



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

**Προσομοίωση Ηλεκτρικού Αισθητήρα Ρωγμών Συνεπίπεδου  
Διατμητικού Τύπου με τη Μέθοδο Πτώσης Ηλεκτρικού  
Δυναμικού (DCPD)**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Χρονοπούλου Αθανασία**

**Επιβλέπων : Β. Σπιτάς**

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2016





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

# Προσομοίωση Ηλεκτρικού Αισθητήρα Ρωγμών Συνεπίπεδου Διατμητικού Τύπου με τη Μέθοδο Πτώσης Ηλεκτρικού Δυναμικού (DCPD)

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χρονοπούλου Αθανασία

Επιβλέπων : Β. Σπιτάς

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή.

.....  
.....  
.....  
Β. Σπιτάς

Αθήνα, Ιούνιος 2016

.....

Χρονοπούλου Αθανασία

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © ΧΡΟΝΟΠΟΥΛΟΥ ΑΘΑΝΑΣΙΑ, 2016

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

## Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Στοιχείων Μηχανών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Υπεύθυνος κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας ήταν ο Καθηγητής κ. Β. Σπιτάς, τον οποίο ευχαριστώ ολόθερμα για τη δυνατότητα που μου προσέφερε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα. Οι υποδείξεις και οι συμβουλές του υπήρξαν καθοριστικές για την επιτυχή ολοκλήρωση αυτής της εργασίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στο διδάκτορα Ε.Μ.Π. κ. Στράτο Τσολάκη, για την καθοδήγηση που μου παρείχε προκειμένου η εργασία να ολοκληρωθεί με τον πλέον βέλτιστο τρόπο.

Η διπλωματική αυτή αφιερώνεται εξ' ολοκλήρου στη μνήμη του πατέρα μου.

### Περίληψη

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία αποτελείται από δυο μέρη.

Το πρώτο μέρος εξετάζει τον τρόπο προώθησης μίας ρωγμής συνεπίπεδου διατμητικού τύπου (Mode II) σε λεπτές μεταλλικές επιφάνειες. Εκτελείται ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων και υπολογισμός των παραγόντων έντασης τάσεων  $K_I$  και  $K_{II}$ . Σε κάθε περίπτωση, η τροχιά προώθησης της ρωγμής καθορίζεται βάσει των διατμητικών κριτηρίων, Tresca και von Mises.

Στο δεύτερο μέρος της διπλωματικής εισάγεται συνεχές ρεύμα μέσω ενός κατάλληλα τοποθετημένου επάνω στο δοκίμιο ζεύγους ηλεκτροδίων και με τη βοήθεια ενός δεύτερου ζεύγους πραγματοποιείται συσχέτιση μεταξύ του μεγέθους πτώσης του ηλεκτρικού δυναμικού και του εξεταζόμενου ανά περίπτωση μήκους της ρωγμής.

Τα αποτελέσματα των δύο παραπάνω αναλύσεων μελετώνται συνδυαστικά, με σκοπό την προσομοίωση κατάλληλου ηλεκτρικού αισθητήρα ρωγμών συνεπίπεδου διατμητικού τύπου.

#### Λέξεις Κλειδιά:

Παράγοντες έντασης τάσεων, ρωγμή συνεπίπεδου διατμητικού τύπου, μέθοδος πτώσης δυναμικού, διατμητικά κριτήρια Tresca και von Mises.

### **Abstract**

This thesis consists of two parts.

On the first part, a finite element analysis using ANSYS was performed and the results illustrated that the stress intensity factor (SIF) in Mode II ( $K_{II}$ ) can be linked with the length of the crack.

On the second part of the thesis two measuring electrodes were placed in selected positions over the gauge area of the shear specimen and their readings were associated with the actual crack length.


### **Keywords:**

Stress intensity factor (SIF), Finite element analysis, Mises criterion, Tresca criterion.

## **ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ**

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	7
1.1 ΣΚΟΠΟΣ - ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ .....	9
1.2 ΦΑΣΕΙΣ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΚΑΙ ΕΞΕΛΙΞΗ ΡΩΓΜΩΝ .....	11
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	13
2.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ .....	13
2.3 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΗΣ ΘΡΑΥΣΗΣ .....	14
2.3.1 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΕΝΤΑΣΗΣ ΤΑΣΕΩΝ .....	14
2.3.2 Ο ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ Κ ΚΑΙ Ο ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΤΑΣΕΩΝ.....	15
2.4 ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗΣ ΤΑΣΗΣ (TRESCA) .....	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ – ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΡΩΓΜΗΣ .....	19
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	21
3.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ .....	21
3.3 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΡΩΓΜΗΣ .....	24
3.4 ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ (3D) ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΡΗΓΜΑΤΩΜΕΝΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.....	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ .....	33
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	35
4.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΗ ΡΗΓΜΑΤΩΜΕΝΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗΣ ΤΑΣΗΣ.....	36
4.2.1 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΦΟΡΤΙΑ.....	36
4.2.2 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ .....	38
4.2.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....	39
4.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΡΗΓΜΑΤΩΜΕΝΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ .....	40
4.3.1 ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΜΕ ΡΩΓΜΗ .....	40
4.3.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	42
4.3.3 ΕΞΑΓΩΓΗ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΤΑΣΕΩΝ $K_I$ & $K_{II}$ .....	62
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΤΩΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ.....	79
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	81
5.2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ.....	82
5.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	82
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	99
6.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	101
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	103





## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ**



## 1.1 ΣΚΟΠΟΣ - ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ

Η Μηχανική της Θραύσης αποτελεί ένα σημαντικότερο εργαλείο στον προσδιορισμό του “πότε”:

- Μία ρωγή δεδομένου μήκους,
- που αναπτύσσεται σε υλικό δοθέντος συντελεστή δυσθραυστότητας,
- θα φτάσει και τελικώς θα ξεπεράσει το “κρίσιμο” εκείνο μέγεθος, στο οποίο επέρχεται η θραύση του υλικού και εν συνεχεία η αστοχία της κατασκευής, υπό τις εκάστοτε, κάθε φορά, συνθήκες λειτουργίας - εφαρμοζόμενες τάσεις.

Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η εκ βάθους μελέτη του μηχανισμού προώθησης ρωγμών σε καθαρό διατμητικό πεδίο. Η επαρκής κατανόηση του τρόπου ανάπτυξης ρωγμών αποτελεί βασική προϋπόθεση για την έγκαιρη πρόβλεψη και αντιμετώπιση πιθανής αστοχίας σε λεπτές επίπεδες μεταλλικές επιφάνειες

## 1.2 ΦΑΣΕΙΣ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε σταδιακά με τη διαδικασία που περιγράφεται πιο κάτω στις εξής φάσεις:

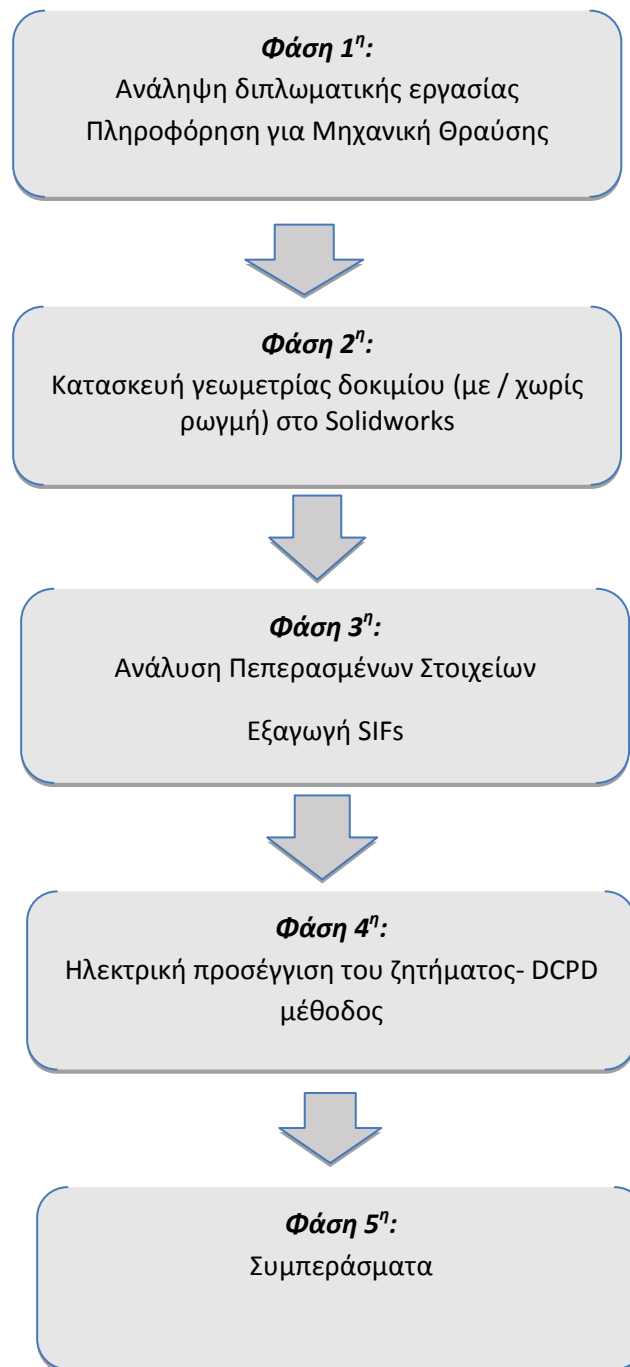
**Φάση 1<sup>η</sup>:** Ανάλυση διπλωματικής εργασίας. Μελέτη διπλωματικών εργασιών με παρόμοιο θέμα και αναζήτηση στο διαδίκτυο για συλλογή επαρκών και αξιόπιστων πληροφοριών σχετικά με το εξεταζόμενο ζήτημα.

**Φάση 2<sup>η</sup>:** Κατασκευή της συγκεκριμένης γεωμετρίας του δοκιμίου στο λογισμικό Solidworks. Κατασκευή στο ίδιο πρόγραμμα όλων των δοκιμίων που θα αναλυθούν στη συνέχεια και στα οποία προϋπάρχει ρωγή συνεπίπεδου διατμητικού τύπου.

**Φάση 3<sup>η</sup>:** Ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων για τη βέλτιστη ανάλυση και κατανόηση του μηχανισμού προώθησης ρωγμών. Υπολογισμός των παραγόντων έντασης τάσεων και εξαγωγή σχετικών διαγραμμάτων.

**Φάση 4<sup>η</sup>:** Ηλεκτρική προσέγγιση του ζητήματος, βάσει της μεθόδου πτώσης του ηλεκτρικού δυναμικού. Εξαγωγή γραφημάτων στα οποία απεικονίζεται η πτώση δυναμικού ανά εξεταζόμενο μήκος ρωγμής.

**Φάση 5<sup>η</sup>:** Αποτύπωση των συμπερασμάτων της παρούσας μελέτης.



Σχήμα 1.1: Φάσεις Υλοποίησης της διπλωματικής εργασίας

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:**

### **ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΚΑΙ ΕΞΕΛΙΞΗ ΡΩΓΜΩΝ**



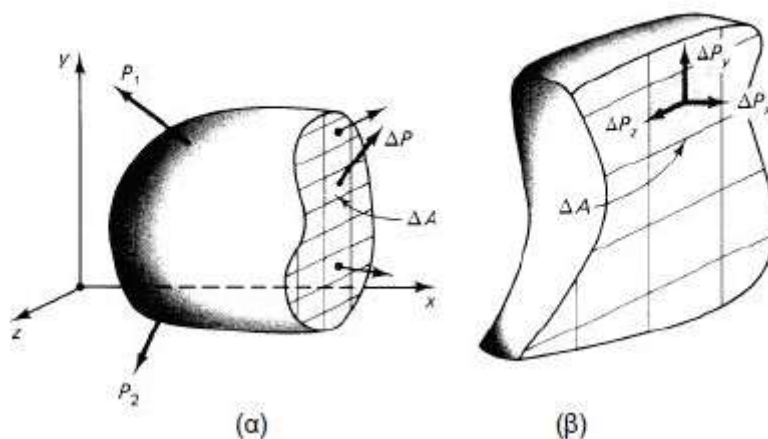
## 2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η συμπεριφορά δομικών στοιχείων υπό φόρτιση εξαρτάται αφενός από θεμελιώδεις νόμους της μηχανικής, αφετέρου από τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών των στοιχείων, όπως αυτά προκύπτουν βάσει εργαστηριακών δοκιμών.

Στις δοκιμές αυτές τα υλικά καταπονούνται συνήθως με γνωστές δυνάμεις, ενώ παράλληλα καταγράφεται η απόκρισή τους σε όρους παραμορφώσεων, ανάπτυξης ρωγμών ή άλλων μορφών αστοχίας.

## 2.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ

Οι εσωτερικές δυνάμεις που ασκούνται σε “πολύ μικρές” επιφάνειες  $\Delta A$  μίας τομής έχουν μέγεθος και φορά που γενικά ποικίλλει, ανάλογα με τη θέση της μικρής αυτής επιφάνειας. Τις δυνάμεις αυτές μπορούμε να θεωρήσουμε ως διανύσματα  $\Delta P$ , τα οποία μπορούν να αναλυθούν κάθετα στο επίπεδο της τομής ( $\Delta P_x$ ) αλλά και πάνω σε αυτό. Το διάνυσμα επί του επιπέδου αναλύεται περαιτέρω στους άξονες  $y$  και  $z$  ενός τρισσορθογώνιου συστήματος συντεταγμένων, δίνοντας τις δυνάμεις  $\Delta P_y$  και  $\Delta P_z$ .



Εικόνα 2.1: (α) Εσωτερικές δυνάμεις σε τομή ελευθέρου σώματος, (β) μεγέθυνση με τις συνιστώσες της δύναμης  $\Delta P$

Θεωρώντας την επιφάνεια  $\Delta A$  απειροστά μικρή, καταλήγουμε στον ορισμό της τάσης σε σημείο της τομής ως εξής:

$$\sigma_x = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P_x}{\Delta A}$$

$$\tau_{xy} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P_y}{\Delta A}$$

$$\tau_{xz} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P_z}{\Delta A}$$

Η τάση κάθετα στο επίπεδο της τομής (στη διεύθυνση του άξονα x) ονομάζεται ορθή τάση και συμβολίζεται με το γράμμα σ (ο δείκτης δηλώνει τη διεύθυνση), ενώ η τάση πάνω στο επίπεδο της τομής ονομάζεται διατμητική τάση και συμβολίζεται με το γράμμα τ. Βάσει της ανάλυσης της διατμητικής τάσης στους άξονες y και z, οι δείκτες του τ δηλώνουν: ο πρώτος τον άξονα που είναι κάθετος στο επίπεδο πάνω στο οποίο ασκείται η διατμητική τάση (άξονας x) και ο δεύτερος τη διεύθυνση του διανύσματος της διατμητικής τάσης (y ή z).

Τέλος, ορθές τάσεις που προκαλούν μήκυνση, δηλαδή εφελκυσμό του στερεού στη διεύθυνση που ασκούνται, ονομάζονται εφελκυστικές, ενώ αυτές που προκαλούν βράχυνση, δηλαδή θλίψη, ονομάζονται θλιπτικές.

Αυτό που αξίζει να γίνει κατανοητό, πέρα από τη μαθηματική διατύπωση της τάσης, είναι η φυσική σημασία της: η τάση σε κάθε σημείο ενός στερεού σώματος καθορίζει το βαθμό καταπόνησης του υλικού, δηλαδή το “πόσο αλλά και το πώς πονάει το υλικό” στο εν λόγω σημείο.

Έχοντας ορίσει την τάση ως “δύναμη δια επιφάνεια”, ως μονάδα τάσης στο διεθνές σύστημα ορίζεται το  $N/m^2$ , γνωστό και ως Pa (Pascal). Συνήθως όμως στην πράξη χρησιμοποιείται το MPa.

Το γινόμενο τάσης επί επιφάνεια στην οποία ασκείται δίνει δύναμη. Σε μία υποθετική τομή, το διανυσματικό άθροισμα όλων αυτών των δυνάμεων, δηλαδή οι συνισταμένες των τάσεων, αποτελεί αυτό που συχνά ονομάζουμε εσωτερικά εντατικά μεγέθη (αξονική δύναμη, τέμνουσα δύναμη, ροπή κάμψης κ.λ.π).

Στη μηχανική, συνήθως πρώτα προσδιορίζονται τα μεγέθη αυτά (βάσει ισορροπίας) και ακολούθως, μέσω μαθηματικών σχέσεων υπολογίζονται οι τάσεις.

## 2.3 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΗΣ ΘΡΑΥΣΗΣ

### 2.3.1 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΕΝΤΑΣΗΣ ΤΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

Το 1950 ο **Irwin** ανέπτυξε τη μέθοδο της **Έντασης Τάσεων**.

Κατ’ αρχήν έδειξε ότι οι τάσεις  $\sigma$  στην περιοχή της ρωγμής έχουν τη μορφή:

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta)$$



όπου,  $r$  &  $\theta$  είναι οι κυλινδρικές πολικές συντεταγμένες του σημείου ως προς την αιχμή της ρωγμής και  $K_I$  είναι μια σταθερά που μας δίνει το μέγεθος του πεδίου ελαστικής τάσης και καλείται **Συντελεστής Έντασης Τάσεων**.

Ο Συντελεστής Έντασης Τάσεων  $K_I$  δίνεται γενικά από τη σχέση:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \cdot f\left(\frac{a}{w}\right)$$

όπου  $f(a/w)$  είναι μια αδιάστατη παράμετρος η οποία εξαρτάται μόνο από τη γεωμετρία του δοκιμίου, το πλάτος του ( $w$ ) και το μήκος της ρωγμής ( $a$ ).

Ο Irwin έδειξε επίσης ότι η διάδοση της ρωγμής εξαρτάται από την επίτευξη μιας κρίσιμης τιμής για το Συντελεστή Έντασης Τάσεων, την  $K_{IC}$ , την **Αντοχή Θραύσης** ή **Σκληρότητα Θραύσης**, και επιπλέον, ότι αυτό είναι απ' ευθείας ισοδύναμο με την επίτευξη της κρίσιμης ελαστικής ενέργειας,  $G_C$ , στη μέθοδο Griffith-Irwin. Μάλιστα, οι δύο κρίσιμες τιμές συνδέονται με την παρακάτω σχέση: [6]

$$G_C = \frac{K_{IC}^2}{E}$$

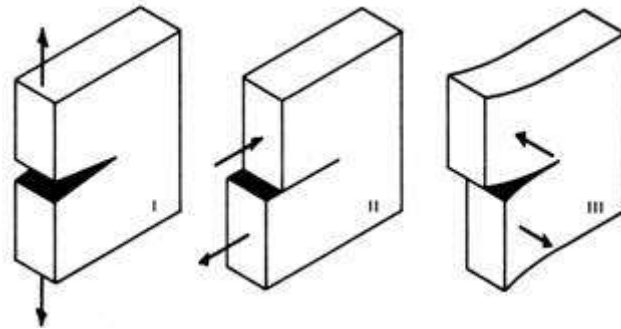
### 2.3.2 Ο ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ K ΚΑΙ Ο ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

Ο συντελεστής  $K$  χρειάζεται, είτε, για να υπολογίσουμε τη στατική αντοχή μιας κατασκευής με ρωγμή, είτε, την επέκταση μιας ρωγμής σε κατασκευή που φορτίζεται δυναμικά, είτε, την επέκταση μιας ρωγμής λόγω διάβρωσης σε μια φορτισμένη κατασκευή.

Για να προβλέψουμε τη συμπεριφορά των ατελειών στα διάφορα υλικά, θα πρέπει να γνωρίζουμε ή να προσδιορίσουμε την τιμή του συντελεστή  $K$  που αντιστοιχεί στη κάθε περίπτωση. Διακρίνουμε τρεις μορφές του συντελεστή  $K$ , μια για κάθε έναν από τους τρεις τρόπους (modes) φόρτισης μιας ρωγμής:

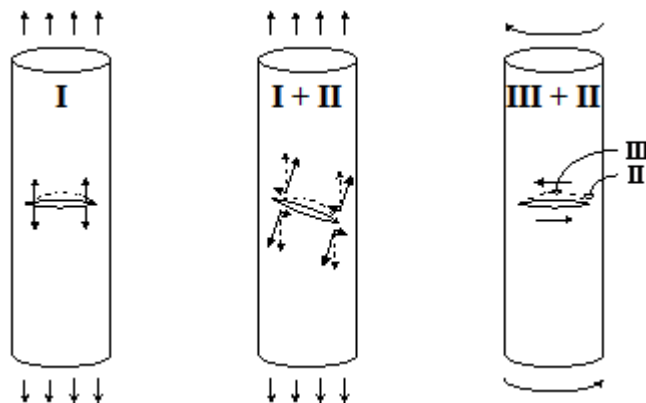
1.  $K_I$  για τρόπο φόρτισης I : Άνοιγμα. (Mode I, Opening mode)
2.  $K_{II}$  για τρόπο φόρτισης II : Ολίσθηση. (Mode II, Sliding mode)
3.  $K_{III}$  για τρόπο φόρτισης III : Ψαλιδισμός. (Mode III, Tearing mode)

Οι τρεις τρόποι φόρτισης μιας ρωγμής (I, II & III) φαίνονται στην παρακάτω Εικόνα 2.2. [6]



Εικόνα 2.2: Οι τρεις τρόποι φόρτισης μιας ρωγμής I (Άνοιγμα), II (Ολίσθηση) & III (Ψαλιδισμός)

Ο Τρόπος I (εφελκυστική φόρτιση) συναντάται στην πλειοψηφία των περιπτώσεων και γι' αυτό έχει λάβει πολύ μεγαλύτερη προσοχή σε θεωρητικό και πειραματικό επίπεδο. Ο Τρόπος II (ολίσθηση) είναι ο λιγότερο συχνός. Εμφανίζεται συνήθως μαζί με τον I ή III οι οποίοι είναι και οι κυρίαρχοι τρόποι φόρτισης. Ο Τρόπος III (ψαλιδισμός) εμφανίζεται κατά την στρέψη μιας ράβδου που φέρει ρωγή. [6]



Εικόνα 2.3: Παραδείγματα εμφάνισης των τριών τρόπων φόρτισης ή των συνδυασμών τους

## 2.4 ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗΣ ΤΑΣΗΣ (TRESCA)

Σύμφωνα με αυτό το κριτήριο, η διαρροή στα όλκιμα υλικά επέρχεται όταν η μέγιστη διατμητική τάση  $\tau_{\max}$  σε οποιοδήποτε επίπεδο γίνει ίση με μια κρίσιμη τιμή  $\tau_0$  που είναι ιδιότητα του υπόψιν υλικού.

Οι τιμές των διατμητικών τάσεων μεγιστοποιούνται σε επίπεδα που έχουν κλίση  $45^\circ$  ως προς τα επίπεδα των κύριων τάσεων. Οι τιμές τους εκεί είναι:

$$\tau_1 = \frac{|\sigma_2 - \sigma_3|}{2}$$

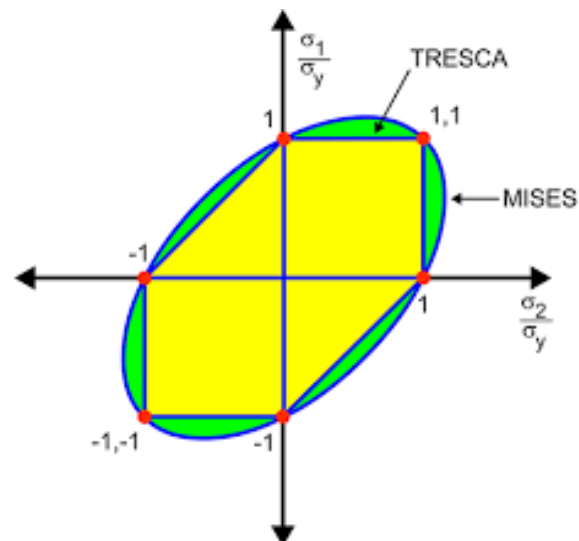
$$\tau_2 = \frac{|\sigma_1 - \sigma_3|}{2}$$

$$\tau_3 = \frac{|\sigma_1 - \sigma_2|}{2}$$

Έτσι, η συνθήκη διαρροής είναι:

$$\tau_0 = \max\left(\frac{|\sigma_2 - \sigma_3|}{2}, \frac{|\sigma_1 - \sigma_3|}{2}, \frac{|\sigma_1 - \sigma_2|}{2}\right)$$

Ο τόπος διαρροής για την περίπτωση της επίπεδης έντασης (εξάγωνο Tresca) καθώς και για τη γενική περίπτωση της τρισδιάστατης εντατικής κατάστασης δείχνονται στο παρακάτω σχήμα [10]:



Εικόνα 2.4: Διατμητικά κριτήρια Tresca & Von Mises



**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:**

**ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ –**

**ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΡΩΓΜΗΣ**



### 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

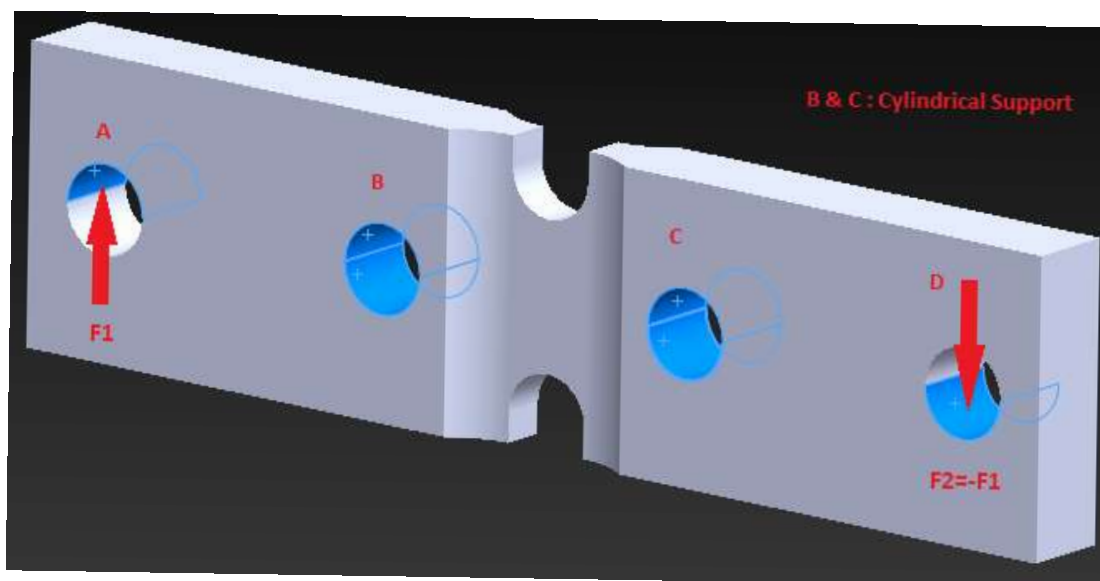
Στην υπάρχουσα βιβλιογραφία υπάρχουν σχετικά περιορισμένα δεδομένα για την ανάπτυξη ρωγμών συνεπίπεδου διατμητικού τύπου (Τύπος II).

Κάθε προτεινόμενη μέθοδος δοκιμής θα πρέπει να ανταποκρίνεται σε μία σειρά κριτηρίων, μεταξύ των οποίων συγκαταλέγονται τα κάτωθι:

- Ανάπτυξη ομοιόμορφου διατμητικού πεδίου στην περιοχή μετρήσεων.
- Ελαχιστοποίηση της πιθανότητας ύπαρξης περιοχών που χαρακτηρίζονται από υψηλές συγκεντρώσεις τάσεων εντός της ζώνης μετρήσεων.
- Ελαχιστοποίηση της πιθανότητας ανάπτυξης ορθών τάσεων εντός της περιοχής μετρήσεων.

### 3.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

Η παρούσα διπλωματική εργασία διεξήχθη με βάση δοκίμιο συγκεκριμένης γεωμετρίας, κατοχυρωμένης με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας (Inventor: Michelis Paul, Publication number: 0 687 899 A2).



Εικόνα 3.1: Γεωμετρία Δοκιμίου

Η συγκεκριμένη γεωμετρία του δοκιμίου εξασφαλίζει την ανάπτυξη ομοιόμορφου και καθαρού διατμητικού πεδίου τάσεων, γεγονός που οφείλεται σε δύο κυρίως παράγοντες:

- Στη γεωμετρία της περιοχής μετρήσεων. Πιο συγκεκριμένα, η προτεινόμενη γεωμετρία χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη ημικυκλικής ζώνης μετρήσεων (αύλακα σχήματος U).
- Στον τρόπο με τον οποίον εφαρμόζονται οι δυνάμεις επάνω στο δοκίμιο.

Η τρισδιάστατη αναπαράσταση του δοκιμίου πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό Solidworks 2016. Το δημιουργηθέν 3D μοντέλο αποτέλεσε τη βάση των αναλύσεων που διεξήχθησαν στο λογισμικό Ansys.

Στην Εικόνα 3.1 αποτυπώνεται πλήρως η τρισδιάστατη αναπαράσταση του εν λόγω δοκιμίου. Σε αυτήν διακρίνονται τέσσερις εσοχές (holes) κυλινδρικής γεωμετρίας οι οποίες εκτείνονται σε όλο το πλάτος του δοκιμίου.

Οι κυλινδρικές αυτές επιφάνειες θα αποτελέσουν τη βάση για την επίτευξη κατάλληλης φόρτισης του δοκιμίου, ικανής να οδηγήσει στην ανάπτυξη ομοιόμορφου διατμητικού πεδίου στην κεντρική περιοχή μετρήσεων, ακόμα και σε περιπτώσεις υψηλού βαθμού παραμόρφωσης του υλικού.

Στην επόμενη σελίδα ακολουθεί η δισδιάστατη απεικόνιση του δοκιμίου. Στο Σχέδιο αυτό αποτυπώνονται λεπτομερώς οι διαστάσεις του.







### 3.3 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΡΩΓΜΗΣ

Ο Irwin [1] συμπέρανε ότι οι τάσεις και οι μετατοπίσεις κοντά και γύρω από το άκρο της ρωγμής, μέσα σε ένα ομογενές ελαστικό μέσο παρουσιάζουν ιδιόμορφη συμπεριφορά αναφορικά με την απόσταση  $r$  από το άκρο της ρωγμής.

Πιο συγκεκριμένα:

$$\text{Μετατοπίσεις} \sim \sqrt{r}$$

$$\text{Τάσεις} \sim \frac{1}{\sqrt{r}}$$

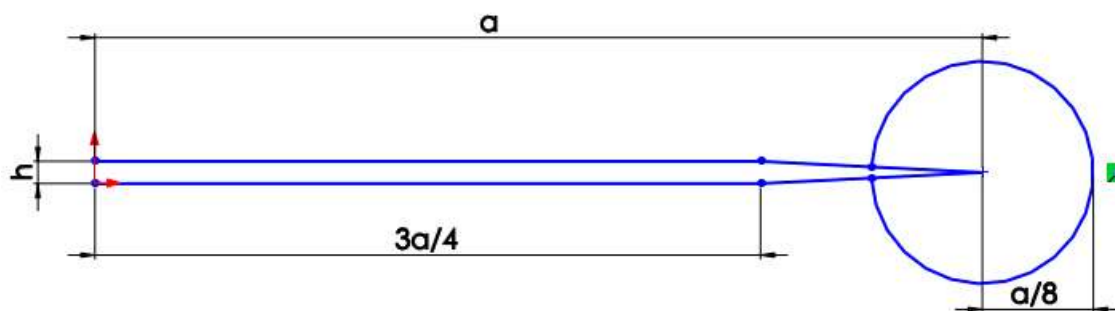
$$\text{Παραμορφώσεις} \sim \frac{1}{\sqrt{r}}$$

Η παρούσα διπλωματική εργασία διερευνά την ανάπτυξη και διάδοση ρωγμών σε καθαρό διατμητικό πεδίο. Για το λόγο αυτό, εξετάζονται δοκίμια στα οποία προϋπάρχει ρωγή πλάτους  $h$ , μεταβαλλόμενου μήκους  $a$ , στην κεντρική περιοχή μετρήσεων.

Η σχεδίαση των ρωγμών στο δοκίμιο κράματος αλουμινίου πραγματοποιήθηκε βάσει συγκεκριμένης γεωμετρίας, όπως αυτή απεικονίζεται στην Εικόνα 3.2 που ακολουθεί.

Η γεωμετρία αυτή λαμβάνει υπόψιν της 2 παράγοντες:

- Τα χείλη της ρωγμής θα πρέπει να συμπίπτουν.
- Το πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων που θα δημιουργηθεί θα δώσει επαρκή στοιχεία σχετικά με το τασικό πεδίο που αναπτύσσεται γύρω από το άκρο της ρωγμής (crack-tip).



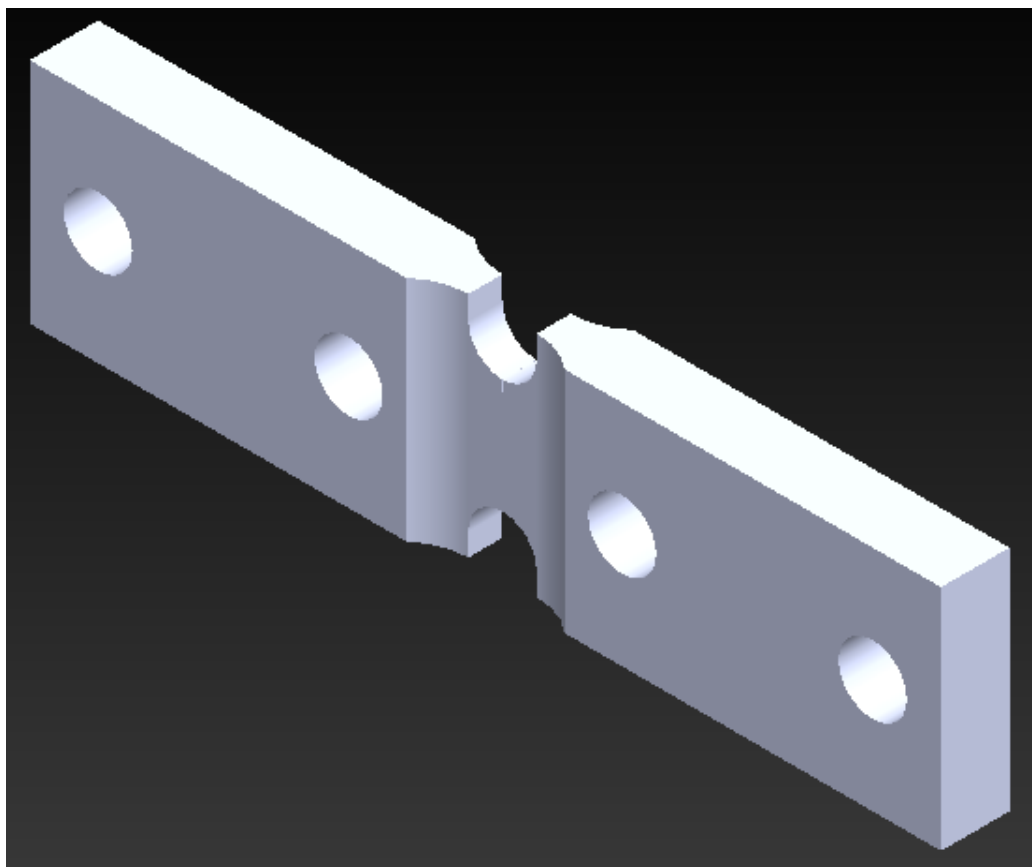
Εικόνα 3.2: Γεωμετρία Ρωγμής

### 3.4 ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ (3D) ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΡΗΓΜΑΤΩΜΕΝΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

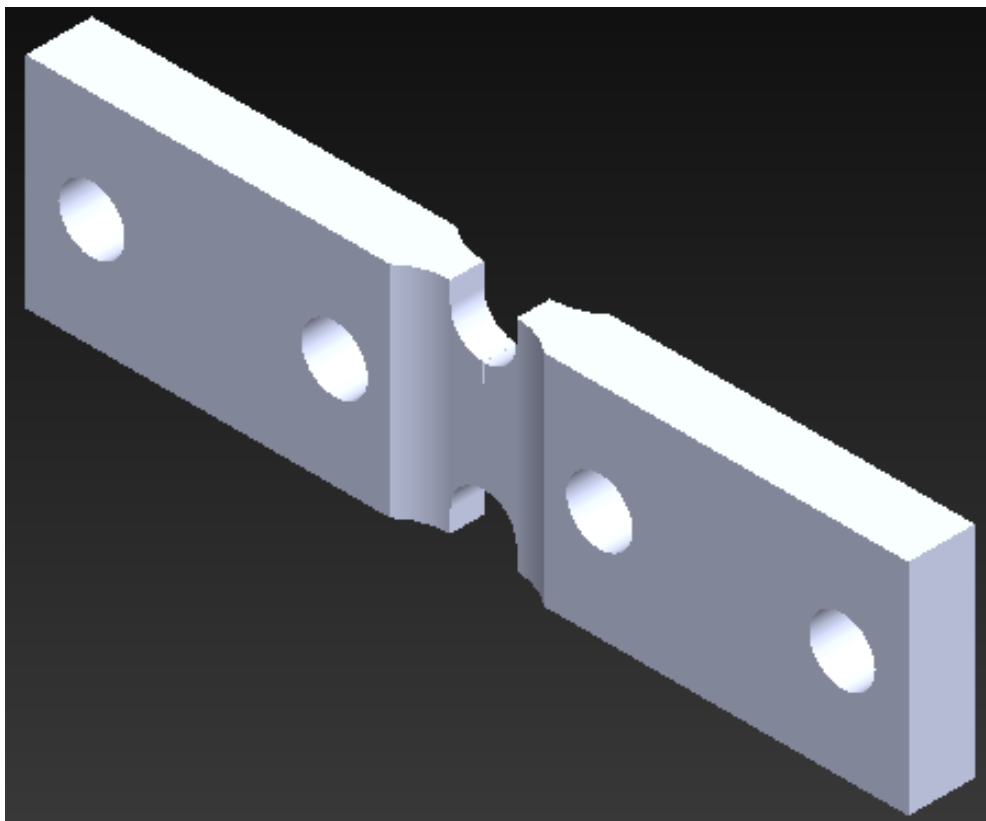
Για τους σκοπούς της παρούσας διπλωματικής εργασίας μελετώνται 8 διαφορετικές περιπτώσεις ρηγματωμένων δοκιμίων, τα οποία φέρουν ρωγή στον κάθετο άξονα της κεντρικής ζώνης μετρήσεων.

Πιο συγκεκριμένα, οι υπολογισμοί εκκινούν με δοκίμιο το οποίο φέρει ρωγή μήκους 1mm. Αντιστοίχως, για τα λοιπά δοκίμια έχει θεωρηθεί βαθμιαίο μήκος αύξησης της ρωγμής ίσο με 1mm ανά εξεταζόμενη κάθε φορά περίπτωση.

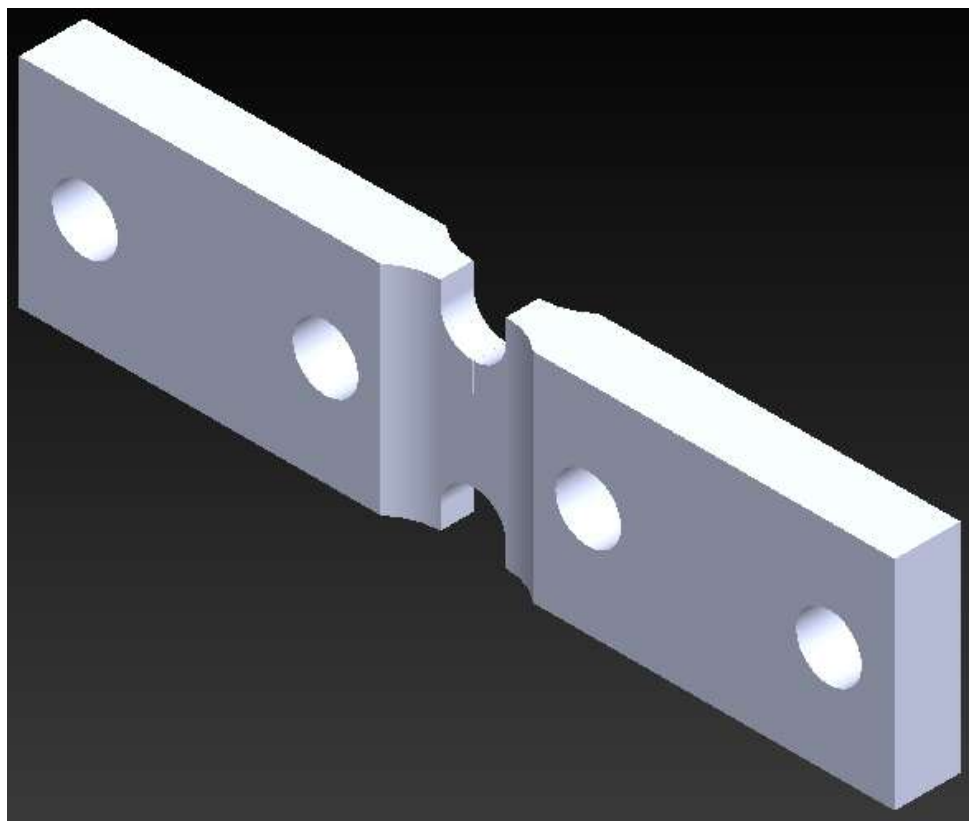
Στις Εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζονται τα 8 ρηγματωμένα δοκίμια όπως αυτά σχεδιάστηκαν με τη βοήθεια του λογισμικού προγράμματος Solidworks.



