



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΤΟΥ
ΚΟΛΛΗΤΙΚΟΥ ΔΕΣΜΟΥ ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΩΝ ΕΠΙΘΕΜΑΤΩΝ
ΑΠΟ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
Κοβεντάρου Ελένη

Επιβλέπων: Τσούβαλης Νικόλαος
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π

ΔΠΜΣ ΝΑΥΤΙΚΗ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΕΠΙΣΤΗΜΗ

ΑΘΗΝΑ, ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 2012

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΤΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΥΛΙΚΑ, Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΚΑΙ ΟΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥΣ.....	1
1.2 ΑΝΑΦΟΡΙΚΑ ΜΕ ΤΙΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΕΠΙΣΚΕΥΗΣ ΧΑΛΥΒΔΙΝΩΝ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ.....	3
1.3 ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΟΛΛΗΤΙΚΟΥ ΜΕΣΟΥ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ COHESIVE ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	6
1.4 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	8

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΣΤΑ ΠΛΑΙΣΙΑ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΠΥΘΑΓΟΡΑΣ II

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	11
2.2 ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.....	11
2.3 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.....	15
2.4 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΔΟΚΙΜΩΝ.....	21
2.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ.....	23

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	36
3.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΟΥ ΑΚΟΛΟΥΘΗΘΗΚΕ ΣΤΑ ΠΛΑΙΣΙΑ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΠΥΘΑΓΟΡΑΣ II	37
3.2.1 ΓΕΝΙΚΑ	37
3.2.2 ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ.....	39
3.2.3 ΤΥΠΟΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ, ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΑΙ ΕΠΙΒΟΛΗ ΦΟΡΤΙΩΝ.....	42
3.2.4 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΚΑΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	43

3.2.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ	48
3.3 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ COHESIVE ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	55
3.3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	55
3.3.2 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	55
3.3.3 ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΥΠΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ	57
3.3.4 ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ ΚΑΙ ΤΕΛΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ	59
3.3.4.1 Επίδραση Μήκους και Χρονικού Βήματος	59
3.3.4.2 Επίδραση Ιδιοτήτων Cohesive Στοιχείων	62
3.3.4.3 Επίδραση Ορίου Διαρροής Χάλυβα	64
3.3.4.5 Επιλογή Τελικού Μοντέλου – Αποτελέσματα	65

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

4.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΚΑΙ ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ ΔΟΚΙΜΩΝ	69
4.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ FG ΕΠΙΘΕΜΑ ΕΠΙ ΧΑΛΥΒΔΙΝΟΥ ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ.....	73
4.2.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΜΗΚΟΣ ΕΠΙΘΕΜΑΤΟΣ $L_p = 180 \text{ mm}$	73
4.2.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΜΗΚΟΣ ΕΠΙΘΕΜΑΤΟΣ $L_p = 280 \text{ mm}$	78
4.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ UD ΕΠΙΘΕΜΑ ΕΠΙ ΧΑΛΥΒΔΙΝΟΥ ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ.....	83
4.3.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΜΗΚΟΣ ΕΠΙΘΕΜΑΤΟΣ $L_p = 180 \text{ mm}$	83
4.3.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΜΗΚΟΣ ΕΠΙΘΕΜΑΤΟΣ $L_p = 280 \text{ mm}$	88
4.4 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΦΟΡΤΙΩΝ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ.....	94

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΜΕΛΕΤΗ

5.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ	102
5.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΔΥΟ ΜΕΘΟΔΩΝ ΤΗΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ	103
5.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	104
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	106
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	
ΚΩΔΙΚΑΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΕ ANSYS.....	109

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΤΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΥΛΙΚΑ, Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΚΑΙ ΟΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥΣ

Τα σύνθετα υλικά έχουν προκύψει ως αποτέλεσμα της ανάπτυξης της γνώσης της τεχνολογίας των υλικών και της ανάγκης σχεδιασμού υλικών με βάση τις ανάγκες που καθορίζουν οι εκάστοτε υψηλών απαιτήσεων εφαρμογές. Δύο ή περισσότερα διακριτά υλικά μπορούν να συνδυαστούν σχηματίζοντας ένα σύνθετο υλικό, το οποίο να κατέχει βελτιωμένες ιδιότητες σε σχέση με τις ιδιότητες των συστατικών υλικών του για ένα συγκεκριμένο πεδίο εφαρμογών.

Ένας τέτοιος τύπος σύνθετου υλικού είναι τα FRP (Fiber Reinforced Polymers), τα οποία αποτελούνται από μία δέσμη ινών που είναι ενσωματωμένη σε μία μήτρα ρητίνης. Ο όρος FRP περιγράφει μια ομάδα υλικών τα οποία κατασκευάζονται από συνθετικές και οργανικές ίνες συγκολλημένες με ρητίνη. Οι ίνες, οι οποίες αναλαμβάνουν κυρίως εφελκυστικές τάσεις παράλληλα στη διεύθυνσή τους, είναι εμποτισμένες με κάποιο θερμοσκληρυνόμενο πολυμερές (εποξειδική ρητίνη, πολυεστέρας κ.α.). Οι πιο συνηθισμένες κατηγορίες αυτού του σύνθετου υλικού είναι τα FRP από άνθρακα (CFRP), από αραμίδιο (AFRP) και από γυαλί (GFRP). Οι ίνες παρέχουν αντοχή και ακαμψία στο σύνθετο υλικό και γενικά φέρουν τα περισσότερα από τα εφαρμοζόμενα φορτία. Η μήτρα ενεργεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε να συνδέει και να προστατεύει τις ίνες καθώς και να φροντίζει για τη μεταφορά της τάσης από ίνα σε ίνα μέσω διατμητικών τάσεων.

Παρατηρούμε λοιπόν ότι στη δημιουργία σύνθετων υλικών, ένα άκαμπτο, ανθεκτικό και υψηλής αντοχής υλικό, εμβαπτίζεται σε ένα εύκαμπτο και πλαστικό υλικό. Το πρώτο, αποτελεί τον «οπλισμό» και λειτουργεί ως φορέας παραλαβής των φορτίων, ενώ το δεύτερο αποτελεί τη μήτρα που προσδίδει συνοχή στο σύνθετο υλικό και μεταβιβάζει τα ασκούμενα φορτία στον οπλισμό (ACI Committee, 2006).

Ενώ η ιδέα των σύνθετων υλικών υπήρχε για αρκετές χιλιετίες, η ένταξη της τεχνολογίας των σύνθετων FRP στον βιομηχανικό κόσμο έγινε περίπου πριν από έναν αιώνα. Τα υλικά αυτά εμφανίστηκαν στο προσκήνιο αμέσως μετά το 1900, με τη χημική βιομηχανία να κάνει μεγάλα βήματα ώστε να δημιουργήσει πλαστικά υλικά από ίνες (βινύλιο, πολυεστέρας και ίνες γυαλιού), με υψηλότερη αντοχή, μεγαλύτερη ακαμψία και μικρότερη πυκνότητα. Η ραγδαία ανάπτυξή τους οφείλεται κυρίως στις μεγάλες ανάγκες που δημιουργήθηκαν στην αεροναυπηγική για την εξερεύνηση του διαστήματος (Bakis, 2002).

Με κίνητρο τις ανάγκες της ηλεκτρονικής και αμυντικής τεχνολογίας και των τεχνολογιών του διαστήματος, οι ερευνητές δημιούργησαν προϊόντα από τα υλικά αυτά με ιδιαίτσες ιδιότητες, όπως το αλεξίσφαιρο γιλέκο Kavelan. Το πρώτο γνωστό προϊόν με υλικά FRP ήταν

μία γάστρα πλοίου, η οποία κατασκευάστηκε στα μέσα της δεκαετίας του 1930, ως τμήμα ενός κατασκευαστικού πειράματος, χρησιμοποιώντας ύφασμα από ίνες γυαλιού και πολυεστερική ρητίνη, σε μήτρα από αφρό (ACI Committee, 2006).

Από αυτή την αφετηρία, οι εφαρμογές των σύνθετων υλικών FRP δημιούργησαν στη συνέχεια ένα επαναστατικό κύμα στη δομική βιομηχανία. Τα σύνθετα υλικά FRP κάνουν ουσιαστικά την εμφάνισή τους στις αρχές της δεκαετίας του 1940, με εφαρμογές κυρίως στην αεροναυπηγική και στο πολεμικό ναυτικό. Η αεροπορία και το ναυτικό των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής επένδυσαν σε σύνθετα FRP, με υψηλό λόγο αντοχής βάρους, και με μεγάλη αντοχή σε περιβάλλον διάβρωσης, όπως είναι οι καιρικές συνθήκες, η θάλασσα και γενικά το υφάλμυρο περιβάλλον. Από το 1945 και μετά, πάνω από 3.2 εκατομμύρια kg από ίνες γυαλιού τοποθετήθηκαν σε πλοία που δεξαμενίστηκαν και χρησιμοποιήθηκαν κυρίως σε στρατιωτικές εφαρμογές (ACI Committee, 2006).

Σύντομα, τα οφέλη των FRP, ιδιαίτερα των ικανοτήτων αντοχής τους στη διάβρωση, έγιναν ευρέως γνωστά. Σωλήνες από ίνες γυαλιού, για παράδειγμα, πρωτοεμφανίστηκαν το 1948 και χρησιμοποιήθηκαν ευρέως από τις πετρελαιοβιομηχανίες. Τα σύνθετα FRP αποδείχθηκαν μία αξιόλογη εναλλακτική λύση σε σχέση με άλλα παραδοσιακά υλικά, ακόμα και σε συνθήκες υψηλής πίεσης και με μεγάλες διαμέτρους σε περιπτώσεις χημικών επεξεργασιών. Εκτός από την υψηλή αντοχή σε διάβρωση, ο σωλήνας FRP προσφέρει επίσης διάρκεια στο χρόνο και αντοχή, συνεπώς ελαχιστοποιεί την ανάγκη για εσωτερική επένδυση, εξωτερική επίστρωση και καθοδική προστασία (American Water Works Association, 1996).

Από τις αρχές της δεκαετίας του 1950, τα FRP χρησιμοποιήθηκαν ευρέως ως εξοπλισμός σε χημικές επεξεργασίες, σε πολτοποίηση χαρτιού, σε επεξεργασία αποβλήτων, και σε βιομηχανίες κατασκευών. Πάρα πολλά προϊόντα και εγκαταστάσεις από FRP βοήθησαν στο να γίνει μία αποδοτική αρχή σε αυτά τα πεδία εφαρμογής (American Water Works Association, 1996).

Στις μετέπειτα από το 1950 δεκαετίες, εισήχθησαν νέες και συχνά επαναστατικές εφαρμογές των FRP. Η ίδια τεχνολογία, η οποία παρήγαγε τους πλαστικούς οπλισμούς που απαιτήθηκαν για το πυρηνικό ερευνητικό έργο του Manhattan στον Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο, οδήγησε στην εξέλιξη των υψηλής απόδοσης σύνθετων υλικών για κινητήρες πυραύλων και για δεξαμενές, τις δεκαετίες του 1960 και 1970. Πιο συγκεκριμένα, δεξαμενές με τοιχώματα από ίνες γυαλιού χρησιμοποιήθηκαν από το εργαστήριο Skylab ώστε να παρέχουν οξυγόνο σε αστροναύτες. Το 1953, το πρώτο αυτοκίνητο Chevrolet Corvette με πλαίσια γυαλιού, μπήκε στη γραμμή παραγωγής (ACI Committee, 2006).

Τη δεκαετία του 1960 το ναυτικό της Βρετανίας και των Ηνωμένων Πολιτειών χρησιμοποίησε ναρκαλιευτικά σκάφη βασισμένα στα FRP, επειδή τα υλικά αυτά είναι αντιμαγνητικά και συμπεριφέρονται καλύτερα από άλλα όταν καλούνται να λειτουργήσουν σε

έντονα διαβρωτικό θαλάσσιο περιβάλλον. Στις εφαρμογές αυτές παρατηρήθηκε ότι ένα από τα χαρακτηριστικά των FRP είναι η ικανότητά τους να μειώνουν τη δυνατότητα ανίχνευσης με radar ενός πλοίου ή αεροσκάφους. Υψηλής απόδοσης σύνθετα υλικά χρησιμοποιήθηκαν επίσης σε αεροσκάφη προηγμένης τεχνολογίας, όπως είναι τα F-117 Stealth Fighter και B-2 Bomber (ACI Committee, 2006).

Ως προς τη ζήτηση των σύνθετων υλικών, η ναυτιλιακή αγορά ήταν ο μεγαλύτερος καταναλωτής από τη δεκαετία του 1960 και έπειτα, είτε με την εξ ολοκλήρου κατασκευή μικρών σκαφών, είτε με την κατασκευή μεμονωμένων τμημάτων τους από σύνθετα πολυμερή υλικά. Στο επόμενο εδάφιο θα γίνει αναφορά στα πλεονεκτήματα της χρήσης των FRPs ως επιθέματα σε χαλύβδινα ελάσματα πλοίων, με στόχο την αποκατάσταση δομικών αστοχιών τους.

1.2 ΑΝΑΦΟΡΙΚΑ ΜΕ ΤΙΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΕΠΙΣΚΕΥΗΣ ΧΑΛΥΒΔΙΝΩΝ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ

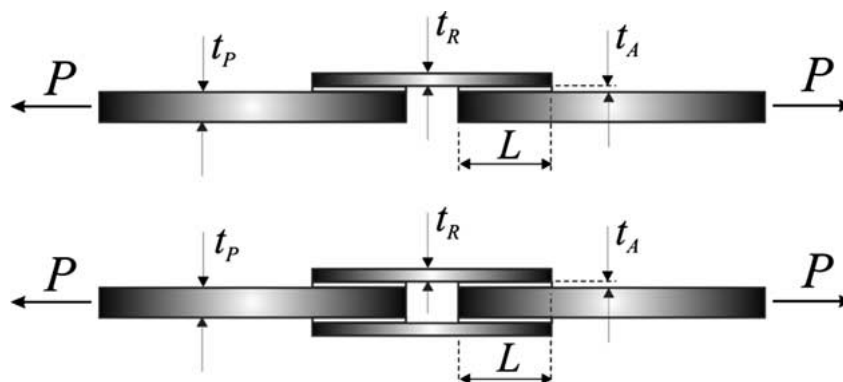
Οι συχνά εμφανιζόμενες δομικές αστοχίες της μεταλλικής κατασκευής των πλοίων, λόγω της έκθεσής της στο έντονα διαβρωτικό θαλάσσιο περιβάλλον, καθώς και της συνεχόμενης καταπόνησής της σε μεγάλα φορτία, αποτελούν ένα από τα σημαντικότερα μειονεκτήματα, αναφορικά με την ανθεκτικότητα της κατασκευής. Έτσι, είναι αναγκαία η επισκευή των δομικών αυτών αστοχιών, οι οποίες εμφανίζονται ως ρωγμές, διαβρωμένες επιφάνειες και τοπικές παραμορφώσεις σε διάφορα μέρη της μεταλλικής κατασκευής ενός πλοίου (γάστρα, υπερκατασκευές, κ.α.).

Η αποκατάσταση-ενίσχυση των ελασμάτων που έχουν διαβρωθεί ή ρωγματωθεί και θέτουν σε κίνδυνο την ακεραιότητα ολόκληρης της κατασκευής, παραδοσιακά περιλαμβάνει την τοποθέτηση ενός μεταλλικού επιθέματος (doubler) είτε με συγκόλληση είτε με κοχλίες, ή την αντικατάσταση ολόκληρου του διαβρωμένου τμήματος (αντιμετώπιση διάβρωσης μεγάλης έκτασης). Οι επισκευές αυτές συχνά αποβαίνουν ιδιαίτερα χρονοβόρες και δαπανηρές, ενώ σε κάποιες περιπτώσεις είναι αδύνατο να εφαρμοστούν, λόγω π.χ. μεγάλης φόρτισης της κατασκευής από το ίδιο βάρος της. Επιπλέον μειονέκτημα των καθιερωμένων μεθόδων επισκευής είναι η παρουσία υψηλών θερμοκρασιών και σπινθήρων κατά τη διάρκεια των συγκολλήσεων, γεγονός εξαιρετικά επικίνδυνο σε εκρηκτικό περιβάλλον (π.χ. δεξαμενές καυσίμων πλοίων).

Τα προαναφερθέντα μειονεκτήματα τονίζουν την ανάγκη διερεύνησης και αποτίμησης της αποτελεσματικότητας νέων λύσεων, που θα βοηθήσουν στην υπερπήδηση των υπάρχοντων προβλημάτων. Τα προβλήματα αυτά φαίνεται να αντιμετωπίζονται αποτελεσματικά με τη χρήση επιθεμάτων αποτελούμενων από σύνθετα υλικά και

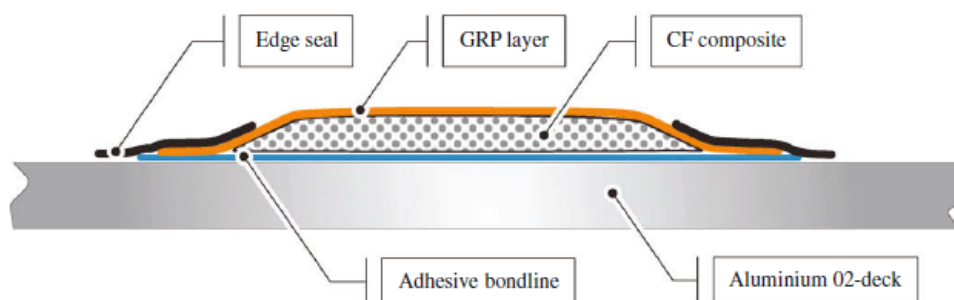
συγκεκριμένα των σύνθετων ενισχυμένων με ίνες (FRP - Fiber Reinforced Polymers) και των κολητικών ουσιών υψηλής αντοχής.

Οι επισκευές με σύνθετα επιθέματα αποδεικνύονται σημαντικά πιο οικονομικές σε σχέση με τις παραδοσιακές, επειδή δεν απαιτείται θερμική κατεργασία του επιθέματος σε υψηλές θερμοκρασίες, αποφεύγοντας πιθανό άδειασμα γειτονικών δεξαμενών του σκάφους ή της υποχρεωτικής διαδικασίας αδρανοποίησης δεξαμενών φορτίου καυσίμων (gas free) που προβλέπεται σε περίπτωση αποκοπής και συγκόλλησης χαλύβδινων ελασμάτων. Αποφεύγεται ακόμη, η δημιουργία νέων σημείων συγκέντρωσης τάσεων, λόγω της απουσίας θερμικών τάσεων (συγκολλήσεις) και οπών (κοχλιωτά μεταλλικά επιθέματα). Επίσης, οι επισκευές με σύνθετο επίθεμα μπορούν να γίνουν είτε μονόπλευρα είτε αμφίπλευρα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.1 (Campilho, 2005), σε αντίθεση με την εφαρμογή κοχλιωτών μεταλλικών επιθεμάτων, όπου απαιτείται προσβασιμότητα και από τις δύο πλευρές του προς επισκευή ελάσματος.



Σχήμα 1.1 : Μονόπλευρο και αμφίπλευρο επίθεμα

Προκειμένου να εφαρμοστεί αυτή η νέα μέθοδος επισκευής, απαιτείται η κατασκευή του επιθέματος από σύνθετα υλικά, το οποίο αποτελείται από ρητίνη (συνήθως εποξική) και ίνες κατάλληλων διαστάσεων και αντοχής (συνήθως ίνες γυλιού ή άνθρακα).



Σχήμα 1.2 : Επίθεμα από σύνθετο υλικό με ίνες από άνθρακα κολημένο σε μεταλλική πλάκα από αλουμίνιο

Για να πραγματοποιηθεί η ένωσή του με την προς επισκευή επιφάνεια χρησιμοποιείται κολλητική ουσία (adhesive) η οποία τοποθετείται στο επίθεμα με κατάλληλη μεθοδολογία. Στο Σχήμα 1.2 (Grabovac, 2008), φαίνεται παραστατικά μια διάταξη, που περιλαμβάνει επίθεμα από σύνθετο υλικό, κολλητικό μέσο και επιφάνεια από αλουμίνιο.

Ο μηχανισμός ενίσχυσης λειτουργεί ως εξής : οι τάσεις μεταφέρονται από τη μεταλλική πλάκα που περιέχει τη δομική αστοχία στις ίνες του επιθέματος μέσω διάτμησης, διαμέσου του στρώματος της κόλλας, ανακουφίζοντας έτσι την περιοχή που επισκευάστηκε. Ο κίνδυνος αποκόλλησης του επιθέματος από την κυρίως κατασκευή εξαιτίας των ισχυρών διατμητικών τάσεων που αναπτύσσονται στο κολλητικό μέσο, αποτελεί ίσως το μεγαλύτερο μειονέκτημα, κάτι όμως που μπορεί να αντιμετωπιστεί με κόλλες υψηλού μέτρου διάτμησης, καθώς και με κατάλληλη διαστασιολόγηση και επιλογή των υλικών του επιθέματος για ελαχιστοποίηση των διατμητικών τάσεων στα όρια της επισκευής

Η τοποθέτηση επιθεμάτων από σύνθετα υλικά έχει αποδείξει εδώ και αρκετά χρόνια στους τομείς της αεροναυπηγικής και αεροδιαστημικής βιομηχανίας αλλά και ευρύτερα στη δομική βιομηχανία (μεταλλικά κτίρια, γεφυροποιία), την αποτελεσματικότητά της και τα πλεονεκτήματα κόστους που προσφέρει. Λόγω της υψηλής ειδικής αντοχής και ειδικής δυσκαμψίας, του υψηλού ορίου κόπωσης και κυρίως του μειωμένου βάρους τους, τα επιθέματα από σύνθετα υλικά καθυστερούν τη διάδοση της δομικής αστοχίας και έτσι παρατείνουν τη διάρκεια ζωής της επισκευασμένης κατασκευής. Επιπρόσθετα, μπορούν να παραχθούν σε πολύπλοκες μορφές, ενώ χάρη στην μεγάλη ποικιλία ινών, ρητινών και στις διάφορες μεθόδους κατασκευής, δίνεται η δυνατότητα στο σχεδιαστή να επιλέξει το πιο κατάλληλο σύστημα υλικών για να καλύψει τις εκάστοτε απαιτήσεις του. Τέλος, η χρήση κολλητικού μέσου υπερτερεί της μηχανικής σύνδεσης, παρουσιάζοντας πιο ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων στην κατασκευή.

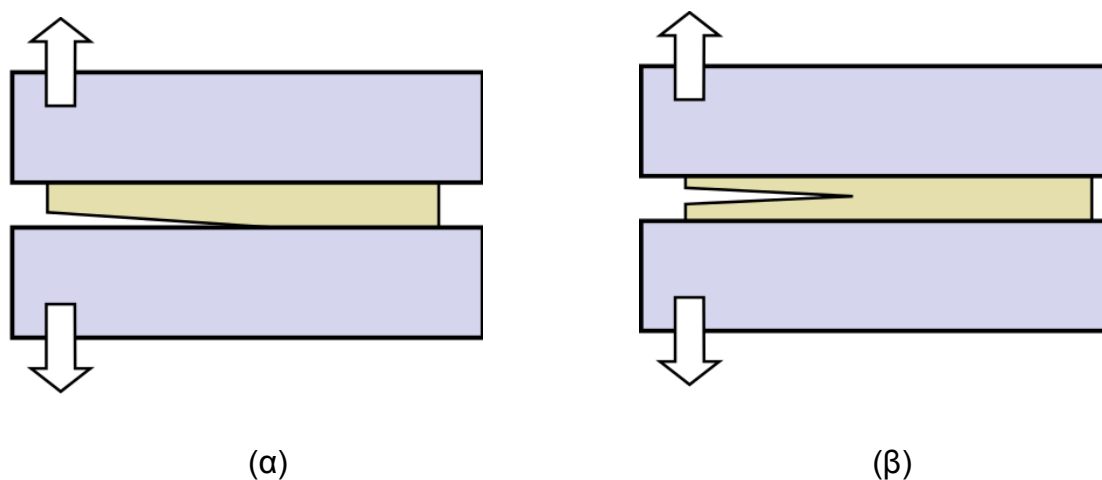
1.3. ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΟΛΛΗΤΙΚΟΥ ΜΕΣΟΥ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ COHESIVE ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Σε επισκευές με σύνθετο επίθεμα η επιλογή του κολλητικού μέσου είναι το ίδιο σημαντική με αυτή των ινών, αφού μέσω αυτού επιτυγχάνεται ο απαραίτητος δεσμός για τη μεταφορά τάσεων από την μεταλλική κατασκευή στο επίθεμα. Οι παράγοντες που καθορίζουν τη συμπεριφορά του κολλητικού μέσου είναι η απαίτηση επίτευξης καθορισμένου επιπέδου αντοχής σε διάτμηση και αποκόλληση, η χημική του συμβατότητα με τα υλικά του επιθέματος, το περιβάλλον λειτουργίας του επιθέματος, οι απαιτήσεις πίεσης, θερμοκρασίας και χρόνου πολυμερισμού του, καθώς και ο απαιτούμενος εξοπλισμός για τον πολυμερισμό αυτόν (Τσούβαλης, 2007).

Σημαντικό ρόλο παίζει η παραμόρφωση μέχρι τη θραύση του κολλητικού μέσου. Μια υψηλή τιμή του μεγέθους αυτού θα βελτιώσει πολύ την αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης, αφού το κολλητικό μέσο θα μπορεί να ακολουθήσει τις μεγάλες πλαστικές παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στο μέταλλο στο άκρο της ρωγμής, χωρίς να αστοχήσει. Στις ναυπηγικές εφαρμογές, τις περισσότερες φορές το ρόλο του κολλητικού μέσου τον παίζει η ίδια η ρητίνη του επιθέματος, το πρώτο στρώμα της οποίας επάνω στο μέταλλο είναι παχύτερο από τα επόμενα μεταξύ των στρώσεων (Τσούβαλης, 2007).

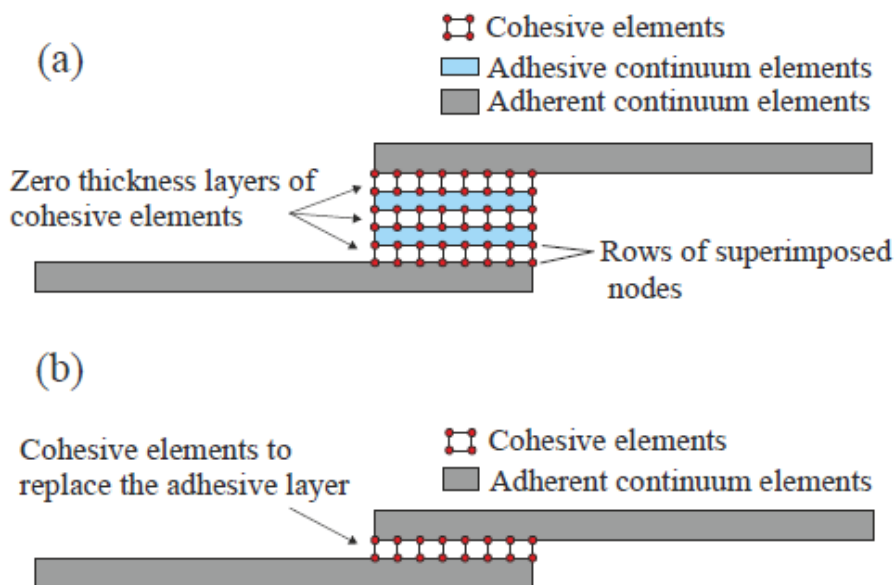
Οι ειδικές κολλητικές ουσίες (στις περισσότερες περιπτώσεις εποξειδικές κόλλες δύο συστατικών) χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον για την κόλληση προκατασκευασμένων επιθεμάτων επάνω στην μεταλλική κατασκευή. Μια τέτοια πρακτική προϋποθέτει τις περισσότερες φορές επίπεδα επιθέματα, γεγονός που δεν είναι συνηθισμένο στις ναυπηγικές εφαρμογές, όπου οι ανάγκες ενίσχυσης αφορούν στην πλειοψηφία των περιπτώσεων μη επίπεδες γεωμετρίες (π.χ. ακραία ρωγμή αγκώνα). Η αντοχή του κολλητικού μέσου σε διάτμηση, είτε αυτό είναι η ρητίνη του επιθέματος, είτε κάτι άλλο, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη διαδικασία πολυμερισμού του, δηλαδή από την πίεση που ασκείται, τη θερμοκρασία και το χρόνο μέχρι τη στερεοποίηση. Σημαντικό ρόλο παίζουν επίσης οι συνθήκες λειτουργίας του επιθέματος (θερμοκρασία, υγρασία). Σε όλες τις περιπτώσεις πρέπει να ακολουθούνται απαρέγκλιτα οι οδηγίες του κατασκευαστή της ρητίνης ή του κολλητικού μέσου (Τσούβαλης, 2007).

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, σε μία σύνδεση με κολλητικό μέσο που υπόκειται σε ένταση, οι τάσεις μεταφέρονται από το ένα υλικό στο άλλο μέσο αυτού. Έτσι, η αστοχία μίας τέτοιας σύνδεσης συμβαίνει με δύο τρόπους : είτε αστοχεί η διεπιφάνεια κόλλας- χάλυβα (interfacial or adhesive failure), είτε αστοχεί το ίδιο το κολλητικό μέσο (cohesive failure). Οι δύο αυτοί τύποι αστοχίας φαίνονται στο Σχήμα 1.3 (Anyfantis, 2012α).



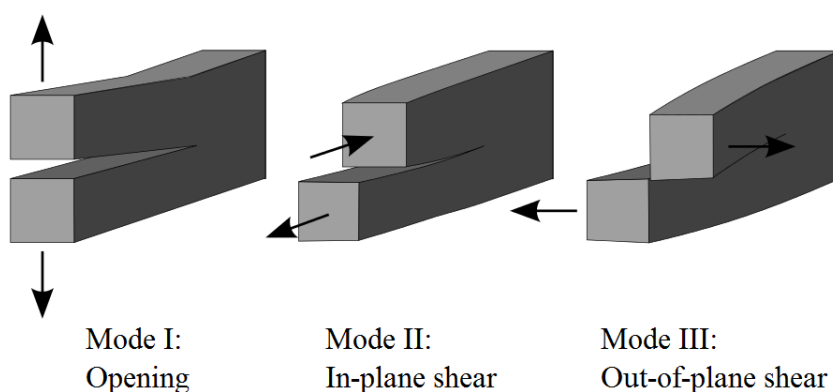
Σχήμα 1.3 : Adhesive or interfacial αστοχία (α) και cohesive αστοχία (β) μίας σύνδεσης με χρήση κολλητικού μέσου

Προκειμένου να προσομοιωθεί αριθμητικά η συμπεριφορά του κολλητικού μέσου με χρήση της μεθόδου ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία, μπορούν να χρησιμοποιηθούν στοιχεία cohesive. Τα στοιχεία αυτά μπορούν να προσομοιώσουν μία μηδενική επιφάνεια ανάμεσα σε δύο διαφορετικά υλικά ή στρώσεις του ίδιου υλικού, είτε να προσομοιώσουν μία λεπτή λωρίδα μεταξύ δύο υλικών πεπερασμένου πάχους, όπως είναι ο κολλητικός δεσμός (Σχήμα 1.4), (Anyfantis, 2012α).



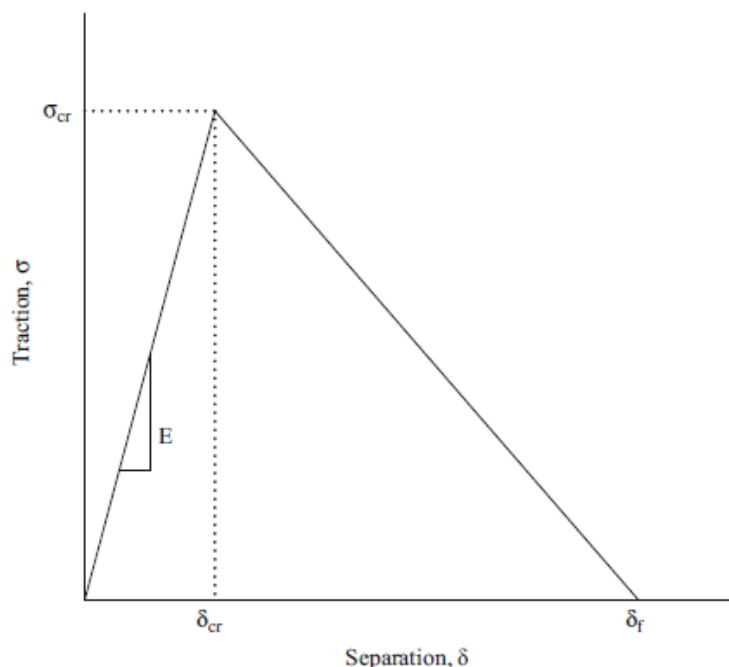
Σχήμα 1.4 : Χρήση cohesive στοιχείων για προσομοίωση κολλητικού δεσμού

Η συμπεριφορά των cohesive στοιχείων περιγράφεται από τους αντίστοιχους νόμους (cohesive laws) οι οποίοι συσχετίζουν τις τάσεις (ορθές ή διατμητικές) με το είδος της αποκόλλησης που αυτές δημιουργούν. Η ζώνη αυτών των στοιχείων αστοχεί με τους τρόπους που φαίνονται στο Σχήμα 1.5.



Σχήμα 1.5 : Βασικοί τύποι αστοχίας μίας ένωσης με κολλητικό μέσο

Ένα είδος νόμου που διέπει αυτή τη ζώνη στοιχείων (Cohesive Zone Model) και συνδέει τις τάσεις με τις μετατοπίσεις (ανάλογα με τον τύπο της καταπόνησης και τον τρόπο αποκόλλησης) ονομάζεται τριγωνικός και σχηματικά αναπαρίσταται όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.6 (Lee, 2010).



Σχήμα 1.6 : Τριγωνικός νόμος – γραφική αναπαράσταση

Ο τριγωνικός νόμος περιγράφει την σταδιακή υποβάθμιση του κολλητικού δεσμού, καθώς αυτός υπόκειται σε καταπόνηση. Το εμβαδό του τριγώνου του Σχήματος 1.6 αντιστοιχεί στην κρίσιμη ενέργεια θραύσης, και η κορυφή του τριγώνου στη μέγιστη τάση (ορθή ή διατμητική) που μπορεί να αναπτύξει το υλικό πριν υποβαθμιστεί. Στην παρούσα εργασία, θεωρούμε ότι τα cohesive στοιχεία καταπονούνται με συνδυασμό των mode I, II του Σχήματος 1.5, οπότε εξετάζονται οι τάσεις και οι ενέργειες ανά ζεύγη. Στο mode I αντιστοιχεί η μέγιστη ορθή τάση S_{max} και η κρίσιμη ενέργεια θραύσης G_{cn} ενώ στο mode II αντιστοιχεί η μέγιστη διατμητική τάση T_{max} και η κρίσιμη ενέργεια θραύσης G_{ct} .

1.4 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Τα υλικά από FRP παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές στις ιδιότητές τους συγκριτικά με τον χάλυβα. Όπως είναι λογικό, για την παγίωση τους στο χώρο των κατασκευών, είναι απαραίτητη η έρευνα για τον έλεγχο της ανθεκτικότητάς τους κάτω από όλες τις πιθανές χημικές και φυσικές καταπονήσεις, τις οποίες ενδέχεται να αντιμετωπίσει μια μεταλλική κατασκευή. Ταυτόχρονα, η είσοδος του νέου αυτού υλικού στη ναυπηγική βιομηχανία,

κυρίως σε χώρες όπως η Ιαπωνία, οι Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, ο Καναδάς και κάποιες Ευρωπαϊκές, έχει θέσει επιτακτικά την ανάγκη ανάπτυξης της απαραίτητης τεχνογνωσίας για την ασφαλή χρήση του στην πράξη. Έτσι, οι αρμόδιοι κρατικοί φορείς στις χώρες που προαναφέρθηκαν, πανεπιστήμια και ερευνητικά κέντρα, που ασχολούνται με τις επισκευές, έχουν θέσει ως ερευνητική προτεραιότητα την διασαφήνιση της μηχανικής συμπεριφοράς του νέου αυτού τρόπου επισκευής ή ενίσχυσης χαλύβδινων ελασμάτων.

Στην κατεύθυνση αυτή, η ομάδα του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ, τα τελευταία χρόνια, έχει αναπτύξει μία έντονη και συνεχή ερευνητική δραστηριότητα πάνω στο νέο αυτό τρόπο επισκευής. Βασικό αντικείμενο της δραστηριότητας αυτής, είναι η θεωρητική και πειραματική διερεύνηση ορισμένων σημαντικών ζητημάτων που αφορούν στη μηχανική συμπεριφορά χαλύβδινων πλακών με επίθεμα από FRP.

Στο πλαίσιο της προσπάθειας αυτής, εκπονήθηκε η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία, με σκοπό την προσπάθεια πρόβλεψης του φορτίου αποκόλλησης επιθεμάτων από σύνθετα υλικά τοποθετημένων επί διαβρωμένων χαλύβδινων πλακών, καθώς και του μέγιστου φορτίου που μπορούν να παραλάβουν οι πλάκες αυτές, με τη βοήθεια της μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων. Για τον λόγο αυτό, τροποποιήθηκαν ήδη υπάρχοντα γραμμικά μοντέλα Πεπερασμένων Στοιχείων, με την προσθήκη ειδικών στοιχείων cohesive για την προσομοίωση του κολλητικού δεσμού μεταξύ επιθέματος και χαλύβδινου ελάσματος.

Επιπλέον, στην παρούσα εργασία αναπτύσσεται μια παραμετρική μελέτη που εξετάζει την επίδραση των αλλαγών, τόσο των γεωμετρικών όσο και των φυσικών ιδιοτήτων του μοντέλου, στα παραπάνω μεγέθη.

Η δομή της μεταπτυχιακής εργασίας έχει ως ακολούθως : Στο πρώτο κεφάλαιο, γίνεται μία παρουσίαση της ιστορικής αναδρομής της εξέλιξης των σύνθετων υλικών και των εφαρμογών τους στη βιομηχανία. Αναφέρονται στοιχεία σχετικά με τις μεθόδους επισκευής χαλύβδινων ελασμάτων, με έμφαση στις επισκευές με επίθεμα από σύνθετα υλικά και στην επιλογή του κατάλληλου κολλητικού μέσου που χρησιμοποιείται σε αυτού του είδους τις επισκευές. Τέλος, εξηγείται ο τρόπος λειτουργίας των cohesive στοιχείων που χρησιμοποιούνται στη μοντελοποίηση του κολλητικού αυτού μέσου.

Στο δεύτερο Κεφάλαιο, περιγράφεται η πειραματική διαδικασία και αναλύονται τα αποτελέσματα μιας σειράς στατικών πειραματικών δοκιμών που διεξήχθησαν το 2006 στις εγκαταστάσεις του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας (ENT) της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ, στο πλαίσιο του προγράμματος Πυθαγόρας II, του έργου «Ενίσχυση Ερευνητικών ομάδων στο ΕΜΠ» και του υποέργου «Χρήση Ενισχυτικών Επιθεμάτων από Σύνθετα Υλικά για την Ενίσχυση Τμημάτων Χαλύβδινων Ναυπηγικών Κατασκευών». Οι πειραματικές δοκιμές αφορούν μεγάλου μεγέθους δοκίμια από χάλυβα με

διαβρωμένο το κεντρικό τους τμήμα και ενισχυμένα στη μία τους όψη από επίθεμα από σύνθετα υλικά, τα οποία φορτίστηκαν από στατικό εφελκυστικό φορτίο.

Στο τρίτο Κεφάλαιο παρουσιάζεται η αριθμητική μοντελοποίηση, με τη ΜΠΣ, των πειραμάτων του Κεφαλαίου 2, στο πλαίσιο του ίδιου προγράμματος, καθώς και η αριθμητική μοντελοποίησή τους με χρήση cohesive στοιχείων για την προσομοίωση του κολλητικού μέσου της κατασκευής σύνθετο επίθεμα – κολλητικό μέσο - χαλύβδινο έλασμα. Στο τέταρτο Κεφάλαιο γίνεται η σύγκριση των δύο αριθμητικών αυτών μοντέλων, ενώ παράλληλα περιγράφονται οι δοκιμές που οδήγησαν στο τελικό μοντέλο με cohesive στοιχεία.

Στο πέμπτο Κεφάλαιο γίνεται η ποσοτική και ποιοτική παρουσίαση της επίδρασης των διαφόρων παραγόντων που επιδρούν στην αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης διαβρωμένου χαλύβδινου ελάσματος με επίθεμα από σύνθετα υλικά, μέσω των αποτελεσμάτων της παραμετρικής μελέτης που διενεργήθηκε. Η αριθμητική μοντελοποίηση όλων των σχετικών δοκιμών περιλαμβάνει την χρήση cohesive στοιχείων για την προσομοίωση του κολλητικού μέσου. Τέλος, στο έκτο Κεφάλαιο συνοψίζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις πειραματικές δοκιμές, τους δύο τρόπους αριθμητικής μοντελοποίησης και την παραμετρική μελέτη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΣΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΠΥΘΑΓΟΡΑΣ II

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο παρόν Κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία και αναλύονται τα αποτελέσματα μιας σειράς στατικών πειραματικών δοκιμών που διεξήχθησαν το 2006 στις εγκαταστάσεις του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας (ENT) της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ, στο πλαίσιο του προγράμματος Πυθαγόρας II, του έργου «Ενίσχυση Ερευνητικών ομάδων στο ΕΜΠ» και του υποέργου «Χρήση Ενισχυτικών Επιθεμάτων από Σύνθετα Υλικά για την Ενίσχυση Τμημάτων Χαλύβδινων Ναυπηγικών Κατασκευών». Οι πειραματικές δοκιμές αφορούν μεγάλου μεγέθους δοκίμια από χάλυβα με διαβρωμένο το κεντρικό τους τμήμα και ενισχυμένα στη μία τους όψη από επίθεμα από σύνθετα υλικά, τα οποία φορτίστηκαν από στατικό εφελκυστικό φορτίο (Mirisiotis, 2007).

2.2 ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Οι χαλύβδινες πλάκες που χρησιμοποιήθηκαν για την πειραματική διαδικασία είναι από κοινό ναυπηγικό χάλυβα Grade A, ο οποίος παραχωρήθηκε στο ENT από τα Ναυπηγεία Ελευσίνας. Από δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν προκειμένου να καθοριστούν οι ιδιότητες εφελκυσμού του χάλυβα προέκυψαν : μέτρο ελαστικότητας του Young, E_{st} , ίσο με 200000 MPa και όριο διαρροής, σ_0 , ίσο με 348 MPa.

Τα επιθέματα που κατασκευάστηκαν από ίνες άνθρακα, είναι δύο τύπων. Ο πρώτος τύπος είναι Twill 2x2 με προσανατολισμό ινών 0°/ 90°, και επιφανειακό βάρος 160 g/m², από την εταιρεία R & G Faserverbundwerkstoffe GmbH. Ο δεύτερος τύπος είναι ένα μονοαξονικό (unidirectional) ανθρακοϋφασμα με ίνες υψηλού μέτρου ελαστικότητας, επιφανειακό βάρος 300 g/m² και εμπορικό όνομα SikaWrap – 300C HiMod NW, της εταιρείας Sika Hellas A.E.

Δύο μέθοδοι χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των σύνθετων πολύστρωτων επιθεμάτων. Η πρώτη αφορά στη μορφοποίηση με το χέρι (hand lay-up, HLU) και η δεύτερη αφορά στην έγχυση ρητίνης υπό συνθήκες κενού (Vacuum Infusion, VI). Τα επιθέματα από το ύφασμα Twill έχουν κατασκευαστεί και με τις δύο μεθόδους, ενώ τα μονοαξονικά επιθέματα από το ύφασμα SikaWrap έχουν κατασκευαστεί χρησιμοποιώντας μόνο τη μέθοδο HLU.

Κάθε τύπος υφάσματος άνθρακα χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με ένα διαφορετικό τύπο ρητίνης, συνεπώς έγινε χρήση δύο τύπων ρητίνης. Ο πρώτος τύπος εποξειδικής ρητίνης, που χρησιμοποιήθηκε με το ύφασμα Twill, ήταν DER 358 της εταιρείας DOW. Το

ιξώδες είναι χαμηλό και ίσο με 600-750 mPa*s στους 25 °C. Επιθέματα αυτού του συνδυασμού ίνας/ρητίνης κατασκευάστηκαν και με τις δύο προαναφερόμενες μεθόδους (HLU, VI) με μόνη διαφορά το είδος του σκληρυντή που αναμειγνύεται. Μεγαλύτερος χρόνος πήξεως απαιτείται στην μέθοδο HLU και για το σκοπό αυτό προτιμήθηκε ο «αργός» σκληρυντής τύπου Eramine PC13 από την εταιρεία PO.INT.ER S.r.l. (pot life ποσότητας 150 g στους 25°C = 50 min). Πιο ταχεία πήξη επιτυγχάνεται με «ταχύ» σκληρυντή τύπου Eramine PA43 της ίδιας εταιρίας (pot life ποσότητας 150g στους 25°C = 18 - 20 λεπτά) και ενδείκνυται για τη μέθοδο VI. Ο δεύτερος τύπος ρητίνης, που χρησιμοποιείται αποκλειστικά με το ύφασμα SikaWrap και για τη μέθοδο HLU, είναι η Sikadur 300 εποξειδική ρητίνη της εταιρείας SIKA, η οποία διατίθεται με τον αντίστοιχο σκληρυντή της ίδιας εταιρείας και έχει pot life 4 ώρες στους 23°C. Η προμήθεια το εποξειδικού αυτού συστήματος έγινε από την εταιρεία SIKA Hellas A.E.

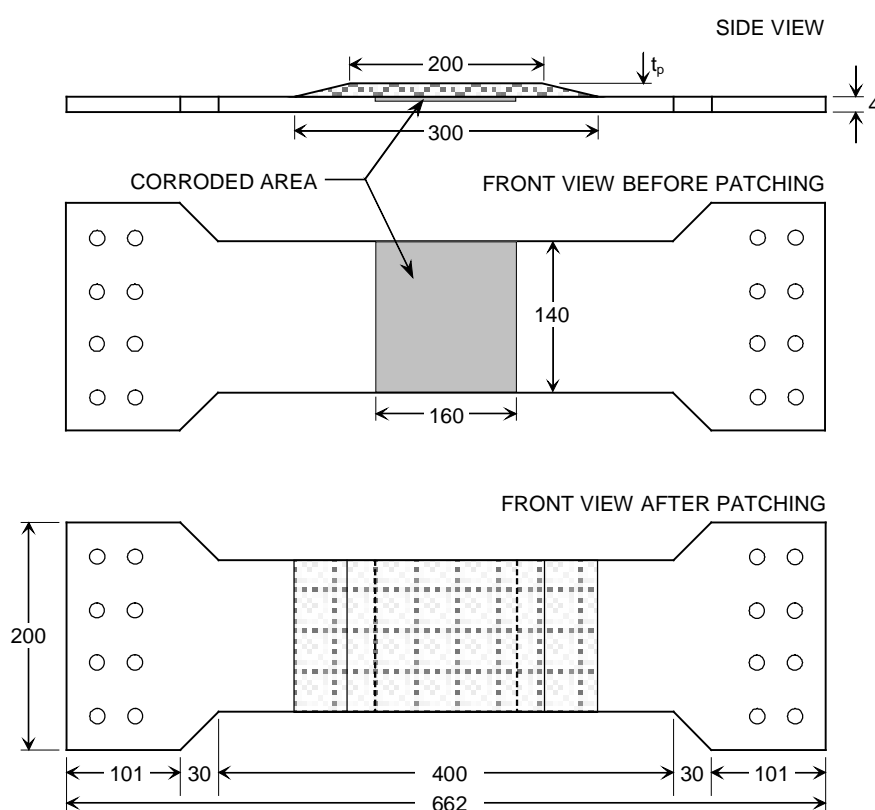
Πλήρης χαρακτηρισμός των σύνθετων υλικών από τα οποία κατασκευάστηκαν τα επιθέματα, για όλους τους συνδυασμούς των υλικών και τις μεθόδους κατασκευής, προηγήθηκε των πειραματικών δοκιμών και περιγράφεται στην τεχνική έκθεση (Μυσιριώτης, 2006α). Από αυτή την τεχνική έκθεση προκύπτει ο Πίνακας 2.1, στον οποίο παρουσιάζονται οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών αυτών, όπου σ_u είναι η αντοχή του σύνθετου υλικού, ϵ_u είναι η αντίστοιχη παραμόρφωση, E_p είναι το μέτρο ελαστικότητας του επιθέματος σε εφελκυσμό, W_f είναι η περιεκτικότητα κατά βάρος σε ίνες άνθρακα και t_{ply} είναι το μέσο πάχος στρώσης του υλικού. Επίσης, στον ίδιο πίνακα, το T δηλώνει το Twill 2x2 ύφασμα, το UD-HM υποδηλώνει το μονοαξονικό ύφασμα υψηλού μέτρου ελαστικότητας SikaWrap και με HLU και VI υποδηλώνονται οι δύο μέθοδοι κατασκευής.

Πίνακας 2.1: Ιδιότητες σύνθετων υλικών επιθεμάτων

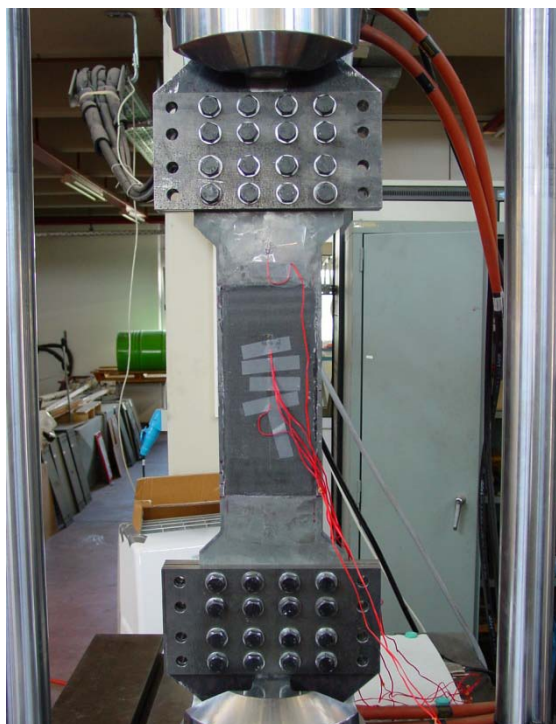
Υλικό	σ_u (MPa)	ϵ_u (%)	E_p (MPa)	W_f (%)	t_{ply} (mm)
T / HLU	478.1	1.12	41500	47.4	0.25
T / VI	866.3	1.41	59300	63.4	0.17
UD-HM / HLU	321.2	0.33	93000	23.8	0.99

Η γεωμετρία των χαλύβδινων δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και οι κύριες διαστάσεις αυτών, φαίνονται στο Σχήμα 2.1. Το ονομαστικό πάχος του χάλυβα, t_s , είναι 4 mm. Το κεντρικό ορθογωνικό τμήμα αναφοράς του δοκιμίου έχει μήκος, $L_s = 400$ mm και πλάτος $W_s = 140$ mm. Τμήμα της κεντρικής περιοχής, στην μία πλευρά του δοκιμίου, διαστάσεων 160 mm μήκος και 140 mm πλάτος, υποβλήθηκε σε διάβρωση, τοποθετώντας το ημικαλυμμένο δοκίμιο σε θάλαμο αλατονέφωσης. Στην ίδια όψη με τη διαβρωμένη επιφάνεια, σε κάθε δοκίμιο τοποθετήθηκε κεντρικό επίθεμα από σύνθετα υλικά πάχους t_p ,

ενεργού μήκους $L_p = 200$ mm και πλάτους $W_p = 140$ mm, ίσο με το πλάτος του δοκιμίου. Το συνολικό μήκος του επιθέματος είναι μεγαλύτερο του ενεργού κατά 100 mm, αφού κατασκευάζεται έτσι ώστε τα άκρα του να είναι επικλινή (tapered edges). Θα πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι ο αρχικός σχεδιασμός των πειραμάτων προέβλεπε ορθογώνια χαλύβδινα δοκίμια πλάτους 200 mm και αυτού του τύπου τα δοκίμια τοποθετήθηκαν στον θάλαμο αλατονέφωσης προκειμένου να διαβρωθούν. Το ασυνήθιστα υψηλό όμως όριο διαρροής του χάλυβα των δοκιμίων, σε συνδυασμό με τη δυνατότητα της υδραυλικής μηχανής δοκιμών του ENT, υπαγόρευσε τη μείωση της διατομής των δοκιμίων και έτσι προέκυψε η γεωμετρία του Σχήματος 2.1. Εξαιτίας 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 διανοιχθεί για το σκοπό αυτό στο δοκίμιο. Οι προσαρμογείς αυτοί μπορούν να συνδυαστούν με δοκίμια διαφόρων παχών (από 2 έως 20 mm) και πλάτους (από 100 έως 300 mm). Το δοκίμιο μαζί με τους ειδικούς προσαρμογείς, εφαρμοσμένα στις αρπάγες της υδραυλικής μηχανής, φαίνονται στο Σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.1: Γεωμετρία δοκιμίου.



