

**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**



**ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΣΚΕΥΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗΣ**  
**ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΑΣ ΠΛΟΙΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΠΙΘΕΜΑΤΟΣ ΑΠΟ**  
**ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΑΥΓΟΥΛΑΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ-ΙΩΑΝΝΗΣ**

**Επιβλέπων: Αναπληρωτής Καθηγητής ΝΙΚΟΛΑΟΣ Γ. ΤΣΟΥΒΑΛΗΣ**

**Αθήνα, Ιούνιος 2011**

Στη Μητέρα Μου, Μαρίνα

Στη Μαρία

## Περιεχόμενα

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	1
1.1 Εισαγωγή στη μέθοδο επισκευής με σύνθετα υλικά.....	1
1.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση .....	4
1.3 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας.....	12
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΤΥΠΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΕΠΙΘΕΜΑΤΩΝ ΣΤΗ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗ</b> .....	14
2.1 Τυπικές εφαρμογές σύνθετων επιθεμάτων στη ναυπηγική .....	14
2.1.1 Εισαγωγή .....	14
2.1.2 Πρώτη τυπική περίπτωση .....	15
2.1.3 Δεύτερη τυπική περίπτωση.....	17
2.1.4 Τρίτη τυπική περίπτωση .....	18
2.1.5 Τέταρτη τυπική περίπτωση.....	22
2.1.6 Πέμπτη τυπική περίπτωση.....	23
2.1.7 Έκτη τυπική περίπτωση.....	25
2.2 Επιλογή περίπτωσης για εξέταση .....	26
2.3 Κατάσταση φόρτωσης – Common Structural Rules (CSR) .....	33
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ</b> .....	38
3.1 Τρόπος μοντελοποίησης κατασκευής με επίθεμα από σύνθετα υλικά – Παραμετρική μελέτη.....	38
3.1.1 Εισαγωγή .....	38
3.1.2 Γενικά περί πεπερασμένων στοιχείων .....	38
3.1.3 Προεπεξεργασία (Preprocessing) .....	40
3.1.4 Επίλυση (Solution).....	48
3.1.5 Μετεπεξεργασία (Postprocessing).....	50
3.2 Διαδικασία.....	65
3.3 Μοντέλο τριών κυτών πλοίου (Three Compartments Model, TCM) .....	66
3.3.1 Δημιουργία γεωμετρίας TCM.....	66
3.3.2 Δημιουργία πλέγματος στοιχείων .....	69
3.3.3 Εφαρμογή των φορτίων που προβλέπουν οι κανονισμοί CSR.....	71
3.4 Μοντέλο έδρας πλευρικής δεξαμενής διπύθμενου (Hopper Tank Floor, HTF) .....	74
3.4.1 Γεωμετρία .....	74
3.4.2 Επιλογή στοιχείων – Δημιουργία πλέγματος.....	75
3.4.3 Επιβολή φορτίσεων.....	77

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ</b> .....	79
4.1 Σύγκριση Μοντέλων (Shell – Solid).....	79
4.2 Επιλογή περιοχών για εμφάνιση ρωγμής.....	92
4.3 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων.....	103
4.3.1 Περιοχή 1.....	103
4.3.2 Περιοχή 2.....	117
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</b> .....	143
5.1 Συμπεράσματα της αριθμητικής μοντελοποίησης.....	143
5.2 Προτάσεις για περαιτέρω μελέτη και επέκταση της εργασίας.....	145
Βιβλιογραφία.....	146

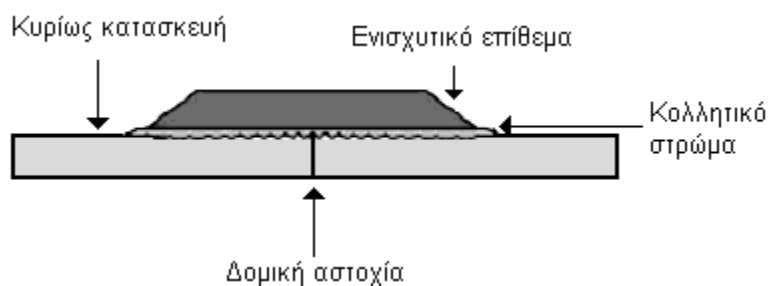
# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Εισαγωγή στη μέθοδο επισκευής με σύνθετα υλικά

Η χρήση επιθεμάτων από σύνθετα υλικά ως μέσο πρόχειρης και γρήγορης επισκευής έχει μακρά ιστορία και θεωρείται ένας από τους πιο άμεσους και αποτελεσματικότερους τρόπους επίλυσης προβλημάτων που συνεπάγεται μια πιθανή αστοχία σε κατασκευές και εξαρτήματα όπως η γάστρα ενός πλοίου, η άτρακτος ενός αεροσκάφους, ακόμα και η σαμπρέλα στο ελαστικό ενός αυτοκινήτου. Τα τελευταία χρόνια, η έκρηξη της τεχνολογίας των σύνθετων υλικών και πιο συγκεκριμένα των σύνθετων ενισχυμένων με ίνες (FRP-Fibre Reinforced Plastics), καθώς και των κολλητικών ουσιών υψηλής αντοχής έχει καταφέρει να καταστήσει αποτελεσματικότερες τις προσωρινές αυτές επισκευές. Επιπλέον, έχει οδηγήσει και στην ανάπτυξη μιας εξολοκλήρου νέας επιστήμης ανθεκτικών επισκευών για τις μεταλλικές και όχι μόνο κατασκευές, η οποία μπορεί να επιδιορθώσει πλήρως τη βλάβη και σε πολλές περιπτώσεις να επεκτείνει τον αρχικό χρόνο ζωής τους. Λόγω των πολύ «ευέλικτων» ιδιοτήτων εφαρμογής που εμφανίζουν τα σύνθετα υλικά, ειδικά σε επείγουσες περιπτώσεις αποκατάστασης, προτιμώνται από τις συμβατικές μεθόδους. Μερικά τυπικά παραδείγματα εφαρμογών έχουν αναφερθεί στην αεροπορική βιομηχανία, σε πολεμικά πλοία, στη γεφυροποιία, σε μεγάλες κτιριακές κατασκευές και φυσικά στη ναυπηγική βιομηχανία.

Για να εφαρμοστεί η νέα αυτή μέθοδος πρέπει να κατασκευαστεί το επίθεμα από σύνθετα υλικά. Το επίθεμα αποτελείται από ρητίνη (συνήθως εποξική) και από ίνες κατάλληλων διαστάσεων και αντοχής (συνήθως ίνες γυαλιού ή άνθρακα ή βορίου). Για να πραγματοποιηθεί η ένωση με την υπό επισκευή επιφάνεια χρησιμοποιείται κολλητική ουσία και με κατάλληλη μεθοδολογία τοποθετείται το επίθεμα (Σχήμα 1.1).



**Σχήμα 1.1:** Επίθεμα από σύνθετα υλικά κολλημένο σε μεταλλικό έλασμα με δομική αστοχία.

Η αναγκαιότητα χρήσης της τεχνολογίας επιθεμάτων από σύνθετα υλικά στη ναυπηγική πηγάζει από τις συχνά εμφανιζόμενες δομικές αστοχίες της μεταλλικής κατασκευής των πλοίων, λόγω της συνεχόμενης καταπόνησής της σε μεγάλα φορτία. Ωστόσο, οι περισσότερες περιπτώσεις αστοχιών εμφανίζονται όταν το πλοίο βρίσκεται αρκετές χιλιάδες ναυτικά μίλια μακριά από τους πιθανούς τόπους επισκευής του. Οι συνήθεις δομικές αστοχίες είναι ρωγμές, διαβρωμένες επιφάνειες, που οδηγούν στη μείωση του ενεργού πάχους του ελάσματος, και τοπικές παραμορφώσεις. Οι παραπάνω αστοχίες εμφανίζονται σε διάφορα μέρη της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου, όπως στη γάστρα, στις υπερκατασκευές, στις φρακτές, στα διπύθμενα κ.α. Οφείλονται σε παράγοντες όπως:

- Στην εναλλασσόμενη φόρτιση από τους κυματισμούς (hogging-sagging)
- Στο έντονα διαβρωτικό θαλάσσιο περιβάλλον
- Στα διάφορα ατυχήματα κατά τη διάρκεια της επιχειρησιακής τους ζωής

Μόλις εντοπιστεί η αστοχία, αποτελεί άμεση προτεραιότητα η επισκευή της, έτσι ώστε το πλοίο να συνεχίσει να εκτελεί ασφαλώς τον πλού του. Η επισκευή μιας τέτοιου είδους αστοχίας μπορεί να οδηγήσει σε επιχειρησιακή ανετοιμότητα του πλοίου, πόσο μάλλον εάν απαιτηθεί έκτατος δεξαμενισμός του, με πολύ σημαντικές οικονομικές επιπτώσεις. Επομένως, είναι αντιληπτό ότι υπάρχει ανάγκη από μία άμεση ή προσωρινή επισκευή που θα επιτρέψει στο πλοίο την κανονική συνέχεια της λειτουργίας του. Την παραπάνω ανάγκη έρχονται να καλύψουν οι επισκευές με επίθεμα από σύνθετα υλικά, οι οποίες φαίνονται ιδανικές σε τέτοιου είδους καταστάσεις και ήδη έχουν σημειώσει αρκετές επιτυχημένες απόπειρες [1,2,3].

Στην περίπτωση που η εύρεση της δομικής αστοχίας παρατηρείται στον προγραμματισμένο δεξαμενισμό του πλοίου, οι επιδιορθώσεις γίνονται με τις κλασσικές μεθόδους επισκευής, όπως με τη χρήση συγκολλήσεων και την εφαρμογή κοχλιωτών μεταλλικών επιθεμάτων. Εδώ, πρέπει να αναφερθεί ότι η χρήση της τεχνολογίας των σύνθετων επιθεμάτων, ως μέθοδος επισκευής με μόνιμο χαρακτήρα δεν έχει εγκριθεί από τους αρμόδιους νηογνώμονες.

Η τεχνολογία όμως των σύνθετων επιθεμάτων λύνει πολλές από τις αδυναμίες των κλασσικών μεθόδων επισκευής, προσφέροντας μια εύκολη, οικονομική και προπάντων γρήγορη λύση, ενισχύοντας την κατασκευή και επαναφέροντας σε μεγάλο ποσοστό την αρχική ακαμψία και αντοχή της.

Οι επισκευές με σύνθετα επιθέματα αποδεικνύονται σημαντικά πιο οικονομικές σε σχέση με τις παραδοσιακές, επειδή:

1. Δεν απαιτείται θερμική κατεργασία του επιθέματος σε υψηλές θερμοκρασίες, αποφεύγοντας πιθανό άδειασμα γειτονικών δεξαμενών του πλοίου ή της αναγκαίας, υποχρεωτικής διαδικασίας αδρανοποίησης δεξαμενών φορτίου καυσίμων (gas free) που επιβάλλεται και προβλέπεται σε περίπτωση αποκοπής και συγκόλλησης χαλύβδινων ελασμάτων.
2. Αποφεύγεται η δημιουργία νέων σημείων συγκέντρωσης τάσεων, λόγω της απουσίας θερμικών τάσεων (συγκολλήσεις) και οπών (κοχλιωτά μεταλλικά επιθέματα), καθιστώντας την κατασκευή ανθεκτική σε κόπωση.
3. Μπορούν να γίνουν είτε μονόπλευρα, είτε αμφίπλευρα, σε αντίθεση με την εφαρμογή κοχλιωτών μεταλλικών επιθεμάτων όπου απαιτείται προσβασιμότητα και από τις δύο πλευρές του προς επισκευή ελάσματος.

Αντιθέτως με τις συμβατικές μεθόδους, η ενίσχυση με επιθέματα από σύνθετα υλικά που αποτελούνται από ίνες άνθρακα (Carbon Fibre Reinforced Plastics, CFRP) είναι μία σχετικά νέα μέθοδος στη ναυπηγική που υπόσχεται ελκυστικότερες μηχανικές, θερμικές και φυσικές ιδιότητες, λόγω της ευκολίας τοποθέτησης του επιθέματος και των άριστων ιδιοτήτων του. Επιπλέον, τα σύνθετα υλικά προσδίδουν πολύ ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά στην περιοχή τοποθέτησης τους, τα οποία ενδιαφέρουν την ναυπηγική επιστήμη, όπως:

- χαμηλό βάρος
- αντίσταση στη διάβρωση
- χαμηλές απαιτήσεις συντήρησης
- ανθεκτικότητα-αντοχή μακράς διάρκειας σε συνθήκες υπηρεσίας θαλάσσιου περιβάλλοντος
- σθεναρή ανθεκτικότητα σε θραύση από κόπωση

Η τελευταία ιδιότητα είναι ιδιαίτερος σημαντική, καθώς οι ναυπηγικές κατασκευές καταπονούνται εντονότατα σε περιοδικά φορτία (π.χ. λόγω κυματισμών) και οι επισκευές τους με επιθέματα από σύνθετα υλικά παρεμποδίζουν τη διάδοση ρωγμών, παρέχοντας εναλλακτικές γεωμετρικές διαδρομές αποφόρτισης των τάσεων και ανακουφίζοντας έτσι τη μεταλλική κατασκευή.

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

Η τεχνολογία των επιθεμάτων από σύνθετα υλικά αποτελεί έναν ταχύτατα αναπτυσσόμενο κλάδο. Πολυάριθμες πειραματικές δοκιμές πραγματοποιούνται για τη βελτιστοποίηση και τη μελέτη της συμπεριφοράς των επιθεμάτων, ενώ παράλληλα αναπτύσσονται σχετικά αριθμητικά μοντέλα για την προσομοίωση της συμπεριφοράς της συνολικής επισκευασμένης διατομής.

Στη συνέχεια, γίνεται μια σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με εφαρμογές των σύνθετων επιθεμάτων στη ναυπηγική και παρουσιάζονται κάποιες από τις σημαντικότερες μελέτες και δημοσιεύσεις. Προς την κατεύθυνση αυτή κινείται και η παρούσα διπλωματική εργασία, ο σκοπός της οποίας θα διασαφηνιστεί σε επόμενο εδάφιο.

## **1.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση**

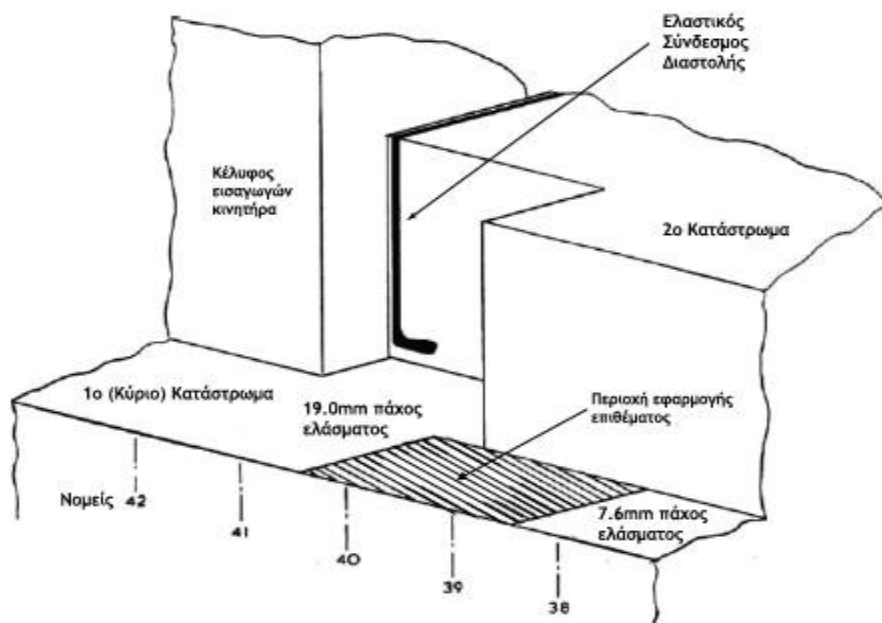
Η αεροπορική βιομηχανία υπήρξε πρωτοπόρος στην εφαρμογή επιθεμάτων από σύνθετα υλικά σε μεταλλικά ελάσματα με τη χρήση κολλητικών μέσων. Η χρήση αλουμινίου, κυρίαρχου υλικού σε τέτοιου είδους εφαρμογές, το οποίο δεν επιδέχεται συγκόλληση ούτε επισκευή με κοχλιωτά μεταλλικά επιθέματα για την επιδιόρθωση ατελειών, οδήγησε στην ανάπτυξη της τεχνολογίας των σύνθετων επιθεμάτων. Η νέα αυτή τεχνολογία εφαρμόζεται στην αεροναυπηγική καθώς και στην αεροδιαστημική εδώ και δεκαετίες και παρουσιάζει συνεχή εξέλιξη. Πρωτοπόρος στην επισκευή με επιθέματα από σύνθετα υλικά ήταν ο Alan Baker. Η πληθώρα πειραμάτων του τον οδήγησε στον περιορισμό των δυσκολιών εφαρμογής της τεχνολογίας επιθεμάτων, στην ανάπτυξη μεθοδολογίας για αυτήν, καθώς και στην βελτιστοποίηση της μεθόδου. Ενδεικτικά, πραγματοποίησε πολλές επισκευές με σύνθετα υλικά σε αεροσκάφη της πολεμικής αεροπορίας της Αυστραλίας και των ΗΠΑ. Η χρήση της τεχνολογίας των σύνθετων επιθεμάτων επεκτάθηκε και στη ναυπηγική βιομηχανία, με αρχικό πεδίο εφαρμογής τα πολεμικά σκάφη και στη συνέχεια τα εμπορικά.



Οι πρώτες μελέτες που συνέδεσαν τη θεωρία με την πράξη στη ναυπηγική βιομηχανία αφορούσαν την επισκευή ρωγμών σε αλουμιένιες υπερκατασκευές φρεγατών. Συγκεκριμένα, στη δεκαετία του '80, σε φρεγάτες τύπου Amazon Class (Σχήμα 1.2) του πολεμικού ναυτικού της Μ.Βρετανίας, χρειάστηκαν επισκευή ρωγμής, μήκους 500 mm. Η μέθοδος της συγκόλλησης δεν απέδωσε εξαιτίας του κράματος αλουμινίου από το οποίο αποτελούνταν οι υπερκατασκευές, καθώς αστόχησε σε μικρό χρονικό διάστημα. Από την άλλη, η χρήση μεταλλικών επιθέματων δεν ήταν δυνατή λόγω αδυναμίας διαμόρφωσής τους στην απαιτούμενη γεωμετρία. Έτσι, έγινε για πρώτη φορά δοκιμή επιθέματος από ίνες άνθρακα με εποξική ρητίνη για την επισκευή της ρωγμής, η οποία αρχικά είχε συγκολληθεί. 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. Το παραπάνω εγχείρημα στέφθηκε με επιτυχία και η τεχνική αυτή υιοθετήθηκε και επεκτάθηκε και στις υπόλοιπες φρεγάτες ίδιου τύπου χωρίς να παρουσιαστεί επανεμφάνιση της ρωγμής για τα επόμενα 10 χρόνια κατά τα οποία τα πλοία ήταν εν ενεργεία [3].



**Σχήμα 1.2:** Φρεγάτα του RN κλάσης Amazon



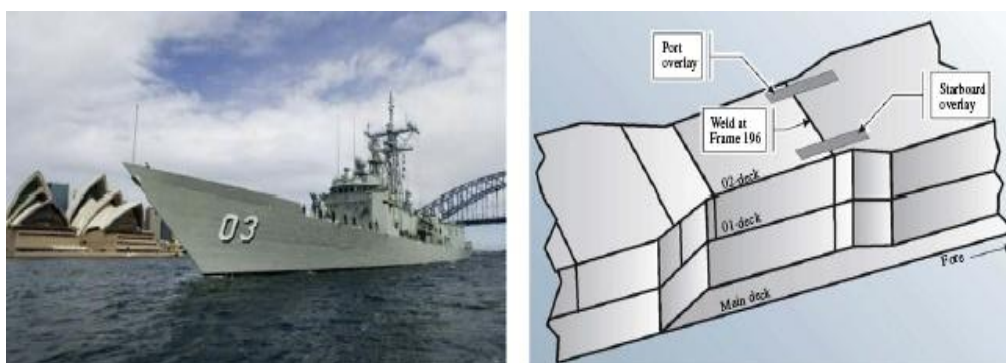
**Σχήμα 1.3:** Τοποθεσία της ρωγμής στις υπερκατασκευές και τοποθέτηση σύνθετου επιθέματος.

Επίσης μέχρι το 1997, αναφέρεται ότι 35 σύνθετα επιθέματα έχουν τοποθετηθεί επιτυχώς σε αντιτορπικά σκάφη του RN (Σχήμα 1.3).



**Σχήμα 1.4:** Αντιτορπικό σκάφος Τύπου 42

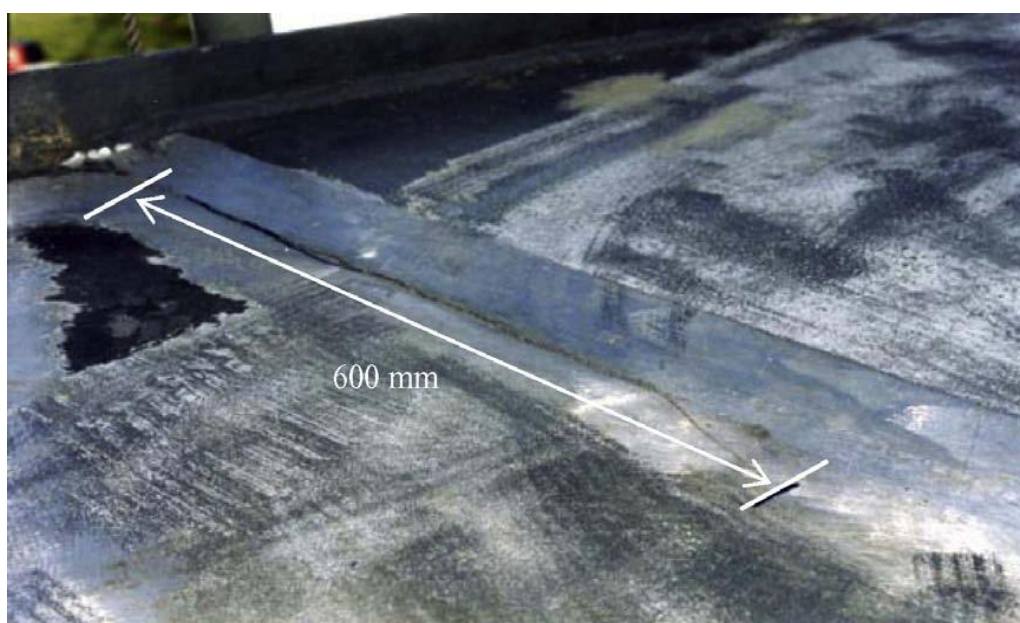
Η επιτυχία αυτής της μεθόδου επισκευής την κατέστησε ιδανική σε αντίστοιχες περιπτώσεις. Η αμέσως επόμενη εφαρμογή της μεθόδου που συναντάται στη βιβλιογραφία [5], [6] εντοπίζεται το 1993 και αφορά στην επισκευή φρεγατών. Από τα μέσα της δεκαετίας του '80 εμφανίστηκαν ρωγμές στις αλουμιένιες υπερκατασκευές των φρεγατών κλάσης FFG-7 (Σχήμα 1.5, 1.6) του πολεμικού ναυτικού της Αυστραλίας (Royal Australian Navy, RAN). Η πρώτη αντιμετώπιση των ρωγμών έγινε με χρήση συγκόλλησης και με τοποθέτηση μεταλλικών επιθεμάτων. Και οι δύο μέθοδοι ήταν ανεπιτυχείς και οι ρωγμές επανεμφάνιστηκαν. Σε συνεργασία με τον οργανισμό Defense Science and Technology Organisation (DSTO) τοποθετήθηκε σύνθετο επίθεμα ενισχυμένο με ίνες άνθρακα καθώς και ένα προστατευτικό στρώμα Glass Reinforced Plastic (GRP) για να προστατεύει την κατασκευή από την διάβρωση (Σχήμα 1.7, 1.8).



α

β

**Σχήμα 1.5:** (α) Η φρεγάτα 'Sydney' τύπου FFG-7 του RAN και (β) τοποθεσία των σύνθετων ενισχυτικών στο δεύτερο κατάστρωμα των υπερκατασκευών

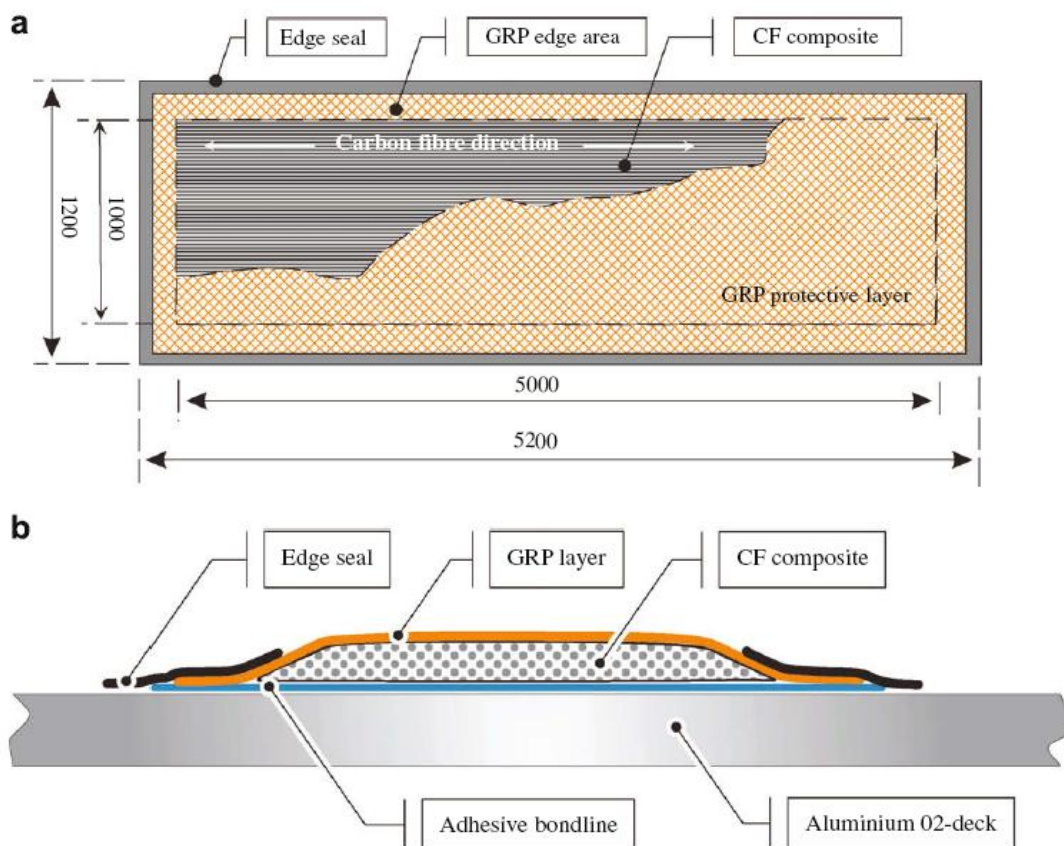


**Σχήμα 1.6:** Η ρωγμή στο κατάστρωμα πριν την εφαρμογή του επιθέματος



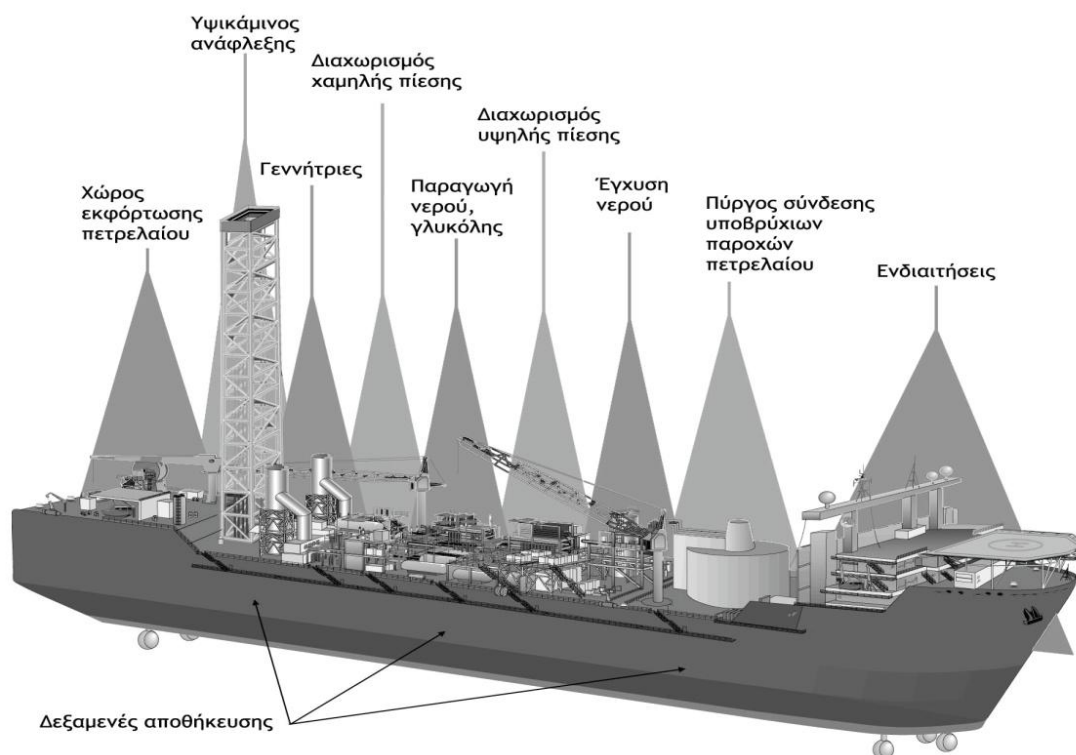
**Σχήμα 1.7:** Επίθεμα τοποθετημένο στο κατάστρωμα υπερκατασκευής

Μετά από 15 χρόνια σε ενεργό δράση δεν παρουσιάστηκε επανεμφάνιση των ρωγμών στις φρεγάτες. Εργασίες συντήρησης που πραγματοποιήθηκαν σε αυτό το διάστημα αφορούσαν κυρίως την αποκατάσταση του προστατευτικού στρώματος GRP, το οποίο είχε υποστεί μηχανικές φθορές και είχε διαβρωθεί από το θαλάσσιο περιβάλλον. Στο σχήμα 1.8 φαίνονται οι διαστάσεις του επιθέματος σε mm καθώς και μία τομή του.



**Σχήμα 1.7:** (a) Διαστασιολογημένη κάτοψη επιθέματος (b) τομή επιθέματος

Η χρήση σύνθετων επιθεμάτων στα εμπορικά πλοία δεν είναι ακόμα τόσο διαδεδομένη, τα πλεονεκτήματα όμως αυτής της μεθόδου επισκευής τα καθιστούν ιδανικά σε αρκετές περιπτώσεις. Μία πιο πρόσφατη εφαρμογή της μεθόδου [3] έγινε το 2002 σε πλοίο παραγωγής, αποθήκευσης και διανομής πετρελαίου (Floating Production, Storage and Offloading – FPSO). Αυτού του τύπου τα πλοία είναι μόνιμα παροπλισμένα πάνω από πετρελαιοπηγές και αντλούν το ορυκτό έλαιο από ευλύγιστους, ειδικά κατασκευασμένους σωλήνες (risers). Είναι, δηλαδή, πλατφόρμες εξόρυξης και επεξεργασίας πετρελαίου οι οποίες διαθέτουν επιπλέον μεγάλες δεξαμενές όπου αποθηκεύεται το πετρέλαιο, Σχήμα 1.8, ενώ παράλληλα μπορούν να μεταφερθούν με ευκολία μεταξύ κοιτασμάτων, αν παραστεί η ανάγκη. Συνήθως, πρόκειται για μεγάλα δεξαμενόπλοια τα οποία μετασκευάστηκαν για να εξυπηρετήσουν το σκοπό αυτό. Τη μελέτη και διεκπεραίωση της επισκευής ανέλαβε η εταιρία QinetiQ με έδρα τη Μεγάλη Βρετανία.



**Σχήμα 1.8:** Τυπική διάταξη πλοίου FPSO

Το 2002, λοιπόν, επισκευάστηκαν τρεις ρωγμές που εντοπίστηκαν σε πλοίο FPSO στη Νορβηγία. Οι ρωγμές προκλήθηκαν από κόπωση στις δεξαμενές φορτίου, καθώς η αγκύρωση του πλοίου που είναι απαραίτητη για την συγκράτηση του σε συγκεκριμένη θέση, δημιουργούν ένα κοπωτικό περιβάλλον πιο αντίξοο σε σχέση με το αν το πλοίο έπλεε ελεύθερα. Οι ρωγμές, που είχαν μήκος περίπου 60 mm σε μια φρακτή που χώριζε το χώρο φορτίου από την δεξαμενή ζυγοστάθμισης, προκαλούσαν διαφυγή του πετρελαίου από την δεξαμενή του φορτίου στην δεξαμενή ζυγοστάθμισης και από εκεί στο θαλάσσιο περιβάλλον. Η επισκευή με συγκόλληση θα απαιτούσε να αδειάσουν και να καθαριστούν προσεχτικά δύο δεξαμενές

εκατέρωθεν της προβληματικής δεξαμενής, δηλαδή πέντε συνολικά (μαζί με την προς επισκευή) δεξαμενές. Αποτέλεσμα θα ήταν η σημαντική μείωση της αποθηκευτικής ικανότητας του πλοίου κατά τη διάρκεια των θερμών εργασιών.

Αντίθετα, με την εφαρμογή του επιθέματος, το οποίο αποτελούνταν από ίνες άνθρακα σε εποξική μήτρα, (μέγιστη θερμοκρασία σκλήρυνσης της μήτρας 60 °C) (Σχ. 1.9), μόνο μία δεξαμενή χρειάστηκε να αδειάσει, δίνοντας τη δυνατότητα στο χειριστή να διατηρεί μέγιστο επίπεδο εκμετάλλευσης της παραγωγής υδρογονανθράκων για τις 15 μέρες που διήρκησαν οι εργασίες.



**Σχήμα 1.9:** Σύνθετο επίθεμα διαστάσεων 750×250 mm τοποθετημένο σε δεξαμενή φορτίου πλοίου FPSO για την επισκευή ρωγμής.

Στα πλοία FPSO, τα οφέλη της επισκευής με χρήση επιθεμάτων από σύνθετα υλικά, έναντι των συμβατικών, εντοπίζονται σε οικονομικό επίπεδο, αφού τα πλοία διατήρησαν την αποθηκευτική και επιχειρησιακή τους ικανότητα με το λιγότερο δυνατό κόστος. Δεκαοκτώ μήνες μετά την εφαρμογή του επιθέματος στις ρωγμές δεν είχε παρουσιαστεί κανένα πρόβλημα στην επισκευασμένη περιοχή.

Όπως αναφέρθηκε, ένα χαρακτηριστικό της επισκευής κατασκευών με χρήση σύνθετων υλικών είναι η αποφυγή ανάπτυξης υψηλών θερμοκρασιών. Η μελέτη του Νορβηγικού νηογνώμονα (DNV) κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η χρήση των επιθεμάτων μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα εμπορικά πλοία μεταφοράς ή αποθήκευσης πετρελαίου (FOUs, FPSO, FSO, Tanker, Product) και να περιορίσει τη διάδοση ρωγμών, που έχουν προκληθεί από κόπωση. Υπερτερεί, δηλαδή, σε σχέση με τις μεθόδους της συγκόλλησης και των θερμών εργασιών, αφού οι τελευταίες εκτός από την επικινδυνότητα που τις διακρίνει, απαιτούν και το άδειασμα και τον καθαρισμό των προβληματικών δεξαμενών πριν την επισκευή, πράγμα χρονοβόρο και ζημιογόνο. Η μελέτη διεξάχθηκε σε ρωγμές που εντοπίστηκαν σε πλοίο τύπου FSO και η τοποθέτηση επιθεμάτων από σύνθετα υλικά οδήγησε στην άμεση παύση

της διάδοσης των ρωγμών. Παρόλα αυτά δεν υπάρχουν ακόμα ούτε αρκετά στοιχεία ούτε πρακτικές εφαρμογές που να αποκλείουν την αστοχία τέτοιου είδους επισκευών, γι' αυτό δεν έγιναν παρεμβάσεις σε κρίσιμα για την ακεραιότητά και τη διατήρηση της πλευστότητάς του πλοίου σημεία.

Για να διερευνηθεί, λοιπόν, περαιτέρω η αποτελεσματικότητα και τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου επισκευής πραγματοποιούνται παράλληλα με τις πρακτικές εφαρμογές, και έρευνες που αποσκοπούν στην ανάπτυξη συγκεκριμένης μεθοδολογίας και στην πιστοποίησή της μεθόδου από νηογνώμονες. Κατά τη διάρκεια των πειραματικών δοκιμών εξετάζονται διάφοροι παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν τη επισκευή όπως το μέταλλο κατασκευής, τα υλικά των σύνθετων επιθεμάτων, η γεωμετρία κ.α. Η ανάπτυξη μιας αξιόπιστης μεθόδου υπολογισμού και πρόβλεψης της αποτελεσματικότητας της επισκευής στηρίζεται στις δοκιμές με χρήση Πεπερασμένων Στοιχείων.

Όσο αφορά την εταιρία QinetiQ, έχει εδραιωθεί στο χώρο των επισκευών, έχοντας συνεργαστεί με πολλούς κατασκευαστές αλλά και με ναυπηγεία για την δημιουργία επιθεμάτων που χρησιμοποιούνται σε πολεμικά πλοία που έχουν υποστεί βλάβες. Σε αρκετές περιπτώσεις, όμως, η επισκευή δεν είναι μόνιμη αλλά γίνεται για να αντέξει η κατασκευή έως τον προγραμματισμένο δεξαμενισμό του πλοίου ή την ολοκλήρωση του τρέχοντος ταξιδιού του. Επίσης, η συγκεκριμένη εταιρία κάνει έρευνα για νέα υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε ως επιθέματα είτε ως κολλητικά και μονωτικά στρώματα, αλλά και για την προετοιμασία της επιφάνειας πριν εφαρμοστεί η ενίσχυση.

Τέλος, το άμεσο ζητούμενο κατά το σχεδιασμό ενός επιθέματος είναι η μείωση του συντελεστή έντασης τάσης (ΣΕΤ) [6]. Ακόμα και μόνο μία επίστρωση ενός στρώματος επιθέματος είναι αρκετή για να έχουμε μείωση του ΣΕΤ. Με την χρήση πεπερασμένων στοιχείων, προσομοιώθηκαν πλάκες κράματος αλουμινίου 2024 T3 που είναι διαβρωμένες και φέρουν ρωγμές περιφερειακά της διαβρωμένης περιοχής. Από τις παραπάνω προσομοιώσεις εξήχθησαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Αφού τοποθετήθηκε το επίθεμα, υπήρξε μετατόπιση των περιοχών μέγιστης τάσης της πλάκας, από τις ακμές της διαβρωμένης περιοχής και του μετώπου της ρωγμής, στις ακμές του επιθέματος. Με την αύξηση των στρώσεων του επιθέματος από σύνθετο υλικό, και κατά συνέπεια του πάχους του, μειώθηκαν οι παραπάνω τάσεις.
- Για το παχύ ενισχυμένο δοκίμιο, η μέγιστη επιφανειακή τάση μειώθηκε κατά 26-37% σε σχέση με το μη ενισχυμένο.
- Πειράματα εφελκυσμού έδειξαν ότι το δοκίμιο με το επίθεμα αντέχει περισσότερο από το αντίστοιχο δοκίμιο χωρίς το επίθεμα. Συγκεκριμένα, το μη ενισχυμένο δοκίμιο, αστόχησε μετά από φόρτιση 155,6kN και μετατόπιση 7,62mm, ενώ το ενισχυμένο δοκίμιο, άντεξε σε φόρτιση 200,17kN και μετατόπιση 15,24mm και δεν αστόχησε. Τέλος, παρατηρήθηκε ότι η αστοχία στο ενισχυμένο δοκίμιο ξεκίνησε στο στρώμα κόλλας και προήλθε από διάτμηση. Τα πειράματα επιβεβαίωσαν τα αποτελέσματα των πεπερασμένων στοιχείων.

### 1.3 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας

Τα προτερήματα που παρουσιάζουν τα σύνθετα επιθέματα σε σχέση με τους συνήθεις τύπους επισκευών καθιστούν αναγκαία την καθιέρωσή τους στη ναυπηγική. Η χρήση όμως της τεχνολογίας επιθεμάτων στις ναυπηγικές κατασκευές δεν είναι τόσο διαδεδομένη όσο στις αντίστοιχες αεροναυπηγικές. Η μη ύπαρξη κανονισμών και σταδίων μεθοδολογίας εμποδίζει την ευρεία χρήση της νέας αυτής τεχνολογίας, αφού δεν υπάρχει τυποποίηση των εργασιών, από τη φάση του σχεδιασμού ως την εφαρμογή των επιθεμάτων και τον έλεγχο ποιότητας. Επίσης, επειδή κάθε περίπτωση αντιμετωπίζεται σαν ξεχωριστή, έχουμε μελέτη της κάθε επισκευής από την αρχή, αυξημένο χρόνο προετοιμασίας και κυρίως, όχι εξασφαλισμένη έκδοση πιστοποιητικού από το νηογνώμονα για την αποτελεσματικότητα της επισκευής μας, και για το αν αυτή χρήζει περαιτέρω επισκευής στον επόμενο λιμενισμό ή δεξαμενισμό του πλοίου. Αν αποδειχθεί η αποτελεσματικότητα της μεθόδου, θα μπορέσει να επιτευχθεί και η τυποποίησή της.

Προς αυτή την κατεύθυνση κινείται η παρούσα διπλωματική εργασία, όπου με την μοντελοποίηση μιας κατασκευαστικής λεπτομέρειας ενός πλοίου που φέρει αστοχία (ρωγμή) με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, αποδεικνύει θεωρητικά την αποτελεσματικότητα των επισκευών με σύνθετα επιθέματα και την καταλληλότητα της χρήσης τους στη ναυπηγική.

Αρχικά, στο πρώτο κεφάλαιο, γίνεται μια εισαγωγή στο αντικείμενο της εργασίας, περιγράφοντας συνοπτικά τι περιλαμβάνει και για ποιό λόγο έχει αναπτυχθεί η τεχνολογία των σύνθετων επιθεμάτων. Στη συνέχεια, ακολουθεί βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με εφαρμογές των σύνθετων επιθεμάτων στη ναυπηγική.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, πραγματοποιείται αναλυτική καταγραφή μερικών από τις συνηθέστερες περιοχές σε χαλύβδινα σκάφη όπου εμφανίζονται ρωγμές και ελαττώματα ικανά να δημιουργήσουν τοπική αστοχία και στις οποίες είναι δυνατή η εφαρμογή επιθεμάτων. Ακολουθεί η επιλογή της περίπτωσης που θα εξεταστεί καθώς και η περιγραφή του πλοίου και της κατασκευαστικής λεπτομέρειας που θα μοντελοποιηθεί. Τέλος περιγράφεται η κατάσταση φόρτωσης του συγκεκριμένου πλοίου με βάση τους κανονισμούς (Common Structural Rules, CSR).

Στο τρίτο κεφάλαιο, γίνεται αρχικά μια εισαγωγή στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και στη συνέχεια μία παραμετρική μελέτη με χρήση πεπερασμένων στοιχείων ενός απλού ορθογώνιου δοκιμίου με κεντρική διαμπερή ρωγμή. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε για να βρεθεί ο βέλτιστος τρόπος μοντελοποίησης του δοκιμίου, συγκρινόμενος και με βιβλιογραφική αναφορά, με και χωρίς επίθεμα από σύνθετα υλικά, για να εφαρμοστεί μετά στην μοντελοποίηση της πραγματικής κατασκευαστικής λεπτομέρειας του πλοίου. Επίσης, περιγράφεται η διαδικασία από το πώς από το μέρος του πλοίου (μοντέλο τριών αμπαριών, Three Compartments Model, TCM) που ορίζουν οι κανονισμοί (CSR) καταλήξαμε στην συγκεκριμένη λεπτομέρεια και πώς εφαρμόστηκαν οι οριακές συνθήκες και στα δύο μοντέλα, καθώς και οι απλοποιήσεις που έγιναν.



Στο τέταρτο κεφάλαιο, παρατίθενται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις μοντελοποιήσεις με πεπερασμένα στοιχεία. Αρχικά επιλέχθηκαν οι περιοχές που τείνουν να αναπτυχθούν ρωγμές. Στη συνέχεια προσομοιώνοντας ρωγμές στα συγκεκριμένα σημεία προέκυψαν οι τιμές του συντελεστή έντασης τάσης (ΣΕΤ) κατά το πάχος του μετώπου της ρωγμής. Επιπλέον, τοποθετήθηκε επίθεμα από σύνθετο υλικό στις συγκεκριμένες περιοχές και έγινε παραμετρική ανάλυση ως προς τον συντελεστή ακαμψίας του επιθέματος προς την μεταλλική πλάκα (SR), την γεωμετρία του επιθέματος και τις ιδιότητες του σύνθετου επιθέματος και του κολλητικού στρώματος που χρησιμοποιήθηκε. Τέλος, συγκρίθηκαν οι (ΣΕΤ) πριν και μετά την τοποθέτηση κάθε επιθέματος.

Τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο, γίνεται μία αποτίμηση του έργου της εργασίας και συνοψίζονται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την αριθμητική μοντελοποίηση. Επίσης, προτείνονται κατευθύνσεις μελλοντικής εργασίας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΤΥΠΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΕΠΙΘΕΜΑΤΩΝ ΣΤΗ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗ

#### 2.1 Τυπικές εφαρμογές σύνθετων επιθεμάτων στη ναυπηγική

##### 2.1.1 Εισαγωγή

Η μεγάλη πλειοψηφία των εν ενεργεία πλοίων στις μέρες μας έχουν κατασκευαστεί χρησιμοποιώντας ποικίλα είδη χαλύβων και με διαφορετικές μεθόδους συγκόλλησης, για να παράγουν γάστρες πλοίων ικανές να λειτουργούν σε ένα από τα πιο δύσκολα περιβάλλοντα, αυτό της θάλασσας. Λόγω των καιρικών συνθηκών, των φορτίων της θάλασσας και των φορτίων των δεξαμενών τους καθώς και πολλών άλλων φορτίων, η κατασκευή του πλοίου παρουσιάζει αστοχίες, όπως ρωγμές, διάβρωση ή και λυγισμό, περιπτώσεις που απαιτούν άμεση και αποδοτική επισκευή. Η συμβατική μέθοδος επισκευής είναι η συγκόλληση ή η αφαίρεση του ελαττωματικού κομματιού και τοποθέτηση καινούργιου.

Οι συμβατικές μέθοδοι επισκευής απαιτούν φυσικά ανάπτυξη πολύ υψηλών θερμοκρασιών που μπορούν να οδηγήσουν σε προσωρινή δυσλειτουργία του πλοίου, καθώς απαιτούν υποχρεωτική διαδικασία αδρανοποίησης δεξαμενών φορτίου ή καυσίμων (gas free) και άλλα μέτρα ασφαλείας με αποτέλεσμα μια τέτοια επισκευή να είναι πολύ ζημιογόνα για το πλοιοκτήτη.

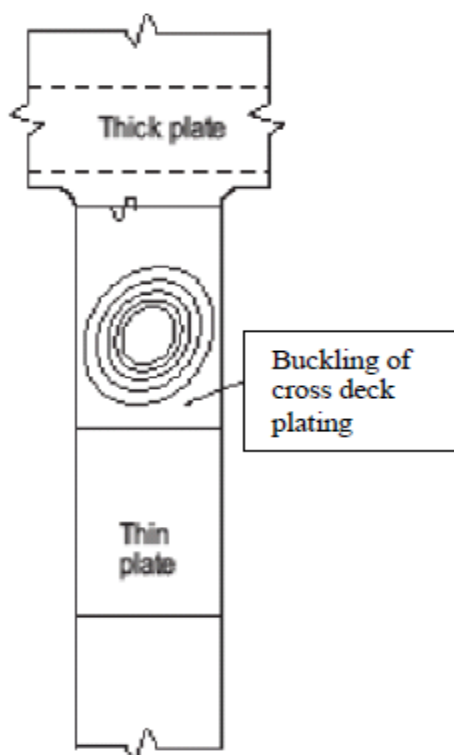
Ακολουθούν περιπτώσεις στις οποίες μπορούν να εφαρμοστούν επιθέματα από σύνθετα υλικά σαν πολύ οικονομικότερη μέθοδος επιδιόρθωσης εναλλακτικά από τις συμβατικές [20]. Οι περιπτώσεις εμφανίζονται σε πλοία μεταφοράς χύδην φορτίου (Bulk Carriers), σε πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (Containerships) και σε πλοία μεταφοράς αργού πετρελαίου (Oil Tankers).

Χρησιμοποιώντας πληροφορίες από τις επιθεωρήσεις του IACS (International Association Classification Society) παρατίθενται στην επόμενη παράγραφο έξι αντιπροσωπευτικές περιπτώσεις στις οποίες αναπτύσσονται ρωγμές και μπορούν να επισκευαστούν με χρήση επιθεμάτων από σύνθετα υλικά. Η κάθε περίπτωση περιλαμβάνει λεπτομέρειες της γεωμετρίας της περιοχής ανάπτυξης των ρωγμών και το αναμενόμενο είδος φόρτισης σε κάθε περιοχή.

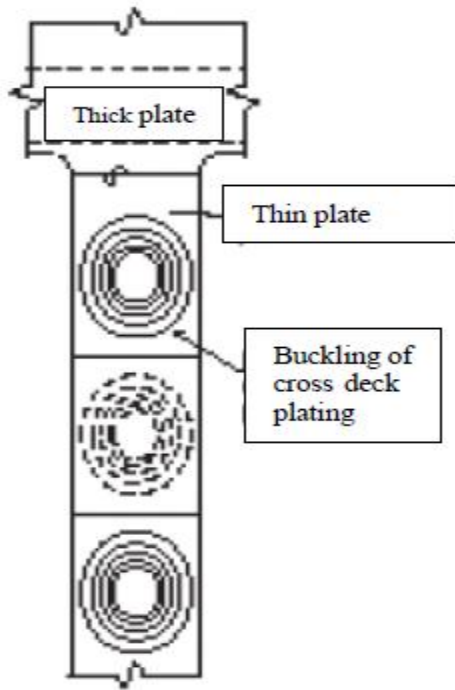
## 2.1.2 Πρώτη τυπική περίπτωση

Η ζώνη του καταστρώματος μεταξύ στομίων (Cross deck plate) στα Containerships και στα Bulk Carriers είναι ένα κατάλληλο παράδειγμα για διερεύνηση της εφαρμογής των σύνθετων επιθεμάτων σε περίπτωση αστοχίας. Λόγω της μεγάλης ανοικτής επιφάνειας που υπάρχει λόγω των στομίων των κυτών, το κυρίως κατάστρωμα του πλοίου, που παίζει κυρίαρχο ρόλο στην διαμήκη αντοχή του, είναι συνεχές μόνο στην εξωτερική πλευρά του. Απόρροια είναι οι ζώνες του καταστρώματος μεταξύ των στομίων να δέχονται πολύ μεγάλα φορτία και λόγω της ασυνέχειας της επιφάνειάς τους να αστοχούν. Οι αστοχίες μπορεί να οφείλονται:

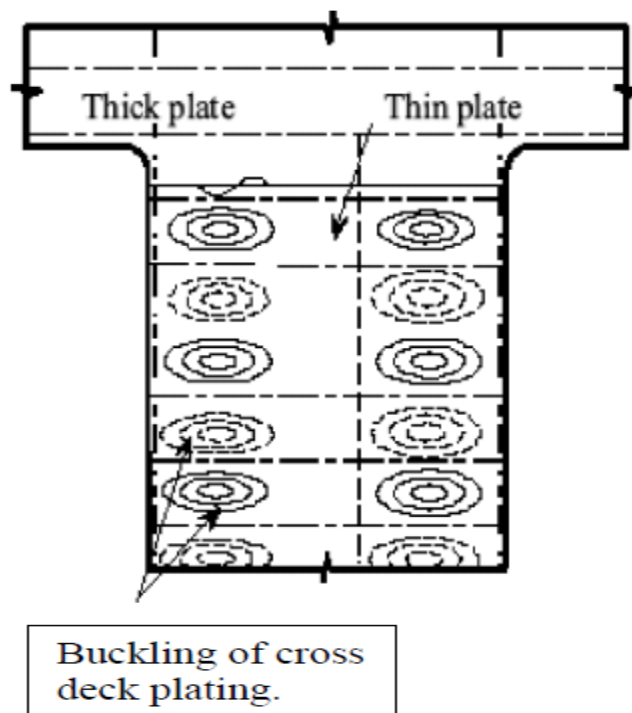
1. Στη διάτμηση στο επίπεδο του καταστρώματος που προκαλείται λόγω στρέψης και συνήθως σε συνδυασμό με διάβρωση οδηγεί σε λυγισμό (Σχήμα 2.1).
2. Σε λυγισμό λόγω φορτίων που ασκεί η θάλασσα στο πλοίο ή και λόγω μη επαρκούς εγκάρσιας ενίσχυσης (Σχήμα 2.2).
3. Σε λυγισμό λόγω εγκάρσιας θλίψης από θαλάσσια φορτία ή υπερβολικής φόρτωσης δύο παρακείμενων δεξαμενών ή μη επαρκούς πάχους ελάσματος (Σχήμα 2.3).



**Σχήμα 2.1:** Λυγισμός στην ζώνη του καταστρώματος μεταξύ στομίων λόγω στρέψης



**Σχήμα 2.2:** Λυγισμός στην ζώνη του καταστρώματος μεταξύ στομίων λόγω θαλάσσιων φορτίων

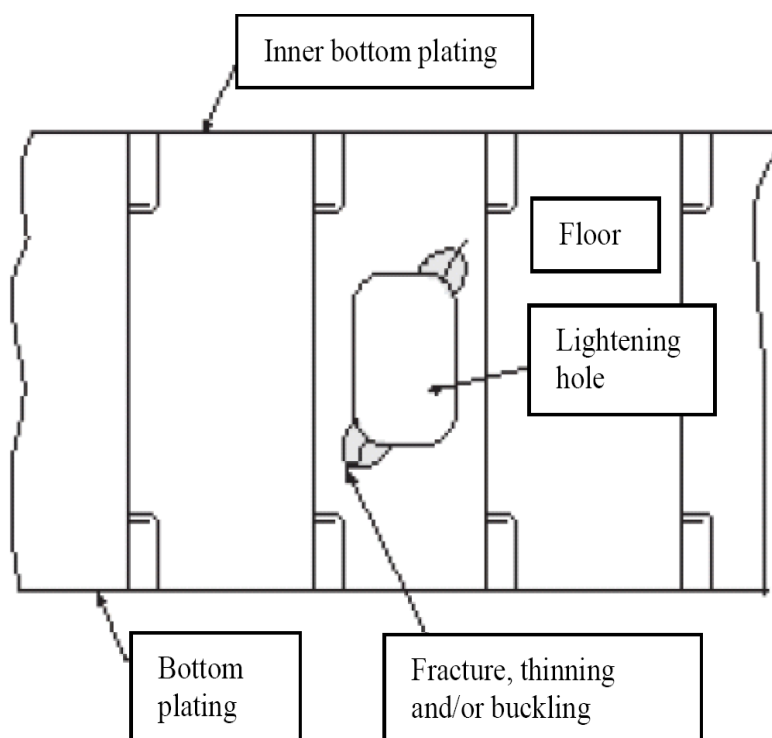


**Σχήμα 2.3:** Λυγισμός στην ζώνη του καταστρώματος μεταξύ στομίων λόγω θαλάσσιων φορτίων εγκάρσιας θλίψης από θαλάσσια φορτία ή υπερβολικής φόρτωσης δύο παρακείμενων δεξαμενών ή μη επαρκούς πάχους ελάσματος.

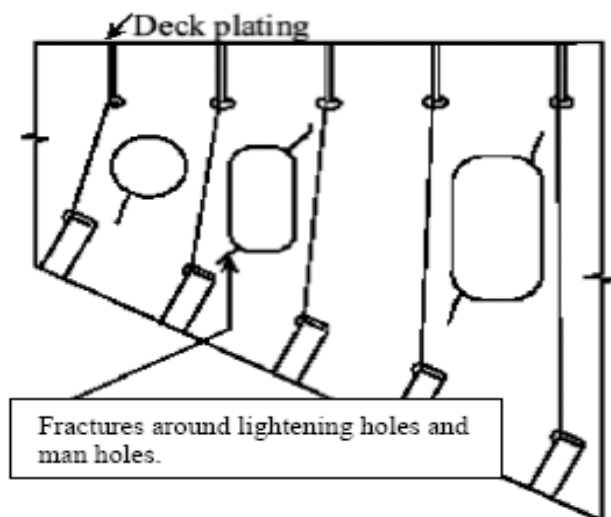
### 2.1.3 Δεύτερη τυπική περίπτωση

Η δεύτερη περίπτωση αφορά την επισκευή με χρήση επιθεμάτων ρωγμών, διαβρωμένων επιφανειών ή και φαινομένων λυγισμού του κορμού του νομέα στην περιοχή της ακτίνας του ανοίγματος μιας ανθρωποθυρίδας. Τέτοιου είδους αστοχίες εμφανίζονται σε όλους τους τύπους πλοίων και δεν περιορίζονται μόνο σε αυτούς που περιγράφονται στο συγκεκριμένο εδάφιο. Παραδείγματα της παραπάνω περίπτωσης είναι:

1. Θραύση, ανάπτυξη ρωγμών ή παραμορφώσεων, λυγισμός λόγω μη επαρκούς αντοχής του υλικού γύρω από το άνοιγμα ή την ανθρωποθυρίδα ή λόγω συγκέντρωσης τάσεων (Σχήμα 2.4).
2. Αστοχίες λόγω συνδυασμού διάβρωσης και συγκέντρωσης τάσεων (Σχήμα 2.5)



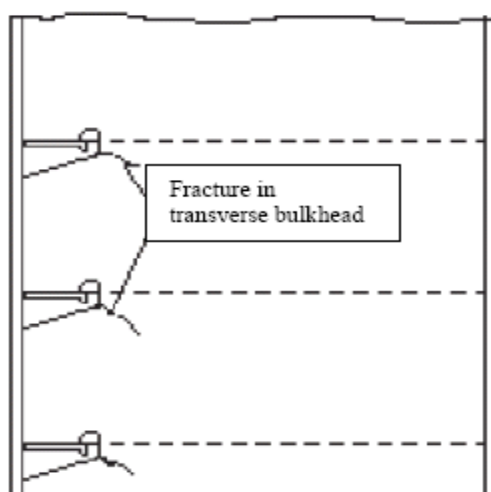
**Σχήμα 2.4:** Θραύση, ανάπτυξη ρωγμών ή παραμορφώσεων, λυγισμός λόγω μη επαρκούς αντοχής του υλικού γύρω από το άνοιγμα ή την ανθρωποθυρίδα ή λόγω συγκέντρωσης τάσεων



**Σχήμα 2.5:** Αστοχίες λόγω συνδυασμού διάβρωσης και συγκέντρωσης τάσεων

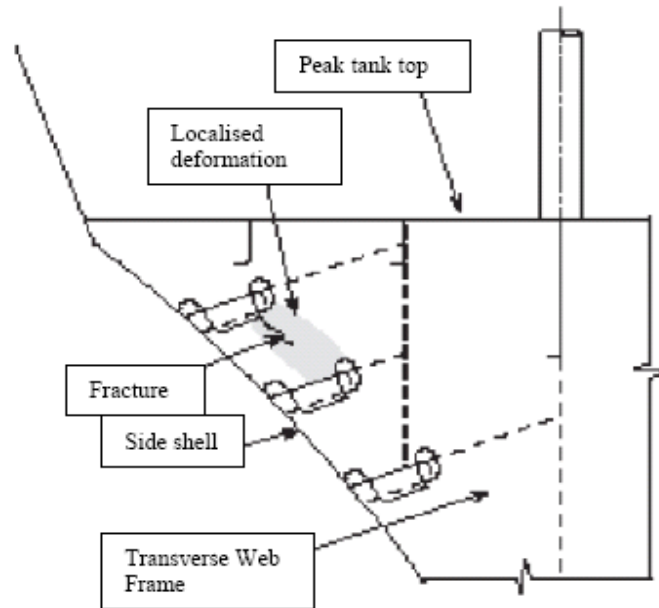
### 2.1.4 Τρίτη τυπική περίπτωση

Η τρίτη περίπτωση αφορά επισκευές ρωγμών, θραύσεων, διαβρωμένων επιφανειών ή/και φαινόμενα λυγισμού, που έχουν εμφανιστεί σε κατασκευαστικές λεπτομέρειες (cut outs), σχεδιασμένες για να διέρχονται ενισχυτικά ή άλλα κατασκευαστικά στοιχεία. Όταν χρησιμοποιούνται σε χώρους που περιέχουν ρευστά, οι κατασκευαστικές αυτές λεπτομέρειες, είναι επιρρεπές σε αστοχία της επιφάνειας και σε διάβρωση η οποία συνεπάγεται μείωση της αντοχής του κατασκευαστικού στοιχείου, μείωση του πάχους του και κατά συνέπεια στην ανάπτυξη ρωγμών. Οι ρωγμές που οφείλονται σε συγκέντρωση τάσεων, οδηγούν σε θραύση από κόπωση (Σχήμα 2.6).



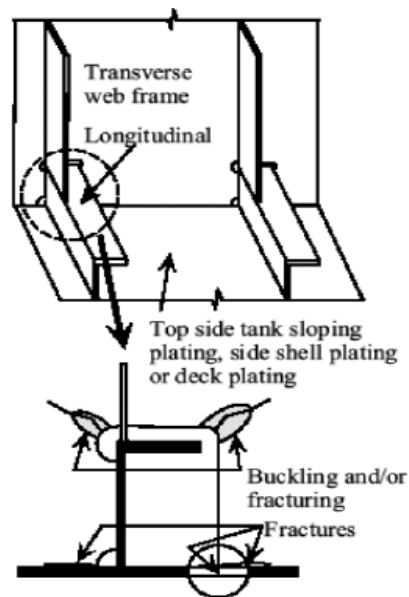
**Σχήμα 2.6:** Τυπική αστοχία σε κατασκευαστικό στοιχείο εγκάρσιας φρακτής πλοίου Containership

Τέτοιου είδους αστοχίες μπορούν να εμφανιστούν και λόγω σφυρόκρουσης της πλώρης σε πολύ έντονους κυματισμούς (Σχήμα 2.7).



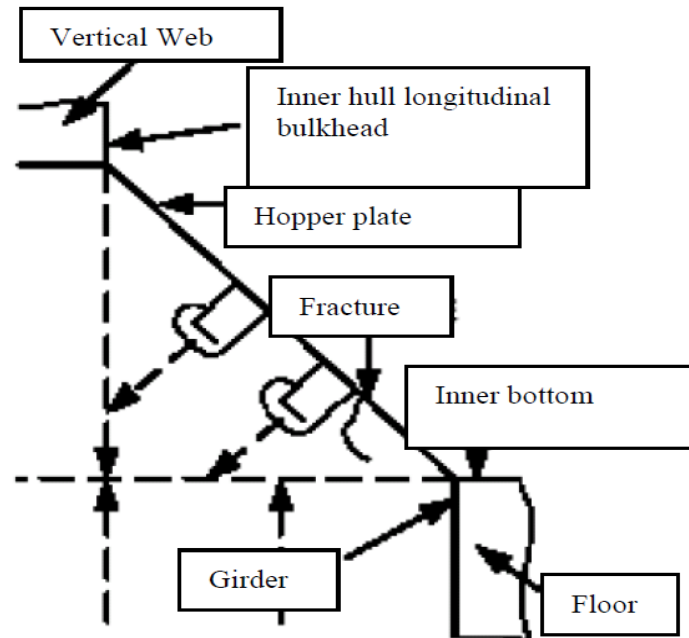
**Σχήμα 2.7:** Τυπική αστοχία σε κατασκευαστικό στοιχείο προραίας εγκάρσιας φρακτής πλοίου Containership

Επιπλέον, αστοχίες μπορούν να εμφανιστούν και σε πλοία Bulk Carriers όταν ένα cut out υπάρχει για να διέλθει ένα ενισχυτικό, καθώς είναι προτιμητέο ένα διάμηκες ενισχυτικό να είναι συνεχές όταν διέρχεται από μία φρακτή γιατί βοηθάει στη στοίχισή του κατά το μήκος όλου του πλοίου. Η αστοχία προκύπτει και αυτή την φορά από συνδυασμό διάβρωσης και συγκέντρωσης τάσεων (Σχήμα 2.8).



**Σχήμα 2.8:** Τυπική αστοχία σε κατασκευαστικό στοιχείο από το οποίο διέρχεται ενισχυτικό σε πλοίο Bulk Carrier

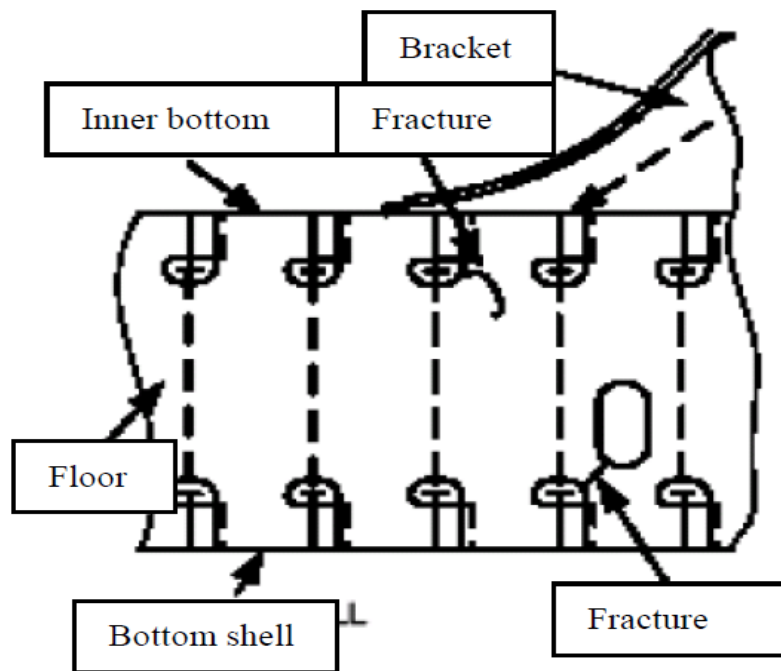
Επιπλέον, ρωγμές εμφανίζονται στο έλασμα της κάτω πλευρικής φρακτής (Σχήμα 2.9).



**Σχήμα 2.9:** Τυπική αστοχία σε κατασκευαστικό στοιχείο της κάτω πλευρικής φρακτής σε πλοίο Oil Tanker



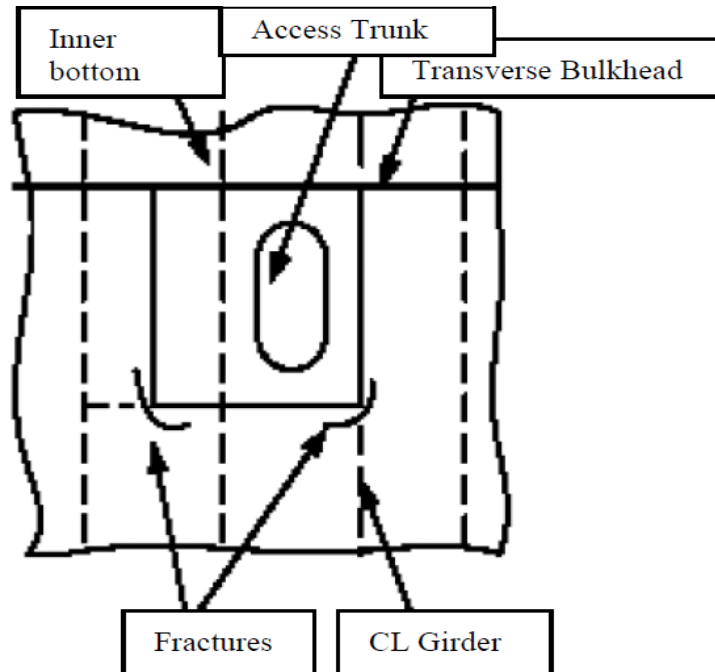
Τέλος, ρωγμές που οφείλονται σε συγκέντρωση τάσεων εμφανίζονται στην κεντρική σταθμίδα πυθμένα στη συγκόλληση άκρου ζυγού με στεγανή φρακτική (σχήμα 2.10).



**Σχήμα 2.10:** Τυπική αστοχία σε εγκάρσια έδρα πλοίου Oil Tanker

### 2.1.5 Τέταρτη τυπική περίπτωση

Η τέταρτη περίπτωση αφορά θραύσεις σε μπρακέτα. Ρωγμή στο έλασμα της έδρας εσωτερικού πυθμένα στη σύνδεση με το έλασμα ανθρωποθυρίδας. Σημειώνεται ότι η παραπάνω περίπτωση συναντάται σε όλα τα είδη πλοίων (Σχήμα 2.11).



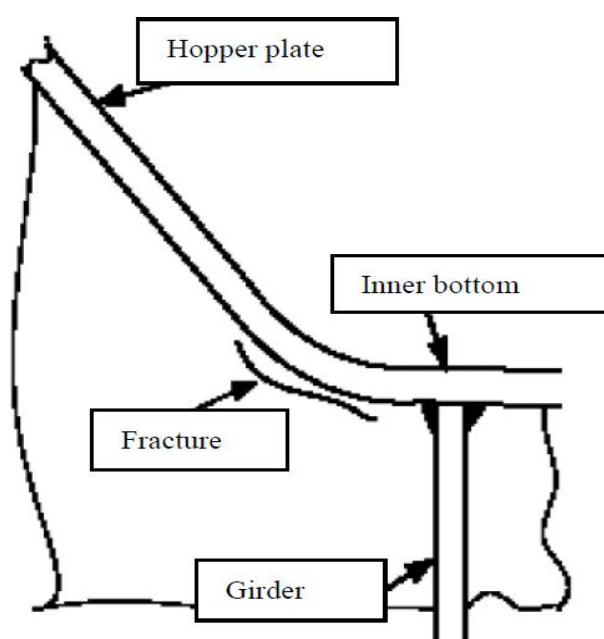
**Σχήμα 2.11:** Τυπική αστοχία σε εγκάρσια φρακτή δεξαμενής φορτίου σε Oil Tanker

## 2.1.6 Πέμπτη τυπική περίπτωση

Η πέμπτη περίπτωση αφορά ρωγμές που εμφανίζονται στο σύνορο του κεκλιμένου ελάσματος της κάτω πλευρικής φρακτής με τον εσωτερικό πυθμένα. Ακολουθούν δύο παραδείγματα.

### Πρώτο παράδειγμα

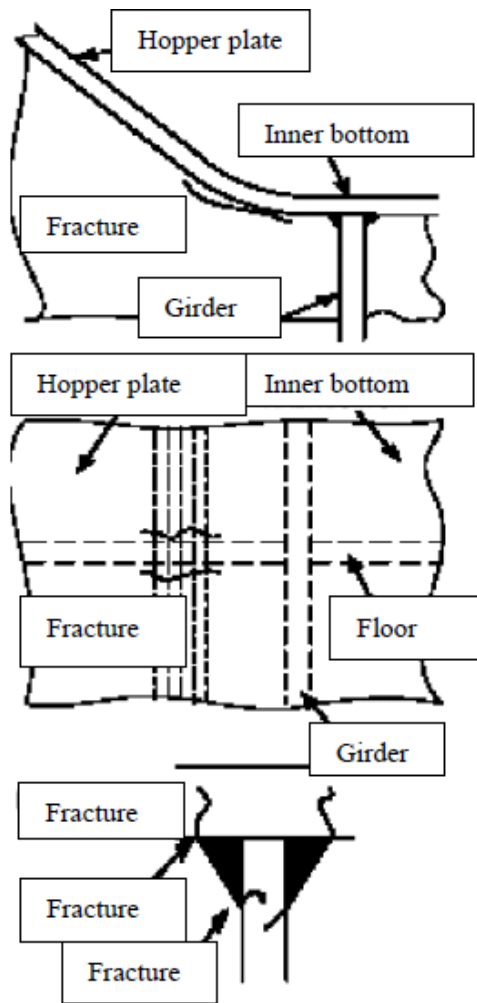
Η αστοχία σχετίζεται με συγκέντρωση τάσεων λόγω μείωσης της δρώντος επιφάνειας της φλάντζας στο κεκλιμένο έλασμα (Σχήμα 2.12)



**Σχήμα 2.12:** Τυπική αστοχία στο σύνορο του κεκλιμένου ελάσματος της κάτω πλευρικής φρακτής με τον εσωτερικό πυθμένα σε Oil Tanker.

