

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΕΚΘΕΣΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ
ΜΕ ΘΕΜΑ

ΕΠΙΣΚΕΥΗ ΧΑΛΥΒΔΙΝΩΝ ΝΑΥΠΗΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΜΕ ΕΠΙΘΕΜΑΤΑ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ
- ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ -

ΜΠΕΖΑΣ ΧΡΗΣΤΟΣ
ΑΘΗΝΑ 2009

Στους γονείς μου, Θεόδωρο και Ευγενία

Στην Ηλιάνα

Στους καλούς μου φίλους και φίλες

Στα χρόνια του «δικού» μας Πολυτεχνείου
που ήδη νοσταλγούμε
ως τα καλύτερα μας

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το παρόν κείμενο αποτελεί την πλήρη έκθεση της μελέτης που πραγματοποιήθηκε από τον υπογράφοντα στα πλαίσια της διπλωματικής του εργασίας, με αντικείμενο την παραμετρική μελέτη της μεθόδου επισκευής χαλύβδινων ναυπηγικών κατασκευών με τη χρήση επιθεμάτων σύνθετου υλικού.

Επιγραμματικά, ο τρόπος αυτός επισκευής συνίσταται στην επικάλυψη τμήματος ενός ελάσματος το οποίο φέρει ρωγμή, με ένα επίθεμα από σύνθετο υλικό και με στόχο την παραλαβή μέρους του φορτίου από το έλασμα, ώστε να μειωθούν οι τάσεις στη διατομή της ρωγμής και να ανασχεθεί η επέκταση αυτής. Η σύνδεση του επιθέματος με το έλασμα γίνεται μέσω ενός λεπτού στρώματος κόλλας.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται μια πρώιμη μελέτη της σκοπιμότητας της ανάπτυξης της μεθόδου, γίνεται η ανασκόπηση των έως τώρα καταγεγραμμένων εφαρμογών της και περιγράφονται αναλυτικά τα υλικά που χρησιμοποιούνται και οι διαδικασίες που ακολουθούνται κατά την εφαρμογή της.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στη θεωρία της ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία, παρουσιάζεται συνοπτικά η αναλυτική θεωρία που περιγράφει τη μέθοδο, ενώ παρουσιάζεται και αναλύεται η διαδικασία που ακολούθησε ο υπογράφων στα πλαίσια της δημιουργίας ενός αξιόπιστου μοντέλου της μεθόδου στο πακέτο λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων ANSYS.

Στο τρίτο και τελευταίο κεφάλαιο περιγράφεται εκτενώς η διαδικασία που ακολουθήθηκε κατά την εκτέλεση της παραμετρικής μελέτης της γεωμετρίας του επιθέματος, ενώ παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της μελέτης και εντοπίζονται τα ιδιαίτερα χρήσιμα συμπεράσματα που προκύπτουν από αυτά.

Στο παράρτημα της έκθεσης παρέχονται οι βασικές μορφές κώδικα που χρησιμοποιήθηκαν για τη μοντελοποίηση της μεθόδου στο ANSYS.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

- ΕΙΣΑΓΩΓΗ
- ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΤΗΣ ΕΠΙΣΚΕΥΗΣ ΜΕ ΕΠΙΘΕΜΑ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

1.1	ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΡΩΓΜΩΝ ΚΑΙ ΠΑΡΑΔΟΣΙΑΚΗ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ	1-1
1.2	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΕΠΙΘΕΜΑΤΟΣ ΕΠΙ ΠΛΑΚΑΣ	1-5
1.3	Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΠΙΣΚΕΥΗΣ ΜΕ ΕΠΙΘΕΜΑ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ	1-13
1.3.1	ΓΕΝΕΣΗ ΚΑΙ ΕΞΕΛΙΞΗ - ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗΝ ΑΕΡΟΠΟΡΙΑ	1-13
1.3.2	ΜΕΛΕΤΕΣ ΕΦΙΚΤΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕ ΝΑΥΠΗΓΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ	1-22
1.4	Η ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΕΠΙΣΚΕΥΗΣ ΜΕ ΕΠΙΘΕΜΑ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ	1-30
1.4.1	ΤΑ ΥΛΙΚΑ ΠΟΥ ΑΠΑΡΤΙΖΟΥΝ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ	1-30
1.4.2	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΟΥ ΕΠΙΘΕΜΑΤΟΣ	1-35
1.4.3	ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΕΠΙΣΚΕΥΗΣ	1-42
1.5	Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΠΙΣΚΕΥΗΣ ΩΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΤΩΝ ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ	1-44

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

2.1	ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	2-1
2.2	ΟΙ ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΠΟΥ ΔΙΕΠΟΥΝ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ	2-5
2.2.1	ΖΗΤΟΥΜΕΝΑ - ΟΡΙΣΜΟΙ	2-5
2.2.2	Η ΕΝΤΑΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΤΑ ΑΚΡΑ ΤΗΣ ΡΩΓΜΗΣ	2-7
2.2.3	Η ΑΝΤΟΧΗ ΤΗΣ ΕΠΙΣΚΕΥΗΣ	2-11
2.3	ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΜΕ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	2-13
2.3.1	ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ	2-13
2.3.2	ΠΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ (PREPROCESSING)	2-16
2.3.3	ΕΠΙΛΥΣΗ (SOLVING)	2-30
2.3.4	ΜΕΤΑΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ (POSTPROCESSING)	2-32
2.3.5	ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ - ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	2-36

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΤΟΥ ΕΠΙΘΕΜΑΤΟΣ

3.1	ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	3-1
3.2	ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	3-4
3.2.1	ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ	3-4
3.2.2	ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	3-7
3.3	ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΟΥ ΕΠΙΘΕΜΑΤΟΣ	3-9
3.3.1	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ	3-9
3.3.2	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΗ ΜΕΙΩΣΗ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΕΝΤΑΣΗΣ ΤΑΣΗΣ	3-15
3.3.3	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΗΝ ΕΝΤΑΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ	3-18
3.3.4	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΗΝ ΕΝΤΑΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΚΟΛΛΑΣ	3-26
3.3.5	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΗΝ ΕΝΤΑΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΕΠΙΘΕΜΑΤΟΣ	3-30
3.4	ΜΕΛΕΤΗ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΟΥ ΕΠΙΘΕΜΑΤΟΣ	3-33
3.4.1	ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΤΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ	3-33
3.4.2	ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΟΚΤΑΓΩΝΙΚΟΥ ΕΠΙΘΕΜΑΤΟΣ	3-38
3.4.3	ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΥΠΕΡΚΑΛΥΨΗΣ ΤΩΝ ΑΚΡΩΝ ΤΟΥ ΕΠΙΘΕΜΑΤΟΣ	3-41

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

- ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ
- ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: ΒΑΣΙΚΟΣ ΚΩΔΙΚΑΣ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΤΗΣ ΕΠΙΣΚΕΥΗΣ ΜΕ ΕΠΙΘΕΜΑ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

1.1 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΡΩΓΜΩΝ ΚΑΙ ΠΑΡΑΔΟΣΙΑΚΗ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ

Στο θαλάσσιο περιβάλλον, η ανάπτυξη ρωγμών στις κατασκευές εμφανίζεται με μεγάλη συχνότητα. Οι ρωγμές είναι αποτέλεσμα της κόπωσης της κατασκευής, η οποία προκαλείται από την μεταβαλλόμενη φύση των φορτίων στα οποία υποβάλλεται αυτή ενώ λειτουργεί στη θάλασσα. Το φαινόμενο εντείνουν κατά κύριο λόγο δύο παράγοντες. Τα έντονα διαβρωτικά χαρακτηριστικά του θαλάσσιου περιβάλλοντος και τα πολύ ισχυρά δυναμικά φορτία που ενδέχεται να φέρουν οι κατασκευές που λειτουργούν σε αυτό. Και στις δύο βέβαια περιπτώσεις σημαντικό ρόλο παίζει ο ανθρώπινος παράγοντας, όπως θα γίνει κατανοητό στη συνέχεια.

Οι χαλύβδινες κατασκευές, οι οποίες αποτελούν και το αντικείμενο της παρούσας μελέτης, δε διαθέτουν συνήθως εγγενή προστασία από τη διάβρωση. Ο σχεδιαστής είναι υποχρεωμένος να προβλέπει τα μέσα της πλήρους προστασίας της κατασκευής και ο χρήστης να φροντίζει επιμελώς τη συντήρηση και την ανανέωση τους. Εφόσον η προστασία που παρέχεται στην κατασκευή χάσει την αποτελεσματικότητά της ή δεν ήταν εξ αρχής η ενδεδειγμένη, είναι θέμα χρόνου (συνήθως σύντομου) να προκληθεί τοπική υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων και της ακεραιότητας του υλικού, ευνοώντας τη δημιουργία σημείων συγκέντρωσης τάσεων και τελικά την ανάπτυξη ρωγμών.

Ακόμα όμως και σε καλά προστατευμένες έναντι της διάβρωσης κατασκευές, η πιθανότητα εμφάνισης ρωγμών παραμένει σημαντική. Η μεγάλη πολυπλοκότητα και το πλήθος των δομικών στοιχείων μιας ναυπηγικής κατασκευής, σε συνδυασμό με την ανάγκη περιορισμού του βάρους της, καθιστούν πολύ δύσκολη έως ανέφικτη οικονομοτεχνικά τη βέλτιστη σχεδίαση κάθε τμήματός της από άποψη αντοχής σε κόπωση. Η μη βέλτιστη σχεδίαση σε συνδυασμό με πιθανά προϋπάρχοντα σφάλματα επί των υλικών ή/και τα έντονα δυναμικά φορτία του θαλάσσιου περιβάλλοντος εγγυώνται την εμφάνιση ρωγμών στην κατασκευή σε κάποιο στάδιο του κύκλου ζωής της. Σημαντικό ρόλο παίζουν τέλος τυχαία γεγονότα όπως οι τοπικές καταπονήσεις της κατασκευής και οι υπερβάσεις της περιοχής λειτουργίας (και συνεπώς της φόρτισης) της κατασκευής από κακή εκτίμηση του χρήστη ή λόγω ατυχήματος.

Στην περίπτωση χαλύβδινων κατασκευών, η ανάπτυξη ρωγμής σηματοδοτεί την εκκίνηση της θραύσης της διατομής που φέρει τη ρωγμή. Η ταχύτητα διάδοσης της ρωγμής εξαρτάται από το εντατικό πεδίο στα άκρα της. Όσο η ρωγμή επεκτείνεται, η επιφάνεια της διατομής που μπορεί να φέρει φορτίο μειώνεται. Συνεπώς η τάση που φέρει η άθικτη διατομή αυξάνεται και το εντατικό πεδίο στα άκρα της ρωγμής γίνεται εντονότερο, επιταχύνοντας την επέκταση της ρωγμής. Τα παραπάνω σημαίνουν πρακτικά ότι όταν μια ρωγμή φτάσει σε μέγεθος τέτοιο ώστε να είναι δυνατός ο εντοπισμός της με οπτικά μέσα, διαδίδεται συνήθως με τέτοια ταχύτητα, ώστε να απαιτείται η άμεση επισκευή της κατασκευής, είτε απαλείφοντας τη ρωγμή, είτε επιβραδύνοντας τη διάδοσή της.

Η ρωγμάτωση και συνεπώς η θραύση που προκαλείται από αυτή έχει αναγνωριστεί ως μείζον πρόβλημα στην αντοχή των ναυπηγικών κατασκευών από την εποχή των πρώτων σιδηρών, τότε, πλοίων, στα τέλη του 19^{ου} αιώνα και ακόμα περισσότερο με την αντικατάσταση της ήλωσης από την ηλεκτροσυγκόλληση κατά τη ναυπήγηση χαλύβδινων, πλέον, πλοίων στο δεύτερο μισό του 20^{ου} αιώνα. Για την αντιμετώπιση του φαινομένου εφαρμόζονται σήμερα διάφορες “παραδοσιακές” μέθοδοι επισκευής. Αυτές διακρίνονται σε μόνιμες και προσωρινές.

Τυπική προσωρινή επισκευή αποτελεί η διάνοιξη κυκλικής οπής ανακούφισης σε κάθε άκρο της ρωγμής, με στόχο να ομαλοποιηθεί τοπικά το εντατικό πεδίο στα άκρα αυτής και να ανακοπεί η πορεία της, τουλάχιστον μέχρι τη δημιουργία νέας ρωγμής περιμετρικά της οπής. Πλεονέκτημα της μεθόδου η δυνατότητα εφαρμογής της από ανειδίκευτο προσωπικό αμέσως μετά τον εντοπισμό της ρωγμής και μειονεκτήματά της ο αυστηρά προσωρινός της χαρακτήρας καθώς και ότι δεν μπορεί να εφαρμοστεί όπου απαιτείται στεγανότητα μεταξύ των δύο πλευρών του ελάσματος.

Σε συνδυασμό με την παραπάνω μέθοδο, και για μεγάλα μεγέθη ρωγμών ή για λόγους στεγανότητας, είναι δυνατή η εφαρμογή μεταλλικού επιθέματος (doubler plate), με κοχλίωση ή συγκόλληση, στην περιοχή της ρωγμής. Το επίθεμα φέρει μέρος του φορτίου της διατομής εξασθενώντας κατά συνέπεια το εντατικό πεδίο στα άκρα της ρωγμής. Πλεονέκτημα της μεθόδου, η αμεσότητα της εφαρμογής της εφόσον διατίθεται στοιχειώδες μηχανουργείο και η στεγανοποίηση σε μεγάλο βαθμό της κατασκευής. Η μέθοδος χαρακτηρίζεται όμως από σημαντικά μειονεκτήματα. Επιγραμματικά είναι δύσκολο να επιτευχθεί ικανοποιητική συνοχή των επιφανειών του επιθέματος και της επιφάνειας που φέρει τη ρωγμή. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τον περιορισμό του ποσοστού του φορτίου που δύναται να μεταφερθεί στο επίθεμα και τη σε σύντομο χρόνο ανάπτυξη νέων ρωγμών στις οπές πρόσδεσης ή στις ραφές συγκόλλησης. Ακόμα είναι σχεδόν αδύνατο να εφαρμοστεί η μέθοδος σε κατασκευές με πολύπλοκη γεωμετρία.

Ο ωφέλιμος χρόνος λειτουργίας των προαναφερθέντων επισκευών δεν ξεπερνάει συνήθως το χρόνο άφιξης του πλοίου στο ναυπηγείο ή στον ασφαλή όρμο όπου θα εκτελεστεί η μόνιμη επισκευή, ή για σταθερές ναυπηγικές κατασκευές (π.χ. εξέδρες εξόρυξης πετρελαίου) το χρόνο εξασφάλισης κατάλληλων συνθηκών εφαρμογής της μόνιμης επισκευής και την άφιξη του εξειδικευμένου συνεργείου και του απαραίτητου εξοπλισμού για την εκτέλεση της επισκευής. Σε λίγες περιπτώσεις, και για μη κρίσιμες περιοχές της κατασκευής, η προσωρινή επισκευή μπορεί να αφεθεί για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, έως για παράδειγμα τον επόμενο προγραμματισμένο δεξαμενισμό ενός πλοίου. Σε κάθε περίπτωση η εξασφάλιση της ακεραιότητας της κατασκευής απαιτεί τη σε σύντομο χρόνο εκτέλεση μόνιμης επισκευής.

Όσον αφορά τις μόνιμες παραδοσιακές μεθόδους επισκευής, η δυνατότητα εφαρμογής τους εξαρτάται από την περιοχή ανάπτυξης της ρωγμής. Διακρίνουμε δύο περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση η ρωγμή έχει ξεκινήσει και αναπτύσσεται εντός της ραφής συγκόλλησης μεταξύ δύο ή περισσότερων ελασμάτων (ή ενισχυτικών ελάσματος). Στην περίπτωση αυτή η επισκευή εξαντλείται στον καθαρισμό τοπικά και την εκ νέου τήξη και συγκόλληση της ραφής, μέθοδο ιδιαίτερα αποτελεσματική. Πλεονεκτήματα της μεθόδου το χαμηλό της κόστος και η δυνατότητα χρήσης της ως προληπτικό μέτρο αποφυγής μελλοντικής ρωγμάτωσης. Μειονέκτημά της η ανάγκη εκτέλεσης της μεθόδου από εξειδικευμένο συνεργείο

συγκολλήσεων ώστε να διασφαλιστεί η ποιότητα της ραφής και η αποφυγή νέας ρωγμής κατά την ψύξη της.

Στην δεύτερη περίπτωση η ρωγμή είτε έχει ξεκινήσει σε περιοχή της κατασκευής μακριά από ραφές συγκόλλησης, είτε έχει ξεκινήσει εντός ραφής αλλά στην πορεία διαδόθηκε και σε τμήμα του ελάσματος εκτός αυτής. Στην περίπτωση αυτή η επισκευή συνίσταται είτε στην τήξη και «γέμιση» της ρωγμής, ουσιαστικά την εφαρμογή συγκόλλησης κατά μήκος της ρωγμής, είτε στην αφαίρεση τμήματος του ελάσματος της επιφάνειας που περικλείει τη ρωγμή και αντικατάσταση του με νέο. Στη δεύτερη περίπτωση, εφόσον επιλεγούν η ενδεδειγμένη μορφή και το μέγεθος του ελάσματος προς αντικατάσταση, η μέθοδος αποδεικνύεται πολύ αποτελεσματική. Βασικά της μειονεκτήματα το μεγάλο κόστος και το ότι για την προετοιμασία και εκτέλεση της επισκευής απαιτούνται συνήθως οι εγκαταστάσεις κάποιου ναυπηγείου.

Σημειώνεται ότι το σύνολο των παραπάνω μεθόδων περιλαμβάνουν την ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών και σπινθήρων, είτε κατά τη διάνοιξη οπών στο μέταλλο, είτε κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης. Συνοπτικά τα χαρακτηριστικά κάθε μιας από τις προαναφερθείσες μεθόδους επισκευής παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 1.1.

Πίνακας 1.1
Παραδοσιακή επισκευή κατασκευής που φέρει ρωγμή

ΜΕΘΟΔΟΣ		ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ
ΠΡΟΣΩΡΙΝΕΣ	Διάνοιξη οπών στα άκρα της ρωγμής	<ul style="list-style-type: none"> Άμεση εφαρμογή από ανειδίκευτο προσωπικό. Μηδενικό κόστος 	<ul style="list-style-type: none"> Μικρός χρόνος ωφέλιμης λειτουργίας της επισκευής Η κατασκευή καθίσταται αυτομάτως μη στεγανή
	Εφαρμογή μεταλλικού επιθέματος	<ul style="list-style-type: none"> Άμεση εφαρμογή. Μικρό κόστος Παροχή περιορισμένης στεγανότητας στην κατασκευή 	<ul style="list-style-type: none"> Απαιτήση ύπαρξης στοιχειώδους μηχανουργείου Μικρός χρόνος ωφέλιμης λειτουργίας της επισκευής Μικρή επίδραση στο εντατικό πεδίο λόγω μη επαρκούς συνοχής των επιφανειών επιθέματος / ελάσματος
ΜΟΝΙΜΕΣ	Ανανέωση / εφαρμογή ραφής συγκόλλησης	<ul style="list-style-type: none"> Μεγάλη αποτελεσματικότητα Μικρό κόστος Εφαρμογή και ως μέθοδος πρόληψης ανάπτυξης ρωγμών 	<ul style="list-style-type: none"> Ανάγκη εκτέλεσης από συνεργείο συγκολλήσεων
	Αντικατάσταση μέρους ελάσματος	<ul style="list-style-type: none"> Μεγάλη αποτελεσματικότητα 	<ul style="list-style-type: none"> Ανάγκη εκτέλεσης σε ναυπηγείο Μεγάλο κόστος

Έχοντας αναφέρει και περιγράψει επιγραμματικά το σύνολο των υπάρχοντων, “παραδοσιακών” όπως τις ονομάσαμε, μεθόδων, μπορούμε πλέον να συνοψίσουμε τα σημαντικότερα μειονεκτήματα που τις χαρακτηρίζουν:

1. Οι παραδοσιακές μέθοδοι προσωρινής επισκευής δεν μπορούν να επιβραδύνουν ουσιαστικά την επέκταση της ρωγμής ενώ έχουν πολύ μικρό ωφέλιμο χρόνο ζωής. Θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν ως λύσεις «ανάγκης» χαμηλής αποτελεσματικότητας.

2. Οι παραδοσιακές μέθοδοι επισκευής βασίζονται σε διεργασίες υψηλής θερμοκρασίας, προϋποθέτοντας χώρο εργασίας ελεύθερο εύφλεκτων παραγόντων. Στην περίπτωση πλοίων ή εξεδρών σχετιζόμενων με τη μεταφορά ή την εξόρυξη/διύλιση καυσίμων ή χημικών, η παραπάνω προϋπόθεση αποδεικνύεται ιδιαίτερα δαπανηρή, αν λάβουμε υπόψη το μεγάλο κόστος των εργασιών καθαρισμού των δεξαμενών πλησίον του χώρου όπου θα εκτελεστεί η επισκευή καθώς και την πιθανώς μεγάλη απώλεια εσόδων εφόσον η κατασκευή τεθεί εκτός λειτουργίας κατά τη διάρκεια των καθαρισμών και της επισκευής.
3. Οι παραδοσιακές μέθοδοι μόνιμης επισκευής απαιτούν εξειδικευμένα συνεργεία ή/και εγκαταστάσεις (ελασματοουργεία, μηχανουργεία) ενώ χαρακτηρίζονται συνήθως από μεγάλο κόστος, είτε λόγω των εργασιών επισκευής (π.χ. έξοδα δεξαμενισμού, αντικατάσταση ελάσματος), είτε λόγω της μη προγραμματισμένης παραμονής του πλοίου (ή της ναυπηγικής κατασκευής γενικότερα) σε κάποιο ναυπηγείο και φυσικά εκτός προσοδοφόρου λειτουργίας.

Εντούτοις, παρά τα σημαντικά τους μειονεκτήματα, οι παραδοσιακές μέθοδοι αποτελούν, για κάθε περίπτωση ξεχωριστά, τη μοναδική επιλογή για την επισκευή χαλύβδινων κατασκευών που φέρουν ρωγμή. Είναι συνεπώς ασφαλές να υποθέσουμε ότι αν ήταν δυνατό να αναπτυχθεί μια νέα μέθοδος η οποία θα εφαρμοζόταν συμπληρωματικά ή/και ανταγωνιστικά των υπαρχόντων, θα προκαλούσε το ενδιαφέρον του ναυτιλιακού χώρου. Λαμβάνοντας ακόμα υπόψη ότι οι υπάρχουσες μέθοδοι έχουν βελτιστοποιηθεί και εδραιωθεί σε μια πορεία πενήντα και πλέον χρόνων, μπορούμε να αντιληφθούμε ότι οι απαιτήσεις από μια νέα μέθοδο θα είναι ιδιαίτερα υψηλές. Μελετώντας τα μειονεκτήματα που εντοπίσαμε παραπάνω, μπορούμε να σκιαγραφήσουμε τα χαρακτηριστικά εκείνα τα οποία θα πρέπει να διαθέτει η όποια νέα, «καινοτόμος» μέθοδος επισκευής ώστε να προσφέρει ουσιαστικές βελτιώσεις επί των υπαρχόντων μεθόδων. Αυτά μπορούν να συνοψιστούν στα εξής:

1. Η μέθοδος ενδείκνυται να είναι γενική. Να μπορεί δηλαδή να εφαρμοστεί σε μια κατασκευή ανεξάρτητα από την πολυπλοκότητα της γεωμετρίας της και την περιοχή όπου αναπτύσσεται η ρωγμή.
2. Κατά την εφαρμογή της μεθόδου δεν θα πρέπει να αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες έτσι ώστε να μην απαιτείται η δαπανηρή και χρονοβόρα διαδικασία πιστοποίησης χώρων της κατασκευής ως ελεύθερες εύφλεκτων παραγόντων (πιστοποίηση gas-free).
3. Η νέα μέθοδος θα πρέπει να είναι πιο εύκολα εφαρμόσιμη από τις υπάρχουσες, αν είναι δυνατόν ακόμα και εν πλω. Πρέπει δηλαδή τα απαιτούμενα υλικά να μπορούν να μεταφερθούν εύκολα στο χώρο της επισκευής και να μην απαιτούνται εξειδικευμένες εγκαταστάσεις ή/και συνεργεία για την εκτέλεσή της.
4. Τέλος, η όποια νέα μέθοδος θα πρέπει να αναπτυχθεί με τη λογική του όσο το δυνατόν μικρότερου κόστους. Είτε αυτό είναι άμεσο, όπως για παράδειγμα το κόστος των υλικών επισκευής και των εξόδων του συνεργείου, είτε έμμεσο, με τη μορφή των διαφυγόντων κερδών κατά το χρόνο παραμονής της κατασκευής εκτός λειτουργίας.

1.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΕΠΙΘΕΜΑΤΟΣ ΕΠΙ ΠΛΑΚΑΣ

Η ιδέα της επισκευής μιας κατασκευής, συγκεκριμένα ενός καλύβδινου ή μεταλλικού γενικότερα ελάσματος, (ή πλάκας ή υποστρώματος, όπως και θα αναφέρεται στη συνέχεια), με την εφαρμογή ενός επιθέματος το οποίο θα υπερκαλύπτει τη ρωγμή και θα φέρει μέρος του φορτίου το οποίο δέχεται η πλάκα, δημιουργήθηκε παράλληλα με την εμφάνιση των πρώτων αστοχιών κατασκευών λόγω ανάπτυξης ρωγμών. Όπως είδαμε προηγουμένως, μια παραδοσιακή μέθοδος προσωρινής επισκευής καλύβδινης κατασκευής που φέρει ρωγμή, είναι αυτή της εφαρμογής μεταλλικού επιθέματος επί της ρωγμής. Ακόμα έχουμε αναφέρει ότι η μέθοδος αυτή χαρακτηρίζεται ως λύση «ανάγκης», χαμηλής αποτελεσματικότητας και μικρού ωφέλιμου χρόνου ζωής. Στη συνέχεια θα εξετάσουμε τη μηχανική της μεθόδου και θα προσπαθήσουμε να εντοπίσουμε τους παράγοντες εκείνους που την καθιστούν αναποτελεσματική.

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο εδάφιο, η ανάπτυξη μίας ρωγμής σε μία πλάκα σηματοδοτεί την εκκίνηση της θραύσης της πλάκας. Ο μηχανισμός της θραύσης μπορεί να περιγραφεί συνοπτικά ως εξής: Θεωρώντας διατομή που φέρει δεδομένο φορτίο, η μείωση της επιφάνειας της διατομής της πλάκας καθώς η ρωγμή επεκτείνεται, συνεπάγεται την αύξηση της τάσης που αναπτύσσεται στην ακέραια διατομή. Καθώς η τάση στο ακέραιο τμήμα της διατομής προσεγγίζει την τάση διαρροής του υλικού, η διατομή διαρρέει, προκαλώντας ταυτόχρονα τη ραγδαία επέκταση της ρωγμής και την αστοχία της πλάκας.

Συμπεραίνουμε ότι εφόσον η επέκταση της ρωγμής τερματιστεί ενώ η τάση της διατομής βρίσκεται σε ασφαλή επίπεδα, το έλασμα μπορεί να θεωρηθεί ακέραιο. Επομένως ως «μόνιμη» επισκευή μιας ρωγματωμένης πλάκας θα μπορούσε να θεωρηθεί όχι μόνο η απαλοιφή της ρωγμής, όπως συμβαίνει με τις παραδοσιακές μεθόδους που αναφέραμε προηγουμένως, αλλά και η επιβράδυνσή της σε τέτοιο βαθμό ώστε ο χρόνος που απαιτείται για να επέλθει αστοχία λόγω της ρωγμής να είναι μεγαλύτερος της εναπομένουσας διάρκειας ζωής ολόκληρης της κατασκευής.

Η ταχύτητα διάδοσης μιας ρωγμής εξαρτάται για μια δεδομένη κατασκευή από το εντατικό πεδίο που τη φορτίζει. Συνεπώς, αν καταφέρουμε να εξασθενήσουμε το εντατικό αυτό πεδίο, να μειώσουμε δηλαδή την τάση η οποία αναπτύσσεται στην περιοχή πλησίον των άκρων της ρωγμής, θα έχουμε καταφέρει την επιβράδυνση της ρωγμής και συνεπώς την επισκευή του ελάσματος που φέρει τη ρωγμή.

Ας δούμε τώρα με ποιο τρόπο η εφαρμογή ενός επιθέματος που υπερκαλύπτει τη ρωγμή μπορεί να επιτύχει την επιζητούμενη επιβράδυνση της επέκτασης της ρωγμής. Να σημειωθεί ότι η ενδελεχής μελέτη του φαινομένου ξεφεύγει του σκοπού της παρούσας παραγράφου. Χάριν απλοποίησης του προβλήματος και χωρίς απώλεια της γενικότητας, θεωρούμε τα εξής:

1. Την τέλεια συνοχή μεταξύ της διεπιφάνειας πλάκας/επιθέματος. Δηλαδή η μεταφορά τάσεων και παραμορφώσεων από το υπόστρωμα στο επίθεμα και αντίστροφα γίνεται σαν να επρόκειτο για ενιαίο συμπαγές σώμα.
2. Την ανάπτυξη μόνο ορθών τάσεων και παραμορφώσεων και αυτών μόνο κατά τη διεύθυνση επιβολής του φορτίου.

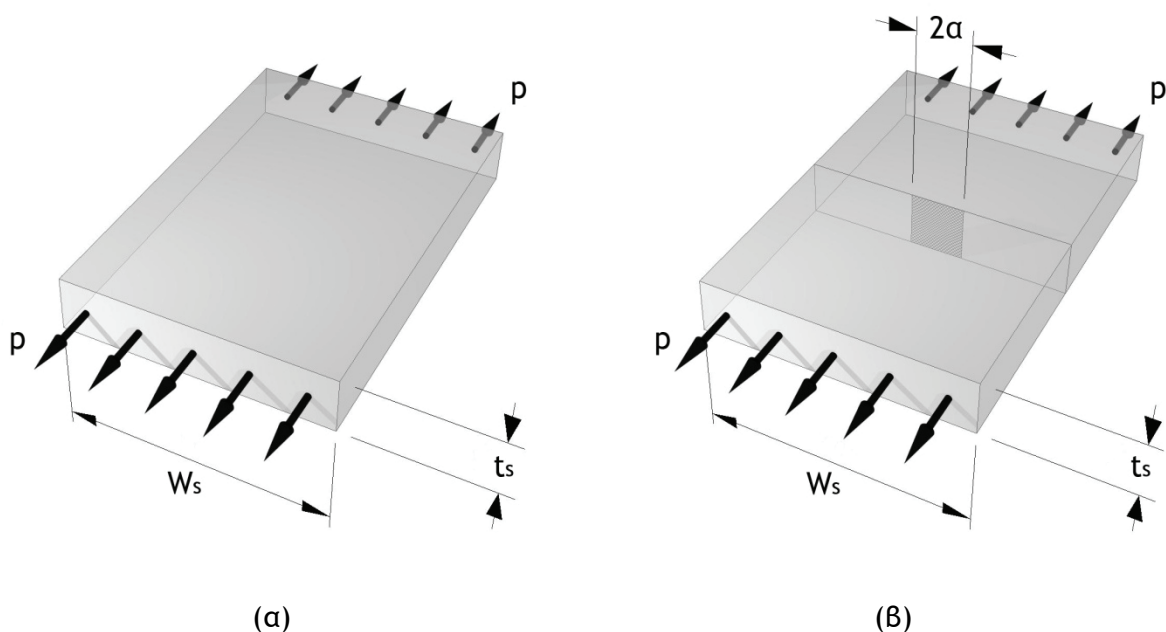
3. Την υπόθεση μίας μέσης τάσης ως αντιπροσωπευτική του τασικού πεδίου στη διατομή της ρωγμής, παρακάμπτοντας ουσιαστικά την ανομοιομορφία της κατανομής τάσεων στη διατομή.

Στη συνέχεια θα αναφερόμαστε σε ρωγμή τύπου I (άνοιγμα ρωγμής) [7], και σε πλάκα (υπόστρωμα) που δέχεται στα άκρα της εφελκυστικό φορτίο κάθετο στη διεύθυνση ανάπτυξης της ρωγμής. Έστω υπόστρωμα αδιευκρίνιστου μήκους, πάχους t_s , πλάτους W_s και μέτρου ελαστικότητας E_s . Έστω ακόμα ότι το υπόστρωμα δέχεται ομοιόμορφα κατανεμημένη εφελκυστική δύναμη p , κάθετη στην επιφάνεια που ορίζεται από τις πλευρές με διαστάσεις t_s , W_s . (βλέπε Σχήμα 1.1α). Η τάση σ_0 που αναπτύσσεται στη διατομή την κάθετη της διεύθυνσης επιβολής της δύναμης ισούται με:

$$\sigma_0 = \frac{p}{t_s \cdot W_s} \quad \rightarrow \quad \sigma_0 = \frac{p}{A_s} \quad (1.1)$$

Θεωρούμε ότι στο μέσον της διατομής υπάρχει διαμπερής ρωγμή με μήκος $2a$ (βλέπε Σχήμα 1.1β). Η μέση τάση που αναπτύσσεται στη διατομή που φέρει τη ρωγμή, ονομάζεται σ_c και είναι αντιστρόφως ανάλογη της άθικτης επιφάνειας της διατομής (Εξίσωση 1.2) και προφανώς μεγαλύτερη της τάσης σ_0 που αναπτύσσεται σε περιοχές του υποστρώματος μακριά της ρωγμής.

$$\sigma_c = \frac{p}{t_s \cdot (W_s - 2a)} \quad \rightarrow \quad \sigma_c = \frac{p}{A_s - t_s \cdot 2a} \quad (1.2)$$



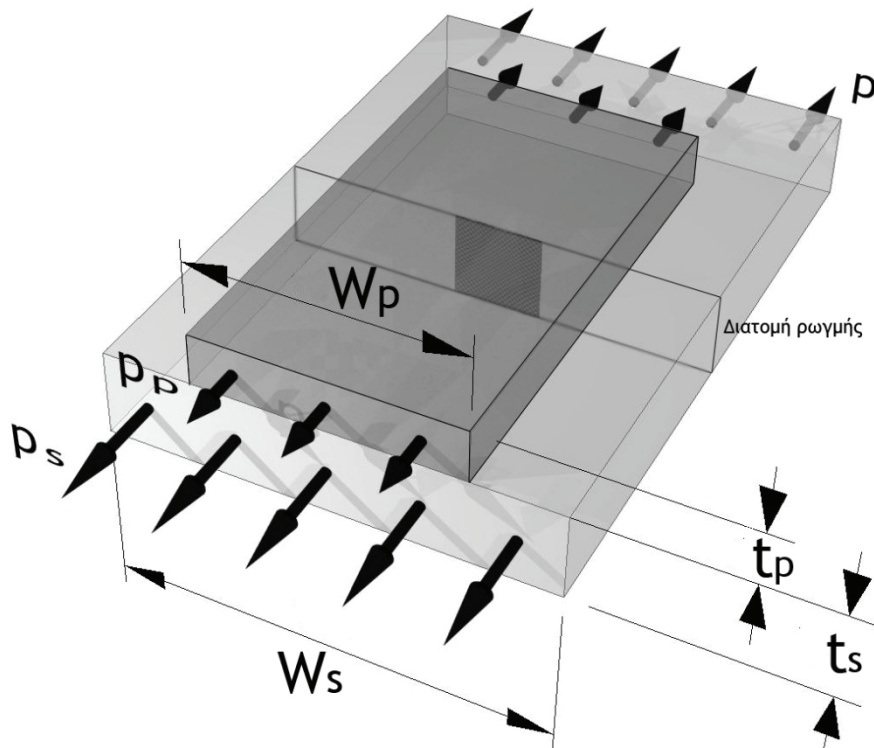
Σχήμα 1.1

(α) Άθικτη πλάκα.

(β) Πλάκα με κεντρική διαμπερή ρωγμή.

Στόχος της μεθόδου είναι η μείωση της τάσης σ_c . Από την παραπάνω εξίσωση προκύπτει ότι εφόσον δεν μπορούμε να μειώσουμε το μήκος της ρωγμής, ο μόνος τρόπος για να μειωθεί η τάση σ_c είναι να μειωθεί το φορτίο που φέρει η διατομή. Να σημειωθεί ότι δεν λαμβάνεται υπόψη η αλληλεπίδραση υποστρώματος/επιθέματος στην άμεση εγγύτητα της διατομής όπου αναπτύσσεται η ρωγή.

Έστω επίθεμα (patch) μικρότερου μήκους από το υπόστρωμα, πάχους t_p , πλάτους W_p και μέτρου ελαστικότητας E_p . Θεωρούμε ότι το επίθεμα εφαρμόζεται επί της πλάκας έτσι ώστε να καλύπτει την ευρύτερη περιοχή της ρωγμής και με τέτοιο τρόπο ώστε η συνοχή των επιφανειών των δύο πλακών να είναι τέλεια (βλέπε Σχήμα 1.2). Η απεικόνιση του σχήματος 1.2 αφορά τομή αρκετά μακριά από το άκρο του επιθέματος, ώστε το φορτίο που παραλαμβάνει το επίθεμα να έχει προσεγγίσει την οριακή του τιμή και αρκετά μακριά από τη διατομή που φέρει τη ρωγή, ώστε η μείωση της επιφάνειας σε αυτήν να μην επηρεάζει την κατανομή των τάσεων. Το συνολικό φορτίο το οποίο ασκείται στα άκρα του υποστρώματος διαιρείται σε δύο μέρη, τα p_s και p_p , που αντιστοιχούν στο φορτίο που φέρουν το υπόστρωμα και το επίθεμα αντίστοιχα.



Σχήμα 1.2

Διατομή του συστήματος πλάκας που φέρει κεντρική διαμπερή ρωγή και επίθεμα.

Το ποσοστό του συνολικού φορτίου που θα κληθούν να παραλάβουν το υπόστρωμα και το επίθεμα εξαρτάται από το λόγο των επιφανειών των διατομών τους καθώς και από το λόγο των μέτρων ελαστικότητας τους. Σημειώνεται ότι οι τάσεις σ_p και σ_s που θα υπολογιστούν παρακάτω αναφέρονται σε περιοχή μακριά από τη ρωγή. Κάνουμε την εξής παραδοχή:

Εφόσον θεωρούμε τέλεια συνοχή μεταξύ των επιφανειών επαφής, η διαμήκης παραμόρφωση καθενός εκ του υποστρώματος και του επίθεματος θα ταυτίζεται. Σύμφωνα με την παραπάνω παραδοχή και με τη βοήθεια των ορισμών της τάσης, $\sigma = p/A$ και του μέτρου ελαστικότητας, $E = \sigma/\varepsilon$, προκύπτουν τα εξής:

$$\left. \begin{array}{l} p = p_S + p_P \\ p_i = \sigma_i \cdot A_i \end{array} \right\} \quad p = \sigma_S \cdot A_S + \sigma_P \cdot A_P \quad (1.3)$$

$$\lambda_E = \frac{E_P}{E_S} \quad (1.4)$$

$$\left. \begin{array}{l} \varepsilon_S = \varepsilon_P \\ \varepsilon_i = \frac{\sigma_i}{E_i} \end{array} \right\} \quad \frac{\sigma_P}{E_P} = \frac{\sigma_S}{E_S} \quad \Leftrightarrow \quad \sigma_P = \sigma_S \cdot \frac{E_P}{E_S} \quad \Leftrightarrow \quad \sigma_P = \sigma_S \cdot \lambda_E \quad (1.5)$$

Η τάση που αναπτύσσεται στο υπόστρωμα σε διατομή μακριά της ρωγμής επί της οποίας όμως έχει εφαρμοστεί επίθεμα είναι:

$$(1.3), (1.4), (1.5) \rightarrow \quad p = \sigma_S \cdot A_S + \sigma_S \cdot \lambda_E \cdot A_P \quad \Leftrightarrow \quad \sigma_S = \frac{p}{A_S + \lambda_E \cdot A_P} \quad (1.6)$$

Και η τάση που αναπτύσσεται στο επίθεμα σε διατομή μακριά της ρωγμής είναι:

$$(1.5), (1.6) \rightarrow \quad \sigma_P = \frac{p \cdot \lambda_E}{A_S + \lambda_E \cdot A_P} \quad (1.7)$$

Συνεπώς το φορτίο που φέρει το επίθεμα προκύπτει:

$$(1.3), (1.7) \rightarrow \quad p_P = \sigma_P \cdot A_P \quad \Leftrightarrow \quad p_P = \frac{p \cdot \lambda_E \cdot A_P}{A_S + \lambda_E \cdot A_P} \quad (1.8)$$

Και το φορτίο που φέρει το υπόστρωμα είναι:

$$(1.3), (1.6) \rightarrow \quad p_S = \sigma_S \cdot A_S \quad \Leftrightarrow \quad p_S = \frac{p \cdot A_S}{A_S + \lambda_E \cdot A_P} \quad (1.9)$$

Η τάση στη διατομή του υποστρώματος όπου αναπτύσσεται η ρωγμή, $\sigma_{C,PATCHED}$ προκύπτει τελικά από την εξίσωση:

$$(1.9) \rightarrow \sigma_{C,PATCHED} = \frac{P_S}{A_S - t_S \cdot 2\alpha} \Leftrightarrow \sigma_{C,PATCHED} = \frac{p \cdot A_S}{(A_S + \lambda_E \cdot A_P) \cdot (A_S - t_S \cdot 2\alpha)} \quad (1.10)$$

Θεωρούμε την τάση θραύσης του υλικού της πλάκας, σ_F . Όταν η τάση $\sigma_{C,PATCHED}$ προσεγγίσει την τάση σ_F , η διατομή θα αστοχήσει. Να σημειωθεί ότι ανάλογα με το υλικό του υποστρώματος, μπορεί να προηγουμένως να επέλθει διαρροή του υλικού, με αποτέλεσμα την επιπλέον αύξηση της ταχύτητας διάδοσης της ρωγμής. Για δεδομένο σύστημα υποστρώματος/επιθέματος η τάση $\sigma_{C,PATCHED}$ εξαρτάται μόνο από το μήκος της ρωγμής. Επομένως θέτοντας συντελεστή ασφάλειας k , το κρίσιμο μήκος ρωγμής για την αστοχία της διατομής, $2\alpha_F$ (Failure), υπολογίζεται:

$$\sigma_{C,PATCHED,F} = k \cdot \sigma_F \quad (1.11)$$

$$(1.10), (1.11) \rightarrow 2\alpha_F = W_S - \frac{p \cdot W_S}{(A_S + \lambda_E \cdot A_P) \cdot k \cdot \sigma_F} \quad (1.12)$$

Η τάση $\sigma_{C,PATCHED}$ που υπολογίσαμε παραπάνω αναφέρεται στη μέση τάση που αναπτύσσεται στη ρωγματωμένη διατομή. Παρόλο που η μεταβολή της μέσης τάσης συνεπάγεται την αντίστοιχη μεταβολή των τάσεων στα άκρα της ρωγμής, δεν μπορεί να περιγράψει με ακρίβεια τη μεταβολή του εντατικού πεδίου στην περιοχή.

Γνωρίζουμε όμως ότι υπό την επίδραση δεδομένης μορφής παραμόρφωσης, η κατανομή των ελαστικών τάσεων και των μετατοπίσεων στην περιοχή του άκρου μιας ρωγμής είναι αναλλοίωτη ως προς όλες τις συνιστώσες τους [7]. Το εντατικό πεδίο στα άκρα της ρωγμής μπορεί συνεπώς να περιγραφεί μονοσήμαντα με τη βοήθεια του συντελεστή έντασης τάσης, K_I (για ρωγμή τύπου I). Για την περίπτωση πλάκας πεπερασμένου πλάτους W_S , στα άκρα της οποίας αναπτύσσεται εφελκυστική τάση σ_S και η οποία φέρει κεντρική διαμπερή ρωγμή μήκους 2α , ο συντελεστής έντασης τάσης δίνεται από την εξίσωση:

$$K_I = \sigma_S \sqrt{\pi\alpha \left(\frac{2W_S}{\pi\alpha} \tan \frac{\pi\alpha}{2W_S} \right)} \quad (1.13)$$

Για να μπορέσουμε να συσχετίσουμε τον συντελεστή έντασης τάσης με την εναπομένουσα διάρκεια ζωής της ρωγματωμένης πλάκας θα χρησιμοποιήσουμε τη θεωρία του νόμου του Paris [11]. Σύμφωνα με το νόμο του Paris, για πλάκες που φέρουν ρωγμή και δέχονται

δυναμικό φορτίο, ο εναπομένων χρόνος μέχρι τη θραύση μετρούμενος σε κύκλους φόρτισης προσδιορίζεται από τον τύπο:

$$\frac{d\alpha}{dN} = C \cdot \Delta K^m \quad \rightarrow \quad \int_0^{N_F} dN = \int_{\alpha_0}^{\alpha_F} \frac{d\alpha}{C \cdot \Delta K^m} \quad (1.14)$$

Όπου α_0 το ημιμήκος της ρωγμής στον παρόντα χρόνο, N_F ο αριθμός των εναπομενουσών κύκλων φόρτισης μέχρι την αστοχία και C, m συντελεστές του υλικού της πλάκας. Θεωρείται ότι η πλάκα δέχεται μεταβαλλόμενο φορτίο με μέση τιμή p και εύρος δp . Η διαφορά ΔK στην περίπτωση ρωγματωμένης πλάκας που φέρει επίθεμα προκύπτει από τις εξισώσεις (1.6) και (1.13) ως εξής:

$$(1.5), (1.6) \quad \rightarrow \quad \Delta K = \frac{\delta p}{A_S + \lambda_E \cdot A_P} \cdot \sqrt{\pi \alpha_0 \left(\frac{2W_S}{\pi \alpha_0} \tan \frac{\pi \alpha_0}{2W_S} \right)} \quad (1.15)$$

Στην περίπτωση πλάκας χωρίς επίθεμα η διαφορά ΔK προκύπτει από τις εξισώσεις (1.1) και (1.13) ως εξής:

$$(1.1), (1.13) \quad \rightarrow \quad \Delta K = \frac{\delta p}{A_S} \cdot \sqrt{\pi \alpha_0 \left(\frac{2W_S}{\pi \alpha_0} \tan \frac{\pi \alpha_0}{2W_S} \right)} \quad (1.16)$$

Ο αριθμός των εναπομενουσών κύκλων φόρτισης μέχρι την αστοχία, όπως γίνεται αντιληπτό από την εξίσωση (1.14), είναι αντιστρόφως ανάλογος της διαφοράς ΔK . Συγκρίνοντας τις Εξισώσεις 1.15 και 1.16 παρατηρούμε ότι η διαφορά ΔK είναι μικρότερη στην περίπτωση συστήματος υποστρώματος/επιθέματος επομένως η πλάκα που δεν φέρει επίθεμα θα αστοχήσει πιο γρήγορα. Η σχέση μεταξύ των δύο εξαρτάται από το γινόμενο $\lambda_E \cdot A_P$. Σε αυτό το σημείο ορίζουμε το λόγο ακαμψίας (stiffness ratio, SR) ως εξής:

$$SR = \frac{E_P \cdot t_P}{E_S \cdot t_S} \quad (1.17)$$

Το γινόμενο $\lambda_E \cdot A_P$ μετασχηματίζεται στο:

$$\lambda_E \cdot A_P = SR \frac{W_P}{W_S} \quad (1.18)$$

Και η Εξίσωση 1.15 μετασχηματίζεται τελικά στην:

$$(1.15), (1.18) \quad \rightarrow \quad \Delta K = \frac{\delta p}{A_S + SR \frac{W_P}{W_S}} \cdot \sqrt{\pi \alpha_0 \left(\frac{2W_S}{\pi \alpha_0} \tan \frac{\pi \alpha_0}{2W_S} \right)} \quad (1.19)$$

Σημειώνεται ότι η παραπάνω εξίσωση δεν μπορεί να παράγει αποτελέσματα ικανοποιητικής ακρίβειας, εξαιτίας των παραδοχών που τέθηκαν προς απλοποίηση του προβλήματος. Όμως παρά τις απλουστεύσεις η παραπάνω διερεύνηση είναι πολύ χρήσιμη ώστε να διαπιστώσουμε ότι η εφαρμογή επιθέματος επί πλάκας που φέρει ρωγμή μπορεί να επιβραδύνει επιτυχώς την επέκταση της ρωγμής (σύγκριση Εξισώσεων 1.15 και 1.16) και ότι το ποσοστό εξασθένησης των τάσεων στην περιοχή της ρωγμής εξαιτίας του επιθέματος είναι ανάλογο του λόγου ακαμψίας του συστήματος ή/και του πλάτους του επιθέματος (Εξίσωση 1.19).

Από τα παραπάνω δεν προέκυψε κάποιος παράγοντας που να μπορεί να δικαιολογήσει τη δεδομένη χαμηλή αποτελεσματικότητα της μεθόδου επισκευής χαλύβδινης κατασκευής (πλάκας) με εφαρμογή μεταλλικού επιθέματος. Είναι λογικό να υποθέσουμε ότι ο παράγοντας αυτής της αναποτελεσματικότητας θα ελλοχεύει στις παραδοχές που κάναμε κατά την εκκίνηση της διερεύνησης. Όπως θα διαπιστώσουμε και αργότερα, κατά την παρουσίαση της παραμετρικής μελέτης, ο παράγοντας αυτός εντοπίζεται στην παραδοχή τέλει και ανθεκτικής συνοχής στην επιφάνεια σύνδεσης μεταξύ υποστρώματος και επιθέματος.

Οι συνήθεις τρόποι σύνδεσης ενός μεταλλικού επιθέματος με το μεταλλικό (χαλύβδινο) υπόστρωμα περιορίζονται είτε στην εφαρμογή ραφής συγκόλλησης κατά μήκος των πλευρών του επιθέματος είτε στη σύσφιξη με κοχλίες διαμέσου οπών που διαπερνούν το επίθεμα και το υπόστρωμα (σε αυτήν την περίπτωση έχουμε συνήθως διπλό επίθεμα, δηλαδή δύο επιθέματα τα οποία εφαρμόζονται ένα σε κάθε πλευρά της πλάκας). Η επιφάνεια σύνδεσης μεταξύ υποστρώματος και επιθέματος, είτε πρόκειται για την επιφάνεια των ραφών συγκόλλησης στην πρώτη περίπτωση, είτε για την επιφάνεια πλησίον των οπών της κοχλίωσης στη δεύτερη, είναι τάξεις μεγέθους μικρότερη της συνολικής επιφάνειας επαφής υποστρώματος/επιθέματος. Όπως είδαμε παραπάνω προβλέπεται για το επίθεμα ένα θεωρητικό μέγιστο ποσοστό του φορτίου που μπορεί να παραληφθεί. Για την παραλαβή όμως αυτού του φορτίου απαιτείται η ύπαρξη ικανής επιφάνειας σύνδεσης, που στις παραπάνω περιπτώσεις δεν παρέχεται. Έτσι το επίθεμα φέρει τελικά ένα μικρό ποσοστό του φορτίου που δέχεται το υπόστρωμα, επιφέροντας περιορισμένη εξασθένηση του εντατικού πεδίου στα άκρα της ρωγμής. Επιπλέον, και παρά τη μεταφορά φορτίου μικρότερου του θεωρητικού, η μικρή επιφάνεια σύνδεσης συνεπάγεται την ανάπτυξη συγκριτικά μεγάλης τάσης σε αυτή, με αποτέλεσμα τη χαμηλή αντοχή της ήδη αναποτελεσματικής επισκευής.

Μία πιθανή παράκαμψη του προβλήματος θα ήταν η παρεμβολή στρώματος κόλλας μεταξύ των επιφανειών υποστρώματος/υποθέματος. Σε αυτήν την περίπτωση η τάση θα μεταφερόταν από το υπόστρωμα στο επίθεμα διαμέσου της κόλλας και θα παρεχόταν επαρκής επιφάνεια σύνδεσης για τη μεταφορά του συνόλου του προβλεπόμενου φορτίου. Η αντοχή όμως των υπαρχόντων υλικών κόλλησης δεν επαρκεί για την εφαρμογή τους σε κολλήσεις μεταξύ μετάλλων που παραλαμβάνουν ικανές φορτίσεις, όπως αυτές που μας ενδιαφέρουν.

Πρέπει ακόμα να επισημάνουμε ότι η δυσκολία και το κόστος της κατεργασίας που θα απαιτούσε ένα μεταλλικό επίθεμα ώστε να ακολουθήσει τη συχνά πολύπλοκη γεωμετρία του ελάσματος προς επισκευή με τέτοια ακρίβεια ώστε να επιτευχθεί η σύμμετρη εφαρμογή του στρώματος της κόλλας, θα καθιστούσε στις περισσότερες περιπτώσεις τη μέθοδο μη συμφέρουσα, αν όχι ανέφικτη.

Τελικά συμπεραίνουμε τα εξής:

1. Το ποσοστό του φορτίου που μπορεί να μεταφέρει το επίθεμα εξαρτάται από τις διαστάσεις του και το μέτρο ελαστικότητας του υλικού του. Επομένως, εάν αντικαταστήσουμε το μεταλλικό επίθεμα με αντίστοιχο πιο «μαλακό» υλικό, μικρότερου δηλαδή μέτρου ελαστικότητας, το φορτίο που δύναται να παραλαμβάνει το επίθεμα θα είναι μικρότερο. Συνεπώς το φορτίο που θα μεταφέρεται μέσω του στρώματος της κόλλας θα είναι και αυτό μικρότερο και η ανθεκτικότητα του στρώματος θα είναι μεγαλύτερη.
2. Εάν το μεταλλικό επίθεμα που προβλέπεται από τη μέθοδο αντικατασταθεί από κάποιο υλικό το οποίο θα είναι τόσο εύκαμπτο ώστε να μπορεί να ακολουθήσει με ευκολία τη γεωμετρία της κατασκευής προς επισκευή, θα μπορούσε να επιτευχθεί η ικανοποιητική εφαρμογή ενός στρώματος κόλλας μεταξύ επιθέματος και υποστρώματος, με ότι αυτό συνεπάγεται για την αποτελεσματικότητα της μεθόδου.

Καταλήγουμε στο ότι η μέθοδος επισκευής μιας χαλύβδινης κατασκευής με τη χρήση επιθέματος θα μπορούσε θεωρητικά να είναι αποδοτική εφόσον το υλικό του επιθέματος ήταν αρκετά «μαλακό» ώστε να απορριφθεί η χρήση ραφών και κοχλιώσεων ως μέσων σύνδεσης και να είναι δυνατή η ομοιογενής σύνδεση του με το χαλύβδινο υπόστρωμα με τη βοήθεια ενός στρώματος κόλλας.

1.3 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΠΙΣΚΕΥΗΣ ΜΕ ΕΠΙΘΕΜΑ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

1.3.1 ΓΕΝΕΣΗ ΚΑΙ ΕΞΕΛΙΞΗ - ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗΝ ΑΕΡΟΠΟΡΙΑ

Το υπέρογκο κόστος απόκτησης σύγχρονων αεροσκαφών, στρατιωτικών ή πολιτικών, σε συνδυασμό με τον περιορισμό των κονδυλίων προς ανανέωση των στόλων αεροσκαφών των ενόπλων δυνάμεων ανά την υφήλιο, κυρίως λόγω του τέλους του ψυχρού πολέμου, και τους ολοένα και πιο σφικτούς προϋπολογισμούς των αεροπορικών εταιριών, έχει οδηγήσει στην χρήση των αεροσκαφών για μεγάλα χρονικά διαστήματα μετά το πέρας της αρχικά σχεδιασθείσας επιχειρησιακής τους ζωής [13]. Κατά τη διάρκεια της υπηρεσιακής ζωής του, ένα αεροσκάφος υπόκειται σε έντονα δομικά και αεροδυναμικά φορτία. Τα φορτία αυτά μπορούν να προκαλέσουν φθορά ή εξασθένηση της αντοχής της κατασκευής, ιδιαίτερα για παλαιότερα στρατιωτικά ή πολιτικά αεροσκάφη, επηρεάζοντας τελικά την ικανότητά τους να φέρουν ωφέλιμο φορτίο. Έτσι οι χρήστες και διαχειριστές στόλων αεροσκαφών καλούνται πλέον, εκτός από την προγραμματισμένη συντήρηση και την επισκευή των όποιων βλαβών στον εξοπλισμό του αεροσκάφους, να αντιμετωπίσουν και την υποβάθμιση των ιδιοτήτων τμημάτων του αεροσκάφους που συμμετέχουν ενεργά στη δομή της κατασκευής.

Παρόλο που η αντικατάσταση του τμήματος όπου έγκειται το πρόβλημα φαντάζει ως η πλέον ενδεδειγμένη λύση, λαμβάνοντας υπόψη τις πιθανές ολέθριες συνέπειες μιας αστοχίας κατά τη λειτουργία του σκάφους και τις ιδιαίτερα σκληρές και υψίσυχνες καταπονήσεις που αυτό δέχεται, πολύ συχνά κρίνεται εξαρχής ως μη εφικτή. Εστιάζοντας την προσοχή μας στους σχετικά γηραιούς στόλους αεροσκαφών όπου και το πρόβλημα είναι εντονότερο, παρατηρούμε τα εξής:

1. Τα αεροσκάφη όσο απομακρύνονται από το χρόνο λήξης της αρχικά σχεδιασθείσας επιχειρησιακής τους ζωής εμφανίζουν δομικά προβλήματα και φθορές με ολοένα αυξανόμενη συχνότητα.
2. Οι γραμμές παραγωγής των αεροσκαφών αυτών είναι στις περισσότερες περιπτώσεις κλειστές. Αυτό μεταφράζεται σε σημαντικές καθυστερήσεις και δυσανάλογα υψηλό κόστος προμήθειας πιστοποιημένων ανταλλακτικών του αεροσκάφους.
3. Οι οργανισμοί πιστοποίησης και ελέγχου απαιτούν συχνά από το χρήστη την προληπτική επιδιόρθωση των δομικών προβλημάτων στο σύνολο των αεροσκαφών του ίδιου τύπου που χρησιμοποιεί.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι εφόσον ο χρήστης υιοθετήσει την πολιτική της άμεσης αντικατάστασης των τμημάτων του αεροσκάφους όπου εμφανίζεται κάποιο δομικό πρόβλημα, θα βρεθεί σύντομα στο σημείο όπου η χρήση των παλαιών αεροσκαφών θα καταστεί μη αποδοτική. Κατά συνέπεια η επισκευή ή η ενίσχυση του φθαρμένου ή εξασθενημένου τμήματος της κατασκευής ώστε να επανέλθει στην αρχική του δομική ικανότητα, εξασφαλίζοντας έτσι την ακεραιότητα και αποδοτική λειτουργία του αεροσκάφους, έχει εξελιχθεί σε μείζον ζήτημα τα τελευταία χρόνια για τους χρήστες και διαχειριστές στρατιωτικών και πολιτικών στόλων αεροσκαφών.

Οι παραδοσιακές μέθοδοι άμεσης επισκευής αεροσκαφών που παρουσιάζουν πρόβλημα στη δομή τους, συνήθως με τη μορφή της ανάπτυξης ρωγμής σε κάποιο τμήμα τους,

περιλαμβάνουν κατά κύριο λόγο τη χρήση μεταλλικών ενισχύσεων ή επιθεμάτων. Αξίζει να σημειωθεί ότι καθώς τα υλικά κατασκευής της συντριπτικής πλειοψηφίας των αεροσκαφών από την περίοδο του Μεσοπολέμου και μετά είναι κράματα αλουμινίου, με τα γνωστά προβλήματα που αυτά παρουσιάζουν κατά τη συγκόλληση τους, η εφαρμογή ραφής συγκόλλησης επί της ρωγμής ως μέθοδος επισκευής ουδέποτε απασχόλησε σοβαρά την αεροπορική βιομηχανία. Η σύνδεση των επιθεμάτων με την προς επισκευή επιφάνεια γίνεται μέσω ήλωσης ή κοκλίωσης. Παρόλο που οι μέθοδοι αυτές μπορούν να χαρακτηριστούν σχετικά αποτελεσματικές σε αρκετές περιπτώσεις, στην πράξη αποδεικνύονται μη αποδοτικές και περιορισμένης εφαρμογής για μια σειρά από λόγους [1], οι οποίοι και παρατίθενται στη συνέχεια:

1. Η διάνοιξη των οπών πρόσδεσης εισάγει πρόσθετες περιοχές συγκέντρωσης τάσεων στην κατασκευή. Εφόσον δεχτούμε το ενδεχόμενο σφαλμάτων κατά τη διάρκεια της διάνοιξης, συχνό φαινόμενο για εφαρμογή υπό μη πλήρως ελεγχόμενες συνθήκες, οι επαγόμενες συγκεντρώσεις τάσεων γίνονται ακόμα πιο δυσμενείς, ευνοώντας την ανάπτυξη νέων ρωγμών.
2. Εφόσον η επισκευή εφαρμόζεται χωρίς την αφαίρεση του ελαττωματικού τμήματος από το αεροσκάφος, υπάρχει πάντα η πιθανότητα να προκληθούν βλάβες στην κατασκευή, για παράδειγμα στο ηλεκτρικό ή το υδραυλικό σύστημα του αεροσκάφους, ή να εισαχθούν επιβλαβή ρινίσματα στο εσωτερικό της.
3. Μη επαρκής σύσφιξη μπορεί να προκαλέσει φθορά λόγω τριβής, να ευνοήσει την ανάπτυξη ρωγμών λόγω κόπωσης, ενώ ικανές εναπομένουσες τάσεις μπορούν να ενθαρρύνουν με τη σειρά τους ρωγμάτωση λόγω διάβρωσης υπό τάση (stress-corrosion cracking, SCC).
4. Η πιθανή απώλεια ήλων (περτσινιών) ή πείρων κοκλίωσης κατά τη λειτουργία του αεροσκάφους μπορεί να προκαλέσει σημαντικές φθορές εφόσον η επισκευή εντοπίζεται πλησίον των εισαγωγών ή/και των ελίκων των κινητήρων.
5. Η εφαρμογή μεταλλικών επιθεμάτων ή ενισχύσεων μπορεί υπό προϋποθέσεις να μεταβάλει σημαντικά τη διανομή των τάσεων και να αυξήσει τις τάσεις στην ευρύτερη περιοχή της ρωγμής, ευνοώντας και πάλι την ανάπτυξη νέων ρωγμών.

Τα παραπάνω προβλήματα των παραδοσιακών μεθόδων επισκευής ώθησαν τους μηχανικούς να στραφούν στην ανάπτυξη νέων, αποτελεσματικότερων μεθόδων. Η σημαντικότερη από αυτές, η οποία έχει φτάσει πλέον στο σημείο να αντικαταστήσει σχεδόν εξ ολοκλήρου τις παραδοσιακές, είναι η εφαρμογή επιθέματος από σύνθετο υλικό, το οποίο συνδέεται με την ελαττωματική επιφάνεια μέσω ενός στρώματος συνεκτικού υλικού (κόλλας).

Πρωτοπόροι της μεθόδου θεωρούνται διεθνώς ο δόκτωρ Alan Baker και η ομάδα του. Εργαζόμενοι για τον Οργανισμό Αμυντικής Επιστήμης και Τεχνολογίας (Defense Science and Technology Organization, DSTO) του Υπουργείου Εθνικής Άμυνας της Αυστραλίας, στα εργαστήρια αεροναυτικής του Fishermans Bend, ξεκίνησαν ήδη από το 1972 να μελετούν τη μέθοδο ως τρόπο επέκτασης της επιχειρησιακής ζωής μαχητικών αεροσκαφών. Όπως αναφέρουν σε σύγγραμμά τους το 1987 [2], εντόπισαν τα προβλήματα των παραδοσιακών μεθόδων στις ιδιότητες του επιθέματος και στον τρόπο σύνδεσής του με την προς επισκευή επιφάνεια. Εξερευνώντας την εφικτότητα της χρήσης σύνθετων υλικών αντί των μεταλλικών

για την κατασκευή του επιθέματος παρατήρησαν ότι η χρήση των πρώτων παρουσιάζει τα εξής σημαντικά πλεονεκτήματα:

1. Το επίθεμα μπορεί να σχεδιαστεί έτσι ώστε να διαθέτει πολύ υψηλή ακαμψία μόνο κατά τις διευθύνσεις όπου αυτό χρειάζεται.
2. Λόγω της υψηλής ακαμψίας, (η ακαμψία ενός σύνθετου με ίνες Βορίου είναι τρεις φορές μεγαλύτερη από αυτή του αλουμινίου), το επίθεμα που προκύπτει μπορεί να είναι πολύ λεπτό, σημαντικό πλεονέκτημα για επισκευές στην εξωτερική επιφάνεια αεροσκαφών.
3. Πολύ καλή αντοχή σε κόπωση.
4. Ιδιαίτερα καλή αντοχή σε διάβρωση.
5. Εφαρμογή με ευκολία στις πλέον πολύπλοκες γεωμετρίες που μπορεί κανείς να συναντήσει σε ένα αεροσκάφος.
6. Μικρό ειδικό βάρος, χαρακτηριστικό ιδιαίτερα χρήσιμο για εφαρμογές όπου η παρουσία έκκεντρων φορτίων αποτελεί πρόβλημα (π.χ. σε έλικες κινητήρων).

Όσον αφορά τη σύνδεση του επιθέματος με την ελαττωματική επιφάνεια χρησιμοποιώντας στρώμα συνδετικού υλικού (κόλλας) συγκριτικά με τις παραδοσιακές μηχανικές μεθόδους παρατήρησαν ότι:

1. Επιτυγχάνεται πολύ αποτελεσματική μεταφορά φορτίου από το ρωγματωμένο τμήμα στο επίθεμα, χωρίς παράλληλα να εισάγονται νέα σημεία συγκέντρωσης τάσεων στην κατασκευή.
2. Αποτρέπεται η φθορά της περιβάλλουσας κατασκευής κατά την εφαρμογή του επιθέματος ή την αφαίρεση του αν αυτό κριθεί αναγκαίο.
3. Στεγανοποιείται πλήρως η ελαττωματική επιφάνεια, μειώνοντας την πιθανότητα εμφάνισης διάβρωσης διαχωριστικών επιφανειών (crevice corrosion) και τον κίνδυνο διαρροής (π.χ. από μια δεξαμενή καυσίμου).

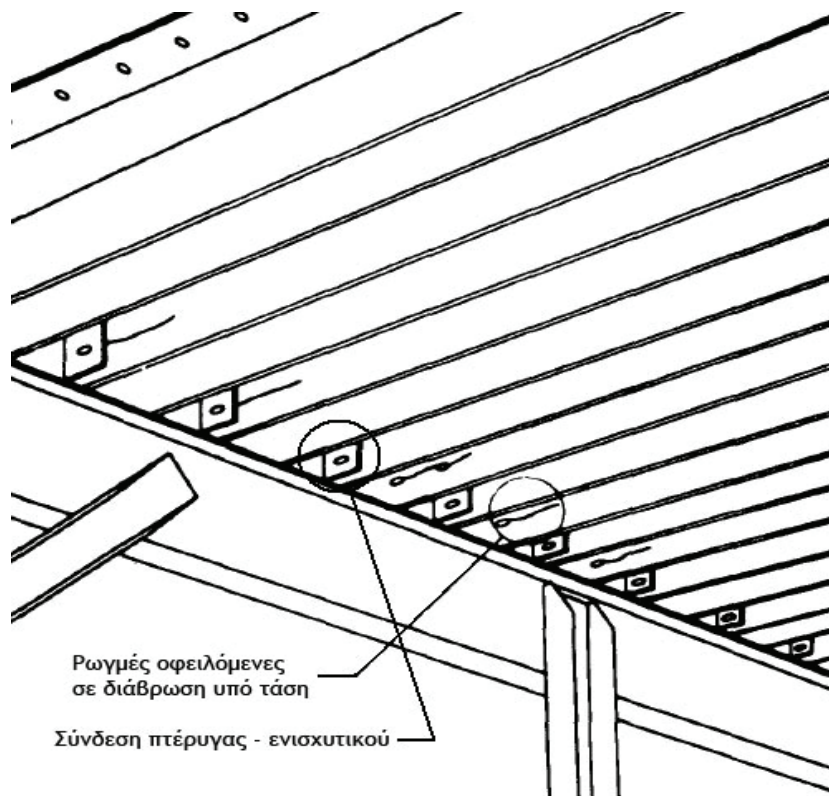
Η πρώτη -πειραματική- εφαρμογή της μεθόδου [1] πραγματοποιήθηκε περί τα μέσα της δεκαετίας του 1970 σε στρατιωτικό μεταγωγικό αεροσκάφος Lockheed Martin C-130A Hercules κατασκευής 1958 της Αυστραλιανής Πολεμικής Αεροπορίας (Royal Australian Air Force, RAAF). Το αεροσκάφος αντιμετώπιζε πρόβλημα στα εγκάρσια ενισχυτικά της οροφής της ατράκτου που αποτελούν μέρος της κεντρικής πτέρυγας.

Συγκεκριμένα παρατηρήθηκε η ανάπτυξη ρωγμής κατά μήκος αρκετών εκ των ενισχυτικών, με συνηθέστερο σημείο εκκίνησης τις οπές κοχλίωσης αυτών (Σχήμα 1.4). Το υλικό των ενισχυτικών ήταν το κράμα αλουμινίου 7075T6. Η παραδοσιακή μέθοδος επισκευής θα ήταν η κοχλίωση μεταλλικού υπερείσματος (αγκώνα) επί της απόφυσης του ενισχυτικού εφόσον η ρωγή ξεπερνούσε ένα ορισμένο μήκος. Η μέθοδος αυτή είναι ταυτόχρονα δαπανηρή και χρονοβόρα.

Εφόσον η επισκευή/ενίσχυση θα είχε ως στόχο την επαναφορά του ενισχυτικού στην αρχική του αντοχή έναντι λυγισμού, αποφασίστηκε να πραγματοποιηθούν δοκιμές θλίψης σε αντίγραφο της προβληματικής περιοχής της πτέρυγας. Τα ενισχυτικά του πρώτου δοκιμίου

ήταν ακέραια, του δεύτερου έφεραν ρωγμή ενώ του τρίτου έφεραν ρωγμή επικαλυμμένη με επίθεμα σύνθετου υλικού ινών Βορίου πάχους 0,6 χιλιοστών.

Τα αποτελέσματα της δοκιμής έδειξαν ότι η παρουσία των ρωγμών στο δεύτερο δοκίμιο υποβάθμισε σημαντικά την αντοχή της κατασκευής σε λυγισμό, ενώ το πρώτο με το τρίτο παρουσίασαν παρεμφερή συμπεριφορά λυγισμού. Οι μορφές των δύο δοκιμών, του ακέραιου και του επισκευασμένου με επίθεμα σύνθετου υλικού, μετά την εμφάνιση πλαστικού λυγισμού ήταν σχεδόν πανομοιότυπες. Η συμπεριφορά αυτή επιδεικνύει ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα των επιθεμάτων από σύνθετο υλικό, όπου η χαμηλή εγκάρσια ακαμψία ελαχιστοποιεί ταυτόχρονα τις τοπικές συγκεντρώσεις τάσεων στα άκρα του επιθέματος και τις διατμητικές τάσεις στο στρώμα της κόλλας.