Σχήμα 2.2: Δοκίμιο προσδεδεμένο στην υδραυλική μηχανή δοκιμών.

Δοκιμές εφαρμόστηκαν σε τέσσερα ζεύγη πανομοιότυπων δοκιμίων που το κάθε ένα αντιστοιχούσε στις διαφορετικές μεθόδους κατασκευής τους και στα διαφορετικά υλικά επιθεμάτων. Η ονοματολογία των δοκιμίων, τα βασικά χαρακτηριστικά τους και οι ακριβείς διαστάσεις του πλάτους και του πάχους του κεντρικού τμήματος αναφοράς του χάλυβα πριν και μετά τη διάβρωση, φαίνονται στον Πίνακα 2.2.

Πίνακας 2.2: Ονοματολογία και βασικές διαστάσεις των δοκιμίων

Δοκίμιο	Υλικό Επιθέματος	Μέθοδος κατασκευής	Πλάτος (mm)	Πάχος πριν τη διάβρωση (mm)	Πάχος 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

Οι τιμές του πάχους πριν και μετά τη διάβρωση, που φαίνονται στον ίδιο πίνακα, είναι οι μέσες τιμές από τρεις διαδοχικές μετρήσεις.

2.3 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί παραπάνω, το αρχικό πλάτος των δοκιμίων ήταν ίσο με 200 mm. Επί των δοκιμίων σημειώθηκε η κεντρική, προς διάβρωση, επιφάνεια διαστάσεων 160 mm (μήκος) και 180 mm (πλάτος). Μια απλή ηλεκτρικά περιστρεφόμενη συρμάτινη βούρτσα χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να απομακρυνθεί η επίστρωση – αστάρι (primer) - που προϋπήρχε στην συγκεκριμένη επιφάνεια. Στη συνέχεια, καθαρίστηκε με ακετόνη (ασετόν) και μετρήθηκε το πάχος της, το οποίο και καταγράφηκε στον Πίνακα 2.2. Το υπόλοιπο δοκίμιο καλύφθηκε με ένα ειδικό κάλυμμα από nylon, το οποίο σταθεροποιήθηκε με τη βοήθεια ειδικής μονωτικής ταινίας. Τα υλικά αυτά επιλέχθηκαν διότι είναι ανθεκτικά στις συνθήκες επιταχυνόμενης διάβρωσης, που θα αναπτυχθούν κατά τη διάρκεια του πειράματος. Το μόνο τμήμα που παρέμεινε εκτεθειμένο ήταν αυτό που επρόκειτο να υποστεί διάβρωση, σε μία από τις πλευρές του. Στο Σχήμα 2.3 απεικονίζεται ένα καλυμμένο δοκίμιο έτοιμο για να υποστεί τη διαδικασία της επιταχυνόμενης διάβρωσης.

Η επιταχυνόμενη κυκλική διαδικασία διάβρωσης πραγματοποιήθηκε βάσει του ISO 14993:2001 προτύπου, το οποίο θεωρείται πως προσεγγίζει καλύτερα από κάθε άλλο τις συνθήκες που συναντώνται στις ναυπηγικές κατασκευές (ISO, 2004β). Για την εφαρμογή αυτής της διαδικασίας απαιτείται ένας θάλαμος αλατονέφωσης. Το διάλυμα που χρησιμοποιείται συνήθως είναι 5% NaCl. Ωστόσο, στην περίπτωση αυτή επιλέχθηκε διάλυμα 3.5% NaCl που αντιστοιχεί στην τυπική συγκέντρωση άλατος στα θαλάσσια ύδατα.



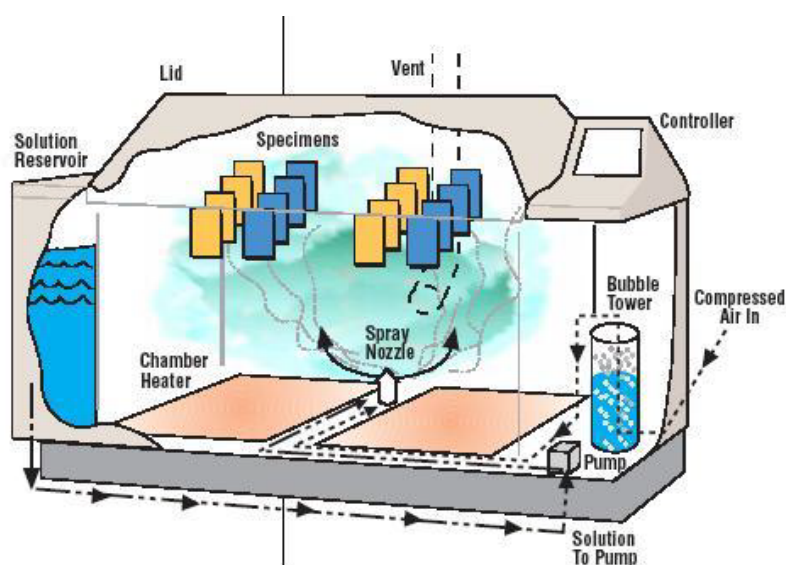
Σχήμα 2.3: Καλυμμένο δοκίμιο έτοιμο για τη δοκιμασία της επιταχυνόμενης διάβρωσης

Σύμφωνα με το προαναφερθέν πρότυπο ISO, κάθε κύκλος διάβρωσης περιλαμβάνει τρία στάδια, όπου επικρατούν διαφορετικές συνθήκες, το στάδιο «αλατονέφωσης», το "ξηρό" και το "υγρό". Η συνολική διάρκεια κάθε κύκλου είναι 8 ώρες και τα στάδιά του περιγράφονται λεπτομερώς στον Πίνακα 2.3. Οι διάρκειες που αναφέρονται στον εν λόγω πίνακα, συμπεριλαμβάνουν και τον χρόνο που απαιτείται ώστε το σύστημα να φθάσει την

καθορισμένη θερμοκρασία για κάθε στάδιο. Ο θάλαμος αλατονέφωσης που χρησιμοποιείται στην παρούσα μελέτη είναι το μοντέλο Q FOG CCT1100 της εταιρείας QPanel. Σκαρίφημα του θαλάμου παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.4, που δείχνει την διαδικασία ψεκασμού άλατος. Ο θάλαμος είναι ένα τυπικό παράδειγμα των συσκευών αυτού του τύπου, με ονομαστικό όγκο 1100 λίτρα, χωρητικότητα 1103 λίτρα με υγρό, και 857 λίτρα χωρίς υγρό. Αυτές οι τιμές χωρητικότητας είναι αρκετά υψηλές, ώστε να διασφαλίζεται ομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας, υγρασίας και ψεκασμού εντός του θαλάμου. Το άνω μέρος του θαλάμου έχει σχεδιαστεί κατάλληλα, έτσι ώστε οι σταγόνες που σχηματίζονται κατά τη διάρκεια ψεκασμού άλατος, να μην πέφτουν στη συνέχεια πάνω στα δοκίμια.

Πίνακας 2.3: Συνθήκες κατά τη διάρκεια ενός κύκλου επιταχυνόμενης διάβρωσης

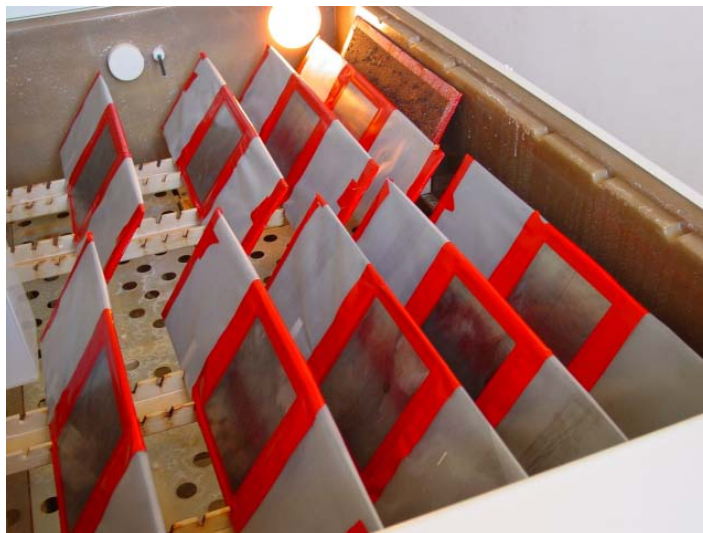
1	Συνθήκες αλατονέφωσης	Διάρκεια:	2
	(1) Θερμοκρασία	35°C ± 2°C	
	(2) Συγκέντρωση σε άλας	3.5% NaCl	
2	Σε «ξηρές» συνθήκες	Διάρκεια:	4
	(1) Θερμοκρασία	60°C ± 2°C	
	(2) Σχετική υγρασία	< 30% RH	
3	Σε «υγρές» συνθήκες	Διάρκεια:	2
	(1) Θερμοκρασία	50°C ± 2°C	
	(2) Σχετική υγρασία	> 95% RH	



Σχήμα 2.4: Θάλαμος αλατονέφωσης τύπου Q FOG CCT1100 κατά τη διάρκεια ψεκασμού άλατος

Τα προς διάβρωση δοκίμια χάλυβα χωρίς επίθεμα (δοκίμια αναφοράς), τοποθετούνται σε ειδικά ράφια από αδρανή, μη μεταλλικά υλικά, και υπό γωνία 45 °, όπως φαίνεται και στο

Σχήμα 2.5. Τα δείγματα παρέμειναν στο θάλαμο για περίπου 7 μήνες. Από το χρονικό αυτό διάστημα, μόνο 70 ημέρες ήταν ο καθαρός χρόνος κατά τον οποίο τα δοκίμια υπέστησαν τις κυκλικές συνθήκες της επιταχυνόμενης διάβρωσης. Αυτό συνέβη λόγω κάποιων δυσλειτουργιών του θαλάμου, που οδήγησαν σε πολλά μικρά χρονικά διαστήματα κατά τα οποία ο θάλαμος δεν χρησιμοποιούνταν.



Σχήμα 2.5: Δοκίμια χάλυβα τοποθετημένα στο θάλαμο ψεκασμού

Μετά από τις 70 ημέρες έκθεσης σε επιταχυνόμενη διάβρωση (περίπου 200 κύκλοι διάβρωσης), τα δοκίμια απομακρύνθηκαν από τον θάλαμο. Το Σχήμα 2.6 δείχνει ένα δοκίμιο μετά την αφαίρεση του από τον θάλαμο, με και χωρίς το κάλυμμα, καθώς και μια κοντινή όψη της διαβρωμένης περιοχής. Ο καθαρισμός των δειγμάτων και η απομάκρυνση των προϊόντων διάβρωσης έγινε σύμφωνα με τις απαιτήσεις του προτύπου ISO 8407:1991 (ISO, 2004α). Σύμφωνα με αυτή τη διαδικασία, τα δοκίμια θα πρέπει πρώτα να καθαρίζονται χρησιμοποιώντας απιονισμένο νερό και κατόπιν να εμβάπτιζονται για 20 - 30 λεπτά σε ένα διάλυμα 1000 ml που περιέχει 500 ml HCl (37%) και 3.5 g εξαμεθυλενοτετραμίνη ($C_6H_{12}N_4$, $M = 140.19 \text{ g/mol}$). Λόγω του μεγάλου μεγέθους των δοκιμίων, η εμβάπτιση αυτή δεν ήταν δυνατή. Κατά συνέπεια, επιλέχθηκε μια διαφορετική διαδικασία, με χρήση χαρτοπολτού πλήρως κορεσμένου με το προαναφερθέν διάλυμα. Ο χαρτοπολτός εφαρμόστηκε στη διαβρωμένη επιφάνεια για χρονικό διάστημα 20 - 30 λεπτών. Στη συνέχεια, η διαβρωμένη περιοχή καθαρίστηκε και βουρτσίστηκε επανειλημμένα με μία πλαστική βούρτσα, ούτως ώστε να απομακρυνθούν κάποια από τα προϊόντα της διάβρωσης. Τέλος, τα δοκίμια καθαρίστηκαν εκ νέου με απιονισμένο νερό και αιθανόλη και έμειναν να στεγνώσουν στον αέρα. Αυτή η διαδικασία καθαρισμού επαναλήφθηκε περισσότερες από μία φορές, στις περιπτώσεις όπου τα προϊόντα της διάβρωσης δεν απομακρύνονταν, λόγω ισχυρής πρόσφυσης με το υπόστρωμα. Μετά την ολοκλήρωση των διαδικασιών διάβρωσης και

καθαρισμού, τα αρχικά ορθογωνικά δοκίμια κόπηκαν σε σχήμα που φαίνεται στο Σχήμα 2.1, με τη βοήθεια υδροκοπής.

Όλα τα σύνθετα επιθέματα επιστρώθηκαν και στερεοποιήθηκαν απευθείας σε κάθε δοκίμιο χάλυβα. Το Σχήμα 2.7 δείχνει ένα ενδιάμεσο στάδιο της διαδικασίας έγχυσης – μορφοποίησης ρητίνης υπό συνθήκες κενού (μέθοδος Vacuum Infusion) των επιθεμάτων, στα δοκίμια S-COR-VI-1 & 2. Ο αριθμός των στρώσεων και, ως εκ τούτου, το πάχος των επιθεμάτων, t_p , ορίστηκε με βάση μία επιθυμητή τιμή του λόγου ακαμψίας επιθέματος-πλάκας (Stiffness Ratio, SR), σύμφωνα με τη σχέση

$$t_p = SR \cdot t_s \cdot \frac{E_s}{E_p} \quad (2.1)$$

όπου t_p and E_p είναι αντίστοιχα το πάχος και το μέτρο ελαστικότητας (συντελεστής Young) του επιθέματος, ενώ όπου t_s και E_s το πάχος και το μέτρο ελαστικότητας του χαλύβδινου ελάσματος.

Αναφορικά με τα επιθέματα από το ανθρακοϋφασμα Twill 2x2, η σχετικά χαμηλή τιμή του μέτρου ελαστικότητάς του (41500 MPa) συγκριτικά με εκείνη του χάλυβα (200000 MPa), οδήγησε στον υπολογισμό ενός απαγορευτικά μεγάλου πάχους επιθέματος για κανονικές τιμές του λόγου ακαμψίας SR. Ενδεικτικά αναφέρεται πως για να επιτευχθεί SR = 0.5 και λαμβάνοντας υπόψη ότι το πάχος του χάλυβα μετά τη διάβρωση είναι περίπου $t_s = 3.2$ mm, το απαιτούμενο πάχος επιθεμάτων τύπου T / HLU είναι $t_p = 7.7$ mm. Αυτό το πάχος αντιστοιχεί σε 31 στρώσεις, αριθμός που είναι εξαιρετικά μεγάλος. Επίθεμα κατασκευασμένο από τόσες πολλές στρώσεις έχει μεγάλη πιθανότητα να οδηγήσει σε κακής ποιότητας προϊόντα, ανεξάρτητα από τη μέθοδο κατασκευής (HLU ή VI). Συνεπώς, λόγω του χαμηλού συντελεστή εφελκυσμού των 2x2 Twill και με σκοπό την κατασκευή επιθεμάτων με ένα λογικό πάχος, ορίστηκε επιθυμητή τιμή SR = 0.3.

Για λόγο ακαμψίας SR = 0.3, απαιτούνται και επομένως χρησιμοποιήθηκαν 18 στρώσεις για την κατασκευή των πολύστρωτων επιθεμάτων τύπου T / HLU και T / VI. Για τον συγκεκριμένο αυτό αριθμό στρώσεων, οι τελικές τιμές του λόγου ακαμψίας διαμορφώθηκαν σε SR = 0.32 για το υλικό T / HLU και σε SR = 0.31 για το υλικό T / VI. Εδώ κρίνεται σκόπιμο να σημειωθεί ότι αυτή η τιμή του SR είναι αρκετά χαμηλότερη της τιμής SR = 1.0, η οποία προτείνεται από τη βιβλιογραφία (Turton, 2005), αλλά η τελευταία αφορά σε προεμπροσμημένα σύνθετα υλικά, που είναι πολύ πιο σκληρά από το Twill ύφασμα.



Σχήμα 2.6: Το δοκίμιο S-COR-VI-1 μετά την απομάκρυνσή του από το θάλαμο αλατονέφωσης



Σχήμα 2.7: Έγχυση ρητίνης υπό συνθήκες κενού (Vacuum infusion) στα δοκίμια S-COR-VI-1 & 2.

Στην περίπτωση των επιθεμάτων UD-HM/HLU (δοκίμια S-COR-HLU-3 & 4), αποφασίστηκε να διατηρηθεί ο ίδιος αριθμός στρώσεων (18 στρώσεις), όπως και στο υλικό Twill, προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση των διαφορετικών τιμών του λόγου ακαμψίας SR και των διαφορετικών παχών των επιθεμάτων. Ομοίως, και για τα μονοαξονικά επιθέματα από το ύφασμα SikaWrap, ο αριθμός των στρώσεων διατηρήθηκε (18 στρώσεις), δίνοντας όμως έτσι λόγο ακαμψίας $SR = 2.6$, τιμή πολύ υψηλότερη από τις 0.31 και 0.32 που προέκυψαν για τα άλλα δύο δοκίμια.

Τονίζεται επίσης πως όλες οι τιμές του SR που αναφέρθηκαν προηγουμένως είναι θεωρητικές, και υπολογίζονται βάσει του μέτρου ελαστικότητας και των τιμών του πάχους που μετρήθηκαν κατά τις δοκιμές χαρακτηρισμού των υλικών (βλέπε Πίνακα 2.1). Οι τελικά επιτευχθείσες τιμές του SR στα κατασκευασμένα δοκίμια μπορεί να διαφέρουν κατά τι, εάν διαφοροποιηθεί η κατά βάρος περιεκτικότητα σε ίνες που τελικά θα επιτευχθεί στα επιθέματα. Αυτό το μέγεθος επηρεάζει τόσο το μέτρο ελαστικότητας (συντελεστής Young), όσο και το πάχος του επιθέματος.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1, το πλάτος του επιθέματος είναι 140 mm και το ενεργό μήκος του 200 mm. Προκειμένου να αποφευχθεί η συγκέντρωση υψηλών τάσεων αποκόλλησης στα άκρα των επιθεμάτων, επιλέχθηκε η επικλινή διαμόρφωσή τους, δηλαδή κατασκευάστηκαν από επάλληλες στρώσεις με σταδιακή μείωση του μήκους τους (tapered edges). Έτσι, οι 18 στρώσεις του επιθέματος χωρίστηκαν σε τέσσερις ομάδες των τεσσάρων ή πέντε στρώσεων η κάθε μία, έχοντας ίδιο πλάτος, αλλά διαφορετικά μήκη. Οι 5 στρώσεις της πρώτης ομάδας είχαν μήκος 200 mm ενώ της δεύτερης ομάδας 232 mm. Η τρίτη ομάδα και τέταρτη ομάδα, διαθέτουν 4 στρώσεις, με μήκος 264 mm και 300 mm αντίστοιχα. Κάθε επόμενη ομάδα καλύπτεται από την προηγούμενη.

Μετά τη διεξαγωγή του πειράματος, μετρήθηκαν εκ νέου τα πάχη των επιθεμάτων που συμμετείχαν στη δοκιμή. Στον Πίνακα 2.4 αναγράφονται το συνολικό πάχος των επιθεμάτων, t_p , καθώς και το αντίστοιχο πάχος κάθε στρώματος, t_{ply} , για κάθε έναν από τους τρεις συνδυασμούς υλικών που μελετήθηκαν. Συγκρίνοντας τα πάχη στρώσης του Πίνακα 2.4 με εκείνα του Πίνακα 2.1 από τις δοκιμές χαρακτηρισμού των υλικών και λαμβάνοντας υπόψη ότι μεγαλύτερο πάχος στρώσης συνεπάγεται μικρότερη κατά βάρος περιεκτικότητα σε ίνες, W_f , και το αντίστροφο, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι για το υλικό T / HLU επιτεύχθηκε τελικά λίγο μικρότερη περιεκτικότητα W_f από την αντίστοιχη τιμή του Πίνακα 2.1. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται και μικρότερο τελικό μέτρο ελαστικότητας, E_p , σε σχέση με αυτό του Πίνακα 2.1. Για το T / VI υλικό, το τελικό πάχος στρώσης μετά το πείραμα (Πίνακας 2.4), συμπίπτει με αυτό πριν το πείραμα (Πίνακας 2.1) και κατά συνέπεια οι ιδιότητες του υλικού θα πρέπει να παρέμειναν οι ίδιες. Τέλος, για το υλικό UD-HM/HLU, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η τελική τιμή της περιεκτικότητας W_f , είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την αρχική τιμή που αναγράφεται στον Πίνακα 2.1. Στην περίπτωση αυτή, το μέτρο

ελαστικότητας επίσης είναι μεγαλύτερο από ότι το αρχικό (Πίνακας 2.1).

Πίνακας 2.4: Τελικό πάχος επιθεμάτων

Υλικό	t_p (mm)	t_{ply} (mm)
T / HLU	7.2	0.40
T / VI	3.1	0.17
UD-HM / HLU	12.6	0.70

Επισημαίνεται πως προκειμένου να υπολογιστούν οι τελικές τιμές SR θα πρέπει οι τελικώς διαμορφωμένοι συντελεστές Young (μέτρα ελαστικότητας E_p), μετά το πείραμα, να είναι γνωστοί.

2.4 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΔΟΚΙΜΩΝ

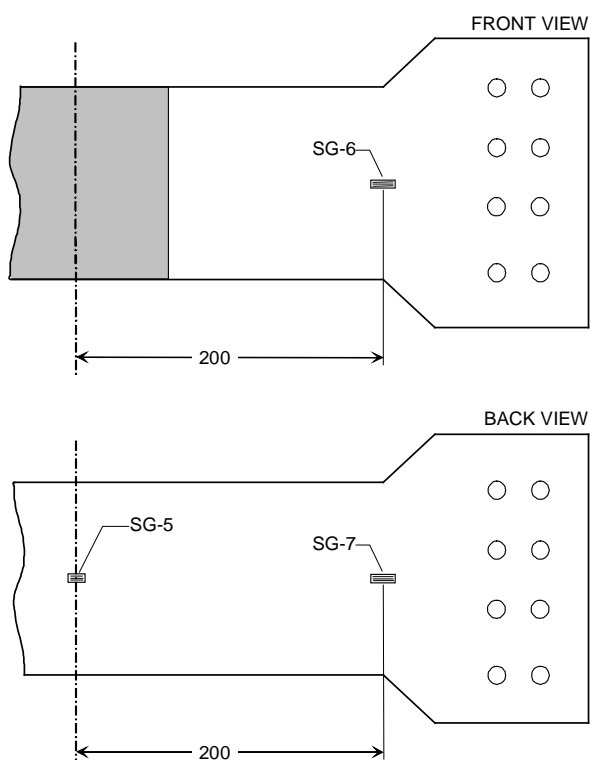
Η υδραυλική μηχανή δοκιμών που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή την πειραματική έρευνα, εναρμονίζεται με τις απαιτήσεις Class C του προτύπου ISO 5893:2002 (ISO, 2002). Οι αρπάγες συγκράτησης των προσαρμογέων των δοκιμών είναι υδραυλικές.

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 εφαρμόστηκε ως μια γραμμικά αυξανόμενη δύναμη με ρυθμό ίσο με 0.5 kN/s. Στη συνέχεια, τα δοκίμια αποφορτίστηκαν με τον ίδιο ρυθμό έως ότου η ασκούμενη δύναμη να μηδενιστεί. Η τελική φόρτιση εφαρμόστηκε με τη μορφή μιας αργής γραμμικά αυξανόμενης εφελκυστικής μετατόπισης, με ταχύτητα 0.5 mm/s. Το πείραμα ολοκληρώνεται όταν το επίθεμα σταματά να συμβάλλει στην αντοχή του δοκιμίου και το χαλύβδινο τμήμα έχει μπει βαθιά μέσα στην πλαστική περιοχή.

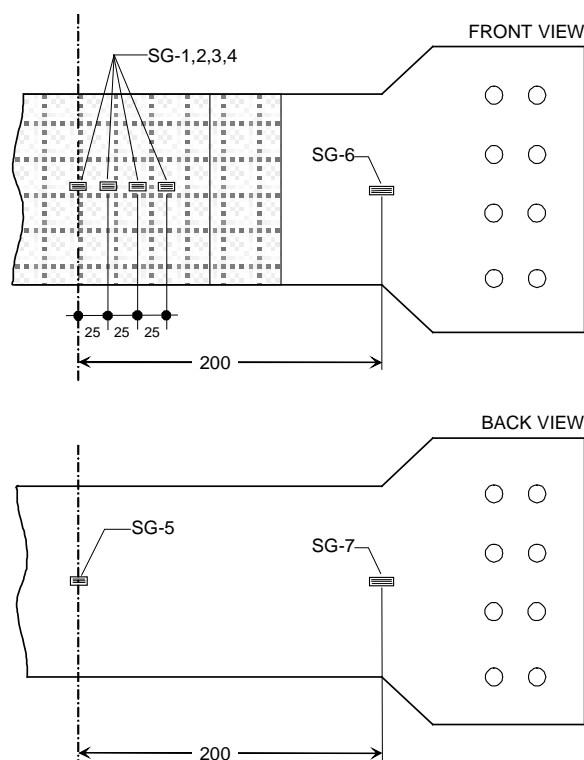
Κατά τη διάρκεια κάθε δοκιμής, μετρώνται και καταγράφονται η εφαρμοζόμενη δύναμη, η συνολική επιμήκυνση του δοκιμίου, καθώς και οι διαμήκεις παραμορφώσεις σε διάφορα σημεία του χάλυβα και του επιθέματος. Για την καταγραφή αυτών των παραμέτρων, χρησιμοποιήθηκε το σύστημα πρόσκτησης δεδομένων της ίδιας της υδραυλικής μηχανής δοκιμών, καθώς και ένα πρόσθετο εξωτερικό σύστημα Spider-8 της εταιρείας HBM, πλήρως συγχρονισμένα μεταξύ τους.

Χρησιμοποιήθηκαν ηλεκτρικά επιμηκυνσιόμετρα (Strain Gages, SG), για τη μέτρηση των παραμορφώσεων, με μήκος αναφοράς (gage length) 5 ή 10 mm. Για τον προσδιορισμό των επιμηκύνσεων των δοκιμών αναφοράς (χωρίς επιθέματα), S-COR-1 & 2, τοποθετήθηκαν επιμηκυνσιόμετρα σε τρία σημεία όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.8. Το επιμηκυνσιόμετρο SG-5 είχε μήκος αναφοράς 5 mm, ενώ τα SG-6 και SG-7 είχαν 10 mm. Στα δοκίμια με τα επιθέματα τοποθετήθηκαν επιμηκυνσιόμετρα σε επτά σημεία, πέντε επί της πλευράς των

επιθεμάτων και δύο στην πλευρά χωρίς επιθέματα όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.9. Η αρίθμηση των SG έγινε με τέτοιο τρόπο, ώστε να είναι συμβατή στα δύο είδη δοκιμών (με και χωρίς επίθεμα). Τα επιμηκυσιομέτρα SG-1 και SG-5 είχαν μήκος αναφοράς 5 mm, ενώ τα SG-6 και SG-7 είχαν 10 mm. Το SG-5, τοποθετήθηκε στο κέντρο της πίσω όψης του αντίστοιχου δοκιμίου, με σκοπό να καταγράψει την έναρξη της διαρροής στην περιοχή αυτή, έτσι ώστε αυτή να μπορεί να συσχετιστεί στη συνέχεια με το φορτίο αστοχίας ή το φορτίο αποκόλλησης του επιθέματος. Από τη σύγκριση των μετρήσεων των SG-6 και SG-7, που τοποθετήθηκαν στο χαλύβδινο τμήμα, μακριά από το επίθεμα, επιδιώκεται η εκτίμηση του μεγέθους της κάμψης, που λαμβάνει χώρα εξαιτίας της μονόπλευρης ενίσχυσης του ελάσματος με το επίθεμα.



Σχήμα 2.8: Θέσεις των επιμηκυσιομέτρων στα δοκίμια αναφοράς (χωρίς επίθεμα).



Σχήμα 2.9: Θέσεις των επιμηκνσιομέτρων στα δοκίμια με επίθεμα

Τέλος, τα επιμηκνσιομέτρα SG-1 έως 4 σκοπό έχουν να καταγράψουν τα φορτία που μπορεί να παραλάβει το επίθεμα, και να δώσουν μια γενική εικόνα του τρόπου μεταφοράς των φορτίων από το χαλύβδινο υπόστρωμα στο σύνθετο επίθεμα.

2.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

Όλες οι πειραματικές μετρήσεις παρουσιάζονται παρακάτω με τη μορφή διαγραμμάτων. Το Σχήμα 2.10 δείχνει την συνολική απόκριση όλων των δοκιμίων, υπό τη μορφή της συνολικής επιμήκυνσης του κάθε δοκιμίου (απόστασης μεταξύ των αρπάγων της υδραυλικής μηχανής δοκιμών), συναρτήσει της επιβαλλόμενης εφελκυστικής δύναμης.

Τα δοκίμια S-COR-1 & 2, όπως αναμενόταν, αρχικά αποκρίνονται ελαστικά και στην συνέχεια συμπεριφέρονται πλαστικά. Η είσοδος στην πλαστική περιοχή, αντιστοιχεί σε διαφορετικές τιμές του επιβαλλόμενου φορτίου, για κάθε δοκίμιο, οι οποίες αναγράφονται στον Πίνακα 2.5 (φορτία διαρροής).

Πίνακας 2.5: Φορτίο αστοχίας όλων των δοκιμίων

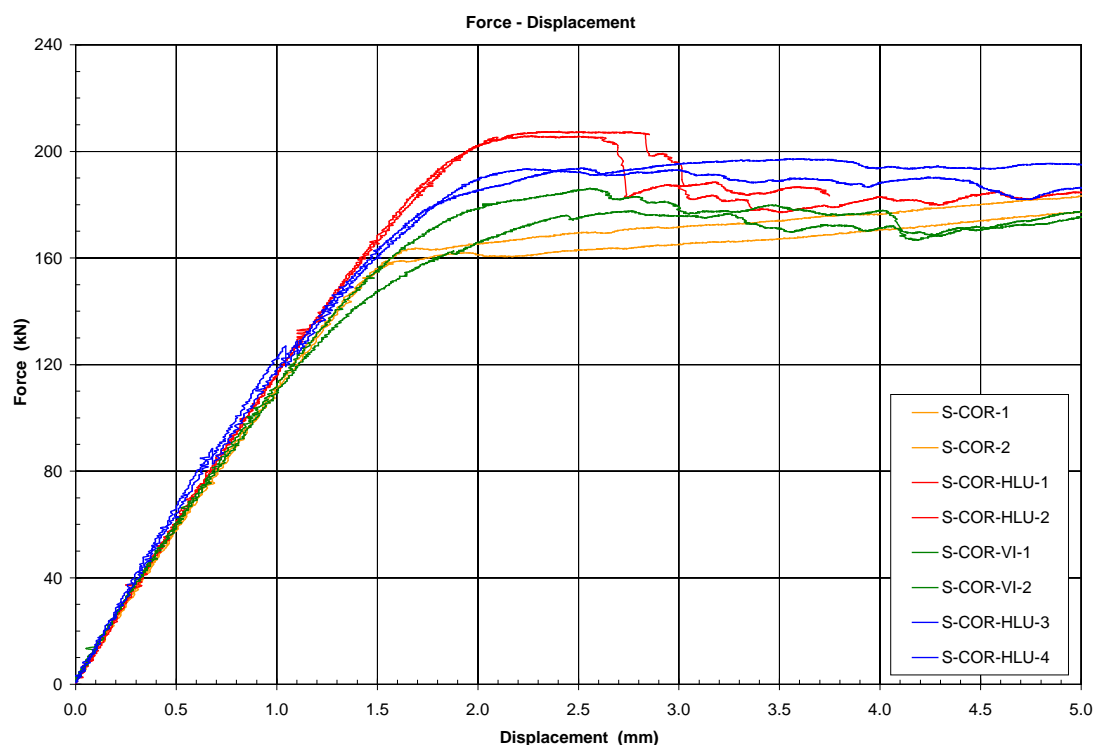
Δοκίμιο	Φορτίο αστοχίας επιθέματος (kN)	% Μεταβολή ²	Μέση % Μεταβολή ²
S-COR-1	158.0 ¹	-	-
S-COR-2	163.1 ¹	-	-
S-COR-HLU-1	206.9	29	28.5
S-COR-HLU-2	205.1	28	
S-COR-VI-1	177.2	10	13
S-COR-VI-2	185.5	16	
S-COR-HLU-3	196.5	22	21
S-COR-HLU-4	192.9	20	

¹ Φορτίο Διαρροής

² Από τη μέση τιμή των φορτίων διαρροής των δοκιμίων αναφοράς S-COR1 και S-COR2

Ο μέσος όρος του φορτίου διαρροής είναι 160.6 kN, τιμή που είναι πολύ κοντά στην θεωρητικά υπολογιζόμενη (158.3 kN), για την ενεργή διατομή του χάλυβα στην διαβρωμένη περιοχή (140 x 3.25 mm², βλέπε Πίνακα 2.2).

Η συμπεριφορά όλων των δοκιμίων με επίθεμα είναι γενικά παρόμοια. Αρχικά παραμορφώνονται ελαστικά, έχοντας όμως ευρύτερη ελαστική περιοχή απόκρισης από τα δοκίμια χωρίς επίθεμα. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι η παρουσία του επιθέματος οδηγεί σε μείωση των αναπτυσσόμενων τάσεων στο υπόστρωμα του χάλυβα, για το ίδιο επιβαλλόμενο φορτίο, και έτσι το δοκίμιο συμπεριφέρεται ελαστικά μέχρι υψηλότερα επιβαλλόμενα φορτία.

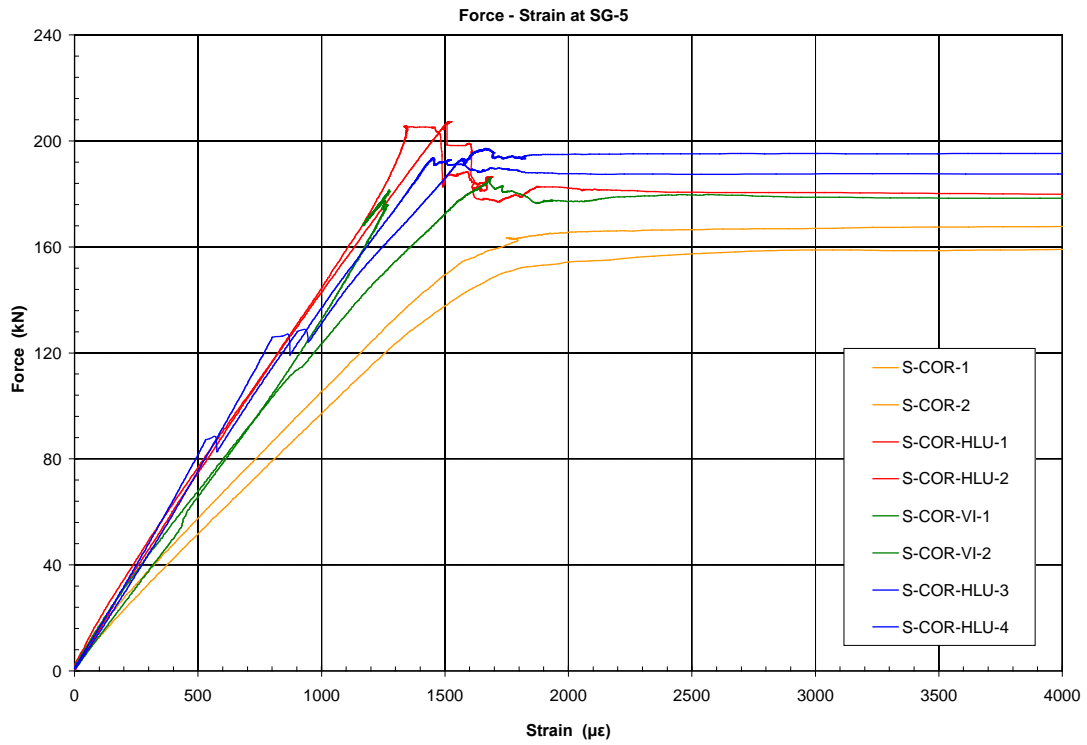


Σχήμα 2.10: Μεταβολή της μετατόπισης των δοκιμίων συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου

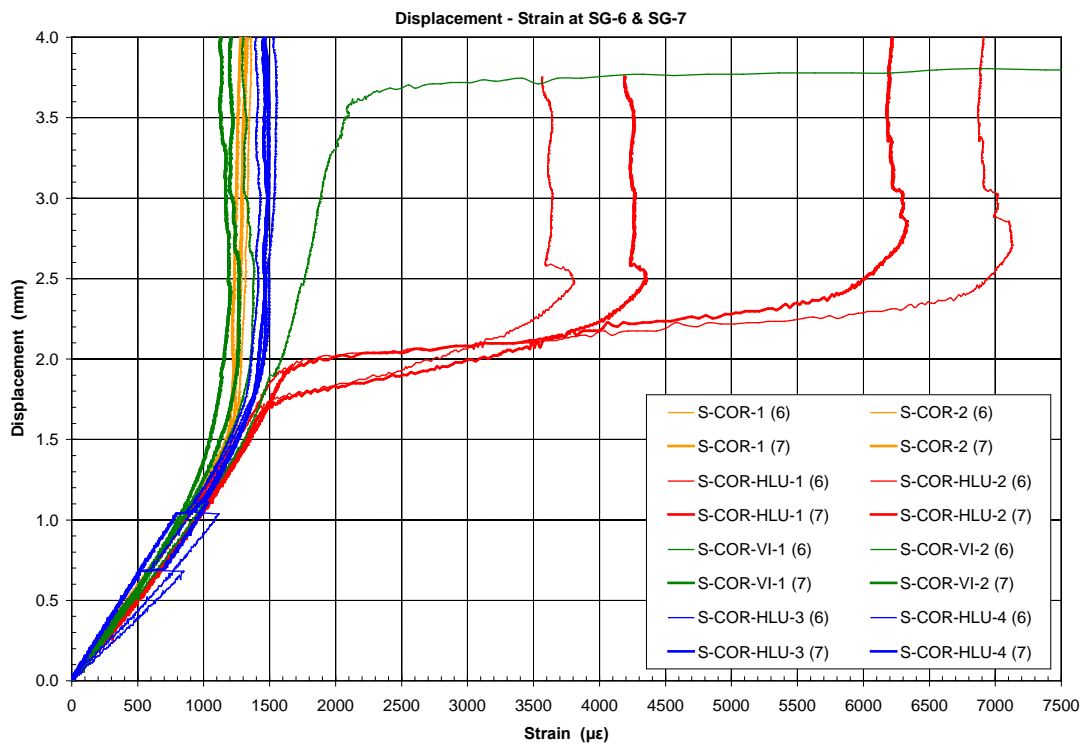
Στη συνέχεια τα δοκίμια συμπεριφέρονται πλαστικά. Η μεταλαστική τους συμπεριφορά μπορεί να εξηγηθεί λαμβάνοντας υπόψη κάποια πρόσθετα μεγέθη, που έχουν εξαχθεί πειραματικά. Υπενθυμίζεται ότι η φόρτιση ασκείται ως μια γραμμικά αυξανόμενη εφελκυστική μετατόπιση, επομένως οποιαδήποτε αλλαγή στην ακαμψία του δοκιμίου, συνεπάγεται τη μεταβολή της φερόμενης δύναμης.

Τα Σχήματα 2.11 έως 2.14 παρουσιάζουν τις πρόσθετες μετρήσεις που απαιτούνται για να ερμηνευτεί η συμπεριφορά των δοκιμίων. Το Σχήμα 2.11 δείχνει τη μεταβολή των παραμορφώσεων, όπως αποτυπώθηκαν από τα SG-5 στο κέντρο της πίσω όψης των δοκιμίων συναρτήσει της ασκούμενης δύναμης. Το Σχήμα 2.12 παρουσιάζει τη μεταβολή των παραμορφώσεων, όπως αποτυπώθηκαν από τα SG-6 και SG-7, τα οποία βρίσκονται μακριά από το επίθεμα, συναρτήσει της ασκούμενης μετατόπισης.

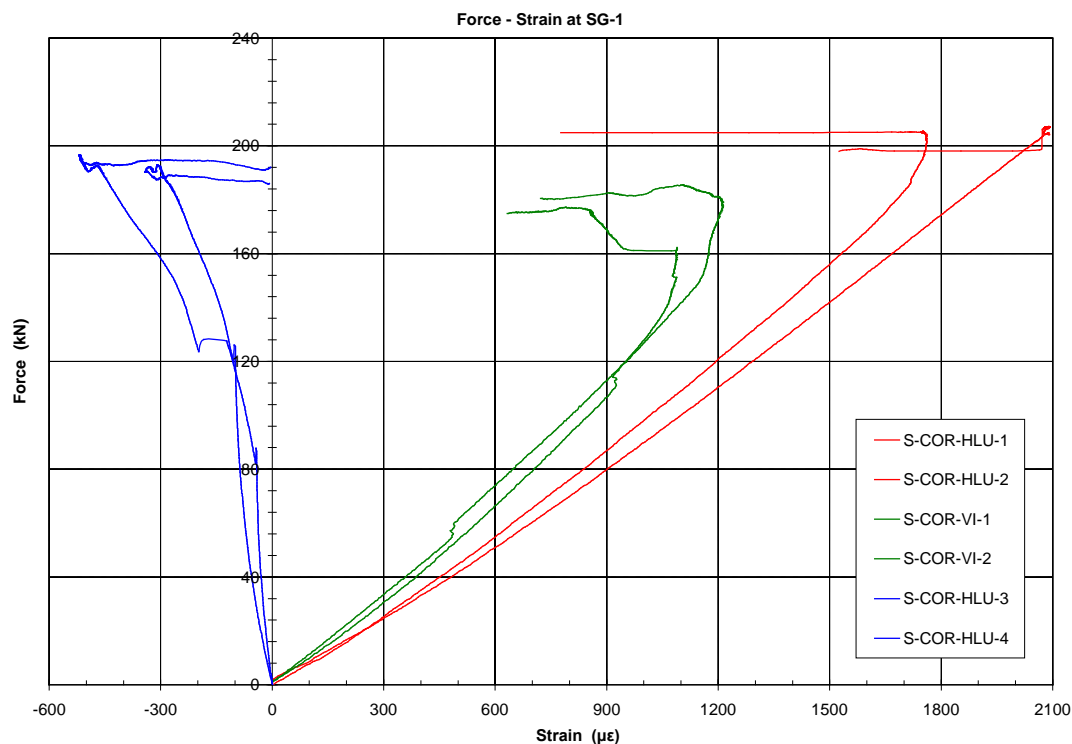
Ο λόγος που επιλέχθηκε η επιβαλλόμενη μετατόπιση αντί του επιβαλλόμενου φορτίου για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων, είναι το γεγονός πως το εν λόγω γράφημα είναι πιο κατατοπιστικό και πιο ευανάγνωστο. Επιπρόσθετα, στο Σχήμα 2.13 παρουσιάζεται η μεταβολή των παραμορφώσεων που μετρήθηκαν από το SG-1 στο κέντρο του επιθέματος, συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου.



Σχήμα 2.11: Μεταβολή των παραμορφώσεων στη θέση 5 συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου



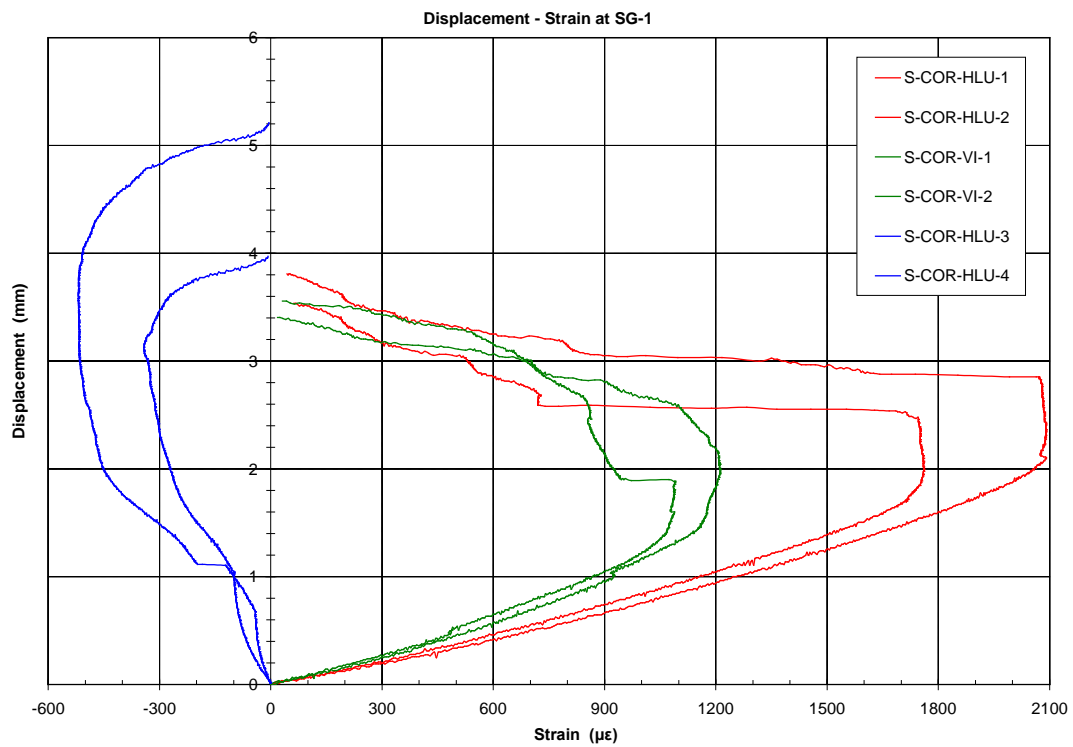
Σχήμα 2.12: Μεταβολή των παραμορφώσεων στις θέσεις 6 και 7 συναρτήσει της επιμήκυνσης των δοκιμών



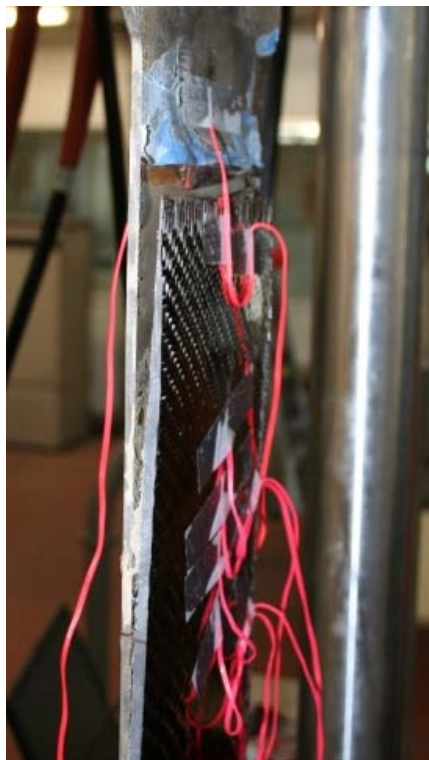
Σχήμα 2.13: Μεταβολή των παραμορφώσεων στη θέση 1 συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου

Τα πειραματικά αποτελέσματα καθορίζουν το φορτίο αστοχίας του επιθέματος κάθε δοκιμίου. Το φορτίο αυτό είναι το μέγιστο φορτίο, μετά από την επιβολή του οποίου σταματάει η επιμήκυνση του επιθέματος. Η τιμή αυτή του φορτίου αντιστοιχεί στην τιμή στην οποία σταματάει η συνεισφορά των επιθεμάτων στην συνολική ακαμψία της κατασκευής. Τα αποτελέσματα των φορτίων αστοχίας των επιθεμάτων που έχουν εξαχθεί, βρίσκονται στον Πίνακα 2.5 και η σύγκριση γίνεται σε σχέση με τα φορτία διαρροής των δοκιμών αναφοράς (χωρίς επίθεμα).

Παρατηρείται, ότι τα δοκίμια S-COR-HLU-1 & 2 για μετατοπίσεις 1.7 ως 1.9 mm (για φορτία 180 ως 190 kN), αρχίζουν να συμπεριφέρονται πλαστικά στην περιοχή που βρίσκεται μακριά από το διαβρωμένο τμήμα όπου βρίσκεται και το επίθεμα (Σχήμα 2.12). Όσο το φορτίο συνεχίζει να αυξάνεται, η περιοχή του χάλυβα που βρίσκεται ακριβώς κάτω από το επίθεμα αρχίζει και αυτή να πλαστικοποιείται (Σχήμα 2.11). Συγχρόνως, έχουμε αποκόλληση του επιθέματος με ξαφνική ταυτόχρονη πτώση της ενεργούσας δύναμης (Σχήματα 2.10, 2.13 και 2.14), ενώ με περαιτέρω αύξηση του φορτίου η επιμήκυνση στις θέσεις 6 και 7 σταματάει να αυξάνεται (Σχήμα 2.12) και η πλαστικότητα περιορίζεται μόνο στην διαβρωμένη επιφάνεια που καλύπτεται από το επίθεμα (Σχήμα 2.11). Μετά την αποκόλληση του επιθέματος, τα παραπάνω δοκίμια, όπως αναμένεται, ακολουθούν τη γενική συμπεριφορά των δοκιμών αναφοράς χωρίς επίθεμα. Στο Σχήμα 2.15 διακρίνεται μια τυπική αποκόλληση επιθέματος.



Σχήμα 2.14: Μεταβολή των παραμορφώσεων στη θέση 1 συναρτήσει της επιμήκυνσης των δοκιμίων



Σχήμα 2.15: Τυπική αποκόλληση επιθέματος

Αντίθετα, στις περιπτώσεις όλων των υπολοίπων δοκιμών, η αποκόλληση δεν ήταν στιγμιαία, αλλά σταδιακή (Σχήματα 2.10 και 2.14). Δηλαδή, οι παραμορφώσεις τους (Σχήμα 2.14) δεν παρουσιάζουν απότομη μείωση, όπως των δοκιμών S-COR-HLU-1 & 2, αλλά σταδιακή ελάττωση, πράγμα που υποδεικνύει την σταδιακή αποκόλληση. Μόνη εξαίρεση αποτελεί το δοκίμιο S-COR-VI-1, που δεν πλαστικοποιείται ποτέ στην διαβρωμένη περιοχή του χάλυβα όπου βρίσκεται το επίθεμα (θέση SG-5), παρά μόνο στην περιοχή μακριά από το επίθεμα (θέση SG-6).

Η συνδυαστική μελέτη του Σχήματος 2.10 και του Πίνακα 2.5, μας δείχνει σαφώς την υπεροχή των δοκιμών με επίθεμα, έναντι αυτών χωρίς επίθεμα, εφ' όσον το μέγιστο φορτίο που επιτυγχάνουν τα δοκίμια με επίθεμα (πριν την αποκόλλησή του) είναι κατά 10% - 29% αυξημένο σε σχέση με το μέγιστο φορτίο διαρροής των δοκιμών χωρίς επίθεμα. Τα δοκίμια με επιθέματα τύπου T / HLU παρουσίασαν μια βελτιωμένη συμπεριφορά, παρά τον χαμηλό συντελεστή ακαμψίας τους $SR = 0.32$.

