



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

Επισκευή ρηγματωμένων χαλύβδινων πλακών με επιθέματα σύνθετων υλικών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Βάσω Ε. Κριαρά

Επιβλέπων: Ιωάννης Ραυτογιάννης

Αθήνα, Ιούλιος 2013

ΕΜΚ ΔΕ 2013/66

Κριαρά Β.Ε. (2013).
Επισκευή ρηγματωμένων χαλύβδινων πλακών με επιθέματα σύνθετων υλικών
Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2013/66
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Kriara V.E. (2013).
Fibre-Reinforced Polymer composite patch repair on cracked steel plates
Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2013/66
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη	2
Abstract	3
Ευχαριστίες	4
1 Εισαγωγή	6
2 Ανάπτυξη ρωγμών και παραδοσιακή αντιμετώπιση	7
3 Επισκευή με επιθέματα σύνθετων ινοπλισμένων υλικών (Fibre Reinforced Polymers, FRP).....	9
3.1 Γενικά	9
3.2 Τα υλικά που απαρτίζουν τη μέθοδο	10
3.2.1 Ενισχυτικές ίνες	10
3.2.2 Μήτρα	11
3.2.3 Στρώμα κόλλας	13
3.3 Μεθοδολογία εφαρμογής του επιθέματος	14
3.3.1 Προετοιμασία του υποστρώματος	14
3.3.2 Εφαρμογή της κόλλας, εφαρμογή και εμβάπτιση των ενισχυτικών ινών	15
3.3.3 Πολυμερισμός	18
3.4 Πιστοποίηση και έλεγχος της επισκευής	20
4 Μελέτες και εφαρμογές της μεθόδου	22
4.1 Εισαγωγή	22
4.2 Εφαρμογές στην Αεροπορία	23
4.3 Εφαρμογές στη Ναυτιλία	28
4.4 Κλείσιμο	34
5 Μοντελοποίηση της μεθόδου με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (FEM)	36
5.1 Εισαγωγή	36
5.2 Χαλύβδινη πλάκα υπό εφελκυσμό	37
5.2.1 Μοντελοποίηση	37
5.2.2 Ανάλυση	41
5.2.3 Παραμορφωμένη γεωμετρία μοντέλου	43
5.3 Χαλύβδινη πλάκα με επίθεμα σύνθετου υλικού υπό εφελκυσμό	48
5.3.1 Μοντελοποίηση	48
5.3.2 Ανάλυση	52
5.3.3 Παραμορφωμένη γεωμετρία μοντέλου	54
6 Αποτελέσματα ανάλυσης	60
6.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων	61
6.1.1 Τάσεις	61
6.1.2 Μετατοπίσεις	74
7 Συμπεράσματα	75
8 Βιβλιογραφία	77

Επισκευή ρηγματωμένων χαλύβδινων πλακών με επιθέματα σύνθετων υλικών

Κριαρά Β. Ε. (Επιβλέπων: Ραυτογιάννης Ι.)

Περίληψη

Το παρόν κείμενο αποτελεί την πλήρη έκθεση της μελέτης που πραγματοποιήθηκε από την υπογράφουσα στα πλαίσια της διπλωματικής της εργασίας, με αντικείμενο την παραμετρική μελέτη με πεπερασμένα στοιχεία της μεθόδου επισκευής χαλύβδινων πλακών με τη χρήση επιθεμάτων ινών άνθρακα σε μήτρα εποξειδικής ρητίνης. Ένα επιφανειακό εφελκυστικό φορτίο εφαρμόστηκε και παρατηρήθηκαν οι παραμορφώσεις του υφάσματος και ο ρυθμός διάδοσης της ρωγμής. Η μοντελοποίηση και ανάλυση έγιναν στο ABAQUS/CAE. Τα αποτελέσματα ήταν πολύ ελπιδοφόρα καθώς έδειξαν ότι η ανάπτυξη της ρωγμής ανασχέθηκε και μεγάλωσε αρκετά η διάρκεια ζωής του δείγματος.

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF STEEL STRUCTURES

DIPLOMA THESIS
EMK ΔE 2013/66

Fibre-Reinforced Polymer composite patch repair on cracked steel plates

Kriara V.E. (supervised by Raftoyiannis I.)

Abstract

This essay comprises the complete report of the study, performed by the author as part of her diploma thesis, whose subject was the parametric study with finite element analysis of composite patch repairs on steel plates using carbon/epoxy patches. A surface tensile loading was applied and patch strains and crack propagation rate were monitored. Modeling and analysis were carried out in ABAQUS/CAE. The results were very encouraging demonstrating that patches can effectively slow down the crack growth and extend the specimen's life.

Ευχαριστίες

Την οικογένειά μου για την ηθική κυρίως στήριξη που μου παρείχαν όλα αυτά τα χρόνια.

Τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Ιωάννη Ραυτογιάννη για την υπομονή και τις συμβολές του κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας.

Και φυσικά, τους Υποψήφιους Διδάκτορες Κ. Αδαμάκο, Σ. Αυγερινού, Γ. Δούγκα και Δ. Δημακογιάννη για την πολύτιμη βοήθειά τους σε σχέση με τη χρήση του προγράμματος Abaqus.

1 Εισαγωγή

Η παρούσα εργασία σκοπεύει να μελετήσει την αντοχή σε κόπωση χαλύβδινων πλακών με μία κεντρική ρωγμή, οι οποίες έχουν ενισχυθεί από τη μία τους πλευρά με επίθεμα από σύνθετο υλικό. Θα δημιουργηθούν μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων με και χωρίς επίθεμα, θα συγκριθούν μεταξύ τους και έπειτα θα αξιολογηθούν τα αποτελέσματα. Έχοντας υπόψη να διαχωρίσω αυτή την έρευνα από άλλες σχετικές που έχουν να κάνουν με αεροδιαστημικά υλικά και γεωμετρίες, επιλέχθηκαν μεγάλης κλίμακας χοντρά δείγματα, αντιπροσωπευτικά ναυτιλιακών κατασκευών. Με το ίδιο σκεπτικό, για τα επιθέματα χρησιμοποιήθηκε carbon/epoxy T300/5208.

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 δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται περιληπτικά τα προβλήματα που οδήγησαν στην αναγκαιότητα της ανάπτυξης αυτής της μεθόδου επισκευής η οποία περιγράφεται στο τρίτο κεφάλαιο. Έπειτα, στο τέταρτο γίνεται μία ανασκόπηση των έως τώρα καταγεγραμμένων ερευνών και εφαρμογών της.

Τα τρία τελευταία κεφάλαια αφιερώνονται στην προσπάθεια που έκανα η ίδια για ανάλυση και εξαγωγή συμπερασμάτων πάνω στην επιδιόρθωση με σύνθετα υλικά μέσω του προγράμματος ABAQUS/CAE.

2 Ανάπτυξη ρωγμών και παραδοσιακή αντιμετώπιση

Τα μεταβαλλόμενα φορτία είναι πολύ συνηθισμένα σε ναυτιλιακές κατασκευές, οι οποίες σε περιοχές συγκεντρωμένων φορτίων οδηγούν στη δημιουργία και τη διάδοση ρωγμών κοπώσεως. 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.

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 προβλέψει 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.

Εκτός από το παραπάνω πρόβλημα, υπάρχει συχνά η ανάγκη για αναβάθμιση της αντοχής και/ή της ακαμψίας κάποιου δομικού στοιχείου, ώστε να μπορέσει να αντέξει νέες συνθήκες φόρτισης ή ώστε να μετριαστούν αρχικά ελαττώματα σχεδιασμού.

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.

Τυπική προσωρινή επισκευή αποτελεί η διάνοιξη κυκλικής οπής ανακούφισης σε κάθε άκρο της ρωγμής, με στόχο να εξομαλυνθεί 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 ρηγματώσης. 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 κάτι το οποίο απαιτεί πολύ προσεκτική και περίπλοκη προετοιμασία και γίνεται μόνο υπό αυστηρά μέτρα ασφαλείας. Αυτό με τη σειρά του, μπορεί να επηρεάσει σημαντικά το κόστος επισκευής, καθώς το πλοίο μπορεί να μείνει εκτός λειτουργίας για ένα σχετικά μεγάλο χρονικό διάστημα.

Όλα αυτά τα μειονεκτήματα των παραδοσιακών μεθόδων επισκευής και ενίσχυσης αναδεικνύουν την ανάγκη έρευνας και εκτίμησης της αποτελεσματικότητας νέων λύσεων που θα βοηθήσουν να ξεπεραστούν τα υπάρχοντα προβλήματα.

3 Επισκευή με επιθέματα σύνθετων ινοπλισμένων υλικών (Fibre Reinforced Polymers, FRP)

3.1 Γενικά

Η εφαρμογή επιθεμάτων (patches) σύνθετων υλικών είναι μία πολύ ελπιδοφόρα μέθοδος επισκευής και/ ή ενίσχυσης χαλύβδινων κατασκευών.

Εξερευνώντας την εφικτότητα της χρήσης σύνθετων υλικών αντί των μεταλλικών για την κατασκευή του επιθέματος παρατηρήθηκε ότι η χρήση των πρώτων παρουσιάζει τα εξής σημαντικά πλεονεκτήματα:

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. Τα επιθέματα από σύνθετο υλικό παρουσιάζουν γενικά πολύ καλή αντοχή σε κόπωση.
9. 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.
10. Παρέχεται η δυνατότητα επιθεώρησης της κατάστασης στο υπόστρωμα με τη χρήση απλών επιφανειακών μεθόδων NDE.
11. Η διαδικασία εφαρμογής μπορεί να σχεδιαστεί έτσι ώστε να μην αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες.
12. Η δυνατότητα εφαρμογής της μεθόδου κατά την επιχειρησιακή λειτουργία της ναυπηγικής κατασκευής μπορεί να προσφέρει σημαντικά οικονομικά οφέλη.
13. 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.

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

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 νηογνωμόνων 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.

3.2 Τα υλικά που απαρτίζουν τη μέθοδο

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 μια 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. 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.

3.2.1 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.

Πίνακας 3.1 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 Y.A.	1.81	248	4500	2486	Μέτριο □
Ίνες άνθρακα Y.M.	2.00	517	2100	1050	Υψηλό □
Ίνες άνθρακα Π.Y.M.	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	-

Οι ενισχυτικές ίνες χρησιμοποιούνται με τη μορφή υφασμάτων, που όπως θα δούμε στην επόμενη παράγραφο 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.

3.2.2 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. 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 3.2 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 παραμενοσών 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 3.2 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 (ορθοφθαλκική)	1.23	3.2	65	Χαμηλό□
Πολυεστερική (ισοφθαλκική)	1.21	3.6	60	Χαμηλό□
Φαινολική	1.15	3.0	50	Χαμηλό□

3.2.3 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.

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 θυλάκων 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 παραμενουσών 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 3.3 παρουσιάζονται ορισμένα από τα κύρια χαρακτηριστικά τριών εποξικών ρητινών που βρίσκουν συχνά χρήση ως συνεκτικά υλικά (κόλλες) στις υπάρχουσες εφαρμογές της μεθόδου.

Πίνακας 3.3 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

3.3 Μεθοδολογία εφαρμογής του επιθέματος

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.

3.3.1 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 και οι οποίες αναφέρονται κατά σειρά εκτέλεσης:

1. Απόξεση μακροσκοπικών επιφανειακών εξάρσεων (αμυχές, επικαθήσεις, κτλ).
2. Καθαρισμός με διαλύτες. Συνήθως εφαρμόζονται αλληπάλλληλα περάσματα με πανιά εμποτισμένα σε διάλυμα βουτανόνης (εμπορική ονομασία της μέθυλ-έθυλ-κετόνης, MEK) 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 (SiH₄). 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. Ψεκάσμος 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 ψεκάσμό.

Στο κεφάλαιο 2 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 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.

3.3.2 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.

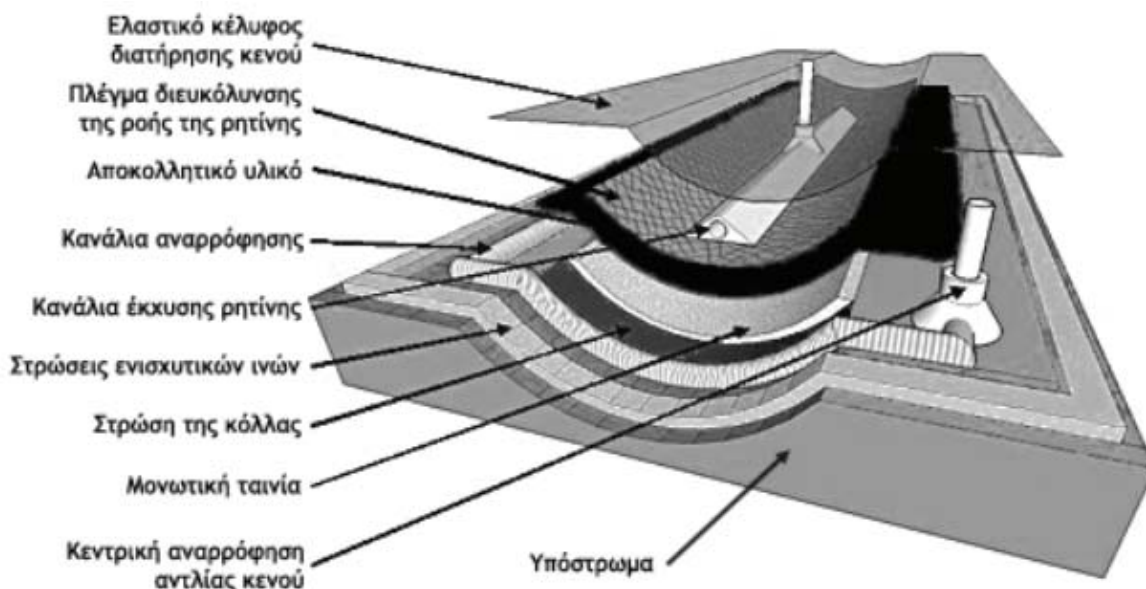
Στη συνέχεια τοποθετούνται διαδοχικά τα υφάσματα των ενισχυτικών ινών επί της κόλλας και εμβαπτίζονται στη ρητίνη της μήτρας. Στην περίπτωση χρήσης ινών άνθρακα, συνηθίζεται η παρεμβολή μίας λεπτής στρώσης υαλονημάτων μεταξύ της κόλλας και των ινών άνθρακα, ώστε να αποτραπεί η δημιουργία γαλβανικού στοιχείου 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 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 3.1 παρουσιάζονται τα τμήματα μιας τυπικής διάταξης της μεθόδου.



Σχήμα 3.1 Τυπική διάταξη έκχυσης ρητίνης με τη δημιουργία κενού.

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

- *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 μεγάλου μεγέθους 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 απ 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.

Εφόσον τα προεμβαπτισμένα υφάσματα ινών δεν διατηρούνται σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες (περί τους -18 ο 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 αποθήκευσή τους.

3.3.3 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 ενδεδειγμένου 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 3.2).



Σχήμα 3.2 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 ημιαγωγίμο, 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 ημιαγωγίμων ινών.

Όπου δεν απαιτείται η επιβολή πίεσης, η απαιτούμενη ενέργεια μπορεί να παρασχεθεί μέσω ακτινοβολίας. Στην περίπτωση αυτή μπορούν να χρησιμοποιηθούν ισχυρές λυχνίες, Σχήμα 3.3α, οι οποίες εκπέμπουν υπεριώδη ακτινοβολία υψηλής έντασης ή καθοδικοί σωλήνες μεγάλης τάσης, Σχήμα 3.3β, που εκτοξεύουν δέσμες ηλεκτρονίων (Electron Beam curing (EB curing)). Οι μέθοδοι αυτές διακρίνονται για την απλότητα τους και την αυξημένη ταχύτητα πολυμερισμού.



Σχήμα 3.3
α. Βιομηχανικό σύστημα πολυμερισμού με λυχνίες υπεριώδους ακτινοβολίας.
β. Καθοδικός σωλήνας πολυμερισμού με δέσμη ηλεκτρονίων.

3.4 Πιστοποίηση και έλεγχος της επισκευής

Ένα άμεσο συμπέρασμα που προκύπτει από την ανάγνωση των παραπάνω 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. Δινορρέυματα. 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. Εξελιγμένες 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 ιών 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.

4 Μελέτες και εφαρμογές της μεθόδου

4.1 Εισαγωγή

Η τεχνολογία ενίσχυσης με τα επιθέματα αυτά σήμερα κυριαρχεί σε κατασκευές αεροσκαφών, ακολουθούν οι παλιές γέφυρες, ενώ οι ναυπηγικές εφαρμογές είναι πολύ λίγες. Οι εφαρμογές σε αεροσκάφη είναι γνωστές από τα τέλη της δεκαετίας του '70.

Μία από τις πρόσφατες έρευνες κλειδιά σε αυτό τον τομέα είναι αυτή των Roach και Graf, στην οποία τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν μία επιμήκυνση ζωής περίπου 20 φορές σε σχέση με ελαττωματικά δείγματα χωρίς επιθέματα και 4 φορές σε σχέση με υγιή δείγματα χωρίς επιθέματα.

Μία προσπάθεια για τον αναλυτικό υπολογισμό του Συντελεστή Έντασης Τάσης (SIF) έγινε από τον Ting et al, ο οποίος βασιζόμενος στο μοντέλο Rose, ανέπτυξε ένα μαθηματικό μοντέλο για τον υπολογισμό του μέγιστου ΣΕΤ ενός ρηγματωμένου ελάσματος επιδιορθωμένο με επιθέματα. Άλλες σχετικές εργασίες είναι αυτές των Lam et al, Baker και Okafor et al. Οι Wang και Pidaparti περιγράφουν μία σειρά πειραμάτων εφελκυσμού και κοπώσεως σε μεταλλικά, οδοντωτά δείγματα τα οποία επισκευάστηκαν με επιθέματα προεμποτισμένα (pre-preg) με ίνες βορίου και έδειξαν ότι η ζωή τους επεκτάθηκε 5-14 φορές. Η επίδραση επιθεμάτων που έχουν τοποθετηθεί στη μία μόνο πλευρά κεντρικά ρηγματωμένου, χοντρού μεταλλικού ελάσματος στο συντελεστή SIF και τη διάρκεια ζωής μελετήθηκε από τους Seo και Lee. Ο Archour et al μελέτησε ένα λεπτό μεταλλικό έλασμα με μία ημικυκλική εγκοπή που επιδιορθώθηκε με επίθεμα βορίου και εποξικής ρητίνης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο χρόνος ζωής του αυξήθηκε κατά 30% περίπου. Τεστ κοπώσεως έγιναν σε διάφορους τύπους μεταλλικών δειγμάτων με σκοπό να αναδειχτούν οι θετικές επιδράσεις σύνθετων επιθεμάτων σε υποστρώματα με ή χωρίς βλάβες από τον Pastor et al.

Πολλά στοιχεία μας δίνονται επίσης από έρευνες στο πεδίο αριθμητικής μοντελοποίησης επιθεμάτων σε κατασκευές αεροδιαστημικής. Μία λεπτομερής παραμετρική μελέτη επιδιορθωμένου λεπτού ρηγματωμένου ελάσματος έγινε από τους Umamaheswar και Singh. Ο Bachir et al. έκανε μία επίσης παραμετρική έρευνα επιθέματος με ίνες γραφίτη και εποξικής ρητίνης από τη μία πλευρά μεταλλικών δειγμάτων με ρωγμή είτε στο κέντρο ή στην άκρη. Μία συγκριτική αριθμητική μελέτη ανάμεσα σε μονά και διπλά επιθέματα ίδιου πάχους έγινε από τον Belhouari et al., καταλήγοντας στο αναμενόμενο αποτέλεσμα ότι τα δεύτερα είναι αποτελεσματικότερα των πρώτων. Μία προσπάθεια ακριβούς μοντελοποίησης της καμπυλόγραμμης ρωγμής μεταλλικής πλάκας επισκευασμένης με μονό επίθεμα πραγματοποιήθηκε από τους Lee και Lee.

Όσον αφορά τη χρήση των σύνθετων επιθεμάτων σε έργα πολιτικού μηχανικού, χαρακτηριστικές εργασίες είναι αυτές του Bassetti et al. ο οποίος έφερε εις πέρας πραγματικής κλίμακας κυκλικά τεστ σε δοκούς από μία παλιά διαλυμένη σιδηροδρομική γέφυρα από μαλακό χάλυβα. Μία από τις δοκούς ενδυναμώθηκε με CFRP επιθέματα. Βρέθηκε ότι μετά από 20 εκατομμύρια επαναλήψεις, η διάδοση της ρωγμής διεκόπη εντελώς. Παρόμοια δουλειά έγινε από τους Colombi και Roggi η οποία αφορούσε ένα μεταλλικό έλασμα με μία τρύπα υπό στατική ένταση, και η οποία κατέληξε σε μία πολύ ενδιαφέρουσα σύγκριση μεταξύ των πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων. Σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν, η αστοχία έγινε στην διεπιφάνεια χάλυβα-κόλλας. Δύο πολύ πρόσφατες εργασίες έγιναν από την ίδια ομάδα και είχαν να κάνουν με την συμπεριφορά σε κόπωση και τους μηχανισμούς αστοχίας του χάλυβα σε σύνθετες αρθρώσεις.

Υπάρχουν πολλές σημαντικές διαφορές μεταξύ των αεροδιαστημικών και των ναυπηγικών χαλύβδινων εφαρμογών οι οποίες επιδεικνύουν και μία διαφορετική προσέγγιση και έρευνα του προβλήματος. Αυτές οι διαφορές συμπεριλαμβάνουν τις διαφορές ακαμψίας του μετάλλου, γεωμετρίας των κατασκευών, φόρτισης και διαφορετικές συνθήκες εργασίας και περιβάλλοντος. Επίσης, υπάρχουν μεγάλες διαφοροποιήσεις μεταξύ του τι είναι γενικά αποδεκτό ως σύνηθες κόστος επισκευής στις αεροδιαστημικές κατασκευές και στις αντίστοιχες ναυπηγικές.

Στον τομέα της ναυτιλίας, μία πρώτη οπτική για την για την ανάπτυξη της τεχνολογίας επισκευής με τα σύνθετα επιθέματα και της εφαρμογής της σε μεγάλα χαλύβδινα πλοία δόθηκε από τους Dalzel-Job et al. Σε μία μεταγενέστερη έρευνα από τον Grabovac, γίνεται αναφορά σε περιπτώσεις όπου η παραπάνω τεχνολογία μπορεί ή έχει ήδη εφαρμοστεί. Ένα αντίστοιχο άρθρο είναι αυτό του Turton et al. στο οποίο ειδική αναφορά κάνουν στις μη καταστροφικές μεθόδους ελέγχου του μεγέθους της ρωγμής κάτω από το επίθεμα.

Ένα θέμα το οποίο χρήζει ιδιαίτερης προσοχής είναι η μακροπρόθεσμη επίδοση των σύνθετων επιθεμάτων υπό τις επιβλαβείς επιδράσεις του περιβάλλοντος της θάλασσας. Είναι ευρέως γνωστό ότι η απορρόφησης υγρασίας υποβιβάζει την επίδοση των σύνθετων υλικών και αυτό επιβεβαιώθηκε επίσης και σε περίπτωση επισκευής μεταλλικών κατασκευών.

Παρόλα αυτά, η κατάλληλη προστασία του επιθέματος απομονώνοντάς το από το περιβάλλον με στεγανωτικά πάνω στην επισκευή αποδείχθηκε αποτελεσματική, όπως αποδεικνύουν αρκετά επιτυχημένα εγχειρήματα.

4.2 Εφαρμογές στην Αεροπορία

Η πρώτη –πειραματική– εφαρμογή της μεθόδου 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. 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 ρωγμή 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 αντίγραφα 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.

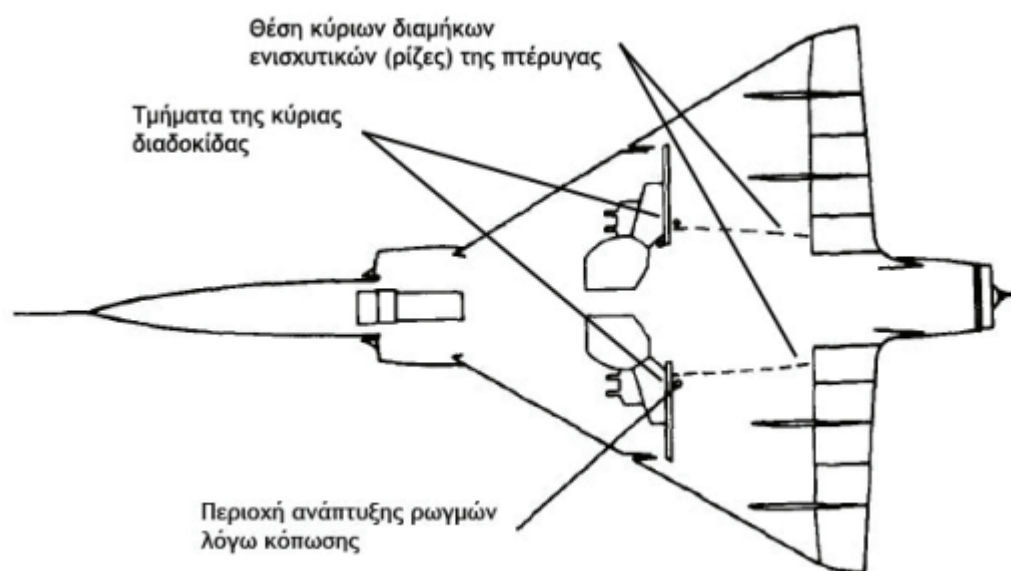
Τα αποτελέσματα της δοκιμής έδειξαν ότι η παρουσία των ρωγμών στο δεύτερο δοκίμιο υποβάθμισε σημαντικά την αντοχή της κατασκευής σε λυγισμό, ενώ το πρώτο με το τρίτο παρουσίασαν παρεμφερή συμπεριφορά λυγισμού. Οι μορφές των δύο δοκιμίων, του ακέραιου και του επισκευασμένου με επίθεμα σύνθετου υλικού, 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.

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.

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 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. Το πρόβλημα έγκειτο στην ανάπτυξη ρωγμών λόγω κόπωσης στο κάτω μέρος των πτερύγων (Σχήμα 4.1) μαχητικού αεροσκάφους Dassault Mirage III, σε μια ευαίσθητη περιοχή επί του οχετού απόρριψης καυσίμου και μάλιστα στην άμεση εγγύτητα της κεντρικής διαδοκίδας της πτέρυγας.



Σχήμα 4.1 Απεικόνιση του αεροσκάφους όπου διακρίνεται η προβληματική περιοχή

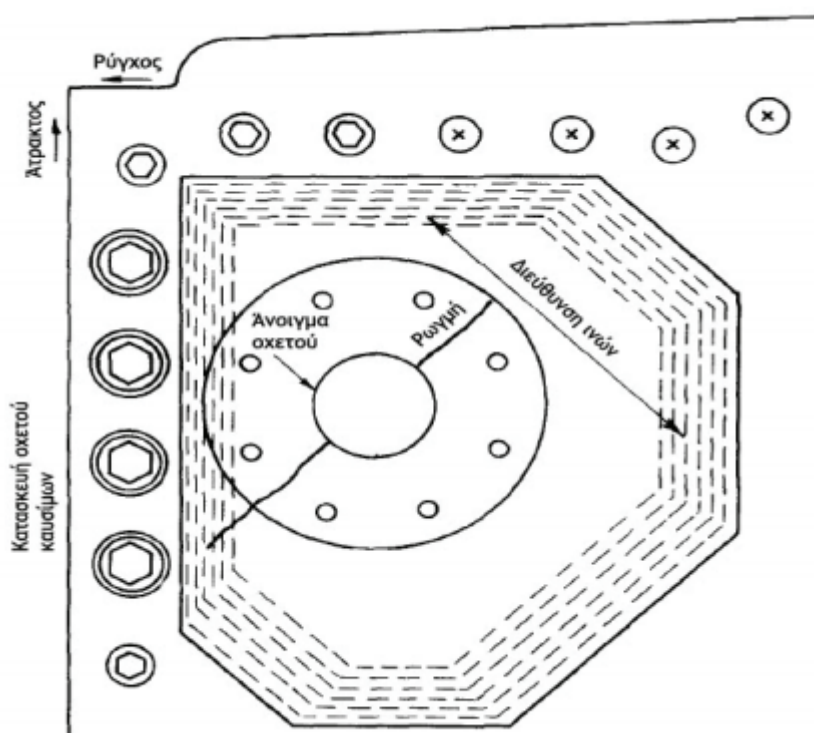
Η μέθοδος επιλέχθηκε καθώς εκτιμήθηκε ότι θα μπορούσε να προσφέρει τα εξής σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των συμβατικών:

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° 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 αποτελείται 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 4.2.



Σχήμα 4.2 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 ρωγματομένων 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 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 εμφάνισή 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 επιμηκυστόμετρα 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.

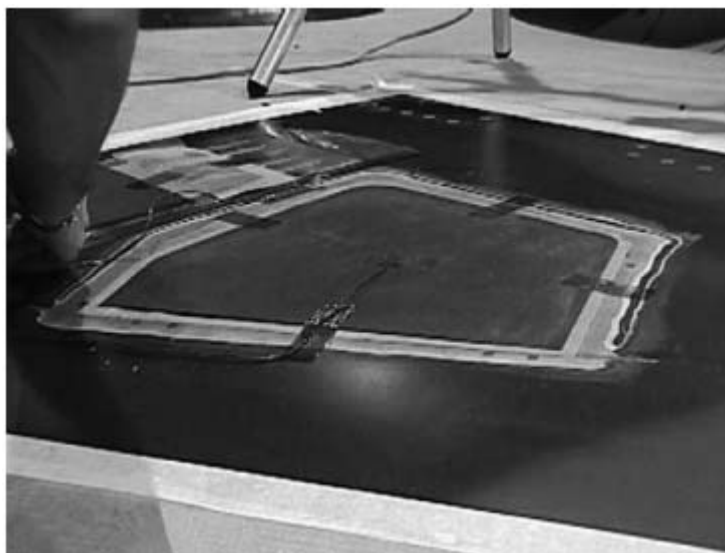
Η μελέτη κατέληξε στο ότι οι δυσμενέστερες περιοχές φόρτισης, όπου η ανάπτυξη ρωγμών λόγω κόπωσης είναι πιο πιθανό να εμφανιστεί, βρίσκονται σε τμήματα των πτερύγων και του ουραίου κάθετου σταθερού. Εκεί αναπτύσσονται έντονες διατμητικές τάσεις, καμπτικές και στρεπτικές ροπές που οφείλονται σε δυνάμεις 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 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 επιμηκυστόμετρο στα πλαίσια του OLM.

