



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

---

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΕ  
ΚΟΠΩΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΜΕ ΡΩΓΜΗ, ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΕΠΙΘΕΜΑΤΑ ΑΠΟ  
ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΦΡΥΔΑΣ Β. ΙΩΑΝΝΗΣ

Επιβλέπων: ΝΙΚΟΛΑΟΣ Γ. ΤΣΟΥΒΑΛΗΣ, Αναπληρωτής Καθηγητής



## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Νικόλαο Τσούβαλη για το ενδιαφέρον που έδειξε, τις πολύτιμες συμβουλές του, και το χρόνο που αφιέρωσε ώστε να ολοκληρωθεί η συγκεκριμένη εργασία. Θέλω επίσης να ευχαριστήσω τον Υποψήφιο Διδάκτορα κ. Κωνσταντίνο Ανυφαντή για τη βοήθεια του στην εκμάθηση του προγράμματος ANSYS, Inc. Τέλος ευχαριστώ και αφιερώνω αυτή τη διπλωματική εργασία στους γονείς μου Βασίλη και Μυρτώ καθώς και στην Άννα που με την υποστήριξη και την υπομονή τους με βοήθησαν να την ολοκληρώσω.



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>: ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΤΗΣ ΕΠΙΣΚΕΥΗΣ ΜΕ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΕΠΙΣΚΕΥΗΣ ΜΕ ΕΠΙΘΕΜΑ ΑΠΟ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ .....	1
1.2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ .....	3
1.2.1 ΑΝΑΦΟΡΑ ΣΤΙΣ ΕΠΙΣΚΕΥΕΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΠΙΘΕΜΑΤΩΝ ΑΠΟ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ..	3
1.2.2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ ΣΤΗΝ ΜΟΝΟΠΛΕΥΡΗ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΛΑΓΙΟ ΜΕΤΩΠΟ ΡΩΓΜΗΣ.....	9
1.3 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ .....	33

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>: ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ .....	34
2.2 ΠΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ.....	35
2.2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ .....	35
2.2.2 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ .....	36
2.2.3 ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΥΠΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	37
2.2.4 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ - ΠΛΗΡΩΣΗ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ - ΠΡΟΕΚΒΟΛΗ ΣΤΟ ΧΩΡΟ .....	41
2.3 ΕΠΙΛΥΣΗ .....	49
2.3.1 ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ - ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ.....	49
2.3.2 ΤΥΠΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ .....	50
2.4 ΜΕΤΑΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ .....	51
2.5 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΑΜΦΙΠΛΕΥΡΗΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΤΗΣ ΠΛΑΚΑΣ .....	54
2.6 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΤΟΥ ΤΡΟΠΟΥ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΤΗΣ ΡΩΓΜΗΣ .....	55
2.7 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ .....	60
2.8 ΓΕΝΙΚΟΣ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ.....	66

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>: ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΤΟΥ ΤΡΟΠΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ**

3.1 ΠΡΩΤΗ ΣΥΓΚΡΙΣΗ .....	72
3.1.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΣΥΓΚΡΙΝΟΜΕΝΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ .....	72
3.1.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΔΥΟ ΜΟΝΤΕΛΩΝ.....	73
3.1.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΔΥΟ ΜΟΝΤΕΛΩΝ .....	76
3.2 ΔΕΥΤΕΡΗ ΣΥΓΚΡΙΣΗ .....	77
3.2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΣΥΓΚΡΙΝΟΜΕΝΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ .....	77
3.2.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΔΥΟ ΜΟΝΤΕΛΩΝ.....	79
3.2.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΔΥΟ ΜΟΝΤΕΛΩΝ .....	80
3.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΣΕ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ANSYS .....	81
3.4 ΣΥΝΟΨΗ ΑΠΟ ΤΗ ΣΥΓΚΡΙΣΗ .....	81

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>: ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΧΑΛΥΒΔΙΝΗΣ ΠΛΑΚΑΣ ΜΕ ΕΠΙΘΕΜΑ ΑΠΟ CARBON - ΕΡΟΧΥ**

4.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ .....	82
4.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ .....	84
4.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ .....	103

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ .....	107
-------------------------------	-----

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ**

ΚΩΔΙΚΑΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ .....	109
--------------------------------------	-----







## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

### ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΤΗΣ ΕΠΙΣΚΕΥΗΣ ΜΕ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

#### 1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΕΠΙΣΚΕΥΗΣ ΜΕ ΕΠΙΘΕΜΑ ΑΠΟ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

Στο θαλάσσιο περιβάλλον είναι συχνή η ανάπτυξη δομικών αστοχιών στις κατασκευές, όπως ρωγμές, διαβρώσεις και τοπικές παραμορφώσεις. Ειδικά σε διάφορα τμήματα χαλύβδινων πλοίων λόγω της εναλλασσόμενης φόρτισης είναι συνήθης η εμφάνιση ρωγμών από κόπωση (fatigue cracking). Όσο αναπτύσσεται η ρωγμή, μειώνεται η επιφάνεια της διατομής που μπορεί να φέρει φορτίο, οδηγώντας στην αύξηση της τάσης της άθικτης διατομής και επιφέροντας εντονότερο εντατικό πεδίο στα άκρα της ρωγμής. Τα παραπάνω σημαίνουν ότι, όταν η ρωγμή ξεπεράσει ένα συγκεκριμένο μέγεθος, η άμεση επισκευή της αποτελεί μονόδρομο για την αποτροπή της αστοχίας της κατασκευής. Εδώ και αρκετά χρόνια, ένας τρόπος επισκευής ρωγμών που δημιουργήθηκαν από κόπωση γίνεται με μεταλλικά επιθέματα που συνδέονται με την κύρια κατασκευή με την βοήθεια κοχλιών ή ήλων. Επειδή σε αυτού του τύπου την επισκευή τα φορτία μεταφέρονται από την κύρια δομή στο επίθεμα μέσω των κοχλιών, υπάρχουν σημαντικές συγκεντρώσεις τάσεων στα όρια τους. Επιπροσθέτως, το μεταλλικό επίθεμα προσέδιδε βάρος στην αρχική κατασκευή και ήταν εξαιρετικά δύσκολη η εφαρμογή του σε πολύπλοκες γεωμετρίες. Σύμφωνα με τα παραπάνω δημιουργήθηκε η ανάγκη ανάπτυξης μιας νέας μεθόδου ενίσχυσης της κύριας δομής, χωρίς την ύπαρξη οπών στην περιοχή της επισκευής.

Η ιστορία των σύνθετων υλικών ξεκίνησε στα τέλη της δεκαετίας του 1930, όταν σύνθετα υλικά από ίνες γυαλιού χρησιμοποιήθηκαν κυρίως στα ραντάρ των αεροπλάνων. Η μετέπειτα ραγδαία χρήση τέτοιων υλικών καθώς και η ανάπτυξη της τεχνολογίας οδήγησαν σε μια νέα μέθοδο επισκευής μεταλλικών -και όχι μόνο- κατασκευών, με την βοήθεια σύνθετων υλικών αποτελούμενων από ίνες άνθρακα και υψηλής αντοχής κολλητικές ουσίες (CFRP). Η ανάπτυξη της πιο πάνω μεθόδου ξεκίνησε από την πολεμική αεροπορία της Αυστραλίας (RAAF) στα τέλη της δεκαετίας του 1970, για την επισκευή τμημάτων αεροσκαφών και από τότε εδραιώθηκε στον κλάδο της αεροναυπηγικής και υιοθετήθηκε τόσο από πολεμικές αεροπορίες διαφόρων χωρών, όσο και από κατασκευαστές πολιτικών αεροσκαφών. Στην ναυπηγική, η τεχνική αυτή εισήχθη τα τελευταία χρόνια, λόγω των πολύ καλών μηχανικών, θερμικών και φυσικών ιδιοτήτων των ινών άνθρακα και των κολλητικών ουσιών, γνωρίζοντας όλο και μεγαλύτερη ανάπτυξη και εύρος εφαρμογής. Μια τυπική επισκευή μεταλλικής πλάκας με διαμπερή κεντρική ρωγμή, επισκευασμένη με επίθεμα από σύνθετα υλικά παρουσιάζεται στο σχήμα 1.1 που ακολουθεί.



Σε περιπτώσεις όπου ο δεξαμενισμός είναι προγραμματισμένος, η μέθοδος αυτή είναι προτιμητέα σε περιοχές με πολύπλοκη γεωμετρία ή σε περιοχές όπου για να γίνει θερμική κατεργασία, είναι αναγκαία η διαδικασία της αδρανοποίησης δεξαμενών (gas-free). Επιπροσθέτως, σε πολλές περιπτώσεις όπου κάποιες κατασκευές πρέπει να πληρούν νέους κανονισμούς ή πρέπει να ανταποκριθούν σε δυσμενέστερα φορτία, η ενίσχυση των ελασμάτων με επιθέματα από ίνες άνθρακα είναι, κάτω από προϋποθέσεις, ιδανική.

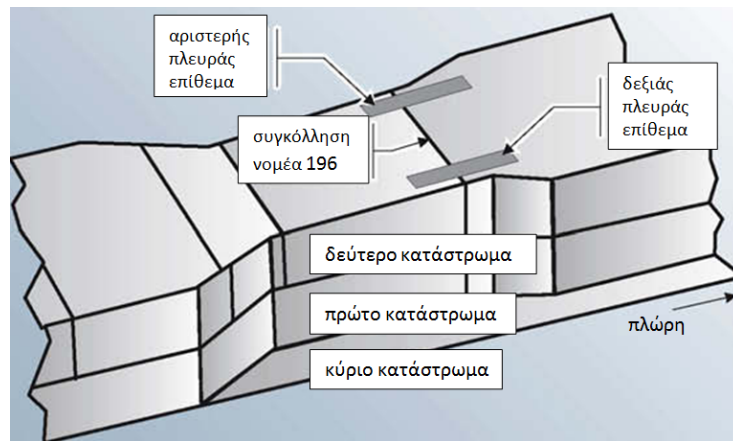
Η μέθοδος των επιθεμάτων από σύνθετα υλικά έχει σαφώς και μειονεκτήματα. Ένα από αυτά είναι ότι σε επισκευασμένες πλάκες ελλοχεύει ο κίνδυνος να αποκολληθεί ολόκληρο το επίθεμα λόγω της έλλειψης της δυνατότητας του κολλητικού στρώματος να ανταποκριθεί στις επιβαλλόμενες τάσεις. Ωστόσο, λόγω των πλεονεκτημάτων που προσφέρει η μέθοδος αυτή, γίνονται συνεχώς έρευνες για την εξέλιξη της, καθώς επίσης προωθείται η ανάπτυξη αριθμητικών μοντέλων που θα προσημειώνουν την συμπεριφορά της επισκευασμένης περιοχής.

## **1.2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ**

### **1.2.1 ΑΝΑΦΟΡΑ ΣΤΙΣ ΕΠΙΣΚΕΥΕΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΠΙΘΕΜΑΤΩΝ ΑΠΟ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ**

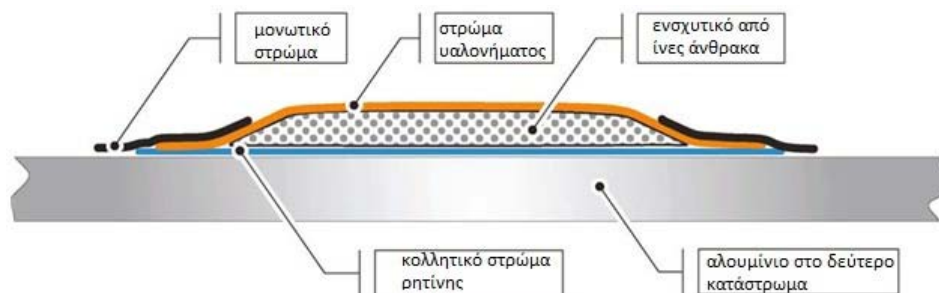
Στο παρόν εδάφιο θα παρουσιαστούν ορισμένες επιλεγμένες επιστημονικές εργασίες που αφορούν στην αντιμετώπιση προβλημάτων και δομικών αστοχιών με τη βοήθεια επιθεμάτων από σύνθετα υλικά, καθώς και διάφορες μελέτες -είτε πειραματικές είτε αριθμητικές- που εξετάζουν την αποτελεσματικότητα της μεθόδου επισκευής μεταλλικών πλακών από σύνθετα υλικά.

Η εργασία [1] είναι σημαντικό να αναφερθεί, διότι παρουσιάζει την απαρχή της χρήσης σύνθετων υλικών για την ενίσχυση ναυπηγικών κατασκευών. Στα μέσα της δεκαετίας του '80, οι φρεγάτες κλάσης FFG-7 της RAN (Royal Australian Navy) (λόγω της γεωμετρίας των συνεχόμενων αλουμινένιων υπερκατασκευών τους, οι οποίες κάλυπταν περίπου το 55% του μήκους του πλοίου) παρουσίασαν ρωγμές νωρίς σε σχέση με τη διάρκεια ζωής τους. Ιδιαίτερη ανησυχία παρουσίαζε η περιοχή του δεύτερου καταστρώματος κοντά στον νομέα 196, όπου ανακαλύφθηκε ότι ήταν περιοχή με μεγάλη συγκέντρωση τάσεων. Εκείνη την εποχή η RAN σκεφτόταν να επιλύσει το πρόβλημα με την χρήση επιθεμάτων από σύνθετα υλικά, έχοντας παρακολουθήσει την εργασία του Δόκτορος Alan Baker στο DSTO (Defense Science and Technology Organization). Έτσι αποφασίστηκε να επικολληθούν δύο επιθέματα -ένα για κάθε πλευρά του πλοίου-, από τον νομέα 188 έως και τον 212, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.2.



**Σχήμα 1.2: Τοποθεσία επιθεμάτων στο 2ο κατάστρωμα.**

Για την επισκευή της πλάκας χρησιμοποιήθηκαν μονοαξονικές ίνες ανθρακονήματος 25 φύλλων με βάρος  $300\text{gr}/\text{m}^2$ , προσανατολισμένες παράλληλα στον διαμήκη άξονα του πλοίου. Με την παραπάνω διάταξη επιτεύχθηκε μείωση της μέγιστης τάσης στην επισκευασμένη περιοχή κατά 20%, δηλαδή περίπου 60 MPa. Η ακριβής διάταξη της περιοχής επιδιόρθωσης παρουσιάζεται στο σχήμα 1.3 και περιλαμβάνει εκτός από τις ενισχυτικές ίνες και την ρητίνη, ένα στρώμα επιθέματος από ίνες γυαλιού (GRP) που καλύπτει τις ίνες του άνθρακα ώστε να το προστατέψει από το θαλάσσιο περιβάλλον και την τριβή, και ένα περιμετρικό στρώμα μόνωσης που εμποδίζει το θαλασσινό νερό να εισχωρεί στα φύλλα του επιθέματος.



**Σχήμα 1.3: Διάταξη επιθέματος που χρησιμοποιήθηκε στις φρεγάτες την (RAN)**

Έπειτα η μελέτη επικεντρώνεται στην συντήρηση της επισκευής και αναφέρει ότι τα επόμενα 15 χρόνια τα επιθέματα ελέγχονταν κατά τακτά χρονικά διαστήματα και χρειάστηκαν τέσσερις φορές επισκευή. Η πρώτη επισκευή των επιθεμάτων έγινε το 1995 όταν το προστατευτικό στρώμα των υαλονημάτων χρειαζόταν άμεσα αντικατάσταση, λόγω αστοχίας της κόλλησης του με το κατάστρωμα. Η δεύτερη επισκευή έγινε το 1998 κατά την διάρκεια ενός προγραμματισμένου δεξαμενισμού στο επίθεμα που βρισκόταν στην αριστερή πλευρά, στο οποίο λόγω λανθασμένης ανθρώπινης ενέργειας τραυματίστηκαν οι ίνες άνθρακα και χρειάστηκαν επισκευή. Το 2002 παρατηρήθηκε ότι στην αριστερή πλευρά το επίθεμα είχε αποκολληθεί από το κατάστρωμα κατά ένα μήκος 200mm και χρειάστηκε αντικατάσταση ένα μεγάλο μέρος του. Τέλος το 2005 παρατηρήθηκαν εκτεταμένες ζημιές

και στα δύο επισκευασμένα τμήματα της φρεγάτας που θεωρήθηκαν ότι ήταν αποτέλεσμα βαρέων εργασιών πάνω στο κατάστρωμα.

Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου, αν και σε πρώιμο στάδιο, δείχνει ότι αυτός ο τρόπος επισκευής έχει να προσδώσει πολλά και στον τομέα της ναυπηγικής.

Στην εργασία [2] περιγράφονται με παραδείγματα τα πλεονεκτήματα της επισκευής μιας κατασκευής με την χρήση επιθεμάτων από σύνθετα υλικά. Αναφέρεται εκτενώς στην εργασία η περίπτωση επισκευής του πολεμικού πλοίου της RAN, όμως επειδή το παράδειγμα έχει ήδη αναλυθεί πιο πάνω, θα παραλειφθεί. Εν συνεχεία περιγράφεται μια περίπτωση επισκευής πλατφόρμας πετρελαίου FPSO (floating, production, storage and offloading). Πρόκειται για ένα πλοίο, μόνιμα αγκυροβολημένο πάνω από την πετρελαιοπηγή, που αντλεί το ορυκτό έλαιο από ευλύγιστους, ειδικά κατασκευασμένους σωλήνες (risers). Η αγκύρωση του πλοίου, που είναι απαραίτητη για την συγκράτηση του πλοίου σε συγκεκριμένη θέση, δημιουργούν ένα κοπωτικό περιβάλλον πιο αντίξοο σε σχέση με το αν το πλοίο έπλεε ελεύθερα. Ρωγμές λόγω κόπωσης βρέθηκαν σε ένα τέτοιου είδους πλοίο στην Νορβηγία. Οι ρωγμές είχαν μήκος περίπου 60 mm σε μια φρακτή που χώριζε το χώρο φορτίου από την δεξαμενή ζυγοστάθμισης, με αποτέλεσμα το ορυκτό έλαιο να μπορεί να διαφύγει από την δεξαμενή του φορτίου στην δεξαμενή ζυγοστάθμισης και από εκεί στο θαλάσσιο περιβάλλον. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να μην χρησιμοποιείται η συγκεκριμένη δεξαμενή φορτίου για την αποφυγή μόλυνσης του περιβάλλοντος, επομένως η μείωση αποθηκευτικής ικανότητας, αύξανε το κόστος εξόρυξης για την εταιρία. Από την άλλη πλευρά η επισκευή της φρακτής με τους μέχρι τότε συνήθεις τρόπους επισκευής, ήταν χρονοβόρα και πολύ ακριβή, λόγω της υψηλής θερμοκρασίας που αναπτύσσεται κατά την κοπή ή συγκόλληση μετάλλων, που θα έκανε απαραίτητη την εκκένωση πέντε δεξαμενών φορτίου μέχρι να τελειώσει η επισκευή. Όλα τα παραπάνω είχαν ως αποτέλεσμα την χρήση επιθεμάτων από σύνθετα υλικά για την επισκευή της δομής. Η επισκευή εκτελέστηκε σε διάστημα μόλις δύο βδομάδων από μια ομάδα δύο τεχνικών. Έως το χρόνο που δημοσιεύτηκε η μελέτη, 18 μήνες μετά την εφαρμογή των επιθεμάτων δεν είχε παρουσιαστεί κανένα πρόβλημα στην επισκευασμένη περιοχή. Η επιτυχία της κατασκευής έκανε εμφανή τα πλεονεκτήματα της μεθόδου στην εταιρία διαχείρισης του πλοίου, η οποία προχώρησε άμεσα στην ανάθεση εργασιών, στην εταιρία QinetiQ, για την επισκευή ενός δεύτερου πλοίου FPSO το οποίο παρουσίαζε παρεμφερή προβλήματα.

Με αφορμή την εργασία [2] η οποία αναφέρεται στην εταιρία QinetiQ, θα αναφερθεί η μελέτη [3] στην οποία περιγράφεται εκτενέστερα η δράση της εταιρίας στην επισκευή πλοίων αλλά και αεροσκαφών. Η 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. Έως το χρόνο που δημοσιεύτηκε η εργασία, η εταιρία QinetiQ είχε επισκευάσει αρκετές φρεγάτες και αντιτορπιλικά πολεμικά πλοία, όπου η εφαρμογή επιθέματος μόνο από την μια πλευρά της δομής έχει ενισχύσει αρκετά την κατασκευή ώστε να αποφευχθεί η

συγκόλληση του μετάλλου. Σε αρκετές περιπτώσεις η επισκευή δεν είναι μόνιμη αλλά γίνεται, ώστε να αντέξει η κατασκευή έως την προγραμματισμένη συντήρηση του πλοίου ή την ολοκλήρωση του ταξιδιού. Η εξέλιξη της τεχνολογίας έχει δημιουργήσει πολλά οφέλη στη χρήση επιθεμάτων από σύνθετα υλικά για την επισκευή μιας δομής, όπως η χρήση αισθητήρων που επιτρέπουν τον έλεγχο της επέκτασης των αρχικών ρωγμών του μετάλλου. Η εταιρία QinetiQ είναι εξίσου ενεργή και στο χώρο της αεροναυπηγικής, όπου η τεχνική της επισκευής με την χρήση επιθεμάτων από σύνθετα υλικά είναι αποδεδειγμένα πιο αποτελεσματική από την παραδοσιακή τεχνική του περιορισμού της ανάπτυξης της ρωγμής με την διάνοιξη μιας οπής στην άκρη της ρωγμής. Τέλος, η εν λόγω 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.

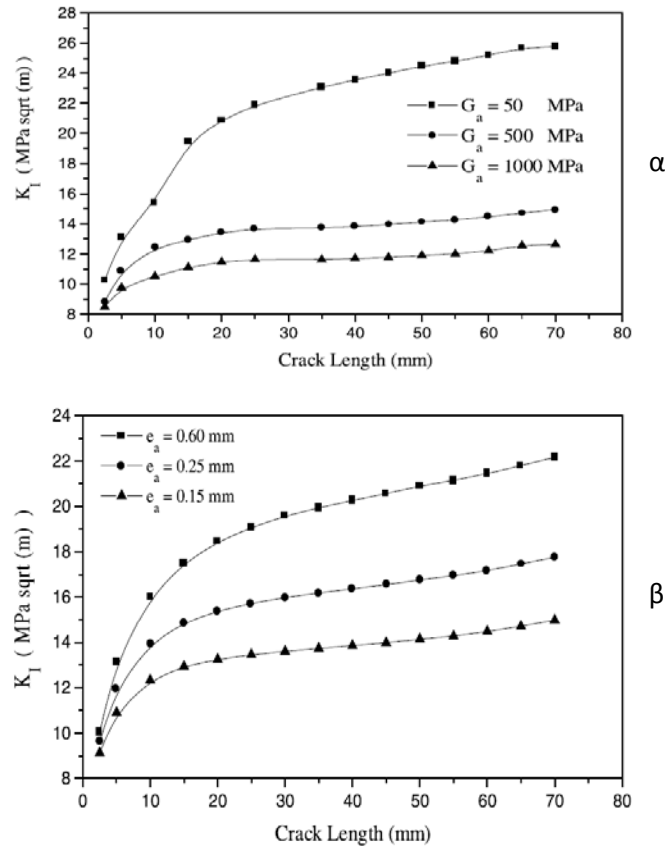
Στην μελέτη [4] αναφέρεται ότι η μείωση του συντελεστή έντασης τάσης (ΣΕΤ) είναι το άμεσο ζητούμενο κατά τον σχεδιασμό ενός επιθέματος. Ακόμα και με την επίστρωση ενός στρώματος επιθέματος, η μείωση του ΣΕΤ είναι αισθητή. Μια αύξηση του πάχους της μεταλλικής πλάκας θα προκαλέσει μια αύξηση του ΣΕΤ, καθώς και μια αύξηση των τάσεων των ινών του επιθέματος και της ρητίνης κοντά στην περιοχή της ρωγμής, όμως λίγες επιπτώσεις θα έχει σε ότι αφορά τις τάσεις του κολλητικού στρώματος στις ακμές του επιθέματος. Πιο συγκεκριμένα με την ανάπτυξη ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων σε πλάκες κράματος αλουμινίου 2024 T3 που είναι διαβρωμένες και φέρουν ρωγμή περιφερειακά της διαβρωμένης περιοχής εξήχθησαν τα κάτωθι συμπεράσματα:

- ✚ Μετά την τοποθέτηση του επιθέματος, οι περιοχές μέγιστης τάσης της πλάκας αλουμινίου μετατοπίστηκαν από τις ακμές της διαβρωμένης περιοχής και του μετώπου της ρωγμής στις ακμές του επιθέματος, και εν γένει μειώθηκαν με την αύξηση των στρώσεων του σύνθετου υλικού.
- ✚ Η μέγιστη επιφανειακή τάση για το παχύ ενισχυμένο δοκίμιο μειώνεται σημαντικά κατά 26-37% σε σχέση με το μη ενισχυμένο δοκίμιο. Αντίστοιχη αναφορά που έχει γίνει από τον κύριο συγγραφέα της μελέτης για λεπτά δοκίμια δείχνει μείωση των επιφανειακών τάσεων της τάξεως του 83-85%.
- ✚ Η αριθμητική ανάλυση εμφάνισε ως αποτελέσματα έντασης του κολλητικού στρώματος τιμές πολύ μεγαλύτερες από εκείνες του αλουμινίου και του σύνθετου επιθέματος υποδεικνύοντας ότι η αστοχία του ενισχυμένου δοκιμίου θα ξεκινήσει πρώτα από το κολλητικό στρώμα.
- ✚ Δοκιμές τάνυσης έδειξαν ότι η ικανότητα του επιθέματος στο να αντέχει επιβαλλόμενα φορτία είναι μεγαλύτερη από αυτήν του τραυματισμένου δοκιμίου αλουμινίου. Το μη ενισχυμένο δοκίμιο κατέρρευσε μετά από φόρτιση 155.6 kN έπειτα από μετατόπιση 7.62 mm, ενώ το ενισχυμένο δοκίμιο άντεξε σε φόρτιση 200.17 kN και μετατόπιση 15.24 mm χωρίς να αστοχήσει. Παρατηρήθηκε επίσης ότι η αστοχία στο ενισχυμένο δοκίμιο ξεκίνησε στο στρώμα του κολλητικού στρώματος



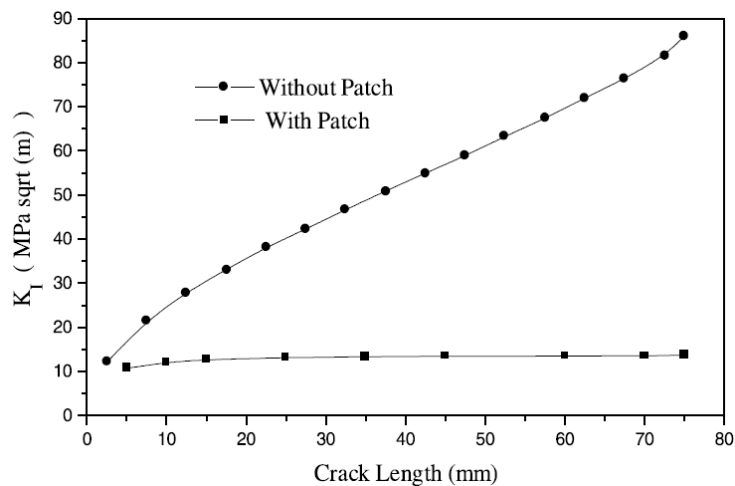
ως αστοχία από διάτμηση, επιβεβαιώνοντας τα αποτελέσματα της ανάλυσης των πεπερασμένων στοιχείων.

Η εργασία [5] είναι μια αποκλειστικά αριθμητική μελέτη όπου με την βοήθεια των πεπερασμένων στοιχείων εξετάζονται οι παράγοντες που επηρεάζουν τις τιμές του ΣΕΤ. Συγκεκριμένα η τοποθέτηση επιθέματος από σύνθετα υλικά μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της τάξεως του 80% σε σχέση με το μη ενισχυμένο δοκίμιο. Το μέτρο διάτμησης του κολλητικού στρώματος  $G_a$  επίσης επηρεάζει την τιμή του ΣΕΤ αλλά όχι μονοσήμαντα, καθώς η αύξηση του  $G_a$  οδηγεί σε μείωση της τιμής του ΣΕΤ. Λόγω όμως του ότι η αύξηση του μέτρου διάτμησης οδηγεί σε μείωση της κολλητικής δύναμης, μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα κακής κόλλησης μεταξύ της πλάκας και του σύνθετου. Σε ό,τι έχει να κάνει με το κολλητικό στρώμα, σημαντικός παράγοντας στην μείωση της τιμής του ΣΕΤ είναι επίσης το πάχος του κολλητικού μέσου  $e_a$ . Το μεγάλο πάχος της κόλλας ενισχύει την κόλληση, αλλά μειώνει την ικανότητα του μέσου να μεταφέρει τα φορτία στο επίθεμα, πράγμα που μειώνει την δραστηριότητα ολόκληρης της ενίσχυσης. Από την άλλη πλευρά, μια μείωση στο πάχος του κολλητικού στρώματος μπορεί να ενισχύει την ικανότητα του να μεταφέρει τα φορτία στο επίθεμα, όμως αυξάνει τις πιθανότητες αποκόλλησης της ενίσχυσης. Επίσης αναφέρεται ότι, αν και το πλάτος του επιθέματος δεν είναι σημαντικός συντελεστής στην μείωση του ΣΕΤ, θεωρείται απαραίτητο το πλάτος του επιθέματος να είναι μεγαλύτερο του μήκους της ρωγμής. Στο σχήμα 1.4 παρατίθενται διαγράμματα από τις επιπτώσεις των προαναφερθέντων παραγόντων στην τιμή του ΣΕΤ.



Σχήμα 1.4: Επιπτώσεις του α) μέτρου διάτμησης της κόλλας στην τιμή του ΣΕΤ και β) του πάχους της κόλλας στην τιμή του ΣΕΤ

Τέλος παρουσιάζεται η διαφοροποίηση των τιμών του ΣΕΤ σε ένα δοκίμιο με επίθεμα από σύνθετα υλικά και χωρίς επίθεμα, (σχήμα 1.5).



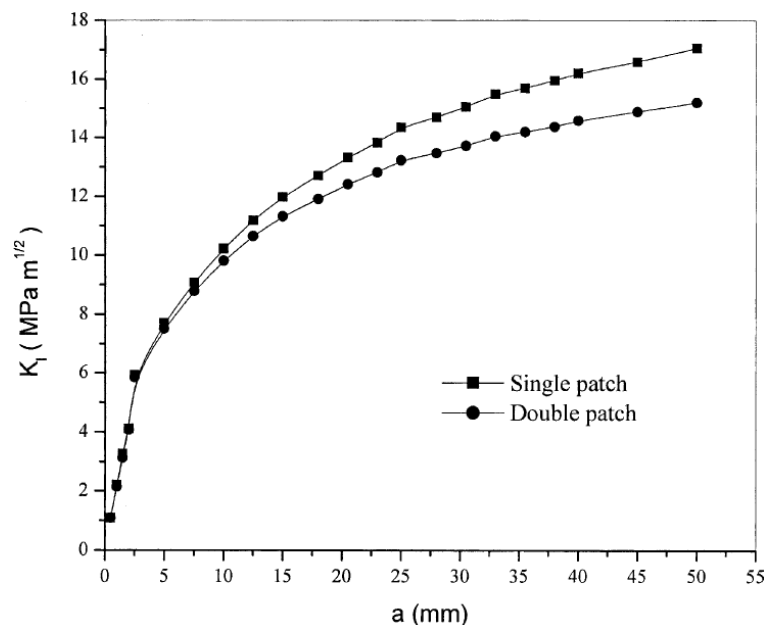
Σχήμα 1.5: Διαφοροποίηση της τιμής του ΣΕΤ σε ένα δοκίμιο με επίθεμα και χωρίς επίθεμα.



## 1.2.2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ ΣΤΗΝ ΜΟΝΟΠΛΕΥΡΗ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΛΑΓΙΟ ΜΕΤΩΠΟ ΡΩΓΜΗΣ

Στο προηγούμενο κεφάλαιο περιγράφησαν τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η επισκευή ή ενίσχυση μιας μεταλλικής πλάκας με επίθεμα από σύνθετα υλικά. Παρόλο που η πιο αποδοτική επισκευή είναι η επικόλληση επιθέματος και στις δύο πλευρές της πλάκας, αρκετές φορές υιοθετείται η μέθοδος της ενίσχυσης από την μια πλευρά του ελάσματος μόνο. Αυτό γίνεται διότι συνήθως μόνο η μια πλευρά της κατασκευής είναι προσβάσιμη για επισκευή ή ακόμα και γιατί μόνο στην μια πλευρά επιτρέπεται να κολληθεί επίθεμα. Η μονόπλευρη ενίσχυση επιφέρει κάμψη στην πλάκα οφειλόμενη στην έκκεντρη μεταφορά του ουδέτερου άξονα της κατασκευής κάτω από μηχανική φόρτιση και μεταβολή του ΣΕΤ κατά το πάχος της πλάκας.

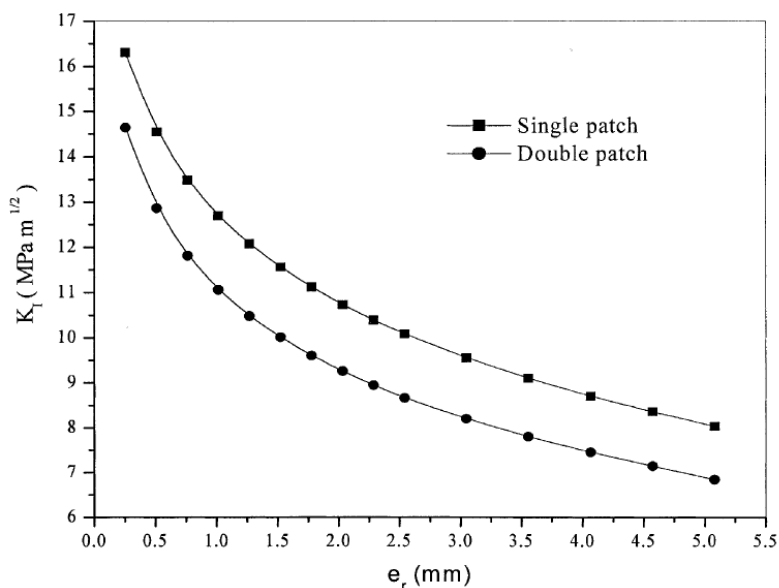
Στην εργασία [6] με τη χρήση προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων γίνεται μια αριθμητική ανάλυση που συγκρίνει τις τιμές του ΣΕΤ σε όμοιες μεταλλικές πλάκες με μονόπλευρο επίθεμα και αμφίπλευρο επίθεμα. Θεωρώντας αλουμινένια πλάκα και επίθεμα ινών βορίου δημιουργείται ένα μοντέλο στο οποίο οι μονόπλευρα ενισχυμένες πλάκες έχουν το διπλάσιο πάχος επιθέματος από εκείνο των αμφίπλευρα ενισχυμένων πλακών. Οι πλάκες υπόκεινται σε μονοαξονικό εφελκυσμό 70 MPa και, λόγω συμμετρίας, μοντελοποιείται το μισό μέρος της κατασκευής. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.6, οι τιμές του ΣΕΤ παρουσιάζουν μια ασυμπτωτική συμπεριφορά, ενώ υπάρχει μείωση της τιμής του ΣΕΤ με την άνοδο τις τιμές του μήκους ρωγμής έως και 10% στην περίπτωση της αμφίπλευρα ενισχυμένης πλάκας σε σχέση με την μονόπλευρα ενισχυμένη.



Σχήμα 1.6: Σύγκριση τιμών ΣΕΤ μεταξύ της μονόπλευρης και αμφίπλευρης ενίσχυσης.

Για καλύτερη κατανόηση της συνεισφοράς της αμφίπλευρης ενίσχυσης στην τιμή του ΣΕΤ παρουσιάζεται το σχήμα 1.7 όπου φαίνεται ότι όσο μεγαλύτερο είναι το πάχος του

επιθέματος τόσο πιο καλά αποτελέσματα έχει η αμφίπλευρη ενίσχυση σε σχέση με την μονόπλευρη.

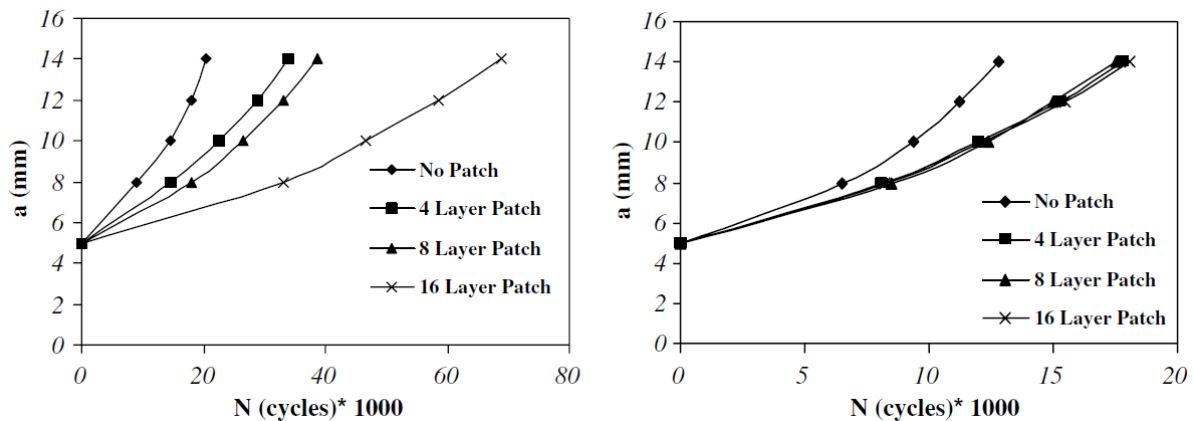


**Σχήμα 1.7 :** Επίδραση του πάχους επιθέματος στον ΣΕΤ σε αμφίπλευρη και μονόπλευρη ενίσχυση.

Τελικά σε αυτήν την μελέτη αποδεικνύεται ότι ο ΣΕΤ μειώνεται σημαντικά χρησιμοποιώντας αμφίπλευρη ενίσχυση σε μια πλάκα σε σχέση με την μονόπλευρη ενίσχυση.

Μια αριθμητική μελέτη που συνοδεύεται από πειραματικά αποτελέσματα είναι η εργασία [5]. Στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα ANSYS, όπου μοντελοποιήθηκε πλάκα αλουμινίου με κεντρική διαμπερή ρωγμή και επίθεμα από μονοαξονικές ίνες άνθρακα μόνο στη μια πλευρά της πλάκας. Στο μοντέλο υπετέθη ότι η ρωγμή αναπτύσσεται μόνο στην αλουμινένια πλάκα και καμία βλάβη ή αποκόλληση δεν υφίσταται στο επίθεμα. Με τη χρήση του μοντέλου που δημιουργήθηκε εξάγονται οι τιμές του ΣΕΤ και έπειτα χρησιμοποιείται ο νόμος του Paris ώστε να συνδεθεί ο ρυθμός διάδοσης της ρωγμής με τον ΣΕΤ. Στις πειραματικές διαδικασίες εξετάστηκαν δοκίμια ιδίων διαστάσεων με το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων. Τα πειραματικά αποτελέσματα καθώς και η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων έδειξε ότι το μέτωπο της ρωγμής είναι καμπυλόγραμμο. Συγκεκριμένα αναφέρεται ότι η ανάπτυξη της ρωγμής στη μη ενισχυμένη πλευρά είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την πλευρά που φέρει το επίθεμα. Αυτό οφείλεται στην εκτός του επιπέδου της πλάκας κάμψη, που δημιουργείται λόγω της ασυμμετρίας της κατασκευής. Στο σχήμα 1.8 φαίνεται η αντοχή πλακών σε κύκλους φόρτισης ανάλογα με το μήκος ρωγμής. Εξετάζονται πλάκες μη ενισχυμένες και πλάκες ενισχυμένες με διάφορα στρώματα επιθέματος. Διαφαίνεται ότι η τοποθέτηση επιθέματος, ακόμα και μονόπλευρα, είναι αποτελεσματική τόσο σε παχιά όσο και σε λεπτά δοκίμια. Ειδικότερα σε πλάκα πάχους 2.29 mm η διάρκεια ζωής της μεταλλικής πλάκας αυξάνεται σημαντικά με την

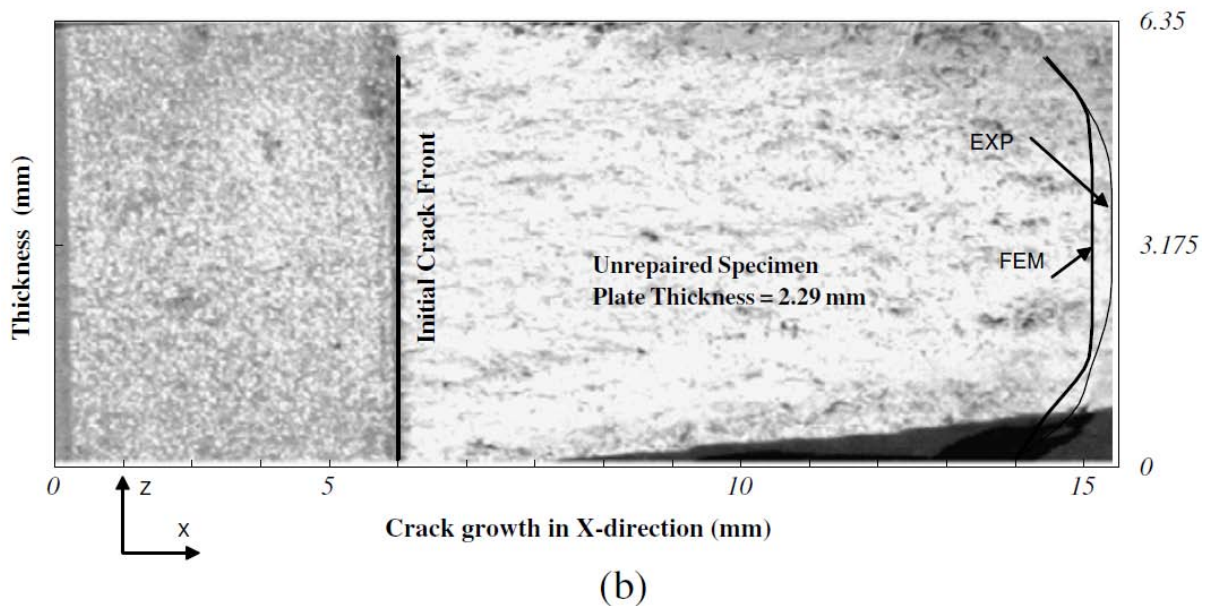
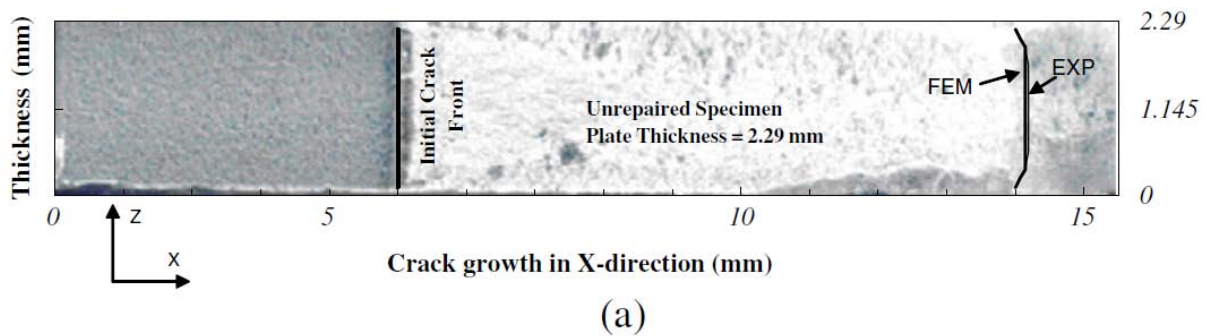
αύξηση των στρωμάτων επιθέματος, όμως σε πλάκα πάχους 6.35 mm δεν υπάρχει αξιόλογη αύξηση ζωής του υλικού με την αύξηση των στρωμάτων επιθέματος.



Σχήμα 1.8: Διάρκεια ζωής μεταλλικών πλακών πάχους 2.29 mm (αριστερά) και 6.35 mm (δεξιά) σε σχέση με το μήκος ρωγμής.

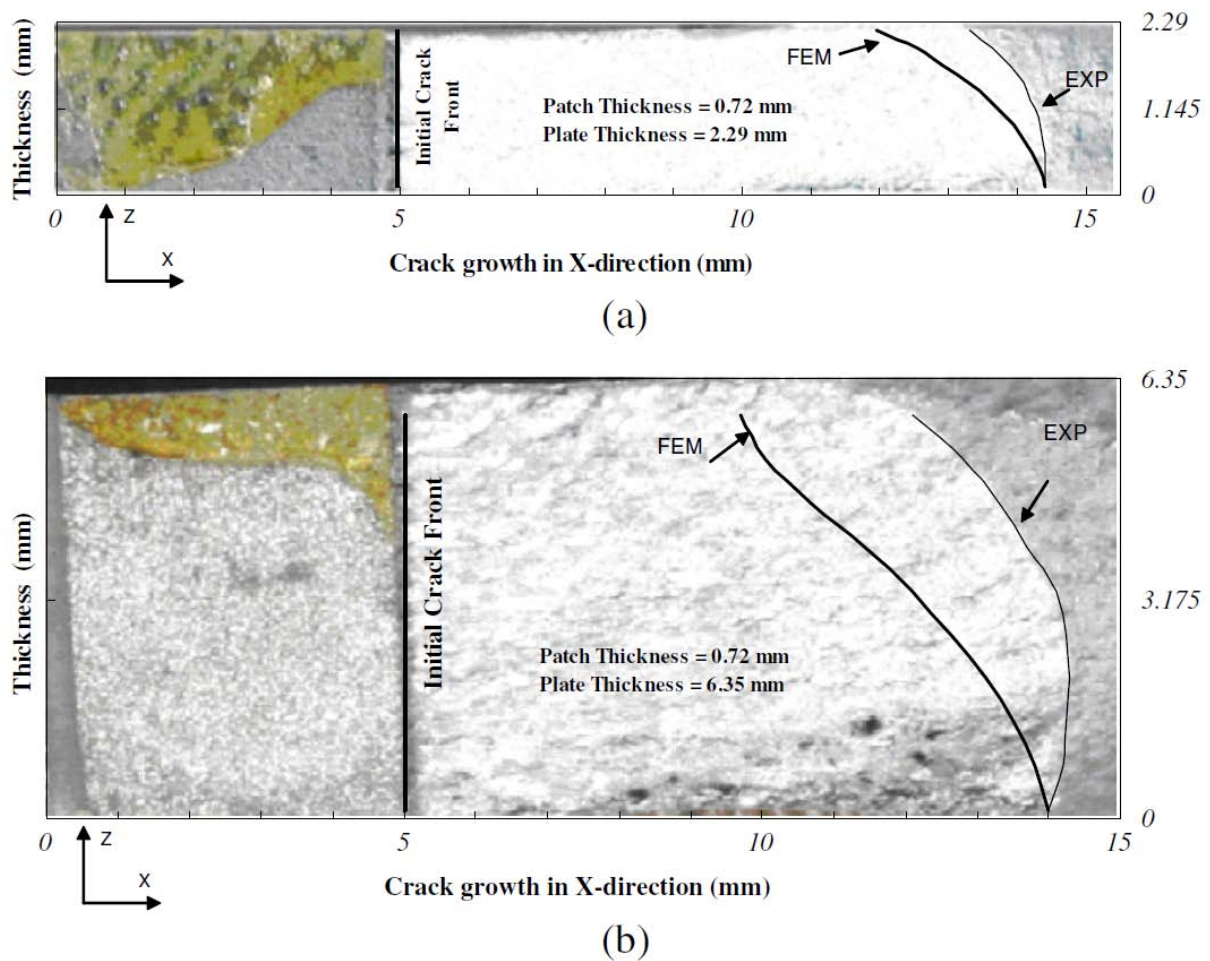
Τα πειράματα της μελέτης έδειξαν ότι σε αλουμινένια πλάκα πάχους 2.29 mm με επίθεμα τεσσάρων στρωμάτων μπορεί να επιτευχθεί αύξηση ζωής της μεταλλικής πλάκας κατά 65-69%, με επίθεμα οκτώ στρωμάτων κατά 85-91% και κατά 218-236% για επίθεμα δεκαέξι στρωμάτων. Από την άλλη πλευρά, σε πλάκα πάχους 6.35 mm η αύξηση ζωής της μπορεί να φτάσει το 21-35% αλλά δεν θα αυξηθεί περαιτέρω με την πρόσθεση και άλλων στρωμάτων επιθέματος.

Στην συνέχεια της μελέτης εξετάζεται το σχήμα του μετώπου της ρωγμής σε μη ενισχυμένα και ενισχυμένα δοκίμια. Το σχήμα του μετώπου της ρωγμής σε μη επισκευασμένα δοκίμια δεν είναι εντελώς ευθύ αλλά παρουσιάζει μια κλίση κοντά στις ελεύθερες επιφάνειες της πλάκας η οποία γίνεται πιο έντονη σε πιο παχιές πλάκες, όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.9. Αυτό συμβαίνει διότι η κατάσταση των τάσεων διαφέρει στις ελεύθερες επιφάνειες κατά το πάχος της πλάκας.



Σχήμα 1.9 σχήμα μετώπου ρωγμής που δημιουργήθηκε από κόπωση σε δοκίμια χωρίς επίθεμα, πάχους 2.29mm (πάνω) και 6.35mm (κάτω).

Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι η διαφορά του μήκους ρωγμής μεταξύ της επιφάνειας που φέρει το επίθεμα και της μη ενισχυμένης επιφάνειας στην περίπτωση της πλάκας πάχους 2.29 mm, είναι όσο και το πάχος της πλάκας, ενώ στην περίπτωση της πλάκας πάχους 6.35 mm είναι όσο το μισό του πάχους της πλάκας. Βέβαια, ενώ για το λεπτό δοκίμιο η αριθμητική ανάλυση συμφωνεί με τα πειραματικά αποτελέσματα σε ότι αφορά στην διαφορά μήκους στις δύο επιφάνειες, στην παχιά πλάκα υπάρχει απόκλιση μεταξύ των δύο τρόπων υπολογισμού, πράγμα που μπορεί να οφείλεται σε μερική αποκόλληση του επιθέματος στην περιοχή της ρωγμής κατά την πειραματική διαδικασία. Στο σχήμα 1.10 φαίνεται η κλίση του μετώπου ρωγμής και στις δύο πλάκες.

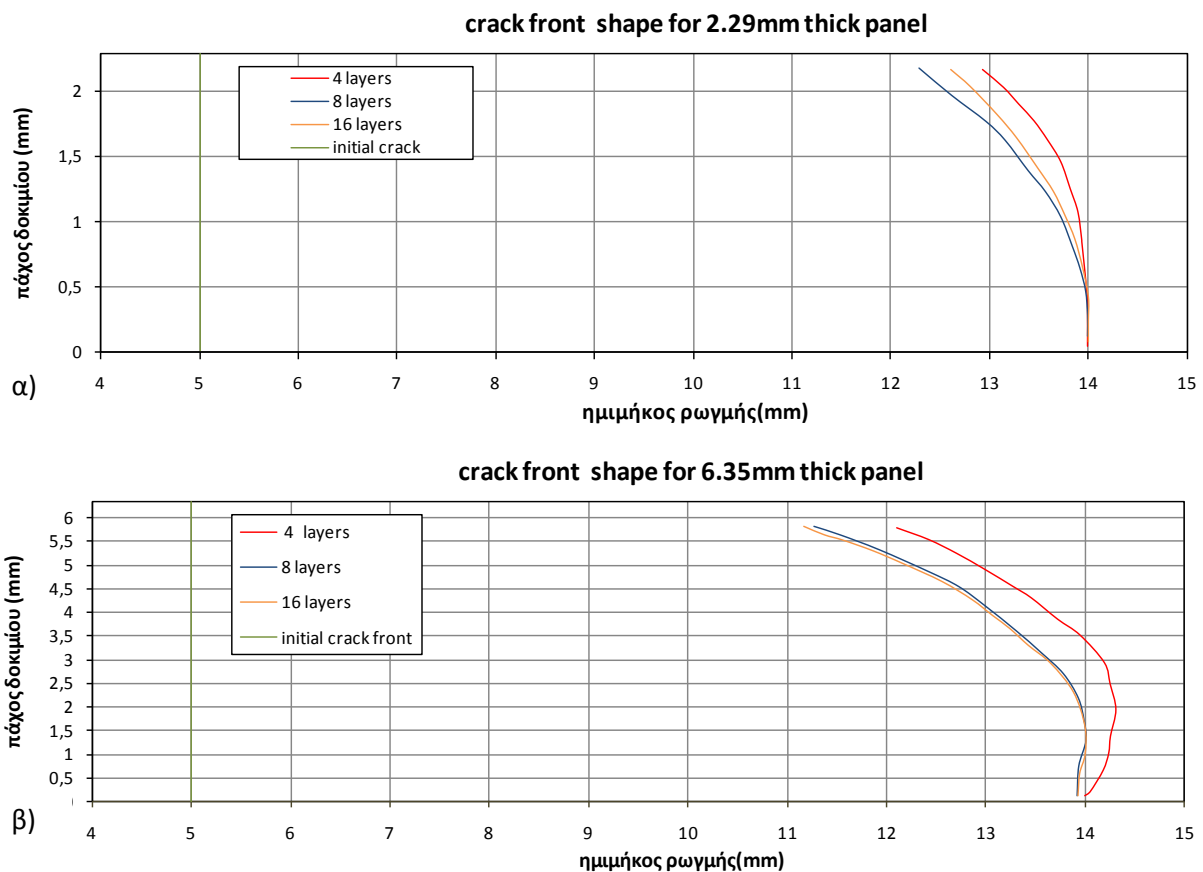


**Σχήμα 1.10:** σχήμα μετώπου ρωγμής που δημιουργήθηκε από κόπωση σε δοκίμια τεσσάρων στρωμάτων επιθέματος και πάχους 2.29mm (πάνω) και 6.35mm (κάτω).

Η μελέτη [8] που αποτελεί συνέχεια της προηγούμενης εργασίας αναφέρεται στην ανεύρεση ενός νέου τρόπου υπολογισμού του ΣΕΤ στις μονόπλευρα επισκευασμένες κατασκευές. Στις περισσότερες μελέτες που χρησιμοποιούν τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για την μοντελοποίηση της ανάπτυξης της ρωγμής θεωρείται ότι το μέτωπο ρωγμής αναπτύσσεται, είτε παράλληλα στην διεύθυνση του πάχους της πλάκας, είτε με κάποια κλίση. Σε αυτήν την μελέτη η μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι βασισμένη σε παραμετρική μελέτη που χρησιμοποιεί και τις δύο πιο πάνω θεωρήσεις ώστε να υπολογίσει τον ΣΕΤ. Πιο συγκεκριμένα μια θέση  $Z_e$  κατά το πάχος της πλάκας αποφασίζεται έτσι ώστε αν ο ΣΕΤ υπολογιζόταν στην μοντελοποίηση του ευθύγραμμου μετώπου ρωγμής σε αυτήν την θέση, να ήταν ο ίδιος σχεδόν με αυτόν που θα υπολογιζόταν με την μοντελοποίηση του πλαγίου μετώπου ρωγμής. Στην μελέτη αναφέρεται ότι η μέγιστη διαφορά στην πρόβλεψη της διάρκειας ζωής ενός υλικού αυτής της μεθόδου σε σχέση με την μέθοδο μοντελοποίησης του πλαγίου μετώπου ρωγμής, είναι 4.5% για λεπτές πλάκες και 7.5% για παχιές πλάκες, ενώ η μέγιστη διαφορά συγκρινόμενη με πειραματικά δεδομένα είναι 11%.