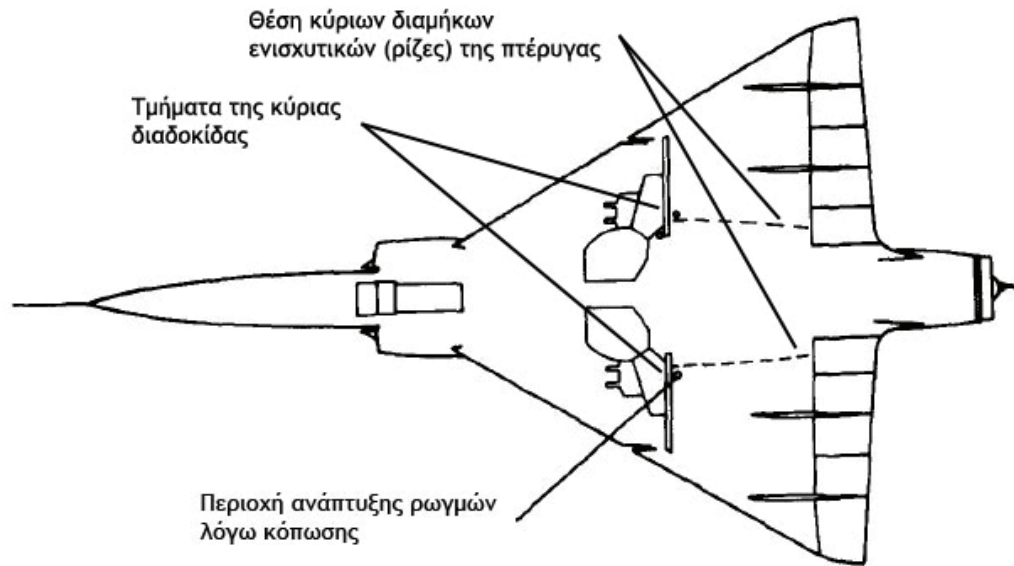
Σχήμα 1.4

Άποψη του κάτω μέρους της πτέρυγας αεροσκάφους C-130A όπου φαίνεται η τυπική θέση ανάπτυξης ρωγμών λόγω διάβρωσης υπό τάση.

Την ολοκλήρωση των πειραμάτων ακολούθησε η επισκευή μεγάλου αριθμού ρωγμών στα ενισχυτικά της κύριας πτέρυγας αεροσκαφών εν ενεργεία. Αναφέρεται χαρακτηριστικά ότι μέχρι το 1984, δέκα περίπου χρόνια μετά την πρώτη, πιλοτική εφαρμογή της μεθόδου, αυτή είχε πλέον υιοθετηθεί και πιστοποιηθεί από τη RAAF ως η τυπική διαδικασία επισκευής του συγκεκριμένου προβλήματος, ενώ είχε εφαρμοστεί σε περισσότερες από 300 περιπτώσεις χωρίς να παρατηρηθεί ουσιαστική αύξηση του μήκους της ρωγμής σε κάποια από αυτές [1]. Άξιο λόγου είναι επίσης το ότι, όπως μαθαίνουμε από την επίσημη ιστοσελίδα του DTSO, ο τύπος του αεροσκάφους εξακολουθεί να βρίσκεται μέχρι σήμερα σε υπηρεσία (αν και η

υποέκδοση -Α έχει πλέον αποσυρθεί) χωρίς να έχει υπάρξει κάποια αναθεώρηση της διαδικασίας, δείγμα της αποτελεσματικότητας της μεθόδου.

Στις αρχές της δεκαετίας του 1980 η ίδια ομάδα προχώρησε στη μελέτη και διεκπεραίωση μιας ιδιαίτερα απαιτητικής για τα δεδομένα της εποχής επισκευής [1]. Το πρόβλημα έγκειτο στην ανάπτυξη ρωγμών λόγω κόπωσης στο κάτω μέρος των πτερύγων (Σχήμα 1.5) μαχητικού αεροσκάφους Dassault Mirage IIIΟ, σε μια ευαίσθητη περιοχή επί του οχετού απόρριψης καυσίμου και μάλιστα στην άμεση εγγύτητα της κεντρικής διαδοκίδας της πτέρυγας.



Σχήμα 1.5

Απεικόνιση του αεροσκάφους όπου διακρίνεται η προβληματική περιοχή.

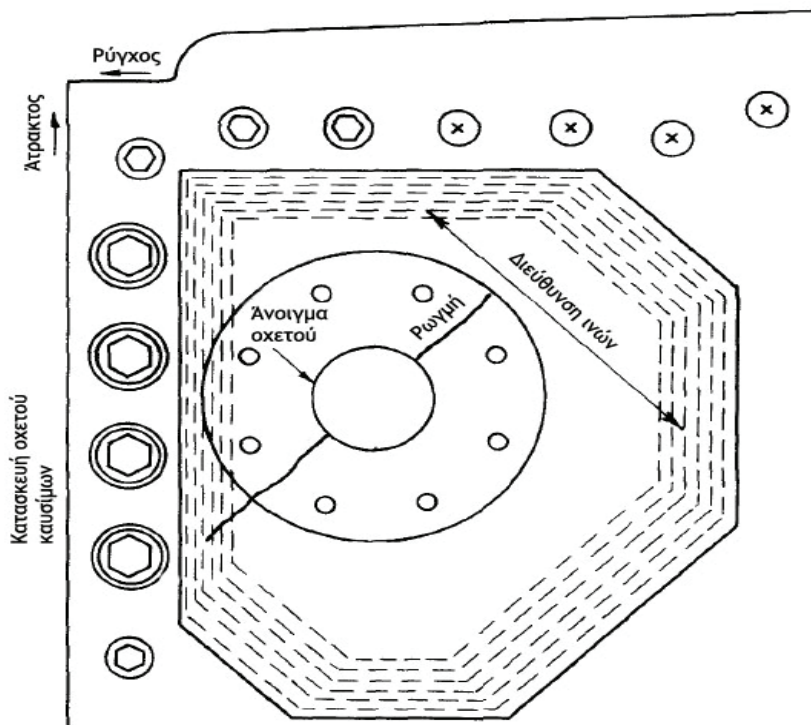
Η μέθοδος επιλέχθηκε καθώς εκτιμήθηκε ότι θα μπορούσε να προσφέρει τα εξής σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των συμβατικών:

1. Αποφυγή της μηχανικής φθοράς που θα προκαλούσε η διάνοιξη οπών στην ευαίσθητη αυτή περιοχή της πτέρυγας.
2. Αποφυγή της αύξησης των τάσεων στην κεντρική διαδοκίδα της πτέρυγας, καθώς η ακαμψία του επιθέματος θα σχεδιαζόταν μεγάλη μόνο κατά την επιθυμητή διεύθυνση.
3. Δυνατότητα χρήσης συμβατικών δινορρευμάτων για τον έλεγχο της επέκτασης της ρωγμής λόγω της κακής ηλεκτρικής αγωγιμότητας του επιθέματος.
4. Η εφαρμογή της επισκευής θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί με λίγα μέσα επί τόπου στις εγκαταστάσεις της επιχειρησιακής μονάδας του αεροσκάφους.

Η υψηλή επικινδυνότητα του προβλήματος σε συνδυασμό με την επιζητούμενη μεγάλη διάρκεια ζωής της επισκευής οδήγησε την ομάδα του Baker να πραγματοποιήσει εκτεταμένες μελέτες σχεδίασης και σημαντική έρευνα και ανάπτυξη προτού εκτελεστεί η επισκευή.

Σημείο εκκίνησης των ρωγμών ήταν το ακροφύσιο του οχετού απόρριψης καυσίμων ακριβώς πίσω από την κεντρική διαδοκίδα της πτέρυγας και πολύ κοντά στο κύριο διάμηκες

ενισχυτικό της (ρίζα της πτέρυγας). Η επιφάνεια της πτέρυγας, από κράμα αλουμινίου AU4SG υπόκειται στην περιοχή αυτή σε διάτμηση, με αποτέλεσμα την επέκταση των ρωγμών υπό γωνία 45° μοιρών σε σχέση με τη διεύθυνση της διαδοκίδας. Ως βέλτιστη λύση επιλέχθηκε μονοαξονικό σύνθετο υλικό από ίνες Βορίου ώστε λόγω της υψηλής ακαμψίας των ινών το επίθεμα που θα προέκυπτε να ήταν πολύ λεπτό. Η διεύθυνση των ινών σχεδιάστηκε κάθετη στη διεύθυνση της πορείας επέκτασης της ρωγμής ώστε να παραλαμβάνουν αποτελεσματικά το διατμητικό φορτίο. Για την επίτευξη της επιθυμητής ακαμψίας το επίθεμα αποτελείτο από επτά στρώσεις υλικού. Κάθε στρώση είχε διαφορετικό μέγεθος, έτσι ώστε κάθε εξωτερική στρώση να υπερκαλύπτει τις εσωτερικές της (tapering), με στόχο τον περιορισμό των διαστρωματικών διατμητικών τάσεων. Η μορφή του επιθέματος καθώς και η μορφολογία της περιοχής προς επισκευή παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.6.



Σχήμα 1.6

Απεικόνιση της ολοκληρωμένης επισκευής.

Για τη μελέτη της μεθόδου χρησιμοποιήθηκε μέθοδος ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία. Οι κύριοι στόχοι της μελέτης ήταν να εκτιμηθεί η μείωση του εντατικού πεδίου στην πτέρυγα, να αποκαλυφθεί η όποια τυχόν αύξηση τάσεων στη διαδοκίδα και να υπολογιστούν οι μέγιστες τιμές των τάσεων που θα αναπτύσσονται στο επίθεμα και στη στρώση της κόλλας. Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν ότι μπορούσε να επιτευχθεί ικανοποιητική μείωση του εντατικού πεδίου στην πτέρυγα χωρίς να υπερβαίνεται η αντοχή των υλικών. Ως πλέον

κρίσιμη παράμετρος της επισκευής εντοπίστηκε η αντοχή του στρώματος της κόλλας σε κόπωση υπό διάτμηση.

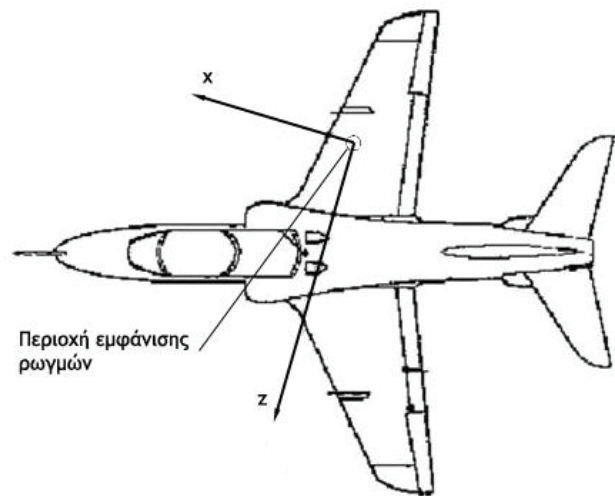
Η επισκευή πιστοποιήθηκε μετά από δύο σειρές πειραματικών δοκιμών. Η πρώτη αφορούσε την εφαρμογή επιθέματος επί αεροσκάφους χωρίς ρωγμή ώστε να επιβεβαιωθεί η αμελητέα επιδείνωση του εντατικού πεδίου στην κεντρική διαδοκίδα της πτέρυγας, ενώ η δεύτερη αφορούσε δοκιμές κόπωσης της επισκευής επί ρωγματωμένων δοκιμών που εξομοίωναν την περιοχή της επισκευής, ώστε να ελεγχθεί η πραγματική μείωση της έντασης των τάσεων και η αντοχή της επισκευής σε κόπωση. Τα αποτελέσματα των δοκιμών ήταν ικανοποιητικά με αποτέλεσμα η επισκευή να εκτελεστεί άμεσα και το αεροσκάφος να δοθεί σε χρήση χωρίς περιορισμούς και τροποποιήσεις στο φάκελο λειτουργίας του. Ακολούθησε η εφαρμογή της επισκευής στο σύνολο του στόλου ως προληπτικό μέτρο ενίσχυσης της συγκεκριμένης προβληματικής κατά τα φαινόμενα περιοχής της πτέρυγας.

Μια άλλη ενδιαφέρουσα περίπτωση εφαρμογής της μεθόδου [3] εκπονήθηκε το 2002 από τις εταιρίες VTT Industries και Patria Aviation Oy με έδρα τη Φινλανδία, σε συνεργασία με την πολεμική αεροπορία της Φινλανδίας (Finnish Air Force, FiAF). Η FiAF διαθέτει και αξιοποιεί επιχειρησιακά από τις αρχές τις δεκαετίας του 1980 περί τα 60 αεροσκάφη BAe Hawk Mk.51/51A σε ρόλο εκπαιδευτικού/ελαφρού μαχητικού. Καθώς ο στόλος αρχίζει να γηράσκει χωρίς να είναι ορατή η προοπτική αντικατάστασής του, στελέχη της FiAF εκδήλωσαν την ανησυχία τους σχετικά με το πρόβλημα της κόπωσης της δομής του αεροσκάφους, το οποίο είχε ήδη κάνει την εμφάνιση του, με τη μορφή εμφάνισης ρωγμών σε σημεία της πτέρυγας, και το οποίο αναμενόταν να ενταθεί με τη συνεχιζόμενη χρήση του τύπου. Ένα από τα μέτρα αντιμετώπισης του προβλήματος που υιοθέτησε η FiAF ήταν η ανάθεση στην VTT Industries ενός προγράμματος καταμέτρησης των επιχειρησιακών φορτίσεων του αεροσκάφους (Operational Loads Measurement, OLM). Στα πλαίσια του προγράμματος, τοποθετήθηκαν επιμηκυνσιόμετρα σε περισσότερα από πενήντα σημεία εντός κρίσιμων περιοχών φόρτισης σε δύο αεροσκάφη Mk.51 εν υπηρεσία. Η ανάλυση και αξιοποίηση των δεδομένων που προέκυψαν αποδείχθηκε ιδιαίτερα επίπονη, καθώς το μεγάλο εύρος των αποστολών που καλούνται να εκπληρώσουν τα συγκεκριμένα αεροσκάφη, όπως είναι οι προσομοιώσεις βομβαρδισμού, η πτήση με μεγάλες ταχύτητες σε χαμηλά ύψη και η εκπαίδευση σε συνθήκες ολικής και μερικής απώλειας στήριξης, μεταξύ άλλων, είχε σαν αποτέλεσμα τη μεγάλη πολυπλοκότητα και διαφοροποίηση των φορτίσεων.

Η μελέτη κατέληξε στο ότι οι δυσμενέστερες περιοχές φόρτισης, όπου η ανάπτυξη ρωγμών λόγω κόπωσης είναι πιο πιθανό να εμφανιστεί, βρίσκονται σε τμήματα των πτερύγων και του ουραίου κάθετου σταθερού. Εκεί αναπτύσσονται έντονες διατμητικές τάσεις, καμπτικές και στρεπτικές ροπές που οφείλονται σε δυνάμεις αδράνειας και στις μεταβολές της πίεσης του αέρα επί αυτών. Το μεγαλύτερο μέρος αυτών των φορτίων φέρονται από μια σύνθετη κατασκευή πολλαπλών εγκάρσιων (διαδοκίδες, spars) και διαμήκων (νεύρα, ribs) ενισχυτικών.

Μετά την ανάλυση των μετρήσεων, το ενδιαφέρον εστιάστηκε σε μία περιοχή της εξωτερικής επιφάνειας της πτέρυγας (Σχήμα 1.7) όπου είχε ήδη παρουσιαστεί ανάπτυξη ρωγμών σε ορισμένα αεροσκάφη, μήκους έξι έως ενενήντα χιλιοστών, μετά από σχετικά λίγες

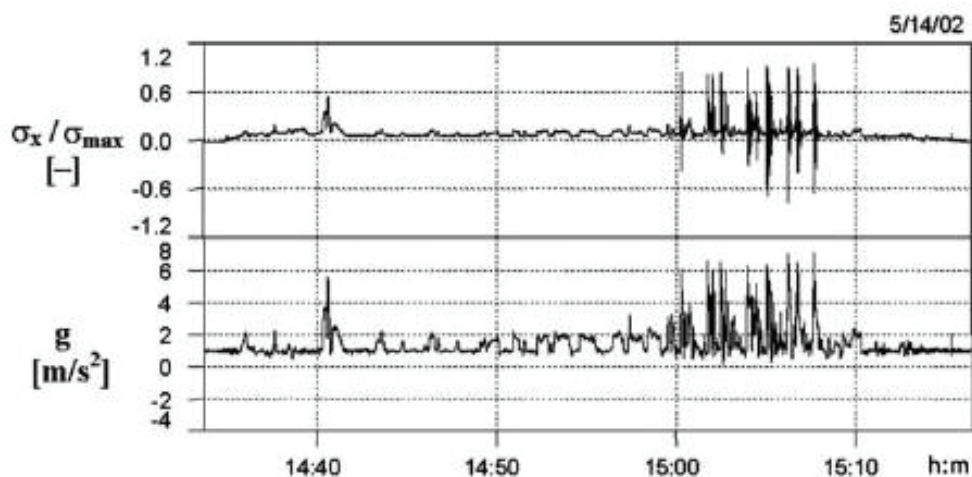
ώρες πτήσης της τάξης των δύο με τεσσάρων χιλιάδων ωρών. Στην περιοχή αυτή είχε τοποθετηθεί επιμηκνισιόμετρο στα πλαίσια του OLM.



Σχήμα 1.7

Αεροσκάφος BAe Hawk Mk.51

Από μελέτη των μετρήσεων έγινε φανερό ότι η κύρια αιτία της κόπωσης στην περιοχή ήταν η υποβολή της σε ισχυρά και υψίσυχνα δυναμικά φορτία. Αυτό φαίνεται στο Σχήμα 1.8, όπου παρουσιάζεται η φόρτιση του σημείου όπως αυτή εξήχθη από τα δεδομένα του επιμηκνισιόμετρου μετά από μια τυπική πτήση του αεροσκάφους. Η τάση σ_x του σχήματος είναι η ορθή τάση ως προς τον άξονα x του τοπικού συστήματος συντεταγμένων, όπως αυτό ορίστηκε στο προηγούμενο Σχήμα 1.7, και ταυτίζεται με τη διεύθυνση μέτρησης του επιμηκνισιόμετρου.

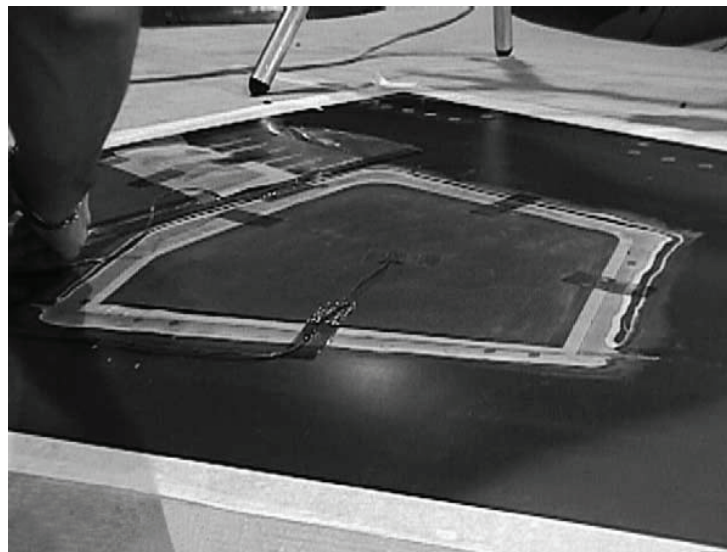


Σχήμα 1.8

Χρονική μεταβολή της φόρτισης σε περιοχή της πτέρυγας κατά τη διάρκεια μιας τυπικής πτήσης.

Τα αποτελέσματα του προγράμματος OLM για την περιοχή αυτή της πτέρυγας συνδυάστηκαν στη συνέχεια με άλλες μετρήσεις και στοιχεία μελετών με πεπερασμένα στοιχεία, συνθέτοντας μια ακριβή εικόνα της τρισδιάστατης εντατικής κατάστασης στην περιοχή. Το προκύπτον συμπέρασμα ήταν ότι οι τάσεις που αναπτύσσονται στην επιφάνεια της πτέρυγας λόγω των δυναμικών φορτίσεων υπερέβαιναν σε αρκετές περιπτώσεις την μέγιστη τάση ασφαλείας, χωρίς να διευκρινίζεται από τη δημοσίευση της μελέτης αν αυτό οφείλεται σε σχεδιαστική αδυναμία ή άλλα αίτια. Μας γνωρίζεται όμως ότι λήφθηκε άμεσα η απόφαση ενίσχυσης της πτέρυγας ώστε να μειωθούν οι τάσεις στα προβλεπόμενα ασφαλή επίπεδα και να αποφευχθούν μελλοντικές αστοχίες. Η απόφαση αφορούσε την εκτέλεση των απαιτούμενων εργασιών στο σύνολο των αεροσκαφών του στόλου.

Τη μελέτη και εκτέλεση της ενίσχυσης ανέλαβε η εταιρία Patria Aviation Oy. Η εταιρία έκρινε ως βέλτιστη λύση την εφαρμογή τριών γεωμετρικά διακριτών επιθεμάτων σύνθετου υλικού επί της πτέρυγας. Η ενίσχυση αφορούσε την μείωση των τάσεων συνολικά στην πτέρυγα. Τα δύο επιθέματα εστίαζαν στην επισκευή περιοχών όπου είχαν ήδη εμφανιστεί ρωγμές σε αεροσκάφη και ήταν ικανά να αντιμετωπίσουν ρωγμές μήκους μέχρι εκατόν είκοσι χιλιοστών. Το τρίτο επίθεμα σχεδιάστηκε ώστε να ομαλοποιεί το εντατικό πεδίο σε όλη την πτέρυγα. Τα επιθέματα αποτελούνταν από ίνες άνθρακα σε μήτρα εποξικής ρητίνης. Στο παρακάτω Σχήμα 1.9 είναι ορατή η διάταξη των επιθεμάτων και ο τρόπος εφαρμογής τους.



Σχήμα 1.9

Εφαρμογή των επιθεμάτων επί της πτέρυγας.

Η επισκευή εκτιμάται ότι προσέφερε σημαντικά οικονομικά οφέλη στην FiAF, καθώς μείωσε σε μεγάλο βαθμό την πιθανότητα εμφάνισης ρωγμών λόγω κόπωσης επί της πτέρυγας. Στο χρονικό διάστημα που μεσολάβησε από την ολοκλήρωση της επισκευής έως τη δημοσίευση της μελέτης (περί τα τρία χρόνια) δεν παρατηρήθηκε η ανάπτυξη νέων ρωγμών ή η ουσιαστική επέκταση παλαιών σε κάποιο από τα αεροσκάφη.

1.3.2 ΜΕΛΕΤΕΣ ΕΦΙΚΤΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕ ΝΑΥΠΗΓΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ

Η πρώτη καταγεγραμμένη εφαρμογή της μεθόδου στη ναυτιλία [4] εντοπίζεται το 1982 σε πλοία του πολεμικού ναυτικού της Μεγάλης Βρετανίας (Royal Navy, RN), φρεγάτες τύπου 21, κλάσης Amazon (Σχήμα 1.10). Το μήκος του τύπου φτάνει τα 117 μέτρα (L_{0A}) και το μέγιστο εκτόπισμα τους 3,360 τόνους.

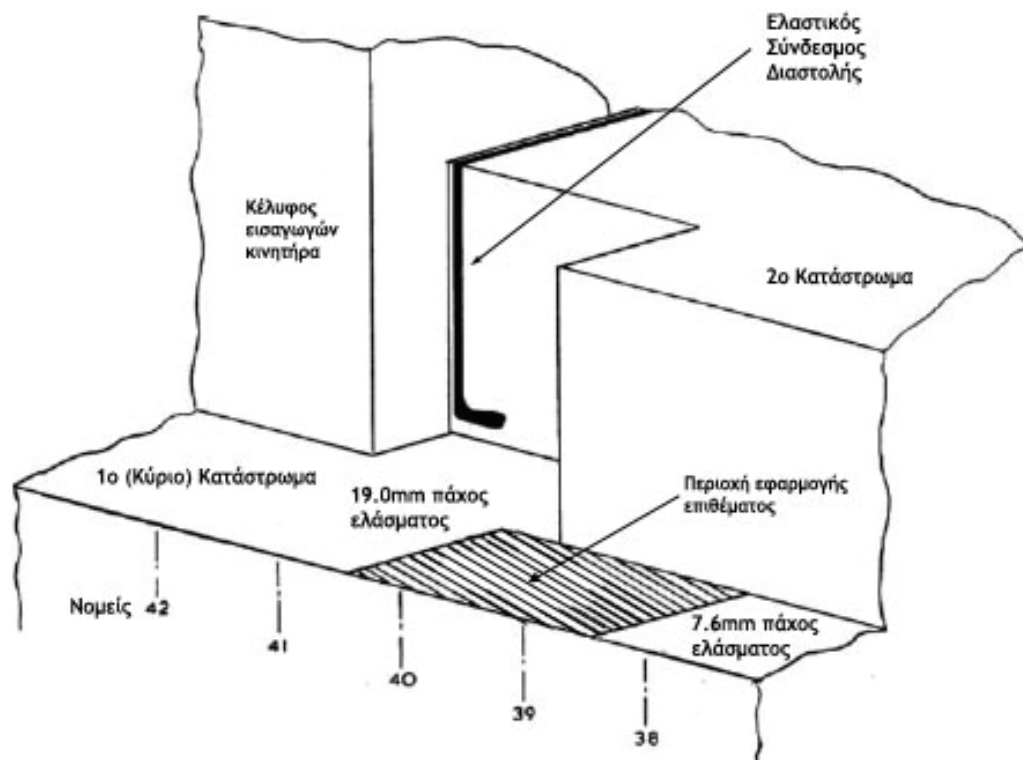


Σχήμα 1.10

Το HMS Amazon, πρώτο της κλάσης, κατασκευής 1969.

Αμέσως μετά τον πόλεμο των Falklands τα έξι εναπομείναντα πλοία της κλάσης (τα HMS Antelope και HMS Ardent βυθίστηκαν από αεροσκάφη της Αργεντινής το Μάιο του 1982) εμφάνισαν εκτεταμένα προβλήματα ανάπτυξης ρωγμών λόγω κόπωσης στα ελάσματα του κύριου καταστρώματος. Το κύριο κατάστρωμα είναι κατασκευασμένο από κράμα αλουμινίου, σε αντίθεση με τη γάστρα, που είναι χαλύβδινη. Στην πλειοψηφία τους τα προβλήματα εκτιμήθηκε ότι οφείλονταν στις ιδιαίτερα σκληρές καιρικές συνθήκες που συνάντησαν τα πλοία στο Νότιο Ατλαντικό κατά τη διάρκεια του πολέμου και οι οποίες δεν είχαν ληφθεί υπόψη κατά τη σχεδίαση της κλάσης. Να σημειωθεί ότι η κλάση ήταν η πρώτη στην ιστορία του RN που σχεδιάστηκε και ναυπηγήθηκε από ιδιωτική εταιρία, συγκεκριμένα από την κοινοπραξία των ναυπηγείων Vosper Thornycroft και Yarrow. Σε πρώτη φάση εκτελέστηκαν διάφορες ανεπιτυχείς προσπάθειες επισκευής με εφαρμογή ραφών συγκόλλησης επί των ρωγμών οι οποίες κατέληξαν σε αστοχία των συγκολλήσεων σε σύντομο χρόνο. Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε με σχετικά ικανοποιητικά αποτελέσματα η μέθοδος επισκευής με εφαρμογή μεταλλικού επιθέματος, συγκεκριμένα κοινού ναυπηγικού χάλυβα. Μια περιοχή της κατασκευής όμως επί του κύριου καταστρώματος όπου το πρόβλημα ήταν έντονο, δεν κατέστη δυνατόν να επισκευαστεί με την παραπάνω μέθοδο. Η περιοχή αυτή ήταν το σημείο σύνδεσης δύο τμημάτων του καταστρώματος με διαφορετικό πάχος ελάσματος (Σχήμα 1.11). Η έναρξη των ρωγμών εντοπίστηκε στη ραφή της συγκόλλησης που συνέδεε τα δύο ελάσματα. Η μέθοδος απέτυχε καθώς το σχετικά άκαμπτο χαλύβδινο επίθεμα αποδείχτηκε δύσκολο να

ακολουθήσει την αλλαγή γεωμετρίας στην περιοχή (σκαλοπάτι) με αποτέλεσμα να αναζητηθούν εναλλακτικές μέθοδοι επισκευής. Το πρόβλημα κλήθηκε να αντιμετωπίσει το ίδρυμα ερευνών του πολεμικού ναυτικού της Μεγάλης Βρετανίας (Admiralty Research Establishment, ARE). Δεδομένων των συνθηκών και παρά την απουσία πρότερης εμπειρίας η μέθοδος επισκευής με εφαρμογή επιθέματος σύνθετου υλικού προκρίθηκε ως η βέλτιστη λύση. Το υλικό που επιλέχθηκε για το επίθεμα ήταν σύνθετο υλικό εποξικής ρητίνης με ενίσχυση ινών άνθρακα. Η υψηλή ειδική αντοχή και ακαμψία των ινών άνθρακα συνεπάγονταν μικρό πάχος επιθέματος, ενώ η ευκαμψία του υλικού πριν τον πολυμερισμό εξασφάλιζε την ικανότητα της μεθόδου να ανταπεξέλθει στην ιδιαίτερη γεωμετρία της περιοχής.



Σχήμα 1.11

Απεικόνιση της περιοχής εφαρμογής της επισκευής.

Το πρώτο πλοίο που επισκευάστηκε με αυτόν τον τρόπο ήταν το HMS Active, κατασκευής 1971. Ρωγμή μήκους 500mm είχε εντοπιστεί επί της ραφής συγκόλλησης στο σημείο της ένωσης των διαφορετικού πάχους ελασμάτων. Η ρωγμή αυτή επισκευάστηκε αρχικά με ανανέωση της συγκόλλησης και στη συνέχεια εφαρμόστηκαν και στις δύο πλευρές του καταστρώματος επιθέματα εποξικής ρητίνης/ανθρακονημάτων. Τα επιθέματα είχαν διαστάσεις 2.4 x 1.0 μέτρα και πάχους 5 mm και τοποθετήθηκαν από ένα σε κάθε πλευρά στην περιοχή που φαίνεται στο παραπάνω Σχήμα 1.11. Η επισκευή του πρώτου πλοίου κρίθηκε επιτυχής και στη συνέχεια εφαρμόστηκε στα υπόλοιπα έξι πλοία της κλάσης. Η μέθοδος εφαρμόστηκε προληπτικά, ανεξάρτητα δηλαδή από το αν είχαν εμφανιστεί ή όχι ρωγμές επί των πλοίων. Στις αρχές της δεκαετίας του 1990 όλα τα πλοία της κλάσης παροπλίστηκαν σταδιακά και το 1993 πωλήθηκαν στο πολεμικό ναυτικό του Πακιστάν. Μέχρι τη στιγμή της πώλησης δεν είχε

παρατηρηθεί ανάπτυξη νέων ρωγμών ή επέκταση των ήδη υπαρχόντων στις περιοχές όπου εφαρμόστηκαν τα επιθέματα σύνθετου υλικού σε κανένα από τα έξι πλοία. Η μέθοδος επισκευής με επιθέματα σύνθετου υλικού αποδείχτηκε σε αυτήν την πρώτη της καταγεγραμμένη εφαρμογή ως ιδιαίτερα αποτελεσματική και ανθεκτική, επιδεικνύοντας άψογη λειτουργία επί τουλάχιστον δέκα έτη υπό επιχειρησιακές συνθήκες.

Η αμέσως επόμενη άξια λόγου εφαρμογή της μεθόδου που συναντάται στη βιβλιογραφία [5] [6] εντοπίζεται το 1993 και αφορά την επισκευή των φρεγατών κατευθυνόμενων βλημάτων κλάσης Adelaide του πολεμικού ναυτικού της Αυστραλίας (Royal Australian Navy, RAN). Το RAN διαθέτει στις τάξεις του από τις αρχές της δεκαετίας του 1980 έξι φρεγάτες κλάσης Adelaide, Σχήμα 1.12. Η κλάση είναι η έκδοση εξαγωγής της αντίστοιχης κλάσης Oliver Hazard Perry του πολεμικού ναυτικού των Ηνωμένων Πολιτειών (United States Navy, USN), σχεδίαση του ναυπηγικού γραφείου Gibbs & Cox. Το μήκος των πλοίων φτάνει τα 139 μέτρα (L_{OA}) και το μέγιστο εκτόπισμα τους 4,100 τόνους. Τα πλοία διαθέτουν χαλύβδινη γάστρα και υπερκατασκευή από κράμα αλουμινίου.

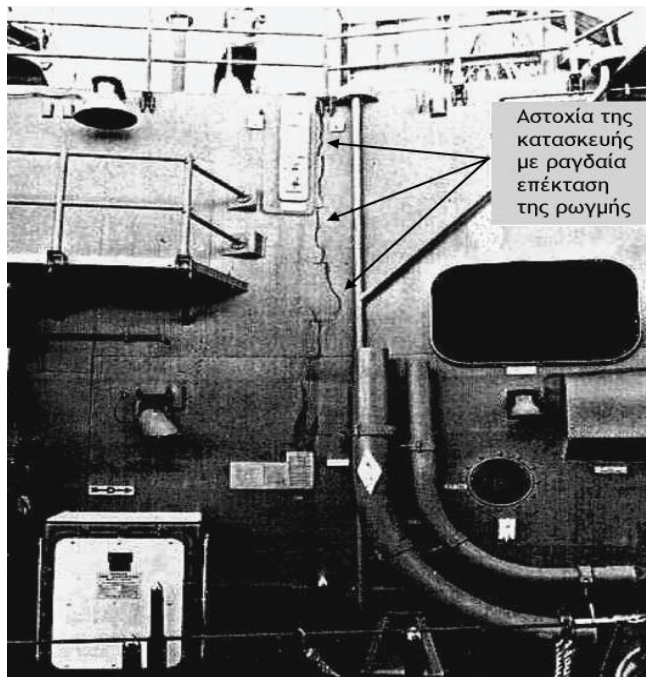


Σχήμα 1.12

Το HMAS Sydney, κατασκευής 1983, που απεικονίζεται εδώ εν πλω, ήταν το πρώτο πλοίο της κλάσης που δέχτηκε την επισκευή.

Στις αρχές της δεκαετίας του 1990 παρατηρήθηκαν προβλήματα ανάπτυξης ρωγμών στις υπερκατασκευές του συνόλου των πλοίων της κλάσης. Ιδιαίτερα προβληματική αποδείχτηκε η περιοχή γύρω από μία εγκάρσια ραφή συγκόλλησης επί του δεύτερου καταστρώματος, κοντά στο μέσο του πλοίου. Μελέτες που πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια πεπερασμένων στοιχείων έδειξαν έντονη τοπική επιδείνωση του εντατικού πεδίου, ως αποτέλεσμα της αλλαγής γεωμετρίας στην περιοχή. Σε μία περίπτωση μάλιστα, υπό ιδιαίτερα δυσμενείς καιρικές συνθήκες, σημειώθηκε μεγάλης έκτασης αστοχία στην κατασκευή, Σχήμα 1.13, αναγκάζοντας το RAN να λάβει επείγοντως μέτρα αντιμετώπισης του προβλήματος. Παρά τις

συμβατικές μεθόδους επισκευής που εφαρμόστηκαν άμεσα και σε συνεργασία με το USN, όπως η εφαρμογή μεταλλικών επιθεμάτων και η προσπάθεια μεταβολής της γεωμετρίας της περιοχής, η ανάπτυξη νέων ρωγμών και η επέκταση των παλαιών δεν ήταν δυνατόν να αντιμετωπιστεί ουσιαστικά.



Σχήμα 1.13

Μεγάλης κλίμακας αστοχία στην υπερκατασκευή φρεγάτας κλάσης Adelaide.

Έτσι το RAN απευθύνθηκε στον DSTO για την εύρεση μιας εναλλακτικής και αποτελεσματικής λύσης του προβλήματος. Οι μελέτες που πραγματοποίησε ο DSTO οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι για να περιοριστεί το πρόβλημα οι ορθές διαμήκειες τάσεις στην περιοχή θα έπρεπε να μειωθούν κατά τουλάχιστον 20 με 25 τις εκατό. Ο οργανισμός μετά από ενδελεχή μελέτη του εντατικού πεδίου στην περιοχή και έχοντας στο ενεργητικό του την εμπειρία από την ανάπτυξη και χρήση της μεθόδου σε αεροσκάφη, έκρινε ως βέλτιστη λύση τη χρήση επιθεμάτων σύνθετου υλικού για τον περιορισμό των τάσεων επί του καταστρώματος.

Ως υλικό ενίσχυσης επιλέχτηκαν μονοαξονικές ίνες άνθρακα. Το επίθεμα που σχεδιάστηκε είχε 5 μέτρα μήκος, 1 μέτρο πλάτος και 7 χιλιοστά πάχος, αποτελούμενο από 25 στρώσεις ανθρακονημάτων βάρους 300 gr/m². Ως μήτρα του σύνθετου χρησιμοποιήθηκε βινυλεστερική ρητίνη, αφού αυτή εκτιμήθηκε ότι προσφέρει επαρκή αντοχή σε συνδυασμό με συμβατά χαρακτηριστικά θερμικής διαστολής με το κράμα αλουμινίου του καταστρώματος. Ελλείπει κατάλληλων προϊόντων στην αγορά το υλικό του στρώματος της κόλλας αναπτύχθηκε από το DSTO με γνώμονα τη δυνατή και ανθεκτική κόλληση καθώς και τη συμβατότητά του με τη βινυλεστερική ρητίνη του επιθέματος, χωρίς όμως να δημοσιεύονται λεπτομέρειες για τη σύστασή του. Καθώς η προς επισκευή περιοχή αποτελεί ουσιαστικά τμήμα ενός διαδρόμου του πλοίου, η σχεδίαση περιελάμβανε την εφαρμογή ενός δεύτερου λεπτού επιθέματος με ενίσχυση υαλονημάτων και βινυλεστερική ρητίνη, εξωτερικά του κύριου επιθέματος, με στόχο την προστασία της επισκευής από τις εργασίες του πληρώματος.

Η εκτέλεση της επισκευής πραγματοποιήθηκε την άνοιξη του 1993 στο τρίτο πλοίο της κλάσης, το HMAS Sydney, κατασκευής 1983. Οι περιοχές (συμμετρικά στις δύο πλευρές του πλοίου) που θα δεχόντουσαν την επισκευή είχαν προηγουμένως καθαριστεί με αμμοβολή. Ο αρχικός πολυμερισμός καθενός από τα τρία τμήματα της επισκευής, δηλαδή του στρώματος της κόλλας, του κύριου επιθέματος με ανθρακονήματα και του δευτερεύοντος με υαλονήματα πραγματοποιήθηκε διαδοχικά μετά την τοποθέτηση καθενός από αυτά επί του καταστρώματος. Ο εμποτισμός του κύριου επιθέματος με ρητίνη εκτελέστηκε με τη μέθοδο έκχυσης υπό κενό. Για να επιτευχθεί η μεγαλύτερη δυνατή αντοχή στη σύνδεση μεταξύ του επιθέματος και του ελάσματος αλουμινίου εκτελέστηκε στη συνέχεια πολυμερισμός σε δεύτερο χρόνο (postcure), εφαρμόζοντας ηλεκτρική τάση στα άκρα του κύριου επιθέματος (μέθοδος παροχής θερμότητας Joule). Η επαγόμενη θέρμανση από την ηλεκτρική ροή στις ίνες του άνθρακα προσέφερε 2.5 kW ενέργειας στην κατασκευή, κρατώντας σταθερή τη θερμοκρασία της κόλλας και του επιθέματος στους 75.8 °C, κατάλληλη θερμοκρασία για την ομαλή ολοκλήρωση των αντιδράσεων πολυμερισμού στο στρώμα της κόλλας και το κύριο επίθεμα. Η προστασία της επισκευής ολοκληρώθηκε με την εφαρμογή δύο στρώσεων εποξικού επιχρίσματος (αστάρι - primer), την κόλληση αντιολισθητικού ελαστικού στην επιφάνεια και τελικά τη βαφή της περιοχής με δύο στρώσεις ναυτικού χρώματος. Το αποτέλεσμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.14.



Σχήμα 1.14

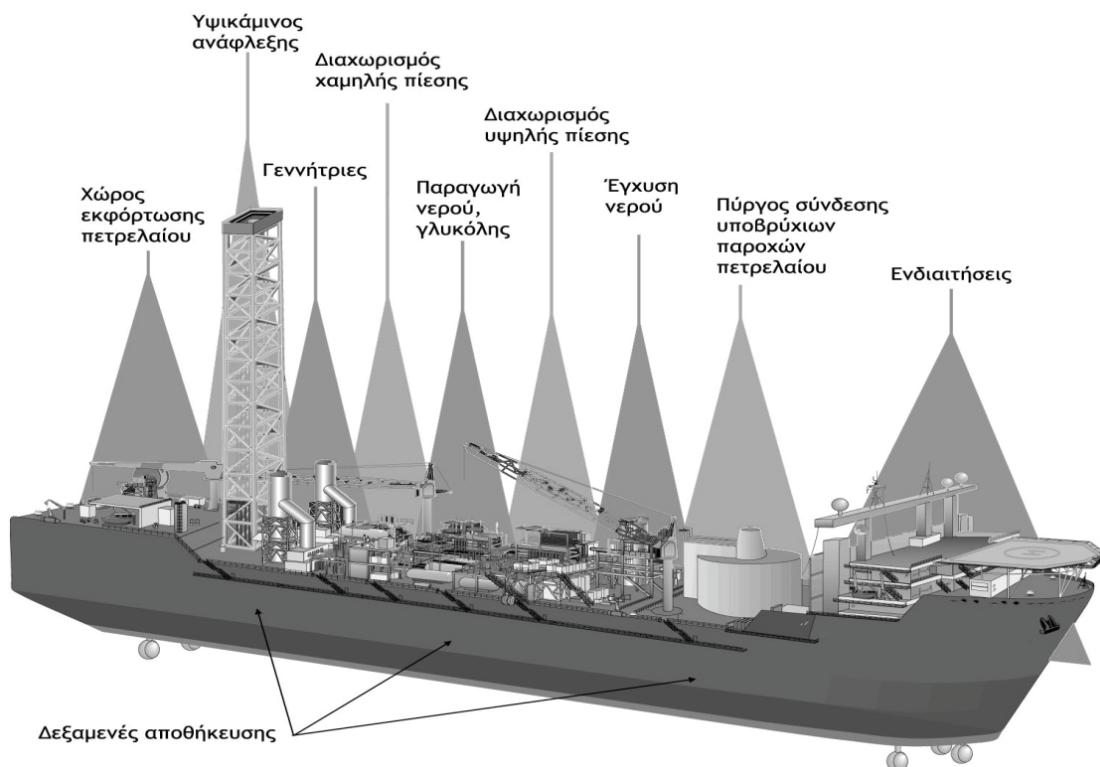
Η ολοκληρωμένη επισκευή επί του καταστρώματος του HMAS Sydney.

Η αποτελεσματικότητα της επισκευής επιβεβαιώθηκε σε πρώτο στάδιο από τη διενέργεια εκτεταμένων δοκιμών θαλάσσης πριν και αμέσως μετά την εφαρμογή της επισκευής. Οι μετρήσεις έγιναν με τη βοήθεια επιμηκυσιομέτρων που είχαν τοποθετηθεί στην περιοχή. Παρατηρήθηκε ικανοποιητική μείωση των τάσεων στο έλασμα του καταστρώματος κατά μήκος του επιθέματος της τάξης του 18%, προσεγγίζοντας τον προδιαγεγραμμένο στόχο του 20%.

Έπειτα, σε δύο περιπτώσεις, το Φεβρουάριο του 1994 και τον Οκτώβριο του 1995 εκτελέστηκαν μη καταστροφικοί έλεγχοι στα επιθέματα με τη βοήθεια φορητών συλλογών υπερήχων, οι οποίες κατέληξαν στην παντελή απουσία αποκολλήσεων στο στρώμα της κόλλας ή μεταξύ των στρώσεων του επιθέματος. Η ουσιαστική επιβεβαίωση όμως της επιτυχίας της μεθόδου ήρθε με την πάροδο του χρόνου, καθώς σε διάρκεια επτά ετών από την εφαρμογή της επισκευής μέχρι τη δημοσίευση της σχετικής μελέτης, το HMAS Sydney συμμετείχε σε δύο πολεμικές εκστρατείες στον Περσικό Κόλπο ενώ αντιμετώπισε επανειλημμένα ακραία καιρικά φαινόμενα στις θάλασσες της Αυστραλίας, χωρίς να παρατηρηθεί ανάπτυξη νέων ρωγμών στην περιοχή ή κάποια μερική έστω αποκόλληση τμήματος των επιθεμάτων.

Μία άλλη πολύ σημαντική εφαρμογή της μεθόδου [4] εφαρμόστηκε το 2002 σε πλοίο παραγωγής, αποθήκευσης και διανομής πετρελαίου (Floating Production, Storage and Offloading - FPSO). Τη μελέτη και διεκπεραίωση της επισκευής ανέλαβε η εταιρία QinetiQ με έδρα τη Μεγάλη Βρετανία. Η σημασία της επισκευής εντοπίζεται στα ιδιαίτερα μεγάλα οικονομικά οφέλη που ενδέχεται να προσφέρει η μέθοδος επισκευής με επιθέματα σύνθετων υλικών έναντι των συμβατικών μεθόδων στα πλοία FPSO, καθώς και στο ότι πρόκειται για την πρώτη αναφορά εφαρμογής της μεθόδου επί καλύβδινου ελάσματος ναυπηγικής κατασκευής.

Τα πλοία FPSO είναι ουσιαστικά πλατφόρμες εξόρυξης και επεξεργασίας πετρελαίου οι οποίες διαθέτουν επιπλέον μεγάλες δεξαμενές όπου αποθηκεύεται το πετρέλαιο, Σχήμα 1.15, ενώ παράλληλα μπορούν να μεταφερθούν με ευκολία μεταξύ κοιτασμάτων, αν παραστεί η ανάγκη. Πρόκειται συνήθως για μεγάλα δεξαμενόπλοια τα οποία μετασκευάστηκαν για να εξυπηρετήσουν το σκοπό αυτό.



Σχήμα 1.15
Τυπική διάταξη πλοίου FPSO.

Το κρίσιμο πλεονέκτημα της μεθόδου στην περίπτωση των πλοίων αυτών, εντοπίζεται στις χαμηλές θερμοκρασίες που απαιτούνται για την εκτέλεσή της, σε αντίθεση με τις συμβατικές μεθόδους. Αυτό μπορεί να γίνει εύκολα κατανοητό αν λάβουμε υπόψη ότι για να εκτελεστεί η οποιαδήποτε εργασία που ενέχει την ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών σε ένα πλοίο, πρέπει μεταξύ της περιοχής που εκτελείται η εργασία και οποιουδήποτε χώρου όπου υπάρχει εύφλεκτο υγρό ή αέριο να παρεμβάλλονται τουλάχιστον δύο υδατοστεγείς φρακτές. Αυτό μεταφράζεται στην ανάγκη εκκένωσης και πιστοποίησης gas-free μεγάλου ποσοστού των δεξαμενών ενός FPSO, αναγκάζοντας τη μείωση ή και διακοπή της παραγωγής πετρελαίου από αυτό. Η παραγωγή πετρελαίου σε ένα τυπικό FPSO ξεπερνάει τα 100,000 βαρέλια την ημέρα. Υποθέτοντας την τιμή του πετρελαίου στα 70\$ το βαρέλι, προκύπτει ότι το κόστος της αναστολής της λειτουργίας του ανέρχεται στα 7,000,000\$ την ημέρα.

Τα FPSO σχεδιάζονται έτσι ώστε να παραμένουν εν πλω για μεγάλα χρονικά διαστήματα που συχνά υπερβαίνουν τα 20 χρόνια. Αυτή η απαίτηση είναι ιδιαίτερα απαιτητική αν σκεφτούμε ότι ένα τυπικό πλοίο καλείται βάσει κανονισμών να υπόκειται σε δεξαμενισμό ανά τακτά χρονικά διαστήματα λίγων ετών προς έλεγχο και συντήρηση της κατασκευής του. Επιπλέον τα FPSO λειτουργούν σε μόνιμο αγκυροβόλιο επί του πυθμένα, κάνοντας τα έτσι πιο ευάλωτα στις καιρικές συνθήκες και το διαβρωτικό περιβάλλον σε σύγκριση με την ελεύθερη πλεύση ενός κοινού πλοίου. Δεν πρέπει λοιπόν να μας προξενεί εντύπωση η σχετικά μεγάλη συχνότητα ανάπτυξης ρωγμών λόγω κόπωσης στην κατασκευή τους.

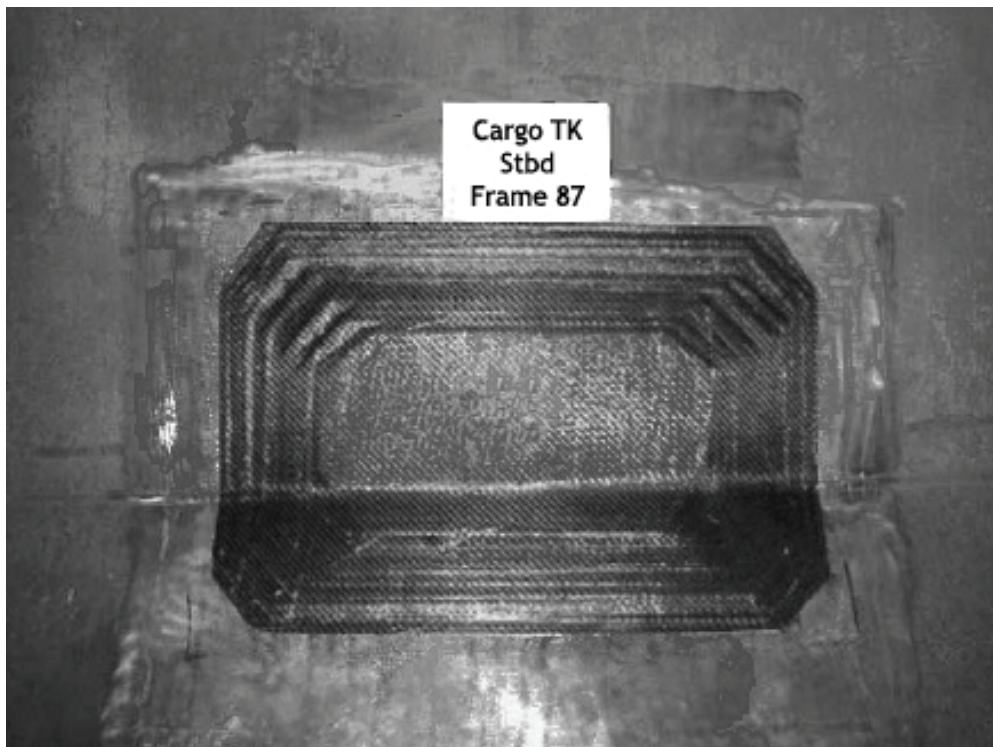
Το 2002 εντοπίστηκαν τρεις ρωγμές μήκους 60 χιλιοστών στη χαλύβδινη φρακτή που χωρίζει μία δεξαμενή πετρελαίου από μία δεξαμενή έρματος σε πλοίο FPSO εγκατεστημένο επί Νορβηγικού κοιτάσματος πετρελαίου. Το πλοίο εξαρτάται από την κατάλληλη και συνεχή διανομή θαλάσσιου έρματος ώστε να κατανέμεται ομαλά το βάρος του φορτίου. Η παρουσία των ρωγμών μεταφράζεται στην απαίτηση εκκένωσης και στεγανοποίησης των δύο δεξαμενών για λόγους ασφαλείας, καθώς και στον περιορισμό της ικανότητας άμεσης ισοκατανομής του βάρους του πλοίου. Η κατάσταση έπρεπε επομένως να επιδιορθωθεί άμεσα καθώς θα μπορούσε μεσοπρόθεσμα να επηρεάσει την ημερήσια παραγωγή πετρελαίου του πλοίου, ενώ ήδη αύξανε το κόστος λειτουργίας της μονάδας με την απαίτηση πύκνωσης των τακτικών δρομολογίων δεξαμενόπλοιου παραλαβής πετρελαίου εξαιτίας της μειωμένης αποθηκευτικής ικανότητας του FPSO.

Εφόσον υιοθετούνταν συμβατική μέθοδος υψηλής θερμοκρασίας για την επισκευή, θα έπρεπε να εκκενωθούν και να λάβουν πιστοποίηση gas-free πέντε δεξαμενές πετρελαίου του πλοίου. Αυτό θα είχε ως αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση της παραγωγής της μονάδας για όσο χρόνο διαρκούσε η επισκευή. Η απαιτούμενη θερμοκρασία για τον πολυμερισμό ενός κατάλληλης σχεδίασης επιθέματος σύνθετου υλικού δεν ξεπερνάει τους 60 °C, επιτρέποντας την εκτέλεση της επισκευής με εκκένωση και πιστοποίηση gas-free μόνο μίας δεξαμενής πετρελαίου, χωρίς να επηρεάζεται το ύψος της ημερήσιας παραγωγής του πλοίου. Έτσι η QinetiQ αποφάσισε να προχωρήσει στη διενέργεια επισκευής με τη μέθοδο εφαρμογής σύνθετου υλικού. Μετά από σύντομη αλλά εκτεταμένη δομική μοντελοποίηση και μελέτη της περιοχής, αποφασίστηκε η εφαρμογή επιθεμάτων με ενίσχυση ανθρακονημάτων και εποξική μήτρα επί των ρωγμών αλλά και επί των περιοχών όπου εντοπίστηκε αυξημένη πιθανότητα ανάπτυξης ρωγμών στο μέλλον. Ως υλικό του στρώματος της κόλλας αναφέρεται ότι

επιλέχθηκε κάποια ειδική εποξική ρητίνη, χωρίς όμως να γίνεται αναφορά στα επιμέρους χαρακτηριστικά της.

Για τον περιορισμό της πολυπλοκότητας της επισκευής και την εξασφάλιση της ποιότητας των επιθεμάτων επιλέχτηκε η χρήση προεμβαπτισμένων επιθεμάτων (prepregs). Τα prepregs, όπως θα δούμε σε επόμενη παράγραφο, είναι στρώσεις επιθέματος στις οποίες έχει ήδη γίνει έγχυση της ρητίνης επί των στρώσεων των ινών και μερικός πολυμερισμός αυτής, ώστε να μπορούν να τοποθετούνται και να πολυμερίζονται άμεσα στην περιοχή ενδιαφέροντος απλοποιώντας σε μεγάλο βαθμό τη διαδικασία της επισκευής.

Η επισκευή εκτελέστηκε τελικά σε διάστημα μόλις δύο εβδομάδων από μία ομάδα δύο τεχνικών, παρά τις αντιξοότητες που ενείχε η εργασία σε βάθος 22 μέτρων εντός της δεξαμενής, την επικίνδυνη σύσταση του αέρα στο χώρο της επισκευής και ενώ το πλοίο βρισκόταν αγκυροβολημένο επί της θέσης λειτουργίας του στη Βόρεια Θάλασσα. Η τελική μορφή ενός από τα επιθέματα που εφαρμόστηκαν φαίνεται στο Σχήμα 1.16. Έως το χρόνο δημοσίευσης της μελέτης, 18 μήνες μετά την εφαρμογή των επιθεμάτων, δεν είχε παρουσιαστεί το παραμικρό πρόβλημα στην περιοχή. Η επιτυχία της επισκευής έκανε εμφανή τα πολύ σημαντικά οφέλη της μεθόδου στην εταιρία διαχείρισης του πλοίου, η οποία προχώρησε άμεσα στην ανάθεση στη QinetiQ των εργασιών επισκευής και ενός δεύτερου FPSO το οποίο αντιμετώπιζε παρεμφερές πρόβλημα.



Σχήμα 1.16
Άποψη της ολοκληρωμένης επισκευής.

1.4 Η ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΕΠΙΣΚΕΥΗΣ ΜΕ ΕΠΙΘΕΜΑ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

1.4.1 ΤΑ ΥΛΙΚΑ ΠΟΥ ΑΠΑΡΤΙΖΟΥΝ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ

Όπως έχει αναφερθεί στις προηγούμενες παραγράφους, το επίθεμα αποτελείται από τρία διακριτά τμήματα. Αυτά είναι οι στρώσεις των ενισχυτικών ινών (reinforcing fibre layers), η ρητίνη της μήτρας (resin matrix) και το στρώμα της κόλλας (adhesive layer). Η επιλογή των υλικών κάθε τμήματος βασίζεται σε μακρά σειρά παραμέτρων και μπορεί να καταλήξει σε μεγάλο αριθμό πιθανών συνδυασμών με σημαντικά διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες.

Σημαντικό κριτήριο σχεδίασης του επιθέματος και επιλογής των υλικών είναι ο προκύπτων λόγος ακαμψίας, SR (βλέπε παράγραφο 1.2, Εξίσωση 1.17). Με το κριτήριο αυτό, το οποίο εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις μηχανικές ιδιότητες και τη γεωμετρία του υποστρώματος, θα ασχοληθούμε εκτεταμένα στα επόμενα κεφάλαια. Κρίνεται όμως σκόπιμο να αναφερθεί σε αυτό το σημείο καθώς αφορά συνδυαστικά την επιλογή των υλικών των ινών και της μήτρας. Καθώς το φορτίο μεταφέρεται στο επίθεμα μέσω της παραμόρφωσης του υποστρώματος, ο λόγος ακαμψίας αποτελεί μέτρο του ποσοστού του φορτίου που καλείται τελικά να παραλάβει το επίθεμα. Συνήθως προτιμώνται λόγοι ακαμψίας κοντά στη μονάδα και μεγαλύτεροι, ενώ πρέπει να σημειωθεί ότι τιμές κοντά στη μονάδα ή μεγαλύτερες είναι πιθανόν να μην είναι ρεαλιστικές για υπόστρωμα μεγάλου πάχους και μέτρου ελαστικότητας (περιπτώσεις χαλύβδινων ναυπηγικών κατασκευών), καθώς μπορούν να έχουν σαν αποτέλεσμα επιθέματα πολύ μεγάλου πάχους.

Στη συνέχεια θα παραθέσουμε τα κριτήρια βάσει των οποίων γίνεται συνήθως η επιλογή του υλικού κάθε τμήματος, καθώς και τα χαρακτηριστικά των κυριότερων διαθέσιμων υλικών για κάθε τμήμα.

α. Ενισχυτικές ίνες

Ο ρόλος των ινών εντοπίζεται στην παραλαβή του φορτίου που μεταφέρεται στο επίθεμα από την ελαττωματική κατασκευή (υπόστρωμα) επί της οποίας έχει εφαρμοστεί. Το ύψος αυτού του φορτίου εξαρτάται ουσιαστικά από τις μηχανικές ιδιότητες των ινών, την περιεκτικότητά τους στο επίθεμα και τη γεωμετρία του επιθέματος. Τα συνήθη κριτήρια επιλογής του υλικού των ινών μπορούν να συνοψιστούν στα εξής:

1. *Ακαμψία*. Εκφράζεται μέσω του μέτρου ελαστικότητας (E) των ινών. Βασικός συντελεστής προσδιορισμού του λόγου ακαμψίας του επιθέματος και ίσως το σημαντικότερο κριτήριο επιλογής του υλικού των ινών.
2. *Ειδική αντοχή*. Εκφράζεται μέσω του πηλίκου της τάσης θραύσης (σ_F) των ινών σε εφελκυσμό, προς το ειδικό τους βάρος (γ). Υψηλές τιμές καταλήγουν γενικά σε επιθέματα χαμηλού βάρους και υψηλής αντοχής. Σπάνια αποτελεί κριτήριο επιλογής καθώς τα περισσότερα προς επιλογή υλικά είναι υψηλής αντοχής, υπερκαλύπτοντας, με κατάλληλο σχεδιασμό του επιθέματος τη μέγιστη τάση που αναπτύσσεται στις ίνες.
3. *Πάχος του επιθέματος*. Σημαντικό κριτήριο για εφαρμογές όπου το επίθεμα είναι εκτεθειμένο σε ροή ρευστού. Αναφέρεται εδώ καθώς, για δεδομένο επιθυμητό λόγο ακαμψίας του επιθέματος, εξαρτάται κυρίως από το μέτρο ελαστικότητας των ινών.

4. *Ηλεκτρική αγωγιμότητα.* Χαμηλές τιμές προτιμώνται, καθώς επιτρέπουν τη χρήση διωρρευμάτων για την επιθεώρηση της επισκευής, μια ιδιαίτερα προσιτή μέθοδο μη καταστροφικού ελέγχου.
5. *Συντελεστής θερμικής διαστολής.* Είναι επιθυμητή η προσέγγιση της αντίστοιχης τιμής του υποστρώματος, αφού έτσι εξασφαλίζεται η ελαχιστοποίηση των θερμικών παραμενουσών τάσεων κατά τον πολυμερισμό και τη λειτουργία του επιθέματος.
6. *Κόστος και διαθεσιμότητα.* Για επιθέματα μεγάλου μεγέθους το κριτήριο αυτό μπορεί να αποδειχθεί κρίσιμο.

Τα υλικά που συναντήσαμε με μεγαλύτερη συχνότητα στις καταγεγραμμένες περιπτώσεις εφαρμογής της μεθόδου, ανεξάρτητα από το εάν επρόκειτο για ναυπηγικές κατασκευές ή όχι, ήταν οι ίνες βορίου και οι ίνες άνθρακα (γραφίτη). Οι ίνες βορίου αναφέρεται ότι διαθέτουν γενικά ανώτερες μηχανικές ιδιότητες, ενώ δεν ενέχουν κίνδυνο γαλβανικής διάβρωσης και παρουσιάζουν πολύ χαμηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα. Ως κύρια πλεονεκτήματα των ινών άνθρακα επισημαίνονται το σχετικά χαμηλό τους κόστος, η υψηλή τους διαθεσιμότητα καθώς και ότι μπορούν να παραχθούν με ευκολία ίνες μικρής διαμέτρου, διευκολύνοντας την εφαρμογή της μεθόδου σε πολύπλοκες γεωμετρίες. Η ταχύτερη όμως εξέλιξη της τεχνολογίας παραγωγής ινών άνθρακα έχει αποφέρει πρόσφατα ίνες πολύ υψηλού μέτρου ελαστικότητας, διευρύνοντας το πεδίο εφαρμογής τους σε πιο απαιτητικές εφαρμογές. Στον παρακάτω Πίνακα 1.2 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά διάφορων τυπικών υλικών ενισχυτικών ινών. Ο πίνακας περιλαμβάνει και τα συνήθη υλικά υποστρώματος για λόγους ευχέρειας σύγκρισης.

Πίνακας 1.2
Βασικά χαρακτηριστικά υλικών ινών και υποστρώματος.

Υλικό	γ (g/cm ³)	E (GPa)	σ_F (MPa)	σ_F/γ (kN·m/kg)	Κόστος
Ίνες γυαλιού	2.55	72	2400	941	Χαμηλό
Ίνες άνθρακα Υ.Α.	1.81	248	4500	2486	Μέτριο
Ίνες άνθρακα Υ.Μ.	2.00	517	2100	1050	Υψηλό
Ίνες άνθρακα Π.Υ.Μ.	2.17	827	2410	1111	Πολύ υψηλό
Ίνες βορίου	2.57	400	3600	1400	Υψηλό
Ίνες αρωματικών πολυαμιδίων	1.45	124	2800	1931	Μέτριο
Αλουμίνιο	2.80	70	150	54	-
Χάλυβας	7.80	207	325	42	-

Υ.Α.: Υψηλής Αντοχής, Υ.Μ.: Υψηλού μέτρου ελαστικότητας, Π.Υ.Μ.: Πολύ υψηλού μέτρου ελαστικότητας

Οι ενισχυτικές ίνες χρησιμοποιούνται με τη μορφή υφασμάτων, που όπως θα δούμε στην επόμενη παράγραφο 1.4.2 εμβαπτίζονται στη ρητίνη της μήτρας σχηματίζοντας τελικά το επίθεμα. Καθώς το κύριο φορτίο που καλείται συνήθως να παραλάβει το επίθεμα επιβάλλεται στη διεύθυνση κάθετα της πορείας επέκτασης της ρωγμής, επιλέγονται συνήθως μονοαξονικά υφάσματα (unidirectional rovings) παρέχοντας ακαμψία στο επίθεμα μόνο κατά την επιθυμητή διεύθυνση.

β. Μήτρα

Οι ρητίνες είναι πολυμερή υλικά με χαμηλές, συγκριτικά με τις ίνες, μηχανικές ιδιότητες. Η ρητίνη της μήτρας είναι επιφορτισμένη με το ρόλο της συγκράτησης των ινών και τη μεταφορά του φορτίου από το στρώμα της κόλλας στις ίνες και αντιστρόφως. Οι ρητίνες βρίσκονται σε υγρή φάση κατά την εφαρμογή τους επί των ινών. Στερεοποιούνται με την προσθήκη καταλύτη και την εφαρμογή του απαιτούμενου κύκλου πολυμερισμού τους (curing), διαδικασία που θα εξετάσουμε στην επόμενη παράγραφο 1.4.2. Οι ρητίνες διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τις θερμοσκληρυνόμενες και τις θερμοπλαστικές. Οι θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες, σε αντίθεση με τις θερμοπλαστικές, εφόσον ολοκληρωθεί ο πολυμερισμός τους, δεν χάνουν τις μηχανικές τους ιδιότητες ούτε μπορούν να ρευστοποιηθούν με αύξηση της θερμοκρασίας. Για αυτό το λόγο σε ναυπηγικές εφαρμογές χρησιμοποιούνται σχεδόν κατ' αποκλειστικότητα θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες.

Στο σύνολο των καταγεγραμμένων εφαρμογών της μεθόδου συναντήσαμε τη χρήση κατά κύριο λόγο εποξικών αλλά και βινυλεστερικών ρητινών. Οι εποξικές ρητίνες αποτελούν ένα από τα πιο αποτελεσματικά είδη κολλητικών ουσιών και βαφών αδιαβροχοποίησης, καθώς και ένα υψηλής απόδοσης υλικό μήτρας για σύνθετα υλικά. Οι βινυλεστερικές ρητίνες παράγονται μέσω της εστεροποίησης μιας εποξικής ρητίνης και τη διάλυση του παραγώγου σε στυρένιο.

Τα πλεονεκτήματα των εποξικών ρητινών εντοπίζονται κυρίως στις ανώτερες μηχανικές τους ιδιότητες και στους ιδιαίτερα συμπαγείς δεσμούς που σχηματίζουν με τις ενισχυτικές ίνες, ιδιαίτερα με τις ίνες άνθρακα. Οι βινυλεστερικές ρητίνες μπορεί να διαθέτουν χειρότερες μηχανικές ιδιότητες αλλά είναι πιο οικονομικές, πιο λεπτόρρευστες και πιο δραστικές από τις εποξικές ρητίνες, απαιτώντας γενικά χαμηλότερες θερμοκρασίες πολυμερισμού.

Άλλες θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες, όπως οι πολυεστερικές και οι φαινολικές ρητίνες, μπορεί να γνωρίζουν ευρεία χρήση σε ναυπηγικές εφαρμογές και να είναι αρκετά πιο οικονομικές, αλλά οι σημαντικά χαμηλότερες μηχανικές τους ιδιότητες αποτρέπουν την επιλογή τους ως μήτρα ενός επιθέματος επισκευής. Στον Πίνακα 1.3 παρουσιάζονται οι βασικές ιδιότητες ορισμένων τυπικών θερμοσκληρυνόμενων ρητινών.

Τα κριτήρια βάσει των οποίων επιλέγει συνήθως ο σχεδιαστής το υλικό της ρητίνης συνοψίζονται στα εξής:

1. *Αντοχή και ακαμψία.* Μπορεί ο κύριος όγκος του φορτίου να παραλαμβάνεται από τις ίνες, όμως πολύ χαμηλές μηχανικές ιδιότητες της μήτρας μπορούν να οδηγήσουν σε τοπικές αστοχίες, όπως η μερική αποκόλληση μεταξύ των στρώσεων των ινών.

2. *Δεσμός μήτρας - ινών.* Εφόσον ο δεσμός που σχηματίζει η ρητίνη με τις ίνες δεν είναι αρκετά ισχυρός, μειώνεται το φορτίο που μπορεί να παραληφθεί από το επίθεμα ενώ ευνοείται η μερική αποκόλληση μεταξύ των στρώσεων των ινών.
3. *Ιξώδες.* Όπως αναφέραμε προηγουμένως οι ρητίνες πριν τον πολυμερισμό τους βρίσκονται σε υγρή φάση. Γενικά όσο πιο λεπτόρρευστη είναι η ρητίνη στην υγρή της μορφή, τόσο πιο εύκολη είναι η αποτελεσματική εμβάπτιση των ινών. Στόχος είναι ο περιορισμός των κενών μεταξύ των ινών.
4. *Απαιτήσεις πολυμερισμού.* Για την επίτευξη ολοκληρωμένου πολυμερισμού της ρητίνης απαιτείται συνήθως η παροχή θερμότητας. Σε αρκετές περιπτώσεις υφίστανται περιορισμοί στο ποσό της θερμότητας που δύναται να παρασχεθεί, καθώς μπορεί η επισκευή να εκτελείται σε εύφλεκτο περιβάλλον, να υπάρχουν στην περιοχή συσκευές ευπαθείς στη θερμοκρασία ή να επιθυμείται η αποφυγή ανάπτυξης θερμικών παραμενουσών τάσεων στο υπόστρωμα. Σε αυτές τις περιπτώσεις, μια ρητίνη που μπορεί να πολυμεριστεί σε χαμηλή θερμοκρασία, ακόμα κι αν απαιτείται μεγαλύτερη διάρκεια πολυμερισμού, διαθέτει σαφές πλεονέκτημα.

Πίνακας 1.3
Βασικά χαρακτηριστικά θερμοσκληρυνόμενων ρητινών.

Ρητίνη	γ (g/cm ³)	E (GPa)	σ_F (MPa)	Κόστος
Εποξική	1.20	3.0	85	Υψηλό
Βινυλεστερική	1.12	3.4	83	Μέτριο
Πολυεστερική (ορθοφθαλική)	1.23	3.2	65	Χαμηλό
Πολυεστερική (ισοφθαλική)	1.21	3.6	60	Χαμηλό
Φαινολική	1.15	3.0	50	Χαμηλό

γ. Στρώμα κόλλας

Οι ιδιότητες του υλικού της κόλλας έχουν άμεση επίδραση στην αντοχή της επισκευής, αφού μέσω της κόλλας μεταφέρεται το φορτίο από το υπόστρωμα στο επίθεμα. Έχει μάλιστα παρατηρηθεί ότι το στρώμα της κόλλας, η σύνδεση δηλαδή υποστρώματος/επιθέματος, είναι η

πλέον κρίσιμη περιοχή της επισκευής, όσον αφορά το ενδεχόμενο αστοχίας αυτής [14], [23]. Το υλικό της κόλλας είναι συνήθως κάποια ειδική εποξική ρητίνη, η οποία μπορεί να προσφέρει τις απαιτούμενες μηχανικές ιδιότητες και ισχυρούς δεσμούς με το υλικό του υποστρώματος. Οι εποξικές κόλλες προσφέρουν ακόμα ισχυρότερους δεσμούς με τις συνήθως χρησιμοποιούμενες εποξικές ή βινυλεστερικές ρητίνες της μήτρας του επιθέματος, διαθέτοντας παρόμοια χημική σύσταση με αυτές. Οι ρητίνες χρησιμοποιούνται συνήθως σε μορφή λεπτών φιλμ, καθιστώντας ευκολότερη την επίτευξη του επιθυμητού πάχους και τον περιορισμό των φυσαλίδων αέρα στο στρώμα της κόλλας.

