



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΝΑΥΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΧΑΛΥΒΔΙΝΩΝ ΠΛΑΚΩΝ ΜΕ ΑΤΕΛΕΙΕΣ,
ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΕΠΙΘΕΜΑ ΑΠΟ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΣΙΛΙΓΚΙΡΗ ΔΑΝΑΗ

Επιβλέπων: ΝΙΚΟΛΑΟΣ Γ. ΤΣΟΥΒΑΛΗΣ
Αναπληρωτής Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2014

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΤΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΥΛΙΚΑ	1
1.2 ΑΝΑΦΟΡΙΚΑ ΜΕ ΤΙΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΕΠΙΣΚΕΥΗΣ ΧΑΛΥΒΔΙΝΩΝ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ	3
1.3 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	6

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	7
2.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ.....	8
2.3 ΟΡΙΣΜΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ	11
2.4 ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΥΠΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	12
2.5 ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	13
2.6 ΟΡΙΣΜΟΣ ΣΥΝΟΡΙΑΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΚΑΙ ΦΟΡΤΙΣΗΣ	15
2.7 ΤΥΠΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ	16
2.8 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ COHESIVE ELEMENTS	18

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

3.1 ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ	23
3.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ	31
3.3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΜΗΚΟΥΣ ΕΠΙΘΕΜΑΤΟΣ	45
3.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΚΑΜΨΙΑΣ	58
3.5 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΑΧΟΥΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ	63
3.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	74

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	76
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	
ΚΩΔΙΚΑΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΕ ANSYS	78

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

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

Εξ' ορισμού, σύνθετα υλικά, ονομάζονται τα υλικά τα οποία προκύπτουν από τη σύνθεση, σε μακροσκοπική κλίμακα, δύο ή περισσότερων υλικών με σκοπό την απόκτηση καλύτερων και χρησιμότερων ιδιοτήτων. Έτσι, το σύνθετο υλικό έχει σημαντικά διαφορετικές ιδιότητες από εκείνες των συνιστώντων μερών του.

Η πιο συνηθισμένη μορφή σύνθετου υλικού είναι τα ενισχυμένα με ίνες πλαστικά FRP (Fiber Reinforced Plastics), 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.

Το μικρό βάρος, η υψηλή αντοχή, η εξαιρετική αντοχή σε διάβρωση, η πολύ καλή συμπεριφορά σε κόπωση, κρούση και στη διάδοση ρωγμών, οι σχετικά εύκολες διαδικασίες παραγωγής και το μικρό κόστος συντήρησης είναι μερικοί από τους παράγοντες εκείνους που έχουν οδηγήσει τα σύνθετα υλικά στην πρώτη θέση μεταξύ των κατασκευαστικών υλικών για μεγάλο πλήθος εφαρμογών. Μερικά τυπικά παραδείγματα εφαρμογών έχουν αναφερθεί στην αεροπορική βιομηχανία, σε πολεμικά πλοία, στη γεφυροποιία, σε μεγάλες κτιριακές κατασκευές και φυσικά στη ναυπηγική βιομηχανία.

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 ιδιαίζουσες 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. Τα σύνθετα υλικά καλύπτουν μεγάλο μέρος των εφαρμογών των νέων τεχνολογιών αιχμής στις κατασκευές και έχουν μεταβάλει σημαντικά τις ακολουθούμενες διαδικασίες σχεδίασης, παραγωγής, ελέγχου και συντήρησης. Η μεγάλη ποικιλία ινών και ρητινών, καθώς και οι διάφορες μέθοδοι κατασκευής παρέχουν στο σχεδιαστή τη δυνατότητα να επιλέξει το πιο κατάλληλο σύστημα υλικών που καλύπτει τις απαιτήσεις του. ⁵ Σύστημα που έχει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και ιδιότητες, που πολλές φορές μπορεί να είναι και μοναδικά.

1.2 ΑΝΑΦΟΡΙΚΑ ΜΕ ΤΙΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΕΠΙΣΚΕΥΗΣ ΧΑΛΥΒΔΙΝΩΝ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ

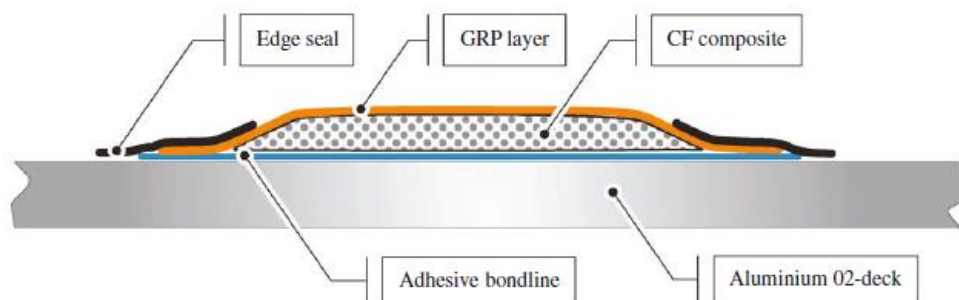
Οι συχνά εμφανιζόμενες δομικές αστοχίες της μεταλλικής κατασκευής των πλοίων, λόγω της έκθεσής της στο έντονα διαβρωτικό θαλάσσιο περιβάλλον, καθώς και της συνεχόμενης καταπόνησής της σε μεγάλα φορτία, αποτελούν ένα από τα σημαντικότερα μειονεκτήματα αναφορικά με την ανθεκτικότητα της κατασκευής. Έτσι, 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.).

Κλασικές μέθοδοι επιδιόρθωσης των αναφερθέντων αστοχιών σε ναυπηγικές κατασκευές περιλαμβάνουν την τοποθέτηση ενός μεταλλικού επιθέματος 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).

Έτσι, δημιουργήθηκε η ανάγκη διερεύνησης νέων λύσεων ώστε να ξεπεραστούν τα προαναφερθέντα προβλήματα. 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 κολλητικών 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 έτσι πιθανό άδειασμα γειτονικών δεξαμενών του σκάφους ή της αναγκαίας - υποχρεωτικής διαδικασίας της αδρανοποίησης δεξαμενών φορτίου καυσίμων (gas free) που επιβάλλεται και προβλέπεται σε περίπτωση αποκοπής και συγκόλλησης χαλύβδινων ελασμάτων. Επίσης, αποφεύγεται η δημιουργία νέων σημείων συγκέντρωσης τάσεων, λόγω της απουσίας θερμικών τάσεων (συγκολλήσεις) και οπών (κοχλιωτά μεταλλικά επιθέματα), καθιστώντας την κατασκευή ανθεκτική σε κόπωση. Οι επισκευές με σύνθετο επίθεμα μπορούν να γίνουν είτε μονόπλευρα, είτε αμφίπλευρα, σε αντίθεση με την εφαρμογή κοχλιωτών μεταλλικών επιθεμάτων όπου απαιτείται προσβασιμότητα και από τις δύο πλευρές του προς επισκευή ελάσματος.

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). 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 1.1 φαίνεται παραστατικά μια διάταξη, που περιλαμβάνει επίθεμα από σύνθετο υλικό, κολλητικό μέσο και επιφάνεια από αλουμίνιο.



Σχήμα 1.1: Επίθεμα από σύνθετο υλικό με ίνες από άνθρακα κολλημένο σε μεταλλική πλάκα από αλουμίνιο [Gravorac, 2008]

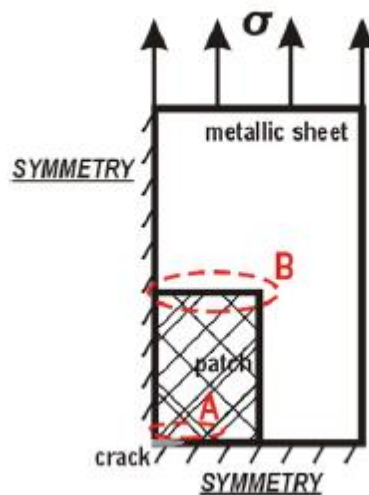
Ο μηχανισμός ενίσχυσης λειτουργεί ως εξής: οι τάσεις μεταφέρονται από τη μεταλλική πλάκα που περιέχει τη δομική αστοχία, στις ίνες του επιθέματος μέσω διάτμησης, διαμέσου του στρώματος της κόλλας, ανακουφίζοντας έτσι την περιοχή που επισκευάστηκε. Ο κίνδυνος αποκόλλησης του επιθέματος από την κυρίως 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 επιτυχία της επισκευής με σύνθετα επιθέματα εξαρτάται, κυρίως, από τις ιδιότητες του κολλητικού δεσμού και του επιθέματος. Επίσης, για την ποιότητά της καθοριστικό

ρόλο παίζουν η προετοιμασία της επιφάνειας και οι διαδικασίες κατασκευής της. [Wang, 2002]

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. 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]

Όσον αφορά το επίθεμα, εκτός από τις ιδιότητές του, σημαντικό ρόλο παίζει και η γεωμετρία του, καθώς καθορίζει το που θα ξεκινήσει η αποκόλλησή του. Έτσι, σε ρωγατωμένα χαλύβδινα ελάσματα που έχουν ενισχυθεί με επίθεμα από σύνθετα υλικά έχει διερευνηθεί ο ρόλος της γεωμετρίας της επισκευής (πάχος και πλάτος επιθέματος, πάχος κολλητικού δεσμού και μήκος της επικλινούς διαμόρφωσης) στην εμφάνιση και εξέλιξη της αποκόλλησης.



Σχήμα 1.2: Υποψήφιες περιοχές έναρξης της αποκόλλησης του επιθέματος

Έχει διαπιστωθεί ότι, αναλόγως του πάχους του επιθέματος, η αποκόλληση ξεκινά είτε στην ακμή του επιθέματος (καταστροφικό για την επισκευή), είτε στην περιοχή ακριβώς πάνω από τη ρωγμή (μη καταστροφικό), όπως φαίνεται στο σχήμα 1.2. Για μικρές τιμές του πάχους του επιθέματος, η αποκόλληση ξεκινάει στη περιοχή της ρωγμής, ενώ για μεγάλες στην ακμή του επιθέματος. Αυτό συμβαίνει, γιατί καθώς μειώνουμε το πάχος του, οι διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται στο άκρο του μειώνονται (ρόλος της επικλινούς

διαμόρφωσης), ενώ οι αντίστοιχες στη περιοχή της ρωγμής αυξάνονται (μικρότερη αντίσταση έναντι ανοίγματος της ρωγμής). Καθώς αυξάνεται το πάχος της κόλλας, αυξάνει η αντοχή της επισκευής. Παρόλ' αυτά, δεν επηρεάζεται η θέση έναρξης της αποκόλλησης. Επίσης, το πλάτος του επιθέματος έχει ελάχιστη επίδραση στην έναρξη της αποκόλλησης και μηδενική στην εξέλιξή της. Σχετικά με το μήκος της επικλινούς διαμόρφωσης, δεν επηρεάζει τις διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται στην περιοχή της ρωγμής, παρά μόνο στο άκρο του επιθέματος. [Paranikos, 2007]

1.3 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στην κατεύθυνση αυτή κινείται και η συγκεκριμένη διπλωματική 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. Επίσης, εξετάζεται το φορτίο διαρροής του χάλυβα, αλλά και το φορτίο πλήρους αστοχίας του επιθέματος (όπου είναι εφικτό), έτσι ώστε να διερευνηθούν όλοι οι τρόποι αστοχίας της κατασκευής.

Σκοπός, λοιπόν, της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να εξετάσει την επίδραση διαφόρων παραμέτρων της γεωμετρίας του επιθέματος από σύνθετα υλικά σε διαβρωμένες χαλύβδινες πλάκες. Χρησιμοποιήθηκε για το λόγο αυτό, η Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων με χρήση στοιχείων cohesive, για την καλύτερη προσομοίωση του κολλητικού δεσμού μεταξύ του επιθέματος και του χάλυβα.

Αρχικά, στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στα σύνθετα υλικά, καθώς και μια σύντομη ιστορική αναδρομή της εξέλιξής τους. Στη συνέχεια, αναφέρονται στοιχεία σχετικά με τις μεθόδους επισκευής χαλύβδινων ελασμάτων με έμφαση στις επισκευές με επίθεμα από σύνθετα υλικά.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύεται διεξοδικά ο τρόπος μοντελοποίησης με τη χρήση Πεπερασμένων Στοιχείων. Περιγράφονται όλα τα στάδια κατασκευής του μοντέλου της διαβρωμένης πλάκας με ενίσχυση από σύνθετο επίθεμα, με τη βοήθεια του προγράμματος Πεπερασμένων Στοιχείων ANSYS. Επίσης, περιγράφεται ο τρόπος εισαγωγής των cohesive στοιχείων, αλλά και ο τρόπος φόρτισης της κατασκευής.

Τέλος, στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι παράμετροι που επιλέχθηκαν για την παραμετρική μελέτη και περιγράφεται ο τρόπος εξαγωγής και επεξεργασίας των αποτελεσμάτων, έτσι ώστε να διερευνηθεί ο τρόπος με τον οποίον επιδρούν οι διάφορες παράμετροι στην αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης του διαβρωμένου χαλύβδινου ελάσματος με επίθεμα από σύνθετα υλικά.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αναλυτική λύση των εξισώσεων με τις οποίες περιγράφονται τα διάφορα μηχανικά προβλήματα είναι δυνατή μόνο σε ειδικές περιπτώσεις, όπου οι καταπονήσεις και τα γεωμετρικά σχήματα 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.

Υπήρχε, όμως, η ανάγκη να λυθούν και πιο σύνθετα προβλήματα και γι' αυτό το λόγο αναπτύχθηκαν διάφορες προσεγγιστικές μέθοδοι. Μία τέτοια μέθοδος είναι και η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων (ΜΠΣ). Αυτή η μέθοδος είναι μεν προσεγγιστική, αλλά μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα και έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα προβλήματα.

Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή σχεδιάζεται μια γεωμετρία (μοντέλο) και αφού εισαχθούν όλες οι απαιτούμενες παράμετροι, όπως ιδιότητες των υλικών, τασική κατάσταση, φορτία, κατακερματίζεται σε πολλά μικρά τμήματα τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με εξισώσεις συνέχειας. Μέσω της επίλυσης των εξισώσεων αυτών, σε συνδυασμό με τις εξισώσεις ισορροπίας κάθε στοιχείου, μπορούν να υπολογιστούν τα ζητούμενα μεγέθη σε οποιοδήποτε σημείο της κατασκευής. Υπάρχει πληθώρα προγραμματιστικών πακέτων πεπερασμένων στοιχείων (ANSYS, ABAQUS, κ.α.), τα οποία δίνουν πολλές επιλογές στο χρήστη ως προς τον τρόπο μοντελοποίησης, την επιλογή των στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν στο μοντέλο, τη μέθοδο επίλυσης, κτλ. Η ΜΠΣ είναι μία αξιόπιστη και ακριβής μέθοδος υπολογισμού της αποτελεσματικότητας επισκευών με σύνθετα υλικά, ικανή να διαχειριστεί πολύπλοκες μορφές και γεωμετρίες όσο πεπλεγμένες και αν είναι οι μητρικές εξισώσεις. 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.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία επιλέχτηκε το πρόγραμμα ANSYS, καθώς προσφέρει υψηλές δυνατότητες προσομοίωσης και ευκολία χειρισμού από την πλευρά του χρήστη. Σε γενικές γραμμές, η επίλυση ενός προβλήματος περιλαμβάνει τρία βασικά στάδια:

- **Προεπεξεργασία (Preprocessing)**

Στο στάδιο αυτό δημιουργείται η γεωμετρία, ορίζεται το πλέγμα (mesh) και ο τύπος στοιχείων που θα απαρτίζεται το μοντέλο. Επίσης, προσδιορίζονται οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών και επιβάλλονται οι φορτίσεις και συνοριακές συνθήκες. Έχοντας, λοιπόν, ολοκληρώσει το στάδιο αυτό έχουν καταρτιστεί οι εξισώσεις ισορροπίας που περιγράφουν το δεδομένο μοντέλο.

- **Επίλυση (Solution)**

Στο στάδιο αυτό επιλέγεται ο τύπος ανάλυσης που περιγράφει καλύτερα το δεδομένο πρόβλημα και επιλύεται το σύστημα εξισώσεων που έχει αναπτυχθεί στο προηγούμενο στάδιο.

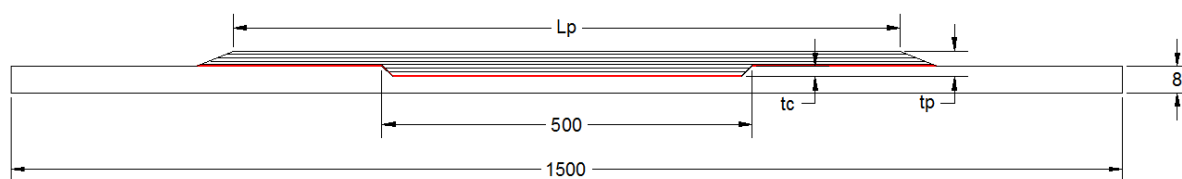
- **Μετεπεξεργασία (Postprocessing)**

Στο τελικό αυτό στάδιο, αφού έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία της επίλυσης, ελέγχεται η συμπεριφορά του μοντέλου και εξάγονται τα απαραίτητα αποτελέσματα.

Στα εδάφια που ακολουθούν αναλύεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη μοντελοποίηση με τη ΜΠΣ χαλύβδινης πλάκας, διαβρωμένης στο κεντρικό της τμήμα και ενισχυμένης από τη μια όψη με επίθεμα από σύνθετα υλικά, η οποία υπόκειται σε στατικό εφελκυστικό φορτίο. Εν συνεχεία, στο κεφάλαιο 3 το μοντέλο αυτό θα χρησιμοποιηθεί για την παραμετρική μελέτη. Ο κώδικας στον οποίο γίνεται αναφορά έχει χρησιμοποιηθεί και επαληθευτεί με πειράματα του προγράμματος Πυθαγόρας II σε παλαιότερη διπλωματική εργασία [Κοβεντάρου, 2012].

2.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ

Η γεωμετρία του μοντέλου με το οποίο ασχολείται η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία φαίνεται στο σχήμα 2.1. Πρόκειται για χαλύβδινη πλάκα μήκους $L_{st} = 1500$ mm και πάχους $t_{st} = 8$ mm στη μη διαβρωμένη περιοχή. Στο κέντρο της έχει υποστεί διάβρωση μήκους $L_c = 500$ mm και πάχους t_c . Έτσι, φέρει επίθεμα μήκους L_p και πάχους t_p στο οποίο επιλέγεται η επικλινή διαμόρφωση των άκρων, ώστε να αποφύγουμε τις υψηλές αποκολλητικές τάσεις που αναπτύσσονται στα άκρα του. Το μήκος της επικλινούς διαμόρφωσης είναι 50 mm. Για τη σχεδίαση αυτής της διαμόρφωσης του επιθέματος, αυτό χωρίστηκε σε 4 τμήματα ίσου πάχους αλλά διαφορετικού μήκους. Έτσι, κάθε τμήμα έχει πάχος $t_p/4$. Τέλος, το πάχος του κολλητικού μέσου θεωρήθηκε ίσο με 0.1 mm.



Σχήμα 2.1: Γεωμετρία μοντέλου

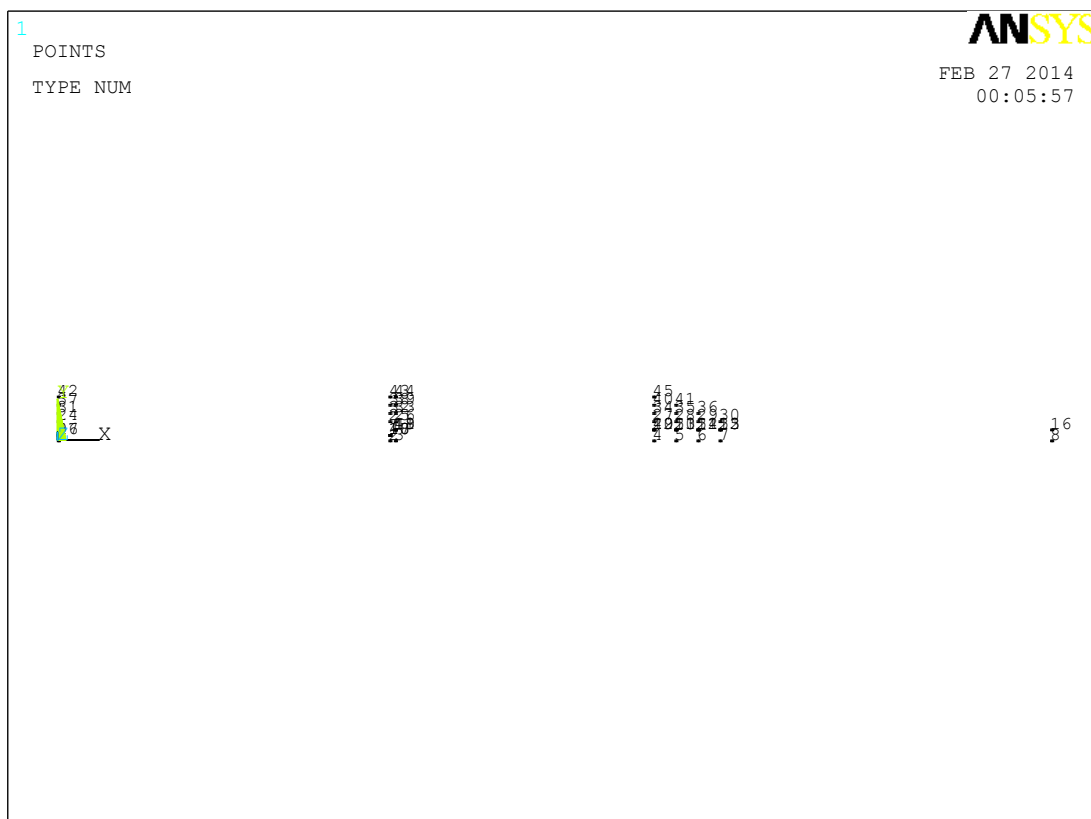
Όπως γίνεται αντιληπτό, σχεδιάζουμε το μοντέλο στις δύο διαστάσεις, θεωρώντας ότι οι ιδιότητες παραμένουν σταθερές κατά το πλάτος, αλλά στην επεξεργασία των αποτελεσμάτων το ανάγουμε σε τρεις, θεωρώντας πλάτος $W = 140 \text{ mm}$. Αυτό γίνεται ώστε να μειωθεί ο χρόνος κατά την επίλυση. Εφαρμόζοντας την ίδια λογική, θα αξιοποιήσουμε πλήρως τη συμμετρία της γεωμετρίας, των υλικών, της φόρτισης και των συνοριακών συνθηκών του μοντέλου, όποτε θα μοντελοποιηθεί μόνο το ήμισυ της κατασκευής.

Για τη σχεδίαση του συγκεκριμένου μοντέλου θα πρέπει να γίνουν αρχικά κάποιες παραδοχές:

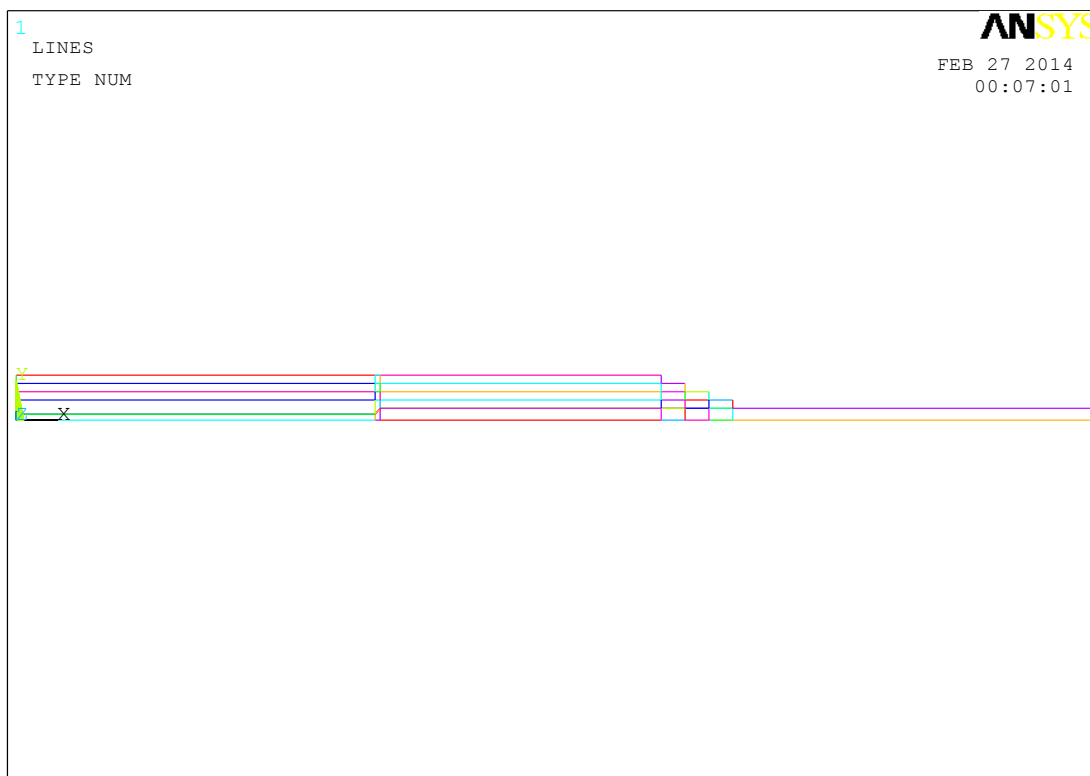
- η διαβρωμένη επιφάνεια της χαλύβδινης πλάκας έχει ομοιόμορφη μείωση πάχους
- η μετάβαση από το συμπαγές στο διαβρωμένο τμήμα γίνεται με σταθερή κλίση 45° .
- η άνω ελεύθερη πλευρά του επιθέματος παραμένει οριζόντια και επίπεδη κατά το μήκος του

Αξίζει να αναφερθεί ότι η τρίτη παραδοχή δεν επηρεάζει καθόλου τα αποτελέσματα.

Αρχικά, εισάγονται τα σημεία που καθορίζουν την κατασκευή, καθώς και ορισμένα βοηθητικά ώστε να σχεδιαστεί καλύτερα η διαβρωμένη περιοχή και η ελάττωση του μήκους του επιθέματος (σχήμα 2.2), ενώ στη συνέχεια τα σημεία αυτά ενώνονται με κατάλληλες γραμμές (σχήμα 2.3).



Σχήμα 2.2: Τα σημεία που αποτελούν το μοντέλο



Σχήμα 2.3: Σχεδίαση γραμμών

2.3 ΟΡΙΣΜΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ

Επόμενο στάδιο είναι ο ορισμός των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών που θα προσομοιωθούν. Οι τιμές τους φαίνονται στους πίνακες 2.1 - 2.3.

Αρχικά, ο χάλυβας είναι ιστροπικό υλικό, άρα έχει τις ίδιες ιδιότητες σε όλες τις διευθύνσεις. Επομένως, χαρακτηρίζεται από το μέτρο ελαστικότητας E , το λόγο Poisson ν , το μέτρο κράτυνσης που χαρακτηρίζει την πλαστική περιοχή του χάλυβα και έχει ληφθεί ίσο με 0.015 του μέτρου ελαστικότητας, καθώς και το όριο διαρροής σ_0 . Οι ιδιότητες του παρουσιάζονται στον πίνακα 2.1 και έχουν ληφθεί από διαθέσιμα τεχνικά φυλλάδια.

Πίνακας 2.1: Μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα που χρησιμοποιήθηκαν στη μοντελοποίηση

Υλικό	E [MPa]	ν	Μέτρο κράτυνσης [MPa]	σ_0 [MPa]
Χάλυβας	207000	0.30	3105	235

Το σύνθετο επίθεμα είναι ορθοτροπικό υλικό. Γι' αυτό το λόγο ορίζονται οι μηχανικές ιδιότητες (μέτρο ελαστικότητας, λόγος Poisson και μέτρο διάτμησης) σε κάθε διεύθυνση ξεχωριστά. Πρόκειται για μονοαξονικό (unidirectional, UD) σύνθετο υλικό του οποίου οι ιδιότητες, που παρουσιάζονται στον πίνακα 2.2, έχουν επιλεγεί ως μέσες χαρακτηριστικές τιμές ενός τέτοιου υλικού. Το μέτρο ελαστικότητάς του στη διεύθυνση x παίρνει τιμές από 40 έως 120 GPa.

Πίνακας 2.2: Μηχανικές ιδιότητες του επιθέματος που χρησιμοποιήθηκαν στη μοντελοποίηση

Υλικό	E_1 [MPa]	E_2 [MPa]	E_3 [MPa]	ν_{12}	ν_{23}	ν_{13}	G_{12} [MPa]	G_{23} [MPa]	G_{13} [MPa]
Επίθεμα	E_p	3500	3500	0.30	0.32	0.30	2500	2000	2500

Για το κολλητικό μέσο γίνεται χρήση των cohesive elements, επομένως θα χρησιμοποιήσουμε το μοντέλο που αξιοποιεί τους δι-γραμμικούς αλγόριθμους (bilinear cohesive zone material model). Έτσι, απαιτείται η εισαγωγή τεσσάρων παραμέτρων που περιγράφουν τις ιδιότητες των στοιχείων αυτών, της μέγιστη τάσης S_{max} σε καταπόνηση τύπου I (ή ορθή τάση), της κρίσιμης ενέργειας θραύσης G_{cn} για τύπο I, της μέγιστης τάσης T_{max} σε καταπόνηση τύπου II (ή διατμητική τάση) και της κρίσιμης ενέργειας θραύσης G_{ct} για τύπο II. Περαιτέρω αναφορά στα cohesive elements γίνεται στο εδάφιο 2.8. Οι ιδιότητες που φαίνονται στον πίνακα 2.3 έχουν ληφθεί από τη διπλωματική εργασία της Κοβεντάρου (2012).

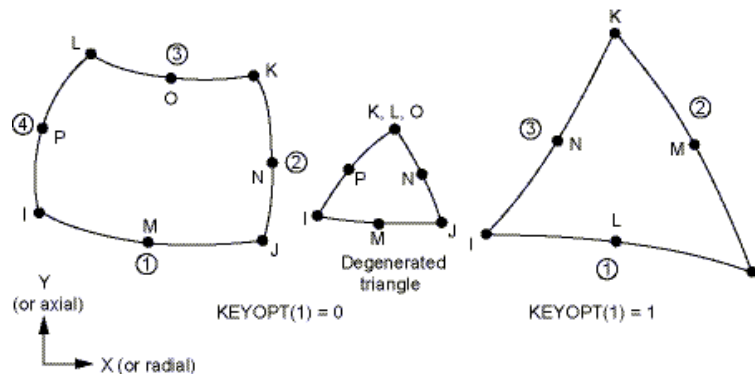
Πίνακας 2.3: Μηχανικές ιδιότητες του κολλητικού μέσου που χρησιμοποιήθηκαν στη μοντελοποίηση

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

2.4 ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΥΠΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

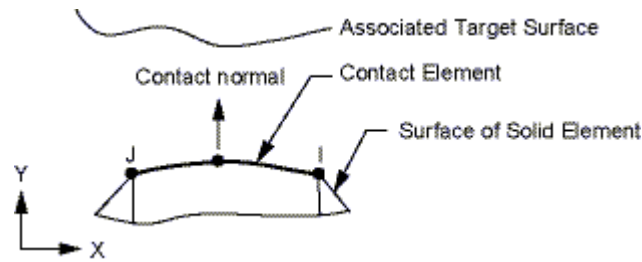
Η μοντελοποίηση όλων των τμημάτων της κατασκευής (μέταλλο, κολλητικό μέσο, επίθεμα) μπορεί να γίνει είτε με χρήση δισδιάστατων (2D plane elements) είτε τρισδιάστατων στοιχείων (3D solid elements). Λόγω του μεγάλου υπολογιστικού χρόνου και της επεξεργαστικής ισχύος που απαιτείται από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή για να αναλύσει τα τρισδιάστατα στοιχεία, στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν 2D στοιχεία. Επομένως, τα αποτελέσματα των φορτίων που υπολογίστηκαν και εξήχθησαν από την ανάλυση του ANSYS πολλαπλασιάστηκαν με την τρίτη διάσταση, ώστε να αφορούν την 3D κατασκευή.

Ο τύπος των στοιχείων του μοντέλου επιλέγεται από τη βιβλιοθήκη που παρέχει το ANSYS, όπου ανάλογα με το προς αντιμετώπιση πρόβλημα, επιλέγουμε το στοιχείο με τα απαραίτητα χαρακτηριστικά. Έτσι, στο συγκεκριμένο μοντέλο χρησιμοποιήθηκε το δισδιάστατο 8 – κομβικό στοιχείο PLANE183, με δύο βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο (x και y διευθύνσεις), με γεωμετρία που φαίνεται στο σχήμα 2.4.

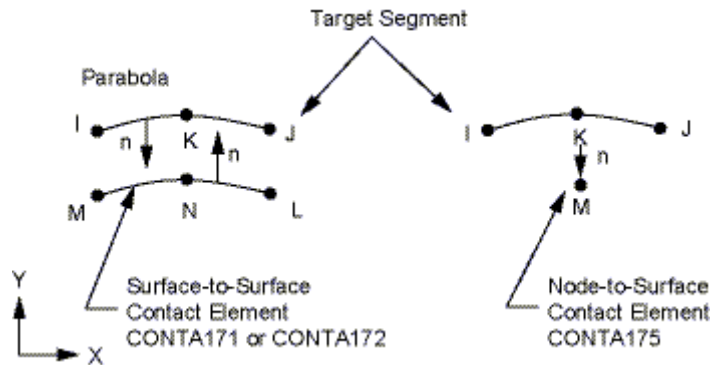


Σχήμα 2.4: Γεωμετρία του στοιχείου PLANE183

Επίσης, είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός των στοιχείων επαφής στη διεπιφάνεια χάλυβα – κολλητικού δεσμού. Η επιλογή του τύπου τους καθορίζεται βάσει του τύπου των στοιχείων που επιλέξαμε παραπάνω, δηλαδή του δισδιάστατου, οχτακομβικού στοιχείου PLANE183. Έτσι, επιλέγεται το στοιχείο CONTA172 (Σχήμα 2.5), το οποίο αποτελείται από τρεις κόμβους και το αντίστοιχο για τη δεύτερη επιφάνεια (target element) TARGE169 (Σχήμα 2.6).



