει υψηλότερη τιμή.

Για το τελευταίο (UD-HM/HLU), καθώς δεν ήταν δυνατή η μέτρηση των ιδιοτήτων του, το μέτρο ελαστικότητας κατά την διεύθυνση x υπολογίστηκε θεωρητικά με βάση την τελικά επιτευχθείσα κατά βάρος περιεκτικότητα των ινών και την αρχική που είχε μετρηθεί κατά τη δοκιμή χαρακτηρισμού του (βλέπε Πίνακα 2.1.1). Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για το σκοπό αυτό βασίστηκε στο «Νόμο των Αναμείξεων» και στις σχέσεις μετατροπής μεταξύ των περιεκτικότητων κατά βάρος και κατ' όγκο των ινών και της ρητίνης:

$$\left. \begin{aligned} E_x &= E_f V_f + E_m V_m \\ V_f &= W_f \frac{\rho_c}{\rho_f} \\ V_m &= W_m \frac{\rho_c}{\rho_m} \end{aligned} \right\} \Rightarrow E_x = E_f W_f \frac{\rho_c}{\rho_f} + E_m W_m \frac{\rho_c}{\rho_m}$$

όπου E_x είναι το μέτρο ελαστικότητας του επιθέματος κατά την διεύθυνση x
 $E_f = 640000$ MPa, είναι το μέτρο ελαστικότητας των ινών
 $E_m = 3000$ MPa, είναι το μέτρο ελαστικότητας της ρητίνης
 V_f και V_m είναι οι κατ' όγκο περιεκτικότητες των ινών και της ρητίνης, αντίστοιχα
 W_f και W_m είναι οι κατά βάρος περιεκτικότητες των ινών και της ρητίνης, αντίστοιχα
 ρ_c είναι η πυκνότητα του σύνθετου υλικού
 $\rho_f = 2.12$ g/cm³ είναι η πυκνότητα των ινών
 $\rho_m = 1.16$ g/cm³ είναι η πυκνότητα της ρητίνης

Οι τιμές των E_f , E_m , ρ_f και ρ_m προέρχονται από το αντίστοιχο φύλλο ιδιοτήτων της SIKA, του

κατασκευαστή των ινών και της ρητίνης. Κατά συνέπεια, το μέτρο ελαστικότητας E'_x ενός επιθέματος με κατά βάρος περιεκτικότητα των ινών διαφορετική από εκείνη που δίνεται στον Πίνακα 2.1.1 μπορεί να υπολογιστεί με βάση τη γνωστή τιμή του E_x , σύμφωνα με τον παρακάτω λόγο:

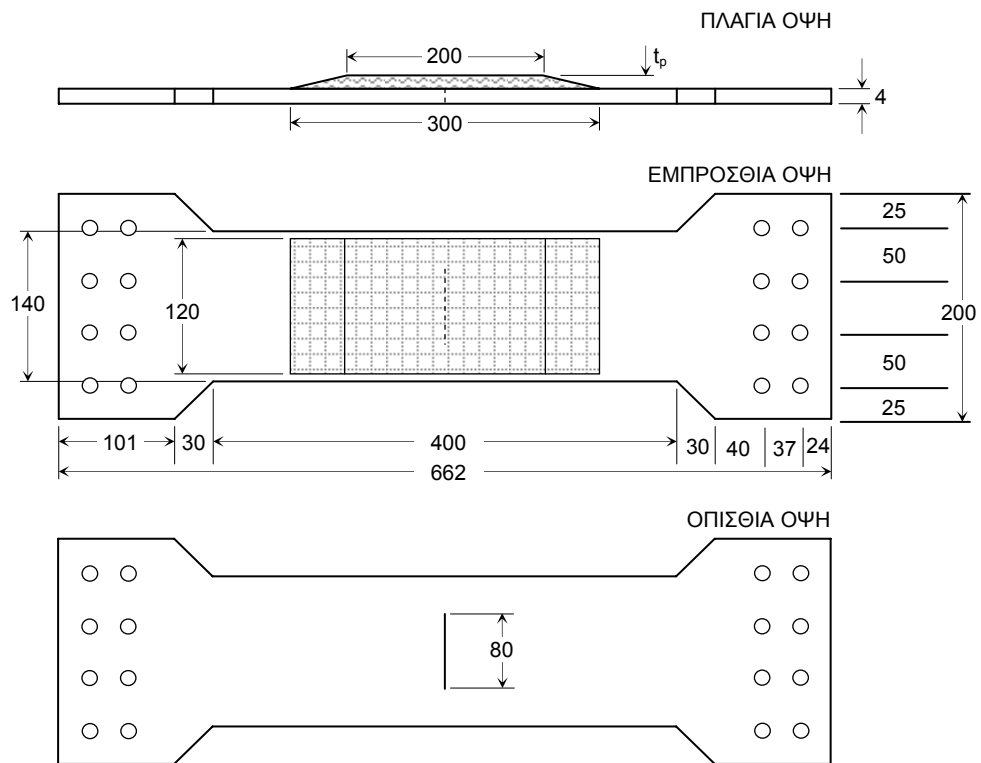
$$\frac{E'_x}{E_x} = \frac{E_f W'_f \frac{\rho'_c}{\rho_f} + E_m W'_m \frac{\rho'_c}{\rho_m}}{E_f W_f \frac{\rho_c}{\rho_f} + E_m W_m \frac{\rho_c}{\rho_m}}$$

θεωρώντας ότι $E_x = 93000$ MPa, $W_f = 0.238$ και $W_m = 1 - W_f = 0.762$ (βλέπε Πίνακα 2.1.1) ενώ έγινε η υπόθεση ότι $\rho'_c = \rho_c$. Η τιμή του W'_f (42.2%) (και η αντίστοιχη τιμή του W'_m (0.578%)) προέρχεται από τις δοκιμές χαρακτηρισμού που διενεργήθηκαν στα αποκολλημένα επιθέματα UD-HM/HLU. Η τιμή του μέτρου ελαστικότητας σύμφωνα με την παραπάνω διαδικασία προκύπτει ίση με **172184 MPa**.

2.1.2 Γεωμετρία Δοκιμίων

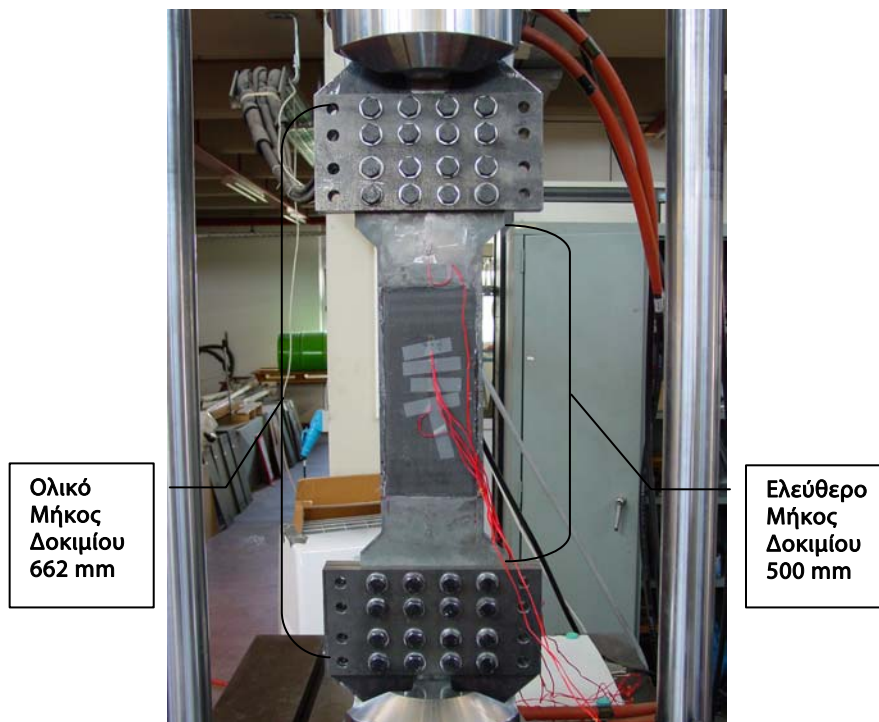
Η γεωμετρία των χαλύβδινων δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και οι κύριες διαστάσεις αυτών φαίνονται στο Σχήμα 2.1.1. Το ονομαστικό πάχος του χάλυβα t_s είναι ίσο με 4 mm. Το κεντρικό ορθογώνιο τμήμα αναφοράς του δοκιμίου έχει μήκος, L_s ίσο με 400 mm και πλάτος W_s ίσο με 140 mm. Στο κέντρο του έχει διαμετρική εγκοπή (notch) μήκους $2a$ ίσο με 80 mm, η οποία δημιουργήθηκε με τη μέθοδο κοπής με τόξο πλάσματος (plasma cutting). Στην εμπρόσθια όψη του, το δοκίμιο έχει κεντρικό επίθεμα από σύνθετα υλικά πάχους t_p , ενεργού μήκους L_p ίσο με 200 mm και πλάτους W_p ίσο με 120 mm. Το συνολικό μήκος του επιθέματος είναι 300 mm, αφού κατασκευάζεται έτσι ώστε τα άκρα του να είναι επικλινή. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο αρχικός σχεδιασμός των πειραμάτων προέβλεπε ορθογώνια χαλύβδινα δοκίμια πλάτους 200 mm. Το ασυνήθιστα όμως υψηλό όριο διαρροής του χάλυβα των δοκιμίων, σε συνδυασμό με τη δυναμικότητα της υδραυλικής μηχανής δοκιμών υπαγόρευε τη μείωση της διατομής των δοκιμίων κι έτσι προέκυψε η γεωμετρία του Σχήματος 2.1.1.

Λόγω των μεγάλων διαστάσεών τους, τα δοκίμια δεν μπορούσαν να προσαρμοστούν κατευθείαν στις αρπάγες της υδραυλικής μηχανής δοκιμών του ENT. Για το λόγο αυτό σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν ειδικοί χαλύβδινοι προσαρμογείς, προκειμένου να προσδεθούν τα δοκίμια στην υδραυλική μηχανή δοκιμών. Τα δοκίμια συνδέονται με τους προσαρμογείς με τη βοήθεια 16 κοχλιών διάστασης M16, μέσα από οπές που έχουν ανοιχτεί για το σκοπό αυτό στα δοκίμια οι οποίες είναι διάστασης $\Phi 16$. Οι συντεταγμένες των κέντρων των οπών προκύπτουν από το Σχήμα 2.1.1, καθώς οι διαστάσεις που αναγράφονται στη δεξιά πλευρά της εμπρόσθιας όψης αναφέρονται στα κέντρα αυτά.



Σχήμα 2.1.1: Γεωμετρία δοκιμίων.

Το δοκίμιο μαζί με τους ειδικούς προσαρμογείς, εφαρμοσμένα στις αρπάγες της υδραυλικής μηχανής φαίνονται στο Σχήμα 2.1.2, όπου σημειώνονται το ελεύθερο μήκος του δοκιμίου που δε συγκρατείται από τους ειδικούς προσαρμογείς και είναι ίσο με 500 mm καθώς και το ολικό μήκος που είναι ίσο με 662 mm.



Σχήμα 2.1.2: Δοκίμιο προσδεμένο στην υδραυλική μηχανή δοκιμών.

Τα δοκίμια που εξετάστηκαν ήταν συνολικά 8, αποτελώντας 4 ζεύγη ανά δύο όμοιων δοκιμίων. Η ονοματολογία των δοκιμίων και η περιγραφή τους φαίνεται στον Πίνακα 2.1.3. Στον ίδιο πίνακα φαίνονται επίσης οι ακριβείς διαστάσεις του πλάτους W_s και του πάχους t_s του κεντρικού τμήματος αναφοράς των δοκιμίων. Τα δοκίμια S-C-1&2 χαρακτηρίζονται ως δοκίμια αναφοράς καθώς δεν περιλαμβάνουν ενισχυτικό επίθεμα.

Πίνακας 2.1.3: Ονοματολογία και διαστάσεις των δοκιμίων.

Δοκίμιο	Υλικό Επιθέματος	Μέθοδος Κατασκευής	W_s (mm)	t_s (mm)
S-C-1	–	–	139.5	3.8
S-C-2	–	–	139.4	3.8
S-C-HLU-1	PW	HLU	139.7	3.9
S-C-HLU-2	PW	HLU	139.5	3.9
S-C-VI-1	PW	VI	139.8	3.9
S-C-VI-2	PW	VI	139.8	3.8
S-C-HLU-3	UD-HM	HLU	139.9	3.7
S-C-HLU-4	UD-HM	HLU	139.9	3.7

2.1.3 Προετοιμασία και Κατασκευή των Δοκιμίων

Όπως έχει προαναφερθεί, η κεντρική διαμπερής εγκοπή δημιουργήθηκε με τη βοήθεια τόξου πλάσματος. Το άνοιγμα της ήταν σε όλες τις περιπτώσεις μικρότερο από 0.5 mm. Η διαμόρφωση του τελικού σχήματος των δοκιμίων έγινε με τη βοήθεια υδροκοπής. Η επιφάνεια των δοκιμίων χάλυβα στα οποία τοποθετήθηκε επίθεμα γυαλίστηκε αρχικά με ηλεκτρικά περιστρεφόμενη συρμάτινη βούρτσα. Στη συνέχεια καθαρίστηκε με ασετόν και μετρήθηκε η τραχύτητά της. Για τη μέτρηση της μέσης τραχύτητας της επιφάνειας, R_a , χρησιμοποιήθηκε φορητό τραχύμετρο (portable roughness instrument), τύπου TIME TR200. Έγιναν τέσσερις μετρήσεις στο κέντρο κάθε επιφάνειας, παράλληλα, κάθετα και σε γωνίες $\pm 45^\circ$ ως προς τη διαμήκη διάσταση του δοκιμίου, σύμφωνα με το πρότυπο ISO 4287-97 “Geometrical Product Specifications (GPS) –Surface texture: Profile method–Terms, definitions and surface texture parameters”. Σε όλες τις περιπτώσεις το μήκος αποκοπής ήταν 0.8 mm και το μήκος δειγματοληψίας 4 mm. Οι μέσες τραχύτητες οι οποίες μετρήθηκαν καθώς και η μέση τιμή τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1.4. Οι τιμές μέσης τραχύτητας του πίνακα αυτού είναι παρόμοιες με εκείνες που μετρήθηκαν για την ίδια μέθοδο προετοιμασίας της επιφάνειας και σε άλλες σειρές δοκιμίων [27], είναι δε περίπου οι μισές από τη μέση τραχύτητα που επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας την κοινή στη ναυπηγική βιομηχανία μέθοδο της ψηγματοβολής με αποκαμινεύματα (nickel slag blasting) [27]. Στη συνέχεια, και πριν την τοποθέτηση των επιθεμάτων, η επιφάνεια καθαρίστηκε και πάλι με ασετόν.

Πίνακας 2.1.4: Μετρήσεις τραχύτητας επιφανειών χάλυβα.

Δοκίμιο	Μέση Τραχύτητα – Ra (μm)				Μέση Τιμή
	0°	90°	+45°	-45°	
S-C-HLU-1	2.782	3.226	3.022	3.326	3.089
S-C-HLU-2	2.553	3.980	4.348	2.334	3.304
S-C-VI-1	2.038	2.739	2.293	2.400	2.368
S-C-VI-2	2.824	2.515	2.311	2.381	2.508
S-C-HLU-3	2.991	2.452	2.133	3.390	2.742
S-C-HLU-4	2.575	3.377	4.261	2.821	3.259

Τα επιθέματα επιστρώθηκαν και στερεοποιήθηκαν επάνω στο κάθε υπό ενίσχυση δοκίμιο. Ο αριθμός των στρώσεων (layers) και άρα το πάχος του επιθέματος, t_p , καθορίστηκε με βάση μια επιθυμητή τιμή του λόγου ακαμψίας επιθέματος-πλάκας (Stiffness Ratio, SR), σύμφωνα με τη σχέση:

$$t_p = SR \cdot t_s \cdot \frac{E_s}{E_x} \quad (2.1.1)$$

όπου E_x και t_p είναι το μέτρο ελαστικότητας του Young κατά τη διεύθυνση x και το πάχος του επιθέματος, αντίστοιχα, ενώ E_s και t_s είναι το μέτρο ελαστικότητας του Young και το πάχος του χάλυβα, αντίστοιχα.

Όσον αφορά στα επιθέματα από το ανθρακοϋφασμα PW, η σχετικά χαμηλή τιμή του μέτρου ελαστικότητάς του σε σύγκριση με εκείνο του χάλυβα (200000 MPa), όπως φαίνεται και στον Πίνακα 2.1.1, οδήγησε στον υπολογισμό απαγορευτικά μεγάλου πάχους επιθέματος για σχετικά υψηλές τιμές του λόγου ακαμψίας SR. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι, για το υλικό PW/HLU και με δεδομένο ότι το πάχος του χάλυβα είναι t_s ίσο με 3.9 mm, η επίτευξη της τιμής SR ίση με 0.5 για το λόγο ακαμψίας, απαιτεί πάχος επιθέματος t_p ίσο με 7.74 mm. Η τιμή αυτή του πάχους αντιστοιχεί σε 26 στρώσεις σύνθετου υλικού, μέγεθος το οποίο είναι αρκετά μεγάλο. Η κατασκευή επιθεμάτων τόσο μεγάλου πάχους εγκυμονεί αρκετούς κινδύνους στην ποιότητα, είτε κατασκευαστεί με τη μέθοδο HLU, είτε, ακόμη περισσότερο, με τη μέθοδο VI. Λόγω λοιπόν του χαμηλού μέτρου ελαστικότητας του PW και για την κατασκευή λογικού πάχους επιθεμάτων, επελέγη ως επιθυμητή η τιμή SR = 0.3 για το λόγο ακαμψίας. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι η τιμή αυτή είναι αρκετά μικρότερη από την τιμή SR = 1.0 που προτείνεται στη βιβλιογραφία [3] για προεμποτισμένα σύνθετα υλικά, με πολύ υψηλότερη ακαμψία από το PW. Για SR = 0.3 λοιπόν, απαιτούνται, και χρησιμοποιήθηκαν τελικά, 16 στρώσεις για τα επιθέματα από PW/HLU και 15 στρώσεις για τα επιθέματα από PW/VI, λόγω του λίγο υψηλότερου μέτρου ελαστικότητας των τελευταίων. Οι τελικά επιτευχθείσες τιμές του λόγου ακαμψίας SR στα κατασκευασμένα δοκίμια προκύπτουν από τις τιμές του Πίνακα 2.1.2, καθώς έχουν προσδιοριστεί τόσο η τιμή του μέτρου ελαστικότητας E_x όσο και το πάχος t_p του επιθέματος, ενώ το πάχος του χάλυβα t_s δίνεται στον Πίνακα 2.1.3. Κατά συνέπεια, στην

περίπτωση των επιθεμάτων PW/HLU και PW/VI ο λόγος ακαμψίας SR προκύπτει ίσος με 0.29, πάρα πολύ κοντά στην επιθυμητή τιμή που ορίστηκε αρχικά.

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.1.1, το πλάτος του επιθέματος είναι 120 mm και το ενεργό του μήκος 200 mm. Για την αποφυγή υψηλών αποκολλητικών τάσεων στα άκρα του επιθέματος, επελέγη η επικλινής διαμόρφωσή τους (βλέπε Σχήμα 2.1.1). Έτσι, οι 16 στρώσεις του υλικού PW/HLU χωρίστηκαν σε τέσσερις ομάδες των τεσσάρων στρώσεων, οι οποίες έχουν το ίδιο πλάτος αλλά διαφορετικό μήκος. Στις ομάδες αυτές των στρώσεων, οι διαστάσεις και η σειρά με την οποία επιστρώθηκαν επάνω στο χαλύβδινο δοκίμιο για την κατασκευή του επιθέματος, έχουν ως εξής:

- 1^η Ομάδα – 4 στρώσεις μήκους 200 mm
- 2^η Ομάδα – 4 στρώσεις μήκους 232 mm
- 3^η Ομάδα – 4 στρώσεις μήκους 264 mm
- 4^η Ομάδα – 4 στρώσεις μήκους 300 mm

Επομένως, κάθε επόμενη ομάδα στρώσεων καλύπτει την προηγούμενη. Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε και στην περίπτωση των επιθεμάτων από PW/VI των 15 στρώσεων, με τη διαφορά ότι η πρώτη ομάδα είχε τρεις και όχι τέσσερις στρώσεις.

Στην περίπτωση των επιθεμάτων από το ανθρακοϋφασμα υψηλού μέτρου ελαστικότητας SikaWrap (δοκίμια S-C-HLU-3&4), επελέγη να κρατηθεί ίδιος ο αριθμός των στρώσεων σε σχέση με τα επιθέματα από υλικό PW, έτσι ώστε να διερευνηθεί η επίδραση του διαφορετικού λόγου ακαμψίας SR και του διαφορετικού πάχους του επιθέματος. Έτσι λοιπόν, τα επιθέματα από SikaWrap κατασκευάστηκαν από 16 στρώσεις, έχοντας ως αποτέλεσμα έναν θεωρητικό λόγο ακαμψίας

$$SR = \frac{E_x \cdot t_p}{E_s \cdot t_s} = \frac{172184 \cdot 11.6}{200000 \cdot 3.7} = 2.7 \quad (2.1.2)$$

Η τιμή αυτή του λόγου ακαμψίας είναι πολύ υψηλότερη από εκείνες των άλλων δοκιμίων από υλικό PW (0.3). Τα επιθέματα από SikaWrap κατασκευάστηκαν επίσης με επικλινή άκρα, με διαδικασία ίδια με εκείνη που ακολουθήθηκε για το υλικό PW/HLU που είχε επίσης 16 στρώσεις.

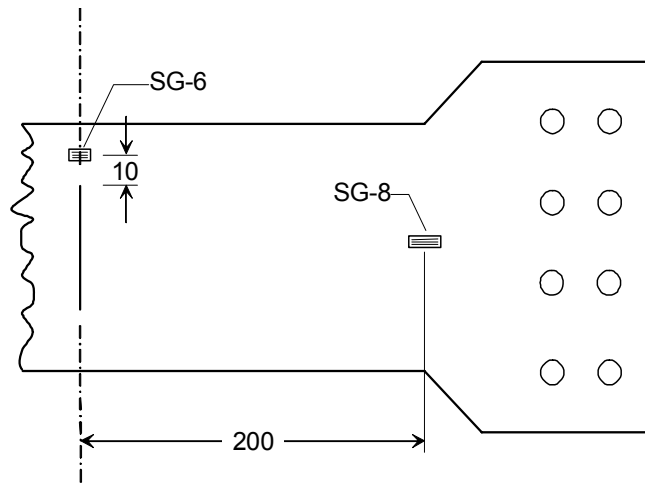
2.1.4 Παράμετροι Δοκιμής

Η υδραυλική μηχανή δοκιμών στην οποία πραγματοποιήθηκαν οι πειραματικές δοκιμές, είναι σύμφωνη με τις απαιτήσεις Class C του διεθνούς προτύπου ISO 5893:2002 [28]. Οι αρπάγες συγκράτησης των προσαρμογέων των δοκιμίων είναι επίσης υδραυλικές.

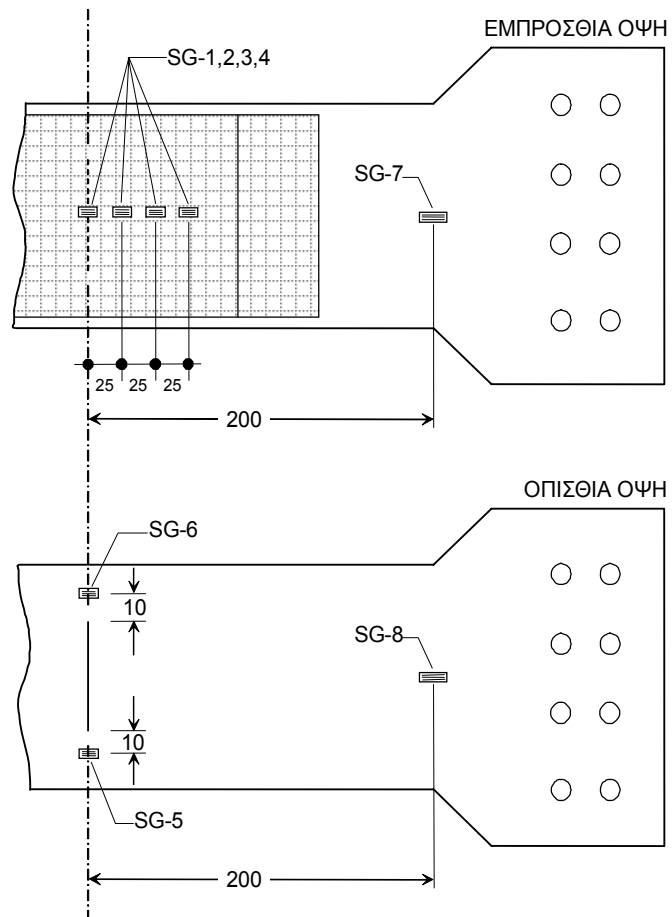
Πριν από κάθε πειραματική δοκιμή εφαρμόστηκε στο δοκίμιο μια προφόρτιση ίση με 30 kN, έτσι ώστε το σύστημα δοκίμιο-προσαρμογείς να βρεθεί στην τελική του θέση, μηδενίζοντας τις τυχόν ανοχές του. Η προφόρτιση αυτή επιβλήθηκε ως γραμμικά αυξανόμενη δύναμη με ρυθμό 0.5 kN/s. Στη συνέχεια, τα δοκίμια αποφορτίστηκαν τελείως με τον ίδιο ρυθμό. Η τελική φόρτιση επιβλήθηκε με τη μορφή γραμμικά αυξανόμενης εφελκυστικής μετατόπισης με ταχύτητα 1.0 mm/min. Η δοκιμή τελειώνει όταν το επίθεμα σταματήσει να συμβάλει στην αντοχή του δοκιμίου και ο χάλυβας έχει μπει βαθιά μέσα την πλαστική περιοχή.

Σε κάθε δοκιμή που πραγματοποιήθηκε μετρήθηκαν και καταγράφηκαν η εφαρμοζόμενη δύναμη, η συνολική επιμήκυνση του δοκιμίου, καθώς και οι διαμήκεις παραμορφώσεις σε διάφορα σημεία του χάλυβα και του επιθέματος. Για την καταγραφή των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το σύστημα πρόσκτησης δεδομένων της ίδιας της υδραυλικής μηχανής δοκιμών, καθώς και ένα πρόσθετο εξωτερικό σύστημα Spider-8, πλήρως συγχρονισμένα μεταξύ τους.

Για τη μέτρηση των παραμορφώσεων χρησιμοποιήθηκαν ηλεκτρικά επιμηκυνσιόμετρα (Strain Gages, SG), με μήκος αναφοράς (gage length) 5 και 10 mm. Στη μία πλευρά των δοκιμίων αναφοράς χωρίς επίθεμα, τοποθετήθηκαν 2 επιμηκυνσιόμετρα, στις θέσεις που φαίνονται στο Σχήμα 2.1.3. Το SG-6 είχε μήκος αναφοράς 5 mm, ενώ το SG-8 10 mm. Η αρίθμηση έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι συμβατή με εκείνη των επιμηκυνσιομέτρων στα δοκίμια με επίθεμα. Σε κάθε ένα από τα δοκίμια με επίθεμα τοποθετήθηκαν οκτώ επιμηκυνσιόμετρα, πέντε στην πλευρά με το επίθεμα και τρία στην άλλη πλευρά του, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1.4. Τα SG-1 έως SG-6 είχαν μήκος αναφοράς 5 mm, ενώ τα SG-7 και SG-8 10 mm. Τα επιμηκυνσιόμετρα που τοποθετήθηκαν δίπλα στα άκρα της εγκοπής στα δοκίμια αναφοράς (SG-6) και στην πίσω πλευρά των δοκιμίων με επίθεμα (SG-5 και SG-6) σκοπό έχουν να καταγράψουν την έναρξη της διαρροής στην περιοχή αυτή, έτσι ώστε αυτή να μπορεί να συσχετιστεί με το φορτίο αστοχίας ή το φορτίο αποκόλλησης του επιθέματος. Οι μετρήσεις των επιμηκυνσιομέτρων SG-7 και SG-8 σκοπό έχουν, συγκρινόμενες, να δώσουν ένδειξη του μεγέθους της κάμψης που λαμβάνει χώρα λόγω της μονόπλευρης ενίσχυσης του δοκιμίου και ως εκ τούτου τη δημιουργία μη συμμετρικής εγκάρσιας διατομής. Τέλος, τα επιμηκυνσιόμετρα SG-1 έως SG-4 τοποθετήθηκαν στο επίθεμα με σκοπό να καταγράψουν τα φορτία που παραλαμβάνονται από αυτό, καθώς και να δώσουν μια εικόνα του τρόπου μεταφοράς των φορτίων από το χαλύβδινο υπόστρωμα προς το επίθεμα.



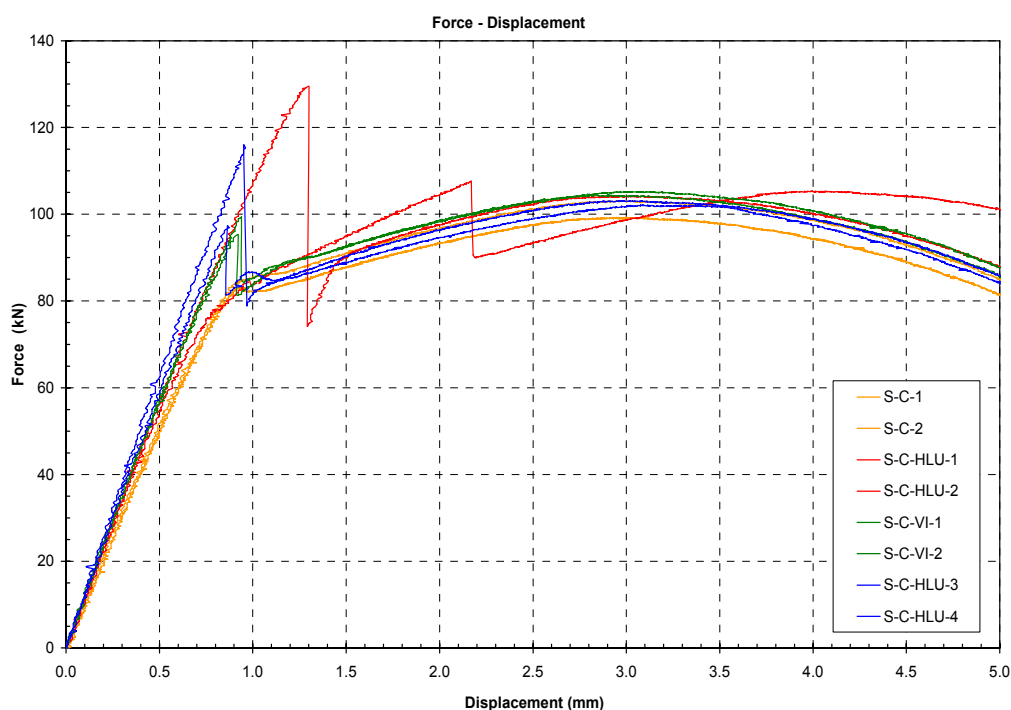
Σχήμα 2.1.3: Θέση επιμηκυνσιομέτρων στα δοκίμια αναφοράς χωρίς επίθεμα.



Σχήμα 2.1.4: Θέση επιμηκυνσιομέτρων στα δοκίμια με επίθεμα.

2.1.5 Αποτελέσματα και Σχολιασμός

Όλες οι πειραματικές μετρήσεις παρουσιάζονται στη συνέχεια με τη μορφή διαγραμμάτων. Στο Σχήμα 2.1.5 φαίνεται η συνολική απόκριση όλων των δοκιμών, με τη μορφή της μεταβολής της συνολικής επιμήκυνσης των δοκιμών (απόσταση μεταξύ των αρπάγων της μηχανής δοκιμών) συναρτήσει της επιβαλλόμενης εφελκυστικής δύναμης. Τα δοκίμια αναφοράς S-C-1&2 επιδεικνύουν μια αναμενόμενη συμπεριφορά, αποκρινόμενα αρχικά γραμμικά και περνώντας στη συνέχεια στην πλαστική περιοχή. Η είσοδος στην πλαστική περιοχή πραγματοποιείται για τις τιμές του επιβαλλόμενου φορτίου που αναφέρονται στον Πίνακα 2.1.5 (φορτία διαρροής). Ο μέσος όρος του φορτίου διαρροής είναι 83.55 kN, τιμή αρκετά κοντά με τη θεωρητικά υπολογιζόμενη τιμή (78.6 kN) για την ενεργό διατομή στην περιοχή της ρωγμής ($59.45 \times 3.8 \text{ mm}^2$, βλέπε Πίνακα 2.1.3).



Σχήμα 2.1.5: Μεταβολή της επιμήκυνσης των δοκιμών συναρτήσει της επιβαλλόμενης δύναμης.

Η συμπεριφορά των δοκιμών με επίθεμα είναι γενικά παρόμοια. Αρχικά παραμορφώνονται ελαστικά, με την περιοχή ελαστικής τους απόκρισης να είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη των δοκιμών χωρίς επίθεμα. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι, λόγω της παρουσίας του επιθέματος, το υπόστρωμα του χάλυβα φορτίζεται από χαμηλότερες τάσεις για το ίδιο επιβαλλόμενο φορτίο και άρα συμπεριφέρεται ελαστικά μέχρι υψηλότερα επιβαλλόμενα φορτία. Στη συνέχεια συμβαίνει αστοχία της κόλλησης μεταξύ του επιθέματος και του χάλυβα, με αποτέλεσμα την απότομη πτώση του μεταφερόμενου φορτίου, αφού το επίθεμα δεν φέρει πια καθόλου φορτίο. Υπενθυμίζεται στο σημείο αυτό ότι η φόρτιση επιβάλλεται ως σταθερού ρυθμού εφελκυστική μετατόπιση, με αποτέλεσμα τη μεταβολή της φερόμενης δύναμης σε ενδεχόμενη αλλαγή της ακαμψίας του δοκιμίου.

Πίνακας 2.1.5: Φορτίο αστοχίας των δοκιμών.

Δοκίμιο	Φορτίο Αστοχίας Επιθέματος (kN)	% Διαφορά ²	Μέση % Διαφορά ²	Μέγιστο Φορτίο (kN)
S-C-1	84.6 ¹	–	–	103.1
S-C-2	82.5 ¹	–	–	99.4
S-C-HLU-1	107.6	29	42	105.3
S-C-HLU-2	129.4	55		104.2
S-C-VI-1	99.4	19	17	104.4
S-C-VI-2	95.2	14		105.2
S-C-HLU-3	116.0	39	28	103.1
S-C-HLU-4	97.3	16		102.1

¹ Φορτίο διαρροής.

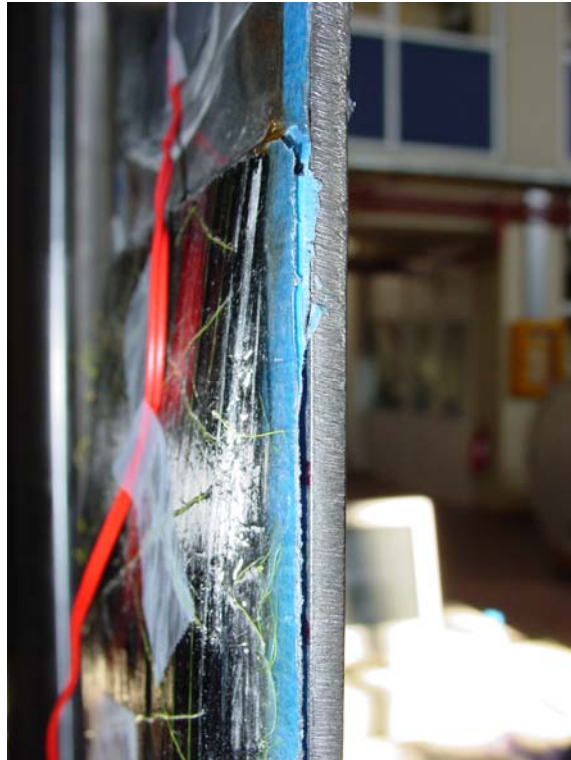
² Από τη μέση τιμή των φορτίων διαρροής των δοκιμών αναφοράς S-C-1 και S-C-2.

Η μορφή αυτή αρχικής αστοχίας, δηλ. η αποκόλληση των επιθεμάτων, παρατηρήθηκε σε όλα τα δοκίμια (βλέπε Σχήμα 2.1.6). Εξαιρεση αποτελεί το δοκίμιο S-C-HLU-1, στο οποίο αναπτύχθηκαν σημαντικές πλαστικές παραμορφώσεις πριν από την αποκόλληση του επιθέματος. Οι τιμές του φορτίου στις οποίες αστόχησαν τα επιθέματα των δοκιμών παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 2.1.5 και συγκρίνονται με το φορτίο διαρροής των δοκιμών αναφοράς χωρίς επίθεμα. Από τη σύγκριση αυτή είναι εμφανής η υπεροχή των δοκιμών με επίθεμα, αφού το εύρος φορτίων στο οποίο συμπεριφέρονται ελαστικά είναι αυξημένο από 14 έως και 55% ως προς το φορτίο διαρροής των μη ενισχυμένων δοκιμών. Μετά την αποκόλληση του επιθέματος, τα δοκίμια εισέρχονται απότομα στην πλαστική περιοχή και ακολουθούν την τυπική απόκριση των δοκιμών χωρίς επίθεμα, παραμορφούμενα πλαστικά και φθάνοντας ένα μέγιστο φορτίο που παραμένει το ίδιο σε όλες τις περιπτώσεις, όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στην τελευταία στήλη του Πίνακα 2.1.5.

Η μελέτη του Σχήματος 2.1.5 και του Πίνακα 2.1.5 καταλήγει στο συμπέρασμα ότι βέλτιστη συμπεριφορά παρουσίασαν τα δοκίμια με επίθεμα από PW/HLU. Η αύξηση μάλιστα του μέγιστου φορτίου ελαστικής απόκρισης που παρουσίασαν τα δοκίμια αυτά είναι αρκετά υψηλότερη από εκείνη που παρουσίασαν τα δοκίμια με επίθεμα από UD-HM/HLU, παρά το γεγονός ότι τα τελευταία έχουν λόγο ακαμψίας ίσο με 2.7, πολύ υψηλότερο από το λόγο ακαμψίας των πρώτων που είναι μόλις 0.29. Η ανακολουθία αυτή πιθανώς να οφείλεται σε μειωμένη ποιότητα κατασκευής των επιθεμάτων από UD-HM/HLU, με πολύ λεπτό στρώμα ρητίνης μεταξύ του επιθέματος και του χάλυβα και η πλήρης ερμηνεία της απαιτεί τη διενέργεια περισσότερων πειραματικών δοκιμών.

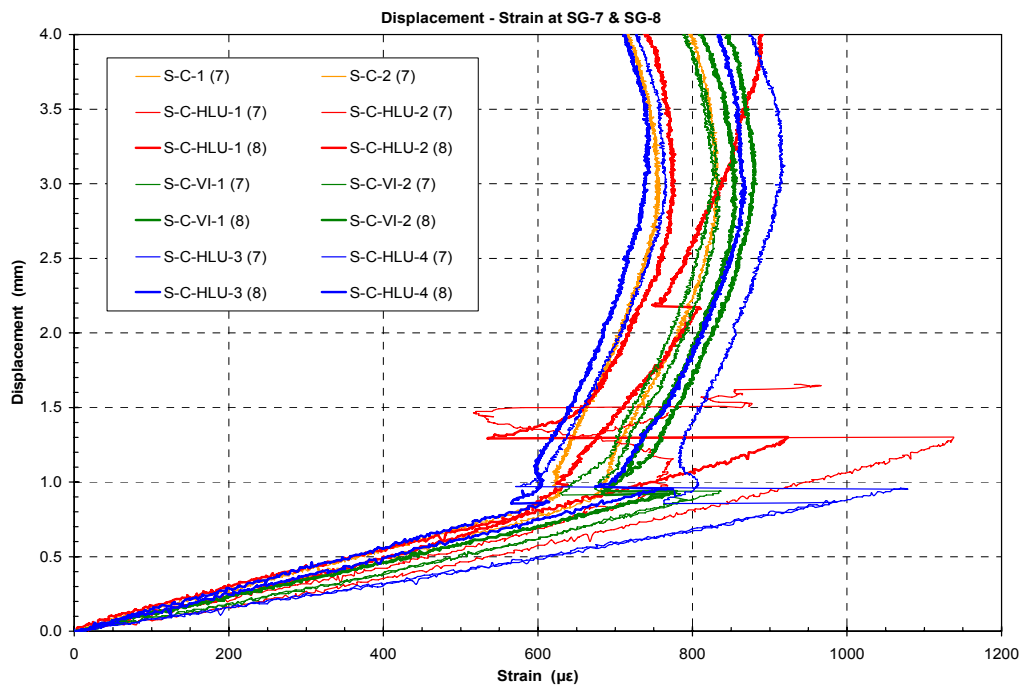
Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει και η σύγκριση της συμπεριφοράς των δοκιμών με επίθεμα από PW/HLU με εκείνη των δοκιμών με επίθεμα από PW/VI, τα οποία έχουν ίσους λόγους ακαμψίας. Η υπεροχή των δοκιμών που κατασκευάστηκαν με τη μέθοδο HLU είναι σαφής, πιθανότατα λόγω της μεγαλύτερης ποσότητας ρητίνης και του μεγαλύτερου

πάχους του επιθέματος που είχαν αυτά σε σχέση με τα επιθέματα που κατασκευάστηκαν με τη μέθοδο VI. Προκύπτει συνεπώς ότι, για σταθερό και συγκεκριμένο λόγο ακαμψίας, είναι επιθυμητή η χρησιμοποίηση υλικών με μικρότερο μέτρο ελαστικότητας και μεγαλύτερο πάχος, έναντι άλλων ισχυρότερων και λεπτότερων. Το συμπέρασμα αυτό επιβεβαιώνεται και από σχετικές αριθμητικές μελέτες του προβλήματος [29].



Σχήμα 2.1.6: Αποκόλληση του επιθέματος στο δοκίμιο S-C-HLU-3.

Η μεταβολή των παραμορφώσεων στις θέσεις SG-7 και SG-8 συναρτήσει της επιβαλλόμενης μετατόπισης παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.1.7. Η επιβαλλόμενη μετατόπιση επιλέχθηκε έναντι της επιβαλλόμενης δύναμης γιατί στην περίπτωση αυτή οι καμπύλες μεταβολής της παραμόρφωσης στις θέσεις αυτές είναι πολύ περισσότερο ευανάγνωστες και κατατοπιστικές. Το βασικό συμπέρασμα που εξάγεται από αυτό το διάγραμμα είναι ότι οι παραμορφώσεις του χάλυβα μακριά από τη ρωγμή και το επίθεμα παραμένουν σε χαμηλά επίπεδα, μέσα στην ελαστική περιοχή ($\epsilon < 1200 \mu\epsilon$). Όπως είναι αναμενόμενο, μετά την αποκόλληση του επιθέματος η διαρροή λαμβάνει χώρα στην περιοχή της ρωγμής και όχι μακριά από αυτήν. Οι καμπύλες του Σχήματος 2.1.7 για τα δοκίμια με επίθεμα έχουν παρόμοια μορφή με τις αντίστοιχες καμπύλες του Σχήματος 2.1.5, με τις παραμορφώσεις να παρουσιάζουν μια απότομη μείωση τη στιγμή της αποκόλλησης του επιθέματος, λόγω της απότομης μείωσης του φορτίου.



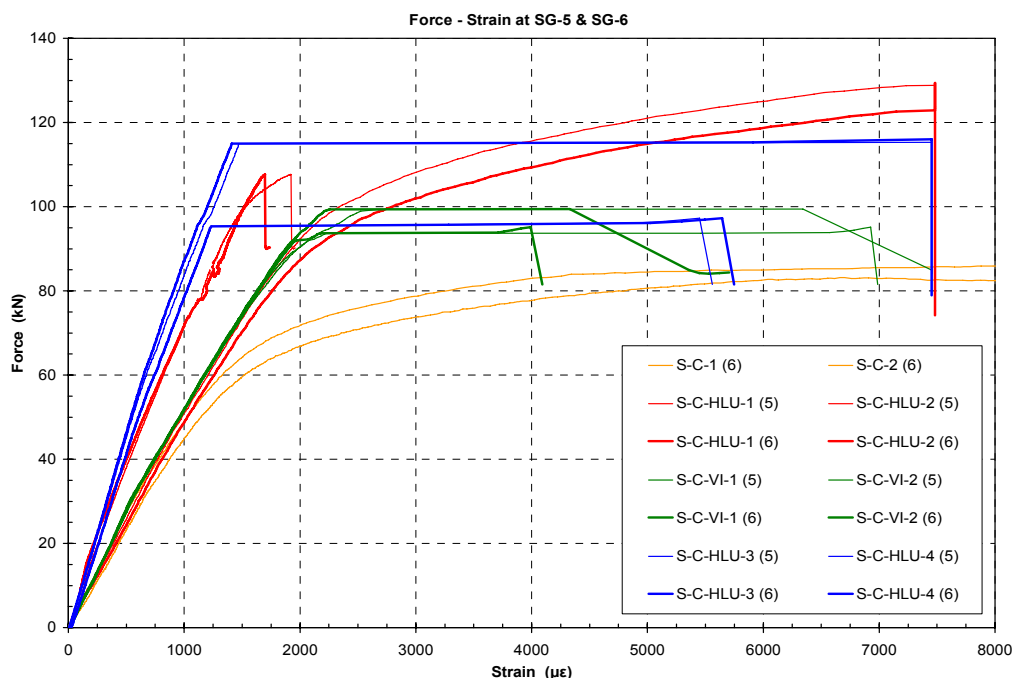
Σχήμα 2.1.7: Μεταβολή των παραμορφώσεων στις θέσεις SG-7 και SG-8 συναρτήσει της επιβαλλόμενης μετατόπισης.

Μια σύγκριση των ελαστικών παραμορφώσεων που μετρήθηκαν στη θέση SG-7 (λεπτές γραμμές στο Σχήμα 2.1.7) με εκείνες που μετρήθηκαν στη θέση SG-8 (παχιές γραμμές στο Σχήμα 2.1.7) για όλα τα δοκίμια με επίθεμα φανερώνει ότι οι πρώτες είναι μεγαλύτερες από τις δεύτερες (οι κλίσεις των καμπύλων στη θέση SG-7 είναι μικρότερες από εκείνες στη θέση SG-8). Το γεγονός αυτό παρουσιάζεται ενδεικτικά στον Πίνακα 2.1.7, όπου έχει καταγραφεί ο μέσος όρος των παραμορφώσεων για κάθε ζεύγος ίδιων δοκιμίων στις θέσεις SG-7 και SG-8, καθώς και η ποσοστιαία διαφορά τους, για επιβαλλόμενη φόρτιση 0.5 mm, τιμή που αντιστοιχεί στο μέσον περίπου της περιοχής ελαστικής απόκρισης των δοκιμίων. Οι διαφορές αυτές οφείλονται στην τοπική κάμψη που συμβαίνει στην κεντρική περιοχή του δοκιμίου κατά την επιβολή του εφελκυστικού φορτίου, λόγω της μη συμμετρικής εγκάρσιας διατομής των δοκιμίων με μονόπλευρο επίθεμα. Το μονόπλευρο επίθεμα προκαλεί τη δημιουργία ενός βέλους κάμψης με διεύθυνση προς το χαλύβδινο μέρος της διατομής, βέλος κάμψης το οποίο αυξάνει με αύξηση του επιβαλλόμενου εφελκυστικού φορτίου. Έτσι λοιπόν, στα άκρα του δοκιμίου δημιουργούνται πρόσθετες εφελκυστικές παραμορφώσεις στην πλευρά του χάλυβα προς το επίθεμα (θέση SG-7), ενώ στην αντίθετη πλευρά (θέση SG-8), ένα μέρος των εφελκυστικών παραμορφώσεων λόγω του εφελκυστικού φορτίου αντισταθμίζεται από τις θλιπτικές παραμορφώσεις λόγω της κάμψης. Παρατηρώντας τις διαφορές που καταγράφονται στον Πίνακα 2.1.6 φαίνεται ότι, όπως αναμενόταν, το λεπτό επίθεμα από PW/VI προκαλεί μικρότερη διαφορά και άρα ασθενέστερη κάμψη από το πιο παχύ επίθεμα από PW/HLU, ενώ το πιο παχύ όλων επίθεμα από UD-HM/HLU προκαλεί την εντονότερη τοπική κάμψη και συνεπώς τη μεγαλύτερη διαφορά.

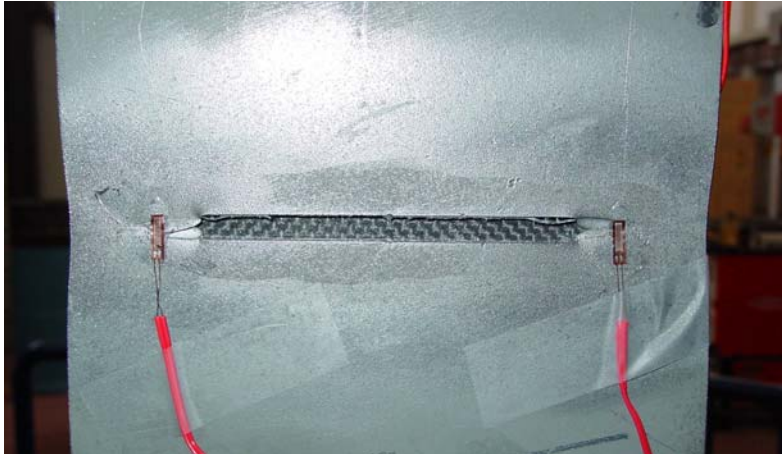
Πίνακας 2.1.6: Σύγκριση παραμορφώσεων (σε $\mu\epsilon$) στις θέσεις SG-7 και SG-8 για επιβαλλόμενη μετατόπιση 0.5 mm (~55 kN).

Δοκίμιο	παραμόρφωση στη θέση 7	παραμόρφωση στη θέση 8	% διαφορά
S-C-HLU-1,2	492	379	-23
S-C-VI-1,2	499	433	-13
S-C-HLU-3,4	609	381	-37

Η μεταβολή των παραμορφώσεων στις θέσεις SG-5 και SG-6, εκατέρωθεν της ρωγμής, συναρτήσει της επιβαλλόμενης δύναμης παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.1.8. Το σημείο αποκόλλησης του επιθέματος σε κάθε καμπύλη αντιστοιχεί στο σημείο όπου παρατηρείται απότομη μείωση της δύναμης. Προκύπτει λοιπόν το συμπέρασμα ότι, με εξαίρεση το δοκίμιο S-C-HLU-1, αναπτύσσονται σχετικά μεγάλες πλαστικές παραμορφώσεις στο χάλυβα κοντά στη ρωγμή, πριν την αποκόλληση του επιθέματος. Οι παραμορφώσεις αυτές κυμαίνονται από 4000 έως 7500 $\mu\epsilon$, όπως φαίνεται και από το Σχήμα 2.1.8. Οι τιμές αυτές είναι αρκετά μικρότερες από τις αντίστοιχες που μετρήθηκαν στην περίπτωση δοκιμών με κεντρική κυκλική οπή [27]. Όσον αφορά στο δοκίμιο S-C-HLU-1, η συνδυασμένη παρατήρηση των Σχημάτων 2.1.5 και 2.1.8 οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η πλαστική διαρροή παρουσιάστηκε στο δοκίμιο αυτό σε άλλη περιοχή και όχι εκατέρωθεν της ρωγμής. Το Σχήμα 2.1.9 δείχνει μια χαρακτηριστική φωτογραφία της περιοχής της ρωγμής μετά την αποκόλληση του επιθέματος και την ανάπτυξη μεγάλων πλαστικών παραμορφώσεων και όλκιμης επέκτασης της αρχικής εγκοπής.

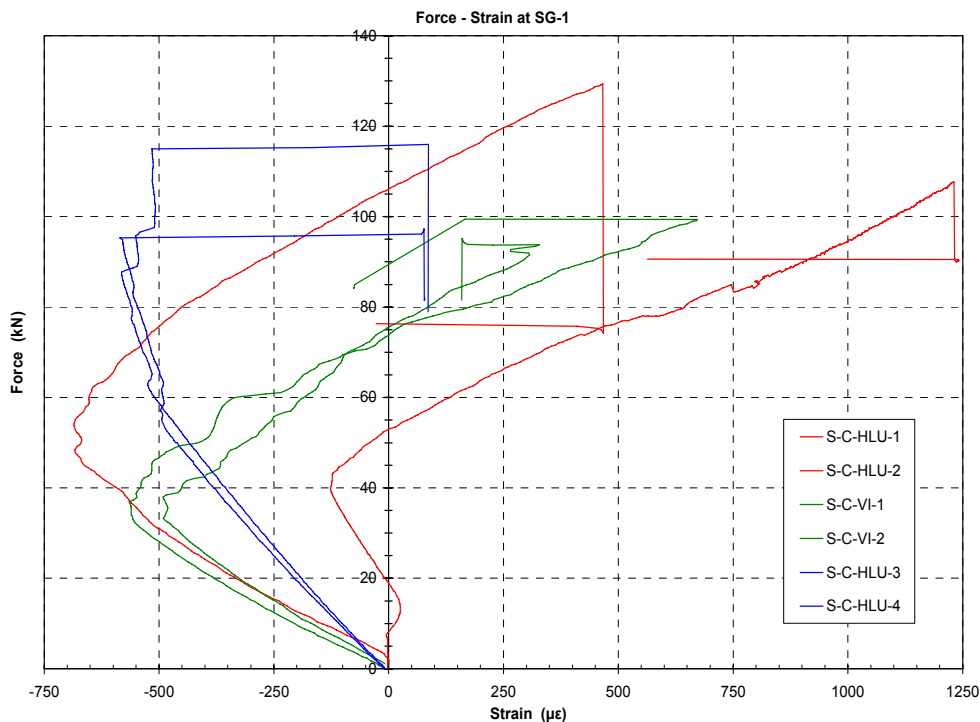


Σχήμα 2.1.8: Μεταβολή των παραμορφώσεων στις θέσεις SG-5 και SG-6 συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου.

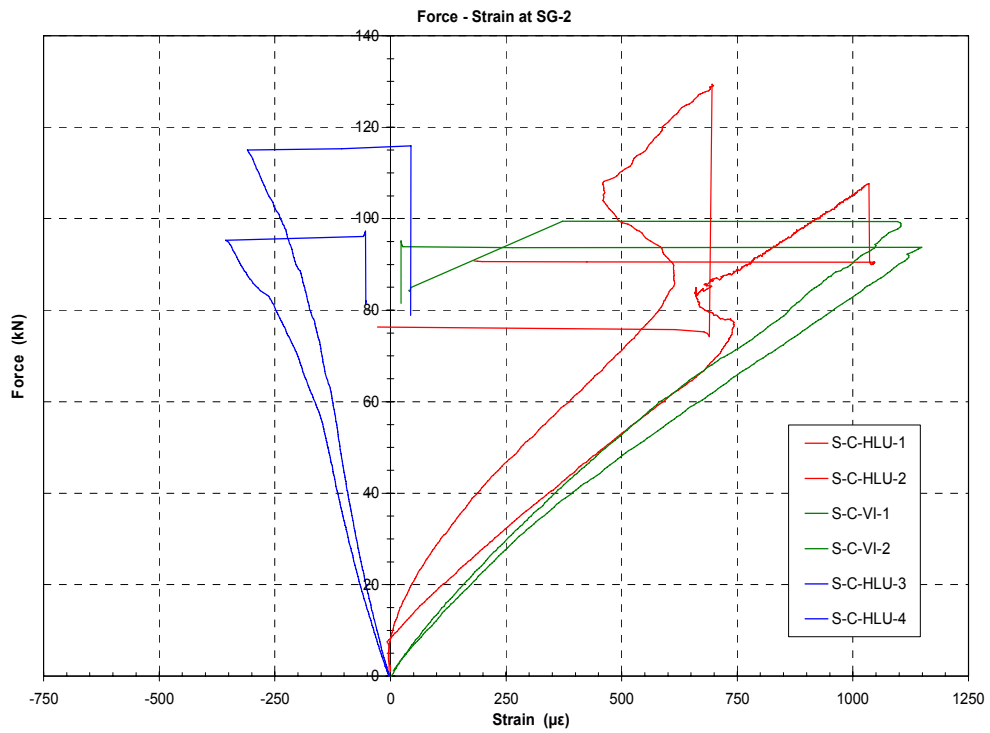


Σχήμα 2.1.9: Πλαστική διαρροή στα άκρα της ρωγμής (θέσεις SG-5 και SG-6) μετά την αποκόλληση του επιθέματος.

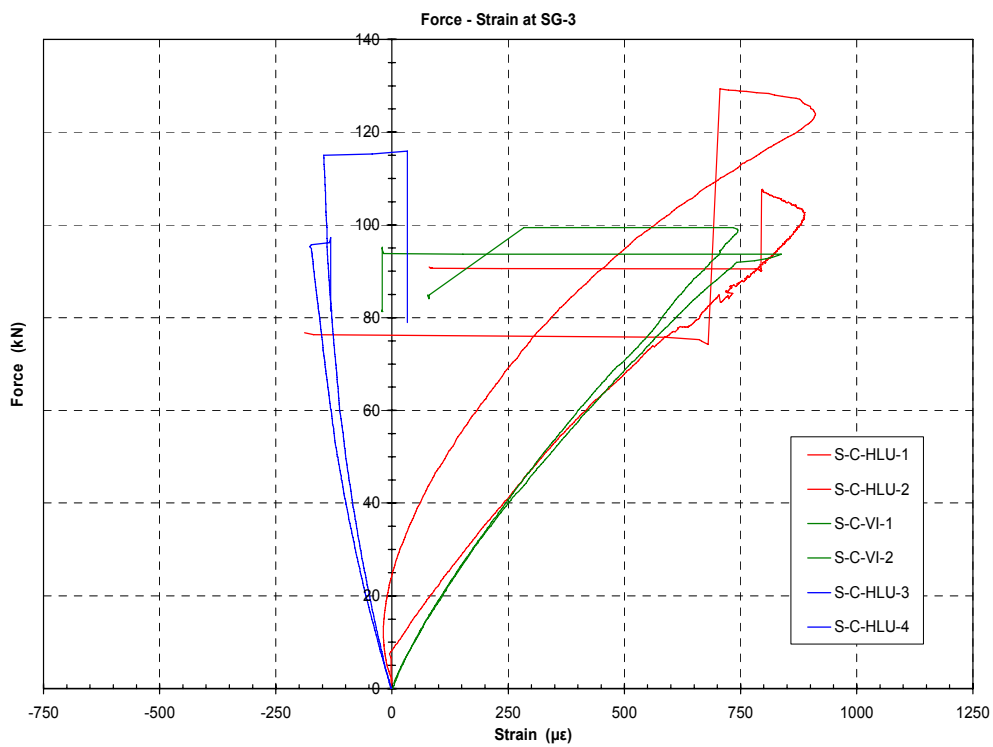
Η μεταβολή των παραμορφώσεων στις θέσεις SG-1, SG-2, SG-3 και SG-4 συναρτήσει της επιβαλλόμενης δύναμης παρουσιάζεται στα Σχήματα 2.1.10 έως 2.1.13, αντίστοιχα. Το πρώτο γενικό σχόλιο που μπορεί να γίνει είναι ότι υπάρχει καλή επαναληψιμότητα των μετρήσεων για τα ζεύγη δοκιμών S-C-VI-1&2 και S-C-HLU-3&4, ενώ δε συμβαίνει το ίδιο για το ζεύγος δοκιμών S-C-HLU-1&2. Με δεδομένη την ιδιαίτερη συμπεριφορά του δοκιμίου S-C-HLU-1 που παρατηρήθηκε και προηγουμένως, οι μετρήσεις από το δοκίμιο αυτό θεωρούνται λιγότερο αξιόπιστες από εκείνες του δοκιμίου S-C-HLU-2.



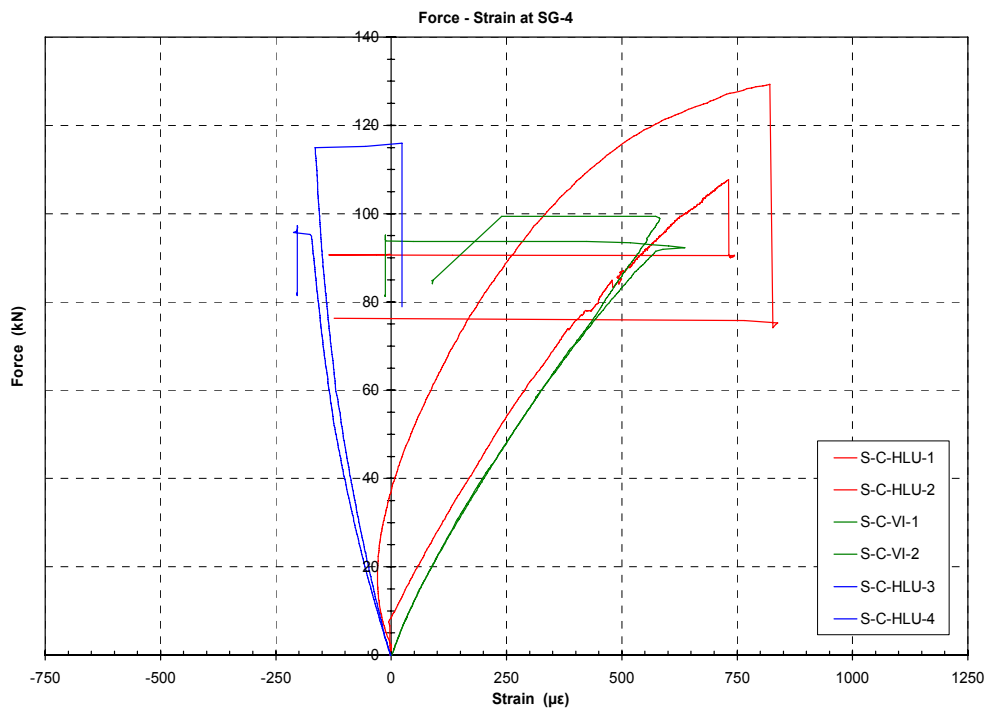
Σχήμα 2.1.10: Μεταβολή των παραμορφώσεων στη θέση SG-1.