Οι παράμετροι που λαμβάνονται κατά κύριο λόγο υπόψη κατά την επιλογή του υλικού της κόλλας είναι οι εξής:

1. *Αντοχή σε διάτμηση.* Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η ανάπτυξη του φορτίου στο επίθεμα επάγεται από την παραμόρφωση του υποστρώματος. Αυτό μεταφράζεται στην ανάπτυξη έντονων διατμητικών τάσεων στη σύνδεση υποστρώματος/επιθέματος, μέσω των οποίων γίνεται ουσιαστικά η μεταφορά του φορτίου. Συνεπώς η αντοχή του υλικού της κόλλας σε διάτμηση έχει άμεση επίδραση στην εν γένει αντοχή της επισκευής.
2. *Αντοχή σε ερπυσμό.* Η πιθανή υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού της κόλλας λόγω της μακρόχρονης επιβολής φορτίου, σε συνδυασμό με τις πιθανές μεταβολές της θερμοκρασίας κατά τη λειτουργία της κατασκευής πρέπει να ελέγχεται, καθώς έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της αντοχής της επισκευής και της ικανότητας του επιθέματος να απορροφά αποτελεσματικά το φορτίο του υποστρώματος.
3. *Απαιτήσεις πολυμερισμού.* Ο απαιτούμενος κύκλος πολυμερισμού της ρητίνης του στρώματος της κόλλας πρέπει να είναι συμβατός με τον αντίστοιχο κύκλο πολυμερισμού της ρητίνης της μήτρας, ώστε να είναι δυνατός ο, έστω εν μέρει, ταυτόχρονος πολυμερισμός τους. Επιπρόσθετα, η απαιτούμενη θερμοκρασία πολυμερισμού πρέπει να ελέγχεται σε σχέση με τη διαφορά των συντελεστών θερμικής διαστολής της κόλλας και του υποστρώματος, καθώς μπορεί να οδηγήσει στην ανάπτυξη σημαντικών θερμικών παραμενοουσών τάσεων στο στρώμα της κόλλας.
4. *Προετοιμασία επιφάνειας κόλλησης.* Ορισμένα υλικά κόλλησης απαιτούν την επεξεργασία της επιφάνειας του υποστρώματος με ειδικές χημικές ουσίες πριν την εφαρμογή τους σε αυτό. Η πρακτική αυτή θα πρέπει όπου είναι δυνατό να αποφεύγεται, καθώς μπορεί να οδηγήσει μακροπρόθεσμα στην ανάπτυξη ρωγμών λόγω διάβρωσης υπό τάση στην επιφάνεια του υποστρώματος.

Μία σημαντική παράμετρος που επηρεάζει την αποτελεσματικότητα της σύνδεσης, χωρίς όμως να εξαρτάται άμεσα από τις ιδιότητες του υλικού, είναι το πάχος του στρώματος της κόλλας. Συνήθως επιλέγονται μικρά πάχη, της τάξης του ενός έως τριών δεκάτων του χιλιοστού, καθώς μεγαλύτερα πάχη καταλήγουν σε πορώδεις και ιδιαίτερα ελαστικές συνδέσεις με μικρότερη δυνατότητα απορρόφησης φορτίου από το υπόστρωμα, ενώ μικρότερα πάχη έχουν συνήθως σαν αποτέλεσμα το σχηματισμό πολύ στιβαρών αλλά ταυτόχρονα πολύ ψαθυρών κολλήσεων οι οποίες παρουσιάζουν μικρή αντοχή σε κόπωση.

Στον παρακάτω Πίνακα 1.4 παρουσιάζονται ορισμένα από τα κύρια χαρακτηριστικά τριών εποξικών ρητινών που βρίσκουν συχνά χρήση ως συνεκτικά υλικά (κόλλες) στις υπάρχουσες εφαρμογές της μεθόδου.

Πίνακας 1.4
Βασικά χαρακτηριστικά συνεκτικών υλικών

Υλικό (Εποξική Ρητίνη)	Βάρος (gr/m ²)	Προτεινόμενος κύκλος πολυμερισμού	Αντοχή σε διάτμηση (MPa)			
			-55 °C	24 °C	82 °C	120 °C
3M AF 163-2	150	90min at 113 °C	37.9	37.2	25.5	16.5
Cytec FM 73	150	90 min at 120 ±3 °C	42.3	42.8	25.9	10.2
Cytec FM 300-2	150	90min at 113 °C	27.6	27.6	27.6	27.9

1.4.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΟΥ ΕΠΙΘΕΜΑΤΟΣ

Στη συνέχεια θα ασχοληθούμε με τις διαδικασίες που διέπουν την εφαρμογή της μεθόδου επισκευής με επίθεμα σύνθετου υλικού. Η εφαρμογή του επιθέματος χωρίζεται σε τρία στάδια. Την προετοιμασία της περιοχής του υποστρώματος που θα δεχθεί την επισκευή, την εφαρμογή της κόλλας σε συνδυασμό με την εφαρμογή και εμβάπτιση των ενισχυτικών ινών και τέλος τον πολυμερισμό της όλης κατασκευής.

α. Προετοιμασία του υποστρώματος

Η ανθεκτικότητα και η ποιότητα του δεσμού που σχηματίζει το στρώμα της κόλλας με το υπόστρωμα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την κατάλληλη προετοιμασία της επιφάνειας του υποστρώματος που πρόκειται να δεχθεί το στρώμα της κόλλας και κατ' επέκταση το επίθεμα. Η προετοιμασία αυτή αποτελείται συνήθως από τις κατεργασίες που αναφέρονται παρακάτω [2],[6] και οι οποίες αναφέρονται κατά σειρά εκτέλεσης:

1. *Απόξεση μακροσκοπικών επιφανειακών εξάρσεων (αμυχές, επικαθήσεις, κτλ).*
2. *Καθαρισμός με διαλύτες.* Συνήθως εφαρμόζονται αλληπάλληλα περάσματα με πανιά εμποτισμένα σε διάλυμα βουτανόνης (εμπορική ονομασία της μέθυλ-έθυλ-κετόνης, ΜΕΚ) ή άλλους οργανικούς διαλύτες, με στόχο τον καθαρισμό της επιφάνειας από ανεπιθύμητες ουσίες, κυρίως οργανικά κατάλοιπα.
3. *Αμμοβολή της επιφάνειας.* Ο καθαρισμός της (πιθανώς) οξειδωμένης επιφάνειας και στη συνέχεια η αύξηση της τραχύτητας της καθαρής επιφάνειας κρίνεται επιβεβλημένη ώστε να επιτευχθεί ικανοποιητικός δεσμός κόλλας/υποστρώματος. Τελική τραχύτητα επιπέδου Sa2 είναι συνήθως επαρκής.

4. *Επίχριση σιλανίου (SiH_4)*. Καθώς το σιλάνιο είναι ιδιαίτερα δραστικό με το οξυγόνο, σχηματίζει πολύ ισχυρούς δεσμούς με τα οξείδια των μετάλλων, καλύπτοντας αποτελεσματικά την επιφάνεια του υποστρώματος. Παράλληλα, τα αδέσμευτα μόρια σιλανίου (ουσιαστικά οι ρίζες πυριτίου) συνάπτουν δεσμούς με τους αρωματικούς υδρογονάνθρακες της ρητίνης του στρώματος της κόλλας, συνεισφέροντας τελικά στην επίτευξη ισχυρού μακροσκοπικού δεσμού μεταξύ της επιφάνειας του υποστρώματος και του στρώματος της κόλλας.
5. *Ψεκασμός αδρανούς αερίου*. Έχει σαν στόχο την απομάκρυνση της υγρασίας και των ξένων σωματιδίων από την επιφάνεια του υποστρώματος, αμέσως πριν εφαρμοστεί το στρώμα της κόλλας. Συνήθως χρησιμοποιείται άζωτο υπό πίεση για τον ψεκασμό.

Στην αρχή του κεφαλαίου είχαμε αναφερθεί στη μέθοδο προσωρινής επισκευής με τη διάνοιξη οπών ανακούφισης των τάσεων στα άκρα της ρωγμής. Θεωρητικά, η εφαρμογή της μεθόδου, εφόσον εφαρμοζόταν στα πλαίσια της προετοιμασίας του υποστρώματος, θα μπορούσε να αυξήσει την αποτελεσματικότητα του επιθέματος, επιφέροντας επιπλέον εξασθένιση του εντατικού πεδίου στην περιοχή της ρωγμής. Στην πραγματικότητα όμως έχει βρεθεί [26] ότι η διάνοιξη των οπών επιδρά αρνητικά στην αποτελεσματικότητα του επιθέματος, κυρίως λόγω της καταστροφής των πλαστικών περιοχών πλησίον των άκρων της ρωγμής, όπου έχουν συσσωρευτεί θλιπτικές παραμένουσες τάσεις ως αποτέλεσμα της επέκτασης της ρωγμής. Αφού εφαρμοστεί το επίθεμα οι παραμένουσες αυτές θλιπτικές τάσεις συνεισφέρουν σημαντικά στην ανάσχεση της επέκτασης της ρωγμής.

β. Εφαρμογή της κόλλας, εφαρμογή και εμβάπτιση των ενισχυτικών ινών

Αρχικά τοποθετείται το στρώμα της κόλλας επί του υποστρώματος. Σε ορισμένες περιπτώσεις, ο μερικός πολυμερισμός της ρητίνης της κόλλας σε αυτό το στάδιο μπορεί να προσφέρει καλύτερες μηχανικές ιδιότητες στη σύνδεση υποστρώματος/επιθέματος [1],[2].

Στη συνέχεια τοποθετούνται διαδοχικά τα υφάσματα των ενισχυτικών ινών επί της κόλλας και εμβαπτίζονται στη ρητίνη της μήτρας. Στην περίπτωση χρήσης ινών άνθρακα, συνηθίζεται η παρεμβολή μίας λεπτής στρώσης υαλονημάτων μεταξύ της κόλλας και των ινών άνθρακα, ώστε να αποτραπεί η δημιουργία γαλβανικού στοιχείου μεταξύ του υποστρώματος και των ινών.

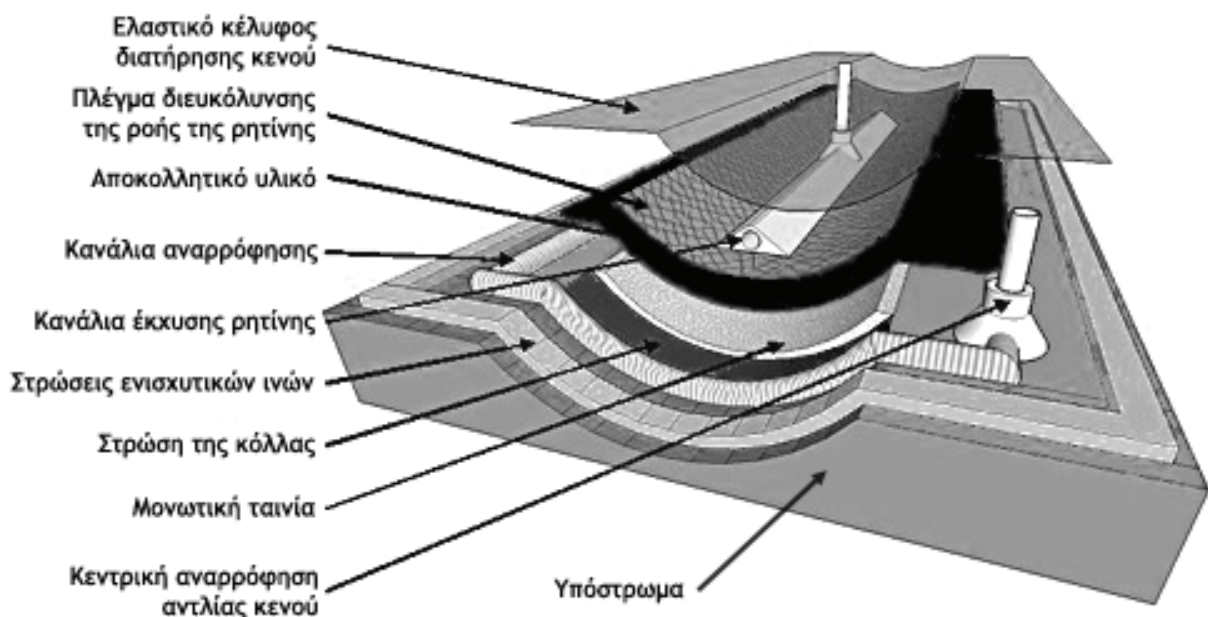
Για τον εμβαπτισμό των ινών χρησιμοποιούνται συνήθως δύο μέθοδοι, η μέθοδος επίστρωσης με το χέρι (hand lay-up) και η μέθοδος έκχυσης ρητίνης με τη δημιουργία κενού (vacuum resin infusion). Από τη μέθοδο που επιλέγεται εξαρτάται και η διαδικασία της τοποθέτησης των ινών, καθώς στην περίπτωση επίστρωσης με το χέρι κάθε στρώση της ίνας τοποθετείται και εμβαπτίζεται πριν την τοποθέτηση της επόμενης στρώσης, σε αντίθεση με την περίπτωση έκχυσης ρητίνης, όπου ο εμβαπτισμός ξεκινάει αφού τοποθετηθεί το σύνολο των στρώσεων των ινών.

Μία «τρίτη» μέθοδος είναι η παράκαμψη του βήματος του εμβαπτισμού των ινών, εφόσον χρησιμοποιηθούν προεμβαπτισμένες στρώσεις ινών (prepregs). Αξίζει να σημειωθεί ότι στην

περίπτωση των prepregs υπάρχει η δυνατότητα εφαρμογής της κόλλας πρώτα στο έτοιμο επίθεμα, με τη λογική του ταυτόχρονου μερικού πολυμερισμού του συστήματος κόλλας/επιθέματος πριν την εφαρμογή του στο υπόστρωμα.

Η μέθοδος επίστρωσης με το χέρι αποτελεί την πιο απλή και ευέλικτη μέθοδο εμβαπτισμού των ινών. Η ρητίνη της μήτρας, αναμεμιγμένη με καταλύτη και επιταχυντή εφαρμόζεται στο στρώμα της κόλλας ή σε μία προηγούμενη στρώση με τη βοήθεια ενός πινέλου. Για την επίτευξη ικανοποιητικής διαβροχής των ινών εφαρμόζεται πίεση με τη βοήθεια ενός ειδικού ρολού ή ενός πινέλου.

Η μέθοδος έκχυσης ρητίνης περιλαμβάνει τον εγκλεισμό του συνόλου των τοποθετημένων επί του υποστρώματος στρώσεων ινών σε ένα αεροστεγές ελαστικό κέλυφος, όπου με τη βοήθεια αντλιών δημιουργούνται συνθήκες κενού. Το κέλυφος διαθέτει πολλαπλά σημεία έκχυσης της ρητίνης ή/και κάποιο πλέγμα που να διαχέει τη ρητίνη ομοιόμορφα στις ίνες. Η ρητίνη ρέει λόγω της διαφοράς της πίεσης μεταξύ της ατμόσφαιρας και του κενού στο εσωτερικό του κελύφους, εμβαπτίζοντας αποτελεσματικά τις στρώσεις των ινών. Εφόσον η γεωμετρία του υποστρώματος το απαιτεί, μπορεί να εφαρμοστεί μικρή ποσότητα κόλλας μεταξύ των υφασμάτων ώστε να συγκρατηθούν οι ίνες στην ενδεδειγμένη τους θέση. Στο Σχήμα 1.17 παρουσιάζονται τα τμήματα μιας τυπικής διάταξης της μεθόδου.



Σχήμα 1.17
 Τυπική διάταξη έκχυσης ρητίνης με τη δημιουργία κενού.

Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα κάθε μίας από τις τρεις μεθόδους εμβαπτισμού των ινών παρουσιάζονται παρακάτω [4]:

- *Πλεονεκτήματα μεθόδου επίστρωσης με το χέρι:*
 1. Δεν απαιτείται υψηλό επίπεδο εκπαίδευσης του χειριστή.
 2. Δεν απαιτείται η χρήση ειδικής διάταξης.
 3. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ευκολία σε περιοχές ιδιαίτερης γεωμετρίας.
 4. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ευκολία σε κατακόρυφες επιφάνειες αφού κάθε νέα στρώση ινών που τοποθετείται συγκρατείται από τη ρητίνη της προηγούμενης.
 5. Χαμηλό κόστος υλικών και αναλωσίμων.

- *Μειονεκτήματα μεθόδου επίστρωσης με το χέρι:*
 1. Επίτευξη χαμηλότερων μηχανικών ιδιοτήτων στο επίθεμα συγκριτικά με τις άλλες μεθόδους.
 2. Γενικά παράγονται επιθέματα μεγαλύτερου βάρους και μικρότερης περιεκτικότητας σε ενισχυτικές ίνες.
 3. Η παρουσία περιοχών που δεν έχουν εμβαπτιστεί επαρκώς στη ρητίνη εξαρτάται από την ικανότητα του χειριστή.
 4. Η ανάμιξη της ρητίνης με τον καταλύτη γίνεται λίγο πριν τον εμβαπτισμό των ινών, διαδικασία επιρρεπής στο ανθρώπινο λάθος.
 5. Δεν είναι δυνατός ο περιορισμός των ιδιαίτερα τοξικών αναθυμιάσεων της ρητίνης.
 6. Για μεγάλο μέγεθος επιθέματα, το χαμηλό κόστος των απαιτούμενων υλικών και αναλωσίμων αντισταθμίζεται από το αυξημένο εργατικό κόστος και την δυσκολία ελέγχου της διαδικασίας.

- *Πλεονεκτήματα μεθόδου έκχυσης ρητίνης με τη δημιουργία κενού:*
 1. Επίτευξη μηχανικών ιδιοτήτων πολύ κοντά στις μέγιστες θεωρητικές τιμές των υλικών.
 2. Πιο ασφαλής μέθοδος, καθώς οι τοξικές αναθυμιάσεις της ρητίνης αναρροφώνται από την αντλία κενού.
 3. Εφόσον γίνει καλή σχεδίαση της διάταξης εξασφαλίζεται ο ομοιόμορφος εμβαπτισμός των ινών και η απουσία ανεπιθύμητων θυλάκων αέρα.
 4. Το μέγεθος του επιθέματος δεν έχει καμία επίδραση στην διαδικασία.
 5. Χαμηλό κόστος υλικών.

- *Μειονεκτήματα μεθόδου έκχυσης ρητίνης με τη δημιουργία κενού:*
 1. Απαιτείται εξειδικευμένο προσωπικό για τη σχεδίαση και εφαρμογή της διάταξης.

2. Η απαραίτητη στεγανότητα της διάταξης μπορεί να αποτελέσει πρόβλημα εφόσον η εφαρμογή γίνεται σε περιβάλλον με έντονη υγρασία ή σκόνη.
 3. Η ανάμιξη της ρητίνης με τον καταλύτη γίνεται λίγο πριν τον εμβαπτισμό των ινών, διαδικασία επιρρεπής στο ανθρώπινο λάθος.
 4. Κακή σχεδίαση της διάταξης μπορεί να έχει αρνητική επίδραση στις τελικές ιδιότητες του επιθέματος.
 5. Απαιτείται η χρήση κόλλας κατά την τοποθέτηση των ινών σε κάθετη επιφάνεια. Εκτεταμένη χρήση κόλλας μπορεί να έχει αρνητική επίδραση στις μηχανικές ιδιότητες του επιθέματος.
 6. Υψηλό κόστος αναλωσίμων.
- *Πλεονεκτήματα χρήσης προεμβαπτισμένων ινών (prepregs):*
1. Οι στρώσεις των ινών είναι προεμβαπτισμένες σε ρητίνη υπό ιδανικές συνθήκες, εξασφαλίζοντας τον τέλειο εμβαπτισμό τους.
 2. Η ρητίνη των ινών έχει υποστεί μερικό πολυμερισμό, μειώνοντας κατά πολύ την έκλυση τοξικών αναθυμιάσεων.
 3. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ευκολία σε κατακόρυφες επιφάνειες αφού κάθε νέα στρώση ινών που τοποθετείται συγκρατείται από τη ρητίνη της προηγούμενης στρώσης.
 4. Συνήθως απαιτούνται χαμηλότερες θερμοκρασίες πολυμερισμού από τις υπόλοιπες μεθόδους.
 5. Μειώνεται κατά πολύ ο χρόνος και η πολυπλοκότητα της εκτέλεσης της επισκευής.
- *Μειονεκτήματα χρήσης προεμβαπτισμένων ινών (prepregs):*
1. Υψηλό κόστος υλικών και αναλωσίμων
 2. Απαιτείται εξειδικευμένο προσωπικό για την μεταχείριση και σωστή εφαρμογή των προεμβαπτισμένων υφασμάτων.
 3. Εφόσον τα προεμβαπτισμένα υφάσματα ινών δεν διατηρούνται σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες (περί τους $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$) πριν τον τελικό πολυμερισμό τους, έχουν πολύ μικρή διάρκεια ζωής, της τάξης των λίγων ημερών. Αυτό μπορεί να προκαλέσει σημαντικά προβλήματα στη μεταφορά και την αποθήκευση τους.

γ. Πολυμερισμός

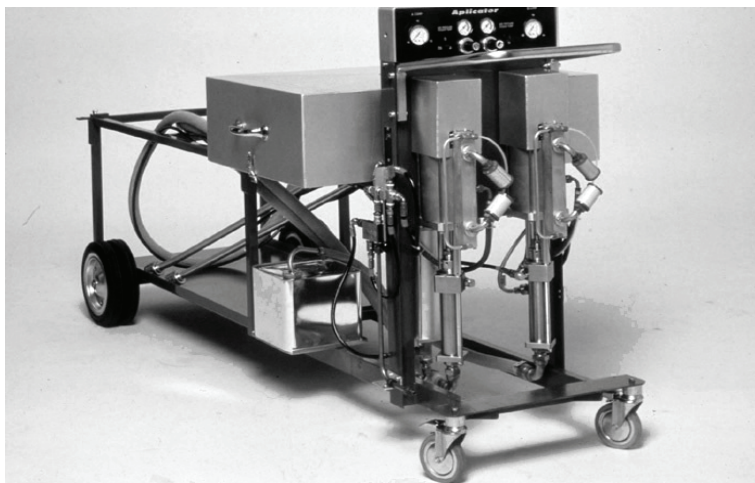
Όπως αναφέραμε προηγουμένως, για να στερεοποιηθούν και να αποκτήσουν τις επιθυμητές μηχανικές τους ιδιότητες οι ρητίνες του στρώματος της κόλλας και της μήτρας, απαιτείται η υποβολή τους στη διαδικασία του πολυμερισμού. Ο πολυμερισμός ορίζεται ως η αντίδραση μεταξύ δύο ή περισσότερων μορίων μιας ένωσης για να σχηματίσουν μία άλλη ένωση με την ίδια ποσοτική και ποιοτική σύσταση αλλά πολλαπλάσιο μοριακό βάρος. Τα

υλικά με μοριακή δομή που επιτρέπει την αντίδραση κατά αυτόν τον τρόπο λέγονται πολυμερή. Τα πολυμερή υλικά πριν τον πολυμερισμό τους βρίσκονται συνήθως σε υγρή μορφή.

Για την εκκίνηση και διατήρηση της αντίδρασης του πολυμερισμού απαιτείται η ύπαρξη κάποιου καταλύτη ή/και η παροχή ενέργειας. Η απαιτούμενη ενέργεια μπορεί να παρέχεται είτε με τη μορφή θερμότητας, είτε με τη μορφή ακτινοβολίας. Εφόσον το υλικό απαιτεί την παροχή ενέργειας, η διαδικασία του πολυμερισμού μπορεί να σταματήσει ή να επιβραδυνθεί ανά πάσα στιγμή, με τη διακοπή της παροχής. Σε αυτήν την περίπτωση το υλικό θεωρείται ότι έχει υποστεί μερικό πολυμερισμό. Οι δεσμοί που δημιουργούνται κατά τον πολυμερισμό είναι στις περισσότερες περιπτώσεις αδύνατο να αντιστραφούν.

Τα πολυμερή υλικά αποκτούν τις θεωρητικά μέγιστες τιμές των μηχανικών τους ιδιοτήτων, εφόσον ολοκληρωθεί ο πολυμερισμός τους. Οι τιμές αυτές όμως εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τον ρυθμό με τον οποίο εκτελείται ο πολυμερισμός. Για το λόγο αυτό οι κατασκευαστές των ρητινών προδιαγράφουν τις απαιτήσεις του ενδεχόμενου κύκλου πολυμερισμού του υλικού ώστε να επιτευχθούν οι ονομαστικές τιμές των μηχανικών τους ιδιοτήτων. Συνήθως προβλέπεται και η εφαρμογή πίεσης, βελτιώνοντας επιπλέον τις τελικές μηχανικές ιδιότητες της κατασκευής.

Όσον αφορά τη μέθοδο επισκευής με επίθεμα σύνθετου υλικού, η ανάμιξη των ρητινών του στρώματος της κόλλας και της μήτρας με τον καταλύτη, γίνεται αμέσως πριν την εφαρμογή τους επί της επιφάνειας του υποστρώματος και των υφασμάτων των ινών αντίστοιχα. Η επιβολή ενέργειας (με τη μορφή θερμότητας) σε συνδυασμό με την επιβολή πίεσης, επιτυγχάνεται με τον εγκλεισμό της κατασκευής σε ένα αεροστεγές ελαστικό κέλυφος και τη δημιουργία κενού. Για τη θέρμανση χρησιμοποιούνται ειδικές ηλεκτρικές αντιστάσεις που περιέχονται στο κέλυφος (κουβέρτα), ενώ για τη δημιουργία κενού χρησιμοποιείται κατάλληλη αντλία. Ο έλεγχος των παραμέτρων του πολυμερισμού είναι συνήθως αυτοματοποιημένος, εφόσον χρησιμοποιηθεί κάποια από τις φορητές συσκευές πολυμερισμού που διατίθενται στην αγορά (Σχήμα 1.18).



Σχήμα 1.18
Φορητή συσκευή πολυμερισμού.

Παρατηρούμε ότι εάν ο εμβαπτισμός των ινών πραγματοποιείται με τη μέθοδο έκχυσης ρητίνης που εξετάσαμε παραπάνω, δεν απαιτείται κάποια επιπλέον διάταξη για τον πολυμερισμό, εφόσον το ελαστικό κέλυφος της μεθόδου εμβαπτισμού είναι θερμαινόμενο.

Στις περιπτώσεις όπου το υλικό των ενισχυτικών ινών είναι ημιαγώγιμο, όπως στην περίπτωση των ινών άνθρακα, μπορεί εναλλακτικά του θερμαινόμενου κελύφους να επιβληθεί ηλεκτρική τάση στα άκρα των ινών, αναπτύσσοντας ηλεκτρικό ρεύμα στις ίνες, το οποίο λόγω της μεγάλης αντίστασης του υλικού έχει σαν αποτέλεσμα την ανάπτυξη θερμότητας. Η μέθοδος είναι απλή, γρήγορη, οικονομική και θερμαίνει ομοιόμορφα την κατασκευή, αλλά μπορεί να εφαρμοστεί μόνο στην περίπτωση ημιαγώγιμων ινών.

Όπου δεν απαιτείται η επιβολή πίεσης, η απαιτούμενη ενέργεια μπορεί να παρασχεθεί μέσω ακτινοβολίας. Στην περίπτωση αυτή μπορούν να χρησιμοποιηθούν ισχυρές λυχνίες, Σχήμα 1.19α, οι οποίες εκπέμπουν υπεριώδη ακτινοβολία υψηλής έντασης ή καθοδικοί σωλήνες μεγάλης τάσης, Σχήμα 1.19β, που εκτοξεύουν δέσμες ηλεκτρονίων (Electron Beam curing (EB curing)). Οι μέθοδοι αυτές διακρίνονται για την απλότητα τους και την αυξημένη ταχύτητα πολυμερισμού.



α.



β.

Σχήμα 1.19

α. Βιομηχανικό σύστημα πολυμερισμού με λυχνίες υπεριώδους ακτινοβολίας.

β. Καθοδικός σωλήνας πολυμερισμού με δέσμη ηλεκτρονίων.

1.4.3 ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΕΠΙΣΚΕΥΗΣ

Ένα άμεσο συμπέρασμα που προκύπτει από την ανάγνωση των παραπάνω, ιδιαίτερα των παραγράφων 1.3.1 και 1.3.2, είναι η μεγάλη ευελιξία της μεθόδου επισκευής με επίθεμα σύνθετου υλικού και η αποδεδειγμένη ικανότητά της να επισκευάζει αποτελεσματικά ναυπηγικές και μη μεταλλικές κατασκευές. Αυτά όμως τα χαρακτηριστικά δεν είναι από μόνα τους αρκετά ώστε να εδραιώσουν τη μέθοδο στην αυστηρά ελεγχόμενη σύγχρονη ναυτιλία.

Η ευελιξία, στην οποία μόλις αναφερθήκαμε, μεταφράζεται στη δυνατότητα που έχει ένας μηχανικός να επιλέξει μεταξύ αναρίθμητων συνδυασμών υλικών και διαδικασιών, σχεδιάζοντας και εφαρμόζοντας το βέλτιστο επίθεμα για την επισκευή της συγκεκριμένης μεταλλικής ναυπηγικής κατασκευής που τον ενδιαφέρει. Η ευελιξία όμως αυτή, ενέχει τον κίνδυνο ενός μηχανικού που λόγω απειρίας, άγνοιας ή μίας τυχαίας παράλειψης σχεδιάζει και εφαρμόζει ένα φαινομενικά αποτελεσματικό επίθεμα, το οποίο είτε δεν επιτυγχάνει την ουσιαστική επισκευή της κατασκευής, είτε κινδυνεύει να αστοχήσει σε μικρό χρονικό διάστημα.

Ο ορατός αυτός κίνδυνος δεν θα μπορούσε να μη γίνει αντιληπτός από τις ρυθμιστικές και ελεγκτικές αρχές της ναυτιλίας, τους οργανισμούς νηογνομόνων, οι οποίοι απαιτούν την ενδελεχή μελέτη κάθε περίπτωσης χρήσης της μεθόδου, προτού πιστοποιήσουν την αποτελεσματικότητα της επισκευής και το αξιόπλοο της κατασκευής. Το πρόβλημα γίνεται εντονότερο, καθώς μετά την εφαρμογή του επιθέματος, η οπτική επαφή με τη ρωγμή κάτω από αυτό καθίσταται αδύνατη.

Η εκτέλεση λεπτομερούς μελέτης της εφαρμογής της μεθόδου ανά περίπτωση, μεταφράζεται σε υψηλό κόστος και μεγάλες καθυστερήσεις, καθιστώντας απαγορευτική την εφαρμογή της σε τυπικές ανάγκες επισκευής, μη ειδικών ναυπηγικών κατασκευών.

Ένας τρόπος εξάλειψης του προβλήματος θα ήταν η δημιουργία, σε συνεργασία με κάποιο νηογνώμονα - μέλος του IACS (International Association of Classification Societies), μιας τυποποιημένης μεθόδου βελτιστοποίησης των παραμέτρων της επισκευής, συνοδευόμενη φυσικά από την ασφαλή εκτίμηση της αποτελεσματικότητας και της αντοχής της. Σχετική προσπάθεια, για αεροπορικές όμως εφαρμογές, η οποία έχει μάλιστα αποφέρει καρπούς, αποτελεί η ανάπτυξη του λογισμικού CRAS (Composite Repair of Aircraft Structures) από την εταιρία Boeing σε συνεργασία με το ερευνητικό τμήμα της πολεμικής αεροπορίας των ΗΠΑ. Ο χρήστης εισάγει στο πρόγραμμα τις παραμέτρους της ελαττωματικής κατασκευής, και στη συνέχεια το λογισμικό, κάνοντας περιορισμένη χρήση ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία, προτείνει στοιχεία της γεωμετρίας και των υλικών μιας αποτελεσματικής επισκευής. Απομένουν αρκετές παράμετροι τις οποίες πρέπει να εξετάσει ο χρήστης πριν αποφασίσει την εφαρμογή της επισκευής, όμως η προσπάθεια αυτή της Boeing αποτελεί ένα πολύ σημαντικό πρώτο βήμα.

Ένας πιο άμεσος τρόπος παράκαμψης του προβλήματος και πιστοποίησης της επισκευής, είναι η πρόβλεψη και προσαρμογή της σχεδίασης του επιθέματος, έτσι ώστε να διευκολύνεται ο περιοδικός έλεγχος της ακεραιότητας και αποτελεσματικότητας της επισκευής, με τη χρήση κάποιας μεθόδου μη καταστροφικού ελέγχου (Non-Destructive Examination, NDE). Πλέον

επιθυμητή θα ήταν η χρήση κάποιας διάταξης ελέγχου ενσωματωμένης στο επίθεμα, η οποία θα μπορούσε να παρέχει συνεχή ενημέρωση για την κατάσταση της επισκευής. Η προοπτική αυτή αναφέρεται συχνά στη βιβλιογραφία ως το «έξυπνο» επίθεμα. Οι μέθοδοι μη καταστροφικού ελέγχου που γνωρίζουν συχνότερη εφαρμογή είναι οι εξής:

1. *Επιμηκυνσιόμετρα*. Η εφαρμογή επιμηκυνσιόμετρων στην περιοχή πλησίον της επισκευής ή ακόμα και ενσωματωμένα στο στρώμα της κόλλας, μπορεί να προσφέρει άμεση πληροφόρηση για την πιθανή υποβάθμιση της αποτελεσματικότητας της επισκευής, καταγράφοντας τις μεταβολές στην επιμήκυνση του υποστρώματος. Η μέθοδος αυτή όμως πρέπει να συνοδεύεται από τη λεπτομερή μελέτη και καταγραφή του εντατικού πεδίου στην περιοχή για όλο το εύρος της λειτουργίας της κατασκευής.
2. *Πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες*. Πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες από PVDF (Polyvinylidene Difluoride) θα μπορούσαν να αντικαταστήσουν σε αρκετές περιπτώσεις τα κοινά επιμηκυνσιόμετρα, προσφέροντας ικανοποιητική ακρίβεια στις μετρήσεις με πολύ χαμηλότερο κόστος.
3. *Δινορρεύματα*. Η μέθοδος των δινορρευμάτων (Foucault - eddy currents) είναι πολύ διαδεδομένη και αξιόπιστη. Βασίζεται στο φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής που αναπτύσσεται σε έναν αγωγό, όπως το υπόστρωμα, όταν εφαρμοστεί σε αυτόν ένα κινούμενο μαγνητικό πεδίο. Εξελεγχμένες συλλογές αισθητήρων θα μπορούσαν ενδεχομένως να ενσωματωθούν στο επίθεμα παρέχοντας στοιχεία για την ταχύτητα επέκτασης της ρωγμής. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο εφόσον το υλικό των ινών διαθέτει αρκετά χαμηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα. Δεν βρίσκει επομένως εφαρμογή σε επιθέματα με ενισχυτικές ίνες άνθρακα.
4. *Υπέρηχοι*. Η χρήση υπερήχων γνωρίζει εκτεταμένη χρήση σε ναυπηγικές εφαρμογές, κυρίως λόγω της ικανότητας εντοπισμού σφαλμάτων σε κατασκευές με μεγάλο πάχος ελάσματος. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό σφαλμάτων και αποκολλήσεων στη δομή του επιθέματος.
5. *Θερμογραφία*. Σχετικά νέα μέθοδος, βασίζεται σε ιδιαίτερα ευαίσθητες θερμικές κάμερες και καταγράφει τις μεταβολές στη θερμοκρασία εντός του υλικού, εντοπίζοντας με ευκολία κενά αέρα και αποκολλήσεις στη δομή του επιθέματος.

1.5 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΠΙΣΚΕΥΗΣ ΩΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΤΩΝ ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ

Στο σημείο αυτό θα επιχειρήσουμε την καταγραφή των βασικότερων θετικών και αρνητικών χαρακτηριστικών της μεθόδου, σε σύγκριση πάντα με τις παραδοσιακές μεθόδους προσωρινής και μόνιμης επισκευής, προσπαθώντας να εντοπίσουμε τα οφέλη που μπορεί αυτή να προσφέρει στην ασφάλεια και την αποδοτικότητα των ναυπηγικών κατασκευών, καθώς και τους τομείς της μεθόδου που χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης και μελέτης.

Πλεονεκτήματα της μεθόδου

1. Η μεγάλη γκάμα των υλικών και των μεθόδων εφαρμογής της μεθόδου προσφέρουν σημαντική ευελιξία στον σχεδιαστή μηχανικό.
2. Το επίθεμα μπορεί να προσαρμοστεί με ευκολία στις πλέον πολύπλοκες γεωμετρίες υποστρώματος.
3. Λόγω της υψηλής αντοχής και ακαμψίας των ενισχυτικών ινών, τα επιθέματα από σύνθετο υλικό έχουν γενικά μικρό πάχος.
4. Στεγανοποιείται η περιοχή της επισκευής και προστατεύεται αποτελεσματικά το υπόστρωμα από τη διάβρωση.
5. Περιορίζονται οι ανεπιθύμητες παράπλευρες μεταβολές στην εντατική κατάσταση του υποστρώματος, καθώς το επίθεμα σχεδιάζεται έτσι ώστε να παραλαμβάνει σημαντικές τάσεις μόνο κατά τις κρίσιμες διευθύνσεις.
6. Μηδενίζεται η πιθανότητα πρόκλησης βλαβών στο υπόστρωμα και τις γειτνιάζουσες κατασκευές κατά την εφαρμογή της επισκευής.
7. Η σύνδεση του επιθέματος μέσω του στρώματος της κόλλας δεν εισάγει νέες συγκεντρώσεις τάσεων στην κατασκευή.
8. Περιορίζεται σημαντικά η πιθανότητα εμφάνισης διάβρωσης λόγω τριβής (fretting).
9. Τα επιθέματα από σύνθετο υλικό παρουσιάζουν γενικά πολύ καλή αντοχή σε κόπωση.
10. Ο μεγάλος χρόνος ζωής της επισκευής σε συνδυασμό με τη δυνατότητα παραλαβής σημαντικού ποσοστού του φορτίου του υποστρώματος από το επίθεμα, την καθιστούν μέθοδο μόνιμης επισκευής.
11. Παρέχεται η δυνατότητα επιθεώρησης της κατάστασης στο υπόστρωμα με τη χρήση απλών επιφανειακών μεθόδων NDE.
12. Η διαδικασία εφαρμογής μπορεί να σχεδιαστεί έτσι ώστε να μην αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες.
13. Η δυνατότητα εφαρμογής της μεθόδου κατά την επιχειρησιακή λειτουργία της ναυπηγικής κατασκευής μπορεί να προσφέρει σημαντικά οικονομικά οφέλη.

14. Εκτός από την επισκευή ρωγμών, η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί σε πολλές περιπτώσεις, μεταξύ άλλων για την δομική ενίσχυση μιας ακέραιας κατασκευής ή την στεγανοποίηση μιας διαρροής.

Μειονεκτήματα της μεθόδου

1. Η μέθοδος δύναται να ενέχει προβλήματα ασφάλειας εργασίας, εφόσον χρησιμοποιείται η μέθοδος εμβαπτισμού των ινών με το χέρι, όπου εκλύονται τοξικές αναθυμιάσεις από τη ρητίνη.
2. Ανάλογα με τον τρόπο εφαρμογής της μεθόδου, η ποιότητα του δεσμού της κόλλησης και οι τελικές μηχανικές ιδιότητες του επιθέματος εξαρτώνται σε κάποιο βαθμό από τον ανθρώπινο παράγοντα.
3. Ο μεγάλος όγκος των παραμέτρων που πρέπει να εξετάσει ο σχεδιαστής μηχανικός κατά την προσαρμογή της μεθόδου στην περίπτωση του, μπορούν ενδεχομένως να οδηγήσουν στην εφαρμογή μιας φαινομενικά βελτιστοποιημένης επισκευής, η οποία όμως στην πράξη να αποδειχθεί αναποτελεσματική.
4. Η πιστοποίηση της αποτελεσματικότητας και της αντοχής της επισκευής από τους οργανισμούς νηογνώνων ενέχει επιπλέον κόστος μελέτης και δοκιμών.
5. Η επισκευή είναι σχετικά ευάλωτη στις θερμοκρασιακές μεταβολές. Σε περίπτωση εκδήλωσης πυρκαγιάς το επίθεμα έχει σημαντικές πιθανότητες να αστοχήσει. Αυτό μπορεί να μην αποτελεί μεγάλο πρόβλημα για μεμονωμένες επισκευές, σε περίπτωση όμως που κατά τη διάρκεια ζωής μίας κατασκευής έχει εφαρμοστεί ικανός αριθμός επιθεμάτων, η εκδήλωση πυρκαγιάς και η επαγόμενη μαζική καταστροφή των επιθεμάτων μπορεί να προκαλέσει την άμεση κατάρρευση της κατασκευής.

Τομείς που χρήζουν περαιτέρω μελέτης

Από την ανάγνωση του κεφαλαίου, καθώς και από τη μελέτη της σχετικής βιβλιογραφίας, μπορούμε να διακρίνουμε την ύπαρξη αρκετών τομέων οι οποίοι χρήζουν επιπλέον μελέτης, μέσω της οποίας θα μπορούσε να βελτιωθεί η αποτελεσματικότητα και η αξιοπιστία της μεθόδου.

Τρέχουσες ερευνητικές προσπάθειες έχουν σαν στόχο την ανάπτυξη του «έξυπνου» επιθέματος, την ενσωμάτωση δηλαδή στην κατασκευή του επιθέματος αισθητήρων μη καταστροφικού ελέγχου, οι οποίοι να μπορούν να ενημερώνουν για την κατάσταση της επισκευής καθόλη τη ζωή της επισκευής. Υπάρχουν αναφορές αρκετών μεθόδων που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν, τα χαρακτηριστικά της εφαρμογής τους όμως μένει να διερευνηθούν, κυρίως σε ότι αφορά την αντοχή και τη διάρκεια ζωής των αισθητήρων, την διακριτική τους ικανότητα, την ικανότητα διασύνδεσης τους με ένα online σύστημα κεντρικής παρακολούθησης της συνολικής κατάστασης της δομής της ναυπηγικής κατασκευής, καθώς και τον περιορισμό της επίδρασης τους τοπικά στην αντοχή ή την αποτελεσματικότητα της επισκευής.

Πέρα από την ανάγκη συνεχούς έρευνας για την βελτίωση των υπαρχόντων υλικών και διαδικασιών, υπάρχει η ανάγκη κατάρτισης ενός εκτεταμένου και λεπτομερούς «καταλόγου» των υλικών και των διαδικασιών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τις ανάγκες της μεθόδου, με τα βασικά χαρακτηριστικά και τις απαιτήσεις καθενός από αυτά, ώστε να διευκολύνεται και να απλοποιείται το έργο του σχεδιαστή μηχανικού που αναλαμβάνει τη μελέτη και εφαρμογή της μεθόδου.

Ο σημαντικότερος όμως τομέας μελέτης, κατά τη γνώμη του υπογράφοντα, είναι η προσπάθεια δημιουργίας μιας τυποποιημένης συστηματικής μεθόδου σχεδίασης και βελτιστοποίησης της επισκευής, η οποία θα λαμβάνει υπόψη της το σύνολο των παραμέτρων που συμμετέχουν στη διαμόρφωση της μεθόδου επισκευής με επίθεμα σύνθετου υλικού και η οποία θα καθοδηγεί το μηχανικό σε κάθε βήμα της σχεδίασης και της εφαρμογής της επισκευής. Η απουσία μιας τέτοιας διαδικασίας αναγκάζει το σχεδιαστή μηχανικό που θα αναλάβει την εκτέλεση της επισκευής, να αναλάβει ταυτόχρονα και την επίπονη και χρονοβόρα μελέτη και προσαρμογή της εφαρμογής στα δικά του δεδομένα.

Τα υπάρχοντα αναλυτικά μοντέλα, όπως θα δούμε στο επόμενο κεφάλαιο, δεν μπορούν να προβλέψουν την επίδραση του συνόλου των παραμέτρων της γεωμετρίας και των υλικών του επιθέματος. Κατά συνέπεια απαιτείται η διενέργεια μελετών με ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων ή/και πειραματικών δοκιμών. Τυπικοί παράμετροι της επισκευής που καλείται να εξετάσει και να βελτιστοποιήσει ο σχεδιαστής μηχανικός είναι οι εξής:

1. Το ύψος του φορτίου που θα πρέπει να παραλαμβάνει το επίθεμα ώστε να είναι αποτελεσματική η επισκευή. Εκφράζεται κυρίως μέσω της επιθυμητής μείωσης του συντελεστή έντασης τάσης (Εξίσωση 1.13) στα άκρα της ρωγμής και εξαρτάται από την στατική και δυναμική εντατική κατάσταση του υποστρώματος, σε συνδυασμό με το υλικό και το πάχος του υποστρώματος, καθώς και τον τρόπο και την ταχύτητα επέκτασης της ρωγμής.
2. Η σχεδίαση του επιθέματος ώστε να παραλαμβάνει το επιθυμητό φορτίο από το υπόστρωμα. Εξαρτάται κυρίως από την ακαμψία του επιθέματος, το πάχος του στρώματος της κόλλας και τη γεωμετρία του επιθέματος. Η ακαμψία του επιθέματος εξαρτάται με τη σειρά της από το υλικό των ινών και της μήτρας, την περιεκτικότητα του επιθέματος σε ίνες, καθώς και από τις διαδικασίες εμβαπτισμού και πολυμερισμού του επιθέματος.
3. Η σχεδίαση της επισκευής ώστε να έχει μεγάλη διάρκεια ζωής. Η διάρκεια ζωής της επισκευής εξαρτάται από την αντοχή του επιθέματος στο φορτίο που πρόκειται να παραλάβει, την αντοχή του στο πιθανώς διαβρωτικό περιβάλλον της κατασκευής και τη συμπεριφορά του στις πιθανές θερμοκρασιακές μεταβολές που προβλέπονται κατά τη λειτουργία της κατασκευής. Η αντοχή του επιθέματος στο φορτίο, στατικό ή δυναμικό, εξαρτάται από το πάχος και το υλικό του στρώματος της κόλλας, τη γεωμετρία του επιθέματος, το υλικό των ινών και της μήτρας, την περιεκτικότητα του επιθέματος σε ίνες, καθώς και από τις διαδικασίες εμβαπτισμού και πολυμερισμού του επιθέματος.

4. Οι συνθήκες κατά την εφαρμογή της επισκευής. Εφόσον η επισκευή απαιτείται να εκτελεστεί χωρίς τη διακοπή της επιχειρησιακής λειτουργίας της κατασκευής, είναι πιθανό να απαιτείται συμβιβασμός στα υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ή στον τρόπο εφαρμογής και πολυμερισμού του επιθέματος. Αυτός ο συμβιβασμός μπορεί να οδηγήσει σε ανακύκλωση της διαδικασίας σχεδίασης του επιθέματος και σε αναπροσαρμογή του επιθυμητού φορτίου που αυτό θα παραλαμβάνει.
5. Το κόστος του επιθέματος. Η βελτιστοποίηση του κόστους απαιτεί την εκτεταμένη έρευνα των διαθέσιμων υλικών και διαδικασιών εφαρμογής της μεθόδου, ενώ μπορεί να οδηγήσει σε εκ νέου σχεδίαση του επιθέματος και σε αναπροσαρμογή του επιθυμητού φορτίου που αυτό θα παραλαμβάνει.

Μια απλή ανάγνωση των παραπάνω αρκεί για να παρατηρήσουμε την πολυπλοκότητα και το εύρος της μελέτης που απαιτείται και να αντιληφθούμε τα οφέλη που θα προέκυπταν από την ανάπτυξη μιας τυποποιημένης, συστηματικής μεθόδου σχεδίασης της επισκευής.

Μελέτες όπως η παρούσα διπλωματική εργασία, που ασχολείται με την παραμετρική μελέτη της γεωμετρίας του επιθέματος, υπάγονται στο ευρύτερο πλαίσιο μιας τέτοιας προσπάθειας, καθώς μπορεί να έχουν σαν άμεσο στόχο τη μελέτη ενός συγκεκριμένου και περιορισμένου τομέα της μεθόδου, αλλά μπορούν μακροπρόθεσμα να αποτελέσουν τη βάση για την ανάπτυξη της επιζητούμενης ενοποιημένης τυποποιημένης συστηματικής μεθόδου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

2.1 ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

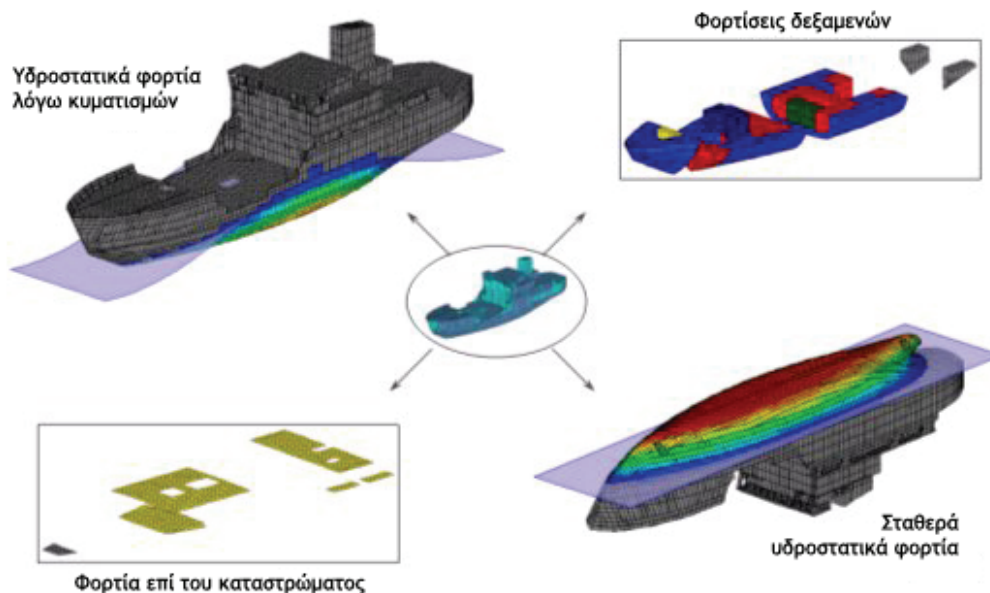
Η μέθοδος ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία (Finite Element Analysis/Method, FEA/FEM) αναπτύχθηκε για πρώτη φορά από τον Richard Courant το 1943, ο οποίος εφάρμοσε τη μέθοδο αριθμητικής ανάλυσης Ritz ώστε να εκτελέσει προσεγγιστικές επιλύσεις σε συστήματα κραδασμών. Το 1956 η διατριβή των M.J. Turner, R.W. Clough, H.C. Martin, και L.J. Torp εγκαθίδρυσε τον ευρύτερο ορισμό της μεθόδου, εστιάζοντας στην ακαμψία και την παραμορφωσιακή συμπεριφορά πολύπλοκων κατασκευών. Περί τα τέλη της δεκαετίας του 1950, οι κύριες έννοιες των μητρώων ακαμψίας και των συστημάτων στοιχείων είχαν πλέον διαμορφωθεί όπως τις ξέρουμε σήμερα και το 1965, η διεύθυνση διαστήματος και αεροναυτικής των Ηνωμένων Πολιτειών (National Space and Aeronautical Administration, NASA) ξεκίνησε διαγωνισμό για τη δημιουργία του πρώτου ολοκληρωμένου λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων, το οποίο έγινε γνωστό με την ονομασία NASTRAN.

Μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 1970, η χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων αφορούσε κυρίως μεγάλες εταιρίες που δραστηριοποιούνταν στην αμυντική, αεροναυτική και πυρηνική βιομηχανία, καθώς οι απαιτήσεις επεξεργαστικής ισχύος της μεθόδου μπορούσαν να ικανοποιηθούν μόνο από τους υπέρογκου κόστους κεντρικούς υπολογιστές (mainframes) της εποχής. Τα επόμενα χρόνια, η ραγδαία μείωση του κόστους και του μεγέθους των υπολογιστών καθώς και η συνεχής αύξηση της επεξεργαστικής τους ισχύος, έκανε εφικτή την ευρεία χρήση της μεθόδου και έδωσε την απαραίτητη ώθηση στην ανάπτυξη νέων, πιο εύχρηστων και αποδοτικών μορφών του λογισμικού. Στις μέρες μας διατίθενται στην αγορά δεκάδες πακέτα λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων, ενώ η χρήση της μεθόδου έχει επεκταθεί πέρα από την επίλυση δομικών συστημάτων και σε εφαρμογές μεταφοράς θερμότητας, υδροδυναμικής και ηλεκτρομαγνητισμού.

Στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, μία δομή, ή «μοντέλο», αναλύεται σε πολλά μικρότερα τμήματα, ή «στοιχεία» (elements), τα οποία αποτελούν το «πλέγμα» στοιχείων (element mesh) του μοντέλου. Κάθε στοιχείο αποτελείται από έναν αριθμό «κόμβων» (nodes) οι οποίοι ορίζουν τη μορφή και τις ιδιότητες του στοιχείου. Η συμπεριφορά καθενός από τα στοιχεία μπορεί να περιγραφεί με ένα πλήθος από συναρτήσεις (functions) και από σχετικά απλές εξισώσεις ισορροπίας (equilibrium equations). Όπως τα στοιχεία ενώνονται μεταξύ τους για να σχηματίσουν το μοντέλο, έτσι και οι εξισώσεις που διέπουν τη συμπεριφορά κάθε στοιχείου συσχετίζονται μεταξύ τους ώστε να περιγράψουν τη συνολική συμπεριφορά του μοντέλου υπό κάποια δεδομένη κατάσταση φόρτισης. Ο υπολογιστής επιλύει διαδοχικά το σύνολο των εξισώσεων και καταλήγει στην τελική επίλυση του μοντέλου, από όπου μπορούν να εξαχθούν οι τάσεις, οι παραμορφώσεις και άλλα στοιχεία για κάθε στοιχείο ξεχωριστά. Μπορούμε να αντιληφθούμε ότι όταν το πλήθος των στοιχείων από τα οποία αποτελείται το μοντέλο αυξάνεται, όσο δηλαδή το πλέγμα των στοιχείων γίνεται πυκνότερο, αυξάνεται αναλόγως και η ακρίβεια της επίλυσης, με παράλληλη αύξηση των απαιτήσεων αυτής σε επεξεργαστική ισχύ.

Η ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία παρέχει τη δυνατότητα στο σχεδιαστή μηχανικό να μελετήσει το πρόβλημα που καλείται να αντιμετωπίσει, χωρίς να αναλώνεται σε εκτενείς και δισεπίλυτους υπολογισμούς με τη χρήση αναλυτικών εξισώσεων και θεωριών. Άλλωστε σε πολλές περιπτώσεις η μελέτη πολύπλοκων κατασκευών βασίζεται σε εμπειρικά μοντέλα και θεωρίες οι οποίες προϋποθέτουν ευρείες παραδοχές, αδυνατώντας να προσφέρουν την επιθυμητή ακρίβεια, ενώ τα αποτελέσματα που προκύπτουν περιορίζονται συνήθως σε περιοχές της κατασκευής όπου αναμένεται να αναπτυχθούν οι πλέον κρίσιμες φορτίσεις κατά τη λειτουργία. Κατά συνέπεια, σε απαιτητικές εφαρμογές όπου δεν γίνεται χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων, είναι πολύ πιθανή η παρείσφρηση στη σχεδίαση περιοχών, οι οποίες ενώ δεν ανιχνεύτηκαν ως κρίσιμες κατά τη σχεδίαση, να αποδειχτούν «κρίσιμες» κατά τη λειτουργία, πιθανώς με την μορφή κάποιας αστοχίας.

Βασικό στοιχείο σε μία σχεδίαση είναι η επιβολή συντελεστών ασφαλείας στις διαστάσεις και το πάχος κάθε δομικού στοιχείου της κατασκευής. Εφόσον υφίστανται γεωμετρικοί περιορισμοί ο συντελεστής ασφαλείας μπορεί να μεταφραστεί σε επιλογή υλικού με καλύτερες μηχανικές ιδιότητες ή στην προσθήκη επιπλέον ενίσχυσης. Οι συντελεστές ασφαλείας αποτελούν ουσιαστικά ένα μέσο αντιστάθμισης της έλλειψης ακρίβειας κατά τον υπολογισμό των φορτίσεων και της αντοχής της κατασκευής. Με τη χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων κατά τη σχεδίαση επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ακρίβεια από ότι με τις συμβατικές αναλυτικές/ημιεμπειρικές μεθόδους, ενώ παρέχεται πλήρης και διαδραστική εικόνα των φορτίσεων στην κατασκευή. Η δυνατότητα σύνθεσης των φορτίσεων και η συνολική αντίληψη της συμπεριφοράς της κατασκευής που παρέχεται στο σχεδιαστή μηχανικό διακρίνεται στο παρακάτω ενδεικτικό Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1

Παράδειγμα χρήσης FEA για τον υπολογισμό της σύνθετης φόρτισης ενός πλοίου.

Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αποτελεσματικότερη βελτιστοποίηση της κατασκευής, αφού η μεγαλύτερη ακρίβεια και σαφήνεια μπορεί να μεταφραστεί σε μείωση των απαιτούμενων

συντελεστών ασφαλείας και συνεπώς τη σχεδίαση μικρότερων διατομών με ανάλογα μικρότερο βάρος και σε επιλογή οικονομικότερων υλικών, αυξάνοντας παράλληλα την ασφάλεια της κατασκευής και υπολογίζοντας με μεγαλύτερη ακρίβεια το χρόνο ζωής της υπό δεδομένο εύρος φορτίσεων.

Σημαντικό κομμάτι της διαδικασίας σχεδίασης μιας νέας κατασκευής, ιδιαίτερα αν αυτή είναι ειδικών απαιτήσεων, αποτελεί η διενέργεια πειραματικών δοκιμών των πλέον κρίσιμων δομικών στοιχείων, με στόχο σε πρώτο στάδιο τη διερεύνηση της συνεργασίας των τμημάτων που τα απαρτίζουν και την κατάδειξη προφανών ατελειών στη σχεδίαση και σε δεύτερο στάδιο την επιβεβαίωση της αξιοπιστίας της σχεδίασης και της ακρίβειας των υπολογισμών. Οι δοκιμές αυτές ενέχουν μεγάλο κόστος και σημαντικές καθυστερήσεις. Με τη χρήση ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία μπορεί να περιοριστεί ο όγκος των δοκιμών, καθώς εφόσον έχει προηγηθεί επιμελής βελτιστοποίηση της κατασκευής, απαιτείται μόνο η διενέργεια του δεύτερου σταδίου δοκιμών, προς επιβεβαίωση της επάρκειας της σχεδίασης.

Οι περισσότερες νέες κατασκευές, με ισχυρότερο παράδειγμα τη ναυπηγική, βασίζονται σε μεγάλο βαθμό στην εμπειρία και στα χαρακτηριστικά υπαρχόντων, βελτιστοποιημένων με τα χρόνια σχεδιάσεων. Αυτό οφείλεται κυρίως στην εξαιρετικά μεγάλη πολυπλοκότητα των κατασκευών αυτών και των φορτίσεων στις οποίες υπόκεινται, σε συνδυασμό με την εξασφαλισμένη κερδοφορία ακόμη και των πλέον συντηρητικών σχεδιάσεων στο σύγχρονο χώρο της ναυτιλίας. Σε αυτό το πλαίσιο, η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων έχει να προσφέρει κατά κύριο λόγο την ευκολία στη σχεδίαση και την παροχή μεγαλύτερη ακρίβειας και ασφάλειας στους υπολογισμούς αντοχής.

Εκεί όμως που η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων έχει ξεκινήσει μια μικρή επανάσταση, είναι στην έρευνα και ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και συστημάτων. Στην περίπτωση νέων, καινοτόμων κατασκευών, των οποίων η σχεδίαση ξεκινάει «από λευκό χαρτί», η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων έχει να προσφέρει την πλήρη μοντελοποίηση της δομής και της λειτουργίας της κατασκευής χωρίς να απαιτείται η εκτέλεση πειραματικών δοκιμών (τουλάχιστον στα πρώτα στάδια), παρέχοντας τη δυνατότητα στο σχεδιαστή μηχανικό να βελτιστοποιήσει κάθε τμήμα της σχεδίασης του ξεχωριστά, διακρίνοντας άμεσα την επίδραση των επιλογών του στην κατασκευή ως σύνολο, δοκιμάζοντας σε σχετικά σύντομο χρόνο και με χαμηλό κόστος πολλές διαφορετικές ιδέες, διατάξεις και υλικά.

Τα πλεονεκτήματα και οι σημαντικότερες δυνατότητες της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων μπορούν να συνοψιστούν στα εξής:

1. Μπορεί να επιλύσει συστήματα ανεξαρτήτως πολυπλοκότητας.
2. Εφόσον η πυκνότητα του πλέγματος είναι επαρκής, μπορεί να επιτευχθεί μεγάλη ακρίβεια στους υπολογισμούς.
3. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση διάφορων φαινομένων, όπως μεταφορά θερμότητας, κίνηση ρευστών, παραμορφώσεις και παραλαβή φορτίων, μαγνητικά πεδία, κ.α.
4. Ορισμένα πακέτα λογισμικού μπορούν να επιλύσουν συστήματα όπου συνυπάρχουν διάφορα φαινόμενα, π.χ. υπολογισμοί αντοχής αυλών καυσαερίων υψηλής πίεσης.

5. Μπορεί να επιλύσει μη γραμμικά συστήματα, π.χ. υπολογισμός αντοχής κατασκευής λαμβάνοντας υπόψη τη μετάβαση των υλικών από την ελαστική στην πλαστική περιοχή.
6. Προσφέρει τη δυνατότητα εκτέλεσης παραμετρικών μελετών βελτιστοποίησης μιας κατασκευής σε σύντομο χρόνο.
7. Παρέχει στο σχεδιαστή μηχανικό τη δυνατότητα συνολικής μελέτης και βελτιστοποίησης μιας κατασκευής.
8. Η παράθεση των αποτελεσμάτων μπορεί να γίνει οπτικά, διευκολύνοντας τον εντοπισμό περιοχών που χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης/βελτιστοποίησης.
9. Περιορίζει την ανάγκη εκτέλεσης πειραματικών δοκιμών, μειώνοντας το κόστος των νέων σχεδιάσεων.
10. Επιτρέπει την ταχύτερη εισαγωγή καινοτόμων κατασκευών, υλικών, και μεθόδων στη βιομηχανία.

Η εξέλιξη των πακέτων λογισμικού ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία συνεχίζεται με αμείωτο ρυθμό, προσφέροντας όλο και περισσότερα εργαλεία και δυνατότητες στο χρήστη. Παρόλα αυτά υπάρχουν ορισμένα αδύναμα σημεία στη μέθοδο, τα οποία και πρέπει να τύχουν της προσοχής του επίδοξου σχεδιαστή μηχανικού. Τα σημαντικότερα από αυτά μπορούν να συνοψιστούν στα εξής:

1. Στην περίπτωση ιδιαίτερα πολύπλοκων κατασκευών μπορεί να χρειαστεί κάποιος συμβιβασμός μεταξύ της πυκνότητας του πλέγματος στοιχείων και του χρόνου επίλυσης του προβλήματος. Ο συμβιβασμός αυτός ενδέχεται να επιδράσει αρνητικά στην ακρίβεια μεθόδου.
2. Η διάγνωση των λαθών σε ένα μοντέλο προς επίλυση δεν είναι πάντα εύκολη υπόθεση, ιδιαίτερα για τον μη έμπειρο χρήστη μηχανικό. Έτσι η επίλυση ενός φαινομενικά αξιόπιστου μοντέλου μπορεί εκ των υστέρων να αποδειχτεί ανακριβής. Άλλωστε εντυπωσιακές, πολύχρωμες κατανομές μπορούν να εξαχθούν από οποιοδήποτε μοντέλο, καλό ή κακό.
3. Η επένδυση σε έναν σύγχρονο κεντρικό υπολογιστή για την ταχεία επίλυση πολύπλοκων συστημάτων (ιδιαίτερα των μη-γραμμικών) ενέχει μεγάλο αρχικό κόστος.

Σε κάθε περίπτωση, οι δυνατότητες που προσφέρει η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων κατά τη μελέτη και σχεδίαση νέων και υπάρχοντων κατασκευών δεν πρέπει να καταργεί ή να υποσκελίζει την ανάπτυξη και χρήση αναλυτικών θεωριών και εξισώσεων για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς μιας κατασκευής στις συνθήκες και τα φορτία που σχεδιάζεται αυτή να αντιμετωπίσει. Άλλωστε στα αρχικά στάδια μιας μελέτης, ο μηχανικός βασίζεται συνήθως στα αποτελέσματα αναλυτικών εξισώσεων ώστε να επιβεβαιώσει την ορθότητα της διαδικασίας που ακολούθησε για τη δημιουργία ενός αξιόπιστου μοντέλου της κατασκευής. Υπό αυτό το πρίσμα θα ασχοληθούμε στην επόμενη παράγραφο 2.2 με την καταγραφή των αναλυτικών εξισώσεων που διέπουν τη μέθοδο επισκευής χαλύβδινης κατασκευής με επίθεμα σύνθετου υλικού.

2.2 ΟΙ ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΠΟΥ ΔΙΕΠΟΥΝ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ

2.2.1 ΖΗΤΟΥΜΕΝΑ - ΟΡΙΣΜΟΙ

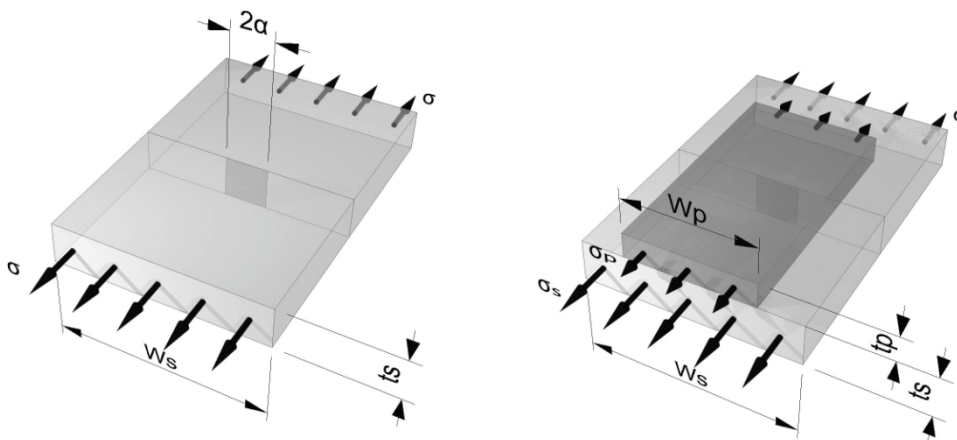
Όπως έχουμε ήδη αναφέρει στο πρώτο κεφάλαιο, μέτρο της αποτελεσματικότητας της μεθόδου επισκευής με επίθεμα σύνθετου υλικού είναι κατά κύριο λόγο η εξασθένιση των τάσεων στη ρωγματωμένη διατομή του υποστρώματος και η αντοχή της επισκευής στην κόπωση. Η εξασθένιση των τάσεων εκφράζεται με το συντελεστή έντασης τάσης στα άκρα της ρωγμής, ενώ η αντοχή της επισκευής αναλύεται στις επιμέρους αντοχές του στρώματος της κόλλας και των ενισχυτικών ινών του επιθέματος. Σε αυτήν την παράγραφο θα ασχοληθούμε με τις αναλυτικές θεωρίες και τις σχετικές εξισώσεις που προκύπτουν από αυτές, μέσω των οποίων μπορούν να υπολογιστούν τα μεγέθη των παραπάνω ιδιοτήτων της επισκευής.

Στο πλαίσιο της θεωρητικής επίλυσης του συστήματος κρίνεται αναγκαίο να τεθούν κάποιες βασικές παραδοχές οι οποίες επιτρέπουν την εφαρμογή των αναλυτικών θεωριών. Αυτές είναι:

1. Οι παραμορφώσεις θεωρούνται γραμμικά ελαστικές. Στην πραγματικότητα οι τάσεις πλησίον των άκρων της ρωγμής υπερβαίνουν τα ανώτατα όρια ελαστικής συμπεριφοράς των υλικών. Οι περιοχές αυτές πλαστικής συμπεριφοράς είναι αρκετά μικρές ώστε να μπορούν να αγνοηθούν κατά τη θεωρητική επίλυση.
2. Θεωρείται επίπεδη εντατική και παραμορφωσιακή κατάσταση στο υπόστρωμα και στο επίθεμα. Στην περίπτωση μας η εφαρμογή του επιθέματος γίνεται μόνο στην μία πλευρά του υποστρώματος, γίνεται δηλαδή έκκεντρη ενίσχυση του υποστρώματος. Η εμφάνιση κάμψης σε αυτήν την περίπτωση προβλέπεται με την επιβολή σχετικής διόρθωσης στις αναλυτικές εξισώσεις.
3. Το στρώμα της κόλλας θεωρείται ότι δρα ως ελατήριο, στα πλαίσια της κλασικής θεωρίας συνδέσεων δια κόλλησης, παραλαμβάνοντας μόνο διατμητικές τάσεις.
4. Το υπόστρωμα και το επίθεμα θεωρούνται δισδιάστατα ελαστικά συνεχή μέσα, στα οποία δύνανται να αναπτυχθούν μόνο ορθές τάσεις και παραμορφώσεις.
5. Τα υλικά του υποστρώματος και του στρώματος της κόλλας θεωρούνται ιστροπικά υλικά.
6. Το επίθεμα θεωρείται ορθοτροπικό υλικό. Ο κύριος άξονας του επιθέματος (άξονας 1) είναι παράλληλος στη διεύθυνση των ινών. Οι δευτερεύοντες άξονες έχουν τις ίδιες ιδιότητες και ορίζονται ως άξονες 2 και 3.
7. Τα μήκη του υποστρώματος και του επιθέματος δεν προσδιορίζονται καθώς θεωρούνται αρκετά μεγάλα ώστε να μην αποτελούν παράμετρο της επίλυσης.
8. Η ρωγή θεωρείται διαμπερής. Το άνοιγμα της ρωγμής θεωρείται τύπου I, δηλαδή συμμετρικού ανοίγματος.