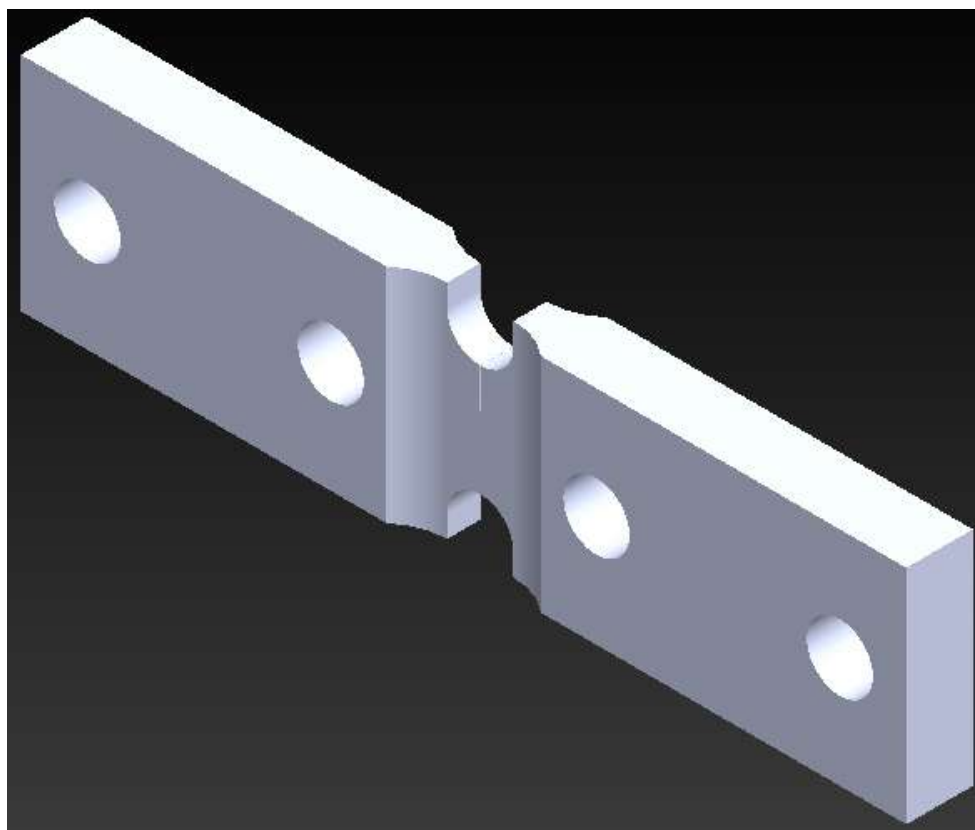
*Εικόνα 3.3: Ισομετρική Όψη Δοκιμίου με ρωγή μήκους 1mm*



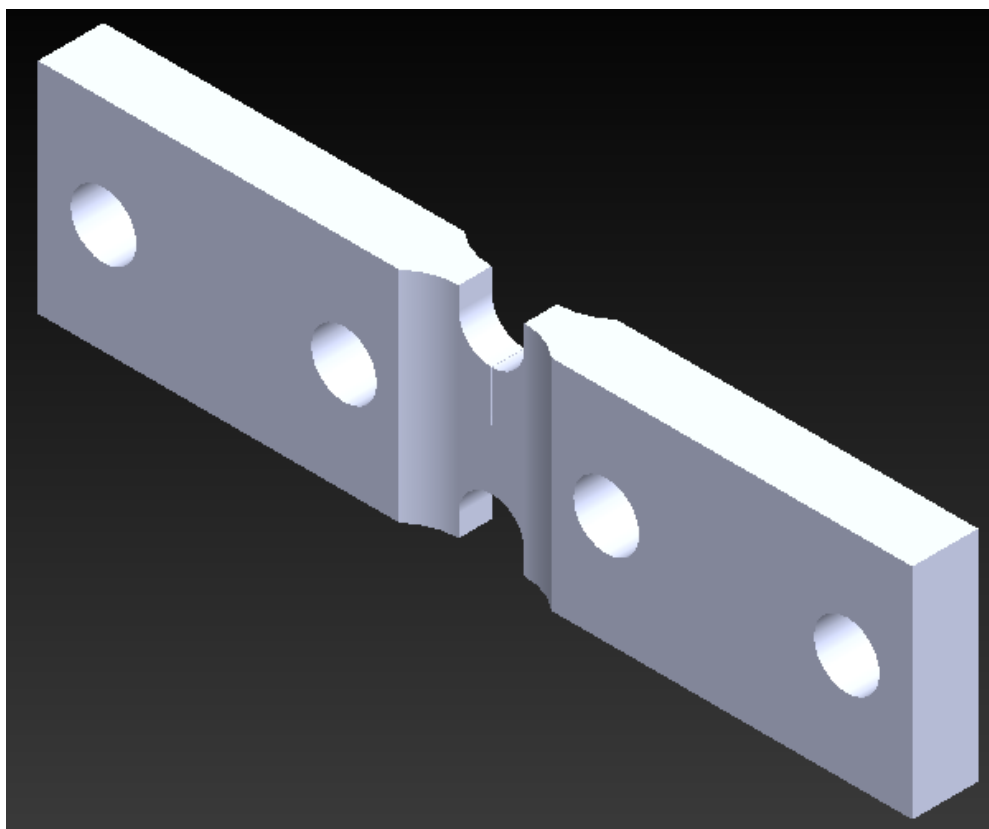
*Εικόνα 3.4: Ισομετρική Όψη Δοκιμίου με ρωγή μήκους 2mm*



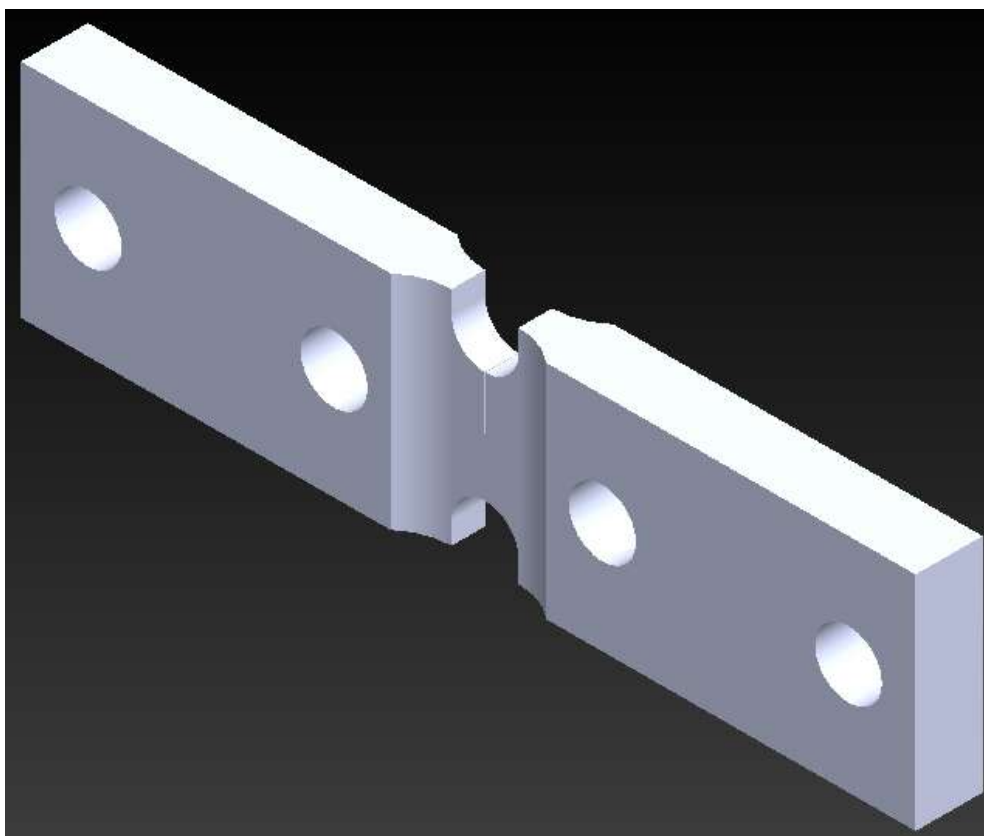
*Εικόνα 3.5: Ισομετρική Όψη Δοκιμίου με ρωγή μήκους 3mm*



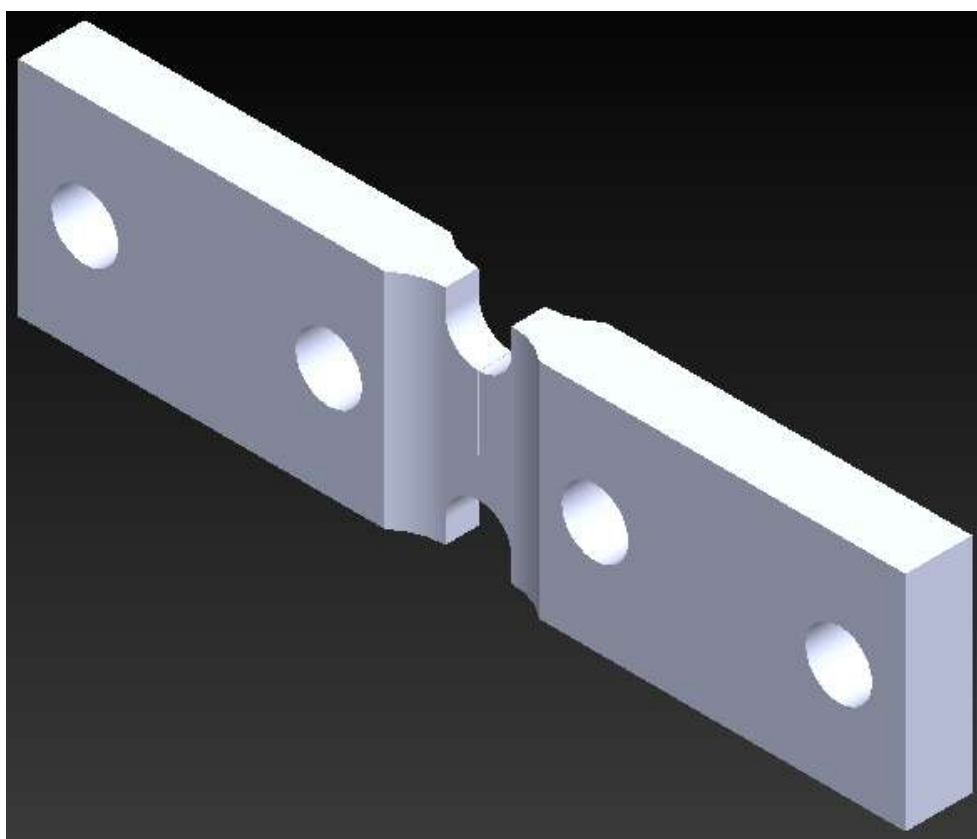
*Εικόνα 3.6: Ισομετρική Όψη Δοκιμίου με ρωγή μήκους 4mm*



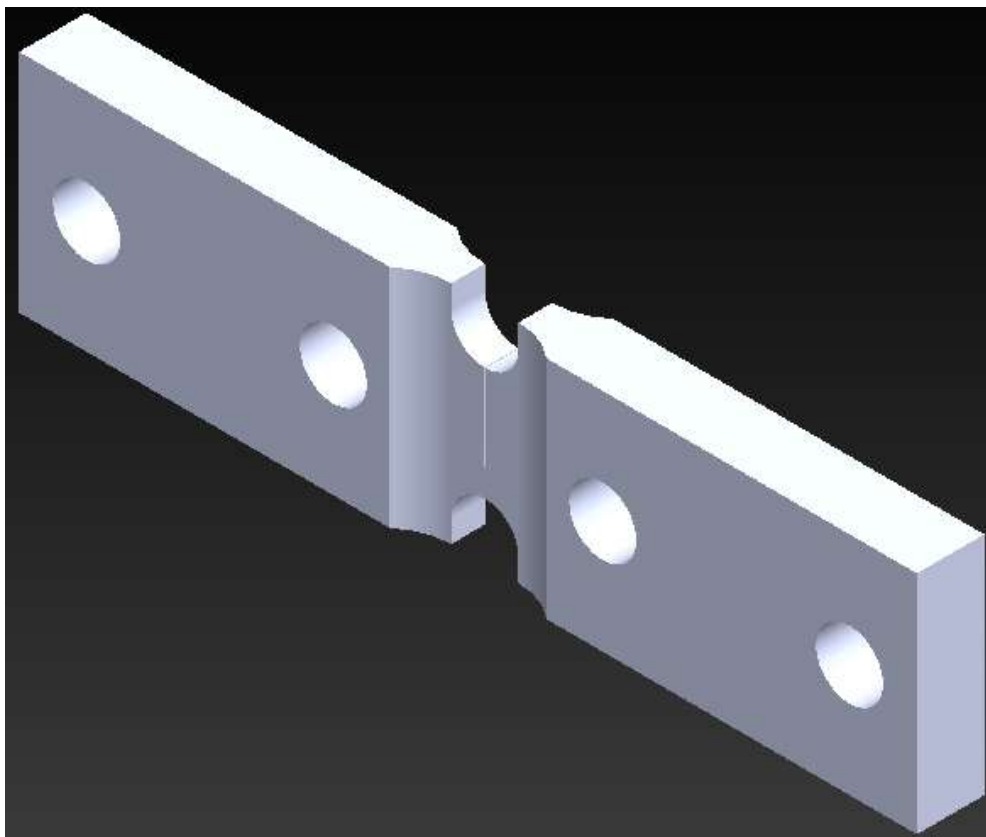
*Εικόνα 3.7: Ισομετρική Όψη Δοκιμίου με ρωγή μήκους 5mm*



*Εικόνα 3.8: Ισομετρική Όψη Δοκιμίου με ρωγή μήκους 6mm*

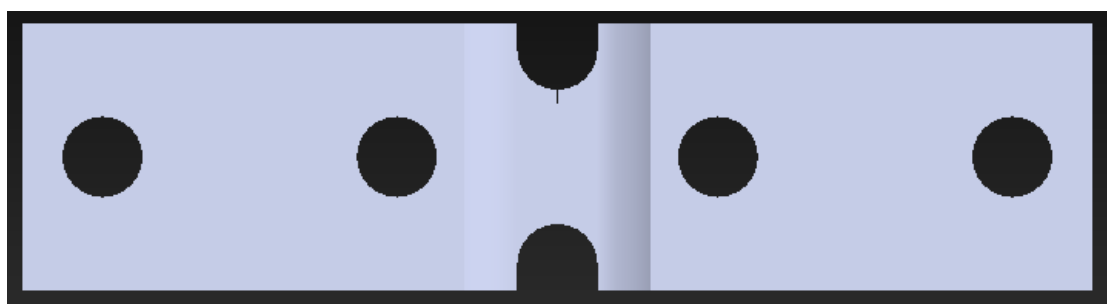


*Εικόνα 3.9: Ισομετρική Όψη Δοκιμίου με ρωγή μήκους 7mm*



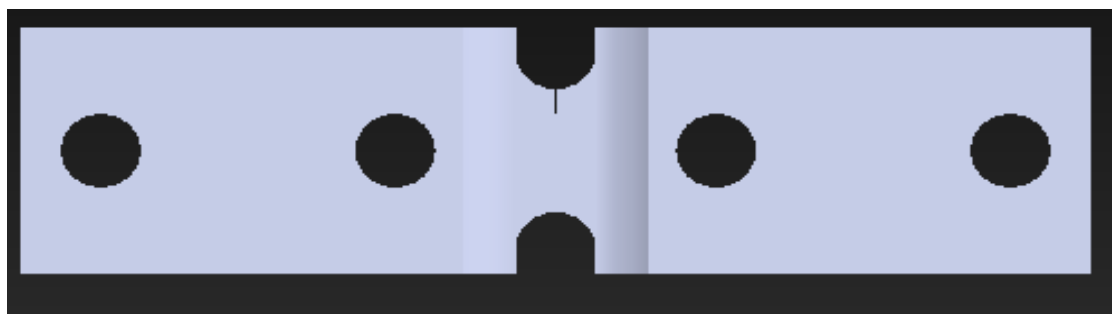
*Εικόνα 3.10: Ισομετρική Όψη Δοκιμίου με ρωγή μήκους 8mm*

➤ **2D-ΟΨΕΙΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΜΕ ΡΩΓΜΗ**

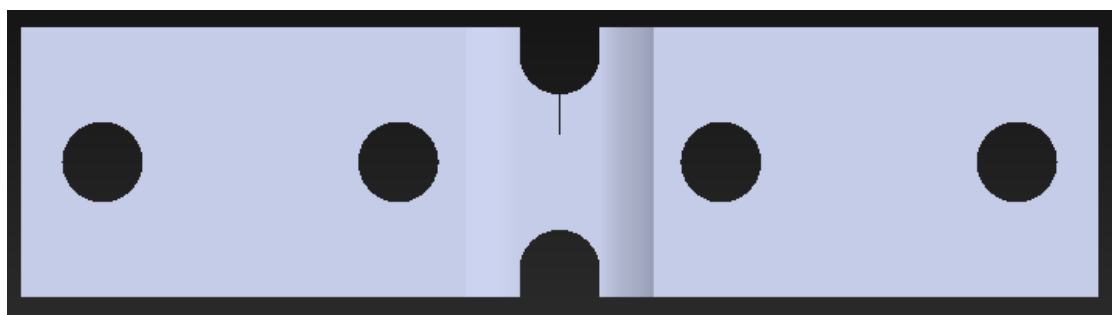


*Εικόνα 3.11: 2D Όψη Δοκιμίου με ρωγή μήκους 1mm*

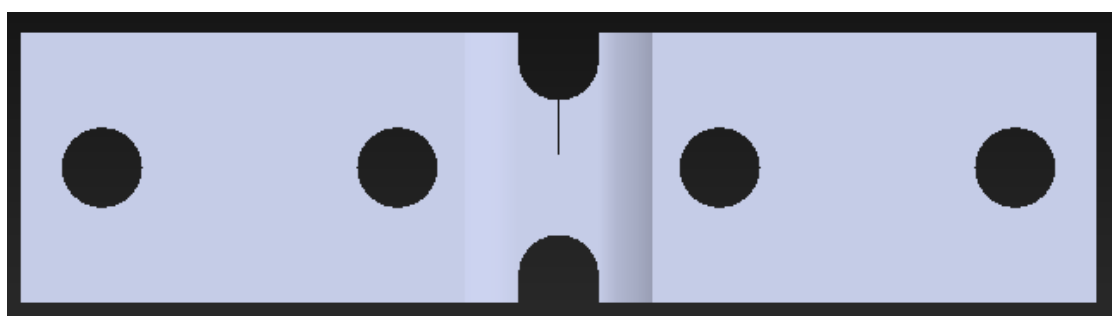




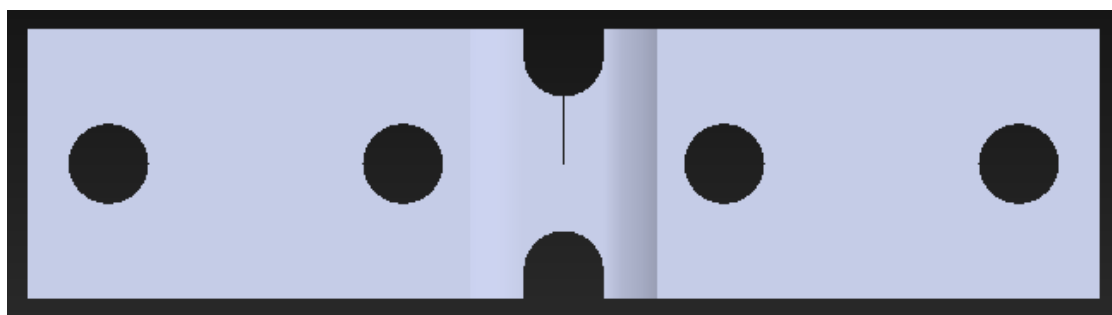
*Εικόνα 3.12: 2D Όψη Δοκιμίου με ρωγμή μήκους 2mm*



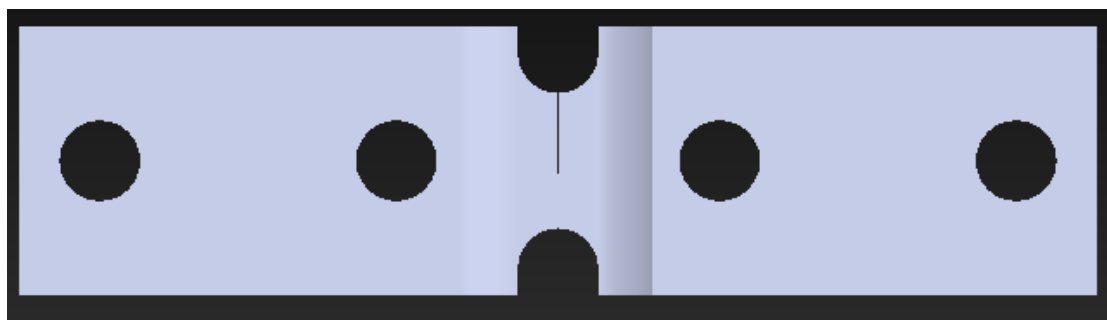
*Εικόνα 3.13: 2D Όψη Δοκιμίου με ρωγμή μήκους 3mm*



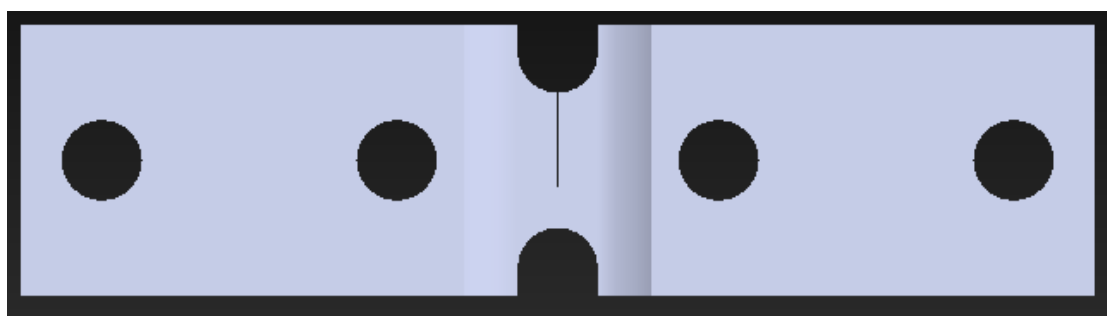
*Εικόνα 3.14: 2D Όψη Δοκιμίου με ρωγμή μήκους 4mm*



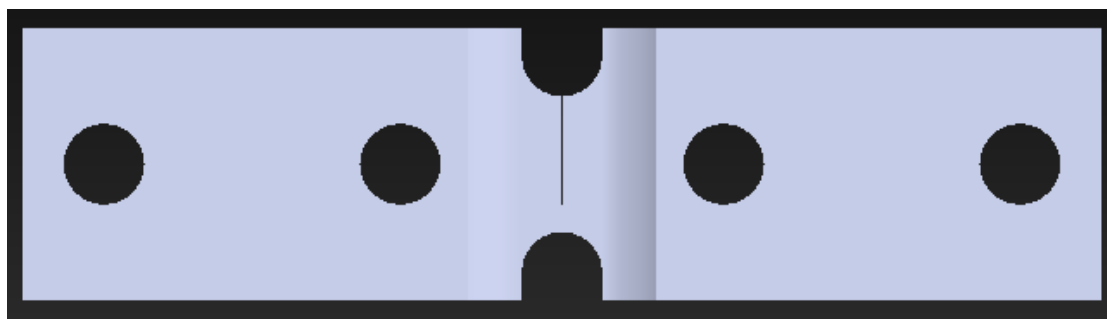
*Εικόνα 3.15: 2D Όψη Δοκιμίου με ρωγμή μήκους 5mm*



*Εικόνα 3.16: 2D Όψη Δοκιμίου με ρωγή μήκους 6mm*



*Εικόνα 3.17: 2D Όψη Δοκιμίου με ρωγή μήκους 7mm*



*Εικόνα 3.18: 2D Όψη Δοκιμίου με ρωγή μήκους 8mm*

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:**

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**



## 4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων είναι μια αριθμητική μέθοδος (δηλαδή μέθοδος υπολογισμού με χρήση Η/Υ) για τον υπολογισμό προσεγγιστικών λύσεων μερικών διαφορικών εξισώσεων. [3]

Η αναλυτική λύση των εξισώσεων με τις οποίες περιγράφονται τα διάφορα τεχνικά προβλήματα είναι δυνατή μόνο σε ειδικές περιπτώσεις, όπου οι καταπονήσεις και τα γεωμετρικά σχήματα είναι πάρα πολύ απλά. [3]

Όμως, υπήρχε η ανάγκη να λυθούν και πιο σύνθετα προβλήματα και γι' αυτό το λόγο αναπτύχθηκαν διάφορες προσεγγιστικές μέθοδοι. [3]

Μία τέτοια μέθοδος είναι και η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Αυτή η μέθοδος είναι μεν προσεγγιστική, αλλά μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα και έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα προβλήματα. Το μειονέκτημά της είναι οι αυξημένες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ, ιδίως όταν εφαρμόζεται σε σύνθετα μοντέλα. Αυτό όμως το μειονέκτημα ξεπεράστηκε τα τελευταία χρόνια χάρη στη ραγδαία ανάπτυξη των υπολογιστών. Η επιτυχία αυτής της μεθόδου ήταν τόσο μεγάλη, που ακόμα και σήμερα χρησιμοποιείται στην έρευνα και στη βιομηχανία για τον υπολογισμό και τη μελέτη διάφορων κατασκευών. [3]

Για να εφαρμοστεί η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων απαιτούνται τα εξής στάδια:

- Εισάγεται η γεωμετρία της κατασκευής σε ένα πρόγραμμα CAD και δημιουργείται το τρισδιάστατο μοντέλο.
- Χωρίζεται το μοντέλο σε πεπερασμένα στοιχεία και αφού ετοιμαστεί το πλέγμα επιλέγεται το είδος της επίλυσης και εισάγονται τα επιπλέον δεδομένα που απαιτούνται. Παραδείγματος χάριν, αν επιλεγεί να λυθεί το μοντέλο σε στατική καταπόνηση θα πρέπει να δοθούν τα δεδομένα για τις δυνάμεις και τις στηρίξεις. Αυτή η διαδικασία γίνεται με προγράμματα που αποκαλούνται pre processor.
- Όταν ετοιμαστούν τα δεδομένα για επίλυση, εισάγονται σε ένα πρόγραμμα το οποίο θα κάνει την επίλυση του προβλήματος. Τέτοιου είδους προγράμματα λέγονται solver και χρησιμοποιούν για τις επιλύσεις αριθμητικές μεθόδους.
- Όταν τελειώσει η επίλυση τα αποτελέσματα, πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα πρόγραμμα, που αποκαλείται post processor, για να μπορέσει ο μελετητής να δει τα αποτελέσματα. [3]

## 4.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΗ ΡΗΓΜΑΤΩΜΕΝΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗΣ ΤΑΣΗΣ

### 4.2.1 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΦΟΡΤΙΑ

Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε ως δοκίμιο για την πραγματοποίηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν το κράμα αλουμινίου από τη βιβλιοθήκη υλικών του λογισμικού Ansys (General Aluminum Alloy).

Στον Πίνακα 4.1 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι ιδιότητες του συγκεκριμένου αυτού υλικού.

Πίνακας 4.1: Ιδιότητες δοκιμίου κράματος αλουμινίου

<b>General Aluminum Alloy</b> (Fatigue properties come from MIL-HDBK-5H, pages 3-277)	
Πυκνότητα (Density)	2770 kg m <sup>-3</sup>
Μέτρο Ελαστικότητας Young (Young's modulus)	7.1E+10 Pa
Μέτρο Διάτμησης (Shear Modulus)	2.7E+10 Pa
Λόγος Poisson (Poisson's ratio)	0.33

Αναφορικά με τον τρόπο φόρτισης του δοκιμίου και τους περιορισμούς που διέπουν το εν λόγω πρόβλημα ισχύουν τα εξής:

- Το ζεύγος των εξωτερικών κυλινδρικών επιφανειών του δοκιμίου φορτίζεται υπό την άσκηση δυνάμεων ίσου μέτρου, αντίθετης φοράς. Πιο συγκεκριμένα, στην αριστερότερη λαβή του δοκιμίου, στην άνω κυλινδρική επιφάνεια αυτής, ασκείται δύναμη  $F_1$  ίση με 100N. Αντιστοίχως, στη δεξιότερη λαβή του δοκιμίου, στην κάτω κυλινδρική επιφάνεια αυτής, ασκείται δύναμη ίσου μέτρου, αντίθετης φοράς, δηλαδή δύναμη ίση με -100N.
- Οι εσωτερικές λαβές του δοκιμίου αποτελούν σταθερά σημεία με δυνατότητα περιστροφής γύρω από τον άξονά τους.
- Είναι φανερό ότι η επίδραση των δυνάμεων  $F_1$  στις εξωτερικές λαβές του δοκιμίου θα οδηγήσει στην ανάπτυξη δυνάμεων αντίδρασης  $F_2$  στις εσωτερικές λαβές αυτού. Ως εκ τούτου, η δύναμη διάτμησης που επενεργεί στην κεντρική περιοχή μετρήσεων ισούται με  $F_2-F_1$ .

- Η κεντρική περιοχή μετρήσεων εντοπίζεται στο τμήμα του δοκιμίου που εκτείνεται μεταξύ των δύο ημικυκλικών αυλάκων (αύλακες σχήματος U). Όπως έχει αποδειχθεί, κάτω από τις προαναφερθείσες ισχύουσες συνθήκες, το κεντρικό αυτό τμήμα του δοκιμίου υπόκειται σε καθαρή διάτμηση.
- Λαμβάνοντας υπόψιν τη γεωμετρία του δοκιμίου, προκύπτουν οι ακόλουθες σχέσεις:

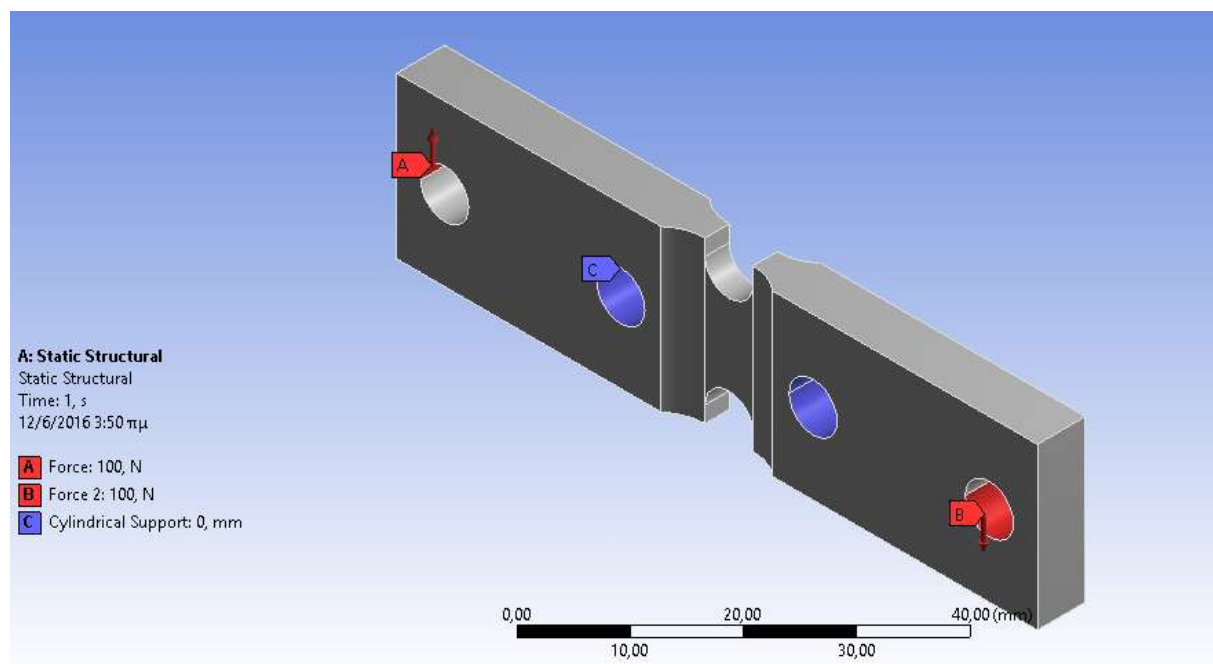
$$A = 30 \text{ mm}^2$$

$$F_2 = F_1 \times \frac{68}{24} = 2.83 \times F_1$$

- Με δεδομένο ότι το διατμητικό πεδίο που αναπτύσσεται είναι ομοιόμορφο, ο υπολογισμός της διατμητικής τάσης  $\tau_m$ , στην περιοχή αυτή, γίνεται μέσω της σχέσης:

$$\tau_m = \frac{F_2 - F_1}{A}$$

Στην Εικόνα 4.1 που ακολουθεί παρουσιάζονται σχηματικά οι ως άνω αναφερθέντες περιορισμοί – ισχύουσες συνθήκες.



Εικόνα 4.1: Φόρτιση Δοκιμίου - Περιορισμοί

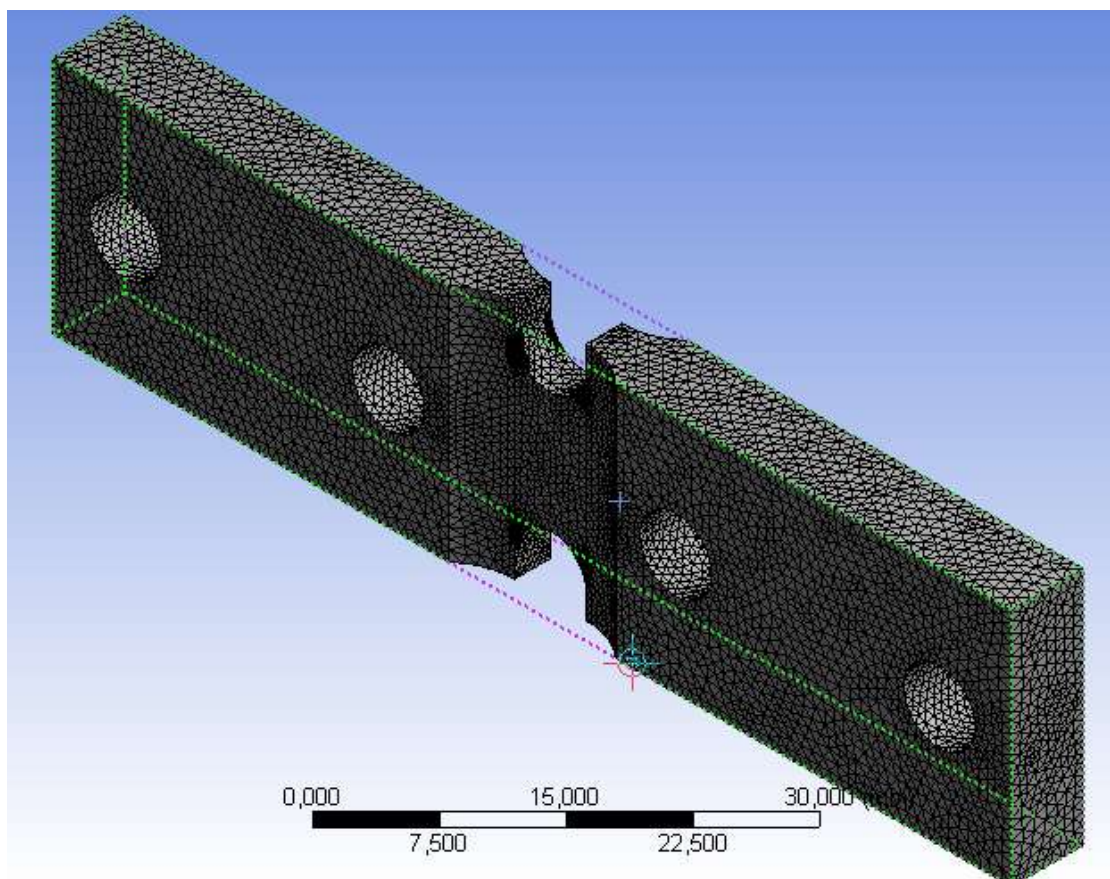
#### 4.2.2 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Προκειμένου να παραχθεί το κατάλληλο πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων πάνω στο οποίο θα βασιστεί η εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων πραγματοποιήθηκαν οι παρακάτω ρυθμίσεις:

- Επιλογή τετραεδρικών στοιχείων: οποιοσδήποτε τρισδιάστατος (3D) αυθαίρετα διαμορφωμένος όγκος, ανεξαρτήτως σχήματος ή τοπολογίας, μπορεί να αναλυθεί μέσω πλέγματος τετραεδρικών στοιχείων.
- Patch Conforming μέθοδος: η διαδικασία παραγωγής πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων βασίζεται σε μία προσέγγιση από κάτω προς τα πάνω, με πλήρη σεβασμό στις επιφάνειες και στα αντίστοιχα όρια τους.

ΑΚΜΕΣ → ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ → ΟΓΚΟΙ

Στην Εικόνα 4.2 που ακολουθεί παρουσιάζεται το πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων του δοκιμίου πριν το σχηματισμό ρωγμής σε αυτό.



Εικόνα 4.2: Πλέγμα Πεπερασμένων Στοιχείων Μη Ρηγματωμένου Δοκιμίου

Αναφορικά με την ποιότητα του πλέγματος, το παραχθέν πλέγμα εξετάστηκε ως προς τα 2 κάτωθι κριτήρια:

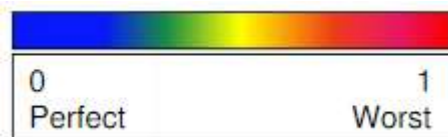


1. Ποιότητα των στοιχείων που συναποτελούν το πλέγμα (Element Quality):

Average Element Quality: 0.83546

Max Element Quality: 0.99963

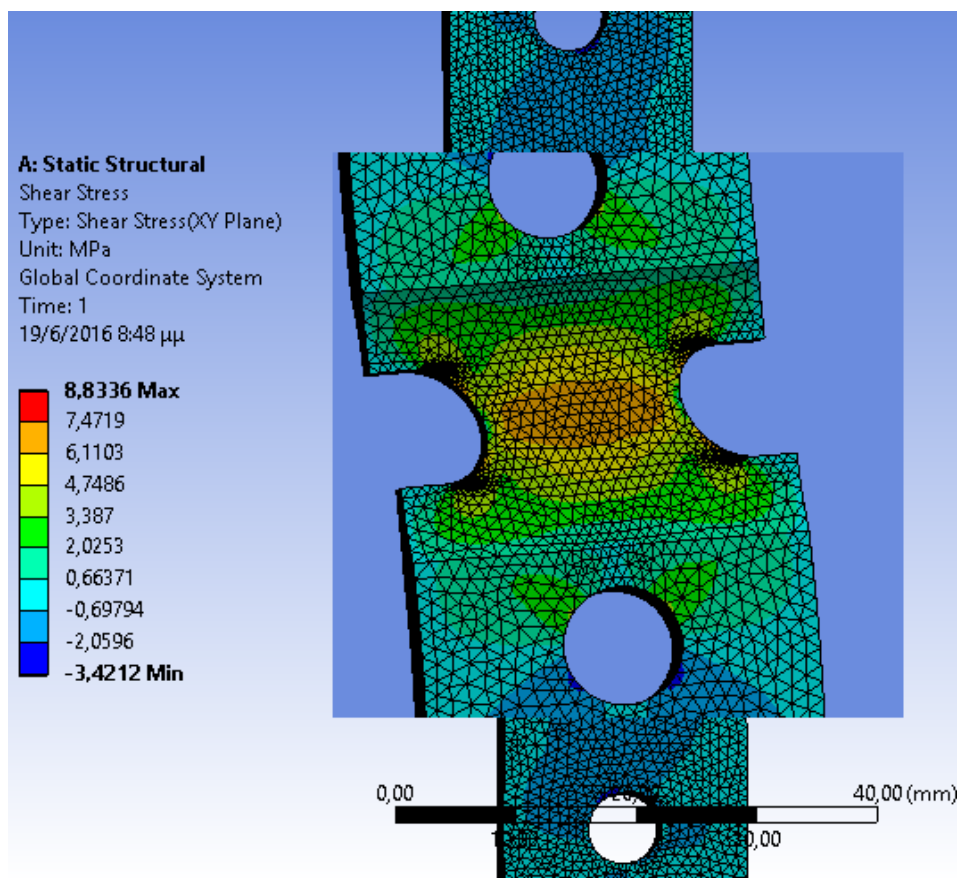
2. Ασυμμετρία πλέγματος (Mesh Skewness): παράμετρος που καθορίζει πότε το παραχθέν πλέγμα χαρακτηρίζεται από υψηλό βαθμό ασυμμετρίας ή κατά πόσο προσεγγίζει τη γεωμετρία ενός ιδεατού τριγώνου ή τετραγώνου.



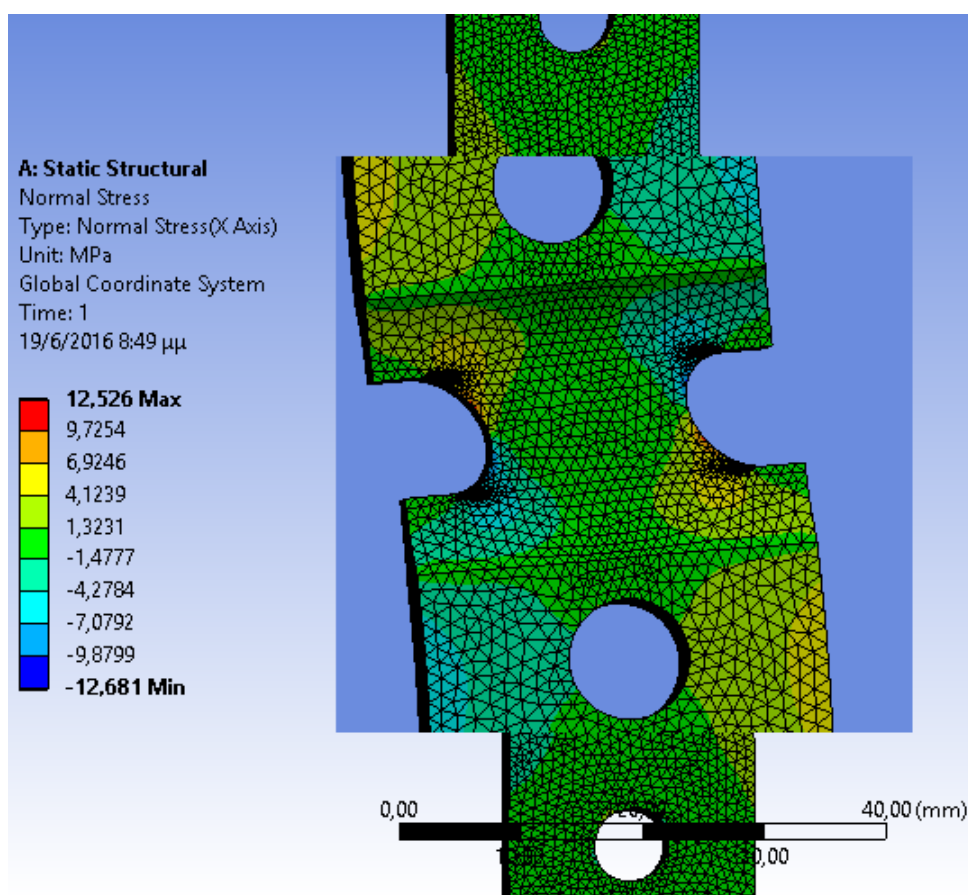
Average Skewness: 0.23146

### 4.2.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στις Εικόνες 4.3 και 4.4 που ακολουθούν παρατίθενται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων στο αρχικό δοκίμιο, πριν την έναρξη διάδοσης ρωγμής σε αυτό.



Εικόνα 4.3: Διατμητικές τάσεις μη ρηγματωμένου δοκιμίου



Εικόνα 4.4: Ορθές τάσεις μη ρηγματωμένου δοκιμίου

### 4.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΡΗΓΜΑΤΩΜΕΝΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

#### 4.3.1 ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΜΕ ΡΩΓΜΗ

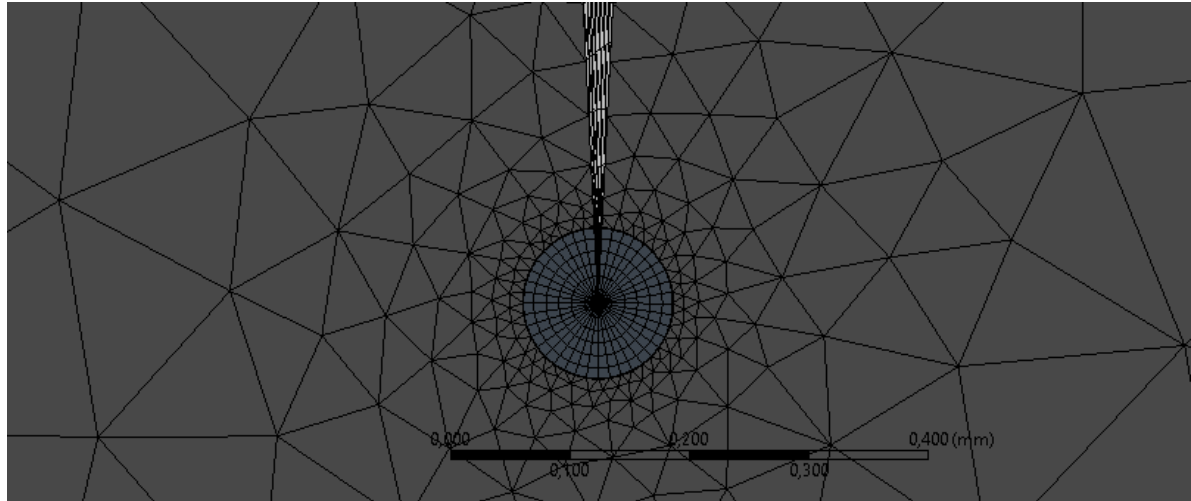
Σε αυτήν την ενότητα εξετάζεται η συμπεριφορά του καθαρού διατμητικού πεδίου που αναπτύσσεται στη ζώνη μετρήσεων, σε μία σειρά δοκιμών στα οποία έχει αναπτυχθεί ρωγή αναπτυσσόμενου πλάτους  $h$ , μεταβαλλόμενου μήκους  $a$ .

Πιο συγκεκριμένα, μελετώνται 8 περιπτώσεις διαφορετικού μήκους ρωγμής με βήμα αύξησης 1mm.

Η σχεδίαση των δοκιμών που φέρουν ρωγή πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό Solidworks 2016.

Τα προσχεδιασμένα δοκίμια εξετάστηκαν με τη βοήθεια του λογισμικού Ansys προκειμένου να παραχθεί το κατάλληλο πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων και βάσει αυτού να γίνει η εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων.

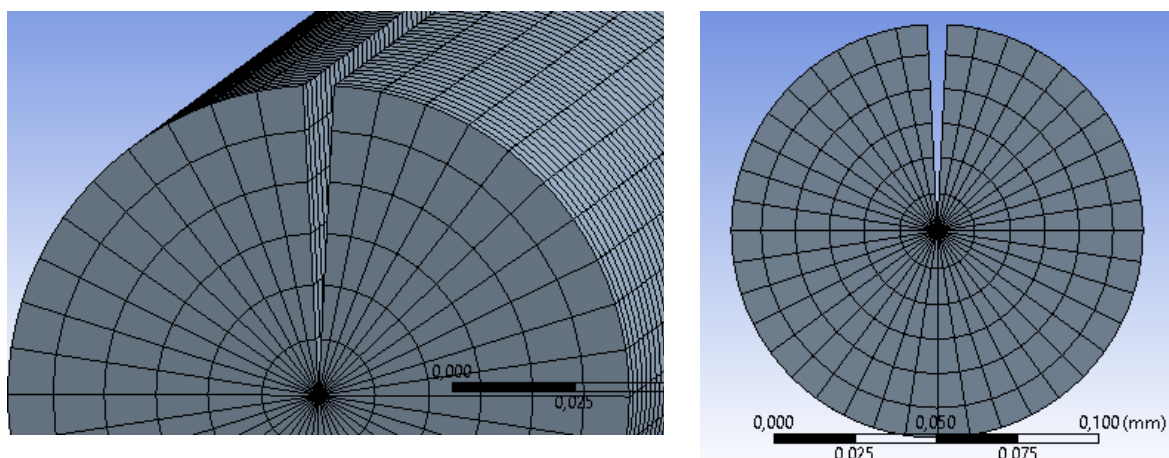
Στις Εικόνες 4.5 και 4.6 που ακολουθούν παρουσιάζεται το πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων που δημιουργήθηκε σε δοκίμιο με μήκος ρωγμής 1mm. Σημειώνεται ότι και στις 8 περιπτώσεις διαφορετικού μήκους ρωγμών που μελετήθηκαν σε αυτό το κεφάλαιο, η δημιουργία του πλέγματος βασίστηκε στις ίδιες ακριβώς ρυθμίσεις.



Εικόνα 4.5: Λεπτομέρεια Πλέγματος Πεπερασμένων Στοιχείων Δοκιμίου Με Μήκος Ρωγμής 1mm

Για τη δημιουργία του πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων στην περιοχή γύρω από το άκρο της ρωγμής επιλέχθηκαν οι εξής ρυθμίσεις:

- Sweep μέθοδος: τοπολογικά σταθερή πηγή (source) και επιφάνειες στόχου (target faces). Ίδιος αριθμός κορυφών ανά επιφάνεια μέσω συγκεκριμένου μονοπατιού από την πηγή στο στόχο.
- Edge Sizing μέθοδος: προκειμένου να διερευνηθεί με τον πλέον βέλτιστο τρόπο η ιδιόμορφη συμπεριφορά αναφορικά με την απόσταση  $r$  από το άκρο της ρωγμής.