Από μελέτη των μετρήσεων έγινε φανερό ότι η κύρια αιτία της κόπωσης στην περιοχή ήταν η υποβολή της σε ισχυρά και υψίσυχνα δυναμικά φορτία.

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 εταιρίαέκρινε 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 4.3 είναι ορατή η διάταξη των επιθεμάτων και ο τρόπος εφαρμογής τους.



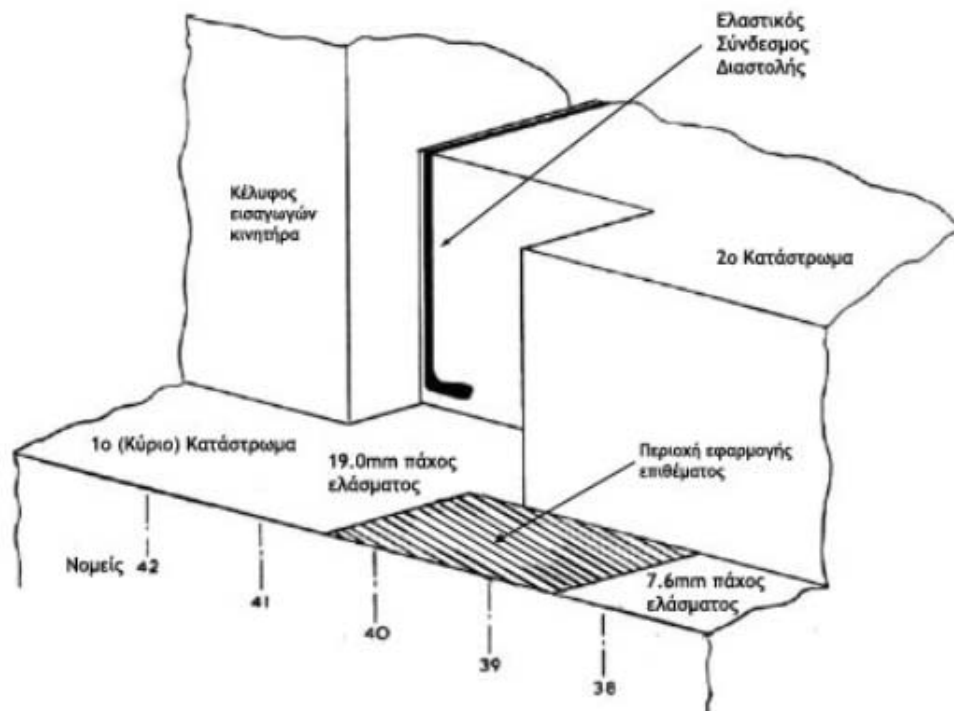
Σχήμα 4.3 Εφαρμογή των επιθεμάτων επί της πτέρυγας

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.

4.3 Εφαρμογές στη Ναυτιλία

Η πρώτη καταγεγραμμένη εφαρμογή της μεθόδου στη ναυτιλία εντοπίζεται το 1982 σε πλοία του πολεμικού ναυτικού της Μεγάλης Βρετανίας (Royal Navy, RN), φρεγάτες τύπου 21, κλάσης Amazon. Το μήκος του τύπου φτάνει τα 117 μέτρα (LOA) και το μέγιστο εκτόπισμα τους 3,360 τόνους.

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. 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 4.4). 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 4.4 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 4.4. 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.

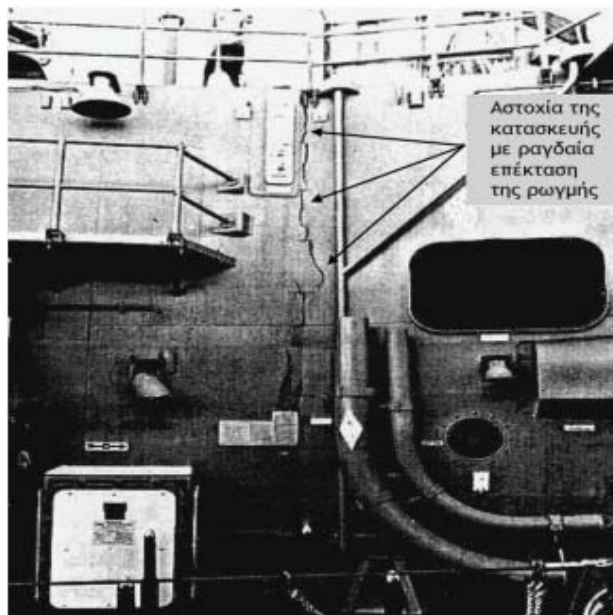
Στις αρχές της δεκαετίας του 1990 όλα τα πλοία της κλάσης παροπλίστηκαν σταδιακά και το 1993 πωλήθηκαν στο πολεμικό ναυτικό του Πακιστάν. Μέχρι τη στιγμή της πώλησης δεν είχε παρατηρηθεί ανάπτυξη νέων ρωγμών ή επέκταση των ήδη υπάρχοντων στις περιοχές όπου εφαρμόστηκαν τα επιθέματα σύνθετου υλικού σε 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 λόγω εφαρμογή της μεθόδου που συναντάται στη βιβλιογραφία 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. Τα πλοία διαθέτουν χαλύβδινη γάστρα και υπερκατασκευή από κράμα αλουμινίου.

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 4.5, 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 4.5 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 διαμήκεις 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 επιλέχθηκαν 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 οC, 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 4.6.



Σχήμα 4.6 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 επιμηκυνσιόμετρων 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 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 χαλύβδινου ελάσματος ναυπηγικής κατασκευής. Τα πλοία FPSO είναι ουσιαστικά πλατφόρμες εξόρυξης και επεξεργασίας πετρελαίου οι οποίες διαθέτουν επιπλέον μεγάλες δεξαμενές όπου αποθηκεύεται το πετρέλαιο, 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.

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.

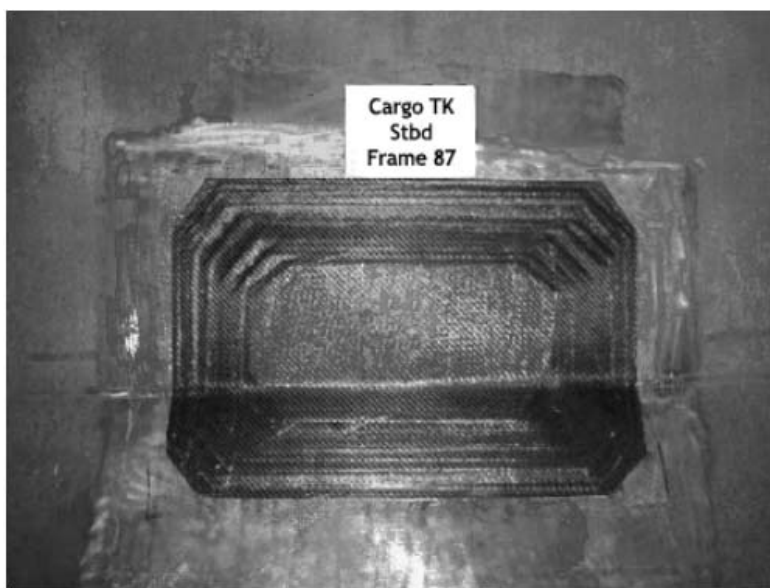
Το 2002 εντοπίστηκαν τρεις ρωγμές μήκους 60 χιλιοστών στη χαλύβδινη φρακτή που χωρίζει μία δεξαμενή πετρελαίου από μία δεξαμενή έρματος σε πλοίο FPSO εγκατεστημένο επί Νορβηγικού κοιτάσματος πετρελαίου. Το πλοίο εξαρτάται από την κατάλληλη και συνεχή διανομή θαλάσσιου έρματος ώστε να κατανέμεται ομαλά 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 οC, 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 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 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 ακυροβολημένο επί της θέσης λειτουργίας του στη Βόρεια Θάλασσα. Η τελική μορφή ενός από τα επιθέματα που εφαρμόστηκαν φαίνεται στο Σχήμα 4.7. 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 4.7 Αποψη της ολοκληρωμένης επισκευής.

4.4 Κλείσιμο

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 μου, 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.

5 Μοντελοποίηση της μεθόδου με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (FEM)

5.1 Εισαγωγή

Η αναλυτική λύση των εξισώσεων με τις οποίες περιγράφονται τα διάφορα μηχανικά προβλήματα είναι δυνατή μόνο σε ειδικές περιπτώσεις, όπου οι καταπονήσεις και τα γεωμετρικά σχήματα είναι πάρα πολύ απλά. Η ανάγκη να λυθούν και πιο σύνθετα προβλήματα οδήγησε στην ανάπτυξη διάφορων προσεγγιστικών μεθόδων. Μία τέτοια μέθοδος είναι και η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Αυτή η μέθοδος είναι μεν προσεγγιστική, αλλά μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα και έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα προβλήματα.

Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή σχεδιάζεται μία δομή και αφού εισαχθούν όλες οι απαιτούμενες παράμετροι, όπως γεωμετρικά χαρακτηριστικά, ιδιότητες των υλικών, συνοριακές συνθήκες και φορτία, κατακερματίζεται σε πολλά μικρά τμήματα τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με εξισώσεις συνέχειας. Με την επίλυση των εξισώσεων αυτών είναι δυνατή η εύρεση οποιουδήποτε μεγέθους, σε οποιοδήποτε σημείο του μοντέλου, οποιαδήποτε χρονική στιγμή (αν το πρόβλημα περιέχει δυναμικά χαρακτηριστικά). Υπάρχει πληθώρα προγραμματιστικών πακέτων πεπερασμένων στοιχείων (ABAQUS, ANSYS, ALGOR, κ.ά.), τα οποία δίνουν πολλές επιλογές στο χρήστη ως προς τον τρόπο μοντελοποίησης, την επιλογή των στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν στο μοντέλο, τη μέθοδο επίλυσης, κτλ.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιείται ευρέως για την μοντελοποίηση κατασκευών και επισκευών από σύνθετα υλικά. Τα αποτελέσματα της συγκρινόμενα με τα πειραματικά είναι ιδιαίτερα ικανοποιητικά. Απαιτείται όμως μεγάλη προσοχή κατά την εφαρμογή της, καθώς μία μικρή παράβλεψη ή ένα μικρό σφάλμα μπορεί να οδηγήσουν σε σημαντικές αποκλίσεις. Συνεπώς, είναι αναγκαίο η προσομοίωση της πραγματικής κατασκευής να είναι όσο το δυνατόν πιστότερη και οι αναπόφευκτες παραδοχές όσο το δυνατόν πιο σωστές.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία επιλέχτηκε το πρόγραμμα ABAQUS/CAE 6.10-1, καθώς προσφέρει υψηλές δυνατότητες προσομοίωσης.

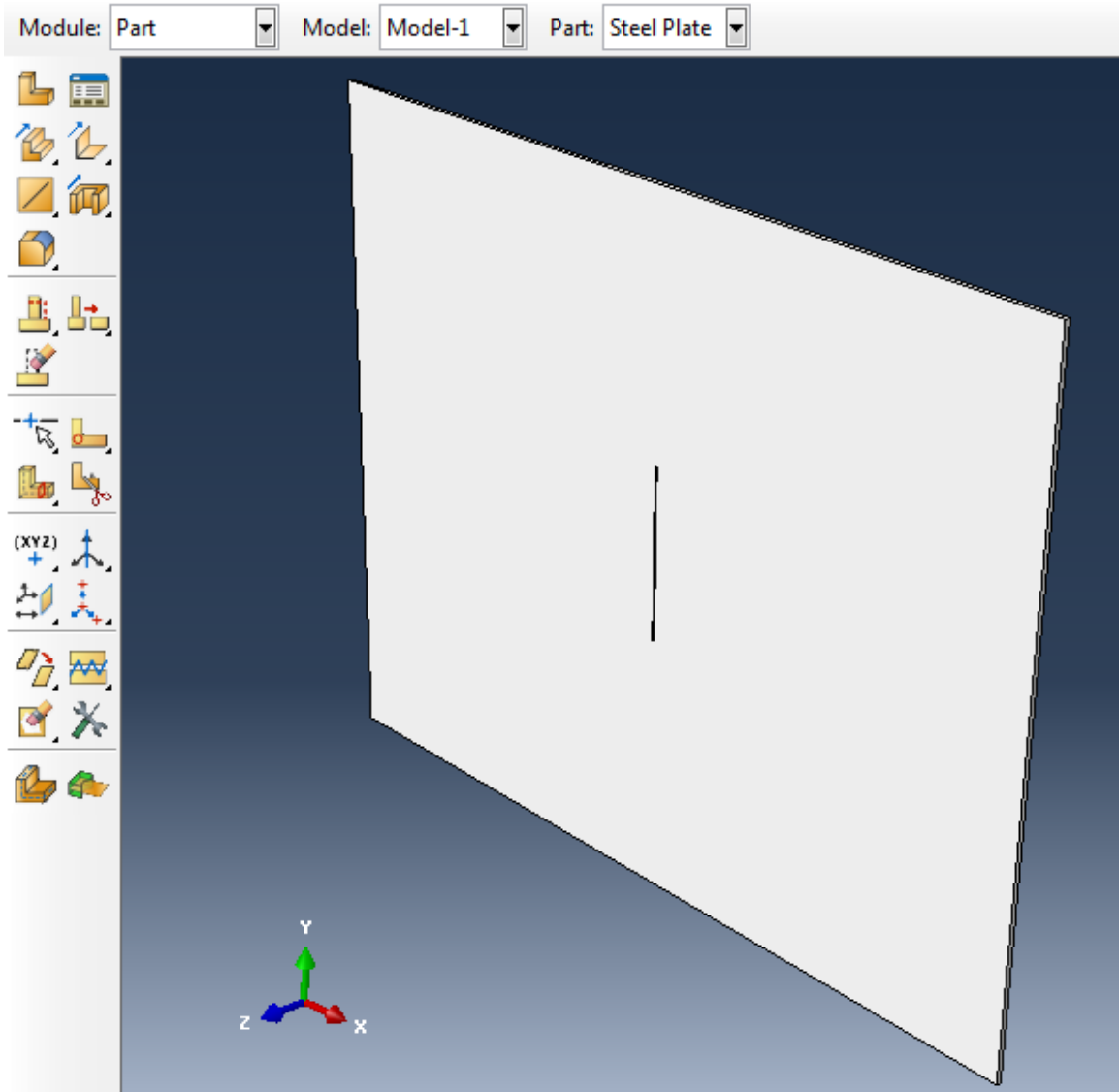
Αρχικά έγινε ανάλυση της χαλύβδινης ρηγματωμένης πλάκας υπό διαφορετικά εφελκυστικά φορτία. Έπειτα προστέθηκε το επιθέμα, έγιναν ξανά δοκιμές υπό τα ίδια φορτία με σκοπό να συγκριθούν όχι μόνο οι διαφορές στις τάσεις και τις παραμορφώσεις σε διαφορετικές φορτίσεις αλλά κυρίως στα δύο διαφορετικά μοντέλα και να αναδειχθεί έτσι η αποτελεσματικότητα του επιθέματος.

Οι μονάδες που χρησιμοποιήθηκαν είναι χιλιοστά (mm) για το μήκος, MPa για τις τάσεις κ.ο.κ.

5.2 Χαλύβδινη πλάκα υπό εφελκυσμό

5.2.1 Μοντελοποίηση

Η πλάκα που επιλέχθηκε για την ανάλυση έχει διαστάσεις 500mm (κατά τον X άξονα), 400 mm (κατά τον Y άξονα) και πάχος 3 mm (κατά τον Z άξονα) και φέρει κεντρική διαμπερή ρωγμή πλάτους 100 mm. Σχεδιάστηκε στην κατηγορία *Part* του προγράμματος ως στερεό *Solid Extrude* όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.1.



Σχήμα 5.1 Γεωμετρία Πλάκας

Το υλικό που επιλέχθηκε για την πλάκα, μέσω ενός *Section* (Τμήματος) *Solid/Homogenous*, είναι χάλυβας S355. Οπότε στην επιλογή *Material* εισήχθησαν οι παρακάτω παράμετροι

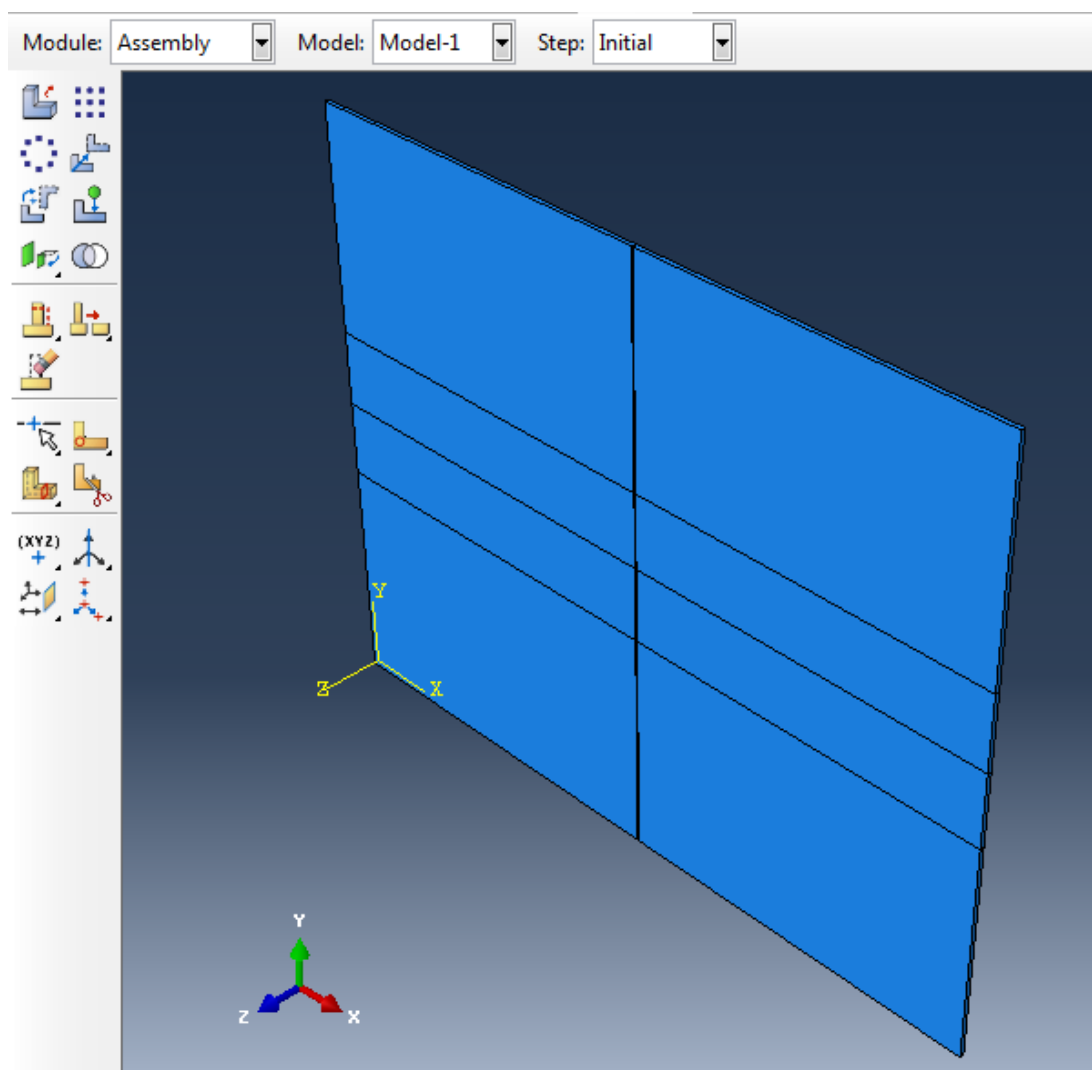
5.1 Ιδιότητες Χάλυβα S355

Material Behavior

Elastic/ Isotropic	<i>Young's Modulus</i> 210000	<i>Poisson's Ratio</i> 0.3
Plastic	<i>Yield Stress</i> 355	<i>Plastic Strain</i> 0*

*ώστε να χρησιμοποιηθεί διγραμμικό διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων

Έπειτα στην επιλογή *Assembly*, αφού δημιουργήθηκε το αντίστοιχο *Instance*, χώρισα την πλάκα σε μέρη (*Partitions*) ώστε να γίνει ευκολότερα η κατανομή των στοιχείων από το πρόγραμμα και κατ' επέκταση η ανάλυση τους (Σχήμα 5.2)



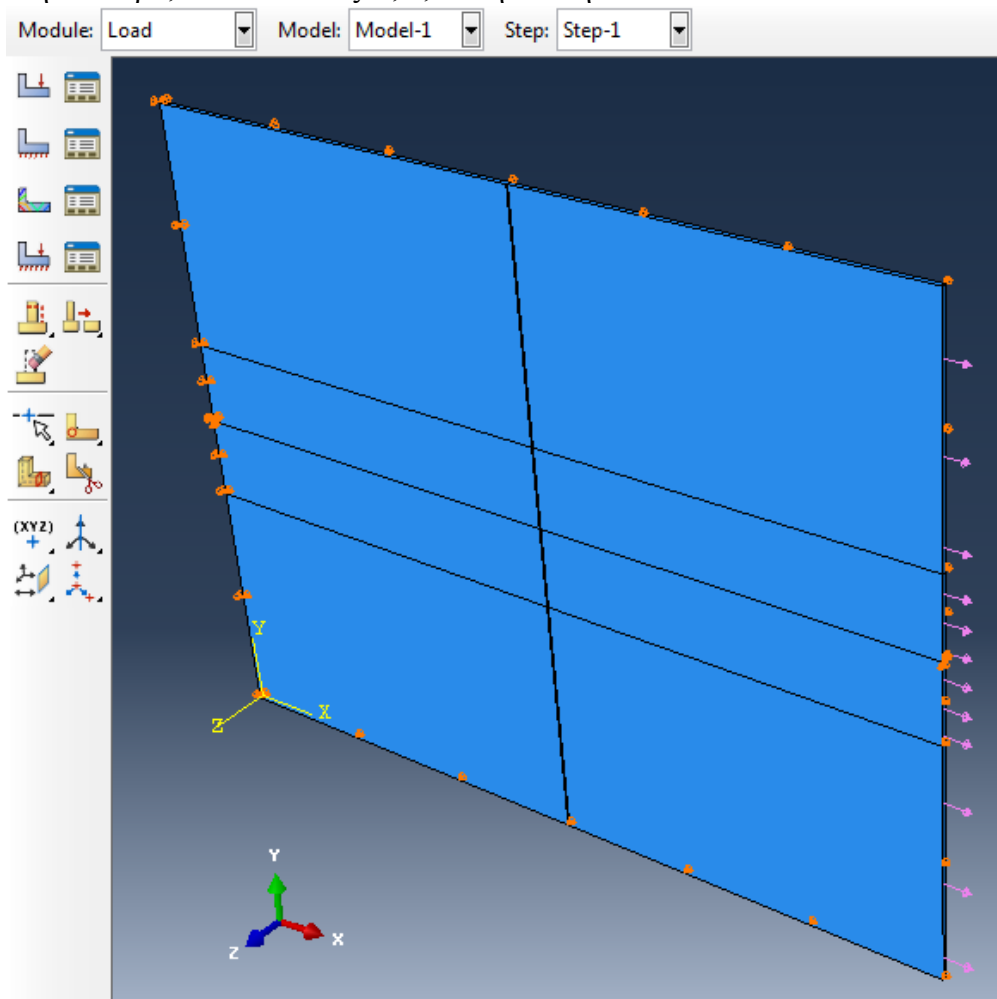
Σχήμα 5.2 Χωρίσματα Πλάκας

Στη συνέχεια ακολούθησε η εντολή *Step* (βήμα) η οποία αφορά την ανάλυση που θα πραγματοποιηθεί στο μοντέλο.

Το Abaqus από μόνο του δημιουργεί ένα ειδικό αρχικό βήμα *Initial Step* το οποίο δεν επιδέχεται καμία αλλαγή ή επεξεργασία και διαγραφή. Το αρχικό αυτό βήμα επιτρέπει να ορισθούν συνοριακές συνθήκες και τριβές, οι οποίες επιβάλλονται με το που αρχίζει η ανάλυση. Τα επόμενα βήματα ανάλυσης, όμως, τα ορίζει ο χρήστης του προγράμματος και εξυπηρετούν τη δουλειά που θέλει να κάνει.

Στο μοντέλο που προσομοιώθηκε χρησιμοποιήθηκε ένα βήμα διαδικασίας γενικού στατικού τύπου. Σ' αυτό το βήμα επιλέχθηκε να γίνει μη γραμμική ανάλυση και επίσης η επιβολή του φορτίου κατά την ανάλυση να γίνει σταδιακά με προσαυξήσεις (*Increments*). Πιο συγκεκριμένα στην αυτόματη προσαύξηση (*Automatic Incrementation*) έδωσα την αρχική, την ελάχιστη και τη μέγιστη τιμή του μεγέθους του βήματος προσαύξησης, 0.1, 1E-012 και 1 αντίστοιχα.

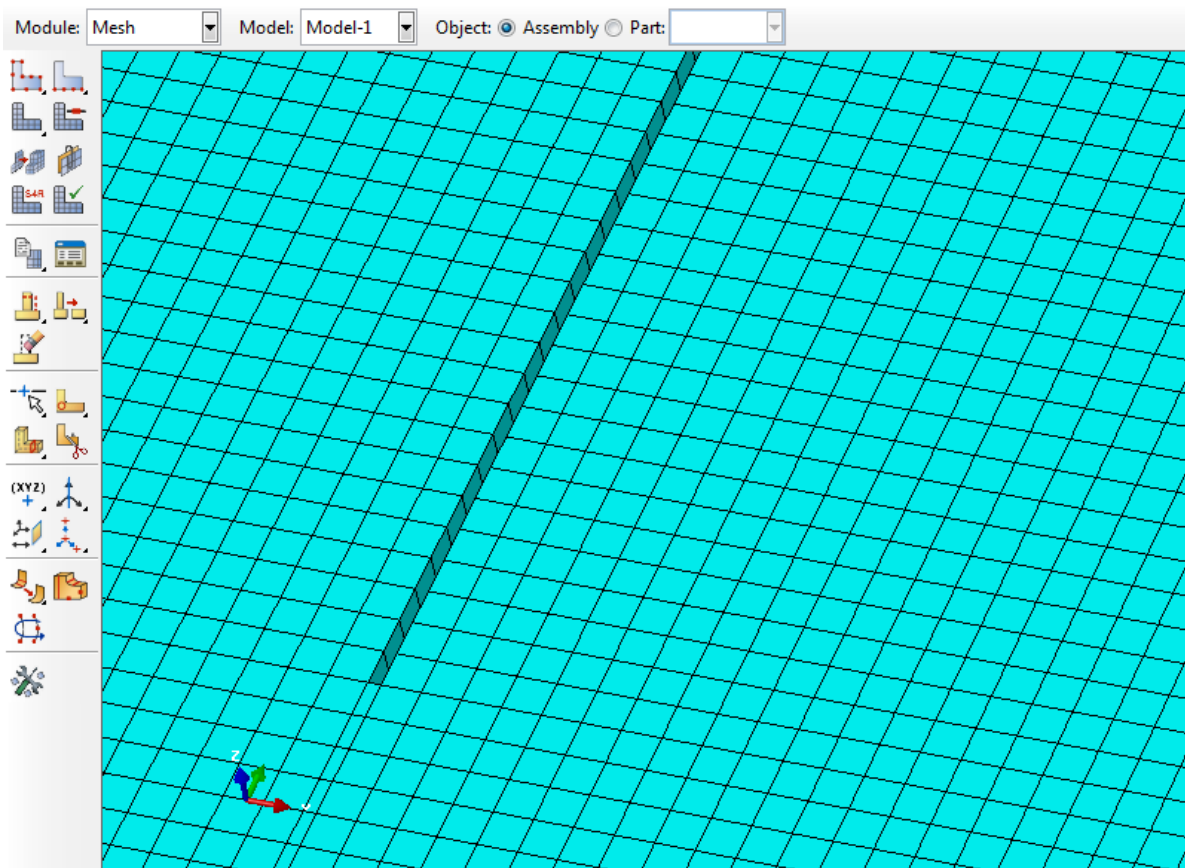
Προχωρώντας στην κατηγορία *Load*, εισήγαγα το φορτίο και τις συνοριακές συνθήκες. Το φορτίο (*Surface Traction*) εφελκύει τη μία πλευρά της πλάκας (αυτής κατά τον άξονα *Y*) και έχει μέτρο 170 MPa στην πρώτη δοκιμή και 270 MPa στη δεύτερη. Σε αυτή την πλευρά, καθώς και στις δύο παράλληλες με τον *X* άξονα πλευρές, απαγορεύτηκαν οι μετατοπίσεις κατά τον άξονα *Z*. Στην απέναντι από αυτή πλευρά κλειδώθηκαν οι μετατοπίσεις κατά τους άξονες *X* και *Z*. Επίσης, σημειακές στηρίξεις επιβλήθηκαν στα μέσα των δύο παράλληλων στον *Y* πλευρών, μηδενίζοντας τις μετατοπίσεις κατά τους άξονες *Y* και *Z* στην «φορτισμένη» πλευρά, και κατά τους *X,Y,Z* στην άλλη.



Σχήμα 5.3 Φορτίο και Συνοριακές Συνθήκες

Μόλις ολοκληρώθηκε η τοποθέτηση των φορτίων και των συνοριακών συνθηκών σειρά είχε η δημιουργία του πλέγματος. Το πλέγμα ουσιαστικά είναι μια ρύθμιση των πεπερασμένων στοιχείων. Είναι μια δραστηριότητα διακριτοποίησης της γεωμετρίας σε μία πεπερασμένη αναπαράσταση στοιχείων.

Πρώτα από την εντολή *Seed* (που στην ουσία είναι η “σπορά” των δεικτών, που τοποθετούνται κατά μήκος των άκρων των χωρίς πλέγμα μερών, για να υποδειχθεί η επιθυμητή πυκνότητα του πλέγματος) όρισα το μέσο μέγεθος στοιχείων για όλη την πλάκα στα 3 (mm) και επέλεξα να γίνει και έλεγχος καμπυλότητας οπότε και προχώρησα στη διακριτοποίηση του μοντέλου με την επιλογή *Mesh*. Στο Σχήμα 5.4 φαίνεται μία λεπτομέρεια της ρωγμής της πλάκας από πεπερασμένα πλέον στοιχεία, και για την ακρίβεια C3D8R (εξάεδρα γραμμικά στοιχεία μειωμένης ολοκλήρωσης).