Σχήμα 2.1.11: Μεταβολή των παραμορφώσεων στη θέση SG-2.



Σχήμα 2.1.12: Μεταβολή των παραμορφώσεων στη θέση SG-3.



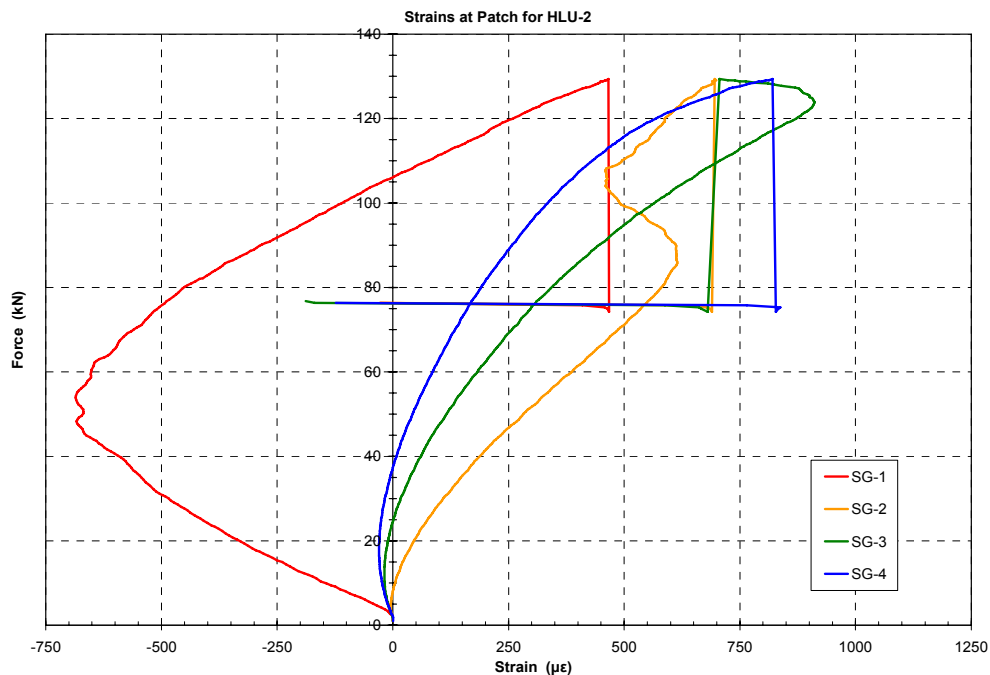
Σχήμα 2.1.13: Μεταβολή των παραμορφώσεων στη θέση SG-4.

Το επόμενο συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί από τα σχήματα αυτά είναι ότι υπάρχει διαφοροποίηση της συμπεριφοράς των δοκιμών στη θέση SG-1 σε σχέση με τις υπόλοιπες θέσεις SG-2, SG-3 και SG-4. Επιπρόσθετα, η συμπεριφορά των δοκιμών S-C-HLU-3&4 είναι διαφορετική από των υπολοίπων σε όλες τις θέσεις. Έτσι λοιπόν, τα δοκίμια S-C-HLU-1&2 και S-C-VI-1&2 παρουσιάζουν γενικά μια γραμμική συμπεριφορά μέχρι την αποκόλλησή τους στις θέσεις SG-2, SG-3 και SG-4, με τις παραμορφώσεις να μένουν εν γένει σε χαμηλά επίπεδα (< 1000 με). Αντίθετα, στη θέση SG-1, ακριβώς επάνω από την εγκοπή, οι παραμορφώσεις των δοκιμών αυτών είναι στην αρχή θλιπτικές, μετατρέπόμενες από κάποιο φορτίο και έπειτα σε εφελκυστικές. Το γεγονός αυτό οφείλεται πιθανότατα σε κάποια τοπική κάμψη του επιθέματος η οποία συμβαίνει ακριβώς επάνω από την εγκοπή και η οποία γίνεται λιγότερο σημαντική όσο το φορτίο αυξάνει και συνεπώς και το εφελκυστικό φορτίο που φέρει το επίθεμα αυξάνει επίσης. Η τοπική αυτή κάμψη είναι διαφορετική από την κάμψη ολόκληρου του δοκιμίου λόγω της μη συμμετρικής εγκάρσιας διατομής του. Ας σημειωθεί ότι, η συμπεριφορά στη θέση SG-1 είναι σημαντικά διαφορετική από την αντίστοιχη συμπεριφορά του επιθέματος στην περίπτωση δοκιμών με κεντρική κυκλική οπή [27].

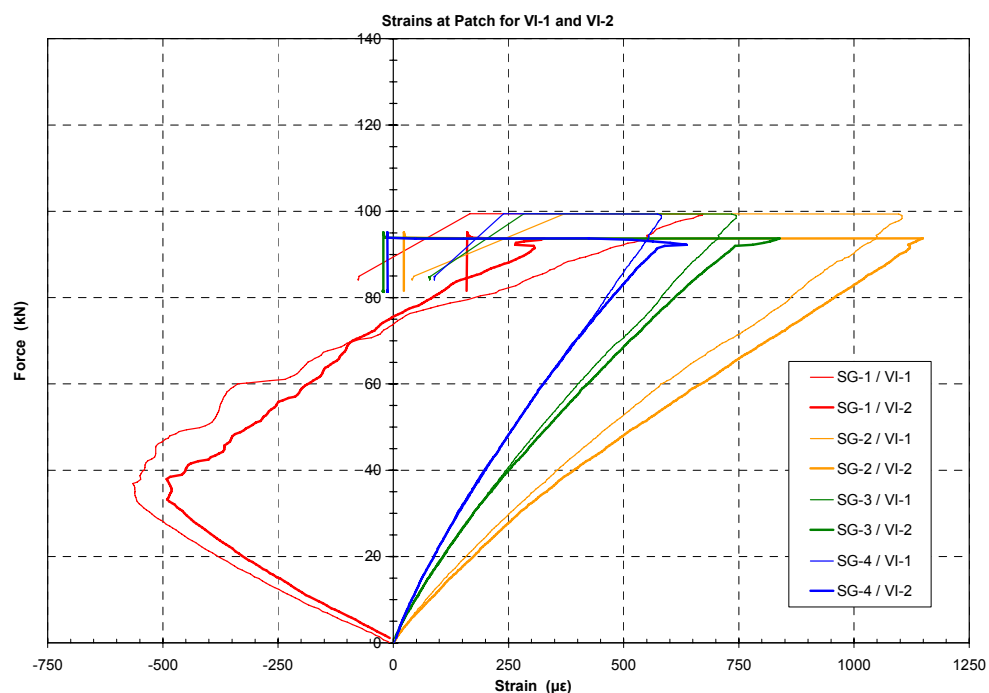
Σχετικά με τα δοκίμια S-C-HLU-3&4, παρατηρείται ότι στα επιθέματά τους αναπτύσσονται μόνο θλιπτικές παραμορφώσεις, σε όλες τις θέσεις και για όλα τα φορτία. Η συμπεριφορά αυτή εξηγείται από το γεγονός ότι τα δοκίμια αυτά έχουν πολύ πιο παχύ επίθεμα με πολύ υψηλότερο λόγο ακαμψίας από τα υπόλοιπα, με αποτέλεσμα την εμφάνιση πολύ πιο έντονης κάμψης λόγω της μη συμμετρικής εγκάρσιας διατομής τους, όπως φάνηκε και από τα αποτελέσματα του Πίνακα 2.1.7. Έτσι δικαιολογείται η ανάπτυξη θλιπτικών παραμορφώσεων στην ελεύθερη επιφάνειά τους. Επιπρόσθετα, το πολύ μεγάλο πάχος

των επιθεμάτων, πιθανότατα εμποδίζει την τοπική κάμψη στη θέση SG-1, με αποτέλεσμα τη διαφορετική συμπεριφορά που φαίνεται στο Σχήμα 2.1.10.

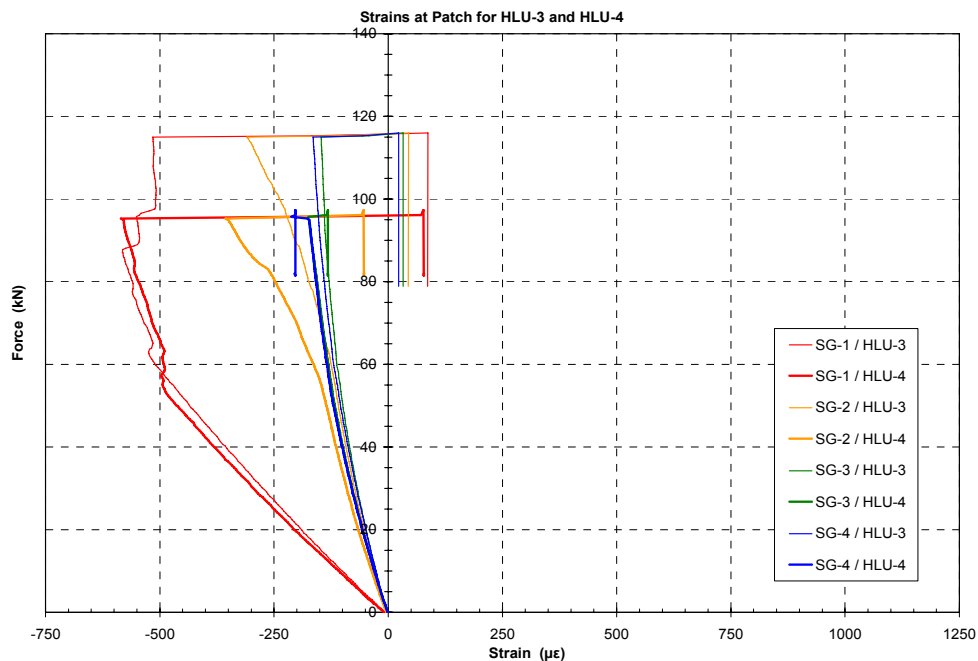
Στη συνέχεια στα Σχήματα 2.1.14 έως 2.1.16 παρουσιάζονται με διαφορετικό τρόπο τα αποτελέσματα των Σχημάτων 2.1.10 έως 2.1.13, στα οποία οι παραμορφώσεις παρουσιάζονται για κάθε είδος δοκιμίου ξεχωριστά και για όλες τις θέσεις του επιθέματος όπου μετρήθηκαν. Πρέπει να σημειωθεί ότι δεν παρουσιάζονται οι παραμορφώσεις στο επίθεμα του δοκιμίου S-C-HLU-1 για τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω.



Σχήμα 2.1.14: Μεταβολή των παραμορφώσεων στο επίθεμα του δοκιμίου S-C-HLU-2.



Σχήμα 2.1.15: Μεταβολή των παραμορφώσεων στα επιθέματα των δοκιμών S-C-VI-1&2.

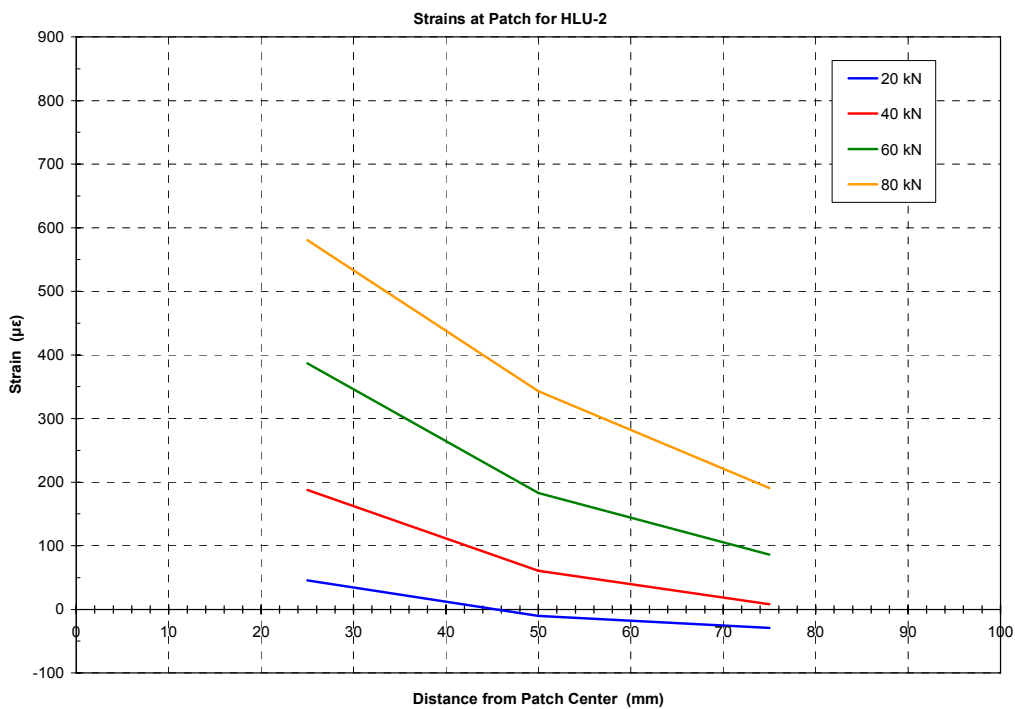


Σχήμα 2.1.16: Μεταβολή των παραμορφώσεων στο επίθεμα του δοκιμίου S-C-HLU-3&4.

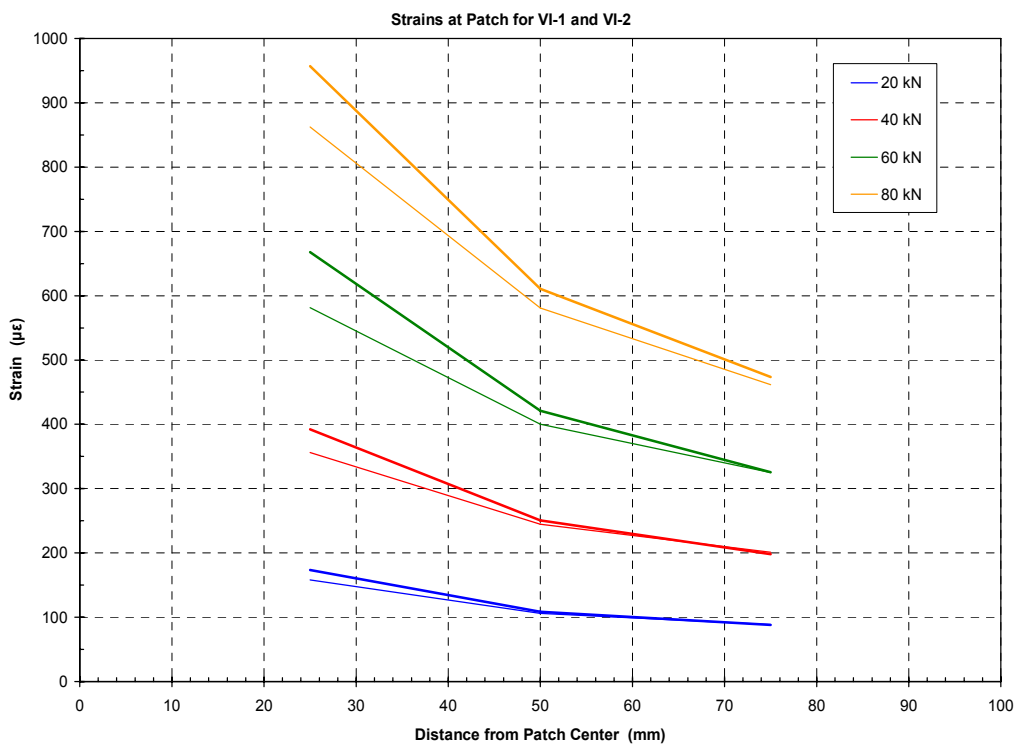
Το πρώτο γενικό συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί από τα Σχήματα 2.1.15 και 2.1.16 είναι η πολύ καλή επαναληψιμότητα των μετρήσεων για κάθε ζεύγος ίδιων δοκιμίων. Ακόμη, αγνοώντας την ιδιαίτερη συμπεριφορά των επιθεμάτων στη θέση SG-1, είναι σαφής η μείωση των παραμορφώσεων (και άρα και του μεταφερόμενου φορτίου) καθώς απομακρυνόμαστε από το κέντρο του επιθέματος.

Ο ρυθμός αυτής της μείωσης φαίνεται καθαρά στα Σχήματα 2.1.17 και 2.1.18, όπου παρουσιάζεται η μεταβολή των παραμορφώσεων στα επιθέματα ως συνάρτηση της απόστασης του σημείου μέτρησης από το κέντρο του επιθέματος (βλέπε και Σχήμα 2.1.4), για τέσσερις διαφορετικές τιμές της επιβαλλόμενης δύναμης. Να σημειωθεί ότι το ενεργό μήκος του επιθέματος (είναι το μήκος στο οποίο το επίθεμα έχει το μέγιστο πάχος του) είναι ίσο με 200 mm. Για τους γνωστούς λόγους, δεν παρουσιάζονται πάλι οι παραμορφώσεις στο επίθεμα του δοκιμίου S-C-HLU-1, ενώ δεν παρουσιάζονται επίσης οι παραμορφώσεις των δοκιμίων S-C-HLU-3&4, οι οποίες, για τους λόγους που εξηγήθηκαν νωρίτερα, είναι θλιπτικές σε όλο το επίθεμα.

Τα Σχήματα 2.1.17 και 2.1.18 δείχνουν μια μονότονη αύξηση των παραμορφώσεων καθώς προσεγγίζουμε το κέντρο του επιθέματος, με συνεχώς αυξανόμενο ρυθμό. Αν και στην περίπτωση των μονόπλευρων επιθεμάτων, λόγω της μη συμμετρικής εγκάρσιας διατομής και της συνεπαγόμενης κάμψης, δεν έχει νόημα ο καθορισμός του «μήκους ανάπτυξης» στο επίθεμα (της απόστασης δηλ. από το άκρο του επιθέματος στην οποία οι τάσεις σε αυτό αποκτούν σταθερή τιμή), το γεγονός του συνεχώς αυξανόμενου ρυθμού υποδηλώνει ότι επιθέματα μήκους μεγαλύτερου από 200 mm ίσως ήταν πιο αποτελεσματικά. Η υπόθεση αυτή θα πρέπει να διερευνηθεί με αντίστοιχες αριθμητικές προσομοιώσεις.



Σχήμα 2.1.17: Μεταβολή των παραμορφώσεων στο επίθεμα του δοκιμίου S-C-HLU-2 συναρτήσει της απόστασης από το κέντρο.



Σχήμα 2.1.18: Μεταβολή των παραμορφώσεων στο επίθεμα του δοκιμίου S-C-VI-1&2 συναρτήσει της απόστασης από το κέντρο.

2.2 Περιγραφή Στατικών Δοκιμών των Διαβρωμένων Πλακών Χάλυβα

2.2.1 Υλικά

Πριν ξεκινήσει η παρουσίαση των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν σ' αυτή τη σειρά δοκιμών πρέπει να σημειωθεί ότι τα υλικά αυτά είναι σε ορισμένες περιπτώσεις ταυτόσημα με αυτά που παρουσιάστηκαν στο εδάφιο 2.1.1 ενώ σε κάποιες άλλες διαφοροποιούνται παραμένουν όμως στις κατηγορίες που παρατέθηκαν στην αρχή του εν λόγω εδαφίου. Κατά συνέπεια, στη συνέχεια καταγράφονται τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στη συγκεκριμένη σειρά δοκιμών ανεξάρτητα αν πραγματοποιείται επανάληψή τους και συμβαίνει χάριν πληρότητας. Επίσης, σημειώνεται ότι οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των ενισχυτικών επιθεμάτων στα διαβρωμένα δοκίμια είναι ίδιες μ' αυτές που χρησιμοποιήθηκαν και αναλύθηκαν στο εδάφιο 2.1.

Οι χαλύβδινες πλάκες που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των δοκιμών αποτελούνται από κοινό ναυπηγικό χάλυβα Grade A. Δοκιμές εφελκυσμού δοκιμών από το χάλυβα αυτόν είχαν ως αποτέλεσμα τον καθορισμό του μέτρου ελαστικότητας του Young E_{st} ίσο με 200 GPa και του ορίου διαρροής σ_0 ίσο με 348 MPa.

Τα επιθέματα κατασκευάστηκαν από δύο διαφορετικούς τύπους υφασμάτων άνθρακα. Ο πρώτος τύπος ήταν ένα ύφασμα με προσανατολισμό ινών $0^\circ/90^\circ$, πλέξη Twill 2x2 και επιφανειακό βάρος 160 g/m^2 της εταιρείας R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH. Ο δεύτερος τύπος ήταν ένα μονοαξονικό (unidirectional) ανθρακοϋφασμα με ίνες υψηλού μέτρου ελαστικότητας, επιφανειακό βάρος 300 g/m^2 και εμπορικό όνομα SikaWrap-300C HiMod NW, της εταιρείας SIKA.

Για την κατασκευή των πολύστρωτων επιθεμάτων από σύνθετα υλικά χρησιμοποιήθηκαν δύο μέθοδοι, η μέθοδος μορφοποίησης με το χέρι (Hand Lay-Up, HLU) και η μέθοδος έγχυσης ρητίνης υπό συνθήκες κενού (Vacuum Infusion, VI). Το ανθρακοϋφασμα Twill χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή δοκιμών και με τις δύο μεθόδους, ενώ με το μονοαξονικό ύφασμα SikaWrap κατασκευάστηκαν δοκίμια μόνο με τη μέθοδο HLU.

Κάθε τύπος υφάσματος ινών άνθρακα χρησιμοποιήθηκε σε συνδυασμό με διαφορετικό τύπο ρητίνης με αποτέλεσμα επίσης να χρησιμοποιηθούν δύο τύποι ρητίνης. Ο πρώτος τύπος, που χρησιμοποιήθηκε με το ανθρακοϋφασμα Twill, είναι η εποξειδική ρητίνη D.E.R. 358 της εταιρείας Dow, η οποία είναι λεπτόρρευστη (ιξώδες στους 25°C ίσο με 600–750 mPa·s) για την κατασκευή επιθεμάτων και με τις δύο μεθόδους κατασκευής (HLU και VI). Αυτό που διαφέρει στις δύο μεθόδους κατασκευής είναι ο σκληρυντής. Στη μέθοδο HLU απαιτείται μεγαλύτερος χρόνος σκλήρυνσης της ρητίνης απ' ό,τι στη μέθοδο VI και έτσι, στην πρώτη μέθοδο χρησιμοποιήθηκε «αργός» σκληρυντής, ενώ στη δεύτερη «γρήγορος». Ο «αργός» σκληρυντής είναι ο Eramine PC13 της εταιρείας PO.INT.ER S.r.l. (pot life ποσότητας 150 g στους 25°C = 50 min), ενώ ο «γρήγορος» είναι ο Eramine PA43 της ίδιας εταιρείας (pot life ποσότητας 150 g στους 25°C = 18 – 20 min). Η δεύτερη ρητίνη

χρησιμοποιήθηκε αποκλειστικά με το ύφασμα SikaWrap και τη μέθοδο HLU. Πρόκειται για την εποξειδική ρητίνη Sikadur 300 της εταιρείας Sika, η οποία συνοδεύεται από τον αντίστοιχο σκληρυντή της ίδιας εταιρείας και έχει pot life 4 ώρες στους 23°C. Το χρονικό διάστημα pot life ορίστηκε στην παράγραφο 2.1.1.

Πριν κατασκευαστούν τα δοκίμια είχε προηγηθεί πλήρης χαρακτηρισμός των σύνθετων υλικών από τα οποία κατασκευάστηκαν τα επιθέματα [25], με αποτέλεσμα να καθοριστούν οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών. Οι τιμές των ιδιοτήτων αυτών αναγράφονται στον Πίνακα 2.2.1, όπου E_x είναι το μέτρο ελαστικότητας του Young σε εφελκυσμό κατά μήκος του επιθέματος (κατά τη x-διεύθυνση), σ_{ux} είναι η αντοχή του σύνθετου υλικού κατά την ίδια διεύθυνση, ϵ_{ux} είναι η αντίστοιχη παραμόρφωση, W_f είναι η περιεκτικότητα κατά βάρος σε ίνες άνθρακα και t_{ply} είναι το μέσο πάχος μιας στρώσης υλικού. Στον πίνακα αυτόν με T υποδηλώνεται το ύφασμα Twill 2x2, με UD-HM υποδηλώνεται το μονοαξονικό ύφασμα υψηλού μέτρου ελαστικότητας SikaWrap και με HLU και VI υποδηλώνονται οι δύο μέθοδοι κατασκευής

Πίνακας 2.2.1: Τιμές Μηχανικών Ιδιοτήτων των Επιθεμάτων από Σύνθετα Υλικά.

Υλικό	E_x (MPa)	σ_{ux} (MPa)	ϵ_{ux} (%)	W_f (%)	t_{ply} (mm)
T / HLU	41500	478.1	1.12	47.4	0.25
T / VI	59300	866.3	1.41	63.4	0.17
UD-HM / HLU	93000	321.2	0.33	23.8	0.99

Μετά το πέρας των δοκιμών, από κάθε αποκολλημένο επίθεμα κόπηκαν δύο δοκίμια για δοκιμή εφελκυσμού κατά τη διεύθυνση του μήκους του επιθέματος. Τα δοκίμια δεν ακολουθούσαν τις προδιαγραφές των σχετικών διεθνών προτύπων ISO καθώς η γεωμετρία των επιθεμάτων δεν επέτρεψε τη λήψη σχετικών δοκιμών. Οι τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων καθώς και οι διαστάσεις που μετρήθηκαν αναγράφονται στον Πίνακα 2.2.2, όπου t_p είναι το συνολικό πάχος του επιθέματος ενώ τα υπόλοιπα μεγέθη έχουν εξηγηθεί παραπάνω. Πρέπει να σημειωθεί το γεγονός ότι στην περίπτωση των επιθεμάτων UD-HM/HLU δε διενεργήθηκαν δοκιμές καθώς τα δοκίμια που ελήφθησαν δεν είχαν σταθερή εγκάρσια διατομή κι έτσι δεν αναγράφονται τιμές στον πίνακα που αφορούν τις μηχανικές του ιδιότητες.

Πίνακας 2.2.2: Μετρημένες Τιμές Μηχανικών Ιδιοτήτων των Επιθεμάτων από Σύνθετα Υλικά.

Υλικό	E_x (MPa)	σ_{ux} (MPa)	ϵ_{ux} (%)	W_f (%)	t_p (mm)	t_{ply} (mm)
T / HLU	69470	426.9	0.67	32.5	7.2	0.40
T / VI	142455	1530.4	1.04	63.6	3.1	0.17
UD-HM / HLU	-	-	-	39.5	12.6	0.70

Εύκολα μπορεί να παρατηρηθεί για τις τιμές του ανωτέρω πίνακα (Πίνακας 2.2.2), ότι και σε σχέση με τα λεγόμενα του εδαφίου 2.1.1 (Θεωρία Σύνθετων Υλικών [26]), οι τιμές των

μέτρων ελαστικότητας κατά τη διεύθυνση x , παρουσιάζουν σημαντικές αποκλίσεις με τις θεωρητικά υπολογιζόμενες (Νόμος των Αναμείξεων [26]), με αποτέλεσμα οι τιμές αυτές να μη θεωρούνται αξιόπιστες. Κατά συνέπεια, το μέτρο ελαστικότητας κατά την διεύθυνση x , E_x υπολογίστηκε θεωρητικά με βάση την τελικά επιτευχθείσα κατά βάρος περιεκτικότητα των ινών W_f σύμφωνα με τις τιμές του Πίνακα 2.2.2 και την αρχική που είχε μετρηθεί κατά τη δοκιμή χαρακτηρισμού (βλέπε Πίνακα 2.2.1), χρησιμοποιώντας τη μέθοδο που αναλύθηκε στο εδάφιο 2.1.1. Για την περίπτωση των επιθεμάτων T/HLU και T/VI οι τιμές των E_f , E_m , ρ_f και ρ_m προέρχονται από το αντίστοιχο φύλλο ιδιοτήτων της κατασκευάστριας εταιρείας των ινών και της ρητίνης και οι αντίστοιχες τιμές είναι E_f ίσο με 45000 MPa, E_m ίσο με 4500 MPa, ρ_f ίση με 1.8 g/cm³ και ρ_m ίση με 1.14 g/cm³. Στην περίπτωση του επιθέματος UD-HM/HLU, καθώς δεν έγιναν δοκιμές χαρακτηρισμού, δεν μπόρεσαν να προσδιοριστούν οι τιμές των μηχανικών του ιδιοτήτων, με αποτέλεσμα να προσδιοριστούν θεωρητικά σύμφωνα με τη μέθοδο που αναφέρθηκε παραπάνω και τις τιμές για το μέτρο ελαστικότητας και την πυκνότητα των ινών και της ρητίνης, αντίστοιχα να δίνονται στο εδάφιο 2.1.1 (φύλλο ιδιοτήτων της εταιρείας SIKA). Οι τιμές για το μέτρο ελαστικότητας κατά τη διεύθυνση x όπως υπολογίστηκε θεωρητικά σύμφωνα με την επιτευχθείσα κατά βάρος περιεκτικότητα των ινών W_f αναγράφονται στον Πίνακα 2.2.3.

Πίνακας 2.2.3: Τιμές του Μέτρου Ελαστικότητας E_x των Επιθεμάτων σύμφωνα με τις Τιμές της W_f .

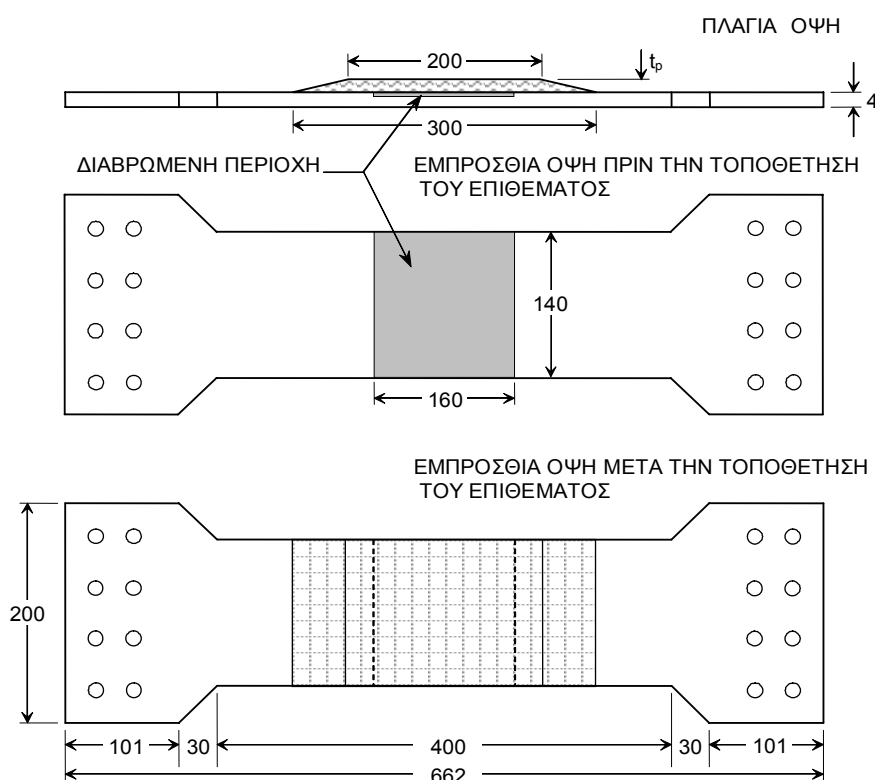
Υλικό	E_x (MPa)
T / HLU	32152
T / VI	59444
UD-HM / HLU	152200

2.2.2 Γεωμετρία Δοκιμίων

Η γεωμετρία των χαλύβδινων δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και οι κύριες διαστάσεις αυτών φαίνονται στο Σχήμα 2.2.1. Το ονομαστικό πάχος του χάλυβα t_s είναι ίσο με 4 mm. Το κεντρικό ορθογώνιο τμήμα αναφοράς του δοκιμίου έχει μήκος, L_s ίσο με 400 mm και πλάτος W_s ίσο με 140 mm. Η κεντρική περιοχή της μιας πλευράς του δοκιμίου έχοντας μήκος 160 mm και πλάτος 140 mm υποβλήθηκε σε συνθήκες διάβρωσης τοποθετώντας τα δοκίμια, μερικώς καλυμμένα, σε ειδικούς θαλάμους που ψεκάζονταν με διάλυμα άλατος. Στην ίδια πλευρά όπου υπάρχει η διαβρωμένη κεντρική ζώνη (εμπρόσθια όψη), κάθε δοκίμιο έχει κεντρικό επίθεμα από σύνθετα υλικά πάχους t_p , ενεργού μήκους L_p ίσο με 200 mm και πλάτους W_p ίσο με 140 mm, ίσο με το πλάτος του δοκιμίου. Το συνολικό μήκος του επιθέματος είναι 300 mm, αφού κατασκευάζεται έτσι ώστε τα άκρα του να είναι επικλινή (βλέπε Σχήμα 2.2.1). Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι ο αρχικός σχεδιασμός των πειραμάτων προέβλεπε ορθογώνια χαλύβδινα δοκίμια πλάτους 200 mm. Το ασυνήθιστα όμως υψηλό όριο διαρροής του χάλυβα των δοκιμίων, σε συνδυασμό με τη δυναμικότητα της υδραυλικής μηχανής δοκιμών

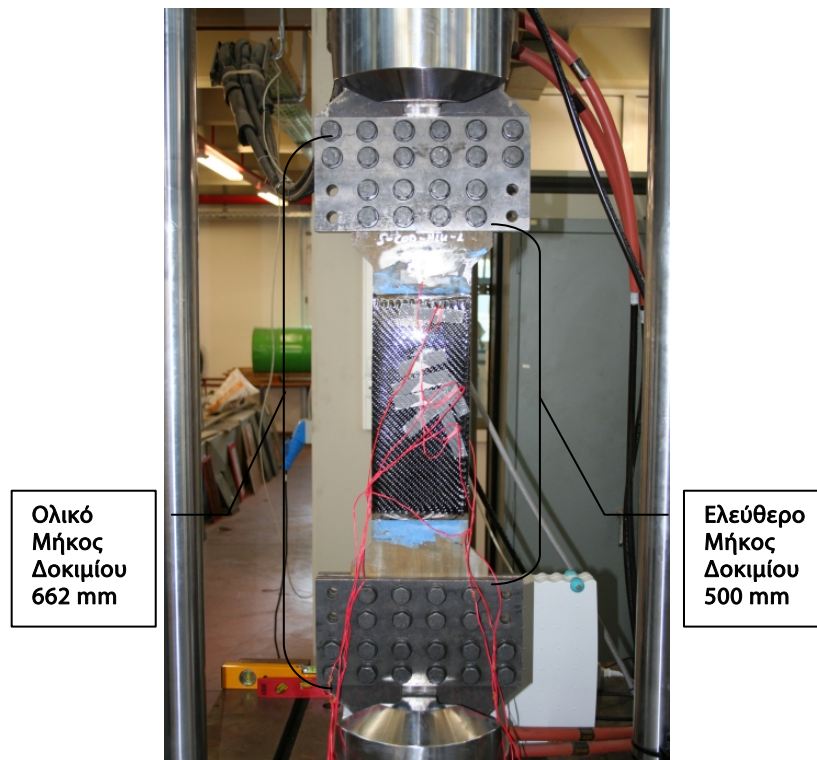
υπαγόρευε τη μείωση της διατομής των δοκιμών κι έτσι προέκυψε η γεωμετρία του Σχήματος 2.2.1.

Λόγω των μεγάλων διαστάσεών τους, τα δοκίμια δε μπορούσαν να προσαρμοστούν κατευθείαν στις αρπάγες της υδραυλικής μηχανής δοκιμών του ENT. Για το λόγο αυτό σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν ειδικοί χαλύβδινοι προσαρμογείς, προκειμένου να προσδεθούν τα δοκίμια στην υδραυλική μηχανή δοκιμών. Τα δοκίμια συνδέονται με τους προσαρμογείς με τη βοήθεια 16 κοχλιών διάστασης M16, μέσα από οπές που έχουν ανοιχτεί για το σκοπό αυτό στα δοκίμια οι οποίες είναι διάστασης $\Phi 16$. Οι συντεταγμένες των κέντρων των οπών καθορίζονται στο εδάφιο 2.1.2 (Σχήμα 2.1.1).



Σχήμα 2.2.1: Γεωμετρία δοκιμών.

Το δοκίμιο μαζί με τους ειδικούς προσαρμογείς, εφαρμοσμένα στις αρπάγες της υδραυλικής μηχανής φαίνονται στο Σχήμα 2.2.2, όπου σημειώνονται το ελεύθερο μήκος του δοκιμίου που δε συγκρατείται από τους ειδικούς προσαρμογείς και είναι ίσο με 500 mm καθώς και το ολικό μήκος που είναι ίσο με 662 mm.



Σχήμα 2.2.2: Δοκίμιο προσδεμένο στην υδραυλική μηχανή δοκιμών.

Τα δοκίμια που εξετάστηκαν ήταν συνολικά 8, αποτελώντας 4 ζεύγη ανά δύο όμοιων δοκιμίων. Η ονοματολογία των δοκιμίων και η περιγραφή τους φαίνεται στον Πίνακα 2.2.4. Στον ίδιο πίνακα φαίνονται επίσης οι ακριβείς διαστάσεις του πλάτους W_s και του πάχους t_s του κεντρικού τμήματος αναφοράς των δοκιμίων πριν και μετά τη διαδικασία της διάβρωσης. Οι τιμές του πάχους πριν και μετά τη διάβρωση που αναγράφονται στον πίνακα προέκυψαν παίρνοντας το μέσο όρο τριών αντίστοιχων μετρήσεων. Τέλος, τα δοκίμια S-COR-1&2 χαρακτηρίζονται ως δοκίμια αναφοράς καθώς δεν περιλαμβάνουν ενισχυτικό επίθεμα.

Πίνακας 2.2.4: Ονοματολογία και διαστάσεις των δοκιμίων.

Δοκίμιο	Υλικό Επιθέματος	Μέθοδος Κατασκευής	W_s (mm)	Πάχος t_s πριν τη διάβρωση (mm)	Πάχος t_s μετά τη διάβρωση (mm)
S-COR-1	-	-	139.8	3.9	3.3
S-COR-2	-	-	140.2	3.8	3.2
S-COR-HLU-1	T	HLU	139.8	3.8	3.1
S-COR-HLU-2	T	HLU	139.8	3.7	3.3
S-COR-VI-1	T	VI	139.8	3.8	3.3
S-COR-VI-2	T	VI	140.7	3.7	3.2
S-COR-HLU-3	UD-HM	HLU	139.9	3.9	3.5
S-COR-HLU-4	UD-HM	HLU	140.0	3.8	3.3

2.2.3 Προετοιμασία και Κατασκευή των Δοκιμίων

Όπως έχει προαναφερθεί, το αρχικό πλάτος των δοκιμίων ήταν ίσο με 200 mm. Αρχικά, η περιοχή που προοριζόταν να υποστεί διάβρωση σημειώθηκε πάνω στα δοκίμια, έχοντας μήκος ίσο με 160 mm και πλάτος 180 mm. Η περιοχή αυτή του χάλυβα γυαλίστηκε με τη χρήση ηλεκτρικά περιστρεφόμενης συρμάτινης βούρτσας. Στη συνέχεια, καθαρίστηκε με ασετόν και μετρήθηκε το πάχος της, οι τιμές του οποίου παρατίθενται στον Πίνακα 2.2.4. Μετά το τέλος της διαδικασίας αυτής, η υπόλοιπη επιφάνεια του δοκιμίου καλύφθηκε με ειδικό κάλυμμα από φύλλο νάιλον και σφραγίστηκε με τη βοήθεια αντίστοιχης ειδικής κολλητικής ταινίας, υλικά με αυξημένη αντοχή στις επιταχυνόμενες διαβρωτικές συνθήκες που επικρατούν κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Η μόνη επιφάνεια των δοκιμίων που είναι εκτεθειμένη είναι αυτή που προορίζεται να διαβρωθεί, στη μία πλευρά των δοκιμίων. Δοκίμιο που είναι έτοιμο να υποβληθεί στη δοκιμή επιταχυνόμενης διάβρωσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.2.3.



Σχήμα 2.2.3: Καλυμμένο δοκίμιο, έτοιμο για τη δοκιμή επιταχυνόμενης διάβρωσης.

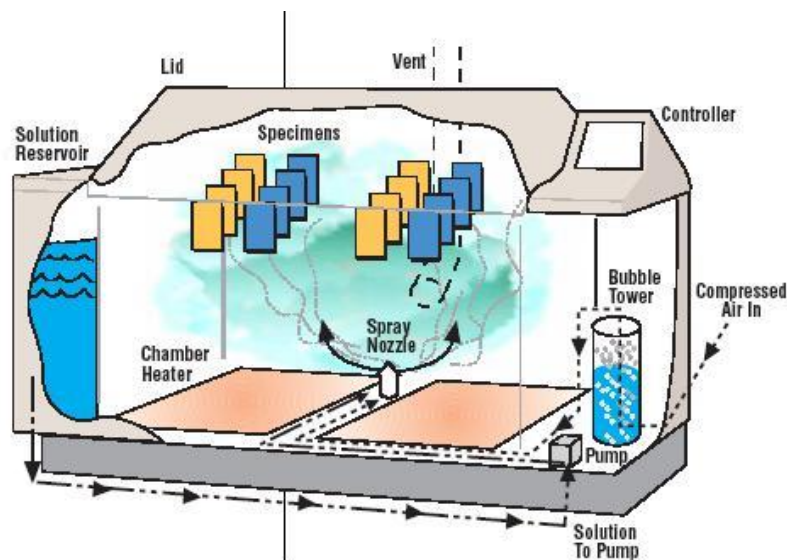
Η δοκιμή επιταχυνόμενης κυκλικής διάβρωσης πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τις απαιτήσεις του διεθνούς προτύπου ISO 14993:2001 [30], το οποίο θεωρήθηκε το καταλληλότερο ώστε να προσομοιώνει τις τυπικές συνθήκες που συναντά μια ναυπηγική κατασκευή. Για να πληρούνται οι απαιτήσεις του συγκεκριμένου προτύπου είναι αναγκαία η ύπαρξη ενός θαλάμου στον οποίο ψεκάζεται ειδικό διάλυμα άλατος. Το διάλυμα που χρησιμοποιείται συνήθως είναι NaCl 5%, όμως στις συγκεκριμένες δοκιμές χρησιμοποιήθηκε διάλυμα NaCl 3.5%, το οποίο αντιπροσωπεύει την τυπική συγκέντρωση NaCl του θαλασσινού νερού.

Σύμφωνα με το παραπάνω κατά ISO πρότυπο, κάθε κύκλος διάβρωσης περιλαμβάνει τρεις διαφορετικές συνθήκες, που ονομάζονται συνθήκες «ομίχλης άλατος» ("salt mist" conditions), «ξηρές» συνθήκες ("dry" conditions) και «υγρές» συνθήκες ("wet" conditions). Η συνολική διάρκεια κάθε κύκλου είναι 8 ώρες και αποτελείται από τρία βήματα, τα οποία περιγράφονται λεπτομερώς στον Πίνακα 2.2.5. Η χρονική διάρκεια που αναγράφεται

στον πίνακα αυτό περιλαμβάνει το χρόνο που απαιτείται ώστε το σύστημα να αποκτήσει την απαιτούμενη θερμοκρασία για κάθε βήμα. Ο θάλαμος ψεκασμού άλατος που χρησιμοποιήθηκε στις δοκιμές αυτές είναι μοντέλο Q FOG CCT1100 της εταιρίας Q Panel, όπου στο Σχήμα 2.2.4 παρουσιάζεται σκαρίφημα του θαλάμου και η διαδικασία ψεκασμού άλατος. Ο θάλαμος αυτός είναι τυπικό παράδειγμα της συγκεκριμένης διάταξης, έχοντας ονομαστική τιμή για τον όγκο ίση με 1100 l, για τη χωρητικότητά με υγρό τιμή ίση με 1103 l και χωρίς υγρό τιμή ίση με 857 l. Οι παραπάνω τιμές για τη χωρητικότητα είναι αρκετά υψηλές ώστε να εξασφαλίσουν ομοιόμορφες συνθήκες θερμοκρασίας, υγρασίας και κατανομής του ψεκασμού του άλατος στο εσωτερικό του θαλάμου. Το επάνω μέρος του εσωτερικού του θαλάμου είναι κατάλληλα διαμορφωμένο ώστε οι σταγόνες που σχηματίζονται λόγω υγροποίησης κατά τη διάρκεια του ψεκασμού να μην καταλήγουν στα δοκίμια που βρίσκονται από κάτω.

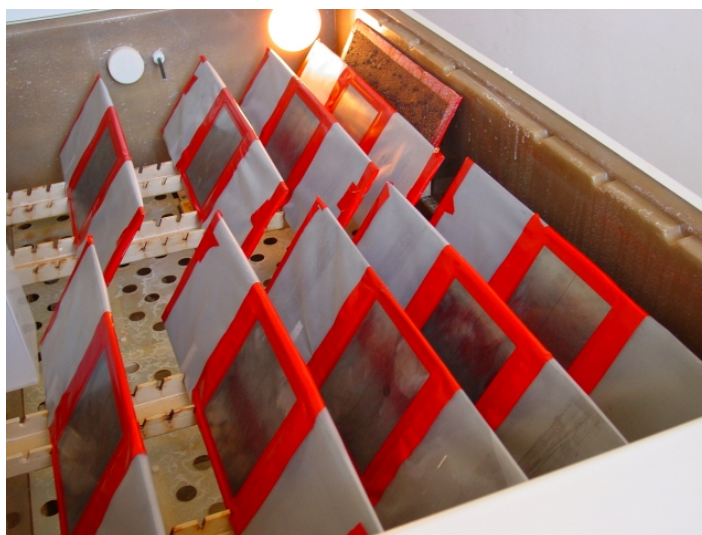
Πίνακας 2.2.5: Συνθήκες ενός κύκλου επιταχυνόμενης διάβρωσης.

1	Salt mist conditions	Duration: 2 hours
	(1) Temperature	35°C ± 2°C
	(2) Salt solution	3.5% solution NaCl
2	"Dry" conditions	Duration: 4 hours
	(1) Temperature	60°C ± 2°C
	(2) Relative humidity	< 30% RH
3	"Wet" conditions	Duration: 2 hours
	(1) Temperature	50°C ± 2°C
	(2) Relative humidity	> 95% RH



Σχήμα 2.2.4: Θάλαμος ψεκασμού άλατος Q FOG CCT1100 κατά τη διαδικασία ψεκασμού.

Τα χαλύβδινα δοκίμια χωρίς επίθεμα για τη διαδικασία της διάβρωσης τοποθετήθηκαν σε ειδικές βάσεις στήριξης από αδρανές, μη μεταλλικό υλικό υπό γωνία 45°, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2.5. Τα δοκίμια παρέμειναν στους θαλάμους για συνολική χρονική διάρκεια περίπου 7 μηνών. Από το διάστημα αυτό, μόνο 70 μέρες ήταν ο καθαρός χρόνος που τα δοκίμια υποβλήθηκαν στις κυκλικές συνθήκες επιταχυνόμενης διάβρωσης. Η διαφορά αυτή οφείλεται σε ορισμένες βλάβες του θαλάμου, οι οποίες τον κατέστησαν ανενεργό για αρκετά μικρά χρονικά διαστήματα.



Σχήμα 2.2.5: Χαλύβδινα δοκίμια τοποθετημένα μέσα στο θάλαμο ψεκασμού άλατος.

Μετά το καθαρό χρονικό διάστημα των 70 ημερών που τα δοκίμια υποβλήθηκαν στις συνθήκες επιταχυνόμενης διάβρωσης (περίπου 70 κύκλους), απομακρύνθηκαν από το θάλαμο. Στο Σχήμα 2.2.6 φαίνεται ένα δοκίμιο μετά την απομάκρυνσή του από το θάλαμο, με και χωρίς το προστατευτικό κάλυμμα από το φύλλο νάιλον, όπως επίσης μια πιο κοντινή άποψη της διαβρωμένης περιοχής. Ο καθαρισμός των δοκιμίων και η απομάκρυνση των προϊόντων της διάβρωσης πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τις απαιτήσεις του διεθνούς προτύπου ISO 8407:1991 [31]. Σύμφωνα με τη διαδικασία αυτή, τα δοκίμια πρέπει να καθαριστούν με απιονισμένο νερό και στη συνέχεια να εμβαπτιστούν για χρονικό διάστημα 20-30 min σε διάλυμα 1000 ml που περιέχει 500 ml HCl (37%) και 3.5 g hexamethylenetetramine ($C_6H_{12}N_4$, $M = 140.19$ g/mol). Λόγω των μεγάλων διαστάσεων των δοκιμίων, η εμβάπτιση αυτή δεν ήταν δυνατόν να πραγματοποιηθεί, κατά συνέπεια επιλέχθηκε διαφορετική διαδικασία. Έτσι, χρησιμοποιήθηκε χαρτοπολτός, σε πλήρη διαβροχή με το προαναφερθέν διάλυμα, ο οποίος τοποθετήθηκε στη διαβρωμένη περιοχή των δοκιμίων για χρονικό διάστημα 20-30 min. Κατόπιν, η διαβρωμένη περιοχή καθαρίστηκε και βουρτσίστηκε επανειλημμένα με τη χρήση πλαστικής βούρτσας. Στη συνέχεια, τα δοκίμια καθαρίστηκαν ξανά με απιονισμένο νερό και αιθανόλη και αφέθηκαν να στεγνώσουν σε συνθήκες περιβάλλοντος. Αυτή η διαδικασία καθαρισμού επαναλήφθηκε παραπάνω από μια φορά, όταν τα προϊόντα της διάβρωσης ήταν ισχυρά προσκολλημένα στο μεταλλικό υπόστρωμα. Μετά το τέλος της διαδικασίας απομάκρυνσης των προϊόντων της διάβρωσης, τα αρχικά

ορθογώνια δοκίμια διαμορφώθηκαν στο τελικό τους σχήμα (βλέπε Σχήμα 2.2.1) με τη βοήθεια υδροκοπής.



Σχήμα 2.2.6: Δοκίμιο S-COR-VI-1 μετά την απομάκρυνση από το θάλαμο ψεκασμού άλατος.

Τα επιθέματα επιστρώθηκαν και στερεοποιήθηκαν επάνω σε κάθε δοκίμιο. Στο Σχήμα 2.2.7 παρουσιάζεται ένα ενδιάμεσο στάδιο της μεθόδου έγχυσης ρητίνης υπό συνθήκες κενού (Vacuum Infusion) για την κατασκευή των επιθεμάτων των δοκιμίων S-COR-VI-1&2. Ο αριθμός των στρώσεων (layers) και άρα το πάχος του επιθέματος, t_p , καθορίστηκε με βάση μια επιθυμητή τιμή του λόγου ακαμψίας επιθέματος-πλάκας (Stiffness Ratio, SR), σύμφωνα με τη σχέση:

$$t_p = SR \cdot t_s \cdot \frac{E_s}{E_x} \quad (2.2.1)$$

όπου E_x και t_p είναι το μέτρο ελαστικότητας του Young κατά τη διεύθυνση x και το πάχος του επιθέματος, αντίστοιχα, ενώ E_s και t_s είναι το μέτρο ελαστικότητας του Young και το πάχος του χάλυβα, αντίστοιχα.

Όσον αφορά στα επιθέματα από το ανθρακοϋφασμα Twill 2x2, η σχετικά χαμηλή τιμή του μέτρου ελαστικότητάς του (41500 MPa) σε σύγκριση με εκείνο του χάλυβα (200000 MPa), οδήγησε στον υπολογισμό απαγορευτικά μεγάλου πάχους επιθέματος για σχετικά υψηλές



Σχήμα 2.2.7: Έγχυση ρητίνης υπό συνθήκες κενού για τα δοκίμια S-COR-VI1&2

τιμές του λόγου ακαμψίας SR . Ενδεικτικά αναφέρεται ότι, για το υλικό T/HLU και με δεδομένο ότι το πάχος του χάλυβα μετά τη διάβρωση είναι περίπου ίσο με 3.2 mm για τα δοκίμια που αντιστοιχούν στο υλικό αυτό, για την επίτευξη της τιμής SR ίσο με 0.5 για το λόγο ακαμψίας, το απαιτούμενο πάχος του επιθέματος είναι t_p ίσο με 7.7 mm. Η τιμή αυτή του πάχους αντιστοιχεί σε 31 στρώσεις σύνθετου υλικού, μέγεθος το οποίο είναι αρκετά μεγάλο. Η κατασκευή επιθεμάτων τόσο μεγάλου πάχους εγκυμονεί αρκετούς κινδύνους στην ποιότητα, είτε κατασκευαστούν με τη μέθοδο HLU, είτε, ακόμη περισσότερο, με τη μέθοδο VI. Λόγω λοιπόν του χαμηλού μέτρου ελαστικότητας του Twill 2x2 και για την κατασκευή λογικού πάχους επιθεμάτων, επελέγη ως επιθυμητή η τιμή $SR = 0.3$ για το λόγο ακαμψίας. Για SR ίσο με 0.3 λοιπόν, απαιτούνται, και χρησιμοποιήθηκαν τελικά, 18 στρώσεις για τα επιθέματα από T/HLU και T/VI. Οι τελικά επιτευχθείσες τιμές του λόγου ακαμψίας SR στα κατασκευασμένα δοκίμια προκύπτουν από τις τιμές του Πίνακα 2.2.2 και 2.2.3, καθώς έχουν προσδιοριστεί τόσο η τιμή του μέτρου ελαστικότητας E_x και το πάχος t_p του επιθέματος, ενώ από τον Πίνακα 2.2.4 προκύπτει το πάχος του χάλυβα t_s πριν τη διάβρωση. Κατά συνέπεια, στην περίπτωση των επιθεμάτων T/HLU ο λόγος ακαμψίας SR προκύπτει ίσος με 0.31 ενώ στην περίπτωση των επιθεμάτων T/VI προκύπτει ίσος με 0.25, τιμές κοντά σε αυτές που ορίστηκαν αρχικά. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι η τιμή αυτή είναι μικρότερη από την τιμή SR ίση με 1.0 που προτείνεται στη βιβλιογραφία [3] για προεμποτισμένα όμως σύνθετα υλικά, με υψηλότερη ακαμψία από το Twill.

Στην περίπτωση των επιθεμάτων από το ανθρακοϋφασμα υψηλού μέτρου ελαστικότητας SikaWrap (δοκίμια S-COR-HLU-3&4), επελέγη να κρατηθεί ίδιος ο αριθμός στρώσεων σε σχέση με τα επιθέματα από υλικό PW, έτσι ώστε να διερευνηθεί η επίδραση του διαφορετικού λόγου ακαμψίας SR και του διαφορετικού πάχους του επιθέματος. Έτσι

λοιπόν, τα επιθέματα από SikaWrap κατασκευάστηκαν από 18 στρώσεις, έχοντας ως αποτέλεσμα έναν θεωρητικό λόγο ακαμψίας

$$SR = \frac{E_x \cdot t_p}{E_s \cdot t_s} = \frac{152200 \cdot 12.6}{200000 \cdot 3.85} = 2.5 \quad (2.2.2)$$

Η τιμή αυτή του λόγου ακαμψίας είναι πολύ υψηλότερη από εκείνες των άλλων δοκιμίων από υλικό PW (0.3). Τα επιθέματα από SikaWrap κατασκευάστηκαν επίσης με επικλινή άκρα, με διαδικασία ίδια με εκείνη που ακολουθήθηκε για το υλικό T/HLU που είχε επίσης 18 στρώσεις.

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.2.1, το πλάτος του επιθέματος είναι 140 mm και το ενεργό του μήκος 200 mm. Για την αποφυγή υψηλών αποκολλητικών τάσεων στα άκρα του επιθέματος, επελέγη η επικλινή διαμόρφωσή τους (βλέπε Σχήμα 2.2.1). Έτσι, οι 18 στρώσεις χωρίστηκαν σε τέσσερις ομάδες των τεσσάρων ή πέντε στρώσεων, οι οποίες έχουν το ίδιο πλάτος αλλά διαφορετικό μήκος. Οι ομάδες αυτές των στρώσεων, οι διαστάσεις τους και η σειρά με την οποία επιστρώθηκαν επάνω στο χαλύβδινο δοκίμιο για την κατασκευή του επιθέματος, έχουν ως εξής:

- 1^η Ομάδα – 5 στρώσεις μήκους 200 mm
- 2^η Ομάδα – 5 στρώσεις μήκους 232 mm
- 3^η Ομάδα – 4 στρώσεις μήκους 264 mm
- 4^η Ομάδα – 4 στρώσεις μήκους 300 mm

Πρέπει να σημειωθεί ότι κάθε επόμενη ομάδα στρώσεων κάλυπτε την προηγούμενη.

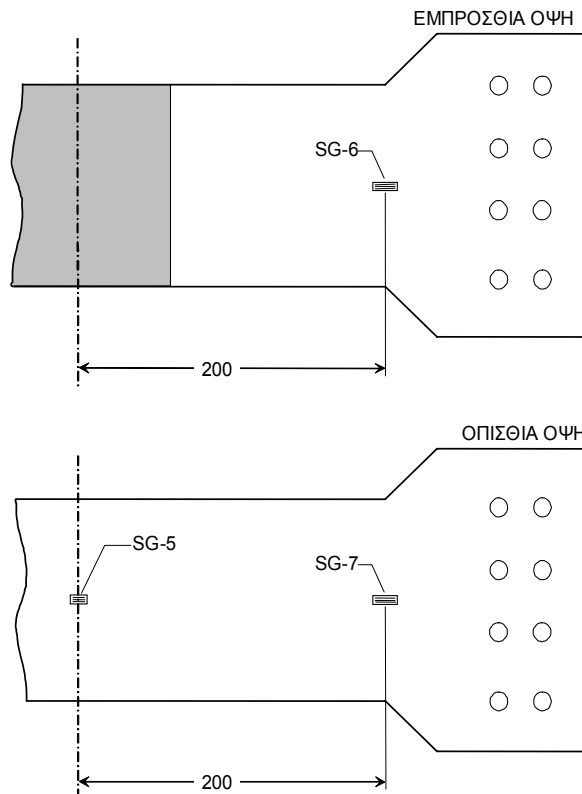
2.2.4 Παράμετροι Δοκιμής

Η υδραυλική μηχανή δοκιμών στην οποία πραγματοποιήθηκαν οι πειραματικές δοκιμές, είναι σύμφωνη με τις απαιτήσεις Class C του διεθνούς προτύπου ISO 5893:2002 [28]. Οι αρπάγες συγκράτησης των προσαρμογέων των δοκιμών είναι επίσης υδραυλικές.

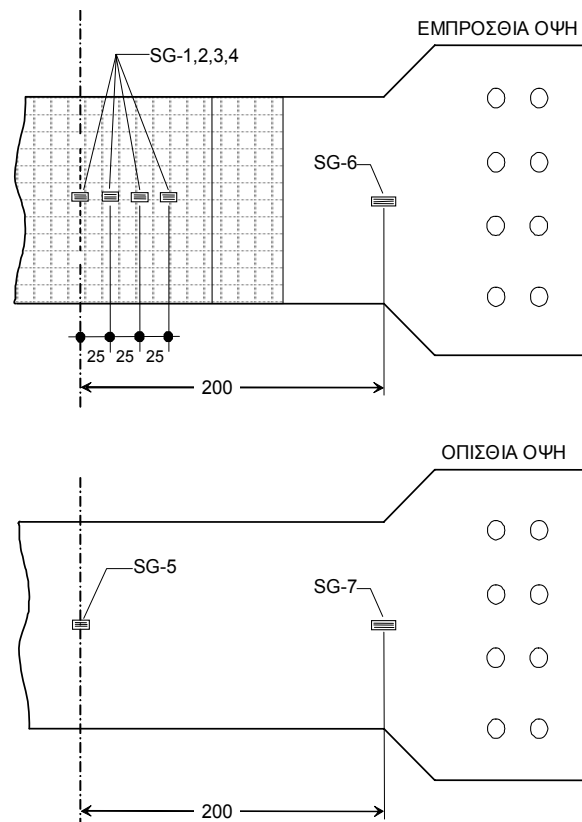
Πριν από κάθε πειραματική δοκιμή εφαρμόστηκε στο δοκίμιο μια προφόρτιση ίση με 30 kN, έτσι ώστε το σύστημα δοκίμιο-προσαρμογείς να βρεθεί στην τελική του θέση, μηδενίζοντας τις τυχόν ανοχές του. Η προφόρτιση αυτή επιβλήθηκε ως γραμμικά αυξανόμενη δύναμη με ρυθμό 0.5 kN/s. Στη συνέχεια, τα δοκίμια αποφορτίστηκαν τελείως με τον ίδιο ρυθμό. Η τελική φόρτιση επιβλήθηκε με τη μορφή γραμμικά αυξανόμενης εφελκυστικής μετατόπισης με ταχύτητα 0.5 mm/s. Η δοκιμή τελειώνει όταν το επίθεμα σταματήσει να συμβάλει στην αντοχή του δοκιμίου και ο χάλυβας έχει μπει βαθιά μέσα την πλαστική περιοχή.

Σε κάθε δοκιμή που πραγματοποιήθηκε μετρήθηκαν και καταγράφηκαν η εφαρμοζόμενη δύναμη, η συνολική επιμήκυνση του δοκιμίου, καθώς και οι διαμήκεις παραμορφώσεις σε διάφορα σημεία του χάλυβα και του επιθέματος. Για την καταγραφή των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το σύστημα πρόσκτησης δεδομένων της ίδιας της υδραυλικής μηχανής δοκιμών, καθώς και ένα πρόσθετο εξωτερικό σύστημα Spider-8, πλήρως συγχρονισμένα μεταξύ τους.