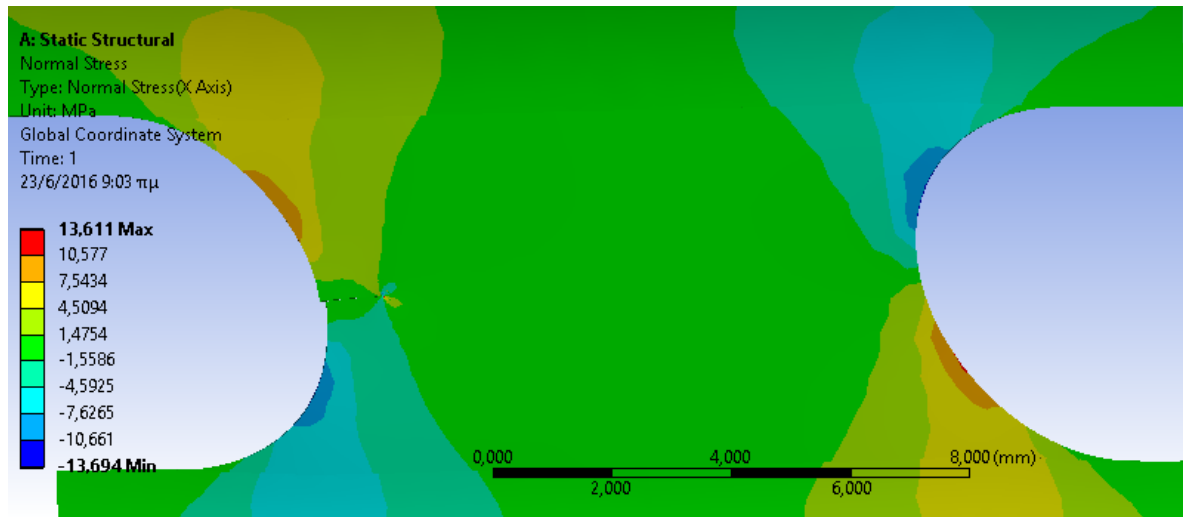


Εικόνα 4.6: Λεπτομέρεια Πλέγματος Πεπερασμένων Στοιχείων Δοκιμίου Με Μήκος Ρωγμής 1mm

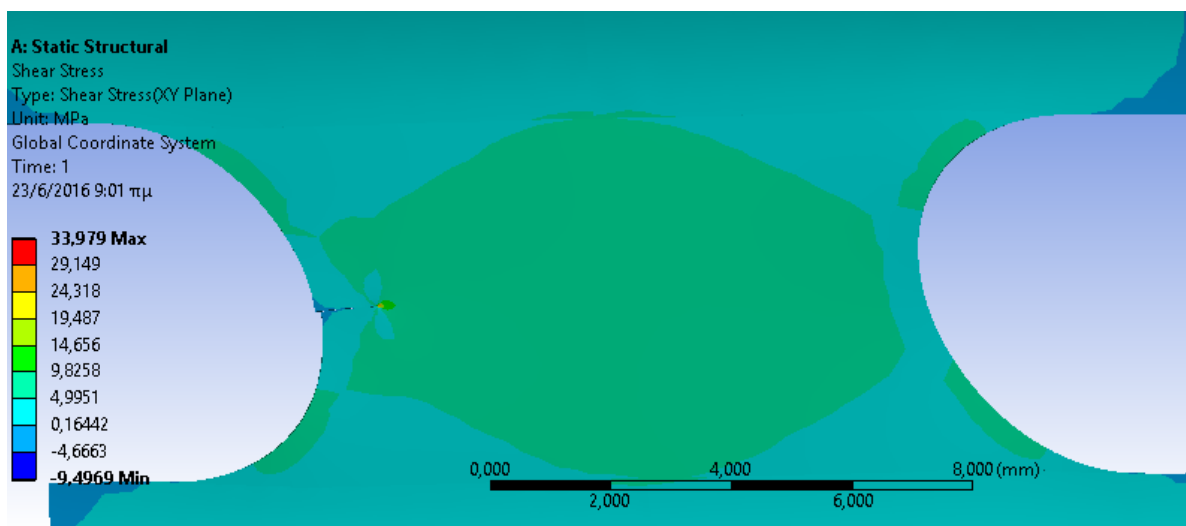
### 4.3.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

#### ΔΟΚΙΜΙΟ ΠΟΥ ΦΕΡΕΙ ΡΩΓΜΗ ΜΗΚΟΥΣ 1mm

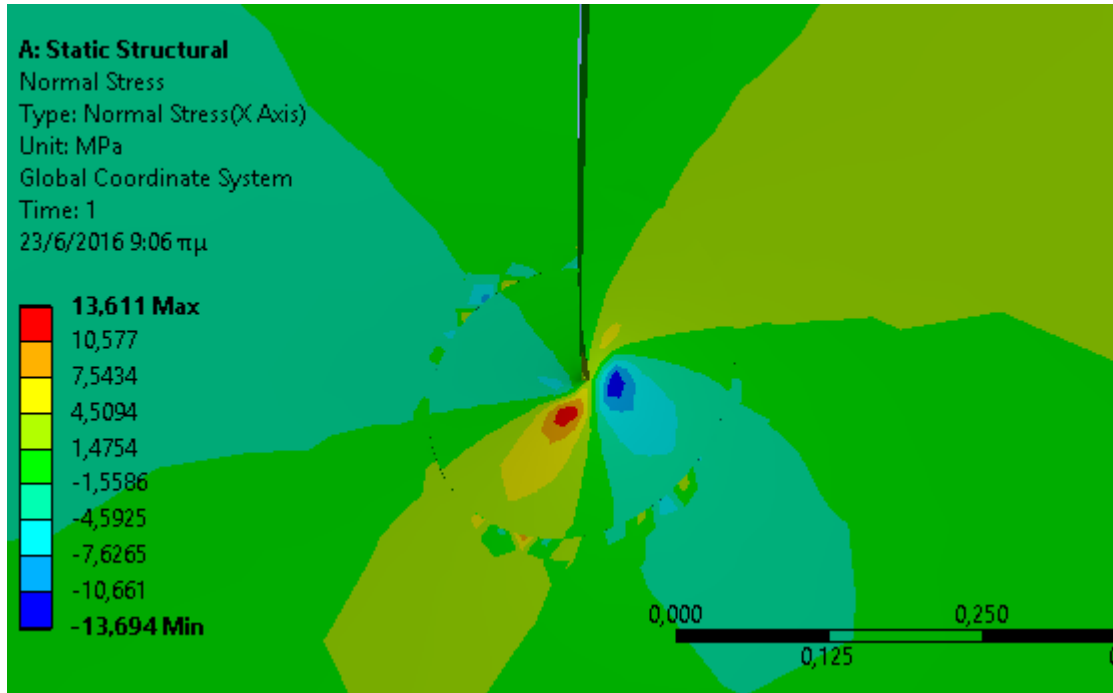
Σε πρώτη φάση εξετάζεται ρωγμή μήκους 1mm που αναπτύσσεται ακριβώς στο μέσο της ημικυκλικής αύλακας. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στις Εικόνες 4.7, 4.8, 4.9 και 4.10.



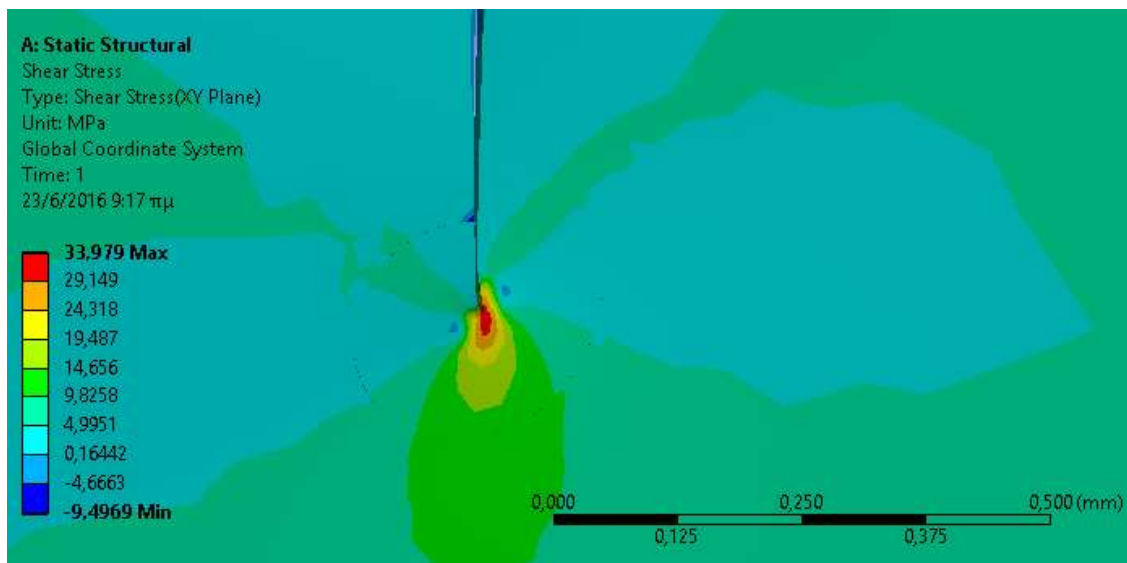
Εικόνα 4.7: Ορθές Τάσεις σε δοκίμιο με ρωγμή μήκους 1mm



Εικόνα 4.8: Διατμητικές Τάσεις σε δοκίμιο με ρωγμή μήκους 1mm

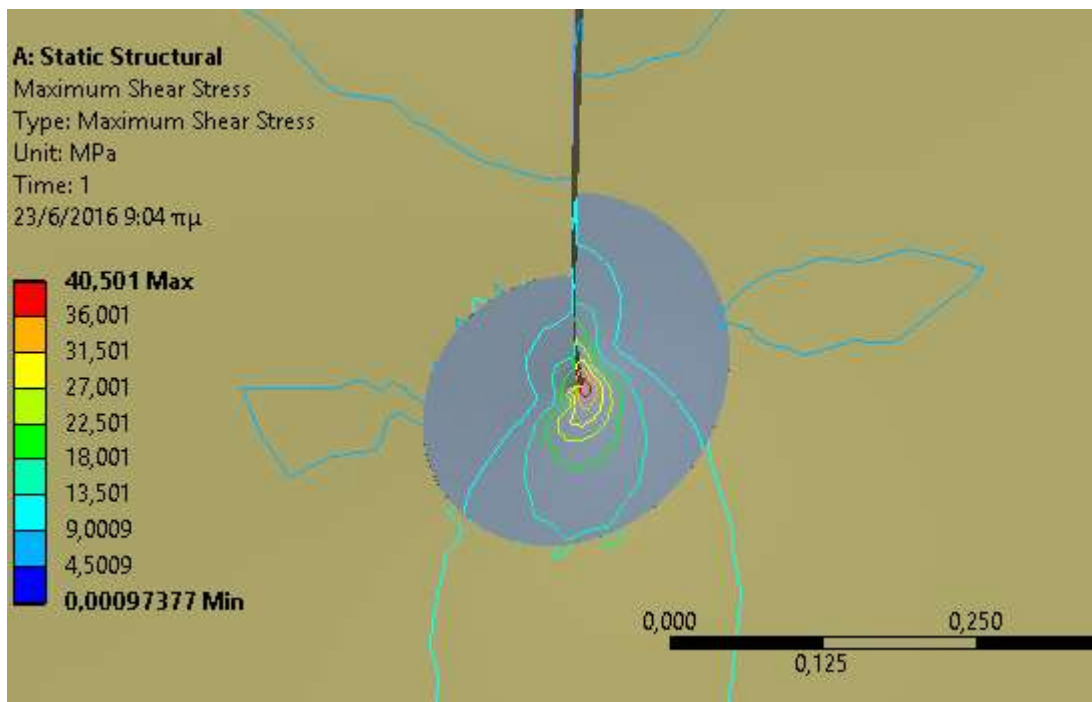


Εικόνα 4.9: Λεπτομέρεια Ορθών Τάσεων στο άκρο ρωγμής μήκους 1mm



Εικόνα 4.10: Λεπτομέρεια Διατμητικών Τάσεων στο άκρο ρωγμής μήκους 1mm

Η διεύθυνση διάδοσης της ρωγμής επαναπροσδιορίζεται βάσει των διατμητικών κριτηρίων Tresca και Von Mises. Ως εκ τούτου, ο κατακόρυφος άξονας συμμετρίας του δοκιμίου εξακολουθεί να αποτελεί τη διεύθυνση διάδοσης της ρωγμής (κάθετη προς τις γραμμές της ίσης μέγιστης διατμητικής τάσης). Στην Εικόνα 4.11 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι γραμμές της ίσης μέγιστης διατμητικής τάσης.



Εικόνα 4.11: Γραμμές ίσης μέγιστης διατμητικής τάσης (ρωγή μήκους 1mm)

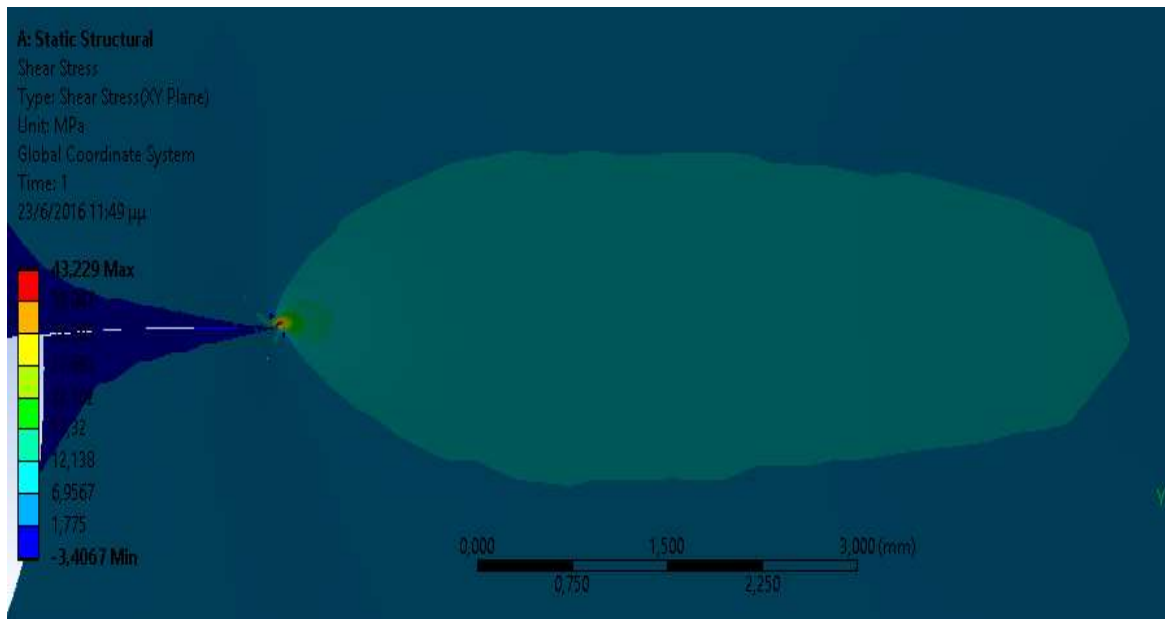
### ΔΟΚΙΜΙΟ ΠΟΥ ΦΕΡΕΙ ΡΩΓΜΗ ΜΗΚΟΥΣ 2mm

Στη συνέχεια εισάγεται δοκίμιο με μήκος ρωγμής αυξημένο κατά 1mm. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων παρουσιάζονται στις Εικόνες 4.12 , 4.13 , 4.14 και 4.15.

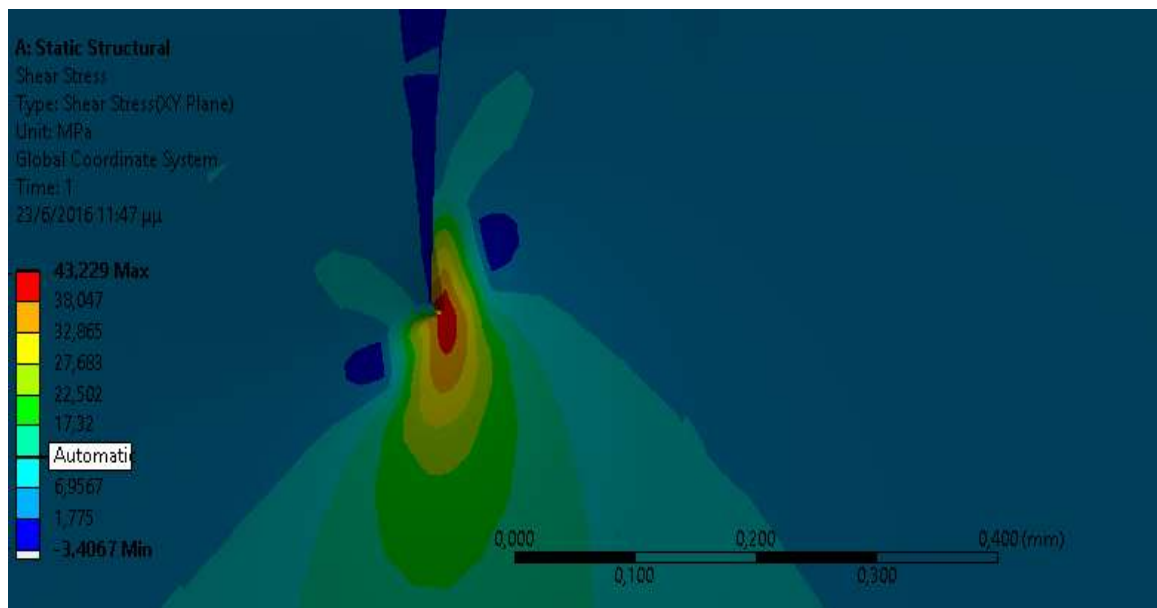


Εικόνα 4.12: Ορθές Τάσεις σε δοκίμιο με ρωγή μήκους 2mm

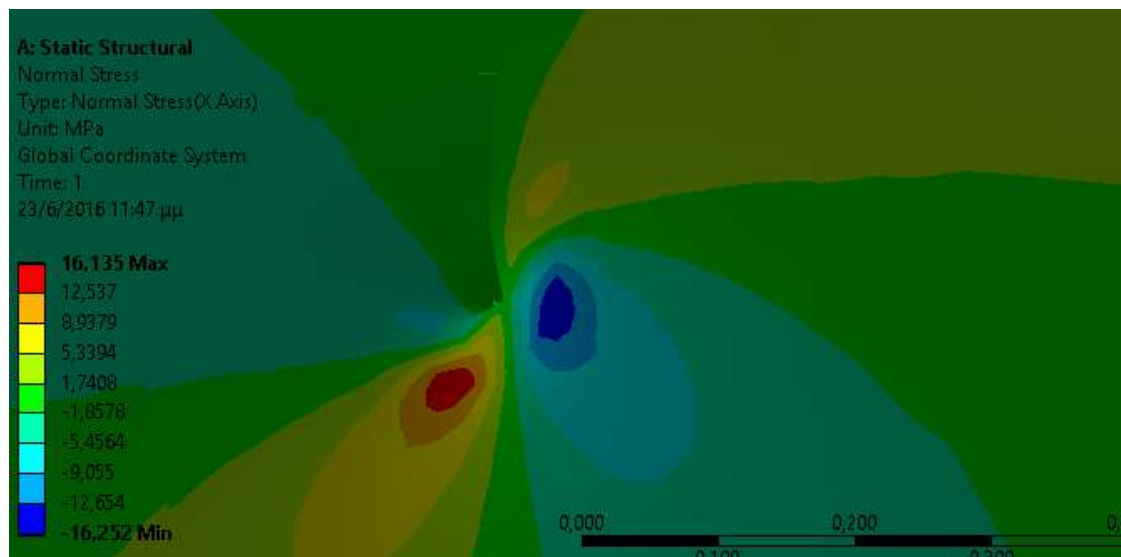




Εικόνα 4.13: Διατμητικές Τάσεις σε δοκίμιο με ρωγή μήκους 2mm

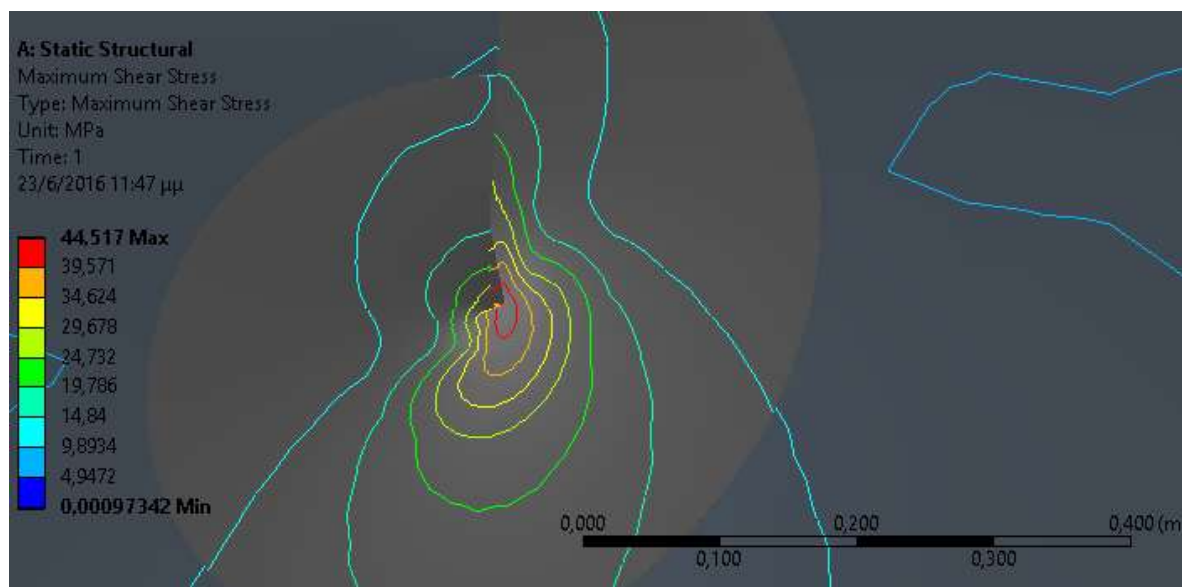


Εικόνα 4.14: Λεπτομέρεια Διατμητικών Τάσεων στο άκρο ρωγμής μήκους 2mm



Εικόνα 4.15: Λεπτομέρεια Ορθών Τάσεων στο άκρο ρωγμής μήκους 2mm

Η διεύθυνση διάδοσης της ρωγμής επαναπροσδιορίζεται βάσει των διατμητικών κριτηρίων Tresca και Von Mises. Ως εκ τούτου, ο κατακόρυφος άξονας συμμετρίας του δοκιμίου εξακολουθεί να αποτελεί τη διεύθυνση διάδοσης της ρωγμής (κάθετη προς τις γραμμές της ίσης μέγιστης διατμητικής τάσης). Στην Εικόνα 4.16 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι γραμμές της ίσης μέγιστης διατμητικής τάσης.

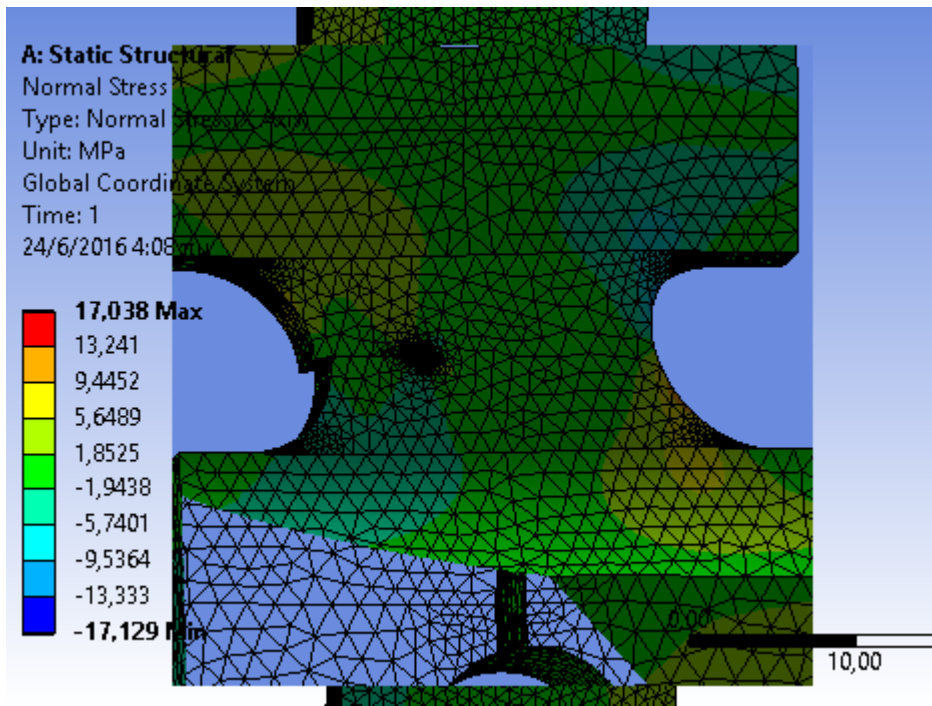


Εικόνα 4.16: Γραμμές ίσης μέγιστης διατμητικής τάσης (ρωγμή μήκους 2mm)

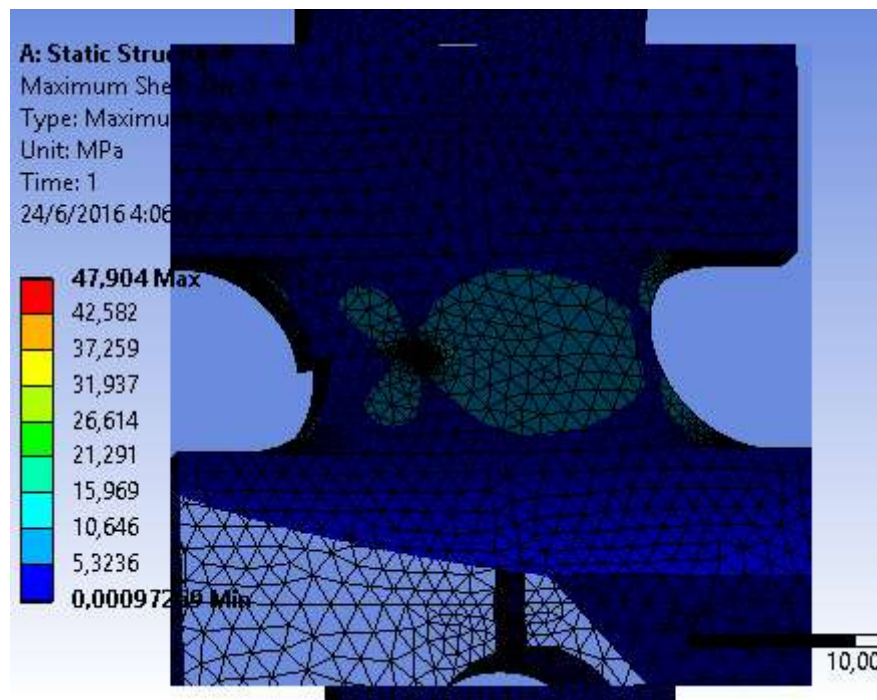


### ΔΟΚΙΜΙΟ ΠΟΥ ΦΕΡΕΙ ΡΩΓΜΗ ΜΗΚΟΥΣ 3mm

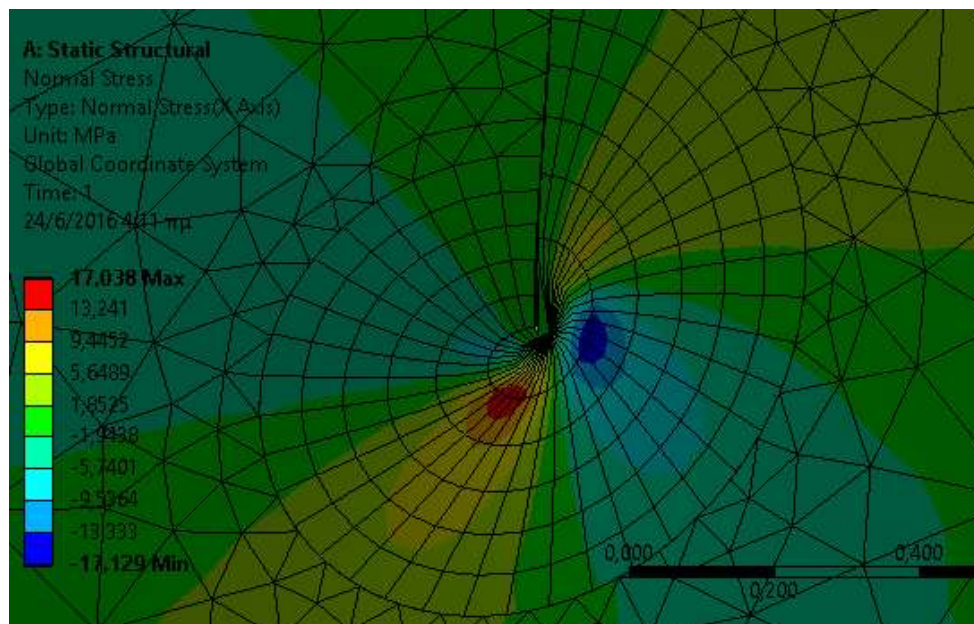
Στη συνέχεια εισάγεται δοκίμιο με μήκος ρωγμής αυξημένο κατά 1mm. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων παρουσιάζονται στις Εικόνες 4.17, 4.18, 4.19 και 4.20.



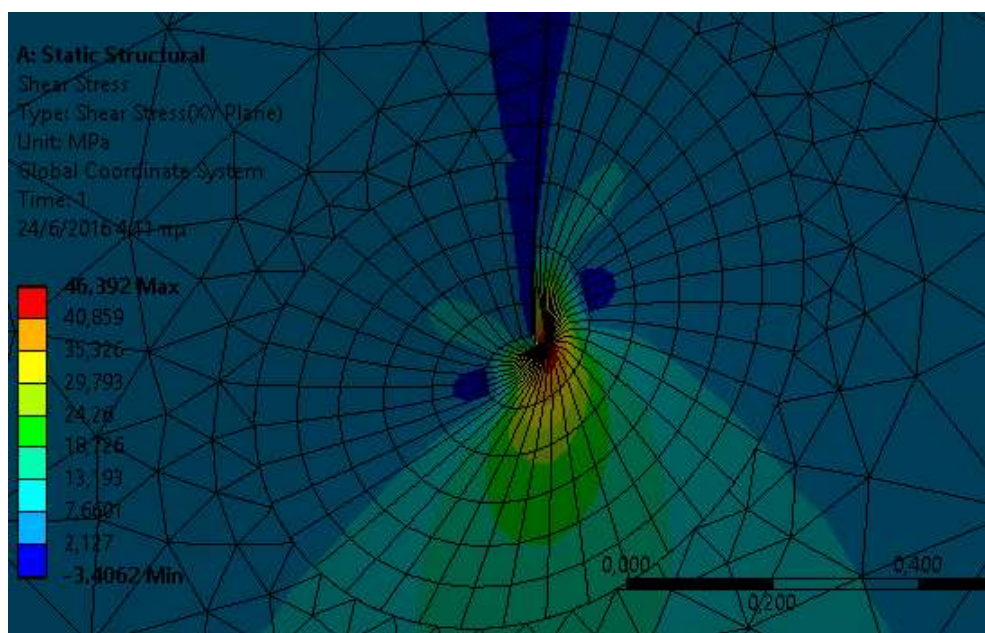
Εικόνα 4.17: Ορθές Τάσεις σε δοκίμιο με ρωγμή μήκους 3mm



Εικόνα 4.18: Διατμητικές Τάσεις σε δοκίμιο με ρωγμή μήκους 3mm



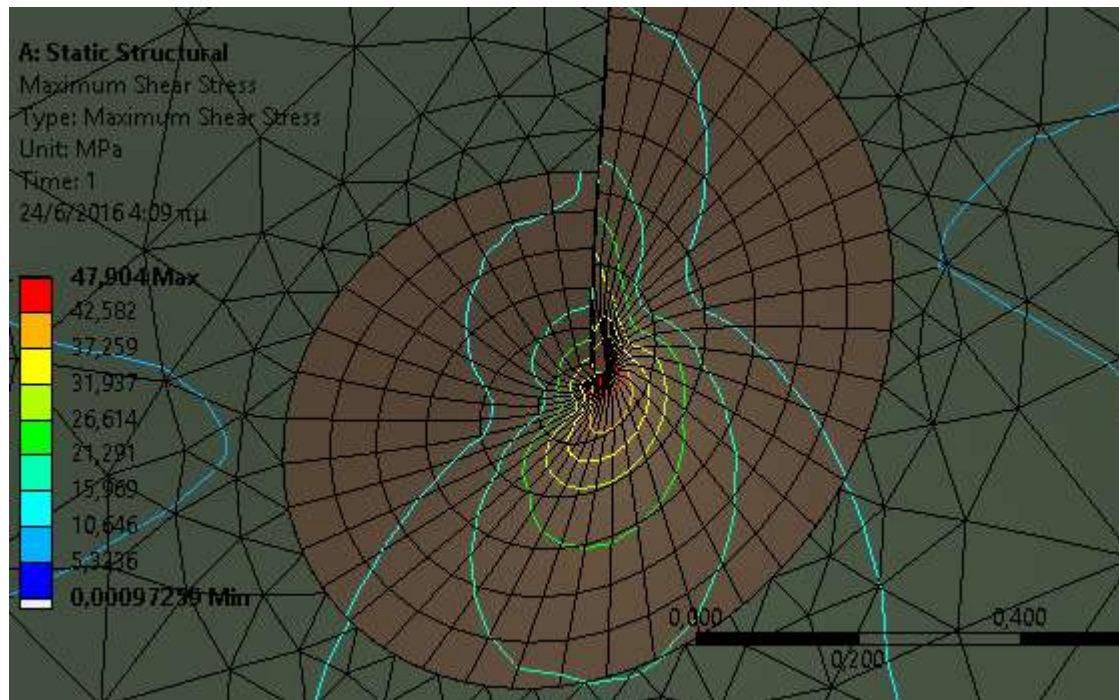
Εικόνα 4.19: Λεπτομέρεια Ορθών Τάσεων στο άκρο ρωγμής μήκους 3mm



Εικόνα 4.20: Λεπτομέρεια Διατμητικών Τάσεων στο άκρο ρωγμής μήκους 3mm

Η διεύθυνση διάδοσης της ρωγμής επαναπροσδιορίζεται βάσει των διατμητικών κριτηρίων Tresca και Von Mises. Ως εκ τούτου, ο κατακόρυφος άξονας συμμετρίας του δοκιμίου εξακολουθεί να αποτελεί τη διεύθυνση διάδοσης της ρωγμής (κάθετη προς τις γραμμές της ίσης μέγιστης διατμητικής τάσης). Στην Εικόνα 4.21 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι γραμμές της ίσης μέγιστης διατμητικής τάσης.

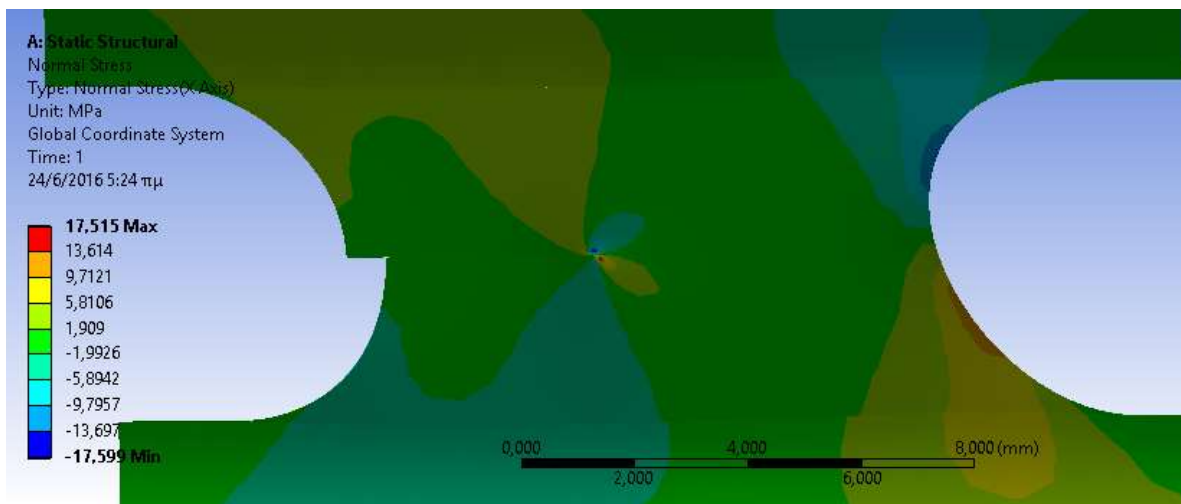




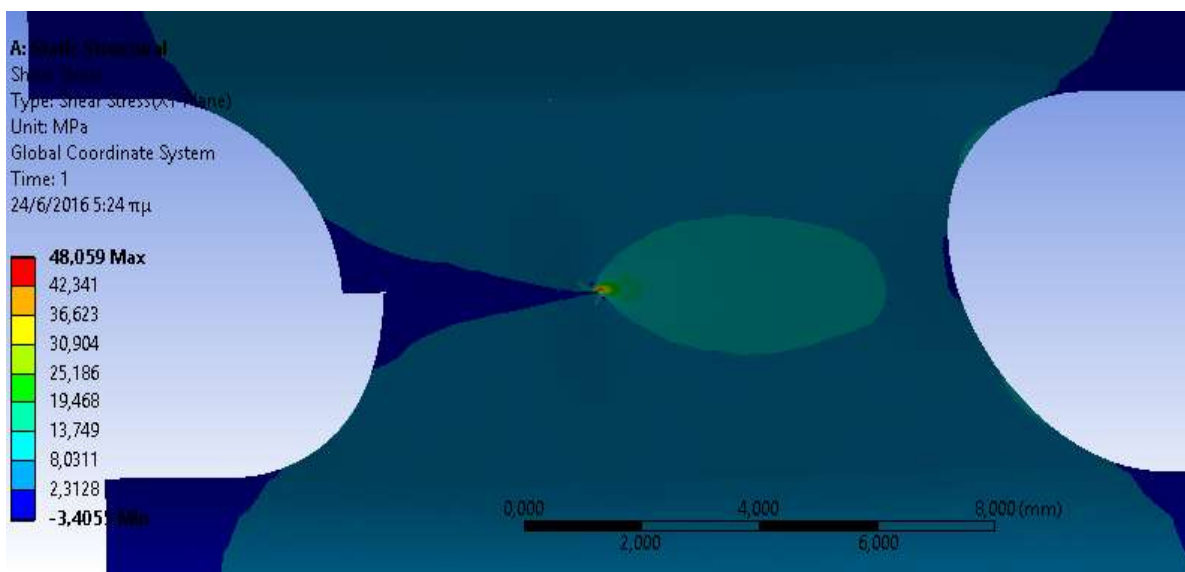
Εικόνα 4.21: Γραμμές ίσης μέγιστης διατμητικής τάσης (ρωγή μήκους 3mm)

### ΔΟΚΙΜΙΟ ΠΟΥ ΦΕΡΕΙ ΡΩΓΜΗ ΜΗΚΟΥΣ 4mm

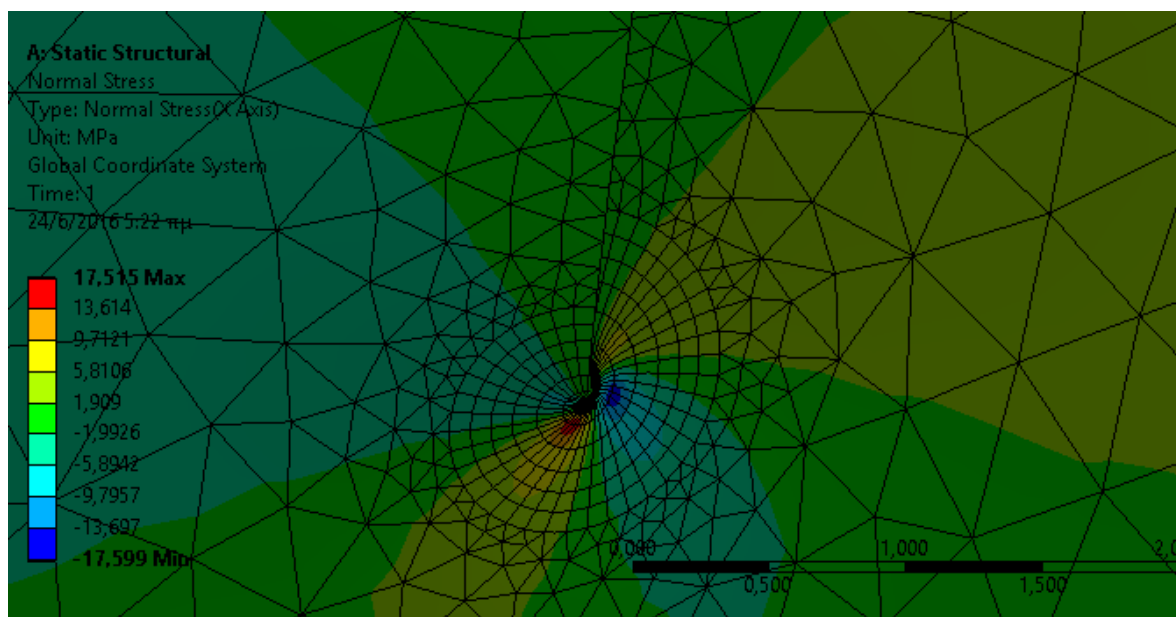
Στη συνέχεια εισάγεται δοκίμιο με μήκος ρωγμής αυξημένο κατά 1 mm. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων παρουσιάζονται στις Εικόνες 4.22, 4.23, 4.24 και 4.25.



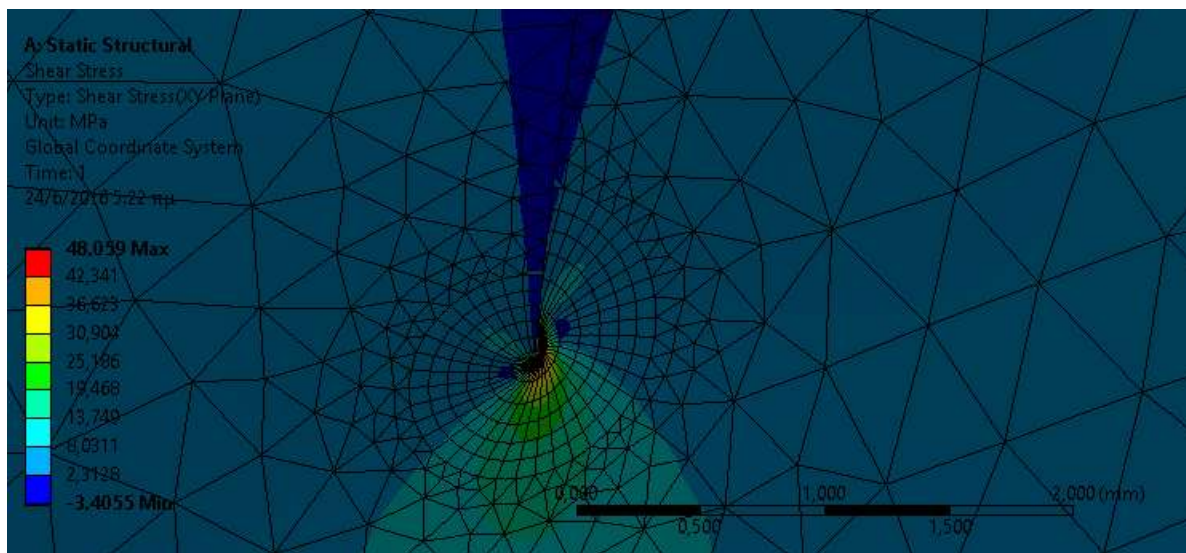
Εικόνα 4.22: Ορθές Τάσεις σε δοκίμιο με ρωγή μήκους 4mm



Εικόνα 4.23: Διατμητικές Τάσεις σε δοκίμιο με ρωγή μήκους 4mm

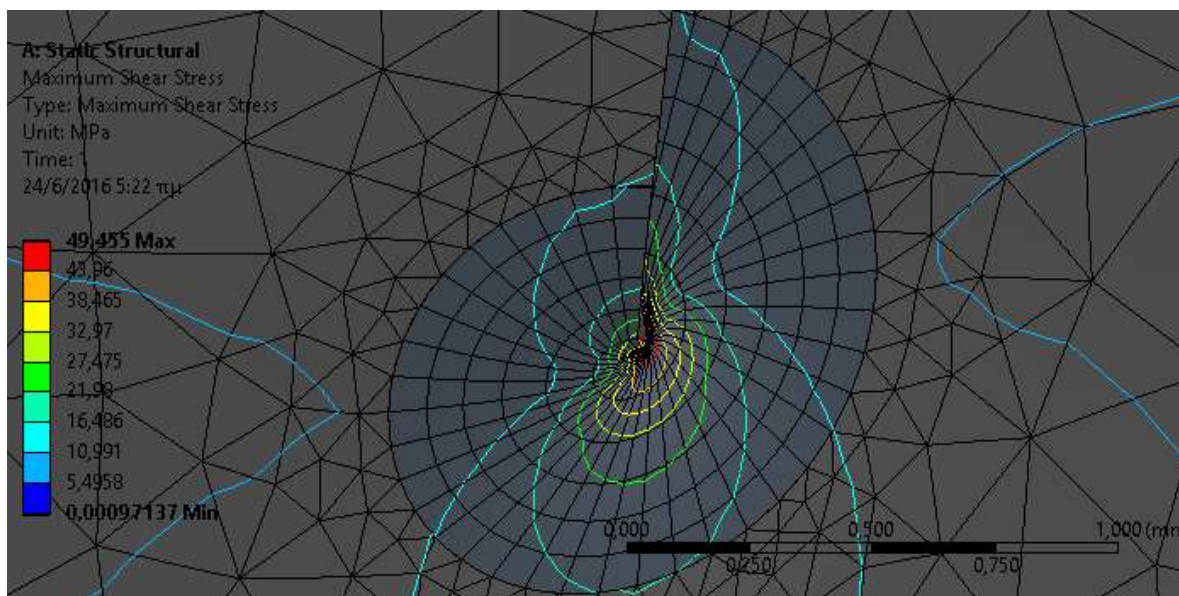


Εικόνα 4.24: Λεπτομέρεια Ορθών Τάσεων στο άκρο ρωγμής μήκους 4mm



Εικόνα 4.25: Λεπτομέρεια Διατμητικών Τάσεων στο άκρο ρωγμής μήκους 4mm

Η διεύθυνση διάδοσης της ρωγμής επαναπροσδιορίζεται βάσει των διατμητικών κριτηρίων Tresca και Von Mises. Ως εκ τούτου, ο κατακόρυφος άξονας συμμετρίας του δοκιμίου εξακολουθεί να αποτελεί τη διεύθυνση διάδοσης της ρωγμής (κάθετη προς τις γραμμές της ίσης μέγιστης διατμητικής τάσης). Στην Εικόνα 4.26 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι γραμμές της ίσης μέγιστης διατμητικής τάσης.