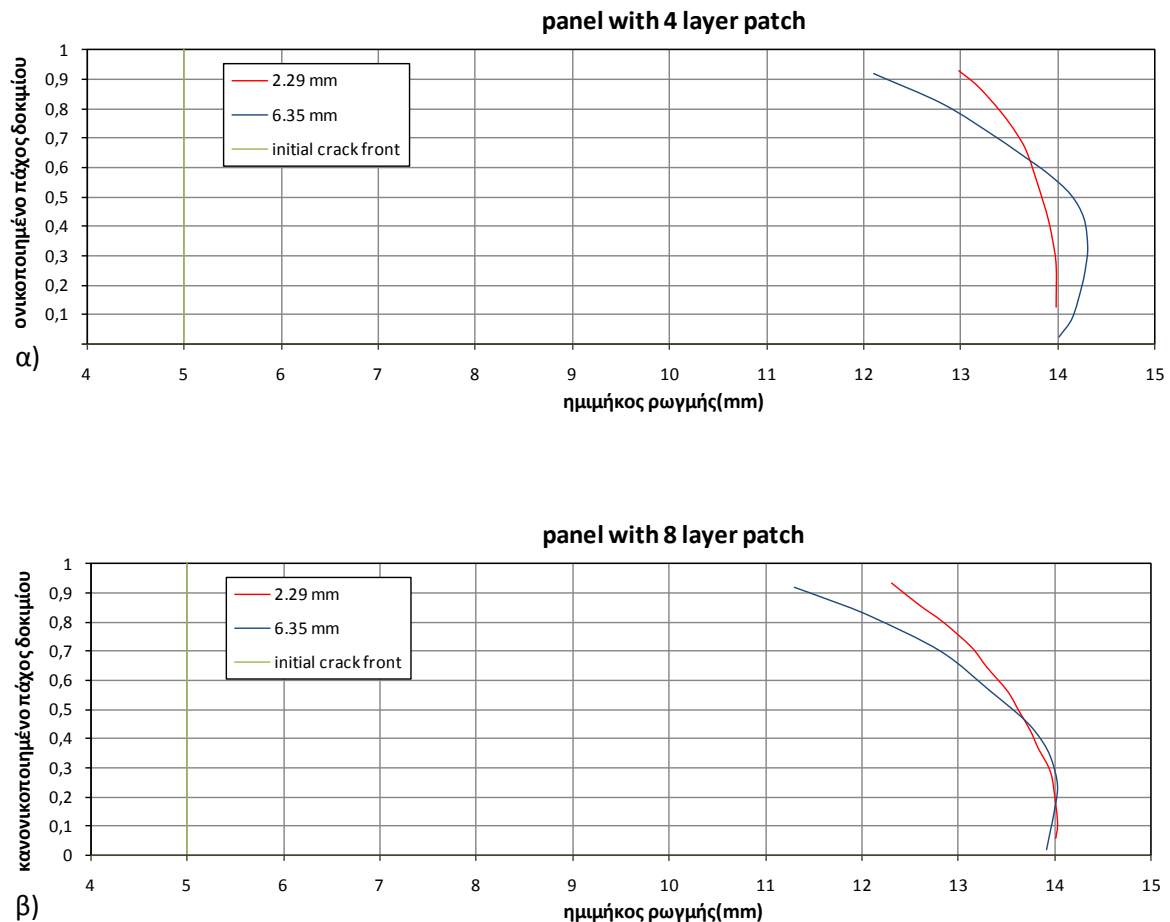
Στην μελέτη [9] που είναι αλληλένδετη με τις εργασίες [7,8] ερευνάται πειραματικά η συμπεριφορά δοκιμίων με κεντρική διαμετρική ρωγμή που καταπονούνται σε κόπωση. Πιο

συγκεκριμένα τα δοκίμια ήταν από κράμα αλουμινίου 2024-T3 και έφεραν αρχική, κεντρική, διαμερή ρωγή 9.8 mm. Έπειτα, με την βοήθεια μηχανήματος παραγωγής φορτίων κοπώσεως, η αρχική ρωγή επεκτάθηκε φτάνοντας τα 10mm σε μήκος. Στη συνέχεια τοποθετούνται στα δοκίμια επιθέματα από μονοαξονικές ίνες γυαλιού αποτελούμενα από 4,8 και 16 στρώματα. Τέλος, στα επιθέματα επιβλήθηκε κυκλική φόρτιση με συχνότητα 10 Hz, αναλογία φόρτισης  $R=0.05$  και μέγιστη τάση 118 MPa. Όταν η ρωγή έφτασε σε μήκος τα 14mm στην μη ενισχυμένη πλευρά, το πείραμα διακόπηκε, μετρήθηκαν οι κύκλοι φόρτισης του υλικού και στο κάθε δοκίμιο εφαρμόστηκε στατικό εντατικό φορτίο, μέχρι αυτό να αστοχήσει. Η τελική φόρτιση του υλικού έως την αστοχία έχει ως αποτέλεσμα να επηρεάσει την όψη της επιφάνειας της ρωγμής. Στην μελέτη αυτή παρατηρείται ότι στα μονόπλευρα ενισχυμένα δοκίμια η ρωγή δεν αναπτύσσεται κατακόρυφα αλλά καμπυλόγραμμα, μάλιστα ερευνάται η μορφή της καμπύλης σε σχέση με το πάχος του δοκίμιου και τον αριθμό των στρώσεων του επιθέματος. Πιο συγκεκριμένα, στα σχήματα 1.11 και 1.12 φαίνεται η μορφή του μετώπου της ρωγμής για δοκίμια με πάχος 2.29mm και 6.35mm τα οποία έχουν ενισχυθεί με επιθέματα 4, 8 και 16 στρώσεων.



Σχήμα 1.11: σύγκριση της μορφής του μετώπου της ρωγμής για δοκίμια, ενισχυμένα με επιθέματα διαφόρων αριθμών στρώσεων. α)2.29mm β)6.35mm.



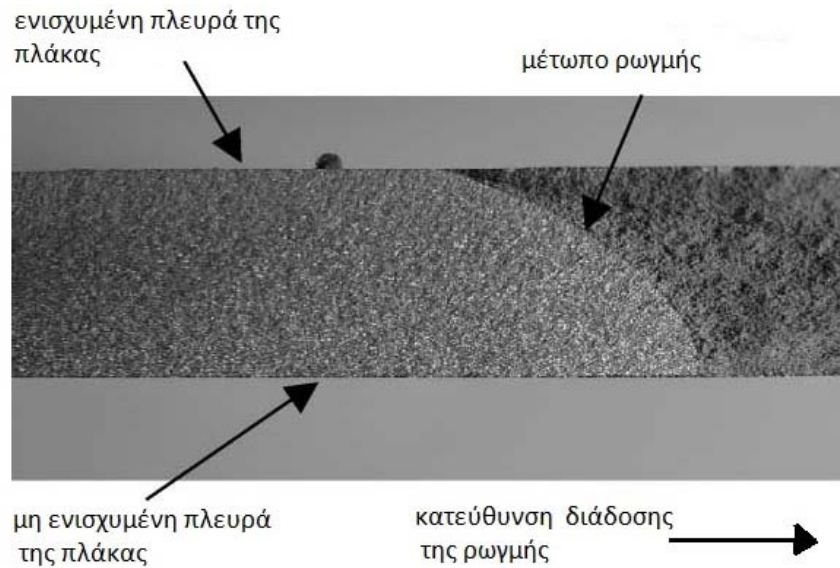


**Σχήμα 1.12:** Σύγκριση της μορφής του μετώπου της ρωγμής για ενισχυμένα δοκίμια με πάχη 2.29mm και 6.35mm, α) με επίθεμα 4 στρώσεων και β) 8 στρώσεων.

Στα σχήματα 1.11 και 1.12 παρατηρείται ότι η μορφή της καμπύλης αλλάζει με την αύξηση των στρωμάτων επιθέματος για το δοκίμιο με πάχος 2.29 mm, ενώ στο δοκίμιο με πάχος 6.35mm η μορφή της καμπύλης παραμένει σχεδόν ίδια με την αύξηση των φύλλων του επιθέματος. Στο σχήμα 12 φαίνεται ότι η κλίση του μετώπου της ρωγμής είναι πιο έντονη για μεγάλα πάχη δοκιμίων και γίνεται ακόμα εντονότερη όσο μικρότερο είναι το πάχος του ενισχυτικού επιθέματος.

Στην μελέτη [10] διερευνήθηκε η ανάπτυξη της ρωγμής σε παχιά δοκίμια αλουμινίου που καταπονήθηκαν σε κόπωση. Στην πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια κράματος Al 7075T6 με διαστάσεις, 220 mm μήκος, 70 mm πλάτος και 10 mm πάχος που έφεραν μια οπή διαμέτρου 6 mm με δύο τεχνητές ρωγμές, μια σε κάθε άκρη. Πριν τοποθετηθεί το επίθεμα, η πλάκα καταπονήθηκε σε κόπωση, μέχρι η ρωγμή να γίνει 10 mm. Το επίθεμα που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από οκτώ στρώματα μονοαξονικού υφάσματος σύνθετου υλικού. Στα δοκίμια επιβλήθηκε εναλλασσόμενη τάση αναλογίας  $R=0.1$  με μέγιστη τιμή 45 MPa. Από τις πειραματικές διαδικασίες παρατηρήθηκε ότι η διαφορά της ανάπτυξης της ρωγμής μεταξύ της ενισχυμένης και της μη ενισχυμένης

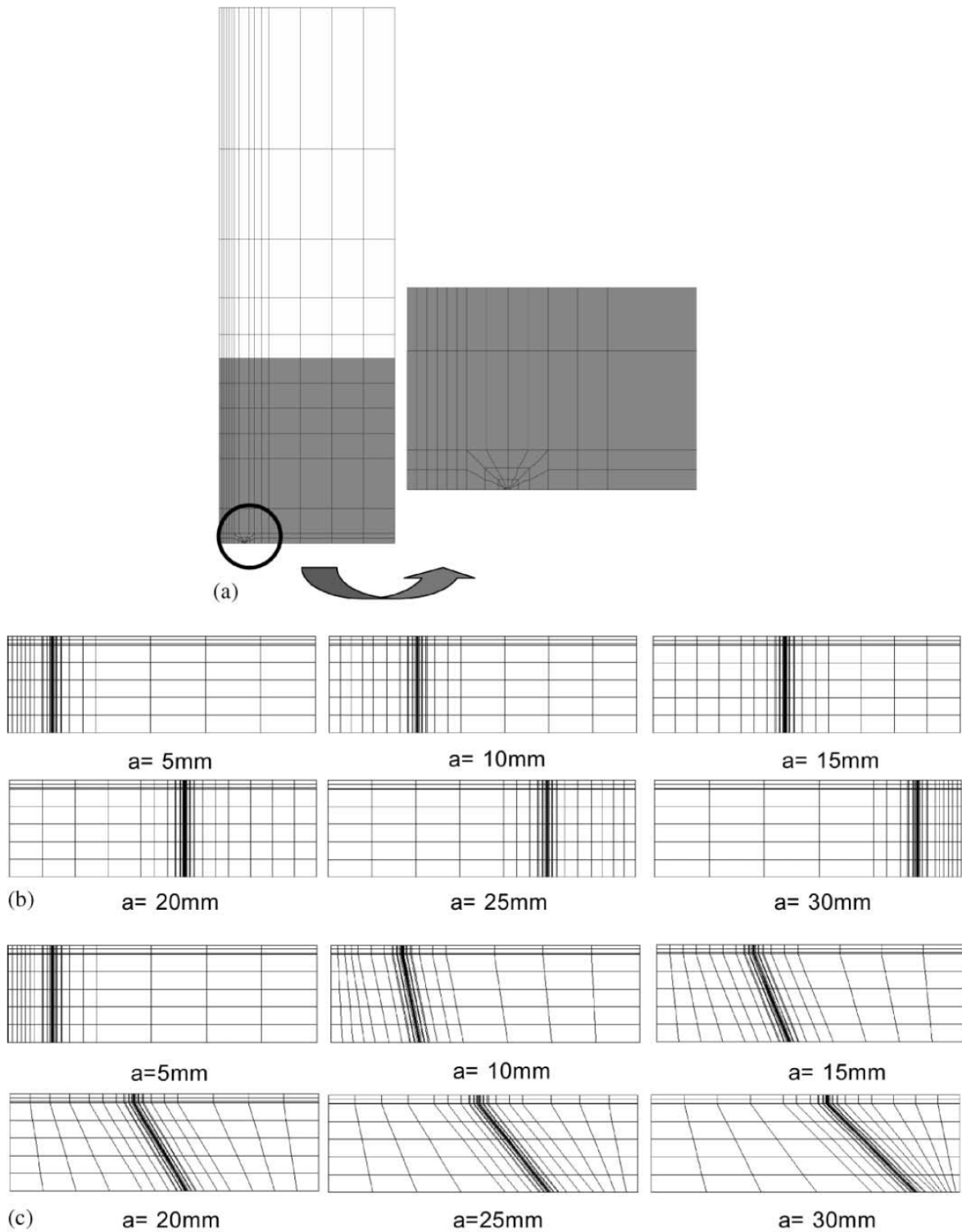
πλευράς της πλάκας είναι 10mm για 30 mm μήκους ρωγμής, καθώς και ότι το μέτωπο της ρωγμής είναι ελλειπτικό όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.13.



**Σχήμα 1.13: τομή σε δοκίμιο που δείχνει την ανάπτυξη του μετώπου ρωγμής.**

Στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιήθηκαν δύο μέθοδοι μοντελοποίησης του μετώπου της ρωγμής. Στην μια, το μέτωπο ρωγμής είναι κατακόρυφο, όπου το μήκος ρωγμής είναι το ίδιο και για τις δύο πλευρές της πλάκας, ενώ στην άλλη το μήκος της ρωγμής είναι ευθύ αλλά δεν είναι παράλληλο στην διεύθυνση του πάχους. Στο δεύτερο αυτό μοντέλο η διαφορά του μήκους ρωγμής στην ενισχυμένη πλευρά της πλάκας σε σχέση με την μη ενισχυμένη θεωρήθηκε γραμμική ξεκινώντας από 0mm για μήκος ρωγμής 5mm όπου τοποθετήθηκε το επίθεμα και κατέληξε σε 10mm για μήκος ρωγμής 30mm. Η διαφορά αυτή βασίστηκε στην τομή του δοκιμίου που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διαδικασία, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.13. Στο σχήμα 1.14 φαίνεται το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε σε κάθε μια από τις δύο μεθόδους.





Σχήμα 1.14: μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων που δείχνει (α) την κορυφή του μετώπου ρωγμής (β) το κατακόρυφο μέτωπο ρωγμής (γ) το πλάγιο μέτωπο ρωγμής.

Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε για μήκη ρωγμής από  $a=5\text{ mm}$  έως  $a=30\text{ mm}$  (όπου  $a$  είναι το μισό μήκος της ρωγμής), για να υπολογιστεί ο συντελεστής έντασης τάσης συναρτήσει του μήκους ρωγμής. Λόγω συμμετρίας, μοντελοποιήθηκε μόνο η μισή πλευρά

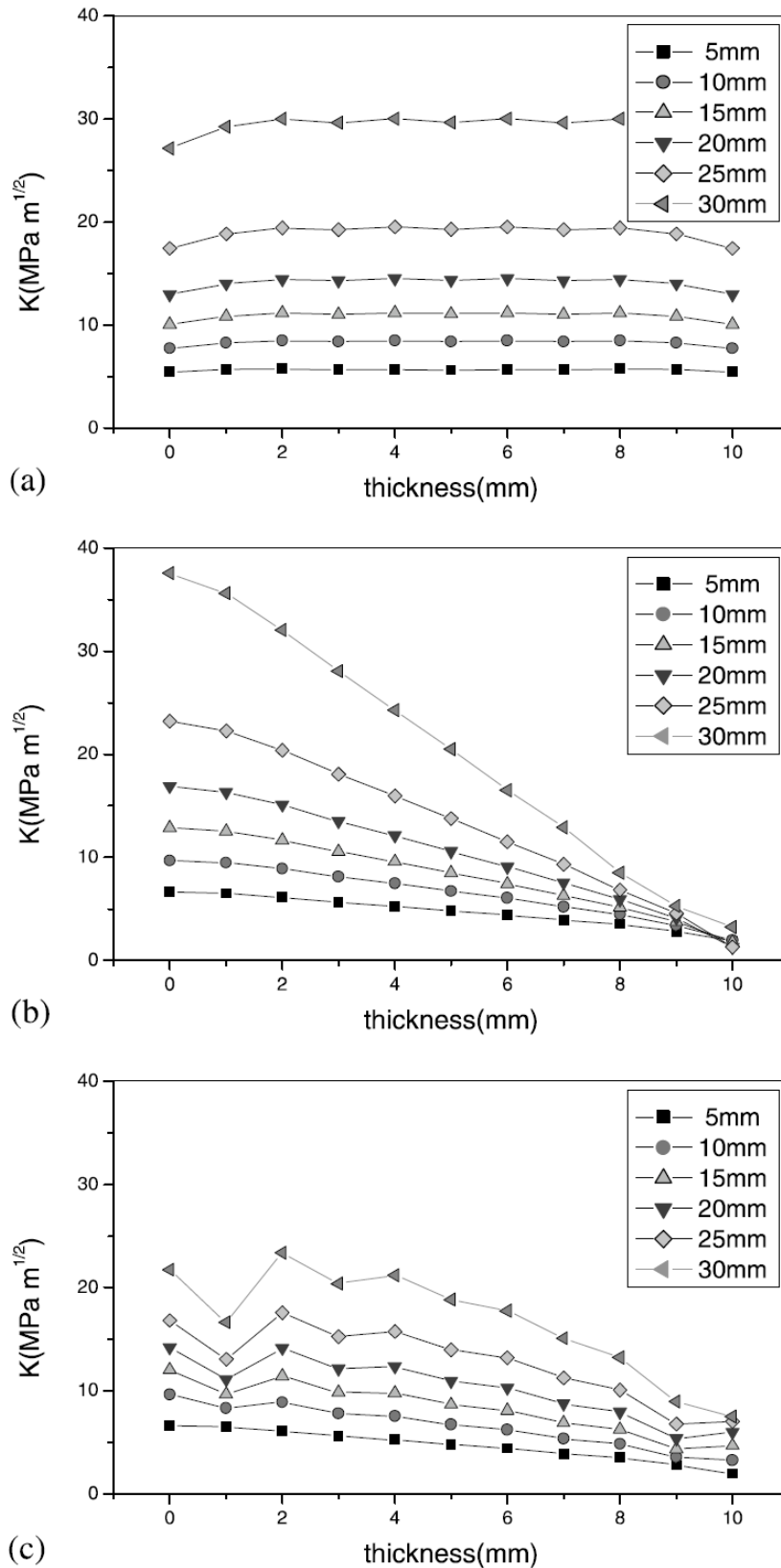
του υλικού. Το μοντέλο δημιουργήθηκε με την βοήθεια του προγράμματος ABAQUS, στο οποίο υπολογίστηκαν οι τιμές J integral όπου στην μηχανική θραύσης είναι ίσες με τον ρυθμό διάδοσης της ενέργειας G. Τέλος, ο συντελεστής έντασης τάσης υπολογίστηκε από την εξίσωση:

$$J = G = \frac{K_I^2}{E'} \quad (1.1)$$

όπου  $E' = E/(1 - \nu^2)$  σε κατάσταση επίπεδης παραμόρφωσης,

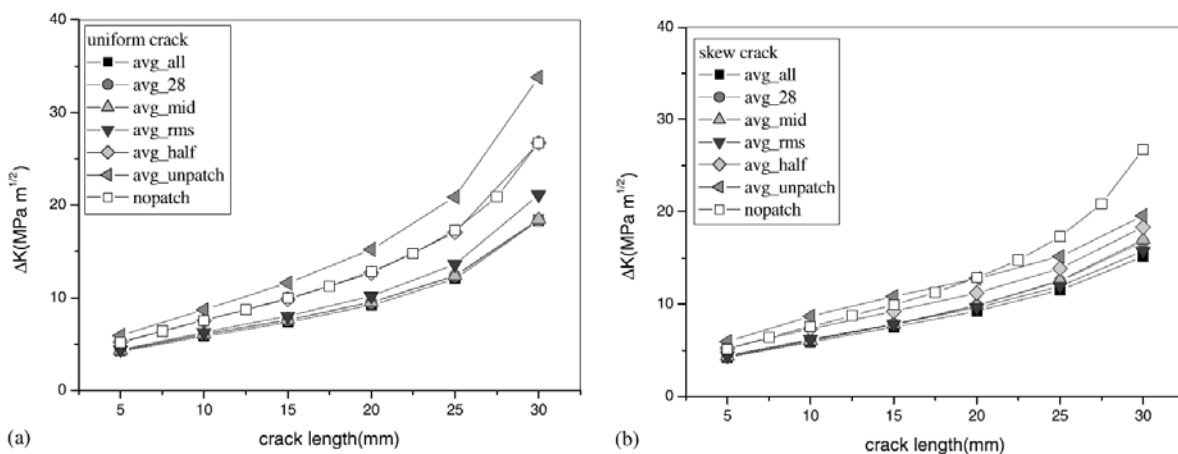
και  $E' = E$  σε κατάσταση επίπεδης τάσης.

Στο σχήμα 1.15 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του ΣΕΤ από την αριθμητική ανάλυση. Πιο συγκεκριμένα, στο σχήμα 1.15.a παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για μεταλλική πλάκα χωρίς επίθεμα. Στο σχήμα 1.15.b παρουσιάζεται η διακύμανση του ΣΕΤ για μοντέλο με επίθεμα και κατακόρυφο μέτωπο ρωγμής, όπου παρατηρείται ότι οι τιμές στην μη ενισχυμένη πλευρά του δοκιμίου είναι πολύ μεγαλύτερες σε σχέση με τις τιμές του στην πλευρά που φέρει το επίθεμα. Τέλος, στο σχήμα 1.15.c παρουσιάζεται η κατανομή του ΣΕΤ σε μοντέλο με ενίσχυση και πλάγιο μέτωπο ρωγμής, παρατηρείται μια μείωση της διαφοράς του ΣΕΤ στις δύο πλευρές. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στην μοντελοποίηση πλάγιου μετώπου της ρωγμής, το μήκος της ρωγμής στην ενισχυμένη πλευρά του δοκιμίου είναι μικρότερο και έτσι είναι μεγαλύτερη η άθικτη επιφάνεια της μεταλλικής πλάκας στο επίπεδο που αναπτύσσεται η ρωγμή. Αυτό οδηγεί σε μεγαλύτερη αντίσταση της πλάκας έναντι της διάδοσης της ρωγμής, πράγμα που είναι ισοδύναμο με μείωση του συντελεστή έντασης τάσης.



Σχήμα 1.15: Διακύμανση του ΣΕΤ κατά το πάχος του δοκιμίου, (a) για μη ενισχυμένη πλάκα, (b) για ενισχυμένη πλάκα και κατακόρυφο μέτωπο ρωγμής, (c) για ενισχυμένη πλάκα και λοξό μέτωπο ρωγμής.

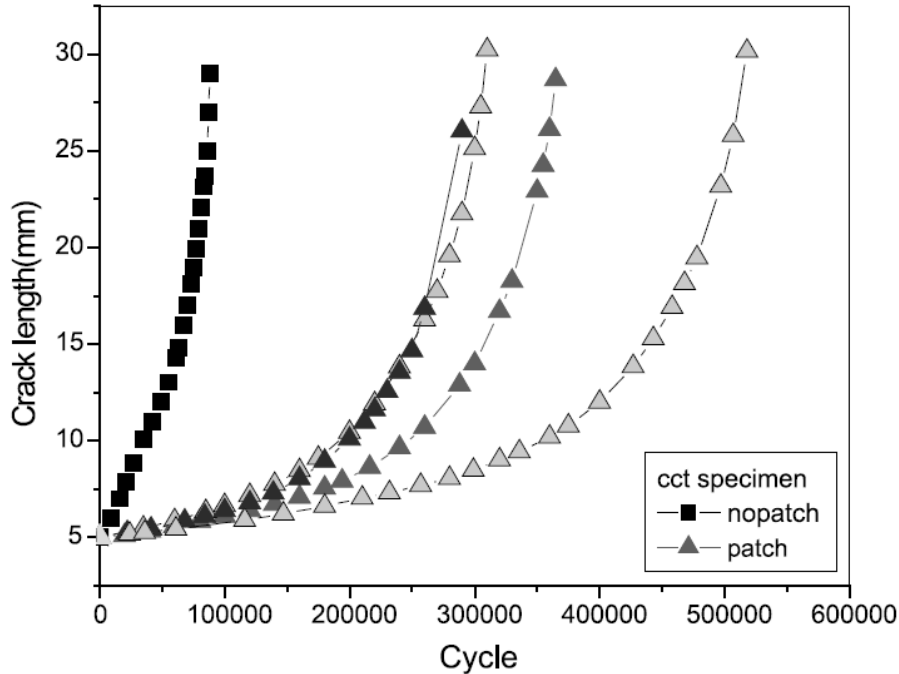
Καθώς ο συντελεστής έντασης τάσης είναι διαφορετικός κατά την διεύθυνση του πάχους του δοκιμίου, έπρεπε να καθοριστεί μια τιμή του ΣΕΤ που να αντιπροσωπεύει ένα συγκεκριμένο μήκος ρωγμής. Υπολογίστηκαν διάφορες τιμές, κυρίως από μέσους όρους, όπως η μέση τιμή όλων των αποτελεσμάτων (*avg\_all*), η μέση τιμή όλων των αποτελεσμάτων εκτός αυτών που είναι στα άκρα (*avg\_28*), η μέση τετραγωνική τιμή όλων των αποτελεσμάτων (*avg\_rms*), η μέση τιμή των αποτελεσμάτων μέχρι την τιμή στο μέσο της πλάκας (*avg\_half*), η τιμή στη μέση του πάχους (*avg\_mid*), και η τιμή στο μη ενισχυμένο άκρο (*avg\_unpatch*). Στη συνέχεια όλα αυτά συγκρίθηκαν για να βρεθεί ποιά είναι πιο αξιόπιστη. Σε ότι αφορά στο κατακόρυφο μέτωπο ρωγμής-όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.16.a- οι τιμές *avg\_all*, *avg\_28* και *avg\_mid* παρουσιάζουν παρόμοια αποτελέσματα και την χαμηλότερη τιμή. Η τιμή *avg\_half* παρουσιάζει αποτελέσματα που είναι κοντά σε αυτά του μη ενισχυμένου δοκιμίου, ενώ τέλος η τιμή *avg\_unpatch* δείχνει αποτελέσματα υψηλότερα ακόμα και από αυτά του μη επισκευασμένου δοκιμίου. Η υπόθεση που γίνεται σε αυτό το σημείο είναι ότι οι τιμές *avg\_unpatch* και *avg\_half* υπερεκτιμούν τον ΣΕΤ, ενώ η πραγματική τιμή του είναι ανάμεσα στις τιμές *avg\_all* και *avg\_half*. Στο πλάγιο μέτωπο ρωγμής σχήμα 1.16.b όλες οι μέσες τιμές που υπολογίστηκαν, εκτός της τιμής *avg\_unpatch* για μικρό μήκος, παρουσιάζουν αποτελέσματα μικρότερα από αυτά του μη ενισχυμένου δοκιμίου, οπότε εξάγεται το συμπέρασμα ότι η μοντελοποίηση του πλάγιου μετώπου ρωγμής προβλέπει ακριβέστερα τον πραγματικό συντελεστή έντασης τάσης, σε σχέση με την μοντελοποίηση του κατακόρυφου μετώπου. Αυτό ήταν αναμενόμενο να υποτεθεί, αφού το σχήμα της ρωγμής στο πλάγιο μέτωπο ρωγμής αντιπροσωπεύει καλύτερα το πραγματικό σχήμα της ρωγμής έναντι του κατακόρυφου μετώπου.



**Σχήμα 1.16:** Τιμές ΣΕΤ συναρτήσει του μήκους ρωγμής με διάφορες μεθόδους υπολογισμού, για (α) κατακόρυφο μέτωπο ρωγμής και (β) λοξό μέτωπο ρωγμής.

Στην εργασία αυτή πραγματοποιήθηκαν και πειραματικές διαδικασίες, έτσι ώστε τα αποτελέσματα των πειραμάτων να συγκριθούν με εκείνα της αριθμητικής ανάλυσης και να διαπιστωθεί η αποτελεσματικότητα της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Καθώς το επίθεμα επιδρά στην μείωση του ΣΕΤ συμπεριφορά της διάδοσης της ρωγμής στην πλάκα αλουμινίου θεωρείται ίδια σε όλα τα δοκίμια, είτε αυτά είναι ενισχυμένα με επίθεμα, είτε

όχι. Συνεπώς ο ΣΕΤ στα ενισχυμένα δοκίμια μπορεί να εξαχθεί συγκρίνοντας την ταχύτητα διάδοσης της ρωγμής στα απλά μη ενισχυμένα δοκίμια, σε σχέση με αυτά που φέρουν ενίσχυση. Στο σχήμα 1.17 παρουσιάζονται πειραματικά οι καμπύλες κύκλων κόπωσης σε συνάρτηση με το μήκος της ρωγμής για ενισχυμένα και μη ενισχυμένα δοκίμια.



**Σχήμα 1.17:** Ρυθμός ανάπτυξης της ρωγμής για ενισχυμένα και μη ενισχυμένα δοκίμια συναρτήσει των κύκλων κόπωσης.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την εξαγωγή τιμών ΣΕΤ από τα πειραματικά αποτελέσματα βασίστηκε στον νόμο του Paris:

$$da/dN = C(\Delta K)^m \quad (1.2)$$

όπου  $a$  είναι το μήκος της ρωγμής,

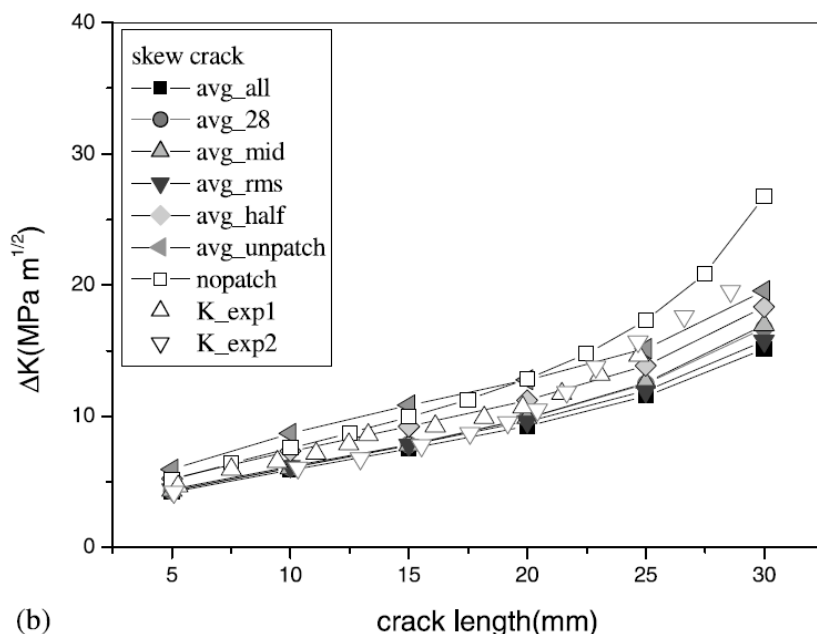
$N$  είναι ο αριθμός των κύκλων κόπωσης,

$C, m$  είναι σταθερές του υλικού,

$\Delta K$  είναι το εύρος του ΣΕΤ.

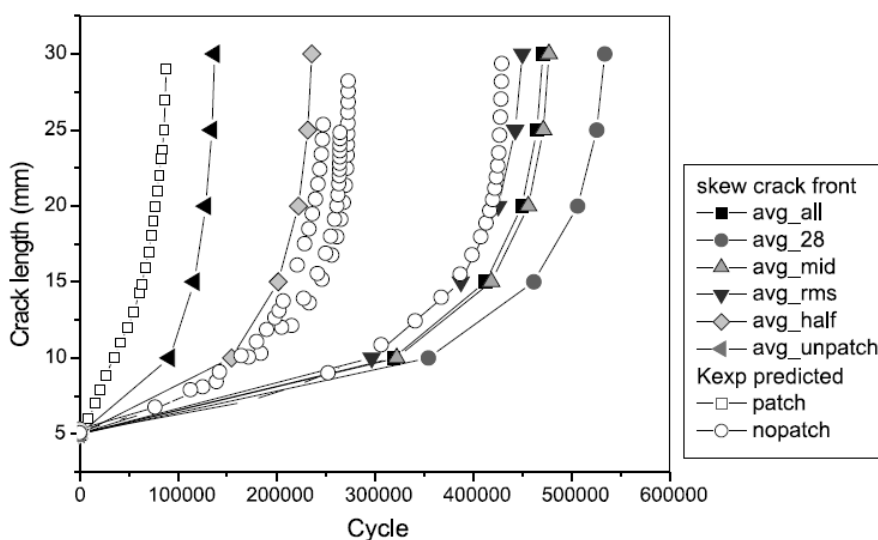
Πιο συγκεκριμένα, θεωρήθηκε ότι οι σταθερές του υλικού παραμένουν ίδιες για όλα τα δοκίμια -είτε είναι ενισχυμένα είτε όχι- επομένως η τιμή  $\Delta K$  μπορεί να εξαχθεί με την βοήθεια του ρυθμού διάδοσης της ρωγμής  $da/dN$  από την εξίσωση (2). Στο σχήμα 1.18 συγκρίνονται οι διάφορες διακυμάνσεις του ΣΕΤ που υπολογίστηκαν με τις προαναφερθείσες μεθόδους από το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, με το εύρος του

ΣΕΤ που υπολογίστηκαν από τα πειραματικά αποτελέσματα με την βοήθεια του ρυθμού διάδοσης της ρωγμής, για το πλάγιο μέτωπο ρωγμής.



**Σχήμα 1.18: Διακύμανση του ΣΕΤ για πλάγιο μέτωπο ρωγμής, πειραματικά αλλά και αριθμητικά υπολογισμένη.**

Τέλος γίνεται μια σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων σε σχέση με την αριθμητική ανάλυση σε ότι έχει να κάνει με την προβλεπόμενη αντοχή του υλικού σε κόπωση, που παρουσιάζεται στο σχήμα 1.19. Από το σχήμα παρατηρείται ότι τα πειραματικά αποτελέσματα κυμαίνονται, ανάμεσα στις τιμές που υπολογίστηκαν από την αριθμητική ανάλυση, με τις μεθόδους avg\_half και avg\_rms για την μοντελοποίηση του λοξού μετώπου ρωγμής.



**Σχήμα 1.19: Σύγκριση της προβλεπόμενης αντοχής των δοκιμών σε κύκλους κόπωσης παραθέτοντας αριθμητικά και πειραματικά αποτελέσματα.**

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι στην ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία, όσο μεγάλωνε το πάχος του δοκιμίου, τόσο μεγάλωνε το εύρος διακύμανσης του ΣΕΤ. Στην μελέτη αυτή φαίνεται καθαρά ότι η μοντελοποίηση του πλαγίου μετώπου ρωγμής δείχνει αποτελέσματα πιο κοντά στα πειραματικά αλλά παρόλα αυτά η πρόβλεψη της αντοχής του υλικού βασίζεται κυρίως στην επιλογή του ΣΕΤ που θα αντιπροσωπεύει το κάθε μήκος ρωγμής.

Η μελέτη [11] αποτελεί συνέχεια της προηγούμενης εργασίας, στην οποία πραγματοποιείται μια τρισδιάστατη αριθμητική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, ώστε να μελετηθεί η συμπεριφορά του ρυθμού ανάπτυξης ρωγμής σε δοκίμια από κράμα αλουμινίου ενισχυμένα μονόπλευρα από επιθέματα σύνθετων υλικών. Πιο συγκεκριμένα αναφέρεται ότι ο συντελεστής έντασης τάσης, ο οποίος είναι καθοριστικός παράγοντας για την πρόβλεψη της αντοχής μιας μεταλλικής πλάκας, διαφοροποιείται σημαντικά κατά την διεύθυνση του πάχους της σε μονόπλευρα ενισχυμένα δοκίμια. Αυτό συμβαίνει γιατί η μορφή της ρωγμής σε δοκίμια που δεν είναι συμμετρικά ενισχυμένα, είναι μια καμπύλη και όχι μια λοξή ευθεία. Στο σχήμα 1.20 φαίνεται η μορφή της ρωγμής σε μια τέτοια κατάσταση και η εξέλιξή της με την αύξηση των κύκλων κοπώσεως.



**Σχήμα 1.20: Μορφή του μετώπου ρωγμής για μονόπλευρα ενισχυμένο δοκίμιο.**

Για να διερευνηθεί εις βάθος πώς επηρεάζει το πάχος του δοκιμίου τον ΣΕΤ κατά το πάχος της πλάκας, θεωρήθηκαν 5 πάχη δοκιμίων, 2, 4, 6, 8, 10 mm στην ανάλυση. Το επίθεμα που μοντελοποιήθηκε θεωρήθηκε ότι αποτελείτο από μονοαξονικές ίνες γραφίτη προσανατολισμένες προς την κατεύθυνση της φόρτισης. Το πάχος του υποτέθηκε τόσο ώστε ο λόγος ακαμψίας πλάκας-επιθέματος να είναι ίσος με 1. Ο λόγος ακαμψίας ορίζεται ως:

$$S.R = \frac{E_r t_r}{E_p t_p} \quad (1.3)$$

όπου  $E$  είναι το μέτρο ελαστικότητας

$t$  είναι το πάχος

και το  $r$  και το  $p$  αναφέρεται στο επίθεμα την πλάκα αντίστοιχα.

Η φόρτιση που επιβλήθηκε που θεωρήθηκε ήταν κυκλική με μέγιστη τάση 45MPa και λόγο  $R=0.1$ .

Για την πρόβλεψη της ανάπτυξης της ρωγμής χρησιμοποιήθηκε ο νόμος του Paris, εξίσωση (1.2).

Η εξίσωση (1.2) ολοκληρώθηκε ώστε να έχει την μορφή:

$$N_f = \int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{c(\Delta K)^m} \quad (1.4)$$

όπου  $N_f$  είναι ο αριθμός των κύκλων που χρειάζεται η ρωγμή να προχωρήσει από το σημείο  $a_0$  στο σημείο  $a_f$ .

Επειδή όμως ο όρος  $\Delta K$  πρακτικά μεταβάλλεται κατά την διάδοση της ρωγμής, για να καθοριστεί ο ολικός αριθμός κύκλων κόπωσης, χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος του Euler:

$$N^{(j+1)} = N^{(j)} + \Delta N^{(j)} = N^{(j)} + \frac{\Delta a^{(j)}}{c[\Delta K(a^{(j)})]^m} \quad (1.5)$$

$j=0,1,2,\dots,n$ , όπου  $n$  είναι ο αριθμός των επιμέρους διαστημάτων.

Η βασική διαφορά ανάμεσα στην εργασία αυτή και στις εργασίες που προαναφέρθηκαν είναι ότι στις προηγούμενες μελέτες η μορφή της καμπύλης και η κλίση της ήταν προαποφασισμένη σε κάθε βήμα. Αυτό σημαίνει ότι σε κάθε βήμα το  $\Delta a$  είναι προαποφασισμένο και σταθερό. Έτσι θεωρείται απαραίτητο να υποτεθεί μια αντιπροσωπευτική τιμή ΣΕΤ ώστε να παραχθούν τα αποτελέσματα  $\Delta N^{(j)}$ . Όμως επειδή ο ΣΕΤ διαφοροποιείται σημαντικά κατά τη διεύθυνση του μετώπου της ρωγμής για μονόπλευρα ενισχυμένα δοκίμια, η παραπάνω υπόθεση μπορεί να οδηγήσει σε μη ακριβή υπολογισμό της διάρκειας ζωής του υλικού.

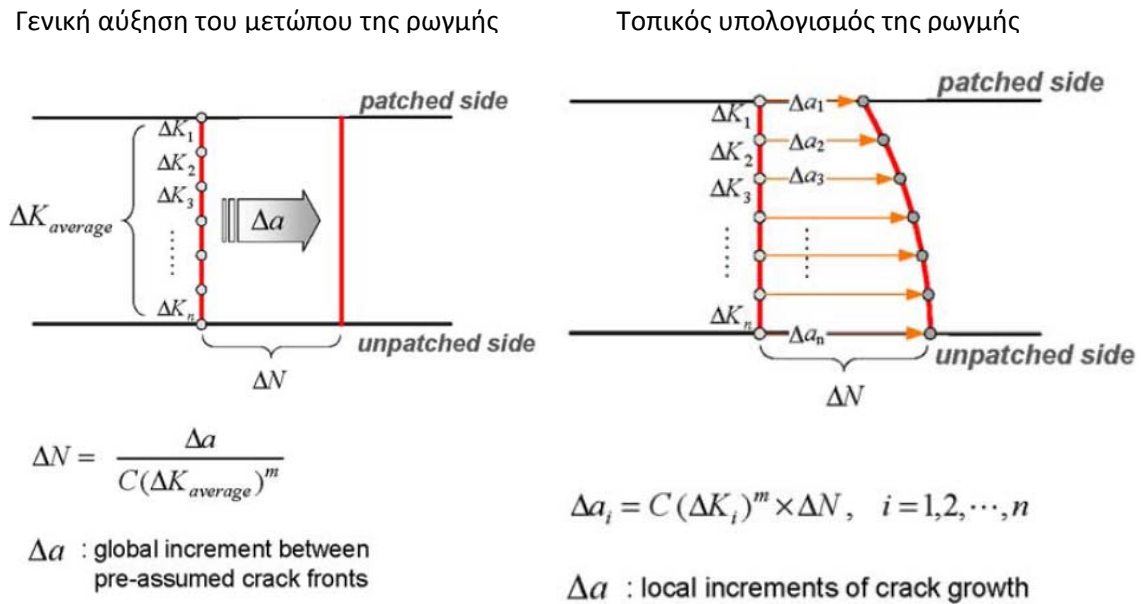
Από την άλλη πλευρά, αν θεωρηθεί τοπική η επαύξηση της ρωγμής σε κάθε σημείο κατά την διεύθυνση του πάχους, τότε μπορεί να εφαρμοστεί τοπικά και ο νόμος του Paris:

$$\frac{da_i}{dN} = C(\Delta K_i)^m \quad (1.6)$$

όπου  $da_i$  και  $\Delta K_i$  είναι η τοπική αύξηση της ρωγμής σε κάθε σημείο  $i$  και η διακύμανση του ΣΕΤ στο σημείο αυτό.



Σύμφωνα με την εξίσωση (6) δημιουργείται ένα μέτωπο ρωγμής σύμφωνα με την τοπική ανάπτυξη της. Στο σχήμα 1.21 παρουσιάζεται η διαφορά της μορφής της ρωγμής, υπολογίζοντας την αύξηση της γενικά σε σχέση με τον τμηματικό υπολογισμό της.



Σχήμα 1.21: Διαφορά γενικού και τοπικού υπολογισμού της αύξησης της ρωγμής.

Από την εξίσωση (1.6) μπορεί να εξαχθεί η εξίσωση:

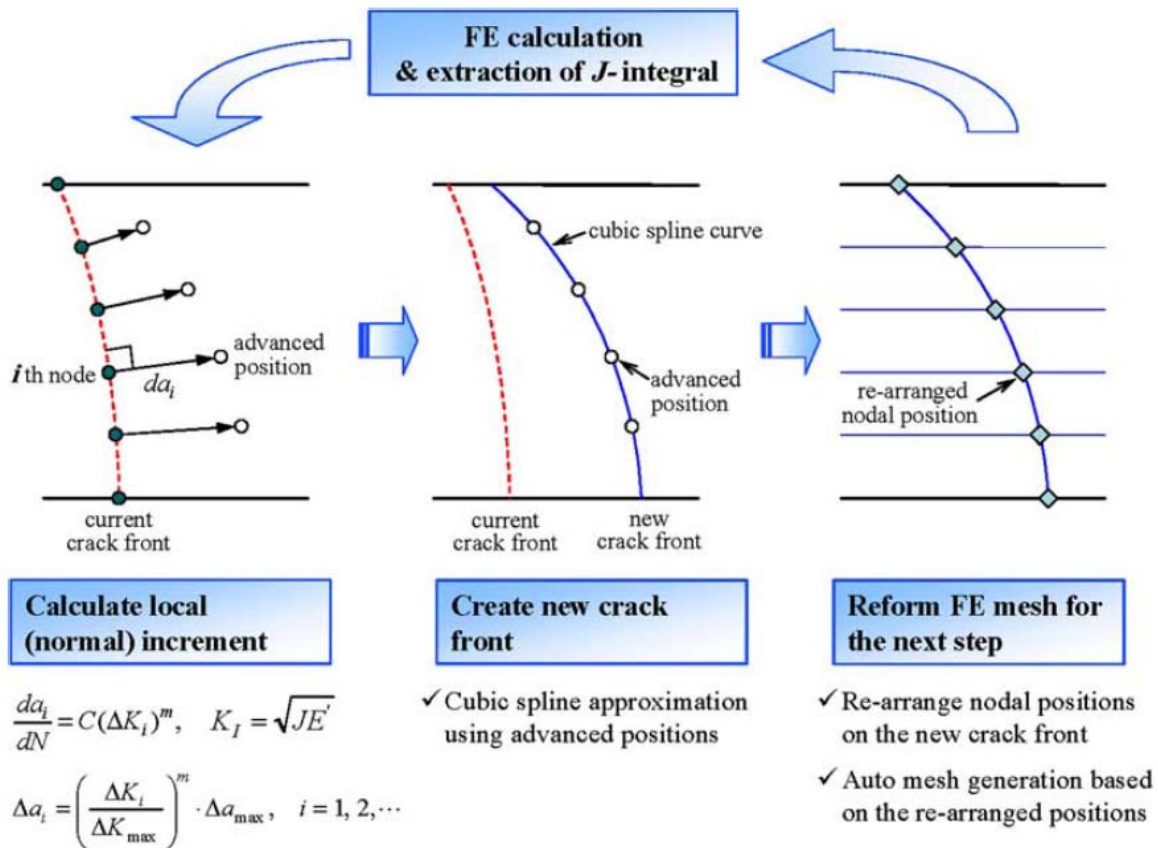
$$\Delta \alpha_i^{(j)} = \left( \frac{\Delta K_i^{(j)}}{\Delta K_{max}^{(j)}} \right)^m \Delta \alpha_{max}^{(j)} \quad \text{όπου } i=1,2,\dots \quad (1.7)$$

$$\text{και } \Delta N^{(j)} = \frac{\Delta \alpha_{max}^{(j)}}{c(\Delta K_{max}^{(j)})^m} \quad (1.8)$$

όπου  $\Delta \alpha_{max}^{(j)}$  είναι η μέγιστη αύξηση του μήκους της ρωγμής στο σημείο όπου εμφανίζεται η μέγιστη διακύμανση του ΣΕΤ.

Οι εξισώσεις (1.7) και (1.8) χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της αύξησης της ρωγμής τοπικά καθώς και του αριθμού των κύκλων κοπώσεως, εάν καθοριστεί η τιμή  $\Delta \alpha_{max}^{(j)}$ . Για την ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιήθηκε τρισδιάστατη μέθοδος. Στην ανάλυση γίνεται αρχικά ορισμός κάποιων παραμέτρων όπως μήκος, πλάτος και πάχος δοκιμίου, και τελικά ορίζονται οι κόμβοι που οριοθετούν το μέτωπο της ρωγμής. Καθώς οι υπόλοιπες παράμετροι παραμένουν σταθερές, μόνο οι κόμβοι του μετώπου της ρωγμής είναι ενεργές μεταβλητές. Σε κάθε βήμα υπολογισμού αφού υπολογιστεί το μέγεθος  $\Delta a_i$  με την βοήθεια κυβικής spline υπολογίζονται οι ακριβείς θέσεις των κόμβων του μετώπου, και έπειτα οι τελικές θέσεις του καθορίζονται, έτσι ώστε να μην υπάρχει κάποια αντίφαση με το

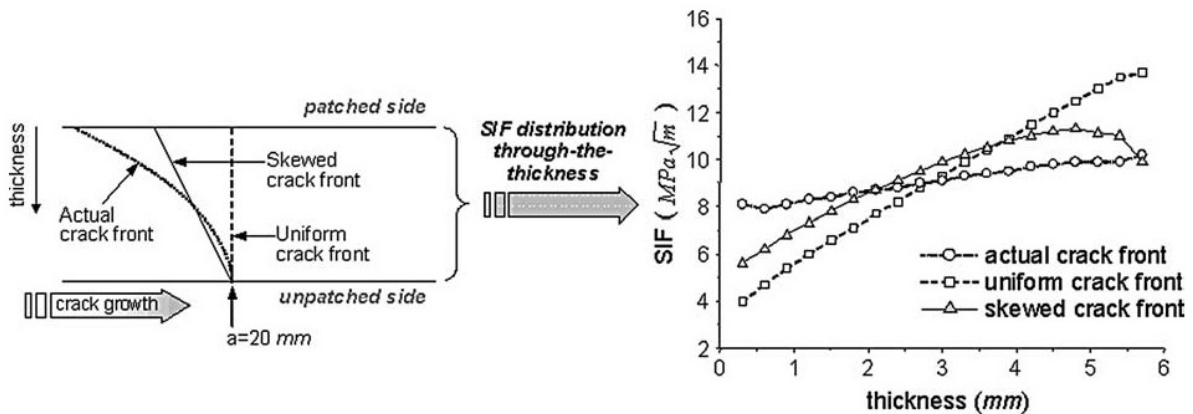
μέγεθος των στοιχείων κοντά στην κορυφή της ρωγμής. Οι τελικές αυτές θέσεις αποτελούν είσοδο για το επόμενο βήμα της υπολογιστικής διαδικασίας. Η διαδικασία ορισμού των κόμβων αυτών παρατίθεται στο σχήμα 1.22.



Σχήμα 1.22: Επιτυχημένη τεχνική υπολογισμού της διάδοσης της ρωγμής κάτω από κόπωση.

Για την μοντελοποίηση των δοκιμών χρησιμοποιήθηκε υπολογιστικό πακέτο ABAQUS v6.3. Χρησιμοποιήθηκαν 20-κομβικά στοιχεία και λόγω συμμετρίας μοντελοποιήθηκε μόνο το 1/4 της κατασκευής.

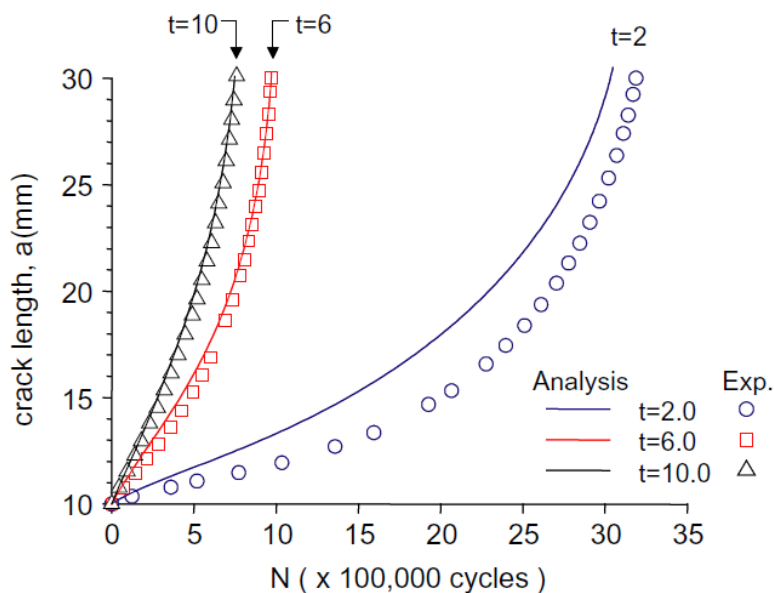
Στο σχήμα 1.23 παρουσιάζεται ο επηρεασμός των τιμών του ΣΕΤ από τη μορφή του μετώπου της ρωγμής. Στο σχήμα φαίνονται οι κατανομές των ΣΕΤ κατά το πάχος των δοκιμών, για μοντέλο με κατακόρυφο, λοξό μέτωπο ρωγμής, καθώς και το μέτωπο ρωγμής όπως θεωρήθηκε από την παρούσα εργασία. Όλα τα δοκίμια που εμφανίζονται στο σχήμα φέρουν 20 mm ρωγμή και έχουν πάχος 6 mm.



Σχήμα 1.23: Κατανομές ΣΕΤ για διάφορες μορφές μετώπων ρωγμής.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του σχήματος 1.23 πρέπει να σημειωθεί ότι η κατανομή του ΣΕΤ είναι άμεσα εξαρτώμενη από την μορφή του μετώπου της ρωγμής.

Η επίλυση έγινε γραμμικά αλλά και μη γραμμικά, ώστε να συγκριθούν ως προς την ακρίβεια τους και οι δύο μέθοδοι επίλυσης. Τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από τα αποτελέσματα της επίλυσης είναι ότι η γραμμική επίλυση υπερεκτιμά την τιμή του ΣΕΤ. Η υπερεκτίμηση αυξάνεται με την μείωση του πάχους της πλάκας του δοκιμίου, συνεπώς η μη γραμμική επίλυση είναι αναγκαία για την λήψη πιο αξιόπιστων αποτελεσμάτων. Στο σχήμα 1.24 παρατίθενται τα αποτελέσματα της μελέτης, δείχνοντας την διάρκεια ζωής των δοκιμών συναρτήσει του μήκους ρωγμής, συγκρινόμενα με τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας. Στα αποτελέσματα του σχήματος 1.24 έχει ληφθεί υπόψη η μη γραμμική γεωμετρία της μεταλλικής πλάκας του δοκιμίου.



Σχήμα 1.24: Διάρκεια ζωής των δοκιμών σε κόπωση συναρτήσει του μήκους ρωγμής, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ανάλυσης και τα πειραματικά αποτελέσματα.

Τέλος στον πίνακα 1.1 που ακολουθεί εμφανίζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης σε σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα.

**Πίνακας 1.1: αναλυτική σύγκριση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης σε σχέση με τα πειραματικά αποτελέσματα.**

Plate thickness (mm)	Fatigue cycles from analysis			Reference (Experiments)
	Linear	Nonlinear	Difference	
2.0	163,173	304,893	46.5%	318,900
4.0	90,493	110,000	17.7%	108,500
6.0	88,060	97,295	9.5%	97,000
8.0	81,999	86,066	4.7%	83,300
10.0	72,503	74,868	3.2%	76,000

Στην εργασία [12] παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από μια σειρά από τρισδιάστατες μοντελοποιήσεις πεπερασμένων στοιχείων για διάφορες διατάξεις ενισχυμένων ελασμάτων. Αρχικά αναφέρεται στην εργασία αυτή ότι, μια προσέγγιση που μπορεί να γίνει για τον υπολογισμό της αντοχής μιας κατασκευής (υπολογίζοντας δηλαδή τον ΣΕΤ) βασίζεται στο γεγονός ότι ο ΣΕΤ, για ένα δοκίμιο ενισχυμένο με επίθεμα από σύνθετα υλικά, τείνει σε μια σταθερή τιμή  $K_{\infty}$ , καθώς το μήκος ρωγμής αυξάνεται. Αυτό στηρίζεται στην υπόθεση ότι, για ένα δοκίμιο που φέρει μια αρκετά μεγάλη κεντρική διαμετρική ρωγμή, το οποίο καταπονείται από μια ομοιόμορφα κατανομημένη τάση, αρκετά μακριά από την ρωγμή, η περιοχή κοντά στο κέντρο του επιθέματος, πάνω από την ρωγμή, συμπεριφέρεται ως μια άρθρωση. Από αυτήν την υπόθεση εξάγεται το συμπέρασμα ότι η κατανομή των τάσεων καθώς και οι τιμές του ΣΕΤ σε αυτήν την περιοχή που προαναφέρθηκε, είναι ανεξάρτητη του μήκους ρωγμής. Επίσης αναφέρεται μια αναλυτική εξίσωση που μπορεί να προσφέρει μια πρώτη υπόθεση για την αντοχή της ενισχυμένης κατασκευής. Η τιμή  $K_{\infty}$  μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με την φόρμουλα:

$$K_{\infty} = Y\Omega_L\sigma_o\sqrt{\pi\lambda} \quad (1.9)$$

$$\text{όπου } \sigma_o = \sigma E_p t_p / (E_p t_p + E_r t_r). \quad (1.10)$$

$Y$  είναι ένας γεωμετρικός συντελεστής που λαμβάνει υπόψη αν η ρωγμή είναι κεντρική ή ακραία ( $Y=1$  για κεντρική ρωγμή και  $Y=0.9$  για ακραία ρωγμή).