Σχήμα 2.5: Γεωμετρία του στοιχείου CONTACT172



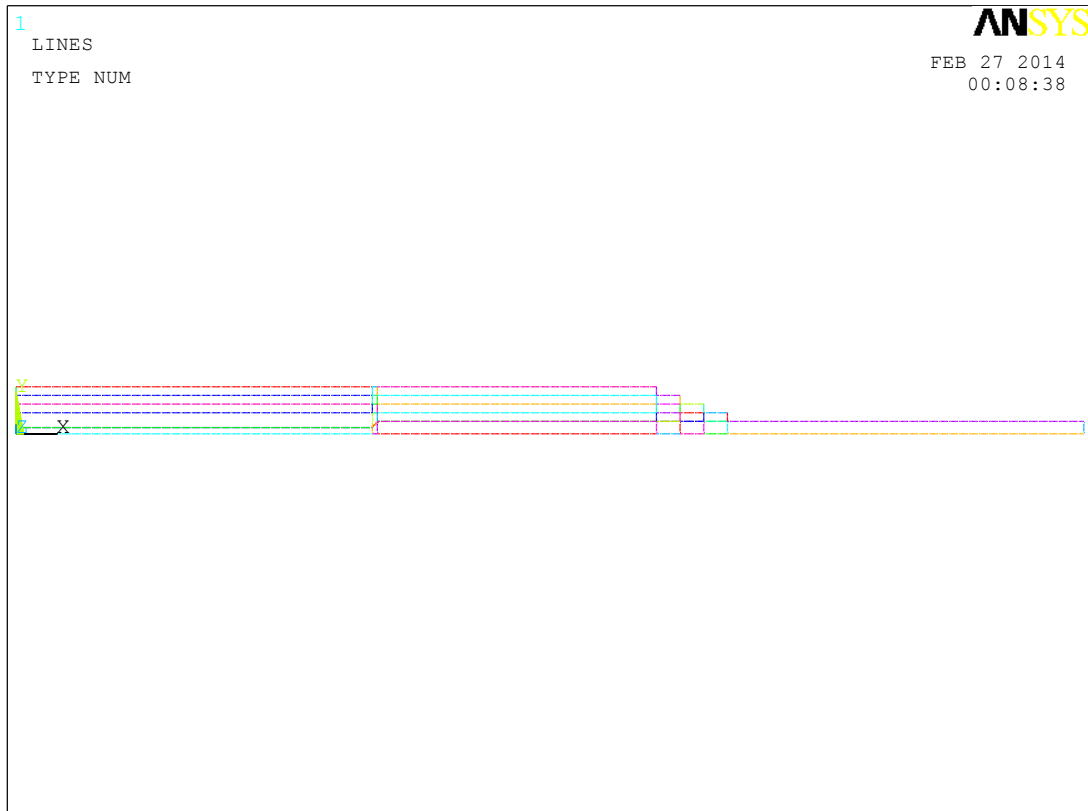
Σχήμα 2.6: Γεωμετρία του στοιχείου TARGET169

2.5 ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

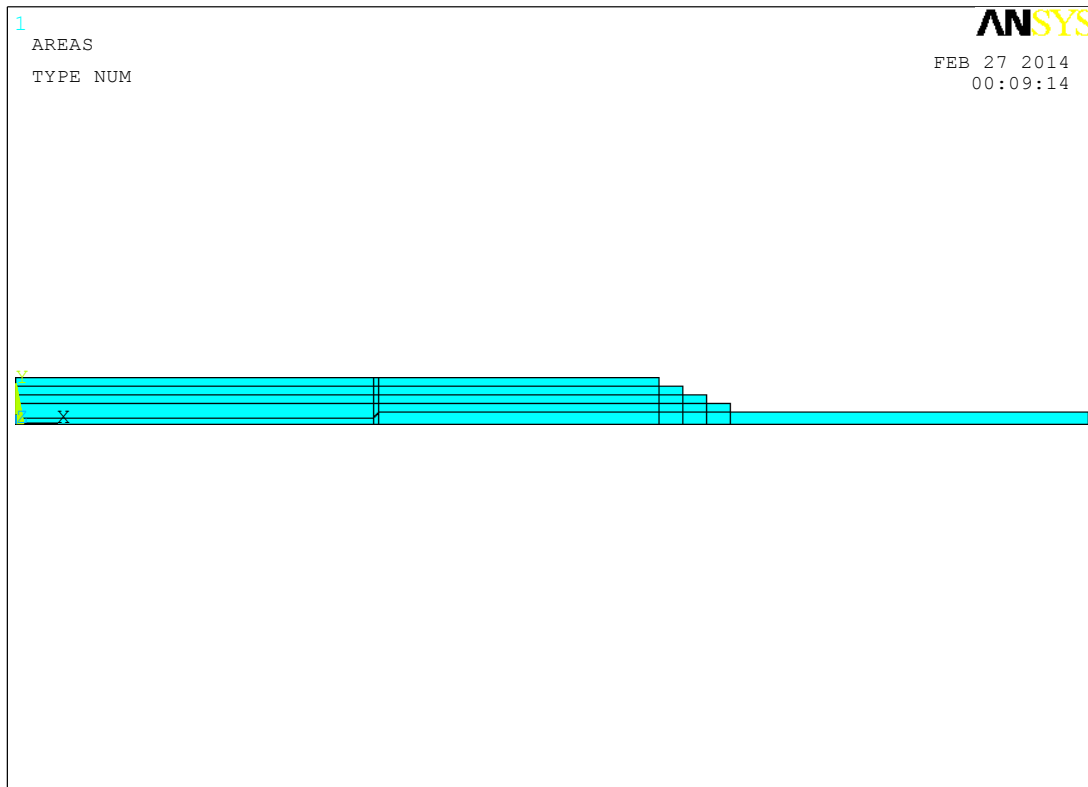
Έχοντας ορίσει πλέον τη γεωμετρία του μοντέλου και τις ιδιότητες των στοιχείων από τα οποία αποτελείται, θα πρέπει να σχηματιστεί εν συνεχεία ο δισδιάστατος κάνναβος βάσει του οποίου θα γίνει η ανάλυση.

Για να σχεδιάσουμε τον κάνναβο θα πρέπει πρώτα οι γραμμές που ορίζουν το μοντέλο να χωριστούν σε τμήματα (Σχήμα 2.7) έτσι ώστε να οριστούν τα στοιχεία. Αυτό γίνεται με τη βοήθεια της εντολής *lesize* στην οποία μας δίνεται η δυνατότητα να ορίσουμε ένα σταθερό ή μεταβαλλόμενο μήκος στοιχείου.

Εφόσον με την εντολή *lesize* έχει πραγματοποιηθεί η διαμέριση των γραμμών που περικλείουν την υπό μοντελοποίηση κατασκευή, μπορεί πλέον να παραχθεί το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων. Αρχικά, δημιουργούνται οι επιφάνειες που ορίζονται από τις αντίστοιχες γραμμές με τη βοήθεια της εντολής *al* (Σχήμα 2.8). Η εντολή *amesh* παράγει το δισδιάστατο κάνναβο του σχήματος 2.9 λαμβάνοντας υπόψιν τη διαμέριση των γραμμών, αλλά και τις ήδη σχηματισθείσες επιφάνειες.



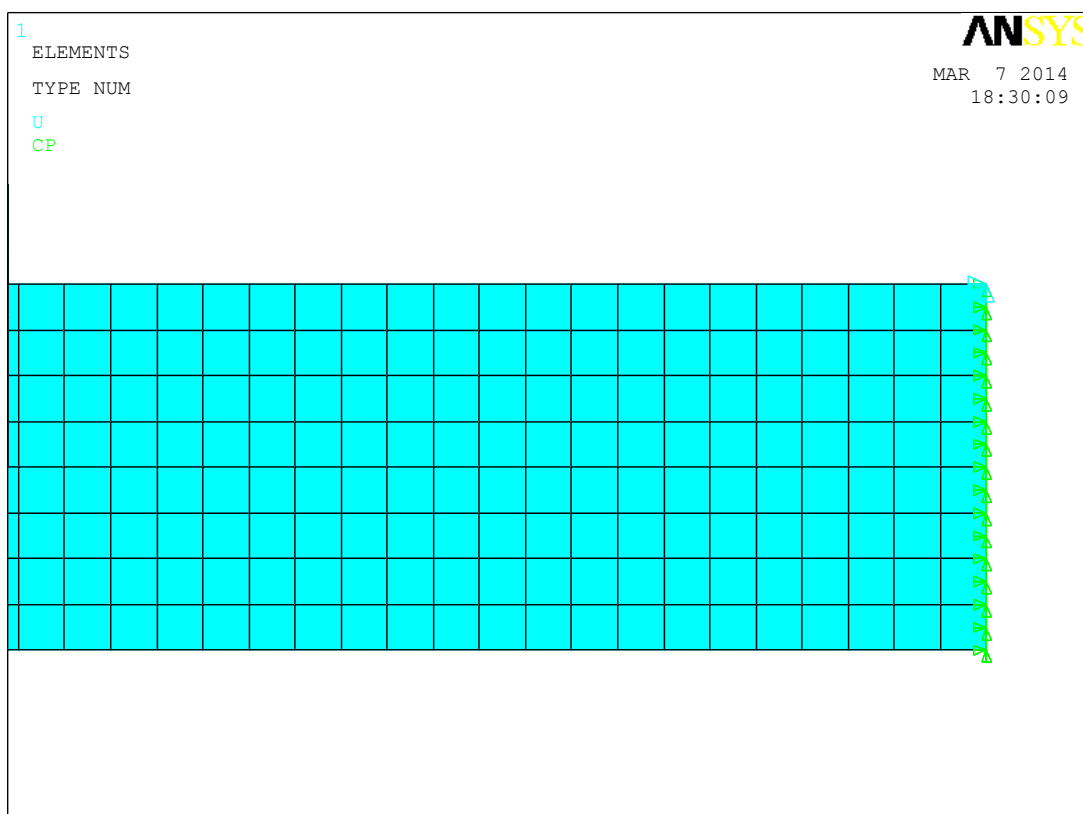
Σχήμα 2.7: Διαμέριση των γραμμών του μοντέλου



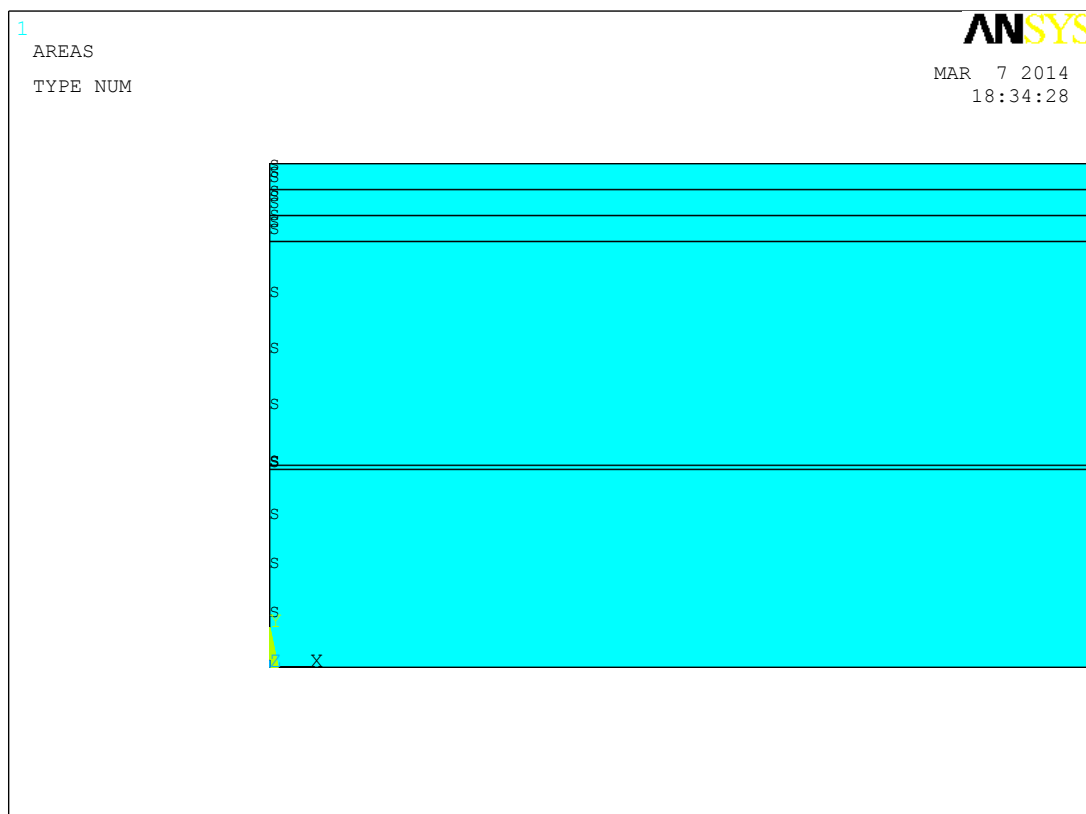
Σχήμα 2.8: Σχεδίαση επιφανειών

2.6 ΟΡΙΣΜΟΣ ΣΥΝΟΡΙΑΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΚΑΙ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

Επόμενο βήμα είναι ο καθορισμός διάφορων παραμέτρων που αφορούν στην επίλυση του προβλήματος. Στο μοντέλο επιβλήθηκε στατικός εφελκυσμός, δηλαδή επιβολή μετατόπισης με σταθερό ρυθμό στο ελεύθερο άκρο του κατά τη διεύθυνση του μήκους (άξονας x) και μηδενική μετατόπιση κατά τη διεύθυνση του πάχους (άξονας y) όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.9. Επιπλέον ορίζουμε το επίπεδο συμμετρίας στο άλλο άκρο της κατασκευής (Σχήμα 2.10).



Σχήμα 2.9: Οριακές συνθήκες και φόρτισης



Σχήμα 2.10: Αξονας συμμετρίας

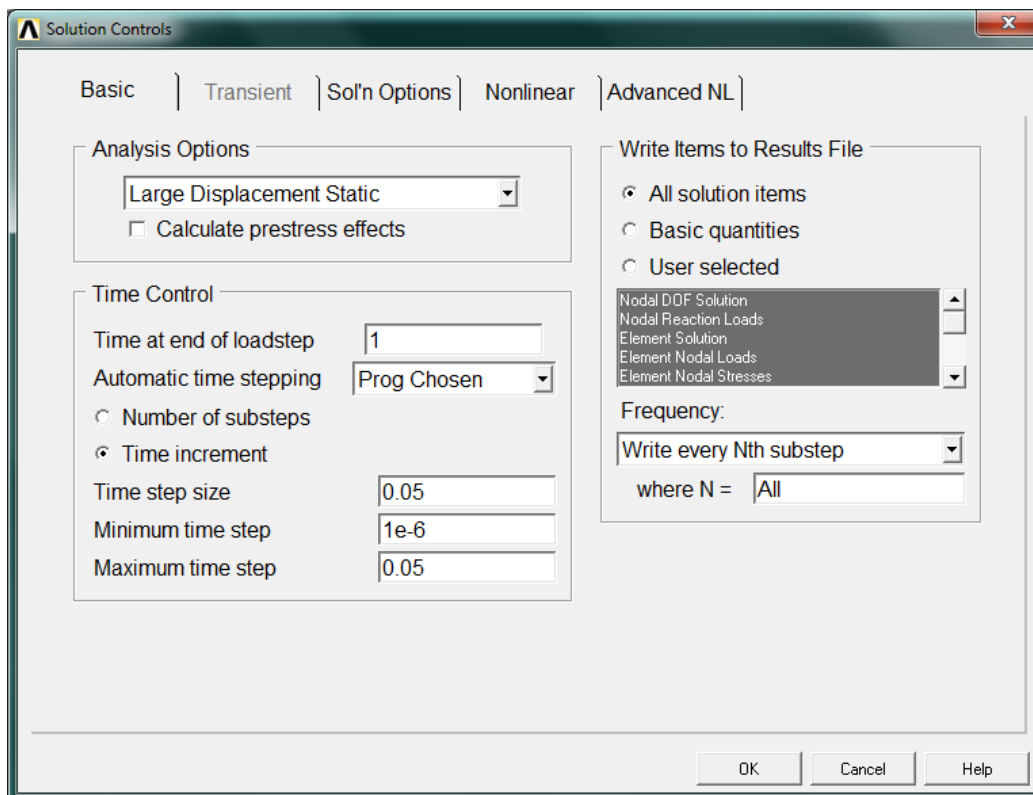
2.7 ΤΥΠΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

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 κατακεραματίζεται 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 μέγεθος 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.

Επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί ο αυτόματος τρόπος ορισμού των βημάτων της επίλυσης, όπου κρίνει το πρόγραμμα ότι χρειάζεται. Αρχικά, ορίζεται το μέγεθος του χρονικού βήματος (time step size) το οποίο όταν χρησιμοποιείται ο αυτόματος τρόπος υπολογισμού των βημάτων δηλώνει τη χρονική έναρξη επιβολής της μετατόπισης (starting time substep). Στη συνέχεια, δηλώνουμε το ελάχιστο και μέγιστο μέγεθος των βημάτων (minimum και maximum timestep) στα οποία θα διαμοιραστεί η συνολική μετατόπιση και τον χρόνο στο τέλος της επιβολής της μετατόπισης (time at end of loadstep). Στο σχήμα 2.11 που ακολουθεί φαίνονται οι τιμές που επιλέχθηκαν για τα παραπάνω μεγέθη. Πιο συγκεκριμένα, στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε time step size $t = 0.05$, δηλαδή τη χρονική στιγμή $t = 0.05$ η κατασκευή φορτίζεται με $0.05 \cdot u_x$ και λήγει τη χρονική στιγμή $t = 1$ κατά την οποία η κατασκευή φορτίζεται με το σύνολο της επιβληθείσας μετατόπισης u_x . Για το ελάχιστο χρονικό βήμα επίλυσης επιλέχθηκε η τιμή $t = 10^{-6}$ διότι δίνει τα πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα [Κοβεντάρου, 2009] και μέγιστο $t = 0.05$.

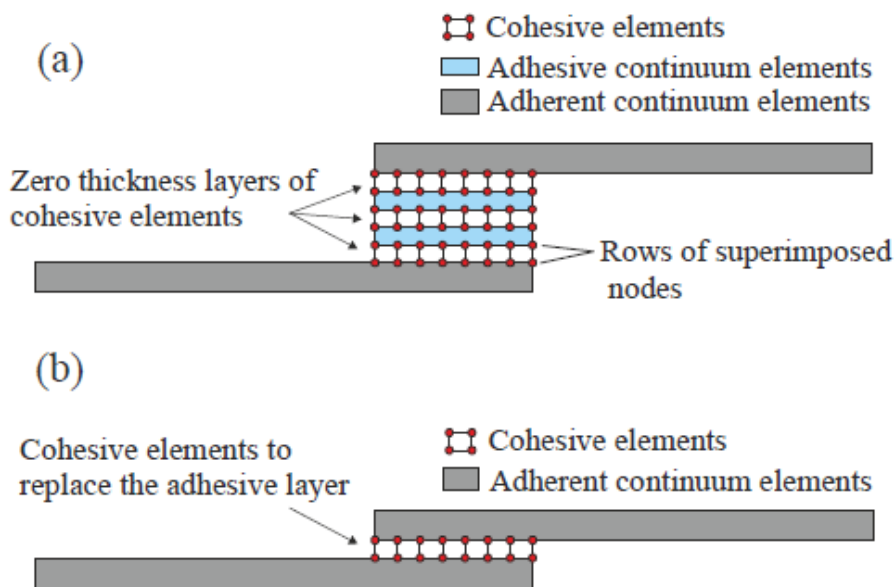


Σχήμα 2.11: Επιλογή παραμέτρων ανάλυσης

2.8 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ COHESIVE ELEMENTS

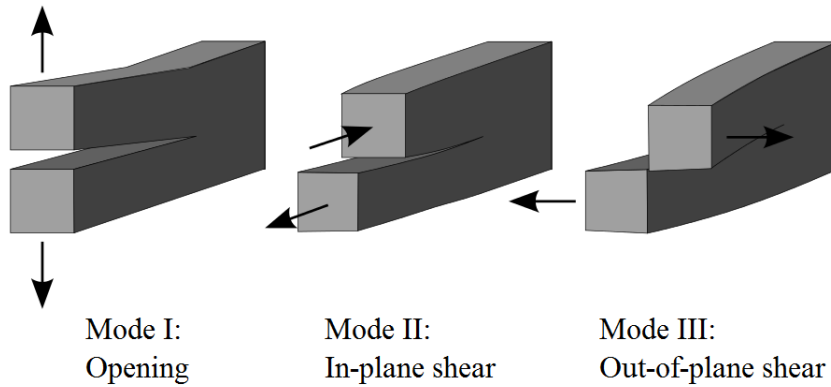
Για να προσομοιωθεί καλύτερα ο κολλητικός δεσμός μεταξύ επιθέματος και χαλύβδινου ελάσματος είναι απαραίτητη η χρήση cohesive elements, όπως έχει αναφερθεί και στο εδάφιο 2.4, έτσι ώστε να επιτευχθεί ακριβέστερη πρόβλεψη του φορτίου αποκόλλησης του επιθέματος από το χαλύβδινο έλασμα και έτσι να μοντελοποιηθεί πιο ικανοποιητικά η συνολική συμπεριφορά της κατασκευής.

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 2.12), [Anyfantis, 2012α].



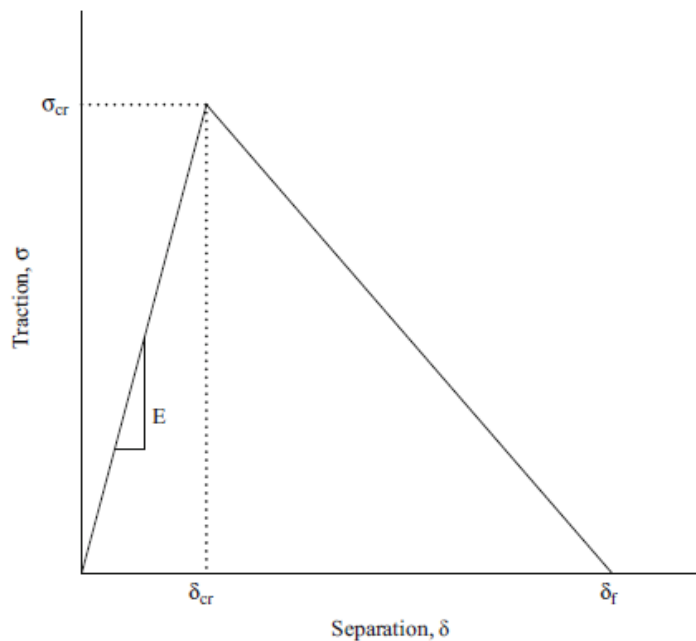
Σχήμα 2.12: Χρήση cohesive στοιχείων για προσομοίωση κολλητικού δεσμού

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 2.13.



Σχήμα 2.13: 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 2.14 [Lee, 2010].



Σχήμα 2.14: Τριγωνικός νόμος – γραφική αναπαράσταση

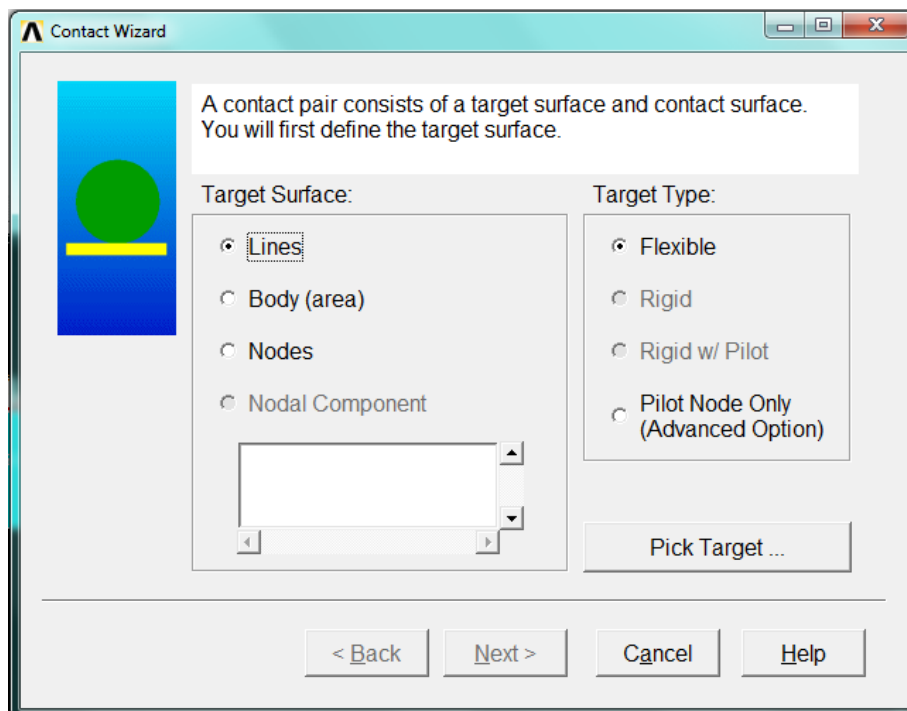
Ο τριγωνικός νόμος περιγράφει την σταδιακή υποβάθμιση του κολλητικού δεσμού, καθώς αυτός υπόκειται σε καταπόνηση. Το εμβαδό του τριγώνου του σχήματος 2.14 αντιστοιχεί στην κρίσιμη ενέργεια θραύσης και η κορυφή του τριγώνου στη μέγιστη τάση (ορθή ή διατμητική) που μπορεί να αναπτύξει το υλικό πριν υποβαθμιστεί. Στην παρούσα εργασία, θεωρούμε ότι τα cohesive στοιχεία καταπονούνται με συνδυασμό των mode I, II του σχήματος 2.13. 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} .

Αρχικά, εισάγουμε διάφορες παραμέτρους που χαρακτηρίζουν τόσο τις ιδιότητες του κολλητικού δεσμού, όσο και του τρόπου αστοχίας, κάνοντας χρήση των εντολών *tb* και *tbdata*. Η επιλογή των παραμέτρων που αφορούν τις μηχανικές ιδιότητες της κόλλας έχει ήδη παρουσιαστεί στον πίνακα 2.3. Είναι όμως απαραίτητη και η εισαγωγή δύο ακόμα παραμέτρων. Πρόκειται για τον συντελεστή η ο οποίος χρησιμοποιείται για να ξεπεραστούν διάφορα προβλήματα σύγκλισης που ανακύπτουν κατά την επίλυση με χρήση της μεθόδου Newton-Raphson και τον συντελεστή β που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο του εφαπτομενικού "γλιστρήματος" στην περιοχή του κολλητικού δεσμού.

Πίνακας 2.4: Επιπλέον παράμετροι για τον σχηματισμό της συνεκτικής επιφάνειας

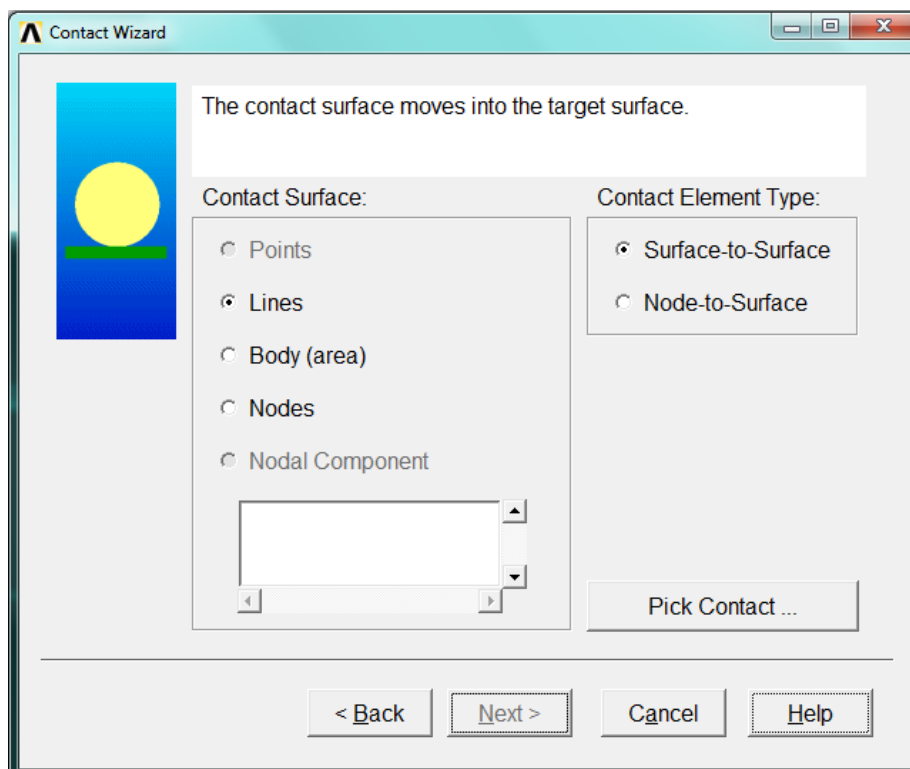
Υλικό	η	β
Κόλλα	0.00001	1

Εφόσον έχουμε ορίσει τις προδιαγραφές της επιφάνειας συνεκτικότητας, αλλά και τις ιδιότητές της, μπορούμε πλέον να την κατασκευάσουμε. Ο σχηματισμός του contact pair γίνεται μέσω του contact manager από όπου ανοίγουμε το contact wizard. Αρχικά, θα κατασκευάσουμε το contact pair του κολλητικού δεσμού, ξεκινώντας από την επιλογή του στοιχείου target (Σχήμα 2.15). Επιλέγουμε ως target surface την επιφάνεια της κόλλας και ως contact surface τον χάλυβα. Παρόλ' αυτά, τα αποτελέσματα δεν επηρεάζονται από την επιλογή αυτή, δηλαδή αν θεωρήσουμε ως επιφάνεια target τον χάλυβα και ως επιφάνεια contact τη κόλλα δεν παρατηρούμε καμία μεταβολή στα αποτελέσματα.

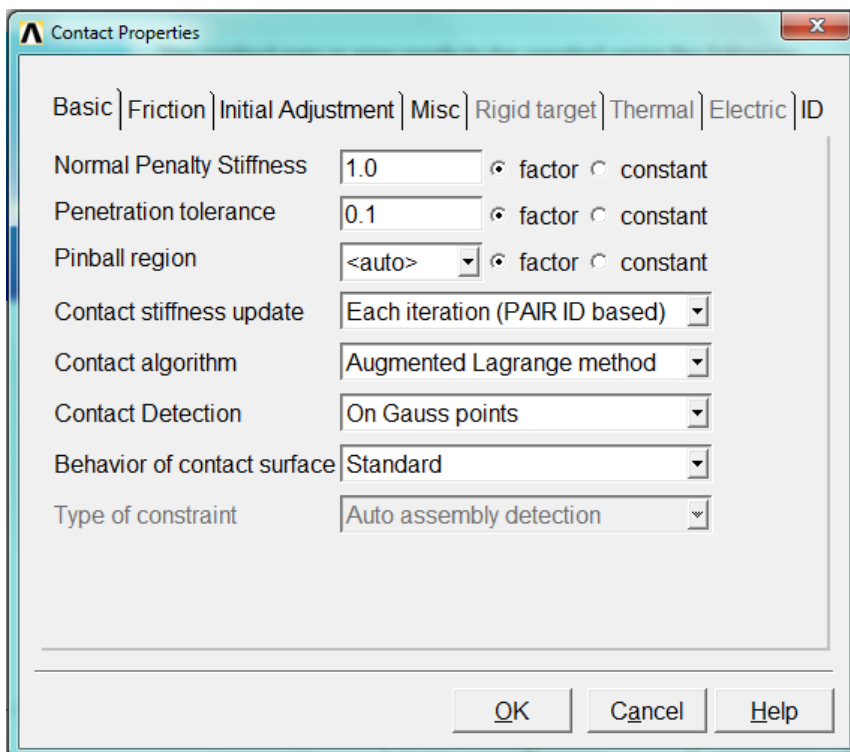


Σχήμα 2.15: Επιλογή target element

Επόμενο βήμα αποτελεί ο ορισμός του στοιχείου επαφής (Σχήμα 2.16) το οποίο θα πρέπει να είναι συμβατό με το είδη επιλεγθέν στοιχείο target. Στη συνέχεια, στο παράθυρο που εμφανίζεται, επιλέγουμε το υλικό που χαρακτηρίζει το συγκεκριμένο ζεύγος, καθώς και διάφορα χαρακτηριστικά της δημιουργούμενης σύνδεσης, όπως η μέγιστη και ελάχιστη επιτρεπτή απομάκρυνση μεταξύ των μερών που την συνιστούν, η επιτρεπόμενη διείσδυση, η αντίσταση σε ολίσθηση, καθώς και το είδος του δεσμού μεταξύ των δύο στοιχείων (Σχήμα 2.17). Εφόσον όλες οι κατάλληλες επιλογές έχουν γίνει, δημιουργούμε το ζεύγος επαφής.



Σχήμα 2.16: Επιλογή contact element



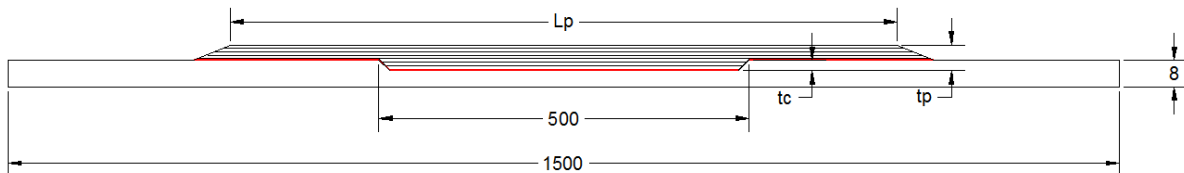
Σχήμα 2.17: Επιλογή συμπεριφοράς επιφάνειας επαφής

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

3.1 ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

Όπως ήδη έχει αναφερθεί στο πρώτο κεφάλαιο, υπάρχουν μια σειρά από παράγοντες που επιδρούν στην αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης με επιθέματα από σύνθετα υλικά. Έτσι, έγινε η παραμετρική μελέτη με την οποία ασχολείται η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία κατά την οποία, μέσω της ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία, μεταβλήθηκαν διάφορα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μοντέλου και μηχανικές ιδιότητες των υλικών, ώστε να εξεταστεί η επίδραση τους στην αντοχή της κατασκευής.

Οι διαστάσεις του επιθέματος που επιλέχθηκαν να διερευνηθούν φαίνονται στο σχήμα 3.1 και αφορούν το μοντέλο που παρουσιάστηκε ήδη στο εδάφιο 2.2. Πιο συγκεκριμένα, μελετήθηκε η επίδραση του πάχους της διαβρωμένης περιοχής του χαλύβδινου ελάσματος (t_c) το οποίο εκφράστηκε υπό τη μορφή λόγου ως προς το πάχος της μη διαβρωμένης περιοχής του χάλυβα (t_{st}), έτσι ώστε τα αποτελέσματα της μελέτης να μπορούν να επεκταθούν και σε άλλες μελέτες. Έτσι, εξετάστηκαν μοντέλα με λόγο $t_c/t_{st} = 0.25, 0.5$, δηλαδή ελάσματα με πάχος διάβρωσης 2 και 4 mm.