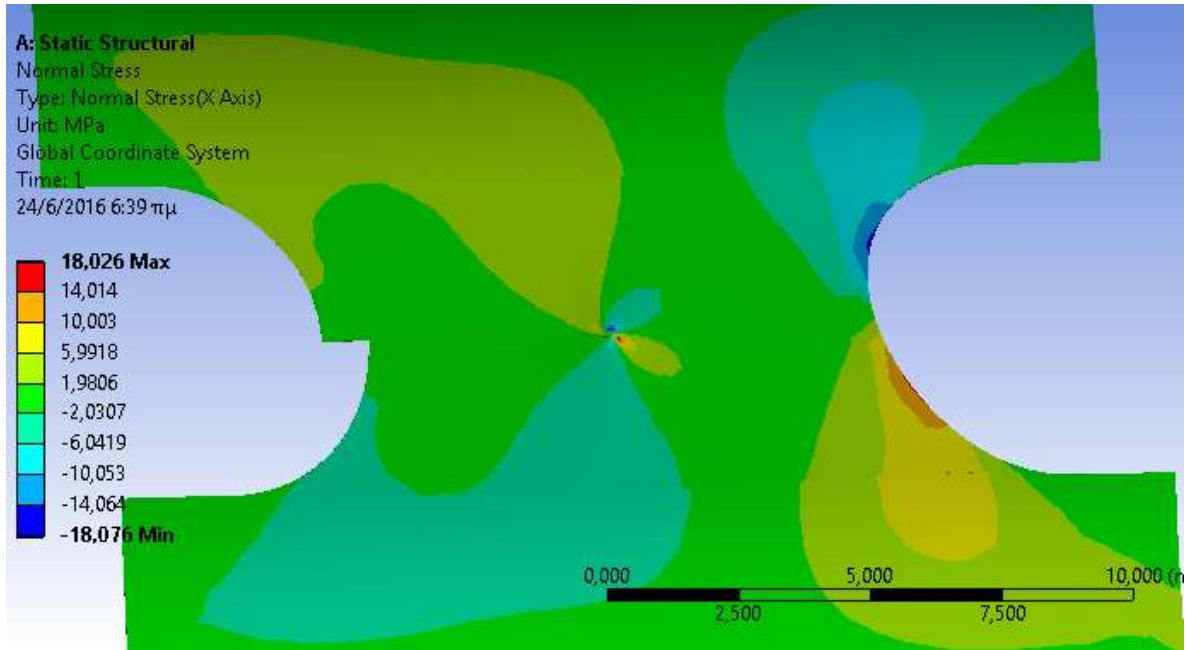


Εικόνα 4.26: Γραμμές ίσης μέγιστης διατμητικής τάσης (ρωγμή μήκους 4mm)

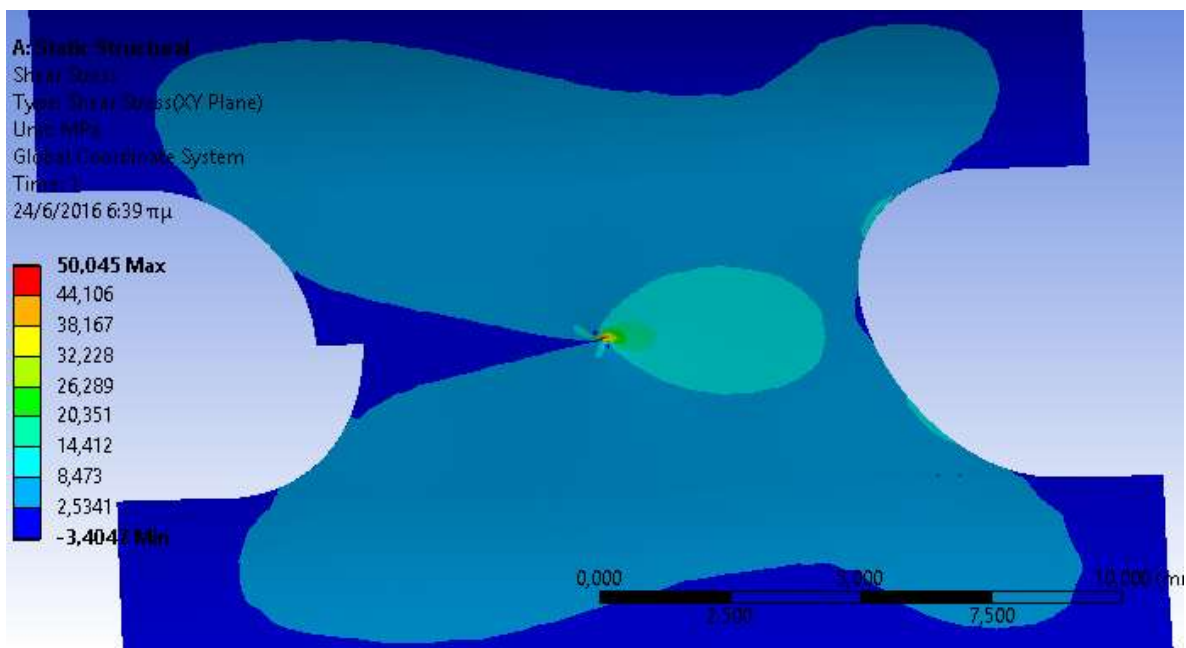


### ΔΟΚΙΜΙΟ ΠΟΥ ΦΕΡΕΙ ΡΩΓΜΗ ΜΗΚΟΥΣ 5mm

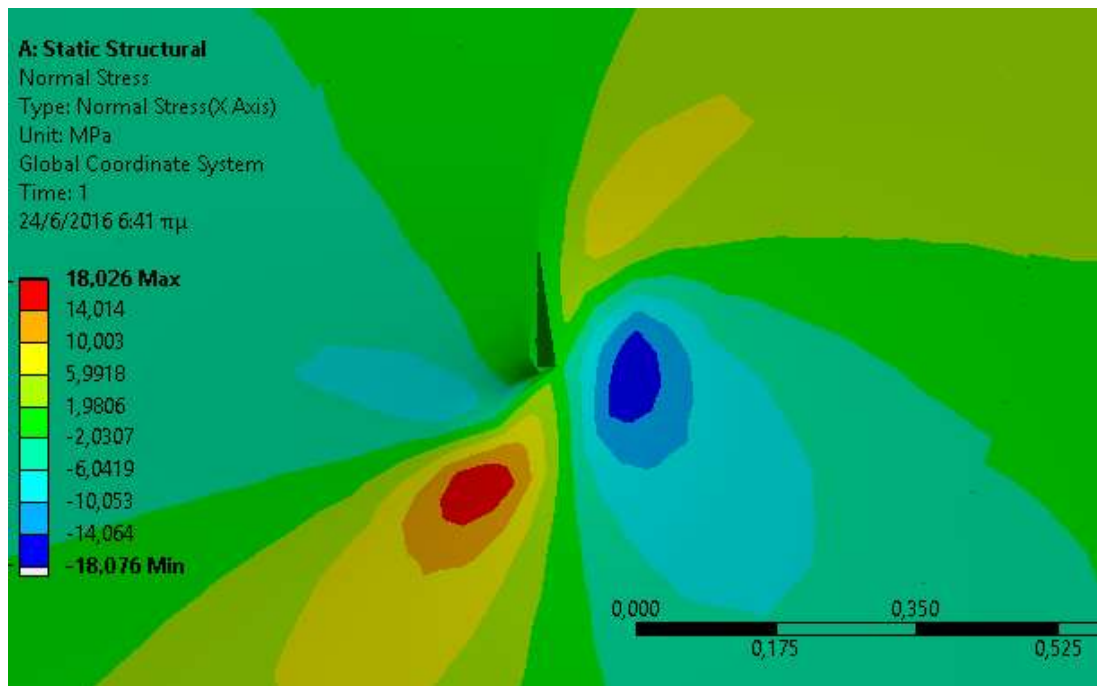
Στη συνέχεια εισάγεται δοκίμιο με μήκος ρωγμής αυξημένο κατά 1mm. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων παρουσιάζονται στις Εικόνες 4.27, 4.28, 4.29 και 4.30.



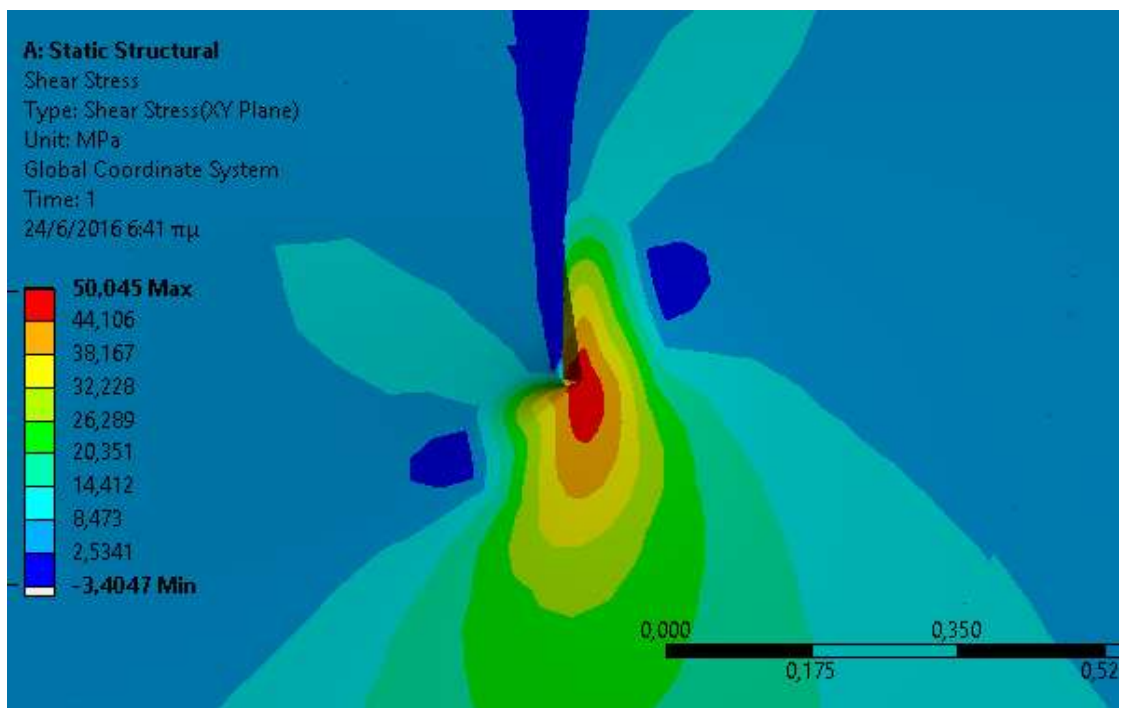
Εικόνα 4.27: Ορθές Τάσεις σε δοκίμιο με ρωγή μήκους 5mm



Εικόνα 4.28: Διατμητικές Τάσεις σε δοκίμιο με ρωγή μήκους 5mm



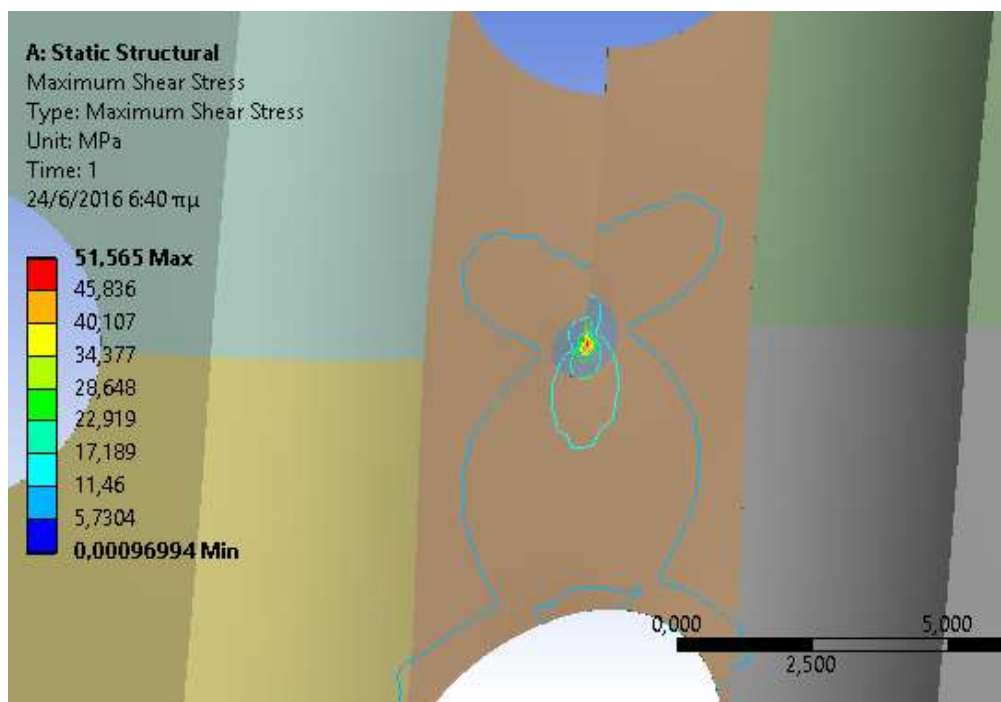
Εικόνα 4.29: Λεπτομέρεια Ορθών Τάσεων στο άκρο ρωγμής μήκους 5mm



Εικόνα 4.30: Λεπτομέρεια Διατμητικών Τάσεων στο άκρο ρωγμής μήκους 5mm

Η διεύθυνση διάδοσης της ρωγμής επαναπροσδιορίζεται βάσει των διατμητικών κριτηρίων Tresca και Von Mises. Ως εκ τούτου, ο κατακόρυφος άξονας συμμετρίας

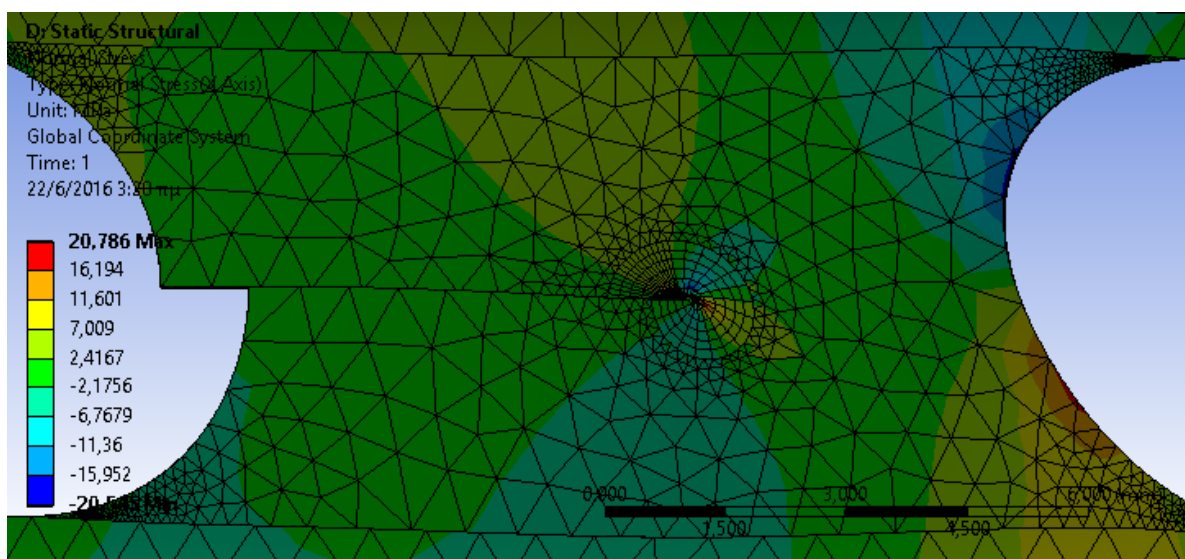
του δοκιμίου εξακολουθεί να αποτελεί τη διεύθυνση διάδοσης της ρωγμής (κάθετη προς τις γραμμές της ίσης μέγιστης διατμητικής τάσης). Στην Εικόνα 4.31 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι γραμμές της ίσης μέγιστης διατμητικής τάσης.



Εικόνα 4.31: Γραμμές ίσης μέγιστης διατμητικής τάσης (ρωγμή μήκους 5mm)

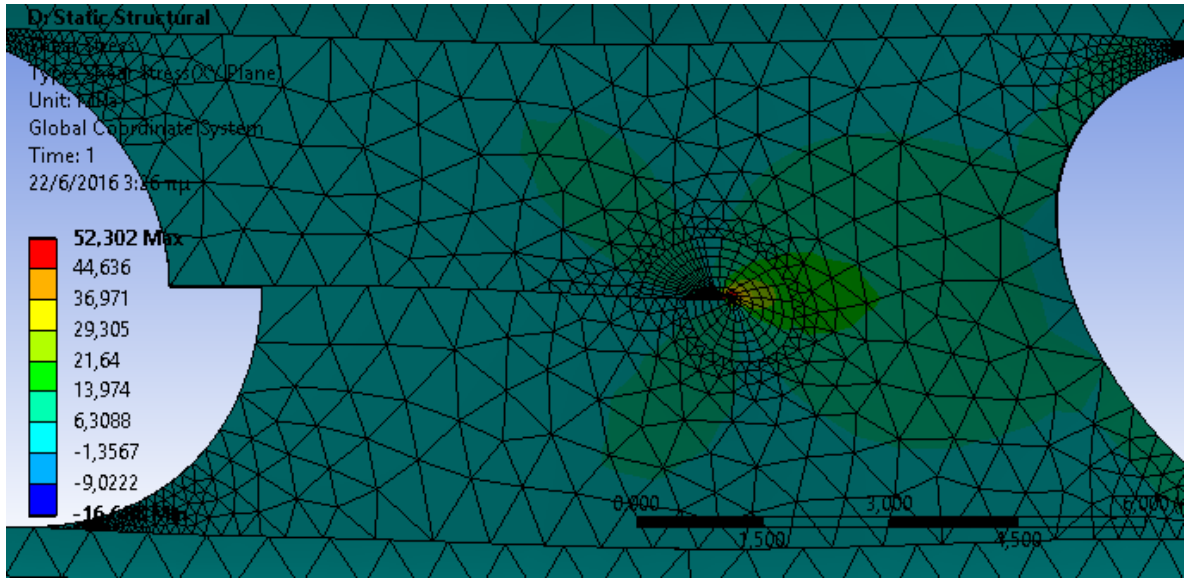
### ΔΟΚΙΜΙΟ ΜΕ ΡΩΓΜΗ ΜΗΚΟΥΣ 6mm

Ακολουθεί δοκίμιο με μήκος ρωγμής αυξημένο κατά 1mm. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων παρουσιάζονται στις Εικόνες 4.32, 4.33, 4.34 και 4.35.

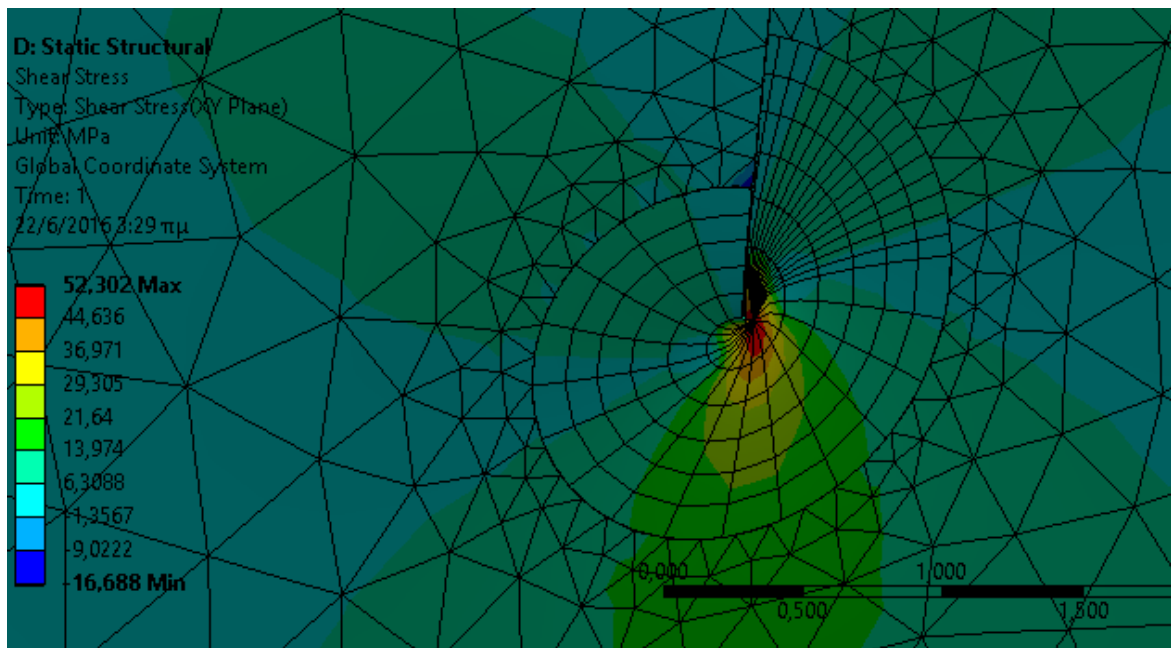


Εικόνα 4.32: Ορθές Τάσεις σε δοκίμιο με ρωγμή μήκους 6mm

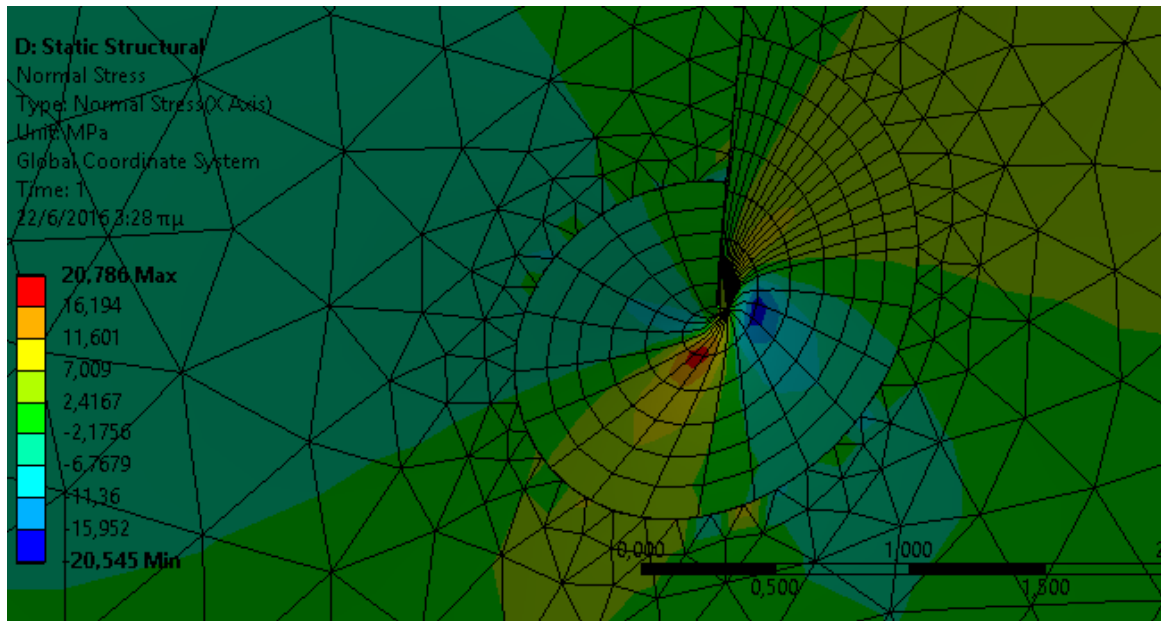




Εικόνα 4.33: Διατμητικές Τάσεις σε δοκίμιο με ρωγή μήκους 6mm

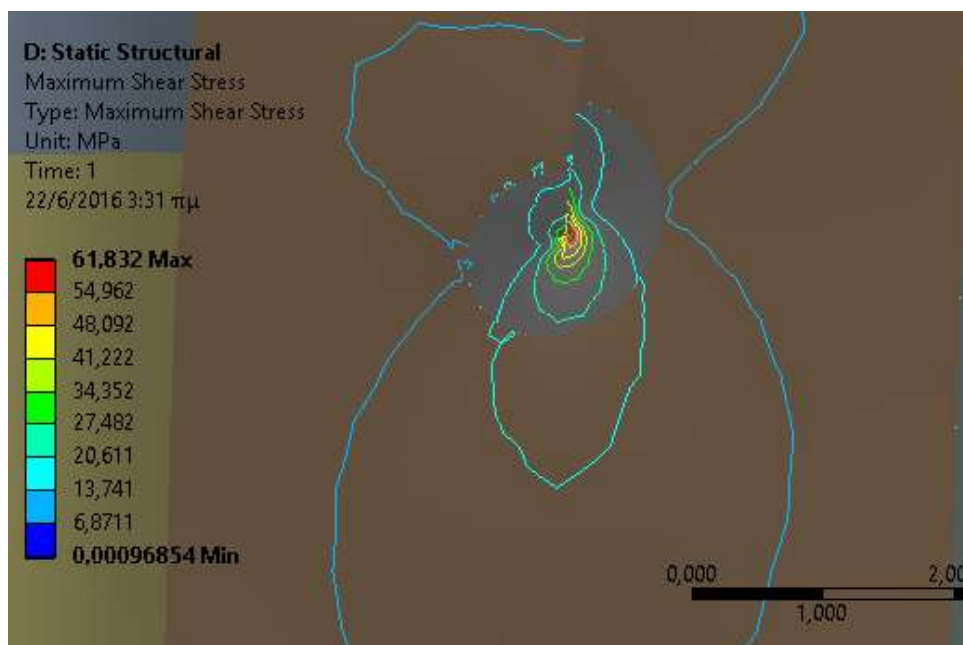


Εικόνα 4.34: Λεπτομέρεια Διατμητικών Τάσεων στο άκρο ρωγμής μήκους 6mm



Εικόνα 4.35: Λεπτομέρεια Ορθών Τάσεων στο άκρο ρωγμής μήκους 6mm

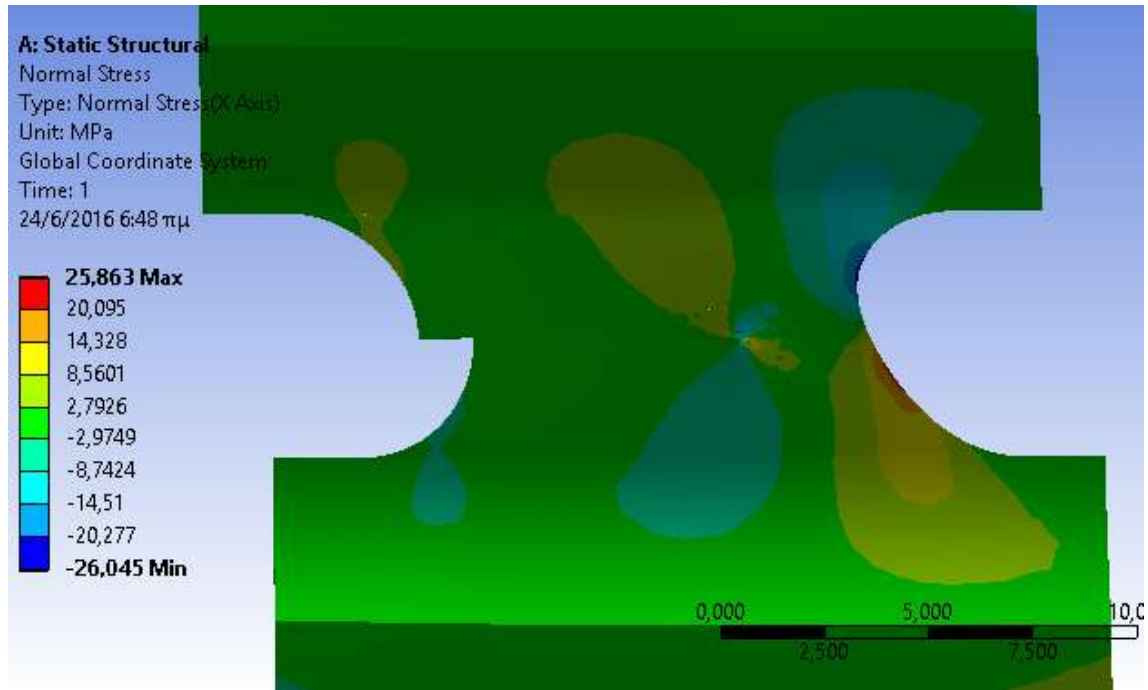
Η διεύθυνση διάδοσης της ρωγμής επαναπροσδιορίζεται βάσει των διατμητικών κριτηρίων Tresca και Von Mises. Ως εκ τούτου, ο κατακόρυφος άξονας συμμετρίας του δοκιμίου εξακολουθεί να αποτελεί τη διεύθυνση διάδοσης της ρωγμής (κάθετη προς τις γραμμές της ίσης μέγιστης διατμητικής τάσης). Στην Εικόνα 4.36 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι γραμμές της ίσης μέγιστης διατμητικής τάσης.



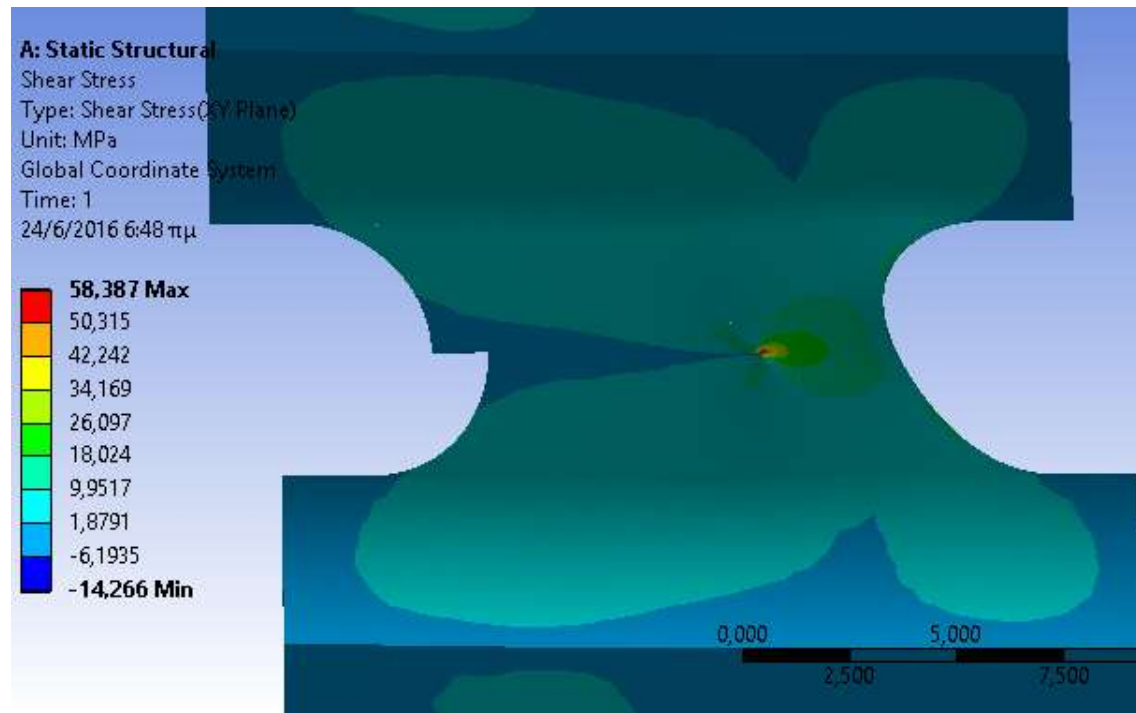
Εικόνα 4.36: Γραμμές ίσης μέγιστης διατμητικής τάσης (ρωγή μήκους 6mm)

### ΔΟΚΙΜΙΟ ΜΕ ΡΩΓΜΗ ΜΗΚΟΥΣ 7mm

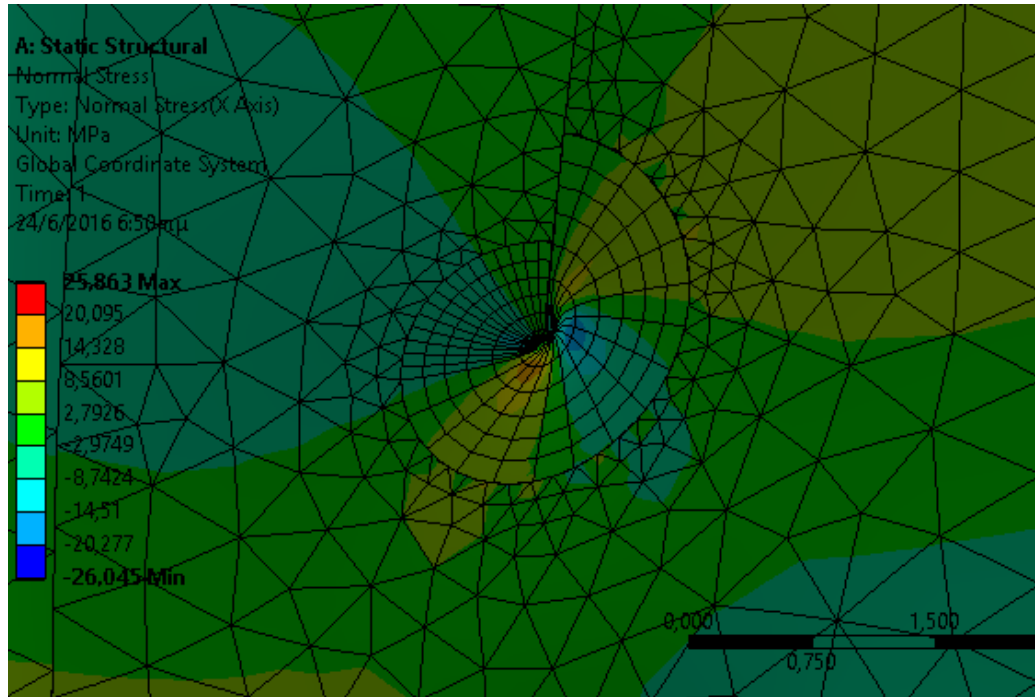
Ακολουθεί δοκίμιο με μήκος ρωγμής αυξημένο κατά 1mm. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων παρουσιάζονται στις Εικόνες 4.37, 4.38, 4.39 και 4.40.



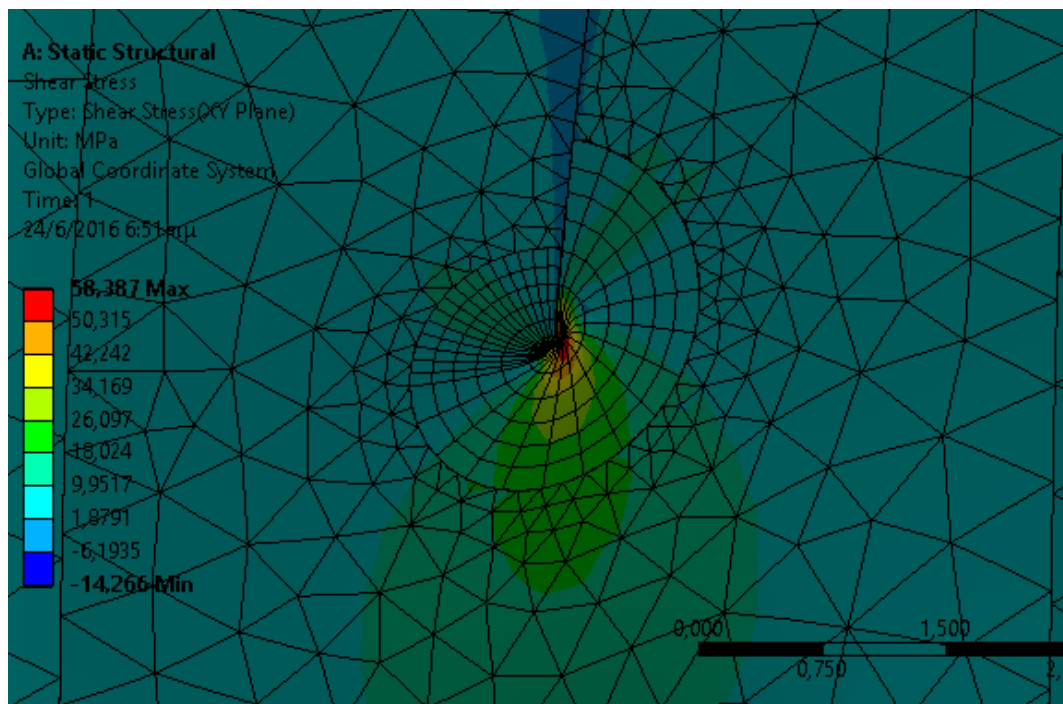
Εικόνα 4.37: Ορθές Τάσεις σε δοκίμιο με ρωγή μήκους 7mm



Εικόνα 4.38: Διατμητικές Τάσεις σε δοκίμιο με ρωγή μήκους 7mm



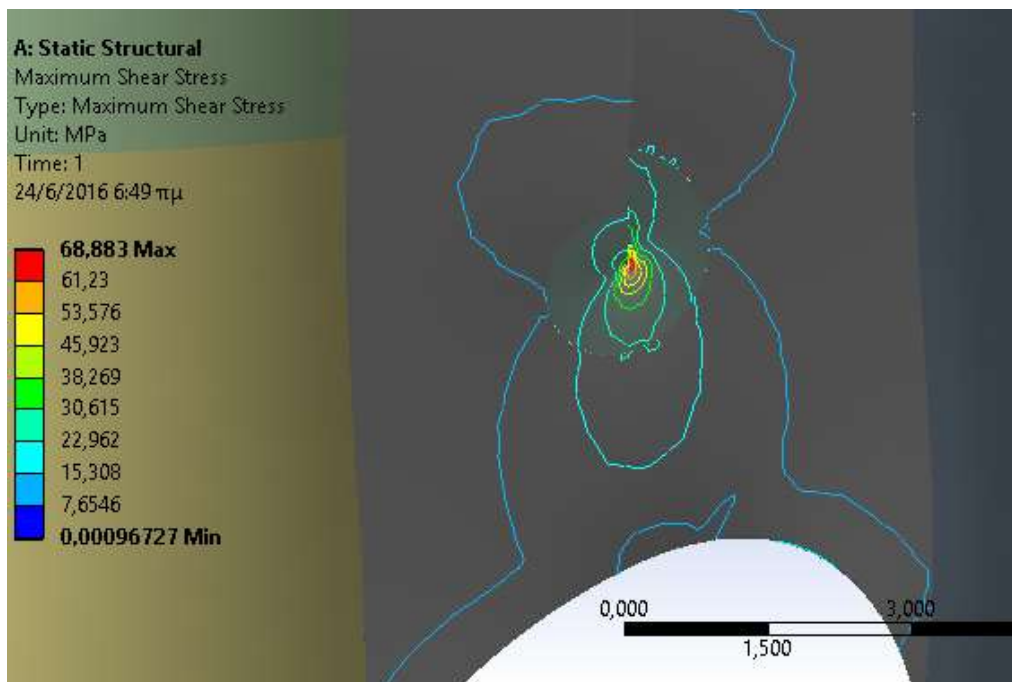
Εικόνα 4.39: Λεπτομέρεια Ορθών Τάσεων στο άκρο ρωγμής μήκους 7mm



Εικόνα 4.40: Λεπτομέρεια Διατμητικών Τάσεων στο άκρο ρωγμής μήκους 7mm

Η διεύθυνση διάδοσης της ρωγμής επαναπροσδιορίζεται βάσει των διατμητικών κριτηρίων Tresca και Von Mises. Ως εκ τούτου, ο κατακόρυφος άξονας συμμετρίας

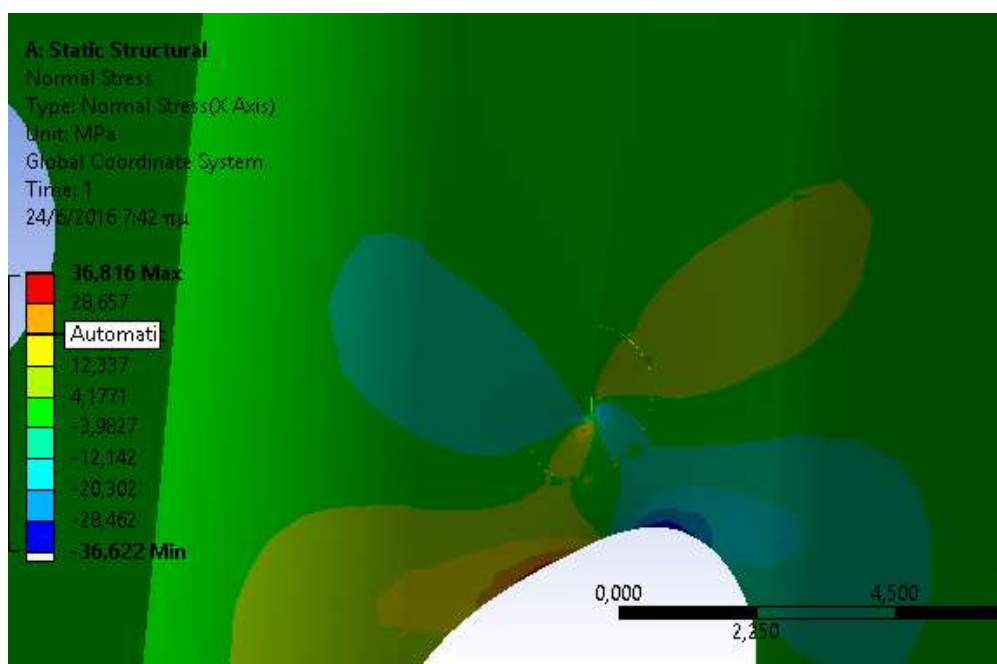
του δοκιμίου εξακολουθεί να αποτελεί τη διεύθυνση διάδοσης της ρωγμής (κάθετη προς τις γραμμές της ίσης μέγιστης διατμητικής τάσης).



Εικόνα 4.41: Γραμμές ίσης μέγιστης διατμητικής τάσης (ρωγμή μήκους 7mm)

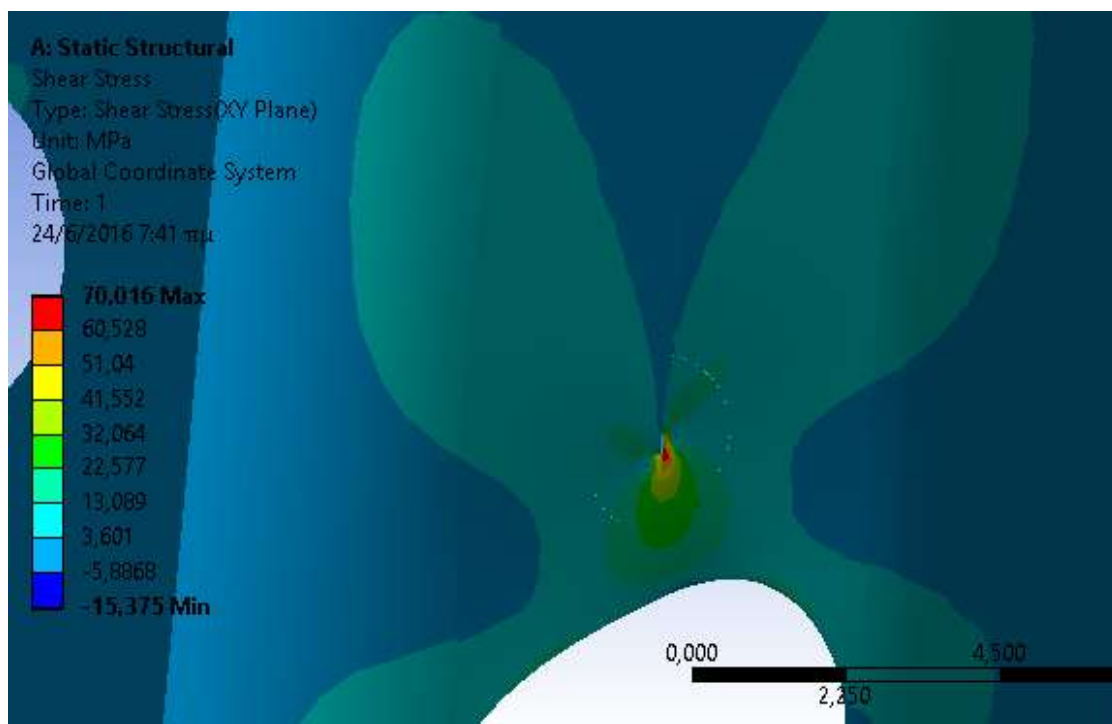
### ΔΟΚΙΜΙΟ ΜΕ ΡΩΓΜΗ ΜΗΚΟΥΣ 8mm

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων παρουσιάζονται στις Εικόνες 4.42, 4.43, 4.44 και 4.45.