Η τιμή  $\Omega_L$  είναι ένας παράγοντας που επηρεάζεται από την φόρτιση.

Για αρκετά μεγάλα σε μήκος επιθέματα αποτελούμενα από μονοαξονικές ίνες μπορεί να προσεγγιστεί από τις σχέσεις:

$$\Gamma = 3/8 \cdot 1 / (1 + X E_r t_r / (B E_p t_p)) - E_p t_p / (E_p t_p + E_r t_r), \quad (1.11)$$

$$\Omega_L = (E_p t_p / (E_p t_p + E_r t_r) + \Gamma) / \sigma_o, \quad (1.12)$$

$$\pi\lambda = \sqrt{E_p t_p / \beta (1 + t_p E_p / t_r E_r)}, \quad (1.13)$$

$$\text{και } \beta = (t_a/G_a + t_r/3G_r + t_p/G_p) / (t_a/G_a + 3t_r/8G_r + 3t_p/8G_p)^2. \quad (1.14)$$

Στις παραπάνω εξισώσεις (1.11-1.14) το  $\chi$  αναφέρεται στο πλάτος του επιθέματος, το  $B$  στο πλάτος της μεταλλικής πλάκας, τα μεγέθη  $t_a, t_p, t_r$ , στα πάχη της κόλλας, της πλάκας και του επιθέματος και τέλος τα μεγέθη  $G, E$  αναφέρονται στο μέτρο διάτμησης και ελαστικότητας, της πλάκας ( $G_p, E_p$ ), του επιθέματος ( $G_r, E_r$ ) και της κόλλας ( $G_a, E_a$ ).

Η παραπάνω μέθοδος αγνοεί τα φαινόμενα κάμψης που παρουσιάζονται σε τέτοιες περιπτώσεις. Για τον υπολογισμό της κάμψης υπάρχουν διάφορες μέθοδοι, μια εκ των οποίων περιγράφεται κάτωθι. Σε αυτήν την μέθοδο υπολογίζεται ο ΣΕΤ στο μέσο του πάχους της πλάκας,  $K_p^*$ , σύμφωνα με τη σχέση:

$$K_p^* = (1 + BC)K_p, \quad (1.15)$$

όπου  $BC$  είναι ο συντελεστής διόρθωσης λόγω κάμψης και υπολογίζεται ως,

$$BC = \alpha y_{max} (1 - K_p/K_s) (t_p + t_r) / I.$$

Εδώ  $K_s$  είναι η τιμή του ΣΕΤ πριν την επισκευή και  $y_{max}$  είναι η απόσταση της πιο μακρινής μη επισκευασμένης επιφάνειας από τον ουδέτερο άξονα.  $I$  είναι η ροπή αδράνειας της διατομής και  $\alpha$  το μισό του μήκους της ρωγμής.

Επειδή η ταχύτητα ανάπτυξης της ρωγμής δεν είναι ίδια σε όλα τα σημεία κατά το πάχος της πλάκας, θεωρείται ορθότερο να υπολογίζεται ο ΣΕΤ  $K_p^{max}$ , που υπολογίζεται από τη σχέση:  $K_p^{max} = (1 + 2BC)K_p$ . (1.16)

Τα αποτελέσματα υπολογισμού του  $K_\infty$  εμφανίζονται στους πίνακες 1.2-1.5, και θεωρούνται από τον συγγραφέα της εργασίας αρκετά ακριβή σε σύγκριση με τα αποτελέσματα που εξήγαγε από την τρισδιάστατη μοντελοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία. Εν συνεχεία ακολουθούν οι πίνακες που παρουσιάζουν τα αποτελέσματα, δείχνοντας ότι καθώς η ρωγμή μεγαλώνει ο ΣΕΤ παρουσιάζει μια ασυμπτωτική συμπεριφορά.

**Πίνακας 1.2: Τιμές ΣΕΤ κατά το πάχος της πλάκας δοκιμίου με 1.85 mm πάχος.**

$K_\infty$  for a repaired edge notch panel, 1.85-mm thick patch

	Crack length				
	5 mm	6 mm	7 mm	10 mm	20 mm
Patched surface	10.6	10.8	10.9	10.9	10.4
Middle	11.6	11.7	11.9	12.1	12.9
Bottom	11.7	11.9	12.0	12.2	12.7

**Πίνακας 1.3: Τιμές ΣΕΤ κατά το πάχος της πλάκας δοκιμίου με 1.85 mm πάχος και κεντρική οπή.***K* values for repaired centre notch panel, 1.85-mm thick patch

	Crack half length				
	5 mm	6 mm	7 mm	10 mm	20 mm
Patched surface	11.2	11.5	11.8	12.0	11.6
Middle	11.9	12.4	12.7	12.2	14.3
Bottom	12.0	13.16	12.9	13.4	14.1

**Πίνακας 1.4: Τιμές ΣΕΤ κατά το πάχος της πλάκας δοκιμίου με 1 mm πάχος.***K* for a repaired centre notch panel, 1-mm thick patch

	Crack half length				
	5 mm	6 mm	7 mm	10 mm	20 mm
Patched surface	14.6	15.2	15.6	16.1	15.7
Middle	15.5	16.3	16.8	17.8	19.4
Bottom	15.6	16.4	17.0	17.9	19.1

**Πίνακας 1.5: Τιμές ΣΕΤ για διάφορα δοκίμια συγκρινόμενα με την αντίστοιχη τιμή που εξήχθη από την μοντελοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία .**Comparison of prediction for  $K_{\infty}$  for various patch configurations

Crack configuration	Crack length (mm)	Configuration	Predicted	<i>K</i> finite element
Edge crack $\sigma = 344.8$ MPa	20	Skin <sup>a</sup> 2 mm, patch = 0.75 mm, $G_a = 375$ MPa, $t_a = 0.25$ mm	21.6	17.8–22.4
Centre crack $\sigma = 344.8$ MPa	20	Skin <sup>a</sup> 2 mm, patch = 0.75 mm, $G_a = 375$ MPa, $t_a = 0.25$ mm	23.6	19.8–24.0
Centre crack $\sigma = 229.8$ MPa	20	Skin <sup>a</sup> 3 mm, patch = 1.00 mm, $G_a = 375$ MPa, $t_a = 0.25$ mm	19.2	15.7–19.1
Centre crack $\sigma = 299.8$ MPa	20	Skin <sup>b</sup> 3 mm, patch = 0.889 mm, $G_a = 750$ MPa, $t_a = 0.165$ mm	16.2	15.7–15.8

Στην εργασία ακολούθως παραθέτονται συγκρίσεις αποτελεσμάτων της μεθόδου υπολογισμού του ΣΕΤ με αναλυτικές εξισώσεις και με τη βοήθεια πεπερασμένων στοιχείων λαμβάνοντας υπόψη και την κάμψη που επέρχεται στα δοκίμια. Οι τιμές από τις δύο μεθόδους είχαν πολύ μικρές διαφορές πράγμα που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι και οι δύο μελέτες έχουν πολύ καλή ακρίβεια. Σε αυτό το σημείο κρίνεται απαραίτητο να σχολιαστεί το γεγονός ότι, στους πίνακες 1.2-1.5 η τιμή του ΣΕΤ αυξάνεται από την επιφάνεια που φέρει το επίθεμα προς την μη επισκευασμένη πλευρά, όμως καθώς αυξάνεται το μήκος της ρωγμής το φαινόμενο αυτό αλλάζει, και ενώ ο ΣΕΤ αυξάνεται από την επισκευασμένη πλευρά προς το μέσο του πάχους, αρχίζει σταδιακά να μειώνεται μέχρι και την μη επισκευασμένη πλευρά.

Στην εργασία αυτή εξήχθησαν και κάποια άλλα ενδιαφέροντα συμπεράσματα σύμφωνα με την αριθμητική ανάλυση όπως ότι:

Ο ΣΕΤ επηρεάζεται περισσότερο από το πάχος του επιθέματος και λιγότερο από το πλάτος του, γι' αυτό κατά τον υπολογισμό του με αναλυτικές εξισώσεις, θα ήταν πολύ πιο



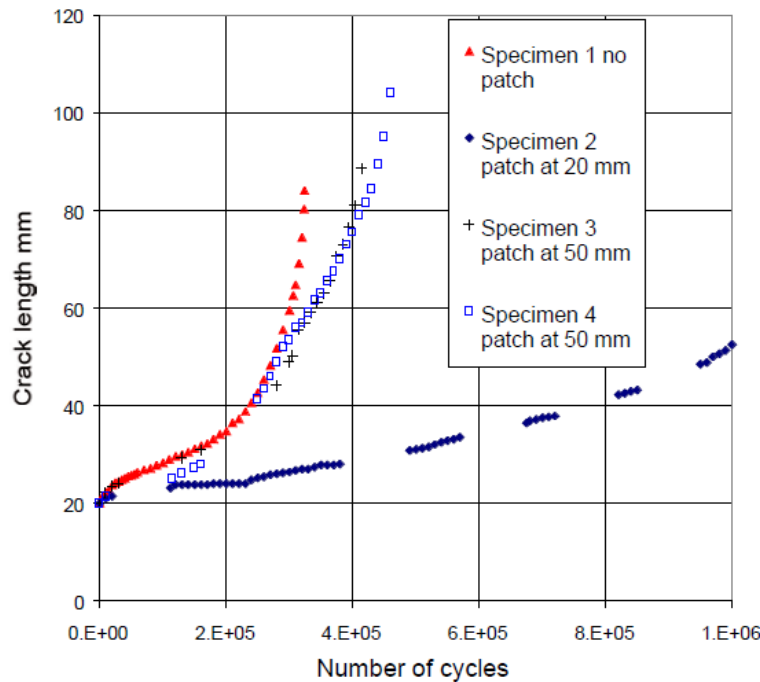
χρήσιμη μια εξίσωση της αδράνειας της διατομής του επιθέματος παρά μια εξίσωση της επιφάνειας που αυτό καλύπτει.

Οι αναλυτικές εξισώσεις μπορούν να προβλέψουν με μεγάλη ακρίβεια την τιμή του ΣΕΤ, προβλέποντας αρκετά καλά αποτελέσματα, ακόμα και στην περίπτωση που λαμβάνεται υπόψη η κάμψη του δοκιμίου, και έτσι είναι αρκετά χρήσιμες για μια πρόβλεψη της αντοχής του.

Η εργασία [13] έχοντας ως έναυσμα το γεγονός ότι μέχρι το 2002 που εκπονήθηκε η μελέτη, πάνω από 10000 επισκευασμένες δομές από σύνθετα υλικά έχουν κατασκευαστεί στην αυστραλιανή και αμερικάνικη πολεμική αεροπορία, λόγω αστοχίας σε κόπωση και διάβρωση, εξετάζει πειραματικά την αντοχή ενισχυμένων δοκιμίων τόσο σε στατική φόρτιση όσο και σε κόπωση. Αναφέρεται ότι η αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης εξαρτάται (εκτός από τις μηχανικές ιδιότητες του επιθέματος και του κολλητικού στρώματος) από τον τρόπο επικόλλησης και από την προετοιμασία της επιφάνειας του μετάλλου. Τα περισσότερα επιθέματα που τοποθετήθηκαν στα αεροσκάφη αποτελούνταν από ίνες βορίου, γραφίτη και άνθρακα, αν και οι θερμικές ιδιότητες των ινών βορίου το καθιστούν ως την καλύτερη επιλογή για αυτό το σκοπό. Πιο συγκεκριμένα, από προηγούμενες μελέτες που αναφέρονται στην εργασία αυτή, η επισκευή δομών από ίνες άνθρακα μπορούν να αυξήσουν την ζωή του υλικού που καταπονείται από κόπωση κατά 4-5 φορές και αν η επικόλληση του επιθέματος είναι αμφίπλευρη τότε η επέκταση ζωής της δομής είναι 5-6 φορές σε σχέση με την μη επισκευασμένη. Σε περιπτώσεις που το επίθεμα είναι κατασκευασμένο από ίνες βορίου η επέκταση ζωής του υλικού μπορεί να φτάσει και τις 15 φορές. Στην εργασία αυτή ως κύριο υλικό για τις μεταλλικές πλάκες χρησιμοποιήθηκε κράμα αλουμινίου 7075-T6, ενώ για το ενισχυτικό επίθεμα χρησιμοποιήθηκε ύφασμα αποτελούμενο από ίνες βορίου. Κατά την διεξαγωγή των αποτελεσμάτων κατασκευάστηκαν τριών ειδών δοκίμια με πλάκες αλουμινίου, επισκευασμένες με επιθέματα από ίνες βορίου ενός, δύο και τεσσάρων στρωμάτων. Όλα τα δοκίμια φέρουν αρχικά, τεχνητή ρωγμή τύπου V, μήκους 6 mm. Οι μη επισκευασμένες πλάκες και οι πλάκες που έφεραν ένα, δύο και τέσσερα δοκίμια, κατέρρευσαν κατά μέσω όρο στους  $6.01 \times 10^3$ ,  $3.24 \times 10^4$ ,  $6.05 \times 10^4$  και  $8.24 \times 10^4$  κύκλους αντίστοιχα. Επίσης η ρωγμή ξεκίνησε να αναπτύσσεται πέραν του αρχικού της μήκους κοντά στους 3000, 12000, 16000 κύκλους. Από τα παραπάνω πειράματα αναφέρθηκε επέκταση ζωής των δοκιμίων που καταπονήθηκαν σε κόπωση από 5 έως 14 φορές. Θεωρείται σημαντικό να αναφερθεί ότι, σε όλες τις περιπτώσεις, ο αριθμός των εναπομεινάντων κύκλων φόρτισης μετά την εκκίνηση της ρωγμής ήταν σχετικά μικρός σε σχέση με το σύνολό τους. Τέλος αναφέρεται μείωση του συντελεστή έντασης τάσης κατά 2-4 φορές, αναλόγως με τον αριθμό των στρώσεων του επιθέματος.

Στην τεχνική έκθεση [14], παρουσιάζονται πειραματικά αποτελέσματα σε χαλύβδινα δοκίμια τα οποία υπόκεινται σε κυκλική φόρτιση  $\pm 100$  MPa. Για την κατασκευή της ενισχυμένης δομής χρησιμοποιούνται επιθέματα από ίνες άνθρακα και εποξική ρητίνη. Στο σχήμα 1.25 παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα για πλάκες που φέρουν

επίθεμα, το οποίο τοποθετήθηκε σε διαφορετικά μήκη ρωγμής καθώς και μη ενισχυμένα δοκίμια.



Σχήμα 1.25: ανάπτυξη της ρωγμής σε σχέση με τους κύκλους φόρτισης για διάφορα δοκίμια.

Στον πίνακα 1.6 παρουσιάζονται οι ιδιότητες και η κύκλοι φόρτισης μέχρι την κατάρρευση, για το κάθε δοκίμιο.

Πίνακας 1.6: περιγραφή των δοκιμών του σχήματος 1.25.

Αρ. Δοκιμίου	Πάχος επιθέματος	Περιγραφή	Συνολικοί κύκλοι φόρτισης	Κύκλοι φόρτισης πέραν των 50mm μήκους ρωγμής.
1	0 mm	Έλεγχος έως την αστοχία	324000	50000
2	24 mm	Διακοπή	1000000	—
3	24 mm	Επισκευάστηκε σε μήκος ρωγμής 50 mm, έως την αστοχία	415000	110000
4	12 mm	Επισκευάστηκε σε μήκος ρωγμής 50 mm, έως την αστοχία	440000	190000

Ενδιαφέρουσα είναι η σύγκριση μεταξύ των δοκιμών 3 και 4, καθώς ενώ και τα δύο δοκίμια ενισχύθηκαν με επίθεμα όταν η ρωγμή είχε μήκος 50 mm, το δοκίμιο 3 έδειξε μεγαλύτερη επέκταση ζωής της πλάκας, σε σχέση με το δοκίμιο 4 που είχε το διπλάσιο πάχος από το δοκίμιο 3.



### 1.3 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Έπειτα από την βιβλιογραφική ανασκόπηση που παρουσιάστηκε παραπάνω, όπου περιγράφονται τα οφέλη που προσφέρει η μέθοδος επισκευής με τη χρήση επιθέματος από σύνθετα υλικά, αλλά και η διαφορετική συμπεριφορά που παρουσιάζουν οι αμφίπλευρα ενισχυμένες, από τις μονόπλευρα ενισχυμένες δομές, κρίνεται απαραίτητη η ανάπτυξη μιας αριθμητικής μεθόδου με τη βοήθεια της οποίας θα εξεταστεί η συμπεριφορά μιας επισκευασμένης κατασκευής. Λόγω του γεγονότος ότι στη ναυπηγική αρκετές κατασκευές έχουν πολύπλοκη γεωμετρία, ορισμένες φορές η ενίσχυση της δομής αμφίπλευρα είναι χρονοβόρα ή ακόμα και ανέφικτη. Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η δημιουργία ενός μοντέλου με τη βοήθεια πεπερασμένων στοιχείων, που θα προσομοιώνει το πρόβλημα της μονόπλευρα - ασύμμετρα ενισχυμένης πλάκας, που φέρει διαμπερή ρωγμή. Στη συνέχεια θα αναπτυχθεί ένας τρόπος για τον υπολογισμό της θέσης και της μορφής του μετώπου της ρωγμής με την αύξηση του μήκους της, ώστε να μπορεί να μοντελοποιηθεί το λοξό μέτωπο της ρωγμής σε διάφορα στάδια του προβλήματος. Έπειτα θα γίνει μια σύγκριση αυτής της μεθόδου με άλλες αριθμητικές μελέτες (από τη βιβλιογραφία) που έχουν πραγματοποιηθεί, ώστε να εξεταστεί η ορθότητα και η ακρίβεια της μελέτης που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα εργασία. Πριν την χρήση της μεθόδου για την εξαγωγή αποτελεσμάτων, κρίνεται απαραίτητη η σε βάθος εξέταση των παραγόντων που επηρεάζουν τα αποτελέσματά της. Τέλος θα αναπτυχθεί μια παραμετρική μελέτη που θα εξετάσει αριθμητικά, τον τρόπο διάδοσης της ρωγμής με την αύξηση του μήκους της, τους κύκλους φόρτισης που χρειάζονται ώστε η ρωγμή να φτάσει σε ένα συγκεκριμένο μήκος, καθώς και την διαφορά της ταχύτητας διάδοσης της ρωγμής μεταξύ της αμφίπλευρης και μονόπλευρης ενίσχυσης της δομής.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>

### ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

#### 2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Οι αναλυτικές εξισώσεις αποτελούν ένα γρήγορο και απλουστευμένο εργαλείο για τον υπολογισμό κάποιων βασικών μεγεθών, όπως ο ΣΕΤ (συντελεστής έντασης τάσης) και οι τάσεις, σύμφωνα με τα οποία εξάγονται κάποια συμπεράσματα για τη συμπεριφορά της ενισχυμένης, ρηγματωμένης κατασκευής. Όμως, για τη σωστή χρήση τέτοιων εξισώσεων είναι υποχρεωτική η θεώρηση κάποιων παραδοχών, που σε πολλές περιπτώσεις αλλοιώνουν τα αποτελέσματα σε μεγάλο βαθμό, σε σύγκριση με την πραγματικότητα. Επίσης με τη χρήση αναλυτικών τύπων δεν υπάρχει δυνατότητα υπολογισμού κάποιων τιμών στις περιοχές ενδιαφέροντος του ερευνητή.

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (ΜΠΣ) είναι απαλλαγμένη από τους προαναφερθέντες περιορισμούς, δίνοντας τη δυνατότητα εύρεσης οποιουδήποτε μεγέθους σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή ή σημείο της υπό μελέτη κατασκευής. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, σχεδιάζεται μια δομή και αφού εισαχθούν όλες οι παράμετροι που την αντιπροσωπεύουν, όπως γεωμετρικά χαρακτηριστικά, σταθερές των υλικών, τασική κατάσταση, συνθήκες συμμετρίας και φορτία που καταπονούν την κατασκευή, η δομή αυτή κατακερματίζεται σε πολλά μικρά τμήματα που συνδέονται μεταξύ τους με εξισώσεις συνέχειας.

Βασική προϋπόθεση για την σωστή μοντελοποίηση μιας κατασκευής με την ΜΠΣ είναι η τήρηση κάποιων βασικών αρχών οι οποίες προάγουν την ακρίβεια στα αποτελέσματα της μεθόδου και εν γένει μειώνουν τις απαιτήσεις σε επεξεργαστική ισχύ. Μερικές από τις αρχές αυτές θεωρούνται οι παρακάτω:

- ✚ Οι συνθήκες συμμετρίας πρέπει να εκμεταλλεύονται όσο το δυνατόν περισσότερο, καθώς με αυτόν τον τρόπο εκτός ότι μειώνονται οι διαστάσεις του μοντέλου, μειώνονται οι εξισώσεις συνέχειας και άρα ο χρόνος που χρειάζεται για την επίλυση.
- ✚ Πρέπει να εξασφαλίζεται συμβατότητα στις μετατοπίσεις των κόμβων και τις ακμές των στοιχείων, η οποία εξασφαλίζεται κατά έναν μεγάλο βαθμό από την εισαγωγή κατάλληλων εξισώσεων περιορισμού.
- ✚ Το πλέγμα των στοιχείων πρέπει να είναι αρκετά πυκνό, ώστε να παράγει αποτελέσματα με μεγάλη ακρίβεια.
- ✚ Η επιλογή των στοιχείων που αποτελούν την δομή, πρέπει να γίνει με βάση την ικανότητα τους να αναπαράγουν-ακολουθούν την συμπεριφορά της πραγματικής κατασκευής, τόσο τοπικά όσο και συνολικά.

- ✚ Πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη σημασία στην επιβολή των συνοριακών συνθηκών, ειδικά σε εκείνες που επιβάλλονται στους κόμβους επί των αξόνων συμμετρίας.

Εν γένει η επίλυση ενός προβλήματος με την ΜΠΣ μπορεί να διαιρεθεί σε τρία στάδια:

1. Προεπεξεργασία (*Preprocessing*)
2. Επίλυση (*Solution*)
3. Μεταεπεξεργασία (*Postprocessing*)

Στην παρούσα διπλωματική εργασία επιλέχτηκε για την ανάλυση το υπολογιστικό πρόγραμμα ANSYS, το οποίο προσφέρει υψηλές δυνατότητες προσομοίωσης, καθώς και ευκολία χειρισμού από την πλευρά του χρήστη.

## 2.2 ΠΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

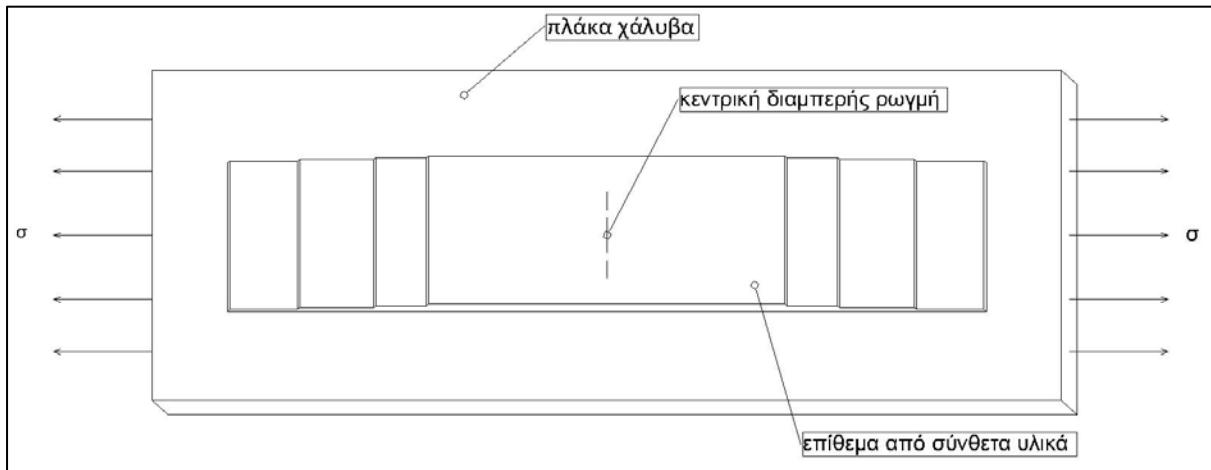
Όλα τα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων δίνουν την δυνατότητα στον χρήστη να εισάγει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κατασκευής είτε με την βοήθεια κάποιου υποπρογράμματος σχεδίασης, είτε με την βοήθεια κάποιου ανεξάρτητου προγράμματος CAD (Computer Aided Design). Επίσης δίνεται η δυνατότητα δημιουργίας ενός ολοκληρωμένου μοντέλου μέσα από ένα εύχρηστο και διαδραστικό γραφικό περιβάλλον. Το μοντέλο που δημιουργήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία θα χρησιμοποιηθεί για την εκτέλεση μιας παραμετρικής μελέτης, έτσι το πλήθος των προς επίλυση μοντέλων είναι τέτοιο που αποκλείει τον εξ' αρχής σχεδιασμό του μοντέλου σε κάθε βήμα. Από την άλλη πλευρά σε κάθε μοντέλο θα αλλάζουν μόνο οι παράμετροι που θα οριστούν από την παραμετρική μελέτη, οδηγώντας έτσι στην ανάγκη δημιουργίας ενός κύριου κώδικα του μοντέλου, ώστε κατά την εκπόνηση της παραμετρικής μελέτης να παράγονται τα προς επίλυση μοντέλα σε ελάχιστο χρόνο.

Στην αρχή του κώδικα αυτού θεωρείται βασικό να ορίζονται όλα τα μεγέθη και οι ιδιότητες του μοντέλου με την μορφή μεταβλητών. Με αυτόν τον τρόπο, οι εντολές που θα δέχεται ως εισόδους το πρόγραμμα στα στάδια της προεπεξεργασίας θα μεταβάλλονται αυτόματα με τον ορισμό των τιμών των μεταβλητών αυτών.

### 2.2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Σε αυτό το σημείο κρίνεται απαραίτητη η περιγραφή του προς μοντελοποίηση προβλήματος ώστε να γίνει έπειτα κατανοητός ο τρόπος δημιουργίας του μοντέλου. Θεωρείται πλάκα χάλυβα ορθογωνική, που φέρει κεντρική διαμπερή ρωγμή, με τα μέτωπα της ρωγμής να είναι παράλληλα στη διεύθυνση του πάχους της μεταλλικής πλάκας. Η πλάκα αυτή ενισχύεται με επίθεμα από σύνθετα υλικά, πολλών στρώσεων. Τέλος στις δύο επιφάνειες του χάλυβα, που βρίσκονται παράλληλα στη διεύθυνση του μήκους της

ρωγμής, εφαρμόζεται σταθερή εφελκυστική δύναμη. Η κατασκευή που περιγράφηκε παραπάνω, θα δημιουργηθεί με σκοπό να εξεταστεί η συμπεριφορά της χαλύβδινης πλάκας μετά την εφαρμογή κοπωτικών φορτίων. Πιο συγκεκριμένα θα εξεταστεί ο αριθμός κύκλων φόρτισης που χρειάζονται ώστε το μήκος ρωγμής να φτάσει σε ανά συγκεκριμένο μήκος, καθώς και η μορφή του μετώπου της ρωγμής με την αύξηση του μήκους της ρωγμής. Το πρόβλημα που περιγράφηκε φαίνεται στο σχήμα 2.1



Σχήμα 2.1: Περιγραφή του προβλήματος που πρόκειται να μοντελοποιηθεί.

### 2.2.2 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Το πρόγραμμα υποστηρίζει την μοντελοποίηση γραμμικών υλικών (ισοτροπικών, ορθοτροπικών και ανισοτροπικών) και μη γραμμικών υλικών (ελαστικών, ανελαστικών, βισκοελαστικών). Υποστηρίζει και αρκετές άλλες επιλογές, όπως η θερμική διαστολή, η απόσβεση, αλλά και υλικά ηλεκτρομαγνητικά και ρευστά. Στην παρούσα μελέτη όλα τα υλικά όπως παρουσιάζονται κάτωθι, θα θεωρηθούν γραμμικά ελαστικά:

- Η μεταλλική πλάκα, της οποίας οι ιδιότητες θα χρησιμοποιηθούν στην παρούσα μελέτη έχει ληφθεί από τη βιβλιογραφία [15], όπου αναφέρεται ότι η πλάκα που παραχωρήθηκε από τα ναυπηγεία Ελευσίνας, τυποποιήθηκε ως κοινός ναυπηγικός χάλυβας Grade A, όμως έπειτα από δοκιμές εφελκυσμού των δοκιμών προέκυψε ότι ο χάλυβας είχε τις ιδιότητες που αναφέρονται στον πίνακα 2.1. Ο χάλυβας θα μοντελοποιηθεί ως ελαστικό υλικό, διότι εάν ληφθεί υπόψη η πλαστικότητα του χάλυβα, γίνεται αποκόλληση του επιθέματος από την μεταλλική πλάκα, αρκετά πριν το φορτίο φτάσει το όριο διαρροής του χάλυβα, φαινόμενο το οποίο δεν θα εξεταστεί στην παρούσα μελέτη.

Πίνακας 2.1: Αριθμητικές τιμές μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα.

Υλικό	E (MPa)	$\nu$	$\sigma_0$ (MPa)
Χάλυβας, Grade A	200000	0.3	348

- Ενισχυτικό επίθεμα από σύνθετα υλικά αποτελούμενο από μονοαξονικές ίνες άνθρακα και εποξειδική ρητίνη (carbon-epoxy). Το επίθεμα θα εισαχθεί στο πρόγραμμα ως ορθοτροπικό με διαφορετικές ιδιότητες κατά τις τρεις κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις, χαρακτηριζόμενο από τρία μέτρα ελαστικότητας ( $E_x$ ,  $E_y$ ,  $E_z$ ), τρεις λόγους Poisson ( $\nu_{xy}$ ,  $\nu_{yz}$ ,  $\nu_{xz}$ ), και τρία μέτρα διάτμησης ( $G_{xy}$ ,  $G_{yz}$ ,  $G_{xz}$ ), όπου X,Y,Z οι τρεις κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις. Οι ιδιότητες του επιθέματος που λήφθηκαν από τη βιβλιογραφία [16], παρουσιάζονται στον πίνακα 2.2.

Πίνακας 2.2: Αριθμητικές τιμές ιδιοτήτων επιθέματος από σύνθετα υλικά.

Υλικό	$E_x$ (GPa)	$E_y$ (GPa)	$E_z$ (GPa)	$\nu_{xy}$	$\nu_{yz}$	$\nu_{xz}$	$G_{xy}$ (MPa)	$G_{yz}$ (MPa)	$G_{xz}$ (MPa)
CFRP	135	9	9	0.3	0.002	0.3	5	9	5

- Το κολλητικό μέσο που θα μεταφέρει μέσω διάτμησης τα φορτία από την χαλύβδινη πλάκα στο επίθεμα από σύνθετα υλικά, θα θεωρηθεί επίσης ως ιστροπικό υλικό όπως αναφέρεται και στις περισσότερες αριθμητικές μελέτες που υπάρχουν στην βιβλιογραφία. Οι ιδιότητες του κολλητικού μέσου, που λήφθηκαν από τη βιβλιογραφία [17], παρουσιάζονται στον πίνακα 2.3.









Πίνακας 2.3: Αριθμητικές ιδιότητες κολλητικού μέσου.

Υλικό	E (MPa)	$\nu$
Κολλητικό μέσο	4500	0.25

### 2.2.3 ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΥΠΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

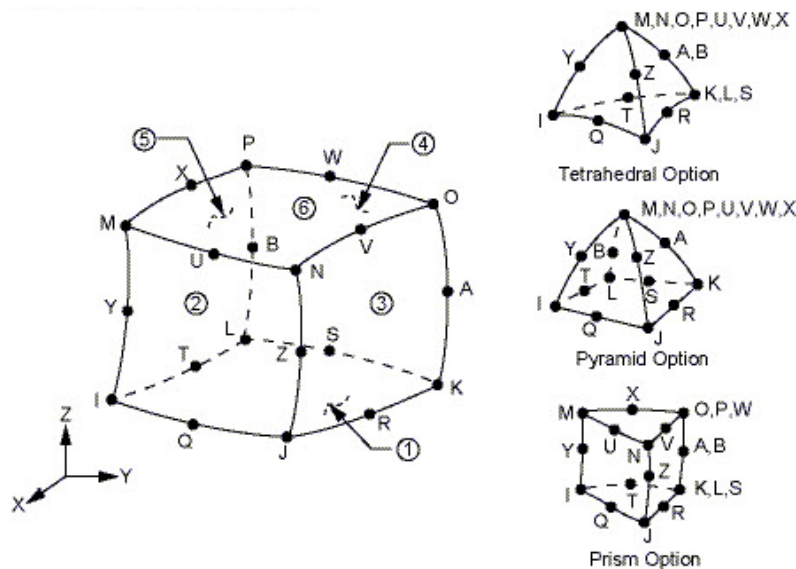
Μετά τον ορισμό των υλικών και των ιδιοτήτων τους, είναι απαραίτητη η επιλογή τύπου στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή του μοντέλου με γνώμονα την ακρίβεια της προσομοίωσης του προβλήματος. Σε αυτό το σημείο κρίνεται απαραίτητη η αναφορά στις πιο γνωστές και ευρύτερα χρησιμοποιούμενες τεχνικές υπολογισμού των

επισκευασμένων μεταλλικών δομών με επιθέματα από σύνθετα υλικά με τη βοήθεια των πεπερασμένων στοιχείων. Οι κυριότερες τέτοιες τεχνικές, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [17] είναι:

-  Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων με την χρήση τρισδιάστατων στοιχείων τύπου h (h-version elements).
-  Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων με τη χρήση τρισδιάστατων στοιχείων τύπου p (p-version elements).
-  Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων με τη χρήση τρισδιάστατων και δισδιάστατων στοιχείων στο ίδιο μοντέλο.
-  Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων με τη χρήση δισδιάστατων επίπεδων στοιχείων με ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας.
-  Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων με τη χρήση επίπεδων ειδικών στρωσιγενών στοιχείων.
-  Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων με τη χρήση στοιχείων κελύφους σε διαφορετικά επίπεδα, συνδεδεμένα με εξισώσεις περιορισμού των μετατοπίσεων.
-  Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων με τη χρήση στοιχείων κελύφους σε διαφορετικά επίπεδα, συνδεδεμένα με στοιχεία ελατηρίου.
-  Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων με τη χρήση ειδικών στοιχείων Mildlin σε διαφορετικά επίπεδα, συνδεδεμένα με εξισώσεις περιορισμού των μετατοπίσεων.

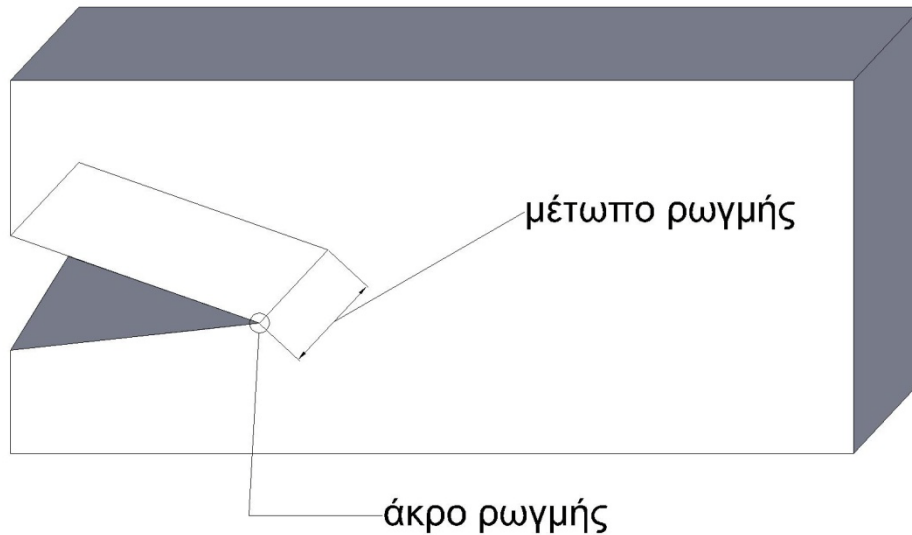
Στην παρούσα εργασία έχουν χρησιμοποιηθεί για την δημιουργία του μοντέλου τρισδιάστατα στοιχεία τύπου h (h-version elements). Ο τύπος αυτών των στοιχείων έχει τη δυνατότητα προσομοίωσης ορθότροπων υλικών όπως συμβαίνει στην περίπτωση του επιθέματος, καθώς και επιβολής θερμικών φορτίων εάν αυτό κριθεί απαραίτητο. Η μέθοδος μοντελοποίησης με την χρήση αυτών των στοιχείων καθιστά δυνατή την προσομοίωση της γεωμετρίας αλλά και της επιβαλλόμενης φόρτισης οποιασδήποτε δομής με εξαιρετική ακρίβεια. Η πιο διαδεδομένη μέθοδος προσομοίωσης της επισκευής μιας

δομής με την χρήση επιθέματος είναι η χρήση μιας σειράς τρισδιάστατων στοιχείων για το κάθε υλικό και την κάθε στρώση. Στο μοντέλο αυτής της εργασίας έχει επιλεγεί το εικοσακομβικό στοιχείο SOLID 95 (Σχήμα 2.2), το οποίο έχει χαρακτηριστικά πλαστικότητας, ερπυσμού, μεγάλων εκτροπών και παραμορφώσεων. Το στοιχείο αυτό έχει τρεις βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο, δίνει την δυνατότητα αφαίρεσης του μεσαίου κόμβου, ώστε να συνεργάζεται με στοιχεία άλλου τύπου που δεν διαθέτουν ενδιάμεσο κόμβο, ή την μετατόπιση αυτού κατά 1 / 4 της απόστασης για τον σχηματισμό ιδιόμορφων στοιχείων (singular elements).



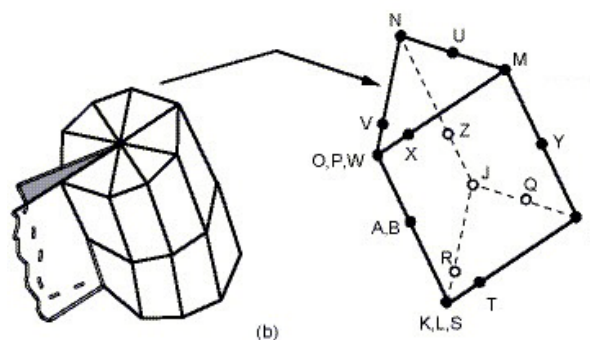
**Σχήμα 2.2: Τρισδιάστατα εικοσακομβικά στοιχεία τύπου SOLID 95 του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ANSYS.**

Η πιο σημαντική περιοχή σε ένα μοντέλο θραύσης είναι η περιοχή γύρω από το άκρο της ρωγμής. Για λόγους ευκολίας και σαφήνειας θα αναφερόμαστε σαν άκρο ρωγμής (crack tip) και μέτωπο ρωγμής όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3. Σε προβλήματα στην περιοχή της γραμμικής ελαστικότητας όπως αυτά που θα εξεταστούν στην συνέχεια έχει αποδειχτεί ότι το πεδίο των τάσεων και των παραμορφώσεων κοντά στο άκρο της ρωγμής ή το μέτωπο αυτής είναι ιδιόμορφο και μεταβάλλεται ανάλογα με την τετραγωνική ρίζα της απόστασης από αυτό,  $r^{-1/2}$ , ενώ το πεδίο των μετατοπίσεων μεταβάλλεται ανάλογα με την τετραγωνική ρίζα της απόστασης από το μέτωπο της ρωγμής,  $r^{1/2}$ . Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος ιδιομορφίας των πεδίων αυτών, πρέπει τα στοιχεία γύρω από το μέτωπο της ρωγμής να είναι μη γραμμικά (quadratic) με τους μεσαίους κόμβους να μετακινούνται στο 1/4 της απόστασης από το άκρο, δηλαδή είναι απαραίτητη η χρήση ιδιόμορφων στοιχείων.



Σχήμα 2.3: Άκρο και μέτωπο μιας ρωγμής.

Με την χρήση ιδιόμορφων στοιχείων γύρω από το μέτωπο της ρωγμής επιτυγχάνεται μεγάλη ακρίβεια αποτελεσμάτων, αποφεύγοντας με αυτόν τον τρόπο την εξαιρετικά μεγάλη πύκνωση του καννάβου που θα ήταν η απαραίτητη εναλλακτική λύση, και θα οδηγούσε σε μεγαλύτερους υπολογιστικούς χρόνους. Το υπολογιστικό πρόγραμμα ANSYS προσφέρει την δυνατότητα απευθείας δημιουργίας ιδιόμορφων στοιχείων. Οι παράμετροι που απαιτούνται για τον καθορισμό των στοιχείων αυτών όπως ο αριθμός τους γύρω από το μέτωπο της ρωγμής και οι διαστάσεις τους, ορίζονται με ευκολία μέσω μιας εντολής (KSCON). Η δομή του ιδιόμορφου στοιχείου SOLID 95 παρουσιάζεται στο σχήμα 2.4.

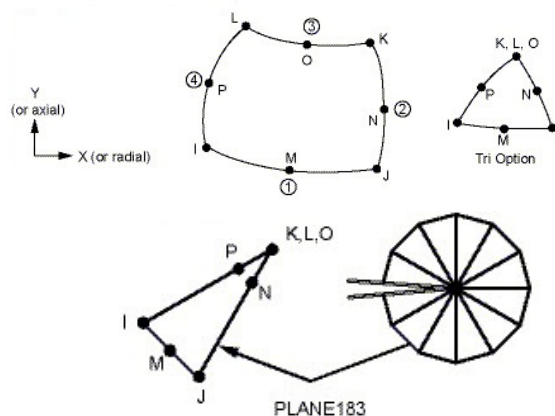


Σχήμα 2.4: Γεωμετρία ιδιόμορφου στοιχείου SOLID 95.

Τέλος πρέπει να επισημανθεί ότι έγινε χρήση και του δισδιάστατου στοιχείου PLANE 82 που παρουσιάζεται στο σχήμα 2.5 καθαρά για βοηθητικούς λόγους. Το στοιχείο



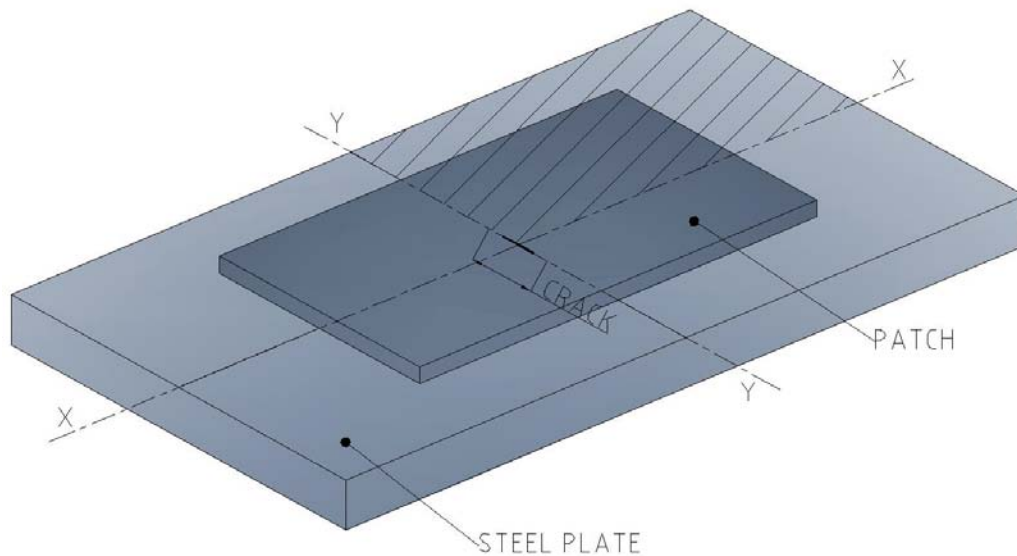
αυτό χρησιμοποιήθηκε διότι δεν έγινε απευθείας δημιουργία των τρισδιάστατων στοιχείων. Σε αρκετά σημεία κατά την μοντελοποίηση, χρειάστηκε να δημιουργηθεί πρώτα μια επίπεδη επιφάνεια, η οποία στη συνέχεια διακριτοποιήθηκε με τη χρήση του στοιχείου PLANE 82 και τελικά έγινε προεκβολή αυτής κατά την τρίτη διάσταση, ώστε να δημιουργηθεί ένας όγκος (η διαδικασία της διακριτοποίησης και της προεκβολής θα περιγραφεί στη συνέχεια). Το στοιχείο PLANE 82 χαρακτηρίζεται ως βοηθητικό διότι κατά την διαδικασία της μετατροπής μιας επιφάνειας σε όγκο τα δισδιάστατα στοιχεία αυτομάτως σβήνονται και μετατρέπονται σε τρισδιάστατα στοιχεία SOLID 95 και άρα δεν λαμβάνουν μέρος στην επίλυση. Το στοιχείο PLANE 82 είναι οκτακομβικό στοιχείο με δύο βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο και επιλέχτηκε επειδή συνεργάζεται άριστα με το στοιχείο SOLID 95 καθώς έχουν τον ίδιο αριθμό κόμβων ανά πλευρά. Στο σχήμα 2.5 παρουσιάζεται επίσης και η μορφή των ιδιόμορφων στοιχείων PLANE 82 που χρησιμοποιήθηκε αρχικά στην δημιουργία της επιφάνειας που προσομοιώνει την μορφή της ρωγμής.



**Σχήμα 2.5: Γεωμετρία του στοιχείου PLANE 82 (πάνω) καθώς και η δομή του ιδιόμορφου στοιχείου PLANE 82 (κάτω).**

#### 2.2.4 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ - ΠΛΗΡΩΣΗ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ - ΠΡΟΕΚΒΟΛΗ ΣΤΟ ΧΩΡΟ

Για λόγους οικονομίας υπολογιστικής ισχύος μοντελοποιείται μόνο το 1/4 της κατασκευής (εφόσον η κατασκευή είναι συμμετρική ως προς του άξονες X,Y), και με τον ορισμό συνθηκών συμμετρίας θα εξαχθούν από το πρόγραμμα αποτελέσματα που θα αφορούν σε ολόκληρη την κατασκευή. Στο σχήμα 2.6 παρουσιάζεται ως σκιαγραφημένο το τμήμα της κατασκευής που θα μοντελοποιηθεί.



**Σχήμα 2.6: Σκαρίφημα της κατασκευής και παρουσίαση του σκιαγραφημένου τμήματος που θα μοντελοποιηθεί.**

Αρχικά, αφού επιλέχτηκε η μέθοδος που θα χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή του μοντέλου, ακολουθεί ο αναλυτικός ορισμός όλων των μεταβλητών που θα χρησιμοποιηθούν στην μοντελοποίηση. Τέτοιες μεταβλητές είναι όλες οι ιδιότητες των υλικών όπως αυτές αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 2.2.2, όλες οι κύριες διαστάσεις που οριοθετούν την γεωμετρία του χάλυβα, του κολλητικού στρώματος και των στρώσεων του επιθέματος και τέλος ο αριθμός των στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν κατά το πάχος κάθε υλικού. Για να ολοκληρωθεί ο ορισμός των μεταβλητών, ορίζεται με την βοήθεια 2 σημείων (keypoints), μια κεκλιμένη ευθεία η οποία θα προσομοιώνει το πλάγιο μέτωπο της ρωγμής. Η κλίση της ευθείας αυτής ορίζεται και αυτή ως μεταβλητή στην αρχή του κώδικα.

Για την σχεδίαση της τρισδιάστατης κατασκευής που αποτελείται από μια χαλύβδινη πλάκα, ένα κολλητικό στρώμα και ένα επίθεμα από σύνθετα υλικά, θα δημιουργηθούν αρχικά οι κόμβοι (keypoints) που θα οριοθετήσουν την περιοχή όλων των τμημάτων της κατασκευής. Η επιλογή της θέσης των κόμβων έγινε με γνώμονα τις επιφάνειες που θα προκύψουν αν αυτοί ενωθούν μεταξύ τους, καθώς και την επιτακτική ανάγκη ύπαρξης κόμβου σε συγκεκριμένες θέσεις. Στο σχήμα 2.7 παρουσιάζονται στα σημεία που ορίζουν το δισδιάστατο μοντέλο.

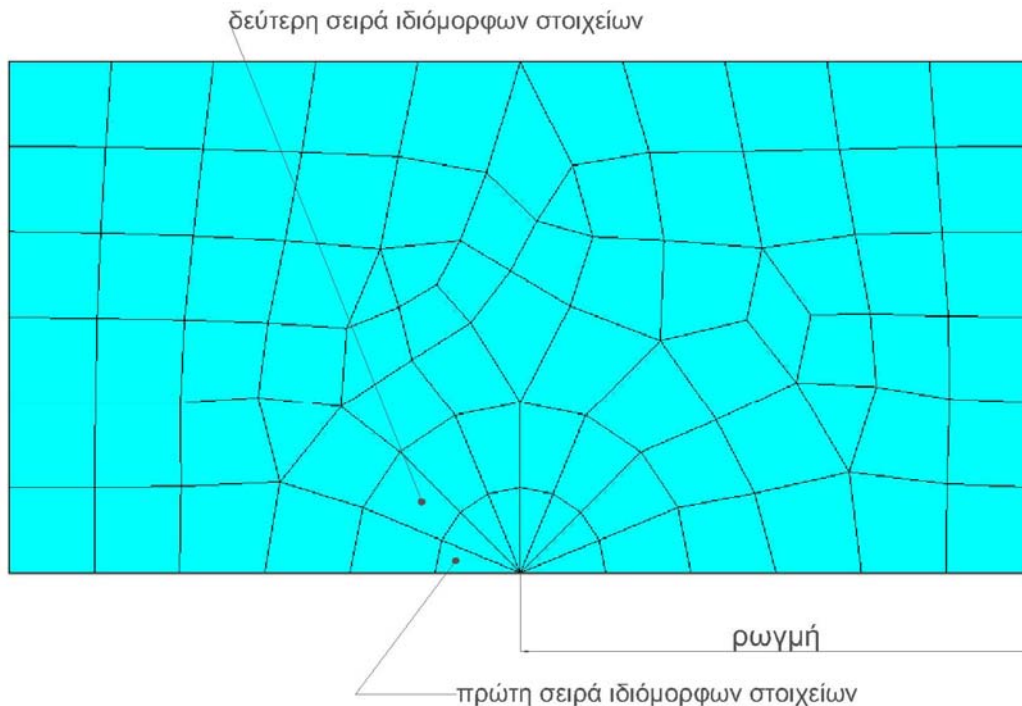
POINTS		TYPE NUM							
16	15	46	41	36	14	13	31	12	
17	21	45	40	35	24	27	30	11	
18	20	44	39	34	23	26	29	10	
1									
2	19	43	38	33	22	25	28	9	
		42	37	32	5	6	7	8	

Σχήμα 2.7: Δημιουργία των κόμβων πάνω στους οποίους θα δομηθεί γεωμετρικά το μοντέλο.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να οριστεί κατάλληλα το σημείο που θα αποτελεί το άκρο της ρωγμής για το δισδιάστατο μοντέλο. Για τον ορισμό του σημείου ως άκρο ρωγμής πρέπει να οριστούν:

- ✚ Η ακτίνα της πρώτης σειράς των ιδιόμορφων στοιχείων που θα βρίσκονται γύρω από το άκρο της ρωγμής (Radius of first row of elements). Η ακτίνα αυτή ορίζεται συνήθως ως κλάσμα του ήμισυ της ρωγμής. Η επιλογή του μήκους της ακτίνας της πρώτης σειράς ιδιόμορφων στοιχείων επηρεάζει τα αποτελέσματα του Συντελεστή Έντασης Τάσης (ΣΕΤ) που εξάγονται από το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων. Για το λόγο αυτό θα πρέπει να επιλεγεί ένα τέτοιο μήκος ακτίνας ώστε να μην υπάρχουν περισσότερα ιδιόμορφα στοιχεία από όσα είναι αναγκαία για την επίλυση του προβλήματος, αλλά να είναι τόσα ώστε οι τιμές ΣΕΤ που εξάγει το πρόγραμμα να έχουν ικανοποιητική ακρίβεια. Περισσότερα για την επιλογή του μήκους της ακτίνας της πρώτης σειράς των ιδιόμορφων στοιχείων θα αναφερθούν στη συνέχεια του κεφαλαίου.
- ✚ Ο αριθμός των ιδιόμορφων στοιχείων γύρω από το άκρο της ρωγμής (Number of elements in circumferential direction). Στην θεωρία πεπερασμένων στοιχείων αναφέρεται ότι η ελάχιστη γωνία τριγωνικών στοιχείων πρέπει να είναι  $15^\circ$ , για να μην παραβιαστούν οι κανόνες ομαλού σχηματισμού, γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιήθηκαν 8 στοιχεία γύρω από το άκρο της ρωγμής, ώστε η γωνία που σχηματίζεται να είναι  $22.5^\circ$ .
- ✚ Ο λόγος της ακτίνας της δεύτερης ακολουθίας ιδιόμορφων στοιχείων προς την ακτίνα της πρώτης (Ratio of second row of element size). Η τιμή αυτή δεν επηρεάζει ιδιαίτερα την ακρίβεια των αποτελεσμάτων και η τιμή της επιλέχθηκε σύμφωνα με την αυτόματη επιλογή που παρέχει το πρόγραμμα.

Οι παραπάνω παράμετροι που καθορίζονται στο πρόγραμμα μέσω της εντολής *KSCON*, βοηθούν στην δημιουργία ενός ημικυκλικού τομέα γύρω από το άκρο της ρωγμής όπως φαίνεται στο σχήμα 2.8, όπου φαίνεται το πλέγμα κοντά στην ρωγμή αποτελούμενο από δισδιάστατα στοιχεία.