Σχήμα 3.1: Γεωμετρία μοντέλου

Επιπλέον, μελετήθηκε η επίδραση του μήκους του επιθέματος (L_p) το οποίο παίρνει τιμές 500 (όσο δηλαδή το μήκος της διαβρωμένης περιοχής), 900 και 1300 mm. Μια άλλη παράμετρος που εξετάζεται αφορά τις ιδιότητες του επιθέματος και πρόκειται για το μέτρο ελαστικότητας (E_p) κατά τη διεύθυνση x, με τιμές 20, 40, 80 και 120 GPa. Τέλος, η τελευταία παράμετρος αφορά τον λόγο ακαμψίας επιθέματος – χαλύβδινης πλάκας (Stiffness Ratio, SR) ο οποίος καθορίζει έμμεσα το πάχος του επιθέματος (t_p) σύμφωνα με τη σχέση:

$$SR = \frac{E_p \cdot t_p}{E_{st} \cdot t_{st}} \quad (3.1)$$

από την οποία προκύπτει:

$$t_p = SR \frac{E_{st} \cdot t_{st}}{E_p} \quad (3.2)$$

Όπου: E_p , το μέτρο ελαστικότητας του επιθέματος από σύνθετο υλικό στη διεύθυνση του φορτίου,

t_p , το πάχος του σύνθετου επιθέματος,

E_{st} , το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα,

t_{st} , το πάχος της μη διαβρωμένης περιοχής του χαλύβδινου ελάσματος.

Έτσι, για λόγους ακαμψίας 0.1, 0.3 και 0.5 και για τα διαφορετικά μέτρα ελαστικότητας του επιθέματος, τα πάχη που προέκυψαν παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 3.1

Πάχη επιθέματος για τους διάφορους λόγους ακαμψίας και μέτρα ελαστικότητας

Μέτρο Ελαστικότητας E_p (GPa)	SR	Πάχος επιθέματος t_p (mm)
20	0.1	8.3
	0.3	24.8
	0.5	41.4
40	0.1	4.1
	0.3	12.4
	0.5	20.7
80	0.1	2.1
	0.3	6.2
	0.5	10.4
120	0.1	1.4
	0.3	4.1
	0.5	6.9

Συνεπώς, η παραμετρική μελέτη περιελάμβανε την επίλυση εβδομήντα δύο (72) μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων με τη βοήθεια του προγράμματος ANSYS v.14. Στον πίνακα 3.2 συνοψίζονται όλες οι παράμετροι με τις τιμές τους.

Πίνακας 3.2:
Εύρος μεταβολής των παραμέτρων

Παράμετροι	Επιλογή Τιμών				Επαναλήψεις
L_p (mm)	500	900	1300		3
t_c / t_{st}	0.25	0.50			2
μέτρο ελαστικότητας E_p (GPa)	20	40	80	120	4
λόγος ακαμψίας SR	0.1	0.3	0.5		3
Σύνολο					72

Η διερεύνηση της επίδρασης των μεγεθών που αναφέρθηκαν παραπάνω στην αποτελεσματικότητα της επισκευής, βασίστηκε στην εξαγωγή αποτελεσμάτων της δύναμης αντίδρασης της κατασκευής και της μετατόπισης στην οριζόντια διεύθυνση, καθώς και στην κατασκευή των αντίστοιχων διαγραμμάτων (Force [kN] – Displacement [mm]).

Σε συνδυασμό με τις γραφικές παραστάσεις, σε κάθε μοντέλο εξετάστηκε η κατάσταση επαφής (contact status) των υλικών της κατασκευής, με τη βοήθεια των εργαλείων που παρέχει το ANSYS, έτσι ώστε να διαπιστωθεί το πότε αρχίζει η αποκόλληση του επιθέματος, σε ποιο χρονικό βήμα δηλαδή, και κατά συνέπεια σε ποιά τιμή μετατόπισης και φορτίου αντιστοιχεί. Επιπλέον, χρησιμοποιώντας το κριτήριο Von Mises, που επίσης παρέχει το ANSYS, καθορίστηκε το φορτίο διαρροής του χάλυβα.

Λόγω του πλήθους των προς μελέτη μοντέλων, κρίθηκε απαραίτητη η ονοματολογία τους έτσι ώστε να διευκολυνθεί η αναφορά σε αυτά κατά τη συνέχεια της διπλωματικής εργασίας. Για το λόγο αυτό, το πρώτο γράμμα του ονόματος αναφέρεται στο μέτρο ελαστικότητας του επιθέματος. Έχουμε δηλαδή A, B, C, D για τα μέτρα ελαστικότητας 20, 40, 80 και 120 GPa αντιστοίχως. Στη συνέχεια ακολουθεί ένας αριθμός που αντιστοιχεί στο μήκος του επιθέματος και παίρνει τις αντίστοιχες τιμές, δηλαδή 500, 900 και 1300 mm. Ο επόμενος αριθμός αναφέρεται στο πάχος της διαβρωμένης περιοχής και οι τιμές που παίρνει είναι 2 και 4 mm. Τέλος, το τελικό νούμερο του ονόματος αφορά τον λόγο ακαμψίας και έχει τιμές 1, 3, 5 για τους αντίστοιχους λόγους ακαμψίας 0.1, 0.3 και 0.5. Για παράδειγμα, το μοντέλο B_900_4_3 φέρει επίθεμα μέτρου ελαστικότητας 40 GPa και μήκους 900 mm, το πάχος της διαβρωμένης περιοχής είναι 4 mm και ο λόγος ακαμψίας είναι 0.3.

Έτσι, εξετάζοντας όλες τις περιπτώσεις εξάγουμε τα αποτελέσματα που συνοψίζονται στους πίνακες 3.3 και 3.4. Οι δύο πρώτες από τα αριστερά στήλες περιέχουν τις τιμές του φορτίου κατά το οποίο ξεκινά η αποκόλληση του επιθέματος ($F_{\text{debonding,initiation}}$) σε kN και τις αντίστοιχες τιμές της μετατόπισης ($U_{\text{debonding,initiation}}$) σε mm. Στις επόμενες δύο στήλες καταγράφεται το φορτίο στο οποίο ο χάλυβας μπαίνει στην πλαστική περιοχή, ξεπερνά

δηλαδή το όριο διαρροής καθ' όλο το πάχος του και έχουμε αστοχία της κατασκευής λόγω διαρροής του χάλυβα (F_{yield}) σε kN και την αντίστοιχη μετατόπιση (U_{yield}) σε mm. Οι επόμενες δύο στήλες που ακολουθούν περιλαμβάνουν το μέγιστο φορτίο της κατασκευής (F_{max}) σε kN και την αντίστοιχη τιμή της μετατόπισης (U_{max}) σε mm. Τέλος, οι δύο τελευταίες στήλες περιέχουν την τιμή του φορτίου στο οποίο παρουσιάζεται απότομη πτώση της δύναμης στο διάγραμμα δύναμης - μετατόπισης, τη στιγμή που το επίθεμα ανοίγει απότομα με αποτέλεσμα την πλήρη αποκόλλησή του και συμβολίζεται με F_{drop} σε kN, ενώ η αντίστοιχη μετατόπιση με U_{drop} σε mm.

Πολλά από τα κελιά των τεσσάρων τελευταίων στηλών δεν περιέχουν τιμές, διότι είτε η μορφή της καμπύλης είναι τέτοια, στην περίπτωση του μέγιστου φορτίου, όπου δεν υπάρχει κάποιο μέγιστο για τη φόρτιση στην οποία υποβλήθηκε το μοντέλο, είτε στην περίπτωση αστοχίας του επιθέματος γιατί η αποκόλλησή του συντελούνταν σταδιακά με αποτέλεσμα να μην έχουμε κάποια απότομη πτώση (drop) στο διάγραμμα. Αυτό συμβαίνει κυρίως όταν το μήκος του επιθέματος είναι μεγαλύτερο του μήκους της διαβρωμένης περιοχής.

Πίνακας 3.3

Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων για τα υλικά μέτρου ελαστικότητας 20 και 40 GPa

Case	$F_{deb,init}$ [kN]	$U_{deb,init}$ [mm]	F_{yield} [kN]	U_{yield} [mm]	F_{max} [kN]	U_{max} [mm]	F_{drop} [kN]	U_{drop} [mm]
A_500_2_1	251	2,10	233	1,65	252	2,10	239	2,21
A_500_2_3	254	1,88	253	1,87	254	1,88	243	1,95
A_500_2_5	254	1,88	254	1,88	258	1,99	247	2,03
A_500_4_1	179	1,49	177	1,43	179	1,49	168	1,59
A_500_4_3	195	1,56	183	1,36	196	1,56	181	1,59
A_500_4_5	193	1,50	194	1,50	194	1,50	179	1,51
A_900_2_1	262	2,23	237	1,66	-	-	-	-
A_900_2_3	264	1,95	263	1,80	-	-	-	-
A_900_2_5	231	1,42	263	1,82	-	-	-	-
A_900_4_1	187	1,59	180	1,44	-	-	-	-
A_900_4_3	214	1,59	211	1,54	219	1,69	148	1,90
A_900_4_5	207	1,46	200	1,38	217	1,79	-	-
A_1300_2_1	263	2,26	239	1,65	-	-	-	-
A_1300_2_3	265	1,62	265	1,62	-	-	-	-
A_1300_2_5	175	0,99	265	1,75	-	-	-	-
A_1300_4_1	187	1,55	182	1,44	-	-	-	-
A_1300_4_3	225	1,57	208	1,35	237	1,78	-	-
A_1300_4_5	165	1,02	215	1,43	234	1,84	-	-
B_500_2_1	248	1,85	241	1,68	251	1,96	194	2,02
B_500_2_3	263	1,82	259	1,76	263	1,83	248	1,90
B_500_2_5	241	1,55	244	1,61	244	1,61	219	1,62
B_500_4_1	172	1,29	174	1,32	177	1,40	148	1,43
B_500_4_3	198	1,38	198	1,37	201	1,49	152	1,50
B_500_4_5	204	1,40	204	1,40	204	1,40	153	1,42
B_900_2_1	258	1,93	245	1,68	-	-	-	-
B_900_2_3	269	2,48	263	1,69	-	-	-	-
B_900_2_5	215	1,24	261	1,66	-	-	-	-
B_900_4_1	180	1,32	181	1,34	-	-	-	-
B_900_4_3	218	1,42	218	1,42	236	1,57	200	2,08
B_900_4_5	212	1,32	221	1,43	232	1,68	151	1,78
B_1300_2_1	260	1,93	247	1,68	-	-	-	-
B_1300_2_3	270	1,76	263	1,54	-	-	-	-
B_1300_2_5	193	1,01	256	1,51	-	-	-	-
B_1300_4_1	178	1,28	179	1,29	-	-	-	-
B_1300_4_3	226	1,39	226	1,38	-	-	-	-
B_1300_4_5	173	0,97	231	1,40	242	1,73	-	-

Πίνακας 3.4:

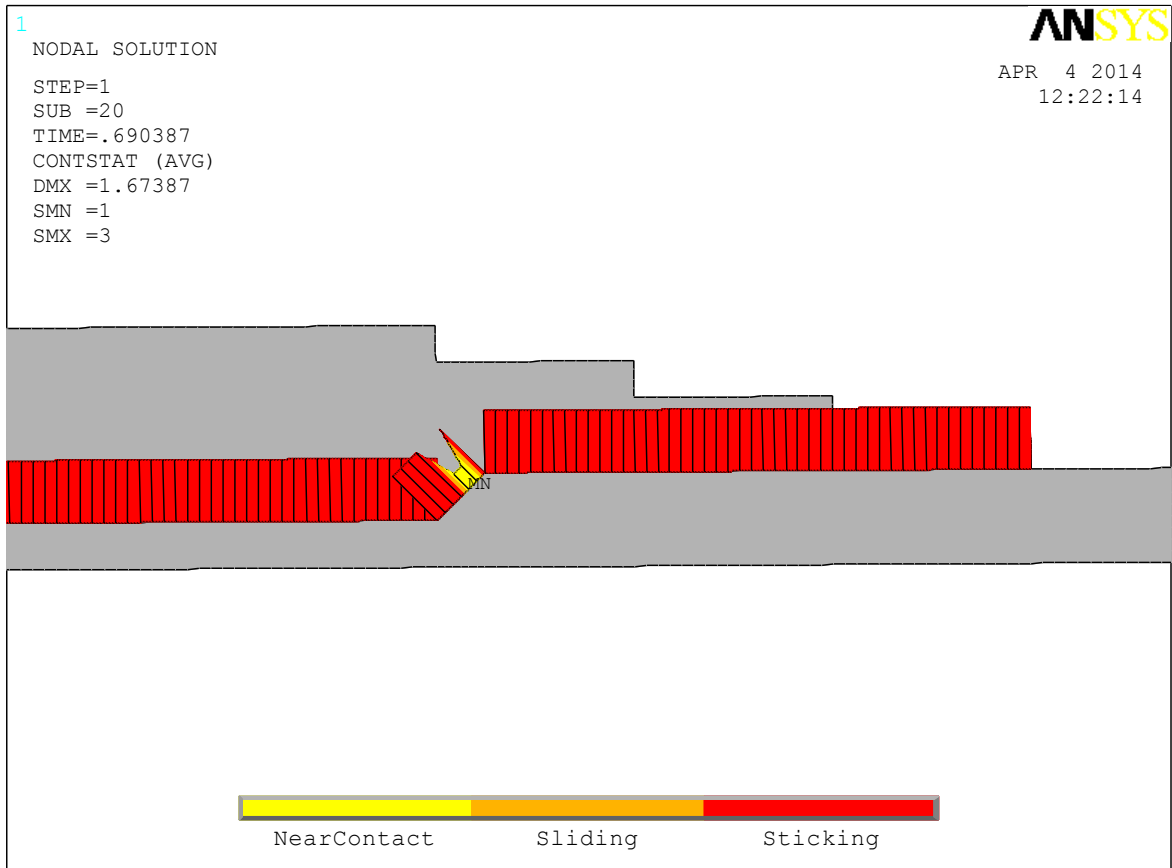
Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων για τα υλικά μέτρου ελαστικότητας 80 και 120 GPa

Case	$F_{deb,init}$ [kN]	$U_{deb,init}$ [mm]	F_{yield} [kN]	U_{yield} [mm]	F_{max} [kN]	U_{max} [mm]	F_{drop} [kN]	U_{drop} [mm]
C_500_2_1	249	1,66	248	1,65	253	1,76	218	1,84
C_500_2_3	269	3,26	263	1,80	-	-	-	-
C_500_2_5	240	1,48	210	1,56	243	1,53	217	1,55
C_500_4_1	161	1,14	171	1,28	172	1,28	145	1,31
C_500_4_3	199	1,31	200	1,32	204	1,41	152	1,42
C_500_4_5	212	1,36	212	1,36	212	1,36	154	1,41
C_900_2_1	255	1,69	255	1,69	-	-	217	1,55
C_900_2_3	270	2,68	264	1,68	-	-	-	-
C_900_2_5	229	1,27	259	1,64	-	-	-	-
C_900_4_1	168	1,17	182	1,31	-	-	-	-
C_900_4_3	217	1,34	217	1,34	257	1,88	-	-
C_900_4_5	229	1,47	234	1,43	241	1,65	205	1,61
C_1300_2_1	254	1,63	254	1,63	-	-	-	-
C_1300_2_3	225	1,73	265	1,53	-	-	225	1,73
C_1300_2_5	221	1,10	253	1,43	-	-	248	1,70
C_1300_4_1	166	1,13	184	1,29	-	-	176	1,47
C_1300_4_3	220	1,27	226	1,32	-	-	-	-
C_1300_4_5	214	1,12	245	1,43	-	-	-	-
D_500_2_1	251	1,64	249	1,62	253	1,70	238	1,81
D_500_2_3	270	3,76	264	1,87	-	-	-	-
D_500_2_5	245	1,49	251	1,62	252	1,58	222	1,62
D_500_4_1	152	1,03	164	1,23	167	1,20	142	1,23
D_500_4_3	194	1,24	201	1,29	206	1,36	192	1,38
D_500_4_5	211	1,30	211	1,30	218	1,37	211	1,40
D_900_2_1	254	1,61	252	1,60	-	-	247	2,25
D_900_2_3	272	2,92	264	1,65	-	-	-	-
D_900_2_5	240	1,32	258	1,62	-	-	-	-
D_900_4_1	157	1,04	185	1,29	-	-	185	1,52
D_900_4_3	210	1,25	224	1,34	258	1,83	224	1,99
D_900_4_5	237	1,33	240	1,40	245	1,46	190	1,66
D_1300_2_1	253	1,57	253	1,57	-	-	-	-
D_1300_2_3	273	1,78	265	1,50	-	-	-	-
D_1300_2_5	232	1,14	260	1,64	-	-	-	-
D_1300_4_1	157	1,01	186	1,26	-	-	-	-
D_1300_4_3	210	1,16	264	1,84	-	-	255	2,14
D_1300_4_5	230	1,17	250	1,37	258	2,02	212	2,19

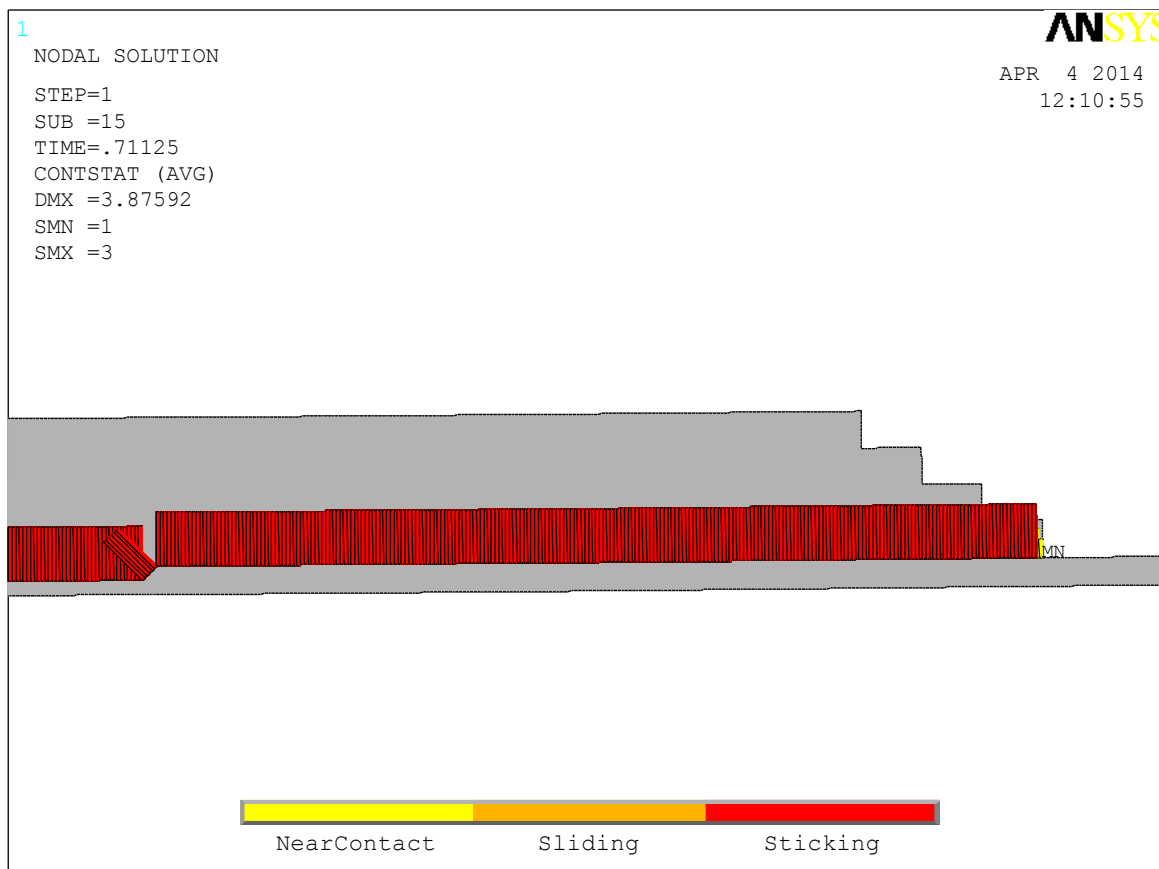
Η διαρροή του χάλυβα εμφανίζεται στη διαβρωμένη περιοχή, όπως θα περίμενε κανείς, αφού σε διατομή μικρότερου πάχους αναπτύσσονται μεγαλύτερες τάσεις. Από τους παραπάνω πίνακες διαπιστώνουμε ότι για το υλικό A στις περισσότερες περιπτώσεις η διαρροή του χάλυβα προηγείται της αποκόλλησης του επιθέματος, ενώ σε λίγες περιπτώσεις συμβαίνουν ταυτόχρονα. Στο υλικό B συμβαίνουν κυρίως ταυτόχρονα, αλλά υπάρχουν κάποιες περιπτώσεις όπου η αποκόλληση αρχίζει πρώτα (για λόγο ακαμψίας 0.5) και άλλες όπου η διαρροή συντελείται πρώτη. Στη συνέχεια βλέπουμε, ότι όσο αυξάνει το μέτρο ελαστικότητας (για τα υλικά C και D), τόσο αυξάνουν και οι περιπτώσεις όπου η αποκόλληση του επιθέματος ξεκινάει πρώτη.

Επίσης, χρησιμοποιώντας τα εργαλεία που παρέχει το ANSYS εντοπίσαμε σε ποιό σημείο του επιθέματος αρχίζει η αποκόλληση σε κάθε μοντέλο. Υποψήφιες θέσεις για την έναρξη της αποκόλλησης είναι είτε το άκρο του επιθέματος, είτε η αρχή της διαβρωμένης περιοχής. Έτσι, όταν το πάχος της διαβρωμένης περιοχής είναι 2 mm και ο λόγος ακαμψίας 0.3 ή 0.5, η αποκόλληση εμφανίζεται στο άκρο του επιθέματος ανεξαρτήτως του μήκους και του μέτρου ελαστικότητας του επιθέματος. Επίσης, για πάχος διάβρωσης 4 mm η αποκόλληση ξεκινά στην ίδια θέση, δηλαδή στο άκρο του επιθέματος, για το υλικό C με λόγο ακαμψίας 0.1 και μήκος επιθέματος 1300 mm, για το υλικό A με λόγο ακαμψίας 0.3 και μήκος επιθέματος 1300 mm. Κυρίως, όμως, εμφανίζεται για λόγο ακαμψίας 0.5 στη θέση αυτή. Δηλαδή, για μήκη επιθέματος 900 και 1300 mm σ' όλα τα υλικά, ενώ για μήκος επιθέματος 500 mm μόνο στο υλικό B. Η αποκόλληση ξεκινά στην αρχή της διαβρωμένης περιοχής για πάχος διάβρωσης 2 mm, όταν ο λόγος ακαμψίας είναι 0.1 ανεξάρτητα από το υλικό ή το μήκος επιθέματος. Για μεγαλύτερο πάχος διαβρωμένης περιοχής όταν το μήκος επιθέματος είναι 500 ή 900 mm και ο λόγος ακαμψίας 0.1 ή 0.3 έχουμε εμφάνιση της αποκόλλησης στην αρχή της διαβρωμένης περιοχής. Επίσης, αυτό συμβαίνει για μήκος επιθέματος 1300 mm και λόγο ακαμψίας 0.1 στα υλικά A, B και D, ενώ για λόγο ακαμψίας 0.3 στα υλικά B, C και D. Τέλος, στην ίδια θέση εμφανίζεται για λόγο ακαμψίας 0.5 και μήκος επιθέματος 500 mm στα υλικά A, C και D.

Επομένως, συμπεραίνουμε ότι η αποκόλληση εμφανίζεται στο άκρο του επιθέματος για το μικρότερο πάχος διάβρωσης όταν ο λόγος ακαμψίας είναι 0.3 ή 0.5, ενώ για το μεγαλύτερο πάχος διάβρωσης όταν ο λόγος ακαμψίας είναι 0.5 και το μήκος του επιθέματος είναι 900 ή 1300 mm. Αντίθετα, η αποκόλληση εντοπίζεται στην αρχή της διαβρωμένης περιοχής για το μικρότερο πάχος διάβρωσης όταν ο λόγος ακαμψίας είναι 0.1, ενώ για το μεγαλύτερο πάχος διάβρωσης όταν ο λόγος ακαμψίας είναι 0.1 ή 0.3.



Σχήμα 3.2: Κατάσταση επαφής του δοκιμίου B_1300_4_3, αποκόλληση επιθέματος στην αρχή της διαβρωμένης περιοχής



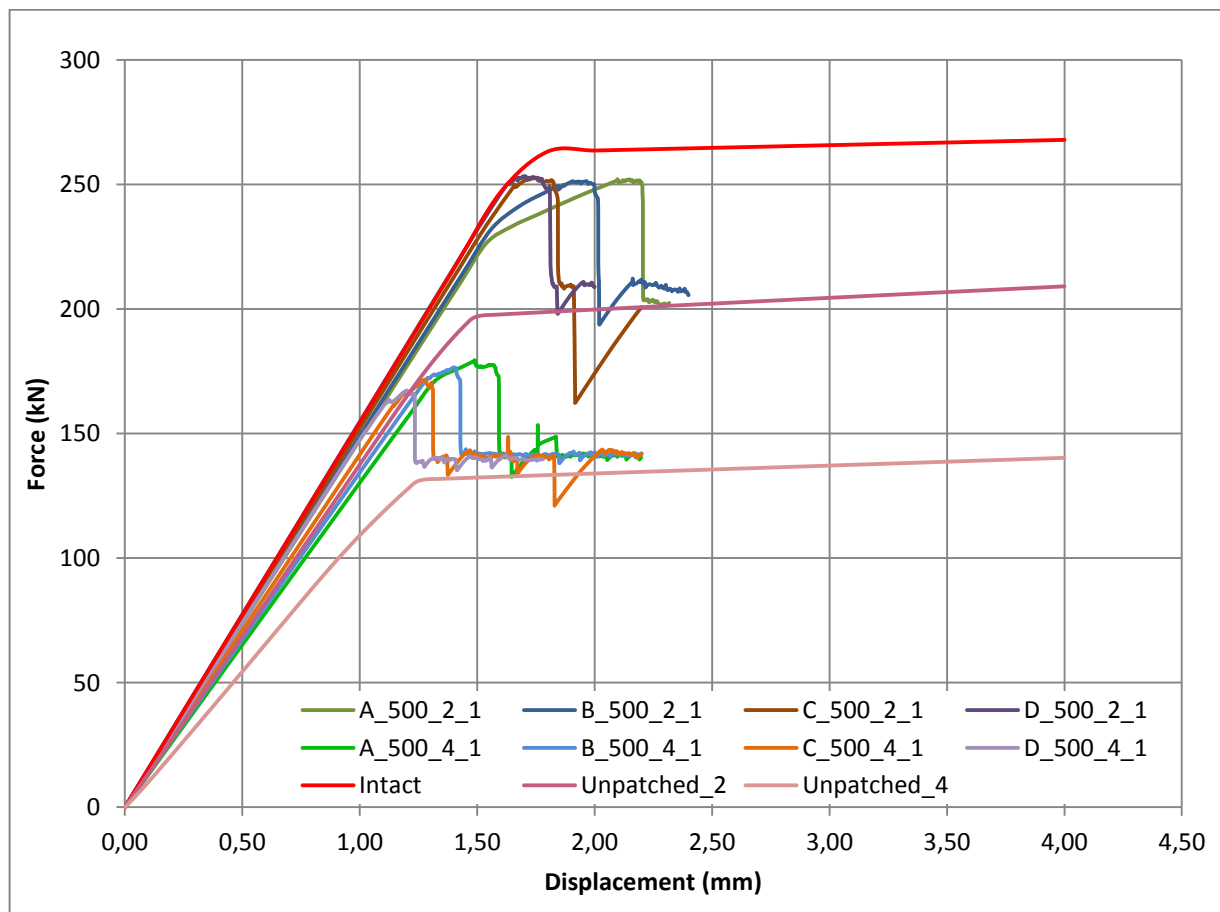
Σχήμα 3.3: Κατάσταση επαφής του δοκιμίου A_900_4_5, αποκόλληση επιθέματος στο άκρο του

Στη συνέχεια, στα εδάφια που ακολουθούν εξετάζεται ξεχωριστά η επίδραση των διάφορων παραμέτρων στην αστοχία της κατασκευής. Ως αστοχία της κατασκευής μπορεί να θεωρηθεί είτε όταν αρχίζει η αποκόλληση του επιθέματος, είτε όταν ο χάλυβας έχει ξεπεράσει το όριο διαρροής του καθ' όλο το πάχος του, είτε όταν το επίθεμα αποκολλάται πλήρως (η πτώση στα διαγράμματα). Εξετάζονται, λοιπόν, όλες αυτές οι περιπτώσεις και παραθέτονται διαγράμματα αλλά και πίνακες στους οποίους διακρίνεται η ποσοστιαία μεταβολή των διάφορων μεγεθών. Η σύγκριση γίνεται κυρίως για την έναρξη της αποκόλλησης και τη διαρροή του χάλυβα, καθώς για αυτές τις περιπτώσεις έχουμε τιμές για όλα τα μοντέλα. Στο τέλος του κεφαλαίου συνοψίζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη συγκεκριμένη μελέτη.

3.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Στα διαγράμματα δύναμης - μετατόπισης που ακολουθούν (Σχήματα 3.4 - 3.12) φαίνονται όλα τα αποτελέσματα της ανάλυσης ομαδοποιημένα έτσι, ώστε να φαίνεται η επίδραση του μέτρου ελαστικότητας του επιθέματος. Οι καμπύλες που έχουν πράσινο χρώμα αντιστοιχούν στο υλικό A με μέτρο ελαστικότητας 20 GPa. Το μήκος επιθέματος και ο συντελεστής ακαμψίας μένουν σταθερά, αλλά αλλάζει το πάχος της διαβρωμένης περιοχής του χάλυβα

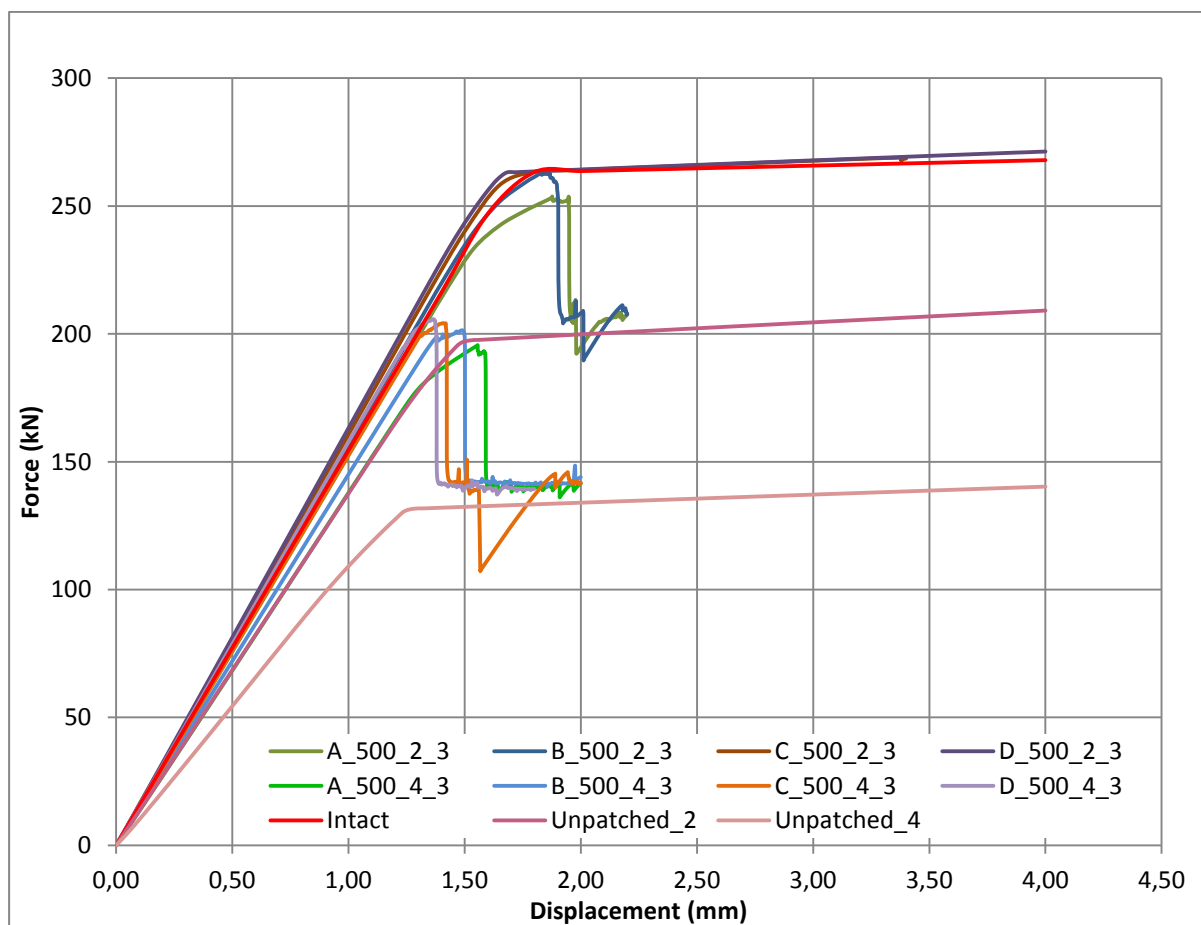
αναλόγως την απόχρωση. Η σκούρα καμπύλη αφορά πάχος διάβρωσης ίσο με 2 mm, ενώ η πιο ανοιχτή 4 mm. Αντίστοιχα, η μπλε οικογένεια χρώματος αφορά το υλικό B με μέτρο ελαστικότητας 40 GPa, η πορτοκαλί το υλικό C με $E=80$ GPa και τέλος η μωβ το υλικό D με $E=120$ GPa. Επίσης, υπάρχουν τρεις ακόμα καμπύλες στα διαγράμματα και αφορούν περιπτώσεις στις οποίες δεν υπάρχει επίθεμα. Πιο συγκεκριμένα, η κόκκινη καμπύλη αντιστοιχεί στην άθικτη κατάσταση, η ροζ σκούρα σε έλασμα με πάχος διάβρωσης 2 mm και η ανοιχτή ροζ σε έλασμα με πάχος διάβρωσης ίσο με 4 mm.