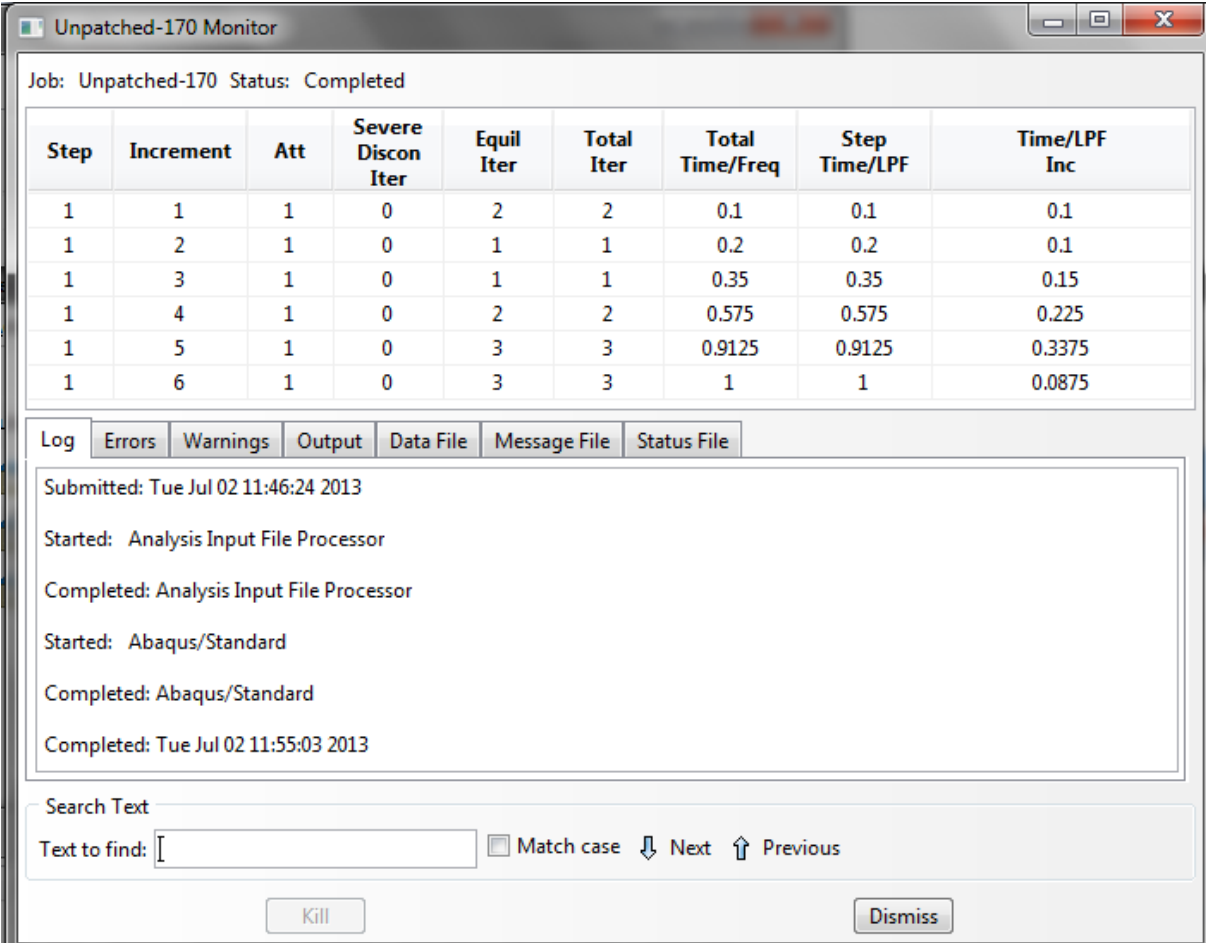


Σχήμα 5.4 Πεπερασμένα Στοιχεία Πλάκας

5.2.2 Ανάλυση

Μετά από την ολοκλήρωση του πλέγματος ακολούθησε η υποβολή της δουλειάς για να πραγματοποιηθεί η ανάλυση και να παραχθούν τα αποτελέσματα. Στην επιλογή *Job* δημιούργησα δύο ξεχωριστές εργασίες για τις δύο διαφορετικές φορτίσεις, καταχωρήθηκαν και το πρόγραμμα προχώρησε στην επίλυση του προβλήματος.

Στα Σχήματα 5.5 και 5.6 παρατίθενται τα παράθυρα με τις λεπτομέρειες της ανάλυσης και τις προσαυξήσεις.



The screenshot shows the 'Unpatched-170 Monitor' window. At the top, it displays 'Job: Unpatched-170 Status: Completed'. Below this is a table with the following data:

Step	Increment	Att	Severe Discon Iter	Equil Iter	Total Iter	Total Time/Freq	Step Time/LPF	Time/LPF Inc
1	1	1	0	2	2	0.1	0.1	0.1
1	2	1	0	1	1	0.2	0.2	0.1
1	3	1	0	1	1	0.35	0.35	0.15
1	4	1	0	2	2	0.575	0.575	0.225
1	5	1	0	3	3	0.9125	0.9125	0.3375
1	6	1	0	3	3	1	1	0.0875

Below the table is a log section with tabs for 'Log', 'Errors', 'Warnings', 'Output', 'Data File', 'Message File', and 'Status File'. The log content is as follows:

```
Submitted: Tue Jul 02 11:46:24 2013
Started: Analysis Input File Processor
Completed: Analysis Input File Processor
Started: Abaqus/Standard
Completed: Abaqus/Standard
Completed: Tue Jul 02 11:55:03 2013
```

At the bottom, there is a search section with a 'Search Text' label, a 'Text to find:' input field, a 'Match case' checkbox, and 'Next' and 'Previous' navigation buttons. There are also 'Kill' and 'Dismiss' buttons at the very bottom.

Σχήμα 5.5 Ανάλυση με 170 MPa

Unpatched-270 Monitor

Job: Unpatched-270 Status: Completed

Step	Increment	Att	Severe Discon Iter	Equil Iter	Total Iter	Total Time/Freq	Step Time/LPF	Time/LPF Inc
1	1	1	0	2	2	0.1	0.1	0.1
1	2	1	0	1	1	0.2	0.2	0.1
1	3	1	0	2	2	0.35	0.35	0.15
1	4	1	0	3	3	0.575	0.575	0.225
1	5	1	0	6	6	0.9125	0.9125	0.3375
1	6	1U	0	4	4	0.9125	0.9125	0.0875
1	6	2	0	5	5	0.934375	0.934375	0.021875
1	7	1	0	3	3	0.95625	0.95625	0.021875
1	8	1	0	4	4	0.978125	0.978125	0.021875
1	9	1U	0	4	4	0.978125	0.978125	0.021875
1	9	2	0	5	5	0.983594	0.983594	0.00546875
1	10	1	0	5	5	0.989062	0.989062	0.00546875
1	11	1	0	4	4	0.994531	0.994531	0.00546875
1	12	1	0	6	6	1	1	0.00546875

Log Errors ! Warnings Output Data File Message File Status File

Submitted: Fri Jun 28 17:05:49 2013
 Started: Analysis Input File Processor
 Completed: Analysis Input File Processor
 Started: Abaqus/Standard
 Completed: Abaqus/Standard
 Completed: Fri Jun 28 17:40:18 2013

Search Text
 Text to find: Match case

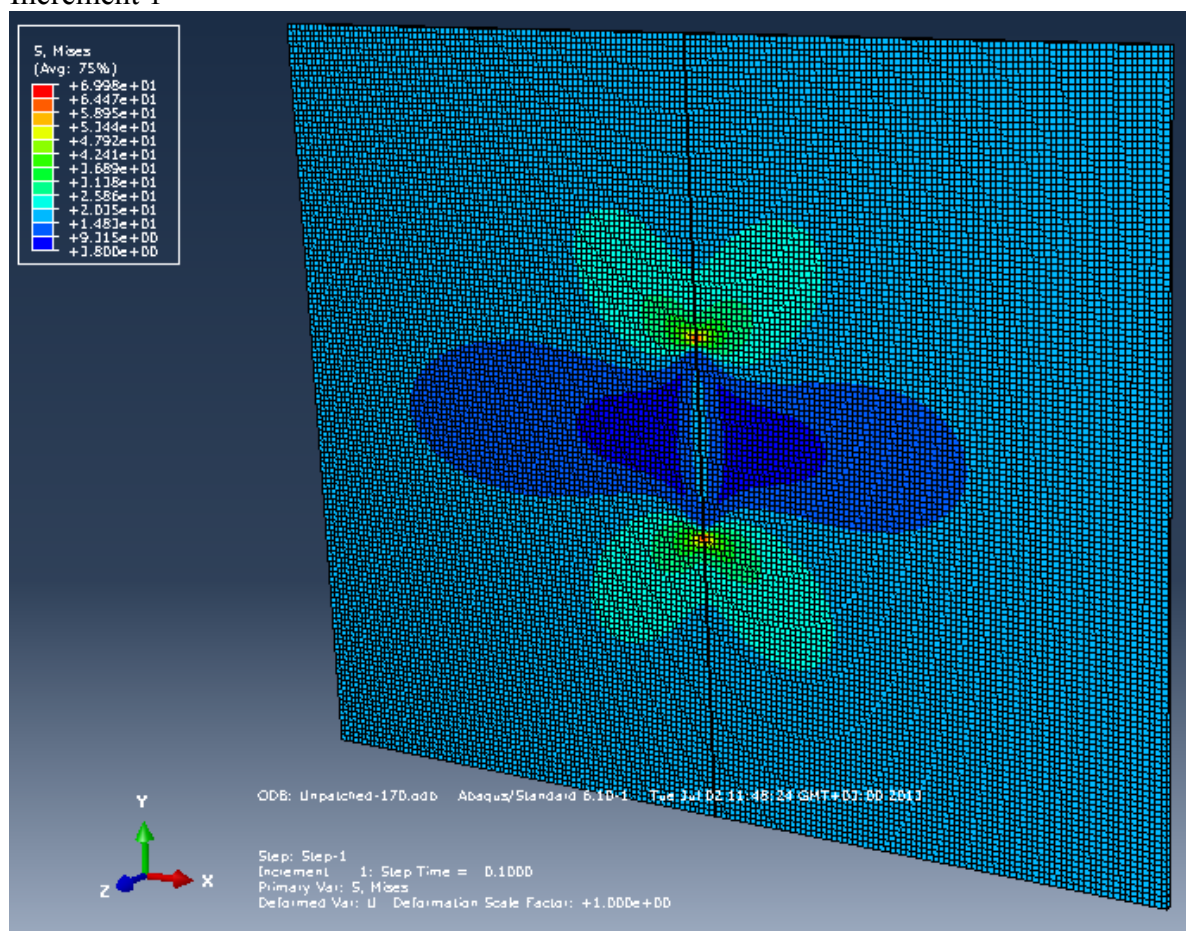
Σχήμα 5.6 Ανάλυση με 270 MPa

5.2.3 Παραμορφωμένη γεωμετρία μοντέλου

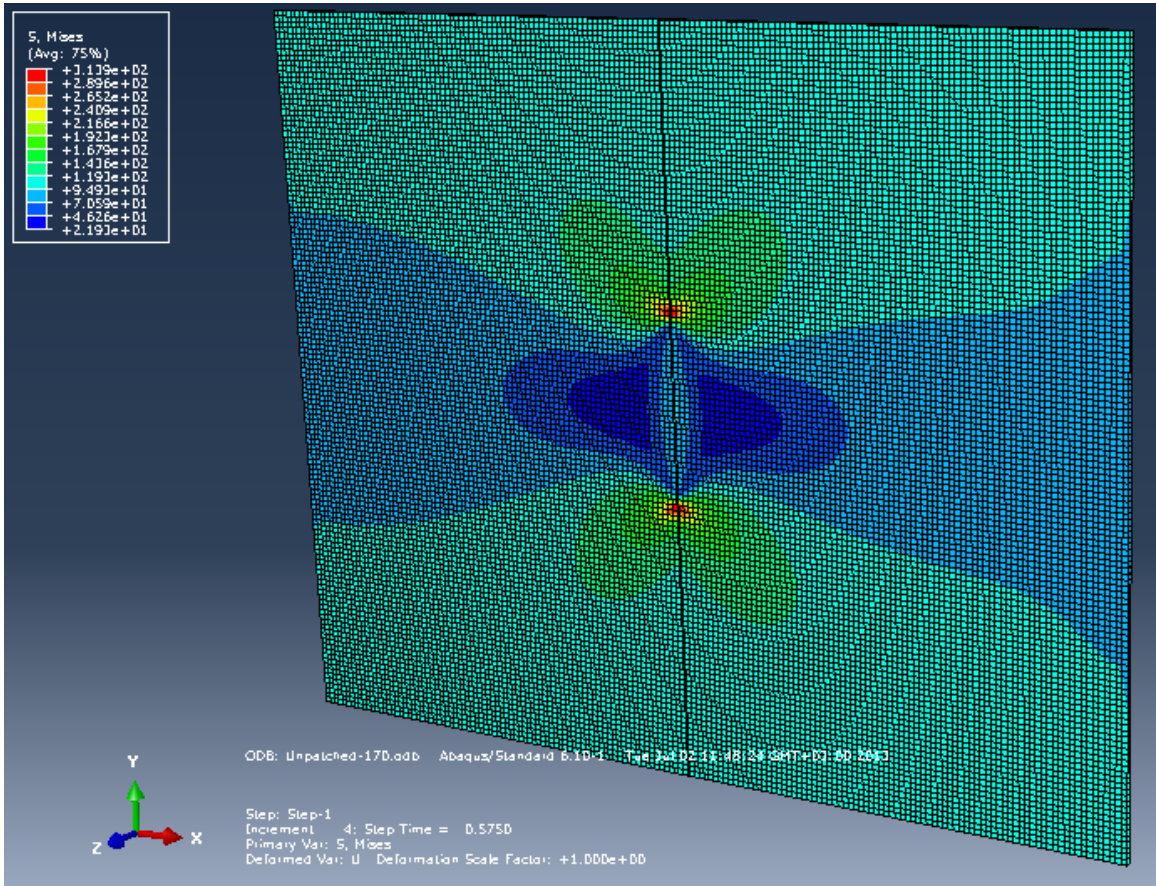
Κατά την ολοκλήρωση κάθε βήματος προσαύξησης μπορούμε να παρακολουθούμε την πορεία παραμόρφωσης και ανάπτυξης τάσεων στο μοντέλο. Εδώ θα παραθέσω τα αποτελέσματα αυτά από μερικές προσαυξήσεις της κάθε δουλειάς ώστε να παρατηρήσουμε και τη διαφορά ανάμεσα στις δύο δοκιμές αλλά κυρίως την εξέλιξη μέσα στην ίδια τη δουλειά, το πόσο «ανοίγει» η ρωγμή κλπ.