Συγκρίνοντας τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στην κατασκευή των επιθεμάτων, παρουσιάζει ενδιαφέρον η σύγκριση της συμπεριφοράς των δοκιμών με επίθεμα T / HLU με τη συμπεριφορά των δοκιμών με επίθεμα T / VI, τα οποία εμφανίζουν περίπου τον ίδιο λόγο ακαμψίας. Η υπεροχή των επιθεμάτων τύπου T / HLU είναι εμφανής, πιθανόν λόγω της μεγαλύτερης περιεκτικότητας σε ρητίνη, που έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση πιο ισχυρού δεσμού μεταξύ του επιθέματος και του χαλύβδινου ελάσματος. Αντίθετα, στην περίπτωση των επιθεμάτων τύπου T / VI, φαίνεται πως η περιεκτικότητα σε ρητίνη δεν επαρκεί στην επίτευξη τόσο ισχυρού δεσμού. Αυτό το συμπέρασμα επιβεβαιώθηκε, εξετάζοντας την επιφάνεια συγκόλλησης των επιθεμάτων μετά την αποκόλλησή τους. Παρατηρήθηκε ότι η επιφάνεια των επιθεμάτων T / HLU ήταν επαρκώς εμποτισμένη με ρητίνη, ενώ η επιφάνεια των επιθεμάτων T / VI παρουσίαζε φυσαλίδες αέρα καθώς και στεγνά σημεία. Η αυξημένη περιεκτικότητα ρητίνης στα επιθέματα που χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος επίστρωσης με το χέρι είχε ως αποτέλεσμα την παραγωγή επιθεμάτων T / HLU με αυξημένο πάχος. Συνεπώς, γίνεται αντιληπτό ότι για χαμηλές και σταθερές τιμές SR, είναι προτιμότερο να γίνεται χρήση υλικών με χαμηλότερο συντελεστή και μεγαλύτερο πάχος, αντί λεπτότερων υλικών με μεγαλύτερη δυσκαμψία.

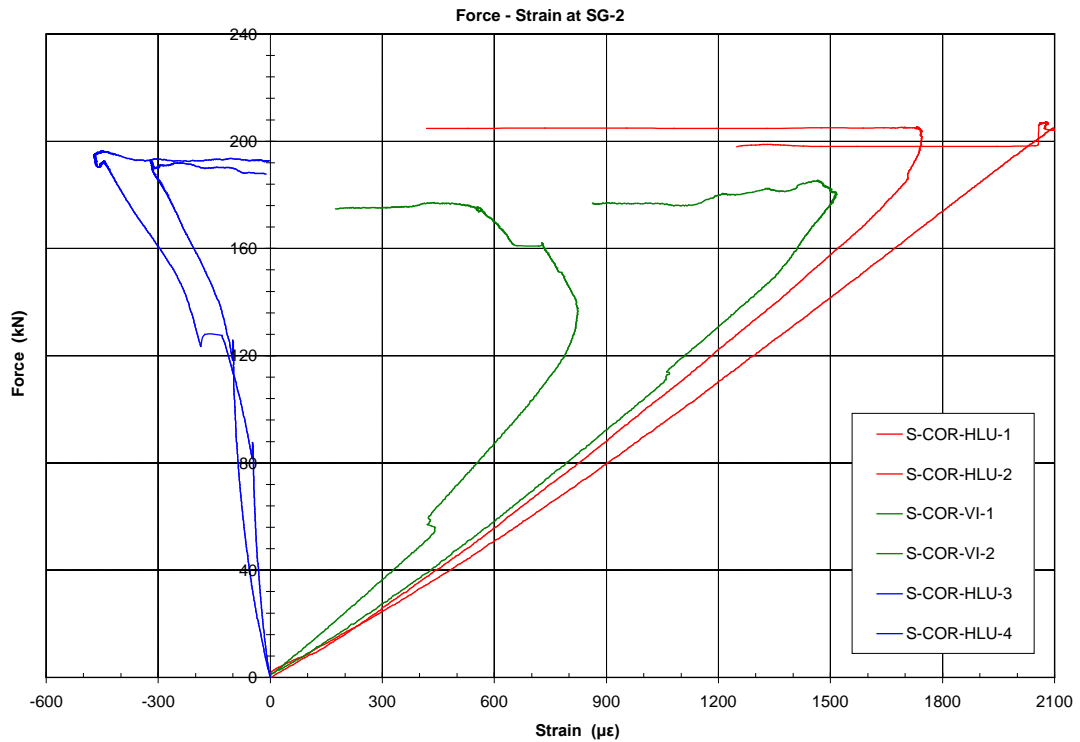
Η συμπεριφορά των επιθεμάτων τύπου T / HLU αποδείχθηκε καλύτερη από αυτή των επιθεμάτων τύπου UD-HM / HLU, παρά το γεγονός ότι τα δεύτερα έχουν μεγαλύτερο SR (2.6 έναντι 0.31 του πρώτου). Αυτή η ανακολουθία μπορεί να οφείλεται είτε σε φυσαλίδες αέρα που παρατηρήθηκαν στην επιφάνεια του επιθέματος UD-HM / HLU, μετά την αποκόλληση, είτε στη μεγάλη εκκεντρότητα και κατά συνέπεια στις αυξημένες καμπτικές τάσεις που εμφανίζονται, λόγω του υπερβολικά μεγάλου πάχους των επιθεμάτων, σε σχέση με το πάχος των επιθεμάτων τύπου T / HLU. Οι υψηλές αυτές καμπτικές τάσεις οδηγούν σε αστοχία στην επιφάνεια της σύνδεσης επιθέματος - χαλύβδινης πλάκας, μέσα σε σύντομο

χρονικό διάστημα. Κατά συνέπεια, αυτό δείχνει ότι το μεγάλο πάχος επιθέματος είναι θετικό χαρακτηριστικό μέχρι μια συγκεκριμένη τιμή του SR, πάνω από την οποία δρα αρνητικά στα επιθέματα με μεγάλο πάχος. Για την πλήρη τεκμηρίωση αυτού του συμπεράσματος, απαιτούνται περαιτέρω αριθμητική έρευνα και πειραματικές διαδικασίες.

Μελετώντας τις παραμορφώσεις, οι μετρήσεις που έγιναν όσον αφορά στην κάτωθεν όψη του διαβρωμένου τμήματος των δοκιμίων (θέση 5), φαίνονται στο Σχήμα 2.11, στο οποίο παρουσιάζεται μια άλλη οπτική της στιγμιαίας αποκόλλησης των επιθεμάτων τύπου S-COR-HLU-1 & 2 και της σταδιακής αποκόλλησης των επιθεμάτων όλων των υπολοίπων δοκιμίων. Μετά την αποκόλληση, επέρχεται αύξηση της παραμόρφωσης μέχρι το σημείο αστοχίας, υποδεικνύοντας ότι λαμβάνει χώρα διαρροή στην απομειωμένη διατομή του διαβρωμένου τμήματος της κατασκευής, όπως αναμενόταν. Εξαίρεση αυτού του κανόνα αποτελεί η συμπεριφορά του δοκιμίου S-COR-VI-1, που διαρρέει μέχρι το σημείο αστοχίας σε άλλη θέση, με αποτέλεσμα η παραμόρφωση να παραμένει σε χαμηλά επίπεδα (<1300 με).

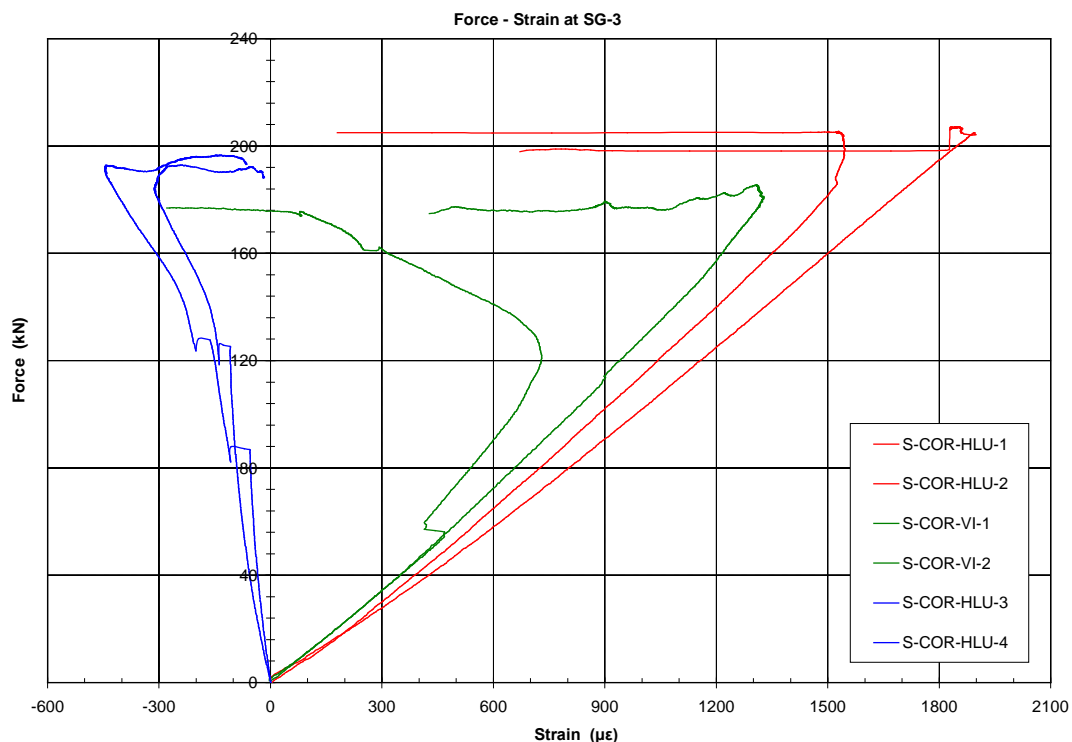
Αυτή η εξαίρεση φαίνεται εναργώς στο Σχήμα 2.12, όπου παρουσιάζονται οι παραμορφώσεις που μετρήθηκαν στις θέσεις 6 και 7, μακριά από το επίθεμα. Η αύξηση της παραμόρφωσης του δοκιμίου τύπου S-COR-VI-1 καταλήγει πάντα στην αστοχία του. Οι παραμορφώσεις των δοκιμίων S-COR-HLU-1 & 2 υποδεικνύουν ότι λαμβάνει χώρα προσωρινή διαρροή στις θέσεις μακριά από τα επιθέματα των δύο δοκιμίων, ενώ οι παραμορφώσεις των υπολοίπων δοκιμίων παραμένουν στο ελαστικό φάσμα απόκρισης (<1600 με).

Επιπλέον, στα δοκίμια S-COR-HLU-3 & 4 έχουμε εμφάνιση τοπικού λυγισμού κατά τη φάση απόκρισης και λίγο πριν την έναρξη της σταδιακής αποκόλλησης των επιθεμάτων (Σχήμα 2.12). Οι διαφορές που εντοπίζονται κατά τη σύγκριση των ελαστικών επιμηκύνσεων σε θέσεις μακριά από τα επιθέματα στην άνωθεν (θέση 6) και στην κάτωθεν (θέση 7) πλευρά του δοκιμίου, οφείλονται στην τοπική κάμψη που εμφανίζεται στην κεντρική περιοχή των δοκιμίων, από την έλλειψη συμμετρίας της διατομής, λόγω της μονόπλευρης ενίσχυσης με επίθεμα. Αυτή η ασυμμετρία εκφράζεται πιο έντονα σε αυτά τα δύο δοκίμια, λόγω του μεγάλου πάχους των επιθεμάτων (12.6 mm). Η ύπαρξη μονόπλευρου επιθέματος προκαλεί την ανάπτυξη κάμψης (deflection) προς το χαλύβδινο τμήμα, η οποία αυξάνεται με την αύξηση του εφελκυστικού φορτίου. Συνεπώς, στις άκρες του δοκιμίου αναπτύσσονται πρόσθετες εφελκυστικές παραμορφώσεις (θέση 6), ενώ από την αντίθετη πλευρά (κάτωθεν όψη των δοκιμίων – θέση 7), μέρος των παραμορφώσεων λόγω εφελκυσμού αντισταθμίζεται από τις θλιπτικές που εμφανίζονται λόγω της κάμψης του δοκιμίου.

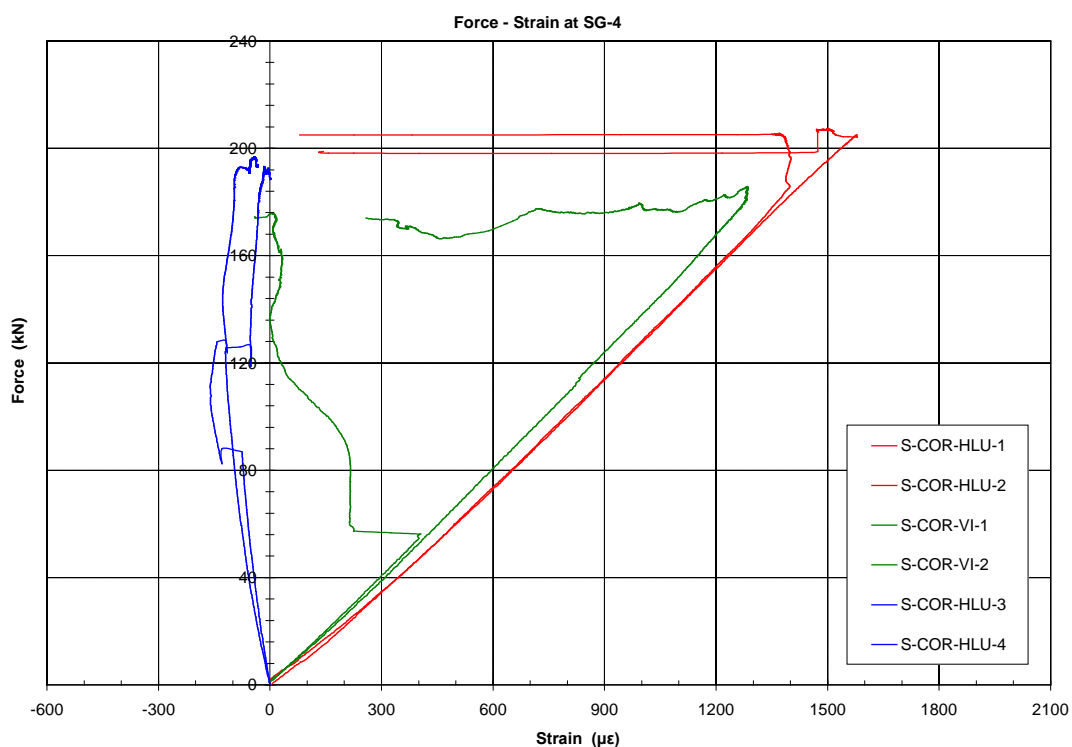


Σχήμα 2.16: Μεταβολή των παραμορφώσεων στη θέση 2 συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου

Η μεταβολή των παραμορφώσεων στις θέσεις 1, 2, 3 και 4 του επιθέματος συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου, παρουσιάζεται στα Σχήματα 2.13, 2.16, 2.17 και 2.18 αντίστοιχα. Το πρώτο γενικό συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί, είναι ότι υπάρχει καλή επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων, για κάθε ζεύγος ίδιων δοκιμίων, με εξαίρεση τα αποτελέσματα του δοκιμίου S-COR-VI-1, που παρουσιάζει την ιδιαίτερη συμπεριφορά που περιγράφηκε παραπάνω.



Σχήμα 2.17: Μεταβολή των παραμορφώσεων στη θέση 3 συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου

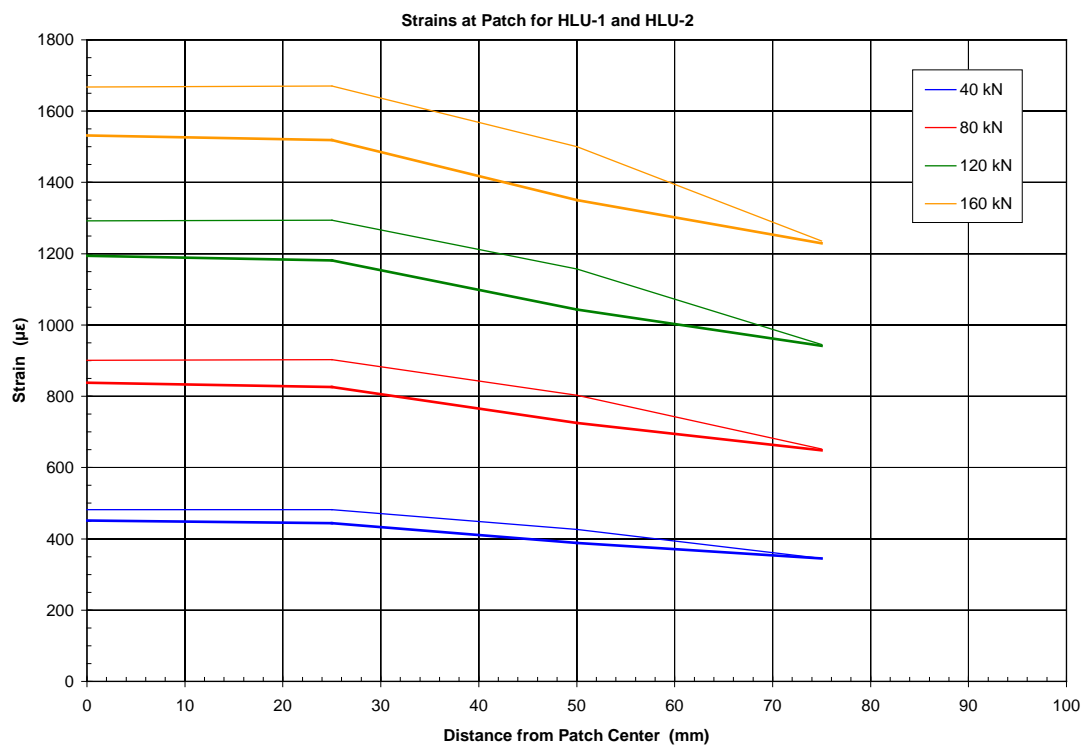


Σχήμα 2.18: Μεταβολή των παραμορφώσεων στη θέση 4 συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου

Επόμενο συμπέρασμα αφορά στα δοκίμια S-COR-HLU-3 & 4, τα οποία παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά σε σχέση με τα υπόλοιπα τέσσερα. Έτσι, οι παραμορφώσεις των

επιθεμάτων των δοκιμών S-COR-HLU-1 & 2 και S-COR-VI-1 είναι πάντα από εφελκυσμό, εκφράζοντας ελαστική συμπεριφορά κατά προσέγγιση, μέχρι το φορτίο να λάβει τιμή τέτοια ώστε να προκληθεί η έναρξη της αποκόλλησης των επιθεμάτων. Αυτή η συμπεριφορά, εξηγείται από το γεγονός ότι αυτά τα δύο δοκίμια διαθέτουν μεγαλύτερο πάχος και μεγαλύτερο SR από τα υπόλοιπα, κάτι το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την εντονότερη εμφάνιση τοπικής κάμψης λόγω της ασυμμετρίας της διατομής, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Κατά συνέπεια, η ελεύθερη επιφάνεια του δοκιμίου βρίσκεται σε θλίψη παρ' ότι η συνολική φόρτιση είναι εφελκυστική.

Οι μετρήσεις των επιμηκύνσεων των επιθεμάτων δείχνουν ότι αυτές μειώνονται (με κάποιες εξαιρέσεις), όσο απομακρυνόμαστε από το μέσον του επιθέματος, όπως αναμενόταν. Ο βαθμός αυτής της μείωσης διακρίνεται στο Σχήμα 2.19, που περιγράφει την μεταβολή των παραμορφώσεων των επιθεμάτων των δοκιμών S-COR-HLU-1 & 2, συναρτήσει της απόστασης ανάμεσα στο σημείο που λήφθηκε η μέτρηση και στο κέντρο του δοκιμίου, για τέσσερις διαφορετικές τιμές επιβαλλόμενου φορτίου. Πρέπει να επισημανθεί ότι το ενεργό μήκος των επιθεμάτων (που αντιστοιχεί στο μήκος που τα επιθέματα έχουν το πλήρες πάχος τους), είναι 200 mm. Το Σχήμα 2.19 δείχνει αρχικά μια αύξηση των παραμορφώσεων, προσεγγίζοντας το μέσο του επιθέματος από τα άκρα αυτού, η οποία από ένα σημείο και μετά σταθεροποιείται και οι παραμορφώσεις παραμένουν σχεδόν σταθερές στην κεντρική περιοχή του επιθέματος.



Σχήμα 2.19: Μεταβολή των παραμορφώσεων στο επίθεμα του δοκιμίου S-COR-HLU-1 & 2 συναρτήσει της απόστασης από το κέντρο

Για τα δοκίμια S-COR-HLU-1 & 2, το Σχήμα 2.19 επίσης δείχνει ότι έχουμε ανάπτυξη του μήκους των επιθεμάτων (που αφορά στην απόσταση από τα άκρα του επιθέματος, εντός της οποίας η επιμήκυνση συγκλίνει προς μια σταθερή τιμή) 75 mm περίπου, παρόλο που δεν μπορεί να καθοριστεί «μήκος ανάπτυξης» σε μονόπλευρα ενισχυμένα δοκίμια, λόγω της ασυμμετρίας που εμφανίζουν και τη συνεπαγόμενη κάμψη. Επιπλέον, η μορφή των καμπυλών και οι σχετικά υψηλές τιμές επιμήκυνσης που μετρήθηκαν στο τελευταίο σημείο κοντά στην άκρη του επιθέματος, μας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι τα επιθέματα με μήκος μεγαλύτερο από 200 mm, ίσως είναι περισσότερο αποτελεσματικά. Αυτό το συμπέρασμα μπορεί να διερευνηθεί με αντίστοιχη αριθμητική μοντελοποίηση.

Λαμβάνοντας υπόψη τα δεδομένα που εμφανίζονται στους Πίνακες 2.1 και 2.4 για τα μέτρα ελαστικότητας και τα πάχη των επιθεμάτων, το φορτίο που φέρεται από το επίθεμα, P_p , υπολογίστηκε και παρατίθεται στον Πίνακα 2.6, για διάφορες τιμές του ασκούμενου φορτίου, P_{ap} . Γίνεται αντιληπτό από τον Πίνακα, ότι τα επιθέματα με τη μέθοδο επίστρωσης με το χέρι, αποδείχθηκαν πολύ περισσότερο αποτελεσματικά από τα επιθέματα με τη μέθοδο έκχυσης ρητίνης με κενό, εφόσον το φορτίο που αναλαμβάνουν τα πρώτα είναι ένα ποσοστό της συνολικά ασκούμενης δύναμης, το οποίο κυμαίνεται από 42 ως 49%. Οι αντίστοιχες τιμές του φορτίου που αναλαμβάνει ο δεύτερος τύπος, είναι περίπου στο μισό των ανωτέρω ποσοστών του πρώτου τύπου. Τα αποτελέσματα αυτά συμφωνούν με την ήδη αναλυμένη συνολική συμπεριφορά αυτών των δοκιμίων, με τη διαφορά ότι τα δοκίμια S-COR-HLU-1 & 2 παρουσιάζουν καλύτερη απόκριση από ότι τα δοκίμια S-COR-VI-1&2. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι τιμές του Πίνακα 2.6 αποτελούν τα χαμηλότερα όρια των φορτίων που αναλαμβάνονται από το επίθεμα, διότι οι παραμορφώσεις στις οποίες βασίστηκε η εξαγωγή των τιμών αυτών, βρίσκονται επίσης στο χαμηλό όριο. Αυτό συμβαίνει διότι οι παραμορφώσεις στην ελεύθερη επιφάνεια του δοκιμίου είναι οι χαμηλότερες που μπορούν να αναπτυχθούν σε μια συγκεκριμένη θέση, λόγω της εμφανιζόμενης θλίψης που υφίσταται λόγω της, προαναφερόμενης, ύπαρξης τοπικής κάμψης.

Πίνακας 2.6: Δύναμη που αναλαμβάνεται από τα επιθέματα

P_{ap} (kN)	S-COR-HLU-1 & 2		S-COR-VI-1 & 2	
	P_p (kN)	P_p / P_{ap}	P_p (kN)	P_p / P_{ap}
40	19.5	0.49	9.5	0.24
80	36.4	0.45	17.2	0.21
120	52.0	0.43	24.2	0.20
160	66.9	0.42	28.7	0.18

Η θεωρητική τιμή του φορτίου P_p , αγνοώντας την ύπαρξη τοπικής κάμψης λόγω ασυμμετρίας της διατομής, δίνεται από τη σχέση :

$$P_p = P_{ap} \cdot \frac{E_p \cdot t_p}{E_s \cdot t_s + E_p \cdot t_p} \quad (2.2)$$

Με βάση δεδομένα των Πινάκων 2.1, 2.2 και 2.4, οι θεωρητικές τιμές του φορτίου P_p είναι 32% και 22% του επιβαλλόμενου φορτίου για τα δοκίμια S-COR-HLU-1 & 2 και S-COR-VI-1 & 2, αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα αυτά συμφωνούν με τη γενική συμπεριφορά των δοκιμών, όπως αυτή προκύπτει από τις πειραματικές μετρήσεις, για τα δοκίμια με μέθοδο έκχυσης ρητίνης με κενό, και δείχνουν ότι η τοπική κάμψη σε αυτούς τους δύο τύπους δοκιμών πρέπει να ήταν μικρής κλίμακας.

Οι πειραματικές μετρήσεις που παρουσιάστηκαν παραπάνω, χρησιμοποιήθηκαν για την κατάλληλη ανάπτυξη και βαθμονόμηση αντίστοιχων μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων, που περιγράφονται στο εδάφιο 3.2.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Ιστορικά η μέθοδος μπορεί να θεωρηθεί ότι έχει τις ρίζες της στα αρχαία χρόνια, όταν προσπαθούσαν να προσεγγίσουν την τιμή του π χρησιμοποιώντας περιγεγραμμένα πολύγωνα (ολοκλήρωση σε βήματα). Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων (Μ.Π.Σ) αναπτύχθηκε τη δεκαετία του 1950. Ορισμένα χαρακτηριστικά της περιγράφηκαν από τους Courant (1943), Hrenikoff (1941), McHenry (1943) και άλλους, ενώ μία από τις πρώτες δημοσιεύσεις στις οποίες παρουσιάστηκε λεπτομερέστερα είναι αυτή των Turner, Clough, Martin και Topp (1956). Ακολούθησαν πολλές δημοσιεύσεις, συμπεριλαμβανομένων και αυτών του Έλληνα καθηγητή Αργύρη και των συνεργατών του την περίοδο 1954-60. Η ονομασία «Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων» (Finite Element Methode - FEM) χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά από τον Clough το 1960 (Καρύδης).

Οι κλασσικές αναλυτικές μέθοδοι θεωρούν την προς μελέτη κατασκευή συνεχή και περιγράφουν τη συμπεριφορά της με χρήση τμηματικών ή συνεχών κοινών εξισώσεων. Η αναλυτική λύση όμως των εξισώσεων με τις οποίες περιγράφονται τα διάφορα μηχανικά προβλήματα είναι δυνατή μόνο σε κάποιες περιπτώσεις, όπου οι καταπονήσεις και τα γεωμετρικά σχήματα που περιγράφουν την κατασκευή είναι πάρα πολύ απλά. Οι παραδοχές που πρέπει να γίνουν για να ισχύουν οι εξισώσεις είναι σε πολλές περιπτώσεις υπεραπλουστευτικές, με συνέπεια τα αποτελέσματα να απέχουν αρκετά από την πραγματικότητα. Επιπλέον, τα αποτελέσματα των αναλυτικών τύπων αποτελούν συνήθως τις μέγιστες ή επιτρεπόμενες τιμές μεγεθών της κατασκευής, χωρίς να υπάρχει δυνατότητα υπολογισμού τους σε συγκεκριμένες περιοχές ενδιαφέροντος, ανάλογα με τα χρησιμοποιούμενα υλικά, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά κτλ.

Σε σύνθετα προβλήματα με περίπλοκη γεωμετρία, η χρήση αυτών των μεθόδων αποδεικνύεται μάλλον ανεπαρκής δεδομένου ότι δεν έχουν καταστρωθεί εξισώσεις που να μπορούν να συμπεριλάβουν όλα τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα, καθώς και λόγω του ότι γίνονται αρκετά πεπλεγμένες όταν καλούνται να περιγράψουν δισδιάστατα ή τρισδιάστατα προβλήματα.

Αντίθετα, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, διακριτοποιεί την προς μελέτη κατασκευή, δηλαδή τη διαχωρίζει σε στοιχεία μικρότερων διαστάσεων και τη θεωρεί ως άθροισμα αυτών. Η συμπεριφορά των στοιχείων και κατ' επέκταση όλης της κατασκευής βρίσκεται καταστρώνοντας ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων, οι οποίες μπορούν να επιλυθούν εύκολα με χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή. Με αυτό τον τρόπο, ένα

ανομοιογενές συνεχές μέσο μπορεί να προσομοιωθεί με διακριτό μέσο αποτελούμενο από μικρότερα δισδιάστατα ή τρισδιάστατα στοιχεία με ίδιες ή διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες, τα οποία αλληλεπιδρούν μέσω των κοινών κόμβων (σημεία στα οποία συνδέονται τα στοιχεία). Η προσεγγιστική αυτή μέθοδος εξασφαλίζει τη συνολική ισορροπία του κάθε στοιχείου καθώς και την ισορροπία των δράσεων στους κόμβους. Η διαδικασία επιλογής και ορισμού των κόμβων ονομάζεται μοντελοποίηση.

Τα πεπερασμένα στοιχεία χρησιμοποιήθηκαν αρχικά για την επίλυση προβλημάτων επίπεδης εντατικής κατάστασης, αργότερα όμως διατυπώθηκαν στοιχεία για τρισδιάστατα στερεά και άλλες μορφές κατασκευών. Μετά την καθιέρωσή τους στη γραμμική ελαστική περιοχή, εφαρμόστηκαν και σε δυσκολότερα προβλήματα όπως η δυναμική συμπεριφορά και η μη-γραμμική απόκριση και συμπεριφορά κατασκευών, όπου και απαιτείται επαναληπτική διαδικασία (Καρύδης).

Λόγω της ραγδαίας εξέλιξης του κλάδου της προσομοίωσης και της αύξησης της υπολογιστικής ισχύος των ηλεκτρονικών υπολογιστών, τα τελευταία χρόνια, έχουν αναπτυχθεί πολλά εμπορικά προγραμματιστικά πακέτα (ANSYS, ABAQUS κ.α.), τα οποία δίνουν πολλές επιλογές στο χρήστη ως προς τον τρόπο μοντελοποίησης, την επιλογή των στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν για να περιγράψουν το μοντέλο-κατασκευή, τη μέθοδο επίλυσης των μητρωϊκών εξισώσεων κτλ. Επίσης, τα προγράμματα αυτά, μέσω των βιβλιοθηκών που διαθέτουν, δίνουν τη δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει τις ιδιότητες των υλικών που απαρτίζουν την κατασκευή, τις φορτίσεις στις οποίες υπόκειται καθώς και τις συνθήκες περιορισμού ή στήριξής της. Το σημαντικότερο όμως πλεονέκτημα της χρήσης τέτοιων προγραμματιστικών πακέτων, είναι οι σύντομοι χρόνοι που χρειάζονται για να επιλύσουν ένα πρόβλημα, οι οποίοι μειώνονται όσο αυξάνεται η επεξεργαστική ισχύς του ηλεκτρονικού υπολογιστή. Ο χρόνος της επίλυσης όμως εξαρτάται και από το πλήθος των στοιχείων από τα οποία αποτελείται το μοντέλο, όσο αυξάνεται ο αριθμός τους, τόσο αυξάνονται οι χρόνοι επίλυσης αλλά και η ακρίβεια αυτής.

3.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΟΥ ΑΚΟΛΟΥΘΗΘΗΚΕ ΣΤΑ ΠΛΑΙΣΙΑ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΠΥΘΑΓΟΡΑΣ II

3.2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Κάθε προσομοίωση που πραγματοποιείται μέσω προγράμματος επίλυσης με χρήση πεπερασμένων στοιχείων, περιλαμβάνει τρία βασικά στάδια:

1. Προεπεξεργασία (preprocessing):

Στο στάδιο αυτό ο χρήστης του προγράμματος καλείται να σχεδιάσει τη γεωμετρία της προς μελέτη κατασκευής. Επίσης επιλέγει τον κατάλληλο τύπο των στοιχείων που θα την απαρτίζουν, καθώς και ορίζει τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των υλικών από τα οποία αποτελείται. Τέλος, η κατασκευή διακριτοποιείται μέσω δομής καννάβου, η οποία περιλαμβάνει κόμβους και στοιχεία.

2. Επίλυση (solving):

Στο στάδιο αυτό ορίζονται οι οριακές συνθήκες και επιβάλλονται οι φορτίσεις που καταπονούν την προς μελέτη κατασκευή. Επιλέγεται η κατάλληλη μέθοδος επίλυσης, προκειμένου να προσδιοριστούν μετατοπίσεις, τάσεις και παραμορφώσεις της κατασκευής.

3. Μετεπεξεργασία (post processing):

Έχοντας πλέον επιλυθεί το μοντέλο, ο χρήστης μπορεί να αντλήσει τα αποτελέσματα της ανάλυσης που τον ενδιαφέρουν. Τα αποτελέσματα είναι μεν αριθμητικά και αφορούν σε κάθε κόμβο (ή ομάδα κόμβων), αλλά δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να παρακολουθήσει και να ελέγξει, μέσω εικόνας χρωματικής διαστρωμάτωσης, τα αποτελέσματα σε όλη την κατασκευή.

Στα παρακάτω εδάφια παρουσιάζεται η αριθμητική μοντελοποίηση των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας, της σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων-Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, στα πλαίσια του προγράμματος ΠΥΘΑΓΟΡΑΣ II, με αντικείμενο «Ενίσχυση Ερευνητικών Ομάδων στα Πανεπιστήμια», έργο «Ενίσχυση Ερευνητικών Ομάδων στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο» και υποέργο «Χρήση ενισχυτικών επιθεμάτων από σύνθετα υλικά για την ενίσχυση τμημάτων χαλύβδινων ναυπηγικών κατασκευών» (Tsouvalis, 2007).

Όλα τα πειράματα περιλάμβαναν χαλύβδινες πλάκες με ελάττωμα, ενισχυμένες μονόπλευρα με επίθεμα από σύνθετο υλικό. Επιλέχθηκαν τρεις τύποι ελαττωματικών κατασκευών και κατ' επέκταση πραγματοποιήθηκαν τρεις σειρές δοκιμών. Οι τρεις τύποι είναι ρωγματωμένο δοκίμιο σε στατικό εφελκυσμό, διαβρωμένο δοκίμιο σε στατικό εφελκυσμό και ρωγματωμένο δοκίμιο σε κυκλική φόρτιση.

Όλες οι αναλύσεις έγιναν με τη βοήθεια του προγραμματιστικού πακέτου ANSYS 10.0. Σκοπός τους ήταν η δημιουργία αριθμητικών μοντέλων, η εξαγωγή των σχετικών αποτελεσμάτων και η σύγκριση αυτών με τις αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις (Mirisiotis, 2007). Βάσει της σύγκρισης αυτής, μπορούν να αξιολογηθούν τα αποτελέσματα των αριθμητικών μοντέλων.

Εδώ, γίνεται περιγραφή των αριθμητικών δοκιμών και των αποτελεσμάτων τους, για διαβρωμένο χαλύβδινο έλασμα με επίθεμα από σύνθετα υλικά, υποκείμενο σε στατικό

εφελκυσμό, προκειμένου να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων του με τα αντίστοιχα πειραματικά, που περιγράφονται στο Κεφάλαιο 2.

3.2.2. ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ

Χρησιμοποιήθηκαν πέντε διαφορετικοί τύποι σύνθετων υλικών για την κατασκευή των επιθεμάτων στα πειράματα τα οποία περιγράφονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 2. Αυτά τα υλικά καθορίζονται ως εξής:

PW / HLU	πλέξη plain wave, προσανατολισμό ινών 0°/90°, επιφανειακό βάρος 240 g/m ² , ίνες άνθρακα σε συνδυασμό με εποξειδική ρητίνη χαμηλού ιξώδους DER 358 με χρήση της Μεθόδου μορφοποίησης με το χέρι (Hand Lay-Up, HLU)
PW / VI	πλέξη plain wave, προσανατολισμό ινών 0°/90°, επιφανειακό βάρος 240 g/m ² , ίνες άνθρακα σε συνδυασμό με εποξειδική ρητίνη χαμηλού ιξώδους DER 358 με χρήση της Μεθόδου έγχυσης ρητίνης υπό συνθήκες κενού (Vacuum Infusion, VI)
T / HLU	πλέξη twill 2x2, προσανατολισμό ινών 0°/90°, επιφανειακό βάρος 160 g/m ² , ίνες άνθρακα σε συνδυασμό με εποξειδική ρητίνη χαμηλού ιξώδους DER 358 με χρήση της Μεθόδου μορφοποίησης με το χέρι (Hand Lay-Up, HLU)
T / VI	πλέξη twill 2x2, προσανατολισμό ινών 0°/90°, επιφανειακό βάρος 160 g/m ² , ίνες άνθρακα σε συνδυασμό με εποξειδική ρητίνη χαμηλού ιξώδους DER 358 με χρήση της Μεθόδου έγχυσης ρητίνης υπό συνθήκες κενού (Vacuum Infusion, VI)
UD – HM / HLU	μονοαξονικό (unidirectional) ανθρακοϋφασμα με ίνες υψηλού μέτρου ελαστικότητας, επιφανειακό βάρος 300 g/m ² , με χρήση της Μεθόδου μορφοποίησης με το χέρι (Hand Lay-Up, HLU)

Οι χαλύβδινες πλάκες που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή και την τελική διαμόρφωση των δοκιμών είναι από κοινό ναυπηγικό χάλυβα Grade A. Οι ιδιότητες του χάλυβα αυτού, που έχουν εξαχθεί πειραματικά παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1, σε συνδυασμό με τις θεωρητικές τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων του κολλητικού μέσου (adhesive), που λήφθηκαν από διαθέσιμη βιβλιογραφία και τεχνικά φυλλάδια. Ο χάλυβας και το κολλητικό μέσο θεωρήθηκαν ισότροπα υλικά. Στον Πίνακα 3.1, E είναι το μέτρο ελαστικότητας (συντελεστής Young), ν ο λόγος Poisson και σ₀ η τάση διαρροής.

Πίνακας 3.1: Ιδιότητες υλικών χάλυβα και υλικών συγκόλλησης

Material	E (MPa)	ν	σ_0 (MPa)
Steel	200000	0.30	348
Adhesive ¹	4500	0.25	–
Adhesive ²	3000	0.32	–
¹ Για υφάσματα PW/HLU, PW/VI, T/HLU, T/VI, από βιβλιογραφία			
² Για υφάσματα UD-HM/HLU, από τεχνικά φυλλάδια της SIKA			

Για όλα τα σύνθετα επιθέματα που χρησιμοποιήθηκαν, πραγματοποιήθηκε μία σειρά βασικών δοκιμών για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών των υλικών. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στον Πίνακα 3.2, όπου E_x είναι ο συντελεστής Young του επιθέματος κατά το μήκος αυτού (διεύθυνση - x), σ_{ux} είναι η τάση διαρροής του σύνθετου υλικού κατά την ίδια διεύθυνση, ϵ_{ux} είναι η αντίστοιχη παραμόρφωση, W_f είναι ποσοστό περιεκτικότητας ινών άνθρακα και t_{ply} είναι το μέσο πάχος της στρώσης του επιθέματος. Μετά την ολοκλήρωση των δοκιμών, αποκόπηκαν δύο δοκίμια από καθένα από τα επιθέματα που έχουν υποστεί αποκόλληση και έχουν δοκιμαστεί σε εφελκυσμό. Τα δοκίμια δεν ήταν πρότυπα, καθώς η γεωμετρία του επιθέματος δεν επιτρέπει την συμμόρφωσή τους στις απαιτούμενες προδιαγραφές κατά ISO.

Πίνακας 3.2: Ιδιότητες υλικών σύνθετων επιθεμάτων

Material	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
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

Οι αντίστοιχες ιδιότητες που έχουν εξαχθεί από μετρήσεις, αποκλίνουν, σε μερικές περιπτώσεις, από αυτές που δίνονται στον Πίνακα 3.2, λόγω της διαφοράς περιεκτικότητας σε ίνες άνθρακα που παρουσιάζονται κατά την τοποθέτηση των επιθεμάτων, σε σχέση με την περιεκτικότητα που διαπιστώθηκε κατά τις αρχικές δοκιμές χαρακτηρισμού των υλικών. Οι ιδιότητες των επιθεμάτων που δεν προσδιορίστηκαν με τις μετρήσεις, λήφθηκαν από τη βιβλιογραφία. Εφ' όσον τα υφάσματα PW και T έχουν ισοσταθμισμένη διαμόρφωση, θεωρούμε το ίδιο μέτρο ελαστικότητας κατά το μήκος του επιθέματος (διεύθυνση - x) και κατά το πλάτος του επιθέματος (διεύθυνση - y), και για τα δύο υλικά.

Δεν πραγματοποιήθηκαν δοκιμές για τα επιθέματα που έχουν υποστεί αποκόλληση UD-HM / HLU, καθώς τα δοκίμια δεν είχαν σταθερή διατομή. Έτσι, έγινε θεωρητική εκτίμηση του συντελεστή Young των δειγμάτων αυτών, με βάση το τελικό βάρος των ινών τους και τα αντίστοιχα αποτελέσματα των αρχικών δοκιμών για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών των υλικών, που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι η εξής:

$$\left. \begin{aligned} E_x &= E_f V_f + E_m V_m \\ V_f &= W_f \frac{\rho_c}{\rho_f} \\ V_m &= W_m \frac{\rho_c}{\rho_m} \end{aligned} \right\} \Rightarrow E_x = E_f W_f \frac{\rho_c}{\rho_f} + E_m W_m \frac{\rho_c}{\rho_m} \quad (3.1)$$

όπου E_x είναι ο συντελεστής Young του επιθέματος κατά την x διεύθυνση

$E_f = 640000MPa$ είναι ο συντελεστής Young των ινών

$E_m = 3000MPa$ είναι ο συντελεστής Young της ρητίνης

V_f και V_m είναι οι περιεκτικότητες κατ' όγκο των ινών και της ρητίνης, αντίστοιχα

W_f και W_m είναι οι περιεκτικότητες κατά βάρος των ινών και της ρητίνης, αντίστοιχα

ρ_c είναι η πυκνότητα της μάζας του σύνθετου υλικού

$\rho_f = 2.12g / cm^3$ είναι η πυκνότητα της μάζας των ινών

$\rho_m = 1.16g / cm^3$ είναι η πυκνότητα της μάζας της ρητίνης

Οι τιμές των E_f , E_m , ρ_f , και ρ_m λήφθηκαν από τις τεχνικές προδιαγραφές της SIKA, της παρασκευάστριας εταιρείας των ινών και της ρητίνης. Συνεπώς, ο συντελεστής Young E_x' ενός επιθέματος με διαφορετικό βάρος ινών, από αυτό που θεωρήθηκε στον Πίνακα 3.2, μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη αναλογία:

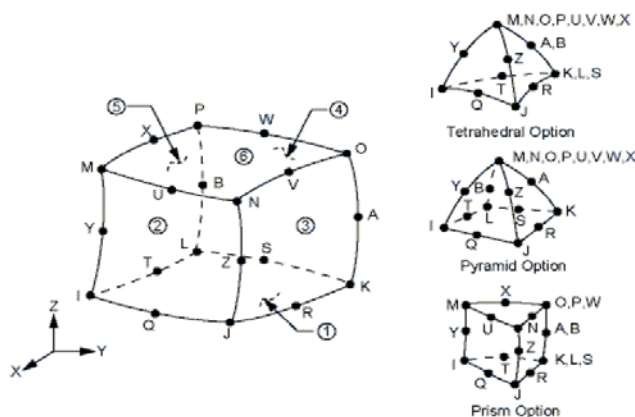
$$\frac{E_x'}{E_x} = \frac{E_f W_f' \frac{\rho_c'}{\rho_f} + E_m W_m' \frac{\rho_c'}{\rho_m}}{E_f W_f \frac{\rho_c}{\rho_f} + E_m W_m \frac{\rho_c}{\rho_m}} \quad (3.2)$$

λαμβάνοντας $E_x = 93000\text{MPa}$, $W_f = 0.238$ και $W_m = 1 - W_f = 0.762$ (βλέπε Πίνακα 3.2) και υποθέτοντας ότι $\rho_c' = \rho_c$. Η τιμή W_f' (και η αντίστοιχη W_m') είναι αυτή που μετρήθηκε από τα αποκολλημένα επιθέματα UD-HM/HLU.

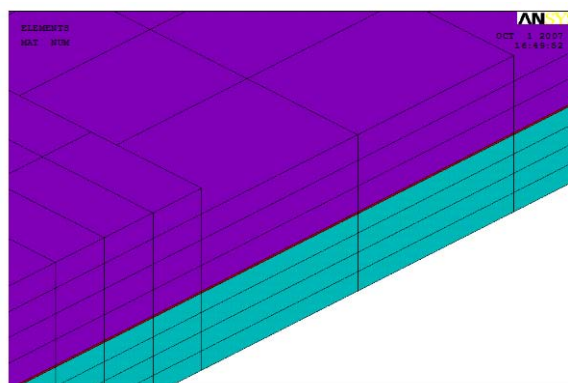
Όσον αφορά στα υλικά των μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν στην αριθμητική ανάλυση, η συγκολλητική ύλη θεωρήθηκε γραμμικώς ελαστικό, ισότροπο υλικό, ενώ τα σύνθετα επιθέματα θεωρήθηκαν ομογενή, γραμμικώς ελαστικά, ορθότροπα υλικά. Ο χάλυβας θεωρήθηκε ως ελαστοπλαστικό, ισότροπο υλικό με μέτρο κράτυνσης ίσο με 3000 MPa. Αυτή η τιμή προσδιορίστηκε προσαρμόζοντας την απόκριση του υπολογισμού του ζεύγους δύναμη - μετακίνηση των δειγμάτων χωρίς επίθεμα (μοντέλο αναφοράς), στις σχετικές πειραματικές μετρήσεις.

3.2.3 ΤΥΠΟΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ, ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΑΙ ΕΠΙΒΟΛΗ ΦΟΡΤΙΩΝ

Όλα τα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων αποτελούνται από τρισδιάστατα στερεά στοιχεία 20 κόμβων (ονομαζόμενα SOLID95, στο ANSYS), που έχουν τρεις βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο (μετατοπίσεις κατά τις διευθύνσεις x, y και z). Κάθε SOLID95 στοιχείο έχει ιδιότητες, εκτός των άλλων, πλαστικότητας, ερπυσμού, αυξημένη ικανότητα επιμήκυνσης και γενικά υιοθετεί ιδιότητες ορθότροπου υλικού. Κατά τη διεύθυνση του πάχους (z), έγινε χρήση τεσσάρων στοιχείων για τη μοντελοποίηση της χαλύβδινης πλάκας, ένα στοιχείο για την προσομοίωση του υλικού συγκόλλησης και τέσσερα στοιχεία για τη μοντελοποίηση του σύνθετου επιθέματος, με κάθε μία από τις τέσσερις ομάδες των στοιχείων του επιθέματος να έχει διαφορετικό μήκος. (Σχήμα 3.2). Μετά την ολοκλήρωση σχετικής παραμετρικής μελέτης, η ύπαρξη των τεσσάρων στοιχείων κατά τη διεύθυνση του πάχους αποδείχθηκε αναγκαία για την ακριβή εκτίμηση της ανομοιόμορφης κατανομής του συντελεστή έντασης τάσης κατά το πάχος της σύνθετης πλάκας (Stress Intensity Factor – SIF / Συντελεστής Έντασης Τάσης - ΣΕΤ).



Σχήμα 3.1: Γεωμετρία πεπερασμένου στοιχείου SOLID95



Σχήμα 3.2: Αριθμός στοιχείων κατά τη διεύθυνση του πάχους

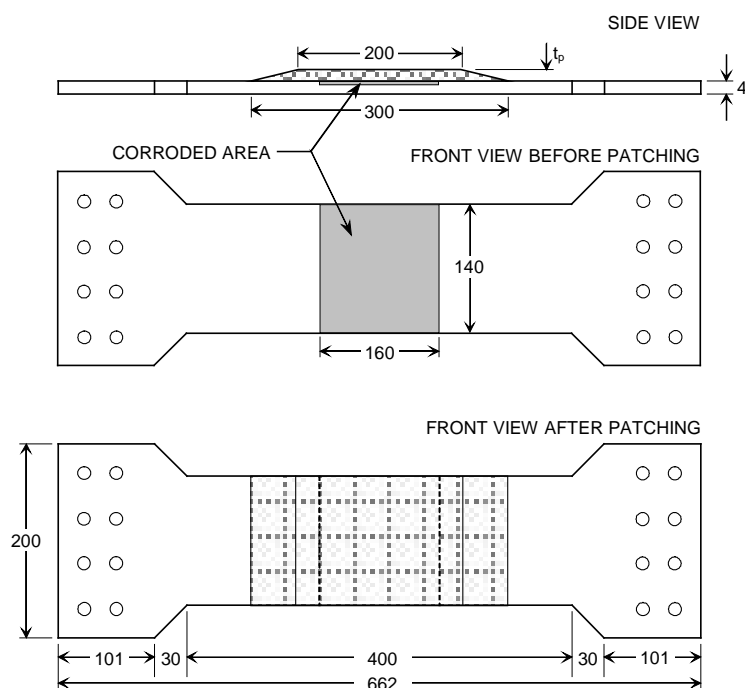
Διενεργήθηκαν δύο μέθοδοι ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, δηλαδή γραμμική ανάλυση (μικρές μετατοπίσεις, γραμμικά-ελαστικά υλικά) και μη-γραμμική ανάλυση (μεγάλες μετατοπίσεις, ελαστοπλαστική μοντελοποίηση χάλυβα). Η πρώτη μέθοδος εφαρμόστηκε για τον υπολογισμό του ΣΕΤ της χαλύβδινης πλάκας για διάφορα μήκη ρωγμών, για τα δοκίμια με εγκοπή που υποβλήθηκαν σε κόπωση. Η δεύτερη μέθοδος χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις περιπτώσεις, που επιθυμούσαμε να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα μετατοπίσεων και επιμηκύνσεων, με τις αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις.

3.2.4 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΚΑΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ

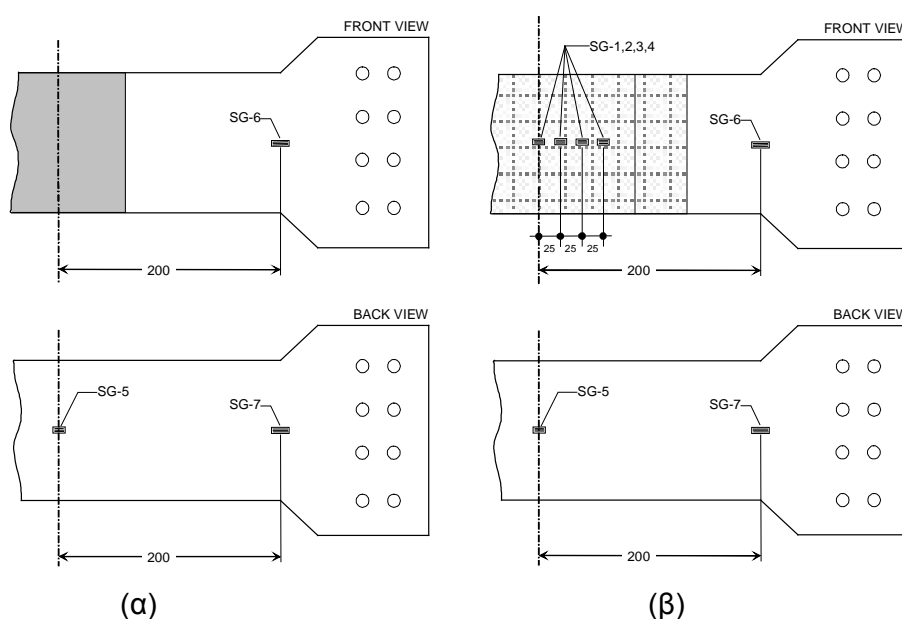
Η γεωμετρία των διαβρωμένων δοκιμίων φαίνεται στο Σχήμα 3.3. Το ονομαστικό πάχος, t_s , της χαλύβδινης πλάκας είναι 4 mm. Το κεντρικό ορθογωνικό τμήμα του χαλύβδινου δοκιμίου έχει μήκος $L_s = 400$ mm και πλάτος $W_s = 140$ mm. Μια κεντρική επιφάνεια στη μία πλευρά του δοκιμίου, με μήκος 160 mm και πλάτος 140 mm, υποβλήθηκε σε επιταχυνόμενη κυκλική πειραματική διαδικασία διάβρωσης, η οποία πραγματοποιήθηκε καλύπτοντας κατάλληλα ολόκληρο το δοκίμιο, αφήνοντας εκτεθειμένο μόνο το προαναφερόμενο τμήμα του και τοποθετώντας στη συνέχεια το δοκίμιο σε ειδικό θάλαμο αλατονέφωσης. Ομοίως, στο μέτωπο της διάβρωσης, κάθε δοκίμιο έχει τοποθετημένο ένα κεντρικό σύνθετο επίθεμα πάχους t_p , ενεργού μήκους $L_p = 200$ mm και πλάτους $W_p = 140$ mm ίσο με το W_s . Το συνολικό μήκος του επιθέματος είναι 300 mm, καθώς συμπεριλαμβάνει και τις σταδιακά ελαττώμενου μήκους άκρες του. Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν σε υδραυλική μηχανή εφελκυσμού χρησιμοποιώντας ως βοηθήματα ειδικά σχεδιασμένες και κατασκευασμένες χαλύβδινες δομές (προσαρμογείς δοκιμίων, αρπάγες συγκράτησης αυτών).