Σχήμα 3.4: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης για επιθέματα μήκους $L_p = 500$ mm και συντελεστή ακαμψίας $SR = 0.1$

Από το παραπάνω διάγραμμα, σε συνδυασμό με τους πίνακες 3.3 – 3.4, παρατηρούμε ότι για μήκος επιθέματος σταθερό και ίσο με $L_p = 500$ mm και λόγο ακαμψίας ίσο με $SR = 0.1$ το μέτρο ελαστικότητας έχει μεγαλύτερη επίδραση στα μεγέθη που εξετάζουμε, όταν το πάχος της διαβρωμένης περιοχής είναι μεγαλύτερο. Ανεξάρτητα από το πάχος διάβρωσης μεγαλύτερο φορτίο έναρξης αποκόλλησης (debonding initiation) έχουμε για το υλικό A, με το μικρότερο μέτρο ελαστικότητας. Όσον αφορά το φορτίο όταν ο χάλυβας διαρρέει, για το μεγαλύτερο πάχος διάβρωσης μέγιστη τιμή έχει το υλικό A, ενώ για το μικρότερο πάχος μεγαλύτερο φορτίο έχει το υλικό D. Σχετικά με το μέγιστο φορτίο που μπορεί να παραλάβει η

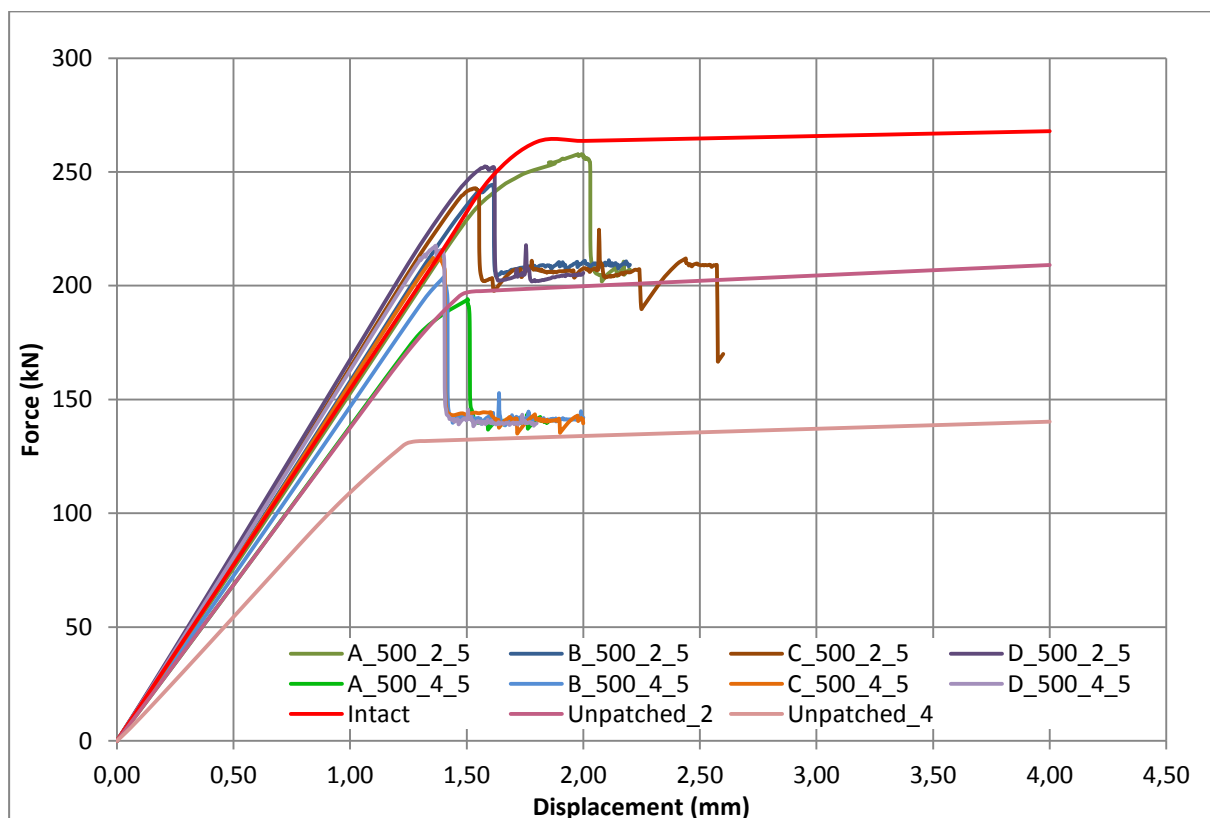
κατασκευή, για το μεγαλύτερο πάχος διάβρωσης μέγιστη τιμή έχει το υλικό A, ενώ για το μικρότερο πάχος μεγαλύτερο φορτίο έχει το υλικό D.



Σχήμα 3.5: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης για επιθέματα μήκους $L_p = 500$ mm και συντελεστή ακαμψίας $SR = 0.3$

Όταν ο λόγος ακαμψίας είναι ίσος με $SR = 0.3$ τότε μεγαλύτερο φορτίο έναρξης αποκόλλησης (debonding initiation) έχουμε για το υλικό D, όπως επίσης και για το φορτίο διαρροής του χάλυβα όταν το πάχος της διαβρωμένης περιοχής έχει τη μικρότερη τιμή. Όταν το πάχος διάβρωσης είναι μεγαλύτερο, μέγιστη τιμή για το φορτίο έναρξης αποκόλλησης του επιθέματος έχει το υλικό C. Επίσης, για το φορτίο στο οποίο ο χάλυβας διαρρέει μέγιστη τιμή έχει το υλικό D. Για τα υπόλοιπα μεγέθη δε μπορούμε να βγάλουμε κάποιο συμπέρασμα διότι δεν έχουμε τιμές για όλα τα μοντέλα ώστε να γίνει η σύγκριση.

Επίσης, στο παραπάνω σχήμα παρατηρούμε ότι για το μικρότερο πάχος διάβρωσης έχουμε μεγαλύτερη απόκλιση στις καμπύλες που αντιστοιχούν στα υλικά A και B, ενώ οι καμπύλες των υλικών B, C και D είναι αρκετά κοντά μεταξύ τους και προσεγγίζουν κατά πολύ την άθικτη κατάσταση (κόκκινη καμπύλη).

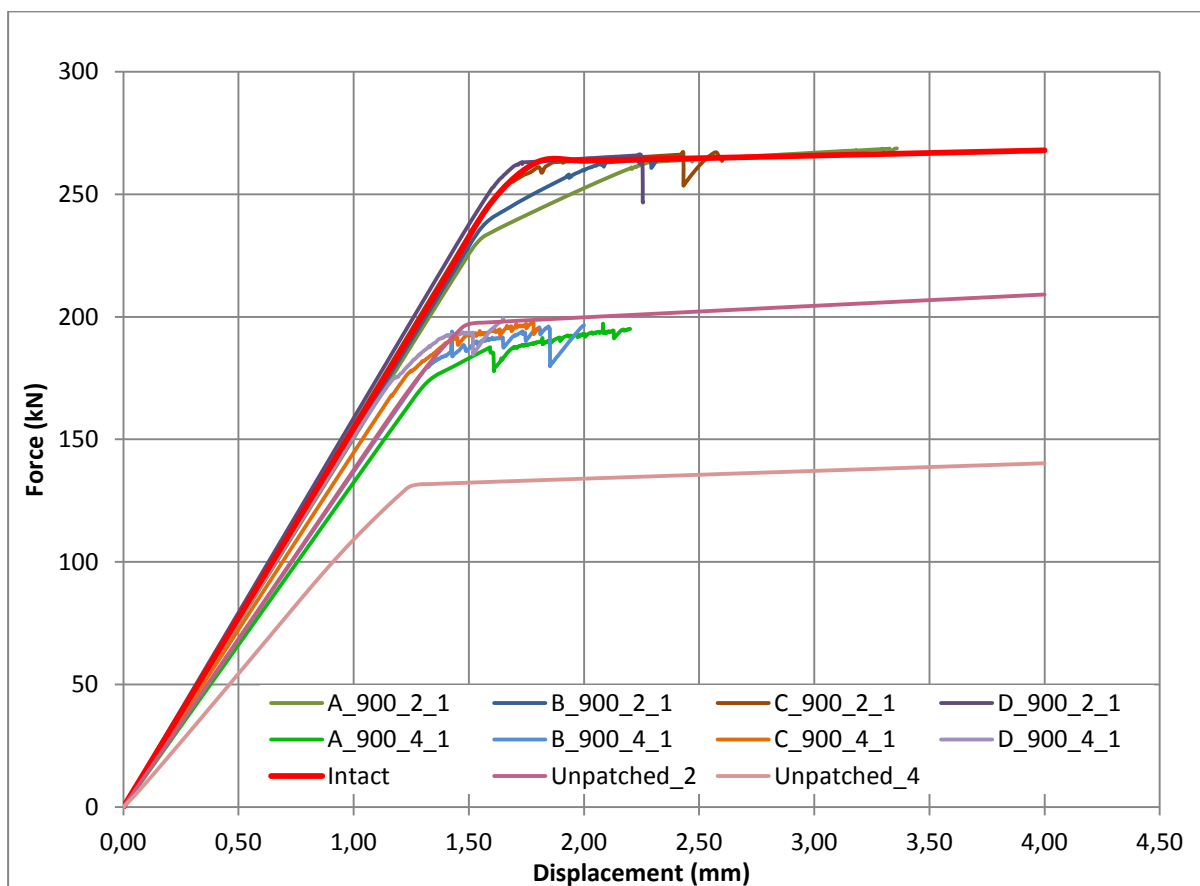


Σχήμα 3.6: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης για επιθέματα μήκους $L_p = 500$ mm και συντελεστή ακαμψίας $SR = 0.5$

Για τα μοντέλα του παραπάνω σχήματος, δηλαδή για μήκος επιθέματος σταθερό και ίσο με $L_p = 500$ mm, λόγο ακαμψίας ίσο με $SR = 0.5$ και για πάχος διάβρωσης ίσο με $t_c = 2$ mm μέγιστη τιμή για όλα τα μεγέθη που εξετάζουμε έχει το υλικό A. Όταν όμως το πάχος διάβρωσης γίνεται ίσο με $t_c = 4$ mm, μέγιστη τιμή για το φορτίο έναρξης αποκόλλησης του επιθέματος, καθώς και για το φορτίο στο οποίο ο χάλυβας διαρρέει έχει το υλικό C.

Εξετάζοντας τα μοντέλα των σχημάτων 3.4 – 3.6 παρατηρούμε ότι για πάχος διάβρωσης ίσο με $t_c = 2$ mm μεγαλύτερη τιμή για το φορτίο έναρξης αποκόλλησης του επιθέματος έχει το υλικό A για τους λόγους ακαμψίας $SR = 0.1$ και 0.5 , ενώ για λόγο ακαμψίας 0.3 μέγιστη τιμή έχει το υλικό D. Όσον αφορά τη διαρροή του χάλυβα μεγαλύτερο φορτίο έχουμε στο υλικό D για τους λόγους ακαμψίας $SR = 0.1$ και 0.3 , ενώ για λόγο ακαμψίας 0.3 στο υλικό A.

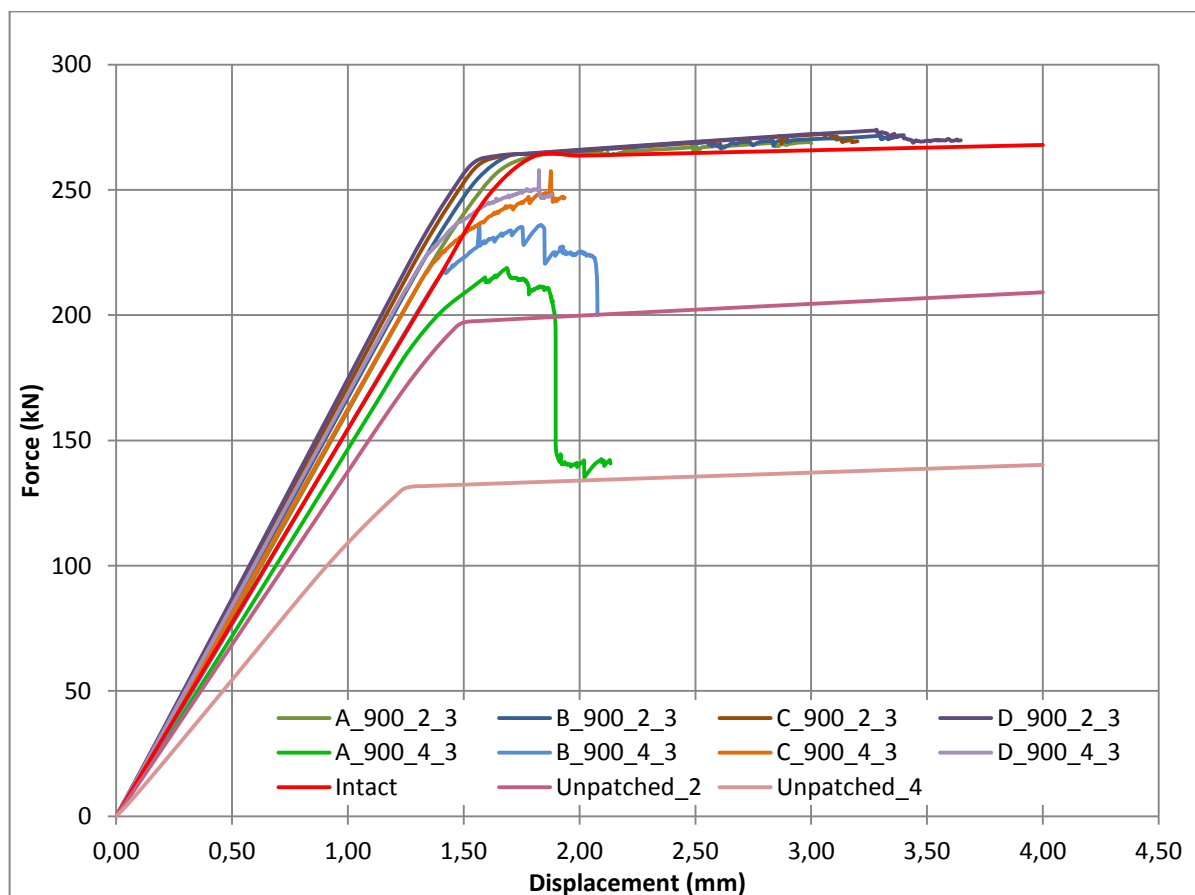
Σχετικά με το μεγαλύτερο πάχος διάβρωσης, μέγιστο φορτίο έναρξης αποκόλλησης έχει A για λόγο ακαμψίας $SR = 0.1$, ενώ για λόγους ακαμψίας $SR = 0.3$ και 0.5 έχει το υλικό C. Όσον αφορά τη διαρροή του χάλυβα μεγαλύτερο φορτίο έχουμε στο υλικό A για λόγο ακαμψίας $SR = 0.1$, στο υλικό D για λόγο ακαμψίας 0.3 και στο C για λόγο ακαμψίας 0.5 .



Σχήμα 3.7: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης για επιθέματα μήκους $L_p = 900$ mm και συντελεστή ακαμψίας $SR = 0.1$

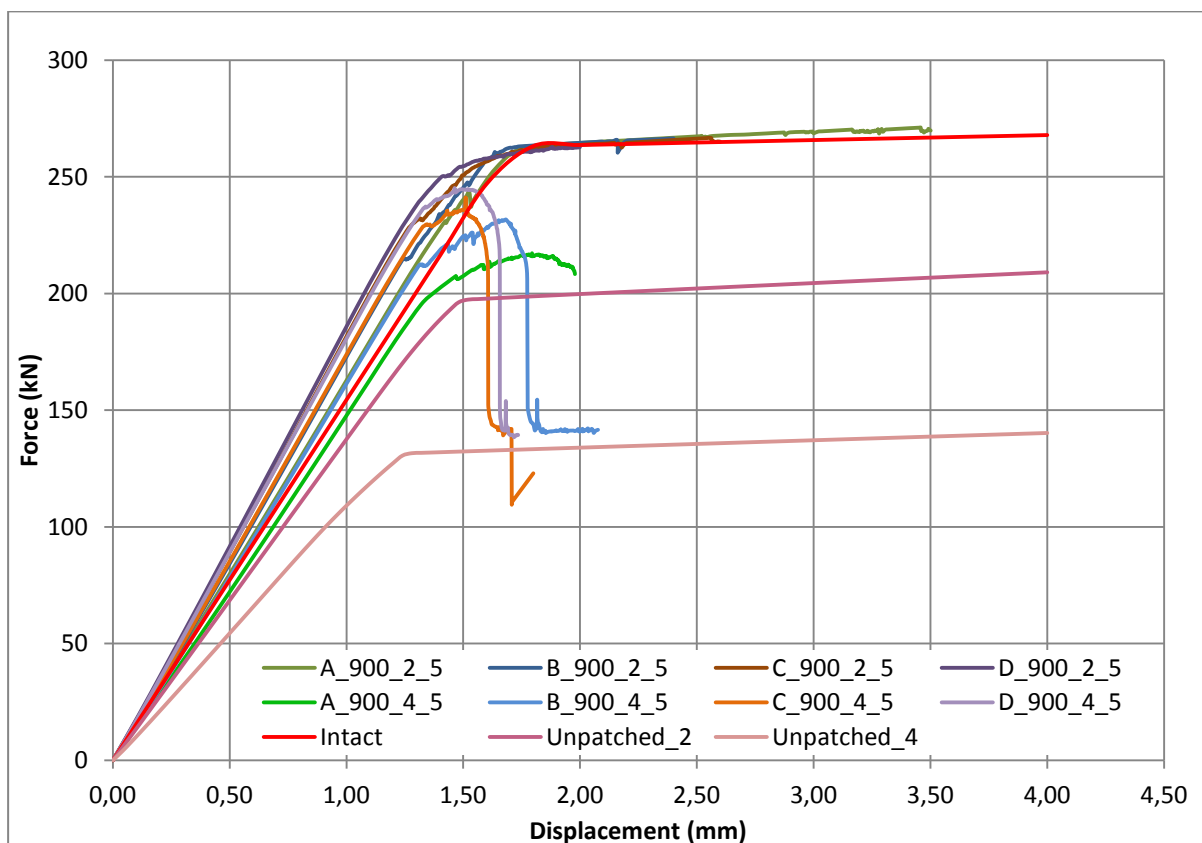
Για μήκος επιθέματος ίσο με $L_p = 900$ mm και λόγο ακαμψίας ίσο με $SR = 0.1$ παρατηρούμε ότι και για τα δύο πάχη διάβρωσης του χαλύβδινου ελάσματος τη μέγιστη τιμή για το φορτίο έναρξης αποκόλλησης έχουμε για το υλικό A. Όσον αφορά τη διαρροή του χάλυβα για το μικρότερο πάχος διάβρωσης μέγιστο φορτίο έχει το υλικό C, ενώ για το μεγαλύτερο πάχος διάβρωσης μέγιστο φορτίο διαρροής έχει το υλικό D.

Η αλλαγή της κλίσης του ευθύγραμμου τμήματος που παρατηρείται στις καμπύλες A_900_2_1, B_900_2_1, αλλά και σε αρκετές άλλες σε ακόλουθα διαγράμματα, οφείλεται στη διαρροή του χάλυβα, δηλαδή είμαστε στην πλαστική περιοχή, χωρίς να έχει ξεκινήσει ακόμα η αποκόλληση του επιθέματος.



Σχήμα 3.8: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης για επιθέματα μήκους $L_p = 900$ mm και συντελεστή ακαμψίας $SR = 0.3$

Παρατηρούμε ότι όταν το μήκος επιθέματος είναι $L_p = 900$ mm και ο λόγος ακαμψίας $SR = 0.3$, για το πάχος διάβρωσης $t_c = 2$ mm μέγιστη τιμή για το φορτίο έναρξης αποκόλλησης του επιθέματος και διαρροής του χάλυβα έχει το υλικό D. Όταν, όμως, το πάχος διάβρωσης μεγαλώνει το υλικό B έχει τη μεγαλύτερη τιμή για το φορτίο έναρξης αποκόλλησης του επιθέματος. Επίσης, μέγιστη τιμή για το φορτίο διαρροής έχει το υλικό D.

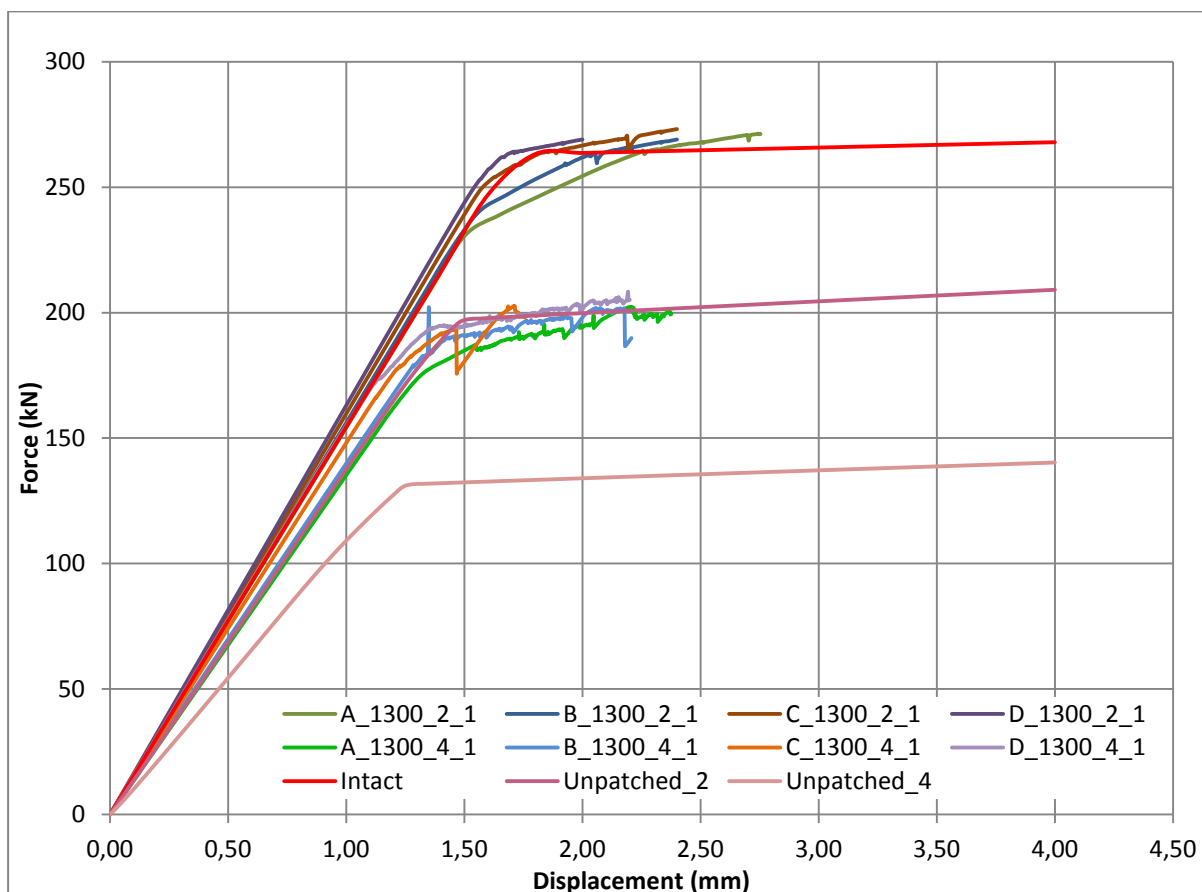


Σχήμα 3.9: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης για επιθέματα μήκους $L_p = 900$ mm και συντελεστή ακαμψίας $SR = 0.5$

Σύμφωνα με το σχήμα 3.9 και τους πίνακες 3.3 – 3.4 βλέπουμε ότι για μήκος επιθέματος ίσο με $L_p = 900$ mm και λόγο ακαμψίας ίσο με $SR = 0.5$, για το μικρότερο πάχος διάβρωσης τη μέγιστη τιμή για το φορτίο διαρροής του χάλυβα έχουμε για το υλικό A, ενώ για το φορτίο έναρξης αποκόλλησης μέγιστη τιμή έχει το υλικό D. Όσον αφορά το μεγαλύτερο πάχος διάβρωσης, μεγαλύτερη τιμή φορτίου έναρξης αποκόλλησης και διαρροής έχει το υλικό D.

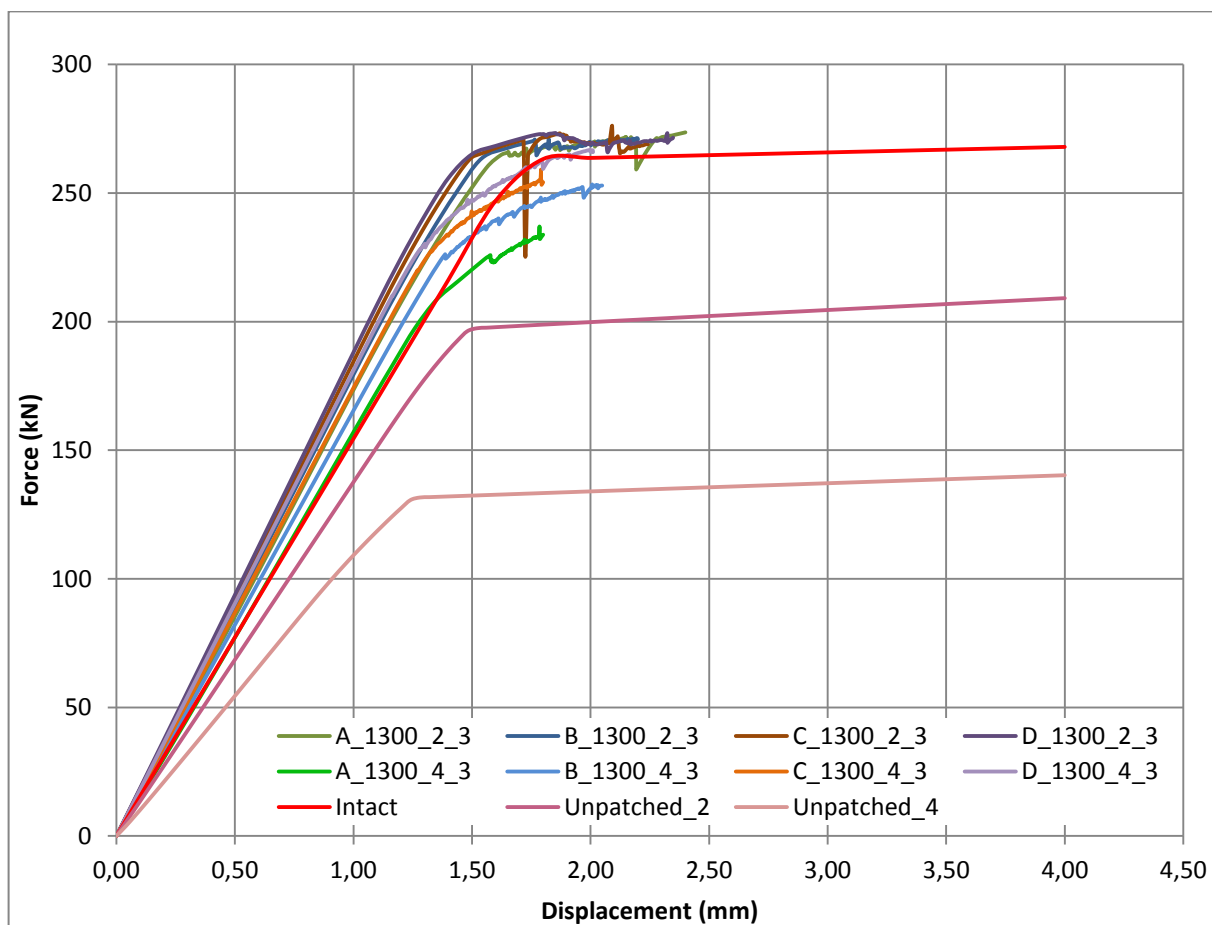
Παρατηρώντας τα μοντέλα που αναπαρίστανται στα διαγράμματα 3.7 – 3.9 συμπεραίνουμε ότι για το πάχος διάβρωσης $t_c = 2$ mm μεγαλύτερη τιμή για το φορτίο έναρξης αποκόλλησης του επιθέματος έχει το υλικό A για λόγο ακαμψίας $SR = 0.1$, ενώ για τους λόγους ακαμψίας 0.3 και 0.5 έχει το υλικό D. Σχετικά με το φορτίο διαρροής του χάλυβα, μεγαλύτερη τιμή έχουμε στο υλικό C για λόγο ακαμψίας $SR = 0.1$, στο υλικό D για λόγο ακαμψίας 0.3 και στο A για λόγο ακαμψίας 0.5.

Όταν το πάχος διάβρωσης είναι ίσο με $t_c = 4$ mm μεγαλύτερη τιμή για το φορτίο έναρξης αποκόλλησης του επιθέματος έχει το υλικό A για λόγο ακαμψίας $SR = 0.1$, το B για λόγο ακαμψίας 0.3 και για λόγο ακαμψίας 0.5 το υλικό D. Για το φορτίο διαρροής του χάλυβα μέγιστη τιμή έχουμε στο υλικό D, ανεξαρτήτως του λόγου ακαμψίας.



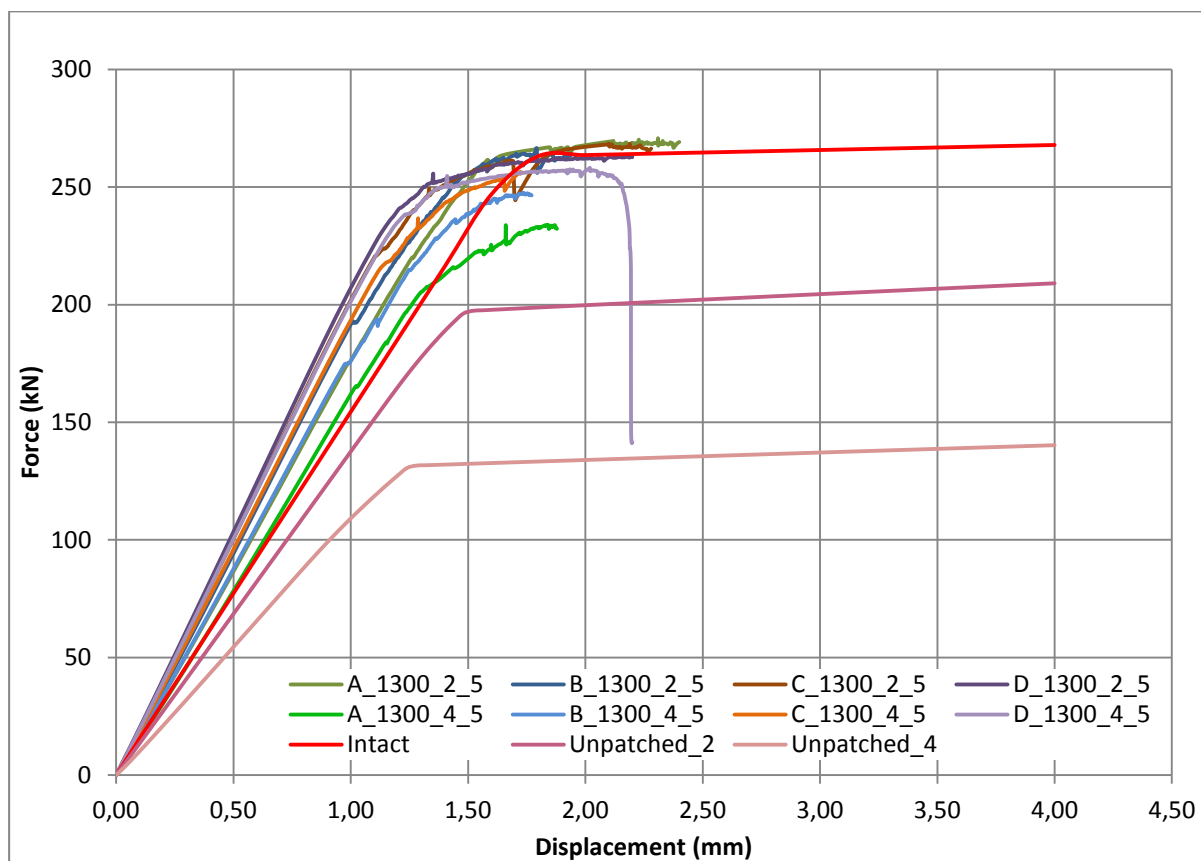
Σχήμα 3.10: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης για επιθέματα μήκους $L_p = 1300$ mm και συντελεστή ακαμψίας $SR = 0.1$

Για μήκος επιθέματος ίσο με $L_p = 1300$ mm και λόγο ακαμψίας ίσο με $SR = 0.1$, παρατηρούμε ότι και για τα δύο πάχη διάβρωσης του χαλύβδινου ελάσματος τη μέγιστη τιμή για το φορτίο έναρξης αποκόλλησης έχουμε για το υλικό A. Όσον αφορά τη διαρροή του χάλυβα, για το μικρότερο πάχος διάβρωσης μέγιστο φορτίο μπορεί να παραλάβει το υλικό C και για το μεγαλύτερο πάχος διάβρωσης το υλικό D.



Σχήμα 3.11: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης για επιθέματα μήκους $L_p = 1300$ mm και συντελεστή ακαμψίας $SR = 0.3$

Στη συνέχεια, για επίθεμα μήκους $L_p = 1300$ mm και λόγο ακαμψίας ίσο με $SR = 0.3$, για το μικρότερο πάχος διάβρωσης μέγιστη τιμή για το φορτίο έναρξης αποκόλλησης του επιθέματος, αλλά και για το φορτίο διαρροής του χάλυβα έχει το υλικό D. Όταν το πάχος διάβρωσης είναι μεγαλύτερο, μέγιστη τιμή φορτίου έναρξης αποκόλλησης έχει το υλικό B, ενώ για το φορτίο διαρροής του χάλυβα μεγαλύτερη τιμή έχει το υλικό C.



Σχήμα 3.12: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης για επιθέματα μήκους $L_p = 1300$ mm και συντελεστή ακαμψίας $SR = 0.5$

Τέλος, για επίθεμα μήκους $L_p = 1300$ mm και λόγο ακαμψίας ίσο με $SR = 0.5$, παρατηρούμε ότι για το μικρότερο πάχος διάβρωσης μέγιστη τιμή για το φορτίο έναρξης αποκόλλησης έχει το υλικό D, ενώ για το φορτίο διαρροής του χάλυβα μεγαλύτερη τιμή έχει το υλικό A. Σχετικά με το μεγαλύτερο πάχος διάβρωσης, μεγαλύτερη τιμή για το φορτίο έναρξης αποκόλλησης του επιθέματος, αλλά και για το φορτίο διαρροής του χάλυβα έχει το υλικό D.

Σύμφωνα με τα διαγράμματα των σχημάτων 3.10 – 3.12, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι όταν το πάχος της διαβρωμένης περιοχής είναι ίσο με $t_c = 2$ mm το φορτίο έναρξης αποκόλλησης του επιθέματος έχει τη μέγιστη τιμή στο υλικό A, όταν ο λόγος ακαμψίας είναι $SR = 0.1$, ενώ για λόγους ακαμψίας $SR = 0.3$ και 0.5 στο υλικό D. Για το φορτίο διαρροής του χάλυβα μεγαλύτερη τιμή έχει το υλικό C για λόγο ακαμψίας $SR = 0.1$, το υλικό D για $SR = 0.3$ και το υλικό A για $SR = 0.5$.