- 1^η Δοκιμή – 170MPa

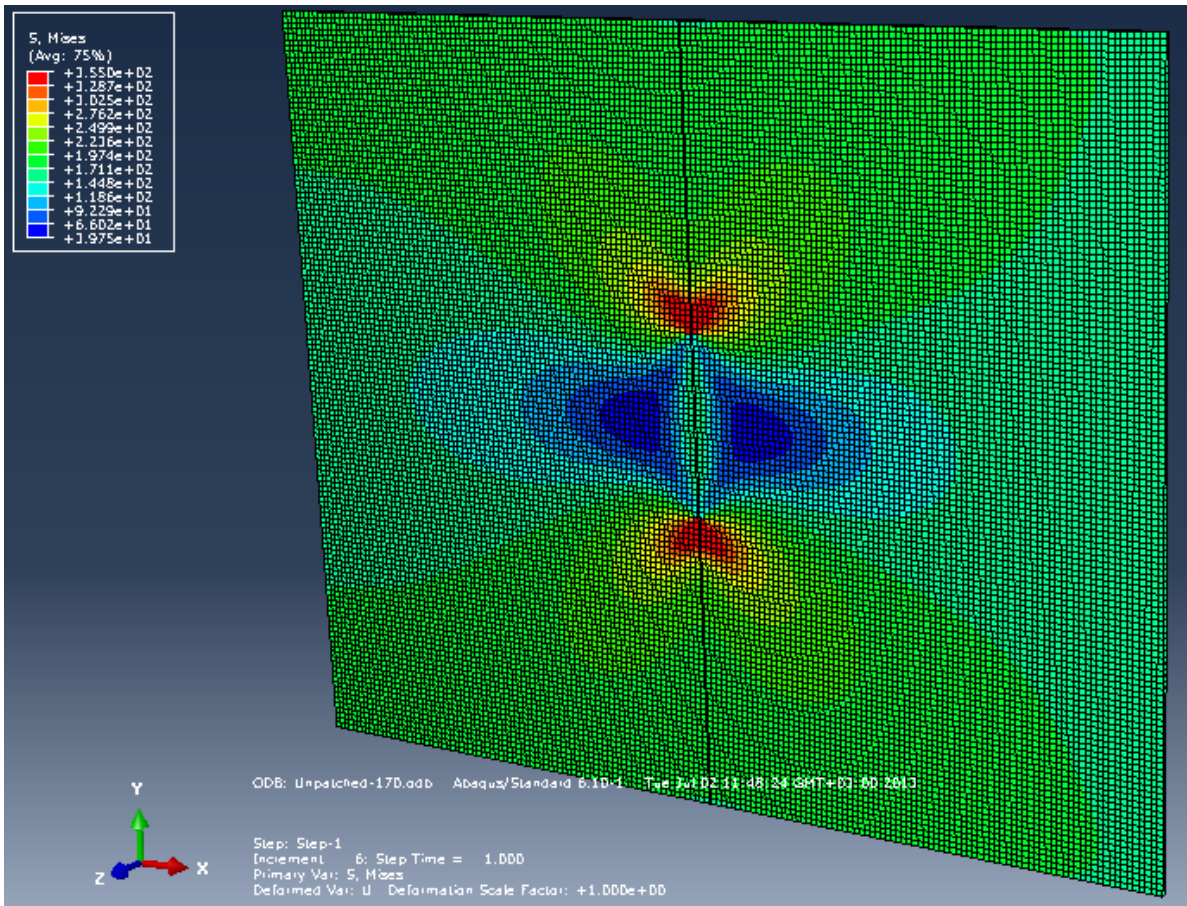
Increment 1



Increment 4

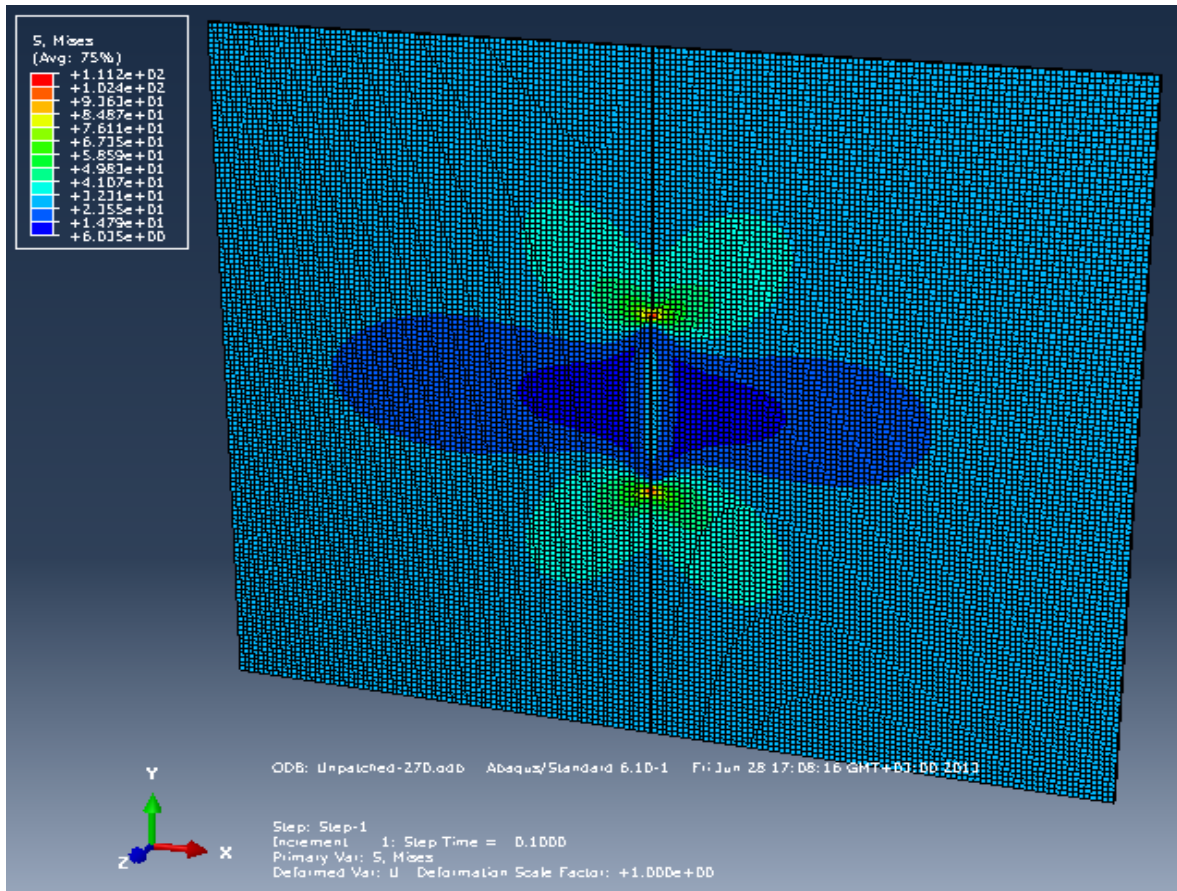


Increment 6

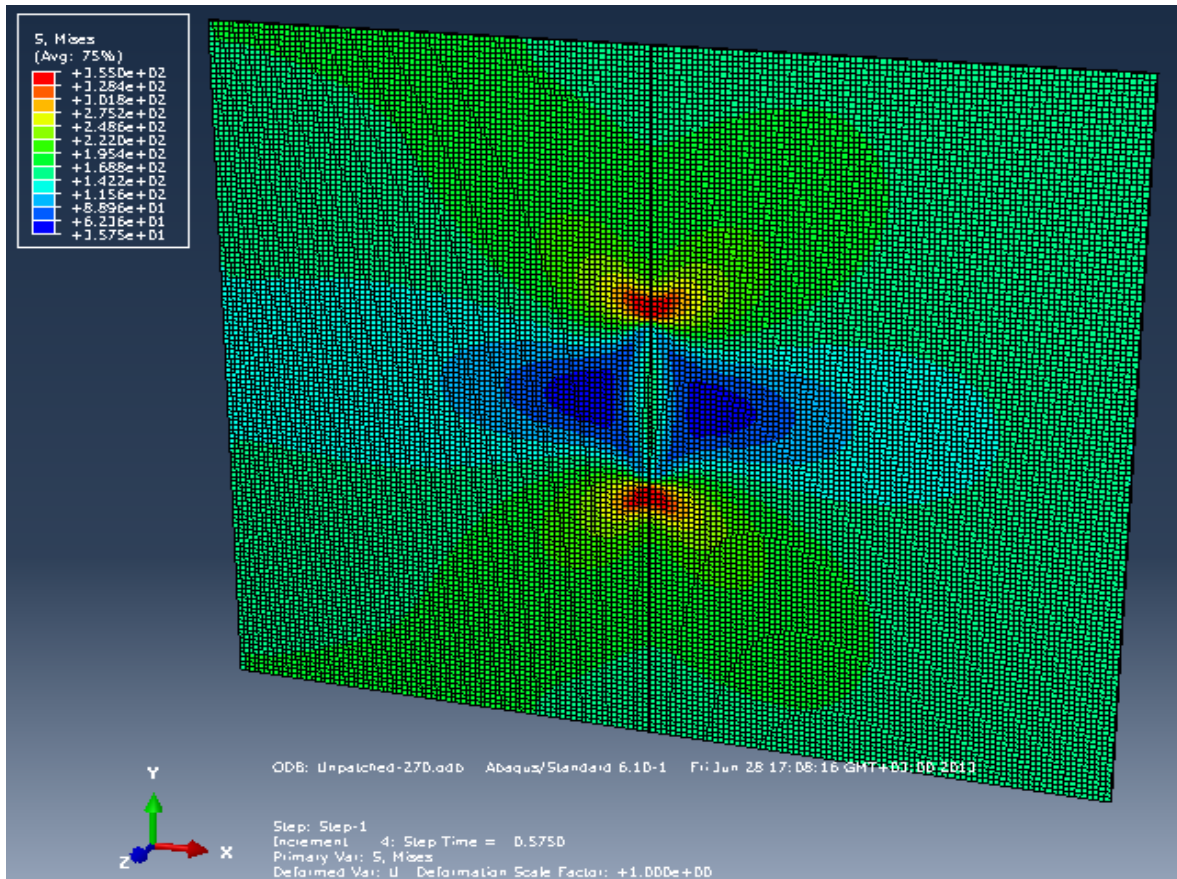


- 2^η Δοκιμή – 270MPa

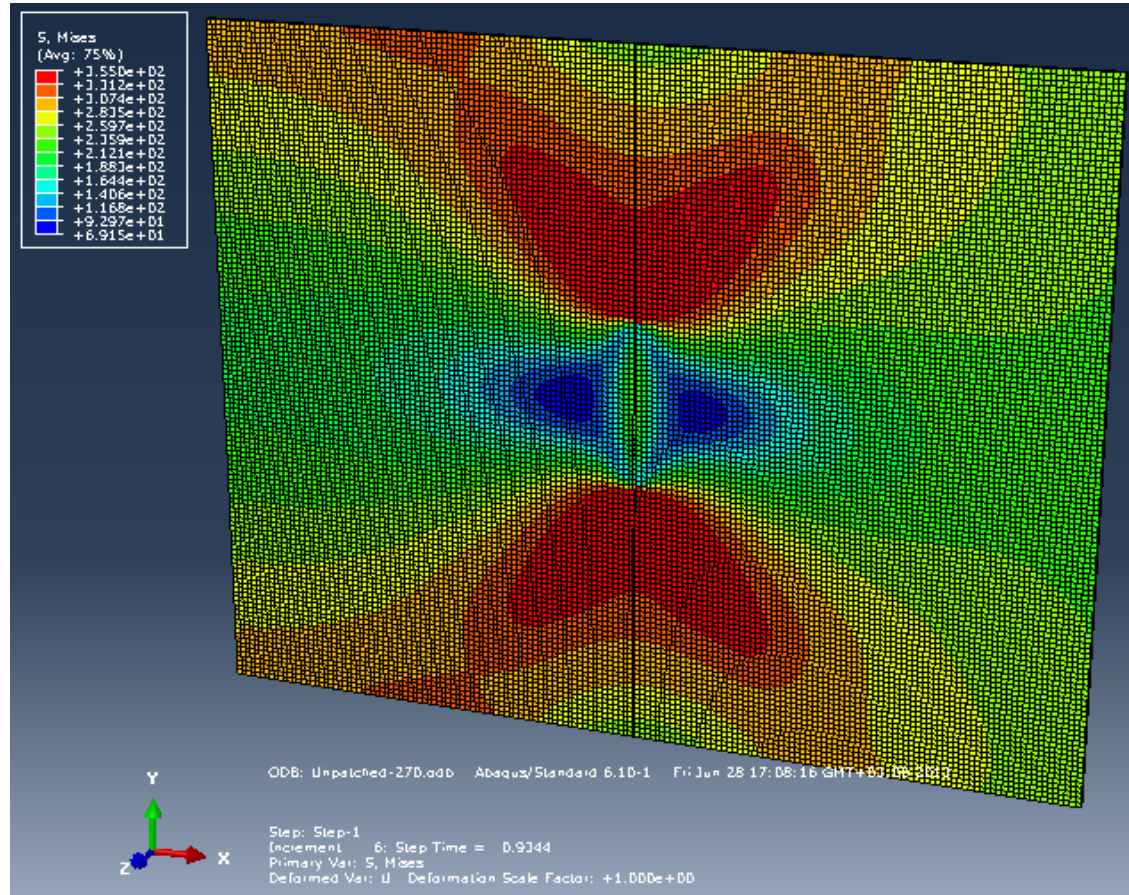
Increment 1



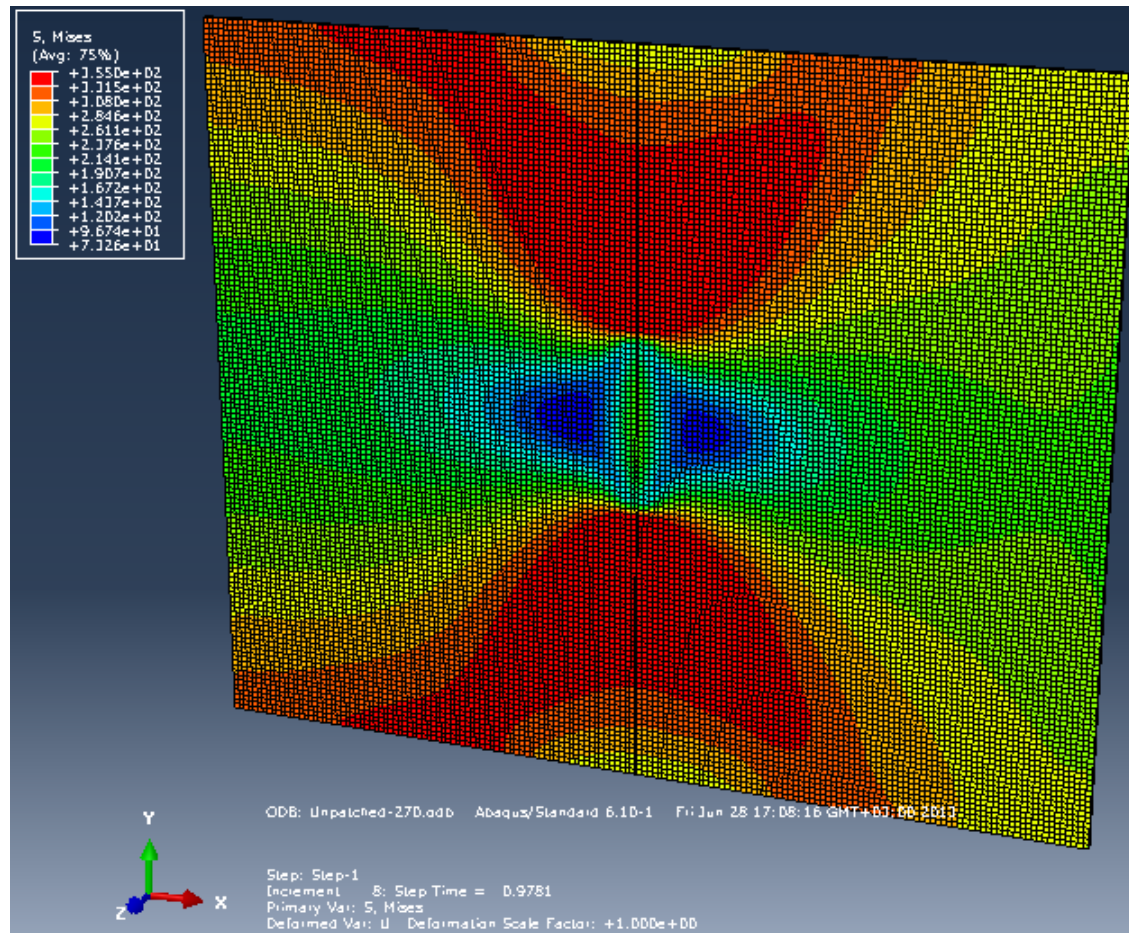
Increment 4



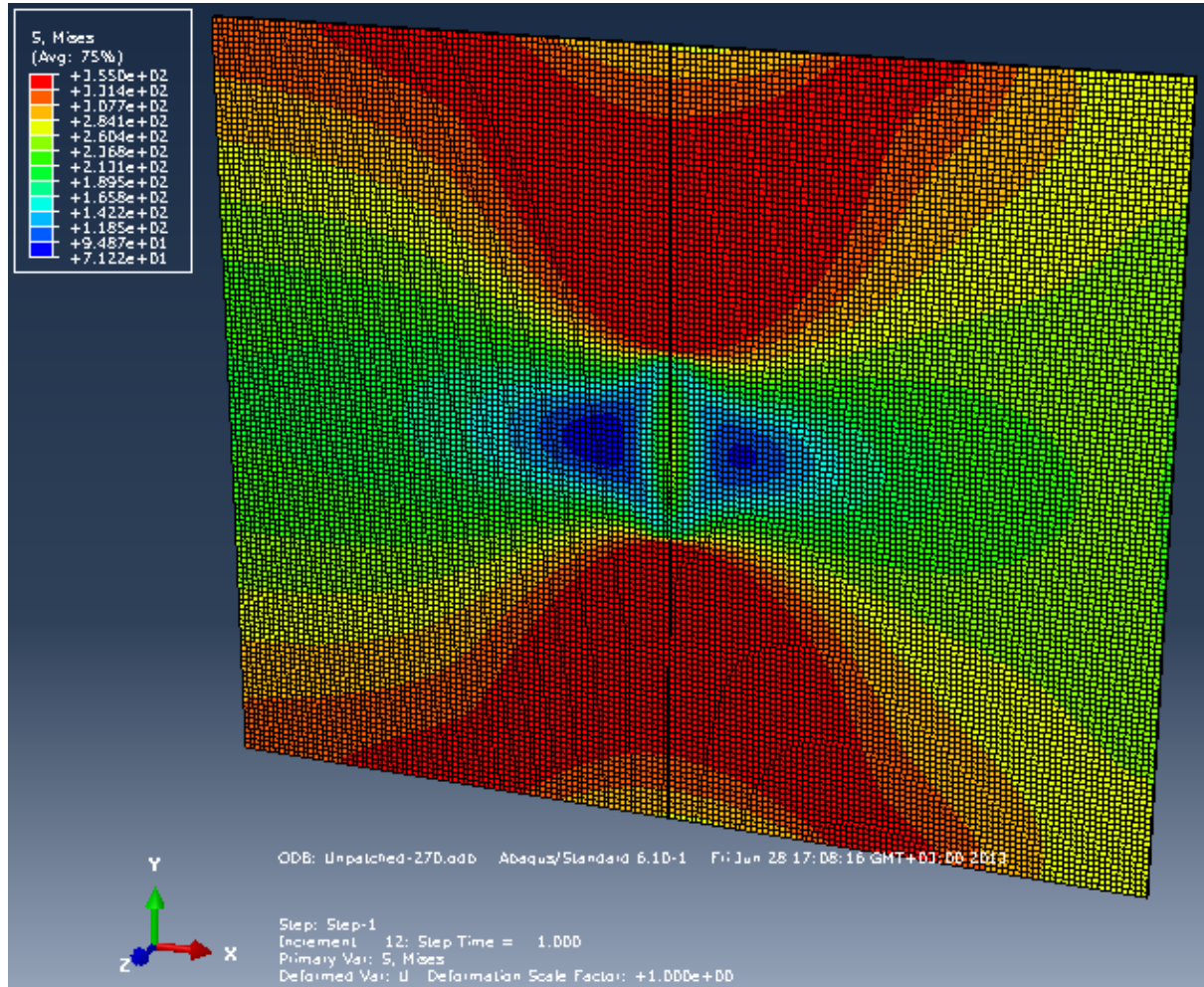
Increment 6



Increment 8



Increment 12

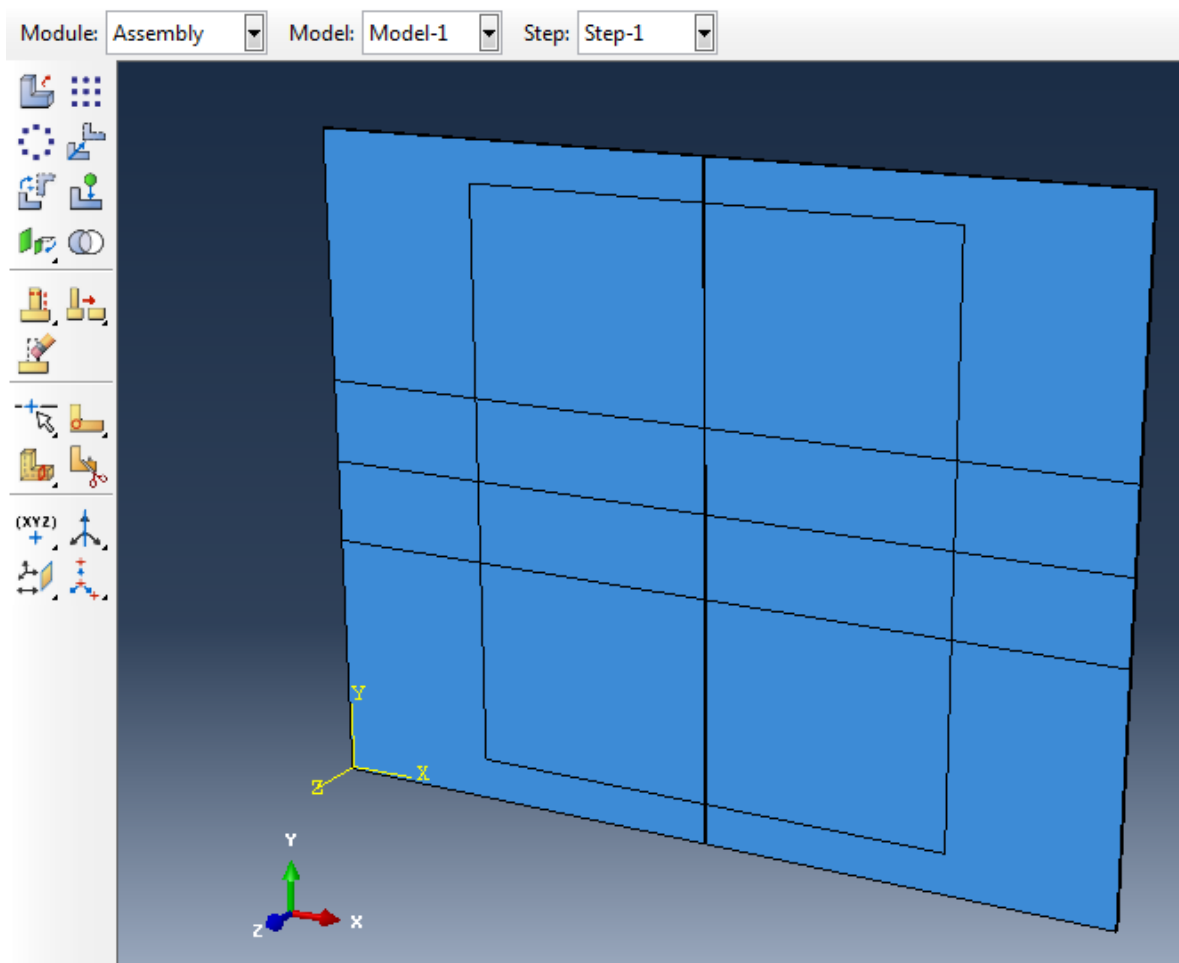


5.3 Χαλύβδινη πλάκα με επίθεμα σύνθετου υλικού υπό εφελκυσμό

5.3.1 Μοντελοποίηση

Αφού δημιουργήθηκε το μοντέλο της πλάκας, προχώρησα στη μοντελοποίηση του επιθέματος στο ίδιο αρχείο.

Πάλι από την κατηγορία *Part* επιλέχθηκε ένα κέλυφος (*Shell Planar*) για το επίθεμα με διαστάσεις 300 mm (κατά τον X άξονα) και 350 mm (κατά τον Y άξονα) και τοποθετήθηκε πάνω και στο κέντρο του χαλύβδινου ελάσματος όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.7.



Σχήμα 5.7

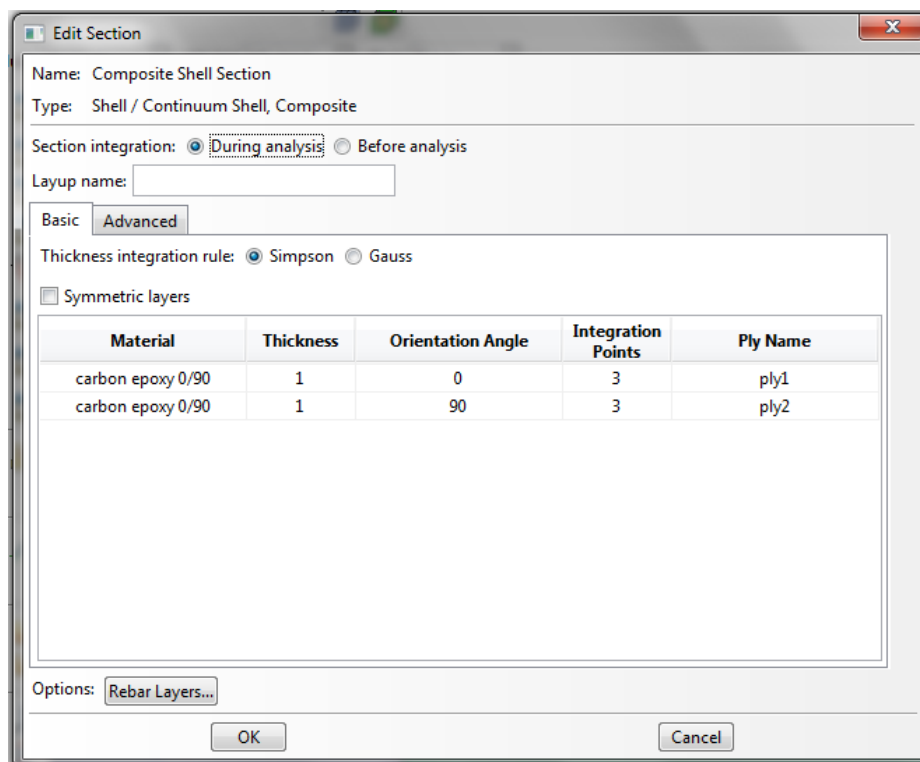
Για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων του πήρα δύο περιπτώσεις.

1. Στην πρώτη περίπτωση να αποτελείται από μία στρώση ανθρακονημάτων σε εποξική μήτρα, Carbon/Epoxy T300/5208 με προσανατολισμό ινών [0], δηλαδή κατά τον άξονα Y, και ιδιότητες αυτές που φαίνονται στον Πίνακα 5.2.. Δημιουργήθηκε γι' αυτό το σκοπό ένα νέο *Section* τύπου ομογενούς κελύφους (*Shell/ Homogenous*) πάχους 2 mm με το υλικό αυτό.

5.2 T300/5208 CFRP

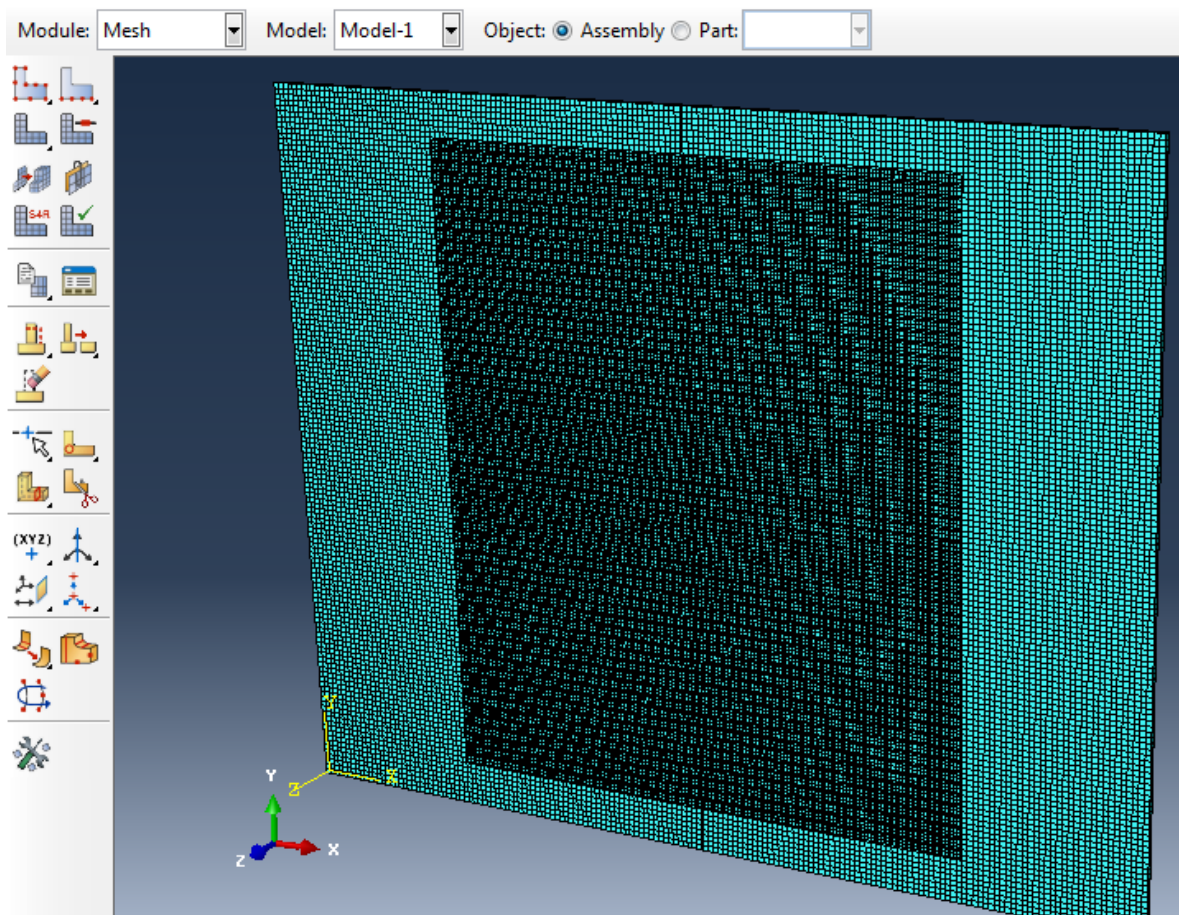
Elastic/ Lamina parameters		Fail Stress parameters	
E_{11}	181000	X_t	1500
E_{22}	10300	X_c	-1500
G_{12}	7170	Y_t	40
G_{23}	3585	Y_c	-246
ν_{12}	0.28	S	68

2. Στην δεύτερη περίπτωση να αποτελείται από δύο στρώσεις T300/5208, πάχους 1mm η κάθε μία και κώδικα αλληλουχίας [0/90]. Σε αυτή την περίπτωση τα μέτρα ελαστικότητας είναι E_x και E_y είναι ίσα με το μέσο όρο των E_{11} και E_{22} δηλαδή $E_x = E_y = 95650\text{MPa}$, ο λόγος Poisson βρίσκεται ίσος με 0.03 και τα μέτρα διατμήσεως όπως στην προηγούμενη περίπτωση. Για αυτή την περίπτωση δημιουργείται ένα *Shell Section* τύπου *Composite* (σύνθετο) όπως στο Σχήμα 5.8.



Σχήμα 5.8

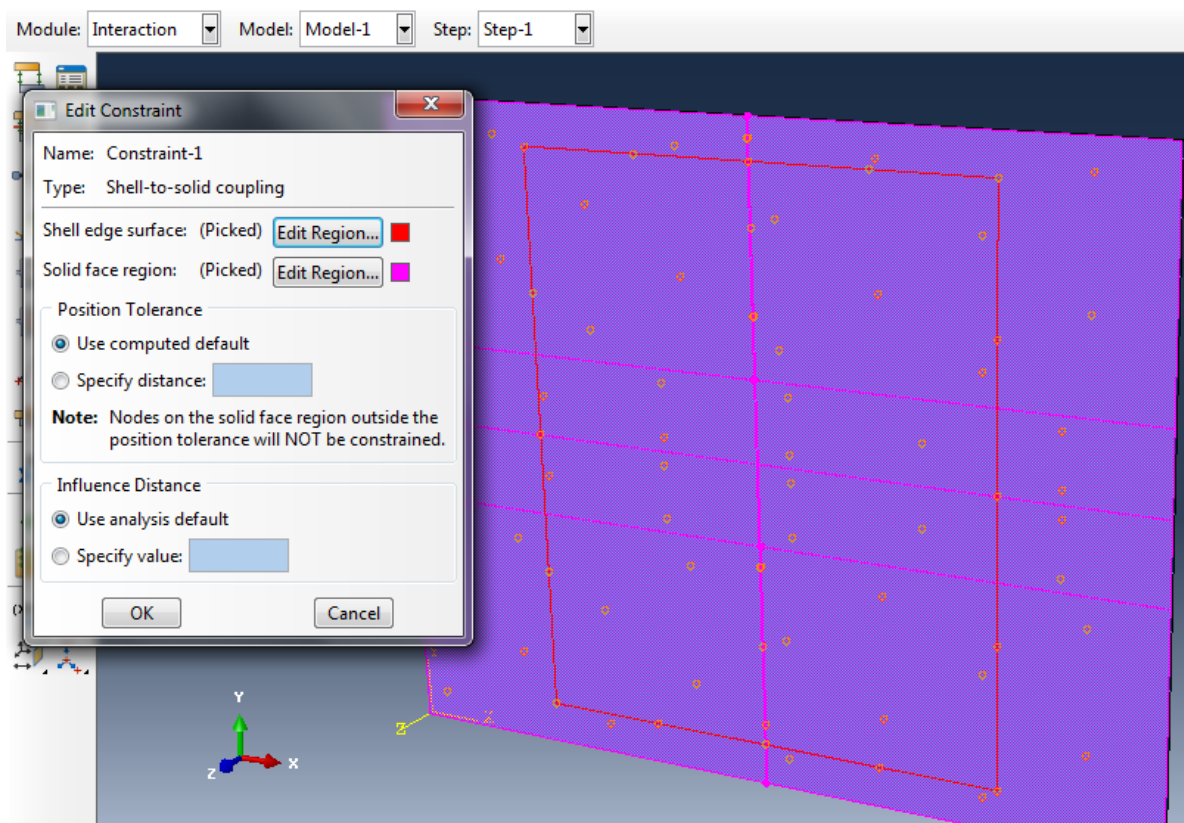
Δημιουργώντας το πλέγμα και για αυτό το τμήμα με γραμμικά τετραγωνικά στοιχεία S4R (ειδικό για κελύφη) και με μέσο μέγεθος στοιχείου 2 mm, το μόνο που έμενε ήταν να δημιουργηθεί κάποιου είδους επαφή μεταξύ των δύο μελών, της πλάκας και του επιθέματος.



Σχήμα 5.9 Διακριτοποιημένο μοντέλο πλάκας-επιθέματος

Για την ένωση είτε των πλεγμάτων (*mesh*) είτε της γεωμετρίας δύο ξεχωριστών τμημάτων με σκοπό είτε την οποιοδήποτε είδους επαφή τους είτε απλά την «συνεργασία» τους, το Abaqus/CAE δίνει πάρα πολλές δυνατότητες και επιλογές.

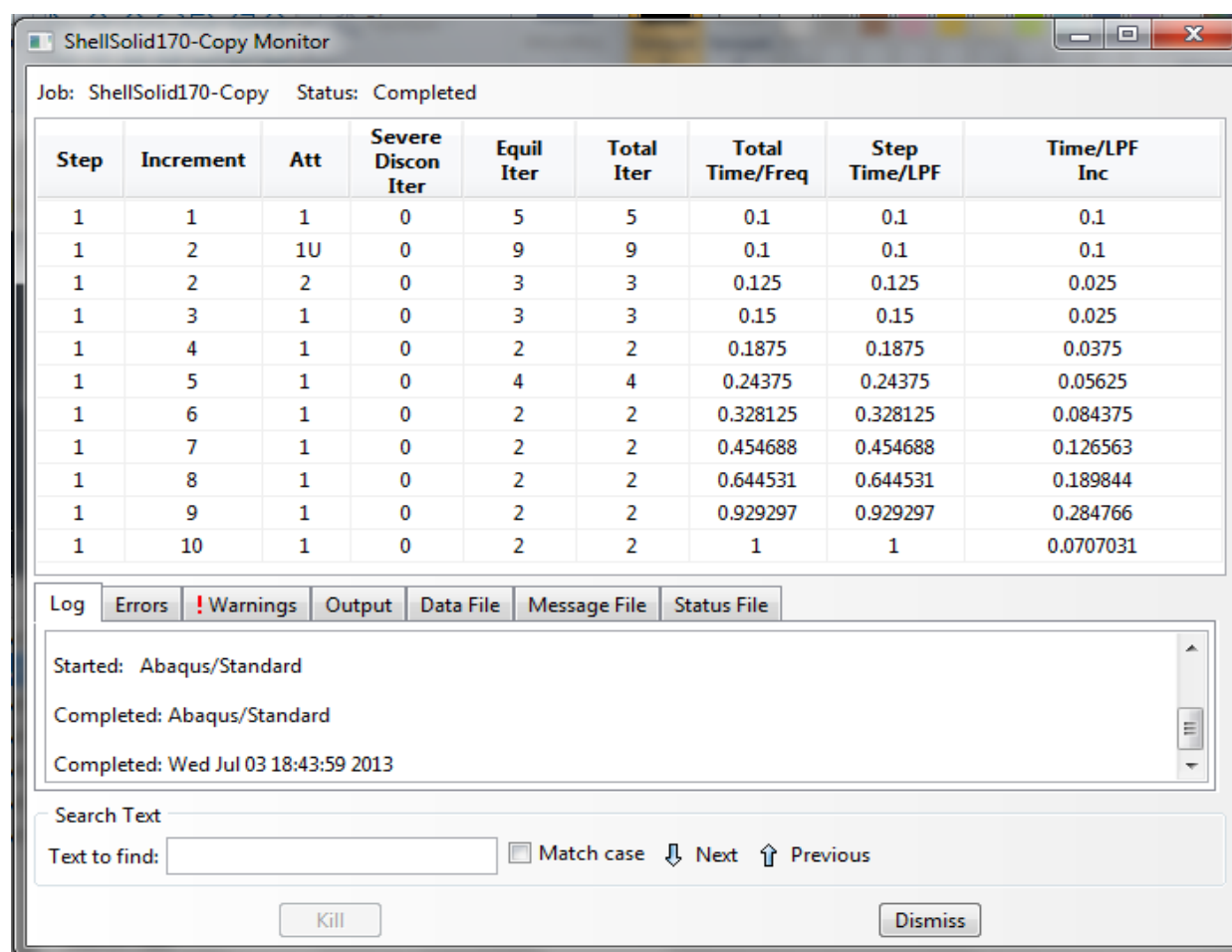
Στο συγκεκριμένο μοντέλο αφού δοκίμασα τους περισσότερους δυνατούς τρόπους κατέληξα στο ότι ήταν αρκετά πιο εύκολο και κυρίως αποτελεσματικό να δημιουργήσω απλά μία αλληλεπίδραση. Στην καρτέλα αυτή (*Interaction*) υπάρχει η επιλογή δημιουργίας κάποιου περιορισμού (*Constraint*). Επέλεξα τον περιορισμό *Shell-to-Solid coupling* καθώς εξειδικεύεται και στη δικιά μας περίπτωση τμημάτων (Σχήμα 5.10).



Σχήμα 5.10 Shell-to-solid coupling

5.3.2 Ανάλυση

Έτσι, με τα ίδια χαρακτηριστικά Βήματος (*Step*) προχώρησα στην ανάλυση του νέου μοντέλου και πάλι για τις δύο φορτίσεις των 170 MPa και 270 MPa (και για τις δύο περιπτώσεις προσανατολισμού των ινών) η οποία ολοκληρώθηκε επιτυχώς (Σχήμα 5.11, 5.12, 5.13).



Job: ShellSolid170-Copy Status: Completed

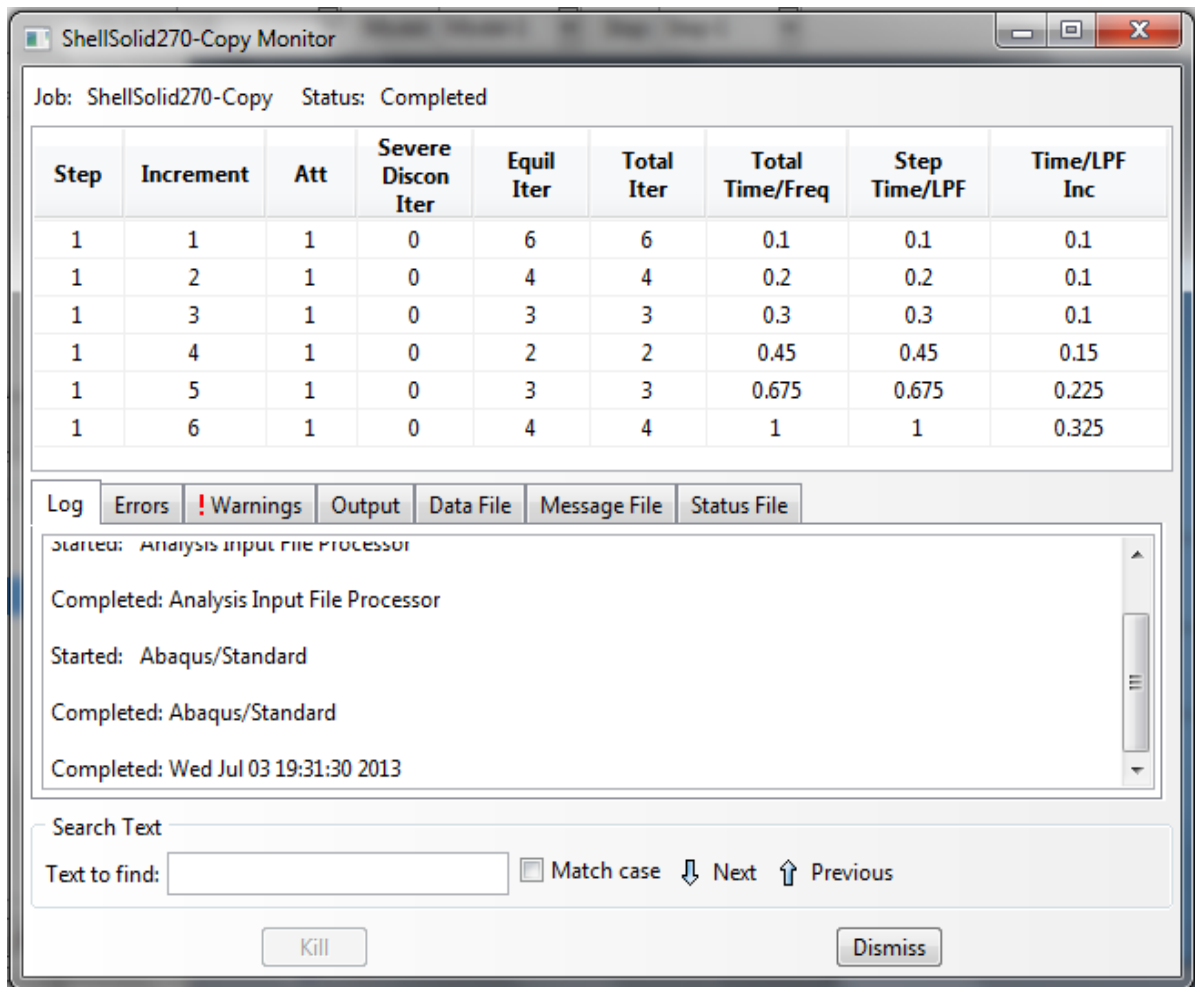
Step	Increment	Att	Severe Discon Iter	Equil Iter	Total Iter	Total Time/Freq	Step Time/LPF	Time/LPF Inc
1	1	1	0	5	5	0.1	0.1	0.1
1	2	1U	0	9	9	0.1	0.1	0.1
1	2	2	0	3	3	0.125	0.125	0.025
1	3	1	0	3	3	0.15	0.15	0.025
1	4	1	0	2	2	0.1875	0.1875	0.0375
1	5	1	0	4	4	0.24375	0.24375	0.05625
1	6	1	0	2	2	0.328125	0.328125	0.084375
1	7	1	0	2	2	0.454688	0.454688	0.126563
1	8	1	0	2	2	0.644531	0.644531	0.189844
1	9	1	0	2	2	0.929297	0.929297	0.284766
1	10	1	0	2	2	1	1	0.0707031