Τα μεγέθη που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια της κάθε δοκιμής ήταν η επιβαλλόμενη δύναμη, η συνολική επιμήκυνση του δοκιμίου (συμπεριλαμβανομένων και των κατάλληλα διαμορφωμένων άκρων του) καθώς και την διαμήκη επιμήκυνση σε διάφορες θέσεις του

δοκιμίου. Τα επιμηκυνσιόμετρα που χρησιμοποιήθηκαν για τις μετρήσεις, ήταν μήκους 5 ή 10 mm. Τοποθετήθηκαν επιμηκυνσιόμετρα σε τρεις θέσεις, στα δοκίμια χωρίς επίθεμα (αναφοράς) S-C-1&2, όπως φαίνονται στο Σχήμα 3.4 (α). Το SG-5 είχε μήκος 5mm, ενώ τα SG-6 και SG-7 είχαν μήκος 10mm. Σε κάθε ένα από τα δοκίμια με επίθεμα, τοποθετήθηκαν επτά strain gages, πέντε στην πλευρά του επιθέματος και δύο σε σημεία που δεν υπήρχε επίθεμα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.4 (β). Ο αριθμός των SG είναι συμβατός και στα δύο είδη δοκιμίων (με και χωρίς επίθεμα). Τα SG 1-5 είχαν μήκος 5mm, ενώ τα SG 6&7 μήκος 10mm.



Σχήμα 3.3: Γεωμετρία δοκιμίου



Σχήμα 3.4: Θέσεις των SG στο διαβρωμένο δοκίμιο χωρίς επίθεμα (α) και με επίθεμα (β)

Τέσσερα ζεύγη πανομοιότυπων δοκιμίων ελέγχθηκαν, αναφορικά με τη διαφοροποίηση του υλικού και τη μέθοδο παρασκευής του δοκιμίου. Η ορολογία των δοκιμίων, τα βασικά χαρακτηριστικά τους και το ακριβές πλάτος και πάχος του τμήματος του χάλυβα πριν και μετά τη διάβρωση, δίνονται στον Πίνακα 3.3.

Πίνακας 3.3: Ορολογία δοκιμίων και πραγματικές διαστάσεις τους

Specimen	Patch Material	Manufacturing Method	Patch # of Layers	W_s (mm)	Initial t_s (mm)	Corroded t_s (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	18	139.8	3.8	3.1
S-COR-HLU-2				139.8	3.7	3.3
S-COR-VI-1	T	VI	18	139.8	3.8	3.3
S-COR-VI-2				140.7	3.7	3.2
S-COR-HLU-3	UD-HM	HLU	18	139.9	3.9	3.5
S-COR-HLU-4				140.0	3.8	3.3

Οι τιμές του πάχους πριν και μετά τη διάβρωση που αναγράφονται στον Πίνακα 3.3, προέκυψαν ως οι μέσες τιμές από τρεις διαφορετικές μετρήσεις, αντίστοιχα για κάθε υλικό. Δύο από τα δοκίμια που αναφέρονται (S-COR-1&2), είναι διαβρωμένα χωρίς επίθεμα, ενώ όλα τα υπόλοιπα δοκίμια είναι ενισχυμένα με σύνθετο επίθεμα.

Για την αποφυγή αυξημένων τάσεων αποκόλλησης στα άκρα του επιθέματος, αυτά τοποθετήθηκαν σε επάλληλες στρώσεις, με σταδιακή ελάττωση του μήκους τους (tapered). Έτσι, τα 18 στρώματα του επιθέματος, χωρίστηκαν σε 4 ομάδες των τεσσάρων ή πέντε στρώσεων, με το ίδιο πλάτος αλλά διαφορετικό μήκος. Τα 5 στρώματα της πρώτης ομάδας είχαν μήκος 200 mm, τα 5 της επόμενης 232 mm, τα 4 της τρίτης ομάδας είχαν μήκος 264 mm και τα υπόλοιπα 4 στρώματα της τέταρτης ομάδας μήκος 300 mm. Δηλαδή, κάθε ομάδα διαστρωμάτωσης κάλυπτε την προηγούμενη. Αυτού του είδους η διαστρωμάτωση προσομοιώθηκε και στο μοντέλο Πεπερασμένων Στοιχείων, χωρίζοντας το επίθεμα σε τέσσερις ομάδες κατά τη διεύθυνση του πάχους τους, με κάθε ομάδα να έχει τα προαναφερθέντα μήκη και πάχος ίσο με το $\frac{1}{4}$ του συνολικού πάχους του επιθέματος.

Οι ιδιότητες και η γεωμετρία των επιθεμάτων που έχουν υποστεί αποκόλληση, όπως μετρήθηκαν μετά τις πειραματικές δοκιμές, παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.4, ενώ στον Πίνακα 3.5 παρουσιάζονται οι ιδιότητες που λήφθηκαν στο μοντέλο Πεπερασμένων Στοιχείων.

Πίνακας 3.4: Ιδιότητες υλικών σύνθετων επιθεμάτων, από μετρήσεις

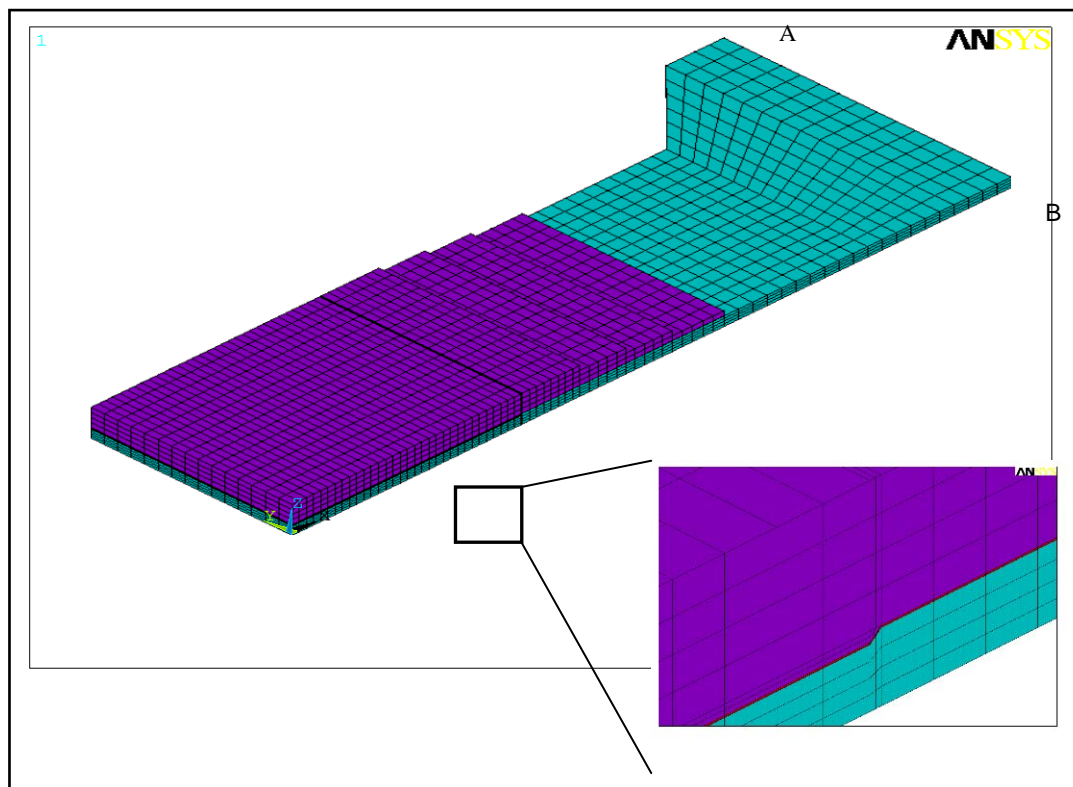
Material	E_x (Mpa)	σ_{ux} (Mpa)	ϵ_{ux} (%)	W_f (%)	t_p (mm)	t_{ply} (mm)
T / HLU	69470	426.9	0.67	32.5	7.2	0.40
T / VI	142455	1530.4	1.04	63.6	3.1	0.17
UD-HM / HLU	-	-	-	39.5	12.6	0.70

Πίνακας 3.5: Ιδιότητες υλικών σύνθετων επιθεμάτων, που χρησιμοποιήθηκαν στο αριθμητικό μοντέλο

Material	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	69470	69470	5000	0.30	0.02	0.30	2400	1600	2400
T / VI	142455	142455	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

Τα μεγέθη με πλάγια γράμματα, του Πίνακα 3.5, είναι μετρήσεις από πειραματικές διαδικασίες, ενώ όλα τα άλλα μεγέθη είναι από βιβλιογραφία. Στην περίπτωση των επιθεμάτων UD-HM / HLU (δοκίμια S-COR-HLU-3&4), το μέτρο ελαστικότητας E_x υπολογίστηκε με τη διαδικασία που περιγράφεται στο εδάφιο 3.2.2 (σχέσεις (3.1), (3.2)), εισάγοντας σαν δεδομένο το αντίστοιχο μετρημένο ποσοστό κατά βάρους περιεκτικότητας των ινών από τον Πίνακα 3.4 (39.5%). Οι υπόλοιπες ιδιότητες των επιθεμάτων UD-HM / HLU, λήφθηκαν από τη βιβλιογραφία. Λαμβάνοντας υπόψη τα τελικά μέτρα ελαστικότητας E_x και τα τελικά πάχη t_p , ο τελικός λόγος ακαμψίας ($SR = (E_x \cdot t_p) / (E_s \cdot t_s)$) είναι ίσος με 0.67 για δοκίμια τύπου S-COR-HLU-1&2, ίσος με 0.59 για δοκίμια S-COR-VI-1&2 και (θεωρητικά) ίσος με 2.5 για δοκίμια S-COR-HLU-3&4.

Λόγω της συμμετρίας της κατασκευής, προσομοιώθηκε το ¼ του δοκιμίου στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Το Σχήμα 3.5 δείχνει ένα τυπικό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, όπου x είναι η διεύθυνση του μήκους του δοκιμίου (καθώς επίσης και η διεύθυνση φόρτισης), y η διεύθυνση του πλάτους και z η διεύθυνση του πάχους. Το συνολικό μήκος του δοκιμίου που μοντελοποιήθηκε είναι 400 mm και αντιστοιχεί στο τμήμα του δοκιμίου πέρα από τους ειδικούς προσαρμογείς των άκρων (βλέπε Σχήμα 3.3). Καθορίστηκαν κατάλληλες συμμετρικές οριακές συνθήκες του μοντέλου κατά τα επίπεδα x - z και y - z.



Σχήμα 3.5: Μοντελοποίηση του ¼ του μεγέθους του διαβρωμένου δοκιμίου

Η διαβρωμένη επιφάνεια της χαλύβδινης πλάκας, προσομοιώθηκε στα μοντέλα των πεπερασμένων στοιχείων που δημιουργήθηκαν, έχοντας ομοιόμορφη μείωση πάχους σύμφωνα με τις αντίστοιχες τιμές του Πίνακα 3.3. Η μετάβαση από το συμπαγές στο διαβρωμένο τμήμα προσομοιώθηκε έχοντας κλίση 45°, όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 3.5. Το επίθεμα προσομοιώθηκε έχοντας ελάχιστα αυξημένο πάχος άνωθεν της διαβρωμένης περιοχής, ώστε η ανώτατη ελεύθερη επιφάνειά του να παραμένει οριζόντια και επίπεδη. Οι τρεις παραπάνω παραδοχές, αποτελούν απλές υποθέσεις, που όμως δεν παρατηρούνται στα πραγματικά δοκίμια. Το μέγεθος του στοιχείου κατά τις διευθύνσεις x και y, κυμαίνεται από 0.275 mm κοντά στην μεταβατική περιοχή, ως 2.5 mm εκτός αυτής.

Σ' αυτό το σημείο θα πρέπει να τονιστεί ότι η μοντελοποίηση των δοκιμίων με επίθεμα δεν περιλαμβάνει κάποιο είδος αστοχία υλικού. Αυτό σημαίνει πως το επίθεμα, το κολλητικό μέσο και το χαλύβδινο έλασμα είναι τέλεια ενωμένα μεταξύ τους. Γι' αυτό τα αριθμητικά αποτελέσματα είναι συγκρίσιμα με τα πειραματικά, μόνο για όσο τα υλικά παραμένουν τέλεια ενωμένα μεταξύ τους. Συνεπώς, οποιαδήποτε σύγκριση μετά από έστω και μερική αστοχία υλικού, είναι ανούσια.

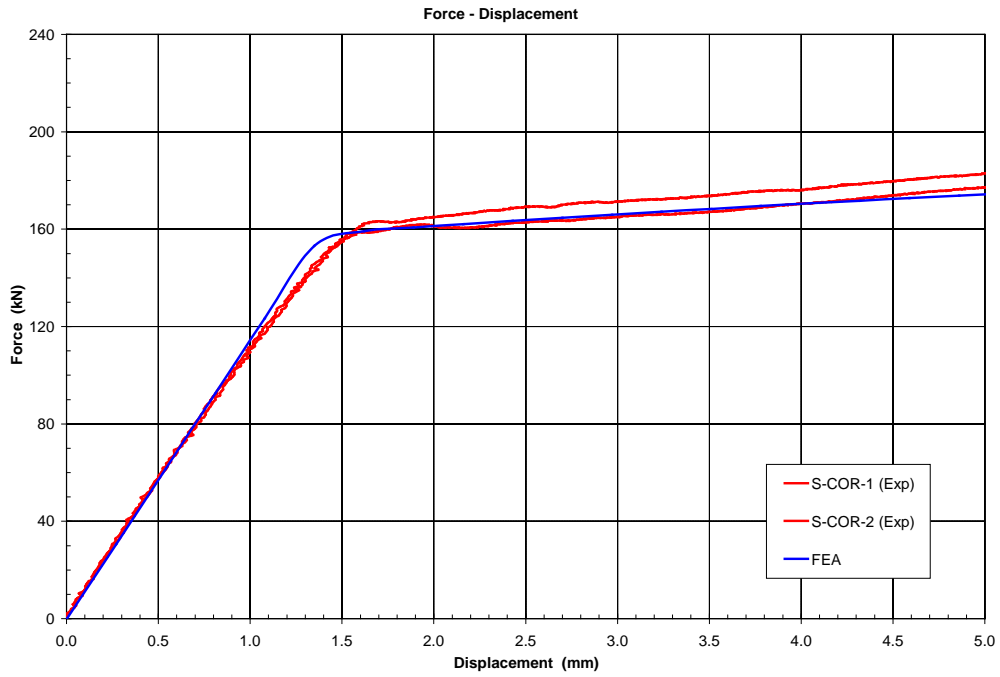
Στις δοκιμές, η φόρτιση εφαρμόστηκε κατά μήκος του δοκιμίου με τη μορφή γραμμικά αυξανόμενης μετατόπισης, με ρυθμό 0.5 mm/s. Η ίδια μορφή φόρτισης (επιβολή

ομοιόμορφης μετατόπισης) χρησιμοποιήθηκε και στα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων, όπου εφαρμόστηκε στο ελεύθερο άκρο AB, του δοκιμίου (βλέπε Σχήμα 3.5). Η συνοριακή συνθήκη που εφαρμόστηκε στο άκρο αυτό, είναι μηδενική μετατόπιση ως προς τον άξονα z. Το γεγονός ότι ασκήθηκε ομοιόμορφη μετατόπιση καθ' όλη την επιφάνεια του ελεύθερου άκρου των μοντέλων, συνεπάγεται πως η επιφάνεια κατά την φόρτιση παραμένει επίπεδη και παράλληλη στον άξονα των y και δεν περιστρέφεται ως προς αυτόν.

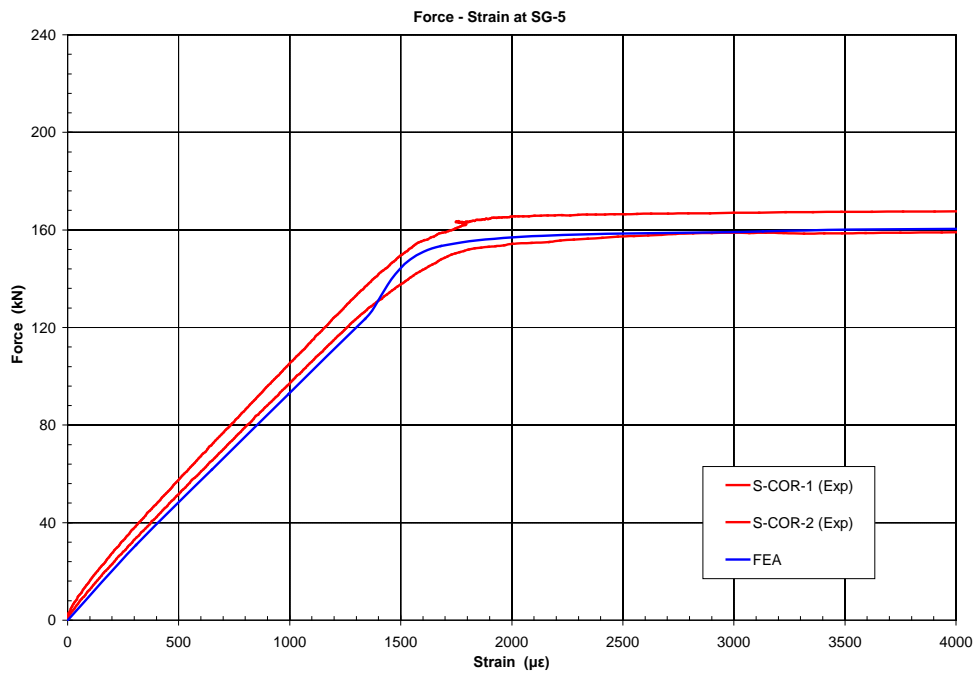
3.2.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ

Η σύγκριση μεταξύ των αριθμητικών και των πειραματικών αποτελεσμάτων παρουσιάζεται στη συνέχεια με τη μορφή γραφημάτων. Στο Σχήμα 3.6 παρουσιάζονται οι καμπύλες δύναμης – μετατόπισης των μοντέλων αναφοράς (χωρίς επίθεμα) S-C-1&2. Για λόγους που έχουν να κάνουν με την πειραματική διάταξη και τον τρόπο μέτρησης της υδραυλικής μηχανής (βλέπε Κεφάλαιο 4, εδάφιο 4.1), τα αριθμητικά αποτελέσματα πολλαπλασιάστηκαν με το συντελεστή 1.8, ώστε να είναι συμβατά με τα πειραματικά. Τα αποτελέσματα των επιμηκύνσεων που μετρήθηκαν από τα SG, δεν επηρεάζονται από αυτή τη διόρθωση. Από το Σχήμα 3.6, παρατηρείται σύγκλιση μεταξύ των αριθμητικών αποτελεσμάτων και των πειραματικών μετρήσεων.

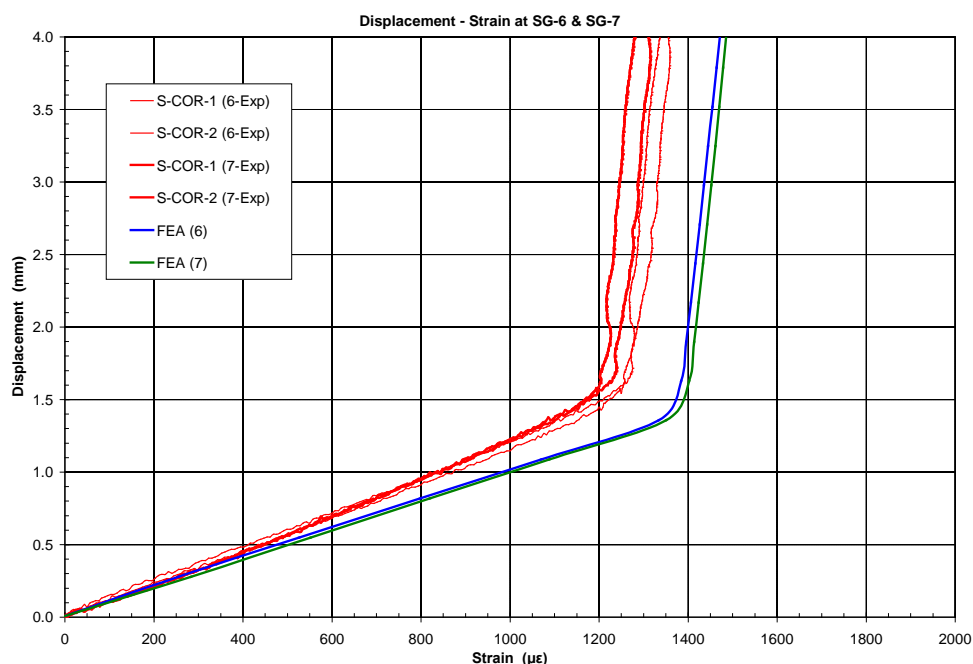
Στο Σχήμα 3.7 φαίνονται οι καμπύλες δύναμης - επιμήκυνσης των μοντέλων αναφοράς (χωρίς επίθεμα), στην θέση SG-5, κάτω από τη διαβρωμένη περιοχή, ενώ στο Σχήμα 3.8 οι καμπύλες δύναμης - επιμήκυνσης των μοντέλων αναφοράς στις θέσεις SG-6 και SG-7, μακριά από την διαβρωμένη περιοχή. Η σύγκριση των πειραματικών μετρήσεων και των αριθμητικών αποτελεσμάτων, των Σχημάτων 3.7 & 3.8 είναι σχετικά καλή. Οι γραμμικές καθώς και οι πλαστικές περιοχές απόκρισης της κατασκευής είναι προσομοιωμένες με ακρίβεια στη θέση του SG-5, ενώ οι μικρές διαφορές που παρατηρούνται στην πλαστική περιοχή απόκρισης, στις θέσεις SG-6 και SG-7, οφείλονται στην απλοποιημένη ελαστοπλαστική συμπεριφορά του χάλυβα και στο γεγονός ότι τα αριθμητικά αποτελέσματα προέκυψαν από τον μέσο όρο των τιμών που λήφθησαν για το μήκος των 10 mm των επιμηκυνσιόμετρων SG-6 και SG-7.



Σχήμα 3.6: Καμπύλη δύναμης - μετατόπισης για το δοκίμιο αναφοράς χωρίς επίθεμα

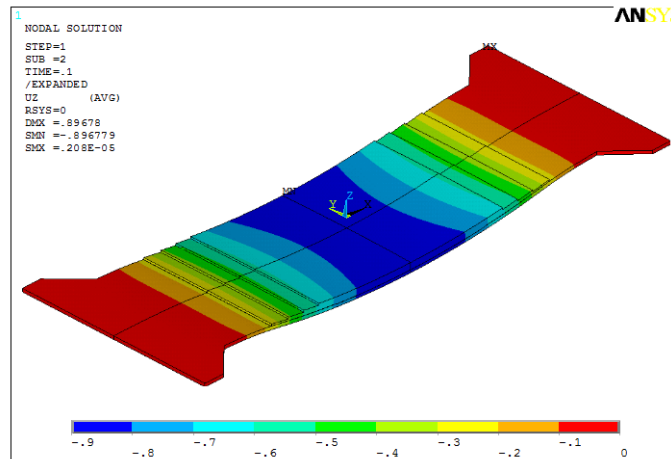


Σχήμα 3.7: Καμπύλη δύναμης - επιμήκυνσης στη θέση του SG-5 για το δοκίμιο αναφοράς χωρίς επίθεμα

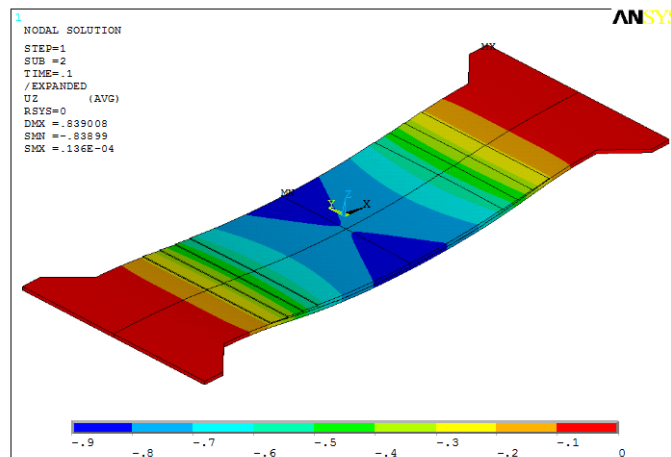


Σχήμα 3.8: Καμπύλη δύναμης - επιμήκυνσης στις θέσεις των SG-6 και SG-7 για το δοκίμιο αναφοράς χωρίς επίθεμα

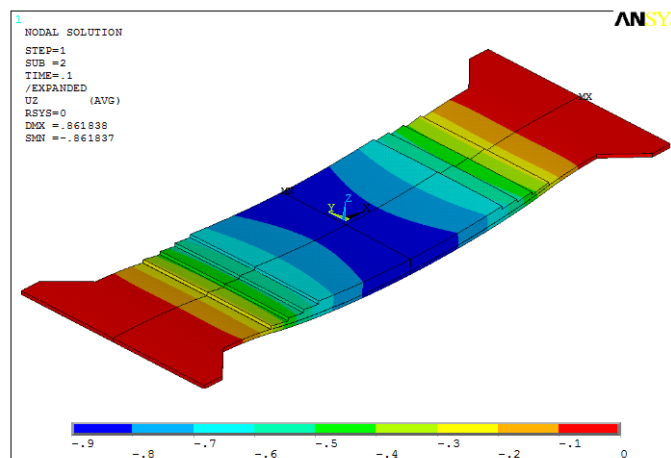
Τα αποτελέσματα από τη μοντελοποίηση των δοκιμών με επιθέματα, παρουσιάζονται ακολούθως. Τα Σχήματα 3.9, 3.10 & 3.11, παρουσιάζουν την παραμορφωμένη κατάσταση και την κατανομή της μετατόπισης κατά τον άξονα z των τριών ειδών δοκιμών, όπως υπολογίστηκαν από την ΜΠΣ. Παρατηρείται πλευρική κάμψη στα δοκίμια με μονόπλευρη τοποθέτηση επιθέματος, λόγω της μη συμμετρικής διατομής τους. Αυτή η κάμψη εμφανίζεται με παρόμοιο τρόπο και για τις τρεις περιπτώσεις, όντας γενικά ομοιόμορφη κατά μήκος του επιθέματος, δημιουργώντας όμως μια αιφνίδια αλλαγή στην παραμορφωμένη κατάσταση του χαλύβδινου ελάσματος, στα άκρα του επιθέματος. Η μέγιστη μετατόπιση κατά z στο μέσο της κατασκευής, είναι μικρότερη στην περίπτωση των δοκιμών S-COR-VI-1&2, τα οποία έχουν πολύ λεπτό επίθεμα σε σχέση με τις άλλες περιπτώσεις, κάτι που φαίνεται και στο Σχήμα 3.12. Αυτό το Σχήμα παρουσιάζει τις μέγιστες μετατοπίσεις κατά z στο κέντρο των τριών δοκιμών ως προς την ασκούμενη φόρτιση.



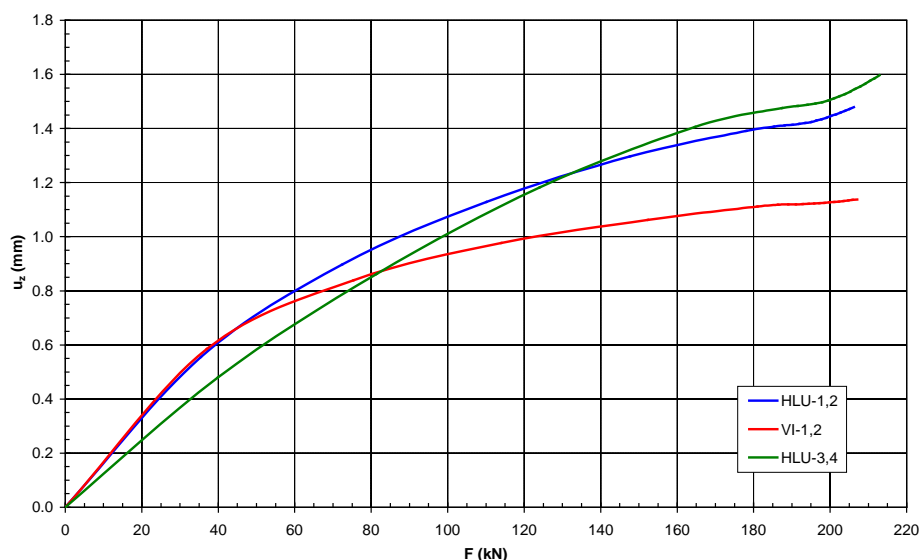
Σχήμα 3.9: Κατανομή της z - μετατόπισης για τα δοκίμια S-COR-HLU-1&2



Σχήμα 3.10: Κατανομή της z - μετατόπισης για τα δοκίμια S-COR-VI-1&2

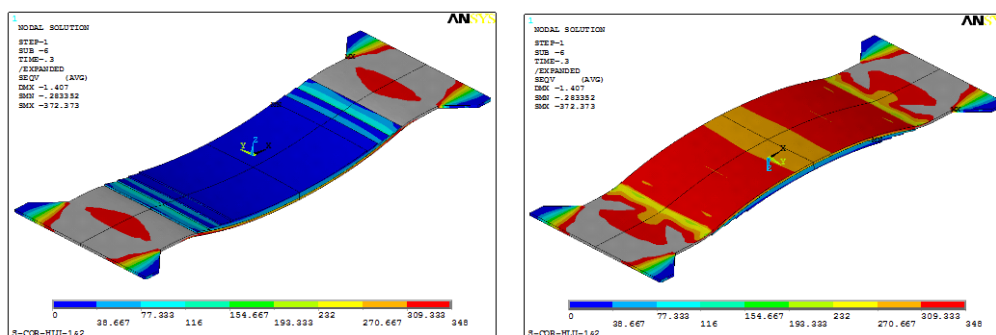


Σχήμα 3.11: Κατανομή της z - μετατόπισης για τα δοκίμια S-COR-HLU-3&4



Σχήμα 3.12: Μέγιστη μετατόπιση κατά z ως προς την επιβαλλόμενη φόρτιση

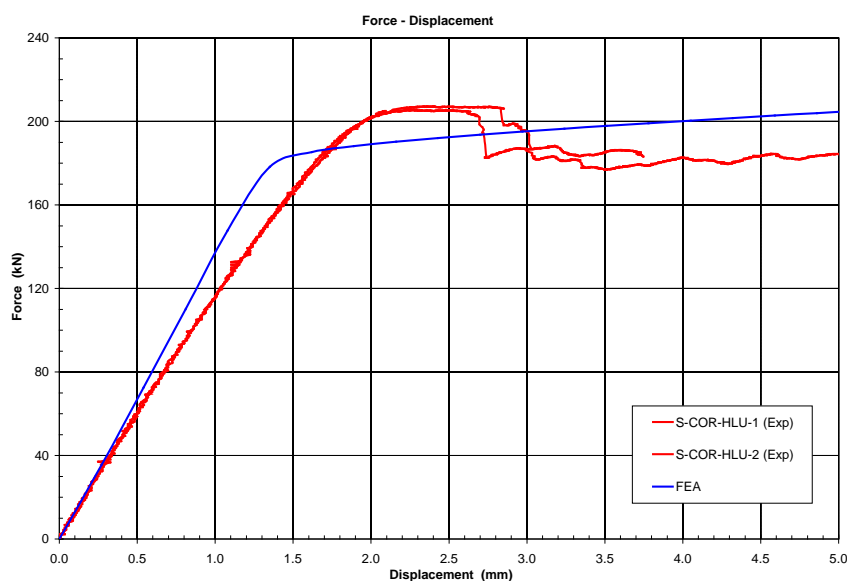
Η ομοιόμορφη κάμψη που παρατηρείται και έχει ως αποτέλεσμα την παραμορφωμένη κατάσταση του χαλύβδινου ελάσματος, επηρεάζει την περιοχή του ελάσματος όπου πρωτοεμφανίζεται η διαρροή του χάλυβα. Συνεπώς, αυτή η διαρροή εμφανίζεται αρχικά κοντά στα άκρα του επιθέματος, λόγω της έντονης κάμψης που παρουσιάζεται εκεί, με την προϋπόθεση ότι το επίθεμα δεν αποκολλάται πριν τη διαρροή του χάλυβα. Αυτό το φαινόμενο διακρίνεται στο Σχήμα 3.13, στο οποίο παρουσιάζεται η άνω και κάτω όψη των παραμορφωμένων δοκιμίων S-COR-HLU-1&2, όπως υπολογίστηκαν με την ΜΠΣ, με ταυτόχρονη απεικόνιση της κατανομής των τάσεων von Mises της κατασκευής. Στο σχήμα αυτό, το γκρι χρώμα υποδεικνύει τις περιοχές του χαλύβδινου ελάσματος που έχουν εμφανίσει πλαστικότητα (η τάση von Mises υπολογίζεται μεγαλύτερη από 348 MPa, που είναι το όριο διαρροής του συγκεκριμένου χάλυβα). Την ίδια κατάσταση παρουσιάζουν και οι άλλους δύο τύποι δοκιμίων, στους οποίους η διαρροή εμφανίζεται για φόρτιση ίση με 185 kN περίπου. Για μεγαλύτερη φόρτιση από αυτή την τιμή, η ολική διαρροή της χαλύβδινης πλάκας έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση μεγάλων μετατοπίσεων κατά τη διεύθυνση x.



Σχήμα 3.13: Κατανομή της τάσης von Mises στα δοκίμια S-COR-HLU-1&2 (άνω και κάτω όψη).

Το τελευταίο, αυτό, συμπέρασμα προκύπτει και από τη σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων, που παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.14, 3.15, 3.16, τα οποία παριστούν τις καμπύλες δύναμης – μετατόπισης όπως προέκυψαν από τις πειραματικές μετρήσεις και την αριθμητική μοντελοποίηση, για όλους τους τύπους δοκιμίων. Όσον αφορά στις πειραματικές μετρήσεις (κόκκινες γραμμές), η συμπεριφορά όλων των δοκιμίων είναι παρόμοια. Αρχικά, παραμορφώνονται ελαστικά, με περιοχή ελαστικής απόκρισης ευρύτερη από αυτή που παρουσιάζεται στα δοκίμια αναφοράς (χωρίς επίθεμα, βλέπε Σχήμα 3.6). Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι η παρουσία του επιθέματος έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των αναπτυσσόμενων τάσεων στην περιοχή του χάλυβα όπου έχει τοποθετηθεί, για το ίδιο μέγεθος φόρτισης, συνεπώς η κατασκευή συμπεριφέρεται ελαστικά για υψηλότερες φορτίσεις. Από αυτό το σημείο και μετά, τα δοκίμια μπαίνουν στην πλαστική περιοχή.

Η συγκεκριμένη συμπεριφορά κάθε τύπου δοκιμίων, προκύπτει από την συνδυασμένη μελέτη των καμπύλων δύναμης - μετατόπισης, των Εικόνων 3.14 - 3.16. Κατ' επέκταση, τα δοκίμια S-COR-HLU 1&2 μπαίνουν στην πλαστική περιοχή για εφαρμογή φόρτισης περίπου 190 kN.

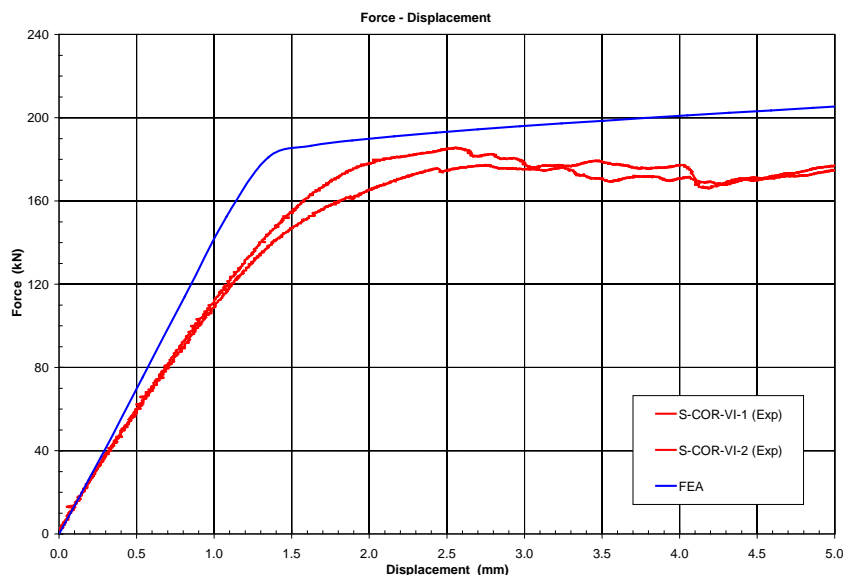


Σχήμα 3.14: Καμπύλες δύναμης - μετατόπισης για τα δοκίμια S-COR-HLU-1&2

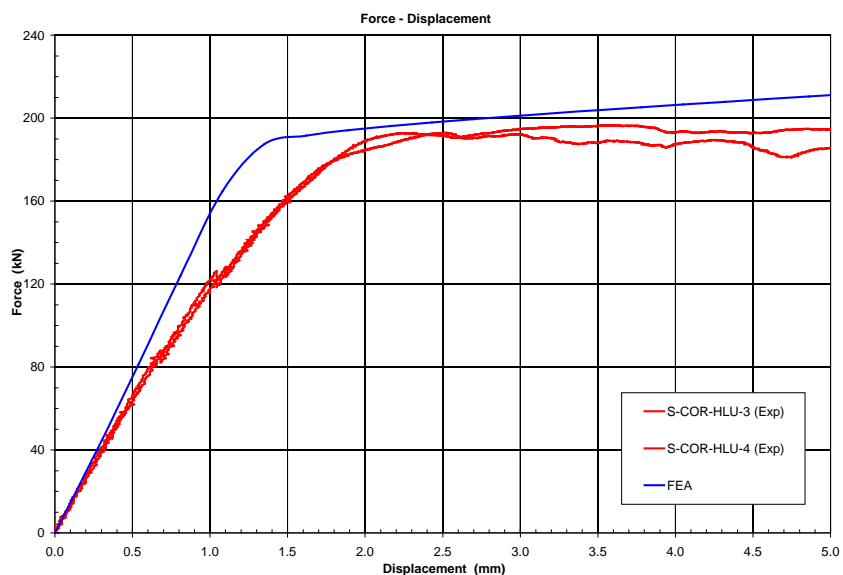
Η πλαστική συμπεριφορά εμφανίζεται στην περιοχή των SG-6 και SG-7, που βρίσκονται μακριά από τη διαβρωμένη περιοχή με επίθεμα, πράγμα που επιβεβαιώνεται από τις αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις επιμηκύνσεων. Όσο αυξάνεται περαιτέρω η φόρτιση, η περιοχή του χάλυβα που βρίσκεται ακριβώς από κάτω από τη διαβρωμένη περιοχή που έχει τοποθετηθεί το επίθεμα, επίσης μπαίνει στην περιοχή πλαστικότητας. Συγχρόνως, έχουμε αποκόλληση του επιθέματος με ταυτόχρονη πτώση της επιβαλλόμενης έντασης. Με την αύξηση της φόρτισης, οι επιμηκύνσεις στις θέσεις των SG-6 και SG-7 σταματούν να

αυξάνονται και η πλαστικότητα περιορίζεται μόνο στην διαβρωμένη περιοχή κάτω από το επίθεμα. Κατόπιν, τα δοκίμια S-COR-HLU-1&2 ακολουθούν τη γενική συμπεριφορά των αντίστοιχων δοκιμίων αναφοράς.

Αντίθετα της ανωτέρω περίπτωσης των δύο αυτών δοκιμίων, η αποκόλληση των επιθεμάτων των δοκιμίων S-COR-VI-1&2 και S-COR-HLU-3&4, δεν ήταν απότομη, αλλά σταδιακή, όπως φαίνεται από τα διαγράμματα (Εικόνες 3.15 και 3.16).



Σχήμα 3.15: Καμπύλες δύναμης – μετατόπισης για τα δοκίμια S-COR-VI-1&2



Σχήμα 3.16: Καμπύλες δύναμης - μετατόπισης για τα δοκίμια S-COR-HLU-3&4

Στα εδάφια που ακολουθούν περιγράφεται το μοντέλο που δημιουργήθηκε με χρήση cohesive στοιχείων για την προσομοίωση του κολητικού μέσου, το οποίο αντιστοιχεί (ιδιότητες υλικών – γεωμετρία) στο μοντέλο για τα δοκίμια S-COR-HLU-1&2. Η διαδικασία επιλογής του καθώς και η σύγκριση των δύο μοντέλων, περιγράφονται στο Κεφάλαιο 4.

3.3. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ COHESIVE ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

3.3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε επισκευές με σύνθετο επίθεμα η επιλογή του κολλητικού μέσου είναι το ίδιο σημαντική με αυτή των ινών και της μήτρας, για τους λόγους που περιγράφονται αναλυτικά στο εδάφιο 1.3. Στην παρούσα εργασία τροποποιήθηκε το ήδη υπάρχον μη γραμμικό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων που περιγράφηκε στο εδάφιο 3.2, με την προσθήκη ειδικών cohesive στοιχείων, για την προσομοίωση του κολλητικού δεσμού μεταξύ επιθέματος και χαλύβδινου ελάσματος, της βιβλιοθήκης του προγράμματος ANSYS 14.0. Σκοπός ήταν να επιτευχθεί ακριβέστερη πρόβλεψη του φορτίου αποκόλλησης του επιθέματος από το χαλύβδινο έλασμα και έτσι να μοντελοποιηθεί ικανοποιητικότερα η συνολική συμπεριφορά της κατασκευής.

Το τελικό μοντέλο είναι αποτέλεσμα διάφορων δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν, αλλάζοντας διαφορετικές παραμέτρους κάθε φορά, οι οποίες περιγράφονται αναλυτικά στο εδάφιο 3.3.4

3.3.2 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Η επιλογή των ιδιοτήτων των υλικών και η διαστασιολόγηση του μοντέλου, έγινε με στόχο να είναι εφικτή η σύγκριση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης τόσο με τα πειραματικά, όσο και με τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης που περιγράφεται στο εδάφιο 3.2. Το αριθμητικό μοντέλο με cohesive στοιχεία αντιστοιχεί στην προσομοίωση του επιθέματος από σύνθετα υλικά, το οποίο τοποθετήθηκε με τη μέθοδο επίστρωσης που ακολουθήθηκε στην κατασκευή των δοκιμών HLU1&2. Οι τιμές των ιδιοτήτων των υλικών όπως μετρήθηκαν πειραματικά και αυτές που χρησιμοποιήθηκαν στην μοντελοποίηση φαίνονται στους Πίνακες 3.6 - 3.8. Στους Πίνακες αυτούς, όπου E είναι το μέτρο ελαστικότητας, ν ο λόγος Poisson, G το μέτρο διάτμησης, σ_o το όριο διαρροής, ενώ το μέτρο κράτυνσης (Πίνακας 3.8) λήφθηκε ίσο με 0.015 του μέτρου ελαστικότητας του χάλυβα. Οι δείκτες x , y , z , συμβολίζουν τις διευθύνσεις του μήκους, πλάτους και πάχους αντίστοιχα, γι' αυτό το λόγο και κάποιες τιμές δεν συμπεριλαμβάνονται στη 2D μοντελοποίηση.

Πίνακας 3.6: Μηχανικές και γεωμετρικές ιδιότητες του επιθέματος που μετρήθηκαν πειραματικά

Υλικό	E_x [MPa]	σ_{ux} [MPa]	ϵ_{ux} [%]	W_f [%]	t_p [mm]	t_{ply} [mm]
T / HLU (measured)	69470	426.9	0.67	32.5	7.2	0.40

Πίνακας 3.7: Μηχανικές ιδιότητες του επιθέματος που χρησιμοποιήθηκαν στη μοντελοποίηση

Υλικό	E_x [MPa]	E_y [MPa]	E_z [MPa]	ν_{xy}	ν_{yx}	ν_{xz}	G_{xy} [MPa]	G_{yz} [MPa]	G_{xz} [MPa]
T / HLU (FEA-3D)	69470	69470	5000	0.30	0.02	0.30	2400	1600	2400
T / HLU (FEA-2D)	69470	-	5000	0.30	-	0.30	-	1600	2400

Πίνακας 3.8: Μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα που χρησιμοποιήθηκαν στη μοντελοποίηση

Υλικό	E [MPa]	ν	Μέτρο κράτυσης [MPa]	σ_0 [MPa]
Χάλυβας	200000	0.30	3000	348

Για το κολλητικό μέσο, στην 3D ανάλυση χρησιμοποιήθηκε μέτρο ελαστικότητας ίσο με 4500 MPa και ο λόγος Poisson ίσος με 0.25. Στην ανάλυση με cohesive στοιχεία, απαιτείται η εισαγωγή τεσσάρων άλλων παραμέτρων που περιγράφουν τις ιδιότητες των στοιχείων αυτών. Οι τιμές των ιδιοτήτων λήφθηκαν από τη βιβλιογραφία (Lee, 2010) και φαίνονται στον Πίνακα 3.9, όπου S_{max} είναι η μέγιστη τάση σε καταπόνηση τύπου I (ή ορθή τάση), G_{cn} η κρίσιμη ενέργεια θραύσης για τύπο I, T_{max} η μέγιστη τάση σε καταπόνηση τύπου II (ή διατμητική τάση) και G_{ct} είναι η κρίσιμη ενέργεια θραύσης για τύπο II.

Πίνακας 3.9: Μηχανικές ιδιότητες του κολλητικού μέσου που χρησιμοποιήθηκαν στη μοντελοποίηση

Υλικό	S_{max} [MPa]	G_{cn} [N/mm]	T_{max} [MPa]	G_{ct} [N/mm]
Κόλλα	7.3	0.14	53	0.28

Στο σχεδιασμό του μοντέλου ακολουθήθηκε η ίδια λογική με αυτή της 3D ανάλυσης, δηλαδή μοντελοποιήθηκε το 1/2 του ενισχυμένου με επίθεμα ελάσματος, λόγω της συμμετρίας της γεωμετρίας, των υλικών, της φόρτισης και των συνοριακών συνθηκών. Η γεωμετρία του μοντέλου επιλέχθηκε ίδια με αυτή που περιγράφεται στο εδάφιο 3.2, οπότε το

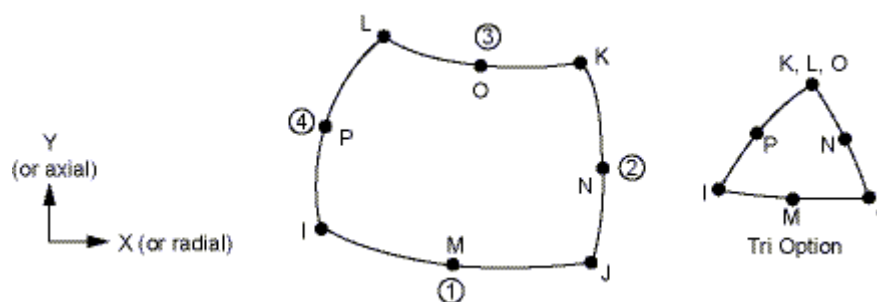
επίθεμα κατά τη μοντελοποίησή του χωρίστηκε σε 4 ομάδες κατά τη διεύθυνση του πάχους, κάθε μία εκ των οποίων είχε μήκος ίσο με 200 mm, 232 mm, 264 mm και 300 mm. Το συνολικό μήκος της κατασκευής λήφθηκε ίσο με 250 mm.

Το πάχος κάθε ομάδας ήταν ίσο με $\frac{1}{4}$ του συνολικού πάχους του επιθέματος t_p , δηλαδή ίσο με 1.8mm, και το πάχος του κολλητικού μέσου θεωρήθηκε ίσο με 0.1 mm. Το πάχος του χαλύβδινου ελάσματος λήφθηκε ίσο με 3.75 mm στη μη διαβρωμένη περιοχή και ίσο με 3.2 mm στη διαβρωμένη, τιμές που προέκυψαν από τον μέσο όρο των πραγματικών διαστάσεων των δοκιμίων (βλέπε Πίνακα 2.2, εδάφιο 2.2.).

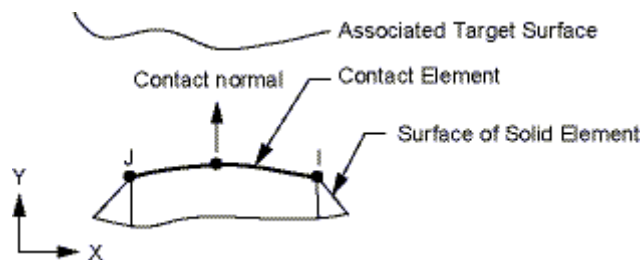
3.3.3 ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΥΠΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Η μοντελοποίηση όλων των τμημάτων της κατασκευής (μέταλλο, κολλητικό μέσο, επίθεμα) συνιστάται εν γένει να γίνεται με τρισδιάστατα στοιχεία στερεού, κατά προτίμηση 20-κομβικά, με δυνατότητες μοντελοποίησης ορθοτροπικής συμπεριφοράς και μεγάλων μετατοπίσεων και παραμορφώσεων. Ωστόσο, κάτι τέτοιο απαιτεί μεγάλους υπολογιστικούς χρόνους και επεξεργαστική ισχύ από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή και έτσι στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν 2D στοιχεία (έναντι των 3D της μελέτης που περιγράφεται στο εδάφιο 3.2). Επομένως, τα αποτελέσματα των φορτίων που υπολογίστηκαν και εξήχθησαν από την ανάλυση του ANSYS πολλαπλασιάστηκαν με την τρίτη διάσταση, ώστε να αφορούν στην 3D κατασκευή.

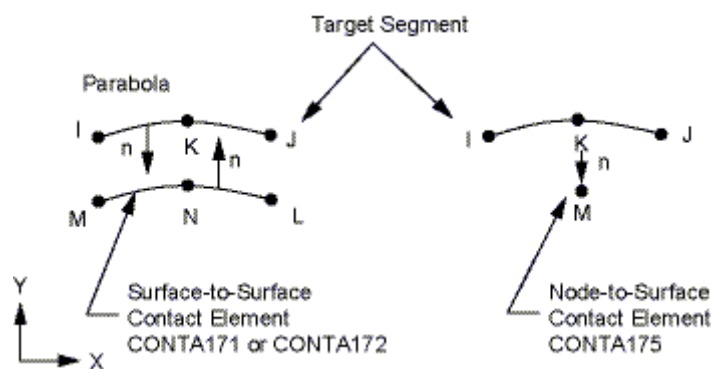
Στο μοντέλο που κατασκευάστηκε, χρησιμοποιήθηκε το δισδιάστατο 8 - κομβικό στοιχείο PLANE183, με δύο βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο, με γεωμετρία που φαίνεται στο Σχήμα 3.17 και τα στοιχεία CONTA172 και TARGE169 που αποτελούν ένα ζεύγος (2D, contact pair), με γεωμετρία που φαίνεται στα Σχήματα 3.18, 3.19 (ANSYS, 2009). Τα στοιχεία CONTA172 και TARGE169 χρησιμοποιούνται μαζί προκειμένου να μοντελοποιηθεί η διεπιφάνεια μεταξύ δύο υλικών.