Για τη μέτρηση των παραμορφώσεων χρησιμοποιήθηκαν ηλεκτρικά επιμηκυνσιόμετρα (Strain Gages, SG), με μήκος αναφοράς (gage length) 5 και 10 mm. Στη μία πλευρά των δοκιμών αναφοράς χωρίς επίθεμα S-COR-1&2, τοποθετήθηκαν 3 επιμηκυνσιόμετρα, στις θέσεις που φαίνονται στο Σχήμα 2.2.8. Το SG-5 είχε μήκος αναφοράς 5 mm, ενώ τα SG-6 και SG-7 10 mm. Η αρίθμηση έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι συμβατή με εκείνη των επιμηκυνσιομέτρων στα δοκίμια με επίθεμα. Σε κάθε ένα από τα δοκίμια με επίθεμα τοποθετήθηκαν επτά επιμηκυνσιόμετρα, πέντε στην πλευρά με το επίθεμα και δύο στην άλλη πλευρά του, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1.9. Τα SG-1 έως SG-5 είχαν μήκος αναφοράς 5 mm, ενώ τα SG-6 και SG-7 10 mm. Το επιμηκυνσιόμετρο SG-5 που τοποθετήθηκε στην πίσω πλευρά των δοκιμών και στο κέντρο τους, σκοπό έχουν να καταγράψουν την έναρξη της διαρροής στην περιοχή αυτή, έτσι ώστε αυτή να μπορεί να συσχετιστεί με το φορτίο αστοχίας ή το φορτίο αποκόλλησης του επιθέματος. Οι μετρήσεις των επιμηκυνσιομέτρων SG-6 και SG-7 σκοπό έχουν, συγκρινόμενες, να δώσουν ένδειξη του μεγέθους της κάμψης που λαμβάνει χώρα λόγω της μονόπλευρης ενίσχυσης του δοκιμίου και ως εκ τούτου τη δημιουργία μη συμμετρικής εγκάρσιας διατομής. Τέλος, τα επιμηκυνσιόμετρα SG-1 έως SG-4 τοποθετήθηκαν στο επίθεμα με σκοπό να καταγράψουν τα φορτία που παραλαμβάνονται από αυτό, καθώς και να δώσουν μια εικόνα του τρόπου μεταφοράς των φορτίων από το χαλύβδινο υπόστρωμα προς το επίθεμα.



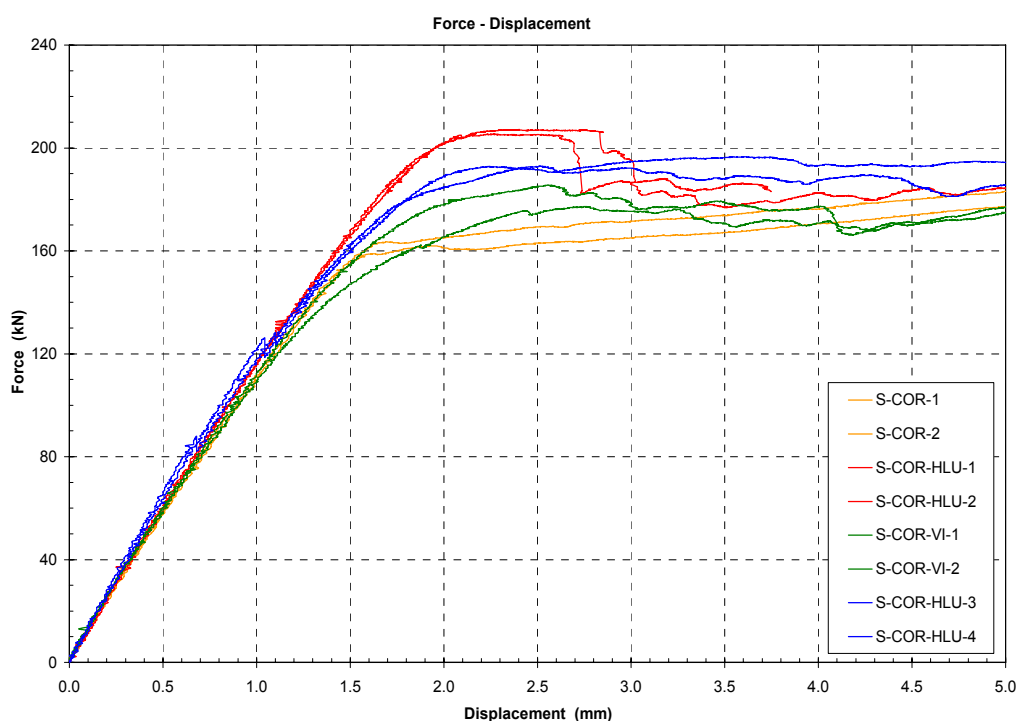
Σχήμα 2.2.8: Θέση επιμηκνσιομέτρων στα δοκίμια αναφοράς χωρίς επίθεμα.



Σχήμα 2.2.9: Θέση επιμηκνσιομέτρων στα δοκίμια με επίθεμα.

2.2.5 Αποτελέσματα και Σχολιασμός

Όλες οι πειραματικές μετρήσεις παρουσιάζονται στη συνέχεια με τη μορφή διαγραμμάτων. Στο Σχήμα 2.2.10 φαίνεται η συνολική απόκριση όλων των δοκιμών, με τη μορφή της μεταβολής της συνολικής επιμήκυνσης των δοκιμών (απόσταση μεταξύ των αρπάγων της μηχανής δοκιμών) συναρτήσει της επιβαλλόμενης εφελκυστικής δύναμης. Τα δοκίμια αναφοράς S-COR-1&2 επιδεικνύουν μια αναμενόμενη συμπεριφορά, αποκρινόμενα αρχικά γραμμικά και περνώντας στη συνέχεια στην πλαστική περιοχή. Η είσοδος στην πλαστική περιοχή πραγματοποιείται για τις τιμές του επιβαλλόμενου φορτίου που αναφέρονται στον Πίνακα 2.2.5 (φορτία διαρροής). Ο σταθμισμένος μέσος όρος του φορτίου διαρροής είναι 160.6 kN, τιμή που είναι αρκετά κοντά με τη θεωρητικά υπολογιζόμενη τιμή (158.3 kN) για την ενεργό διατομή στη διαβρωμένη περιοχή του χάλυβα ($140 \times 3.25 \text{ mm}^2$, βλέπε Πίνακα 2.2.4).



Σχήμα 2.2.10: Μεταβολή της επιμήκυνσης των δοκιμών συναρτήσει της επιβαλλόμενης δύναμης.

Η συμπεριφορά όλων των δοκιμών με επίθεμα είναι γενικά παρόμοια. Αρχικά παραμορφώνονται ελαστικά, με την περιοχή ελαστικής τους απόκρισης να είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη των δοκιμών χωρίς επίθεμα. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι, λόγω της παρουσίας του επιθέματος, το υπόστρωμα του χάλυβα φορτίζεται από χαμηλότερες τάσεις για το ίδιο επιβαλλόμενο φορτίο και άρα συμπεριφέρεται ελαστικά μέχρι υψηλότερα επιβαλλόμενα φορτία. Από το σημείο αυτό και μετά, τα δοκίμια εισέρχονται στην περιοχή πλαστικής τους απόκρισης. Για να εξηγηθεί περαιτέρω η συμπεριφορά των δοκιμών πρέπει να γίνει συνδυασμένη μελέτη των μεγεθών που καταγράφηκαν κατά τις πειραματικές μετρήσεις. Υπενθυμίζεται στο σημείο αυτό ότι η φόρτιση επιβάλλεται ως σταθερού ρυθμού εφελκυστική μετατόπιση, με αποτέλεσμα τη μεταβολή της φερόμενης δύναμης εάν επέρχεται αλλαγή στην ακαμψία του δοκιμίου.

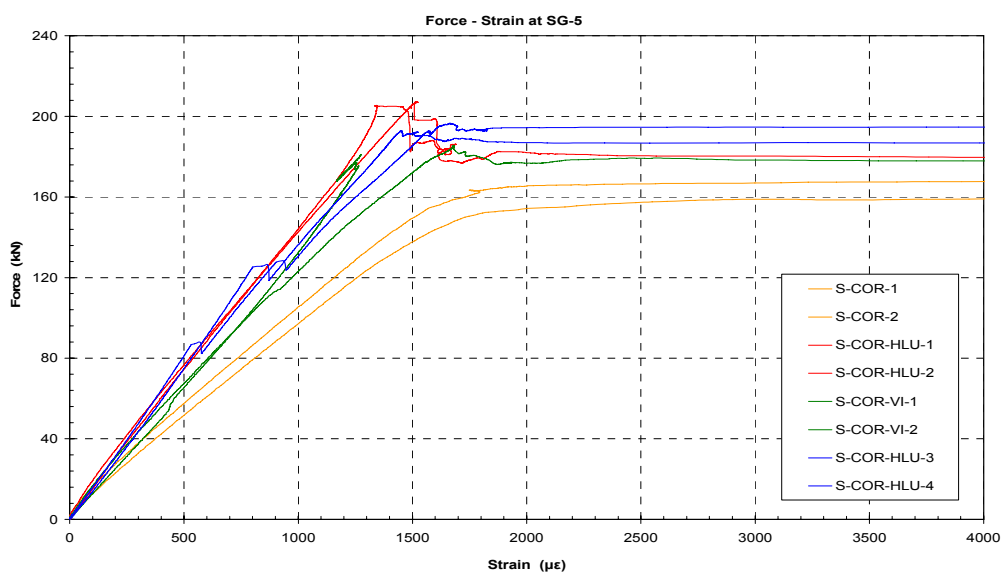
Πίνακας 2.2.5: Φορτίο αστοχίας των δοκιμίων.

Δοκίμιο	Φορτίο Αστοχίας Επιθέματος (kN)	% Διαφορά ²	Μέση % Διαφορά ²
S-COR-1	158.0 ¹	-	-
S-COR-2	163.1 ¹	-	-
S-COR-HLU-1	206.9	29	28.5
S-COR-HLU-2	205.1	28	
S-COR-VI-1	177.2	10	13
S-COR-VI-2	185.5	16	
S-COR-HLU-3	196.5	22	21
S-COR-HLU-4	192.9	20	

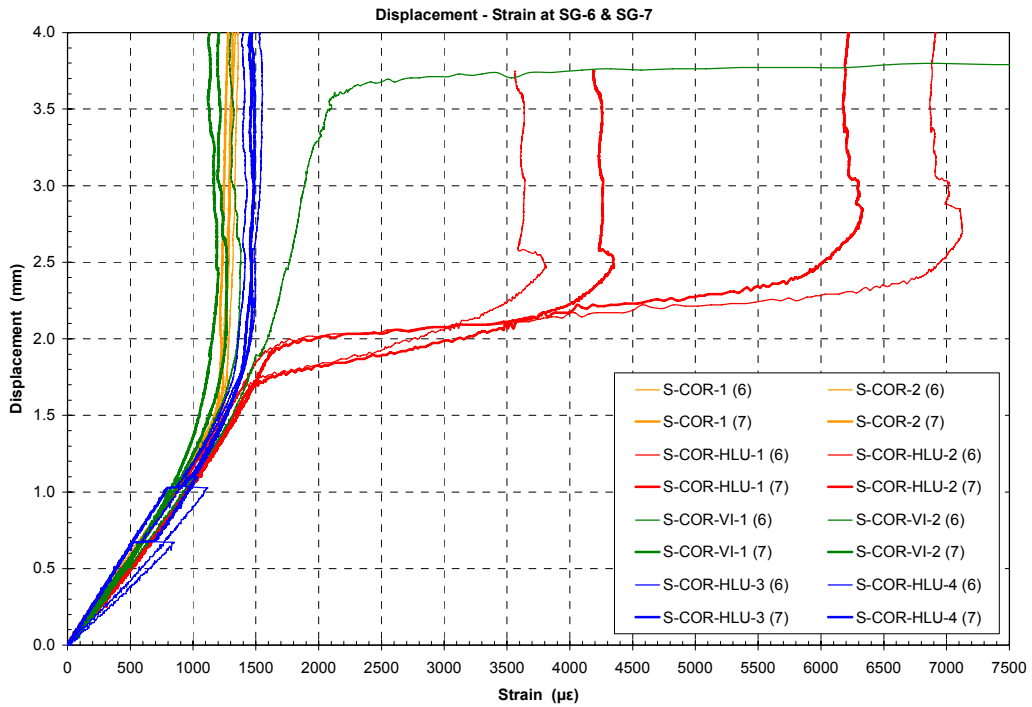
¹ Φορτίο διαρροής.

² Από τη μέση τιμή των φορτίων διαρροής των δοκιμίων αναφοράς S-COR-1 and S-COR-2.

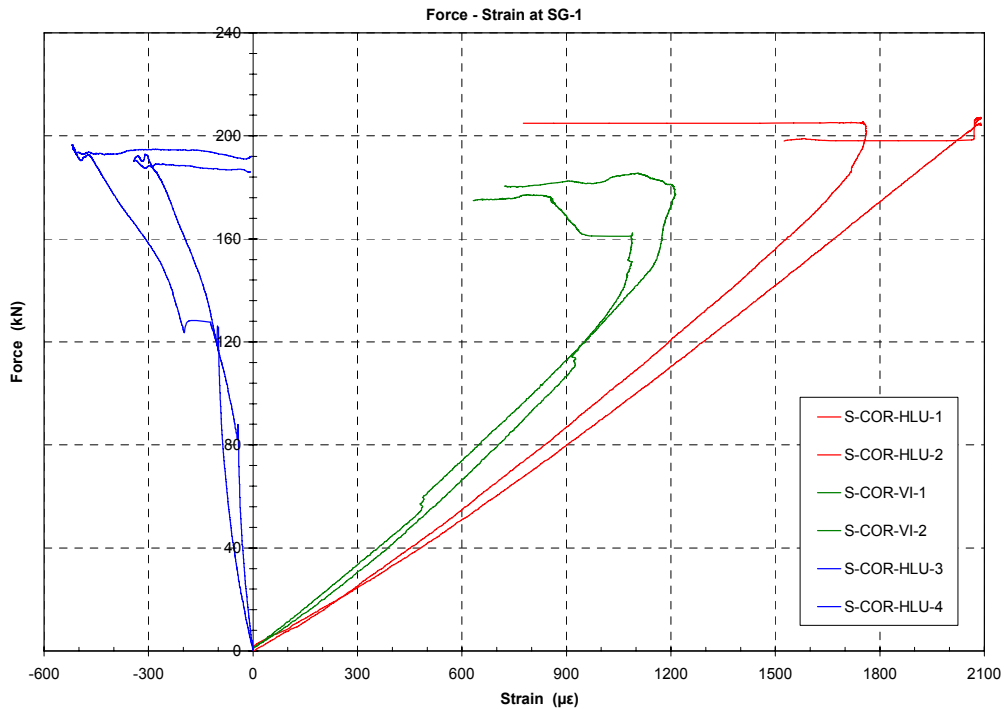
Στα Σχήματα 2.2.11 έως 2.2.14 παρουσιάζονται οι απαιτούμενες μετρήσεις ώστε να εξηγηθεί η συμπεριφορά των δοκιμίων. Στο Σχήμα 2.2.11 παρουσιάζεται η μεταβολή των παραμορφώσεων στη θέση SG-5, που βρίσκεται στην πίσω πλευρά και στο κέντρο του δοκιμίου, συναρτήσει της επιβαλλόμενης δύναμης, ενώ στο Σχήμα 2.2.12 παρουσιάζεται η μεταβολή των παραμορφώσεων στις θέσεις SG-6 και SG-7, μακριά από το επίθεμα, συναρτήσει της επιβαλλόμενης μετατόπισης. Η επιβαλλόμενη μετατόπιση επιλέχθηκε έναντι της επιβαλλόμενης δύναμης στο Σχήμα 2.2.11 γιατί στην περίπτωση αυτή οι καμπύλες μεταβολής της παραμόρφωσης στις θέσεις αυτές είναι πολύ περισσότερο ευανάγνωστες και κατατοπιστικές. Επιπρόσθετα, στο Σχήμα 2.2.13 παρουσιάζεται η μεταβολή των παραμορφώσεων στη θέση SG-1 στο κέντρο του επιθέματος, συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου. Τα πειραματικά αποτελέσματα του σχήματος αυτού προσδιορίζουν το φορτίο αστοχίας του επιθέματος κάθε δοκιμίου, που είναι το μέγιστο φορτίο πέρα από το οποίο οι παραμορφώσεις στο επίθεμα μειώνονται και το επίθεμα παύει να συνεισφέρει στην αντοχή του δοκιμίου. Τα φορτία αστοχίας του επιθέματος παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 2.2.5 και συγκρίνονται με το φορτίο διαρροής των δοκιμίων χωρίς επίθεμα.



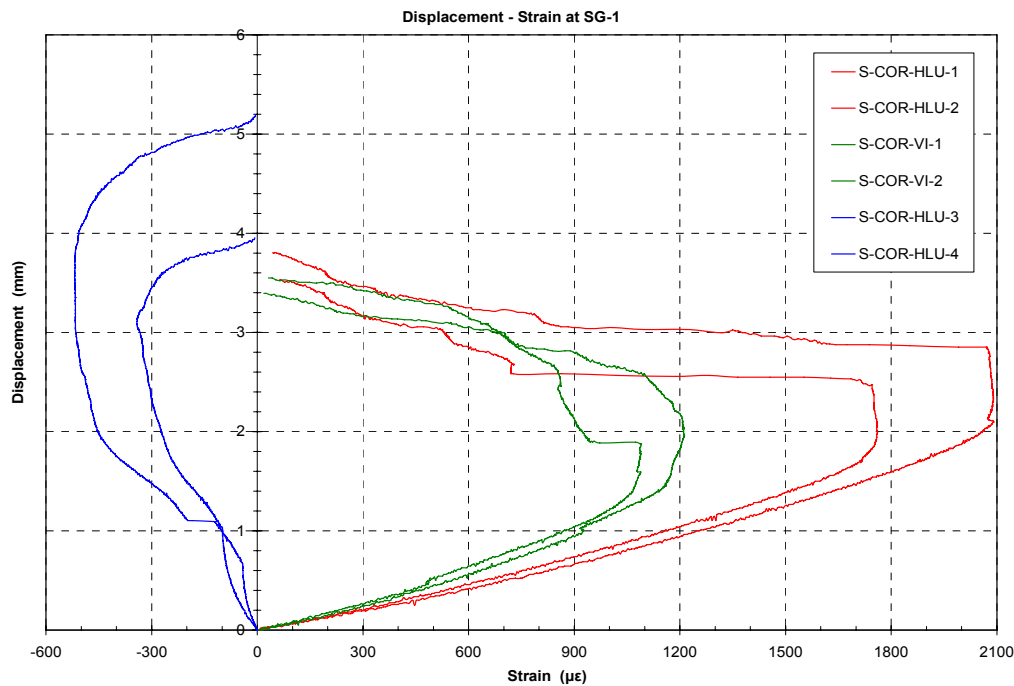
Σχήμα 2.2.11: Παραμορφώσεις στη θέση SG-5 συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου



Σχήμα 2.2.12: Μεταβολή των παραμορφώσεων στις θέσεις SG-6 και SG-7 συναρτήσει της επιβαλλόμενης μετατόπισης.



Σχήμα 2.2.13: Μεταβολή των παραμορφώσεων στη θέση SG-1 συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου.

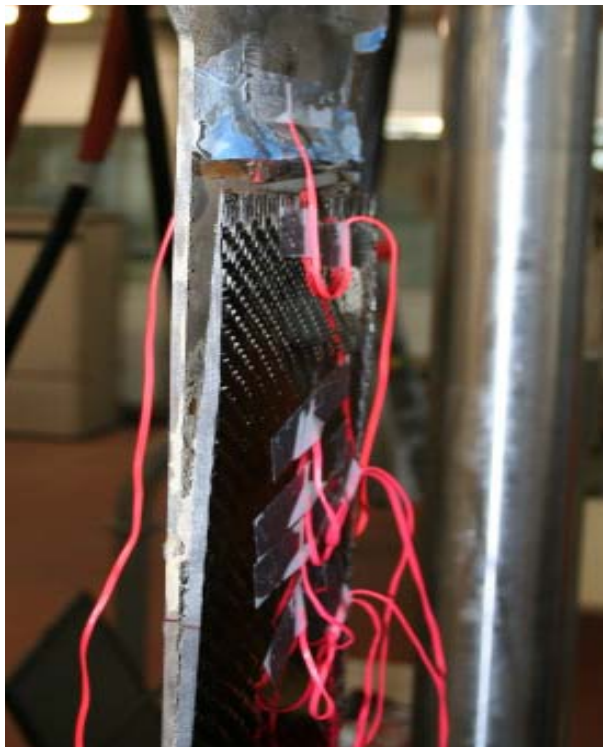


Σχήμα 2.2.14: Μεταβολή των παραμορφώσεων στη θέση SG-1 συναρτήσει της επιβαλλόμενης μετατόπισης.

Η συμπεριφορά των δοκιμών με ενισχυτικό επίθεμα είναι καταλληλότερο να εξεταστεί με την ταυτόχρονη μελέτη των Σχημάτων 2.2.10 έως 2.2.13, μαζί με το Σχήμα 2.2.14 το οποίο παρουσιάζει τις ίδιες μετρήσεις με εκείνες του Σχήματος 2.2.13 (παραμορφώσεις στη θέση SG-1) αλλά συναρτήσει της επιβαλλόμενης μετατόπισης. Κατά συνέπεια, για τα δοκίμια S-COR-HLU-1&2, οι μετρήσεις των παραμορφώσεων στο Σχήμα 2.2.12 υποδηλώνουν ότι για επιβαλλόμενη μετατόπιση περίπου ίση με 1.7 έως 1.9 mm (περίπου 180 έως 195 kN), τα δοκίμια αυτά εισέρχονται στην περιοχή πλαστικής απόκρισης στην περιοχή των θέσεων SG-6 και SG-7, που βρίσκονται μακριά από τη διαβρωμένη περιοχή του χάλυβα και έχει εφαρμοστεί το ενισχυτικό επίθεμα (βλέπε Σχήμα 2.2.9). Καθώς το φορτίο αυξάνεται, στο Σχήμα 2.2.11 φαίνεται ότι η περιοχή του χάλυβα ακριβώς κάτω από το επίθεμα εισέρχεται στην πλαστική περιοχή. Ταυτόχρονα, επέρχεται η αποκόλληση του επιθέματος με απότομη πτώση της επιβαλλόμενης δύναμης (βλέπε Σχήματα 2.2.10, 2.2.13 και 2.2.14), ενώ, καθώς συνεχίζεται η φόρτιση, οι παραμορφώσεις στις θέσεις SG-6 και SG-7 παύουν να αυξάνονται (Σχήμα 2.2.12), και η διαρροή περιορίζεται μόνο κάτω από τη διαβρωμένη περιοχή του δοκιμίου (βλέπε Σχήμα 2.2.11). Μετά την αποκόλληση του επιθέματος, τα δοκίμια S-COR-HLU-1&2 ακολουθούν την τυπική απόκριση των δοκιμών αναφοράς χωρίς επίθεμα, όπως ήταν αναμενόμενο. Στο Σχήμα 2.2.15 παρουσιάζεται μια τυπική μορφή αποκόλλησης του ενισχυτικού επιθέματος.

Σε αντίθεση με την περίπτωση των παραπάνω δοκιμών, η αποκόλληση του επιθέματος στα υπόλοιπα δεν ήταν απότομη αλλά σταδιακή, όπως αποδεικνύεται από τα αποτελέσματα του Σχήματος 2.2.10 και ειδικότερα αυτών στο Σχήμα 2.2.14. Οι παραμορφώσεις στο επίθεμα που φαίνονται στο Σχήμα 2.2.14 δεν παρουσιάζουν απότομη πτώση όπως αυτές των δοκιμών S-COR-HLU-1&2, αλλά επιδεικνύουν βαθμιαία

μείωση, υποδηλώνοντας σταδιακή αποκόλληση του επιθέματος. Επιπλέον, τα Σχήματα 2.2.11 και 2.2.12 υποδεικνύουν ότι όλα τα υπόλοιπα δοκίμια δεν διαρρέουν στην περιοχή των θέσεων SG-6 και SG-7 μακριά από το επίθεμα, αλλά στη θέση SG-5, κάτω από τη διαβρωμένη περιοχή των δοκιμίων.



Σχήμα 2.2.15: Τυπική μορφή της αποκόλλησης του ενισχυτικού επιθέματος.

Η μελέτη του Σχήματος 2.2.10 και του Πίνακα 2.2.5 αποκαλύπτει τη σαφή υπεροχή των δοκιμίων με ενισχυτικό επίθεμα έναντι των δοκιμίων αναφοράς (χωρίς επίθεμα), καθώς το εύρος φορτίων πριν την αποκόλληση του επιθέματος είναι αυξημένο από 10 έως 29% ως προς το φορτίο διαρροής των μη ενισχυμένων δοκιμίων. Η συνολική αποτίμηση της συμπεριφοράς των διαβρωμένων χαλύβδινων δοκιμίων με ενισχυτικό επίθεμα καταλήγει στα ίδια συμπεράσματα που προέκυψαν για τη συμπεριφορά των ρωγματωμένων χαλύβδινων δοκιμίων με ενισχυτικό επίθεμα, όπως αυτά παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο εδάφιο 2.1. Τα δοκίμια με επίθεμα T/HLU παρουσιάζουν σημαντική βελτίωση στη συμπεριφορά τους, παρά το χαμηλό λόγο ακαμψίας SR.

Συγκρίνοντας τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των επιθεμάτων, είναι ενδιαφέρον να γίνει αρχικά σύγκριση της συμπεριφοράς μεταξύ των δοκιμίων με επίθεμα από υλικό T/HLU και των δοκιμίων με επίθεμα T/VI, τα οποία παρουσίασαν παρόμοιο λόγο ακαμψίας. Η ανωτερότητα των επιθεμάτων T/HLU είναι προφανής, πιθανόν εξαιτίας της μεγαλύτερης ποσότητας ρητίνης η οποία συνεπάγεται την ύπαρξη πιο αποτελεσματικού δεσμού μεταξύ του επιθέματος και της χαλύβδινης πλάκας. Αντιθέτως, στην περίπτωση των επιθεμάτων T/VI, φαίνεται ότι η υπάρχουσα ποσότητα ρητίνης δεν ήταν αρκετή ώστε να εξασφαλίσει εξίσου ικανοποιητικό δεσμό. Το συμπέρασμα αυτό επιβεβαιώνεται από την εξέταση της επιφάνειας επαφής του επιθέματος μετά την αποκόλλησή τους από το

χαλύβδινο υπόστρωμα. Βρέθηκε ότι η επιφάνεια επαφής των επιθεμάτων T/HLU ήταν ικανοποιητικά εμποτισμένη με ρητίνη, σε αντίθεση με την επιφάνεια επαφής των επιθεμάτων T/VI που παρουσίαζε κάποια κενά αέρος και ξηρές περιοχές. Η μεγαλύτερη ποσότητα ρητίνης των επιθεμάτων που κατασκευάστηκαν με τη μέθοδο μορφοποίησης με το χέρι (Hand Lay-Up, HLU) προκύπτει, όπως ήταν φυσικό, στα μεγαλύτερου πάχους επιθέματα T/HLU. Συνεπώς είναι φανερό ότι, για σταθερή και χαμηλή τιμή του λόγου ακαμψίας SR, είναι επιθυμητή η χρησιμοποίηση υλικών με μικρότερο μέτρο ελαστικότητας και μεγαλύτερο πάχος, έναντι άλλων μεγαλύτερης ακαμψίας και λεπτότερων. Το συμπέρασμα αυτό επιβεβαιώνεται και από σχετικές αριθμητικές μελέτες του προβλήματος [29], καθώς και από τη συμπεριφορά των ρωγματομένων δοκιμίων που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο εδάφιο 2.1 και αυτών που δοκιμάστηκαν σε κόπωση [14].

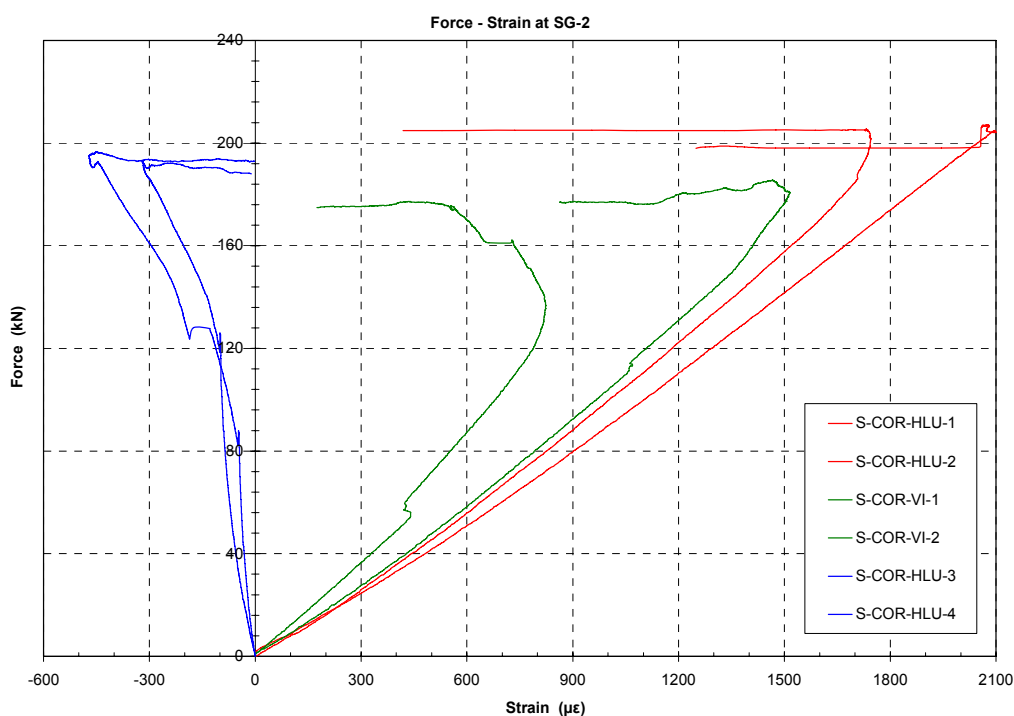
Η συμπεριφορά των δοκιμίων με ενισχυτικό επίθεμα T/HLU είναι καλύτερη ακόμα και από αυτή των δοκιμίων με επίθεμα UD-HM/HLU, παρά τη πολύ μεγαλύτερη τιμή του λόγου ακαμψίας που παρουσιάζουν ίση με 2.5. Η ανακολουθία αυτή πιθανώς να οφείλεται είτε στην ύπαρξη κενών αέρος που παρατηρήθηκαν στην επιφάνεια επαφής μετά την αποκόλλησή τους, είτε στην εντονότερη κάμψη που παρουσίασαν τα δοκίμια και στην ανάπτυξη υψηλών τάσεων εξαιτίας του μεγάλου πάχους των επιθεμάτων τους συγκριτικά με το πάχος των επιθεμάτων T/HLU. Οι υψηλές τάσεις που αναπτύχθηκαν λόγω της έντονης κάμψης των δοκιμίων οδήγησαν στην αστοχία του δεσμού μεταξύ χάλυβα και ενισχυτικού επιθέματος και τελικά την πρώιμη αποκόλλησή του. Παρατηρείται λοιπόν ότι το μεγάλο πάχος του επιθέματος είναι επιθυμητό μέχρι ένα συγκεκριμένο όριο του λόγου ακαμψίας SR, πάνω από το οποίο μεγαλύτερο πάχος επιθέματος έχει αρνητική επίπτωση στη συμπεριφορά της επισκευής. Η πλήρης ερμηνεία του φαινόμενου αυτού απαιτεί τη διενέργεια περισσότερων πειραματικών δοκιμών και αντίστοιχων αριθμητικών μελετών. Ωστόσο, τέτοιου είδους ανακολουθίες έχουν επίσης παρατηρηθεί σε παρόμοιες πειραματικές δοκιμές [8].

Μελετώντας τη συμπεριφορά των παραμορφώσεων, στο Σχήμα 2.2.11 παρουσιάζονται οι παραμορφώσεις που μετρήθηκαν στη θέση SG-5 που βρίσκεται στην πίσω πλευρά της διαβρωμένης περιοχής του δοκιμίου και υποδηλώνεται από άλλη οπτική γωνία η απότομη αποκόλληση του επιθέματος στα δοκίμια S-COR-HLU-1&2 και η σταδιακή αποκόλληση του επιθέματος σε όλα τα υπόλοιπα. Μετά την αποκόλληση, συνεχίζουν να αυξάνονται μέχρι την αστοχία, υποδεικνύοντας ότι η διαρροή λαμβάνει χώρα στη μειωμένη εγκάρσια διατομή της διαβρωμένης περιοχής, όπως ήταν αναμενόμενο. Εξαιρέση στον κανόνα αυτό παρουσιάζει το δοκίμιο S-COR-VI-1, το οποίο διαρρέει μέχρι την αστοχία σε διαφορετική θέση, με αποτέλεσμα οι παραμορφώσεις στη θέση SG-5 να παραμένουν σε χαμηλά επίπεδα (<1300 με).

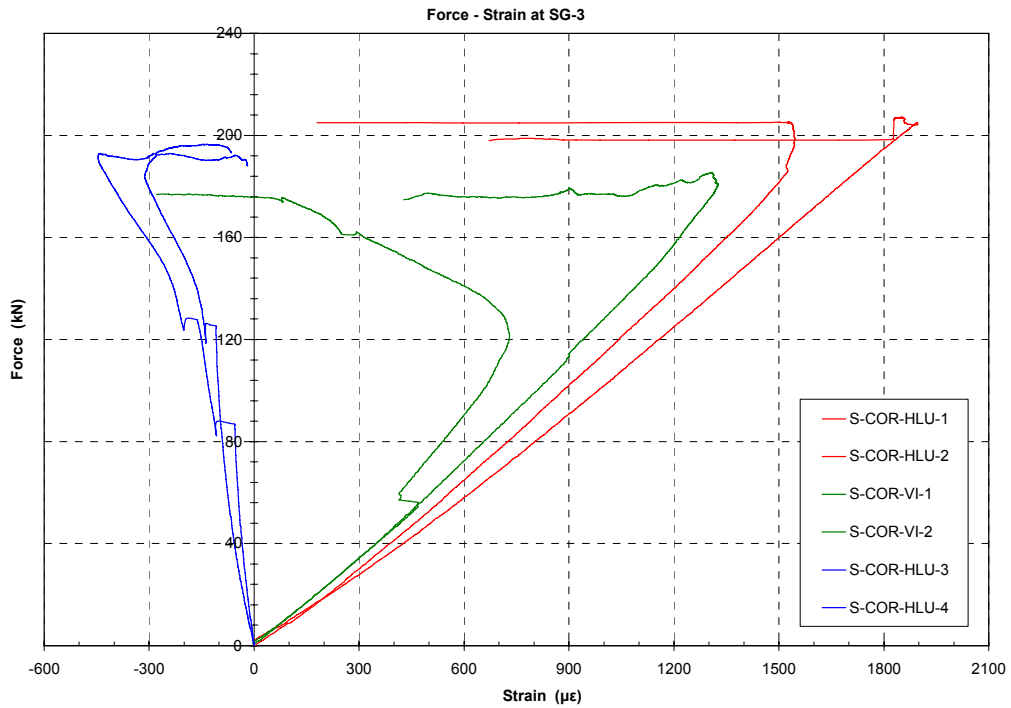
Η εξαιρέση αυτή φαίνεται ξεκάθαρα στο Σχήμα 2.2.12 που παρουσιάζονται οι μετρήσεις των παραμορφώσεων στις θέσεις SG-6 και SG-7, μακριά από το επίθεμα. Οι παραμορφώσεις στο δοκίμιο S-COR-VI-1 είναι συνεχώς αυξανόμενες μέχρι την αστοχία.

Οι παραμορφώσεις στα δοκίμια S-COR-HLU-1&2 υποδηλώνουν ότι διαρρέουν προσωρινά στις θέσεις αυτές, καθώς οι παραμορφώσεις στα υπόλοιπα δοκίμια παραμένουν στην περιοχή ελαστικής απόκρισης (<1600 με).

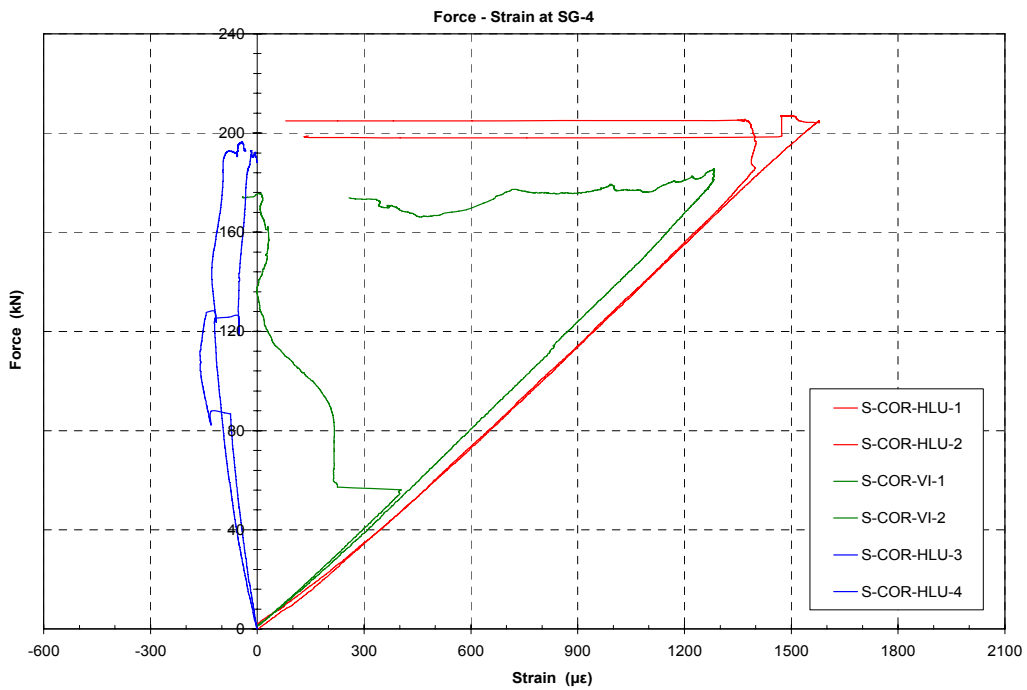
Το Σχήμα 2.2.12 υποδηλώνει επίσης την έντονη τοπική κάμψη που παρουσιάζουν τα δοκίμια S-COR-HLU-3&4 η οποία λαμβάνει χώρα κατά τη διάρκεια της ελαστικής απόκρισης των δοκιμίων, πριν ξεκινήσει η σταδιακή αποκόλληση του επιθέματος. Η σύγκριση των ελαστικών παραμορφώσεων που μετρήθηκαν στη θέση SG-6 γι' αυτά τα δύο δοκίμια (λεπτές μπλε γραμμές) με αυτές που μετρήθηκαν στη θέση SG-7 (παχιές μπλε γραμμές) αποδεικνύει ότι οι πρώτες είναι σημαντικά μεγαλύτερες από τις δεύτερες. Οι διαφορές αυτές προκαλούνται από την τοπική κάμψη της κεντρικής περιοχής των δοκιμίων, εξαιτίας της μη συμμετρικής εγκάρσιας διατομής λόγω της ύπαρξης του μονόπλευρου ενισχυτικού επιθέματος. Η μη συμμετρικότητα που εμφανίζεται είναι πιο έντονη στην περίπτωση των δοκιμίων αυτών εξαιτίας του μεγάλου πάχους του επιθέματος (12.6 mm). Το μονόπλευρο επίθεμα προκαλεί τη δημιουργία ενός βέλους κάμψης με διεύθυνση προς το χαλύβδινο μέρος της διατομής, βέλος κάμψης το οποίο αυξάνει με αύξηση του επιβαλλόμενου εφελκυστικού φορτίου. Έτσι λοιπόν, στα άκρα του δοκιμίου δημιουργούνται πρόσθετες εφελκυστικές παραμορφώσεις στην πλευρά του χάλυβα προς το επίθεμα (θέση SG-6), ενώ στην αντίθετη πλευρά (θέση SG-7), ένα μέρος των εφελκυστικών παραμορφώσεων λόγω του εφελκυστικού φορτίου αντισταθμίζεται από τις θλιπτικές παραμορφώσεις λόγω της κάμψης του δοκιμίου.



Σχήμα 2.2.16: Μεταβολή των παραμορφώσεων στη θέση SG-2 συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου.



Σχήμα 2.2.17: Μεταβολή των παραμορφώσεων στη θέση SG-3 συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου.



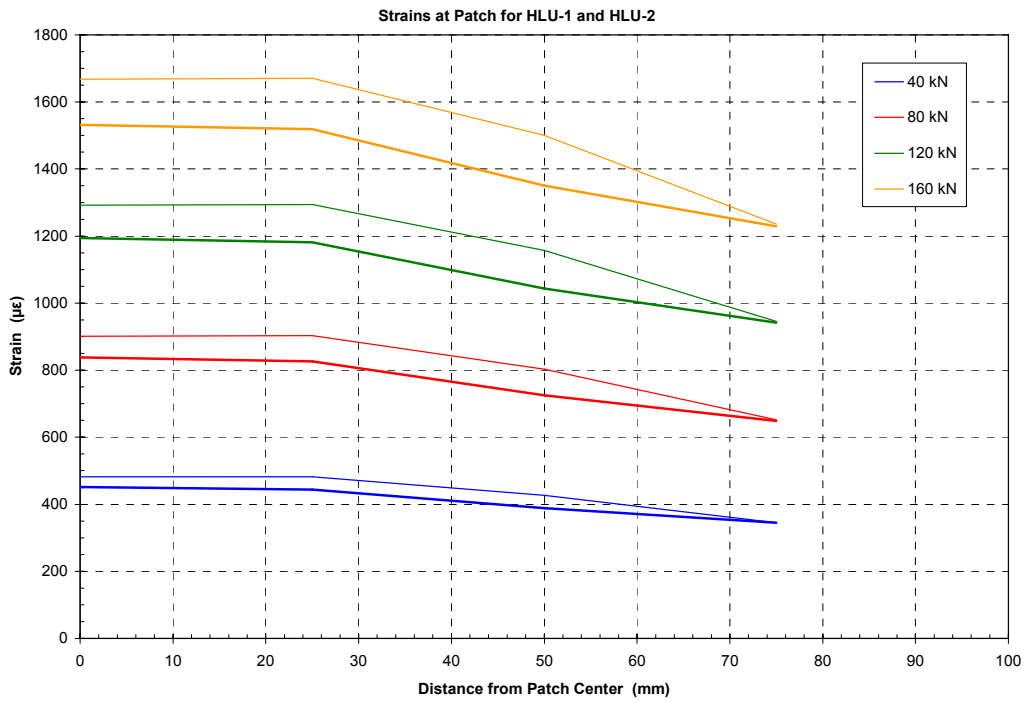
Σχήμα 2.2.18: Μεταβολή των παραμορφώσεων στη θέση SG-4 συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου.

Η μεταβολή των παραμορφώσεων στις θέσεις SG-1, SG-2, SG-3 και SG-4 πάνω στο επίθεμα συναρτήσει της επιβαλλόμενης δύναμης παρουσιάζεται στα Σχήματα 2.2.13 και 2.2.16 έως 2.1.18, αντίστοιχα. Το πρώτο γενικό σχόλιο που μπορεί να γίνει είναι ότι υπάρχει καλή επαναληψιμότητα των μετρήσεων για τα ζεύγη ίδιων δοκιμών, με εξαίρεση το δοκίμιο S-COR-VI-1, λόγω της ιδιαίτερης συμπεριφοράς του.

Το επόμενο συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί από τα σχήματα αυτά είναι ότι η συμπεριφορά των δοκιμών S-COR-HLU-3&4 είναι διαφορετική από των υπολοίπων δοκιμών. Έτσι λοιπόν, οι παραμορφώσεις που καταγράφονται στο επίθεμα των δοκιμών S-COR-HLU-1&2 και S-COR-VI-1&2 είναι συνεχώς εφελκυστικές και παρουσιάζουν περίπου γραμμική συμπεριφορά μέχρι την αποκόλλησή τους. Σχετικά με τα δοκίμια S-C-HLU-3&4, παρατηρείται ότι στα επιθέματά τους αναπτύσσονται μόνο θλιπτικές παραμορφώσεις και αποκλίνουν από τη γραμμική απόκριση. Η συμπεριφορά αυτή εξηγείται από το γεγονός ότι τα δοκίμια αυτά έχουν πολύ πιο παχύ επίθεμα με πολύ υψηλότερο λόγο ακαμψίας από τα υπόλοιπα, με αποτέλεσμα την εμφάνιση πολύ πιο έντονης τοπικής κάμψης λόγω της μη συμμετρικής εγκάρσιας διατομής τους, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Κατά συνέπεια, η ελεύθερη επιφάνεια των επιθεμάτων υπόκειται σε θλίψη, παρά τη συνολική εφελκυστική φόρτιση.

Οι πειραματικές μετρήσεις των παραμορφώσεων στο επίθεμα υποδηλώνουν επίσης (εκτός ορισμένων εξαιρέσεων) ότι οι παραμορφώσεις μειώνονται καθώς απομακρυνόμαστε από το κέντρο του δοκιμίου, όπως ήταν αναμενόμενο. Ο ρυθμός αυτής της μείωσης φαίνεται καθαρά στο Σχήμα 2.2.19, όπου παρουσιάζεται η μεταβολή των παραμορφώσεων στο επίθεμα των δοκιμών S-COR-HLU-1&2 ως συνάρτηση της απόστασης του σημείου μέτρησης από το κέντρο του επιθέματος (βλέπε και Σχήμα 2.2.9), για τέσσερις διαφορετικές τιμές της επιβαλλόμενης δύναμης. Να σημειωθεί ότι το ενεργό μήκος του επιθέματος (είναι το μήκος στο οποίο το επίθεμα έχει το μέγιστο πάχος του) είναι ίσο με 200 mm. Το Σχήμα 2.2.19 δείχνει μια αρχική αύξηση των παραμορφώσεων καθώς προσεγγίζουμε το κέντρο από τα άκρα του επιθέματος, ενώ από κάποιο σημείο και μετά σταθεροποιούνται και οι παραμορφώσεις παραμένουν περίπου σταθερές στην κεντρική περιοχή. Η συμπεριφορά αυτή είναι ουσιαστικά διαφορετική από την αντίστοιχη απόκριση των επιθεμάτων στα δοκίμια των ρωγματομένων πλακών χάλυβα, όπου οι παραμορφώσεις ήταν συνεχώς αυξανόμενες καθώς προσεγγίζουμε το κέντρο του επιθέματος (βλέπε εδάφιο 2.1.5). Το Σχήμα 2.2.19 υποδηλώνει ότι για τα δοκίμια S-COR-HLU-1&2 ο καθορισμός του «μήκους ανάπτυξης» στο επίθεμα (της απόστασης δηλ. από το άκρο του επιθέματος στην οποία οι παραμορφώσεις σε αυτό αποκτούν σταθερή τιμή) είναι περίπου ίσος με 75 mm, παρά το γεγονός ότι στην περίπτωση των μονόπλευρων επιθεμάτων, λόγω της μη συμμετρικής εγκάρσιας διατομής και της συνεπαγόμενης κάμψης, δεν έχει νόημα ο καθορισμός του «μήκους ανάπτυξης». Επιπλέον, η μορφή των καμπύλων στο Σχήμα 2.2.19 και οι σχετικά υψηλές τιμές των παραμορφώσεων που μετρήθηκαν στην τελευταία θέση προς τα άκρα του επιθέματος (θέση SG-4), υποδηλώνουν ότι επιθέματα μήκους μεγαλύτερου από 200 mm ίσως ήταν πιο

αποτελεσματικά. Η υπόθεση αυτή θα πρέπει να διερευνηθεί με αντίστοιχες αριθμητικές προσομοιώσεις.



Σχήμα 2.2.19: Μεταβολή των παραμορφώσεων στο επίθεμα των δοκιμίων S-COR-HLU-1&2 (λεπτή και παχιά γραμμή, αντίστοιχα) συναρτήσει της απόστασης από το κέντρο.

Κεφάλαιο 3

Αριθμητική Μοντελοποίηση Πειραματικών Δοκιμών και Σύγκριση Αποτελεσμάτων

Εισαγωγή

Η ανάγκη δημιουργίας ενός αξιόπιστου αριθμητικού μοντέλου που θα περιγράψει σε ικανοποιητικό βαθμό την πειραματική δοκιμή και κυρίως τη μηχανική συμπεριφορά της επισκευής κατά τη διάρκειά της, οδήγησε στην επιλογή της μεθόδου ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία. Με την επιβεβαίωση της ορθότητας του αριθμητικού μοντέλου, συγκρίνοντάς το με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα, είναι δυνατόν να εξαχθούν πολύτιμα συμπεράσματα για την αποτελεσματικότητα και την αξιοπιστία μιας επισκευής με επίθεμα από σύνθετα υλικά με φθινό και γρήγορο τρόπο. Κατά συνέπεια, στο μέλλον, η διεξαγωγή χρονοβόρων και κυρίως υψηλού κόστους πειραμάτων μπορεί να ελλатωθεί! Με γνώμονα τα παραπάνω, στο παρόν κεφάλαιο, θα περιγραφεί λεπτομερώς η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την δημιουργία ενός μοντέλου, που αντιστοιχεί-προσομοιάζει τις πειραματικές δοκιμές. Ειδικότερα, θα περιγραφούν όλοι εκείνοι οι παράγοντες που συνιστούν ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων σε τέτοιες περιπτώσεις, όπως επίσης και το είδος των δοκιμών και των παραδοχών που υιοθετούνται, και καθορίζουν την τελική μορφή τους. Στους κυριότερους των παραγόντων περιλαμβάνονται οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν, η υπό εξέταση γεωμετρία, τα στοιχεία με τα οποία διακριτοποιήθηκε αυτή, οι συνοριακές συνθήκες και το είδος της φόρτισης που επιβλήθηκαν, και τέλος ο τύπος της ανάλυσης (γραμμική ή μη-γραμμική) για την επίλυσή του. Για το σκοπό αυτό επιλέχθηκε το λογισμικό ANSYS 10.0, με τη βοήθεια του οποίου έγιναν όλα τα απαιτούμενα βήματα για τον καθορισμό του μοντέλου, τη διαδικασία επίλυσής του και τέλος την εξαγωγή των αποτελεσμάτων.

3.1 Περιγραφή της Αριθμητικής Μοντελοποίησης των Ρωγματομένων Πλακών Χάλυβα

3.1.1 Μηχανικές Ιδιότητες και Μοντελοποίηση Υλικών

Τα υλικά που εξετάστηκαν σε αυτή τη σειρά των δοκιμών περιλαμβάνουν:

1. Μεταλλικές πλάκες από κοινό ναυπηγικό χάλυβα
2. Ενισχυτικό επίθεμα από σύνθετο υλικό αποτελούμενο από ίνες άνθρακα και εποξειδική ρητίνη
3. Κολλητικό μέσο από εποξειδική ρητίνη

Σημειώνεται ότι η ονοματολογία και ο συμβολισμός των δοκιμών, που ακολουθούν παρακάτω, θα διατηρηθεί ο ίδιος όπως ορίστηκε στο Κεφάλαιο 2, εδάφιο 2.1.

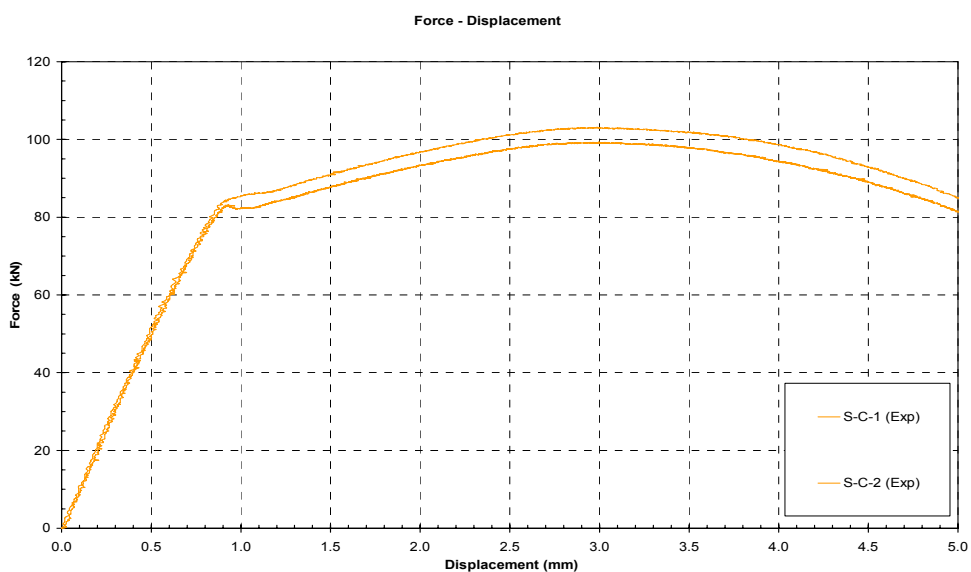
Οι μεταλλικές πλάκες που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των δοκιμών αποτελούνται από κοινό ναυπηγικό χάλυβα Grade A, μέτρου ελαστικότητας E , λόγου Poisson ν και ορίου διαρροής σ_0 . Οι τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων, που έχουν προσδιοριστεί από δοκιμές χαρακτηρισμού και χρησιμοποιήθηκαν στην αριθμητική προσομοίωση, αναγράφονται στον Πίνακα 3.1.1.

Πίνακας 3.1.1: Αριθμητικές Τιμές Μηχανικών Ιδιοτήτων Χάλυβα.

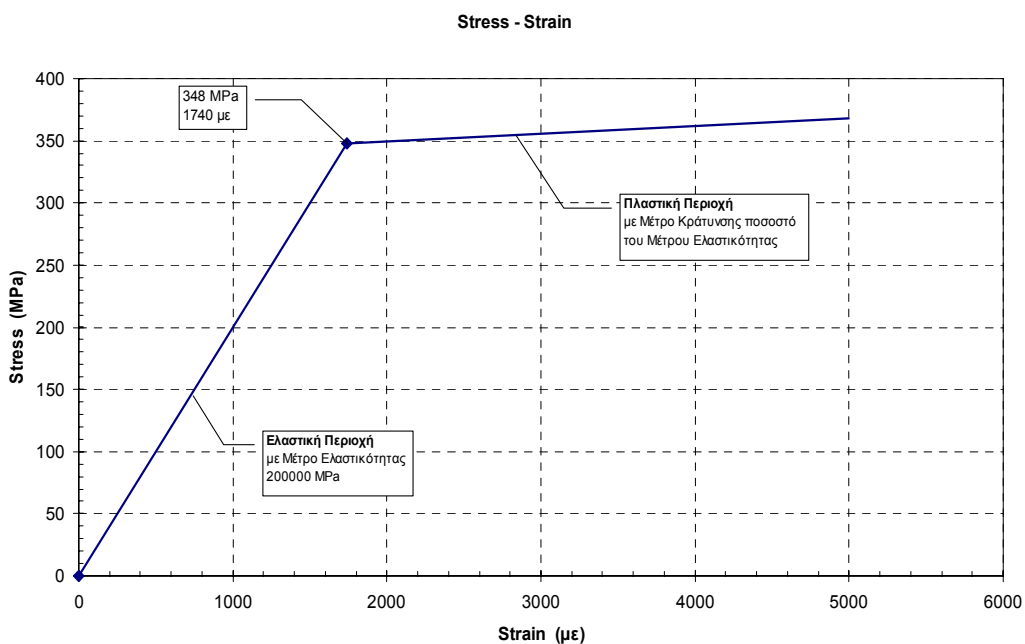
Υλικό	E (MPa)	ν	σ_0 (MPa)
Χάλυβας	200000	0.30	348

Η μηχανική συμπεριφορά του χάλυβα προσδιορίστηκε παρατηρώντας τη συμπεριφορά των δοκιμών αναφοράς, δηλαδή αυτών που δεν έχουν επισκευαστεί από επίθεμα σύνθετων υλικών. Κατά συνέπεια, γνωρίζοντας την καμπύλη φορτίου-επιμήκυνσης (**Force-Displacement** Σχήμα 3.1.1) που προέκυψε από τα αποτελέσματα της δοκιμής στατικού εφελκυσμού των πειραματικών αυτών δοκιμών (**Experimental Results**), συμπεραίνουμε ότι η μοντελοποίησή του ως ελαστικό γραμμικώς κρατυνόμενο, ιστροπικό υλικό θα προσομοίωνε σε ικανοποιητικό εύρος μετατοπίσεων την πραγματική συμπεριφορά του χάλυβα. Η καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων σ - ϵ (**Stress-Strain**) ενός τέτοιου υλικού, που ονομάζεται και διγραμμικό κρατυνόμενο υλικό εξαιτίας των δύο γραμμικών περιοχών που εμφανίζει (στην περιοχή ελαστικής και πλαστικής απόκρισης, αντίστοιχα), παριστάνεται στο Σχήμα 3.1.2. Για να προσδιοριστεί πλήρως θα πρέπει να δοθεί μια τιμή για το μέτρο κράτυνσης (**tangent modulus**), που γραφικά αποδίδεται ως η κλίση της ευθείας μετά το σημείο διαρροής και παίρνει τιμές που προκύπτουν ως ποσοστό του αρχικού μέτρου ελαστικότητας E . Για το σκοπό αυτό έγινε μια σειρά προκαταρκτικών δοκιμών μεταβάλλοντας την τιμή του από ένα ως τρία τα εκατό του μέτρου ελαστικότητας ($0.01E \pm 0.03E$), δηλαδή από 2000 έως 6000 MPa, και εκτελώντας την αντίστοιχη ανάλυση

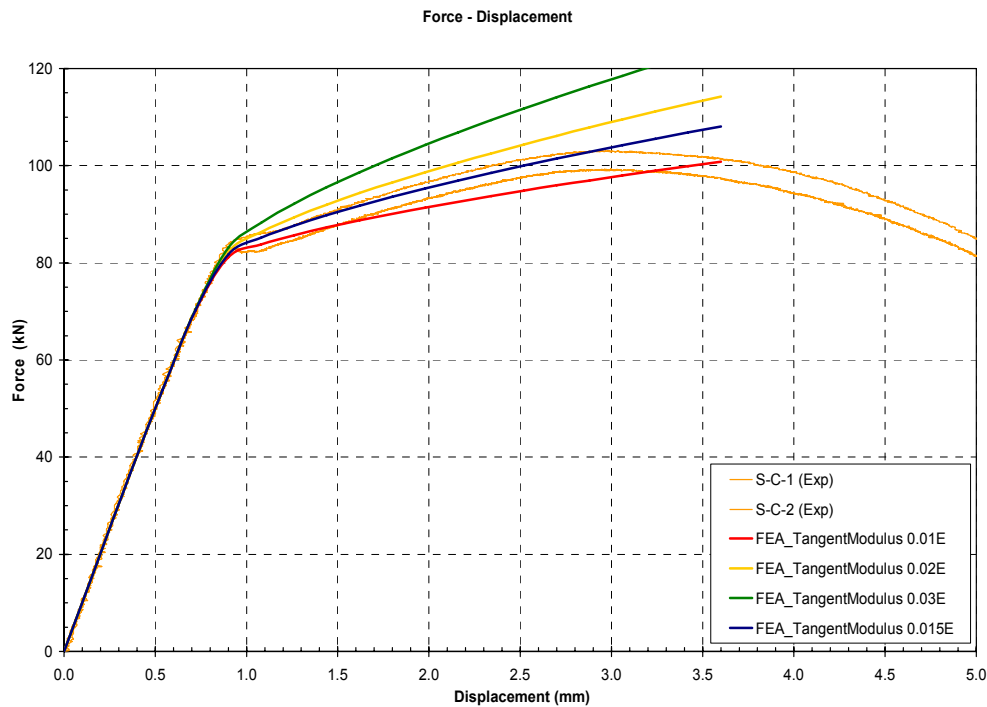
πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Analysis). Στη συνέχεια, εξάγοντας τα αποτελέσματα από την αντίστοιχη ανάλυση (FEA Results) δημιουργήθηκαν οι καμπύλες μεταβολής του φορτίου συναρτήσει της επιμήκυνσης για κάθε περίπτωση. Τέλος, παρατέθηκαν στις αντίστοιχες καμπύλες των πειραματικών αποτελεσμάτων για τα δοκίμια αναφοράς (Σχήμα 3.1.1). Με τον τρόπο αυτό προέκυψε το Σχήμα 3.1.3, με μελέτη του οποίου επιλέχτηκε η τιμή του μέτρου κράτυνσης ίση με ενάμιση τα εκατό του μέτρου ελαστικότητας (0.015E), δηλαδή 3000 MPa. Βάσει της επιλογής αυτής, ο χάλυβας προσομοιώνεται πλήρως στην ελαστική περιοχή, αλλά και στην πλαστική περιοχή για μετατόπιση έως και σχεδόν τα 3 mm. Βέβαια, το γεγονός ότι η περιοχή πλαστικής απόκρισης προσομοιώνεται κατά προσέγγιση και βάση των ρωγματωμένων πλακών χάλυβα ενδέχεται να ελλοχεύει ο κίνδυνος απόκλισης των αποτελεσμάτων του αριθμητικού μοντέλου σε σύγκριση με τα αντίστοιχα πειραματικά.



Σχήμα 3.1.1: Καμπύλες φορτίου–επιμήκυνσης για τα δοκίμια αναφοράς.



Σχήμα 3.1.2: Καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων (σ-ε) διγραμμικού υλικού.



Σχήμα 3.1.3: Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου–επιμήκυνσης για διάφορες τιμές του μέτρου κράτνσης.

Το επίθεμα από σύνθετα υλικά μοντελοποιήθηκε ως ομοιογενές γραμμικά ελαστικό, ορθοτροπικό υλικό με τις τιμές των μηχανικών του ιδιοτήτων διαφορετικές στις τρεις ορθοκανονικές διευθύνσεις του (τρία, κάθετα μεταξύ τους, επίπεδα συμμετρίας). Κατά συνέπεια, ορίστηκαν τα μέτρα ελαστικότητας E_x , E_y , E_z , οι λόγοι Poisson ν_{xy} , ν_{yz} , ν_{xz} και τα μέτρα διάτμησης G_{xy} , G_{yz} , G_{xz} .