Log Errors ! Warnings Output Data File Message File Status File

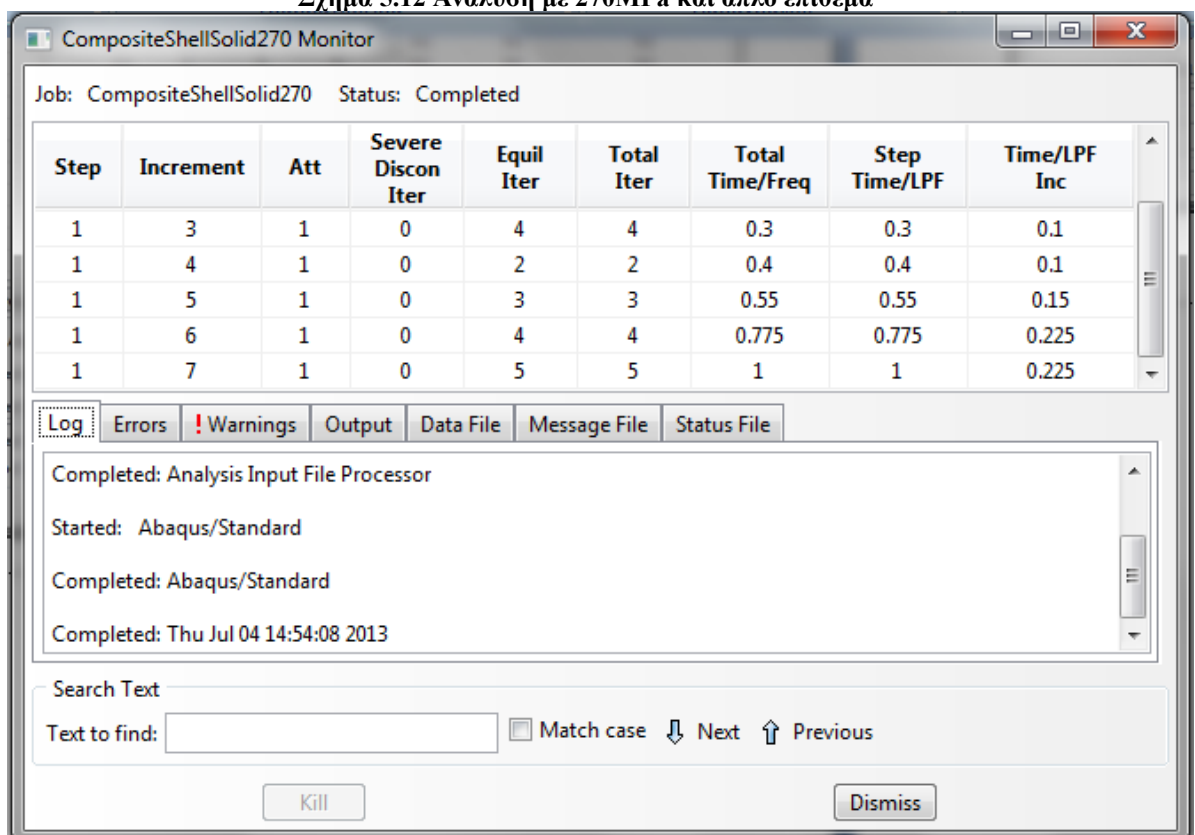
Started: Abaqus/Standard
Completed: Abaqus/Standard
Completed: Wed Jul 03 18:43:59 2013

Search Text
Text to find: Match case

Σχήμα 5.11 Ανάλυση με 170 MPa και απλό επίθεμα



Σχήμα 5.12 Ανάλυση με 270MPa και απλό επίθεμα



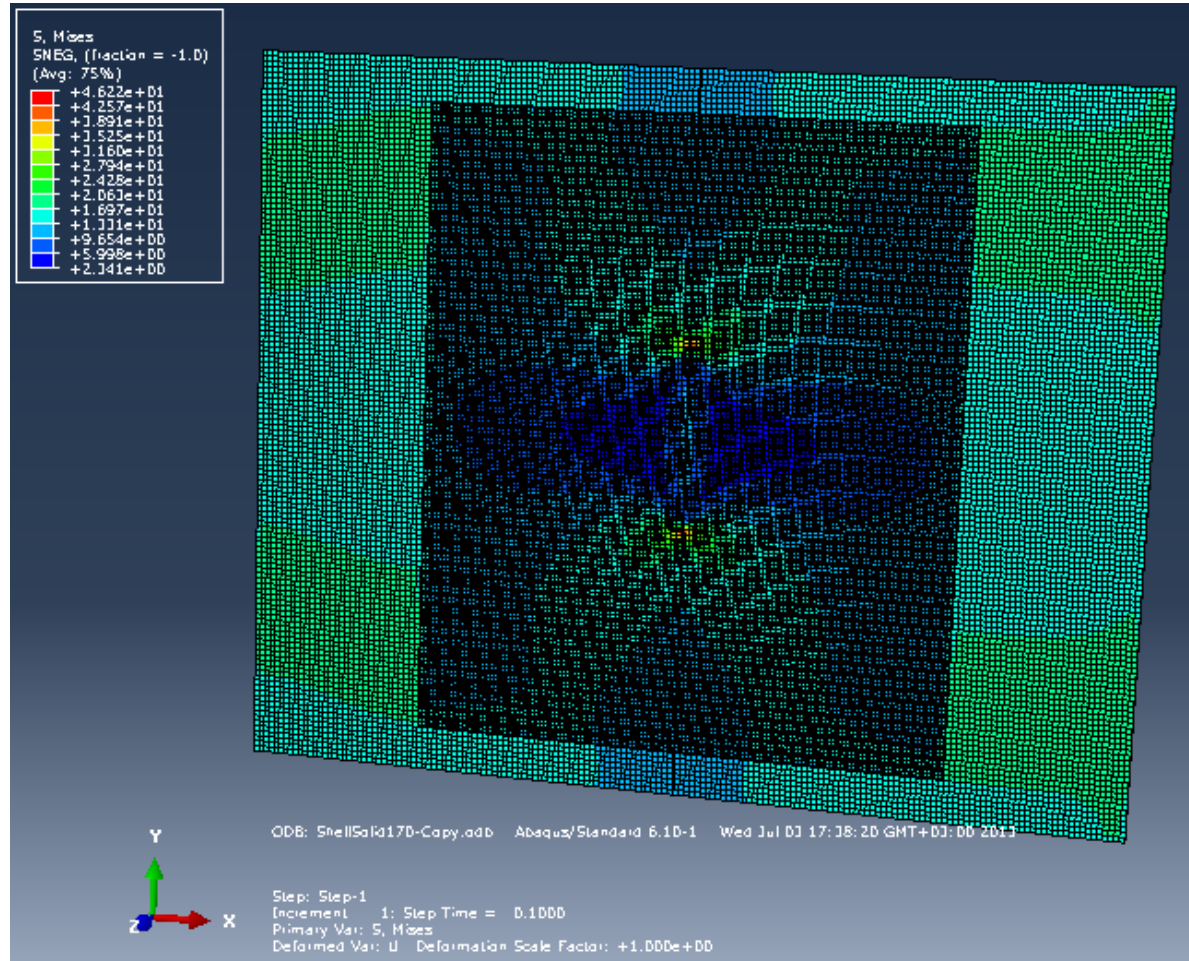
Σχήμα 5.13 Ανάλυση με 270MPa και σύνθετο επίθεμα