Σχήμα 3.17: Γεωμετρία του στοιχείου PLANE183 του ANSYS 14.0

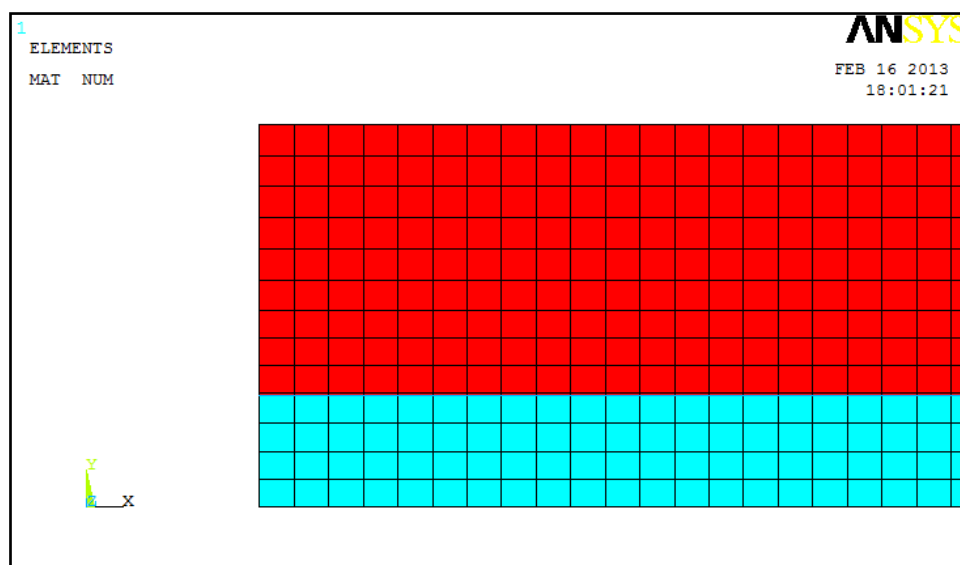


Σχήμα 3.18: Γεωμετρία του στοιχείου CONTACT172 του ANSYS 14.0



Σχήμα 3.19: Γεωμετρία του στοιχείου TARGE169 του ANSYS 14.0

Κατά τη διεύθυνση του πάχους χρησιμοποιήθηκαν 4 στοιχεία PLANE183 για την μοντελοποίηση της χαλύβδινης πλάκας, ένα ζεύγος CONTACT172 και TARGE169 για το κολλητικό μέσο και 9 για το σύνθετο επίθεμα (Σχήμα 3.20).



Σχήμα 3.20: Αριθμός στοιχείων κατά τη διεύθυνση του πάχους

Στις πειραματικές δοκιμές επιβλήθηκε στατικός εφελκυσμός, δηλαδή μετατόπιση με σταθερό ρυθμό στο ελεύθερο άκρο των δοκιμίων. Στη μοντελοποίηση ασκήθηκε ο ίδιος τύπος φόρτισης, επιβολή μετατόπισης κατά τη διεύθυνση του μήκους (άξονας x) και η συνοριακή συνθήκη που τέθηκε στους κόμβους του ελεύθερου άκρου ήταν μηδενική μετατόπιση κατά τη διεύθυνση του πάχους (άξονας y). Εδώ κρίνεται σκόπιμο να διευκρινιστεί ότι η διεύθυνση του πάχους αντιστοιχεί στον άξονα y της δισδιάστατης μοντελοποίησης, ενώ η ίδια διεύθυνση αντιστοιχεί στον άξονα z της τρισδιάστατης μοντελοποίησης (βλέπε Πίνακα 3.7 και Σχήμα 3.20).

Το είδος της ανάλυσης που επιλέχθηκε ήταν η στατική ανάλυση, δηλαδή η επιβολή δεδομένης και σταθερής φόρτισης στο μοντέλο. Επειδή η γραμμική ανάλυση μπορεί να προσομοιώσει με ακρίβεια μόνο την ελαστική περιοχή του χάλυβα, επιλέχθηκε η μη γραμμική στατική ανάλυση (θεωρία μεγάλων παραμορφώσεων) ώστε να μοντελοποιηθεί ικανοποιητικά η ελαστοπλαστική συμπεριφορά του χαλύβδινου ελάσματος.

Ο χρόνος ολοκλήρωσης της μη γραμμικής ανάλυσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον αριθμό των χρονικών βημάτων (substeps) που ορίζεται από τον χρήστη. Το συνολικό επιβαλλόμενο φορτίο κατακερματίζεται σε μία σειρά από βήματα κάθε ένα εκ των οποίων εφαρμόζεται ξεχωριστά στην κατασκευή. Μετά την ολοκλήρωση κάθε βήματος, το μητρώο ακαμψίας της κατασκευής επαναυπολογίζεται και προσαρμόζεται στη νέα παραμορφωσιακή κατάσταση πριν επιβληθεί το επόμενο τμήμα φορτίου. Η βηματική αυτή προσέγγιση πραγματοποιείται με την αριθμητική μέθοδο Newton Raphson, μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση, βάσει των κριτηρίων που έχουν τεθεί από τον χρήστη. Όσο περισσότερα είναι τα χρονικά αυτά βήματα και αυστηρότερα τα κριτήρια σύγκλισης, τόσο πιο απαιτητική σε χρόνο είναι η ανάλυση. Πέρα από τον αρχικό καθορισμό των βημάτων, δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να ορίσει ένα μέγιστο και ελάχιστο αριθμό βημάτων και βάσει αυτών να επιλεγεί αυτόματα από το πρόγραμμα ο τελικός αριθμός των βημάτων που απαιτούνται για την επίλυση. Αυτή η μέθοδος ακολουθήθηκε, ικανοποιώντας όλα τα κριτήρια σύγκλισης και προσφέροντας ικανοποιητική ακρίβεια σε σχετικά χαμηλό υπολογιστικό χρόνο.

3.3.4 ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ ΚΑΙ ΤΕΛΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

3.3.4.1 Επίδραση Μήκους και Χρονικού Βήματος

Στη μοντελοποίηση που πραγματοποιήθηκε δεν έχει συμπεριληφθεί η μέθοδος προετοιμασίας της χαλύβδινης επιφάνειας καθώς και η απόκλιση των μετρήσεων της επιμήκυνσης που κατέγραφε η υδραυλική μηχανή εφελκυσμού που χρησιμοποιήθηκε για την τέλεση των πειραμάτων. Η απόκλιση αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι η επιμήκυνση μετρούνταν από το έμβολο της μηχανής και όχι από την άκρη της αρπάγης, ώστε η μέτρηση να αφορά μόνο στο μήκος του δοκιμίου. Έτσι, με την επιβολή του φορτίου από τη μηχανή, η

αντίστοιχη μετρηθείσα επιμήκυνση συμπεριλάμβανε και την όποια επιμήκυνση εμφανίζουν οι αρπάγες, το υλικό των οποίων έχει και αυτό μια δεδομένη ακαμψία. Αποτέλεσμα των παραπάνω ήταν η ακαμψία που προβλέπεται από την μοντελοποίηση να είναι μεγαλύτερη από αυτή που παρουσίασαν τα δοκίμια (κλίση της καμπύλης στην περιοχή της ελαστικής συμπεριφοράς).

Προκειμένου η ανάλυση να ανταποκρίνεται όσο το δυνατόν καλύτερα στην πραγματικότητα και να προσεγγίζει τις τιμές που μετρήθηκαν πειραματικά, πραγματοποιήθηκαν διάφορες δοκιμές ώστε να καταλήξουμε στην αριθμητική ανάλυση που περιγράφεται στο εδάφιο 3.3.

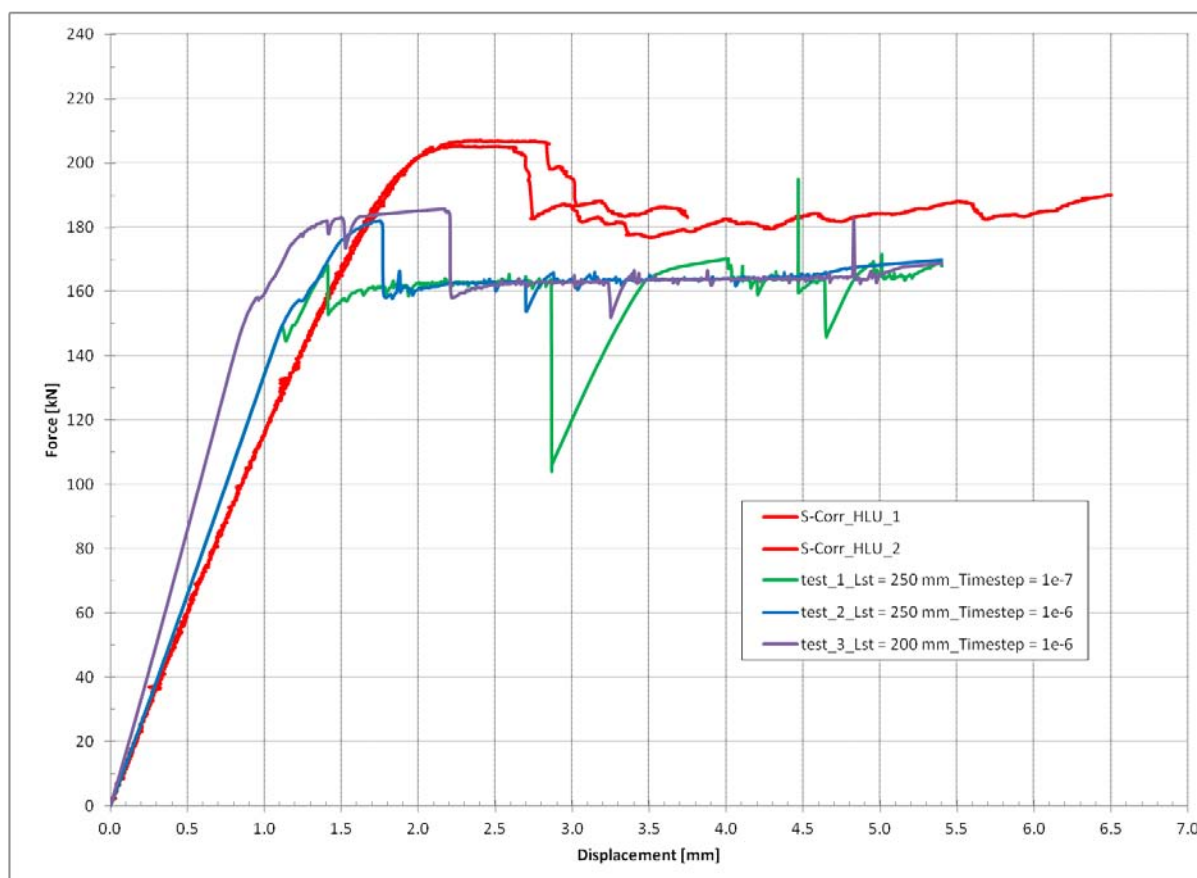
Στα Σχήματα 3.21 – 3.24 του παρόντος Κεφαλαίου, οι καμπύλες δύναμης – μετατόπισης που απεικονίζονται με κόκκινο χρώμα αντιστοιχούν στα πειραματικά αποτελέσματα, που προέκυψαν για δοκίμια με διάβρωση που επισκευάστηκαν με σύνθετο επίθεμα τοποθετημένο με τη μέθοδο επίστρωσης Hand Lay Up (βλέπε Κεφάλαιο 2, Σχήμα 2.10).

Μία πρώτη δοκιμή έγινε ως προς το χρονικό βήμα της επίλυσης και το μήκος του χαλύβδινου ελάσματος. Ελέγχθηκε ως παράμετρος το μήκος του χαλύβδινου ελάσματος, λόγω του η μέτρηση της υδραυλικής μηχανής δεν ανταποκρίνεται πλήρως στην πραγματικότητα, όπως περιγράφεται παραπάνω, και το χρονικό βήμα της επίλυσης γιατί αποτελεί σημαντικό παράγοντα στη μοντελοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία (βλέπε εδάφιο 3.3.3).

Επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί ο αυτόματος τρόπος ορισμού των βημάτων της επίλυσης, που προσφέρεται από το πρόγραμμα. Σύμφωνα με αυτόν, ορίζεται η χρονική έναρξη επιβολής της μετατόπισης (starting time substep), ο ελάχιστος και ο μέγιστος αριθμός βημάτων (minimum και maximum timestep) στα οποία θα διαμοιραστεί η συνολική μετατόπιση και ο χρόνος στον οποίο θα ολοκληρωθεί η επιβολή της μετατόπισης (the end of the load step). Πιο συγκεκριμένα, στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε χρονική έναρξη $t = 0.01$, δηλαδή τη χρονική στιγμή $t = 0.01$ η κατασκευή φορτίζεται με $0.01 * u_x$ και λήξη η χρονική στιγμή $t = 1$ κατά την οποία η κατασκευή φορτίζεται με το σύνολο της επιβληθείσας μετατόπισης u_x . Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές για ελάχιστο χρονικό βήμα επίλυσης ίσο με $t = 10^{-4}$, 10^{-6} , 10^{-7} και μέγιστο $t = 0.01$, ενώ επιλέγεται αυτόματα από το πρόγραμμα ποια τιμή από αυτό το εύρος (π.χ. $10^{-6} * u_x$ έως $0.01 * u_x$) θα επιβληθεί σε κάθε βήμα φόρτισης.

Στο Σχήμα 3.21, η καμπύλη με πράσινο χρώμα απεικονίζει τα αποτελέσματα για μήκος χαλύβδινου ελάσματος ίσο με $L_{st} = 250$ mm και ελάχιστο χρονικό βήμα επίλυσης ίσο με 10^{-7} , η καμπύλη με μπλε χρώμα τα αποτελέσματα για ίδιο μήκος χαλύβδινου ελάσματος και μικρότερο χρονικό βήμα επίλυσης ίσο με 10^{-6} και τέλος η καμπύλη με μωβ χρώμα τα αποτελέσματα για μήκος ίσο με $L_{st} = 200$ mm και χρονικό βήμα επίλυσης ίσο με 10^{-6} . Η

πρώτη περίπτωση (test 1) οδήγησε σε μείωση του μέγιστου φορτίου, σε σχέση με αυτό που προέκυψε πειραματικά, ίση με 19% περίπου, η δεύτερη περίπτωση (test 2) σε μείωση ίση με 14% περίπου και η τρίτη (test 3) σε μείωση ίση με 12% περίπου.

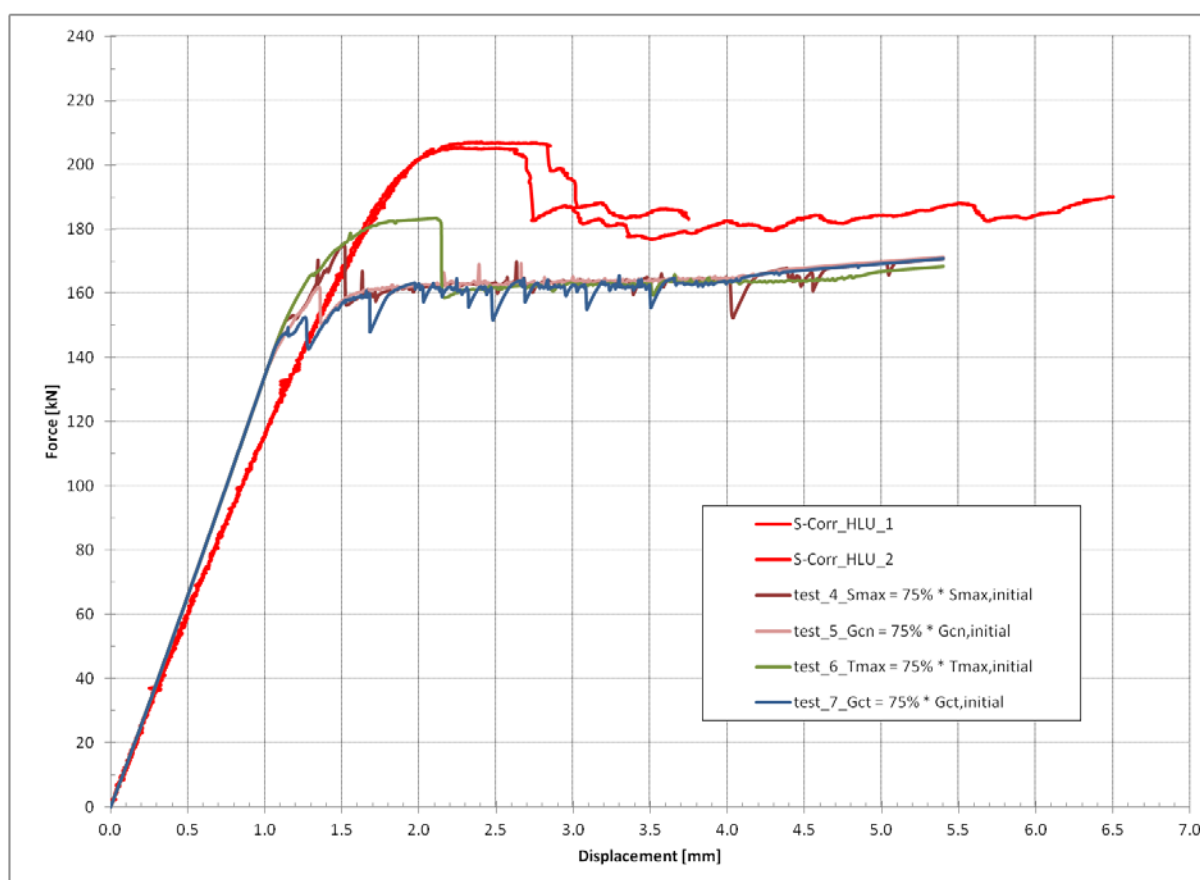


Σχήμα 3.21: Σύγκριση της επίδρασης του μήκους του χαλύβδινου ελάσματος και του χρονικού βήματος στην καμπύλη δύναμης – μετατόπισης

Η πρώτη δοκιμή (test 1) έχει την μεγαλύτερη ποσοστιαία απόκλιση στην τιμή του μέγιστου φορτίου και επιπλέον δεν μοντελοποιεί την πλαστική περιοχή απόκρισης της κατασκευής. Η τελευταία δοκιμή (test 3) προσεγγίζει μεν καλύτερα την τιμή του μέγιστου φορτίου, αλλά μοντελοποιεί λιγότερο ικανοποιητικά την ελαστική περιοχή απόκρισης της κατασκευής. Η καμπύλη που αντιστοιχεί σε $L_{st} = 250$ mm και ελάχιστο χρονικό βήμα επίλυσης ίσο με 10^{-6} (test 2) δίνει τα πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα σε σχέση με τα πειραματικά. Η ελαστικότητα της κατασκευής (κλίση του ευθύγραμμου τμήματος της καμπύλης) προσεγγίζει περισσότερο τις αντίστοιχες καμπύλες των πειραμάτων και το μέγιστο φορτίο έχει προβλεφθεί ικανοποιητικά. Ωστόσο, καμία δε από τις τρεις δοκιμές δεν κατάφερε να μοντελοποιήσει ακριβώς το μέγιστο φορτίο που μπορεί να δεχτεί η κατασκευή.

3.3.4.2 Επίδραση Ιδιοτήτων Cohesive Στοιχείων

Κατόπιν, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές αναφορικά με τις ιδιότητες των cohesive στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση του κολλητικού δεσμού επιθέματος – χαλύβδινου ελάσματος. Έτσι, αρχικά μειώθηκαν κατά 25% κάθε μία από τις 4 ιδιότητες των στοιχείων αυτών (βλέπε εδάφιο 1.3), με αρχικές τιμές αυτές που φαίνονται στον Πίνακα 3.9. Από το Σχήμα 3.22, παρατηρούμε ότι μειώνοντας τις ιδιότητες των cohesive στοιχείων, οδηγούμαστε σε μείωση του μέγιστου φορτίου και αλλοίωση της μορφής της καμπύλης δύναμης – μετατόπισης της κατασκευής (δεν εμφανίζεται πλαστική περιοχή και αστοχία).

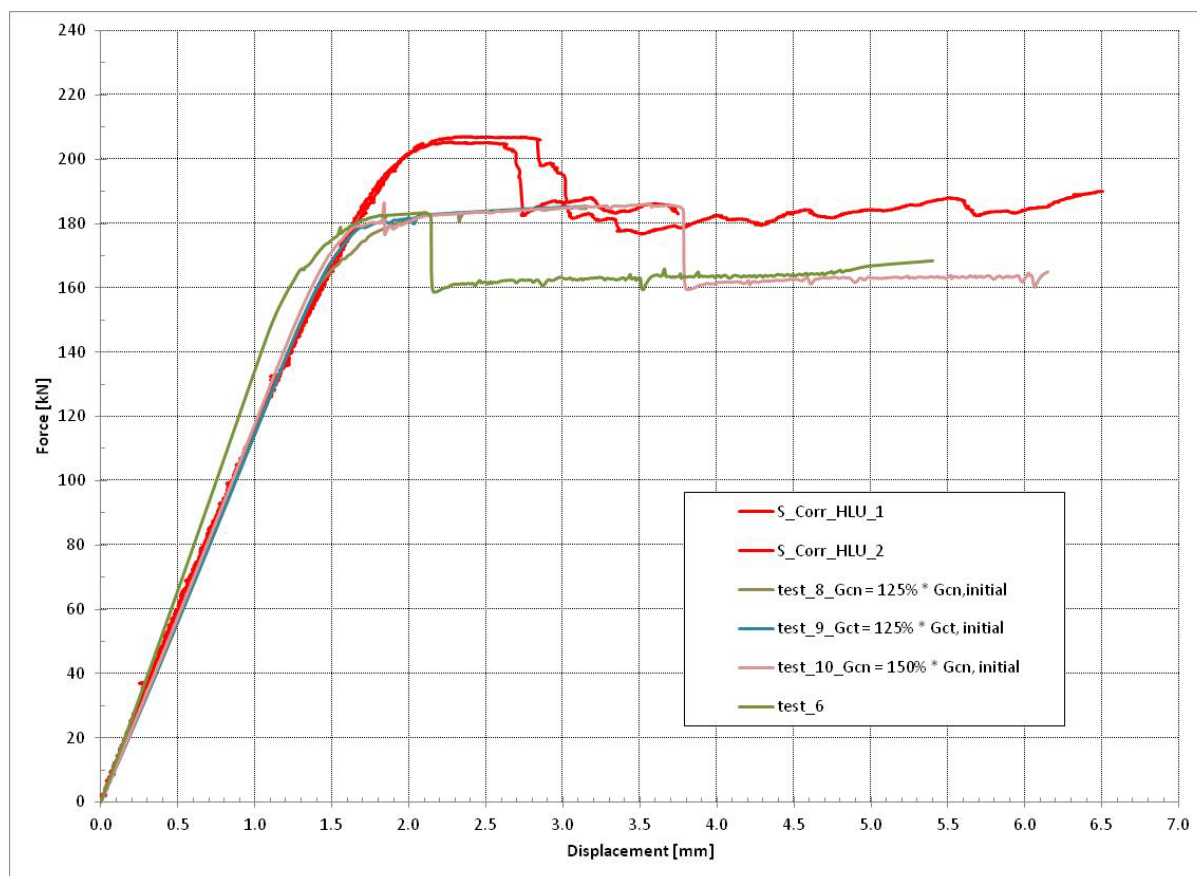


Σχήμα 3.22: Σύγκριση της επίδρασης της μείωσης κατά 25% έκαστης των τεσσάρων ιδιοτήτων των cohesive στοιχείων στη καμπύλη δύναμης – μετατόπισης

Συγκεκριμένα, η μείωση της μέγιστης ορθής τάσης επαφής (S_{max}) οδήγησε σε μείωση του μέγιστου φορτίου ίση με 17% περίπου. Η μείωση της κρίσιμης ενέργειας θραύσης για καταπόνηση τύπου I (G_{cn}) οδήγησε σε μείωση του μέγιστου φορτίου ίση με 24% περίπου. Η μείωση της μέγιστης εφαπτομενικής τάσης επαφής (T_{max}) οδήγησε σε μείωση του μέγιστου φορτίου ίση με 12% και τέλος η μείωση της κρίσιμης ενέργειας θραύσης σε καταπόνηση τύπου II (G_{ct}) σε μείωση ίση με 29% περίπου. Επομένως, η καμπύλη που προσεγγίζει καλύτερα τις πειραματικές είναι αυτή που αντιστοιχεί σε μείωση της T_{max} κατά 25%, μιας και

δίνει την μικρότερη ποσοστιαία μείωση του μέγιστου φορτίου και επιπλέον εμφανίζει το πλατώ που αντιστοιχεί στην πλαστική συμπεριφορά της κατασκευής. Ωστόσο, η αστοχία της κατασκευής συμβαίνει για μικρότερη τιμή μετατόπισης από αυτή των πειραματικών.

Κρατώντας λοιπόν σταθερή την τιμή $T_{max} = 75\% * T_{max,initial} = 42 \text{ MPa}$, πραγματοποιήθηκαν στη συνέχεια δοκιμές με αύξηση των υπόλοιπων ιδιοτήτων των cohesive στοιχείων. Οι καμπύλες δύναμης – μετατόπισης που αντιστοιχούν στις δοκιμές αυτές παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.23, συμπεριλαμβανομένης και αυτής του test 6 (όπου $T_{max} = 75\% * T_{max,initial} = 42 \text{ MPa}$). Συγκεκριμένα, αυξήθηκε κατά 25% και 50% της αρχικής της τιμής η G_{cn} , με αποτέλεσμα αμελητέα αλλαγή στην τιμή του μέγιστου φορτίου. Αυξήθηκε κατόπιν η τιμή της G_{ct} κατά 25%, με το ίδιο αποτέλεσμα, δηλαδή αμελητέα επίδραση στην τιμή του μέγιστου φορτίου. Φαίνεται ότι η καμπύλη που αντιστοιχεί σε $T_{max} = 75\% * T_{max,initial} = 42 \text{ MPa}$ και $G_{cn} = 150\% * G_{cn,initial}$ (test_10) δίνει ικανοποιητικότερα αποτελέσματα, ωστόσο η αστοχία της κατασκευής συμβαίνει για αρκετά μεγαλύτερη τιμή μετατόπισης από αυτή των πειραματικών.



Σχήμα 3.23: Σύγκριση της επίδρασης διαφόρων συνδυασμών των τεσσάρων ιδιοτήτων των cohesive στοιχείων στην καμπύλη δύναμης – μετατόπισης

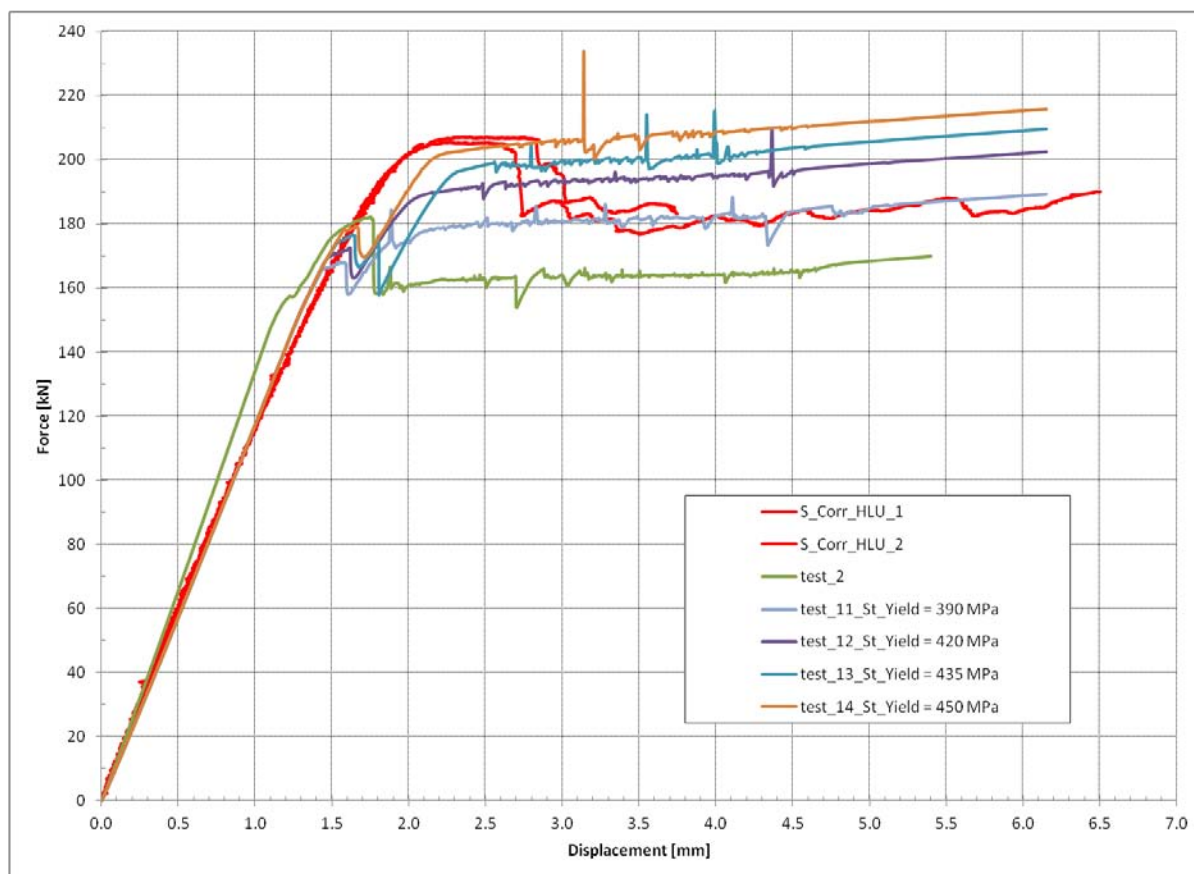
Πραγματοποιήθηκαν και άλλες δοκιμές με παραπλήσια αποτελέσματα, με μοναδική ουσιαστική επίδραση στη μετατόπιση κατά την οποία αστοχεί η κατασκευή. Ακόμα και με αύξηση κατά 150% των αρχικών ιδιοτήτων των cohesive στοιχείων, το μέγιστο φορτίο δεν πλησίασε την τιμή των πειραματικών αποτελεσμάτων. Έτσι, οι τιμές των ιδιοτήτων των cohesive στοιχείων που επιλέχθηκαν να χρησιμοποιηθούν στην τελική μοντελοποίηση είναι αυτές του Πίνακα 3.9.

3.3.4.3 Επίδραση Ορίου Διαρροής Χάλυβα

Προκειμένου να επιτευχθεί αύξηση του μέγιστου φορτίου, πραγματοποιήθηκαν και δοκιμές όσον αφορά στο όριο διαρροής του χάλυβα. Στην αντίστοιχη μοντελοποίηση που περιγράφεται στο εδάφιο 3.2, το όριο διαρροής του χάλυβα λήφθηκε ίσο με 348 MPa και τόσο λήφθηκε σε όλες τις παραπάνω δοκιμές. Στο Σχήμα 3.24 φαίνονται οι καμπύλες που προέκυψαν για χάλυβα με όριο διαρροής 390, 420, 435, 450 MPa, καθώς και η καμπύλη του test 2 (με όριο διαρροής ίσο με 348 MPa). Από τις καμπύλες αυτές φαίνεται ότι η χρήση χάλυβα με υψηλότερο όριο διαρροής οδηγεί μεν σε αύξηση του μέγιστου φορτίου και επομένως της αντοχής της κατασκευής, αλλά αλλοιώνει και πάλι την απεικόνιση της συμπεριφοράς που παρουσίασε πειραματικά. Δεν παρατηρείται αστοχία, ούτε εμφανίζεται ελαστοπλαστική συμπεριφορά, για το σύνολο της κατασκευής επίθεμα – χαλύβδινο έλασμα, αποτέλεσμα που δεν συνάδει με τα πειραματικά.

Συγκεκριμένα, εμφανίζεται ένα «γόνατο» στις καμπύλες, το οποίο αντιστοιχεί στην έναρξη της διαρροής του χάλυβα. Αυτή η διαρροή αρχικά λαμβάνει χώρα στο άνω τμήμα του χάλυβα που βρίσκεται κάτω από το άκρο του επιθέματος, στο σημείο όπου το επίθεμα έχει το μέγιστο πάχος του και επεκτείνεται κατόπιν προς τη διαβρωμένη περιοχή. Την ίδια στιγμή έχει ήδη αποκολληθεί η πρώτη (εκ των τεσσάρων) στρώση του επιθέματος, από το χαλύβδινο έλασμα.

Η συνολική παρατήρηση του Σχήματος 3.24 οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η χρήση χάλυβα με αρκετά υψηλότερο όριο διαρροής στη μοντελοποίηση έχει ως αποτέλεσμα την ακριβέστερη πρόβλεψη του μέγιστου φορτίου διαρροής (ενδεικτικά, χάλυβας με $\sigma_0 = 450$ [MPa] αντιστοιχεί σε πρόβλεψη του μέγιστου φορτίου ίση με 98% περίπου) αλλά εμφανίζει τελείως διαφορετική εικόνα, ως προς την συνολική συμπεριφορά της κατασκευής μέχρι την αστοχία της, σε σχέση με αυτή που παρατηρήθηκε πειραματικά.

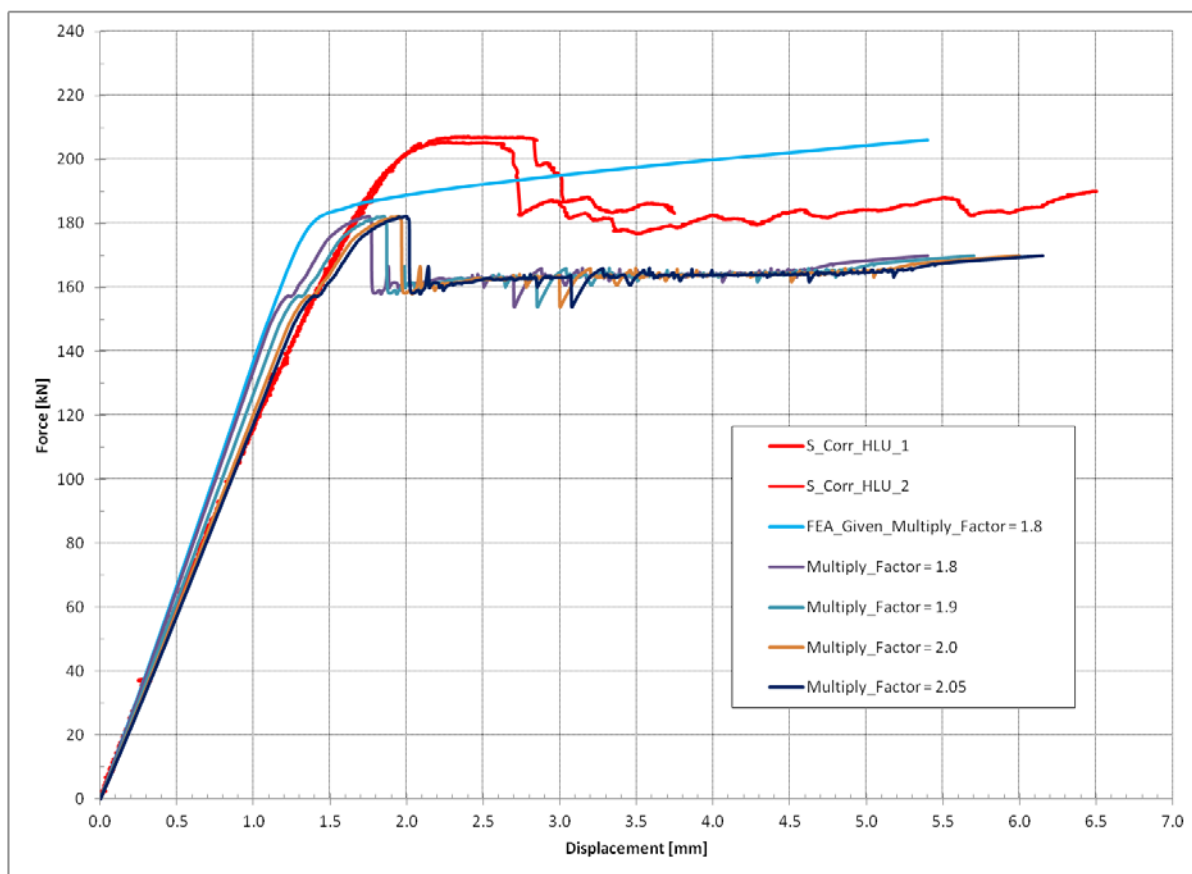


Σχήμα 3.24: Σύγκριση της επίδρασης της αύξησης του ορίου διαρροής του χάλυβα στην καμπύλη δύναμης - μετατόπισης

3.3.4.5 Επιλογή Τελικού Μοντέλου - Αποτελέσματα

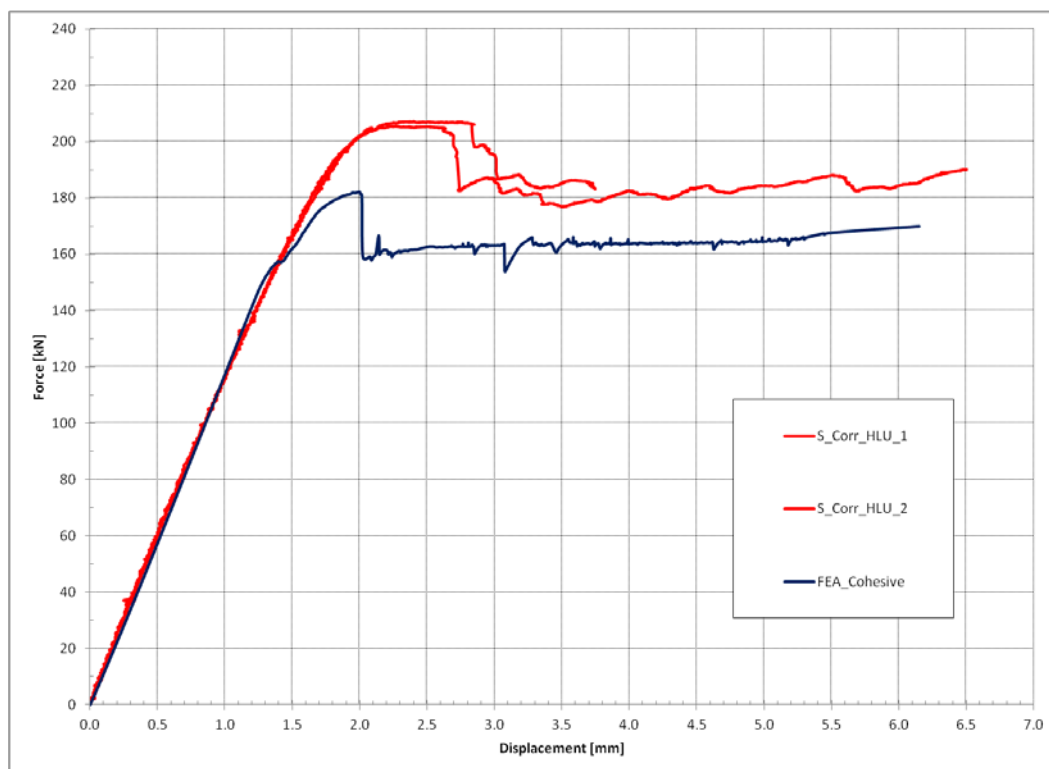
Λαμβάνοντας υπόψη όλες τις δοκιμές που περιγράφηκαν στο παρόν Κεφάλαιο, θεωρήθηκε βέλτιστη η δοκιμή που αντιστοιχεί στο test 2. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, οι ιδιότητες των υλικών και ο τύπος στοιχείων και ανάλυσης που χρησιμοποιήθηκαν στο τελικό μοντέλο περιγράφονται αναλυτικά στα εδάφια 3.3.2 και 3.3.3.

Προκειμένου να επιτευχθεί σύμπτωση του ευθύγραμμου τμήματος της καμπύλης δύναμης – μετατόπισης με αυτό των πειραματικών αποτελεσμάτων, τα αποτελέσματα της μετατόπισης του αριθμητικού μοντέλου που περιγράφεται στο εδάφιο 3.2 πολλαπλασιάστηκαν με έναν συντελεστή ίσο με 1.8. Αυτός ο πολλαπλασιασμός δεν στερεί ακρίβεια από τα τελικά αποτελέσματα, δεδομένων των παραγόντων που περιγράφονται στο εδάφιο 3.3.4.1 (τρόπος μέτρησης της επιμήκυνσης από την υδραυλική μηχανή, αδυναμία μοντελοποίησης της μεθόδου προετοιμασίας της χαλύβδινης επιφάνειας). Στο τελικό μοντέλο, κατόπιν δοκιμών που φαίνονται στο Σχήμα 3.25, ο συντελεστής αυτός προσαρμόστηκε σε 2.05.



Σχήμα 3.25: Επιλογή τιμής του συντελεστή προσαρμογής

Τα αριθμητικά αποτελέσματα της μη γραμμικής ανάλυσης του τελικού μοντέλου που κατασκευάστηκε με χρήση cohesive στοιχείων παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.26 που ακολουθεί και παριστά την καμπύλη δύναμης – μετατόπισης. Στο σχήμα αυτό φαίνονται τα πειραματικά αποτελέσματα (κόκκινες καμπύλες) καθώς και τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης (μπλε καμπύλη).

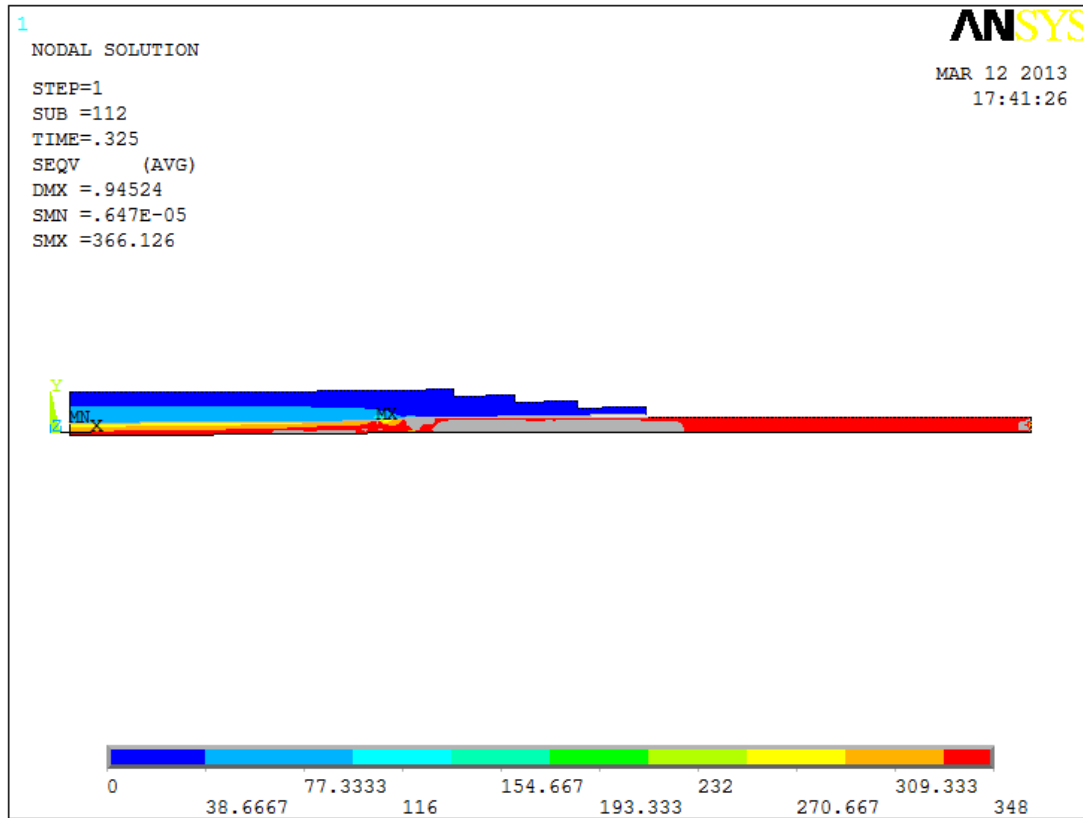


Σχήμα 3.26: Καμπύλη δύναμης – μετατόπισης πειραματικών αποτελεσμάτων και αριθμητικής μοντελοποίησης με χρήση cohesive στοιχείων

Παρατηρούμε ότι η συμπεριφορά της κατασκευής μοντελοποιήθηκε ικανοποιητικά. Η κατασκευή αρχικά παραμορφώνεται ελαστικά μέχρι τις υψηλότερες φορτίσεις και στη συνέχεια μπαίνει στην πλαστική περιοχή. Κατόπιν, παρατηρείται αστοχία της κατασκευής, με την αποκόλληση του επιθέματος. Η τιμή του μέγιστου φορτίου είναι κατά 14% περίπου μικρότερη από αυτή που εμφανίζεται στις πειραματικές δοκιμές. Η τιμή της επιβληθείσας μετατόπισης, για την οποία εμφανίζεται η τιμή του μέγιστου φορτίου, ταυτίζεται με την τιμή της μετατόπισης για την οποία εμφανίζεται η τιμή του φορτίου αποκόλλησης του επιθέματος. Από τα πειραματικά αποτελέσματα όμως προκύπτει ότι η κατασκευή παραμένει στην πλαστική περιοχή πριν την αποκόλληση του επιθέματος. Επίσης, παρατηρείται ένα μικρό «γόνατο» στην καμπύλη της μοντελοποίησης. Η πολύ γρηγορότερη τοπικά διάδοση της αποκόλλησης έχει ως αποτέλεσμα να περνάει στην πλαστική περιοχή ολόκληρο το πάχος της διατομής (σε κάποιο σημείο της). Στη συνέχεια, μειώνονται οι τάσεις τοπικά στον χάλυβα (λόγω της αποκόλλησης), μειώνεται η πλαστικότητα και επομένως συνολικά η κατασκευή μπορεί να παραλάβει λίγο επιπλέον φορτίο.

Με την προϋπόθεση ότι το επίθεμα δεν αποκολλάται πριν τη διαρροή της χαλύβδινης πλάκας, αυτή η διαρροή εμφανίζεται αρχικά κοντά στα άκρα του επιθέματος, για την τιμή του μέγιστου φορτίου. Στο Σχήμα 3.27 το γκρι χρώμα υποδεικνύει τα μέρη που έχουν μπει στην πλαστική περιοχή (η τάση von Mises υπολογίζεται μεγαλύτερη από 348 MPa, που είναι

τάση διαρροής του συγκεκριμένου χάλυβα). Όσο αυξάνεται περαιτέρω η φόρτιση, η περιοχή του χάλυβα που βρίσκεται ακριβώς από κάτω από τη διαβρωμένη περιοχή όπου έχει τοποθετηθεί το επίθεμα, επίσης μπαίνει στην περιοχή πλαστικότητας.

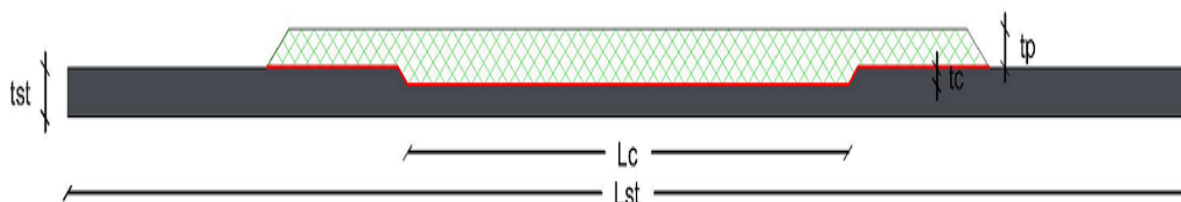


Σχήμα 3.27: Κατανομή τάσεων Von Mises τη χρονική στιγμή που αναπτύσσεται το μέγιστο φορτίο που παραλαμβάνει η κατασκευή

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

4.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΚΑΙ ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ ΔΟΚΙΜΩΝ

Κατά την διενέργεια της αριθμητικής ανάλυσης που περιγράφεται στο εδάφιο 3.3, εντοπίστηκε μια σειρά από παράγοντες που επιδρούν στην αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης διαβρωμένου χαλύβδινου ελάσματος με επίθεμα από σύνθετα υλικά. Προκειμένου να ελεγχθεί ποιοτικά η επίδραση των διαφόρων αυτών παραγόντων στα αποτελέσματα της ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία, διενεργήθηκε μία παραμετρική μελέτη, κατά την οποία μεταβλήθηκαν κάποια γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μοντέλου και μηχανικές ιδιότητες των υλικών από τα οποία αποτελείται (χάλυβας, σύνθετο επίθεμα, κολλητικό μέσο).



Σχήμα 4.1: Γεωμετρία μοντέλου

Πιο συγκεκριμένα, αναφορικά με τα γεωμετρικά στοιχεία του μοντέλου (Σχήμα 4.1) μελετήθηκε η επίδραση της αλλαγής του πάχους της διαβρωμένης περιοχής (t_c) του χαλύβδινου ελάσματος καθώς και του μήκους (L_p) και πάχους (t_p) του επιθέματος (Πίνακας 4.1). Το πάχος της μη διαβρωμένης περιοχής (t_{st}), το μήκος της διαβρωμένης περιοχής (L_c) και του μήκους του χαλύβδινου ελάσματος (L_{st}) παρέμειναν σταθερά. Οι τιμές των μεγεθών αυτών που λήφθηκαν στην παραμετρική μελέτη είναι $t_{st} = 6$ [mm], $L_c = 150$ [mm], $L_{st} = 400$ [mm]. Αναφορικά με τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών, μελετήθηκε η επίδραση του μέτρου ελαστικότητας (E_x) του χάλυβα και του σύνθετου επιθέματος, του μέτρου κράτυνσης του χάλυβα (σ_o) και τέλος των ιδιοτήτων του κολλητικού μέσου (σ_{max} , G_I , T_{max} , G_{II}). Το μέγεθος που συνδέει τα μέτρα ελαστικότητας χάλυβα και επιθέματος καθώς και τα πάχη αυτών είναι ο λόγος ακαμψίας (Stiffness Ratio) ο οποίος προκύπτει από τη σχέση:

$$SR = \frac{E_p * t_p}{E_{st} * t_{st}} \quad (4.1)$$

από την οποία προκύπτει

$$t_p = SR \frac{E_{st} * t_{st}}{E_p}, \quad (4.2)$$

όπου E_p είναι το μέτρο ελαστικότητας του επιθέματος από σύνθετο υλικό,
 t_p είναι το πάχος του σύνθετου επιθέματος,
 E_{st} είναι το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα,
 t_{st} είναι το πάχος της μη διαβρωμένης περιοχής του χαλύβδινου ελάσματος.

