



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

*Ανάλυση και σχεδιασμός ηλεκτρικού αισθητήρα ρωγμών
οδοντωτών τροχών με τη μέθοδο των πεπερασμένων
στοιχείων*

Διπλωματική εργασία

ΑΝΔΡΕΑΣ Ε. ΝΙΚΟΛΑΚΑΚΗΣ

Επιβλέπωντας: Δρ. Β. Σπιτάς
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα 2012

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, αναπτύσσεται μια μέθοδος που βασίζεται στην πτώση του ηλεκτρικού δυναμικού, η οποία επιτρέπει τον προσδιορισμό σε πραγματικό χρόνο του μήκους της ρωγμής στον πόδα οδόντος μετωπικού οδοντωτού τροχού ευθείας, μετωπικής οδοντώσεως. Για να σχεδιασθεί ο αισθητήρας είναι απαραίτητο να εκτιμηθεί η επίπεδη παραμορφωσιακή κατάσταση στην επικίνδυνη διατομή του οδόντος. Εκτελείται στατική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων στον οδόντα εφαρμόζοντας ένα ομοιόμορφα κατανεμημένο, μοναδιαίο φορτίο κάθετα στο ανώτερο σημείο μονής επαφής του. Η ρωγμή ξεκινάει στο σημείο της μέγιστης κύριας τάσης σ_1 και η τροχιά της προσδιορίζεται και σχεδιάζεται με βάση διατμητικά κριτήρια (τύπου Tresca και von Mises). Εισάγεται συνεχές ρεύμα από ένα ζεύγος ηλεκτροδίων και από ένα δεύτερο ζεύγος μετράται η διαφορά δυναμικού. Τα αποτελέσματα συσχετίζονται με το πραγματικό (%) μήκος της ρωγμής. Η βέλτιστη θέση τοποθέτησης των ηλεκτροδίων εντοπίζεται εκτελώντας ηλεκτροστατική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων.

ABSTRACT

In this thesis an electrical potential difference method for the real-time assessment of the length of a gear root crack is presented. In order to design and study a crack sensor for gear teeth it is necessary to assess the stress conditions prevailing in the vicinity of the tooth root. In this report, a Finite Element Analysis (FEA) of single spur gear teeth loaded at their HPSTC was performed and the location of the critical cross-section as well as the crack path were determined assuming a maximum shear stress criterion. Two measuring electrodes were placed in selected positions over the gauge area of a spur gear tooth and their readings were associated with the actual position of the crack tip using FEA. The optimum position of the two measuring electrodes was found performing rigorous Electrostatic Field Analysis Simulations.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αντικείμενο αυτής της εργασίας αποτελεί η ανάλυση και ο σχεδιασμός αισθητήρα προσδιορισμού του μήκους της ρωγμής σε πραγματικό χρόνο στον πόδα οδόντος μετωπικού οδοντωτού τροχού ευθείας οδοντώσεως. Βασικός σκοπός του αισθητήρα είναι η έγκαιρη πρόβλεψη του μήκους της ρωγμής, ώστε να αποφευχθεί η αποκόλληση τμήματος του οδόντα και κατ' επέκταση να περιοριστούν οι συνέπειες μια πιθανής βλάβης τόσο στον ίδιο τον τροχό του οδόντα όσο και στα συνεργαζόμενα στοιχεία μηχανών.

Στο πρώτο Κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή για τους επιμέρους τομείς της διπλωματική εργασίας. Αρχικά, παρατίθενται κάποιοι ορισμοί για τους οδοντωτούς τροχούς και στη συνέχεια παρουσιάζονται οι αιτίες που προκαλούν την αστοχία τους. Έπειτα, αναφέρονται κάποια εισαγωγικά στοιχεία για τις ρωγμές και πιο συγκεκριμένα για τις ρωγμές στον πόδα του οδόντος και μετέπειτα γίνεται αναφορά σε μεθόδους διάγνωσης βλαβών και στην υφιστάμενη τεχνολογία (state-of-the-art) στον τομέα της πρόβλεψης των ρωγμών. Συνθέτοντας τα παραπάνω, προκύπτουν οι λόγοι για τους οποίους η παρούσα εργασία καλύπτει ένα κενό στην έρευνα και στην εφαρμογή της μεθόδου της πτώσης ηλεκτρικού δυναμικού σε οδόντες οδοντωτών τροχών.

Στο Κεφάλαιο 2, μετά την αρχική αναφορά κάποιων εισαγωγικών στοιχείων για τους μετωπικούς οδοντωτούς τροχούς, παρουσιάζεται η διαδικασία δημιουργίας της γεωμετρίας οδόντων μετωπικών οδοντωτών τροχών στο λογισμικό Solidworks της εταιρείας Dassault Systèmes, και στη συνέχεια γίνεται η επαλήθευση της γεωμετρίας τους μέσω της δημιουργίας των αντίστοιχων μετωπικών τροχών. Έπειτα, αναλύεται Ανώτερο Σημείο Μονής Επαφής Οδόντος κατά τη συνεργασία οδόντων και δίνεται η σχέση, μέσω της οποίας υπολογίζεται το σημείο αυτό για κάθε οδόντα.

Στο τρίτο κεφάλαιο, πραγματοποιείται στατική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων για κάποιους από τους οδόντες που σχεδιάστηκαν. Αρχικά, παρουσιάζονται γενικά στοιχεία για τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων και γίνεται αναφορά για τον λόγο που επιλέχθηκε ο συγκεκριμένος τύπος της

στατικής ανάλυσης. Πραγματοποιείται στατική ανάλυση πεπερασμένων τόσο στο Solidworks, όσο και στο λογισμικό Ansys Multiphysics εφαρμόζοντας σε κάθε οδόντα ένα ομοιόμορφα κατανεμημένο μοναδιαίο φορτίο κάθετα στο ανώτερο σημείο μονής επαφής, το οποίο έχει υπολογιστεί για κάθε οδόντα στο τέλος του Κεφαλαίου 2. Από τις αναλύσεις, προκύπτουν τα διαγράμματα της κατανομής της κύριας τάσης σι στους οδόντες.

Στο Κεφάλαιο 4, έχοντας εξαγάγει τα διαγράμματα κατανομής της κύριας τάσης σι, εντοπίζεται το σημείο έναρξης της ρωγμής. Παρατίθενται, επίσης, τα διαγράμματα των τροχιών της ίσης μέγιστης διατμητικής τάσης, κάθετα στις οποίες διαδίδεται η ρωγμή σύμφωνα με διατμητικά κριτήρια τύπου Tresca και von Mises. Με βάση, λοιπόν, το σημείο έναρξης της ρωγμής και την τροχιά της, σχεδιάζονται δέκα -αδιαστατοποιημένες ως προς τον ουδέτερο άξονα- ρωγμές στον ίδιο οδόντα ($Z=20$, $\epsilon=1.2$), που κάθε μία είναι συνέχεια της προηγούμενης.

Στο πέμπτο Κεφάλαιο, περιγράφεται, αρχικά, η διαδικασία τοποθέτησης των ηλεκτροδίων εκατέρωθεν της ρωγμής και στη συνέχεια παρουσιάζεται, με βήματα, η ανάλυση του ηλεκτροστατικού πεδίου με τη βοήθεια πεπερασμένων στοιχείων στο πρόγραμμα Ansys Multiphysics. Κατόπιν αυτών, πραγματοποιείται η παραπάνω ανάλυση για τα ηλεκτρόδια για τις αδιαστατοποιημένες θέσεις από το 10% ως το 40% και από το 0 ως το 10% της τροχιάς θραύσης και από τα ευρήματα των αναλύσεων εντοπίζεται η βέλτιστη θέση τοποθέτησης των ηλεκτροδίων ως προς τη συνολική απόσταση του σημείου έναρξης της ρωγμής από τον ουδέτερο άξονα. Στη συνέχεια προκύπτει ότι οι αναλύσεις είναι ανεξάρτητες από την ειδική ηλεκτρική αντίσταση (ρ). Έπειτα, με δεδομένη τη βέλτιστη θέση τοποθέτησης των ηλεκτροδίων που βρέθηκε ως προς την μέγιστη ρωγμή, μελετάται ποια είναι η βέλτιστη απόσταση που πρέπει να έχουν μεταξύ τους τα ηλεκτρόδια. Από τις αναλύσεις, προέκυψε εμπειρικός τύπος από τον οποίο μπορεί να προβλεφθεί το ποσοστό (%) του μήκους της ρωγμής εισάγοντας ως δεδομένα το αδιαστατοποιημένο δυναμικό που δίνει ο αισθητήρας και την αδιαστατοποιημένη απόσταση (x) μεταξύ των ηλεκτροδίων. Όλες οι αναλύσεις και περιγραφές στο παρόν κεφάλαιο συνοδεύονται από πληθώρα διαγραμμάτων και σχημάτων για την καλύτερη κατανόηση του.

Στο τελευταίο κεφάλαιο, παρουσιάζονται, συγκεντρωτικά, τα συμπεράσματα και τα ευρήματα της διπλωματικής εργασίας, καθώς και προτάσεις για μελλοντική εργασία.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα, καταρχήν, να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή Δρ. Β. Σπιτά για την καθοδήγησή του κατά την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας αλλά και για την προσπάθειά του, η οποία πιστεύω ότι ήταν επιτυχής, να μου μεταδώσει τη νοοτροπία που χρειάζεται ένας απόφοιτος μηχανικός για να εξελιχθεί, σταδιακά, σε αυτόνομη επιστημονική προσωπικότητα.

Επίσης, νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές και συμφοιτητές μου, οι οποίοι, συνέβαλαν, ο καθένας με διαφορετικό τρόπο, στην επιτυχή κατάληξη της φοιτητικής μου πορείας στη σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών. Τέλος, δε θα μπορούσα να παραλείψω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για τη συνολικότερη στήριξή της κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περιεχόμενα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	3
1.1. Γενικά περί Οδοντωτών Τροχών	3
1.2. Βλάβες Οδοντωτών Τροχών [2]	4
1.3. Δημιουργία και Διάδοση Ρωγμών	5
1.3.1. Εισαγωγικά στοιχεία	5
1.3.2. Θραύση στον πόδα του οδόντος.....	6
1.4. Μέθοδοι Διάγνωσης Βλαβών (Diagnostics-Monitoring).....	7
1.4.1. Καταγραφή Φάσματος Συχνοτήτων.....	7
1.4.1.1. Μορφή φάσματος κραδασμών σε ραγισμένο ή σπασμένο οδόντα	8
1.4.1.2. Μειονεκτήματα.....	9
1.4.2. Μέθοδος Ελέγχου με Υπερήχους.....	9
1.4.2.1. Μειονεκτήματα.....	10
1.4.3. Μέθοδος Ακουστικών Εκπομπών (Accoustic Emissions).....	10
1.4.3.1. Εξοπλισμός.....	11
1.4.3.2. Μειονεκτήματα.....	12
1.4.4. Μέθοδος Πτώσης Δυναμικού	12
2. ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΟΔΟΝΤΩΝ ΜΕΤΩΠΙΚΩΝ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ	15
2.1. Εισαγωγή.....	15
2.2. Διαδικασία Δημιουργίας της Γεωμετρίας.....	16
2.2.1. Επαλήθευση γεωμετρίας	16
2.3. Ανώτερο Σημείο Μονής Επαφής Οδόντος (HPSTC)	21
3. ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	23
3.1. Εισαγωγή.....	23
3.2. Στατική Ανάλυση Πεπερασμένων Στοιχείων στο Solidworks	24
3.2.1. Παρατηρήσεις	25
3.3. Στατική Ανάλυση Πεπερασμένων Στοιχείων στο Ansys.....	27
4. ΕΝΑΡΞΗ ΚΑΙ ΔΙΑΔΟΣΗ ΤΗΣ ΡΩΓΜΗΣ.....	31
4.1. Έναρξη ρωγμής	31
4.2. Ίση Μέγιστη Διατμητική Τάση και Τροχιά της Ρωγμής	32

4.3. Διάδοση της Ρωγμής.....	34
5. ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΤΩΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ	41
5.1. Τοποθέτηση Ηλεκτροδίων.....	41
5.2. Ηλεκτροστατική Ανάλυση Πεπερασμένων Στοιχείων στο Ansys	45
5.3. Ανάλυση από τη θέση στο 10% ως τη θέση στο 40%	52
5.4. Ανάλυση από τη θέση στο 0 ως τη θέση στο 10%	54
5.5. Ανάλυση ανεξάρτητη της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ρ	59
5.6. Επίδραση της απόστασης μεταξύ των ηλεκτροδίων στην ακρίβεια της μέτρησης	59
5.6.1. Εμπειρικός τύπος για το αδιαστατοποιημένο δυναμικό και το % αδιαστατοποιημένο μήκος κάθε ρωγμής	66
5.7. Μέτρηση του ηλεκτρικού δυναμικού σε διαφορετική θέση από αυτή της εισαγωγής του ρεύματος....	69
5.8. Απεικόνιση του διανυσματικού πεδίου της πυκνότητας ηλεκτρικού ρεύματος στο δοκίμιο.....	71
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	75
ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	79

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Γενικά περί Οδοντωτών Τροχών

Οι οδοντωτοί τροχοί [1], είναι στοιχεία μηχανών που χρησιμοποιούνται για την μετάδοση περιστροφικής κινήσεως και την μεταφορά ισχύος από κινητήρια σε κινούμενη άτρακτο, μέσω διαδοχικής εμπλοκής συνεργαζόμενων οδόντων.

Οι οδόντες είναι σχηματισμοί αλληπάλληλων εσοχών και προεξοχών στην περιφέρεια ενός οδοντωτού τροχού, τέτοιες ώστε να είναι δυνατή η συνεργασία της εσοχής του ενός τροχού με την προεξοχή του συνεργαζόμενου οδοντωτού τροχού υπό σταθερή σχέση των ταχυτήτων και κατασκευάζονται με διάφορα προφίλ κατατομών, όπως αυτό της εξείλιγμένης, της ορθοκυκλοειδούς, της επικυκλοειδούς, της περικυκλοειδούς και της υποκυκλοειδούς καμπύλης, ή τόξου κύκλου, ή ακόμα και σπείρας. Συνηθέστερη μεταξύ αυτών είναι η κατατομή της εξείλιγμένης, η οποία είναι η καμπύλη εκείνη που διαγράφει ένα σημείο ευθείας κυλιόμενης χωρίς ολίσθηση επί κύκλου.

1.2. Βλάβες Οδοντωτών Τροχών [2]

Μία από τις αιτίες που προκαλούν την αστοχία των οδοντωτών τροχών είναι η σημειακή υπερφόρτιση των κατατομών. Σαν αποτέλεσμα αυτής έχουμε τη δημιουργία ραβδώσεων επί των κατατομών του οδοντωτού τροχού που απογυμνώνουν τον οδόντα. Επίσης, η υπερβολική ταχύτητα περιστροφής μπορεί να προκαλέσει την αστοχία του οδόντα. Το αίτιο αυτό ισχύει για μηχανισμούς, οι οποίοι δεν έχουν συστήματα μέτρησης και ελέγχου της ταχύτητας. Οι τροχοί αυτοί λοιπόν, είναι πιθανό να εργάζονται σε στροφές μεγαλύτερες του επιτρεπτού ορίου.

Η ακατάλληλη θερμική κατεργασία είναι ακόμα μία από τις αιτίες αστοχίας καθώς και η ύπαρξη ξένων σωματιδίων: όσον αφορά την πρώτη, οι οδόντες συνήθως υφίστανται επιφανειακή σκλήρυνση, η οποία όμως θα είναι ακατάλληλη αν το πάχος σκληρύνσεως προκύψει ανομοιόμορφο επί της επιφάνειας των οδόντων του τροχού, ενώ όσον αφορά τα ξένα σωματίδια, η ύπαρξή τους στις συνεργαζόμενες κατατομές δημιουργεί επαφή στερεού με στερεό, η οποία προκαλεί τοπική συγκόλληση και φυσικά πρέπει να αποφεύγεται.

Μερικές ακόμα αιτίες που προκαλούν αστοχία των οδοντωτών τροχών είναι :

- Η ακατάλληλη λίπανση στις οδοντώσεις : Γενικά στους οδοντωτούς τροχούς συνίσταται η χρήση λιπαντικού κατάλληλου για υψηλές πιέσεις, διότι η επαφή των κατατομών είναι συνήθως μόνο γραμμική. Το σύστημα λιπάνσεως, θα πρέπει να μπορεί να λιπώνει όλες τις θέσεις εργασίας, το δε λιπαντικό θα πρέπει να παραμένει επί της κατατομής του οδόντος μέχρι την στιγμή της επαφής των κατατομών. Εάν κάτι τέτοιο δεν καθίσταται δυνατόν και η λειτουργία της βαθμίδας γίνεται χωρίς την χρήση του απαραίτητου λιπαντικού, τότε η λίπανση είναι ακατάλληλη. Επίσης, είναι απαραίτητο, το λιπαντικό να φιλτράρεται, διότι μέσα απ' αυτό μεταφέρονται και τα ξένα σωματίδια για τα οποία αναφερθήκαμε προηγουμένως.
- Η ακατάλληλη κατασκευή : Οι κατατομές των δοντιών πρέπει να έχουν κατασκευασθεί με ακρίβεια, τα δε fillets (πόδες) των οδόντων πρέπει να είναι τα προβλεπόμενα.
- Η ακατάλληλη συναρμολόγηση : Η χαλαρή πρόσδεση, για παράδειγμα, των τροχών στους άξονες, των αξόνων στα έδρανα ή των εδράνων στο κέλυφος, μπορούν να προκαλέσουν μεταξύ των άλλων δονήσεις από αζυγοσταθμία. Επιπρόσθετα, η κακή

ευθυγράμμιση ή η λάθος απόσταση μεταξύ των κέντρων των συνεργαζόμενων τροχών, μπορούν να οδηγήσουν στη δημιουργία απρόβλεπτων δυνάμεων και στην εκδήλωση βλάβης στα γρανάζια.