Πριν προχωρήσουμε κρίνεται σκόπιμο να παρατεθεί η επεξήγηση των συμβόλων των βασικών μεγεθών στα οποία θα αναφερόμαστε στη συνέχεια, καθώς και ένα σχήμα όπου διακρίνονται τα βασικά στοιχεία της γεωμετρίας της επισκευής (Σχήμα 2.2):

- a : το ήμισυ του μήκους της ρωγμής (για ακραία ρωγμή το ολικό μήκος).
- W_S : το πλάτος του υποστρώματος.
- t_S : το πάχος του υποστρώματος.
- W_P : το πλάτος του επιθέματος.
- t_P : το πάχος του επιθέματος.
- t_A : το πάχος του στρώματος της κόλλας.
- σ : η ομοιόμορφη εφελκυστική τάση που αναπτύσσεται στο υπόστρωμα που δεν φέρει επίθεμα, σε διατομή μακριά από τη ρωγμή.
- σ_S : η ομοιόμορφη εφελκυστική τάση που αναπτύσσεται στο υπόστρωμα που φέρει επίθεμα και σε διατομή μακριά από τη ρωγμή αλλά σε περιοχή επί της οποίας έχει εφαρμοστεί το επίθεμα.
- σ_P : η ομοιόμορφη εφελκυστική τάση που αναπτύσσεται στο επίθεμα σε διατομή μακριά από τη ρωγμή.
- τ_A : η ομοιόμορφη διατμητική τάση που αναπτύσσεται στο στρώμα της κόλλας.
- γ_A : η διατμητική παραμόρφωση στο στρώμα της κόλλας.
- E_S : το μέτρο ελαστικότητας του υποστρώματος.
- G_S : το μέτρο διάτμησης του υποστρώματος.
- ν_S : ο λόγος Poisson του υποστρώματος.
- E_P : το μέτρο ελαστικότητας του επιθέματος κατά τον κύριο άξονα ($E_P = E_1$).
- G_P : το μέτρο διάτμησης του επιθέματος κατά τα επίπεδα 1-2 και 1-3 ($G_P = G_{12} = G_{13}$).
- ν_P : ο λόγος Poisson του επιθέματος κατά τα επίπεδα 1-2 και 1-3 ($\nu_P = \nu_{12} = \nu_{13}$).
- E_A : το μέτρο ελαστικότητας της κόλλας.
- G_A : το μέτρο διάτμησης της κόλλας.
- ν_A : ο λόγος Poisson της κόλλας.



Σχήμα 2.2

Απεικόνιση βασικών μεγεθών του υποστρώματος και του επιθέματος.

2.2.2 Η ΕΝΤΑΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΤΑ ΑΚΡΑ ΤΗΣ ΡΩΓΜΗΣ

α. Υπολογισμός του συντελεστή έντασης τάσης σε υπόστρωμα άνευ επιθέματος

Σύμφωνα με τη γραμμική ελαστική θεωρία θραύσης, όπως είδαμε στην παράγραφο 1.2 αλλά αναφέρουμε και εδώ για λόγους συνοχής του κειμένου, οι παράμετροι της εντατικής κατάστασης στο άκρο μιας ρωγμής, υπό δεδομένη μορφή παραμόρφωσης, είναι αναλλοίωτοι ως προς όλες τις συνιστώσες τους [7]. Η κατανομή των ελαστικών τάσεων στην περιοχή μπορεί να περιγραφεί μονοσήμαντα με τον συντελεστή έντασης τάσης, ΣΕΤ (Stress Intensity Factor, SIF). Για τύπο ρωγμής I ο ΣΕΤ συμβολίζεται με K_I . Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του υποστρώματος και τη θέση της ρωγμής σε αυτό, ο υπολογισμός του ΣΕΤ στα άκρα της ρωγμής του μη επισκευασμένου υποστρώματος γίνεται με τη βοήθεια των παρακάτω ημιεμπειρικών αναλυτικών εξισώσεων [7]. Να σημειωθεί ότι στις περιπτώσεις ακραίας ρωγμής, το σύμβολο a αναφέρεται στο μήκος της ρωγμής και όχι στο ήμισυ αυτού.

- *Κεντρική ρωγή σε υπόστρωμα άπειρου πλάτους.*

$$K_I = \sigma \cdot (\pi \cdot a)^{1/2} \quad (2.1)$$

- *Κεντρική ρωγή σε υπόστρωμα πεπερασμένου πλάτους.*

$$K_I = \sigma \cdot \left[\pi \cdot a \left(\frac{W_s}{\pi a} \tan \frac{\pi a}{W_s} \right) \right]^{1/2} \quad (2.2)$$

- *Απλή ακραία ρωγή σε υπόστρωμα πεπερασμένου πλάτους.*

$$K_I = Y \cdot \sigma \cdot (\pi \cdot a)^{1/2} \quad (2.3)$$

όπου ο συντελεστής Y δίνεται από τη σχέση:

$$Y = 1.12\sqrt{\pi} - 0.41 \frac{a}{W_s} + 18.7 \left(\frac{a}{W_s} \right)^2 - 38.48 \left(\frac{a}{W_s} \right)^3 + 53.85 \left(\frac{a}{W_s} \right)^4 \quad (2.4)$$

- *Διπλή ακραία ρωγή σε υπόστρωμα πεπερασμένου πλάτους.*

$$K_I = Y \cdot \sigma \cdot (\pi \cdot a)^{1/2} \quad (2.5)$$

όπου ο συντελεστής Y δίνεται από τη σχέση:

$$Y = 1.12\sqrt{\pi} + 0.76 \frac{a}{W_s} - 8.48 \left(\frac{a}{W_s} \right)^2 + 27.36 \left(\frac{a}{W_s} \right)^3 \quad (2.6)$$

β. Υπολογισμός του συντελεστή έντασης τάσης σε υπόστρωμα που φέρει επίθεμα

Η θεωρία του Rose [8][9][10] κάνει δυνατό τον υπολογισμό της μέγιστης τιμής της αναπτυσσόμενης τάσης στα άκρα της ρωγμής σε υπόστρωμα επισκευασμένο με αμφίπλευρο επίθεμα. Αναφέρεται ενδεικτικά ότι η θεωρία προβλέπει την ασυμπτωτική αύξηση της αναπτυσσόμενης τάσης με την αύξηση του μήκους της ρωγμής, αποδεικνύοντας ότι η τάση αυτή έχει πεπερασμένη τιμή, εφόσον θεωρηθεί η ικανότητα του επιθέματος να παραλάβει το φορτίο ακόμα και μετά την επέκταση της ρωγμής καθόλη τη διατομή του υποστρώματος. Ο προσδιορισμός της μέγιστης τιμής της τάσης που αναπτύσσεται στα άκρα της ρωγμής προσεγγίζεται με την επίλυση μιας ολοκληρωτικής εξίσωσης Fredholm, από την οποία η ασυμπτωτική συμπεριφορά συμπεραίνεται με τη μέθοδο των διαδοχικών προσεγγίσεων. Τελικά προκύπτει η εξίσωση που επιτρέπει τον υπολογισμό της τιμής του ΣΕΤ, K_R στην περίπτωση υποστρώματος που φέρει επίθεμα:

$$K_R = \frac{K_I}{(1+SR) \cdot \left(\frac{\alpha+\Lambda}{\Lambda}\right)^{1/2}} \quad (2.7)$$

όπου με SR συμβολίζεται ο λόγος ακαμψίας του συστήματος και όπως έχει οριστεί στην παράγραφο 1.2 ισούται με:

$$SR = \frac{E_P \cdot t_P}{E_S \cdot t_S} \quad (2.8)$$

ενώ με Λ συμβολίζεται το χαρακτηριστικό μήκος της ρωγμής, το οποίο είναι ανεξάρτητο του πραγματικού μήκους και της αναπτυσσόμενης τάσης και το οποίο ισούται με:

$$\Lambda = \left(\frac{t_A}{G_A} \cdot \frac{E_S \cdot t_S \cdot E_P \cdot t_P}{E_S \cdot t_S + E_P \cdot t_P} \right)^{1/2} \quad (2.9)$$

Παρατηρώντας τις σχέσεις 2.7 έως 2.9 γίνεται αντιληπτό ότι ο ΣΕΤ μετά την εφαρμογή του επιθέματος είναι πάντα μικρότερος του K_I , ενώ για δεδομένες τιμές επιβαλλόμενου φορτίου και μήκους ρωγμής, είναι αντιστρόφως ανάλογος του λόγου ακαμψίας, ενώ εξαρτάται σε μικρότερο βαθμό και από το πάχος και το μέτρο διάτμησης της κόλλας.

γ. Υπολογισμός της εναπομένουσας ζωής του συστήματος υποστρώματος/επιθέματος

Για να υπολογίσουμε πρακτικά την αποτελεσματικότητα της επισκευής, πρέπει να εκφράσουμε την επίδραση της μείωσης του ΣΕΤ λόγω της εφαρμογής του επιθέματος στον υπολειπόμενο χρόνο ζωής του συστήματος υποστρώματος/επιθέματος, δηλαδή στον αναμενόμενο αριθμό κύκλων φόρτισης της κατασκευής μέχρι η ρωγμή να επεκταθεί τόσο ώστε να επέλθει η θραύση του υποστρώματος. Το κατάλληλο αναλυτικό εργαλείο σε αυτήν την περίπτωση είναι ο νόμος του Paris [10] [11] [12], μέσω του οποίου θα μπορούσαμε να υπολογίσουμε τη μείωση που επιφέρει η εφαρμογή του επιθέματος στην ταχύτητα διάδοσης

της ρωγμής. Σύμφωνα με τον νόμο του Paris η ταχύτητα (ρυθμός) διάδοσης της ρωγμής δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K)^m \quad (2.10)$$

όπου C και m είναι σταθερές του υλικού του υποστρώματος, dN είναι ο υπολειπόμενος αριθμός κύκλων φόρτισης πριν τη θραύση και ΔK είναι το εύρος μεταβολής του ΣΕΤ κατά τη δυναμική φόρτιση της κατασκευής, ενώ για δεδομένο μήκος ρωγμής, είναι ευθέως ανάλογο του εύρους των τάσεων που αναπτύσσονται στο υπόστρωμα.

Η σχέση μπορεί να ολοκληρωθεί και να εκφραστεί βάσει των υπολειπόμενων κύκλων φόρτισης μέχρι τη θραύση, N_F (Fracture) του συστήματος υποστρώματος επιθέματος. Λαμβάνοντας υπόψη τη μεταβολή των συντελεστών του υλικού C και m ανάλογα με το αν η ρωγμή χαρακτηρίζεται «μικρή», (Small) ή «μεγάλη» (Large), η σχέση που προκύπτει είναι [8]:

$$N_F = \int_{a_0}^{a_S} \left(\frac{da}{C_S \cdot (\Delta K_R)^{m_S}} \right) + \int_{a_S}^{a_L} \left(\frac{da}{C_L \cdot (\Delta K_R)^{m_L}} \right) \quad (2.11)$$

Ένας τρόπος προσεγγιστικής επίλυσης της παραπάνω σχέσης είναι ο υπολογισμός του ΔK_R για διάφορα μήκη ρωγμών και η παρεμβολή των τιμών στο ολοκλήρωμα. Η σχέση που προκύπτει έχει τη μορφή:

$$N_F = \int_{a_0}^{a_1} \left(\frac{da}{C_S \cdot (\Delta K_{R,1})^{m_S}} \right) + \int_{a_1}^{a_2} \left(\frac{da}{C_S \cdot (\Delta K_{R,2})^{m_S}} \right) + \dots + \int_{a_S}^{a_{S+1}} \left(\frac{da}{C_L \cdot (\Delta K_{R,S+1})^{m_L}} \right) + \dots + \int_{a_{F-1}}^{a_F} \left(\frac{da}{C_L \cdot (\Delta K_{R,F})^{m_L}} \right) \quad (2.12)$$

γ. Πρόβλεψη έκκεντρης ενίσχυσης

Η θεωρία του Rose αγνοεί τη μεταβολή των τάσεων κατά το πάχος του υποστρώματος, η οποία οφείλεται στην ανάπτυξη καμπτικών ροπών ως αποτέλεσμα της έκκεντρης ενίσχυσης του υποστρώματος στην περίπτωση μονόπλευρου επιθέματος. Το φαινόμενο μπορεί να προβλεφθεί με τη χρήση ενός διορθωτικού συντελεστή επί του ΣΕΤ [10], μέσω του οποίου υπολογίζεται ο ΣΕΤ στο μέσο του πάχους του υποστρώματος, K_R' :

$$K_R' = (1 + BC) \cdot K_R \quad (2.13)$$

όπου ως BC συμβολίζεται ο συντελεστής διόρθωσης λόγω της κάμψης, (Bend Correction Factor), που υπολογίζεται από τη σχέση:

$$BC = a \cdot y_{MAX} \cdot \left(1 - \frac{K_R}{K_I} \right) \cdot (t_S + t_P) \cdot I^{-1} \quad (2.14)$$

όπου με y_{MAX} συμβολίζεται η απόσταση του ουδέτερου άξονα του συστήματος υποστρώματος/επιθέματος από την ελεύθερη επιφάνεια του υποστρώματος και με I

συμβολίζεται η ροπή αδράνειας της διατομής του συστήματος υποστρώματος/επιθέματος ως προς τον άξονα του πλάτους της διατομής, δηλαδή τον άξονα τον παράλληλο προς τη διεύθυνση διάδοσης της ρωγμής.

δ. Κριτήριο αποτελεσματικότητας της επισκευής

Ο ρυθμός διάδοσης της ρωγμής για τις περιπτώσεις ελεύθερου υποστρώματος και υποστρώματος που φέρει ενισχυτικό επίθεμα, αγνοώντας την εξάρτηση των συντελεστών C και m από το μήκος της ρωγμής, δίνονται αντίστοιχα από τις σχέσεις:

$$\frac{da}{dN_{FREE}} = C \cdot (\Delta K_I)^m \quad (2.15)$$

$$\frac{da}{dN_{PATCHED}} = C \cdot (\Delta K_R)^m \quad (2.16)$$

Διαιρώντας τις σχέσεις 2.15 και 2.16 μεταξύ τους προκύπτει η σχέση:

$$\frac{dN_{FREE}}{dN_{PATCHED}} = \left(\frac{\Delta K_R}{\Delta K_I} \right)^m \quad (2.17)$$

Ορίζοντας το συντελεστή λ ως το λόγο αύξησης των κύκλων φόρτισης μέχρι τη θραύση του υποστρώματος, ως αποτέλεσμα της εφαρμογής επιθέματος, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\lambda \equiv \frac{N_{F,PATCHED}}{N_{F,FREE}} = \frac{dN_{PATCHED}}{dN_{FREE}} \quad (2.18)$$

και αντικαθιστώντας στη σχέση 2.17, προκύπτει η άμεση συνάρτηση του ΣΕΤ της πλάκας με επίθεμα από την αναμενόμενη αύξηση του υπολειπόμενου χρόνου ζωής λόγω της εφαρμογής του επιθέματος:

$$\Delta K_R = \left(\frac{1}{\lambda} \right)^{1/m} \cdot \Delta K_I \quad (2.19)$$

Η αύξηση του υπολειπόμενου χρόνου ζωής της ρωγματωμένης κατασκευής είναι προφανώς ο κύριος στόχος της επισκευής. Θέτοντας το ζητούμενο λόγο αύξησης του χρόνου ζωής λ_{REQ} , προκύπτει το εξής κριτήριο σχεδίασης της επισκευής:

$$\Delta K_R \leq \left(\frac{1}{\lambda_{REQ}} \right)^{1/m} \cdot \Delta K_I \quad (2.20)$$

2.2.3 Η ΑΝΤΟΧΗ ΤΗΣ ΕΠΙΣΚΕΥΗΣ

α. Αντοχή του στρώματος της κόλλας

Το σημαντικότερο κριτήριο όσον αφορά στην αντοχή του στρώματος της κόλλας είναι το ανώτατο όριο της διατμητικής τάσης και παραμόρφωσης που μπορεί να αναπτυχθεί σε αυτό, χωρίς να επέλθει αστοχία του υλικού. Η διατμητική τάση που αναπτύσσεται στο στρώμα της κόλλας δίνεται με ικανοποιητική ακρίβεια από τη σχέση [10]:

$$\tau_A = (G_A - k \cdot B) \cdot \gamma_A + B \cdot (1 - e^{-k\gamma_A}) \quad (2.21)$$

όπου k , B σταθερές του υλικού της κόλλας που μπορούν να προσδιοριστούν με πειραματικές δοκιμές. Η επίλυση της παραπάνω σχέσης προϋποθέτει τον υπολογισμό της διατμητικής παραμόρφωσης στο στρώμα της κόλλας.

Η αναλυτική θεωρία προβλέπει την ασυμπτωτική συμπεριφορά της διατμητικής παραμόρφωσης του στρώματος της κόλλας [10]. Θεωρώντας ελαστική συμπεριφορά του υλικού, η μέγιστη τιμή της διατμητικής παραμόρφωσης προκύπτει από τη σχέση:

$$\gamma_{A,MAX} = \frac{\sigma \cdot t_S \cdot \beta}{G_A} \quad (2.22)$$

όπου β συντελεστής που εκφράζει το μήκος της ζώνης μεταφοράς των φορτίων και ισούται με:

$$\beta = \left[\left(\frac{G_A}{t_A} \right) \cdot \left[\left(\frac{1}{E_S \cdot t_S} \right) + \left(\frac{1}{E_P \cdot t_P} \right) \right] \right]^{1/2} \quad (2.23)$$

Εφόσον η αναπτυσσόμενη διατμητική τάση στο στρώμα της κόλλας υπερβεί το όριο διαρροής του υλικού σε διάτμηση, τ_Y , η θεωρία προβλέπει τον υπολογισμό της μέγιστης διατμητικής παραμόρφωσης για πλαστική συμπεριφορά από τη σχέση [8]:

$$\gamma_{A,MAX} = \frac{0.5 \cdot \tau_Y \cdot \left[1 + \left(\frac{\sigma \cdot t_S \cdot \beta}{\tau_Y} \right)^2 \right]}{G_A} \quad (2.24)$$

Αντικαθιστώντας την τιμή που προκύπτει από τη σχέσης 2.24 στη σχέση 2.21, καταλήγουμε στη μέγιστη τιμή της διατμητικής τάσης, $\tau_{A,MAX}$ που μπορεί να αναπτυχθεί στο στρώμα της κόλλας. Κριτήριο της σχεδίασης της επισκευής ως προς την αντοχή του στρώματος της κόλλας, είναι η διατήρηση της διατμητικής τάσης $\tau_{A,MAX}$ κάτω από το όριο διαρροής σε διάτμηση του υλικού, τ_Y .

Να σημειωθεί ότι στην περίπτωση μονόπλευρου επιθέματος πρέπει να λάβουμε υπόψη τη μετατόπιση κατά το πάχος του ουδέτερου άξονα της διατομής λόγω της έκκεντρης ενίσχυσης

του υποστρώματος, η οποία εισάγει ανεπιθύμητες δευτερεύουσες καμπτικές ροπές στο σύστημα, προκαλώντας την ανάπτυξη έντονων αποκολλητικών τάσεων, σ_{PEEL} στα άκρα του στρώματος της κόλλας. Οι τάσεις αυτές υπολογίζονται [13]:

$$\sigma_{PEEL} = \tau_{A,MAX} \cdot \left[\frac{3 \cdot t_p \cdot (1 - \nu_A^2)}{t_A} \right]^{1/4} \quad (2.25)$$

β. Αντοχή του επιθέματος

Βασικό κριτήριο που εκφράζει την αντοχή του επιθέματος είναι η μέγιστη επιτρεπόμενη παραμόρφωση των ινών. Στον πίνακα 2.1 παρουσιάζονται οι τιμές της παραμόρφωσης θραύσης των ινών για διάφορα υλικά.

Πίνακας 2.1
Όρια θραύσης ενισχυτικών ινών

Υλικό ινών	Τάση θραύσης σ_f (MPa)	Παραμόρφωση θραύσης ε_f (%)
Γυαλί	2400	3.0
Άνθρακας Υ.Α.	4500	1.8
Άνθρακας Υ.Μ.	2100	0.4
Άνθρακας Π.Υ.Μ.	2410	0.3
Βόριο	3600	0.5
Αρ. Πολυαμίδιο	2800	2.5

Υ.Α.: Υψηλής Αντοχής, Υ.Μ.: Υψηλού μέτρου ελαστικότητας, Π.Υ.Μ.: Πολύ υψηλού μέτρου ελαστικότητας

Η παραμόρφωση των ινών, ε_f συναρτάται με την ορθή εφελκυστική τάση που ασκείται σε αυτές, σ_f , με τον νόμο του Young:

$$\sigma_f = \varepsilon_f \cdot E_f \quad (2.26)$$

όπου E_f το μέτρο ελαστικότητας του υλικού των ινών. Μία πρώτη εκτίμηση της τάσης που αναπτύσσεται στο επίθεμα μπορούμε να πάρουμε από την ανεπτυγμένη μορφή της εξίσωσης 1.7 του πρώτου κεφαλαίου για την περίπτωση μονόπλευρου επιθέματος:

$$\sigma_p = \frac{\sigma \cdot t_s \cdot W_s \cdot E_p / E_s}{t_s \cdot W_s + E_p / E_s \cdot t_p \cdot W_p} \quad (2.27)$$

Γνωρίζοντας την τάση που αναπτύσσεται στο επίθεμα, μπορούμε με τη χρήση του κατάλληλου συντελεστή συγκέντρωσης τάσεων στο επίθεμα (βάσει της περιεκτικότητας του υλικού του επιθέματος σε ίνες και το μέτρο ελαστικότητας ινών/μήτρας) να υπολογίσουμε την τάση στις ενισχυτικές ίνες και στη συνέχεια την παραμόρφωση των ινών από τη σχέση 2.26, ελέγχοντας έτσι την αντοχή του επιθέματος.

2.3 ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΜΕ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

2.3.1 ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Η σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών έχει εξασφαλίσει για τις ερευνητικές της ανάγκες την άδεια χρήσης του πακέτου λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων ANSYS v9.0. Πρόκειται για ένα από τα πιο πλήρη και διαδεδομένα πακέτα λογισμικού FEA, με κύρια χαρακτηριστικά του το ιδιαίτερα εύχρηστο διαδραστικό γραφικό περιβάλλον, το σχετικά χαμηλό κόστος απόκτησης και τη δυνατότητα επίλυσης συστημάτων όπου επιδρούν ταυτόχρονα φαινόμενα γραμμικής και μη γραμμικής στατικής μηχανικής, ρευστομηχανικής, μεταφοράς θερμότητας, ακουστικής και ηλεκτρομαγνητισμού. Το λογισμικό χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση της παραμετρικής μελέτης που θα παρουσιαστεί στο επόμενο κεφάλαιο.

Το ANSYS αποτελεί δημιούργημα του Δρ. John Swanson [27]. Η σύλληψη της αρχικής ιδέας ανιχνεύεται το 1963 κατά την εργασία του Swanson στα εργαστήρια πυρηνικής πρόωσης της εταιρίας Westinghouse στο Pittsburgh των ΗΠΑ, ενώ η γέννηση του ANSYS ως λογισμικό ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία εντοπίζεται το 1970 από την εταιρία Swanson Analysis System Incorporated, με έδρα την οικία του ιδρυτή της. Έκτοτε γνώρισε σχετική επιτυχία με τη χρήση του κυρίως στο τοπικό κέντρο δεδομένων της εταιρίας Westinghouse. Η πρώτη μορφή του λογισμικού για χρήση σε προσωπικούς υπολογιστές κυκλοφόρησε το 1984 με την έκδοση v4.0. Το 1994 ιδρύθηκε η εταιρία ANSYS Incorporated, εισηγμένη από το 1996 στο χρηματιστήριο των ΗΠΑ, για να φτάσουμε στη σημερινή εξέχουσα θέση του λογισμικού στη διεθνή αγορά, με γραφεία πωλήσεων και υποστήριξης σε 40 χώρες ανά την υφήλιο και στην ανανεωμένη έκδοση ANSYS v11.0.

Κατά την μοντελοποίηση μιας κατασκευής σε λογισμικό FEA, ενδείκνυται να τηρούνται κάποιες βασικές αρχές οι οποίες αυξάνουν γενικά την ακρίβεια της μεθόδου ή/και μειώνουν τις απαιτήσεις σε επεξεργαστική ισχύ. Αυτές μπορούν να συνοψιστούν στις:

1. Οι συνθήκες συμμετρίας πρέπει να εκμεταλλεύονται στο μέγιστο δυνατό, ώστε να περιορίζεται το μέγεθος του μοντέλου και το πλήθος των εξισώσεων ισορροπίας.
2. Πρέπει να εξασφαλίζεται συμβατότητα μετατοπίσεων στους κόμβους και τις ακμές των στοιχείων. Συνήθως η συμβατότητα αυτή μπορεί να επιτευχθεί με την εισαγωγή κατάλληλων εξισώσεων περιορισμού.
3. Η επιλογή των στοιχείων πρέπει να γίνεται βάσει της ικανότητας τους να ακολουθούν τη συμπεριφορά της πραγματικής κατασκευής, τόσο τοπικά όσο και συνολικά.
4. Το πλέγμα στοιχείων πρέπει να είναι αρκετά πυκνό, ώστε να επιτυγχάνεται ικανοποιητική ακρίβεια. Ένας άμεσος τρόπος εκτίμησης της ενδεδωμένης πυκνότητας είναι η σταδιακή αύξηση αυτής, μέχρι οι υπολογισθείσες τιμές των ζητούμενων μεγεθών να συγκλίνουν.
5. Μεγάλη προσοχή πρέπει να δίνεται στην επιβολή των συνοριακών συνθηκών, ιδιαίτερα στους κόμβους επί των αξόνων συμμετρίας.

Η διαδικασία χωρίζεται γενικά σε τρία κύρια στάδια, ανεξάρτητα από το λογισμικό ή το είδος της κατασκευής. Αυτά είναι:

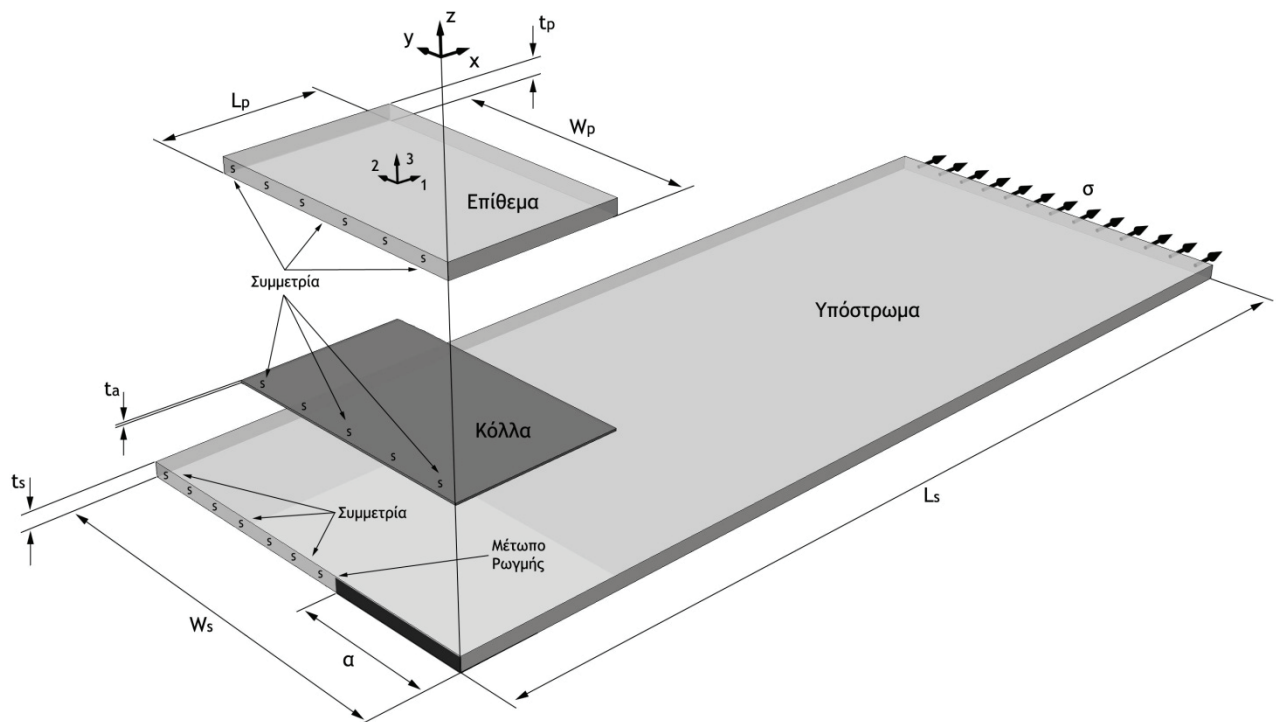
1. *Προεπεξεργασία (Preprocessing)*. Σε αυτό το στάδιο δημιουργείται η γεωμετρία του μοντέλου, εισάγονται οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών, ορίζεται το πλέγμα στοιχείων και επιβάλλονται οι φορτίσεις και οι συνοριακές συνθήκες. Με την ολοκλήρωση των παραπάνω έχει ουσιαστικά καταρτιστεί το σύστημα εξισώσεων ισορροπίας που περιγράφει το μοντέλο.
2. *Επίλυση (Solving)*. Σε αυτό το στάδιο καθορίζονται τα χαρακτηριστικά της επίλυσης και στη συνέχεια επιλύεται το σύστημα εξισώσεων που έχει προκύψει από την προεπεξεργασία. Υπάρχουν συνήθως επιλογές στατικής ή δυναμικής φόρτισης καθώς και η δυνατότητα γραμμικής ή μη-γραμμικής επίλυσης, υπολογίζοντας έτσι με μεγαλύτερη ακρίβεια την πιθανή εμφάνιση μεγάλων μετατοπίσεων στο μοντέλο. Τα περισσότερα σύγχρονα πακέτα λογισμικού FEA παρέχουν τη δυνατότητα σύγχρονου οπτικού ελέγχου της επίλυσης. Έτσι ο χρήστης μπορεί να διακόψει ανά πάσα στιγμή την επίλυση, εφόσον διαγνώσει κακή συμπεριφορά ή δυσκολία σύγκλισης αυτής, ένδειξη κάποιου σφάλματος ή παραλείψεων κατά την προεπεξεργασία.
3. *Μεταεπεξεργασία (Postprocessing)*. Σε αυτό το στάδιο γίνεται έλεγχος της συμπεριφοράς του μοντέλου και στη συνέχεια εξάγονται τα ζητούμενα αποτελέσματα. Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων μπορεί να γίνει είτε οπτικά, με τη μορφή κατανομών, είτε αριθμητικά με τη μορφή μητρώων για κάθε κόμβο ή στοιχείο.

Στη συνέχεια θα εξετάσουμε βήμα προς βήμα τη διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη μοντελοποίηση και επίλυση σε λογισμικό FEA. Σε κάθε βήμα, πέρα από τις όποιες γενικές οδηγίες και κατευθύνσεις, θα παρουσιάζεται λεπτομερώς η διαδικασία, συνοδευόμενη από σχήματα και αποσπάσματα κώδικα, που εφαρμόστηκε στο ANSYS και η οποία οδήγησε στο μοντέλο με το οποίο εκτελέστηκε η παραμετρική μελέτη του επόμενου κεφαλαίου. Αυτή η αναλυτική παράθεση μπορεί να κουράσει και να κριθεί άσκοπη από τον έμπειρο χρήστη μηχανικό, μπορεί όμως να βοηθήσει όποιον κάνει τα πρώτα του βήματα στη μελέτη της μεθόδου επισκευής με επίθεμα σύνθετου υλικού με τη βοήθεια ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων.

Για τις ανάγκες βελτιστοποίησης του πλέγματος στοιχείων και επαλήθευσης της ακρίβειας του μοντέλου, πέρα από τα εργαλεία εντοπισμού λαθών που είναι ενσωματωμένα στο λογισμικό, ακολουθήθηκαν δύο οδοί. Η βελτιστοποίηση του πλέγματος έγινε χρησιμοποιώντας ως αναφορά την τιμή του ΣΕΤ, όπως αυτή προκύπτει από τις σχέσεις της παραγράφου 2.2.2 για υπόστρωμα χωρίς επίθεμα, ενώ η ακρίβεια του μοντέλου επαληθεύτηκε χρησιμοποιώντας ως αναφορά τα αποτελέσματα σχετικής μελέτης που εντοπίστηκε στη βιβλιογραφία [14]. Η γεωμετρία και τα υλικά αυτής της μελέτης χρησιμοποιήθηκαν ως πρότυπο κατά τη συγγραφή του κώδικα του μοντέλου. Η μελέτη αναφέρεται σε υπόστρωμα αλουμινίου που φέρει ακραία διαμπερή ρωγμή, όπου εφαρμόζεται ένα λεπτό φιλμ εποξικής κόλλας και μονόπλευρο επίθεμα μονοαξονικών υαλονημάτων σε μήτρα εποξικής ρητίνης. Να σημειωθεί ότι λόγω συμμετρίας μοντελοποιείται το ήμισυ της κατασκευής. Τα βασικά μεγέθη και οι ιδιότητες παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα 2.2, ενώ το μοντέλο απεικονίζεται στο Σχήμα 2.3.

Πίνακας 2.2
Στοιχεία γεωμετρίας και ιδιότητες υλικών του μοντέλου

Παράμετρος	Σύμβολο	Τιμή	Παράμετρος	Σύμβολο	Τιμή
Μήκος υποστρώματος	$2 \cdot L_s$	200 mm	Μέτρο ελαστικότητας υποστρώματος	E_s	70 GPa
Πλάτος υποστρώματος	W_s	40 mm	Λόγος Poisson υποστρώματος	ν_s	0.32
Πάχος υποστρώματος	t_s	1.5 mm	Μέτρο ελαστικότητας επιθέματος (άξονας 1)	E_{P1}	38.60 GPa
Μήκος επιθέματος	$2 \cdot L_p$	26 mm	Μέτρο ελαστικότητας επιθέματος (άξονες 2,3)	$E_{P2}=E_{P3}$	8.27 GPa
Πλάτος επιθέματος	W_p	26 mm	Λόγος Poisson επιθέματος (επίπεδα 1-2, 1-3)	$\nu_{P12}=\nu_{P13}$	0.168
Πάχος επιθέματος	t_p	1.4 mm	Λόγος Poisson επιθέματος (επίπεδο 2-3)	ν_{P23}	0.035
Πάχος στρώματος κόλλας	t_a	0.2 mm	Μέτρο διάτμησης επιθέματος (επίπεδα 1-2, 1-3)	$G_{P12}=G_{P13}$	4.14 GPa
Μήκος ρωγμής	a	15 mm	Μέτρο διάτμησης επιθέματος (επίπεδα 2-3)	G_{P23}	3.14 GPa
Επιβαλλόμενη τάση	σ	58.33 MPa	Μέτρο ελαστικότητας κόλλας	E_a	2.20 GPa
			Λόγος Poisson κόλλας	ν_a	0.32



Σχήμα 2.3
Απεικόνιση του μοντέλου

2.3.2 ΠΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ (PREPROCESSING)

α. Ορισμός μεταβλητών - γεωμετρίας

Τα περισσότερα σύγχρονα πακέτα λογισμικού FEA παρέχουν τη δυνατότητα στο χρήστη να δημιουργεί τη γεωμετρία της κατασκευής προς μελέτη είτε με τη βοήθεια κάποιου ενσωματωμένου υποπρογράμματος σχεδίασης είτε με την υποστήριξη εισαγωγής αρχείου γεωμετρίας από κάποιο ανεξάρτητο πρόγραμμα σχεδίασης CAD (Computer Aided Design). Επίσης δίνεται η δυνατότητα να εισαχθούν οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών, οι συνοριακές συνθήκες (συμμετρίας και στήριξης), οι φορτίσεις και γενικά να δημιουργηθεί ένα πλήρες μοντέλο προς επίλυση μέσα από ένα άμεσο, εύχρηστο και διαδραστικό γραφικό περιβάλλον. Αυτή η δυνατότητα είναι πολύ σημαντική, καθώς καταργεί γενικά την ανάγκη συγγραφής κώδικα, μειώνοντας κατά πολύ τον χρόνο που απαιτείται από τον χρήστη ώστε να δημιουργήσει το μοντέλο του.

Στην περίπτωση μας όμως, το μοντέλο προορίζεται για την εκτέλεση παραμετρικής μελέτης, όπου ως προς μελέτη παράμετροι ορίζονται και στοιχεία της γεωμετρίας του μοντέλου. Αυτό σημαίνει ότι εφόσον ακολουθούσαμε την οδό της γραφικής σχεδίασης και καθορισμού ιδιοτήτων, τότε για κάθε τιμή της εκάστοτε γεωμετρικής παραμέτρου θα έπρεπε να σχεδιάζουμε εξ αρχής το μοντέλο, αφού μόλις οριστεί το πλέγμα στοιχείων δεν μπορεί πλέον να γίνει καμία αλλαγή στη γεωμετρία του μοντέλου. Να σημειωθεί ότι ορισμένα πακέτα λογισμικού φέρονται να παρέχουν εν μέρει αυτή τη δυνατότητα, όχι όμως και το ANSYS v9.0.

Ο παραπάνω περιορισμός μεταφράζεται στην ανάγκη δημιουργίας ενός κύριου κώδικα του μοντέλου, ώστε η παραγωγή των έτοιμων προς επίλυση μοντέλων κατά την παραμετρική μελέτη να γίνεται σε ελάχιστο χρόνο, μόνο με τη μεταβολή της τιμής της εκάστοτε παραμέτρου και στη συνέχεια την ανάγνωση του κώδικα από το λογισμικό FEA.

Στην αρχή του κώδικα είναι σημαντικό να ορίζεται το σύνολο των μεγεθών και ιδιοτήτων του μοντέλου με τη μορφή μεταβλητών. Με αυτόν τον τρόπο οι εντολές που ακολουθούν στον κώδικα και καλύπτουν όλα τα στάδια της προεπεξεργασίας, δέχονται ως ορίσματα τις αρχικά ορισθείσες μεταβλητές. Αυτό σημαίνει ότι άπαξ και επιβεβαιωθεί η αξιοπιστία του μοντέλου, ο χρήστης κατά την παραμετρική του μελέτη θα χρειαστεί να επεξεργάζεται μόνο τις τιμές των μεταβλητών, χρησιμοποιώντας ένα κύριο κώδικα καθόλη τη μελέτη.

Εκτός των μεταβλητών που ορίζουν τη γεωμετρία, τις φορτίσεις και τις ιδιότητες των υλικών, εισάγονται και κάποιες επιπλέον μεταβλητές που ορίζουν κάποια χαρακτηριστικά του πλέγματος στοιχείων και επιτρέπουν την εύκολη και άμεση μεταβολή της πυκνότητας αυτού. Στις μεταβλητές αυτές θα αναφερθούμε αναλυτικά στη συνέχεια. Η εντολή που καλείται για την εισαγωγή των μεταβλητών είναι η:

***SET, Par, Value, Val1, Val2, ...**

όπου ***SET** το όνομα κλήσης της εντολής,

Par το όρισμα της ονομασίας αναφοράς που θέλουμε να έχει η μεταβλητή,

Value το όρισμα της μεταβλητής που μπορεί να είναι σταθερή τιμή ή συνάρτηση και

Val1, Val2, ... τα επιπλέον ορίσματα για πολυδιάστατες μεταβλητές.

Να σημειωθεί ότι όλες οι διαστάσεις εισάγονται σε μέτρα και οι τάσεις/ακαμψίες σε MPa. Ακολουθεί απόσπασμα του κώδικα όπου φαίνεται ο τρόπος εισαγωγής των μεταβλητών:

```
*SET, Ls, 0.1000
*SET, Ws, 0.0400
*SET, Ts, 0.0015
...
*SET, Es, 70000
*SET, Ns, 0.32
...
*SET, CP, a/4
*SET, CTER, a/24
...
```

Στη συνέχεια ορίζονται τα υλικά που θα απαρτίζουν το μοντέλο και οι μηχανικές ιδιότητες αυτών. Τα υλικά ορίζονται μέσω της απευθείας εισαγωγής των ιδιοτήτων τους. Η σχετική εντολή που καλείται είναι η:

MP, Lab, MAT, C0, C1, C2, C3, C4

όπου **MP** το όνομα κλήσης της εντολής,
Lab το είδος της ιδιότητας που θέλουμε να εισάγουμε,
MAT ο αριθμός αναφοράς του υλικού,
C0 η αριθμητική τιμή της ιδιότητας ή η συνάρτηση εκ της οποίας προκύπτει και
C1, C2, C3, C4 ορίσματα που αναφέρονται στους συντελεστές πολυωνύμου 4^{ου} βαθμού το οποίο προσδιορίζει την εξάρτηση της ιδιότητας από τη θερμοκρασία.

Σημειώνεται ότι εφόσον δεν εισαχθούν τιμές στα ορίσματα **C1, C2, C3** και **C4**, η ιδιότητα που εισάγουμε θεωρείται ότι δεν επηρεάζεται από τη θερμοκρασία. Ακολουθεί απόσπασμα του κώδικα όπου φαίνεται ο τρόπος εισαγωγής των υλικών και ορισμού των ιδιοτήτων τους:

```
mp, ex, 1, Es          ! (Υπόστρωμα)
mp, prxy, 1, Ns
mp, ex,2, Ea          ! (Στρώμα κόλλας)
mp, prxy, 2, Na
mp, ex, 3, Ep1        ! (Επίθεμα)
mp, ey, 3, Ep2
mp, ez, 3, Ep3
mp, prxy, 3, Np12
mp, pryz, 3, Np23
...
```

Ενδεικτικές τιμές που μπορεί να δεχτεί το όρισμα **Lab** είναι τα **ex, ey, ez** για τα μέτρα ελαστικότητας κατά τις τρεις διευθύνσεις, τα **prxy, prxz, pryz** για τους λόγους Poisson, **gxy, gxz, gyz** για τα μέτρα διάτμησης, **dens** για την πυκνότητα του υλικού, **visc** για το κινηματικό ιξώδες, κ.α. Στο μοντέλο μας ορίσαμε αριθμό αναφοράς 1 για το υλικό του υποστρώματος, 2 για την κόλλα και 3 για το επίθεμα.

Η γεωμετρία του μοντέλου έχει άμεση σχέση με τα χαρακτηριστικά του πλέγματος στοιχείων που θα δημιουργηθεί στη συνέχεια. Επομένως, εφόσον κρίνεται χρήσιμο να υπάρχουν περιοχές με διαφορετική πυκνότητα στο πλέγμα, οι διαφορετικές αυτές περιοχές πρέπει να καθοριστούν κατά τη δημιουργία της γεωμετρίας του μοντέλου. Στην περίπτωση μας το μοντέλο χωρίζεται σε τρεις περιοχές διαφορετικής πυκνότητας πλέγματος. Την περιοχή που περιβάλλει το άκρο της ρωγμής, την περιοχή όπου τοποθετείται το επίθεμα και την περιοχή του υποστρώματος μακριά από το επίθεμα.

Να σημειωθεί ότι, για να επιτευχθεί η ελεγχόμενη κατανομή στοιχείων κατά το πάχος, το μοντέλο πρέπει να σχεδιαστεί αρχικά δισδιάστατο, να δημιουργηθεί το επίσης δισδιάστατο πλέγμα στοιχείων (επίπεδο x-y) και στη συνέχεια να γίνει εξώθηση (extrusion) των όγκων, σχηματίζοντας το τελικό τρισδιάστατο μοντέλο και πλέγμα.

Η διαδικασία σχεδίασης ξεκινάει με τον ορισμό των σημείων (keypoints) των άκρων των επιφανειών από τις οποίες θα αποτελείται το μοντέλο. Η σχετική εντολή είναι η:

K, NPT, X, Y, Z

όπου **K** το όνομα κλήσης της εντολής,

NPT το όρισμα του αριθμού αναφοράς που θέλουμε να έχει το σημείο και

X, Y, Z τα ορίσματα των συντεταγμένων του σημείου.

Ακολουθούν το σχετικό απόσπασμα του κώδικα του μοντέλου και η απεικόνιση του αποτελέσματος της ανάγνωσης του από το λογισμικό, Σχήμα 2.4:

K,1,0,0,0,
K,2,0,Ws,0,
K,3,Ls,Ws,0,
K,4,Ls,0,0,
K,101,0,a,0,
K,201,0,a-CP,0,
K,202,0,a+CP,0,
K,203,2*CP,a-CP,0,
K,204,2*CP,a+CP,0,
K,301,0,Wp,0
K,302,2*CP,Wp,0
K,303,Lp,Wp,0
K,304,Lp,a+CP,0
K,305,Lp,a-CP,0
K,306,Lp,0,0
K,307,2*CP,0,0
K,401,Ls,Wp,0
K,402,Ls,a+CP,0
K,403,Ls,a-CP,0
K,404,2*CP,Ws,0
K,405,Lp,Ws,0



Σχήμα 2.4

Τα σημεία που ορίζουν το δισδιάστατο μοντέλο.

Το σημείο 101 ταυτίζεται με το άκρο της ρωγμής. Να σημειωθεί ότι η μεταβλητή *CP* η οποία εμφανίζεται ως όρισμα στις παραπάνω γραμμές κώδικα, προσδιορίζει το εύρος της

περιοχής υψηλής πυκνότητας του πλέγματος πλησίον της ρωγμής και ο ρόλος της θα εξηγηθεί στη συνέχεια.

Επόμενο βήμα είναι η δημιουργία των επιφανειών που ορίζονται από τα σημεία που εισήχθησαν προηγουμένως. Η εντολή που θα καλέσουμε είναι η:

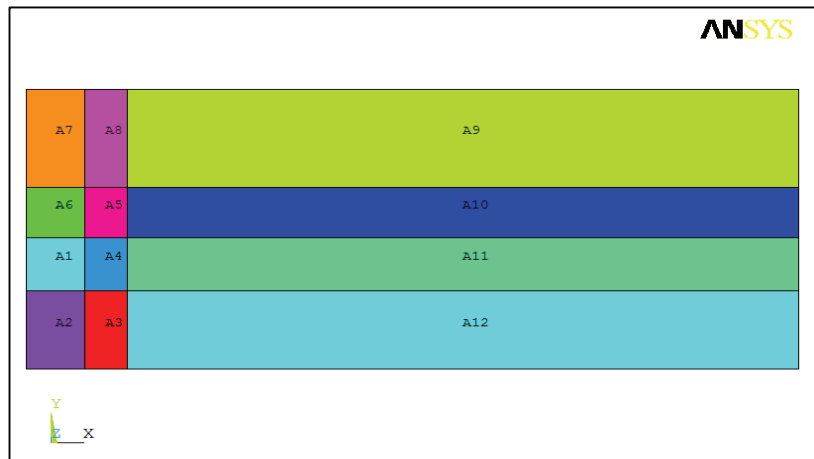
A, P₁, P₂, P₃, ...

όπου **A** το όνομα κλήσης της εντολής και

P₁, P₂, P₃, ... οι αριθμοί αναφοράς των σημείων από τα οποία ορίζεται η επιφάνεια.

Ακολουθούν το σχετικό απόσπασμα του κώδικα του μοντέλου και η απεικόνιση του αποτελέσματος της ανάγνωσής του από το λογισμικό, Σχήμα 2.5:

a,201,101,202,204,203
 a,1,201,203,307
 a,307,203,305,306
 a,203,204,304,305
 a,204,302,303,304
 a,202,301,302,204
 a,301,2,404,302
 a,302,404,405,303
 a,303,405,3,401
 a,304,303,401,402
 a,305,304,402,403
 a,306,305,403,4



Σχήμα 2.5

Οι επιφάνειες που αποτελούν το δισδιάστατο μοντέλο

Θα υπέθετε κανείς ότι το επόμενο βήμα θα είχε να κάνει με την εξαγωγή των όγκων και την ολοκλήρωση της γεωμετρίας του μοντέλου. Στην πράξη όμως απαιτείται να οριστούν πρώτα τα χαρακτηριστικά του πλέγματος στοιχείων και να δημιουργηθεί το δισδιάστατο πλέγμα επί των επιφανειών, ώστε κατά την εξαγωγή των όγκων να εξαχθεί παράλληλα και το τρισδιάστατο πλέγμα στοιχείων του μοντέλου. Με τη διαδικασία αυτή θα ασχοληθούμε εκτεταμένα στη συνέχεια. Παρόλα αυτά και για λόγους συνοχής του κειμένου θα αναφέρουμε σε αυτό το σημείο τη διαδικασία της δημιουργίας των όγκων του μοντέλου.

Για την εξαγωγή των όγκων απαιτείται μια σειρά εντολών οι οποίες και αναφέρονται παρακάτω με τη σειρά που καλούνται στον κώδικα:

Επιλογή είδους στοιχείων:

TYPE, ITYPE

όπου **TYPE** το όνομα κλήσης της εντολής και

ITYPE ο αριθμός αναφοράς του είδους του στοιχείου.

Η παραπάνω εντολή καλείται ώστε να επιλεγεί το κατάλληλο είδος στοιχείου που θα χρησιμοποιηθεί κατά την εξώθηση της επιλεγμένης επιφάνειας. Περισσότερα για τον ορισμό των ειδών των στοιχείων θα αναφέρουμε στη συνέχεια.

Ορισμός επιλογών εξώθησης:

EXTOPT, *Lab*, *Val1*, *Val2*, *Val3*

όπου **EXTOPT** το όνομα κλήσης της εντολής,
Lab η επιλογή ελέγχου της εξώθησης που πρόκειται να οριστεί και
Val1, *Val2*, *Val3* τα ορίσματα που προσδιορίζουν την επιλογή αυτή.

Με την εντολή αυτή κάνουμε τις απαραίτητες επιλογές για να προσδιορίσουμε τον τρόπο της εξώθησης των όγκων. Αναφέρονται οι επιλογές που μας ενδιαφέρουν και τα ορίσματα τους:

ESIZE. Η επιλογή αυτή καθορίζει τον αριθμό των στοιχείων κατά το πάχος στους όγκους που θα εξωθηθούν. Δέχεται σαν ορίσματα τιμές, μεταβλητές ή συναρτήσεις μεταβλητών.

ACLEAR. Αναφέρεται στην διαγραφή ή διατήρηση των επίπεδων στοιχείων της επιφάνειας βάσει της οποίας εξωθείται ο όγκος. Τα ορίσματα που μπορεί να δεχτεί είναι 0 και 1. Το 0 μεταφράζεται σε διατήρηση, ενώ το 1 σε διαγραφή. Στην περίπτωση μας τα επίπεδα στοιχεία είναι βοηθητικά και επιλέγεται να διαγραφούν κατά την εξώθηση.

ATTR. Η επιλογή καθορίζει τις ιδιότητες των όγκων και των στοιχείων που θα εξωθηθούν. Δέχεται ορίσματα 0 και 1. Το 0 μεταφράζεται σε χρήση των ιδιοτήτων του υλικού της τρέχουσας επιλογής και το 1 σε χρήση των ιδιοτήτων της επιφάνειας βάσει της οποίας γίνεται η εξώθηση. Καθώς στην περίπτωση μας θα εξαχθούν τρεις όγκοι ανά επιφάνεια, διαφορετικού υλικού ο καθένας, επιλέγεται το όρισμα 0.

Επιλογή υλικού:

MAT, *MAT*

όπου **MAT** το όνομα κλήσης της εντολής και
MAT ο αριθμός αναφοράς του υλικού που θα χρησιμοποιηθεί για τους όγκους και τα στοιχεία που πρόκειται να εξωθηθούν.

Επιλογή συλλογής σταθερών:

REAL, *NSET*

όπου **REAL** το όνομα κλήσης της εντολής και
NSET ο αριθμός αναφοράς της συλλογής (set) αριθμητικών σταθερών που θα χρησιμοποιηθεί για τους όγκους και τα στοιχεία που πρόκειται να εξωθηθούν.

Καθώς δεν υπήρξε ανάγκη στην περίπτωση μας για ορισμό επιπλέον συλλογών, το όρισμα της εντολής θα είναι `_Z4` που αντιστοιχεί στη βασική (default) συλλογή σταθερών του συστήματος.

Επιλογή συστήματος συντεταγμένων:

ESYS, KCN

όπου **ESYS** το όνομα κλήσης της εντολής και **KCN** ο αριθμός αναφοράς του συστήματος συντεταγμένων στο οποίο θα αναφέρονται τα στοιχεία που παραχθούν από την εξώθηση.

Στην περίπτωση μας το όρισμα της παραπάνω εντολής επιλέχτηκε ίσο με 1, τιμή που αντιστοιχεί στο γενικό καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων, το οποίο και χρησιμοποιείται καθόλη την προεπεξεργασία του μοντέλου.

Εξώθηση:

VEXT, NA1, NA2, NINC, DX, DY, DZ, RX, RY, RZ

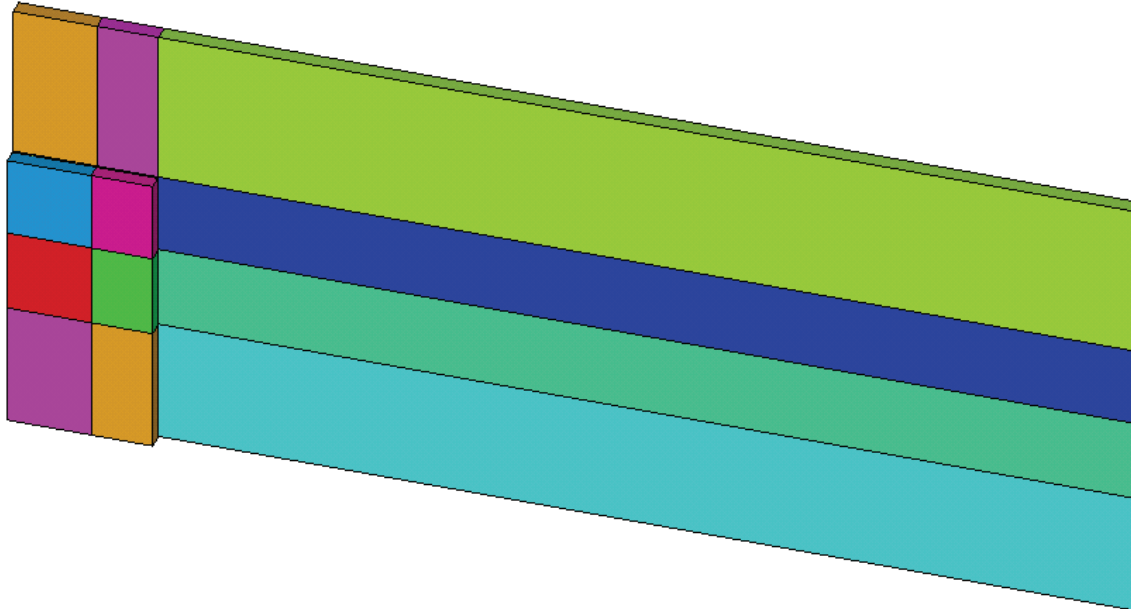
όπου **VEXT** το όνομα κλήσης της εντολής,
NA1, NA2 οι αριθμοί αναφοράς της πρώτης και της τελευταίας επιφάνειας βάσει των οποίων θα γίνει η εξώθηση,
NINC το βήμα επιλογής επιφανειών από την ομάδα που ορίζουν τα **NA1** και **NA2**,
DX, DY, DZ το μήκος της εξώθησης κατά την αντίστοιχη διεύθυνση και
RX, RY, RZ οι λόγοι επιμήκυνσης κατά την αντίστοιχη επιφάνεια.

Σημειώνεται ότι εφόσον επιθυμούμε την εξώθηση όλων των επιφανειών από **NA1** έως **NA2**, το όρισμα **NINC** αφήνεται κενό. Ακόμα η εξώθηση στην περίπτωση μας γίνεται μόνο κατά τον άξονα z, επομένως συμπληρώνεται μόνο το αντίστοιχο όρισμα **DZ**. Τέλος τα ορίσματα των λόγων επιμήκυνσης αφορούν την εξώθηση βάσει όγκων και όχι επιφανειών, επομένως στην περίπτωση μας τα ορίσματα **RX, RY** και **RZ** δεν συμπληρώνονται.

Ακολουθεί απόσπασμα του κώδικα όπου φαίνεται ο τρόπος εισαγωγής των παραπάνω εντολών για την εξώθηση του όγκου του υποστρώματος επί της επιφάνειας 1, που αντιστοιχεί στην περιοχή της ρωγμής:

```
TYPE, 2
EXTOPT, ESIZE, EDs, 0
EXTOPT, ACLEAR, 1
EXTOPT, ATTR, 0, 0, 0
MAT, 1
REAL, _Z4
ESYS, 0
VEXT, 1, , , , -Ts
```

Στο παρακάτω Σχήμα 2.6 παρουσιάζεται η γεωμετρία του μοντέλου στην τελική της μορφή.

ANSYS

Σχήμα 2.6

Οι όγκοι που αποτελούν το τρισδιάστατο μοντέλο.

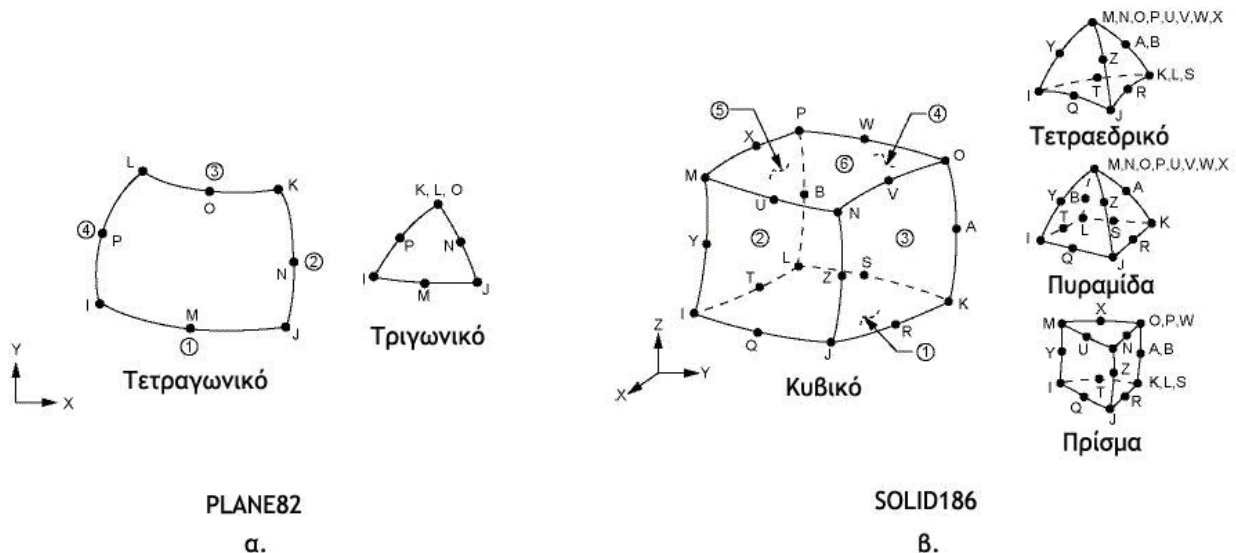
β. Καθορισμός του πλέγματος στοιχείων

Τα περισσότερα σύγχρονα πακέτα λογισμικού παρέχουν τη δυνατότητα αυτόματου σχηματισμού του πλέγματος στοιχείων του μοντέλου. Με αυτήν την τεχνική, πέρα από το χρόνο που κερδίζει ο χρήστης, εξασφαλίζεται και η «καλή» γεωμετρία των στοιχείων, η συμβατότητά τους δηλαδή με τους γεωμετρικούς περιορισμούς του κάθε στοιχείου.

Στην περίπτωσή μας δεν έγινε χρήση αυτής της δυνατότητας, καθώς συναντήθηκαν δυσκολίες με το σχηματισμό του ιδιόμορφου πλέγματος στο άκρο της ρωγμής και την ελεγχόμενη μεταβολή της πυκνότητας των στοιχείων ανά περιοχή.

Επιπλέον η επιθυμία ομοιόμορφης κατανομής του πλέγματος των στοιχείων κατά το πάχος, μας οδήγησε στο να ορίσουμε πρώτα το δισδιάστατο πλέγμα και στη συνέχεια να γίνει εξώθηση αυτού στο τελικό τρισδιάστατο πλέγμα στοιχείων. Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για το αρχικό και προσωρινό δισδιάστατο πλέγμα είναι τύπου PLANE82. Πρόκειται για δισδιάστατα «δομικά» (structural) οκτακομβικά στοιχεία με κύριο χαρακτηριστικό τους την ικανότητα μοντελοποίησης ιδιόμορφης γεωμετρίας χωρίς αρνητική επίδραση στην ακρίβεια. Στο παρακάτω Σχήμα 2.7α φαίνονται τα χαρακτηριστικά της γεωμετρίας των στοιχείων.

Τα στοιχεία που επιλέχθηκαν για το τελικό τρισδιάστατο πλέγμα είναι τύπου SOLID186. Πρόκειται για εικοσακομβικά δομικά στοιχεία υψηλής τάξης, τα οποία παρουσιάζουν συμπεριφορά μετατόπισης δευτέρου βαθμού (quadratic displacement behavior) και προτείνονται για χρήση σε ιδιόμορφες γεωμετρίες. Οι κόμβοι των στοιχείων μπορούν να δεχτούν τρισδιάστατους περιορισμούς μετατόπισης, ενώ υποστηρίζουν μεταξύ άλλων τη μοντελοποίηση φαινομένων πλαστικότητας, ερπυσμού, διόγκωσης και μεγάλων μετατοπίσεων. Η γεωμετρία των στοιχείων και οι παραλλαγές της παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.7B.



Σχήμα 2.7

Απεικόνιση της γεωμετρίας των στοιχείων του μοντέλου.

Για τον ορισμό του είδους των στοιχείων που θα αποτελούν το πλέγμα γίνεται χρήση της εντολής:

ET, ITYPE, Ename, KOP1, KOP2, KOP3, KOP4, KOP5, KOP6, INOPR

όπου **ET** το όνομα κλήσης της εντολής,

ITYPE ο αριθμός αναφοράς που θα έχει το είδος στοιχείου,

KOP1-KOP6 ορίσματα επιλογών και

INOPR επιλογή που αποτρέπει την εξαγωγή αποτελεσμάτων από αυτό το είδος στοιχείου.

Εν προκειμένω η εντολή καλείται με τη βασική της μορφή και ο σχετικός κώδικας είναι:

ET,1,PLANE82

ET,2,SOLID186

Έχοντας επιλέξει τα στοιχεία που θα χρησιμοποιηθούν κατά το σχηματισμό του πλέγματος, ακολουθεί ο προσδιορισμός της πυκνότητας και της μορφής του γενικότερα. Σε πρώτη φάση πρέπει να καθορίσουμε τις όποιες ιδιόμορφες περιοχές θα περιέχονται σε αυτό και πιο συγκεκριμένα τα χαρακτηριστικά του πλέγματος στο άκρο της ρωγμής.

Η ύπαρξη ιδιομορφίας στο άκρο της ρωγμής υπαγορεύεται από τον τρόπο υπολογισμού και εξαγωγής του συντελεστή έντασης τάσης, τον οποίο και θα εξετάσουμε στη συνέχεια, κατά την ενασχόληση μας με τις διαδικασίες μεταεπεξεργασίας του μοντέλου. Η επιζητούμενη ιδιομορφία του πλέγματος μεταφράζεται στην «κατάρρευση» (collapse) των στοιχείων στο άκρο της ρωγμής, από τετραγωνική σε τριγωνική μορφή για το δισδιάστατο πλέγμα και από κυβική σε πρισματική για το τρισδιάστατο, με ιδιόμορφους κόμβους επί του μετώπου της ρωγμής. Μια απεικόνιση της ιδιομορφίας παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.8 όπου φαίνεται η μορφή του δισδιάστατου πλέγματος στην περιοχή του άκρου της ρωγμής. Η σχετική εντολή που καλείται είναι η:

KSCON, NPT, DELR, KCTIP, NTHET, RRAT

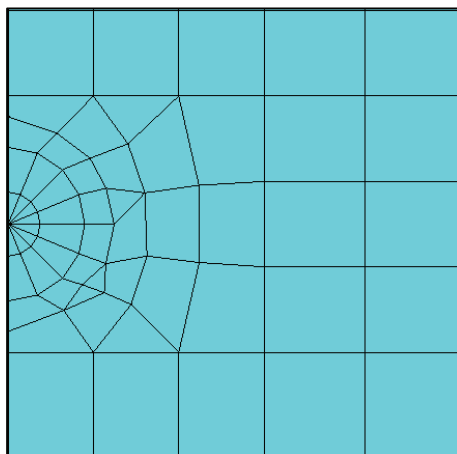
όπου **KSCON** το όνομα κλήσης της εντολής,
NPT το σημείο (keypoint) όπου εντοπίζεται η ιδιομορφία,
DELR η διάμετρος του κυκλικού δίσκου που διαγράφουν τα ιδιόμορφα στοιχεία,
KCTIP η επιλογή μετατόπισης του ενδιάμεσου κόμβου Υ (βλέπε Σχήμα 2.7β) κατά το πάχος του στοιχείου,
NTHET το πλήθος των ιδιόμορφων στοιχείων περιμετρικά του σημείου της ιδιομορφίας
και **RRAT** ο λόγος της διαμέτρου της δεύτερης σειράς στοιχείων προς την τιμή του **DELR**.

Η σχετική γραμμή του κώδικα είναι:

KSCON,101,CTER,1,CTEN,1,

όπου **CTER** και **CTEN** μεταβλητές των επιλογών **DELR** και **NTHET** αντίστοιχα.

Οι μεταβλητές **CTER** (Crack Tip Element Radius) και **CTEN** (Crack Tip Element Number) ορίστηκαν ως παράμετροι βελτιστοποίησης του πλέγματος, καθώς εντοπίστηκε συσχέτιση των τιμών τους με την ακρίβεια του μοντέλου. Με τη διαδικασία και τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης θα ασχοληθούμε εκτενώς στην παράγραφο 2.3.5.



Σχήμα 2.8

Απεικόνιση του πλέγματος στοιχείων στο άκρο της ρωγμής.

Επόμενο βήμα είναι ο καθορισμός της πυκνότητας του πλέγματος ανά περιοχή. Για τις ανάγκες βελτιστοποίησης και άμεσης μεταβολής της πυκνότητας ορίστηκε η μεταβλητή *BEL* (Basic Element Length) η οποία αναφέρεται στο μήκος των στοιχείων στην περιοχή υψηλής πυκνότητας στοιχείων που περιβάλλει το άκρο της ρωγμής. Περισσότερα για το ρόλο της μεταβλητής *BEL* θα αναφέρουμε σε επόμενη παράγραφο. Το πλέγμα χωρίστηκε σε τρεις διακριτές περιοχές. Την περιοχή που περιβάλλει το άκρο της ρωγμής, την περιοχή του επιθέματος και την περιοχή του ελεύθερου υποστρώματος, περιοχές υψηλής, μέσης και χαμηλής πυκνότητας στοιχείων αντίστοιχα.

Οι περιοχές αυτές προσδιορίζονται από τις επιφάνειες που τις αποτελούν (βλέπε Σχήμα 2.5). Η περιοχή υψηλής πυκνότητας αποτελείται από την επιφάνεια A1, η περιοχή μέσης πυκνότητας από τις επιφάνειες A2 έως A6 και η περιοχή χαμηλής πυκνότητας από τις επιφάνειες A7 έως A12. Η επιθυμητή πυκνότητα σε κάθε επιφάνεια καθορίζεται από το πλήθος των στοιχείων κατά το μήκος και κατά το πλάτος αυτής. Κατά τη διαδικασία δημιουργίας των επιφανειών που αναφέραμε παραπάνω, ορίζονται αυτόματα και οι ακμές τους, με τη μορφή δικτυώματος γραμμών. Για κάθε μία από αυτές τις γραμμές, ορίζουμε το πλήθος των στοιχείων κατά το μήκος με τη βοήθεια της παρακάτω εντολής:

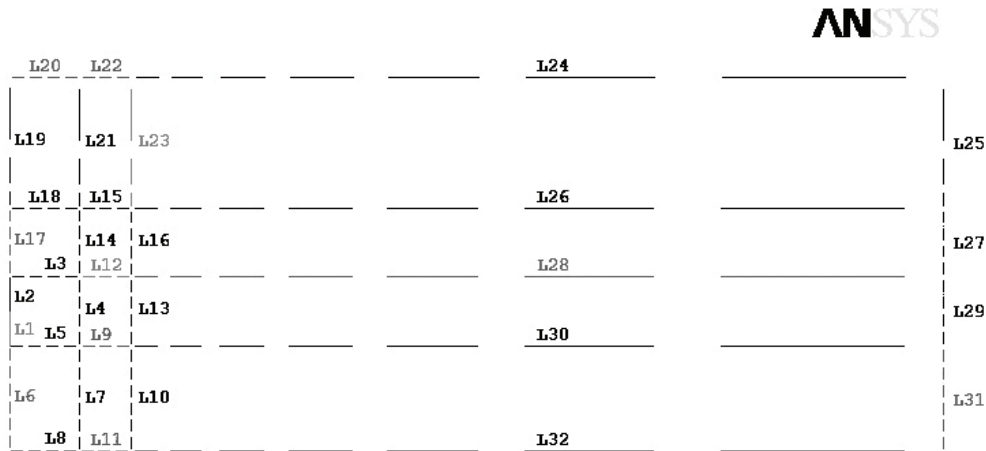
LESIZE, NL1, SIZE, NDIV, SPACE, KYNDIV

όπου **LESIZE** το όνομα κλήσης της εντολής,
NL1 ο αριθμός αναφοράς της γραμμής,
SIZE το μήκος των στοιχείων,
NDIV το πλήθος των στοιχείων κατά το μήκος της γραμμής,
SPACE ο λόγος μεταβολής του μήκους των στοιχείων (spacing ratio) κατά το μήκος της γραμμής και
KYNDIV επιλογή που αναφέρεται στην δυνατότητα του εργαλείου αυτόματου σχηματισμού να παρακάμψει τις παραπάνω επιλογές.

Προφανώς σε κάθε περίπτωση μπορεί να συμπληρωθεί μόνο το ένα από τα ορίσματα **SIZE** και **NDIV**, ενώ εφόσον επιλεγεί η μεταβολή του μήκους των στοιχείων κατά μήκος της γραμμής, το όρισμα του **SIZE** αναφέρεται στο μήκος του πρώτου στοιχείου. Η επιλογή **KYNDIV** μπορεί να δεχτεί ορίσματα 0 και 1, όπου το 0 απενεργοποιεί τη σχετική δυνατότητα και το 1 την ενεργοποιεί. Καθώς επιθυμούμε τον απόλυτο έλεγχο επί της κατανομής του πλέγματος των στοιχείων, επιλέγουμε το όρισμα 0. Ακολουθεί απόσπασμα του σχετικού κώδικα:

```
...
LESIZE,6,BEL,,,,,0           ! (Περιοχή μέσης πυκνότητας)
LESIZE,7,BEL,,,,,0
...
LESIZE,21,,,0.25*Wp/BEL,1/4,,,0   ! (Περιοχή χαμηλής πυκνότητας)
LESIZE,23,,,0.25*Wp/BEL,1/4,,,0
...
LESIZE,26,,,Lp/BEL,1/8,,,0       ! (Περιοχή χαμηλής πυκνότητας)
LESIZE,27,,,Lp/BEL,1/8,,,0
...
```

Στο Σχήμα 2.9 φαίνεται η μορφή που αποκτούν οι γραμμές μετά την ανάγνωση του κώδικα από το λογισμικό, επιδεικνύοντας την επιλεχθείσα κατανομή του πλέγματος στοιχείων:



Σχήμα 2.9

Απεικόνιση των γραμμών μέσω των οποίων ορίζεται το πλέγμα στοιχείων.