Το πάχος του επιθέματος καθορίστηκε έμμεσα, από την επιλογή τιμής για τον λόγο ακαμψίας επιθέματος – πλάκας που περιγράφεται στη σχέση (4.2), με καθορισμένη τιμή του πάχους του χάλυβα καθώς και των μέτρων ελαστικότητας του χάλυβα και του σύνθετου υλικού. Η τμηματική διαστρωμάτωση του επιθέματος χωρίζεται σε τέσσερις ομάδες ίδιου πάχους και διαφορετικού μήκους. Το πάχος κάθε ομάδας προκύπτει διαιρώντας το πάχος του επιθέματος δια 4. Έτσι, τα πάχη για τους τρεις λόγους ακαμψίας και του δύο τύπους υλικών των επιθεμάτων που περιλαμβάνονται στην παραμετρική μελέτη, έχουν ως εξής :

- ❖ Για σύνθετο υλικό με μέτρο ελαστικότητας $E_p = E_x = 20000$ MPa (fabric glass - FG), μέτρο ελαστικότητας του χαλύβδινου ελάσματος $E_{st} = 207000$ MPa και πάχος της μη διαβρωμένης περιοχής του χάλυβα $t_{st} = 6.0$ mm με εφαρμογή της (4.2) προέκυψαν :
 - $t_p = 15.525$ mm , για $SR = 0.25$, οπότε πάχος στρώσης $t_p/4 = 3.88125$ mm
 - $t_p = 31.050$ mm , για $SR = 0.50$, οπότε πάχος στρώσης $t_p/4 = 7.7625$ mm
 - $t_p = 46.575$ mm , για $SR = 0.75$, οπότε πάχος στρώσης $t_p/4 = 11.64375$ mm

- ❖ Για σύνθετο υλικό με μέτρο ελαστικότητας $E_p = E_x = 69470$ MPa (unidirectional glass - UD), μέτρο ελαστικότητας του χαλύβδινου ελάσματος $E_{st} = 207000$ MPa και πάχος της μη διαβρωμένης περιοχής του χάλυβα $t_{st} = 6.0$ [mm] με εφαρμογή της (5.2) προέκυψαν :
 - $t_p = 15.525$ mm , για $SR = 0.25$, οπότε πάχος στρώσης $t_p/4 = 4.4695$ mm
 - $t_p = 31.050$ mm , για $SR = 0.50$, οπότε πάχος στρώσης $t_p/4 = 8.9391$ mm
 - $t_p = 46.575$ mm , για $SR = 0.75$, οπότε πάχος στρώσης $t_p/4 = 13.4087$ mm

Οι τιμές των παραμέτρων που αναφέρθηκαν παραπάνω και επιλέχθηκαν να μελετηθούν συνοψίζονται στον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1: Παράγοντες παραμετρικής μελέτης

Παράμετροι	Επιλογή Τιμών			Αριθμός Επαναλήψεων
L_p	180 [mm]	280 [mm]		2
t_c / t_{st}	1.5 [mm] / 6.0 [mm] = 0.25	3.0 [mm] / 6.0 [mm] = 0.50		2
ιδιότητες κολλητικού μέσου mode I	50%	100%	150%	5
ιδιότητες κολλητικού μέσου mode II	50%	100%	150%	
υλικό patch	$E_x = 69470$ [MPa] $E_y = 5000$ [MPa]	$E_x = 20000$ [MPa] $E_y = 20000$ [MPa]		2
λόγος ακαμψίας SR	0.25	0.50	0.75	3
	Σύνολο			120

Τα στοιχεία και το είδος της ανάλυσης της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, καθώς και εν γένει η λογική της μοντελοποίησης (προσομοίωση του 1/2 της κατασκευής, καθορισμός οριακών συνθηκών, κτλ.) συνάδουν με όσα περιγράφονται στο εδάφιο 3.3.3. Ασκήθηκε επίσης το ίδιο είδος φόρτισης, δηλαδή επιβολή μετατόπισης κατά τη διεύθυνση του μήκους (άξονας x), και μάλιστα συγκεκριμένη τιμή αυτού, δηλαδή μετατόπιση ίση με $u_x = 0.95 \text{ mm}$ σε κάθε δοκιμή.

Προκειμένου να πραγματοποιηθούν οι παραπάνω συνδυασμοί των προς έλεγχο παραμέτρων, δημιουργήθηκαν 120 μοντέλα και πραγματοποιήθηκαν συνολικά 120 δοκιμές (runs) του προγράμματος ANSYS 14.0. Ο μέσος όρος του χρόνου επίλυσης που απαιτήθηκε για την ολοκλήρωση κάθε μίας εκ των δοκιμών ήταν 1.5 ώρα. Το μέγεθος που μελετάται είναι η δύναμη αντίδρασης της κατασκευής ως προς την μετατόπιση στην οριζόντια διεύθυνση (διαγράμματα Force [kN] – Displacement [mm]).

Η ονοματολογία των δοκιμών που επιλέχθηκε και σύμφωνα με την οποία θα γίνεται αναφορά σε αυτές εφ εξής στα διαγράμματα είναι η ακόλουθη :

- τα πρώτα δύο γράμματα αντιστοιχούν στο είδος του επιθέματος (ως προς τη διαφορά στα μέτρα ελαστικότητας). Οι δοκιμές που ξεκινούν με UD αφορούν στα μέτρα ελαστικότητας $E_x = 69470 \text{ MPa}$, $E_y = 5000 \text{ MPa}$ και αναφέρονται σε επίθεμα από μονοαξονικό ύφασμα γυαλιού (Unidirectional Glass). Οι δοκιμές που ξεκινούν με FG αφορούν στα μέτρα ελαστικότητας $E_x = 20000 \text{ MPa}$, $E_y = 20000 \text{ MPa}$ και αναφέρονται σε επίθεμα από υαλοϋφασμα (Fabric Glass)
- ο επόμενος αριθμός αφορά στο λόγο ακαμψίας (Stiffness Ratio) και παίρνει τις τιμές 1,2,3 οι οποίες αναφέρονται σε $SR = 0.25$, $SR = 0.50$ και $SR = 0.75$ αντίστοιχα
- οι επόμενοι αριθμοί αφορούν στο ποσοστό των ιδιοτήτων των mode I και mode II των cohesive στοιχείων επί των τιμών που είχαν στη δοκιμή αναφοράς (βλέπε Πίνακα 3.9). Συγκεκριμένα ο πρώτος αντιστοιχεί στο mode I και ο δεύτερος στο mode II
- το επόμενο γράμμα αφορά στο πάχος της διαβρωμένης περιοχής του χαλύβδινου ελάσματος. Το A αντιστοιχεί σε $t_c = 1.5 \text{ mm}$, και το B σε $t_c = 3.0 \text{ mm}$
- ο τελευταίος αριθμός αφορά στο συνολικό μήκος του χαλύβδινου ελάσματος και παίρνει τις τιμές 180 και 280 για μήκος $L_{st} = 180 \text{ mm}$ και $L_{st} = 280 \text{ mm}$ αντίστοιχα.

Η επιλογή της ομαδοποίησης των αποτελεσμάτων και του σχολιασμού τους, στα εδάφια που ακολουθούν, έγινε με κριτήριο την ευκρίνεια των καμπυλών δύναμης – επιμήκυνσης, δεδομένου του μεγάλου αριθμού τους (120 δοκιμές και αντίστοιχες καμπύλες).

4.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ FG ΕΠΙΘΕΜΑ ΕΠΙ ΧΑΛΥΒΔΙΝΟΥ ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ

4.2.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΜΗΚΟΣ ΕΠΙΘΕΜΑΤΟΣ $L_p = 180$ mm

Στα διαγράμματα δύναμης – μετατόπισης των Σχημάτων 4.2 – 4.5 φαίνονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης για επίθεμα με μέτρα ελαστικότητας $E_x = 20000$ MPa και $E_y = 20000$ MPa, μήκους $L_p = 180$ mm και λόγο ακαμψίας (SR) ίσο με 0.25, 0.5 και 0.75. Οι καμπύλες που αποτυπώνονται με συνεχή γραμμή, αντιστοιχούν σε κάθε διάγραμμα σε πάχος διάβρωσης ίσο με 1.5 mm (A), ενώ αυτές που αποτυπώνονται με διάστικτη γραμμή σε πάχος διάβρωσης ίσο με 3.0 mm (B). Οι δύο ομάδες καμπυλών (συνεχής και διάστικτης γραμμής), περιλαμβάνουν τα αποτελέσματα που προέκυψαν με την ποσοστιαία διαφοροποίηση των ιδιοτήτων των mode I και mode II των cohesive στοιχείων, οι οποίες λήφθηκαν από τη βιβλιογραφία και χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων της δοκιμής αναφοράς (βλέπε εδάφιο 3.3, Πίνακα 3.9).

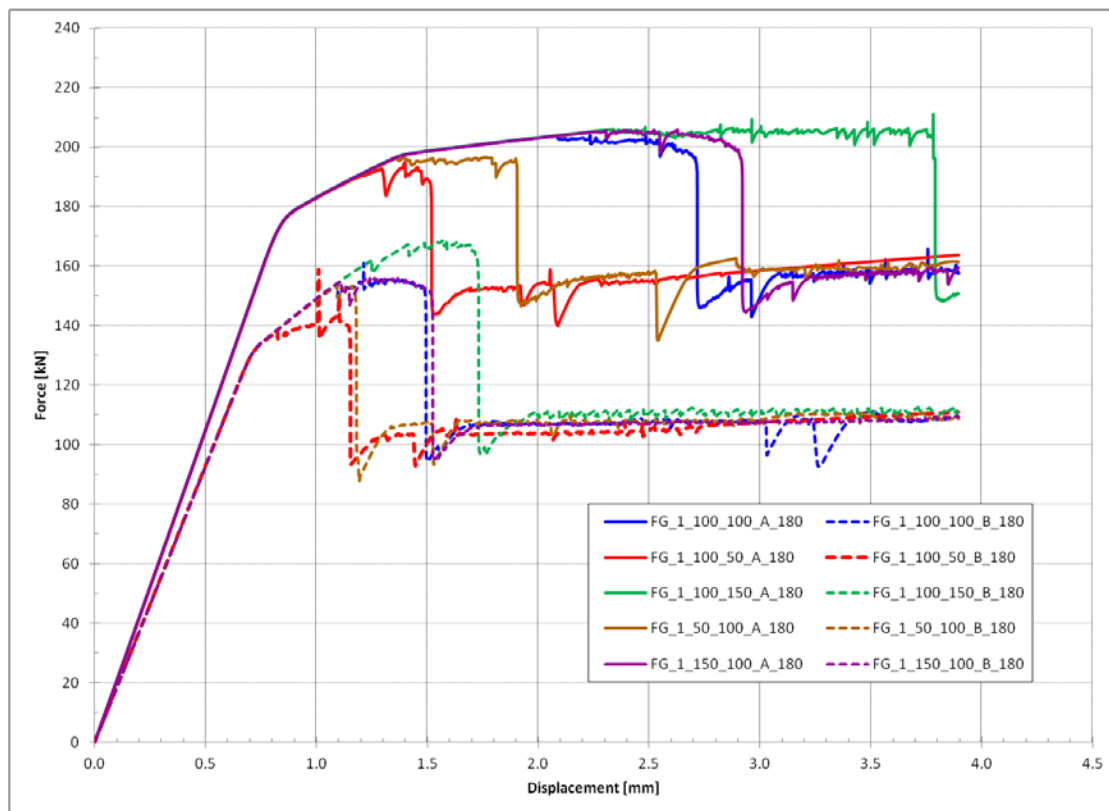
Στα διαγράμματα των Σχημάτων 4.2 – 4.4 φαίνεται ότι η τιμή του μέγιστου φορτίου που μπορεί να δεχτεί η κατασκευή πριν αστοχήσει είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση που το πάχος της διαβρωμένης περιοχής του χαλύβδινου ελάσματος είναι μικρότερο (περίπτωση $t_{c,(A)} = 1.5$ mm – ομάδα καμπυλών A). Αυτό είναι αναμενόμενο, αφού μία κατασκευή με μεγαλύτερο πάχος διατομής είναι πιο ανθεκτική από μία πιο λεπτή.

Τη χρονική στιγμή που εμφανίζεται το μέγιστο φορτίο, ο χάλυβας έχει ήδη διαρρεύσει και για τις δύο τιμές πάχους της διαβρωμένης περιοχής. Η διαφορά στις δύο περιπτώσεις πάχους έγκειται στην περιοχή του χαλύβδινου ελάσματος που έχει διαρρεύσει. Η ολική διαρροή του χάλυβα προηγείται της αστοχίας του κολλητικού δεσμού.

Η αλλαγή της κλίσης του ευθύγραμμου τμήματος της καμπύλης που παρατηρείται μεταξύ των δύο ομάδων καμπυλών, οφείλεται στην πλαστική διαρροή του χάλυβα η οποία, όπως είναι λογικό, για μεγαλύτερο πάχος διάβρωσης (λεπτότερη η διατομή του χαλύβδινου ελάσματος) συμβαίνει σε πιο μικρή τιμή φόρτισης.

Η διαφοροποίηση των ιδιοτήτων των mode I και mode II των cohesive στοιχείων, έχει επίδραση στο μέγιστο φορτίο. Τα παρακάτω ποσοστά μείωσης και αύξησης του μέγιστου φορτίου προκύπτουν από τη μελέτη του Σχήματος 4.2. Για την περίπτωση του μικρότερου πάχους διαβρωμένης περιοχής ($t_{c,(A)} = 1.5$ mm - ομάδα καμπυλών A) η μείωση κατά 50% των δύο τιμών των ιδιοτήτων του mode I οδήγησε σε μείωση του μέγιστου φορτίου ίση με 5% (καφέ καμπύλη). Η μείωση κατά 50% των δύο τιμών των ιδιοτήτων του mode II οδήγησε σε μείωση του φορτίου ίση με 7% περίπου (κόκκινη καμπύλη). Αντίστοιχα, για την περίπτωση του

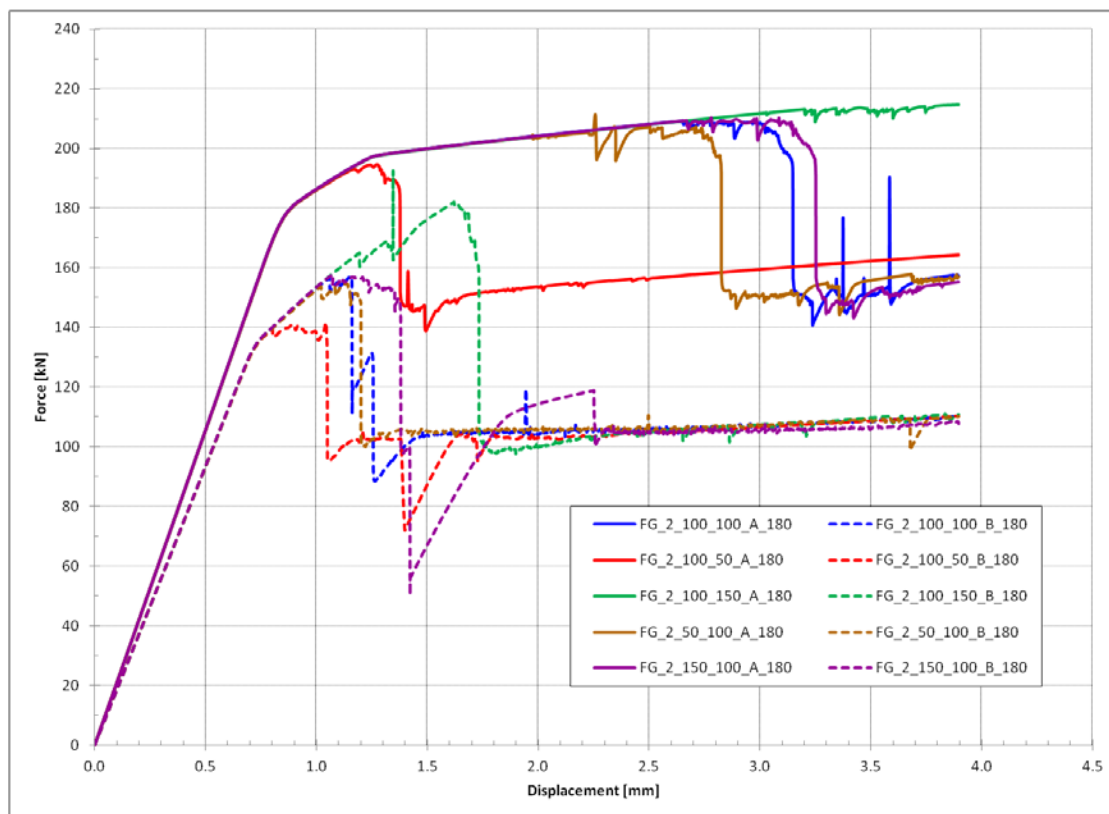
μεγαλύτερου πάχους διαβρωμένης περιοχής ($t_{c,(B)} = 3.0 \text{ mm}$ - ομάδα καμπυλών B) η μείωση κατά 50% των δύο τιμών των ιδιοτήτων του mode I οδήγησε σε μείωση του μέγιστου φορτίου ίση με 3% περίπου (καφέ καμπύλη). Η μείωση κατά 50% των δύο τιμών των ιδιοτήτων του mode II οδήγησε σε μείωση του φορτίου ίση με 9% περίπου (κόκκινη καμπύλη). Παρατηρούμε ότι και στις δύο περιπτώσεις η επίδραση των ιδιοτήτων του mode II είναι μεγαλύτερη αυτής των ιδιοτήτων του mode I.



Σχήμα 4.2 : Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης για FG επίθεμα $L_p = 180 \text{ mm}$, $t_{c,(A)} = 1.5 \text{ mm}$ και $t_{c,(B)} = 3.0 \text{ mm}$, συνδυασμούς ποσοστών των ιδιοτήτων mode I,II των cohesive στοιχείων και $SR = 0.25$

Η κατά 50% αύξηση τώρα των ιδιοτήτων τόσο του mode I όσο και του mode II στην περίπτωση A οδήγησε σε αύξηση μικρότερη του 3% που μπορεί να θεωρηθεί και αμελητέα (συνεχείς καμπύλες, μωβ και πράσινη αντίστοιχα). Η κατά 50% αύξηση των ιδιοτήτων του mode I στην περίπτωση B οδήγησε σε αμελητέα αλλαγή της τιμής του μέγιστου φορτίου ενώ η αντίστοιχη αύξηση των ιδιοτήτων του mode II οδήγησε σε αύξηση του μέγιστου φορτίου ίση με 9% περίπου (διάστικτες καμπύλες, μωβ και πράσινη αντίστοιχα).

Η διαφοροποίηση αυτή των ιδιοτήτων των mode I και mode II των cohesive στοιχείων όμως έχει επίσης επίδραση στην τιμή της επιβαλλόμενης μετατόπισης (u_x) όπου συμβαίνει η αστοχία. Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 4.2 φαίνεται η επίδραση του mode II στη μετατόπιση να είναι μεγαλύτερη της επίδρασης του mode I. Ενδεικτικά, για την ομάδα καμπυλών A, η τιμή της μετατόπισης που συμβαίνει η αστοχία αυξάνεται κατά 7 % περίπου για το 150% των ιδιοτήτων του mode I ενώ αυξάνεται κατά 40% περίπου για το 150% των ιδιοτήτων του mode II (Σχήμα 4.2). Μάλιστα, όσο αυξάνεται ο λόγος ακαμψίας, η επίδραση της αύξησης του mode II είναι τέτοια ώστε για τη συγκεκριμένη τιμή της επιβαλλόμενης φόρτισης ($u_x = 0.95$ mm) η κατασκευή να μην φτάνει στην αστοχία, πράγμα που φαίνεται στα Σχήματα 4.3 και 4.4. Για την ομάδα καμπυλών B η επίδραση στη μετατόπιση είναι αντίστοιχη ποιοτικά (το mode II έχει μεγαλύτερη επίδραση από το mode I), αλλά είναι μικρότερη από αυτή της ομάδας A.



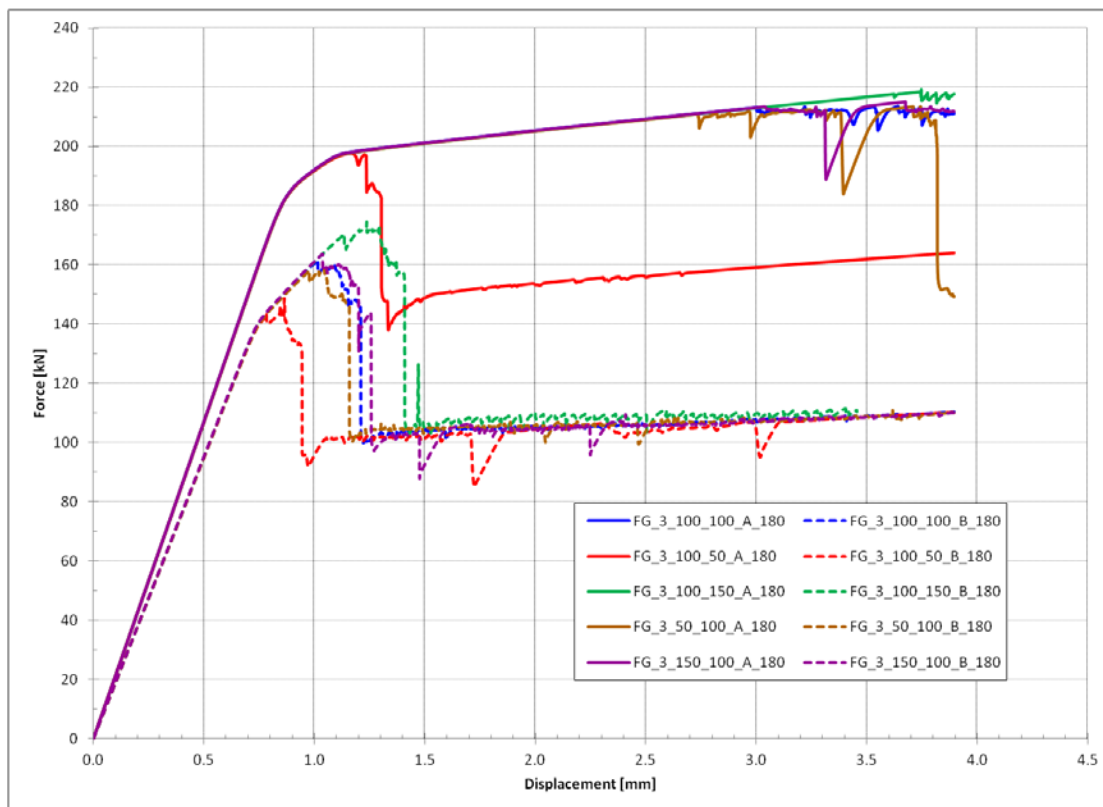
Σχήμα 4.3 : Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης για FG επίθεμα $L_p = 180$ mm, $t_{c,(A)} = 1.5$ mm και $t_{c,(B)} = 3.0$ mm, συνδυασμούς ποσοστών των ιδιοτήτων mode I,II των cohesive στοιχείων και $SR = 0.5$

Παρατηρώντας το Σχήμα 4.3 , για το 150% του mode I στην περίπτωση B η αύξηση του μέγιστου φορτίου είναι αμελητέα (μωβ καμπύλη), ενώ για το 150% του mode II (πράσινη

καμπύλη) το μέγιστο φορτίο αυξάνεται κατά 16% περίπου. Για το 50% του mode I στην περίπτωση B (καφέ καμπύλη) η μείωση του μέγιστου φορτίου είναι αμελητέα, ενώ για το 50% του mode II (κόκκινη καμπύλη) η μείωση είναι ίση με 10% περίπου.

Παρατηρώντας το Σχήμα 4.4, για το 150% του mode I στην περίπτωση B η αύξηση του μέγιστου φορτίου είναι αμελητέα (μωβ καμπύλη), ενώ για το 150% του mode II (πράσινη καμπύλη) το μέγιστο φορτίο αυξάνεται κατά 9% περίπου. Για το 50% του mode I στην περίπτωση B (καφέ καμπύλη) η μείωση του μέγιστου φορτίου είναι αμελητέα, ενώ για το 50% του mode II (κόκκινη καμπύλη) η μείωση είναι ίση με 12% περίπου.

Δεν μπορεί να γίνει αντίστοιχη σύγκριση στην περίπτωση A, διότι για την συγκεκριμένη τιμή της επιβαλλόμενης φόρτισης η κατασκευή δεν έφτασε σε αστοχία, επομένως δεν είναι γνωστή η τιμή του μέγιστου φορτίου.

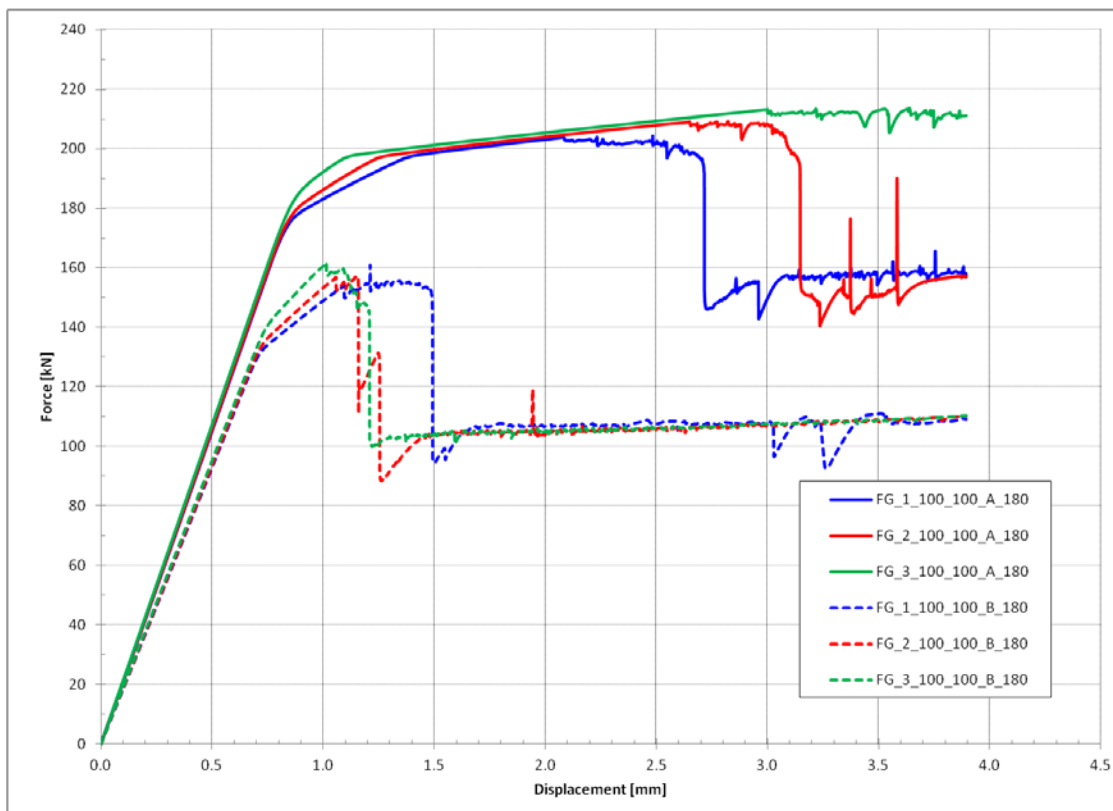


Σχήμα 4.4 : Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης για FG επίθεμα $L_p = 180$ mm, $t_{c,(A)} = 1.5$ mm και $t_{c,(B)} = 3.0$ mm, συνδυασμούς ποσοστών των ιδιοτήτων mode I,II των cohesive στοιχείων και $SR = 0.75$

Στο Σχήμα 4.5 φαίνονται οι καμπύλες δύναμης – μετατόπισης που προέκυψαν για τους τρεις διαφορετικούς λόγους ακαμψίας, τα δύο διαφορετικά πάχη διάβρωσης του χαλύβδινου

ελάσματος και το 100% των τιμών των ιδιοτήτων των cohesive στοιχείων που λήφθηκαν από τη βιβλιογραφία (Lee, 2010).

Το μέγιστο φορτίο έχει εύρος τιμών από 150 kN (FG_1_100_100_B_180) έως 160 kN (FG_3_100_100_B_180) περίπου στην περίπτωση του μεγαλύτερου πάχους της διαβρωμένης περιοχής και από 200 kN (FG_1_100_100_A_180) έως 210 kN (FG_3_100_100_A_180) στην περίπτωση του μικρότερου (Σχήμα 4.5). Η διαφορά δηλαδή του μέγιστου φορτίου πριν την αστοχία της κατασκευής, για το ίδιο πάχος διάβρωσης και διαφορετικό λόγο ακαμψίας, είναι της τάξης του 6%. Έτσι, συμπεραίνουμε ότι η αύξηση του πάχους του επιθέματος, όταν το χαλύβδινο έλασμα έχει σχετικά μικρό πάχος, δεν συνεισφέρει ιδιαίτερα στο μέγιστο φορτίο που μπορεί να παραλάβει.

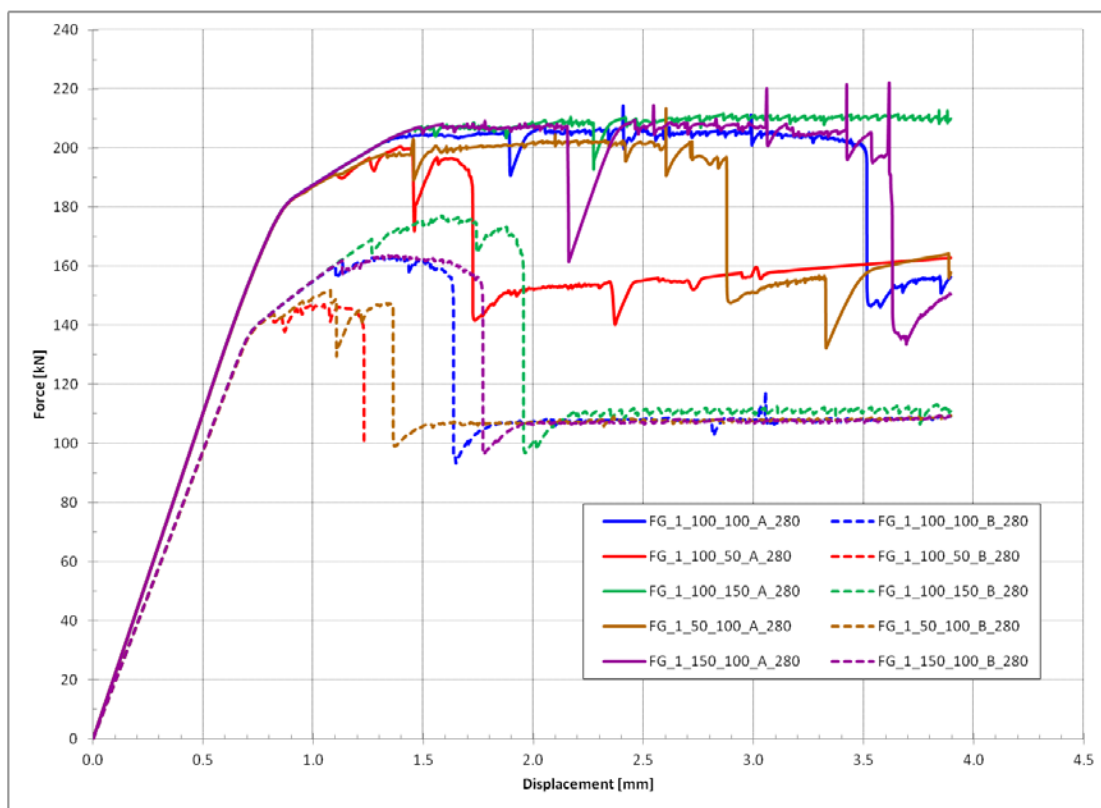


Σχήμα 4.5 : Συγκεντρωτικό διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης για FG επίθεμα $L_p = 180$ mm

Επιπλέον, στην περίπτωση του μεγαλύτερου πάχους διάβρωσης του χαλύβδινου ελάσματος (ομάδα καμπυλών B), παρά την αύξηση του λόγου ακαμψίας, παρατηρούμε ότι η αστοχία της κατασκευής συμβαίνει σε μικρότερη τιμή επιβαλλόμενης μετατόπισης.

4.2.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΜΗΚΟΣ ΕΠΙΘΕΜΑΤΟΣ $L_p = 280$ mm

Στα διαγράμματα δύναμης – μετατόπισης των Σχημάτων 4.6 – 4.9 φαίνονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης για επίθεμα με μέτρα ελαστικότητας $E_x = 20000$ MPa και $E_y = 20000$ MPa, μήκους $L_p = 280$ mm και λόγο ακαμψίας (SR) ίσο με 0.25, 0.5 και 0.75. Ο τρόπος αναπαράστασης των καμπυλών είναι αντίστοιχος με αυτόν που επιλέχθηκε στο εδάφιο 4.2.1. Επομένως, οι καμπύλες που αποτυπώνονται με συνεχή γραμμή, αντιστοιχούν σε κάθε διάγραμμα σε πάχος διάβρωσης ίσο με 1.5 mm (A), ενώ αυτές που αποτυπώνονται με διάστικτη γραμμή σε πάχος διάβρωσης ίσο με 3.0 mm (B). Οι δύο ομάδες καμπυλών (συνεχής και διάστικτης γραμμής), περιλαμβάνουν τα αποτελέσματα που προέκυψαν με την ποσοστιαία διαφοροποίηση των ιδιοτήτων των mode I και mode II των cohesive στοιχείων, οι οποίες λήφθηκαν από τη βιβλιογραφία και χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων της δοκιμής αναφοράς.



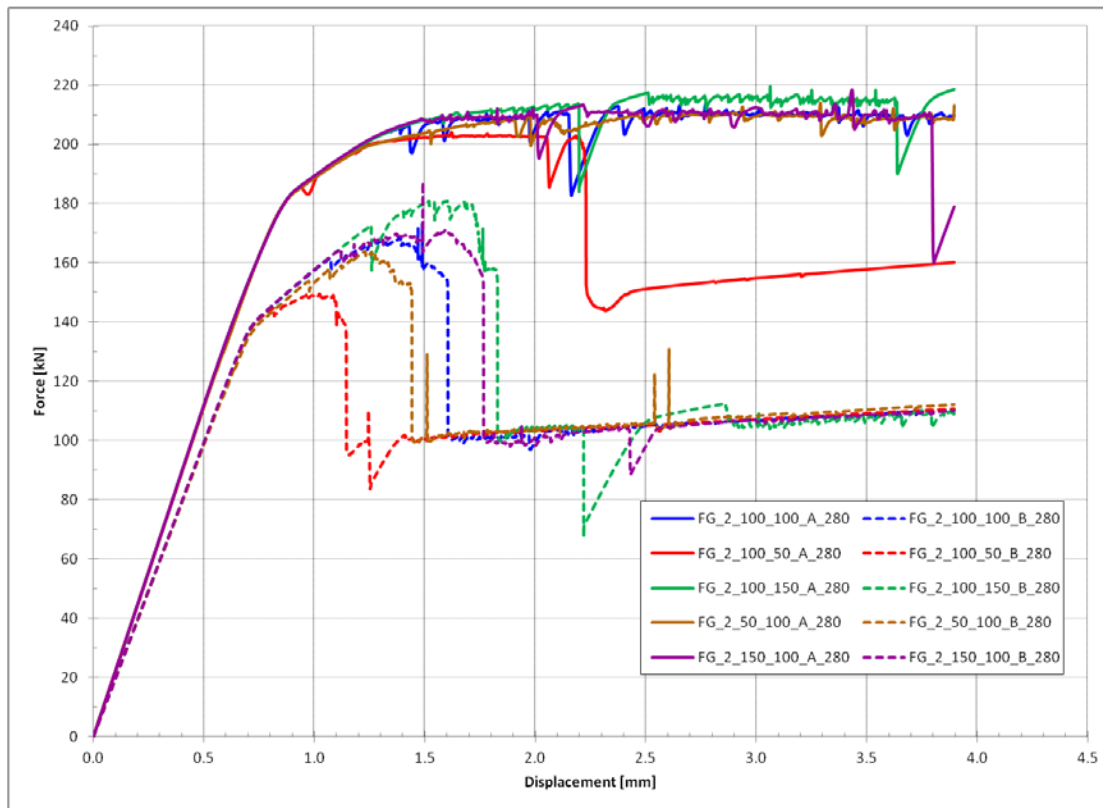
Σχήμα 4.6 : Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης για FG επίθεμα $L_p = 280$ mm, $t_{c,(A)} = 1.5$ mm και $t_{c,(B)} = 3.0$ mm, συνδυασμούς ποσοστών των ιδιοτήτων mode I,II των cohesive στοιχείων και $SR = 0.25$

Η εικόνα των αποτελεσμάτων είναι αντίστοιχη αυτής για μικρότερου μήκους επίθεμα (εδάφιο 4.2.1). Η τιμή του μέγιστου φορτίου που μπορεί να δεχτεί η κατασκευή πριν αστοχήσει είναι και εδώ μεγαλύτερη στην περίπτωση που το πάχος της διαβρωμένης περιοχής του χαλύβδινου ελάσματος είναι μικρότερο (περίπτωση $t_{c,(A)} = 1.5 \text{ mm}$ – ομάδα καμπυλών A). Τη χρονική στιγμή που εμφανίζεται το μέγιστο φορτίο, ο χάλυβας έχει ήδη διαρρεύσει και για τις δύο τιμές πάχους της διαβρωμένης περιοχής. Η ολική διαρροή του χάλυβα προηγείται της αστοχίας του κολλητικού δεσμού. Η επίδραση του mode II στην τιμή του μέγιστου φορτίου και της μετατόπισης που συμβαίνει η αστοχία είναι και πάλι πιο σημαντική έναντι αυτής του mode I.

Από την σύγκριση των διαγραμμάτων των Σχημάτων 4.6 – 4.8 με τα αντίστοιχα της περίπτωσης με μήκος επιθέματος ίσο με 180 mm (Σχήματα 4.2 – 4.4), προκύπτει ότι η αύξηση του μήκους του επιθέματος οδήγησε σε μεγαλύτερη τιμή του μέγιστου φορτίου. Ενδεικτικά, από το Σχήμα 4.2, παρατηρούμε ότι το μέγιστο φορτίο, στην περίπτωση B έχει εύρος τιμών από 140 (για το 50% του mode II – κόκκινη καμπύλη) έως 170 kN (για το 150% του mode II – πράσινη καμπύλη) ενώ από το Σχήμα 4.6 το μέγιστο φορτίο στην περίπτωση B έχει εύρος τιμών από 150 kN (για το 50% του mode II – κόκκινη καμπύλη) έως 180 kN (για το 150% του mode II – πράσινη καμπύλη). Αυξάνοντας λοιπόν το μήκος του επιθέματος κατά 55% (από 180 mm σε 280 mm) αυξήθηκε κατά 7% περίπου η τιμή του μέγιστου φορτίου.

Από τα ίδια σχήματα παρατηρούμε ότι η αστοχία της κατασκευής στην περίπτωση A, για μήκος επιθέματος 180 mm, συμβαίνει για μετατόπιση ίση με 2.7 mm (Σχήμα 4.2 – για το 100% των mode I, II - μπλε καμπύλη), ενώ για μήκος επιθέματος 280 mm για μετατόπιση ίση με 3.5 mm (Σχήμα 4.6 – για το 100% των mode I, II - μπλε καμπύλη). Αυξάνοντας λοιπόν το μήκος του επιθέματος κατά 55% αυξήθηκε η τιμή της μετατόπισης κατά την οποία συμβαίνει η αστοχία της κατασκευής, κατά 30% περίπου.

Επομένως, η μεγαλύτερη επίδραση της παραμέτρου του μήκους του επιθέματος, διατηρώντας όλες τις άλλες παραμέτρους σταθερές (πάχος διάβρωσης, λόγο ακαμψίας, ιδιότητες των cohesive στοιχείων), εντοπίζεται στην τιμή της μετατόπισης που αντιστοιχεί στην αστοχία της κατασκευής ενώ δεν συνεισέφερε ιδιαίτερα στην αύξηση του μέγιστου φορτίου.

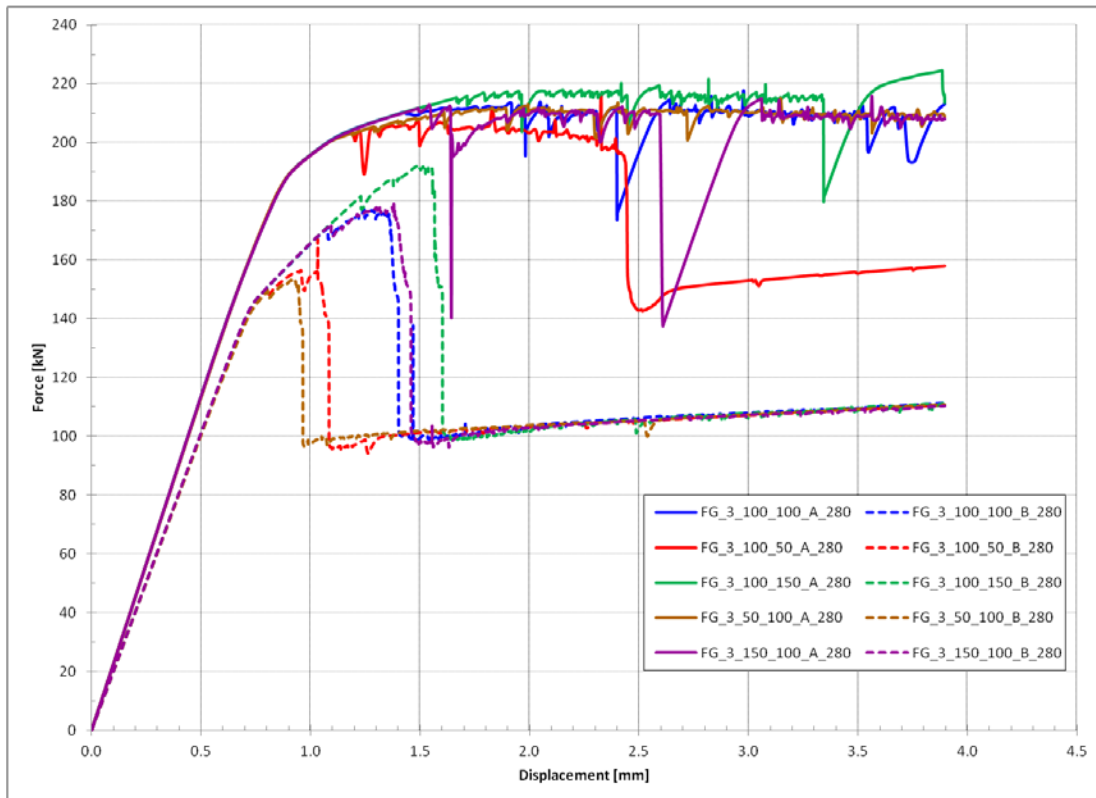


Σχήμα 4.7 : Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης για FG επίθεμα $L_p = 280$ mm, $t_{c,(A)} = 1.5$ mm και $t_{c,(B)} = 3.0$ mm, συνδυασμούς ποσοστών των ιδιοτήτων mode I,II των cohesive στοιχείων και $SR = 0.5$

Παρατηρώντας το Σχήμα 4.7 , για το 150% του mode I στην περίπτωση B η αύξηση του μέγιστου φορτίου είναι αμελητέα (μωβ καμπύλη), ενώ για το 150% του mode II (πράσινη καμπύλη) το μέγιστο φορτίο αυξάνεται κατά 9% περίπου. Για το 50% του mode I στην περίπτωση B (καφέ καμπύλη) η μείωση του μέγιστου φορτίου είναι αμελητέα, ενώ για το 50% του mode II (κόκκινη καμπύλη) η μείωση είναι ίση με 11% περίπου.

Παρατηρώντας το Σχήμα 4.8, για το 150% του mode I στην περίπτωση B η αύξηση του μέγιστου φορτίου είναι αμελητέα (μωβ καμπύλη), ενώ για το 150% του mode II (πράσινη καμπύλη) το μέγιστο φορτίο αυξάνεται κατά 9% περίπου. Για το 50% του mode I στην περίπτωση B (καφέ καμπύλη) η μείωση του μέγιστου φορτίου είναι 14%, ενώ για το 50% του mode II (κόκκινη καμπύλη) η μείωση είναι ίση με 11% περίπου. Εδώ συναντάμε για πρώτη φορά μεγαλύτερη επίδραση των ιδιοτήτων του mode I έναντι της μείωσης των ιδιοτήτων του mode II, και μάλιστα μόνο όταν αυτές μειώνονται.

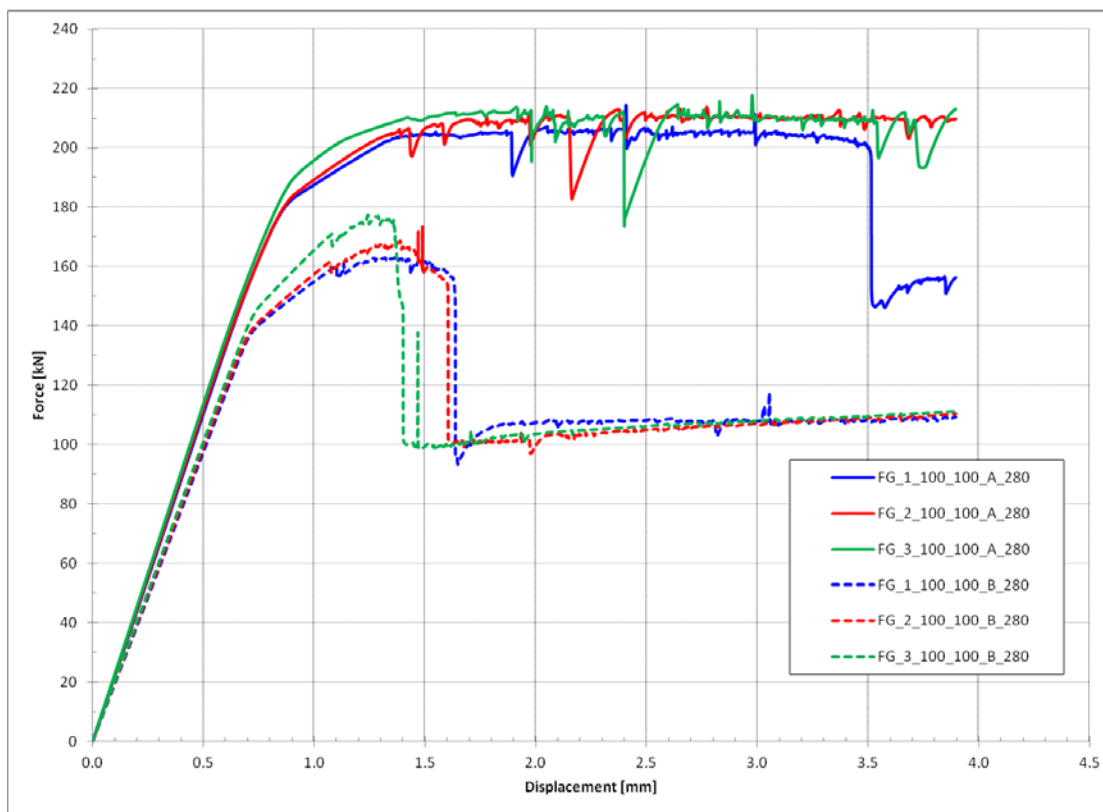
Δεν μπορεί να γίνει αντίστοιχη σύγκριση στην περίπτωση A, διότι για την συγκεκριμένη τιμή της επιβαλλόμενης φόρτισης η κατασκευή δεν έφτασε σε αστοχία, επομένως δεν είναι γνωστή η τιμή του μέγιστου φορτίου. Ωστόσο, από την γενική εικόνα των Σχημάτων 4.7 και 4.8, για την κατά 50% αύξηση ή μείωση των ιδιοτήτων των mode I και II, το μέγιστο φορτίο φαίνεται να αυξάνεται ή να μειώνεται αντίστοιχα κατά 2% περίπου.



Σχήμα 4.8 : Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης για FG επίθεμα $L_p = 280$ mm, $t_{c,(A)} = 1.5$ mm και $t_{c,(B)} = 3.0$ mm, συνδυασμούς ποσοστών των ιδιοτήτων mode I,II των cohesive στοιχείων και $SR = 0.75$

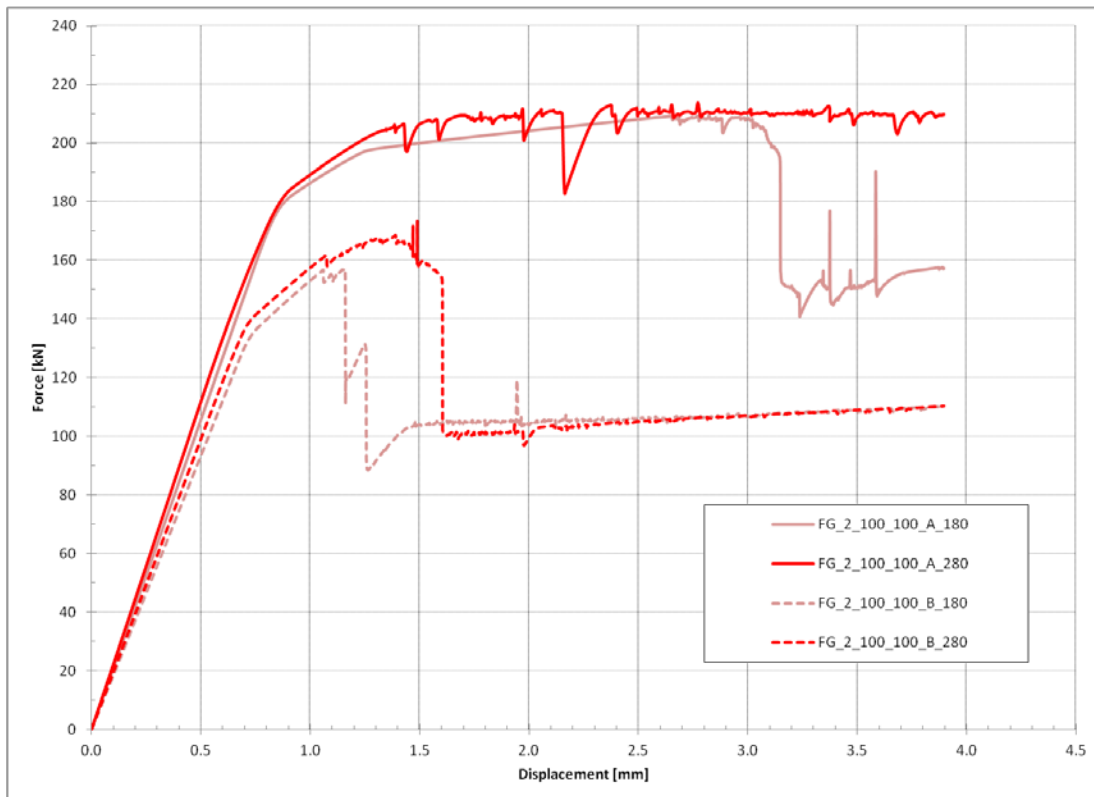
Όπως προκύπτει από το Σχήμα 4.9, το μέγιστο φορτίο και σε αυτές τις δοκιμές παραμένει σχετικά σταθερό, για το ίδιο πάχος διάβρωσης, παρά τη διαφοροποίηση του λόγου ακαμψίας. Το εύρος των τιμών του είναι από 165 kN (FG_1_100_100_B_180) έως 175 kN (FG_3_100_100_B_180) περίπου στην περίπτωση του μεγαλύτερου πάχους διάβρωσης και από 205 kN (FG_1_100_100_A_180) έως 210 kN (FG_3_100_100_A_180) στην περίπτωση του μικρότερου. Η διακύμανση δηλαδή του μέγιστου φορτίου, για το ίδιο πάχος διάβρωσης και διαφορετικό λόγο ακαμψίας, είναι 6% στην περίπτωση B (μεγάλο πάχος διάβρωσης) και 2%

στην περίπτωση A (μικρό πάχος διάβρωσης). Τα αντίστοιχα ποσοστά για επίθεμα μήκους 180 mm είναι της τάξης του 6% (βλέπε Σχήμα 4.5).



Σχήμα 4.9: Συγκεντρωτικό διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης για FG επίθεμα $L_p = 280$ mm

Στο Σχήμα 4.10 φαίνονται τα διαγράμματα δύναμης – μετατόπισης για τα δύο πάχη διάβρωσης (A, B), για το 100% των ιδιοτήτων των cohesive στοιχείων, λόγο ακαμψίας $SR = 0.50$ και μήκος επιθέματος $L_p = 180$ mm (ροζ καμπύλη) και $L_p = 280$ mm (κόκκινη καμπύλη). Παρατηρούμε ότι για την περίπτωση του μικρότερου πάχους διάβρωσης (ομάδα καμπυλών A), η αύξηση του μήκους του επιθέματος οδήγησε σε αμελητέα αύξηση του μέγιστου φορτίου. Για την περίπτωση του μεγαλύτερου πάχους διάβρωσης (ομάδα καμπυλών B), η αύξηση του μήκους του επιθέματος οδήγησε σε αύξηση του μέγιστου φορτίου ίση με 10% περίπου.