### Δεύτερο παράδειγμα

Η αστοχία οφείλεται σε μη σωστή ευθυγράμμιση, η οποία παράγει παραμορφώσεις του εσωτερικού πυθμένα. Άλλοι λόγοι για τέτοιου είδους αστοχία μπορεί να είναι η συγκέντρωση τάσεων στην σύνδεση μεταξύ έδρας και εσωτερικού πυθμένα ή και λόγω στατικών και δυναμικών φορτίσεων των ρευστών (Σχήμα 2.13).



**Σχήμα 2.13:** Τυπική αστοχία στη σύνδεση έδρας με τον εσωτερικό πυθμένα σε Oil Tanker.

## 2.1.7 Έκτη τυπική περίπτωση

Η έκτη περίπτωση αφορά στη διάβρωση που μπορεί να παρατηρηθεί χωρίς την ύπαρξη κάποιας ρωγμής, θραύσης ή παραμόρφωσης. Το συγκεκριμένο φαινόμενο οφείλεται σε διάφορες αιτίες, συμπεριλαμβανομένης της έλλειψης συντήρησης, της αλληλεπίδρασης της σύστασης του φορτίου με τον χάλυβα, της γαλβανικής διάβρωσης μεταξύ μετάλλων (όπως όταν η γάστρα μετατρέπεται μη εσκεμμένα σε άνοδο), και άλλων διαβρωτικών παραγόντων. Στη έκτη αυτή περίπτωση, είναι απαραίτητη η πρόληψη παρά η αντιμετώπιση του προβλήματος. Η διαδικασία της επισκευής αφορά την ομοιόμορφη διάβρωση και την διάβρωση με βελονισμούς.

Τα δύο είδη διαβρώσεων αντιμετωπίζονται με αρκετούς τρόπους, όπως με τον καθαρισμό της διαβρωμένης επιφάνειας με υδροβολή ή αμμοβολή, ή ακόμα με την ανανέωση του χάλυβα. Σε κάθε περίπτωση, οι κανονισμοί του IACS συγκεκριμενοποιούν τα αποδεκτά όρια μείωσης του πάχους του ελάσματος του χάλυβα, γεγονός που πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά την εφαρμογή της χρήσης των επιθεμάτων.

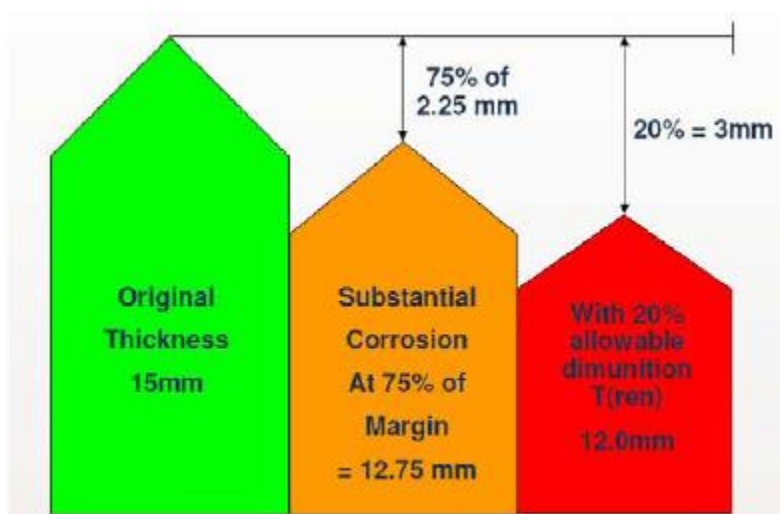
Το μέγεθος της διάβρωσης μπορεί να περιγραφεί ως εξής:

Διάβρωση: Ελάττωση του πάχους του ελάσματος του χάλυβα.

Όριο Κλάσης IACS: Η επιτρεπτή ελάττωση του πάχους ενός ελάσματος, που συνήθως εκφράζεται ως ποσοστό του αρχικού πάχους.

Ουσιαστική διάβρωση: Η ελάττωση του πάχους του ελάσματος του χάλυβα, όταν η διάβρωση έχει φτάσει το 75% του επιτρεπόμενου ορίου διάβρωσης.

Το παρακάτω σχήμα συσχετίζει την ουσιαστική διάβρωση με την επιτρεπόμενη μείωση του 20% της ομοιόμορφης διάβρωσης (Σχήμα 2.14).



Σχήμα 2.14: Συσχετισμός ουσιαστικής διάβρωσης με 20% ομοιόμορφης διάβρωσης.

## 2.2 Επιλογή περίπτωσης για εξέταση

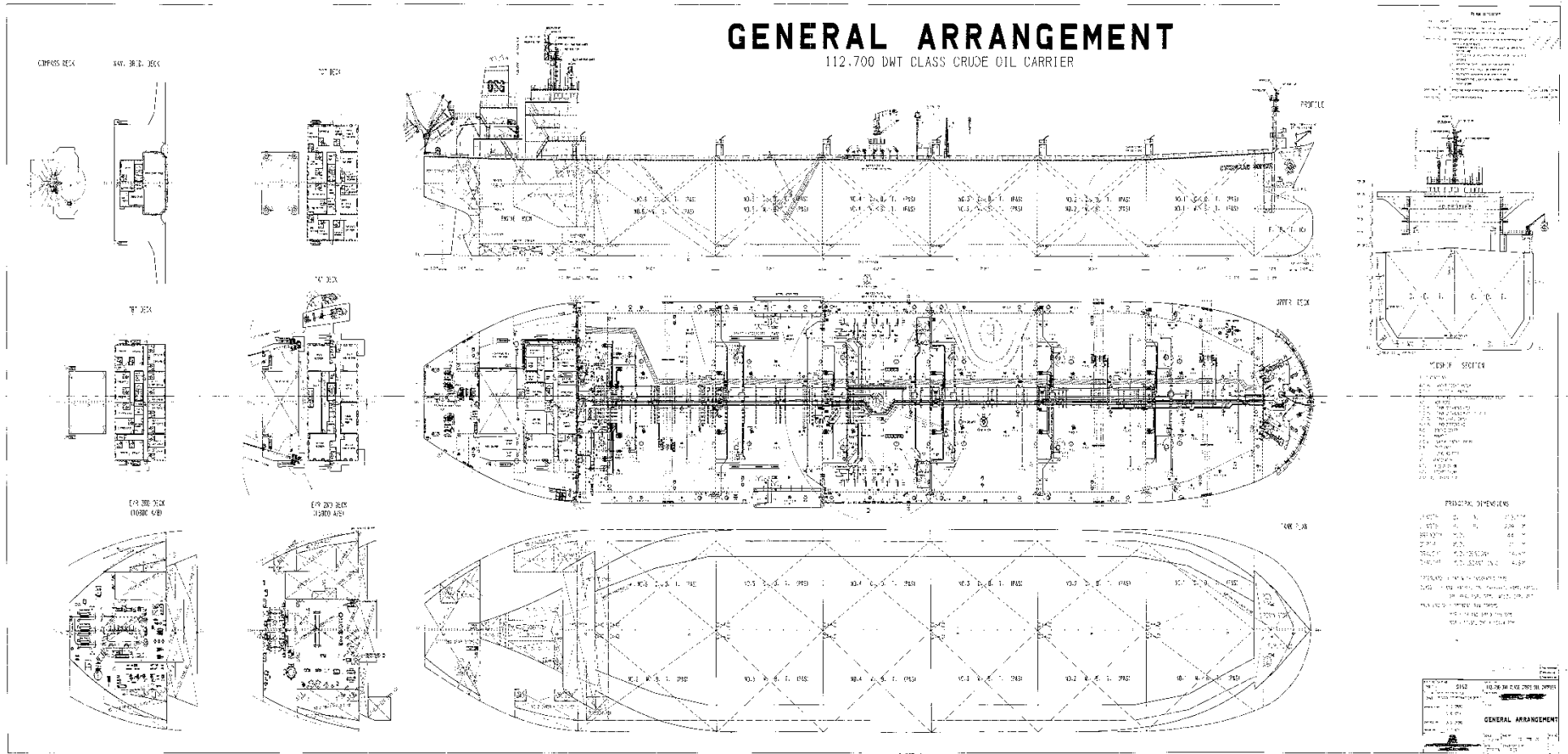
Στην παρούσα διπλωματική, από τις παραπάνω έξι περιπτώσεις, επιλέχθηκε για εξέταση η περίπτωση δύο. Οι ρωγμές που αφορούν την περίπτωση δύο εμφανίζονται σε όλα τα είδη των πλοίων και έτσι καλύπτεται μεγάλο πεδίο εφαρμογών των επιθεμάτων από σύνθετα υλικά.

Το πλοίο που χρησιμοποιήθηκε για την μοντελοποίηση είναι ένα Crude Oil Tanker κλάσης 112000 tons DWT. Το πλοίο είναι double side και double bottom. Έχει μία διαμήκη φρακτή και έξι ζεύγη κυτών φορτίου. Η γενική διάταξη (general arrangement) του πλοίου φαίνεται στο σχήμα 2.15. Οι κύριες διαστάσεις του πλοίου καθώς και τα κύρια χαρακτηριστικά του φαίνονται στον πίνακα 2.1.

**Πίνακας 2.1:** Κύριες διαστάσεις και χαρακτηριστικά του πλοίου που χρησιμοποιήθηκε για την μοντελοποίηση.

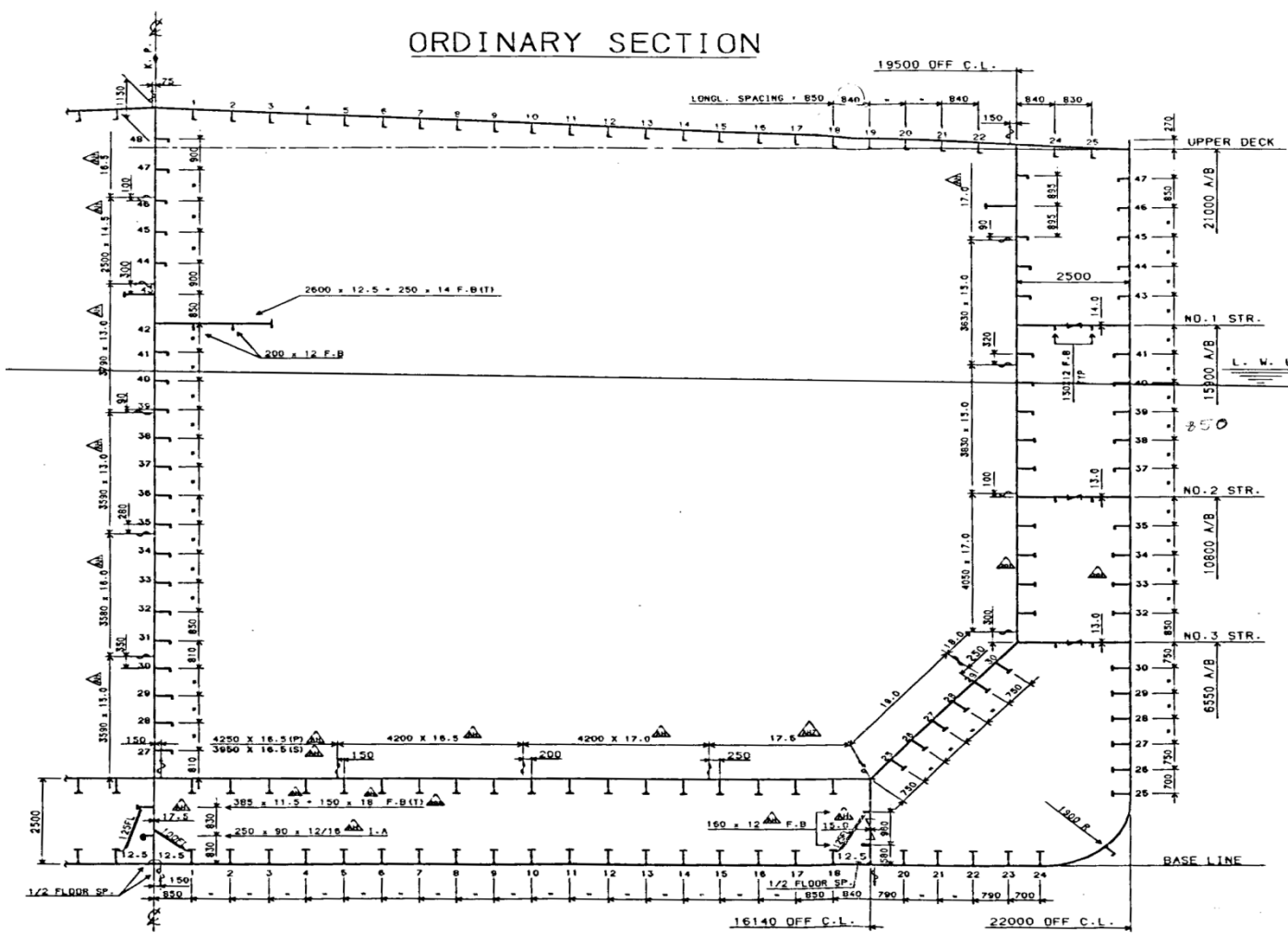
ΚΥΡΙΕΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ	ΟΛΙΚΟ ΜΗΚΟΣ	$L_{OA}$	250.17 m
	ΜΗΚΟΣ ΜΕΤΑΞΥ ΚΑΘΕΤΩΝ	$L_{BP}$	239 m
	ΠΛΑΤΟΣ	B	44 m
	ΚΟΙΛΟ	D	21 m
	ΒΥΘΙΣΜΑ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ = ΒΥΘΙΣΜΑ ΑΝΤΟΧΗΣ	$T_{des}=T_{sc}$	14.6 m
	ΕΚΤΟΠΙΣΜΑ	$\Delta$	130882.9 t
	ΒΑΡΟΣ ΚΕΝΟΥ ΣΚΑΦΟΥΣ	$W_{LS}$	18182.9 t
	DEADWEIGHT	DWT	112700 t
ΙΣΧΥΣ ΠΡΟΩΣΗΣ	MCR		19460 BHP x 105 RPM
	NCR		17510 BHP x 101.4 RPM

Επιπλέον, ακολουθούν τα σχέδια της μέσης τομής του πλοίου (σχήμα 2.16, 2.17) καθώς και η αναλυτική περιγραφή του τμήματος που θα εξεταστεί.



Σχήμα 2.15: Γενική διάταξη του πλοίου (General arrangement).

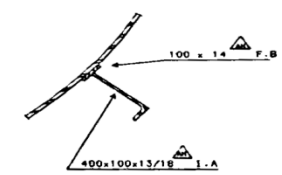
### ORDINARY SECTION



SCANTLINGS OF LONGITUDINALS

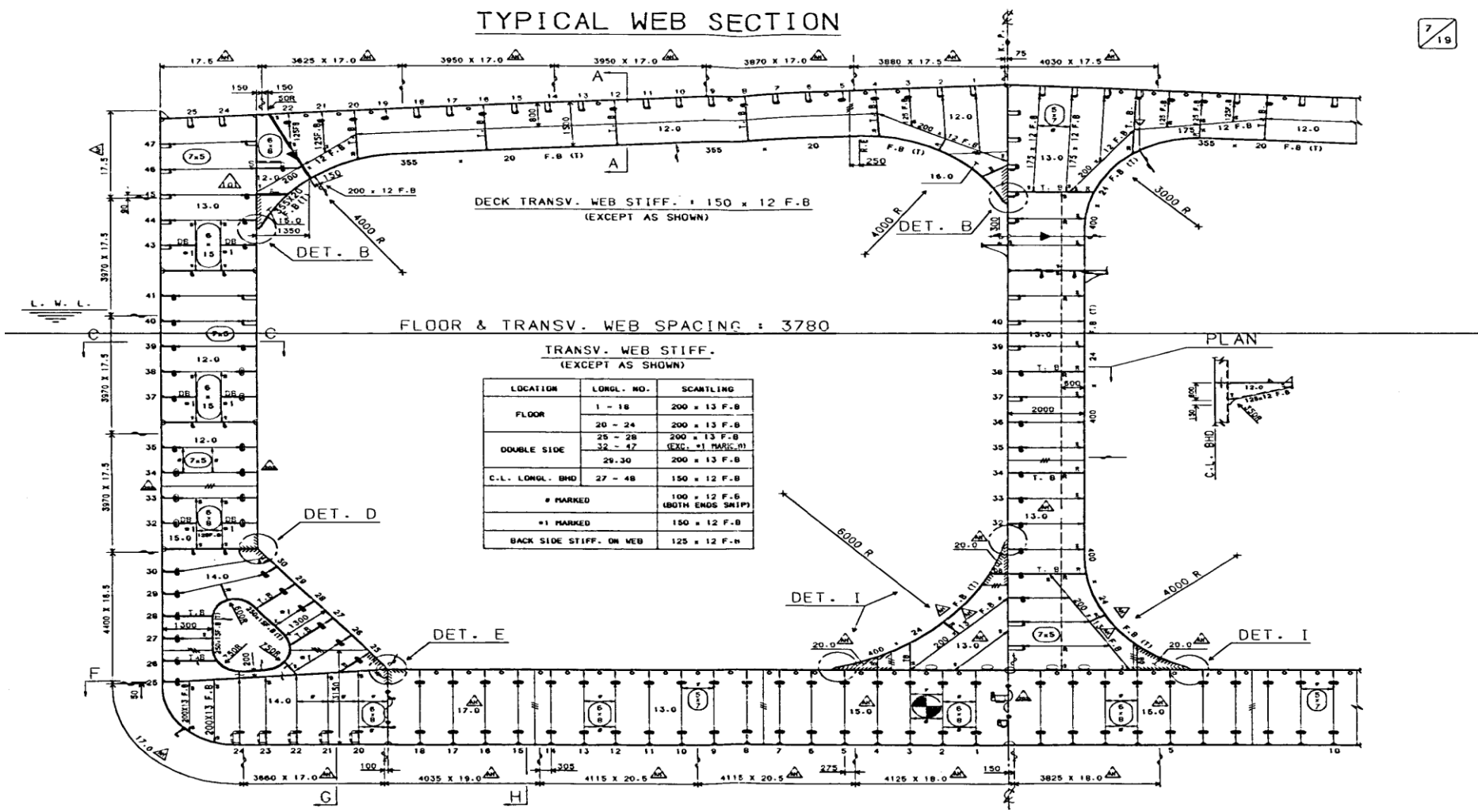
LOCATION	LONG. NO.	SCANTLING
UPPER DECK	1 ~ 25	300 x 90 x 11/16 I.A
	45 ~ 47	250 x 90 x 12/16 I.A
	43 ~ 44	250 x 90 x 12/16 I.A
	35 ~ 41	350 x 100 x 12/17 I.A
	32 ~ 34	385 x 11.0 x 125 x 15.0 F.B(1)
SIDE SHELL	28 ~ 30	425 x 11 x 150 x 16 F.B(1)
	25 ~ 27	425 x 11 x 150 x 18 F.B(1)
	47 ~ 48	300 x 90 x 11/16 I.A
	44 ~ 46	250 x 90 x 12/16 I.A
	43	880 x 14 x 150 x 14 F.B(1)
CENTER LINE LONGL. BHD.	39 ~ 41	300 x 90 x 11/16 I.A
	30 ~ 38	380 x 100 x 12/17 I.A
	27 ~ 29	400 x 100 x 11.5/16 I.A
	46	680 x 14 x 150 x 14 F.B(1)
	45 ~ 47	250 x 90 x 12/16 I.A
INNER SIDE LONGL. BHD.	43 ~ 44	300 x 90 x 13/17 I.A
	39 ~ 41	350 x 100 x 12/17 I.A
	37 ~ 38	385 x 11.0 x 125 x 15.0 F.B(1)
	32 ~ 35	385 x 11.0 x 125 x 18.0 F.B(1)
	25 ~ 30	425 x 11 x 150 x 16 F.B(1)
INNER BOTTOM	1 ~ 18	425 x 11 x 150 x 18 F.B(1)
BOTTOM	1 ~ 24	425 x 11 x 150 x 16 F.B(1)

DETAIL OF BILGE KEEL  
( S + 1/20 )



Σχήμα 2.16: Εγκάρσια διατομή του πλοίου (Ordinary Section).

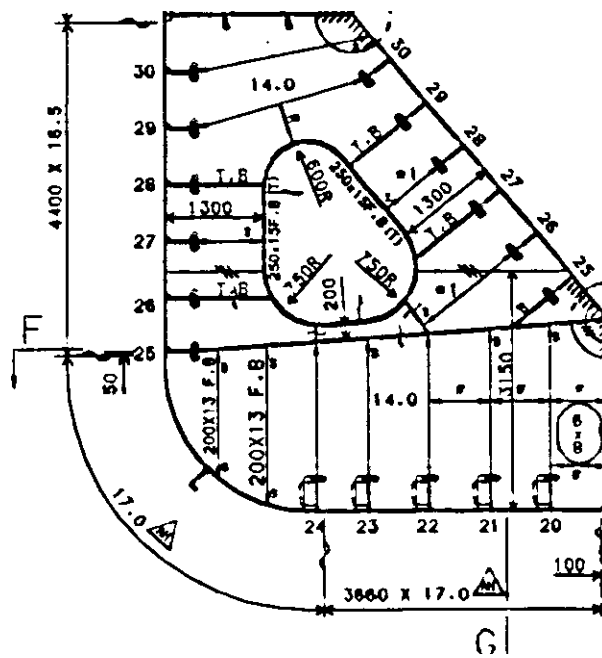




Σχήμα 2.17: Εγκάρσια διατομή του πλοίου (Web Section).

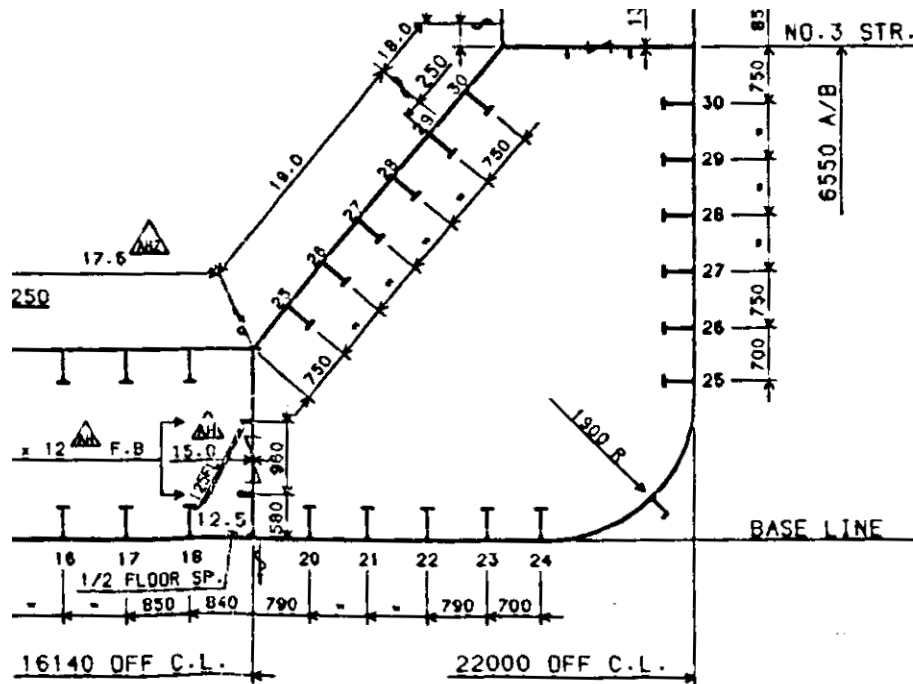
Το τμήμα που επιλέχθηκε για εξέταση φαίνεται στα σχήματα 2.18-2.19 και αποτελείται περιμετρικά από έξι πλευρές (πέντε ευθύγραμμα τμήματα και ένα καμπυλόγραμμο). Η κάτω πλευρά του σχήματος 2.18 είναι ο εξωτερικός πυθμένας του πλοίου (Bottom<sup>1</sup>). Κινούμενοι δεξιόστροφα συνεχίζουμε με την ακτίνα καμπυλότητας (Bilge) και με την εξωτερική πλευρά του πλοίου (Side). Στη συνέχεια έχουμε το τμήμα που ορίζει τη διπλή γάστρα του πλοίου (Upper) καθώς και την κεκλιμένη πλευρά που καταλήγει στον εσωτερικό πυθμένα (Tilted). Τέλος, έχουμε την κατακόρυφη πλευρά που ορίζει και το ύψος του διπύθμενου (Inner). Επιπλέον, υπάρχει μια ανθρωποθυρίδα κεντρικά περίπου της κατασκευής.

Όσο αναφορά τις διαστάσεις, το πάχος της λαμαρίνας της φρακτής είναι 14mm. Οι διαστάσεις τις ανθρωποθυρίδας φαίνονται στο σχήμα 2.18. Οι διαστάσεις των διαμήκων ενισχυτικών τύπου T, φαίνονται στο σχήμα 2.20 που είναι μεγέθυνση του πίνακα του σχήματος 2.16. Οι αποστάσεις των διαμήκων ενισχυτικών φαίνονται στο σχήμα 2.19. Τα πάχη των διαμήκων λαμαρινών περιμετρικά της κατασκευής φαίνονται είτε στο σχήμα 2.18 (εξωτερικό περίβλημα), είτε στο σχήμα 2.19 (εσωτερικό περίβλημα). Τέλος, οι διαστάσεις των εγκαρσίων ενισχυτικών φαίνονται στο σχήμα 2.21, το οποίο είναι μεγέθυνση του πίνακα του σχήματος 2.17. Οι διαστάσεις του bilge keel φαίνονται στο σχήμα 2.22.



**Σχήμα 2.18:** Τμήμα που επιλέχθηκε για εξέταση (web section).

<sup>1</sup> Στις παρενθέσεις υπάρχει η ορολογία που χρησιμοποιήθηκε για την μοντελοποίηση της κατασκευής και την επιβολή των μετατοπίσεων στην κάθε πλευρά (βλέπε παράγραφο 3.4).



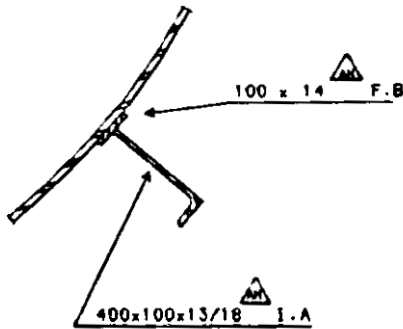
Σχήμα 2.19: Τμήμα που επιλέχθηκε για εξέταση (ordinary section).

LOCATION	LONG. NO.	SCANTLING
UPPER DECK	1 ~ 25	300 x 90 = 11/16 I-A
SIDE SHELL	45 ~ 47	250 x 90 = 12/16 I-A
	43 ~ 44	250 x 90 = 12/16 I-A
	35 ~ 41	350 x 100 = 12/17 I-A
	32 ~ 34	385 = 11.0 + 125 = 15.0 F-B(T)
	28 ~ 30	425 = 11 + 150 = 16 F-B(T)
	25 ~ 27	425 = 11 + 150 = 18 F-B(T)
CENTER LINE LONGL. BMD.	47 ~ 48	300 x 90 = 11/16 I-A
	44 ~ 46	250 x 90 = 12/16 I-A
	43	680 = 14 + 150 = 14 F-B(T)
	39 ~ 41	300 x 90 = 11/16 I-A
	30 ~ 38	350 x 100 = 12/17 I-A
	27 ~ 29	400 x 100 = 11.5/16 I-A
INNER SIDE LONGL. BMD.	46	680 = 14 + 150 = 14 F-B(T)
	45 ~ 47	250 x 90 = 12/16 I-A
	43 ~ 44	300 x 90 = 13/17 I-A
	39 ~ 41	350 x 100 = 12/17 I-A
	37 ~ 38	385 = 11.0 + 125 = 15.0 F-B(T)
	32 ~ 35	385 = 11.0 + 125 = 18.0 F-B(T)
25 ~ 30	425 = 11 + 150 = 16 F-B(T)	
INNER BOTTOM	1 ~ 18	425 = 11 + 150 = 18 F-B(T)
BOTTOM	1 ~ 24	425 = 11 + 150 = 16 F-B(T)

Σχήμα 2.20: Διαστάσεις διαμήκων ενισχυτικών.

LOCATION	LONGL. NO.	SCANTLING
FLOOR	1 - 18	200 x 13 F.B
	20 - 24	200 x 13 F.B
DOUBLE SIDE	25 - 28	200 x 13 F.B
	32 - 47	(EXC. #1 MARKED)
	29,30	200 x 13 F.B
C.L. LONGL. BHD	27 - 48	150 x 12 F.B
# MARKED		100 x 12 F.B (BOTH ENDS SNIP)
#1 MARKED		150 x 12 F.B
BACK SIDE STIFF. ON WEB		125 x 12 F.B

Σχήμα 2.21: Διαστάσεις εγκάρσιων ενισχυτικών.



Σχήμα 2.22: Διαστάσεις bilge keel.

## 2.3 Κατάσταση φόρτωσης – Common Structural Rules (CSR)

### Φορτία

Σύμφωνα με τους κανονισμούς CSR [16] υπάρχουν διαφορετικά σενάρια φόρτωσης με διαφορετικούς συνδυασμούς φορτίων που πρέπει να εξεταστούν. Κάθε συνδυασμός από στατική και δυναμική φόρτιση αποτελείται από δύο μέρη:

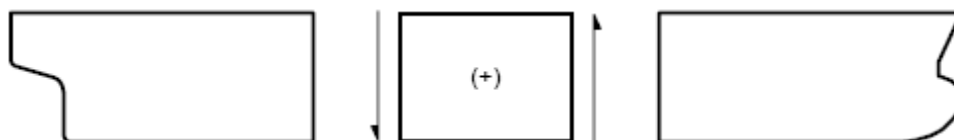
α) Στατικά φορτία, όπως αυτά συνεπάγονται από το βύθισμα του πλοίου, από την ενίσχυση της γάστρας, από την καμπτική ροπή και διατμητική δύναμη σε ήρεμο νερό.

β) Δυναμικά φορτία, τα οποία ουσιαστικά εφαρμόστηκαν σαν στατικά στην ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία.

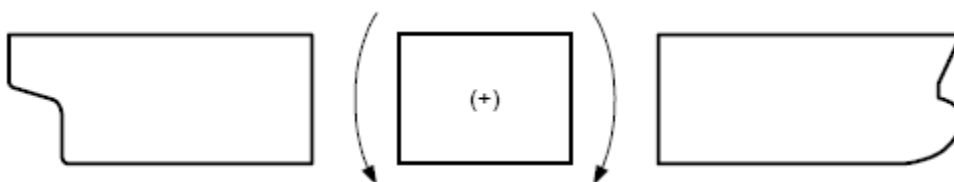
Τα φορτία τα οποία ασκήθηκαν στο μοντέλο σύμφωνα με τους κανονισμούς CSR είναι:

- ✓ Βάρος μεταλλικής κατασκευής
- ✓ Βάρος μεταφερόμενου φορτίου και έρματος
- ✓ Υδροστατική Πίεση
- ✓ Δυναμική πίεση λόγω κυματισμών
- ✓ Κάθετη καμπτική ροπή και διατμητική δύναμη
- ✓ Πίεση από την κίνηση του ρευστού στις δεξαμενές φορτίου και έρματος

Στα σχήματα 2.23 και 2.24 φαίνονται οι θετικές φορές των κάθετων διατμητικών δυνάμεων και καμπτικών ροπών.

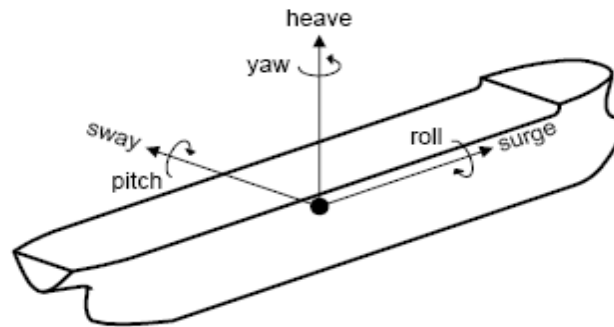


**Σχήμα 2.23:** Κάθετες διατμητικές δυνάμεις.

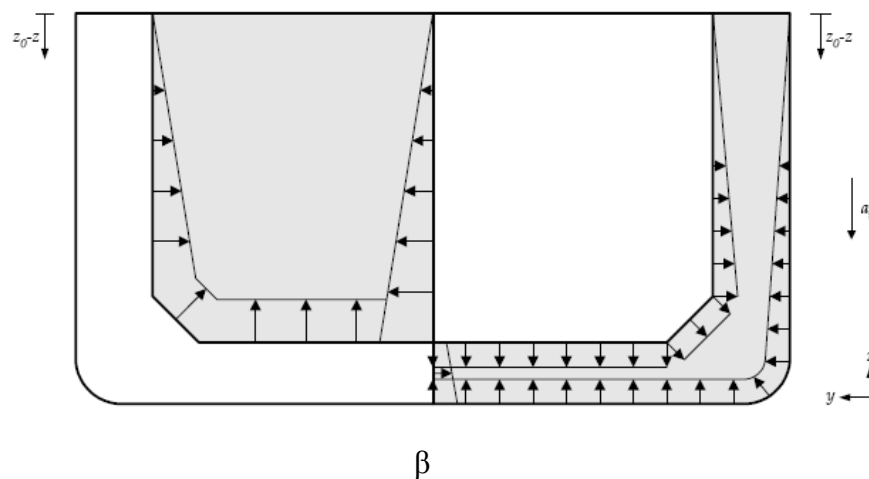
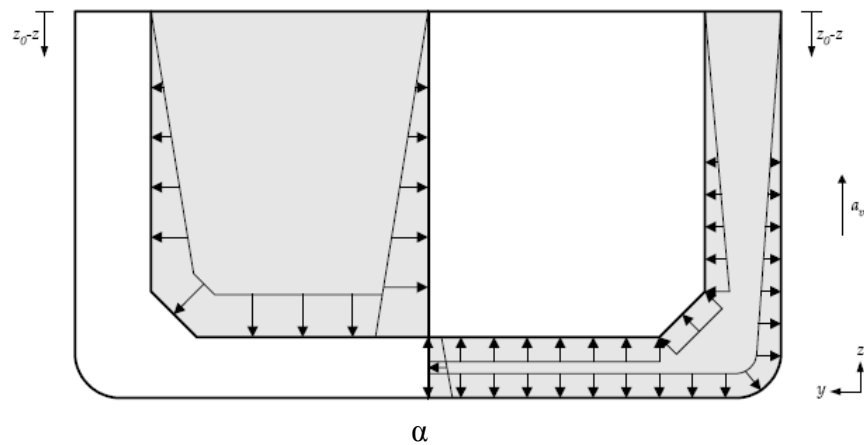


**Σχήμα 2.24:** Κάθετες καμπτικές ροπές.

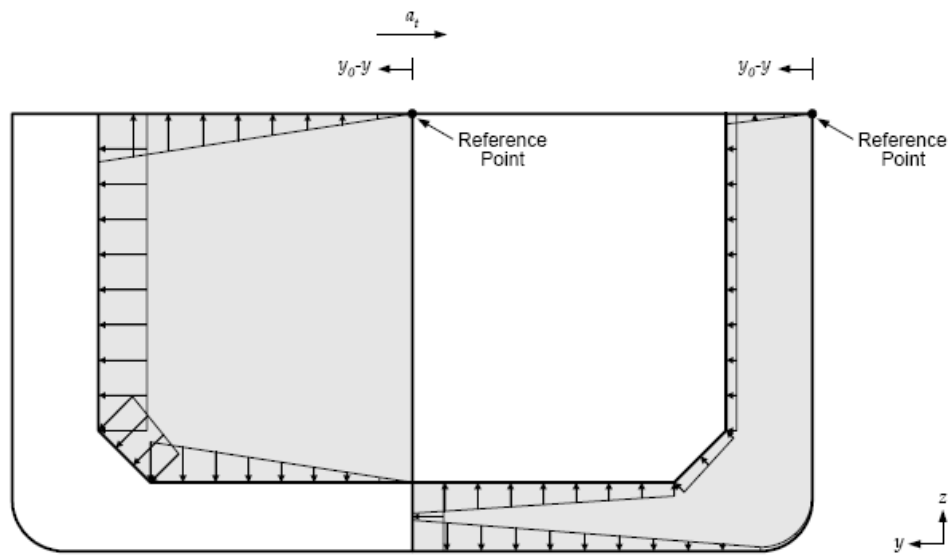
Όσο αναφορά τις πιέσεις που προέρχονται από την κίνηση του ρευστού στις δεξαμενές φορτίου και έρματος παρατίθενται τα σχήματα 2.26 έως 2.28. Φαίνεται η κατανομή των δυνάμεων που ασκούνται στα τοιχώματα των δεξαμενών ανάλογα με τις επιταχύνσεις του πλοίου σε κάθε μία από τις τρεις διευθύνσεις z, y, x (heave,sway,surge). Οι θετικές φορές των κινήσεων φαίνονται στο σχήμα 2.25.



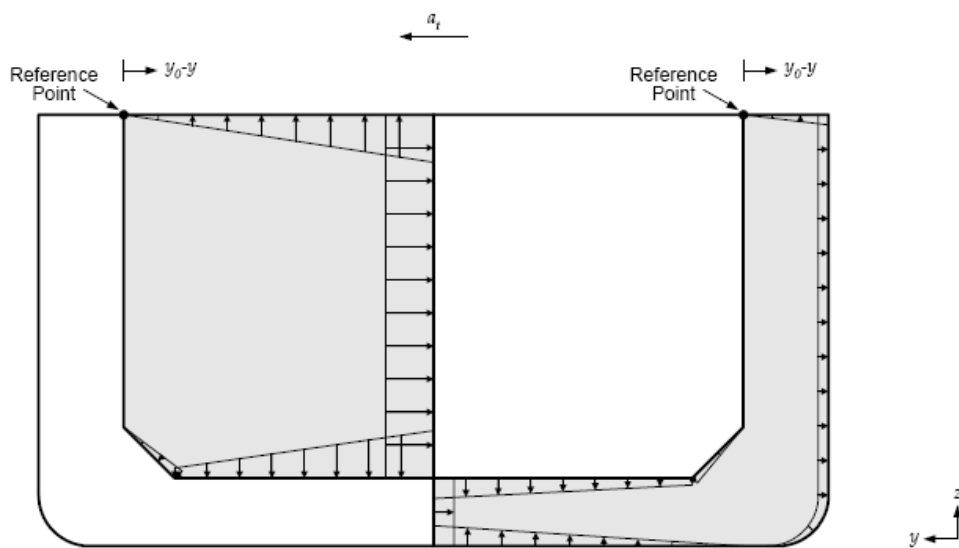
**Σχήμα 2.25:** Θετικές φορές των κινήσεων.



**Σχήμα 2.26α,β:** Δυνάμεις στα τοιχώματα των δεξαμενών λόγω επιτάχυνσης στη διεύθυνση z (heave).

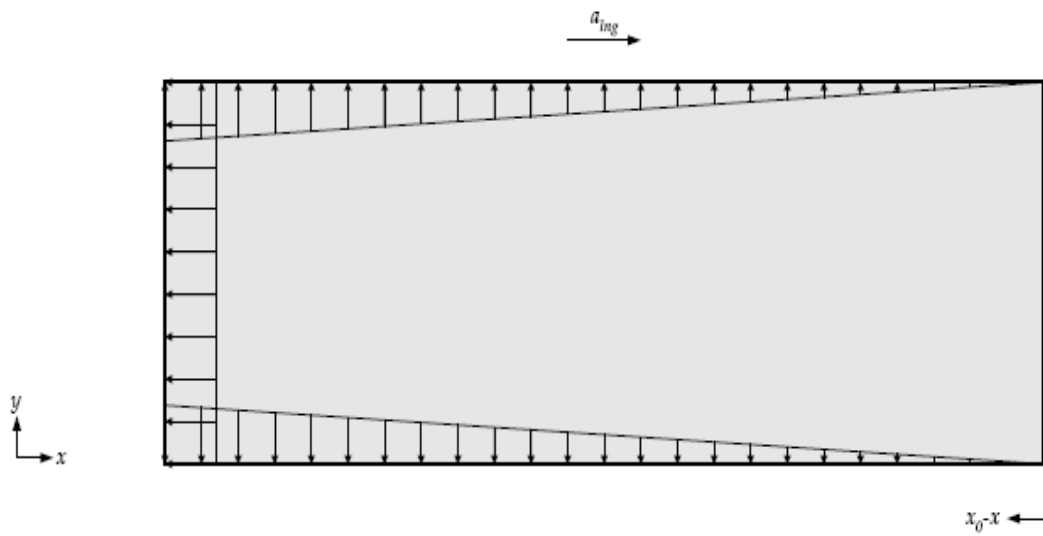


α

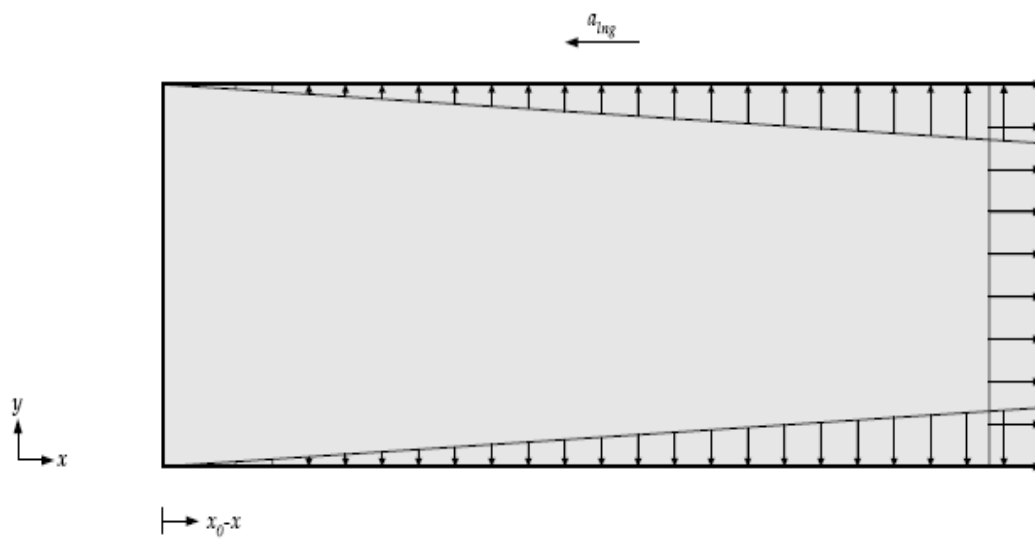


β

**Σχήμα 2.27α,β:** Δυνάμεις στα τοιχώματα των δεξαμενών λόγω επιτάχυνσης στη διεύθυνση  $y$  (sway).



α



β

**Σχήμα 2.28α,β:** Δυνάμεις στα τοιχώματα των δεξαμενών λόγω επιτάχυνσης στη διεύθυνση x (surge).



Σύμφωνα με τους κανονισμούς CSR οι τιμές των διατμητικών δυνάμεων και των καμπτικών ροπών πρέπει να φτάσουν κάποια συγκεκριμένη τιμή,  $Q_{target}$  και  $M_{target}$  αντίστοιχα. Η διαδικασία για να εφαρμοστούν τα φορτία απαιτεί την δημιουργία ενός μοντέλου δοκού (beam model), η οποία θα περιγραφεί στο επόμενο κεφάλαιο (παράγραφος 3.3.3).

Τέλος, παρατίθενται τα σενάρια φόρτωσης για πλοία Tanker με μία διαμήκη φρακτή που πρέπει να εξεταστούν σύμφωνα με τους κανονισμούς του CSR (Σχήμα 2.29). Στην παρούσα διπλωματική επιλέχθηκε το σενάριο B1.

Table B.2.4 Load Cases for Tankers with One Centreline Oil-tight Longitudinal Bulkhead								
Loading Pattern	Figure	Still Water Loads			Dynamic load cases			
		Draught	% of Perm. SWBM <sup>(2)</sup>	% of Perm. SWSF <sup>(2)</sup>	Strength assessment (1a) Midship region	Strength assessment against hull girder shear loads (1b) Forward region    Midship and aft regions		
<b>Design load combination S + D (Sea-going load cases)</b>								
B1			0.9 $T_{sc}$	100% (sag)	See note 3	1	\	\
				100% (hog)	100% (-ve fwd) See note 4	2, 5a	\	\
B2 (6)			0.9 $T_{sc}$	100% (sag)	See note 3	1	\	\
				100% (hog)	100% (-ve fwd) See note 4	2, 5b	\	\
B3			0.9 $T_{sc}$	100% (hog)	100% (-ve fwd) See note 5	2	4	2
					100% (-ve fwd) See note 4	5a, 5b, 6a, 6b	\	\
B4			0.6 $T_{sc}$	100% (sag)	75% (+ve fwd) See note 4	1, 5a	\	\
B5 (6)			0.6 $T_{sc}$	100% (sag)	75% (+ve fwd) See note 4	1, 5b	\	\
B6			0.6 $T_{sc}$	100% (+ve fwd) See note 5		1	3	1
				100% (sag)	100% (+ve fwd) See note 4	5a, 5b	\	\
B7 (7)			$T_{bat-em}$	100% (sag)	100% (+ve fwd) See note 4	1	\	\
<b>Design load combination S (Harbour and tank testing load cases)</b>								
B8 (8)			$1/3 T_{sc}$	100% (sag)	100% (+ve fwd) See note 5	Applicable to strength assessment of midship region (see 1(a)) and strength assessment against hull girder shear loads (see 1(b))		
B9 (8)			$1/3 T_{sc}$	100% (sag)	75% (+ve fwd) See note 4	Only applicable to strength assessment of midship region (see note 1(a))		
B10 (6, 8)			$1/3 T_{sc}$	100% (sag)	75% (+ve fwd) See note 4	Only applicable to strength assessment of midship region (see note 1(a))		
B11 (8)			$T_{sc}$	100% (Hog)	100% (-ve fwd) See note 5	Applicable to strength assessment of midship region (see 1(a)) and strength assessment against hull girder shear loads (see 1(b))		

Σχήμα 2.29: Σενάρια φόρτωσης σύμφωνα με κανονισμούς CSR

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

#### 3.1 Τρόπος μοντελοποίησης κατασκευής με επίθεμα από σύνθετα υλικά – Παραμετρική μελέτη

##### 3.1.1 Εισαγωγή

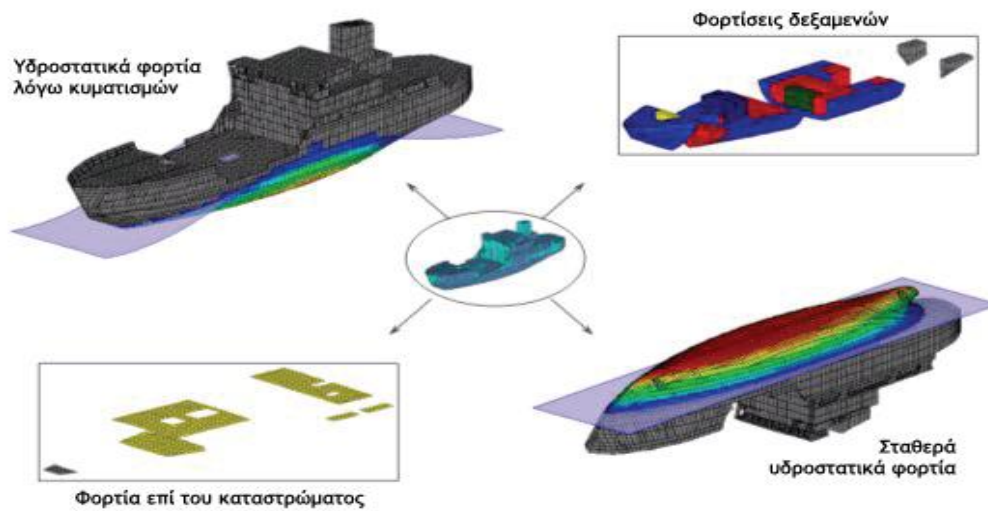
Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει αρχικά μια σύντομη εισαγωγή στην μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Στη συνέχεια παρουσιάζεται μία δημοσίευση η οποία ασχολείται κατά κύριο λόγο με την μοντελοποίηση ρωγμών σε δοκίμια με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Η παρουσίασή της κρίνεται απαραίτητη για λόγους σύγκρισης και επαλήθευσης της μεθοδολογίας με αυτή της παρούσας διπλωματικής. Τέλος, περιλαμβάνεται και ένα υπολογιστικό συγκριτικό πείραμα (benchmark) για την ποιοτική, αλλά και ποσοτική επαλήθευση της υιοθετούμενης αριθμητικής μεθόδου.

##### 3.1.2 Γενικά περί πεπερασμένων στοιχείων

Οι αναλυτικές εξισώσεις αποτελούν ένα γρήγορο και απλουστευμένο εργαλείο για τον υπολογισμό κάποιων βασικών μεγεθών, όπως ο συντελεστής έντασης τάσης (ΣΕΤ), οι τάσεις και οι παραμορφώσεις, σύμφωνα με τα οποία εξάγονται κάποια συμπεράσματα για την ενίσχυση μιας ρωγματομένης κατασκευής. Η αναλυτική λύση όμως 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. Επιπλέον, οι παραδοχές που πρέπει να γίνουν για να ισχύουν οι εξισώσεις είναι σε πολλές περιπτώσεις υπεραπλουστευτικές, σε σημείο που τα αποτελέσματα να απέχουν σε μεγάλο βαθμό από την πραγματικότητα. Πέραν αυτού, τα αποτελέσματα των αναλυτικών τύπων αποτελούν συνήθως τις μέγιστες εμφανιζόμενες ή επιτρεπόμενες τιμές μεγεθών της κατασκευής, χωρίς να υπάρχει δυνατότητα υπολογισμού τους σε συγκεκριμένες περιοχές ενδιαφέροντος, ανάλογα με τα χρησιμοποιούμενα υλικά, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, κλπ. Την ανάγκη για να λυθούν πιο σύνθετα προβλήματα και να καλυφθούν οι παραπάνω αδυναμίες έρχεται να καλύψει η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (ΜΠΣ), η οποία είναι απαλλαγμένη από τους προαναφερθέντες περιορισμούς, δίνοντας την δυνατότητα εύρεσης οποιουδήποτε μεγέθους σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή ή σημείο της υπό μελέτη κατασκευής.

Στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, σχεδιάζεται μία δομή, ή «μοντέλο», στην οποία, αφού εισαχθούν όλες οι απαιτούμενες παράμετροι όπως γεωμετρικά χαρακτηριστικά, σταθερές των υλικών, τασική κατάσταση, φορτία, κατακερματίζεται σε πολλά μικρότερα τμήματα ή στοιχεία (elements), τα οποία αποτελούν το πλέγμα στοιχείων (element mesh) του μοντέλου. Κάθε στοιχείο αποτελείται από έναν αριθμό κόμβων (nodes) οι οποίοι ορίζουν τη μορφή και τις ιδιότητες του στοιχείου. Η συμπεριφορά καθενός από τα στοιχεία μπορεί να περιγραφεί με ένα πλήθος από συναρτήσεις (functions) και από σχετικά απλές εξισώσεις ισορροπίας (equilibrium equations). Όπως τα στοιχεία ενώνονται μεταξύ τους για να σχηματίσουν το μοντέλο, έτσι και οι εξισώσεις που διέπουν τη συμπεριφορά κάθε στοιχείου συσχετίζονται μεταξύ τους ώστε να περιγράψουν τη συνολική συμπεριφορά του μοντέλου υπό κάποια δεδομένη κατάσταση φόρτισης.

Ο υπολογιστής επιλύει διαδοχικά το σύνολο των εξισώσεων και καταλήγει στην τελική επίλυση του μοντέλου, από όπου μπορούν να εξαχθούν οι τάσεις, οι παραμορφώσεις και άλλα στοιχεία για κάθε στοιχείο ξεχωριστά. Είναι φανερό ότι όταν το πλήθος των στοιχείων από τα οποία αποτελείται το μοντέλο αυξάνεται, δηλαδή όσο πιο πυκνό πλέγμα έχουμε, αυξάνεται ανάλογα και η ακρίβεια της επίλυσης, με παράλληλη αύξηση όμως των απαιτήσεων αυτής σε επεξεργαστική ισχύ. Υπάρχει πληθώρα προγραμματιστικών πακέτων πεπερασμένων στοιχείων (ANSYS, ABAQUS, ALGOR, κ.α), τα οποία δίνουν πολλές επιλογές στο χρήστη ως προς τον τρόπο μοντελοποίησης, την επιλογή των στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν στο μοντέλο, τη μέθοδο επίλυσης, κτλ. Η ΜΠΣ είναι μία αξιόπιστη και ακριβής μέθοδος υπολογισμού της αποτελεσματικότητας επισκευών με σύνθετα υλικά και έχει χρησιμοποιηθεί από την πλειοψηφία των ερευνητικών ομάδων που έχουν ασχοληθεί με το θέμα, επιβεβαιωμένη μάλιστα σε μεγάλο βαθμό και από πειραματικές διαδικασίες. Απαιτείται όμως μεγάλη προσοχή κατά την εφαρμογή της, καθώς μία πολύ μικρή παράβλεψη ή ένα μικρό σφάλμα μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές αποκλίσεις των αποτελεσμάτων. Για το λόγο αυτό, πρέπει να γίνεται όσο το δυνατόν πιστότερη προσομοίωση της πραγματικής κατασκευής και σωστές παραδοχές έτσι ώστε τα αποτελέσματα να ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα.



**Σχήμα 3.1:** Παράδειγμα χρήσης ΜΠΣ για τον υπολογισμό της σύνθετης φόρτισης ενός πλοίου.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία επιλέχτηκε το πρόγραμμα ABAQUS, το οποίο προσφέρει υψηλές δυνατότητες προσομοίωσης καθώς και ευκολία χειρισμού από την πλευρά του χρήστη. Η επίλυση του προβλήματος μπορεί να χωριστεί σε τρία στάδια:

- Προεπεξεργασία (Preprocessing)
- Επίλυση (Solution)
- Μετεπεξεργασία (Postprocessing)

### **3.1.3 Προεπεξεργασία (Preprocessing)**

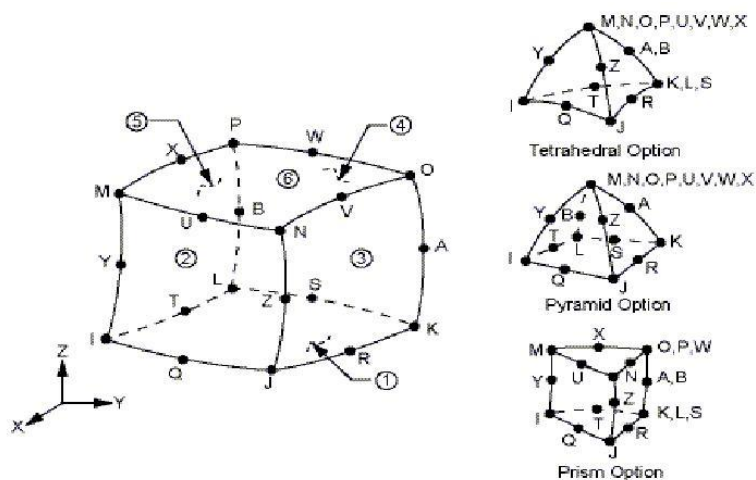
Στο στάδιο της προεπεξεργασίας περιλαμβάνονται όλα εκείνα τα βήματα που απαιτούνται για τη δημιουργία του καννάβου (mesh), τα οποία είναι:

- ✓ Η επιλογή κατάλληλου τύπου στοιχείων για την δημιουργία δισδιάστατου (2D) ή τρισδιάστατου μοντέλου (3D).
- ✓ Ο προσδιορισμός των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών που απαρτίζουν την κατασκευή (Μέτρο ελαστικότητας, λόγο Poisson, κλπ.)
- ✓ Ο σχεδιασμός του μοντέλου.
- ✓ Διακριτοποίηση της κατασκευής και δημιουργία του τελικού πλέγματος στοιχείων (mesh).

Τέλος, ορίζεται το είδος φόρτισης και οι συνοριακές συνθήκες του μοντέλου, διαδικασία η οποία μπορεί να γίνει και στο στάδιο της επίλυσης.

### 3.1.3.1 Επιλογή τύπου στοιχείων (*element type*)

Η μοντελοποίηση με τη ΜΠΣ βασίζεται στον κατακερματισμό του μοντέλου σε μικρά δομικά τμήματα, τα στοιχεία. Το ABAQUS παρέχει μία μεγάλη βιβλιοθήκη στοιχείων, η επιλογή των οποίων εξαρτάται από την κατασκευή που θα μοντελοποιηθεί και τον τρόπο μοντελοποίησής της. Για την προσομοίωση της ορθογώνιας ρωγατομένης πλάκας, της κατασκευαστικής λεπτομέρειας του πλοίου που έγινε στην συνέχεια, του σύνθετου επιθέματος που τοποθετήθηκε στις ρωγμές καθώς και του στρώματος κόλλας που χρησιμοποιήθηκε, μπορούν να υιοθετηθούν αρκετές διαφορετικές μέθοδοι που έχουν σαν αποτέλεσμα την επιλογή διαφορετικού τύπου στοιχείων. Η μέθοδος που επιλέχθηκε στην παρούσα διπλωματική ήταν η μοντελοποίηση με τρισδιάστατα στερεά στοιχεία (*solid elements*), τα οποία παρέχουν μεγαλύτερη ακρίβεια. Ειδικότερα επιλέχθηκε το εικοσάκομβο εξαεδρικό στοιχείο (20-node) αναφερόμενο ως C3D20R (Σχήμα 3.2) στο ABAQUS, το οποίο έχει 3 βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο (μετατόπιση στους άξονες  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) και παρουσιάζει επιπλέον χαρακτηριστικά πλαστικότητας, ερπυσμού και μεγάλων εκτροπών και παραμορφώσεων.



Σχήμα 3.2: Γεωμετρία στοιχείου C3D20R

### 3.1.3.2 Μηχανικές ιδιότητες των υλικών

Το πρόγραμμα ABAQUS υποστηρίζει την μοντελοποίηση γραμμικών υλικών (ισοτροπικών, ορθοτροπικών και ανισοτροπικών) και μη γραμμικών υλικών (ελαστικών, ανελαστικών, βισκοελαστικών). Στην μοντελοποίηση του δοκιμίου τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τα εξής:

- Η χαλύβδινη μεταλλική πλάκα είναι ισοτροπικό υλικό, άρα παρουσιάζει τις ίδιες ιδιότητες σε όλες τις διευθύνσεις. Οπότε χαρακτηρίζεται από ένα μέτρο ελαστικότητας (E) και ένα λόγο Poisson ( $\nu$ ) (Πίνακας 3.1).
- Το κολλητικό μέσο θεωρείται και αυτό ως ισοτροπικό υλικό, επομένως χαρακτηρίζεται από ένα μέτρο ελαστικότητας (E) και ένα λόγο Poisson ( $\nu$ ) (Στο απλό δοκίμιο δεν χρησιμοποιήθηκε κολλητικό μέσο).
- Το σύνθετο επίθεμα, το οποίο αποτελείται από μονοαξονικές ίνες άνθρακα (Unidirectional, UD) και εποξική ρητίνη, είναι ορθοτροπικό υλικό. Γι' αυτό το λόγο ορίζονται οι μηχανικές ιδιότητες (μέτρο ελαστικότητας (E), λόγος Poisson ( $\nu$ ) και μέτρο διάτμησης (G)) σε κάθε διεύθυνση ξεχωριστά (Πίνακας 3.2).

**Πίνακας 3.1:** Μηχανικές Ιδιότητες Χάλυβα

Material	E (MPa)	$\nu$	$\sigma_o$ (MPa)
Steel	200000	0.30	348

**Πίνακας 3.2:** Μηχανικές Ιδιότητες Σύνθετου Επιθέματος

Material	$E_x$ (MPa)	$E_y$ (MPa)	$E_z$ (MPa)	$\nu_{xy}$	$\nu_{yz}$	$\nu_{xz}$	$G_{xy}$ (MPa)	$G_{yz}$ (MPa)	$G_{xz}$ (MPa)
PW / HLU	47085	47085	5000	0.30	0.02	0.30	2400	1600	2400

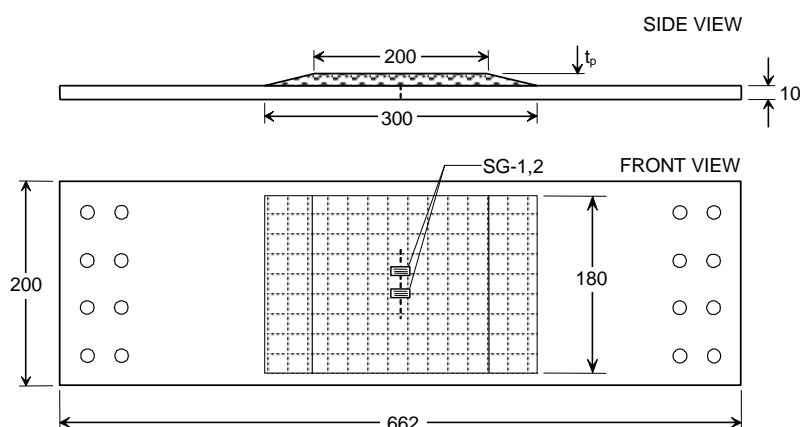
### 3.1.3.3 Σχεδίαση της κατασκευής (Modeling)

Όπως είδη αναφέρθηκε, για να επιβεβαιωθεί η ορθότητα του τρόπου μοντελοποίησης που θα ακολουθηθεί στην παρούσα εργασία, κρίθηκε απαραίτητη η δημιουργία ενός μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων από τη βιβλιογραφία και η σύγκριση των αποτελεσμάτων. Η διαδικασία ανάπτυξης του μοντέλου θα ακολουθήσει τις γενικές κατευθύνσεις που ορίζονται και εφαρμόζονται για τις υφιστάμενες ανάγκες, διατηρώντας ταυτόχρονα τις ιδιότητες και όσο το δυνατόν περισσότερα από τα χαρακτηριστικά μοντελοποίησης κοινά με την πηγή. Το ενδιαφέρον μέγεθος προς σύγκριση ήταν ο συντελεστής έντασης τάσης πριν και μετά την επιβολή του επιθέματος. Έτσι η εργασία που επιλέχθηκε [8], εμπεριέχει στα αποτελέσματά της, τους συντελεστές έντασης τάσης πριν και μετά την εφαρμογή του επιθέματος, σε παρεμφερή πειραματικά δοκίμια. Το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε στην [8] ήταν το ANSYS. Στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ABAQUS.

Οι ιδιότητες του χάλυβα και του επιθέματος που χρησιμοποιήθηκε φαίνονται στους πίνακες 3.1 και 3.2 αντίστοιχα. Το μέτρο διάτμησης  $G$  του χάλυβα υπολογίστηκε από το τύπο:

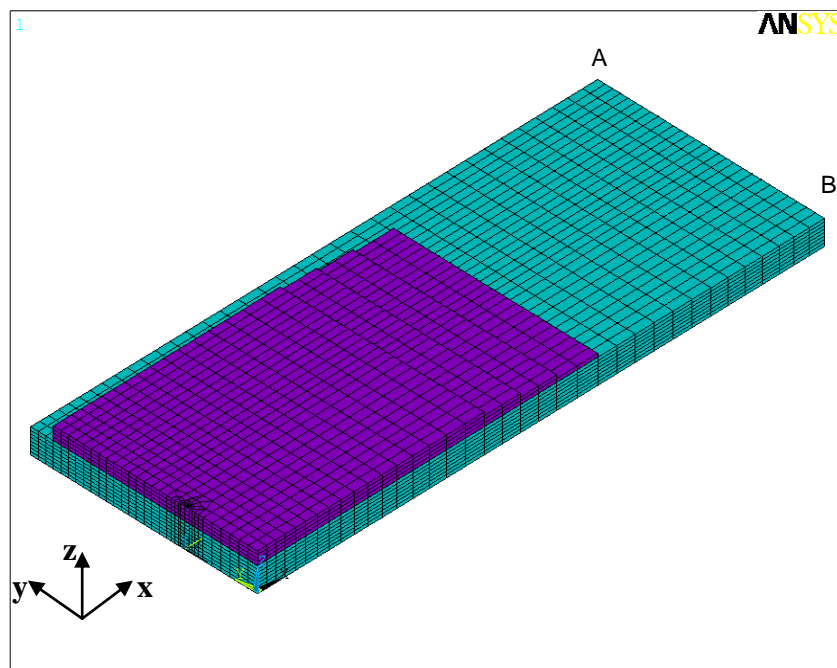
$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

Οι τιμές που αναφέρονται στους πίνακες 3.1 και 3.2 πάρθηκαν από την εργασία [8]. Η γεωμετρία και οι διαστάσεις του δοκιμίου και του επιθέματος της εργασίας [8] φαίνονται στο σχήμα 3.3. Το πάχος του επιθέματος για την περίπτωση PW / HLU ήταν 5,2mm.



Σχήμα 3.3: Γεωμετρία και διαστάσεις του δοκιμίου της βιβλιογραφίας [8]

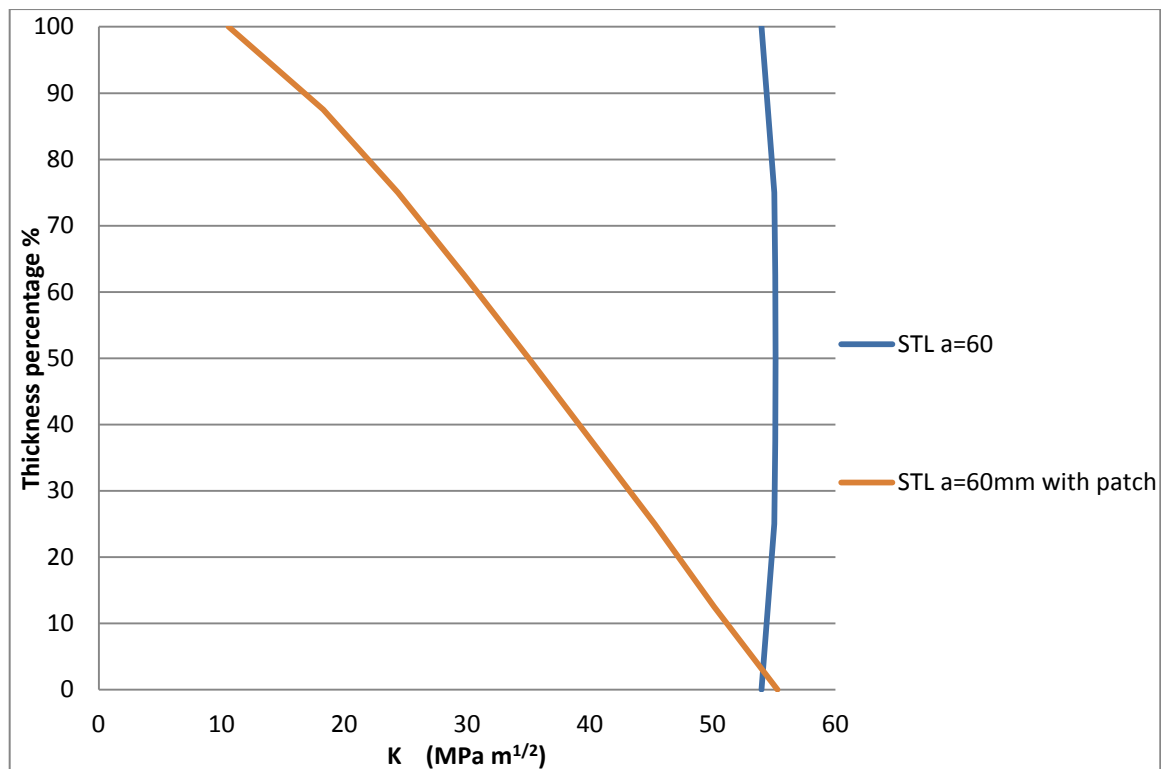
Μοντελοποιήθηκε μόνο το 1/4 της κατασκευής, και με τον ορισμό συνθηκών συμμετρίας προέκυψαν από το πρόγραμμα αποτελέσματα που αφορούσαν ολόκληρη την κατασκευή. Στο σχήμα 3.4 παρουσιάζεται το τμήμα της κατασκευής που μοντελοποιήθηκε [8]. Το μέγεθος των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε ήταν από 2mm κοντά στην περιοχή της ρωγμής μέχρι 15mm στις διευθύνσεις x, y, ενώ χρησιμοποιήθηκαν 8 στοιχεία κατά το πάχος της μεταλλικής πλάκας για τον πιο ακριβή υπολογισμό του συντελεστή έντασης τάσης (ΣΕΤ). Επίσης χρησιμοποιήθηκαν 4 στοιχεία κατά το μέγιστο πάχος του επιθέματος. Η φόρτιση που εφαρμόστηκε ήταν ομοιόμορφα κατανομημένος εφελκυσμός στη πλευρά AB ίσος με 100MPa. Οι οριακές συνθήκες στην πλευρά AB ήταν να μην επιτρέπεται μετατόπιση κατά τον z άξονα και να μην επιτρέπεται περιστροφή κατά τον y άξονα.



**Σχήμα 3.4:** Μοντελοποίηση του 1/4 της κατασκευής λόγω συμμετρίας [8].

Η περίπτωση που επιλέχθηκε για σύγκριση ήταν αυτή με μήκος ρωγμής  $2a=120\text{mm}$  (ή  $a=60\text{mm}$ ). Στο σχήμα 3.5 βλέπουμε τη μεταβολή του συντελεστή έντασης τάσης κατά το πάχος του μετώπου της ρωγμής [8], πριν και μετά την εφαρμογή του επιθέματος.

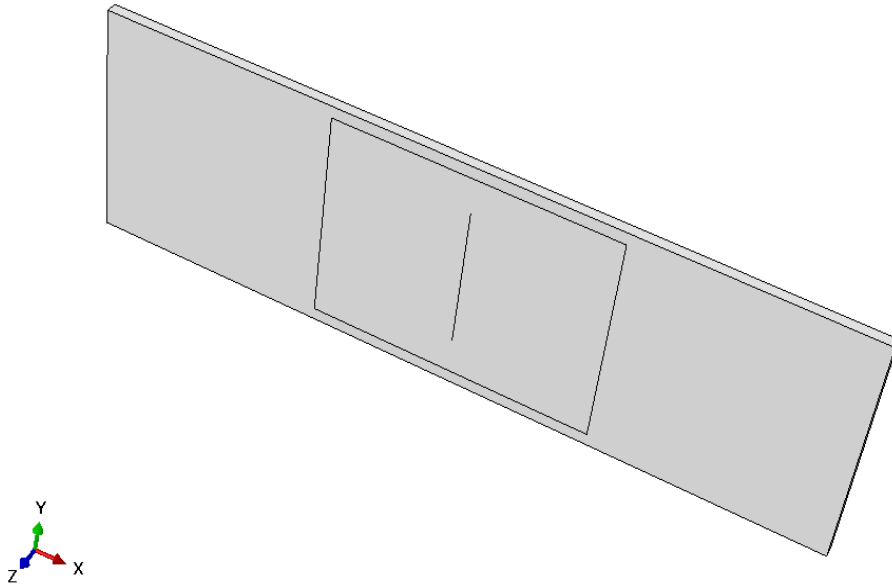




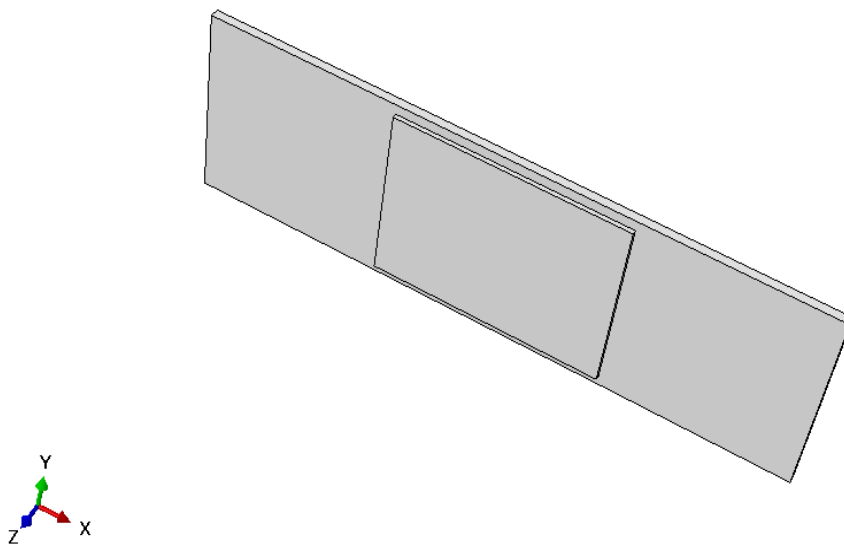
**Σχήμα 3.5:** Συντελεστής έντασης τάσης κατά το πάχος του μετώπου της ρωγμής πριν και μετά την εφαρμογή του επιθέματος [8].