- Η κακή σχεδιομελέτη: Στην κατασκευή των οδοντωτών τροχών, ο μελετητής θα πρέπει να ακολουθήσει την καλύτερη διαθέσιμη τεχνική για να εφοδιάσει τους τροχούς με ακριβή και κατάλληλα μεγέθη, όπως διάμετρο αρχικού κύκλου, πλάτος, υλικό και επιφανειακές κατεργασίες (π.χ. θερμική). Πρέπει να μελετηθεί, επίσης προσεκτικά, η εκλογή του κατάλληλου ζεύγους οδοντωτών τροχών και να γίνει λεπτομερής ανάλυση των δυνάμεων, πριν αρχίσει η διαδικασία κατασκευής του μηχανισμού.

1.3. Δημιουργία και Διάδοση Ρωγμών

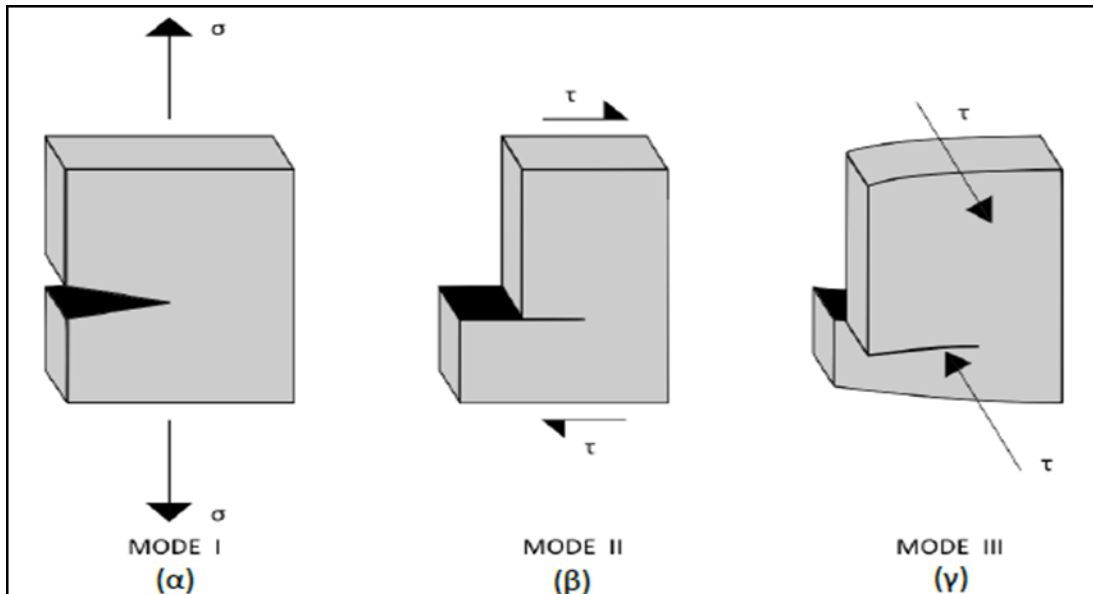
1.3.1. Εισαγωγικά στοιχεία

Ρωγμή στο επίπεδο μπορεί να ορισθεί ότι είναι το όριο ελλειπτικής οπής, ο μικρός ημι-άξονας της οποίας τείνει στο μηδέν ή ότι είναι μια φυσική ασυνέχεια χωρίς πάχος (μαθηματική γραμμή).

Ο G.R. Irwin [3] μελετώντας το τασικό πεδίο στην αιχμή μιας ρωγμής παρατήρησε ότι υπάρχουν τρεις ανεξάρτητοι τρόποι μετακινήσεως (παραμορφώσεως) των χειλέων της ανάλογα με το είδος της εφαρμοζόμενης φορτίσεως. Οποιαδήποτε άλλη μορφή παραμορφώσεως μπορεί να θεωρηθεί ότι προκύπτει από τον συνδυασμό των τριών αυτών τύπων.

α) Επίπεδος Εφελκυστικός Τύπος-I (Opening Mode ή Mode I): Αντιστοιχεί σε ομοαξονικό εφελκυσμό κάθετο στο μεγάλο άξονα της ρωγμής. Στην περίπτωση αυτή τα χείλη της ρωγμής τείνουν να διαχωριστούν συμμετρικά ως προς το πριν την παραμόρφωση επίπεδό της. (Σχ. 1.1α)

β) Συνεπίπεδος Διατμητικός Τύπος-II (Sliding Mode ή Mode II): Αντιστοιχεί σε διάτμηση κατά μήκος του μεγάλου άξονα της ρωγμής και προκύπτει όταν τα απέναντι χείλη της τείνουν να ολισθήσουν το ένα σχετικά με το άλλο προς αντίθετες διευθύνσεις, αλλά πάνω στο ίδιο επίπεδο. (Σχ. 1.1β)



Σχήμα 1.1: Οι τρεις βασικοί τύποι παραμόρφωσης της ρωγμής.

γ) Εγκάρσιος Διατμητικός Τύπος-III (Tearing Mode ή Mode III): Αντιστοιχεί στην εγκάρσια διάτμηση και προκύπτει όταν τα χείλη της ρωγμής διαχωρίζονται προς αντίθετες εγκάρσιες διευθύνσεις εξαιτίας της επιδράσεως ίσων και αντίθετων δυνάμεων κάθετων στο επίπεδο του σώματος. (Σχ. 1.1γ).

1.3.2. Θραύση στον πόδα του οδόντος

Η θραύση στον πόδα του οδόντος λόγω κόπωσης είναι ο κοινότερος τύπος αστοχίας και προκύπτει από τις επαναλαμβανόμενες καμπτικές καταπονήσεις που ξεπερνούν το όριο διαρκούς αντοχής του υλικού. Αυτές οι τάσεις μπορούν να δημιουργηθούν από τον ελαττωματικό σχεδιασμό, την υπερφόρτιση, την έλλειψη ευθυγράμμισης ή τη μη αναμενόμενη αύξηση των τάσεων στις επιφανειακές ατέλειες του οδόντος. Συνήθως, οι ρωγμές δημιουργούνται στο τροχοειδές (fillet) του τροχού, που ονομάζεται επικίνδυνη διατομή ποδός στη βάση του οδοντωτού τροχού. Η ρωγμή ξεκινά από μία αυξημένη επιφανειακή τάση κάπου στην βάση του οδόντος, αρκετά μακριά από την εργαζόμενη πλευρά και αφού δημιουργηθεί εξελίσσεται, με αποτέλεσμα την τελική αποκόλληση ολόκληρου του τμήματος του οδόντος. Η πορεία που θα ακολουθήσει η ρωγμή εξαρτάται κυρίως από τη σχέση της διαμέτρου του κύκλου ποδός με τη διάμετρο του άξονα του άξονα του οδοντωτού τροχού.

Ένας σημαντικός κίνδυνος προκύπτει αν ο σπασμένος οδόντας επιχειρήσει να περάσει μέσα από το σημείο σύμπλεξης των άλλων οδόντων του τροχού και μπλοκάρει τον οδηγό.

Οι ρωγμές μπορούν επίσης να δημιουργήσουν πρόβλημα όταν ξεκινούν πάνω στο μέσο της εργαζόμενης πλευράς, συνήθως κοντά στον αρχικό κύκλο (λίγο πιο κάτω προς το LPSTC). Η έναρξη σ' αυτήν την περίπτωση φαίνεται να οφείλεται στις ρωγμές που δημιουργούν οι μικρο- και μακροσκοπικές διαβρώσεις. Η τριβή κατά την επαφή φαίνεται να παίζει σημαντικό ρόλο και αυτή με την σειρά της εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις συνθήκες λίπανσης. Όπως και με την συμβατική ρωγμή βάσης είναι πιθανό να δημιουργηθεί μικρός ή και καθόλου θόρυβος.

Πολλές φορές το σπάσιμο των οδόντων μπορεί να συμβεί και να μην γίνει αντιληπτό μέχρι να αποκαλυφθεί λόγω κάποιας βλάβης της μηχανής (run to failure). Σε τέτοιες περιπτώσεις, η βλάβη δεν μπορεί να γίνει αντιληπτή από τη δημιουργία θορύβου και ακόμα και συσκευές καταγραφής μπορεί να μην τον εντοπίσουν.

1.4. Μέθοδοι Διάγνωσης Βλαβών (Diagnostics-Monitoring)

1.4.1. Καταγραφή Φάσματος Συχνοτήτων

Η συχνότητα εμπλοκής οδοντωτών τροχών, που επίσης καλείται συχνότητα εμπλοκής οδόντων (f_z), είναι η συχνότητα κατά την οποία οι οδόντες των οδοντωτών τροχών εμπλέκονται μεταξύ τους και ισούται με τον αριθμό των οδόντων του τροχού επί την περιστροφική ταχύτητα της ατράκτου. Όταν ένα πρόβλημα του οδοντωτού τροχού ή ένα πρόβλημα μετάδοσης επηρεάζει την συχνότητα εμπλοκής οδοντωτών τροχών (Gear Meshing Frequency - GMF), το πλάτος μπορεί να γίνει σημαντικό. Εάν υπάρχει πρόβλημα στον οδοντωτό τροχό, το οποίο δεν επηρεάζει την σύμπλεξη (π.χ. έναρξη ρωγμής), μπορεί να μην δημιουργηθούν μεγαλύτερα πλάτη στην GMF. Τα μεγαλύτερα πλάτη στην GMF υποδεικνύουν ένα πρόβλημα στην εμπλοκή των οδοντωτών τροχών. Η αιτία γι' αυτό το πρόβλημα στην σύμπλεξη μπορεί να ταυτοποιηθεί με την ανάλυση του φάσματος συχνοτήτων και του χρονικού σήματος.

Η καταγραφή μορφής φάσματος κραδασμών είναι, πρακτικά, ο πιο διαδεδομένος τρόπος παρακολούθησης της κατάστασης ενός κιβωτίου ταχυτήτων [4]. Τα δεδομένα δόνησης συλλέγονται από αισθητήρες, συνήθως επιταχυνσιόμετρα, τα οποία φτιάχνονται από μία πολύ μικρή μάζα, η οποία εδράζεται πάνω σε έναν πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο. Ανάλογα με τις διακυμάνσεις στα δεδομένα δόνησης που συλλέγονται, μπορούν να εντοπιστούν

βλάβες, όπως η ρωγμή στον πόδα ενός οδόντος. Οι διακυμάνσεις αυτές αναγνωρίζονται και κατηγοριοποιούνται προκειμένου να αναγνωριστεί ο τύπος και το επίπεδο της βλάβης.

1.4.1.1. Μορφή φάσματος κραδασμών σε ραγισμένο ή σπασμένο οδόντα

Όσον αφορά τώρα στην βλάβη ενός σπασμένου οδόντος σ' έναν οδοντωτό τροχό, είναι προφανές ότι ένας σπασμένος οδόντας δεν μπορεί να «μεταδώσει» κανένα φορτίο. Αυτή η στιγμιαία διακοπή στην παροχή της στρεπτικής ροπής, που συμβαίνει λόγω της παραπάνω βλάβης, προκαλεί μερικές φορές μία αιχμή στο φάσμα μας στην συχνότητα $1X$ της ταχύτητας περιστροφής, η οποία εμφανίζεται ως πλευρικές ζώνες στην συχνότητα εμπλοκής οδοντωτών τροχών. Το διάστημα των πλευρικών ζωνών προσδιορίζεται από την ταχύτητα περιστροφής. Τα ελαττώματα αυτού του είδους, όπως π.χ. σπασμένοι ή χαραγμένοι οδόντες, φαίνονται καλύτερα στις φασματικές απεικονίσεις ως προς τον χρόνο.

Γενικά, όσο τα φορτία τριβής μεγαλώνουν σε έναν οδοντωτό τροχό που επηρεάζει τη συχνότητα εμπλοκής του, τόσο αυξάνεται ο εκπεμπόμενος θόρυβος (αυξημένο πλάτος), αλλά συνεχίζεται η μετάδοση ισχύος. Σε κάποιο σημείο ξεκινούν να αναπτύσσονται ρωγμές και αυτά είναι τα σημάδια που θα οδηγήσουν σε μία καταστροφική βλάβη. Συνήθως, αρκεί να καταγράψουμε τις συχνότητες των οδοντωτών τροχών και να παρακολουθήσουμε τα πλάτη τους να μεγαλώνουν λόγω της φυσιολογικής φθοράς. Με την εμπειρία και ένα προηγούμενο ιστορικό της διάταξης, στο οποίο μπορούμε να βασιστούμε, θα είμαστε σε θέση να προβλέψουμε σε ποιο σημείο θα αστοχήσει ένας οδοντωτός τροχός. Μια απότομη αλλαγή στην ανάλυση φάσματος συχνοτήτων είναι πολύ σημαντική. Η αλλαγή μπορεί να είναι μια απότομη μείωση προς ένα χαμηλότερο πλάτος. Η απότομη πτώση του πλάτους της δόνησης υποδεικνύει ότι μία δραματική μείωση στη σκληρότητα έχει εξασθενήσει την δυνατότητα της βαθμίδας στη μετάδοση της ισχύος. Η ρωγμή έχει διαδοθεί πολύ περισσότερο αφήνοντας τον οδοντωτό τροχό ή τον άξονα πολύ «ελαστικό» και ικανό να απορροφά τις δυνάμεις καμπτόμενο περισσότερο.

1.4.1.2. Μειονεκτήματα

Όπως προαναφέρθηκε, τα δεδομένα δόνησης συλλέγονται συνήθως από επιταχυνσιόμετρα. Ωστόσο, τα εξαρτήματα του ενσωματωμένου ενισχυτή σ' ένα επιταχυνσιόμετρο ολοκληρωμένου ηλεκτρικού κυκλώματος καταστρέφονται σε θερμοκρασίες ανώτερες των 218 °C [4]. Σε αυτή την περίπτωση αναγκάζεται κανείς να χρησιμοποιήσει ένα επιταχυνσιόμετρο τύπου ενισχυτή-φορτίου.

Σε έναν πολυβάθμιο μειωτήρα στροφών οι συχνότητες που δύναται να εμφανιστούν μπορεί να προέρχονται από τις εξής αιτίες: την εμπλοκή των οδοντωτών τροχών, τα σφάλματα στην κατασκευαστική τους διαμόρφωση και τις διάφορες συχνότητες που παράγονται από τα υπόλοιπα περιστρεφόμενα μέρη του κιβωτίου ταχυτήτων. Σε πολλές έρευνες, μάλιστα, έχει διαπιστωθεί [5] ότι οι συχνότητες οφείλονται κυρίως στις κατασκευαστικές ατέλειες. Γι' αυτούς τους λόγους, οι συχνότητες αναγνωρίζονται εύκολα αλλά ερμηνεύονται δύσκολα.

1.4.2. Μέθοδος Ελέγχου με Υπερήχους

Ο έλεγχος με υπερήχους αποτελεί ένα Μη Καταστροφικό Έλεγχο που χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό, τον έλεγχο και την αξιολόγηση εσωτερικών ασυνεχειών σε μέταλλα και άλλα υλικά. Η βασική αρχή αυτής της μεθόδου είναι η παραγωγή μιας δέσμης ήχου υψηλής συχνότητας με κατεύθυνση προς το υπό έλεγχο υλικό, στο οποίο σε περίπτωση εσωτερικών ασυνεχειών ανακλά την εν λόγω δέσμη. Αυτή η ασυνέχεια εμφανίζεται σαν μια απότομη κάθετη κατακόρυφη γραμμή σε μια CRT οθόνη.

Η εύρεση, ο εντοπισμός και η αξιολόγηση εσωτερικών ασυνεχειών κάποιου υλικού είναι δυνατός, διότι η ταχύτητα του ήχου εντός ενός υλικού δεδομένης πυκνότητας και σχήματος είναι σταθερή, με αποτέλεσμα να είναι δυνατή η μέτρηση αποστάσεων, καθώς επίσης και το σχετικό εύρος ενός απεικονιζόμενου παλμού είναι ανάλογο του μεγέθους του ανακλαστήρα.