Οι τιμές των ιδιοτήτων αυτών καθορίστηκαν είτε από δοκιμές χαρακτηρισμού (βλέπε εδάφιο 2.1.1), είτε από τιμές που προτείνονται στη βιβλιογραφία στις περιπτώσεις που δεν ήταν διαθέσιμα τέτοιου είδους στοιχεία. Το ύφασμα ινών άνθρακα Plain Weave είναι ισοσταθμισμένο, με αποτέλεσμα το σύνθετο υλικό (PW/HLU και PW/VI) να θεωρηθεί ότι έχει ίσο μέτρο ελαστικότητας κατά τις διευθύνσεις x και y. Για την περίπτωση του σύνθετου υλικού αποτελούμενο από μονοαξονικό ύφασμα ινών άνθρακα υψηλού μέτρου ελαστικότητας (UD-HM/HLU) θεωρήθηκε ίσο μέτρο ελαστικότητας κατά τις διευθύνσεις y και z. Η διεύθυνση x ορίζεται ως η διεύθυνση κατά μήκος του μοντέλου και κατ' επέκταση και του επιθέματος, η διεύθυνση y κατά το πλάτος του ενώ η διεύθυνση z κατά το πάχος του. Για το τελευταίο δεν ήταν δυνατή η μέτρηση των ιδιοτήτων του, με αποτέλεσμα το μέτρο ελαστικότητας κατά την διεύθυνση x να υπολογιστεί θεωρητικά με βάση την τελικά επιτευχθείσα κατά βάρος περιεκτικότητα των ινών και την αρχική που είχε μετρηθεί κατά τη δοκιμή χαρακτηρισμού του (βλέπε εδάφιο 2.1.1). Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για το σκοπό αυτό βασίστηκε στον γνωστό «Νόμο των Αναμειξεων» και στις σχέσεις μετατροπής μεταξύ των κατά βάρος και κατ' όγκο περιεκτικότητων των ινών και της ρητίνης [26], θεωρώντας γνωστή την κατά βάρος περιεκτικότητα των ινών από τις τιμές του Πίνακα 2.1.2, ίση με 42.2%. Να σημειωθεί ότι με τη διαδικασία αυτή υπολογίστηκε το μέτρο ελαστικότητας E_x του ενισχυτικού επιθέματος UD-HM/HLU.

Οι τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων που υιοθετήθηκαν στο αριθμητικό μοντέλο, για τα τρία είδη επιθεμάτων από σύνθετα υλικά, παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1.2, όπου η έντονη γραφή υποδηλώνει τιμές που μετρήθηκαν πειραματικά, ενώ οι υπόλοιπες προέκυψαν τόσο από τη βιβλιογραφία όσο και μέσω της διαδικασίας που αναφέρθηκε προηγουμένως, που η τελευταία υποδηλώνεται με λοξή γραφή.

Πίνακας 3.1.2: Αριθμητικές Τιμές Μηχανικών Ιδιοτήτων των Επιθεμάτων από Σύνθετα Υλικά.

Υλικό	E_x (MPa)	E_y (MPa)	E_z (MPa)	ν_{xy}	ν_{yz}	ν_{xz}	G_{xy} (MPa)	G_{yz} (MPa)	G_{xz} (MPa)
PW / HLU	42950	42950	5000	0.30	0.02	0.30	2400	1600	2400
PW / VI	62750	62750	5000	0.30	0.02	0.30	2400	1600	2400
UD-HM / HLU	<i>172184</i>	9700	9700	0.32	0.02	0.32	5500	3200	5500

Το κολλητικό μέσο (**adhesive**), που αποτελείται από εποξειδική ρητίνη σε μορφή φιλμ, μοντελοποιήθηκε ως γραμμικά ελαστικό, ισοτροπικό υλικό με μέτρο ελαστικότητας E και λόγο Poisson ν . Όπως αναφέρθηκε στο εδάφιο 2.1.1, χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι εποξειδικής ρητίνης για την κατασκευή των δοκιμίων, ένας γι' αυτά που αποτελούνται από το ύφασμα Plain Weave κι ένας για εκείνα με το μονοαξονικό ύφασμα της κατασκευάστριας εταιρίας SIKA. Τυπικές θεωρητικές τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων αναγράφονται στον Πίνακα 3.1.3. Οι τιμές αυτές προέρχονται για μεν τον πρώτο τύπο από τη βιβλιογραφία ενώ για το δεύτερο από το φύλλο ιδιοτήτων του κατασκευαστή.

Πίνακας 3.1.3: Αριθμητικές Τιμές Μηχανικών Ιδιοτήτων του Κολλητικού Μέσου.

Υλικό	E (MPa)	ν
Κολλητικό Μέσο ¹	4500	0.25
Κολλητικό Μέσο ²	3000	0.32

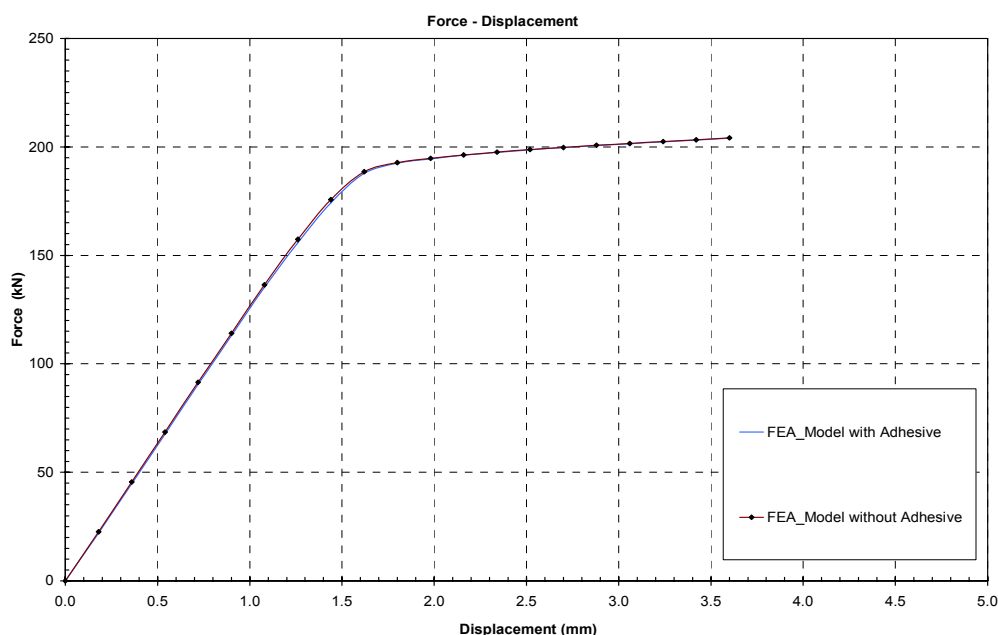
¹ Για τα Υλικά PW/HLU, PW/VI, από τη βιβλιογραφία

² Για το Υλικό UD-HM/HLU, από το φύλλο ιδιοτήτων της SIKA

Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι, αν και τόσο τα μέταλλα όσο και τα σύνθετα υλικά συμπεριφέρονται, γενικά, γραμμικά στην ελαστική περιοχή, οι ρητίνες παρουσιάζουν μη γραμμική συμπεριφορά [26]. Επιπλέον, η καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων μπορεί να μεταβάλλεται ανάλογα με τον ρυθμό επιβολής του φορτίου ή/ και με τη θερμοκρασία λειτουργίας της κατασκευής. Από την άλλη μεριά, στις περιπτώσεις όπου το κριτήριο σχεδίασης της επισκευής με τη χρήση επικολλημένων επιθεμάτων από σύνθετα υλικά, που αφορά στην φόρτιση του κολλητικού μέσου ικανοποιείται ($\gamma^A < \gamma^A_{max}$ έξω από μια περιοχή 0.2a, όπου 2a είναι το μήκος της ρωγμής, γ^A η διατμητική τάση που αναπτύσσεται στην κόλλα και γ^A_{max} είναι η μέγιστη επιτρεπόμενη [16]) ο υπολογισμός της μη γραμμικής συμπεριφοράς της ρητίνης δεν είναι απαραίτητος. Επιπροσθέτως, σύμφωνα με βιβλιογραφικές αναφορές [16] η προσομοίωση της κόλλας ως ένα μη γραμμικό υλικό, δεν μεταβάλλει τα αποτελέσματα για τη μεταλλική δομή της επισκευής. Συμπερασματικά, η γραμμική προσέγγιση της καμπύλης τάσεων

παραμορφώσεις της κόλλας που αντιστοιχεί στο δεδομένο ρυθμό επιβολής φορτίου είναι ικανοποιητική για την προσομοίωσή της στην ελαστική περιοχή.

Κατά συνέπεια, λαμβάνοντας υπ' όψη τα παραπάνω στοιχεία, η θεώρηση της στο αριθμητικό μοντέλο ως γραμμικά ελαστικό υλικό ενδέχεται να εισάγει κάποιου είδους σφάλματα στα εξαγόμενα αποτελέσματα, όσον αφορά στη σύγκρισή τους με τα αντίστοιχα πειραματικά. Τελικά όπως αποδεικνύεται στη συνέχεια, η μοντελοποίηση του λεπτού στρώματος ρητίνης μεταξύ του χάλυβα και του ενισχυτικού επιθέματος από σύνθετα υλικά, επηρεάζει σε πολύ μικρό βαθμό τα αποτελέσματα της ανάλυσης των πεπερασμένων στοιχείων. Έτσι λοιπόν, μετά τη διενέργεια δοκιμών σχετικά με την ύπαρξη ή μη του κολλητικού μέσου, συγκρίθηκαν οι καμπύλες φορτίου-επιμήκυνσης των αριθμητικών μοντέλων των δοκιμών S-C-HLU-1&2, στο ένα εκ των οποίων απουσίαζε η προσομοίωσή του. Όπως φαίνεται λοιπόν στο Σχήμα 3.1.4, η απόκλιση των δύο καμπύλων είναι αμελητέα, με αποτέλεσμα να συμπεράνουμε ότι ο ακριβής καθορισμός της μηχανικής συμπεριφοράς του κολλητικού μέσου είναι ελάχιστος σημασίας, καθώς επιπλέον, απουσιάζει η μοντελοποίηση κριτηρίων αστοχίας στο μοντέλο (βλέπε εδάφιο 3.1.6), σημείο στο οποίο θα έπαιζε σημαντικό ρόλο η προσομοίωση του κολλητικού μέσου, υπό την έννοια της μεταβολής των κατανομών των τάσεων.



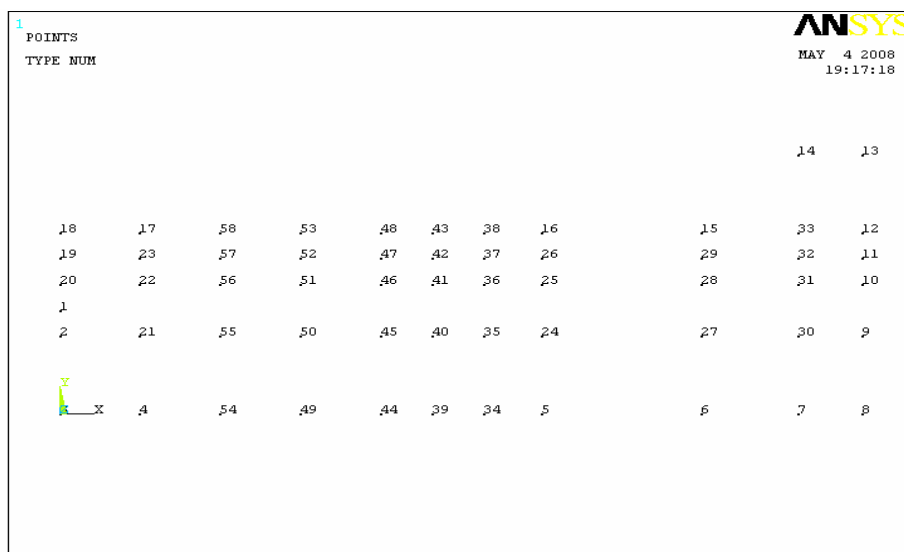
Σχήμα 3.1.4: Σύγκριση αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων με και χωρίς κολλητικό μέσο.

3.1.2 Γεωμετρία Μοντέλου

Αρχικά κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί ο τρόπος με τον οποίο δημιουργήθηκε το τρισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων που προσομοιώνει τα δοκίμια που εξετάστηκαν και στη συνέχεια να δοθούν όλα εκείνα τα στοιχεία σύμφωνα με τα οποία καθορίστηκε η τελική του μορφή. Η διαδικασία παραγωγής του μοντέλου περιλαμβάνει τα εξής στάδια

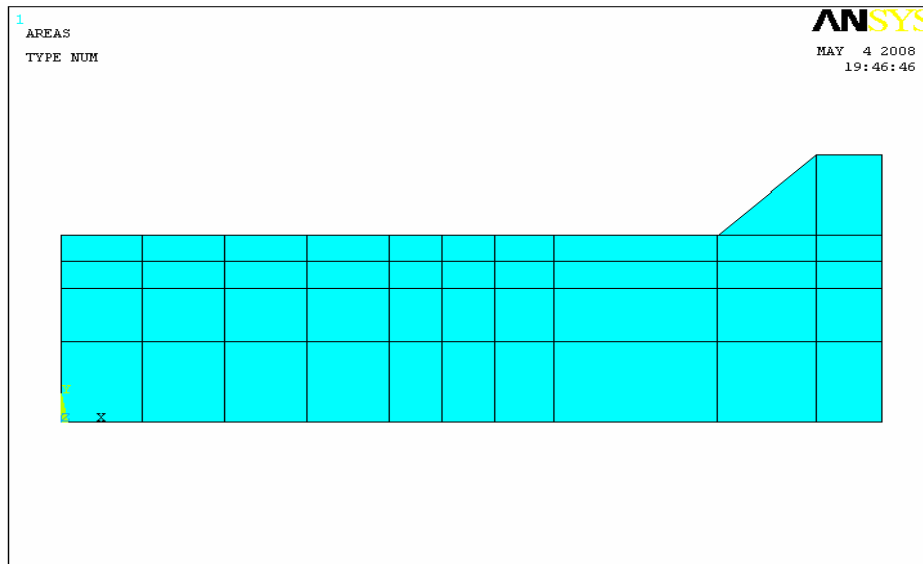
1. Καθορισμός σημείων (keypoints)
2. Δημιουργία επιφανειών (areas)
3. Δημιουργία όγκων (volumes)

Στο πρώτο στάδιο εισάγονται με τη μορφή συντεταγμένων στο x-y επίπεδο τα σημεία (keypoints) τα οποία οριοθετούν την επιφάνεια που πρόκειται να δημιουργηθεί. Η επιλογή των συντεταγμένων αυτών γίνεται με γνώμονα τις επιφάνειες που προκύπτουν όταν αυτά ενωθούν και στη συνέχεια οδηγήσουν στη δημιουργία των επιθυμητών όγκων όπως επίσης και την ύπαρξη κόμβου σε συγκεκριμένη θέση στον κάρναβο των πεπερασμένων στοιχείων. Κατά συνέπεια, τα σημεία αυτά οριοθετούν την περιοχή του χαλύβδινου τμήματος των δοκιμίων, καθώς και αυτή του κολλητικού μέσου και του ενισχυτικού επιθέματος. Επίσης, η ανάγκη ύπαρξης κόμβου σε συγκεκριμένη θέση θα αναλυθεί σε επόμενη παράγραφο και αφορά στην εξαγωγή των αποτελεσμάτων επι των θέσεων των ηλεκτρικών επιμηκυνσιομέτρων (εδάφιο 3.1.6). Το σύνολο των σημείων που χρησιμοποιήθηκαν φαίνεται στο Σχήμα 3.1.5.



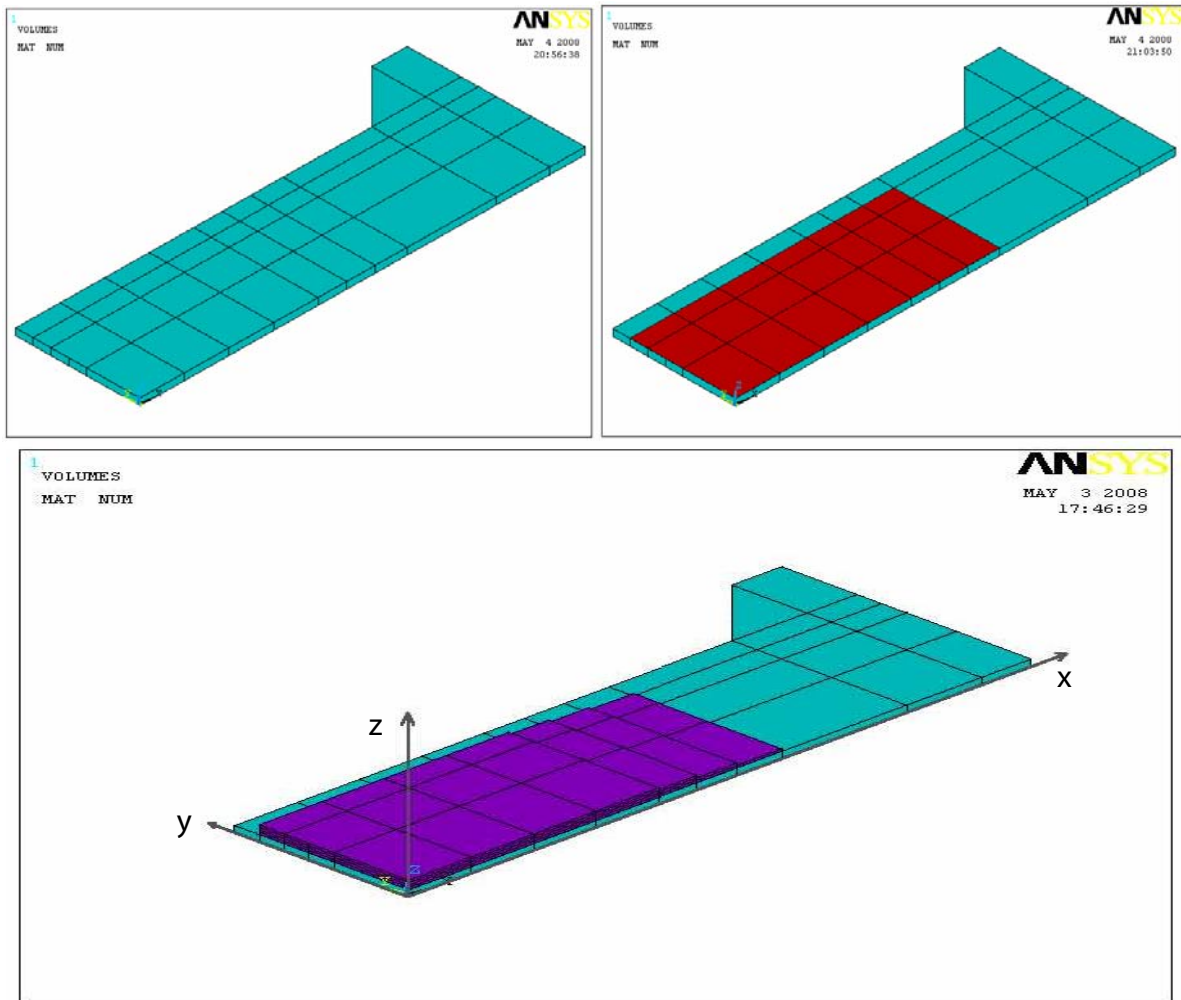
Σχήμα 3.1.5: Δημιουργία σημείων (keypoints) της επιφάνειας. Αύζοντες αριθμοί κόμβων.

Στο δεύτερο στάδιο ενώνονται τα σημεία έτσι ώστε να δημιουργηθούν οι επιθυμητές επιφάνειες (areas). Αποτέλεσμα της διαδικασίας αυτής είναι η δημιουργία ενός δισδιάστατου μοντέλου χωρισμένο σε πολλές μικρότερες επιφάνειες όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1.6. Εξαιτίας της ύπαρξης συμμετρίας στη γεωμετρία των δοκιμών αλλά και για μείωση της απαιτούμενης υπολογιστικής ισχύος μοντελοποιήθηκε, με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, μόνο το ένα τέταρτο της συνολικής γεωμετρίας (Σχήμα 3.1.6).



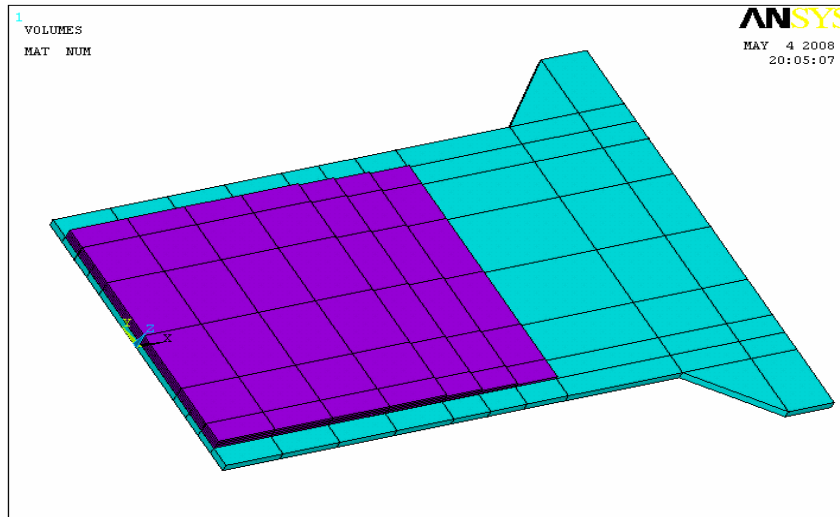
Σχήμα 3.1.6: Δημιουργία επιφανειών (areas).

Η ανάγκη δημιουργίας ενός τέτοιου δισδιάστατου μοντέλου χωρισμένου σε πολλές μικρότερες επιφάνειες οφείλεται στον τρόπο δημιουργίας του τρισδιάστατου μοντέλου, δηλαδή των όγκων (volumes), που αποτελεί το τρίτο και τελευταίο στάδιο. Κατά το στάδιο αυτό γίνεται προεκβολή κατά τη διεύθυνση του πάχους (διεύθυνση z), των κατάλληλων επιφανειών ώστε να προκύψει η τελική μορφή του μοντέλου. Αρχικά δημιουργήθηκε ο όγκος της μεταλλικής πλάκας με προεκβολή της συνολικής επιφάνειας που έχει κατασκευαστεί και απεικονίζεται με μπλε χρώμα στο Σχήμα 3.1.7. Στη συνέχεια επιλέγοντας τις επιφάνειες που αντιστοιχούν στην έκταση του κολλητικού μέσου και με την αντίστοιχη προεκβολή τους δημιουργείται το αντίστοιχο στρώμα, που απεικονίζεται στο σχήμα με κόκκινο χρώμα. Τέλος, για να δημιουργηθεί ο όγκος του επιθέματος (μωβ χρώμα) επιλέχθηκαν και έγινε η προεκβολή εκείνων των επιφανειών που αποτελούσαν κάθε φορά την έκταση της αντίστοιχου μήκους ομάδας στρώσεων (βλέπε εδάφιο 2.1.3). Από την περιγραφή της παραπάνω διαδικασίας είναι φανερός ο σκοπός για τον οποίο αρχικά η συνολική επιφάνεια χωρίστηκε σε πολλές επιμέρους. Στο Σχήμα 3.1.7 φαίνονται τα στάδια κατασκευής, η τελική μορφή του μοντέλου και καθορίζονται οι άξονες x, y και z.



Σχήμα 3.1.7: Δημιουργία όγκων (volumes).

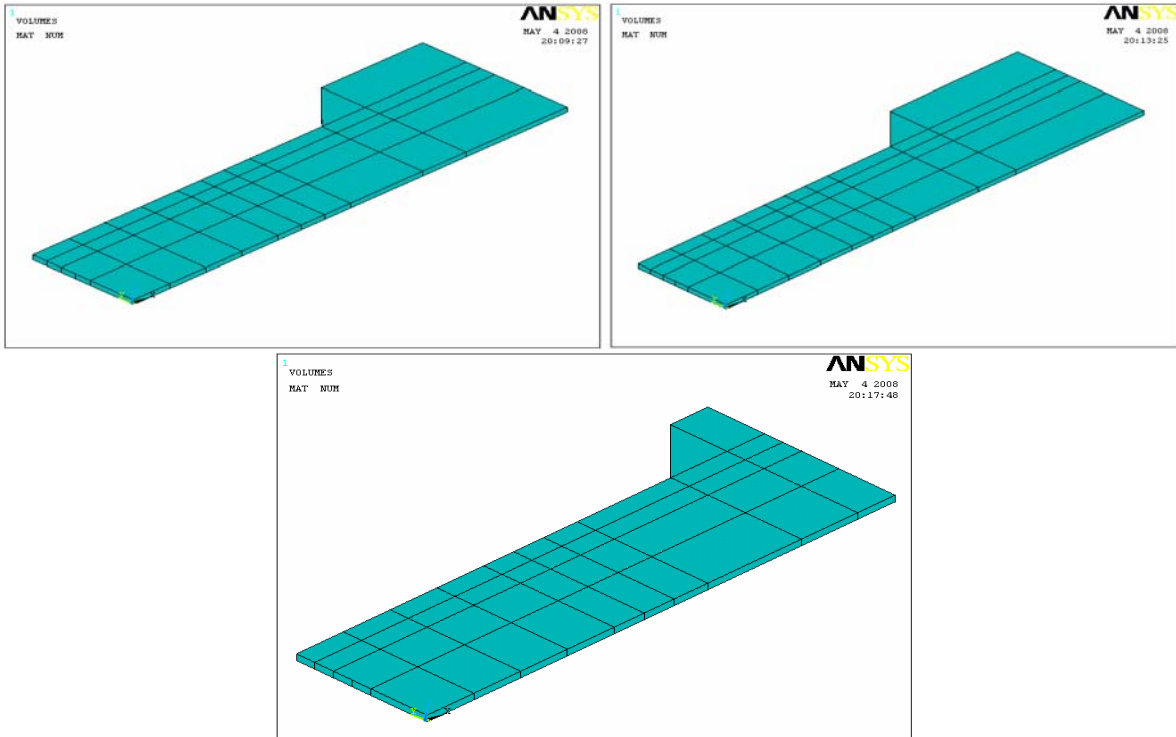
Για να εξακριβωθεί η ορθότητα της συγκεκριμένης μεθόδου μοντελοποιήθηκε και η μισή γεωμετρία παράγοντας το αντίστοιχο μοντέλο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1.8. Στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι δυνάμεις αντίδρασης στα αντίστοιχα μοντέλα (διαδικασία που θα αναλυθεί στην παράγραφο 3.1.6), με αποτέλεσμα να προκύψουν τιμές αντίστοιχες του μεγέθους της γεωμετρίας του μοντέλου, δηλαδή η τιμή στο μισό μοντέλο να είναι διπλάσια αυτής του ενός τετάρτου. Με τον τρόπο αυτό προέκυψε το συμπέρασμα ότι η μέθοδος μοντελοποίησης είναι σωστή. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι τιμές των διαστάσεων που δίνονται στη συνέχεια είναι ανάλογες με τον τρόπο μοντελοποίησης που επιλέχθηκε.



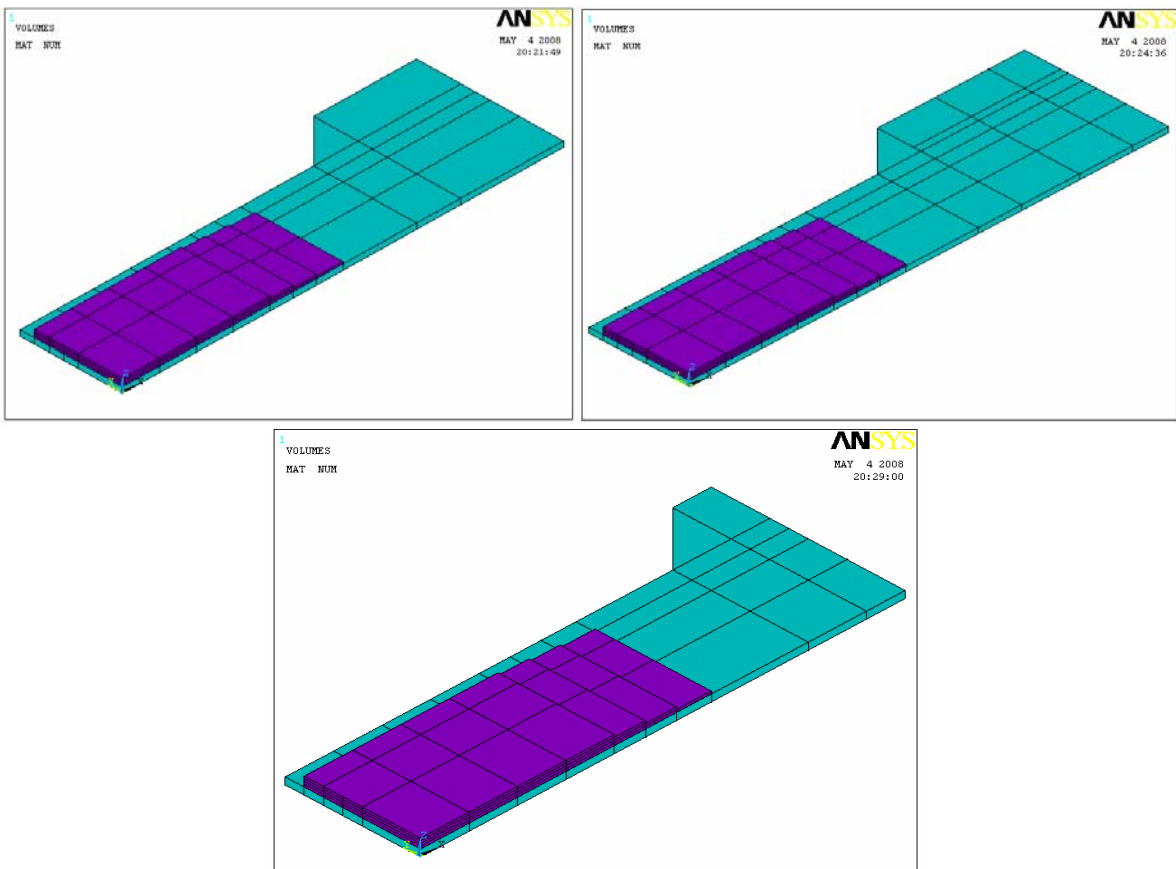
Σχήμα 3.1.8: Μοντελοποίηση της μισής γεωμετρίας.

Οι τιμές των γεωμετρικών διαστάσεων που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται τόσο από πειραματικά μετρούμενες, όσο και από ονομαστικές. Πιο συγκεκριμένα, η τιμή του πλάτους W_s και του πάχους t_s του χάλυβα προέρχεται από τις τιμές του Πίνακα 2.1.3 θεωρώντας το μέσο όρο αυτών για το κάθε δοκίμιο. Επίσης, από τον Πίνακα 2.1.2 προέρχεται η τιμή για το πάχος των επιθεμάτων t_p , θεωρώντας ως πάχος κάθε ομάδας στρώσεων το ένα τέταρτο του συνολικού πάχους t_p . Το μήκος της πρώτης ομάδας στρώσεων είναι 200 mm, της δεύτερης 232 mm, της τρίτης 264 mm και της τέταρτης 300 mm. Κατασκευαστικές λεπτομέρειες δίνονται στο εδάφιο 2.1.3. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1.7, η διάταξη των διαφορετικών ομάδων στρώσεων είναι αντίθετη από αυτή που εφαρμόστηκε στην πραγματικότητα, γεγονός που δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα που προκύπτουν και οφείλεται στον τρόπο παραγωγής του με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων. Το πάχος του κολλητικού μέσου θεωρήθηκε ίσο με 0.1 mm, ενώ το μήκος του ταυτίζεται με εκείνο της τέταρτης ομάδας στρώσεων. Το πλάτος του κολλητικού μέσου ταυτίζεται με εκείνο του επιθέματος και είναι ίσο με 120 mm. Να σημειωθεί ότι οι τιμές για τα πάχη χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διαδικασία της προεκβολής όπως αναλύθηκε παραπάνω. Για τις υπόλοιπες διαστάσεις θεωρήθηκαν οι ονομαστικές τιμές όπως αυτές δίνονται στο εδάφιο 2.1.2 (Σχήμα 2.1.1), θεωρώντας το $\frac{1}{4}$ της συνολικής γεωμετρίας.

Για την επιλογή του μήκους του μοντέλου πραγματοποιήθηκε μια σειρά δοκιμών που περιελάμβαναν τη δημιουργία τριών διαφορετικών μοντέλων με μήκη που ξεκινούσαν από τα 250 mm μέχρι τα 331 mm. Αρχικά, επιλέχθηκε η τιμή των 250 mm που προκύπτει από το σημείο στο οποίο σταματάνε οι ειδικοί προσαρμογείς που συγκρατούν το δοκίμιο στις αρπάγες της υδραυλικής μηχανής εφελκυσμού και στο οποίο ο χάλυβας μένει ελεύθερος (βλέπε Σχήμα 2.1.2). Κατόπιν, επιλέχθηκε η τιμή των 331 mm που προκύπτει από το ονομαστικό μήκος των δοκιμών. Τέλος, δημιουργήθηκε ένα μοντέλο με μήκος 300 mm, θεωρώντας μια ενδιάμεση τιμή μεταξύ των δύο παραπάνω ακραίων. Τα μοντέλα που δημιουργήθηκαν φαίνονται στα Σχήματα 3.1.9 και 3.1.10 και αναφέρονται τόσο στα δοκίμια αναφοράς (S-C-1&2) όσο και στα δοκίμια με ενισχυτικό επίθεμα S-C-HLU-1&2.

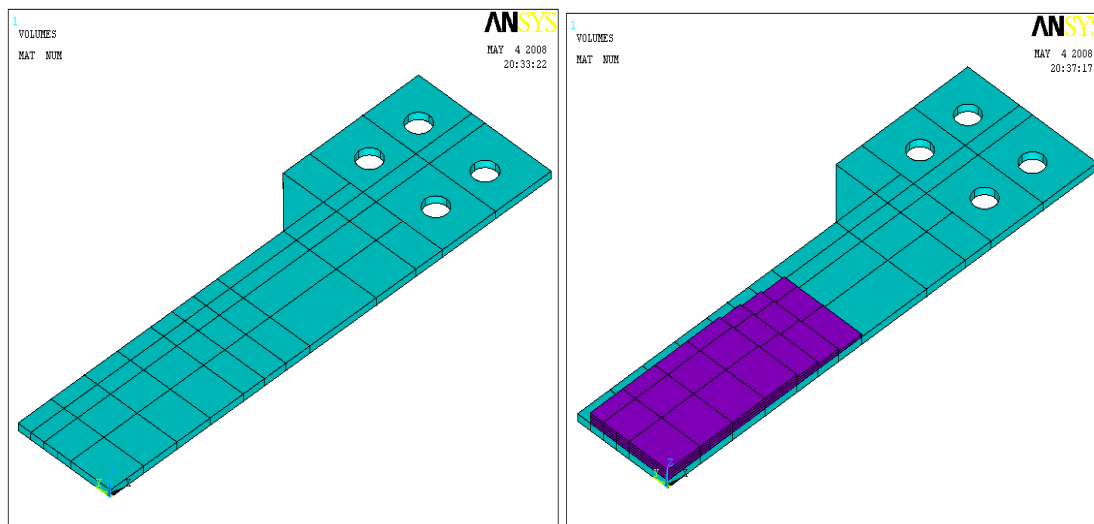


Σχήμα 3.1.9: Μοντέλα για τα δοκίμια αναφοράς μήκους 300 mm (αριστερά), 331 mm (δεξιά) και 250 mm (κάτω).



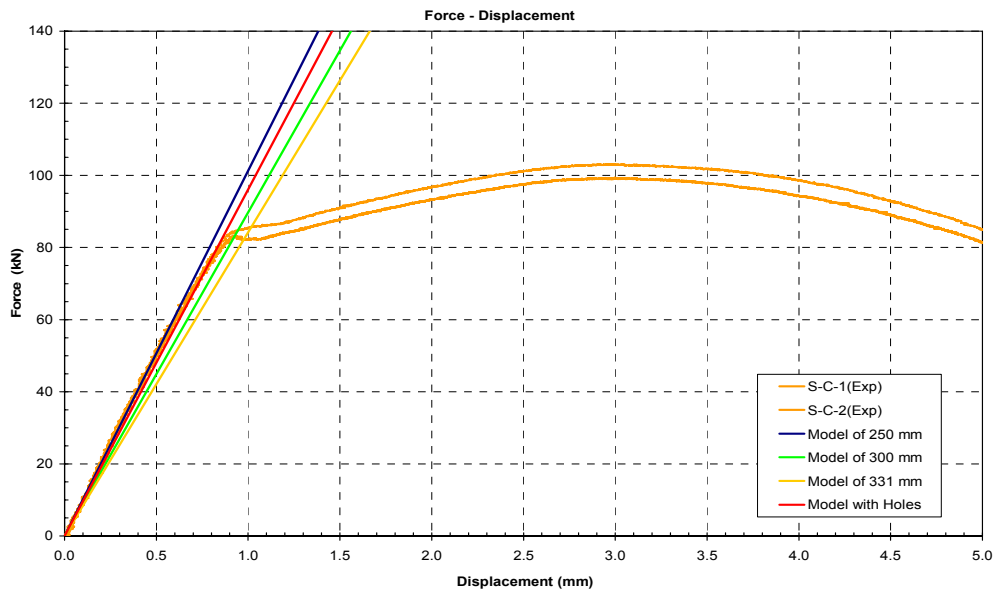
Σχήμα 3.1.10: Μοντέλα για τα δοκίμια S-C-HLU-1&2 μήκους 300 mm (αριστερά), 331 mm (δεξιά) και 250 mm (κάτω).

Επίσης, για λόγους πληρότητας, κατασκευάστηκε ένα μοντέλο που προσομοιώνε επακριβώς την πλήρη γεωμετρία των δοκιμίων. Επομένως, στο μοντέλο με το πλήρες μήκος προστέθηκαν οι οπές διάστασης $\Phi 16$ που απαιτούνται για να περάσουν οι κοχλίες που συνδέουν το δοκίμιο με τους ειδικούς προσαρμογείς. Η γεωμετρία περιγράφεται αναλυτικά στο εδάφιο 2.1.2 ενώ οι απαραίτητες διαστάσεις δίνονται στο Σχήμα 2.1.1. Τα μοντέλα που προέκυψαν φαίνονται στο Σχήμα 3.1.11.

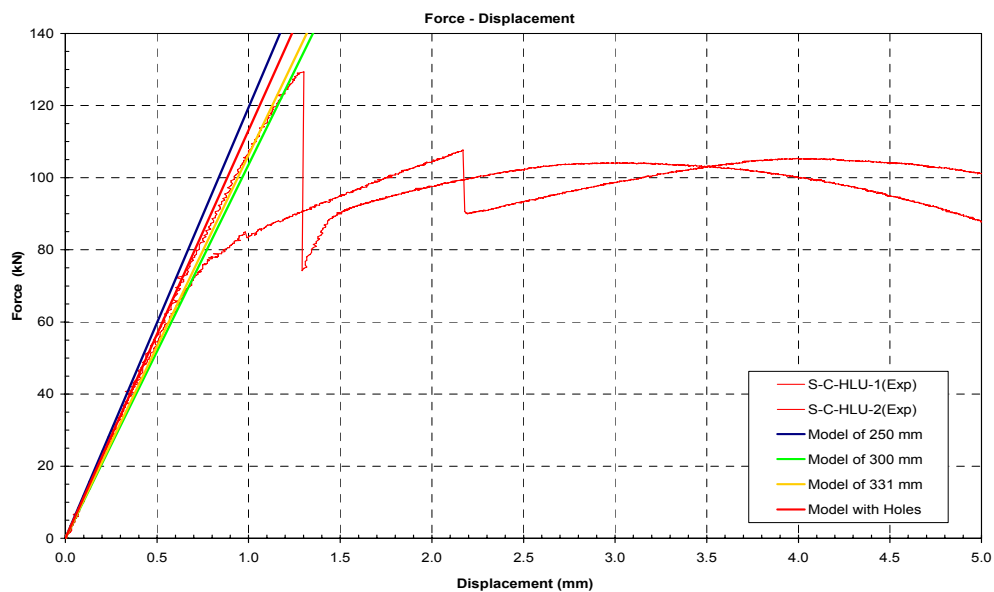


Σχήμα 3.1.11: Μοντέλα με οπές για τα δοκίμια αναφοράς (αριστερά) και τα δοκίμια S-C-HLU-1&2 (δεξιά).

Η τελική επιλογή της γεωμετρίας που υιοθετήθηκε για την προσομοίωση των πειραματικών δοκιμίων βασίστηκε σε γραμμικές αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων (βλέπε εδάφιο 3.2.5) στα μοντέλα, τόσο για τα δοκίμια αναφοράς S-C-1&2 όσο και για τα δοκίμια με ενισχυτικό επίθεμα S-C-HLU-1&2, και συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν. Η σύγκριση έγινε υπό τη μορφή διαγραμμάτων φορτίου-επιμήκυνσης με ταυτόχρονη παράθεσή τους στα αντίστοιχα πειραματικά. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1.12 και 3.1.13 αντίστοιχα, οι διαφορές που παρατηρούνται είναι μικρές με καλύτερη προσομοίωση του φαινομένου από το μοντέλο μήκους 250 mm και αυτό με τις οπές, όσον αφορά στο μοντέλο των δοκιμίων αναφοράς (Σχήμα 3.1.12). Επίσης, από την παρατήρηση των τελευταίων διαγραμμάτων (Σχήμα 3.1.12) προκύπτει το συμπέρασμα ότι η μοντελοποίηση είναι σωστή καθώς η τιμή του αρχικού μήκους είναι αντιστρόφως ανάλογη της τιμής του φορτίου που ασκείται (Νόμος του Hooke $\sigma = E \cdot \varepsilon$ με $\varepsilon = \frac{l}{l_0}$, όπου l η επιμήκυνση και l_0 το αρχικό μήκος). Βέβαια, με γνώμονα την απλότητα της κατασκευής και τη διατήρηση της υπολογιστικής ισχύος σε χαμηλά επίπεδα, θεωρήθηκε ως μήκος του μοντέλου τα 250 mm, διατηρώντας αυτούσια τη γεωμετρία σε όλο αυτό το μήκος.



Σχήμα 3.1.12: Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου-επιμήκυνσης για τα δοκίμια αναφοράς για την επιλογή της γεωμετρίας του μοντέλου.



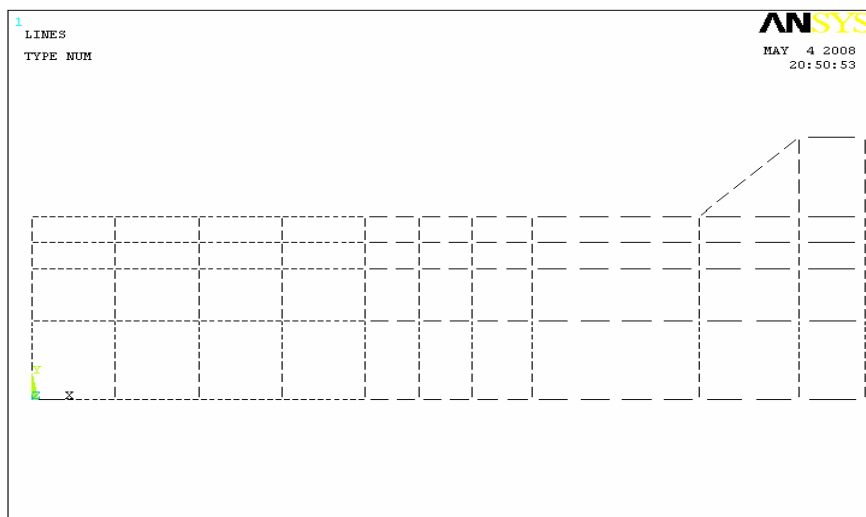
Σχήμα 3.1.13: Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου-επιμήκυνσης για τα δοκίμια S-C-HLU-1&2 για την επιλογή της γεωμετρίας του μοντέλου.

3.1.3 Επιλογή στοιχείων- Διακριτοποίηση

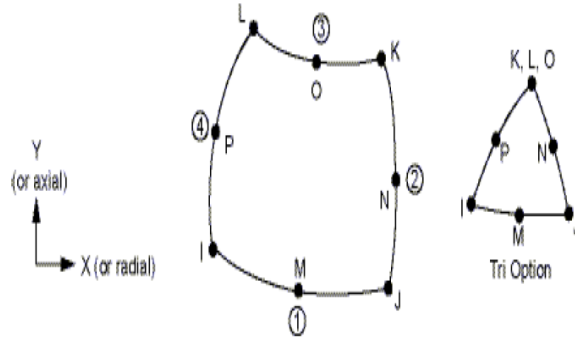
Η επιλογή των κατάλληλων στοιχείων για τη δημιουργία ενός μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων είναι πολύ σημαντική για την πιστότερη προσομοίωση του φαινομένου που εξετάζεται και την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων που προκύπτουν. Ειδικότερα, στην παρούσα γεωμετρία, η ύπαρξη της ρωγμής στο χάλυβα εισάγει έναν επιπλέον βαθμό δυσκολίας στον τρόπο μοντελοποίησης. Κατά συνέπεια, στην παράγραφο αυτή θα

περιγράφουν τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν και θα δοθούν λεπτομέρειες για τον τρόπο δημιουργίας του τρισδιάστατου μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων που περιγράφει τα πειραματικά δοκίμια.

Η διαδικασία ξεκινάει από το δισδιάστατο μοντέλο που, με γνώμονα τη δημιουργία ενός ομοιόμορφου καννάβου και την ανάγκη για ύπαρξη κόμβων σε συγκεκριμένες θέσεις, που θα χρειαστούν για την εξαγωγή αποτελεσμάτων (βλέπε εδάφιο 3.1.6). Για το σκοπό αυτό γίνεται διακριτοποίηση των γραμμών του δισδιάστατου μοντέλου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1.14. Η ανάγκη ύπαρξης του βήματος αυτού προκύπτει από τον τρόπο δημιουργίας του τρισδιάστατου μοντέλου, όπως αυτός αναλύθηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Επομένως, η χρήση του δισδιάστατου στοιχείου PLANE 82 (Σχήμα 3.1.15), όπως ονομάζεται στο ANSYS, είναι αναγκαία για την παραγωγή του μοντέλου. Το στοιχείο αυτό αποτελείται από οχτώ κόμβους (8-node), με δύο βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο (2 μετατοπίσεις). Η χρήση του χαρακτηρίζεται ως βοηθητική καθώς, όπως εξελίσσεται η πορεία δημιουργίας του μοντέλου, η επιφάνεια μετατρέπεται σε όγκο, μέσω της διαδικασίας της προεκβολής, με αποτέλεσμα η επιφάνεια και τα δισδιάστατα στοιχεία να παύουν να υπάρχουν και να μην παίζουν κανένα ρόλο στη διαδικασία της κυρίως επίλυσης. Βέβαια η διακριτοποίηση που έγινε στο δισδιάστατο μοντέλο παραμένει η ίδια και στο τρισδιάστατο μοντέλο που προκύπτει με τη διαδικασία αυτή. Τέλος, πρέπει να τονιστεί η αναγκαιότητα της άψογης συνεργασίας με τα τρισδιάστατα στοιχεία που θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια, όπως αυτή εκφράζεται μέσω του κοινού αριθμού κόμβων σε κάθε πλευρά και των κοινών χαρακτηριστικών.

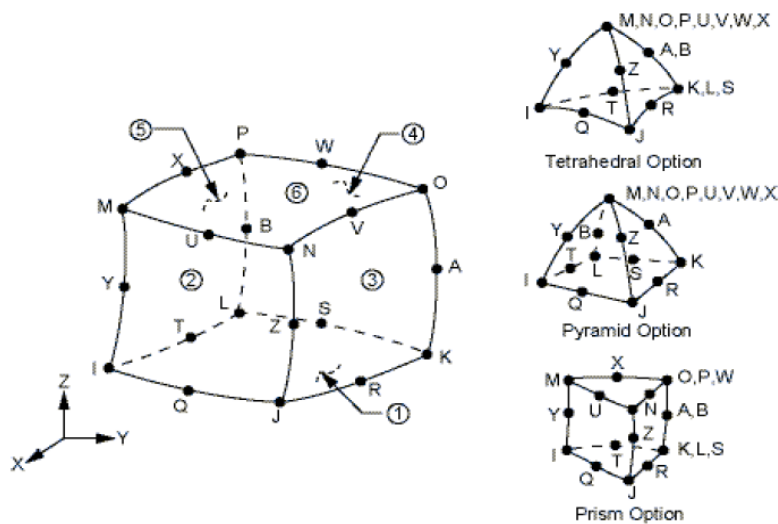


Σχήμα 3.1.14: Διακριτοποίηση των γραμμών του δισδιάστατου μοντέλου.



Σχήμα 3.1.15: Γεωμετρία στοιχείου PLANE 82.

Τα τρισδιάστατα στερεά στοιχεία (solid elements) που χρησιμοποιήθηκαν, είναι τα στοιχεία είκοσι κόμβων (20-node) SOLID95 (Σχήμα 3.1.16), τα οποία έχουν τρεις βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο (μετατοπίσεις κατά τις διευθύνσεις x , y και z) και μπορούν να προσομοιώσουν ορθοτροπικά υλικά, γεγονός το οποίο συνάδει με την μηχανική συμπεριφορά του επιθέματος από σύνθετα υλικά. Το στοιχείο SOLID95 έχει επιπλέον χαρακτηριστικά, μεταξύ άλλων, πλαστικότητα, μεγάλων εκτροπών και μεγάλων παραμορφώσεων. Επίσης, πρέπει να σημειωθεί η άψογη συνεργασία με το στοιχείο PLANE82 καθώς έχουν τον ίδιο αριθμό κόμβων σε κάθε πλευρά και τα ίδια χαρακτηριστικά. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι τα συγκεκριμένα στοιχεία προτιμήθηκαν έναντι των αντίστοιχων ειδικών τρισδιάστατων στρωσιγενών στοιχείων (στην προσομοίωση του επιθέματος) που αναφέρθηκαν στο εδάφιο 1.1, εξαιτίας της αδυναμίας του ANSYS να συνδυάσει τη θεωρία μεγάλων παραμορφώσεων με τα στοιχεία αυτά, χαρακτηριστικό που κρίνεται απαραίτητο για την παρούσα ανάλυση (βλέπε εδάφιο 3.1.5).

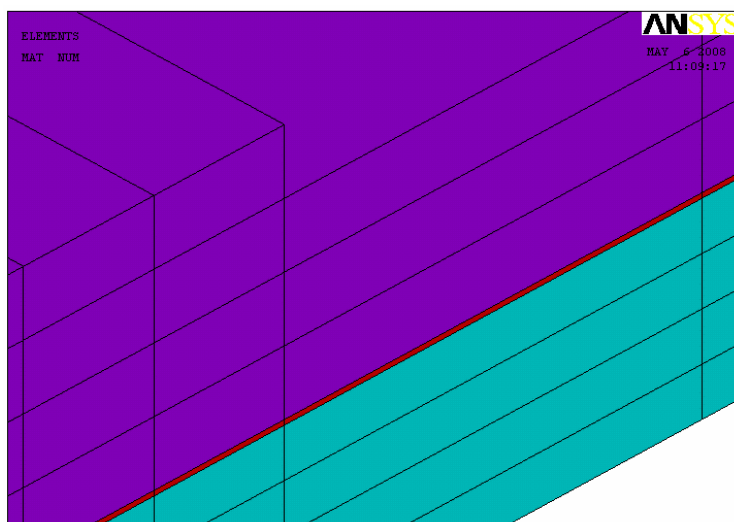


Σχήμα 3.1.16: Γεωμετρία στοιχείου SOLID95.

Βέβαια, πρέπει να τονιστεί ότι με τη μέθοδο που δημιουργούνται οι όγκοι έτσι ώστε να προκύψει το τελικό τρισδιάστατο μοντέλο (προεκβολή στη διεύθυνση του πάχους), γίνεται και ταυτόχρονη προβολή των αντίστοιχων στοιχείων κατά το πάχος. Αυτό έχει ως

αποτέλεσμα για κάθε όγκο, που αντιπροσωπεύει και ένα διαφορετικό υλικό (χάλυβας, ρητίνη και σύνθετο υλικό), να δημιουργούνται διαφορετικοί κόμβοι που όμως έχουν τις ίδιες συντεταγμένες. Για να επιτευχθεί λοιπόν συνέχεια μεταξύ των στρώσεων των διαφορετικών υλικών και το μοντέλο να συμπεριφέρεται ως ενιαίος όγκος στη φόρτιση που θα του επιβληθεί, θα πρέπει να γίνει συγχώνευση των κόμβων αυτών. Επομένως, πραγματοποιείται συγχώνευση των ανώτερων κόμβων του χάλυβα με τους κατώτερους κόμβους της ρητίνης και των κατώτερων κόμβων του σύνθετου υλικού με τους ανώτερους κόμβους της ρητίνης. Επίσης, η παραπάνω διαδικασία πραγματοποιείται και μεταξύ των στρώσεων που αποτελούν το σύνθετο υλικό. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η επιθυμητή συνέχεια μεταξύ των διαφορετικών υλικών και λαμβάνονται αποτελέσματα που αφορούν το σύνολο της κατασκευής (εξασφάλιση της συνέχειας των τροπών).

Ο αριθμός των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διεύθυνση του πάχους (διεύθυνση z), για την προσομοίωση του χαλύβδινου τμήματος των δοκιμών προέκυψε από παραμετρική μελέτη που έγινε [29] και θεωρήθηκε ίσος με τέσσερα. Η τιμή αυτή κρίθηκε απαραίτητη ώστε να υπολογιστεί με ακρίβεια η ανομοιόμορφη κατανομή του Συντελεστή Έντασης Τάσης κατά την διεύθυνση του πάχους σε μια ρωγματομένη χαλύβδινη πλάκα που έχει ενισχυθεί με επίθεμα από σύνθετα υλικά. Για την προσομοίωση του κολλητικού μέσου χρησιμοποιήθηκε ένα στοιχείο, ενώ για το ενισχυτικό επίθεμα χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα στοιχεία, ένα για κάθε ομάδα στρώσεων διαφορετικού μήκους (βλέπε εδάφιο 2.1.3). Στο Σχήμα 3.1.17 φαίνεται συνολικά ο αριθμός των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο κατά τη διεύθυνση του πάχους, όπου με μπλε χρώμα συμβολίζεται ο χάλυβας, με κόκκινο το κολλητικό μέσο και με μωβ το ενισχυτικό επίθεμα.

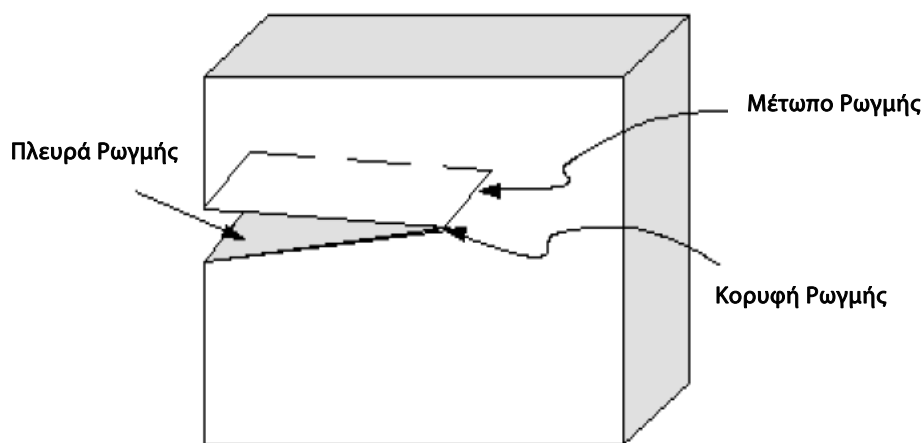


Σχήμα 3.1.17: Αριθμός στοιχείων κατά τη διεύθυνση του πάχους.

Σύμφωνα με τη διακριτοποίηση που έγινε, το μέγεθος των στοιχείων κατά τις x και y διευθύνσεις ποικίλει ανάλογα με την περιοχή που εξετάζεται, διότι σε περιοχές που απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια στα εξαγόμενα αποτελέσματα είναι προτιμητέα η αύξηση

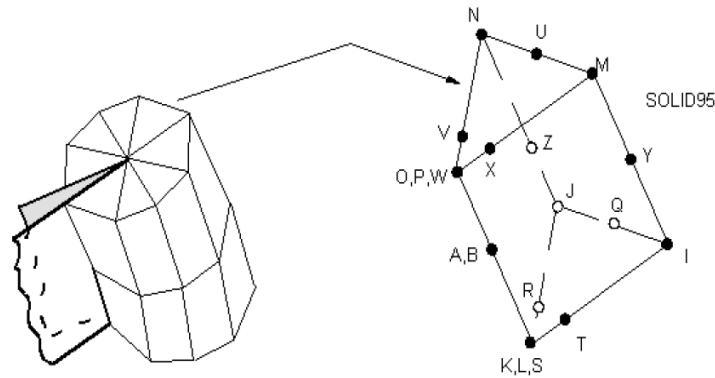
του αριθμού των στοιχείων. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται τη δημιουργία ενός λεπτότερου καννάβου πεπερασμένων στοιχείων σε περιοχές μεγαλύτερου ενδιαφέροντος και μεγαλύτερης πολυπλοκότητας του φαινομένου που εμφανίζεται κατά τη διάρκεια της φόρτισης. Μια τέτοια περιοχή είναι η περιοχή της ρωγμής, με αποτέλεσμα το μέγεθος των στοιχείων να κυμαίνεται από 1.25 mm κοντά στο άκρο αυτής έως 5.67 mm. Επειδή όμως αύξηση του αριθμού των στοιχείων σημαίνει και αύξηση της υπολογιστικής ισχύος, επιλέγεται σε περιοχές χαμηλότερης πολυπλοκότητας το μέγεθος των στοιχείων να είναι μεγαλύτερο, γεγονός που σημαίνει μείωση του αριθμού τους. Κατά συνέπεια, το μέγεθος των στοιχείων μακριά από την περιοχή της ρωγμής κυμαίνεται από 9 mm έως 20 mm. Με τον τρόπο αυτό παραμένει η υπολογιστική ισχύς και ως εκ τούτου και ο χρόνος υπολογισμού σε επιτρεπτά επίπεδα.

Τέλος, θα πρέπει να αναλυθεί λεπτομερώς ο τρόπος με τον οποίο έγινε η μοντελοποίηση της ρωγμής καθώς, όπως υπονοήθηκε προηγουμένως, η πιο σημαντική περιοχή σε ένα τρισδιάστατο μοντέλο θραύσης είναι η περιοχή γύρω από το μέτωπο της ρωγμής (Σχήμα 3.1.18).



Σχήμα 3.1.18: Μορφολογία και Γεωμετρία της Ρωγμής.

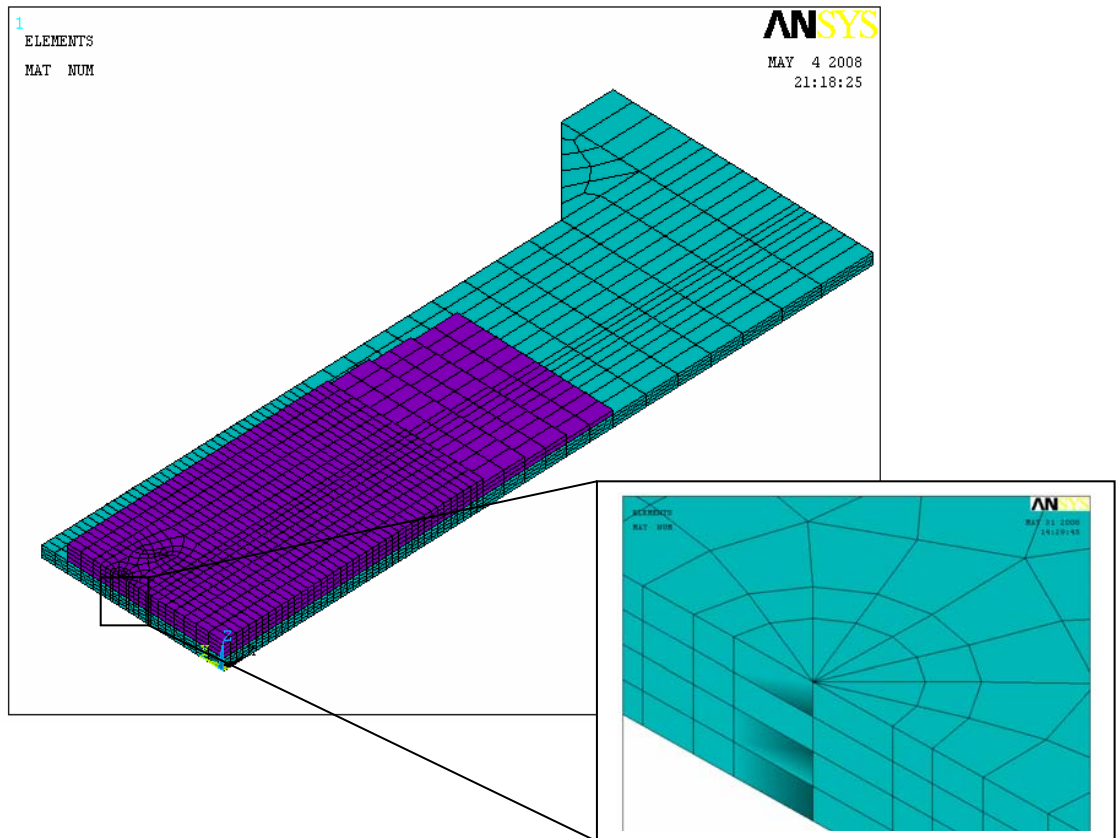
Στα προβλήματα στην περιοχή της γραμμικής ελαστικότητας έχει αποδειχθεί ότι το πεδίο των μετατοπίσεων κοντά στο μέτωπο της ρωγμής μεταβάλλεται ανάλογα με την ποσότητα $r^{1/2}$, όπου r είναι η απόσταση από το μέτωπο της ρωγμής. Το πεδίο των τάσεων και των παραμορφώσεων είναι ιδιόμορφο στην περιοχή αυτή και μεταβάλλεται ανάλογα με την ποσότητα $r^{-1/2}$. Για να αντιμετωπιστεί η ιδιομορφία των πεδίων αυτών, πρέπει οι πλευρές της ρωγμής να συμπίπτουν και τα στοιχεία γύρω από το μέτωπο της ρωγμής να είναι μη γραμμικά (quadratic), με τους μεσαίους κόμβους να είναι τοποθετημένοι στο $1/4$ της πλευράς, δηλαδή στο $1/4$ της απόστασης από το άκρο της ρωγμής. Τα στοιχεία αυτά ονομάζονται ιδιόμορφα (singular elements), με την γεωμετρία των ιδιόμορφων στοιχείων SOLID95 που χρησιμοποιήθηκαν να απεικονίζεται στο Σχήμα 3.1.19. [32]



Σχήμα 3.1.19: Γεωμετρία ιδιόμορφου στοιχείου SOLID95.