Όσον αφορά τώρα την μοντελοποίηση των δοκιμών προς σύγκριση, η γεωμετρία της ορθογώνιας πλάκας παρέμεινε ακριβώς ίδια, καθώς και οι μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα και του σύνθετου επιθέματος (πίνακες 3.1, 3.2). Κύρια παράμετρος ήταν η διαμόρφωση του πλέγματος των στοιχείων σε ολόκληρο το δοκίμιο και με έμφαση στην περιοχή κοντά στο μέτωπο της ρωγμής. Επίσης το επίθεμα που μοντελοποιήθηκε δεν έχει βαθμωτή μείωση του πάχους του από το μήκος των 200mm έως τα 300mm (σχήμα 3.3), αλλά χρησιμοποιήθηκε επίθεμα μήκους 250mm. Το φορτίο και οι οριακές συνθήκες που εφαρμόστηκαν στην πλευρά AB ήταν ίδιες με την [8]. Ωστόσο, εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι μοντελοποιήθηκε ολόκληρη η κατασκευή και όχι το  $\frac{1}{4}$  γιατί, στην πραγματική κατασκευαστική λεπτομέρεια που θα μοντελοποιούσαμε στην συνέχεια δεν υπήρχε συμμετρία με αποτέλεσμα να θέλουμε να εξετάσουμε την μοντελοποίηση και την ορθότητα των αποτελεσμάτων χωρίς συνθήκες συμμετρίας. Ακολουθούν τα σχήματα 3.6 και 3.7 που δείχνουν την κατασκευή που μοντελοποιήθηκε στο ABAQUS πριν και μετά την τοποθέτηση του επιθέματος. Το πλέγμα των στοιχείων δεν φαίνεται, καθώς είναι η παράμετρος που θα εξεταστεί στη συνέχεια.

Στο σχήμα 3.6 φαίνεται επίσης και το περίγραμμα στο οποίο στη συνέχεια θα τοποθετηθεί το επίθεμα.

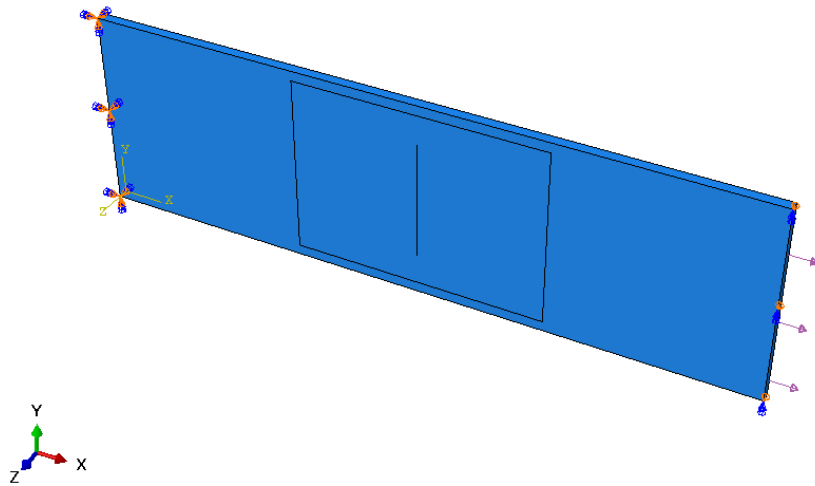


**Σχήμα 3.6:** Μοντελοποίηση του δοκιμίου χωρίς το επίθεμα στο ABAQUS.

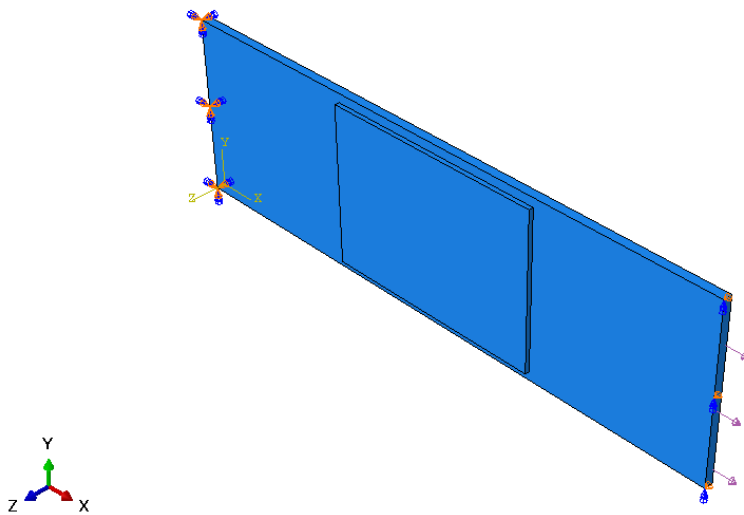


**Σχήμα 3.7:** Μοντελοποίηση του δοκιμίου με το επίθεμα στο ABAQUS.

Επιπλέον, στα σχήματα 3.8 και 3.9 φαίνονται η επιβολή των οριακών συνθηκών και της φόρτισης στο δοκίμιο, πριν και μετά την τοποθέτηση του επίθεματος.



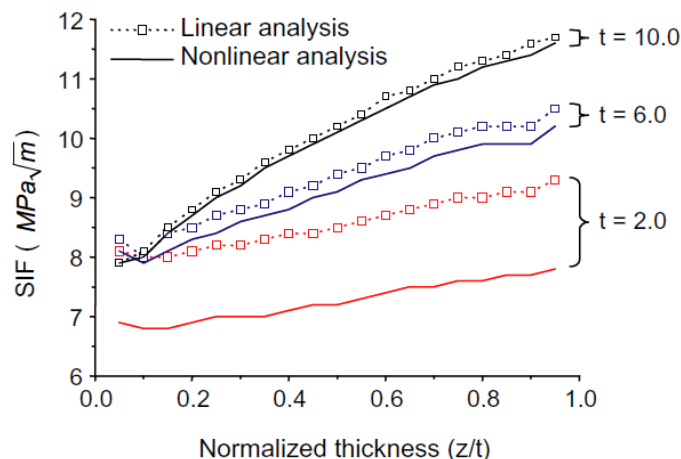
**Σχήμα 3.8:** Οριακές συνθήκες και φόρτιση του δοκιμίου χωρίς το επίθεμα στο ABAQUS.



**Σχήμα 3.9:** Οριακές συνθήκες και φόρτιση του δοκιμίου με το επίθεμα στο ABAQUS.

### 3.1.4 Επίλυση (Solution)

Σε αυτό το στάδιο ορίζεται ο τύπος της ανάλυσης βάσει του οποίου θα γίνει η επίλυση του προβλήματος. Η ανάλυση μπορεί να είναι γραμμική ή μη γραμμική, ανάλογα με τις απαιτήσεις και τα χαρακτηριστικά του προβλήματος. Η γραμμική ανάλυση δίνει αρκετά ακριβή αποτελέσματα, με πολύ μικρή απαίτηση σε υπολογιστική ισχύ. Η γραμμική ανάλυση σε σχέση με τη μη γραμμική (θεωρία μεγάλων παραμορφώσεων), η οποία είναι ακριβέστερη μέθοδος, υπερεκτιμά το Συντελεστή Έντασης Τάσης (ΣΕΤ) της ρωγμής [9], [10], [11], [12], [13]. Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.10 η γραμμική ανάλυση εξάγει αρκετά μεγαλύτερες τιμές ΣΕΤ σε σχέση με την μη γραμμική σε λεπτά ελάσματα, διαφορά που μειώνεται σημαντικά με την αύξηση του πάχους της μεταλλικής πλάκας. Επομένως, η επιλογή της γραμμικής ανάλυσης, οδηγεί σε ασφαλή αποτελέσματα, με ένα συντελεστή ασφαλείας. Η προσθήκη όμως ρωγμής στο δοκίμιο και χρησιμοποιώντας την μέθοδο «Contour Integration» για τον υπολογισμό του ΣΕΤ οδηγούσε αναγκαστικά στη λύση του προβλήματος με μη γραμμική ανάλυση, στην οποία όμως επιβαλλόταν το φορτίο σε ένα μόνο βήμα.

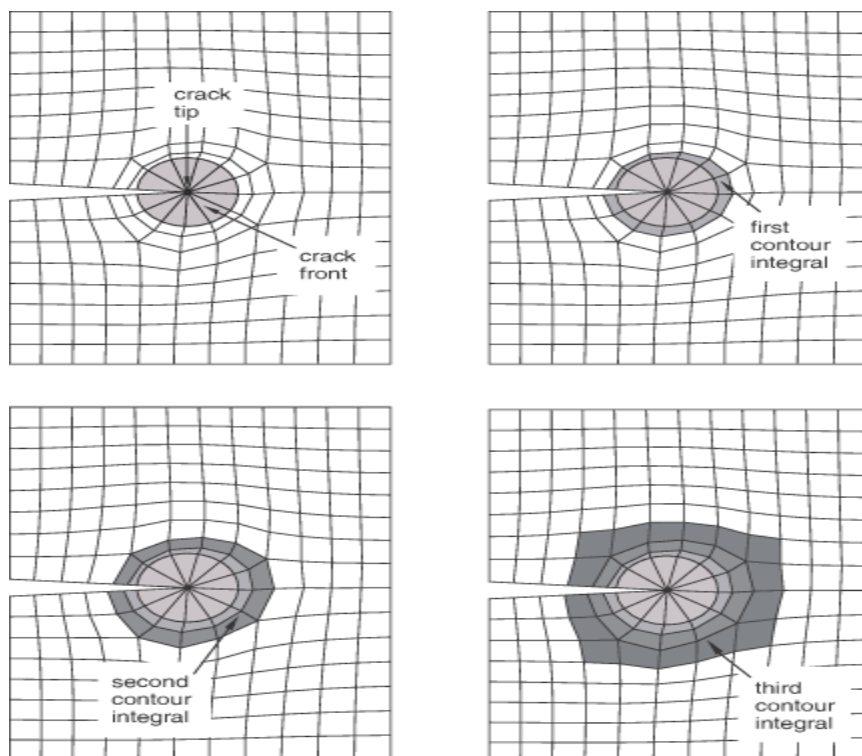


**Σχήμα 3.10:** Διαφορά αποτελεσμάτων μεταξύ γραμμικής και μη γραμμικής ανάλυσης [9],[10].

Τα «contour integrals» είναι μία μέθοδος υπολογισμού ολοκληρωμάτων κατά μήκος «διαδρομών» (paths). Για να δημιουργηθεί η ρωγμή, αρχικά ορίστηκε μία ραφή. Όταν δημιουργείται το πλέγμα στοιχείων στο ABAQUS αυτόματα δημιουργούνται διπλοί επικαλυπτόμενοι κόμβοι πάνω στη ραφή οι οποίοι είναι ελεύθεροι να μετακινηθούν όταν η ραφή διαχωρίζεται λόγω επιβολής φόρτισης. Αφού έχει οριστεί η ραφή, ορίζεται το μέτωπο της ρωγμής και στη συνέχεια η διεύθυνση διάδοσής της. Για να έχουμε καλύτερα αποτελέσματα του ΣΕΤ τα «contour integrals» δεν υπολογίζονται μόνο στο μέτωπο της ρωγμής, αλλά και σε περιμετρικές περιοχές γύρω από αυτό (contours) μέχρι να προκύψει σύγκλιση των αποτελεσμάτων (σχήμα 3.11). Κάθε νέα περιοχή ορίζεται από ένα περίγραμμα που είναι σαν ένα «δακτυλίδι» στοιχείων γύρω από το μέτωπο της ρωγμής. Κάθε ένα

επόμενο περίγραμμα (contour) περιλαμβάνει ακόμα ένα «δακτυλίδι» στοιχείων που το προσθέτει γύρω από την προηγούμενη περιοχή ολοκλήρωσης.

Το ABAQUS έχει την δυνατότητα να ορίζει αυτόματα αυτές τις περιοχές. Η μέθοδος των «contour integral» είναι αυτοδύναμη καθώς ακριβής εκτιμήσεις του ΣΕΤ πραγματοποιούνται και με αραιό πλέγμα στοιχείων γύρω από τη ρωγμή [14].



**Σχήμα 3.11:** Περιμετρικές περιοχές γύρω από τη ρωγμή για τον υπολογισμό του ΣΕΤ

Τέλος, θα αναφερθούν κάποια γενικά στοιχεία για τα «contour integrals»:

- Υπολογίζουν μεγέθη τα οποία προκύπτουν στην μετεπεξεργασία και δεν επηρεάζουν τα αποτελέσματα
- Μπορούν να ζητηθούν μόνο σε γενική στατική ανάλυση, (general static analysis) η οποία ουσιαστικά ορίστηκε ως μη γραμμική ανάλυση με επιβολή φορτίου σε ένα βήμα.
- Μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο όταν έχουμε two-dimensional quadrilateral elements ή three dimensional brick στοιχεία

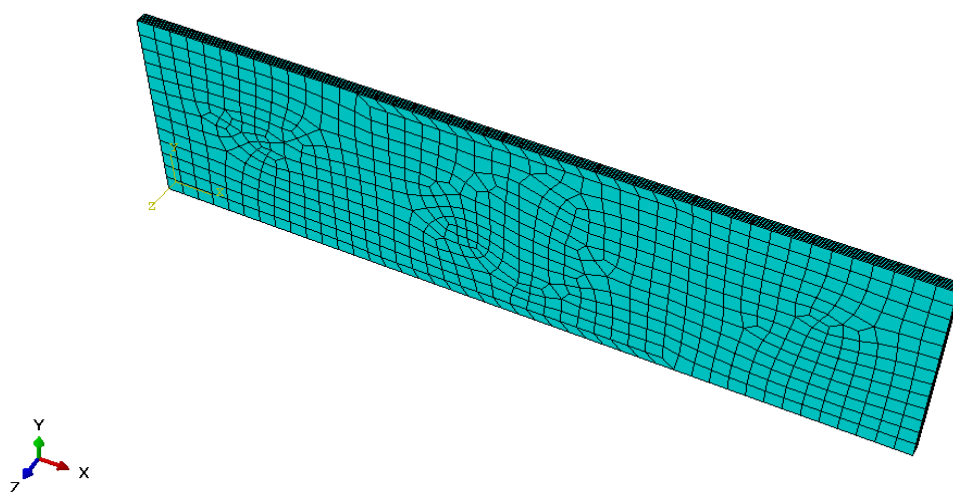
### 3.1.5 Μετεπεξεργασία (Postprocessing)

Αφού έχει επιλυθεί το πρόβλημα, το ζητούμενο αποτέλεσμα είναι ο υπολογισμός του ΣΕΤ στο άκρο της ρωγμής. Η διαδικασία υπολογισμού του αναφέρθηκε στη προηγούμενη παράγραφο. Παρακάτω, θα ακολουθήσουν τα αποτελέσματα για τον ΣΕΤ με διαφορετικά πλέγματα στοιχείων και οι συγκρίσεις τους με την βιβλιογραφία [8].

Αρχικά θα δείξουμε μία περίπτωση σαν παράδειγμα σύγκλισης των ΣΕΤ σε σχέση με την περιοχή ολοκλήρωσης (contours) που αναφέρθηκε στη προηγούμενη παράγραφο. Στη συνέχεια, τα σχήματα που θα παρατίθενται θα περιλαμβάνουν μόνο την τελική καμπύλη του ΣΕΤ κατά το πάχος του δοκιμίου στο μέτωπο της ρωγμής μετά την σύγκλιση. Το 0% του πάχους που αναφέρεται στα σχήματα βρίσκεται από την ελεύθερη πλευρά του δοκιμίου (unpatch side), ενώ το 100% του πάχους στην πλευρά του επιθέματος (patch side). Λόγω μη εφαρμογής στρώματος κολλητικού μέσου ανάμεσα στο δοκίμιο και στο επίθεμα, η τιμή για 100% του πάχους θεωρείται μη έγκυρη και απορρίπτεται. Στην πραγματική περίπτωση όμως (Κεφάλαιο 4), το στρώμα του κολλητικού μέσου τοποθετείται και έχουμε έγκυρες τιμές για τον ΣΕΤ και στο 100% του πάχους της κατασκευής (patch side). Τέλος, τιμές για τον ΣΕΤ υπολογίζονται μόνο στις κορυφές των ακμών των στοιχείων όπως και στη βιβλιογραφία [8].

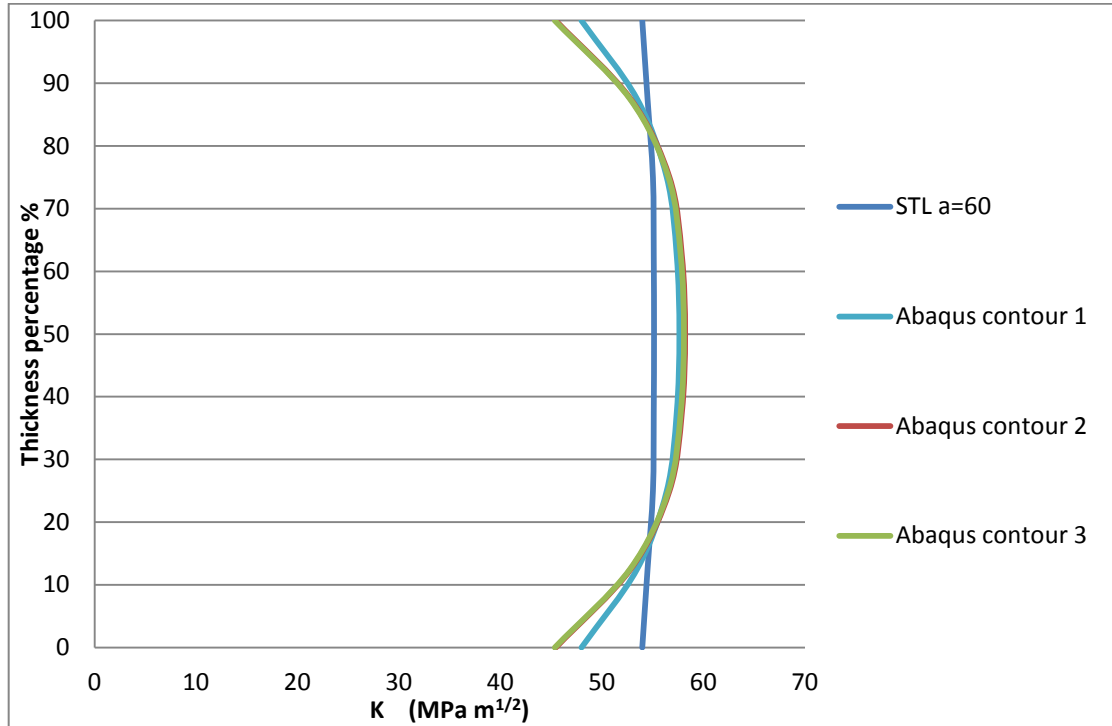
#### 3.1.5.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Αρχικά εφαρμόστηκε πλέγμα στοιχείων σταθερού μεγέθους στις διευθύνσεις x και y διαστάσεων 15mm περίπου και 8 στοιχεία κατά το πάχος του δοκιμίου. Το πλέγμα των στοιχείων (mesh) φαίνεται στο σχήμα 3.12.



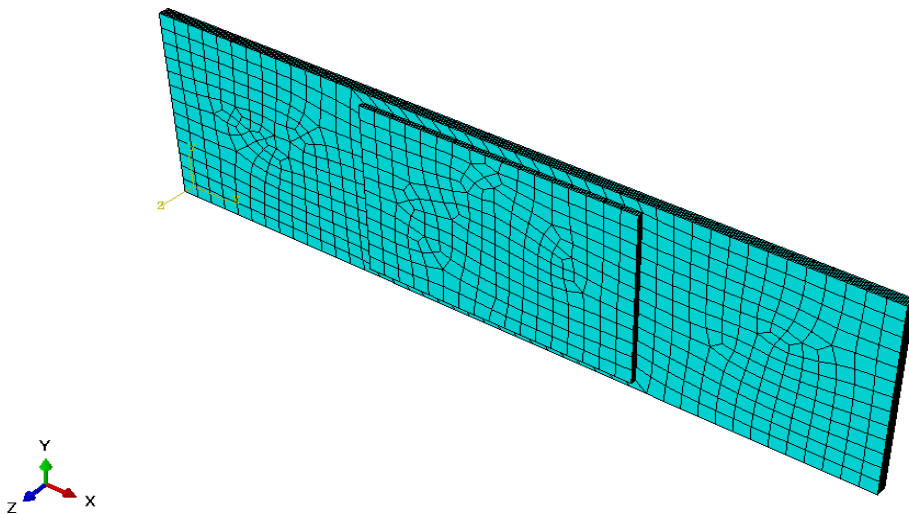
**Σχήμα 3.12:** Πλέγμα στοιχείων σταθερού περίπου μεγέθους στοιχείων 15mm και 8 στοιχεία κατά το πάχος στο δοκίμιο χωρίς επίθεμα

Η σύγκριση των συντελεστών έντασης τάσης πριν την εφαρμογή του επιθέματος φαίνεται στο σχήμα 3.13. Όπως είχε αναφερθεί, στο πρώτο σχήμα που θα παρατεθεί θα φαίνονται όλες οι καμπύλες των ΣΕΤ για κάθε περιοχή ολοκλήρωσης. Στο σχήμα 3.13 παρατηρούμε την σύγκλιση που επιτυγχάνεται ήδη με την δεύτερη περιοχή ολοκλήρωσης. Από εδώ και πέρα, για λόγους ευκρίνειας, στα διαγράμματα θα παρατίθεται μόνο μία καμπύλη του ΣΕΤ, αυτή μετά την σύγκλιση.



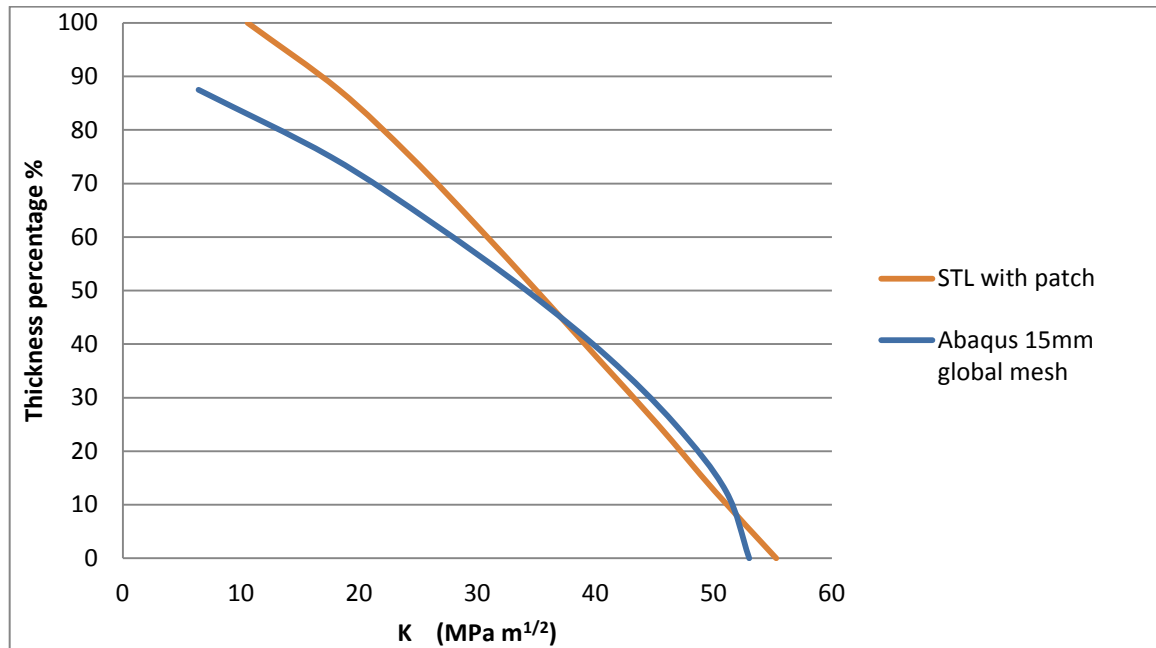
**Σχήμα 3.13:** Σύγκριση αποτελεσμάτων ΣΕΤ με βιβλιογραφία [8].

Το πλέγμα των στοιχείων στο δοκίμιο με επίθεμα φαίνεται στο σχήμα 3.14.



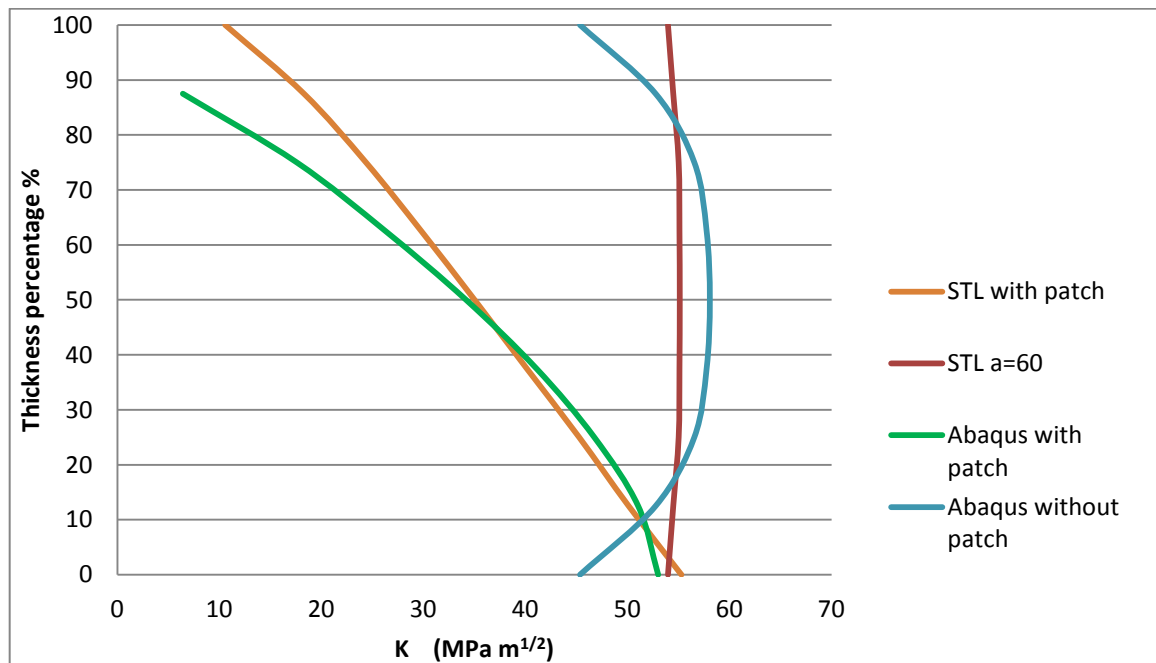
**Σχήμα 3.14:** Πλέγμα στοιχείων σταθερού περίπου μεγέθους 15mm και 8 στοιχεία κατά το πάχος στο δοκίμιο με επίθεμα.

Ακολουθεί η σύγκριση της καμπύλης του ΣΕΤ με αυτή της βιβλιογραφίας (σχήμα 3.15).



Σχήμα 3.15: Σύγκριση αποτελεσμάτων ΣΕΤ με βιβλιογραφία [8]

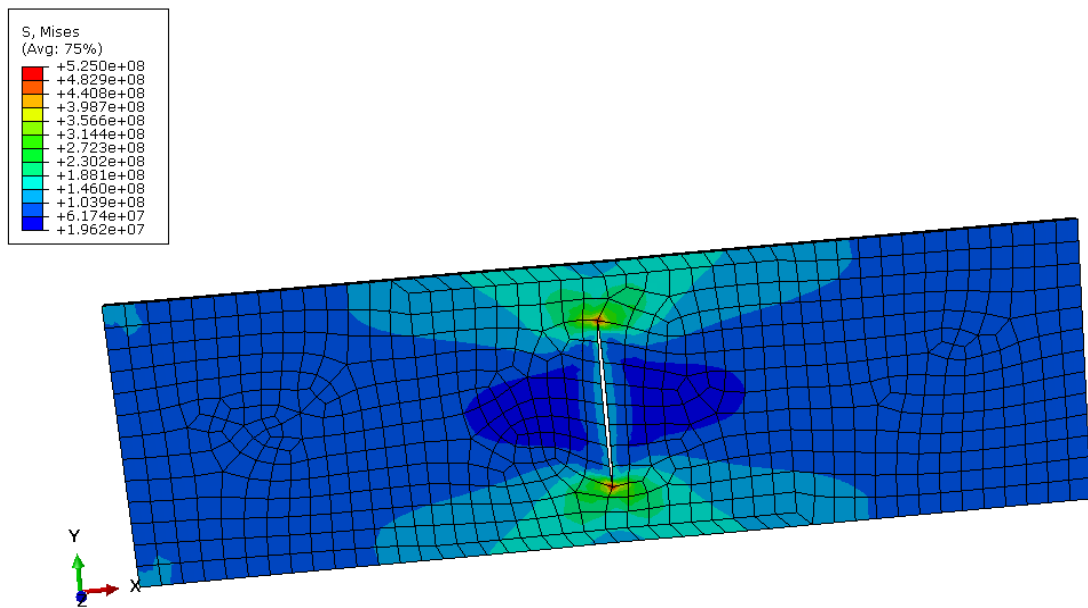
Ακολουθεί το σχήμα 3.16 το οποίο συγκεντρώνει τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης δοκιμής πλέγματος στοιχείων.



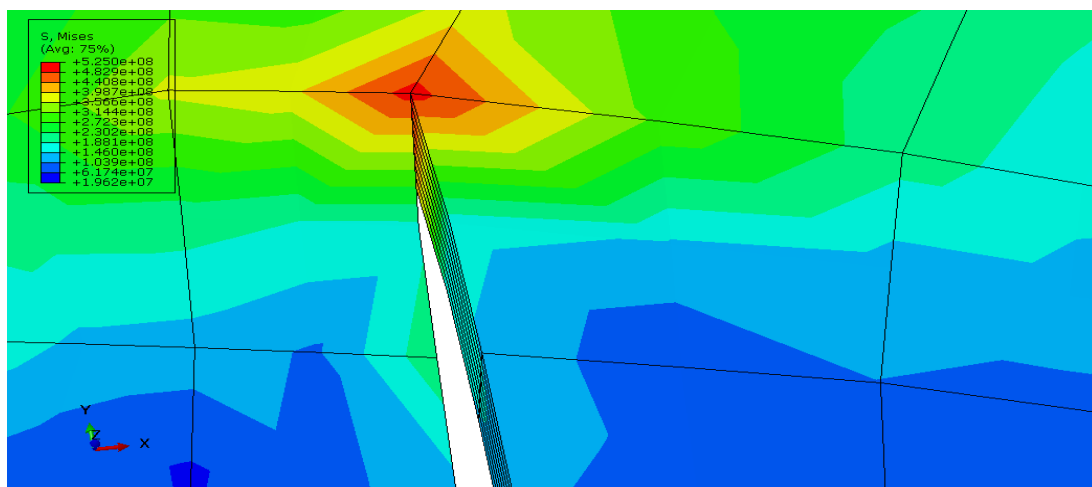
Σχήμα 3.16: Συγκεντρωτική σύγκριση αποτελεσμάτων ΣΕΤ με αυτά της βιβλιογραφίας



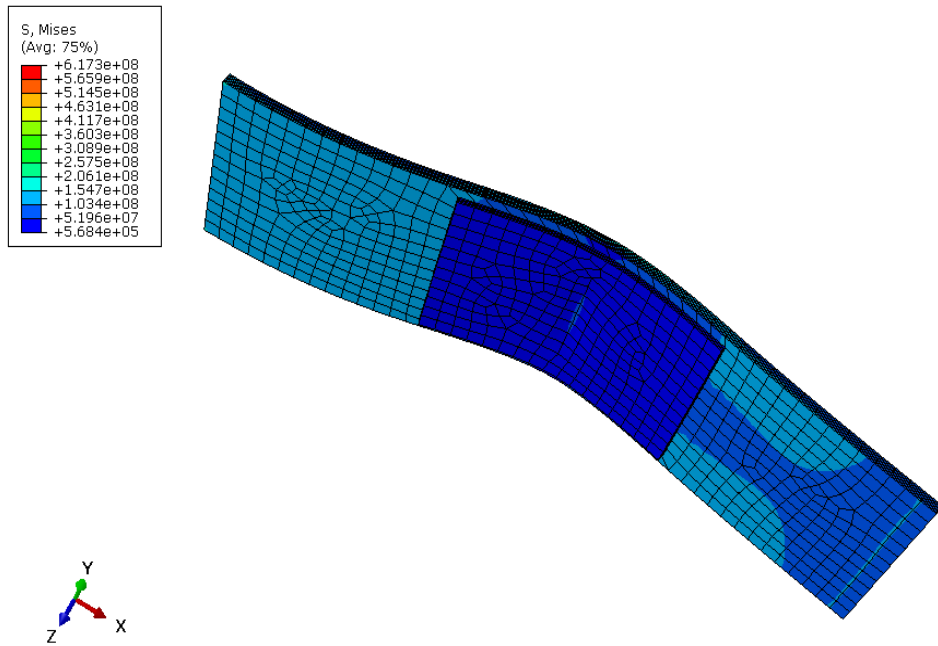
Στα επόμενα σχήματα (3.17 έως 3.20) φαίνεται το εντατικό πεδίο των τάσεων Von Mises πριν και μετά την εφαρμογή του επιθέματος στο δοκίμιο. Παρατηρείται σαφής μείωση του εντατικού πεδίου των τάσεων, κάτι το οποίο περιμένουμε και από τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει ήδη από τον ΣΕΤ. Στο σχήμα 3.20 φαίνεται ξεκάθαρα η διαβάθμιση των τάσεων κατά το πάχος του δοκιμίου. Διαπιστώνουμε μια μείωση των τάσεων καθώς μεταβαίνουμε από την ελεύθερη πλευρά του δοκιμίου, σε αυτήν που βρίσκεται το επίθεμα, κάτι το οποίο έχει προκύψει ήδη και από τα διαγράμματα του ΣΕΤ.



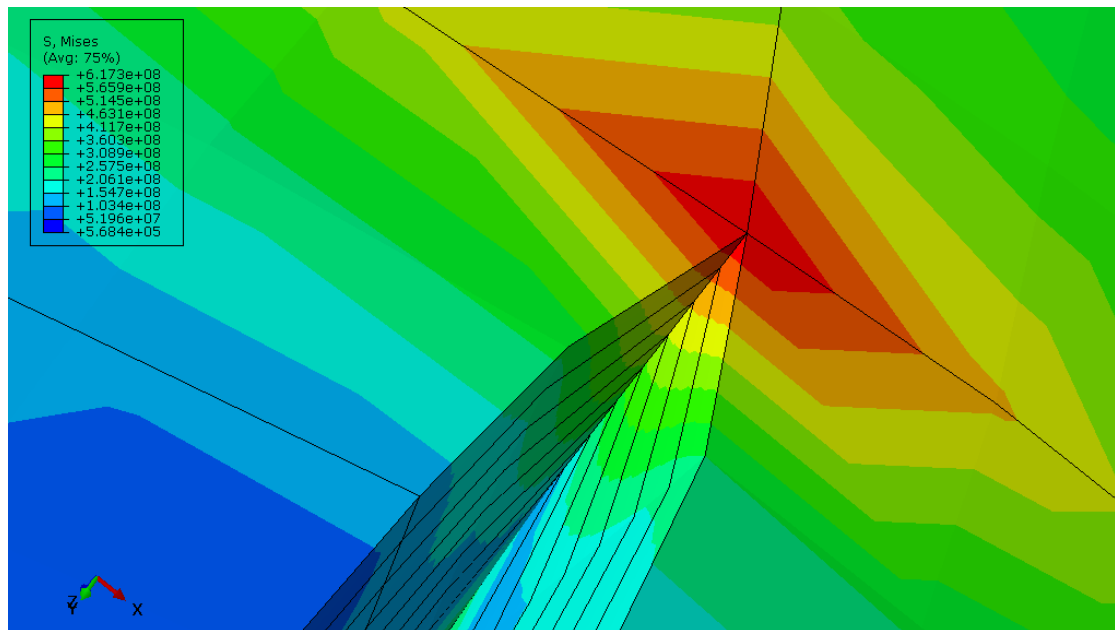
**Σχήμα 3.17:** Εντατικό πεδίο τάσεων Von Mises στο υπό μελέτη δοκίμιο χωρίς επίθεμα.



**Σχήμα 3.18:** Τάση Von Mises στο μέτωπο της ρωγμής του υπό μελέτη δοκιμίου.



**Σχήμα 3.19:** Εντατικό πεδίο τάσεων Von Mises στο υπό μελέτη δοκίμιο με επίθεμα.

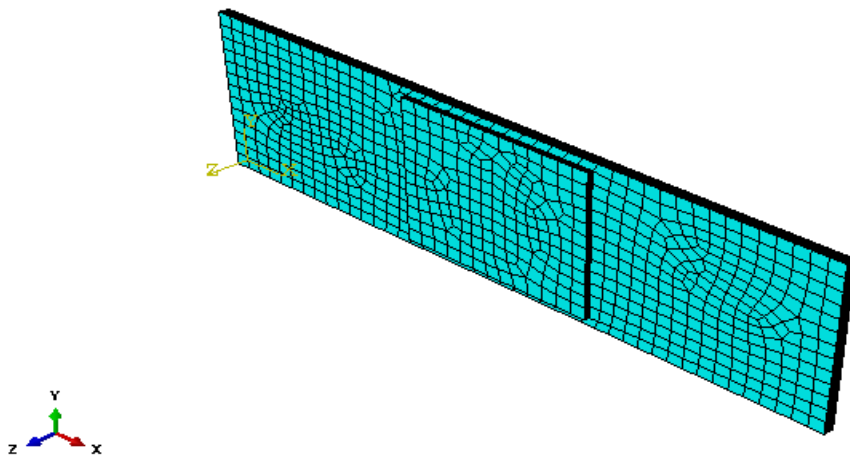


**Σχήμα 3.20:** Διαβάθμιση τάσεων Von Mises στο υπό μελέτη δοκίμιο από την ελεύθερη πλευρά του δοκιμίου προς αυτήν που βρίσκεται το επίθεμα.

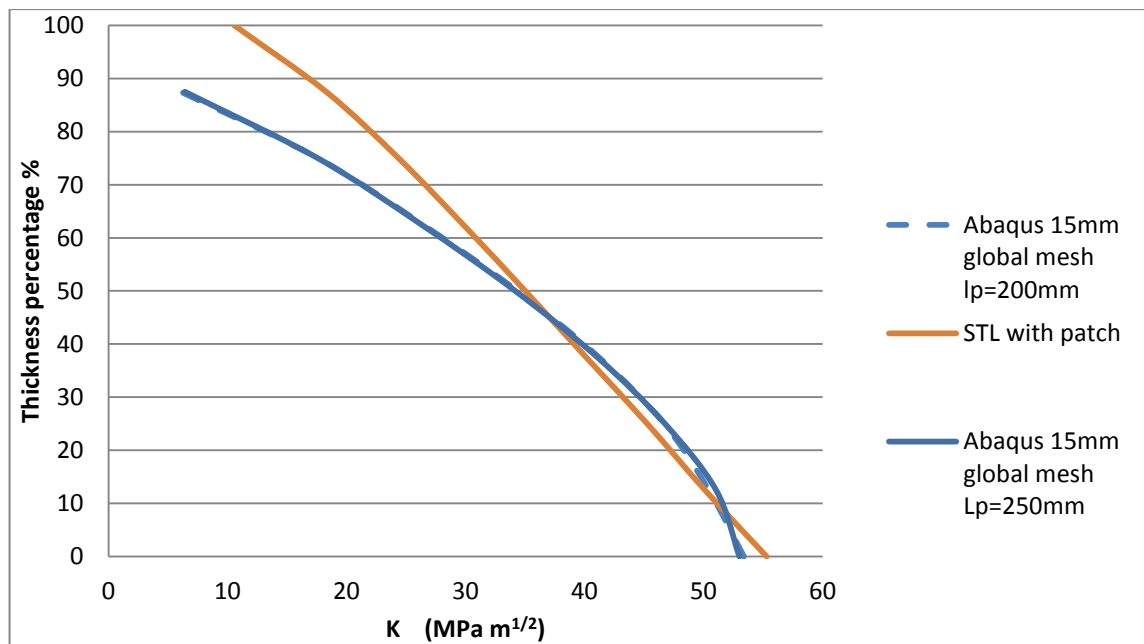
Στα επόμενα παραδείγματα, δόθηκε έμφαση στα δοκίμια με το επίθεμα και τα πιθανά πλέγματα στοιχείων εξετάστηκαν σε αυτά.

Με το ίδιο πλέγμα στοιχείων έγινε ένας εκ νέου υπολογισμός του ΣΕΤ αλλά με επίθεμα μήκους  $l=200\text{mm}$  σε αντίθεση με το  $l=250\text{mm}$  που έγιναν όλοι οι επόμενοι συνδυασμοί πλέγματος στοιχείων.

Το πλέγμα στοιχείων φαίνεται στο σχήμα 3.21 και τα αποτελέσματα για τον ΣΕΤ στο σχήμα 3.22. Στο σχήμα 3.22 παρατηρούμε ότι η αλλαγή του μεγέθους του επιθέματος από  $l=250\text{mm}$  σε  $l=200\text{mm}$  δεν επιφέρει καμία ουσιαστική αλλαγή στο μέγεθος και την κατανομή του ΣΕΤ.

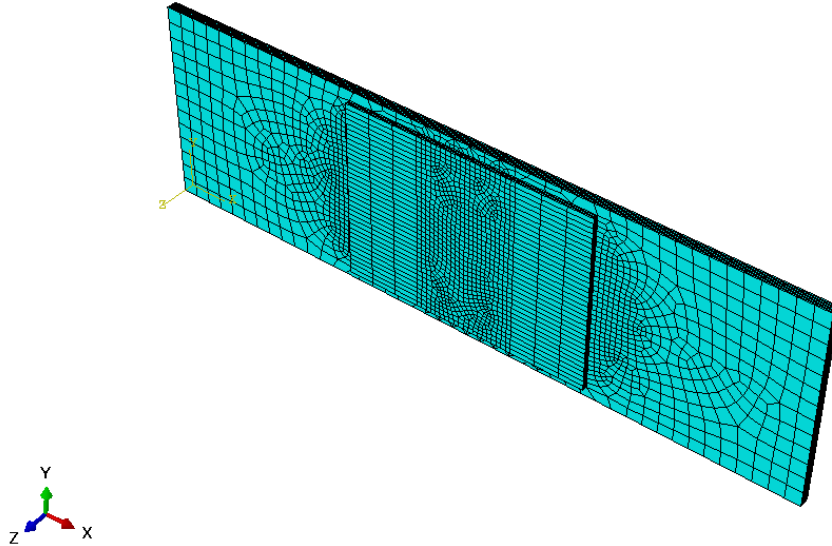


**Σχήμα 3.21:** Πλέγμα στοιχείων σταθερού περίπου μεγέθους 15mm και 8 στοιχεία κατά το πάχος του δοκιμίου. Μήκος επιθέματος 200mm

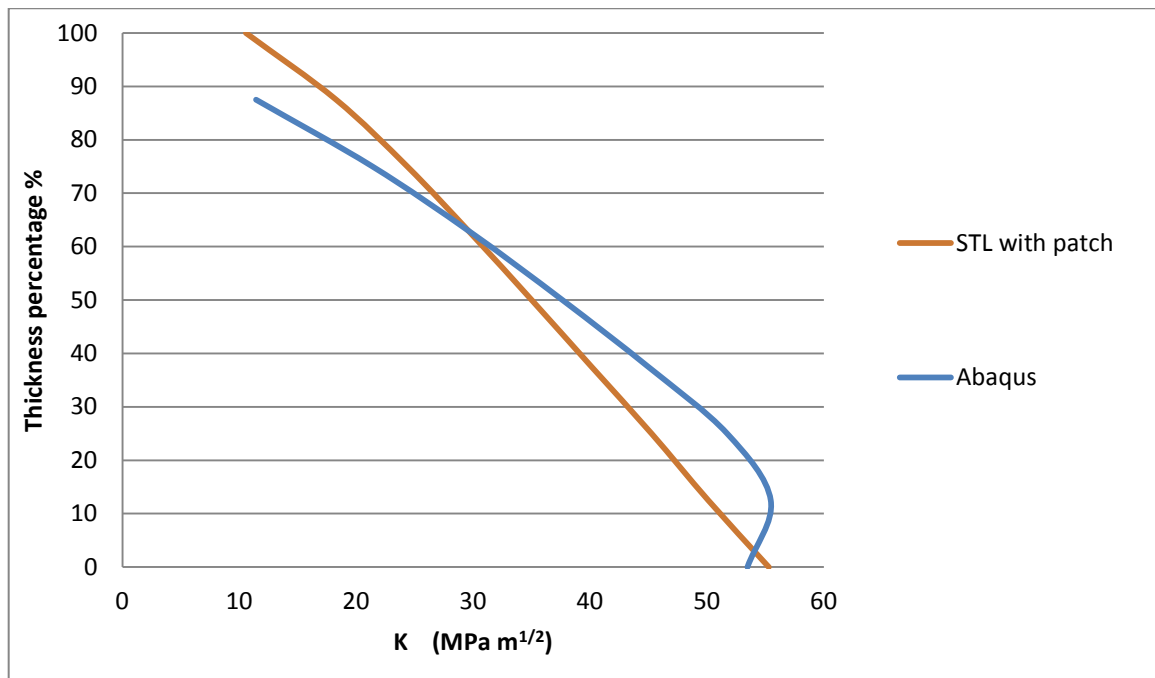


**Σχήμα 3.22:** Σύγκριση αποτελεσμάτων ΣΕΤ με βιβλιογραφία και με επίθεμα μήκους 250mm.

Στη συνέχεια επιστρέφουμε στις δοκιμές με μήκος επιθέματος  $l=250\text{mm}$ . Το πλέγμα στοιχείων αλλάζει στις διευθύνσεις  $x, y$  με μέγεθος στοιχείων  $5\text{mm}$  σε μία περιοχή  $50\text{mm}$  εκατέρωθεν της ρωγμής (σχήμα 3.23). Το πλήθος των στοιχείων κατά το πάχος του δοκιμίου παραμένει 8. Στη συνέχεια παρατίθεται και η σύγκριση των ΣΕΤ (σχήμα 3.24).

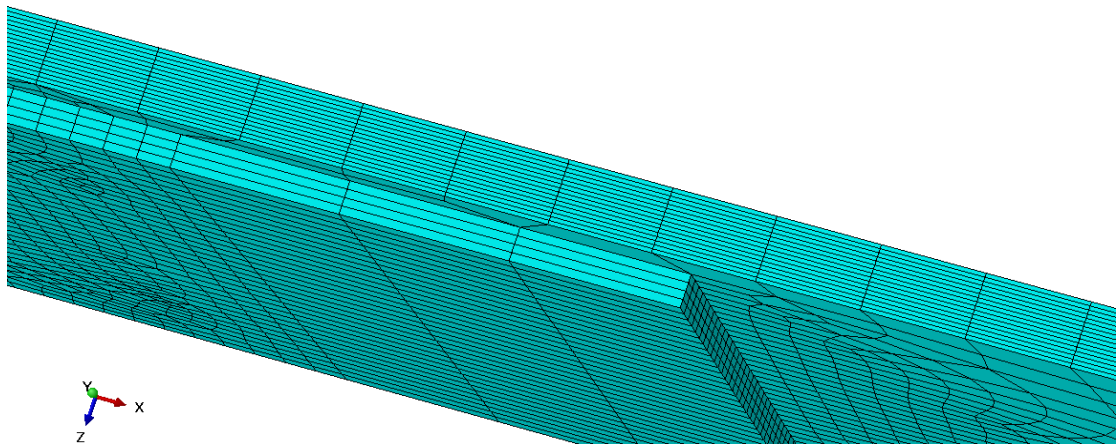


**Σχήμα 3.23:** Πλέγμα στοιχείων  $5\text{mm}$  σε περιοχή που περιλαμβάνει την ρωγμή και ανάπτυξή του μέχρι και  $15\text{mm}$  στις διευθύνσεις  $x, y$  και 8 στοιχεία κατά το πάχος του δοκιμίου.

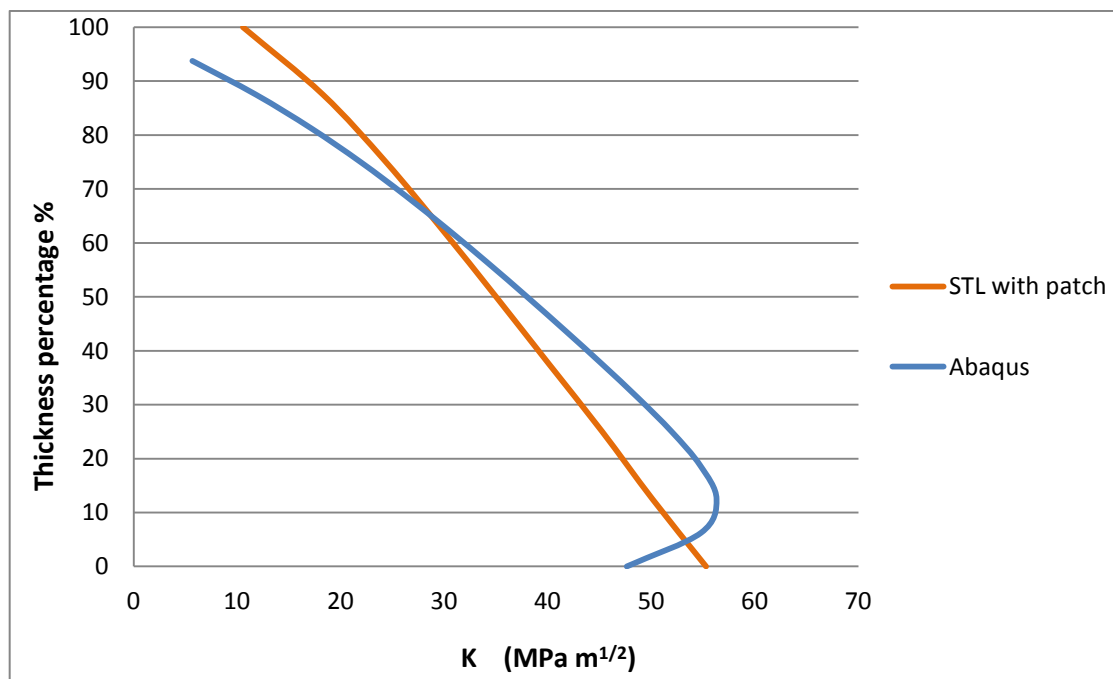


**Σχήμα 3.24:** Σύγκριση αποτελεσμάτων ΣΕΤ με βιβλιογραφία.

Στην επόμενη δοκιμή, το πλέγμα στοιχείων παραμένει ίδιο στις διευθύνσεις x, y αλλά αυτή τη φορά το πλήθος στοιχείων κατά το πάχος του δοκιμίου, μεταβλήθηκε από 8 σε 16 στοιχεία. Στο σχήμα 3.25 βλέπουμε ένα κοντινό πλάνο του πλέγματος στοιχείων κατά το πάχος του δοκιμίου, ενώ στο σχήμα 3.26 βλέπουμε την σύγκριση του ΣΕΤ που προέκυψε με αυτόν της βιβλιογραφίας [8].

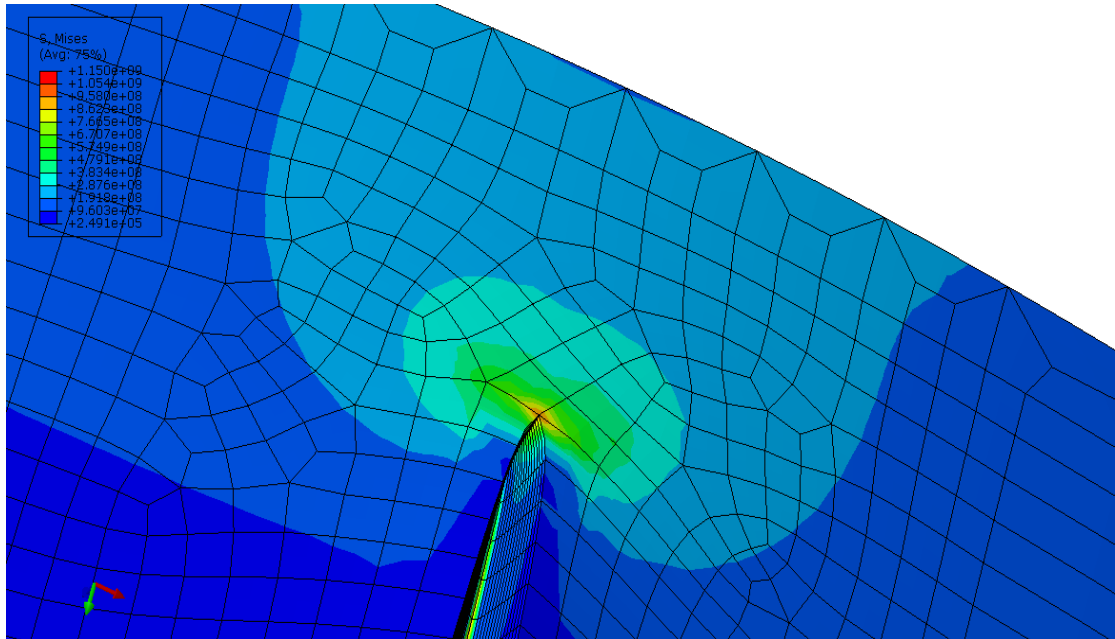


**Σχήμα 3.25:** Κοντινό πλάνο πλέγματος στοιχείων 5mm σε περιοχή που περιλαμβάνει την ρωγμή και ανάπτυξή του μέχρι και 15mm στις διευθύνσεις x, y και 16 στοιχεία κατά το πάχος του δοκιμίου.

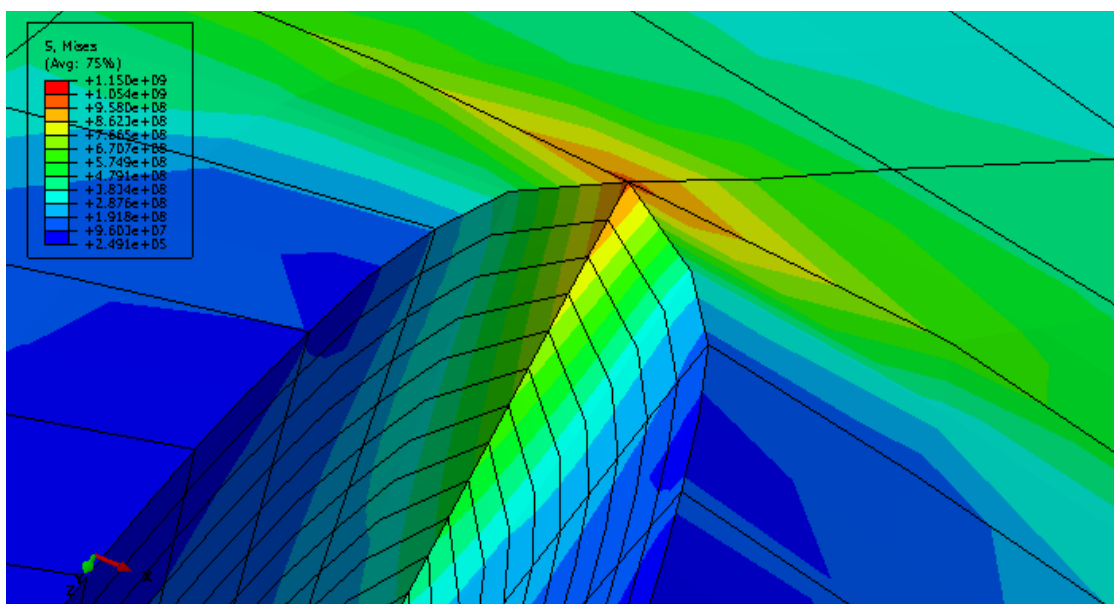


**Σχήμα 3.26:** Σύγκριση αποτελεσμάτων ΣΕΤ με βιβλιογραφία.

Και εδώ παρατίθεται η κατανομή των τάσεων Von Mises στην περιοχή κοντά στη ρωγμή (σχήμα 3.27), καθώς και κατά το πάχος του μετώπου της ρωγμής (σχήμα 3.28).

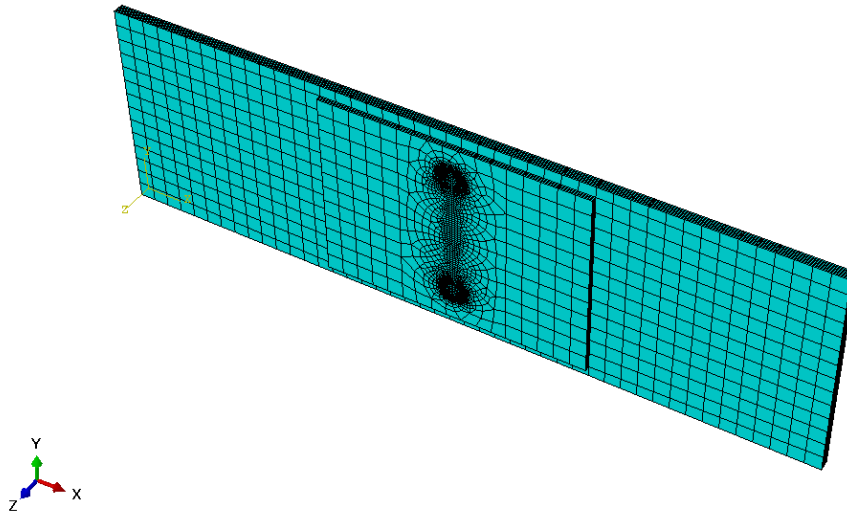


Σχήμα 3.27: Πεδίο τάσεων Von Mises γύρω από τη ρωγμή.

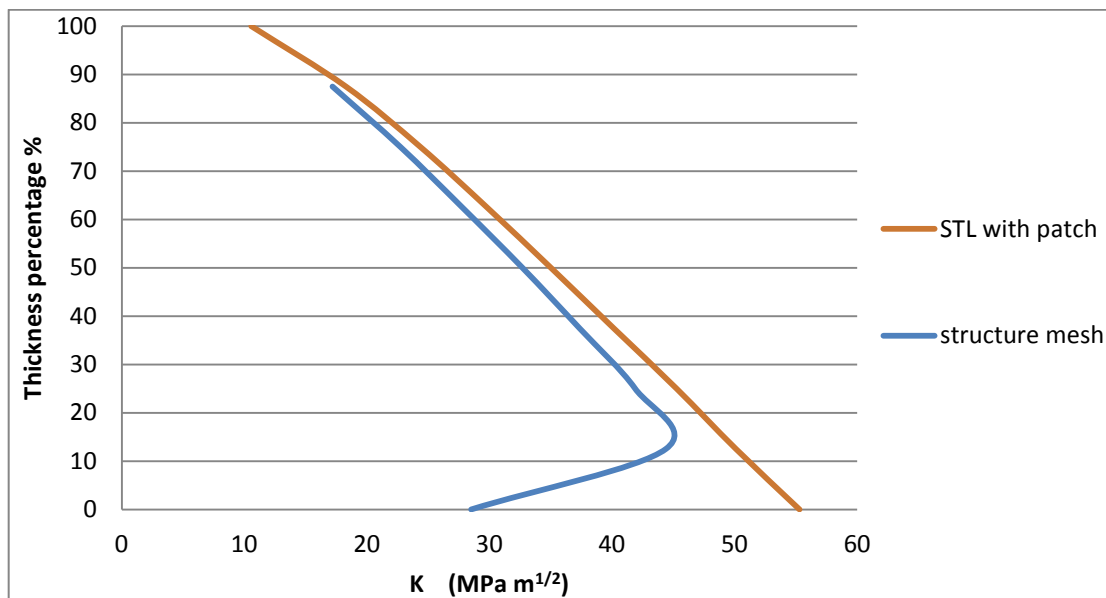


Σχήμα 3.28: Πεδίο τάσεων Von Mises κατά το πάχος του δοκιμίου και πως αυτές αυξάνονται προς την ελεύθερη πλευρά.

Στη συνέχεια επιστρέφουμε στις δοκιμές με αριθμό στοιχείων κατά το πάχος του δοκιμίου ίσο με 8. Η παράμετρος που εξετάζεται αυτή τη φορά είναι η πυκνωση του πλέγματος στοιχείων κοντά στο μέτωπο της ρωγμής και στη συνέχεια η διαβαθμισμένη, όσο το δυνατόν γίνεται, αραίωσή του. Το πλέγμα έχει μεγέθη στοιχείων από 1mm και 2mm κοντά στη ρωγμή και 15mm στη συνέχεια. Στην πρώτη τέτοιου είδους δοκιμή προσπαθήθηκε να έχουμε συγκροτημένο πλέγμα στην αραίωση (structure mesh). Ακολουθεί το σχήμα 3.29 με το πλέγμα των στοιχείων και το 3.30 με τα αποτελέσματα για τον ΣΕΤ.

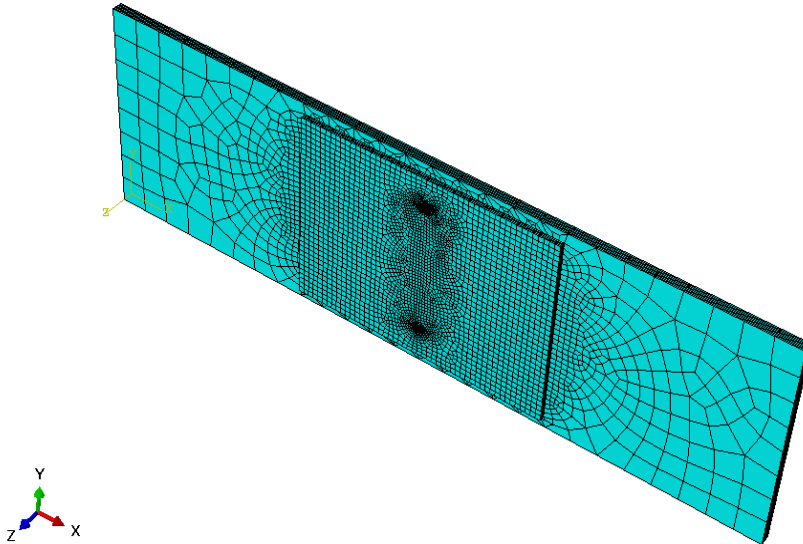


**Σχήμα 3.29** Πλέγμα στοιχείων 5mm σε περιοχή που περιλαμβάνει την ρωγμή και αραίωσή του μέχρι και 15mm στις διευθύνσεις x, y και 8 στοιχεία κατά το πάχος του δοκιμίου.

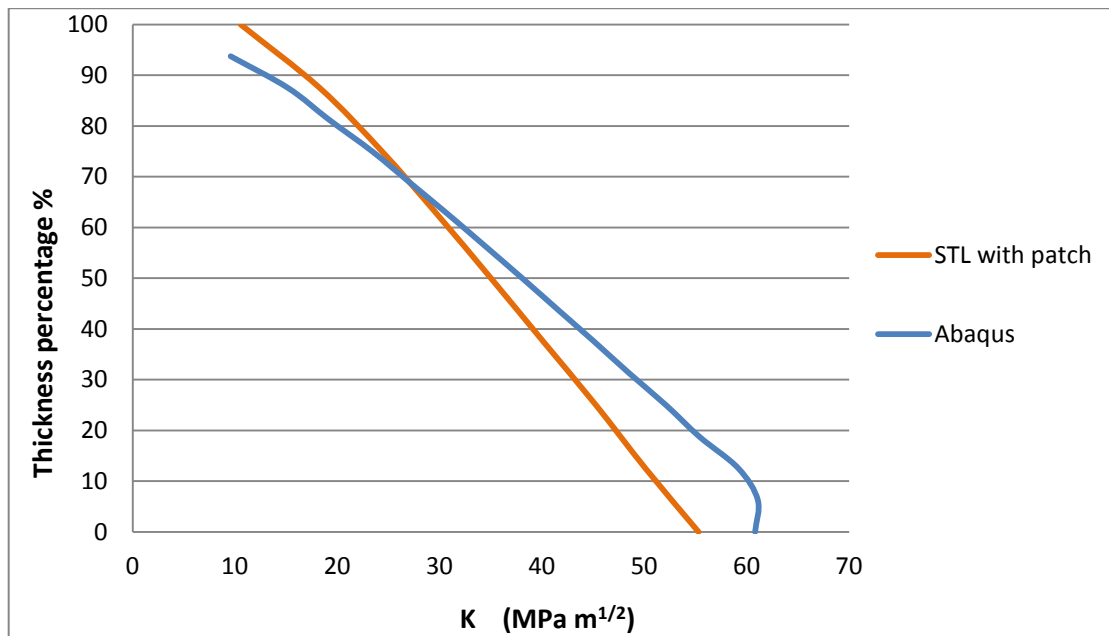


**Σχήμα 3.30:** Σύγκριση αποτελεσμάτων ΣΕΤ με βιβλιογραφία.

Η επόμενη δοκιμή ήταν με πλέγμα στοιχείων 0,5mm στο μέτωπο της ρωγμής και στην συνέχεια σταδιακή αραίωσή του μέχρι τα 5mm και στη συνέχεια τα 25mm. Παραμένουν 8 τα στοιχεία κατά το πάχος του δοκιμίου. Το πλέγμα στοιχείων φαίνεται στο σχήμα 3.31 και οι συγκρίσεις των ΣΕΤ στο σχήμα 3.32. Επιπλέον, παρατίθενται και τα σχήματα 3.33-3.34 που είναι οι διαβαθμίσεις στο πεδίο των τάσεων Von Mises γύρω από τη ρωγμή (σχήμα 3.33) και κατά το πάχος του δοκιμίου και πως αυτές αυξάνονται προς την ελεύθερη πλευρά (σχήμα 3.34).

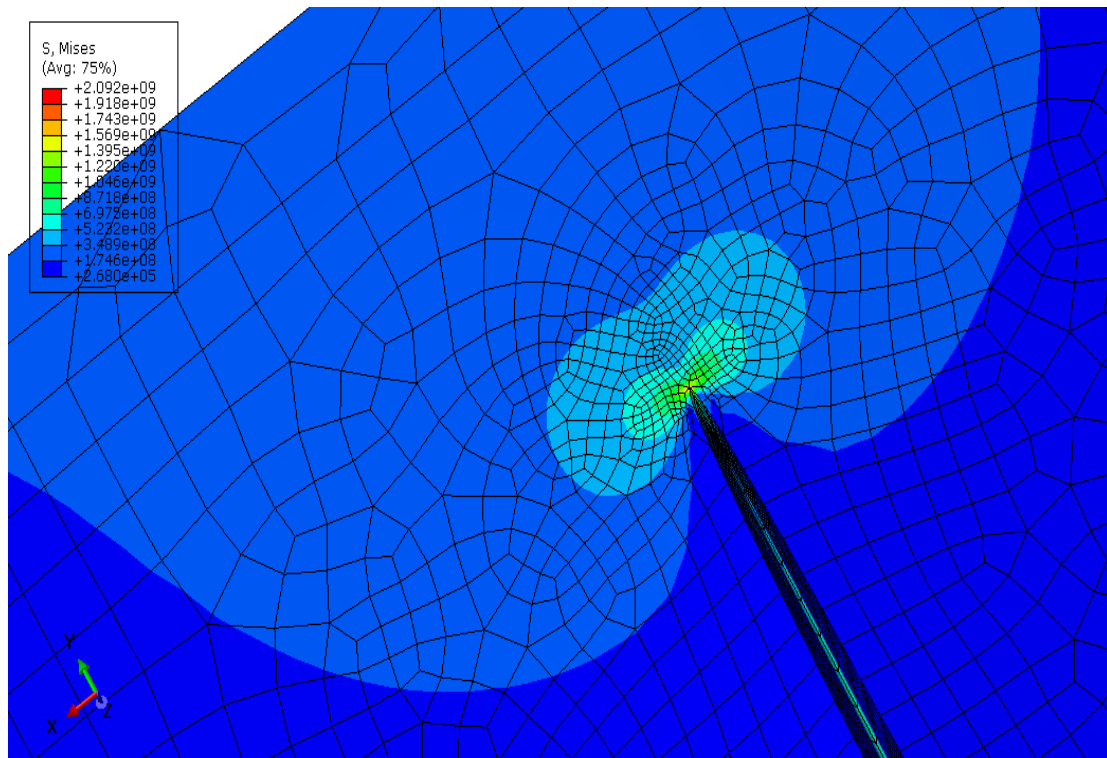


**Σχήμα 3.31:** Πλέγμα στοιχείων 0,5mm κοντά στο μέτωπο της ρωγμής και αραίωσή του σε 5mm και στην συνέχεια σε 25mm στις διευθύνσεις x, y και 8 στοιχεία κατά το πάχος του δοκιμίου.

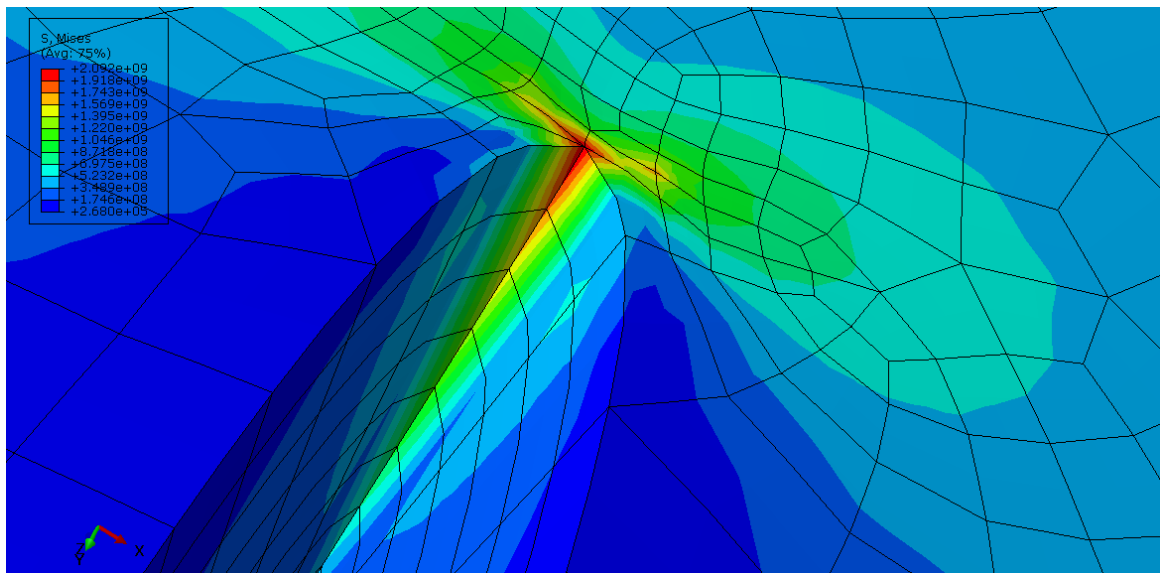


**Σχήμα 3.32:** Σύγκριση αποτελεσμάτων ΣΕΤ με βιβλιογραφία.



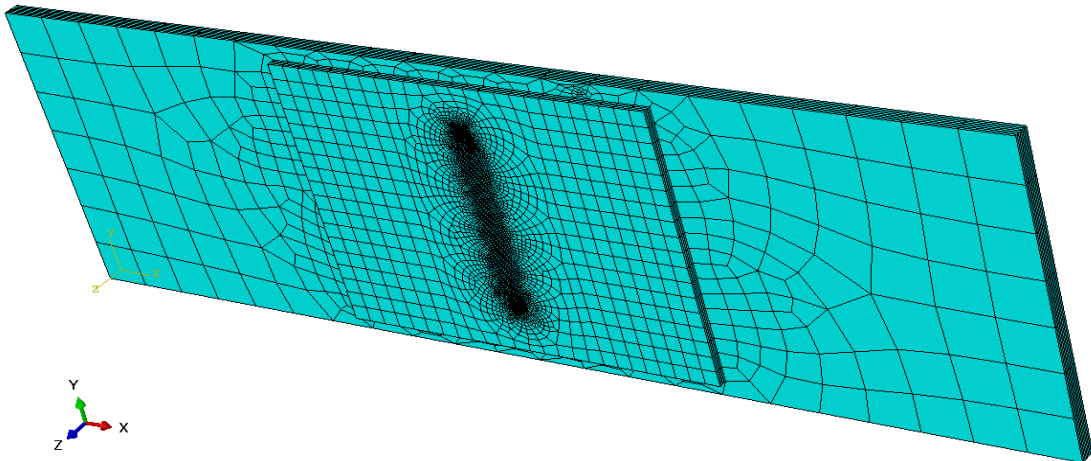


**Σχήμα 3.33:** Πεδίο τάσεων Von Mises γύρω από τη ρωγμή.

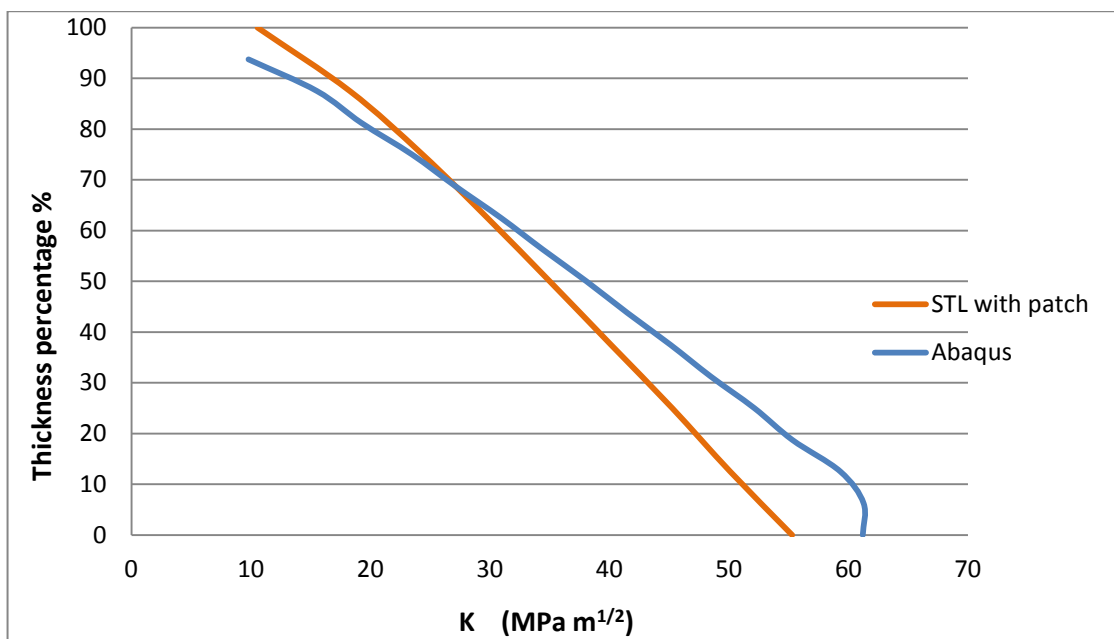


**Σχήμα 3.34:** Πεδίο τάσεων Von Mises κατά το πάχος του δοκιμίου και πως αυτές αυξάνονται προς την ελεύθερη πλευρά.

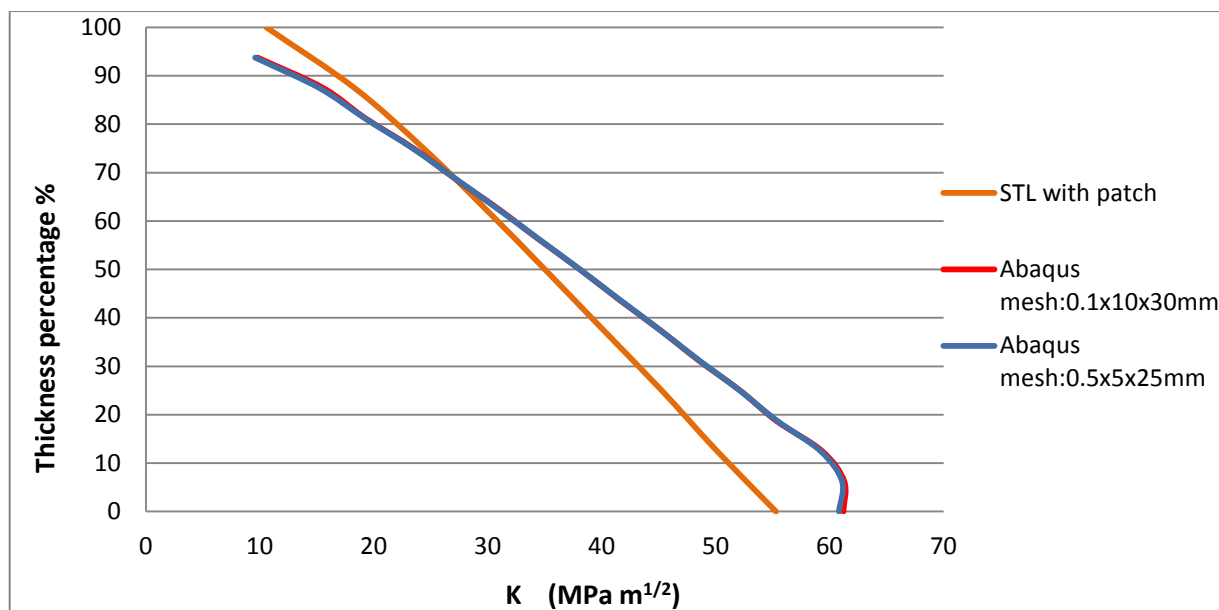
Τέλος, η τελευταία δοκιμή αφορούσε κυρίως την εξέταση της σύγκλισης της παρούσας με την ακριβώς προηγούμενη. Η δοκιμή ήταν με πλέγμα στοιχείων 0,1mm στο μέτωπο της ρωγμής και στην συνέχεια σταδιακή αραίωσή του μέχρι τα 10mm και στη συνέχεια τα 30mm. Παραμένουν 8 τα στοιχεία κατά το πάχος του δοκιμίου. Το πλέγμα στοιχείων φαίνεται στο σχήμα 3.35 και οι συγκρίσεις των ΣΕΤ στο σχήμα 3.36. Ακολουθούν επιπλέον η σύγκριση της παρούσας δοκιμής με την προηγούμενη (σχήμα 3.37).