Όταν η συσκευή παραγωγής υπερήχων τοποθετηθεί σε μια επιφάνεια σταθερού πάχους, τότε, μόνο ένα πολύ μικρό ποσοστό της ανακλώμενης ηχητικής ενέργειας απορροφάται από τον μετατροπέα υπερήχων, ενώ η εναπομείνουσα ενέργεια θα ανακλαστεί πίσω στο δοκίμιο, αντηχώντας ανάμεσα στις παράλληλες επιφάνειες του δοκίμιου, δημιουργώντας

έτσι μια ακόμα ένδειξη στην οθόνη απεικόνισης. Αυτό θα συμβαίνει σε κάθε επιστροφή της ηχητικής δέσμης στην αρχική επιφάνεια. Σε αντίθεση με τις συχνότητες του ήχου που μπορεί να αντιληφθεί το ανθρώπινο αυτί, οι ήχοι υψηλών συχνοτήτων είναι εύκολο να χάσουν την ενέργεια τους και να φθαρούν όταν διέρχονται από αέρα, αλλά παρ' όλα αυτά μπορούν να ταξιδέψουν ελεύθερα σε ομογενοποιημένες συμπαγής επιφάνειες ή υγρά. Έτσι γίνεται εύκολα αντιληπτό, πως τα οποιαδήποτε εγκλείσματα αέρα ανάμεσα στην επιφάνεια του δοκιμίου και της πηγής παραγωγής υπερήχων θα πρέπει να απομακρυνθούν.

1.4.2.1. Μειονεκτήματα

Η επιφάνεια πάνω στην οποία θα τοποθετηθεί το μηχάνημα του υπερήχου θα πρέπει να είναι κατάλληλα προετοιμασμένη και απαιτείται η χρήση ειδικού υγρού. Επίσης, μικρές ή λεπτές συγκολλήσεις είναι δύσκολο να ελεγχθούν με ακρίβεια. Επιπρόσθετα, για τη μέθοδο χρειάζονται εξειδικευμένοι και έμπειροι τεχνικοί με υψηλή στάθμη τεχνικών γνώσεων.

1.4.3. Μέθοδος Ακουστικών Εκπομπών (Acoustic Emissions)

Η μέθοδος των ακουστικών εκπομπών αποτελεί κατά κύριο λόγο μια βοηθητική-συμπληρωματική μέθοδο για τον εντοπισμό ασυνεχειών. Η ακουστική εκπομπή (Acoustic Emission Testing) αναφέρεται στην παραγωγή παροδικών ελαστικών ηχητικών κυμάτων που παράγονται από μια ξαφνική ανακατανομή της πίεσης σε ένα υλικό. Όταν μια δομή υποβάλλεται σε ένα εξωτερικό ερέθισμα (ή αλλαγή σε πίεση, φόρτιση ή θερμοκρασία), τότε πραγματοποιείται έκκληση ενέργειας, υπό μορφή κυμάτων πίεσης, τα οποία διαδίδονται στην επιφάνεια και καταγράφονται από αισθητήρες. Με τον σωστό εξοπλισμό, οι κινήσεις και η διάδοση των κυμάτων μπορούν να προσδιοριστούν. Η μέθοδος των ακουστικών εκπομπών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εποπτεία κατασκευών που βρίσκονται υπό λειτουργία, προσφέροντας έτσι πολλά πλεονεκτήματα.

Η ανίχνευση και η ανάλυση των σημάτων Ακουστικών Εκπομπών μπορεί να παρέχει πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με την προέλευση και τη σημασία μιας ασυνέχειας σε ένα υλικό. Λόγω της μεταβλητότητας της ακουστικής εκπομπής η μέθοδος αυτή έχει πολλές

βιομηχανικές εφαρμογή στην ανίχνευση ρωγμής και χρησιμοποιείται εκτενώς ως ερευνητικό εργαλείο.

Η μέθοδος ακουστικών εκπομπών έχει εφαρμοστεί σε οδοντωτούς τροχούς, ωστόσο, έχει δειχθεί [6], ότι δεν παρέχει ικανοποιητικά ακριβείς πληροφορίες για τη θέση της ασυνέχειας στα γρανάζια κι αυτό διότι η εφαρμογή της μεθόδου σε αυτά χαρακτηρίζεται από πολλά προβλήματα.

Η μέθοδος των ακουστικών εκπομπών διαφέρει από τις υπόλοιπες μεθόδους Μη Καταστρεπτικού Ελέγχου στα εξής :

- Η πρώτη διαφορά έχει να κάνει με την προέλευση του σήματος. Αντί να παρέχεται ενέργεια στο υπό εξέταση αντικείμενο, σε αυτή την περίπτωση λαμβάνεται η ενέργεια που απελευθερώνεται από το αντικείμενο με την μορφή ηχητικών κυμάτων. Οι δοκιμές Ακουστικών Εκπομπών εκτελούνται συχνά σε υλικά τα οποία βρίσκονται σε χρήση, διότι με αυτό τον τρόπο παρέχετε επαρκή φόρτιση για τη διάδοση ακουστικών σημάτων που προκαλούνται από τις διάφορες ατέλειες.

- Η δεύτερη διαφορά είναι ότι η μέθοδος των Ακουστικών Εκπομπών εξετάζει τις δυναμικές αλλαγές που πραγματοποιούνται σε ένα υλικό. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, επειδή εντοπίζονται ενεργά χαρακτηριστικά γνωρίσματα (π.χ. αύξηση ρωγμών). Η δυνατότητα να γίνει διάκριση μεταξύ στάσιμων και αναπτυσσόμενων ατελειών είναι μεγάλη. Επιπλέον, η δοκιμή ΑΕΤ παρέχει συνήθως μια άμεση ένδειξη σχετικά με τον κίνδυνο αστοχίας ενός υλικού. Άλλα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου περιλαμβάνουν τη γρήγορη και πλήρη ογκομετρική επιθεώρηση χωρίς να γίνεται χρήση κάποιου αισθητήρα.

1.4.3.1. Εξοπλισμός

Η μέθοδος ακουστικών εκπομπών μπορεί να εκτελεσθεί είτε με φορητά όργανα ή εντός κάποιου εργαστηρίου. Πιο συγκεκριμένα, τα συστήματα περιέχουν αισθητήρες, ενισχυτές, φίλτρα, μαζί με όργανα μέτρησης και απεικόνισης των αποτελεσμάτων, αλλά και τον εξοπλισμό αποθήκευσης (π.χ. παλμογράφοι, βολτόμετρα, και προσωπικοί Η/Υ). Οι ακουστικοί αισθητήρες αποκρίνονται στη δυναμική κίνηση που προκαλείται από κάποιο γεγονός. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω μετατροπών που μετατρέπουν τη μηχανική ενέργεια του ακουστικού σήματος σε ηλεκτρικό σήμα. Βασικό στοιχείο των μετατροπών σε έναν

αισθητήρα ΑΕΤ είναι ένας πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος. Οι μετατροπείς επιλέγονται ανάλογα με τη συχνότητα λειτουργίας, την ευαισθησία και κάποια άλλα χαρακτηριστικά.. Η πλειοψηφία του εξοπλισμού ΑΕΤ ανταποκρίνεται σε ένα φάσμα συχνότητας από 30 KHz έως 1 MHz.

1.4.3.2. Μειονεκτήματα

Η μέθοδος απαιτεί διατάξεις μετατροπής συνδεδεμένες με την επιφάνεια του ελεγχόμενου αντικειμένου. Επιπρόσθετα, πιθανός "θόρυβος" θα πρέπει να απομακρύνεται από το σύστημα ελέγχου με φίλτρα. Ένα ακόμα μειονέκτημα είναι ότι τα μαλακά υλικά αποδίδουν εκπομπές μικρού πλάτους.

1.4.4. Μέθοδος Πτώσης Δυναμικού

Η μέθοδος πτώσης ηλεκτρικού δυναμικού έχει καθιερωθεί τα τελευταία χρόνια ως μια από τις πιο ακριβείς και αποτελεσματικές μεθόδους έρευνας της έναρξης και της διάδοσης των ρωγμών [7]. Η τεχνική, με λίγα λόγια, βασίζεται στο γεγονός ότι η διάδοση της ρωγμής οδηγεί στην αύξηση της ηλεκτρικής αντίστασης. Εφαρμόζεται (συνεχές) ρεύμα σε ένα δοκίμιο με ρωγμή με τέτοιο τρόπο ώστε κάθε αύξηση του μήκους της ρωγμής αλλάζει τη διαφορά δυναμικού μεταξύ κατάλληλα τοποθετημένων ηλεκτροδίων. Έτσι, μετρώντας τη διαφορά δυναμικού μεταξύ των ηλεκτροδίων και τη διάδοση της ρωγμής μπορούν να συσχετιστούν τα δύο αυτά μεγέθη με τελικό στόχο, από τη συσχέτιση που θα προκύψει να μπορεί να προβλεφθεί η διάδοση της εκάστοτε ρωγμής απλά και μόνο μετρώντας τη διαφορά δυναμικού μεταξύ των κατάλληλα τοποθετημένων ηλεκτροδίων [8].

Μία μη-καταστρεπτική μέθοδος [9] που βασίζεται στην πτώση του δυναμικού έχει αναπτυχθεί που επιτρέπει την μέτρηση σε πραγματικό χρόνο του μήκους της ρωγμής που έχει δημιουργηθεί λόγω κόπωσης σε υψηλή θερμοκρασία. Επιπρόσθετα, υπάρχει μία ακόμα τεχνική [10] που έχει σαν οδηγό την πτώση του ηλεκτρικού δυναμικού, βάσει της οποίας μπορεί να εκτιμηθεί τόσο το μήκος όσο και η κατεύθυνση της ρωγμής, που διαδίδεται συνδυάζοντας τους δύο από τους τρεις βασικούς τύπους διάδοσης ρωγμής (I και II). Ωστόσο, και οι δυο προαναφερθείσες μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί πάνω σε ειδικά διαμορφωμένα, παντεταρισμένα δοκίμια [11-12] και όχι σε οδόντες οδοντωτών τροχών.

Αυτό το κενό έρχεται να καλύψει η παρούσα εργασία, καθώς είναι, διεθνώς, η πρώτη μελέτη πρόβλεψης του μήκους της ρωγμής σε οδόντα μετωπικού οδοντωτού τροχού που βασίζεται στη μέθοδο πτώσης ηλεκτρικού δυναμικού.

Συνοψίζοντας, η ουσία, του αισθητήρα που πρόκειται να σχεδιαστεί είναι μετρώντας σε πραγματικό χρόνο τη διαφορά δυναμικού να μπορεί με ασφάλεια να προσδιοριστεί το ποσοστό διάδοσης της ρωγμής στην κατασκευή, όπου έχει τοποθετηθεί ο αισθητήρας. Αυτό θα επιτευχθεί έχοντας βρει τη συσχέτιση μεταξύ της διαφοράς δυναμικού των ηλεκτροδίων και του μήκους της ρωγμής και εξετάσει την ευαισθησία της μεθόδου για μικρές μεταβολές των παραμέτρων σχεδιασμού.

2. ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΟΔΟΝΤΩΝ ΜΕΤΩΠΙΚΩΝ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ

2.1. Εισαγωγή

Οι μετωπικοί οδοντωτοί τροχοί διακρίνονται, κυρίως, σε αυτούς με ευθείς οδόντες και σε αυτούς με ελικοειδείς οδόντες. Στην πρώτη περίπτωση, οι οδόντες είναι παράλληλοι με τον άξονα του τροχού, ενώ στην δεύτερη, είναι κεκλιμένοι ως προς τον άξονα του τροχού, σχηματίζοντας σταθερή γωνία με αυτόν, ενώ για να είναι δυνατή η συνεργασία τους πρέπει σε μια βαθμίδα ο ένας να έχει δεξιόστροφους και ο άλλος αριστερόστροφους οδόντες. Οι μετωπικοί τροχοί ευθείας οδοντώσεως έχουν, συνήθως, βαθμό επικάλυψης 1 έως 2, ενώ δεν ενδείκνυνται για μεγάλα φορτία διότι προκαλούν θόρυβο και δημιουργούν μεγάλα δυναμικά φορτία. Αντίθετα, οι μετωπικοί τροχοί ελικοειδούς οδοντώσεως έχουν μεγαλύτερο βαθμό επικάλυψης, αλλά μειονεκτούν στο

θέμα ότι η ύπαρξη της γωνίας ελίκωσης έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη αξονικού φορτίου επί των οδόντων, το οποίο καταπονεί τις σταθερές εδράσεις των ατράκτων. Οι μετωπικοί οδοντωτοί τροχοί μπορούν να έχουν εξωτερική οδόντωση, δηλαδή οι οδόντες να βρίσκονται στην εξωτερική επιφάνεια του τροχού ή εσωτερική οδόντωση, δηλαδή οι οδόντες να βρίσκονται στην εσωτερική επιφάνεια του τροχού.

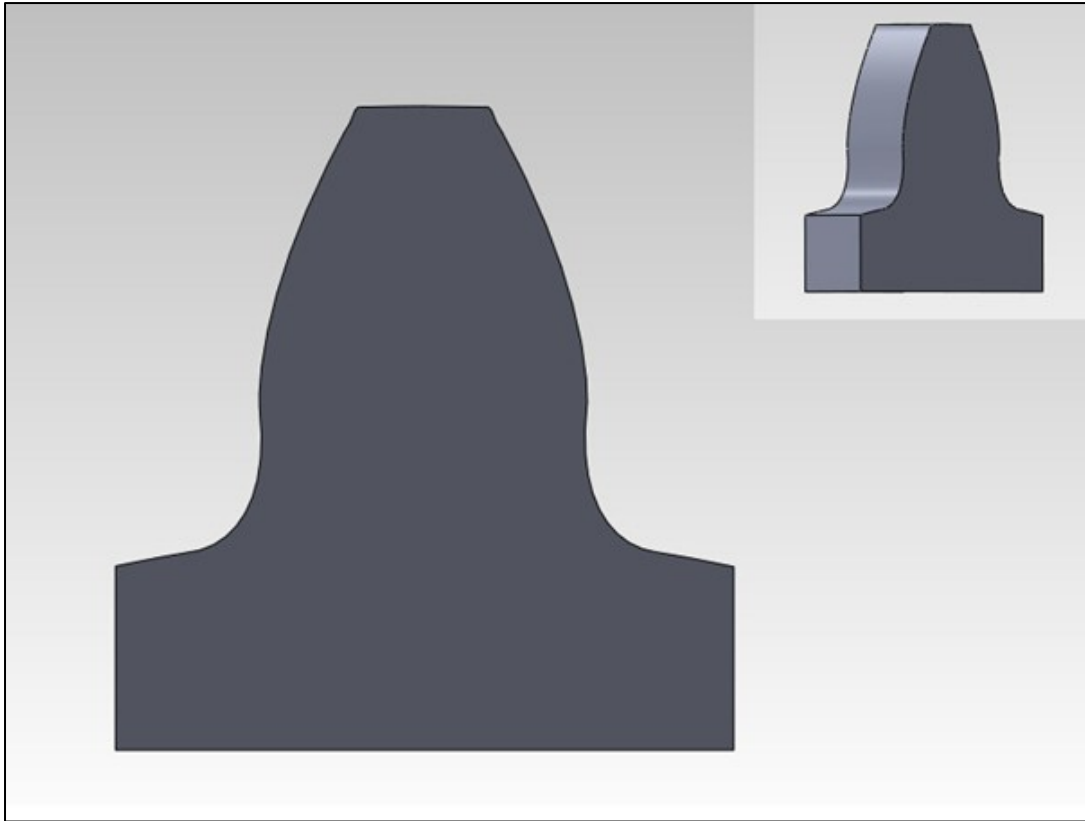
2.2. Διαδικασία Δημιουργίας της Γεωμετρίας

Για να αναλυθεί και να σχεδιασθεί ο αισθητήρας μέτρησης του μήκους της ρωγμής πρέπει να μελετηθούν διάφορες περιπτώσεις οδόντων (case studies). Η παρακάτω διαδικασία αφορά τη γεωμετρία ευθέων οδόντων εξειλιγμένης κανονικής οδοντώσεως. Τα μοντέλα που σχεδιάζονται για την ανάλυση περιλαμβάνουν τρία δόντια μετωπικού τροχού. Σ'ένα πρόγραμμα κώδικα, εισάγονται τα απαραίτητα δεδομένα και αυτό παρέχει τις συντεταγμένες των σημείων της κατατομής του οδόντος. Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται είναι : συντελεστής πάχος δοντιού = 0.5, γωνία εξειλιγμένης στον αρχικό κύκλο $\alpha=20^\circ$ και αριθμός οδόντων $z = 18, 20,$ και 30 αντίστοιχα. Οι αριθμοί αυτοί των οδόντων επιλέγονται, διότι αποτελούν συνηθείς περιπτώσεις σε πινιόν.