Έχοντας πλέον ορίσει την επιθυμητή κατανομή των στοιχείων στο πλέγμα, απομένει ο σχηματισμός του δισδιάστατου πλέγματος. Η σχετική εντολή που καλείται είναι:

AMESH, NA1, NA2, NINC,

όπου **AMESH** το όνομα κλήσης της εντολής,

NL1 ο αριθμός αναφοράς της πρώτης επιφάνειας όπου θα σχηματιστεί το πλέγμα,

NL2 ο αριθμός αναφοράς της τελευταίας επιφάνειας όπου θα σχηματιστεί το πλέγμα

και **NINC** το βήμα επιλογής των επιφανειών, εφόσον δεν είναι επιθυμητός ο σχηματισμός πλέγματος στο σύνολο της ομάδας επιφανειών που ορίζεται από τα ορίσματα **NA1** και **NA2**.

Εν προκειμένω η εντολή καλείται με τη βασική της μορφή και ο σχετικός κώδικας από τον οποίο προκύπτει το δισδιάστατο πλέγμα είναι:

AMESH,1

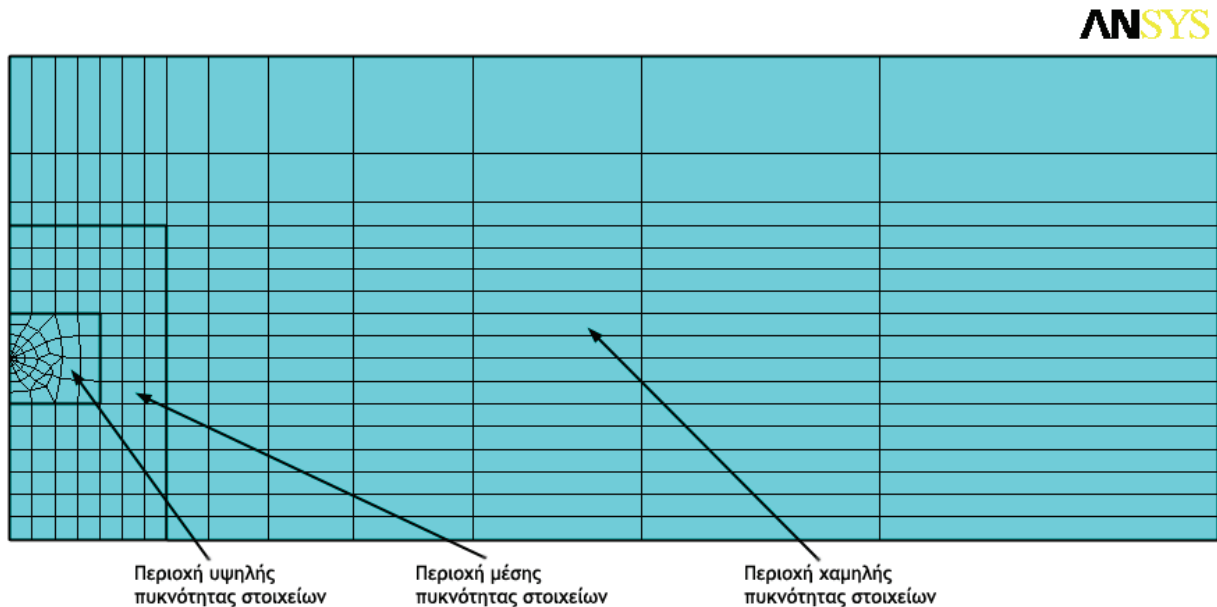
...

AMESH,2,12

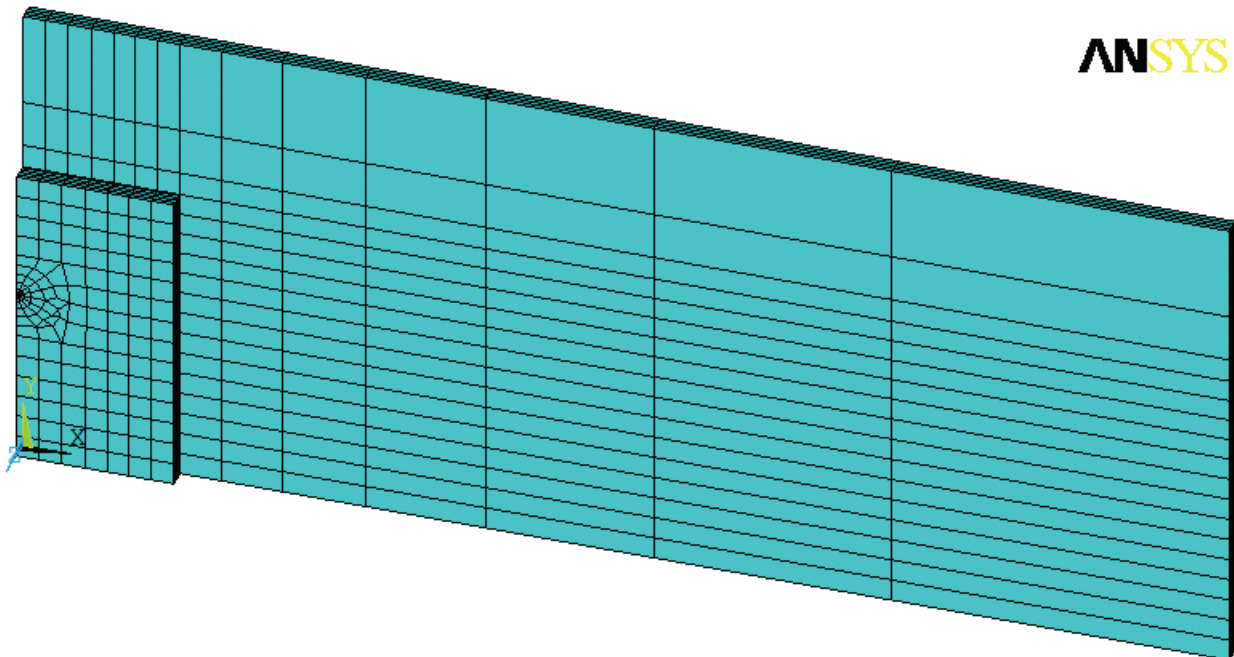
Αμέσως μετά το σχηματισμό του δισδιάστατου πλέγματος ακολουθεί η δημιουργία του τρισδιάστατου πλέγματος, ως ενέργεια που εκτελείται αυτόματα με την εξώθηση των όγκων από τις επιφάνειες, διαδικασία που αναλύσαμε προηγουμένως. Αναφέρουμε σε αυτό το σημείο τη χρήση των μεταβλητών **EDs**, **EDa** και **EDp** που συμβολίζουν αντίστοιχα τις παραμέτρους του πλήθους των στοιχείων κατά το πάχος στο υπόστρωμα, το στρώμα της κόλλας και το επίθεμα. Οι μεταβλητές αυτές εισάγονται ως όρισμα της επιλογής **ESIZE** στην εντολή **EXTOPT** που αφορά την εξώθηση και τέθηκαν με στόχο τη γρήγορη μεταβολή των σχετικών παραμέτρων. Το τρισδιάστατο πλέγμα επιλέχθηκε να αποτελείται από 4 στοιχεία κατά το πάχος στο

υπόστρωμα και στο επίθεμα και 2 στοιχεία κατά το πάχος στο στρώμα της κόλλας. Ο συνδυασμός αυτός κρίνεται επαρκής για να περιγράψει τη μεταβολή των τάσεων κατά το πάχος [24].

Στα παρακάτω Σχήματα 2.10 και 2.11 παρουσιάζεται η τελική μορφή του δισδιάστατου και του τρισδιάστατου πλέγματος αντίστοιχα.



Σχήμα 2.10
Απεικόνιση του δισδιάστατου πλέγματος στοιχείων.



Σχήμα 2.11
Απεικόνιση του τρισδιάστατου πλέγματος στοιχείων.

γ. Επιβολή φόρτισης - συνοριακών συνθηκών

Η κατάσταση φόρτισης της κατασκευής αναλύεται στην ανάπτυξη ομοιόμορφης εφελκυστικής τάσης στο υπόστρωμα, κατά τον άξονα x (βλέπε Σχήμα 2.3). Η ανάπτυξη της τάσης εισάγεται στο μοντέλο με τη βοήθεια της εντολής:

SFA, AREA, Lab, VALUE, VALUE2

όπου **SFA** το όνομα κλήσης της εντολής,
AREA ο αριθμός αναφοράς της επιφάνειας όπου θα επιβληθεί το φορτίο/τάση,
Lab το είδος της φόρτισης και
VALUE η τιμή της φόρτισης.

Ακολουθεί το σχετικό απόσπασμα του κώδικα:

```
SFA,49,PRES,-Sx  
SFA,52,PRES,-Sx  
SFA,55,PRES,-Sx  
SFA,58,PRES,-Sx
```

όπου οι επιφάνειες 49,52,55 και 58 αποτελούν την κάθετη επιφάνεια στο άκρο του υποστρώματος, το όρισμα *PRES* συμβολίζει την τάση (πίεση / pressure) και η μεταβλητή *Sx* έχει οριστεί στην αρχή του κώδικα και συμβολίζει την τάση. Να σημειωθεί ότι οι εφελκυστικές τάσεις ορίζονται με αρνητικό πρόσημο.

Όπως αναφέραμε στην αρχή της παραγράφου η μοντελοποίηση έγινε θεωρώντας συμμετρία στη διατομή της ρωγμής (βλέπε Σχήμα 2.3), περιορίζοντας το μέγεθος του μοντέλου και το χρόνο επίλυσης κατά το ήμισυ, απλοποιώντας παράλληλα και τη διαδικασία μοντελοποίησης της ρωγμής. Η συμμετρία ορίζεται στις επιφάνειες με τη βοήθεια της εντολής επιβολής περιορισμών βαθμών ελευθερίας (degrees of freedom constraints) σε επιφάνειες:

DA, AREA, Lab, Value1, Value2

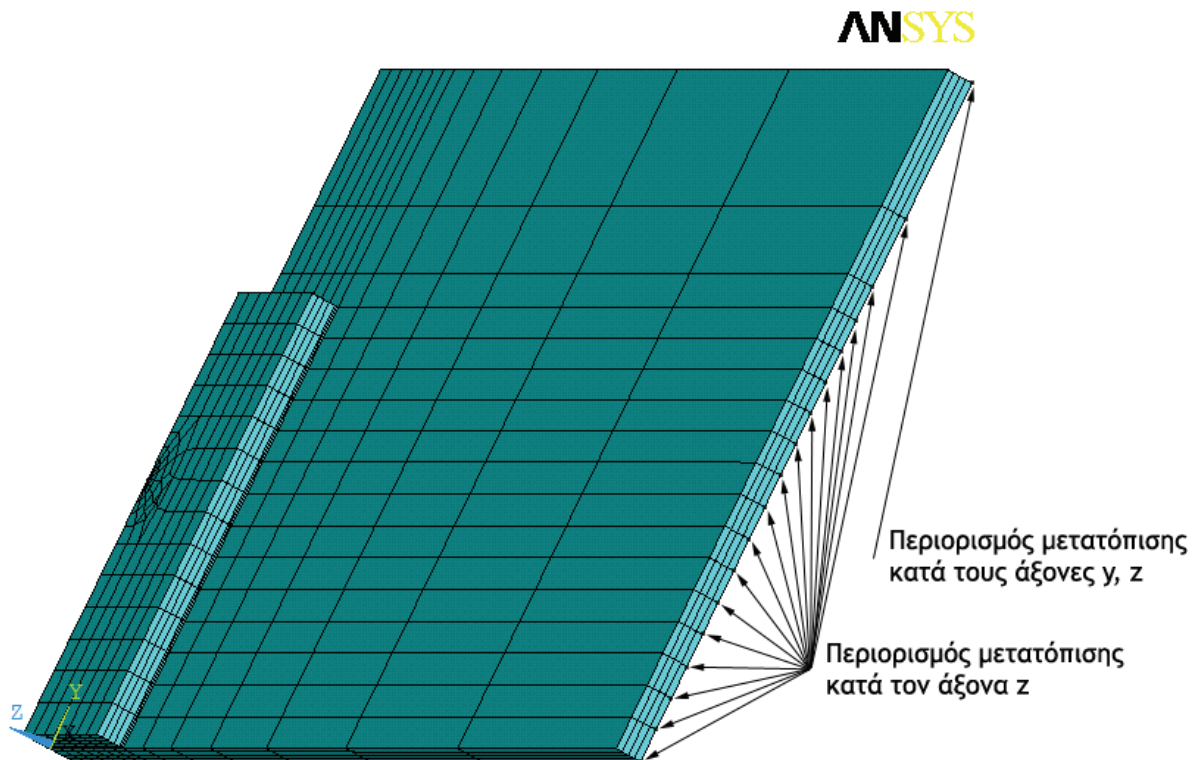
όπου **DA** το όνομα κλήσης της εντολής,
AREA ο αριθμός αναφοράς της επιφάνειας όπου θα επιβληθεί ο περιορισμός,
Lab η ονομασία αναφοράς του είδους του περιορισμού και
Value1, Value2 τα ορίσματα των τιμών του περιορισμού εφόσον απαιτούνται.

Να σημειωθεί ότι στο στρώμα της κόλλας ορίστηκε συμμετρία πάνω από τη ρωγμή μόνο στη μία σειρά στοιχείων, αυτή που εφάπτεται στο επίθεμα. Με αυτόν τον τρόπο προσομοιώνεται ρεαλιστικά η συμπεριφορά της κόλλας ακριβώς πάνω από το άνοιγμα της ρωγμής. Ακολουθεί το σχετικό απόσπασμα του κώδικα:

```
DA,15,SYMM          ! (Υπόστρωμα)  
DA,37,SYMM  
DA,41,SYMM
```

DA,62,SYMM	! (Κόλλα - Σειρά επαπτόμενη στο υπόστρωμα)
DA,82,SYMM	
DA,85,SYMM	! (Κόλλα - Σειρά επαπτόμενη στο επίθεμα)
DA,86,SYMM	
DA,91,SYMM	
DA,111,SYMM	
DA,116,SYMM	! (Επίθεμα)
DA,117,SYMM	
DA,122,SYMM	
DA,142,SYMM	

Πέραν της συμμετρίας απαιτείται η εισαγωγή επιπλέον συνοριακών συνθηκών στο μοντέλο, ώστε να είναι καλά ορισμένο πρόβλημα. Οι ενδεδειγμένες συνοριακές συνθήκες για το συγκεκριμένο μοντέλο προσομοιώνουν τον περιορισμό κύλισης στο ελεύθερο άκρο του υποστρώματος. Η συνθήκη της κύλισης επιβάλλεται στο μοντέλο περιορίζοντας τη μετατόπιση κατά τον άξονα z στην κατώτερη σειρά κόμβων του ελεύθερου άκρου του υποστρώματος, ενώ ταυτόχρονα περιορίζεται η μετατόπιση κατά τον άξονα y στον ακραίο κόμβο αυτής της σειράς. Με τον τρόπο αυτό αποκλείονται οι μετατοπίσεις και οι περιστροφές του μοντέλου ως στερεό (rigid body movement) κατά την επίλυση, ενώ παράλληλα επιτρέπεται η ρεαλιστική παραμόρφωση του, ως αποτέλεσμα της επιβαλλόμενης φόρτισης. Το παρακάτω Σχήμα 2.12 είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για να αντιληφθεί κανείς τους κόμβους στους οποίους επιβάλλονται οι περιορισμοί.



Σχήμα 2.12
Κόμβοι στους οποίους επιβάλλονται συνοριακές συνθήκες.

Οι περιορισμοί επιβάλλονται με τη βοήθεια της εντολής:

D, NODE, Lab, Value1, Value2

όπου **D** το όνομα κλήσης της εντολής,
NODE ο αριθμός αναφοράς του κόμβου όπου θα επιβληθεί ο περιορισμός,
Lab η ονομασία αναφοράς του είδους του περιορισμού και
Value1, Value2 τα ορίσματα των τιμών του περιορισμού εφόσον απαιτούνται.

Η επιλογή συγκεκριμένων κόμβων με τον αριθμό αναφοράς τους ενέχει σημαντικές δυσκολίες, ειδικά στην περίπτωση της παραμετρικής μελέτης, όπου λόγω της μεταβολής της γεωμετρίας οι αριθμοί αναφοράς των κόμβων διαφέρουν από μοντέλο σε μοντέλο. Το πρόβλημα παρακάμπτεται επιλέγοντας τους κόμβους βάσει της θέσης τους στο μοντέλο πριν την εκτέλεση της εντολής *D*, με τη βοήθεια της εντολής:

NSEL, Type, Item, Comp, Value

όπου **NSEL** το όνομα κλήσης της εντολής,
Type το είδος της επιλογής (*S* για νέα επιλογή, *R* για επιμέρους επιλογή)
Item το κριτήριο βάσει του οποίου θα γίνει η επιλογή των κόμβων (*LOC* για θέση),
Comp το επιμέρους όρισμα του κριτηρίου επιλογής (άξονας για *LOC*) και
Value η τιμή του κριτηρίου επιλογής (συντεταγμένη κατά άξονα για *LOC*).

Το σχετικό απόσπασμα του κώδικα είναι:

```
NSEL,S,LOC,X,Is          ! (Περιορισμοί κατά τον άξονα z)
NSEL,R,LOC,Z,-Ts/2
D,ALL,UZ,0
NSEL,ALL                 ! (Μηδενισμός επιλογής κόμβων)
NSEL,S,LOC,X,Is          ! (Περιορισμοί κατά τον άξονα y)
NSEL,R,LOC,Y,Ws
NSEL,R,LOC,Z,-Ts/2
D,ALL,UY,0
```

2.3.3 ΕΠΙΛΥΣΗ (SOLVING)

Αφού ολοκληρωθεί το στάδιο της προεπεξεργασίας ακολουθεί η επίλυση του μοντέλου. Αυτή μπορεί να είναι γραμμική ή μη γραμμική, επηρεάζοντας την ακρίβεια της επίλυσης, ανάλογα με το φαινόμενο που προσομοιώνεται. Κατά την βιβλιογραφική έρευνα της ανάλυσης μεθόδου επισκευής με επίθεμα σύνθετου υλικού με πεπερασμένα στοιχεία, παρατηρήθηκε σημαντική βελτίωση της ακρίβειας εφόσον υιοθετηθεί μη γραμμική επίλυση του μοντέλου [13][14].

Η μη γραμμική επίλυση στην περίπτωσή μας μεταφράζεται στην ανάλυση μεγάλων μετατοπίσεων, αφού δεν έχουμε εισάγει μη γραμμικές μηχανικές ιδιότητες (κριτήρια αστοχίας, ελαστοπλαστική συμπεριφορά, κτλ) στα υλικά του μοντέλου. Κατά τη βελτιστοποίηση του μοντέλου χρησιμοποιήθηκε κυρίως γραμμική ανάλυση, αφού παρά τη μειωμένη ακρίβεια, το

κριτήριο κατά τη βελτιστοποίηση είναι πρωτίστως η εμφάνιση σύγκλισης στα αποτελέσματα, ενώ παράλληλα η μη γραμμική ανάλυση απαιτεί πολλαπλάσιο χρόνο για την εκτέλεση κάθε επίλυσης. Η γραμμική επίλυση είναι η προεπιλεγμένη (default) μέθοδος επίλυσης και απαιτεί για την εκτέλεσή της μόνο την επίκληση της μονοσήμαντης εντολής **SOLVE**.

Η μη γραμμική επίλυση συνίσταται εν προκειμένω στην τμηματική (ανά βήματα, *substeps*) επιβολή της φόρτισης, υπολογίζοντας στο τέλος κάθε βήματος την εντατική κατάσταση και τις παραμορφώσεις του μοντέλου. Για την ομαλή εκτέλεσή της απαιτείται προηγουμένως ο καθορισμός ορισμένων ιδιοτήτων της επίλυσης. Έτσι πρέπει πρώτα να οριστούν τα κριτήρια σύγκλισης ως προς τις δυνάμεις και τις μετατοπίσεις, ο αριθμός βημάτων στα οποία θα επιβληθεί η φόρτιση και η επιλογή της δυνατότητας αναπροσαρμογής (προς τα πάνω) των βημάτων επιβολής της φόρτισης εφόσον παρατηρηθεί δυσκολία στην επίτευξη σύγκλισης. Οι εντολές που χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό των ιδιοτήτων παρουσιάζονται στη συνέχεια:

CNVTOL, Lab, VALUE, TOLER

όπου **CNVTOL** το όνομα κλήσης της εντολής,
Lab το είδος του κριτηρίου σύγκλισης (F για δυνάμεις, U για μετατοπίσεις),
VALUE η επιθυμητή τιμή σύγκλισης (αν αφεθεί κενό υπολογίζεται αυτόματα) και
TOLER η ποσοστιαία ανοχή του συστήματος κατά τον έλεγχο της σύγκλισης.

NLGEOM, Key

όπου **NLGEOM** το όνομα κλήσης της εντολής και
Key το όρισμα της επιλογής για ανάλυση μεγάλων μετατοπίσεων (1 για ενεργοποίηση).

NSUBST, NSBSTP, NSBMX, NSBMN, Carry

όπου **NSUBST** το όνομα κλήσης της εντολής,
NSBSTP ο αριθμός των βημάτων κατά την επιβολή της φόρτισης (εφόσον η εντολή **AUTOTS** είναι ενεργή αναφέρεται στο ποσοστό φόρτισης του πρώτου βήματος της ανάλυσης) και
NSBMX, NSBMN ο μέγιστος και ελάχιστος αντίστοιχα αριθμός βημάτων που επιτρέπεται να εκτελεστούν κατά την επίλυση. Στην περίπτωση που απαιτείται μεγαλύτερος αριθμός βημάτων από το *NSBMX* η επίλυση διακόπτεται και αναφέρεται σφάλμα.

AUTOTS, Key

όπου **AUTOTS** το όνομα κλήσης της εντολής και
Key το όρισμα που ενεργοποιεί ή απενεργοποιεί τον αυτόματο υπολογισμό των απαιτούμενων βημάτων φόρτισης (1 για ενεργοποίηση).

Το σχετικό απόσπασμα του κώδικα είναι:

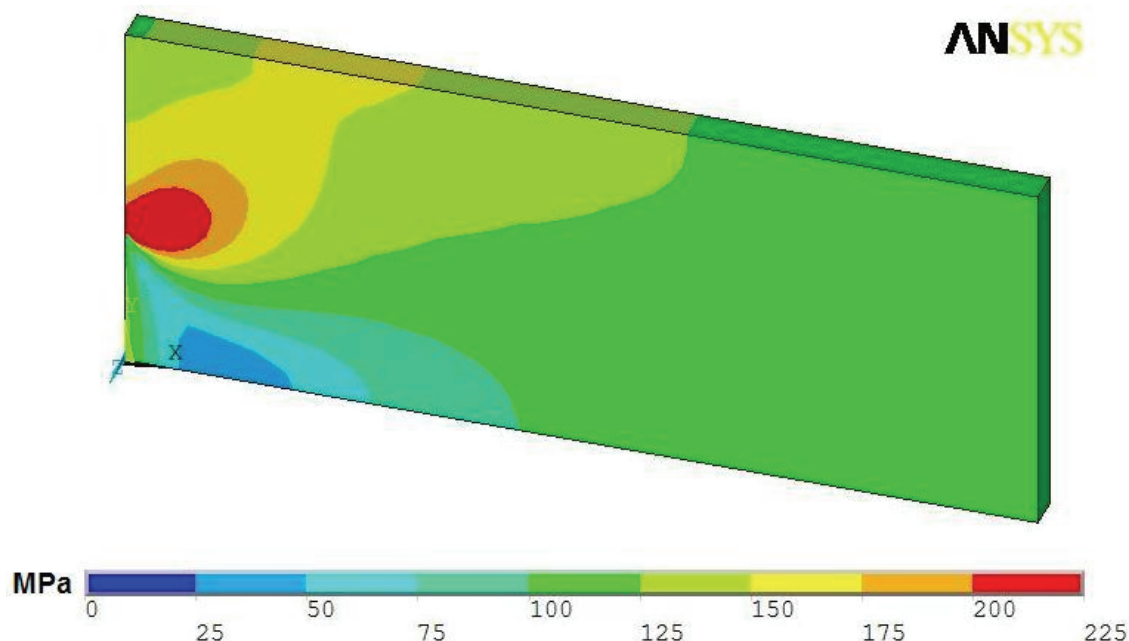
```
CNVTOL, F, , 0.001
CNVTOL, U, , 0.005
NLGEOM, 1
NSUBST, 10, 15, 0
AUTOTS, 1
```

2.3.4 ΜΕΤΑΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ (POSTPROCESSING)

Η μεταεπεξεργασία του μοντέλου αφορά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων, δηλαδή τις διαδικασίες εκείνες, μέσω των οποίων εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα για τη συμπεριφορά του μοντέλου υπό την επιβληθείσα φόρτιση. Συνήθως η μεταεπεξεργασία ενός μοντέλου χωρίζεται σε δύο στάδια.

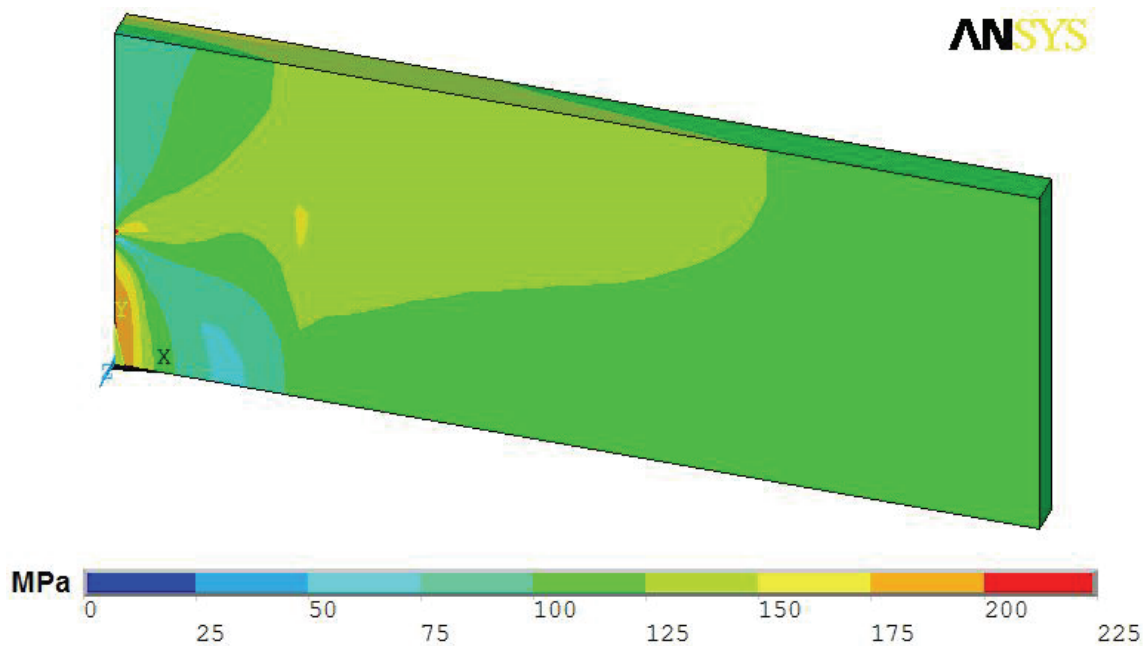
Σε πρώτη φάση γίνεται ο έλεγχος του μοντέλου ως προς το αν παρουσιάζει την αναμενόμενη συμπεριφορά. Τυχόν διαφοροποιήσεις πρέπει να ελέγχονται άμεσα και επισταμένα, ώστε να εξασφαλίζεται ότι οφείλονται σε δική μας ελλιπή εκτίμηση του φαινομένου και όχι σε κάποιο λάθος ή παράλειψη που έχει τυχόν παρεισφρήσει στο μοντέλο κατά την προεπεξεργασία.

Βασικό εργαλείο για την εποπτεία και επιβεβαίωση της ορθής συμπεριφοράς του μοντέλου αποτελούν οι γραφικές κατανομές μεγεθών (contour plots), οι οποίες προβάλλονται επί του μοντέλου, και προσφέρουν τη δυνατότητα άμεσης αντίληψης της μεταβολής ενός μεγέθους σε όλες τις περιοχές του μοντέλου. Η κατανομή μπορεί να προβληθεί επί της αρχικής γεωμετρίας, διευκολύνοντας τον εντοπισμό των κρίσιμων περιοχών στο μοντέλο, ή επί της τελικής παραμορφωμένης γεωμετρίας, για άμεσο έλεγχο της παραμορφωσιακής του συμπεριφοράς. Η ικανότητα αντίληψης της κατάστασης που προσφέρεται από τις γραφικές κατανομές γίνεται εμφανής παρατηρώντας τα παρακάτω Σχήματα 2.14 και 2.15, όπου παρουσιάζεται ενδεικτικά η κατανομή της ισοδύναμης τάσης κατά von Mises στο υπόστρωμα, πριν και μετά την εφαρμογή του επιθέματος.



Σχήμα 2.14

Κατανομή ισοδύναμης τάσης στο υπόστρωμα πριν την εφαρμογή του επιθέματος.



Σχήμα 2.15

Κατανομή ισοδύναμης τάσης στο υπόστρωμα μετά την εφαρμογή του επιθέματος.

Πέρα από την εποπτεία της επίλυσης, είναι πολύ χρήσιμο για τη διαδικασία ελέγχου να υπάρχει κάποιο μέγεθος στο μοντέλο, την τιμή αναφοράς του οποίου μπορούμε είτε να υπολογίσουμε αναλυτικά, είτε να «δανειστούμε» από κάποια αντίστοιχη επίλυση που θεωρούμε αξιόπιστη. Στην περίπτωση μας, το ρόλο του μεγέθους αναφοράς δεν θα μπορούσε παρά να έχει η τιμή του συντελεστή έντασης τάσης, ΣΕΤ στο άκρο της ρωγμής.

Το δεύτερο στάδιο της μεταεπεξεργασίας αφορά την εξαγωγή από το μοντέλο των ζητούμενων αποτελεσμάτων που για οποιοδήποτε λόγο μπορούν να φανούν χρήσιμα στο σχεδιαστή μηχανικό. Οι γραφικές κατανομές μπορεί να είναι ιδιαίτερα χρήσιμες για τον έλεγχο της συμπεριφοράς του μοντέλου και για την εξαγωγή κάποιων γενικών συμπερασμάτων, όμως μία πλήρης μελέτη απαιτεί τον ορισμό περιοχών ενδιαφέροντος και των σχετικών κόμβων από όπου θα εξάγονται αριθμητικά αποτελέσματα που καθορίζουν τη συμπεριφορά και την αποτελεσματικότητα της κατασκευής υπό μελέτη.

Για την εξαγωγή των ζητούμενων αποτελεσμάτων πρέπει πρώτα να επιλεγούν οι σχετικοί κόμβοι, με τη βοήθεια της εντολής *NSEL* που είδαμε παραπάνω και στη συνέχεια να γίνει η εξαγωγή με τη βοήθεια της εντολής:

PRNSOL, Item, Comp

όπου **PRNSOL** το όνομα κλήσης της εντολής,
Item το μέγεθος προς εξαγωγή (*EPTO* για παραμορφώσεις, *S* για τάσεις, κτλ) και
Comp το όρισμα των επιμέρους χαρακτηριστικών του μεγέθους προς εξαγωγή (*X* για αποτελέσματα κατά τον άξονα *x*, *COMP* για το σύνολο των αποτελεσμάτων, κτλ).

Η επιλογή των κόμβων από τους οποίους κρίνεται σκόπιμο να εξαχθούν αποτελέσματα γίνεται συνήθως κατά τα πρώτα στάδια της μελέτης. Μία χρήσιμη διαδικασία είναι ο εκ των προτέρων ορισμός των σχετικών κόμβων, ώστε να μπορούν να εντοπιστούν με ευκολία μετά την επίλυση, αφού ο αριθμός αναφοράς τους θα έχει εισαχθεί από τον χρήστη. Ο ορισμός των κόμβων μπορεί να γίνει μόνο πριν το σχηματισμό του πλέγματος, με τη βοήθεια της εντολής:

N, *NODE*, *X*, *Y*, *Z*

όπου **N** το όνομα κλήσης της εντολής,

NODE ο αριθμός αναφοράς που θα έχει ο κόμβος προς εισαγωγή και

X, *Y*, *Z* οι συντεταγμένες του σημείου όπου θα εισαχθεί ο κόμβος.

Κατά το σχηματισμό του πλέγματος εισάγονται στο μοντέλο νέοι κόμβοι για κάθε νέο στοιχείο που δημιουργείται. Αυτό μεταφράζεται στην ύπαρξη πολλαπλών κόμβων και σημείων με τις ίδιες συντεταγμένες μετά το πέρας της διαδικασίας σχηματισμού του πλέγματος. Η απαλοιφή των περιττών κόμβων και στοιχείων γίνεται με χρήση της εντολής:

NUMMRG, *Label*, *TOLER*, *GTOLER*, *Action*, *Switch*

όπου **NUMMRG** το όνομα κλήσης της εντολής,

Label το είδος των αντικειμένων προς απαλοιφή (*NODE* για απαλοιφή κόμβων),

TOLER η μέγιστη απόσταση μεταξύ των αντικειμένων προς απαλοιφή,

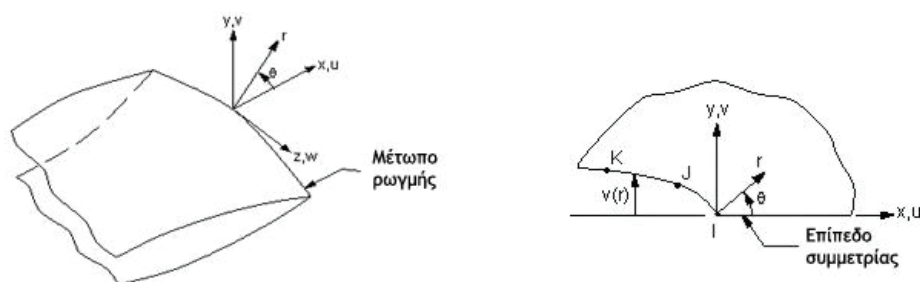
GTOLER η τιμή της ανοχής που θα ισχύει γενικά (globally) στο μοντέλο,

Action η επιλογή απαλοιφής/επιλογής πολλαπλών αντικειμένων (κενό για απαλοιφή)

και *Switch* η επιλογή διατήρησης του αντικειμένου με το μικρότερο ή μεγαλύτερο αριθμό αναφοράς (*LOW* για διατήρηση του μικρότερου).

Με την εντολή **NUMMRG** διατηρούνται κατά προτίμηση οι κόμβοι με το μικρότερο αριθμό αναφοράς. Συνεπώς η αρίθμηση των κόμβων από όπου προβλέπεται να εξαχθούν τα αποτελέσματα πρέπει να ξεκινάει από τη χαμηλότερη δυνατή τιμή, συνήθως τη μονάδα.

Μία ιδιαίτερη περίπτωση αποτελέσματος είναι η εξαγωγή του ΣΕΤ, ο οποίος αποτελεί και το σημαντικότερο κριτήριο αποτελεσματικότητας της μεθόδου επισκευής με επίθεμα σύνθετου υλικού. Η τιμή του ΣΕΤ υπολογίζεται μέσω της θεωρίας ομογενούς ισοτροπικής γραμμικής ελαστικής θραύσης, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο παρεκβολής των μετατοπίσεων στους κόμβους που ορίζουν το άκρο της ρωγμής. Στο Σχήμα 2.16 φαίνονται οι θεωρητικοί κόμβοι I, J και K, και το τοπικό σύστημα αναφοράς x,y βάσει των οποίων γίνεται ο υπολογισμός του ΣΕΤ.



Σχήμα 2.16

Απεικόνιση της γεωμετρίας και των κόμβων στην περιοχή του άκρου της ρωγμής.

Η μέθοδος υπολογισμού του ΣΕΤ είναι ενσωματωμένη στο λογισμικό και εκτελείται με χρήση της εντολής:

KCALC, KPLAN, MAT, KCSYM, KLOCPR

όπου **KCALC** το όνομα κλήσης της εντολής,
KPLAN το όρισμα που καθορίζει τον υπολογισμό του ΣΕΤ (0 για υπολογισμό τάσεων),
MAT ο αριθμός αναφοράς του υλικού βάσει του οποίου θα γίνει η εξαγωγή του ΣΕΤ,
KCSYM το όρισμα ύπαρξης συμμετρίας στην περιοχή της ρωγμής (0 για συμμετρία) και
KLOCPR το όρισμα για την εκτύπωση ή όχι των μετατοπίσεων των κόμβων.

Η εκτέλεση της εντολής **KCALC** προϋποθέτει τον ορισμό ενός τοπικού συστήματος αναφοράς στο άκρο της ρωγμής και τον ορισμό της καμπύλης που διαγράφουν οι κόμβοι του μοντέλου που αντιστοιχούν στους θεωρητικούς κόμβους I, J και K (βλέπε Σχήμα 2.16).

Το τοπικό σύστημα συντεταγμένων ορίζεται με τη βοήθεια της εντολής:

CS, KCN, KCS, NORIG, NXAX, NXYP1

όπου **CS** το όνομα κλήσης της εντολής,
KCN ο αριθμός αναφοράς του συστήματος,
KCS το είδος του συστήματος (0 για καρτεσιανό),
NORIG ο αριθμός αναφοράς του κόμβου που ορίζει την αρχή των αξόνων,
NXAX ο αριθμός αναφοράς του κόμβου που ορίζει το θετικό τμήμα του άξονα x και
NXYP1 ο αριθμός αναφοράς του κόμβου που ορίζει το θετικό τμήμα του άξονα y.

Η εντολή ορισμού της καμπύλης που διαγράφουν οι αντίστοιχοι των I, J, K κόμβοι είναι:

PATH, NAME, nPts

όπου **PATH** το όνομα κλήσης της εντολής,
NAME το όνομα αναφοράς της καμπύλης και
nPts το πλήθος των κόμβων που απαρτίζουν την καμπύλη.

Ενώ οι κόμβοι που αποτελούν την καμπύλη επιλέγονται με τη βοήθεια της εντολής:

PPATH, POINT, NODE, X, Y, Z

όπου **PPATH** το όνομα κλήσης της εντολής,
POINT το όρισμα της θέσης του κόμβου στην καμπύλη,
NODE ο αριθμός αναφοράς του κόμβου και
X, Y, Z οι συντεταγμένες του κόμβου (συμπληρώνονται εφόσον δεν κρίνεται σκόπιμο να εισαχθεί προηγουμένως ο αριθμός αναφοράς του κόμβου).

2.3.5 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ - ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Ακολουθώντας τη διαδικασία που αναλύσαμε στις προηγούμενες παραγράφους, μπορεί κάποιος να κατασκευάσει ένα μοντέλο που προσομοιώνει ικανοποιητικά τη μέθοδο επισκευής με επίθεμα σύνθετου υλικού. Προτού όμως χρησιμοποιηθεί το μοντέλο για τις ανάγκες κάποιας μελέτης, πρέπει να εκτελεστεί μια διαδικασία βελτιστοποίησης αυτού, ώστε να επιτευχθεί η κατά το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα που θα κληθεί να παράγει στη συνέχεια το μοντέλο. Η βελτιστοποίηση αποτελεί ουσιαστικά μια περιορισμένης κλίμακας παραμετρική μελέτη με αντικείμενο την ακρίβεια του μοντέλου.

Η τιμή του συντελεστή έντασης τάσης, ΣΕΤ που εξάγεται από την επίλυση του μοντέλου κρίθηκε ως η πλέον κατάλληλη παράμετρος για τη βελτιστοποίηση καθώς και για την επαλήθευση του μοντέλου με την οποία θα ασχοληθούμε στη συνέχεια. Άλλωστε, όπως έχει αναφερθεί αρκετές φορές μέχρι τώρα, το πρωταρχικό κριτήριο της αποτελεσματικότητας της μεθόδου επισκευής είναι η επίδραση του ενισχυτικού επιθέματος στο ΣΕΤ στο μέτωπο της ρωγμής. Η θεωρητική τιμή του ΣΕΤ στο άκρο της ρωγμής για υπόστρωμα που δεν φέρει επίθεμα, προκύπτει από τις σχέσεις 2.3 και 2.4 της παραγράφου 2.2.2, ενώ η τιμή αναφοράς του ΣΕΤ για υπόστρωμα που φέρει επίθεμα προκύπτει από τη μελέτη [14] την οποία και επιλέξαμε για την επαλήθευση του μοντέλου.

Η βελτιστοποίηση του μοντέλου γίνεται θεωρώντας υπόστρωμα που δεν φέρει επίθεμα, καθώς η χρήση αναλυτικών εξισώσεων για τον υπολογισμό της τιμής αναφοράς του ΣΕΤ για το υπόστρωμα που φέρει επίθεμα, παρουσιάζει σημαντικές δυσκολίες και χαμηλή ακρίβεια.

Η τιμή αναφοράς του ΣΕΤ για το μοντέλο μας προκύπτει υπολογίζοντας αρχικά το διορθωτικό συντελεστή Y από τη σχέση 2.4:

$$Y = 1.12\sqrt{\pi} - 0.41\frac{\alpha}{W_s} + 18.7\left(\frac{\alpha}{W_s}\right)^2 - 38.48\left(\frac{\alpha}{W_s}\right)^3 + 53.85\left(\frac{\alpha}{W_s}\right)^4$$

Για μήκος ρωγμής $a = 15 \text{ mm} = 0.015 \text{ m}$ και πλάτος $W_s = 0.04 \text{ m}$, ο διορθωτικός συντελεστής Y υπολογίζεται σε $Y = 3.4967$.

Υπενθυμίζεται σε αυτό το σημείο ότι ο ΣΕΤ για διαμπερή ρωγμή απλού ανοίγματος συμβολίζεται με K_I . Για εφελκυστική τάση στα άκρα του υποστρώματος ίση με $\sigma = 58.33 \text{ MPa}$, η τιμή αναφοράς του ΣΕΤ για το μοντέλο χωρίς επίθεμα υπολογίζεται από τη σχέση 2.3 ως εξής:

$$K_{I,REF} = Y \cdot \sigma \cdot (\pi \cdot a)^{1/2} = 3.4967 \cdot 58.33 \cdot \sqrt{\pi \cdot 0.015} = 24.981 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$$

Να σημειωθεί σε αυτό το σημείο ότι η προσέγγιση της υπολογισθείσας τιμής στην τιμή αναφοράς του ΣΕΤ δεν είναι το απόλυτο κριτήριο βελτιστοποίησης, αφού ενδείκνυται παράλληλα να παρατηρείται σύγκλιση των υπολογισθεισών τιμών καθώς μεταβάλλεται η τιμή κάθε παραμέτρου βελτιστοποίησης.

Οι παράμετροι βάσει των οποίων έγινε η βελτιστοποίηση του μοντέλου είναι:

1. Το πλήθος των ιδιόμορφων στοιχείων περιμετρικά του άκρου της ρωγμής. Η παράμετρος εισάγεται στο μοντέλο με τη βοήθεια της μεταβλητής *CTEN* (Crack Tip Element Number).
2. Η ακτινική διάσταση (μήκος) των ιδιόμορφων στοιχείων περιμετρικά του άκρου της ρωγμής. Η παράμετρος εισάγεται στο μοντέλο με τη βοήθεια της μεταβλητής *CTER* (Crack Tip Element Radius).
3. Η πυκνότητα του πλέγματος στοιχείων. Εισάγεται έμμεσα στο μοντέλο με τη μεταβλητή *BEL* (Basic Element Length), ενώ εκφράζεται από το πλήθος στοιχείων που αποτελούν το μοντέλο.

Για τις ανάγκες της διαδικασίας βελτιστοποίησης επιλέχθηκε η επίλυση των μοντέλων με γραμμική ανάλυση, που συνεπάγεται χαμηλό χρόνο επεξεργασίας για κάθε μοντέλο.

Να σημειωθεί ότι οι τιμές του ΣΕΤ που υπολογίζονται παρακάτω αναφέρονται στο μέσο όρο των τιμών του κάθε κόμβου επί του μετώπου της ρωγμής, προσέγγιση που όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφία [25], είναι και η πλέον ρεαλιστική.

Αρχικά διερευνήθηκε η επίδραση της παραμέτρου του πλήθους των ιδιόμορφων στοιχείων στο άκρο της ρωγμής. Για την επίλυση των μοντέλων, επιλέχθηκε μήκος ιδιόμορφων στοιχείων ίσο με το 1/12 του μήκους της ρωγμής, 4 στοιχεία κατά το πάχος και υψηλή πυκνότητα του πλέγματος στοιχείων. Στον παρακάτω πίνακα 2.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης του μοντέλου του υποστρώματος που δεν φέρει επίθεμα.

Πίνακας 2.3

Βελτιστοποίηση του μοντέλου ως προς το πλήθος των ιδιόμορφων στοιχείων.

Μοντέλο	CTEN	CTER	Πυκνότητα πλέγματος	Πλήθος στοιχείων	K_I (MPa · m ^{1/2})	Απόκλιση από θεωρητικό ΣΕΤ
A1	4	α/12	Υψηλή	2224	24.886	-0.38%
A2	6	α/12	Υψηλή	2236	24.975	-0.02%
A3	8	α/12	Υψηλή	2260	24.979	-0.01%
A4	12	α/12	Υψηλή	2316	24.985	+0.02%
A5	16	α/12	Υψηλή	2400	25.003	+0.09%

Όπως φαίνεται από τον παραπάνω πίνακα, το μοντέλο που προσεγγίζει καλύτερα τη θεωρητική τιμή του ΣΕΤ είναι το A3, με 8 ιδιόμορφα στοιχεία περιμετρικά του άκρου της ρωγμής. Επιπλέον παρατηρείται σύγκλιση των τιμών μεταξύ 6 και 12 ιδιόμορφων στοιχείων. Επομένως επιλέγεται ως βέλτιστη η χρήση 8 ιδιόμορφων στοιχείων περιμετρικά της ρωγμής.

Στη συνέχεια εκτελέστηκε η διερεύνηση της παραμέτρου του βέλτιστου μήκους των ιδιόμορφων στοιχείων περίξ του άκρου της ρωγμής. Η μεταβλητή *CTER* επιλέχθηκε ως συνάρτηση του μήκους της ρωγμής, ώστε το αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης να μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε μοντέλα με σημαντικά διαφορετικό μήκος ρωγμής. Να σημειωθεί ότι το μήκος των ιδιόμορφων στοιχείων επηρεάζει έμμεσα την πυκνότητα του πλέγματος στην περιοχή πλησίον του άκρου της ρωγμής, μια περιοχή που έχουμε ορίσει (βλέπε Σχήμα 2.10) ως περιοχή υψηλής πυκνότητας πλέγματος. Το εύρος της παραμέτρου και τα αποτελέσματα της διερεύνησης παρουσιάζονται στον πίνακα 2.4 που ακολουθεί.

Πίνακας 2.4

Βελτιστοποίηση του μοντέλου ως προς το μέγεθος των ιδιόμορφων στοιχείων.

Μοντέλο	CTEN	CTER	Πυκνότητα πλέγματος	Πλήθος στοιχείων	K_I (MPa · m ^{1/2})	Απόκλιση από θεωρητικό ΣΕΤ
B1	8	<i>a/10</i>	Υψηλή	2252	25.024	+0.17%
B2	8	<i>a/12</i>	Υψηλή	2260	24.979	-0.01%
B3	8	<i>a/14</i>	Υψηλή	2332	24.942	-0.16%
B4	8	<i>a/16</i>	Υψηλή	2452	24.897	-0.34%
B5	8	<i>a/18</i>	Υψηλή	2588	24.848	-0.53%

Όπως γίνεται σαφές από τα παραπάνω αποτελέσματα, δεν παρατηρείται σύγκλιση στις τιμές του ΣΕΤ. Δεδομένων όμως του σχετικά χαμηλού ποσοστού μεταβολής της τιμής ανά μοντέλο και την πολύ καλή προσέγγιση του B2 προς τη θεωρητική τιμή, επιλέγεται ως βέλτιστη τιμή του μήκους των ιδιόμορφων στοιχείων το 1/12 του μήκους της ρωγμής.

Το τελικό στάδιο της βελτιστοποίησης του μοντέλου του υποστρώματος που δεν φέρει επίθεμα αφορά την παράμετρο της πυκνότητας του πλέγματος στοιχείων. Εξετάστηκαν τέσσερις διαμορφώσεις, χαμηλής, μέσης, υψηλής και πολύ υψηλής πυκνότητας. Στον παρακάτω πίνακα 2.6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αυτής της διερεύνησης.

Πίνακας 2.6

Βελτιστοποίηση του μοντέλου ως προς την πυκνότητα του πλέγματος στοιχείων.

Μοντέλο	CTEN	CTER	Πυκνότητα πλέγματος	Πλήθος στοιχείων	K_I (MPa · m ^{1/2})	Απόκλιση από θεωρητικό ΣΕΤ
D1	8	<i>a/12</i>	<i>Χαμηλή</i>	456	25.007	+0.11%
D2	8	<i>a/12</i>	<i>Μέση</i>	1352	24.989	+0.03%
D3	8	<i>a/12</i>	<i>Υψηλή</i>	2260	24.979	-0.01%
D4	8	<i>a/12</i>	<i>Πολύ Υψηλή</i>	3512	24.976	-0.02%

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα μπορεί κανείς να διακρίνει τη σύγκλιση της υπολογισθείσας τιμής του ΣΕΤ για μέση και υψηλή πυκνότητα πλέγματος. Η χρήση όμως πλέγματος με υψηλή και πολύ υψηλή πυκνότητα δεν δικαιολογείται από το δυσανάλογα μεγαλύτερο χρόνο επεξεργασίας της επίλυσης, συγκριτικά με την αντίστοιχη μεταβολή της τιμής του ΣΕΤ, οπότε για τις ανάγκες της παραμετρικής μελέτης του επόμενου κεφαλαίου επιλέχθηκαν μέσες τιμές πλήθους στοιχείων.

Να σημειωθεί ότι δεν γίνεται αναφορά στην αντίστοιχη τιμή του συντελεστή BEL, καθώς αυτός δεν επηρεάζει μονοσήμαντα την πυκνότητα των στοιχείων και πρέπει να μεταβάλλεται ανά μοντέλο ώστε να διατηρείται η πυκνότητα σε σταθερά περίπου επίπεδα.

Ολοκληρώνοντας τη βελτιστοποίηση του μοντέλου καλούμαστε να επαληθεύσουμε την ορθότητα αυτού, εφαρμόζοντας τα συμπεράσματα της βελτιστοποίησης στο μοντέλο του υποστρώματος που φέρει επίθεμα. Η τιμή αναφοράς του ΣΕΤ βάσει του οποίου γίνεται η επαλήθευση λήφθηκε από σχετική μελέτη της βιβλιογραφίας [14]. Η μελέτη επιλέχθηκε καθώς μεγάλο τμήμα της αναλώνεται στη διαδικασία και τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης της μεθόδου επισκευής με επίθεμα σύνθετου υλικού σε λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων, συγκεκριμένα στο πακέτο λογισμικού NISA v6.0.

Η γεωμετρία και οι ιδιότητες του μοντέλου της παρούσας μελέτης ταυτίζονται εσκεμμένα με αυτά της μελέτης αναφοράς, όπως έχουμε ήδη αναφέρει στην παράγραφο 2.3.1. Η τιμή του ΣΕΤ στην οποία κατέληξε η μελέτη αναφοράς ως αποτέλεσμα εκτεταμένης βελτιστοποίησης είναι:

$$K_{I,REF} = 9.590 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$$

Η τιμή αυτή, όπως επισημαίνεται στη μελέτη αναφοράς, εκτιμάται ότι προσεγγίζει την πραγματική τιμή του ΣΕΤ με απόκλιση μεταξύ -1.0% και -1.5%. Να σημειωθεί ότι η παραπάνω τιμή αφορά επίλυση μη γραμμικής ανάλυσης, καθώς όπως αναφέρεται στη μελέτη, αυτή προσφέρει σημαντικά μεγαλύτερη ακρίβεια σε σχέση με τη γραμμική επίλυση του μοντέλου που φέρει επίθεμα. Η αντίστοιχη τιμή που εξάγεται από την τελική μορφή του μοντέλου μας, όπως αυτή προέκυψε από τη διαδικασία βελτιστοποίησης που εξετάσαμε παραπάνω, μετά από επίλυση με μη γραμμική ανάλυση προκύπτει:

$$K_I = 9.609 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$$

Η απόκλιση της τιμής του ΣΕΤ που εξάγεται από το μοντέλο της παρούσας μελέτης ως προς την αντίστοιχη τιμή της μελέτης αναφοράς είναι + 0.198 %. Η απόκλιση αυτή επαληθεύει με απόλυτο τρόπο την ορθότητα του μοντέλου της παρούσας μελέτης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΤΟΥ ΕΠΙΘΕΜΑΤΟΣ

3.1 ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Κατά τη διενέργεια της βιβλιογραφικής ανασκόπησης εντοπίστηκαν μια σειρά από παράγοντες που επιδρούν στην αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης με επιθέματα, δηλαδή στο βαθμό μείωσης του ΣΕΤ στο άκρο της ρωγμής, καθώς και στην αντοχή της κατασκευής, κυρίως όσον αφορά στο στρώμα του κολλητικού μέσου μεταξύ του μεταλλικού υποστρώματος και του επιθέματος από σύνθετο υλικό. Οι σημαντικότεροι από αυτούς που αφορούν τη γεωμετρία της επισκευής, παρουσιάζονται στη συνέχεια, ενώ συνοψίζονται στον πίνακα 3.1.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο πρώτο κεφάλαιο, οι ιδιότητες του στρώματος της κόλλας επιδρούν στην αποτελεσματικότητα της επισκευής, επηρεάζοντας την ποιότητα της ένωσης υποστρώματος/επιθέματος, μέσω της οποίας μεταφέρεται το φορτίο από το υπόστρωμα στο επίθεμα. Έχει παρατηρηθεί [14] ότι για δεδομένο επίθεμα, η μείωση του πάχους του στρώματος της κόλλας έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση του ΣΕΤ στο άκρο της ρωγμής. Το βέλτιστο εύρος πάχους εντοπίζεται μεταξύ 0.10 mm και 0.25 mm, καθώς μεγαλύτερο πάχος καταλήγει σε αδύναμες και πορώδεις συνδέσεις, ενώ για μικρότερες τιμές πάχους το στρώμα της κόλλας γίνεται ιδιαίτερα άκαμπτο και ψαθυρό [13]. Γενικά η αύξηση του πάχους βελτιώνει την αντοχή της επισκευής, μειώνοντας τις διατμητικές τάσεις στο στρώμα της κόλλας, μειώνοντας όμως παράλληλα και το ποσοστό του φορτίου που παραλαμβάνει το επίθεμα από το υπόστρωμα, ενώ η μείωση του πάχους διευκολύνει τη μεταφορά του φορτίου αλλά αυξάνει παράλληλα τον κίνδυνο αστοχίας στο στρώμα της κόλλας [15] [16] [17].

Όσον αφορά το επίθεμα, έχει παρατηρηθεί ότι με την αύξηση του πάχους του αυξάνεται και η αποτελεσματικότητα της επισκευής, καθώς αυτό παραλαμβάνει μεγαλύτερο ποσοστό του φορτίου από το υπόστρωμα [16], εξασθενεί η εντατική κατάσταση στις ενισχυτικές ίνες και στο στρώμα της κόλλας [13], ενώ περιορίζεται και η αρνητική επίδραση των μερικών αποκολλήσεων που ενδέχεται να κάνουν την εμφάνιση τους κατά την επιχειρησιακή λειτουργία της κατασκευής [17]. Η επιλογή όμως του πάχους του επιθέματος δεν επιδρά μονοσήμαντα στην αποτελεσματικότητα της επισκευής, αφού επιθέματα με το ίδιο πάχος αλλά διαφορετική ακαμψία αποφέρουν πολύ διαφορετικά ποσοστά μείωσης του ΣΕΤ [17]. Για το λόγο αυτό εισήχθη η παράμετρος του λόγου ακαμψίας, SR (βλέπε σχέση 2.8), η οποία εκφράζει τη συσχετισμένη επίδραση του πάχους και της ακαμψίας του επιθέματος στην αποτελεσματικότητα της επισκευής. Γενικά η αύξηση του λόγου ακαμψίας της επισκευής έχει την ισχυρότερη επίδραση από κάθε άλλη παράμετρο στη μείωση του ΣΕΤ και στην επέκταση του χρόνου ζωής της κατασκευής [19]. Το αποδοτικότερο εύρος του λόγου ακαμψίας εντοπίζεται μεταξύ των τιμών 1.0 και 1.6 [13], με προτεινόμενο λόγο ακαμψίας την τιμή 1.4.

Σχετικά με τη μορφή και τις διαστάσεις του επιθέματος, έχει βρεθεί [14] [18] ότι τα ορθογωνικά επιθέματα, με τη μεγαλύτερη πλευρά τους κάθετη στη διεύθυνση επέκτασης της ρωγμής, είναι πολύ πιο αποτελεσματικά από τα αντίστοιχου βάρους και όγκου τετραγωνικά, ελλειπτικά ή κυκλικά επιθέματα.

Ειδικότερα, για ορθογωνικό επίθεμα, το μέγεθος της διάστασης που είναι κάθετη ως προς την πορεία επέκταση της ρωγμής (συνήθως αναφέρεται ως μήκος) βρέθηκε να έχει σχετικά ασθενή επίδραση στη μείωση της τιμής του ΣΕΤ, επηρεάζοντας όμως σε μεγάλο βαθμό τη συχνότητα εμφάνισης μερικών αποκολλήσεων κατά τη λειτουργία της κατασκευής [19]. Το ενδεδειγμένο μήκος του επιθέματος εντοπίζεται σε 80 με 100 φορές το πάχος του υποστρώματος για «λεπτό» υπόστρωμα [13].

Η διάσταση του επιθέματος παράλληλα στη διεύθυνση επέκτασης της ρωγμής (συνήθως αναφέρεται ως πλάτος) φέρεται να επιδρά αποδοτικότερα στη μείωση του ΣΕΤ όταν είναι μεγαλύτερο κατά 150% του μήκους της ρωγμής [20]. Σε άλλη μελέτη το ελάχιστο ωφέλιμο πλάτος προσδιορίζεται στο 125% του μήκους της ρωγμής, ενώ το μέγιστο στο 400% [17].

Ένα άλλο χαρακτηριστικό της γεωμετρίας του επιθέματος με μεγάλη σημασία, είναι η σταδιακή μείωση του πάχους του επιθέματος στα άκρα του (tapering). Η τεχνική συνίσταται στην μικρή αύξηση των διαστάσεων της κάθε στρώσης του επιθέματος, ώστε η κάθε νέα στρώση που εφαρμόζεται κατά την κατασκευή του επιθέματος να υπερκαλύπτει τα άκρα της προηγούμενης. Με τη μέθοδο αυτή επιτυγχάνεται σημαντική μείωση των διατμητικών τάσεων στην κρίσιμη περιοχή των άκρων του στρώματος της κόλλας [21] [22] [23] [24].

Πίνακας 3.1

Παράμετροι γεωμετρίας που επιδρούν στην αποτελεσματικότητα της επισκευής.

Τμήμα	Παράμετρος	Επίδραση
Στρώμα κόλλας	Πάχος	<ul style="list-style-type: none"> Μεγάλα πάχη οδηγούν σε μεγάλη αντοχή της επισκευής. ? Μικρά πάχη οδηγούν σε μεγάλη αποτελεσματικότητα της επισκευής. ? Ενδείκνυται πάχος από 0.10 έως 0.25 mm.
Επίθεμα	Πάχος	<ul style="list-style-type: none"> Μεγαλύτερα πάχη προσφέρουν γενικά μεγαλύτερη αντοχή και αποτελεσματικότητα στην επισκευή. Υπεισέρχεται στο λόγο ακαμψίας του συστήματος, ο οποίος έχει πολύ ισχυρή επίδραση στην αποτελεσματικότητα της επισκευής.
	Μορφή	<ul style="list-style-type: none"> Τα ορθογωνικά επιθέματα υπερτερούν των αντίστοιχων τετραγωνικών, ελλειπτικών ή κυκλικών.
	Διαστάσεις	<ul style="list-style-type: none"> Το μήκος του επιθέματος επιδρά κυρίως στην αντοχή της επισκευής. Για λεπτό υπόστρωμα προτείνεται μήκος επιθέματος από 80 έως 100 φορές του πάχους του υποστρώματος. Το πλάτος του επιθέματος επιδρά κυρίως στη μείωση του ΣΕΤ στο άκρο της ρωγμής. Προτείνεται πλάτος από 1.25 έως 4 φορές του μήκους της ρωγμής.
	Tapering άκρων	<ul style="list-style-type: none"> Φέρεται να μειώνει σημαντικά το ύψος των κρίσιμων διατμητικών τάσεων στο στρώμα της κόλλας.

Όπως φάνηκε από τη μελέτη της βιβλιογραφίας και μπορεί να έγινε αντιληπτό από την ανάγνωση της παραγράφου 1.3 της παρούσας διπλωματικής εργασίας, η πλειοψηφία των μελετών και εφαρμογών της μεθόδου επισκευής με επίθεμα σύνθετου υλικού εστιάζονται στην επισκευή κατασκευών αλουμινίου, συνήθως λεπτών ελασμάτων και πολύ συχνά χρησιμοποιώντας εξωτικά για τη ναυτιλία υλικά (π.χ. ίνες Βορίου).

Σκοπός της παρούσας μελέτης είναι να μεταφέρει τη μέθοδο σε περιπτώσεις ευρύτερου ναυπηγικού ενδιαφέροντος και να εξετάσει και ακολούθως να επιβεβαιώσει ή να επαναπροσδιορίσει την επίδραση ορισμένων εκ των ήδη εντοπισθέντων σημαντικών παραμέτρων της γεωμετρίας της επισκευής.

Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε ως υπόστρωμα κοινός ναυπηγικός χάλυβας, με πάχος που είναι σύνηθες στις ναυπηγικές κατασκευές και επίθεμα εποξικής ρητίνης - ινών άνθρακα χαμηλού κόστους, ευρείας χρήσης και μεγάλης διαθεσιμότητας.

Η παραμετρική μελέτη χωρίζεται σε δύο διαδοχικά και αλληλοεξαρτώμενα τμήματα.

Στο πρώτο τμήμα εξετάζεται η επίδραση της μεταβολής των διαστάσεων ορθογωνικού επιθέματος στους παράγοντες που εκφράζουν την αποτελεσματικότητα και την αντοχή της επισκευής. Οι παράγοντες αυτοί είναι:

- Η μείωση του συντελεστή έντασης τάσης, ΣΕΤ.
- Η κατανομή και το ύψος των τάσεων στο χαλύβδινο υπόστρωμα.
- Η κατανομή και το ύψος των τάσεων στο στρώμα της κόλλας.
- Η κατανομή και το ύψος των τάσεων στο επίθεμα.

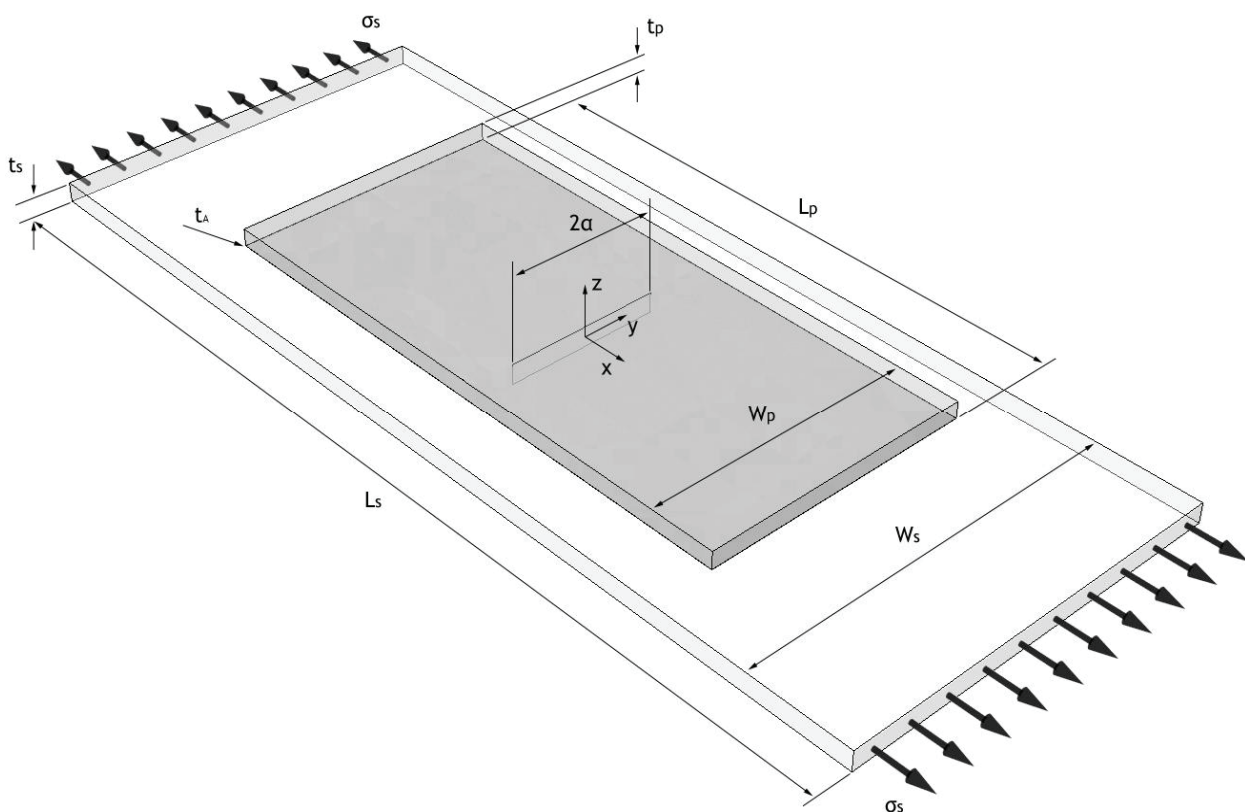
Στο δεύτερο τμήμα διερευνάται η επίδραση κάποιων τροποποιήσεων στη διάταξη του ορθογωνικού επιθέματος. Συγκεκριμένα εξετάζεται η περίπτωση επιθέματος οκταγωνικής μορφής και η περίπτωση εφαρμογής tapering στα άκρα του επιθέματος. Και σε αυτό το τμήμα παράμετροι υπό μελέτη είναι οι διαστάσεις του επιθέματος.

Οι τροποποιημένες αυτές διατάξεις δεν αναμένεται να επιδράσουν ουσιαστικά στην αποτελεσματικότητα της επισκευής, επηρεάζοντας την τιμή του ΣΕΤ. Κρίνεται όμως χρήσιμο να διερευνηθούν, καθώς εκτιμάται ότι μπορούν να προσφέρουν στη βελτίωση της αντοχής της επισκευής, εξασθενώντας το τασικό πεδίο στις κρίσιμες περιοχές φόρτισης του συστήματος, περιοχές που εντοπίστηκαν κατά την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του πρώτου τμήματος της παραμετρικής μελέτης.

3.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

3.2.1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ

Παράλληλα με την παρούσα μελέτη, το Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας είχε προγραμματίσει τη διερεύνηση της μεθόδου με μια σειρά πειραματικών δοκιμών. Τα απαιτούμενα δοκίμια είχαν ήδη παραγγελθεί από τον κατασκευαστή κατά την έναρξη της παρούσας μελέτης και συνεπώς, για λόγους ομοιοτυπίας και ευκολίας στη σύγκριση των αποτελεσμάτων, οι ιδιότητες των υλικών και η μορφή του μοντέλου επιλέχθηκαν κοινές για τις δύο μελέτες. Στο παρακάτω σχήμα 3.1 παρουσιάζεται η γενική μορφή της γεωμετρίας του μοντέλου και ορίζονται σχηματικά τα βασικά της χαρακτηριστικά.



Σχήμα 3.1

Ενδεικτική απεικόνιση της γεωμετρίας του μοντέλου υπό μελέτη.

Το σύστημα συντεταγμένων στο οποίο ορίστηκε το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων ορίζεται από τις διευθύνσεις x , y και z , όπου x είναι η διεύθυνση επιβολής του φορτίου, y η διεύθυνση της ρωγμής και z η κατά το πάχος διεύθυνση. Στο εξής, όπου αναφέρεται μήκος θα εννοείται η διάσταση κατά τη διεύθυνση x , πλάτος η διάσταση κατά τη διεύθυνση y και πάχος η διάσταση κατά τη διεύθυνση z . Μόνη εξαίρεση το μήκος της ρωγμής, το οποίο ορίζεται στον άξονα y .

Το υπόστρωμα (substrate) θεωρήθηκε ως χαλύβδινη πλάκα με πάχος $t_s = 10$ mm, η οποία φέρει κεντρική διαμπερή ρωγμή με μήκος $2a = 80$ mm. Το μήκος της πλάκας επιλέχθηκε ίσο με

$L_s = 500$ mm, ενώ αντίστοιχα το πλάτος της ίσο με $W_s = 200$ mm. Στα παράλληλα στον άξονα y άκρα της πλάκας εφαρμόστηκε εφελκυστική τάση $\sigma_s = 120$ MPa. Οι φορτιζόμενες πλευρές της χαλύβδινης πλάκας μοντελοποιούνται ως απλά αρθρωμένες και οι μη φορτιζόμενες ως ελεύθερες. Οι οριακές αυτές συνθήκες προσομοιώνουν την παραμορφωσιακή και εντατική κατάσταση της πλάκας μακριά από την ένωσή της με ενισχυτικά ή άλλα δομικά στοιχεία ενός σκάφους. Το υλικό της πλάκας ορίστηκε ως ιστροπικός κοινός ναυπηγικός χάλυβας, με μέτρο ελαστικότητας $E_s = 207$ GPa και λόγο Poisson $\nu_s = 0.33$.

Σημειώνεται ότι σε μελέτη που αναφέρεται στη βιβλιογραφία [25], όπου και εξετάστηκε η αριθμητική μοντελοποίηση του κεκλιμένου μετώπου ρωγμής (skewed crack front) που δημιουργείται στην πραγματικότητα, δε διαγνώστηκαν σημαντικές αποκλίσεις στα αποτελέσματα και συνεπώς, για λόγους απλοποίησης του προβλήματος, κρίθηκε σκόπιμο στην παρούσα μελέτη το φαινόμενο του κεκλιμένου μετώπου της ρωγμής να αγνοηθεί και αυτό να μοντελοποιηθεί ως ευθύ και κατακόρυφο.

Το στρώμα του κολλητικού μέσου (adhesive) μοντελοποιήθηκε ως ιστροπικό υλικό εποξικής ρητίνης με τις ιδιότητες της εποξικής κόλλας τύπου FM-73 της εταιρείας Cytec, υλικό που συναντάται πολύ συχνά στη βιβλιογραφία. Ουσιαστικά πρόκειται για μια σχετικά μαλακή εποξική ρητίνη με όριο θραύσης $\sigma_{uA} \approx 40$ MPa. Το μέτρο ελαστικότητας της είναι $E_A = 2.55$ GPa και ο λόγος Poisson $\nu_A = 0.32$. Οι διαστάσεις και το σχήμα του στρώματος του κολλητικού μέσου ακολουθούν προφανώς αυτά του επιθέματος. Τέλος, το πάχος του κολλητικού μέσου ορίστηκε ως $t_A = 0.1$ mm. Η τιμή αυτή επιλέχθηκε με βάση τη βιβλιογραφία, καθώς παρατηρήθηκε ότι η δυνατότητα του επιθέματος να φέρει ικανό μέρος του φορτίου της κατασκευής, διατηρώντας παράλληλα ικανοποιητικό βαθμό συνοχής μεταξύ των δύο υλικών, μεγιστοποιείται σε αυτήν την περιοχή πάχους.