Όταν το πάχος διάβρωσης μεγαλώνει, μεγαλύτερη τιμή για το φορτίο έναρξης αποκόλλησης έχει το υλικό A για λόγο ακαμψίας $SR = 0.1$, το B για λόγο ακαμψίας $SR = 0.3$ και το D για λόγο ακαμψίας $SR = 0.5$. Σχετικά με το φορτίο διαρροής, το υλικό D έχει τη μεγαλύτερη τιμή για όλους τους λόγους ακαμψίας.

Επομένως, σε γενικές γραμμές, μέγιστη τιμή για το φορτίο έναρξης αποκόλλησης, αλλά και διαρροής έχουμε για το υλικό D.

Παρατηρούμε ότι στα διαγράμματα 3.7 – 3.12, δηλαδή για μήκη επιθέματος 900 mm και 1300 mm, όταν το πάχος διάβρωσης είναι το μικρότερο ανεξάρτητα από το λόγο ακαμψίας, καθώς και για το μεγαλύτερο πάχος όταν ο λόγος ακαμψίας είναι 0.3 ή 0.5, όλα τα μοντέλα τείνουν προς την άθικτη κατάσταση.

Στη συνέχεια, στους πίνακες που ακολουθούν φαίνεται η ποσοστιαία επίδραση του μέτρου ελαστικότητας στα διάφορα μεγέθη. Εκφράζεται, δηλαδή, η μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας από το υλικό A στο B, από το B στο C και από το C στο D σε μορφή ποσοστών. Το αρνητικό πρόσημο αναφέρεται στη ποσοστιαία μείωση των τιμών σε σχέση με το προηγούμενο μέτρο ελαστικότητας και χωρίς πρόσημο στην ποσοστιαία αύξησή τους. Θεωρούμε ότι για τα ποσοστά μέχρι 3% η επίδραση είναι μηδενική και μπορεί να οφείλεται η διαφορά σε αριθμητικό σφάλμα (numerical error) του προγράμματος. Επίσης, θεωρούμε ότι διαφορές μεταξύ των τιμών μέχρι 15% είναι μικρές και απεικονίζονται με πράσινο χρώμα, από 15% μέχρι 35% είναι μεσαίες και απεικονίζονται με πορτοκαλί ενώ πάνω από 35% θεωρούμε ότι είναι μεγάλες και εμφανίζονται με κόκκινο χρώμα.

Πίνακας 3.4:

Επίδραση του μέτρου ελαστικότητας για τα υλικά Α και Β – ποσοστιαία σύγκριση.

		compare $F_{deb, init}$		compare $U_{deb., in.}$		compare F_{yield}		compare U_{yield}	
		$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$
compare A-B $L_p=500$ mm	SR=0.1	-1%	-4%	-12%	-14%	3%	-2%	2%	-7%
	SR=0.3	4%	2%	-3%	-11%	2%	8%	-6%	1%
	SR=0.5	-5%	6%	-17%	-7%	-4%	5%	-14%	-7%
compare A-B $L_p=900$ mm	SR=0.1	-2%	-4%	-13%	-17%	3%	1%	1%	-7%
	SR=0.3	2%	2%	27%	-11%	0%	3%	-6%	-8%
	SR=0.5	-7%	3%	-13%	-10%	-1%	10%	-9%	4%
compare A-B $L_p=1300$ mm	SR=0.1	-1%	-4%	-15%	-17%	3%	-1%	2%	-10%
	SR=0.3	2%	0%	9%	-12%	0%	8%	-5%	3%
	SR=0.5	10%	5%	2%	-6%	-3%	8%	-13%	-2%
		compare F_{max}		compare U_{max}		compare F_{drop}		compare U_{drop}	
		$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$
compare A-B $L_p=500$ mm	SR=0.1	0%	-2%	-6%	-6%	-19%	-12%	-8%	-10%
	SR=0.3	4%	3%	-2%	-4%	2%	-16%	-2%	-6%
	SR=0.5	-5%	5%	-19%	-7%	-11%	-14%	-20%	-6%
compare A-B $L_p=900$ mm	SR=0.1	-	-	-	-	-	-	-	-
	SR=0.3	-	8%	-	-7%	-	35%	-	10%
	SR=0.5	-	7%	-	-6%	-	-	-	-
compare A-B $L_p=1300$ mm	SR=0.1	-	-	-	-	-	-	-	-
	SR=0.3	-	-	-	-	-	-	-	-
	SR=0.5	-	4%	-	-6%	-	-	-	-

Παρατηρούμε ότι η επίδραση του μέτρου ελαστικότητας για τα υλικά Α και Β είναι πολύ μικρή έως αμελητέα για τα φορτία έναρξης αποκόλλησης και διαρροής του χάλυβα και τα δύο πάχη διάβρωσης. Επίσης, από τον πίνακα 3.4 είναι φανερό ότι για λόγο ακαμψίας $SR = 0.1$ έχουμε μείωση του φορτίου έναρξης αποκόλλησης του επιθέματος ανεξαρτήτως πάχους διάβρωσης και μήκους επιθέματος, ενώ για λόγο ακαμψίας 0.3 αυξάνεται τόσο το φορτίο έναρξης αποκόλλησης, όσο και το φορτίο διαρροής του χάλυβα. Ειδικά για το φορτίο διαρροής του χάλυβα, η μεταβολή είναι απειροελάχιστη για το μικρότερο πάχος διάβρωσης, ενώ για το μεγαλύτερο πάχος η επίδραση είναι μικρή στις περισσότερες περιπτώσεις. Διαπιστώνουμε ακόμα ότι η επίδραση του μέτρου ελαστικότητας είναι μεγαλύτερη για μεγαλύτερο μήκος επιθέματος και λόγο ακαμψίας.

Πίνακας 3.5:

Επίδραση του μέτρου ελαστικότητας για τα υλικά Β και C – ποσοστιαία σύγκριση.

		compare $F_{deb, init}$		compare $U_{deb, in.}$		compare F_{yield}		compare U_{yield}	
		$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$
compare B-C $L_p=500$ mm	SR=0.1	1%	-6%	-10%	-11%	3%	-1%	-2%	-3%
	SR=0.3	2%	0%	79%	-5%	2%	1%	2%	-4%
	SR=0.5	-1%	4%	-4%	-3%	-14%	4%	-3%	-3%
compare B-C $L_p=900$ mm	SR=0.1	-1%	-7%	-13%	-12%	4%	1%	1%	-3%
	SR=0.3	1%	0%	8%	-6%	0%	0%	-1%	-5%
	SR=0.5	7%	8%	3%	11%	-1%	6%	-1%	0%
compare B-C $L_p=1300$ mm	SR=0.1	-2%	-7%	-15%	-12%	3%	2%	-3%	0%
	SR=0.3	-17%	-3%	-2%	-8%	1%	0%	-1%	-5%
	SR=0.5	14%	24%	9%	16%	-1%	6%	-5%	2%
		compare F_{max}		compare U_{max}		compare F_{drop}		compare U_{drop}	
		$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$
compare B-C $L_p=500$ mm	SR=0.1	1%	-3%	-10%	-9%	12%	-2%	-9%	-8%
	SR=0.3	-	1%	-	-5%	-	0%	-	-5%
	SR=0.5	-1%	4%	-5%	-3%	-1%	1%	-4%	-1%
compare B-C $L_p=900$ mm	SR=0.1	-	-	-	-	-	-	-	-
	SR=0.3	-	9%	-	20%	-	-	-	-
	SR=0.5	-	4%	-	-2%	-	36%	-	-10%
compare B-C $L_p=1300$ mm	SR=0.1	-	-	-	-	-	-	-	-
	SR=0.3	-	-	-	-	-	-	-	-
	SR=0.5	-	-	-	-	-	-	-	-

Από τον παραπάνω πίνακα μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η επίδραση του μέτρου ελαστικότητας για τα υλικά Β και C είναι πολύ μικρή έως αμελητέα για το φορτίο διαρροής του χάλυβα και τα δύο πάχη διάβρωσης. Για το φορτίο έναρξης αποκόλληση του επιθέματος, η επίδραση είναι αμελητέα έως μεσαία. Επίσης, παρατηρούμε ότι μεγαλύτερη μεταβολή για το μέτρο ελαστικότητας έχουμε για μήκος επιθέματος ίσο με 1300 mm.

Πίνακας 3.6:

Επίδραση του μέτρου ελαστικότητας για τα υλικά C και D – ποσοστιαία σύγκριση.

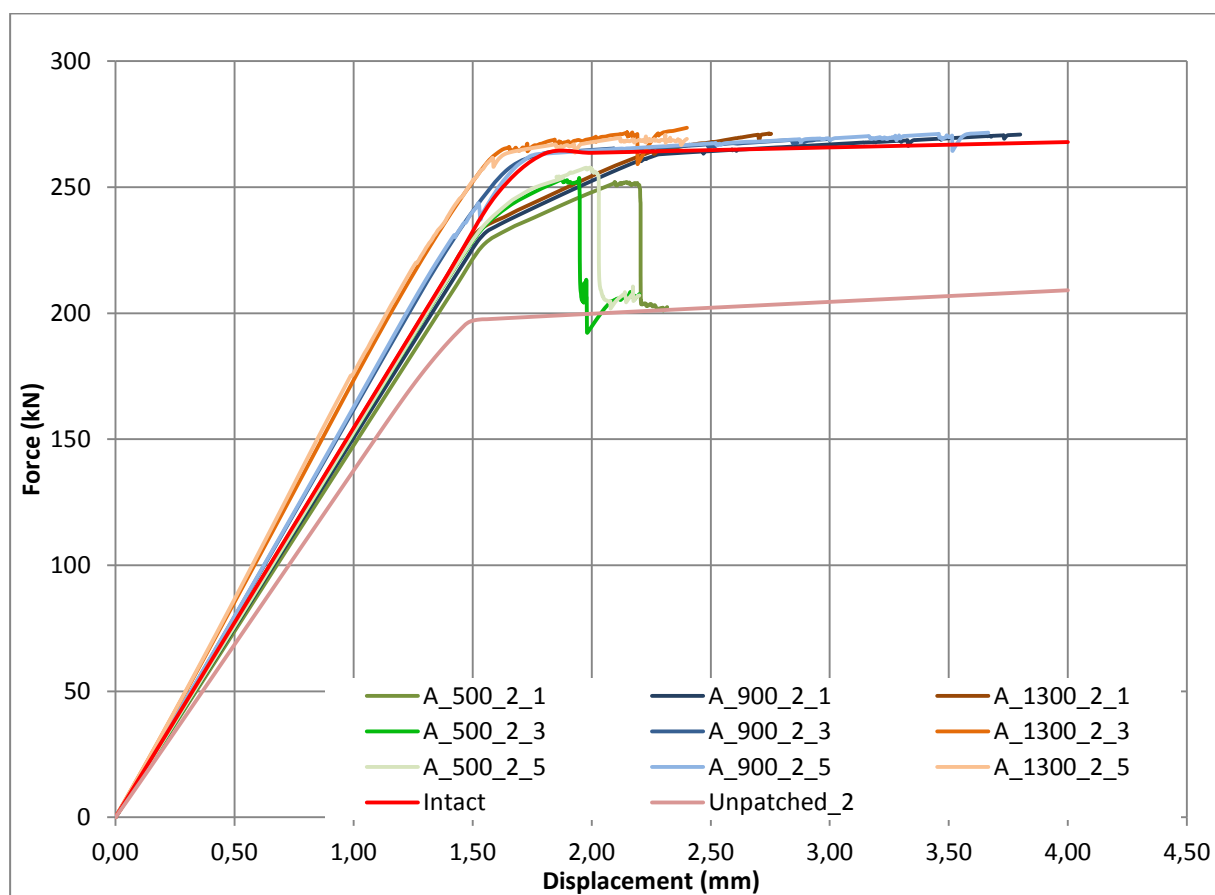
		compare $F_{deb, init}$		compare $U_{deb, in.}$		compare F_{yield}		compare U_{yield}	
		$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$
compare C-D $L_p=500$ mm	SR=0.1	0%	-6%	-1%	-10%	0%	-4%	-2%	-4%
	SR=0.3	1%	-2%	15%	-6%	0%	1%	4%	-3%
	SR=0.5	2%	0%	1%	-4%	19%	0%	4%	-4%
compare C-D $L_p=900$ mm	SR=0.1	-1%	-7%	-5%	-11%	-1%	2%	-5%	-1%
	SR=0.3	1%	-3%	9%	-6%	0%	3%	-2%	0%
	SR=0.5	5%	3%	4%	-9%	0%	3%	-1%	-2%
compare C-D $L_p=1300$ mm	SR=0.1	0%	-6%	-4%	-10%	0%	1%	-4%	-2%
	SR=0.3	21%	-4%	3%	-8%	0%	17%	-2%	40%
	SR=0.5	5%	8%	3%	4%	3%	2%	14%	-4%
		compare F_{max}		compare U_{max}		compare F_{drop}		compare U_{drop}	
		$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$
compare C-D $L_p=500$ mm	SR=0.1	0%	-3%	3%	-6%	9%	-2%	-2%	-6%
	SR=0.3	-	1%	-	-3%	-	26%	-	-3%
	SR=0.5	4%	3%	-3%	1%	3%	37%	4%	0%
compare C-D $L_p=900$ mm	SR=0.1	-	-	-	-	-3%	-	-7%	-
	SR=0.3	-	0%	-	-3%	-	-	-	-
	SR=0.5	-	2%	-	-12%	-	-7%	-	3%
compare C-D $L_p=1300$ mm	SR=0.1	-	-	-	-	-	-	-	-
	SR=0.3	-	-	-	-	-	-	-	-
	SR=0.5	-	-	-	-	-	-	-	-

Για τα υλικά C και D η επίδραση του μέτρου ελαστικότητας για το φορτίο έναρξης αποκόλλησης είναι σε γενικές γραμμές μηδενική για το μικρότερο και μικρή για το μεγαλύτερο πάχος διάβρωσης. Επίσης, παρατηρούμε ότι μεγαλύτερη είναι η επίδραση στο φορτίο έναρξης αποκόλλησης για μήκος επιθέματος 1300 mm. Σχετικά με το φορτίο διαρροής του χάλυβα, η επίδραση είναι, σε γενικές γραμμές, αμελητέα και για τα δύο πάχη.

Έτσι, από τους πίνακες 3.4 – 3.6 συμπεραίνουμε ότι η επίδραση του μέτρου ελαστικότητας είναι μικρή έως αμελητέα, με λίγες εξαιρέσεις μεσαία. Ειδικότερα, για τα φορτία έναρξης αποκόλλησης και διαρροής του χάλυβα, το μέτρο ελαστικότητας έχει μικρότερη επίδραση για το μικρότερο πάχος διάβρωσης σε σχέση με το μεγαλύτερο. Πιο συγκεκριμένα, για το μικρότερο πάχος διάβρωσης η επίδραση του μέτρου ελαστικότητας είναι κυρίως αμελητέα, ενώ για μεγαλύτερο πάχος διάβρωσης είναι μικρή. Επιπλέον, διαπιστώνουμε ότι έχουμε μεγαλύτερη επίδραση για το μεγαλύτερο μήκος επιθέματος.

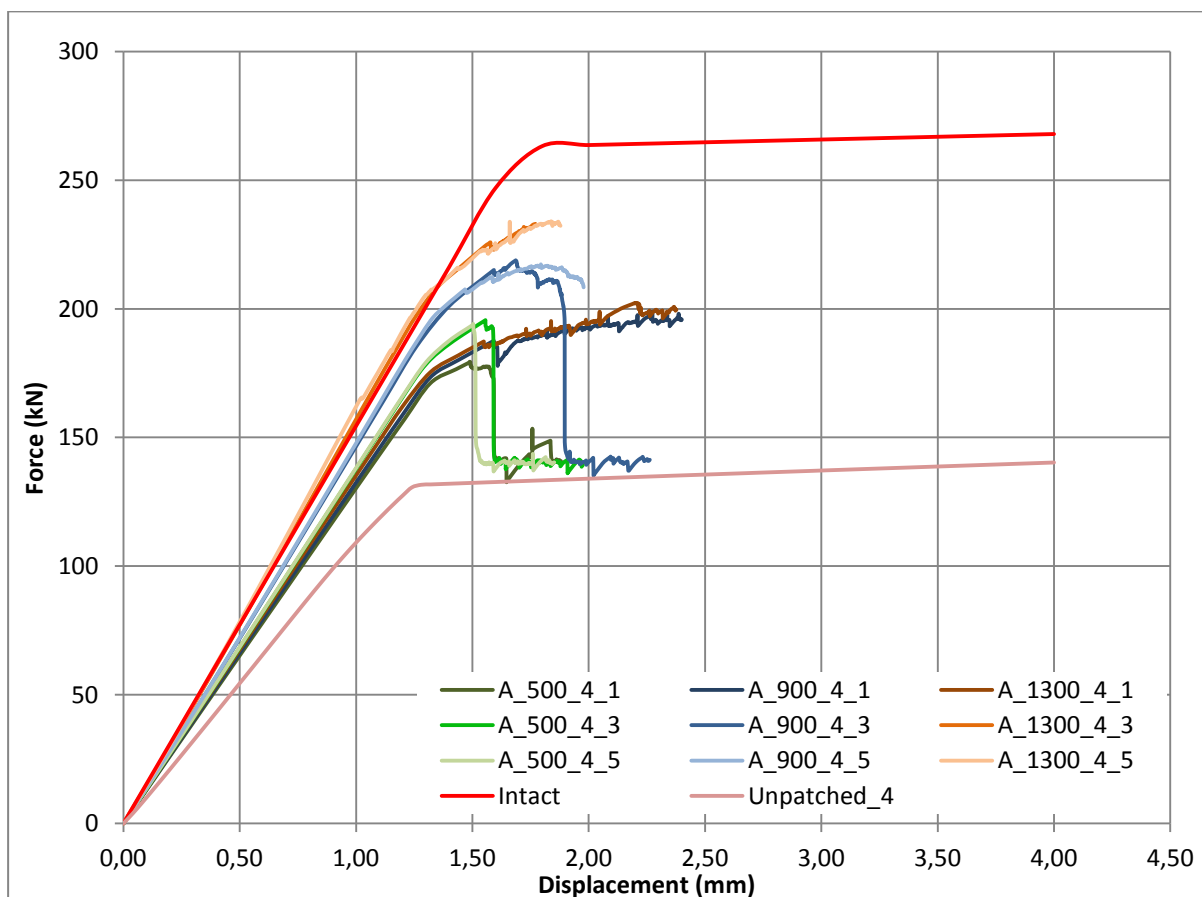
3.3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΜΗΚΟΥΣ ΕΠΙΘΕΜΑΤΟΣ

Ομοίως με το εδάφιο 3.2, ακολουθείται η ίδια λογική για την μελέτη της επίδραση του μήκους του επιθέματος. Έτσι, στα διαγράμματα δύναμης - μετατόπισης που ακολουθούν (Σχήματα 3.13 - 3.20) είναι ομαδοποιημένες όλες οι καμπύλες με τέτοιο τρόπο ώστε να φαίνεται η επίδραση του μήκους επιθέματος. Όσες έχουν πράσινο χρώμα αντιστοιχούν σε μήκος επιθέματος 500 mm, όσες είναι μπλε αντιστοιχούν σε μήκος 900 mm, ενώ όσες είναι πορτοκαλί αντιστοιχούν σε μήκος επιθέματος 1300 mm. Αναλόγως την απόχρωση αλλάζει ο λόγος ακαμψίας, με τη πιο σκούρα να έχει τη μικρότερη τιμή ($SR = 0.1$) και την ανοιχτότερη τη μεγαλύτερη ($SR = 0.5$). Τέλος, η κόκκινη καμπύλη αφορά την άθικτη κατάσταση, ενώ η ροζ αφορά έλασμα το οποίο έχει υποστεί διάβρωση, αλλά δε φέρει επίθεμα.



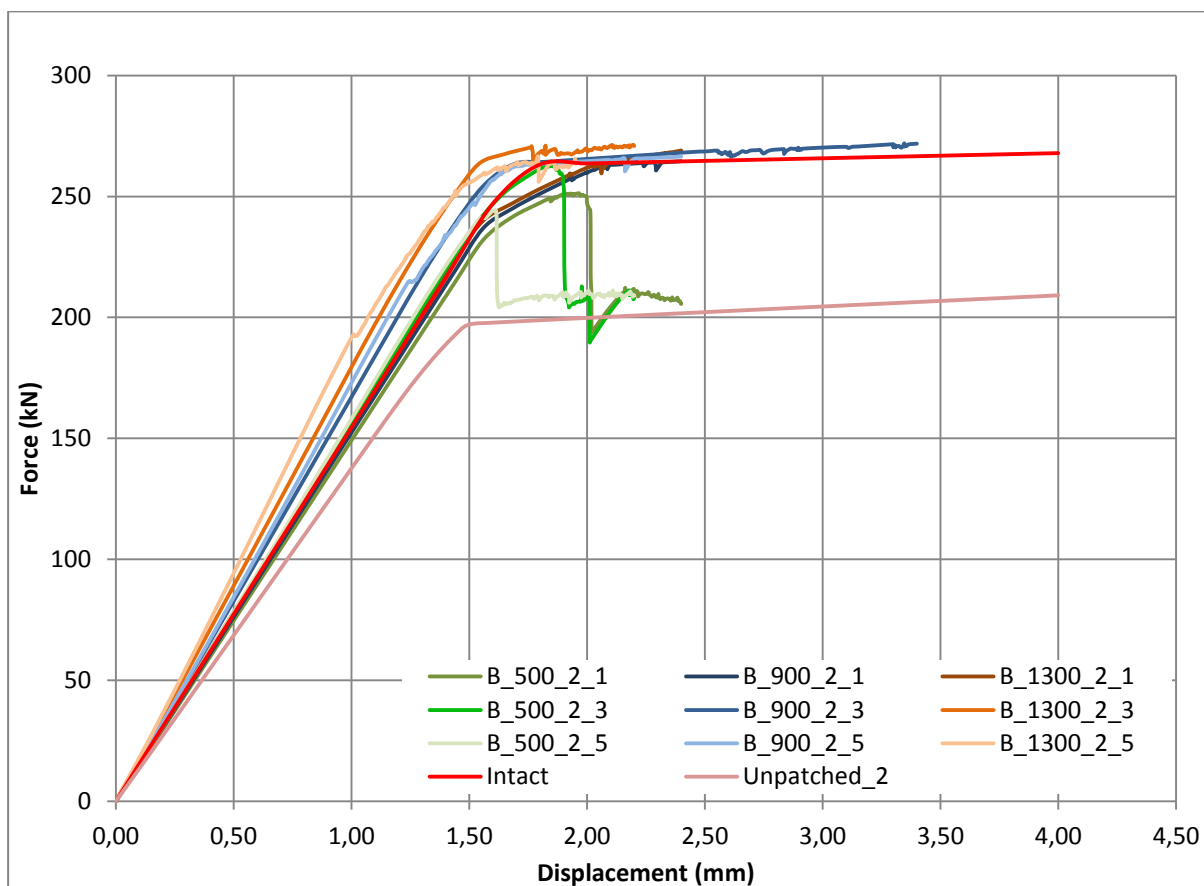
Σχήμα 3.13: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης για επίθεμα μέτρου ελαστικότητας $E = 20 \text{ GPa}$ και πάχους διάβρωσης $t_c = 2 \text{ mm}$

Για τα μοντέλα του παραπάνω σχήματος παρατηρούμε ότι για λόγο ακαμψίας 0.1 και 0.3 μεγαλύτερη τιμή για τα φορτία έναρξης αποκόλλησης του επιθέματος και διαρροής του χάλυβα έχουμε όταν το μήκος επιθέματος είναι ίσο με 1300 mm. Όταν ο λόγος ακαμψίας είναι 0.5 μέγιστη τιμή για το φορτίο έναρξης αποκόλλησης έχουμε για μήκος επιθέματος 500 mm, ενώ για το φορτίο διαρροής του χάλυβα μέγιστη τιμή έχουμε για μήκος επιθέματος 1300 mm.



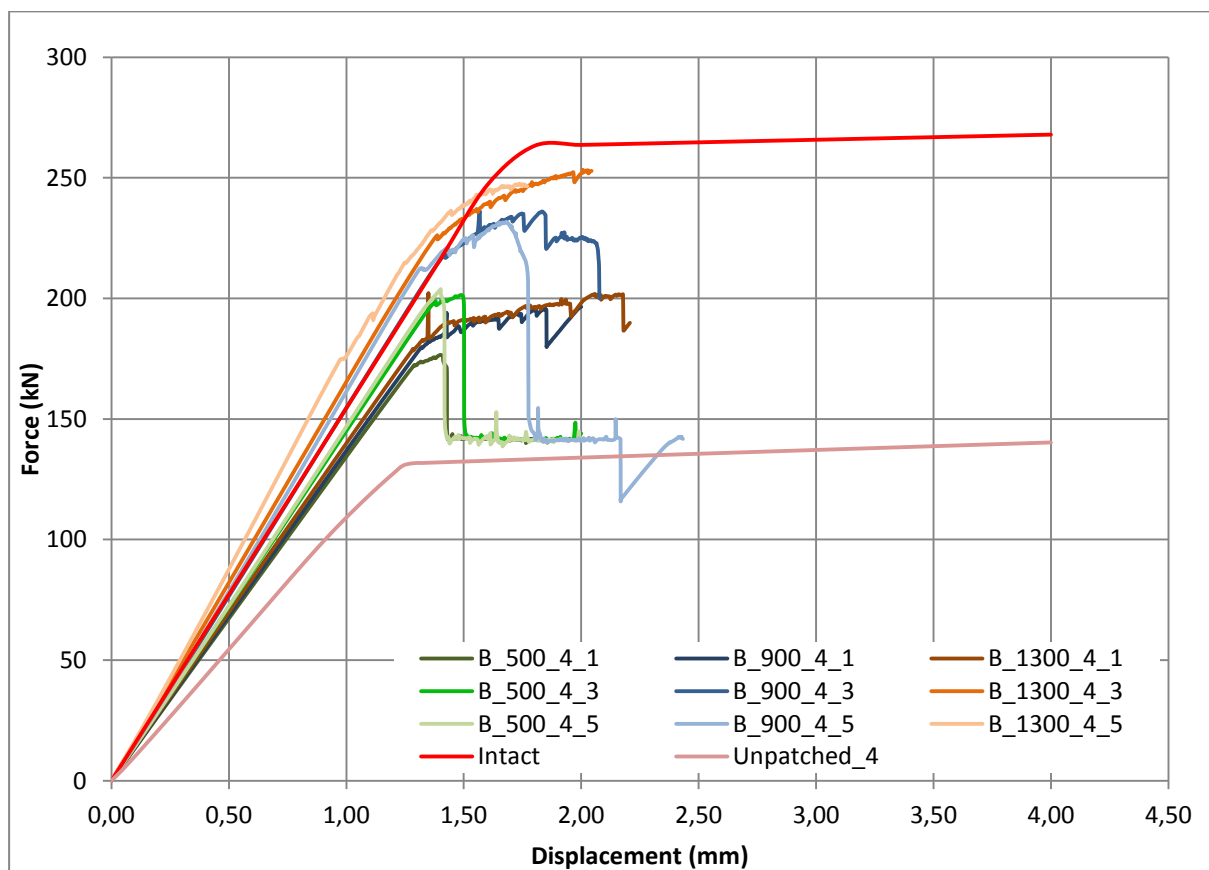
Σχήμα 3.14: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης για επίθεμα μέτρου ελαστικότητας $E = 20 \text{ GPa}$ και πάχους διάβρωσης $t_c = 4 \text{ mm}$

Όταν το πάχος διάβρωσης είναι 4 mm και ο λόγος ακαμψίας 0.1 , μεγαλύτερη τιμή για το φορτίο έναρξης αποκόλλησης του επιθέματος έχουμε όταν το μήκος του είναι 900 mm , ενώ για το φορτίο διαρροής του χάλυβα έχουμε μέγιστο όταν το μήκος του επιθέματος είναι 1300 mm . Για λόγο ακαμψίας ίσο με 0.3 , η μέγιστη τιμή για το φορτίο έναρξης αποκόλλησης εμφανίζεται όταν το επίθεμα έχει μήκος 1300 mm , ενώ για το φορτίο διαρροής του χάλυβα έχουμε μέγιστη τιμή για επίθεμα μήκους 900 mm . Όταν, όμως, ο λόγος ακαμψίας είναι 0.5 μέγιστη τιμή για το φορτίο έναρξης αποκόλλησης του επιθέματος έχουμε για μήκος ίσο με 900 mm και για το φορτίο διαρροής του χάλυβα για μήκος επιθέματος 1300 mm .



Σχήμα 3.15: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης για επίθεμα μέτρου ελαστικότητας $E = 40 \text{ GPa}$ και πάχους διάβρωσης $t_c = 2 \text{ mm}$

Για το υλικό B με πάχος διάβρωσης 2 mm, όταν ο συντελεστής ακαμψίας είναι 0.1 μέγιστη τιμή για τα φορτία έναρξης αποκόλλησης και διαρροής έχει το επίθεμα μήκους 1300 mm. Το ίδιο συμβαίνει και για λόγο ακαμψίας 0.3. Στη συνέχεια, για λόγο ακαμψίας ίσο με 0.5 μέγιστη τιμή για το φορτίο έναρξης αποκόλλησης του επιθέματος έχουμε όταν το μήκος του είναι ίσο με 500 mm, ενώ για το φορτίο διαρροής του χάλυβα έχουμε για μήκος επιθέματος 900 mm.

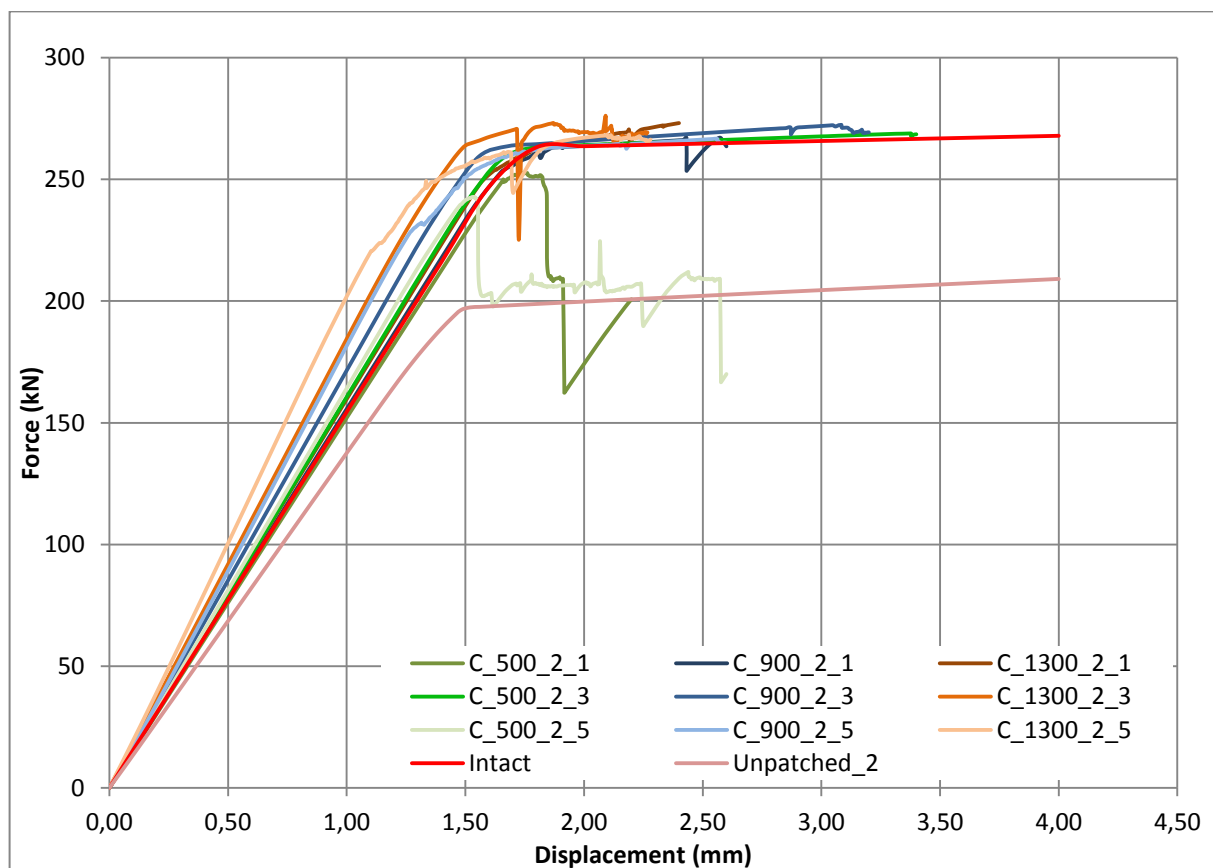


Σχήμα 3.16: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης για επίθεμα μέτρου ελαστικότητας $E = 40 \text{ GPa}$ και πάχους διάβρωσης $t_c = 4 \text{ mm}$

Για τα μοντέλα του σχήματος 3.16 παρατηρούμε ότι όταν ο λόγος ακαμψίας είναι 0.1 μέγιστη τιμή για τα φορτία έναρξης αποκόλλησης αλλά και διαρροής έχουμε για το επίθεμα μήκους 900 mm. Για λόγο ακαμψίας 0.3 μέγιστη τιμή για τα φορτία έναρξης αποκόλλησης και διαρροής έχουμε για μήκος επιθέματος 1300 mm. Τέλος, για λόγο ακαμψίας 0.5 μεγαλύτερη τιμή για το φορτίο έναρξης αποκόλλησης του επιθέματος έχουμε όταν το μήκος του είναι 900 mm, ενώ για το φορτίο διαρροής του χάλυβα μεγαλύτερη τιμή έχουμε για μήκος επιθέματος 1300 mm.