5.3.3 Παραμορφωμένη γεωμετρία μοντέλου

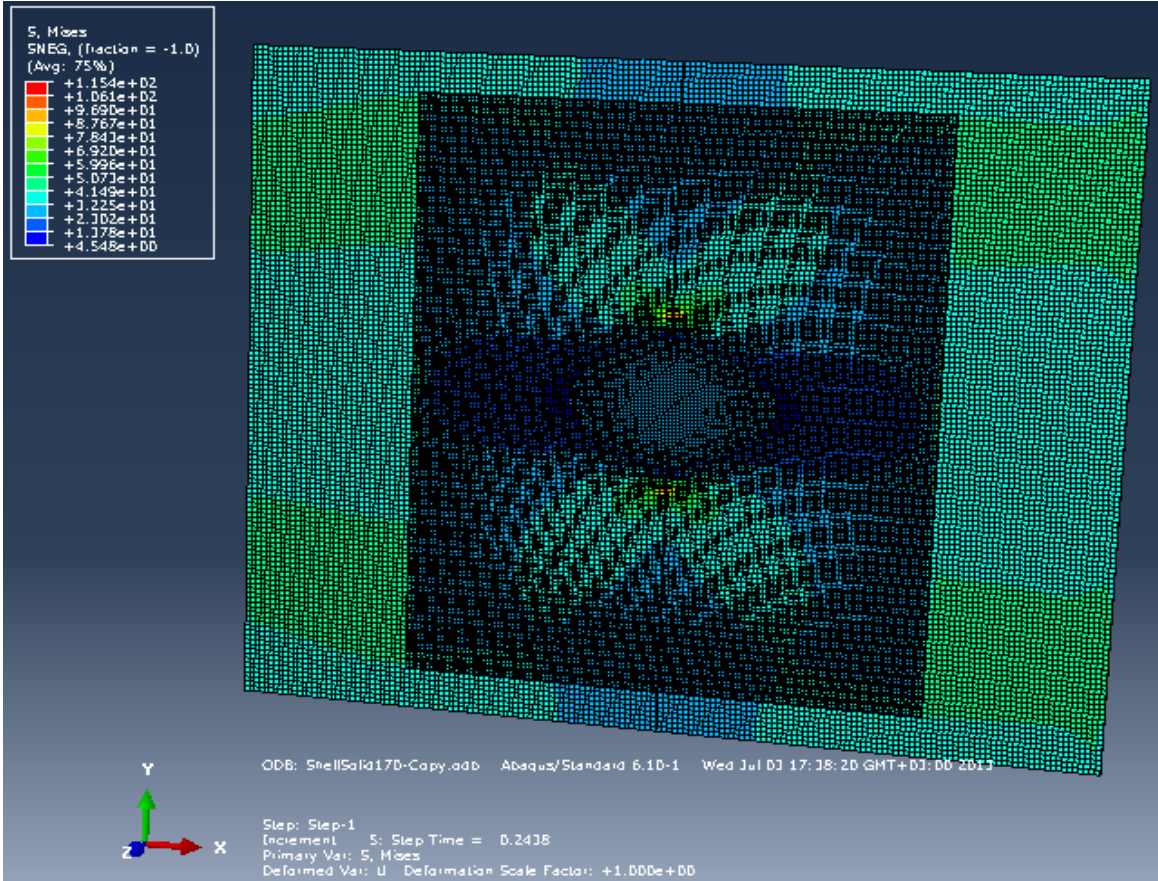
Ομοίως με το 5.2.3

- I^n Δοκιμή – 170MPa

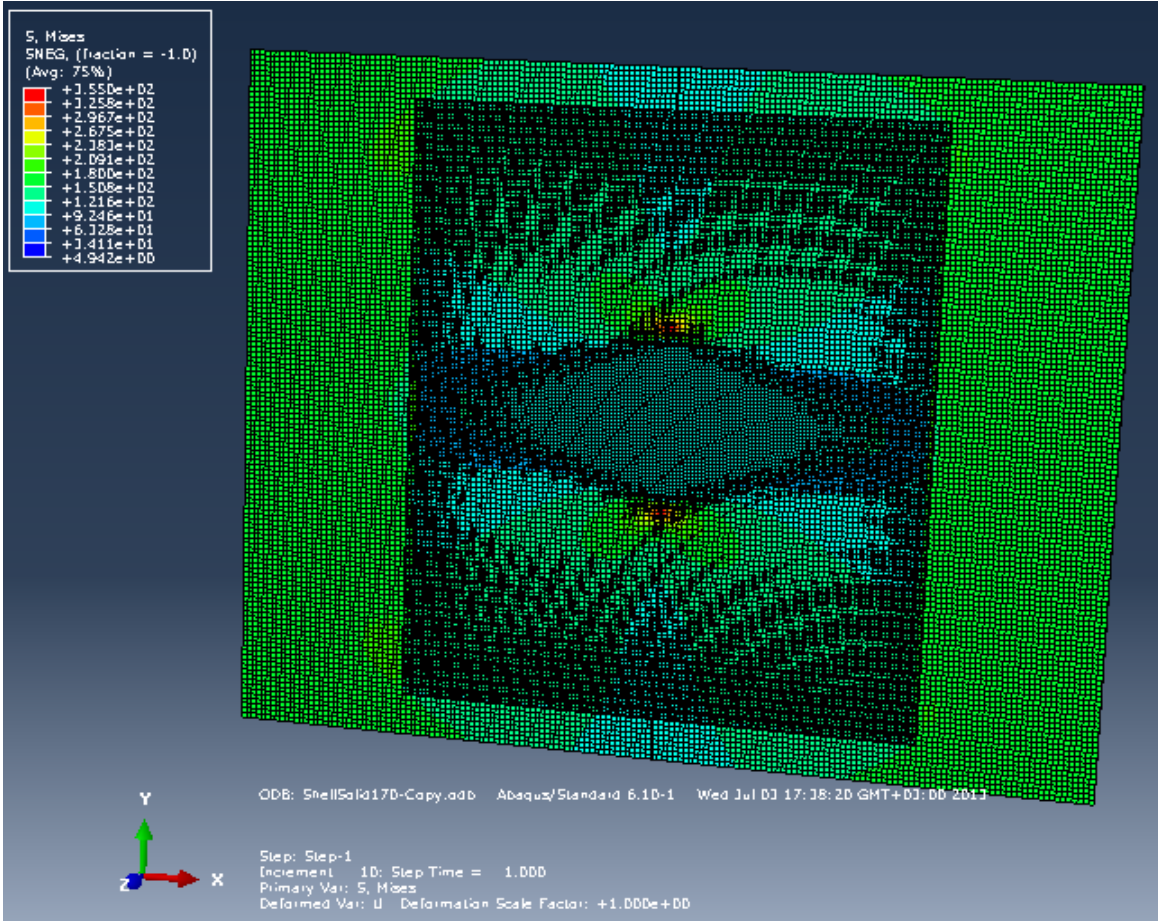
Increment 1



Increment 5

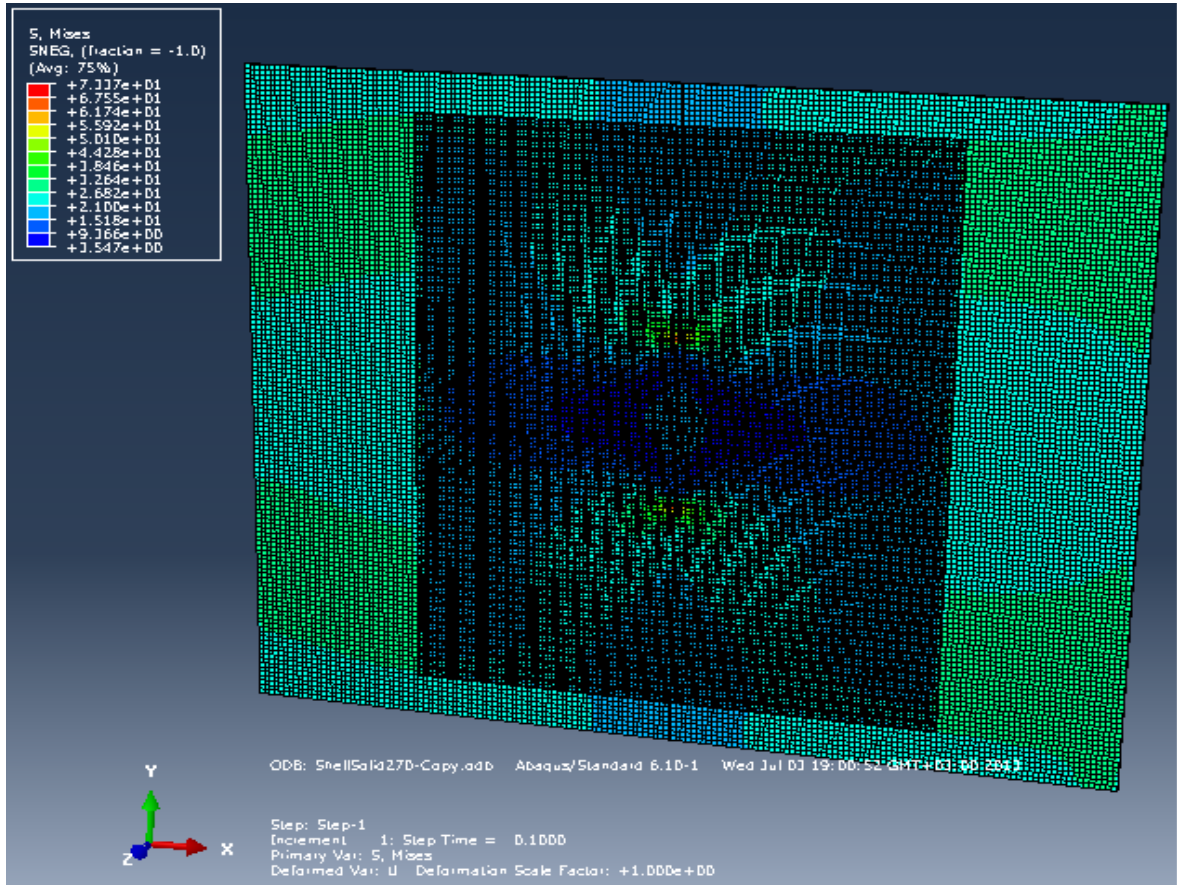


Increment 10

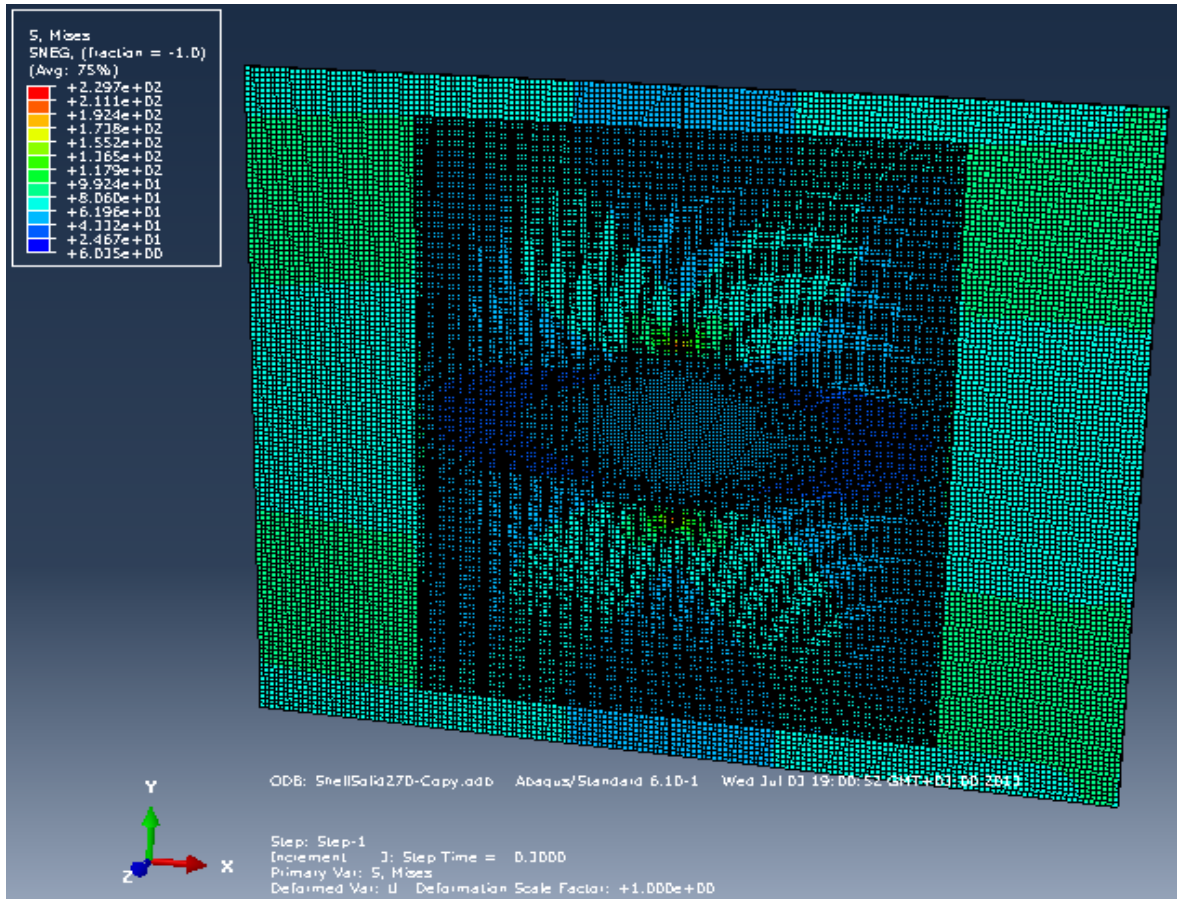


- 2^η Δοκιμή – 270MPa – απλό επίθεμα

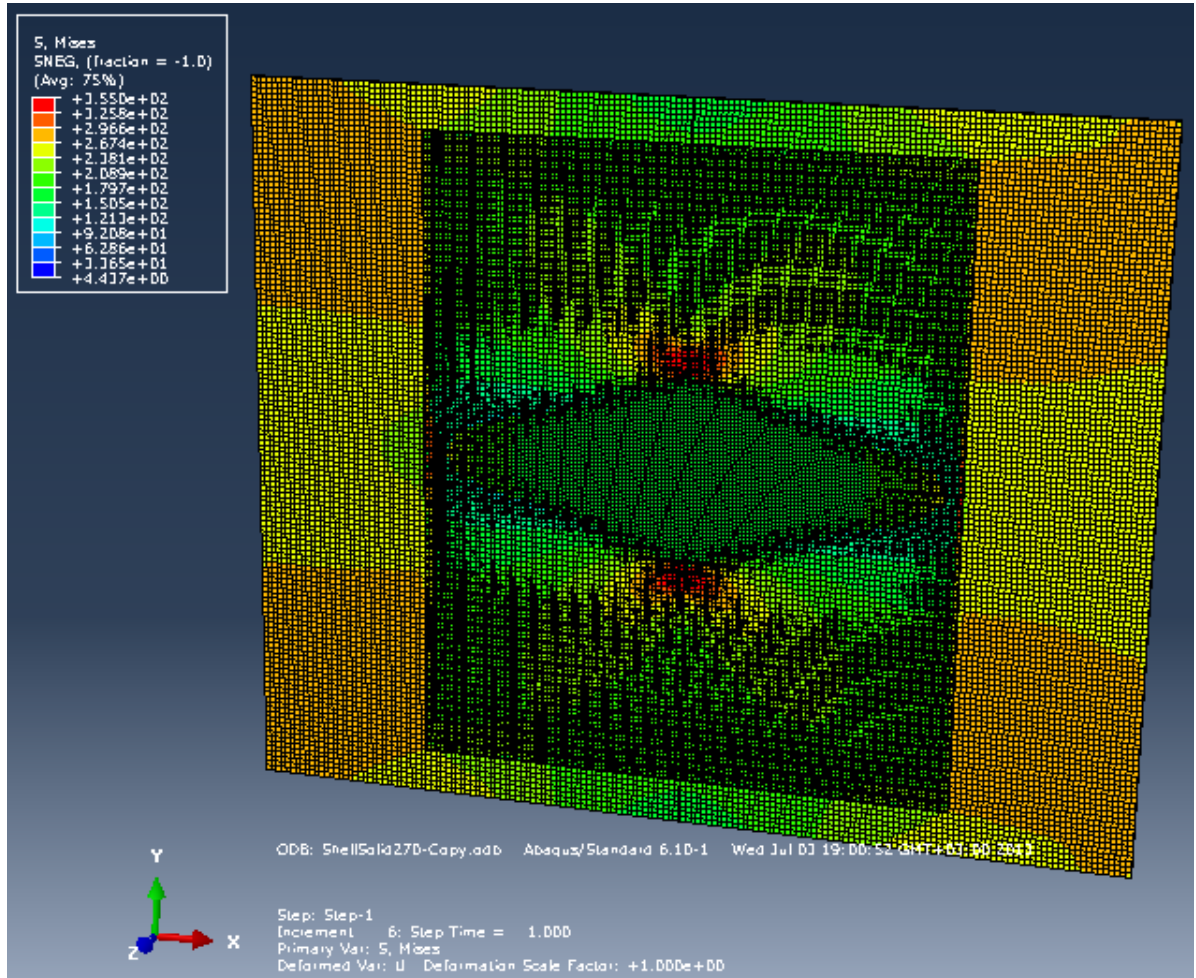
Increment 1



Increment 3

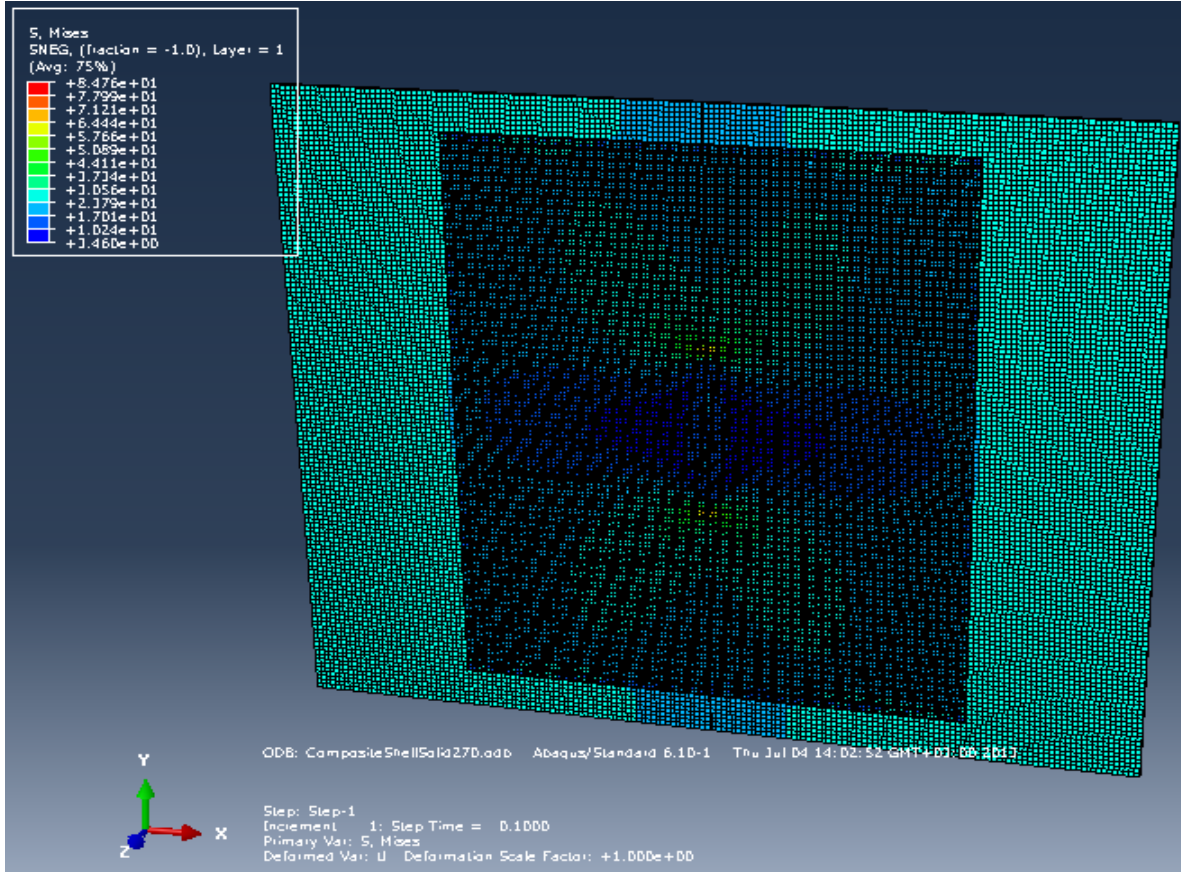


Increment 6

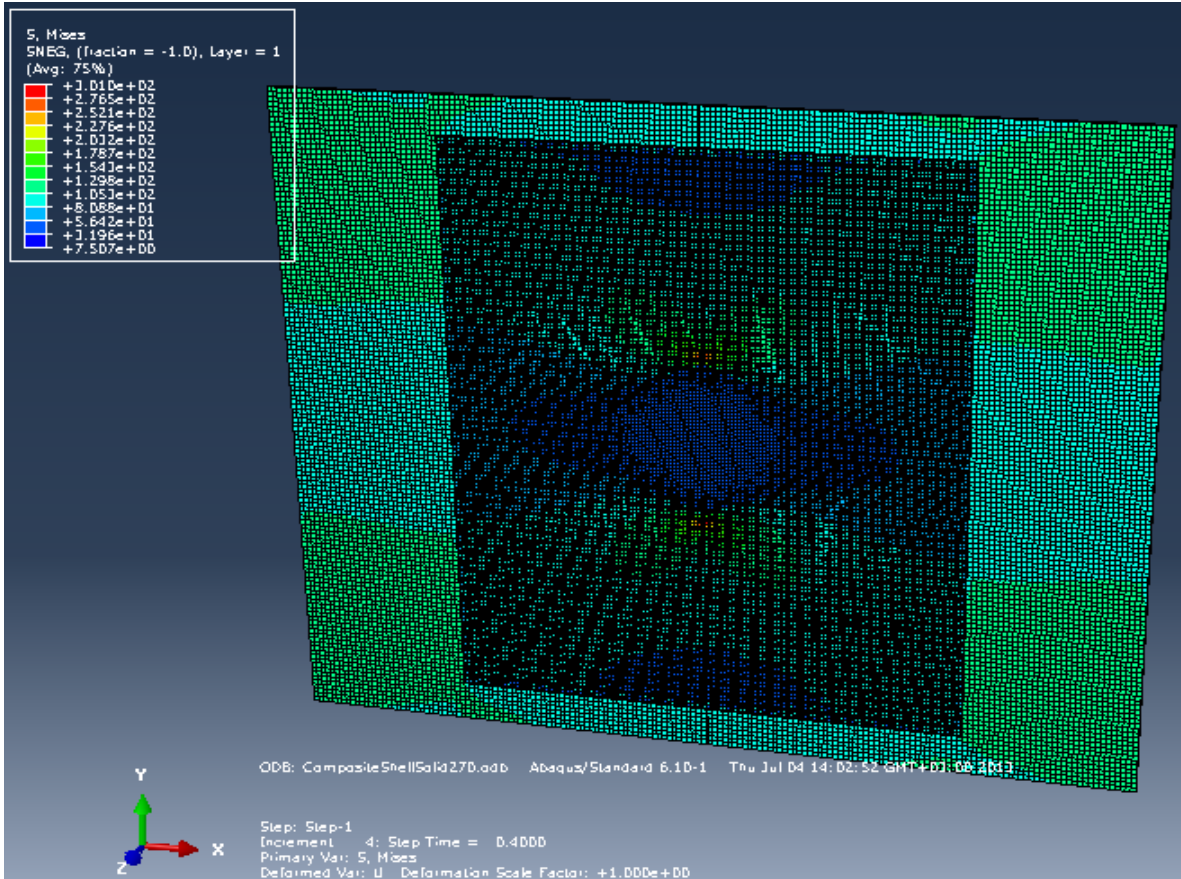


- 3^η Δοκιμή – 270MPa – σύνθετο επίθεμα

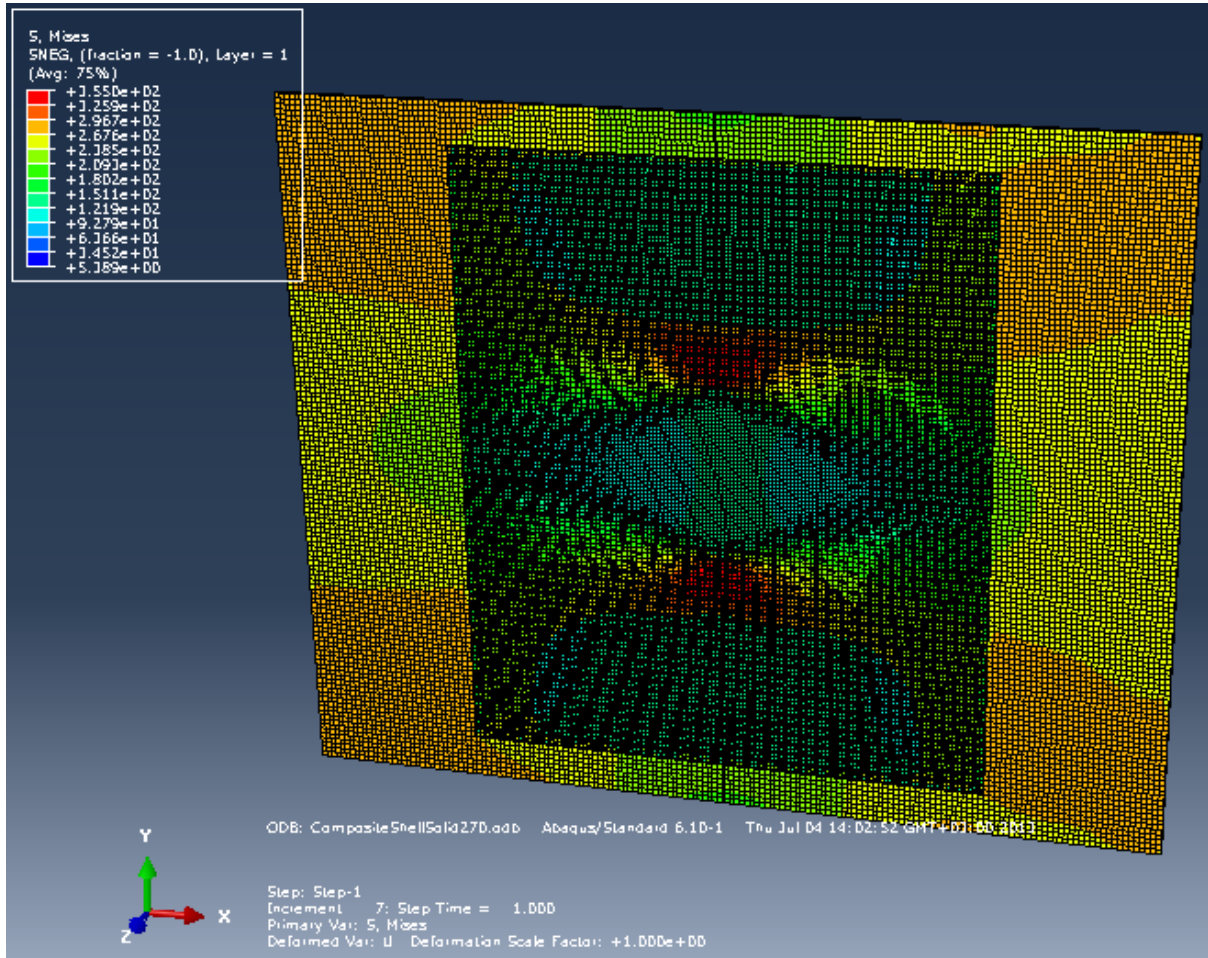
Increment 1



Increment 4



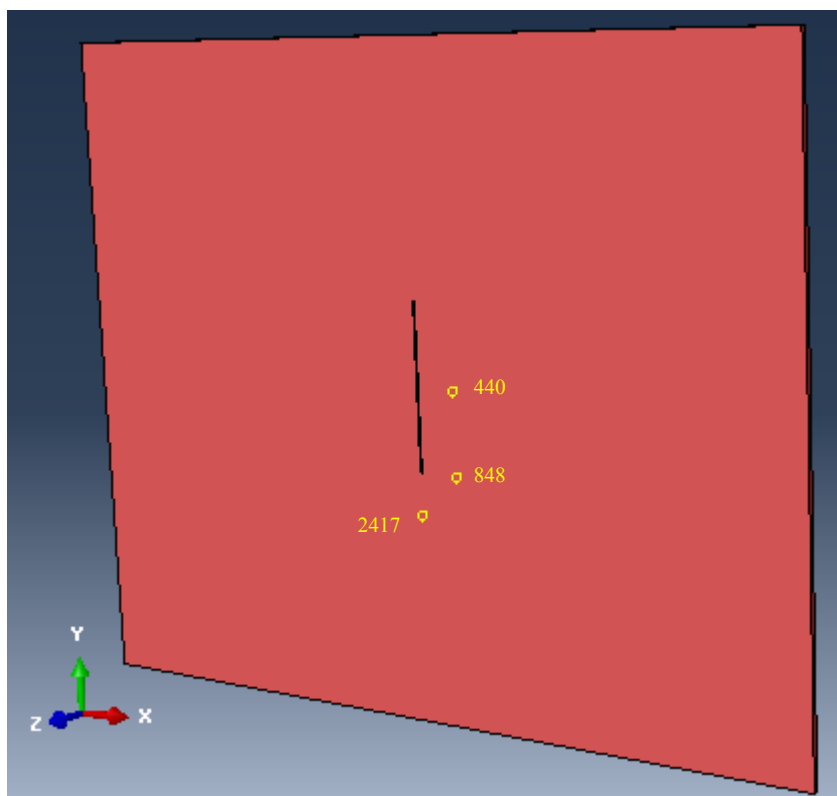
Increment 7



6 Αποτελέσματα ανάλυσης

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν αναλυτικά τα αποτελέσματα της έρευνας στη δυσμενέστερη περίπτωση των εξεταζομένων, δηλαδή στη φόρτιση με 270MPa . Πιο συγκεκριμένα, έχουν επιλεγεί δύο σημεία στη χαλύβδινη πλάκα και τα αντίστοιχα στο επίθεμα για τη μόρφωση διαγραμμάτων των τάσεων σ_{xx} , σ_{yy} και τ_{xy} συναρτήσει του χρόνου ανάλυσης, δηλαδή συναρτήσει της προσαύξησης του φορτίου, και ένα σημείο στην πλάκα για το αντίστοιχο διάγραμμα της μετατόπισής του.

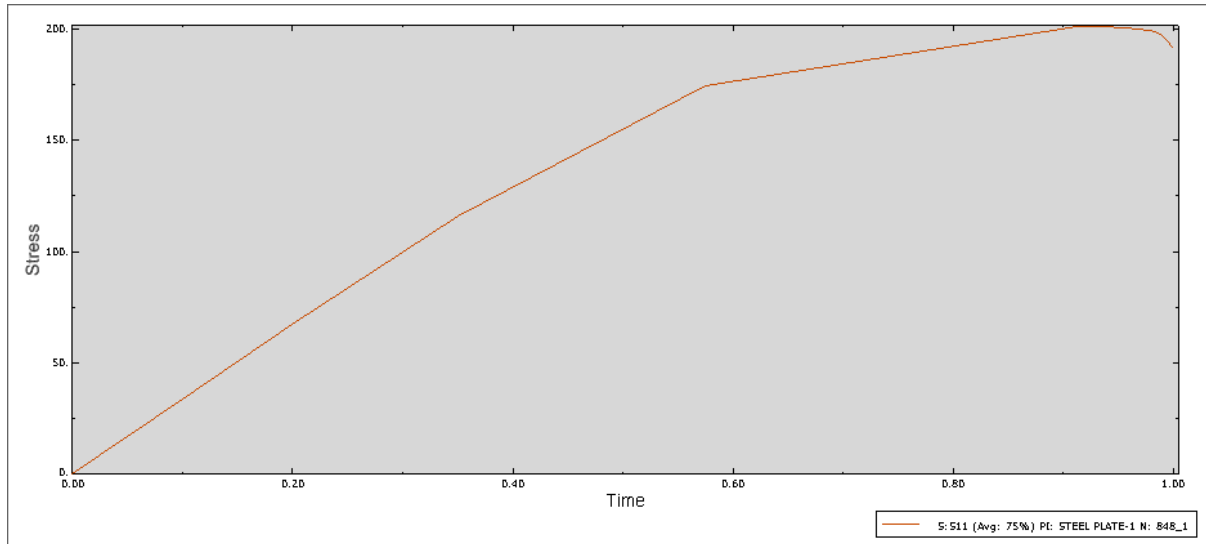
Τα σημεία εξέτασης της τάσεως που επιλέχθηκαν βρίσκονται κατά περίπου $a/2=25\text{mm}$ κάτω και δεξιά από το κάτω άκρο της ρωγμής (όπου $2*a=100\text{mm}$ το πλάτος της ρωγμής κατά Y). Είναι τα υπ' αριθμόν *Node 2417* και *Node 848* στην πλάκα και τα *Node 7777* και *Node 9450* αντίστοιχα στο επίθεμα. Το τρίτο σημείο εξέτασης της μετατόπισης είναι το *Node 440* στην πλάκα (δε χρειάζεται να πάρουμε το αντίστοιχο στο επίθεμα καθώς θα έχει την ίδια μετατόπιση λόγω της σύνδεσής τους).



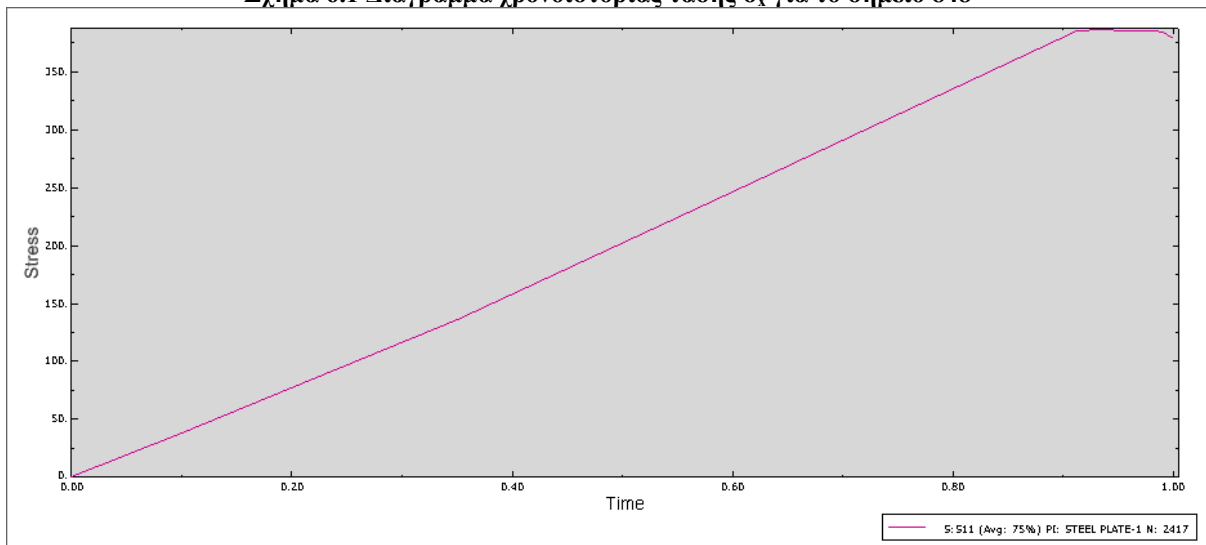
6.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

6.1.1 Τάσεις

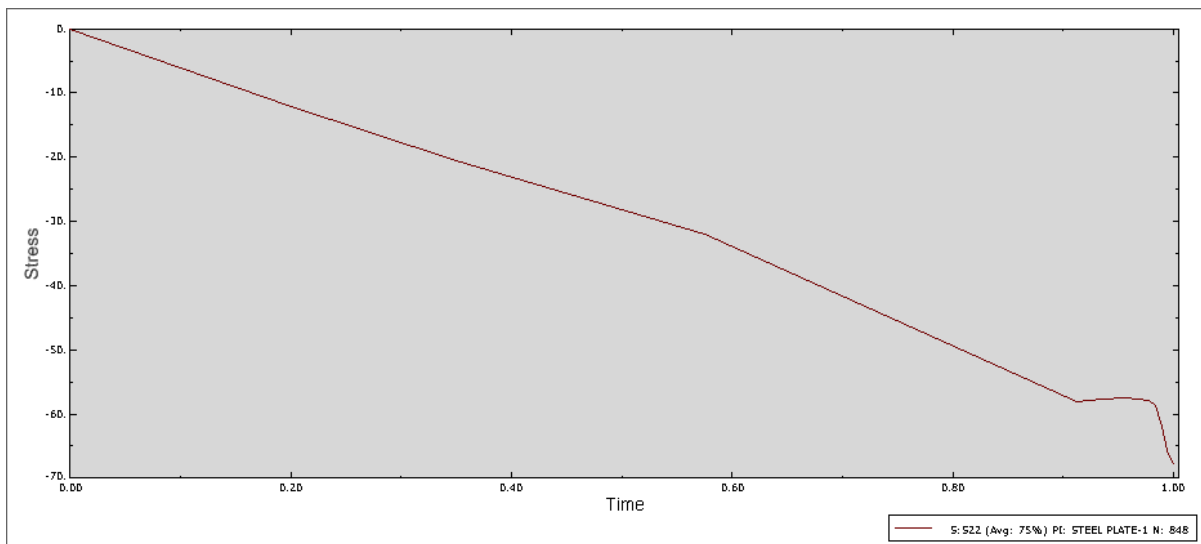
6.1.1.1 Αποτελέσματα φόρτισης με 270MPa - χωρίς επίθεμα



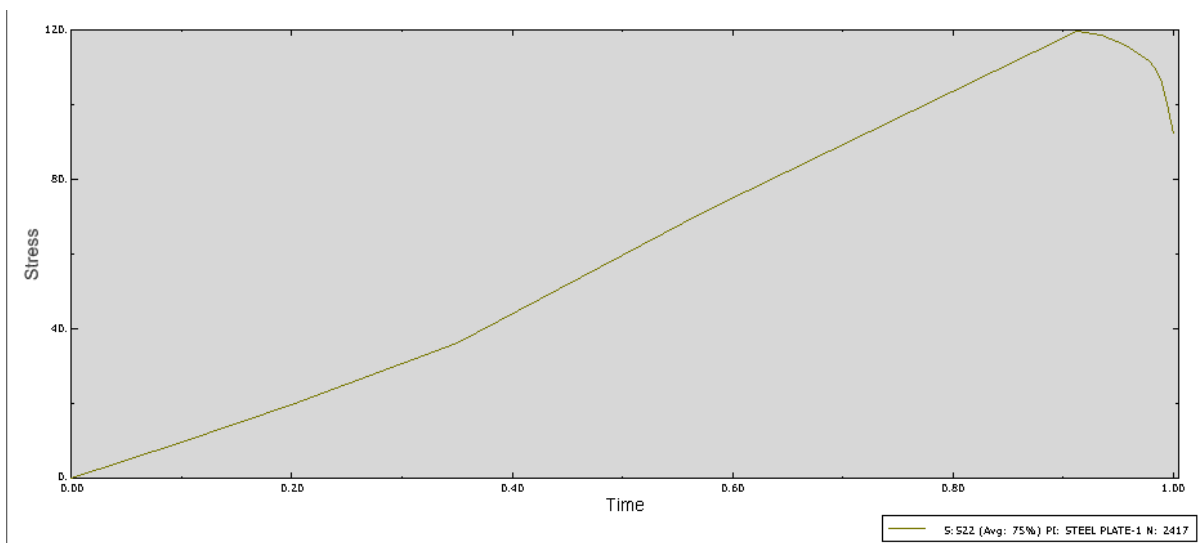
Σχήμα 6.1 Διάγραμμα χρονοϊστορίας τάσης σ_x για το σημείο 848



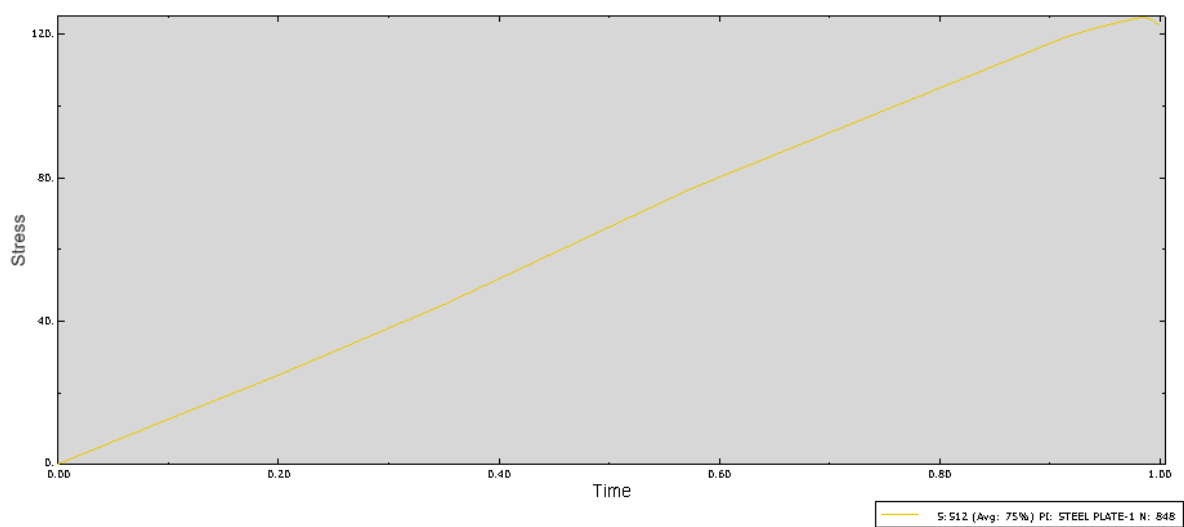
Σχήμα 6.2 Διάγραμμα χρονοϊστορίας τάσης σ_x για το σημείο 2417



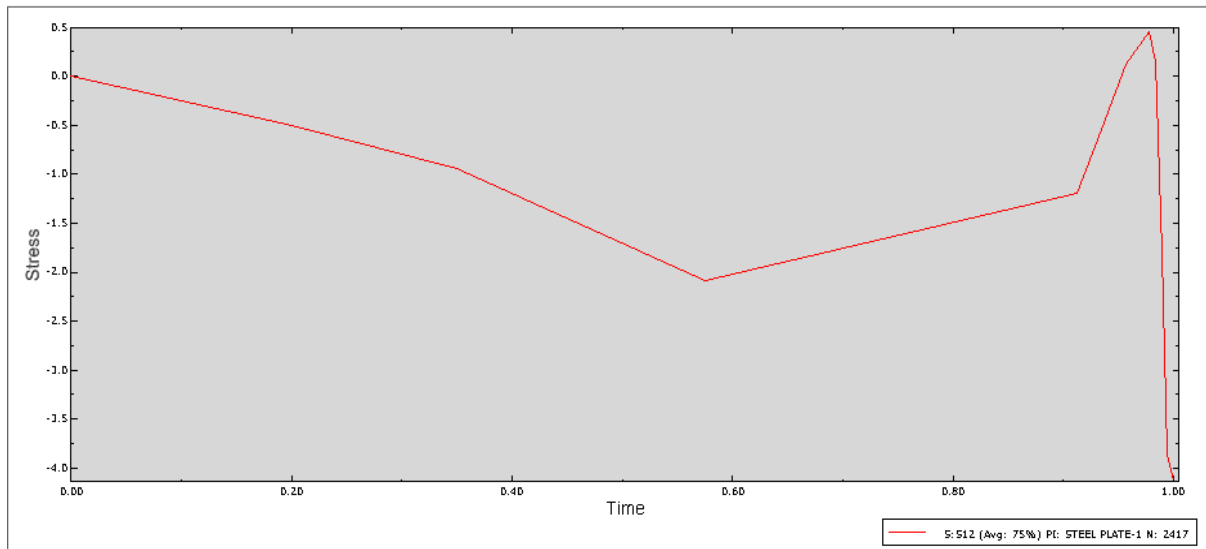
Σχήμα 6.3 Διάγραμμα χρονοϊστορίας τάσης σ_y για το σημείο 848



Σχήμα 6.4 Διάγραμμα χρονοϊστορίας τάσης σ_y για το σημείο 2417



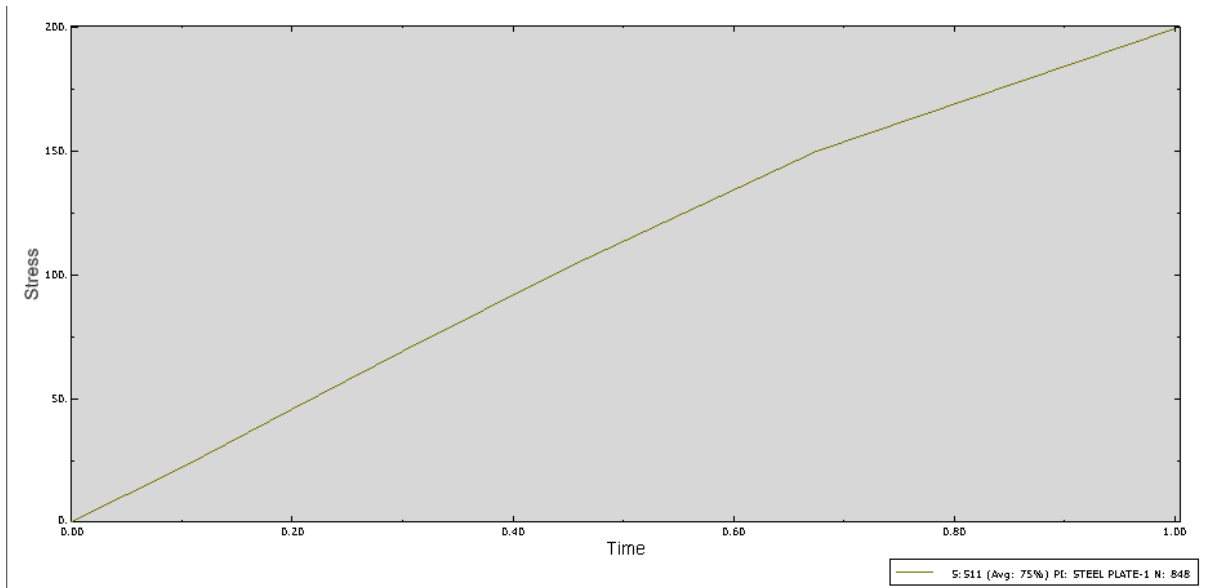
Σχήμα 6.5 Διάγραμμα χρονοϊστορίας τάσης τ_{xy} για το σημείο 848



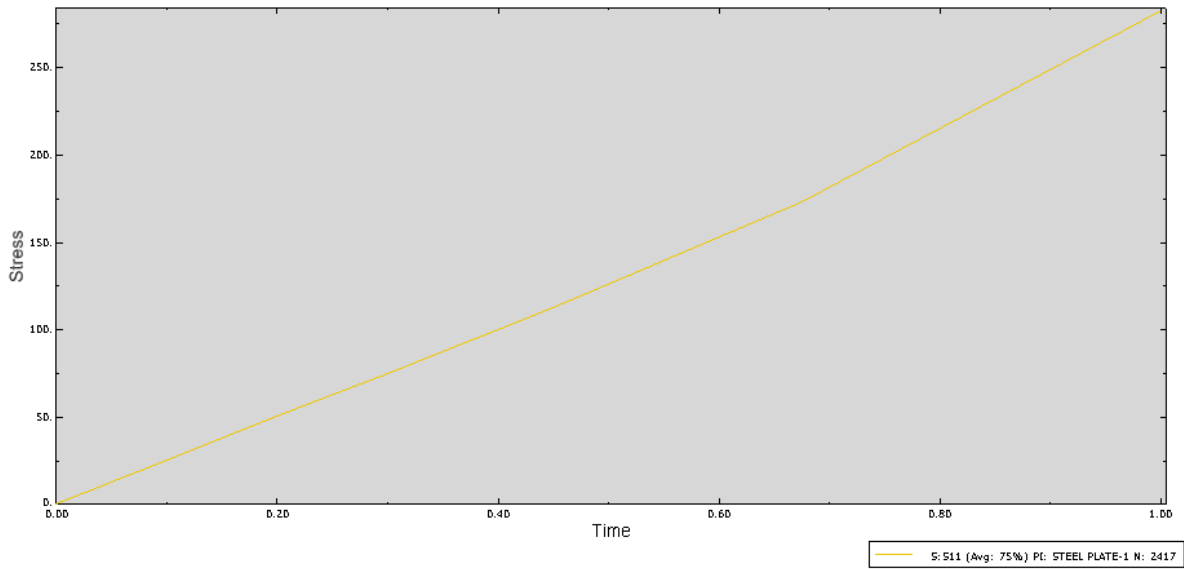
Σχήμα 6.6 Διάγραμμα χρονοϊστορίας τάσης τ_{xy} για το σημείο 2417

6.1.1.2 Αποτελέσματα φόρτισης με 270MPa - επίθεμα προσανατολισμού [0]

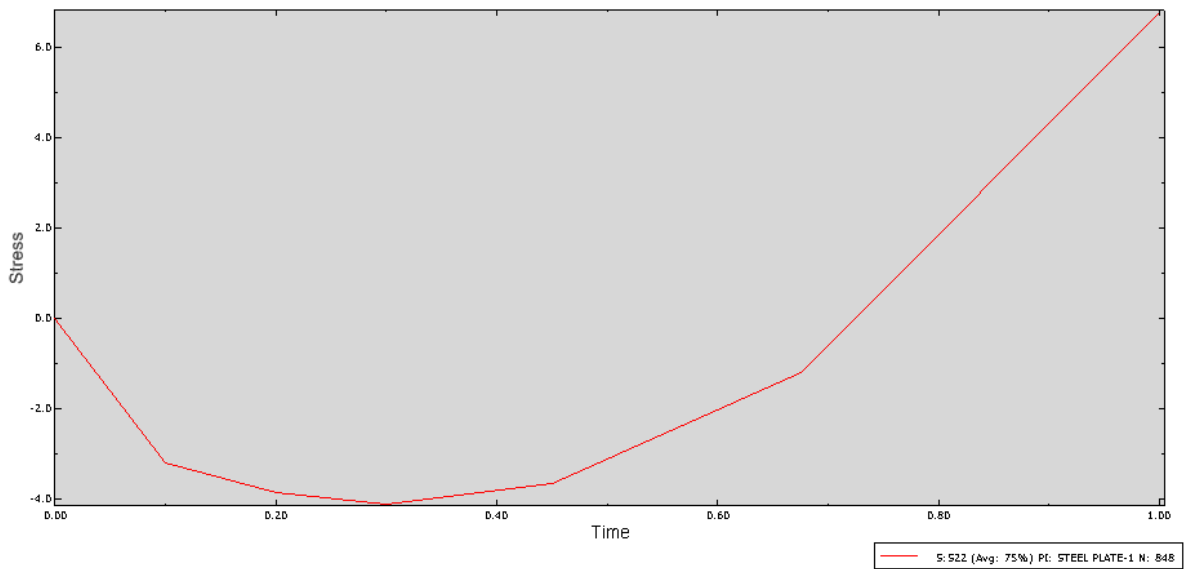
- Στην πλάκα



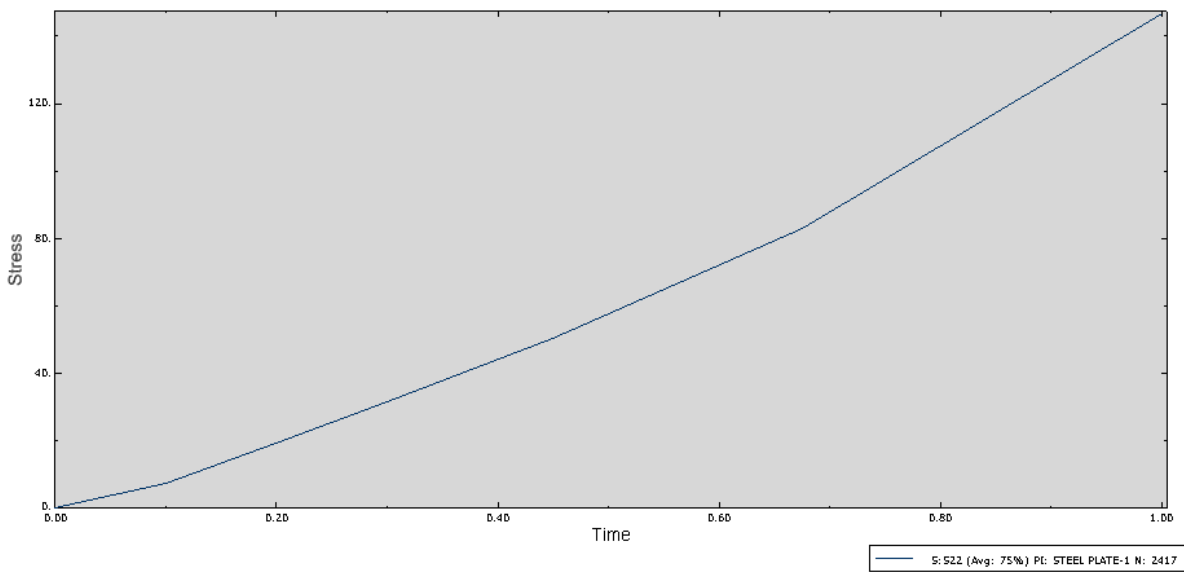
Σχήμα 6.7 Διάγραμμα χρονοϊστορίας τάσης σ_x για το σημείο 848