Σύμφωνα με παραμετρική μελέτη που έγινε [29], καθορίστηκε ο αριθμός των ιδιόμορφων στοιχείων γύρω από το άκρο της ρωγμής ίσος με 8. Η τιμή αυτή προκύπτει καθώς από την τιμή αυτή και πάνω οι τιμές του Συντελεστή Έντασης Τάσης συγκλίνουν ενώ ταυτόχρονα ικανοποιείται η συνθήκη της θεωρίας πεπερασμένων στοιχείων που ορίζει ως ελάχιστη γωνία τριγωνικών στοιχείων τις 15° (με την επιλογή 8 στοιχείων η γωνία αυτή ισούται με 22.5°). Η ίδια μελέτη καταλήγει επίσης ότι το μήκος των στοιχείων αυτών, που δίνεται ως ακτίνα καθώς τα στοιχεία αυτά διατάσσονται περιφερειακά του άκρου της ρωγμής και ταυτίζεται με τις πλευρές των ισοσκελών τριγώνων που σχηματίζονται, είναι ίσο με το $\frac{1}{16}$ του μήκους της ρωγμής a . Οι παραπάνω παράμετροι όπως επίσης και η τελική μορφή του καννάβου πεπερασμένων στοιχείων για το τρισδιάστατο μοντέλο παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.1.19a.

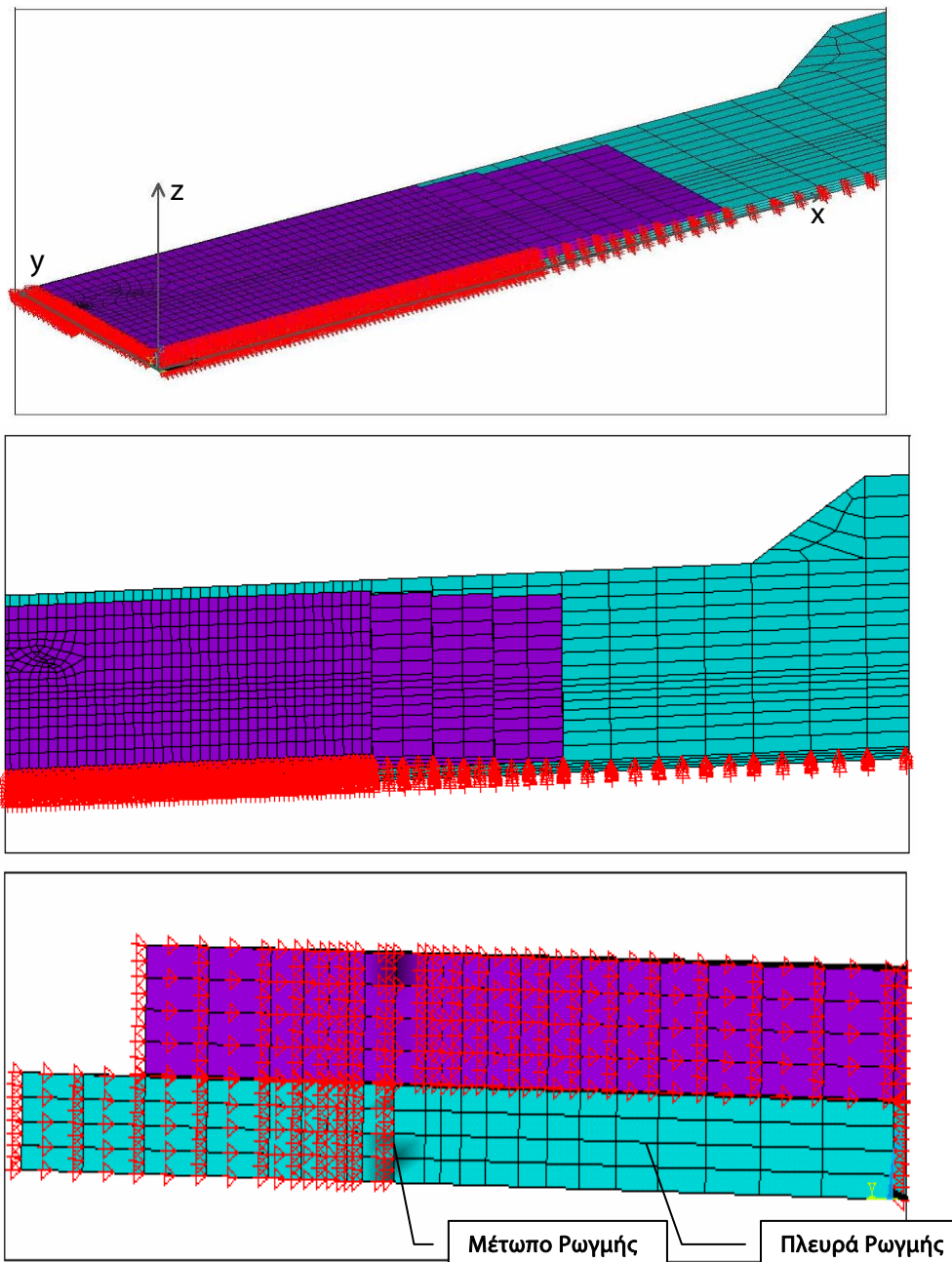
Ο τρόπος με τον οποίο δημιουργήθηκε ο όγκος του χάλυβα (προεκβολή κατά την διεύθυνση του πάχους) έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός ευθύγραμμου μετώπου ρωγμής (Σχήμα 3.1.20), γεγονός που δε συμφωνεί με την πραγματική μορφή του που είναι καμπυλόγραμμη. Η μορφή αυτή του μετώπου οφείλεται στη μονόπλευρη ενίσχυση από επίθεμα σύνθετων υλικών. Αυτό συμβαίνει διότι το ενισχυτικό επίθεμα παραλαμβάνει μεγάλο ποσοστό των τάσεων στην πλευρά που έχει εφαρμοσθεί με αποτέλεσμα να ανακουφίζει την πλευρά αυτή του χάλυβα σε αντίθεση με ότι συμβαίνει στη γυμνή πλευρά. Κατά συνέπεια, ο ρυθμός διάδοσης της ρωγμής στην ελεύθερη πλευρά είναι μεγαλύτερος συγκριτικά με την ενισχυμένη, με λογικό επακόλουθο τη δημιουργία λοξού μετώπου ρωγμής. Συγκριτική μελέτη που πραγματοποιήθηκε για τη μοντελοποίηση του μετώπου της ρωγμής μεταξύ ευθέως και λοξού [29] αποδεικνύει ότι το ευθύ παρουσιάζει πιο αξιόπιστα αποτελέσματα κι επομένως προτιμήθηκε στην παρούσα ανάλυση. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι το μοντέλο δεν περιλαμβάνει προσομοίωση της διάδοσης της ρωγμής. Κάτι τέτοιο θα απαιτούσε τον επανακαθορισμό του καννάβου πεπερασμένων στοιχείων ανάλογα με το ρυθμό διάδοσης, διαδικασία περίπλοκη και χρονοβόρα.



Σχήμα 3.1.19a: Τυπικό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων και λεπτομέρεια διακριτοποίησης ρωγμής.

3.1.4 Συνοριακές Συνθήκες- Είδος Φόρτισης

Οι συνοριακές συνθήκες που θα επιβληθούν στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων καθορίζουν εξίσου την πιστή προσομοίωση του φαινομένου που εξετάζεται. Ειδικότερα, η επιλογή μοντελοποίησης των πειραματικών δοκιμών μόνο κατά το $\frac{1}{4}$ της συνολικής γεωμετρίας, επιβάλλει επιπλέον συνοριακές συνθήκες που πρέπει να καθοριστούν. Επομένως, επιβλήθηκαν συνθήκες συμμετρίας στις επιφάνειες εκείνες που θα εξασφάλιζαν τη προσομοίωση ολόκληρης της γεωμετρίας, δηλαδή τις επιφάνειες κατά τα επίπεδα x-z και y-z (επίπεδα συμμετρίας). Στο Σχήμα 3.1.20 με κόκκινο χρώμα σημειώνονται οι κόμβοι των στοιχείων στους οποίους επιβλήθηκαν οι συγκεκριμένες συνθήκες συμμετρίας, δηλαδή στα στοιχεία τα οποία περιλαμβάνονται στις αντίστοιχες επιφάνειες. Στο ίδιο σχήμα φαίνεται κι ο τρόπος μοντελοποίησης της ρωγμής κατά το πάχος του μεταλλικού υλικού, που προσομοιώνεται με το μη περιορισμό των στοιχείων του μετάλλου (4 κατά το πάχος) και κατ' επέκταση των επιφανειών που αντιστοιχούν στις πλευρές της ρωγμής. Ο μη περιορισμός των στοιχείων πραγματοποιήθηκε σε μήκος που αντιστοιχεί με το μισό μήκος της ρωγμής a (λόγω συνθηκών συμμετρίας), ίσο με 40 mm. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί η ιδιαίτερη επιβολή συνοριακών συνθηκών που απαιτούν οι κόμβοι που απαρτίζουν το κολλητικό μέσο, δεδομένου ότι η άνω σειρά κόμβων είναι κοινή με τους κόμβους του επιθέματος (άρα υπάρχει συνέχεια υλικού και κατ' επέκταση επιβολή συνθηκών συμμετρίας) ενώ η κάτω σειρά κόμβων είναι κοινή με του κόμβους του χάλυβα (άρα ύπαρξη ρωγμής και κατά συνέπεια μη περιορισμός τους).

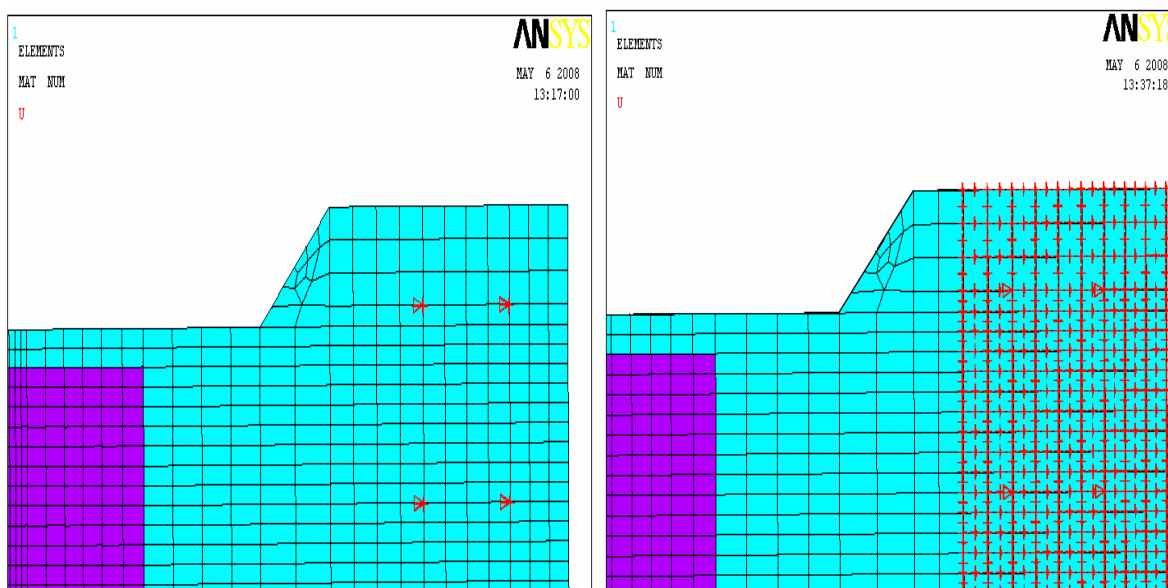


Σχήμα 3.1.20: Συνοριακές συνθήκες συνολικά στο μοντέλο (πάνω) και κατά τα επίπεδα συμμετρίας (α) x-z επίπεδο (μέση) (β) y-z επίπεδο και μοντελοποίηση της ρωγμής (κάτω).

Μια περιοχή που χρίζει ιδιαίτερης προσοχής όσον αφορά στις συνοριακές συνθήκες που θα επιβληθούν είναι η περιοχή, όπου τα πειραματικά δοκίμια προσδένονται με την υδραυλική μηχανή δοκιμών (βλέπε εδάφιο 2.1.2). Επιπλέον, στην περιοχή αυτή εφαρμόζεται και η φόρτιση των δοκιμίων, που όπως αναφέρθηκε στο εδάφιο 2.1.4, επιβλήθηκε με τη μορφή γραμμικά αυξανόμενης εφελκυστικής μετατόπισης, η τιμή της οποίας στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων ορίστηκε ίση με 1 mm. Εξαιτίας του τρόπου πρόσδεσης των δοκιμίων μέσω των ειδικών χαλύβδινων προσαρμογών και της ομοιόμορφα επιβαλλόμενης εφελκυστικής μετατόπισης συνεπάγεται ότι κατά τη διάρκεια της φόρτισης, η περιοχή αυτή παραμένει ευθύγραμμη και παράλληλη με τον y-άξονα και δεν περιστρέφεται γύρω από τον άξονα αυτό. Οι παραπάνω συνθήκες μεταφράζονται

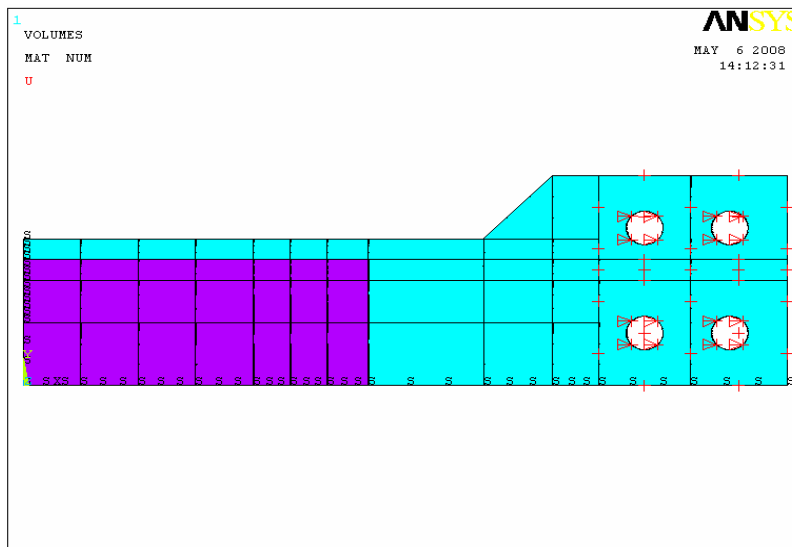
στο μοντέλο ως συνθήκες περιορισμού της μετατόπισης κατά τον z-άξονα. Με γνώμονα τα παραπάνω, πραγματοποιήθηκε μια σειρά δοκιμών, αντίστοιχη με εκείνη που αφορούσε τη γεωμετρία του μοντέλου, ώστε να γίνει η τελική επιλογή των συνοριακών συνθηκών στην περιοχή αυτή όπως επίσης και του σημείου εφαρμογής της φόρτισης.

Αρχικά, στο μοντέλο με πλήρες μήκος (331 mm) θεωρήθηκαν δύο περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση (Case 1), η επιβολή της φόρτισης όπως επίσης και η συνθήκη περιορισμού της μετατόπισης κατά τον z-άξονα εφαρμόστηκαν στους κόμβους που αντιστοιχούν στο κέντρο των κοχλιών συγκράτησης των δοκιμίων. Στη δεύτερη περίπτωση (Case 2), η φόρτιση επιβλήθηκε στους ίδιους κόμβους ενώ η συνθήκη περιορισμού εφαρμόστηκε σε όλη την περιοχή συγκράτησης (κόμβοι στην περιοχή από 250 mm μέχρι 331 mm). Οι παραπάνω συνθήκες επιβλήθηκαν σε όλους τους κόμβους κατά το πάχος του χάλυβα. Στο Σχήμα 3.1.21 σημειώνονται με κόκκινο χρώμα (τα βέλη αντιστοιχούν στο φορτίο και οι σταυροί στις συνθήκες συγκράτησης) οι κόμβοι στους οποίους εφαρμόστηκαν οι συνθήκες αυτές, ενώ οι συντεταγμένες των κέντρων όπως και όλη η γεωμετρία της περιοχής δίνονται στο εδάφιο 2.1.2.



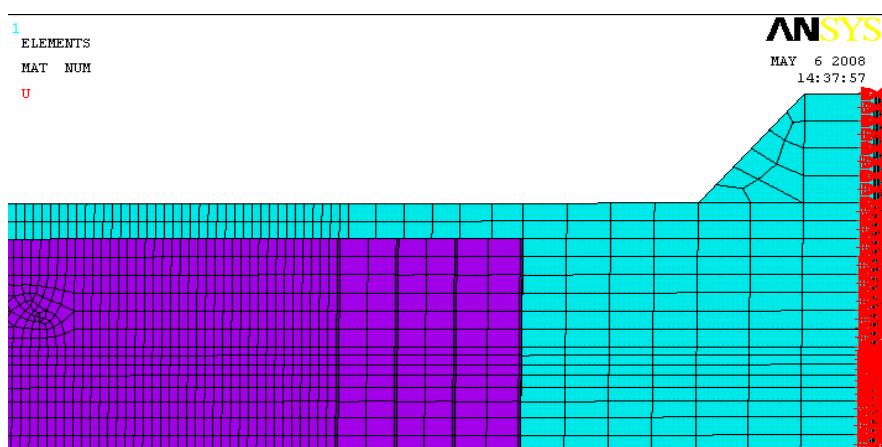
Σχήμα 3.1.21: Επιβολή φορτίου και συνθηκών περιορισμού στο μοντέλο μήκους 331 mm (Case 1 αριστερά και Case 2 δεξιά).

Στη συνέχεια, στο μοντέλο που περιελάμβανε τις οπές, μέσα από τις οποίες διέρχονται οι κοχλίες συγκράτησης εφαρμόστηκε η επιβαλλόμενη φόρτιση στους κόμβους κατά την περιφέρεια αυτών και η συνθήκη περιορισμού σε όλους τους κόμβους της περιοχής συγκράτησης. Στο Σχήμα 3.1.22 φαίνεται το αντίστοιχο μοντέλο, καθώς με κόκκινο σταυρό σημειώνονται οι επιφάνειες στις οποίες έχουν εφαρμοστεί οι συνθήκες περιορισμού και με κόκκινα βέλη οι επιφάνειες στις οποίες επιβλήθηκε το φορτίο και με S (Symmetry) οι επιφάνειες στις οποίες εφαρμόστηκαν συνθήκες συμμετρίας. Να σημειωθεί ότι στο σχήμα έγινε επιλογή απεικόνισης των επιφανειών λόγω ευκρινέστερης εικόνας σε σύγκριση με την αντίστοιχη που απεικονίζει τα στοιχεία.



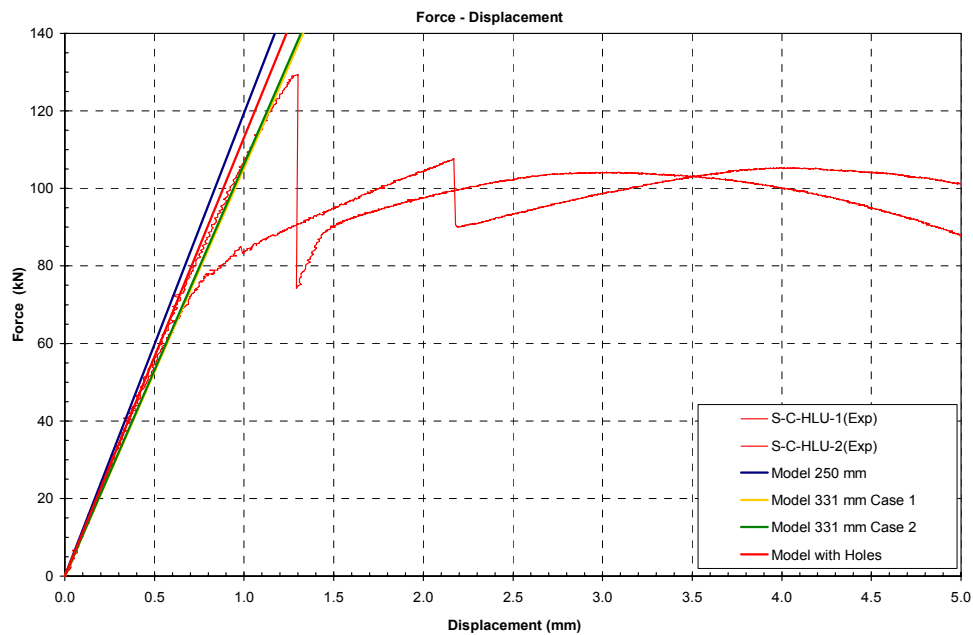
Σχήμα 3.1.22: Επιβολή φορτίου και συνθηκών περιορισμού στο μοντέλο με τις σπές.

Τέλος, στο μοντέλο μήκους 250 mm, εφαρμόστηκε η επιβαλλόμενη φόρτιση όπως και η συνθήκη περιορισμού στους κόμβους που περιλαμβάνονται στην εγκάρσια διατομή που βρίσκεται σε μήκος 250 mm (ελεύθερο άκρο). Στο Σχήμα 3.1.23 με κόκκινο χρώμα σημειώνεται η παραπάνω διατομή.



Σχήμα 3.1.23: Επιβολή φορτίου και συνθηκών περιορισμού στο μοντέλο μήκους 250 mm.

Η τελική επιλογή έγινε κάνοντας γραμμικές αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων (βλέπε επόμενο εδάφιο) για το μοντέλο των δοκιμών S-C-HLU-1&2 και συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν. Η σύγκριση έγινε υπό τη μορφή διαγραμμάτων φορτίου-επιμήκυνσης με ταυτόχρονη παράθεσή τους στα αντίστοιχα πειραματικά. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1.24 οι διαφορές που παρατηρούνται είναι μικρές και με γνώμονα την απλότητα του μοντέλου, τη χαμηλή υπολογιστική ισχύ και συνυπολογίζοντας το συμπέρασμα που προέκυψε στην περίπτωση των δοκιμών για τη γεωμετρία του μοντέλου (βλέπε εδάφιο 3.1.2), επιλέχθηκε το μοντέλο μήκους 250 mm.



Σχήμα 3.1.24: Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου-επιμήκυνσης για την επιλογή συνοριακών συνθηκών.

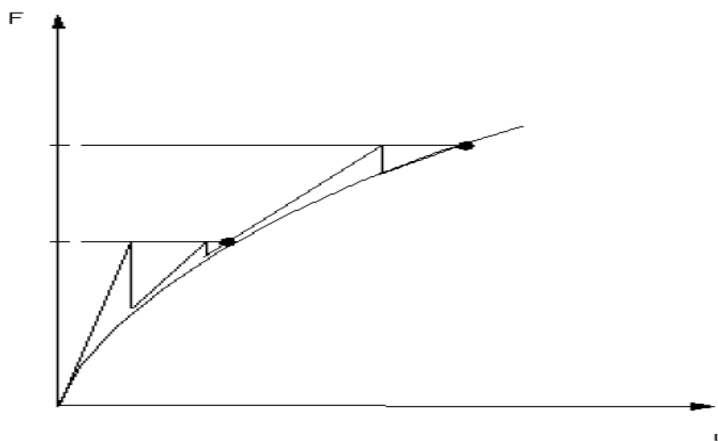
3.1.5 Είδος Ανάλυσης

Με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι δυνατή η εκτέλεση διαφορετικών αναλύσεων, λαμβάνοντας υπόψη μη γραμμικά φαινόμενα που προκύπτουν λόγω της γεωμετρίας ή/και των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών. Όμως η επιλογή μη γραμμικής ανάλυσης, που περιλαμβάνει τα παραπάνω φαινόμενα, οδηγεί στην απαίτηση μεγάλης υπολογιστικής ισχύος με ταυτόχρονη αύξηση του χρόνου υπολογισμού. Από την άλλη μεριά, είναι αναπόφευκτη για την πιστότερη προσομοίωση του φαινομένου που εξετάζεται. Τέλος, υπάρχει και η δυνατότητα επιλογής γραμμικής ανάλυσης που όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα και ταυτόχρονα να περιορίσει αισθητά την υπολογιστική ισχύ και τον απαιτούμενο χρόνο.

Στην περίπτωση των επισκευών με τη χρήση επιθεμάτων από σύνθετα υλικά η μη γραμμική αντίδραση της κατασκευής λόγω γεωμετρίας προέρχεται από τη μονόπλευρη ενίσχυση της δομής, όπου παρατηρείται μετατόπιση του ουδέτερου άξονα και συνακόλουθη παραμόρφωση της κατασκευής έξω από το επίπεδο (παρουσίαση φαινομένου κάμψης). Το φαινόμενο αυτό είναι πιο έντονο όταν υπάρχει μεγάλη απόσταση από το σημείο στήριξης της κατασκευής, όπως είναι στην περίπτωση των δοκιμών εφελκυσμού που εξετάζονται.

Μια προσέγγιση για την επίλυση τέτοιων μη γραμμικών προβλημάτων περιλαμβάνει τον κατακερματισμό του συνολικού επιβαλλόμενου φορτίου σε μια σειρά από βήματα, τα οποία εφαρμόζονται σταδιακά στην κατασκευή. Μετά την ολοκλήρωση κάθε βήματος το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων προσαρμόζει το μητρώο ακαμψίας της κατασκευής στη νέα παραμορφωσιακή κατάσταση, πριν επιβληθεί το επόμενο τμήμα του φορτίου. Η

βηματική προσέγγιση του προβλήματος εισάγει ένα σημαντικό τελικό σφάλμα στα αποτελέσματα, λόγω της συσσώρευσης σφάλματος σε κάθε βήμα φόρτισης. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται η μέθοδος Newton-Raphson για την επίλυση του μη γραμμικού προβλήματος. Κατά τη μέθοδο αυτή το κάθε τμήμα του επιβαλλόμενου φορτίου διαιρείται σε μικρότερες ενότητες, οι οποίες επιβάλλονται με τον τρόπο που φαίνεται στο Σχήμα 3.1.25.



Σχήμα 3.1.25: Προσέγγιση με τη μέθοδο Newton-Raphson (παράδειγμα 2 βημάτων).

Πριν από κάθε νέα επίλυση, η μέθοδος Newton-Raphson υπολογίζει το διάνυσμα του φορτίου που είναι εκτός ισορροπίας το οποίο αποκλίνει από τις δυνάμεις επαναφοράς (είναι οι δυνάμεις που αντιστοιχούν στα στοιχεία της κατασκευής) και την επιβαλλόμενη φόρτιση. Στη συνέχεια το πρόγραμμα πραγματοποιεί μια γραμμική επίλυση, με την επιβολή του παραπάνω αποκλίνοντος φορτίου και ελέγχει για σύγκλιση. Εάν τα κριτήρια σύγκλισης δεν ικανοποιούνται τότε το διάνυσμα του αποκλίνοντος φορτίου υπολογίζεται ξανά, το μητρώο ακαμψίας μεταβάλλεται και η κατασκευή επιλύεται εκ νέου. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση, σύμφωνα με τα κριτήρια που έχουν τεθεί, πριν την επιβολή του επόμενου τμηματικού φορτίου. [33]

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η φόρτιση επιβάλλεται ως σταθερού ρυθμού εφελκυστική μετατόπιση με βήμα 0.05 mm, με αποτέλεσμα τη μεταβολή της φερόμενης δύναμης, σε είκοσι διακριτά βήματα. Η μη γραμμική ανάλυση περιλαμβάνει την ελαστοπλαστική μοντελοποίηση του χάλυβα ως διγραμμικό υλικό, όπως αναλύθηκε στο εδάφιο 3.1.1, καθώς και τη θεώρηση συνθηκών μεγάλων εκτροπών και μεγάλων παραμορφώσεων. Αυτού του είδους η ανάλυση χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις περιπτώσεις που απαιτείται η σύγκριση αποτελεσμάτων, σχετικά με μετατοπίσεις και παραμορφώσεις, με τις αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις.

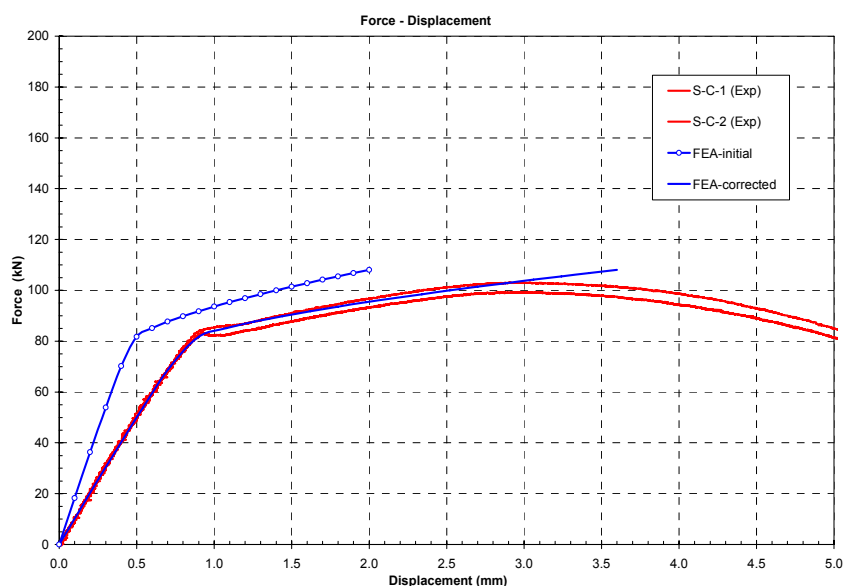
Επίσης, πραγματοποιήθηκαν γραμμικές αναλύσεις κατά τις οποίες ο χάλυβας μοντελοποιήθηκε ως γραμμικά ελαστικό, ιστροπικό υλικό και θεωρήθηκαν συνθήκες μικρών εκτροπών. Η ανάλυση αυτή χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια των διάφορων δοκιμών που διενεργήθηκαν καθώς η ορθή απεικόνιση της τάσης του φαινομένου στα εξαγόμενα αποτελέσματα και ο πολύ μικρός χρόνος υπολογισμού, υπηρέτησαν επακριβώς τον σκοπό των δοκιμών αυτών.

3.1.6 Εξαγωγή Αποτελεσμάτων

Τα μεγέθη που μετρήθηκαν και καταγράφηκαν σε κάθε πειραματική δοκιμή που πραγματοποιήθηκε είναι η εφαρμοζόμενη δύναμη, η συνολική επιμήκυνση των δοκιμίων (μαζί με το μήκος των ειδικών προσαρμογών) καθώς και οι διαμήκεις παραμορφώσεις σε διάφορα σημεία του χάλυβα και του ενισχυτικού επιθέματος. Κατά συνέπεια, για να γίνει η απαιτούμενη σύγκριση είναι αναγκαίο να εξαχθούν τα αντίστοιχα αποτελέσματα από το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων. Όμως, οι επιλογές που έγιναν κατά τη δημιουργία του μοντέλου έχουν άμεσο αντίκτυπο στα αποτελέσματα αυτά με επιτακτική την ανάγκη κατάλληλων προσαρμογών και θεωρήσεων ώστε οι διαφορές που προκύπτουν είτε να εξαλειφθούν, είτε να ληφθούν υπ' όψη.

Ένα σημείο στο οποίο πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη έμφαση, είναι ότι το μοντέλο δεν περιέχει κανένος είδους κριτήριο αστοχίας, με αποτέλεσμα το επίθεμα να θεωρείται τελείως κολλημένο στο χάλυβα καθ' όλη τη διάρκεια της ανάλυσης, γεγονός που έρχεται σε αντίθεση με την πραγματική εξέλιξη του φαινομένου. Επομένως, τα αριθμητικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται είναι συγκρίσιμα με τις πειραματικές μετρήσεις μόνο κατά τη διάρκεια που το επίθεμα δεν έχει υποστεί αποκόλληση από το χάλυβα. Οποιαδήποτε σύγκριση μετά την έναρξη του φαινομένου αυτού είναι άνευ σημασίας.

Θεωρώντας το μήκος του μοντέλου ίσο με 250 mm δημιουργείται μια επιπλέον διαφορά στην απεικόνιση της συνολικής επιμήκυνσης μεταξύ των πειραματικών μετρήσεων και των αριθμητικών αποτελεσμάτων. Αυτό συμβαίνει διότι οι μετρήσεις που έγιναν καταγράφουν την επιμήκυνση των δοκιμίων μαζί με το μήκος των ειδικών προσαρμογών και τις μικρές μετακινήσεις των κοχλίων συγκράτησης κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Από την άλλη μεριά, μοντελοποιώντας μόνο το ελεύθερο μήκος των δοκιμίων είναι επόμενο στα εξαγόμενα αποτελέσματα να παρουσιάζεται μικρότερη επιμήκυνση από την πραγματική. Η παραπάνω διαπίστωση φαίνεται και στο Σχήμα 3.1.26 όπου παρατίθενται οι καμπύλες φορτίου-επιμήκυνσης τόσο των πειραματικών μετρήσεων (**Exp**) των δοκιμίων αναφοράς S-C-1&2, όσο και των αριθμητικών αποτελεσμάτων (**FEA**), παρατηρώντας στα τελευταία μικρότερες τιμές για την επιμήκυνση απ' ότι στις πειραματικές μετρήσεις (**FEA-initial**). Η διαφορά αυτή εξαφανίζεται και οι καμπύλες μπορούν να συγκριθούν σε μεγάλο βαθμό αν λάβουμε υπ' όψη καταλλήλως τις παραπάνω διαφορές και πολλαπλασιαστεί η επιμήκυνση των αριθμητικών αποτελεσμάτων με ένα διορθωτικό συντελεστή της τάξης του 1.8 (καμπύλη **FEA-corrected** στο Σχήμα 3.1.26). Κατά συνέπεια, όλες οι αντίστοιχες καμπύλες που θα παρουσιαστούν στο επόμενο εδάφιο έχουν υποστεί την παραπάνω διόρθωση.



Σχήμα 3.1.26: Παρουσίαση διορθωμένων αριθμητικών αποτελεσμάτων.

Μια επιπλέον προσαρμογή που έγινε στα αριθμητικά αποτελέσματα για να συμβαδίζουν με τις αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις αφορά στην επιλογή μοντελοποίησης μόνο του $\frac{1}{4}$ της συνολικής γεωμετρίας. Εξαιτίας του γεγονότος αυτού, τα αποτελέσματα που αφορούσαν στην επιμήκυνση του μοντέλου και στην εφαρμοζόμενη δύναμη δεν αντιστοιχούσαν στις πραγματικές τιμές. Διπλασιάζοντας τις τιμές αυτές επιτυγχάνεται η πλήρης αντιστοίχισή τους με τις αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις καθώς με τον τρόπο αυτό λαμβάνονται αποτελέσματα που αφορούν ολόκληρη τη γεωμετρία. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα αποτελέσματα σχετικά με τις διαμήκεις παραμορφώσεις δεν επηρεάζονται από τις παραπάνω δύο διορθώσεις καθώς εκφράζονται μέσω αδιάστατου μεγέθους (strains).

Γνωρίζοντας τις ακριβείς θέσεις και το μέγεθος των ηλεκτρικών επιμηκυνσιομέτρων (Strain Gages, SG) που χρησιμοποιήθηκαν για την καταγραφή των ζητούμενων μεγεθών κατά τη διάρκεια των πειραματικών δοκιμών (βλέπε εδάφιο 2.1.4, Σχήμα 2.1.3 και Σχήμα 2.1.4), επόμενο είναι να αναζητηθούν τα αντίστοιχα αποτελέσματα και στο αριθμητικό μοντέλο. Επομένως, οι τιμές αυτές εξήχθησαν από τους κόμβους που περικλείονται κατά το μήκος αναφοράς (gage length) του κάθε επιμηκυνσιόμετρου, παίρνοντας το μέσο όρο για την τελική τιμή που δίνει το κάθε ένα από αυτά. Τα μεγέθη αυτά αφορούν στις ελαστικές διαμήκεις παραμορφώσεις των κόμβων που αντιστοιχούν στα επιμηκυνσιόμετρα που είναι τοποθετημένα στο ενισχυτικό επίθεμα των σύνθετων υλικών. Για εκείνα που είναι τοποθετημένα στο χάλυβα απαιτείται η εξαγωγή τόσο των ελαστικών, όσο και των πλαστικών διαμήκων παραμορφώσεων καθώς ενδέχεται η περιοχή αυτή του χάλυβα να έχει εισέλθει στην πλαστική περιοχή από κάποιο φορτίο κι έπειτα. Στο Σχήμα 3.1.27 φαίνονται οι τιμές που εξάγονται από ένα κόμβο που αντιστοιχεί σε επιμηκυνσιόμετρο τοποθετημένο στο χάλυβα, όπου στο σχήμα αριστερά φαίνονται οι ελαστικές διαμήκεις παραμορφώσεις και δεξιά οι πλαστικές. Για τις δεύτερες παρατηρείται ότι αρχικά είναι μηδενικές και από κάποιο βήμα και μετά αποκτούν τιμές,

γεγονός που σημαίνει ότι από το βήμα αυτό και μετά (και το αντίστοιχο φορτίο), ο χάλυβας έχει διαρρεύσει. Βέβαια, η τελική τιμή των παραμορφώσεων προκύπτει προσθέτοντας τις ελαστικές και τις πλαστικές παραμορφώσεις στη δεδομένη θέση.

```

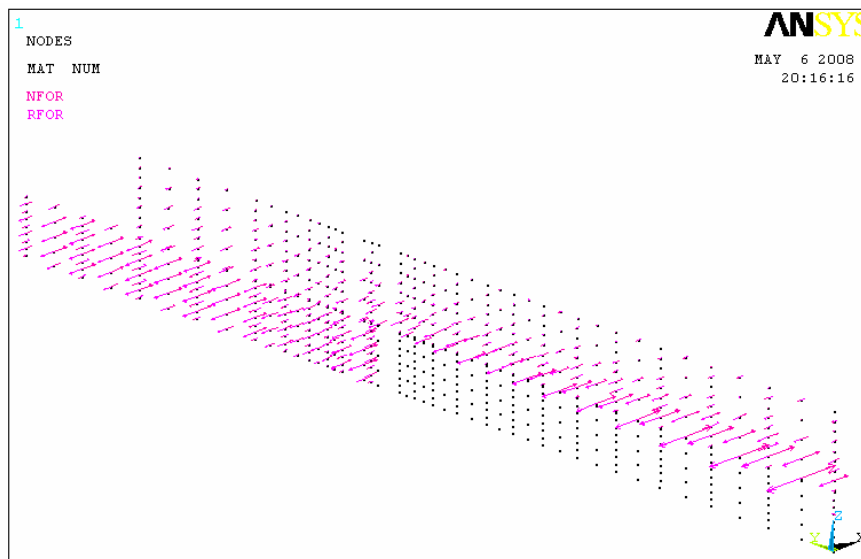
***** ANSYS POST26 VARIABLE LISTING *****
***** ANSYS POST26 VARIABLE LISTING *****

```

TIME	ANSO EPFLX SG-7_e1	TIME	ANSO EPPLX SG-7_pl
0.50000E-01	0.233308E-03	0.50000E-01	0.00000
0.10000	0.449224E-03	0.10000	0.00000
0.15000	0.656958E-03	0.15000	0.00000
0.20000	0.859998E-03	0.20000	0.00000
0.25000	0.105953E-02	0.25000	0.00000
0.30000	0.125471E-02	0.30000	0.00000
0.35000	0.144112E-02	0.35000	0.00000
0.40000	0.160817E-02	0.40000	0.00000
0.45000	0.169283E-02	0.45000	0.00000
0.50000	0.173262E-02	0.50000	0.439198E-04
0.55000	0.175405E-02	0.55000	0.345796E-03
0.60000	0.177284E-02	0.60000	0.678713E-03
0.65000	0.178935E-02	0.65000	0.983424E-03
0.70000	0.180569E-02	0.70000	0.128786E-02
0.75000	0.182211E-02	0.75000	0.159471E-02
0.80000	0.183879E-02	0.80000	0.190644E-02
0.85000	0.185571E-02	0.85000	0.222248E-02
0.90000	0.187297E-02	0.90000	0.254556E-02
0.95000	0.189043E-02	0.95000	0.287182E-02
1.0000	0.190807E-02	1.0000	0.320107E-02

Σχήμα 3.1.27: Πίνακας αποτελεσμάτων ανά κόμβο, ελαστικές(αριστερά) και πλαστικές(δεξιά) διαμήκεις παραμορφώσεις.

Τέλος, απομένει ο προσδιορισμός του φορτίου (εφαρμοζόμενη δύναμη) που αντιστοιχεί σε κάθε βήμα και προκαλεί την αντίστοιχη επιμήκυνση. Έτσι, το φορτίο προέκυψε υπολογίζοντας σε κάθε βήμα τις δυνάμεις αντίδρασης των κατάλληλων κόμβων. Οι κόμβοι αυτοί, που αρχικά χαρακτηρίστηκαν ως μία ομάδα, αντιστοιχούν σ' αυτούς που βρίσκονται κατά τη διαμήκη θέση μηδέν του μοντέλου. Στο Σχήμα 3.1.28 φαίνονται οι κόμβοι από τους οποίους έχουν εξαχθεί οι δυνάμεις αντίδρασης και με μωβ βέλη αναπαρίστανται οι δυνάμεις αυτές. Να σημειωθεί ότι δεν έχει εφαρμοστεί κανενός είδους συνοριακή συνθήκη στους κόμβους κατά το πάχος του μεταλλικού υλικού που αντιστοιχούν στην πλευρά της ρωγμής, με αποτέλεσμα να μην αναπτύσσονται δυνάμεις αντίδρασης, όπως φαίνεται στο σχήμα.

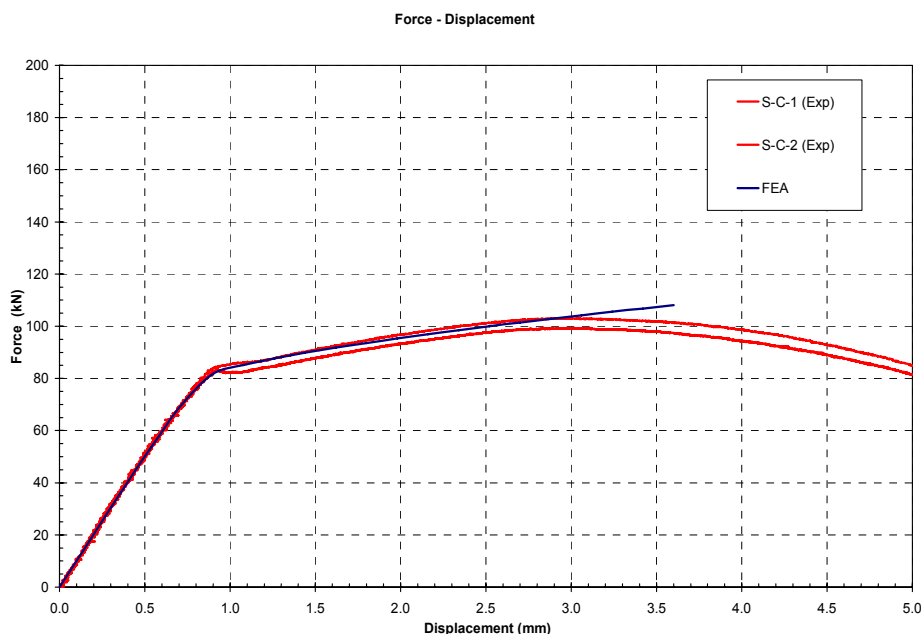


Σχήμα 3.1.28: Κόμβοι για τον υπολογισμό των δυνάμεων αντίδρασης.

3.1.7 Σύγκριση Αποτελεσμάτων και Σχολιασμός

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (FEA) για τα πειραματικά δοκίμια παρατίθενται στη συνέχεια με τη μορφή διαγραμμάτων, συγκρίνοντας τα, ταυτόχρονα, με τις αντίστοιχες καμπύλες των πειραματικών μετρήσεων (Exp). Επιπροσθέτως, εξετάζεται το κατά πόσο αυτά ταυτίζονται με την πραγματικότητα, όπως αυτή εκφράζεται από τα πειραματικά δεδομένα, ενώ γίνεται προσπάθεια να δοθούν αίτια εκ των οποίων υφίστανται τυχόν αποκλίσεις. Στο σημείο αυτό πρέπει να επισημανθεί ότι η ονοματολογία των δοκιμών παραμένει η ίδια, όπως ορίστηκε στο Κεφάλαιο 2, ενώ χάριν πληρότητας και αναγκαιότητας επιπλέον επεξηγήσεων, παρατίθενται κάποια σχήματα που έχουν παρουσιαστεί σε προηγούμενα εδάφια.

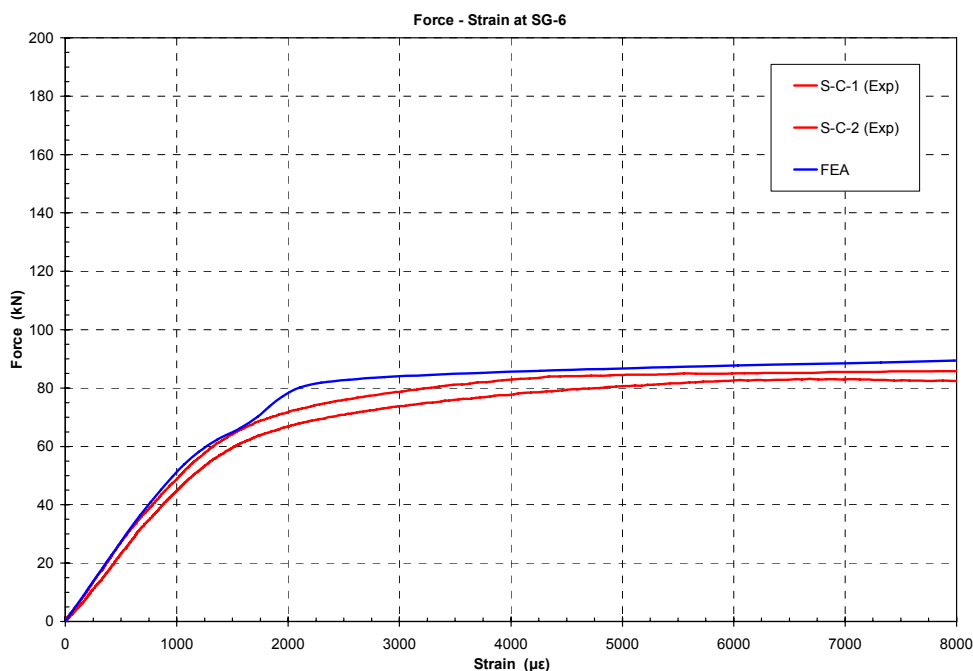
Η μεταβολή της συνολικής επιμήκυνσης συναρτήσει της επιβαλλόμενης εφελκυστικής δύναμης για τα δοκίμια αναφοράς χωρίς ενισχυτικό επίθεμα S-C-1&2 παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1.29, όπου παρατηρείται πολύ καλή προσομοίωση των πειραματικών αποτελεσμάτων από τα αντίστοιχα αριθμητικά, ακόμα και σε κάποιο εύρος της πλαστικής περιοχής. Οι διαφορές που παρατηρούνται μεταξύ των δύο καμπύλων για μεγάλες μετατοπίσεις, άρα και για μεγάλες παραμορφώσεις, οφείλονται στην επιλογή μοντελοποίησης του χάλυβα ως διγραμμικό ελαστοπλαστικό υλικό, γεγονός που απλουστεύει την προσομοίωση της πραγματικής συμπεριφοράς του χάλυβα.



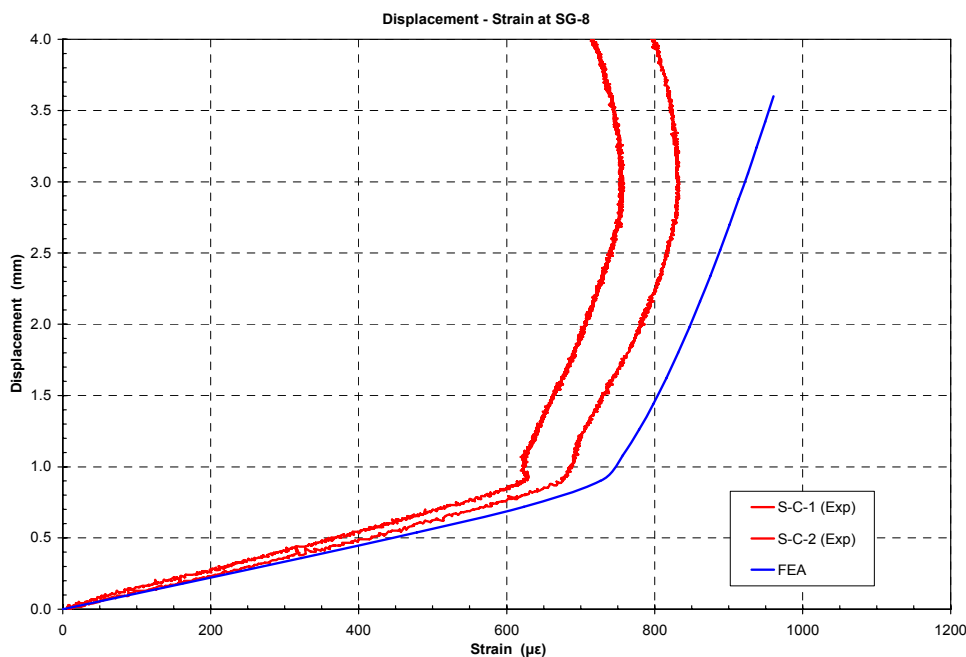
Σχήμα 3.1.29: Καμπύλες φορτίου-επιμήκυνσης για τα δοκίμια αναφοράς.

Η μεταβολή των παραμορφώσεων στη θέση SG-6 συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου και η μεταβολή των παραμορφώσεων στη θέση SG-8 συναρτήσει της επιβαλλόμενης μετατόπισης, για τα δοκίμια αναφοράς S-C-1&2, παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.1.30 και 3.1.31, αντίστοιχα. Η επιβαλλόμενη μετατόπιση επιλέχθηκε έναντι του επιβαλλόμενου φορτίου για τη θέση SG-8, καθώς οι αντίστοιχες καμπύλες αποδίδουν πιο κατατοπιστικά την εξέλιξη του φαινομένου και επιτρέπουν την εξαγωγή ορθότερων

συμπερασμάτων (βλέπε Σχήμα 2.1.3). Όσον αφορά στην προσομοίωση των παραμορφώσεων στα πειραματικά αποτελέσματα, παρατηρείται ότι αποδίδονται αρκετά καλά από το αριθμητικό μοντέλο και για τις δύο θέσεις. Η ελαστική περιοχή έχει μοντελοποιηθεί επακριβώς, ενώ οι διαφορές που παρατηρούνται στην πλαστική περιοχή οφείλονται τόσο στην απλουστευμένη μοντελοποίηση του χάλυβα ως διγραμμικό υλικό, όσο και στην εξαγωγή των αποτελεσμάτων που πραγματοποιήθηκε θεωρώντας το μέσο όρο των παραμορφώσεων κατά το μήκος αναφοράς 10 mm του επιμηκυνσιόμετρου SG-8.

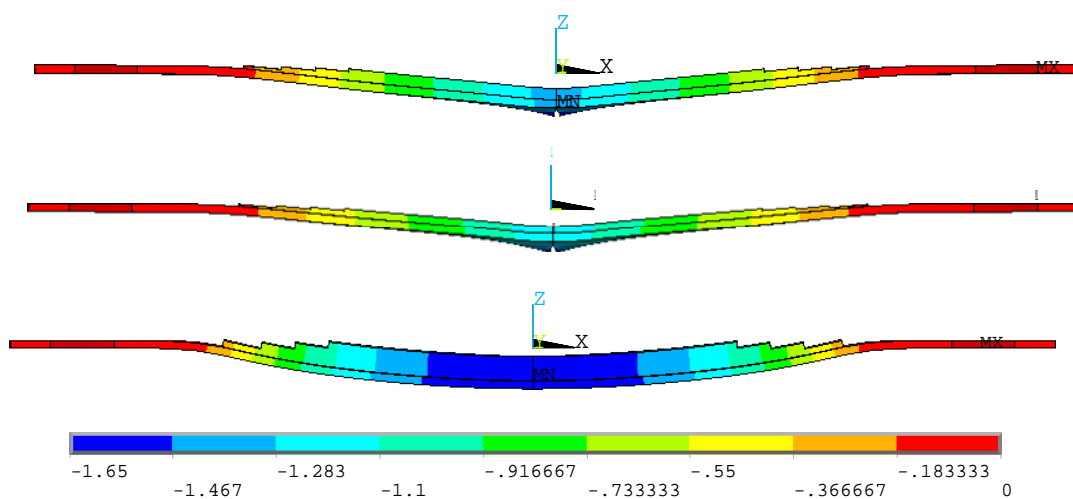


Σχήμα 3.1.30: Καμπύλες φορτίου-παραμορφώσεων στη θέση SG-6 για τα δοκίμια αναφοράς.

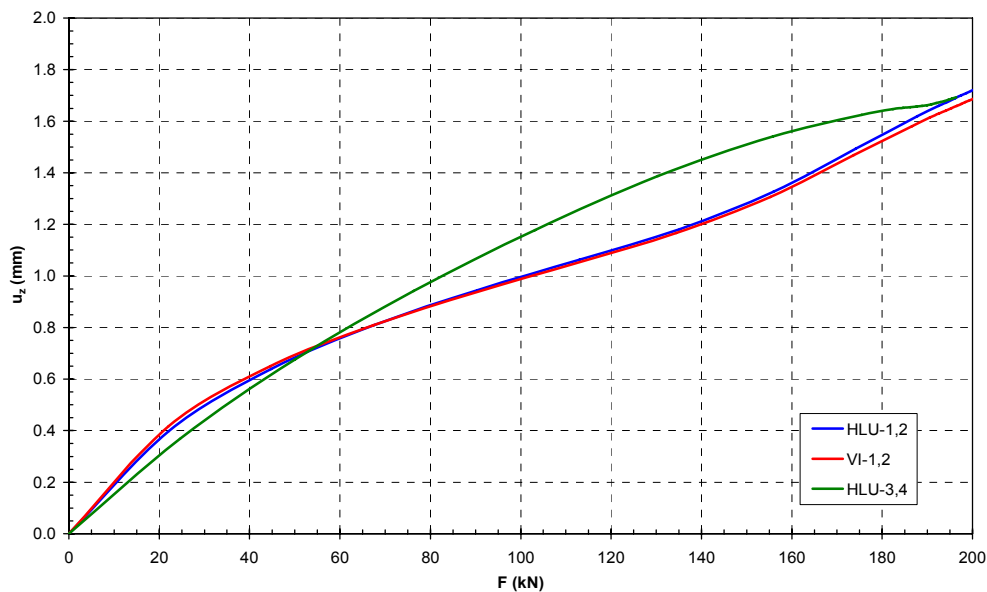


Σχήμα 3.1.31: Καμπύλες μετατόπισης-παραμορφώσεων στη θέση SG-8 για τα δοκίμια αναφοράς.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων για τα δοκίμια που διαθέτουν ενισχυτικό επίθεμα από σύνθετα υλικά. Στο σημείο αυτό πρέπει να επισημανθεί το γεγονός ότι τα δοκίμια S-C-HLU-1&2 και S-C-VI-1&2 παραμορφώνονται με διαφορετικό τρόπο συγκριτικά με τα δοκίμια S-C-HLU-3&4. Στο Σχήμα 3.1.32 παρουσιάζονται οι πλάγιες όψεις και των τριών μοντέλων με την παραμόρφωση που υπέστησαν μετά την επιβολή φορτίου της τάξης των 185 kN. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι παραμορφώσεις έχουν μεγεθυνθεί έτσι ώστε να παρουσιάζονται πιο κατατοπιστικές πληροφορίες για την εξέλιξη του φαινομένου. Απεικονίζεται με σαφήνεια η τυπική συμπεριφορά χαλύβδινης πλάκας με μονόπλευρη ενίσχυση που καταπονείται σε εφελκυσμό καθώς παρατηρείται παραμόρφωση της κατασκευής έξω από το επίπεδο, δηλαδή η εμφάνιση του φαινομένου της κάμψης. Αυτό οφείλεται στη μετατόπιση του ουδέτερου άξονα εξαιτίας της παρουσίας του μονόπλευρου επιθέματος και ως εκ τούτου τη δημιουργία μη συμμετρικής εγκάρσιας διατομής. Στο Σχήμα 3.1.32 φαίνεται με σαφήνεια ότι τα δύο πρώτα δοκίμια, που αποτελούνται από συγκριτικά πιο λεπτό ενισχυτικό επίθεμα σύνθετων υλικών, παρουσιάζουν πιο ήπια κάμψη, η οποία εμφανίζεται κυρίως στην κεντρική περιοχή των δοκιμίων. Επίσης, φαίνεται ξεκάθαρα το άνοιγμα των πλευρών της ρωγμής εξαιτίας της καταπόνησης που δέχεται. Αντιθέτως, τα δοκίμια S-C-HLU-3&4, που αποτελούνται από πιο παχύ ενισχυτικό επίθεμα, παρουσιάζουν πιο έντονη κάμψη, η οποία εμφανίζεται ομοιόμορφα κατά μήκος των επιθεμάτων. Κατά συνέπεια, προκαλείται μια πιο απότομη μεταβολή της παραμόρφωσης της χαλύβδινης πλάκας κοντά στα άκρα του επιθέματος. Τα παραπάνω επιβεβαιώνονται και στο Σχήμα 3.1.33, όπου παρουσιάζεται η μέγιστη μετατόπιση κατά τον z-άξονα του κέντρου των δοκιμίων συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου, για κάθε δοκίμιο. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι, τα δοκίμια αναφοράς χωρίς ενισχυτικό επίθεμα δεν παραμορφώνονται έξω από το επίπεδο (φαινόμενο κάμψης) κατά την καταπόνησή τους σε εφελκυσμό καθώς αποτελούνται από συμμετρική εγκάρσια διατομή.



Σχήμα 3.1.32: Δοκίμια S-C-HLU-1&2 (πάνω), S-C-VI-1&2 (μέση) και S-C-HLU-3&4 (κάτω) που έχουν υποστεί παραμόρφωση.

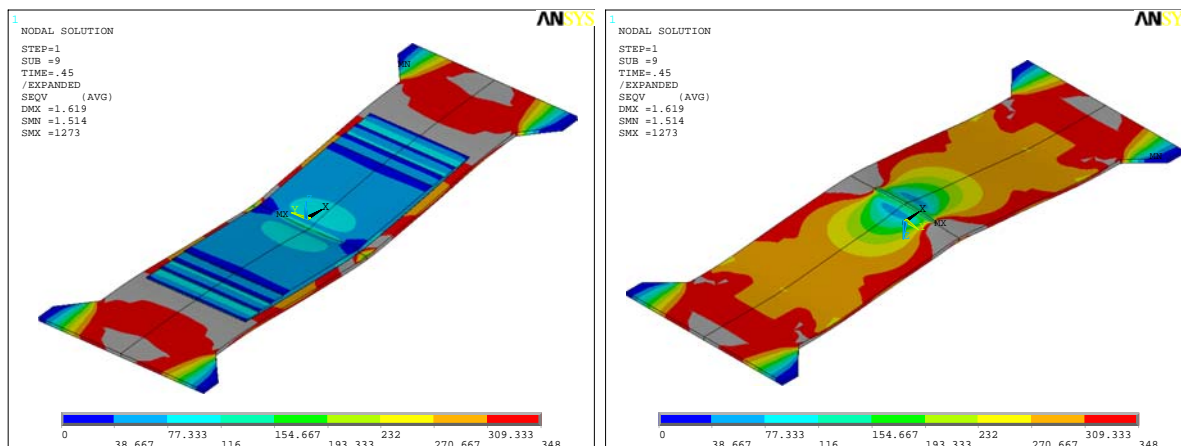


Σχήμα 3.1.33: Μέγιστη μετατόπιση κατά τον z-άξονα συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου.