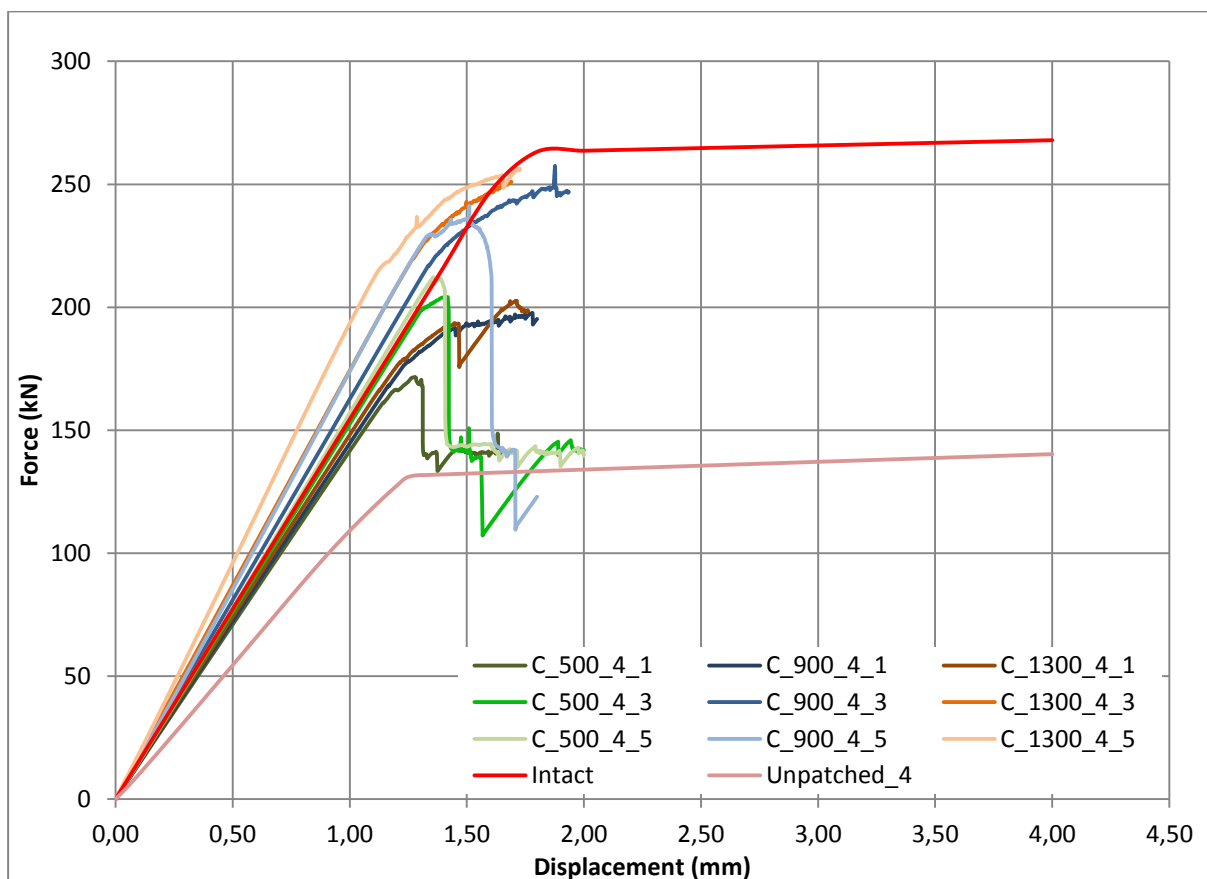
Διαπιστώνουμε, συνεπώς, από τα σχήματα 3.13 – 3.16 και σε συνδυασμό με τους πίνακες 3.7 – 3.10 ότι για τα δύο υλικά (A και B) για λόγο ακαμψίας 0.1 οι καμπύλες για μήκος επιθέματος 900 mm και 1300 mm (μπλε και πορτοκαλί σκούρα) είναι πολύ κοντά, η μεταβολή δηλαδή των μεγεθών που εξετάζουμε είναι μηδενική.

Επίσης, από τα παραπάνω διαγράμματα διαπιστώνουμε ότι όσο μεγαλώνει το μήκος του επιθέματος τόσο η επισκευή τείνει προς την άθικτη κατάσταση. Ειδικότερα, σημαντική διαφορά παρατηρούμε μεταξύ του μήκους επιθέματος 500 mm και των 900, 1300 mm (κυρίως για τους λόγους ακαμψίας 0.3 και 0.5). Αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς μήκος επιθέματος μεγαλύτερο της διαβρωμένης περιοχής καθιστά την ενίσχυση πιο αποτελεσματική, αποφορτίζοντας τον χάλυβα από τις αναπτυσσόμενες τάσεις, αφού για την ίδια μετατόπιση η κατασκευή μπορεί να παραλάβει μεγαλύτερες δυνάμεις.



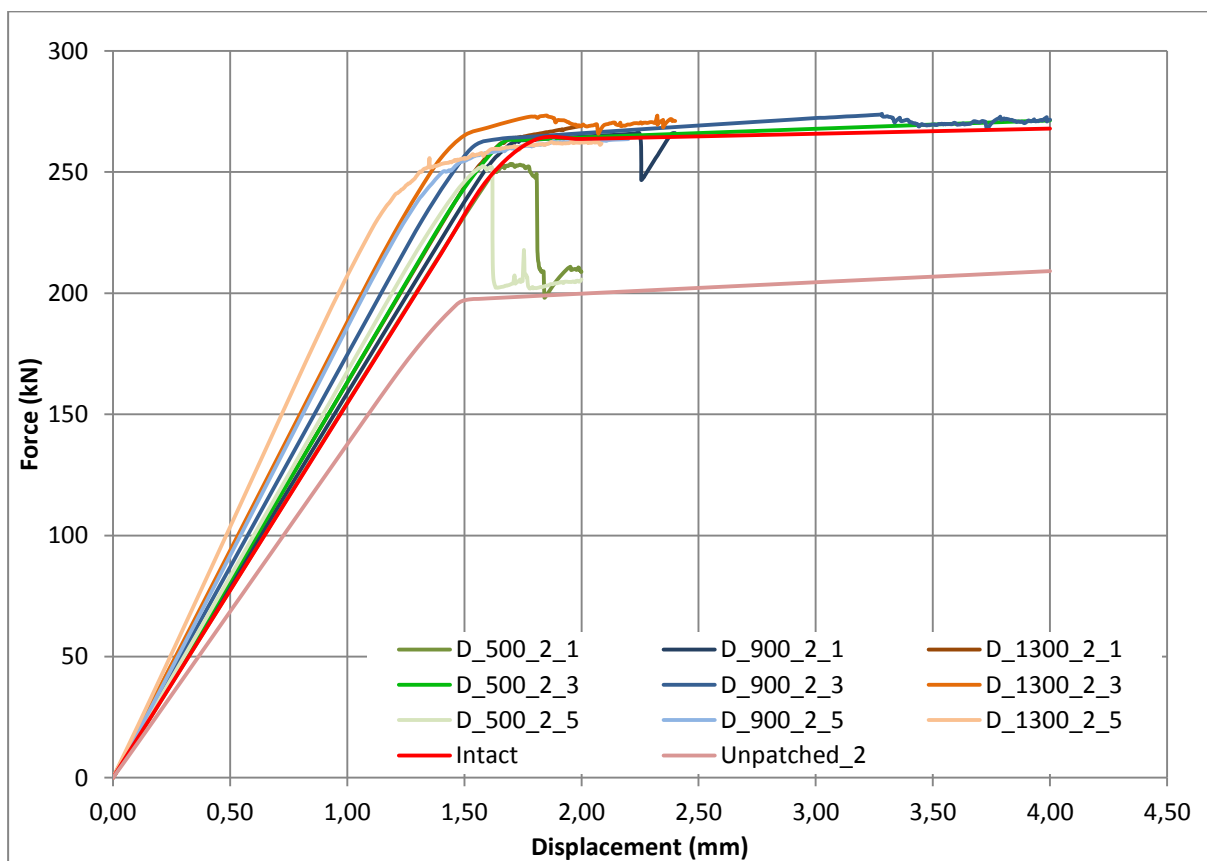
Σχήμα 3.17: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης για επίθεμα μέτρου ελαστικότητας $E = 80 \text{ GPa}$ και πάχους διάβρωσης $t_c = 2 \text{ mm}$

Για τα επιθέματα μέτρου ελαστικότητας 80 GPa και πάχους διάβρωσης 2 mm , όταν ο λόγος ακαμψίας είναι 0.1 τότε μέγιστη τιμή για όλα τα μεγέθη που εξετάζουμε έχουμε όταν το μήκος του επιθέματος είναι 900 mm . Για λόγο ακαμψίας ίσο με 0.3 , μέγιστη τιμή εμφανίζεται όταν το μήκος επιθέματος είναι 900 mm για το φορτίο έναρξης αποκόλλησης, ενώ για το φορτίο διαρροής όταν το μήκος είναι 1300 mm . Για λόγο ακαμψίας 0.5 έχουμε μέγιστη τιμή για το φορτίο έναρξης αποκόλλησης όταν το επίθεμα έχει μήκος 500 mm , ενώ για το φορτίο διαρροής του χάλυβα όταν έχει μήκος 900 mm .



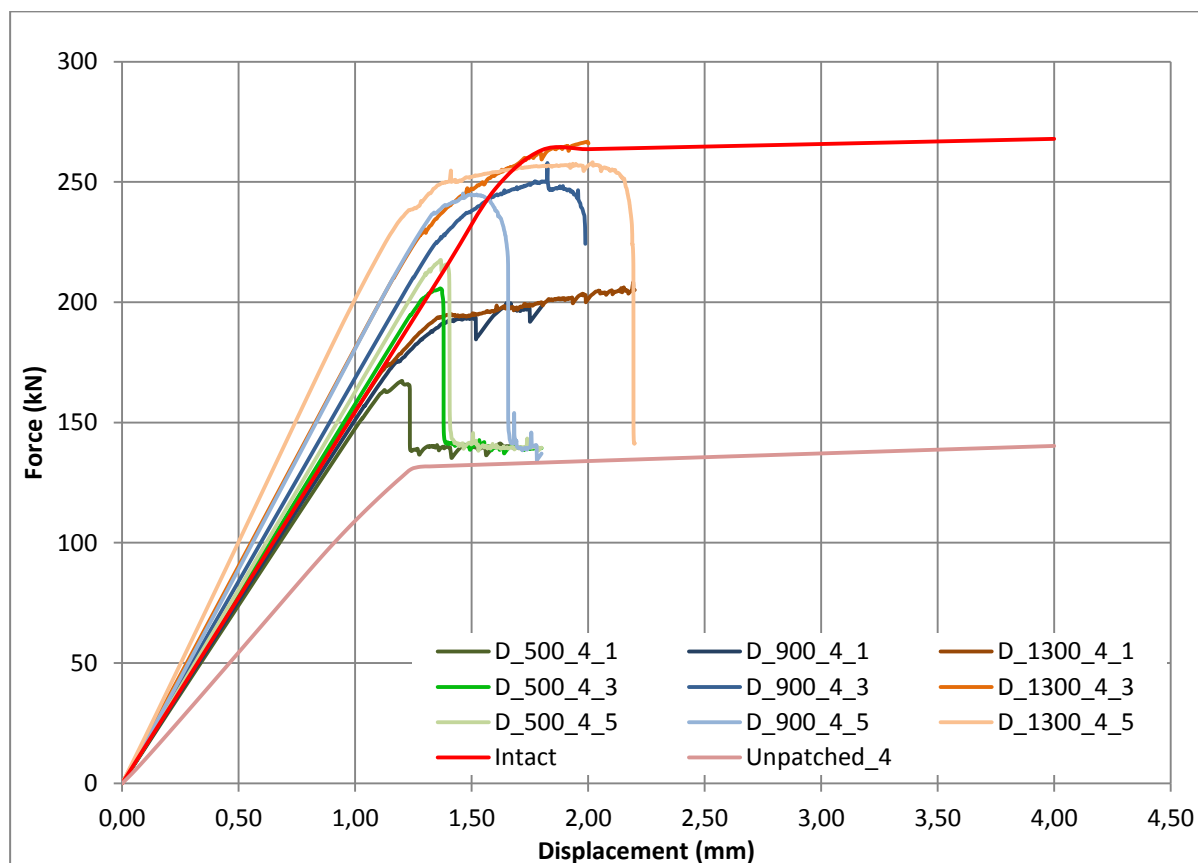
Σχήμα 3.18: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης για επίθεμα μέτρου ελαστικότητας $E = 80 \text{ GPa}$ και πάχους διάβρωσης $t_c = 4 \text{ mm}$

Για τα μοντέλα που αναπαρίστανται στο παραπάνω σχήμα παρατηρούμε ότι όταν ο λόγος ακαμψίας είναι 0.1 μέγιστη τιμή για το φορτίο έναρξης αποκόλλησης έχουμε για επίθεμα μήκους 900 mm, ενώ για το φορτίο διαρροής του χάλυβα για 1300 mm. Για λόγο ακαμψίας 0.3 μεγαλύτερη τιμή στα φορτία έναρξης αποκόλλησης και διαρροής έχει το επίθεμα μήκους 1300 mm. Τέλος, όταν ο λόγος ακαμψίας είναι 0.5, μέγιστη τιμή για το φορτίο έναρξης αποκόλλησης του επιθέματος έχουμε για μήκος επιθέματος 900 mm, ενώ για το φορτίο διαρροής του χάλυβα έχουμε για μήκος 1300 mm.



Σχήμα 3.19: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης για επίθεμα μέτρου ελαστικότητας $E = 120 \text{ GPa}$ και πάχους διάβρωσης $t_c = 2 \text{ mm}$

Όσον αφορά τα μοντέλα του παραπάνω σχήματος, για λόγο ακαμψίας 0.1 και μήκος 900 mm έχουμε τη μέγιστη τιμή για το φορτίο έναρξης αποκόλλησης, ενώ για μήκος 1300 mm για το φορτίο διαρροής. Για λόγο ακαμψίας 0.3 έχουμε τη μέγιστη τιμή για τα φορτία έναρξης αποκόλλησης και διαρροής του χάλυβα όταν το μήκος επιθέματος ισούται με 1300 mm. Επιπλέον, όταν ο λόγος ακαμψίας είναι 0.5 μεγαλύτερη τιμή για το φορτίο έναρξης αποκόλλησης έχουμε για μήκος επιθέματος 500 mm, ενώ για το φορτίο διαρροής του χάλυβα για μήκος 1300 mm.



Σχήμα 3.20: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης για επίθεμα μέτρου ελαστικότητας $E = 120 \text{ GPa}$ και πάχους διάβρωσης $t_c = 4 \text{ mm}$

Παρατηρώντας τα μοντέλα του παραπάνω σχήματος, διαπιστώνουμε ότι όταν ο λόγος ακαμψίας είναι 0.1 μέγιστη τιμή για τα φορτία έναρξης αποκόλλησης του επιθέματος και διαρροής του χάλυβα έχουμε για επίθεμα μήκους 1300 mm. Όταν ο λόγος ακαμψίας είναι 0.3 μέγιστη τιμή για το φορτίο έναρξης αποκόλλησης έχουμε για μήκος επιθέματος 900 mm, ενώ για το φορτίο διαρροής του χάλυβα για μήκος 1300 mm. Το ίδιο ισχύει και για λόγο ακαμψίας 0.5.

Επομένως, συνοψίζοντας όλα τα παραπάνω και θεωρώντας τις μεταβολές των μεγεθών κάτω του 3% αμελητέες, παρατηρούμε ότι όταν ο λόγος ακαμψίας είναι 0.1 μέγιστη τιμή για το φορτίο έναρξης αποκόλλησης έχουμε για μήκος επιθέματος 900 mm. Για το φορτίο διαρροής του χάλυβα μέγιστη τιμή έχουμε για μήκος επιθέματος 1300 mm.

Για λόγο ακαμψίας 0.3 για τα φορτία έναρξης αποκόλλησης και διαρροής μέγιστη τιμή έχουμε όταν το μήκος επιθέματος είναι 1300 mm.

Όταν ο λόγος ακαμψίας είναι 0.5 και το πάχος διάβρωσης 2 mm μέγιστη τιμή για το φορτίο έναρξης αποκόλλησης έχουμε για μήκος επιθέματος 500 mm ανεξαρτήτως του μέτρου ελαστικότητας, ενώ για το φορτίο διαρροής του χάλυβα η μέγιστη τιμή εντοπίζεται για μήκος επιθέματος 900 mm ή 1300 mm (οι διαφορές για αυτά τα μήκη επιθέματος είναι πάρα πολύ μικρές). Στην περίπτωση που το πάχος διάβρωσης είναι 4 mm, για το φορτίο έναρξης

αποκόλλησης μέγιστη τιμή έχουμε για επίθεμα μήκους 900 mm, ενώ για το φορτίο διαρροής του χάλυβα μέγιστη τιμή έχουμε για μήκος επιθέματος 1300 mm.

Έτσι, διαπιστώνουμε ότι μέγιστες τιμές για τα φορτία έναρξης αποκόλλησης και διαρροής έχουμε για τα μεγαλύτερα μήκη επιθέματος. Συγκεκριμένα, για το φορτίο έναρξης αποκόλλησης μέγιστες τιμές εντοπίζονται είτε σε μήκος επιθέματος 900 mm, είτε σε 1300 mm, ενώ για το φορτίο διαρροής εντοπίζονται για μήκος επιθέματος 1300 mm.

Επιπλέον, από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι καθώς αυξάνεται το μέτρο ελαστικότητας οι καμπύλες τείνουν προς την άθικτη κατάσταση.

Στους πίνακες που ακολουθούν φαίνεται η ποσοστιαία επίδραση του μήκους επιθέματος στα διάφορα μεγέθη που εξετάζουμε. Η χρωματική διαφοροποίηση που χρησιμοποιείται αναλύθηκε για τους πίνακες 3.4 – 3.6. Εν συντομία, με πράσινο χρώμα φαίνεται η μικρή, με πορτοκαλί η μεσαία και με κόκκινο η μεγάλη επίδραση του μήκους επιθέματος. Τα ποσοστά που δεν έχουν κανένα χρώμα θεωρούμε ότι έχουν μηδενική επίδραση.

Πίνακας 3.7:
Επίδραση του μήκους επιθέματος για το υλικό Α – ποσοστιαία σύγκριση.

Υλικό Α		compare $F_{deb, in.}$		compare $U_{deb., in.}$		compare F_{yield}		compare $U_{x,yield}$	
		$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$
compare $L_p=500 - 900mm$	SR=0.1	4%	4%	6%	7%	2%	2%	0%	1%
	SR=0.3	4%	10%	4%	2%	4%	15%	-4%	13%
	SR=0.5	-9%	7%	-24%	-3%	4%	4%	-3%	-8%
compare $L_p=900-1300 mm$	SR=0.1	1%	0%	1%	-3%	1%	1%	0%	0%
	SR=0.3	0%	5%	-17%	-1%	0%	-1%	-10%	-12%
	SR=0.5	-24%	-20%	-31%	-30%	1%	7%	-4%	4%
		compare F_{max}		compare U_{max}		compare F_{drop}		compare U_{drop}	
		$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$
compare $L_p=500 - 900mm$	SR=0.1	-	-	-	-	-	-	-	-
	SR=0.3	-	12%	-	8%	-	-18%	-	19%
	SR=0.5	-	12%	-	19%	-	-	-	-
compare $L_p=900-1300 mm$	SR=0.1	-	-	-	-	-	-	-	-
	SR=0.3	-	8%	-	6%	-	-	-	-
	SR=0.5	-	8%	-	2%	-	-	-	-

Από τον πίνακα 3.7 διαπιστώνουμε ότι για τον λόγο ακαμψίας 0.1 η αύξηση του μήκους επιθέματος από 900 mm σε 1300 mm έχει μηδενική επίδραση σε όλα τα μεγέθη. Για όλες τις άλλες περιπτώσεις η επίδρασή του είναι μικρή έως μεσαία. Επίσης, παρατηρούμε ότι τα περισσότερα μεσαίας επίδρασης ποσοστά αφορούν τον λόγο ακαμψίας 0.5 και κυρίως για τη μεταβολή του μήκους επιθέματος από 900 mm σε 1300 mm. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με ότι αναφέρθηκε προηγουμένως για τον λόγο ακαμψίας 0.1. Επιπλέον, όταν αυξάνουμε το μήκος επιθέματος από 500 mm σε 900 mm η επίδραση στα φορτία έναρξης αποκόλλησης του επιθέματος και διαρροής του χάλυβα είναι μικρή, ενώ περαιτέρω αύξηση του μήκους προκαλεί απειροελάχιστη μεταβολή, σε γενικές γραμμές, στα φορτία αυτά.

Πίνακας 3.8:
Επίδραση του μήκους επιθέματος για το υλικό Β – ποσοστιαία σύγκριση.

Υλικό Β		compare $F_{deb, in.}$		compare $U_{deb., in.}$		compare F_{yield}		compare $U_{x,yield}$	
		$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$
compare $L_p=500-900mm$	SR=0.1	4%	4%	5%	2%	1%	4%	0%	1%
	SR=0.3	2%	10%	37%	3%	2%	10%	-4%	3%
	SR=0.5	-11%	4%	-20%	-6%	7%	8%	3%	2%
compare $L_p=900-1300mm$	SR=0.1	1%	-1%	0%	-3%	1%	-1%	0%	-4%
	SR=0.3	1%	4%	-29%	-2%	0%	4%	-9%	-3%
	SR=0.5	-10%	-18%	-19%	-27%	-2%	5%	-9%	-2%
		compare F_{max}		compare U_{max}		compare F_{drop}		compare U_{drop}	
		$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$
compare $L_p=500-900mm$	SR=0.1	-	-	-	-	-	-	-	-
	SR=0.3	-	17%	-	5%	-	32%	-	38%
	SR=0.5	-	14%	-	20%	-	-2%	-	25%
compare $L_p=900-1300mm$	SR=0.1	-	-	-	-	-	-	-	-
	SR=0.3	-	-	-	-	-	-	-	-
	SR=0.5	-	5%	-	3%	-	-	-	-

Παρατηρούμε ότι τα συμπεράσματα για τον πίνακα 3.7 ισχύουν και στην περίπτωση του υλικού Β. Επιπλέον, διαπιστώνουμε ότι η επίδραση του μήκους επιθέματος είναι μεγαλύτερη για το μεγαλύτερο πάχος διάβρωσης.

Πίνακας 3.9:
Επίδραση του μήκους επιθέματος για το υλικό C – ποσοστιαία σύγκριση.

Υλικό C		compare $F_{deb, in.}$		compare $U_{deb., in.}$		compare F_{yield}		compare $U_{x,yield}$	
		$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$
compare $L_p=500-900mm$	SR=0.1	2%	4%	2%	2%	3%	6%	2%	2%
	SR=0.3	1%	9%	-18%	2%	0%	9%	-7%	1%
	SR=0.5	-5%	8%	-14%	8%	23%	11%	6%	5%
compare $L_p=900-1300mm$	SR=0.1	-1%	-1%	-3%	-3%	-1%	1%	-4%	-2%
	SR=0.3	-17%	1%	-36%	-5%	1%	4%	-9%	-2%
	SR=0.5	-4%	-6%	-13%	-24%	-2%	5%	-13%	0%
		compare F_{max}		compare U_{max}		compare F_{drop}		compare U_{drop}	
		$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$
compare $L_p=500-900mm$	SR=0.1	-	-	-	-	17%	-	32%	-
	SR=0.3	-	26%	-	33%	-	-	-	-
	SR=0.5	-	14%	-	22%	-	33%	-	14%
compare $L_p=900-1300mm$	SR=0.1	-	-	-	-	-	-	-	-
	SR=0.3	-	-	-	-	-	-	-	-
	SR=0.5	-	-	-	-	-	-	-	-

Βλέπουμε ότι και για το υλικό C η αύξηση του μήκους επιθέματος σε 1300 mm έχει την ίδια επίδραση με τα δύο προηγούμενα υλικά για λόγο ακαμψίας 0.1. Σε γενικές γραμμές βλέπουμε ότι το μήκος επιθέματος επιδρά σε μικρό έως αμελητέο βαθμό, σε λίγες περιπτώσεις σε μεσαίο βαθμό ενώ σε μία σε μεγάλο βαθμό. Για το φορτίο έναρξης αποκόλλησης η επίδραση είναι κυρίως μικρή, ενώ για το φορτίο διαρροής είναι αμελητέα για το μικρότερο πάχος διάβρωσης και μικρή για το μεγαλύτερο πάχος.

Πίνακας 3.10:
Επίδραση του μήκους επιθέματος για το υλικό D – ποσοστιαία σύγκριση.

Υλικό D		compare $F_{deb, in.}$		compare $U_{deb., in.}$		compare F_{yield}		compare $U_{x,yield}$	
		$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$
compare $L_p=500$ - 900mm	SR=0.1	1%	3%	-1%	1%	1%	13%	-1%	5%
	SR=0.3	0%	8%	-22%	1%	0%	11%	-12%	4%
	SR=0.5	-2%	12%	-12%	2%	3%	14%	0%	7%
compare $L_p=900$ - 1300 mm	SR=0.1	0%	0%	-3%	-2%	0%	0%	-2%	-2%
	SR=0.3	0%	0%	-39%	-7%	1%	18%	-9%	37%
	SR=0.5	-4%	-3%	-14%	-12%	0%	4%	1%	-2%
		compare F_{max}		compare U_{max}		compare F_{drop}		compare U_{drop}	
		$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$
compare $L_p=500$ - 900mm	SR=0.1	-	-	-	-	4%	30%	25%	25%
	SR=0.3	-	25%	-	34%	-	17%	-	44%
	SR=0.5	-	13%	-	7%	-	-10%	-	18%
compare $L_p=900$ - 1300 mm	SR=0.1	-	-	-	-	-	-	-	-
	SR=0.3	-	-	-	-	-	14%	-	8%
	SR=0.5	-	5%	-	38%	-	12%	-	32%

Η μεταβολή του φορτίου έναρξης αποκόλλησης είναι αμελητέα για αύξηση του μήκους του επιθέματος από 900 mm σε 1300 mm. Επιπλέον, για τα φορτία διαρροής και έναρξης αποκόλλησης στη περίπτωση του μικρότερου πάχους διάβρωσης το μήκος επιθέματος έχει αμελητέα επίδραση, ενώ για το μεγαλύτερο πάχος διάβρωσης μικρή.

Συνεπώς, από τους πίνακες 3.7 – 3.10 συμπεραίνουμε ότι μειώνεται η επίδραση του μήκους του επιθέματος όσο μεγαλώνει το μέτρο ελαστικότητάς του. Επιπλέον, για τον λόγο ακαμψίας 0.1 η αύξηση του μήκους επιθέματος από 900 mm σε 1300 mm έχει μηδενική επίδραση σε όλα τα μεγέθη και για όλα τα υλικά. Επίσης, διαπιστώνουμε ότι για το φορτίο έναρξης αποκόλλησης η επίδραση του μήκους επιθέματος είναι μικρή για μεταβολή από 500 mm σε 900 mm, ενώ περαιτέρω αύξησή του έχει σε γενικές γραμμές αμελητέα επίδραση. Για το φορτίο διαρροής στη περίπτωση του μικρότερου πάχους διάβρωσης το μήκος επιθέματος έχει αμελητέα επίδραση, ενώ για το μεγαλύτερο πάχος διάβρωσης μικρή.

3.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΚΑΜΨΙΑΣ

Για τη διερεύνηση της επίδρασης του λόγου ακαμψίας χρησιμοποιούνται οι πίνακες 3.3 – 3.4 και 3.11 – 3.14 ενώ από πλευράς διαγραμμάτων δεν παραθέτονται καινούργια, καθώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε αυτά του εδαφίου 3.3, είτε του 3.4.

Έτσι, για το υλικό A όταν το πάχος διάβρωσης του χάλυβα είναι 2 mm, μέγιστη τιμή για το φορτίο έναρξης αποκόλλησης έχουμε για λόγο ακαμψίας 0.3, ενώ για το φορτίο διαρροής του χάλυβα για λόγο ακαμψίας 0.5, ανεξαρτήτως του μήκους επιθέματος. Για μεγαλύτερο πάχος διάβρωσης μεγαλύτερη τιμή για το φορτίο έναρξης αποκόλλησης του επιθέματος έχουμε για λόγο ακαμψίας 0.3, ενώ για το φορτίο λόγω διαρροής του χάλυβα έχουμε για λόγο ακαμψίας 0.5 όταν το μήκος επιθέματος είναι 500 mm και 1300 mm και για λόγο ακαμψίας 0.3 όταν το μήκος είναι 900 mm.

Αναφορικά με το υλικό B, για το μικρότερο πάχος διάβρωσης στα φορτία έναρξης αποκόλλησης και διαρροής μέγιστη τιμή έχουμε για λόγο ακαμψίας 0.3. Στη περίπτωση που το πάχος διάβρωσης είναι 4 mm για το φορτίο διαρροής του χάλυβα μέγιστη τιμή έχουμε για λόγο ακαμψίας 0.5, ενώ για το φορτίο έναρξης αποκόλλησης έχουμε μέγιστο για λόγο ακαμψίας 0.3 όταν το μήκος επιθέματος είναι 900 ή 1300 mm και 0.5 όταν είναι 500 mm.

Για το υλικό C, όταν το πάχος διάβρωσης είναι 2 mm για το φορτίο έναρξης αποκόλλησης μέγιστη τιμή έχουμε για συντελεστή ακαμψίας 0.3 όταν το μήκος επιθέματος είναι 500 ή 900 mm και για συντελεστή 0.1 όταν είναι 1300 mm. Για το φορτίο διαρροής του χάλυβα, μέγιστη τιμή έχουμε για συντελεστή ακαμψίας 0.3 ανεξάρτητα από το μήκος επιθέματος. Όταν το πάχος διάβρωσης είναι μεγαλύτερο, για το φορτίο έναρξης αποκόλλησης του επιθέματος μέγιστη τιμή έχουμε για επίθεμα μήκους 500 ή 900 mm όταν ο λόγος ακαμψίας είναι 0.5, ενώ για επίθεμα μήκους 1300 mm όταν είναι 0.3. Για το φορτίο διαρροής του χάλυβα μέγιστη τιμή έχουμε για λόγο ακαμψίας 0.5 ανεξαρτήτως μήκους επιθέματος.

Τέλος, σχετικά με το υλικό D για το μικρότερο πάχος διάβρωσης μέγιστη τιμή για το φορτίο έναρξης αποκόλλησης, καθώς και για το φορτίο διαρροής έχουμε για συντελεστή ακαμψίας 0.3. Για το μεγαλύτερο πάχος διάβρωσης, όσον αφορά το φορτίο έναρξης αποκόλλησης του επιθέματος έχουμε τη μέγιστη τιμή για λόγο ακαμψίας 0.5, ενώ για το φορτίο διαρροής του χάλυβα όταν το μήκος του επιθέματος είναι 500 ή 900 mm έχουμε τη μέγιστη τιμή για λόγο ακαμψίας 0.5 και όταν είναι 1300 mm για λόγο ακαμψίας 0.3.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω, παρατηρούμε ότι για το φορτίο έναρξης αποκόλλησης μέγιστες τιμές έχουμε κυρίως για λόγο ακαμψίας 0.3, ενώ για το φορτίο διαρροής του χάλυβα στις περισσότερες περιπτώσεις οι μέγιστες τιμές εντοπίζονται για λόγο ακαμψίας 0.5, ενώ σε αρκετές για λόγο ακαμψίας 0.3.

Στη συνέχεια, ακολουθούν πίνακες οι οποίοι δείχνουν την ποσοστιαία επίδραση του συντελεστή ακαμψίας στα μεγέθη που μελετάμε.

Πίνακας 3.11:
Επίδραση του συντελεστή ακαμψίας για το υλικό Α – ποσοστιαία σύγκριση.

Υλικό Α		compare $F_{deb, in.}$		compare $U_{deb, in.}$		compare F_{yield}		compare $U_{x,yield}$	
		$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$
compare SR=0.1 - 0.3	$L_p=500$ mm	1%	9%	-11%	4%	8%	4%	13%	-5%
	$L_p=900$ mm	1%	15%	-13%	0%	11%	17%	9%	7%
	$L_p=1300$ mm	1%	21%	-28%	1%	11%	15%	-2%	-6%
compare SR=0.3 - 0.5	$L_p=500$ mm	0%	-1%	0%	-3%	0%	6%	0%	10%
	$L_p=900$ mm	-13%	-4%	-27%	-8%	0%	-5%	1%	-11%
	$L_p=1300$ mm	-34%	-27%	-39%	-35%	0%	3%	8%	6%
		compare F_{max}		compare U_{max}		compare F_{drop}		compare U_{drop}	
		$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$
compare SR=0.1 - 0.3	$L_p=500$ mm	1%	9%	-10%	5%	2%	8%	-12%	0%
	$L_p=900$ mm	-	-	-	-	-	-	-	-
	$L_p=1300$ mm	-	-	-	-	-	-	-	-
compare SR=0.3 - 0.5	$L_p=500$ mm	2%	-1%	6%	-3%	2%	-1%	4%	-5%
	$L_p=900$ mm	-	-1%	-	6%	-	-	-	-
	$L_p=1300$ mm	-	-1%	-	3%	-	-	-	-

Από τον παραπάνω πίνακα διαπιστώνουμε πως για μήκος επιθέματος 500 mm η επίδραση του λόγου ακαμψίας στα διάφορα μεγέθη είναι μικρή για μεταβολή του από 0.1 σε 0.3, ενώ είναι αμελητέα για μεταβολή του από 0.3 σε 0.5. Μεγαλύτερη είναι η επίδραση του για μήκος επιθέματος 1300 mm κυρίως για το φορτίο έναρξης αποκόλλησης, όπου είναι μεσαία. Για αύξηση του λόγου ακαμψίας από 0.1 σε 0.3 η επίδραση στο φορτίο έναρξης αποκόλλησης είναι αμελητέα για το μικρότερο πάχος διάβρωσης, ενώ για το μεγαλύτερο πάχος είναι μεσαία. Επίσης, για το φορτίο διαρροής όταν το πάχος διάβρωσης είναι 2 mm η επίδρασή του είναι μικρή για τους λόγους ακαμψίας 0.1, 0.3 και μηδενική για τους λόγους 0.3, 0.5. Ενώ για το μεγαλύτερο πάχος η επίδραση είναι πιο μεγάλη. Συγκεκριμένα, έχει μεσαία επίδραση για τους λόγους ακαμψίας 0.1, 0.3 και μικρή για τους λόγους 0.3, 0.5.

Πίνακας 3.12:

Επίδραση του συντελεστή ακαμψίας για το υλικό B – ποσοστιαία σύγκριση.

Υλικό B		compare $F_{deb, in.}$		compare $U_{deb, in.}$		compare F_{yield}		compare $U_{x,yield}$	
		$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$
compare SR=0.1 - 0.3	$L_p=500$ mm	6%	15%	-1%	7%	7%	14%	5%	4%
	$L_p=900$ mm	4%	21%	28%	8%	8%	20%	1%	6%
	$L_p=1300$ mm	4%	27%	-9%	8%	7%	26%	-8%	7%
compare SR=0.3 - 0.5	$L_p=500$ mm	-8%	3%	-15%	2%	-6%	3%	-8%	2%
	$L_p=900$ mm	-20%	-2%	-50%	-7%	-1%	1%	-2%	1%
	$L_p=1300$ mm	-29%	-23%	-43%	-30%	-3%	3%	-2%	1%
		compare F_{max}		compare U_{max}		compare F_{drop}		compare U_{drop}	
		$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$
compare SR=0.1 - 0.3	$L_p=500$ mm	5%	14%	-7%	6%	28%	3%	-6%	5%
	$L_p=900$ mm	-	-	-	-	-	-	-	-
	$L_p=1300$ mm	-	-	-	-	-	-	-	-
compare SR=0.3 - 0.5	$L_p=500$ mm	-7%	1%	-12%	-6%	-12%	1%	-15%	-6%
	$L_p=900$ mm	-	-2%	-	7%	-	-24%	-	-15%
	$L_p=1300$ mm	-	-	-	-	-	-	-	-

Για το υλικό B συμπεραίνουμε η επίδραση του συντελεστή ακαμψίας στο φορτίο διαρροής του χάλυβα είναι μικρή για το μικρότερο πάχος διάβρωσης, ενώ για το μεγαλύτερο πάχος διάβρωσης αμελητέα. Μεγαλύτερη επίδραση έχουμε στο φορτίο έναρξης αποκόλλησης. Συγκεκριμένα, για το μικρότερο πάχος διάβρωσης η επίδραση είναι μικρή, ενώ για το μεγαλύτερο πάχος είναι μεσαία. Επίσης, στο φορτίο έναρξης αποκόλλησης παρατηρούμε ότι μεγαλύτερη είναι η επίδραση για μήκος επιθέματος 1300 mm.