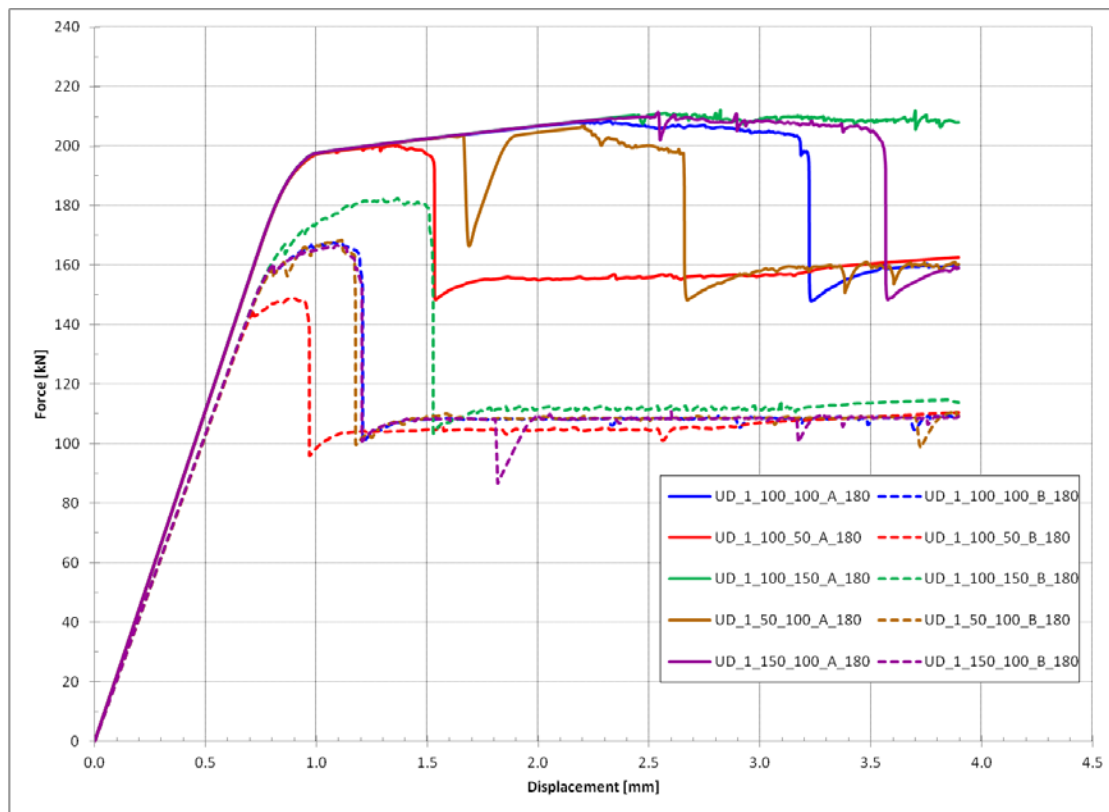
Σχήμα 4.10 : Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης για FG επίθεμα, $SR = 0.50$, $t_{c,(A)} = 1.5$ mm και $t_{c,(B)} = 3.0$ mm, και $L_p = 180$ mm, $L_p = 280$ mm

4.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ UD ΕΠΙΘΕΜΑ ΕΠΙ ΧΑΛΥΒΔΙΝΟΥ ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ

4.3.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΜΗΚΟΣ ΕΠΙΘΕΜΑΤΟΣ $L_p = 180$ mm

Στα διαγράμματα δύναμης – επιμήκυνσης των Σχημάτων 4.11 – 4.14 φαίνονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης για επίθεμα με μέτρα ελαστικότητας $E_x = 69470$ MPa και $E_y = 5000$ MPa, μήκους $L_p = 180$ mm και λόγο ακαμψίας (SR) ίσο με 0.25, 0.5 και 0.75. Η μορφή της αναπαράστασης των αποτελεσμάτων ακολουθεί την λογική του εδαφίου 4.2, δηλαδή οι καμπύλες που αποτυπώνονται με συνεχή γραμμή, αντιστοιχούν σε κάθε διάγραμμα σε πάχος διάβρωσης ίσο με 1.5 mm (A), ενώ αυτές που αποτυπώνονται με διάστικτη γραμμή σε πάχος διάβρωσης ίσο με 3.0 mm (B). Οι δύο ομάδες καμπυλών (συνεχής και διάστικτης γραμμής), περιλαμβάνουν τα αποτελέσματα που προέκυψαν με την ποσοστιαία διαφοροποίηση των ιδιοτήτων των mode I και mode II των cohesive στοιχείων, οι οποίες λήφθηκαν από τη

βιβλιογραφία (Lee, 2010) και χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων της δοκιμής αναφοράς (βλέπε εδάφιο 3.3, Πίνακα 3.9).



Σχήμα 4.11 : Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης για UD επίθεμα $L_p = 180$ mm, $t_{c,(A)} = 1.5$ mm και $t_{c,(B)} = 3.0$ mm, συνδυασμούς ποσοστών των ιδιοτήτων mode I,II των cohesive στοιχείων και $SR = 0.25$

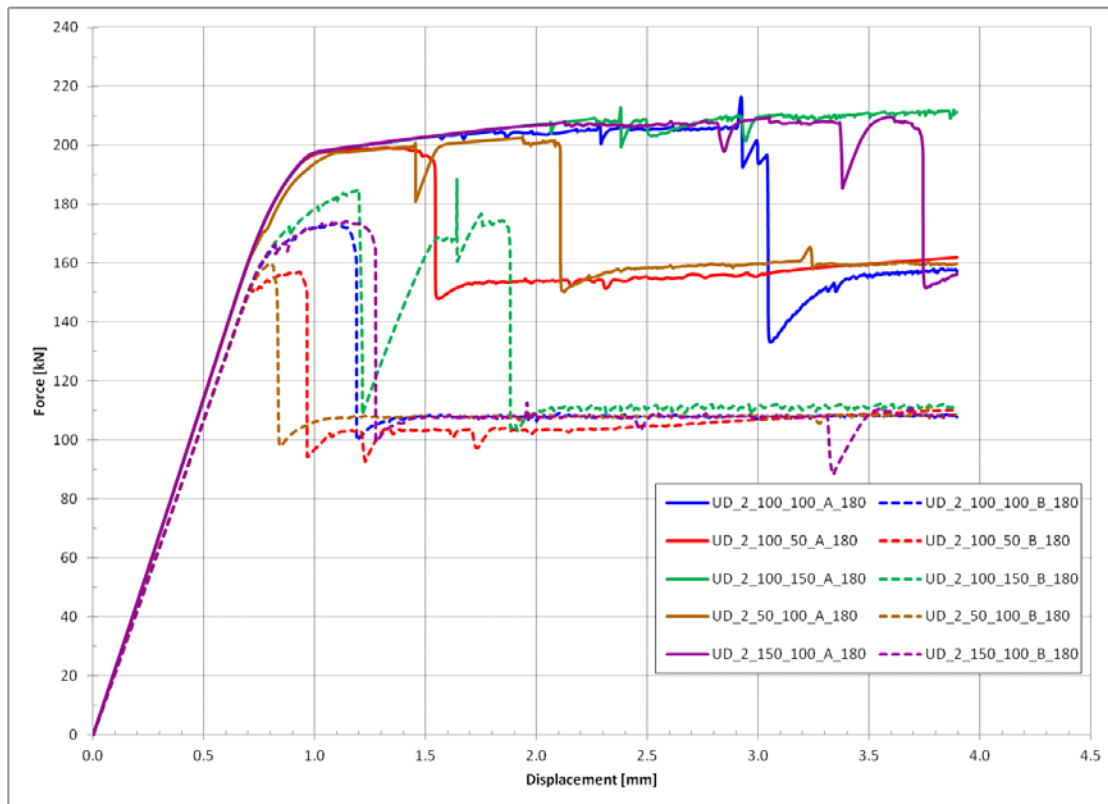
Η διαφοροποίηση των ιδιοτήτων των mode I και mode II των cohesive στοιχείων, έχει επίδραση στο μέγιστο φορτίο. Τα παρακάτω ποσοστά μείωσης και αύξησης του μέγιστου φορτίου προκύπτουν από τη μελέτη του Σχήματος 4.11. Για την περίπτωση του μικρότερου πάχους διαβρωμένης περιοχής ($t_{c,(A)} = 1.5$ mm - ομάδα καμπυλών A), η μείωση κατά 50% των δύο τιμών των ιδιοτήτων του mode I οδήγησε σε αμελητέα μείωση του μέγιστου φορτίου (καφέ καμπύλη). Η αντίστοιχη μείωση του μέγιστου φορτίου για υλικό FG ήταν 5% (Σχήμα 4.2 – καφέ καμπύλη). Η μείωση κατά 50% των δύο τιμών των ιδιοτήτων του mode II οδήγησε σε μείωση του φορτίου ίση με 5% περίπου (κόκκινη καμπύλη). Η αντίστοιχη μείωση του μέγιστου φορτίου για το υλικό FG ήταν ίση με 7% περίπου (Σχήμα 4.2 – κόκκινη καμπύλη). Παρατηρούμε ότι η επίδραση των ιδιοτήτων του mode II είναι και για αυτό το υλικό μεγαλύτερη αυτής των ιδιοτήτων

του mode I. Ωστόσο, από τα αντίστοιχα ποσοστά για τα δύο είδη υλικών, φαίνεται ότι η επίδραση του mode II στο μέγιστο φορτίο είναι μεγαλύτερη για το υλικό FG από αυτή για το υλικό UD.

Για την περίπτωση του μεγαλύτερου πάχους διαβρωμένης περιοχής ($t_{c,(B)} = 3.0 \text{ mm}$ - ομάδα καμπυλών B) η μείωση κατά 50% των δύο τιμών των ιδιοτήτων του mode I οδήγησε σε μηδενική μείωση του μέγιστου φορτίου (καφέ καμπύλη). Η αντίστοιχη μείωση του μέγιστου φορτίου για υλικό FG ήταν ίση με 3% περίπου (Σχήμα 4.2 – καφέ καμπύλη). Η μείωση κατά 50% των δύο τιμών των ιδιοτήτων του mode II οδήγησε σε μείωση του μέγιστου φορτίου ίση με 11% περίπου (κόκκινη καμπύλη). Η αντίστοιχη μείωση του μέγιστου φορτίου για υλικό FG ήταν ίση 9% περίπου (Σχήμα 4.2 - κόκκινη καμπύλη).

Η κατά 50% αύξηση τώρα των ιδιοτήτων των ιδιοτήτων τόσο του mode I όσο και του mode II στην περίπτωση A οδήγησε σε αύξηση μικρότερη του 3% που μπορεί να θεωρηθεί και αμελητέα (συνεχείς καμπύλες, μωβ και πράσινη αντίστοιχα), όπως ακριβώς συνέβη και για το υλικό FG. Η κατά 50% αύξηση των ιδιοτήτων του mode I στην περίπτωση B οδήγησε σε αμελητέα αλλαγή της τιμής του μέγιστου φορτίου ενώ η αντίστοιχη αύξηση των ιδιοτήτων του mode II οδήγησε σε αύξηση του μέγιστου φορτίου ίση με 6% περίπου (διάστικτες καμπύλες, μωβ και πράσινη αντίστοιχα). Η αντίστοιχη αύξηση για το υλικό FG ήταν 9% περίπου (Σχήμα 4.2). Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι η διαφορά των μέτρων ελαστικότητας του σύνθετου επιθέματος δεν επηρεάζει σημαντικά την τιμή του μέγιστου φορτίου που μπορεί να παραλάβει η κατασκευή.

Η διαφοροποίηση αυτή των ιδιοτήτων των mode I και mode II των cohesive στοιχείων όμως έχει επίσης επίδραση στην τιμή της επιβαλλόμενης μετατόπισης (u_x) όπου συμβαίνει η αστοχία. Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 4.11 φαίνεται η επίδραση του mode II στη μετατόπιση να είναι μεγαλύτερη της επίδρασης του mode I. Ενδεικτικά, για την ομάδα καμπυλών B (μεγάλο πάχος διάβρωσης), η τιμή της μετατόπισης που συμβαίνει η αστοχία δεν αυξάνεται για το 150% των ιδιοτήτων του mode I (μωβ καμπύλη) ενώ αυξάνεται κατά 30% περίπου για το 150% των ιδιοτήτων του mode II (πράσινη καμπύλη). Μάλιστα, όσο αυξάνεται ο λόγος ακαμψίας, η επίδραση της αύξησης του mode II είναι τέτοια ώστε για τη συγκεκριμένη τιμή της επιβαλλόμενης φόρτισης ($u_x = 0.95 \text{ mm}$) η κατασκευή να μην φτάνει στην αστοχία, πράγμα που φαίνεται στα Σχήματα 4.12 και 4.13 για την περίπτωση A.



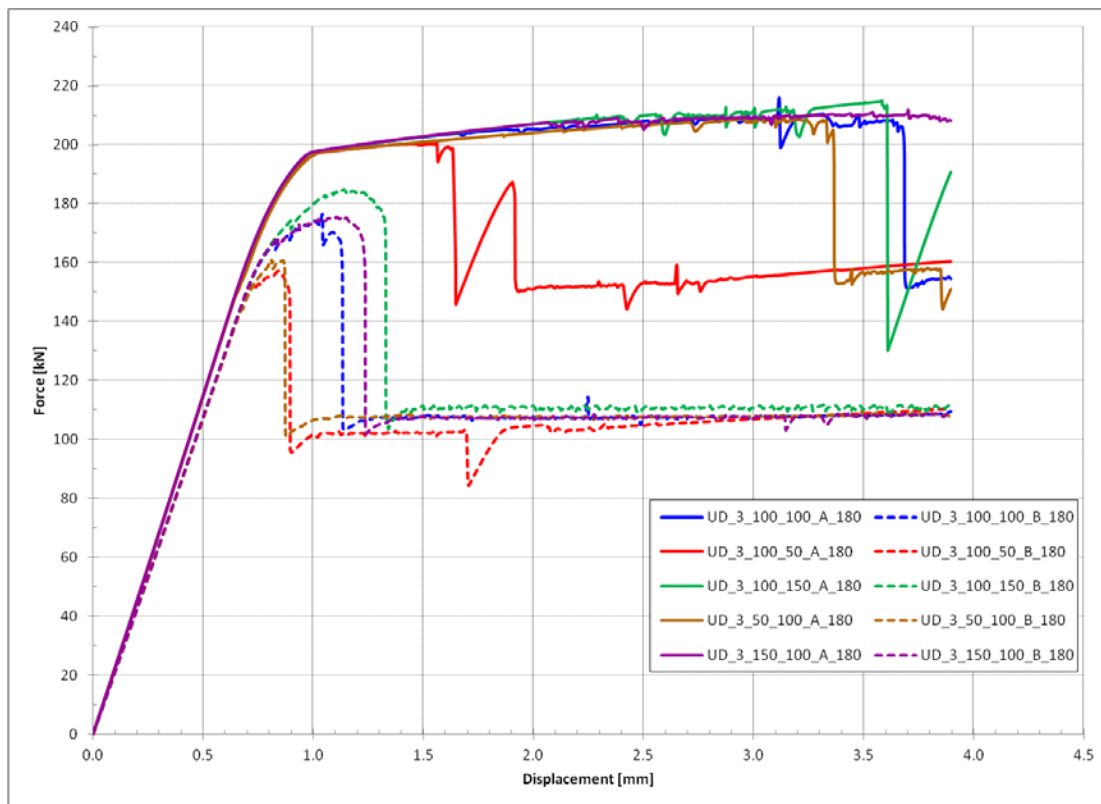
Σχήμα 4.12 : Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης για UD επίθεμα $L_p = 180$ mm, $t_{c,(A)} = 1.5$ mm και $t_{c,(B)} = 3.0$ mm, συνδυασμούς ποσοστών των ιδιοτήτων mode I,II των cohesive στοιχείων και $SR = 0.50$

Παρατηρώντας το Σχήμα 4.12, για το 150% του mode I στην περίπτωση B η αύξηση του μέγιστου φορτίου είναι αμελητέα (μωβ καμπύλη), ενώ για το 150% του mode II (πράσινη καμπύλη) το μέγιστο φορτίο αυξάνεται κατά 6% περίπου. Για το 50% του mode I στην περίπτωση B (καφέ καμπύλη) η μείωση του μέγιστου φορτίου είναι 9%, ενώ για το 50% του mode II (κόκκινη καμπύλη) η μείωση είναι ίση με 11% περίπου.

Παρατηρώντας το Σχήμα 4.13, για το 150% του mode I στην περίπτωση B η αύξηση του μέγιστου φορτίου είναι αμελητέα (μωβ καμπύλη), ενώ για το 150% του mode II (πράσινη καμπύλη) το μέγιστο φορτίο αυξάνεται κατά 6% περίπου. Για το 50% του mode I στην περίπτωση B (καφέ καμπύλη) η μείωση του μέγιστου φορτίου είναι ίση με 9% περίπου, όση και για το 50% του mode II (κόκκινη καμπύλη).

Δεν μπορεί να γίνει αντίστοιχη σύγκριση στην περίπτωση A, διότι για την συγκεκριμένη τιμή της επιβαλλόμενης φόρτισης η κατασκευή δεν έφτασε σε αστοχία σε όλες τις δοκιμές, επομένως δεν είναι γνωστή η τιμή του μέγιστου φορτίου. Ωστόσο, για τις δοκιμές που είναι γνωστή, οι

διαφορές της τιμής του μέγιστου φορτίου από αυτήν για το 100% των ιδιοτήτων των cohesive στοιχείων είναι μικρότερες του 5%.

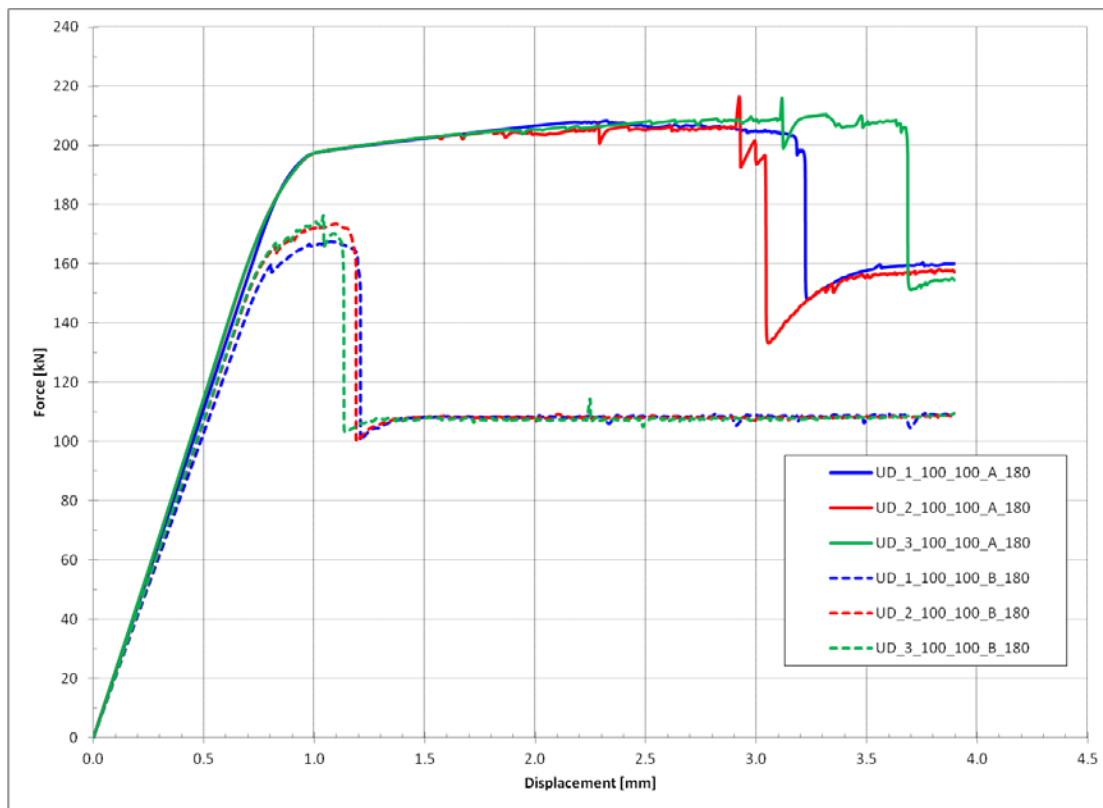


Σχήμα 4.13 : Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης για UD επίθεμα $L_p = 180$ mm, $t_{c,(A)} = 1.5$ mm και $t_{c,(B)} = 3.0$ mm, συνδυασμούς ποσοστών των ιδιοτήτων mode I,II των cohesive στοιχείων και $SR = 0.75$

Επομένως, για σχεδόν τετραπλάσιο μέτρο ελαστικότητας του σύνθετου επιθέματος στη x διεύθυνση και υποτετραπλάσιο στην y διεύθυνση, οι διαφορές στην τιμή του μέγιστου φορτίου είναι το πολύ 10% περίπου. Η ουσιαστική διαφορά έγκειται στον τρόπο εισαγωγής της κατασκευής στην πλαστική περιοχή και τις μεγαλύτερες τιμές των μετατοπίσεων μέχρι την αστοχία.

Από τα διαγράμματα του Σχήματος 4.14 παρατηρώντας την ομάδα καμπυλών B (μεγαλύτερο πάχος διάβρωσης), βλέπουμε ότι ο διπλασιασμός και τριπλασιασμός του πάχους του επιθέματος (αύξηση του λόγου ακαμψίας) προκαλεί ελάχιστη αύξηση στο μέγιστο φορτίο (αύξηση 5% περίπου) και στην τιμή της μετατόπισης που συμβαίνει η αστοχία. Στην περίπτωση

μικρότερου πάχους διάβρωσης (ομάδα καμπυλών A) υπάρχει διαφοροποίηση όχι στο μέγιστο φορτίο αλλά στην τιμή της μετατόπισης αστοχίας.

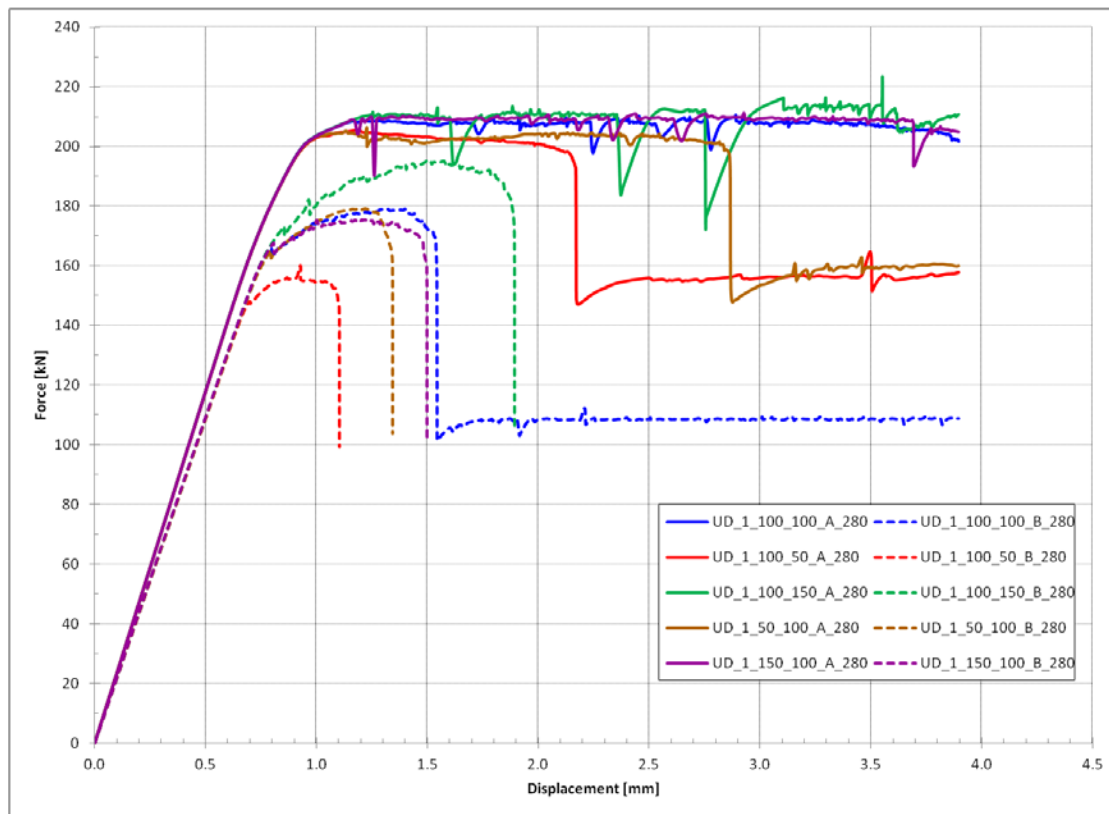


Σχήμα 4.14: Συγκεντρωτικό διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης για UD επίθεμα $L_p = 180\text{mm}$

4.3.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΜΗΚΟΣ ΕΠΙΘΕΜΑΤΟΣ $L_p = 280\text{ mm}$

Στα διαγράμματα δύναμης – μετατόπισης των Σχημάτων 4.15 – 4.18 φαίνονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης για επίθεμα με μέτρα ελαστικότητας $E_x = 69470\text{ MPa}$ και $E_y = 5000\text{ MPa}$, μήκους $L_p = 280\text{ mm}$ και λόγο ακαμψίας (SR) ίσο με 0.25, 0.5 και 0.75. Ο τρόπος αναπαράστασης των καμπυλών είναι αντίστοιχος με αυτόν που επιλέχθηκε στο εδάφιο 4.3.1. Επομένως, οι καμπύλες που αποτυπώνονται με συνεχή γραμμή, αντιστοιχούν σε κάθε διάγραμμα σε πάχος διάβρωσης ίσο με 1.5 mm (A), ενώ αυτές που αποτυπώνονται με διάστικτη γραμμή σε πάχος διάβρωσης ίσο με 3.0 mm (B). Οι δύο ομάδες καμπυλών (συνεχής και διάστικτης γραμμής), περιλαμβάνουν τα αποτελέσματα που προέκυψαν με την ποσοστιαία διαφοροποίηση των ιδιοτήτων των mode I και mode II των cohesive στοιχείων, οι οποίες

λήφθηκαν από τη βιβλιογραφία (Lee, 2010) και χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων της δοκιμής αναφοράς.



Σχήμα 4.15 : Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης για UD επίθεμα $L_p = 280$ mm, $t_{c,(A)} = 1.5$ mm και $t_{c,(B)} = 3.0$ mm, συνδυασμούς ποσοστών των ιδιοτήτων mode I,II των cohesive στοιχείων και $SR = 0.25$

Η εικόνα των αποτελεσμάτων είναι αντίστοιχη αυτής για μικρότερου μήκους επίθεμα (εδάφιο 4.3.1). Η τιμή του μέγιστου φορτίου που μπορεί να δεχτεί η κατασκευή πριν αστοχήσει είναι και εδώ μεγαλύτερη στην περίπτωση που το πάχος της διαβρωμένης περιοχής του χαλύβδινου ελάσματος είναι μικρότερο (περίπτωση $t_{c,(A)} = 1.5$ mm – ομάδα καμπυλών A). Τη χρονική στιγμή που εμφανίζεται το μέγιστο φορτίο, ο χάλυβας έχει ήδη διαρρεύσει και για τις δύο τιμές πάχους της διαβρωμένης περιοχής. Η ολική διαρροή του χάλυβα προηγείται της αστοχίας του κολλητικού δεσμού. Η επίδραση του mode II στην τιμή του μέγιστου φορτίου και της μετατόπισης που συμβαίνει η αστοχία είναι και πάλι πιο σημαντική έναντι αυτής του mode I.

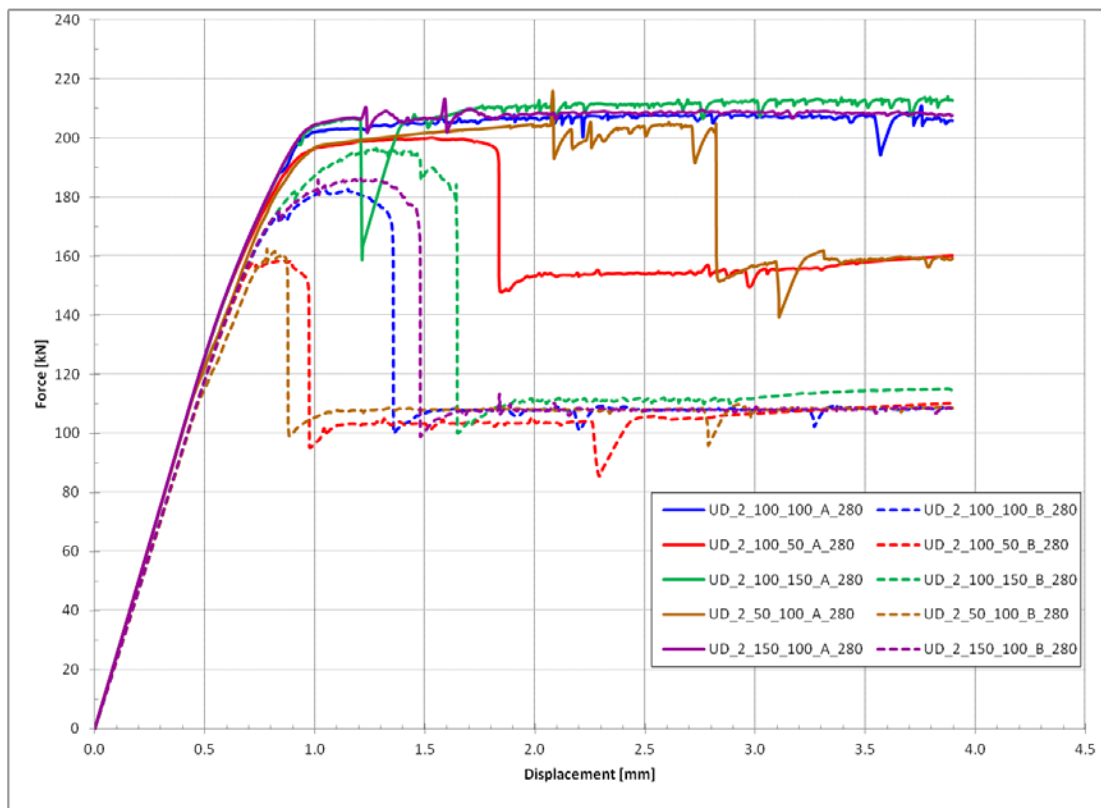
Από την σύγκριση των διαγραμμάτων των Σχημάτων 4.15 – 4.17 με τα αντίστοιχα της περίπτωσης με μήκος επιθέματος ίσο με 180 mm (Σχήματα 4.11 – 4.13), προκύπτει ότι η

αύξηση του μήκους του επιθέματος οδήγησε σε μεγαλύτερη τιμή του μέγιστου φορτίου. Ενδεικτικά, από το Σχήμα 4.11, παρατηρούμε ότι το μέγιστο φορτίο, στην περίπτωση B έχει εύρος τιμών από 150 kN (για το 50% του mode II – κόκκινη καμπύλη) έως 180 kN (για το 150% του mode II – πράσινη καμπύλη) ενώ από το Σχήμα 4.15 το μέγιστο φορτίο στην περίπτωση B έχει εύρος τιμών από 155 kN (για το 50% του mode II – κόκκινη καμπύλη) έως 195 kN (για το 150% του mode II – πράσινη καμπύλη). Αυξάνοντας λοιπόν το μήκος του επιθέματος κατά 55% (από 180 mm σε 280 mm) αυξήθηκε κατά 3% έως 8% περίπου η τιμή του μέγιστου φορτίου.

Για τη συγκεκριμένη τιμή της επιβαλλόμενης φόρτισης ($u_x = 0.95$ mm), η κατασκευή με πάχος διάβρωσης ίσο με 1.5 mm, δεν φτάνει στην αστοχία (ομάδες καμπυλών A) για τους περισσότερους συνδυασμούς των ιδιοτήτων των mode I, II των cohesive στοιχείων. Επομένως, δεν είναι δυνατή η αντίστοιχη σύγκριση της επίδρασης των ιδιοτήτων αυτών (ομάδα καμπυλών A). Ωστόσο, από την γενική εικόνα των Σχημάτων 4.14 έως και 4.16, για την κατά 50% αύξηση ή μείωση των ιδιοτήτων των mode I και II, το μέγιστο φορτίο φαίνεται να αυξάνεται ή να μειώνεται αντίστοιχα κατά 2% περίπου.

Από τα ίδια σχήματα παρατηρούμε ότι η αστοχία της κατασκευής στην περίπτωση B, για μήκος επιθέματος 180 mm, συμβαίνει για μετατόπιση ίση με 1.2 mm (Σχήμα 4.11 – για το 100% των mode I, II - μπλε καμπύλη), ενώ για μήκος επιθέματος 280 mm για μετατόπιση ίση με 1.6 mm (Σχήμα 4.15 – για το 100% των mode I, II - μπλε καμπύλη). Αυξάνοντας λοιπόν το μήκος του επιθέματος κατά 55% αυξήθηκε η τιμή της μετατόπισης κατά την οποία συμβαίνει η αστοχία της κατασκευής, κατά 33% περίπου.

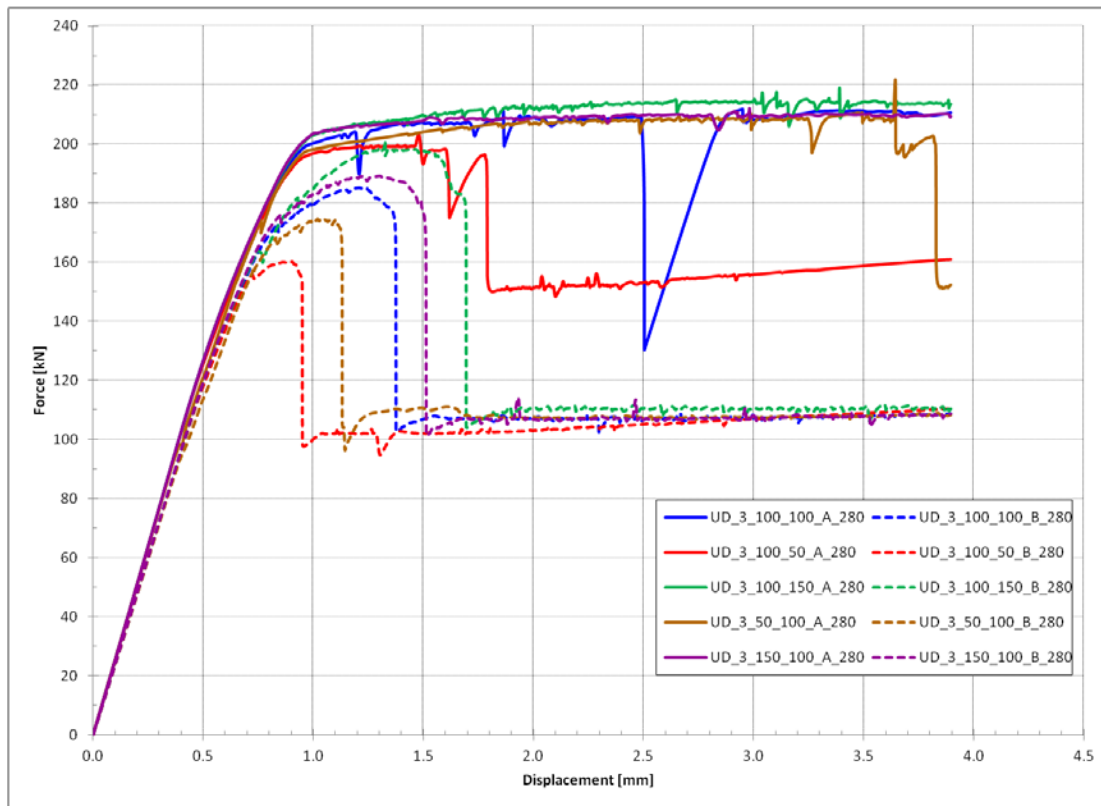
Επομένως, και πάλι η μεγαλύτερη επίδραση της παραμέτρου του μήκους του επιθέματος, διατηρώντας όλες τις άλλες παραμέτρους σταθερές (πάχος διάβρωσης, λόγο ακαμψίας, ιδιότητες των cohesive στοιχείων), εντοπίζεται στην τιμή της μετατόπισης που αντιστοιχεί στην αστοχία της κατασκευής ενώ δεν συνεισέφερε ιδιαίτερα στην αύξηση του μέγιστου φορτίου.



Σχήμα 4.16 : Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης για UD επίθεμα $L_p = 280$ mm, $t_{c,(A)} = 1.5$ mm και $t_{c,(B)} = 3.0$ mm, συνδυασμούς ποσοστών των ιδιοτήτων mode I,II των cohesive στοιχείων και $SR = 0.50$

Παρατηρώντας το Σχήμα 4.16, για το 150% του mode I στην περίπτωση B η μεταβολή της τιμής του μέγιστου φορτίου είναι 2% (μωβ καμπύλη), ενώ για το 150% του mode II (πράσινη καμπύλη) το μέγιστο φορτίο αυξάνεται κατά 8% περίπου. Για το 50% του mode I στην περίπτωση B (καφέ καμπύλη) η μείωση της τιμής του μέγιστου φορτίου είναι 11% περίπου, όση και για το 50% του mode II (κόκκινη καμπύλη).

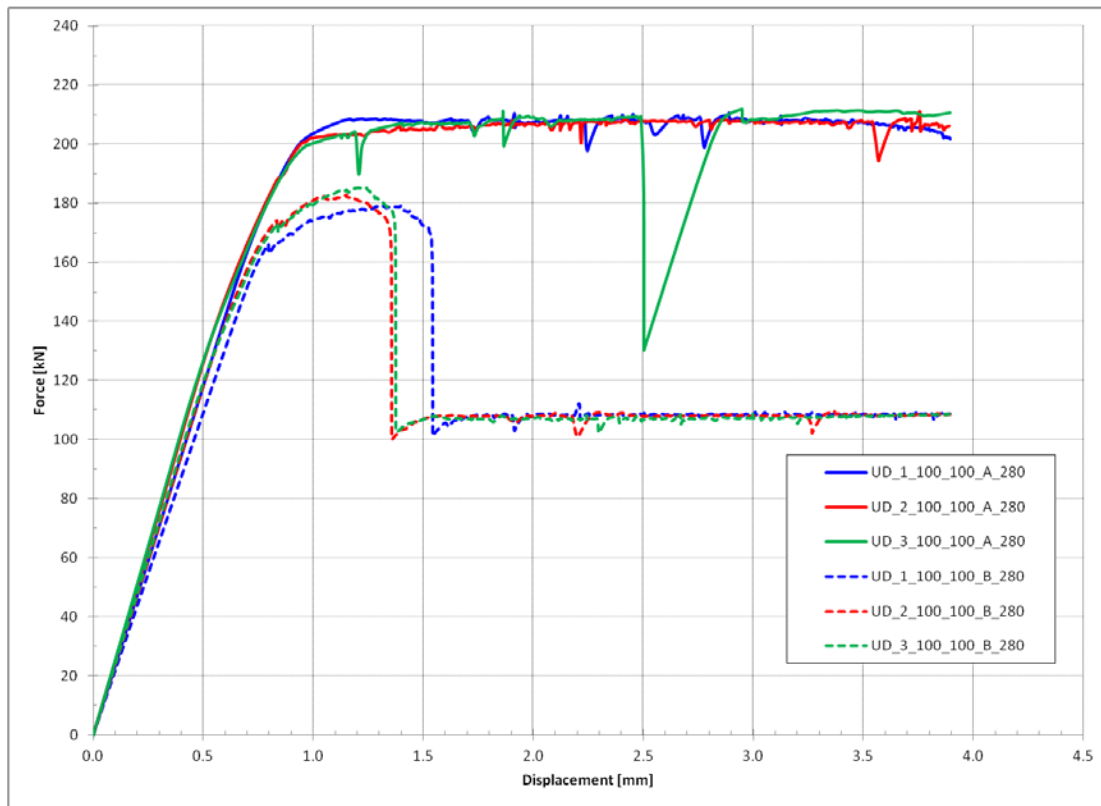
Παρατηρώντας το Σχήμα 4.17, για το 150% του mode I στην περίπτωση B η αύξηση του μέγιστου φορτίου είναι ίση με 3% περίπου (μωβ καμπύλη), ενώ για το 150% του mode II (πράσινη καμπύλη) το μέγιστο φορτίο αυξάνεται κατά 8% περίπου. Για το 50% του mode I στην περίπτωση B (καφέ καμπύλη) η μείωση του μέγιστου φορτίου είναι 5%, ενώ για το 50% του mode II (κόκκινη καμπύλη) η μείωση είναι ίση με 14% περίπου.



Σχήμα 4.17 : Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης για UD επίθεμα $L_p = 280$ mm, $t_{c,(A)} = 1.5$ mm και $t_{c,(B)} = 3.0$ mm, συνδυασμούς ποσοστών των ιδιοτήτων mode I,II των cohesive στοιχείων και $SR = 0.75$

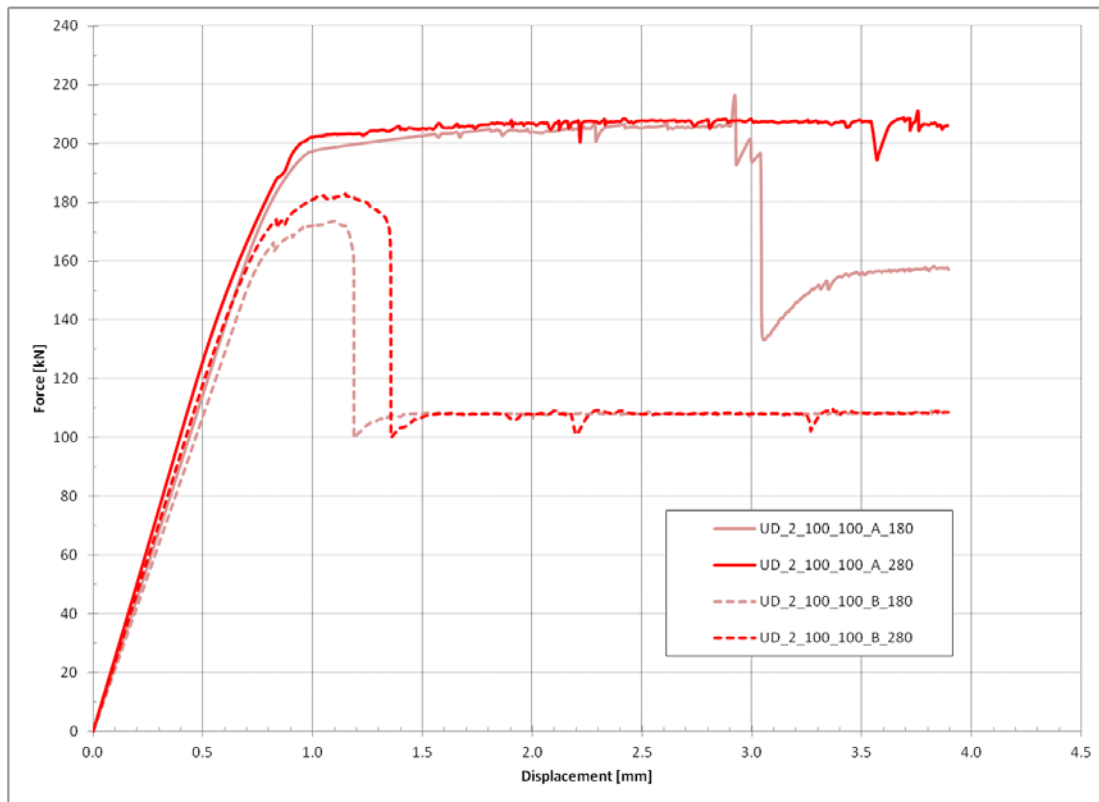
Όπως προκύπτει από το Σχήμα 4.18, το μέγιστο φορτίο και σε αυτές τις δοκιμές παραμένει σχετικά σταθερό, για το ίδιο πάχος διάβρωσης, παρά τη διαφοροποίηση του λόγου ακαμψίας. Το εύρος των τιμών του είναι από 180 kN (UD_1_100_100_B_180) έως 185 kN (UD_3_100_100_B_180) περίπου στην περίπτωση του μεγαλύτερου πάχους διάβρωσης ενώ στην περίπτωση του μικρότερου πάχους διάβρωσης δεν μπορεί να γίνει σύγκριση. Η διακύμανση δηλαδή του μέγιστου φορτίου, για το ίδιο πάχος διάβρωσης και διαφορετικό λόγο ακαμψίας, είναι της τάξης του 2% στην περίπτωση B (μεγάλο πάχος διάβρωσης). Τα αντίστοιχα ποσοστά για επίθεμα μήκους 180 mm είναι της τάξης του 5% (βλέπε Σχήμα 4.14).

Επομένως, η μεγαλύτερη επίδραση της παραμέτρου του μήκους του επιθέματος, διατηρώντας όλες τις άλλες παραμέτρους σταθερές (πάχος διάβρωσης, λόγο ακαμψίας, ιδιότητες των cohesive στοιχείων) και πάλι εντοπίζεται στην τιμή της μετατόπισης που αντιστοιχεί στην αστοχία της κατασκευής.



Σχήμα 4.18: Συγκεντρωτικό διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης για UD επίθεμα $L_p = 280\text{mm}$

Στο Σχήμα 4.19 φαίνονται τα διαγράμματα δύναμης – μετατόπισης για τα δύο πάχη διάβρωσης (A, B), για το 100% των ιδιοτήτων των cohesive στοιχείων, λόγω ακαμψίας $SR = 0.50$ και μήκος επιθέματος $L_p = 180\text{ mm}$ (ροζ καμπύλη) και $L_p = 280\text{ mm}$ (κόκκινη καμπύλη). Παρατηρούμε ότι για την περίπτωση του μικρότερου πάχους διάβρωσης (ομάδα καμπυλών A), η αύξηση του μήκους του επιθέματος οδήγησε σε αμελητέα αύξηση του μέγιστου φορτίου. Για την περίπτωση του μεγαλύτερου πάχους διάβρωσης (ομάδα καμπυλών B), η αύξηση του μήκους του επιθέματος οδήγησε σε αύξηση του μέγιστου φορτίου ίση με 6% περίπου. Η αντίστοιχη αύξηση του μέγιστου φορτίου για την περίπτωση A και FG επίθεμα ήταν επίσης αμελητέα, ενώ για την περίπτωση B ήταν 10% (Σχήμα 4.10)



Σχήμα 4.19 : Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης για UD επίθεμα, $SR = 0.50$, $t_{c,(A)} = 1.5$ mm και $t_{c,(B)} = 3.0$ mm, και $L_p = 180$ mm, $L_p = 280$ mm

4.4 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΦΟΡΤΙΩΝ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

Στον Πίνακα 4.2 φαίνονται ομαδοποιημένα τα αποτελέσματα των φορτίων που προέκυψαν για τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν στην παραμετρική μελέτη, με το 100% των ιδιοτήτων των cohesive στοιχείων. Η κατηγοριοποίηση στις γραμμές του πίνακα γίνεται όπως περιγράφεται στο εδάφιο 4.1. Οι στήλες του πίνακα περιλαμβάνουν :

- οι πρώτες δύο από αριστερά το φορτίο για την τιμή του οποίου ξεκινάει η αποκόλληση του επιθέματος ($F_{crack, initiation}$) σε kN και την αντίστοιχη τιμή της μετατόπισης ($U_x, F_{cr.in.}$) σε mm. Το φορτίο αυτό εξάγεται από το πρόγραμμα. Μέσω της δυνατότητας που δίνει το ANSYS να εποπτεύει ο χρήστης την κατάσταση επαφής (contact status) των υλικών της κατασκευής, εντοπίζεται το χρονικό βήμα (substep) κατά το οποίο συμβαίνει η έναρξη της αποκόλλησης του επιθέματος και καταγράφεται το φορτίο και η τιμή της μετατόπισης που αντιστοιχεί σε αυτό το βήμα

- οι επόμενες δύο, το μέγιστο φορτίο της κατασκευής, σύνθετο επίθεμα – χαλύβδινο έλασμα, (F_{max}) σε kN και την αντίστοιχη τιμή της μετατόπισης ($U_{x, Fmax}$) σε mm
- οι τελευταίες δύο, το φορτίο αστοχίας της κατασκευής ($F_{failure}$) σε kN και την αντίστοιχη τιμή της μετατόπισης ($U_{x, Ffail.}$) σε mm. Ως φορτίο αστοχίας της κατασκευής ορίζεται εδώ η τιμή του φορτίου για την οποία έχει διαρρεύσει ο χάλυβας, μιας και η διαρροή του χάλυβα προηγείται της ολικής αποκόλλησης του επιθέματος (εποπτεία μέσω του αντίστοιχου εργαλείου του προγράμματος των τάσεων Von Mises)

Πίνακας 4.2: Συγκεντρωτικός πίνακας φορτίων

	SR	t_{cor} / t_{st}	L [mm]	$F_{crack,initiation}$ [kN]	$U_{x, Fcr.in.}$ [mm]	F_{max} [kN]	$U_{x, Fmax}$ [mm]	$F_{failure}$ [kN]	$U_{x, Ffail.}$ [mm]
FG	0.25	0.25	180	203	2.03	204	2.48	197	2.71
			280	202	1.33	214	2.41	202	3.49
		0.50	180	152	1.10	161	1.21	153	1.48
			280	158	1.10	163	1.37	158	1.60
	0.50	0.25	180	209	2.65	209	2.82	204	3.08
			280	205	1.34	214	2.77	---	---
		0.50	180	155	1.06	157	1.16	131	1.25
			280	162	1.07	173	1.49	157	1.57
	0.75	0.25	180	212	3.00	214	3.64	---	---
			280	210	1.45	218	2.98	---	---
		0.50	180	160	1.02	162	1.01	148	1.19
			280	169	1.08	177	1.24	175	1.35
UD	0.25	0.25	180	208	2.14	208	2.32	204	3.17
			280	208	1.17	211	2.89	---	---
		0.50	180	158	0.80	168	1.08	165	1.18
			280	164	0.80	179	1.31	172	1.52
	0.50	0.25	180	203	1.56	216	2.92	197	3.04
			280	188	0.84	211	3.76	---	---
		0.50	180	165	0.82	174	1.10	171	1.15
			280	174	0.83	183	1.15	174	1.34
	0.75	0.25	180	203	1.56	216	3.12	206	3.67
			280	110	0.43	212	2.95	---	---
		0.50	180	166	0.83	176	1.04	170	1.09
			280	112	0.47	185	1.21	178	1.35

Κάποια κελιά των δύο τελευταίων στηλών δεν περιέχουν τιμές, διότι η επιβαλλόμενη φόρτιση, η οποία ήταν ίδια σε όλες τις δοκιμές και ίση με επιβαλλόμενη επιμήκυνση τιμής $u_x = 0.95$ mm, δεν οδήγησε σε αστοχία της κατασκευής.

Στον Πίνακα 4.3 φαίνεται η ποσοστιαία σύγκριση των αποτελεσμάτων, ως προς το μήκος του σύνθετου επιθέματος, των μεγεθών του Πίνακα 4.2. Ως τιμές αναφοράς χρησιμοποιήθηκαν αυτές που αντιστοιχούν στο μήκος επιθέματος $L_p = 180$ mm και συγκρίθηκαν με αυτές για μήκος επιθέματος $L_p = 280$ mm. Χωρίς πρόσημο είναι η ποσοστιαία αύξηση των τιμών αναφοράς και με αρνητικό πρόσημο η ποσοστιαία μείωσή τους. Μικρές θεωρούμε τις ποσοστιαίες διαφορές μέχρι 10% (απεικονίζονται με πράσινο), μεσαίες από 10% έως και 30% (απεικονίζονται με πορτοκαλί) και μεγάλες από 30% και πλέον (απεικονίζονται με κόκκινο).

Πίνακας 4.3: Επίδραση του μήκους του επιθέματος – ποσοστιαία σύγκριση

	SR	t_{cor} / t_{st}	L [mm]	$F_{crack,initiation}$	$U_{x, Fcr.in.}$	F_{max}	$U_{x, Fmax}$	$F_{failure}$	$U_{x, Ffail.}$
FG	0.25	0.25	180	0%	-34%	5%	-3%	3%	29%
			280						
		0.50	180	4%	1%	1%	13%	3%	8%
			280						
	0.50	0.25	180	-2%	-49%	2%	-2%	-	-
			280						
		0.50	180	4%	1%	10%	29%	19%	26%
			280						
	0.75	0.25	180	-1%	-52%	2%	-18%	-	-
			280						
		0.50	180	6%	6%	10%	22%	18%	14%
			280						
UD	0.25	0.25	180	0%	-45%	1%	24%	-	-
			280						
		0.50	180	4%	-1%	7%	22%	4%	29%
			280						
	0.50	0.25	180	-7%	-46%	-2%	28%	-	-
			280						
		0.50	180	6%	1%	5%	5%	2%	16%
			280						
	0.75	0.25	180	-46%	-73%	-2%	-5%	-	-
			280						
		0.50	180	-32%	-43%	5%	16%	4%	24%
			280						

Παρατηρείται ότι η αλλαγή του μήκους του επιθέματος έχει μικρή επίδραση στο μέγιστο φορτίο και στο φορτίο αστοχίας, με εξαίρεση δύο περιπτώσεις που έχει μεσαία, για υλικό FG, πάχος διάβρωσης $t_{c,(B)} = 3.0$ mm και λόγο ακαμψίας 0.50 και 0.75. Η επίδρασή του στο φορτίο αρχικής αποκόλλησης του επιθέματος είναι μικρή, με εξαίρεση δύο περιπτώσεις για υλικό UD και λόγο ακαμψίας 0.75 που έχει μεγάλη, για πάχος διάβρωσης $t_{c,(A)} = 1.5$ mm και $t_{c,(B)} = 3.0$ mm. Η μεγαλύτερη επίδραση του μήκους του επιθέματος αφορά στην μετατόπιση, στην οποία παρουσιάζονται τα φορτία που μελετώνται, όπου παρατηρούνται κατά πλειοψηφία μεσαίες και μεγάλες ποσοστιαίες διαφορές.