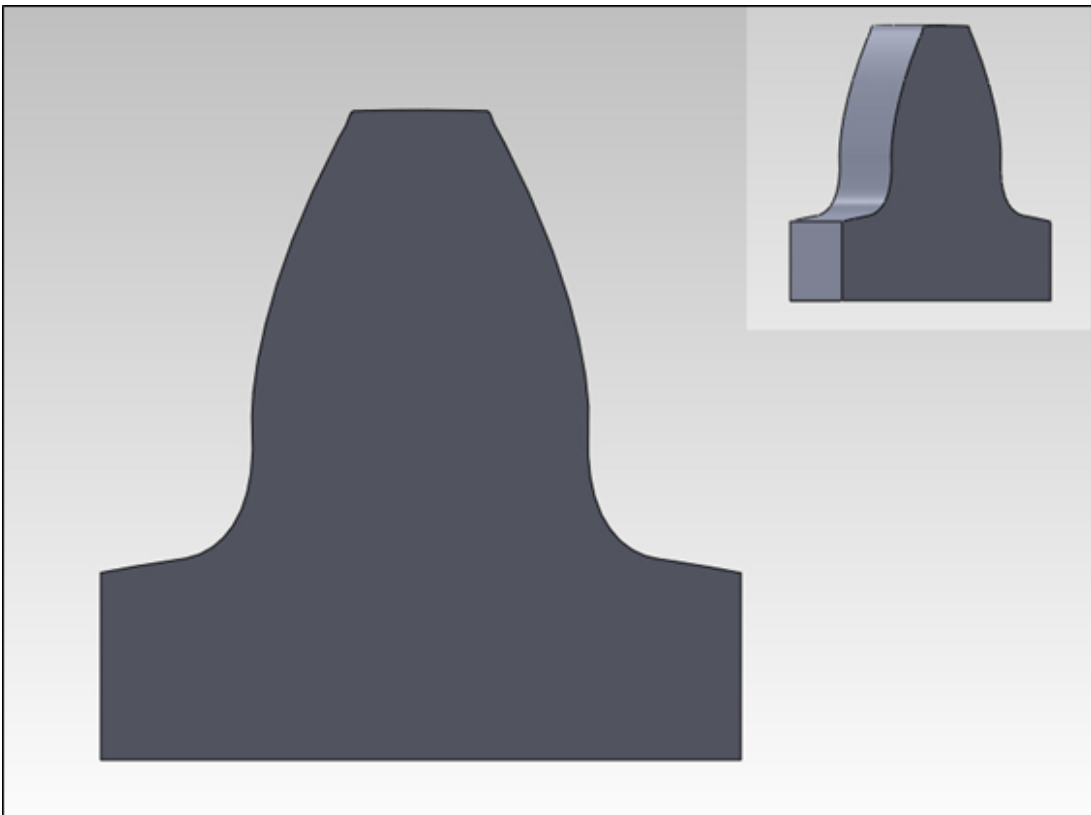
Το προαναφερθέν λογισμικό, παρέχει τις συντεταγμένες 388 σημείων, μέσω των οποίων δημιουργείται η δισδιάστατη γεωμετρία κάθε οδόντος στο λογισμικό Solidworks [13]. Στη συνέχεια, η γεωμετρία του κάθε οδόντος μετατρέπεται σε τρισδιάστατη προσθέτοντας τις ίδιες παραμέτρους για όλες τις περιπτώσεις : facewidth $b=1$ m, module $m = 1$. Ο λόγος που επιλέγεται το μέτρο των δυο αυτών παραμέτρων να ισούται με την μονάδα είναι η αδιαστατοποίηση των αποτελεσμάτων. Οι σχεδιασθέντες οδόντες απεικονίζονται στα Σχήματα 2.1 – 2.3.

2.2.1. Επαλήθευση γεωμετρίας

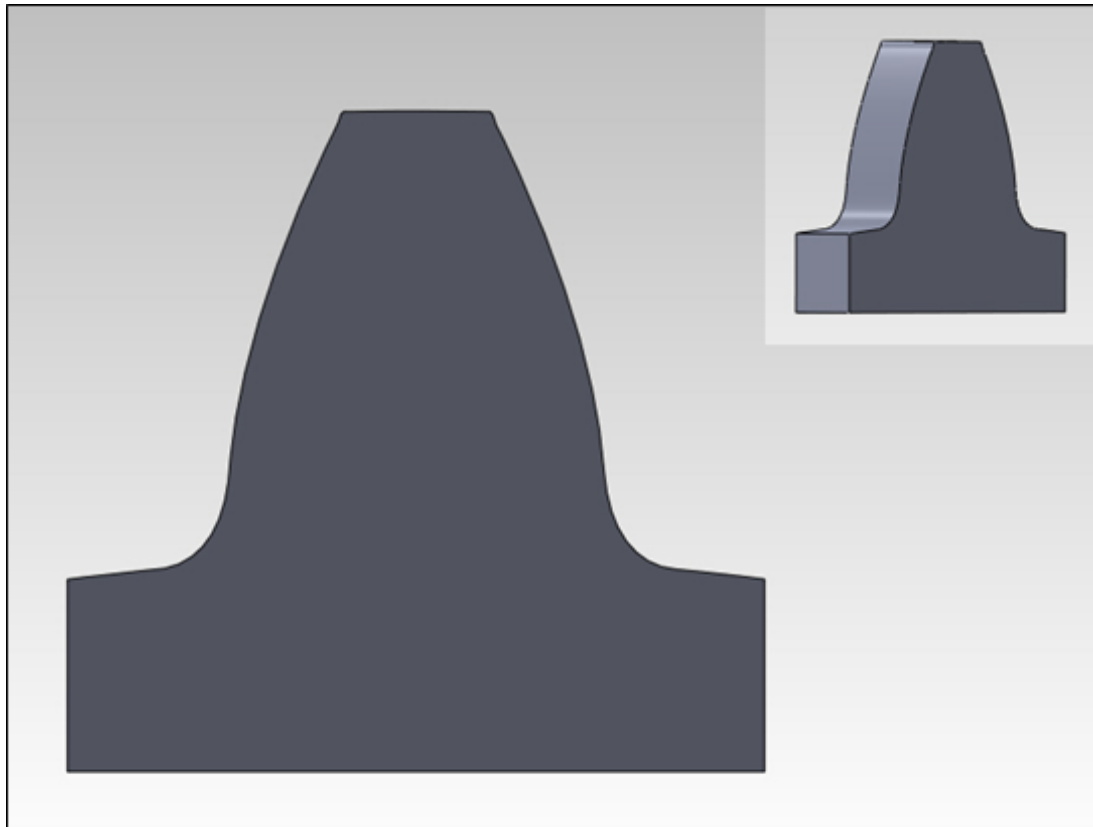
Για να επαληθευτεί ότι η γεωμετρία των οδόντων είναι σωστή ως προς το βήμα, ένας απλός τρόπος είναι από κάθε οδόντα να δημιουργηθεί ολόκληρος ο οδοντωτός τροχός, στον οποίο θεωρητικά ανήκει. Έχοντας δημιουργήσει τη γεωμετρία κάθε οδόντα, εκτελείται η εντολή circular pattern στο λογισμικό Solidworks και εισάγεται ο σωστός αριθμός οδόντων. Ενδεικτικά, στα Σχήματα 2.4,2.5 παρουσιάζονται οι τροχοί με αριθμό οδόντων 18 και 30 αντίστοιχα.



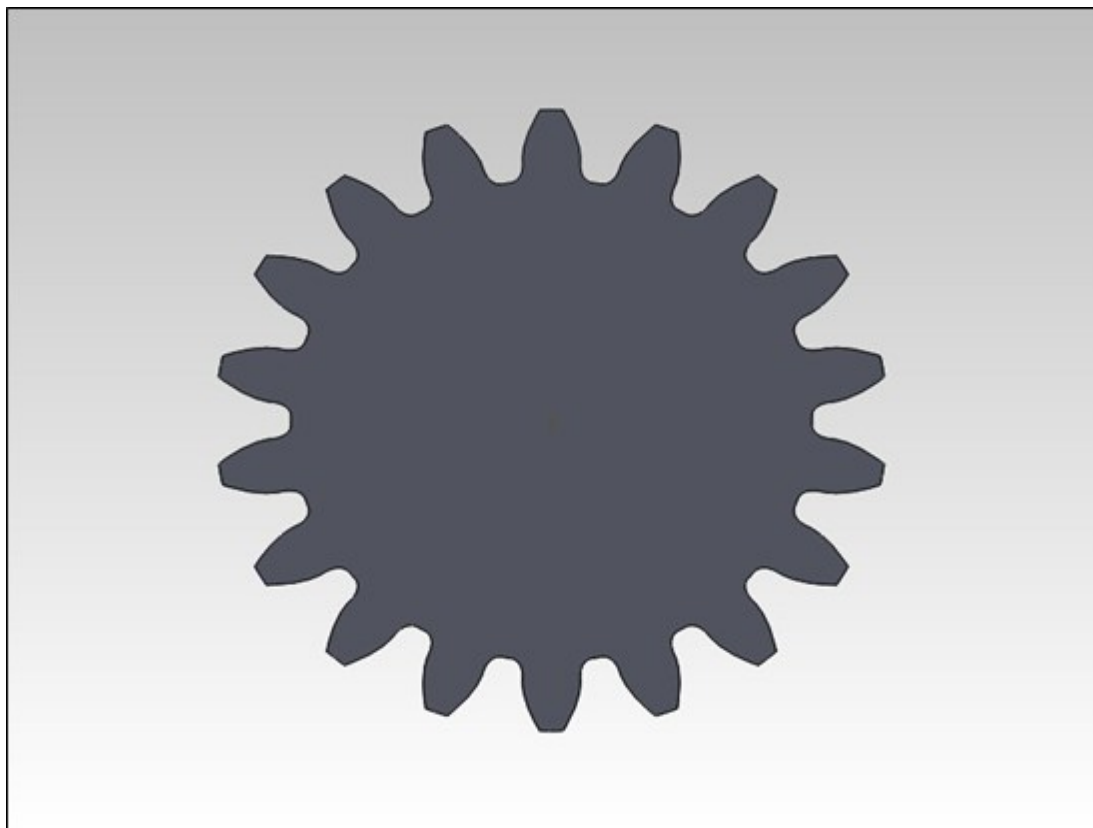
Σχήμα 2.1 : 2D και 3D γεωμετρία οδόντος - $Z = 18$, $a = 20^\circ$, $b = 1 \text{ m}$, $m = 1$



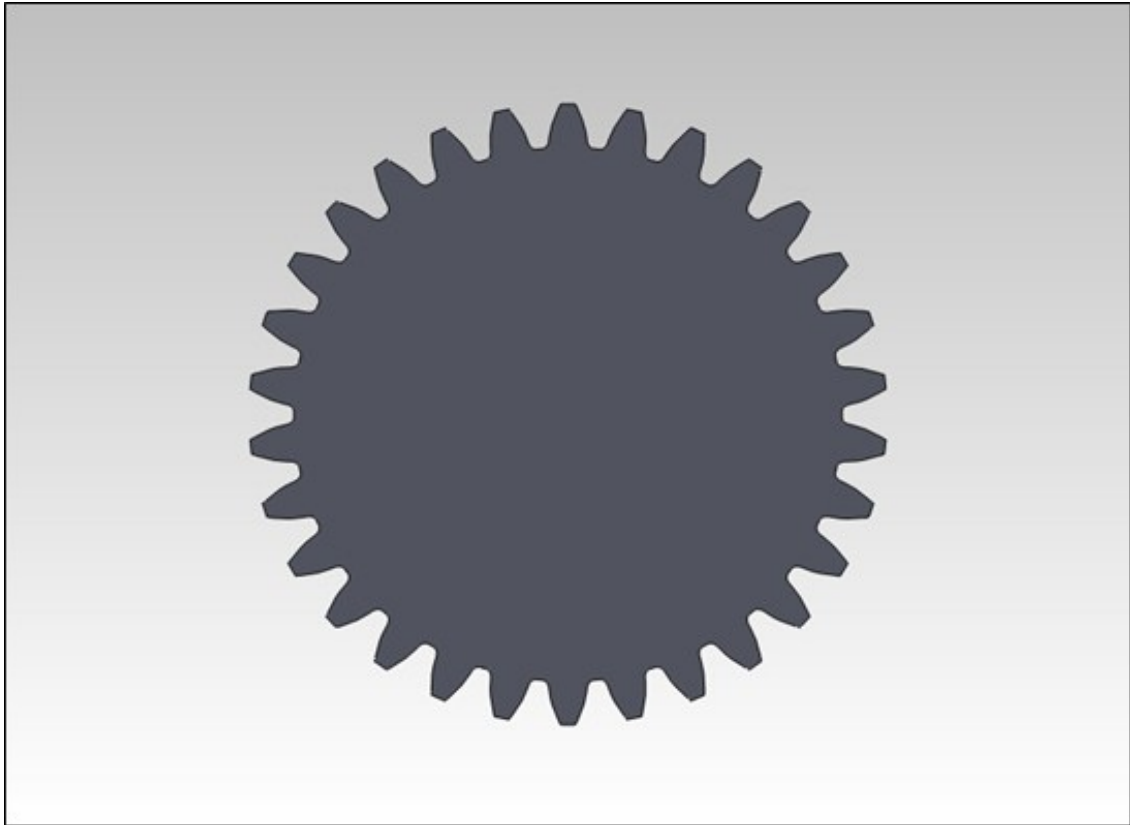
Σχήμα 2.2: 2D και 3D γεωμετρία οδόντος - $Z = 20$, $a = 20^\circ$, $b = 1 \text{ m}$, $m = 1$



Σχήμα 2.3: 2D και 3D γεωμετρία οδόντος - $Z = 30$, $a = 20^\circ$, $b = 1$ m, $m = 1$



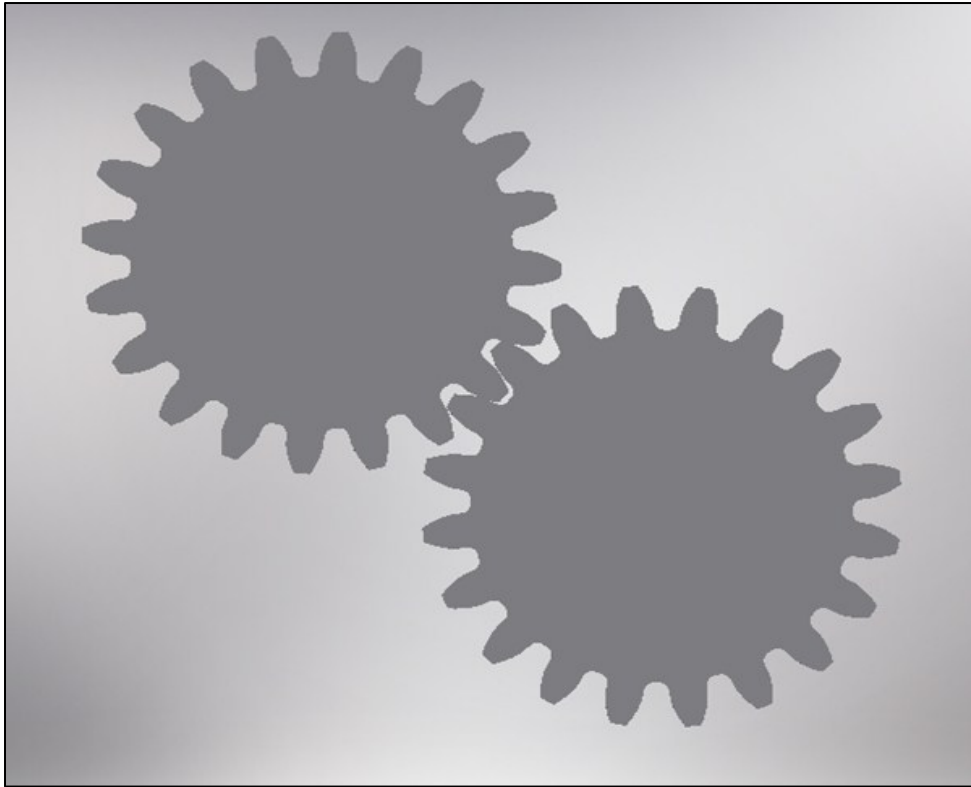
Σχήμα 2.4: 3D μοντέλο μετωπικού οδοντωτού τροχού - $Z = 18$



Σχήμα 2.5: 3D Μοντέλο μετωπικού οδοντωτού τροχού - $Z = 30$

Κατά τη συνεργασία τους, δυο οδοντωτοί τροχοί μεταφέρουν στρεπτική ροπή και αναπτύσσονται δυνάμεις. Το φορτίο σε κάθε οδόντα αλλάζει κατά μέγεθος και κατά θέση. Αρχικά συνεργάζονται δύο ή περισσότερα ζεύγη οδοντώσεων, ενώ κάποια στιγμή κατά τη συνεργασία συνεργάζεται μόνο ένα ζεύγος, το οποίο δέχεται και τη συνολική δύναμη που αναπτύσσεται. Η χειρότερη θέση για τον οδόντα, από άποψη φόρτισης, είναι όταν ένα συνεργάζεται μόνο ένα ζεύγος οδοντώσεων και το φορτίο ασκείται στο μέγιστο δυνατό μοχλοβραχίονα. Η θέση αυτή ονομάζεται ανώτερο σημείο μονής επαφής και αναλύεται στην Παράγραφο 2.3.