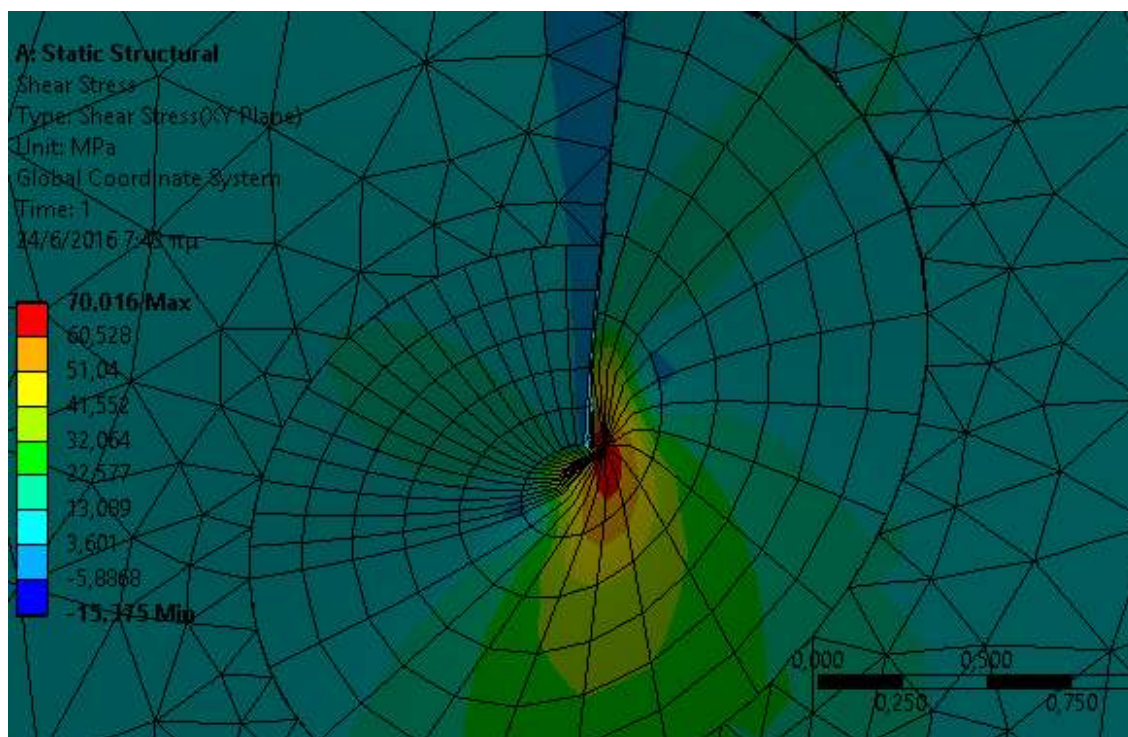


Εικόνα 4.42: Ορθές Τάσεις σε δοκίμιο με ρωγμή μήκους 8mm

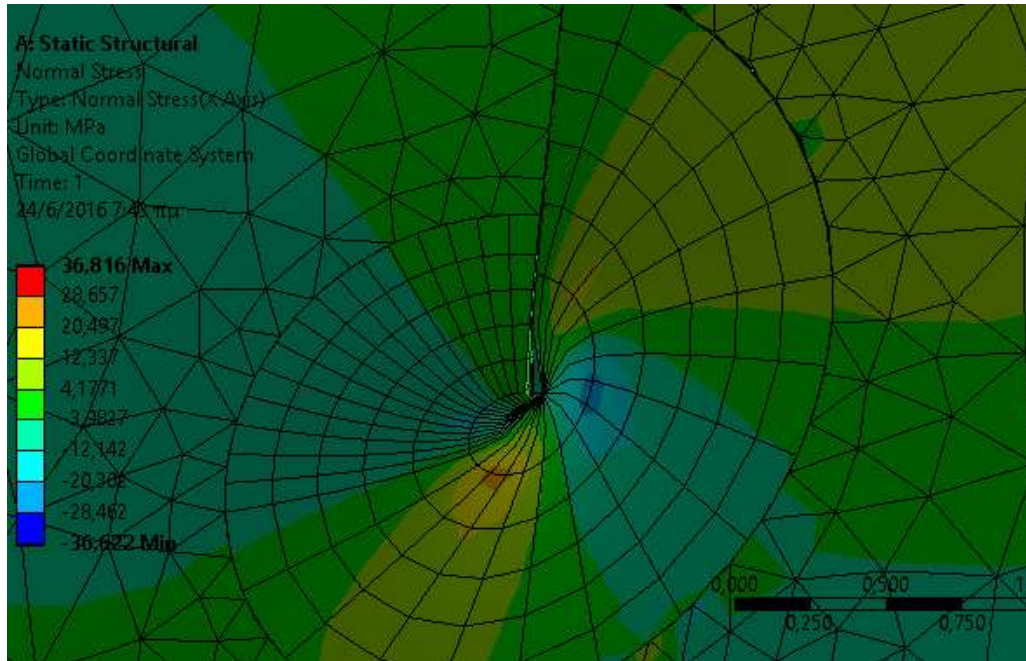




Εικόνα 4.43: Διατμητικές Τάσεις σε δοκίμιο με ρωγή μήκους 8mm

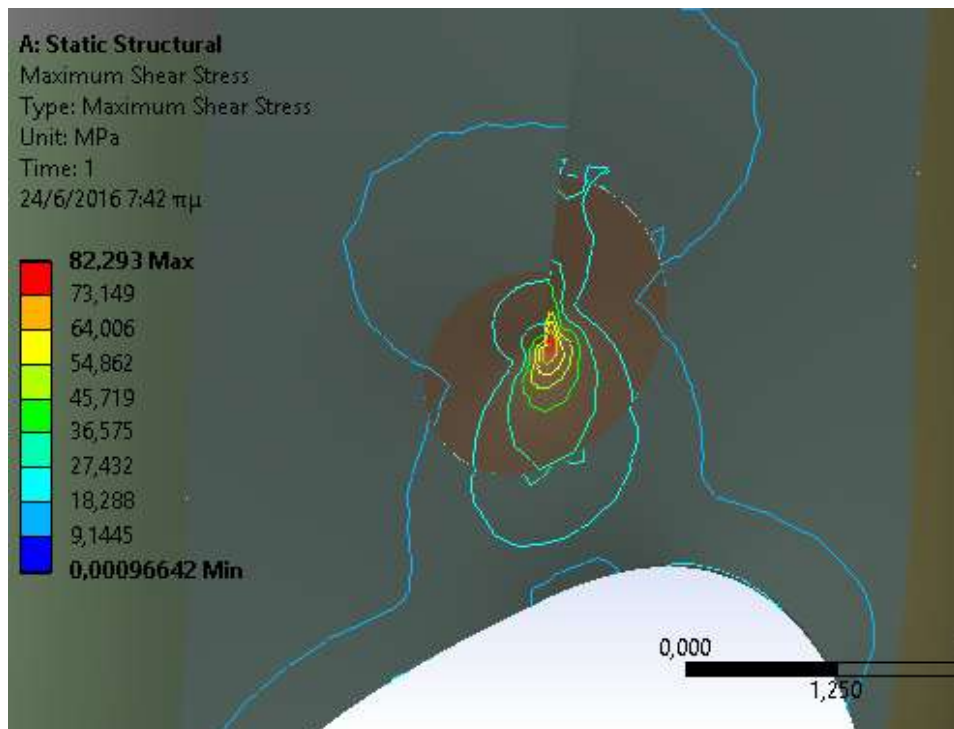


Εικόνα 4.44: Λεπτομέρεια Διατμητικών Τάσεων στο άκρο ρωγμής μήκους 8mm



Εικόνα 4.45: Λεπτομέρεια Ορθών Τάσεων στο άκρο ρωγμής μήκους 8mm

Η διεύθυνση διάδοσης της ρωγμής επαναπροσδιορίζεται βάσει των διατμητικών κριτηρίων Tresca και Von Mises. Ως εκ τούτου, ο κατακόρυφος άξονας συμμετρίας του δοκιμίου εξακολουθεί να αποτελεί τη διεύθυνση διάδοσης της ρωγμής (κάθετη προς τις γραμμές της ίσης μέγιστης διατμητικής τάσης).



Εικόνα 4.46: Γραμμές ίσης μέγιστης διατμητικής τάσης (ρωγμή μήκους 8mm)

### 4.3.3 ΕΞΑΓΩΓΗ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΤΑΣΕΩΝ $K_I$ & $K_{II}$

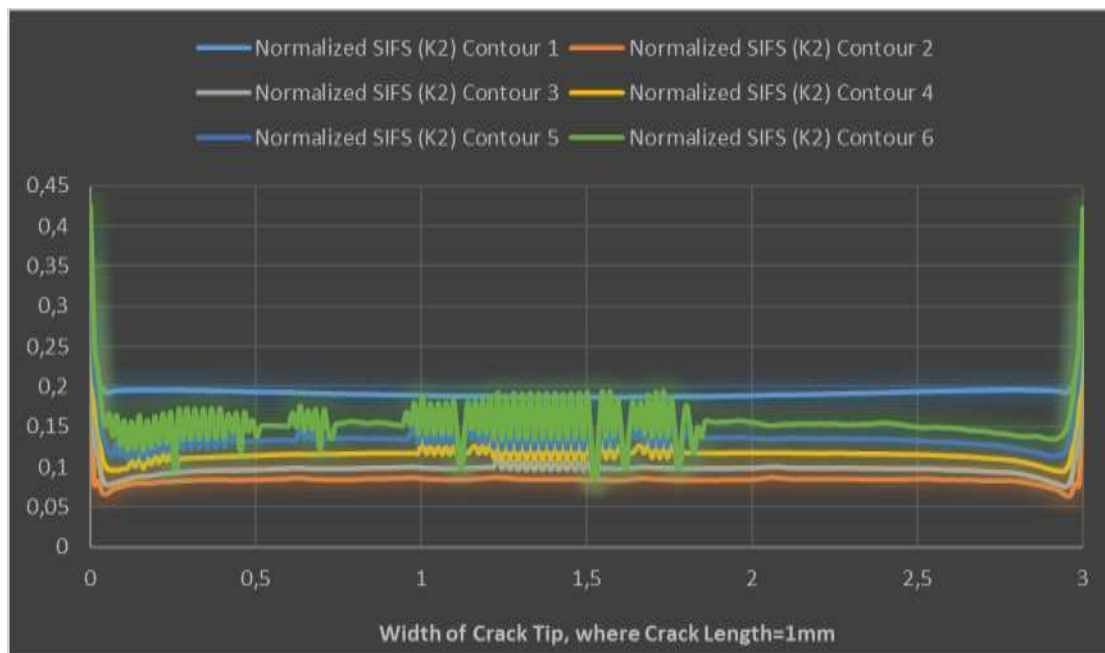
Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα του υπολογισμού των συντελεστών συγκέντρωσης τάσεων, όπως αυτοί προέκυψαν με τη βοήθεια του λογισμικού προγράμματος Solidworks, για κάθε χωριστή περίπτωση διαφορετικού μήκους ρωγμής που εξετάστηκε στην προηγούμενη ενότητα της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Για τη βέλτιστη προσέγγιση των συντελεστών συγκέντρωσης τάσεων  $K_I$  και  $K_{II}$ , η περιοχή γύρω από το άκρο της ρωγμής διαιρέθηκε σε 6 ακτινικές περιοχές. Λόγω του απειρισμού των τάσεων στο άκρο της ρωγμής, είναι αναμενόμενο οι συντελεστές συγκέντρωσης τάσεων να διαφοροποιούνται αισθητά σε αυτό το τμήμα ενώ αντιθέτως στις υπόλοιπες ακτινικές περιοχές παρατηρείται σύγκλιση των τιμών.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν επαληθεύουν ότι η συγκεκριμένη γεωμετρία του δοκιμίου αλλά και ο ειδικός τρόπος φόρτισής του είναι ικανές και αναγκαίες συνθήκες προκειμένου να αναπτυχθεί καθαρό διατμητικό πεδίο στη ζώνη μετρήσεων. Για το λόγο αυτό, οι υπολογιζόμενες τιμές των συντελεστών συγκέντρωσης τάσεων  $K_I$  βρίσκονται πολύ κοντά στο 0.

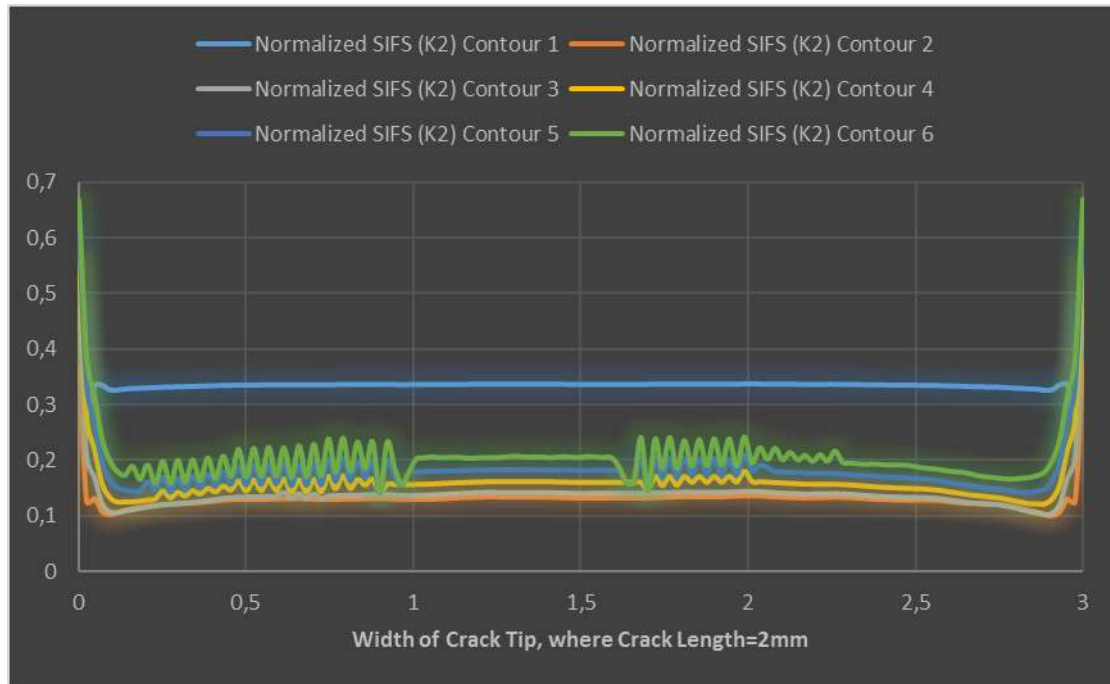
Από την άλλη, αναφορικά με τους συντελεστές συγκέντρωσης τάσεων  $K_{II}$  παρατηρείται αύξηση των τιμών τους καθώς το μήκος της ρωγμής αυξάνεται.

#### ➤ Συντελεστές Συγκέντρωσης Τάσεων $K_{II}$

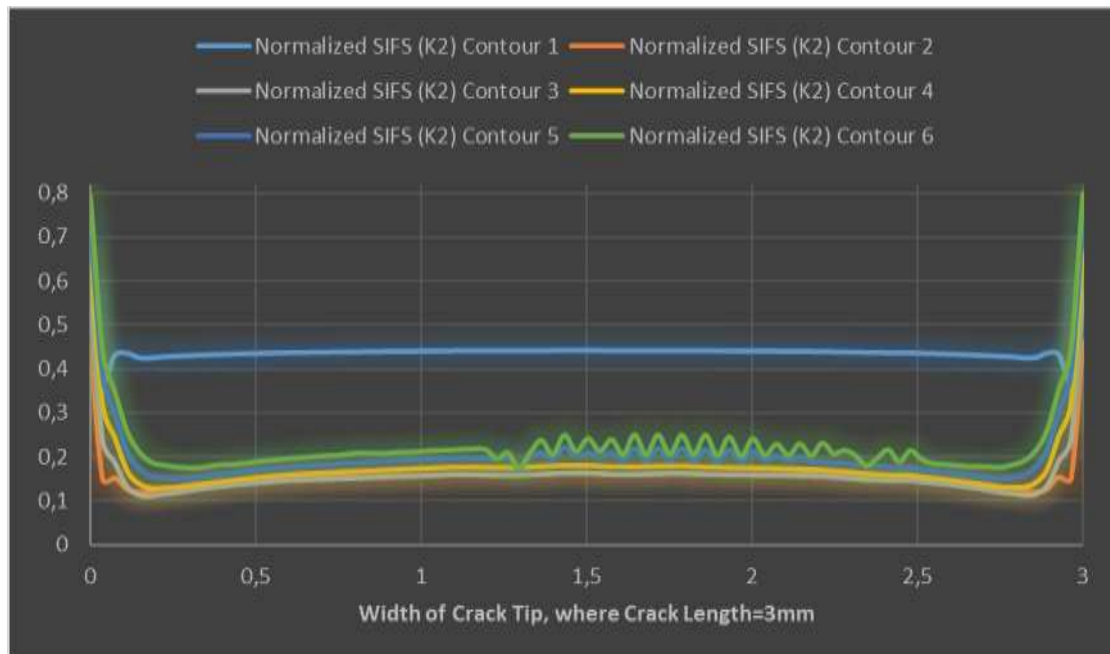


Γράφημα 4.1: Normalized SIFS ( $K_{II}/\tau_m$ ), crack length 1mm

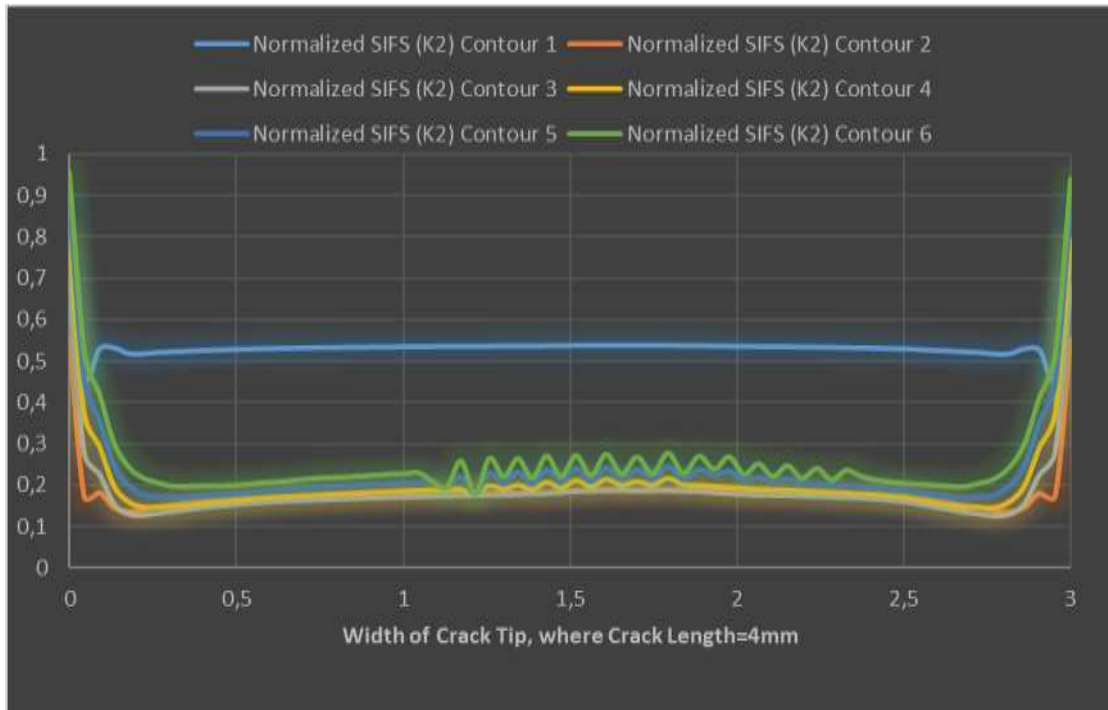




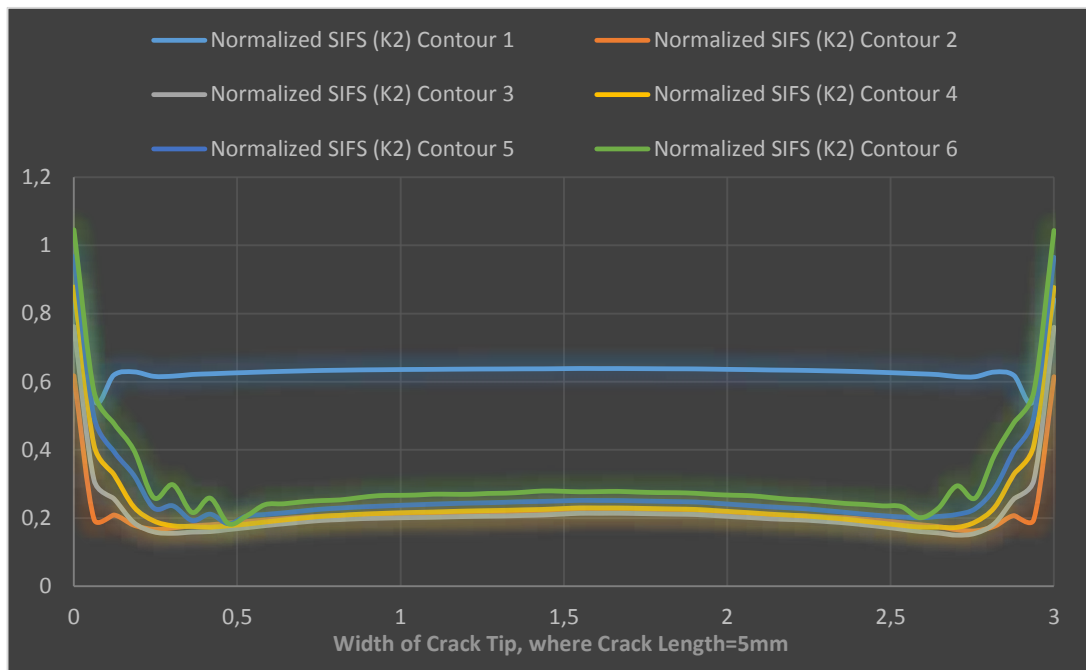
Γράφημα 4.2: Normalized SIFS ( $K_I/\tau_m$ ), crack length 2mm



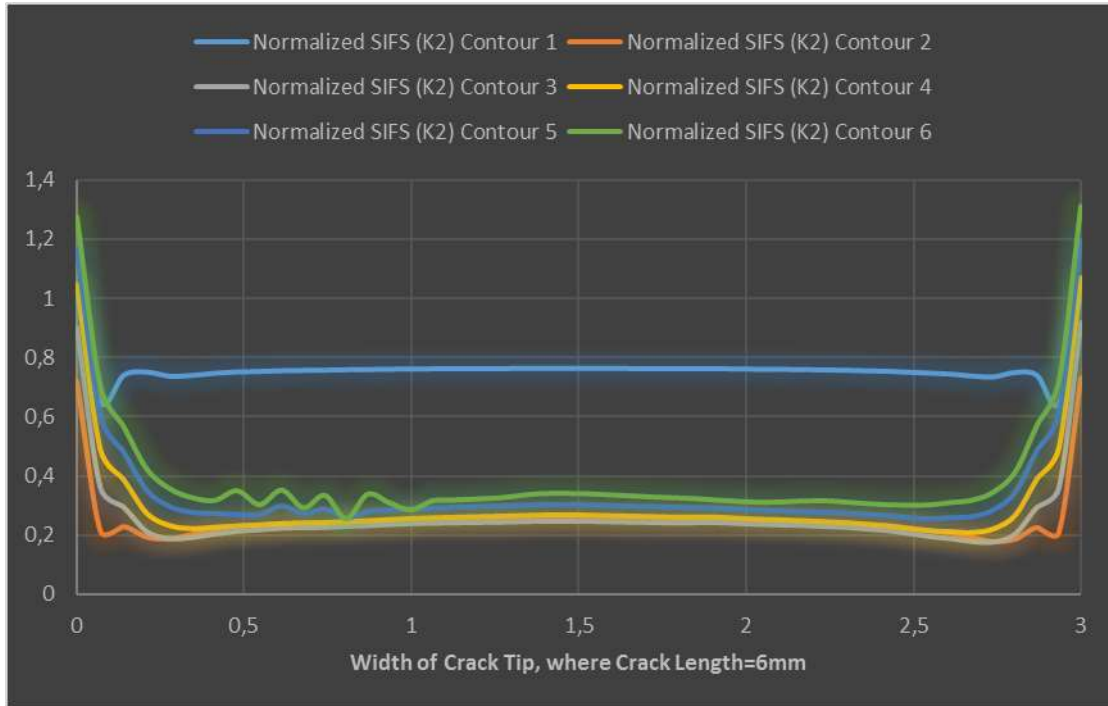
Γράφημα 4.3: Normalized SIFS ( $K_I/\tau_m$ ), crack length 3mm



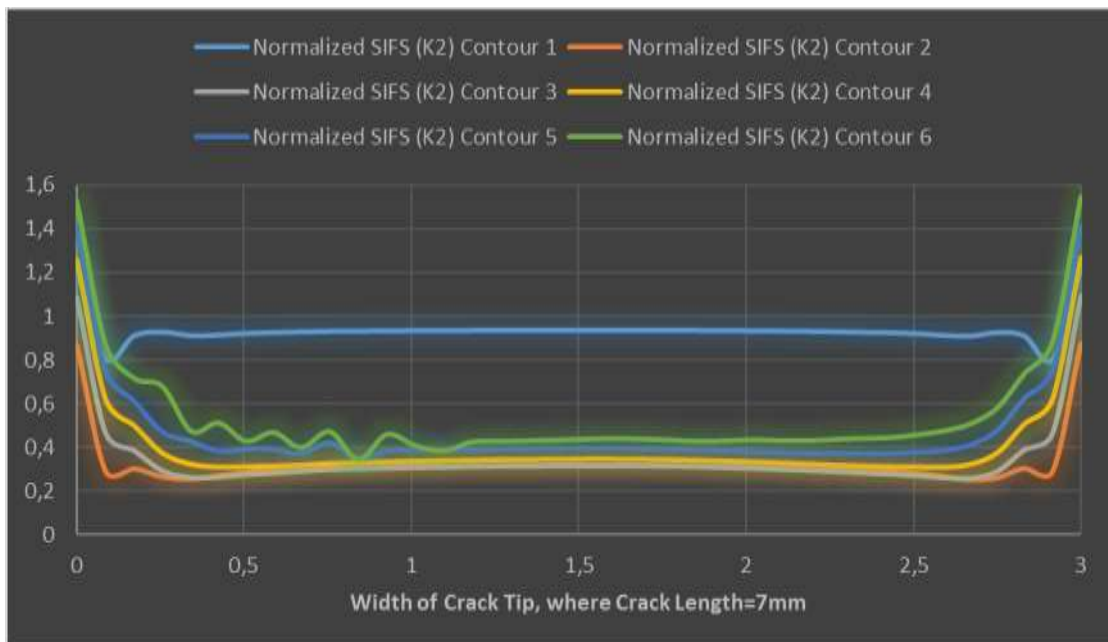
Γράφημα 4.4: Normalized SIFS ( $K_{II}/\tau_m$ ), crack length 4mm



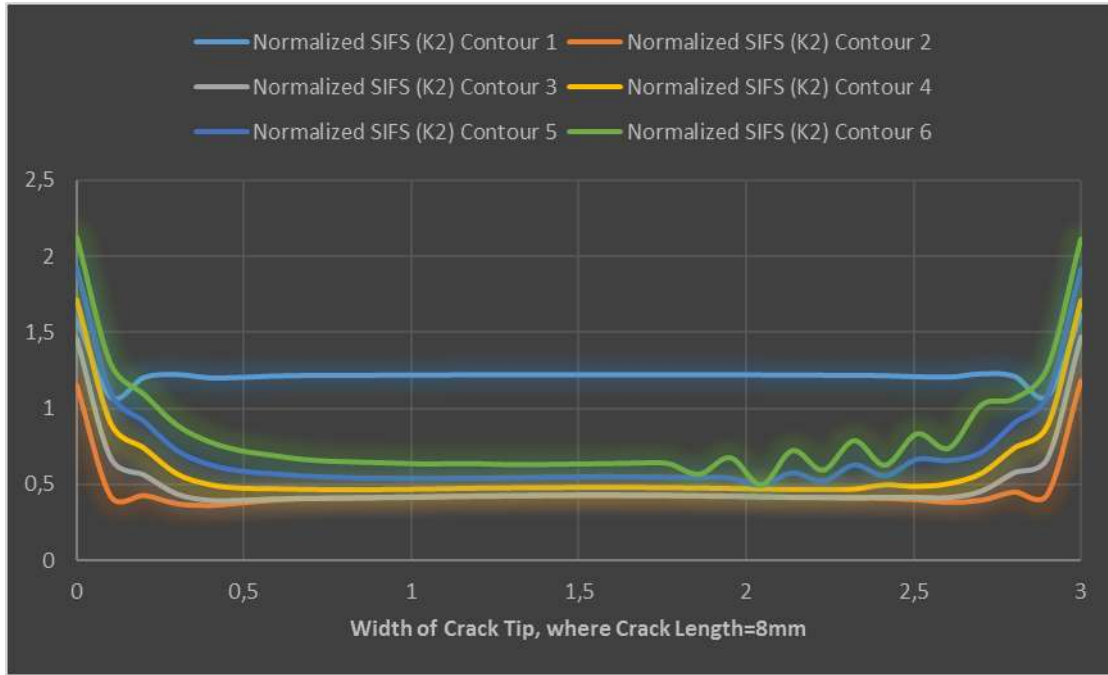
Γράφημα 4.5: Normalized SIFS ( $K_{II}/\tau_m$ ), crack length 5mm



Γράφημα 4.6: Normalized SIFS ( $K_{II}/\tau_m$ ), crack length 6mm

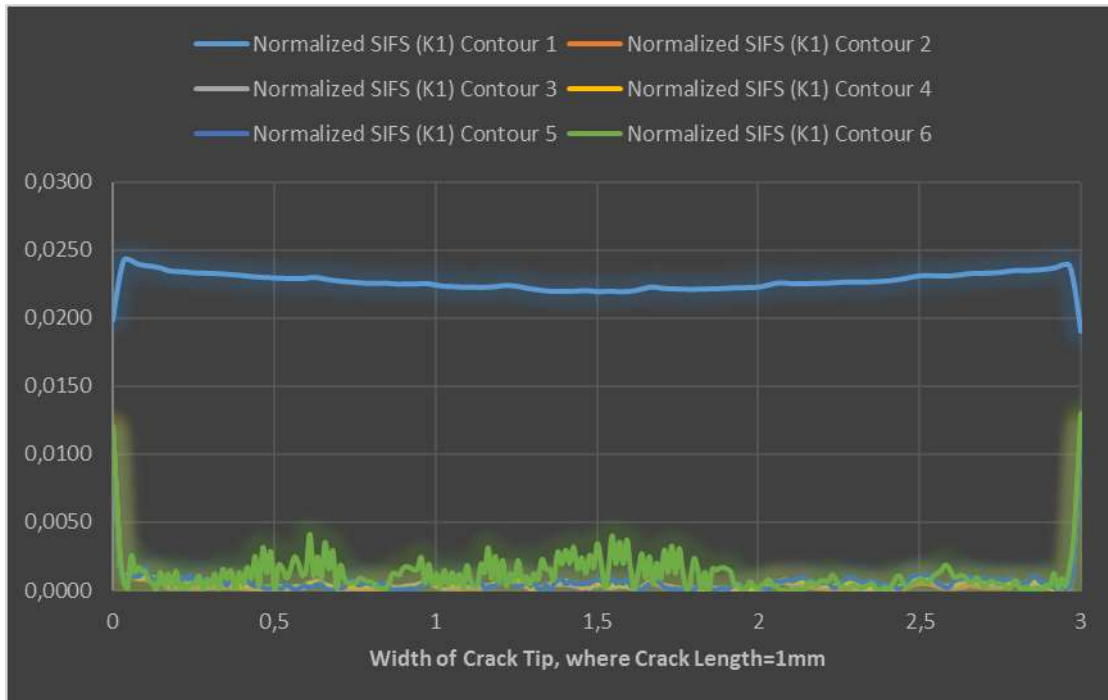


Γράφημα 4.7: Normalized SIFS ( $K_{II}/\tau_m$ ), crack length 7mm

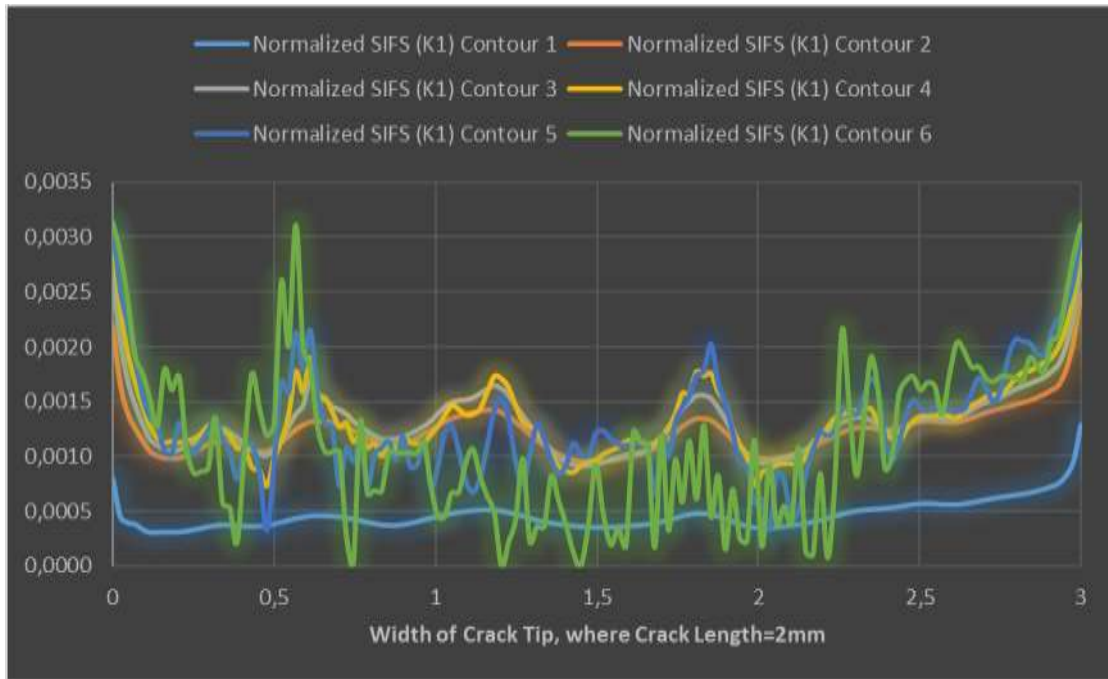


Γράφημα 4.8: Normalized SIFS ( $K_{II}/\tau_m$ ), crack length 8mm

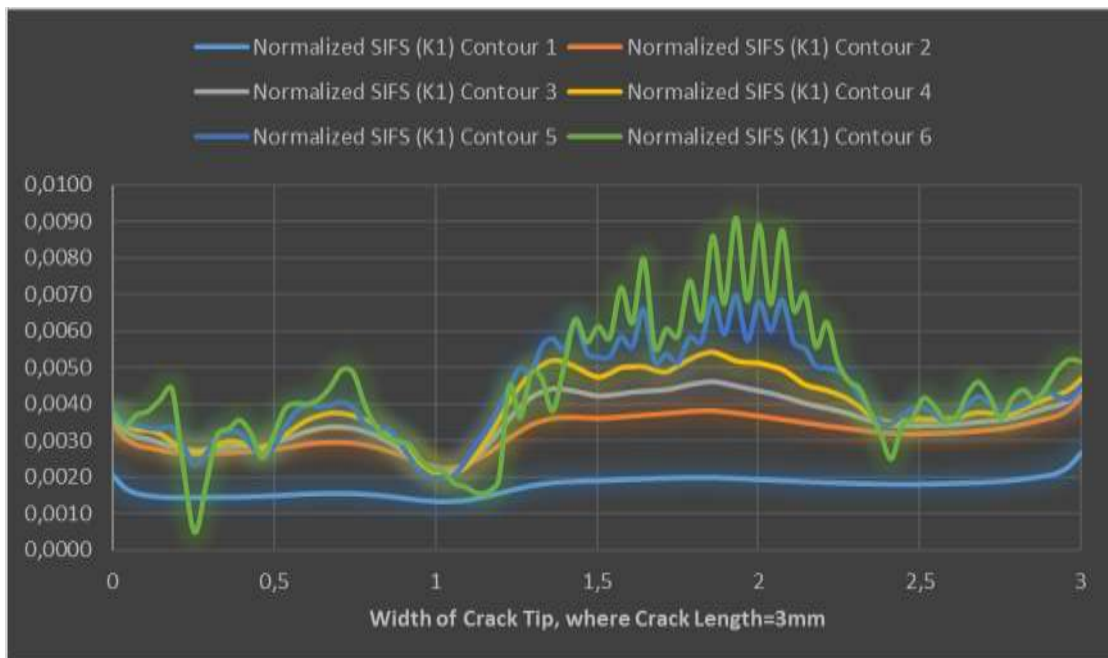
➤ Συντελεστές Συγκέντρωσης Τάσεων  $K_I$



Γράφημα 4.9: Normalized SIFS ( $K_I$ ), crack length 1mm

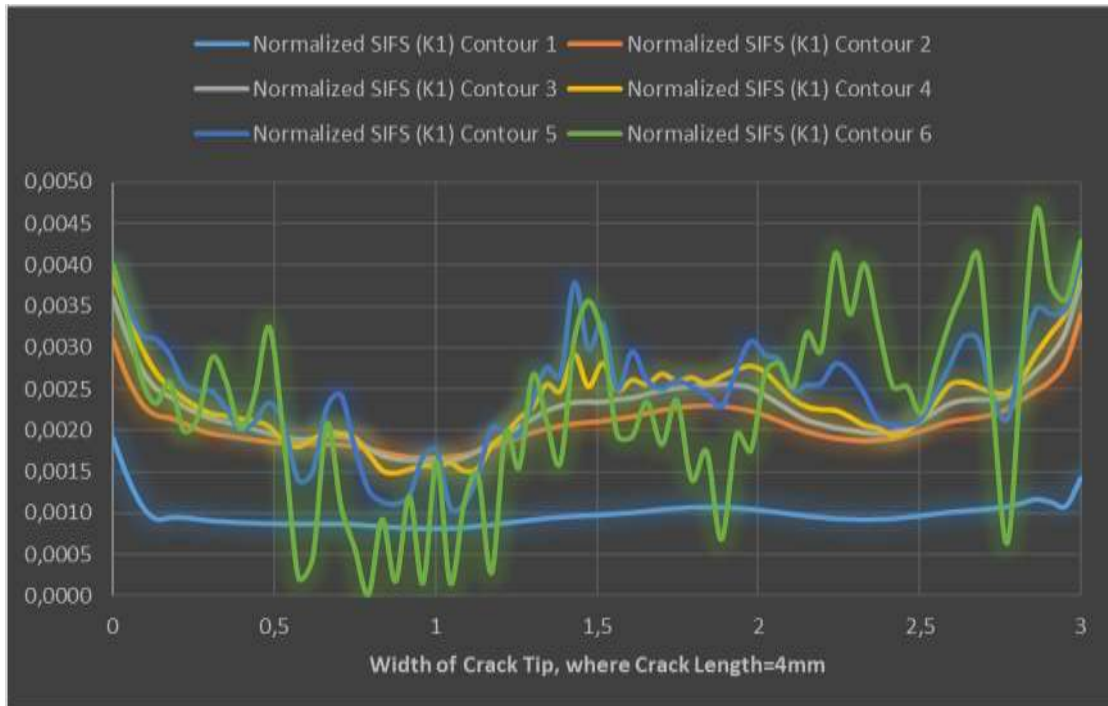


Γράφημα 4.10: Normalized SIFS ( $K_I$ ), crack length 2mm

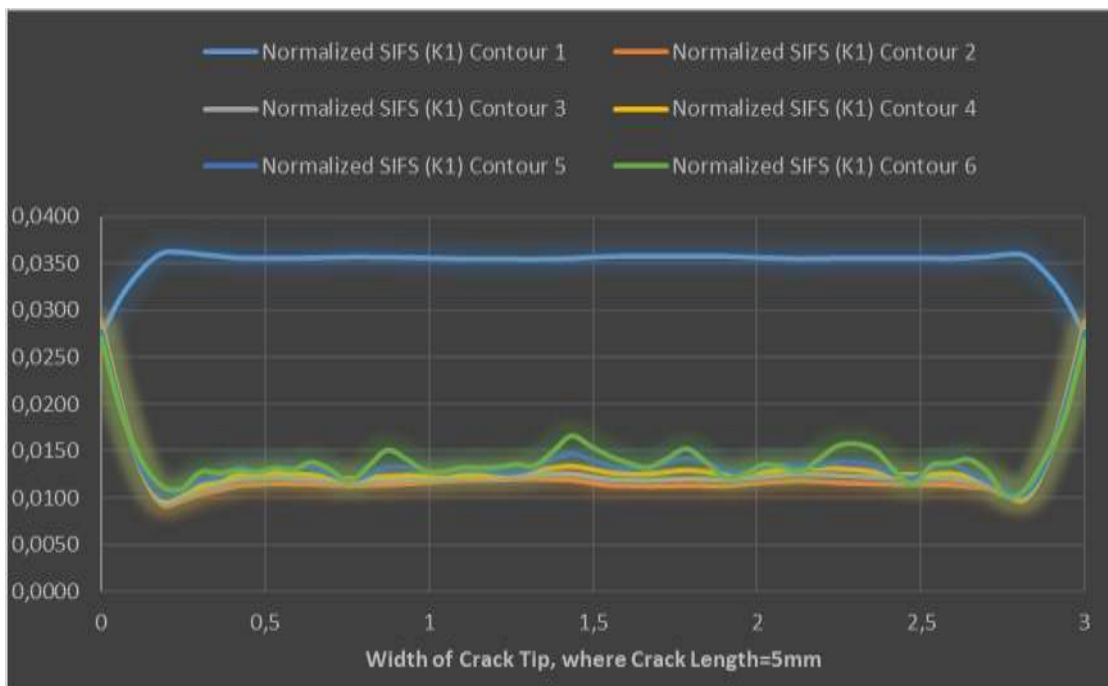


Γράφημα 4.11: Normalized SIFS ( $K_I$ ), crack length 3mm

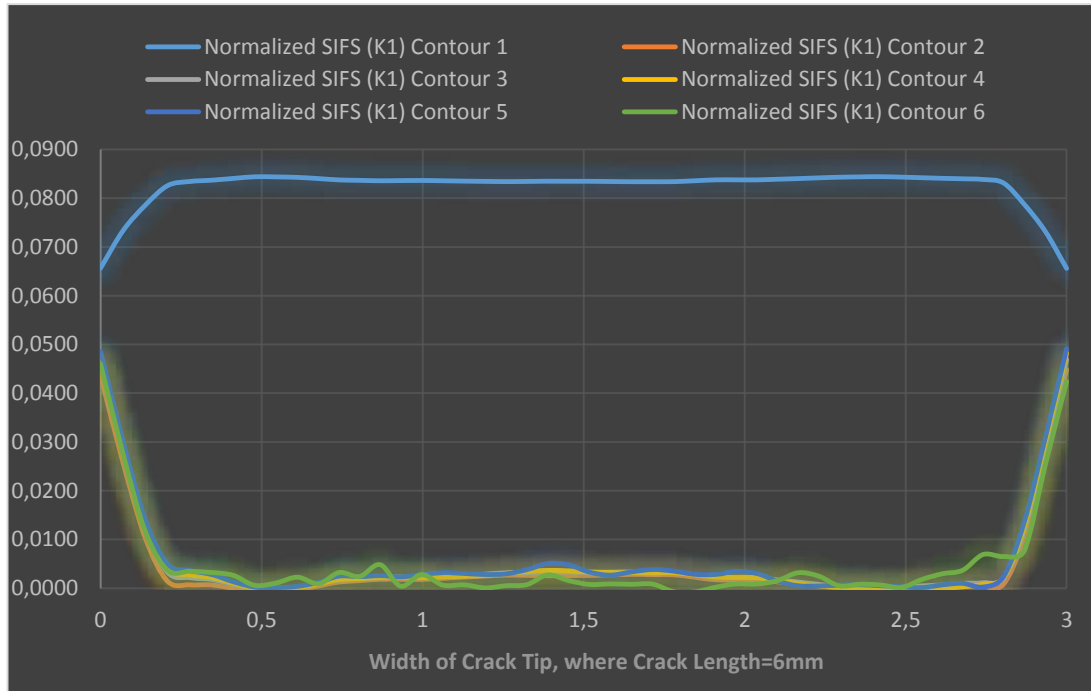




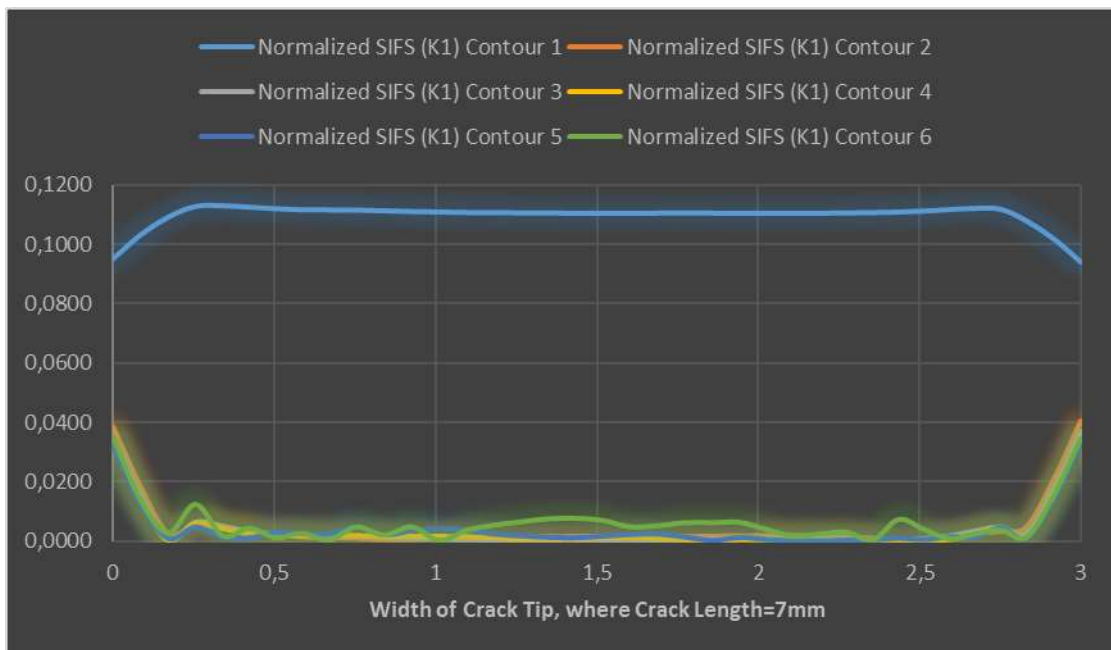
Γράφημα 4.12: Normalized SIFS ( $K_I$ ), crack length 4mm