Πίνακας 3.13:

Επίδραση του συντελεστή ακαμψίας για το υλικό C – ποσοστιαία σύγκριση.

Υλικό C		compare $F_{deb, in.}$		compare $U_{deb, in.}$		compare F_{yield}		compare $U_{x,yield}$	
		$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$
compare SR=0.1 - 0.3	$L_p=500$ mm	8%	24%	96%	15%	6%	17%	9%	3%
	$L_p=900$ mm	6%	29%	59%	15%	3%	19%	-1%	3%
	$L_p=1300$ mm	-11%	32%	6%	13%	4%	23%	-6%	2%
compare SR=0.3 - 0.5	$L_p=500$ mm	-11%	6%	-54%	4%	-20%	6%	-14%	3%
	$L_p=900$ mm	-15%	6%	-52%	10%	-2%	8%	-2%	7%
	$L_p=1300$ mm	-2%	-3%	-36%	-12%	-5%	8%	-6%	9%
		compare F_{max}		compare U_{max}		compare F_{drop}		compare U_{drop}	
		$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$
compare SR=0.1 - 0.3	$L_p=500$ mm	-	19%	-	10%	-	5%	-	8%
	$L_p=900$ mm	-	-	-	-	-	-	-	-
	$L_p=1300$ mm	-	-	-	-	-	-	-	-
compare SR=0.3 - 0.5	$L_p=500$ mm	-	4%	-	-3%	-	2%	-	-1%
	$L_p=900$ mm	-	-6%	-	-12%	-	-	-	-
	$L_p=1300$ mm	-	-	-	-	10%	-	-2%	-

Από τον παραπάνω πίνακα διαπιστώνουμε πως για το συγκεκριμένο μέτρο ελαστικότητας έχουμε μεγαλύτερες μεταβολές σε γενικές γραμμές. Η επίδραση του λόγου ακαμψίας για πάχος διάβρωσης 2 mm στο φορτίο έναρξης αποκόλλησης είναι μικρή, ενώ για το μεγαλύτερο πάχος διάβρωσης είναι μεσαία για μεταβολή του λόγου ακαμψίας από 0.1 σε 0.3 και μικρή για περαιτέρω αύξησή του. Το ίδιο ισχύει και για το φορτίο διαρροής του χάλυβα. Τέλος, διαπιστώνουμε ότι για το υλικό C μεγαλύτερη επίδραση και μέγιστες τιμές στα φορτία έναρξης αποκόλλησης και διαρροής έχουμε για λόγο ακαμψίας 0.3.

Πίνακας 3.14:

Επίδραση του συντελεστή ακαμψίας για το υλικό D – ποσοστιαία σύγκριση.

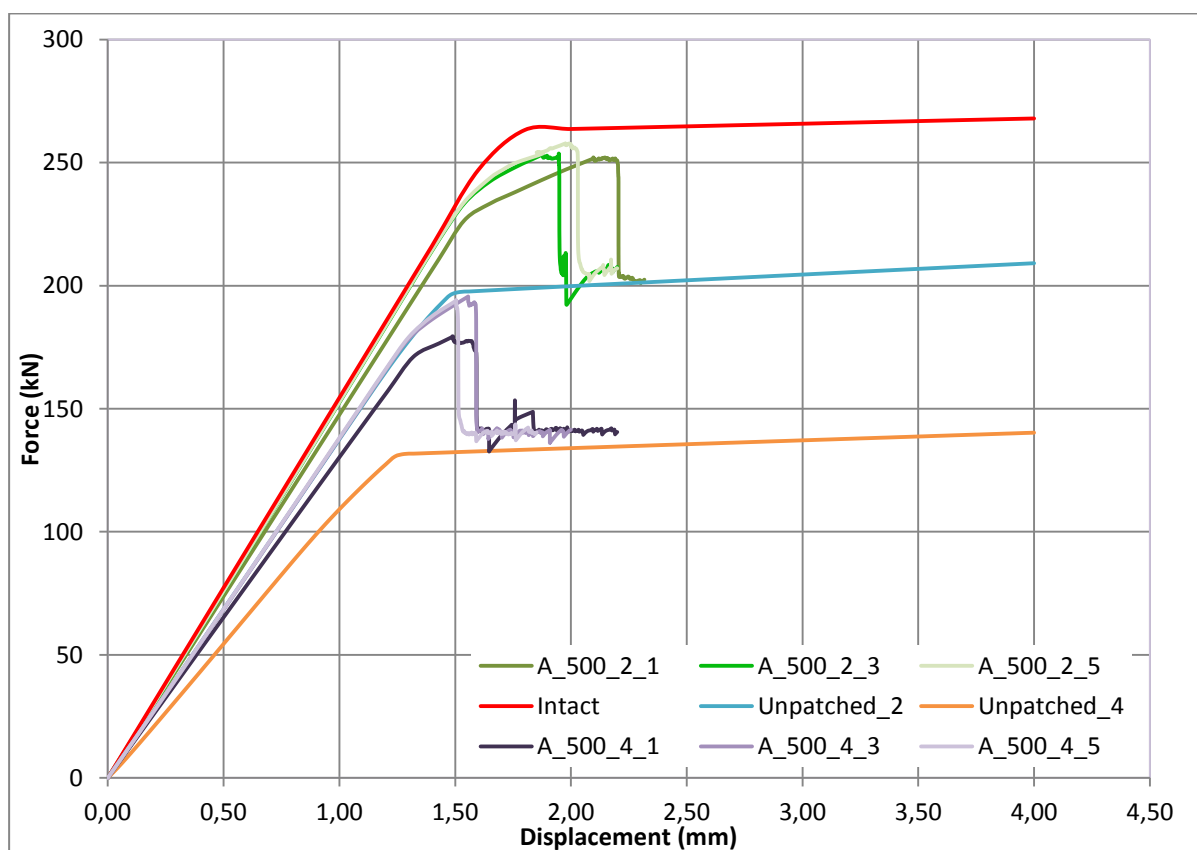
Υλικό D		compare $F_{deb, in.}$		compare $U_{deb, in.}$		compare F_{yield}		compare $U_{x,yield}$	
		$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$
compare SR=0.1 - 0.3	$L_p=500$ mm	8%	28%	130%	20%	6%	23%	16%	4%
	$L_p=900$ mm	7%	34%	81%	20%	4%	21%	3%	4%
	$L_p=1300$ mm	8%	34%	13%	15%	5%	42%	-4%	46%
compare SR=0.3 - 0.5	$L_p=500$ mm	-9%	9%	-60%	5%	-5%	5%	-13%	1%
	$L_p=900$ mm	-12%	13%	-55%	7%	-2%	7%	-2%	4%
	$L_p=1300$ mm	-15%	10%	-36%	0%	-2%	-5%	9%	-25%
Υλικό D		compare F_{max}		compare U_{max}		compare F_{drop}		compare U_{drop}	
		$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$	$t_{cor}/t_{st} = 0.25$	$t_{cor}/t_{st} = 0.50$
compare SR=0.1 - 0.3	$L_p=500$ mm	-	23%	-	14%	-	35%	-	12%
	$L_p=900$ mm	-	-	-	-	-	22%	-	31%
	$L_p=1300$ mm	-	-	-	-	-	-	-	-
compare SR=0.3 - 0.5	$L_p=500$ mm	-	6%	-	0%	-	10%	-	2%
	$L_p=900$ mm	-	-5%	-	-20%	-	-15%	-	-17%
	$L_p=1300$ mm	-	-	-	-	-	-17%	-	2%

Για το υλικό D παρατηρούμε ότι η επίδραση του λόγου ακαμψίας στο φορτίο έναρξης αποκόλλησης και διαρροής είναι μικρή για το μικρότερο πάχος διάβρωσης, ενώ αυξάνεται για το μεγαλύτερο πάχος. Επίσης, μεγαλύτερη επίδραση για πάχος διάβρωσης 4 mm έχουμε όταν μεταβάλλουμε το λόγο ακαμψίας από 0.1 σε 0.3.

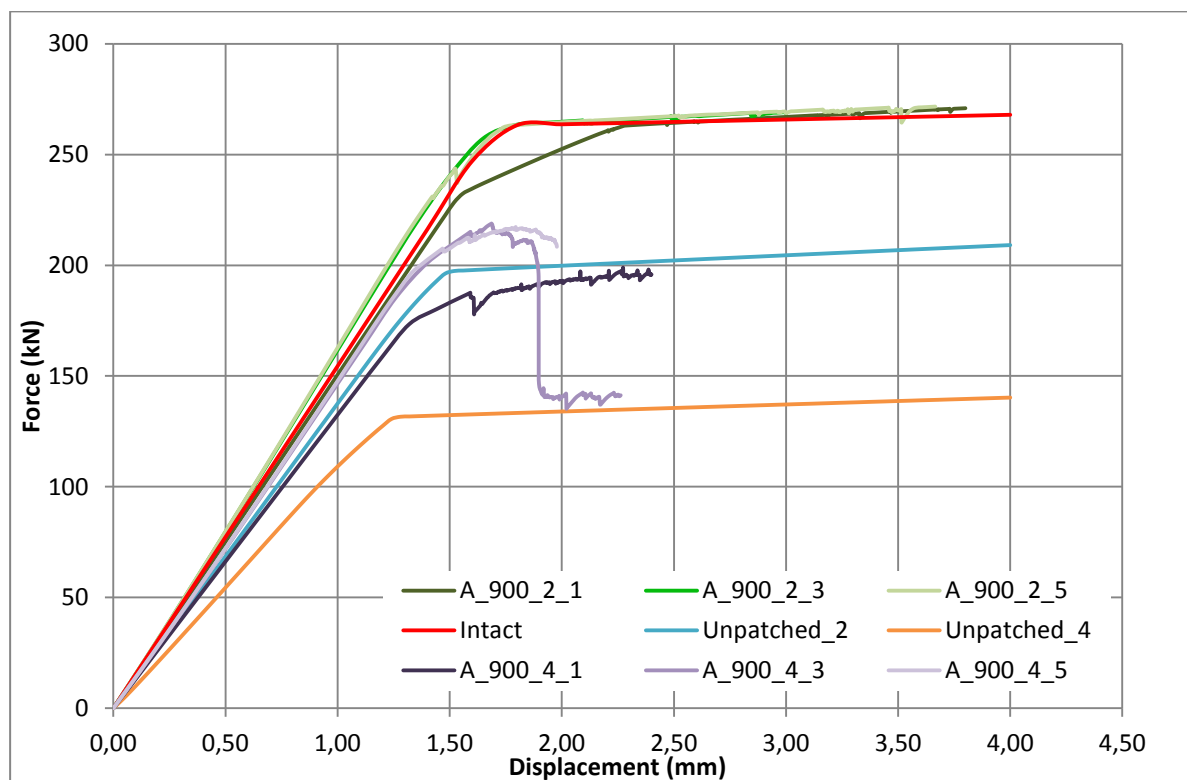
Εξετάζοντας τους πίνακες 3.11 – 3.14 τα συμπεράσματα που βγαίνουν είναι τα εξής: Για τα μικρότερα μέτρα ελαστικότητας (υλικά A και B) η επίδραση του λόγου ακαμψίας για μήκος επιθέματος 500 mm είναι μικρή έως αμελητέα, ενώ καθώς αυξάνει το μέτρο ελαστικότητας αυξάνει και η επίδρασή του. Ειδικά για το φορτίο έναρξης αποκόλλησης του επιθέματος, έχουμε μεγαλύτερη επίδραση, σε σχέση με το φορτίο διαρροής, η οποία αυξάνει όσο μεγαλώνει το μέτρο ελαστικότητας. Μικρή έως μεσαία είναι, σε γενικές γραμμές, η επίδραση στο φορτίο έναρξης αποκόλλησης. Για το φορτίο διαρροής, στο μικρότερο πάχος διάβρωσης η επίδραση είναι αμελητέα έως μικρή, ενώ για το μεγαλύτερο πάχος είναι μεγαλύτερη και συγκεκριμένα μικρή έως μεσαία.

3.5 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΑΧΟΥΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

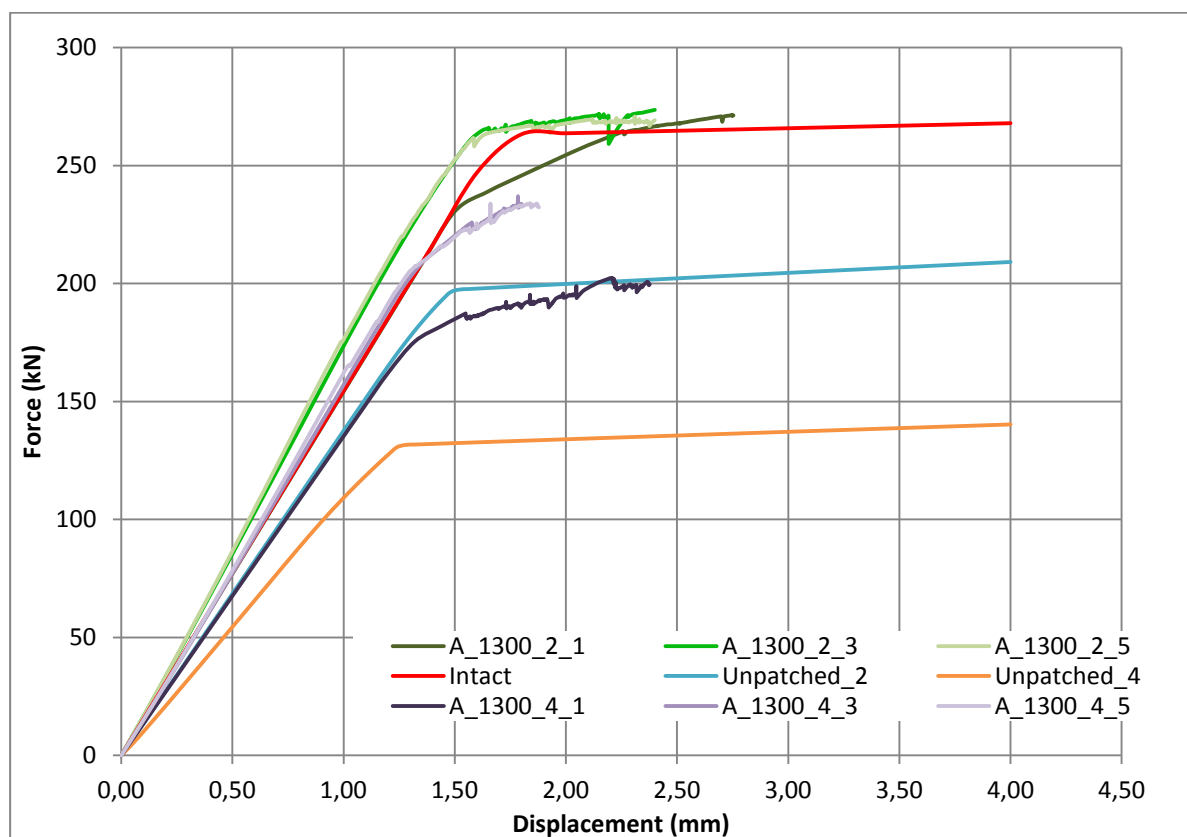
Στα διαγράμματα δύναμης - μετατόπισης που ακολουθούν (Σχήματα 3.21 -3.32), φαίνονται όλα τα αποτελέσματα της ανάλυσης ομαδοποιημένα έτσι, ώστε να φαίνεται η επίδραση του πάχους διάβρωσης του χάλυβα στην κατασκευή. Οι καμπύλες που έχουν πράσινο χρώμα αντιστοιχούν στα μοντέλα με πάχος διάβρωσης ίσο με 2 mm, ενώ η οικογένεια καμπυλών που αναπαριστάται με μωβ χρώμα αφορά μοντέλα με πάχος διάβρωσης ίσο με 4 mm. Επίσης, υπάρχουν τρεις καμπύλες που αφορούν περιπτώσεις στις οποίες δεν υπάρχει επίθεμα. Πιο συγκεκριμένα η κόκκινη καμπύλη αντιστοιχεί στην άθικτη κατάσταση, η γαλάζια σε έλασμα με πάχος διάβρωσης 2 mm και η πορτοκαλί σε έλασμα με πάχος διάβρωσης ίσο με 4 mm.



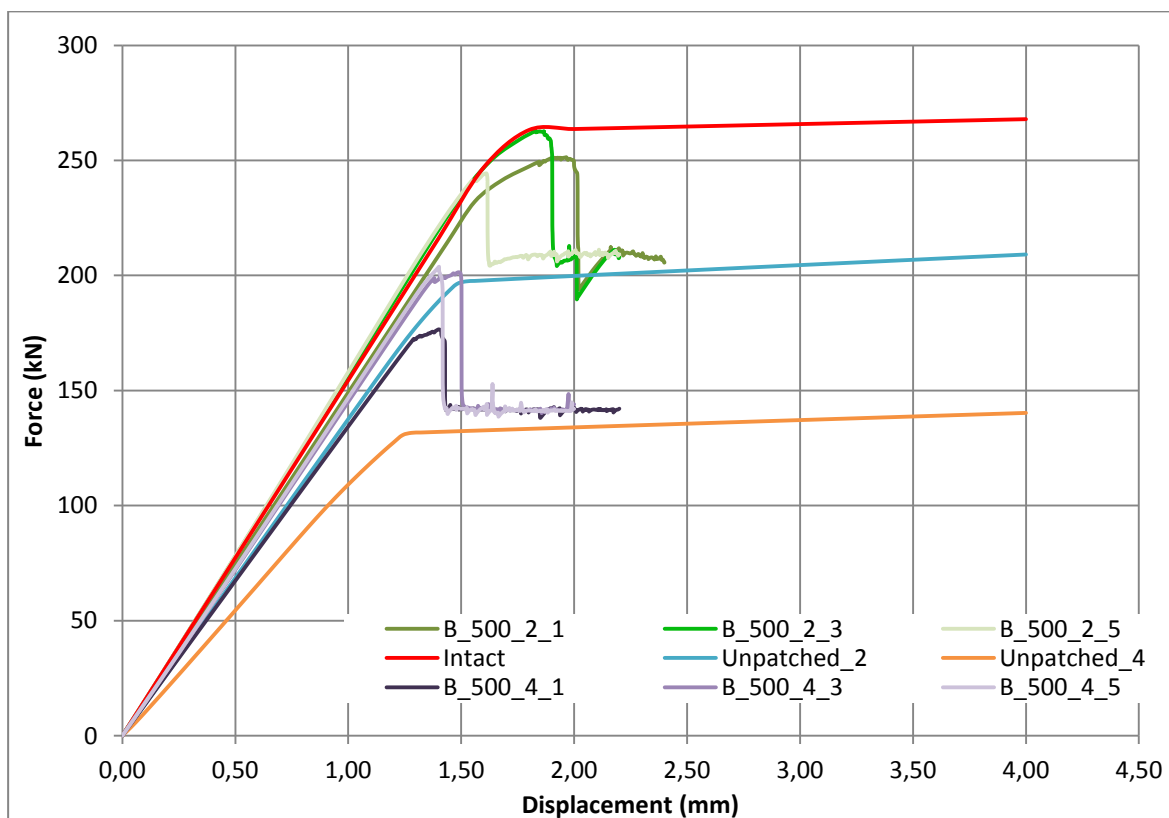
Σχήμα 3.21: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης για επίθεμα μέτρου ελαστικότητας $E = 20 \text{ GPa}$ και μήκους $L_p = 500 \text{ mm}$



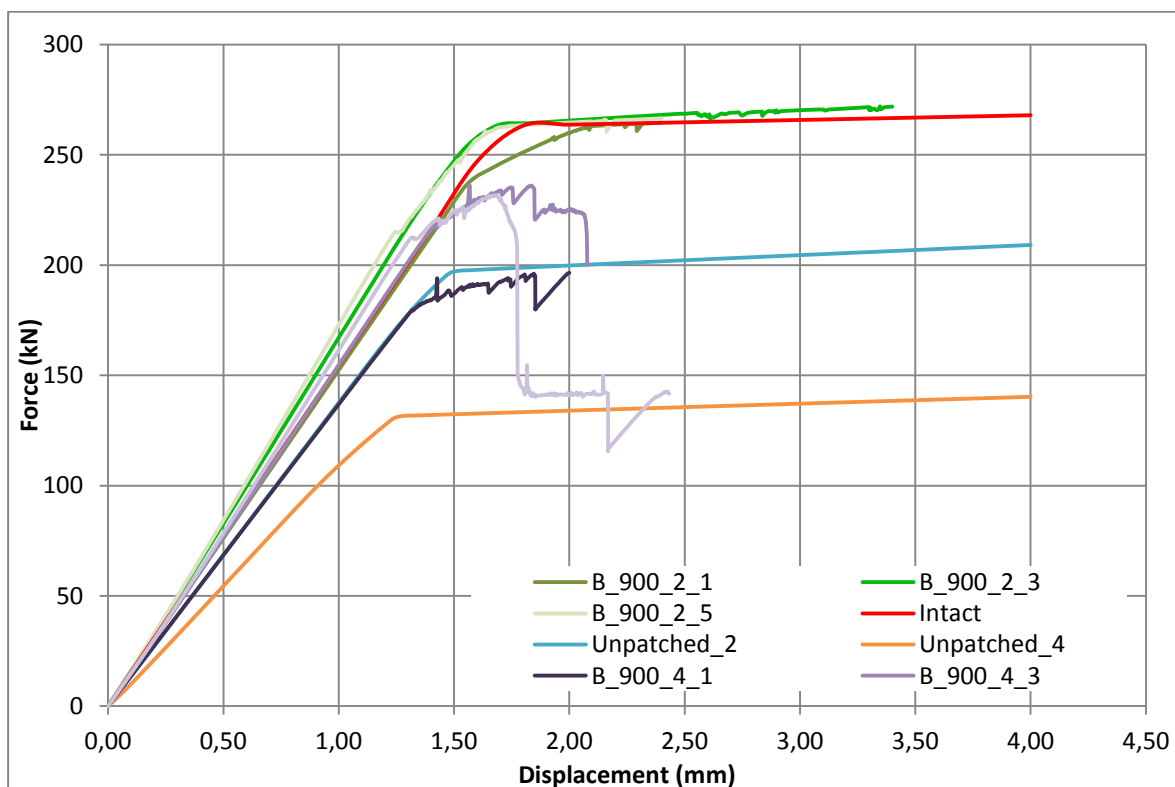
Σχήμα 3.22: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης για επίθεμα μέτρου ελαστικότητας $E = 20 \text{ GPa}$ και μήκους $L_p = 900 \text{ mm}$



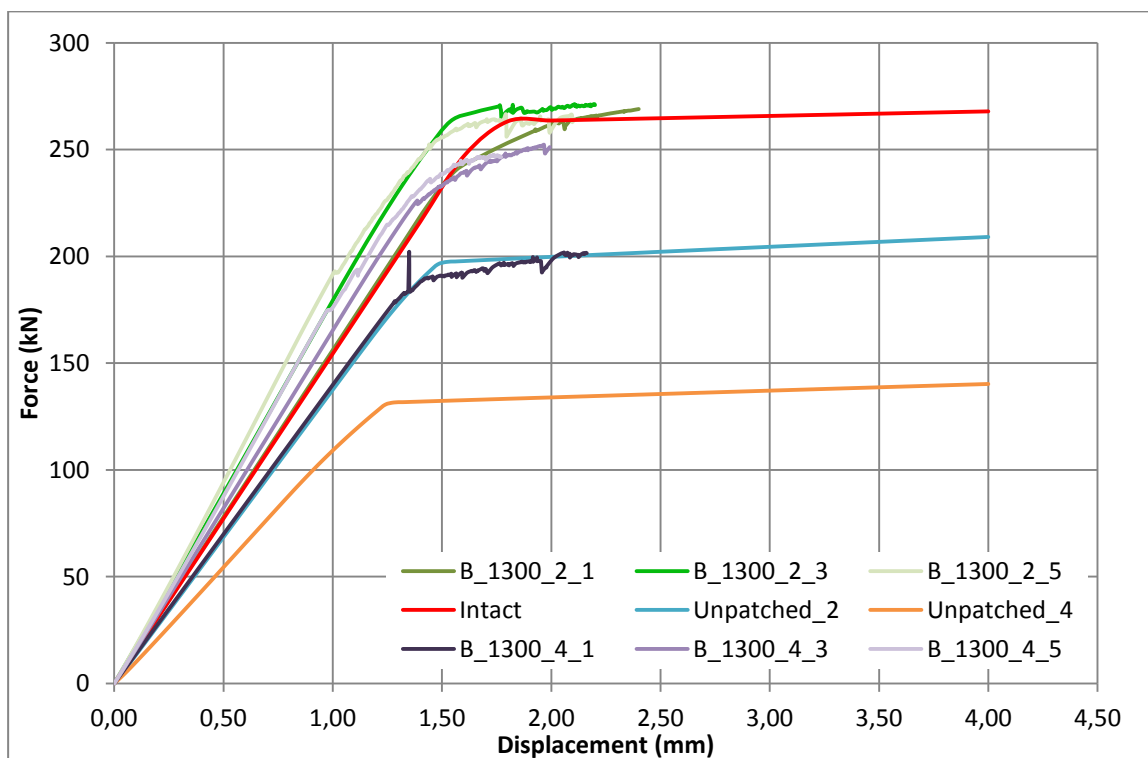
Σχήμα 3.23: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης για επίθεμα μέτρου ελαστικότητας $E = 20 \text{ GPa}$ και μήκους $L_p = 1300 \text{ mm}$



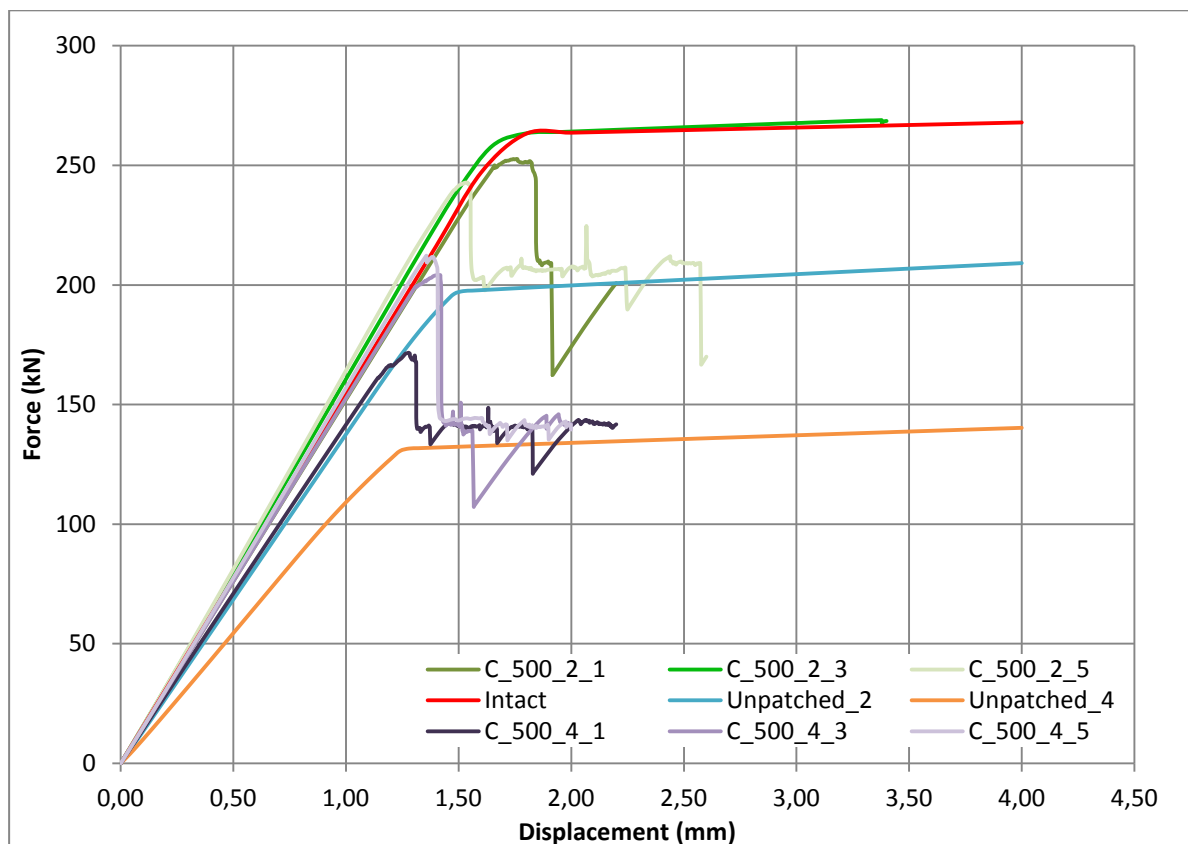
Σχήμα 3.24: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης για επίθεμα μέτρου ελαστικότητας $E = 40 \text{ GPa}$ και μήκους $L_p = 500 \text{ mm}$



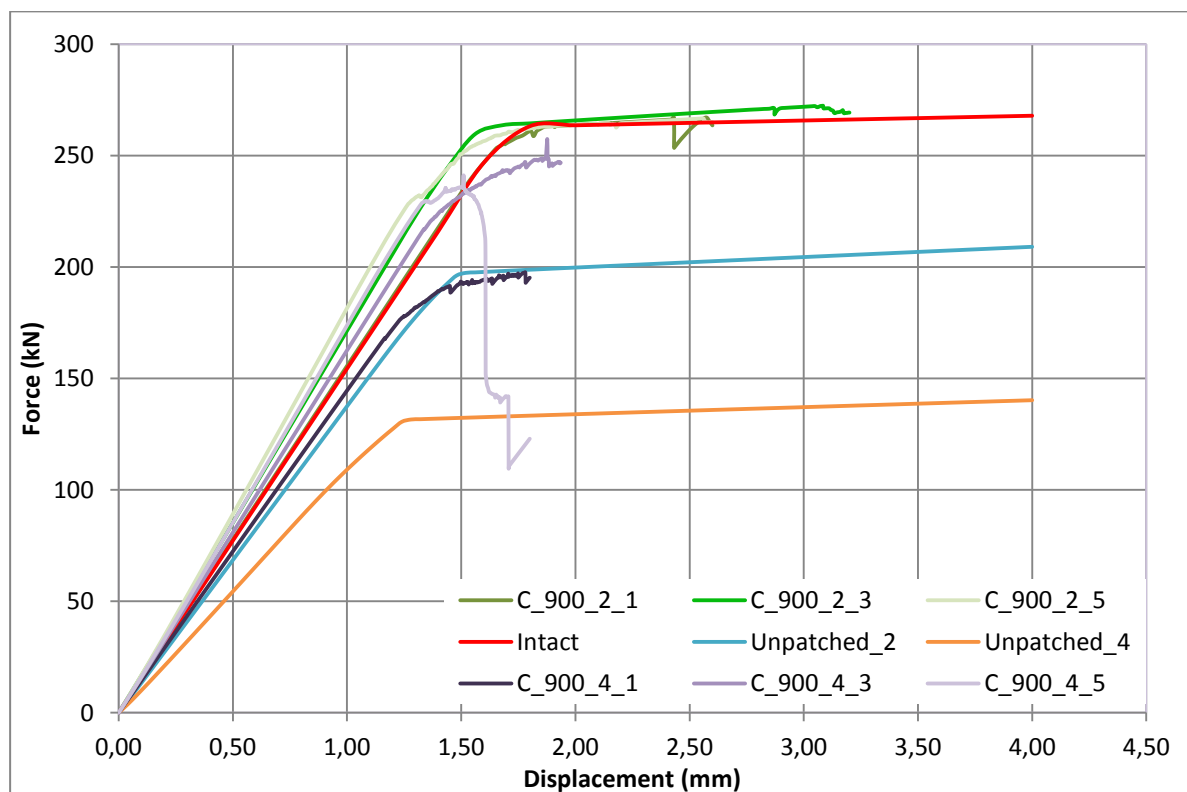
Σχήμα 3.25: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης για επίθεμα μέτρου ελαστικότητας $E = 40 \text{ GPa}$ και μήκους $L_p = 900 \text{ mm}$



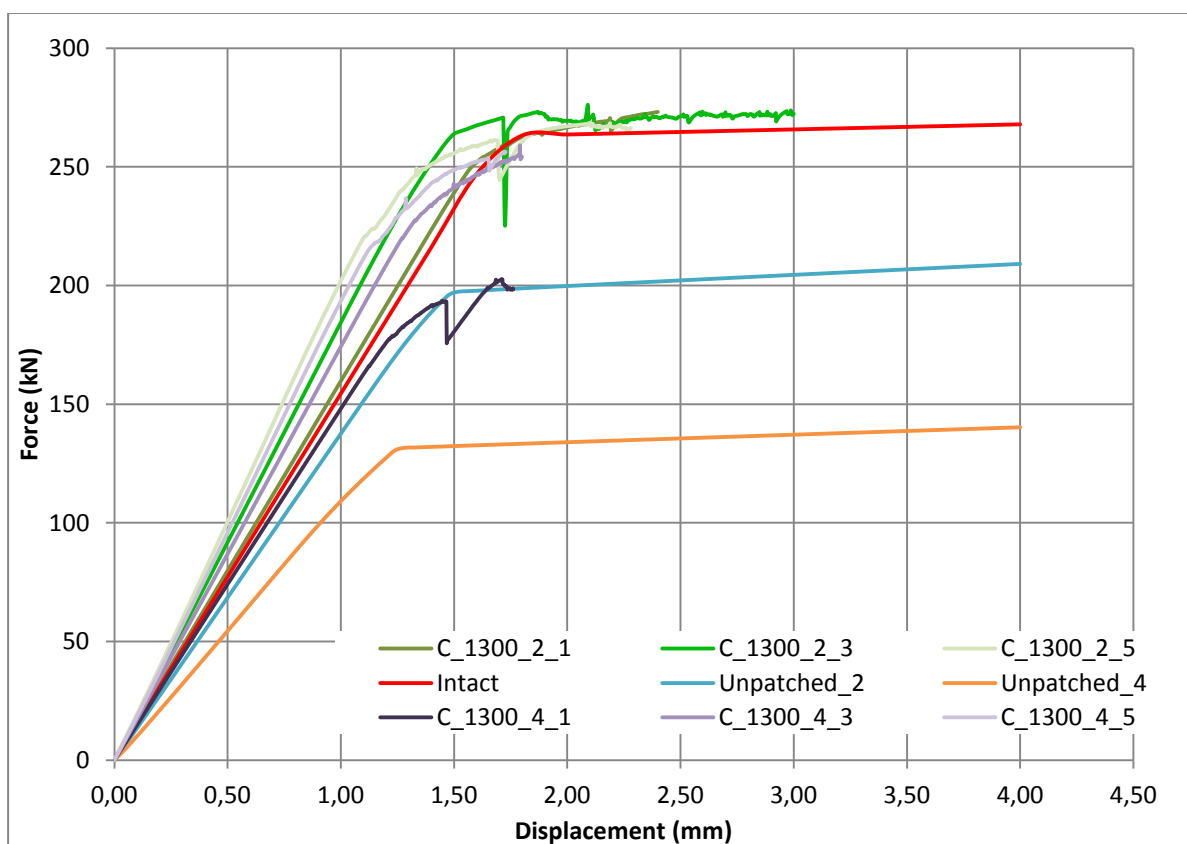
Σχήμα 3.26: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης για επίθεμα μέτρου ελαστικότητας $E = 40 \text{ GPa}$ και μήκους $L_p = 1300 \text{ mm}$