Στα Σχήματα 2.6,2.7 παρουσιάζονται δύο μετωπικοί, οδοντωτοί τροχοί ευθείας οδοντώσεως σε συνεργασία με αριθμό οδόντων 20, $module=1$. Στο Σχήμα 2.7 έχει γίνει εστίαση στα ζεύγη οδόντων που συνεργάζονται.



Σχήμα 2.6: Μετωπικοί οδοντωτοί τροχοί ευθείας οδοντώσεως σε συνεργασία



Σχήμα 2.7: Μετωπικοί οδοντωτοί τροχοί ευθείας οδοντώσεως σε συνεργασία -
Εστίαση στα συνεργαζόμενα ζεύγη οδοντώσεων

2.3. Ανώτερο Σημείο Μονής Επαφής Οδόντος (HPSTC)

Έχοντας κατασκευάσει τη γεωμετρία του κάθε οδόντος, το επόμενο βήμα είναι να βρεθεί για κάθε οδόντα το ανώτερο σημείο μονής επαφής, διότι κάθετα σε αυτό θα εφαρμοστεί, στο προθύστερο Κεφάλαιο, μοναδιαίο φορτίο για να πραγματοποιηθεί η απαραίτητη στατική ανάλυση. Η ολική δύναμη P_N που ασκείται στον οδόντα του τροχού 2, επί της γραμμής ενέργειας, αναλύεται σε δύο συνιστώσες, την ακτινική P_{r2} και την περιφερειακή P_{u2} .

Στον κύκλο κεφαλής η δύναμη P_N δεν λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της. Έχει ευρεθεί ότι στο διάστημα $A'B'$ του τμήματος επαφών εργάζεται μόνον ένας οδόντας από κάθε τροχό, ενώ στα διαστήματα AA' και BB' εργάζονται συγχρόνως από δύο οδόντες σε κάθε τροχό (Σχήμα 2.8). Αυτό σημαίνει ότι το μέγιστο φορτίο οδόντος αναπτύσσεται σε σημείο του διαστήματος $A'B'$ [14-15].

Είναι γνωστό ότι η θέση του ανώτερου σημείου μονής επαφής ενός τροχού εξαρτάται μόνο από τη γεωμετρία του και τον βαθμό επικάλυψης του ζευγαριού. Για την ακτίνα $r_{B'}$ (B' είναι το HPSTC) ισχύει [16]:

$$r_{B'} = \sqrt{r_{k1}^2 + (\varepsilon - 1)t_g - 2\sqrt{r_{k1}^2 - r_{g1}^2}} \quad (2.1)$$

όπου :

r_k = ακτίνα κεφαλής

r_g = ακτίνα βασικού κύκλου

t_g = βήμα οδοντώσεως στον βασικό κύκλο

ε = βαθμός επικάλυψης

Εφαρμόζοντας έτσι τη σχέση (1) μπορεί για κάθε οδόντα να βρεθεί το αντίστοιχο ανώτερο σημείο μονής επαφής.

3. ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

3.1. Εισαγωγή

Το σύνολο των απαραίτητων διαδικασιών για την ανάπτυξη ενός πλήρους μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων, δηλαδή η εισαγωγή της γεωμετρίας, η δημιουργία του πλέγματος, η επιβολή στηρίξεων και φόρτισης αποτελούν αυτό που συνοπτικά ονομάζεται μοντελοποίηση πεπερασμένων στοιχείων (finite-element modeling). Παραδοσιακά λογισμικά FEA (Finite Element Analysis) είχαν μόνο στοιχειώδεις λειτουργίες μοντελοποίησης, αλλά σήμερα τα περισσότερα είτε προσφέρουν προηγμένες δυνατότητες ή έχουν παρόμοιο interface με συστήματα CAD (μερικές φορές και τα δύο). Για παράδειγμα, το Solidworks 2011, στο οποίο σχεδιάστηκαν οι οδόντες των Σχημάτων 2.1-2.3, προσφέρει προηγμένες δυνατότητες μοντελοποίησης.

3.2. Στατική Ανάλυση Πεπερασμένων Στοιχείων στο Solidworks

Λόγω του πολύ μεγάλου αριθμού ηλεκτροστατικών αναλύσεων που χρειάστηκε να πραγματοποιηθούν για να εξαχθούν τα απαραίτητα συμπεράσματα στο Κεφάλαιο 5, αυτές έγιναν για έναν από τους οδόντες του τροχού με αριθμό οδόντων $Z = 20$ και για βαθμό επικάλυψης 1.2. Ωστόσο, η στατική ανάλυση εκτελείται για τον μετωπικό τροχό με $Z = 20$ αλλά χρησιμοποιούνται τρεις διαφορετικοί βαθμοί επικάλυψης (1.2, 1.5 και 1.8), ώστε να βρεθεί η συσχέτιση του βαθμού επικάλυψης με τη μέγιστη κύρια τάση στους οδόντες. Όπως έχει προαναφερθεί στην Παράγραφο 2.1, οι μετωπικοί τροχοί ευθείας οδοντώσεως έχουν, συνήθως, βαθμό επικάλυψης 1 έως 2, γι' αυτό και επιλέγονται, οι τρεις παραπάνω βαθμοί επικάλυψης. Επιλέγεται να πραγματοποιηθεί στατική ανάλυση, διότι το φαινόμενο είναι γραμμικό.

Δεδομένου ότι οι σχεδιασθέντες οδόντες θα είναι με ρωγμή (ώστε στη συνέχεια, εκατέρωθεν αυτής, να τοποθετηθούν τα ηλεκτρόδια), πρέπει να μελετηθεί η εντατική παραμορφωσιακή κατάσταση των οδόντων ώστε να βρεθεί η επικίνδυνη διατομή του ποδός και κατ' επέκταση το σημείο όπου η κύρια τάση σι λαμβάνει τη μέγιστη τιμή.

Αρχικά, εισάγεται η γεωμετρία των μετωπικών οδόντων στο Solidworks Simulation και καθορίζονται οι ιδιότητες του υλικού από το οποίο θα αποτελείται ο τροχός. Στην προκειμένη περίπτωση, το υλικό που θα χρησιμοποιήσουμε είναι χάλυβας με μέτρο ελαστικότητας $E = 210000 \text{ MPa}$ και Λόγο Poisson $\nu = 0,28$.

Το επόμενο στάδιο είναι η δημιουργία πλέγματος και κατανομής κόμβων. Όταν σε πλέγμα αποδίδονται κόμβοι, τότε αυτοί μετατρέπονται σε πεπερασμένα στοιχεία. Η γένεση πλέγματος είναι ένα σημαντικό στάδιο της μοντελοποίησης πεπερασμένων στοιχείων. Για τη διευκόλυνση αυτού του σταδίου, σήμερα όλα τα λογισμικά συστήματα προσφέρουν δυνατότητες αυτόματης γένεσης πλέγματος. Η τυπική προσέγγιση είναι να προσφέρουν αυτόματο πλέγμα τετραεδρικών στοιχείων για στερεή γεωμετρία και τετραπλευρικά ή τριγωνικά στοιχεία για επιφάνεια στον τρισδιάστατο χώρο. Το πλέγμα, στη συγκεκριμένη περίπτωση, δημιουργείται αυτόματα με τη μεγαλύτερη δυνατή πυκνότητα που προσφέρει στον χρήστη το λογισμικό Solidworks.

Έπειτα, θεωρώντας ότι ο οδόντας είναι πακτωμένος στον τροχό, εφαρμόζεται ένα ομοιόμορφα κατανεμημένο, μοναδιαίο φορτίο κάθετα στο ανώτερο σημείο μονής επαφής του και συνεπακόλουθα, πραγματοποιείται στατική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων για την επίπεδη παραμορφωσιακή κατάσταση (plane strain analysis) του εκάστοτε οδόντος. Η ανάλυση επιλέχθηκε να γίνει για την παραμορφωσιακή κατάσταση των οδόντων, διότι γενικά τα γρανάζια έχουν μεγάλο πάχος.

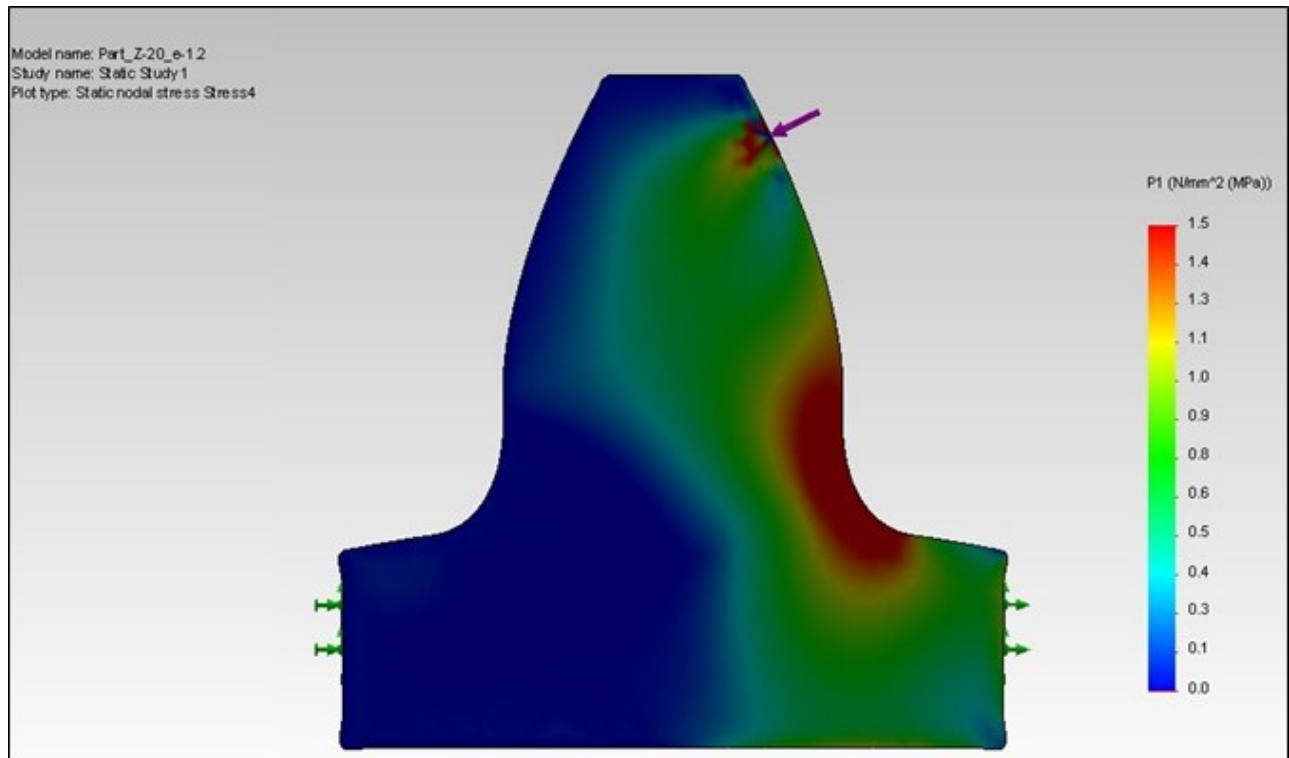
Τα Σχήματα 3.1-3.3 δείχνουν την κατανομή της κύριας τάσης σ₁. Ο βασικός λόγος για την επιλογή αυτή είναι το γεγονός ότι η ρωγμή στον πόδα του οδόντα ξεκινάει από το σημείο της μέγιστης κύριας τάσης σ₁.

3.2.1. Παρατηρήσεις

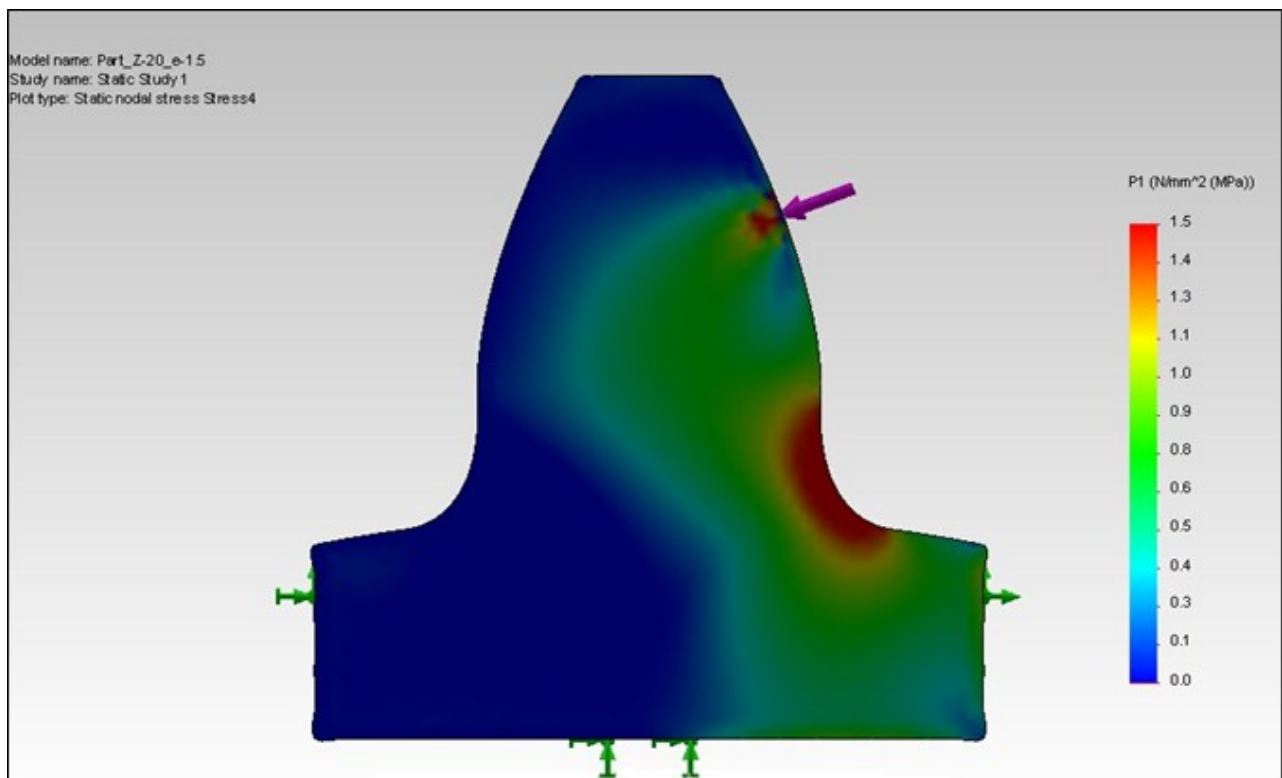
Γενικά, μέχρι σήμερα έχουν αναπτυχθεί πολλές θεωρητικές μέθοδοι υπολογισμού των τάσεων όπως οι αναλυτικές και οι υπολογιστικές μέθοδοι. Οι θεωρητικές μέθοδοι, οι οποίες βασίζονται στις κλειστές αναλυτικές λύσεις, έχουν αρκετές παραδοχές και έτσι πολλές φορές τα αποτελέσματα απέχουν πολύ των πραγματικών καταστάσεων μιας κατασκευής. Ωστόσο, για τη συγκεκριμένη περίπτωση, όπου εξετάζεται η επίπεδη παραμορφωσιακή κατάσταση του οδόντος, τα αποτελέσματα της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων είναι αρκετά ικανοποιητικά.

Όπως όταν αναμενόμενο, η μέγιστη κύρια τάση εμφανίζεται στον πόδα του οδόντος ενώ η χρωματική κλίμακα βοηθάει να κατανοηθεί η κατανομή της κύριας τάσης σε όλο τον οδόντα.