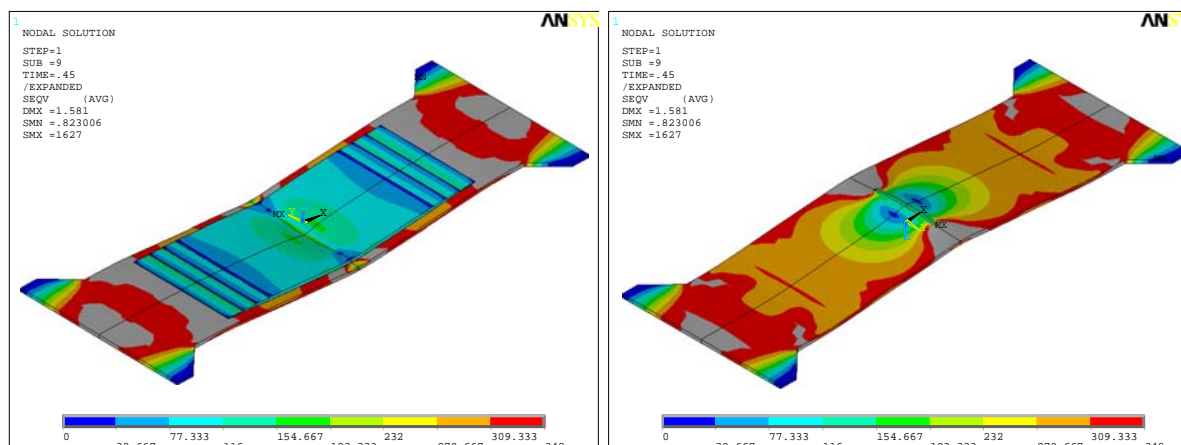
Η κάτοψη και η άνοψη των τριών δοκιμίων που έχουν μοντελοποιηθεί παρουσιάζονται προοπτικά στα Σχήματα 3.1.34 έως 3.1.36, όπου ταυτόχρονα φαίνεται και η παραμόρφωση που έχουν υποστεί κατά τη διάρκεια της καταπόνησης. Επίσης είναι ξεκάθαρες οι διαφορές που παρουσιάζουν στο εύρος και τη μορφή της παραμόρφωσης ανάλογα με το πάχος του ενισχυτικού επιθέματος, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Στα σχήματα αυτά παρουσιάζεται η κατανομή των τάσεων κατά von Mises στις χαλύβδινες πλάκες των δοκιμίων για επιβαλλόμενο φορτίο της τάξης των 185 kN. Με γκρι χρώμα υποδεικνύονται οι περιοχές του χάλυβα που έχουν εισέλθει στην πλαστική περιοχή (τιμές των τάσεων κατά von Mises μεγαλύτερες των 348 MPa, τιμή που αντιπροσωπεύει το όριο διαρροής του υπό μελέτη χάλυβα). Από μελέτη των αποτελεσμάτων της μη γραμμικής ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων που πραγματοποιήθηκε αποδείχθηκε ότι, στην περίπτωση των δοκιμίων S-C-HLU-1&2 και S-C-VI-1&2, η διαρροή του χάλυβα ξεκινάει από τα άκρα της ρωγμής στη γυμνή επιφάνειά του, για επιβαλλόμενο φορτίο περίπου ίσο με 100 kN, ενώ καθώς το φορτίο αυξάνει, η διαρροή εξαπλώνεται προς τις διαμήκεις πλευρές του χάλυβα. Η περιοχή της ρωγμής εισέρχεται στην πλαστική περιοχή καθ' όλο το πλάτος και πάχος των δοκιμίων για επιβαλλόμενο φορτίο περίπου ίσο με 180 kN, πάνω από το οποίο ο χάλυβας διαρρέει εκτενώς (global yield) για μεγάλες τιμές της επιβαλλόμενης μετατόπισης κατά τον x-άξονα (βλέπε άνοψη στα Σχήματα 3.1.34 και 3.1.35). Για τιμή του επιβαλλόμενου φορτίου μικρότερη των 180 kN, η πλευρά του χάλυβα στην οποία έχει επικοληθεί το ενισχυτικό επίθεμα, εισέρχεται στην πλαστική περιοχή κοντά στα άκρα του επιθέματος, που όμως δεν προχωράει σε όλο το πάχος όπως φαίνεται στα Σχήματα 3.1.34 και 3.1.35.

Στην περίπτωση των δοκιμίων S-C-HLU-3&4, στα οποία το ενισχυτικό επίθεμα είναι πιο παχύ, η εξέλιξη του φαινομένου διαφοροποιείται από αυτή που αναλύθηκε παραπάνω. Μελετώντας το Σχήμα 3.1.36 συμπεραίνεται ότι η διαρροή του χάλυβα στην περιοχή των άκρων της ρωγμής είναι αρκετά περιορισμένη. Για πρώτη φορά ο χάλυβας διαρρέει καθ'

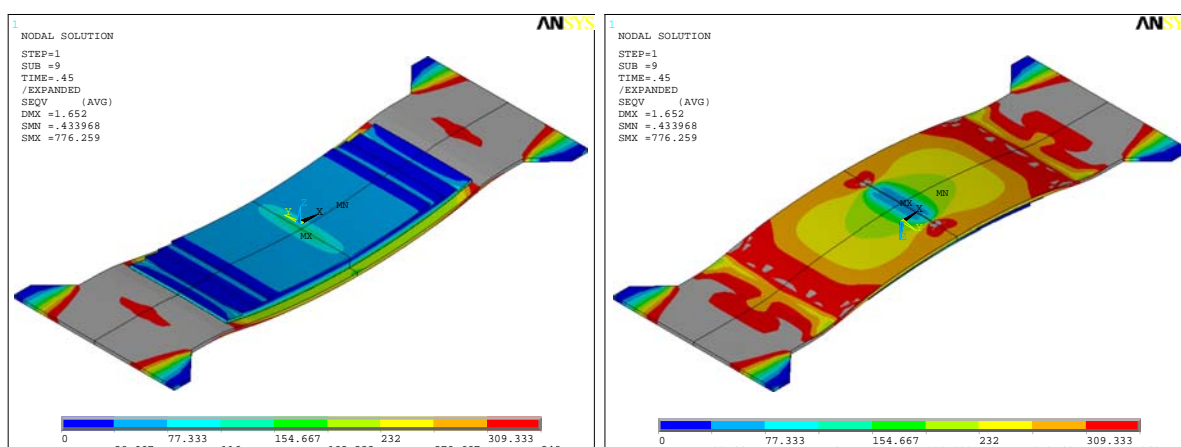
όλο το πλάτος και το πάχος του στην περιοχή κοντά στα άκρα του ενισχυτικού επιθέματος, εξαιτίας της έντονης κάμψης που εμφανίζεται στην περιοχή αυτή.



Σχήμα 3.1.34: Κατανομή των τάσεων κατά von Mises για τα δοκίμια S-C-HLU-1&2(κάτοψη και άνοψη).



Σχήμα 3.1.35: Κατανομή των τάσεων κατά von Mises για τα δοκίμια S-C-VI-1&2 (κάτοψη και άνοψη).

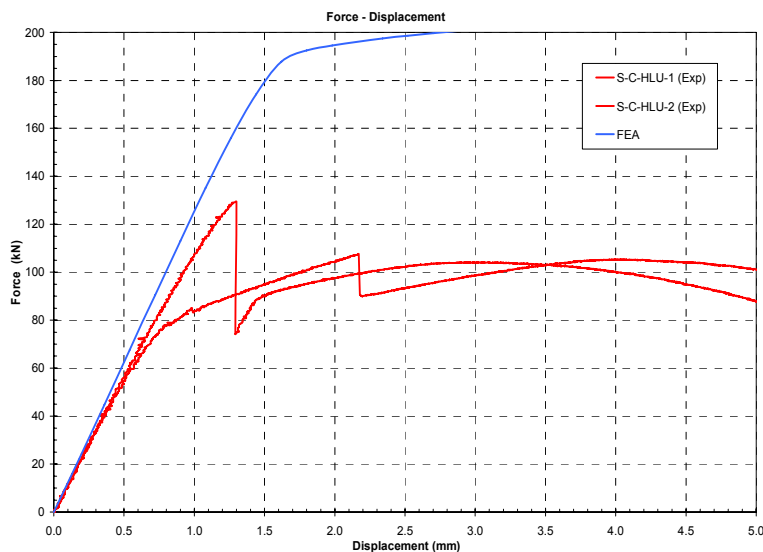


Σχήμα 3.1.36: Κατανομή των τάσεων κατά von Mises για τα δοκίμια S-C-HLU-3&4(κάτοψη και άνοψη).

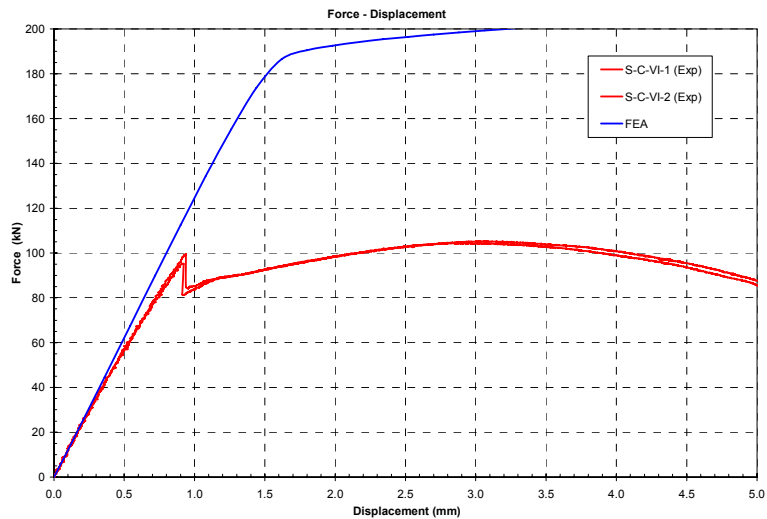
Η μεταβολή της συνολικής επιμήκυνσης των τριών δοκιμών συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου παρουσιάζεται στα Σχήματα 3.1.37 έως 3.1.39, όπου γίνεται σύγκριση των πειραματικών μετρήσεων με τα αντίστοιχα αριθμητικά αποτελέσματα.

Όσον αφορά στις πειραματικές μετρήσεις, όπου στα σχήματα παρουσιάζονται με κόκκινες γραμμές, η συμπεριφορά όλων των τύπων των δοκιμών είναι παρόμοια. Αρχικά παραμορφώνονται ελαστικά, με την ελαστική περιοχή να είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη των δοκιμών αναφοράς (βλέπε Σχήμα 3.1.29). Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι ο χάλυβας ανακουφίζεται εξαιτίας της παρουσίας του ενισχυτικού επιθέματος με αποτέλεσμα να συμπεριφέρεται ελαστικά έως την τιμή μεγαλύτερου φορτίου. Στη συνέχεια, μετά την περιοχή της ελαστικής συμπεριφοράς, το φορτίο που μεταφέρεται μειώνεται απότομα καθώς επέρχεται αποκόλληση του επιθέματος, με αποτέλεσμα τη διακοπή της συνεισφοράς του στην ανακούφιση του χαλύβδινου υποστρώματος. Από το σημείο αυτό κι έπειτα παρουσιάζεται συμπεριφορά παρόμοια με αυτή των δοκιμών αναφοράς και ο χάλυβας εισέρχεται στην πλαστική περιοχή. Επισημαίνεται το γεγονός ότι σε όλα τα δοκίμια παρατηρήθηκε αποκόλληση του ενισχυτικού επιθέματος, με εξαίρεση το δοκίμιο S-C-HLU-1 το οποίο παρουσιάζει σημαντικές πλαστικές παραμορφώσεις πριν την αποκόλληση του επιθέματος.

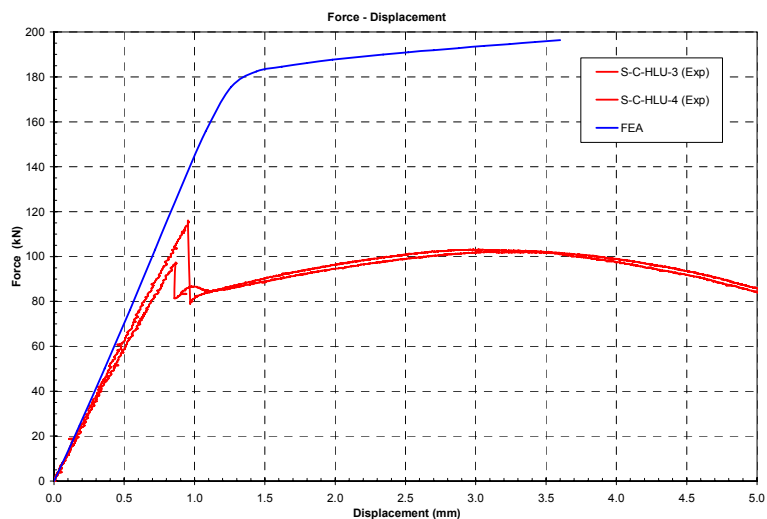
Μόνο η ελαστική περιοχή της συμπεριφοράς των δοκιμών προσομοιώνεται επακριβώς από τα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων, όπου στα σχήματα παρουσιάζονται με μπλε γραμμές. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι απουσιάζουν κριτήρια αστοχίας του κολλητικού μέσου, με αποτέλεσμα να μην παρουσιάζεται η αποκόλληση του ενισχυτικού επιθέματος στα αριθμητικά αποτελέσματα. Κατά συνέπεια, η αστοχία που εμφανίζεται στα αριθμητικά αποτελέσματα οφείλεται στη διαρροή του χαλύβδινου υποστρώματος που, στην περίπτωση των δοκιμών S-C-HLU-1&2 και S-C-VI-1&2 εμφανίζεται στην περιοχή γύρω από τη ρωγμή, ενώ στην περίπτωση των δοκιμών S-C-HLU-3&4 εμφανίζεται στην περιοχή κοντά στα άκρα του ενισχυτικού επιθέματος, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Καθώς η αστοχία των επιθεμάτων γίνεται σταδιακά κι επικρατεί μερική αποκόλλησή τους, τα πειραματικά αποτελέσματα αποκλίνουν ελαφρώς από τα αντίστοιχα αριθμητικά, με την απόκλιση αυτή να ξεκινάει σχεδόν από το μέσον της ελαστικής περιοχής.



Σχήμα 3.1.37: Καμπύλες φορτίου-επιμήκυνσης για τα δοκίμια S-C-HLU-1&2.



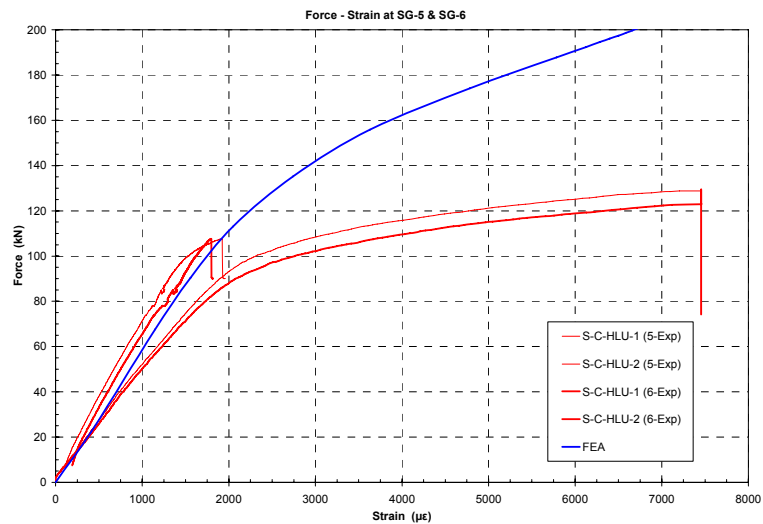
Σχήμα 3.1.38: Καμπύλες φορτίου-επιμήκυνσης για τα δοκίμια S-C-VI-1&2.



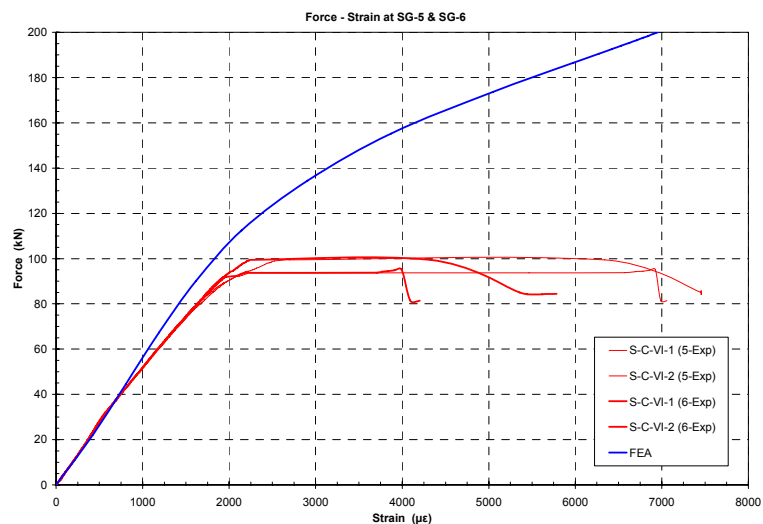
Σχήμα 3.1.39: Καμπύλες φορτίου-επιμήκυνσης για τα δοκίμια S-C-HLU-3&4.

Η μεταβολή των παραμορφώσεων στις θέσεις SG-5 και SG-6, εκατέρωθεν της ρωγμής, συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου παρουσιάζεται στα Σχήματα 3.1.40 έως 3.1.42. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί το γεγονός ότι καθώς μοντελοποιήθηκε μόνο το ¼ των δοκιμών, τα αποτελέσματα που λαμβάνονται αφορούν τη μία από τις δύο θέσεις. Όμως αυτό δεν επηρεάζει τα εξαγόμενα αποτελέσματα, καθώς οι θέσεις αυτές είναι απολύτως συμμετρικές ως προς τον διαμήκη άξονα του μοντέλου, με αποτέλεσμα να προκύπτουν ταυτόσημες τιμές. Στα πειραματικά αποτελέσματα (κόκκινες γραμμές), η αποκόλληση του ενισχυτικού επιθέματος αντιστοιχεί στο σημείο όπου παρατηρείται απότομη πτώση του φορτίου. Σε όλες τις περιπτώσεις, τα σχήματα υποδεικνύουν ότι εμφανίζονται σημαντικές πλαστικές παραμορφώσεις στα άκρα της ρωγμής του χαλύβδινου υποστρώματος, πριν ξεκινήσει η αποκόλληση του ενισχυτικού επιθέματος. Εξάιρεση αποτελεί το δοκίμιο S-C-HLU-1, το οποίο δεν εμφανίζει σημαντικές πλαστικές παραμορφώσεις πριν την αποκόλληση του επιθέματος. Όπως και προηγουμένως, τα αριθμητικά αποτελέσματα (μπλε γραμμές) προσομοιώνουν με ακρίβεια, μόνο την περιοχή της ελαστικής συμπεριφοράς των δοκιμών καθώς τα μοντέλα δεν περιλαμβάνουν

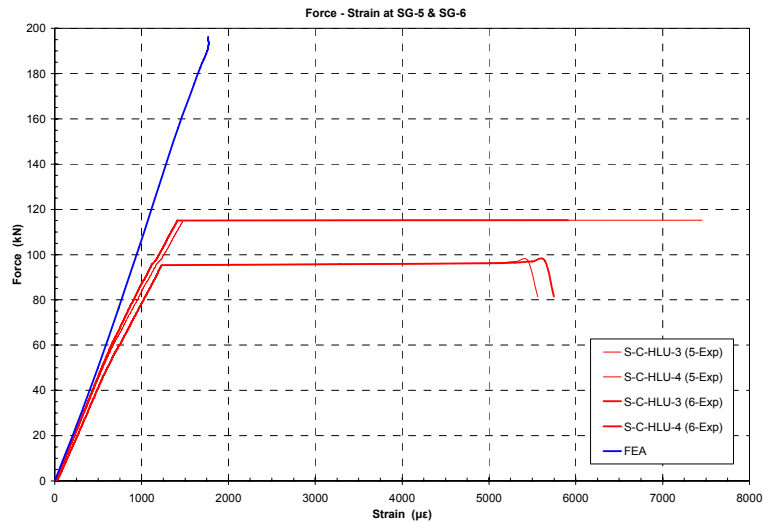
κριτήρια αστοχίας σχετικά με την αποκόλληση του επιθέματος. Πρέπει να επισημανθεί το γεγονός ότι στην περίπτωση των δοκιμών S-C-HLU-3&4, οι παραμορφώσεις στα άκρα της ρωγμής που προκύπτουν στα αριθμητικά αποτελέσματα, παραμένουν ελαστικές καθώς ο χάλυβας διαρρέει στην περιοχή κοντά στα άκρα του επιθέματος, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Στην πραγματικότητα όμως, ο χάλυβας διαρρέει και στην περιοχή γύρω από τη ρωγμή, μετά την αποκόλληση του ενισχυτικού επιθέματος.



Σχήμα 3.1.40: Καμπύλες φορτίου-παραμορφώσεων στις θέσεις SG-5 και SG-6 για τα δοκίμια S-C-HLU-1&2.



Σχήμα 3.1.41: Καμπύλες φορτίου-παραμορφώσεων στις θέσεις SG-5 και SG-6 για τα δοκίμια S-C-VI-1&2.

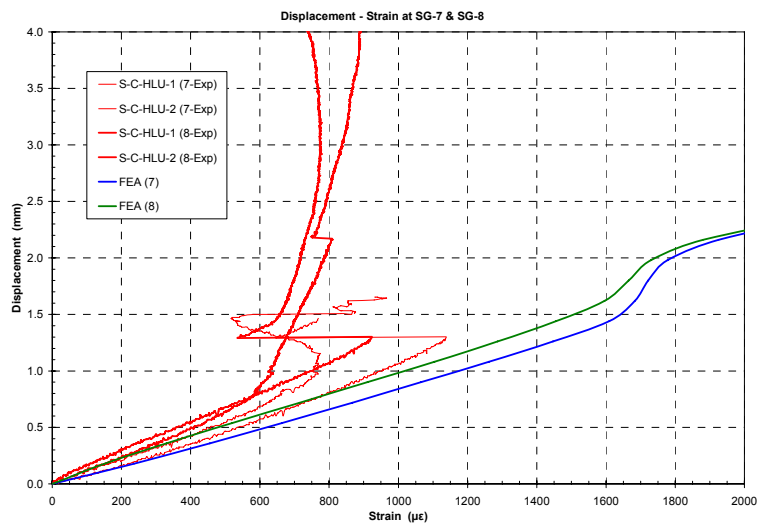


Σχήμα 3.1.42: Καμπύλες φορτίου-παραμορφώσεων στις θέσεις SG-5 και SG-6 για τα δοκίμια S-C-HLU-3&4.

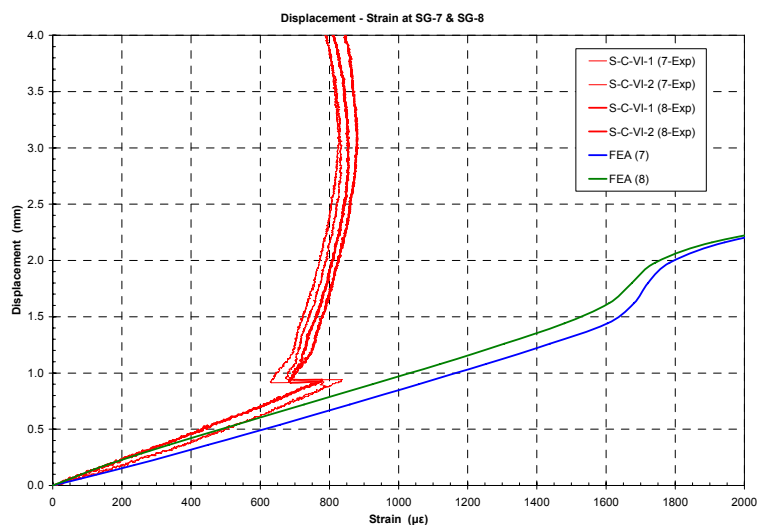
Η μεταβολή των παραμορφώσεων στις θέσεις SG-7 και SG-8, που βρίσκονται στη χαλύβδινη πλάκα μακριά από το ενισχυτικό επίθεμα, συναρτήσει της επιβαλλόμενης μετατόπισης παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.1.43 έως 3.1.45. Οι καμπύλες των παραμορφώσεων είναι συναρτήσει της επιβαλλόμενης μετατόπισης, διότι οι αντίστοιχες καμπύλες συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου δεν παρέχουν σαφή πληροφόρηση για την εξέλιξη του φαινομένου. Το βασικό συμπέρασμα που εξάγεται από τη μελέτη των πειραματικών αποτελεσμάτων είναι ότι, οι παραμορφώσεις στις θέσεις αυτές παραμένουν σε χαμηλά επίπεδα, μέσα στην ελαστική περιοχή. Μόλις πραγματοποιηθεί η αποκόλληση του ενισχυτικού επιθέματος, οι παραμορφώσεις παρουσιάζουν μια απότομη πτώση εξαιτίας του γεγονότος ότι ο χάλυβας παύει να υπόκειται σε κάμψη καθώς δεν υφίσταται πλέον μη συμμετρική εγκάρσια διατομή. Όπως ήταν αναμενόμενο, μετά την αποκόλληση του επιθέματος, ο χάλυβας διαρρέει στην περιοχή γύρω από τα άκρα της ρωγμής κι όχι σε περιοχή μακριά από το επίθεμα, με αποτέλεσμα οι παραμορφώσεις στις θέσεις SG-7 και SG-8 να μένουν ανεπηρέαστες. Τα αριθμητικά αποτελέσματα (μπλε και πράσινες γραμμές) συγκρίνονται σε καλό βαθμό με τα αντίστοιχα πειραματικά μόνο στην ελαστική περιοχή, για τους ίδιους λόγους που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Η προσωρινή μείωση του ρυθμού αύξησης των παραμορφώσεων που παρατηρείται, πραγματοποιείται τη στιγμή που ο χάλυβας διαρρέει σε ευρύτερη περιοχή γύρω από τα άκρα της ρωγμής.

Σύγκριση μεταξύ τόσο των πειραματικών μετρήσεων όσο και των αριθμητικών αποτελεσμάτων για τις ελαστικές παραμορφώσεις στη θέση SG-7 (λεπτές κόκκινες και μπλε γραμμές, αντίστοιχα) και τις αντίστοιχες στη θέση SG-8 (παχιές κόκκινες και πράσινες γραμμές) αποδεικνύει ότι οι πρώτες είναι σε κάποιο βαθμό μεγαλύτερες από τις τελευταίες (η κλίση της καμπύλης για τη θέση SG-7 είναι μικρότερη από εκείνη για τη θέση SG-8). Οι διαφορές αυτές οφείλονται στο γεγονός ότι η κεντρική περιοχή των δοκιμών υπόκειται σε κάμψη με την επιβολή του εφελκυστικού φορτίου, εξαιτίας της παρουσίας του μονόπλευρου επιθέματος και ως εκ τούτου τη δημιουργία μη συμμετρικής εγκάρσιας διατομής. Συνεπώς, κοντά στα άκρα των δοκιμών, επιπλέον εφελκυστικές

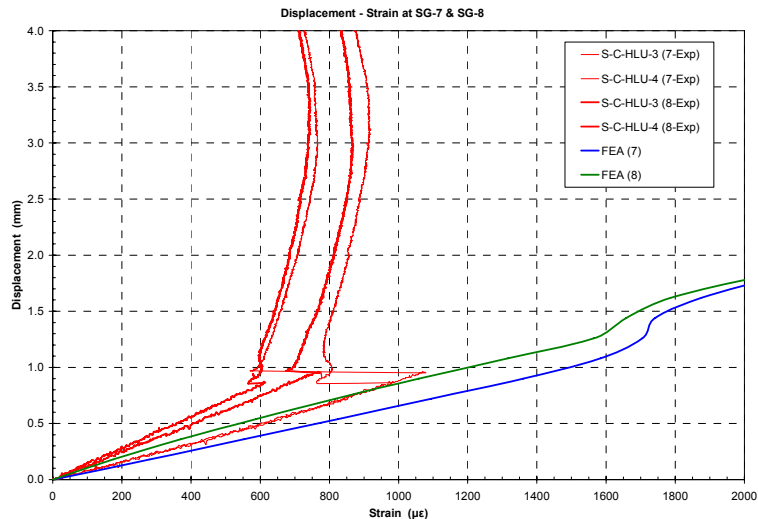
παραμορφώσεις αναπτύσσονται στην επάνω επιφάνεια του χάλυβα, στην οποία είναι τοποθετημένο το ενισχυτικό επίθεμα και βρίσκεται η θέση SG-7, ενώ στην αντίθετη επιφάνεια (θέση SG-8), μέρος των εφελκυστικών παραμορφώσεων, λόγω του εφελκυστικού φορτίου, αντισταθμίζονται από θλιπτικές παραμορφώσεις, λόγω του φαινομένου της κάμψης (βλέπε Σχήμα 3.1.32). Η μελέτη των καμπύλων στα Σχήματα 3.1.43 έως 3.1.45 καταλήγει στο συμπέρασμα ότι, όπως ήταν αναμενόμενο, το λεπτό ενισχυτικό επίθεμα PW/VI των δοκιμών S-C-VI-1&2 προκαλεί μικρότερη διαφορά μεταξύ των παραμορφώσεων στις δύο θέσεις, εξαιτίας της πιο ήπιας κάμψης που προκαλεί, συγκριτικά με το επίθεμα PW/HLU των δοκιμών S-C-HLU-1&2, ενώ το πιο παχύ επίθεμα UD-HM/HLU των δοκιμών S-C-HLU-3&4 προκαλεί τη μεγαλύτερη διαφορά, λόγω της πιο έντονης κάμψης που παρουσιάζει.



Σχήμα 3.1.43: Καμπύλες μετατόπισης-παραμορφώσεων στις θέσεις SG-7 και SG-8 για τα δοκίμια S-C-HLU-1&2.

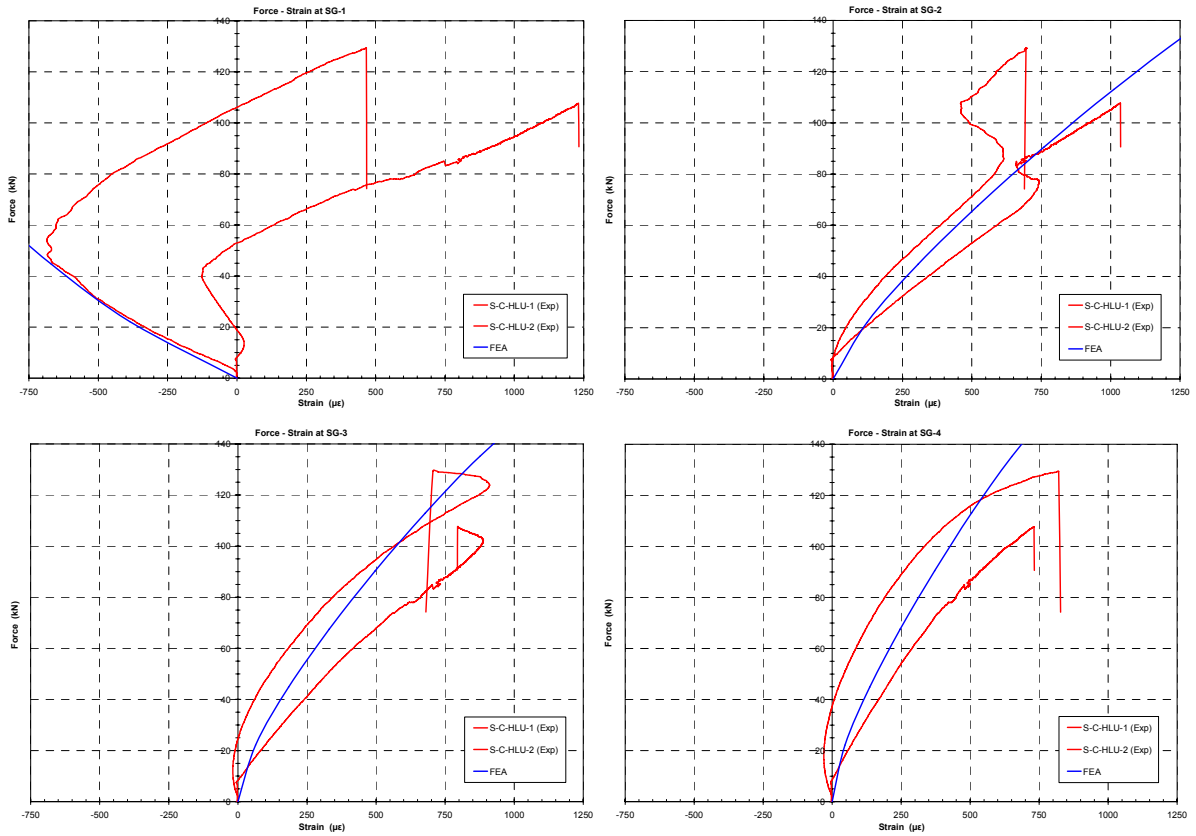


Σχήμα 3.1.44: Καμπύλες μετατόπισης-παραμορφώσεων στις θέσεις SG-7 και SG-8 για τα δοκίμια S-C-VI-1&2.

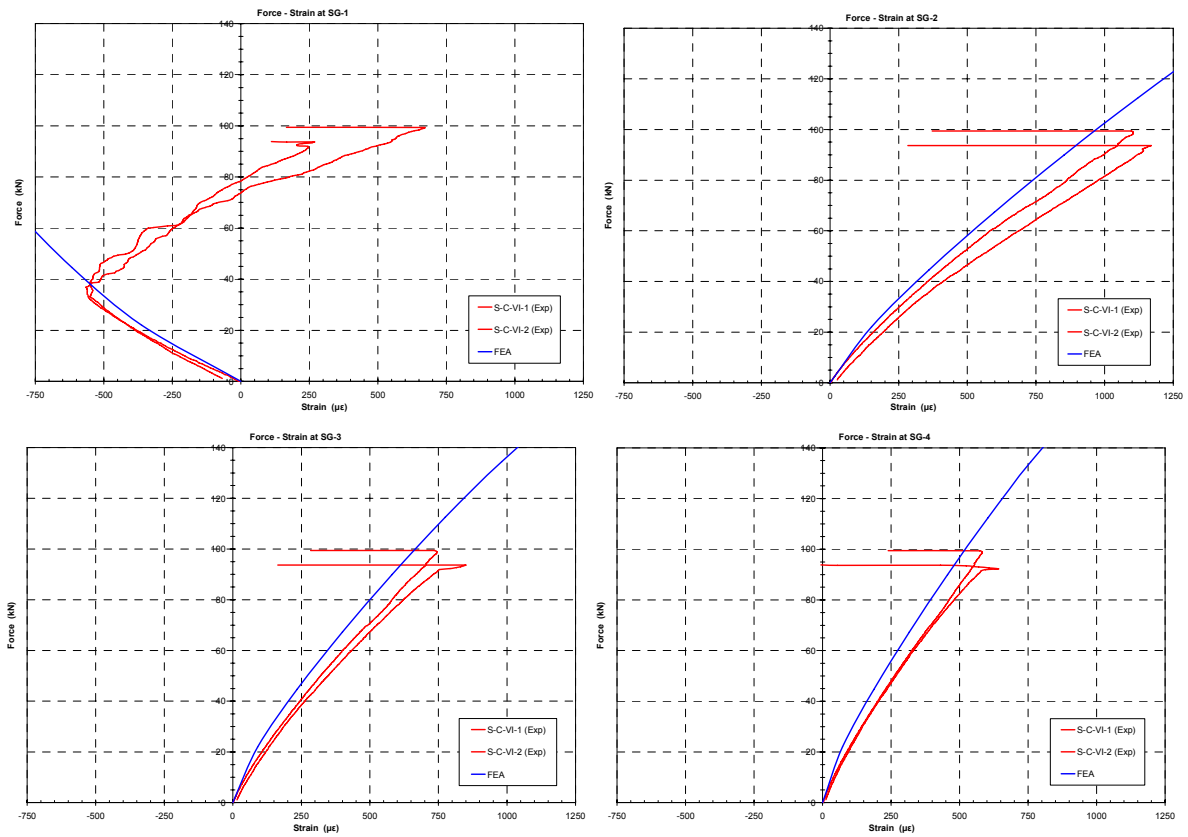


Σχήμα 3.1.45: Καμπύλες μετατόπισης-παραμορφώσεων στις θέσεις SG-7 και SG-8 για τα δοκίμια S-C-HLU-3&4.

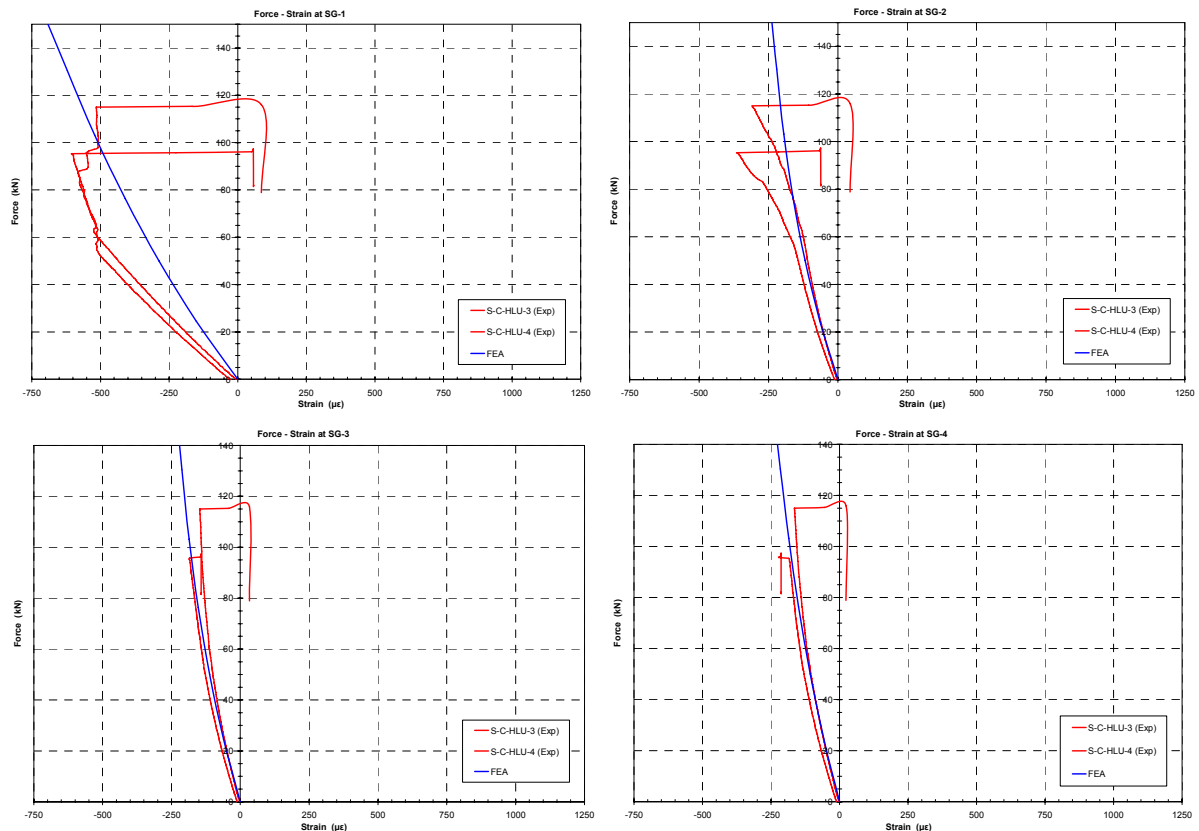
Η μεταβολή των παραμορφώσεων στο ενισχυτικό επίθεμα στις θέσεις SG-1, SG-2, SG-3 και SG-4 συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου για όλους τους τύπους των δοκιμών παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.1.46 έως 3.1.48. Όσον αφορά στις πειραματικές μετρήσεις (κόκκινες γραμμές), το πρώτο γενικό συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι υπάρχει καλή επαναληψιμότητα στα αποτελέσματα των δοκιμών S-C-VI-1&2 και S-C-HLU-3&4, ενώ δε συμβαίνει το ίδιο για τα δοκίμια S-C-HLU-1&2. Έχοντας υπ' όψη την ιδιαίτερη συμπεριφορά του δοκιμίου S-C-HLU-1 που αναφέρθηκε προηγουμένως, οι μετρήσεις του δοκιμίου αυτού δεν μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστες. Επόμενο συμπέρασμα που προκύπτει, είναι η διαφορά της συμπεριφοράς των παραμορφώσεων στη θέση SG-1 σχετικά με τις υπόλοιπες θέσεις SG-2, SG-3 και SG-4. Επιπλέον, η συμπεριφορά των δοκιμών S-C-HLU-3&4 είναι διαφορετική από των άλλων δοκιμών, σε όλες τις θέσεις. Σύμφωνα με τα παραπάνω, οι παραμορφώσεις των δοκιμών S-C-HLU-1&2 και S-C-VI-1&2 στις θέσεις SG-2, SG-3 και SG-4 παρουσιάζουν γραμμικά ελαστική συμπεριφορά και παραμένουν εν γένει σε χαμηλά επίπεδα. Αντιθέτως, στη θέση SG-1 ακριβώς πάνω από τη ρωγμή, οι παραμορφώσεις των δοκιμών αυτών είναι αρχικά θλιπτικές, ενώ στη συνέχεια, από κάποιο φορτίο κι έπειτα, μετατρέπονται σε εφελκυστικές. Οι αρχικά θλιπτικές παραμορφώσεις οφείλονται πιθανότατα σε τοπική κάμψη που υπόκειται το επίθεμα στην περιοχή ακριβώς πάνω από τη ρωγμή. Καθώς το φορτίο αυξάνει, πιθανότατα αρχίζει η αποκόλληση του επιθέματος στην περιοχή αυτή, με αποτέλεσμα το φαινόμενο της τοπικής κάμψης να περιορίζεται και οι παραμορφώσεις να μετατρέπονται σε εφελκυστικές, ακολουθώντας το επιβαλλόμενο εφελκυστικό φορτίο. Η τοπική αυτή κάμψη είναι διαφορετική από την κάμψη ολόκληρου του δοκιμίου που οφείλεται στη μη συμμετρική εγκάρσια διατομή και μπορεί να φανεί με σαφήνεια στα Σχήματα 3.1.49 και 3.1.50, όπου με μπλε χρώμα σημειώνεται η κεντρική περιοχή των δοκιμών. Στα σχήματα παρουσιάζονται τα μοντέλα που δημιουργήθηκαν με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για τα δοκίμια S-C-HLU-1&2 και S-C-VI-1&2 στα οποία απεικονίζεται η παραμόρφωση που έχουν υποστεί καθώς και η κατανομή της μετατόπισης κατά τον z-άξονα.



Σχήμα 3.1.46: Καμπύλες φορτίου-παραμορφώσεων στο επίθεμα για τα δοκίμια S-C-HLU-1&2.



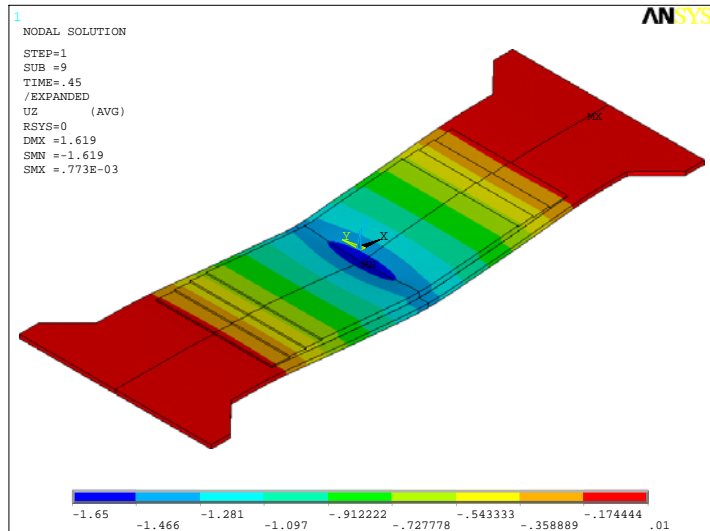
Σχήμα 3.1.47: Καμπύλες φορτίου-παραμορφώσεων στο επίθεμα για τα δοκίμια S-C-VI-1&2.



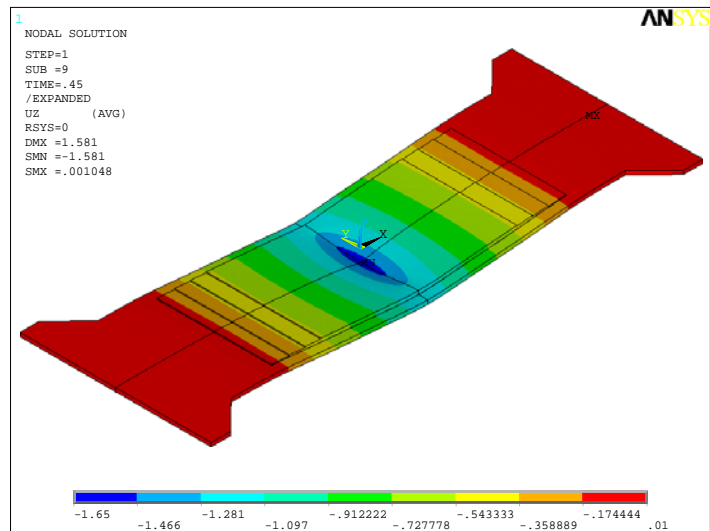
Σχήμα 3.1.48: Καμπύλες φορτίου-παραμορφώσεων στο επίθεμα για τα δοκίμια S-C-HLU-3&4.

Όσον αφορά στα δοκίμια S-C-HLU-3&4, στο Σχήμα 3.1.48 φαίνεται ότι αναπτύσσονται μόνο θλιπτικές παραμορφώσεις στο επίθεμα, σε όλες τις θέσεις και για όλο το εύρος της φόρτισης. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι τα δοκίμια αυτά αποτελούνται από πιο παχύ ενισχυτικό επίθεμα σε σύγκριση με τα υπόλοιπα, με αποτέλεσμα να υπόκεινται σε πιο έντονη κάμψη, όπως δείχθηκε παραπάνω. Η παρουσία του επιθέματος αυτού πιθανότατα περιορίζει την εμφάνιση της τοπικής κάμψης στη θέση SG-1 που παρουσιάζεται στα υπόλοιπα δοκίμια, με αποτέλεσμα τα δοκίμια S-C-HLU-3&4 να παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά. Η διαφορά αυτή φαίνεται καθαρά συγκρίνοντας την παραμόρφωση που έχουν υποστεί τα συγκεκριμένα δοκίμια καθώς και τη κατανομή της μετατόπισης κατά το z-άξονα όπου φαίνονται στο Σχήμα 3.1.51 με τα αντίστοιχα στα Σχήματα 3.1.49 και 3.1.50. Η απουσία της τοπικής κάμψης στην περιοχή ακριβώς πάνω από τη ρωγμή είναι ολοφάνερη στο Σχήμα 3.1.51, ενώ η παρουσία της φαίνεται ξεκάθαρα στα Σχήματα 3.1.49 και 3.1.50.

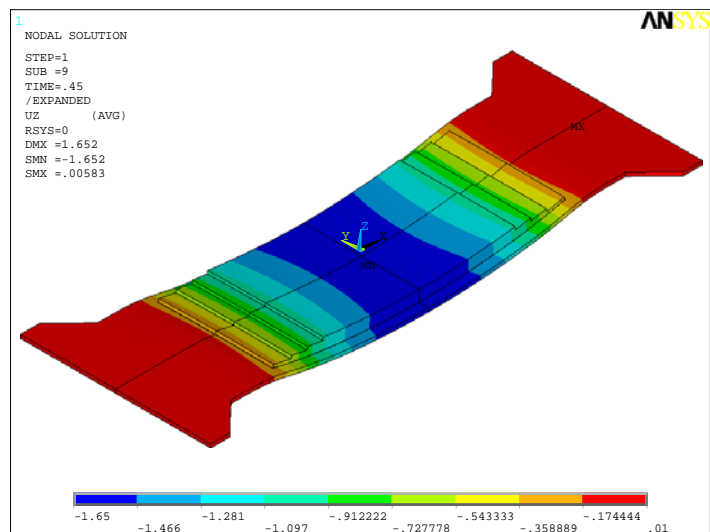
Οι πειραματικές μετρήσεις προσομοιώνονται με αρκετά καλή ακρίβεια από τα αντίστοιχα αριθμητικά αποτελέσματα, ειδικότερα στις θέσεις SG-2, SG-3 και SG-4. Οι παραμορφώσεις στη θέση SG-1 για τα δοκίμια S-C-HLU-1&2 και S-C-VI-1&2 δεν παρουσιάζουν μεταβολή στο πρόσημό τους στα αριθμητικά αποτελέσματα καθώς τα μοντέλα δεν περιλαμβάνουν κριτήριο αστοχίας σχετικά με την αποκόλληση του ενισχυτικού επιθέματος. Ωστόσο, οι αριθμητικές παραμορφώσεις προβλέπονται με μεγάλη ακρίβεια κατά το αρχικό στάδιο.



Σχήμα 3.1.49: Κατανομή της μετατόπισης κατά τον z-άξονα για τα δοκίμια S-C-HLU-1&2.



Σχήμα 3.1.50: Κατανομή της μετατόπισης κατά τον z-άξονα για τα δοκίμια S-C-VI-1&2.



Σχήμα 3.1.51: Κατανομή της μετατόπισης κατά τον z-άξονα για τα δοκίμια S-C-HLU-3&4.

3.2 Περιγραφή της Αριθμητικής Μοντελοποίησης των Διαβρωμένων Πλακών Χάλυβα

Στο εδάφιο αυτό θα παρουσιαστεί ο τρόπος με τον οποίο μοντελοποιήθηκαν τα δοκίμια των διαβρωμένων πλακών χάλυβα που ενισχύθηκαν με επίθεμα σύνθετων υλικών, καθώς και οι επιλογές που έγιναν για το σκοπό αυτό. Πρέπει να τονιστεί το γεγονός ότι για την ανάπτυξη του συγκεκριμένου μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων εφαρμόστηκαν τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε για την παραγωγή του αριθμητικού μοντέλου των ρωγματομένων πλακών. Κατά συνέπεια, στην περιγραφή της διαδικασίας αυτής υπάρχουν σημεία τα οποία έχουν ήδη περιγραφεί σε προηγούμενα εδάφια οπότε δε θα αναλυθούν ξανά, παρά μόνο θα αναφερθούν. Υπάρχουν όμως και κάποια σημεία όπου παρατηρούνται διαφορές οπότε και θα παρατεθεί η απαιτούμενη ανάλυση και θα δοθούν τα αντίστοιχα στοιχεία. Τέλος, επισημαίνεται ότι η ονοματολογία και ο συμβολισμός των δοκιμών παραμένει ο ίδιος όπως ορίστηκε στο Κεφάλαιο 2, εδάφιο 2.2.

3.2.1 Μηχανικές Ιδιότητες και Μοντελοποίηση Υλικών

Τα πειραματικά δοκίμια που εξετάζονται αποτελούνται από μεταλλικές πλάκες χάλυβα, ενισχυτικό επίθεμα από σύνθετα υλικά που αποτελούνται από ίνες άνθρακα και εποξειδική ρητίνη και κολλητικό μέσο από εποξειδική ρητίνη.

Οι μεταλλικές πλάκες που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των δοκιμών αποτελούνται από κοινό ναυπηγικό χάλυβα Grade A, μέτρου ελαστικότητας E , λόγου Poisson ν και ορίου διαρροής σ_0 . Οι τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων που χρησιμοποιήθηκαν στην αριθμητική προσομοίωση αναγράφονται στον Πίνακα 3.2.1. Η μηχανική συμπεριφορά του χάλυβα προσομοιώθηκε ως ελαστικό γραμμικώς κρατυνόμενο, ιστροπικό υλικό (βλέπε Σχήμα 3.1.2) με μέτρο κράτυνσης το 1.5% του μέτρου ελαστικότητας E , ίσο με 3000 MPa.

Πίνακας 3.2.1: Αριθμητικές Τιμές Μηχανικών Ιδιοτήτων Χάλυβα.

Υλικό	E (MPa)	ν	σ_0 (MPa)
Χάλυβας	200000	0.30	348

Το επίθεμα από σύνθετα υλικά μοντελοποιήθηκε ως ομοιογενές γραμμικά ελαστικό, ορθοτροπικό υλικό με μέτρα ελαστικότητας E_x, E_y, E_z , λόγους Poisson $\nu_{xy}, \nu_{yz}, \nu_{xz}$ και μέτρα διάτμησης G_{xy}, G_{yz}, G_{xz} . Οι τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων που χρησιμοποιήθηκαν στην αριθμητική προσομοίωση αναγράφονται στον Πίνακα 3.2.2. Όσον αφορά στα ενισχυτικά επιθέματα T/HLU και T/VI, οι τιμές των μέτρων ελαστικότητας E_x και E_y προέρχονται από τον Πίνακα 2.2.3 και υπολογίστηκαν θεωρητικά σύμφωνα με την επιτευχθείσα κατά βάρος περιεκτικότητα των ινών W_f (βλέπε εδάφιο 2.2.1), και αναγράφονται με έντονο χρώμα, ενώ οι υπόλοιπες προέρχονται από τη βιβλιογραφία. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί το

γεγονός ότι το ύφασμα ινών άνθρακα Twill 2x2, με το οποίο είναι κατασκευασμένα τα επιθέματα αυτά, έχει τα ίδια χαρακτηριστικά (ισοσταθμισμένο) με το ύφασμα Plain Weave (επιθέματα PW/HLU και PW/VI), οπότε μοντελοποιείται κατά τον ίδιο τρόπο (βλέπε εδάφιο 3.1.1). Στην περίπτωση των ενισχυτικών επιθεμάτων UD-HM/HLU, η τιμή του μέτρου ελαστικότητας E_x υπολογίστηκε σύμφωνα με την προαναφερθείσα διαδικασία (βλέπε Πίνακα 2.2.3), με τη τιμή της κατά βάρος περιεκτικότητας των ινών W_f να προέρχεται από τον Πίνακα 2.2.2, ενώ οι τιμές των υπόλοιπων μηχανικών ιδιοτήτων να προέρχονται από τη βιβλιογραφία.

Πίνακας 3.2.2: Αριθμητικές Τιμές Μηχανικών Ιδιοτήτων των Επιθεμάτων από Σύνθετα Υλικά.

Υλικό	E_x (MPa)	E_y (MPa)	E_z (MPa)	ν_{xy}	ν_{yz}	ν_{xz}	G_{xy} (MPa)	G_{yz} (MPa)	G_{xz} (MPa)
T / HLU	32152	32152	5000	0.30	0.02	0.30	2400	1600	2400
T / VI	59444	59444	5000	0.30	0.02	0.30	2400	1600	2400
UD-HM / HLU	152200	9700	9700	0.32	0.02	0.32	5500	3200	5500

Το κολλητικό μέσο, που αποτελείται από εποξειδική ρητίνη σε μορφή φιλμ, μοντελοποιήθηκε ως γραμμικά ελαστικό, ιστροπικό υλικό με μέτρο ελαστικότητας E και λόγο Poisson ν . Οι τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων που χρησιμοποιήθηκαν στην αριθμητική προσομοίωση αναγράφονται στον Πίνακα 3.2.3. Πρέπει να σημειωθεί ότι χρησιμοποιήθηκαν αντίστοιχα δύο τύποι ρητίνης, για τα επιθέματα T/HLU και T/VI και για το επίθεμα UD-HM/HLU, οι μηχανικές ιδιότητες των οποίων προέρχονται, αντιστοίχως, από τη βιβλιογραφία και την κατασκευάστρια εταιρία.

Πίνακας 3.2.3: Αριθμητικές Τιμές Μηχανικών Ιδιοτήτων του Κολλητικού Μέσου.

Υλικό	E (MPa)	ν
Κολλητικό Μέσο ¹	4500	0.25
Κολλητικό Μέσο ²	3000	0.32

¹ Για τα Υλικά T/HLU, T/VI, από τη βιβλιογραφία

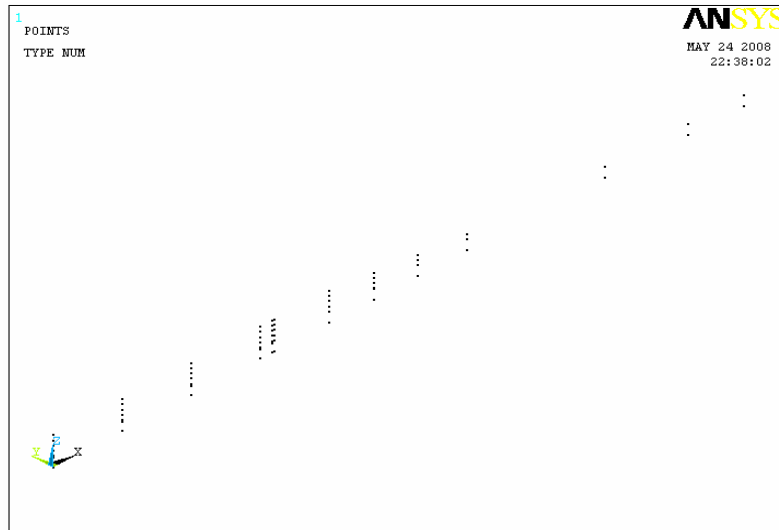
² Για το Υλικό UD-HM/HLU, από το φύλλο ιδιοτήτων της SIKA

3.2.2 Γεωμετρία Μοντέλου

Η δημιουργία του μοντέλου συνίσταται από τα ίδια βήματα που παρουσιάστηκαν στο εδάφιο 3.1.2, δηλαδή τον καθορισμό των σημείων (keypoints), τη δημιουργία των επιφανειών (areas) και τέλος τη δημιουργία των όγκων (volumes) και την τελική μορφή του μοντέλου. Η παρουσία όμως διαφορών στον τρόπο παραγωγής τους έχει ως αποτέλεσμα την ανάγκη παρουσίασης και ανάλυσής τους, κάτι που θα ακολουθήσει στη συνέχεια. Επίσης σημειώνεται ότι οι άξονες x , y και z ορίζονται με τον ίδιο τρόπο όπως ορίστηκε στην παράγραφο που αναφέρθηκε παραπάνω και στο Σχήμα 3.1.7.

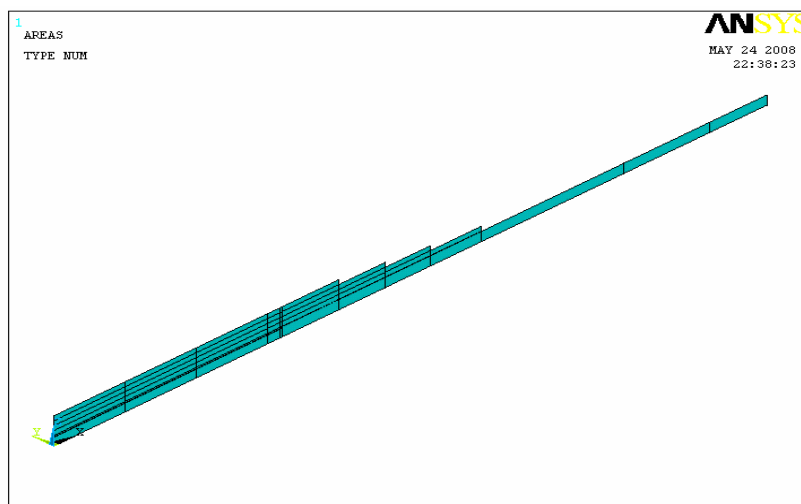
Ο καθορισμός των σημείων (keypoints) πραγματοποιήθηκε εισάγοντας τις συντεταγμένες τους στο επίπεδο x - z , ορίζοντας έτσι τη διαμήκη διατομή του μοντέλου κατά το επίπεδο

αυτό, που επίσης τυγχάνει να είναι και επίπεδο συμμετρίας της γεωμετρίας των δοκιμίων. Με τον τρόπο αυτό οριοθετήθηκε η έκταση των επιμέρους υλικών που αποτελούν τα δοκίμια κατά τον x και z άξονα καταλήγοντας έτσι στη συνολική γεωμετρία. Το σύνολο των σημείων που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.2.1., ενώ έχουν παραληφθεί οι αύξοντες αριθμοί τους, για την ευκρινέστερη παρουσίασή τους.



Σχήμα 3.2.1: Δημιουργία σημείων (keypoints) της επιφάνειας.

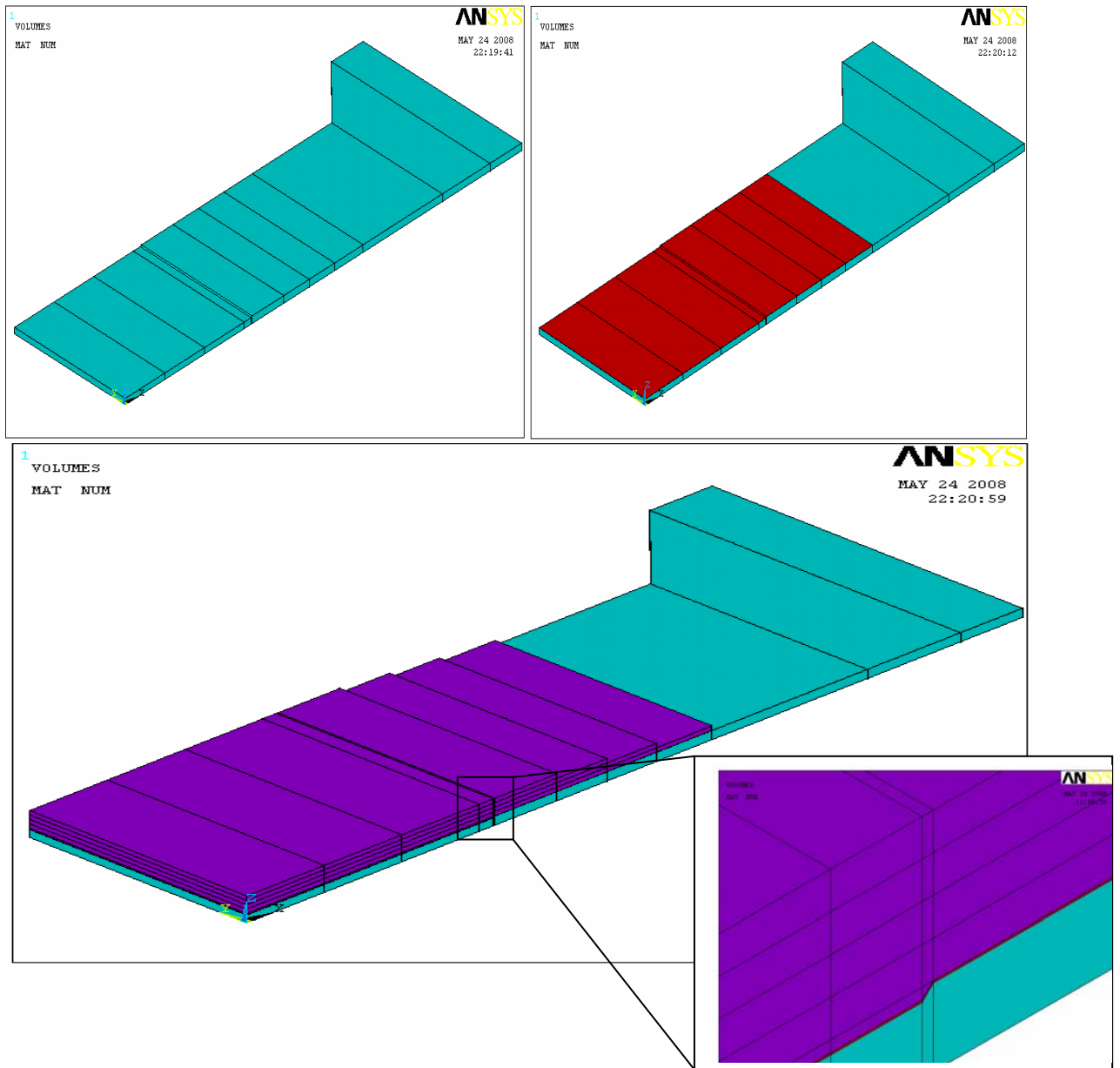
Στη συνέχεια, ενώνοντας τα σημεία που έχουν δημιουργηθεί, παράγεται η συνολική επιφάνεια (areas) της διατομής που αναφέρθηκε παραπάνω. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται το δισδιάστατο μοντέλο που κρίνεται ως βοηθητικό, καθώς στη συνέχεια, βάσει αυτού, θα προκύψει η συνολική γεωμετρία και το τελικό τρισδιάστατο μοντέλο. Οι επιφάνειες που προκύπτουν παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.2.2. Η διαφορά με το δισδιάστατο μοντέλο που παρουσιάστηκε στο εδάφιο 3.1.2 είναι ότι τώρα εκτείνεται κατά το επίπεδο x-z, σε αντίθεση με το προηγούμενο που εκτείνεται κατά το επίπεδο x-y. Επόμενο είναι λοιπόν να διαφέρει και η δημιουργία των όγκων καθώς η διαδικασία της προεκβολής θα γίνει κατά τη διεύθυνση y, έτσι ώστε να προκύψει το τελικό μοντέλο.