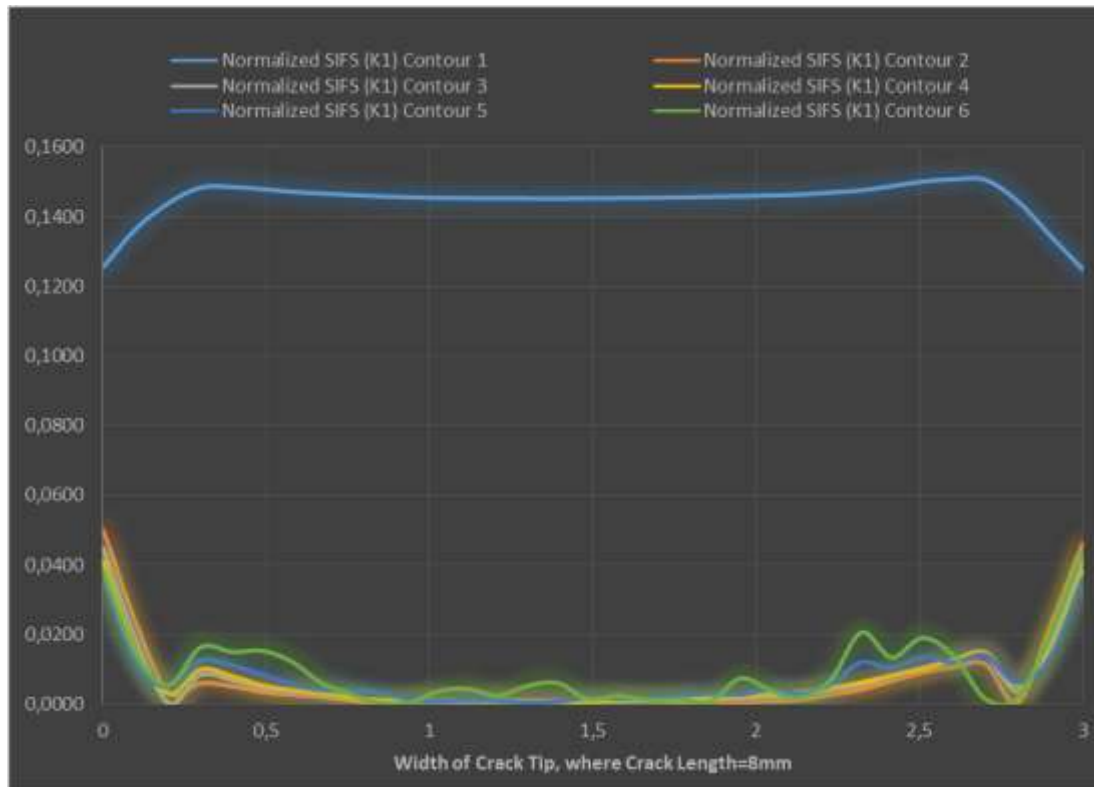
Γράφημα 4.13: Normalized SIFS ( $K_I$ ), crack length 5mm



Γράφημα 4.14: Normalized SIFS ( $K_I$ ), crack length 6mm

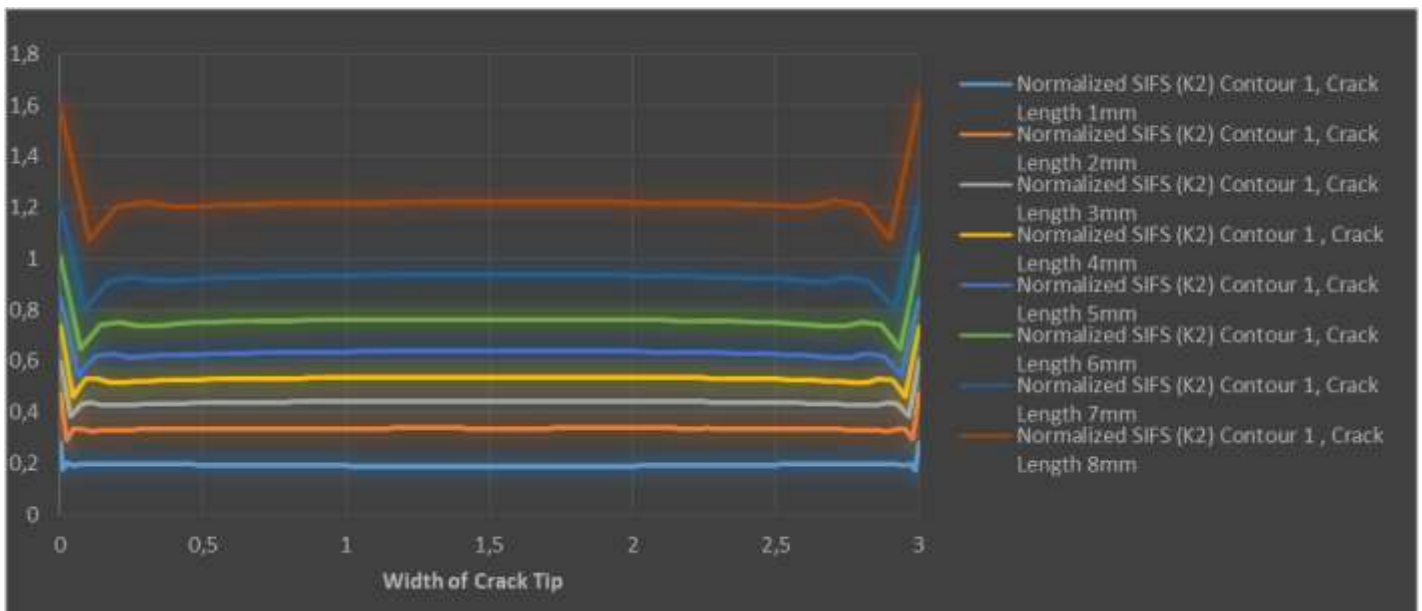


Γράφημα 4.15: Normalized SIFS ( $K_I$ ), crack length 7mm



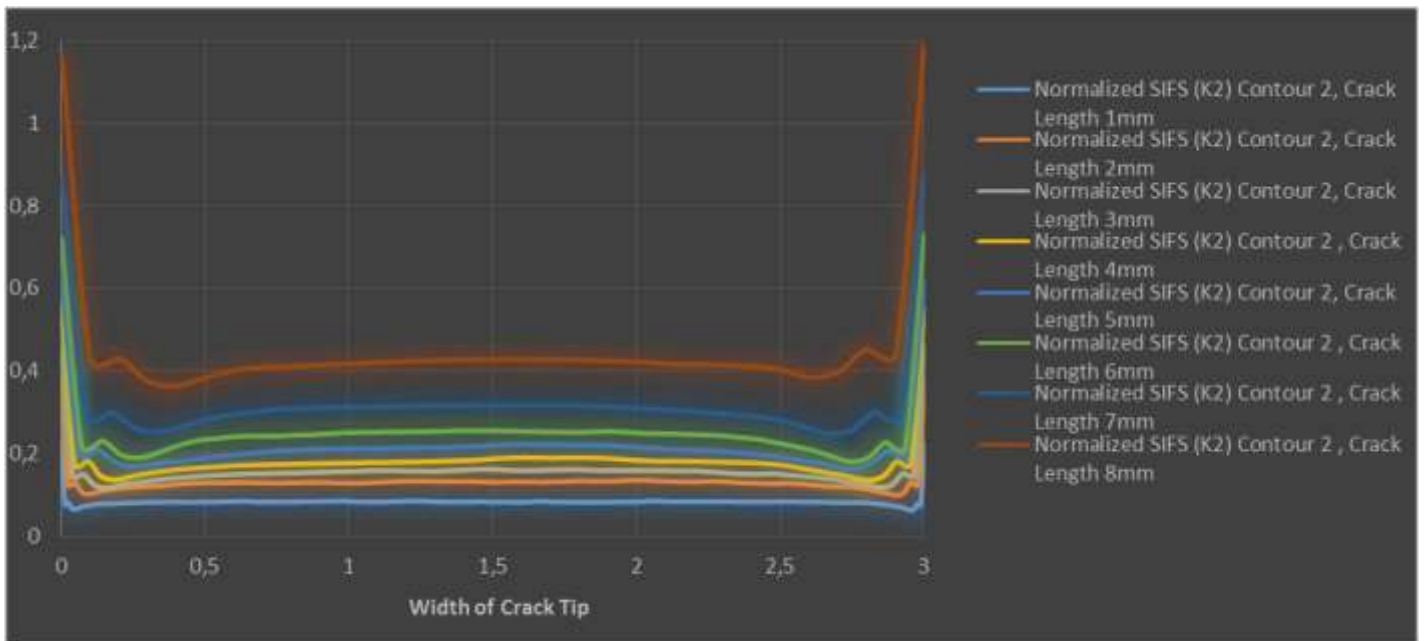
Γράφημα 4.16: Normalized SIFS ( $K_I$ ), crack length 8mm

➤ Συντελεστές Συγκέντρωσης Τάσεων  $K_{II}$  ομαδοποιημένοι ανά contour

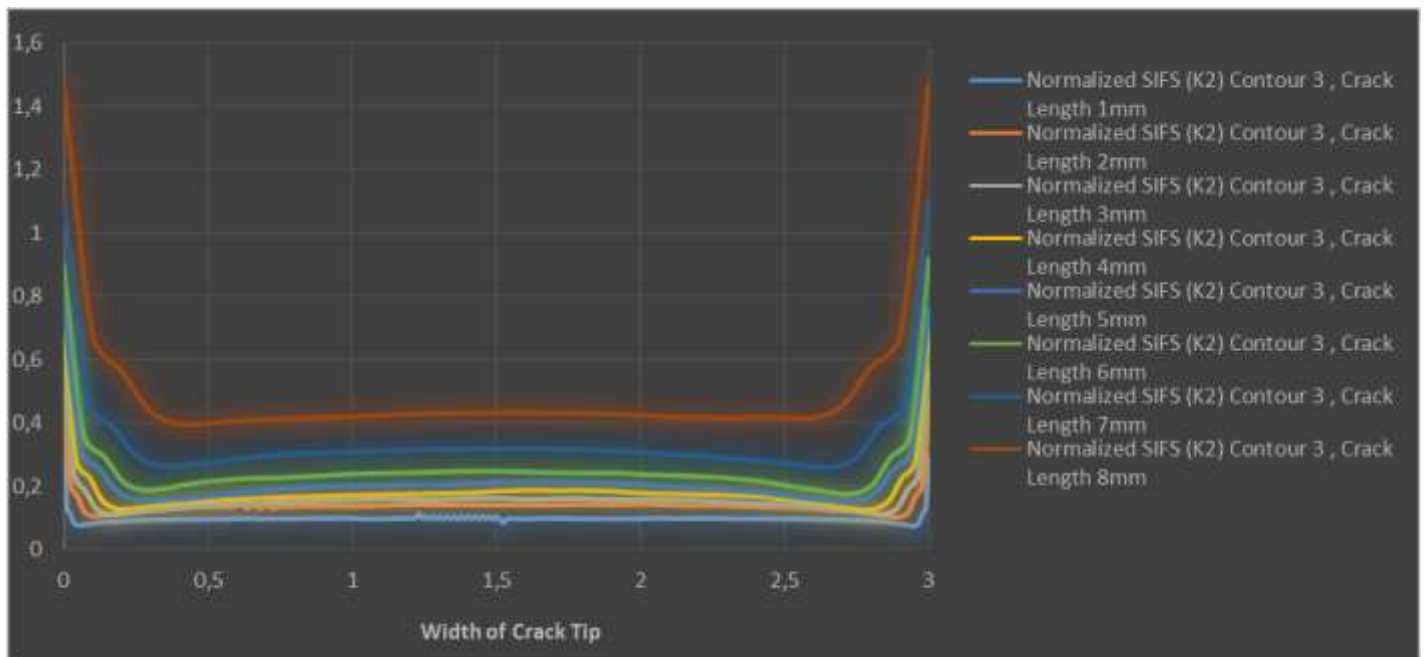


Γράφημα 4.17: Normalized SIFS ( $K_{II}$ ), contour 1

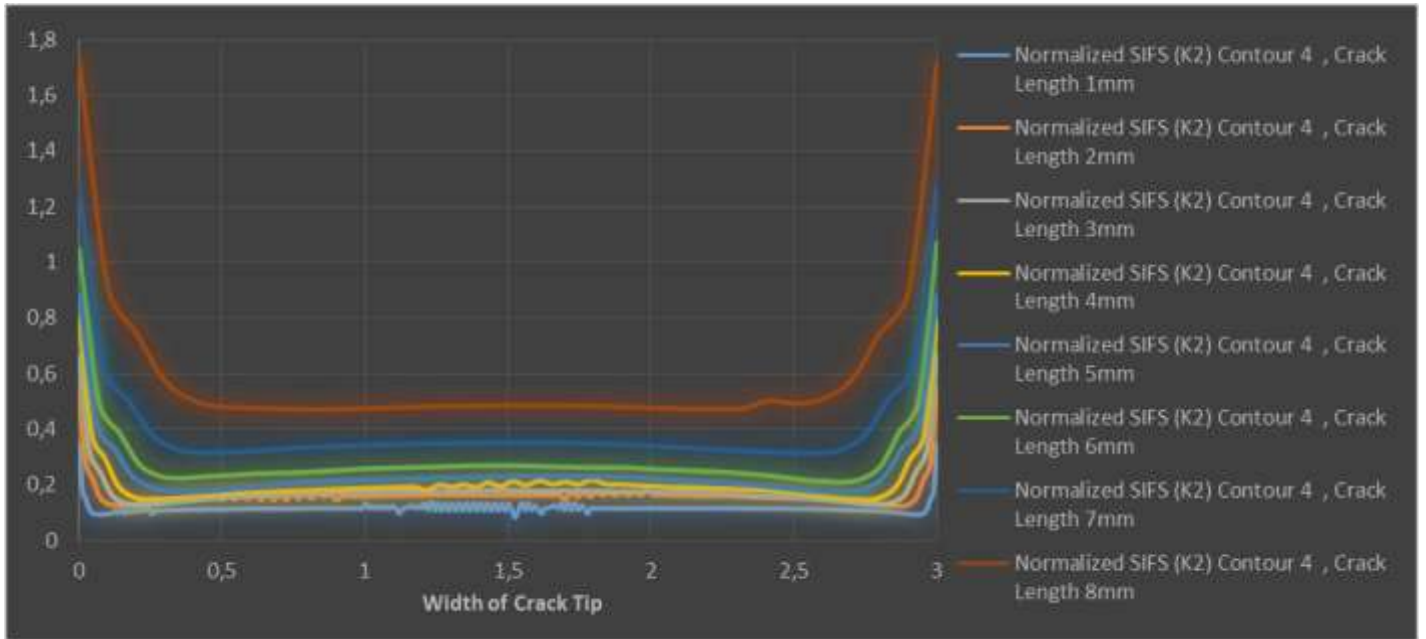




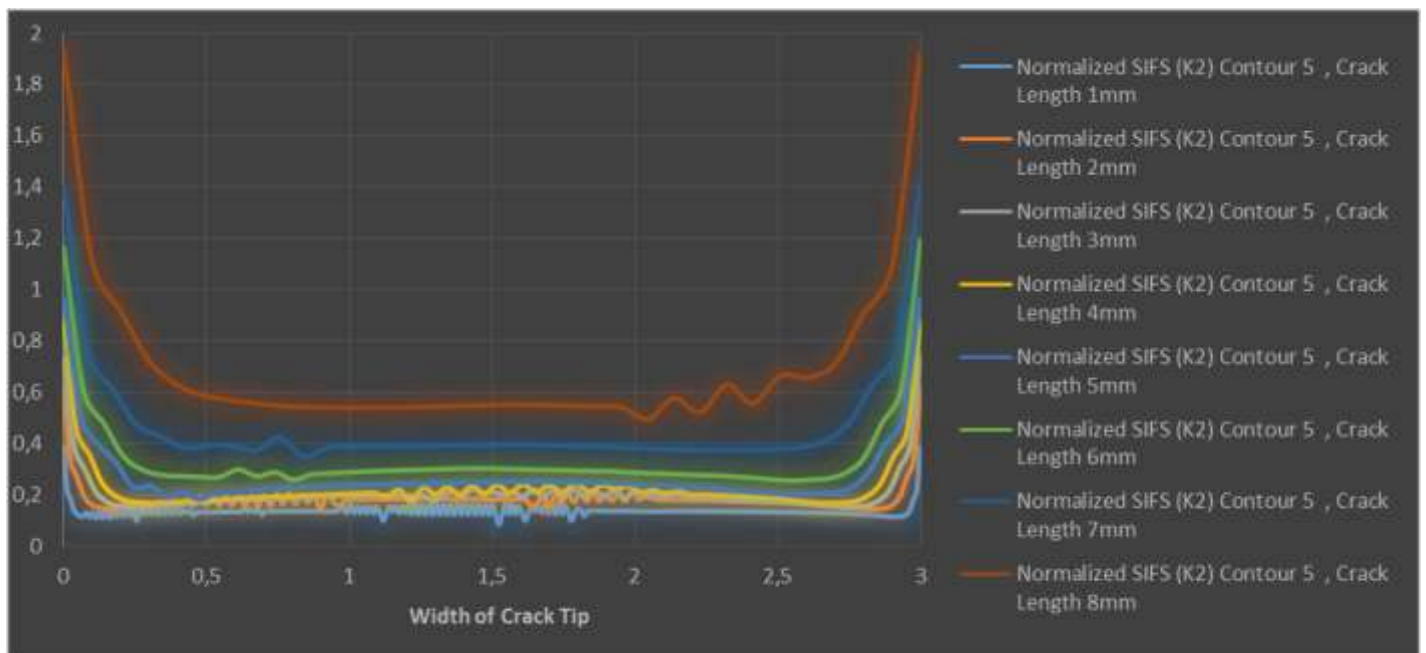
Γράφημα 4.18: Normalized SIFS ( $K_{II}$ ), contour 2



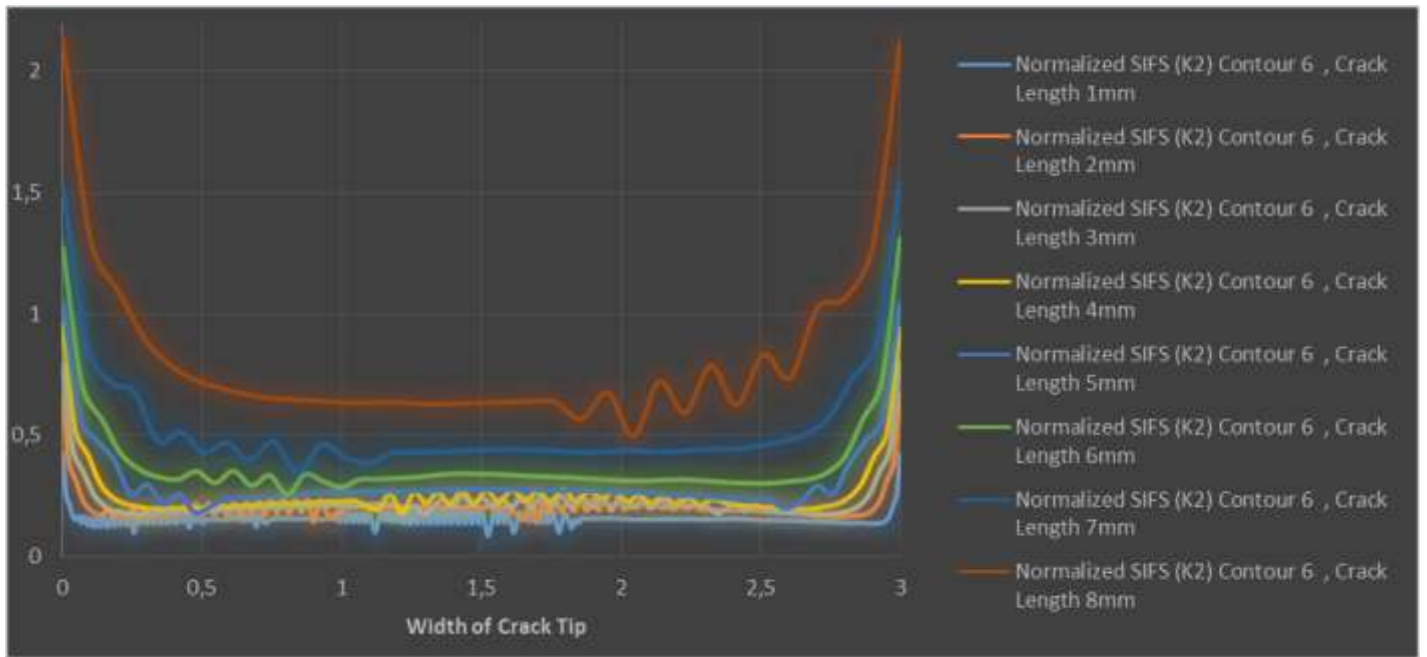
Γράφημα 4.19: Normalized SIFS ( $K_{II}$ ), contour 3



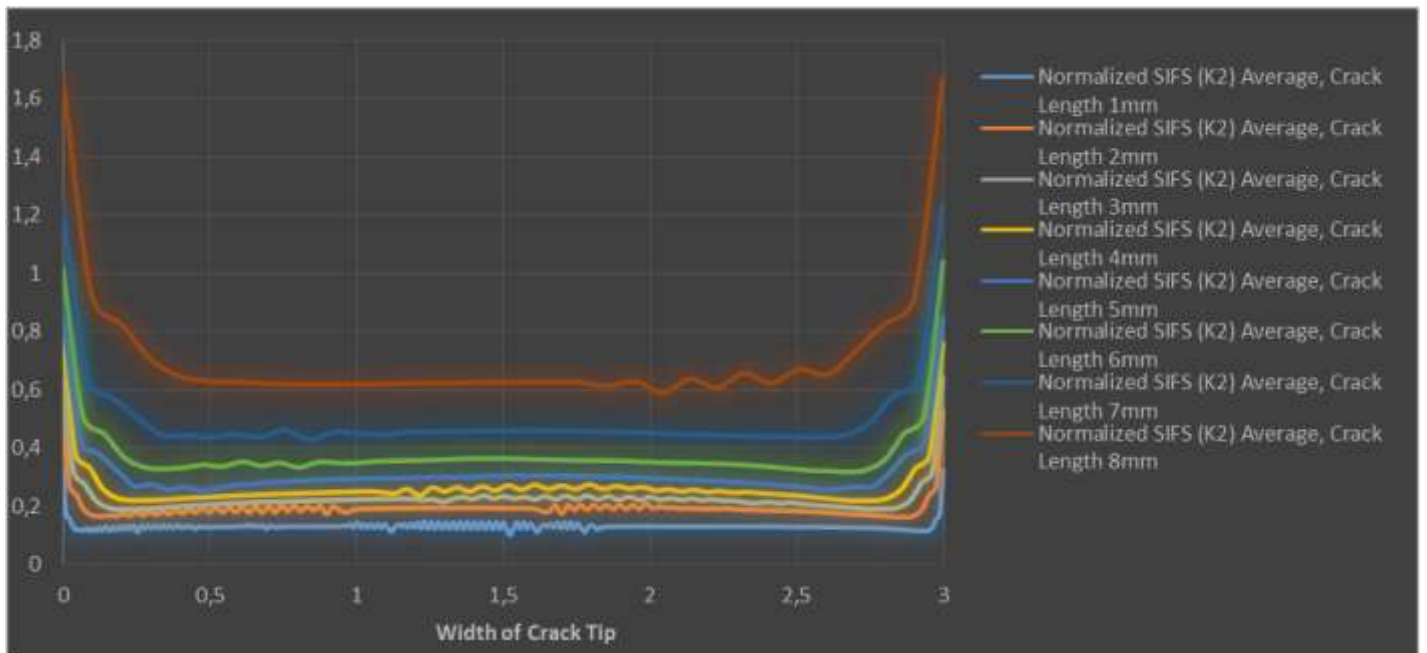
Γράφημα 4.20: Normalized SIFS ( $K_{II}$ ), contour 4



Γράφημα 4.21: Normalized SIFS ( $K_{II}$ ), contour 5

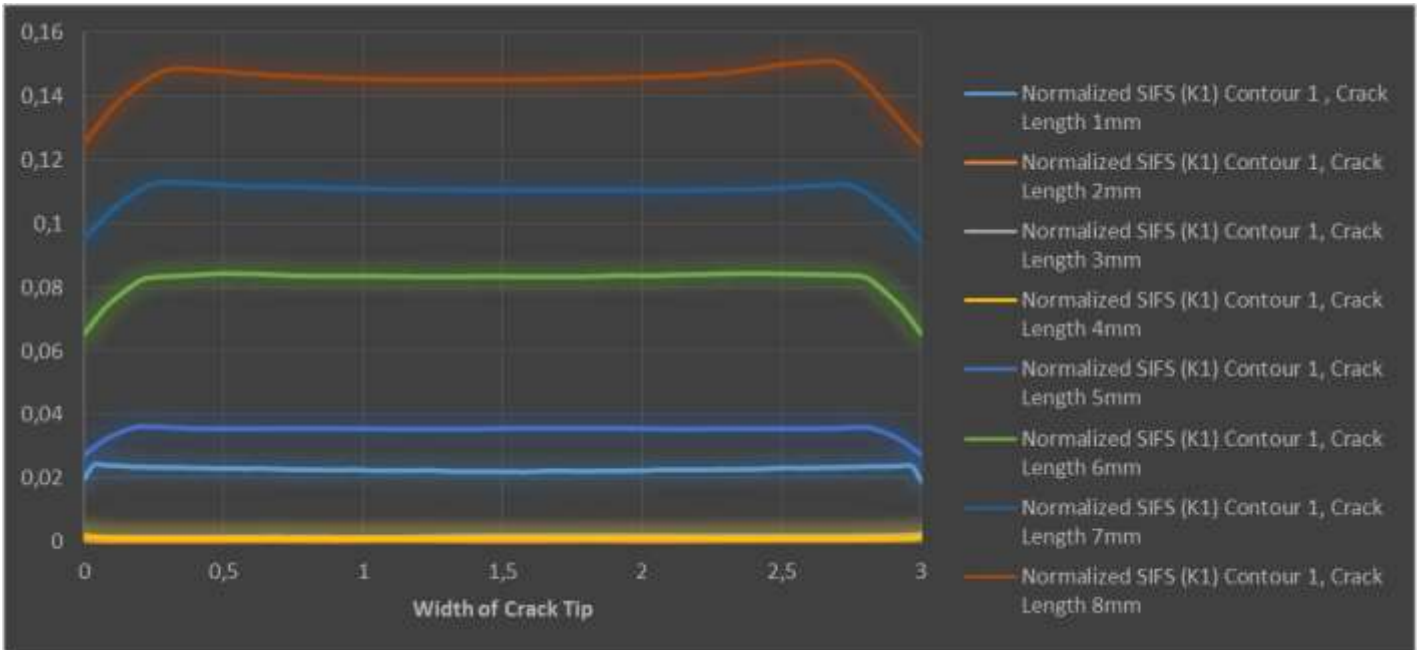


Γράφημα 4.22: Normalized SIFS ( $K_{II}$ ), contour 6

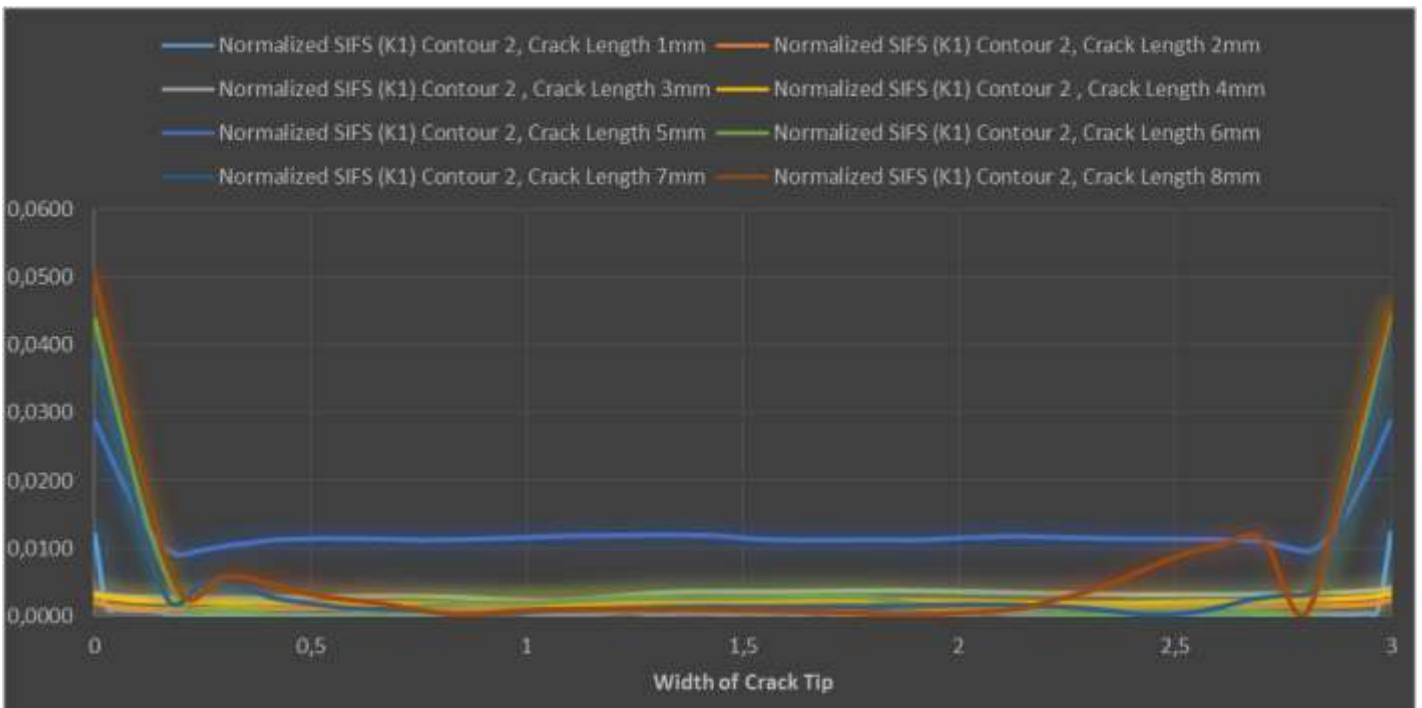


Γράφημα 4.23: Normalized SIFS ( $K_{II}$ ) – Average Values

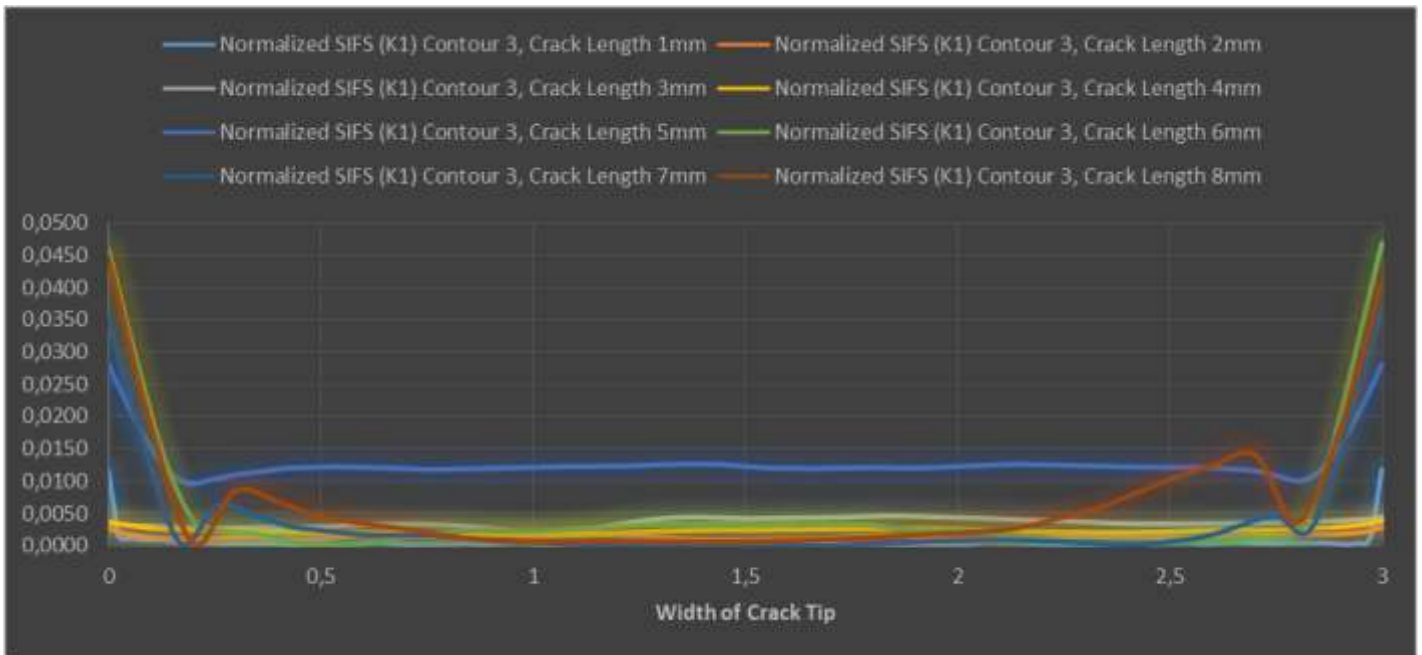
➤ Συντελεστές Συγκέντρωσης Τάσεων  $K_I$  ομαδοποιημένοι ανά contour



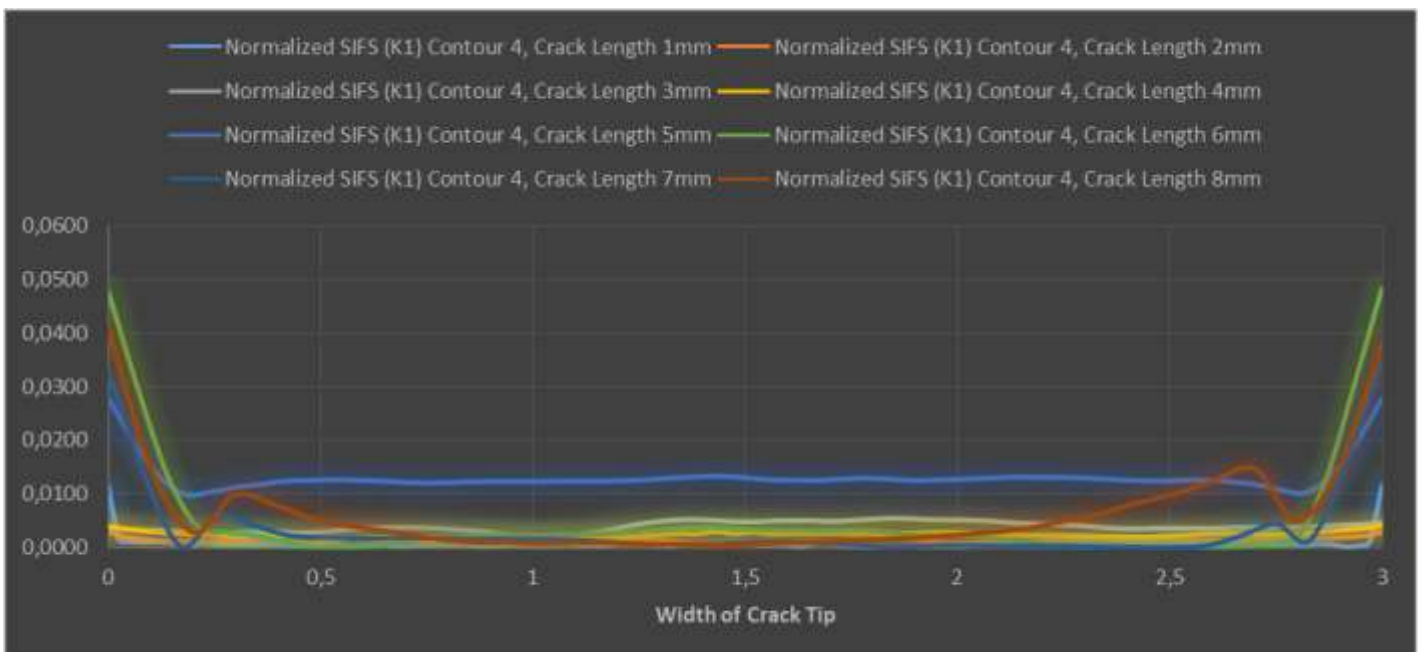
Γράφημα 4.24: Normalized SIFS ( $K_I$ ) – contour 1



Γράφημα 4.25: Normalized SIFS ( $K_I$ ) – contour 2

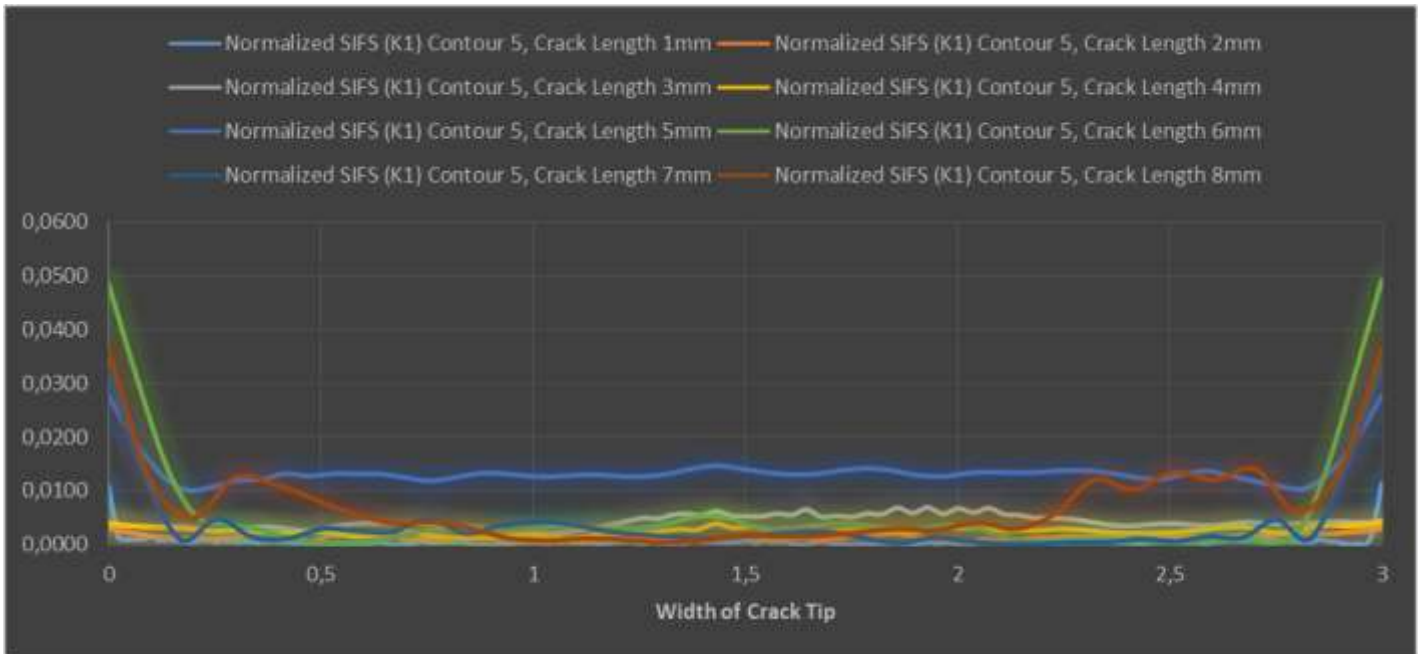


Γράφημα 4.26: Normalized SIFS ( $K_I$ ) – contour 3

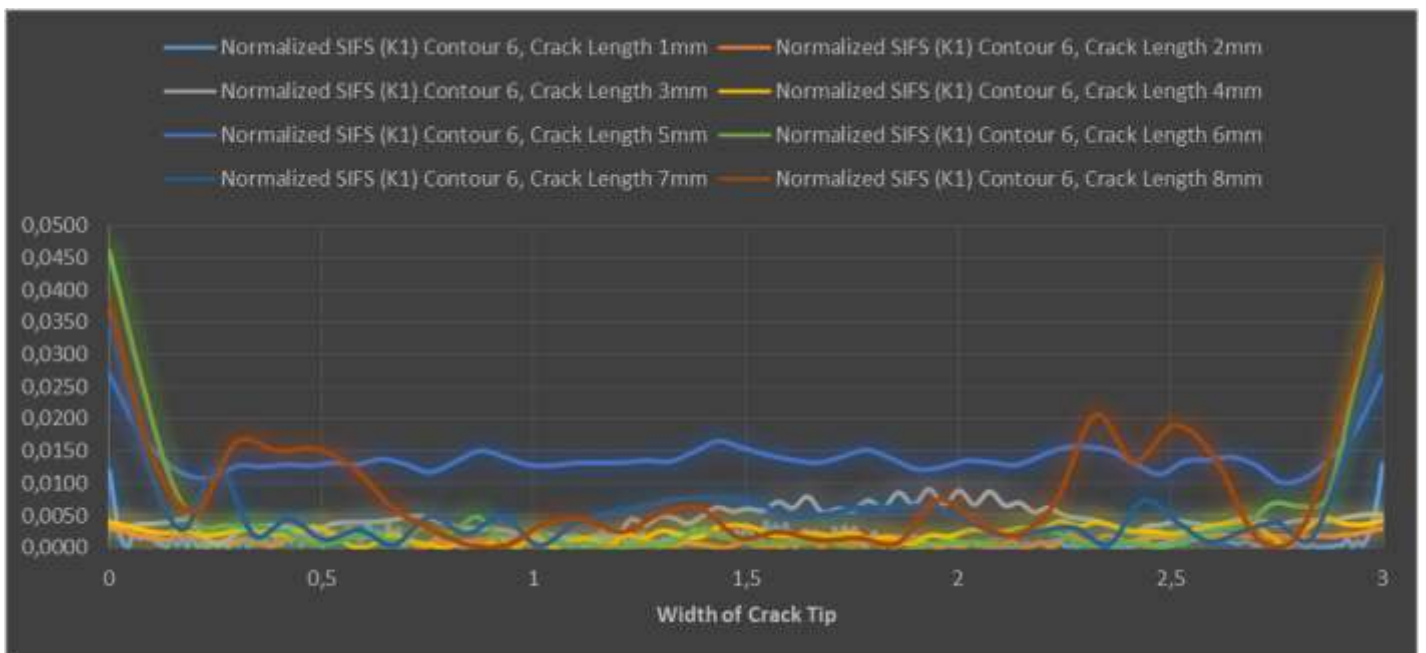


Γράφημα 4.26: Normalized SIFS ( $K_I$ ) – contour 4

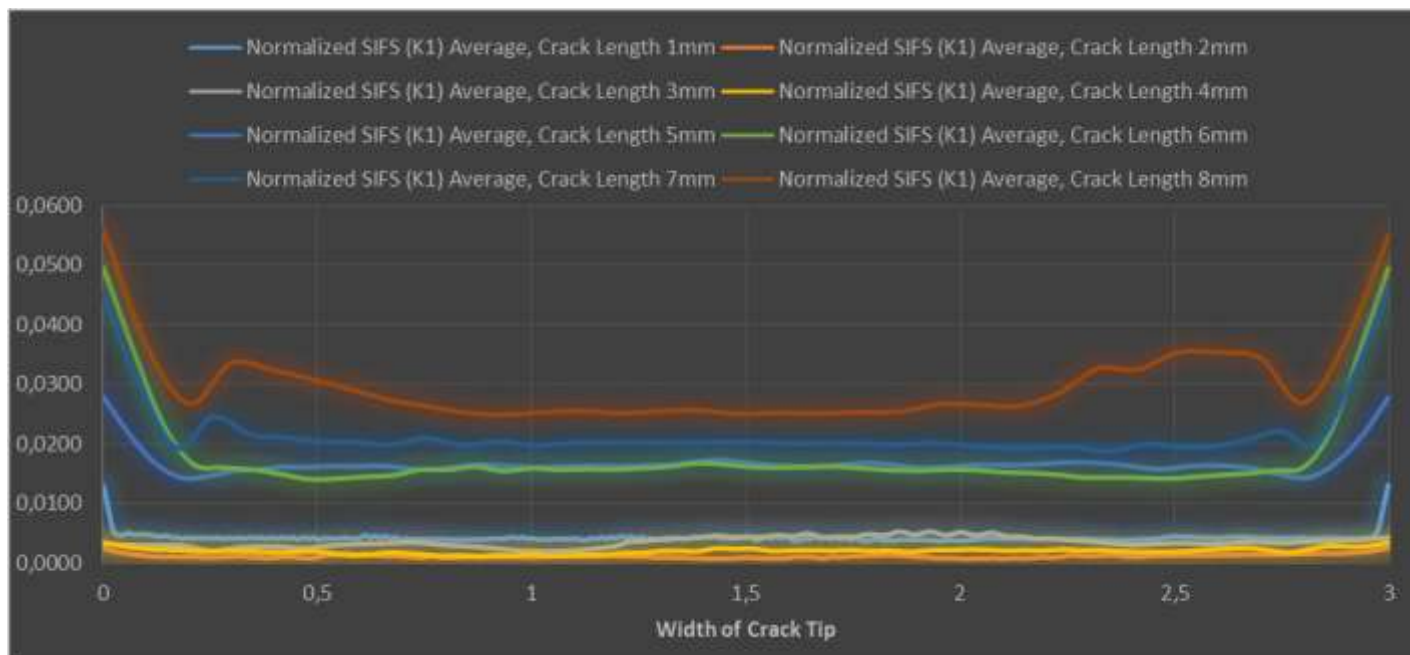




Γράφημα 4.27: Normalized SIFS ( $K_1$ ) – contour 5



Γράφημα 4.28: Normalized SIFS ( $K_1$ ) – contour 6



Γράφημα 4.29: Normalized SIFS ( $K_I$ ) – Average Values





**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5:**

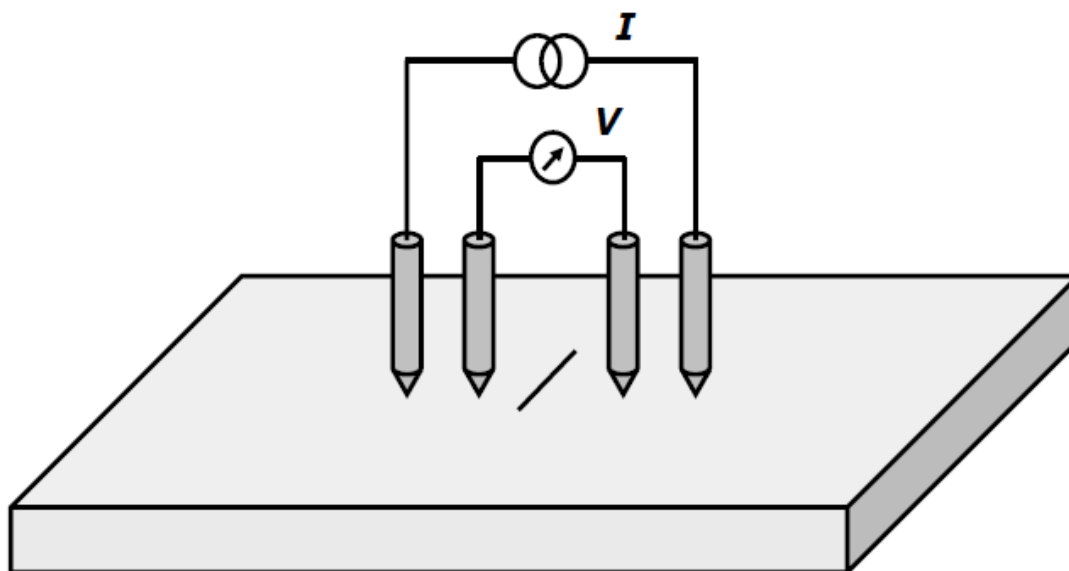
**ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΤΩΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ  
ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ**



## 5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μέθοδος της πτώσης του δυναμικού (Potential Drop-PD) αποτελεί μια μη καταστροφική τεχνική ανίχνευσης και διαστασιολόγησης φθορών - ελαττωμάτων (ρωγμές), η οποία εφαρμόζεται σε αγωγίμα υλικά. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται με δύο διαφορετικές τεχνικές [7]:

1. Η τεχνική κατά την οποία εφαρμόζεται συνεχές ρεύμα (Direct Current Potential Drop - DCPD).
2. Η τεχνική κατά την οποία εφαρμόζεται εναλλασσόμενο ρεύμα (Alternating Current Potential Drop - ACPD).