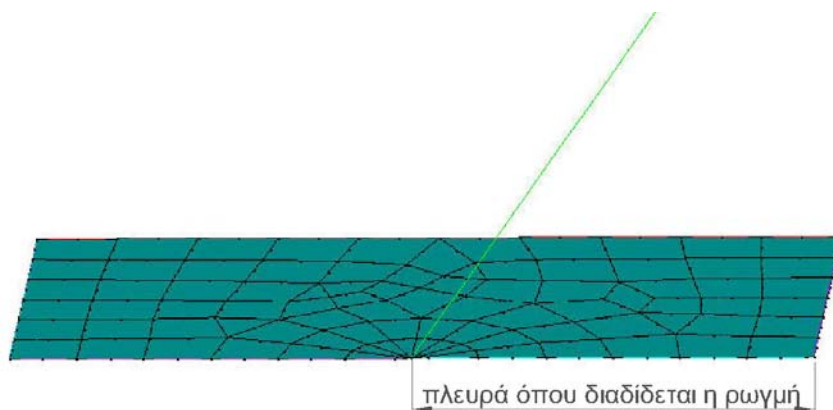
**Σχήμα 2.8: Πλέγμα στοιχείων κοντά στο άκρο της ρωγμής.**

Τα περισσότερα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων υποστηρίζουν την αυτόματη διακριτοποίηση της μοντελοποιημένης κατασκευής. Το πρόγραμμα ANSYS με τον ορισμό κάποιων απαραίτητων παραμέτρων έχει την δυνατότητα να κατακερματίσει αυτόματα το μοντέλο στα στοιχεία που έχουμε επιλέξει. Η κατασκευή που εξετάζεται στην συγκεκριμένη εργασία απαιτεί αρκετά πυκνό πλέγμα κοντά στο μέτωπο της ρωγμής και σταδιακή αραίωση των στοιχείων, αυξανόμενης της απόστασης από αυτό. Επιπλέον η δημιουργία του πλέγματος θα γίνει σε δύο στάδια (πρώτα κοντά στην ρωγμή και μετά στην υπόλοιπη δομή, όπως θα εξηγηθεί παρακάτω), οδηγώντας έτσι στην δημιουργία προσαρμοσμένης από τον χρήστη διακριτοποίησης. Με την προσαρμοσμένη διακριτοποίηση δίνεται στον χρήστη η δυνατότητα καθορισμού του ακριβούς αριθμού και σχήματος των στοιχείων που θα απαρτίζουν κάθε περιοχή της κατασκευής. Η διακριτοποίηση κάθε περιοχής γίνεται εμμέσως με την διακριτοποίηση των γραμμών που την περιβάλλουν.

Η βασική διαφορά μεταξύ της μοντελοποίησης μιας ρηγματωμένης πλάκας με κατακόρυφο μέτωπο ρωγμής, σε σχέση με την μοντελοποίηση της πλάκας με πλάγιο

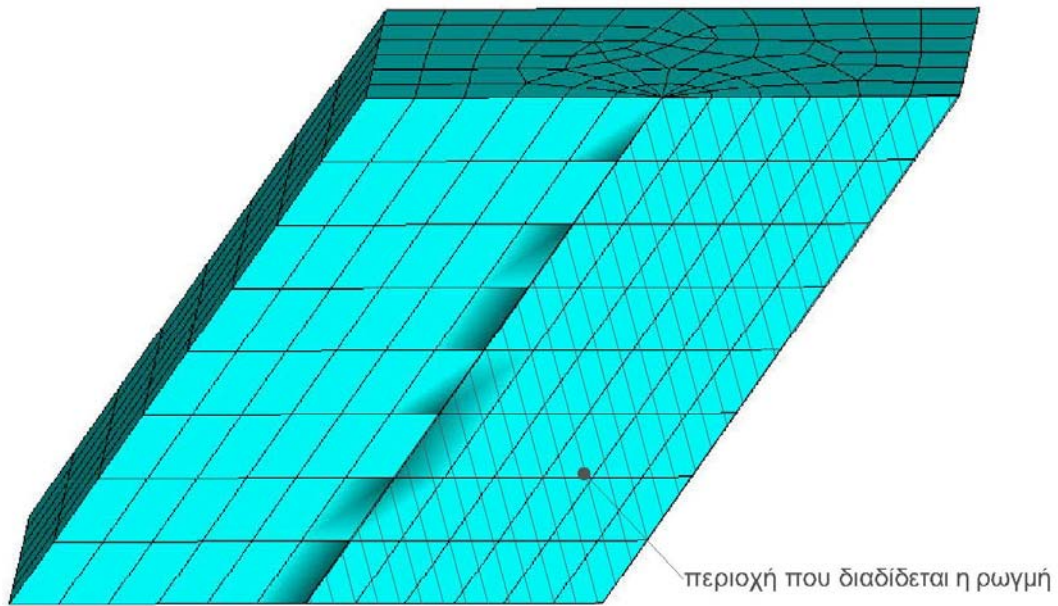
μέτωπο ρωγμής, είναι ότι στην δεύτερη περίπτωση δεν γίνεται να δημιουργηθεί ολόκληρη η επιφάνεια της πλάκας και μετά αυτή να προεκβληθεί, ώστε να δημιουργήσει έναν όγκο. Για το λόγο αυτό, στο μοντέλο της εργασίας δημιουργήθηκε αρχικά μια επιφάνεια κοντά στο άκρο της ρωγμής που θα περιλαμβάνει πολύ πυκνό πλέγμα. Για την δημιουργία του πλέγματος στην περιοχή αυτή πρέπει να επιλεχτούν όλες οι γραμμές που οριοθετούν την επιφάνεια και να χωριστούν σε τμήματα (divisions). Οι γραμμές που βρίσκονται στο επίπεδο που διαδίδεται η ρωγμή πρέπει να χωριστούν σε τμήματα των οποίων το μέγεθος να αυξάνεται, όσο απομακρύνονται από το άκρο της ρωγμής, ώστε το πλέγμα να αραιώσει σταδιακά. Η τμηματοποίηση των ευθειών γίνεται με την εντολή *LESIZE* και φαίνεται στο σχήμα 2.7. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στο γεγονός ότι κάθε ευθεία έχει εξ ορισμού μια διεύθυνση στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων. Στην τμηματοποίηση γραμμών με μη σταθερά τμήματα αρκετές φορές χρειάζεται η αντιστροφή της διεύθυνσης αυτής, με την χρήση της εντολής *Main Menu* → *Preprocessor* → *Meshing* → *Size Cntrls* → *ManualSize* → *Lines* → *Flip Bas*.

Μόλις γίνει η τμηματοποίηση της επιφάνειας αυτής, ακολουθεί η διακριτοποίησή της. Επόμενο βήμα είναι η δημιουργία ενός όγκου που θα αποτελείται από πυκνό πλέγμα και θα προσομοιώνει το μέτωπο της ρωγμής. Για την δημιουργία αυτού του όγκου ο οποίος θα προεκβληθεί όχι κατακόρυφα αλλά σύμφωνα με την κλίση του λοξού μετώπου, χρησιμοποιούμε την εντολή *Main Menu* → *Preprocessor* → *Modeling* → *Operate* → *Extrude* → *Areas* → *Along Lines*. Η γραμμή που χρειάζεται για να προεκβληθεί η επιφάνεια έχει οριστεί στην αρχή του κώδικα σύμφωνα με την γωνία που σχηματίζει με την κατακόρυφο και έχει διαχωριστεί σε 8 ίσα τμήματα έτσι ώστε η πλάκα του χάλυβα να αποτελείται από 8 στοιχεία κατά το πάχος. Στο σχήμα 2.9 φαίνεται η ευθεία σύμφωνα με την οποία θα προεκβληθεί η επιφάνεια.



**Σχήμα 2.9:** Επιφάνεια που πρόκειται να προεκβληθεί και η ευθεία σύμφωνα με την οποία θα γίνει η προεκβολή.

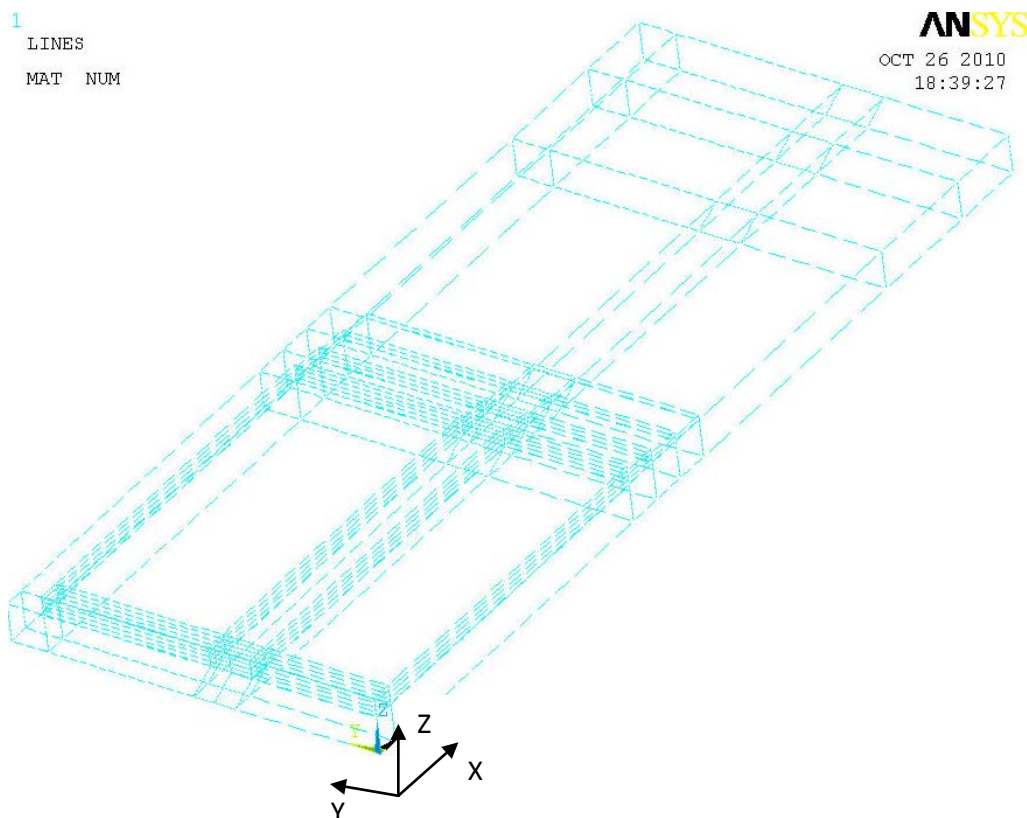
Στο σχήμα 2.10 φαίνεται ο όγκος που δημιουργείται μετά την προεκβολή και θα προσημειώνει το μέτωπο της ρωγμής.



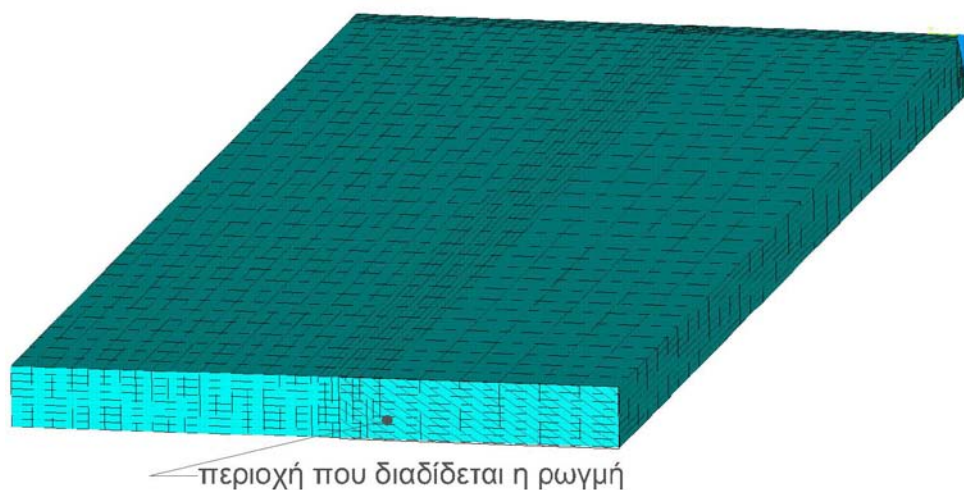
**Σχήμα 2.10:** Όγκος που δημιουργείται από την προεκβολή της επιφάνειας κοντά στο άκρο ρωγμής.

Έπειτα από την δημιουργία του όγκου αυτού, δημιουργούνται τα σημεία που θα οριοθετούν την άνω πλευρά της πλάκας και την κάτω πλευρά του κολλητικού μέσου. Στην συνέχεια ενώνονται όλα τα σημεία αυτά ώστε να δημιουργηθούν όλοι οι υπόλοιποι όγκοι που είναι απαραίτητοι για την κατασκευή του μοντέλου. Για την προσαρμοσμένη διακριτοποίηση της υπόλοιπης κατασκευής, πρέπει να διακριτοποιηθούν όλες οι γραμμές που αποτελούν τον κάθε όγκο (σχήμα 2.11), σύμφωνα με τις επιλογές του χρήστη, και στην συνέχεια οι όγκοι κατακερματίζονται σε στοιχεία τύπου SOLID 95. Η μοντελοποίηση ολόκληρης της πλάκας του χάλυβα παρουσιάζεται στο σχήμα 2.12.





Σχήμα 2.11: Διακριτοποίηση των γραμμών της κατασκευής.



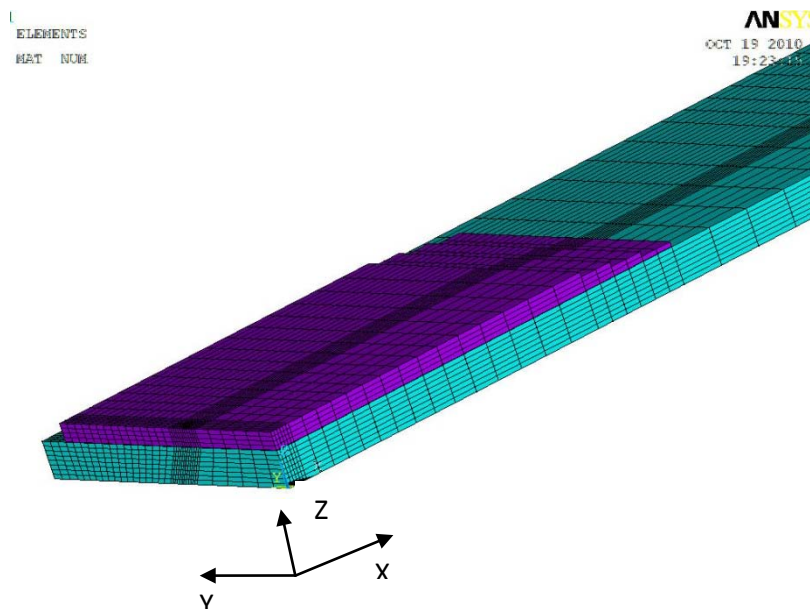
Σχήμα 2.12: Τελική μορφή της μοντελοποιημένης πλάκας χάλυβα.

Όπως και στην δημιουργία γραμμών έτσι και στην κατασκευή όγκων, ανάλογα με την σειρά που θα επιλεγούν τα σημεία που θα αποτελούν έναν όγκο, ορίζεται ένα διάνυσμα για την κάθε επιφάνεια που τον αποτελεί. Η κατεύθυνση του διανύσματος αυτού

ορίζει την κατεύθυνση προς την οποία θα γίνει η προεκβολή της επιφάνειας αυτής εάν αυτό ζητηθεί. Στο συγκεκριμένο μοντέλο πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στο γεγονός αυτό καθώς μετά την κατασκευή της μεταλλικής πλάκας θα γίνει προεκβολή κάποιων επιφανειών της, για την κατασκευή του επιθέματος και της κόλλας, όπως περιγράφεται παρακάτω.

Αφού ολοκληρώθηκε η δημιουργία της μεταλλικής πλάκας πρέπει να επιλεγεί η επιφάνεια στην οποία θα επικολληθεί το επίθεμα και ορίζεται ο τύπος των στοιχείων της κόλλας, ο τύπος του υλικού, το πάχος και ο αριθμός των στοιχείων κατά αυτό. Επιλέγεται, λόγω του μικρού πάχους του κολλητικού στρώματος, να προσομοιωθεί με ένα στοιχείο κατά το πάχος, ώστε να μην παραβιαστούν οι συνθήκες ομαλού σχηματισμού των στοιχείων. Γίνεται η προεκβολή των επιφανειών της άνω πλευράς του χάλυβα που πρόκειται να τοποθετηθεί το επίθεμα κατά το πάχος της κόλλας. Με τον ίδιο τρόπο μοντελοποιείται το κάθε στρώμα του επιθέματος. Ο αριθμός των στοιχείων που θα βρίσκονται κατά το πάχος του επιθέματος δεν θα είναι σταθερός, καθώς το πάχος του επιθέματος δεν θα είναι σταθερό κατά την εκπόνηση της παραμετρικής μελέτης.

Τέλος, για να ολοκληρωθεί το στάδιο της προεπεξεργασίας, πρέπει να γίνει συγχώνευση των κόμβων του μοντέλου που έχουν ίδιες συντεταγμένες. Το πρόγραμμα θεωρεί πριν από την συγχώνευση πολλούς ασύνδετους, μεταξύ τους, όγκους. Με την εντολή *NUMMRG* γίνεται η συγχώνευση των κατώτερων κόμβων της κόλλας με τους ανώτερους κόμβους της πλάκας, καθώς και των ανώτερων κόμβων της κόλλας με τους κατώτερους κόμβους του επιθέματος, οπότε η κατασκευή συμπεριφέρεται ως ενιαία. Η τελική μορφή του μοντέλου παρουσιάζεται στο σχήμα 2.13.



Σχήμα 2.13: Τελική μορφή του μοντέλου.

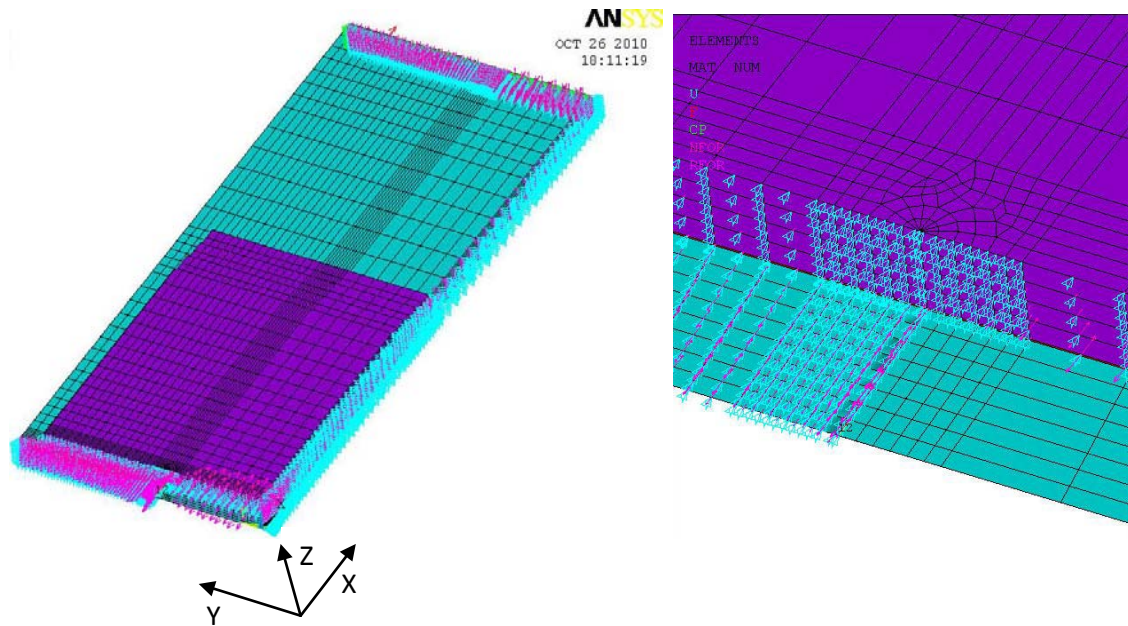


## 2.3 ΕΠΙΛΥΣΗ

Στο στάδιο της επίλυσης επιβάλλονται οι συνθήκες συμμετρίας, οι συνθήκες φόρτισης και στήριξης ώστε να λυθούν οι απαραίτητες εξισώσεις και να τελεστεί η επίλυση του προβλήματος. Στο σημείο αυτό του κώδικα πρέπει να οριστεί ο τύπος της ανάλυσης που επιλέχτηκε από τον χρήστη (γραμμική/μη γραμμική, στατική/μη στατική) ανάλογα με τις απαιτήσεις και τα χαρακτηριστικά του προβλήματος.

### 2.3.1 ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ - ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ

Οι συνοριακές συνθήκες που θα επιβληθούν στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων καθορίζουν εξίσου την ακριβή προσομοίωση του φαινομένου που εξετάζεται. Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 2.2.3, θα μοντελοποιηθεί μόνο το 1/4 της κατασκευής, επομένως πρέπει να οριστούν συνθήκες συμμετρίας στις επιφάνειες εκείνες που θα εξασφαλίσουν την προσομοίωση ολόκληρης της κατασκευής, δηλαδή τις επιφάνειες κατά τα επίπεδα συμμετρίας (x-z και y-z). Στο σχήμα 2.14 φαίνονται οι επιφάνειες στις οποίες έχουν επιβληθεί συνθήκες συμμετρίας. Στο σχήμα αυτό φαίνεται και ο τρόπος μοντελοποίησης της ρωγμής με τον μη περιορισμό των στοιχείων του χάλυβα, δηλαδή των επιφανειών που αντιστοιχούν στις πλευρές της ρωγμής. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην επιβολή περιορισμών των κόμβων του κολλητικού μέσου κατά το επίπεδο διάδοσης της ρωγμής, όπου οι κάτω σειρά των κόμβων των επιφανειών είναι κοινή με τους κόμβους του μετάλλου (άρα η ύπαρξη ρωγμής οδηγεί στον μη περιορισμό τους), ενώ η πάνω σειρά των κόμβων είναι κοινή με τους κόμβους του επιθέματος (άρα υπάρχει συνέχεια υλικού που οδηγεί στον περιορισμό τους). Για την σωστή προσομοίωση αυτής της περιοχής δεν επιβάλλεται καμία συνοριακή συνθήκη στις επιφάνειες του κολλητικού μέσου, όμως επιβάλλοντας συνθήκες συμμετρίας στις επιφάνειες του επιθέματος, εμποδίζεται η ολίσθηση του κολλητικού μέσου μεταξύ της πλάκας και του επιθέματος (γεγονός που θα οδηγούσε σε αναληθείς υπολογισμούς).



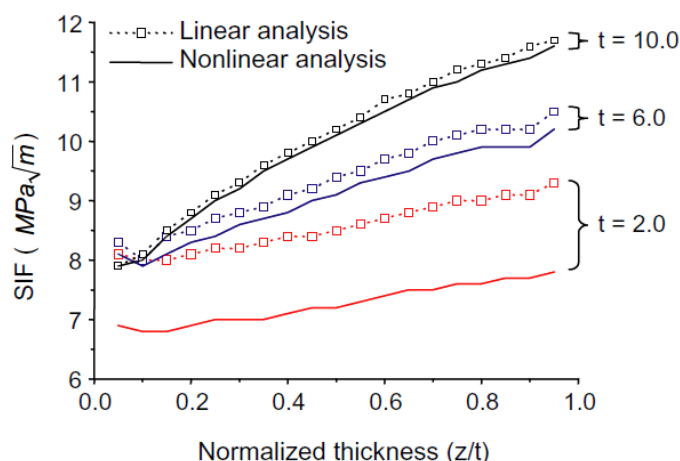
Σχήμα 2.14: Επιφάνειες στις οποίες έχουν επιβληθεί συνθήκες συμμετρίας(αριστερά), και οι συνθήκες συμμετρίας κοντά στην ρωγμή, σε λεπτομέρεια (δεξιά).

Μια περιοχή του μοντέλου που χρήζει ιδιαίτερης προσοχής σε ό,τι αφορά στις συνοριακές συνθήκες, είναι η περιοχή όπου θα εφαρμοστεί η τάση που θα ασκηθεί στην κατασκευή. Για την αποφυγή φαινομένων μετατόπισης και περιστροφής στερεού σώματος (rigid body motion), αλλά και για την σωστή προσομοίωση του προβλήματος, επιβάλλεται περιορισμός μετατόπισης κατά τον z-άξονα, περιορίζοντας ουσιαστικά τις επιφάνειες της πλάκας που θα εφαρμοστεί το τασικό πεδίο. Η εφελκυστική τάση που ασκείται στην μεταλλική πλάκα εφαρμόζεται ως δύναμη, ομοιόμορφα κατανεμημένη σε όλους τους κόμβους που βρίσκονται στην ακραία επιφάνεια της, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 2.14.

### 2.3.2 ΤΥΠΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Στο σημείο αυτό επιλέγεται ο τύπος ανάλυσης σύμφωνα με τον οποίο θα γίνει η επίλυση του προβλήματος. Κατά την μοντελοποίηση της ενισχυμένης μεταλλικής πλάκας στην οποία διαδίδεται μια ρωγμή, πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι σε κάθε στάδιο διεύρυνσης της ρωγμής απαιτείται εκ νέου σχεδιασμός του καννάβου κοντά στην περιοχή της ρωγμής. Επειδή όμως η διαδικασία αυτή είναι πολύπλοκη αλλά και χρονοβόρα, επιλέγεται στατική ανάλυση για ένα συγκεκριμένο μήκος ρωγμής και σε κάθε αύξηση του μήκους αυτού κατασκευάζεται διαφορετικό μοντέλο για τον υπολογισμό των ζητούμενων μεγεθών. Ένας βασικός διαχωρισμός στον τύπο ανάλυσης, είναι εκείνος της γεωμετρικά γραμμικής και μη γραμμικής ανάλυσης. Η γραμμική ανάλυση δίνει αρκετά ακριβή αποτελέσματα, εξοικονομώντας παράλληλα υπολογιστική ισχύ. Στη σχετική βιβλιογραφία [11], [18] αναφέρεται ότι η γραμμική ανάλυση υπολογίζει υψηλότερες τιμές ΣΕΤ δείχνοντας έτσι ότι υποεκτιμά τις ενισχυτικές ιδιότητες του επιθέματος. Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και

στο σχήμα 2.15, από τη μελέτη [11], 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 θα οδηγούσε σε ασφαλή αποτελέσματα σε ότι αφορά στην αύξηση ζωής της πλάκας. Οι σημαντικές παραμορφώσεις εκτός του επιπέδου της πλάκας όμως, που δεν μπορούν να ληφθούν υπόψη με τη γραμμική ανάλυση, οδήγησε στην επιλογή της μη γραμμικής ανάλυσης για την επίλυση του εν λόγω προβλήματος.



Σχήμα 2.15: Διαφορά αποτελεσμάτων μεταξύ γραμμικής και μη γραμμικής ανάλυσης, [11].

## 2.4 ΜΕΤΑΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

Μετά την επίλυση του προβλήματος το πρόγραμμα έχει την δυνατότητα να εμφανίσει οποιαδήποτε αποτελέσματα ζητηθούν από τον χρήστη. Στην παρούσα εργασία τα αποτελέσματα που θα ζητηθούν κυρίως είναι, η κατανομή του ΣΕΤ κατά το πάχος του χαλύβδινου ελάσματος στο άκρο της ρωγμής, καθώς και οι τάσεις και μετατοπίσεις σε κάποιες περιοχές της δομής. Για τον υπολογισμό των τάσεων και των παραμορφώσεων το πρόγραμμα εξάγει πίνακες με τις τιμές αυτών για κάθε κόμβο ή για κάθε στοιχείο, σχήμα 2.16, καθώς και σχήματα με την κατανομή τους σε κάθε επιθυμητή επιφάνεια, 2.17.

PRINT 5 NODAL SOLUTION PER NODE

\*\*\*\*\* POST1 NODAL STRESS LISTING \*\*\*\*\*  
PowerGraphics Is Currently Enabled

LOAD STEP= 1 SUBSTEP= 1  
TIME= 1.0000 LOAD CASE= 0  
NODAL RESULTS ARE FOR MATERIAL 1

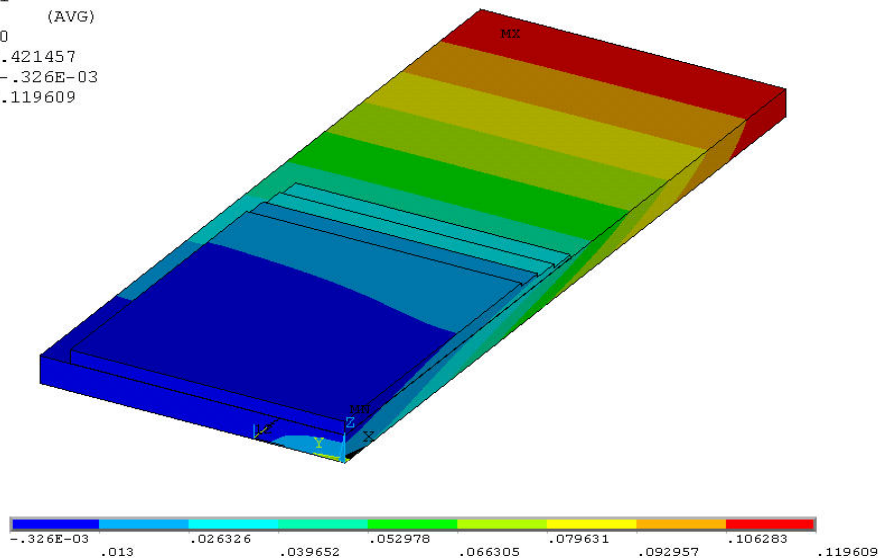
THE FOLLOWING X,Y,Z VALUES ARE IN ROTATED GLOBAL COORDINATES,  
WHICH INCLUDE RIGID BODY ROTATION EFFECTS

NODE	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
1	745.49	614.93	219.21	-19.478	142.19	-48.775
2	-0.93470	-37.772	-0.41424	0.50180	0.64401	0.25472E-01
4	-4.7734	-17.268	-56.728	7.0309	6.7530	18.501
6	-8.0274	-17.605	-9.8771	3.1356	10.767	3.5064
8	-4.3276	-23.799	-1.8024	3.1501	3.7111	1.8447
10	-2.8834	-28.448	0.28589	2.3089	2.3859	1.0954
12	-0.85428	-35.002	1.6449	0.91987	1.5538	0.20444
14	61.951	15.923	-0.70099	-106.82	1.7138	-1.4836
16	-0.66142	-6.0387	1.3051	-19.432	1.4885	1.6755
18	-0.88014	12.898	1.2189	-44.635	2.1137	0.81396
20	6.8917	21.385	0.56819	-68.571	2.1706	-0.78043
22	21.837	22.469	-0.55141E-01	-86.720	1.7008	-1.7339
24	39.410	19.140	-0.33125	-98.023	0.79012	-1.6511
26	228.13	11.885	0.12129	-3.1676	0.21262E-01	0.53705
28	92.169	4.2653	-0.44618	-116.01	0.85563	-1.2885
30	128.04	-6.7340	-0.48220	-119.87	0.57644	-1.7068
32	167.45	-18.505	-0.31955	-115.24	-0.26018	-1.8109
34	204.94	-27.479	0.27975E-01	-100.21	-0.94305	-1.5206
36	233.96	-29.950	0.50504	-77.004	-1.2217	-1.0253
38	247.51	-25.594	0.17807	-52.471	-0.93573	-0.22663
40	250.49	-15.991	0.12436	-31.731	-0.53275	0.24195
42	245.72	-5.1237	0.79799E-01	-17.449	-0.18251	0.41425
44	236.99	4.1412	-0.10110	-8.7853	0.39931E-01	0.43612
46	230.06	56.786	0.41487E-01	0.29297	-0.10497	0.53952E-01
48	230.95	20.572	0.46808	1.2927	-0.12441E-01	0.10827
50	232.36	29.687	0.37632	4.7572	0.52943E-01	0.15707
52	232.47	39.182	0.31727	6.7008	0.43656E-01	0.15760
54	231.61	48.011	0.19920	6.4714	-0.62358E-02	0.12742
56	230.53	54.425	0.87373E-01	3.9789	-0.70315E-01	0.73439E-01
59	241.49	66.124	0.72674	0.14904	-0.53942	0.11036
61	254.09	75.173	0.32339	0.54792	-1.5360	0.25957
63	269.35	87.915	-2.6016	0.34288	-4.5451	0.26728
65	291.66	105.12	-16.506	0.66111	-15.153	1.1933

Σχήμα 2.16: Πίνακας αποτελεσμάτων, ορθών ( $S_x, S_y, S_z$ ) και διατμητικών ( $S_{xy}, S_{yz}, S_{xz}$ ) τάσεων ανά κόμβο.

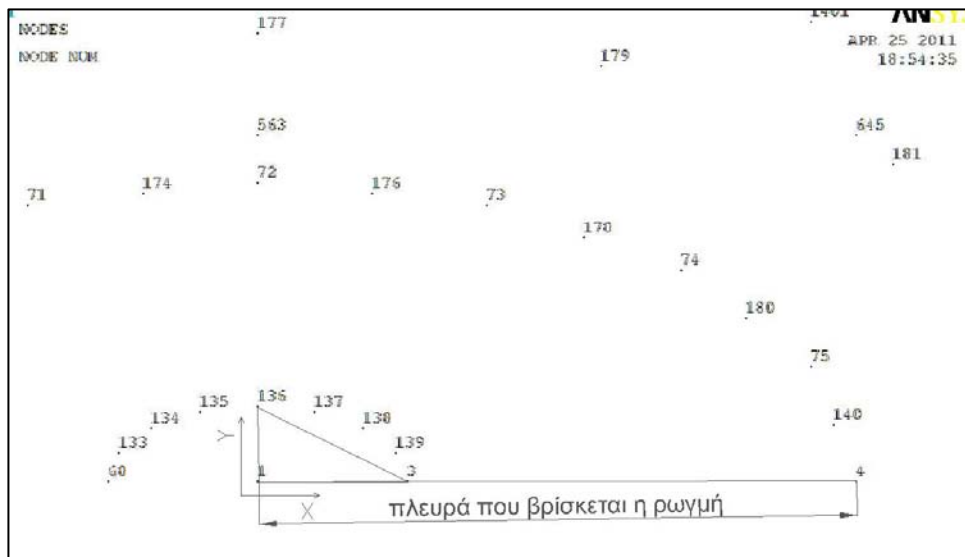
NODAL SOLUTION  
STEP=1  
SUB =1  
TIME=1  
UX (AVG)  
RSYS=0  
DMX =.421457  
SMN =-.3226E-03  
SMX =.119609

ANSYS  
OCT 26 2010  
13:41:30



Σχήμα 2.17: Μετατόπιση κατά τον άξονα διεύθυνσης της φόρτισης (άξονας x).

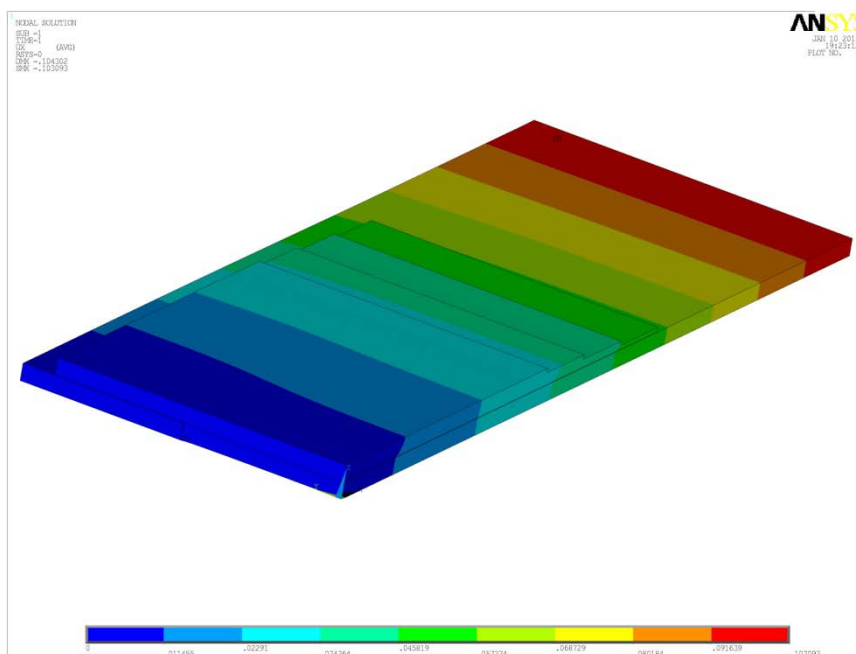
Για τον υπολογισμό του ΣΕΤ χρειάζεται καταρχήν ο ορισμός ενός τοπικού συστήματος συντεταγμένων (local coordinate system) καθώς και μια σειρά από τρεις κόμβους (path) που χρησιμεύει στον καθορισμό της ρωγμής. Πιο συγκεκριμένα, το τοπικό σύστημα συντεταγμένων ορίζεται από τρεις κόμβους κοντά στο άκρο της ρωγμής. Η αρχή των αξόνων ορίζεται από τον πρώτο κόμβο που βρίσκεται στο άκρο της ρωγμής, ο άξονας x που ορίζεται από τον δεύτερο κόμβο πρέπει να έχει ως διεύθυνση την διεύθυνση διάδοσης της ρωγμής, και τέλος ο άξονας y που ορίζεται από τον τρίτο κόμβο πρέπει να έχει ως διεύθυνση την διεύθυνση της φόρτισης. Στο σχήμα 2.18 όπου φαίνονται οι κόμβοι του μοντέλου αρκετά κοντά στη ρωγμή, για τον ορισμό της αρχής των αξόνων ενός τοπικού συστήματος συντεταγμένων αρκεί να ορίσουμε τον κόμβο 1, για να ορίσουμε τον άξονα X εισάγουμε τον κόμβο με αριθμό 3 στο πρόγραμμα, και τέλος ως άξονα Y τον κόμβο με αριθμό 136. Για τον καθορισμό της πλευράς που βρίσκεται η ρωγμή, ορίζεται στο πρόγραμμα μια σειρά συνευθειακών, διαδοχικών κόμβων κατά το μήκος της ρωγμής, όπου ο πρώτος κόμβος ορίζει το άκρο της ρωγμής και οι άλλοι δύο την διεύθυνσή της. Οι κόμβοι που θα εισάγονταν στο πρόγραμμα είναι 1, 3, 4 όπως αυτοί εμφανίζονται στο σχήμα 2.18. Σε κάθε υπολογισμό του ΣΕΤ κατά το πάχος είναι απαραίτητος ο εκ νέου ορισμός των κόμβων αυτών. Τέλος ο υπολογισμός του ΣΕΤ μπορεί να γίνει με συνθήκες επίπεδης εντατικής κατάστασης (plain stress) ή με συνθήκες επίπεδης εντατικής παραμόρφωσης (plain strain). Στο συγκεκριμένο πρόβλημα λόγω της κάμψης που δημιουργείται από την ασυμμετρία του μοντέλου κατά τον z-άξονα, επιλέγονται συνθήκες επίπεδης έντασης.



**Σχήμα 2.18:** Παρουσίαση των σημείων που χρειάζονται στον ορισμό ενός τοπικού συστήματος συντεταγμένων, καθώς και της πλευράς διάδοσης της ρωγμής.

## 2.5 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΑΜΦΙΠΛΕΥΡΗΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΤΗΣ ΠΛΑΚΑΣ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα εξηγηθεί ο τρόπος μοντελοποίησης του προβλήματος της αμφίπλευρης ενίσχυσης της μεταλλικής πλάκας. Στην παρούσα εργασία για την ολοκλήρωση της παραμετρικής μελέτης θα χρησιμοποιηθεί μοντέλο που θα προσομοιώνει την περίπτωση της συμμετρικής ενίσχυσης και από τις δύο πλευρές της πλάκας, με σκοπό να συγκριθεί η αποτελεσματικότητά της σε σχέση με την μη συμμετρική, μονόπλευρη ενίσχυση. Το μοντέλο αυτό που χρησιμοποιήθηκε δεν δημιουργήθηκε εξ αρχής, αλλά βασίστηκε στο μοντέλο της μονόπλευρης ενίσχυσης-που περιγράφηκε στις παραπάνω παραγράφους- και τροποποιήθηκε αναλόγως. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα, δύο και ένα στοιχείο κατά το πάχος για την προσομοίωση της χαλύβδινης πλάκας, του επιθέματος και του κολλητικού στρώματος, αντίστοιχα. Επιπροσθέτως, εφόσον η κατασκευή θα είναι συμμετρικά ενισχυμένη, κατά την φόρτιση δεν θα μετακινηθεί ο ουδέτερος άξονας της πλάκας, και ως εκ τούτου δεν θα υπάρξει κάμψη εκτός του επιπέδου του δοκιμίου, οπότε το μέτωπο της ρωγμής δεν θα είναι κυρτό αλλά κατακόρυφο όπως και στην περίπτωση της μη ενισχυμένης δομής. Τέλος ορίζονται συνθήκες συμμετρίας σε όλες τις περιοχές που βρίσκονται στην κάτω πλευρά της πλάκας του χάλυβα ώστε να μοντελοποιηθεί τελικά το 1/8 της κατασκευής. Ουσιαστική διαφορά παρά της ομοιότητας των δύο μοντέλων είναι ότι, στην περίπτωση της μονόπλευρης ενίσχυσης μοντελοποιείται το 1/4 της κατασκευής, ενώ στην περίπτωση της αμφίπλευρης ενίσχυσης μοντελοποιείται το 1/8 της δομής. Στο σχήμα 2.19 εμφανίζεται το τμήμα του μοντέλου που έχει μοντελοποιηθεί στην διπλής όψης ενίσχυση, ενώ στο σχήμα 2.20 εμφανίζεται ολόκληρη η δομή.

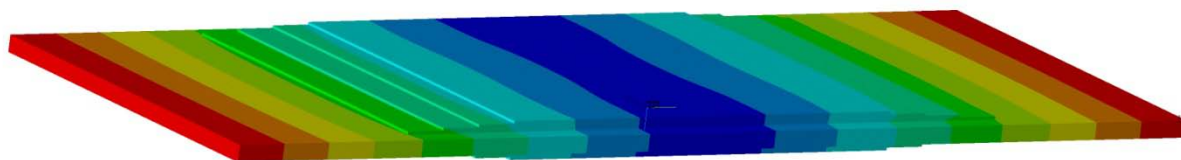


Σχήμα 2.19: Τμήμα της αμφίπλευρης ενισχυμένης δομής που μοντελοποιήθηκε.



NODAL SOLUTION  
 SUB =1  
 TIME=1  
 /EXPANDED  
 /CM (AVG)  
 RSYS=0  
 ENF =.104096  
 SNF =.102884

**ANSYS**  
 APR 27 2011  
 22:17:38  
 PLOT NO. 1



Σχήμα 2.20: Ολόκληρη η γεωμετρία του μοντέλου της αμφίπλευρης ενίσχυσης.

## 2.6 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΤΟΥ ΤΡΟΠΟΥ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΤΗΣ ΡΩΓΜΗΣ

Όπως αναφέρθηκε στο 1<sup>ο</sup> κεφάλαιο της εργασίας αυτής, όταν η ενίσχυση μιας μεταλλικής πλάκας γίνει με την επικόλληση επιθέματος μόνο στη μια πλευρά της πλάκας, η ρωγμή δεν μεταδίδεται με την ίδια ταχύτητα και στις δύο πλευρές, οδηγώντας έτσι στη δημιουργία ενός λοξού μετώπου ρωγμής. Στο παρόν κεφάλαιο θα επεξηγηθεί η μέθοδος υπολογισμού του ΣΕΤ σε συνδυασμό με την πρόβλεψη του τρόπου διάδοσης και τη σχετική προσομοίωση της λοξής μορφής του μετώπου ρωγμής.

Αρχικά επιλέγεται ένα μήκος ρωγμής στο οποίο θα τοποθετηθεί το επίθεμα. Για το μήκος αυτό, και για κατακόρυφο μέτωπο ρωγμής, διότι μέχρι να τοποθετηθεί το επίθεμα η ρωγμή διαδίδεται με την ίδια ταχύτητα κατά το πάχος της πλάκας, υπολογίζονται οι τιμές του ΣΕΤ κατά το πάχος του χάλυβα, με τη βοήθεια του κώδικα που δημιουργήθηκε, όπως επεξηγήθηκε στις παραγράφους 2.1-2.4. Τα αποτελέσματα που λαμβάνουμε από το πρόγραμμα παρουσιάζονται με τη μορφή παραθύρου όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.21,

στο οποίο εμφανίζεται ο ΣΕΤ, για ένα τυπικό παράδειγμα χαλύβδινης πλάκας με διαμετρική κεντρική ρωγμή 24 mm, κλίση του μετώπου της ρωγμής 62 μοίρες, ενώ η μέτρηση αντιπροσωπεύει το σημείο που βρίσκεται στην ενισχυμένη πλευρά της πλάκας. Το πρόγραμμα ANSYS υπολογίζει τον ΣΕΤ σε μονάδες ίδιες με αυτές που δέχτηκε ως εισόδους για τα δεδομένα που απαιτούντο, συνεπώς στο σχήμα 2.21 παρουσιάζεται η τιμή του ΣΕΤ σε  $MPa * \sqrt{mm}$ .

```

**** CALCULATE MIXED-MODE STRESS INTENSITY FACTORS ****
ASSUME PLANE STRESS CONDITIONS
ASSUME A HALF-CRACK MODEL WITH SYMMETRY BOUNDARY CONDITIONS <USE 3 NODES>
EXTRAPOLATION PATH IS DEFINED BY NODES:      282      284      285
WITH NODE      282 AS THE CRACK-TIP NODE
USE MATERIAL PROPERTIES FOR MATERIAL NUMBER      1
EX = 0.200000E+06  NUXY = 0.300000  AT TEMP = 0.0000
**** KI = 352.99 , KII = 0.0000 , KIII = 0.0000 ****

```

Σχήμα 2.21: τρόπος εμφάνισης αποτελεσμάτων του προγράμματος ANSYS.

Στο σημείο αυτό κρίνεται απαραίτητο να τονιστεί το γεγονός ότι σε κάθε βήμα της μεθόδου και για ένα συγκεκριμένο μήκος ρωγμής, λαμβάνονται 9 τιμές ΣΕΤ κατά το πάχος του χάλυβα. Επομένως πρέπει να αποφασιστεί ένα σημείο κατά το πάχος του χάλυβα (το οποίο θα παραμείνει το ίδιο για όλα τα στάδια της μεθόδου), το οποίο θα ονομαστεί σημείο αναφοράς (reference). Για την συνέχεια της μεθόδου πρέπει να οριστεί από τον χρήστη μια αύξηση του μήκους ρωγμής για το επόμενο βήμα της μεθόδου. Στην εργασία αυτή επιλέχτηκε ως σημείο αναφοράς το σημείο που βρίσκεται στο μέσο του πάχους του χάλυβα. Χρησιμοποιώντας την τιμή του ΣΕΤ στο σημείο αυτό, υπολογίζουμε τον λόγο:

$$\left( \frac{\Delta K_i}{\Delta K_{ref}} \right)^m \quad (2.1)$$

για κάθε σημείο  $i$  κατά το πάχος της πλάκας.

όπου:

$m$  είναι σταθερά του υλικού της πλάκας.

$\Delta K_i$  είναι η τιμή του ΣΕΤ στα σημεία  $i$  του χάλυβα όπου πραγματοποιούνται υπολογισμοί, για  $i=1,2,\dots,9$ .

$\Delta K_{ref}$  είναι η τιμή του ΣΕΤ στο σημείο αναφοράς.

Σύμφωνα με το μέγεθος που εξάγεται από την εξίσωση (2.1), υπολογίζεται η μορφή του μετώπου ρωγμής στο επόμενο βήμα της μεθόδου σε διάφορες κατά το πάχος θέσεις  $i$ , χρησιμοποιώντας την σχέση:



$$\Delta\alpha_{i\ new} = \left(\frac{\Delta K_i}{\Delta K_{ref}}\right)^m \Delta\alpha_{ref} \quad (2.2)$$

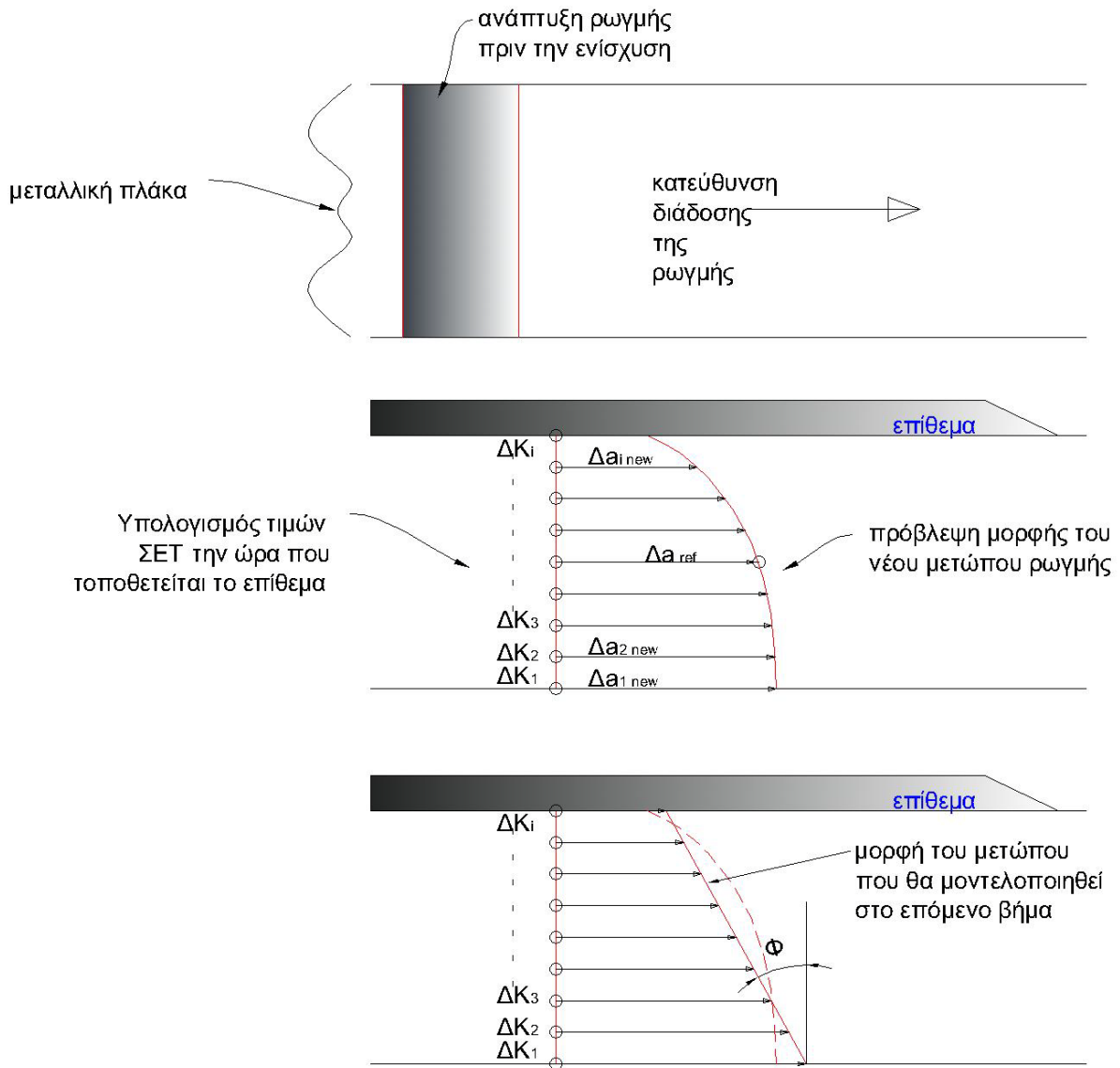
όπου:

$\Delta\alpha_{ref}$ , είναι η σταθερή τιμή που έχουμε επιλέξει ως βήμα προχώρησης για το επόμενο βήμα της μεθόδου. Η τιμή αυτή επηρεάζει τα αποτελέσματα της παραμετρικής μελέτης και θα περιγραφεί στην παράγραφο 2.7 ο τρόπος επιλογής της.

$\Delta\alpha_{i\ new}$ , είναι η αύξηση του μήκους ρωγμής σε κάθε σημείο  $i$ , που υπολογίζεται για το επόμενο βήμα της μεθόδου.

Από την εξίσωση (2.2) δημιουργείται η καμπύλη που προσομοιώνει τη μορφή του μετώπου ρωγμής στο επόμενο βήμα. Στη συνέχεια, η καμπύλη αυτή προσεγγίζεται γραμμικά (linear fitting). Η ευθεία γραμμή που σχεδιάζεται με τον τρόπο αυτό, θα αντιπροσωπεύει το λοξό μέτωπο ρωγμής που θα μοντελοποιηθεί στο επόμενο βήμα.

Τα παραπάνω βήματα θα επαναληφθούν αρκετές φορές μέχρι το μήκος ρωγμής στο κάτω άκρο να φτάσει πολύ κοντά στο πλάτος του επιθέματος. Η σχέση 2.2 για τον υπολογισμό του  $\Delta\alpha_{i\ new}$  χρησιμοποιείται και στην εργασία [11].



Σχήμα 2.22: Περιγραφή της μεθόδου μοντελοποίησης του πλαγίου μετώπου ρωγμής.

Στο σχήμα 2.22 παρουσιάζεται σχηματικά η διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω. Αρχικά παρουσιάζεται το μέτωπο της ρωγμής χωρίς την ενίσχυση από κάποιο επίθεμα, ακριβώς από κάτω φαίνονται τα σημεία που υπολογίζεται ο ΣΕΤ και η καμπύλη του μετώπου ρωγμής που παράγεται από τη διαδικασία που εξηγήθηκε πιο πάνω, και τέλος στο τρίτο σχήμα παρουσιάζεται μαζί με την καμπύλη του μετώπου της ρωγμής (διακεκομμένη γραμμή), η ευθεία γραμμή που προέρχεται από γραμμική προσαρμογή της καμπύλης, ώστε να προσεγγίζει όσο το δυνατόν καλύτερα το μέτωπο της ρωγμής.

Για την ολοκλήρωση της περιγραφής της μεθόδου πρέπει να εξηγηθεί ο τρόπος παραγωγής της καμπύλης  $\alpha-N$ , όπου  $\alpha$  είναι το ημιμήκος της ρωγμής και  $N$  είναι οι κύκλοι φόρτισης. Δηλαδή σε αυτό το γράφημα φαίνονται πόσοι κύκλοι φορτίου χρειάζονται ώστε η ρωγμή να φτάσει σε ένα συγκεκριμένο μήκος.

Όπως προαναφέρθηκε, το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων θα εξάγει 9 τιμές ΣΕΤ κατά το πάχος του χάλυβα. Για την εφαρμογή του νόμου του Paris ώστε να υπολογιστεί η ταχύτητα διάδοσης της ρωγμής όμως, απαιτείται μια τιμή ΣΕΤ που θα εισαχθεί στη σχέση, οπότε για να υπολογιστούν οι κύκλοι ζωής του υλικού πρέπει πρώτα να αποφασιστεί ποιά θα είναι η αντιπροσωπευτική τιμή του ΣΕΤ που θα χρησιμοποιείται για την εξαγωγή αποτελεσμάτων. Από τη βιβλιογραφία [10], φαίνεται ότι πιο αξιόπιστα αποτελέσματα παράγονται με την χρήση του μέσου όρου όλων των αποτελεσμάτων ( $av\_all$ ), τη μέση τετραγωνική τιμή όλων των αποτελεσμάτων ( $av\_rms$ ), και τέλος τη μέση τιμή των αποτελεσμάτων από την μη ενισχυμένη πλευρά έως το μέσο της πλάκας ( $av\_half\_unpr$ ). Μετά τον υπολογισμό αυτών των τιμών, υπολογίζεται η ταχύτητα διάδοσης της ρωγμής με τη βοήθεια της εξίσωσης του νόμου του Paris:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m, \quad (2.3)$$

όπου:

$\Delta K$  η τιμή του ΣΕΤ που έχει οριστεί να αντιπροσωπεύει το συγκεκριμένο μήκος ρωγμής.

$\frac{da}{dN}$  είναι η ταχύτητα με την οποία διαδίδεται η ρωγμή από ένα σημείο στο επόμενο.

$C, m$  είναι σταθερές του υλικού της πλάκας.