Το επίθεμα (patch) μοντελοποιήθηκε ως σύνθετο ορθοτροπικό υλικό εποξικής ρητίνης - μονοαξονικών ινών άνθρακα. Οι τιμές των μηχανικών του ιδιοτήτων που επιλέχθηκαν είναι ένας συνδυασμός των συνήθων τιμών που συναντώνται στη βιβλιογραφία και τιμών που μπορούν σχετικά εύκολα να επιτευχθούν στην πράξη. Το μέτρο ελαστικότητας κατά τη διεύθυνση x θεωρήθηκε $E_{px} = 60$ GPa και κατά τις άλλες κύριες διευθύνσεις $E_{py} = E_{pz} = 4$ GPa. Ο λόγος Poisson για τα επίπεδα x - y και x - z θεωρήθηκε $\nu_{pxy} = \nu_{pxz} = 0.3$ και για το επίπεδο y - z $\nu_{pyz} = 0.02$. Το μέτρο διάτμησης του επιθέματος κατ' αντιστοιχία θεωρήθηκε $G_{xy} = G_{xz} = 2.4$ GPa και $G_{yz} = 1.6$ GPa.

Το πάχος του επιθέματος καθορίζεται από το λόγο ακαμψίας SR , εφόσον έχουμε ήδη ορίσει το μέτρο ελαστικότητάς του. Ο λόγος ακαμψίας έχει οριστεί στη σχέση 2.8 του προηγούμενου κεφαλαίου, ενώ αναφέρεται και εδώ για λόγους συνοχής του κειμένου:

$$SR = \frac{E_p \cdot t_p}{E_s \cdot t_s}$$

Ο λόγος ακαμψίας εκφράζει ουσιαστικά την ακαμψία του επιθέματος σε σχέση με αυτήν του υποστρώματος, ενώ έχει άμεση σχέση με το ποσοστό του φορτίου της κατασκευής που μπορεί να φέρει το επίθεμα. Όπως αναφέραμε και στην προηγούμενη παράγραφο, η επίδραση του λόγου ακαμψίας στην αποτελεσματικότητα της επισκευής βελτιστοποιείται μεταξύ των τιμών 1.0 και 1.6, με προτεινόμενο λόγο ακαμψίας την τιμή 1.4.

Η πλειοψηφία των εργασιών που εξετάστηκαν κατά τη μελέτη της βιβλιογραφίας και οι οποίες κατέληξαν στο παραπάνω συμπέρασμα, αφορούσαν κυρίως λεπτές κατασκευές, όπου το υλικό του υποστρώματος ήταν αλουμίνιο με τυπικό μέτρο ελαστικότητας τα 70 GPa και του επιθέματος συνήθως κάποιο προηγμένο σύνθετο υλικό με μεγάλο μέτρο ελαστικότητας, μεγαλύτερο των 100 GPa. Στην περίπτωση μας όμως, η οποία έχει μεγαλύτερη επαφή με τη ναυτιλία, η κατασκευή έχει μεγαλύτερο πάχος και το υλικό του υποστρώματος είναι χάλυβας με μέτρο ελαστικότητας 207 GPa. Επίσης το επίθεμα αποτελείται από σύνθετο υλικό ευρείας χρήσης και λογικού κόστους με χαμηλότερο μέτρο ελαστικότητας, ίσο με 60 GPa. Συγκεντρωμένες οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα 3.2.

Πίνακας 3.2

Μηχανικές ιδιότητες των υλικών που απαρτίζουν το υπό μελέτη μοντέλο.

Τμήμα κατασκευής	Υλικό	Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	Λόγος Poisson	Μέτρο διάτμησης (GPa)	Όριο θραύσης / διαρροής (MPa)
Υπόστρωμα (substrate)	Ναυπηγικός χάλυβας	$E_S = 207$	$\nu_S = 0.33$	$G_S = 77.8$	$\sigma_{SY} = 235$
Στρώμα κόλλας (adhesive)	Εποξική κόλλα FM-73	$E_A = 2,55$	$\nu_A = 0.32$	$G_A = 0.97$	$\sigma_{AF} = 40$
Επίθεμα (patch)	Εποξική ρητίνη / Ίνες άνθρακα	$E_{PX} = 60$ $E_{PY} = E_{PZ} = 4$	$\nu_{PXY} = \nu_{PXZ} = 0.3$ $\nu_{PYZ} = 0,02$	$G_{PXY} = G_{PYZ} = 2.4$ $G_{PZY} = 1.6$	$\sigma_{PF} > 600$

Ανατρέχοντας στην προηγούμενη σχέση για το λόγο ακαμψίας, οι τιμές αυτές των ιδιοτήτων σημαίνουν ότι το πάχος του επιθέματος, t_p , στην περίπτωσή μας και για λόγο ακαμψίας ίσο με $SR=1.40$ θα έπρεπε να ήταν της τάξης των 48 mm, αφού το πάχος του χάλυβα είναι $t_s = 10$ mm. Ένα τέτοιο επίθεμα όμως είναι δύσκολο να κατασκευαστεί και πιθανότατα θα προκαλούσε λειτουργικά προβλήματα. Έτσι καταλήξαμε στη μελέτη δύο πιο λογικών περιπτώσεων λόγων $SR = 0.25$ και $SR = 0.50$, με αντίστοιχα πάχη επιθέματος $t_s = 8.7$ mm και $t_s = 17.3$ mm. Τα χαρακτηριστικά της γεωμετρίας του υπό μελέτη μοντέλου συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα 3.3.

Πίνακας 3.3

Γενικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά του υπό μελέτη μοντέλου.

2a	σ_s	L_s	W_s	t_s	t_A	t_p	
80 mm	120 MPa	500 mm	200 mm	10 mm	0.1 mm	SR = 0.25	SR = 0.50
						8.7 mm	17.3 mm

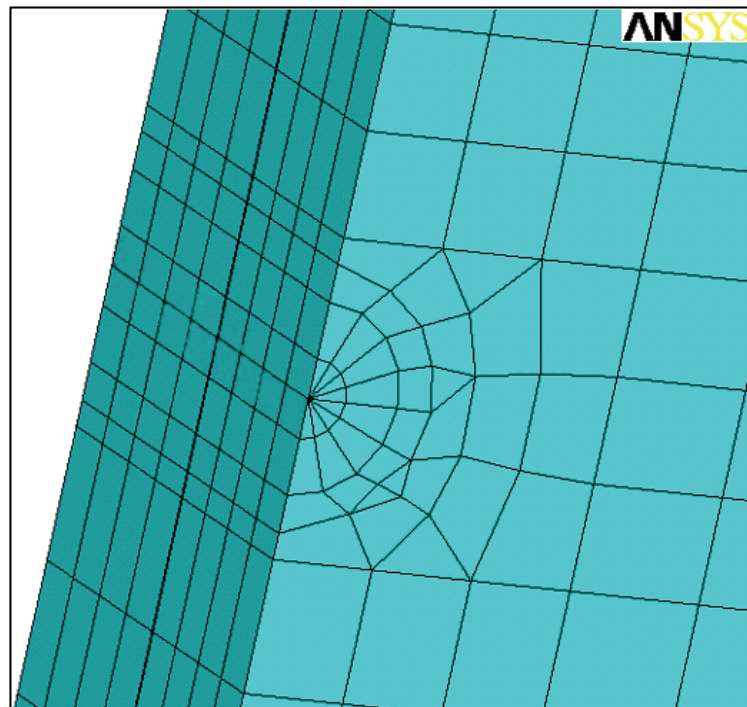
3.2.2 ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Η κατασκευή του τελικού μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων το οποίο και αποτέλεσε τον πυρήνα της παραμετρικής μελέτης βασίστηκε στο μοντέλο που παρήγαγε η διαδικασία της βελτιστοποίησης που αναλύσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

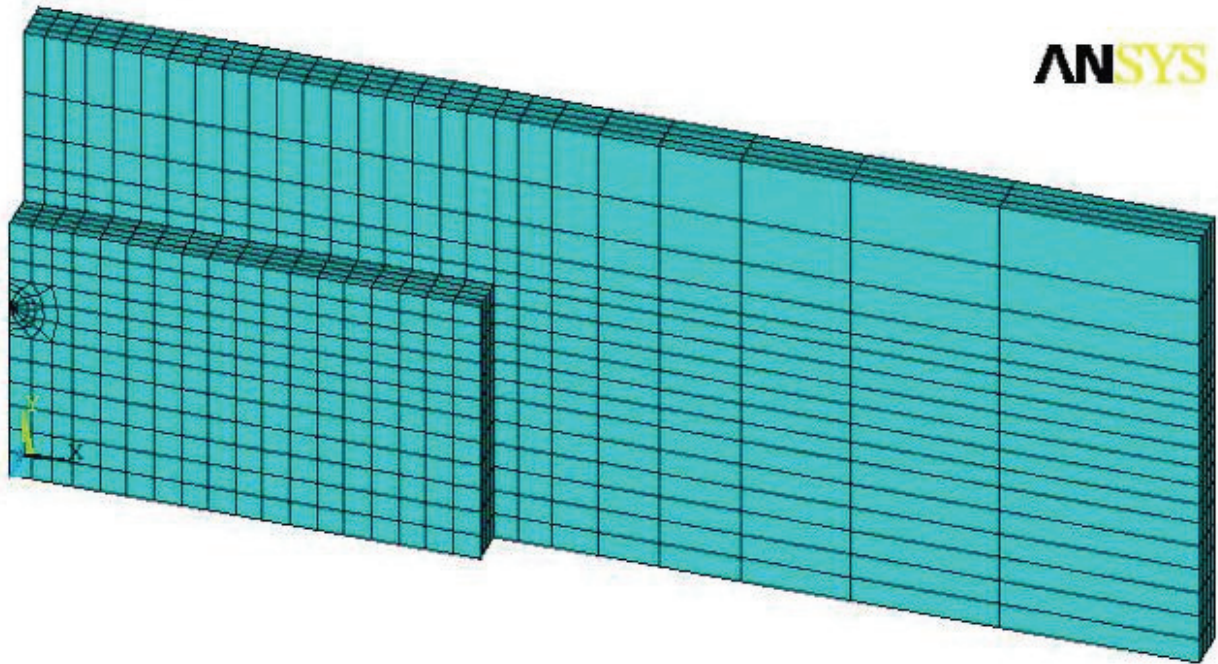
Να σημειωθεί ότι λόγω συμμετρίας υλικού, φόρτισης και συνοριακών συνθηκών, έγινε μοντελοποίηση του ενός τετάρτου του μοντέλου. Επιπλέον, το σύνολο των μοντέλων της παραμετρικής μελέτης επιλύθηκε με χρήση μη γραμμικής ανάλυσης. Αυτή αφορά την τμηματική επιβολή του φορτίου στα πλαίσια ανάλυσης μεγάλων μετατοπίσεων και όχι τη μη γραμμική συμπεριφορά των υλικών.

Αναφέρεται ακόμη ότι εξαιτίας της φύσεως των υπό μελέτη παραμέτρων, οι οποίες αφορούν τη γεωμετρία του επιθέματος, τα χαρακτηριστικά του πλέγματος στοιχείων τείνουν να μεταβάλλονται έντονα με τη μεταβολή της τιμής κάθε παραμέτρου. Η συμπεριφορά αυτή οδήγησε στην προσαρμογή του κώδικα ώστε να είναι δυνατή η εύκολη μεταβολή της πυκνότητας του πλέγματος μακριά από τη ρωγμή ανά μοντέλο. Τελικά το πλήθος των στοιχείων σταθεροποιήθηκε στα 3000 περίπου ανά μοντέλο. Το πλήθος αυτό αντιστοιχεί σε μέση πυκνότητα πλέγματος.

Ο πλήρης κώδικας των βασικών μοντέλων που αντιστοιχούν σε κάθε τμήμα της παραμετρικής μελέτης παρέχεται στο Παράρτημα, ενώ ενδεικτικές όψεις ενός έτοιμου μοντέλου παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα 3.2 και 3.3.



Σχήμα 3.2
Λεπτομέρεια του πλέγματος στην περιοχή του μετώπου της ρωγμής.

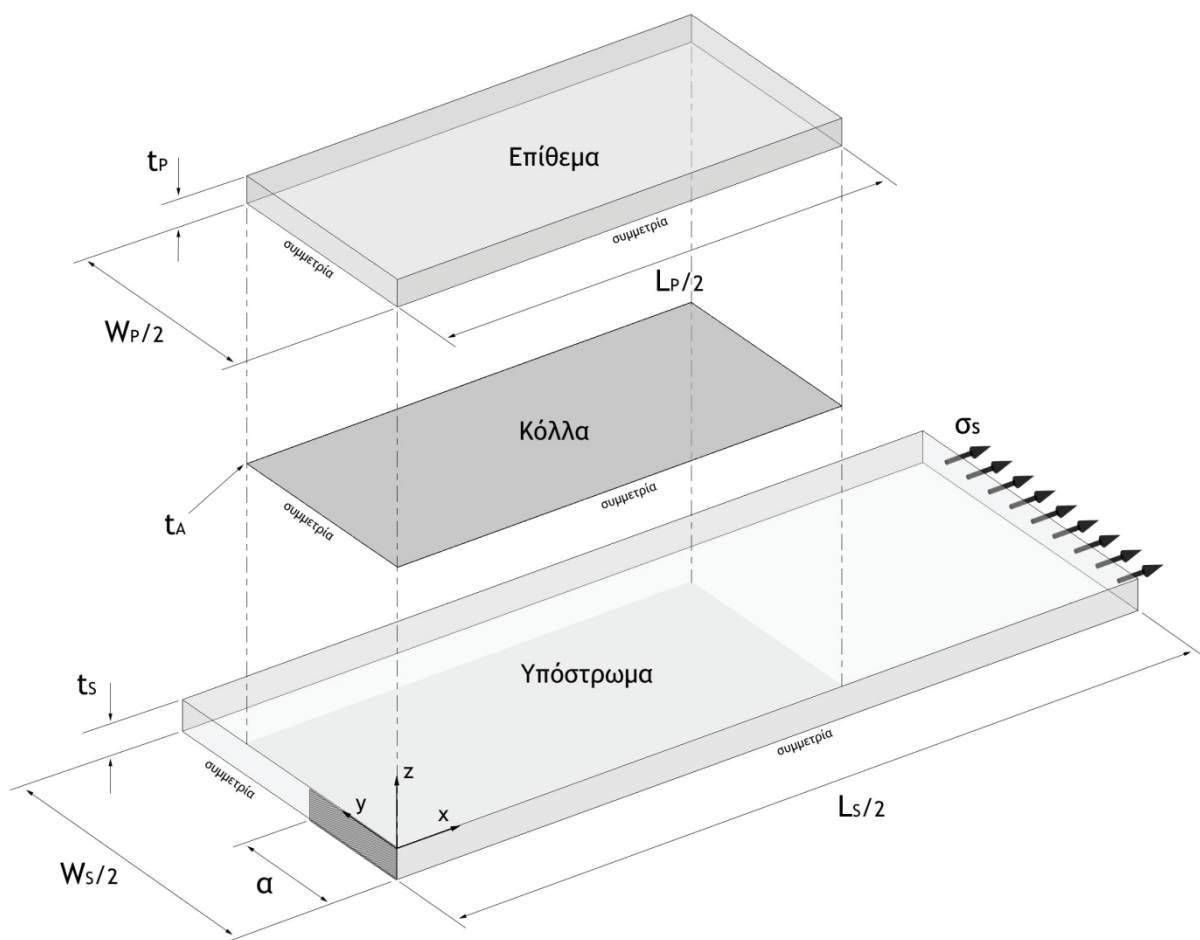


Σχήμα 3.3
Τυπικό πλέγμα στοιχείων μοντέλου.

3.3 ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΟΥ ΕΠΙΘΕΜΑΤΟΣ

3.3.1 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ

Στο πρώτο και μεγαλύτερο τμήμα της παραμετρικής μελέτης εξετάζεται η περίπτωση ορθογωνίου επιθέματος και οι παράμετροι που μελετώνται είναι το πλάτος του επιθέματος, W_p , και το μήκος αυτού, L_p . Στο παρακάτω σχήμα 3.4 παρουσιάζεται μια γεωμετρική αναπαράσταση των συνιστώντων μερών του υποστρώματος ενισχυμένου με ορθογωνικό επίθεμα. Σημειώνεται ότι στο σχήμα αυτό αναπαρίσταται μόνο το ένα τέταρτο της κατασκευής, αφού, λόγω συμμετρίας, μοντελοποιείται μόνο αυτό το τμήμα της κατασκευής.



Σχήμα 3.4

Η γεωμετρία του μοντέλου του ορθογωνικού επιθέματος.

Οι διαστάσεις του επιθέματος επιλέχθηκε να οριστούν με τη μορφή λόγων ως προς άλλες συγκεκριμένες διαστάσεις της κατασκευής, έτσι ώστε τα αποτελέσματα της παραμετρικής μελέτης να μπορούν να επεκταθούν και σε άλλες περιπτώσεις. Έτσι, το πλάτος του επιθέματος, W_p , ορίστηκε συναρτήσει του μήκους της ρωγμής, $2a$, με το λόγο $W_p/2a$ να κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 1.25 και 2.25. Εξετάστηκαν μοντέλα με $W_p/2a = 1.25, 1.50, 1.75, 2.00$ και 2.25 , δηλαδή με επιθέματα πλάτους 100, 120, 140, 160 και 180 mm.

Το μήκος L_p του επιθέματος αντίστοιχα εκφράζεται συναρτήσει του πάχους του υποστρώματος, t_s , με το λόγο L_p / t_s να κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 5 και 40, εξετάζοντας ουσιαστικά περιπτώσεις μικρής, μέσης, υψηλής και σχεδόν πλήρους κάλυψης του υποστρώματος. Εξετάστηκαν μοντέλα με $L_p / t_s = 5, 10, 20, 30$ και 40, δηλαδή με επιθέματα μήκους 50, 100, 200, 300 και 400 mm.

Ουσιαστικά εξετάζεται το σύνολο του δυνατού εύρους διαστάσεων μήκους και πλάτους, καθώς τα μοντέλα που προκύπτουν ξεκινούν από μικρή και καταλήγουν σε σχεδόν πλήρη κάλυψη της επιφάνειας του δεδομένου υποστρώματος από το επίθεμα.

Όπως προαναφέρθηκε, εξετάστηκαν μοντέλα για δύο τιμές του λόγου ακαμψίας, $SR = 0.25$ και 0.50. Έτσι λοιπόν, η παραμετρική μελέτη περιελάμβανε την επίλυση πενήντα (50) μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων. Στον παρακάτω πίνακα 3.4 συνοψίζεται το εύρος μεταβολής των παραμέτρων.

Πίνακας 3.4
Εύρος μεταβολής παραμέτρων του ορθογωνικού επιθέματος.

L_p	$5 \cdot t_s$	$10 \cdot t_s$	$20 \cdot t_s$	$30 \cdot t_s$	$40 \cdot t_s$
	50 mm	100 mm	200 mm	300 mm	400 mm
W_p	$1.25 \cdot 2a$	$1.50 \cdot 2a$	$1.75 \cdot 2a$	$2.00 \cdot 2a$	$2.25 \cdot 2a$
	100 mm	120 mm	140 mm	160 mm	180 mm

Η διερεύνηση της επίδρασης των διαστάσεων του επιθέματος στην αποτελεσματικότητα της επισκευής βασίστηκε στην εξαγωγή και αξιολόγηση των τιμών του ΣΕΤ στο μέτωπο της ρωγμής για κάθε μοντέλο. Η εξαγωγή έγινε με τη διαδικασία που περιγράψαμε στην παράγραφο 2.3.4, ενώ η ρωγή του μοντέλου θεωρείται τύπου I, οπότε ο ΣΕΤ δέχεται και εδώ το συμβολισμό K_I . Σημειώνεται ότι ο ΣΕΤ ορίζεται διαστατικά ως $[K] = [\text{τάση}] \cdot [\text{μήκος ρωγμής}]^{1/2}$ και οι μονάδες του ορίστηκαν ως $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

Όσον αφορά στη μεταβολή της εντατικής κατάστασης γενικά στο υπόστρωμα, εξήχθησαν σειρές γραφικών κατανομών των τάσεων για κάθε μοντέλο, ενώ για τη μελέτη της επίδρασης των διαστάσεων του επιθέματος στο μέγεθος των τάσεων που αναπτύσσονται στο στρώμα της κόλλας και στο επίθεμα, έγινε χρήση γραφικών κατανομών σε συνδυασμό με αριθμητικά δεδομένα. Τα σημεία εξαγωγής αυτών των δεδομένων φαίνονται στο παρακάτω σχήμα 3.5.

Ειδικότερα, τα σημεία 1 και 2 αντιστοιχούν στο άκρο της κόλλας, το παράλληλο στη διεύθυνση ανάπτυξης της ρωγμής, όπου και αναπτύσσονται οι μέγιστες τάσεις στο υλικό, όπως ενδεικτικά φαίνεται στα σχήματα 3.6 και 3.7. Να σημειωθεί ότι από την παρατήρηση αυτή εξαιρείται η περιοχή πλησίον της ρωγμής, όπου το υλικό είναι γνωστό από την εμπειρία ότι βρίσκεται σε κατάσταση πλαστικής συμπεριφοράς, φαινόμενο που έχουμε ήδη αναφέρει ότι δεν προσομοιώνεται στο μοντέλο μας. Από τα σημεία 1 και 2 εξάγονται οι τιμές της ισοδύναμης κατά von Mises τάσης, σ_{EQ} , μέγεθος που περιγράφει με σαφήνεια την έντονη παρουσία ορθών και διατμητικών τάσεων στην περιοχή.

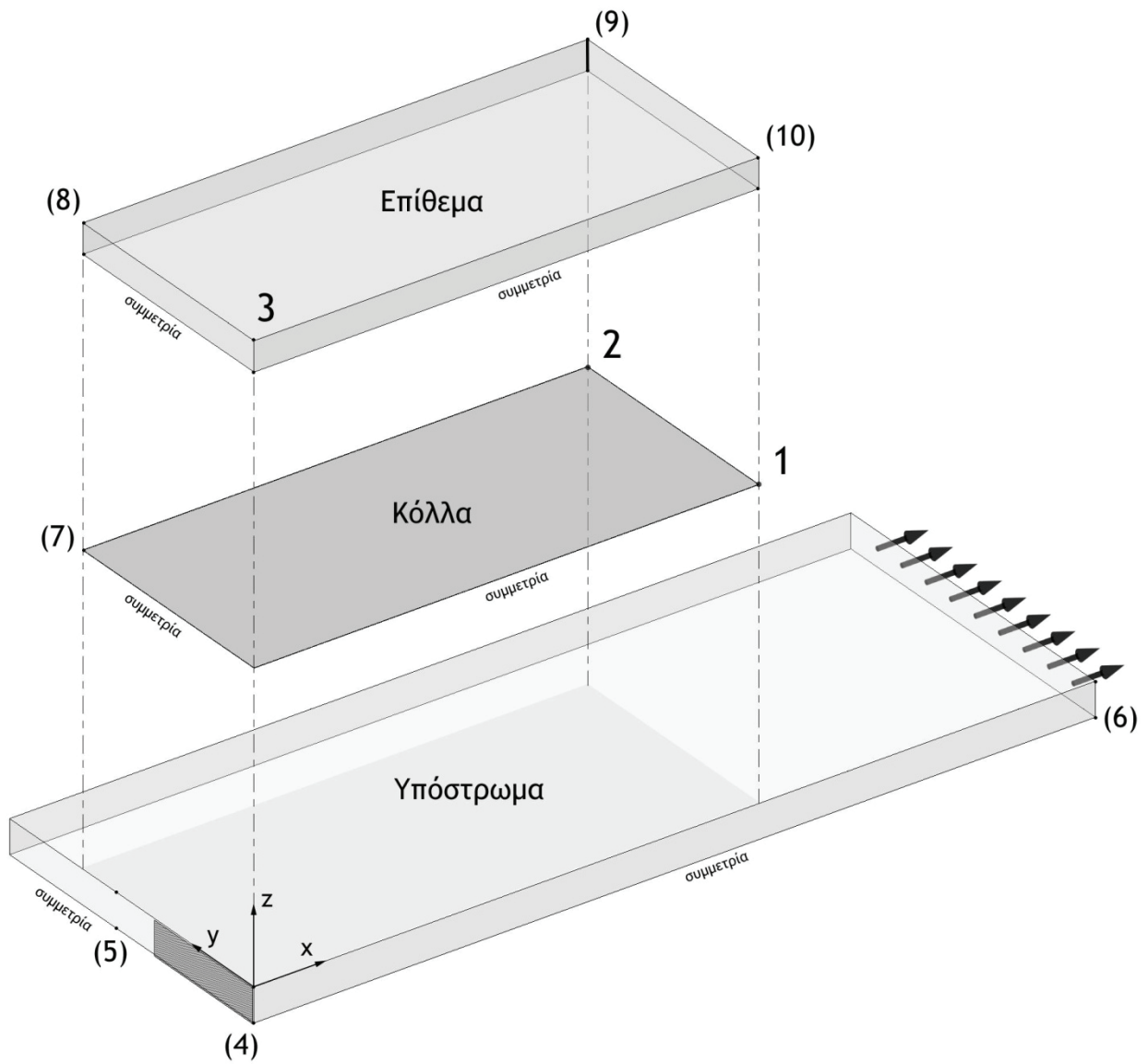
Το σημείο 3 εντοπίζεται στην περιοχή του επιθέματος ακριβώς πάνω από το μέγιστο άνοιγμα της ρωγμής, όπου και αναπτύσσεται η μέγιστη τιμή των ορθών τάσεων κατά τη διεύθυνση x , παράλληλα δηλαδή στη διεύθυνση των ινών, όπως γίνεται αντιληπτό από το ενδεικτικό σχήμα 3.8. Η τιμή που εξάγεται από το σημείο είναι φυσικά η τιμή της ορθής τάσης κατά τον άξονα x που συμβολίζεται με σ_{px} .

Καθένα από τα παραπάνω σημεία αναφέρεται σε ένα μόνο σημείο της επιφάνειας του υλικού. Περιλαμβάνει όμως όλα τα αντίστοιχα κατά το πάχος σημεία του υλικού. Έτσι τα δεδομένα των σημείων 1 και 2 εξάγονται ως οι μέγιστες τιμές των ισοδύναμων τάσεων κατά το πάχος της κόλλας, λαμβάνοντας υπόψη το πολύ μικρό πάχος του στρώματος της κόλλας και του ότι παρατηρήθηκε σημαντική μεταβολή στην κατανομή της ισοδύναμης τάσης κατά το πάχος του υλικού στο σημείο 1. Αντίστοιχη σημαντική μεταβολή κατά το πάχος παρατηρήθηκε στο σημείο 3 του επιθέματος (βλέπε σχήμα 3.9), από όπου εξάγεται η μέγιστη τιμή της ορθής τάσης κατά τον άξονα x , η οποία μάλιστα εντοπίζεται στην επιφάνεια του επιθέματος που εφάπτεται στο στρώμα της κόλλας. Σημειώνεται ότι στα παρακάτω σχήματα οι τιμές των τάσεων αναφέρονται σε MPa.

Όσον αφορά τα υπόλοιπα σημεία που επισημαίνονται στο σχήμα 3.5, εξήχθησαν πλήρη αριθμητικά στοιχεία κατά το πάχος, από τη μελέτη όμως των οποίων προέκυψε ότι η μεταβολή των διαστάσεων του επιθέματος δεν επηρεάζει ουσιαστικά τις τιμές τους και για αυτό το λόγο δεν γίνεται επιπλέον αναφορά σε αυτά στις επόμενες παραγράφους.

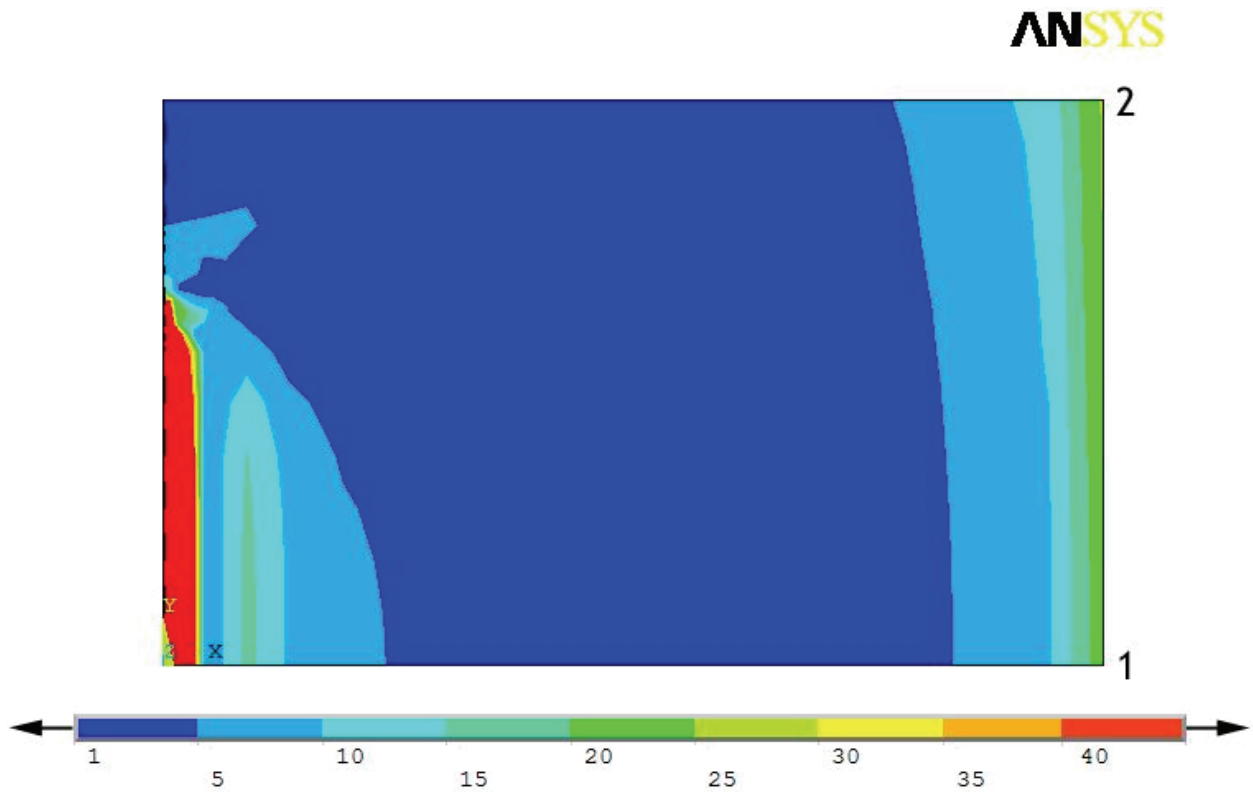
Ειδικότερα εξήχθησαν τα εξής:

- Σημείο 4 (επί του υποστρώματος) : Μετατόπιση κατά τον άξονα x (u_x).
- Σημείο 5 (επί του υποστρώματος) : Ορθή τάση κατά τον άξονα x (σ_x), παραμόρφωση κατά τον άξονα x (s_x).
- Σημείο 6 (επί του υποστρώματος) : Μετατόπιση κατά τον άξονα x (u_x).
- Σημείο 7 (επί του στρώματος κόλλας) : Ορθή τάση κατά τον άξονα x (σ_x), παραμόρφωση κατά τον άξονα x (s_x), διατμητική τάση κατά το επίπεδο xy (τ_{xy}).
- Σημείο 8 (επί του επιθέματος) : Ορθή τάση κατά τον άξονα x (σ_x), παραμόρφωση κατά τον άξονα x (s_x).
- Σημείο 9 (επί του επιθέματος) : Ορθή τάση κατά τον άξονα z (σ_z).
- Σημείο 10 (επί του επιθέματος) : Ορθή τάση κατά τον άξονα z (σ_z).



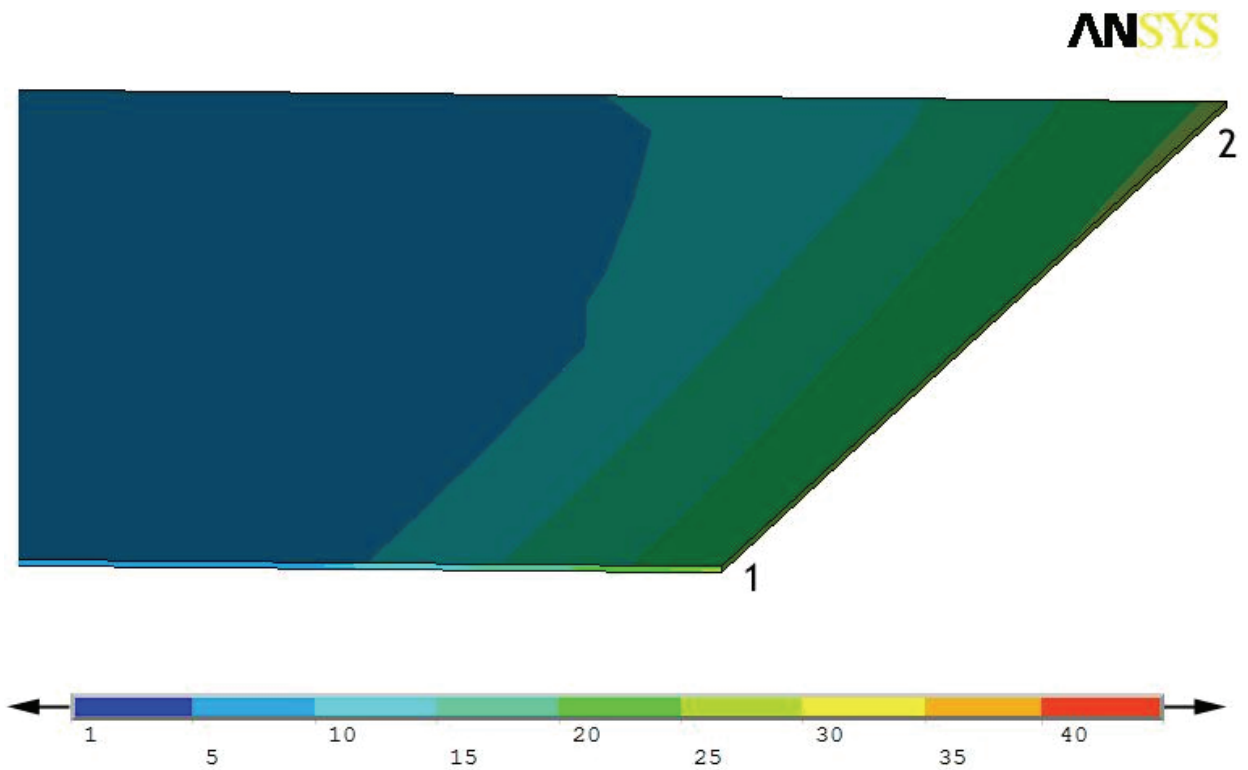
Σχήμα 3.5

Απεικόνιση του μοντέλου όπου φαίνονται τα σημεία εξαγωγής αριθμητικών δεδομένων.



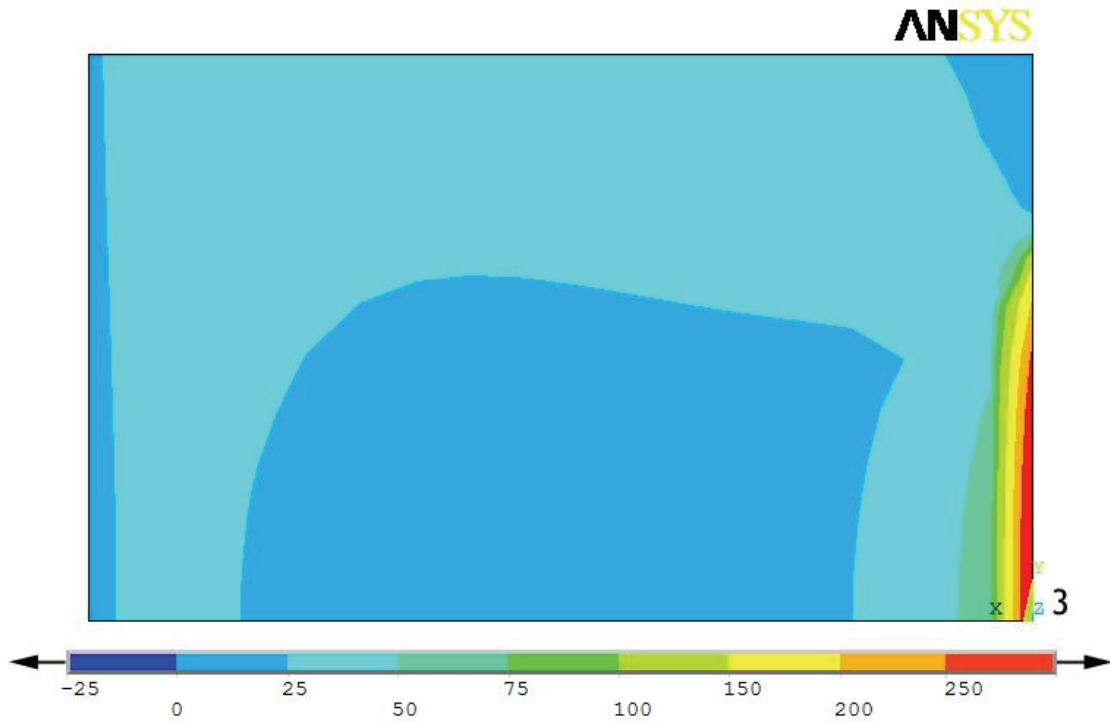
Σχήμα 3.6

Ενδεικτική κατανομή της τάσης σ_{EQ} στην επιφάνεια του στρώματος της κόλλας.

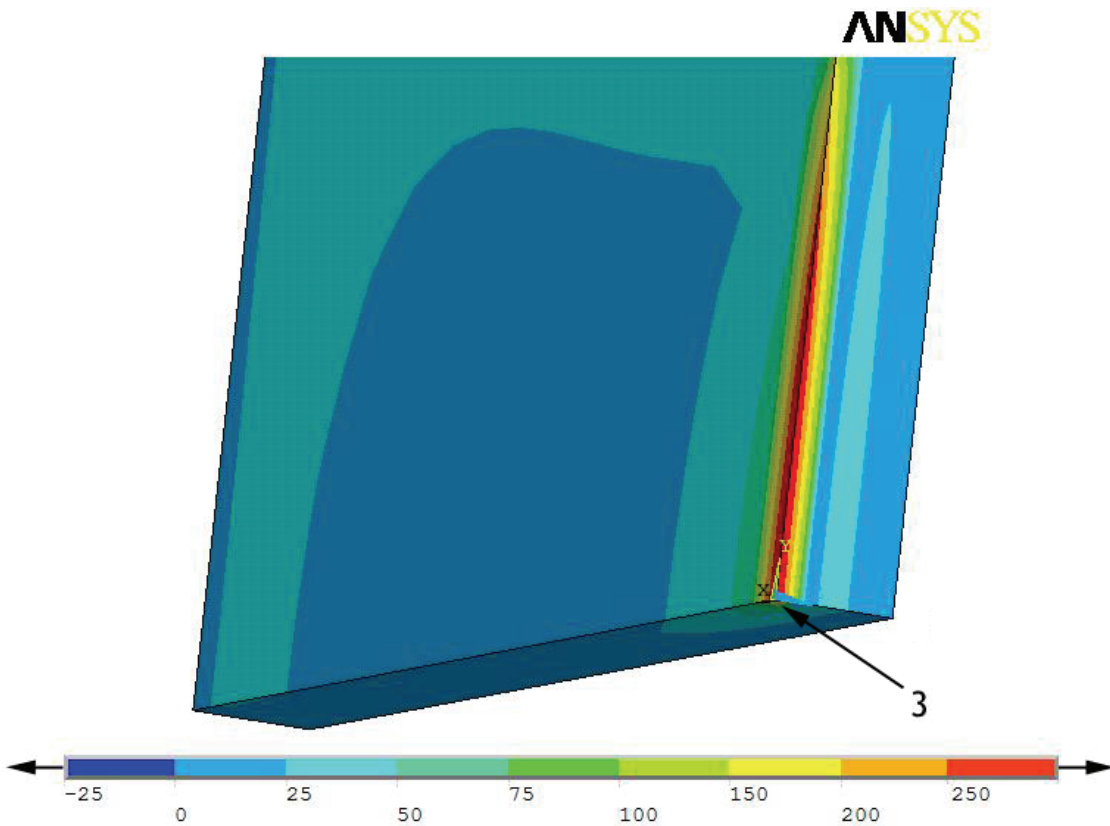


Σχήμα 3.7

Λεπτομέρεια της κατανομής της τάσης σ_{EQ} στο άκρο του στρώματος της κόλλας.



Σχήμα 3.8
Ενδεικτική κατανομή της τάσης σ_x στην επιφάνεια του επιθέματος.



Σχήμα 3.9
Ενδεικτική κατανομή της τάσης σ_x κατά το πάχος στο επίθεμα.

3.3.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΗ ΜΕΙΩΣΗ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΕΝΤΑΣΗΣ ΤΑΣΗΣ

Ο ΣΕΤ παρουσιάζει μεγάλη μεταβολή κατά το πάχος του καλύβδινου υποστρώματος, λαμβάνοντας μικρές τιμές στο άκρο του μετώπου της ρωγμής που εφάπτεται του επιθέματος και μεγάλες στην ελεύθερη πλευρά του καλύβδινου ελάσματος. Έτσι, υπολογίζεται η μέση τιμή του ΣΕΤ, η οποία μπορεί να αποτελέσει ουσιαστικό μέτρο σύγκρισης με την αντίστοιχη τιμή του υποστρώματος που δε φέρει επίθεμα. Η τιμή αναφοράς του ΣΕΤ υπολογίστηκε επιλύοντας το βασικό μοντέλο της παραμετρικής μελέτης χωρίς το επίθεμα ή το στρώμα της κόλλας και βρέθηκε ίση με:

$$K_{I,REF} = 45.483 \text{ MPa} \cdot m^{1/2}$$

έχοντας περίπου ομοιόμορφη και συμμετρική κατανομή κατά το πάχος του υποστρώματος.

Η μέση τιμή του ΣΕΤ για κάθε μοντέλο, καθώς και ο λόγος μείωσής του σε σχέση με την τιμή χωρίς επίθεμα (τιμή με επίθεμα / τιμή χωρίς επίθεμα) για όλο το εύρος των παραμέτρων και για τις δύο τιμές του λόγου ακαμψίας που εξετάστηκαν, παρουσιάζονται στους πίνακες 3.5 έως 3.8, ενώ στα σχήματα 3.10 και 3.11 παρουσιάζονται οι αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις της μεταβολής του ΣΕΤ. Οι γραφικές παραστάσεις δεν παρουσιάζονται σε κλίμακα με αρχή το 0, ώστε να είναι περισσότερο ορατές οι μεταβολές στην κλίση των καμπυλών.

Πίνακας 3.5
Μεταβολή του ΣΕΤ ανά μοντέλο για λόγο ακαμψίας $SR = 0.25$.

$K_I \text{ (MPa} \cdot m^{1/2} \text{)}$					
$W_P / 2a$	L_P / t_S				
	5	10	20	30	40
1.25	33.592	33.041	32.596	32.398	32.233
1.50	33.526	32.907	32.384	32.107	31.893
1.75	33.397	32.729	32.108	31.741	31.474
2.00	33.396	32.713	32.001	31.540	31.223
2.25	33.402	32.706	31.918	31.370	31.006

Πίνακας 3.6
Λόγος μείωσης του ΣΕΤ ανά μοντέλο για λόγο ακαμψίας $SR = 0.25$.

$K_{I,PATCHED} / K_{I,REF}$					
$W_P / 2a$	L_P / t_S				
	5	10	20	30	40
1.25	0.739	0.726	0.717	0.712	0.709
1.50	0.737	0.724	0.712	0.706	0.701
1.75	0.734	0.720	0.706	0.698	0.692
2.00	0.734	0.719	0.704	0.693	0.686
2.25	0.734	0.719	0.702	0.690	0.682

Πίνακας 3.7
Μεταβολή του ΣΕΤ ανά μοντέλο για λόγο ακαμψίας $SR = 0.50$.

K_I (MPa·m ^{1/2})					
$W_p / 2a$	L_p / t_s				
	5	10	20	30	40
1.25	32.462	31.651	31.387	31.184	30.971
1.50	32.347	31.387	31.070	30.830	30.594
1.75	32.091	31.015	30.609	30.320	30.059
2.00	32.079	30.932	30.422	30.076	29.792
2.25	32.077	30.873	30.260	29.859	29.557

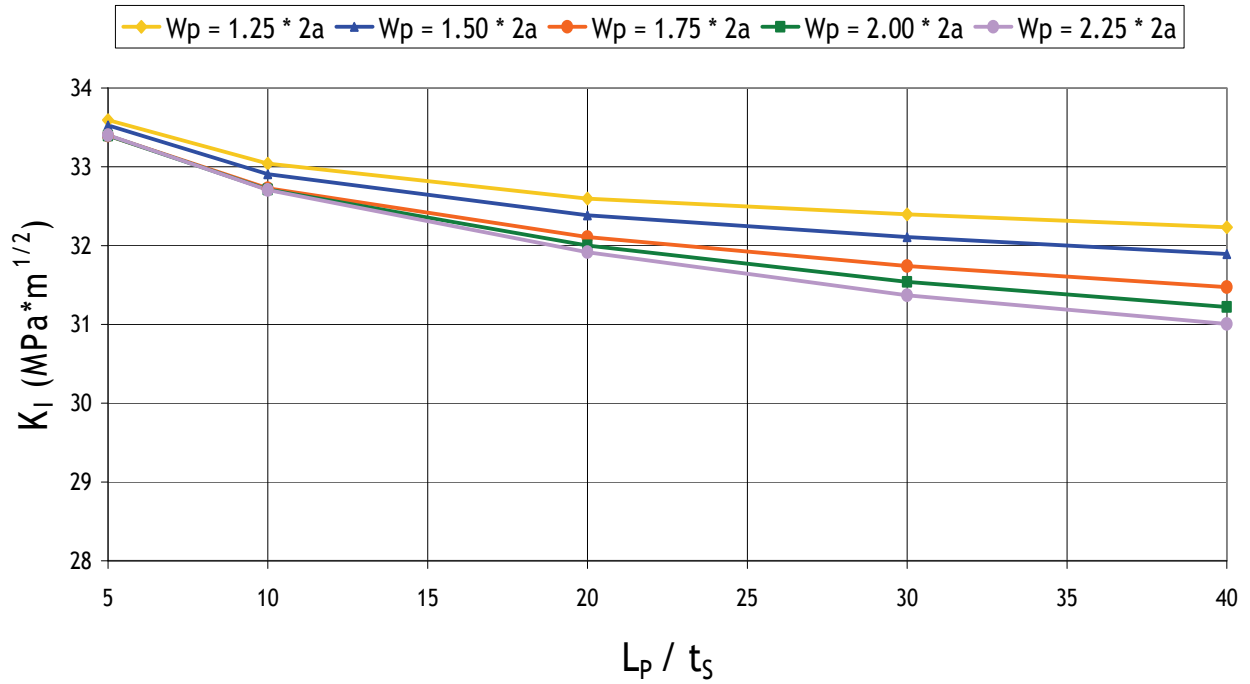
Πίνακας 3.8
Λόγος μείωσης του ΣΕΤ ανά μοντέλο για λόγο ακαμψίας $SR = 0.50$.

$K_{I,PATCHED} / K_{I,REF}$					
$W_p / 2a$	L_p / t_s				
	5	10	20	30	40
1.25	0.714	0.696	0.690	0.686	0.681
1.50	0.711	0.690	0.683	0.678	0.673
1.75	0.706	0.682	0.673	0.667	0.661
2.00	0.705	0.680	0.669	0.661	0.655
2.25	0.705	0.679	0.665	0.657	0.650

Παρατηρούμε ότι ο συντελεστής έντασης τάσης παίρνει τη χαμηλότερη τιμή του για το μεγαλύτερο σε μήκος και πλάτος επίθεμα και για τις δύο περιπτώσεις του λόγου ακαμψίας. Ο ΣΕΤ σε αυτήν την περίπτωση μειώνεται κατά 35 % για $SR = 0.50$ και κατά 32 % για $SR = 0.25$. Ακόμη, από τους πίνακες και τα σχήματα φαίνεται ότι ακόμη και για πολύ μικρή τιμή του μήκους του επιθέματος, δηλαδή για $L_p/t_s = 5$, αυτό είναι αρκετά αποτελεσματικό, αφού ο ΣΕΤ δέχεται μείωση της τάξης του 25%.

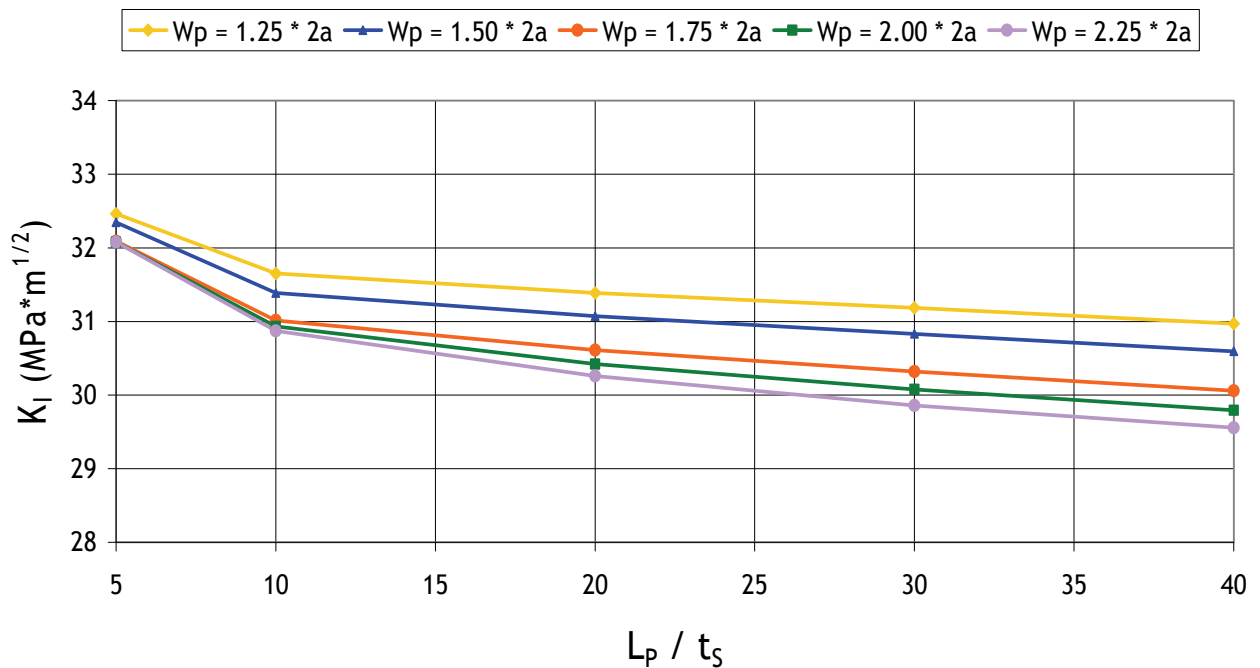
Η μελέτη των Σχημάτων 3.10 και 3.11 οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ο ρυθμός μείωσης του ΣΕΤ ως προς το πλάτος κάνει ένα άλμα μεταξύ των τιμών $W_p/2a = 1.50$ και $W_p/2a = 1.75$. Εάν επιχειρήσουμε λοιπόν να χωρίζουμε το εξεταζόμενο εύρος διαστάσεων σε δύο περιοχές, μπορούμε να ισχυριστούμε ότι τα επιθέματα λειτουργούν περισσότερο αποδοτικά για μήκη μεγαλύτερα του λόγου $L_p/t_s = 20$ και πλάτη μεγαλύτερα του λόγου $W_p/2a = 1.75$.

Παρατηρείται τέλος ότι ο διπλασιασμός της τιμής του λόγου ακαμψίας από 0.25 σε 0.50, δεν οδηγεί σε σημαντική μείωση των αντίστοιχων ΣΕΤ. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονιστεί ότι κανενός είδους αστοχία υλικού δεν έχει ληφθεί υπόψη στο μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων.



Σχήμα 3.10

Γραφική παράσταση της μεταβολής του ΣΕΤ για λόγο ακαμψίας $SR = 0.25$.



Σχήμα 3.11

Γραφική παράσταση της μεταβολής του ΣΕΤ για λόγο ακαμψίας $SR = 0.50$

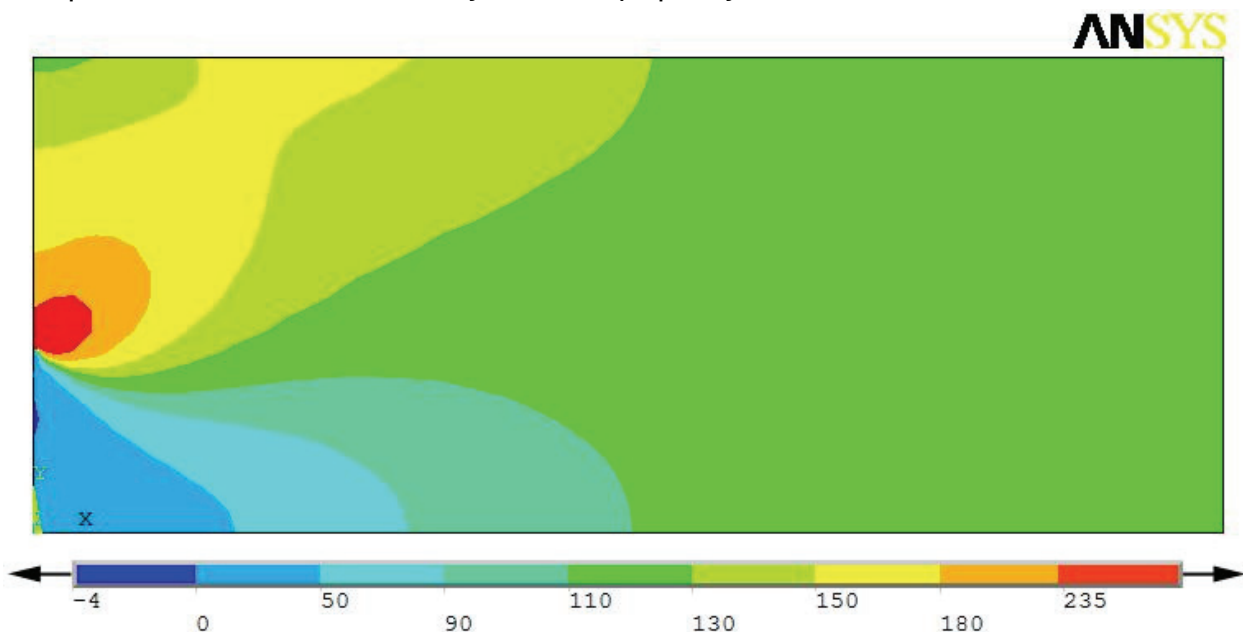
3.3.3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΗΝ ΕΝΤΑΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ

Το τασικό πεδίο στην περιοχή του άκρου της ρωγμής εκφράζεται μέσω του ΣΕΤ, όπως είδαμε παραπάνω. Όσον αφορά στις τάσεις στο υπόλοιπο τμήμα του υποστρώματος, η ύπαρξη του επιθέματος επιφέρει γενικά σημαντικές μεταβολές, οι οποίες φαίνονται στα παρακάτω ενδεικτικά σχήματα 3.12 έως 3.16. Σε όλα τα σχήματα οι τιμές αντιστοιχούν σε MPa.

Η συγκριτική μελέτη των σχημάτων 3.12 και 3.13, τα οποία δείχνουν την κατανομή της διαμήκου τάσης σ_x στο χαλύβδινο έλασμα στην περίπτωση ελάσματος χωρίς επίθεμα και στην ελεύθερη πλευρά ελάσματος με μονόπλευρο επίθεμα, αντίστοιχα, δεν φανερώνει σημαντικές διαφορές ως προς τις τάσεις πλησίον της ρωγμής, όπου οι μέγιστες τιμές των τάσεων παραμένουν πρακτικά ίδιες, ενώ η επιφάνεια των περιοχών υπερφόρτισης επεκτείνεται λίγο.

Η κατάσταση είναι τελείως διαφορετική όταν γίνει σύγκριση μεταξύ των Σχημάτων 3.12 και 3.14, με την κατανομή δηλαδή των τάσεων σ_x στην επιφάνεια του ελάσματος που είναι σε επαφή με το επίθεμα. Οι τάσεις στην περίπτωση αυτή και στην περιοχή πλησίον της ρωγμής εμφανίζουν δραματική μείωση, σε σχέση με την περίπτωση χωρίς επίθεμα, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα και τη σημαντική μείωση των τιμών του ΣΕΤ που υπολογίστηκαν προηγουμένως.

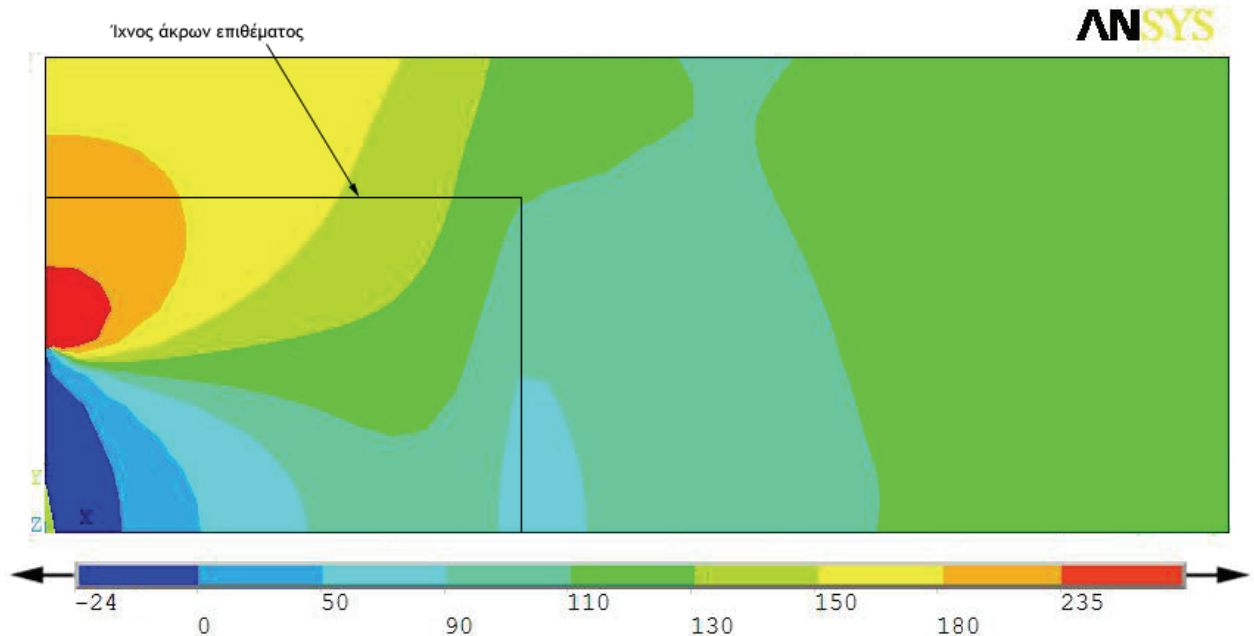
Παρατηρώντας τα σχήματα 3.13 και 3.14 και εστιάζοντας την προσοχή μας στην περιοχή πλησίον του παράλληλου στη διεύθυνση y άκρου του επιθέματος, όπου και συντελείται η μεταφορά του φορτίου από το υπόστρωμα στο επίθεμα, καταλήγουμε σε μία πολύ ενδιαφέρουσα διαπίστωση. Συγκεκριμένα παρατηρείται ότι στην εφραπτόμενη του επιθέματος πλευρά (Σχ.3.14) δημιουργείται μια ευρεία περιοχή όπου αναπτύσσονται σχετικά υψηλές τάσεις, της τάξης των 130 με 180 MPa (αύξηση 20 με 70 MPa σε σχέση με την περίπτωση χωρίς επίθεμα) η οποία καλύπτει ουσιαστικά όλο το πλάτος του υποστρώματος, παρόλο που το επίθεμα δεν καλύπτει όλο το πλάτος του υποστρώματος.



Σχήμα 3.12

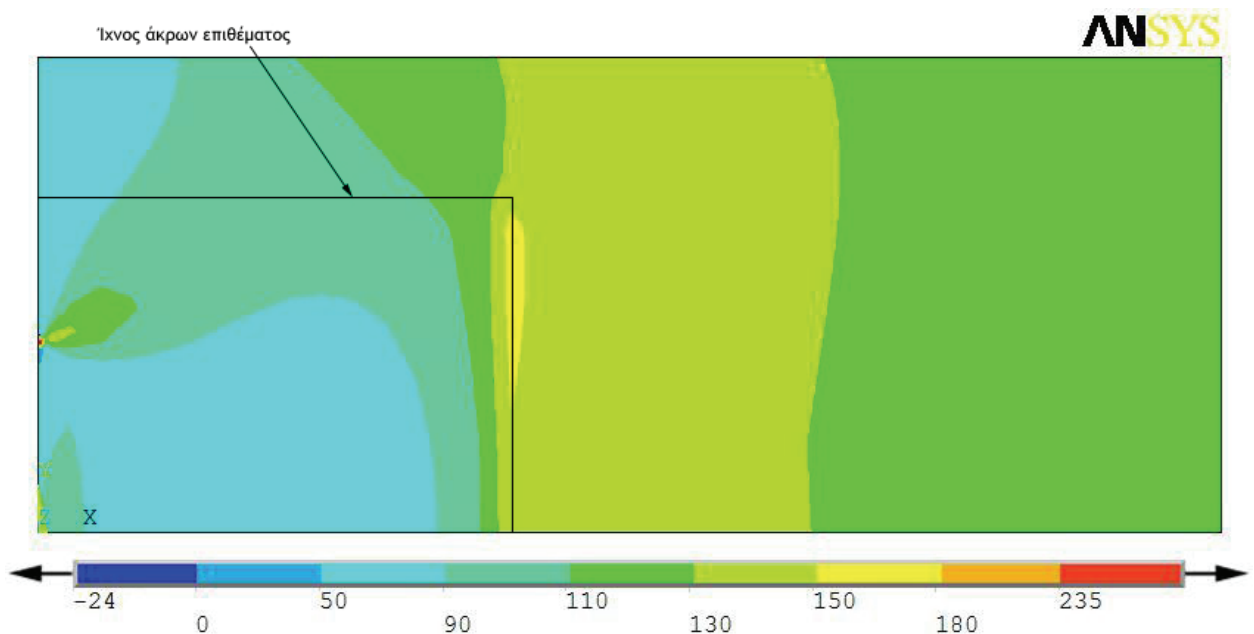
Κατανομή τάσης σ_x στο υπόστρωμα που δεν φέρει επίθεμα.

Στην αντίστοιχη περιοχή της ελεύθερης πλευράς του υποστρώματος (Σχ. 3.13) παρατηρείται μια μικρή μόνο μείωση των τάσεων, ενώ παράλληλα απουσιάζει πλήρως η περιοχή υψηλών τάσεων που παρατηρείται στην πλευρά του επιθέματος. Με τη διαπίστωση αυτή θα ασχοληθούμε στη συνέχεια, διερευνώντας τη συσχέτισή της με το εύρος μεταβολής των διαστάσεων του επιθέματος.



Σχήμα 3.13

Κατανομή τάσης σ_x στο υπόστρωμα που φέρει επίθεμα, στην ελεύθερη πλευρά του.



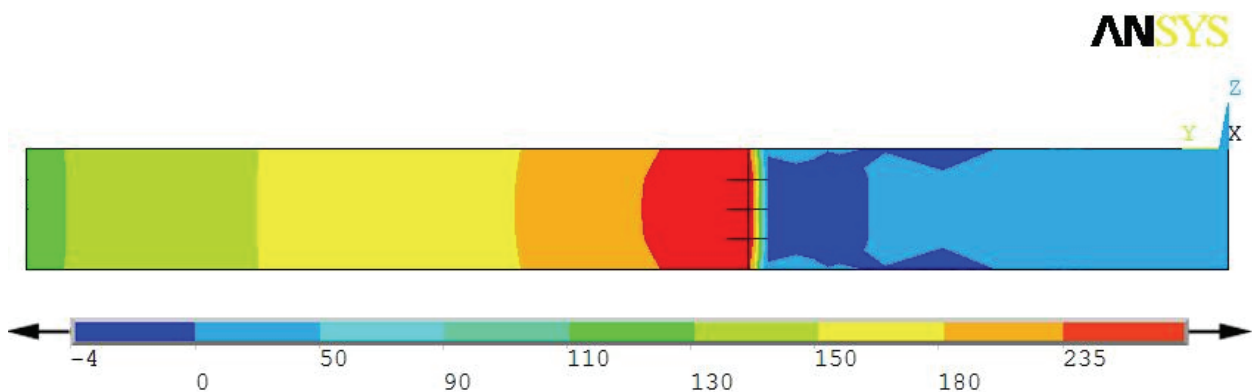
Σχήμα 3.14

Κατανομή τάσης σ_x στο υπόστρωμα που φέρει επίθεμα, στην επαπτόμενη του επιθέματος πλευρά του.

Η έντονη μεταβολή του τασικού πεδίου του υποστρώματος ως αποτέλεσμα της εφαρμογής του επιθέματος παρουσιάζεται και μέσω των σχημάτων 3.15 και 3.16, τα οποία δείχνουν την μεταβολή των διαμήκων τάσεων σ_x στην εγκάρσια διατομή $y-z$ του χαλύβδινου ελάσματος όπου υπάρχει και η ρωγμή.

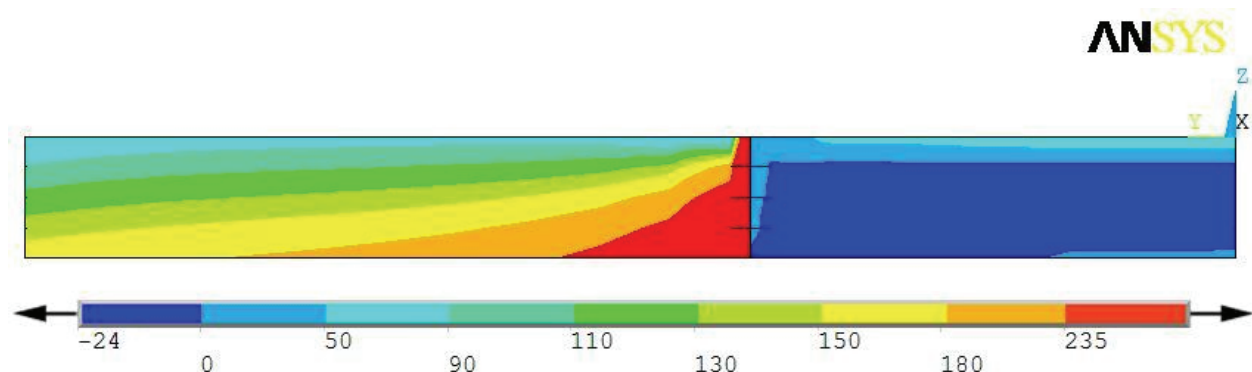
Στην περίπτωση υποστρώματος χωρίς επίθεμα, η κατά το πάχος κατανομή των τάσεων είναι συμμετρική, παρουσιάζοντας μέγιστες τιμές στο μέσο του πάχους του υποστρώματος. Αντίθετα, στην περίπτωση εφαρμογής του επιθέματος, η κατανομή των τάσεων παρουσιάζει σημαντική κατά το πάχος μεταβολή. Ειδικότερα, οι τάσεις από το μέσο της διατομής και προς την πλευρά του επιθέματος (άνω πλευρά) εμφανίζονται πολύ μειωμένες, ενώ οι μέγιστες τιμές εμφανίζονται επί της ελεύθερης πλευράς (κάτω) του υποστρώματος.

Η συμπεριφορά αυτή επιβεβαιώνει σε μεγάλο βαθμό τη σημαντική ανακούφιση του ελάσματος που προσφέρει η ύπαρξη του επιθέματος και η οποία αποτυπώνεται στη μείωση του ΣΕΤ που εξετάσαμε προηγουμένως, ενώ είναι αλληλένδετη με την κάμψη η οποία επάγεται στο σύστημα υποστρώματος - επιθέματος.



Σχήμα 3.15

Κατανομή τάσης σ_x στη διατομή της ρωγμής, στο υπόστρωμα που δεν φέρει επίθεμα.



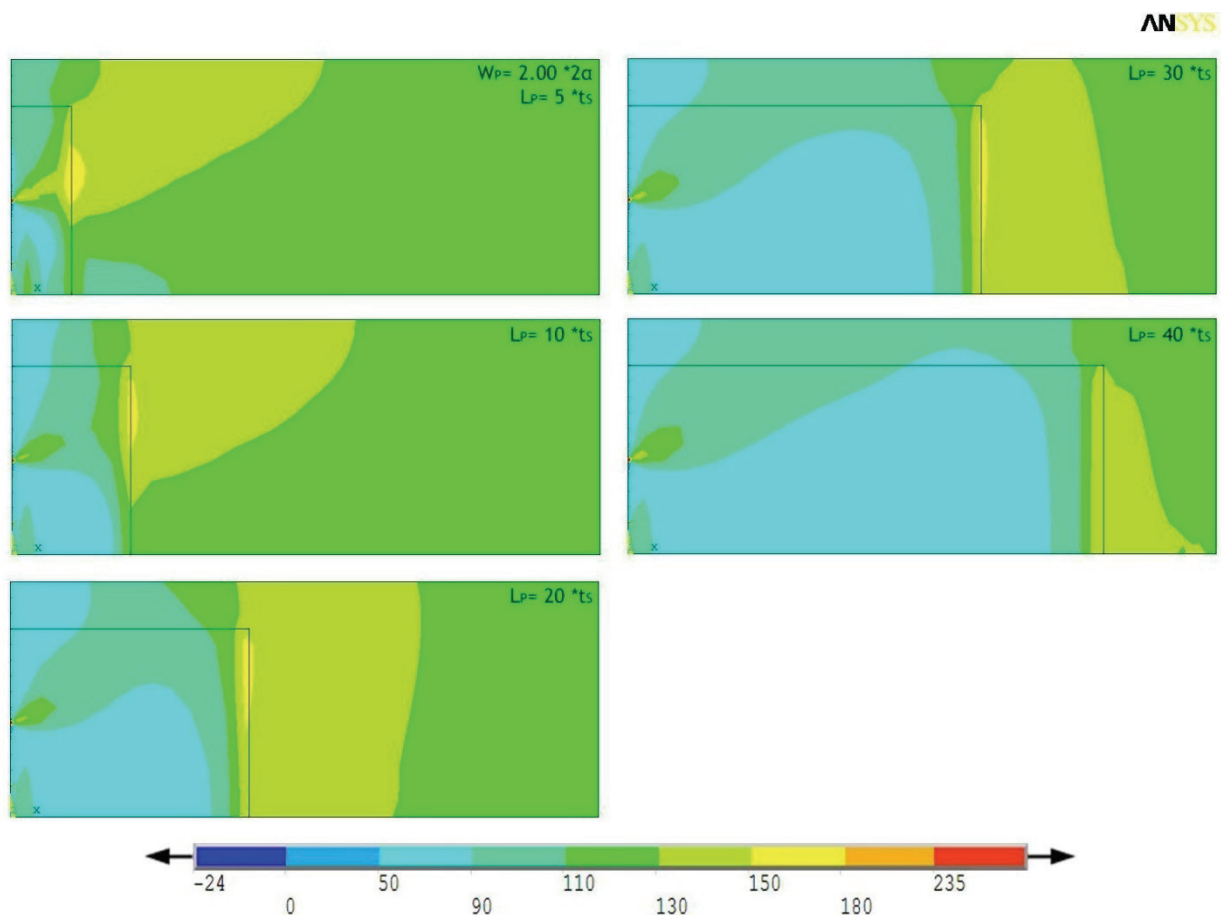
Σχήμα 3.16

Κατανομή τάσης σ_x στη διατομή της ρωγμής, στο υπόστρωμα που φέρει επίθεμα.