Σχήμα 3.2.2: Δημιουργία επιφανειών(areas) και δισδιάστατου (βοηθητικού) μοντέλου.

Τέλος, έχοντας ορίσει τη διαμήκη διατομή του μοντέλου, απομένει η διαδικασία με την οποία παράγεται το τρισδιάστατο μοντέλο. Η διαδικασία αυτή συνίσταται στην προεκβολή των κατάλληλων επιφανειών κατά τη διεύθυνση y . Δηλαδή, έγινε προεκβολή της διατομής που αντιστοιχεί στο χάλυβα (μπλε χρώμα), στο κολλητικό μέσο (κόκκινο χρώμα) και σε κάθε ομάδα στρώσεων (βλέπε εδάφιο 2.2.3) του ενισχυτικού επιθέματος (μωβ χρώμα), όπου στο Σχήμα 3.2.3 φαίνονται τα στάδια της διαδικασίας αυτής και η τελική μορφή του τρισδιάστατου μοντέλου.

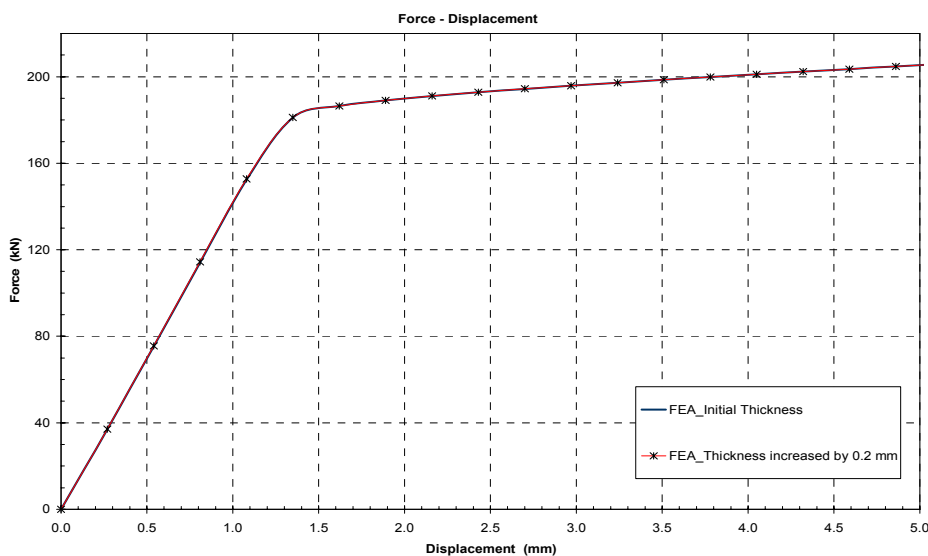
Οι τιμές των γεωμετρικών διαστάσεων που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται τόσο από πειραματικά μετρούμενες τιμές, όσο και από ονομαστικές τιμές αυτών. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι, εξαιτίας της ύπαρξης συμμετρίας στη γεωμετρία των δοκιμίων αλλά και για μείωση της υπολογιστικής ισχύος, με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων μοντελοποιήθηκε μόνο το $\frac{1}{4}$ της συνολικής γεωμετρίας. Κατά συνέπεια, οι τιμές των γεωμετρικών διαστάσεων που χρησιμοποιήθηκαν ακολουθούν την επιλογή αυτή. Το πλάτος του χαλύβδινου τμήματος των δοκιμίων W_s , καθώς και το πάχος του t_s πριν και μετά τη διάβρωση προκύπτουν από τις τιμές του Πίνακα 2.2.4, θεωρώντας το μέσο όρο για το κάθε δοκίμιο. Το μήκος θεωρήθηκε ίσο με 250 mm, τιμή που προκύπτει από τη σειρά σχετικών δοκιμών που διενεργήθηκαν στο εδάφιο 3.1.2 και αντιστοιχεί στο μήκος του χάλυβα που βρίσκεται εκτός των ειδικών προσαρμογών που χρησιμοποιήθηκαν στην υδραυλική μηχανή δοκιμών (ελεύθερο μήκος). Το πάχος του ενισχυτικού επιθέματος t_p προκύπτει από τις τιμές του Πίνακα 2.2.2, θεωρώντας το $\frac{1}{4}$ της τιμής αυτής για κάθε ομάδα στρώσεων. Το μήκος της πρώτης ομάδας στρώσεων είναι 200 mm, της δεύτερης 232 mm, της τρίτης 264 mm και της τέταρτης 300 mm. Όπως αναφέρθηκε στο εδάφιο 3.1.2, η διάταξή τους στο αριθμητικό μοντέλο είναι αντίθετη από τη σειρά επίθεσής τους (βλέπε εδάφιο 2.2.3). Το πλάτος του επιθέματος ταυτίζεται με το πλάτος του χάλυβα W_s . Τέλος, το πάχος του κολλητικού μέσου θεωρήθηκε ίσο με 0.1 mm, ενώ οι υπόλοιπες διαστάσεις του ταυτίζονται με αυτές της τέταρτης ομάδας στρώσεων. Για τις υπόλοιπες διαστάσεις θεωρήθηκαν οι ονομαστικές τιμές όπως αυτές δίνονται στο εδάφιο 2.2.2 (Σχήμα 2.2.1), θεωρώντας το $\frac{1}{4}$ της συνολικής γεωμετρίας. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι τιμές που δόθηκαν παραπάνω για τα πλάτη χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διαδικασία της προεκβολής, διαδικασία που αναφέρθηκε στον τρόπο παραγωγής του μοντέλου.



Σχήμα 3.2.3: Δημιουργία όγκων (volumes).

Μια περιοχή που χρίζει ιδιαίτερης προσοχής στον τρόπο μοντελοποίησής της είναι αυτή όπου ο χάλυβας έχει υποστεί διάβρωση και εφαρμόζεται το ενισχυτικό επίθεμα από σύνθετα υλικά. Η περιοχή αυτή μοντελοποιήθηκε έχοντας ομοιόμορφη μείωση πάχους σύμφωνα με τις τιμές του Πίνακα 2.2.4, όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Η μετάβαση από τη διαβρωμένη περιοχή του χάλυβα στην άθικτή του περιοχή πραγματοποιήθηκε με κλίση 45°, όπως φαίνεται στη λεπτομέρεια του Σχήματος 3.2.3. Στην περιοχή αυτή, αποδίδεται ελαφρώς αυξημένο πάχος στο ενισχυτικό επίθεμα έτσι ώστε η ανώτερη ελεύθερη επιφάνειά του να παραμείνει επίπεδη και οριζόντια. Οι παραπάνω υποθέσεις που έγιναν στον τρόπο μοντελοποίησης της περιοχής αυτής ενδέχεται να εισάγουν κάποιο λάθος στο μοντέλο καθώς δεν παρουσιάζονται με τον τρόπο αυτό στα πειραματικά δοκίμια. Βέβαια, μια δοκιμή που διενεργήθηκε και αφορούσε το πάχος της διαβρωμένης περιοχής έδειξε ότι η τιμή του δεν επηρεάζει τα εξαγόμενα αποτελέσματα. Η δοκιμή έγινε καταγράφοντας τις καμπύλες φορτίου-

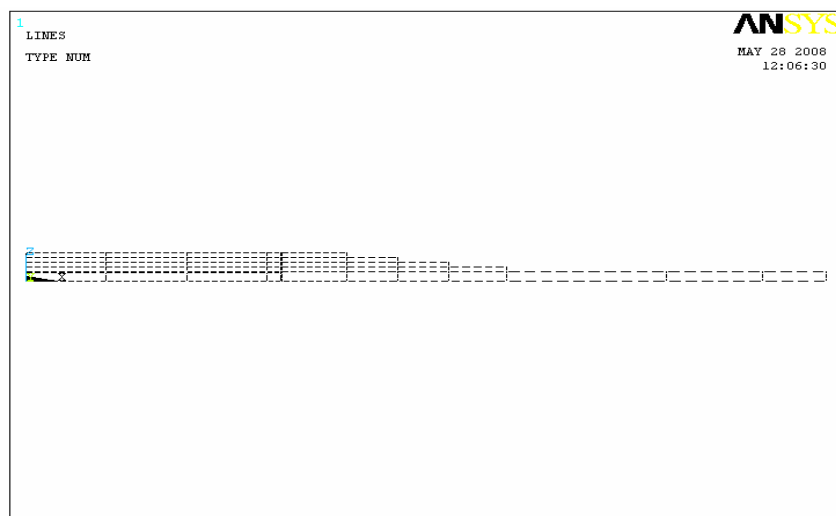
επιμήκυνσης δύο μοντέλων, που προσομοίωναν δοκίμια με ενισχυτικό επίθεμα και το ένα είχε αυξημένο το πάχος του χάλυβα μετά τη διάβρωση (βλέπε Πίνακα 2.2.4) κατά 0.2 mm. Στο Σχήμα 3.2.8 παρουσιάζονται οι καμπύλες αυτές όπου παρατηρείται ταύτιση μεταξύ των δύο καμπύλων με αποτέλεσμα να προκύψει το συμπέρασμα ότι η αλλαγή στην τιμή του πάχους είναι μικρής σημασίας.



Σχήμα 3.2.8: Συγκριτικό διάγραμμα για το πάχος της διαβρωμένης περιοχής.

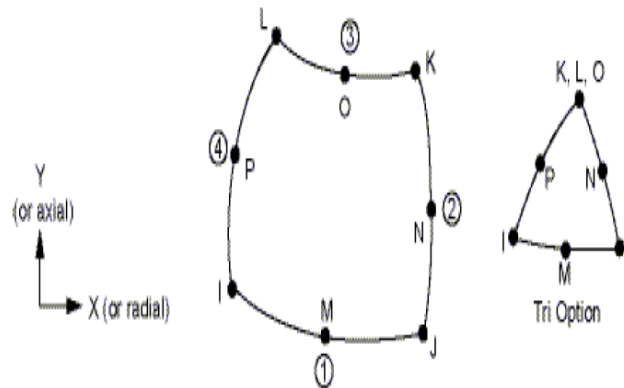
3.2.3 Επιλογή στοιχείων- Διακριτοποίηση

Η διαδικασία της διακριτοποίησης ξεκινάει από τις γραμμές του δισδιάστατου μοντέλου (Σχήμα 3.2.2) με την κατάλληλη διαμέρισή τους. Σκοπός του βήματος αυτού είναι η δημιουργία ενός ομοιόμορφου καννάβου πεπερασμένων στοιχείων και η ύπαρξη κόμβων σε επιθυμητά σημεία όπου απαιτείται η εξαγωγή αποτελεσμάτων μετά το πέρας της ανάλυσης (βλέπε εδάφιο 3.2.6). Οι γραμμές του δισδιάστατου μοντέλου που έχουν υποστεί διακριτοποίηση φαίνονται στο Σχήμα 3.2.4.



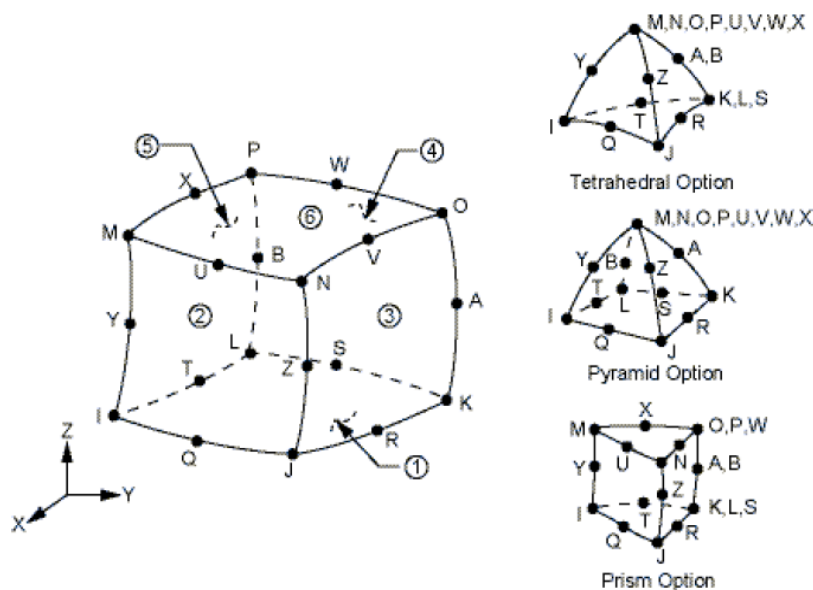
Σχήμα 3.2.4: Διακριτοποίηση των γραμμών του δισδιάστατου μοντέλου.

Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία του βοηθητικού μοντέλου είναι τα δισδιάστατα στοιχεία PLANE 82 (Σχήμα 3.2.5), που αποτελούνται από οχτώ κόμβους (8-node), με δύο βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο (2 μετατοπίσεις). Πρέπει να σημειωθεί ότι τα στοιχεία αυτά πρέπει να συνεργάζονται άψογα με τα αντίστοιχα τρισδιάστατα που θα χρησιμοποιηθούν στο τρισδιάστατο μοντέλο, δηλαδή να έχουν κοινό αριθμό κόμβων ανά πλευρά και τα ίδια χαρακτηριστικά.



Σχήμα 3.2.5: Γεωμετρία στοιχείου PLANE 82.

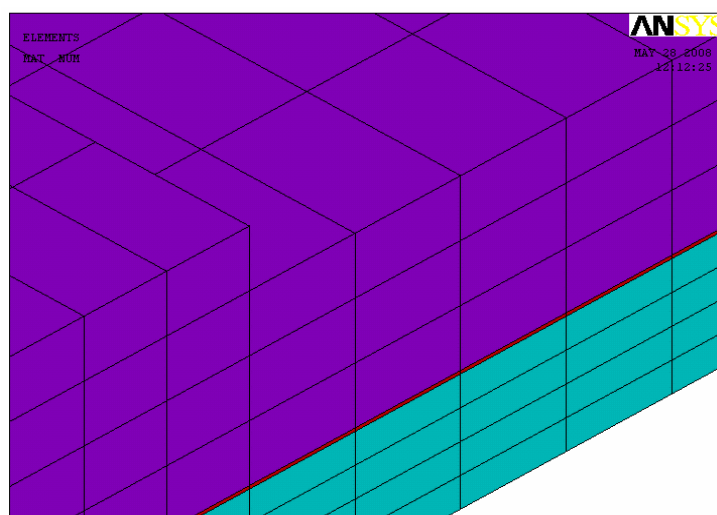
Τα τρισδιάστατα στερεά στοιχεία (solid elements) που χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία του μοντέλου είναι τα στοιχεία είκοσι κόμβων (20-node) SOLID95 (Σχήμα 3.2.6), τα οποία έχουν τρεις βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο (μετατοπίσεις κατά τις διευθύνσεις x, y και z). Πρέπει να σημειωθεί και η αγαστή συνεργασία με το στοιχείο PLANE82 καθώς έχουν τον ίδιο αριθμό κόμβων σε κάθε πλευρά και τα ίδια χαρακτηριστικά.



Σχήμα 3.2.6: Γεωμετρία στοιχείου SOLID95.

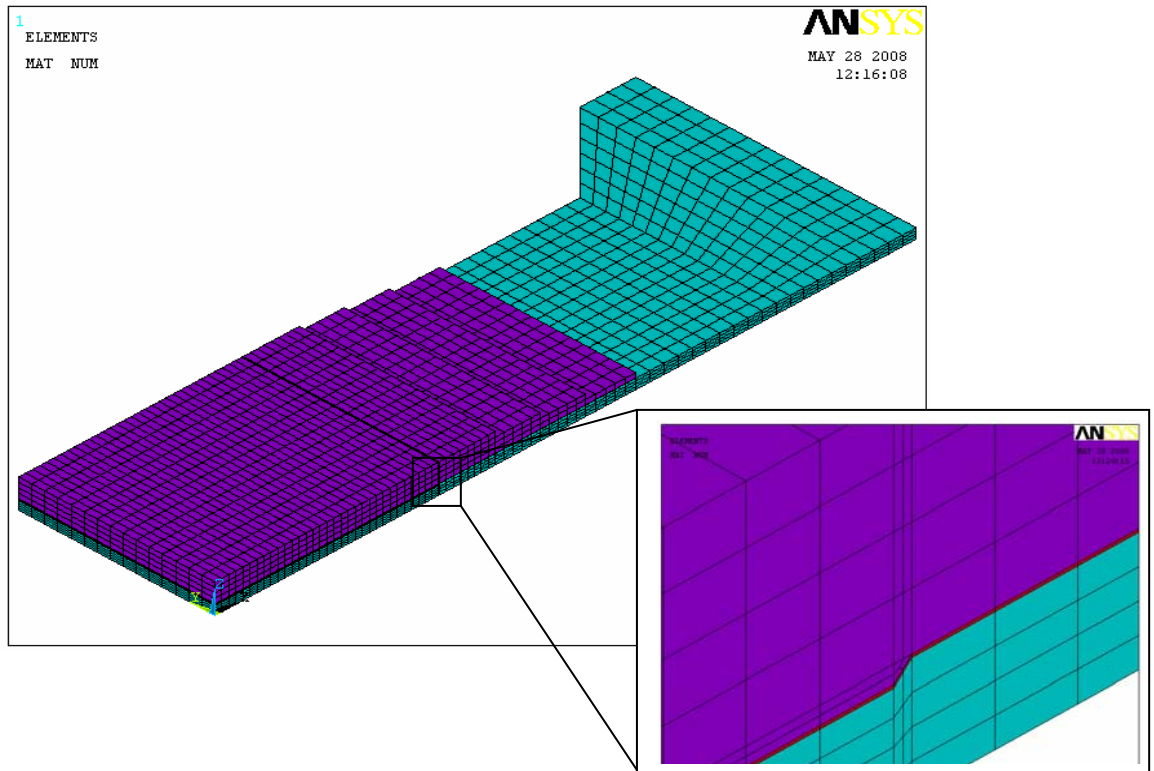
Τονίζεται η ανάγκη συγχώνευσης των κόμβων που έχουν τις ίδιες συντεταγμένες έτσι ώστε να υπάρχει συνέχεια μεταξύ των διαφορετικών υλικών που αποτελούν το μοντέλο και να συμπεριφέρεται ως ενιαία κατασκευή. Κατά συνέπεια, πραγματοποιήθηκε συγχώνευση των ανώτερων κόμβων του χάλυβα με τους κατώτερους κόμβους της ρητίνης και των κατώτερων κόμβων του σύνθετου υλικού με τους ανώτερους κόμβους της ρητίνης. Επίσης, η παραπάνω διαδικασία πραγματοποιήθηκε και μεταξύ των στρώσεων που αποτελούν το σύνθετο υλικό.

Ο αριθμός των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διεύθυνση του πάχους (διεύθυνση z) για την προσομοίωση του χαλύβδινου τμήματος των δοκιμίων θεωρήθηκε ίσος με τέσσερα. Για το κολλητικό μέσο χρησιμοποιήθηκε ένα στοιχείο, ενώ για το ενισχυτικό επίθεμα χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα στοιχεία, ένα για κάθε ομάδα στρώσεων διαφορετικού μήκους (βλέπε εδάφιο 2.2.3). Στο Σχήμα 3.2.7 φαίνεται συνολικά ο αριθμός των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο κατά τη διεύθυνση του πάχους, όπου με μπλε χρώμα συμβολίζεται ο χάλυβας, με κόκκινο το κολλητικό μέσο και με μωβ το ενισχυτικό επίθεμα.



Σχήμα 3.2.7: Αριθμός στοιχείων κατά τη διεύθυνση του πάχους.

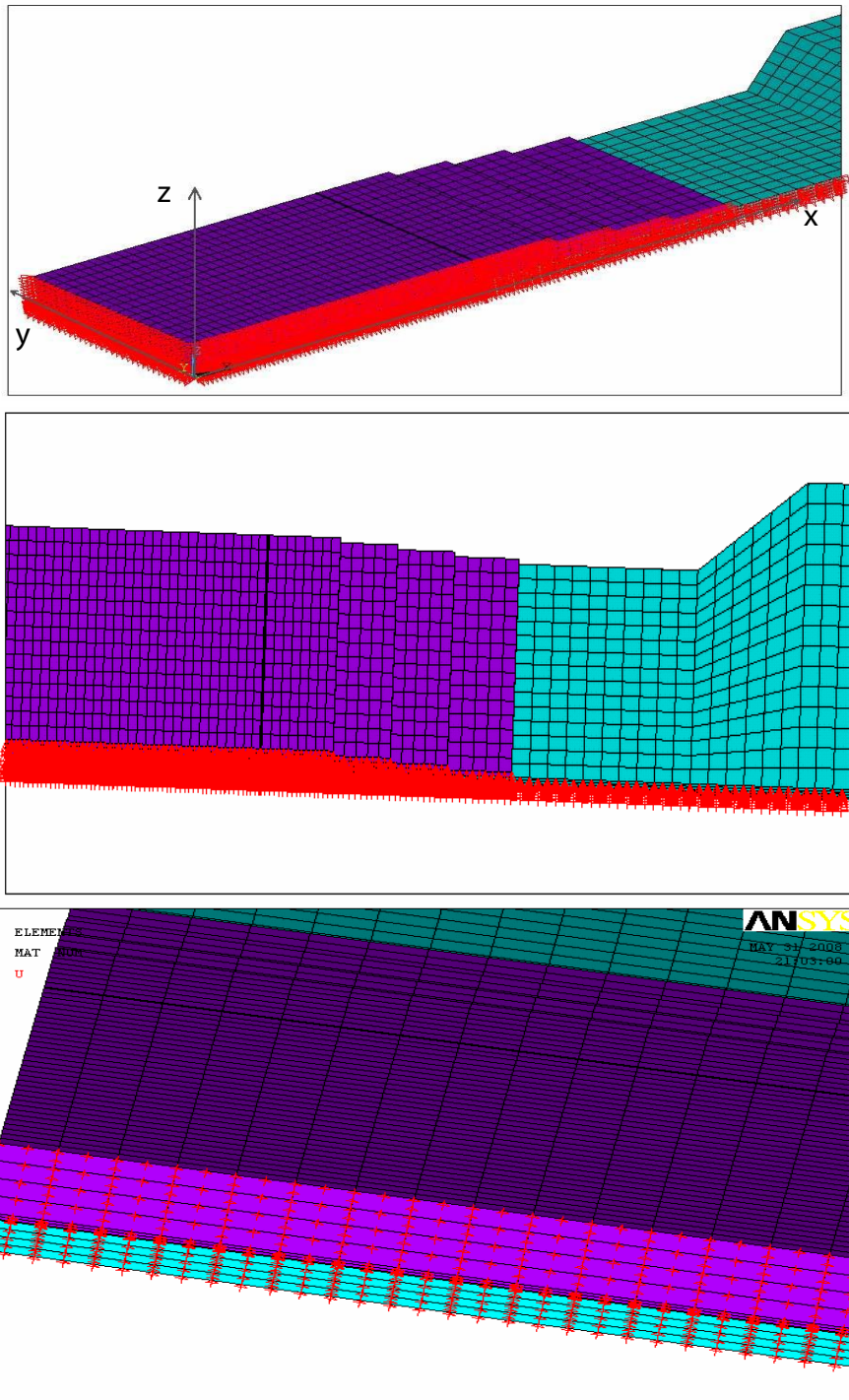
Σύμφωνα με τη διακριτοποίηση που έγινε, το μέγεθος των στοιχείων κατά τις x και y διευθύνσεις ποικίλει ανάλογα με την περιοχή που εξετάζεται. Έτσι, στην περιοχή μετάβασης από τη διαβρωμένη περιοχή του χάλυβα στην άθικτη κυμαίνεται από 0.275 mm έως 2.5 mm, ενώ στα υπόλοιπα σημεία του μοντέλου κυμαίνεται από 2.5 mm έως 5.0 mm. Στο Σχήμα 3.2.8 παρουσιάζεται η τελική μορφή του καννάβου πεπερασμένων στοιχείων για το τρισδιάστατο μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε καθώς και η λεπτομέρεια της περιοχής μετάβασης της διαβρωμένης περιοχής του χάλυβα.



Σχήμα 3.2.8: Τυπικό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων και λεπτομέρεια περιοχής μετάβασης.

3.2.4 Συνοριακές Συνθήκες- Είδος Φόρτισης

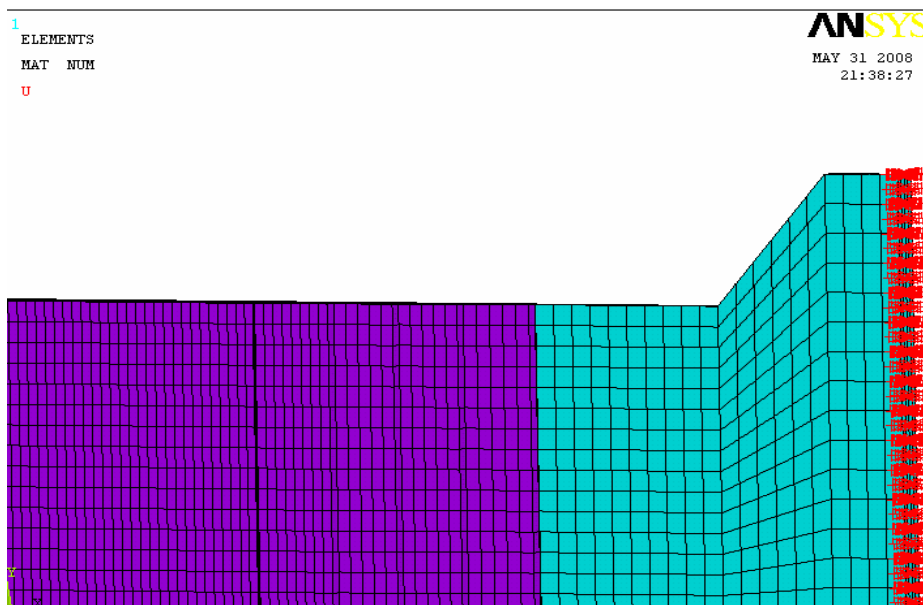
Η επιλογή μοντελοποίησης των δοκιμίων μόνο κατά το $\frac{1}{4}$ της συνολικής γεωμετρίας επιβάλλει τον καθορισμό συνοριακών συνθηκών συμμετρίας στις επιφάνειες του μοντέλου που έχουν τμηθεί. Οι συνθήκες συμμετρίας που επιβάλλονται εξασφαλίζουν τη θεώρηση ολόκληρης της γεωμετρίας και ως εκ τούτου τα εξαγόμενα αποτελέσματα αφορούν στο σύνολο των δοκιμίων. Οι επιφάνειες που αποτελούν επίπεδο συμμετρίας του μοντέλου είναι αυτές που βρίσκονται κατά τα επίπεδα $x-z$ και $y-z$, με αποτέλεσμα στους αντίστοιχους κόμβους που περιλαμβάνονται σε αυτά να οριστούν συνθήκες συμμετρίας. Στο Σχήμα 3.2.9 απεικονίζονται οι επιφάνειες συμμετρίας και με κόκκινο χρώμα συμβολίζονται οι κόμβοι στους οποίους καθορίστηκαν οι συνοριακές συνθήκες συμμετρίας.



Σχήμα 3.2.9: Συνοριακές συνθήκες συνολικά στο μοντέλο (πάνω) και κατά τα επίπεδα συμμετρίας (α) x-z επίπεδο (μέση) (β) y-z επίπεδο (κάτω).

Τέλος, απομένει η περιοχή πρόσδεσης των δοκιμίων με τους ειδικούς προσαρμογείς στην υδραυλική μηχανή δοκιμών. Έχοντας επιλέξει το μήκος του μοντέλου ίσο με 250 mm, οι συνοριακές συνθήκες όπως επίσης και η φόρτιση επιβάλλονται στην εγκάρσια διατομή που βρίσκεται στο ελεύθερο άκρο του μοντέλου και στους κόμβους που περιλαμβάνονται στη διατομή αυτή. Έτσι, προσομοιώνοντας τη συγκράτηση των δοκιμίων επιβλήθηκαν συνθήκες περιορισμού της μετατόπισης κατά τον z-άξονα στους παραπάνω κόμβους, καθώς από τη φόρτιση (ομοιόμορφη μετατόπιση) συνεπάγεται ότι η παραπάνω διατομή

παραμένει ευθύγραμμη και παράλληλη με τον y-άξονα και δεν περιστρέφεται γύρω του. Επιπλέον, στην περιοχή αυτή εφαρμόζεται και η φόρτιση των δοκιμίων, που όπως αναφέρθηκε στο εδάφιο 2.2.4, επιβλήθηκε με τη μορφή γραμμικά αυξανόμενης εφελκυστικής μετατόπισης, η τιμή της οποίας στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων ορίστηκε ίση με 1.5 mm και επιβλήθηκε στους κόμβους της παραπάνω διατομής. Στο Σχήμα 3.2.10 σημειώνονται με κόκκινο χρώμα οι κόμβοι στους οποίους επιβλήθηκαν οι παραπάνω συνοριακές συνθήκες και η φόρτιση, ενώ καθορίζεται και η συγκεκριμένη εγκάρσια διατομή του μοντέλου.



Σχήμα 3.2.10: Επιβολή φορτίου και συνθηκών περιορισμού στο ελεύθερο άκρο του μοντέλου.

3.2.5 Είδος Ανάλυσης

Λόγω της ύπαρξης μονόπλευρης ενίσχυσης από επίθεμα σύνθετων υλικών στα δοκίμια που εξετάζονται, καθώς και η χρήση τους ως δοκίμια εφελκυσμού έχει ως αποτέλεσμα την εισαγωγή μη γραμμικών χαρακτηριστικών λόγω γεωμετρίας στη συμπεριφορά τους κατά τη διάρκεια του φαινομένου που μοντελοποιείται. Η παραπάνω συμπεριφορά οφείλεται στη μετατόπιση του ουδέτερου άξονα και τη συνακόλουθη παραμόρφωση της κατασκευής έξω από το επίπεδο (παρουσίαση φαινομένου κάμψης). Επίσης, η προσομοίωση του χάλυβα ως διγραμμικό ελαστοπλαστικό υλικό εισάγει ένα ακόμα μη γραμμικό χαρακτηριστικό λόγω μηχανικών ιδιοτήτων. Κατά συνέπεια, η χρήση μη γραμμικής ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων θεωρείται αναγκαία για την πιστότερη προσομοίωση του φαινομένου και χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις περιπτώσεις όπου απαιτείται η σύγκριση αποτελεσμάτων, σχετικά με μετατοπίσεις και παραμορφώσεις, με τις αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις. Πρέπει να σημειωθεί ότι εφαρμόστηκε η μέθοδος Newton-Raphson (βλέπε εδάφιο 3.1.5) στην διαδικασία της επίλυσης έτσι ώστε η φόρτιση να επιβληθεί ως σταθερού ρυθμού εφελκυστική μετατόπιση με βήμα 0.075 mm, με αποτέλεσμα τη μεταβολή της φερόμενης δύναμης, σε είκοσι διακριτά βήματα. Επίσης,

υιοθετήθηκαν συνθήκες μεγάλων εκτροπών και μεγάλων παραμορφώσεων, κάτι το οποίο είναι αναγκαίο λαμβάνοντας υπ' όψη την έκβαση του φαινομένου.

Τέλος, πραγματοποιήθηκαν γραμμικές αναλύσεις κατά τις οποίες ο χάλυβας μοντελοποιήθηκε ως γραμμικά ελαστικό, ιστροπικό υλικό και θεωρήθηκαν συνθήκες μικρών εκτροπών. Η ανάλυση αυτή χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια των δοκιμών που διενεργήθηκαν καθώς η ορθή απεικόνιση της τάσης του φαινομένου στα εξαγόμενα αποτελέσματα και ο πολύ μικρός χρόνος υπολογισμού, υπηρέτησαν επακριβώς τον σκοπό των δοκιμών αυτών.

3.2.6 Εξαγωγή Αποτελεσμάτων

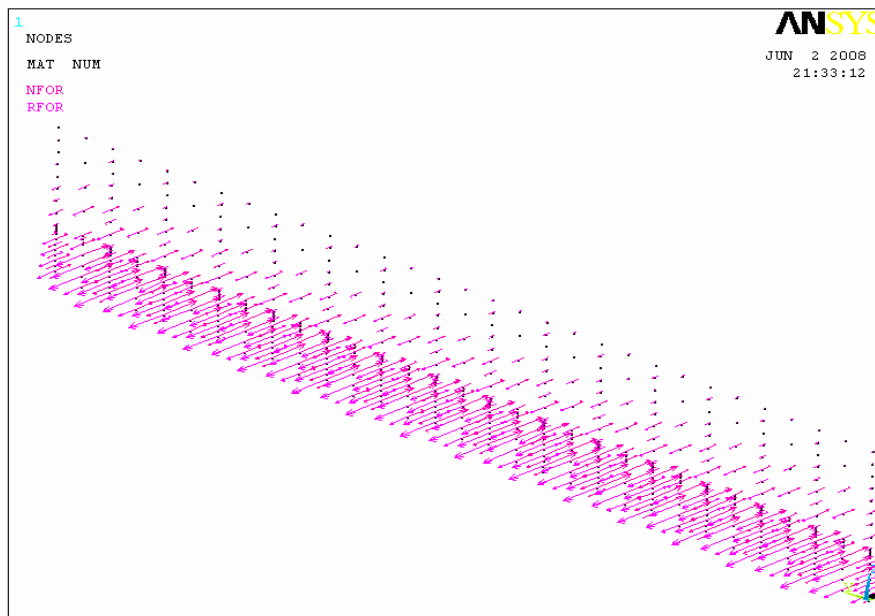
Τα μεγέθη που μετρήθηκαν και καταγράφηκαν σε κάθε πειραματική δοκιμή που πραγματοποιήθηκε είναι η εφαρμοζόμενη δύναμη, η συνολική επιμήκυνση των δοκιμίων (μαζί με το μήκος των ειδικών προσαρμογέων) καθώς και οι διαμήκεις παραμορφώσεις σε διάφορα σημεία του χάλυβα και του ενισχυτικού επιθέματος. Κατά συνέπεια, για να γίνει η απαιτούμενη σύγκριση είναι αναγκαίο να εξαχθούν τα αντίστοιχα αποτελέσματα από το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων. Στο σημείο αυτό πρέπει να επισημανθεί το γεγονός ότι το αριθμητικό μοντέλο δεν περιέχει κανενός είδους κριτήριο αστοχίας με αποτέλεσμα το επίθεμα να θεωρείται τελείως προσκολλημένο στο χάλυβα καθ' όλη τη διάρκεια της ανάλυσης, γεγονός που έρχεται σε αντίθεση με την πραγματική εξέλιξη του φαινομένου. Επομένως, τα αριθμητικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται είναι συγκρίσιμα με τις πειραματικές μετρήσεις μόνο κατά τη διάρκεια που το επίθεμα δεν έχει υποστεί αποκόλληση από το χάλυβα. Οποιαδήποτε σύγκριση μετά την έναρξη του φαινομένου, είναι για ακόμη μία φορά άτοπη.

Για λόγους που εξηγήθηκαν στην παράγραφο 3.1.6, τα αριθμητικά αποτελέσματα για τις μετατοπίσεις πολλαπλασιάστηκαν με ένα διορθωτικό συντελεστή της τάξης του 1.8, έτσι ώστε να είναι συμβατά και άρα συγκρίσιμα με τις αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις, όσον αφορά τις τιμές της επιμήκυνσης των μοντέλων. Επιπλέον, εξαιτίας της επιλογής μοντελοποίησης της γεωμετρίας μόνο κατά το $\frac{1}{4}$, τα εξαγόμενα αριθμητικά αποτελέσματα που αφορούσαν την επιμήκυνση των δοκιμίων και την εφαρμοζόμενη δύναμη διπλασιάστηκαν έτσι ώστε να αντιπροσωπεύουν το σύνολο της γεωμετρίας και να είναι συγκρίσιμα με τις αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα αποτελέσματα για τις διαμήκεις παραμορφώσεις δεν απαιτούν καμία μετατροπή και δεν επηρεάζονται από τις παραπάνω διορθώσεις, καθώς εκφράζονται μέσω αδιάστατων μεγεθών (strains).

Οι τιμές των αριθμητικών διαμήκων παραμορφώσεων εξήχθησαν από τους κόμβους που περιλαμβάνονται κατά το μήκος αναφοράς των ηλεκτρικών επιμηκυνσιομέτρων (SG), παίρνοντας το μέσο όρο για την τελική τιμή που δίνει το κάθε ένα από αυτά. Το μέγεθος τους δίνεται στην παράγραφο 2.2.4 ενώ η θέση τους καθορίζεται στα Σχήματα 2.2.8 και

2.2.9. Από τους κόμβους που αντιστοιχούν σε επιμηκυνσιόμετρα τοποθετημένα στο χάλυβα εξήχθησαν, τόσο ελαστικές, όσο και πλαστικές διαμήκεις παραμορφώσεις ενώ από αυτά που είναι τοποθετημένα στο ενισχυτικό επίθεμα αποκλειστικά ελαστικές διαμήκεις παραμορφώσεις. Η καταγραφή δύο ειδών διαμήκων παραμορφώσεων στο χάλυβα οφείλεται στο ενδεχόμενο το συγκεκριμένο σημείο του χάλυβα να έχει εισέλθει στην πλαστική περιοχή, από κάποιο φορτίο (συγκεκριμένο βήμα της ανάλυσης) κι έπειτα, με αποτέλεσμα την ανάγκη εξαγωγής και των διαμήκων πλαστικών παραμορφώσεων. Βέβαια, η τελική τιμή των παραμορφώσεων προκύπτει αθροίζοντας τις ελαστικές και τις πλαστικές παραμορφώσεις στη δεδομένη θέση.

Τέλος, απομένει ο προσδιορισμός του φορτίου (εφαρμοζόμενη δύναμη) που αντιστοιχεί σε κάθε βήμα και προκαλεί την αντίστοιχη επιμήκυνση. Έτσι, το φορτίο προέκυψε υπολογίζοντας σε κάθε βήμα τις δυνάμεις αντίδρασης των κατάλληλων κόμβων. Οι κόμβοι αυτοί, που αρχικά χαρακτηρίστηκαν ως μία ομάδα, αντιστοιχούν σ' αυτούς που βρίσκονται κατά τη διαμήκη θέση μηδέν του μοντέλου. Στο Σχήμα 3.2.11 φαίνονται οι κόμβοι από τους οποίους έχουν εξαχθεί οι δυνάμεις αντίδρασης και με μωβ βέλη αναπαρίστανται οι δυνάμεις αυτές.

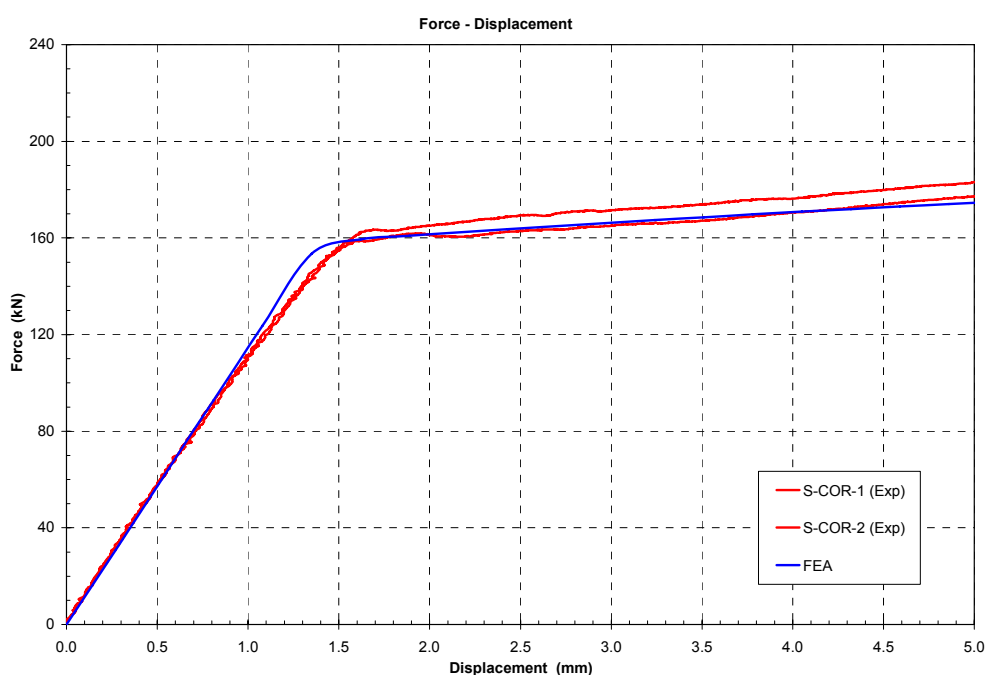


Σχήμα 3.2.11: Κόμβοι για τον υπολογισμό των δυνάμεων αντίδρασης.

3.2.7 Σύγκριση Αποτελεσμάτων και Σχολιασμός

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (FEA) για τα πειραματικά δοκίμια παρατίθενται στη συνέχεια με τη μορφή διαγραμμάτων, συγκρίνοντας τα, ταυτόχρονα, με τις αντίστοιχες καμπύλες των πειραματικών μετρήσεων (Exp). Επιπροσθέτως, εξετάζεται το κατά πόσο αυτά ταυτίζονται με την πραγματικότητα, όπως αυτή εκφράζεται από τα πειραματικά δεδομένα, ενώ γίνεται προσπάθεια να δοθούν τα αίτια εκ των οποίων υφίστανται τυχόν αποκλίσεις. Στο σημείο αυτό πρέπει να επισημανθεί ότι η ονοματολογία των δοκιμών παραμένει η ίδια, όπως ορίστηκε στο Κεφάλαιο 2.

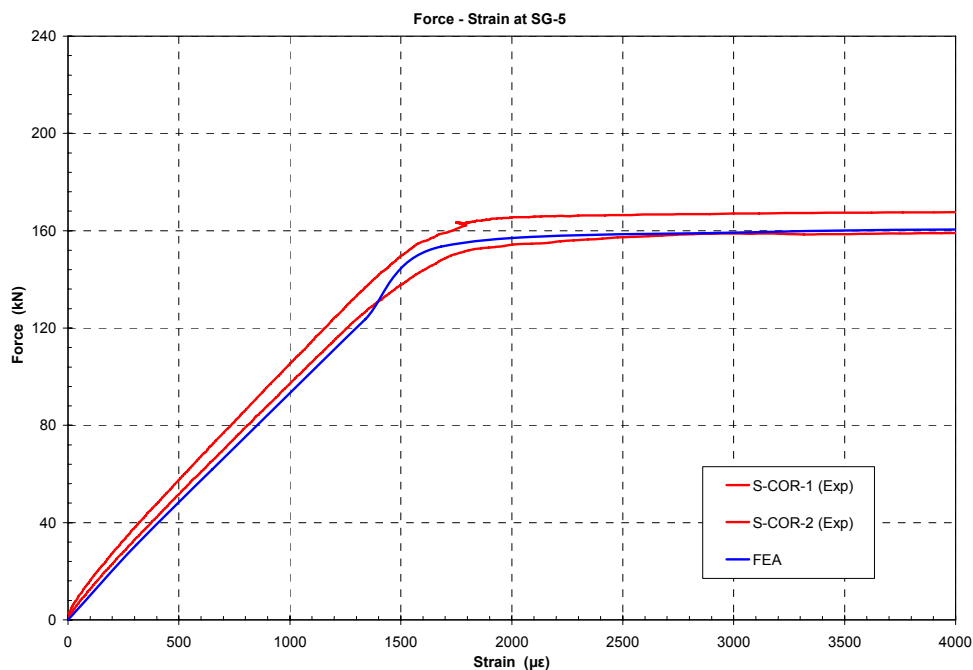
Η μεταβολή της συνολικής επιμήκυνσης συναρτήσει της επιβαλλόμενης εφελκυστικής δύναμης για τα δοκίμια αναφοράς χωρίς ενισχυτικό επίθεμα S-COR-1&2 παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.2.12, όπου παρατηρείται πολύ καλή προσομοίωση των πειραματικών αποτελεσμάτων από τα αντίστοιχα αριθμητικά, ακόμα και σε μεγάλο εύρος της πλαστικής περιοχής. Οι διαφορές που παρατηρούνται μεταξύ των δύο καμπύλων στην ελαστική περιοχή ενδέχεται να οφείλονται στη μοντελοποίηση της διαβρωμένης περιοχής των δοκιμών με μέσο πάχος, σύμφωνα με τις τιμές του Πίνακα 2.2.4.



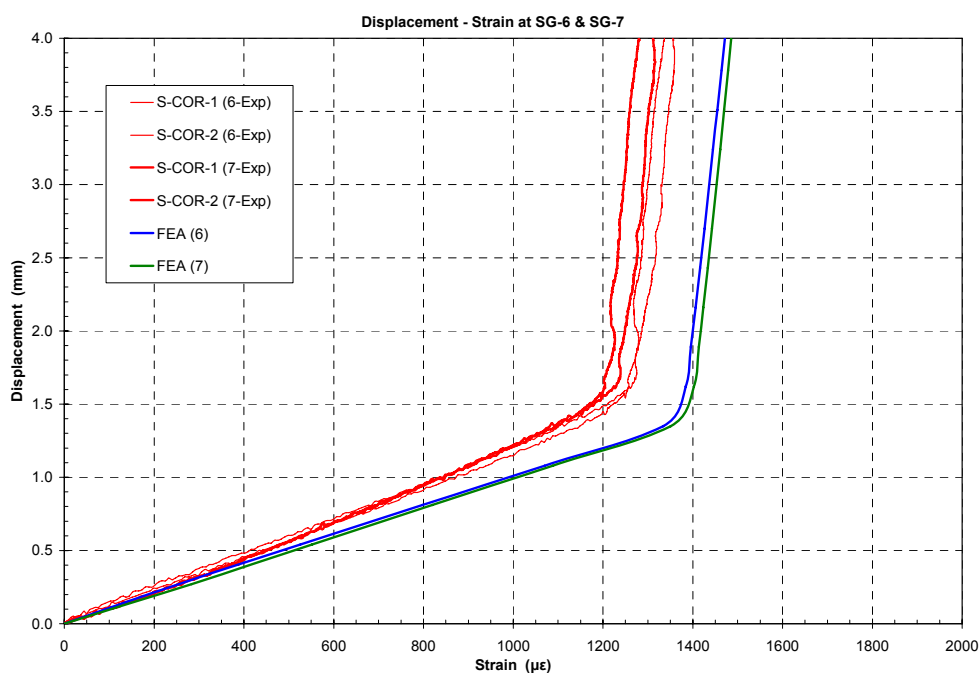
Σχήμα 3.2.12: Καμπύλες φορτίου-επιμήκυνσης για τα δοκίμια αναφοράς.

Η μεταβολή των παραμορφώσεων στη θέση SG-5 (κάτω από τη διαβρωμένη περιοχή, βλέπε Σχήμα 2.2.8) συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου και η μεταβολή των παραμορφώσεων στη θέση SG-6 και SG-7 (μακριά από τη διαβρωμένη περιοχή) συναρτήσει της επιβαλλόμενης μετατόπισης, για τα δοκίμια αναφοράς S-COR-1&2, παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.2.13 και 3.2.14, αντίστοιχα. Η επιβαλλόμενη μετατόπιση επιλέχθηκε έναντι του επιβαλλόμενου φορτίου για τις θέσεις SG-6 και SG-7, καθώς οι αντίστοιχες καμπύλες αποδίδουν κατατοπιστικότερα την εξέλιξη του φαινομένου και επιτρέπουν την εξαγωγή ορθότερων συμπερασμάτων. Η σύγκριση μεταξύ των

αριθμητικών και των πειραματικών αποτελεσμάτων όσον αφορά τις παραμορφώσεις είναι αρκετά καλή και στο Σχήμα 3.2.13 και στο Σχήμα 3.2.14. Τόσο η ελαστική όσο και η πλαστική περιοχή έχουν προσομοιωθεί με μεγάλη ακρίβεια στη θέση SG-5, ενώ οι μικρές διαφορές που παρατηρούνται στην πλαστική περιοχή στις θέσεις SG-6 και SG-7 οφείλονται τόσο στην απλουστευμένη μοντελοποίηση του χάλυβα ως διγραμμικό υλικό, όσο και στην εξαγωγή των αποτελεσμάτων, που πραγματοποιήθηκε θεωρώντας το μέσο όρο των παραμορφώσεων κατά το μήκος αναφοράς 10 mm του επιμηκυνσιόμετρου SG-6 και SG-7.

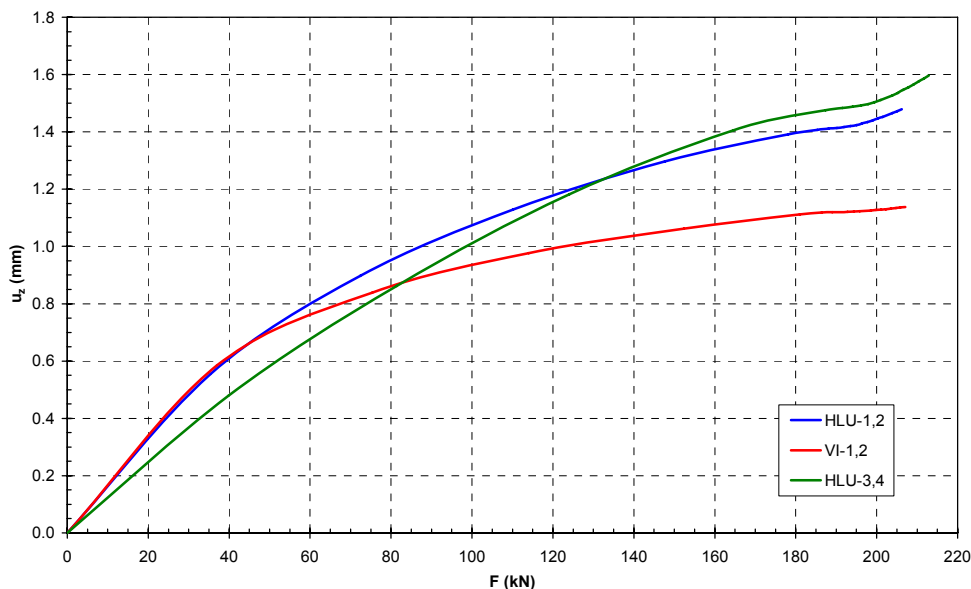


Σχήμα 3.2.13: Καμπύλες φορτίου-παραμορφώσεων στη θέση SG-5 για τα δοκίμια αναφοράς.

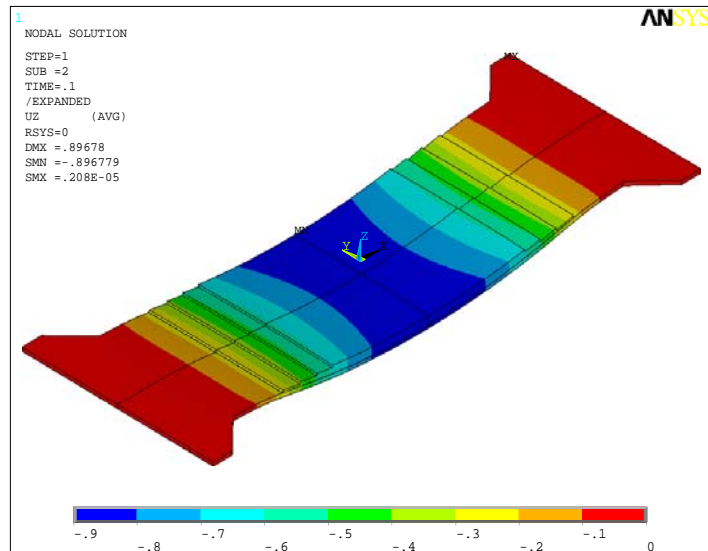


Σχήμα 3.2.14: Καμπύλες μετατόπισης-παραμορφώσεων στις θέσεις SG-6 και SG-7 για τα δοκίμια αναφοράς.

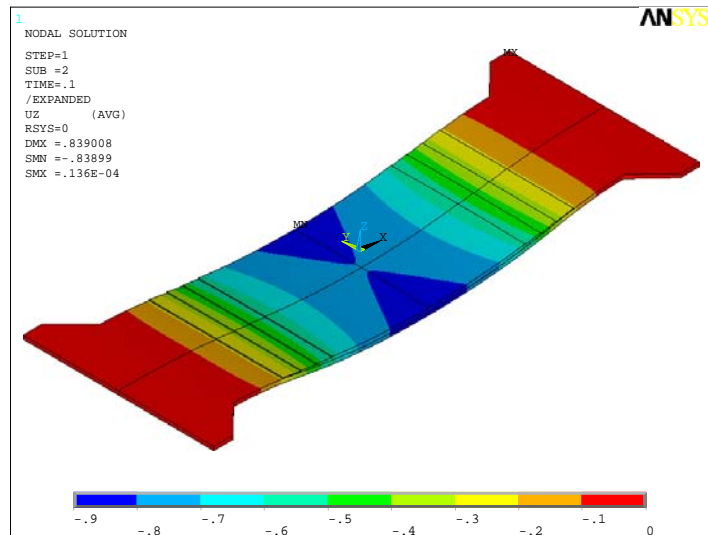
Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων για τα δοκίμια που διαθέτουν ενισχυτικό επίθεμα από σύνθετα υλικά. Στα Σχήματα 3.2.16 έως 3.2.18 παρουσιάζονται τα τρία δοκίμια που έχουν μοντελοποιηθεί και φαίνεται η παραμόρφωση που έχουν υποστεί κατά τη διάρκεια της καταπόνησης (σε μεγέθυνση) καθώς και η μετατόπισή τους κατά τον z-άξονα όπως υπολογίστηκε με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων. Απεικονίζεται με σαφήνεια η τυπική συμπεριφορά χαλύβδινης πλάκας με μονόπλευρη ενίσχυση που καταπονείται σε εφελκυσμό καθώς παρατηρείται παραμόρφωση της κατασκευής έξω από το επίπεδο, δηλαδή η εμφάνιση του φαινομένου της κάμψης. Αυτό οφείλεται στη μετατόπιση του ουδέτερου άξονα εξαιτίας της παρουσίας του μονόπλευρου επιθέματος και ως εκ τούτου τη δημιουργία μη συμμετρικής εγκάρσιας διατομής. Η κάμψη που παρατηρείται είναι παρόμοια και στα τρία δοκίμια, η οποία είναι ομοιόμορφη κατά μήκος του ενισχυτικού επιθέματος ενώ η χαλύβδινη πλάκα υπόκειται σε απότομη παραμόρφωση στην περιοχή κοντά στα άκρα του επιθέματος. Η μέγιστη μετατόπιση κατά τον z-άξονα στο κέντρο των δοκιμίων είναι συγκριτικά μικρότερη στην περίπτωση των δοκιμίων S-COR-VI-1&2 με το λεπτότερο ενισχυτικό επίθεμα σε σχέση με τις άλλες δύο περιπτώσεις με το πιο παχύ επίθεμα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2.15. Στο σχήμα αυτό παρουσιάζεται η μεταβολή της μέγιστης μετατόπισης κατά τον z-άξονα του κέντρου των δοκιμίων συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου, για κάθε δοκίμιο.



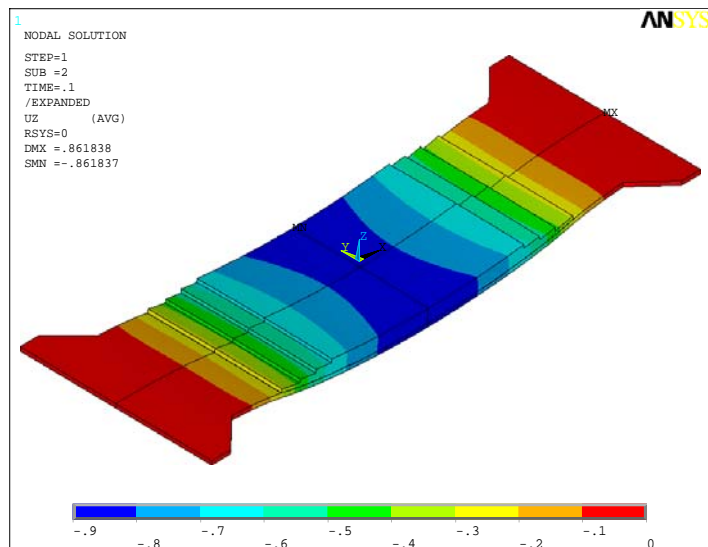
Σχήμα 3.2.18: Μέγιστη μετατόπιση κατά τον z-άξονα συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου.



Σχήμα 3.2.16: Κατανομή της μετατόπισης κατά τον z-άξονα για τα δοκίμια S-COR-HLU-1&2.

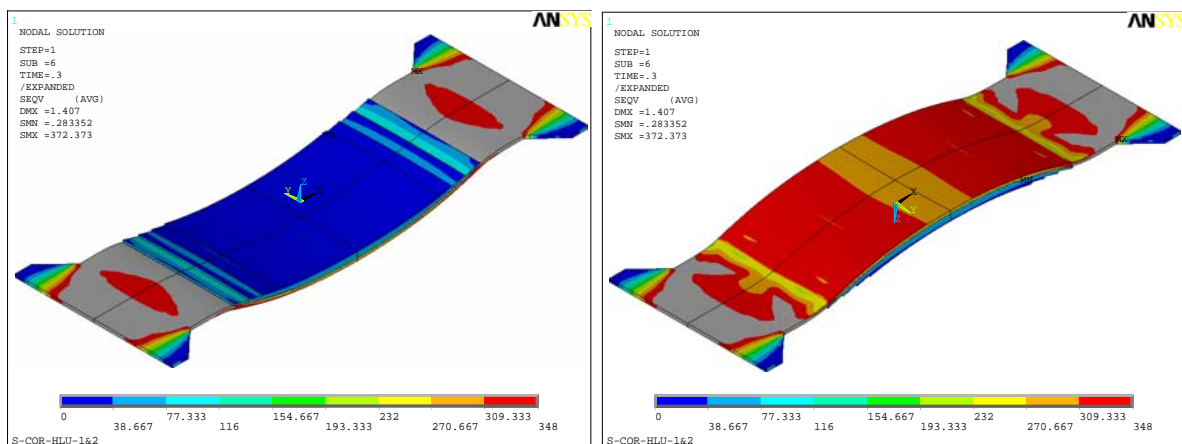


Σχήμα 3.2.17: Κατανομή της μετατόπισης κατά τον z-άξονα για τα δοκίμια S-COR-VI-1&2.



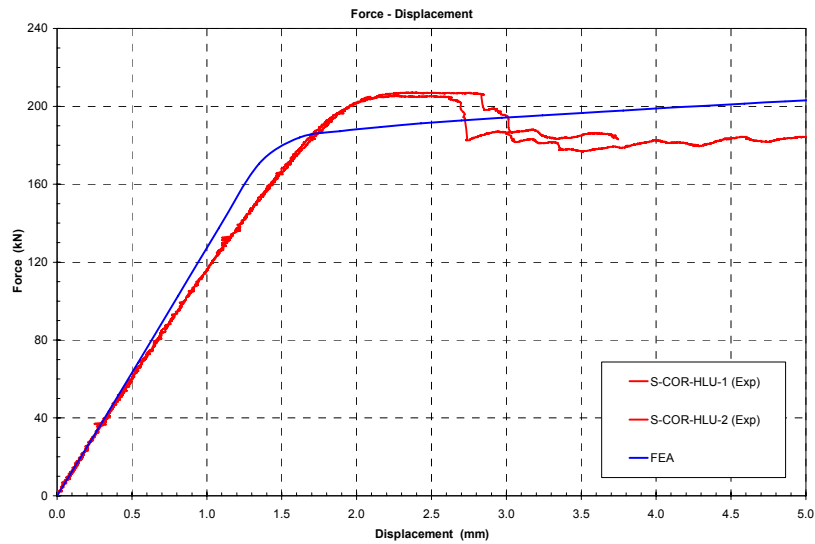
Σχήμα 3.2.18: Κατανομή της μετατόπισης κατά τον z-άξονα για τα δοκίμια S-COR-HLU-3&4.