**Σχήμα 3.35:** Πλέγμα στοιχείων 0,1mm κοντά στο μέτωπο της ρωγμής και αραίωσή του σε 10mm και στην συνέχεια σε 30mm στις διευθύνσεις x, y και 8 στοιχεία κατά το πάχος του δοκιμίου.



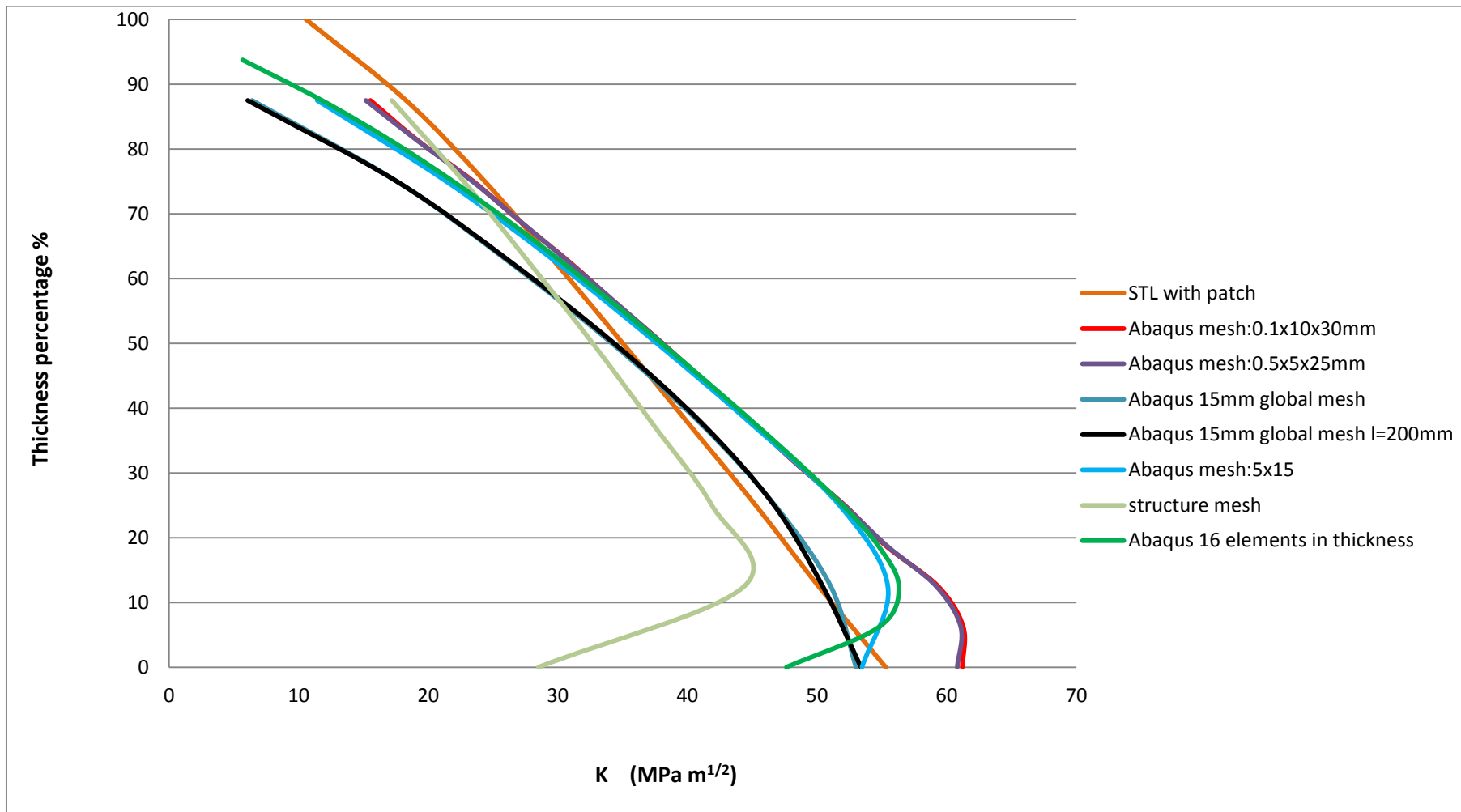
**Σχήμα 3.36:** Σύγκριση αποτελεσμάτων ΣΕΤ με βιβλιογραφία.



**Σχήμα 3.37:** Σύγκριση αποτελεσμάτων ΣΕΤ των 2 τελευταίων δοκιμών και ταυτόχρονα με βιβλιογραφία.

Όπως φαίνεται από το σχήμα 3.37 η διαφορά των δύο τελευταίων δοκιμών στα αποτελέσματα του ΣΕΤ είναι ουσιαστικά αμελητέα. Συμπέρασμα είναι ότι δεν χρειάζεται να υιοθετήσουμε πολύ μικρά στοιχεία κοντά στο μέτωπο της ρωγμής (από 0,5mm σε 0,1mm), καθώς και με τα ακόμα μεγαλύτερα σε μέγεθος (0.5mm) έχουμε τα σχεδόν ταυτόσημα αποτελέσματα για τον ΣΕΤ και ταυτόχρονα οικονομία στο χρόνο και στην υπολογιστική ισχύ. Τέλος παρατίθεται ένα διάγραμμα που περιλαμβάνει την σύγκριση όλων των ΣΕΤ (σχήμα 3.38).

Συμπερασματικά, σύμφωνα με το διάγραμμα 3.38 καταλήγουμε ότι το πλέγμα των στοιχείων κοντά στο μέτωπο της ρωγμής επηρεάζει αρκετά τα αποτελέσματά μας όσο αναφορά τον ΣΕΤ, είναι όμως συγκρίσιμα με αυτά της βιβλιογραφίας αν λάβουμε υπόψιν και τις παραδοχές που έγιναν, όπως το διαφορετικό μέγεθος του επιθέματος όσο αναφορά το μήκος του λόγω της μη εφαρμογής βαθμιαίας μείωσης του πάχους του (tapering), τη μη εφαρμογή στρώματος κολλητικού μέσου και σίγουρα την διαφορετικότητα του πλέγματος στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε. Παραδείγματος χάρη, στην μετέπειτα μοντελοποίησή μας, προφανώς δεν θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε συγκροτημένο πλέγμα στοιχείων (structure mesh). Καταληκτικά, αποφασίσαμε να χρησιμοποιήσουμε ένα πυκνό πλέγμα στοιχείων στο μέτωπο της ρωγμής το οποίο θα αραιώνεται καθώς απομακρυνόμαστε από αυτό. Επιπλέον, θα χρησιμοποιήσουμε 8 στοιχεία κατά το πάχος της μεταλλικής πλάκας.



Σχήμα 3.38: Σύγκριση αποτελεσμάτων ΣΕΤ όλων των δοκιμών

### 3.2 Διαδικασία μοντελοποίησης κατασκευαστικής λεπτομέρειας

Στην παρούσα παράγραφο θα περιγραφεί εν συντομία η διαδικασία που ακολουθήθηκε για να μοντελοποιηθεί το μέρος της κατασκευής του πλοίου που θα χρησιμοποιηθεί για ανάλυση και εφαρμογή σύνθετου επιθέματος σε ρωγμή στην παρούσα διπλωματική.

Σύμφωνα με τους κανονισμούς του CSR, για να γίνει ανάλυση αντοχής ενός πλοίου με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων απαιτείται η δημιουργία ενός μοντέλου πλοίου που να περιλαμβάνει τρία κύττα φορτίου (Three Compartments Model, TCM), το οποίο θα περιγραφεί αναλυτικά στην παράγραφο 3.3. Από το ήδη υπάρχον TCM [15] απομονώθηκε το τμήμα της κατασκευής που είχε επιλεγεί προς εξέταση (παράγραφος 2.2, σχήμα 2.18) και με βάση αυτό μοντελοποιήθηκε στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS 6.10.1. μόνο το συγκεκριμένο τμήμα. Στο TCM είχαν εφαρμοσθεί φορτία από μία συγκεκριμένη κατάσταση φόρτωσης (παράγραφος 2.3) και οριακές συνθήκες, όπως αυτά ορίζονται από τους κανονισμούς του CSR. Από την μετεπεξεργασία (postprocessing) του TCM πάρθηκαν περιμετρικά της έδρας της πλευρικής δεξαμενής διπυθμένου (Hopper Tank Floor, HTF) οι κατανομές των μετατοπίσεων των κόμβων και στις τρεις διευθύνσεις (x, y, z) καθώς και οι κατανομές των στρωφών ( $R_x$ ,  $R_y$ ,  $R_z$ ). Οι ίδιες ακριβώς μετατοπίσεις εφαρμόστηκαν περιμετρικά του HTF, αλλά οι στρωφές θεωρήθηκαν αμελητέες και παραλήφθηκαν.

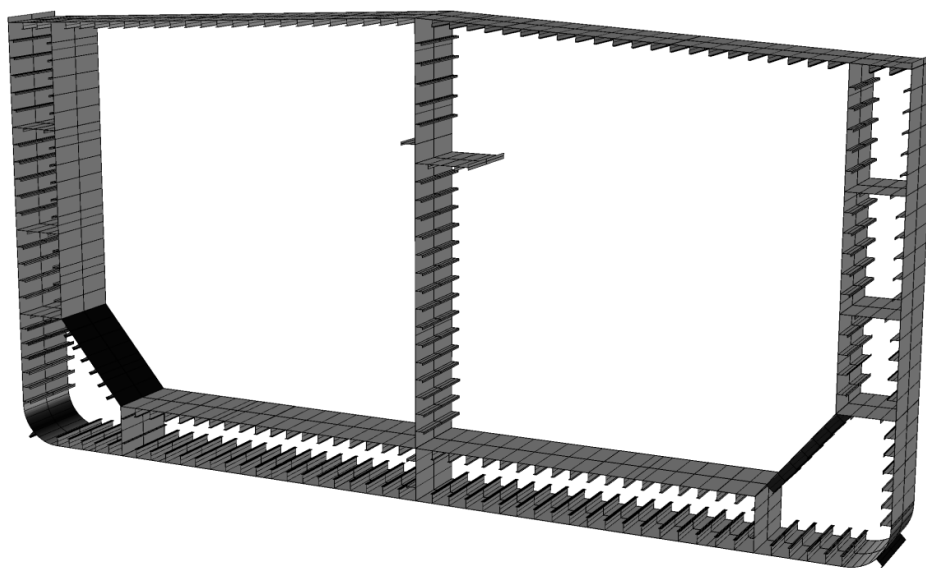
Μετά την επίλυση (solution) του HTF έγιναν συγκρίσεις του πεδίου των μετατοπίσεων του TCM στο συγκεκριμένο τμήμα και του HTF οι οποίες ήταν θετικές και δόθηκε το έναυσμα για την συνέχεια. Ακολούθησε η επιλογή των περιοχών για δημιουργία ρωγμής στο HTF και τελικά επιλέχθηκαν 2 σημεία. Τέλος, ανάλογα με τη ρωγμή και το μήκος της, έγινε παραμετροποίηση του επιθέματος ανάλογα με το συντελεστή ακαμψίας του (SR), το μέγεθός του, τις ιδιότητές του σύνθετου υλικού που χρησιμοποιήθηκε καθώς και αν θα τοποθετηθεί από την μία ή και από τις δύο πλευρές της αστοχίας.

### 3.3 Μοντέλο τριών κυτών πλοίου (Three Compartments Model, TCM)

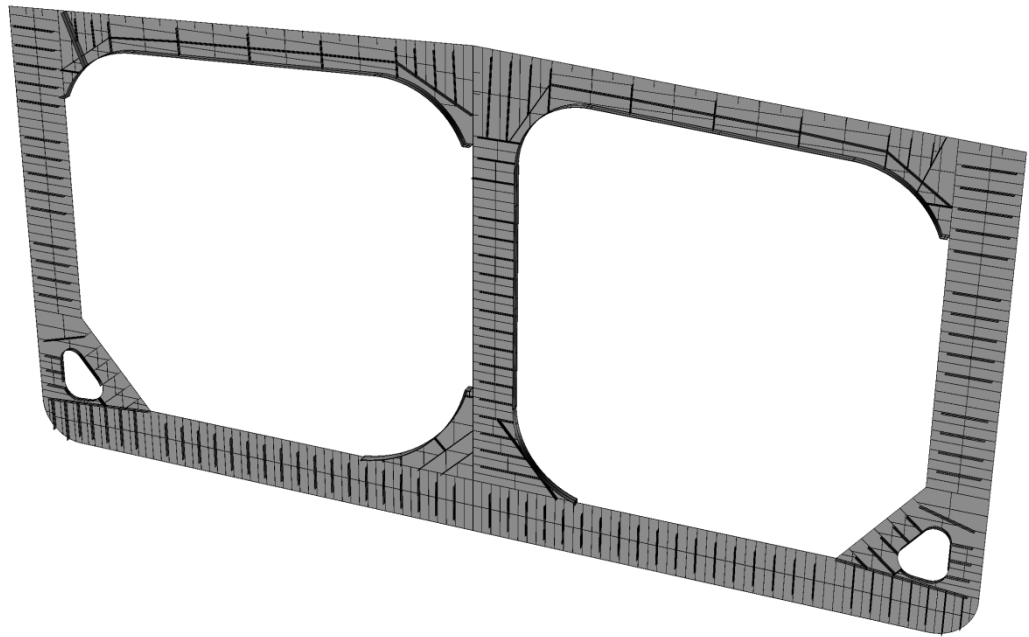
Όπως ήδη αναφέρθηκε, η ανάλυση αντοχής ενός πλοίου με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων απαιτεί την δημιουργία ενός μοντέλου πλοίου που να περιλαμβάνει τρία κύτη φορτίου (Three Compartments Model, TCM). Οι οριακές συνθήκες και τα φορτία που θα επιβληθούν στο μοντέλο περιγράφονται αναλυτικά από τους κανονισμούς CSR, όπως και γενικές οδηγίες σχεδίασης του μοντέλου. Το TCM δημιουργήθηκε [15] με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS 6.10.2. Όλα τα φορτία και οι οριακές συνθήκες που επιβλήθηκαν στο μοντέλο ακολουθούν πλήρως τους κανονισμούς CSR. Επιπλέον, μία υπορουτίνα γραμμένη σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN διευκόλυνε τον υπολογισμό και την σωστή εφαρμογή των φορτίων στο μοντέλο και η οποία καλούνταν αυτόματα από το ABAQUS. Ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή της γεωμετρίας του TCM, της δημιουργίας του πλέγματος των στοιχείων και πως εφαρμόστηκαν οι κανονισμοί φόρτωσης του CSR σε αυτό.

#### 3.3.1 Δημιουργία γεωμετρίας TCM

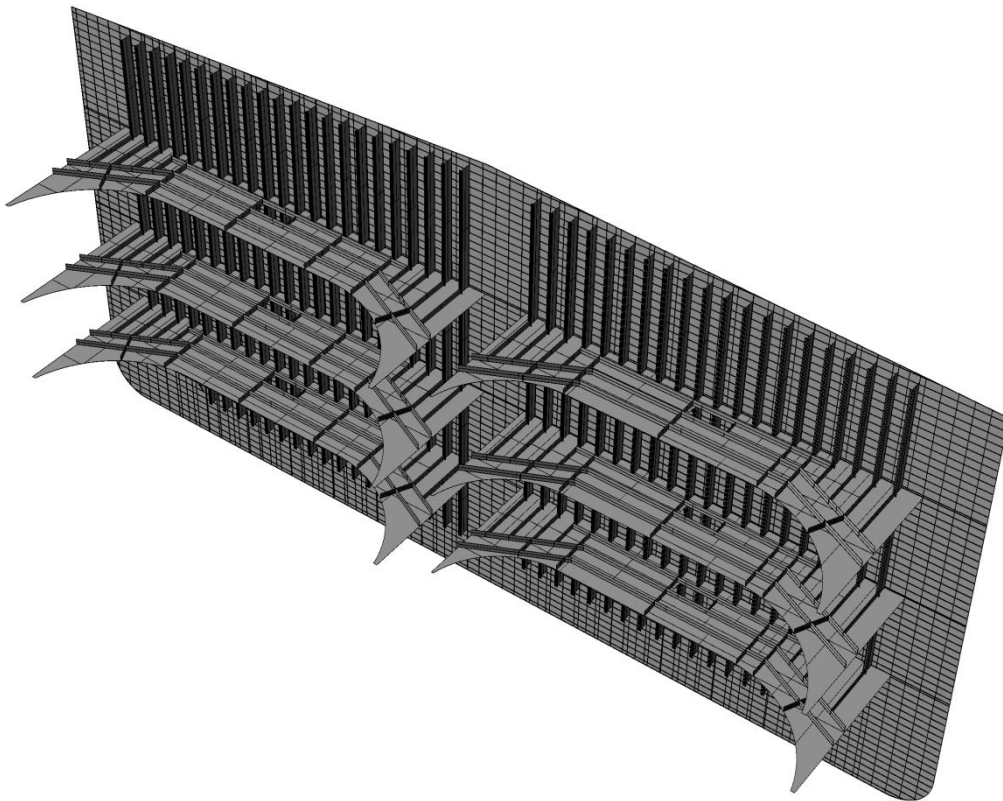
Όλα τα σχέδια έγιναν αρχικά σε δύο διαστάσεις με χρήση του σχεδιαστικού προγράμματος Rhinoceros και ακλουθώντας τα υπαρκτά σχέδια του πλοίου (σχήματα 2.15 έως 2.17). Στη συνέχεια εισήχθησαν στο ABAQUS σαν σκαριφήματα και έγινε με κατάλληλες διαδικασίες η προβολή τους στο χώρο. Ακολουθούν σχήματα της ενδιάμεσης κατασκευής του TCM στο ABAQUS (σχήματα 3.39 έως 3.41). Αφού κατασκευάστηκαν ξεχωριστά όλα τα παραπάνω τμήματα, στην ενότητα Assembly του ABAQUS ενώθηκαν και δημιουργήθηκε το TCM (σχήμα 3.42).



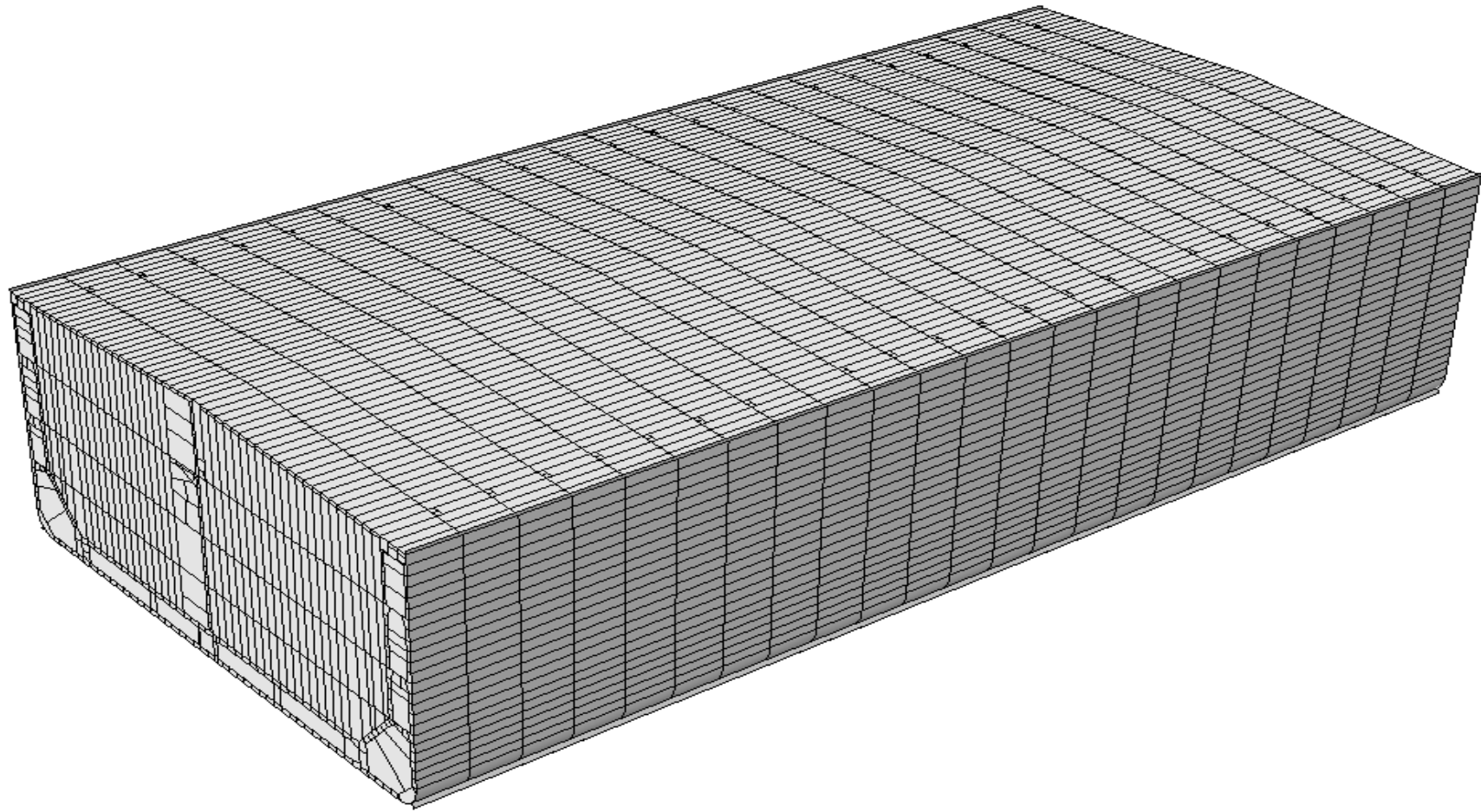
Σχήμα 3.39: Γεωμετρία εγκάρσιας τομής του TCM (Ordinary section) [15]



**Σχήμα 3.40:** Γεωμετρία εγκάρσιας τομής του TCM (Web Frame) [15]



**Σχήμα 3.41:** Γεωμετρία εγκάρσιας φρακτής του TCM (Bulkhead and stringers) [15]



**Σχήμα 3.42:** Γεωμετρία μοντέλου τριών κοτών πλοίου (Three Compartments Model, TCM) [15]



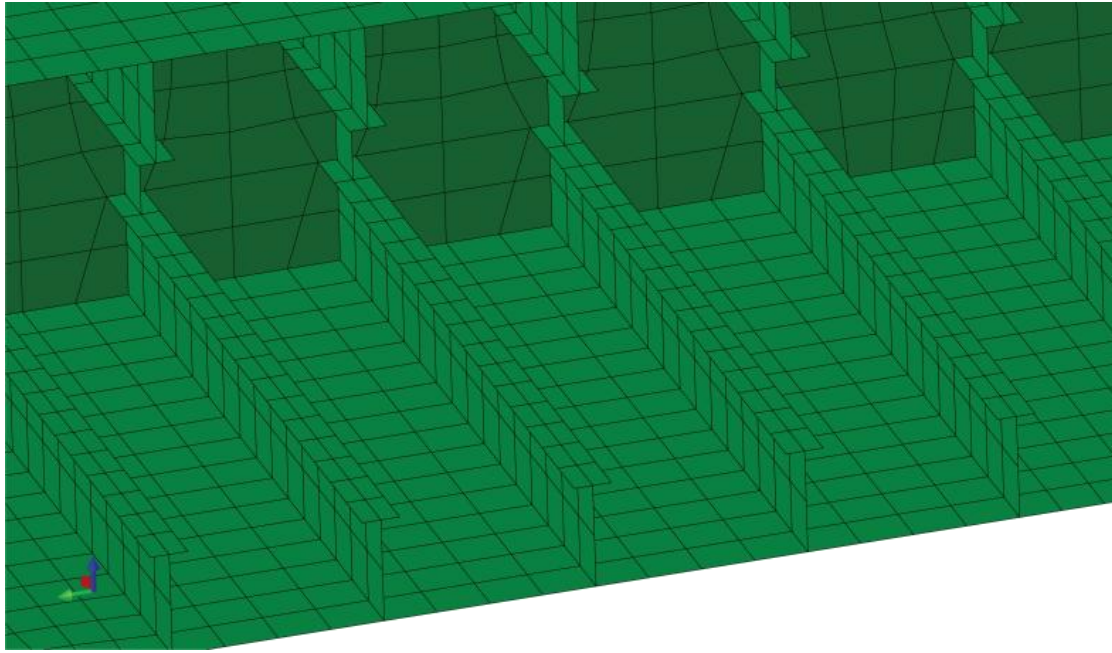
### **3.3.2 Δημιουργία πλέγματος στοιχείων**

Το πλέγμα στοιχείων που δημιουργείται σε ένα μοντέλο είναι πολύ σημαντικό καθώς επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την ποιότητα των αποτελεσμάτων, τον χρόνο επίλυσης, και την υπολογιστική ισχύ που απαιτείται. Τρεις παράμετροι πρέπει να λαμβάνονται υπόψη από το σχεδιαστή μηχανικό κατά την δημιουργία του πλέγματος των στοιχείων, οι οποίες είναι:

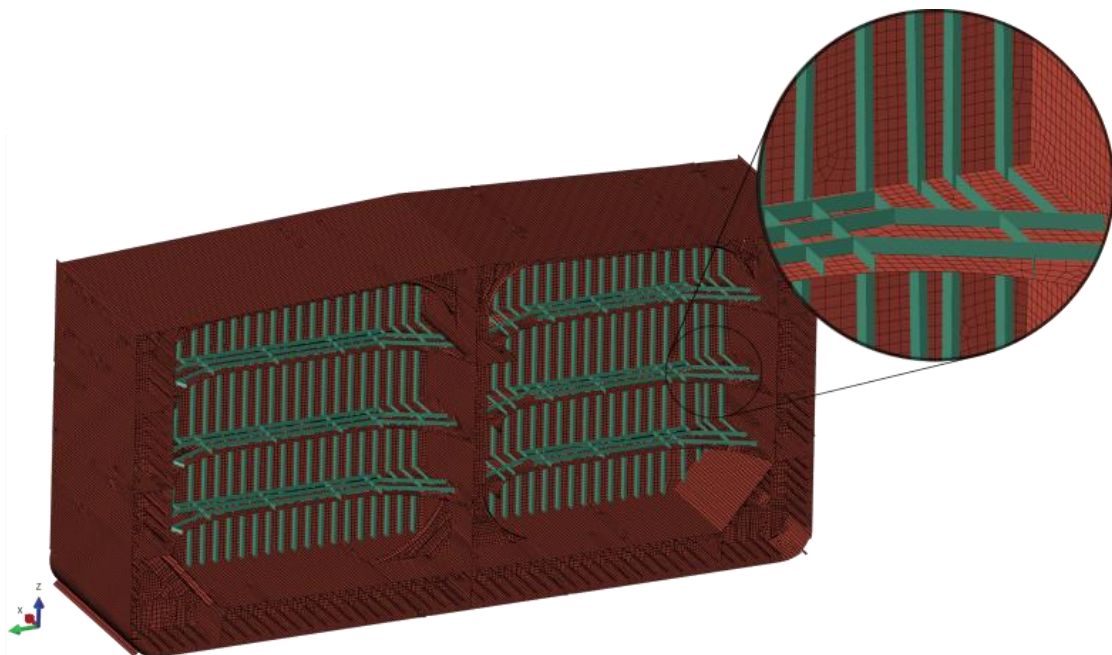
1. Ο αριθμός των στοιχείων και κατά συνέπεια το μέγεθός τους.
2. Είδος πλέγματος στοιχείων, όπως συγκροτημένο ή ελεύθερο (structure or free mesh)
3. Τύπος στοιχείων

Εφαρμόστηκε ένα γενικό μέγεθος στοιχείων περίπου 200mm (global mesh 200mm) έτσι ώστε να καλύπτονται οι απαιτήσεις των κανονισμών CSR ως προς το πλέγμα στοιχείων. Επιπλέον, στο στάδιο της σχεδίασης, η κατασκευή χωρίστηκε σε πολλά κομμάτια (partitions), είτε με αυτόματη εντολή, είτε σε δύσκολα σημεία γεωμετρίας με παρεμβολή του σχεδιαστή, για να είναι εφικτό να προσαρμοστεί όπου γίνεται συγκροτημένο πλέγμα στοιχείων (structure mesh). Στο σχήμα 3.43 βλέπουμε τα διαμήκη ενισχυτικά του μοντέλου μαζί με το πλέγμα στοιχείων που εφαρμόστηκε.

Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τα τετράκομβα (αναφερόμενα ως S4 στο ABAQUS) και τρίκομβα (αναφερόμενα ως S3 στο ABAQUS) στοιχεία κελύφους (shell elements). Για τα στοιχεία κελύφους, χρησιμοποιήθηκε η προεπιλογή του προγράμματος για 5 σημεία ολοκλήρωσης κατά το πάχος τους. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκαν δίκκομβα στοιχεία δοκού Timoshenko (beam elements, αναφερόμενα ως B33 στο ABAQUS) για τα εγκάρσια ενισχυτικά της φρακτής και για τα stringers (σχήμα 3.44).



**Σχήμα 3.43:** Διαμήκη ενισχυτικά του μοντέλου μαζί με το πλέγμα στοιχείων που εφαρμόστηκε [15].



**Σχήμα 3.44:** Στοιχεία κελύφους (shells) με κόκκινο χρώμα και στοιχεία δοκών (Timoshenko beam elements) με κυανό χρώμα [15].

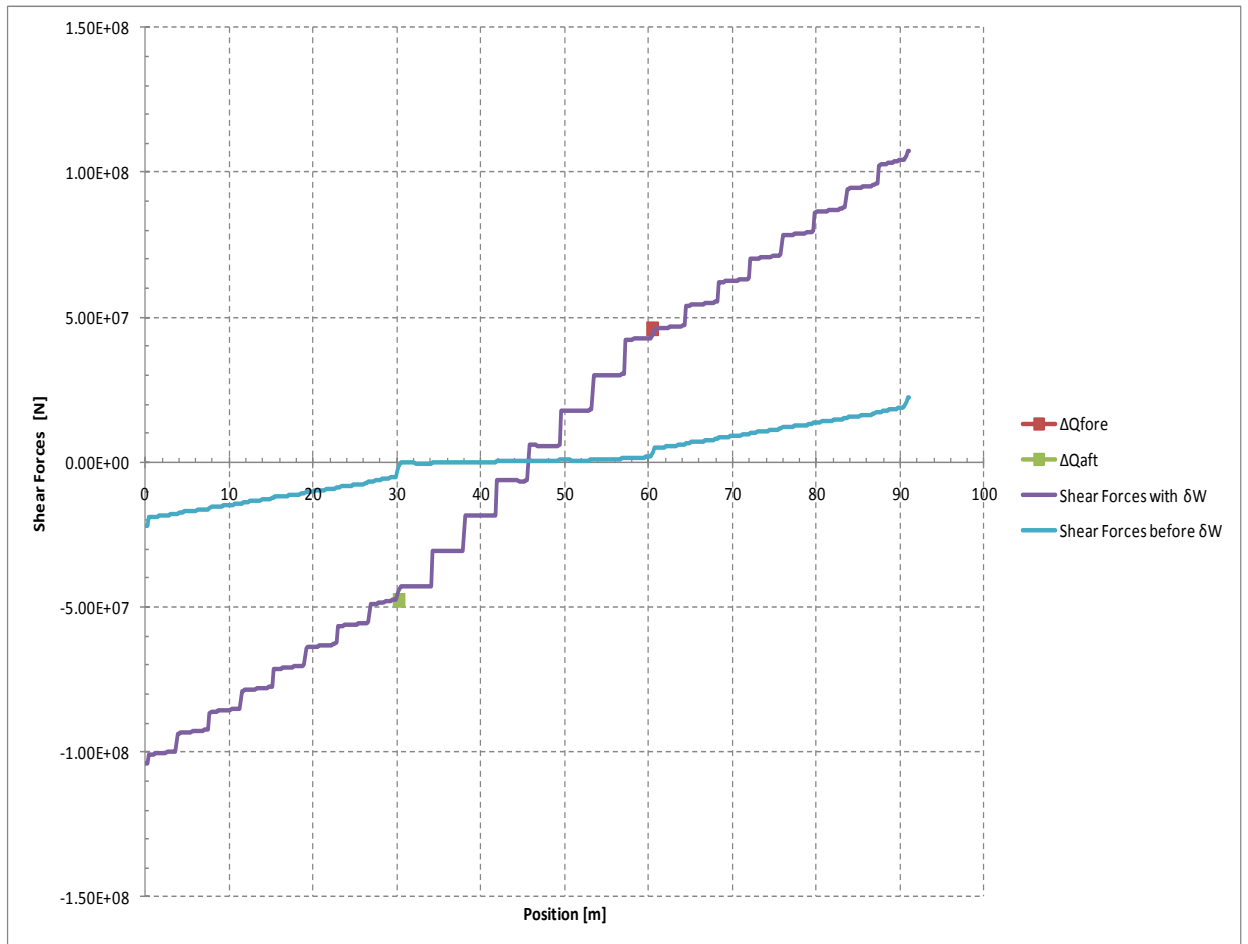
### **3.3.3 Εφαρμογή των φορτίων που προβλέπουν οι κανονισμοί CSR**

Τα φορτία που προβλέπουν οι κανονισμοί για το TCM έχουν αναφερθεί στην παράγραφο 2.3, καθώς και η κατάσταση φόρτωσης που θα επιλεγεί σύμφωνα με τους κανονισμούς CSR. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, μία υπορουτίνα χρησιμοποιήθηκε για να επιβάλει τα φορτία στις επιφάνειες του TCM όπως ακριβώς ορίζουν οι κανονισμοί. Επιπλέον, σύμφωνα με τους κανονισμούς, οι διατμητικές δυνάμεις και οι καμπτικές ροπές στο TCM πρέπει να επιτύχουν μία συγκεκριμένη τιμή ( $Q_{target}$ ,  $M_{target}$ ). Η διαδικασία για να βρεθούν τα φορτία που πρέπει να ασκηθούν στο TCM για να πετύχουμε τις απαιτούμενες τιμές, απαιτεί τη δημιουργία ενός μοντέλου δοκού (beam model) [16] το οποίο αναπαριστά το TCM.

Για την δημιουργία του μοντέλου δοκού χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα ANSYS χρησιμοποιώντας στοιχεία BEAM3, καθώς φημίζεται για την ευκολία του στο να παρέχει διαγράμματα ελευθέρου σώματος δοκών. Και το μοντέλου δοκού είχε περίπου μέγεθος στοιχείων 200mm (global mesh 200mm) όπως και το TCM και έτσι η διαμήκης διαμέριση στα δύο μοντέλα ήταν ίδια. Οι οριακές συνθήκες της δοκού ήταν απλές αρθρώσεις. Για τον υπολογισμό των διατμητικών δυνάμεων και των καμπτικών ροπών της δοκού χρειαζόταν η επιβολή των εξής φορτίων:

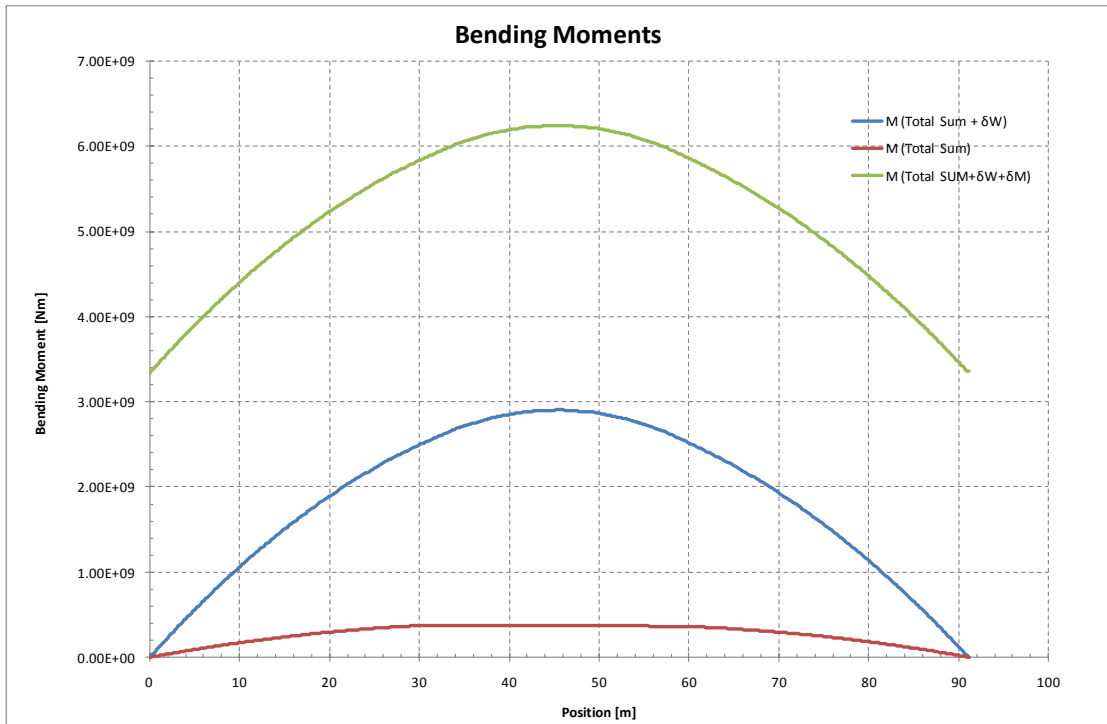
1. Το βάρος της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου στα τρία κύτη του.
2. Το βάρος του μεταφερόμενου φορτίου και του έρματος.
3. Η υδροστατική πίεση, η δυναμική πίεση λόγω κυματισμών καθώς και του νερού που προσπίπτει στο κατάστρωμα λόγω δυσμενών κυματισμών.
4. Οι αδρανειακές δυνάμεις λόγω της κίνησης του ρευστού και της επιτάχυνσής του.

Μετά την επιβολή των παραπάνω φορτίων στο μοντέλο δοκού με χρήση πάλι της υπορουτίνας, προέκυψαν τα διαγράμματα των διατμητικών δυνάμεων ( $Q$ ) και των καμπτικών ροπών ( $M$ ). Αρχικά έγινε έλεγχος αν η διατμητική δύναμη προσέγγιζε την τιμή που απαιτούσαν οι κανονισμοί. Καθώς υπήρχε απόκλιση έγιναν διορθώσεις των φορτίων επιβάλλοντας κατανεμημένη φόρτιση ( $\delta W$ ) σε κάθε στοιχείο της δοκού όπως ορίζουν οι κανονισμοί [16, Appendix B]. Μετά τις διορθώσεις προέκυψαν νέα διαγράμματα διατμητικών δυνάμεων και καμπτικών ροπών. Η διατμητική δύναμη είχε πλέον προσεγγίσει την απαίτηση των κανονισμών (σχήμα 3.45). Η κυανή καμπύλη περιγράφει τη κατανομή των διατμητικών δυνάμεων της δοκού πριν την διόρθωση των κανονισμών, ενώ η μοβ καμπύλη μετά την εφαρμογή των διορθώσεων. Το πράσινο και κόκκινο σημείο είναι η  $Q_{target}$  και η  $M_{target}$  που πρέπει να επιτευχθούν σύμφωνα με τους κανονισμούς.



**Σχήμα 3.45:** Καμπύλες διατμητικών δυνάμεων πριν και μετά την εφαρμογή των διορθώσεων στο μοντέλο δοκού.

Ο επόμενος στόχος ήταν ταυτόχρονα και η κατανομή της καμπτικής ροπής να διέρχεται από τα σημεία που ορίζουν οι κανονισμοί. Η κατανομή της καμπτικής ροπής δεν διερχόταν από τα σημεία  $M_{target}$  ούτε μετά τη διόρθωση των διατμητικών δυνάμεων και έτσι έπρεπε να γίνει εκ νέου διόρθωση. Έτσι, προστέθηκε μία επιπλέον καμπτική ροπή στα άκρα της δοκού, έτσι ώστε να έχουμε προσέγγιση της  $M_{target}$  (σχήμα 3.46). Η κόκκινη καμπύλη είναι η αρχική κατανομή της καμπτικής ροπής πριν την εφαρμογή οποιασδήποτε διόρθωσης. Η μπλε καμπύλη αφορά την κατανομή της καμπτικής ροπής μετά την εφαρμογή των διορθώσεων των διατμητικών δυνάμεων, ενώ η πράσινη καμπύλη προκύπτει μετά την διόρθωση και των καμπτικών ροπών. Προφανώς, η τελική επιπρόσθετη καμπτική ροπή δεν επηρέασε την κατανομή των διατμητικών δυνάμεων, ενώ το αντίθετο δεν ισχύει. Αυτό συμβαίνει γιατί, η διατμητική δύναμη είναι η πρώτη παράγωγος της καμπτικής ροπής και έτσι αν προσθέσουμε μια σταθερή ποσότητα στην καμπτική ροπή, το αποτέλεσμα που θα επιφέρει στην διατμητική δύναμη θα είναι μηδενικό.



**Σχήμα 3.46:** Καμπύλες καμπτικών ρομών πριν και μετά την εφαρμογή των διορθώσεων στο μοντέλο δοκού.

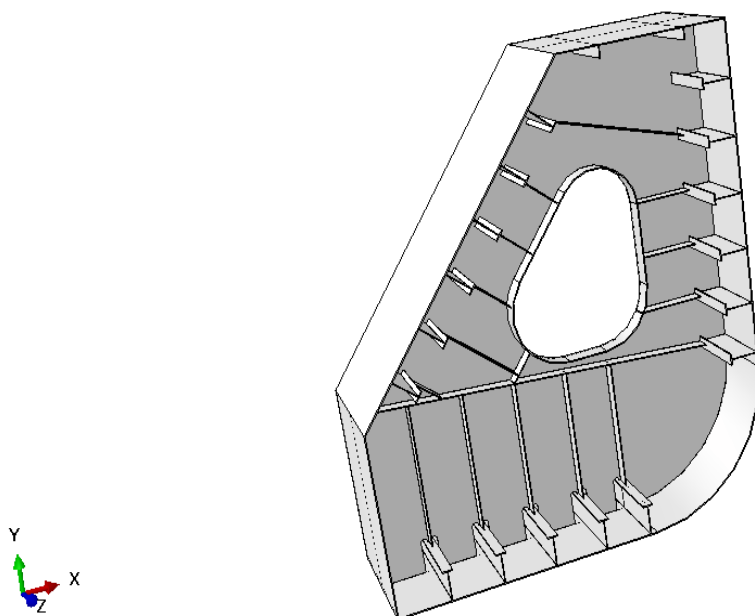
Οι διορθώσεις που προέκυψαν από το μοντέλο δοκού που όριζαν οι κανονισμοί εφαρμόστηκαν στο TCM με μία ροπή η οποία ορίζεται ως η επιπρόσθετη ροπή που χρειάστηκε για να φτάσουμε από την αρχική σε αυτή της  $M_{\text{target}}$  (διαφορά πράσινης από κόκκινη καμπύλη, σχήμα 3.46).

Τέλος, οι οριακές συνθήκες στο TCM εφαρμόστηκαν όπως ακριβώς ορίζουν οι κανονισμοί του CSR ([16], Πίνακας B.2.9, Appendix B).

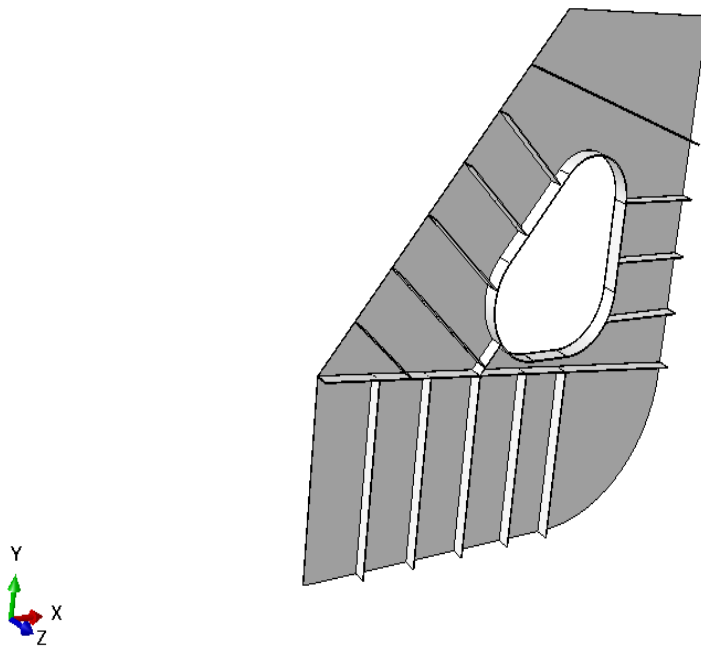
### 3.4 Μοντέλο έδρας πλευρικής δεξαμενής διπύθμενου (Hopper Tank Floor, HTF)

#### 3.4.1 Γεωμετρία

Μετά την επιβολή των φορτίων στο TCM όπως ακριβώς ορίζουν οι κανονισμοί CSR και μετά την διαδικασία της επίλυσης μπορούσαμε πλέον να επικεντρωθούμε στην περιοχή που μας ενδιέφερε (σχήμα 2.18). Αρχικά έγινε μία απόπειρα να σχεδιαστεί το τμήμα της χαλύβδινης πλάκας μαζί με την ανθρωποθυρίδα, τα εγκάρσια ενισχυτικά, και επιπλέον τα διαμήκη ενισχυτικά, το πλευρικό έλασμα, το κεκλιμένο πλευρικό έλασμα εσωτερικού πυθμένα και οι διαμήκες πλευρικές σταθμίδες να αναπτύσσονται 1m εκατέρωθεν της πλάκας. Η μοντελοποίηση έγινε αλλά το πλήθος των στοιχείων του πλέγματος που προέκυψαν και η υπολογιστική ισχύς που θα απαιτούνταν για την επίλυση ήταν μεγέθη απαγορευτικά για τη συνέχεια. Στο σχήμα 3.47 φαίνεται η γεωμετρία του μοντέλου που κατασκευάστηκε αρχικά. Για τους λόγους που προαναφέρθηκαν, έγιναν απλοποιήσεις και αποφασίστηκε να εξεταστεί η πλάκα μαζί με την ανθρωποθυρίδα και τα εγκάρσια ενισχυτικά της, χωρίς τη διαμήκη επέκταση των διαμήκων ενισχυτικών και όλων των ειδών των πλευρικών ελασμάτων εκατέρωθεν της πλάκας. Η γεωμετρία που προέκυψε τελικά φαίνεται στο σχήμα 3.48. Επίσης, στη θέση των διαμήκων ενισχυτικών που απλοποιήθηκαν, έγινε προέκταση των εγκαρσίων ενισχυτικών μέχρι τα άκρα της πλάκας.



Σχήμα 3.47: Αρχική γεωμετρία πριν τις απλοποιήσεις.

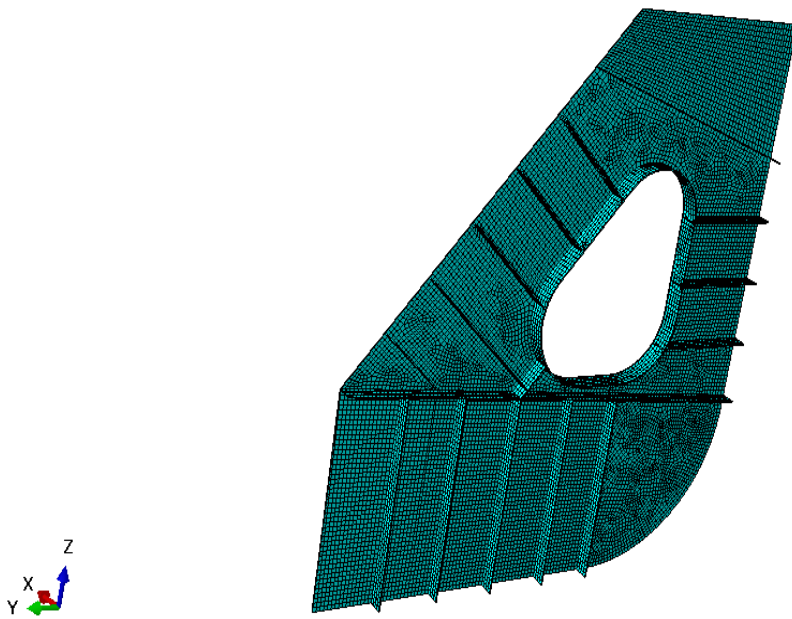


**Σχήμα 3.48:** Τελική γεωμετρία μετά τις απλοποιήσεις.

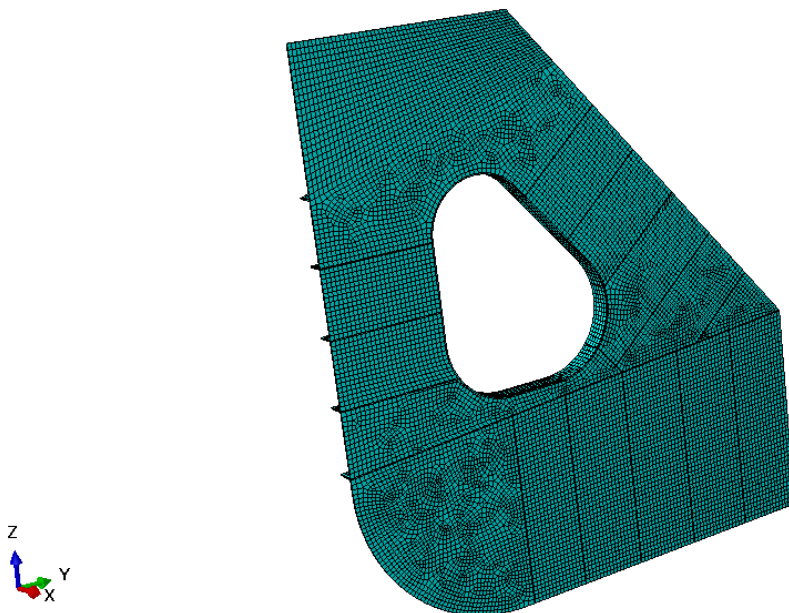
Το μοντέλο που προέκυψε μετά τις απλοποιήσεις είχε ένα πολύ λογικό αριθμό στοιχείων πλέγματος και δεν θα παρουσιαζόταν ανάγκη για πολύ μεγάλη υπολογιστική ισχύ και για πολύ χρονοβόρα διαδικασία επίλυσης.

### **3.4.2 Επιλογή στοιχείων – Δημιουργία πλέγματος**

Τα στοιχεία που επιλέχθηκαν για τη δημιουργία του πλέγματος ήταν τα ίδια με εκείνα της πλάκας που έγινε το πείραμα σύγκρισης με τη βιβλιογραφία (παράγραφος 3.1.3.1). Άρα επιλέχθηκε το εικοσάκομβο εξαεδρικό στοιχείο (20-node) αναφερόμενο ως C3D20R στο ABAQUS (σχήμα 3.2). Στα σχήματα 3.49 και 3.50 φαίνεται το πλέγμα στοιχείων που δημιουργήθηκε στο μοντέλο HTF. Όπου ήταν εφικτό χρησιμοποιήθηκε συγκροτημένο πλέγμα στοιχείων (structure mesh), ενώ στο υπόλοιπο μοντέλο εφαρμόστηκε ελεύθερο πλέγμα στοιχείων (free mesh). Τέλος, επιλέχθηκε ένα γενικό πλέγμα στοιχείων (global mesh) μεγέθους 50mm και 8 στοιχεία χρησιμοποιήθηκαν κατά το πάχος της πλάκας.



**Σχήμα 3.49:** Πλέγμα στοιχείων από τη πλευρά των εγκάρσιων ενισχυτικών

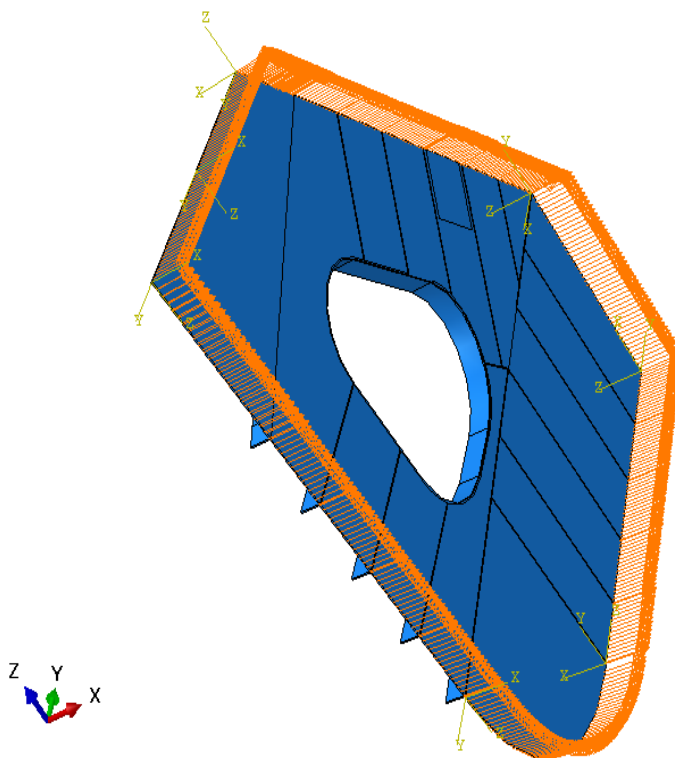


**Σχήμα 3.50:** Πλέγμα στοιχείων από τη πίσω πλευρά των εγκάρσιων ενισχυτικών.

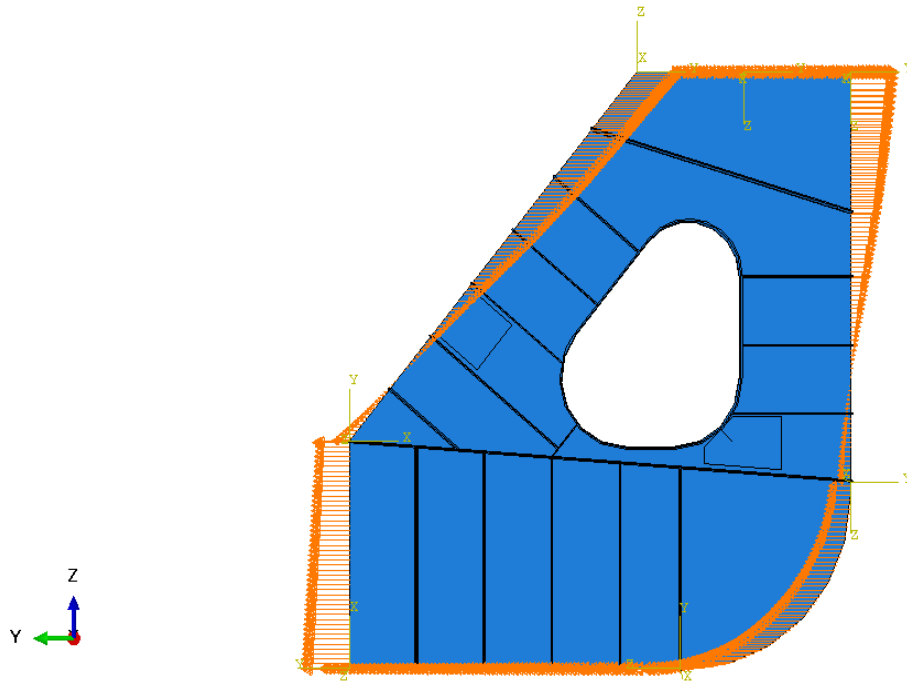


### 3.4.3 Επιβολή φορτίσεων

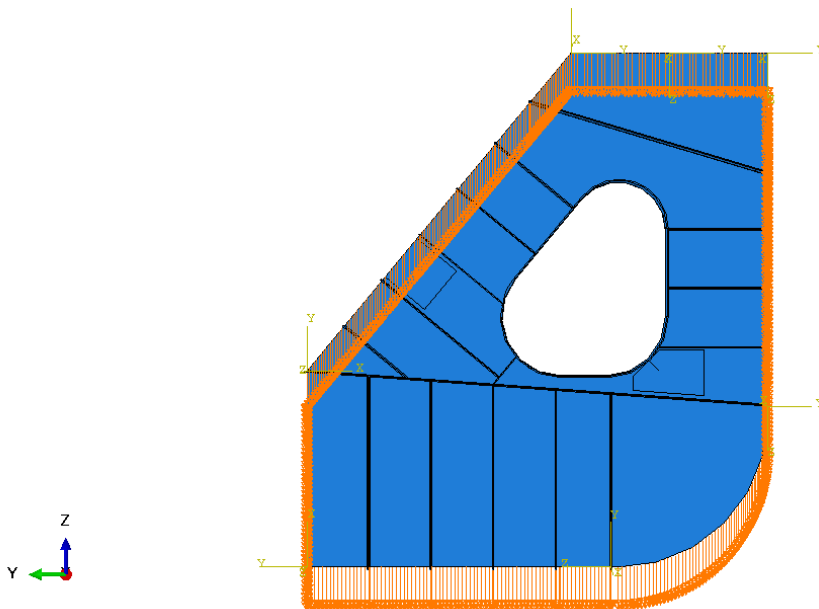
Οι φορτίσεις που επιβλήθηκαν στο μοντέλο HTF προέκυψαν από τη μετεπεξεργασία (postprocessing) του TCM και εισήχθησαν με τη μορφή μετατοπίσεων περιμετρικά του μοντέλου HTF. Αρχικά, από το TCM απομονώθηκε η περιοχή του HTF μοντέλου. Περιμετρικά σε αυτή τη περιοχή πάρθηκαν οι μετατοπίσεις σε κάθε κόμβο της κάθε πλευράς (Bottom, Inner, Tilted, Upper, Side, Bilge, παράγραφος 2.2) και στις τρεις διευθύνσεις (x, y, z). Με χρήση κατάλληλου βαθμού πολυωνυμικής συνάρτησης δημιουργήθηκαν οι κατανομές των μετατοπίσεων στις πλευρές και στις τρεις διευθύνσεις (x, y, z). Η εξίσωση των συγκεκριμένων συναρτήσεων εισήχθη σε κάθε πλευρά του μοντέλου HTF σαν ταυτόχρονη φόρτιση και οριακή συνθήκη. Οι παραπάνω συναρτήσεις εφαρμόστηκαν μόνο στους κόμβους των στοιχείων που βρίσκονταν στην πλάκα και όχι στους κόμβους των στοιχείων των εγκαρσίων ενισχυτικών. Για να εισαχθούν οι κατανομές των μετατοπίσεων στις πλευρές έπρεπε να δημιουργηθεί τοπικό σύστημα συντεταγμένων σε κάθε πλευρά. Στα σχήματα 3.51 έως 3.53 φαίνονται οι κατανομές των μετατοπίσεων όπως αυτές εφαρμόστηκαν στο HTF μοντέλο και στις τρεις διευθύνσεις (x, y, z). Τέλος, όπως ήδη αναφέρθηκε (παράγραφος 3.2), οι στροφές ως προς τις τρεις διευθύνσεις ( $R_x$ ,  $R_y$ ,  $R_z$ ) θεωρήθηκαν αμελητέες και δεν επιβλήθηκαν στο HTF μοντέλο.



**Σχήμα 3.51:** Κατανομή μετατοπίσεων στη διεύθυνση x.



**Σχήμα 3.52:** Κατανομή μετατοπίσεων στη διεύθυνση  $y$ .



**Σχήμα 3.53:** Κατανομή μετατοπίσεων στη διεύθυνση  $z$ .

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

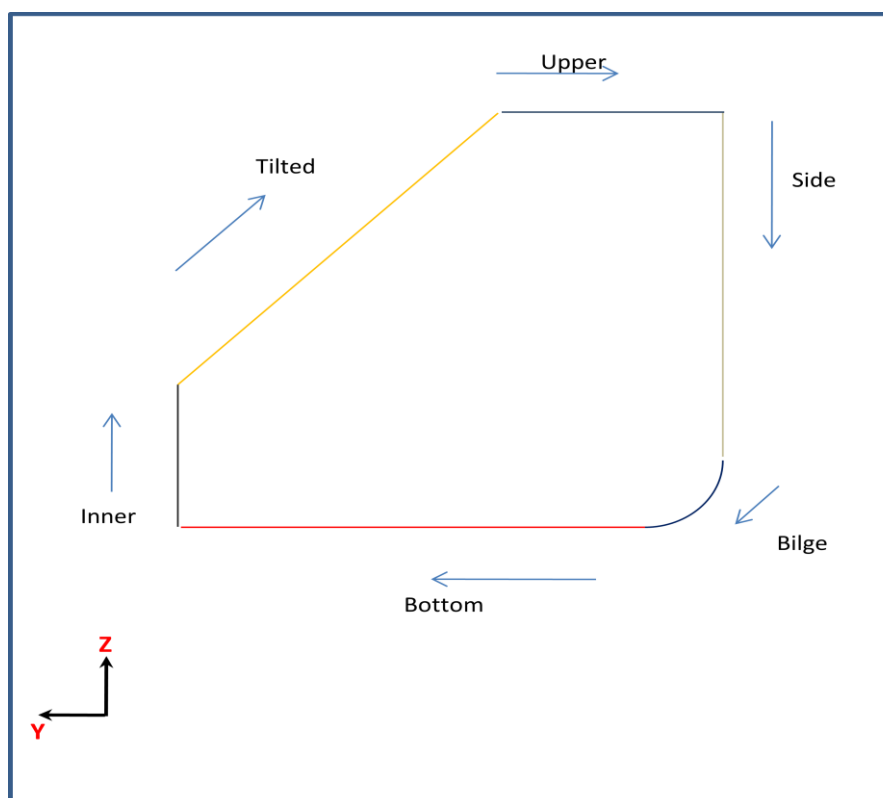
### ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστούν όλα τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα διάφορα «τρεξίματα» του HTF μοντέλου. Αρχικά θα παρουσιαστούν τα πεδία των κατανομών των μετατοπίσεων σε ολόκληρο το μοντέλο και θα συγκριθούν με τα αντίστοιχα από το TCM. Επίσης θα παρατεθούν διαγράμματα που θα συγκρίνουν τις μετατοπίσεις που προέκυψαν περιμετρικά του HTF μοντέλου με αυτές που υπήρχαν στο αντίστοιχο τμήμα του TCM. Στη συνέχεια θα γίνει επιλογή των περιοχών που θα αναπτυχθεί ρωγμή στο HTF μοντέλο. Αφού μοντελοποιηθεί η κάθε ρωγμή ξεχωριστά θα τοποθετηθούν στις αντίστοιχες περιοχές επιθέματα από σύνθετα υλικά και θα γίνει παραμετρική μελέτη ανάλογα με τη ρωγμή και το μήκος της, το συντελεστή ακαμψίας του επιθέματος προς τη πλάκα (SR), το μέγεθός του επιθέματος, τις ιδιότητές του σύνθετου υλικού που χρησιμοποιήθηκε καθώς και αν θα τοποθετηθεί επίθεμα από την μία ή και από τις δύο πλευρές της αστοχίας. Όλες οι περιπτώσεις θα συνοδεύονται από τα εκάστοτε σχήματα του μοντέλου, καθώς και διαγράμματα συγκρίσεων ΣΕΤ πριν και μετά την εφαρμογή του επιθέματος.

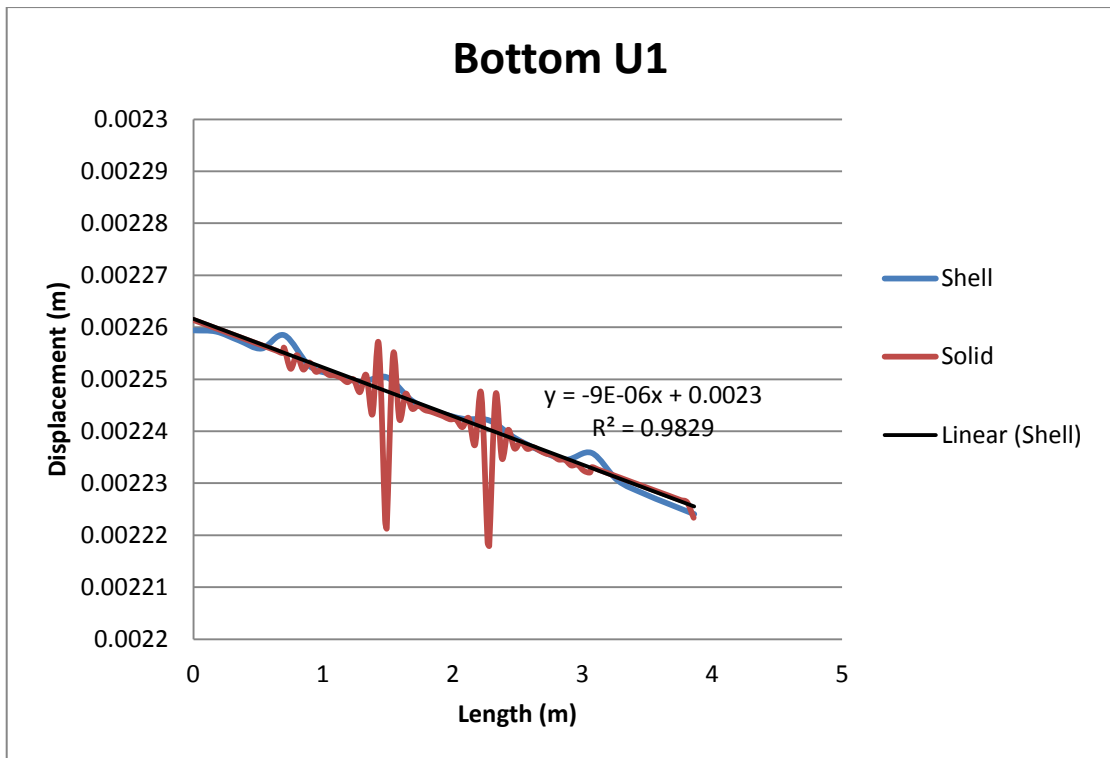
#### 4.1 Σύγκριση Μοντέλων (Shell – Solid)

Στην παρούσα παράγραφο θα συγκριθούν το μοντέλο HTF με το αντίστοιχο τμήμα του TCM, όσον αφορά στην επιβολή των φορτίσεων που έγινε στο HTF και αν αυτή ανταποκρίνεται στην πραγματική φόρτιση που πάθηκε από το TCM. Η σύγκριση θα γίνει με δύο τρόπους. Αρχικά θα παρατεθούν τα διαγράμματα της κατανομής των μετατοπίσεων και στις τρεις διευθύνσεις (x, y, z) περιμετρικά του HTF μοντέλου (6 πλευρές όπως έχει ήδη αναφερθεί, παράγραφος 2.2) και θα συγκριθούν με τα αντίστοιχα του TCM (σχήματα 4.2 έως 4.19). Η μαύρη καμπύλη στα σχήματα 4.2 έως 4.19 είναι η γραμμή τάσης που εισήχθη (γραμμική ή πολυωνυμική) έτσι ώστε να εκφρασθεί με τον καλύτερο τρόπο η κατανομή των μετατοπίσεων με μία συνάρτηση, για να μπορεί στη συνέχεια να εφαρμοσθεί αυτή η κατανομή στο HTF μοντέλο. Η κόκκινη καμπύλη στα διαγράμματα 4.2 έως 4.19 είναι οι μετατοπίσεις που πάθησαν περιμετρικά από το HTF μοντέλο. Οι διαφορές με τη μπλε καμπύλη (μετατοπίσεις στο TCM μοντέλο) διαπιστώνονται στα σημεία που βρίσκονται τα εγκάρσια ενισχυτικά. Αυτό οφείλεται στις διαφορές που έχουν τα δύο μοντέλα λόγω των απλοποιήσεων που έγιναν στο HTF. Κύρια αιτία είναι ότι τα εγκάρσια ενισχυτικά στο HTF προεκτείνονται μέχρι τις ακμές περιμετρικά του μοντέλου, σε αντίθεση με το TCM που βρίσκονται στις κανονικές τους θέσεις σύμφωνα με τα σχέδια του πλοίου (σχήματα 2.16 - 2.17). Ο άξονας x των διαγραμμάτων 4.2 έως 4.19 είναι η απόσταση από την αρχή της κάθε πλευράς μέχρι το τέλος της και η φορά του προκύπτει από το σχήμα 4.1.