Στα παρακάτω σχήματα 3.17 και 3.18 παρουσιάζεται η επίδραση της μεταβολής των διαστάσεων του επιθέματος στην εντατική κατάσταση του υποστρώματος, στην πλευρά αυτού την επαπτόμενη στο επίθεμα.

Παρατηρώντας το σχήμα 3.17, όπου φαίνεται η κατανομή των τάσεων σ_x για τις διάφορες τιμές του μήκους του επιθέματος και για πλάτος αυτού ίσο με $W_p = 2.00 \cdot 2a = 160$ mm, μπορούμε να αντιληφθούμε ότι οι μέγιστες τάσεις αναπτύσσονται στην περιοχή του υποστρώματος πλησίον του παράλληλου στη διεύθυνση y άκρου του επιθέματος. Πέρα από μία μεγάλης έκτασης περιοχή όπου αναπτύσσονται σχετικά υψηλές τάσεις, από 130 έως 150 MPa, το ενδιαφέρον εντοπίζεται κυρίως στο μικρό θύλακα εντός αυτής της περιοχής, όπου αναπτύσσονται πολύ υψηλές τάσεις, της τάξης των 150 MPa με 180 MPa.

Διακρίνουμε επίσης ότι για μήκος επιθέματος ίσο και μεγαλύτερο από 20 φορές το πάχος του υποστρώματος, $L_p = 20 \cdot t_s = 200$ mm, η κατανομή των τάσεων στην περιοχή αρχίζει να ομαλοποιείται και να καλύπτει όλο και μεγαλύτερο μέρος του πλάτους του υποστρώματος, ενώ φαίνεται να περιορίζεται συνεχώς ο θύλακας των μέγιστων τάσεων μέχρι και την τιμή $L_p = 40 \cdot t_s = 400$ mm όπου οι μέγιστες τάσεις σε όλη την περιοχή δεν ξεπερνούν τα 150 MPa.

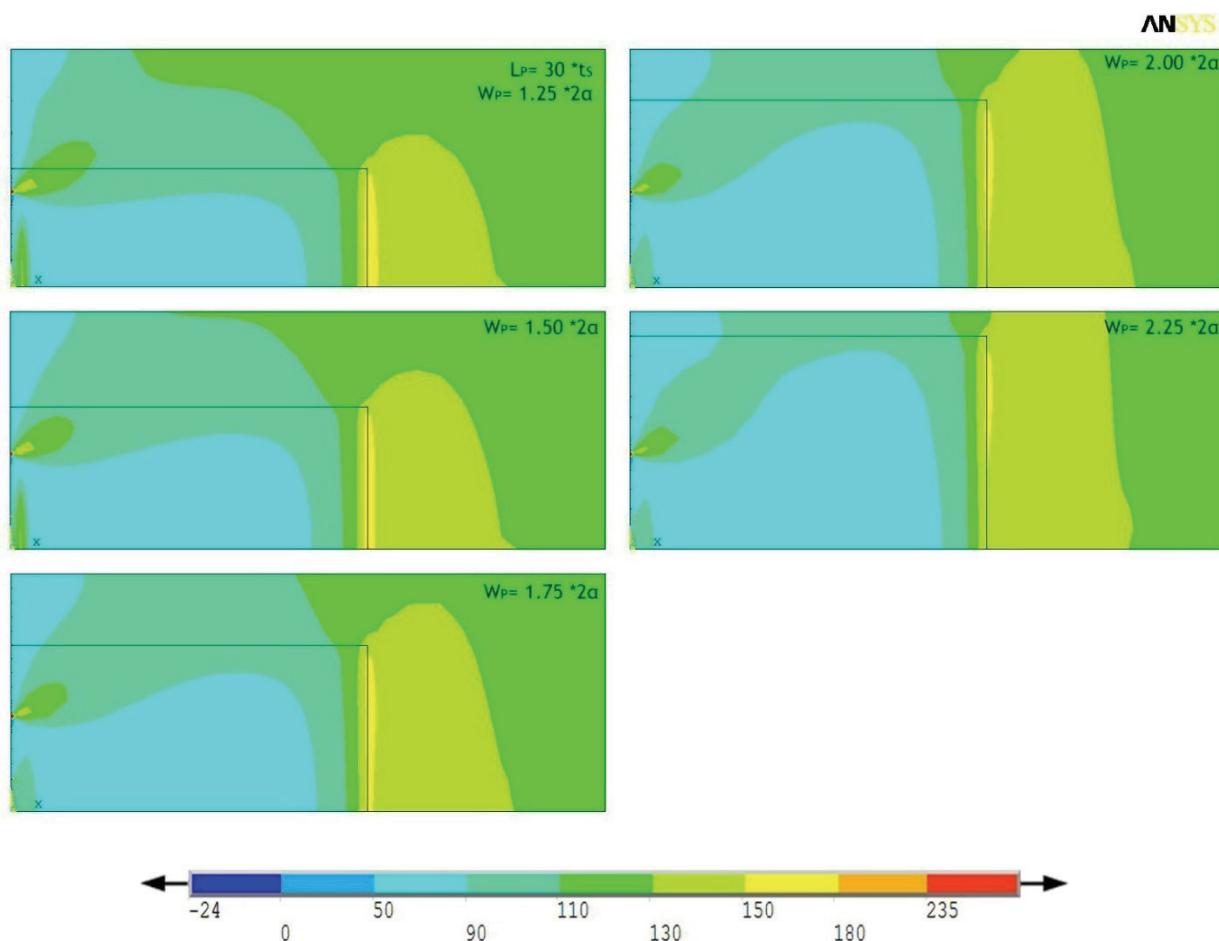


Σχήμα 3.17

Κατανομή τάσης σ_x στο υπόστρωμα, στην επαπτόμενη του επιθέματος πλευρά του, για δεδομένο πλάτος και για όλο το εύρος του μήκους του επιθέματος.

Από το σχήμα 3.17 προκύπτει ακόμα ότι μεταξύ των μοντέλων με λόγο μήκους $L_p/t_s = 5$ και $L_p/t_s = 10$ οι τάσεις στην περιοχική περιμετρικά της ρωγμής μειώνονται αισθητά, από ένα μέσο εύρος 110 έως 150 MPa για το πρώτο μοντέλο, στο πολύ χαμηλότερο εύρος των 50 έως 110 MPa του δεύτερου. Για περαιτέρω αύξηση του μήκους του επιθέματος οι τάσεις στην περιοχική εξακολουθούν να μειώνονται, με μικρότερο όμως ρυθμό. Η συμπεριφορά αυτή εξηγεί σε μεγάλο βαθμό το βήμα στο ρυθμό μείωσης του ΣΕΤ που εντοπίζεται στα σχήματα 3.10 και 3.11 της προηγούμενης παραγράφου και για λόγο μήκους μεταξύ $L_p/t_s = 5$ και $L_p/t_s = 10$.

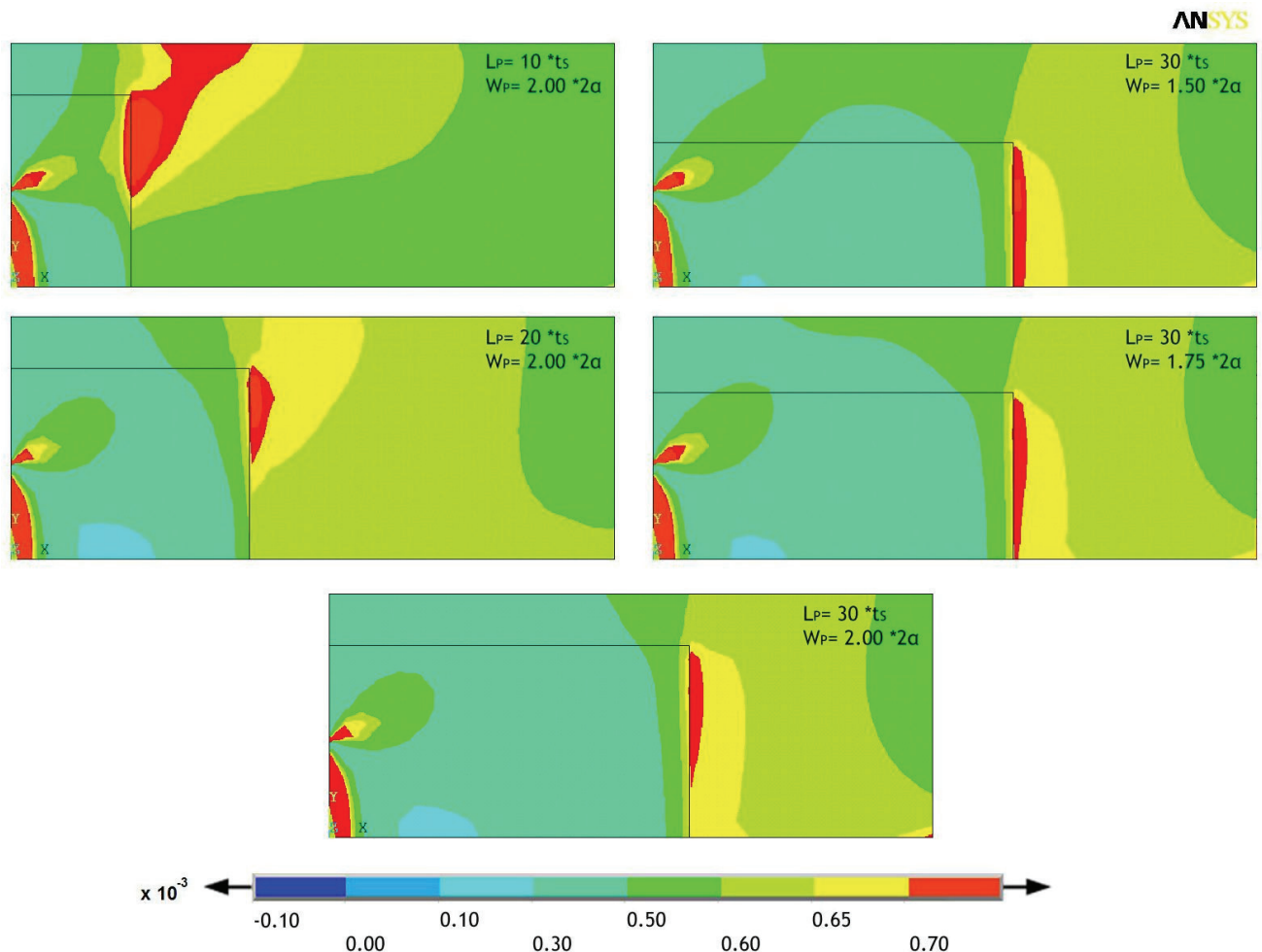
Στο σχήμα 3.18 παρουσιάζεται η αντίστοιχη μεταβολή της κατανομής της τάσης σ_x για σταθερό μήκος ίσο με $L_p = 30 \cdot t_s = 300$ mm και για όλο το εύρος μεταβολής του πλάτους του επιθέματος. Παρατηρούμε ότι με την αύξηση του πλάτους μειώνεται σταθερά η έκταση του θύλακα πολύ υψηλών τάσεων (150-180 MPa) που αναφέραμε παραπάνω, ενώ παράλληλα διευρύνεται η περιοχική ανάπτυξης υψηλών τάσεων (μέχρι 150 MPa) στην περιοχική του άκρου του επιθέματος. Ο ρυθμός μείωσης των τάσεων στην περιοχική φαίνεται να είναι μικρότερος από τον αντίστοιχο ρυθμό για την αύξηση του μήκους. Επιπρόσθετα, με την αύξηση του πλάτους του επιθέματος παρατηρείται σημαντική μείωση των τάσεων στην περιοχική της ρωγμής, ειδικά για τις περιπτώσεις μεγάλου πλάτους, $W_p/2a = 2.00$ και $W_p/2a = 2.25$.



Σχήμα 3.18

Κατανομή τάσης σ_x στο υπόστρωμα, στην επαφτόμενη του επιθέματος πλευρά του, για δεδομένο μήκος και για όλο το εύρος του πλάτους του επιθέματος.

Από το παρακάτω σχήμα 3.19 είναι εμφανές ότι οι κατανομές των ισοδύναμων παραμορφώσεων, s_{EQ} , στην εφαπτόμενη του επιθέματος πλευρά, παρουσιάζουν σημαντικές ομοιότητες με τις κατανομές των ορθών τάσεων που είδαμε παραπάνω. Συμπεραίνουμε επομένως ότι το εύρος της επαγόμενης στο υπόστρωμα κάμψης επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τις τάσεις που αναπτύσσονται στην περιοχή του υποστρώματος πλησίον του παράλληλου στον άξονα y άκρου του επιθέματος.

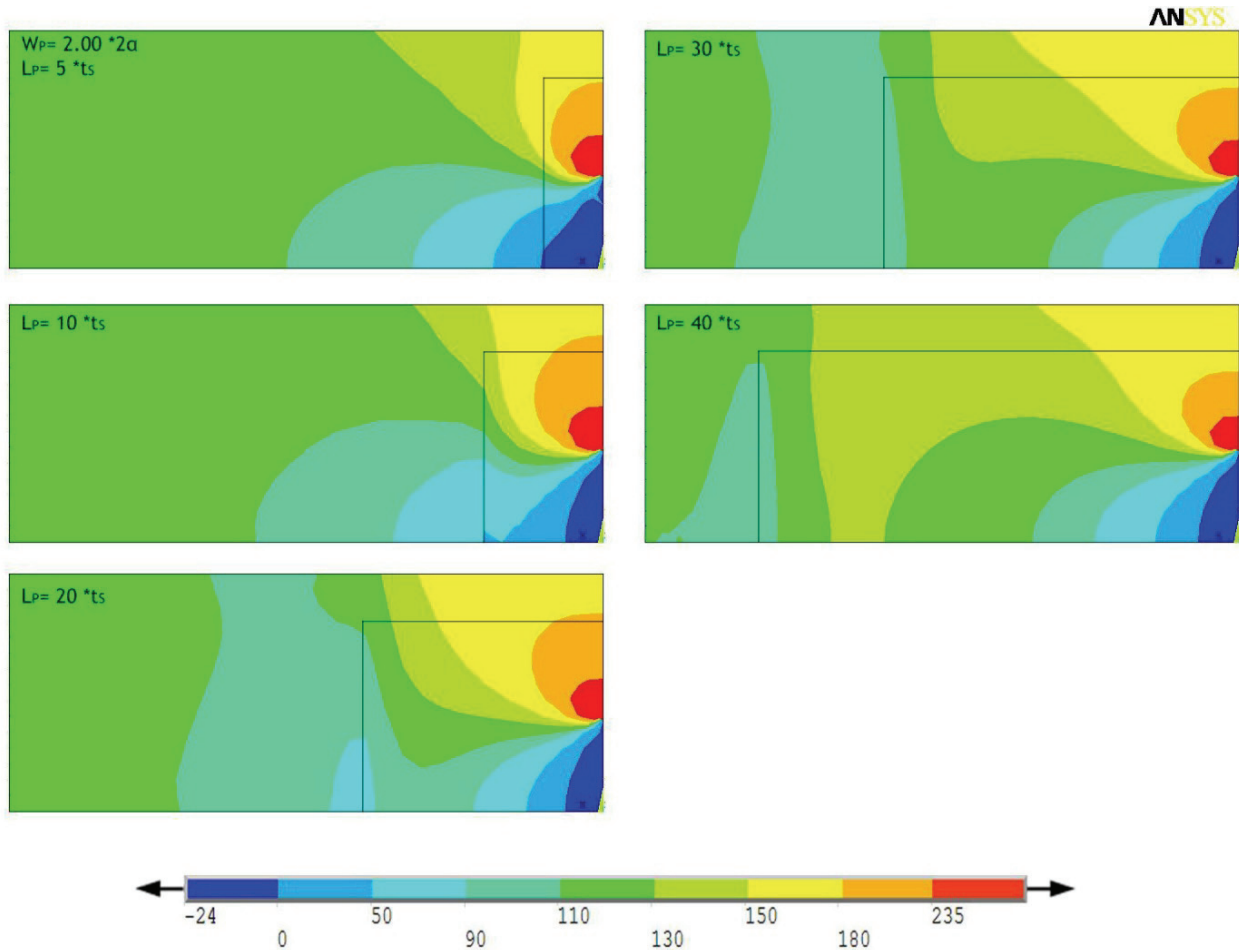


Σχήμα 3.19

Κατανομή της κατά von Mises ισοδύναμης παραμόρφωσης s_{EQ} στο υπόστρωμα, στην εφαπτόμενη του επιθέματος πλευρά του, για ενδεικτικές περιπτώσεις διαστάσεων επιθέματος.

Στα επόμενα σχήματα 3.20 και 3.21 παρουσιάζεται η επίδραση της μεταβολής των διαστάσεων του επιθέματος στο τασικό πεδίο της ελεύθερης πλευράς του υποστρώματος. Στο σχήμα 3.20 φαίνεται η κατανομή των τάσεων για τις διάφορες τιμές του μήκους του επιθέματος και για πλάτος αυτού ίσο με $W_p = 2.00 \cdot 2a = 160 \text{ mm}$, ενώ στο σχήμα 3.21 παρουσιάζεται η αντίστοιχη μεταβολή της κατανομής της τάσης σ_x για σταθερό μήκος ίσο με $L_p = 30 \cdot t_s = 300 \text{ mm}$ και για όλο το εύρος μεταβολής του πλάτους του επιθέματος.

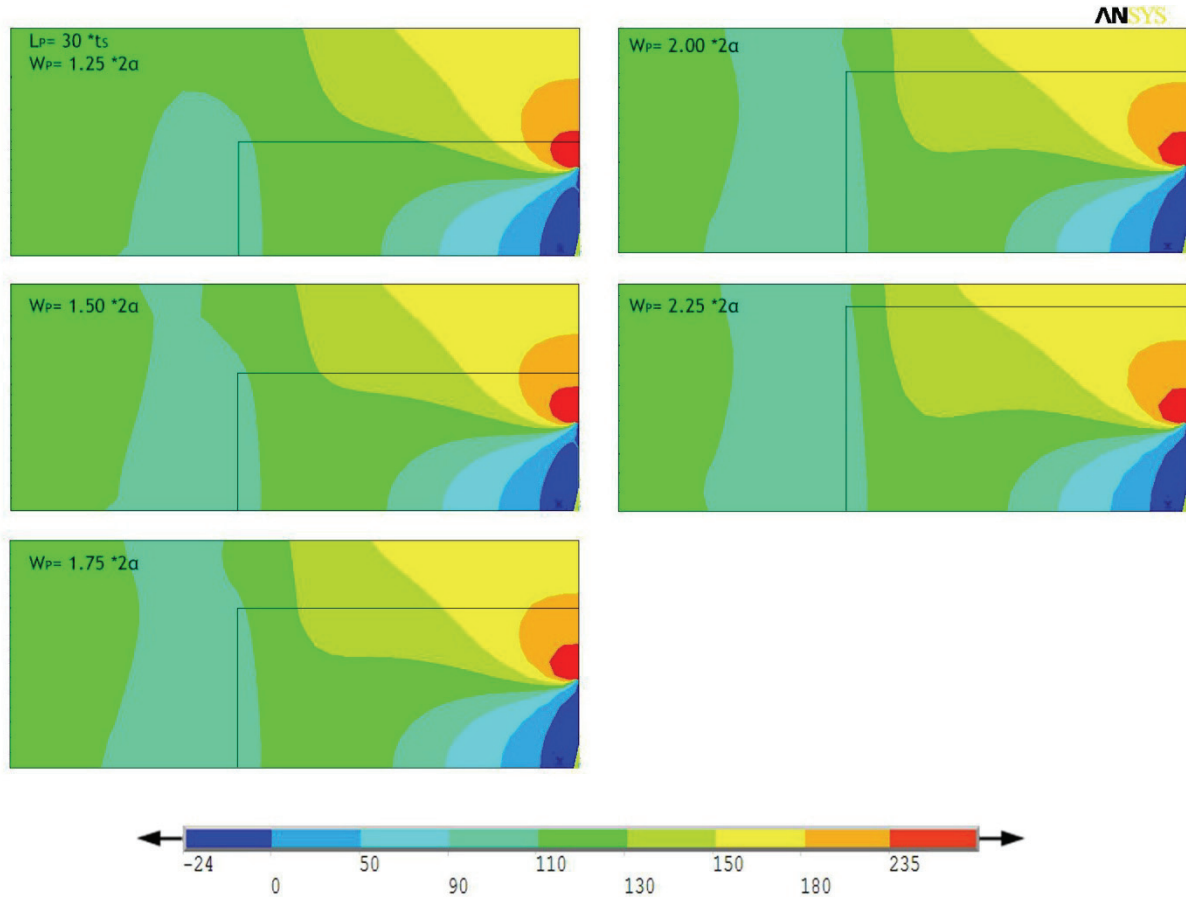
Από το σχήμα 3.20 μπορούμε να συμπεράνουμε ότι για μήκος επιθέματος μεγαλύτερο του λόγου $L_p/t_s = 20$, παρατηρείται σχετικά έντονη διεύρυνση της περιοχής του υποστρώματος όπου αναπτύσσονται υψηλές τάσεις (130 με 150 MPa), παράλληλα με την ασθενή μείωση της έκτασης των περιοχών πολύ υψηλής τάσης (μεγαλύτερης των 150 MPa) στην περιοχή πλησίον της ρωγμής.



Σχήμα 3.20

Κατανομή τάσης σ_x στην ελεύθερη πλευρά του υποστρώματος για δεδομένο πλάτος και για όλο το εύρος του μήκους του επιθέματος.

Από το παρακάτω σχήμα 3.21 δεν φαίνεται να προκύπτει κάποια ένδειξη ουσιαστικής επίδρασης του πλάτους του επιθέματος στο τασικό πεδίο της ελεύθερης επιφάνειας του υποστρώματος.



Σχήμα 3.21

Κατανομή τάσης σ_x στην ελεύθερη πλευρά του υποστρώματος για δεδομένο μήκος και για όλο το εύρος του πλάτους του επιθέματος.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι το σύνολο των γραφικών κατανομών που παρατέθηκαν σε αυτήν την παράγραφο αφορούν τα μοντέλα με λόγο ακαμψίας $SR = 0.25$, καθώς δεν παρατηρήθηκε ουσιαστική μεταβολή στη συμπεριφορά της κατανομής των τάσεων μεταξύ των μοντέλων που αντιστοιχούν στις δύο τιμές του λόγου ακαμψίας.

3.3.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΗΝ ΕΝΤΑΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΚΟΛΛΑΣ

Οι τάσεις που αναπτύσσονται στο κολλητικό μέσο μπορούν να χαρακτηριστούν ως οι πλέον κρίσιμες της κατασκευής. Η παρατήρηση αυτή επιβεβαιώνεται τόσο από τη σχετική βιβλιογραφία που μελετήθηκε, όσο και από τις πειραματικές δοκιμές που διεξήχθησαν και οι οποίες έδειξαν ότι, σε όλες ανεξαιρέτως τις περιπτώσεις, η αστοχία εμφανίστηκε ως αποκόλληση του επιθέματος, μετά από θραύση του κολλητικού μέσου.

Το μέγεθος του τασικού πεδίου μπορεί να εκτιμηθεί μελετώντας τις αναπτυσσόμενες τιμές των τάσεων στα σημεία 1 και 2 του στρώματος της κόλλας, όπως αυτά έχουν οριστεί στο σχήμα 3.5. Επειδή οι αναπτυσσόμενες τάσεις στα σημεία αυτά, σε όλες τις διευθύνσεις, έχουν την ίδια τάξη μεγέθους, αποφασίστηκε ο υπολογισμός της ισοδύναμης τάσης von Mises, σ_{EQ} .

Κατά το πάχος του στρώματος του κολλητικού μέσου, στο σημείο 2 δεν παρατηρήθηκε σημαντική διακύμανση των τάσεων, ενώ αντίθετα, στο σημείο 1 η διακύμανση ήταν σημαντική. Για το λόγο αυτό, οι τιμές των ισοδύναμων τάσεων οι οποίες αναφέρονται στη συνέχεια είναι οι μέγιστες κατά το πάχος. Η μεταβολή των ισοδύναμων τάσεων για όλο το εύρος μεταβολής των διαστάσεων του επιθέματος παρουσιάζεται στους πίνακες 3.9 έως 3.11 καθώς και στα σχήματα 3.22 και 3.23.

Παρατηρούμε ότι οι μέγιστες τάσεις του κολλητικού μέσου μακριά από τη ρωγμή αναπτύσσονται στο μέσον της εγκάρσιας πλευράς του (σημείο 1) και ότι, σε αντίθεση με τις τάσεις στο σημείο 2, παρουσιάζουν έντονη εξάρτηση από το μήκος του επιθέματος.

Σημειώνεται ότι οι τάσεις στο σημείο 1 είναι υπεύθυνες για τυχόν αποκόλληση των άκρων του επιθέματος. Καθώς λοιπόν το μήκος του επιθέματος αυξάνεται, οι ισοδύναμες τάσεις στο σημείο 1 μειώνονται, μείωση που μπορεί να φτάσει μέχρι και το 50% των αντίστοιχων τάσεων του πιο κοντού επιθέματος. Καθίσταται σαφές λοιπόν ότι το επίθεμα χρειάζεται να έχει ένα ικανό μήκος, έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται οι τάσεις στα άκρα του κολλητικού μέσου. Από τα σχήματα 3.22 και 3.23 καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι το μήκος αυτό πρέπει να αντιστοιχεί σε λόγο L_p/t_s μεγαλύτερο του 20 και για τους δύο λόγους ακαμψίας που εξετάστηκαν.

Πίνακας 3.9

Μεταβολή του σ_{EQ} ανά μοντέλο για λόγο ακαμψίας $SR = 0.25$ στο σημείο 1 της κόλλας.

σ_{EQ} (MPa)					
$W_p / 2a$	L_p / t_s				
	5	10	20	30	40
1.25	45.46	31.49	27.88	27.96	26.95
1.50	41.40	31.15	27.45	27.29	26.38
1.75	49.95	33.23	27.90	27.19	26.09
2.00	49.79	32.67	27.56	26.73	25.67
2.25	49.54	32.36	27.05	26.28	25.27

Πίνακας 3.10

Μεταβολή του σ_{EQ} ανά μοντέλο για λόγο ακαμψίας $SR = 0.50$ στο σημείο 1 της κόλλας.

σ_{EQ} (MPa)					
$W_P / 2\alpha$	L_P / t_S				
	5	10	20	30	40
1.25	45.01	30.81	28.28	29.08	28.20
1.50	41.21	30.57	27.77	28.08	27.30
1.75	49.20	32.55	28.14	27.81	26.83
2.00	49.03	32.12	27.88	27.31	26.37
2.25	48.78	31.83	27.45	26.89	26.00

Πίνακας 3.11

Μεταβολή του σ_{EQ} ανά μοντέλο για λόγο ακαμψίας $SR = 0.25$ στο σημείο 2 της κόλλας.

σ_{EQ} (MPa)					
$W_P / 2\alpha$	L_P / t_S				
	5	10	20	30	40
1.25	26.68	27.83	27.36	26.83	25.84
1.50	23.74	27.10	26.76	26.57	25.33
1.75	21.73	25.53	26.07	25.73	24.19
2.00	20.53	23.66	25.11	24.86	22.64
2.25	19.20	22.23	24.18	23.79	21.85

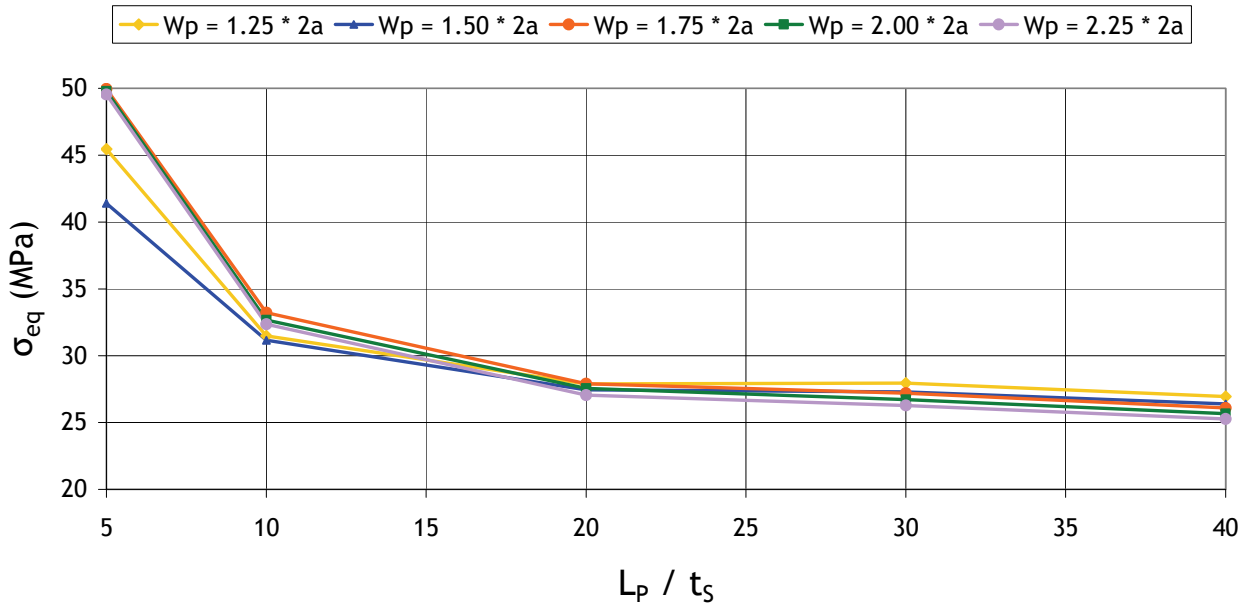
Πίνακας 3.12

Μεταβολή του σ_{EQ} ανά μοντέλο για λόγο ακαμψίας $SR = 0.50$ στο σημείο 2 της κόλλας.

σ_{EQ} (MPa)					
$W_P / 2\alpha$	L_P / t_S				
	5	10	20	30	40
1.25	25.75	26.77	27.42	27.84	26.93
1.50	23.31	26.34	26.56	27.10	25.98
1.75	21.53	25.07	25.69	25.93	24.56
2.00	20.46	23.49	24.63	24.76	23.24
2.25	19.21	22.14	23.57	23.40	21.75

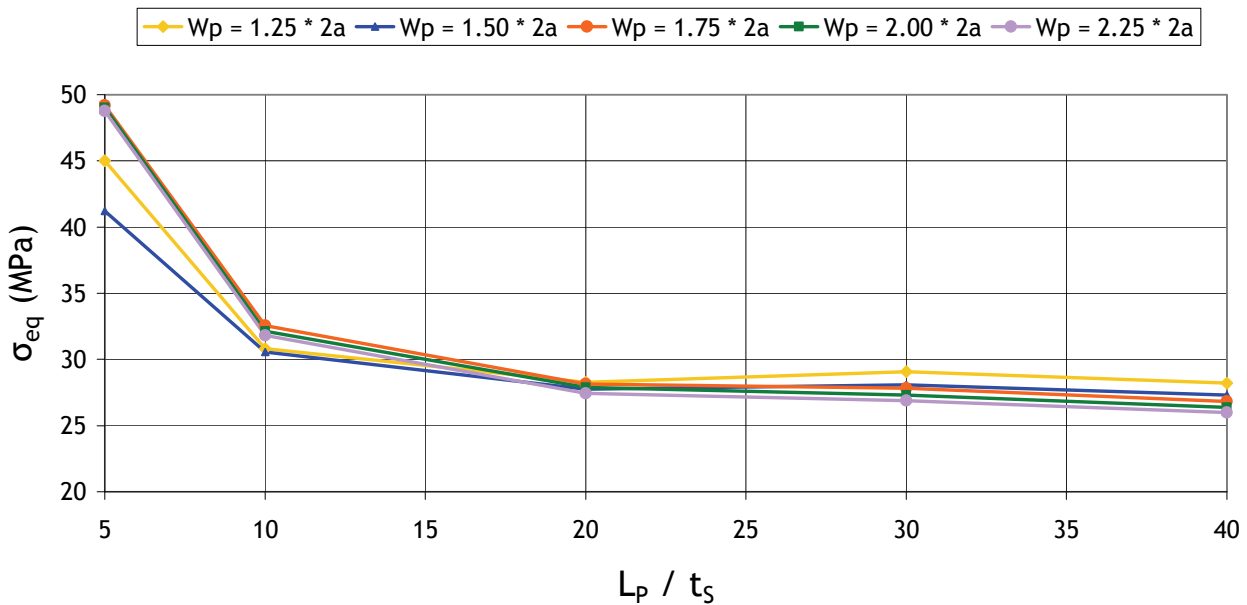
Η μελέτη των πινάκων 3.9 έως 3.12 και των σχημάτων 3.22 και 3.23 φανερώνει ότι το πλάτος του επιθέματος δεν φαίνεται να επιδρά σημαντικά στην εντατική κατάσταση των άκρων του επιθέματος. Η μόνη σχετικά σημαντική επίδραση είναι στις τάσεις στο σημείο 2, οι

οποίες όμως δεν είναι οι μέγιστες στην περιοχή. Επίσης παρατηρούμε ότι η επίδραση του λόγου ακαμψίας στις μέγιστες τιμές των ισοδύναμων τάσεων δεν είναι σημαντική.



Σχήμα 3.22

Γραφική παράσταση της μεταβολής του σ_{eq} στο σημείο 1 για λόγο ακαμψίας $SR = 0.25$.

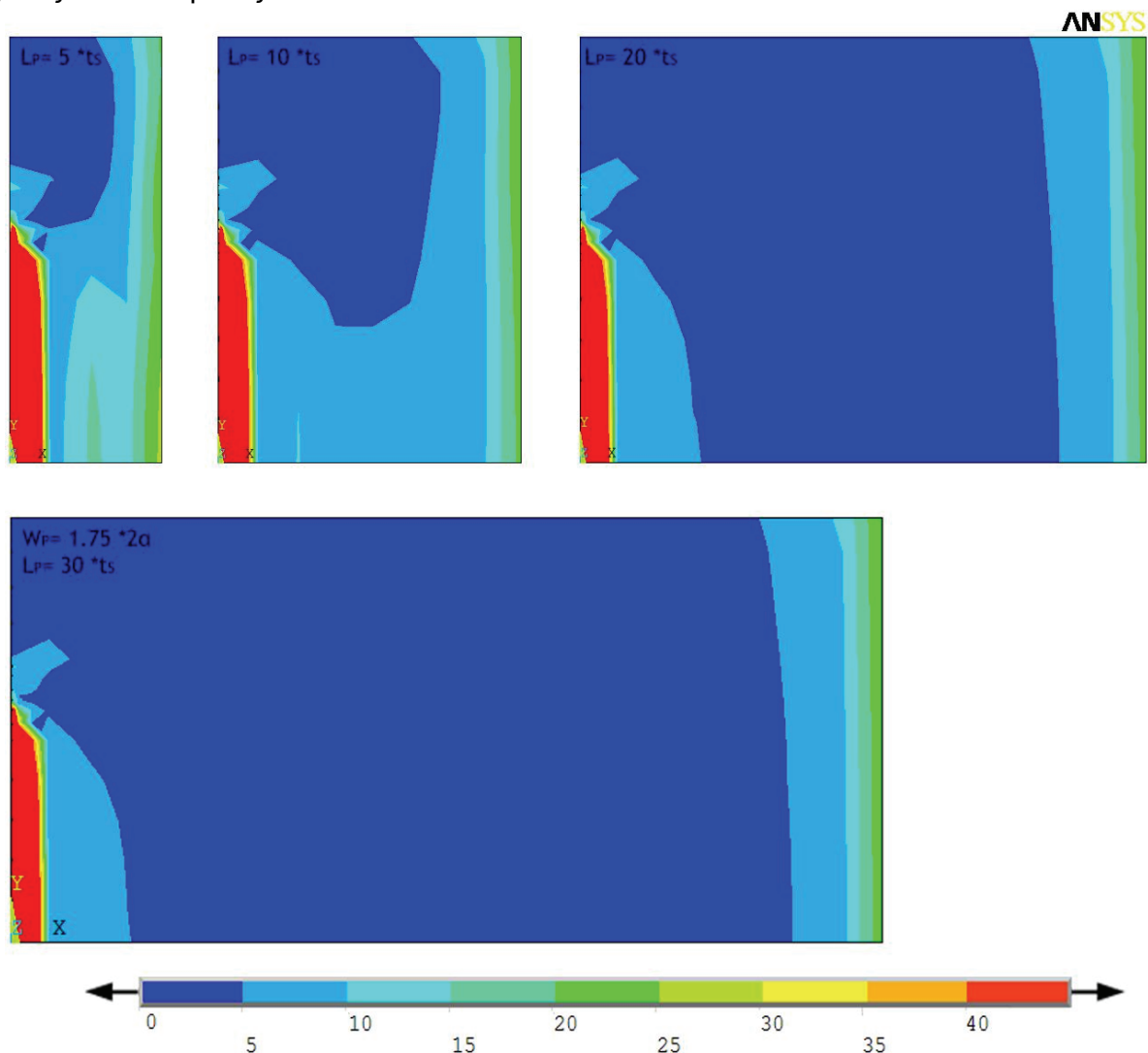


Σχήμα 3.23

Γραφική παράσταση της μεταβολής του σ_{eq} στο σημείο 1 για λόγο ακαμψίας $SR = 0.50$.

Στο σχήμα 3.24 παρουσιάζεται η μεταβολή της κατανομής των αναπτυσσόμενων ισοδύναμων τάσεων στο στρώμα της κόλλας για διάφορες τιμές του μήκους του επιθέματος.

Από το σχήμα αυτό καθίσταται σαφές ότι οι μέγιστες τάσεις στο κολλητικό μέσο αναπτύσσονται στην περιοχή της ρωγμής, ένδειξη της αποκόλλησης που εμφανίζεται πλησίον του ανοίγματος της ρωγμής αμέσως μετά την εφαρμογή του επιθέματος και την επιβολή της φόρτισης. Το φαινόμενο αυτό είναι φυσιολογικό, εμφανίζεται ανεξάρτητα από τα χαρακτηριστικά και τις διαστάσεις του επιθέματος, ενώ διαπιστώθηκε και πειραματικά ότι δεν συμμετέχει στο μηχανισμό αστοχίας του άκρου του στρώματος, τουλάχιστον για χαμηλό και μέσο αριθμό κύκλων φόρτισης. Επιπλέον παρατηρείται ότι η κατανομή των τάσεων για μήκος μεγαλύτερο του λόγου $L_p/t_s = 10$ δεν μεταβάλλεται ουσιαστικά με την περαιτέρω αύξηση του μήκους του επιθέματος.



Σχήμα 3.24

Κατανομή τάσεων σ_{EQ} στο στρώμα της κόλλας για το εύρος τιμών του μήκους του επιθέματος και για λόγο ακαμψίας $SR = 0.25$.

3.3.5 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΗΝ ΕΝΤΑΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΕΠΙΘΕΜΑΤΟΣ

Λεπτομερής μελέτη του αναπτυσσόμενου εντατικού πεδίου στο επίθεμα κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η περιοχή όπου αναπτύσσεται η πιο έντονη εντατική κατάσταση είναι το σημείο 3 (βλέπε σχήμα 3.5), ακριβώς επάνω από το κέντρο της ρωγμής. Οι τάσεις στις διευθύνσεις y και z είναι εν γένει πολύ μικρές και επομένως εξετάζεται μόνο η μεταβολή και το μέγεθος της διαμήκουσ τάσης σ_x .

Κατά τη διεύθυνση του πάχους η μέγιστη τάση σ_x αναπτύσσεται στην πλευρά του επιθέματος, την επαπτόμενη στο στρώμα της κόλλας, όπως φαίνεται και στο ακόλουθο σχήμα 3.28. Όσο μάλιστα προσεγγίζουμε την ελεύθερη πλευρά του επιθέματος, η τάση μετατρέπεται σε θλιπτική, ως αποτέλεσμα της επαγόμενης κάμψης.

Η μέγιστη τιμή της τάσης σ_x παρουσιάζεται στους πίνακες 3.13 και 3.14 και στα διαγράμματα των σχημάτων 3.25 και 3.26, για όλο το εύρος των διαστάσεων του επιθέματος που εξετάστηκαν. Από τους πίνακες και τα διαγράμματα αυτά προκύπτει ότι η μέγιστη τιμή της αναπτυσσόμενης τάσης σ_x εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το λόγο ακαμψίας και από το πλάτος του επιθέματος. Η εξάρτηση από το μήκος του επιθέματος βρέθηκε να είναι αμελητέα. Ειδικότερα, οι τιμές της τάσης για $SR= 0.50$ βρέθηκαν μικρότερες κατά περίπου 30% από τις αντίστοιχες για $SR= 0.25$.

Πίνακας 3.13

Μεταβολή του σ_x ανά μοντέλο για λόγο ακαμψίας $SR = 0.25$ στο σημείο 3 του επιθέματος.

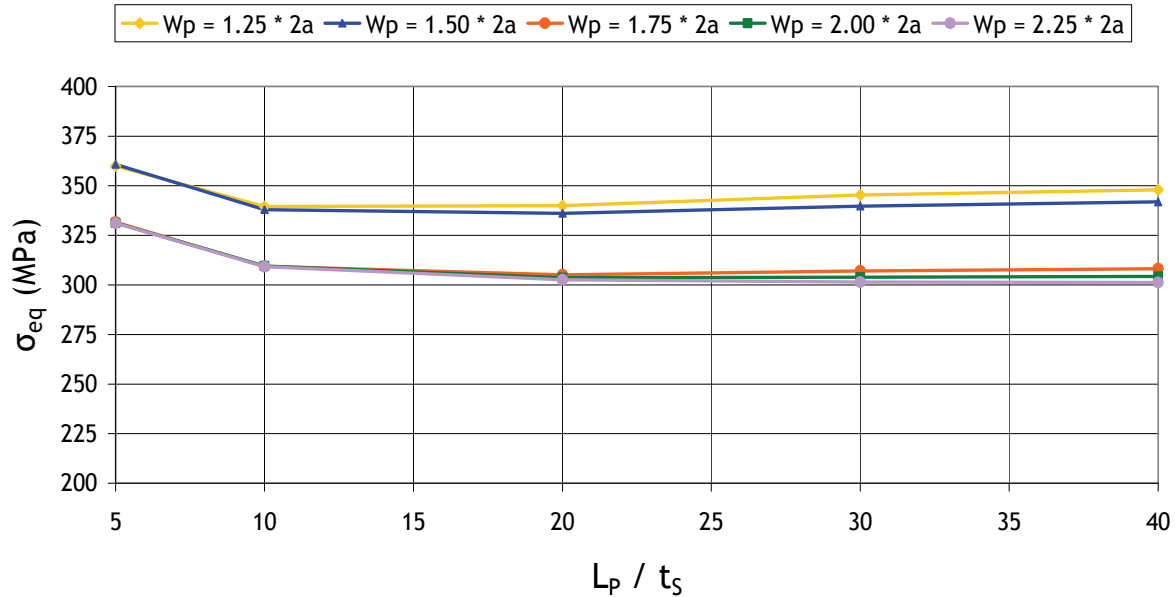
σ_x (MPa)					
$W_p / 2a$	L_p / t_s				
	5	10	20	30	40
1.25	359.96	339.53	339.93	345.26	347.87
1.50	360.78	337.88	336.03	339.74	341.82
1.75	331.65	309.27	305.15	307.01	308.17
2.00	331.20	309.56	303.67	303.82	304.26
2.25	331.09	309.25	302.63	301.45	301.16

Πίνακας 3.14

Μεταβολή του σ_x ανά μοντέλο για λόγο ακαμψίας $SR = 0.50$ στο σημείο 3 του επιθέματος.

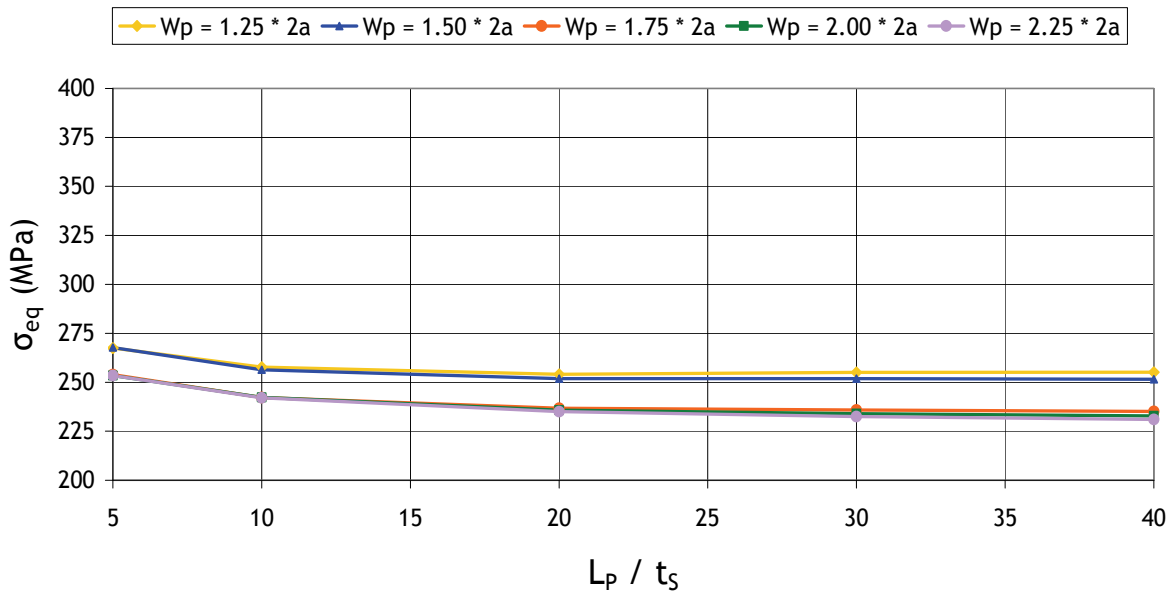
σ_x (MPa)					
$W_p / 2a$	L_p / t_s				
	5	10	20	30	40
1.25	267.44	257.77	254.09	254.98	255.13
1.50	267.75	256.42	251.85	251.83	251.58
1.75	253.87	242.24	236.69	235.84	235.13
2.00	253.49	242.34	235.77	233.95	232.82
2.25	253.40	242.04	235.06	232.54	231.03

Επιπλέον παρατηρείται ένα άλμα στο ρυθμό μείωσης της μέγιστης τάσης μεταξύ των τιμών πλάτους που αντιστοιχούν στους λόγους $W_p/2a = 1.5$ και $W_p/2a = 1.75$, και για τους δύο λόγους ακαμψίας. Έτσι, οι μέγιστες τάσεις στο επίθεμα μειώνονται σημαντικά για επιθέματα με πλάτη που αντιστοιχούν σε λόγο $W_p/2a$ μεγαλύτερο του 1.75.



Σχήμα 3.25

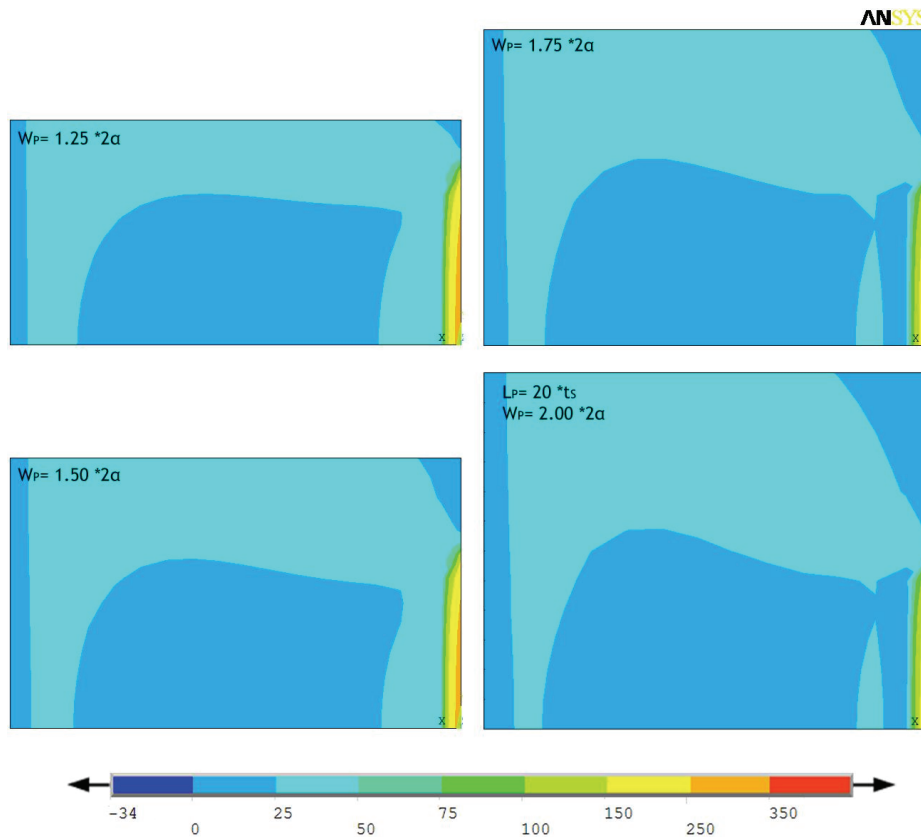
Γραφική παράσταση της μεταβολής του σ_x στο σημείο 3 για λόγο ακαμψίας $SR = 0.25$.



Σχήμα 3.26

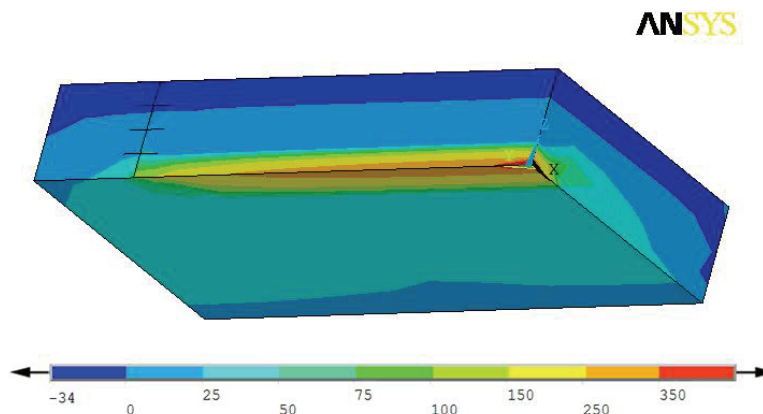
Γραφική παράσταση της μεταβολής του σ_x στο σημείο 3 για λόγο ακαμψίας $SR = 0.50$.

Στο παρακάτω σχήμα 3.27 παρουσιάζεται η επίδραση της μεταβολής του πλάτους του επιθέματος στην κατανομή των τάσεων που αναπτύσσονται στην επιφάνεια αυτού. Η απουσία ουσιαστικής επίδρασης της μεταβολής του πλάτους στη μορφή του τασικού πεδίου είναι εμφανής. Τέλος στο σχήμα 3.28 παρουσιάζεται ενδεικτικά η τυπική κατανομή της τάσης σ_x κατά το πάχος στο επίθεμα.



Σχήμα 3.27

Κατανομή τάσεων σ_x στο επίθεμα για το εύρος τιμών του πλάτους του επιθέματος και για λόγο ακαμψίας $SR = 0.25$.



Σχήμα 3.28

Ενδεικτική κατανομή της τάσης σ_x κατά το πάχος στο επίθεμα για λόγο ακαμψίας $SR = 0.25$.

3.4 ΜΕΛΕΤΗ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΟΥ ΕΠΙΘΕΜΑΤΟΣ

3.4.1 ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΤΩΝ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων της παραμετρικής μελέτης των διαστάσεων του ορθογωνικού επιθέματος, την οποία και παραθέσαμε στην προηγούμενη παράγραφο 3.3, προέκυψαν κάποια βασικά συμπεράσματα σχετικά με το μέγεθος και την κατανομή των τάσεων στο κάθε τμήμα της επισκευής.

Στο υπόστρωμα παρατηρήθηκε όπως ήταν αναμενόμενο η ανάπτυξη πολύ υψηλών τάσεων πλησίον της ρωγμής. Ενδεικτικές τιμές τάσεων που εξήχθησαν από τους κόμβους στην ελεύθερη πλευρά του υποστρώματος και πολύ κοντά στο άκρο της ρωγμής βρέθηκαν μάλιστα να υπερβαίνουν σημαντικά το όριο διαρροής του υλικού του υποστρώματος. Η φαινομενική όμως ανάπτυξη τόσο υψηλών τάσεων οφείλεται στην ηθελημένη απουσία προσομοίωσης της αστοχίας των υλικών στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων και δεν χρήζει περαιτέρω ανάλυσης. Άλλωστε όπως έχουμε προαναφέρει, η εντατική κατάσταση στο άκρο της ρωγμής περιγράφεται μονοσήμαντα με τη βοήθεια του συντελεστή έντασης τάσης, ΣΕΤ, που αποτελεί και το μέτρο της αποτελεσματικότητας της επισκευής.

Όπως είδαμε όμως στην παράγραφο 3.3.3, η περιοχή του υποστρώματος που συγκεντρώνει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον, βρίσκεται επί της επιφάνειας του υποστρώματος όπου εφάπτεται το επίθεμα και πλησίον του παράλληλου στη διεύθυνση επέκτασης της ρωγμής άκρο του επιθέματος. Στην περιοχή αυτή συντελείται η μεταφορά του μεγαλύτερου μέρους του φορτίου από το υπόστρωμα προς το επίθεμα και χάριν συντομίας θα αναφερόμαστε σε αυτή στη συνέχεια ως περιοχή «μεταφοράς». Στην περιοχή μεταφοράς παρατηρήθηκε η ανάπτυξη υψηλών τάσεων, από 130 έως 180 MPa, για όλες τις τιμές των διαστάσεων του επιθέματος, μεγαλύτερες από κάθε άλλη περιοχή του υποστρώματος, εξαιρουμένης προφανώς της περιοχής πλησίον της ρωγμής. Υπενθυμίζεται ότι το όριο διαρροής του χάλυβα του υποστρώματος έχει οριστεί στα $\sigma_{SY} = 235$ MPa.

Όσον αφορά στο στρώμα της κόλλας, το ενδιαφέρον εστιάζεται στο ελεύθερο άκρο αυτού, το κάθετο στη διεύθυνση επιβολής του φορτίου, το οποίο χάριν συντομίας θα αναφέρεται στη συνέχεια ως το «εγκάρσιο» άκρο. Μπορεί οι μεγαλύτερες τάσεις στο στρώμα της κόλλας να εντοπίστηκαν στην περιοχή πλησίον του ανοίγματος της ρωγμής, όμως η αποκόλληση στην περιοχή αυτή θεωρείται δεδομένη, ενώ οι φαινομενικά πολύ υψηλές τάσεις που προκύπτουν οφείλονται και πάλι στην ηθελημένη απουσία προσομοίωσης της αστοχίας των υλικών στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων και δεν χρήζουν περαιτέρω ανάλυσης.

Αντιθέτως, στο εγκάρσιο άκρο φαίνεται να αναπτύσσονται τάσεις αρκετά κοντά στο όριο θραύσης του υλικού της κόλλας, ($\sigma_{AF} \approx 40$ MPa), ενώ για ορισμένες τιμές των διαστάσεων του επιθέματος φαίνεται ακόμα και να το υπερβαίνουν. Η κρίσιμη φόρτιση στο στρώμα της κόλλας επιβεβαιώνεται από τις πειραματικές δοκιμές που διεξήχθησαν και οι οποίες έδειξαν ότι, σε όλες ανεξαιρέτως τις περιπτώσεις, η αστοχία εμφανίστηκε ως αποκόλληση του επιθέματος, μετά από θραύση του κολλητικού μέσου.

Συγκριτικά με τα υπόλοιπα τμήματα της επισκευής, το τασικό πεδίο στο επίθεμα δεν φαίνεται να επηρεάζει σε κάποιο βαθμό την αντοχή της επισκευής, αφού οι μέγιστες τάσεις που αναπτύσσονται σε αυτό, με μέγιστη τιμή περί τα 360 MPa για το δυσμενέστερο συνδυασμό διαστάσεων του επιθέματος, είναι πολύ χαμηλότερες από το όριο θραύσης του σύνθετου υλικού εποξικής ρητίνης / ινών άνθρακα, το οποίο εκτιμάται σε $\sigma_{PF} > 600$ MPa.

Από τα παραπάνω μπορούμε να καταλήξουμε σε δύο περιοχές κρίσιμης φόρτισης της κατασκευής, εξαιρουμένης της προφανούς στο άκρο της ρωγμής. Αυτές είναι:

1. Η περιοχή «μεταφοράς» στο υπόστρωμα.
2. Το «εγκάρσιο» άκρο του στρώματος της κόλλας.

Η παραμετρική μελέτη των διαστάσεων του ορθογώνιου επιθέματος έδειξε ότι το τασικό πεδίο στις παραπάνω περιοχές ενδιαφέροντος μπορεί να περιοριστεί αισθητά επιλέγοντας κατάλληλο συνδυασμό μήκους και πλάτους του επιθέματος. Επιπλέον και για τις δύο περιοχές εντοπίστηκε η πολύ πιο έντονη εξάρτηση του τασικού πεδίου από το μήκος του επιθέματος, παρά από το πλάτος αυτού.

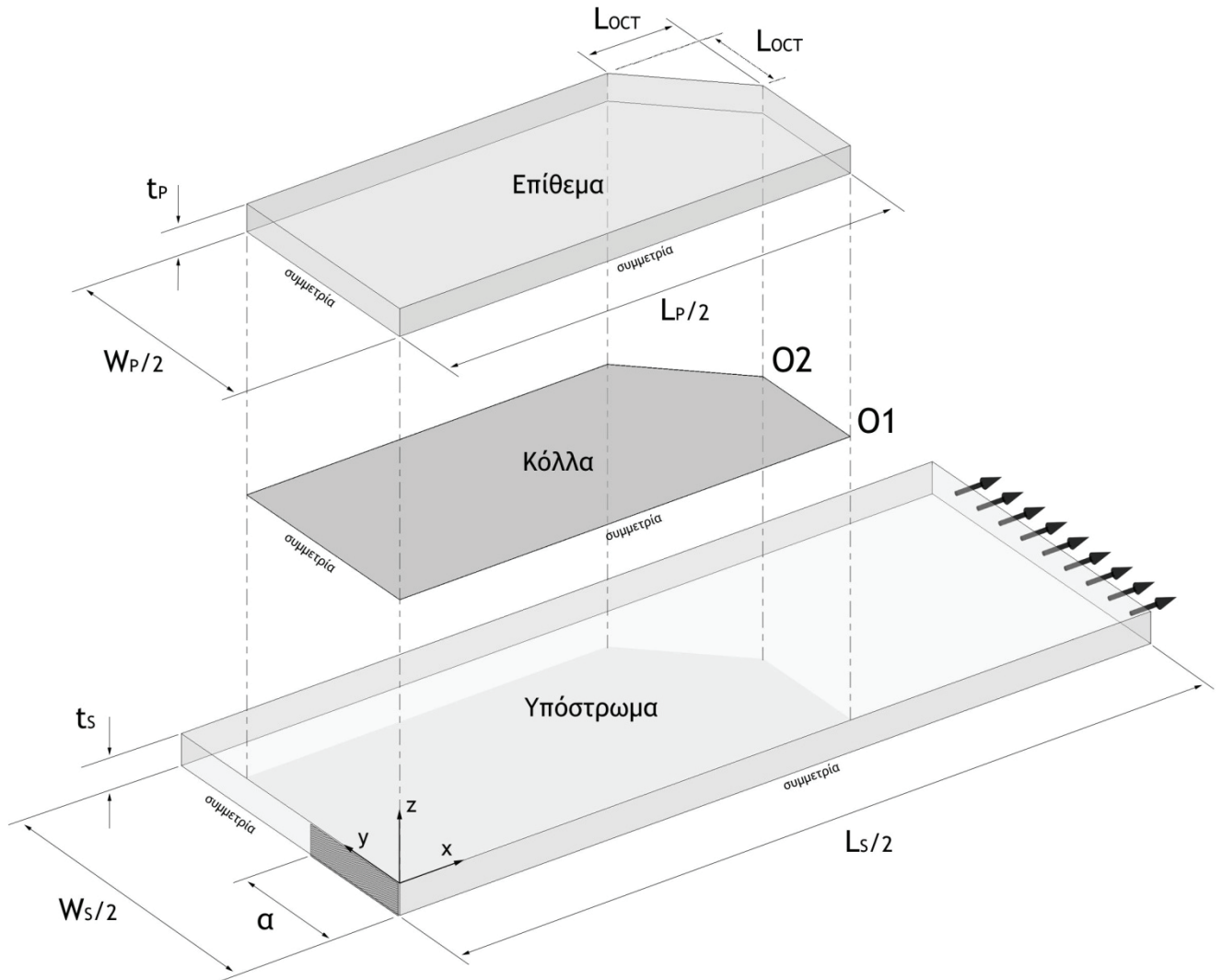
Έχοντας ως στόχο την περαιτέρω διερεύνηση των κρίσιμων περιοχών φόρτισης που αναφέρθηκαν παραπάνω και ευελπιστώντας στον εντοπισμό αποτελεσματικών μεθόδων για την εξασθένιση των τάσεων σε αυτές, λήφθηκε η απόφαση της παραμετρικής μελέτης δύο τροποποιημένων διατάξεων του ορθογωνικού επιθέματος. Αυτές είναι:

1. Η μελέτη του οκταγωνικού επιθέματος.
2. Η μελέτη της εφαρμογής tapering στα άκρα του επιθέματος.

Το οκταγωνικό επίθεμα προκύπτει από τη δημιουργία μίας επιπλέον έδρας στην κάθε γωνία του ορθογωνικού επιθέματος. Κατασκευαστικά η τροποποίηση είναι ιδιαίτερα απλή, αφού συνίσταται στην κοπή των άκρων κάθε στρώσης των ενισχυτικών ινών πριν από την τοποθέτηση τους στο υπόστρωμα και τον εμβαπτισμό τους με τη ρητίνη της μήτρας. Η γεωμετρία της διάταξης φαίνεται στο σχήμα 3.29. Σημειώνεται ότι μοντελοποιείται το ένα τέταρτο της κατασκευής λόγω συμμετρίας.

Το μόνο επιπλέον μέγεθος που ορίζεται σε σχέση με την περίπτωση του απλού ορθογωνικού επιθέματος είναι το μήκος «κοπής», L_{OCT} , το οποίο μπορεί να περιγραφεί ως το μήκος των ίσων πλευρών του ισοσκελούς τριγώνου που «αφαιρείται» από το απλό ορθογωνικό επίθεμα ώστε να προκύψει το οκταγωνικό επίθεμα. Με τη λογική αυτή της «αφαίρεσης» έγινε και η προσαρμογή του βασικού κώδικα του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων, ενώ η τιμή του μήκους κοπής εκφράζεται ως συνάρτηση του πλάτους του επιθέματος, W_p . Για όλα τα μοντέλα της μελέτης ο λόγος του μήκους κοπής επιλέχθηκε ίσος με $L_{OCT} / L_p = 0.125$, εξαιρώντας την περίπτωση του επιθέματος με μικρό μήκος ($L_p = 5 * t_s$), όπου το μήκος κοπής επιλέχθηκε ίσο με $L_{OCT} / W_p = 0.125$.

Στο σχήμα 3.29 φαίνονται επίσης τα σημεία εξαγωγής δεδομένων O1 και O2 στο στρώμα της κόλλας, από τα οποία εξήχθησαν οι μέγιστες τιμές ισοδύναμων τάσεων, σ_{EQ} , για σύγκριση με τις αντίστοιχες τιμές της τάσης στα σημεία 1 και 2 της μελέτης του απλού ορθογωνικού επιθέματος.



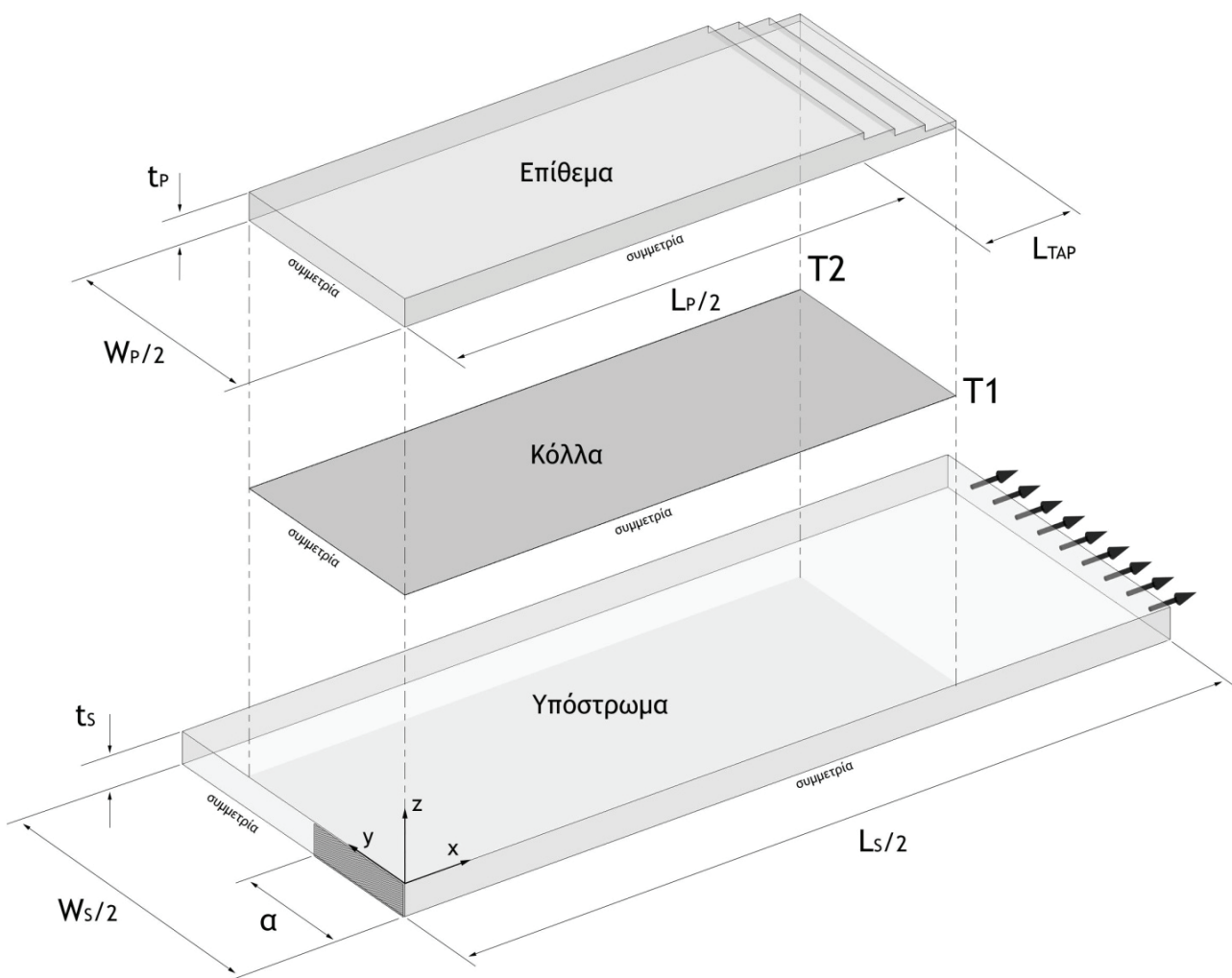
Σχήμα 3.29

Απεικόνιση της γεωμετρίας του μοντέλου του οκταγωνικού επιθέματος.

Η γεωμετρία του επιθέματος με tapering στα άκρα του παρουσιάζεται στο σχήμα 3.30. Και σε αυτήν την περίπτωση μοντελοποιείται το ένα τέταρτο της κατασκευής λόγω συμμετρίας. Οι τέσσερις έδρες που σχηματίζονται αντιστοιχούν σε κάθε μία από τις τέσσερις κατά το πάχος σειρές στοιχείων από τις οποίες αποτελείται το επίθεμα. Το μήκος του tapering, L_{TAP} , ορίζεται ως ποσοστό του μήκους του επιθέματος. Για όλα τα μοντέλα της μελέτης ο λόγος του μήκους του tapering επιλέχθηκε ίσος με $L_{TAP} / L_p = 0.25$. Στο σχήμα φαίνονται τα σημεία εξαγωγής δεδομένων T1 και T2 στο στρώμα της κόλλας, από τα οποία εξήχθησαν οι μέγιστες τιμές

ισοδύναμων τάσεων, σ_{EQ} , για σύγκριση με τις αντίστοιχες τιμές της τάσης στα σημεία 1 και 2 της μελέτης του απλού ορθογωνικού επιθέματος.

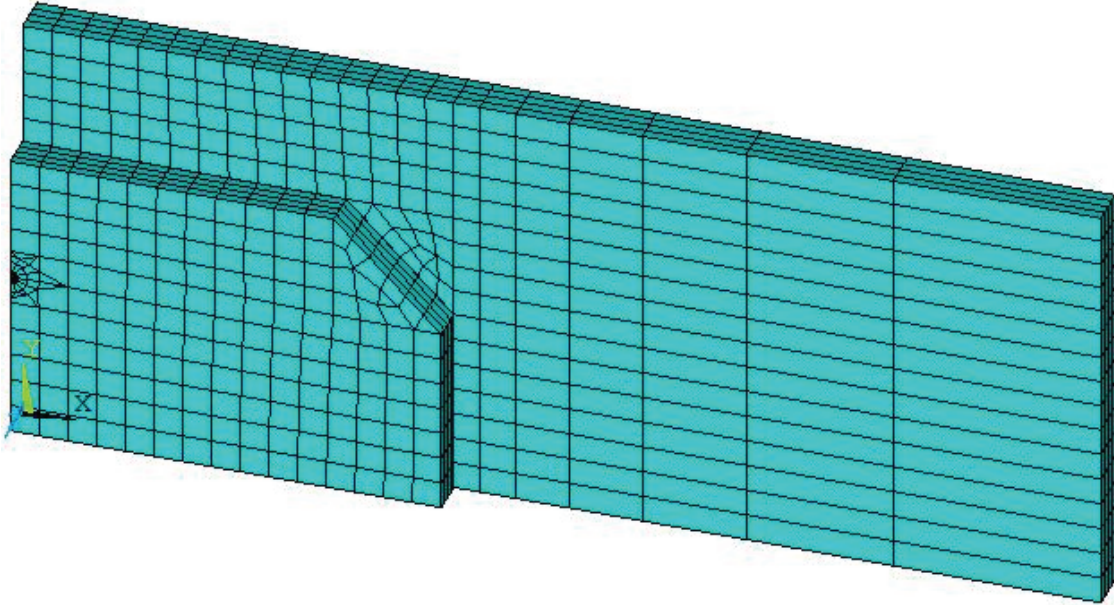
Να σημειωθεί ότι οι σειρές των στοιχείων και η γεωμετρική τους απεικόνιση στο μοντέλο δεν πρέπει να συγκρίνονται με τις στρώσεις των ινών στο πραγματικό επίθεμα, όπου η κάθε στρώση ινών είναι μεγαλύτερη από την στρώση επί της οποίας εναποτίθεται. Το αποτέλεσμα είναι η τελευταία στρώση ινών, που ορίζει και την ελεύθερη επιφάνεια του επιθέματος, να είναι η μεγαλύτερη στρώση, καλύπτοντας πλήρως τις υπόλοιπες.