Η ομοιόμορφη κάμψη στην οποία υπόκεινται τα δοκίμια και η συνεπαγόμενη παραμόρφωση που υφίσταται το μεταλλικό υπόστρωμα, επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την περιοχή όπου πρωτοεμφανίζεται η διαρροή της χαλύβδινης πλάκας. Έτσι, υποθέτοντας ότι το ενισχυτικό επίθεμα δεν έχει υποστεί αποκόλληση πριν τη διαρροή του χάλυβα, η διαρροή αυτή ξεκινάει στην περιοχή κοντά στα άκρα του επιθέματος εξαιτίας της έντονης κάμψης που εμφανίζεται στην περιοχή αυτή. Η συμπεριφορά αυτή απεικονίζεται με σαφήνεια στο Σχήμα 3.2.19, όπου παρουσιάζονται προοπτικά η άνοψη και η κάτοψη των δοκιμίων S-COR-HLU-1&2 και φαίνεται η παραμόρφωση που έχουν υποστεί κατά τη διάρκεια της καταπόνησης, ταυτόχρονα με την κατανομή των τάσεων κατά von Mises στις χαλύβδινες πλάκες των δοκιμίων. Με γκρι χρώμα υποδεικνύονται στο σχήμα οι περιοχές του χάλυβα που έχουν εισέλθει στην πλαστική περιοχή (τιμές των τάσεων κατά von Mises μεγαλύτερες των 348 MPa, τιμή που αντιπροσωπεύει το όριο διαρροής του υπό μελέτη χάλυβα). Η ίδια συμπεριφορά παρατηρείται και στους άλλους δύο τύπους δοκιμίων, με τη διαρροή να εμφανίζεται για επιβαλλόμενο φορτίο της τάξης των 185 kN. Μετά το φορτίο αυτό ο χάλυβας διαρρέει εκτενώς (global yield) για μεγάλες τιμές της επιβαλλόμενης μετατόπισης κατά τον x-άξονα.

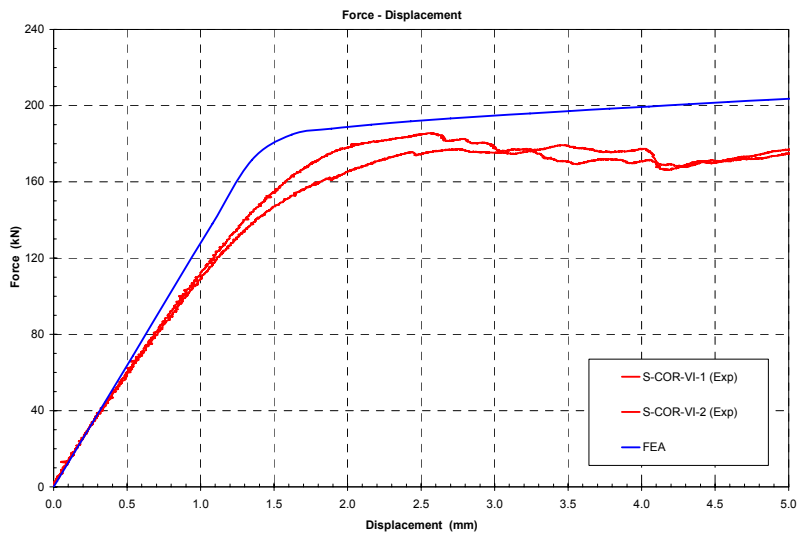


Σχήμα 3.2.19: Κατανομή των τάσεων κατά von Mises για τα δοκίμια S-COR-HLU-1&2(κάτοψη και άνοψη)

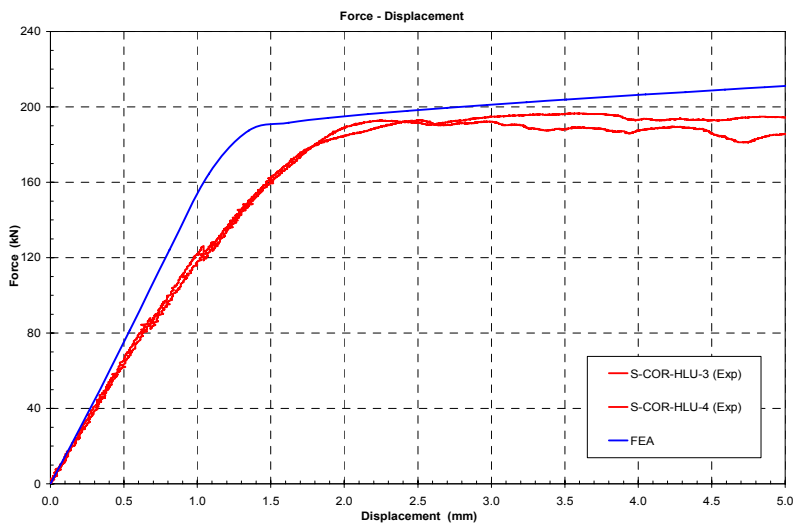
Το παραπάνω συμπέρασμα προκύπτει κι από τα Σχήματα 3.2.20 έως 3.2.22 όπου παρουσιάζεται η μεταβολή της συνολικής επιμήκυνσης των τριών δοκιμίων συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου και πραγματοποιείται η σύγκριση των πειραματικών μετρήσεων με τα αντίστοιχα αριθμητικά αποτελέσματα. Όσον αφορά στις πειραματικές μετρήσεις, όπου στα σχήματα παρουσιάζονται με κόκκινες γραμμές, η συμπεριφορά όλων των τύπων των δοκιμίων είναι παρόμοια. Αρχικά παραμορφώνονται ελαστικά, με την ελαστική περιοχή να είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη των δοκιμίων αναφοράς (βλέπε Σχήμα 3.2.12). Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι η παρουσία του ενισχυτικού επιθέματος συμβάλλει στη μείωση των αναπτυσσόμενων τάσεων στο χαλύβδινο υπόστρωμα για συγκεκριμένο επιβαλλόμενο φορτίο, με αποτέλεσμα το δοκίμιο να συμπεριφέρεται ελαστικά για μεγαλύτερο εύρος και ως εκ τούτου για μεγαλύτερο επιβαλλόμενο φορτίο. Από το σημείο αυτό και μετά ο χάλυβας εισέρχεται στην πλαστική περιοχή.



Σχήμα 3.2.20: Καμπύλες φορτίου-επιμήκυνσης για τα δοκίμια S-COR-HLU-1&2.



Σχήμα 3.2.21: Καμπύλες φορτίου-επιμήκυνσης για τα δοκίμια S-COR-VI-1&2.



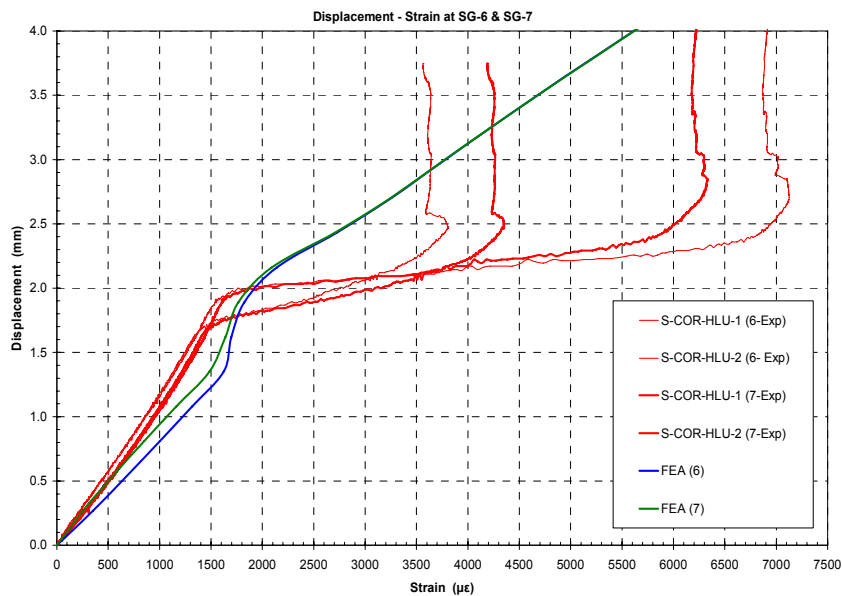
Σχήμα 3.2.22: Καμπύλες φορτίου-επιμήκυνσης για τα δοκίμια S-COR-HLU-3&4.

Η συμπεριφορά κάθε τύπου δοκιμίου είναι δυνατόν να εξηγηθεί με τη συνδυασμένη μελέτη των Σχημάτων 3.2.20 έως 3.2.28, όπου φαίνονται οι καμπύλες που παρουσιάζουν τη μεταβολή της συνολικής επιμήκυνσης των δοκιμίων συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου και τη μεταβολή των παραμορφώσεων συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου, όπως έγινε στην παράγραφο 2.2.5. Συνεπώς, τα δοκίμια S-COR-HLU-1&2 εισέρχονται στην πλαστική περιοχή για επιβαλλόμενο φορτίο περίπου ίσο με 190 kN. Η διαρροή εμφανίζεται στην περιοχή των θέσεων SG-6 και SG-7, η οποία βρίσκεται μακριά από τη διαβρωμένη περιοχή του χάλυβα όπου έχει εφαρμοστεί το ενισχυτικό επίθεμα και είναι φανερό από τις αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις των παραμορφώσεων που παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.2.23. Καθώς το επιβαλλόμενο φορτίο αυξάνει, το Σχήμα 3.2.26 υποδηλώνει ότι ο χάλυβας διαρρέει ακριβώς κάτω από τη διαβρωμένη του περιοχή. Την ίδια στιγμή επέρχεται αποκόλληση του επιθέματος ενώ ταυτόχρονα παρατηρείται απότομη πτώση της εφαρμοζόμενης δύναμης, κάτι που φαίνεται στα Σχήματα 3.2.20 και 3.2.26. Ενώ η φόρτιση συνεχίζεται, η αύξηση των παραμορφώσεων στις θέσεις SG-6 και SG-7 σταματάει και η διαρροή του χάλυβα περιορίζεται μόνο κάτω από τη διαβρωμένη του περιοχή. Από το σημείο αυτό κι έπειτα τα δοκίμια S-COR-HLU-1&2 παρουσιάζουν συμπεριφορά παρόμοια με αυτή των δοκιμίων αναφοράς.

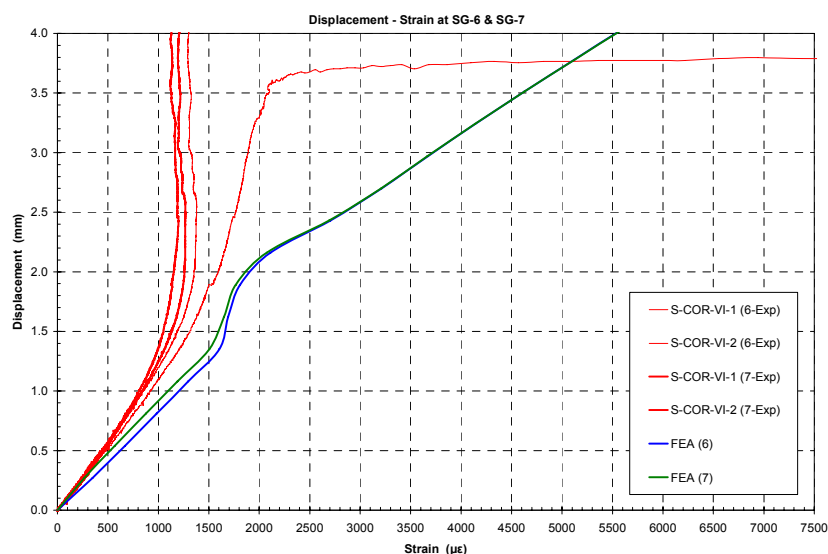
Σε αντίθεση με τα παραπάνω δοκίμια, η αποκόλληση του ενισχυτικού επιθέματος στην περίπτωση των δοκιμίων S-COR-VI-1&2 και S-COR-HLU-3&4 δεν έγινε απότομα αλλά σταδιακά, συμπέρασμα που προκύπτει από τη μελέτη των αποτελεσμάτων στα Σχήματα 3.2.21 και 3.2.22. Επιπλέον, στα Σχήματα 3.2.24, 3.2.25, 3.2.27 και 3.2.28 υποδεικνύεται ότι τα δοκίμια αυτά δεν διαρρέουν στις θέσεις SG-6 και SG-7 μακριά από το επίθεμα, παρά μόνο στη θέση SG-5 ακριβώς κάτω από τη διαβρωμένη περιοχή του χάλυβα. Η μόνη εξαίρεση στη συμπεριφορά αυτή είναι του δοκιμίου S-COR-VI-1, το οποίο εισέρχεται στην πλαστική περιοχή μόνο στη θέση SG-6.

Τα Σχήματα 3.2.20 έως 3.2.22 υποδηλώνουν ότι τα αριθμητικά μοντέλα (μπλε γραμμές στα σχήματα) είναι σε θέση να προσομοιώσουν με μεγάλη ακρίβεια μόνο για μια μικρό εύρος επιβαλλόμενου φορτίου, στο ξεκίνημα της ελαστικής περιοχής. Όπως παρουσιάστηκε και παραπάνω (βλέπε Σχήμα 3.2.19), η αστοχία των δοκιμίων στα αριθμητικά μοντέλα παρουσιάζεται λόγω της διαρροής του χάλυβα, στην περιοχή κοντά στα άκρα του επιθέματος (θέσεις SG-6 και SG-7). Η συμπεριφορά αυτή επιβεβαιώνεται και από τις τιμές των παραμορφώσεων των αριθμητικών αποτελεσμάτων στα Σχήματα 3.2.23 έως 3.2.28 (μπλε και πράσινες γραμμές). Τα αριθμητικά μοντέλα δεν προσομοιώνουν την αστοχία του επιθέματος από σύνθετα υλικά ή του κολλητικού μέσου με αποτέλεσμα η αποκόλληση του επιθέματος, είτε απότομη είτε σταδιακή, να μη λαμβάνεται υπ' όψη. Κατά συνέπεια, τα αριθμητικά μοντέλα δεν προσομοιώνουν τη διαρροή του χάλυβα κάτω από τη διαβρωμένη του περιοχή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να υπάρχουν διαφορές μεταξύ των αριθμητικών και των πειραματικών αποτελεσμάτων στις καμπύλες που παρουσιάζουν τη μεταβολή της συνολικής επιμήκυνσης των δοκιμίων συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου, αν και η γενική συμπεριφορά των δοκιμίων έχει προσομοιωθεί με αρκετή ακρίβεια.

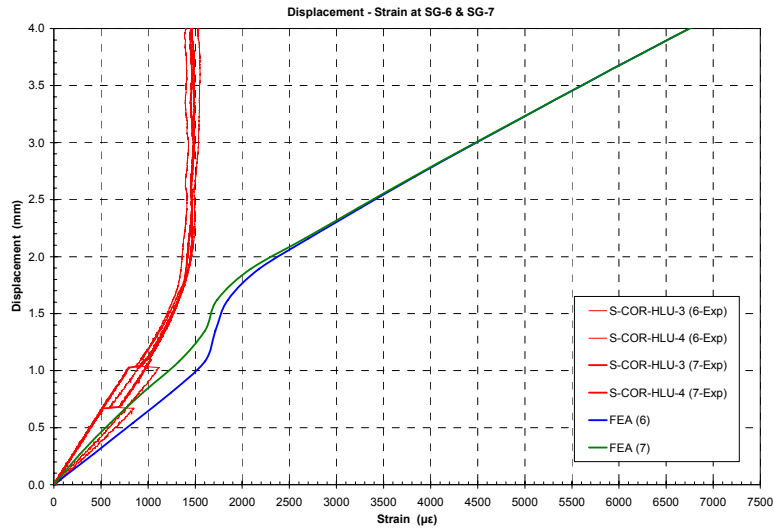
Ο υπολογισμός των παραμορφώσεων στις θέσεις SG-6 και SG-7 που παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.2.23 έως 3.2.25 είναι ακριβής μόνο στην αρχή της περιοχής της ελαστικής συμπεριφοράς για τους ίδιους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω. Οι καμπύλες των παραμορφώσεων δίνονται συναρτήσει της επιβαλλόμενης μετατόπισης, διότι οι αντίστοιχες καμπύλες συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου δεν παρέχουν σαφή πληροφόρηση για την εξέλιξη του φαινομένου. Καλύτερη προσομοίωση των πειραματικών αποτελεσμάτων από τα αντίστοιχα αριθμητικά, επιτυγχάνεται στον υπολογισμό των παραμορφώσεων στη θέση SG-5, όπως παρουσιάζεται στα Σχήματα 3.2.26 έως 3.2.28.



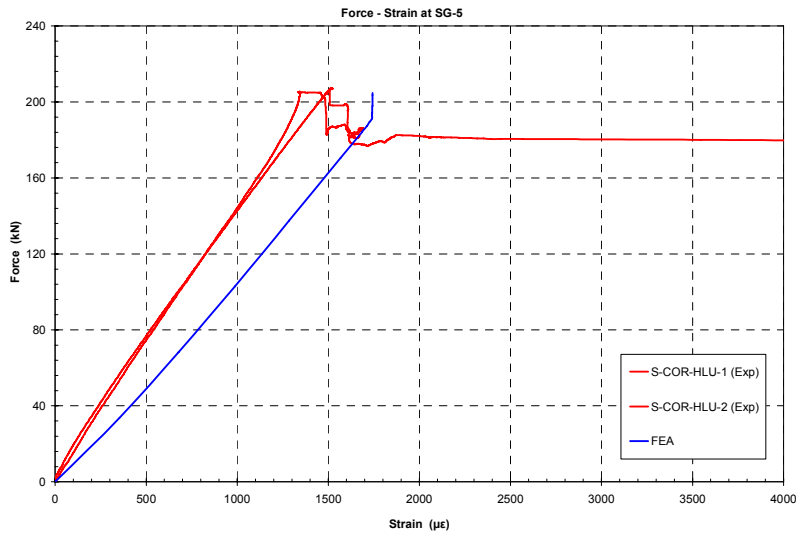
Σχήμα 3.2.23: Καμπύλες μετατόπισης-παραμορφώσεων στις θέσεις SG-7 και SG-8 για τα δοκίμια S-COR-HLU-1&2.



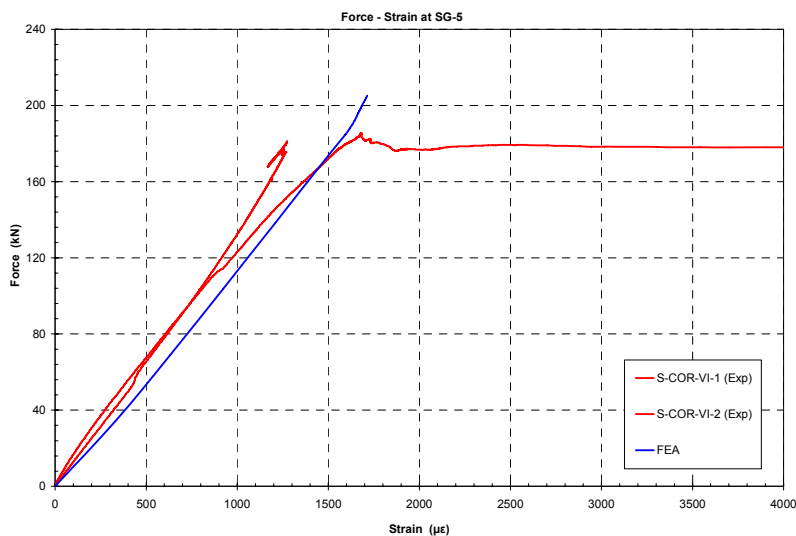
Σχήμα 3.2.24: Καμπύλες μετατόπισης -παραμορφώσεων στις θέσεις SG-7 και SG-8 για τα δοκίμια S-COR-VI-1&2.



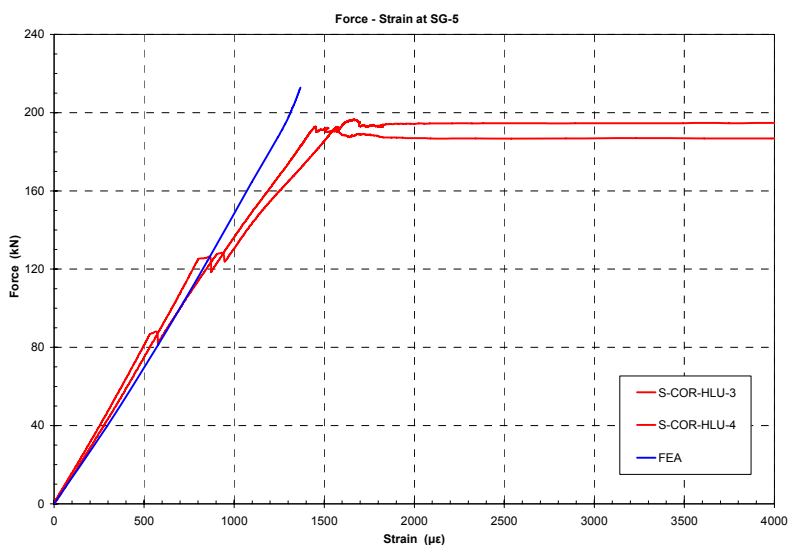
Σχήμα 3.2.25: Καμπύλες μετατόπισης-παραμορφώσεων στις θέσεις SG-7 και SG-8 για τα δοκίμια S-COR-HLU-3&4.



Σχήμα 3.2.26: Καμπύλες φορτίου-παραμορφώσεων στη θέση SG-5 για τα δοκίμια S-COR-HLU-1&2.



Σχήμα 3.2.27: Καμπύλες φορτίου-παραμορφώσεων στη θέση SG-5 για τα δοκίμια S-COR-VI-1&2.

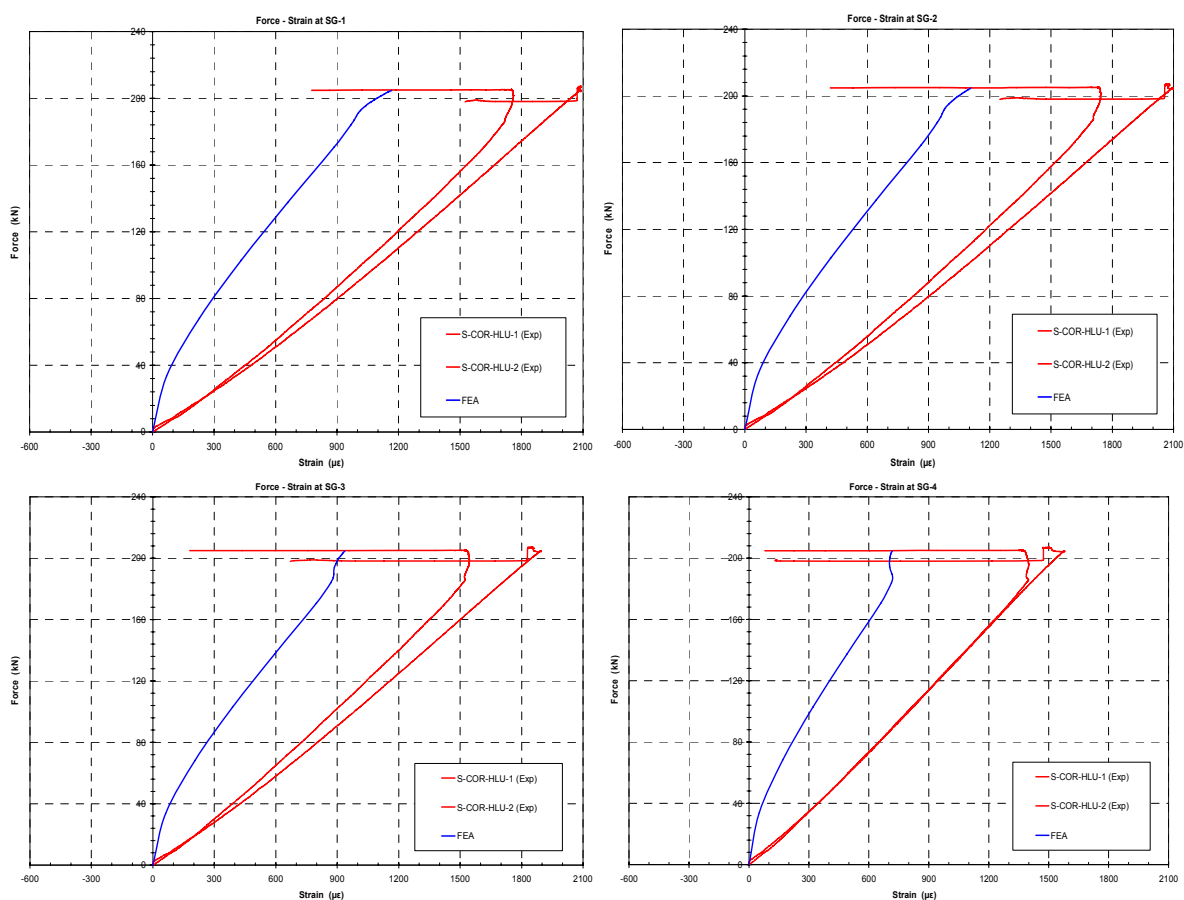


Σχήμα 3.2.28: Καμπύλες φορτίου-παραμορφώσεων στη θέση SG-5 για τα δοκίμια S-COR-HLU-3&4.

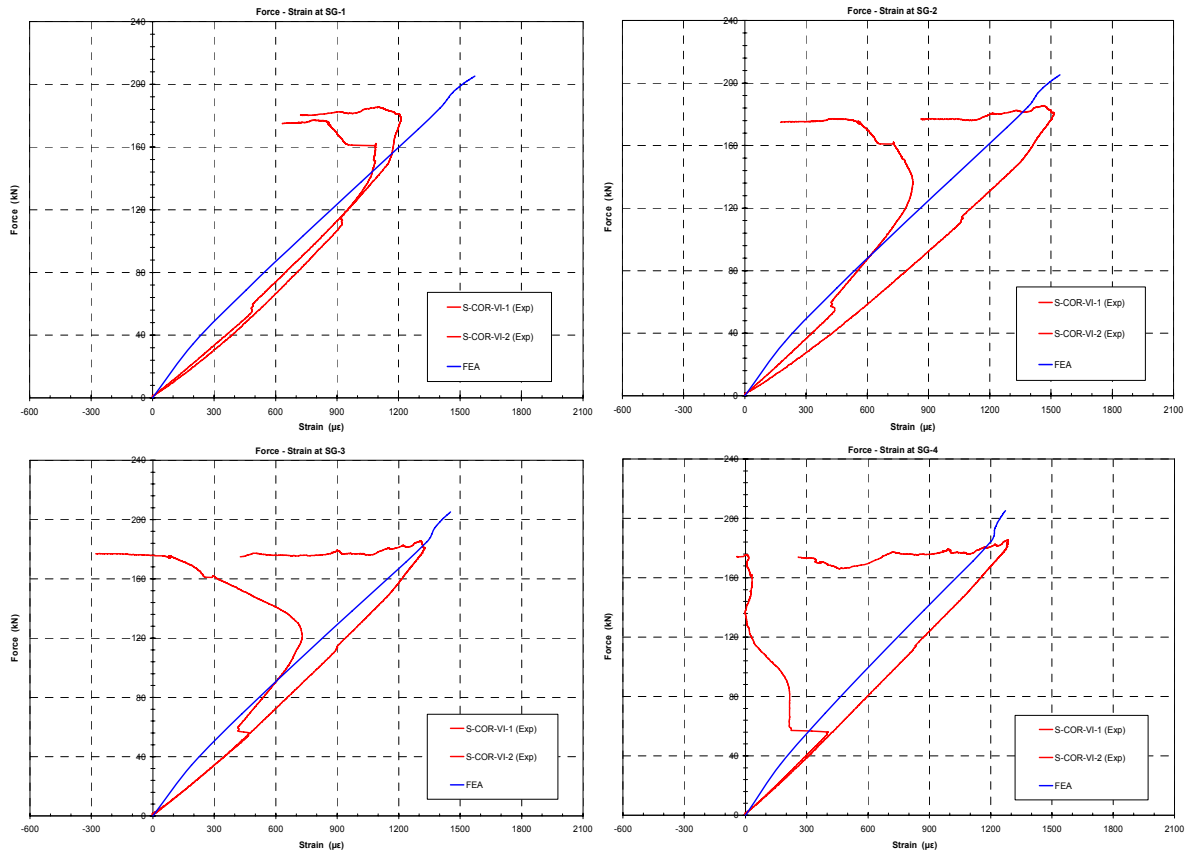
Παρατηρώντας τα Σχήματα 3.2.23 έως 3.2.25, σύγκριση μεταξύ τόσο των πειραματικών μετρήσεων όσο και των αριθμητικών αποτελεσμάτων για τις ελαστικές παραμορφώσεις στη θέση SG-6 (λεπτές κόκκινες και μπλε γραμμές, αντίστοιχα) και τις αντίστοιχες στη θέση SG-7 (παχιές κόκκινες και πράσινες γραμμές), αποδεικνύει ότι οι πρώτες είναι σε κάποιο βαθμό μεγαλύτερες από τις τελευταίες (η κλίση της καμπύλης για τη θέση SG-6 είναι μικρότερη από εκείνη για τη θέση SG-7). Οι διαφορές αυτές οφείλονται στο γεγονός ότι τα δοκίμια υπόκεινται σε κάμψη με την επιβολή του εφελκυστικού φορτίου, εξαιτίας της παρουσίας του μονόπλευρου επιθέματος και ως εκ τούτου τη δημιουργία μη συμμετρικής εγκάρσιας διατομής. Συνεπώς, κοντά στα άκρα των δοκιμίων, επιπλέον εφελκυστικές παραμορφώσεις αναπτύσσονται στην επάνω επιφάνεια του χάλυβα, στην οποία είναι τοποθετημένο το ενισχυτικό επίθεμα και βρίσκεται η θέση SG-6, ενώ στην αντίθετη επιφάνεια (θέση SG-7), μέρος των εφελκυστικών παραμορφώσεων, λόγω του εφελκυστικού φορτίου, αντισταθμίζονται από θλιπτικές παραμορφώσεις, λόγω του φαινομένου της κάμψης. Η μελέτη των καμπύλων στα Σχήματα 3.2.23 έως 3.2.25 καταλήγει στο συμπέρασμα ότι, όπως ήταν αναμενόμενο, το λεπτό ενισχυτικό επίθεμα T/VI των δοκιμίων S-COR-VI-1&2 προκαλεί μικρότερη διαφορά μεταξύ των παραμορφώσεων στις δύο θέσεις, εξαιτίας της πιο ήπιας κάμψης που προκαλεί, συγκριτικά με τα επιθέματα μεγαλύτερου πάχους T/HLU και UD-HM/HLU των δοκιμίων S-C-HLU-1&2 και S-C-HLU-3&4, αντίστοιχα.

Η μεταβολή των παραμορφώσεων στο ενισχυτικό επίθεμα στις θέσεις SG-1, SG-2, SG-3 και SG-4 συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου για όλους τους τύπους των δοκιμίων παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.2.29 έως 3.2.31. Όσον αφορά στις πειραματικές μετρήσεις (κόκκινες γραμμές), το πρώτο γενικό συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι υπάρχει καλή επαναληψιμότητα στα αποτελέσματα των ανά δύο όμοιων δοκιμίων, με εξαίρεση το δοκίμιο S-COR-VI-1, λόγω της ιδιαίτερης συμπεριφοράς του. Επόμενο συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι η συμπεριφορά των δοκιμίων S-COR-HLU-3&4 είναι διαφορετική από των άλλων δοκιμίων. Έτσι, οι παραμορφώσεις που μετρήθηκαν στο επίθεμα, των

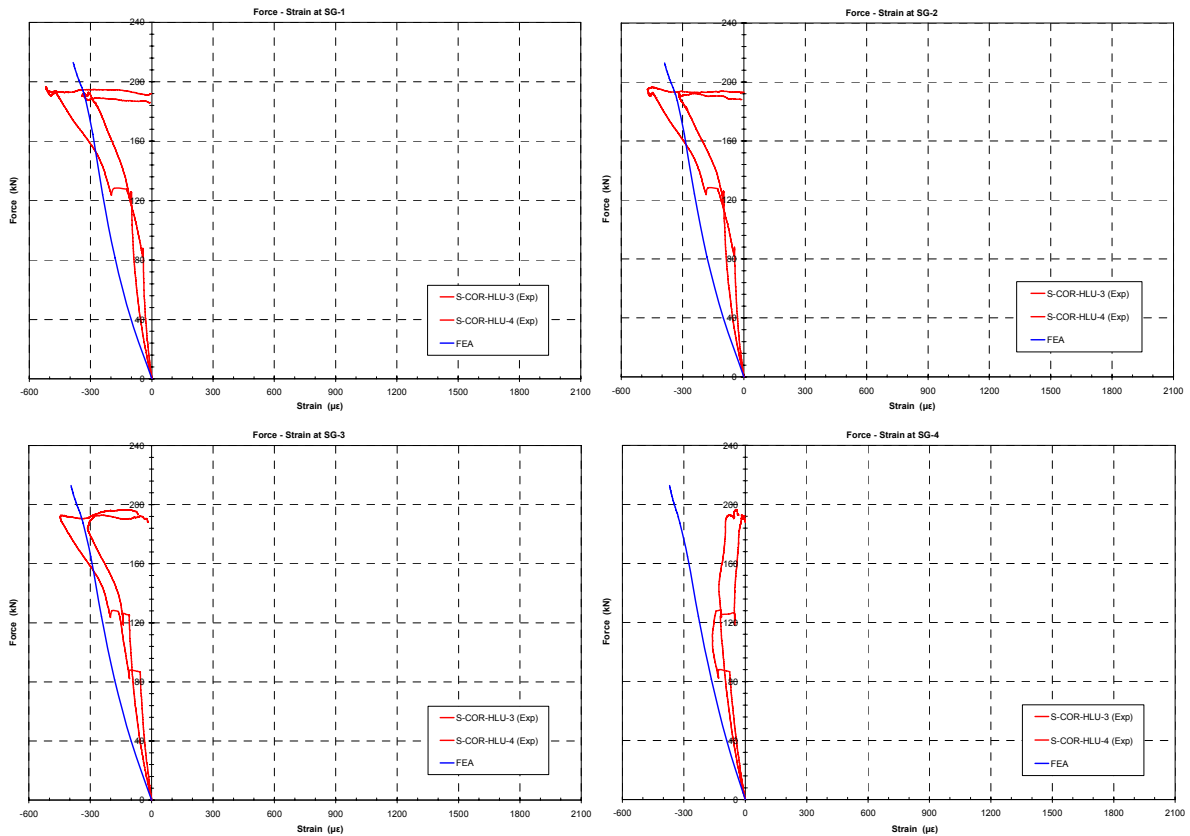
δοκιμίων S-COR-HLU-1&2 και S-COR-VI-1&2 είναι πάντα εφελκυστικές, παρουσιάζοντας σχεδόν γραμμικά ελαστική συμπεριφορά μέχρι τη τιμή του φορτίου που προκαλεί το ξεκίνημα της αποκόλλησης του επιθέματος. Ωστόσο, οι παραπάνω παραμορφώσεις στα δοκίμια S-COR-HLU-3&4 είναι πάντα θλιπτικές και αποκλίνουν από τη γραμμική συμπεριφορά. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι τα δοκίμια αυτά έχουν πολύ πιο παχύ επίθεμα με μεγαλύτερο λόγο ακαμψίας (Stiffness Ratio) SR (βλέπε εδάφιο 2.2.3) συγκριτικά με τα υπόλοιπα, με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν πολύ πιο έντονη κάμψη, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Κατά συνέπεια, η ελεύθερη επιφάνεια του ενισχυτικού επιθέματος υπόκειται σε θλίψη, παρά τη συνολική εφελκυστική φόρτιση.



Σχήμα 3.2.29: Καμπύλες φορτίου-παραμορφώσεων στο επίθεμα για τα δοκίμια S-COR-HLU-1&2.



Σχήμα 3.2.30: Καμπύλες φορτίου-παραμορφώσεων στο επίθεμα για τα δοκίμια S-COR-VI-1&2.



Σχήμα 3.2.31: Καμπύλες φορτίου-παραμορφώσεων στο επίθεμα για τα δοκίμια S-COR-HLU-3&4.

Η προσομοίωση των πειραματικών αποτελεσμάτων από τα αντίστοιχα αριθμητικά στα Σχήματα 3.2.29 έως 3.2.31 είναι αρκετά καλή στην περίπτωση των δοκιμών S-COR-VI-1&2 και S-COR-HLU-3&4, ενώ στην περίπτωση των δοκιμών S-COR-HLU-1&2 τα αριθμητικά αποτελέσματα υποεκτιμούν τις αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις. Οι παραμορφώσεις στο επίθεμα όπως υπολογίστηκαν στα αριθμητικά αποτελέσματα, οι οποίες στα σχήματα απεικονίζονται με μπλε γραμμές, βασίζονται στην υπόθεση ότι το ενισχυτικό επίθεμα είναι κολλημένο στο χαλύβδινο υπόστρωμα σε όλη τη διάρκεια της ανάλυσης και είναι συμβατές με τους τρεις τύπους δοκιμών που εξετάστηκαν. Κατά συνέπεια, οι παραπάνω παραμορφώσεις για τα δοκίμια S-COR-HLU-3&4 με το πιο παχύ επίθεμα είναι θλιπτικές εξαιτίας της έντονης κάμψης των δοκιμών. Οι παραμορφώσεις για τα δοκίμια S-COR-HLU-1&2 με το πιο λεπτό επίθεμα και για τα δοκίμια S-COR-VI-1&2 με το λεπτότερο επίθεμα είναι πάντα εφελκυστικές καθώς η κάμψη είναι πολύ πιο ήπια. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι συνεχόμενα εφελκυστικές παραμορφώσεις που μετρήθηκαν πειραματικά στο επίθεμα για τα δοκίμια S-COR-HLU-1&2 και S-COR-VI-1&2 υποδηλώνουν ότι η αποκόλληση του επιθέματος πρέπει να ξεκίνησε από την αρχή της επιβολής της φόρτισης και πιθανόν να επηρεάζει όλη την περιοχή όπου τα επιμηκυνσιόμετρα SG-1 και SG-2 είναι τοποθετημένα. Η αποκόλληση εξελισσόταν σταδιακά καθώς το φορτίο αυξανόταν. Βέβαια, τέτοια συμπεριφορά δε μπορούσε να προσομοιωθεί από το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων. Όσον αφορά στην περίπτωση των δοκιμών S-COR-HLU-3&4, η ικανοποιητική προσομοίωση των παραμορφώσεων μπορεί εν μέρει να οφείλεται στο γεγονός ότι η αποκόλληση αυτή ξεκίνησε από τα άκρα του επιθέματος. Το συμπέρασμα αυτό ενισχύεται και από τη μελέτη των αποτελεσμάτων στο Σχήμα 3.2.31 για τη θέση SG-4 που βρίσκεται σχετικά κοντά στα άκρα του επιθέματος, όπου καλή προσομοίωση των πειραματικών αποτελεσμάτων επιτυγχάνεται για χαμηλό επιβαλλόμενο φορτίο.

Επίλογος, Συμπεράσματα και Προτάσεις για Μελλοντική Εργασία

Επίλογος

Σαν γενικό συμπέρασμα αυτής της εργασίας, αλλά και αποτιμώντας τα αποτελέσματα της συνδυασμένης μελέτης των πειραματικών μετρήσεων και των λύσεων που παρήχθησαν με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (FEA), μπορεί καταληκτικά να ειπωθεί ότι:

- η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων προσφέρει ικανοποιητικού επιπέδου αποτελέσματα για το συγκεκριμένο είδος επισκευών, διότι αναλύει αποτελεσματικά και σε τοπικό επίπεδο, τη συμπεριφορά της επισκευής, συνυπολογίζοντας αλληλεπιδράσεις και στις τρεις χωρικές διαστάσεις, προσμετρώντας τις ακριβείς ιδιότητες των χρησιμοποιούμενων υλικών.
- η συνδυασμένη μελέτη αποδεικνύεται πολύ πιο αποτελεσματική και κατατοπιστική για τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα επί της επισκευής σε ότι αφορά τα τασικά πεδία που αναπτύσσονται και στα αρχικά στάδια των μηχανισμών της θραύσης.
- βεβαίως, πάντα κάποιες αρχικές πειραματικές μετρήσεις θα είναι απαραίτητες για τη βαθμονόμηση οποιουδήποτε απλούστερου ή συνθετότερου μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων αναπτυχθεί, αλλά και για την επάρκεια στη σύγκριση αποτελεσμάτων.

Ειδικότερα, τα συμπεράσματα για τις επιμέρους ομάδες δοκιμών αλλά και από τις λύσεις των πεπερασμένων στοιχείων, συνοψίζονται στις επόμενες παραγράφους, ενώ στην τελευταία παράγραφο δίδονται κάποιες προτάσεις για την περαιτέρω ανάπτυξη και εφαρμογή της συνδυασμένης διαδικασίας μελέτης του προβλήματος.

4.1 Συμπεράσματα της πειραματικής μελέτης των ρωγματομένων πλακών χάλυβα

Από την πειραματική μελέτη των ρωγματομένων δοκιμίων χάλυβα (βλέπε εδάφιο 2.1 και τη δημοσίευση [13]) προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

Σε όλες τις περιπτώσεις, η αστοχία της επισκευής συμβαίνει λόγω αποκόλλησης του επιθέματος από το χαλύβδινο υπόστρωμα. Μέχρι την αποκόλληση του επιθέματος, τα δοκίμια συμπεριφέρονται γραμμικά και μετά από αυτήν ακολουθούν μια τυπική συμπεριφορά, παραμορφούμενα πλαστικά. Ειδικότερα, το φορτίο αστοχίας των ενισχυμένων με επίθεμα δοκιμίων είναι αυξημένο έως και 55% σε σχέση με το φορτίο διαρροής των δοκιμίων αναφοράς. Καλύτερη συμπεριφορά επέδειξαν τα δοκίμια με επίθεμα από PW/HLU. Η χειρότερη της αναμενόμενης συμπεριφορά των δοκιμίων με επίθεμα από UD-HM/HLU απαιτεί περαιτέρω μελέτη.

Για σταθερό και συγκεκριμένο λόγο ακαμψίας του επιθέματος, είναι επιθυμητή η χρησιμοποίηση σύνθετων υλικών με μικρότερο μέτρο ελαστικότητας και μεγαλύτερο πάχος, έναντι άλλων ισχυρότερων και λεπτότερων. Επιβεβαιώθηκε πειραματικά, ότι όσο πιο παχύ είναι το επίθεμα, τόσο εντονότερη είναι η κάμψη που προκαλείται λόγω της μη συμμετρικής εγκάρσιας διατομής του μονόπλευρα ενισχυμένου δοκιμίου.

Σε ότι αφορά τις παραμορφώσεις του χάλυβα, αναπτύσσονται σχετικά μεγάλες πλαστικές παραμορφώσεις (έως 0.75%) κοντά στα άκρα της ρωγμής, πριν την αποκόλληση του επιθέματος. Αντίθετα, οι παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στην ελεύθερη επιφάνεια των επιθεμάτων μέχρι την αποκόλλησή τους, είναι εν γένει χαμηλές (μικρότερες από 0.1%).

Οι πειραματικές μετρήσεις που παρουσιάστηκαν, όπως έχει ήδη υποσημειωθεί, χρησιμοποιήθηκαν για την βαθμονόμηση του αντίστοιχου μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία.

4.2 Συμπεράσματα της πειραματικής μελέτης των διαβρωμένων πλακών χάλυβα

Από την πειραματική μελέτη των διαβρωμένων δοκιμίων χάλυβα (βλέπε εδάφιο 2.2 και τη δημοσίευση [15]) προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

Σε δύο από τις τρεις περιπτώσεις που εξετάστηκαν (S-COR-VI-1&2 και S-COR-HLU-3&4), η αστοχία της επισκευής συμβαίνει λόγω σταδιακής αποκόλλησης του επιθέματος από το

χαλύβδινο υπόστρωμα, συνοδευόμενη από ταυτόχρονη διαρροή των χαλύβδινων δοκιμίων, στη διαβρωμένη ή όχι περιοχή τους. Στην τρίτη εκ των περιπτώσεων (S-COR-HLU-1&2), εμφανίστηκε αρχικά διαρροή στην διαβρωμένη περιοχή του χαλύβδινου υποστρώματος, η οποία πολύ γρήγορα συνοδεύτηκε από απότομη αποκόλληση του ενισχυτικού επιθέματος.

Το μέγιστο φορτίο στο οποίο άντεξαν τα ενισχυμένα με επίθεμα δοκίμια, πριν την αποκόλληση του επιθέματος είναι αυξημένο σε σχέση με το φορτίο διαρροής των δοκιμίων αναφοράς και η αύξηση αυτή ποικίλει από 13 έως 28%. Τα δοκίμια με ενισχυτικό επίθεμα από ανθρακοϋφασμα Twill φτιαγμένα με τη μέθοδο μορφοποίησης με το χέρι (Hand Lay-Up, HLU) παρουσίασαν καλύτερη συμπεριφορά, παρά το μειωμένο λόγο ακαμψίας SR.

Για να επιτευχθεί συγκεκριμένος λόγος ακαμψίας SR για την επισκευασμένη κατασκευή, είναι καλύτερο να χρησιμοποιηθούν υλικά επιθεμάτων με χαμηλότερο μέτρο ελαστικότητας και μεγαλύτερο πάχος, έναντι άλλων τα οποία είναι μεν λεπτότερα αλλά και πιο άκαμπτα. Πειραματικά διαπιστώθηκε ότι όσο παχύτερο είναι το επίθεμα τόσο πιο έντονο είναι το φαινόμενο της προκύπτουσας κάμψης λόγω της μη συμμετρικής εγκάρσιας διατομής εξαιτίας της μονόπλευρης ενίσχυσης της κατασκευής.

Η χειρότερη της αναμενόμενης συμπεριφορά των δοκιμίων με επίθεμα από UD-HM/HLU απαιτεί περαιτέρω πειραματική μελέτη, παραταύτα στην επιλογή της καταλληλότερης τιμής του λόγου ακαμψίας πρέπει πάντα να λαμβάνεται υπ' όψη το προκύπτον πάχος επιθέματος για μην εμφανίζεται έντονο το φαινόμενο της κάμψης το οποίο οδηγεί στην πρόωμη αποκόλληση του επιθέματος. Παράλληλα πρέπει κανείς να λαμβάνει υπ' όψη την αντοχή του κολλητικού μέσου μεταξύ του επιθέματος και του χαλύβδινου υποστρώματος, επειδή είναι προτιμότερο το επίθεμα να φέρει μικρότερο μεν φορτίο, από το να αποκολλάται πολύ σύντομα και να προκαλεί πρόωμη αστοχία της κατασκευής, μη εξαντλώντας τη δυναμική αντοχή του.

Οι παραμορφώσεις στο επίθεμα παραμένουν σταθερές στην κεντρική του περιοχή και η μεταβολή τους κατά το μήκος υποδεικνύουν ότι ένα πιο επίμηκες επίθεμα θα ήταν πιο αποτελεσματικό. Το τμήμα του εφαρμοζόμενου φορτίου το οποίο φέρεται από το επίθεμα είναι σημαντικό και μειώνεται ελαφρώς καθώς το εφαρμοζόμενο στην κατασκευή φορτίο αυξάνεται. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι ισχυρότερος δεσμός μεταξύ του χαλύβδινου υποστρώματος και του ενισχυτικού επιθέματος θα οδηγήσει σε πιο ικανοποιητική ενίσχυση των διαβρωμένων πλακών χάλυβα.

Και αυτές οι πειραματικές μετρήσεις που παρουσιάστηκαν, όπως έχει ήδη υποσημειωθεί, χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση του αντίστοιχου μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία.

4.3 Συμπεράσματα της συνδυασμένης πειραματικής και αριθμητικής μελέτης

Ανά κατηγορία δοκιμίων, όπως έχουν παρουσιαστεί τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών στα προηγούμενα εδάφια 4.1 και 4.2, ισχύουν ακέραια τα ίδια ποιοτικά και ποσοτικά συμπεράσματα, ενώ σε ότι αφορά στα αποτελέσματα της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων μπορούμε με συνδυασμένη ανάλυση να συνοψίσουμε τα ακόλουθα:

Η ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία βοήθησε να ερμηνευτούν τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων και να εντοπιστούν τα στάδια της παραμόρφωσης της κατασκευής προς την κατάρρευση. Επειδή η αστοχία των υλικών δεν περιελήφθη στα μοντέλα των πεπερασμένων στοιχείων, η αποκόλληση των επιθεμάτων δεν ήταν δυνατό να προβλεφθεί κατά συνέπεια οποιοδήποτε αριθμητικό αποτέλεσμα παρουσιάζεται μετά την αστοχία του κολλητικού μέσου είναι άνευ σημασίας και δεν ενδιαφέρει την μελέτη. Για του ίδιους λόγους δεν κατέστη δυνατό να προβλεφθεί το τελικό φορτίο κατάρρευσης του επιθέματος και η αποτελεσματικότητα των επισκευασμένων δοκιμίων.

Πάραυτα, εντός του ορίου της περιοχής γραμμικής ελαστικής απόκρισης και πριν την αποκόλληση του επιθέματος, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, όπως έχει μέχρι στιγμής αναπτυχθεί, αποτελεί μια πολύ καλή βάση για περαιτέρω αναπτύξεις αριθμητικών μοντέλων προσομοίωσης του φαινομένου. Εκτός των προηγούμενων, η μέθοδος αποδείχτηκε ακριβής στην πρόβλεψη των παραμορφώσεων που παρατηρούνται στο χαλύβδινο υπόστρωμα και στο επίθεμα από σύνθετα υλικά, εντός της περιοχής εφαρμογής της, όπως αυτή περιγράφηκε ανωτέρω.

Συνολικά, και πειραματικά αλλά και αριθμητικά επιβεβαιώθηκε ότι όσο πιο παχύ είναι το ενισχυτικό επίθεμα, τόσο εντονότερο είναι το φαινόμενο της κάμψης λόγω της μη συμμετρικής εγκάρσιας διατομής. Επιπροσθέτως, τα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων προέβλεψαν καλύτερα τις αποκρίσεις των ρωγματωμένων δοκιμίων στην δοκιμή του στατικού εφελκυσμού, απ' ότι για τα διαβρωμένα δοκίμια, πράγμα το οποίο μερικώς οφείλεται στο γεγονός ότι για τα διαβρωμένα δοκίμια έγιναν περισσότερες υποθέσεις στη μοντελοποίηση αλλά και επειδή στα τελευταία το ενισχυτικό επίθεμα αποκολλάται σταδιακά, ενώ στα ρωγματωμένα αποκολλάται ακαριαία.

Συμπερασματικά για την αριθμητική επίλυση με πεπερασμένα στοιχεία, θα μπορούσαμε εν γένει να πούμε ότι στα πλαίσια των υποθέσεων που εξ αρχής τέθηκαν στη μοντελοποίηση, τα αποτελέσματα που παράχθηκαν είναι σε γενικές γραμμές αρκετά ενθαρρυντικά για περαιτέρω αναπτύξεις καθώς και συνθετότερες μοντελοποιήσεις του φαινομένου.

4.4 Κατευθύνσεις μελλοντικής εργασίας και ανάπτυξης της αριθμητικής μεθόδου

Η αριθμητική επίλυση με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων, όπως αναπτύχθηκε και παρουσιάστηκε στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία επιδέχεται των ακόλουθων περαιτέρω αναπτύξεων:

1. Προς την κατεύθυνση της μοντελοποίησης των ιδιοτήτων των υλικών μπορεί σε δεύτερο χρόνο να μοντελοποιηθεί η πλήρης μηχανική συμπεριφορά τους, συμπεριλαμβάνοντας, τις καμπύλες τάσεων παραμορφώσεων στην ακριβή τους μορφή χωρίς απλοποιητικές παραδοχές όπως αυτές που έγιναν στο Κεφάλαιο 3.
2. Σε σχέση με το θεωρητικό υπόβαθρο της αριθμητικής επίλυσης, μπορούμε να ισχυριστούμε ότι περιπλοκότερες μη γραμμικές θεωρήσεις της «ελαστικότητας» είναι δυνατόν να μοντελοποιηθούν.
3. Προς την κατεύθυνση συνθετότερων επισκευαστικών (με χρήση επιθεμάτων από σύνθετα υλικά) διατάξεων, μια πληθώρα διαφορετικών γεωμετριών χαλύβδινων υποστρωμάτων, αλλά και επιθεμάτων θα μπορούσε με εύκολο τρόπο να μοντελοποιηθεί.
4. Συνθετότερη μοντελοποίηση της μηχανικής συμπεριφοράς του επιθέματος, η οποία θα περιλαμβάνει την ενδεχόμενη αστοχία του και κατά συνέπεια τη μη συμμετοχή του στην ανακούφιση της επισκευής, κρίνεται απαραίτητη και ουσιαστική για την παρακολούθηση και μελέτη του φαινομένου σε μεγαλύτερο εύρος παραμορφώσεων.
5. Ειδικότερη μοντελοποίηση της συμπεριφοράς του συστήματος χαλύβδινο υπόστρωμα-κολλητικό μέσο-ενισχυτικό επίθεμα, θα μπορούσε να αναπτυχθεί σε σχέση με το φαινόμενο της αποκόλλησης και της αστοχίας του κολλητικού μέσου. Πιο αναλυτικά σημειώνουμε την δεδομένη τάση των εργασιών που καταγράφονται στην διεθνή βιβλιογραφία για μοντελοποίηση προς αυτή την ειδική κατεύθυνση (failure analysis).
6. Σε ότι αφορά στα ρωγματοωμένα δοκίμια σχετική περιπλοκότητα στην μοντελοποίηση θα προκύψει από τη θεώρηση του φαινομένου της διάδοσης της ρωγμής (crack propagation). Ενδεικτικά αναφέρεται η απαίτηση για τη δημιουργία νέου πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων επί του οποίου λαμβάνεται η λύση σε κάθε υπολογιστικό βήμα της μεθόδου (moving boundary problems).
7. Τέλος σαν επιστέγασμα των ανωτέρω επεκτάσεων η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων θα μπορούσε κάλλιστα να χρησιμοποιηθεί και για τη μοντελοποίηση συνθετότερων φορτίων που καταπονούν την επισκευή, όπως για παράδειγμα φορτία κόπωσης (βλέπε [14]), ή/και συνθετότερα, στοχαστικά φορτία, σαν και αυτά που συναντούν συνήθως τέτοιες επισκευές στην διάρκεια της «υπηρεσίας» τους.
8. Βεβαίως, κρίνεται σκόπιμη η ανάπτυξη των σχετικών κωδίκων προγράμματος ηλεκτρονικού υπολογιστή (π.χ. σε κάποια από τις γνωστές γλώσσες

προγραμματισμού), με σκοπό την απεμπλοκή από τους περιορισμούς που θέτει στη μοντελοποίηση, το πρόγραμμα ANSYS που χρησιμοποιήθηκε.

Βιβλιογραφία

1. Grabovac I, "Bonded composite solution to ship reinforcement", Defence Science and Technology Organisation, Platforms Sciences Laboratory, Maritime Platforms Division, Composites: Part A, 2003; **34**: 847-854.
2. Grabovac I, Maritime Platforms Division, Aeronautical and Maritime Research Laboratory, Defence Science and Technology Organisation, "Case history: Bonded Composite Reinforcement of Ship Structure", 2003.
3. Turton, T.J., Dalzel-Job, J., Livingstone, F., "Oil Platforms, Destroyers and Frigates– Case Studies of QinetiQ's Marine Composite Patch Repairs", *Composites: Part A*, 2005; **36**: 1066-1072.
4. Colombi P, Poggi C, "Strengthening of tensile steel members and bolted joints using adhesively bonded CFRP plates", *Construction and Building Materials*, 2006; **20**: 22–33.
5. Colombi P, Poggi C, "An experimental, analytical and numerical study of the static behaviour of steel beams reinforced by pultruded CFRP strips", *Composites: Part B*, 2006; **37**: 64–73.
6. Photiou N, Hollaway C.L, Chryssanthopoulos K.M, "Strengthening of an artificially degraded steel beam utilising a carbon/glass composite system", School of Engineering, University of Surrey, 2004
7. Bocciarelli M., Colombi P., Fava G., Poggi C., "Fatigue performance of tensile steel members strengthened with CFRP plates", *Composite Structures*, 2008.
8. Dalzel-Job, J., Sumpter, J.D.G. and Livingstone, F., "Composite Patch Repair of Steel Ships", *Proc. Advanced Marine Materials, Technology and Applications Conference, RINA*, London, 2003.
9. Colombi P, "Plasticity induced fatigue crack growth retardation model for steel elements reinforced by composite patch", *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2005; **43**: 63–76.
10. Baker, A., "Bonded Composite Repair of Fatigue-Cracked Primary Aircraft Structure", *Composite Structures*, 1999; **47**: 431-443.
11. Dae-Cheol Seo, Jung-Ju Lee, "Fatigue crack growth behaviour of cracked aluminium plate repaired with composite patch", *Composite Structure*, 2002; **57**: 323-330.
12. Hosseini- Toudeshky H., "Effects of composite patches on fatigue crack propagation of single-side repaired aluminium panels", *Composite Structure*, 2006; **76**: 243-251.
13. Tsouvalis G.N., Mirisiotis S.L., "Experimental Investigation of a Composite Patch Reinforced Cracked Steel Plate in Static Loading", Ninth International Conference on Fast Sea Transportation FAST2007, Shanghai, China, September 2007.
14. Tsouvalis G.N., Mirisiotis S.L., Papazoglou J.V., "Fatigue Behaviour of Composite Patch Reinforced Steel Plates", Conference on Structural Analysis of Advanced Materials (ICSAM 2007) Patras, Greece, September 2007.

15. Tsouvalis G.N., Mirisiotis S.L., Tsiourva E.T., "Experimental Investigation of a Composite Patch Reinforced Corroded Steel Plates in Static Loading", 13th European Conference on Composite Materials (ECCM-13) Stockholm, Sweden, June 2008.
16. Καντεράκης Γ., Τομέας Μηχανικής, Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, «Η μέθοδος της επισκευής μεταλλικών δομών με την επικόλληση ενισχυτικών επιθεμάτων από σύνθετα υλικά», 2000, Διδακτορική Διατριβή.
17. Umamaheswar T, Singh R, "Modelling of a patch repair to a thin cracked sheet", *Engineering Fracture Mechanics*, 1999; **62**; 267-289.
18. O. O. Ochoa and J. N. Reddy, *Finite Element Analysis of Composite Laminates*, Chapter 3, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht / Boston / London, 1994.
19. Schubbe J. J, Mall S. , "Modeling of cracked thick metallic structure with bonded composite patch repair using three-layer technique", *Composite Structures* 45, (Issue 3), pp 185-193, Elsevier Science Ltd, 1999.
20. F. L. Matthews, G. A. O. Davies, D. Hitchings and C. Soutis, *Finite element modelling of composite materials and structures*, Chapter 5, CRC Press, Woodhead Publishing Limited, 2000.
21. Chukwujekwu Okafor A., Navdeep S., Enemuoh E.U., Rao V.S., "Design, analysis and performance of adhesively bonded composite patch repair of cracked aluminium aircraft panels", *Composite Structures*, 2005; **71**: 258-270.
22. Righiniotis D.T, Aggelopoulos S.E, Chryssanthopoulos K.M, "Fracture mechanics 2D-FEA of a cracked steel plate with a CFRP patch", School of Engineering, University of Surrey, 2004
23. Papanikos P., Tsepres I.K., Labeas G., Pantelakis Sp., "Progressive damage modeling of bonded composite repairs", *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2005; **43**: 189-198.
24. Colombi P, Panzeri N, Poggi C, "Experimental characterization of steel elements reinforced by adhesively bonded CFRP plates", Department of Structural Engineering, Polytechnic of Milan, 2004.
25. Μυρισιώτης, Λ. και Τσούβαλης, Ν., «Χαρακτηρισμός Σύνθετων Υλικών Ενισχυτικών Επιθεμάτων από Ανθρακοϋφάσματα και Εποξειδική Ρητίνη», Τεχνική Έκθεση STL-213-F-06, Rev. 1.0, Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Νοέμβριος 2006.
26. Τσούβαλης Ν. Γ., Τομέας Θαλάσσιων Κατασκευών, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σημειώσεις για το μάθημα "Ανάλυση και Σχεδίαση Σκαφών από Σύνθετα Υλικά", Κεφ. 1,2, 1998.
27. Tsouvalis G.N., Mirisiotis S.L., "Experimental Investigation of the Static Behaviour of a Hole Drilled Steel Plate Reinforced with a Composite Patch", 13th International Conference on Experimental Mechanics (ICEM-13), July 2007, Alexandroupolis, Greece.

28. International Organization for Standardization, ISO 5893:2002 "Rubber and Plastics Test Equipment – Tensile, Flexural and Compression Types (Constant Rate of Traverse) – Specification" (2002).
29. Σωτηρόπουλος, Β.Π., «Αναλυτική και Αριθμητική Μοντελοποίηση της Χρήσης Επιθεμάτων από Σύνθετα Υλικά για την Ενίσχυση και Επισκευή Χαλύβδινων Κατασκευών», Διπλωματική Εργασία, Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2007.
30. International Standardization Organization, Standard ISO 14993:2001 "Corrosion of metals and alloys – Accelerated testing involving cyclic exposure to salt mist, "dry" and "wet" conditions", ISO Standards Handbook, 1st ed., 2004, pp. 735-750.
31. International Standardization Organization, Standard ISO 8407:1991 "Corrosion of metals and alloys : Removal of corrosion products from corrosion test specimens" ISO Standards Handbook, 1st ed., 2004, pp. 395-404.
32. ANSYS Release 10.0 Documentation, Chapter 12.2.1, Modeling the Crack Region, 2005
33. ANSYS Release 10.0 Documentation, Chapter 8 (8.1, 8.2, 8.3), Non Linear Structural Analysis, 2005.
34. Andresena W.H., Echtermeyer T.A., "Critical energy release rate for a CSM reinforced carbon fibre composite/steel bonding", Composites: Part A, 2006; **37**: 742–751.