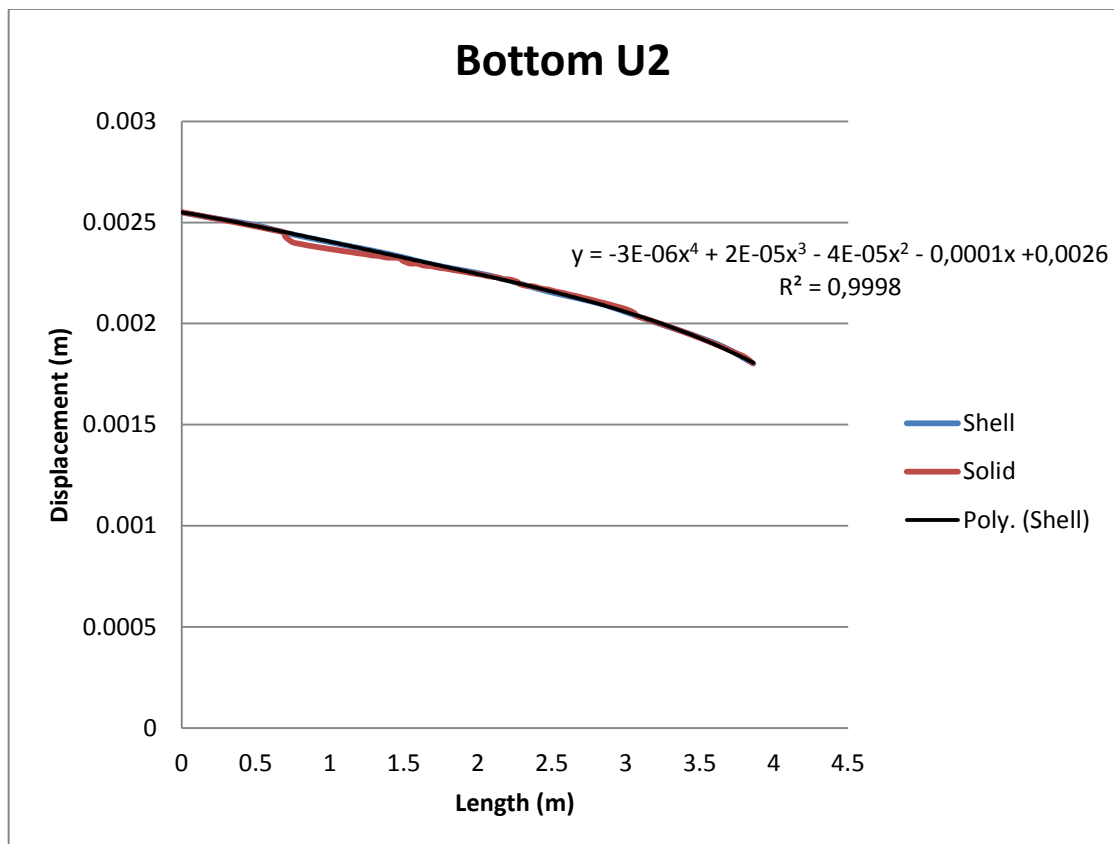
Τα U1, U2, U3 αναφέρονται στις μετατοπίσεις κατά τους άξονες x, y, z αντίστοιχα. Επιπλέον, θα παρατεθούν και τα διαγράμματα της κατανομής των μετατοπίσεων και στις τρεις διευθύνσεις (x, y, z) σε όλο το μοντέλο HTF (πεδίο μετατοπίσεων) και θα συγκριθούν με τα αντίστοιχα του TCM (σχήματα 4.20 έως 4.25). Οι έντονες διαφορές που παρουσιάζουν τα διαγράμματα 4.20 και 4.21 (πεδίο μετατοπίσεων κατά τον άξονα x) οφείλονται στην θεώρηση των στροφών ως αμελητέες ως προς τις τρεις διευθύνσεις ( $R_x$ ,  $R_y$ ,  $R_z$ ). Παρόλα αυτά, αν παρατηρήσουμε καλύτερα τα νούμερα στη κλίμακα των μετατοπίσεων στα σχήματα 4.20 και 4.21 οι διαφορές θεωρούνται πράγματι αμελητέες. Τα ζεύγη των σχημάτων 4.22 – 4.23 και 4.24 – 4.25 μας επιβεβαιώνουν ότι οι μετατοπίσεις που θέσαμε σαν οριακές συνθήκες στο HTF μοντέλο ήταν πολύ ακριβής και η μεταβίβαση τους από το TCM στο HTF μοντέλο ήταν επιτυχής.



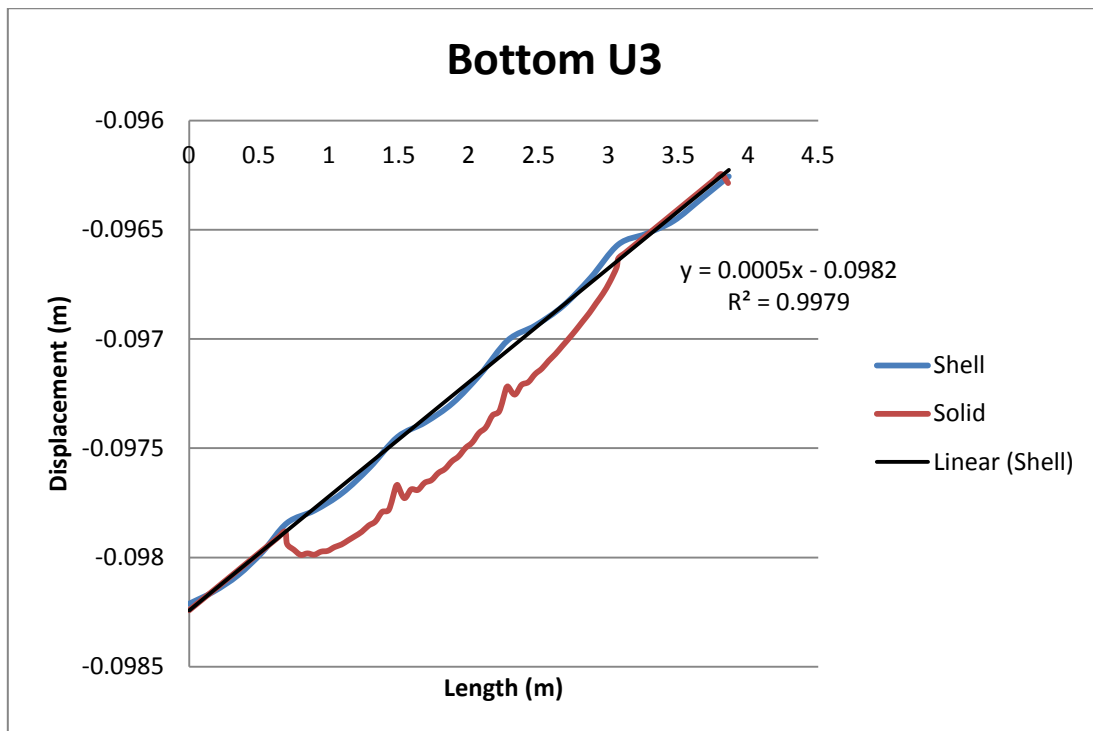
**Σχήμα 4.1:** Φορά μέτρησης απόστασης σε κάθε πλευρά



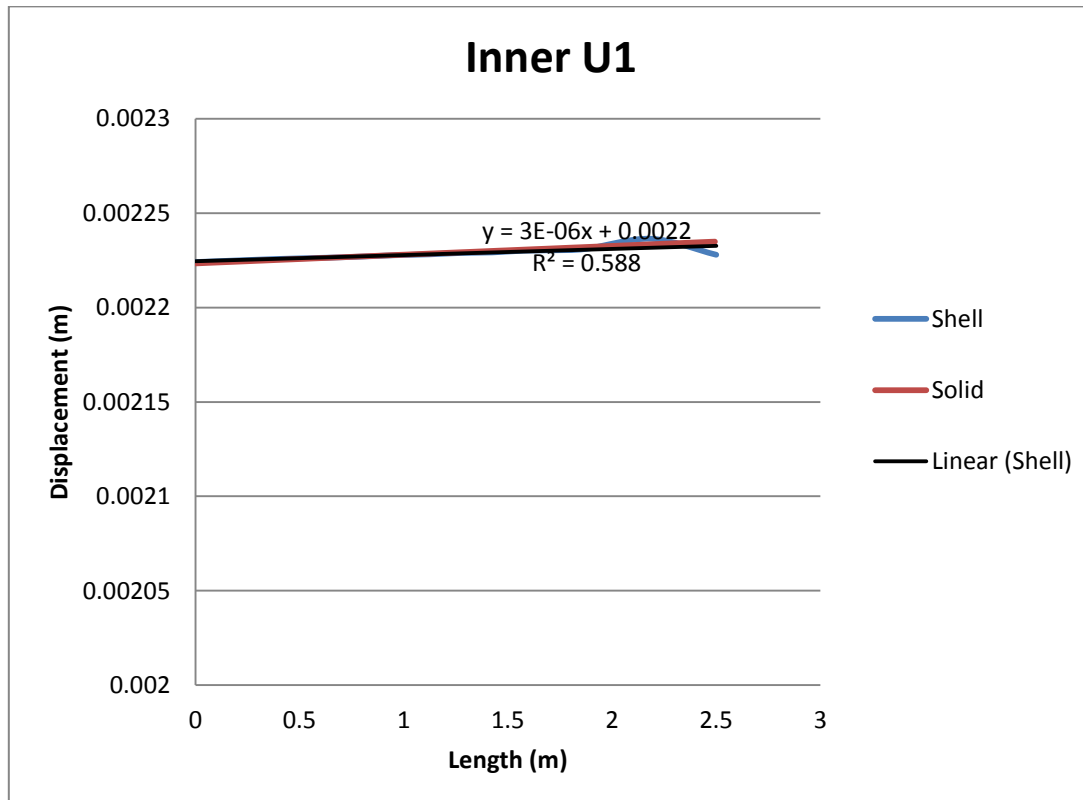
Σχήμα 4.2: Κατανομή μετατοπίσεων κατά τον άξονα x στη πλευρά Bottom.



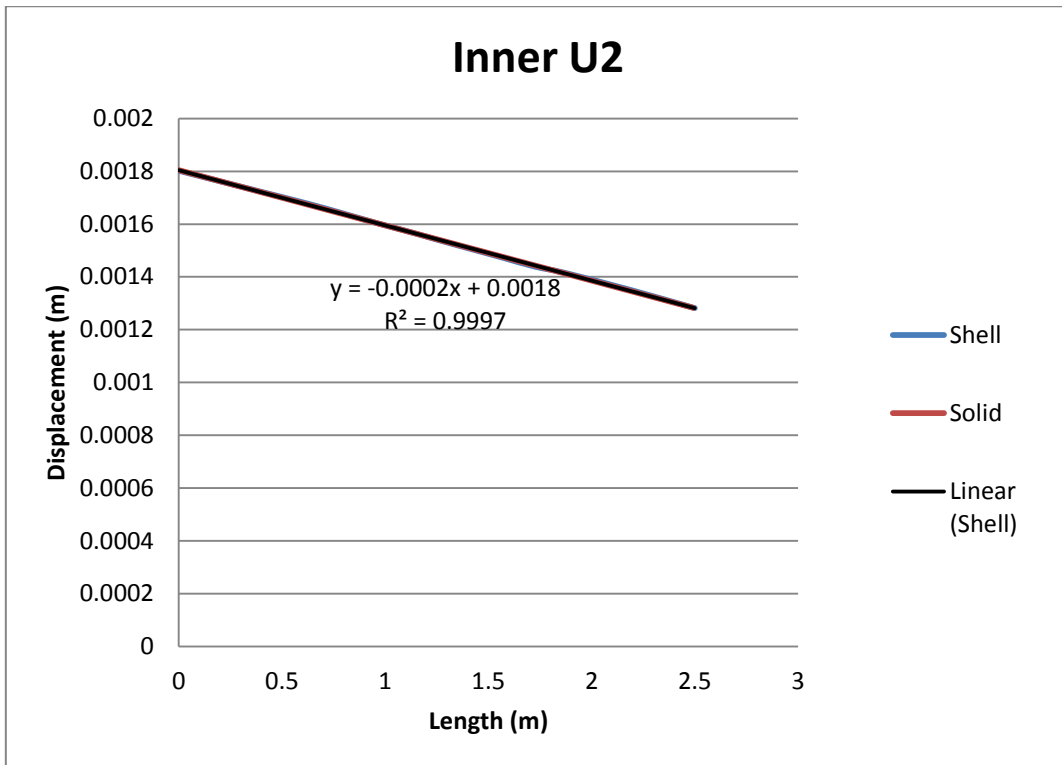
Σχήμα 4.3: Κατανομή μετατοπίσεων κατά τον άξονα y στη πλευρά Bottom



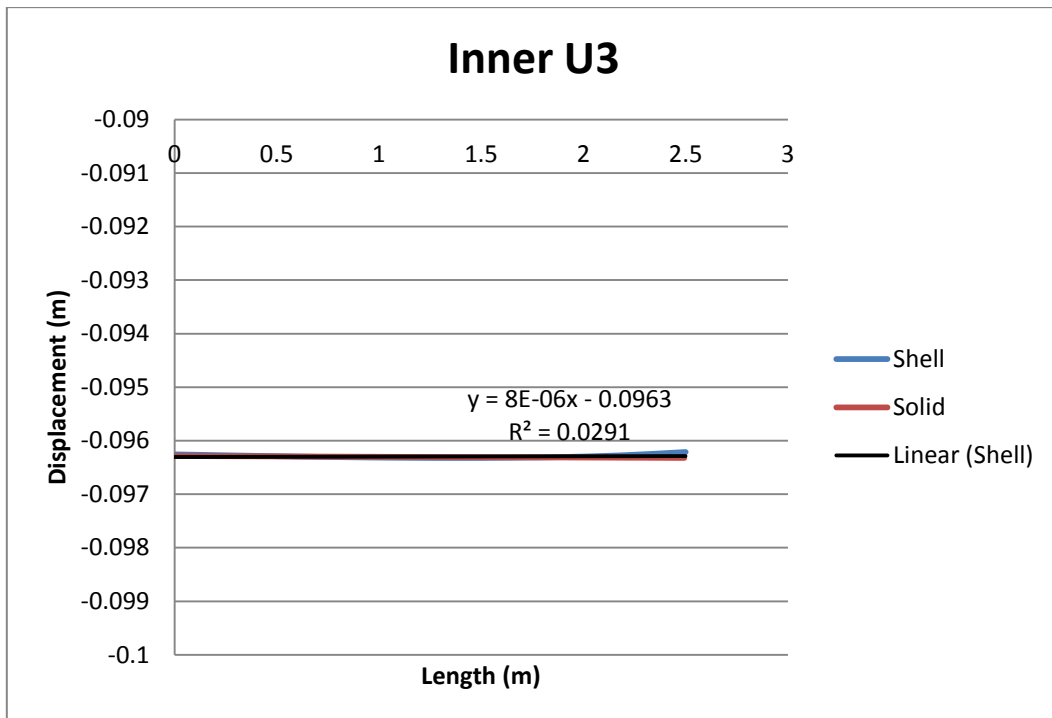
**Σχήμα 4.4:** Κατανομή μετατοπίσεων κατά τον άξονα z στη πλευρά Bottom



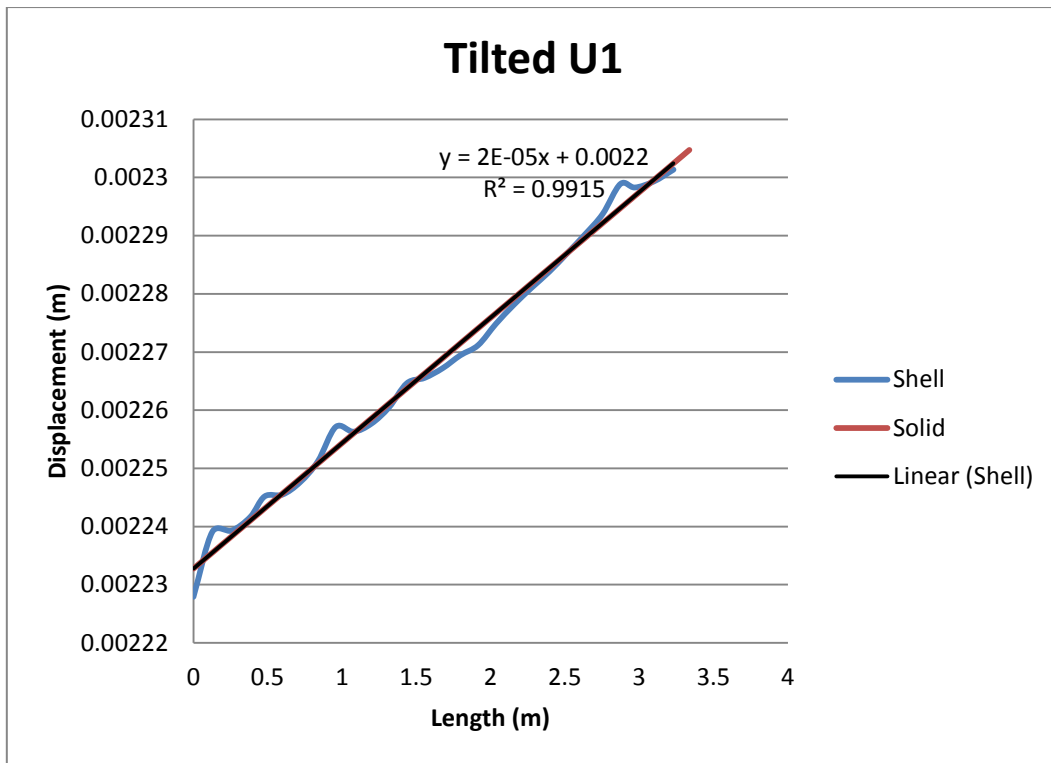
**Σχήμα 4.5:** Κατανομή μετατοπίσεων κατά τον άξονα x στη πλευρά Inner



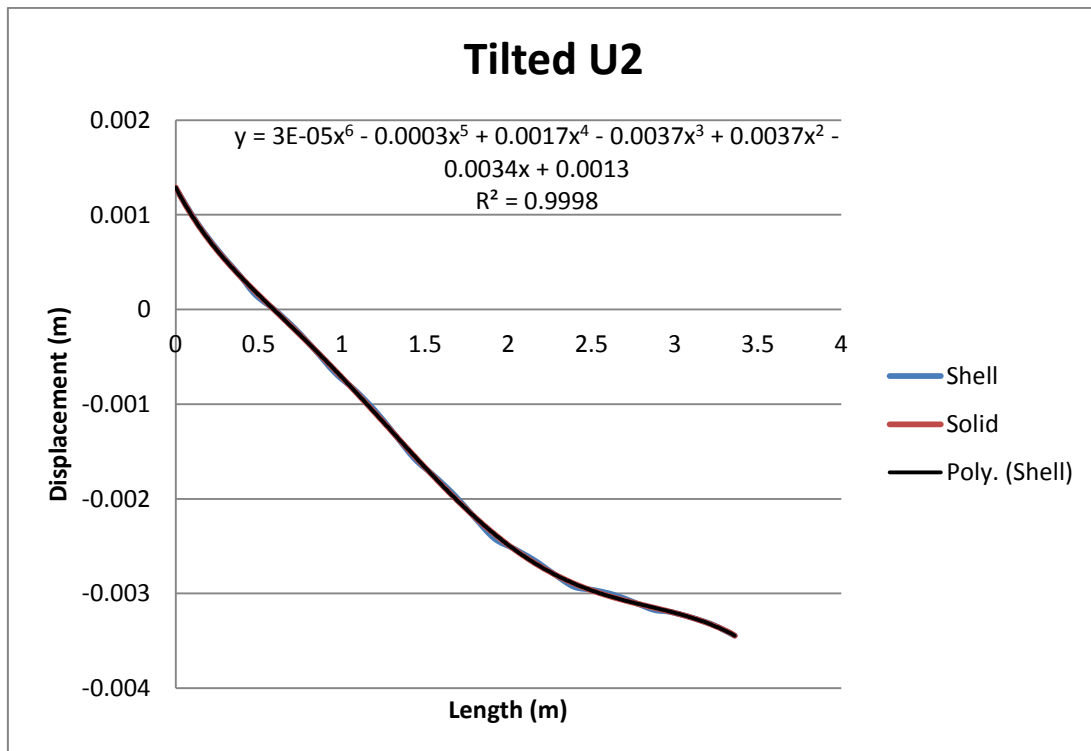
**Σχήμα 4.6:** Κατανομή μετατοπίσεων κατά τον άξονα y στη πλευρά Inner



**Σχήμα 4.7:** Κατανομή μετατοπίσεων κατά τον άξονα z στη πλευρά Inner

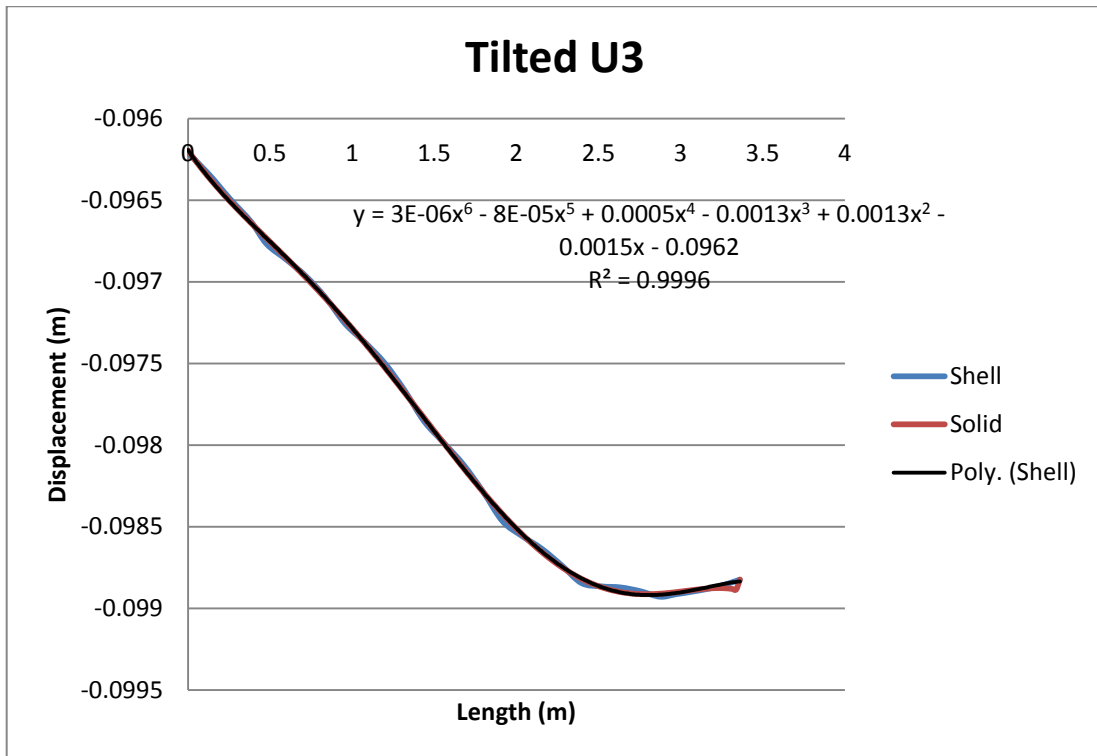


**Σχήμα 4.8:** Κατανομή μετατοπίσεων κατά τον άξονα x στη πλευρά Tilted

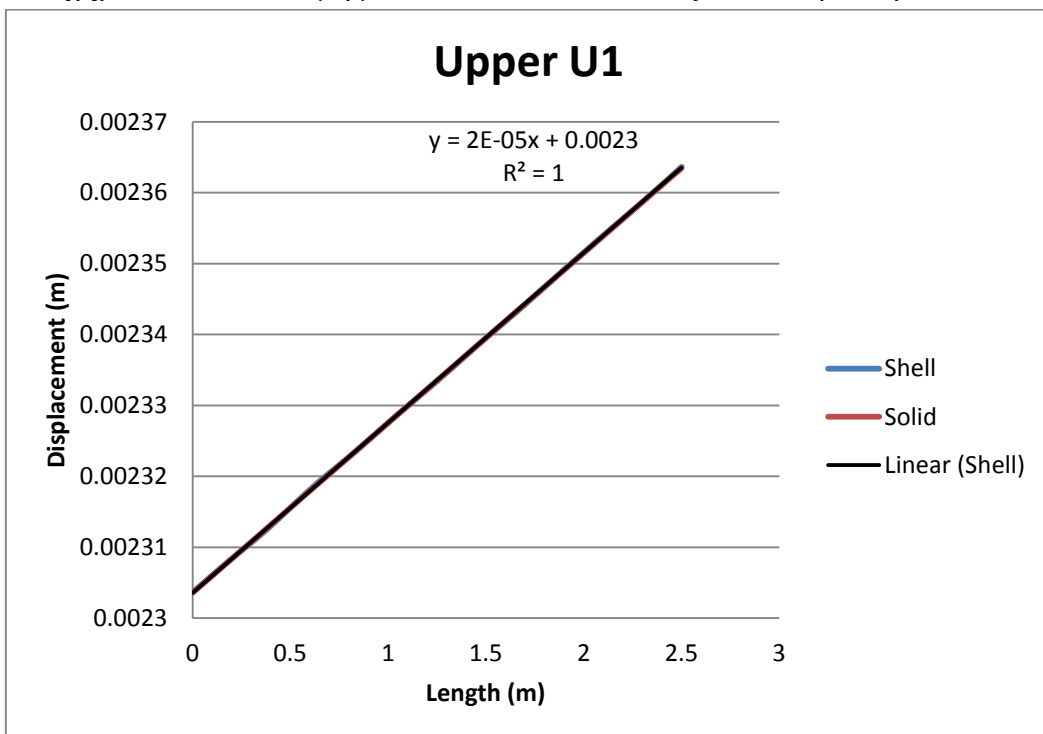


**Σχήμα 4.9:** Κατανομή μετατοπίσεων κατά τον άξονα y στη πλευρά Tilted

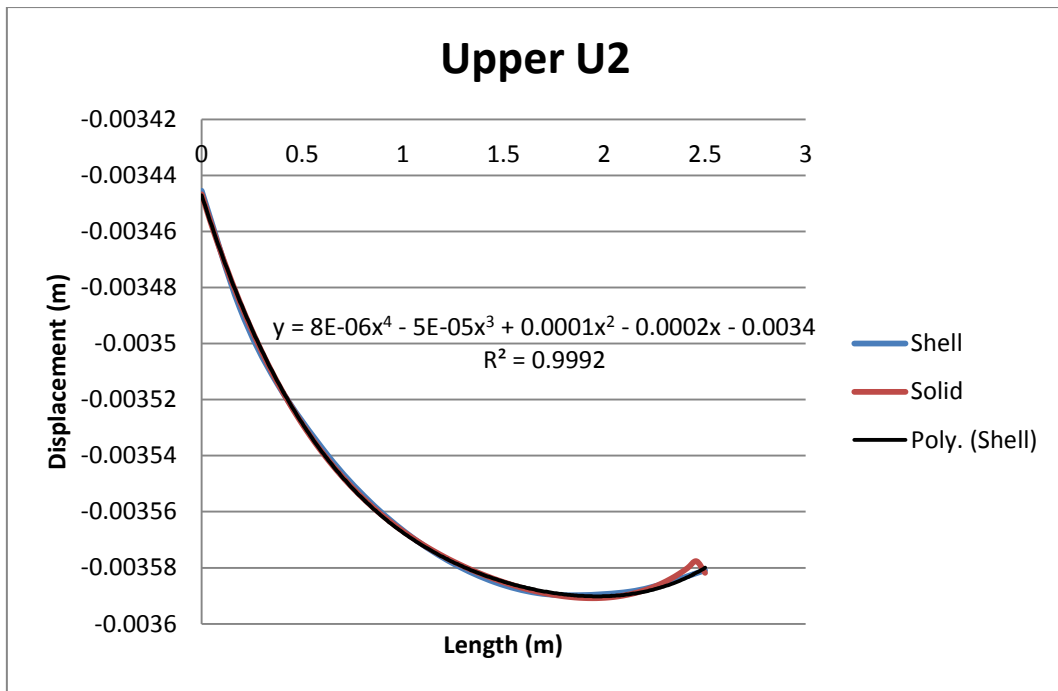




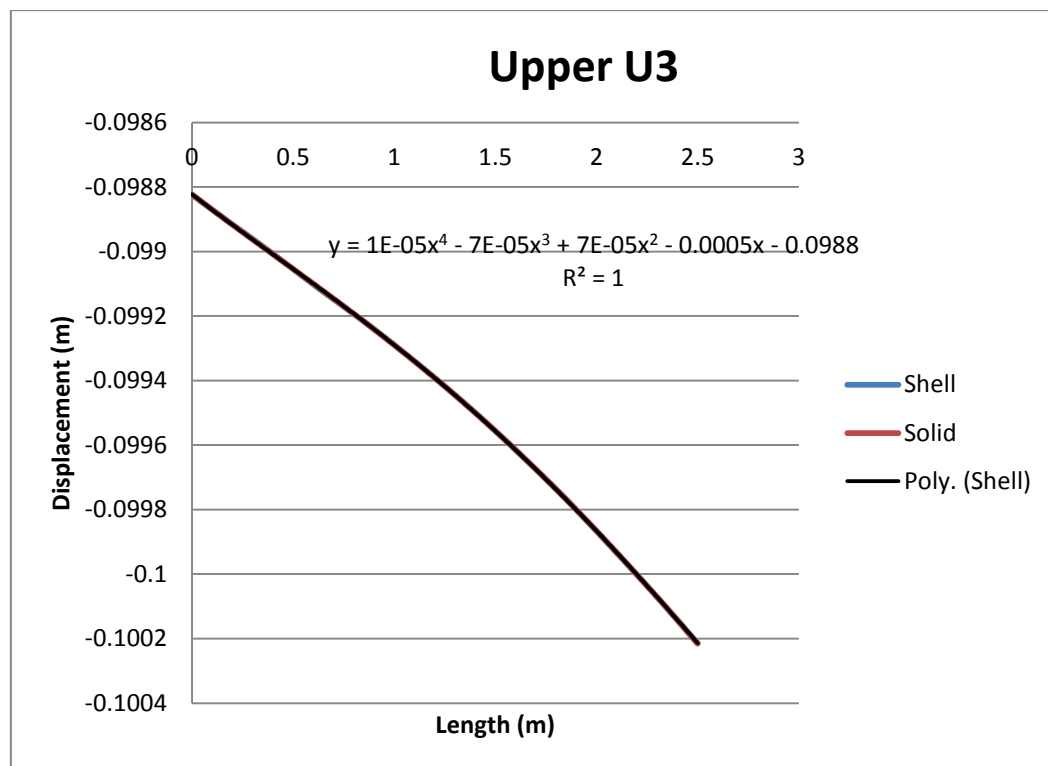
**Σχήμα 4.10:** Κατανομή μετατοπίσεων κατά τον άξονα z στη πλευρά Tilted



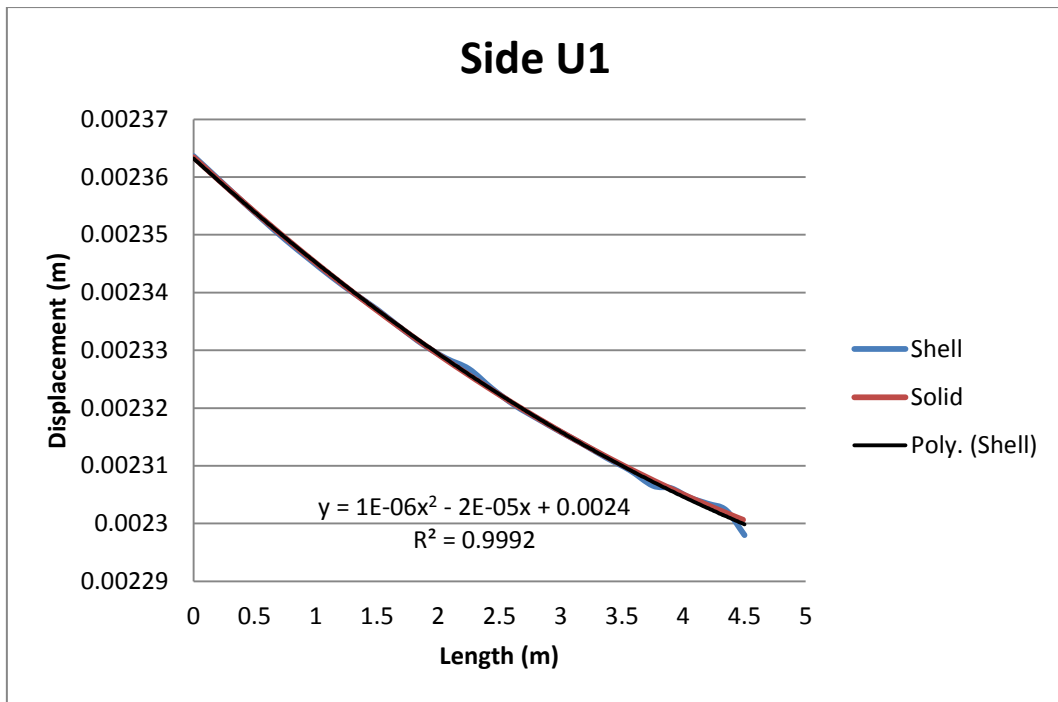
**Σχήμα 4.11:** Κατανομή μετατοπίσεων κατά τον άξονα x στη πλευρά Upper



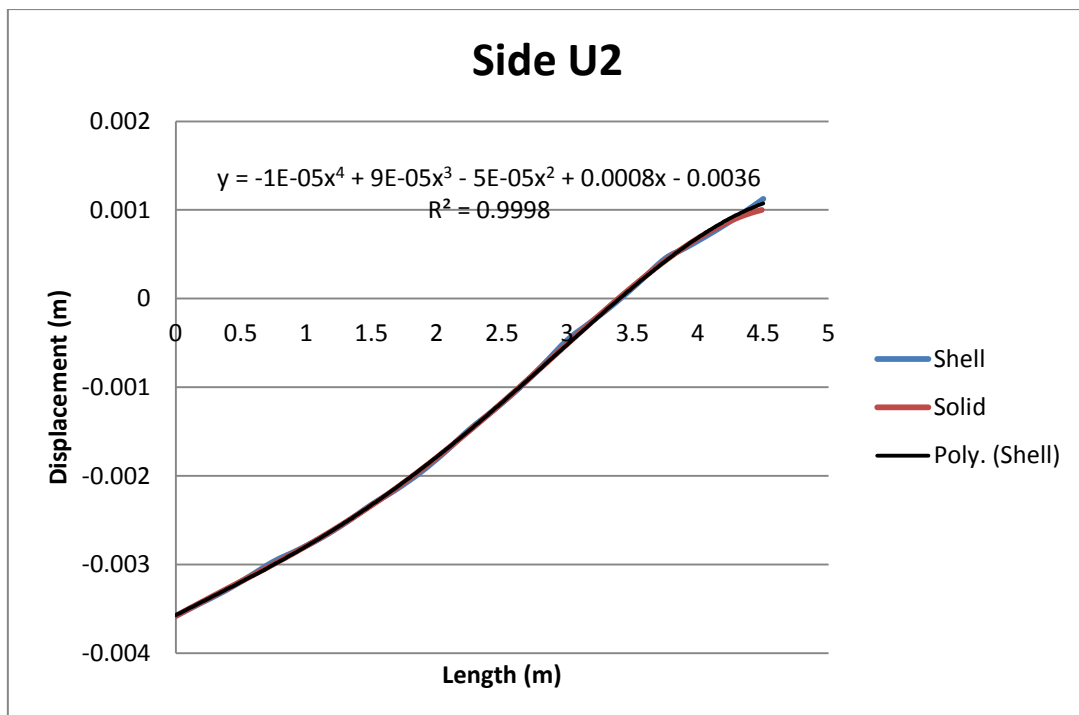
**Σχήμα 4.12:** Κατανομή μετατοπίσεων κατά τον άξονα y στη πλευρά Upper



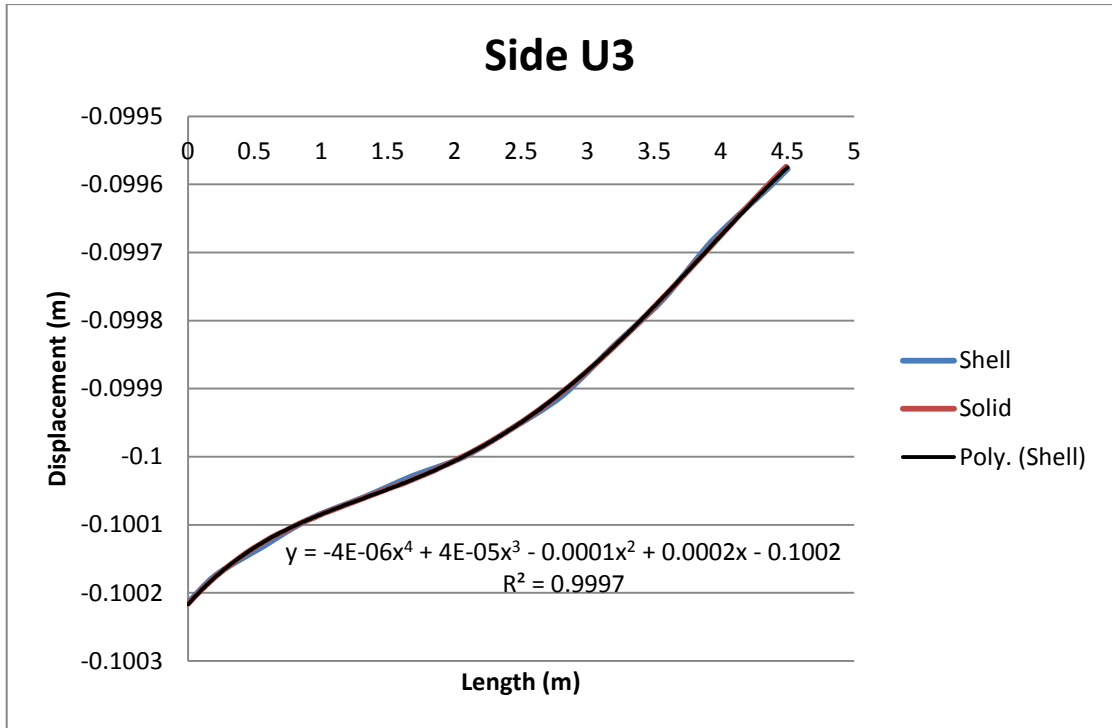
**Σχήμα 4.13:** Κατανομή μετατοπίσεων κατά τον άξονα z στη πλευρά Upper



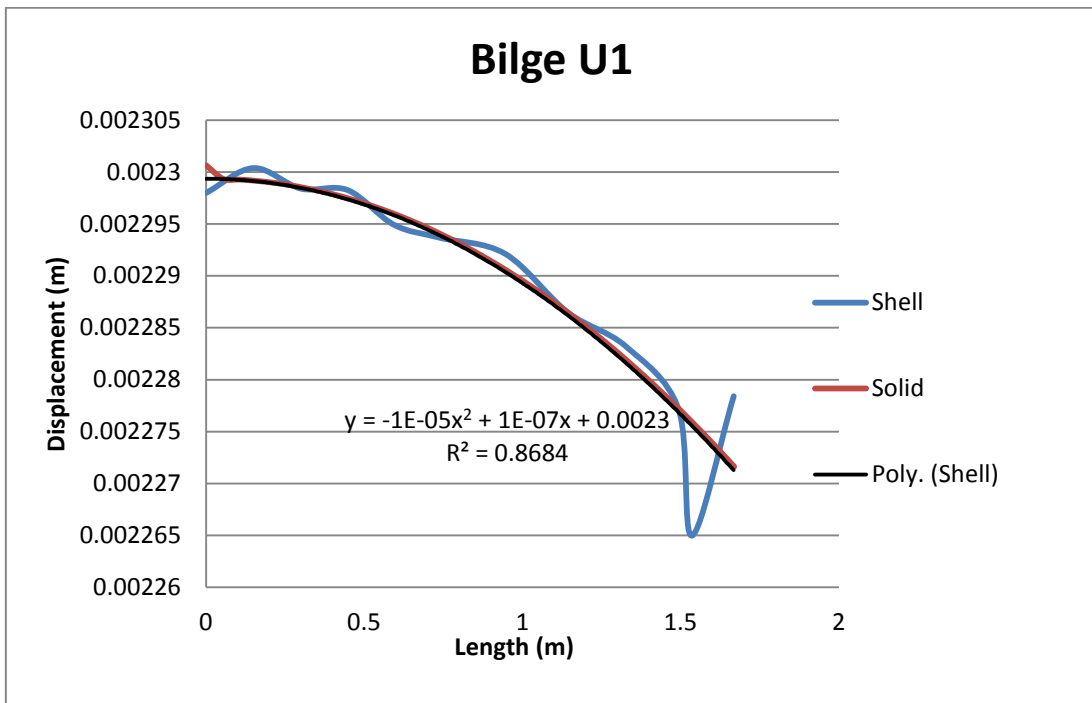
**Σχήμα 4.14:** Κατανομή μετατοπίσεων κατά τον άξονα x στη πλευρά Side



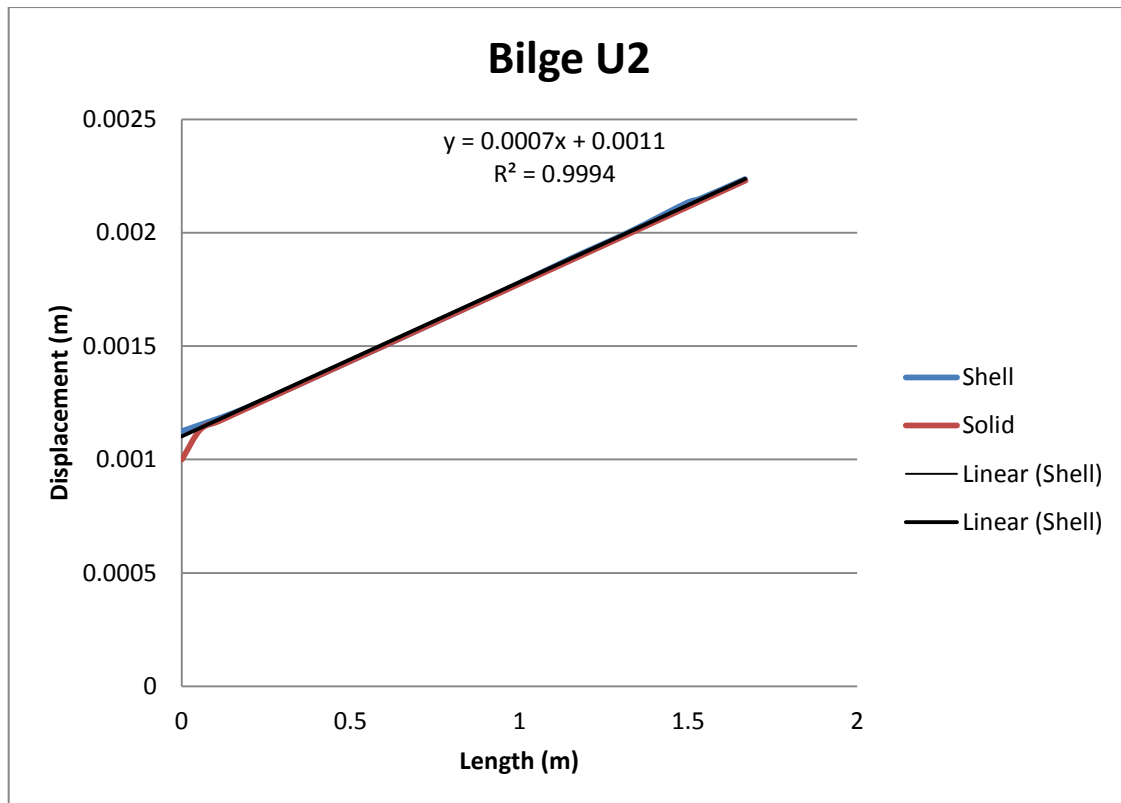
**Σχήμα 4.15:** Κατανομή μετατοπίσεων κατά τον άξονα y στη πλευρά Side



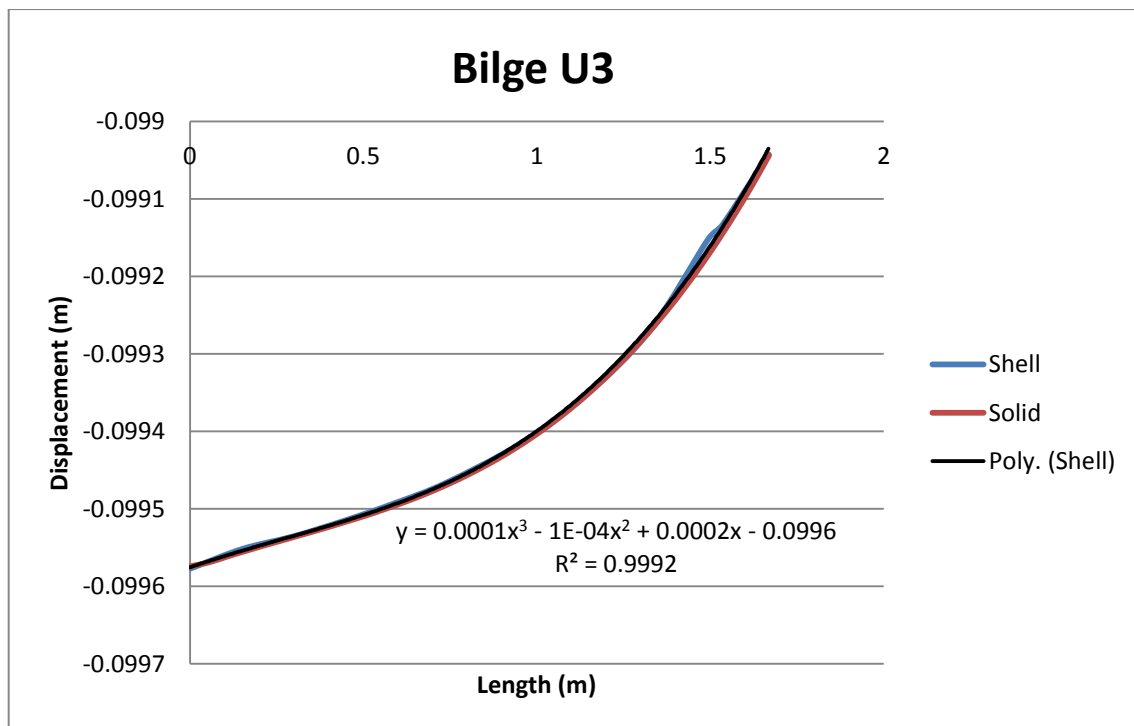
**Σχήμα 4.16:** Κατανομή μετατοπίσεων κατά τον άξονα z στη πλευρά Side



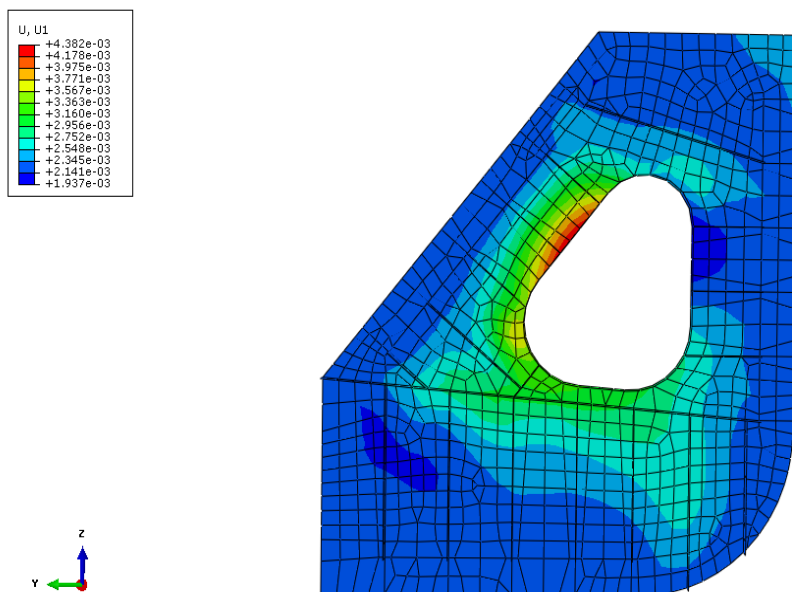
**Σχήμα 4.17:** Κατανομή μετατοπίσεων κατά τον άξονα x στη πλευρά Bilge



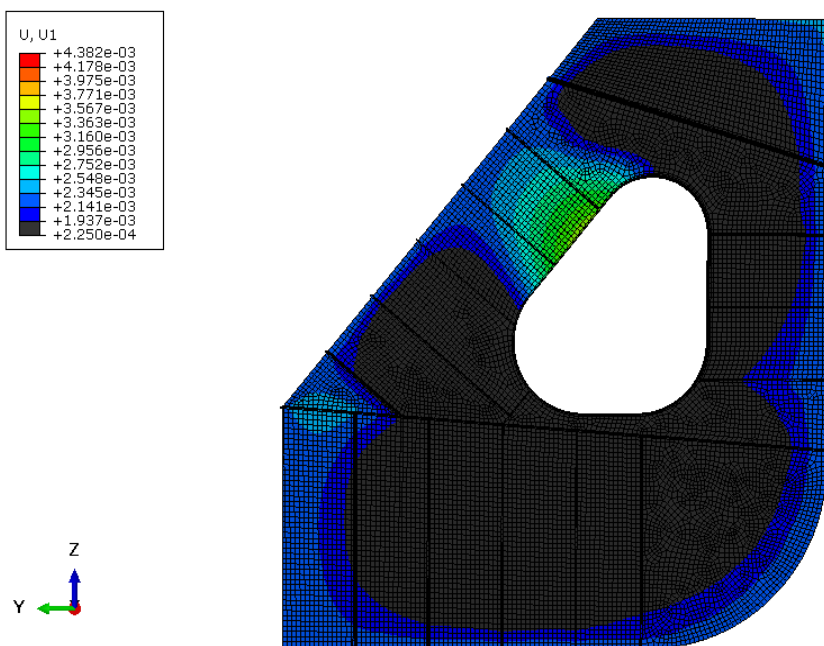
**Σχήμα 4.18:** Κατανομή μετατοπίσεων κατά τον άξονα y στη πλευρά Bilge



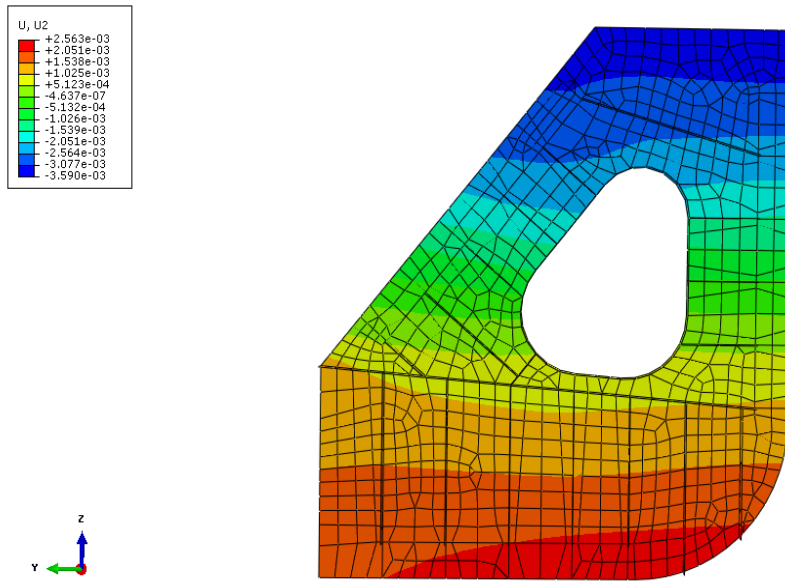
**Σχήμα 4.19:** Κατανομή μετατοπίσεων κατά τον άξονα z στη πλευρά Bilge



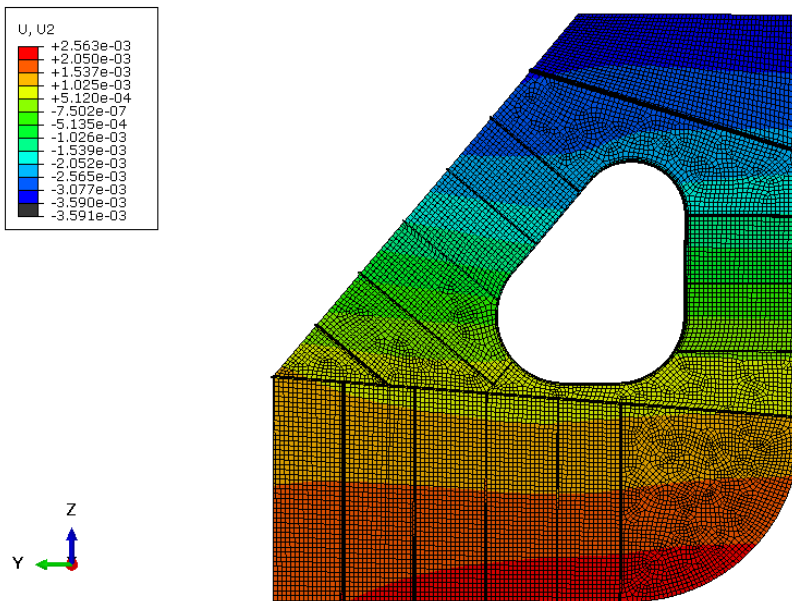
**Σχήμα 4.20:** Κατανομή μετατοπίσεων κατά τον άξονα x που προέκυψαν από το TCM.



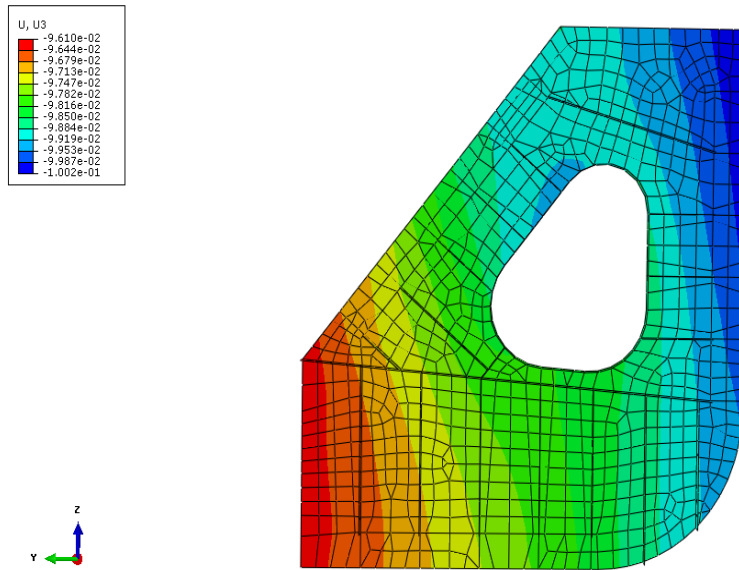
**Σχήμα 4.21:** Κατανομή μετατοπίσεων κατά τον άξονα x που προέκυψαν από το HTF.



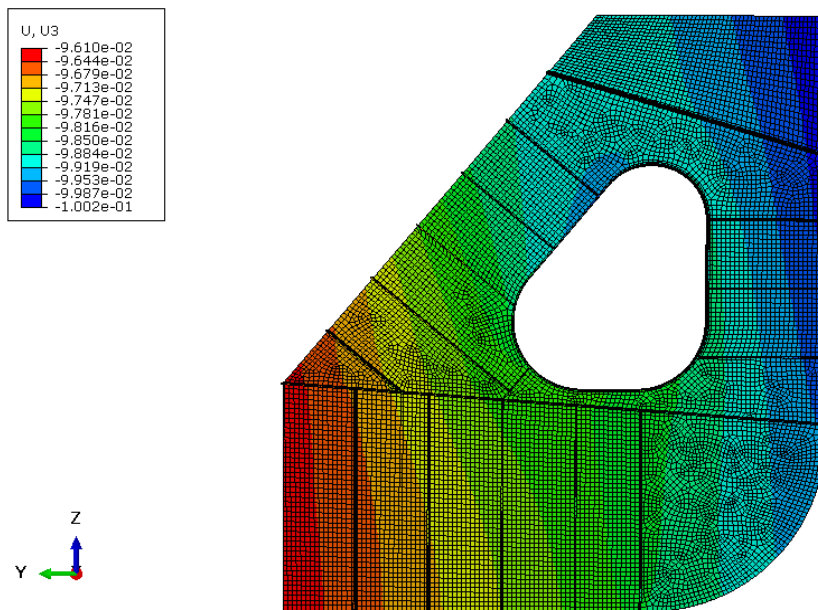
**Σχήμα 4.22:** Κατανομή μετατοπίσεων κατά τον άξονα y που προέκυψαν από το TCM.



**Σχήμα 4.23:** Κατανομή μετατοπίσεων κατά τον άξονα y που προέκυψαν από το HTF.



**Σχήμα 4.24:** Κατανομή μετατοπίσεων κατά τον άξονα z που προέκυψαν από το TCM.

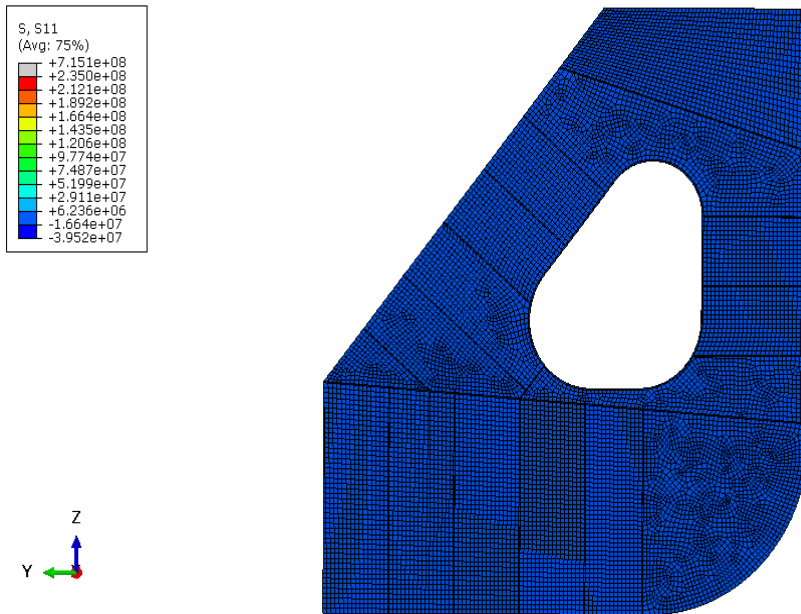


**Σχήμα 4.25:** Κατανομή μετατοπίσεων κατά τον άξονα z που προέκυψαν από το HTF.

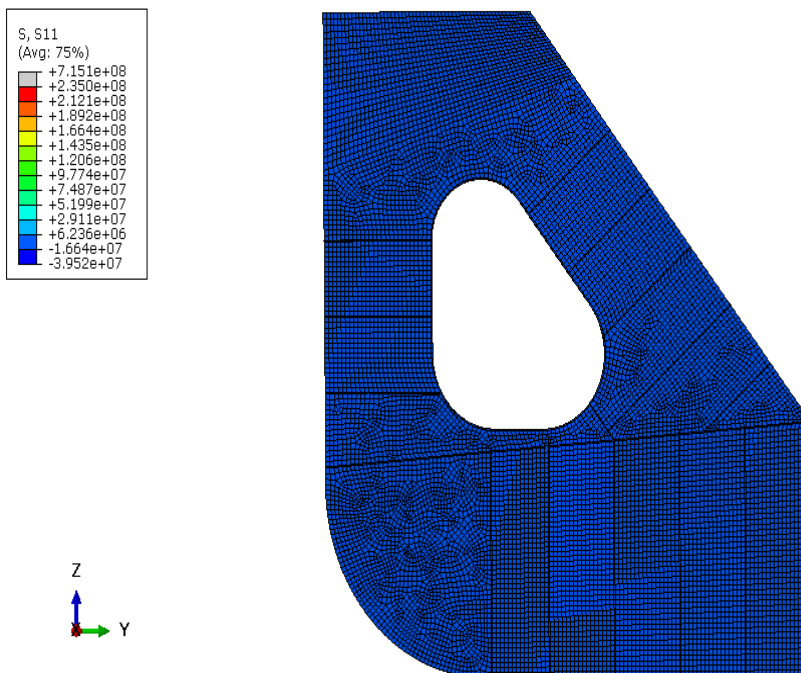


## 4.2 Επιλογή περιοχών για εμφάνιση ρωγμής

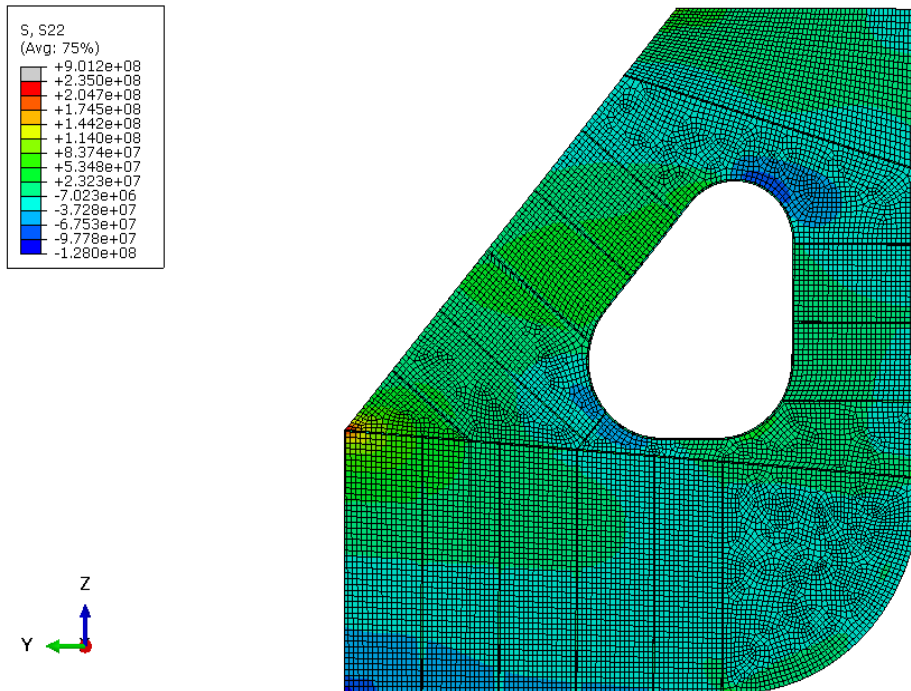
Από την μετεπεξεργασία (postprocessing) του HTF μοντέλου έχουμε την κατανομή του πεδίου των κύριων τάσεων (S11, S22, S33) σε όλο το μοντέλο (σχήματα 4.26 έως 4.31 ) στα οποία έχει τοποθετηθεί σαν μέγιστη τιμή το όριο διαρροής του κοινού ναυπηγικού χάλυβα (235MPa). Η επιλογή της θέσης της ρωγμής έγινε με γνώμονα τις περιοχές που η κατασκευή παρουσιάζει εφελκυσμό για να έχουμε σαν αποτέλεσμα την τάση της ρωγμής να διαδοθεί ακόμα περισσότερο στο πέρασμα του χρόνου. Έτσι, παρατίθενται επιπλέον σχήματα τα οποία δείχνουν και αυτά το πεδίο των κυρίων τάσεων, αλλά με ελάχιστη τιμή τα 0 MPa για να ξεχωρίσουν οι περιοχές που υπόκειται σε εφελκυσμό (σχήματα 4.32 έως 4.37) . Με γκρι χρώμα στα διαγράμματα των κυρίων τάσεων είναι οι περιοχές που ξεπερνούν το όριο διαρροής του κοινού ναυπηγικού χάλυβα, ενώ με μαύρο οι περιοχές που έχουν αρνητικές τιμές τάσεων και άρα υπόκεινται σε θλίψη. Τα σχήματα περιλαμβάνουν όψεις από την πλευρά που βρίσκονται τα εγκάρσια ενισχυτικά, καθώς και από την άλλη πλευρά. Από τα σχήματα 4.32 έως 4.37 επιλέχθηκαν δύο περιοχές για προσομοίωση ρωγμής. Οι περιοχές αυτές δείχνονται με βέλη στα παρακάτω σχήματα από τη μεριά των εγκάρσιων ενισχυτικών. Τα S11, S22, S33 εκφράζουν τις ορθές τάσεις στις διευθύνσεις x, y, z αντίστοιχα.



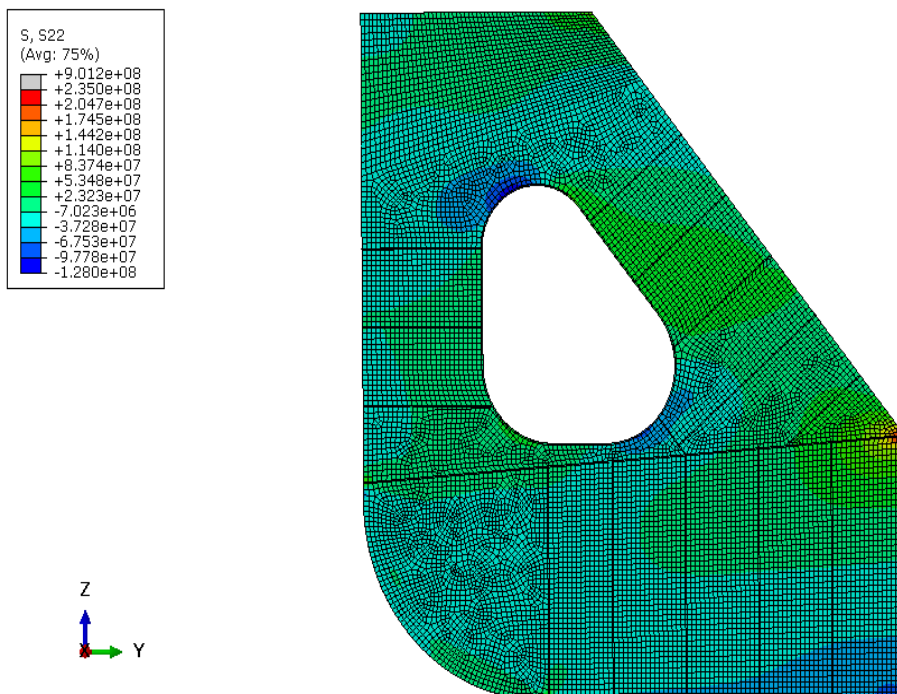
**Σχήμα 4.26:** Κατανομή κυρίων τάσεων S11 από την πλευρά των εγκάρσιων ενισχυτικών.



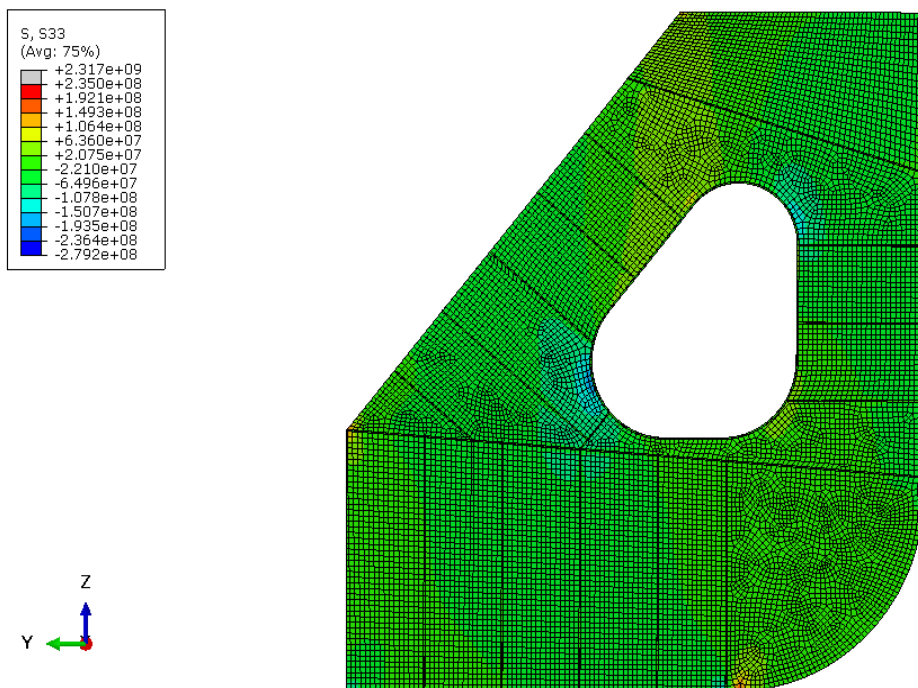
**Σχήμα 4.27:** Κατανομή κυρίων τάσεων S11 από την πλευρά που δεν υπάρχουν εγκάρσια ενισχυτικά.



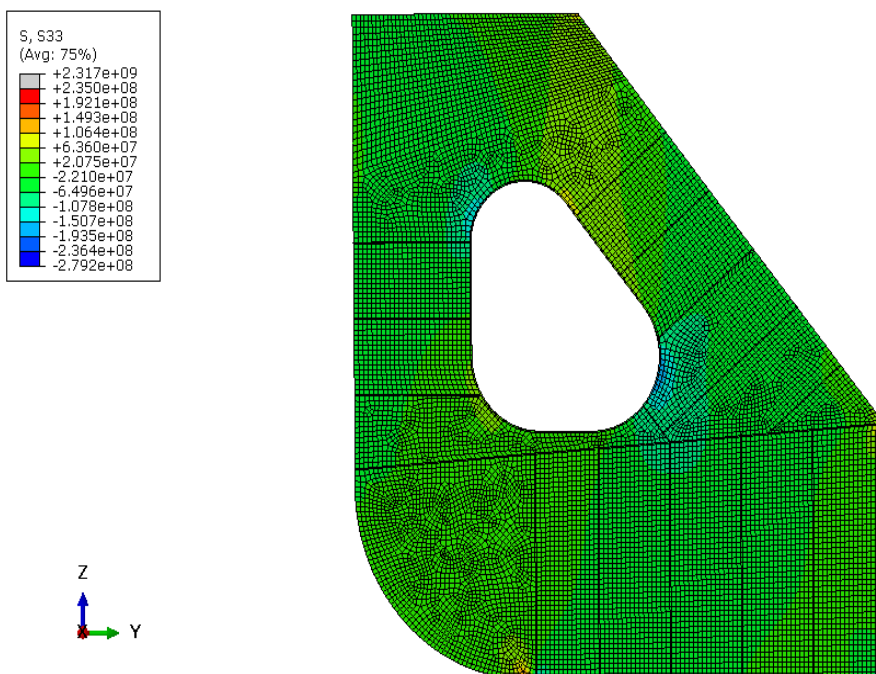
**Σχήμα 4.28:** Κατανομή κυρίων τάσεων S22 από την πλευρά των εγκάρσιων ενισχυτικών.



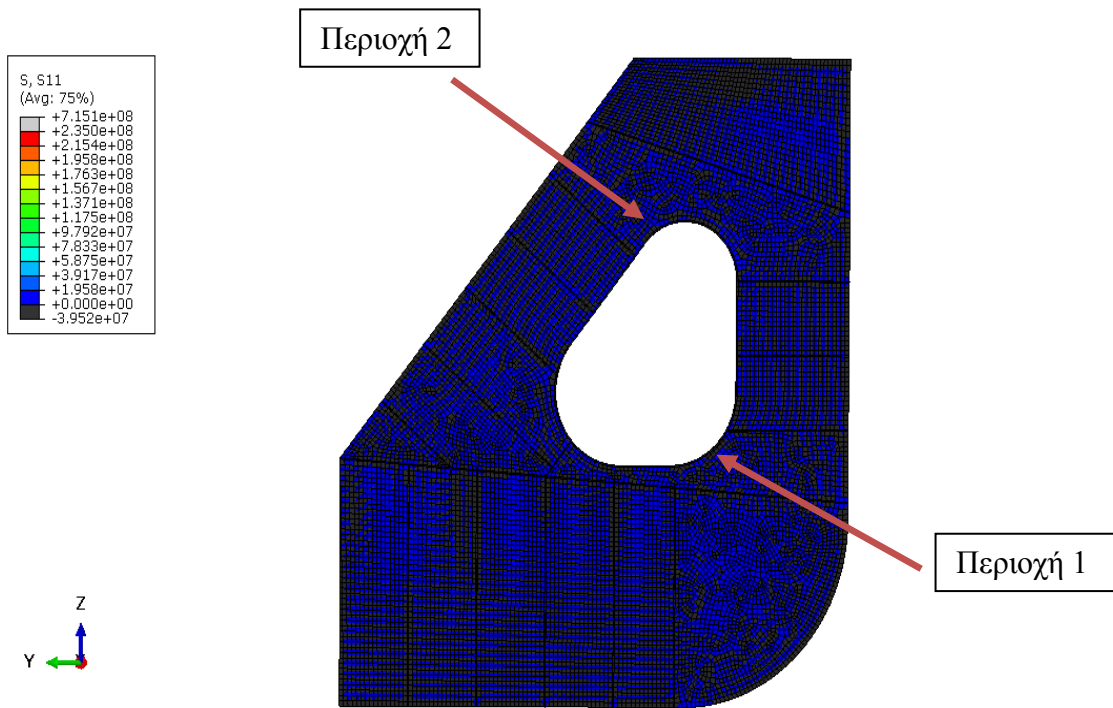
**Σχήμα 4.29:** Κατανομή κυρίων τάσεων S22 από την πλευρά που δεν υπάρχουν εγκάρσια ενισχυτικά.