Στον Πίνακα 4.4 φαίνεται η ποσοστιαία σύγκριση των αποτελεσμάτων, ως προς τα διαφορετικά μέτρα ελαστικότητας του υλικού από το οποίο αποτελείται το σύνθετο επίθεμα, των μεγεθών του Πίνακα 4.2. Ως τιμές αναφοράς χρησιμοποιήθηκαν αυτές που αντιστοιχούν στο υλικό επιθέματος FG και συγκρίθηκαν με αυτές για υλικό επιθέματος UD. Χωρίς πρόσημο είναι η ποσοστιαία αύξηση των τιμών αναφοράς και με αρνητικό πρόσημο η ποσοστιαία μείωσή τους. Μικρές και πάλι θεωρούμε τις ποσοστιαίες διαφορές μέχρι 10% (απεικονίζονται με πράσινο), μεσαίες από 10% έως και 30% (απεικονίζονται με πορτοκαλί) και μεγάλες από 50% και πλέον (απεικονίζονται με κόκκινο).

Παρατηρείται ότι η αύξηση του μέτρου ελαστικότητας του υλικού του σύνθετου επιθέματος στη x διεύθυνση ($E_{x,(UD)} \cong 3.5 * E_{x,(FG)}$) και η ταυτόχρονη μείωσή του στην y διεύθυνση ($E_{y,(UD)} = E_{y,(FG)} / 4$), έχει μικρή επίδραση στο φορτίο της αρχικής αποκόλλησης του επιθέματος και για τις δύο τιμές του πάχους της διαβρωμένης περιοχής και για τα δύο μήκη επιθέματος που ελέγχθηκαν. Σημαντικά μεγάλη, όμως, είναι η επίδρασή του για λόγο ακαμψίας ίσο με 0.75, και για τα δύο πάχη της διαβρωμένης περιοχής, για επίθεμα μήκους 280 mm.

Η αλλαγή αυτή των μέτρων ελαστικότητας έχει μεσαία και μεγάλη επίδραση στην τιμή της μετατόπισης όπου εμφανίζεται το φορτίο αρχικής αποκόλλησης και για τα δύο πάχη διάβρωσης και για τα δύο μήκη επιθέματος και για τους τρεις λόγους ακαμψίας.

Όσον αφορά στην επίδραση των μέτρων ελαστικότητας στην τιμή του μέγιστου φορτίου που μπορεί να αναλάβει η κατασκευή, παρατηρείται μικρή επίδραση για όλες τις περιπτώσεις, πέραν δύο περιπτώσεων που η επίδραση είναι οριακά μεσαία. Στην τιμή της μετατόπισης στην οποία αντιστοιχεί το μέγιστο φορτίο, η επίδραση είναι γενικά μικρή και για τις περιπτώσεις του μεγαλύτερου μήκους επιθέματος, μεσαία.

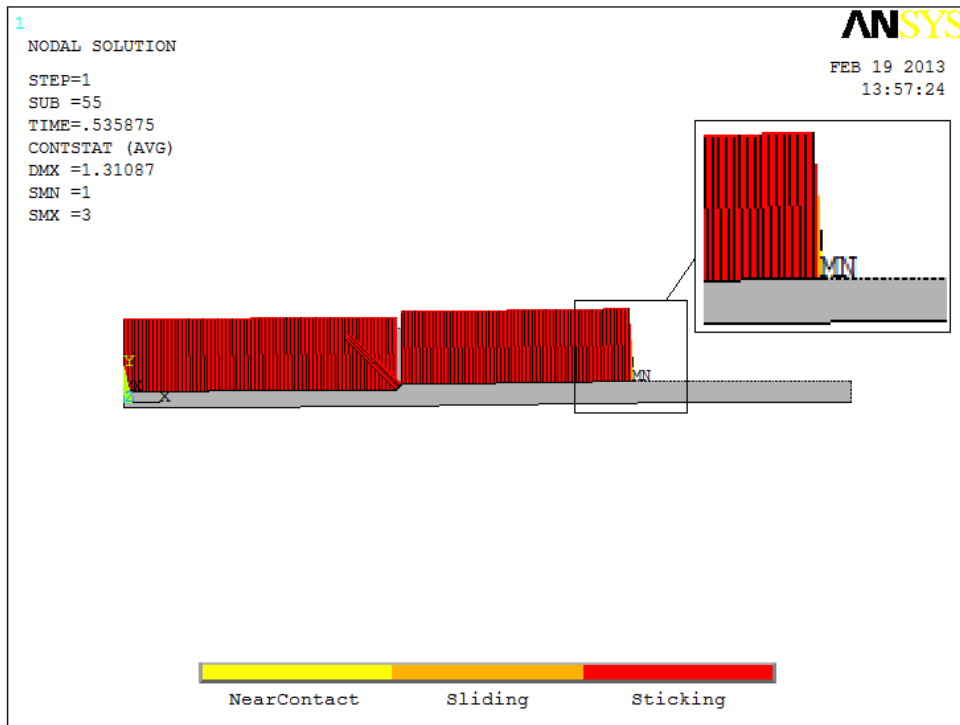
Μικρή και μεσαία είναι επίσης η επίδραση των μέτρων ελαστικότητας στο φορτίο και την αντίστοιχη μετατόπιση αστοχίας, στις περιπτώσεις που η κατασκευή έφτασε την αστοχία, με την ανάλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων που πραγματοποιήθηκε για την συγκεκριμένη τιμή της επιβαλλόμενης φόρτισης ($u_x = 0.95$ mm).

Πίνακας 4.4: Επίδραση των μέτρων ελαστικότητας του σύνθετου υλικού του επιθέματος – ποσοστιαία σύγκριση

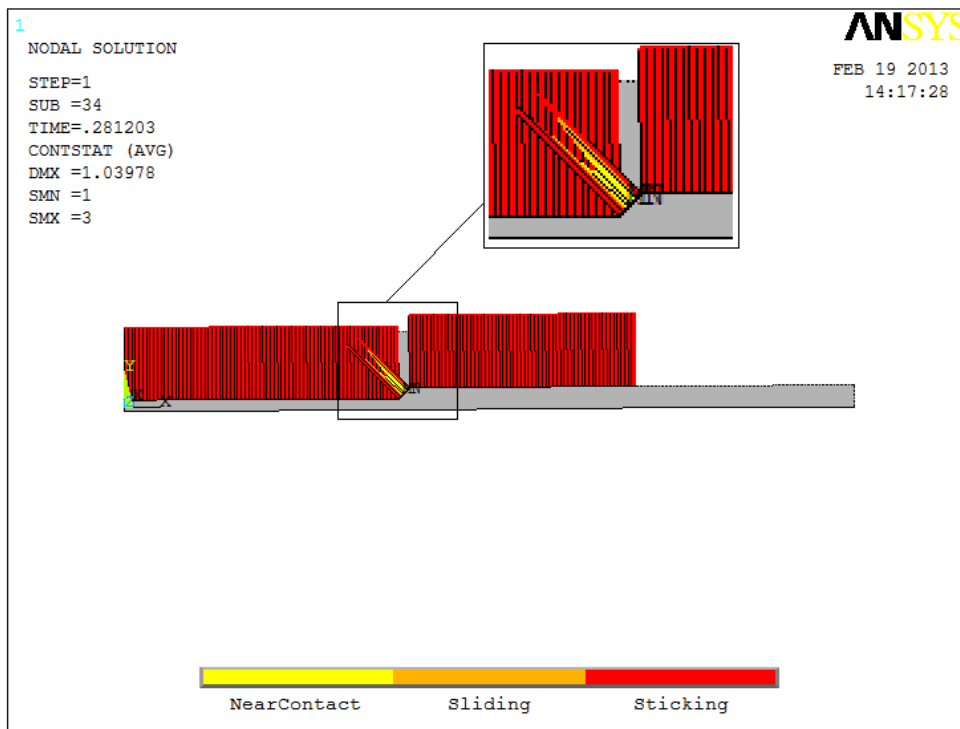
		compare $F_{crack, initiation}$		compare $U_{x, Fcr., in.}$		compare F_{max}	
		$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$
compare UD-FG $L_p=180mm$	SR=0.25	2%	4%	6%	-27%	2%	4%
	SR=0.50	-3%	6%	-41%	-22%	3%	11%
	SR=0.75	-4%	4%	-48%	-19%	1%	9%
compare UD-FG $L_p=280mm$	SR=0.25	3%	4%	-12%	-28%	-2%	10%
	SR=0.50	-8%	8%	-38%	-23%	-1%	5%
	SR=0.75	-48%	-34%	-71%	-57%	-3%	4%
		compare $U_{x, Fmax}$		compare $F_{failure}$		compare $U_{x, Ffail.}$	
		$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$
compare UD-FG $L_p=180mm$	SR=0.25	-6%	-11%	4%	8%	17%	-20%
	SR=0.50	4%	-5%	-4%	30%	-1%	-8%
	SR=0.75	-14%	3%	-	15%	-	-8%
compare UD-FG $L_p=280mm$	SR=0.25	17%	-5%	-	9%	-	-5%
	SR=0.50	36%	-23%	-	11%	-	-15%
	SR=0.75	-1%	-3%	-	1%	-	0%

Επιπλέον, για τις δοκιμές που περιλαμβάνονται στον Πίνακα 4.1, μέσω των δυνατοτήτων postprocessing του προγράμματος ANSYS (Results Viewer), ελέγχθηκε ο τρόπος αστοχίας της κατασκευής (contact status), δηλαδή σε ποιο σημείο της κατασκευής παρατηρείται η αποκόλληση του επιθέματος, όταν το φορτίο παίρνει μέγιστη τιμή, καθώς και κατά πόσο εκείνη τη χρονική στιγμή (substep) ο χάλυβας έχει μπει στην πλαστική περιοχή.

Βρέθηκε ότι για τις δοκιμές με μικρότερο πάχος διάβρωσης ($t_{c,(A)} = 1.5 \text{ mm}$), το επίθεμα αποκολλάται από τα άκρα του, όπως ενδεικτικά φαίνεται στο Σχήμα 4.20. Για τις δοκιμές με μεγαλύτερο πάχος διάβρωσης ($t_{c,(B)} = 3.0 \text{ mm}$) το επίθεμα αποκολλάται στο σημείο όπου ξεκινάει η διαβρωμένη περιοχή του χάλυβα, όπως φαίνεται ενδεικτικά στο Σχήμα 4.21. Η ίδια συμπεριφορά, ως προς την αποκόλληση του επιθέματος, εμφανίζεται και στις δοκιμές για υλικό επίθεμα UD.



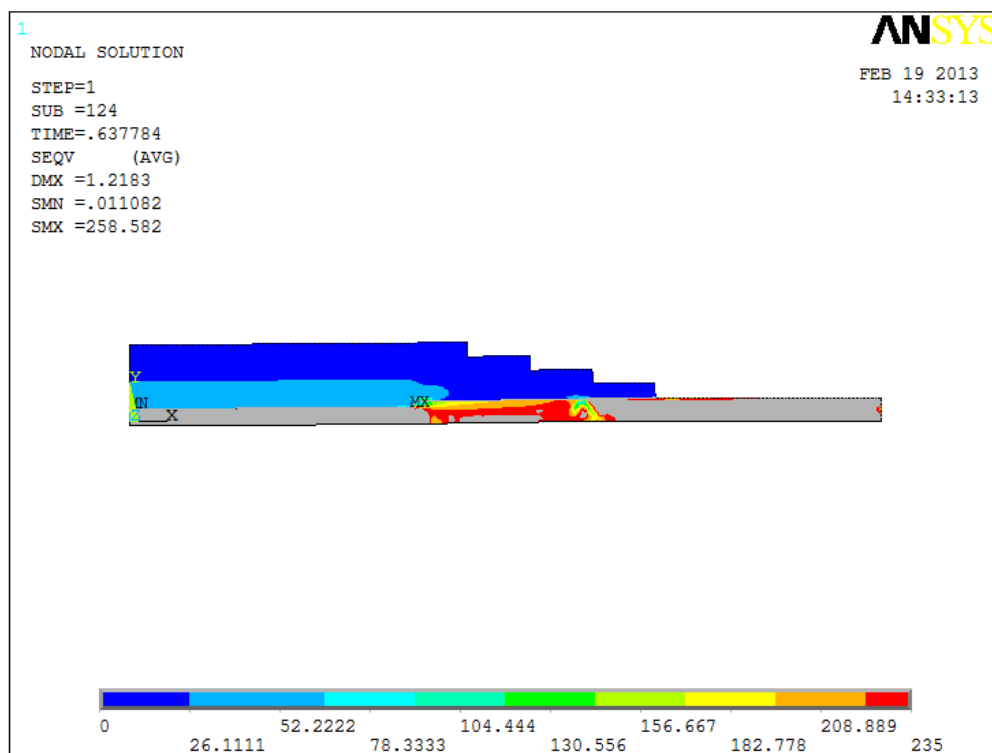
Σχήμα 4.20: Κατάσταση επαφής δοκιμής FG_1_100_100_A_180, αποκόλληση επιθέματος από το άκρο του



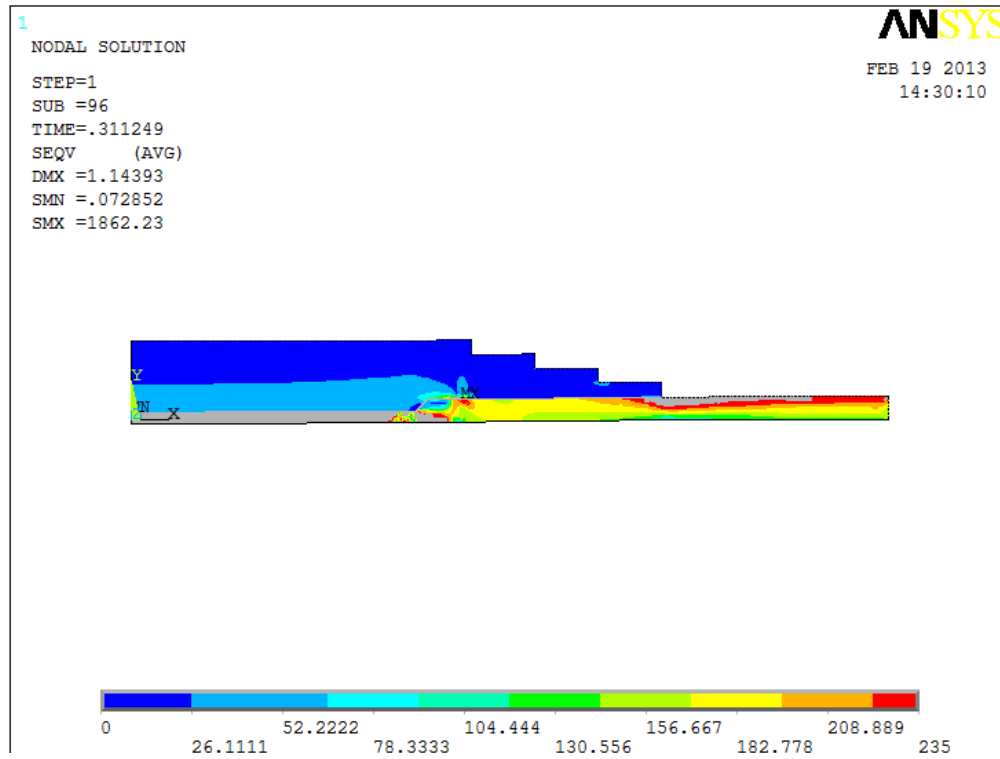
Σχήμα 4.21: Κατάσταση επαφής δοκιμής FG_1_100_100_B_180, αποκόλληση επιθέματος στο σημείο όπου ξεκινάει η διαβρωμένη περιοχή του χάλυβα

Τέλος, για την τιμή του μέγιστου φορτίου (F_{max}) όλο το πάχος του χαλύβδινου ελάσματος έχει μπει στην πλαστική περιοχή, σε όλες τις δοκιμές και για τα δύο υλικά. Η παρατήρηση έγινε οριοθετώντας με τιμές 0 έως 235 MPa τη χρωματική διαστρωμάτωση των τάσεων Von Mises στο εργαλείο postprocessing του προγράμματος και ελέγχοντας τη χρονική στιγμή (substep), στην οποία εμφανίζεται το μέγιστο φορτίο. Πραγματοποιήθηκαν τέτοιοι έλεγχοι για όλες τις δοκιμές που περιλαμβάνονται στον Πίνακα 4.1.

Στις δοκιμές με μικρότερο πάχος διάβρωσης ($t_{c,(A)} = 1.5 \text{ mm}$), μπαίνει στην πλαστικότητα σχεδόν όλο το μήκος του χαλύβδινου ελάσματος, όπως ενδεικτικά φαίνεται στο Σχήμα 4.22. Στις δοκιμές με μεγαλύτερο πάχος διάβρωσης ($t_{c,(B)} = 3.0 \text{ mm}$) μπαίνει στην πλαστικότητα όλο το πάχος της διαβρωμένης περιοχής, όπως ενδεικτικά φαίνεται στο Σχήμα 4.23.



Σχήμα 4.22: Κατανομή τάσεων Von Mises δοκιμής FG_1_100_100_A_180, με όριο διαρροής χάλυβα ίσο με 235 MPa



Σχήμα 4.22: Κατανομή τάσεων Von Mises δοκιμής FG_1_100_100_B_180, με όριο διαρροής χάλυβα ίσο με 235 MPa

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΜΕΛΕΤΗ

5.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

Τα παρακάτω συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν από την πειραματική μελέτη, η οποία περιγράφεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 2 (Mirisiotis, 2007):

- Στις δύο από τις τρεις περιπτώσεις που διερευνήθηκαν (S-COR-VI-1 & 2 και S-COR-HLU-3 & 4), η αστοχία του επιθέματος εμφανίστηκε σαν σταδιακή αποκόλλησή του από την επιφάνεια συγκόλλησης του χάλυβα, συνοδευόμενη από ταυτόχρονη διαρροή των χαλύβδινων ελασμάτων, είτε στην διαβρωμένη πλευρά τους είτε σε κάποιο άλλη θέση. Στην τρίτη περίπτωση (S-COR-HLU-1 & 2), πρώτα εμφανίστηκε διαρροή στη διαβρωμένη περιοχή, την οποία ακολούθησε ξαφνική αποκόλληση του επιθέματος.
- Το μέγιστο φορτίο που αναλαμβάνεται από τα επιθέματα πριν την αποκόλλησή τους αυξάνεται συναρτήσει του φορτίου διαρροής των δοκιμών αναφοράς (χωρίς επίθεμα). Αυτή η αύξηση κυμαίνεται από 10 ως 29%. Τα δοκίμια με επιθέματα από Twill ανθρακοϋφασμα με τη μέθοδο μορφοποίησης με το χέρι επέδειξαν καλύτερη συμπεριφορά, παρά τον χαμηλό τους συντελεστή $SR = 0.32$.
- Για την επίτευξη συγκεκριμένου λόγου ακαμψίας της κατασκευής με επίθεμα, είναι προτιμότερη η χρήση επιθεμάτων με χαμηλό συντελεστή ελαστικότητας και μεγαλύτερο πάχος, από άλλα που έχουν μεγαλύτερη ακαμψία και μικρότερο πάχος.
- Επιβεβαιώθηκε πειραματικά ότι όσο πιο παχύ είναι το επίθεμα, τόσο πιο έντονη η κάμψη που υφίσταται, λόγω της ασυμμετρίας της διατομής από την μονόπλευρη ενίσχυση.
- Η συμπεριφορά των δοκιμών με επίθεμα τύπου UD-HM/HLU, που έχει υψηλό λόγο ακαμψίας, αποδείχθηκε χειρότερη από την αναμενόμενη, πράγμα που απαιτεί περαιτέρω πειραματική και αριθμητική ανάλυση. Φαίνεται, ωστόσο, ότι για την επιλογή του καταλληλότερου SR , πρέπει να ληφθεί υπόψη το τελικό πάχος των επιθεμάτων, ώστε να μην εκδηλωθεί έντονη λυγηρότητα, που θα έχει ως αποτέλεσμα την πρόωρη αποκόλληση του επιθέματος. Παράλληλα, πρέπει να εξεταστεί η δύναμη της σύνδεσης του επιθέματος με το χαλύβδινο υπόστρωμα, αφού η επιλογή επιθέματος που φέρει χαμηλό φορτίο (και κατά συνέπεια δεν αποφορτίζει σε μεγάλο βαθμό την χαλύβδινη κατασκευή), μπορεί να είναι προτιμότερη από ένα ισχυρότερο επίθεμα, που φορτίζει περισσότερο την συγκόλληση και προκαλεί την πρόωρη αστοχία της.

- Οι παραμορφώσεις των επιθεμάτων παραμένουν σταθερές στην κεντρική περιοχή των επιθεμάτων. Η διακύμανση αυτών των παραμορφώσεων υποδεικνύει ότι ένα επίθεμα μεγαλύτερου μήκους θα ήταν πιο ενεργό.
- Το ποσοστό του επιβαλλόμενου φορτίου που φέρει το επίθεμα είναι χαρακτηριστικό και μειώνεται ελαφρώς καθώς αυξάνεται το επιβαλλόμενο φορτίο. Αυτό το γεγονός υποδεικνύει ότι η χρήση ισχυρότερου χάλυβα στη σύνδεση του επιθέματος, θα δημιουργούσε μια αποτελεσματικότερη ενίσχυση των διαβρωμένων χαλύβδινων δοκιμίων.

5.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ

Τα παρακάτω συμπεράσματα προέκυψαν από την αριθμητική μοντελοποίηση με cohesive στοιχεία, η οποία περιγράφεται στο εδάφιο 3.3:

- Η αριθμητική μοντελοποίηση του κολλητικού δεσμού με χρήση cohesive στοιχείων, προσομοιώνει καλύτερα την ελαστοπλαστική συμπεριφορά της κατασκευής και έτσι ήταν δυνατή η σχετικά ικανοποιητική πρόβλεψή του μέγιστου φορτίου που μπορεί να παραλάβει η κατασκευή πριν την αστοχία της. Η τιμή του μέγιστου φορτίου που προβλέφθηκε ήταν κατά 12% περίπου μικρότερη από αυτή που προέκυψε πειραματικά.
- Η διαρροή του χαλύβδινου ελάσματος συμβαίνει ταυτόχρονα με την έναρξη της αποκόλλησης του επιθέματος (αστοχία του κολλητικού δεσμού) από το χαλύβδινο έλασμα.
- Η επιλογή των τιμών των ιδιοτήτων των δύο τύπων καταπόνησης (mode I και mode II) των στοιχείων αυτών, χρήζει περαιτέρω μελέτης, ώστε η πρόβλεψη αυτή να είναι ακριβέστερη. Επιπλέον, δεν μελετήθηκε στην παρούσα εργασία η επίδραση της χρήσης cohesive στοιχείων σε τρισδιάστατο μοντέλο, η οποία ενδεχομένως να έδινε καλύτερα αποτελέσματα.
- Μελετήθηκαν μόνο τα διαγράμματα δύναμης – μετατόπισης ολόκληρης της κατασκευής και δεν εξήχθησαν αποτελέσματα για τις θέσεις των επιμηκυνσιομέτρων που είχαν τοποθετηθεί επί των δοκιμίων στις πειραματικές δοκιμές. Τα αποτελέσματα αυτά όμως είναι αναμένεται να είναι ακριβέστερα, διότι δεν υπεισέρχεται η μέτρηση από το έμβολο της υδραυλικής μηχανής (βλέπε εδάφιο 4.1).

5.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Τα παρακάτω συμπεράσματα προέκυψαν από την διενέργεια της παραμετρικής μελέτης για αριθμητική μοντελοποίηση του κολλητικού δεσμού με χρήση cohesive στοιχείων, η οποία περιγράφεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4:

- Η τιμή του μέγιστου φορτίου που μπορεί να δεχτεί η κατασκευή πριν αστοχήσει είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση που το πάχος της διαβρωμένης περιοχής του χαλύβδινου ελάσματος είναι μικρότερο.
- Τη χρονική στιγμή που εμφανίζεται το μέγιστο φορτίο, ο χάλυβας έχει ήδη διαρρεύσει και για τις δύο τιμές πάχους της διαβρωμένης περιοχής. Η διαφορά στις δύο περιπτώσεις πάχους έγκειται στην περιοχή του χαλύβδινου ελάσματος που έχει διαρρεύσει. Στις δοκιμές με μικρότερο πάχος διάβρωσης μπαίνει στην πλαστικότητα σχεδόν όλο το μήκος του χαλύβδινου ελάσματος. Στις δοκιμές με μεγαλύτερο πάχος διάβρωσης μπαίνει στην πλαστικότητα όλο το πάχος της διαβρωμένης περιοχής.
- Για τις δοκιμές με μικρότερο πάχος διάβρωσης, το επίθεμα ξεκινά να αποκολλάται από τα άκρα του. Για τις δοκιμές με μεγαλύτερο πάχος διάβρωσης το επίθεμα αποκολλάται στο σημείο όπου ξεκινάει η διαβρωμένη περιοχή του χάλυβα. Η ίδια συμπεριφορά, ως προς την αποκόλληση του επιθέματος, εμφανίζεται και για τα δύο υλικά επιθέματος.
- Η κατά 50% μείωση και αύξηση των ιδιοτήτων του mode I και mode II των cohesive στοιχείων από αυτές της βιβλιογραφίας (Πίνακας, 3.9), έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση ή μείωση αντίστοιχα της τιμής του μέγιστου φορτίου (u_x) όπου συμβαίνει η αστοχία της τάξης του 2% - 10% και για τα δύο υλικά. Συγκεκριμένα, η επίδραση των ιδιοτήτων του mode II στην τιμή του μέγιστου φορτίου είναι μεγαλύτερη της επίδρασης του mode I και η επίδραση αυτή αυξάνεται όσο αυξάνεται το πάχος του επιθέματος.
- Η μεγαλύτερη επίδραση της παραμέτρου του μήκους του επιθέματος, διατηρώντας όλες τις άλλες παραμέτρους σταθερές (υλικό επίθεματος, πάχος διάβρωσης, λόγο ακαμψίας, ιδιότητες των cohesive στοιχείων), εντοπίζεται στην τιμή της μετατόπισης που αντιστοιχεί στο μέγιστο φορτίο που μπορεί να δεχτεί η κατασκευή. Η κατά 55% αύξηση του μήκους του επιθέματος οδήγησε σε αύξηση της τιμής της μετατόπισης που εμφανίζεται το μέγιστο φορτίο ίση με 30% περίπου.
- Για μεγάλο πάχος επιθέματος ($SR = 0.75$), και υλικό με διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας στις δύο διευθύνσεις (Unidirectional Glass), το φορτίο αρχικής αποκόλλησης του

επιθέματος και η αντίστοιχη μετατόπιση είναι σημαντικά μικρότερα σε σχέση με τις υπόλοιπες δοκιμές

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΕΛΛΗΝΙΚΗ

- Καντεράκης Γ., (2000), *“Η μέθοδος της επισκευής μεταλλικών δομών με την επικόλληση ενισχυτικών επιθεμάτων από σύνθετα υλικά”*, Τομέας Μηχανικής, Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Διδακτορική Διατριβή
- Καρατζάς Α. Βασίλειος, (2009), *“Αριθμητική και Πειραματική Μελέτη Ενώσεων Σύνθετων και Μεταλλικών Υλικών”*, Τομέας Θαλάσσιων Κατασκευών, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Διπλωματική Εργασία
- Καρύδης Α. Πέτρος, *“Υπολογιστικές Μέθοδοι και Εφαρμογές σε Λεπτότοιχες Κατασκευές”*, Τομέας Θαλάσσιων Κατασκευών, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σημειώσεις μαθήματος, Κεφάλαιο 3
- Μυρσιώτης Λ. και Τσούβαλης Ν., (2006α), *“Χαρακτηρισμός Σύνθετων Υλικών Ενισχυτικών Επιθεμάτων από Ανθρακοϋφάσματα και Εποξειδική Ρητίνη”*, Πυθαγόρας II, Ενίσχυση Ερευνητικών ομάδων στα Πανεπιστήμια, 2.2.3 στ, Report No STL-213-F-06, Revision 1.0, Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
- Μυρσιώτης Λ., Τσούβαλης Ν. και Παπάζογλου Β, (2006β), *“Πειραματική Διερεύνηση της Συμπεριφοράς σε Εφελκυσμό Ρωγματωμένων Πλακών Χάλυβα Ενισχυμένων με Επιθέματα από Σύνθετα Υλικά”*, Πυθαγόρας II, Ενίσχυση Ερευνητικών ομάδων στα Πανεπιστήμια, 2.2.3 στ, Report No STL-227-F-06, Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
- Μυρσιώτης Λ., Τσούβαλης Ν. και Παπάζογλου Β, (2006γ), *“Πειραματική Διερεύνηση της Συμπεριφοράς σε Κόπωση Ρωγματωμένων Πλακών Χάλυβα Ενισχυμένων με Επιθέματα από Σύνθετα Υλικά”*, Πυθαγόρας II, Ενίσχυση Ερευνητικών ομάδων στα Πανεπιστήμια, 2.2.3 στ, Report No STL-228-F-06, Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
- Νταμαδάκης Α., (2010), *“Πειραματική Μελέτη και Αριθμητική Μοντελοποίηση της Αντοχής σε Εφελκυσμό Ρωγματωμένων Χαλύβδινων Πλακών Ενισχυμένων με Επιθέματα από Σύνθετα Υλικά υπό τη Επίδραση του Θαλάσσιου Περιβάλλοντος”*, Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Διπλωματική Εργασία

- Τσούβαλης Ν., (2007), Χρήση Ενισχυτικών Επιθεμάτων από Σύνθετα Υλικά για την Ενίσχυση Τμημάτων Χαλύβδινων Ναυπηγικών Κατασκευών, Πυθαγόρας II, Ενίσχυση Ερευνητικών ομάδων στα Πανεπιστήμια, Παραδοτέο ΠΕ.4-1, “Κατευθυντήριες Οδηγίες Σχεδιασμού, Αριθμητικής Προσομοίωσης και Εφαρμογής”, Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
- Τσούβαλης Ν., (1998), “Σύνθετα υλικά και Χρήσεις τους στη Ναυπηγική”, Σημειώσεις Μαθήματος Υλικά Ναυπηγικών και Θαλάσσιων Κατασκευών, Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Ναυτική και Θαλάσσια Τεχνολογία και Επιστήμη», Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

ΔΙΕΘΝΗΣ

- ACI Committee 440 XR, (2006), “*Report on Fiber-reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*”, pp. 8-15, ACI 440.XR (to replace 440R), American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich,
- American Water Works Association, (2005), “*Fiberglass Pipe Design*”, Manual of Water Supply Practices – M45, Second Edition
- ANSYS Release 12.0, (2009), Contact Technology Guide
- ANSYS Release 12.0, (2004), Documentation,
- Anyfantis Konstantinos N., (2012α), “*Analysis and Design of Composite-to-Metal Adhesively Bonded Joints*”, PhD Thesis, School of Naval Architecture and Marine Engineering
- Anyfantis Konstantinos N., (2012β), “*Finite element predictions of composite-to-metal bonded joints with ductile adhesive materials*”, Composite Structures, Elsevier
- Anyfantis Konstantinos N., Tsouvalis Nicholas G., (2011), “*A novel traction–separation law for the prediction of the mixed mode response of ductile adhesive joints*”, International Journal of Solids and Structures, Elsevier
- Bakis C. E., Bank L. C., Brown V. L., Cosenza E., Davalos J. F., Lesko J. J., Machida A., Rizkalla S. H., and Triantafillou T. C., (2002), “*Fiber-Reinforced Polymer Composites for Construction-State-of-the-Art Review*”, Journal of composites for construction, pp.1-85
- Campilho R.D.S.G., de Moura M.F.S.F., Domingues J.J.M.S., (2005), “*Modelling single and double-lap repairs on composite materials*”, Composites Science and Technology, Elsevier
- Grabovac Ivan, Whittaker David, (2008), “*Application of bonded composites in the repair of ships structures – A 15-year service experience*”, Composites: Part A, Elsevier

- Hongbo Liu, Riadh Al-Mahaidi , Xiao-Ling Zhao, (2009), *“Experimental study of fatigue crack growth behaviour in adhesively reinforced steel structures”*, Composite Structures, Elsevier
- International Standardization Organization, (2004α), Standard ISO 8407:1991 *“Corrosion of metals and alloys : Removal of corrosion products from corrosion test specimens”*, ISO Standards Handbook, 1st ed., pp. 395-404
- International Standardization Organization, (2004β), 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., pp. 735-750
- International Organization for Standardization, (2002), ISO 5893:2002 *“Rubber and Plastics Test Equipment – Tensile, Flexural and Compression Types (Constant Rate of Traverse) – Specification”*
- Lee Min Jung , Tae Min Cho, Won Seock Kim, Byung Chai Lee, Jung Ju Lee, (2010), *“Determination of cohesive parameters for a mixed-mode cohesive zone model”*, International Journal of Adhesion & Adhesives, Elsevier
- Li S., Thouless M.D., Waas A.M., Schroeder J.A., Zavattieri P.D., (2005), *“Mixed-mode cohesive-zone models for fracture of an adhesively bonded polymer–matrix composite”*, Engineering Fracture Mechanics, Elsevier
- McGeorge D., Echtermeyer A.T., Leong K.H., Melve B., Robinson M., Fischer K.P., (2009), *“Repair of floating offshore units using bonded fibre composite materials”*, Composites: Part A, Elsevier
- Mirisiotis L., Tsouvalis N. and Tsiourva D., (2007), *“Experimental Investigation of the Static Tensile Behaviour of Corroded Steel Plates Reinforced with Composite Patches”*, Pithagoras II, Support of University Research Teams, 2.2.3 στ, Report No. STL-238-F-07
- Seo Dae-Cheol, Lee Jung-Ju, (2002), *“Fatigue crack growth behavior of cracked aluminum platerepaired with composite patch”*, Composite Structures, Elsevier
- Tsouvalis N., Kouloukouras J., Dimou D. and Mirisiotis L., (2007), *“Numerical Modeling of the Static and Dynamic Experimental Tests Performed in Composite Patch Reinforced Steel Plates With Defects”*, Pithagoras II, Support of University Research Teams, 2.2.3 στ, Report No. STL-247-F-07
- Turton T.J., Dalzel-Job J. and Livingstone F., (2005), *“Oil Platforms, Destroyers and Frigates – Case Studies of QinetiQ’s Marine Composite Patch Repairs”*, Composites Part A, 36, 1066-1072

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ


```

!/BATCH
!/COM,ANSYS RELEASE 13.0  UP20101012  18:16:14  01/23/2012
!/input,menust,tmp, " ,,,,,,,,,,,,,,1
!/GRA,POWER
!/GST,ON
!/PLO,INFO,3
!/GRO,CURL,ON
!/CPLANE,1
!/REPLOT,RESIZE
!/WPSTYLE,,,,,,,,,0
!/REPLOT,RESIZE
/PREP7
FLST,3,1,8
FITEM,3,0,0,0  !!!!! Position of first KP
K, ,P51X
FLST,3,1,8
FITEM,3,75,0,0  !!!!! 75 / 50 = extension of corroded area [mm]
K, ,P51X
FLST,3,1,8
FITEM,3,76.5,0,0  !!!!! ????? 76.5 = 75 + 1.5 / 50.26 = 50 + 0.3 where 0.3 is the depth of the corroded area
K, ,P51X
FLST,3,1,8
FITEM,3,90,0,0  !!!!! 90 / 100 = half length of the full thickness patch [mm]
K, ,P51X
FLST,3,1,8
FITEM,3,106.6667,0,0  !!!! 106.6667 / 116.6667 KP to define Number of tapered groups
K, ,P51X
FLST,3,1,8
FITEM,3,123.3334,0,0  !!!!!123.3334 / 133.3334 KP to define Number of tapered groups
K, ,P51X
FLST,3,1,8
FITEM,3,140,0,0  !!!!!!!!!!!!! 140 / 150 = half length of the patch [mm]
K, ,P51X
FLST,3,1,8
FITEM,3,200,0,0  !!!!!!!!!!!!! 200 / 200 = half length of the steel component [mm]
K, ,P51X
FLST,3,2,3,ORDE,2
FITEM,3,1
FITEM,3,-2
KGEN,2,P51X, , ,4.5, , ,0  !!!!!!!!! 4.5 / 4.77 = thickness of steel plate in the corroded area [mm]
FLST,3,6,3,ORDE,2
FITEM,3,3
FITEM,3,-8
KGEN,2,P51X, , ,6, , ,0  !!!!! 6 / 5.07 = thickness of the steel plate (in the uncorroded section) [mm]
FLST,3,8,3,ORDE,2
FITEM,3,9
FITEM,3,-16
KGEN,2,P51X, , ,0.1, , ,0  !!!!! 0.1 / 0.1 = offset of the KP to be copied (adhesive layer)
/REP,FAST
KDELE, 24
/REPLO
SAVE
/FOC, 1, 153.320526838 , 4.39799437549 , 0.00000000000

```

```

/REPLO
FLST,3,2,3,ORDE,2
FITEM,3,17
FITEM,3,-18
KGEN,2,P51X, , , 2.617375, , , 0 !!!!! ???? 2.617375 = 1.117375 (thickness of patch) + 1.5 (corroded area
thickness reduction) / 1.1375 = 0.8375 (thickness of the taper group) + 0.3 (corroded area thickness reduction)
FLST,3,5,3,ORDE,2
FITEM,3,19
FITEM,3,-23
KGEN,2,P51X, , , 1.117375, , , 0
FLST,3,6,3,ORDE,2
FITEM,3,24
FITEM,3,-29
KGEN,2,P51X, , , 1.117375, , , 0
FLST,3,5,3,ORDE,2
FITEM,3,31
FITEM,3,-35
KGEN,2,P51X, , , 1.117375, , , 0
FLST,3,4,3,ORDE,2
FITEM,3,37
FITEM,3,-40
KGEN,2,P51X, , , 1.117375, , , 0
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
FLST,3,7,3,ORDE,2
FITEM,3,9
FITEM,3,-15
KGEN,2,P51X, , , 0, , , 0
LSTR, 1, 2
LSTR, 2, 3
LSTR, 3, 4
LSTR, 4, 5
LSTR, 5, 6
LSTR, 6, 7
LSTR, 7, 8
LSTR, 9, 10
/PNUM,KP,1
/PNUM,LINE,1
/PNUM,AREA,0
/PNUM,VOLU,0
/PNUM,NODE,0
/PNUM,TABN,0
/PNUM,SVVAL,0
/NUMBER,0
!*
/PNUM,ELEM,0
/REPLOT
LSTR, 11, 12
LSTR, 12, 13
LSTR, 13, 14
LSTR, 14, 15
LSTR, 15, 16
LSTR, 10, 11
LSTR, 17, 18
LSTR, 18, 19

```

LSTR, 19, 20
LSTR, 20, 21
LSTR, 21, 22
LSTR, 22, 23
/REPLO
LSTR, 24, 25
LSTR, 25, 26
LSTR, 26, 27
LSTR, 27, 28
LSTR, 28, 29
LSTR, 29, 30
LSTR, 31, 32
LSTR, 32, 33
LSTR, 33, 34
LSTR, 34, 35
LSTR, 35, 36
LSTR, 37, 38
LSTR, 38, 39
LSTR, 39, 40
LSTR, 40, 41
LSTR, 42, 43
LSTR, 43, 44
LSTR, 44, 45
LSTR, 46, 47
LSTR, 47, 48
LSTR, 48, 49
LSTR, 49, 50
LSTR, 50, 51
LSTR, 51, 52
SAVE
!!!****!!!
LSTR, 1, 9
LSTR, 46, 17
LSTR, 17, 24
LSTR, 24, 31
LSTR, 31, 37
LSTR, 37, 42
LSTR, 2, 10
LSTR, 47, 18
LSTR, 18, 25
LSTR, 25, 32
LSTR, 32, 38
LSTR, 38, 43
LSTR, 3, 11
LSTR, 48, 19
LSTR, 19, 26
LSTR, 26, 33
LSTR, 33, 39
LSTR, 39, 44
LSTR, 4, 12
LSTR, 49, 20
LSTR, 20, 27
LSTR, 27, 34
LSTR, 34, 40

```
LSTR, 40, 45
LSTR, 5, 13
LSTR, 50, 21
LSTR, 21, 28
LSTR, 28, 35
LSTR, 35, 41
LSTR, 6, 14
LSTR, 51, 22
LSTR, 22, 29
LSTR, 29, 36
LSTR, 7, 15
LSTR, 52, 23
LSTR, 23, 30
LSTR, 8, 16
```

```
SAVE
```

```
!*
```

```
ET,1,PLANE183
```

```
!*
```

```
FLST,5,81,4,ORDE,2
```

```
FITEM,5,1
```

```
FITEM,5,-81
```

```
CM,_Y,LINE
```

```
LSEL, , , P51X
```

```
CM,_Y1,LINE
```

```
CMSEL,_,_Y
```

```
!*
```

```
LESIZE,_Y1,1, , , , , 1
```

```
AL,36,50,32,56
```

```
AL,32,49,27,55
```

```
AL,27,48,21,54
```

```
AL,21,47,15,53
```

```
AL,15,46,39,52
```

```
AL,8,45,1,51 !L8 and L39 coincidents, L39--> composite L8--> Steel
```

```
AL,37,56,33,62
```

```
AL,33,55,28,61
```

```
AL,28,54,22,60
```

```
AL,22,53,16,59
```

```
AL,16,52,40,58
```

```
AL,14,51,2,57 !L40 and L14 coincidents, L40--> composite L14--> Steel
```

```
AL,38,62,34,68
```

```
AL,34,61,29,67
```

```
AL,29,60,23,66
```

```
AL,23,59,17,65
```

```
AL,17,58,41,64
```

```
AL,9,57,3,63 !L41 and L9 coincidents, L41--> composite L9--> Steel
```

```
AL,35,67,30,73
```

```
AL,30,66,24,72
```

```
AL,24,65,18,71
```

```
AL,18,64,42,70
```

```
AL,10,63,4,69 !L42 and L10 coincidents, L42--> composite L10--> Steel
```

```
AL,31,72,25,77
```

```
AL,25,71,19,76
```

```
AL,19,70,43,75
```

```
AL,11,69,5,74 !L43 and L11 coincidents, L43--> composite L11--> Steel
```

```
AL,26,76,20,80
AL,20,75,44,79
AL,12,74,6,78 !L44 and L12 coincidents, L44--> composite L12--> Steel
AL,13,78,7,81
SAVE
!!!!!!!!!!!!
!!!!!!
!!!!
!!
!
mat,1
MSHAPE,0,2D
MSHKEY,1
!*
FLST,5,7,5,ORDE,7
FITEM,5,6
FITEM,5,12
FITEM,5,18
FITEM,5,23
FITEM,5,27
FITEM,5,30
FITEM,5,31
CM,_Y,AREA
ASEL, , , ,P51X
CM,_Y1,AREA
CHKMSH,'AREA'
CMSEL,S,_Y
!*
AMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
ASEL,S,MAT,,1
asel,inve
/REPLO
! inve
APLOT
/REPLO
mat,3
FLST,5,24,5,ORDE,12
FITEM,5,1
FITEM,5,-5
FITEM,5,7
FITEM,5,-11
FITEM,5,13
FITEM,5,-17
FITEM,5,19
FITEM,5,-22
FITEM,5,24
FITEM,5,-26
FITEM,5,28
FITEM,5,29
```

```

CM,_Y,AREA
ASEL, , , P51X
CM,_Y1,AREA
CHKMSH,'AREA'
CMSEL,S,_Y
!*
AMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
LSLA,S
asel,inve
ALLSEL,ALL
/REPLO
/MREP,EPLO
*SET,Est,207e3 !!!!! 207 / 203 Young's Modulus of Elasticity for S [MPa]
*SET,nst,0.3 !!!!! 0.3 / 0.3 Poisson ratio of Steel
*SET,Etst,0.015*Est !!!!! 0.015 * Est / 0.02* Est Hardening of steel [MPa]
*SET,Sst,235 !!!!! 235 / 314 Yield Stress of Steel [MPa]
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,Est !Young Modulus
MPDATA,PRXY,1,,nst !Poisson Coefficient X-Y plane
!!!!!!!! Steel Plasticity !!!!!!!!!!!!!
TB,BISO,1,1,2
TBTEMP,0
TBDATA,,Sst,Etst
/REPLO
*SET,Ex,69.470e3 !!!!! ?????? 69.470e3 / 112.29e3 Young's Tensile Modulus in X direction [MPa] Dir 1 comp
*SET,Ey,5.0e3 !!!!! ??????? 5.0e3 / 5.5e3 Young's Tensile Modulus in Y direction [MPa] Dir 3 comp
*SET,Ez,5.0e3 !!!!! 5.0e3 / 5.5e3 Young's Tensile Modulus in Z direction [MPa] Dir 2 comp
*SET,nxy,0.3 !!!!! 0.3 / 0.376 Poisson Ratio XY Dir13
*SET,nyz,0.02 !!!!! ??????? 0.02 / 0.591 Poisson Ratio YZ Dir32  $v_{23} = v_{12} * ((1-v_{21})/(1-v_{12}))$ 
*SET,nxz,0.3 !!!!! 0.3 / 0.376 Poisson Ratio XZ Dir12
*SET,Gxy,2.4e3 !!!!! 2.4e3 / 2e3 Shear Modulus XY [MPa] Dir13
*SET,Gyz,1.6e3 !!!!! 1.6e3 / 1.2e3 Shear Modulus YZ [MPa] Dir32  $G_{23} = 0.6 * G_{12}$ 
*SET,Gxz,2.4e3 !!!!! 2.4e3 / 2e3 Shear Modulus XZ [MPa] Dir12
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,3,,Ex
MPDATA,EY,3,,Ey
MPDATA,EZ,3,,Ez
MPDATA,PRXY,3,,nxy
MPDATA,PRYZ,3,,nyz
MPDATA,PRXZ,3,,nxz
MPDATA,GXY,3,,Gxy
MPDATA,GYZ,3,,Gyz
MPDATA,GXZ,3,,Gxz
*SET,Smax , 7.3 !!!!! 3.65 / 7.3 maximum normal contact stress [MPa]
*SET,Gcn , 0.140 !!!!! 0.07 / 0.140 critical fracture energy for normal separation [N/mm] [+25%]
*SET,Tmax , 53 !!!!! 26.5 / 53 maximum equivalent tangential xontact stress [MPa]
*SET,Gct , 0.28 !!!!! 0.14 / 0.28 Critical fracture energy for tangential slip [N/mm]

```



```

*SET,hta , 1e-5 !artificial damping coefficient (1000 fores mikrotero apo to minimum time step)
*SET,beta , 1 !flag for tangential slip under compressive normal contact stress
TB,CZM,4,1,1,CBDE
TB,DATA,1,Smax,Gcn,Tmax,Gct,hta,beta
!*
ALLSEL,ALL
EPLOT
/PNUM,KP,1
/PNUM,LINE,1
/PNUM,AREA,0
/PNUM,VOLU,0
/PNUM,NODE,0
/PNUM,TABN,0
/PNUM,SVAL,0
/NUMBER,0
!*
/PNUM,MAT,1
/REPLOT
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!*
!*
!*
/COM, CONTACT PAIR CREATION - START
CM,_NODECM,NODE
CM,_ELEMCM,ELEM
CM,_KPCM,KP
CM,_LINECM,LINE
CM,_AREACM,AREA
CM,_VOLUCM,VOLU
/GSAV,cwz,gsav,,temp
MP,MU,4,
MAT,4
MP,EMIS,4,7.88860905221e-031
R,3
REAL,3
ET,2,169
ET,3,172
R,3,,,1.0,0.1,0,
RMORE,,,1.0E20,0.0,1.0,
RMORE,0.0,0,1.0,,1.0,0.5
RMORE,0,1.0,1.0,0.0,,1.0
KEYOPT,3,3,0
KEYOPT,3,4,0
KEYOPT,3,5,0
KEYOPT,3,7,0
KEYOPT,3,8,0
KEYOPT,3,9,0
KEYOPT,3,10,2
KEYOPT,3,11,0
KEYOPT,3,12,5
KEYOPT,3,2,0
! Generate the target surface
LSEL,S,,,39
LSEL,A,,,40

```

```

LSEL,A,,,41
LSEL,A,,,42
LSEL,A,,,43
LSEL,A,,,44
CM,_TARGET,LINE
TYPE,2
NSLL,S,1
ESLN,S,0
ESURF
CMSEL,S,_ELEMCM
! Generate the contact surface
LSEL,S,,,8
LSEL,A,,,9
LSEL,A,,,10
LSEL,A,,,11
LSEL,A,,,12
LSEL,A,,,14
CM,_CONTACT,LINE
TYPE,3
NSLL,S,1
ESLN,S,0
ESURF
ALLSEL
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,2
ESEL,A,TYPE,,3
ESEL,R,REAL,,3
/PYMB,ESYS,1
/PNUM,TYPE,1
/NUM,1
EPLOT
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,2
ESEL,A,TYPE,,3
ESEL,R,REAL,,3
CMSEL,A,_NODECM
CMDEL,_NODECM
CMSEL,A,_ELEMCM
CMDEL,_ELEMCM
CMSEL,S,_KPCM
CMDEL,_KPCM
CMSEL,S,_LINECM
CMDEL,_LINECM
CMSEL,S,_AREACM
CMDEL,_AREACM
CMSEL,S,_VOLUCM
CMDEL,_VOLUCM
/GRES,cwz,gsav
CMDEL,_TARGET
CMDEL,_CONTACT
/COM, CONTACT PAIR CREATION - END
/MREP,EPLOT
!!!!!!!!!!!!!! Coupling komvwn, epiboli oriakwn synuhkwn kai fortisis!!!!
/DIST,1,0.924021086472,1

```

```

/REP,FAST
/DIST,1,0.924021086472,1
/REP,FAST
/ZOOM,1,SCRN,0.720391,0.019948,0.782064,-0.063471
/FOC, 1, 199.709878442 , 3.33582946110 , 0.000000000000
/REPLO
/DIST,1,0.924021086472,1
/REP,FAST
/DIST,1,0.924021086472,1
/REP,FAST
/DIST,1,0.924021086472,1
/REP,FAST
/DIST,1,0.924021086472,1
/REP,FAST
/DIST,1,0.924021086472,1
/REP,FAST
/DIST,1,0.924021086472,1
/REP,FAST
/DIST,1,0.924021086472,1
/REP,FAST
/DIST,1,0.924021086472,1
/REP,FAST
/DIST,1,0.924021086472,1
/REP,FAST
/DIST,1,0.924021086472,1
/REP,FAST
/DIST,1,0.924021086472,1
/REP,FAST
N PLOT
/PNUM,KP,1
/PNUM,LINE,1
/PNUM,AREA,0
/PNUM,VOLU,0
/PNUM,NODE,1
/PNUM,TABN,0
/PNUM,SVAL,0
/NUMBER,0
!*
/PNUM,ELEM,0
/REPLOT
!*
FLST,4,13,1,ORDE,3
FITEM,4,2874
FITEM,4,2994
FITEM,4,-3005
CP,999111,ALL,P51X
FLST,2,1,1,ORDE,1
FITEM,2,2874
!*
/GO
D,P51X, ,0.95, , , ,UX, , , ,
FLST,2,1,1,ORDE,1
FITEM,2,2874
!*
/GO
D,P51X, ,0, , , ,UY, , , ,
!*
!!!!!!! Epilisi !!!!!!!

```

```
/REPLO
FLST,2,6,4,ORDE,2
FITEM,2,45
FITEM,2,-50
DL,P51X, ,SYMM
ANTYPE,0
NLGEOM,1
DELTIM,0.01,1e-6,0.01
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,ALL
LNSRCH,1
TIME,1
FINISH
/POST1
FINISH
/SOL
/STATUS,SOLU
SOLVE
SAVE
FINISH
```