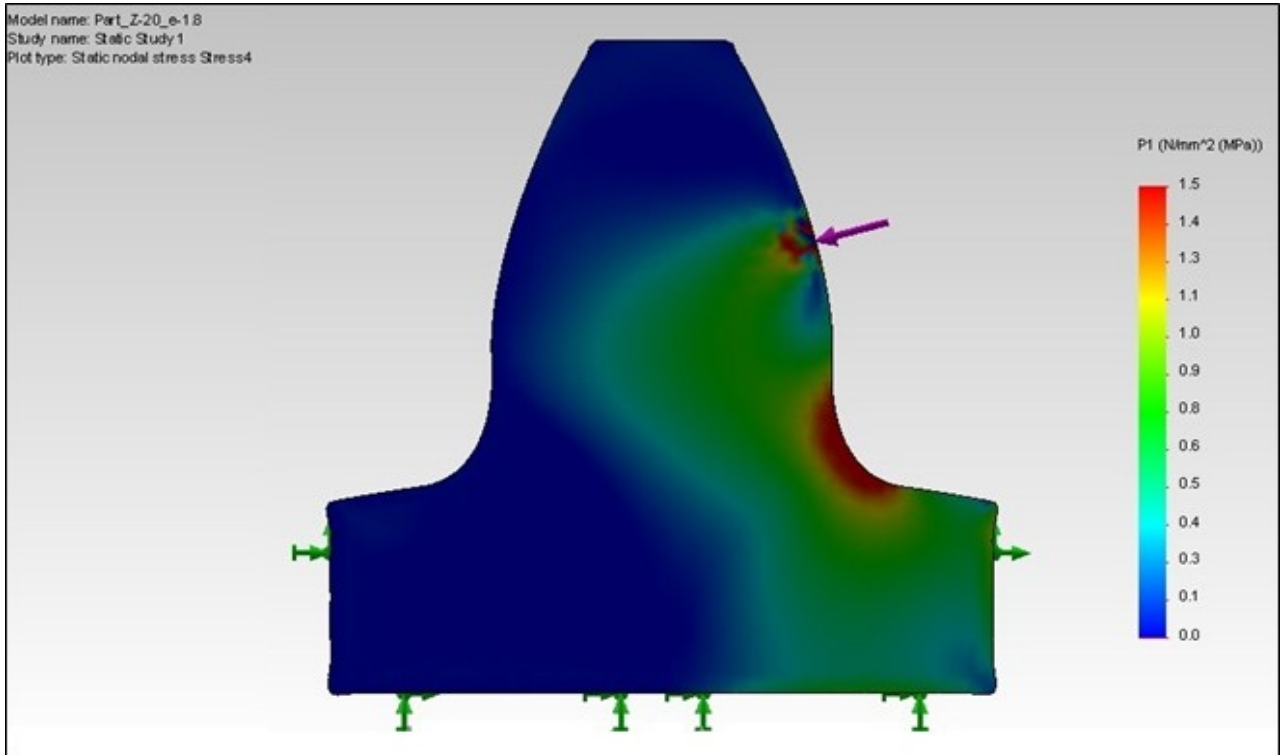
Από την παραπάνω ανάλυση απορρέει ότι όσο αυξάνεται ο βαθμός επικάλυψης, η κύρια τάση μειώνεται αντίστοιχα στην επικίνδυνη - για την έναρξη της ρωγμής- διατομή του ποδός του οδόντος.



Σχήμα 3.1: Προσομίωση στο Solidworks , Κύρια τάση σ_1 , μετωπικός οδόντας: $Z = 20$, $\varepsilon = 1.2$.



Σχήμα 3.2: Προσομίωση στο Solidworks , Κύρια τάση σ_1 , μετωπικός οδόντας: $Z = 20$, $\varepsilon = 1.5$.



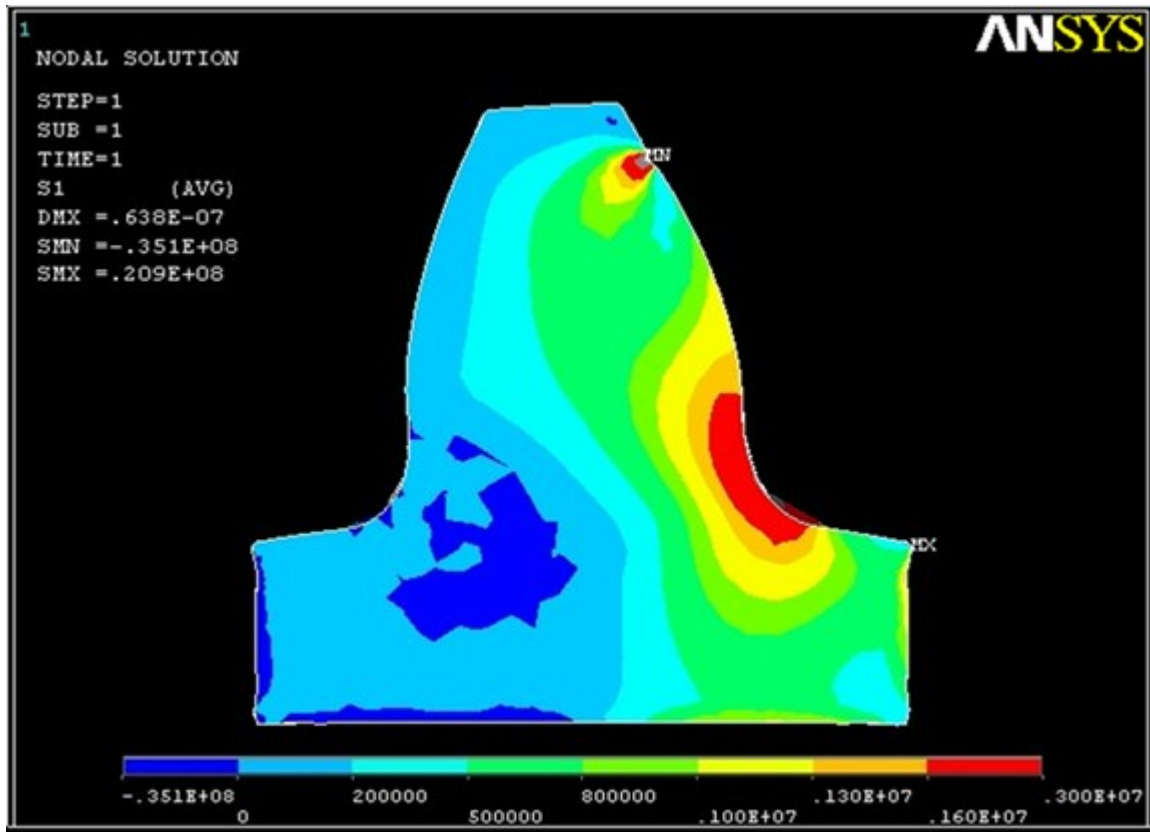
Σχήμα 3.3: Προσομοίωση στο Solidworks , Κύρια τάση σ_1 , μετωπικός οδόντας: $Z = 20$, $\varepsilon = 1.8$.

3.3. Στατική Ανάλυση Πεπερασμένων Στοιχείων στο Ansys

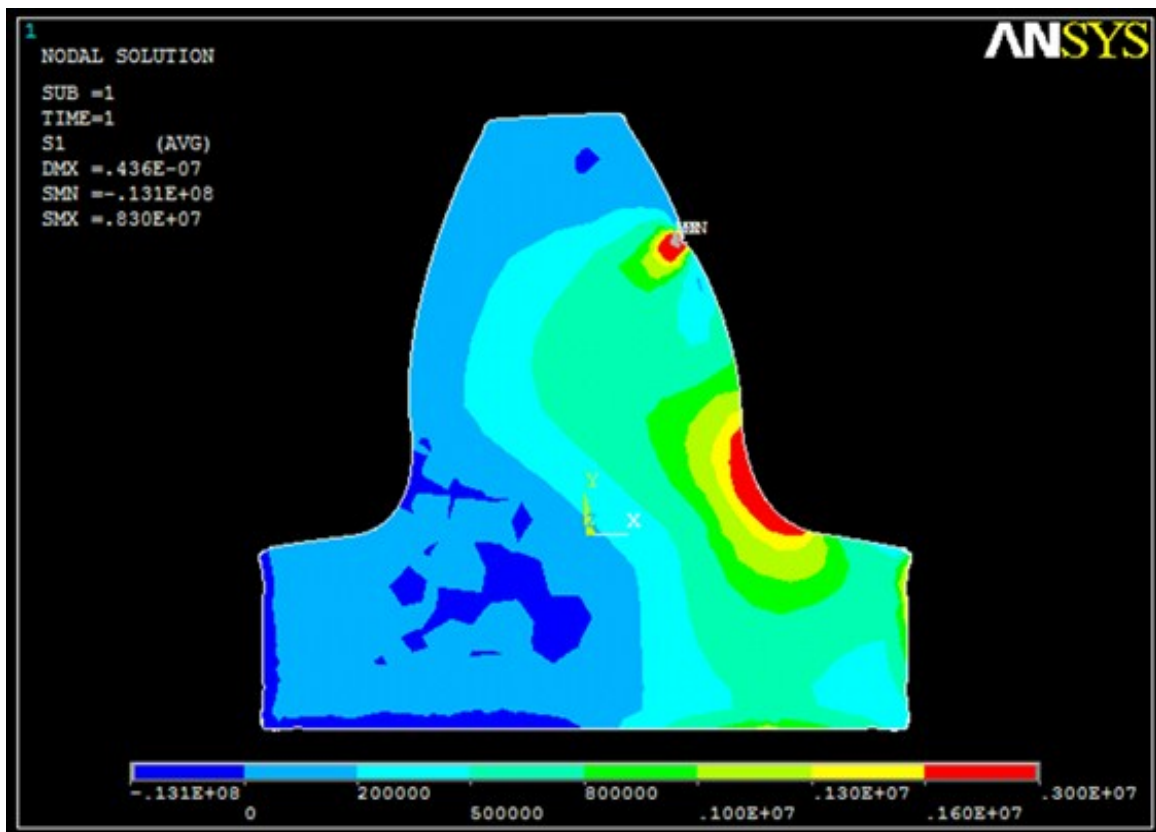
Η ίδια στατική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων για την επίπεδη παραμορφωσιακή κατάσταση του εκάστοτε οδόντος πραγματοποιείται και στο λογισμικό Ansys Multiphysics [17].

Για τον ίδιο λόγο που αναφέρθηκε παραπάνω, δηλαδή ότι η ρωγμή στον πόδα του οδόντος ξεκινάει από το σημείο της μέγιστης κύριας τάσης σ_1 , τα Σχήματα 3.4-3.6 δείχνουν την κατανομή της κύριας τάσης σ_1 .

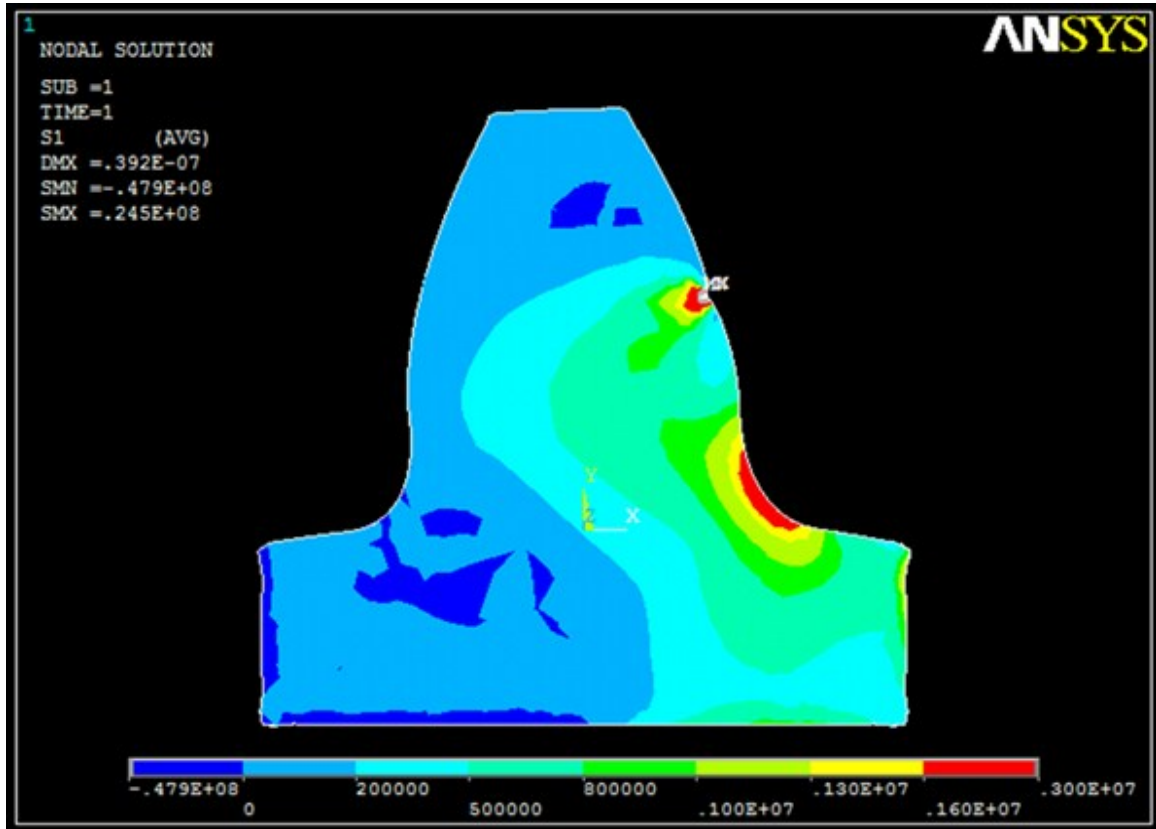
Συγκρίνοντας τα διαγράμματα που προέκυψαν από το Solidworks με τα αντίστοιχα του Ansys, παρατηρείται ότι είναι πανομοιότυπα.



Σχήμα 3.4: Προσομείωση στο Ansys, Κύρια τάση s_1 , μετωπικός οδόντας : $Z = 20$, $\epsilon = 1.2$.



Σχήμα 3.5: Προσομείωση στο Ansys, Κύρια τάση s_1 , μετωπικός οδόντας : $Z = 20$, $\epsilon = 1.5$.



Σχήμα 3.6: Προσομείωση στο Ansys, Κύρια τάση σ_1 , μετωπικός οδόντας : $Z = 20$, $\epsilon = 1.8$.

4. ΕΝΑΡΞΗ ΚΑΙ ΔΙΑΔΟΣΗ ΤΗΣ ΡΩΓΜΗΣ

4.1. Έναρξη ρωγμής

Είναι γνωστό από τη Μηχανική του Παραμορφώσιμου Σώματος [18] ότι στο άκρο της ρωγμής συγκεντρώνονται τάσεις που θεωρητικά έχουν άπειρη τιμή. Τα σημεία αυτά λέγονται ιδιόμορφα σημεία. Σ' αυτά τα σημεία επικεντρώνεται το ενδιαφέρον του μηχανικού, διότι είναι γνωστό ότι η αστοχία στοιχείου της κατασκευής προέρχονται από την ύπαρξη τέτοιου είδους ιδιόμορφων σημείων. Ο υπολογισμός των τάσεων σε ιδιόμορφα σημεία γίνεται με θεωρητικές μεθόδους όπως οι υπολογιστικές μέθοδοι, πεπερασμένα στοιχεία, ολοκληρωτικές εξισώσεις και αναλυτικές συναρτήσεις. Πειραματικά, ο υπολογισμός των τάσεων γίνεται με οπτικές μεθόδους (π.χ. οπτικός έλεγχος με μικροσκόπιο, οπτικές μέθοδοι με laser κ.ά.). Ο υπολογισμός του εντατικού πεδίου μπορεί να γίνει είτε θεωρητικά είτε πειραματικά.

Η ρωγμή ξεκινάει στο σημείο όπου εμφανίζεται η μέγιστη κύρια τάση σ_1 . Αυτό συμβαίνει, διότι η σ_1 είναι εφελκυστική και συνεπώς συμβάλει στη δημιουργία της ρωγμής (Mode I). Αντίθετα, η σ_2 είναι θλιπτική και γι' αυτό το λόγο δεν διαδραματίζει κάποιο ρόλο στη δημιουργία της ρωγμής. Ο κόμβος -και κατ' επέκταση οι συντεταγμένες του σημείου- στον οποίο η κύρια τάση γίνεται μέγιστη βρέθηκε στο λογισμικό Ansys μέσω της ταξινόμησης της κύριας τάσης σε κάθε κόμβο (nodal stress listing).

Στο Σχ. 4.1 απεικονίζονται οι κόμβοι (nodes) σε ένα τμήμα του οδόντα, δίνοντας έμφαση στην επικίνδυνη περιοχή πόδα του οδόντος. Πιο συγκεκριμένα, η εστίαση της περιοχής στο άσπρο ορθογώνιο διάγραμμα, ακολουθεί στο Σχ. 4.2.