Στην συνέχεια υπολογίζεται η τιμή  $\Delta N$  χρησιμοποιώντας την εξίσωση:

$$\Delta N = \frac{\Delta a}{\left(\frac{da}{dN}\right)_{M.O}}, \quad (2.4)$$

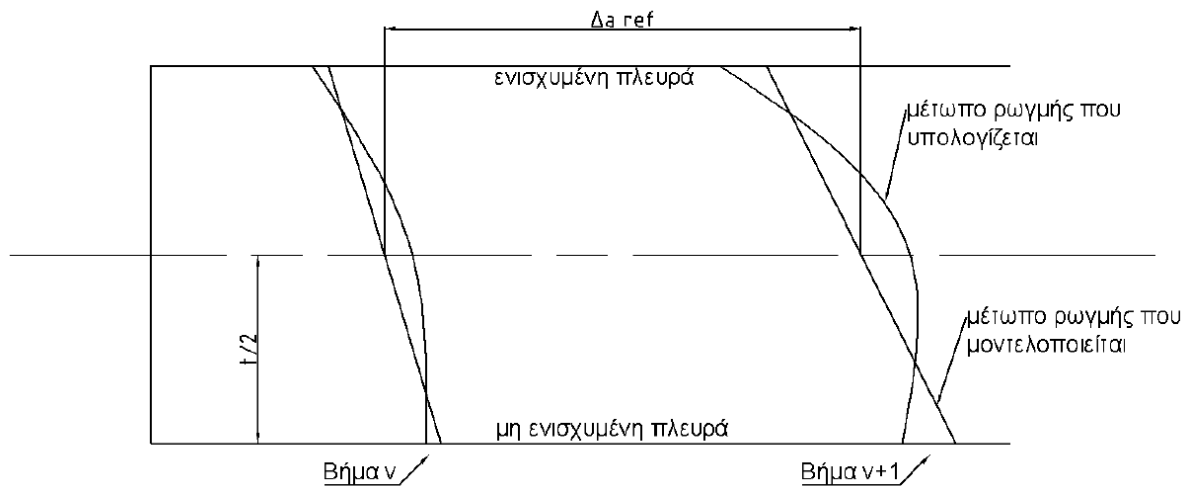
όπου:

$\Delta N$  είναι οι κύκλοι φορτίου που χρειάζονται για την επέκταση του μήκους ρωγμής κατά  $\Delta a$ ,

$\Delta a$  είναι η διαφορά του αντιπροσωπευτικού μήκους ρωγμής όπως αυτό ορίστηκε παραπάνω, μεταξύ δύο διαδοχικών βημάτων, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.23, και τέλος

$\left(\frac{da}{dN}\right)_{M.O}$  είναι ο μέσος όρος των ταχυτήτων διάδοσης της ρωγμής στα δύο αυτά βήματα, που υπολογίζονται από την εξίσωση (2.3).

Το μήκος σε κάθε ρωγμή που υπολογίζεται στα πλαίσια αυτής της εργασίας θα θεωρείται το μήκος που έχει η ρωγμή στο μέσο του πάχους της μεταλλικής πλάκας. Στο σχήμα 2.23 φαίνεται ποια είναι η απόσταση  $\Delta a_{ref}$  που πρέπει να υπολογιστεί για τον υπολογισμό της καμπύλης  $a-N$  της πλάκας του χάλυβα.



Σχήμα 2.23: Εικονική απεικόνιση του μεγέθους  $\Delta a$ .

Για τον υπολογισμό της ίδιας καμπύλης στην περίπτωση της μη ενισχυμένης πλάκας, επιλέγεται ο ίδιος μέσος όρος ΣΕΤ που επιλέχτηκε και για την ενισχυμένη πλάκα. Το μέτωπο ρωγμής είναι κατακόρυφο, οπότε και στα 9 σημεία υπολογισμού του ΣΕΤ το μήκος ρωγμής είναι το ίδιο.

## 2.7 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναφερθούν παράγοντες που επηρεάζουν τα αποτελέσματα καθώς και την ακρίβεια της μεθόδου. Οι παράγοντες αυτοί μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες: (α) στους παράγοντες που επηρεάζουν τα αποτελέσματα που εξάγει το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων (ANSYS) και (β) στους παράγοντες που επηρεάζουν τα αποτελέσματα της παραμετρικής μελέτης, ανάλογα με τον τρόπο διαχείρισής τους.

(α)

Οι παράγοντες που ανήκουν στην κατηγορία αυτή και έχουν περιγραφεί εκτενέστερα στις παραγράφους 2.1-2.4, είναι παράγοντες που συναντώνται κατά τη δημιουργία του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων. Οι κυριότεροι τέτοιοι παράγοντες είναι οι ακόλουθοι:

- ✚ Η τεχνική που θα ακολουθηθεί για την μέθοδο μοντελοποίησης πεπερασμένων στοιχείων.
- ✚ Το πλήθος και ο τύπος των στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν για την προσομείωση της κατασκευής.
- ✚ Η χρήση η μη ιδιόμορφων στοιχείων, καθώς και το μήκος αυτών, εάν τελικά χρησιμοποιηθούν τέτοιου είδους στοιχεία.

✚ Το πλήθος των ιδιόμορφων στοιχείων που θα απαρτίζουν την περιοχή γύρω από το άκρο της ρωγμής. Πιο συγκεκριμένα η ακτίνα της πρώτης σειράς των ιδιόμορφων στοιχείων που θα βρίσκονται γύρω από το άκρο της ρωγμής (Radius of first row of elements), επηρεάζει τα αποτελέσματα που εξάγει το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων. Η ακτίνα αυτή ορίζεται συνήθως ως κλάσμα του ήμισυ μήκους της ρωγμής. Στον πίνακα 2.4 παραθέτονται κάποιες τιμές ΣΕΤ κατά το πάχος της πλάκας για ένα τυπικό παράδειγμα κεκλιμένου μετώπου ρωγμής, όπου τα 10mm είναι το άκρο που φέρει την ενίσχυση και τα 0mm είναι το μη ενισχυμένο άκρο, με διαφορετικό μήκος ιδιόμορφων στοιχείων. Δίπλα σε κάθε στήλη φαίνεται και η ποσοστιαία διαφορά της κάθε τιμής με την αντίστοιχη τιμή για μήκος στοιχείων  $\alpha/48$ , όπου  $\alpha$  είναι το μισό του μήκους της ρωγμής. Παρατηρείται ότι όσο μικραίνει το μήκος των ιδιόμορφων στοιχείων οι τιμές συγκλίνουν. Για το μοντέλο της παρούσας εργασίας επιλέγεται μήκος ιδιόμορφων στοιχείων ως  $\alpha/48$ .

**Πίνακας 2.4: Τιμές ΣΕΤ για διάφορα μήκη ιδιόμορφων στοιχείων γύρω από το άκρο της ρωγμής.**

$K_i$ (MPa)	Μήκος ιδιόμορφων στοιχείων σε mm και σε ποσοστό επί του μισού μήκους ρωγμής									
	2.5 mm		1.818 mm		1.111 mm		0.909 mm		0.833 mm	
πάχος πλάκας	$\alpha/16$		$\alpha/22$		$\alpha/36$		$\alpha/44$		$\alpha/48$	
10.00 mm	10.259	-4.03%	10.420	-2.42%	10.593	-0.75%	10.656	-0.15%	<b>10.672</b>	
8.75 mm	15.861	0.34%	15.877	0.44%	15.834	0.17%	15.814	0.04%	<b>15.807</b>	
7.50 mm	19.426	0.09%	19.410	0.00%	19.402	-0.04%	19.406	-0.01%	<b>19.409</b>	
6.25 mm	22.137	-0.08%	22.137	-0.08%	22.150	-0.02%	22.153	-0.01%	<b>22.154</b>	
5.00 mm	24.311	0.00%	24.313	0.01%	24.312	0.00%	24.311	0.00%	<b>24.312</b>	
3.75 mm	25.887	0.02%	25.877	-0.02%	25.878	-0.02%	25.881	-0.01%	<b>25.883</b>	
2.50 mm	26.664	0.68%	26.604	0.46%	26.517	0.13%	26.491	0.03%	<b>26.482</b>	
1.25 mm	25.985	-0.17%	25.996	-0.13%	26.034	0.02%	26.034	0.02%	<b>26.029</b>	
0.00 mm	20.644	15.27%	19.591	10.72%	18.197	3.88%	17.696	1.16%	<b>17.492</b>	
$K_{\text{AVERAGE}}$	21.242	1.54%	21.136	1.04%	20.991	0.36%	20.938	0.11%	<b>20.916</b>	

✚ Ο αριθμός των κατά το πάχος στοιχείων που προσομοιώνουν την πλάκα, το κολλητικό στρώμα και το επίθεμα από σύνθετα υλικά.

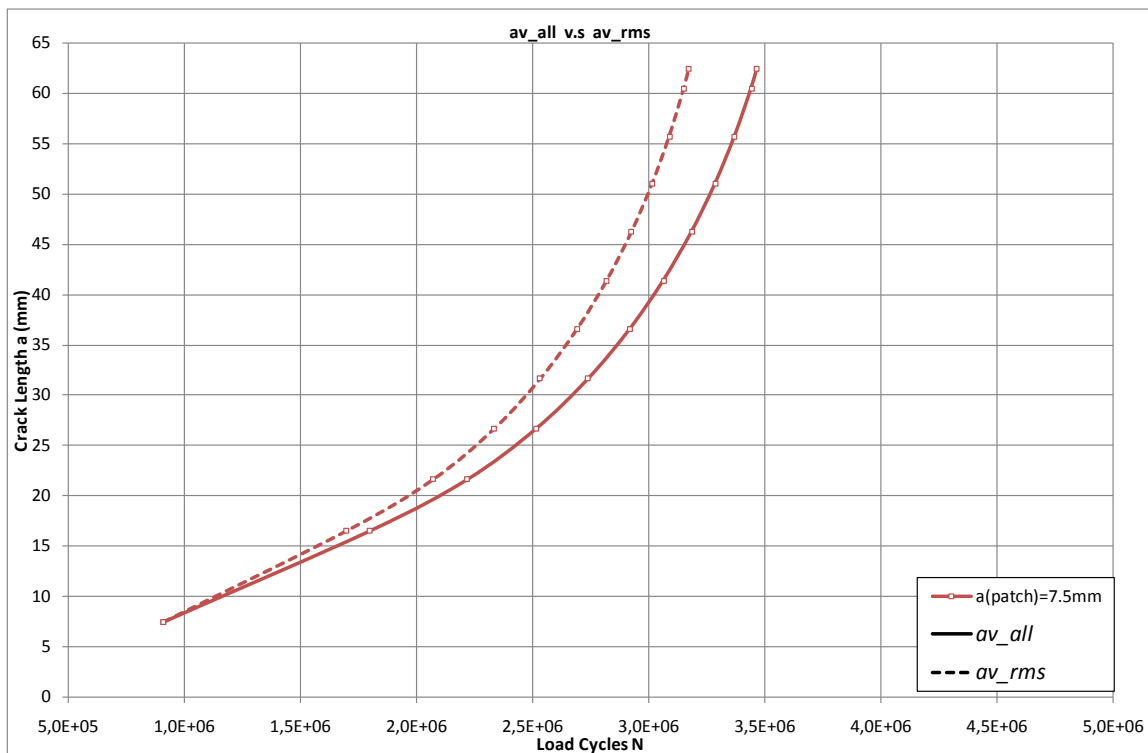
(β)

Οι παράγοντες που ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία και θα περιγραφούν αναλυτικότερα, είναι παράγοντες που επηρεάζουν τα αποτελέσματα της παραμετρικής μελέτης και συναντώνται κατά την ανάπτυξη της μεθόδου πρόβλεψης και προσομοίωσης του μετώπου της ρωγμής σε ένα επόμενο μήκος ρωγμής, αλλά και της παραγωγής των γραφημάτων  $\alpha$ -N. Τέτοιοι παράγοντες είναι οι ακόλουθοι:

✚ Οι σταθερές  $m$ ,  $C$  του υλικού που χρησιμοποιούνται στην εξίσωση (2.1) και (2.3), και επηρεάζουν σημαντικά τα αποτελέσματα της παραμετρικής μελέτης. Οι σταθερές

αυτές λήφθηκαν από την βιβλιογραφία [15]. Στην εργασία [15] έγιναν πειραματικές δοκιμές για τον υπολογισμό των σταθερών  $m$ ,  $C$ . Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι οι τιμές των σταθερών  $m$ ,  $C$  επηρεάζονται από διάφορα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του υλικού, αλλά και από τις ιδιότητες του, όμως ακόμα και για τα μοντέλα που έφεραν ενίσχυση από σύνθετα υλικά χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες τιμές  $m$ ,  $C$ , όπως και στην βιβλιογραφία που μελετήθηκε. Οι τιμές των  $m$ ,  $C$  λήφθηκαν ως  $3.239$  και  $4.387 \cdot 10^{-9}$  αντίστοιχα.

✚ Ο ΣΕΤ που θα επιλεγεί να αντιπροσωπεύει μια περίπτωση ενίσχυσης. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.22, για κάθε μήκος ρωγμής το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων εξάγει 9 τιμές ΣΕΤ κατά το πάχος του χάλυβα. Η τιμή του ΣΕΤ που θα αντιπροσωπεύει μια συγκεκριμένη περίπτωση στην παραμετρική μελέτη επιλέγεται από τον χρήστη όπως εξηγήθηκε στην παράγραφο 2.6. Στο σχήμα 2.24 παρουσιάζεται η διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων σε ένα διάγραμμα  $a$ - $N$ , όπου για την ίδια περίπτωση μοντελοποίησης η μια καμπύλη έχει δημιουργηθεί με τιμές ΣΕΤ  $av\_all$ , ενώ η δεύτερη με τιμές ΣΕΤ  $av\_rms$ . Μεταξύ των δύο καμπυλών παρατηρείται μέγιστη απόκλιση της τάξεως του 8.5%.



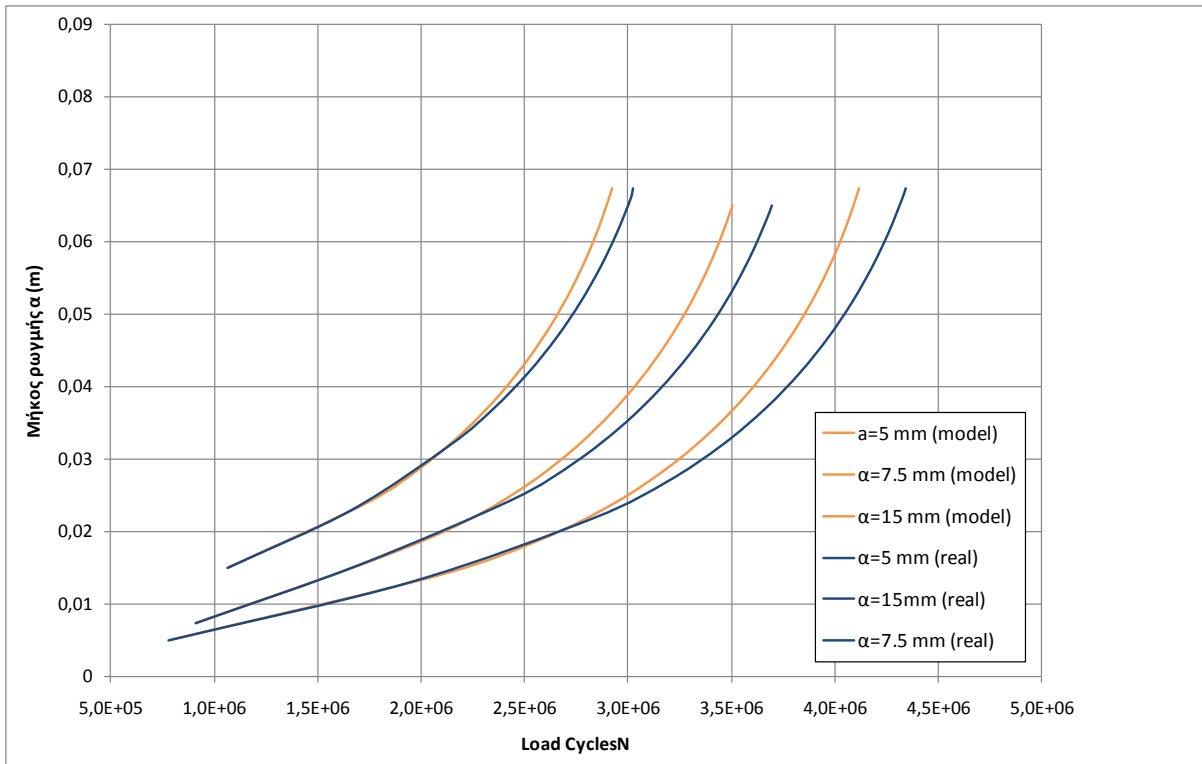
Σχήμα 2.24: Διαφορά μεταξύ της χρήσης το ΣΕΤ  $av\_all$  και  $av\_rms$  στο διάγραμμα διάρκειας ζωής του δοκιμίου.

✚ Η μορφή του μοντελοποιημένου μετώπου ρωγμής είναι ένας παράγοντας που φυσικά επηρεάζει το  $a(patch)$  και τις εξαγόμενες τιμές ΣΕΤ, συνεπώς επηρεάζει τα αποτελέσματα της μελέτης. Από την βιβλιογραφία είναι γνωστό ότι σε μονόπλευρα

ενισχυμένες κατασκευές το μέτωπο ρωγμής είναι καμπύλο. Στην παρούσα εργασία όμως μοντελοποιείται ως μια κεκλιμένη ευθεία γραμμή που προέρχεται από γραμμική προσαρμογή του καμπυλόγραμμου μετώπου ρωγμής, οπότε είναι λογικό να επηρεάζει και τη μορφή των γραφημάτων της παραμετρικής μελέτης.

- ✚ Το μήκος ρωγμής που επιλέγεται από τον χρήστη ώστε να αντιπροσωπεύει μια συγκεκριμένη περίπτωση μοντελοποίησης επηρεάζει ομοιόμορφα τα γραφήματα  $a-N$  της παραμετρικής μελέτης μετακινώντας τις καμπύλες είτε προς τα επάνω (εάν ληφθεί ως αντιπροσωπευτικό μήκος, το μήκος ρωγμής στην μη ενισχυμένη πλευρά), είτε προς τα κάτω (εάν ληφθεί ως αντιπροσωπευτικό μήκος ρωγμής, το μήκος στην ενισχυμένη πλευρά). Επίσης σημαντικό παράγοντα αποτελεί και η επιλογή του μήκους ρωγμής σε σχέση με το μέτωπο ρωγμής, δηλαδή το μήκος αυτό που θα επιλεγεί, εκτός από την θέση του στον άξονα του πάχους της πλάκας, και στον άξονα του πλάτους της πλάκας. Αυτό συμβαίνει διότι στη συγκεκριμένη εργασία υπολογίζεται το καμπυλόγραμμο μέτωπο ρωγμής, αλλά μοντελοποιείται ως μια ευθεία κεκλιμένη γραμμή. Το μήκος ρωγμής στην συγκεκριμένη εργασία επιλέχτηκε να μετράται από το σημείο που βρίσκεται στο μισό του πάχους της πλάκας και περνά από το μοντελοποιημένο μέτωπο ρωγμής ενός βήματος, μέχρι το μοντελοποιημένο μήκος ρωγμής του επόμενου βήματος.

Στο σχήμα 2.25 παρουσιάζονται οι διαφορές σε κύκλους φορτίου του υλικού, όπου στις καμπύλες (model) το μήκος ρωγμής έχει μετρηθεί όπως επιλέχτηκε παραπάνω, ενώ στις καμπύλες (real), το μήκος ρωγμής έχει μετρηθεί μεταξύ δύο μετώπων ρωγμής που εξήχθησαν από την εξίσωση (2.2), δηλαδή η επέκταση της ρωγμής μετράται από τα σημεία που βρίσκονται στο υπολογισμένο (καμπύλο) μέτωπο ρωγμής, στο μέσο του πάχους της πλάκας μεταξύ δύο διαδοχικών βημάτων της μεθόδου.



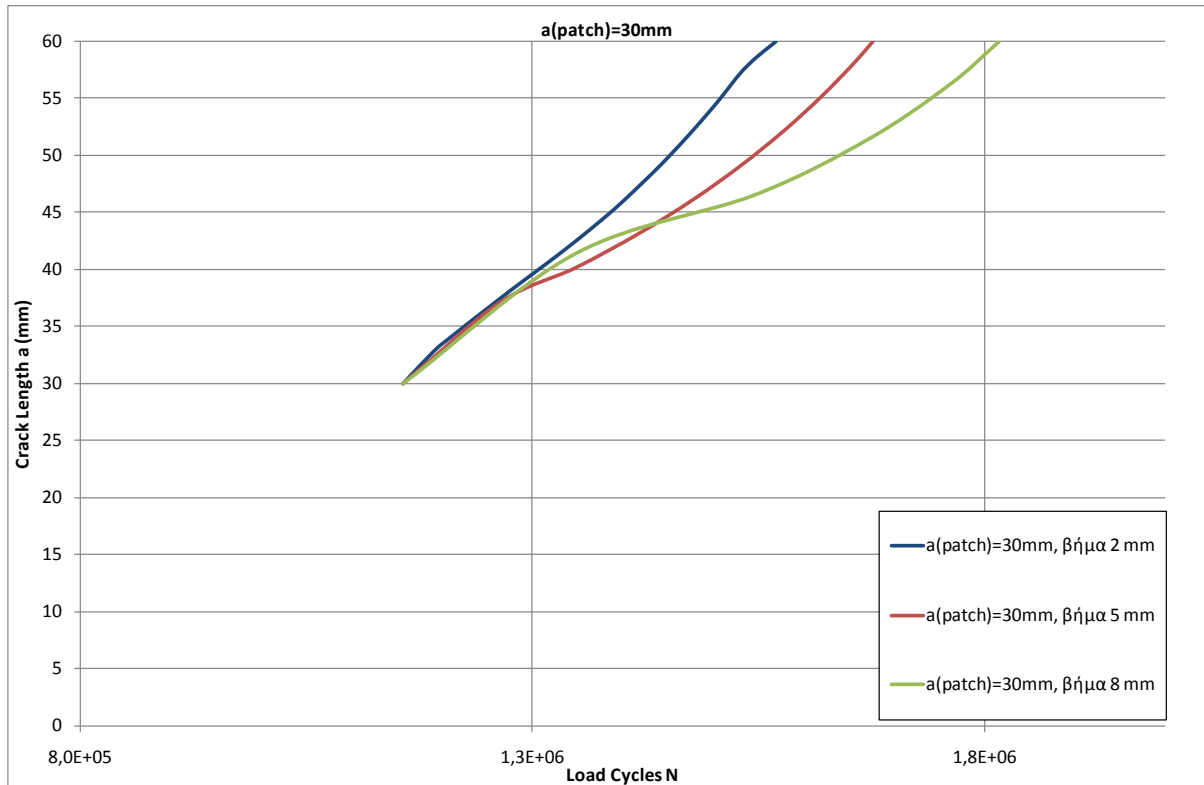
Σχήμα 2.25: Γράφημα α-N με δύο διαφορετικούς τρόπους ορισμού του μήκους ρωγμής ( $\Delta\alpha$ ).

Σε όλες τις καμπύλες του διαγράμματος παρατηρείται ότι οι καμπύλες (real) παρουσιάζουν περισσότερη αντοχή του υλικού σε κόπωση, σε σχέση με τις καμπύλες (model). Οι μεγαλύτερες διαφορές που παρατηρήθηκαν, είναι 5.2%, 5.25%, 3.3% για τις περιπτώσεις που το επίθεμα τοποθετήθηκε στην πλάκα για μήκος ρωγμής  $a=5\text{ mm}$ ,  $a=7.5\text{ mm}$ ,  $a=15\text{ mm}$  αντίστοιχα.

- Ένας ακόμα παράγοντας που επηρεάζει τα αποτελέσματα της παραμετρικής μελέτης είναι το βήμα προχώρησης  $\Delta\alpha_{ref}$  που έχει επιλεγεί από τον χρήστη για την πρόοδο της ρωγμής, όπως αυτό ορίζεται στην παράγραφο (2.6). Το μέγεθος αυτό πρέπει να είναι αρκετά μικρό ώστε να παρουσιάζει αξιόπιστα αποτελέσματα, αλλά πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή καθώς η μείωση αυτού του μεγέθους οδηγεί σε πολύ περισσότερα βήματα έως την περάτωση της μελέτης. Πιο συγκεκριμένα για μια περίπτωση ενίσχυσης μεταλλικής πλάκας, όπου το επίθεμα τοποθετήθηκε όταν η ρωγμή είχε μήκος  $a=5\text{ mm}$ , εάν το βήμα προχώρησης ( $\Delta\alpha_{ref}$ ) οριστεί ίσο με  $8\text{ mm}$  χρειάζεται η επίλυση 12 μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων μέχρι να ολοκληρωθεί η μελέτη, ενώ εάν το βήμα προχώρησης οριστεί ως  $5\text{ mm}$ , τότε θα χρειαστεί η επίλυση 21 μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων μέχρι την ολοκλήρωση της μελέτης. Στο σχήμα 2.26 παρουσιάζεται η διαφορά που υπολογίστηκε στους κύκλους φορτίου του δοκιμίου, για την περίπτωση που η μέθοδος εφαρμόστηκε για  $\Delta\alpha_{ref}=2\text{ mm}$ ,  $\Delta\alpha_{ref}=5\text{ mm}$  και  $\Delta\alpha_{ref}=8\text{ mm}$ . Παρατηρείται διαφορά 6.4% μεταξύ  $\Delta\alpha_{ref}=2\text{ mm}$  και  $\Delta\alpha_{ref}=5\text{ mm}$ , και διαφορά 13.5% μεταξύ  $\Delta\alpha_{ref}=2\text{ mm}$  και

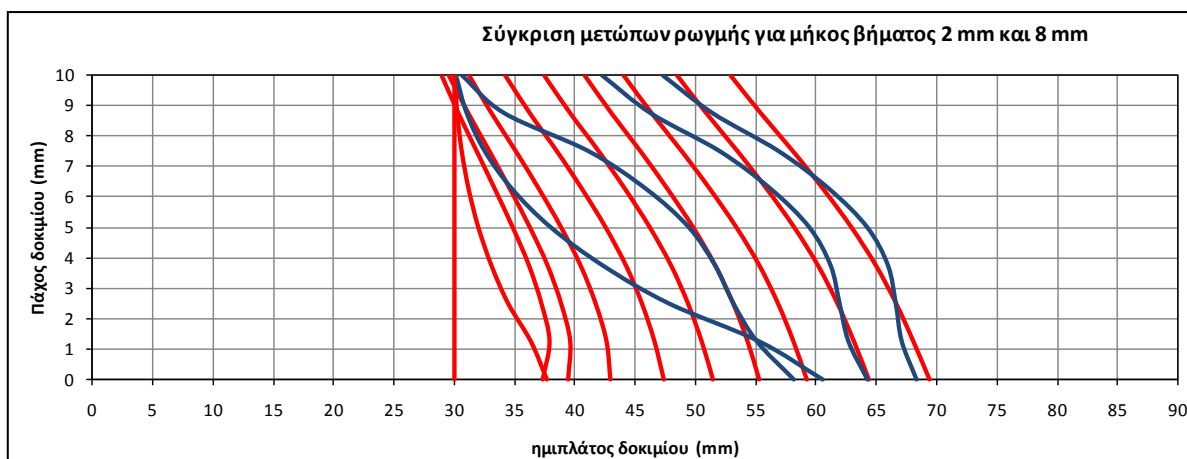


$\Delta a_{ref} = 8 \text{ mm}$ . Τέλος παρατηρείται διαφορά 7.7% μεταξύ  $\Delta a_{ref} = 5 \text{ mm}$  και  $\Delta a_{ref} = 8 \text{ mm}$ .



Σχήμα 2.26: Παρουσίαση της διαφοράς των αποτελεσμάτων ανάλογα με το μήκος του βήματος προχώρησης  $\Delta a_{ref}$ .

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.26, όσο μικρότερο είναι το μήκος βήματος, τόσο πιο συντηρητικά αποτελέσματα εξάγει η μέθοδος σε κύκλους φορτίου. Επίσης παρατηρείται ότι όσο μεγαλώνει το μέγεθος  $a(\text{patch})$ , η μορφή της καμπύλης αλλάζει ανάλογα με το βήμα προχώρησης, και γίνεται όλο και πιο ομαλή η καμπυλότητά της όσο αυτό μικραίνει. Στο σχήμα 2.27 γίνεται μια σύγκριση μεταξύ των μετώπων ρωγμής που εξάγονται από τη μέθοδο για βήμα 2 mm (κόκκινο χρώμα), και 8mm (μπλε γραμμή).



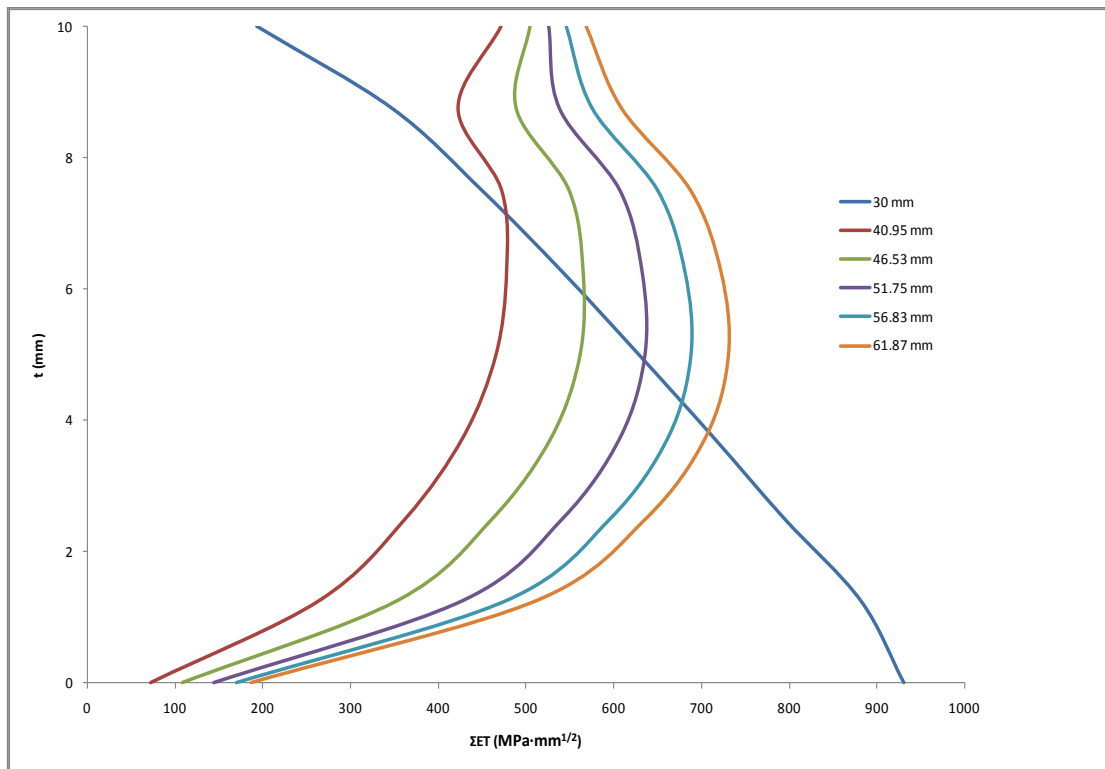
Σχήμα 2.27

Από το παραπάνω σχήμα φαίνεται ότι όταν το μήκος βήματος είναι 2 mm, το σχήμα του μετώπου ρωγμής αλλάζει σταδιακά από ένα βήμα της μεθόδου στο επόμενο, συνεχίζοντας όμως το φαινόμενο της διαφορετικής καμπυλότητας μεταξύ του δεύτερου και τρίτου βήματος της μεθόδου. Παρατηρείται τελικά ότι η καμπυλότητα του μετώπου ρωγμής είναι αρκετά πιο έντονη όταν το βήμα είναι 8 mm, και στο τελικό βήμα της μεθόδου φαίνεται ότι για βήμα 8 mm, η ρωγμή υπολογίζεται ότι διαδίδεται αρκετά πιο αργά στην ενισχυμένη πλευρά από ότι όταν το βήμα είναι 2 mm. Στην παραμετρική μελέτη που θα ακολουθήσει στην παρούσα εργασία το  $\Delta a_{ref}$  θα θεωρηθεί ίσο με 8 mm για λόγους υπολογιστικής οικονομίας.

## 2.8 ΓΕΝΙΚΟΣ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

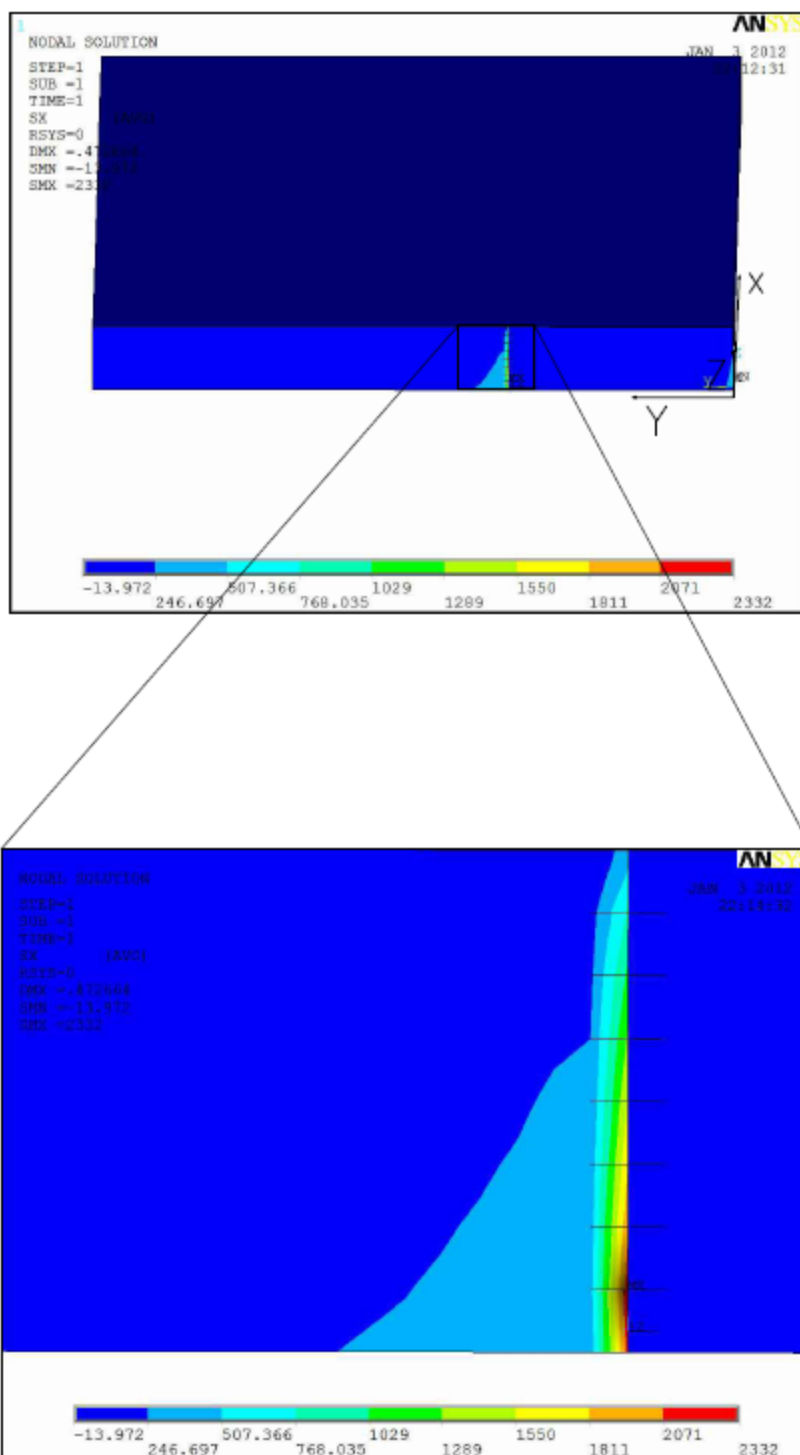
Στην παράγραφο αυτή θα σχολιαστούν τα αποτελέσματα που παράγει η πιο πάνω περιγραφόμενη μέθοδος μοντελοποίησης. Αρχικά πρέπει να διερευνηθεί η κατανομή του ΣΕΤ κατά το πάχος της μεταλλικής, ενισχυμένης πλάκας, όπως αυτό παράγεται από το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων και έπειτα η μορφή του μετώπου της ρωγμής όπως αυτό παράγεται από την μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε.

Στο σχήμα 2.28 εμφανίζεται η κατανομή του ΣΕΤ κατά το πάχος της πλάκας, χρησιμοποιώντας την περίπτωση, όπου το επίθεμα τοποθετείται στη χαλύβδινη πλάκα όταν η ρωγμή φτάσει σε μήκος  $a=30\text{mm}$ . Στο παρακάτω σχήμα το επίθεμα είναι στην πλευρά όπου  $t=10\text{ mm}$ .

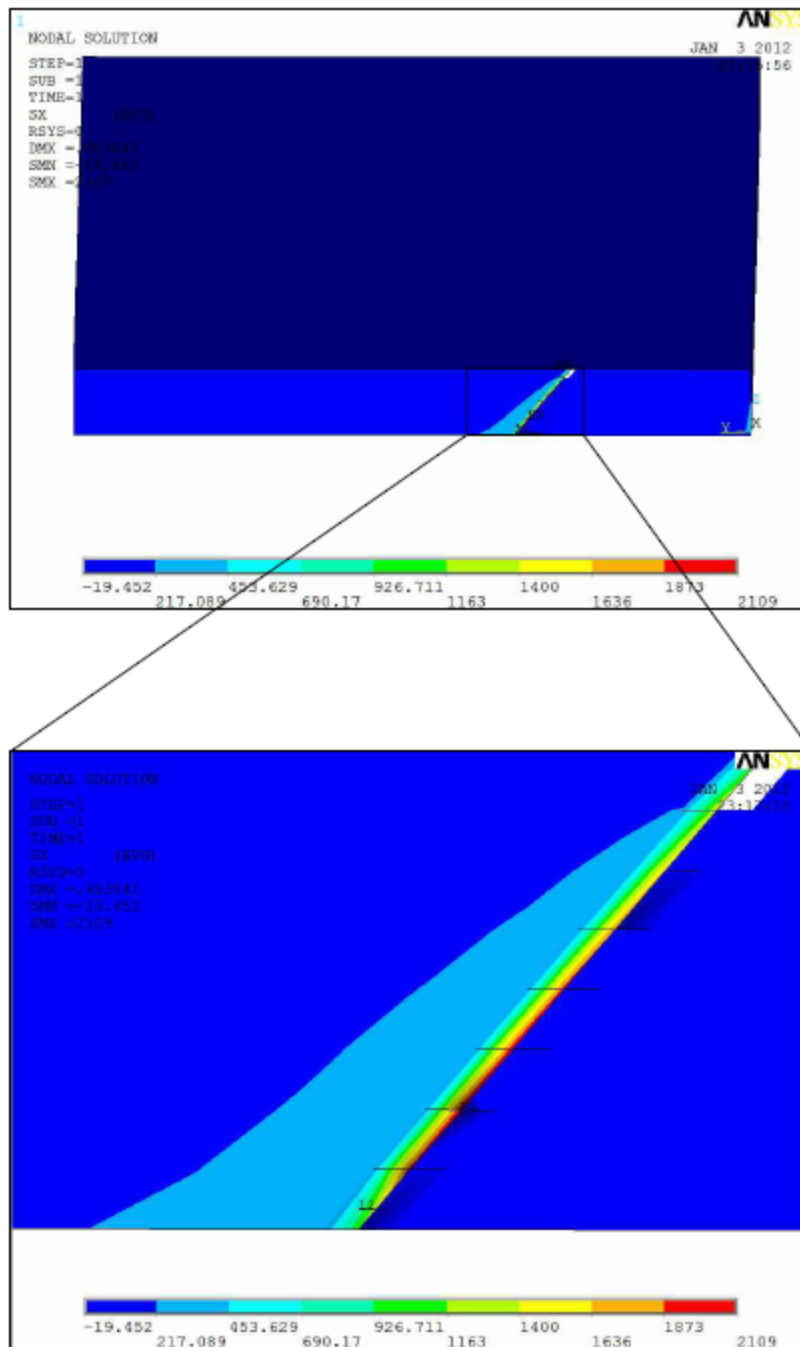


Σχήμα 2.28: Κατανομή του ΣΕΤ κατά το πάχος της πλάκας

Στο παραπάνω σχήμα παρατηρείται ότι για αρχικό μήκος ρωγμής των 30 mm όπου το μέτωπο της ρωγμής είναι κατακόρυφο, οι τιμές του ΣΕΤ αυξάνονται όσο αυξάνεται η απόσταση από το επίθεμα. Στο επόμενο βήμα της μεθόδου όπου το μοντελοποιημένο μέτωπο ρωγμής είναι κεκλιμένο, η κατανομή του ΣΕΤ αλλάζει σημαντικά εμφανιζόμενη ως καμπυλόγραμμη και παρουσιάζοντας τις μεγαλύτερες τιμές κοντά στο μέσο της διατομής. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην κλίση του μετώπου της ρωγμής που μειώνει τον γεωμετρικό περιορισμό στο κάτω άκρο αυτού με αποτέλεσμα να μεταφέρονται οι τάσεις προς το κέντρο της διατομής. Στο σχήμα 2.29, 2.30 φαίνονται οι τάσεις  $\sigma_x$  κοντά στο μέτωπο της ρωγμής για το μοντέλο του κατακόρυφου και του λοξού μετώπου ρωγμής αντίστοιχα. Από τα σχήματα αυτά παρατηρείται ότι ενώ η κατανομή των τάσεων, στην περίπτωση του κατακόρυφου μετώπου ρωγμής, παρουσίαζε μέγιστη τιμή στο σημείο 1.25 mm πάνω από το μη ενισχυμένο άκρο, στην περίπτωση του κεκλιμένου μετώπου ρωγμής η μέγιστη τιμή μετατοπίζεται κοντά στο κέντρο του πάχους της πλάκας.



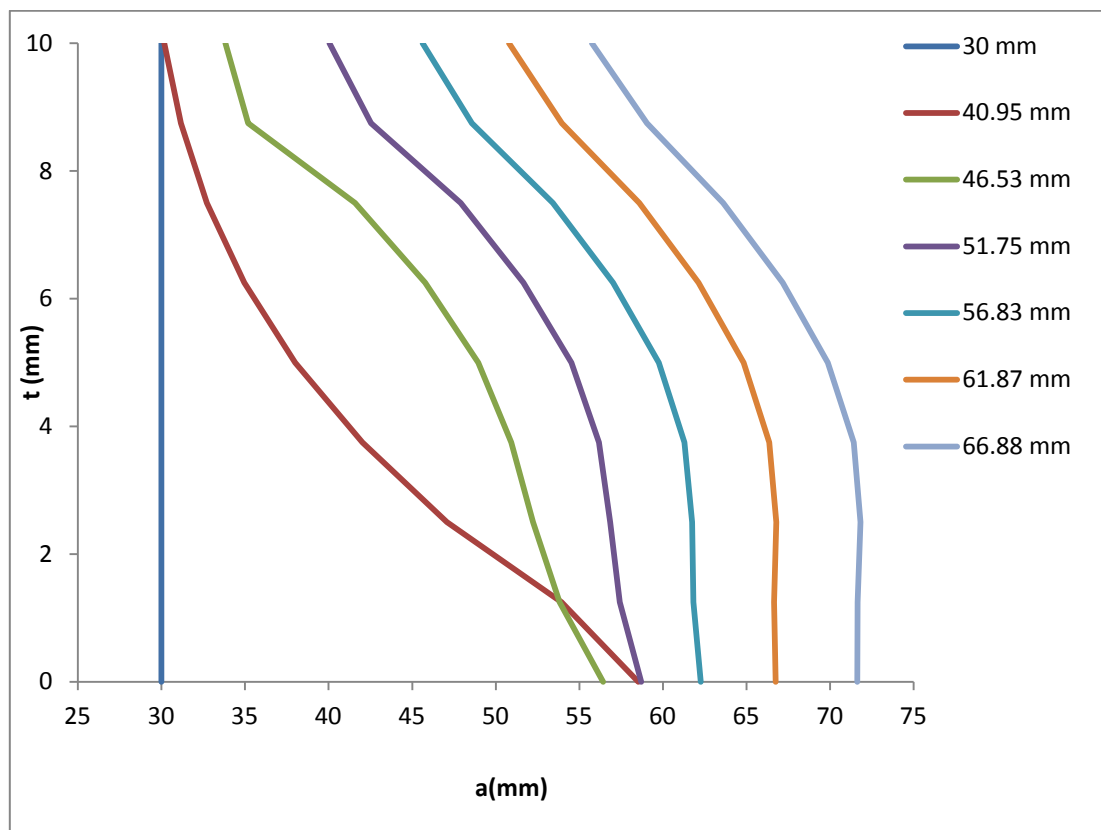
Σχήμα 2.29: Κατανομή των τάσεων  $\sigma_x$  στην πλάκα του χάλυβα κοντά στο μέτωπο ρωγμής, για κατακόρυφο μέτωπο ρωγμής (η επάνω πλευρά είναι αυτή που φέρει ενίσχυση).



Σχήμα 2.30: Κατανομή των τάσεων  $\sigma_x$  κοντά στο μέτωπο ρωγμής, για πλάγιο μέτωπο ρωγμής (η επάνω πλευρά είναι αυτή που φέρει ενίσχυση).

Επίσης παρατηρείται μια απότομη μείωση της τιμής του ΣΕΤ πολύ κοντά στην ενισχυμένη πλευρά αμέσως μετά την εφαρμογή του επιθέματος, η οποία εξομαλύνεται αρκετά μετά από την εφαρμογή ορισμένων βημάτων.

Στο σχήμα 2.28 εμφανίζεται η μορφή του μετώπου ρωγμής, κατά το πάχος της πλάκας, χρησιμοποιώντας την ίδια περίπτωση ενίσχυσης με το παραπάνω παράδειγμα, που αντιστοιχεί στην κατανομή του ΣΕΤ που εμφανίζεται στο σχήμα 2.25.



Σχήμα 2.28: Κατανομή του μετώπου της ρωγμής κατά το πάχος της πλάκας.

Στο παραπάνω σχήμα παρατηρείται αρχικά ότι το μέτωπο της ρωγμής είναι κατακόρυφο, εφόσον η ρωγμή διαδιδόταν μέχρι τα 30 mm χωρίς την παρουσία επιθέματος, ενώ στα επόμενα βήματα, το μήκος της ρωγμής διαφοροποιείται σημαντικά στα δύο άκρα. Αυτό ήταν αναμενόμενο να συμβεί καθώς με την ύπαρξη του επιθέματος στην επάνω πλευρά, ένα μεγάλο ποσοστό των τάσεων μεταφέρεται από την πλάκα στην ενίσχυση. Όσο η απόσταση από το επίθεμα γίνεται μεγαλύτερη, τόσο λιγότερη είναι η επίδρασή του. Αυτό οδηγεί σε ένα καμπυλόγραμμο μέτωπο ρωγμής, όπου η ρωγμή διαδίδεται όλο και γρηγορότερα όσο μακρύτερα βρίσκεται από το επίθεμα. Στο δεύτερο βήμα της μεθόδου, όπου το μέτωπο ρωγμής από κατακόρυφο γίνεται καμπυλόγραμμο, παρατηρείται ότι η καμπύλη που εξάγεται ως αποτέλεσμα έχει αντίθετη καμπυλότητα από όλες τις άλλες καμπύλες του παραδείγματος και επιπροσθέτως η διαφορά του μήκους ρωγμής είναι τόσο μεγάλη μεταξύ των δύο άκρων που ξεπερνά το μήκος ρωγμής του επόμενου βήματος, στο κάτω άκρο. Αυτό το φαινόμενο οφείλεται στο γεγονός ότι ενώ στη μέθοδο χρησιμοποιούνται οι τιμές του ΣΕΤ για να υπολογιστεί η μορφή του μετώπου της

ρωγμής του επόμενου βήματος ώστε αυτή να μοντελοποιηθεί, τελικώς μοντελοποιείται ένα ευθύγραμμο, λοξό μέτωπο ρωγμής, αντί αυτού, όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 2.6. Ένα άλλο φαινόμενο που παρατηρείται στην μορφή του μετώπου της ρωγμής είναι η απότομη αλλαγή γεωμετρίας που παρατηρείται κοντά στο ενισχυμένο άκρο. Η αλλαγή αυτή της γεωμετρίας στο σημείο αυτό οφείλεται στην κατανομή του ΣΕΤ, η οποία επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη μορφή του μετώπου της ρωγμής. Παρατηρείται ότι, όπως και στην κατανομή του ΣΕΤ, η αλλαγή αυτή της γεωμετρίας γίνεται πιο ομαλή όσο αυξάνεται το μήκος της ρωγμής.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

### ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΤΟΥ ΤΡΟΠΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ

#### 3.1 ΠΡΩΤΗ ΣΥΓΚΡΙΣΗ

##### 3.1.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΣΥΓΚΡΙΝΟΜΕΝΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

Στην παράγραφο αυτή θα εξεταστεί η εγκυρότητα της μεθόδου μοντελοποίησης πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιείται στην παρούσα μελέτη, με τη βοήθεια μιας μεθόδου από τη βιβλιογραφία. Για την επαλήθευση επιλέχτηκε η εργασία [10], στην οποία γίνεται παρουσίαση αποτελεσμάτων αριθμητικής μοντελοποίησης με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, τόσο για κατακόρυφα μοντελοποιημένο μέτωπο ρωγμής, όσο και για λοξό μέτωπο ρωγμής. Στην αναφορά [10] τα δοκίμια αποτελούνται από μεταλλικές πλάκες AL 7075T6 διαστάσεων 220 mm x 70 mm x 10 mm. Τα μεταλλικά δοκίμια φέρουν στο κέντρο οπή διαμέτρου 6 mm, και μια ρωγμή 1 mm από την κάθε πλευρά παράλληλη στο μήκος της πλάκας. Πριν την επισκευή με επίθεμα το κάθε δοκίμιο υποβλήθηκε σε κόπωση ώστε η κάθε μια από τις δύο ρωγμές να διπλασιάσει το μήκος της. Έτσι το αρχικό μήκος της ρωγμής πριν την επισκευή είναι 10 mm . Έπειτα τα δοκίμια ενισχύονται με επιθέματα από σύνθετα υλικά και τέλος υποβάλλονται σε δοκιμασίες αντοχής έναντι σε κόπωση. Στην εργασία αυτή το πρόγραμμα που χρησιμοποιείται για την ΜΠΣ, είναι το πρόγραμμα ABAQUS. Κατά την μοντελοποίηση στην εργασία αναφοράς χρησιμοποιήθηκαν 20-κομβικά, κυβικά στοιχεία, ενώ κοντά στο άκρο της ρωγμής χρησιμοποιήθηκαν ιδιόμορφα στοιχεία. Η προς επισκευή μεταλλική πλάκα μοντελοποιήθηκε με πέντε στρώσεις στοιχείων, ενώ το επίθεμα και το κολλητικό στρώμα με δύο και μία στρώση στοιχείων αντίστοιχα. Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας για να αναπαράξει τα αποτελέσματα της αναφοράς, μοντελοποιήθηκε όπως περιγράφεται στις παραγράφους 2.2-2.4. Για την προσομοίωση της μεταλλικής πλάκας χρησιμοποιήθηκαν οκτώ στρώματα στοιχείων, ενώ για το ενισχυτικό επίθεμα και το κολλητικό στρώμα, χρησιμοποιήθηκε από ένα στρώμα στοιχείων. Ο λόγος που χρησιμοποιήθηκαν οκτώ στρώματα στοιχείων αντί για πέντε, όπως χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία αναφοράς, για να προσομοιωθεί η μεταλλική πλάκα, είναι διότι δεν μπορεί να ληφθούν αποτελέσματα ΣΕΤ σε ενδιάμεσους κόμβους ενός στοιχείου στο πρόγραμμα ANSYS. Έτσι χρησιμοποιήθηκαν περισσότερες στρώσεις για τη λήψη περισσότερων αποτελεσμάτων κατά το πάχος της πλάκας.