Εικόνα 5.1: Προσδιορισμός θέσης ηλεκτροδίων εισαγωγής ρεύματος και μέτρησης ηλεκτρικού δυναμικού, εκατέρωθεν της ρωγμής

Σύμφωνα με τη μέθοδο πτώσης δυναμικού τροφοδοτούνται τα υπό έλεγχο με ρεύμα (εναλλασσόμενο ή συνεχές) δοκίμια, μέσω ηλεκτρικών ακροδεκτών (ηλεκτροδίων).

Το ηλεκτρικό ρεύμα εφαρμόζεται εκατέρωθεν της ρωγμής, με αποτέλεσμα την ύπαρξη διαφοράς δυναμικού σε κατάλληλα τοποθετημένα ηλεκτρόδια, ομοίως εκατέρωθεν της ρωγμής.

Κάθε μεταβολή ή αύξηση της ρωγμής, θα προκαλέσει μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης και συνεπώς διαφορά του αδιαστατοποιημένου δυναμικού, το οποίο αντιπροσωπεύει την αναλογία της μετρηθείσας διαφοράς δυναμικού ως προς την διαφορά δυναμικού που θα παρουσίαζε ένα δοκίμιο χωρίς ρωγμή [8].

## 5.2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας επιλέχτηκε η τεχνική του συνεχούς ρεύματος.

Οι διαφορικές εξισώσεις που διέπουν το εν λόγω πρόβλημα είναι οι κάτωθι:

$$\nabla^2 V(x, y) = 0$$

$$\mathbf{J} = \sigma \cdot \mathbf{E} = -\sigma \cdot \nabla V(x, y)$$

όπου:

$V(\mathbf{x}, \mathbf{y})$  το ηλεκτροστατικό δυναμικό στη θέση  $(x, y)$ ,

$\mathbf{J}$  είναι το διάνυσμα της πυκνότητας του ηλεκτρικού ρεύματος,

$\mathbf{E}$  είναι το διάνυσμα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, και

$\sigma$  είναι η ειδική αγωγιμότητα του εκάστοτε υλικού.

## 5.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

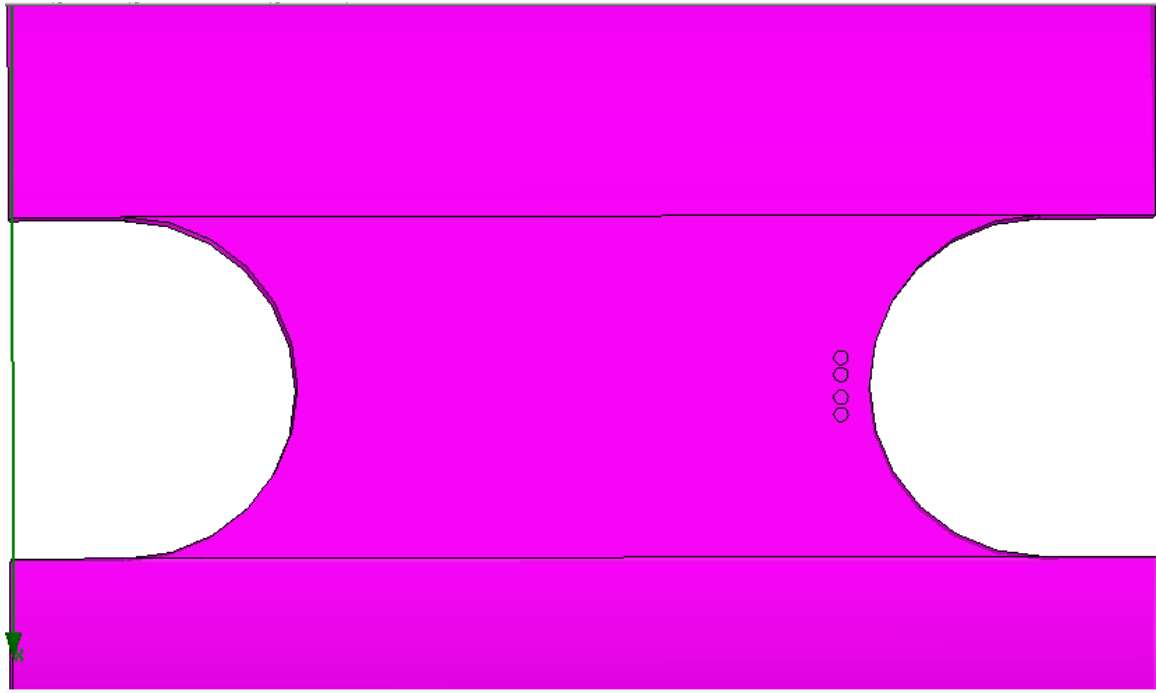
Η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό Maxwell 11. Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν είχαν προσχεδιαστεί στο λογισμικό Solidworks 2016.

Πιο συγκεκριμένα, μελετήθηκαν εννέα διαφορετικές περιπτώσεις δοκιμίων. Σε πρώτη φάση, εξετάστηκε η απόκριση του μη ρηγματωμένου δοκιμίου ενώ η ανάλυση προχώρησε βαθμιαία στη μελέτη της συμπεριφοράς οκτώ δοκιμίων, με σχηματισμό ρωγμής κατά μήκος του κάθετου άξονα συμμετρίας τους, και βαθμιαίο μήκος αύξησης ρωγμής 1mm ανά εξεταζόμενη περίπτωση.

Για την κάθε ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν δύο ζευγάρια ηλεκτροδίων: δύο ηλεκτρόδια για την εισαγωγή του συνεχούς ρεύματος και δύο ηλεκτρόδια για τη μέτρηση του δυναμικού. Και τα τέσσερα ηλεκτρόδια τοποθετήθηκαν στην ίδια αδιαστατοποιημένη θέση ως προς τον ουδέτερο άξονα.

Η απόσταση μεταξύ καθενός ηλεκτροδίου εισαγωγής συνεχούς ρεύματος με το αντίστοιχο ηλεκτρόδιο της μέτρησης του δυναμικού ορίστηκε στα 0.3mm. Επίσης, τόσο τα ηλεκτρόδια εισαγωγής του συνεχούς ρεύματος όσο και τα ηλεκτρόδια μέτρησης του δυναμικού τοποθετήθηκαν κοντά στο σημείο ανάπτυξης της ρωγμής αλλά σε ικανή απόσταση που να εξασφαλίζει την εγκυρότητα των μετρήσεων.

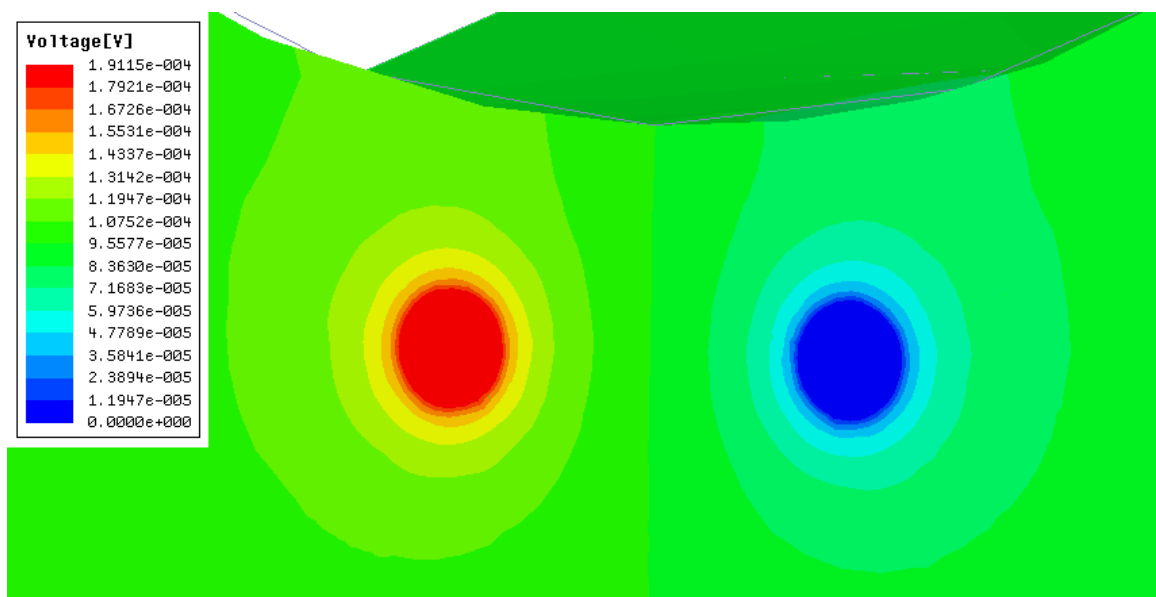
Στην Εικόνα 5.2 παρουσιάζονται τα σημεία τοποθέτησης των τεσσάρων ηλεκτροδίων.



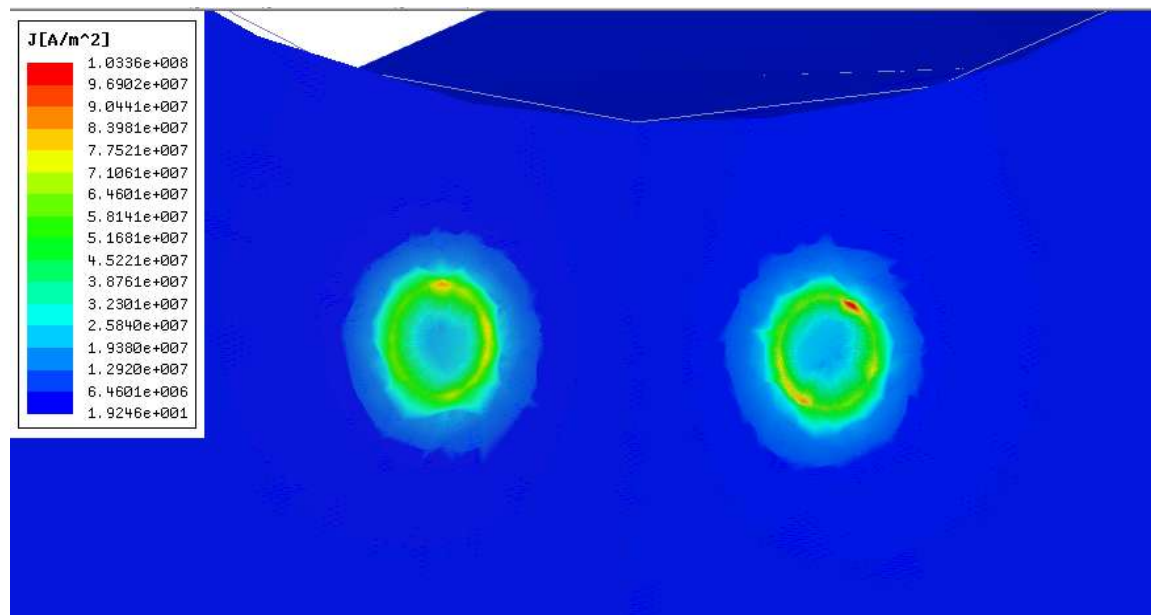
Εικόνα 5.2: Σημεία τοποθέτησης ηλεκτροδίων εισαγωγής συνεχούς ρεύματος και ηλεκτροδίων μέτρησης δυναμικού

### Αποτελέσματα Μελέτης Μη Ρηγματωμένου Δοκιμίου

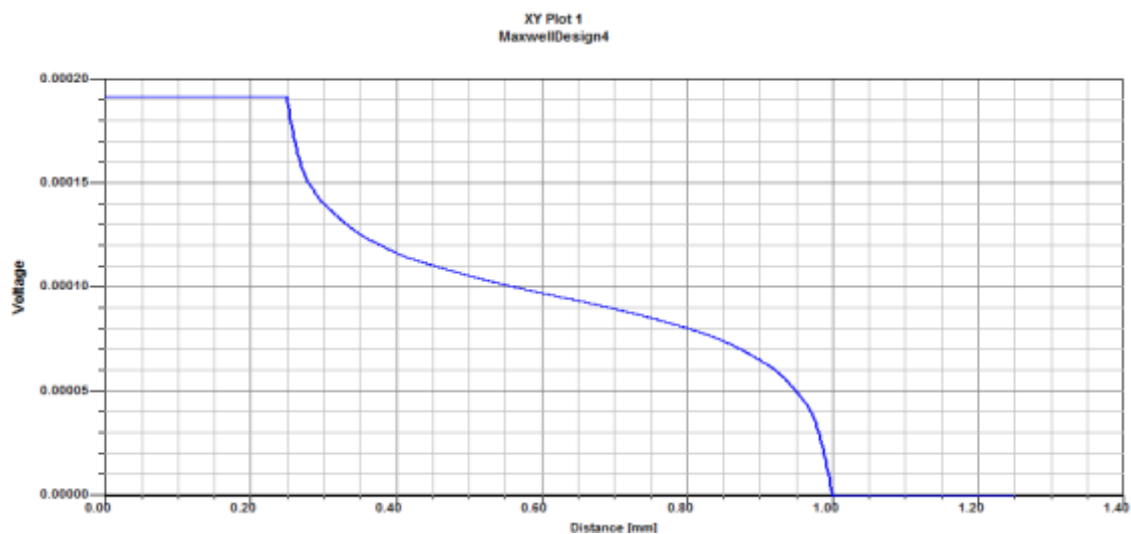
Σε πρώτη φάση μελετήθηκε το μη ρηγματωμένο δοκίμιο. Στις Εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζονται οι ισοδυναμικές γραμμές που αναπτύσσονται στην επιφάνεια του δοκιμίου καθώς και το διάγραμμα της πυκνότητας του ηλεκτρικού ρεύματος.



Εικόνα 5.3: Ισοδυναμικές Επιφάνειες μη ρηγματωμένου δοκιμίου



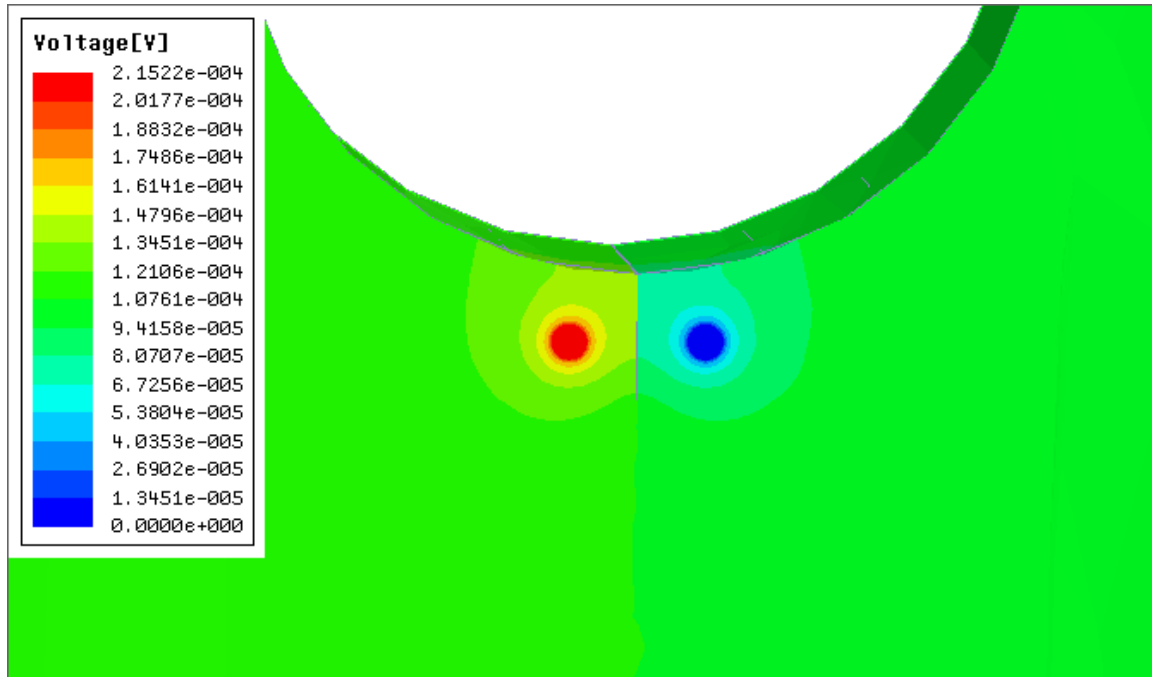
Εικόνα 5.4: Διάνυσμα πυκνότητας ηλεκτρικού ρεύματος μη ρηγματωμένου δοκιμίου



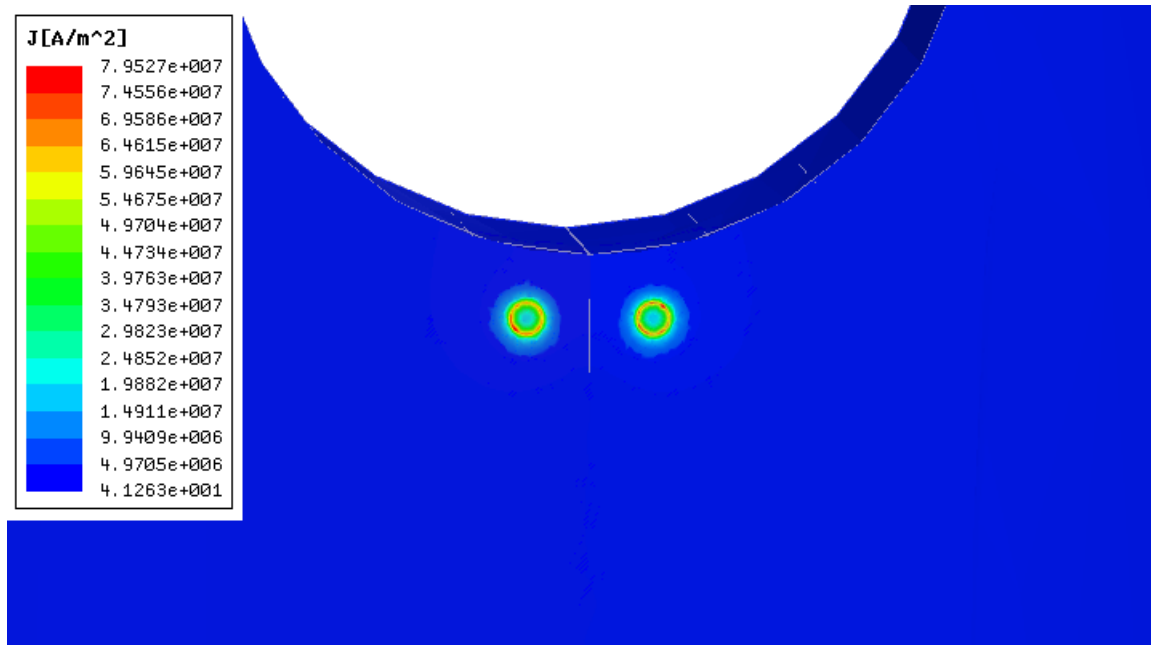
Γράφημα 5.1: Διάγραμμα Δυναμικού – Σημείον Τοποθέτησης Ηλεκτροδίων κατά μήκος γραμμής που ενώνει τα 2 ηλεκτρόδια εισαγωγής ρεύματος και τα 2 ηλεκτρόδια μέτρησης δυναμικού (Ηλεκτρόδιο Μετρήσεων 1<sup>ο</sup>: 0.425mm, Ηλεκτρόδιο Μετρήσεων 2<sup>ο</sup> : 0.825mm)

### Αποτελέσματα Μελέτης Δοκιμίου με Ρωγμή Μήκους 1mm

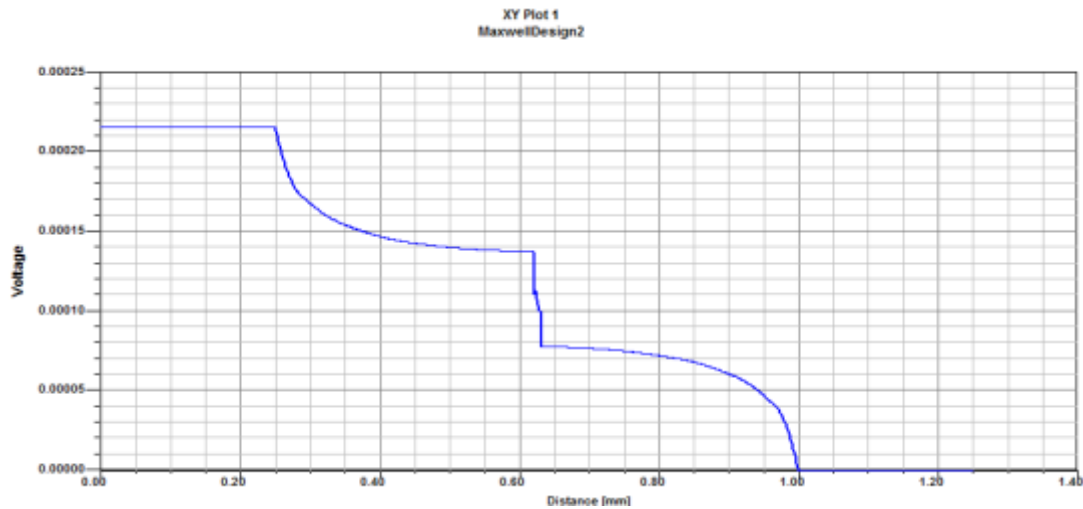
Στη συνέχεια μελετήθηκε δοκίμιο που φέρει σχηματισμό ρωγμής μήκους 1mm. Στις Εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζονται οι ισοδυναμικές γραμμές που αναπτύσσονται στην επιφάνεια του δοκιμίου καθώς και το διάνυσμα της πυκνότητας του ηλεκτρικού ρεύματος.



Εικόνα 5.5: Ισοδυναμικές Επιφάνειες Δοκιμίου που φέρει ρωγή μήκους 1mm



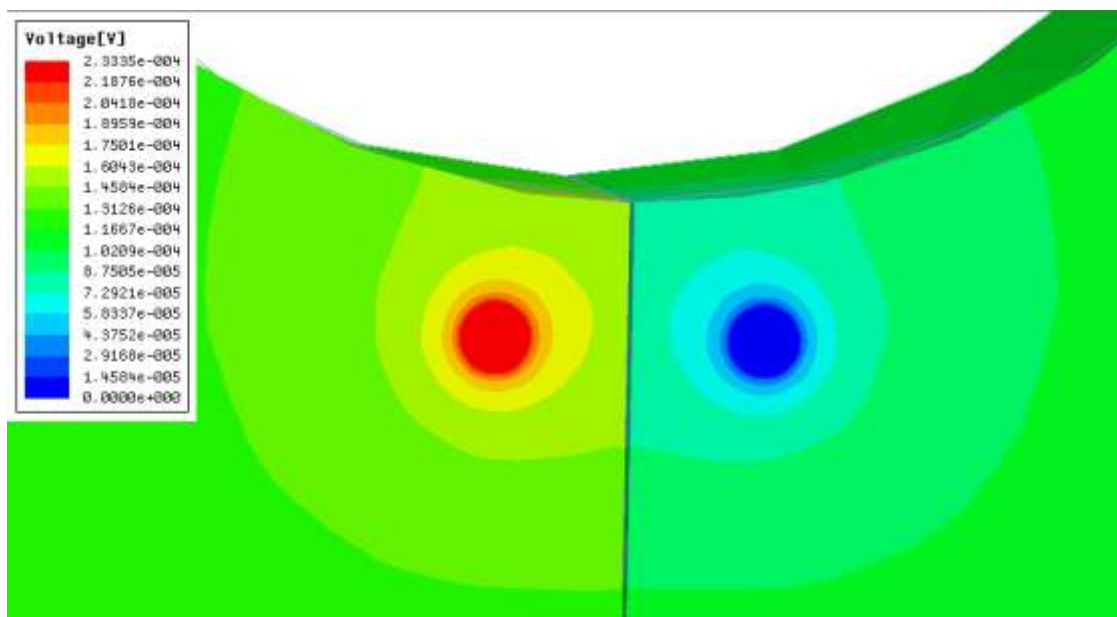
Εικόνα 5.6: Διάνυσμα πυκνότητας ηλεκτρικού ρεύματος Δοκιμίου που φέρει ρωγή μήκους 1mm



Γράφημα 5.2: Διάγραμμα Δυναμικού – Σημείον Τοποθέτησης Ηλεκτροδίων κατά μήκος γραμμής που ενώνει τα 2 ηλεκτρόδια εισαγωγής ρεύματος και τα 2 ηλεκτρόδια μέτρησης δυναμικού (Ηλεκτρόδιο Μετρήσεων 1<sup>ο</sup>: 0.425mm, Ηλεκτρόδιο Μετρήσεων 2<sup>ο</sup>: 0.825mm)

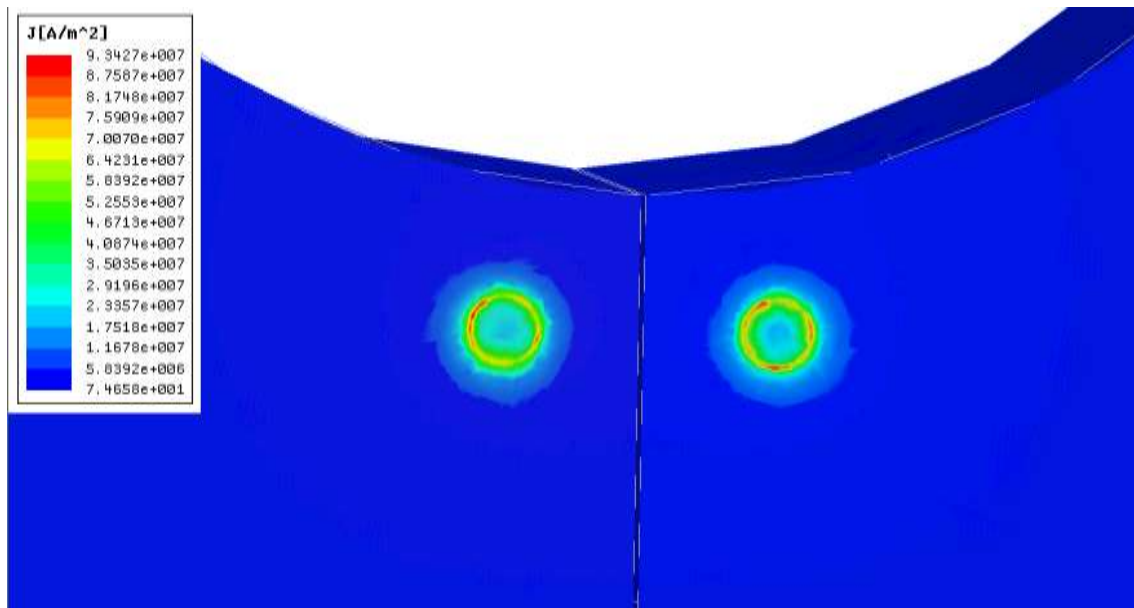
### Αποτελέσματα Μελέτης Δοκιμίου με Ρωγμή Μήκους 2mm

Στη συνέχεια μελετάται δοκίμιο που φέρει σχηματισμό ρωγμής μήκους 2mm. Στις Εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζονται οι ισοδυναμικές γραμμές που αναπτύσσονται στην επιφάνεια του δοκιμίου καθώς και το διάνυσμα της πυκνότητας του ηλεκτρικού ρεύματος.

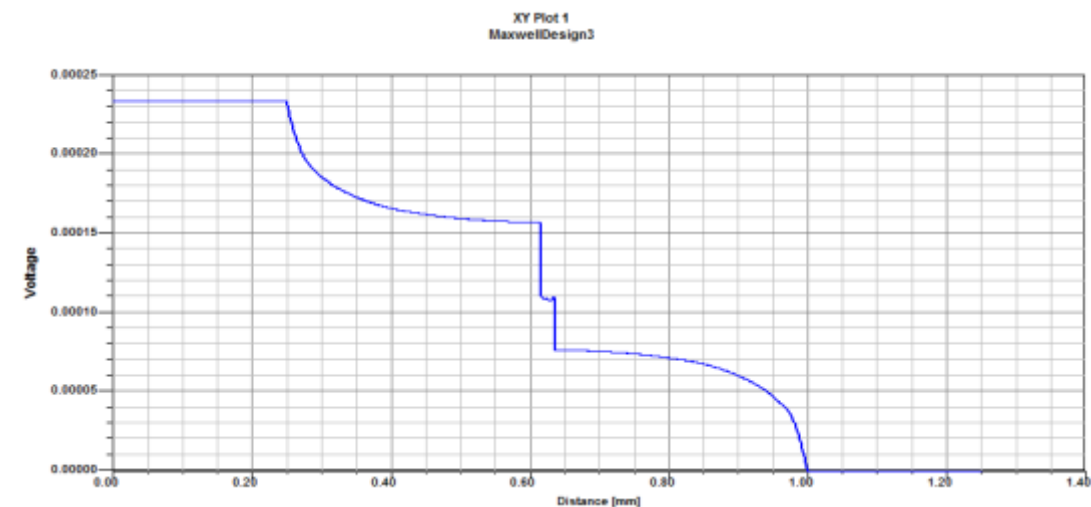


Εικόνα 5.7: Ισοδυναμικές Επιφάνειες Δοκιμίου που φέρει ρωγμή μήκους 2mm





Εικόνα 5.8: Διάνυσμα πυκνότητας ηλεκτρικού ρεύματος Δοκιμίου που φέρει ρωγή μήκους 2mm

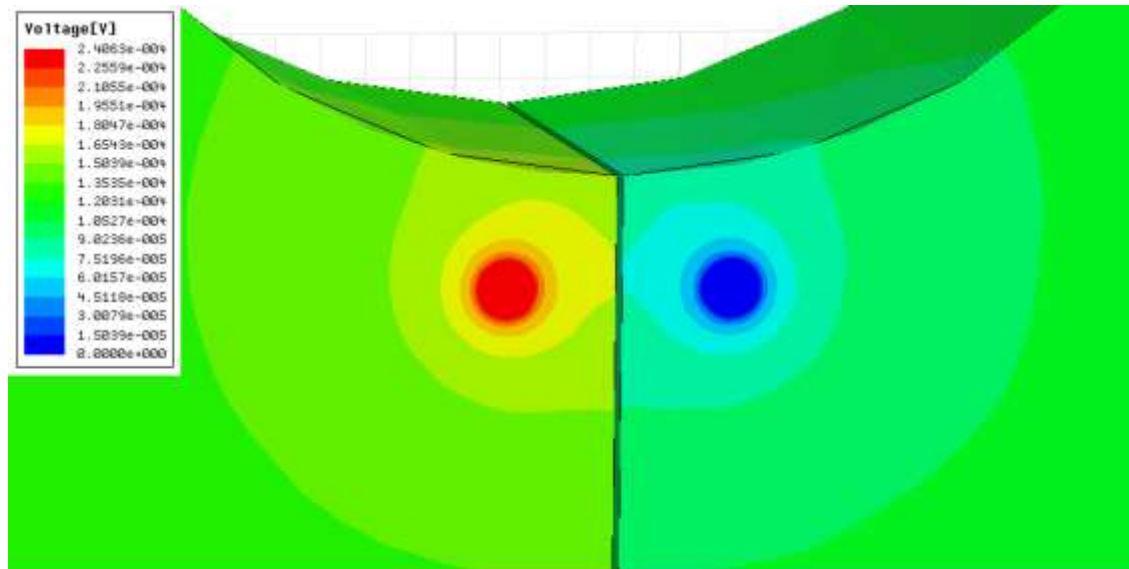


Γράφημα 5.3: Διάγραμμα Δυναμικού – Σημείον Τοποθέτησης Ηλεκτροδίων κατά μήκος γραμμής που ενώνει τα 2 ηλεκτρόδια εισαγωγής ρεύματος και τα 2 ηλεκτρόδια μέτρησης δυναμικού (Ηλεκτρόδιο Μετρήσεων 1<sup>ο</sup>: 0.425mm, Ηλεκτρόδιο Μετρήσεων 2<sup>ο</sup>: 0.825mm)

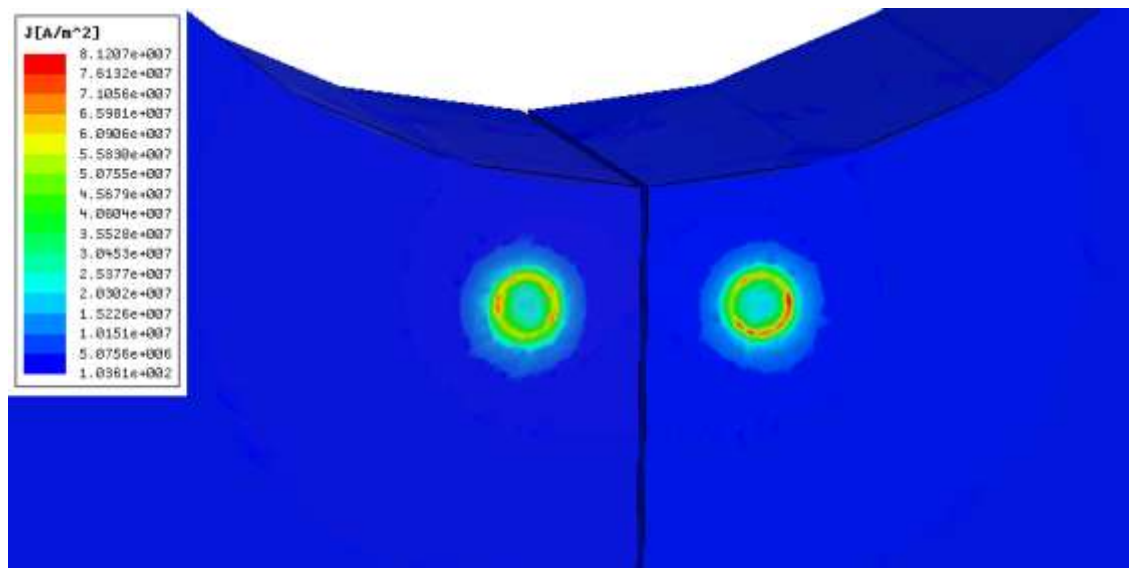
### Αποτελέσματα Μελέτης Δοκιμίου με Ρωγή Μήκους 3mm

Στη συνέχεια μελετάται δοκίμιο που φέρει σχηματισμό ρωγμής μήκους 3mm. Στις Εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζονται οι ισοδυναμικές γραμμές που

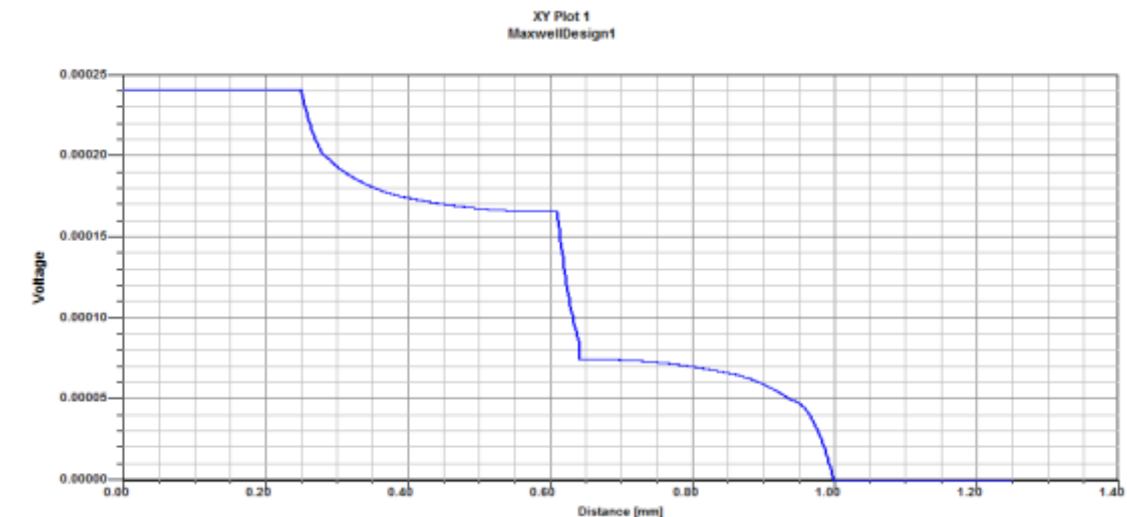
αναπτύσσονται στην επιφάνεια του δοκιμίου καθώς και το διάνυσμα της πυκνότητας του ηλεκτρικού ρεύματος.



Εικόνα 5.9: Ισοδυναμικές Επιφάνειες Δοκιμίου που φέρει ρωγμή μήκους 3mm



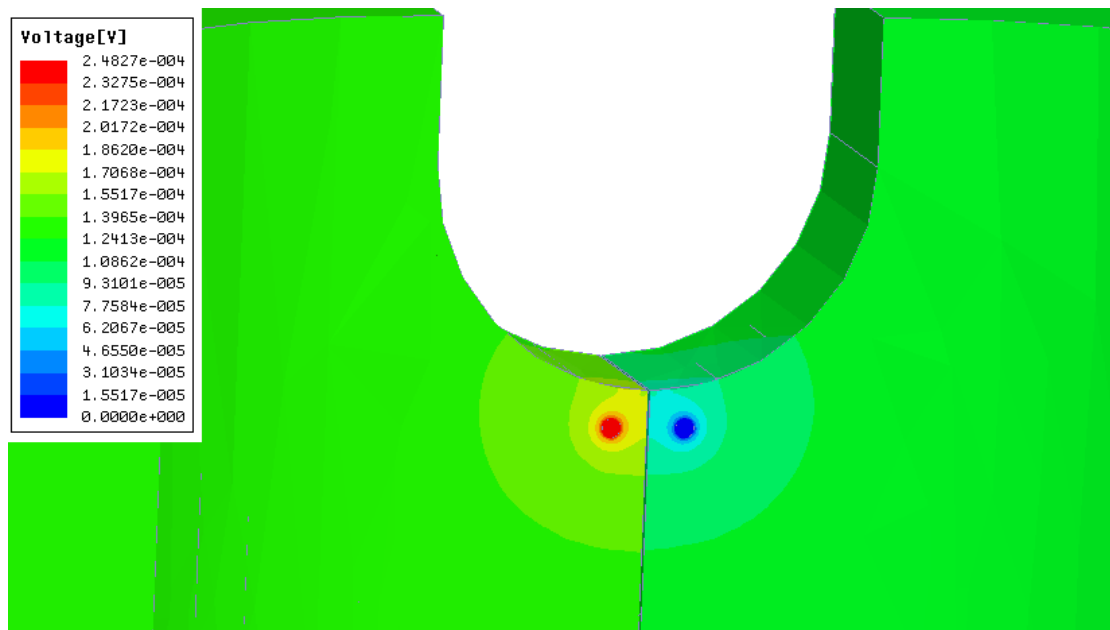
Εικόνα 5.10: Διάνυσμα πυκνότητας ηλεκτρικού ρεύματος Δοκιμίου που φέρει ρωγμή μήκους 3mm



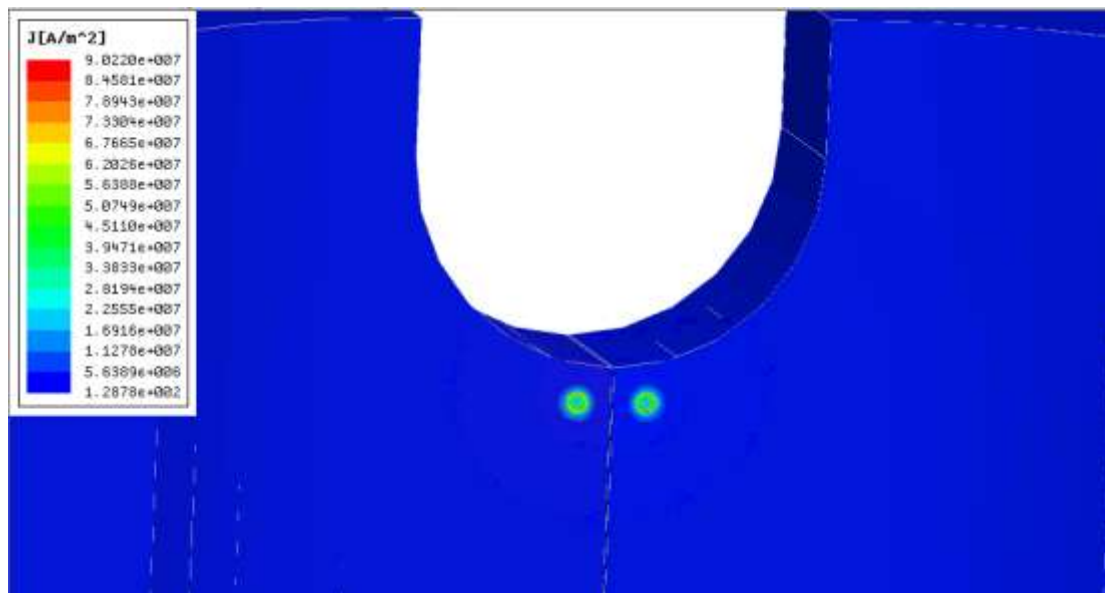
Γράφημα 5.4: Διάγραμμα Δυναμικού – Σημείον Τοποθέτησης Ηλεκτροδίων κατά μήκος γραμμής που ενώνει τα 2 ηλεκτρόδια εισαγωγής ρεύματος και τα 2 ηλεκτρόδια μέτρησης δυναμικού (Ηλεκτρόδιο Μετρήσεων 1<sup>ο</sup>: 0.425mm, Ηλεκτρόδιο Μετρήσεων 2<sup>ο</sup>: 0.825mm)

### Αποτελέσματα Μελέτης Δοκιμίου με Ρωγμή Μήκους 4mm

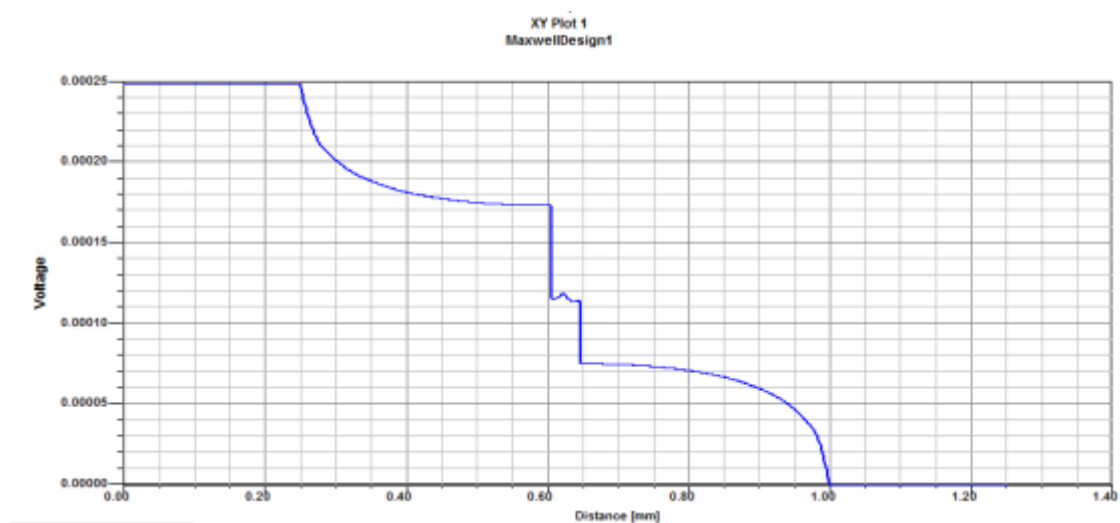
Στη συνέχεια μελετάται δοκίμιο που φέρει σχηματισμό ρωγμής μήκους 4mm. Στις Εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζονται οι ισοδυναμικές γραμμές που αναπτύσσονται στην επιφάνεια του δοκιμίου καθώς και το διάγραμμα της πυκνότητας του ηλεκτρικού ρεύματος.