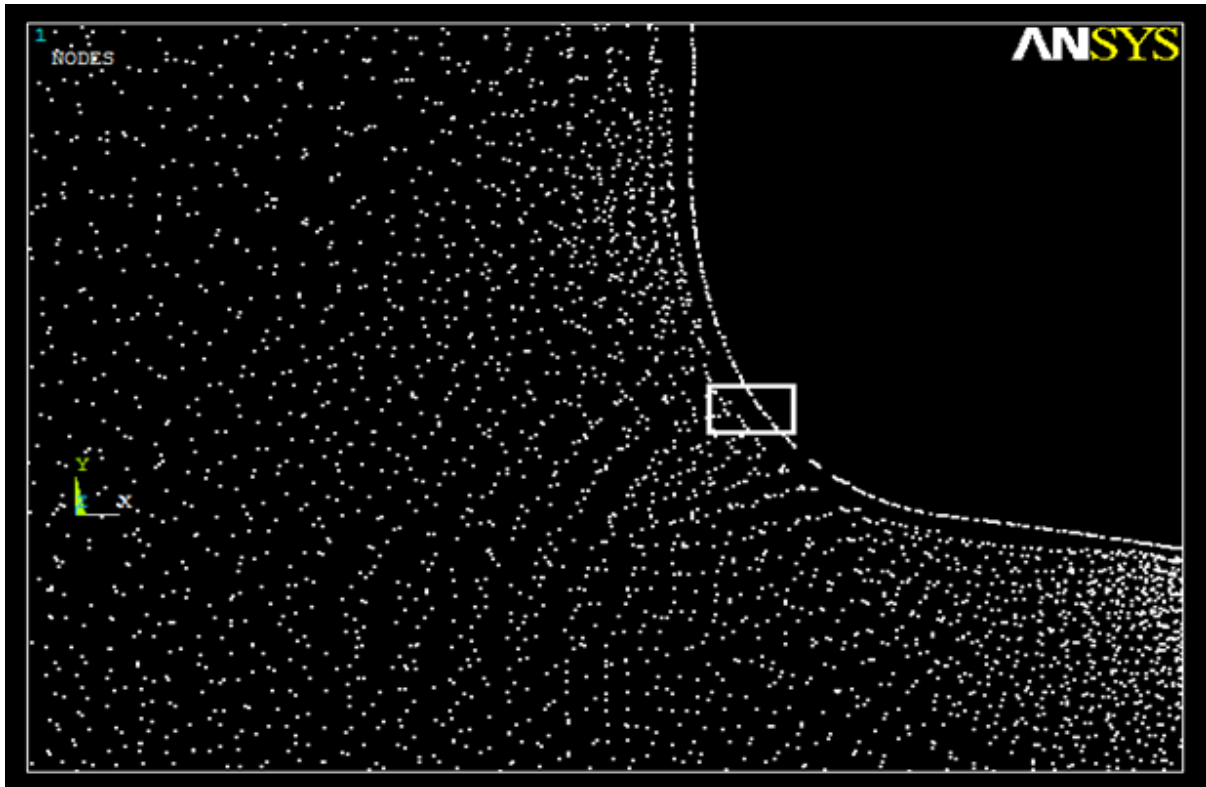
Με το βέλος, φαίνεται ο κόμβος στον οποίο εντόπισε το πρόγραμμα ότι η κύρια τάση σ_1 μεγιστοποιείται. Όπως φαίνεται, η ρωγμή θα ξεκινήσει από τον κόμβο με αύξοντα αριθμό 3395.

4.2. Ίση Μέγιστη Διατμητική Τάση και Τροχιά της Ρωγμής

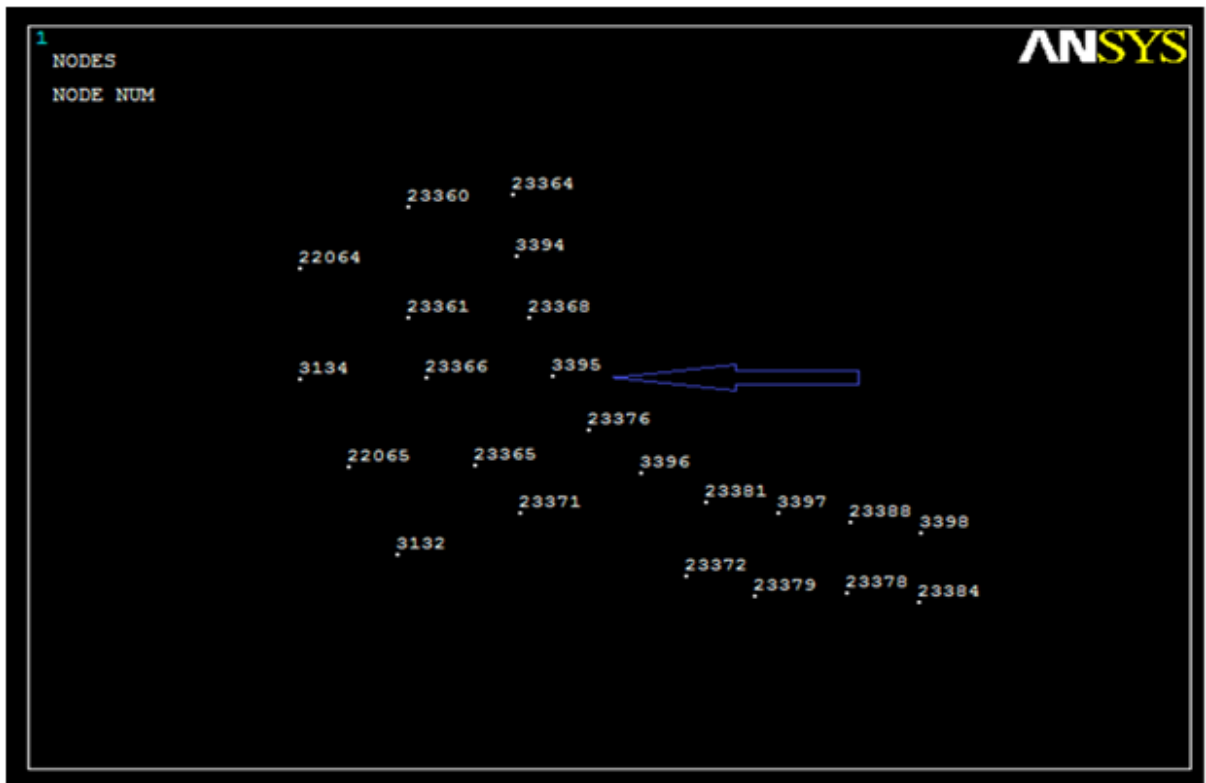
Στη συνέχεια, πρέπει να βρεθεί το πώς διαδίδεται η ρωγμή. Με βάση διατμητικά κριτήρια τύπου Tresca και von Mises είναι γνωστό ότι, για μικρές ρωγμές, η ρωγμή διαδίδεται κάθετα στις γραμμές της ίσης μέγιστης διατμητικής τάσης.

Οι γραμμές της ίσης μέγιστης διατμητικής τάσης βρέθηκαν μέσω της στατικής ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων που εκτελέστηκε στο Κεφάλαιο 3 τόσο στο Solidworks όσο και στο Ansys Multiphysics και παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.3, 4.4. Πιο συγκεκριμένα, στο Σχ. 4.3 απεικονίζονται οι γραμμές της ίσης μέγιστης διατμητικής τάσης που προέκυψαν από την στατική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων στο Ansys.

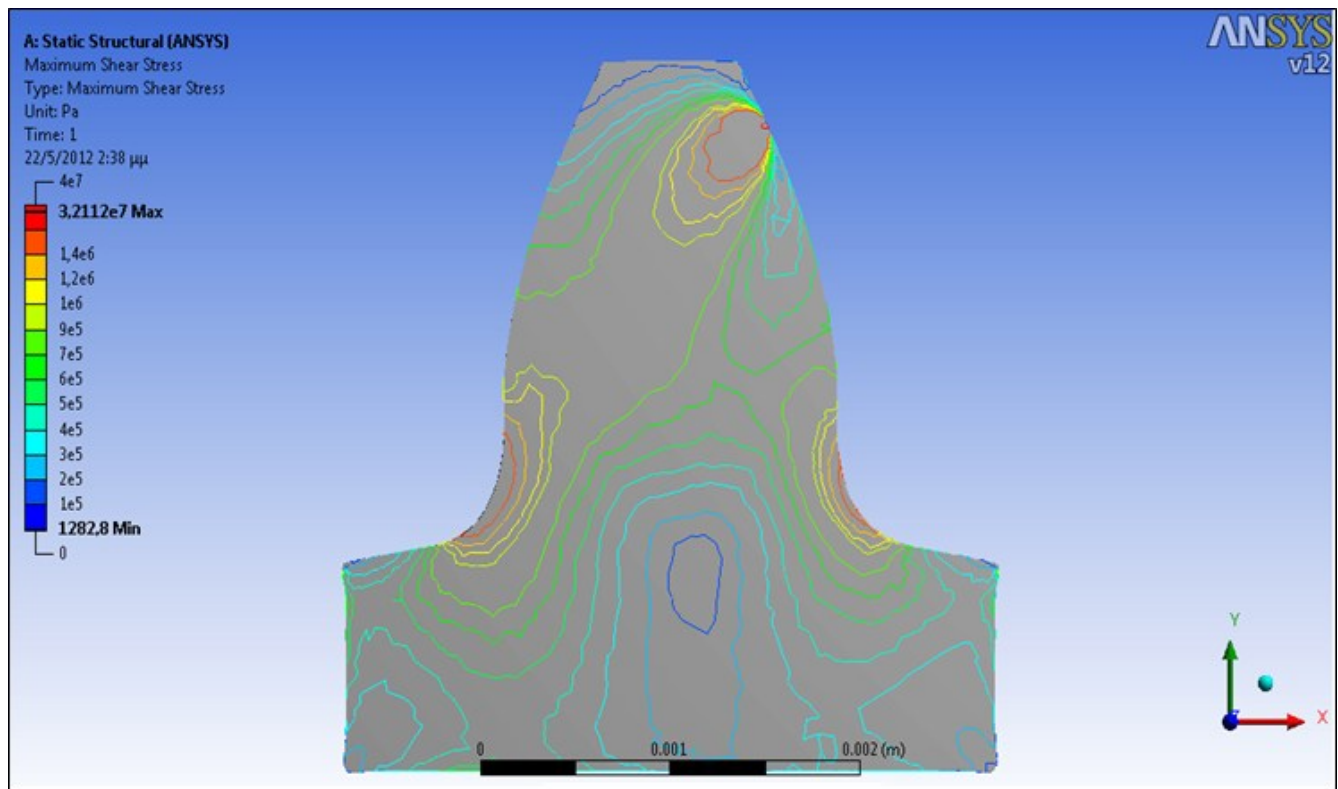
Με βάση το Σχ. 4.3 και με οδηγό το κριτήριο που αναφέρθηκε στην αρχή της Παραγράφου 4.2, σχεδιάστηκε στο λογισμικό Solidworks, με splines, η τροχιά (crack path) που θα ακολουθήσει η ρωγμή μέχρι τον ουδέτερο άξονα. Μετά από το σημείο αυτό δεν μελετάται η τροχιά της ρωγμής, διότι ο οδόντας θα έχει αστοχήσει. Η τροχιά φαίνεται στο Σχ. 4.4.



Σχήμα 4.1: Ansys, Κόμβοι (nodes) στον πόδα του οδόντος.



Σχήμα 4.2: Ansys, Κόμβοι (Nodes) - Εστίαση στην επικίνδυνη περιοχή του οδόντος.

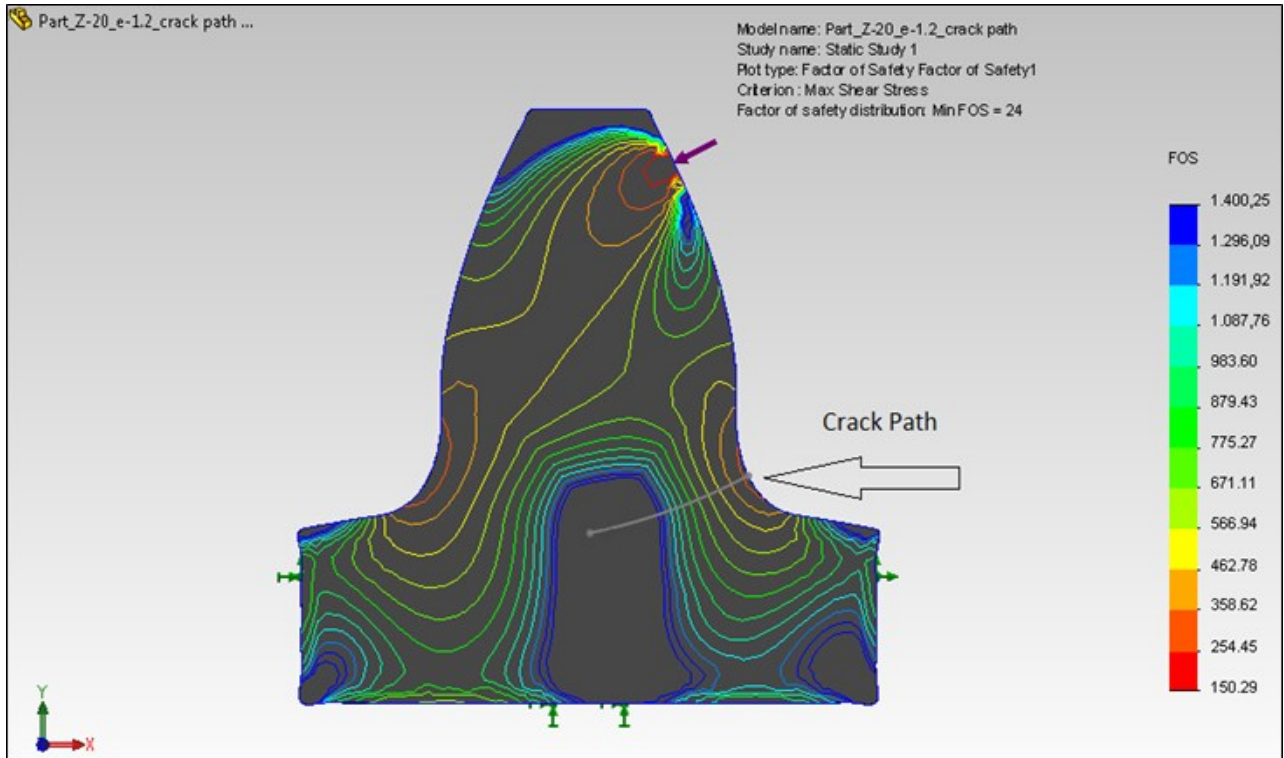


Σχήμα 4.3: Ansys Multiphysics, Γραμμές ίσης μέγιστης διατμητικής τάσης.

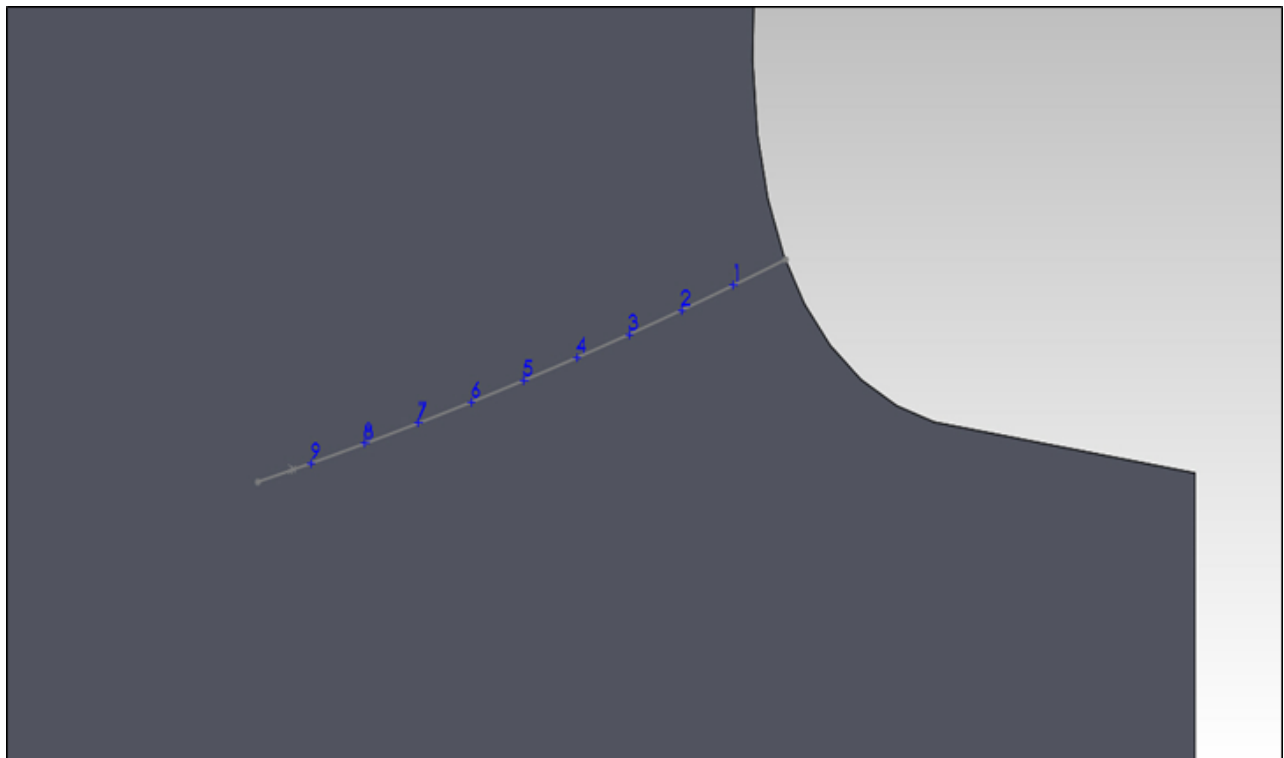
4.3. Διάδοση της Ρωγμής

Η τροχιά της ρωγμής αδιαστατοποιείται ως προς τον ουδέτερο άξονα με 9 σημεία, με το πρώτο να είναι στο 10% της διαδρομής της ρωγμής, το 2ο σημείο στο 20% κ.ο.κ. Τα σημεία αυτά φαίνονται στο Σχ. 4.5. Με βάση την προώθηση της ρωγμής (Σχ. 4.4) και την αδιαστατοποίηση, σχεδιάζονται στο Solidworks δέκα ρωγμές στον ίδιο μετωπικό οδόντα ($Z=20$, $\epsilon=1.2$), που κάθε μία είναι συνέχεια της προηγούμενης, δηλαδή η τελευταία ρωγμή φτάνει στον ουδέτερο άξονα. Πιο συγκεκριμένα, κάθε ρωγμή χαρακτηρίζεται από ένα ποσοστό (που αναφέρεται στον υπότιτλο των παρακάτω Σχημάτων 4.6-4.15), το οποίο δηλώνει το πηλίκο του μήκους κάθε ρωγμής ως προς τη συνολική απόσταση του σημείου έναρξης της ρωγμής από τον ουδέτερο άξονα.