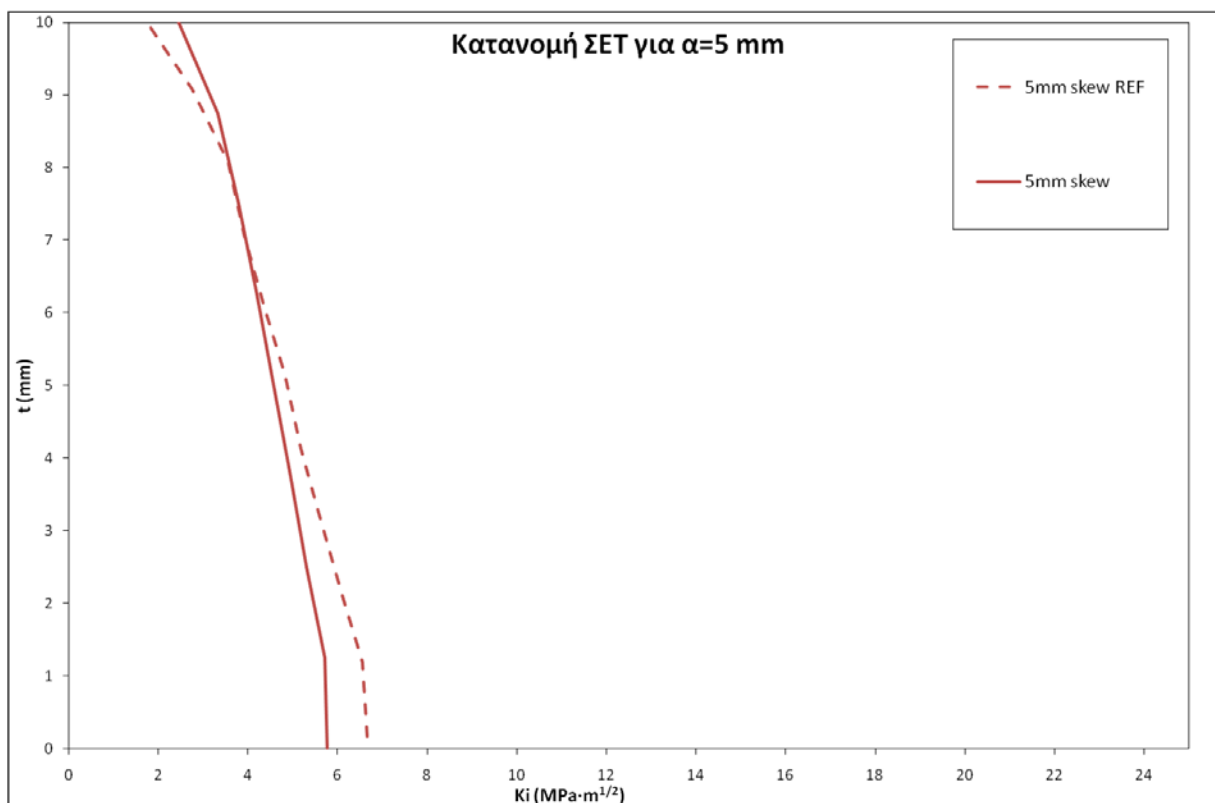
**Πίνακας 3.1: Γεωμετρία και Ιδιότητες υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία αναφοράς.**

Υλικό Πλάκα αλουμινίου	Μήκος (mm) 220	Πλάτος (mm) 70	Πάχος (mm) 10	Ιδιότητες υλικού $E=71.02$ GPa, $\nu=0.32$
Κολλητικό στρώμα	70	70	0.1016	$G=0.965$ GPa, $\nu=0.32$
Ενισχυτικό επίθεμα	70	70	0.9	$E_1=134$ GPa, $E_2=E_3=10.3$ GPa, $G_{23}=3.2$ GPa, $G_{12},G_{13}=5.5$ GPa, $\nu_{12}=\nu_{13}=0.33$ , $\nu_{23}=0.53$

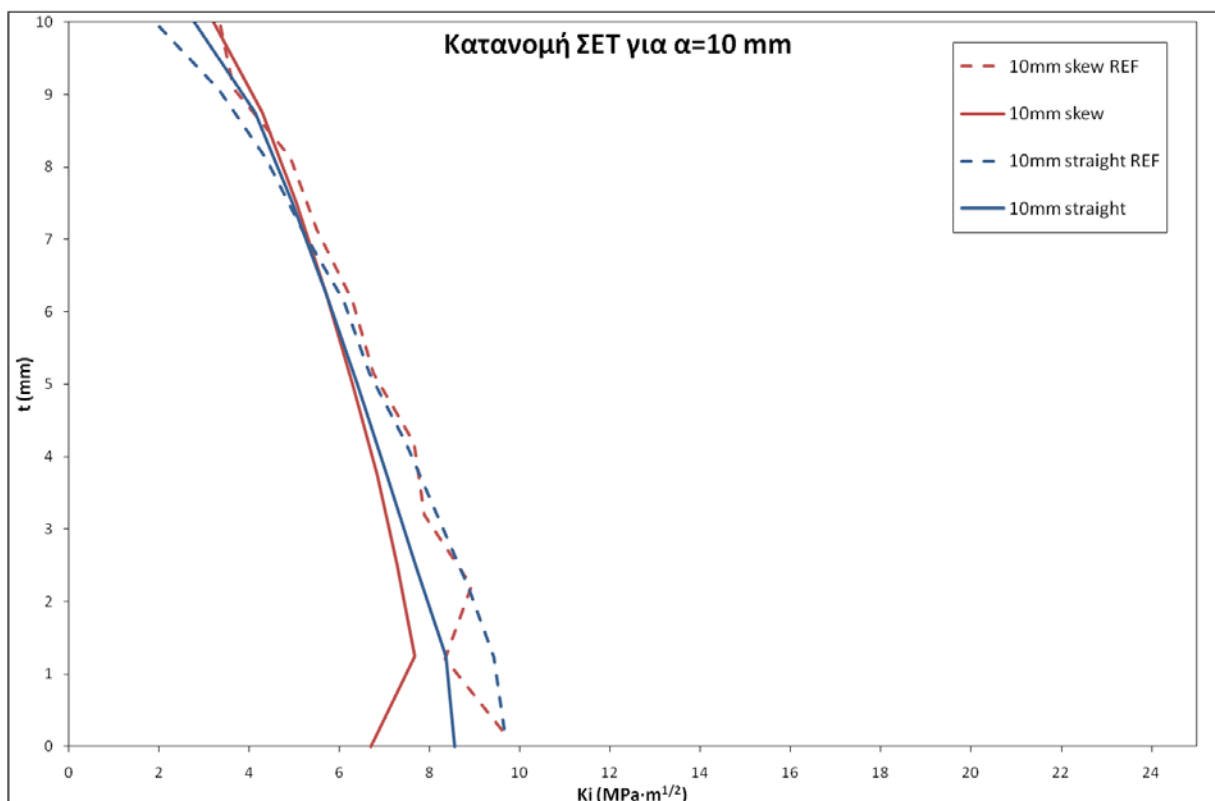
Στον πίνακα 3.1 παρουσιάζονται οι ιδιότητες των υλικών όπως αυτές χρησιμοποιήθηκαν και στα δύο μοντέλα που συγκρίνονται. Για λόγους εξοικονόμησης υπολογιστικής ισχύος, τα μοντέλα τόσο της υπό μελέτη αναφοράς όσο και της παρούσας εργασίας, μοντελοποιήθηκαν κατά το 1/4 και επιβλήθηκαν οι κατάλληλες συνθήκες συμμετρίας. Στο μοντέλο αναφοράς επιβάλλεται ομοιόμορφα κατανεμημένη πίεση 45 MPa στην ακραία επιφάνεια της μεταλλικής πλάκας. Στην παρούσα εργασία εφαρμόζεται ομοιόμορφα κατανεμημένη δύναμη που αντιστοιχεί σε 45 MPa. Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί ότι τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την επιβολή των φορτίων λήφθηκαν από το πειραματικό μέρος της εργασίας αναφοράς και θεωρείται ότι και στην μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες φορτίσεις. Τέλος, και στα δύο μοντέλα που συγκρίνονται η ρωγμή έχει αρχικό μήκος  $a=5$ mm και μηδενική κλίση του μετώπου της. Το τελικό μήκος ρωγμής στην εργασία αναφοράς είναι  $a=30$ mm όπου η κλίση του μετώπου της είναι τέτοια ώστε το μήκος ρωγμής έχει διαφορά 10mm μεταξύ των δύο πλευρών της πλάκας. Η κλίση στα υπόλοιπα μοντέλα με διαφορετικά μήκη ρωγμής υπολογίζεται με γραμμική παρεμβολή. Σε αυτό το κεφάλαιο εξετάζονται οι διαφορές των τιμών ΣΕΤ μεταξύ μοντέλων με μήκη 5mm, 10mm, 15mm, 20mm και 25mm.

### 3.1.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΔΥΟ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

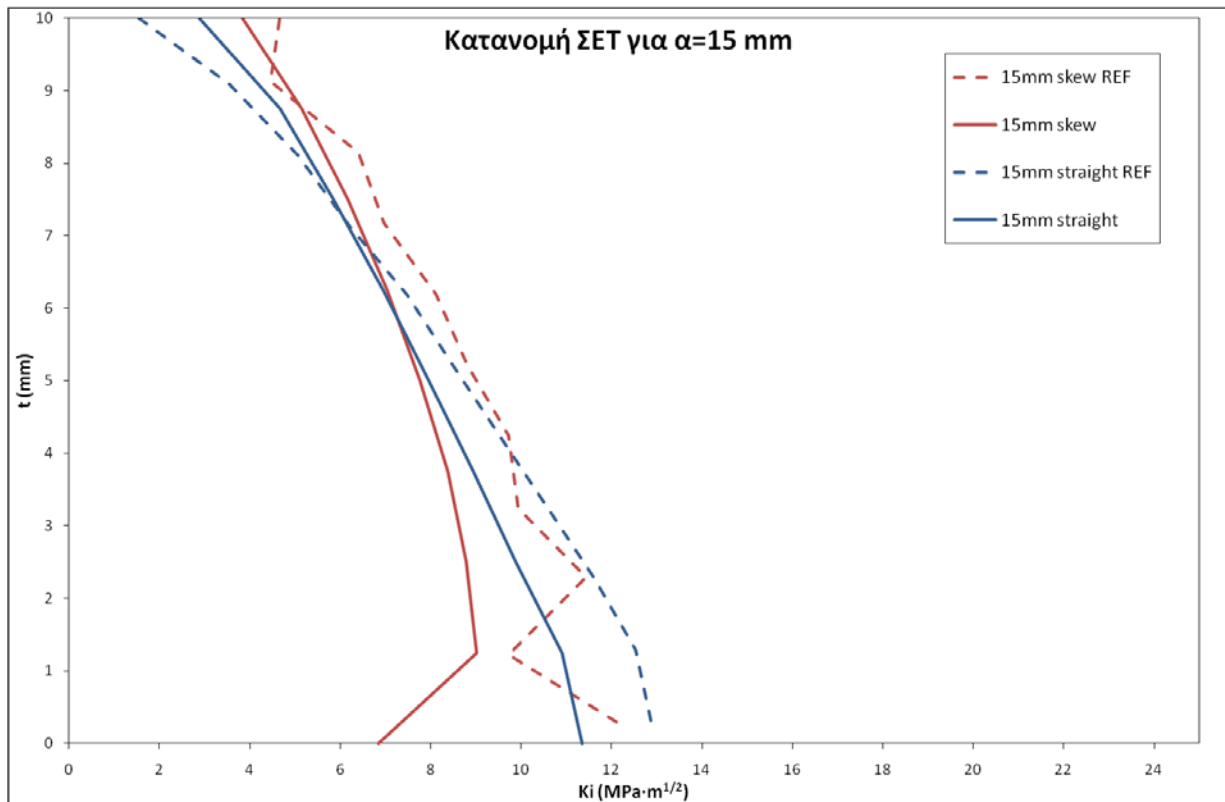
Στην παράγραφο αυτή θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από τα μοντέλα που περιγράφηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Τα σχήματα 3.1-3.5 αντιστοιχούν το κάθε ένα, σε ένα μήκος ρωγμής, όπου στο κάθε σχήμα παρουσιάζονται οι κατανομές του ΣΕΤ, για κατακόρυφο μέτωπο ρωγμής (μπλε χρώμα) και για πλάγιο μέτωπο ρωγμής (κόκκινο χρώμα). Στα σχήματα οι καμπύλες που εμφανίζονται με διακεκομμένη γραμμή, είναι οι κατανομές που προέκυψαν από την εργασία αναφοράς, ενώ με συνεχόμενη γραμμή εμφανίζονται οι καμπύλες που παρήχθησαν από το μοντέλο της παρούσας εργασίας. Τέλος πρέπει να αναφερθεί ότι σε όλα τα διαγράμματα η μέτρηση του πάχους της πλάκας ξεκινά από την μη ενισχυμένη πλευρά.



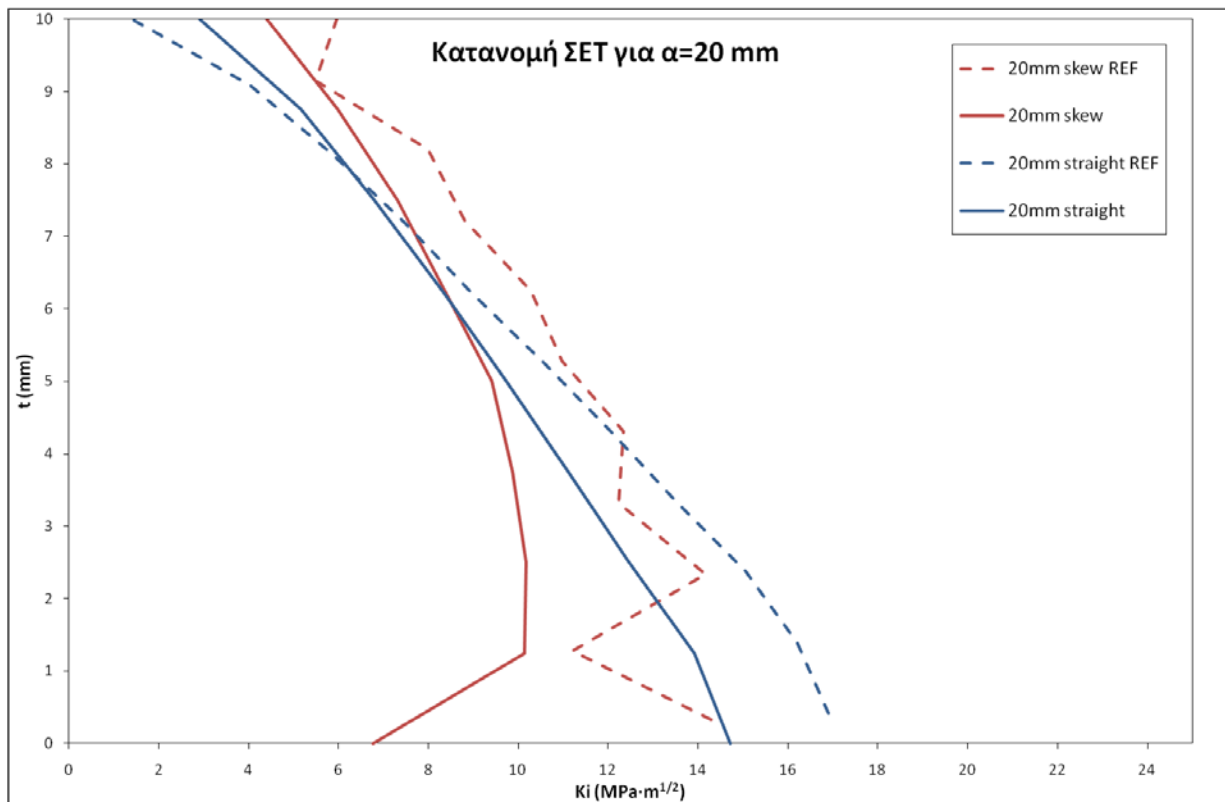
Σχήμα 3.1



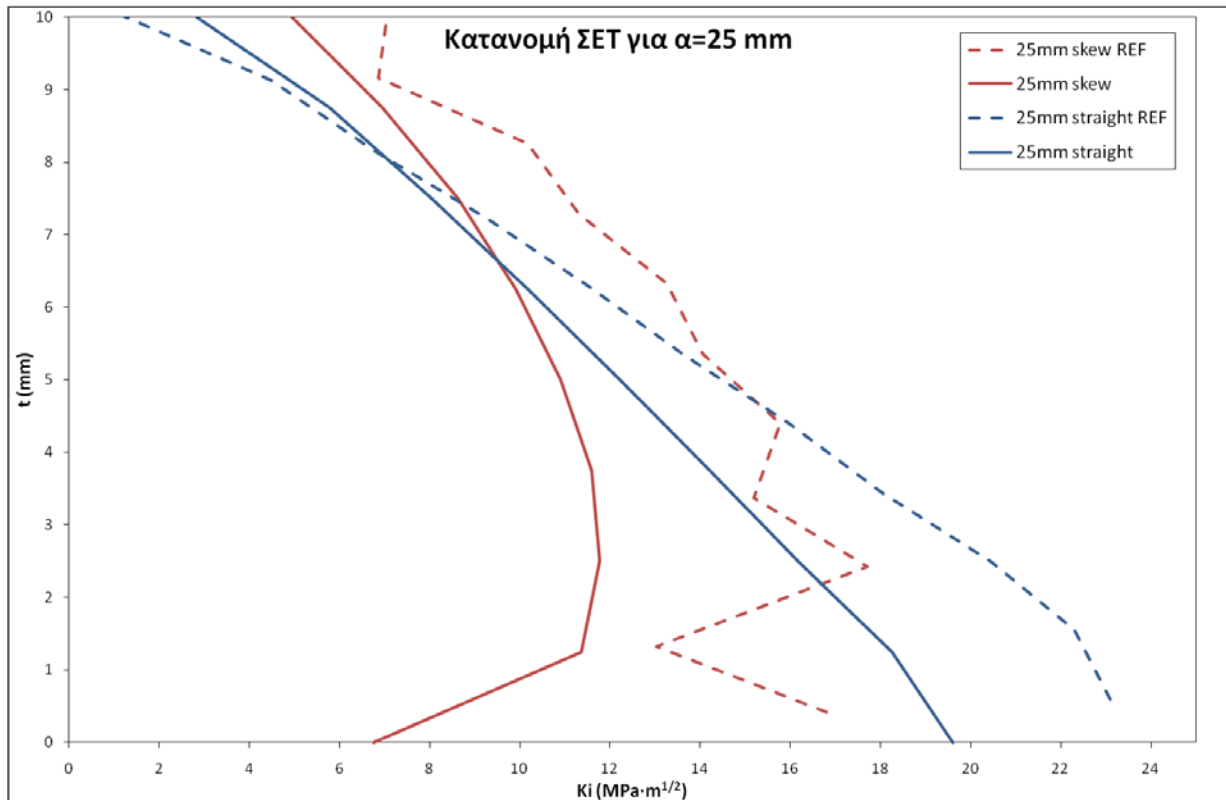
Σχήμα 3.2



Σχήμα 3.3



Σχήμα 3.4



Σχήμα 3.5

### 3.1.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΔΥΟ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

Από τις κατανομές του ΣΕΤ στα σχήματα 3.1-3.5 παρατηρούνται, σε ό,τι αφορά το κατακόρυφο μέτωπο ρωγμής, τα εξής:

- ✚ Στη μη ενισχυμένη πλευρά της πλάκας το μοντέλο της παρούσας εργασίας εξάγει μικρότερες τιμές ΣΕΤ σε σχέση με την εργασία αναφοράς, ενώ κοντά στην ενισχυμένη πλευρά γίνεται το αντίστροφο.
- ✚ Σε όλα τα μήκη όπου πραγματοποιήθηκε σύγκριση, η κλίση της καμπύλης της κατανομής, αλλάζει στα ίδια σημεία και στα δύο μοντέλα.
- ✚ Οι διαφορές των μέσων όρων των δύο μοντέλων είναι 4.5%, 4.6%, 5%, 7.1%, 10.6% όπου η μικρότερη διαφορά παρουσιάζεται στα μοντέλα με μήκος ρωγμής 5mm και όσο αυξάνεται το μήκος της ρωγμής αυξάνεται και η διαφορά στα αποτελέσματα του ΣΕΤ, με την μεγαλύτερη διαφορά να παρουσιάζεται για μήκος ρωγμής 25 mm. Σε όλους τους μέσους όρους των τιμών του ΣΕΤ, το μοντέλο αυτής της εργασίας εξάγει μικρότερες τιμές ΣΕΤ από το μοντέλο αναφοράς.

Σε ό,τι αφορά τη σύγκριση των μοντέλων με πλάγιο μέτωπο ρωγμής, από τα σχήματα 3.1-3.5 συμπεραίνεται ότι:

- ✚ Στη μη ενισχυμένη πλευρά της πλάκας παρατηρείται ότι το μοντέλο της εργασίας αυτής εξάγει χαμηλότερες τιμές ΣΕΤ σε σχέση με την εργασία που χρησιμοποιείται για την σύγκριση, όπως δηλαδή και στην περίπτωση του κατακόρυφου μετώπου. Στην περίπτωση του πλαγίου μετώπου όμως οι τιμές του ΣΕΤ στην εργασία αυτή είναι γενικώς χαμηλότερες σε σχέση με την εργασία αναφοράς, έχοντας ως αποτέλεσμα τις μεγαλύτερες διαφορές μεταξύ των μέσων όρων των τιμών των δύο μοντέλων. Οι διαφορές ξεκινούν με ποσοστό 4.5%, μεταξύ των μοντέλων με μήκος ρωγμής 5 mm και αυξάνονται σε ποσοστά 11%, 16.7%, 22%, 28.7%, που αντιστοιχούν στα μοντέλα με μήκος ρωγμής 10 mm, 15 mm, 20 mm και 25 mm αντίστοιχα.
- ✚ Το μοντέλο αυτής της εργασίας παρουσιάζει κατανομές ΣΕΤ χωρίς απότομες αλλαγές κλίσης.

Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθεί ότι στα αποτελέσματα και των δύο εργασιών παρατηρείται μια απότομη αλλαγή στην καμπύλη της κατανομής του ΣΕΤ, τόσο για κατακόρυφο όσο και για λοξό μέτωπο ρωγμής. Η αλλαγή αυτή εμφανίζεται αρκετά κοντά στη μη ενισχυμένη πλευρά του δοκιμίου, και μάλλον οφείλεται στο γεγονός ότι, ενώ κατά το πάχος της πλάκας υπάρχει τρισδιάστατη εντατική κατάσταση, στις μετρήσεις που γίνονται στα άκρα της πλάκας υπάρχει δισδιάστατη εντατική κατάσταση με αποτέλεσμα να παρουσιάζεται μειωμένη τιμή τάσης στα άκρα και τελικά μειωμένη τιμή ΣΕΤ. Το ίδιο φαινόμενο εμφανίζεται και στο ενισχυμένο άκρο της πλάκας, αν και όχι τόσο έντονα.

## 3.2 ΔΕΥΤΕΡΗ ΣΥΓΚΡΙΣΗ

### 3.2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΣΥΓΚΡΙΝΟΜΕΝΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

Στην εργασία [11] η οποία αποτελεί συνέχεια της εργασίας [10], γίνεται ακόμα μια σύγκριση μεταξύ του κατακόρυφου και του λοξού μετώπου ρωγμής. Στην αναφορά [11] ιδιαίτερη βαρύτητα δίνεται στην ακριβή πρόβλεψη του σχήματος και της κλίσης του μετώπου της ρωγμής καθώς αυτή αναπτύσσεται σε μονόπλευρα ενισχυμένες πλάκες, διότι ο ΣΕΤ επηρεάζεται σημαντικά από αυτούς τους παράγοντες. Στην μελέτη [11] μοντελοποιήθηκαν πλάκες μήκους και πλάτους 220 mm και 70 mm αντίστοιχα, με πάχος 2, 4, 6, 8, 10 mm. Όλες οι πλάκες έφεραν διαμεπρή κεντρική ρωγμή παράλληλα στο πλάτος της και τα επιθέματα που μοντελοποιήθηκαν για την ενίσχυσή τους ήταν διαστάσεων 70 mm x 70 mm. Πρέπει να σημειωθεί ότι το πάχος του επιθέματος και του κολλητικού στρώματος δεν ήταν σαφή και για αυτόν το λόγο υπολογίστηκαν από την εξίσωση:

$$SR = \frac{E_r t_r}{E_p t_p} = 1 \quad (3.1)$$

όπου  $E$  είναι το μέτρο ελαστικότητας,  $t$  είναι το πάχος, και οι δείκτες  $r, p$  αναφέρονται στο επίθεμα και στην μεταλλική πλάκα αντίστοιχα. Σύμφωνα με την εξίσωση (3.1)

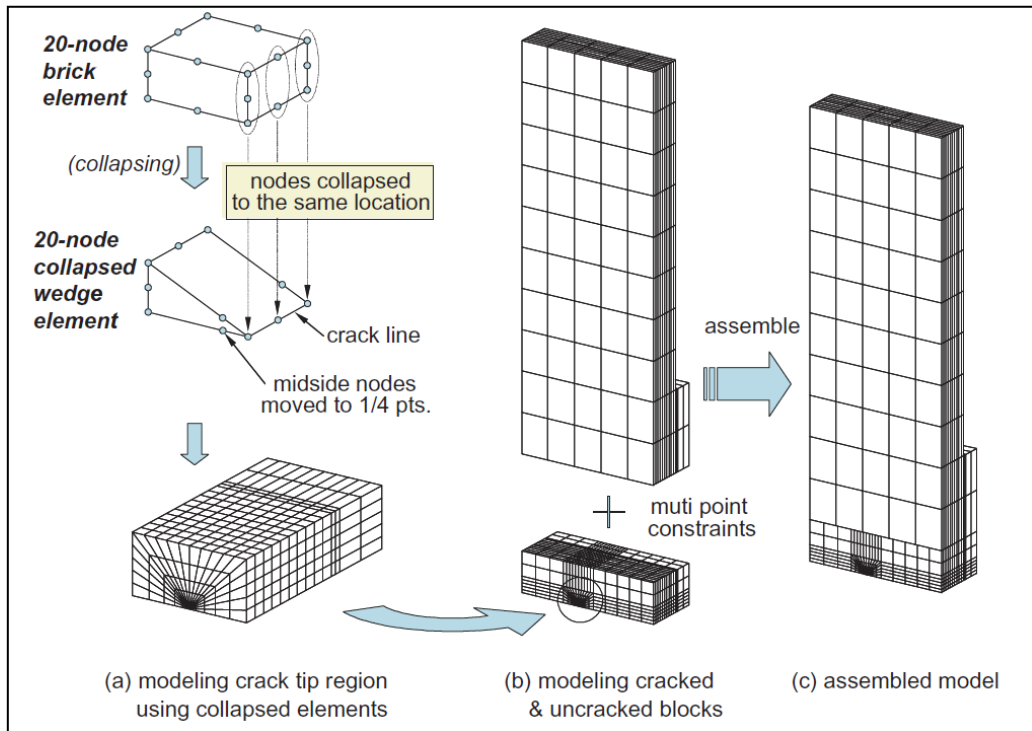
υπολογίστηκε το πάχος του επιθέματος, ενώ το πάχος του κολλητικού στρώματος λήφθηκε από την εργασία [10].

Το μοντέλο στη συγκεκριμένη μελέτη δημιουργήθηκε στο πρόγραμμα ABAQUS 6.3. Μοντελοποιήθηκε το 1/4 του δοκιμίου λόγω συμμετρίας. Η ιδιαιτερότητα του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε σε αυτήν την εργασία έγκειται στο γεγονός ότι, σε ό,τι έχει να κάνει με τον κατακερματισμό του δοκιμίου σε μικρά στοιχεία, το μοντέλο έχει χωριστεί σε δύο τμήματα. Το πρώτο τμήμα αποτελείται από μικρά στοιχεία και κατακερματίζεται εκ νέου σε κάθε αύξηση του μήκους ρωγμής, ενώ το δεύτερο, μένει σταθερά χωρισμένο στα ίδια στοιχεία. Για την δημιουργία του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν εικοσακομβικά κυβικά στοιχεία σε όλο το εύρος της δομής, ενώ κοντά στο άκρο της ρωγμής χρησιμοποιήθηκαν εικοσακομβικά ιδιόμορφα στοιχεία. Στο σχήμα 3.6 παρουσιάζονται τα στοιχεία καθώς και ο τρόπος που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο της μελέτης [11]. Δεν υπήρχαν πληροφορίες για τον αριθμό των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν κατά το πάχος της μεταλλικής πλάκας και του επιθέματος, έτσι για την πραγματοποίηση της σύγκρισης επιλέχθηκε, η μεταλλική πλάκα να αποτελείται από οκτώ στρώματα στοιχείων, ενώ το κολλητικό στρώμα και το επίθεμα από σύνθετα υλικά από ένα στρώμα στοιχείων, όπως δηλαδή είχε μοντελοποιηθεί το δοκίμιο στην προηγούμενη μελέτη του συγγραφέα. Οι ιδιότητες και οι διαστάσεις των υλικών που χρησιμοποιούνται στα μοντέλα που συγκρίνονται σε αυτό το εδάφιο παρουσιάζονται στον πίνακα 3.2. Τέλος πρέπει να σημειωθεί ότι στο μοντέλο αναφοράς επιβάλλεται ομοιόμορφα κατανεμημένη τάση 45 MPa στην ελεύθερη πλευρά της πλάκας, ενώ στο μοντέλο της εργασίας αυτής επιβάλλεται ομοιόμορφη κατανεμημένη δύναμη που ισοδυναμεί με 45 MPa ομοιόμορφα κατανεμημένης τάσης.

**Πίνακας 3.2: Ιδιότητες και διαστάσεις των υλικών που χρησιμοποιούνται για τη σύγκριση.**

Υλικό	Μήκος (mm)	Πλάτος (mm)	Πάχος (mm)	Ιδιότητες υλικού
Πλάκα αλουμινίου	220	70	6	$E=71.02$ GPa, $\nu=0.32$
Κολλητικό στρώμα	70	70	0.1016	$G=2.76$ GPa, $\nu=0.32$
Ενισχυτικό επίθεμα	70	70	3.18	$E_1=134$ GPa, $E_2=E_3=10.3$ GPa, $G_{23}=3.2$ GPa, $G_{12},G_{13}=5.5$ GPa, $\nu_{12}=\nu_{13}=0.33$ , $\nu_{23}=0.53$

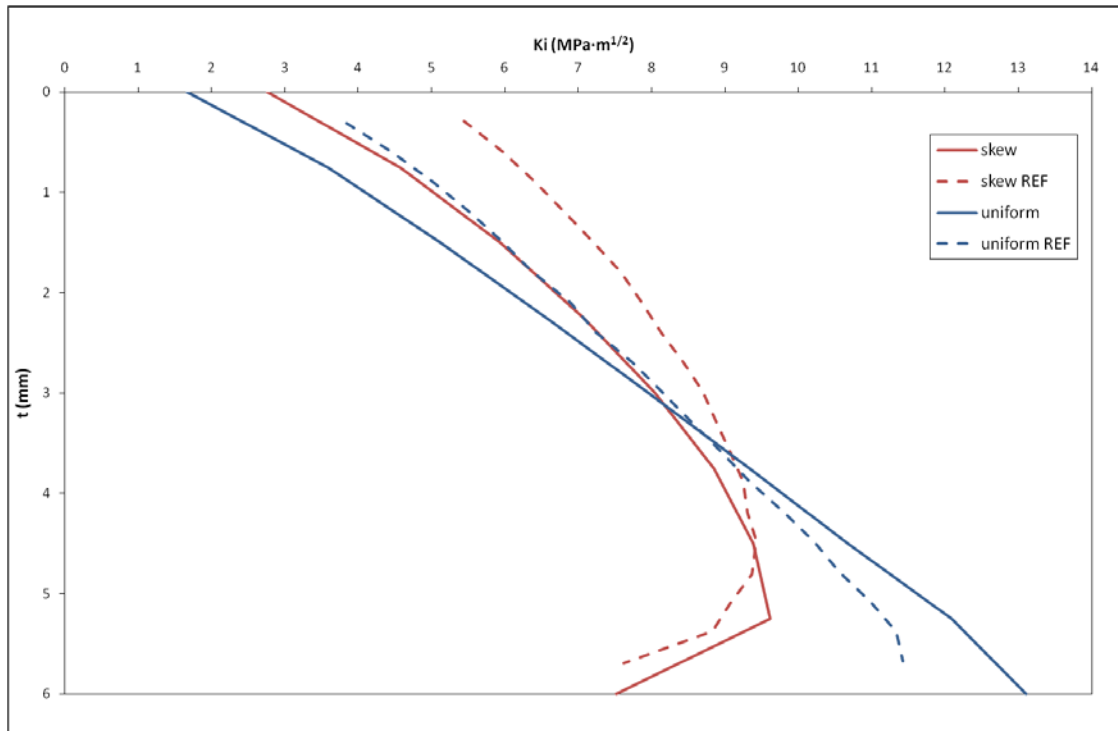




Σχήμα 3.6: Τρόπος κατακερματισμού του μοντέλου αναφοράς, της μελέτης [11].

### 3.2.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΔΥΟ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

Στο σχήμα 3.7 παρουσιάζεται η σύγκριση μεταξύ του μοντέλου αναφοράς (διακεκομμένη γραμμή) και του μοντέλου της παρούσας εργασίας (συνεχόμενη γραμμή), τόσο για κατακόρυφο μέτωπο ρωγμής (μπλε χρώμα), όσο και για πλάγιο μέτωπο ρωγμής (κόκκινο χρώμα). Στο σχήμα 3.7 η μέτρηση του πάχους της πλάκας ξεκινά από την πλευρά που φέρει το επίθεμα.



Σχήμα 3.7: Σύγκριση αποτελεσμάτων ΣΕΤ για σύγκριση με την μελέτη [11].

### 3.2.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΔΥΟ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

Όπως και στη σύγκριση που έγινε με την εργασία [10], σε αυτή την εργασία παρατηρείται επίσης ότι το μοντέλο αναφοράς εξάγει υψηλότερες τιμές ΣΕΤ στην πλευρά που φέρει το επίθεμα ενώ για τη μη ενισχυμένη πλευρά ισχύει το αντίθετο. Επίσης παρατηρείται ότι και στα δύο μοντέλα οι κατανομές του ΣΕΤ έχουν παρόμοια κλίση. Ένα άλλο κοινό που εμφανίζεται στα δύο μοντέλα είναι η απότομη αλλαγή στην κλίση των κατανομών ΣΕΤ κοντά στο μη ενισχυμένο άκρο. Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 3.1.7 αυτό πρέπει να οφείλεται στο γεγονός ότι ενώ κατά το πάχος του μετάλλου υπάρχει τρισδιάστατη εντατική κατάσταση, στα άκρα της πλάκας η εντατική κατάσταση είναι δισδιάστατη, έχοντας ως αποτέλεσμα τις μειωμένες τιμές της τάσης και, κατ' επέκταση, μικρότερες τιμές ΣΕΤ.

### 3.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΣΕ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ANSYS.

Σε αυτή την παράγραφο αναφέρεται η σύγκριση του ΜΠΣ της παρούσας εργασίας με το ΜΠΣ που δημιουργήθηκε κατά την εκπόνηση της μελέτης [19]. Στην αναφορά αυτή μοντελοποιείται μεταλλική πλάκα από χάλυβα η οποία φέρει κεντρική διαμπερή ρωγμή κατά τη διεύθυνση του πλάτους της πλάκας, η οποία ενισχύεται από επίθεμα. Τέλος στην πλάκα ασκείται εφελκυστική τάση η οποία εφαρμόζεται ως ομοιόμορφα κατανεμημένη αρνητική πίεση στην ακραία επιφάνειά της. Στην εργασία [19] μοντελοποιήθηκε το πρόβλημα της επέκτασης της ρωγμής θεωρώντας το μέτωπο αυτής πάντα ευθύ και κατακόρυφο. Για τον τελικό έλεγχο του μοντέλου της παρούσας μελέτης έγιναν αρκετά τρεξίματα, διατηρώντας και στα δύο μοντέλα το μέτωπο της ρωγμής κατακόρυφο. Τα δύο μοντέλα δημιουργήθηκαν στο πρόγραμμα ANSYS, και η μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ των τιμών που εξήγαγαν τα δύο προγράμματα ήταν 3%. Η διαφορά αυτή μπορεί να οφείλεται, στις διαφορετικές διαστάσεις των ιδιόμορφων στοιχείων, στο συνολικό αριθμό των στοιχείων που προσομοιώνουν το πρόβλημα ή στον τρόπο επιβολής των φορτίων.

### 3.4 ΣΥΝΟΨΗ ΑΠΟ ΤΗ ΣΥΓΚΡΙΣΗ

Η σύγκριση των δύο μοντέλων των εργασιών [10, 11] δείχνει μια παρόμοια συμπεριφορά κυρίως σε ότι έχει να κάνει με την μορφή της κατανομής του ΣΕΤ. Υπάρχουν κάποιες διαφορές στις τιμές του ΣΕΤ καθώς αλλάζει το πρόγραμμα στο οποίο γίνεται η μοντελοποίηση, αλλά και λόγω έλλειψης περαιτέρω στοιχείων, όπως το μέγεθος των στοιχείων γύρω από το άκρο της ρωγμής. Στη σύγκριση που έγινε με την εργασία [19], οι διαφορές στα αποτελέσματα ήταν ελάχιστες και η απόκλισή τους σταθερή. Σύμφωνα με όλα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, το μοντέλο θεωρείται ικανοποιητικά ακριβές για να χρησιμοποιηθεί για την εκπόνηση της αριθμητικής μελέτης.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>

### ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΧΑΛΥΒΔΙΝΗΣ ΠΛΑΚΑΣ ΜΕ ΕΠΙΘΕΜΑ ΑΠΟ CARBON - EPOXY

#### 4.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Κατά την διενέργεια της βιβλιογραφικής ανασκόπησης εντοπίστηκαν μια σειρά από παράγοντες που επιδρούν στην αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης με επιθέματα, δηλαδή στον βαθμό μείωσης του ΣΕΤ κοντά στο μέτωπο της ρωγμής, καθώς και στην αντοχή της κατασκευής, κυρίως όσον αφορά στο στρώμα του κολλητικού μέσου μεταξύ του μεταλλικού δοκιμίου και του επιθέματος από σύνθετα υλικά. Στην συγκεκριμένη εργασία η εκτέλεση των "τρεξιμάτων" θα πραγματοποιηθεί για συγκεκριμένη γεωμετρία δοκιμίου και ιδιότητες υλικών που θα προσομοιωθούν, με σκοπό την ποιοτική εκτίμηση της αντοχής της πλάκας σε σχέση με το μήκος της ρωγμής τη χρονική στιγμή που εφαρμόζεται το επίθεμα. Το υλικό της πλάκας είναι κοινός ναυπηγικός χάλυβας, οι ιδιότητες του κολλητικού μέσου λήφθηκαν από την βιβλιογραφία και τέλος το επίθεμα είναι μονοαξονικό carbon-epoxy. Η παραμετρική μελέτη θα πραγματοποιηθεί για τρεις διαφορετικούς λόγους ακαμψίας επιθέματος - πλάκας ( $SR=[E_p \cdot t_p]/[E_s \cdot t_s]$ ), και για έξι διαφορετικά αρχικά μήκη ρωγμής, (18 περιπτώσεις). Όλα τα διαγράμματα που παρουσιάζονται έχουν προέλθει από την χρήση της μεθόδου που περιγράφηκε στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο, με βήμα 8 mm, εκτός από τα διαγράμματα που παρουσιάζουν τις διαφορές στα αποτελέσματα της μεθόδου ανάλογα με το βήμα που θα επιλεγεί. Στη συνέχεια θα γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ της μοντελοποίησης του κατακόρυφου και του πλαγίου μετώπου ρωγμής για την περίπτωση της μονόπλευρης ενίσχυσης και τελικά θα γίνει σύγκριση της αποτελεσματικότητας μεταξύ της μονόπλευρης και της αμφίπλευρης επισκευής της μεταλλικής πλάκας. Οι διαστάσεις, οι ιδιότητες των δοκιμίων και οι παράμετροι της παραμετρικής μελέτης παρουσιάζονται στον πίνακα 4.1. Σημειώνεται ότι οι λόγοι Poisson καθώς και τα μέτρα ελαστικότητας  $E_y$  και  $E_z$  καθώς και τα μέτρα διάτμησης  $G_{xy}$ ,  $G_{yz}$ ,  $G_{xz}$ , λήφθηκαν από παραδείγματα της βιβλιογραφίας [16].

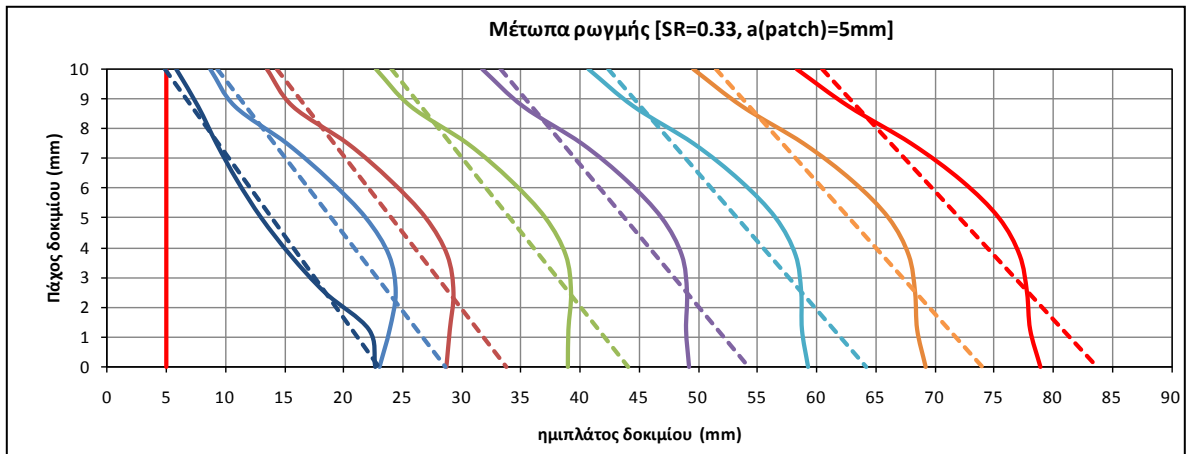
Πίνακας 4.1

Μεταλλική Πλάκα	Μήκος	$L_s=500$ mm
	Πλάτος	$W_s=200$ mm
	Πάχος	$t_s=10$ mm
	Μέτρο ελαστικότητας	$E_s=200$ GPa
	Λόγος Poisson	$\nu_s=0.33$
Επίθεμα	Μήκος	$L_p=200$ mm
	Πλάτος	$W_p=180$ mm
	Λόγος ακαμψίας SR	$SR_1=0.33 \rightarrow t_{p1}=4.89$ mm $SR_2=0.66 \rightarrow t_{p2}=9.78$ mm $SR_3=1.0 \rightarrow t_{p3}=14.81$ mm
	Μέτρο ελαστικότητας (X)	$E_x=135$ GPa
	Μέτρο ελαστικότητας (Y)	$E_y=9$ GPa
	Μέτρο ελαστικότητας (Z)	$E_z=9$ GPa
	Λόγος Poisson (XY)	$\nu_{xy}=0.3$
	Λόγος Poisson (YZ)	$\nu_{yz}=0.002$
	Λόγος Poisson (XZ)	$\nu_{xz}=0.3$
	Μέτρο διάτμησης (XY)	$G_{xy}=5$ GPa
	Μέτρο διάτμησης (YZ)	$G_{yz}=9$ GPa
	Μέτρο διάτμησης (XZ)	$G_{xz}=5$ GPa
Κολλητικό Μέσο	Πάχος	$t_a=0.1$ mm
	Μέτρο ελαστικότητας	$E_a=4.5$ GPa
	Λόγος Poisson	$\nu_a=0.25$
	Μέγιστο μήκος ρωγμής	$2\alpha=80$ mm
	Ασκούμενη ομοιόμορφη τάση	$\sigma_\chi=100$ MPa
	Τρόπος ενίσχυσης	Μονόπλευρη Αμφίπλευρη

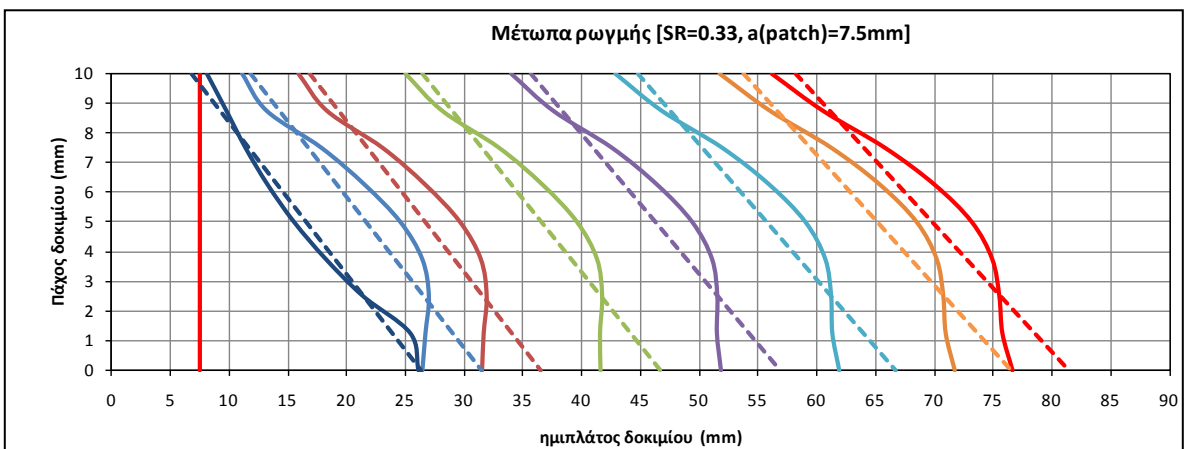
## 4.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

Σε αυτήν την παράγραφο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης με πεπερασμένα στοιχεία, με την βοήθεια του προγράμματος ANSYS, και την χρήση των αποτελεσμάτων αυτών στην μέθοδο που περιγράφηκε στην παράγραφο 2.6. Συνολικά, πραγματοποιούνται 233 τρεξίματα στο πρόγραμμα ANSYS για την εύρεση του Συντελεστή Έντασης Τάσης. Στη συνέχεια, αφού εξαχθούν τα αποτελέσματα από το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, λόγω της αναγκαιότητας της αντιπροσώπευσης του κάθε συνόλου αποτελεσμάτων από μια τιμή ΣΕΤ, όπως περιγράφεται και στην παράγραφο 2.6, επιλέγονται από την βιβλιογραφία [7,9] δύο τρόποι, ώστε με μέσους όρους να υπολογιστεί μια τιμή ΣΕΤ που θα αντιπροσωπεύει το κάθε σύνολο αποτελεσμάτων, λόγω των αξιόπιστων αποτελεσμάτων που προσφέρουν. Οι μέσοι όροι που επιλέχτηκαν είναι οι: (av\_all) δηλαδή ο μέσος όρος όλων των αποτελεσμάτων και (av\_rms) δηλαδή η μέση τετραγωνική τιμή όλων των αποτελεσμάτων. Ως a(patch) ορίζεται το μήκος της ρωγμής τη στιγμή που τοποθετείται το επίθεμα. Σε αυτό το σημείο κρίνεται απαραίτητο να αναφερθεί ότι οι παρατηρήσεις και τα συμπεράσματα που θα διατυπωθούν στη συνέχεια του κεφαλαίου αναφέρονται μόνο στις περιπτώσεις που εξετάζονται στα πλαίσια αυτής της εργασίας και δεν μπορούν να γενικευτούν για άλλες περιπτώσεις.

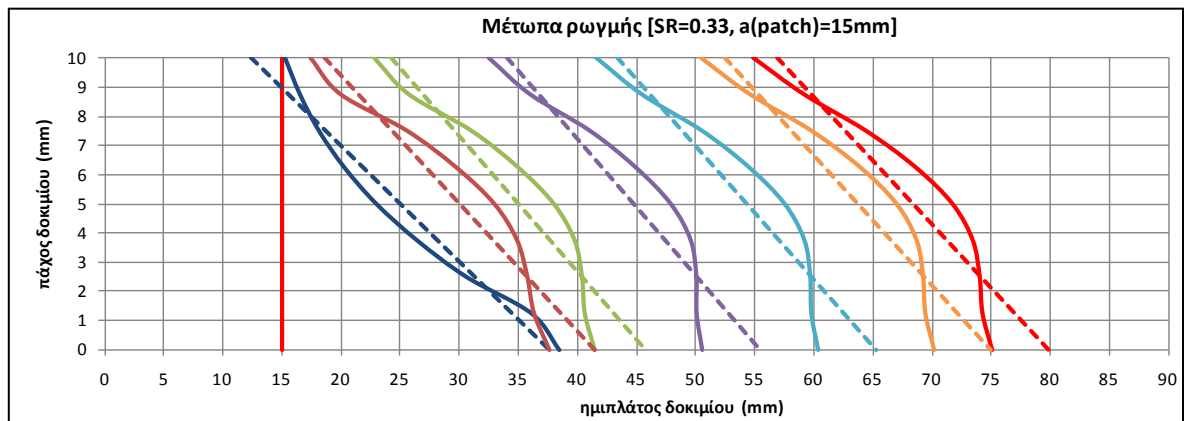
Στα σχήματα (4.1-4.18) που παρουσιάζονται παρακάτω εμφανίζονται ενδεικτικά κάποιες μορφές του μετώπου της ρωγμής όπως αυτές εξάγονται από την μέθοδο. Πιο συγκεκριμένα στα σχήματα 4.1-4.6, 4.7-4.12, 4.12-4.18, παρουσιάζονται τα μέτωπα ρωγμής για SR 0.33, 0.66 και 1.0 αντίστοιχα. Αρχικά το μέτωπο ρωγμής είναι ευθύ και κατακόρυφο, ενώ στα επόμενα βήματα είναι κεκλιμένο και καμπύλο. Στα διαγράμματα αυτά παρουσιάζονται επίσης με διακεκομμένη γραμμή και οι μορφές του μετώπου της ρωγμής που μοντελοποιήθηκαν στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων. Στα σχήματα 4.1-4.18 η μέτρηση του πάχους της πλάκας ξεκινάει από τη μη ενισχυμένη πλευρά, ενώ η πλευρά που έχει 10 mm πάχος είναι η πλευρά που έχει ενισχυθεί από το επίθεμα.