Εικόνα 5.11: Ισοδυναμικές Επιφάνειες Δοκιμίου που φέρει ρωγμή μήκους 4mm



Εικόνα 5.12: Διάγραμμα πυκνότητας ηλεκτρικού ρεύματος Δοκιμίου που φέρει ρωγή μήκους 4mm

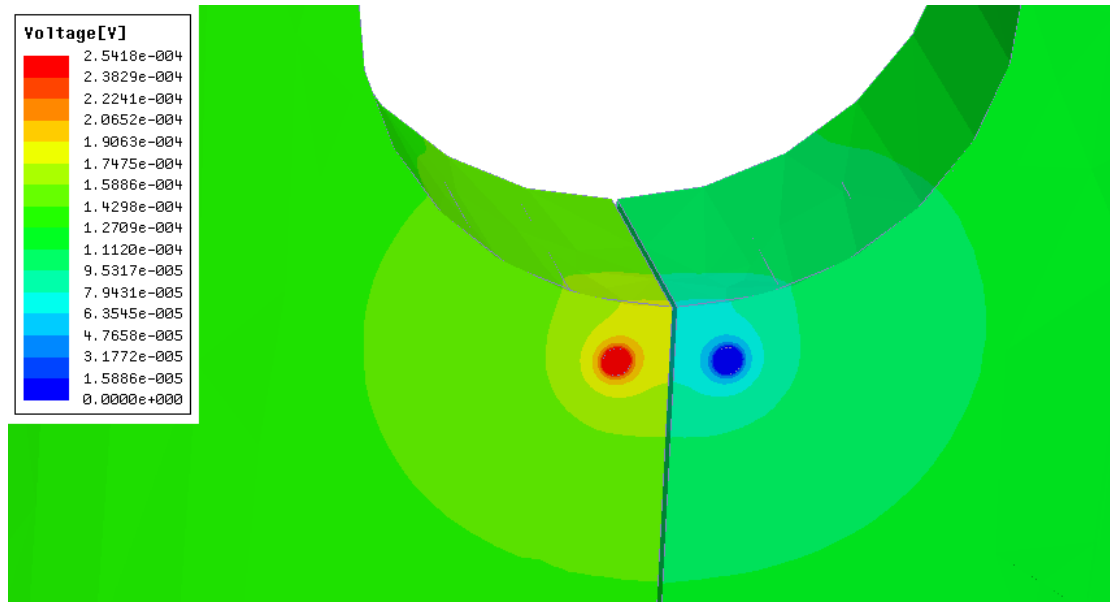


Γράφημα 5.5: Διάγραμμα Δυναμικού – Σημείον Τοποθέτησης Ηλεκτροδίων κατά μήκος γραμμής που ενώνει τα 2 ηλεκτρόδια εισαγωγής ρεύματος και τα 2 ηλεκτρόδια μέτρησης δυναμικού (Ηλεκτρόδιο Μετρήσεων 1<sup>ο</sup>: 0.425mm, Ηλεκτρόδιο Μετρήσεων 2<sup>ο</sup> : 0.825mm)

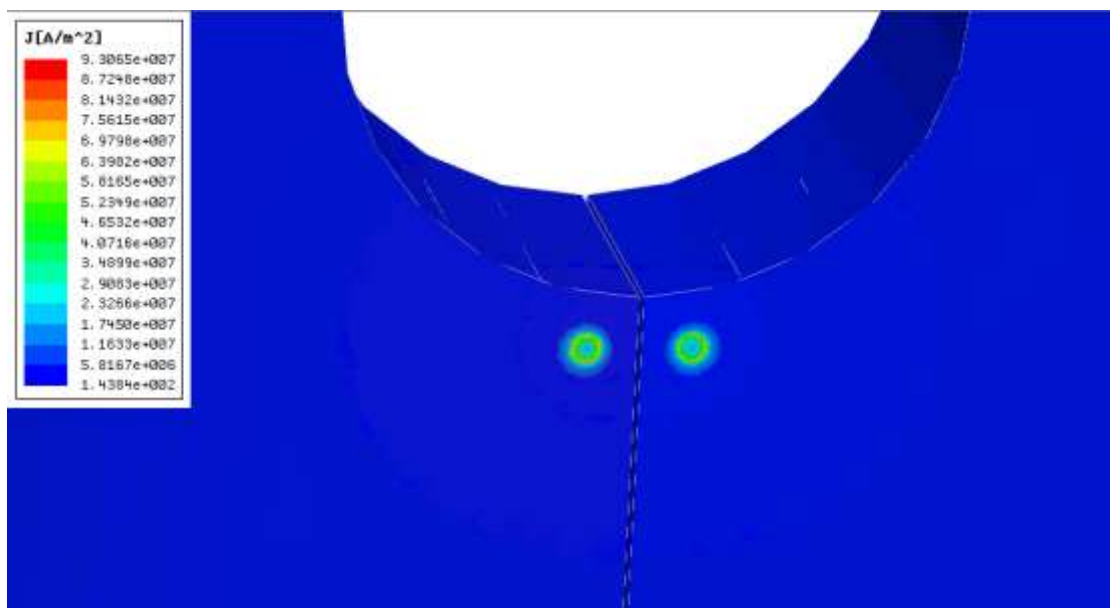
### Αποτελέσματα Μελέτης Δοκιμίου με Ρωγή Μήκους 5mm

Στη συνέχεια μελετάται δοκίμιο που φέρει σχηματισμό ρωγμής μήκους 5mm. Στις Εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζονται οι ισοδυναμικές γραμμές που

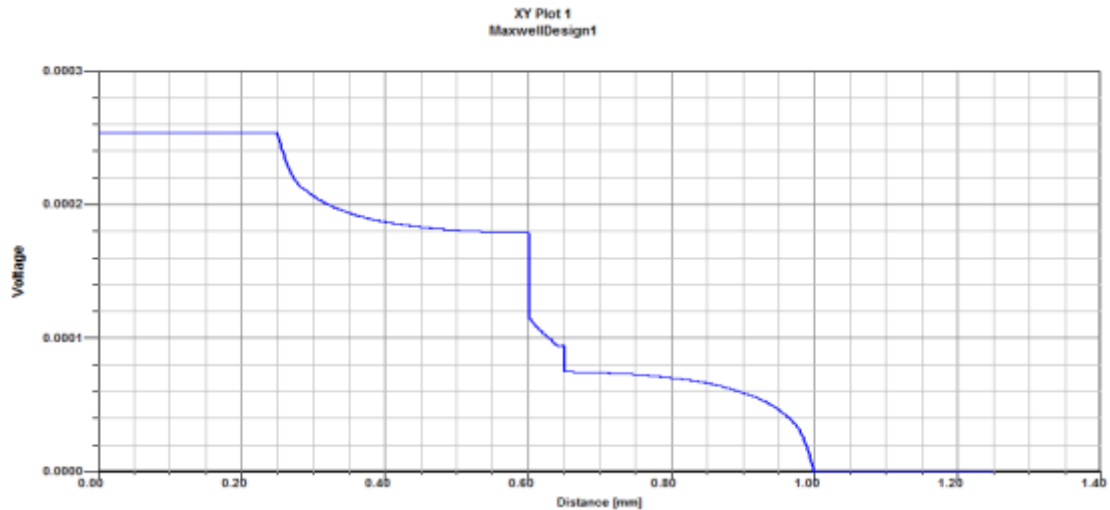
αναπτύσσονται στην επιφάνεια του δοκιμίου καθώς και το διάνυσμα της πυκνότητας του ηλεκτρικού ρεύματος.



Εικόνα 5.13: Ισοδυναμικές Επιφάνειες Δοκιμίου που φέρει ρωγή μήκους 5mm



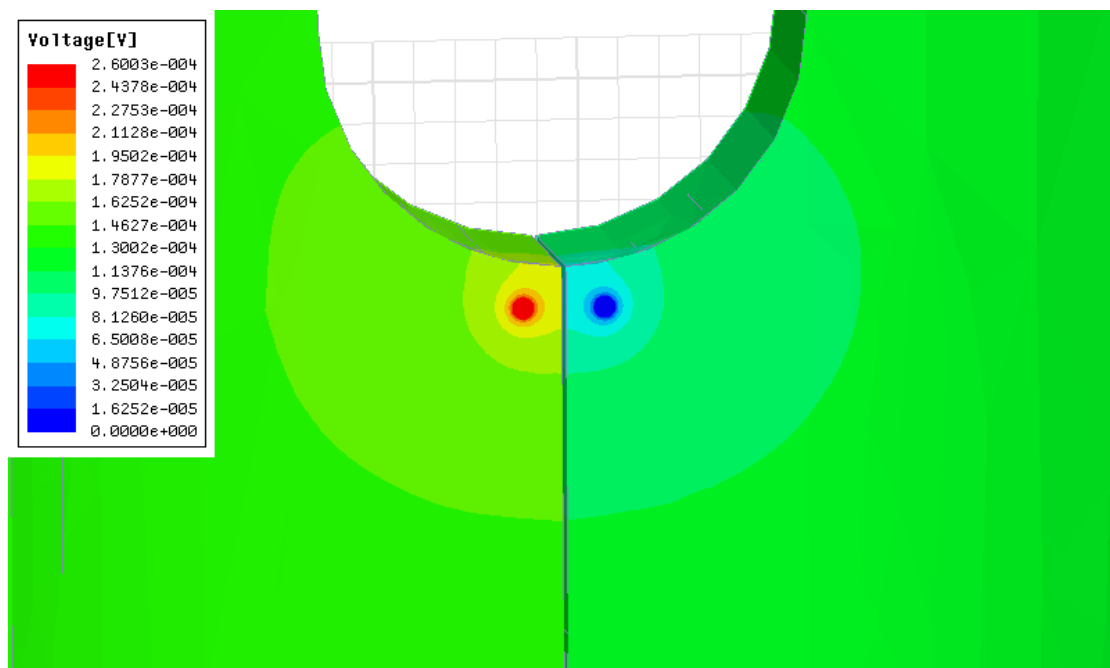
Εικόνα 5.14: Διάνυσμα πυκνότητας ηλεκτρικού ρεύματος Δοκιμίου που φέρει ρωγή μήκους 5mm



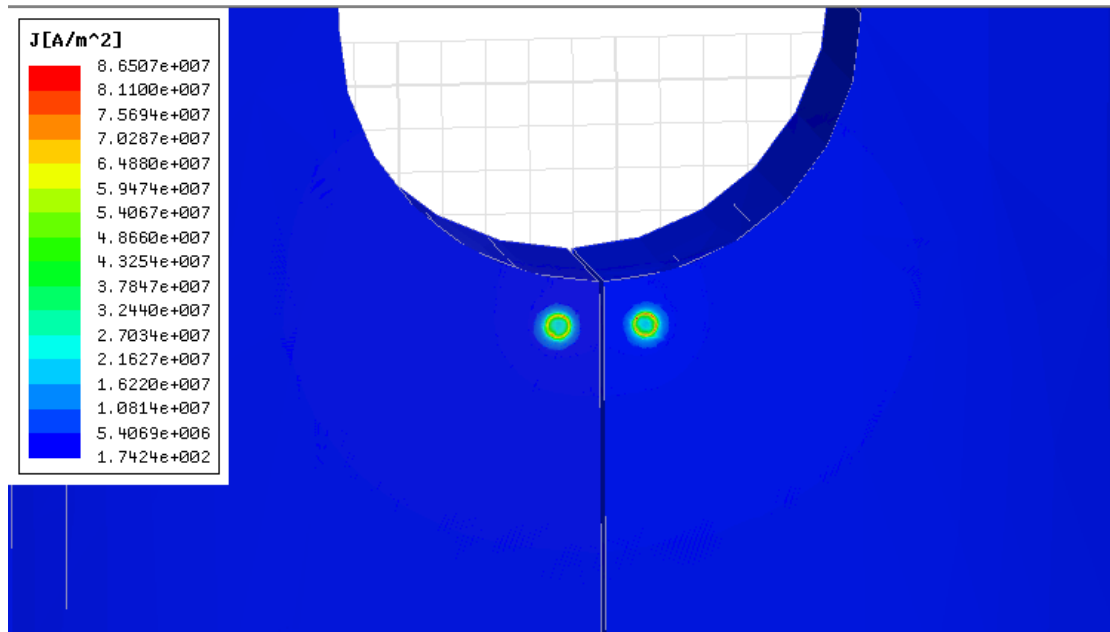
Γράφημα 5.6: Διάγραμμα Δυναμικού – Σημείον Τοποθέτησης Ηλεκτροδίων κατά μήκος γραμμής που ενώνει τα 2 ηλεκτρόδια εισαγωγής ρεύματος και τα 2 ηλεκτρόδια μέτρησης δυναμικού (Ηλεκτρόδιο Μετρήσεων 1<sup>ο</sup>: 0.425mm, Ηλεκτρόδιο Μετρήσεων 2<sup>ο</sup> : 0.825mm)

### Αποτελέσματα Μελέτης Δοκιμίου με Ρωγή Μήκους 6mm

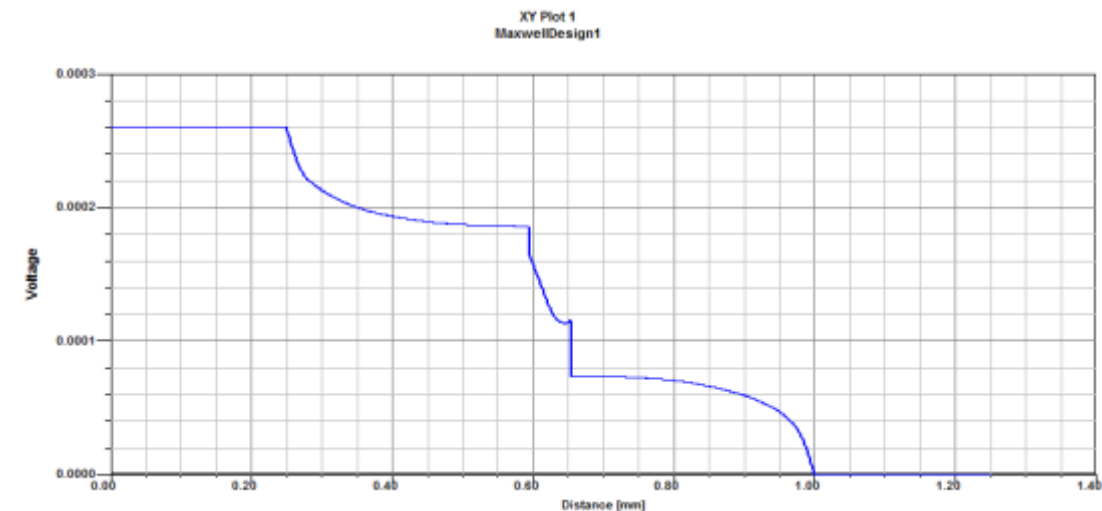
Στη συνέχεια μελετάται δοκίμιο που φέρει σχηματισμό ρωγμής μήκους 6mm. Στις Εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζονται οι ισοδυναμικές γραμμές που αναπτύσσονται στην επιφάνεια του δοκιμίου καθώς και το διάνυσμα της πυκνότητας του ηλεκτρικού ρεύματος.



Εικόνα 5.15: Ισοδυναμικές Επιφάνειες Δοκιμίου που φέρει ρωγή μήκους 6mm



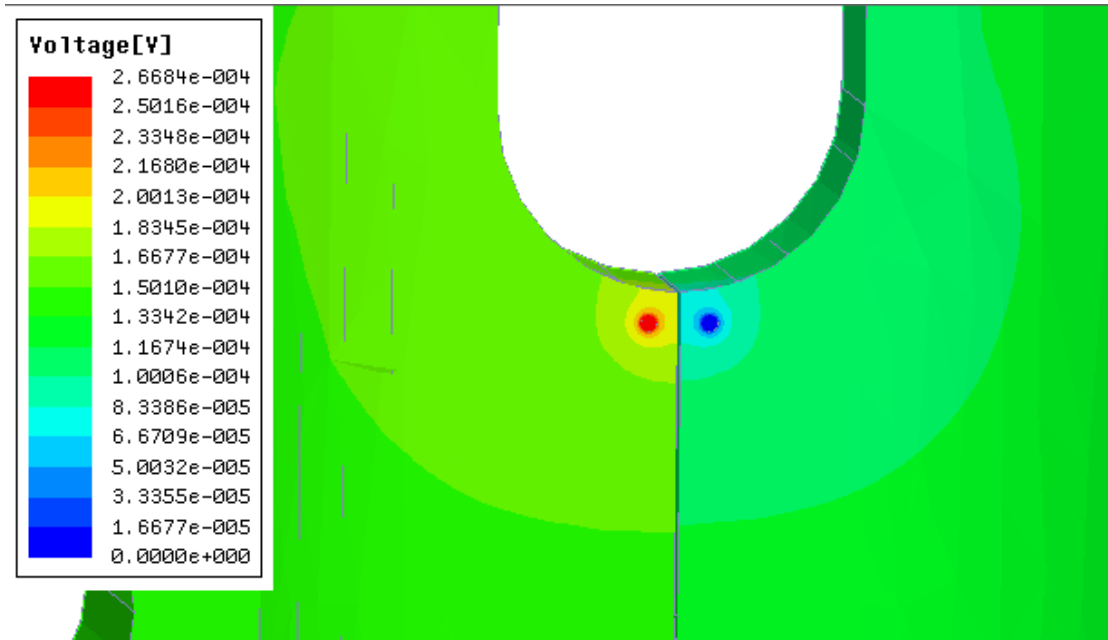
Εικόνα 5.16: Διάνυσμα πυκνότητας ηλεκτρικού ρεύματος Δοκιμίου που φέρει ρωγή μήκους 6mm



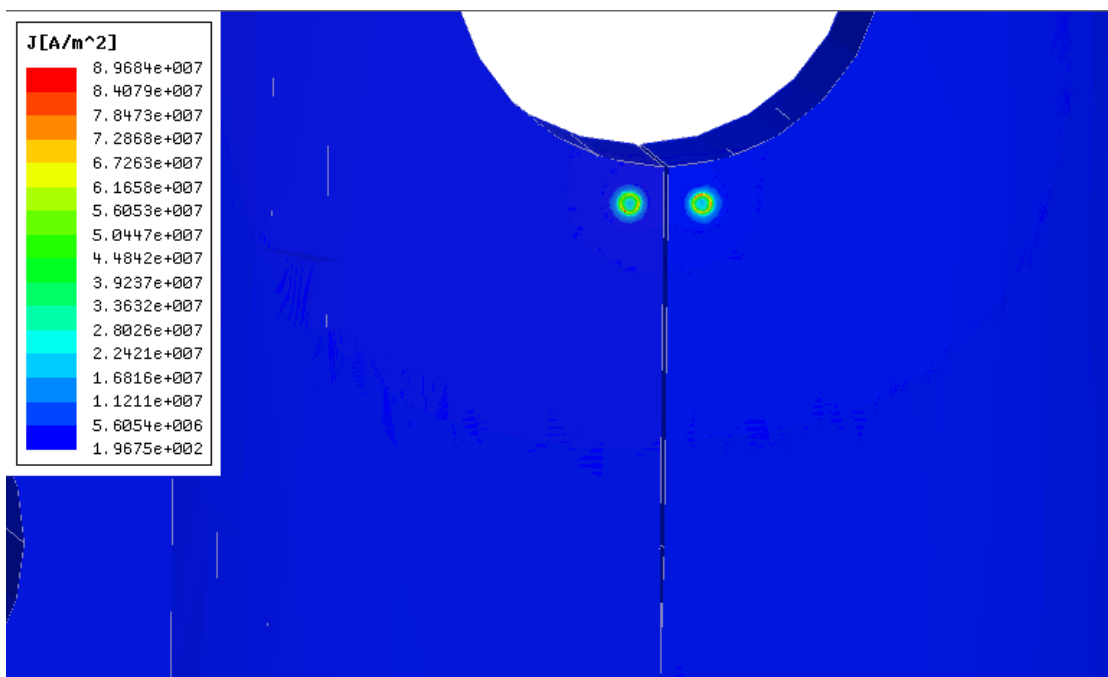
Γράφημα 5.7: Διάγραμμα Δυναμικού – Σημείον Τοποθέτησης Ηλεκτροδίων κατά μήκος γραμμής που ενώνει τα 2 ηλεκτρόδια εισαγωγής ρεύματος και τα 2 ηλεκτρόδια μέτρησης δυναμικού (Ηλεκτρόδιο Μετρήσεων 1<sup>ο</sup>: 0.425mm, Ηλεκτρόδιο Μετρήσεων 2<sup>ο</sup>: 0.825mm)

### Αποτελέσματα Μελέτης Δοκιμίου με Ρωγή Μήκους 7mm

Στη συνέχεια μελετάται δοκίμιο που φέρει σχηματισμό ρωγμής μήκους 7mm. Στις Εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζονται οι ισοδυναμικές γραμμές που αναπτύσσονται στην επιφάνεια του δοκιμίου καθώς και το διάνυσμα της πυκνότητας του ηλεκτρικού ρεύματος.

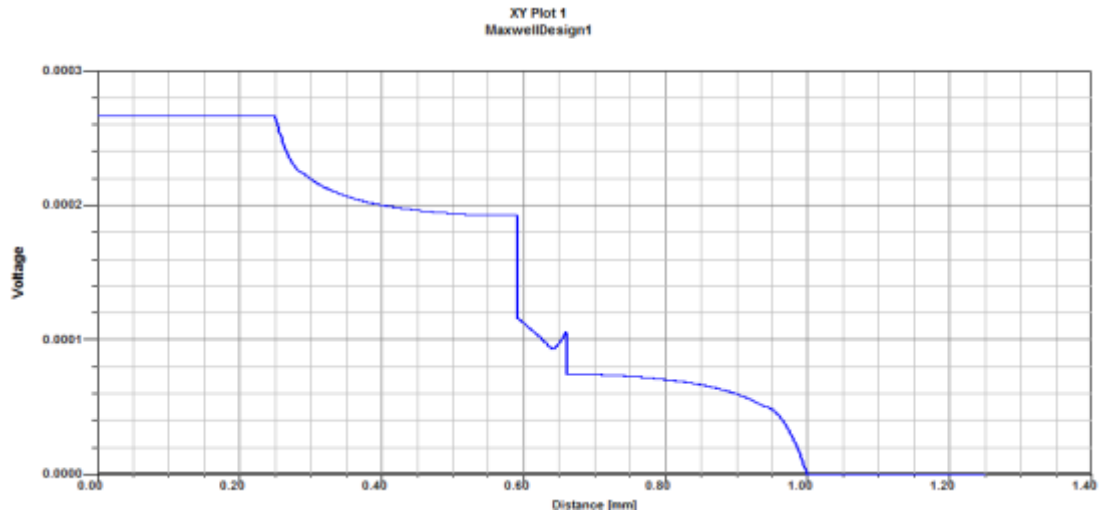


Εικόνα 5.17: Ισοδυναμικές Επιφάνειες Δοκιμίου που φέρει ρωγή μήκους 7mm



Εικόνα 5.18: Διάνυσμα πυκνότητας ηλεκτρικού ρεύματος Δοκιμίου που φέρει ρωγή μήκους 7mm

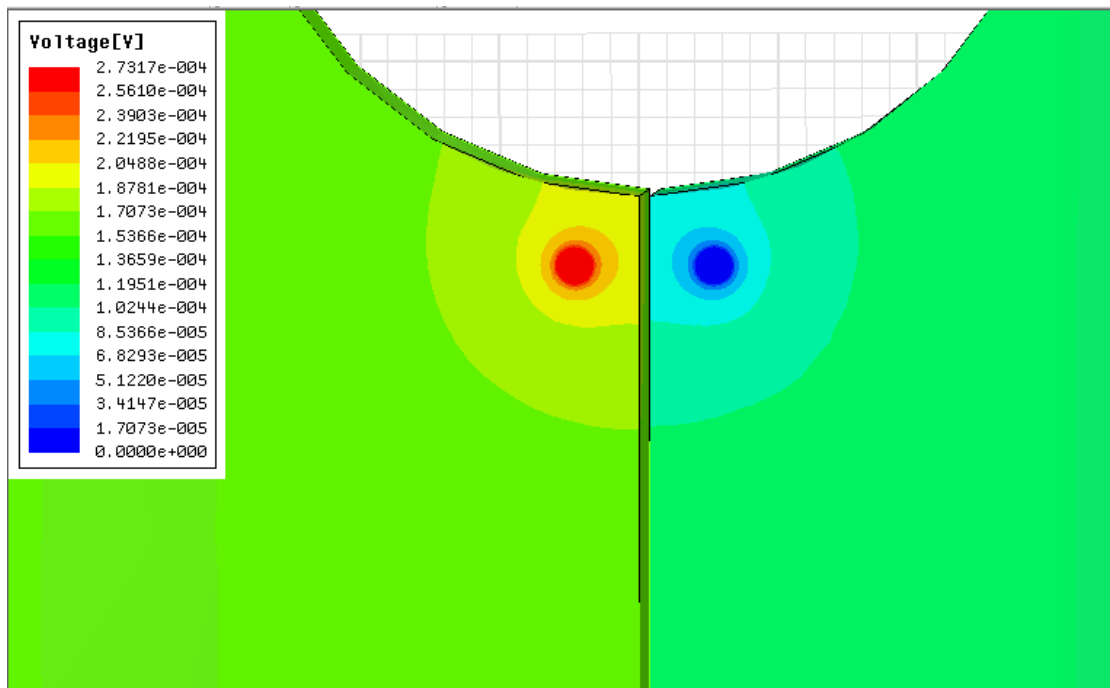




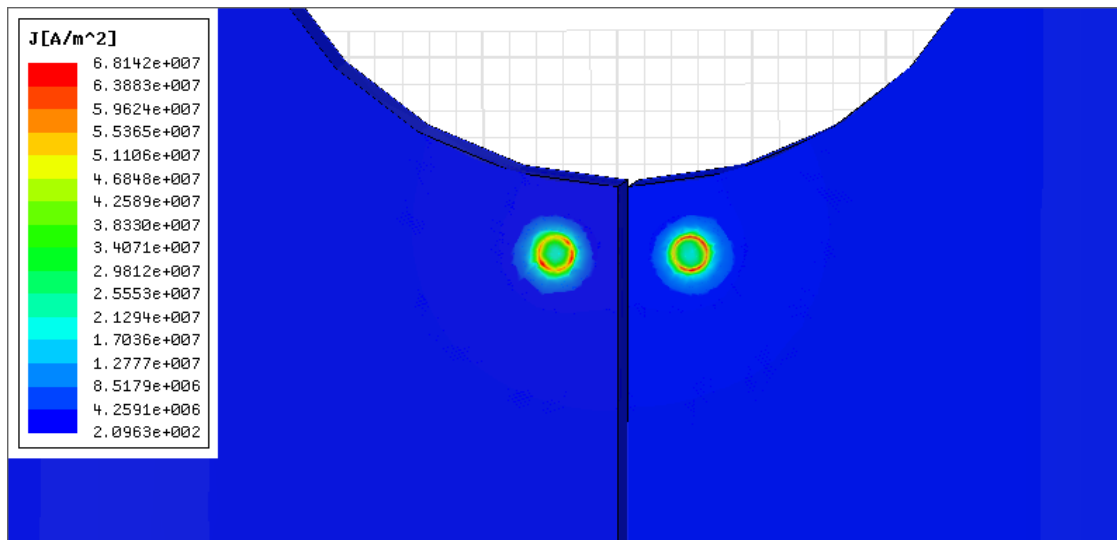
Γράφημα 5.8: Διάγραμμα Δυναμικού – Σημείον Τοποθέτησης Ηλεκτροδίων κατά μήκος γραμμής που ενώνει τα 2 ηλεκτρόδια εισαγωγής ρεύματος και τα 2 ηλεκτρόδια μέτρησης δυναμικού (Ηλεκτρόδιο Μετρήσεων 1<sup>ο</sup>: 0.425mm, Ηλεκτρόδιο Μετρήσεων 2<sup>ο</sup>: 0.825mm)

### Αποτελέσματα Μελέτης Δοκιμίου με Ρωγή Μήκους 8mm

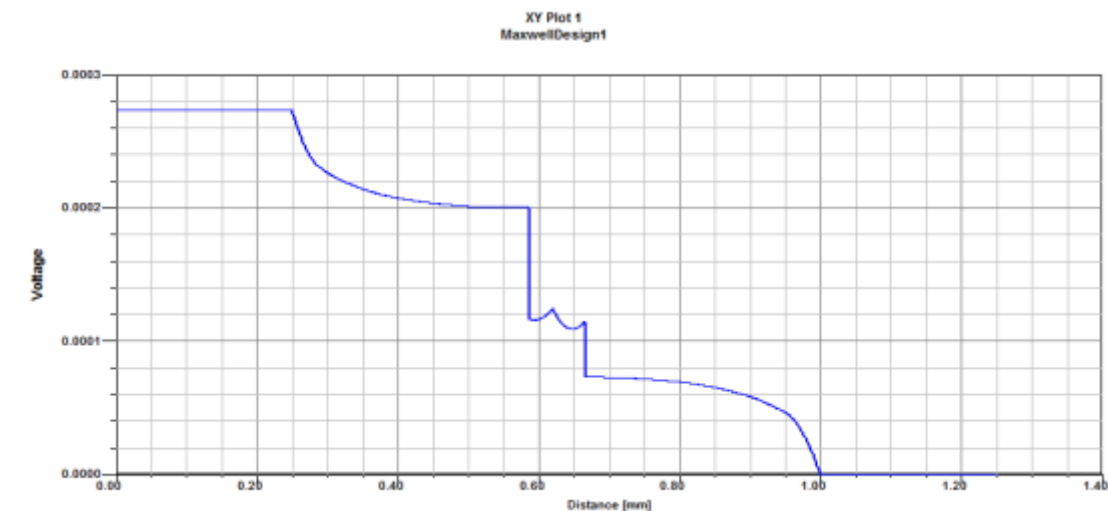
Στη συνέχεια μελετάται δοκίμιο που φέρει σχηματισμό ρωγμής μήκους 8mm. Στις Εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζονται οι ισοδυναμικές γραμμές που αναπτύσσονται στην επιφάνεια του δοκιμίου καθώς και το διάνυσμα της πυκνότητας του ηλεκτρικού ρεύματος.



Εικόνα 5.19: Ισοδυναμικές Επιφάνειες Δοκιμίου που φέρει ρωγή μήκους 8mm



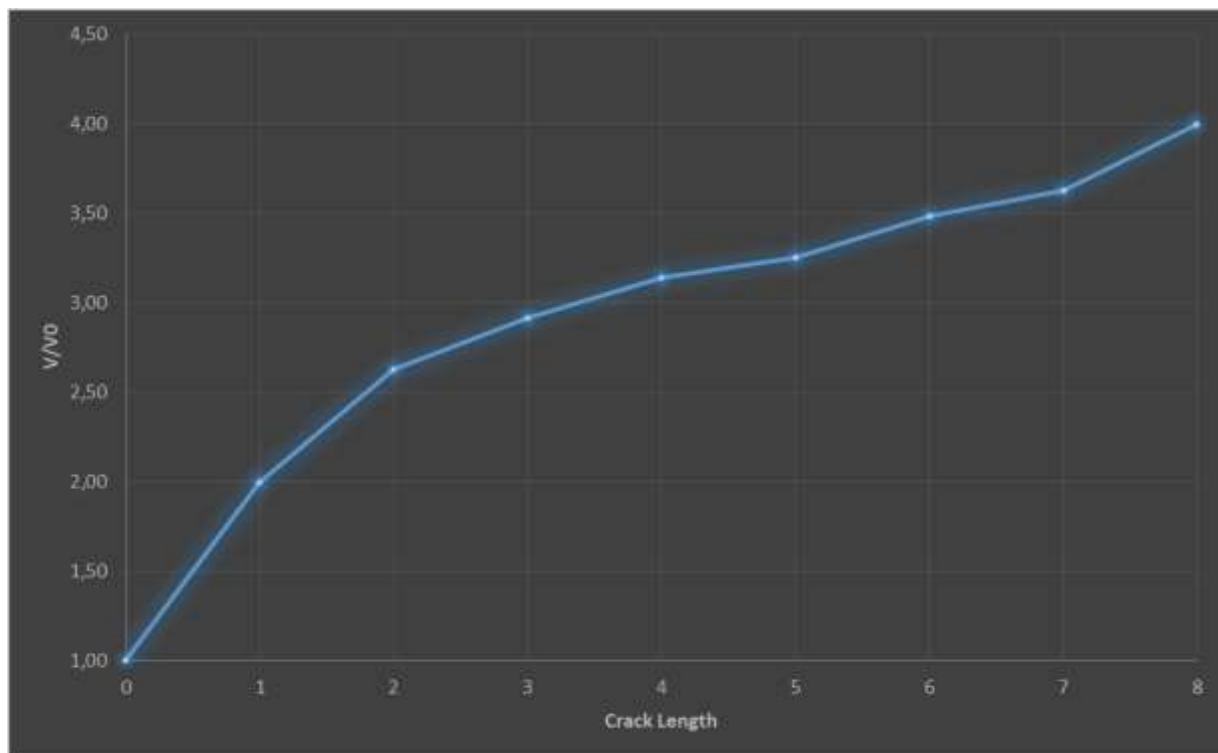
Εικόνα 5.20: Διάγραμμα πυκνότητας ηλεκτρικού ρεύματος Δοκιμίου που φέρει ρωγή μήκους 8mm



Γράφημα 5.9: Διάγραμμα Δυναμικού – Σημείον Τοποθέτησης Ηλεκτροδίων κατά μήκος γραμμής που ενώνει τα 2 ηλεκτρόδια εισαγωγής ρεύματος και τα 2 ηλεκτρόδια μέτρησης δυναμικού (Ηλεκτρόδιο Μετρήσεων 1<sup>ο</sup>: 0.425mm, Ηλεκτρόδιο Μετρήσεων 2<sup>ο</sup>: 0.825mm)

Με βάση τις τιμές που προέκυψαν από την παραπάνω ανάλυση, δημιουργήθηκε ένα συγκεντρωτικό διάγραμμα στο οποίο αποτυπώνεται η μεταβολή του ηλεκτρικού δυναμικού μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων μέτρησης συναρτήσει της προώθησης του ρήγματος στο υπό εξέταση δοκίμιο.

Οι τιμές είναι ανηγμένες ως προς τη διαφορά δυναμικού των ηλεκτροδίων μέτρησης στο μη ρηγματωμένο δοκίμιο.



Γράφημα 5.10: Μεταβολή Αδιαστατοποιημένου Δυναμικού συναρτήσει Μήκους Ρήγματος





**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6:**  
**ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**



## 6.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε εκτενώς η προώθηση ρωγμών σε καθαρό διατμητικό πεδίο.

Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε σε δύο στάδια.

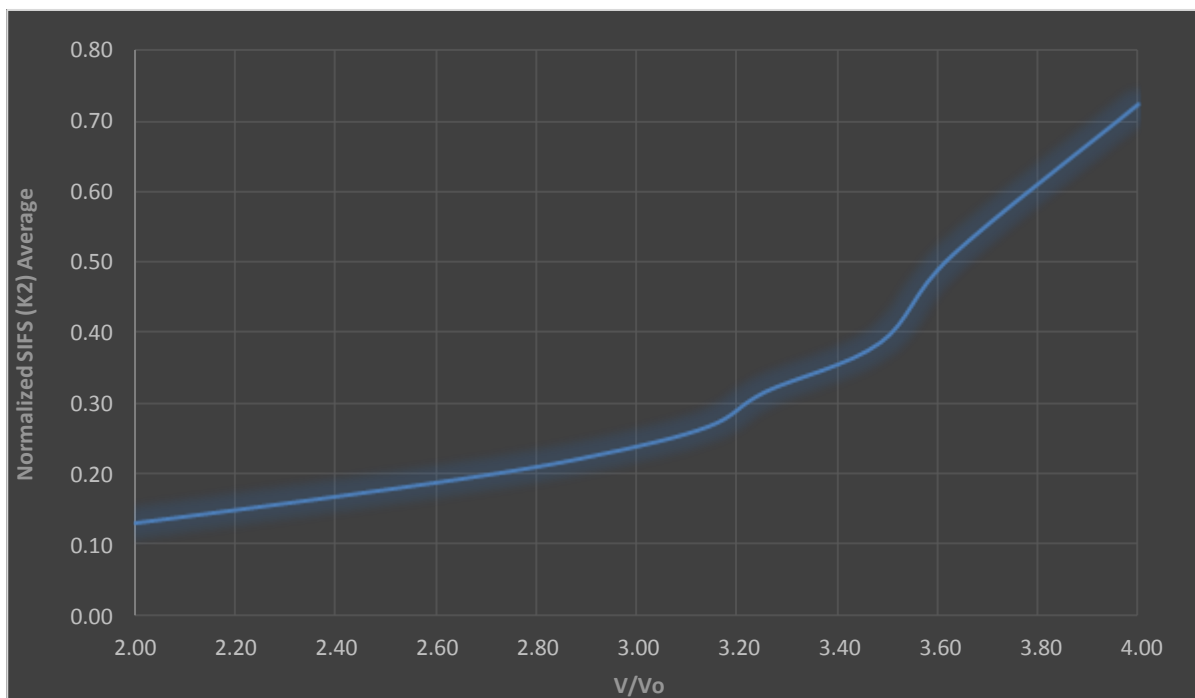
Αρχικώς, εισήχθηκε στο λογισμικό Ansys δοκίμιο στο οποίο είχε προσχεδιαστεί ρήγμα μήκους 1mm. Με τη βοήθεια διατμητικών κριτηρίων Tresca και Von Mises σχεδιάστηκε η τροχιά που θα ακολουθήσει η ρωγμή (κάθετα στις γραμμές της ίσης μέγιστης διατμητικής τάσης). Στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι συντελεστές συγκέντρωσης τάσεων  $K_I$  και  $K_{II}$ . Για τη βέλτιστη προσέγγιση των συντελεστών συγκέντρωσης τάσεων  $K_I$  και  $K_{II}$ , η περιοχή γύρω από το άκρο της ρωγμής διαιρέθηκε σε 6 ακτινικές περιοχές. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν επαλήθευσαν ότι:

- Η συγκεκριμένη γεωμετρία του δοκιμίου αλλά και ο ειδικός τρόπος φόρτισής του είναι ικανές και αναγκαίες συνθήκες προκειμένου να αναπτυχθεί καθαρό διατμητικό πεδίο στη ζώνη μετρήσεων. Για το λόγο αυτό, οι υπολογιζόμενες τιμές των συντελεστών συγκέντρωσης τάσεων  $K_I$  βρίσκονται πολύ κοντά στο 0.
- Αναφορικά με τους συντελεστές συγκέντρωσης τάσεων  $K_{II}$  παρατηρείται αύξηση των τιμών τους καθώς το μήκος της ρωγμής αυξάνεται.

Σε δεύτερη φάση πραγματοποιήθηκε ηλεκτρική ανάλυση του ζητήματος με τη βοήθεια του λογισμικού Maxwell 11. Εφαρμόστηκε η μέθοδος ηλεκτρικού δυναμικού συνεχούς ρεύματος (DCPD). Τόσο τα ηλεκτρόδια εισαγωγής συνεχούς ρεύματος όσο και τα ηλεκτρόδια λήψης των μετρήσεων τοποθετήθηκαν σε σημεία που επέτρεπαν τη δημιουργία ικανού πεδίου ηλεκτρικών μετρήσεων (όσο πιο κοντά στο άκρο της ρωγμής). Από τα αποτελέσματα διαπιστώθηκε ότι η προώθηση του ρήγματος προκαλεί αύξηση των τιμών του μετρούμενου αδιαστατοποιημένου δυναμικού.

Τα παραπάνω αποτελέσματα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στο Διάγραμμα 6.1, το οποίο δίνεται στην επόμενη σελίδα.

Πιο συγκεκριμένα, στο Διάγραμμα 6.1 παρουσιάζεται η συσχέτιση μεταξύ των κανονικοποιημένων τιμών των SIFs, τα οποία προέκυψαν από την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων με τις αντίστοιχες κανονικοποιημένες τιμές του ηλεκτρικού δυναμικού, όπως αυτές προέκυψαν βάσει της μεθόδου της πτώσης του ηλεκτρικού δυναμικού.



Διάγραμμα 6.1: Διάγραμμα Συσχέτισης κανονικοποιημένων τιμών SIFs με τις αντίστοιχες κανονικοποιημένες τιμές διαφοράς δυναμικού  $V/V_0$





**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] G.R. Irwin, Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate, *Applied Mechanics*, 24, 361–364, 1957.
- [2] Fracture Mechanics in ANSYS Workbench 14.5 | ANSYS e-Learning | CAE Associates
- [3] [el.wikipedia.org/wiki/Μέθοδος\\_πεπερασμένων\\_στοιχείων](http://el.wikipedia.org/wiki/Μέθοδος_πεπερασμένων_στοιχείων)
- [4] ANSYS TUTORIAL – 2-D Fracture Analysis, Dr. A.-V. Phan, University of South Alabama
- [5] Ορθές και Διατμητικές Τάσεις, Σχεδιασμός Δομικών Στοιχείων, Αθ. Χ. Τριανταφύλλου
- [6] <http://users.teiath.gr/vmouss/ebooks/fmndt/index.html>
- [7] V. Spitas, D C. Spitas, P. Michelis, Real-time measurement of shear fatigue crack propagation at high-temperature using the potential drop technique , *Measurement*, Vol 41 (4),424-432 ,2008
- [8] Ansys Help
- [9] Α. Νικολακάκης, Ανάλυση και σχεδιασμός ηλεκτρικού αισθητήρα ρωγμών οδοντωτών τροχών με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π. Σχολή Μηχ/γων Μηχ/κών, Εργαστήριο Στοιχείων Μηχανών, Αθήνα 2012
- [10] ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΙΙ, ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ, ΔΡ Σ. Π. ΦΙΛΟΠΟΥΛΟΣ
- [11] V. Spitas, C. Spitas, P. Michelis, *A three-point electrical potential difference method for in situ monitoring of propagating mixed-mode cracks at high temperature*, *Measurement* 43, 950-959, 2010.
- [12] P. Michelis, *European Patent EP 0687899*.