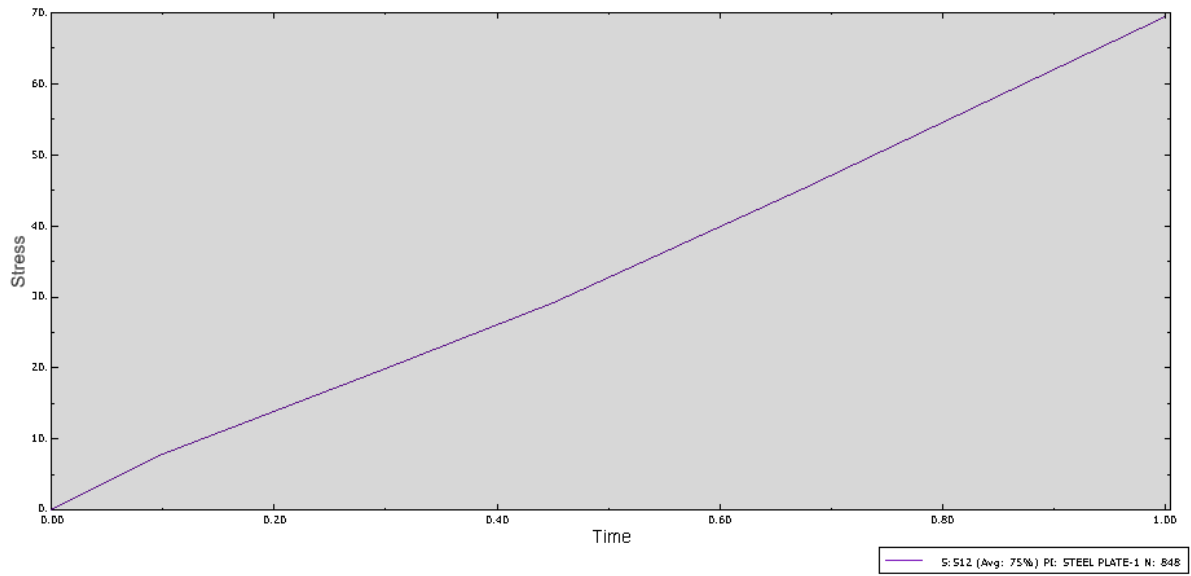
Σχήμα 6.8 Διάγραμμα χρονοϊστορίας τάσης σ_x για το σημείο 2417



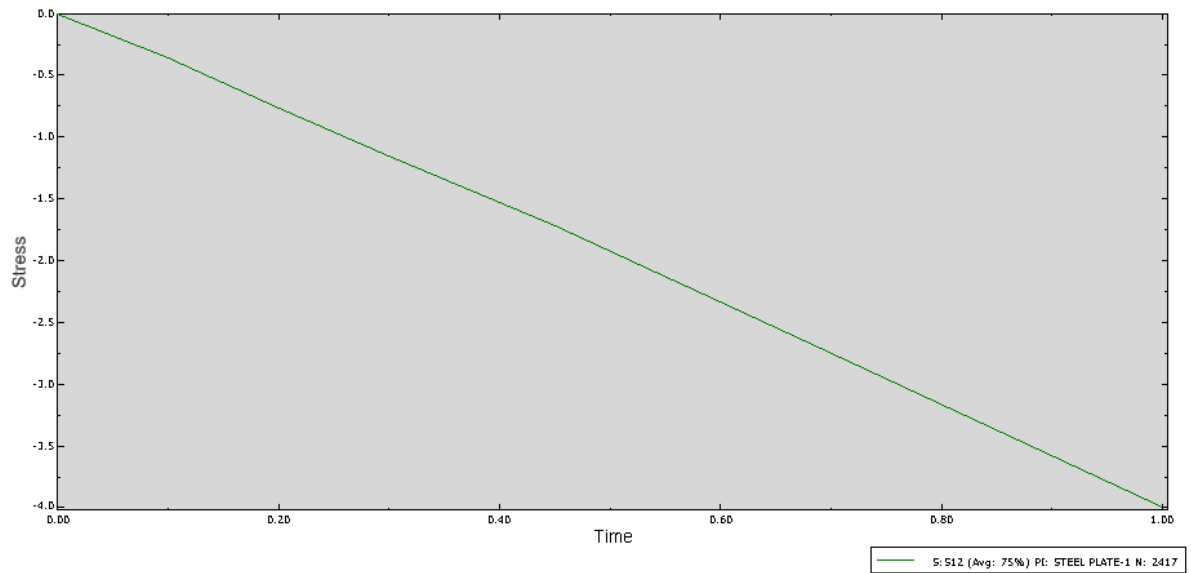
Σχήμα 6.9 Διάγραμμα χρονοϊστορίας τάσης σ_y για το σημείο 848



Σχήμα 6.10 Διάγραμμα χρονοϊστορίας τάσης σ_y για το σημείο 2417

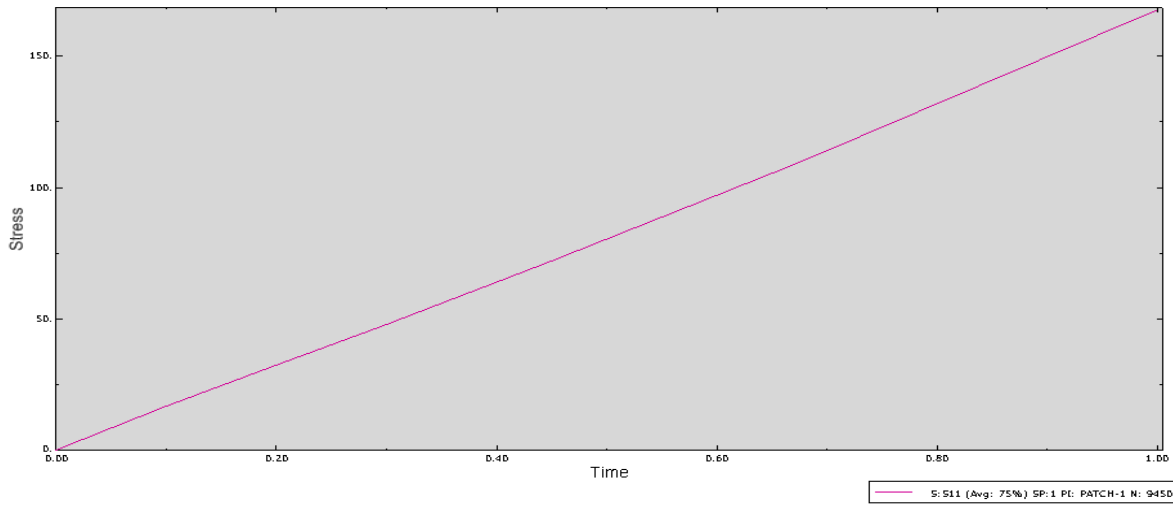


Σχήμα 6.12 Διάγραμμα χρονοϊστορίας τάσης τ_{xy} για το σημείο 848

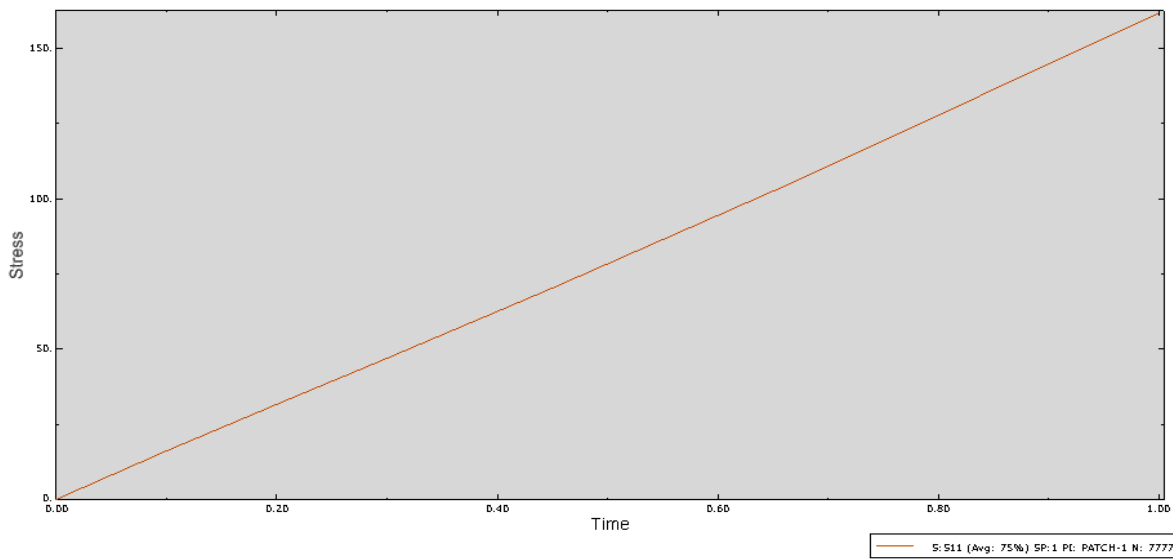


Σχήμα 6.11 Διάγραμμα χρονοϊστορίας τάσης τ_{xy} για το σημείο 2417

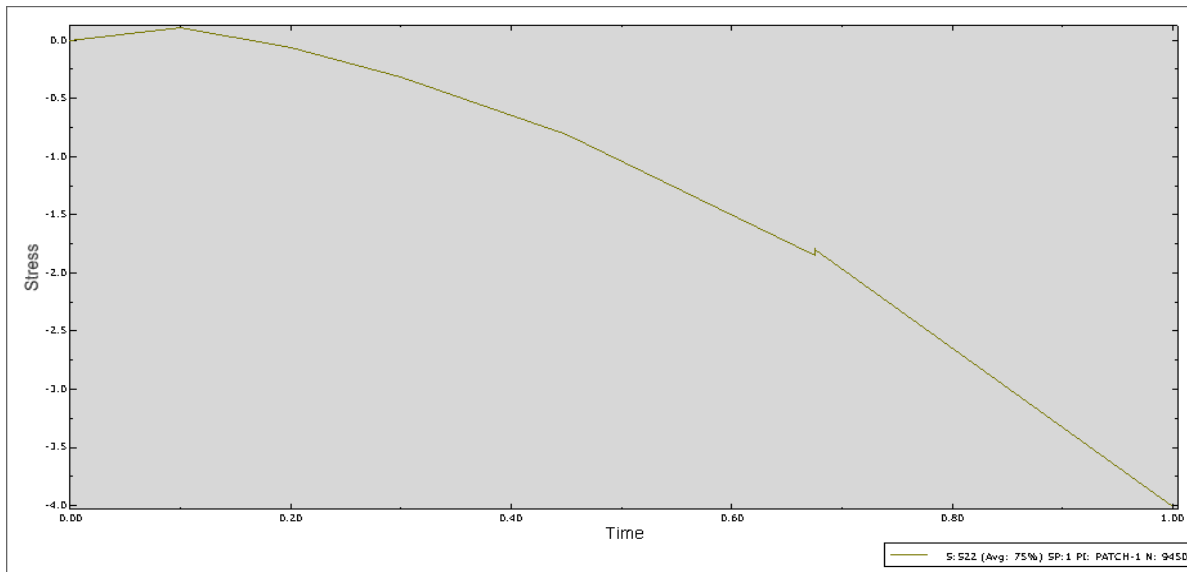
- Στο επίθεμα



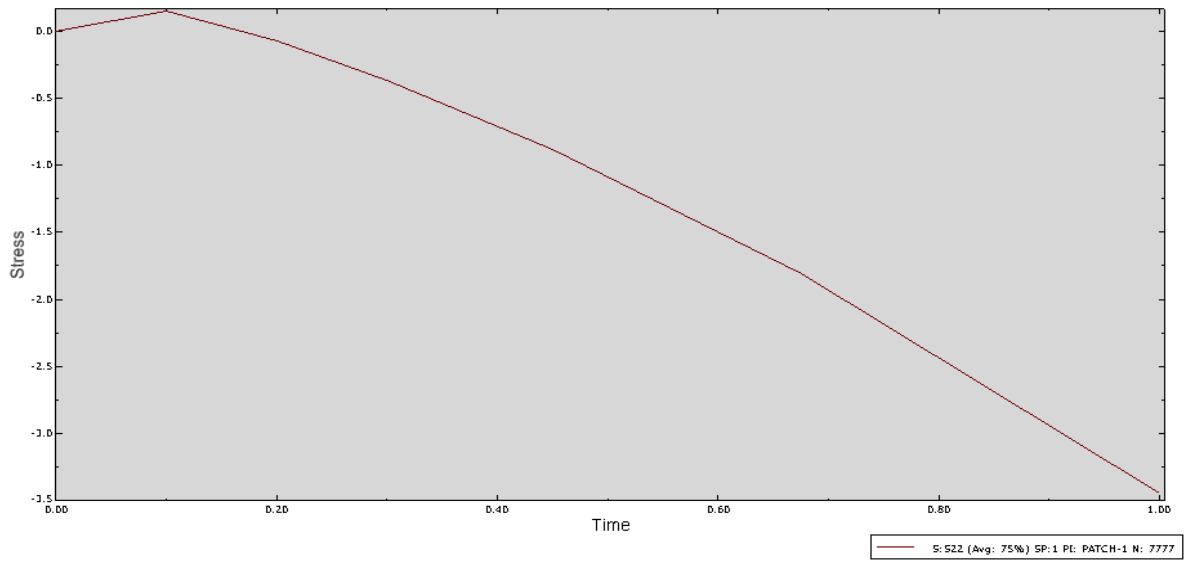
Σχήμα 6.12 Διάγραμμα χρονοϊστορίας τάσης σ_x για το σημείο 9450



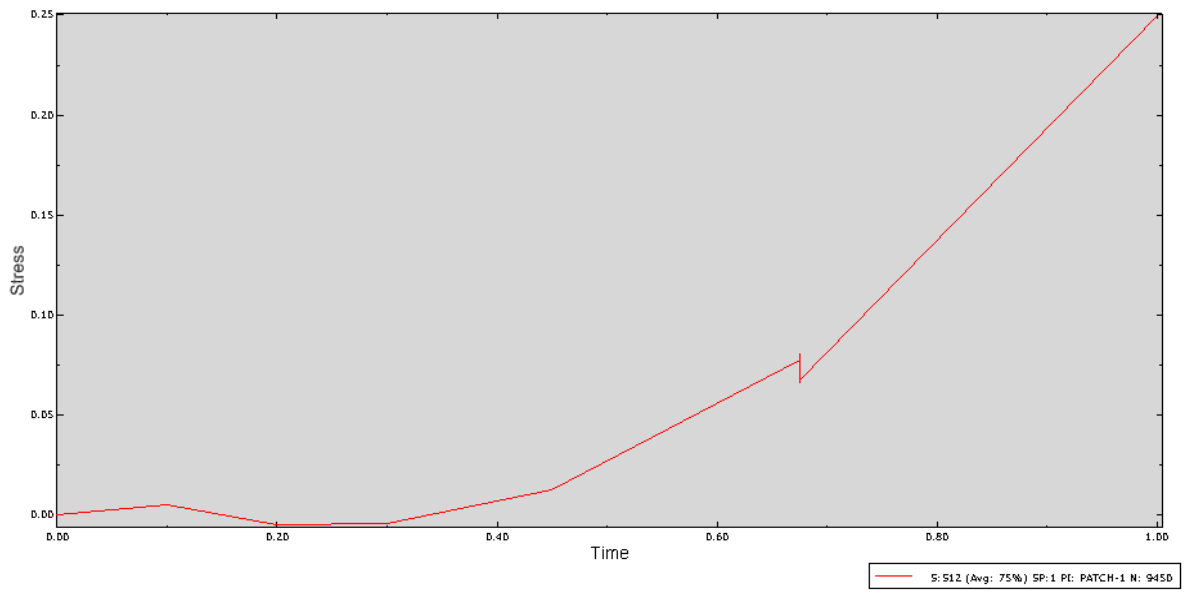
Σχήμα 6.13 Διάγραμμα χρονοϊστορίας τάσης σ_x για το σημείο 7777



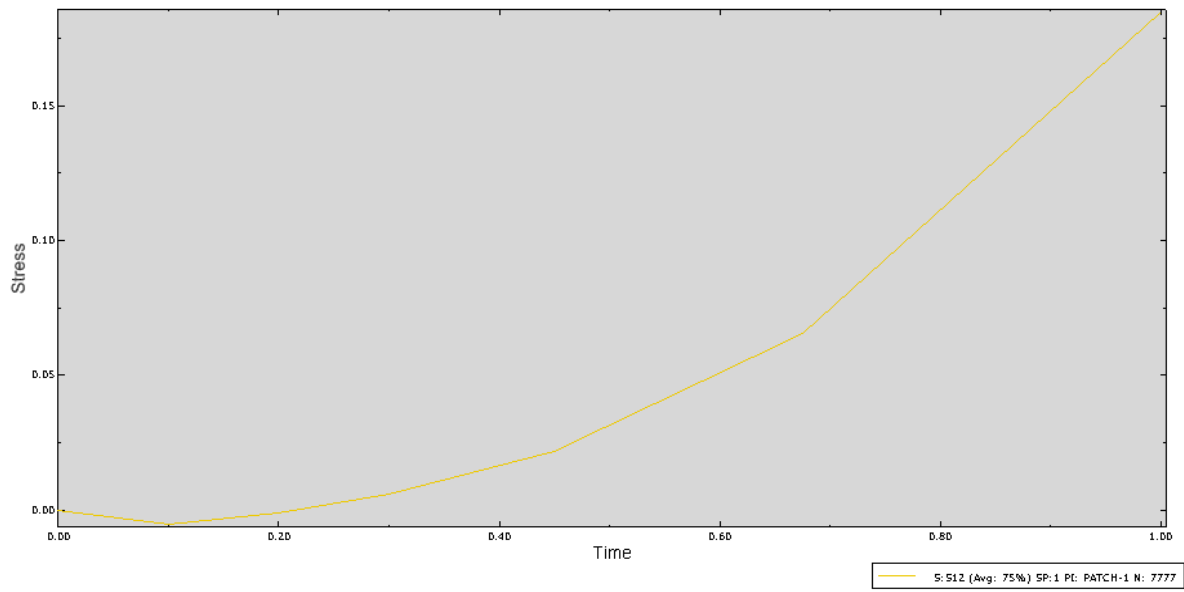
Σχήμα 6.14 Διάγραμμα χρονοϊστορίας τάσης σ_y για το σημείο 9450



Σχήμα 6.15 Διάγραμμα χρονοϊστορίας τάσης σ_y για το σημείο 7777



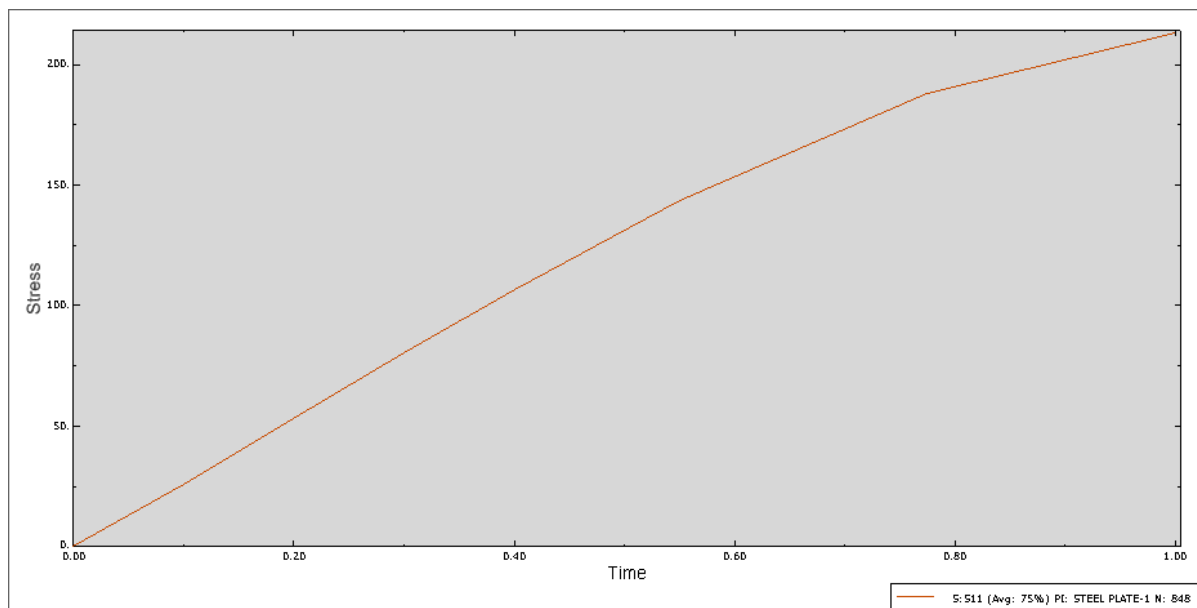
Σχήμα 6.16 Διάγραμμα χρονοϊστορίας τάσης τ_{xy} για το σημείο 9450



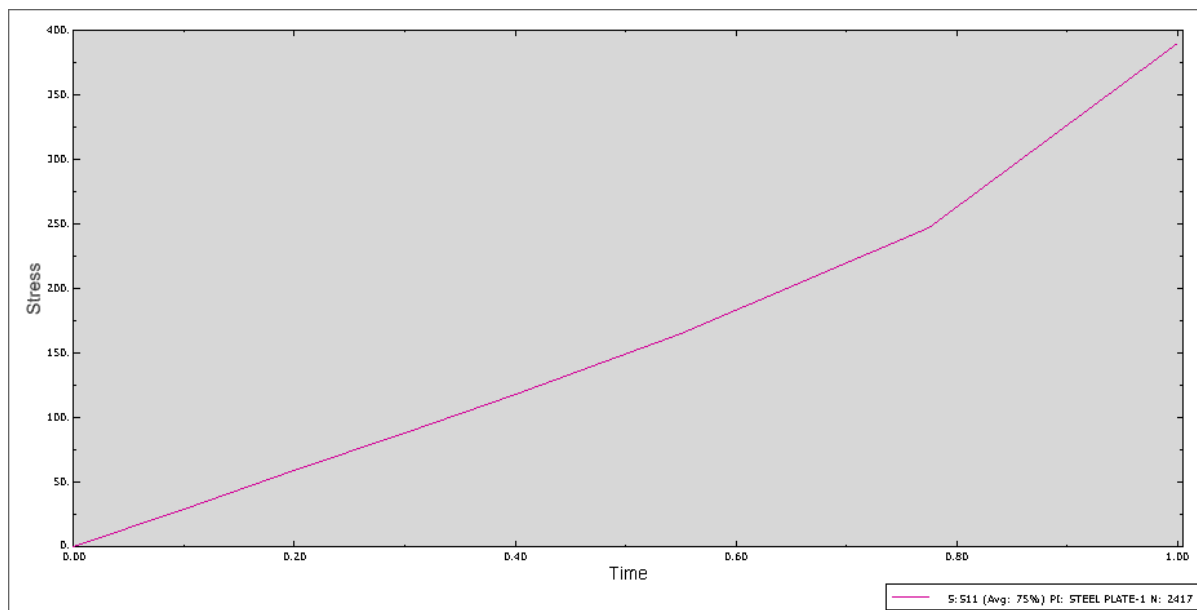
Σχήμα 6.17 Διάγραμμα χρονοϊστορίας τάσης τ_{xy} για το σημείο 7777

6.1.1.3 Αποτελέσματα φόρτισης με 270MPa - επίθεμα προσανατολισμού [0,90]

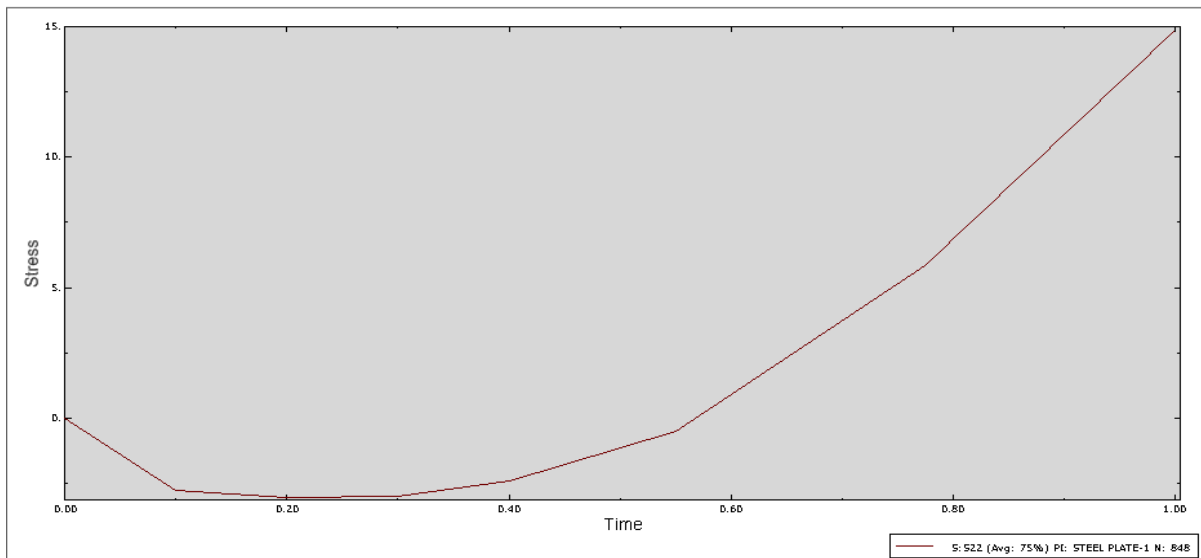
- Στην πλάκα



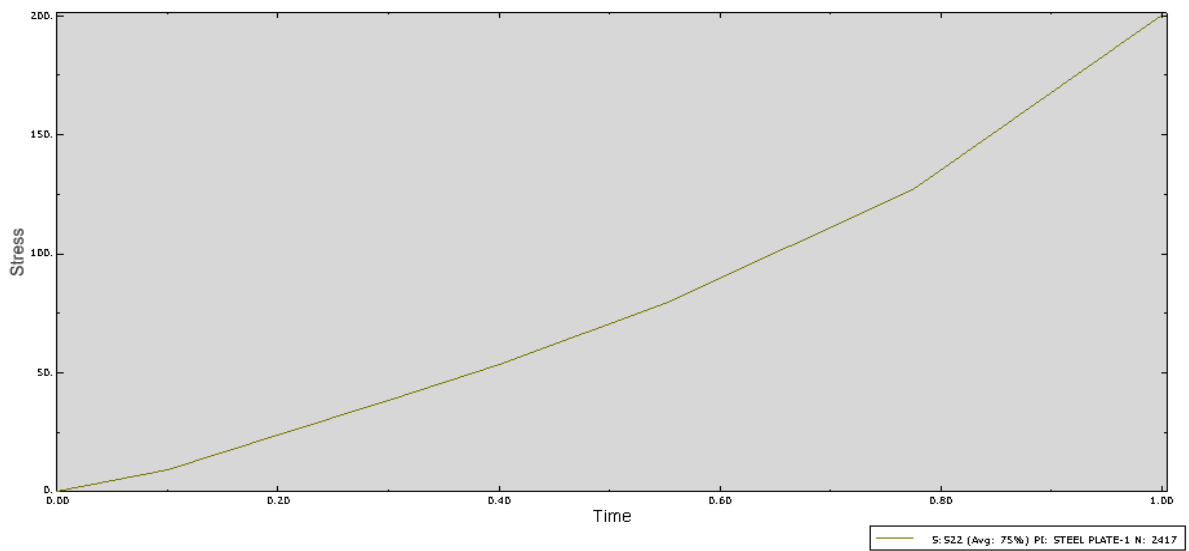
Σχήμα 6.18 Διάγραμμα χρονοϊστορίας τάσης σ_x για το σημείο 848



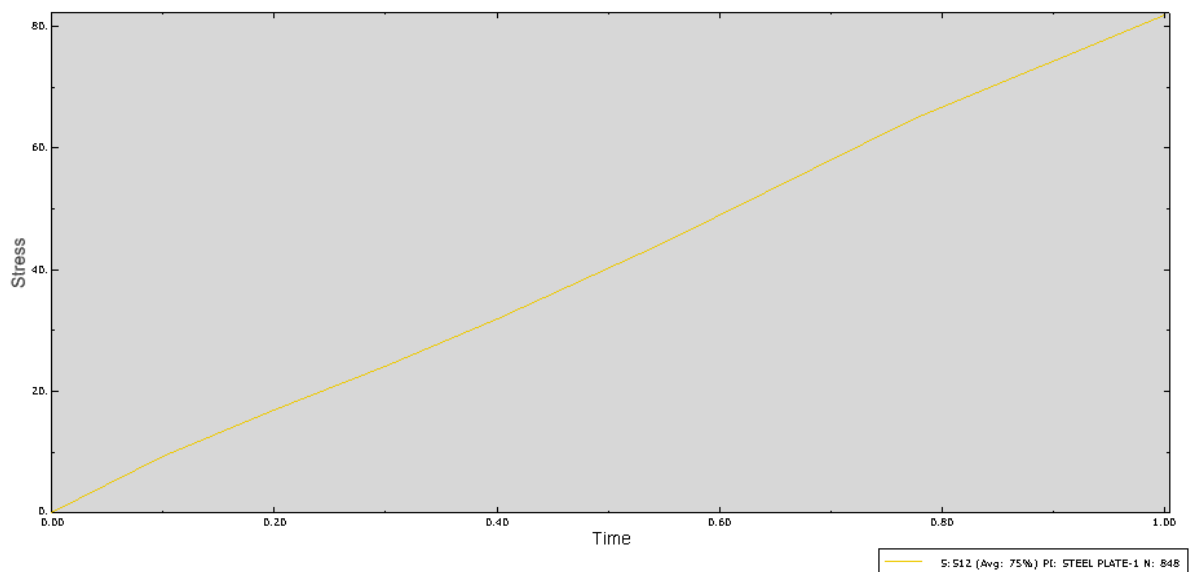
Σχήμα 6.19 Διάγραμμα χρονοϊστορίας τάσης σ_x για το σημείο 2417