Σχήμα 4.1

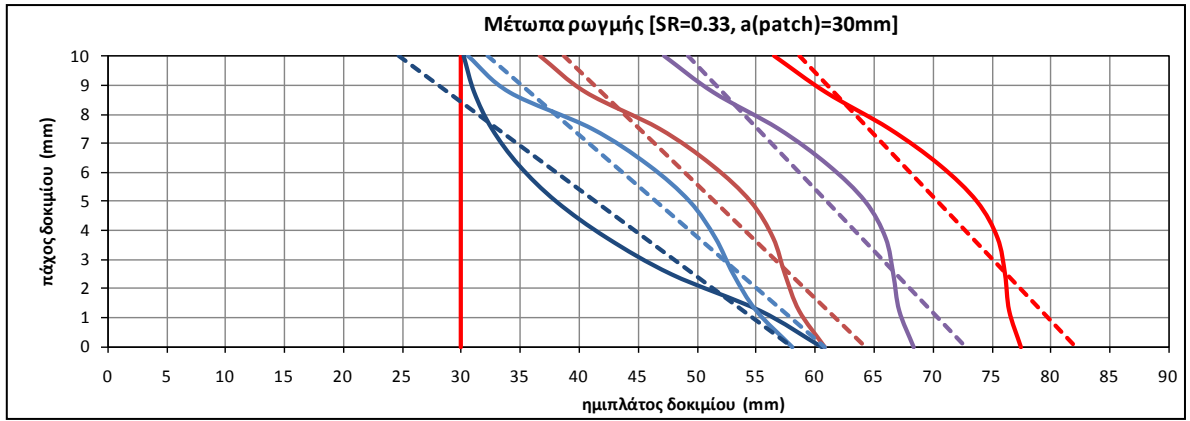


Σχήμα 4.2

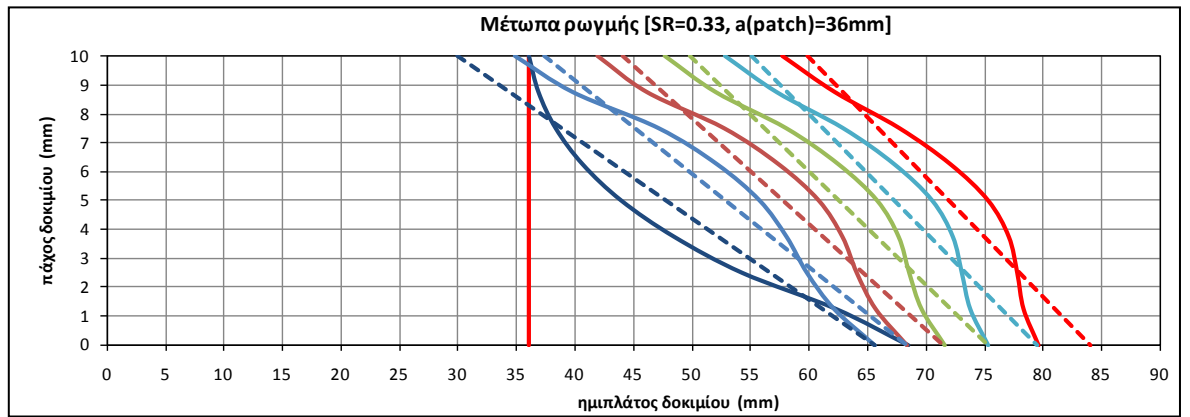


Σχήμα 4.3

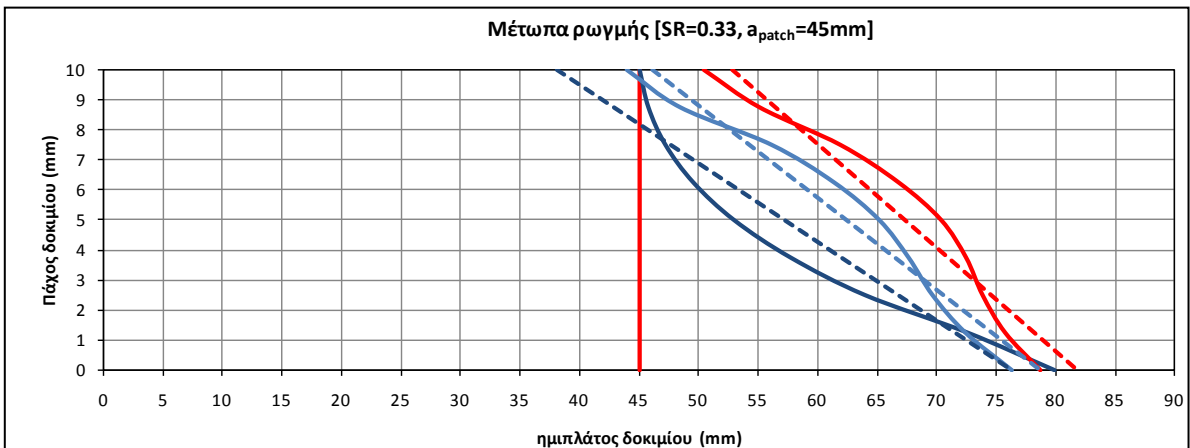




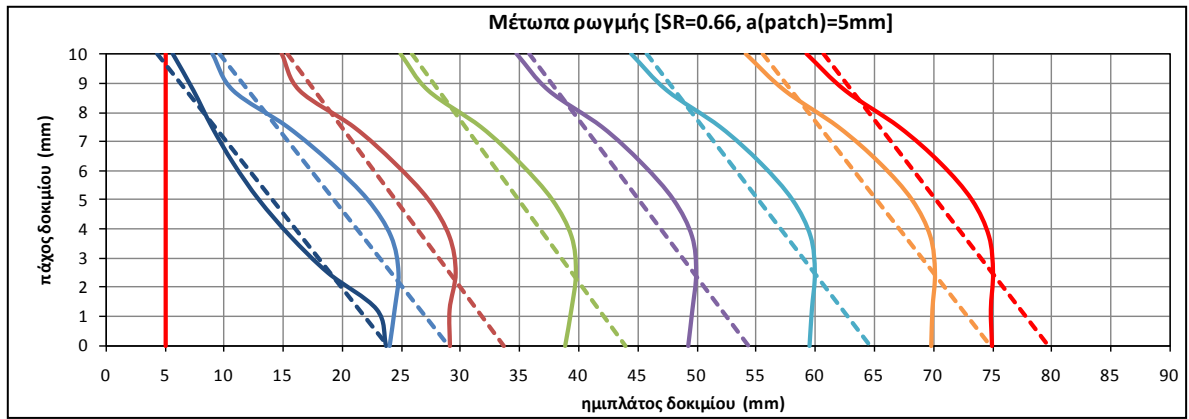
Σχήμα 4.4



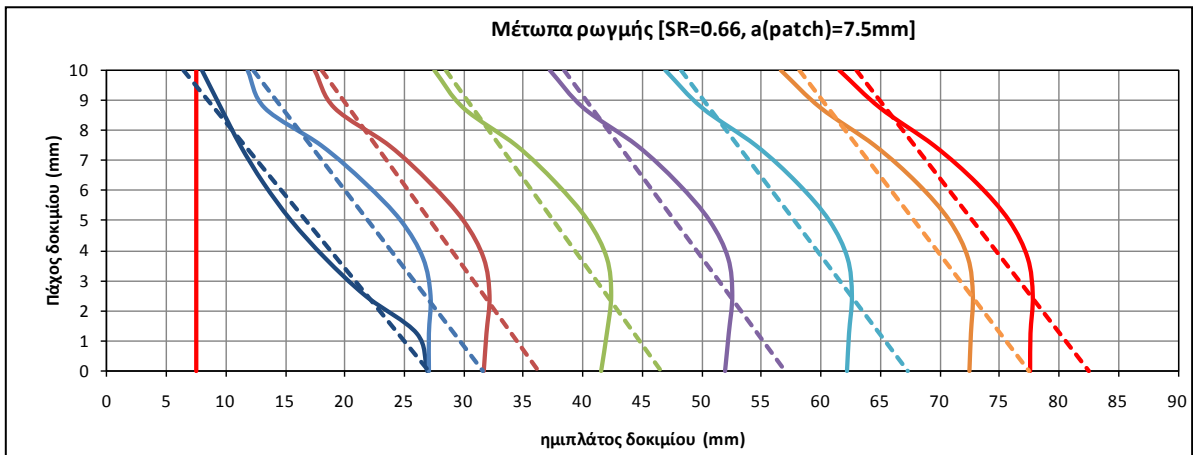
Σχήμα 4.5



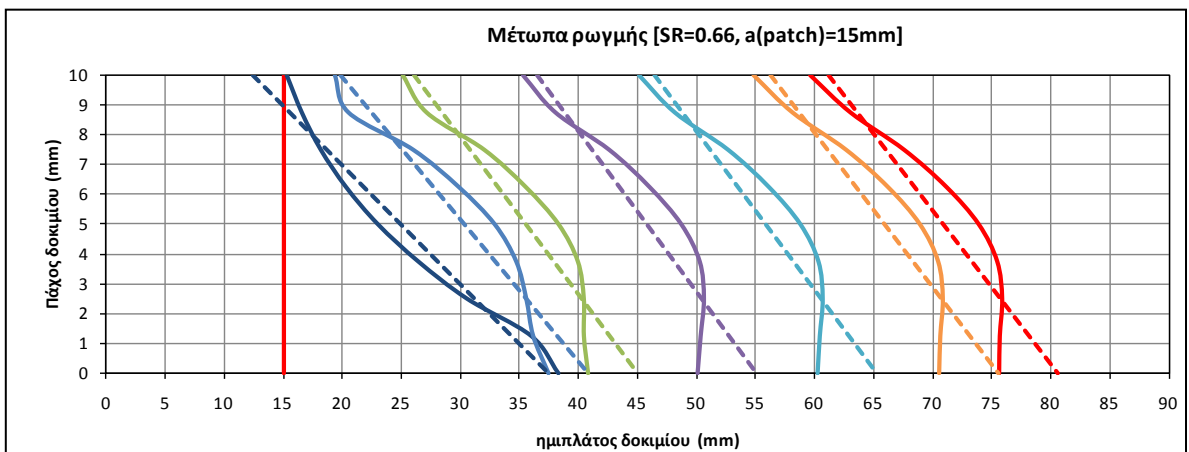
Σχήμα 4.6



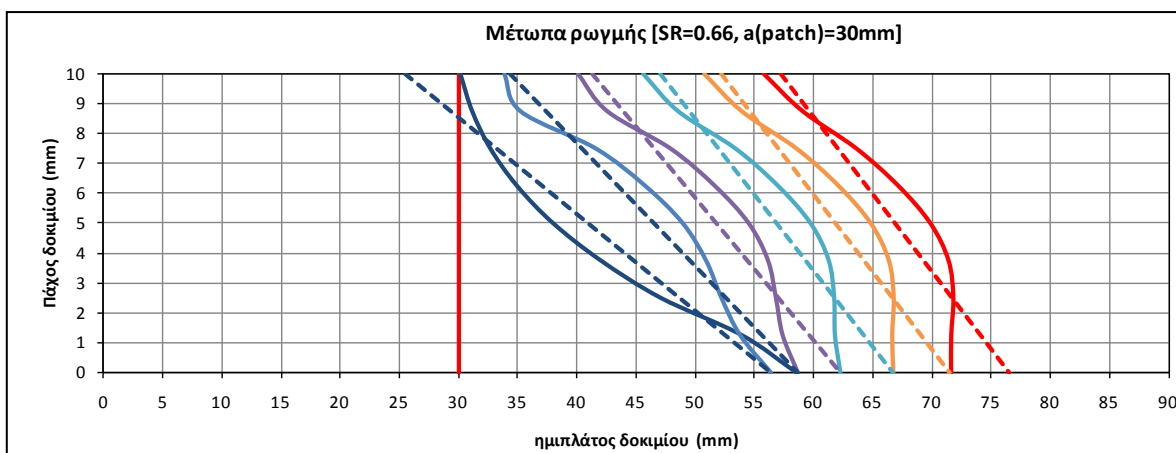
Σχήμα 4.7



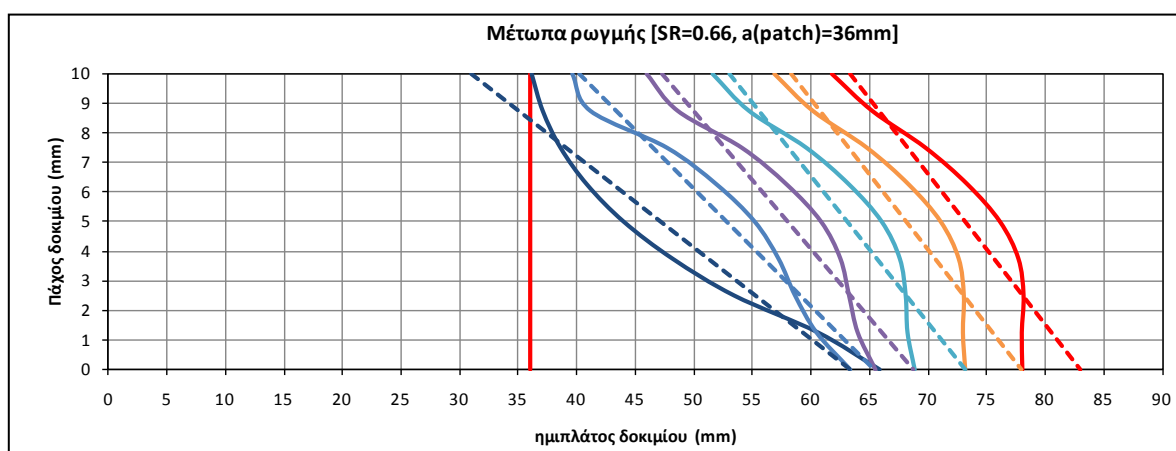
Σχήμα 4.8



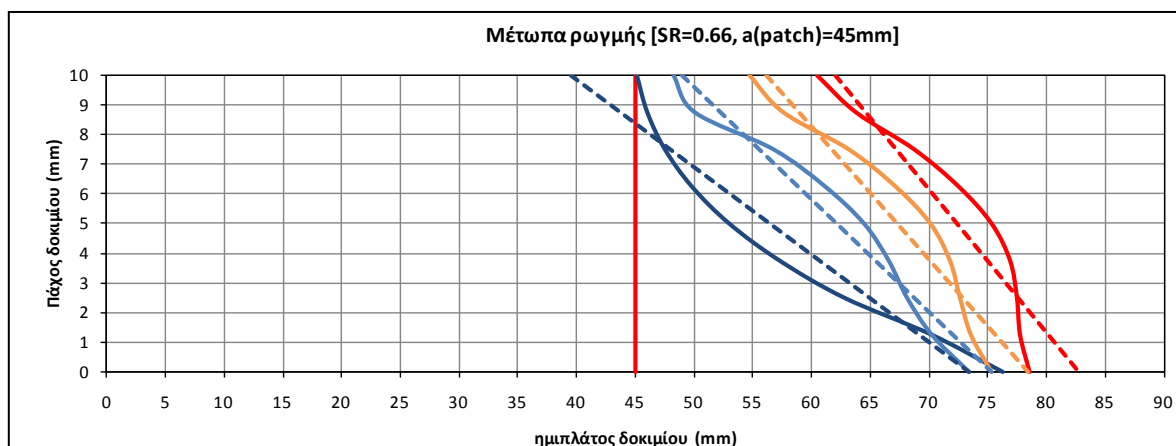
Σχήμα 4.9



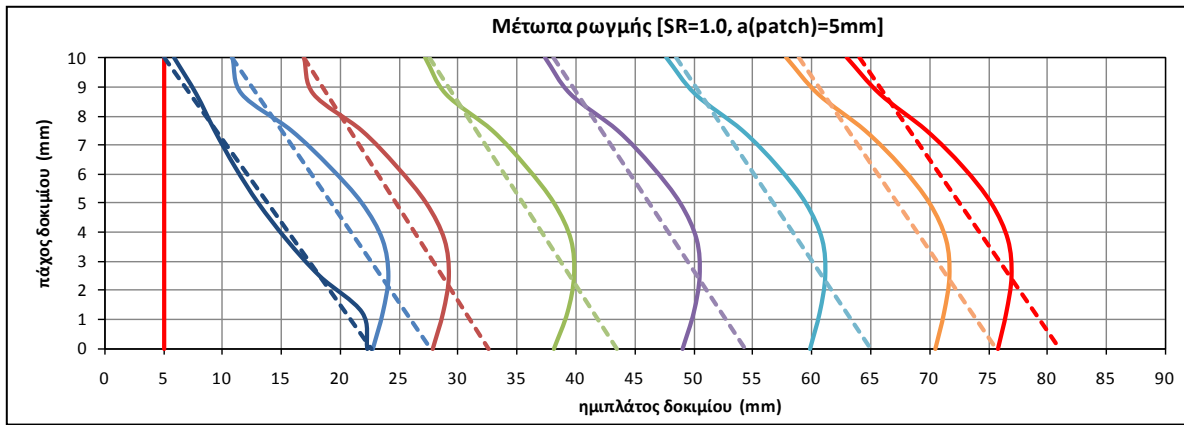
Σχήμα 4.10



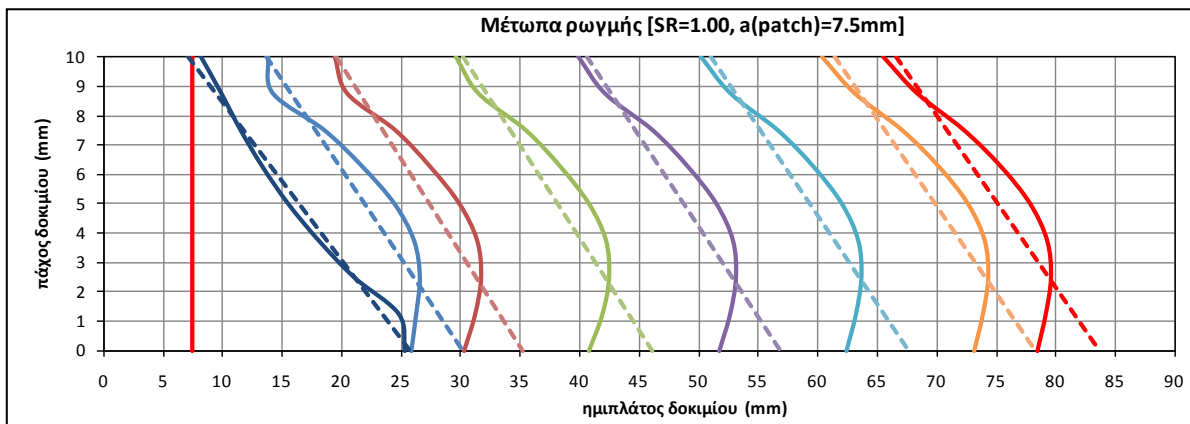
Σχήμα 4.11



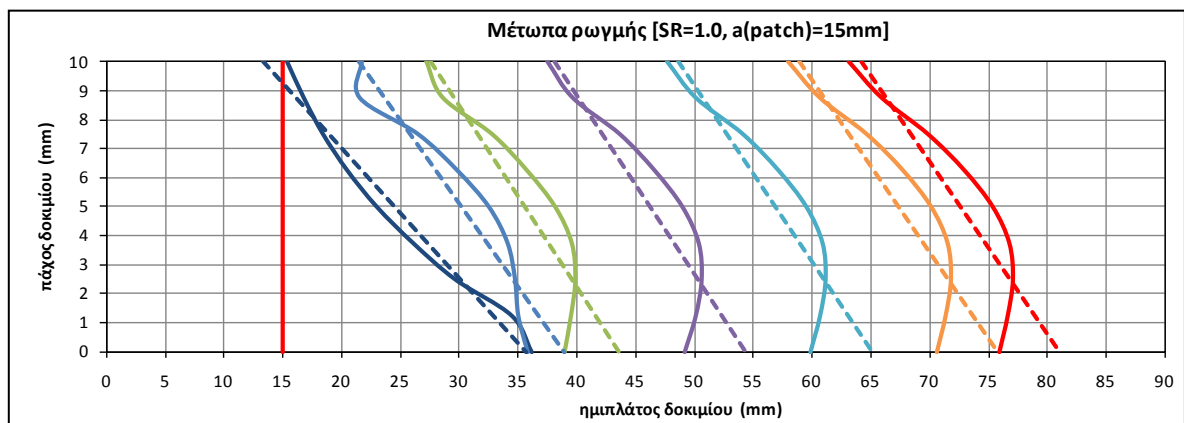
Σχήμα 4.12



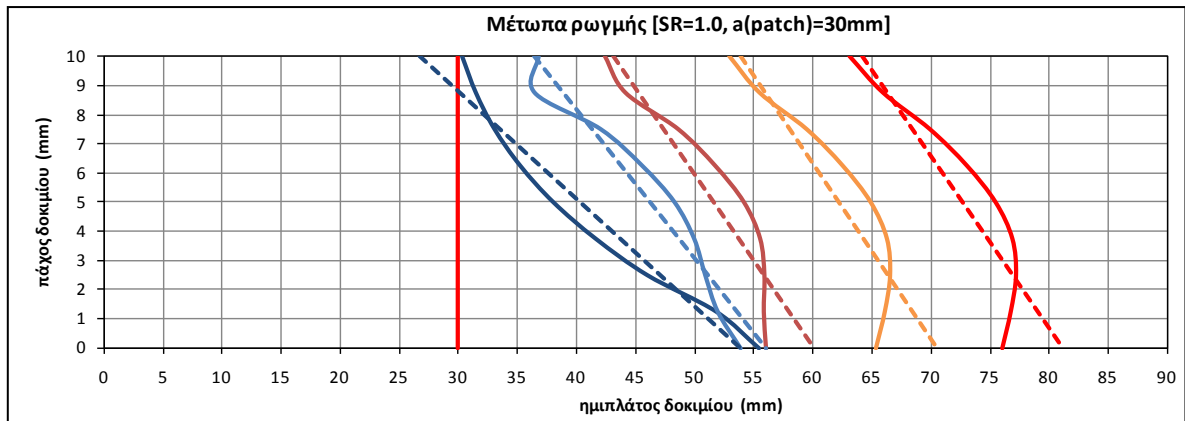
Σχήμα 4.13



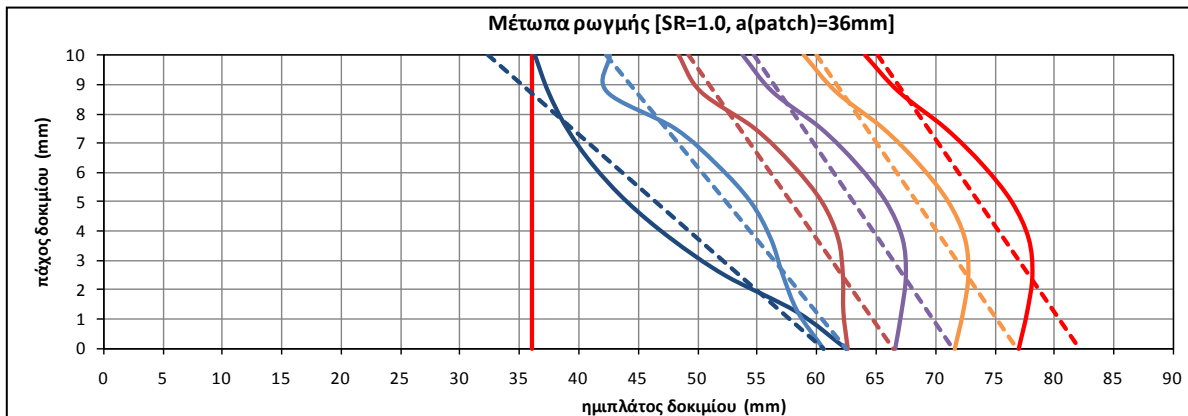
Σχήμα 4.14



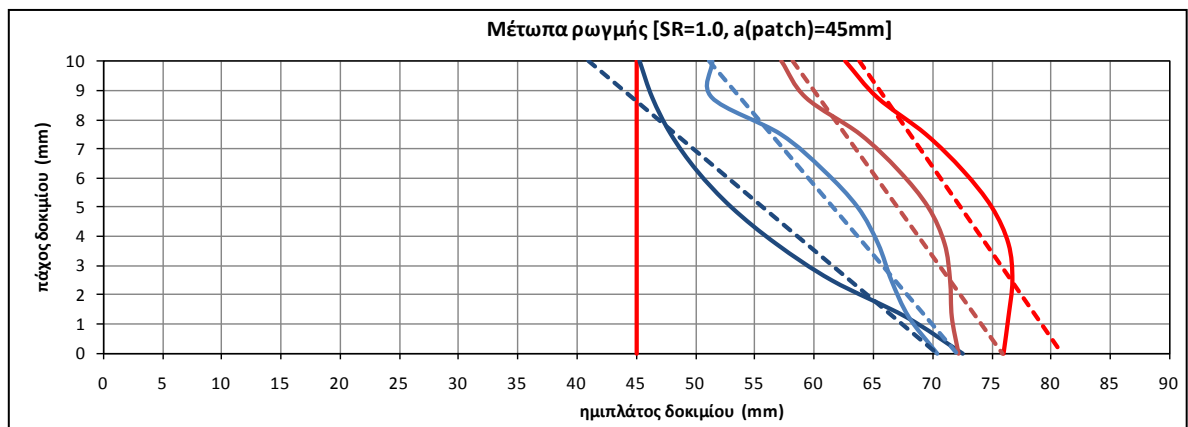
Σχήμα 4.15



Σχήμα 4.16



Σχήμα 4.17



Σχήμα 4.18

Όπως παρατηρείται από τα παραπάνω σχήματα (4.1 - 4.18), η κλίση του μετώπου της ρωγμής γίνεται αρκετά μεγάλη αμέσως μετά την εφαρμογή του επιθέματος και έπειτα διαφοροποιείται ελάχιστα με την αύξηση του μήκους ρωγμής. Αυτό συμβαίνει διότι με την

εφαρμογή του επιθέματος, αλλάζει εντελώς το τασικό πεδίο της δομής με αποτέλεσμα στο άνω άκρο το επίθεμα να απορροφά ένα μεγάλο μέρος των τάσεων και η ρωγμή να μεγαλώνει ελάχιστα, ενώ στη μη ενισχυμένη πλευρά η ρωγμή να διαδίδεται πολύ γρήγορα. Στη συνέχεια, εφόσον στο μη ενισχυμένο άκρο της πλάκας υπάρχει μεγάλη γεωμετρική ελευθερία, η δομή στη μη ενισχυμένη πλευρά αδυνατεί να απορροφήσει τις τάσεις, με αποτέλεσμα οι τάσεις να παρουσιάζουν μέγιστο κοντά στο εσωτερικό του πάχους της πλάκας, και πιο συγκεκριμένα μεταφέρεται προς το μέσο του πάχους της κατά 3/10, όπως φαίνεται και στα σχήματα 4.1-4.18. Το γεγονός αυτό οδηγεί στην ταχύτερη διάδοση της ρωγμής σε εκείνη την περιοχή.

Η αρχική κλίση του μοντελοποιημένου μετώπου ρωγμής γίνεται πιο έντονη όσο αυξάνεται το μέγεθος  $a(\text{patch})$ . Αυτό συμβαίνει διότι όσο μεγαλύτερο είναι το  $a(\text{patch})$  τόσο λιγότερες τάσεις μπορεί να απορροφήσει η κατασκευή με αποτέλεσμα με την εφαρμογή του επιθέματος να διαδίδεται η ρωγμή όλο και γρηγορότερα στο μη ενισχυμένο άκρο. Λόγω του γεγονότος ότι οι τάσεις παρουσιάζουν μέγιστο κοντά στο 3/10 του πάχους κοντά στο μη ενισχυμένο άκρο, κατά την διάδοση της ρωγμής σε μεγάλα μήκη, το μέτωπο παρουσιάζει έντονη καμπυλότητα στις περισσότερες περιπτώσεις στο μη ενισχυμένο άκρο και η ρωγμή έχει μικρότερο μήκος εκεί. Η συμπεριφορά αυτή του δοκιμίου συμβαίνει πιο έντονα όσο αυξάνεται ο SR της δομής. Το εύρημα αυτό της μελέτης, έχει παρατηρηθεί και στην μελέτη [15], όπου έχει φωτογραφηθεί δοκίμιο χάλυβα μετά από δοκιμή αντοχής σε κόπωση, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.19.



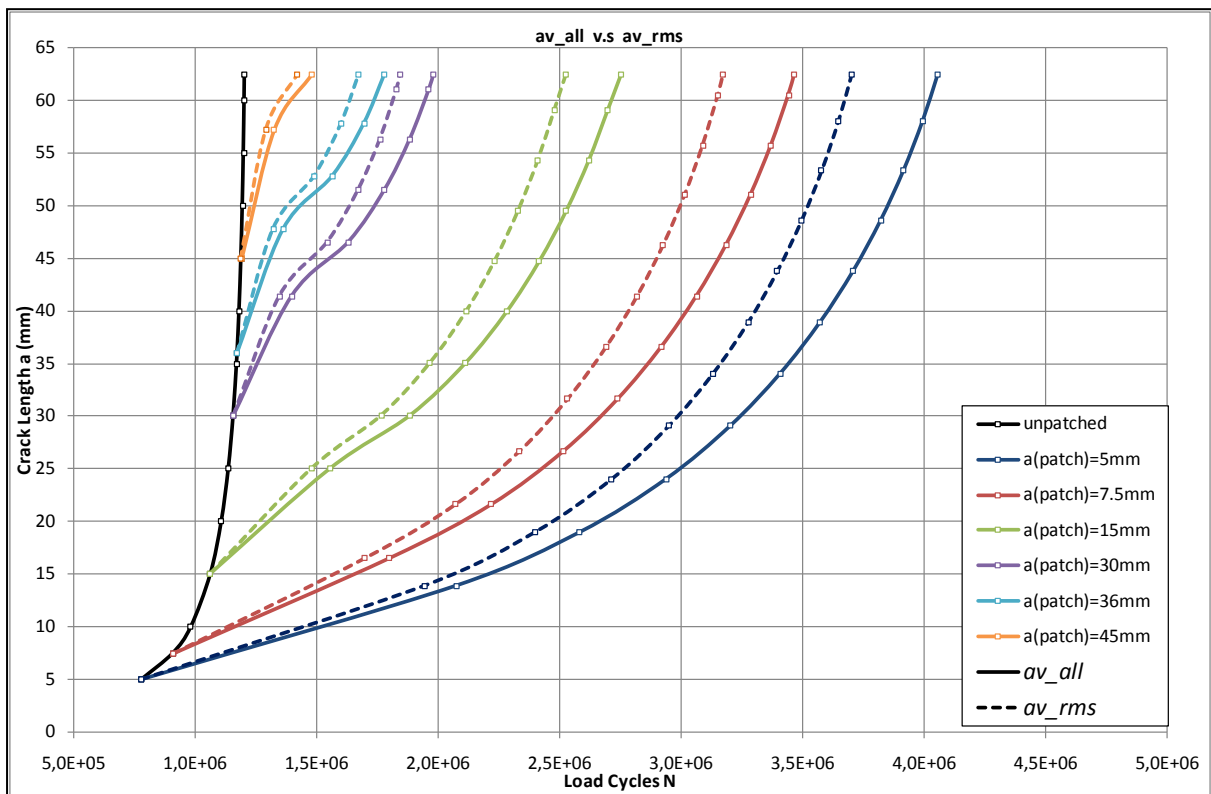
Σχήμα 4.19

Στο ενισχυμένο άκρο της δομής παρατηρείται ότι η ρωγμή διαδίδεται αρκετά αργά όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, καθώς το επίθεμα απορροφά μέρος των τάσεων, ανακουφίζοντας έτσι την μεταλλική πλάκα όχι μόνο στο άκρο της πλάκας αλλά και στο εσωτερικό της στην περιοχή κοντά στο επίθεμα. Αυτή η απότομη αλλαγή της καμπυλότητας στο άνω μέρος της μορφής του μετώπου της ρωγμής που μαρτυρά το παραπάνω φαινόμενο φαίνεται να εξασθενεί και να ομαλοποιείται σταδιακά κατά την διάδοση της ρωγμής, δηλαδή στα επόμενα βήματα. Το φαινόμενο αυτό είναι όλο και πιο έντονο με την

αύξηση του SR καθώς το επίθεμα έχει την ικανότητα να απορροφήσει σε μεγαλύτερο βαθμό τις τάσεις.

Τέλος παρατηρείται ότι ανεξάρτητα με το SR της δομής και το μέγεθος  $a(\text{patch})$  η τελική μορφή του μετώπου της ρωγμής είναι παρόμοια.

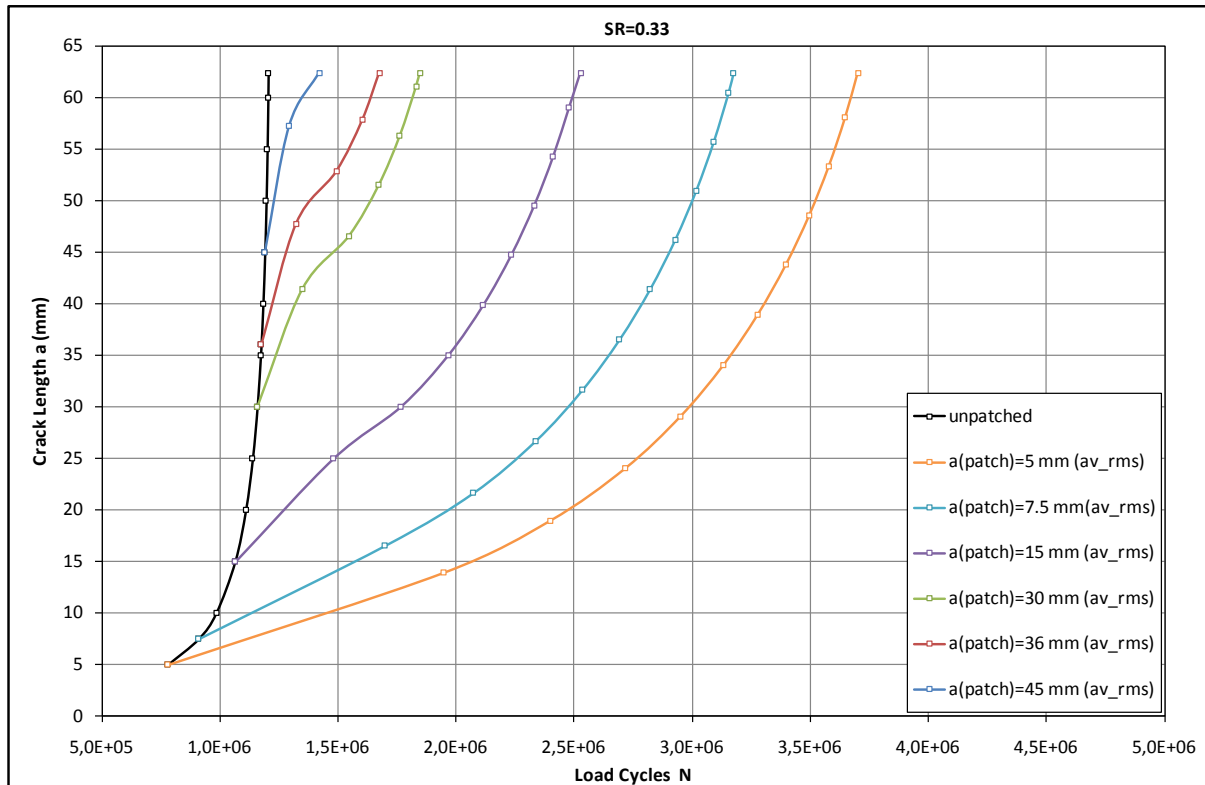
Στη μελέτη που έγινε, τα αποτελέσματα  $av_{rms}$  εμφανίζουν πάντα μικρότερες τιμές σε σχέση με τα αποτελέσματα  $av_{all}$ , πράγμα που σημαίνει ότι εξάγει πιο συντηρητικά αποτελέσματα. Ειδικότερα τα αποτελέσματα  $av_{rms}$  παρουσιάζουν μειωμένα αποτελέσματα έως και 8.75% στην περίπτωση όπου  $SR=0.33$  και  $a(\text{patch})=5\text{ mm}$  σε σχέση με τα αποτελέσματα που προέρχονται από τον μέσο όρο  $av_{all}$ . Με την αύξηση του SR και του  $a(\text{patch})$  η διαφορά αυτή μειώνεται αρκετά, και στην περίπτωση όπου είναι  $SR=1.0$  και  $a(\text{patch})=45\text{ mm}$  η διαφορά αυτή μειώνεται αρκετά, φτάνοντας έως το 2.8%. Στο σχήμα 4.20 παρουσιάζονται καμπύλες του μήκους ρωγμής σε σχέση με τους κύκλους φορτίου (N), για την περίπτωση  $SR=0.33$ , για διάφορα  $a(\text{patch})$ , και με τους δύο μέσους όρους ( $av_{all}$ ,  $av_{rms}$ ).



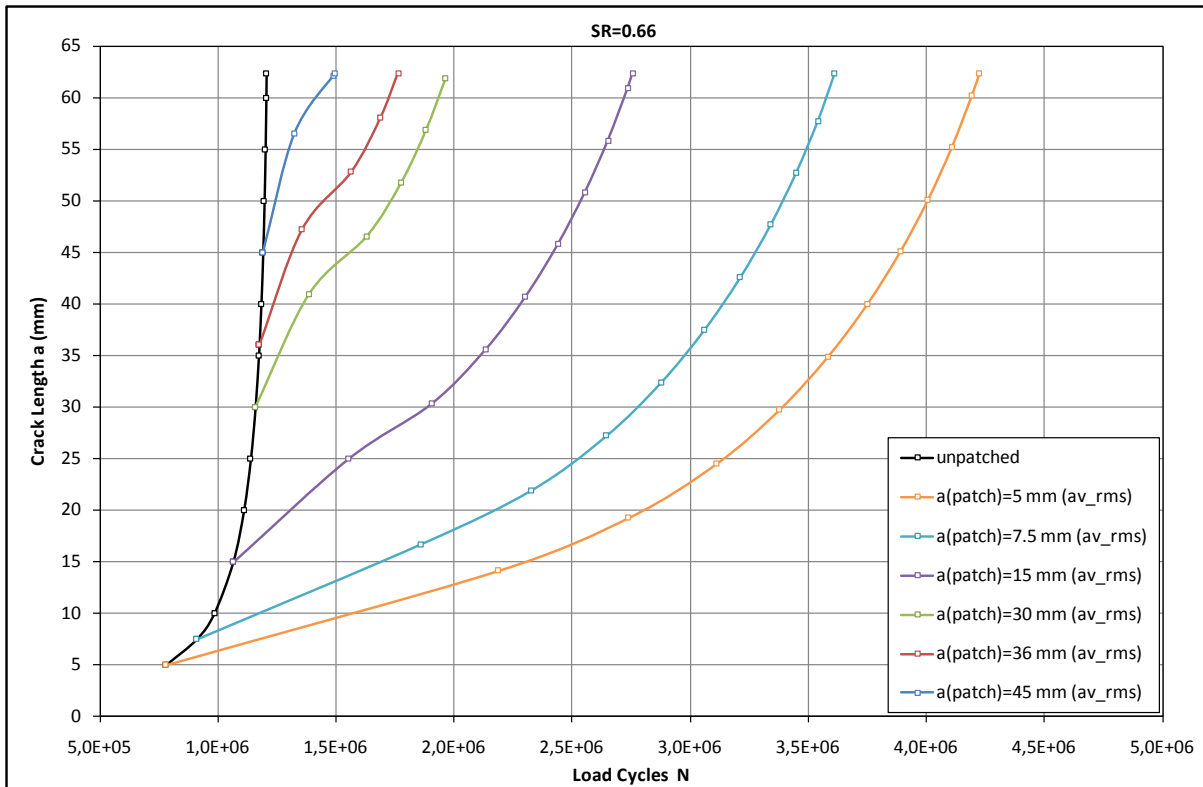
Σχήμα 4.20



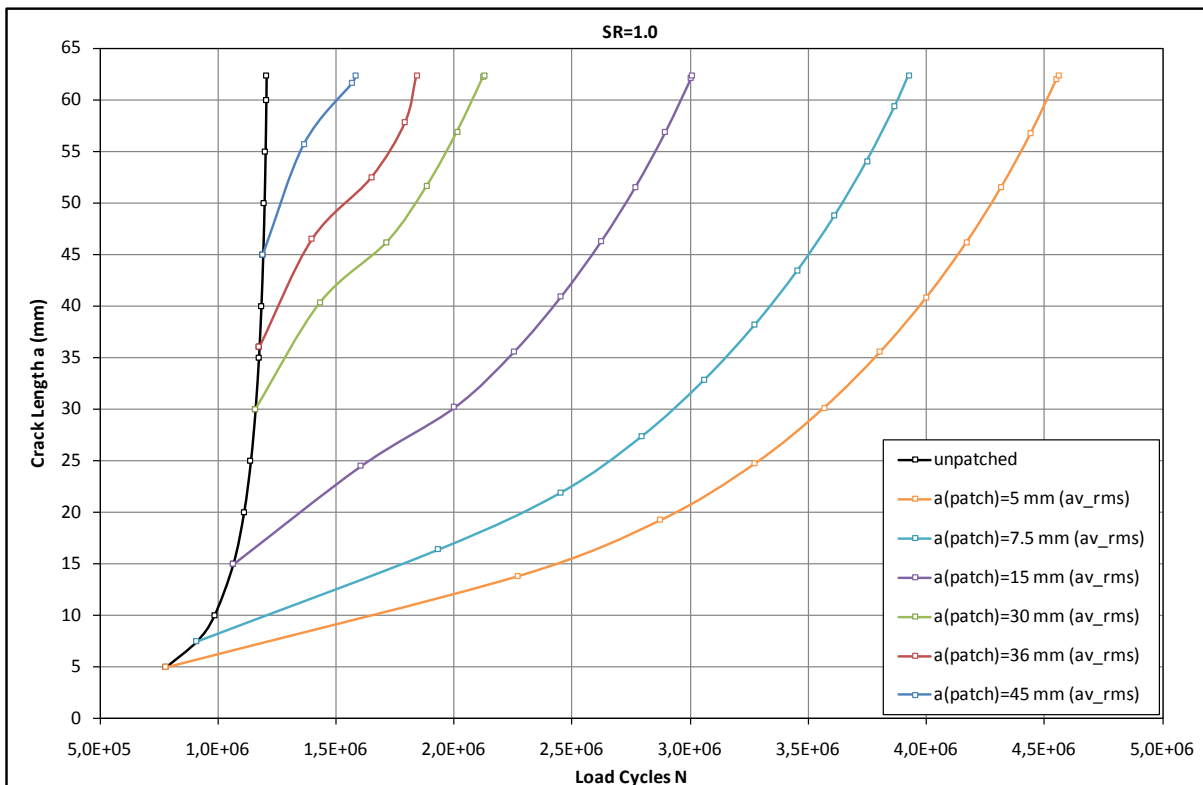
Στη συνέχεια της μελέτης όλα τα αποτελέσματα που προέρχονται από μέσους όρους του ΣΕΤ θα προέρχονται από το μέσο όρο  $av_{rms}$ . Στα σχήματα 4.21, 4.22, 4.23 παρουσιάζονται οι καμπύλες  $a-N$ , για  $SR=0.33$ ,  $SR=0.66$  και  $SR=1.0$ . Σε όλα τα σχήματα για λόγους σύγκρισης των αποτελεσμάτων, η μέθοδος έχει τερματιστεί όταν το μήκος της ρωγμής φτάσει στα 62.5 mm. Για την συγκεκριμένη περίπτωση που εξετάζεται σε αυτήν την εργασία έχει υπολογιστεί ως κρίσιμο μήκος ρωγμής χωρίς το επίθεμα,  $a_{cr}=57$  mm.



Σχήμα 4.21

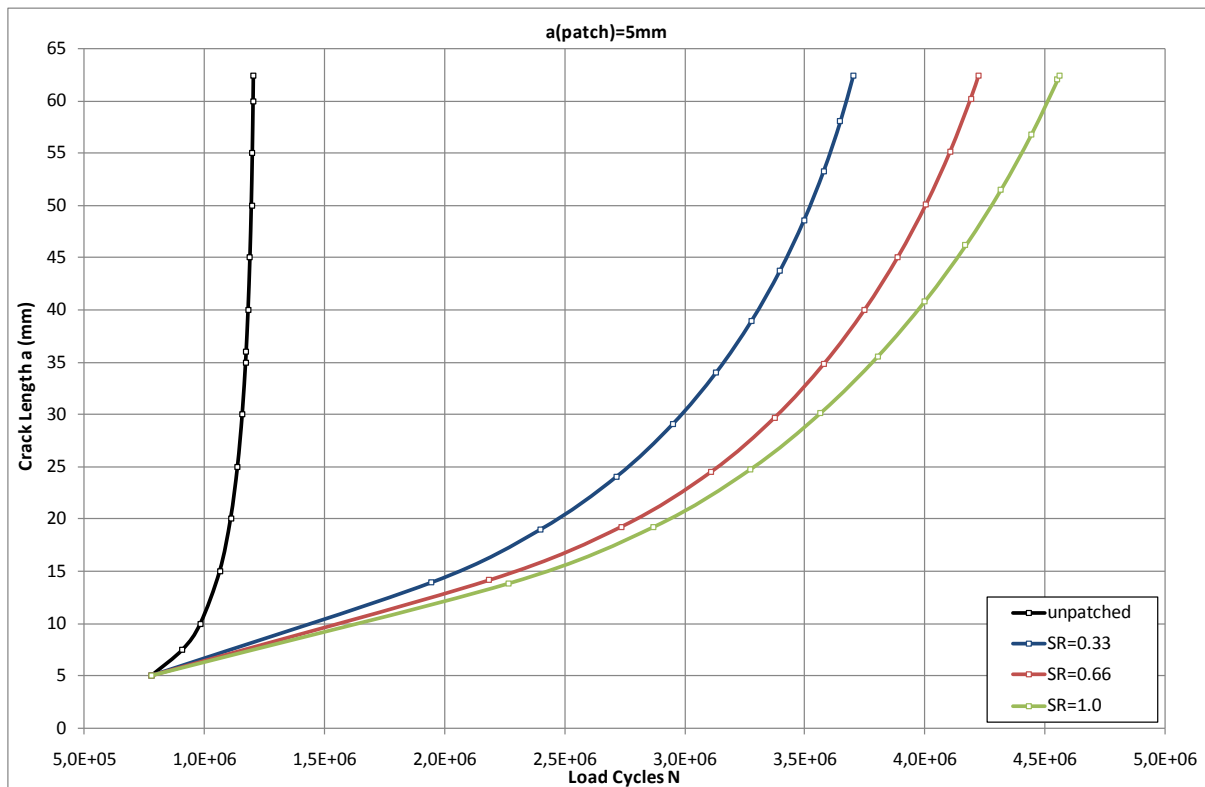


Σχήμα 4.22

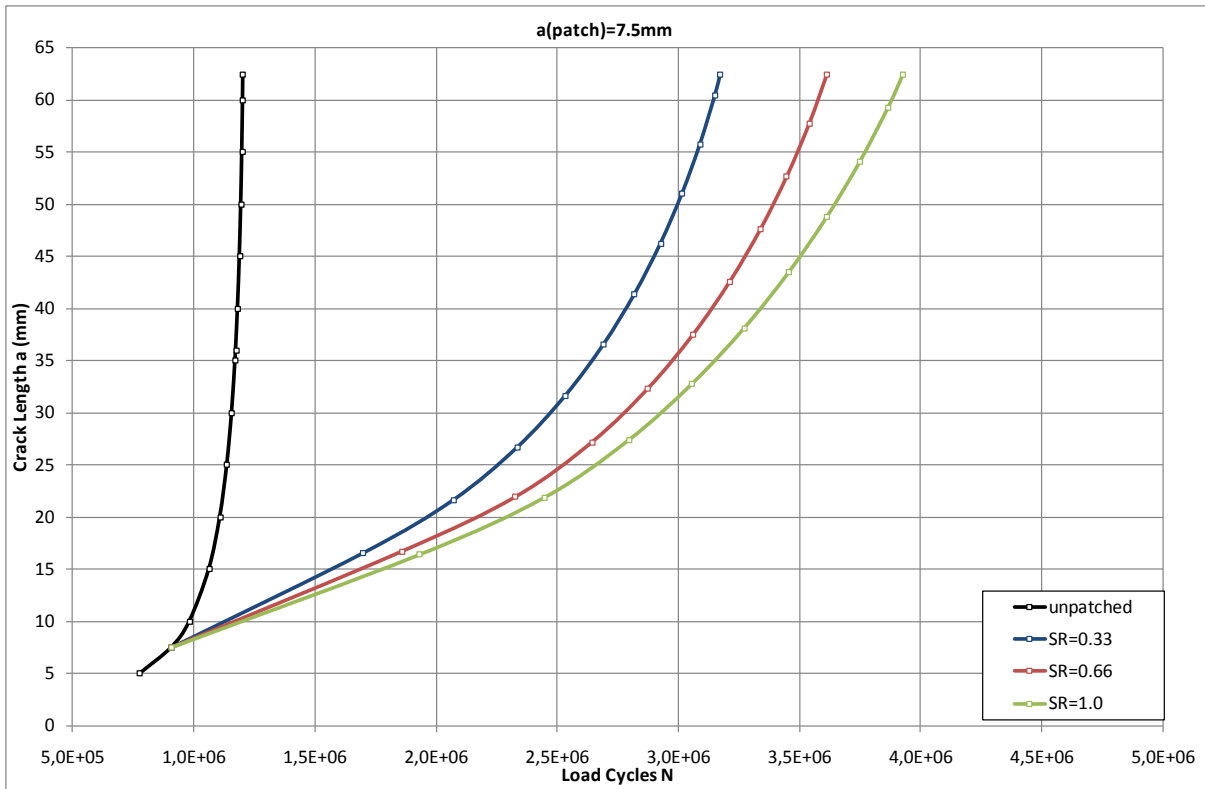


Σχήμα 4.23

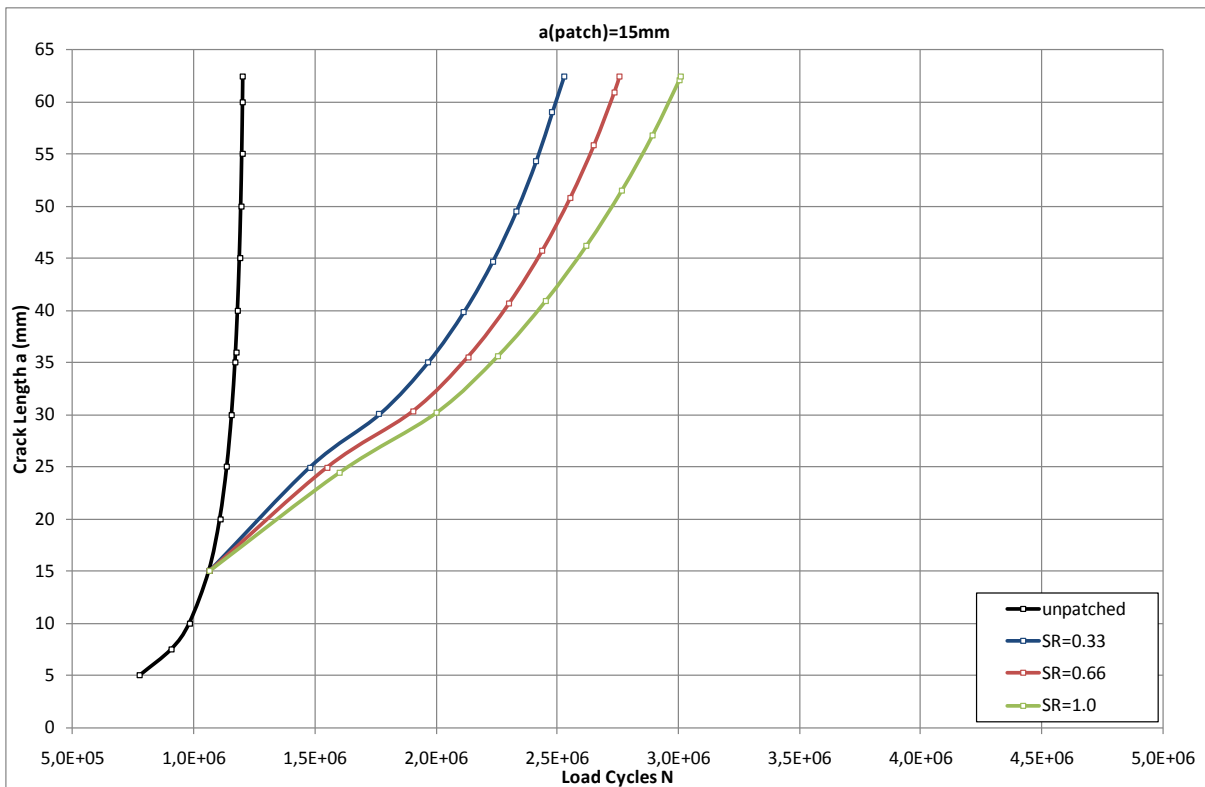
Στα σχήματα 4.24 - 4.29 παρουσιάζονται οι καμπύλες a-N για a(patch)=5, 7.5, 15, 30, 36, 45 mm αντίστοιχα, ομαδοποιημένες κατά SR.



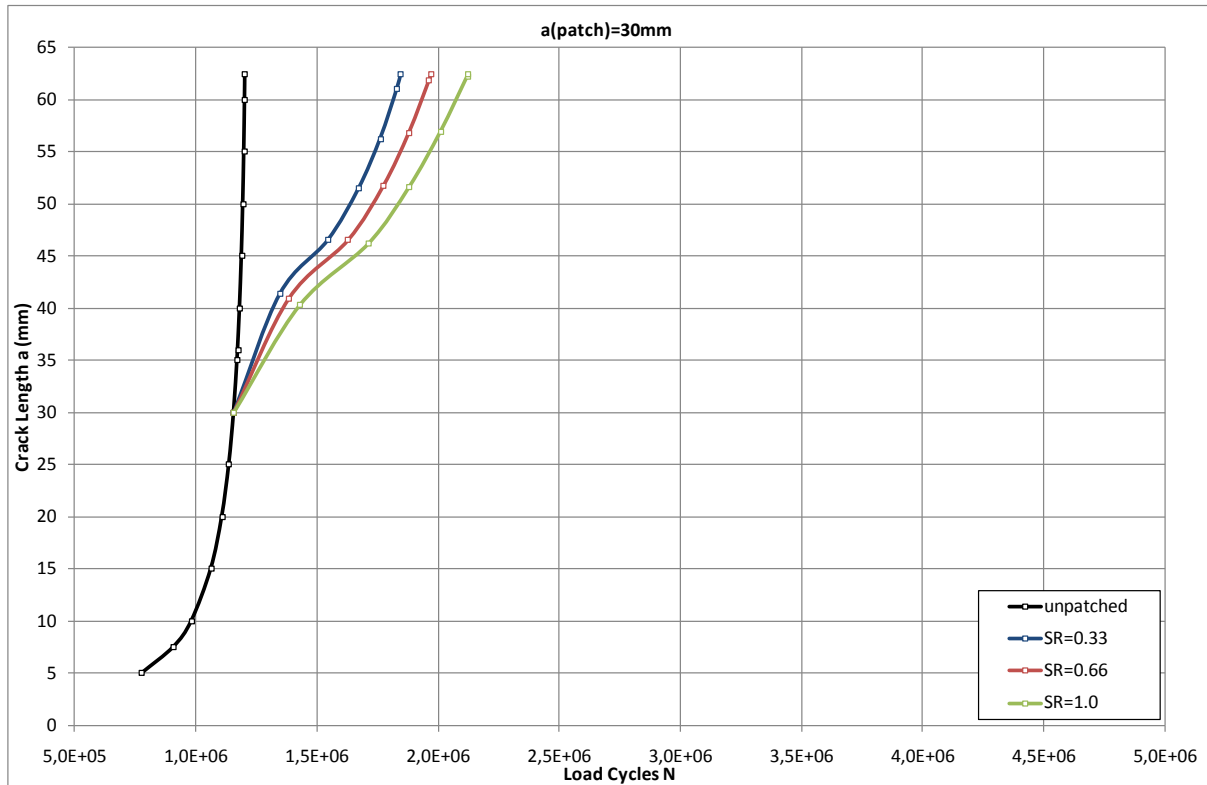
Σχήμα 4.24



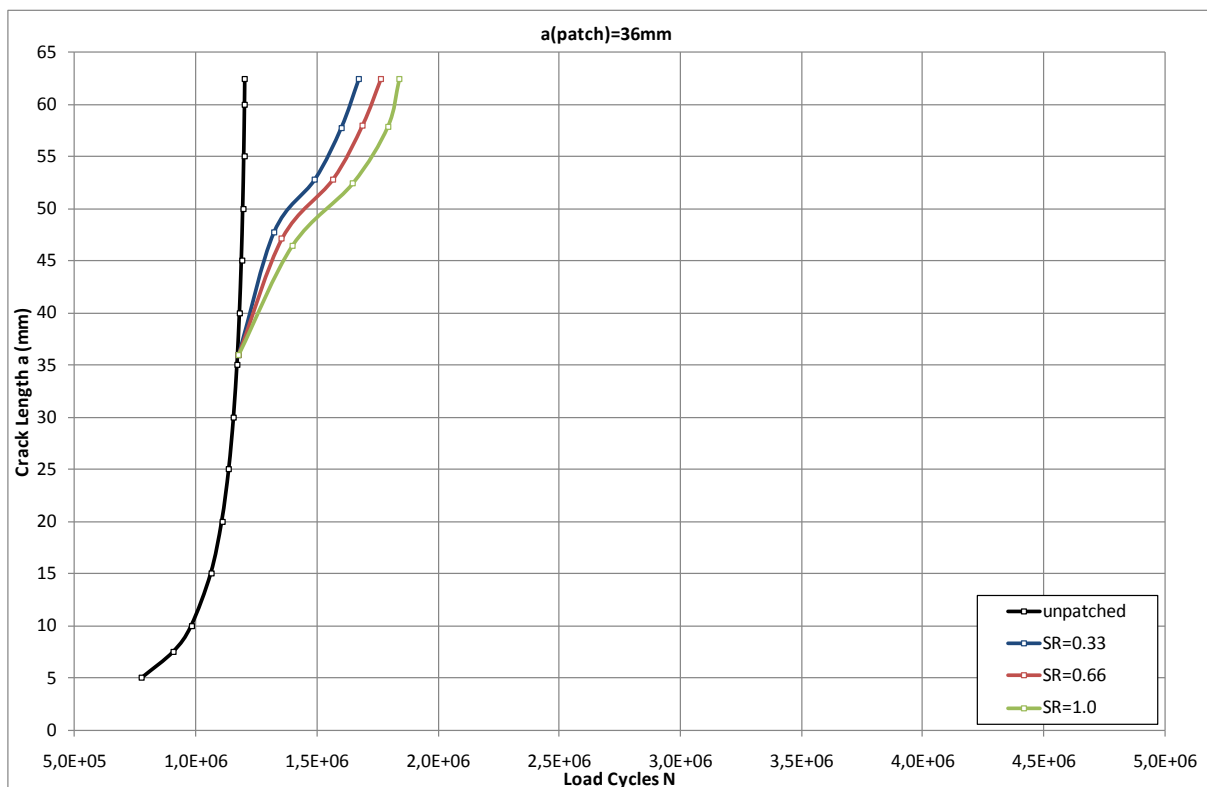
Σχήμα 4.25



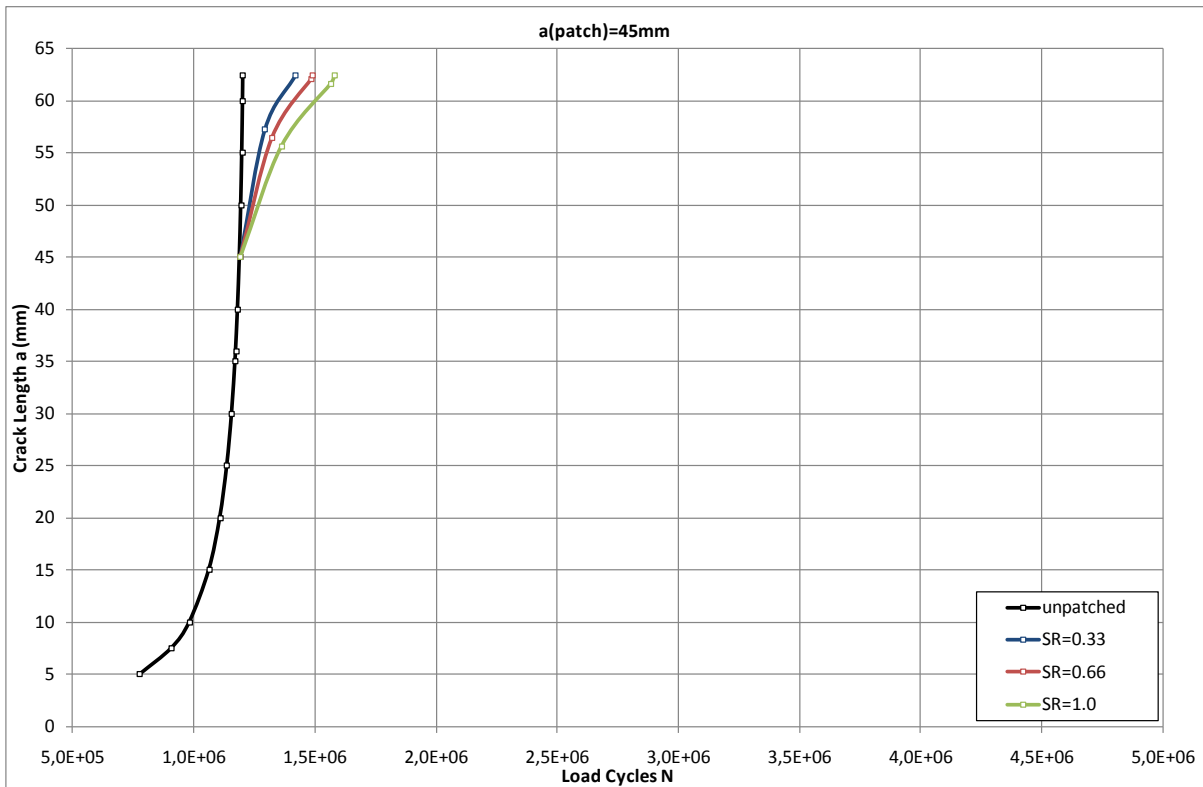
Σχήμα 4.26



Σχήμα 4.27



Σχήμα 4.28



Σχήμα 4.29

Παρατηρείται ότι, ενώ για πολύ μικρά  $a(patch)$  η καμπύλη  $a-N$  δεν παρουσιάζει καμία αλλαγή στην καμπυλότητά της, από  $a(patch)=15$  mm έως και  $a(patch)=45$  mm, η καμπύλη παρουσιάζει αλλαγή στην καμπυλότητά της στην αρχή της. Αυτό γίνεται διότι η ρωγμή, με την εφαρμογή του επιθέματος σε μεγάλα  $a(patch)$ , διαδίδεται αρκετά ταχύτερα στο μη ενισχυμένο άκρο της πλάκας, όπως φαίνεται και στα διαγράμματα 4.1 - 4.18, δημιουργώντας έτσι μια μεγάλη κλίση στο προς μοντελοποίηση μέτωπο ρωγμής, γεγονός που οδηγεί σε ταχύτερη διάδοση της ρωγμής στα αρχικά βήματα της μεθόδου, μέχρι η κλίση να σταθεροποιηθεί ή να αυξάνεται με μικρότερους ρυθμούς, οπότε μειώνεται και η ταχύτητα διάδοσης της ρωγμής. Όταν το επίθεμα τοποθετηθεί ενώ η ρωγμή έχει διαδοθεί σε πολύ μεγάλο μήκος, (πχ.  $a(patch)=45$  mm), η κλίση δεν προλαβαίνει να σταθεροποιηθεί μέχρι να τερματιστεί η μέθοδος, και έτσι δεν υπάρχει αλλαγή στην καμπυλότητα, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.29. Το φαινόμενο αυτό επηρεάζεται άμεσα από το βήμα προχώρησης του μήκους ( $\Delta a_{ref}$ ) της ρωγμής, όπως αυτό ορίζεται στο εδάφιο 2.6, το οποίο χρησιμοποιείται για κάθε επόμενο βήμα της μεθόδου. Πιο συγκεκριμένα όσο μικρότερο είναι το βήμα προχώρησης της ρωγμής, τόσο λιγότερο έντονα εμφανίζεται το φαινόμενο που περιγράφηκε πιο πάνω διότι η καμπυλότητα του άκρου της ρωγμής αλλάζει πιο ομαλά σε μικρότερα  $\Delta a_{ref}$  και άρα η καμπύλη  $a-N$  παρουσιάζει αρκετά μικρή αλλαγή στην

καμπυλότητά της. Αυτό φαίνεται στο σχήμα 2.26 όπου φαίνεται η διαφορά στην καμπυλότητα της καμπύλης a-N σε σχέση με το  $\Delta\alpha_{ref}$ .