Σχήμα 3.30

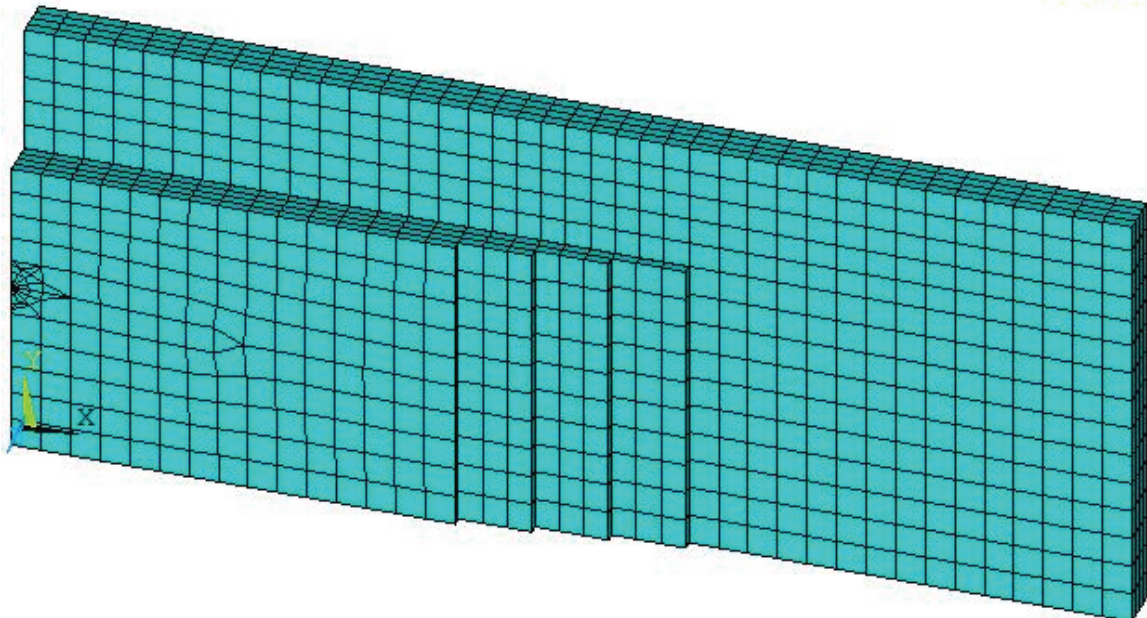
Απεικόνιση της γεωμετρίας του μοντέλου με tapering στα άκρα του επιθέματος.

Στα παρακάτω σχήματα 3.31 και 3.32 παρουσιάζονται ενδεικτικές απεικονίσεις του πλέγματος στοιχείων των μοντέλων οκταγωνικού επιθέματος και επιθέματος με tapering των άκρων του αντίστοιχα.

ANSYS

Σχήμα 3.31

Ενδεικτική απεικόνιση του πλέγματος στοιχείων του μοντέλου με οκταγωνικό επίθεμα.

ANSYS

Σχήμα 3.32

Ενδεικτική απεικόνιση του πλέγματος στοιχείων του μοντέλου με tapering στα άκρα του ορθογωνικού επιθέματος.

3.4.2 ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΟΚΤΑΓΩΝΙΚΟΥ ΕΠΙΘΕΜΑΤΟΣ

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει και διαπιστώσει στην παράγραφο 3.3, το τασικό πεδίο στην περιοχή μεταφοράς στο υπόστρωμα και στο εγκάρσιο άκρο του στρώματος της κόλλας εμφανίζει ισχυρή εξάρτηση από το μήκος του επιθέματος και αντίστοιχα ασθενή εξάρτηση από το πλάτος αυτού. Έτσι στα πλαίσια της παραμετρικής μελέτης του οκταγωνικού επιθέματος επιλέχθηκε η διερεύνηση τριών περιπτώσεων μήκους επιθέματος για κάθε λόγο ακαμψίας, κρατώντας σταθερό το πλάτος του επιθέματος. Οι διαστάσεις του επιθέματος για όλα τα μοντέλα της μελέτης παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα 3.15.

Πίνακας 3.15
Εύρος μεταβολής παραμέτρων του οκταγωνικού επιθέματος.

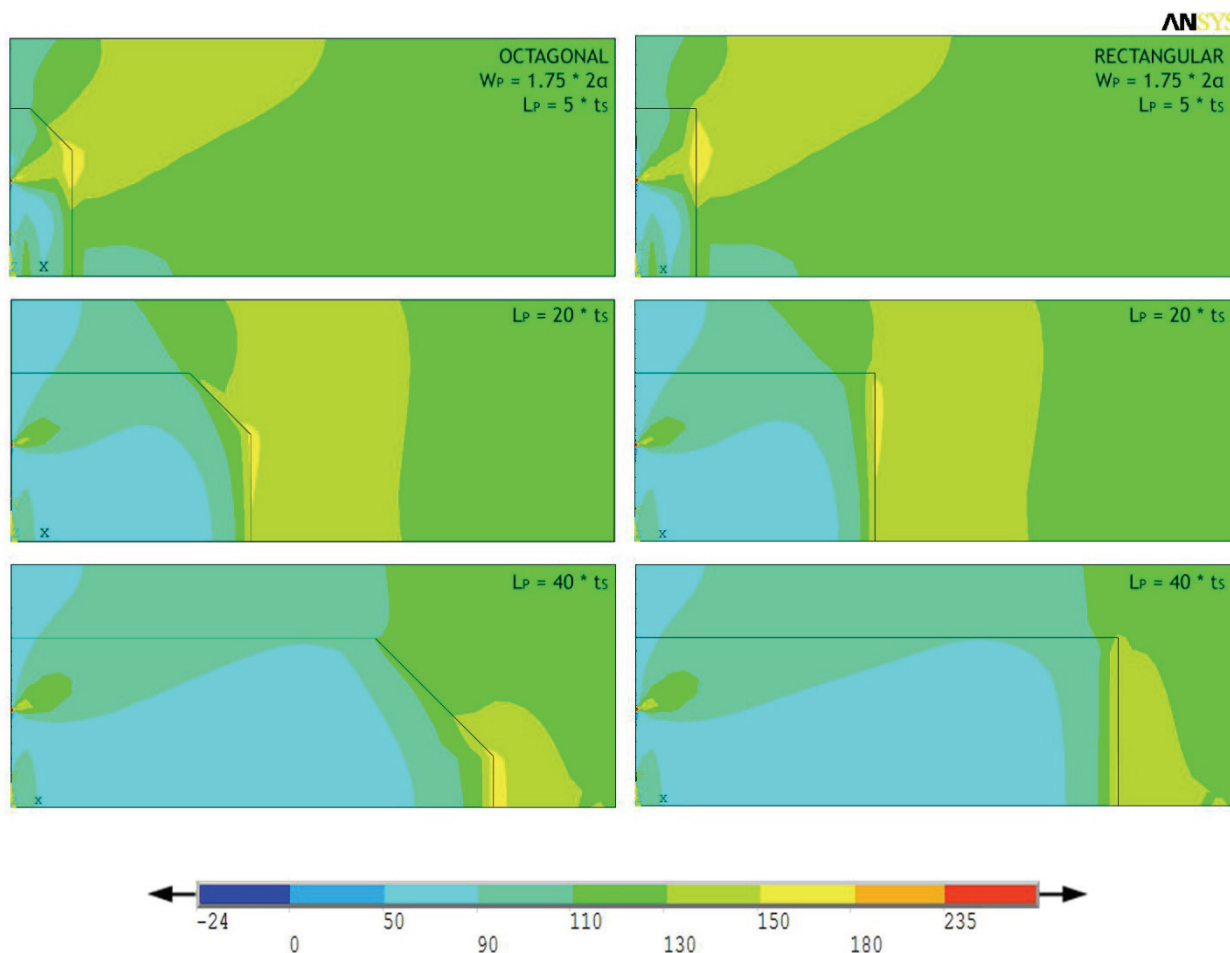
SR 0.25	$W_p / 2a$	1.75	280 mm
	L_p / t_s	5	50 mm
		20	200 mm
		40	400 mm
	t_p	8.7 mm	
SR 0.50	$W_p / 2a$	1.75	280 mm
	L_p / t_s	5	50 mm
		20	200 mm
		40	400 mm
	t_p	17.3 mm	

Η εξέταση των τιμών του ΣΕΤ για κάθε ένα από τα παραπάνω μοντέλα έδειξε ότι συμπίπτουν ακριβώς με τις αντίστοιχες τιμές του ΣΕΤ που εξήχθησαν από τα μοντέλα του απλού ορθογωνικού επιθέματος. Ενδεικτικά αναφέρουμε τη μέγιστη τιμή της απόκλισης, η οποία παρατηρήθηκε στο μοντέλο με λόγο ακαμψίας $SR = 0.25$ και μήκος $L_p / t_s = 20$, είναι της τάξης του 0.4%.

Στο σχήμα 3.33 παρατίθενται οι γραφικές κατανομές της τάσης σ_x στην περιοχή μεταφοράς του υποστρώματος. Παρουσιάζονται μόνο τα μοντέλα με λόγο ακαμψίας $SR = 0.25$, αφού δεν παρατηρήθηκε ουσιαστική μεταβολή στις κατανομές μεταξύ των μοντέλων διαφορετικού λόγου ακαμψίας. Χάριν εύκολης σύγκρισης με την περίπτωση του απλού επιθέματος, το σχήμα περιλαμβάνει και τις κατανομές των αντίστοιχων μοντέλων της παραμετρικής μελέτης του απλού ορθογωνικού επιθέματος.

Από το σχήμα 3.33 φαίνεται ότι η τροποποίηση του απλού ορθογωνικού επιθέματος σε οκταγωνικό επιφέρει τα αντίθετα των επιθυμητών αποτελέσματα, αφού επιδεινώνει σημαντικά το τασικό πεδίο στην περιοχή μεταφοράς για όλες τις τιμές του μήκους του επιθέματος. Αυτή η συμπεριφορά πιθανόν να οφείλεται στη μείωση της επιφάνειας της διατομής του επιθέματος

που είναι κάθετη στη διεύθυνση επιβολής του φορτίου, λόγω του οκταγωνικού σχήματος αυτού, αναγκάζοντας τελικά τη μεταφορά του φορτίου από το υπόστρωμα στο επίθεμα να συντελεστεί σε μικρότερη περιοχή επί της επιφάνειας του υποστρώματος.



Σχήμα 3.33

Κατανομή τάσης σ_x στο υπόστρωμα, στην επαπτόμενη του επιθέματος πλευρά του, για λόγο ακαμψίας $SR = 0.25$ και για μοντέλα οκταγωνικού και απλού ορθογωνικού επιθέματος.

Οι μέγιστες τιμές της ισοδύναμης τάσης σ_{EQ} που εξήχθησαν από τα σημεία O1 και O2 του στρώματος της κόλλας και για τους δύο λόγους ακαμψίας παρατίθενται στους παρακάτω πίνακες 3.16 και 3.17. Στους ίδιους πίνακες περιλαμβάνονται και οι τιμές των σημείων 1 και 2 των αντίστοιχων μοντέλων με απλό ορθογωνικό επίθεμα. Παρατηρούμε ότι η τροποποίηση του επιθέματος από ορθογωνικό σε οκταγωνικό αυξάνει τις τάσεις και στα δύο σημεία εξαγωγής τάσεων στο εγκάρσιο άκρο, αντί να της μειώνει, όπως θα ήταν επιθυμητό.

Λαμβάνοντας υπόψη το αντίστοιχο συμπέρασμα που προέκυψε για τις τάσεις στο υπόστρωμα και τη μηδαμινή μεταβολή στην τιμή του ΣΕΤ συγκριτικά με το ορθογώνιο επίθεμα, καταλήγουμε στο ασφαλές συμπέρασμα ότι η κλασική διάταξη της επισκευής με ορθογωνικό επίθεμα, υπερτερεί από κάθε άποψη της διάταξης οκταγωνικού επιθέματος.

Πίνακας 3.16

Μεταβολή του σ_{EQ} στην περιοχή O1 του στρώματος της κόλλας οκταγωνικού επιθέματος και σύγκριση με το αντίστοιχο σημείο 1 της περίπτωσης απλού ορθογωνικού επιθέματος.

σ_{EQ} (MPa)					
$W_p/2a = 1.75$		EXTRACTION POINT	L_p / t_s		
			5	20	40
SR 0.25	OCTAGONAL	O1	50.32	28.54	29.40
	RECTANGULAR	1	49.95	27.90	26.09
	DEVIATION	-	+0.74%	+2.29%	+12.69%
SR 0.50	OCTAGONAL	O1	49.55	28.90	30.62
	RECTANGULAR	1	49.20	28.14	26.83
	DEVIATION	-	+0.71%	+2.70%	+14.13%

Πίνακας 3.17

Μεταβολή του σ_{EQ} στο σημείο O2 του στρώματος της κόλλας οκταγωνικού επιθέματος και σύγκριση με το αντίστοιχο σημείο 2 της περίπτωσης απλού ορθογωνικού επιθέματος.

σ_{EQ} (MPa)					
$W_p/2a = 1.75$		EXTRACTION POINT	L_p / t_s		
			5	20	40
SR 0.25	OCTAGONAL	O2	25.18	29.35	33.18
	RECTANGULAR	2	21.73	26.07	24.19
	DEVIATION	-	+15.88%	+12.58%	+37.16%
SR 0.50	OCTAGONAL	O2	25.24	30.69	36.20
	RECTANGULAR	2	21.53	25.69	24.56
	DEVIATION	-	+17.23%	+19.46%	+47.39%

3.4.3 ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΟΥ TAPERING ΣΤΑ ΑΚΡΑ ΤΟΥ ΕΠΙΘΕΜΑΤΟΣ

Για τους ίδιους λόγους που αναφέραμε στην περίπτωση του οκταγωνικού επιθέματος επιλέχθηκε η διερεύνηση τριών περιπτώσεων μήκους επιθέματος για κάθε λόγο ακαμψίας, κρατώντας σταθερό το πλάτος του επιθέματος. Οι διαστάσεις του επιθέματος για όλα τα μοντέλα της μελέτης παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα 3.18.

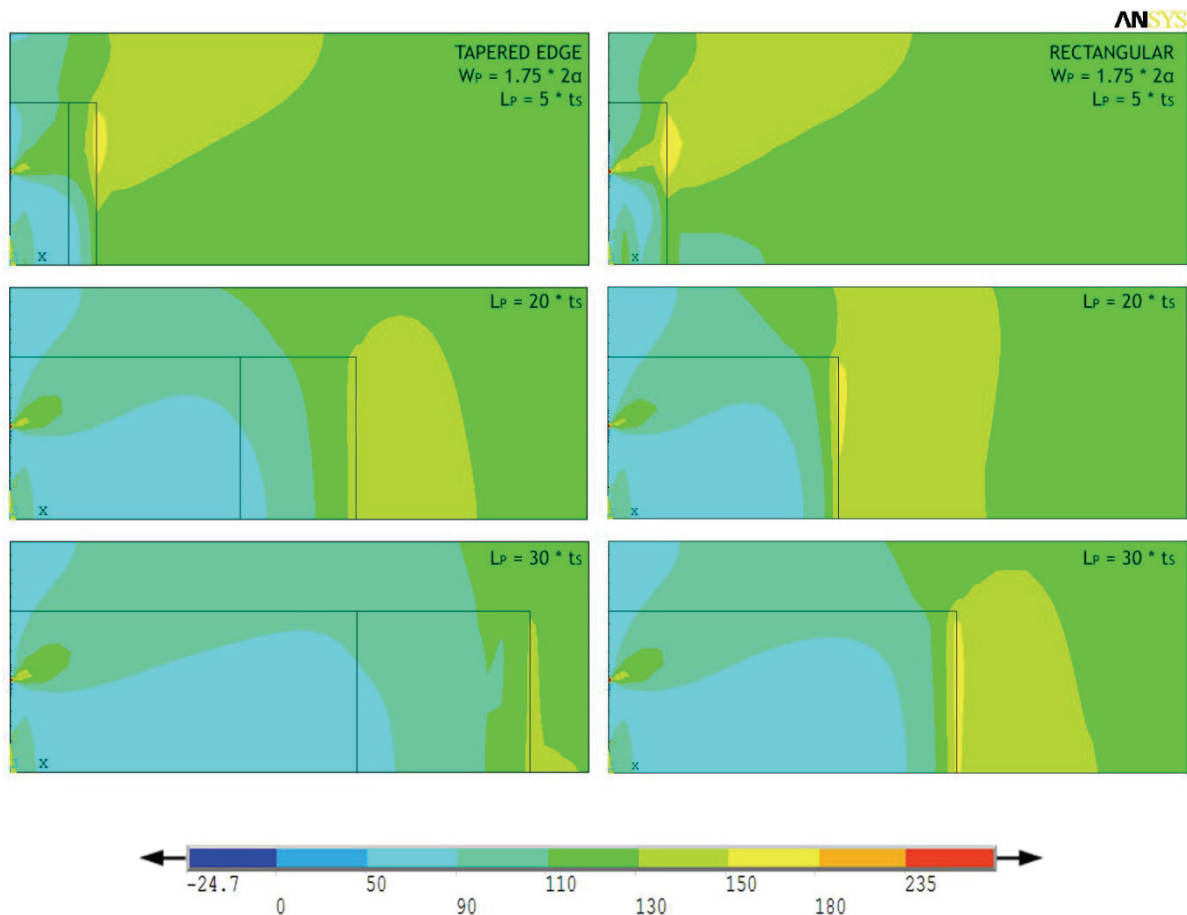
Πίνακας 3.18
Εύρος μεταβολής παραμέτρων του επιθέματος με tapering.

SR 0.25	$W_p / 2\alpha$	1.75	280 mm
	L_p / t_s	5	50 mm
		20	200 mm
		30	300 mm
	t_p	8.7 mm	
SR 0.50	$W_p / 2\alpha$	1.75	280 mm
	L_p / t_s	5	50 mm
		20	200 mm
		30	300 mm
	t_p	17.3 mm	

Η εξέταση των τιμών του ΣΕΤ για κάθε ένα από τα παραπάνω μοντέλα έδειξε ότι είναι γενικά ελάχιστα μειωμένες σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές του ΣΕΤ που εξήχθησαν από τα μοντέλα του απλού ορθογωνικού επιθέματος, ακολουθώντας παράλληλα ακριβώς τον ίδιο ρυθμό μεταβολής. Ενδεικτικά αναφέρουμε τη μέγιστη τιμή της απόκλισης, η οποία παρατηρήθηκε στο μοντέλο με λόγο ακαμψίας $SR = 0.50$ και μήκος $L_p / t_s = 5$ και είναι της τάξης του 1.8%.

Στο σχήμα 3.34 παρατίθενται οι γραφικές κατανομές της τάσης σ_x στην περιοχή μεταφοράς του υποστρώματος. Παρουσιάζονται μόνο τα μοντέλα με λόγο ακαμψίας $SR = 0.25$, αφού δεν παρατηρήθηκε ουσιαστική μεταβολή στις κατανομές μεταξύ των μοντέλων διαφορετικού λόγου ακαμψίας. Χάριν εύκολης σύγκρισης με την περίπτωση του απλού επιθέματος, το σχήμα περιλαμβάνει και τις κατανομές των αντίστοιχων μοντέλων της παραμετρικής μελέτης του απλού ορθογωνικού επιθέματος.

Από το σχήμα 3.34 φαίνεται ότι η εφαρμογή tapering στα άκρα του επιθέματος επιφέρει σημαντική εξασθένιση του τασικού πεδίου στην περιοχή μεταφοράς του υποστρώματος. Συγκεκριμένα εμφανίζεται αισθητή μείωση ακόμα και για την μικρότερη τιμή του μήκους του επιθέματος $L_p / t_s = 5$, ενώ για μήκος επιθέματος ίσο και μεγαλύτερο του $L_p / t_s = 20$, παρατηρείται μεγάλη μείωση στις τάσεις σε όλη την επιφάνεια του υποστρώματος, οι οποίες δεν ξεπερνούν πλέον σε καμία περιοχή τα 150 MPa.

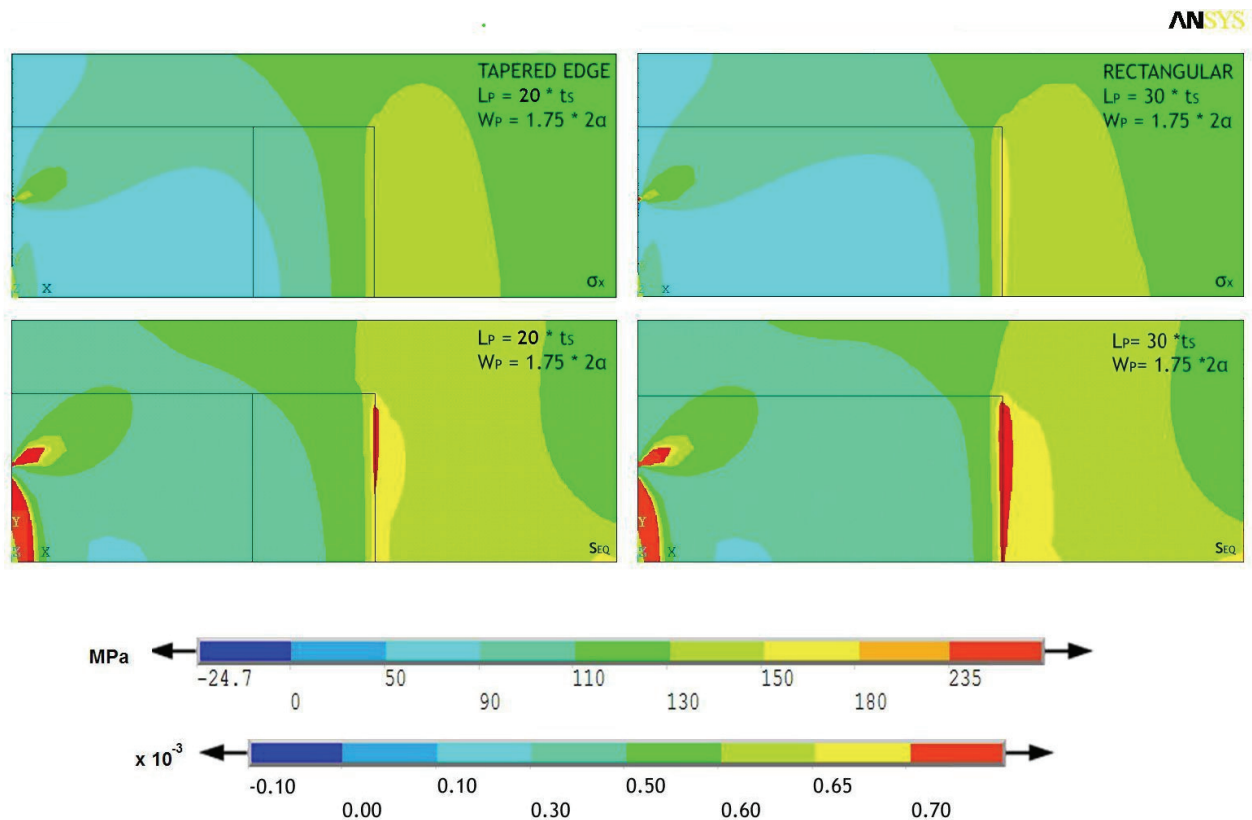


Σχήμα 3.34

Κατανομή τάσης σ_x στο υπόστρωμα, στην επαπτόμενη του επιθέματος πλευρά του, για λόγο ακαμψίας $SR = 0.25$ και για μοντέλα απλού ορθογωνικού επιθέματος και μοντέλα με tapering στα άκρα του επιθέματος.

Είναι χαρακτηριστικό ότι αν συγκρίνουμε τις περιπτώσεις tapered επιθέματος για $L_p / t_s = 20$ και non-tapered για $L_p / t_s = 30$, παρατηρούμε ότι το τασικό πεδίο στην περίπτωση του tapered επιθέματος είναι σημαντικά εξασθενημένο. Το ενδιαφέρον έγκειται στο ότι το συνολικό μήκος του επιθέματος προκύπτει το ίδιο και για τις δύο αυτές περιπτώσεις, αφού $[1,25 * (20 * t_s)] = (30 * t_s)$.

Από το παρακάτω σχήμα 3.35, όπου παρουσιάζονται συγκριτικά οι κατανομές ορθής τάσης σ_x και ισοδύναμης κατά von Mises παραμόρφωσης s_{EQ} για τις εν λόγω περιπτώσεις, επιβεβαιώνεται η παρατήρηση μας της προηγούμενης παραγράφου 3.3.3, ότι το εύρος της επαγόμενης στο υπόστρωμα κάμψης επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τις τάσεις που αναπτύσσονται στην περιοχή του υποστρώματος πλησίον του παράλληλου στον άξονα y άκρου του επιθέματος, ενώ εντοπίζουμε παράλληλα την ευεργετική επίδραση του tapering στην εξομάλυνση της καμπτικής παραμόρφωσης του υποστρώματος και κατ'επέκταση τον κύριο μηχανισμό επίδρασης του tapering στο τασικό πεδίο πλησίον του παράλληλου στον άξονα y άκρου του επιθέματος.



Σχήμα 3.35

Σύγκριση κατανομών τάσης σ_x και ισοδύναμης παραμόρφωσης κατά von Mises σ_{EQ} στο υπόστρωμα, στην επαπτόμενη του επιθέματος πλευρά του, για λόγο ακαμψίας $SR = 0.25$, μεταξύ μοντέλου απλής γεωμετρίας και μοντέλου με tapering, των οποίων το συνολικό μήκος επιθέματος είναι το ίδιο.

Οι μέγιστες τιμές της ισοδύναμης τάσης σ_{EQ} που εξήχθησαν από τα σημεία T1 και T2 του στρώματος της κόλλας και για τους δύο λόγους ακαμψίας παρατίθενται στους παρακάτω πίνακες 3.19 και 3.20. Στους ίδιους πίνακες περιλαμβάνονται και οι τιμές των σημείων 1 και 2 των αντίστοιχων μοντέλων με απλό ορθογωνικό επίθεμα.

Από την ανάγνωση των πινάκων επιβεβαιώνεται αρχικά το συμπέρασμα της προηγούμενης παραγράφου 3.3.4, ότι η κρίσιμη φόρτιση εμφανίζεται στο μέσον του εγκάρσιου άκρου, εν προκειμένω στο σημείο εξαγωγής τάσεων T1.

Μεγαλύτερη όμως σημασία έχει το γεγονός ότι παρατηρώντας τους πίνακες, καταλήγουμε στο ασφαλές συμπέρασμα ότι η τροποποίηση της διάταξης με την εφαρμογή tapering στα άκρα του επιθέματος έχει σαν αποτέλεσμα τη δραστική μείωση των τάσεων στο εγκάρσιο άκρο του στρώματος της κόλλας.

Ακόμα πιο ενθαρρυντική είναι η επίδραση αυτή του tapering των άκρων για όλες τις τιμές του μήκους του επιθέματος. Μάλιστα, η μέγιστη μείωση παρατηρείται για μήκος επιθέματος $L_p / t_s = 5$ και είναι της τάξης του 24 %. Για μεγαλύτερα μήκη παρατηρείται συνεχής, αν και μη γραμμική, μείωση των τάσεων, απομακρύνοντας όλο και περισσότερο το ύψος των τάσεων

από το όριο θραύσης του υλικού, που υπενθυμίζεται ότι εντοπίζεται περίπου στα 40 MPa.

Πίνακας 3.19

Μεταβολή του σ_{EQ} στο σημείο T1 του στρώματος της κόλλας επιθέματος με tapering και σύγκριση με το αντίστοιχο σημείο 1 της περίπτωσης απλού ορθογωνικού επιθέματος.

σ_{EQ} (MPa)					
$W_p/2\alpha = 1.75$		EXTRACTION POINT	L_p / t_s		
			5	20	30
SR 0.25	TAPERED EDGE	T1	38.19	23.89	21.79
	RECTANGULAR	1	49.95	27.90	27.19
	DEVIATION	-	-23.54%	-14.37%	-19.86%
SR 0.50	TAPERED EDGE	T1	37.70	26.48	24.82
	RECTANGULAR	1	49.20	28.14	27.81
	DEVIATION	-	-23.37%	-5.90%	-10.75%

Πίνακας 3.20

Μεταβολή του σ_{EQ} στο σημείο T2 του στρώματος της κόλλας επιθέματος με tapering και σύγκριση με το αντίστοιχο σημείο 2 της περίπτωσης απλού ορθογωνικού επιθέματος.

σ_{EQ} (MPa)					
$W_p/2\alpha = 1.75$		EXTRACTION POINT	L_p / t_s		
			5	20	30
SR 0.25	TAPERED EDGE	T2	23.94	21.85	19.14
	RECTANGULAR	2	21.73	26.07	25.73
	DEVIATION	-	+10.17%	-16.19%	-25.61%
SR 0.50	TAPERED EDGE	T2	22.72	25.01	22.11
	RECTANGULAR	2	21.53	25.69	25.93
	DEVIATION	-	+5.53%	-2.65%	-14.73%

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Ολοκληρώνοντας την παρουσίαση της παραμετρικής μελέτης της μεθόδου επισκευής χαλύβδινων ναυπηγικών κατασκευών με επιθέματα σύνθετων υλικών, συνοψίζουμε παρακάτω τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη μελέτη αυτή.

1. Η εφαρμογή του ορθογώνιου επιθέματος μειώνει αποτελεσματικά την τιμή του συντελεστή έντασης τάσης στο άκρο της ρωγμής. Το ποσοστό μείωσης κυμάνθηκε από 26.1 έως 35.0 %.
2. Για την περίπτωση που εξετάστηκε, η αύξηση του λόγου ακαμψίας του συστήματος υποστρώματος / επιθέματος από την τιμή $SR = 0.25$ στην τιμή $SR = 0.50$ επιφέρει επιπλέον μείωση του συντελεστή έντασης τάσης στο άκρο της ρωγμής μόνο κατά 3 έως 5 %.
3. Για δεδομένο μήκος επιθέματος, η αύξηση του πλάτους του επιθέματος επιφέρει μικρή επιπλέον μείωση στο συντελεστή έντασης τάσης. Η μέγιστη σχετική μείωση που υπολογίστηκε ήταν της τάξης του 5 %.
4. Για δεδομένο πλάτος επιθέματος, η αύξηση του μήκους του επιθέματος επιφέρει σχετικά μικρή επιπλέον μείωση στο συντελεστή έντασης τάσης. Η μέγιστη σχετική μείωση που υπολογίστηκε ήταν της τάξης του 8 %.
5. Συγκρίνοντας το ρυθμό μείωσης του συντελεστή έντασης τάσης σε σχέση με το πλάτος και το μήκος του επιθέματος, μπορούμε να ισχυριστούμε ότι τα επιθέματα λειτουργούν περισσότερο αποδοτικά για μήκη μεγαλύτερα του λόγου $L_p/t_s = 20$ και πλάτη μεγαλύτερα του λόγου $W_p/2a = 1.75$.
6. Η εφαρμογή του επιθέματος βρέθηκε να μην επιφέρει ουσιαστική μεταβολή στο τασικό πεδίο επί της ελεύθερης πλευράς του υποστρώματος.
7. Η εφαρμογή του επιθέματος βρέθηκε να επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό το τασικό πεδίο της πλευράς του υποστρώματος που εφάπτεται στο επίθεμα. Ειδικότερα, οι τάσεις σε όλη την επιφάνεια βρέθηκαν σημαντικά μειωμένες, εκτός από έναν θύλακα πλησίον του παράλληλου στον άξονα y άκρου του επιθέματος, όπου παρατηρήθηκε η ανάπτυξη ιδιαίτερα υψηλών τάσεων, της τάξης των 150 έως 180 MPa. Το ύψος των τάσεων στην περιοχή αυτή βρέθηκε να εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το μήκος του επιθέματος, με έντονη εξασθένιση των τάσεων όσο μεγαλώνει το μήκος.
8. Η καμπτικές παραμορφώσεις που προκαλούνται από την εφαρμογή του επιθέματος βρέθηκε να εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το μήκος του επιθέματος, με έντονη εξασθένιση τους όσο μεγαλώνει το μήκος.
9. Οι πλέον κρίσιμες φορτίσεις της κατασκευής βρέθηκαν στο άκρο του στρώματος της κόλλας. Σε ορισμένα μάλιστα μοντέλα, η ισοδύναμη τάση στην περιοχή ξεπερνάει την τάση θραύσης του υλικού.

10. Το ύψος της μέγιστης κατά το πάχος ισοδύναμης τάσης στο στρώμα της κόλλας βρέθηκε να έχει ισχυρή εξάρτηση από το μήκος του επιθέματος και αντίστοιχα περιορισμένη εξάρτηση από το πλάτος του επιθέματος και το λόγο ακαμψίας του συστήματος. Ειδικότερα, εξετάζοντας τη μεταβολή της τάσης ως προς τη μεταβολή κάθε παραμέτρου ξεχωριστά, από το ελάχιστο στο μέγιστο του εύρους της, παρατηρήθηκε μέγιστη μείωση της τάσης του 50% για μεταβολή του μήκους του επιθέματος και 8% για μεταβολή του πλάτους, ενώ διαφορά μεταξύ των δύο λόγων ακαμψίας ήταν της τάξης του 1%.
11. Οι μέγιστες τάσεις στο επίθεμα βρέθηκαν στην περιοχή πάνω από το άνοιγμα της ρωγμής. Το ύψος των μέγιστων τάσεων στο επίθεμα βρέθηκε σε όλα τα μοντέλα πολύ χαμηλότερο της τάσης θραύσης του επιθέματος.
12. Το ύψος των μέγιστων τάσεων στο επίθεμα βρέθηκε να έχει μεγάλη εξάρτηση από το λόγο ακαμψίας του συστήματος, ενώ αντίστοιχα παρατηρήθηκε μικρότερη αλλά αισθητή εξάρτηση από το μήκος και το πλάτος του επιθέματος.
13. Για δεδομένο μήκος και πλάτος επιθέματος, η αύξηση του λόγου ακαμψίας του συστήματος από την τιμή $SR = 0.25$ στην τιμή $SR = 0.50$ μπορεί να επιφέρει μέγιστη μείωση στο ύψος των τάσεων στο επίθεμα της τάξης του 25 %.
14. Για δεδομένο μήκος του επιθέματος και λόγο ακαμψίας του συστήματος, η αύξηση του πλάτους του επιθέματος μπορεί να επιφέρει μέγιστη μείωση στο ύψος των τάσεων στο επίθεμα της τάξης του 13 %.
15. Για δεδομένο πλάτος του επιθέματος και λόγο ακαμψίας του συστήματος, η αύξηση του μήκους του επιθέματος μπορεί να επιφέρει μέγιστη μείωση στο ύψος των τάσεων στο επίθεμα της τάξης του 9 %.
16. Η τροποποίηση της κλασικής διάταξης ορθογωνίου επιθέματος με την εφαρμογή tapering στα άκρα αυτού κρίνεται ιδιαίτερα ωφέλιμη για την αύξηση της αντοχής της επισκευής. Ειδικότερα, προσφέρει σημαντική ανακούφιση στο τασικό πεδίο της κρίσιμης περιοχής φόρτισης του στρώματος της κόλλας. Το σχετικό ποσοστό μείωσης της μέγιστης τάσης στο στρώμα της κόλλας, κυμάνθηκε από 14 έως 25 %. Επίσης βρέθηκε ότι έχει σαν αποτέλεσμα τον περιορισμό της καμπτικής παραμόρφωσης του συστήματος, μειώνοντας ταυτόχρονα σημαντικά το τασικό πεδίο του υποστρώματος στην περιοχή πλησίον του παράλληλου στον άξονα y άκρου του επιθέματος.
17. Η τροποποίηση της κλασικής διάταξης ορθογωνίου επιθέματος σε διάταξη οκταγωνικού επιθέματος κρίνεται μη ωφέλιμη. Ειδικότερα, βρέθηκε ότι επιδεινώνει το τασικό πεδίο στις κρίσιμες περιοχές φόρτισης του υποστρώματος και της κόλλας, χωρίς παράλληλα να εμφανίζει αύξηση της αποτελεσματικότητας της επισκευής.

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ

1. A. A. Baker, "Repair of cracked or defective metallic aircraft components with advanced fibre composites - an overview of Australian work", *Composite Structures*, 1984.
2. A.A. Baker, "Fibre composite repair of cracked metallic aircraft components - practical and basic aspects", *Composites*, 1987.
3. K. Koski, J. Tikka, M. Baeckstroem, A. Siljander, S. Liukkonen, G. Marquis, "An aging aircraft's wing under complex multiaxial spectrum loading: Fatigue assessment and repairing", *International Journal of Fatigue*, 2005.
4. T.J. Turtona, J. Dalzel-Jobb, F. Livingstone, "Oil platforms, destroyers and frigates - case studies of QinetiQ's marine composite patch repairs", *Composites*, 2005.
5. Ivan Grabovac, "Bonded composite solution to ship reinforcement", *Composites*, 2003.
6. I. Grabovac, R.A. Bartholomeusz, A.A. Baker, "Composite reinforcement of a ship superstructure - project overview", *Composites*, 1993.
7. Β.Ι. Παπάζογλου, "Σημειώσεις Ναυπηγικής Τεχνολογίας", Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 1995.
8. Γ. Καντεράκης, "Η μέθοδος της επισκευής μεταλλικών δομών με την επικόλληση ενισχυτικών επιθεμάτων από σύνθετα υλικά", Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2000.
9. L.R.F. Rose, "An application of the inclusion analogy for bonded reinforcements", *International Journal of Solids*, 1981.
10. L.R.F. Rose, "A cracked plate repaired by bonded reinforcements", *International Journal of Fracture*, 1982.
11. H.H. Johnson, Paul C. Paris, "Sub-critical flaw growth", *Engineering Fracture Mechanics*, 1968.
12. Q.Y. Wang, R.M. Pidaparti, "Static characteristics and fatigue behavior of composite-repaired aluminum plates", *Composite Structures*, 2002.
13. A. Chukwujekwu Okafor, Navdeep Singh, U.E. Enemuoh, S.V. Rao, "Design, analysis and performance of adhesively bonded composite patch repair of cracked aluminum aircraft panels", *Composite Structures*, 2005.
14. Turaga V.R.S. Umamaheswar, Ripudaman Singh, "Modeling of patch repair to a thin cracked sheet", *Engineering Fracture Mechanics*, 1999.
15. B. Bachir Bouiadjra, M. Belhouari, B. Serier, "Computation of the stress intensity factors for repaired cracks with bonded composite patch in mode I and mixed mode", *Composite Structures*, 2002.

16. T. Achour, B. Bachir Bouiadjra, B. Serier, "Numerical analysis of the performances of the bonded composite patch for reducing stress concentration and repairing cracks at notch", *Computational Materials Science*, 2002.
17. B. Bachir Bouiadjra, D. Ouinas, B. Serier, N. Benderdouche, "Disbond effects on bonded boron-epoxy composite repair to aluminium plates", *Computational Materials Science*, 2007.
18. A. Mahadesh Kumar, S.A. Hakeem, "Optimum design of symmetric composite patch repair to centre cracked metallic sheet", *Composite Structures*, 2000.
19. J.J. Schubbe, S. Mall, "Investigation of a cracked thick aluminum panel repaired with a bonded composite patch", *Engineering Fracture Mechanics*, 1999.
20. Ki-Hyun Chung, Won-Ho Yang, "A study on the fatigue crack growth behaviour of thick aluminum panels repaired with a composite patch", *Composite Structures*, 2003.
21. T. Tran-Cong, M. Heller, "Reduction in Adhesive Shear Strains at the Ends of Bonded Reinforcements", DSTO-RR-0115, 1997.
22. Kumar A.M., Ripudaman Singh, "3D Finite element modeling of a composite patch repair", *Proceedings of International conference on Fracture*, 1997.
23. Jones R., Callinan R.J., "A design study in crack patching", *Fibre Science and Technology*, 1981.
24. P. Papanikos, K.I. Tserpes, G. Labeas, Sp. Pantelakis, "Progressive damage modeling of bonded composite repairs", *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2005
25. Dae-Cheol Seo, Jung-Ju Lee, "Fatigue crack growth behavior of cracked aluminum plate repaired with composite patch", *Composite Structures*, 2002.
26. C.L. Ong, S.B. Shen, "The reinforcing effect of composite patch repairs on metallic aircraft structures", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 1992.
27. X-ANSYS, ANSYS Professional and Student Users Online Community, www.xansys.org.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Στο παράρτημα παρουσιάζεται ο βασικός κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία και επίλυση των τριών μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων, ένα για κάθε κύριο τμήμα της παραμετρικής μελέτης.

1. ΜΟΝΤΕΛΟ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΟΥ ΕΠΙΘΕΜΑΤΟΣ

!Distance measured in m
!Stress measured in MPa

*SET,Ls , 0.250	!Substrate half-length
*SET,Ws , 0.1	!Substrate width
*SET,Ts , 0.01	!Substrate thickness
*SET,a , 0.04	!Crack length
*SET,Lp , 30*Ts/2	!Patch half-length
*SET,Wp , 1.75*a	!Patch width
*SET,Ta , 0.0001	!Adhesive thickness
*SET,Es , 207000	!Plate Young modulus
*SET,Ns , 0.33	!Plate Poisson ratio
*SET,Ea , 2550	!Adhesive Young modulus
*SET,Na , 0.32	!Adhesive Poisson ratio
*SET,Ep1 , 60000	!Patch X-axis Young modulus (fiber axis)
*SET,Ep2 , Ep1/15	!Patch Y-axis Young modulus
*SET,Ep3 , Ep1/15	!Patch Z-axis Young modulus
*SET,Np12 , 0.3	!Patch XY Poisson Ratio
*SET,Np23 , 0.02	!Patch YZ Poisson Ratio
*SET,Np13 , 0.3	!Patch XZ Poisson Ratio
*SET,Gp12 , Ep1/25	!Patch XY shear modulus
*SET,Gp23 , Gp12/1.5	!Patch YZ shear modulus
*SET,Gp13 , Ep1/25	!Patch XZ shear modulus
*SET,SR , 0.25	!Patch/Substrate Stiffness Ratio
*SET,Tp , Es*Ts*SR/Ep1	!Patch thickness ~ SR
*SET,EDs , 4	!Substrate Elements through thickness
*SET,EDa , 2	!Adhesive Elements through thickness
*SET,EDp , 4	!Patch Elements through thickness
*SET,CP , a/6	!Crack proximity area half-length (mesh utility)

```

*SET,CPEL, Wp/10          !Crack proximity element length
*SET,CTER,a/24           !Crack tip element radius
*SET,CTEN,8              !Crack tip element number (elements around crack tip)
*SET,Sx , 120            !Applied uni-axial stress

/PREP7

ET,1,PLANE82             !Element definition
ET,2,SOLID186
KEYOPT,2,2,0

mp, ex,1, Es             !Plate material model
mp, prxy, 1, Ns

mp, ex,2, Ea             !Adhesive material model
mp, prxy, 2, Na

mp,ex,3,Ep1              !Comp.Patch material model
mp,ey,3,Ep2
mp,ez,3,Ep3
mp,prxy,3,Np12
mp,pryz,3,Np23
mp,prxz,3,Np13
mp,gxy,3,Gp12
mp,gyz,3,Gp23
mp,gxz,3,Gp13

K,1,0,0,0,              !Keypoint definition
K,2,0,Ws,0,
K,3,Ls,Ws,0,
K,4,Ls,0,0,
K,101,0,a,0,

K,201,0,a-CP,0,
K,202,0,a+CP,0,
K,203,2*CP,a-CP,0,
K,204,2*CP,a+CP,0,

K,301,0,Wp,0
K,302,2*CP,Wp,0
K,303,Lp,Wp,0
K,304,Lp,a+CP,0
K,305,Lp,a-CP,0
K,306,Lp,0,0
K,307,2*CP,0,0

K,401,Ls,Wp,0
K,402,Ls,a+CP,0

```

K,403,Ls,a-CP,0
 K,404,2*CP,Ws,0
 K,405,Lp,Ws,0

a,201,101,202,204,203 !Area creation
 a,1,201,203,307
 a,307,203,305,306
 a,203,204,304,305
 a,204,302,303,304
 a,202,301,302,204
 a,301,2,404,302
 a,302,404,405,303
 a,303,405,3,401
 a,304,303,401,402
 a,305,304,402,403
 a,306,305,403,4

KSCON,101,CTER,1,CTEN,1.4, !Crack tip mesh definition

FLST,5,21,4,ORDE,7 !Crack proximity element spacing
 FITEM,5,3
 FITEM,5,-18
 FITEM,5,20
 FITEM,5,22
 FITEM,5,27
 FITEM,5,29
 FITEM,5,31
 CM,_Y,LINE
 LSEL, , , ,P51X
 CM,_Y1,LINE
 CMSEL,,_Y
 LESIZE,_Y1,CPEL,,,,,,0

!-----
 ! The following are not universal settings and need to be changed whenever the geometry
 ! of the plate and/or patch are to be significantly altered. Very often only the appliance
 ! of a proper coefficient is adequate to obtain the favored element density.
 !-----

LESIZE,19,CPEL,,,,,,0 !plate width element spacing
 LESIZE,21,CPEL,,,,,,0
 LESIZE,23,CPEL,,,,,,0
 LESIZE,25,CPEL,,,,,,0

!LESIZE,19,,0.5*Wp/CPEL,4,,,0 !plate width element spacing
 !LESIZE,21,,0.5*Wp/CPEL,1/4,,,0
 !LESIZE,23,,0.5*Wp/CPEL,1/4,,,0
 !LESIZE,25,,0.5*Wp/CPEL,1/4,,,0

!LESIZE,24,CPEL,,,,,,0 !plate length element spacing
 !LESIZE,26,CPEL,,,,,,0

```

!LESIZE,28,CPEL,,,,,,,,0
!LESIZE,30,CPEL,,,,,,,,0
!LESIZE,32,CPEL,,,,,,,,0

LESIZE,24,,0.3*Lp/CPEL,4,,,,0           !plate length element spacing
LESIZE,26,,0.3*Lp/CPEL,1/4,,,,0
LESIZE,28,,0.3*Lp/CPEL,1/4,,,,0
LESIZE,30,,0.3*Lp/CPEL,1/4,,,,0
LESIZE,32,,0.3*Lp/CPEL,1/4,,,,0

!-----

AMESH,1                                !Area meshing

TYPE,2                                  !Plate Extrusion
EXTOPT,ESIZE,EDs,0,
EXTOPT,ACLEAR,1
EXTOPT,ATTR,0,0,0
MAT,1
REAL,_Z4
ESYS,0
VEXT,1,,,,-Ts,,

AMESH,2,12                              !Area meshing

TYPE,2                                  !Plate Extrusion
EXTOPT,ESIZE,EDs,0,
EXTOPT,ACLEAR,1
EXTOPT,ATTR,0,0,0
MAT,1
REAL,_Z4
ESYS,0
VEXT,2,12,,,,-Ts,,

TYPE,2                                  !Adhesive Extrusion # 1
EXTOPT,ESIZE,EDa/2,0,
EXTOPT,ACLEAR,1
EXTOPT,ATTR,0,0,0
MAT,2
REAL,_Z4
ESYS,0
VEXT,1,6,,,,Ta/2,,

TYPE,2                                  !Adhesive Extrusion # 2
EXTOPT,ESIZE,EDa/2,0,
EXTOPT,ACLEAR,1
EXTOPT,ATTR,0,0,0
MAT,2
REAL,_Z4
ESYS,0
VEXT,60,,,,Ta/2,,

```

```

VEXT,81,,,,,Ta/2,,,
VEXT,77,,,,,Ta/2,,,
VEXT,74,,,,,Ta/2,,,
VEXT,70,,,,,Ta/2,,,
VEXT,66,,,,,Ta/2,,,

TYPE,2                                !Comp.Patch Extrusion
EXTOPT,ESIZE,EDp,0,
EXTOPT,ACLEAR,1
EXTOPT,ATTR,0,0,0
MAT,3
REAL,_Z4
ESYS,0
VEXT,84,,,,,Tp,,,
VEXT,90,,,,,Tp,,,
VEXT,95,,,,,Tp,,,
VEXT,100,,,,,Tp,,,
VEXT,105,,,,,Tp,,,
VEXT,110,,,,,Tp,,,

NUMMRG,NODE,1e-6,1e-6, ,LOW         !Node and Keypoint merging
NUMMRG,KP,1e-6,1e-6, ,LOW

DA,15,SYMM                            !Plate symmetry
DA,37,SYMM
DA,41,SYMM
DA,23,SYMM
DA,27,SYMM
DA,59,SYMM

!DA,61,SYMM                          !! !Adhesive # 1 symmetry
DA,62,SYMM
!DA,67,SYMM                          !!
DA,82,SYMM
DA,69,SYMM
DA,73,SYMM

DA,85,SYMM                            !Adhesive # 2 symmetry
DA,86,SYMM
DA,111,SYMM
DA,91,SYMM
DA,114,SYMM
DA,109,SYMM

DA,116,SYMM                          !Comp.Patch symmetry
DA,117,SYMM
DA,122,SYMM
DA,142,SYMM
DA,140,SYMM
DA,145,SYMM

NSEL,S,LOC,X,Ls                       !Rigid Body constraint

```

```
NSEL,R,LOC,Y,0
NSEL,R,LOC,Z,-Ts/2
D,ALL,UZ,0
NSEL,ALL

SFA,49,1,PRES,-Sx      !Stress Appliance
SFA,52,1,PRES,-Sx
SFA,55,1,PRES,-Sx
SFA,58,1,PRES,-Sx

/SOL

CNVTOL,F, ,0.001,2, , !Non-linear analysis options
CNVTOL,U, ,0.5,2, ,
ANTYPE,0
NLGEOM,1
NSUBST,10,15,0
AUTOTS,1

!antype,0              !Linear analysis options
!solve

FINISH
```

2. ΜΟΝΤΕΛΟ ΟΚΤΑΓΩΝΙΚΟΥ ΕΠΙΘΕΜΑΤΟΣ

!Distance measured in m
!Stress measured in MPa

*SET,Ls , 0.250	!Substrate half-length
*SET,Ws , 0.1	!Substrate width
*SET,Ts , 0.01	!Substrate thickness
*SET,a , 0.04	!Crack length
*SET,Lp , 40*Ts/2	!Patch half-length
*SET,Wp , 1.75*a	!Patch width
*SET,Ta , 0.0001	!Adhesive thickness
*SET,Es , 207000	!Plate Young modulus
*SET,Ns , 0.33	!Plate Poisson ratio
*SET,Ea , 2550	!Adhesive Young modulus
*SET,Na , 0.32	!Adhesive Poisson ratio
*SET,Ep1 , 60000	!Patch X-axis Young modulus (fiber axis)
*SET,Ep2 , Ep1/15	!Patch Y-axis Young modulus
*SET,Ep3 , Ep1/15	!Patch Z-axis Young modulus
*SET,Np12 , 0.3	!Patch XY Poisson Ratio
*SET,Np23 , 0.02	!Patch YZ Poisson Ratio
*SET,Np13 , 0.3	!Patch XZ Poisson Ratio
*SET,Gp12 , Ep1/25	!Patch XY shear modulus
*SET,Gp23 , Gp12/1.5	!Patch YZ shear modulus
*SET,Gp13 , Ep1/25	!Patch XZ shear modulus
*SET,SR , 0.50	!Patch/Substrate Stiffness Ratio
*SET,Tp , Es*Ts*SR/Ep1	!Patch thickness ~ SR
*SET,EDs , 4	!Substrate Elements through thickness
*SET,EDa , 2	!Adhesive Elements through thickness
*SET,EDp , 4	!Patch Elements through thickness
*SET,CP , a/6	!Crack proximity area half-length (mesh utility)
*SET,CPEL,Wp/10	!Crack proximity element length
*SET,CTER,a/24	!Crack tip element radius
*SET,CTEN,8	!Crack tip element number (elements around crack tip)
*SET,Sx , 120	!Applied uni-axial stress

```

*SET,Loct,(0.75*Lp)
*SET,Woct,(Wp-Lp+Loct)

/PREP7

ET,1,PLANE82          !Element definition
ET,2,SOLID186
KEYOPT,2,2,0

mp,ex,1,Es           !Plate material model
mp,prxy,1,Ns

mp,ex,2,Ea           !Adhesive material model
mp,prxy,2,Na

mp,ex,3,Ep1          !Comp.Patch material model
mp,ey,3,Ep2
mp,ez,3,Ep3
mp,prxy,3,Np12
mp,pryz,3,Np23
mp,prxz,3,Np13
mp,gxy,3,Gp12
mp,gyz,3,Gp23
mp,gxz,3,Gp13

K,1,0,0,0,           !Keypoint definition
K,2,0,Ws,0,
K,3,Ls,Ws,0,
K,4,Ls,0,0,
K,101,0,a,0,

K,201,0,a-CP,0,
K,202,0,a+CP,0,
K,203,2*CP,a-CP,0,
K,204,2*CP,a+CP,0,

K,301,0,Wp,0
K,302,Lp,Wp,0
K,303,Lp,Woct,0
K,304,Lp,0,0

K,401,Ls,Wp,0
K,403,Lp,Ws,0
K,404,2*CP,0,0

K,501,Loct,Wp,0
K,502,Loct,Woct,0
K,503,Ls,Woct,0

```


K,601,2*CP,Wp,0
 K,602,2*CP,Woct,0
 K,603,2*CP,Ws,0
 K,604,Loct,Ws,0
 K,605,Loct,0,0
 K,606,Loct,a-CP,0
 K,607,Loct,a+CP,0
 K,608,Lp,Wp-(a-CP-Woct),0
 K,609,Lp,Wp-(a+CP-Woct),0

a,201,101,202,204,203 !Area creation
 a,1,201,203,602,404
 a,404,602,502,605
 a,602,203,606,502
 a,203,204,607,606
 a,204,601,501,607
 a,202,301,601,204
 a,301,2,603,601
 a,601,603,604,501
 a,501,604,403,302
 a,302,403,3,401
 a,303,609,608,302,401,503
 a,304,303,503,4
 a,605,502,303,304
 a,502,606,607,501,303
 a,501,302,608,609,303

KSCON,101,CTER,1,CTEN,1.4, !Crack tip mesh definition

FLST,5,42,4,ORDE,3 !Crack proximity element spacing
 FITEM,5,1
 FITEM,5,3
 FITEM,5,-43
 CM,_Y,LINE
 LSEL, , , ,P51X
 CM,_Y1,LINE
 CMSEL, ,_Y
 !*
 LESIZE,_Y1,CPEL, , , , , ,1

!-----

! The following are not universal settings and need to be changed whenever the geometry
 ! of the plate and/or patch are to be significantly altered. Very often only the appliance
 ! of a proper coefficient is adequate to obtain the favored element density.

!-----

!LESIZE,16,CPEL,,,,,,0 !plate width element spacing
 !LESIZE,18,CPEL,,,,,,0
 !LESIZE,27,CPEL,,,,,,0

!LESIZE,16,,,0.5*Wp/CPEL,4,,,0 !plate width element spacing
 !LESIZE,20,,,0.5*Wp/CPEL,1/4,,,0

```

!LESIZE,29,,,0.5*Wp/CPEL,1/4,,,0

!LESIZE,20,CPEL,,,,,,0           !plate length element spacing
!LESIZE,22,CPEL,,,,,,0
!LESIZE,24,CPEL,,,,,,0
!LESIZE,26,CPEL,,,,,,0

!LESIZE,20,,,0.5*Lp/CPEL,8,,,0   !plate length element spacing
!LESIZE,22,,,0.5*Lp/CPEL,1/8,,,0
!LESIZE,24,,,0.5*Lp/CPEL,8,,,0
!LESIZE,26,,,0.5*Lp/CPEL,8,,,0

!-----

AMESH,1                           !Area meshing

TYPE,2                             !Plate Extrusion
EXTOPT,ESIZE,EDs,0,
EXTOPT,ACLEAR,1
EXTOPT,ATTR,0,0,0
MAT,1
REAL,_Z4
ESYS,0
VEXT,1,,,,,-Ts,,

AMESH,2,14                         !Area meshing
AMESH,15
AMESH,16

TYPE,2                             !Plate Extrusion
EXTOPT,ESIZE,EDs,0,
EXTOPT,ACLEAR,1
EXTOPT,ATTR,0,0,0
MAT,1
REAL,_Z4
ESYS,0
VEXT,2,16,,,,-Ts,,

TYPE,2                             !Adhesive Extrusion # 1
EXTOPT,ESIZE,EDa/2,0,
EXTOPT,ACLEAR,1
EXTOPT,ATTR,0,0,0
MAT,2
REAL,_Z4
ESYS,0
VEXT,1,7,,,,Ta/2,,
VEXT,14,,,,,Ta/2,,
VEXT,15,,,,,Ta/2,,

```

```

TYPE,2                                !Adhesive Extrusion # 2
EXTOPT,ESIZE,EDa/2,0,
EXTOPT,ACLEAR,1
EXTOPT,ATTR,0,0,0
MAT,2
REAL,_Z4
ESYS,0
VEXT,85,,,,,Ta/2,,,
VEXT,79,,,,,Ta/2,,,
VEXT,104,,,,,Ta/2,,,
VEXT,90,,,,,Ta/2,,,
VEXT,94,,,,,Ta/2,,,
VEXT,97,,,,,Ta/2,,,
VEXT,107,,,,,Ta/2,,,
VEXT,100,,,,,Ta/2,,,
VEXT,112,,,,,Ta/2,,,

TYPE,2                                !Comp.Patch Extrusion
EXTOPT,ESIZE,EDp,0,
EXTOPT,ACLEAR,1
EXTOPT,ATTR,0,0,0
MAT,3
REAL,_Z4
ESYS,0
VEXT,118,,,,,Tp,,,
VEXT,124,,,,,Tp,,,
VEXT,130,,,,,Tp,,,
VEXT,135,,,,,Tp,,,
VEXT,140,,,,,Tp,,,
VEXT,145,,,,,Tp,,,
VEXT,155,,,,,Tp,,,
VEXT,150,,,,,Tp,,,
VEXT,160,,,,,Tp,,,

NUMMRG,NODE,1e-6,1e-6, ,LOW        !Node and Keypoint merging
NUMMRG,KP,1e-6,1e-6, ,LOW

DA,19,SYMM                            !Plate symmetry
DA,45,SYMM
DA,49,SYMM
DA,28,SYMM
DA,32,SYMM
DA,72,SYMM
DA,75,SYMM

DA,81,SYMM                            !! !Adhesive # 1 symmetry
DA,105,SYMM
DA,89,SYMM
DA,93,SYMM
DA,111,SYMM

```

```

DA,119,SYMM          !Adhesive # 2 symmetry
DA,125,SYMM
DA,126,SYMM
DA,131,SYMM
DA,123,SYMM
DA,139,SYMM
DA,154,SYMM

DA,167,SYMM          !Comp.Patch symmetry
DA,173,SYMM
DA,174,SYMM
DA,179,SYMM
DA,171,SYMM
DA,187,SYMM
DA,207,SYMM

NSEL,S,LOC,X,Ls      !Rigid Body constraint
NSEL,R,LOC,Y,0
NSEL,R,LOC,Z,-Ts/2
D,ALL,UZ,0
NSEL,ALL

SFA,61,1,PRES,-Sx    !Stress Appliance
SFA,67,1,PRES,-Sx
SFA,71,1,PRES,-Sx

/SOL

CNVTOL,F, ,0.001,2, , !Non-linear analysis options
CNVTOL,U, ,0.5,2, ,
ANTYPE,0
NLGEOM,1
NSUBST,10,15,0
AUTOTS,1

!antype,0            !Linear analysis options
!solve

FINISH

```

3. ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΠΙΘΕΜΑΤΟΣ ΜΕ TAPERING

!Distance measured in m
!Stress measured in MPa

*SET,Ls , 0.250	!Substrate half-length
*SET,Ws , 0.1	!Substrate width
*SET,Ts , 0.01	!Substrate thickness
*SET,a , 0.04	!Crack length
*SET,Lp , $20 \cdot Ts/2$!Patch half-length
*SET,Wp , $1.75 \cdot a$!Patch width
*SET,Lt , $0.5 \cdot Lp$	
*SET,Ta , 0.0001	!Adhesive thickness
*SET,Es , 207000	!Plate Young modulus
*SET,Ns , 0.33	!Plate Poisson ratio
*SET,Ea , 2550	!Adhesive Young modulus
*SET,Na , 0.32	!Adhesive Poisson ratio
*SET,Ep1 , 60000	!Patch X-axis Young modulus (fiber axis)
*SET,Ep2 , $Ep1/15$!Patch Y-axis Young modulus
*SET,Ep3 , $Ep1/15$!Patch Z-axis Young modulus
*SET,Np12 , 0.3	!Patch XY Poisson Ratio
*SET,Np23 , 0.02	!Patch YZ Poisson Ratio
*SET,Np13 , 0.3	!Patch XZ Poisson Ratio
*SET,Gp12 , $Ep1/25$!Patch XY shear modulus
*SET,Gp23 , $Gp12/1.5$!Patch YZ shear modulus
*SET,Gp13 , $Ep1/25$!Patch XZ shear modulus
*SET,SR , 0.25	!Patch/Substrate Stiffness Ratio
*SET,Tp , $Es \cdot Ts \cdot SR / Ep1$!Patch thickness ~ SR
*SET,EDs , 4	!Substrate Elements through thickness
*SET,EDa , 2	!Adhesive Elements through thickness
*SET,EDp , 4	!Patch Elements through thickness
*SET,CP , $a/6$!Crack proximity area half-length (mesh utility)
*SET,CPEL , $Wp/10$!Crack proximity element length
*SET,CTER , $a/24$!Crack tip element radius
*SET,CTEN , 8	!Crack tip element number (elements around crack tip)

```

*SET,Sx , 120                !Applied uni-axial stress

*SET,Loct,(0.75*Lp)
*SET,Woct,(Wp-Lp+Loct)

/PREP7

ET,1,PLANE82                !Element definition
ET,2,SOLID186
KEYOPT,2,2,0

mp, ex,1, Es                !Plate material model
mp, prxy, 1, Ns

mp, ex,2, Ea                !Adhesive material model
mp, prxy, 2, Na

mp,ex,3,Ep1                !Comp.Patch material model
mp,ey,3,Ep2
mp,ez,3,Ep3
mp,prxy,3,Np12
mp,pryz,3,Np23
mp,prxz,3,Np13
mp,gxy,3,Gp12
mp,gyz,3,Gp23
mp,gxz,3,Gp13

K,1,0,0,0,                !Keypoint definition
K,2,0,Ws,0,
K,3,Ls,Ws,0,
K,4,Ls,0,0,
K,101,0,a,0,

K,201,0,a-CP,0,
K,202,0,a+CP,0,
K,203,2*CP,a-CP,0,
K,204,2*CP,a+CP,0,

K,301,0,Wp,0
K,302,2*CP,Wp,0
K,303,Lp,Wp,0
K,304,Lp,0,0
K,305,Lp,Ws,0
K,306,Ls,Wp,0
K,307,2*CP,0,0
K,308,2*CP,Ws,0

K,401,Lp+(3*Lt/3),0,0
K,402,Lp+(2*Lt/3),0,0
K,403,Lp+(1*Lt/3),0,0
K,404,Lp+(3*Lt/3),Wp,0

```

K,405,Lp+(2*Lt/3),Wp,0
 K,406,Lp+(1*Lt/3),Wp,0
 K,407,Lp+(3*Lt/3),Ws,0
 K,408,Lp+(2*Lt/3),Ws,0
 K,409,Lp+(1*Lt/3),Ws,0

a,201,101,202,204,203 !Area creation
 a,1,201,203,307
 a,307,203,204,302,303,304
 a,202,301,302,204
 a,301,2,308,302
 a,302,308,305,303

a,304,303,406,403
 a,403,406,405,402
 a,402,405,404,401
 a,303,305,409,406
 a,406,409,408,405
 a,405,408,407,404
 a,404,407,3,306
 a,401,404,306,4

KSCON,101,CTER,1,CTEN,1.4, !Crack tip mesh definition

FLST,5,27,4,ORDE,9 !Crack proximity element spacing
 FITEM,5,3
 FITEM,5,-14
 FITEM,5,16
 FITEM,5,18
 FITEM,5,20
 FITEM,5,-29
 FITEM,5,31
 FITEM,5,33
 FITEM,5,38
 CM,_Y,LINE
 LSEL, , , ,P51X
 CM,_Y1,LINE
 CMSEL, ,_Y
 LESIZE,_Y1,CPEL, , , , , ,0

!-----
 ! The following are not universal settings and need to be changed whenever the geometry
 ! of the plate and/or patch are to be significantly altered. Very often only the appliance
 ! of a proper coefficient is adequate to obtain the favored element density.
 !-----

LESIZE,15,CPEL,,,,,,0 !plate width element spacing
 LESIZE,17,CPEL,,,,,,0
 LESIZE,19,CPEL,,,,,,0

```

LESIZE,30,CPEL,,,,,0
LESIZE,32,CPEL,,,,,0
LESIZE,34,CPEL,,,,,0
LESIZE,36,CPEL,,,,,0

!LESIZE,15,,,0.5*Wp/CPEL,4,,,0    !plate width element spacing
!LESIZE,17,,,0.5*Wp/CPEL,1/4,,,0
!LESIZE,19,,,0.5*Wp/CPEL,1/4,,,0
!LESIZE,30,,,0.5*Wp/CPEL,1/4,,,0
!LESIZE,32,,,0.5*Wp/CPEL,1/4,,,0
!LESIZE,34,,,0.5*Wp/CPEL,1/4,,,0
!LESIZE,36,,,0.5*Wp/CPEL,1/4,,,0

LESIZE,35,CPEL,,,,,0                !plate length element spacing
LESIZE,37,CPEL,,,,,0
LESIZE,39,CPEL,,,,,0

!LESIZE,35,,,0.5*Lp/CPEL,8,,,0    !plate length element spacing
!LESIZE,37,,,0.5*Lp/CPEL,1/8,,,0
!LESIZE,39,,,0.5*Lp/CPEL,8,,,0

```

!-----

```

AMESH,1                                !Area meshing

TYPE,2                                  !Plate Extrusion
EXTOPT,ESIZE,EDs,0,
EXTOPT,ACLEAR,1
EXTOPT,ATTR,0,0,0
MAT,1
REAL,_Z4
ESYS,0
VEXT,1,,,,,-Ts,,

AMESH,2,14                              !Area meshing

TYPE,2                                  !Plate Extrusion
EXTOPT,ESIZE,EDs,0,
EXTOPT,ACLEAR,1
EXTOPT,ATTR,0,0,0
MAT,1
REAL,_Z4
ESYS,0
VEXT,2,14,,,,-Ts,,

TYPE,2                                  !Adhesive Extrusion # 1
EXTOPT,ESIZE,EDa/2,0,
EXTOPT,ACLEAR,1

```


EXTOPT,ATTR,0,0,0
 MAT,2
 REAL,_Z4
 ESYS,0
 VEXT,1,4,,,,Ta/2,,,
 VEXT,7,9,,,,Ta/2,,,

TYPE,2 !Adhesive Extrusion # 2
 EXTOPT,ESIZE,EDa/2,0,
 EXTOPT,ACLEAR,1
 EXTOPT,ATTR,0,0,0
 MAT,2
 REAL,_Z4
 ESYS,0
 VEXT,77,,,,,Ta/2,,,
 VEXT,71,,,,,Ta/2,,,
 VEXT,86,,,,,Ta/2,,,
 VEXT,81,,,,,Ta/2,,,
 VEXT,89,,,,,Ta/2,,,
 VEXT,94,,,,,Ta/2,,,
 VEXT,98,,,,,Ta/2,,,

TYPE,2 !Comp.Patch Extrusion
 EXTOPT,ESIZE,EDp,0,
 EXTOPT,ACLEAR,1
 EXTOPT,ATTR,0,0,0
 MAT,3
 REAL,_Z4
 ESYS,0
 VEXT,102,,,,,Tp,,,
 VEXT,107,,,,,Tp,,,
 VEXT,113,,,,,Tp,,,
 VEXT,118,,,,,Tp,,,

TYPE,2 !Comp.Patch Extrusion
 EXTOPT,ESIZE,3*EDp/4,0,
 EXTOPT,ACLEAR,1
 EXTOPT,ATTR,0,0,0
 MAT,3
 REAL,_Z4
 ESYS,0
 VEXT,125,,,,,3*Tp/4,,,

TYPE,2 !Comp.Patch Extrusion
 EXTOPT,ESIZE,2*EDp/4,0,
 EXTOPT,ACLEAR,1
 EXTOPT,ATTR,0,0,0
 MAT,3
 REAL,_Z4
 ESYS,0
 VEXT,130,,,,,2*Tp/4,,,

```

TYPE,2                                !Comp.Patch Extrusion
EXTOPT,ESIZE,EDp/4,0,
EXTOPT,ACLEAR,1
EXTOPT,ATTR,0,0,0
MAT,3
REAL,_Z4
ESYS,0
VEXT,135,,,,,Tp/4,,

NUMMRG,NODE,1e-6,1e-6, ,LOW          !Node and Keypoint merging
NUMMRG,KP,1e-6,1e-6, ,LOW

DA,17,SYMM                            !Plate symmetry
DA,33,SYMM
DA,37,SYMM
DA,25,SYMM
DA,31,SYMM
DA,46,SYMM
DA,50,SYMM
DA,54,SYMM
DA,70,SYMM

DA,73,SYMM                            !! !Adhesive # 1 symmetry
DA,87,SYMM
DA,80,SYMM
DA,85,SYMM
DA,93,SYMM
DA,97,SYMM
DA,101,SYMM

DA,103,SYMM                           !Adhesive # 2 symmetry
DA,108,SYMM
DA,109,SYMM
DA,114,SYMM
DA,106,SYMM
DA,124,SYMM
DA,129,SYMM
DA,134,SYMM
DA,139,SYMM

DA,141,SYMM                           !Comp.Patch symmetry
DA,146,SYMM
DA,147,SYMM
DA,152,SYMM
DA,144,SYMM
DA,162,SYMM
DA,167,SYMM
DA,172,SYMM
DA,177,SYMM

```

```
NSEL,S,LOC,X,Ls          !Rigid Body constraint
NSEL,R,LOC,Y,0
NSEL,R,LOC,Z,-Ts/2
D,ALL,UZ,0
NSEL,ALL

SFA,66,1,PRES,-Sx       !Stress Appliance
SFA,69,1,PRES,-Sx

/SOL

CNVTOL,F, ,0.001,2, ,   !Non-linear analysis options
CNVTOL,U, ,0.5,2, ,
ANTYPE,0
NLGEOM,1
NSUBST,10,15,0
AUTOTS,1

!antype,0               !Linear analysis options
!solve

FINISH
```