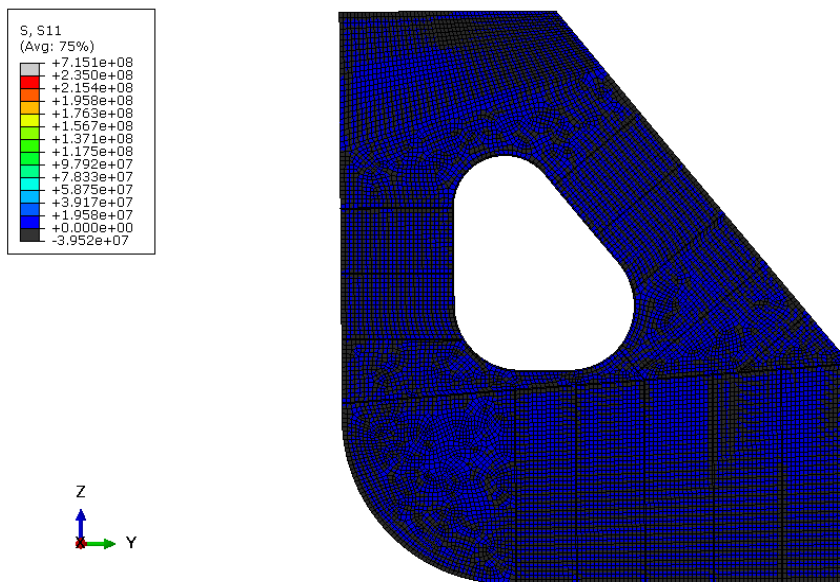
**Σχήμα 4.30:** Κατανομή κυρίων τάσεων S33 από την πλευρά των εγκάρσιων ενισχυτικών.



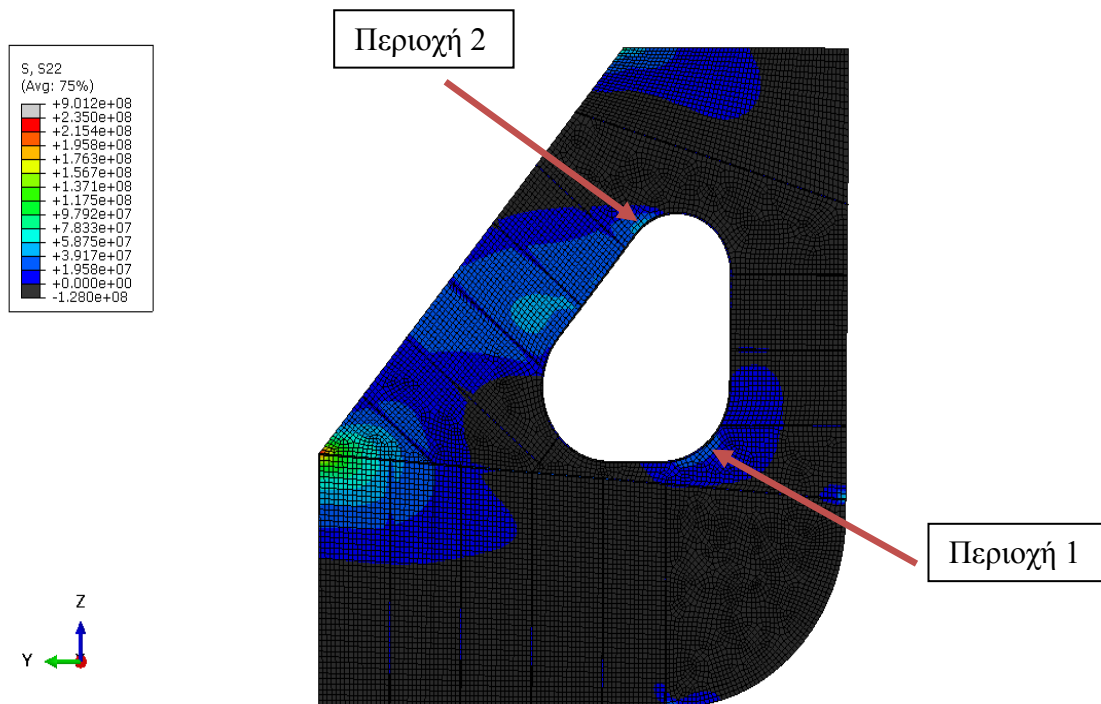
**Σχήμα 4.31:** Κατανομή κυρίων τάσεων S33 από την πλευρά που δεν υπάρχουν εγκάρσια ενισχυτικά.



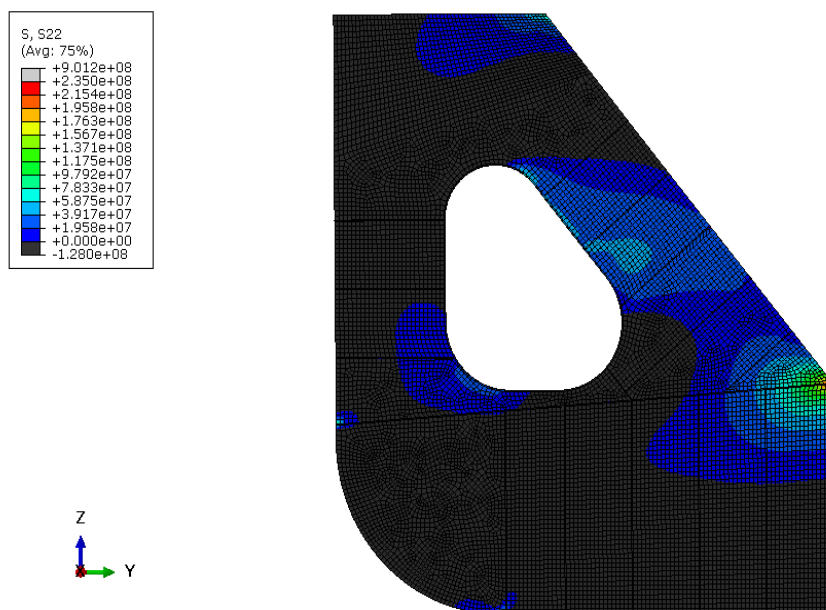
**Σχήμα 4.32:** Κατανομή εφελκυστικών κυρίων τάσεων S11 από την πλευρά των εγκάρσιων ενισχυτικών.



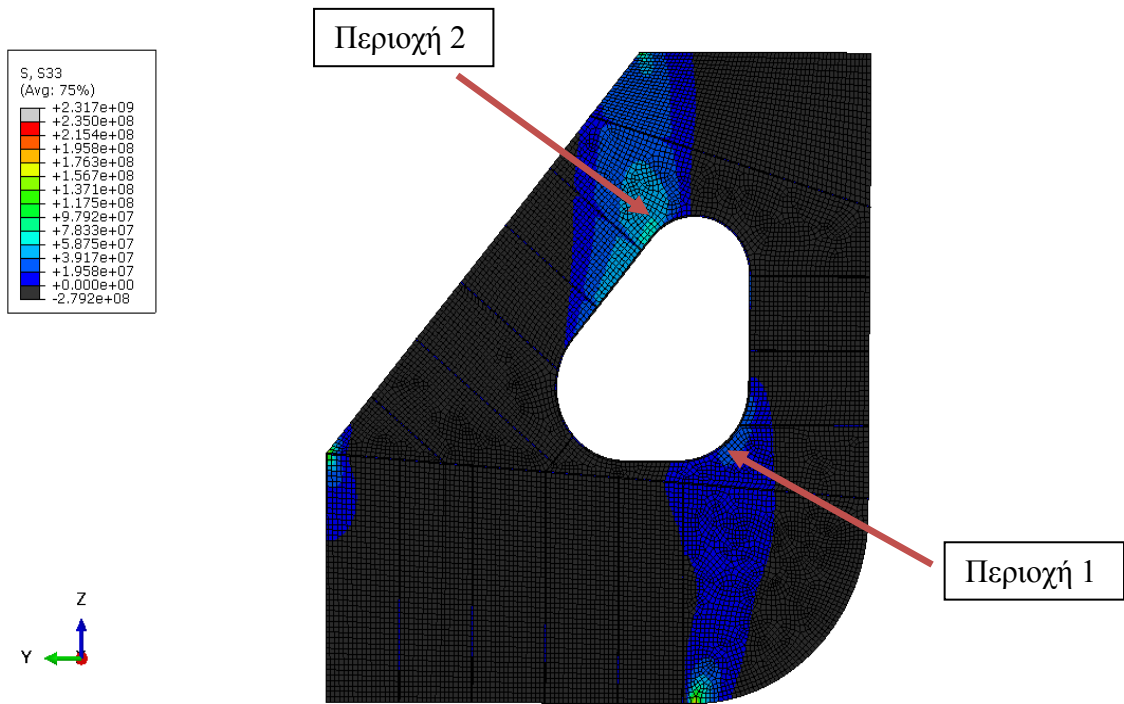
**Σχήμα 4.33:** Κατανομή εφελκυστικών κυρίων τάσεων S11 από την πλευρά που δεν υπάρχουν εγκάρσια ενισχυτικά.



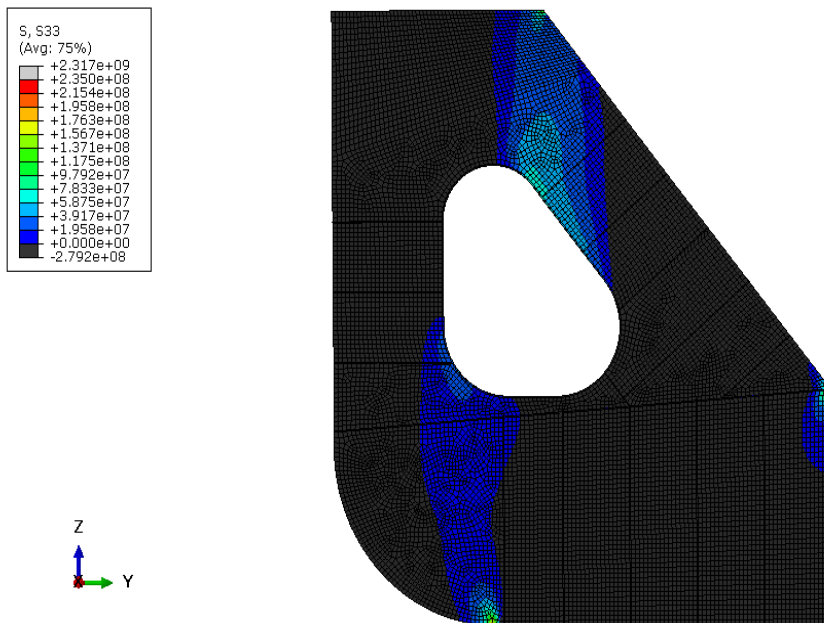
**Σχήμα 4.34:** Κατανομή εφελκυστικών κυρίων τάσεων S22 από την πλευρά των εγκάρσιων ενισχυτικών.



**Σχήμα 4.35:** Κατανομή εφελκυστικών κυρίων τάσεων S22 από την πλευρά που δεν υπάρχουν εγκάρσια ενισχυτικά.

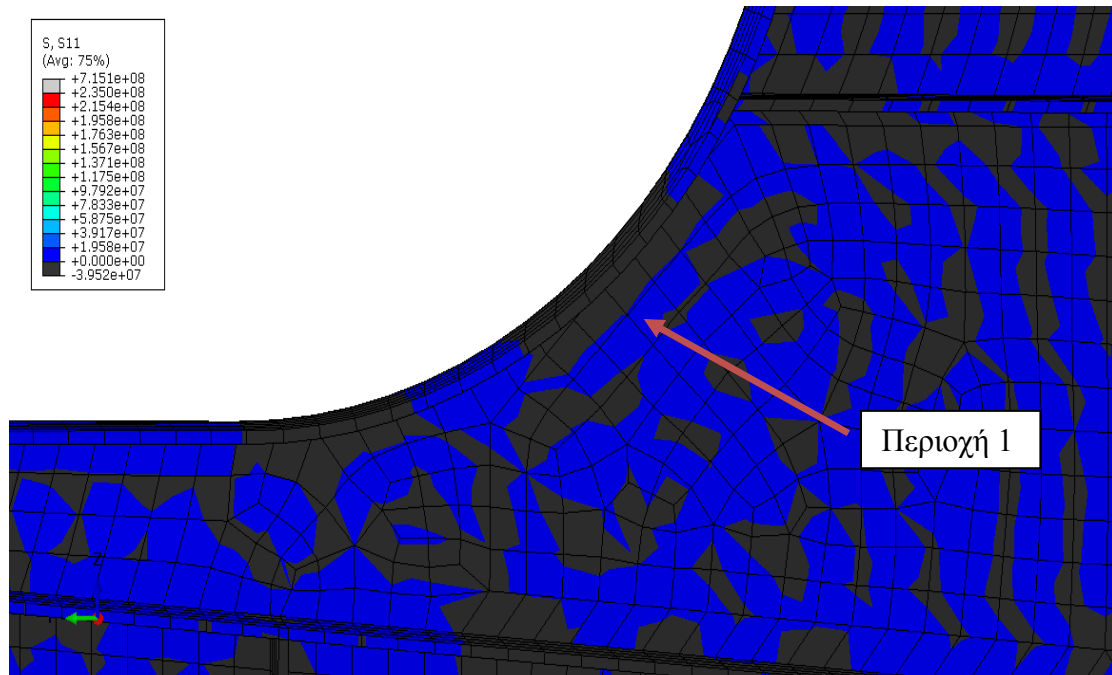


**Σχήμα 4.36:** Κατανομή εφελκυστικών κυρίων τάσεων S33 από την πλευρά των εγκάρσιων ενισχυτικών.

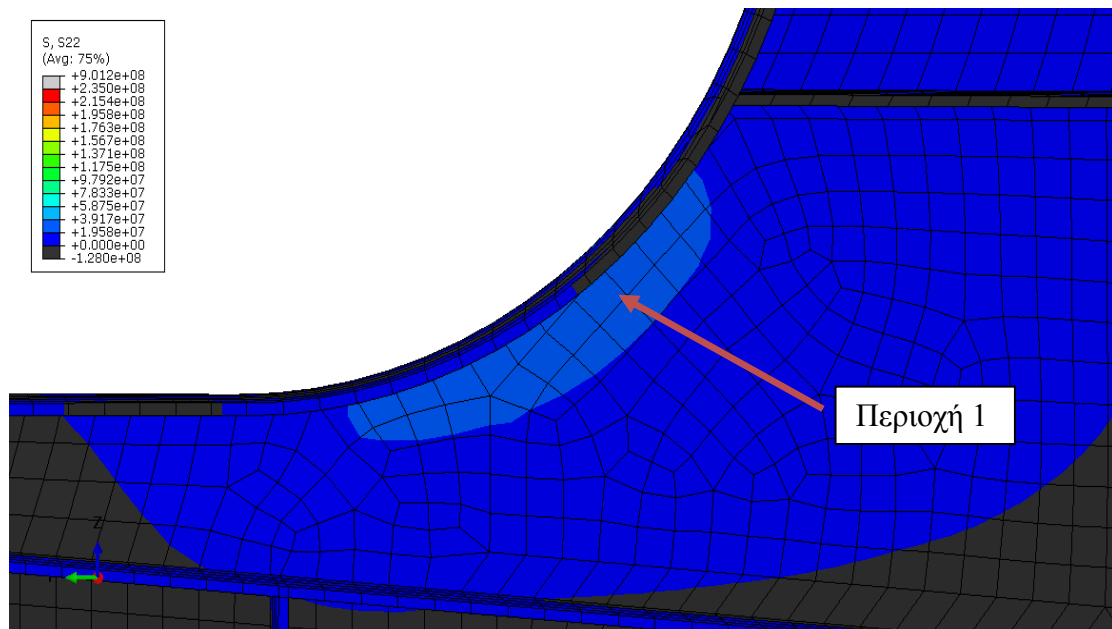


**Σχήμα 4.37:** Κατανομή εφελκυστικών κυρίων τάσεων S33 από την πλευρά που δεν υπάρχουν εγκάρσια ενισχυτικά.

Επιπλέον, παρατίθενται οι περιοχές που επιλέχθηκαν για εμφάνιση ρωγμών σε μεγέθυνση (σχήματα 4.38 έως 4.43).

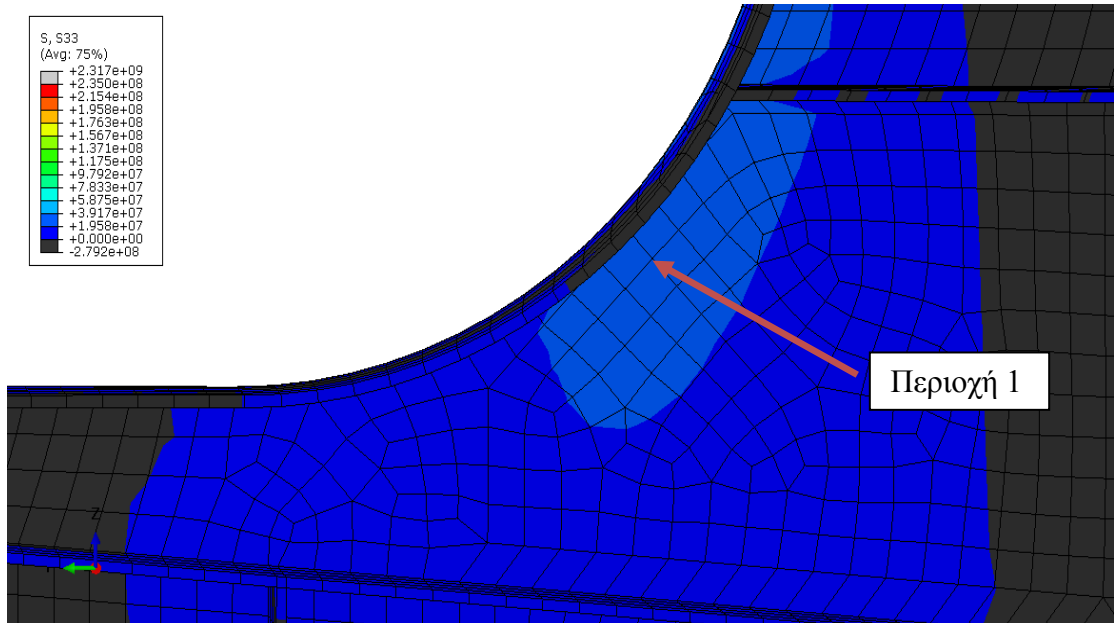


**Σχήμα 4.38:** Κατανομή εφελκυστικών κυρίων τάσεων S11 από την πλευρά των εγκάρσιων ενισχυτικών (μεγέθυνση περιοχής 1).

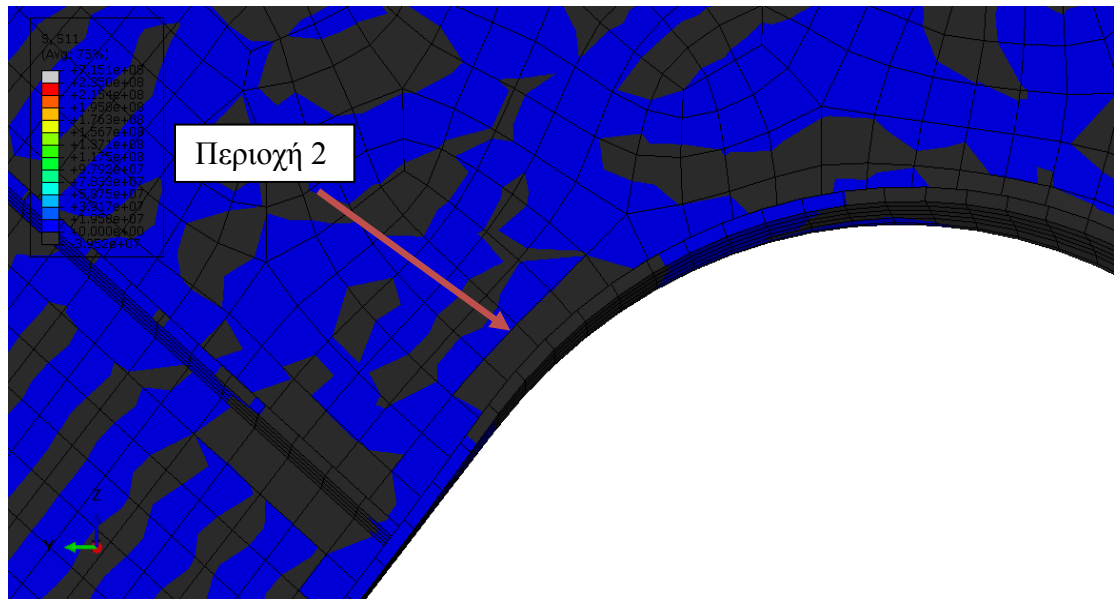


**Σχήμα 4.39:** Κατανομή εφελκυστικών κυρίων τάσεων S22 από την πλευρά των εγκάρσιων ενισχυτικών (μεγέθυνση περιοχής 1).

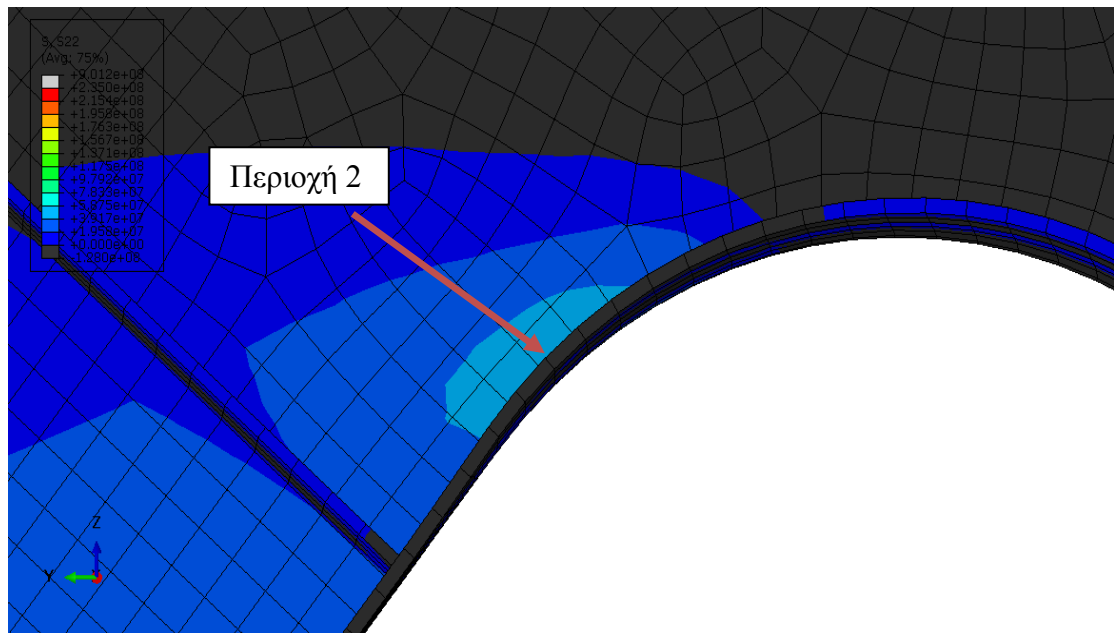




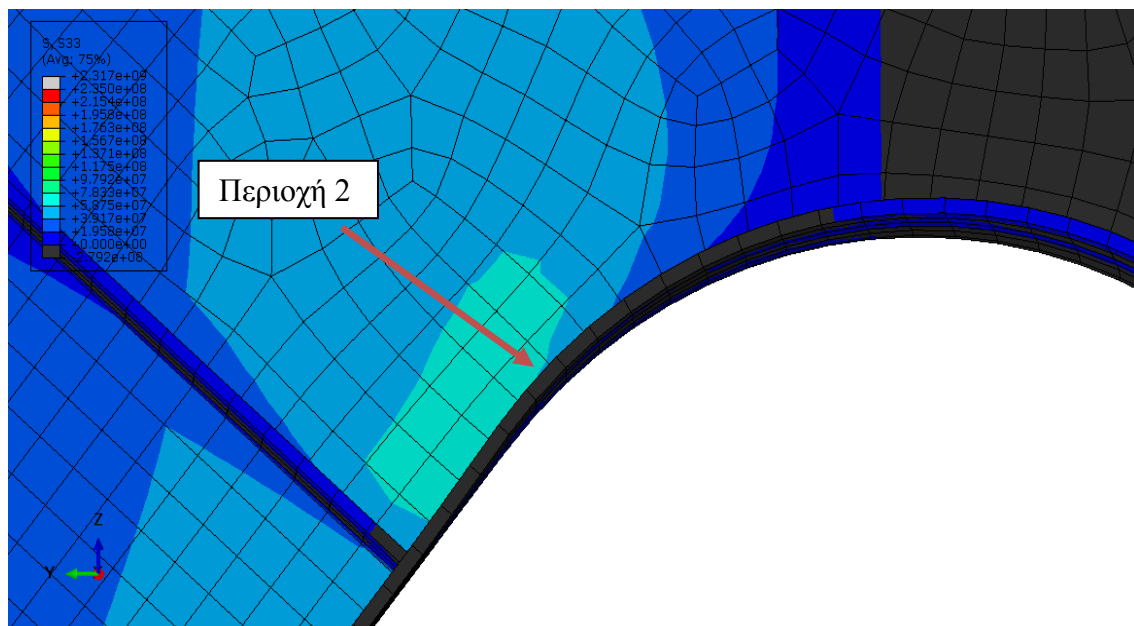
**Σχήμα 4.40:** Κατανομή εφελκυστικών κυρίων τάσεων S33 από την πλευρά των εγκάρσιων ενισχυτικών (μεγέθυνση περιοχής 1).



**Σχήμα 4.41:** Κατανομή εφελκυστικών κυρίων τάσεων S11 από την πλευρά των εγκάρσιων ενισχυτικών (μεγέθυνση περιοχής 2).



**Σχήμα 4.42:** Κατανομή εφελκυστικών κυρίων τάσεων S22 από την πλευρά των εγκάρσιων ενισχυτικών (μεγέθυνση περιοχής 2).



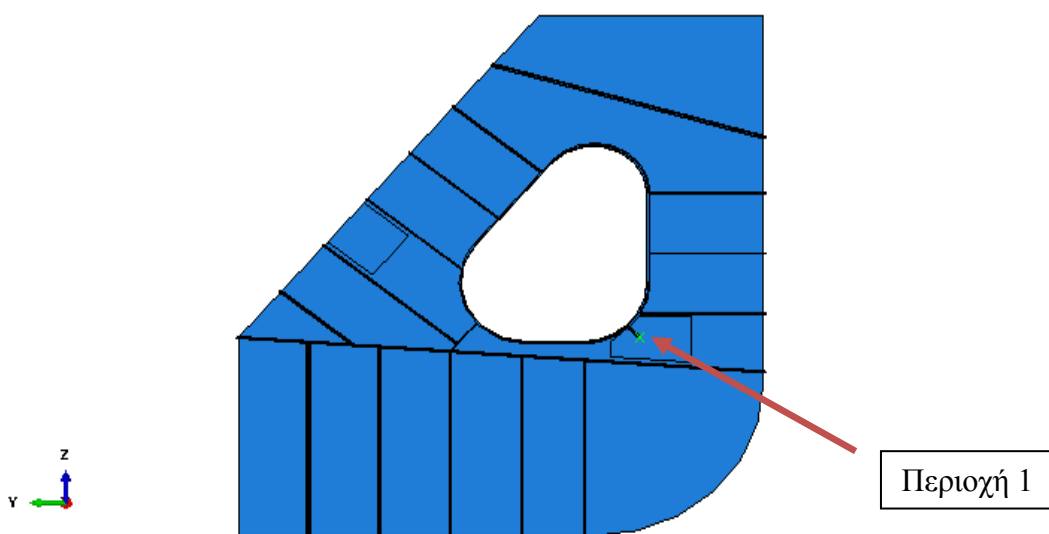
**Σχήμα 4.43:** Κατανομή εφελκυστικών κυρίων τάσεων S33 από την πλευρά των εγκάρσιων ενισχυτικών (μεγέθυνση περιοχής 2).

### 4.3 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων

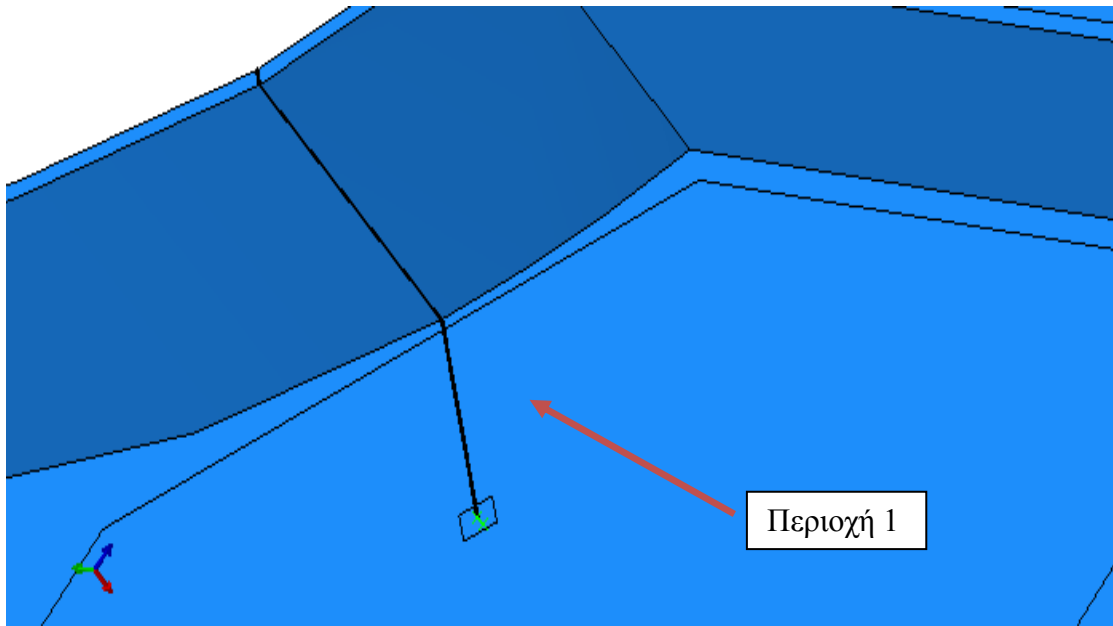
Στην παρούσα παράγραφο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα μετά την μοντελοποίηση της ρωγμής στις 2 περιοχές. Αρχικά θα υπολογιστεί με χρήση του προγράμματος ABAQUS ο ΣΕΤ κατά το πάχος της πλάκας στο μέτωπο της ρωγμής και στη συνέχεια θα γίνει παραμετρική σχεδίαση του επιθέματος και θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα του ΣΕΤ μετά την τοποθέτηση του κάθε επιθέματος καθώς και συγκριτικά αποτελέσματα όλων των ειδών των επιθεμάτων που χρησιμοποιήθηκαν.

#### 4.3.1 Περιοχή 1

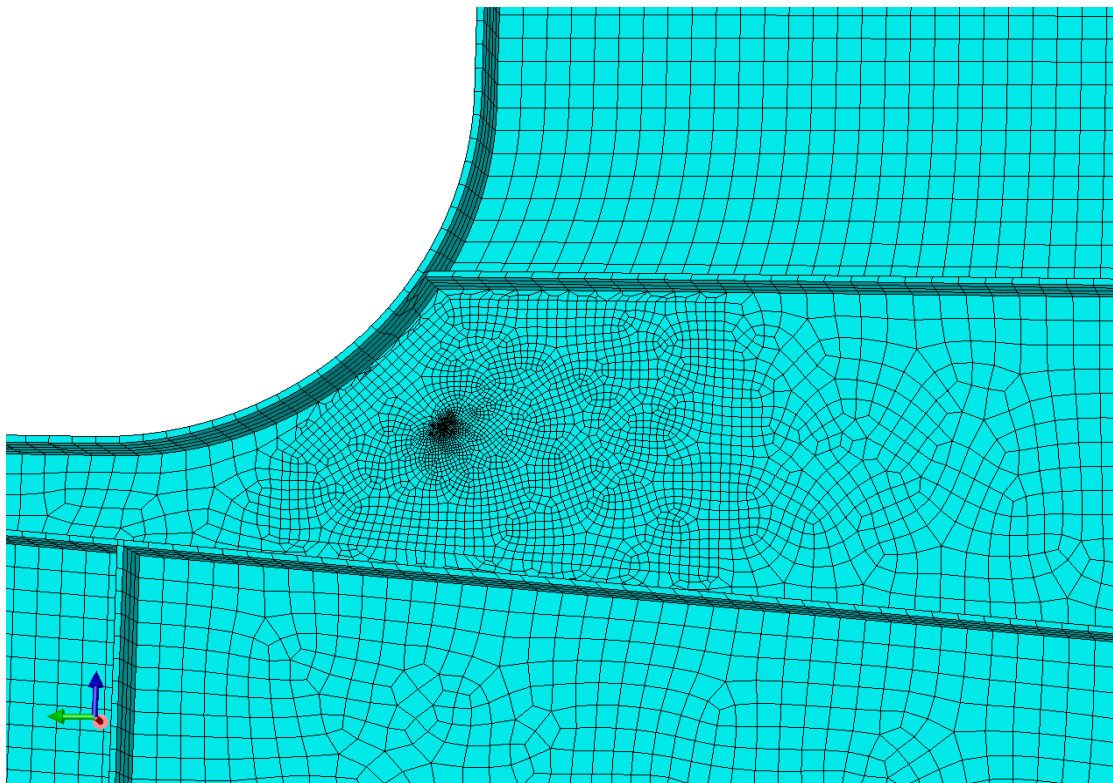
Η ρωγή που μοντελοποιήθηκε στην περιοχή 1 είχε μήκος  $a=200\text{mm}$  στο επίπεδο της πλάκας, συνεχιζόταν στην ανθρωποθυρίδα και σχεδιάστηκε με κλίση  $45^\circ$  ως προς την οριζόντιο (πυθμένας). Στο σχήμα 4.44 φαίνεται η ραφή της ρωγμής όπως αυτή σχεδιάστηκε και στο σχήμα 4.45 μία μεγέθυνση της περιοχής. Όσον αφορά το πλέγμα των στοιχείων, καταρχάς σχεδιάστηκε μία τετράγωνη περιοχή στο μέτωπο της ρωγμής, ακμής  $26\text{mm}$ , περίπου  $a/8$  (σχήμα 4.45). Το πλέγμα των στοιχείων στη περιοχή κοντά στη ρωγή φαίνεται στο σχήμα 4.46. Το μέγεθος των στοιχείων μέσα στη τετράγωνη περιοχή είναι περίπου  $2\text{mm}$  και στη περιοχή που θα οριστεί στη συνέχεια το επίθεμα είναι  $20\text{mm}$ . Το γενικό μέγεθος στοιχείων (global mesh) παραμένει στα  $50\text{mm}$ . Στη συνέχεια παρατίθεται το πεδίο των τάσεων Von Mises στο HTF μοντέλο (σχήμα 4.47) και κοντά στη περιοχή της ρωγμής (σχήμα 4.48-4.49) στην οποία βλέπουμε ξεκάθαρα τη συγκέντρωση των τάσεων στη ρωγή και κυρίως στη περιοχή κοντά στο μέτωπό της.



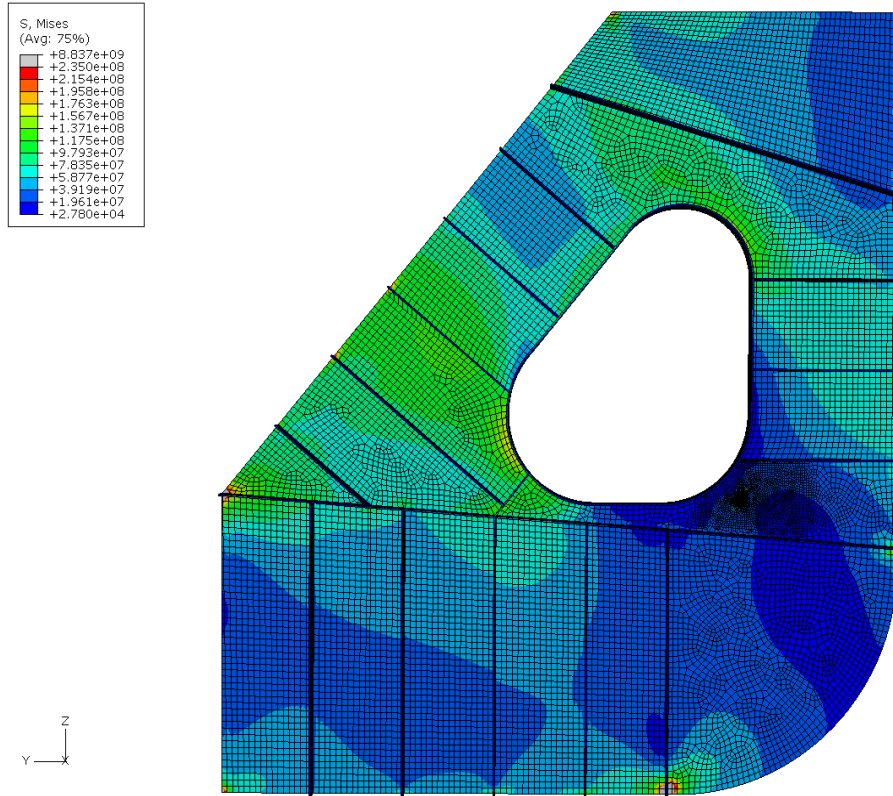
Σχήμα 4.44: Ραφή ρωγμής στη περιοχή 1



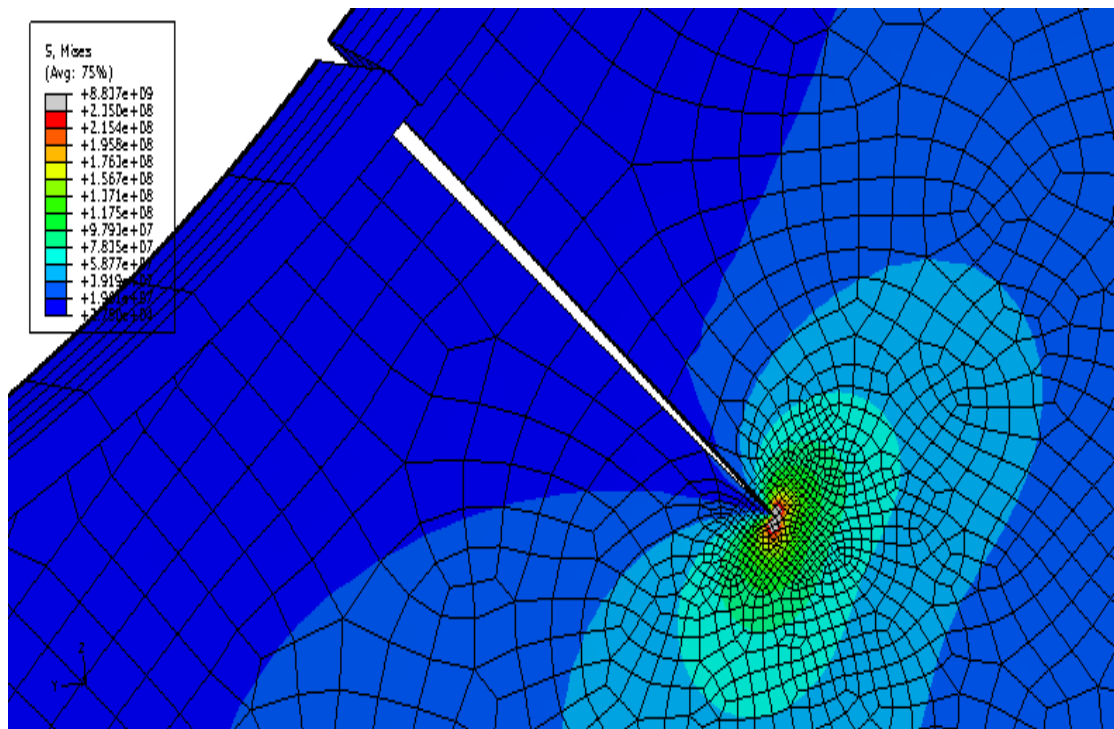
**Σχήμα 4.45:** Μεγέθυνση στη ραφή ρωγμής στη περιοχή 1



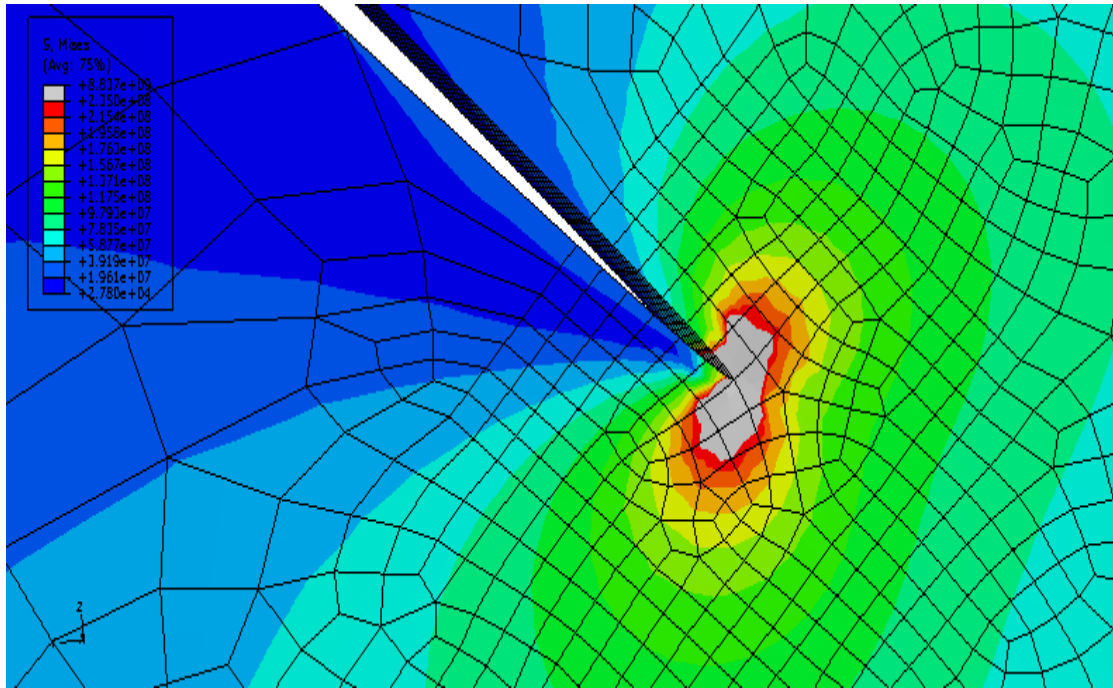
**Σχήμα 4.46:** Πλέγμα στοιχείων ρωγμής κοντά στη περιοχή 1



Σχήμα 4.47: Εντατικό πεδίο τάσεων Von Mises

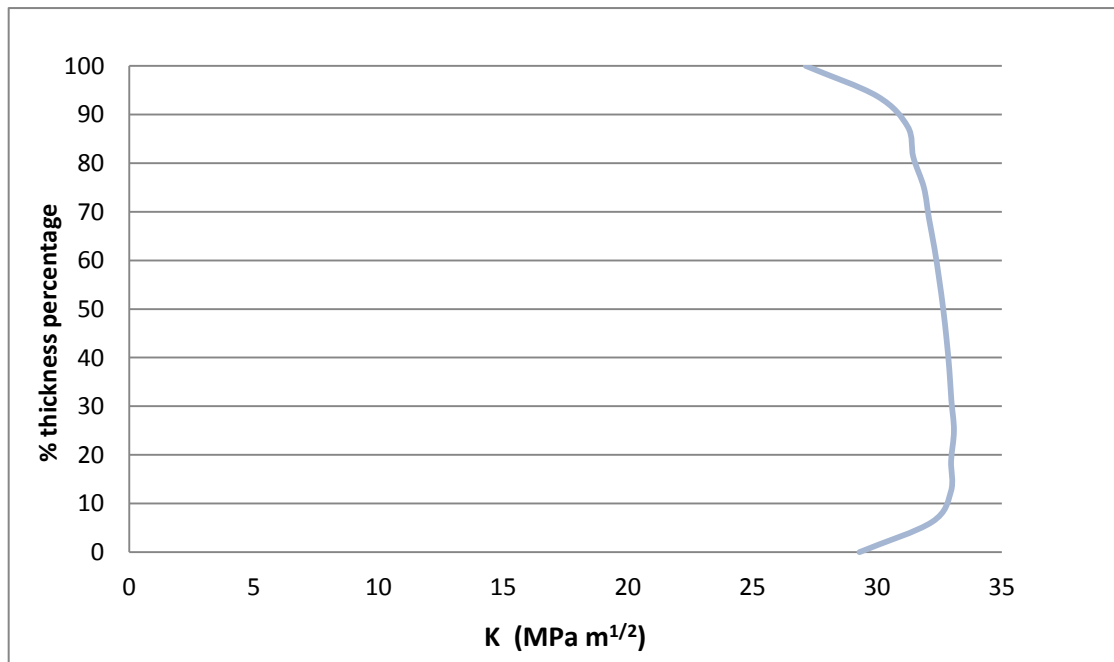


Σχήμα 4.48: Εντατικό πεδίο τάσεων Von Mises κοντά στη ρωγμή



**Σχήμα 4.49:** Εντατικό πεδίο τάσεων Von Mises κοντά στη ρωγμή

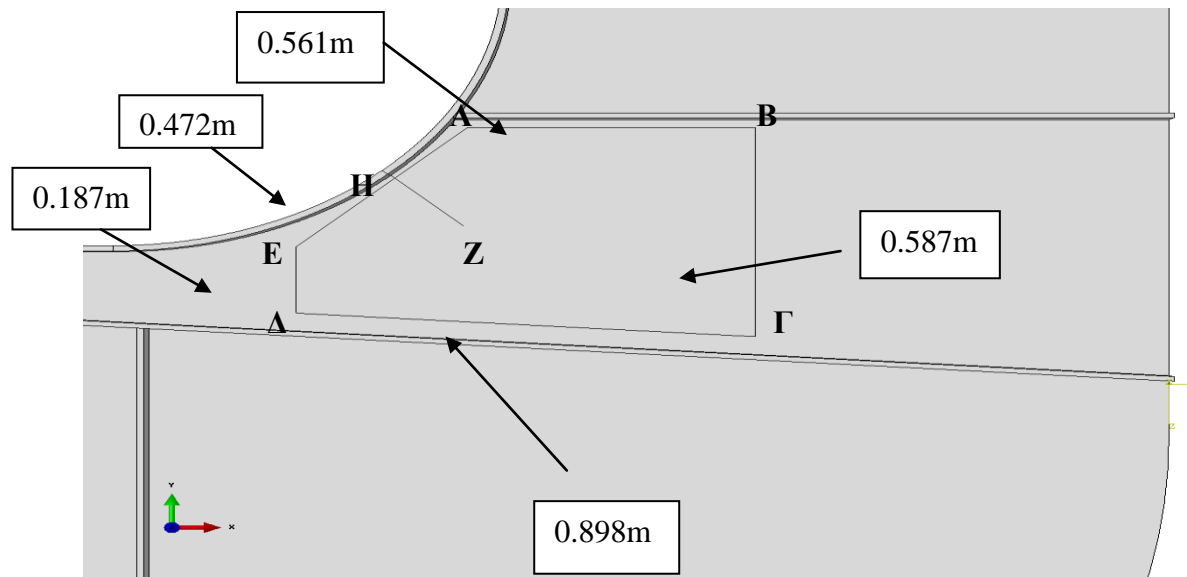
Τέλος, παρατίθεται ο ΣΕΤ συναρτήσει του πάχους της πλάκας στο μέτωπο της ρωγμής (σχήμα 4.50). Το 0% του πάχους θεωρείται από την πλευρά που δεν υπάρχουν τα εγκάρσια ενισχυτικά.



**Σχήμα 4.50:** ΣΕΤ χωρίς επίθεμα κατά το πάχος της πλάκας στη ρωγμή της περιοχής 1.

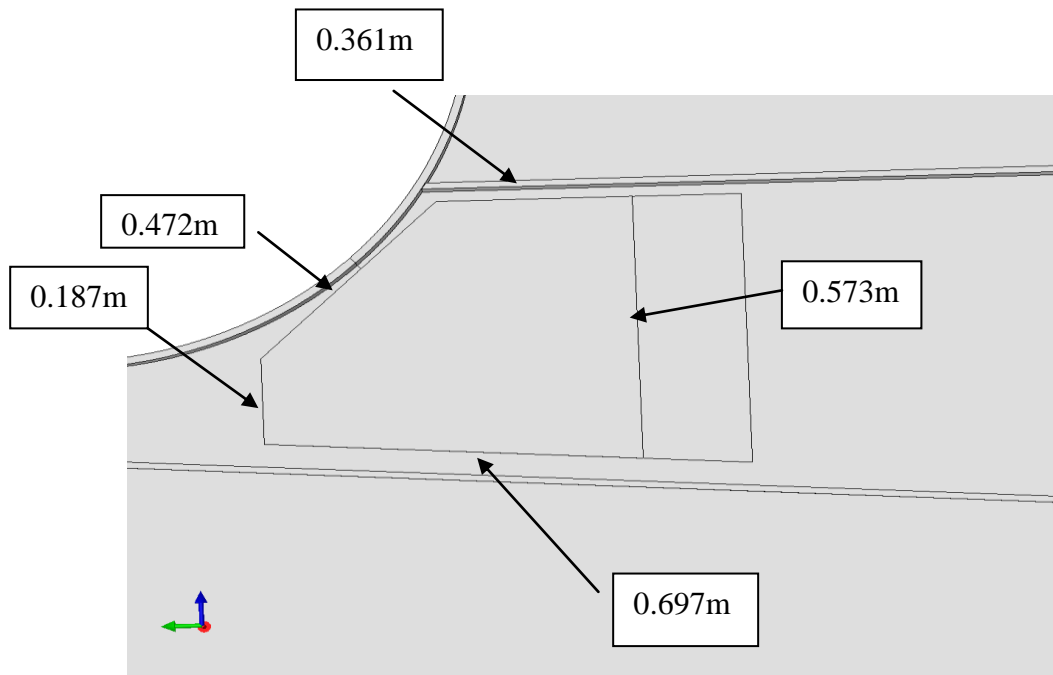
#### 4.3.1.1 Παραμετροποίηση ως προς τη γεωμετρία του επιθέματος

Η πρώτη γεωμετρία που χρησιμοποιήθηκε για το επίθεμα φαίνεται στο σχήμα 4.51. Το επίθεμα σχεδιάστηκε με τη λογική ότι οι πλευρές AB και ΓΔ θα βρίσκονται όσο το δυνατόν κοντά στα εγκάρσια ενισχυτικά και θα είναι παράλληλες σε αυτά. Επιπλέον, η απόσταση του σημείου Z (μέτωπο της ρωγμής) από τη πλευρά ΒΓ καθώς και η πλευρά ΒΓ είναι περίπου τρία μήκη ρωγμής. Τέλος, η απόσταση ΑΗ είναι περίπου ίση με την απόσταση ΗΕ.



Σχήμα 4.51: Πρώτη γεωμετρία του επιθέματος.

Η δεύτερη γεωμετρία του επιθέματος ήταν σχεδόν ίδια με τη πρώτη με τη μόνη διαφορά ότι μειώθηκε η μία διάστασή του κατά 200mm. Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται η δεύτερη γεωμετρία του επιθέματος σε σχέση με τη πρώτη (σχήμα 4.52).



**Σχήμα 4.52:** Δεύτερη γεωμετρία του επιθέματος.

Όπως ήδη αναφέρθηκε έγινε παραμετροποίηση του κάθε επιθέματος με βάση τις μηχανικές ιδιότητες διαφορετικών ινών και ρητινών που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή του, καθώς και διαφορετικού συντελεστή ακαμψίας SR. Οι ιδιότητες του χάλυβα, των κολλητικών μέσων που χρησιμοποιήθηκαν και οι ιδιότητες των επιθεμάτων [21] φαίνονται στους πίνακες 4.1, 4.2 και 4.3 αντίστοιχα.

**Πίνακας 4.1:** Μηχανικές Ιδιότητες Χάλυβα

Material	E (MPa)	$\nu$	$\sigma_o$ (MPa)
Steel	207000	0.33	235

**Πίνακας 4.2:** Μηχανικές Ιδιότητες Κολλητικού μέσου

Material	E (MPa)	$\nu$
Vinylester	3050	0.35
Epoxy	3450	0.35



**Πίνακας 4.3:** Μηχανικές Ιδιότητες Σύνθετου Επιθέματος

Material	$E_x$ (MPa)	$E_y$ (MPa)	$E_z$ (MPa)	$\nu_{xy}$	$\nu_{yz}$	$\nu_{xz}$	$G_{xy}$ (MPa)	$G_{yz}$ (MPa)	$G_{xz}$ (MPa)
VI-CV <sup>1</sup>	102600	7600	7600	0.488	0.919	0.488	4500	1981	4500
HLU-CE <sup>2</sup>	38700	6500	6500	0.355	0.518	0.355	1700	2142	1700

Όσο αφορά το πλέγμα στοιχείων στο επίθεμα, παρέμεινε ακριβώς ίδιο με αυτό του σχήματος 4.46. Επιπλέον χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα στοιχεία κατά το πάχος του επιθέματος και ένα στοιχείο κατά το πάχος του κολλητικού στρώματος σε όλες τις περιπτώσεις. Η ρωγμή θεωρείται ότι διαδίδεται και στο κολλητικό στρώμα το οποίο αστοχεί και αυτό κατά μήκος της ρωγμής.

Τα επιθέματα μοντελοποιήθηκαν επίσης και με κάποιο συντελεστή ακαμψίας του επιθέματος προς τη χαλύβδινη πλάκα, που ήταν αυτός που όρισε το πάχος τους. Ο συντελεστής ακαμψίας (SR) ορίζεται ως:

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

Όπου,

$E_p$ : Μέτρο ελαστικότητας επιθέματος

$E_s$ : Μέτρο ελαστικότητας χαλύβδινης πλάκας

$t_p$ : πάχος επιθέματος

$t_s$ : πάχος χαλύβδινης πλάκας

Με δεδομένο συντελεστή ακαμψίας και λύνοντας τη παραπάνω σχέση ως προς  $t_s$  προκύπτει το πάχος του επιθέματος:

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

<sup>1</sup> Vacuum Infusion – Carbon Vinylester

<sup>2</sup> Hand Lay Up – Carbon Epoxy

### Μέθοδος VI-CV

Για  $SR=0.4$  προκύπτει  $t_p=11,298\text{mm} \rightarrow t_p \approx 11,3\text{mm}$

Για  $SR=0.6$  προκύπτει  $t_p=11,947\text{mm} \rightarrow t_p \approx 17\text{mm}$

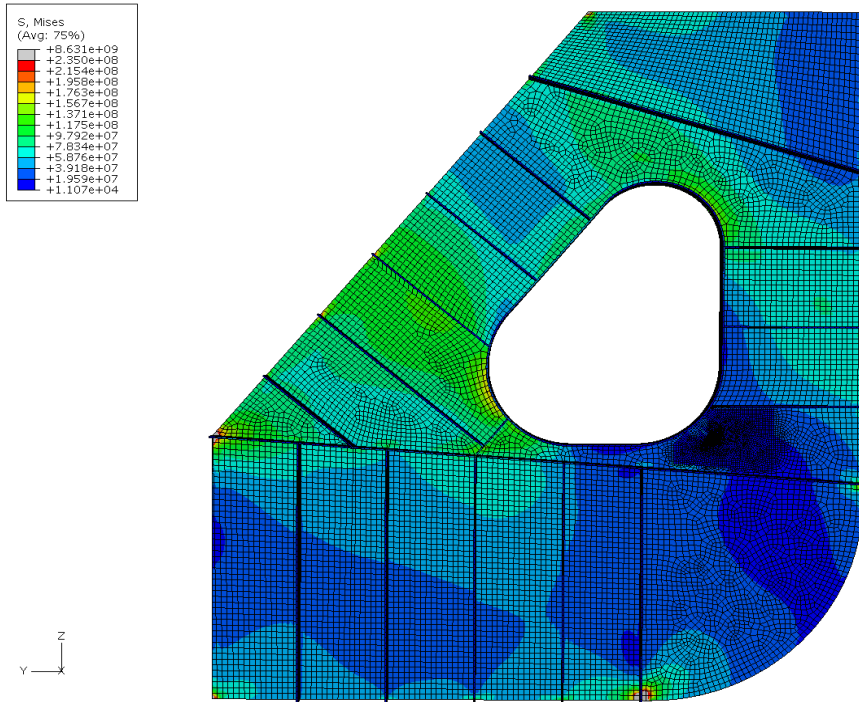
### Μέθοδος HLU-CE

Για  $SR=0.2$  προκύπτει  $t_p=14,97\text{mm} \rightarrow t_p \approx 15\text{mm}$

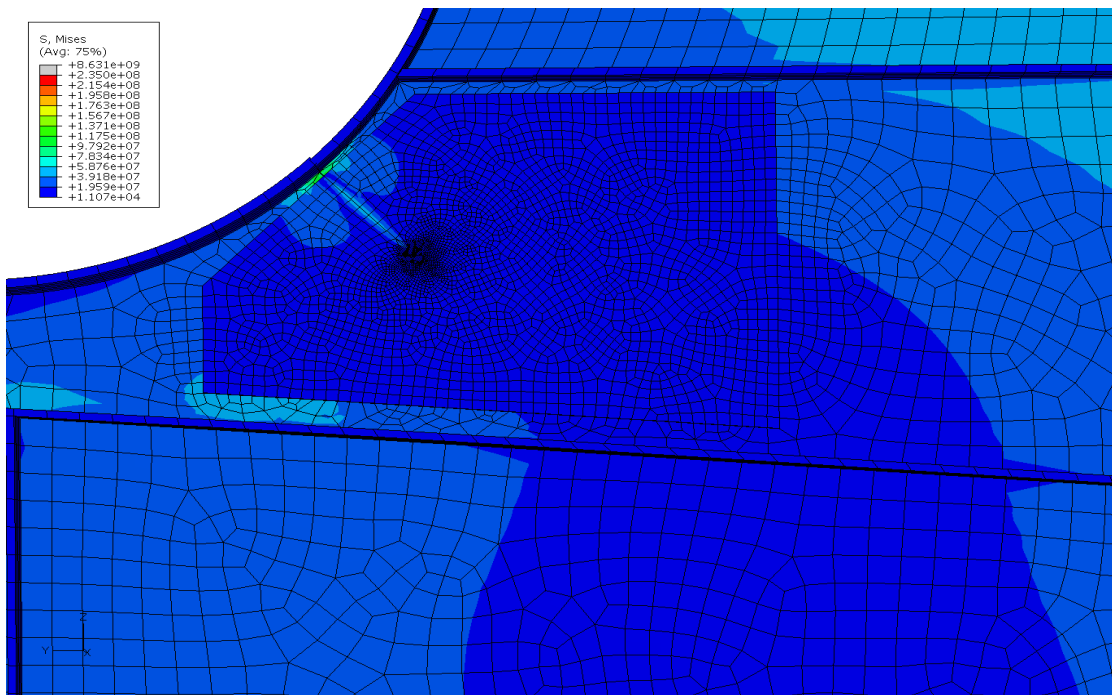
Για  $SR=0.4$  προκύπτει  $t_p=29,95\text{mm} \rightarrow t_p \approx 30\text{mm}$

Οι παραπάνω συντελεστές  $SR$  επιλέχθηκαν με τη λογική να μην οδηγηθούμε σε ένα επίθεμα πολύ μεγάλου πάχους. Επιπλέον, για να υπάρξει σύγκριση των αποτελεσμάτων της κατανομής του ΣΕΤ μεταξύ των δύο μεθόδων, επιλέχθηκε ο ένας εκ των δύο συντελεστών  $SR$  να είναι κοινός.

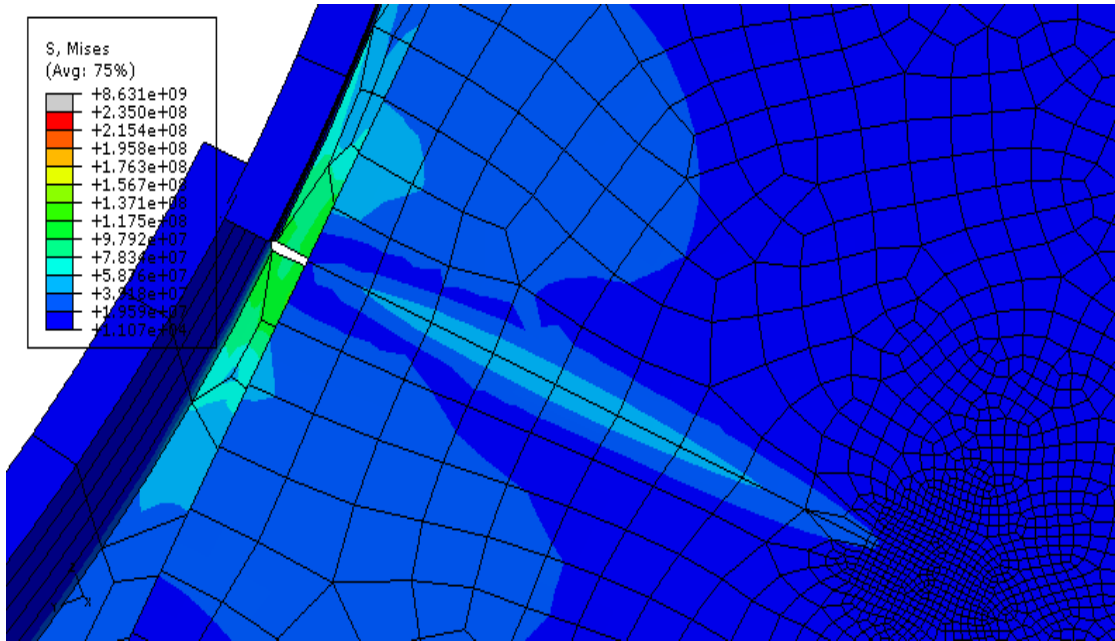
Ακολουθούν χαρακτηριστικά τα σχήματα 4.53 έως 4.57 στα οποία φαίνεται το εντατικό πεδίο τάσεων Von Mises στο HTF μετά την εφαρμογή του επιθέματος στη περιοχή κοντά στη ρωγμή.



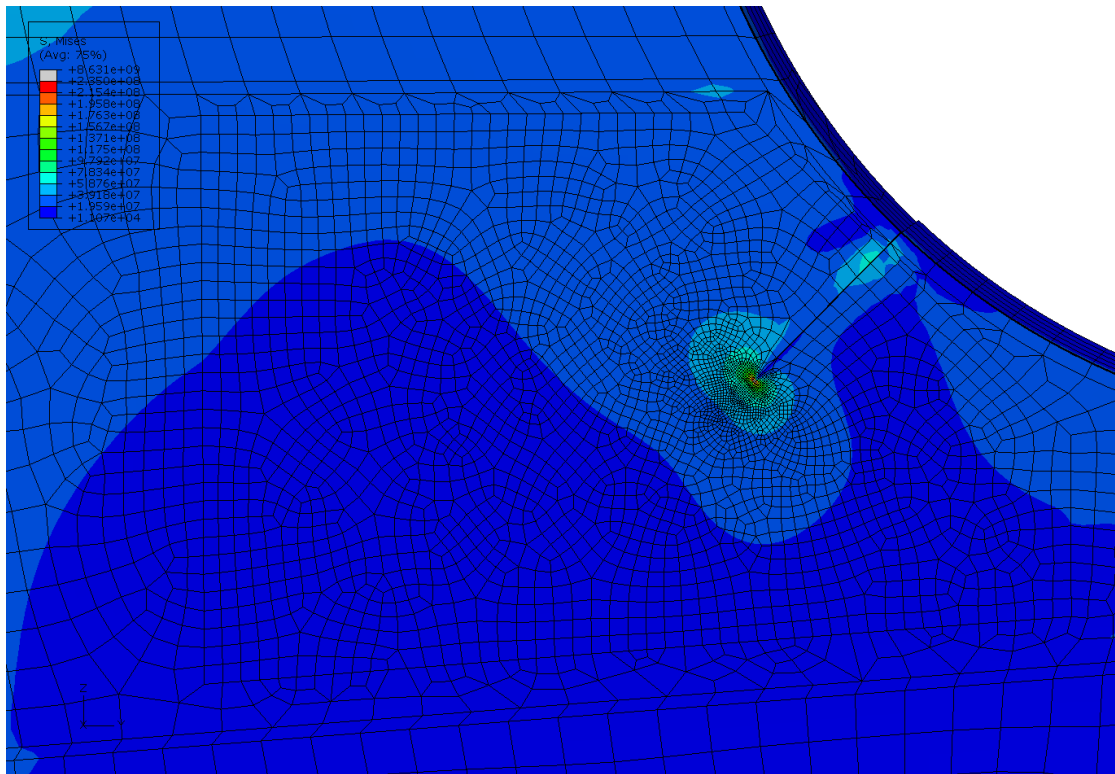
**Σχήμα 4.53:** Εντατικό πεδίο τάσεων Von Mises μετά την εφαρμογή του επιθέματος.



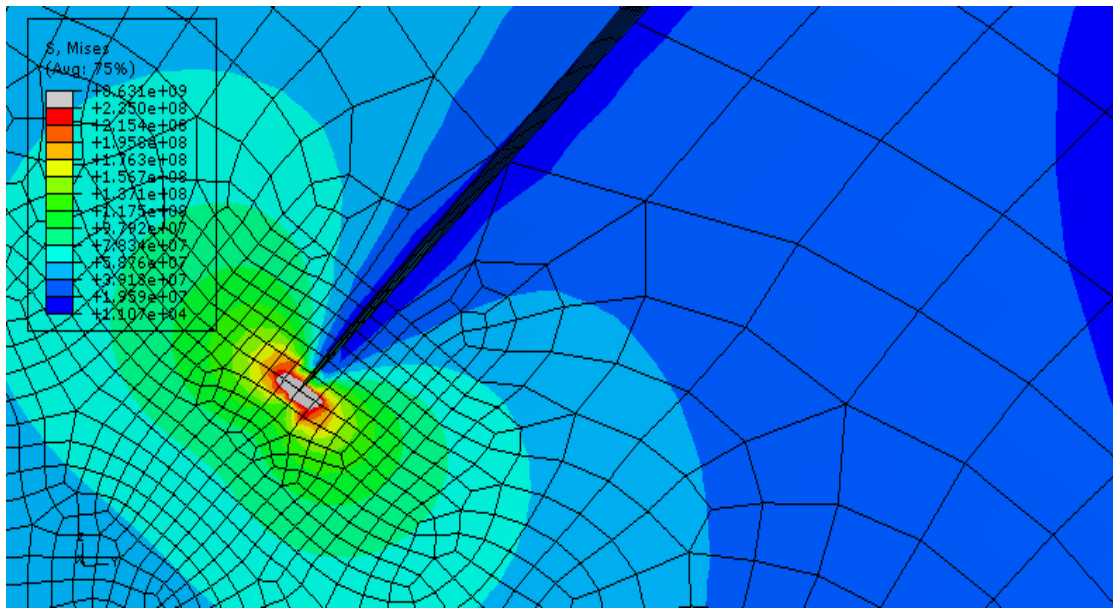
**Σχήμα 4.54:** Εντατικό πεδίο τάσεων Von Mises μετά την εφαρμογή του επιθέματος.



Σχήμα 4.55: Εντατικό πεδίο τάσεων Von Mises μετά την εφαρμογή του επιθέματος.

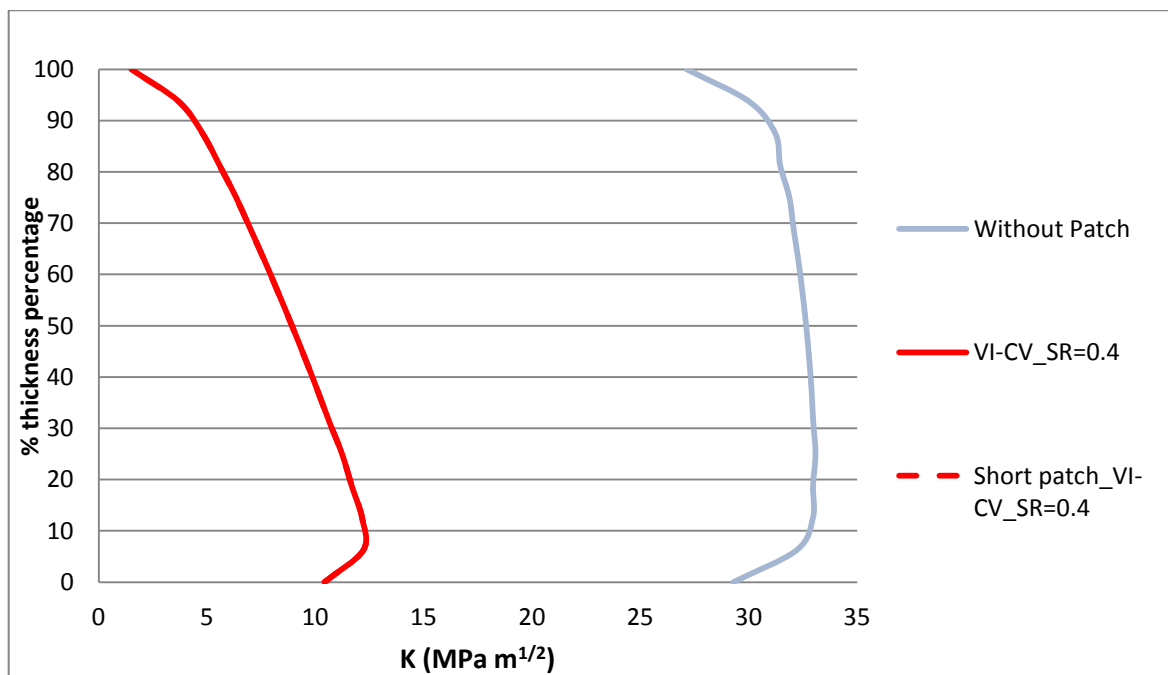


Σχήμα 4.56: Εντατικό πεδίο τάσεων Von Mises μετά την εφαρμογή του επιθέματος (ελεύθερη πλευρά).