Στον πίνακα 4.2 εμφανίζεται ο αριθμός των κύκλων που χρειάζονται για να διαδοθεί η ρωγμή από 5 mm έως τα 60 mm, για όλα τα a(patch) και τους SR που μελετήθηκαν, σε σύγκριση με τη μη ενισχυμένη μεταλλική πλάκα.

Πίνακας 4.2

Επίδραση του επιθέματος στην αντοχή του δοκιμίου			
a(patch)	SR/πάχος επιθέματος		
	0.33/4.89 mm	0.66/9.78 mm	1.0/14.81 mm
5 mm	+205 %	+248 %	+275 %
7.5 mm	+161 %	+197 %	+222 %
15 mm	+107 %	+126 %	+146 %
30 mm	+51 %	+61 %	+73 %
36 mm	+36 %	+43 %	+51 %
45 mm	+13 %	+19 %	+26 %

Όπως φαίνεται στον πίνακα 4.2 και αναμενόταν, η αύξηση του SR δρα ευεργετικά στην αντοχή των δοκιμίων, και η αύξηση σε κύκλους φορτίου μπορεί να φτάσει το 275% στην περίπτωση όπου το επίθεμα τοποθετηθεί όταν η ρωγμή έχει μήκος a(patch)=5 mm και το επίθεμα έχει πάχος 14.81 mm. Αξίζει να σημειωθεί ότι από τα ευρήματα της μελέτης φαίνεται ότι το μήκος της ρωγμής όπου θα τοποθετηθεί το επίθεμα είναι πιο σημαντική παράμετρος από το πάχος του επιθέματος. Πιο συγκεκριμένα αναφέρεται ότι προσφέρει μεγαλύτερη αντοχή στο δοκίμιο η ενίσχυση του με ένα λεπτό επίθεμα (4.89 mm), όταν η ρωγμή έχει μήκος 5 mm, από ότι αν το δοκίμιο ενισχυθεί με ένα παχύ επίθεμα (14.81 mm) και η ρωγμή έχει μήκος 15 mm. Όταν το a(patch)=45 mm (δηλαδή το μήκος της ρωγμής όταν θα τοποθετηθεί το επίθεμα φτάσει το 80 % του κρίσιμου μήκους της) τότε η ενίσχυση με επίθεμα δεν προσφέρει μεγάλη βελτίωση στην αντοχή της μεταλλικής πλάκας, έτσι η αύξηση σε κύκλους φόρτισης του δοκιμίου φτάνει το 13 %, 19 % και 26 % στην περίπτωση που το επίθεμα είναι 4.89 mm, 9.78 mm και 14.81 mm αντίστοιχα.

Στον πίνακα 4.3 παρουσιάζονται οι διαφορές σε κύκλους φορτίου για κάθε a(patch) μεταξύ των επιθεμάτων με διαφορετικό πάχος (SR), δηλαδή η αύξηση σε κύκλους φορτίου που χρειάζονται ώστε η ρωγμή να φτάσει τα 60 mm αν αυξηθεί ο SR.

Πίνακας 4.3

Επίδραση του SR στην αντοχή του δοκιμίου			
a(patch)	SR/πάχος επιθέματος		
	0.33/4.89 mm	<sup>1</sup> 0.66/9.78 mm	<sup>2</sup> 1.0/14.81 mm
5 mm	100 %	+14 %	+7.7 %
7.5 mm	100 %	+13.6 %	+8.5 %
15 mm	100 %	+9.2 %	+8.7 %
30 mm	100 %	+6.4 %	+7.5 %
36 mm	100 %	+5.1 %	+5.5 %
45 mm	100 %	+4.7 %	+5.9 %

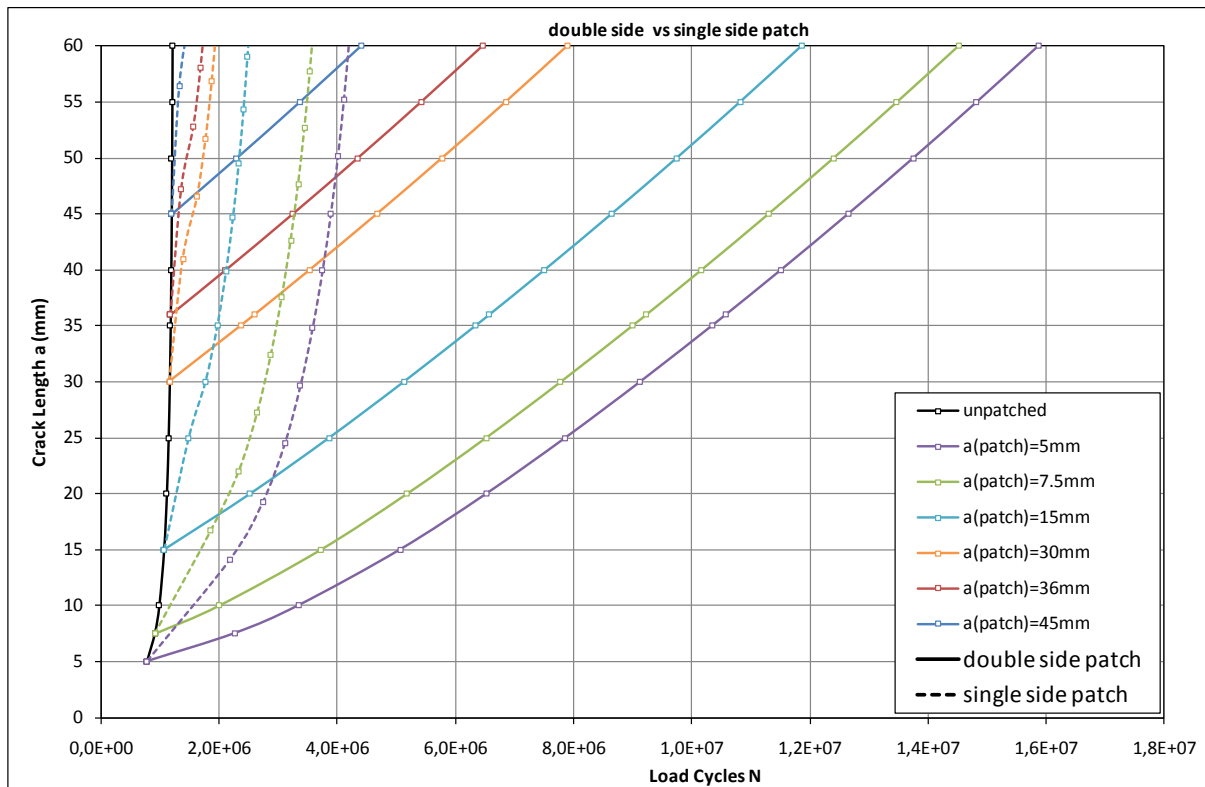
Από τον πίνακα 4.3 παρατηρείται ότι δεν μπορεί να επιτευχθεί μεγάλη βελτίωση της αντοχής με την αύξηση του πάχους του επιθέματος. Πιο συγκεκριμένα η μεγαλύτερη αύξηση που μπορεί να επιτευχθεί με αύξηση του πάχους του επιθέματος είναι 14 %, στην περίπτωση που διπλασιαστεί το πάχος του επιθέματος από 4.89 mm στα 9.78 mm και το επίθεμα τοποθετηθεί όταν η ρωγμή έχει αρκετά μικρό μήκος δηλαδή όταν  $a(\text{patch})=5$  mm. Όσο μεγαλώνει το  $a(\text{patch})$  τόσο λιγότερη αύξηση σε κύκλους φόρτισης παρατηρείται με την αύξηση του SR. Συγκεκριμένα όταν το  $a(\text{patch})$  φτάσει σε ποσοστό άνω του 60 % του  $a_{cr}$  η αύξηση αυτή σταθεροποιείται κοντά στο 5 %. Τέλος παρατηρείται εν γένει μεγαλύτερη αύξηση στην αντοχή του δοκιμίου αυξάνοντας τον SR από 0.33 σε 0.66 από ό,τι αυξάνοντας τον SR από 0.66 σε 1.0. Ειδικότερα, για μικρά  $a(\text{patch})$ , αυτή η αύξηση είναι αρκετά μεγαλύτερη.

Στη συνέχεια γίνεται σύγκριση μεταξύ της μονόπλευρης και της αμφίπλευρης ενίσχυσης. Ο SR και για τις δύο περιπτώσεις έχει επιλεγεί να είναι  $SR=0.66$ , όπου το επίθεμα έχει πάχος 9.78 mm στην μονόπλευρη ενίσχυση, ενώ στην περίπτωση της αμφίπλευρης ενίσχυσης υπάρχει επίθεμα πάχους 4.89 mm και στις δύο πλευρές της μεταλλικής πλάκας. Στο σχήμα 4.20 παρατίθεται σχήμα που παρουσιάζει την διαφορά σε κύκλους φορτίου σε συνάρτηση με το μήκος της ρωγμής, για διάφορα  $a(\text{patch})$ , για τις δύο περιπτώσεις.

<sup>1</sup> Τα ποσοστά στην στήλη αυτή παρουσιάζονται ως αύξηση σε κύκλους φόρτισης, επιπρόσθετα των κύκλων φόρτισης της περίπτωσης όπου  $SR=0.33$ .

<sup>2</sup> Τα ποσοστά στην στήλη αυτή παρουσιάζονται ως αύξηση σε κύκλους φόρτισης, επιπρόσθετα των κύκλων φόρτισης της περίπτωσης όπου  $SR=0.66$ .





Σχήμα 4.30

Στον πίνακα 4.4 παρουσιάζεται η αύξηση σε κύκλους φορτίου που χρειάζονται επιπρόσθετα για να φτάσει το μήκος της ρωγμής τα 60 mm, εάν η ενίσχυση είναι αμφίπλευρη αντί μονόπλευρη.

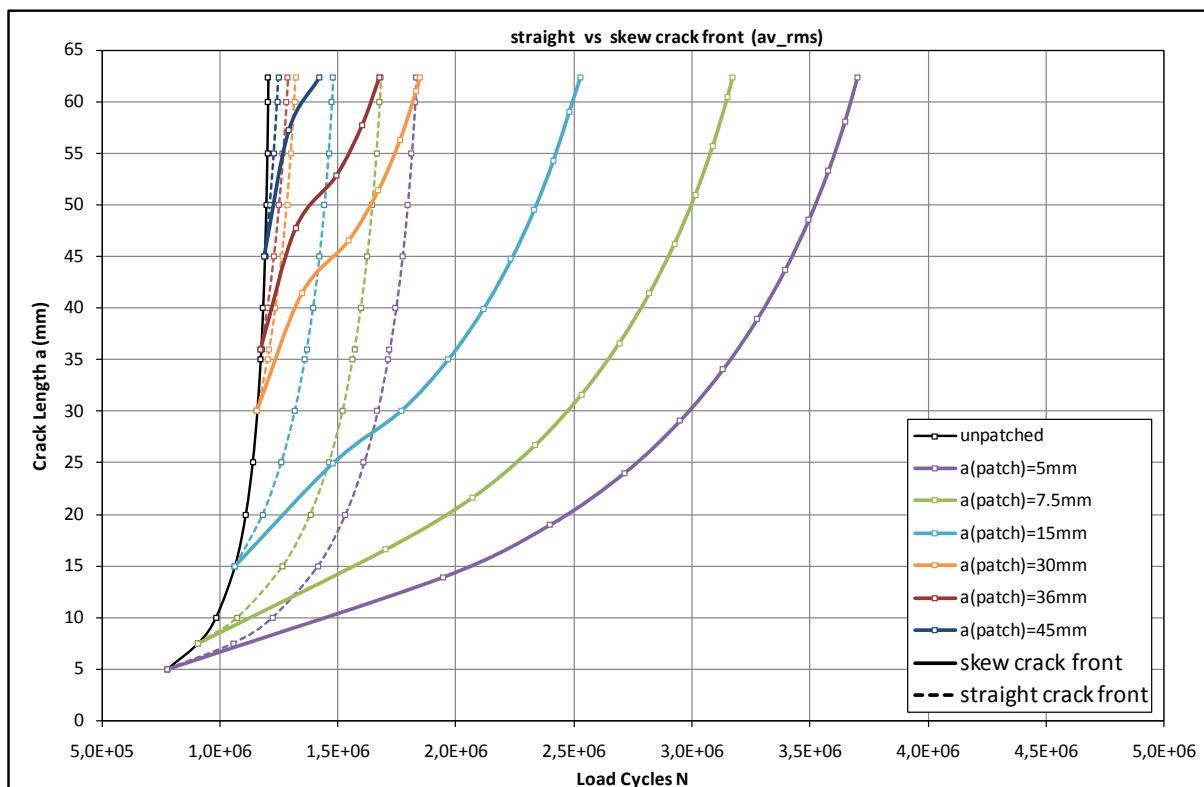
Πίνακας 4.4

Επίδραση του τρόπου ενίσχυσης στην αντοχή του δοκιμίου		
$a(\text{patch})$	Μονόπλευρη ενίσχυση	Αμφίπλευρη ενίσχυση
5 mm	100 %	+287 %
7.5 mm	100 %	+315 %
15 mm	100 %	+395 %
30 mm	100 %	+325 %
36 mm	100 %	+294 %
45 mm	100 %	+228 %

Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρείται ότι η αμφίπλευρη ενίσχυση είναι πιο αποδοτική από τη μονόπλευρη ενίσχυση. Η διαφορά στην αντοχή της δομής μπορεί να φτάσει έως και 395 %. Πιο συγκεκριμένα φαίνεται από το σχήμα 4.30 ότι το δοκίμιο αντέχει

περισσότερους κύκλους φορτίου στην αμφίπλευρη ενίσχυση όταν  $a(\text{patch})=45 \text{ mm}$ , από ότι αν ενισχυθεί το δοκίμιο μονόπλευρα όταν  $a(\text{patch})=5 \text{ mm}$ . Ουσιαστικά η διαφορά αυτή οφείλεται στις τιμές του ΣΕΤ που στην αμφίπλευρη ενίσχυση είναι πολύ μικρές και φτάνουν έως και το μισό των τιμών που εξάγονται από την μονόπλευρη ενίσχυση.

Στο σχήμα 4.31 παρουσιάζεται μια σύγκριση μεταξύ της μοντελοποίησης του πλαγίου μετώπου ρωγμής και του κατακόρυφου μετώπου ρωγμής. Στο σχήμα παρατίθεται η καμπύλη  $a-N$  και για τις δύο περιπτώσεις.



Σχήμα 4.31

Στον πίνακα 4.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που εξάγονται από τους δύο τρόπους μοντελοποίησης εμφανίζοντας την αύξηση σε κύκλους φορτίου, στην περίπτωση της μοντελοποίησης του πλαγίου μετώπου ρωγμής.

Πίνακας 4.5

Επίδραση του τρόπου μοντελοποίησης στα αποτελέσματα		
a(patch)	Ευθύ μέτωπο ρωγμής	Πλάγιο μέτωπο ρωγμής
5 mm	100 %	+102 %
7.5 mm	100 %	+88.5 %
15 mm	100 %	+68 %
30 mm	100 %	+39.6 %
36 mm	100 %	+30 %
45 mm	100 %	+13.8 %

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η μοντελοποίηση του πλαγίου μετώπου ρωγμής παρουσιάζει την δομή ως πιο ανθεκτική σε κόπωση έναντι της μοντελοποίησης του κατακόρυφου μετώπου ρωγμής. Η διαφορά αυτή είναι 13.8 % για  $a(\text{patch})=45$  mm, και φτάνει έως και 102 % όταν  $a(\text{patch})=5$  mm. Αυτό είναι λογικό καθώς μοντελοποιώντας το μέτωπο ρωγμής ως κατακόρυφο και ευθύ, δεν υπολογίζεται το γεγονός ότι στην ενισχυμένη πλευρά της δομής, η ρωγμή διαδίδεται αρκετά πιο αργά σε σχέση με την κάτω πλευρά. Θεωρείται έτσι ότι η ρωγμή διαδίδεται με την ίδια ταχύτητα κατά το πάχος της πλάκας, εξάγοντας έτσι αποτελέσματα που παρουσιάζουν αρκετά μειωμένη την αντοχή της ενισχυμένης πλάκας έναντι σε κόπωση. Εφόσον δεν υπάρχει κάποια διαφοροποίηση στην ταχύτητα διάδοσης της ρωγμής, οι καμπύλες που αντιπροσωπεύουν το κατακόρυφο μέτωπο ρωγμής στο σχήμα 4.30 δεν παρουσιάζουν κάποια αλλαγή στην καμπυλότητα.

### 4.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Σκοπός της διπλωματικής αυτής εργασίας είναι να αποδείξει έμπρακτα την αποδοτικότητα της ενίσχυσης - επισκευής μιας μεταλλικής δομής με επιθέματα από ινώδη σύνθετα υλικά. Αποτελεσματική θεωρείται μια κατασκευή όταν περιορίζει σημαντικά την διάδοση της ρωγμής χωρίς να οδηγεί στην ανάπτυξη άλλων πιο επιβλαβών ανωμαλιών στην κατασκευή. Επίσης όταν η κατασκευή λειτουργεί στο θαλάσσιο περιβάλλον, είναι αναγκαίο η επισκευασμένη κατασκευή να είναι ανθεκτική σε φορτία κόπωσης. Στην παρούσα εργασία εξετάστηκε αριθμητικά το όφελος (στην επέκταση της διάρκειας ζωής του δοκιμίου σε κόπωση) που επιφέρει η ενίσχυση από σύνθετα υλικά σε σχέση με το πάχος του επιθέματος, που εκφράζεται με τον συντελεστή SR. Επίσης κρίθηκε ως καταλυτικής σημασίας το μήκος που θα έχει η ρωγμή, τη στιγμή που θα εφαρμοστεί το επίθεμα. Για το λόγο αυτό εξετάστηκαν έξι διαφορετικά αρχικά μήκη ρωγμής για να διαπιστωθεί η αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης από ένα μήκος ρωγμής και έπειτα. Για τη γεωμετρία του μεταλλικού δοκιμίου που χρησιμοποιήθηκε στην μοντελοποίηση υπολογίστηκε το κρίσιμο μήκος ρωγμής και, σύμφωνα με αυτή την τιμή, αποφασίστηκαν τα μήκη ρωγμής που θα χρησιμοποιηθούν ως αρχικά για την διεξαγωγή της μελέτης. Έτσι από

το κρίσιμο μήκος ρωγμής  $a_{cr}=57\text{mm}$ , αποφασίστηκε τα μήκη ρωγμής τη στιγμή που τοποθετείται το επίθεμα,  $a(\text{patch})$ , να είναι 5, 7.5, 15, 30, 36, 45 mm, καλύπτοντας έτσι την περιοχή 9% - 80% του κρίσιμου μήκους ρωγμής. Συγκεκριμένα με την Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων αναλύθηκαν:

- ✚ Μεταλλική πλάκα και κολλητικό στρώμα συγκεκριμένης γεωμετρίας (μήκος, πλάτος, πάχος) και μηχανικών ιδιοτήτων (μέτρου ελαστικότητας και λόγου Poisson)
- ✚ Επίθεμα συγκεκριμένων μηχανικών ιδιοτήτων (μέτρα ελαστικότητας, μέτρα διάτμησης και λόγοι Poisson), συγκεκριμένου μήκους και πλάτους αλλά μεταβλητού πάχους, για μονόπλευρη και αμφίπλευρη ενίσχυση.
- ✚ Κεντρική διαμπερής ρωγμή μεταβλητού μήκους, μοντελοποιημένη είτε με κατακόρυφο είτε με λοξό μέτωπο.
- ✚ Αμφίπλευρη - συμμετρική ενίσχυση της πλάκας, ή μονόπλευρη - μη συμμετρική ενίσχυση αυτής.

Τα αποτελέσματα της παραμετρικής μελέτης που πραγματοποιήθηκε σε αυτήν την διπλωματική εργασία, οδηγούν στην εξαγωγή των παρακάτω αποτελεσμάτων:

- ✓ Οι μέσοι όροι  $av\_all$  και  $av\_rms$  παρουσιάζουν μικρές διαφορές στα αποτελέσματα της μοντελοποίησης του πλαγίου μετώπου ρωγμής σε ό,τι αφορά στην επέκταση ζωής του δοκιμίου. Πιο συγκεκριμένα, η μεγαλύτερη διαφορά 8.75%, παρουσιάζεται για  $SR=0.33$  και  $a(\text{patch})=5\text{ mm}$ . Η μικρότερη διαφορά εμφανίζεται για  $SR=1.0$  και  $a(\text{patch})=45\text{ mm}$  και είναι της τάξεως του 2.8 %. Λόγω του γεγονότος ότι ο μέσος όρος  $av\_rms$  προσφέρει πιο ασφαλή αποτελέσματα, στην παραμετρική μελέτη χρησιμοποιήθηκε αυτός ο μέσος όρος για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων.
- ✓ Η κλίση του μετώπου της ρωγμής γίνεται αρκετά μεγάλη αμέσως μετά την επιβολή του επιθέματος, όπου το μέτωπο ρωγμής από κατακόρυφο γίνεται λοξό, ενώ έπειτα η κλίση αυτή διαφοροποιείται ελάχιστα.
- ✓ Οι τάσεις στα άκρα της πλάκας μειώνονται εν γένει διότι ενώ στο εσωτερικό της πλάκας υπάρχει τρισδιάστατο τασικό πεδίο, στα άκρα της πλάκας το πεδίο τάσεων γίνεται δισδιάστατο. Επίσης, το επίθεμα απορροφά ένα ποσοστό τάσεων, όχι μόνο στο άνω άκρο της πλάκας (ενισχυμένο άκρο), αλλά και για ένα μέρος κατά το πάχος της πλάκας, το οποίο αυξάνεται με την αύξηση του  $SR$ .
- ✓ Κατά την ενίσχυση του δοκιμίου με επίθεμα, όπου το μέτωπο ρωγμής γίνεται από κατακόρυφο, λοξό, λόγω της κλίσης που δημιουργείται, υπάρχει μεγάλη γεωμετρική ελευθερία στο μη ενισχυμένο άκρο της πλάκας με αποτέλεσμα να μπορεί να απορροφήσει ακόμα λιγότερο ποσοστό των τάσεων σε σύγκριση με την πρότερή της κατάσταση, με αποτέλεσμα οι τάσεις να μεταφέρονται προς το κέντρο της πλάκας, δημιουργώντας μέγιστο κοντά στο 3/10 της απόστασης από το μη ενισχυμένο άκρο,

οδηγώντας την ρωγμή να διαδοθεί γρηγορότερα σε εκείνο το σημείο από το μη ενισχυμένο άκρο.

- ✓ Όταν το μέγεθος  $a(\text{patch})$  είναι αρκετά μικρό, η  $a-N$  δεν παρουσιάζει σημαντικές αλλαγές στην καμπυλότητά της, ενώ όταν το  $a(\text{patch})$  αυξηθεί πάνω από το 27 % του κρίσιμου μήκους ρωγμής, η καμπύλη αλλάζει καμπυλότητα στα πρώτα 4 βήματα της μεθόδου. Από αυτό το γεγονός εξάγεται το συμπέρασμα ότι όσο μεγαλύτερο είναι το  $a(\text{patch})$  τόσο μεγαλύτερη είναι και η διακύμανση στους υπολογισμούς της ταχύτητας διάδοσης της ρωγμής στα αρχικά βήματα της μεθόδου. Οι υπολογισμοί της ταχύτητας διάδοσης της ρωγμής στα επόμενα βήματα ομαλοποιούνται σταδιακά.
- ✓ Η αύξηση του SR δρα ευεργετικά στη διάρκεια ζωής του δοκιμίου, όμως θεωρείται πιο σημαντικό από αυτόν τον παράγοντα, η ενίσχυση της μεταλλικής πλάκας πριν διαδοθεί σε μεγάλο μήκος η ρωγμή. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της μεθόδου, θεωρείται πιο αποδοτική η ενίσχυση του δοκιμίου όταν η ρωγμή έχει 5 mm μήκος, με πολύ λεπτό επίθεμα, παρά η ενίσχυση της πλάκας όταν η ρωγμή έχει μήκος 15 mm με τριπλάσιου πάχους επίθεμα. Η αύξηση σε κύκλους φορτίου που μπορεί να αντεπεξέλθει το δοκίμιο, μπορεί να είναι της τάξεως του 275 % σε περίπτωση που η ρωγμή έχει πολύ μικρό μήκος (5 mm) και το πάχος του επιθέματος είναι πολύ μεγάλο (14.81 mm). Από την άλλη πλευρά η αύξηση αυτή είναι αρκετά μικρή αν το επίθεμα τοποθετηθεί όταν η ρωγμή έχει φτάσει ήδη το 80 % του κρίσιμου μήκους της, και είναι της τάξεως του 13 % για επίθεμα με  $SR=0.33$  και 26 % όταν  $SR=1.0$ .
- ✓ Παρατηρείται ότι η αύξηση στη διάρκεια ζωής του υλικού είναι μεγαλύτερη αυξάνοντας τον SR από 0.33 σε 0.66 παρά όταν αυξάνεται από 0.66 σε 1.0. Ακόμα εμφανίζεται ότι όταν η ρωγμή ξεπεράσει το 50 % του κρίσιμου μήκους της την ώρα που τοποθετείται το επίθεμα, υπάρχει μια σταθερή αύξηση στους κύκλους φορτίου που μπορεί να ανταπεξέλθει το δοκίμιο, της τάξεως του 5 % με την αύξηση του SR από 0.33 σε 0.66 και από 0.66 σε 1.0.
- ✓ Η ενίσχυση του δοκιμίου αμφίπλευρα επιφέρει πολύ καλύτερη απόδοση στη διάρκεια ζωής του έναντι σε κόπωση. Η αύξηση σε κύκλους φορτίου που μπορεί να αντέξει το δοκίμιο έως ότου φτάσει η ρωγμή σε μήκος 60 mm μπορεί να φτάσει και το 315 %, πράγμα που σημαίνει ότι η αμφίπλευρη ενίσχυση λόγω της συμμετρίας που προσφέρει στη δομή, απαλείφοντας την κάμψη που δημιουργείται στη μονόπλευρη ενίσχυση, προσφέρει αρκετά καλύτερα αποτελέσματα.
- ✓ Η μοντελοποίηση του προβλήματος με πλάγιο μέτωπο της ρωγμής στην περίπτωση της μονόπλευρης ενίσχυσης, παρουσιάζει αποτελέσματα που δείχνουν ότι η δομή είναι πιο ανθεκτική έναντι σε κόπωση. Εάν το μέτωπο ρωγμής μοντελοποιηθεί ως

κατακόρυφο, ουσιαστικά θεωρείται ότι η ρωγμή διαδίδεται με την ίδια ταχύτητα καθ' όλο το πάχος της δομής, πράγμα το οποίο δεν συμβαίνει, αντιθέτως επειδή η ρωγμή διαδίδεται αρκετά πιο αργά στο ενισχυμένο άκρο της ρωγμής, τα αποτελέσματα του πλαγίου μετώπου ρωγμής είναι λιγότερο συντηρητικά σε σύγκριση με τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης του κατακόρυφου μετώπου ρωγμής.

**ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ**

- [1] Ivan Grabovac, David Whittaker, "Application of bonded composites in the repair of ships structures – A 15-year service experience", *Composites: Part A* xxx(2009) xxx-xxx.
- [2] T.J Turton, J. Dalzel-Job, F. Livingstone, "Oil platforms, destroyers and frigates—case studies of QinetiQ's marine composite patch repairs", *Composites: Part A* 36 (2005) 1066-1072.
- [3] QinetiQ, "Patching it up", *REINFORCEDplastics* July/August 2004.
- [4] 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.
- [5] B. Bachir Bouiadjra, M. Belhouari, B. Serier, "Computation of the stress intensity factors for repaired cracks with bonded composite patch in mode I and mixed mode", *Composite Structures* 56 (2002) 401-406.
- [6] M. Belhouari, B. Bachir Bouiadjra, A. Megueni, K. Kaddouri, "Comparison of double and single bonded repairs to symmetric composite structures: a numerical analysis", *Composite Structures* 65 (2004) 47-53.
- [7] H. Hosseini-Toudeshky, B. Mohammadi, G. Sadeghi, H.R. Daghyani, "Numerical and experimental fatigue crack growth analysis in mode-I for repair aluminum panels using composite material", *Composites: Part A* 38 (2007) 1141-1148.
- [8] H. Hosseini-Toudeshky, "Effects of composite patches on fatigue crack propagation of single-side repaired aluminum panels", *Composite Structures* 76 (2006) 243-251.
- [9] H. Hosseini-Toudeshky, G. Sadeghi, H.R. Daghyani, "Experimental fatigue crack growth and crack-front shape analysis of asymmetric repaired aluminum panels with glass/epoxy composite patches", *Composite structures* 71 (2005) 401-406.
- [10] Dae-Cheol Seo, Jung-Ju Lee, "Fatigue crack growth behavior of cracked aluminum plate repaired with composite patch", *Composite Structures* 57 (2002)323-330.
- [11] 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.
- [12] T. Ting, R. Jones, W.K Chiu, I.H. Marshall, J.M. Greer, "Composite repairs to rib stiffened panels", *Composite Structures* 47 (1999) 737-743.

- [13] Q.Y. Wang, R.M. Pidaparti, "Static characteristics and fatigue behavior of composite-repaired aluminum plates", *Composite Structures* 56 (2002) 151-155.
- [14] G.J Wortelboer Jr BV, "Repairing steel ships with composite patches", *Shiprepair and conversion technology* 4th Quarter 2003.
- [15] Μυρισιώτης Λ., Τσούβαλης Ν., Παπάζογλου Β., "Πειραματική διερεύνηση της συμπεριφοράς σε κόπωση ρωγματωμένων πλακών χάλυβα ενισχυμένων με επιθέματα από σύνθετα υλικά", Πυθαγόρας II, Ενίσχυση ερευνητικών ομάδων στα πανεπιστήμια, 2.2.3.στ, Report No STL-228-F-06, Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Δεκέμβριος 2006.
- [16] P.Papanikos, K.I. Tserpes, G. Labeas, Sp. Pantelakis, "Progressive damage modelling of bonded composite repairs", *Theoretical and applied fracture mechanics* 42 (2005) 189-198.
- [17] Κουλουκούρας Ι., "Αριθμητική μοντελοποίηση ρωγματωμένων και διαβρωμένων χαλύβδινων ελασμάτων, ενισχυμένων με επίθεμα από σύνθετα υλικά", Διπλωματική εργασία, Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2008.
- [18] 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.
- [19] Σωτηρόπουλος Β.Π., "Αναλυτική και αριθμητική μοντελοποίηση της χρήσης επιθεμάτων από σύνθετα υλικά για την ενίσχυση και επισκευή χαλύβδινων κατασκευών", Διπλωματική εργασία, Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2007.



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Στο παράρτημα παρουσιάζεται ο βασικός κώδικας που δημιουργήθηκε για την επίλυση των μοντέλων των πεπερασμένων στοιχείων που εξετάστηκαν στην παρούσα μελέτη. Ο κώδικας είναι γραμμένος με τέτοιο τρόπο ώστε ο χειριστής να μπορεί να μεταβάλει τις βασικές παραμέτρους του προβλήματος που εξετάζεται, όπως το μήκος και η κλίση της ρωγμής, το πάχος του επιθέματος και τα επιβαλλόμενα φορτία χωρίς να πρέπει να αλλαχτούν άλλα μέρη του κώδικα.

!\*\*\*\*\*

!Properties & Constant & Variant Numbers

\*SET,ex1,200000 !Steel Properties

\*SET,prxy1,0.30

\*SET,yield,348

\*SET,ex2,135000 !Patch Properties

\*SET,ey2,9000

\*SET,ez2,9000

\*SET,prxy2,0.3

\*SET,pryz2,0.002

\*SET,prxz2,0.3

\*SET,gxy2,5000

\*SET,gyz2,9000

\*SET,gxz2,5000

\*SET,ex3,4500 !Adhesive Properties

\*SET,prxy3,0.25

\*SET,x2,127.73 !Half Length of 1st Layer of Patch

\*SET,x6,118.488 !Half Length of 2nd Layer of Patch

\*SET,x7,109.244 !Half Length of 3rd Layer of Patch

\*SET,x8,100 !Half Length of 4th Layer of Patch

\*SET,x3,200

\*SET,x4,230

\*SET,x5,250

\*SET,y2,50 !Half Length of Crack (min=5,max=75)

\*SET,y4,90 !Half Width of Patch

\*SET,y5,100 !Half Width of Plate

\*SET,x1,y2/8 !Length of the Rectangle near the Crack

\*SET,y1,y2-x1

\*SET,y3,y2+x1

\*SET,NEA,1 ! Number of Elements through Adhesive thickness

\*SET,NEP,1 ! Number of Elements through Patch thickness

\*SET,THKS,10 ! Thickness of Steel

\*SET,THKA,0.1 ! Thickness of Adhesive

\*SET,THKP,4.89 ! Thickness of Patch

\*SET,THKP1,THKP/4 ! Thickness of Patch, 1st Layer

```
*SET,THKP2,THKP/4      !Thickness of Patch, 2nd Layer
*SET,THKP3,THKP/4      !Thickness of Patch, 3rd Layer
*SET,THKP4,THKP/4      !Thickness of Patch, 4th Layer
*AFUN,DEG               ! Use degrees for input and output of parameter Angular function
*SET,ANG,30             ! Angle of the Crack tip Line with the Perpendicular
*SET,Y9,THKS*TAN(ANG)
```

```
!*****
```

```
/PREP7
```

```
ET,1,PLANE82           !Element definition / Shell Element Type    42 82
ET,2,SOLID95           !Element definition /Solid Element Type    45 95
```

```
MPTEMP,,,,,,,,        !Steel's Properties
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,ex1
MPDATA,PRXY,1,,prxy1
```

```
mp,ex,2,ex2           !Patch Properties
mp,ey,2,ey2
mp,ez,2,ez2
mp,prxy,2,prxy2
mp,pryz,2,pryz2
mp,prxz,2,prxz2
mp,gxy,2,gxy2
mp,gyz,2,gyz2
mp,gxz,2,gxz2
```

```
mp,ex,3,ex3           !Adhesive Properties
mp,prxy,3,prxy3
```

```
!*****
```

```
k,1,0,y2              !Keypoints used for the geometry of the Model
k,2,0,y1
k,3,0,0
k,4,x1,0
k,5,x2,0
k,6,x3,0
k,7,x4,0
k,8,x5,0
k,9,x5,y1
k,10,x5,y3
k,11,x5,y4
k,12,x5,y5
k,13,x3,y5
k,14,x2,y5
k,15,x1,y5
k,16,0,y5
k,17,0,y4
k,18,0,y3
k,19,x1,y1
k,20,x1,y3
```

```

k,21,x1,y4
k,22,x2,y1
k,23,x2,y3
k,24,x2,y4
k,25,x3,y1
k,26,x3,y3
k,27,x3,y4
k,28,x4,y1
k,29,x4,y3
k,30,x4,y4
k,31,x4,y5

k,32,x6,0
k,33,x6,y1
k,34,x6,y3
k,35,x6,y4
k,36,x6,y5

k,37,x7,0
k,38,x7,y1
k,39,x7,y3
k,40,x7,y4
k,41,x7,y5

k,42,x8,0
k,43,x8,y1
k,44,x8,y3
k,45,x8,y4
k,46,x8,y5
k,47,0,y2-y9,thks      !Keypoint on the Top Edge of Crack tip

kscon,1,y2/48,1,8,1    !Create the Crack tip Mesh

a,1,2,19,20,18        !Small Area close to Crack tip, used for Fine Mesh
L,1,47,8              !Line of the Scew Crack tip
lesize,1,,,6,7       ! And number of Elements through steel thickness
lesize,2,,,6
lesize,5,,,6,7
lesize,4,,,6
lesize,3,,,10
FLST,5,1,4,ORDE,1    !Flip Line 5
FITEM,5,5
CM,_Y1,LINE
LSEL,,,P51X
*GET,_z1,LINE,,COUNT
*SET,_z2,0
*DO,_z5,1,_z1
*SET,_z2,LSNEXT(_z2)
*GET,_z3,LINE,_z2,ATTR,NDNX
*GET,_z4,LINE,_z2,ATTR,SPNX
*get,_z6,line,_z2,attr,kynd
*IF,_z3,GT,0,THEN
*IF,_z4,NE,0,THEN

```

```

LESIZE,_z2,,,_z3,1/_z4,,,,_z6
*ENDIF
*ENDIF
*ENDDO
CMSEL,S,_Y1
CMDELE,_Y1
MSHAPE,0,2D
MSHKEY,0
CM,_Y,AREA
ASEL,,,, 1
CM,_Y1,AREA
CHKMSH,'AREA'
CMSEL,S,_Y
AMESH,_Y1
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2

```

```

!*****

```

```

TYPE, 2                                !Extrusion of the Area near the Crack tip along Line 6
EXTOPT,ESIZE,0,0,
EXTOPT,ACLEAR,1

```

```

EXTOPT,ATTR,0,0,0
MAT,1
REAL,_Z4
ESYS,0

```

```

VDRAG, 1,,,,, 6

```

```

FLST,3,14,3,ORDE,14
FITEM,3,9
FITEM,3,-10
FITEM,3,22
FITEM,3,-23
FITEM,3,25
FITEM,3,-26
FITEM,3,28
FITEM,3,-29
FITEM,3,33
FITEM,3,-34
FITEM,3,38
FITEM,3,-39
FITEM,3,43
FITEM,3,-44
KGEN,2,P51X,,,,-y9,thks,,1
NUMMRG,ALL,,,,LOW

```

```

FLST,3,27,3,ORDE,15
FITEM,3,3
FITEM,3,-8
FITEM,3,11

```

FITEM,3,-17  
 FITEM,3,21  
 FITEM,3,24  
 FITEM,3,27  
 FITEM,3,30  
 FITEM,3,-32  
 FITEM,3,35  
 FITEM,3,-37  
 FITEM,3,40  
 FITEM,3,-42  
 FITEM,3,45  
 FITEM,3,-46  
 KGEN,2,P51X, , , ,thks, ,1

!\*\*\*\*\*

V, 17,21,15,16,78,79,76,77      !Create Volumes through Keypoints  
 v, 18,20,21,17,52,51,79,78  
 V, 3,4,19,2,48,67,50,49  
 V, 21,45,46,15,79,91,92,76  
 V, 20,44,45,21,51,66,91,79  
 V, 19,43,44,20,50,65,66,51  
 V, 4,42,43,19,67,90,65,50  
 V, 45,40,41,46,91,88,89,92  
 V, 44,39,40,45,66,64,88,91  
 V, 43,38,39,44,65,63,64,66  
 V, 42,37,38,43,90,87,63,65  
 V, 40,35,36,41,88,85,86,89  
 V, 39,34,35,40,64,62,85,88  
 V, 38,33,34,39,63,61,62,64  
 V, 37,32,33,38,87,84,61,63  
 V, 35,24,14,36,85,80,75,86  
 V, 34,23,24,35,62,56,80,85  
 V, 33,22,23,34,61,55,56,62  
 V, 32,5,22,33,84,68,55,61  
 V, 24,27,13,14,80,81,74,75  
 V, 23,26,27,24,56,58,81,80  
 V, 22,25,26,23,55,57,58,56  
 V, 5,6,25,22,68,69,57,55  
 V, 27,30,31,13,81,82,83,74  
 V, 26,29,30,27,58,60,82,81  
 V, 25,28,29,26,57,59,60,58  
 V, 6,7,28,25,69,70,59,57  
 V, 30,11,12,31,82,72,73,83  
 V, 29,10,11,30,60,54,72,82  
 V, 28,9,10,29,59,53,54,60  
 V, 7,8,9,28,70,71,53,59

FLST,5,6,4,ORDE,6

!Volume Meshing

```
FITEM,5,8
FITEM,5,18
FITEM,5,21
FITEM,5,25
FITEM,5,32
FITEM,5,36
CM,_Y,LINE
LSEL,,,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
```

```
LESIZE,_Y1,,2,,,,1
```

```
FLST,5,4,4,ORDE,4
FITEM,5,53
FITEM,5,56
FITEM,5,58
FITEM,5,61
CM,_Y,LINE
LSEL,,,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
```

```
LESIZE,_Y1,,15,2,,,,1
```

```
FLST,5,6,4,ORDE,6
FITEM,5,40
FITEM,5,42
FITEM,5,44
FITEM,5,47
FITEM,5,-48
FITEM,5,51
CM,_Y,LINE
LSEL,,,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
```

```
LESIZE,_Y1,,15,0.5,,,,1
```

```
FLST,5,4,4,ORDE,4           !Flip line
FITEM,5,40
FITEM,5,48
FITEM,5,56
FITEM,5,61
CM,_Y1,LINE
LSEL,,,P51X
*GET,_z1,LINE,,COUNT
*SET,_z2,0
*DO,_z5,1,_z1
*SET,_z2,LSNEXT(_z2)
*GET,_z3,LINE,_z2,ATTR,NDNX
*GET,_z4,LINE,_z2,ATTR,SPNX
```

```
*get,_z6,line,_z2,attr,kynd
*IF,_z3,GT,0,THEN
*IF,_z4,NE,0,THEN
LESIZE,_z2,,,_z3,1/_z4,,,,_z6
*ENDIF
*ENDIF
*ENDDO
CMSEL,S,_Y1
CMDELE,_Y1
```

```
FLST,5,30,4,ORDE,30          ! Area Meshing
FITEM,5,63
FITEM,5,65
FITEM,5,67
FITEM,5,70
FITEM,5,-71
FITEM,5,74
FITEM,5,76
FITEM,5,79
FITEM,5,81
FITEM,5,84
FITEM,5,86
FITEM,5,88
FITEM,5,90
FITEM,5,93
FITEM,5,-94
FITEM,5,97
FITEM,5,99
FITEM,5,102
FITEM,5,104
FITEM,5,107
FITEM,5,109
FITEM,5,111
FITEM,5,113
FITEM,5,116
FITEM,5,-117
FITEM,5,120
FITEM,5,122
FITEM,5,125
FITEM,5,127
FITEM,5,130
CM,_Y,LINE
LSEL,,,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
```

```
LESIZE,_Y1,,,2,,,,,1
```

```
FLST,5,10,4,ORDE,10
FITEM,5,132
FITEM,5,134
FITEM,5,136
FITEM,5,139
```

FITEM,5,-140  
FITEM,5,143  
FITEM,5,145  
FITEM,5,148  
FITEM,5,150  
FITEM,5,153  
CM,\_Y,LINE  
LSEL,,,P51X  
CM,\_Y1,LINE  
CMSEL,,\_Y

LESIZE,\_Y1,,6,,,,1

FLST,5,10,4,ORDE,10  
FITEM,5,155  
FITEM,5,157  
FITEM,5,159  
FITEM,5,162  
FITEM,5,-163  
FITEM,5,166  
FITEM,5,168  
FITEM,5,171  
FITEM,5,173  
FITEM,5,176  
CM,\_Y,LINE  
LSEL,,,P51X  
CM,\_Y1,LINE  
CMSEL,,\_Y

LESIZE,\_Y1,,4,,,,1

FLST,5,10,4,ORDE,10  
FITEM,5,178  
FITEM,5,180  
FITEM,5,182  
FITEM,5,185  
FITEM,5,-186  
FITEM,5,189  
FITEM,5,191  
FITEM,5,194  
FITEM,5,196  
FITEM,5,199  
CM,\_Y,LINE  
LSEL,,,P51X  
CM,\_Y1,LINE  
CMSEL,,\_Y

LESIZE,\_Y1,,3,,,,1

FLST,5,18,4,ORDE,18  
FITEM,5,33  
FITEM,5,-34  
FITEM,5,38



```
FITEM,5,-39
FITEM,5,59
FITEM,5,62
FITEM,5,82
FITEM,5,85
FITEM,5,105
FITEM,5,108
FITEM,5,128
FITEM,5,131
FITEM,5,151
FITEM,5,154
FITEM,5,174
FITEM,5,177
FITEM,5,197
FITEM,5,200
CM,_Y,LINE
LSEL,,,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y

LESIZE,_Y1,,6,,,,1

FLST,5,14,4,ORDE,14
FITEM,5,54
FITEM,5,57
FITEM,5,77
FITEM,5,80
FITEM,5,100
FITEM,5,103
FITEM,5,123
FITEM,5,126
FITEM,5,146
FITEM,5,149
FITEM,5,169
FITEM,5,172
FITEM,5,192
FITEM,5,195
CM,_Y,LINE
LSEL,,,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y

LESIZE,_Y1,,4,,,,1

FLST,5,18,4,ORDE,16
FITEM,5,28
FITEM,5,-31
FITEM,5,49
FITEM,5,52
FITEM,5,72
FITEM,5,75
FITEM,5,95
FITEM,5,98
```

```
FITEM,5,118
FITEM,5,121
FITEM,5,141
FITEM,5,144
FITEM,5,164
FITEM,5,167
FITEM,5,187
FITEM,5,190
CM,_Y,LINE
LSEL,,,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
```

```
LESIZE,_Y1,,,15,,,,,1
```

```
FLST,5,18,4,ORDE,18
FITEM,5,17
FITEM,5,19
FITEM,5,23
FITEM,5,27
FITEM,5,41
FITEM,5,45
FITEM,5,64
FITEM,5,68
FITEM,5,87
FITEM,5,91
FITEM,5,110
FITEM,5,114
FITEM,5,133
FITEM,5,137
FITEM,5,156
FITEM,5,160
FITEM,5,179
FITEM,5,183
CM,_Y,LINE
LSEL,,,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
```

```
LESIZE,_Y1,,,3,,,,,1
```

```
FLST,5,41,4,ORDE,41
FITEM,5,20
FITEM,5,22
FITEM,5,24
FITEM,5,26
FITEM,5,35
FITEM,5,37
FITEM,5,43
FITEM,5,46
FITEM,5,50
FITEM,5,55
FITEM,5,60
```

```
FITEM,5,66
FITEM,5,69
FITEM,5,73
FITEM,5,78
FITEM,5,83
FITEM,5,89
FITEM,5,92
FITEM,5,96
FITEM,5,101
FITEM,5,106
FITEM,5,112
FITEM,5,115
FITEM,5,119
FITEM,5,124
FITEM,5,129
FITEM,5,135
FITEM,5,138
FITEM,5,142
FITEM,5,147
FITEM,5,152
FITEM,5,158
FITEM,5,161
FITEM,5,165
FITEM,5,170
FITEM,5,175
FITEM,5,181
FITEM,5,184
FITEM,5,188
FITEM,5,193
FITEM,5,198
CM,_Y,LINE
LSEL,,,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y

LESIZE,_Y1,,8,,,,1

MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1

FLST,5,31,6,ORDE,2
FITEM,5,2
FITEM,5,-32
CM,_Y,VOLU
VSEL,,,P51X
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y

VMESH,_Y1

CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
```

CMDELE,\_Y2

TYPE, 2 !Adhesive Extrusion  
EXTOPT,ESIZE,NEA,0,  
EXTOPT,ACLEAR,1

EXTOPT,ATTR,0,0,0  
MAT,3  
REAL,\_Z4  
ESYS,0

VOFFST,22,THKA, ,  
VOFFST,7,THKA, ,  
VOFFST,17,THKA, ,  
VOFFST,39,THKA, ,  
VOFFST,35,THKA, ,  
VOFFST,31,THKA, ,  
VOFFST,56,THKA, ,  
VOFFST,52,THKA, ,  
VOFFST,48,THKA, ,  
VOFFST,73,THKA, ,  
VOFFST,69,THKA, ,  
VOFFST,65,THKA, ,  
VOFFST,90,THKA, ,  
VOFFST,86,THKA, ,  
VOFFST,82,THKA, ,

TYPE, 2 !Patch Extrusion  
EXTOPT,ESIZE,NEP,0,  
EXTOPT,ACLEAR,1

EXTOPT,ATTR,0,0,0  
MAT,2  
REAL,\_Z4  
ESYS,0

VOFFST,142,THKP1, , !1st Layer of Patch  
VOFFST,147,THKP1, ,  
VOFFST,153,THKP1, ,  
VOFFST,158,THKP1, ,  
VOFFST,163,THKP1, ,  
VOFFST,168,THKP1, ,  
VOFFST,173,THKP1, ,  
VOFFST,178,THKP1, ,  
VOFFST,183,THKP1, ,  
VOFFST,188,THKP1, ,  
VOFFST,193,THKP1, ,  
VOFFST,198,THKP1, ,  
VOFFST,203,THKP1, ,  
VOFFST,208,THKP1, ,  
VOFFST,213,THKP1, ,

VOFFST,218,THKP2, ,                   !2nd Layer of Patch  
 VOFFST,223,THKP2, ,  
 VOFFST,229,THKP2, ,  
 VOFFST,234,THKP2, ,  
 VOFFST,239,THKP2, ,  
 VOFFST,244,THKP2, ,  
 VOFFST,249,THKP2, ,  
 VOFFST,254,THKP2, ,  
 VOFFST,259,THKP2, ,  
 VOFFST,264,THKP2, ,  
 VOFFST,269,THKP2, ,  
 VOFFST,274,THKP2, ,

VOFFST,294,THKP3, ,                   !3rd Layer of Patch  
 VOFFST,299,THKP3, ,  
 VOFFST,305,THKP3, ,  
 VOFFST,310,THKP3, ,  
 VOFFST,315,THKP3, ,  
 VOFFST,320,THKP3, ,  
 VOFFST,325,THKP3, ,  
 VOFFST,330,THKP3, ,  
 VOFFST,335,THKP3, ,

VOFFST,355,THKP4, ,                   !4th Layer of Patch  
 VOFFST,360,THKP4, ,  
 VOFFST,366,THKP4, ,  
 VOFFST,371,THKP4, ,  
 VOFFST,376,THKP4, ,  
 VOFFST,381,THKP4, ,

NUMMRG,all                               !Merging all Nodes

!\*\*\*\*\*

DA,    19,SYMM                       !Apply Symmetry to Areas at Steel's side  
 DA,    37,SYMM  
 DA,    54,SYMM  
 DA,    71,SYMM  
 DA,    88,SYMM  
 DA,   105,SYMM  
 DA,   122,SYMM  
 DA,   139,SYMM  
 DA,   143,SYMM  
 DA,   159,SYMM  
 DA,   174,SYMM  
 DA,   189,SYMM  
 DA,   204,SYMM  
 DA,   219,SYMM  
 DA,   235,SYMM

DA, 250,SYMM  
 DA, 265,SYMM  
 DA, 280,SYMM  
 DA, 295,SYMM  
 DA, 311,SYMM  
 DA, 326,SYMM  
 DA, 341,SYMM  
 DA, 356,SYMM  
 DA, 372,SYMM  
 DA, 387,SYMM  
 DA, 402,SYMM  
 DA, 418,SYMM

DA, 6,SYMM  
 DA, 16,SYMM  
 DA, 12,SYMM  
 DA, 152,SYMM  
 DA, 157,SYMM  
 DA, 222,SYMM  
 DA, 224,SYMM  
 DA, 228,SYMM  
 DA, 233,SYMM  
 DA, 298,SYMM  
 DA, 300,SYMM  
 DA, 304,SYMM  
 DA, 309,SYMM  
 DA, 359,SYMM  
 DA, 361,SYMM  
 DA, 365,SYMM

DA, 405,SYMM  
 DA, 407,SYMM  
 DA, 411,SYMM  
 DA, 416,SYMM

!Apply Symmetry to Areas at Crack's side

DA,140,UZ,0  
 DA,136,UZ,0  
 DA,132,UZ,0  
 DA,127,UZ,0

! Apply Tenancy at at Area Opposite of the Crack

!\*\*\*\*\*

FLST,4,901,1,ORDE,28  
 FITEM,4,46674  
 FITEM,4,46680  
 FITEM,4,-46685  
 FITEM,4,46707  
 FITEM,4,-46722  
 FITEM,4,46779  
 FITEM,4,-46850  
 FITEM,4,47067  
 FITEM,4,47073  
 FITEM,4,-47101

!Couple Dof's, used for the Load Definition

FITEM,4,47202  
 FITEM,4,-47217  
 FITEM,4,47274  
 FITEM,4,-47617  
 FITEM,4,48642  
 FITEM,4,48648  
 FITEM,4,-48666  
 FITEM,4,48732  
 FITEM,4,-48747  
 FITEM,4,48804  
 FITEM,4,-49027  
 FITEM,4,49692  
 FITEM,4,49698  
 FITEM,4,-49708  
 FITEM,4,49746  
 FITEM,4,-49761  
 FITEM,4,49818  
 FITEM,4,-49945  
 CP,1,UX,P51X

FLST,2,1,1,ORDE,1                   !Definition of Force Loads  
 FITEM,2,46674  
 /GO  
 F,P51X,FX,100000

!\*\*\*\*\*

FINISH  
 /SOL                                   !Non-Linear analysis Options  
 antype,0  
 NLGEOM,1  
 solve  
 FINISH

/POST1  
 CS,12,0,1,3,136,1,1,               !Create a Local Coordinate System  
 CSYS,12,  
 RSYS,12

                                      !SIF measured in Mpa\*(sqrt (mm))

FLST,2,3,1  
 FITEM,2,1  
 FITEM,2,3  
 FITEM,2,4  
 PATH,k1,3,30,20,  
 PPATH,P51X,1  
 KCALC,1,1,0,0                       !Calculation of SIF for the 1st layer z=0

FLST,2,3,1  
 FITEM,2,564  
 FITEM,2,638  
 FITEM,2,646

PATH,k1,3,30,20,  
PPATH,P51X,1  
KCALC,1,1,0,0 !Calculation of SIF for the 2ndt layer z=1.25

FLST,2,3,1  
FITEM,2,566  
FITEM,2,639  
FITEM,2,648  
PATH,k1,3,30,20,  
PPATH,P51X,1  
KCALC,1,1,0,0 !Calculation of SIF for the 3d layer z=2.5

FLST,2,3,1  
FITEM,2,568  
FITEM,2,640  
FITEM,2,650  
PATH,k1,3,30,20,  
PPATH,P51X,1  
KCALC,1,1,0,0 !Calculation of SIF for the 4th layer z=3.75

FLST,2,3,1  
FITEM,2,570  
FITEM,2,641  
FITEM,2,652  
PATH,k1,3,30,20,  
PPATH,P51X,1  
KCALC,1,1,0,0 !Calculation of SIF for the 5th layer z=5

FLST,2,3,1  
FITEM,2,572  
FITEM,2,642  
FITEM,2,654  
PATH,k1,3,30,20,  
PPATH,P51X,1  
KCALC,1,1,0,0 !Calculation of SIF for the 6th layer z=6.25

FLST,2,3,1  
FITEM,2,574  
FITEM,2,643  
FITEM,2,656  
PATH,k1,3,30,20,  
PPATH,P51X,1  
KCALC,1,1,0,0 !Calculation of SIF for the 7th layer z=7.5

FLST,2,3,1  
FITEM,2,576  
FITEM,2,644  
FITEM,2,658  
PATH,k1,3,30,20,  
PPATH,P51X,1  
KCALC,1,1,0,0 !Calculation of SIF for the 8th layer z=8.75

FLST,2,3,1



FITEM,2,282  
FITEM,2,284  
FITEM,2,285  
PATH,k1,3,30,20,  
PPATH,P51X,1  
KCALC,1,1,0,0

!Calculation of SIF for the 9th layer z=10

RSYS,0  
CSYS,0