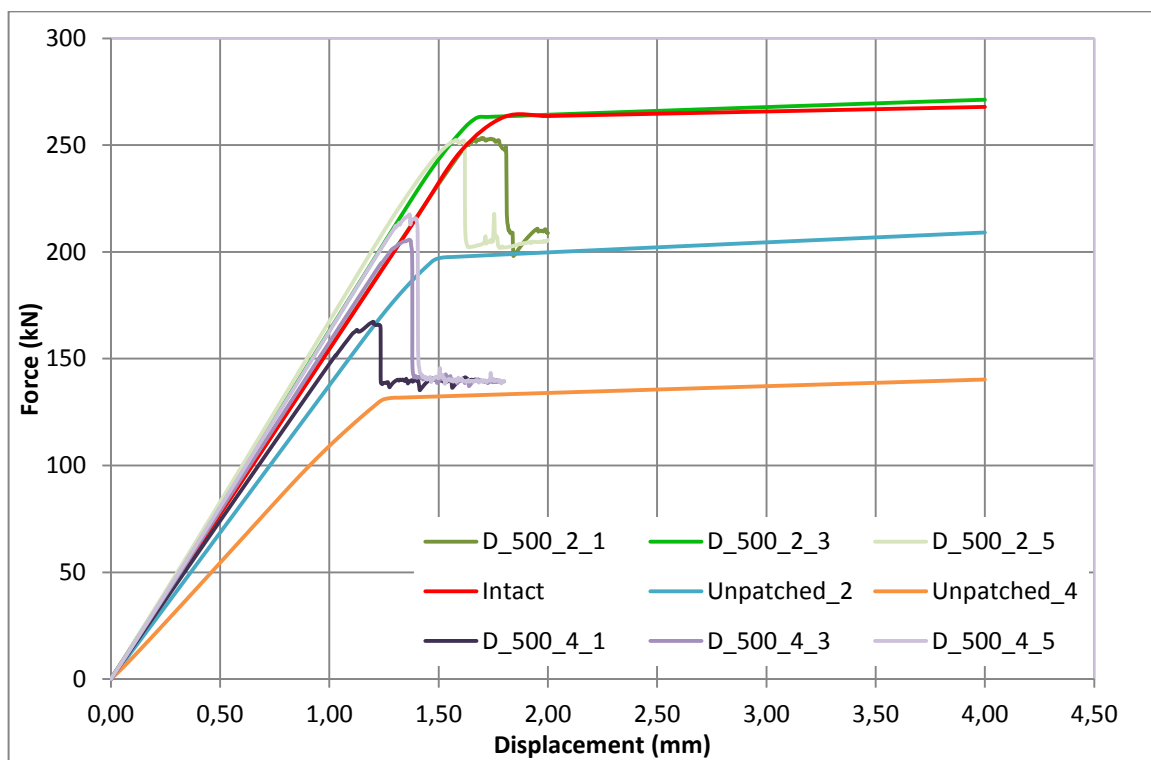
Σχήμα 3.27: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης για επίθεμα μέτρου ελαστικότητας $E = 80 \text{ GPa}$ και μήκους $L_p = 500 \text{ mm}$



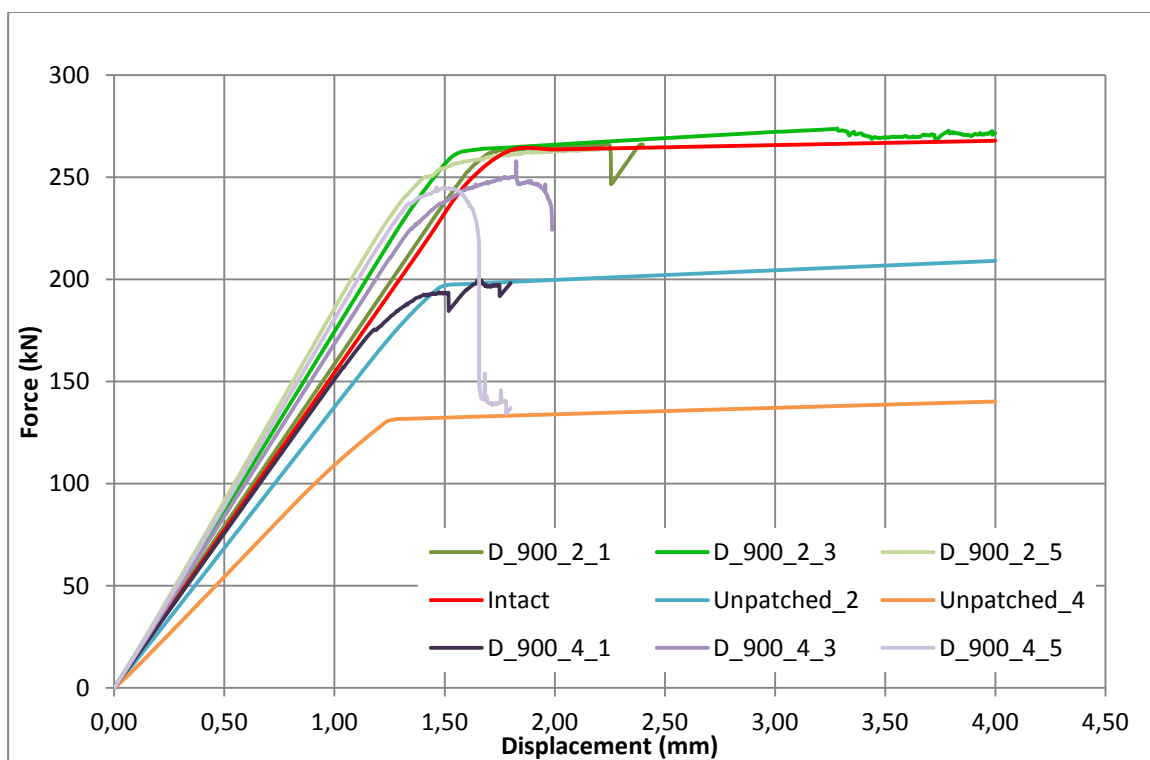
Σχήμα 3.28: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης για επίθεμα μέτρου ελαστικότητας $E = 80 \text{ GPa}$ και μήκους $L_p = 900 \text{ mm}$



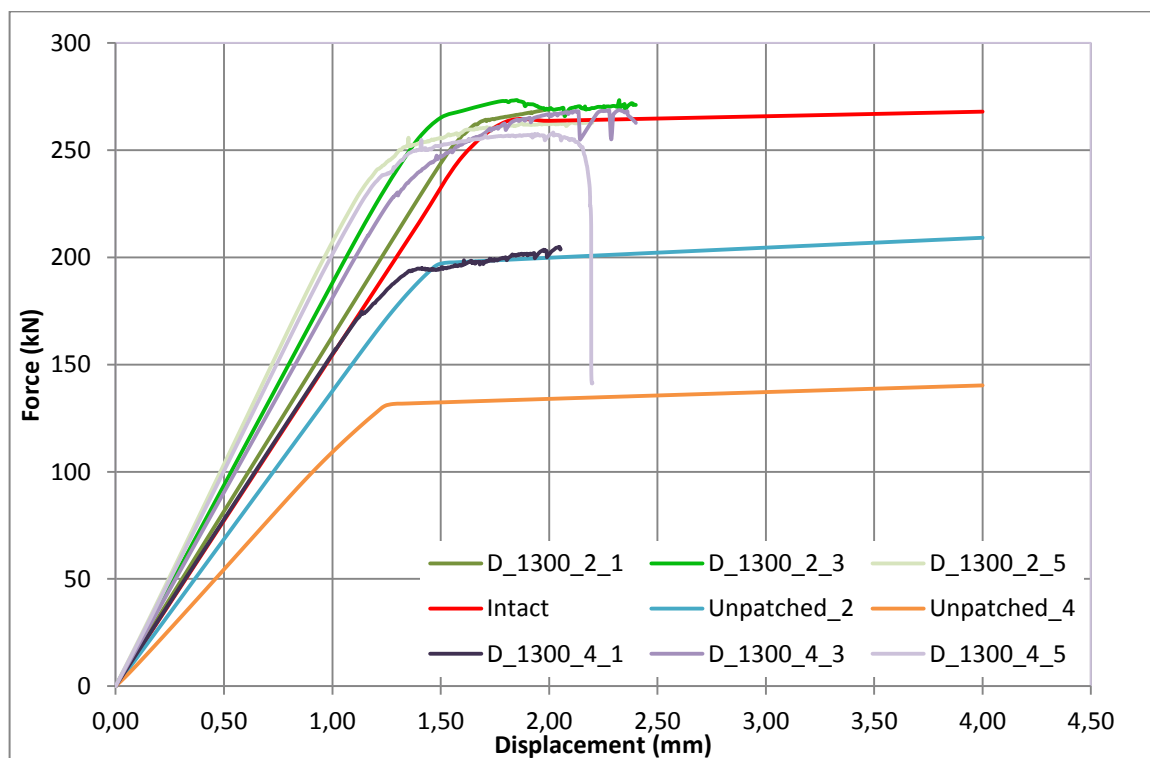
Σχήμα 3.29: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης για επίθεμα μέτρου ελαστικότητας $E = 80 \text{ GPa}$ και μήκους $L_p = 1300 \text{ mm}$



Σχήμα 3.30: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης για επίθεμα μέτρου ελαστικότητας $E = 120 \text{ GPa}$ και μήκους $L_p = 500 \text{ mm}$



Σχήμα 3.31: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης για επίθεμα μέτρου ελαστικότητας $E = 120 \text{ GPa}$ και μήκους $L_p = 900 \text{ mm}$



Σχήμα 3.32: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης για επίθεμα μέτρου ελαστικότητας $E = 120 \text{ GPa}$ και μήκους $L_p = 1300 \text{ mm}$

Από τα διαγράμματα 3.21 – 3.32 διαπιστώνουμε όσο μικρότερο είναι το πάχος της διαβρωμένης περιοχής του χαλύβδινου ελάσματος, τόσο μεγαλύτερο φορτίο μπορεί να δεχτεί η κατασκευή πριν αστοχήσει. Αυτό είναι αναμενόμενο, αφού σε μια κατασκευή με μικρότερο πάχος διατομής αναπτύσσονται μεγαλύτερες τάσεις, άρα είναι λιγότερο ανθεκτική και αστοχεί πιο γρήγορα. Επίσης, για μικρότερο πάχος διάβρωσης ενισχύοντας την κατασκευή με το μικρότερο μήκος επιθέματος βλέπουμε ότι οι αντίστοιχες καμπύλες είναι πολύ κοντά στη καμπύλη άθικτης κατάστασης, ενώ για το μεγαλύτερο πάχος διάβρωσης πρέπει να χρησιμοποιήσουμε επίθεμα μεγαλύτερου μήκους, συγκεκριμένου λόγου ακαμψίας και μέτρου ελαστικότητας ώστε να προσεγγίσουμε την άθικτη κατάσταση.

Η επίδραση του πάχους της διαβρωμένης περιοχής φαίνεται καλύτερα στους πίνακες που ακολουθούν.

Πίνακας 3.15:
Επίδραση του πάχους διάβρωσης για το υλικό A – ποσοστιαία σύγκριση.

Υλικό A		compare $F_{deb, in.}$			compare $U_{deb, in.}$		
		SR = 0.1	SR = 0.3	SR = 0.5	SR = 0.1	SR = 0.3	SR = 0.5
compare t_c = 2 - 4 mm	$L_p=500$ mm	-29%	-23%	-24%	-29%	-17%	-20%
	$L_p=900$ mm	-29%	-19%	-11%	-29%	-18%	2%
	$L_p=1300$ mm	-29%	-15%	-5%	-31%	-3%	4%
		compare F_{yield}			compare $U_{x,yield}$		
		SR = 0.1	SR = 0.3	SR = 0.5	SR = 0.1	SR = 0.3	SR = 0.5
compare t_c = 2 - 4 mm	$L_p=500$ mm	-24%	-27%	-24%	-13%	-27%	-20%
	$L_p=900$ mm	-24%	-20%	-24%	-13%	-14%	-24%
	$L_p=1300$ mm	-24%	-21%	-19%	-13%	-17%	-18%
		compare F_{max}			compare U_{max}		
		SR = 0.1	SR = 0.3	SR = 0.5	SR = 0.1	SR = 0.3	SR = 0.5
compare t_c = 2 - 4 mm	$L_p=500$ mm	-29%	-23%	-25%	-29%	-17%	-25%
	$L_p=900$ mm	-	-	-	-	-	-
	$L_p=1300$ mm	-	-	-	-	-	-
		compare F_{drop}			compare U_{drop}		
		SR = 0.1	SR = 0.3	SR = 0.5	SR = 0.1	SR = 0.3	SR = 0.5
compare t_c = 2 - 4 mm	$L_p=500$ mm	-30%	-26%	-27%	-28%	-18%	-25%
	$L_p=900$ mm	-	-	-	-	-	-
	$L_p=1300$ mm	-	-	-	-	-	-

Παρατηρούμε ότι για λόγο ακαμψίας 0.1 η επίδραση του πάχους διάβρωσης στο φορτίο έναρξης αποκόλλησης και διαρροής παραμένει σταθερή, ενώ για τους υπόλοιπους μειώνεται καθώς μεγαλώνει το μήκος του επιθέματος. Με ελάχιστες εξαιρέσεις το πάχος διάβρωσης έχει μεσαία επίδραση σ' όλα τα μεγέθη.

Πίνακας 3.16:
Επίδραση του πάχους διάβρωσης για το υλικό Β – ποσοστιαία σύγκριση.

Υλικό Β		compare $F_{deb, in.}$			compare $U_{deb, in.}$		
		SR = 0.1	SR = 0.3	SR = 0.5	SR = 0.1	SR = 0.3	SR = 0.5
compare t_c = 2 - 4 mm	$L_p=500$ mm	-31%	-24%	-16%	-30%	-24%	-9%
	$L_p=900$ mm	-30%	-19%	-1%	-32%	-43%	6%
	$L_p=1300$ mm	-31%	-16%	-10%	-33%	-21%	-4%
		compare F_{yield}			compare $U_{x,yield}$		
		SR = 0.1	SR = 0.3	SR = 0.5	SR = 0.1	SR = 0.3	SR = 0.5
compare t_c = 2 - 4 mm	$L_p=500$ mm	-28%	-24%	-17%	-21%	-22%	-13%
	$L_p=900$ mm	-26%	-17%	-15%	-20%	-16%	-14%
	$L_p=1300$ mm	-27%	-14%	-10%	-23%	-10%	-8%
		compare F_{max}			compare U_{max}		
		SR = 0.1	SR = 0.3	SR = 0.5	SR = 0.1	SR = 0.3	SR = 0.5
compare t_c = 2 - 4 mm	$L_p=500$ mm	-30%	-23%	-17%	-29%	-19%	-13%
	$L_p=900$ mm	-	-	-	-	-	-
	$L_p=1300$ mm	-	-	-	-	-	-
		compare F_{drop}			compare U_{drop}		
		SR = 0.1	SR = 0.3	SR = 0.5	SR = 0.1	SR = 0.3	SR = 0.5
compare t_c = 2 - 4 mm	$L_p=500$ mm	-24%	-39%	-30%	-29%	-21%	-12%
	$L_p=900$ mm	-	-	-	-	-	-
	$L_p=1300$ mm	-	-	-	-	-	-

Για το υλικό Β διαπιστώνουμε ότι για λόγο ακαμψίας 0.5, η επίδραση του πάχους διάβρωσης στα φορτία έναρξης αποκόλλησης και διαρροής είναι μικρότερη σε σχέση με το υλικό Α. Γενικά, για λόγο ακαμψίας 0.5 έχουμε τη μικρότερη επίδραση, ενώ για λόγο ακαμψίας 0.1 τη μεγαλύτερη. Και στο υλικό αυτό, παρατηρούμε ότι το πάχος διάβρωσης έχει μεσαία επίδραση στα μεγέθη (με κάποιες εξαιρέσεις).

Πίνακας 3.17:
Επίδραση του πάχους διάβρωσης για το υλικό C – ποσοστιαία σύγκριση.

Υλικό C		compare $F_{deb, in.}$			compare $U_{deb, in.}$		
		SR = 0.1	SR = 0.3	SR = 0.5	SR = 0.1	SR = 0.3	SR = 0.5
compare t_c = 2 - 4 mm	$L_p=500$ mm	-35%	-26%	-12%	-31%	-60%	-9%
	$L_p=900$ mm	-34%	-20%	0%	-31%	-50%	15%
	$L_p=1300$ mm	-35%	-2%	-3%	-31%	-26%	1%
		compare F_{yield}			compare $U_{x,yield}$		
		SR = 0.1	SR = 0.3	SR = 0.5	SR = 0.1	SR = 0.3	SR = 0.5
compare t_c = 2 - 4 mm	$L_p=500$ mm	-31%	-24%	1%	-22%	-26%	-13%
	$L_p=900$ mm	-29%	-18%	-9%	-23%	-20%	-13%
	$L_p=1300$ mm	-28%	-15%	-3%	-21%	-14%	0%
		compare F_{max}			compare U_{max}		
		SR = 0.1	SR = 0.3	SR = 0.5	SR = 0.1	SR = 0.3	SR = 0.5
compare t_c = 2 - 4 mm	$L_p=500$ mm	-32%	-	-13%	-27%	-	-11%
	$L_p=900$ mm	-	-	-	-	-	-
	$L_p=1300$ mm	-	-	-	-	-	-
		compare F_{drop}			compare U_{drop}		
		SR = 0.1	SR = 0.3	SR = 0.5	SR = 0.1	SR = 0.3	SR = 0.5
compare t_c = 2 - 4 mm	$L_p=500$ mm	-33%	-	-29%	-29%	-	-9%
	$L_p=900$ mm	-	-	-	-	-	-
	$L_p=1300$ mm	-	-	-	-	-	-

Για το υλικό C παρατηρούμε ότι έχουμε μεγαλύτερες διακυμάνσεις στις ποσοστιαίες μεταβολές. Στα φορτία έναρξης αποκόλλησης και διαρροής για λόγο ακαμψίας 0.5 η επίδραση του πάχους διάβρωσης είναι μικρότερη απ' ό τι στο υλικό B και πιο συγκεκριμένα είναι αμελητέα έως μικρή, ενώ για λόγο ακαμψίας 0.1 η επίδραση του πάχους διάβρωσης είναι μεγαλύτερη (μεσαία έως μεγάλη επίδραση).

Πίνακας 3.18:
Επίδραση του πάχους διάβρωσης για το υλικό D – ποσοστιαία σύγκριση.

Υλικό D		compare $F_{deb, in.}$			compare $U_{deb, in.}$		
		SR = 0.1	SR = 0.3	SR = 0.5	SR = 0.1	SR = 0.3	SR = 0.5
compare t_c = 2 - 4 mm	$L_p=500$ mm	-39%	-28%	-14%	-37%	-67%	-13%
	$L_p=900$ mm	-38%	-23%	-2%	-36%	-57%	1%
	$L_p=1300$ mm	-38%	-23%	-1%	-35%	-34%	2%
		compare F_{yield}			compare $U_{x,yield}$		
		SR = 0.1	SR = 0.3	SR = 0.5	SR = 0.1	SR = 0.3	SR = 0.5
compare t_c = 2 - 4 mm	$L_p=500$ mm	-34%	-24%	-16%	-24%	-31%	-20%
	$L_p=900$ mm	-27%	-15%	-7%	-19%	-19%	-14%
	$L_p=1300$ mm	-26%	-1%	-4%	-19%	23%	-16%
		compare F_{max}			compare U_{max}		
		SR = 0.1	SR = 0.3	SR = 0.5	SR = 0.1	SR = 0.3	SR = 0.5
compare t_c = 2 - 4 mm	$L_p=500$ mm	-34%	-	-14%	-30%	-	-13%
	$L_p=900$ mm	-	-	-	-	-	-
	$L_p=1300$ mm	-	-	-	-	-	-
		compare F_{drop}			compare U_{drop}		
		SR = 0.1	SR = 0.3	SR = 0.5	SR = 0.1	SR = 0.3	SR = 0.5
compare t_c = 2 - 4 mm	$L_p=500$ mm	-40%	-	-5%	-32%	-	-13%
	$L_p=900$ mm	-25%	-	-	-33%	-	-
	$L_p=1300$ mm	-	-	-	-	-	-

Για το υλικό D παρατηρούμε ότι η επίδραση του πάχους διάβρωσης στο φορτίο έναρξης αποκόλλησης είναι μεγάλη για λόγο ακαμψίας 0.1, μεσαία έως μεγάλη για λόγο 0.3, ενώ για λόγο ακαμψίας 0.5 είναι αμελητέα. Για το φορτίο διαρροής η επίδραση είναι κυρίως μεσαία με εξαίρεση για λόγο ακαμψίας 0.5 όπου είναι μικρή.

Από τους πίνακες 3.15 – 3.18 συμπεραίνουμε ότι η επίδραση του πάχους διάβρωσης είναι μεσαία στη πλειοψηφία των περιπτώσεων. Καθώς αυξάνει το μέτρο ελαστικότητας αυξάνει και η επίδραση του πάχους διάβρωσης στα εξεταζόμενα μεγέθη. Για λόγο ακαμψίας 0.1 έχουμε τη μεγαλύτερη επίδραση (μεσαία έως μεγάλη), ενώ για λόγο ακαμψίας 0.5 τη

μικρότερη (μεσαία έως αμελητέα). Επίσης, καθώς αυξάνει το μέτρο ελαστικότητας παρατηρούμε ότι η επίδραση του πάχους διάβρωσης για λόγο ακαμψίας 0.1 αυξάνει, ενώ για λόγο ακαμψίας 0.5 μειώνεται.

3.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα συμπεράσματα της παραμετρικής μελέτης συνοψίζονται παρακάτω:

- Η αποκόλληση εμφανίζεται στο άκρο του επιθέματος για το μικρότερο πάχος διάβρωσης όταν ο λόγος ακαμψίας είναι 0.3 ή 0.5, ενώ για το μεγαλύτερο πάχος διάβρωσης όταν ο λόγος ακαμψίας είναι 0.5 και το μήκος του επιθέματος είναι 900 ή 1300 mm. Αντίθετα, η αποκόλληση εντοπίζεται στην αρχή της διαβρωμένης περιοχής για το μικρότερο πάχος διάβρωσης όταν ο λόγος ακαμψίας είναι 0.1, ενώ για το μεγαλύτερο πάχος διάβρωσης όταν ο λόγος ακαμψίας είναι 0.1 ή 0.3.
- Η διαρροή του χάλυβα εμφανίζεται στη διαβρωμένη περιοχή.
- Για το μικρότερο μέτρο ελαστικότητας (20 GPa) η διαρροή του χάλυβα προηγείται της αποκόλλησης του επιθέματος. Για το μέτρο ελαστικότητας 40 GPa συμβαίνουν κυρίως ταυτόχρονα. Στη συνέχεια, καθώς αυξάνει το μέτρο ελαστικότητας (80, 120 GPa), τόσο αυξάνουν και οι περιπτώσεις όπου η αποκόλληση του επιθέματος ξεκινάει πρώτη.
- Οι παράμετροι που εξετάστηκαν κατά φθίνουσα σειρά επίδρασης είναι: το πάχος διάβρωσης, ο λόγος ακαμψίας, το μήκος του επιθέματος και το μέτρο ελαστικότητάς του.
- Η επίδραση του μέτρου ελαστικότητας είναι μικρή έως αμελητέα. Επίσης, έχει μικρότερη επίδραση στο μικρότερο απ' ό,τι στο μεγαλύτερο πάχος διάβρωσης. Πιο συγκεκριμένα, για το μικρότερο πάχος διάβρωσης η επίδραση του μέτρου ελαστικότητας είναι κυρίως αμελητέα, ενώ για μεγαλύτερο πάχος διάβρωσης είναι μικρή. Επιπλέον, διαπιστώνουμε ότι έχει μεγαλύτερη επίδραση για το μεγαλύτερο μήκος επιθέματος.
- Όσο μεγαλώνει το μήκος του επιθέματος τόσο η επισκευή τείνει προς την άθικτη κατάσταση. Ειδικότερα, σημαντική διαφορά παρατηρούμε όταν το μήκος επιθέματος είναι μεγαλύτερο του μήκους της διαβρωμένης περιοχής. Αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς μήκος επιθέματος μεγαλύτερο της διαβρωμένης περιοχής καθιστά την ενίσχυση πιο αποτελεσματική, αποφορτίζοντας τον χάλυβα από τις αναπτυσσόμενες τάσεις, αφού για την ίδια μετατόπιση η κατασκευή μπορεί να παραλάβει μεγαλύτερες δυνάμεις.
- Το μήκος επιθέματος έχει μικρή έως αμελητέα επίδραση. Η επίδραση του μειώνεται όσο μεγαλώνει το μέτρο ελαστικότητας του επιθέματος. Επιπλέον, για τον λόγο ακαμψίας 0.1 η αύξηση του μήκους επιθέματος από 900 mm σε 1300 mm έχει μηδενική επίδραση. Επίσης, διαπιστώνουμε ότι μέγιστες τιμές για τα φορτία έναρξης αποκόλλησης και διαρροής έχουμε για τα μεγαλύτερα μήκη επιθέματος. Συγκεκριμένα, για το φορτίο έναρξης αποκόλλησης μέγιστες τιμές εντοπίζονται είτε σε μήκος επιθέματος 900 mm, είτε σε 1300 mm, ενώ για το φορτίο διαρροής εντοπίζονται για μήκος επιθέματος 1300 mm.

- Η επίδραση του λόγου ακαμψίας είναι μικρή έως μεσαία για το φορτίο έναρξης αποκόλλησης και μικρή για το φορτίο διαρροής. Στο φορτίο έναρξης αποκόλλησης του επιθέματος έχει μεγαλύτερη επίδραση, η οποία αυξάνει όσο μεγαλώνει το μέτρο ελαστικότητας. Για το φορτίο διαρροής, στο μικρότερο πάχος διάβρωσης η επίδραση είναι αμελητέα έως μικρή, ενώ στο μεγαλύτερο πάχος είναι μεγαλύτερη και συγκεκριμένα μικρή έως μεσαία.
- Μέγιστες τιμές για το φορτίο έναρξης αποκόλλησης έχουμε κυρίως για λόγο ακαμψίας 0.3, ενώ για το φορτίο διαρροής του χάλυβα στις περισσότερες περιπτώσεις οι μέγιστες τιμές εντοπίζονται για λόγο ακαμψίας 0.5, ενώ σε αρκετές για λόγο ακαμψίας 0.3.
- Η επίδραση του πάχους διάβρωσης είναι μεσαία για τη πλειοψηφία των περιπτώσεων. Καθώς αυξάνει το μέτρο ελαστικότητας αυξάνει και η επίδραση του πάχους διάβρωσης στα εξεταζόμενα μεγέθη. Για λόγο ακαμψίας 0.1 έχουμε τη μεγαλύτερη επίδραση (μεσαία έως μεγάλη), ενώ για λόγο ακαμψίας 0.5 τη μικρότερη (μεσαία έως αμελητέα). Όπως αναμέναμε, όσο μικρότερο είναι το πάχος της διαβρωμένης περιοχής του χαλύβδινου ελάσματος, τόσο μεγαλύτερο φορτίο μπορεί να δεχτεί η κατασκευή πριν αστοχήσει.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΕΛΛΗΝΙΚΗ

- Βλάχος Χ., (2013), “Αριθμητική ανάλυση λυγισμού σύνθετων υλικών με αποχωρισμό στρώσεων”, Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Διπλωματική Εργασία
- Κοβεντάρου Ε., (2012), “Αριθμητική ανάλυση της αντοχής του κολλητικού δεσμού ενισχυτικών επιθεμάτων από σύνθετα υλικά”, Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Διπλωματική Εργασία
- Μυρσιώτης Λ., Τσούβαλης Ν. και Παπάζογλου Β, (2006β), “Πειραματική Διερεύνηση της Στατικής Συμπεριφοράς σε Εφελκυσμό Ρωγματομένων Πλακών Χάλυβα Ενισχυμένων με Επίθεμα από Σύνθετα Υλικά”, Πυθαγόρας ΙΙ, 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 Ρωγματομένων Πλακών Χάλυβα Ενισχυμένων με Επίθεμα από Σύνθετα Υλικά”, Πυθαγόρας ΙΙ, 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 Ρωγματομένων Χαλύβδινων Πλακών Ενισχυμένων με Επίθεμα από Σύνθετα Υλικά υπό τη Επίδραση του Θαλάσσιου Περιβάλλοντος”, Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Διπλωματική Εργασία
- Τσούβαλης Ν. (1998), “Ανάλυση και Σχεδίαση Σκαφών από Σύνθετα Υλικά”, Σημειώσεις του Μαθήματος, Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 1998.

ΑΙΕΘΝΗΣ

- 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 14.0, (2011), ANSYS Mechanical APDL Contact Technology Guide

- ANSYS Release 14.0, (2011), Basic Analysis Guide.
- ANSYS Release 14.0, (2011), Modeling and Mesh inf. Guide.
- ANSYS Release 14.0, (2011), Element Reference.
- Anyfantis Konstantinos N., (2009), “*Adhesive Bonding of Disimilar Materials: Literature Survey*”, School of Naval Architecture and Marine Engineering
- Anyfantis Konstantinos N., (2012α), “*Analysis and Design of Composite-to-Metal Adhesively Bonded Joints*”, PhD Thesis, School of Naval Architecture and Marine Engineering
- 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
- 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
- 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
- Papanikos P., Tserpes K. I., Pantelakis Sp., (2007), “*Initiation and progression of composite patch debonding in adhesively repaired cracked metallic sheets*”, Composite Structures, Elsevier
- Seo Dae-Cheol, Lee Jung-Ju, (2002), “*Fatigue crack growth behavior of cracked aluminum plate repaired with composite patch*”, Composite Structures, Elsevier
- Tsouvalis N., Mirisiotis L., Dimou D., (2008), “*Experimental and numerical study of the fatigue behaviour of composite patch reinforced cracked steel plates*”, International Journal of Fatigue, Elsevier
- Wang Q. Y., Pidaparti R. M., (2002), “*Static characteristics and fatigue behavior of composite – repaired aluminum plates*”, Composite Structures, Elsevier


```
/PNUM,NODE,0
/PNUM,TABN,0
/PNUM,SVAL,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
/REPLOT
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  
!*  
CM,_Y,LINE  
LSEL, , , 1,81,1  
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

```

```

Est=207e3  !!!!! 207 / 203 Young's Modulus of Elasticity for S [MPa]
nst=0.3   !!!!! 0.3 / 0.3 Poisson ratio of Steel
Etst=0.015*Est !!!!! 0.015 * Est / 0.02* Est Hardening of steel [MPa]
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

```

```

Ex=20.0e3 !!!!! ????? 69.470e3 / 112.29e3 Young's Tensile Modulus in X direction [MPa] Dir 1 comp
Ey=3.5e3  !!!!! ?????? 5.0e3 / 5.5e3 Young's Tensile Modulus in Y direction [MPa] Dir 3 comp
Ez=3.5e3  !!!!! 5.0e3 / 5.5e3 Young's Tensile Modulus in Z direction [MPa] Dir 2 comp
nxy=0.3   !!!!! 0.3 / 0.376 Poisson Ratio XY Dir13
nyz=0.32  !!!!! ?????? 0.02 / 0.591 Poisson Ratio YZ Dir32  v23 = v12 * ((1-v21)/(1-v12))
nxz=0.3   !!!!! 0.3 / 0.376 Poisson Ratio XZ Dir12
Gxy=2.5e3 !!!!!!! 2.4e3 / 2e3 Shear Modulus XY [MPa] Dir13
Gyz=2.0e3 !!!!! 1.6e3 / 1.2e3 Shear Modulus YZ [MPa] Dir32  G23 = 0.6 * G12
Gxz=2.5e3 !!!!!!! 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
```

```
Smax=7.3 !!!!! 3.65 / 7.3 maximum normal contact stress [MPa]
Gcn=0.140 !!!!! 0.07 / 0.140 critical fracture energy for normal separation [N/mm] [+25%]
Tmax=53 !!!!!!! 26.5 / 53 maximum equivalent tangential contact stress [MPa]
Gct=0.28 !!!!!!! 0.14 / 0.28 Critical fracture energy for tangential slip [N/mm]
hta=1e-5 !artificial damping coefficient (1000 fores mikrotero apo to minimum time step)
beta=1 !flag for tangential slip under compressive normal contact stress
```

```
TB,CZM,4,1,1,CBDE
TBDATA,1,Smax,Gcn,Tmax,Gct,hta,beta
!*
ALLSEL,ALL
EPLLOT
/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

```

```

/PSYMB,ESYS,1
/PNUM,TYPE,1
/NUM,1
EPLLOT
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,EPLLOT
!!!!!!!!!!!!!!! Coupling komvwn, epiboli oriakwn synuhkwn kai fortisis!!!!

```

```

NPLOT
/PNUM,KP,1
/PNUM,LINE,1
/PNUM,AREA,0
/PNUM,VOLU,0
/PNUM,NODE,1
/PNUM,TABN,0
/PNUM,SVL,0
/NUMBER,0
!*
/PNUM,ELEM,0
/REPLOT
!*

```

```

FLST,4,17,1,ORDE,3
FITEM,4,13070
FITEM,4,13570
FITEM,4,-13585

```

```
CP,999111,ALL,P51X
FLST,2,1,1,ORDE,1
FITEM,2,13070
!*
/GO
D,P51X, ,2.3, , , ,UX, , , , ,
FLST,2,1,1,ORDE,1
FITEM,2,13070
!*
/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,0.05,1e-6,0.05
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,ALL
LNSRCH,1
TIME,1
FINISH
/POST1
FINISH
/SOL
/STATUS,SOLU
SOLVE
SAVE
FINISH
```