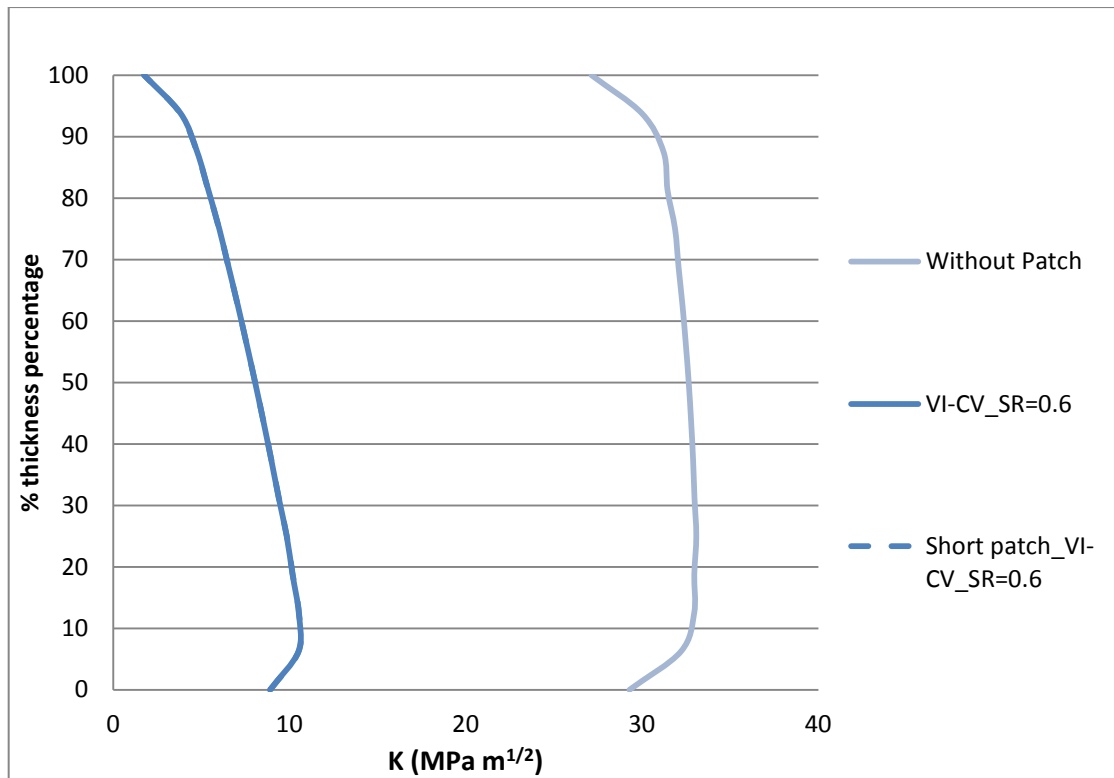


**Σχήμα 4.57:** Εντατικό πεδίο τάσεων Von Mises μετά την εφαρμογή του επιθέματος (ελεύθερη πλευρά).

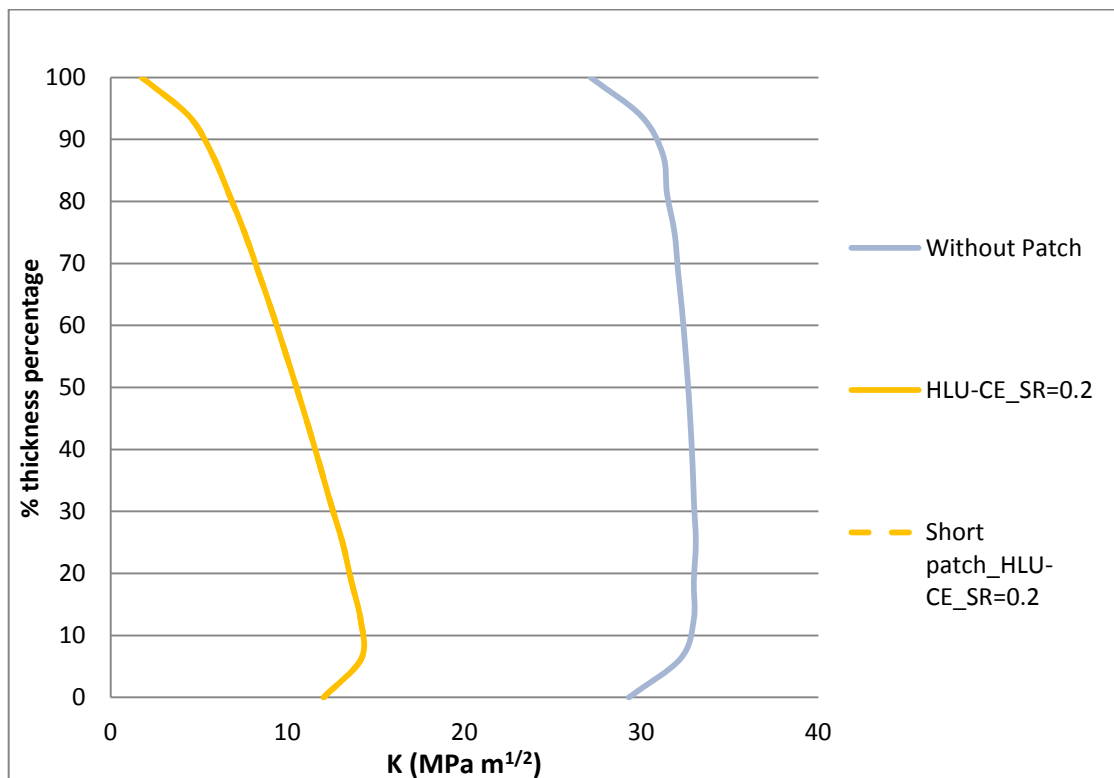
Στη συνέχεια, παρατίθενται οι κατανομές του ΣΕΤ κατά το πάχος της χαλύβδινης πλάκας σε όλες τις προαναφερθείσες περιπτώσεις (σχήματα 4.58 έως 4.61). Από τα παρακάτω διαγράμματα συμπεραίνουμε μείωση του ΣΕΤ της τάξης του 50% σε όλες σχεδόν τις περιπτώσεις. Επιπλέον, καταλήγουμε στο ότι η αλλαγή της γεωμετρίας του επιθέματος δεν επιφέρει καμία ουσιαστική αλλαγή στη κατανομή του ΣΕΤ.



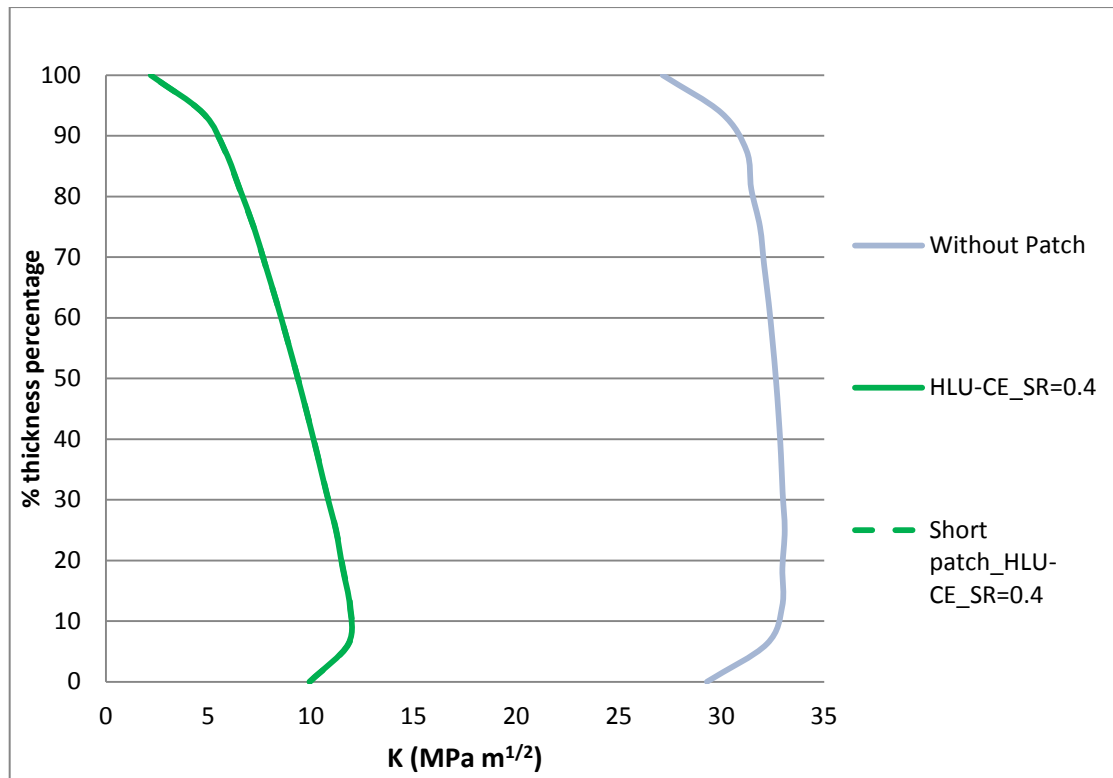
**Σχήμα 4.58:** Κατανομή του ΣΕΤ κατά το πάχος της χαλύβδινης πλάκας



**Σχήμα 4.59:** Κατανομή του ΣΕΤ κατά το πάχος της χαλύβδινης πλάκας

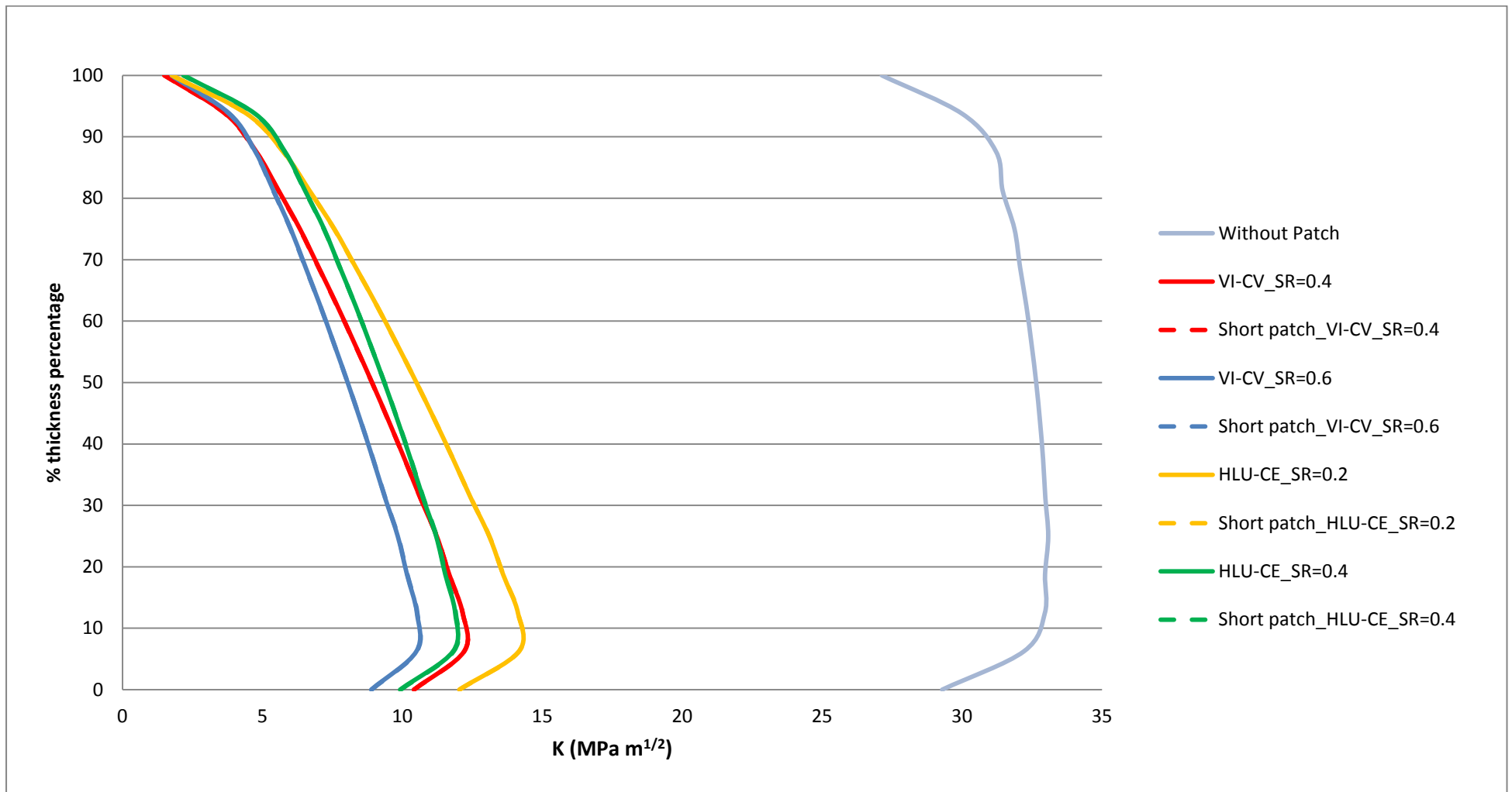


**Σχήμα 4.60:** Κατανομή του ΣΕΤ κατά το πάχος της χαλύβδινης πλάκας



**Σχήμα 4.61:** Κατανομή του ΣΕΤ κατά το πάχος της χαλύβδινης πλάκας

Τέλος ακολουθεί συγκεντρωτικό διάγραμμα κατανομών των ΣΕΤ όλων των περιπτώσεων για τη ρωγμή στη περιοχή 1 (σχήμα 4.62). Παρατηρούμε ότι σε όλες τις περιπτώσεις υπάρχει αισθητή μείωση του ΣΕΤ. Όπως ήταν αναμενόμενο, σε κάθε μία από τις μεθόδους έχουμε μεγαλύτερη μείωση του ΣΕΤ όταν έχουμε μεγαλύτερο συντελεστή ακαμψίας (SR). Όσον αφορά τη σύγκριση μεταξύ διαφορετικής μεθόδου επίστρωσης αλλά ίδιου συντελεστή ακαμψίας (SR=0.4), οι διαφορές στη κατανομή του ΣΕΤ είναι πολύ μικρές. Συμπερασματικά, όποιο επίθεμα και να χρησιμοποιήσουμε, η διαφορά στη γεωμετρία, στη μέθοδο επίστρωσης και στους συντελεστές ακαμψίας, θα είναι μικρή στην κατανομή του ΣΕΤ.



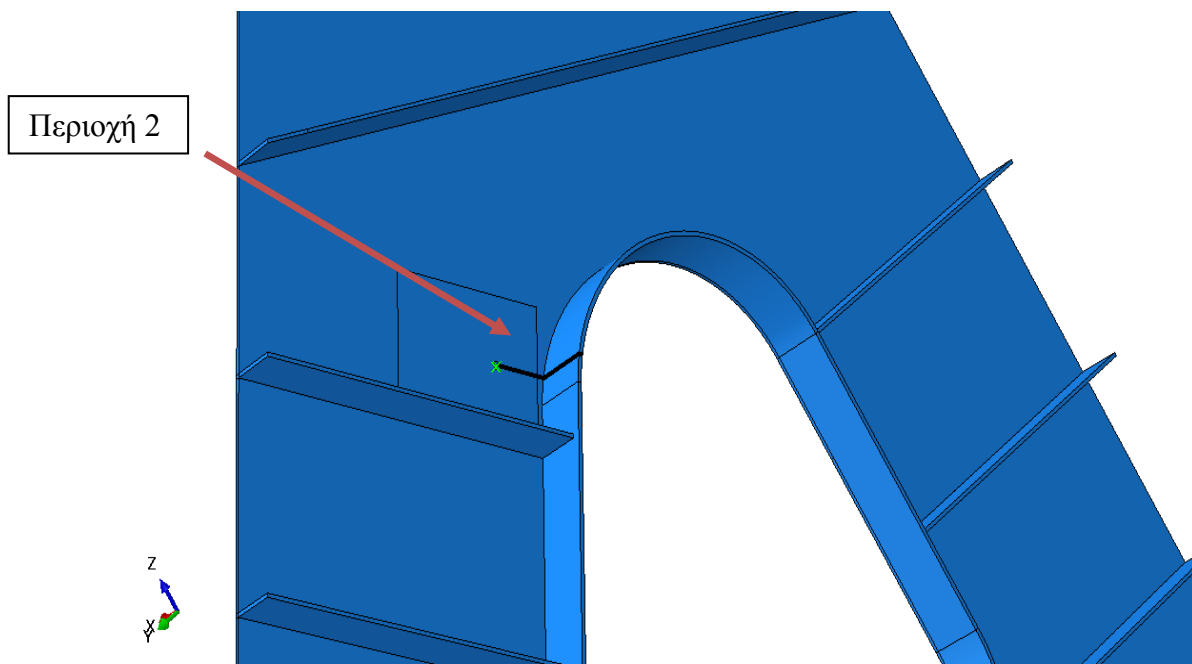
**Σχήμα 4.62:** Συγκεντρωτικό διάγραμμα κατανομών των ΣΕΤ όλων των περιπτώσεων για τη ρωγμή στη περιοχή 1.



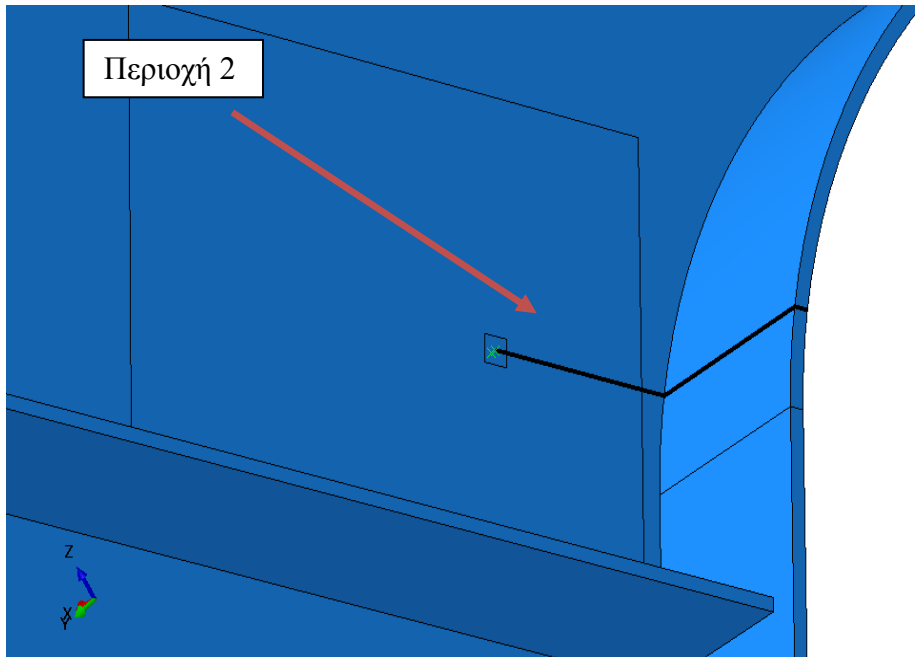
## 4.3.2 Περιοχή 2

### 4.3.2.1 Παραμετροποίηση ως προς το μήκος της ρωγμής

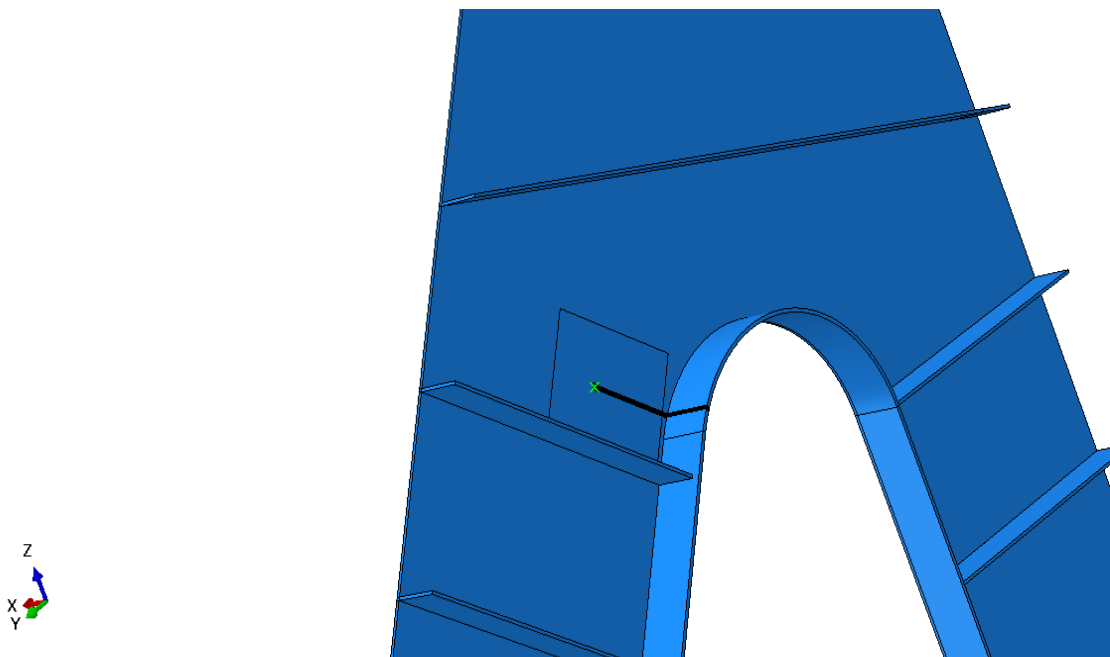
Η ρωγμή που μοντελοποιήθηκε στη περιοχή 2 είχε παράμετρο το μήκος της ρωγμής, που αρχικά ήταν  $a=200\text{mm}$  και στη συνέχεια  $400\text{mm}$ . Βρίσκεται στο επίπεδο της πλάκας, συνεχίζεται στην ανθρωποθυρίδα και σχεδιάστηκε παράλληλη προς το εγκάρσιο ενισχυτικό που βρίσκεται αριστερά της κοιτώντας το μοντέλο από τη πλευρά των εγκάρσιων ενισχυτικών. Για λόγους σύγκρισης θα παρατίθενται εναλλάξ τα διαγράμματα που αφορούν τις διαφορετικού μήκους ρωγμές. Στα σχήματα 4.63 και 4.65 φαίνονται οι ραφές των ρωγμών ( $200\text{mm}$  και  $400\text{mm}$ ) όπως αυτές σχεδιάστηκαν και στα σχήματα 4.64 και 4.66 μία μεγέθυνση της περιοχής. Όσο αναφορά το πλέγμα των στοιχείων, όπως και στη περιοχή 1, σχεδιάστηκε μία τετράγωνη περιοχή στο μέτωπο της ρωγμής, ακμής  $26\text{mm}$ . Το πλέγμα των στοιχείων στη περιοχή κοντά στη ρωγμή φαίνεται στο σχήμα 4.67 ( $a=200\text{mm}$ ) και στο σχήμα 4.68 ( $a=400\text{mm}$ ). Το μέγεθος των στοιχείων μέσα στη τετράγωνη περιοχή είναι περίπου  $2\text{mm}$  και στη περιοχή που θα οριστεί στη συνέχεια το επίθεμα είναι  $20\text{mm}$ . Το γενικό μέγεθος στοιχείων (global mesh) παραμένει στα  $50\text{mm}$ . Στη συνέχεια παρατίθεται το πεδίο των τάσεων Von Mises στο HTF μοντέλο (σχήμα 4.69) και κοντά στη περιοχή της ρωγμής (σχήματα 4.70 έως 4.73) στην οποία βλέπουμε ξεκάθαρα τη συγκέντρωση των τάσεων στη ρωγμή και κυρίως στη περιοχή κοντά στο μέτωπό της και για τα δύο μήκη ρωγμών.



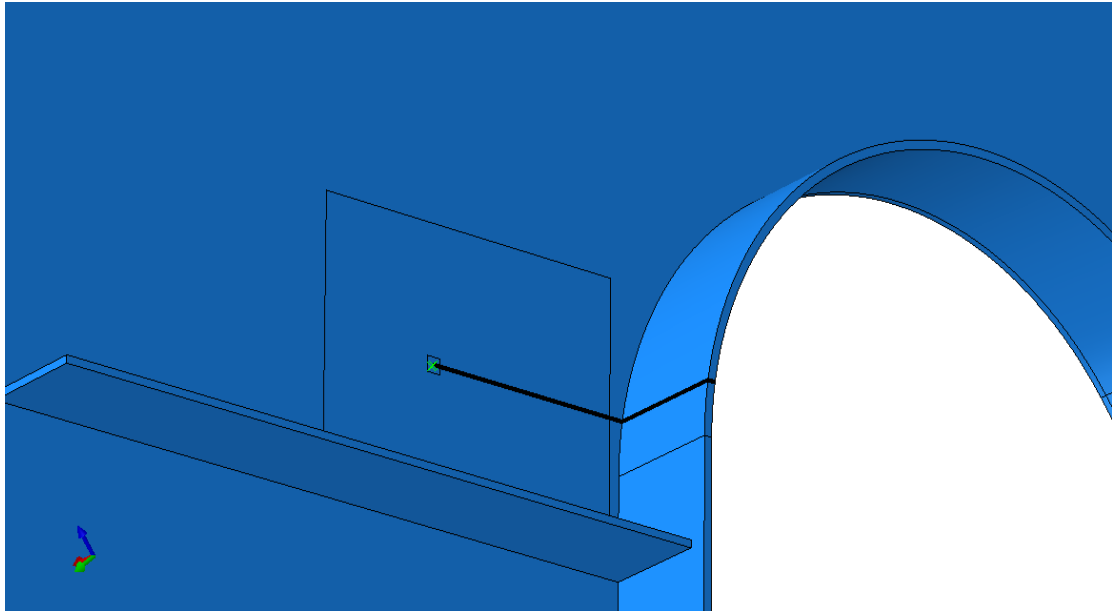
Σχήμα 4.63: Ραφή ρωγμής  $200\text{mm}$  στη περιοχή 1



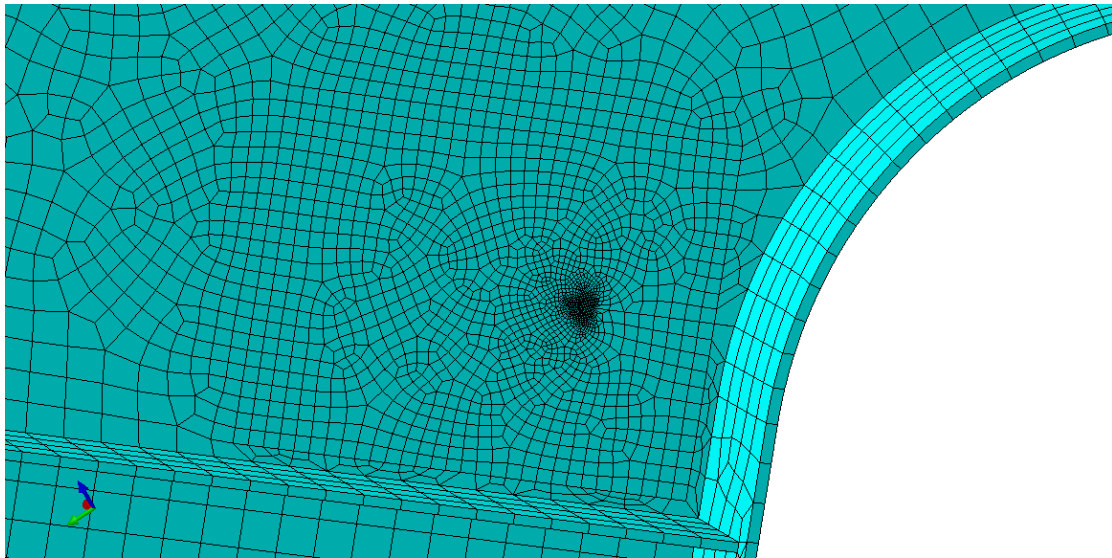
**Σχήμα 4.64:** Μεγέθυνση στη ραφή ρωγμής 200mm στη περιοχή 1



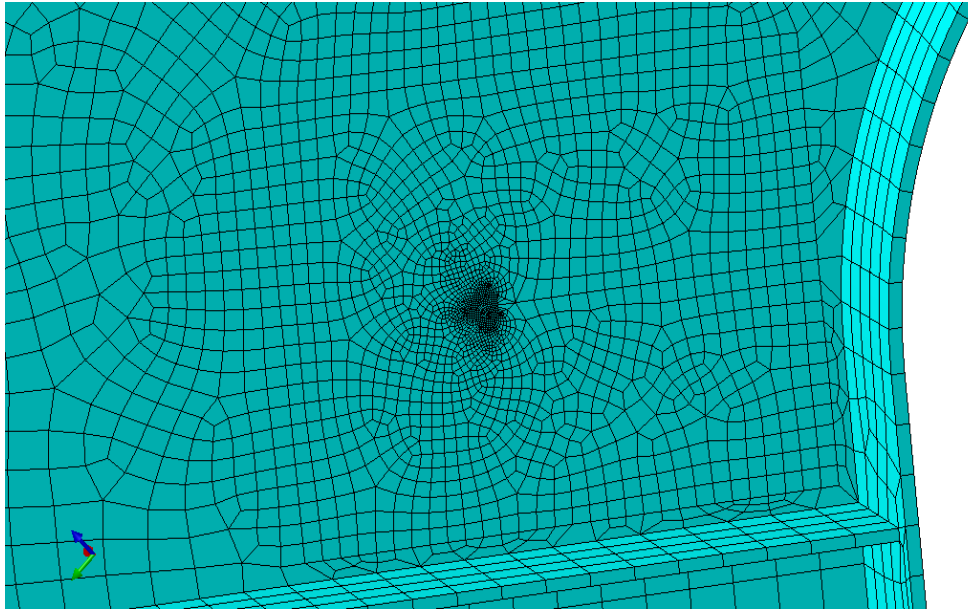
**Σχήμα 4.65:** Ραφή ρωγμής 400mm στη περιοχή 1



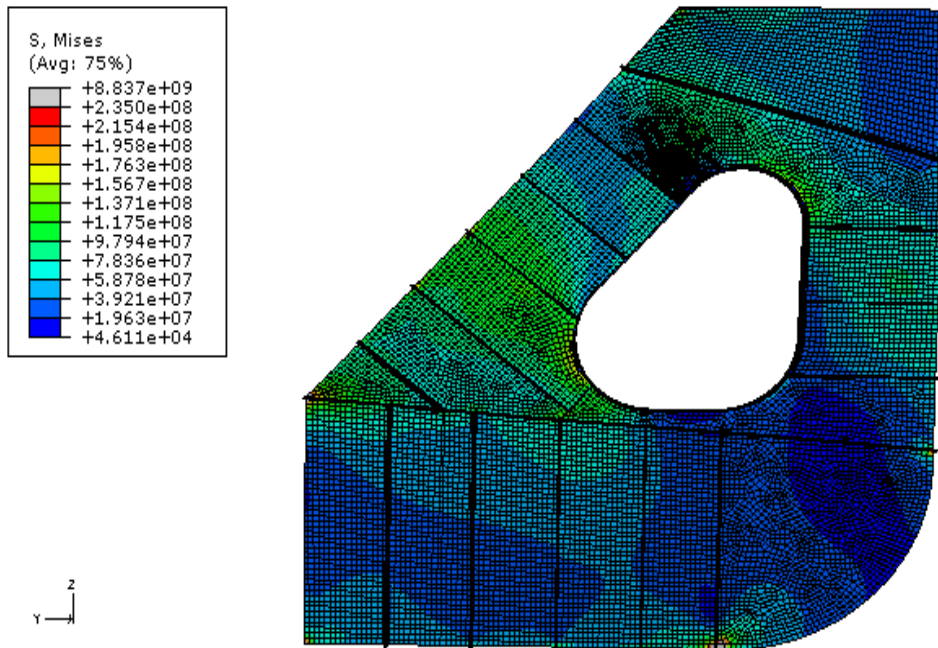
**Σχήμα 4.66:** Μεγέθυνση στη ραφή ρωγμής 400mm στη περιοχή 1



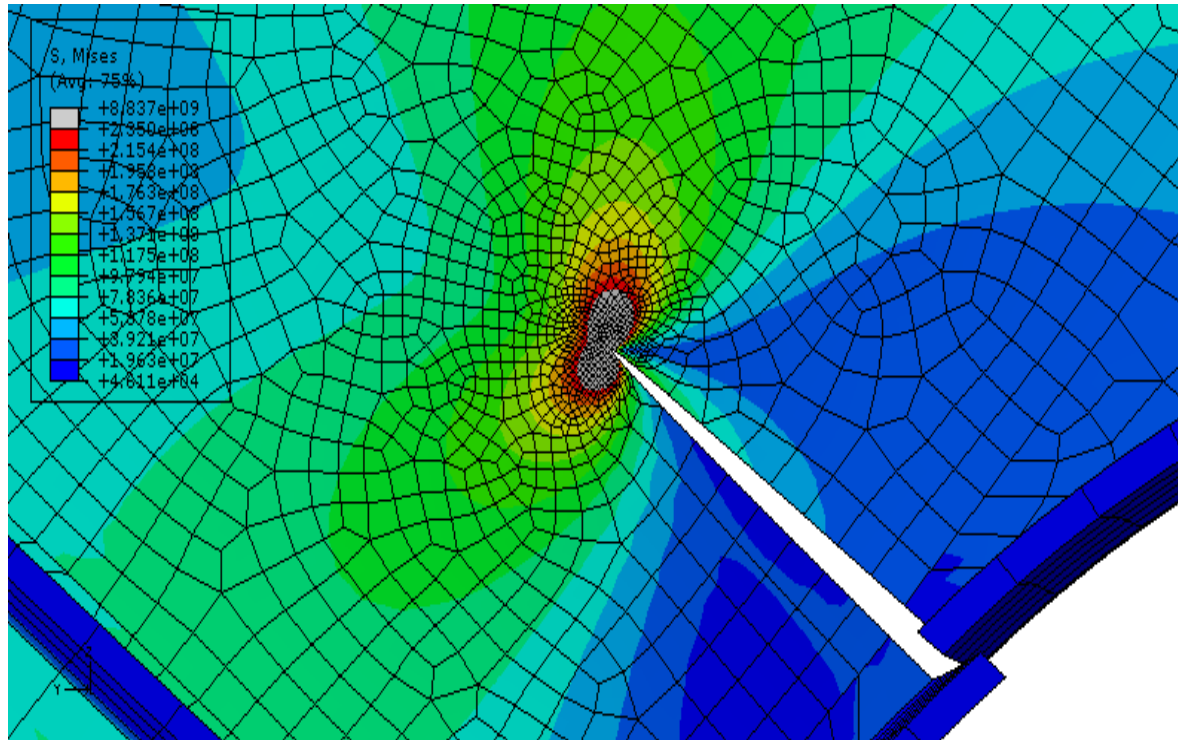
**Σχήμα 4.67:** Πλέγμα στοιχείων ρωγμής 200mm στη περιοχή 2



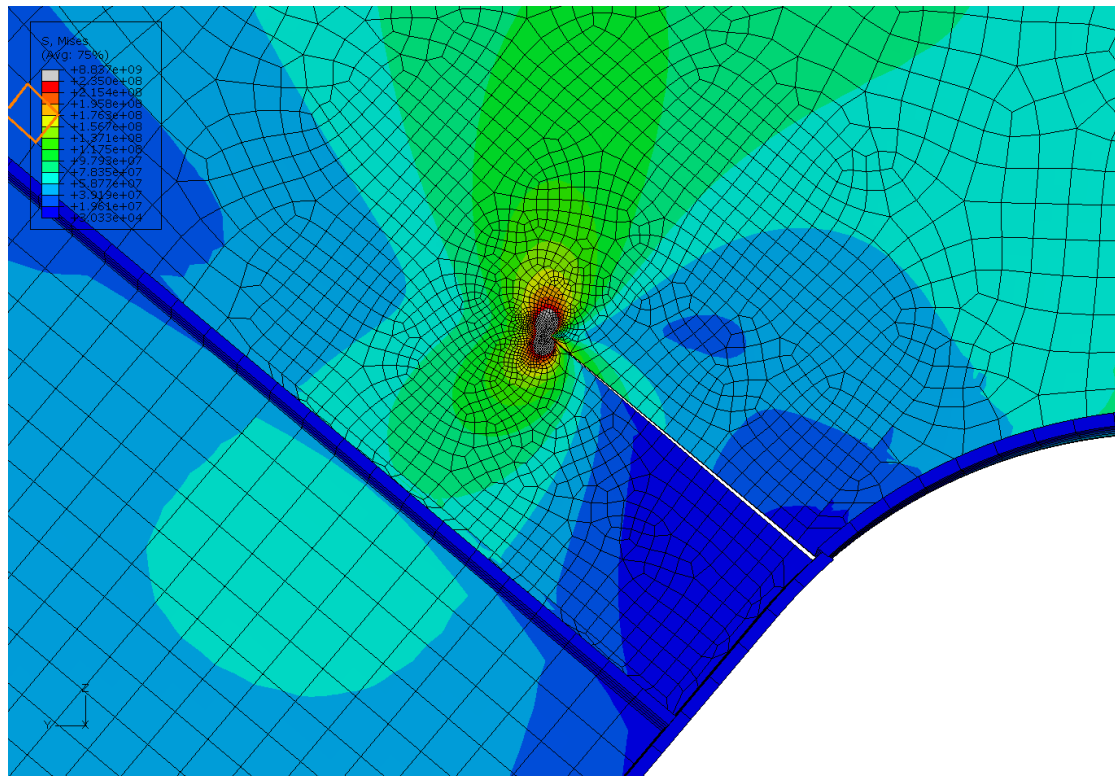
**Σχήμα 4.68:** Πλέγμα στοιχείων ρωγμής 400mm στη περιοχή 2



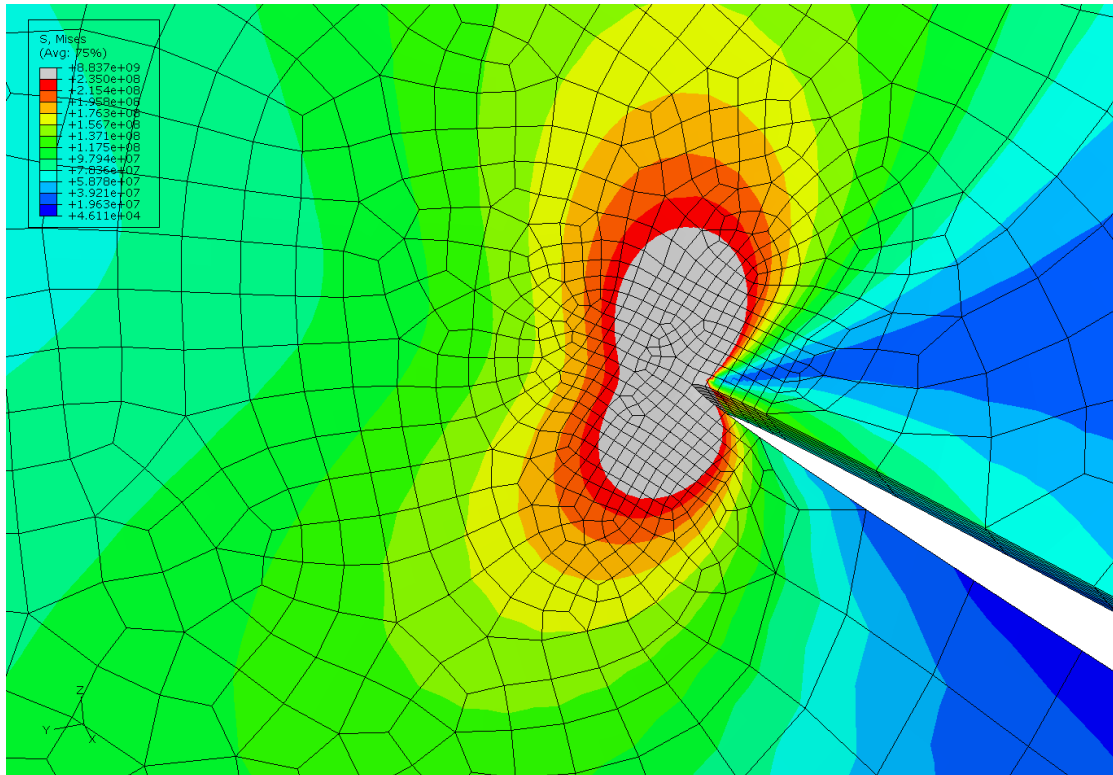
**Σχήμα 4.69:** Εντατικό πεδίο τάσεων Von Mises



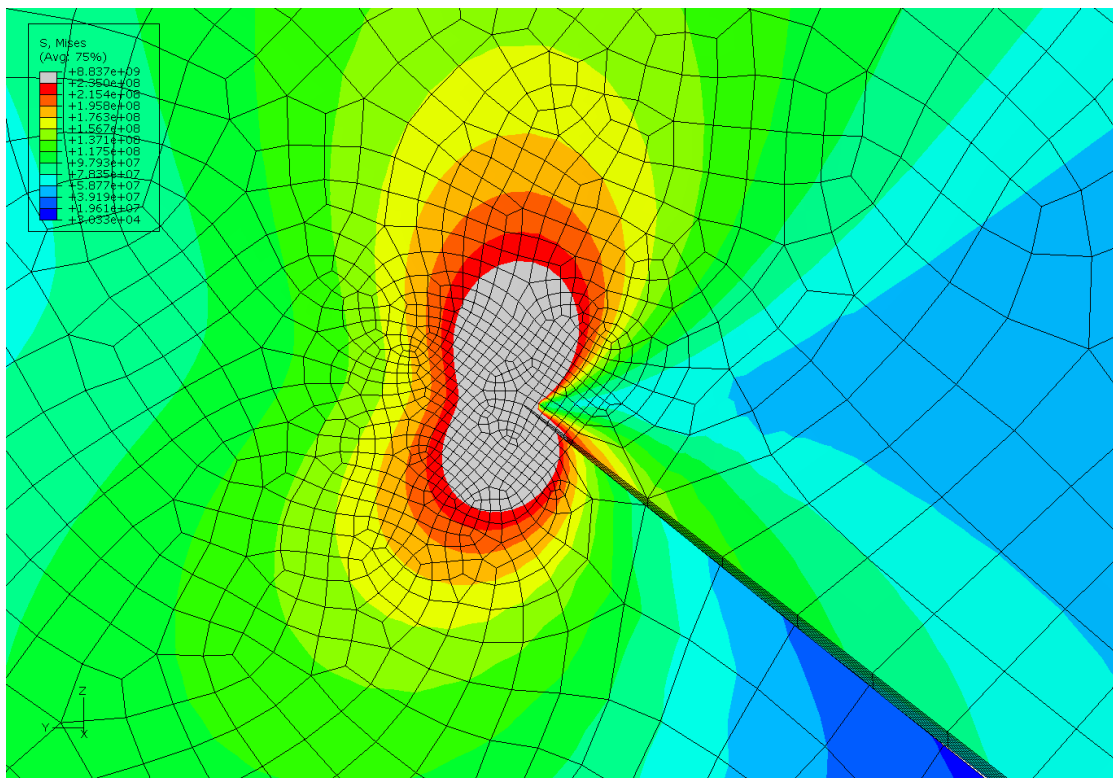
**Σχήμα 4.70:** Εντατικό πεδίο τάσεων Von Mises κοντά στη ρωγή 200mm



**Σχήμα 4.71:** Εντατικό πεδίο τάσεων Von Mises κοντά στη ρωγή 400mm

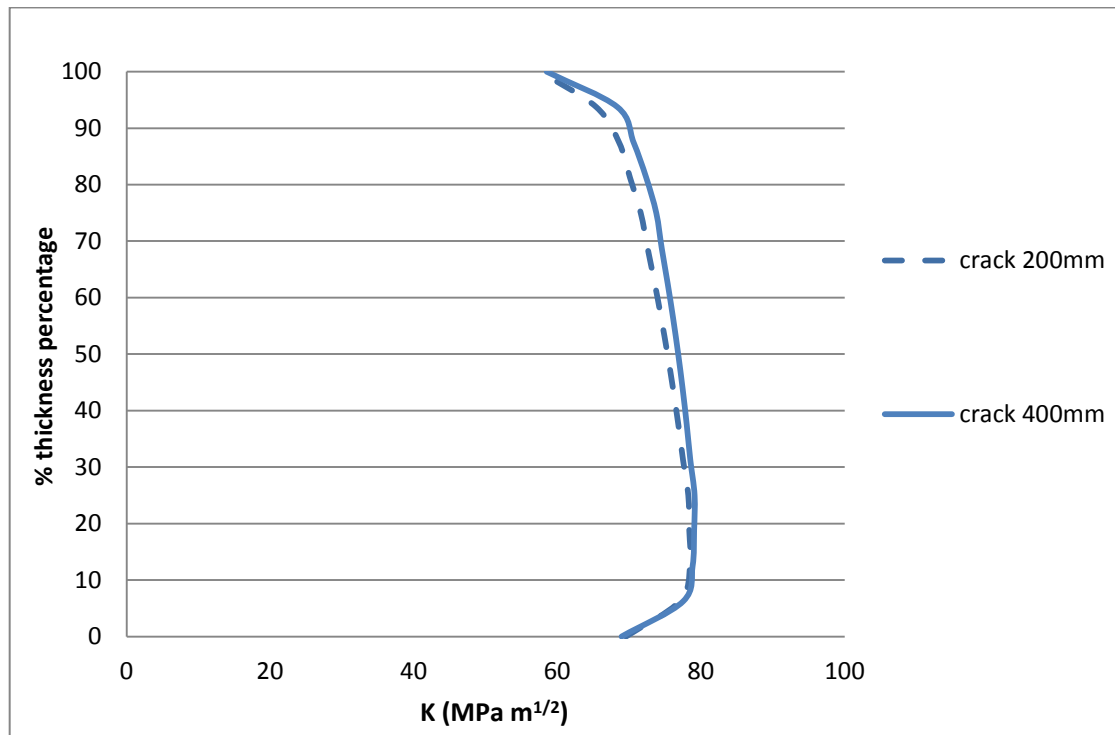


**Σχήμα 4.72:** Εντατικό πεδίο τάσεων Von Mises κοντά στη ρωγμή 200mm



**Σχήμα 4.73:** Εντατικό πεδίο τάσεων Von Mises κοντά στη ρωγμή 400mm

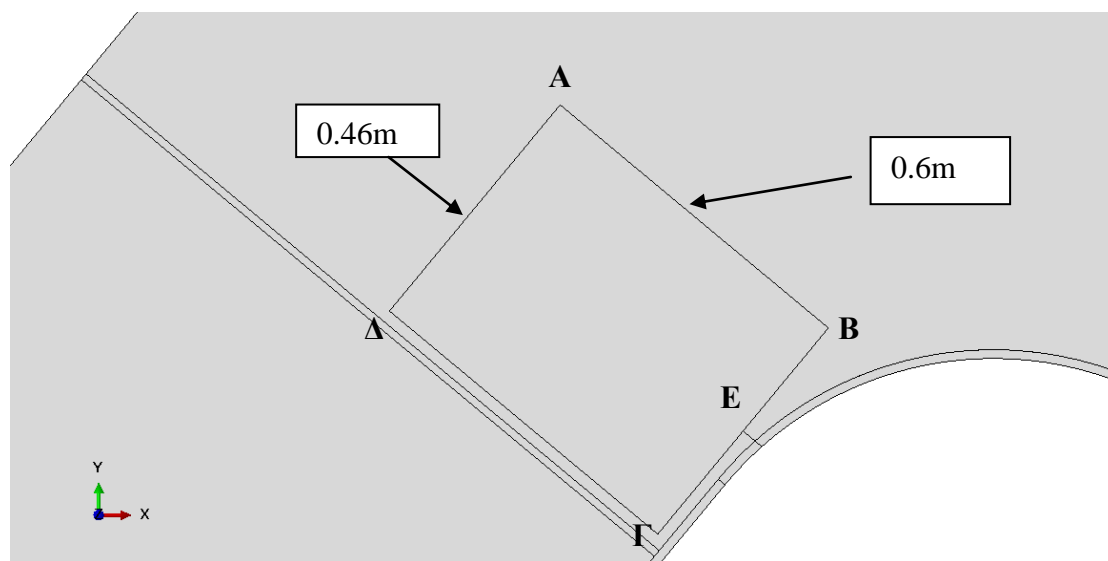
Τέλος ακολουθεί συγκεντρωτικό διάγραμμα κατανομών των ΣΕΤ χωρίς επίθεμα και για τα δύο μήκη ρωγμών (σχήμα 4.74).



**Σχήμα 4.74:** Κατανομή των ΣΕΤ χωρίς επίθεμα και για τα δύο μήκη ρωγμών.

## Γεωμετρία επιθέματος

Για τη περιοχή 2, η γεωμετρία που χρησιμοποιήθηκε για το επίθεμα από σύνθετα υλικά και για τα δύο μήκη ρωγμών φαίνεται στο σχήμα 4.75. Το επίθεμα σχεδιάστηκε με τη λογική ότι η πλευρά AB θα έχει μήκος ίσο με τρία μήκη ρωγμής (για  $a=200\text{mm}$ ) και θα παρέμενε ίδια και για τη περίπτωση της ρωγμής μήκους 400mm. Η πλευρά ΓΔ σχεδιάστηκε όσο κοντά γινόταν στο εγκάρσιο ενισχυτικό και παράλληλα σε αυτό. Τέλος, το μήκος ΕΓ ισούται με το μήκος ΕΒ.

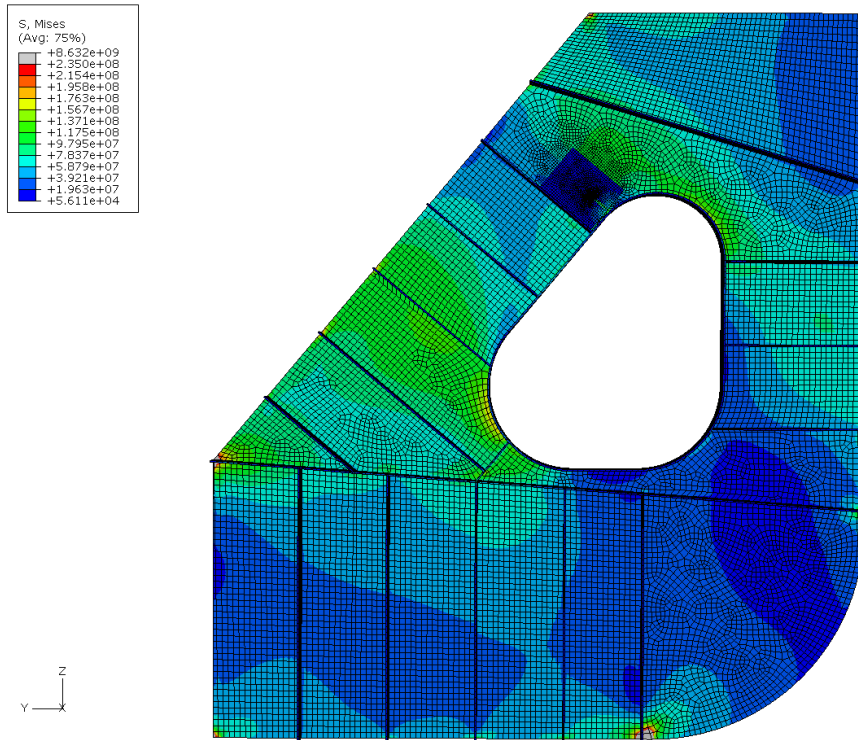


**Σχήμα 4.75:** Γεωμετρία του επιθέματος στη περιοχή 2.

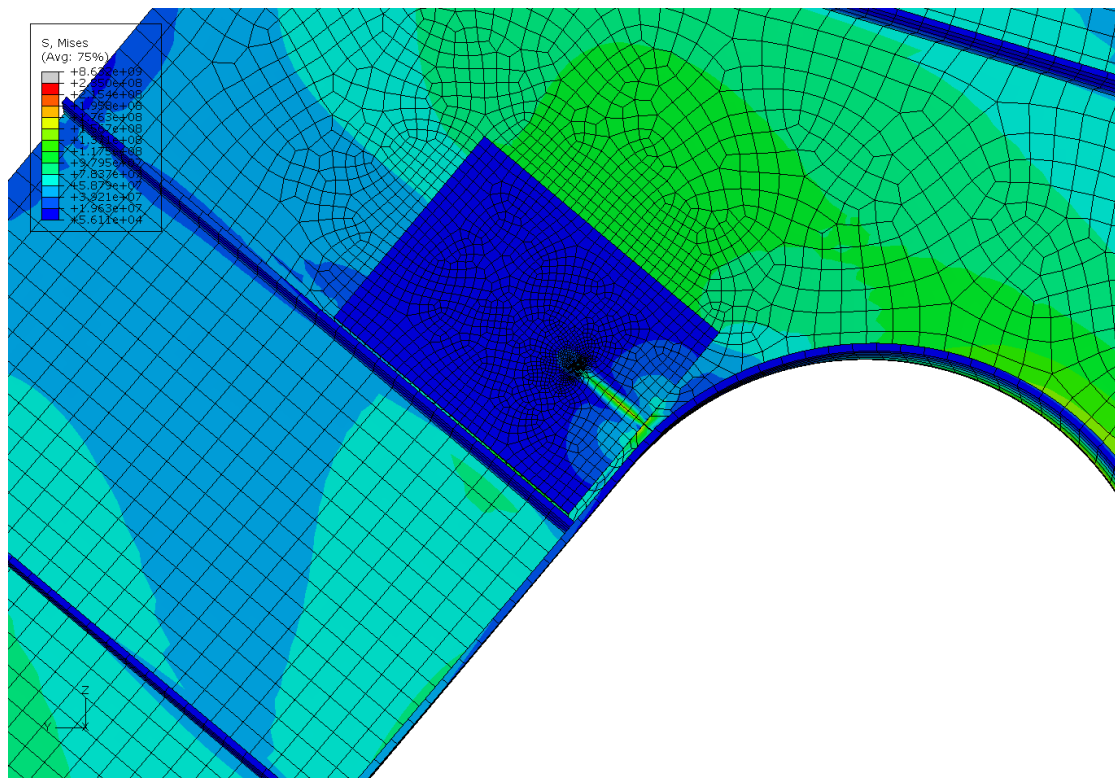
Οι ιδιότητες των επιθεμάτων και των κολλητικών μέσων που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ίδιες με αυτές της περιοχής 1 και φαίνονται στους πίνακες 4.2 και 4.3. Η παραμετροποίηση του πάχους του επιθέματος έγινε με βάση το συντελεστή ακαμψίας (SR) του επιθέματος προς τη χαλύβδινη πλάκα, όπως ακριβώς και στη περιοχή 1 (σελ 109 - 110).

Ακολουθούν χαρακτηριστικά τα σχήματα 4.76 έως 4.79 στα οποία φαίνεται το εντατικό πεδίο τάσεων Von Mises στο HTF μετά την εφαρμογή του επιθέματος στη περιοχή κοντά στη ρωγμή. Αρχικά παραθέτονται τα σχήματα για τη ρωγμή μήκους 200mm και μετά θα παρατεθούν για τη ρωγμή μήκους 400mm.

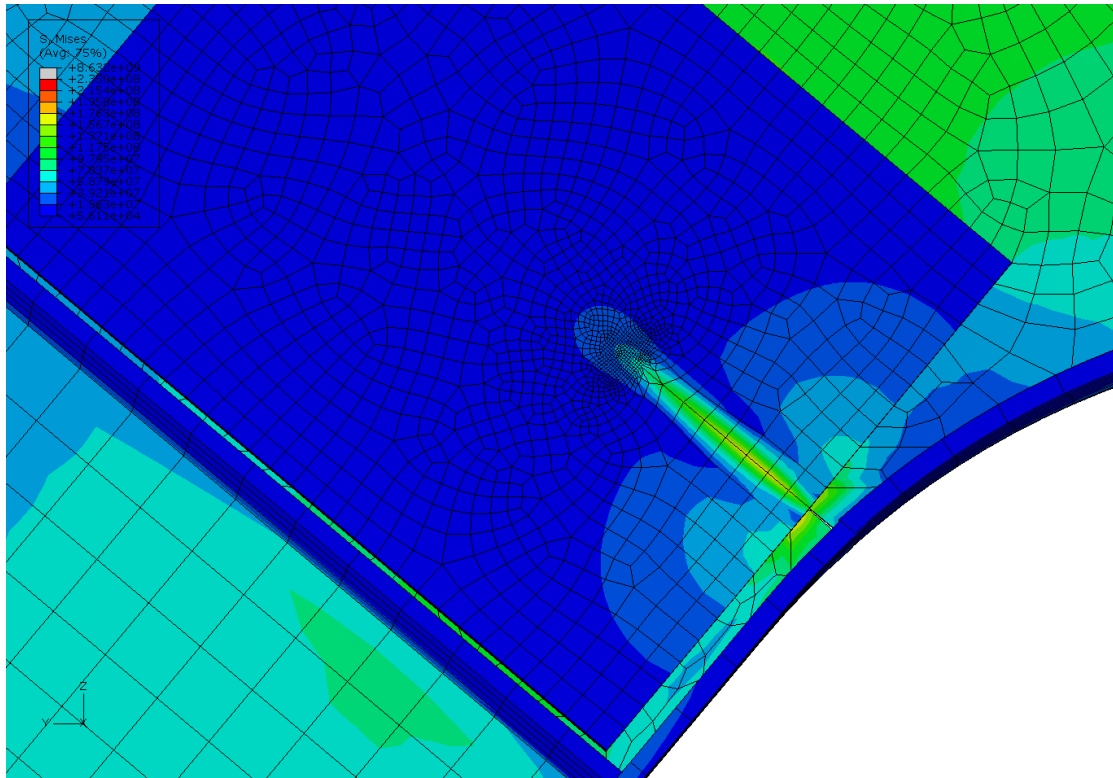




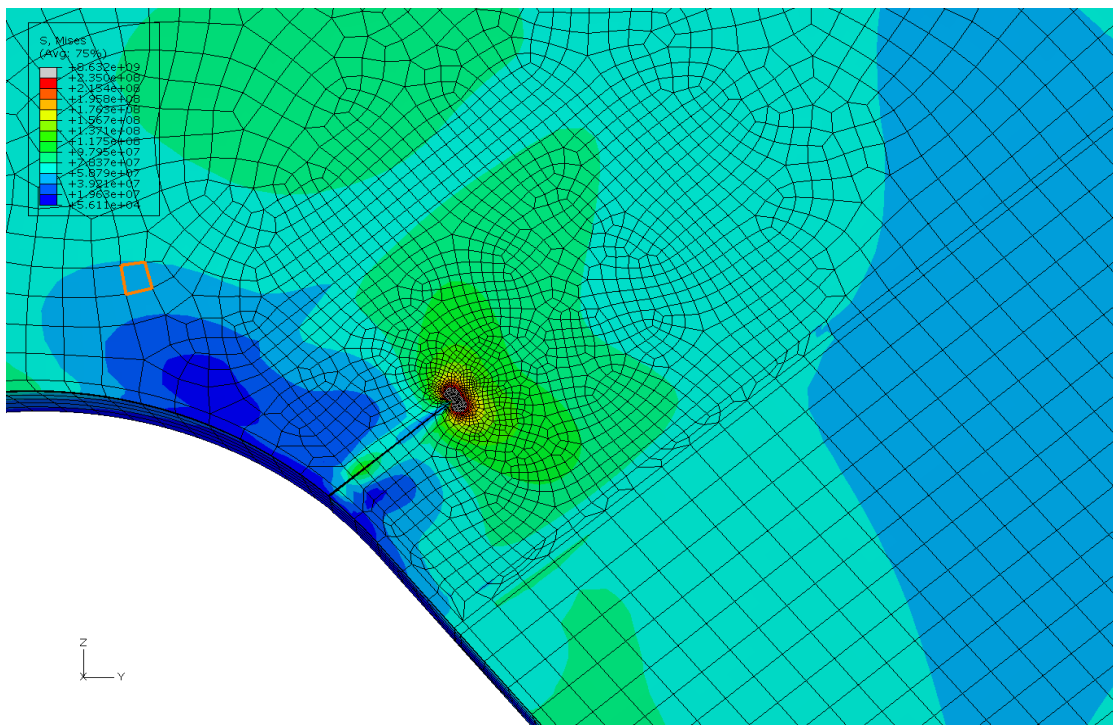
Σχήμα 4.76: Εντατικό πεδίο τάσεων Von Mises μετά την εφαρμογή του επιθέματος.



Σχήμα 4.77: Εντατικό πεδίο τάσεων Von Mises μετά την εφαρμογή του επιθέματος.

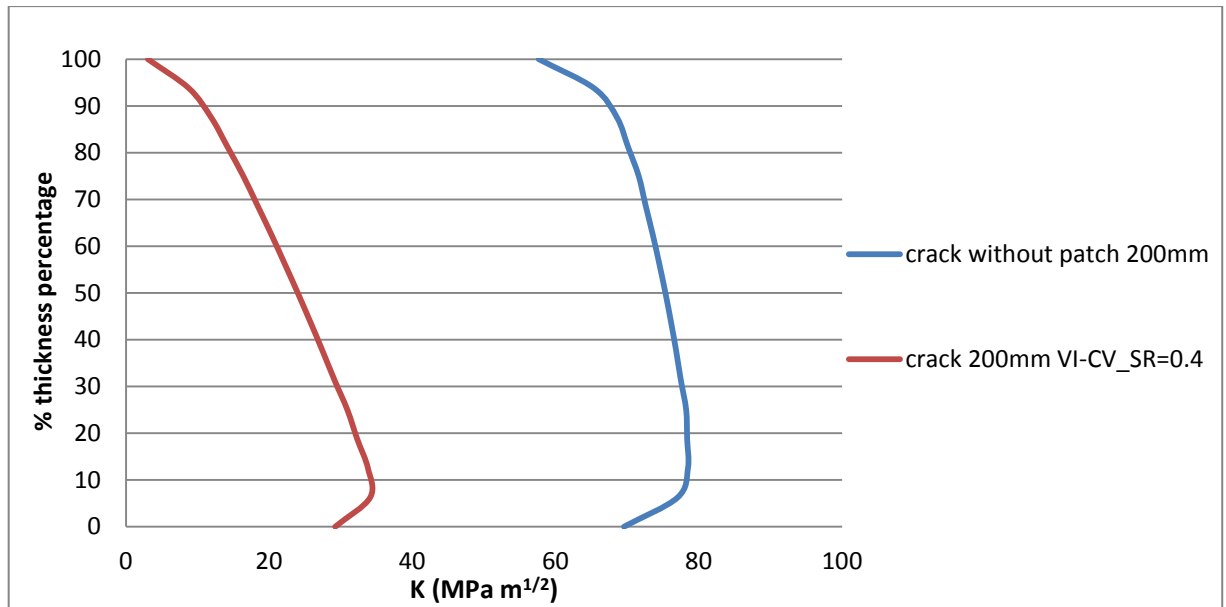


**Σχήμα 4.78:** Εντατικό πεδίο τάσεων Von Mises μετά την εφαρμογή του επιθέματος.

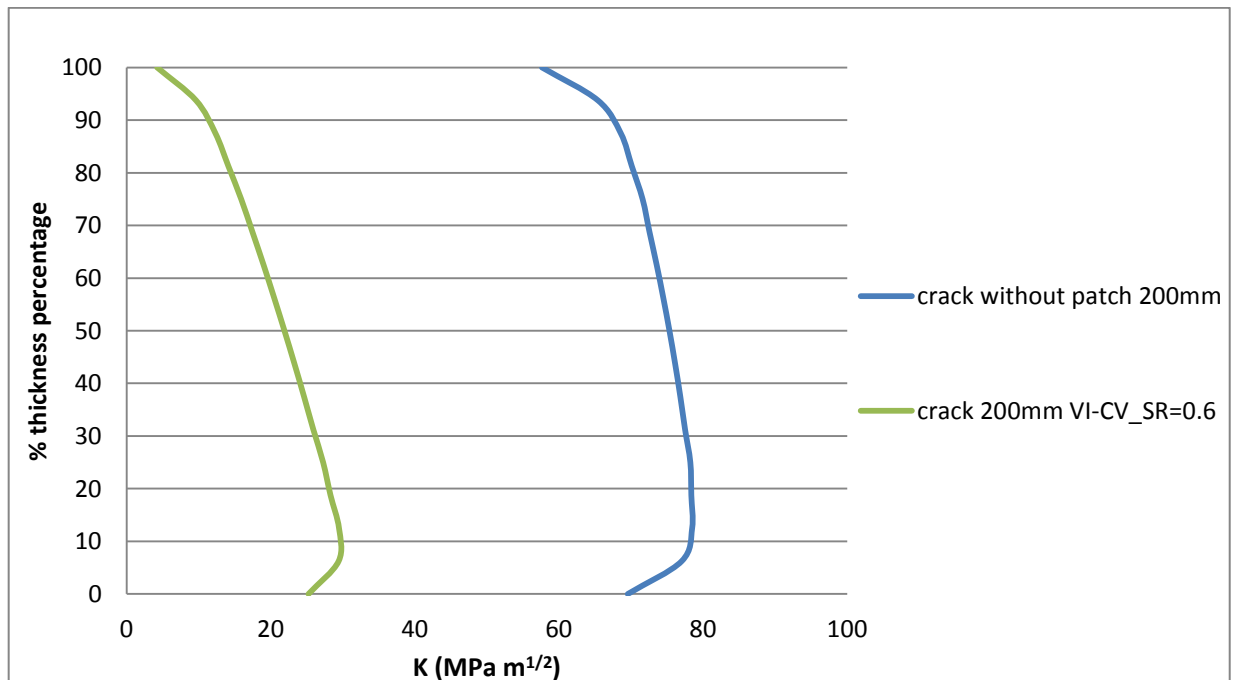


**Σχήμα 4.79:** Εντατικό πεδίο τάσεων Von Mises μετά την εφαρμογή του επιθέματος (ελεύθερη πλευρά).

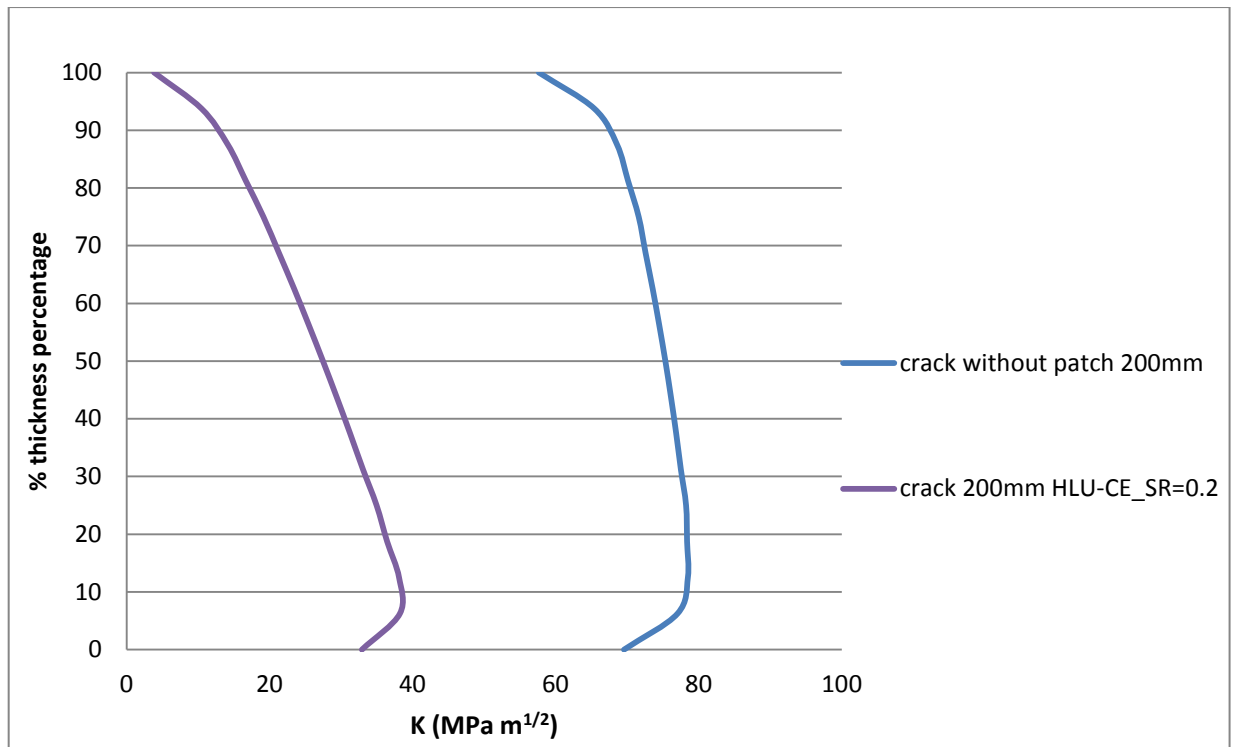
Στη συνέχεια, παρατίθενται οι κατανομές του ΣΕΤ κατά το πάχος της χαλύβδινης πλάκας και στις 4 περιπτώσεις παραμετροποίησης του επιθέματος ως προς τις μηχανικές του ιδιότητες και το συντελεστή ακαμψίας του για μήκος ρωγμής 200mm (σχήματα 4.80 έως 4.83). Από τα παρακάτω διαγράμματα συμπεραίνουμε μείωση του ΣΕΤ της τάξης του 50% σε όλες σχεδόν τις περιπτώσεις.



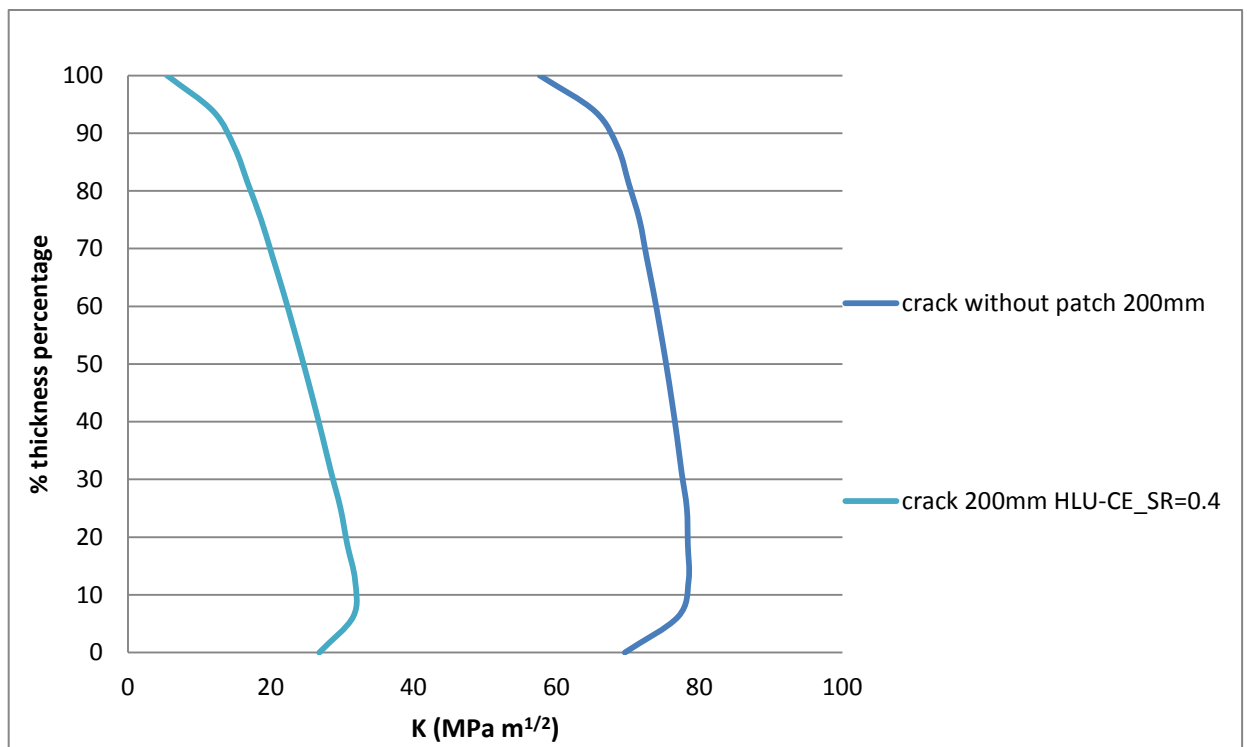
**Σχήμα 4.80:** Κατανομή του ΣΕΤ κατά το πάχος της χαλύβδινης πλάκας



**Σχήμα 4.81:** Κατανομή του ΣΕΤ κατά το πάχος της χαλύβδινης πλάκας

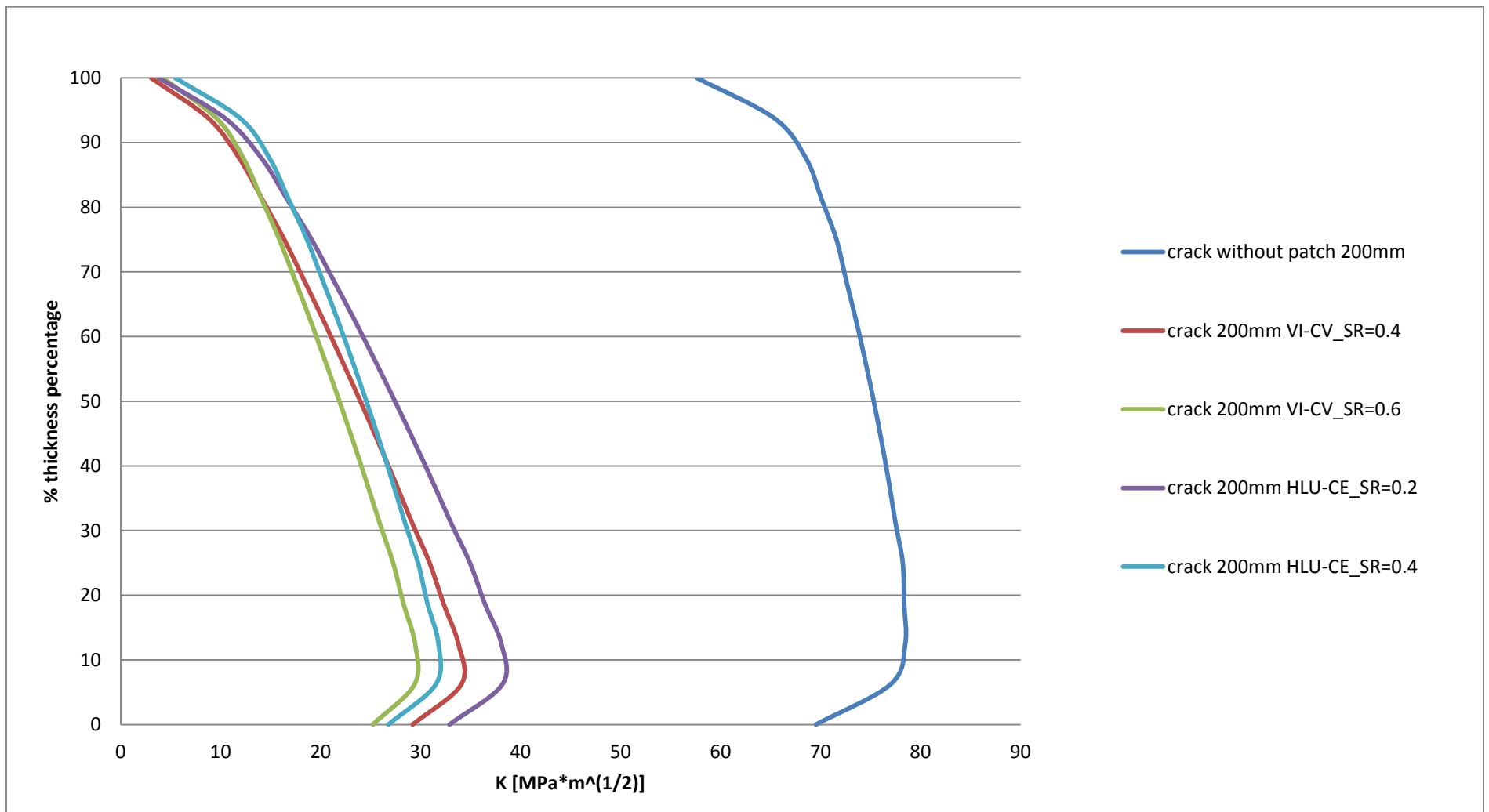


**Σχήμα 4.82:** Κατανομή του ΣΕΤ κατά το πάχος της χαλύβδινης πλάκας



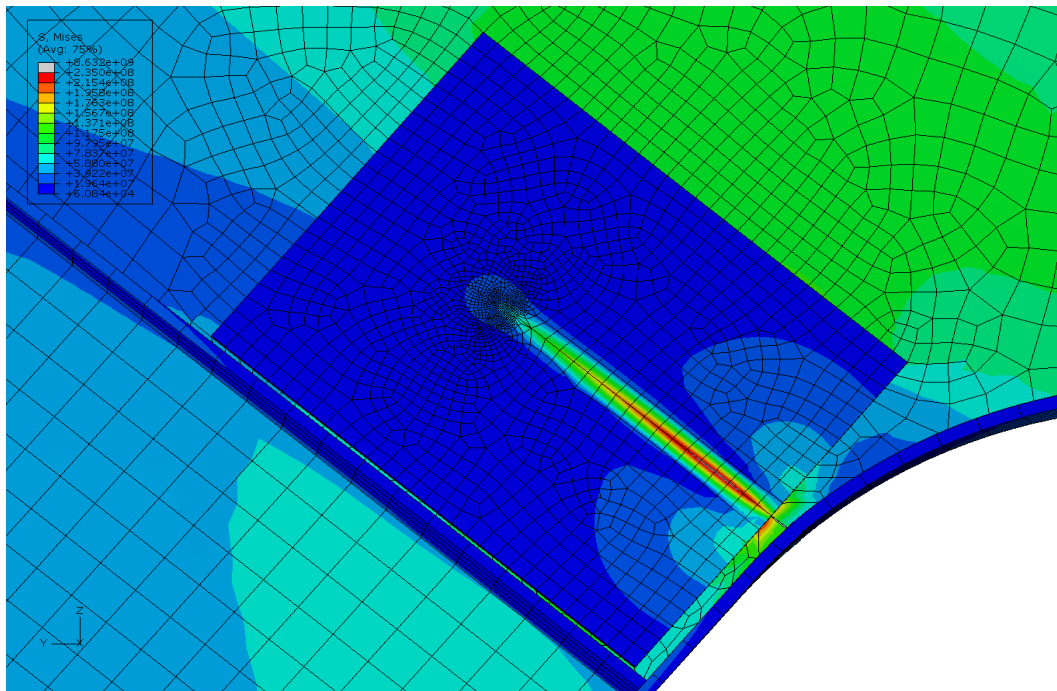
**Σχήμα 4.83:** Κατανομή του ΣΕΤ κατά το πάχος της χαλύβδινης πλάκας

Ακολουθεί συγκεντρωτικό διάγραμμα όλων των κατανομών του ΣΕΤ και στις 4 παραπάνω περιπτώσεις με μήκος ρωγμής 200mm στη περιοχή 2 (σχήμα 4.84).