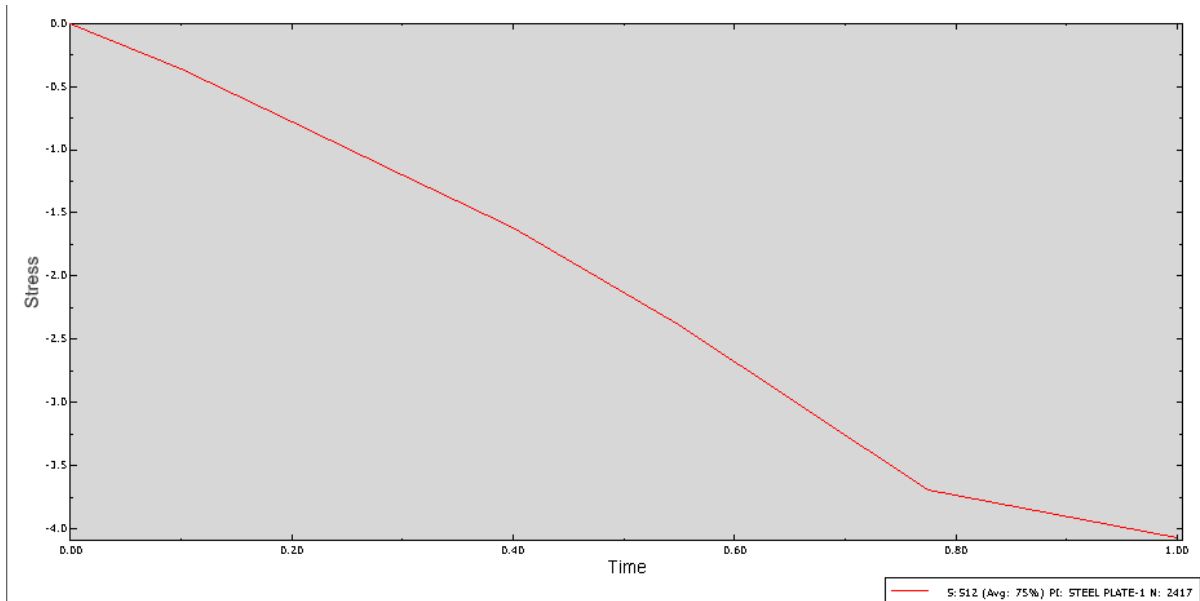
Σχήμα 6.20 Διάγραμμα χρονοϊστορίας τάσης σ_y για το σημείο 848



Σχήμα 6.21 Διάγραμμα χρονοϊστορίας τάσης σ_y για το σημείο 2417

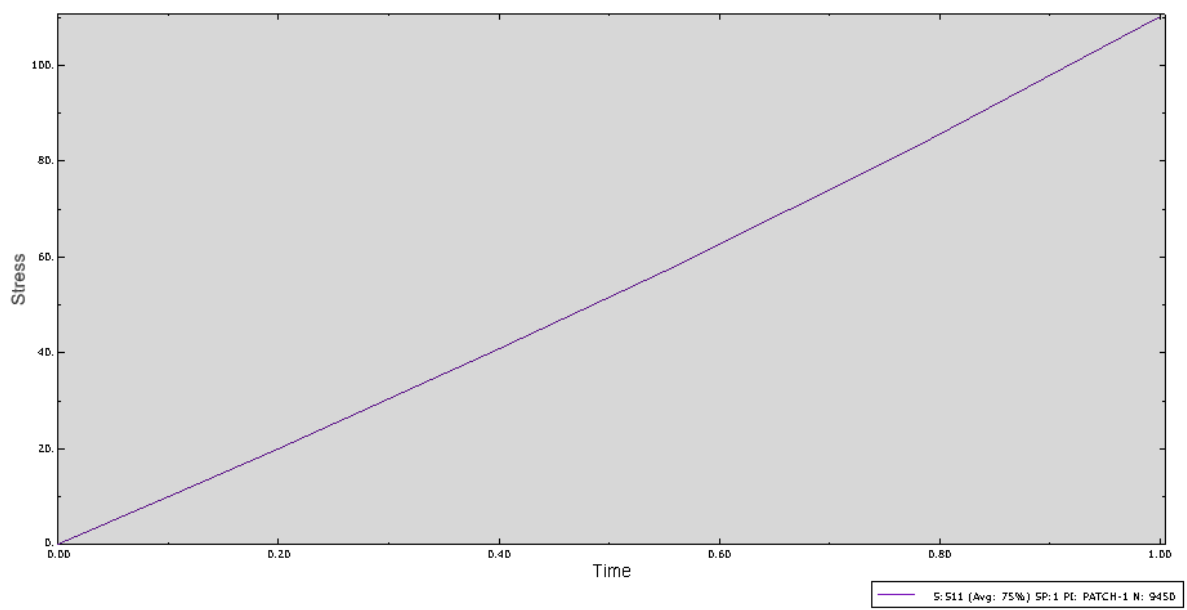


Σχήμα 6.22 Διάγραμμα χρονοϊστορίας τάσης τ_{xy} για το σημείο 848

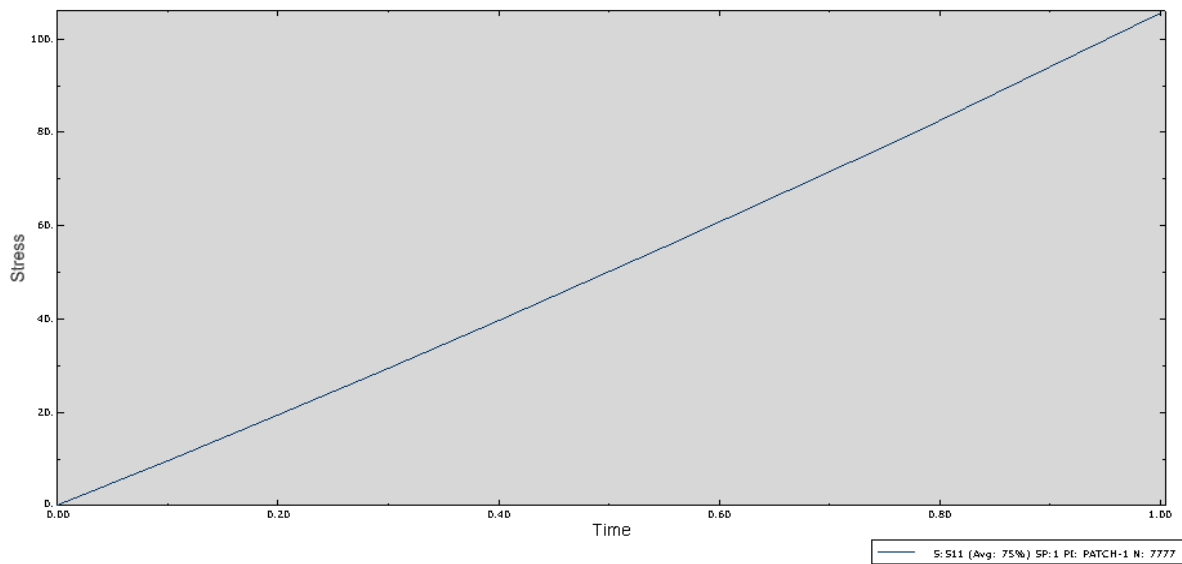


Σχήμα 6.23 Διάγραμμα χρονοϊστορίας τάσης τ_{xy} για το σημείο 2417

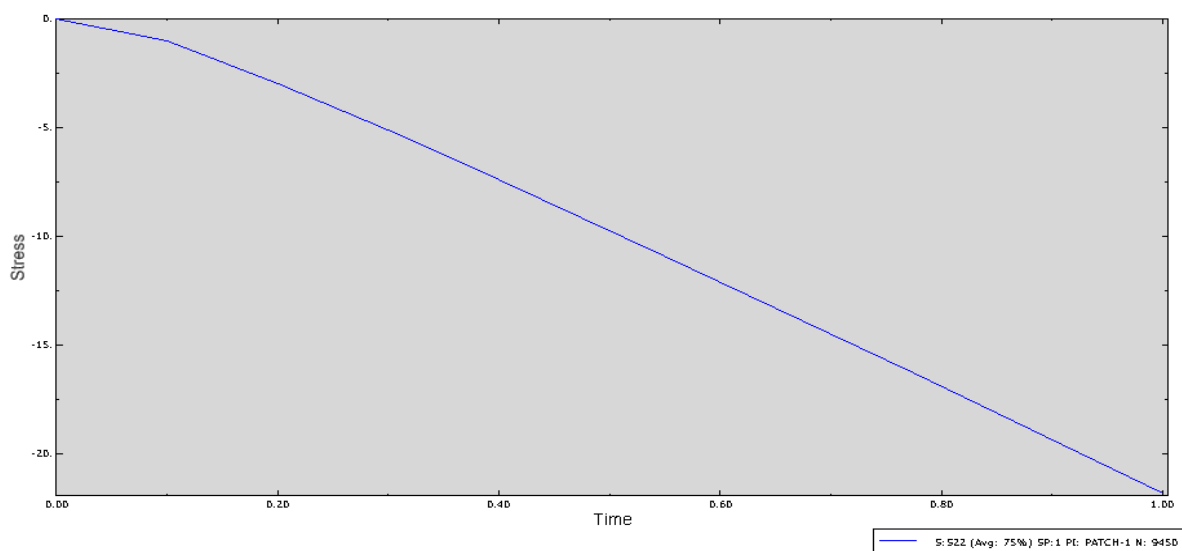
- Στο επίθεμα



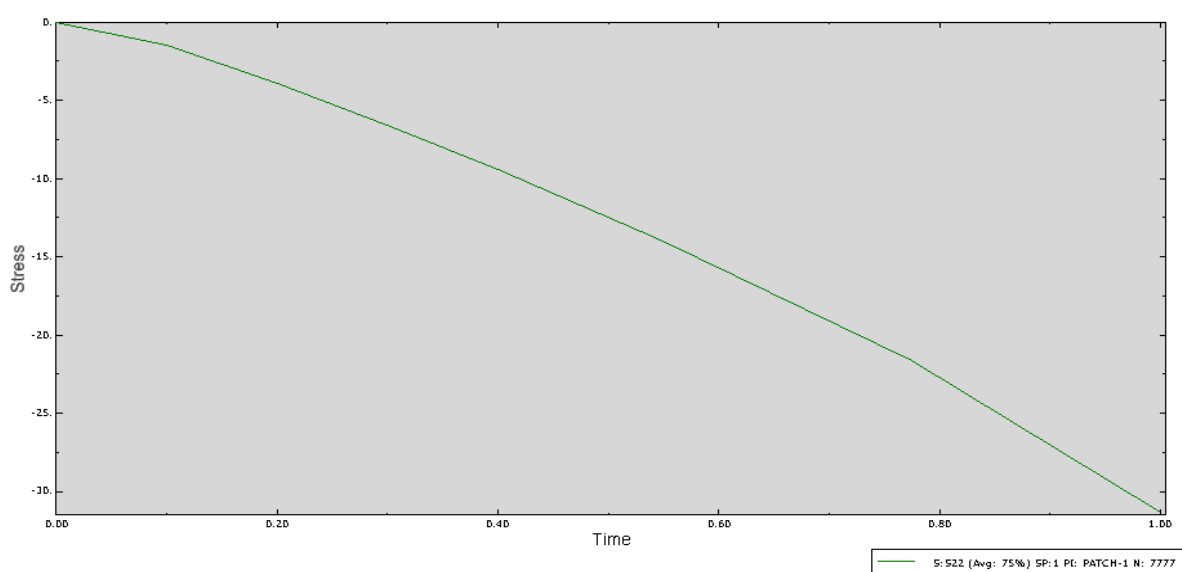
Σχήμα 6.24 Διάγραμμα χρονοϊστορίας τάσης σ_x για το σημείο 9450



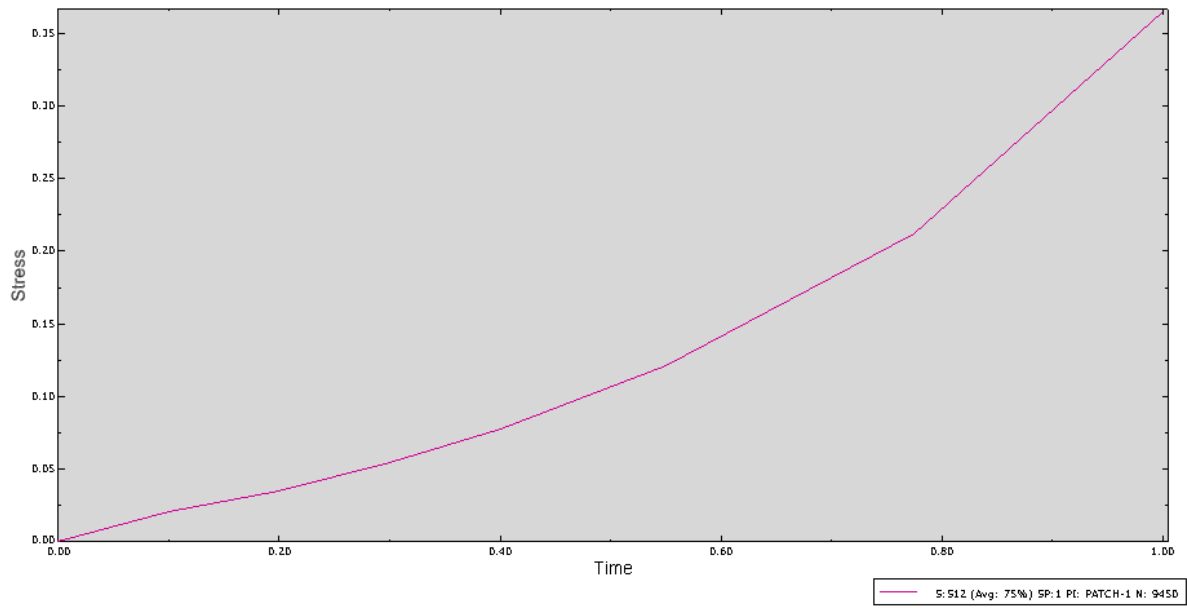
Σχήμα 6.25 Διάγραμμα χρονοϊστορίας τάσης σ_x για το σημείο 7777



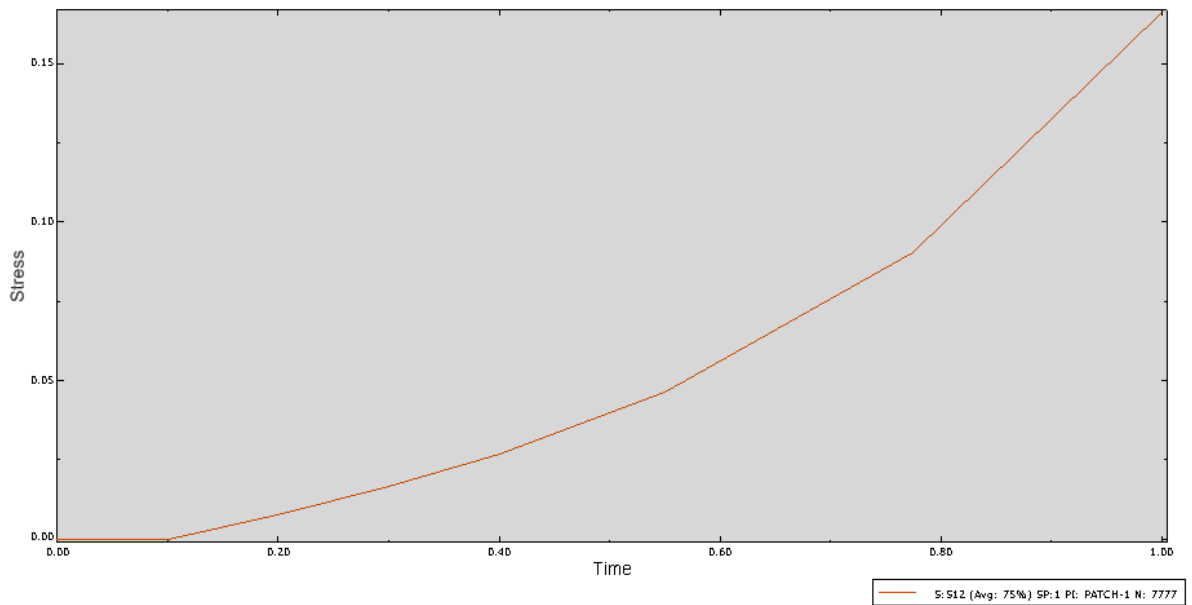
Σχήμα 6.26 Διάγραμμα χρονοϊστορίας τάσης σ_y για το σημείο 9450



Σχήμα 6.27 Διάγραμμα χρονοϊστορίας τάσης σ_y για το σημείο 7777

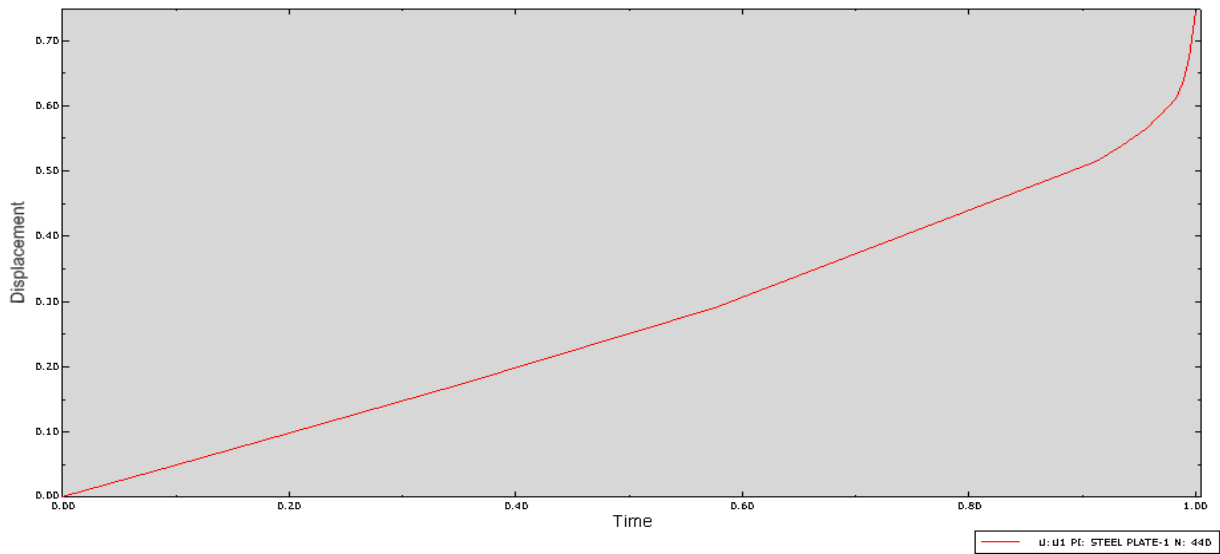


Σχήμα 6.28 Διάγραμμα ιστορίας τάσης τ_{xy} για το σημείο 9450

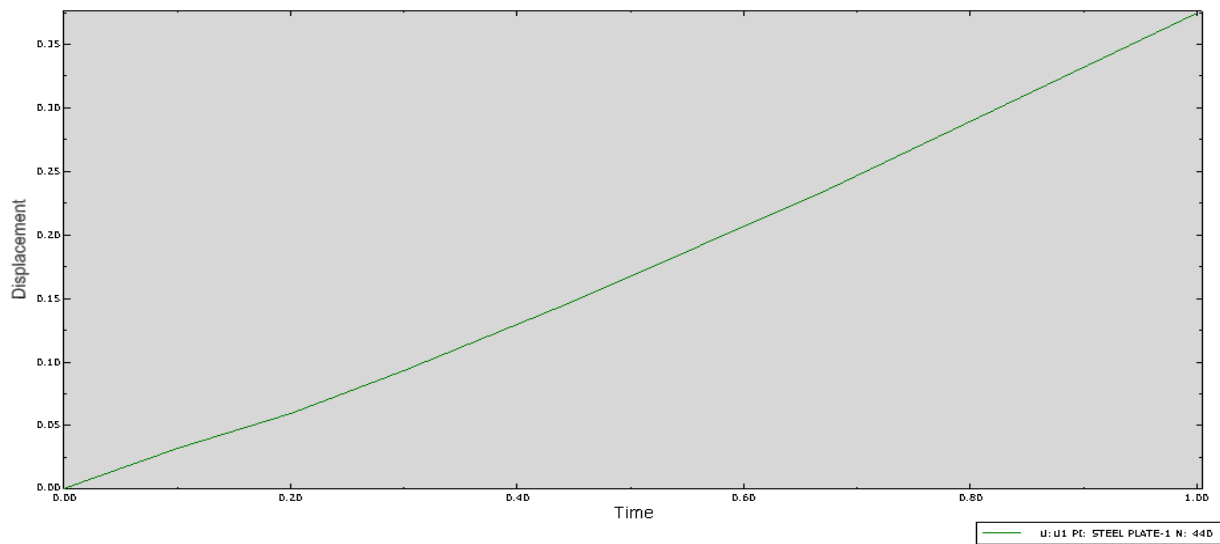


Σχήμα 6.29 Διάγραμμα ιστορίας τάσης τ_{xy} για το σημείο 7777

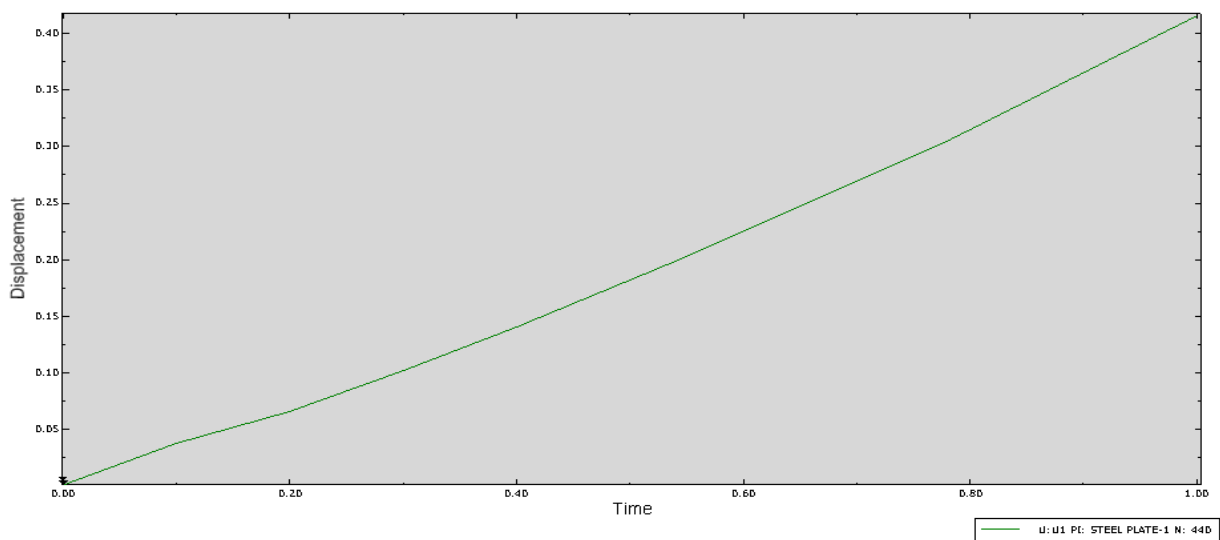
6.1.2 Μετατοπίσεις



Σχήμα 6.30 Διάγραμμα χρονοϊστορίας μετατόπισης δ_x για το σημείο 440 – χωρίς επίθεμα



6.31 Διάγραμμα χρονοϊστορίας μετατόπισης δ_x για το σημείο 440 – με απλό επίθεμα



6.32 Διάγραμμα χρονοϊστορίας μετατόπισης δ_x για το σημείο 440 – με σύνθετο επίθεμα

7 Συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα της εργασίας, λαμβάνοντας υπόψη την όλη μελέτη της σχετικής βιβλιογραφίας, ήταν αρκετά ικανοποιητικά επιβεβαιώνοντας την αποτελεσματικότητα της μεθόδου επιδιόρθωσης με επίθεμα σύνθετου υλικού.

Η ανάλυση ενός αρκετά αξιόπιστου μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων και έπειτα η δημιουργία των διαγραμμάτων που μας ενδιέφεραν κάνει προφανή τη χρησιμότητα αυτών των επιθεμάτων ακόμα και με τα περιθώρια σφάλματος που μπορεί να έχει αυτή η προσομοίωση. Στον πίνακα 7.1 παρατίθενται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα με τις μέγιστες τιμές των τάσεων και των παραμορφώσεων στα σημεία που αναλύθηκαν παραπάνω κατά τις δοκιμές με το φορτίο των 270MPa.

7.1 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα

	S11	S22	S12	U1
<i>1^η Δοκιμή – Φόρτιση με 270MPa, χωρίς επίθεμα</i>				
848	191.2	-67.8561	122.411	
2417	378.34	91.9678	-4.11816	
440				0.745012
<i>2^η Δοκιμή – Φόρτιση με 270MPa, με απλό επίθεμα</i>				
848	184.893	6.4559	68.5973	
2417	258.812	164.997	1.68604	
9450	167.508	-4.04368	0.257297	
7777	161.535	-3.37013	0.178727	
440				0.374848
<i>3^η Δοκιμή – Φόρτιση με 270MPa, με σύνθετο επίθεμα</i>				
848	197.679	4.51068	78.332	
2417	368.899	190.715	1.02415	
9450	110.223	-21.8235	0.365095	
7777	105.667	-31.3614	0.166228	
440				0.415587

Η διάδοση της ρωγμής περιορίστηκε, λοιπόν, σε πολύ μεγάλο βαθμό. Ενώ στην πρώτη δοκιμή η ρηγματωμένη πλάκα στο σημείο που εξετάστηκε στο κεφάλαιο 6 είχε μία μετατόπιση 0.745012mm, με το απλό επίθεμα μειώθηκε στα 0.374848mm (περίπου 49%) και με το σύνθετο, που ανταποκρίνεται λίγο περισσότερο στην πραγματικότητα, στα 0.415587mm (44%).

Επίσης, από τα διαγράμματα αλλά και τα παραμορφωμένα μοντέλα, βλέπουμε μία εξομάλυνση της κατανομής των τάσεων. Η εφαρμογή του επιθέματος βρέθηκε να επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό το τασικό πεδίο της πλευράς του υποστρώματος που εφάπτεται στο επίθεμα, μειώνοντάς τις.

Σε κάθε περίπτωση μεγαλύτερες τάσεις είχαμε στα άκρα της ρωγμής οι οποίες όμως και πάλι μειώθηκαν κατά ένα ποσοστό της τάξεως του 20%.

Τέλος, μετά από αρκετές ακόμα δοκιμές με μεγαλύτερα φορτία, διαπιστώθηκαν και οι ενισχυτικές ιδιότητες των επιθεμάτων αυτών. Με το απλό επίθεμα είχαμε μία αύξηση της αντοχής κατά 25%.

8 Βιβλιογραφία

Baker A. A., "Repair of cracked or defective metallic aircraft components with advanced fibre composites - an overview of Australian work", *Composite Structures*, 1984.

Baker A.A., "Fibre composite repair of cracked metallic aircraft components - practical and basic aspects", *Composites*, 1987.

Koski K., Tikka J., Baeckstroem M., Siljander A., Liukkonen S., Marquis G., "An aging aircraft's wing under complex multiaxial spectrum loading: Fatigue assessment and repairing", *International Journal of Fatigue*, 2005.

Turtona T.J., Dalzel-Jobb J., Livingstone F., "Oil platforms, destroyers and frigates - case studies of QinetiQ's marine composite patch repairs", *Composites*, 2005.

Grabovac I., "Bonded composite solution to ship reinforcement", *Composites*, 2003.

Grabovac I., Bartholomeusz R.A., Baker A.A., "Composite reinforcement of a ship superstructure - project overview", *Composites*, 1993.

Jones R., Callinan R.J., "A design study in crack patching", *Fibre Science and Technology*, 1981.

Turaga V.R.S. Umamaheswar, Ripudaman Singh, "Modeling of patch repair to a thin cracked sheet", *Engineering Fracture Mechanics*, 1999.

Ong C.L., Shen S.B., "The reinforcing effect of composite patch repairs on metallic aircraft structures", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 1992.

Roach DP, Graf D. Validation of bonded composite doubler technology through application oriented structural testing. In: *Proceedings of the 11th DoD/NASA/FAA conference on fibrous composites in structural design*, 1996.

Ting T, Jones R, Chiu WK, Marshall IH, Greer JM. Composite repairs to rib stiffened panels. *Composite Structures*, 1999

Lam YC, Zhu C, Heller M. Stress analysis of plates with bonded unbalanced laminates. *Composite Structures*, 1995.

Okafor AC, Singh N, Enemuoh UE, Rao SV. Design analysis and performance of adhesively bonded composite patch repair of cracked aluminum aircraft panels. *Composite Structures*, 2005.

Wang QY, Pidaparti RM. Static characteristics and fatigue behavior of composite-repaired aluminum plates. *Composite Structures*, 2002.

Seo DC, Lee JJ. Fatigue crack growth behavior of cracked aluminum plate repaired with composite patch. *Composite Structures*, 2002.

Achour T, Bachir Bouiadjra B, Serier B. Numerical analysis of the performances of the bonded composite patch for reducing stress concentration and repairing cracks at notch. *Composite Material Science*, 2003.

- Pastor ML, Balandraud X, Grudiac M, Robert JL. On the fatigue response of aluminium specimens reinforced with carbon–epoxy patches. *Composite Structures*, 2007.
- Umamaheswar TVRS, Singh R. Modeling of a patch repair to a thin cracked sheet. *Engineering Fracture Mechanics*, 1999
- Bachir Bouiadjra B, Belhouari M, Serier B. Computation of the stress intensity factors for repaired cracks with bonded composite patch in mode I and mixed mode. *Composite Structures*, 2002.
- Belhouari M, Bachir Bouiadjra B, Megueni A, Kaddouri K. Comparison of double and single bonded repairs to symmetric composite structures: a numerical analysis. *Composite Structures*, 2004.
- Lee WY, Lee JJ. Successive 3D FE analysis technique for characterization of fatigue crack growth behavior in composite-repaired aluminum plate. *Composite Structures*, 2004
- Bassetti A, Nussbaumer A, Hirt MA. Crack repair and fatigue life extension of riveted bridge members using composite materials. In: *Proceedings of bridge engineering conference (IABSE)*, Sharm El Sheikh, Egypt, 2000.
- Colombi P, Bassetti A, Nussbaumer A. Analysis of cracked steel members reinforced by pre-stress composite patch. *Fatigue Fracture Engineering*, 2003
- Colombi P, Poggi C. Strengthening of tensile steel members and bolted joints using adhesively bonded CFRP plates. *Construction and Building Materials*, 2006.
- Bocciarelli M, Colombi P, Fava G, Poggi C. Fatigue performance of tensile steel members strengthened with CFRP plates. *Composite Structures*, 2009.
- Bocciarelli M, Colombi P, Fava G, Poggi C. Prediction of debonding strength of tensile steel/CFRP joints using fracture mechanics and stress based criteria. *Engineering Fracture Mechanics*, 2009.
- Dalzel-Job J, Sumpter JDG, Livingstone F. Composite patch repair of steel ships. In: *Proceedings of advanced marine materials: technology and applications*, RINA conference, London, 2003.
- Grabovac I. Bonded composite solution to ship reinforcement. *Composites Part A – Appl S*, 2003.
- Turton TJ, Dalzel-Job J, Livingstone F. Oil platforms, destroyers and frigates – case studies of QinetiQ’s marine composite patch repairs. *Composites Part A – Appl S*, 2005.