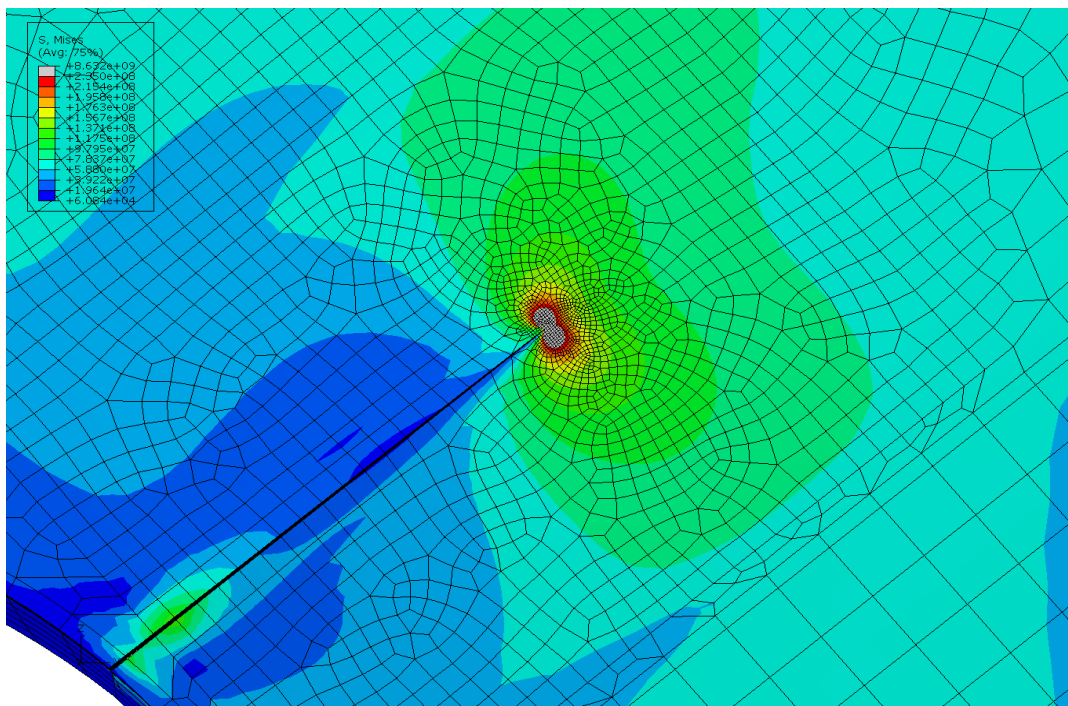


**Σχήμα 4.84:** Συγκεντρωτικό διάγραμμα όλων των κατανομών του ΣΕΤ και στις 4 περιπτώσεις με μήκος ρωγμής 200mm στη περιοχή 2.

Όσο αφορά τη ρωγή μήκους 400mm παρατίθενται κάποια χαρακτηριστικά διαγράμματα πεδίου τάσεων Von Mises κοντά στη ρωγή μετά την εφαρμογή του επιθέματος (σχήματα 4.85 - 4.86).

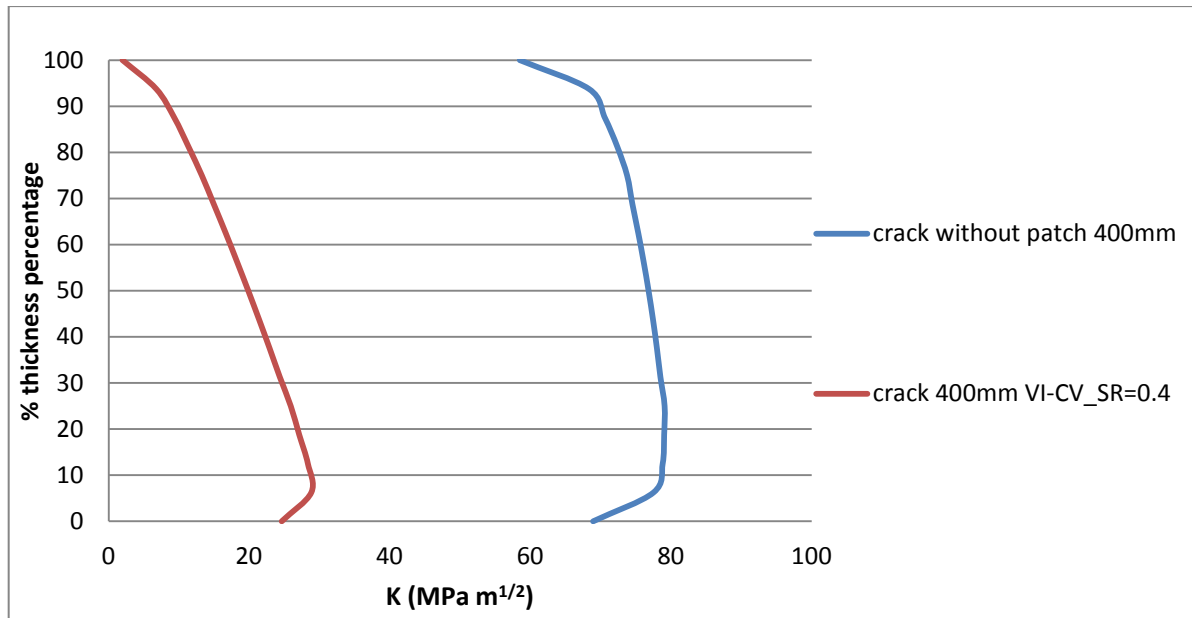


**Σχήμα 4.85:** Εντατικό πεδίο τάσεων Von Mises μετά την εφαρμογή του επιθέματος.

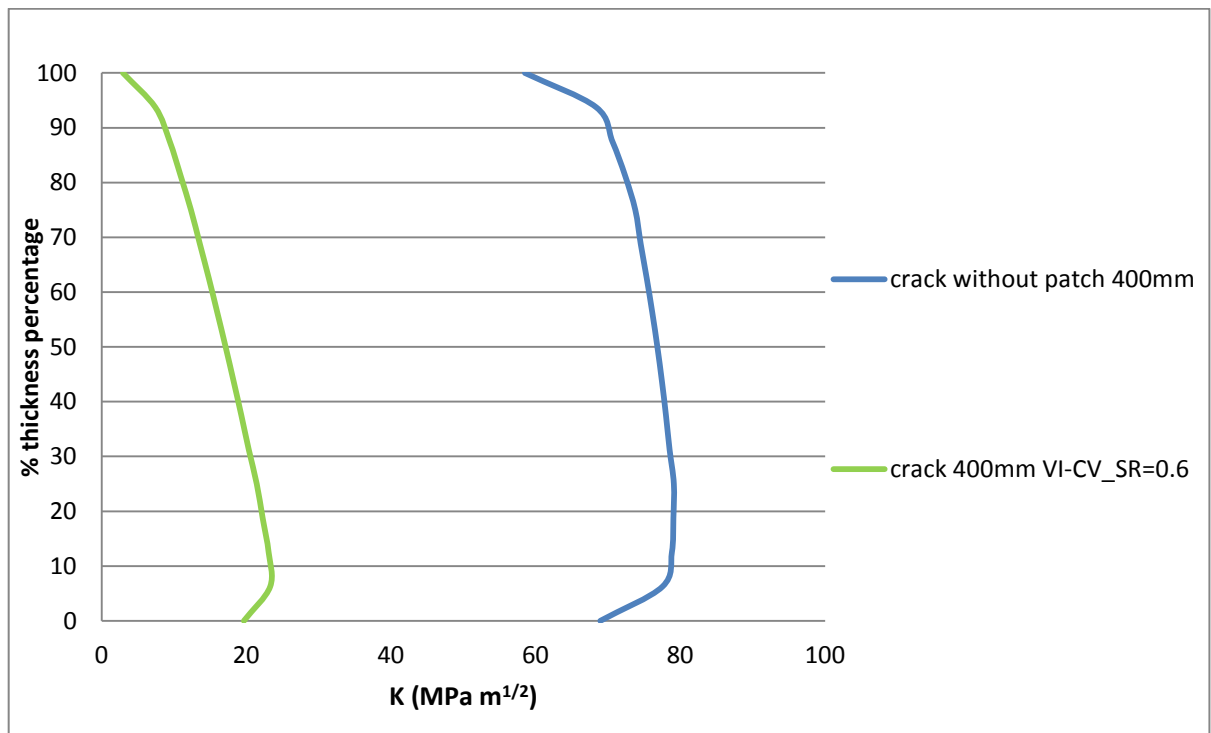


**Σχήμα 4.86:** Εντατικό πεδίο τάσεων Von Mises μετά την εφαρμογή του επιθέματος (ελεύθερη πλευρά).

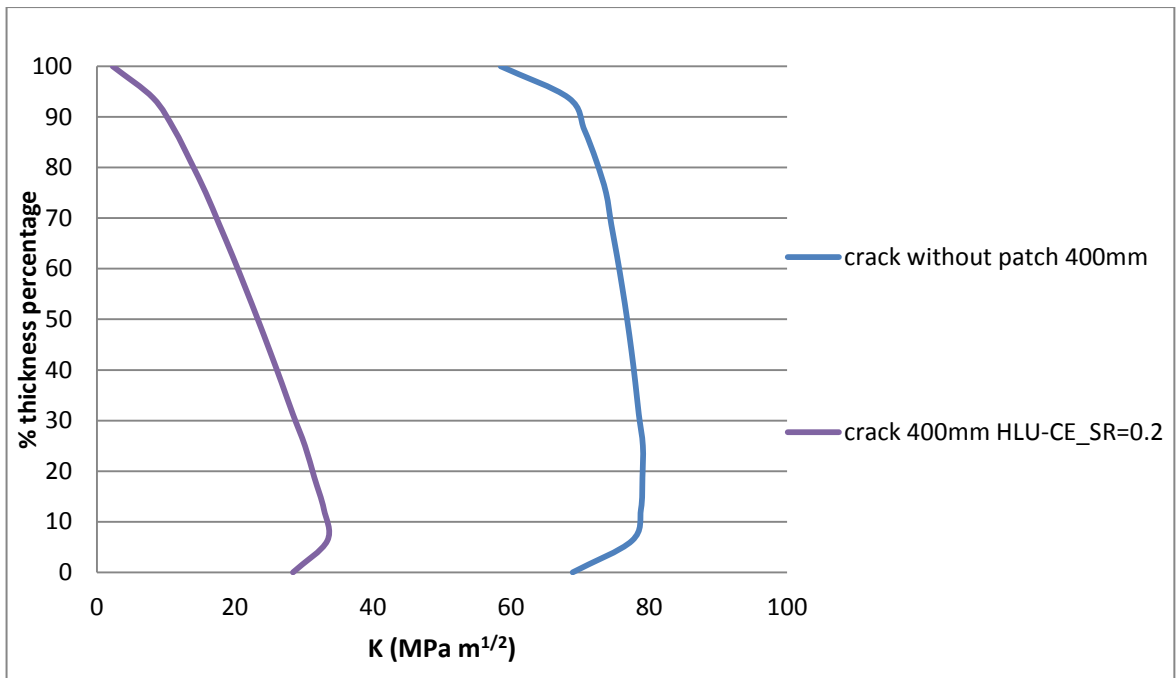
Στη συνέχεια, παρατίθενται οι κατανομές του ΣΕΤ κατά το πάχος της χαλύβδινης πλάκας σε όλες και στις 4 περιπτώσεις παραμετροποίησης του επιθέματος ως προς τις μηχανικές του ιδιότητες και το συντελεστή ακαμψίας του για μήκος ρωγμής 400mm (σχήματα 4.87 έως 4.90). Από τα παρακάτω διαγράμματα συμπεραίνουμε μείωση του ΣΕΤ της τάξης του 50% σε όλες σχεδόν τις περιπτώσεις.



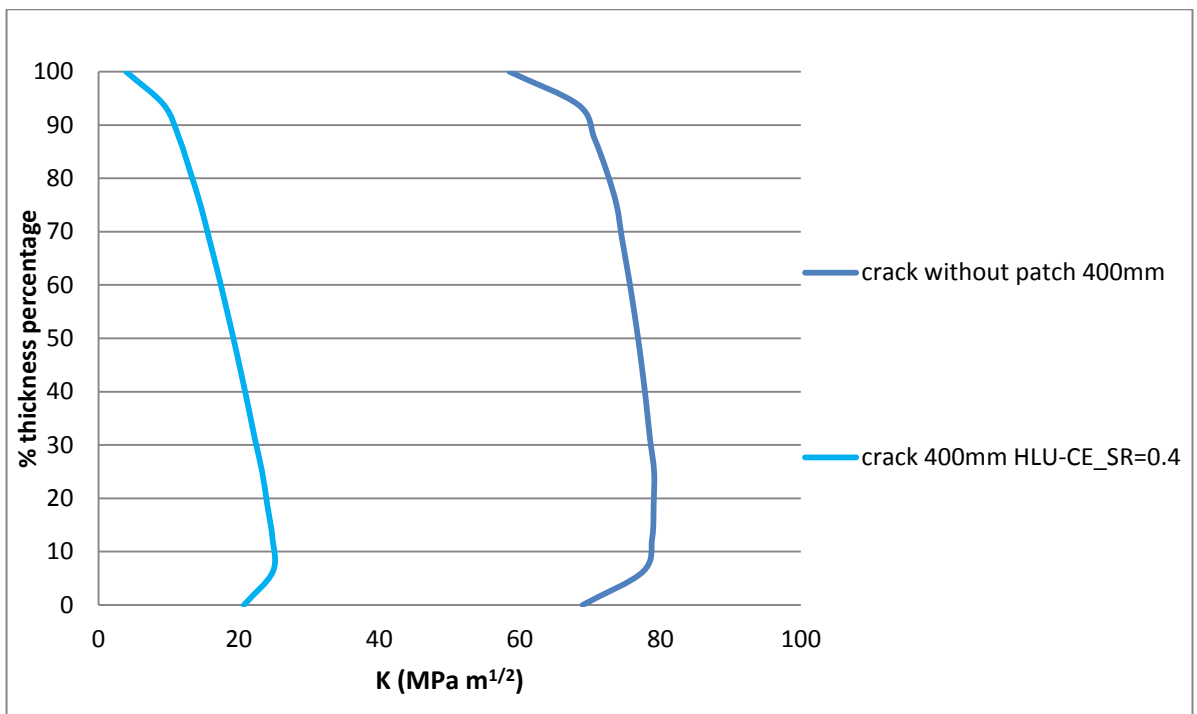
**Σχήμα 4.87:** Κατανομή του ΣΕΤ κατά το πάχος της χαλύβδινης πλάκας



**Σχήμα 4.88:** Κατανομή του ΣΕΤ κατά το πάχος της χαλύβδινης πλάκας



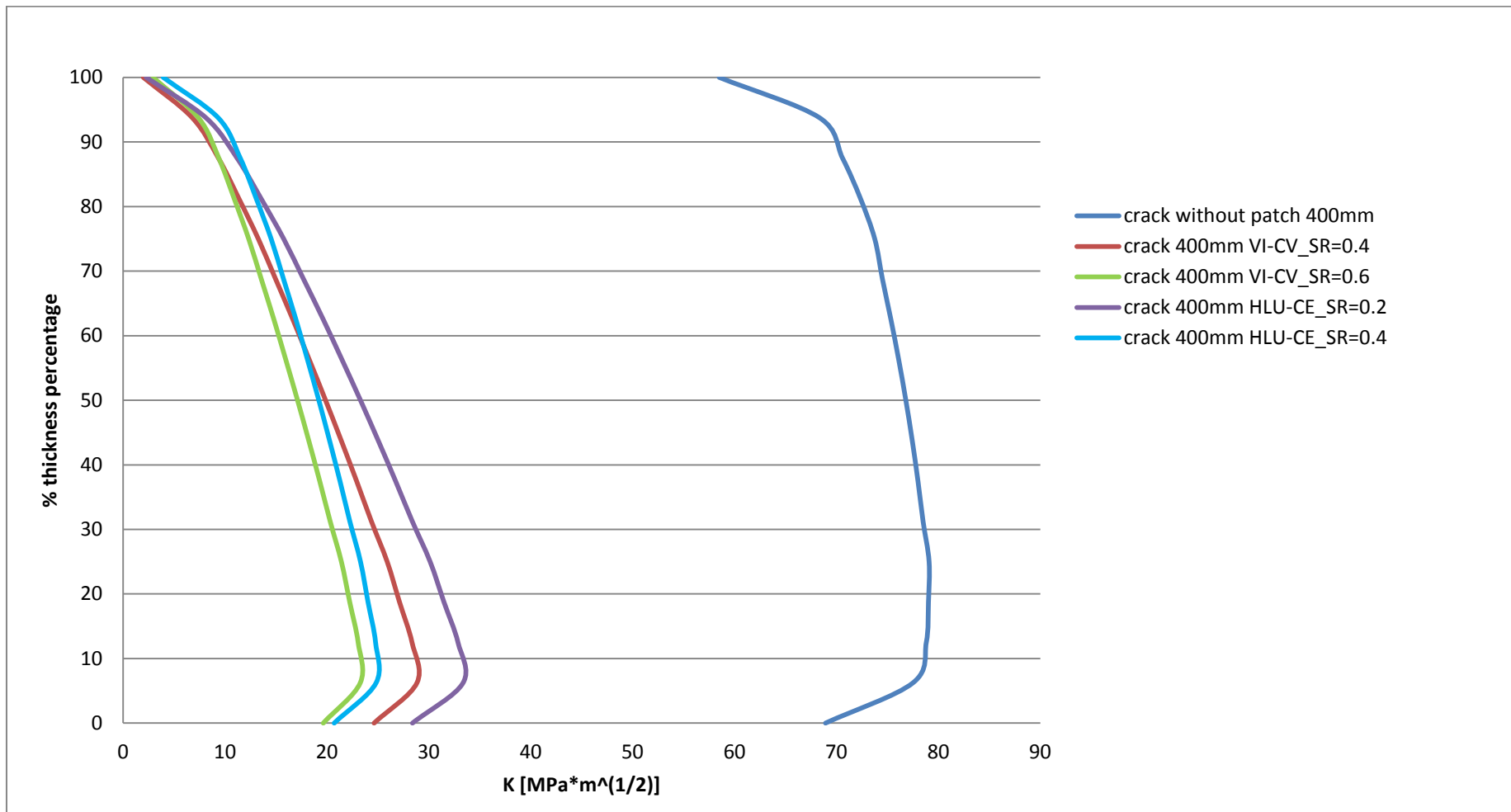
Σχήμα 4.89: Κατανομή του ΣΕΤ κατά το πάχος της χαλύβδινης πλάκας



Σχήμα 4.90: Κατανομή του ΣΕΤ κατά το πάχος της χαλύβδινης πλάκας

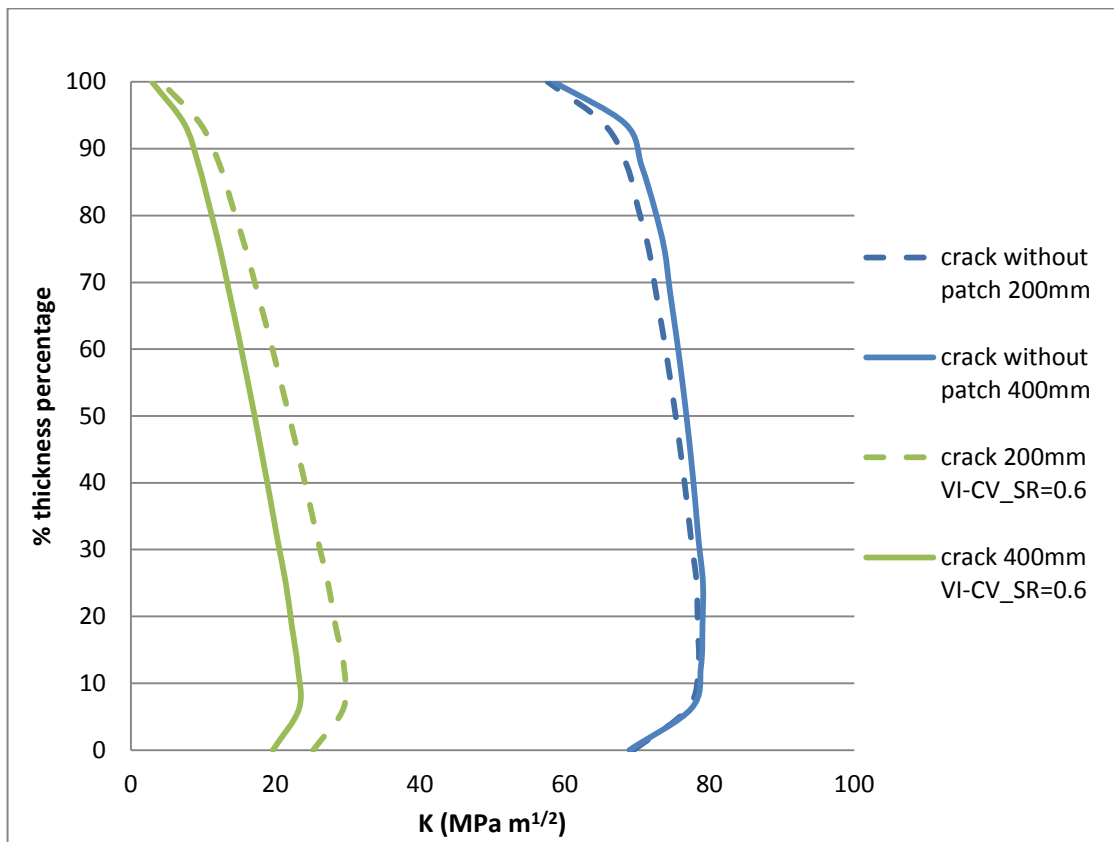
Ακολουθεί συγκριτικό διάγραμμα όλων των κατανομών του ΣΕΤ και στις 4 παραπάνω περιπτώσεις με μήκος ρωγμής 400mm στη περιοχή 2 (σχήμα 4.91).



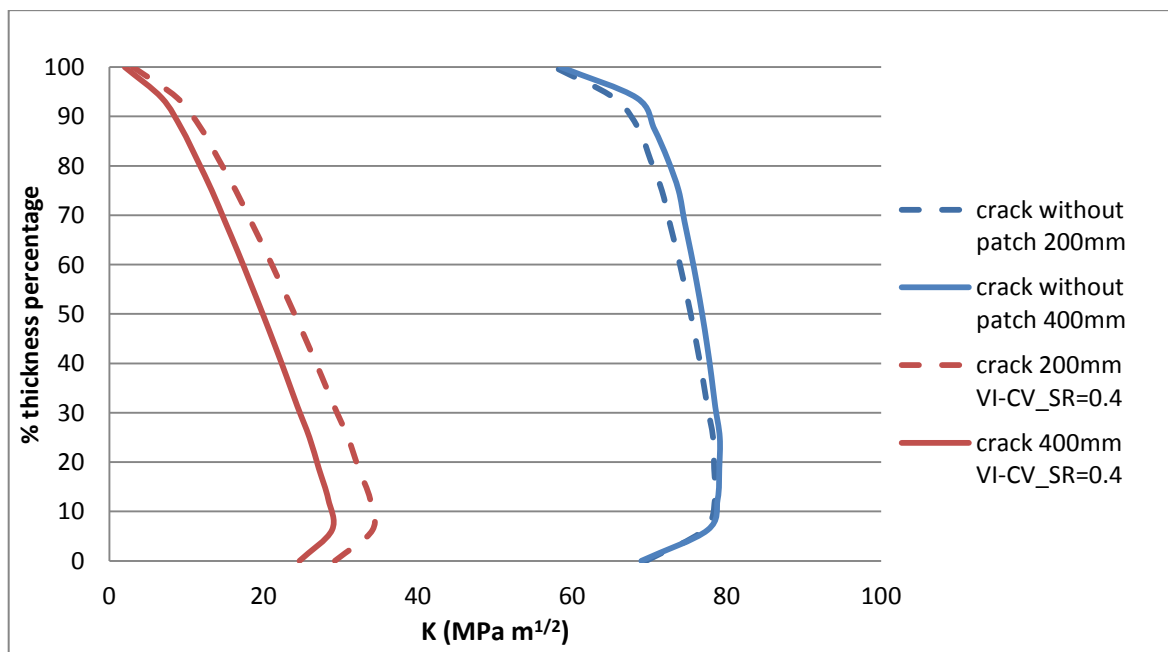


**Σχήμα 4.91:** Συγκεντρωτικό διάγραμμα όλων των κατανομών του ΣΕΤ και στις 4 περιπτώσεις με μήκος ρωγμής 400mm στη περιοχή 2.

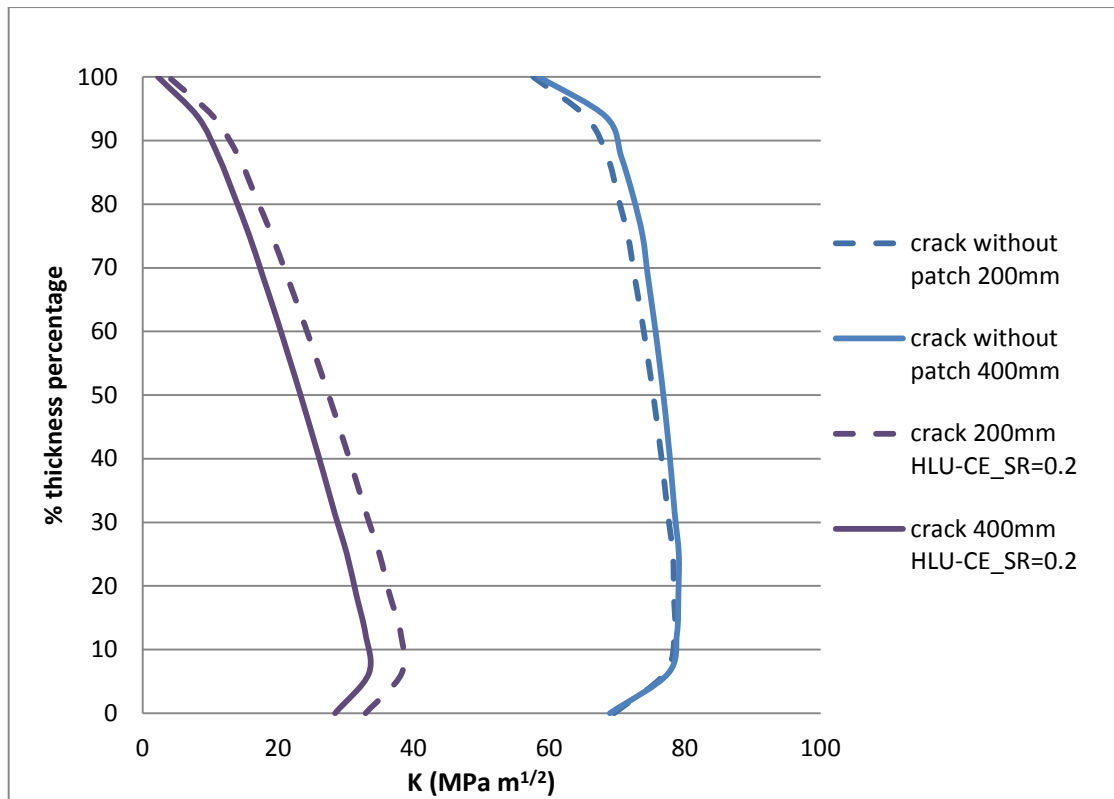
Επιπλέον, ακολουθούν συγκριτικά διαγράμματα των ΣΕΤ των δύο διαφορετικών μηκών ρωγμής και για κάθε περίπτωση (σχήματα 4.92 έως 4.95)



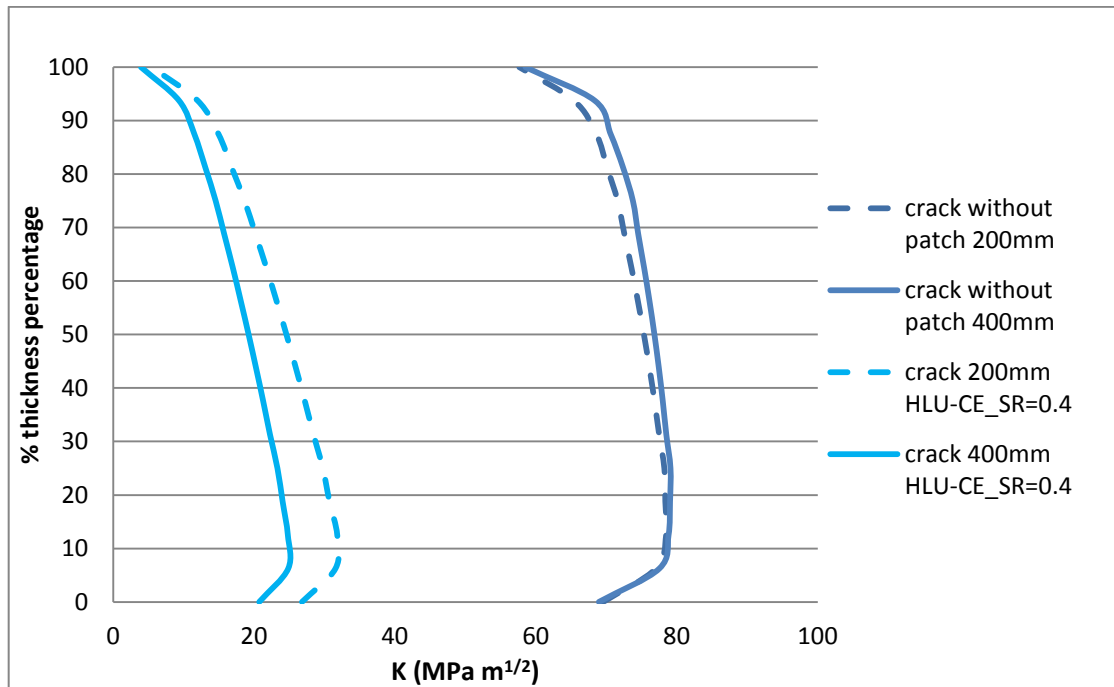
**Σχήμα 4.92:** Συγκριτικό διάγραμμα της κατανομής του ΣΕΤ πριν και μετά την εφαρμογή του επιθέματος για τα δύο διαφορετικά μήκη ρωγμών.



**Σχήμα 4.93:** Συγκριτικό διάγραμμα της κατανομής του ΣΕΤ πριν και μετά την εφαρμογή του επιθέματος για τα δύο διαφορετικά μήκη ρωγμών.



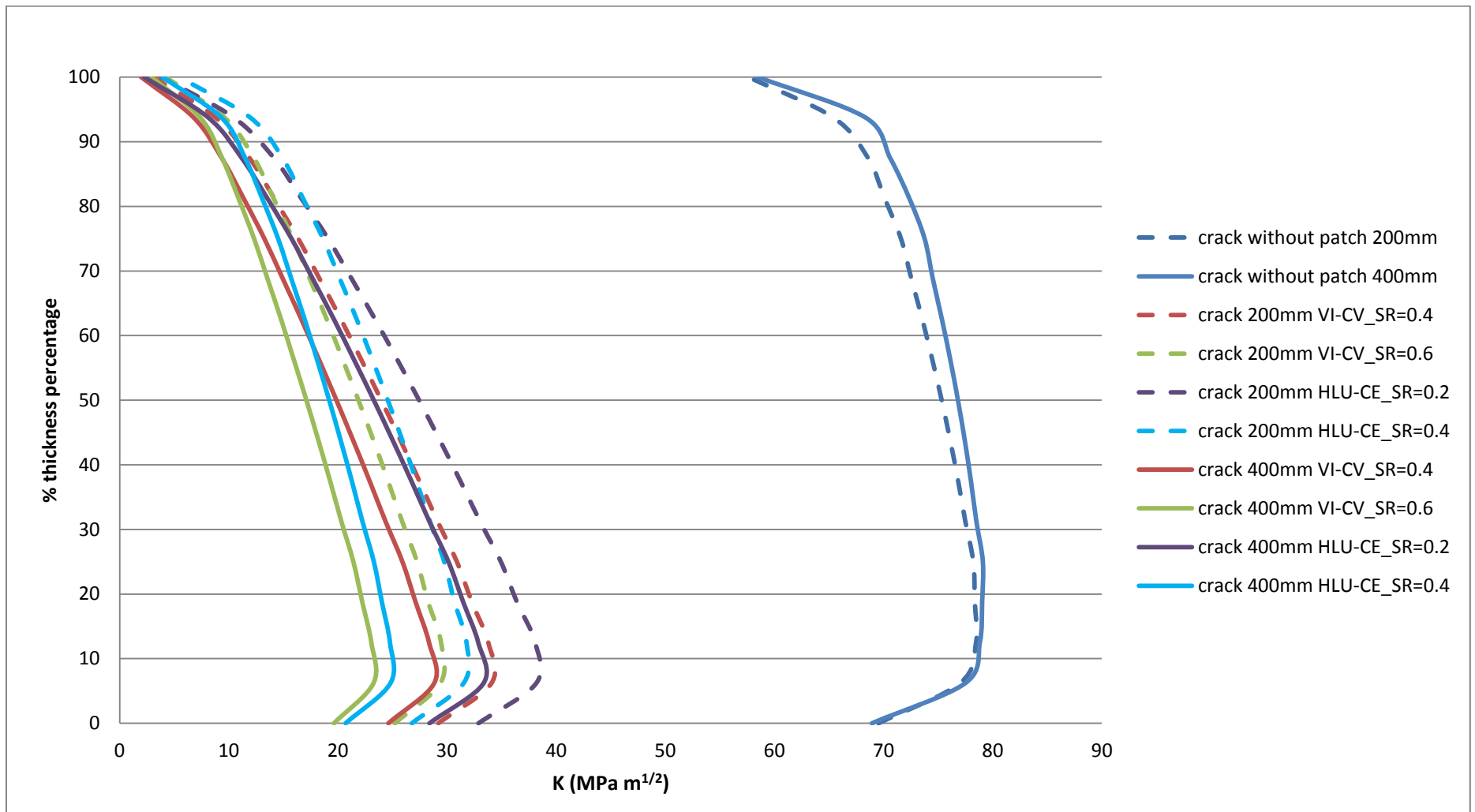
**Σχήμα 4.94:** Συγκριτικό διάγραμμα της κατανομής του ΣΕΤ πριν και μετά την εφαρμογή του επιθέματος για τα δύο διαφορετικά μήκη ρωγμών.



**Σχήμα 4.95:** Συγκριτικό διάγραμμα της κατανομής του ΣΕΤ πριν και μετά την εφαρμογή του επιθέματος για τα δύο διαφορετικά μήκη ρωγμών.

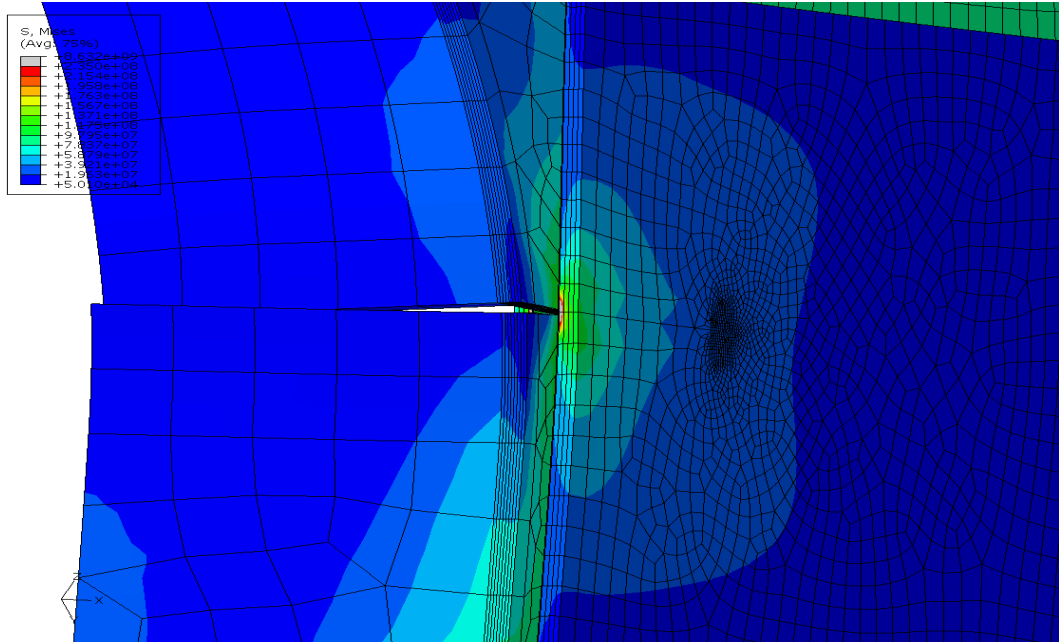
Ακολουθεί συγκριτικό διάγραμμα των ΣΕΤ και για τα δύο μήκη ρωγμών με όλες τις περιπτώσεις μαζί για τη περιοχή 2 (σχήμα 4.96). Παρατηρούμε ότι σε όλες τις περιπτώσεις υπάρχει αισθητή μείωση του ΣΕΤ της τάξης του 50%. Όπως και στη περιοχή 1, έτσι και εδώ σε κάθε μία από τις μεθόδους έχουμε μεγαλύτερη μείωση του ΣΕΤ όταν έχουμε μεγαλύτερο συντελεστή ακαμψίας (SR). Όσον αφορά τη σύγκριση μεταξύ διαφορετικής μεθόδου επίστρωσης αλλά ίδιου συντελεστή ακαμψίας (SR=0.4), οι διαφορές στη κατανομή του ΣΕΤ είναι πολύ μικρές και για τα δύο μήκη ρωγμών. Συγκρίνοντας τη κατανομή του ΣΕΤ για τη ρωγμή μήκους 200mm με αυτή μήκους 400mm βλέπουμε ότι χωρίς επίθεμα ο ΣΕΤ είναι λίγο μεγαλύτερος στη ρωγμή των 400mm. Αντίθετα, μετά την εφαρμογή του επιθέματος, παρατηρούμε μεγαλύτερη μείωση του ΣΕΤ για τη ρωγμή μήκους 400mm, κάτι το οποίο οφείλεται στο μη ομοιόμορφο πεδίο τάσεων στο HTF μοντέλο.

Συμπερασματικά, όποιο επίθεμα και να χρησιμοποιήσουμε, η διαφορά στη γεωμετρία, στη μέθοδο επίστρωσης και στους συντελεστές ακαμψίας, θα είναι μικρή στην κατανομή του ΣΕΤ.

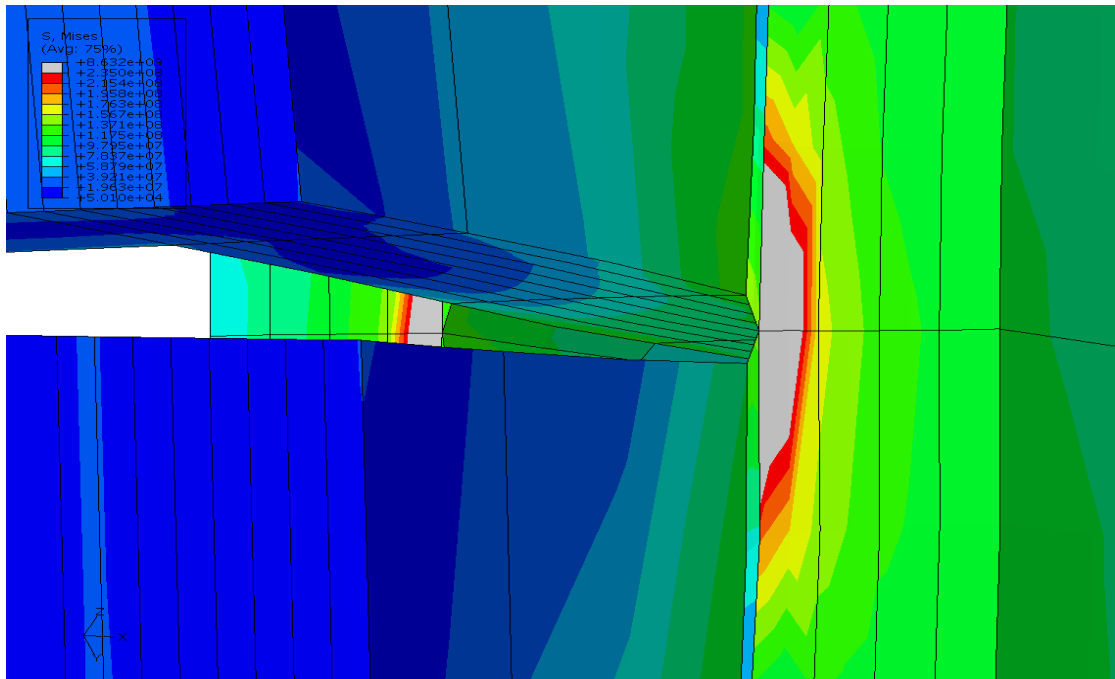


**Σχήμα 4.96:** Συγκεντρωτικό και συγκριτικό διάγραμμα των ΣΕΤ και για τα δύο μήκη ρωγμών με όλες τις περιπτώσεις μαζί για τη περιοχή 2.

Τέλος, στη ρωγμή με μήκος  $a=200\text{mm}$  τοποθετήθηκαν επιθέματα και από τις 2 πλευρές της χαλύβδινης πλάκας για τις προαναφερθείσες περιπτώσεις μηχανικών ιδιοτήτων επιθεμάτων και συντελεστών ακαμψίας. Χαρακτηριστικά παρατίθενται διαγράμματα συγκέντρωσης τάσεων (σχήματα 4.97 – 4.98 ) κοντά στα επιθέματα.

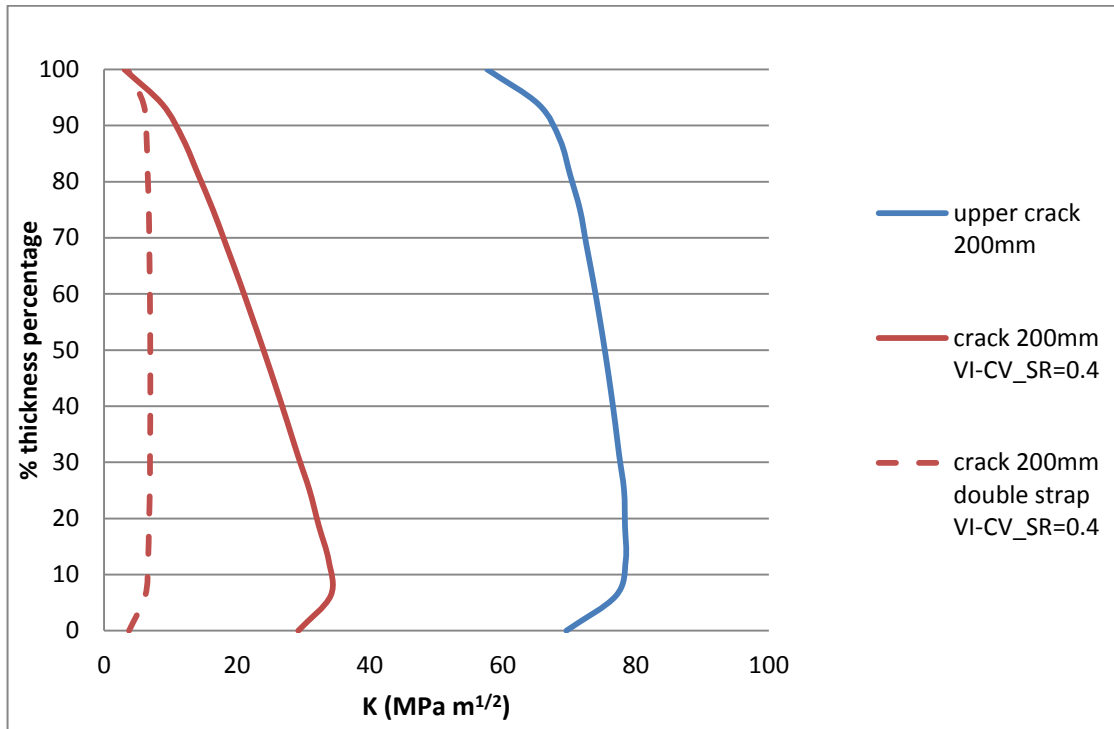


**Σχήμα 4.97:** Εντατικό πεδίο τάσεων Von Mises μετά την εφαρμογή των αμφίπλευρων επιθεμάτων.

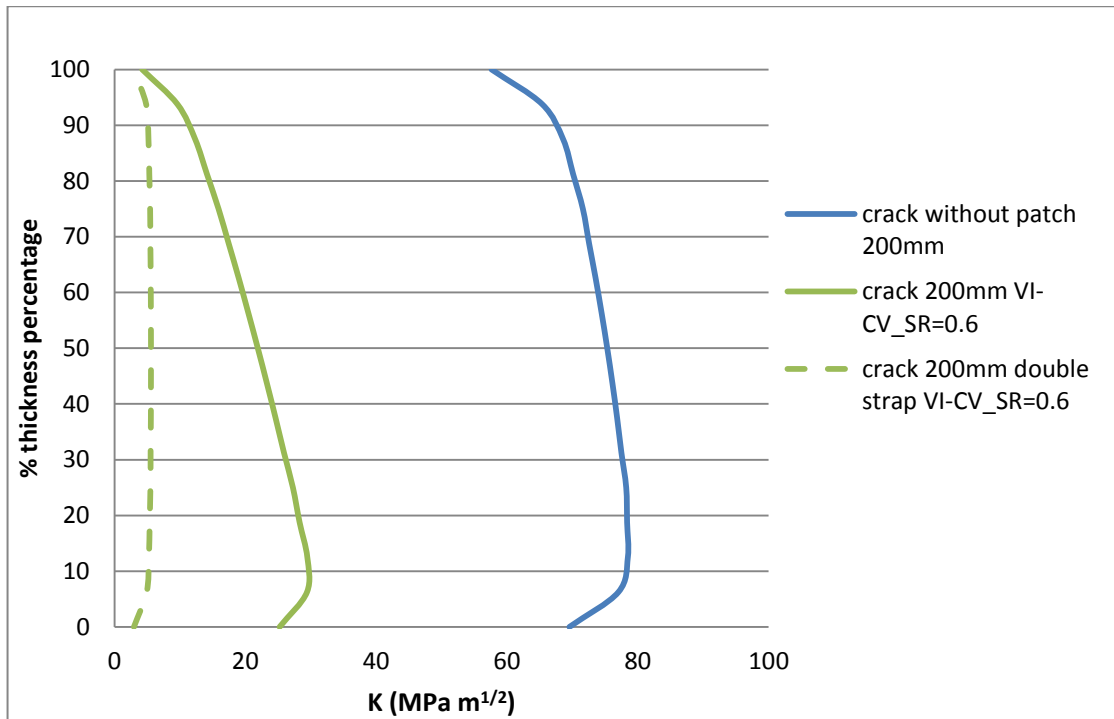


**Σχήμα 4.98:** Εντατικό πεδίο τάσεων Von Mises μετά την εφαρμογή των αμφίπλευρων επιθεμάτων.

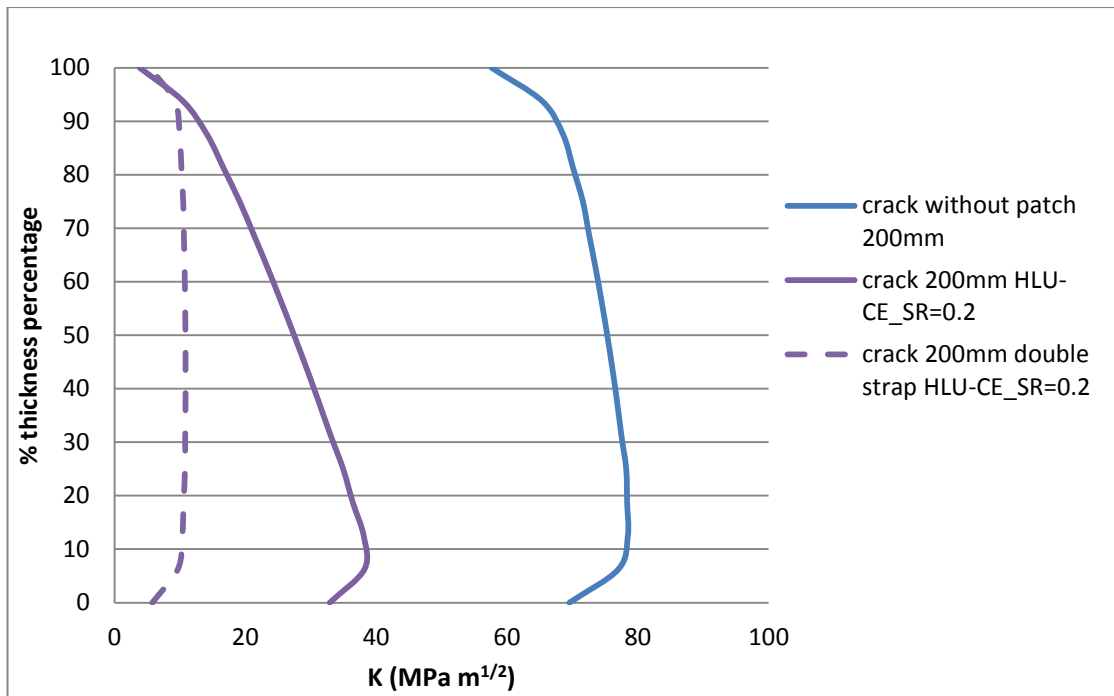
Στη συνέχεια παρατίθενται τα συγκριτικά διαγράμματα κατανομής του ΣΕΤ κατά το πάχος της χαλύβδινης πλάκας με το μονόπλευρο επίθεμα και με το αμφίπλευρο επίθεμα (σχήματα 4.99 έως 4.102).



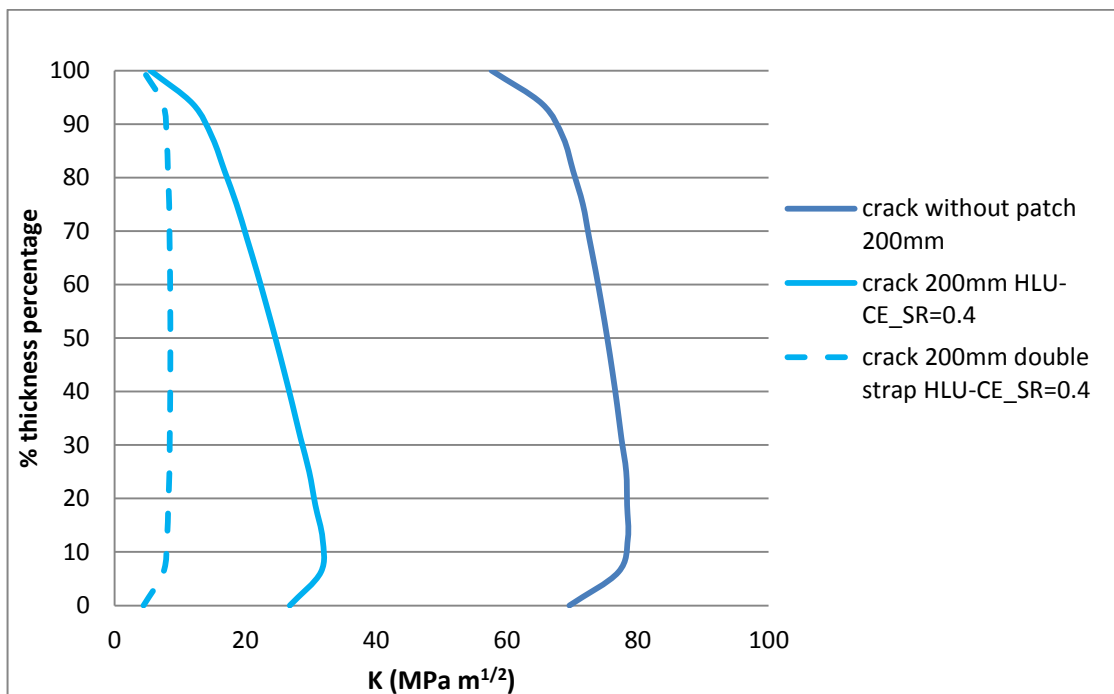
**Σχήμα 4.99:** Συγκριτικό διάγραμμα της κατανομής του ΣΕΤ του μονόπλευρου με το αμφίπλευρο επίθεμα.



**Σχήμα 4.100:** Συγκριτικό διάγραμμα της κατανομής του ΣΕΤ του μονόπλευρου με το αμφίπλευρο επίθεμα.



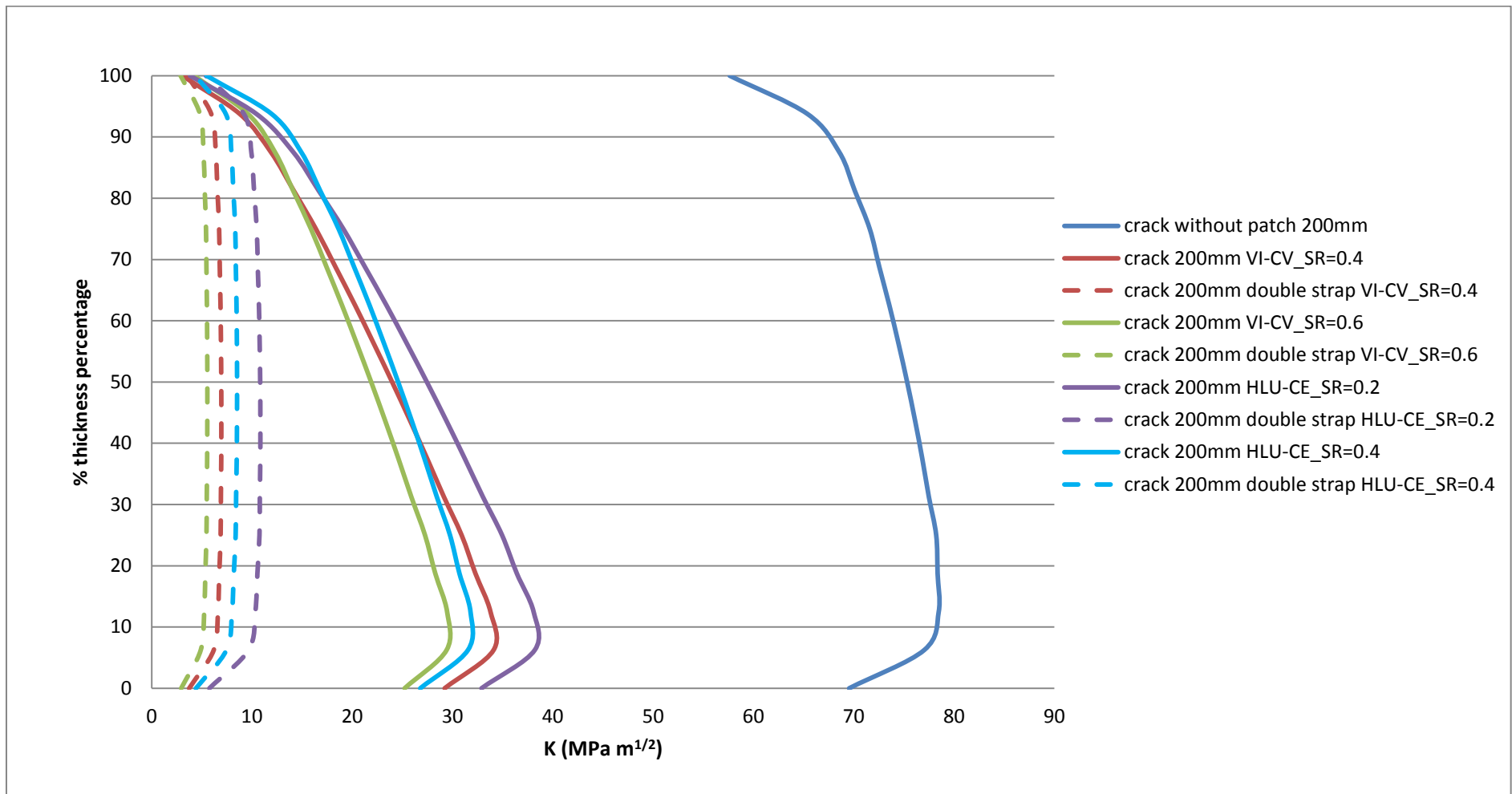
**Σχήμα 4.101:** Συγκριτικό διάγραμμα της κατανομής του ΣΕΤ του μονόπλευρου με το αμφίπλευρο επίθεμα.



**Σχήμα 4.102:** Συγκριτικό διάγραμμα της κατανομής του ΣΕΤ του μονόπλευρου με το αμφίπλευρο επίθεμα.



Τέλος, ακολουθεί συγκεντρωτικό διάγραμμα της κατανομής των ΣΕΤ με όλες τις περιπτώσεις των αμφίπλευρων επιθεμάτων και ταυτόχρονη σύγκριση με τις περιπτώσεις των μονόπλευρων επιθεμάτων για ρωγή 200mm στη περιοχή 2 (σχήμα 4.103). Από το παρακάτω διάγραμμα παρατηρούμε την πολύ μεγάλη μείωση του ΣΕΤ της τάξης του 90% μετά την εφαρμογή αμφίπλευρου επιθέματος. Η μείωση της κατανομής του ΣΕΤ παρατηρείται σε όλο το πάχος της μεταλλικής πλάκας. Συμπερασματικά, το αμφίπλευρο επίθεμα προτιμάται στην προκειμένη περίπτωση.



**Σχήμα 4.103:** Συγκεντρωτικό και συγκριτικό διάγραμμα της κατανομής των ΣΕΤ των αμφίπλευρων και μονόπλευρων επιθεμάτων για ρωγμή 200mm στη περιοχή 2.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός της διπλωματικής αυτής εργασίας ήταν να αποδείξει με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων την αποδοτικότητα της ενίσχυσης - επισκευής μιας μεταλλικής κατασκευαστικής λεπτομέρειας πλοίου με επιθέματα από ινώδη σύνθετα υλικά. Αποτελεσματική θεωρείται μια επισκευή όταν περιορίζει σημαντικά την διάδοση της ρωγμής χωρίς να οδηγεί στην ανάπτυξη άλλων πιο επιβλαβών ανωμαλιών στην κατασκευή. Συγκεκριμένα, με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων εξετάστηκαν οι εξής περιπτώσεις:

- Ορθογώνια μεταλλική πλάκα με κεντρική διαμπερή ρωγμή ενισχυμένη με επίθεμα συγκεκριμένης γεωμετρίας (μήκος, πλάτος, πάχος) και μηχανικών ιδιοτήτων (μέτρου ελαστικότητας και λόγου Poisson) για σύγκρισή των αποτελεσμάτων του ΣΕΤ με αυτά της βιβλιογραφίας.
- Έδρα Πλευρικής Δεξαμενής Διπυθμένου (Hoper Tank Floor, HTF) με ρωγμές διαφορετικών διαστάσεων σε επιλεγμένα σημεία.
- Κολητικό στρώμα και επίθεμα συγκεκριμένων μηχανικών ιδιοτήτων (μέτρα ελαστικότητας, μέτρα διάτμησης και λόγοι Poisson), συγκεκριμένου μήκους και πλάτους αλλά μεταβλητού πάχους (διαφορετικό συντελεστή ακαμψίας (SR) του επιθέματος προς τη χαλύβδινη πλάκα), για μονόπλευρη και αμφίπλευρη ενίσχυση.

#### 5.1 Συμπεράσματα της αριθμητικής μοντελοποίησης

Η μελέτη των αποτελεσμάτων της μοντελοποίησης της κατασκευής με πεπερασμένα στοιχεία παρήγαγε ορισμένα σημαντικά συμπεράσματα, τα οποία συνοψίζονται ως εξής:

- Με τη προσομοίωση της ρωγμής στην ορθογώνια μεταλλική πλάκα στο πρόγραμμα ABAQUS και τη σύγκριση των ΣΕΤ που προέκυψαν με τη βιβλιογραφία, το πλέγμα των στοιχείων κοντά στο μέτωπο της ρωγμής παίζει σημαντικό ρόλο. Απαιτείται πολύ πυκνό πλέγμα στοιχείων κοντά στη ρωγμή και αρκετά στοιχεία κατά το πάχος της πλάκας έτσι ώστε να καταλήγουμε σε ορθά αποτελέσματα του ΣΕΤ.
- Όσο αφορά το HTF, σε όλες τις περιπτώσεις, μετά την τοποθέτηση του επιθέματος είχαμε μείωση του ΣΕΤ της τάξης του 50% με τη μονόπλευρη ενίσχυση, ενώ με την αμφίπλευρη η μείωση έφτασε το 90%.

- Από το νόμο του Paris,  $\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m$ , μπορούμε με διαίρεση κατά μέλη να βρούμε τη μείωση του ρυθμού διάδοσης της ρωγμής. Ισχύει:

$$\frac{\left(\frac{da}{dN}\right)_{patched}}{\left(\frac{da}{dN}\right)} = \left(\frac{\Delta K_{patched}}{\Delta K}\right)^m$$

Με σταθερά υλικού  $m=3$ , που ισχύει για το ναυπηγικό χάλυβα, και για μείωση του ΣΕΤ ( $\Delta K$ ) της τάξης του 50% και 90%, έχουμε μείωση του ρυθμού διάδοσης της ρωγμής της τάξης του 87,5% και 99,9% αντίστοιχα. Όπως γίνεται αντιληπτό, η δράση του επιθέματος μπορεί να περιορίσει σημαντικά μέχρι και να σταματήσει τη διάδοση της ρωγμής, γεγονός που αποδεικνύει την υψηλή αποτελεσματικότητα της επισκευής.

- Η κλίση των διαγραμμάτων των κατανομών των ΣΕΤ μετά τη τοποθέτηση του επιθέματος είναι πολύ μεγαλύτερη από τη κλίση της κατανομής του ΣΕΤ όταν δεν έχει εφαρμοστεί το επίθεμα. Πριν την τοποθέτηση του επιθέματος, η κλίση της κατανομής του ΣΕΤ οφείλεται στην κάμψη της κατασκευής λόγω των εγκαρσίων ενισχυτικών που βρίσκονται από τη μία μόνο πλευρά της. Την κλίση αυτή έρχεται να μεγαλώσει το επίθεμα το οποίο προσθέτει επιπλέον κάμψη στην κατασκευή. Η κάμψη και στις δύο περιπτώσεις προέρχεται από την εκκεντρότητα που προκαλεί το φορτίο ως προς τον ουδέτερο άξονα της κατασκευής και η οποία είναι μεγαλύτερη μετά την τοποθέτηση του επιθέματος.
- Από τη μελέτη των αποτελεσμάτων της μεταβολής του ΣΕΤ κατά το πάχος της χαλύβδινης πλάκας, παρατηρήθηκε ότι ο ΣΕΤ στη μη ενισχυμένη πλευρά είναι μέχρι και 90% (HLU-CE SR=0.2) μεγαλύτερος σε σχέση με την πλευρά στην οποία επικολλάται το επίθεμα, διαφορά η οποία θα προκαλέσει γρηγορότερη ανάπτυξη της ρωγμής στη γυμνή πλευρά και κατά συνέπεια καμπυλόγραμμο μέτωπο της ρωγμής κατά τη διάδοσή της.
- Από τη παραμετρική μελέτη του συντελεστή ακαμψίας (SR) προέκυψε ότι μεγαλύτερες τιμές του οδηγούν σε μικρή μείωση του ΣΕΤ.
- Η διαφοροποίηση της γεωμετρίας του σύνθετου επιθέματος στη περιοχή 1 δεν επέφερε καμία ουσιαστική αλλαγή στη κατανομή του ΣΕΤ κατά το πάχος του μετώπου της ρωγμής.
- Όσο αφορά τη περιοχή 2, η αύξηση του μήκους της ρωγμής από 200mm σε 400mm, οδήγησε σε μικρή αύξηση του ΣΕΤ πριν την εφαρμογή του επιθέματος. Μετά την εφαρμογή του επιθέματος, η μείωση του ΣΕΤ στη ρωγμή μήκους 400mm ήταν μεγαλύτερη από αυτή των 200mm.
- Η αμφίπλευρη ενίσχυση στη περιοχή 2 του HTF προσέφερε μείωση του ΣΕΤ σε όλο το μέτωπο της ρωγμής με σχεδόν κατακόρυφη καμπύλη του ΣΕΤ.

## 5.2 Προτάσεις για περαιτέρω μελέτη και επέκταση της εργασίας

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

- Μία επιπλέον παράμετρος για μελέτη θα μπορούσε να αποτελέσει το κολλητικό μέσο. Στην παρούσα μελέτη το ρόλο του κολλητικού μέσου έπαιξε μία αρχική στρώση ρητίνης, για λόγους απλότητας. Η χρησιμοποίηση όμως διαφορετικών κολλητικών μέσων θα μπορούσε να δώσει ενδιαφέροντα αποτελέσματα.
- Το πάχος και το μέτρο ελαστικότητας του σύνθετου επιθέματος, ο λόγος ακαμψίας επιθέματος-πλάκας (SR), ο προσανατολισμός, το πάχος και ο αριθμός των στρώσεων του επιθέματος είναι μερικές παράμετροι που δημιουργούν πολλούς συνδυασμούς και χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης.
- Προς τη κατεύθυνση συνθετότερων επισκευαστικών (με χρήση επιθεμάτων από σύνθετα υλικά) διατάξεων, μια πληθώρα διαφορετικών γεωμετριών χαλύβδινων υποστρωμάτων, αλλά και επιθεμάτων θα μπορούσε με εύκολο τρόπο να μοντελοποιηθεί.
- Συνθετότερη μοντελοποίηση της μηχανικής συμπεριφοράς του επιθέματος, η οποία θα περιλαμβάνει την ενδεχόμενη αστοχία του και κατά συνέπεια τη μη συμμετοχή του στην ανακούφιση της επισκευής, κρίνεται απαραίτητη και ουσιαστική για την παρακολούθηση και μελέτη του φαινομένου σε μεγαλύτερο εύρος παραμορφώσεων.
- Επιλογή διαφορετικού σεναρίου φόρτωσης με βάση τους κανονισμούς CSR.

## Βιβλιογραφία

1. Grabovac I, “Bonded composite solution to ship reinforcement”, Defence Science and Technology Organisation, Platforms Sciences Laboratory, Maritime Platforms Division, Composites: Part A, 2003; 34: 847-854.
2. Grabovac I, Maritime Platforms Division, Aeronautical and Maritime Research Laboratory, Defence Science and Technology Organisation, “Case history: Bonded Composite Reinforcement of Ship Structure”, 2003.
3. Turton, T.J., Dalzel-Job, J., Livingstone, F., “Oil Platforms, Destroyers and Frigates– Case Studies of QinetiQ’s Marine Composite Patch Repairs”, Composites: Part A, 2005; 36: 1066-1072.
4. Ivan Grabovac, "Bonded composite solution to ship reinforcement", Composites, 2003.
5. I. Grabovac, R.A. Bartholomeusz, A.A. Baker, "Composite reinforcement of a ship superstructure - project overview", Composites, 1993.
6. A. Chukwujekwu Okafor, Hari Bhogapurapu, "Design and analysis of adhesively bonded thick composite patch repair of corrosion grind-out and cracks on 2024 T3 clad aluminum aging aircraft structures", Composite Structures 76 (2006) 138-150.
7. McGeorge D., Echtermeyer A.T., Leong K.H., Melve B., Robinson M., Fischer K.P. (2009), “*Repair of Floating Offshore Units Using Bonded Fibre Composite Materials*”, Det Norske Veritas AS, Composites Part A, **40**, 2009, 1364-1380.
8. N.Tsouvalis, “Numerical Modeling of the Static and Dynamic Experimental Tests Performed in Composite Patch Reinforced Steel Plates with Defects”, Pithagoras II, Support of university research teams, report No. STL-247-F-07, Athens, September 2007.
9. Woo-Yong Lee, Jung-Ju Lee, "Successive 3D FE analysis technique for characterization of fatigue crack growth behavior in composite-repaired aluminum plate", Composite Structures 66 (2004) 513-520.
10. Καντεράκης Γ., Τομέας Μηχανικής, Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, «Η μέθοδος της επισκευής μεταλλικών δομών με την επικόλληση ενισχυτικών επιθεμάτων από σύνθετα υλικά», 2000, Διδακτορική Διατριβή.
11. Sun C.T, Klug J.C, “Large deflection effects of cracked aluminum plates repaired with bonded composite patches”, Composite Structures, 42, 1998, 291 – 296.

12. Naboulsi S, Mall S, “Nonlinear analysis of bonded composite patch repair of cracked aluminum panels”, *Composite Structures*, 49, 2000 285 – 292.
13. Σωτηρόπουλος Π. (2007), «Αναλυτική και Αριθμητική Μοντελοποίηση της Χρήσης Επιθεμάτων από Σύνθετα Υλικά για την Ενίσχυση και Επισκευή Χαλύβδινων Κατασκευών», Διπλωματική Εργασία, Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας, Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Μάρτιος 2007.
14. ABAQUS 6.10.1 Documentation, Chapter 30, Fracture Mechanics
15. C. Smith, S. Volonakis, E. Chatzidouros, I. Zilakos, “Definition of a buoyancy rescue concepts for three scenarios (Deliverable D2.4)”, SuSy, D2.4v03 20.05.11
16. IACS, Common Structural Rules for Double Hull Tankers, in, International Association of Classification Societies, 2010.
17. Τσούβαλης Ν., Τομέας Θαλάσσιων Κατασκευών, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σημειώσεις για το μάθημα “Ανάλυση και Σχεδίαση Σκαφών από Σύνθετα Υλικά”, 1998.
18. Κουλουκούρας Ι. (2008), «Αριθμητική Μοντελοποίηση Ρωγματομένων και Διαβρωμένων Χαλύβδινων Ελασμάτων, Ενισχυμένων με Επίθεμα απο Σύνθετα Υλικά», Διπλωματική Εργασία, Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας, Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Οκτώβριος 2008.
19. Παπάζογλου Β. (1995), *Ναυπηγική Τεχνολογία*, Σημειώσεις του Μαθήματος, Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 1995.
20. Allan T. Larsen, Elisabeth D. Wilson, “Definition of Application Cases (Marine)”, Co-Patch Project Report, Composite Patch Repair for Marine and Civil Engineering Infrastructure Applications, September 2010
21. V.A Karatzas and N.G. Tsouvalis, “Composite Materials Characterization Tests (Deliverable D3.1.1)”, Co-Patch Project Report, Shipbuilding Technology Laboratory, NTUA, February 2011