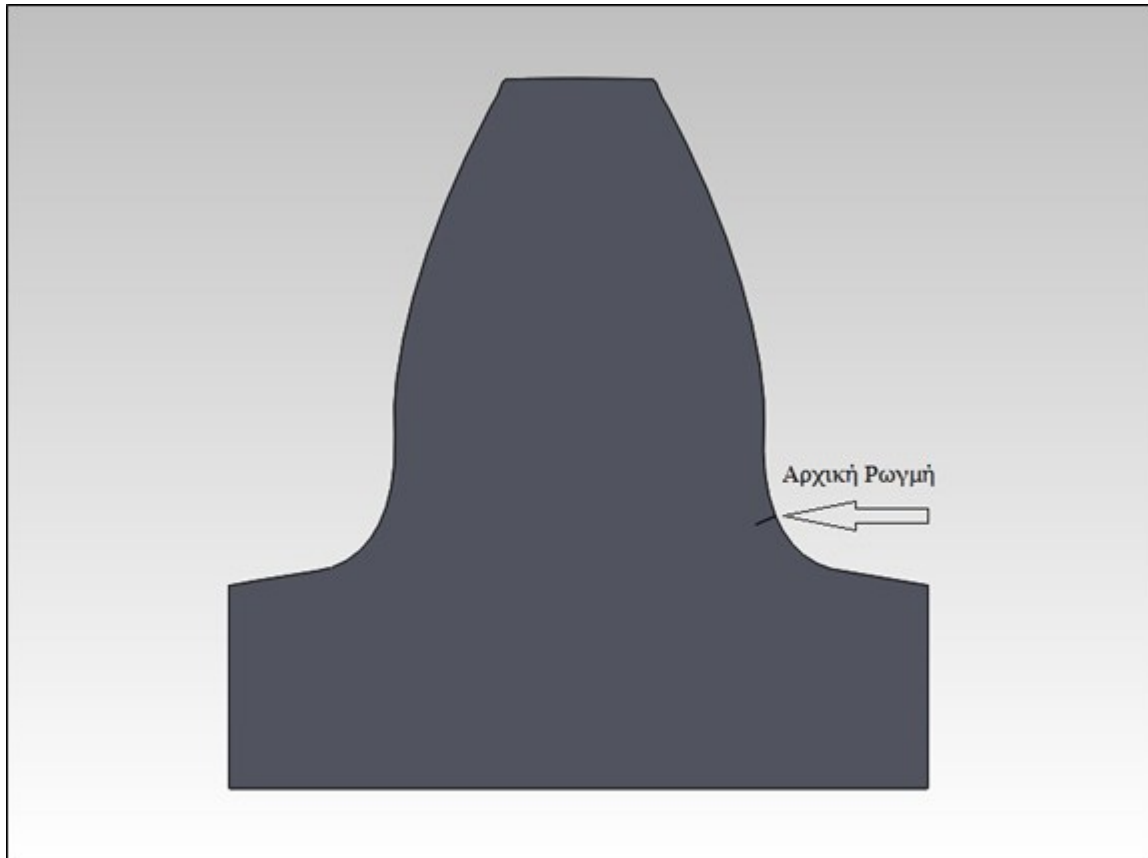
Στα Σχ. 4.6-4.15 απεικονίζονται οι οδόντες με τις ρωγμές που σχεδιάσθηκαν, πάνω στους οποίους θα λάβει χώρα η ηλεκτροστατική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων στο Κεφάλαιο 5.



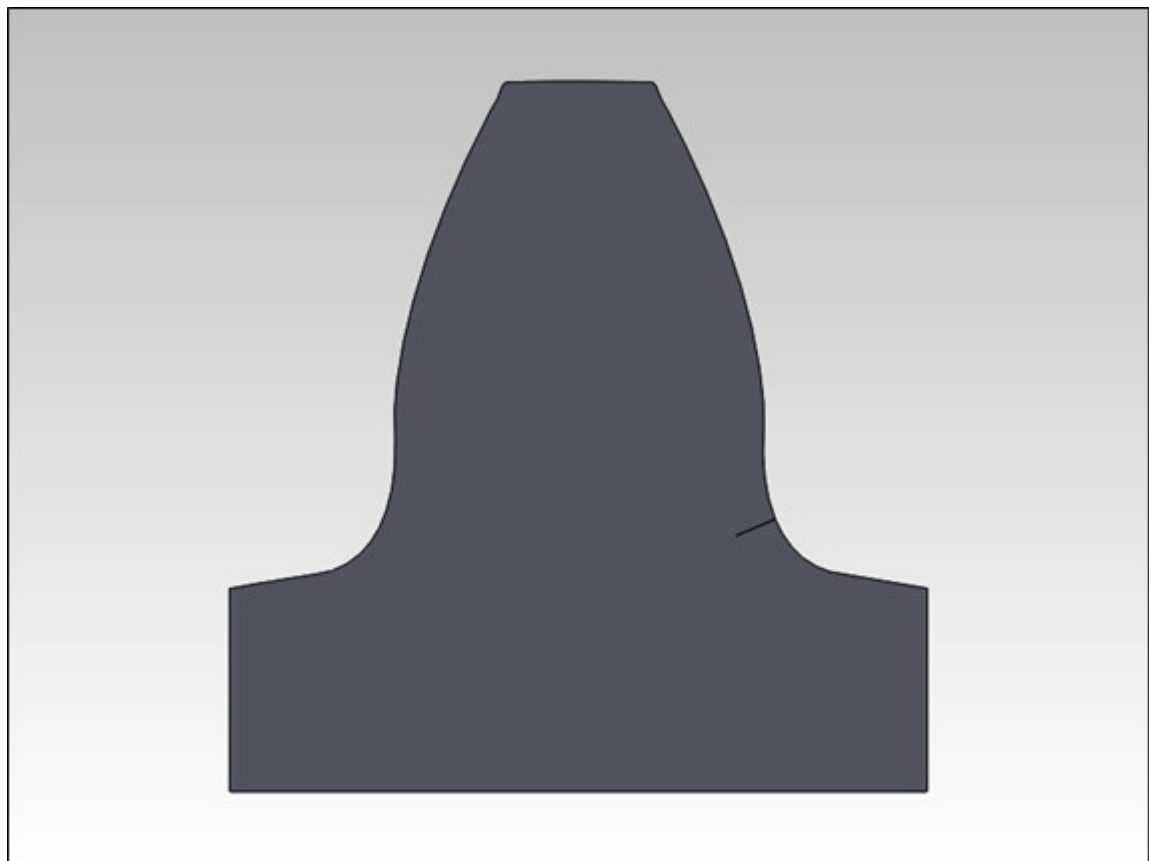
Σχήμα 4.4: Solidworks, Factor of Safety, Μέγιστη Διατμητική Τάση .



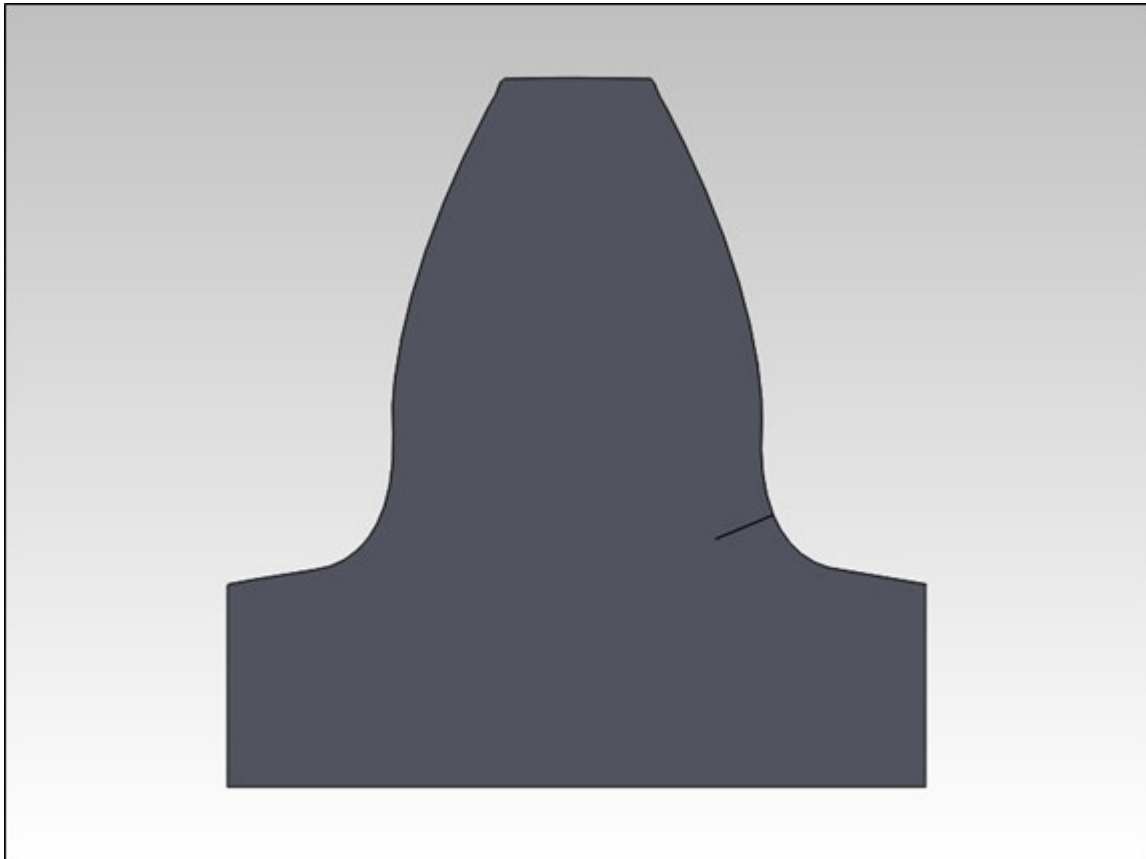
Σχήμα 4.5: Αδιαστατοποίηση της τροχιάς της ρωγμής ως προς τον ουδέτερο άξονα.



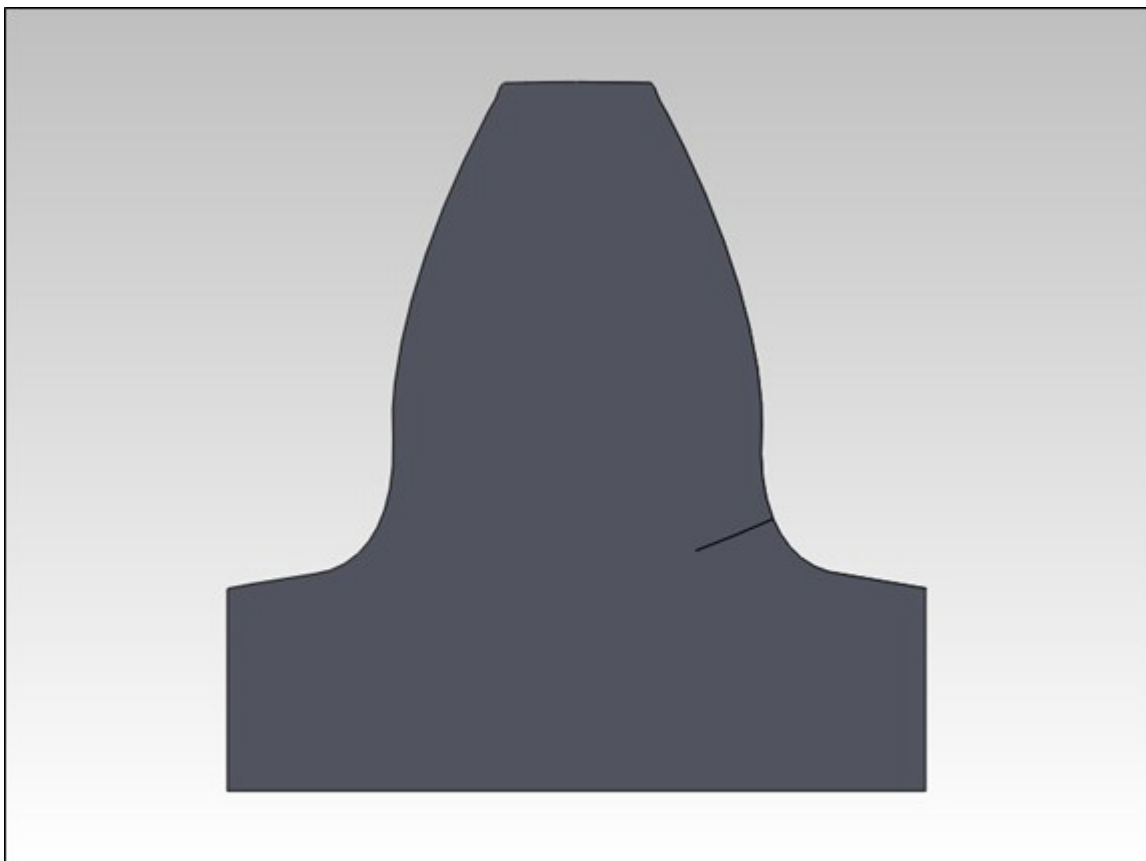
Σχήμα 4.6: Αρχική ρωγμή, 10% επί του ουδέτερου άξονα.



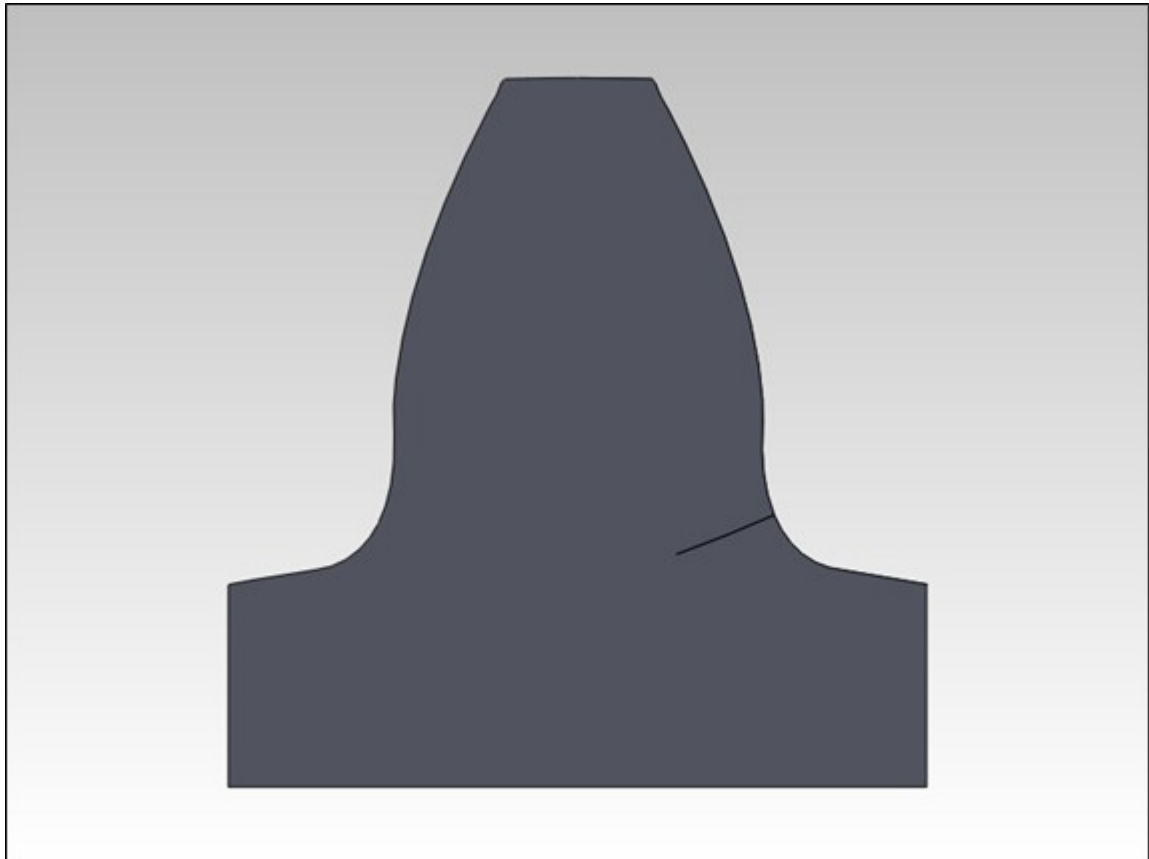
Σχήμα 4.7: Ρωγμή, 20% επί του ουδέτερου άξονα.



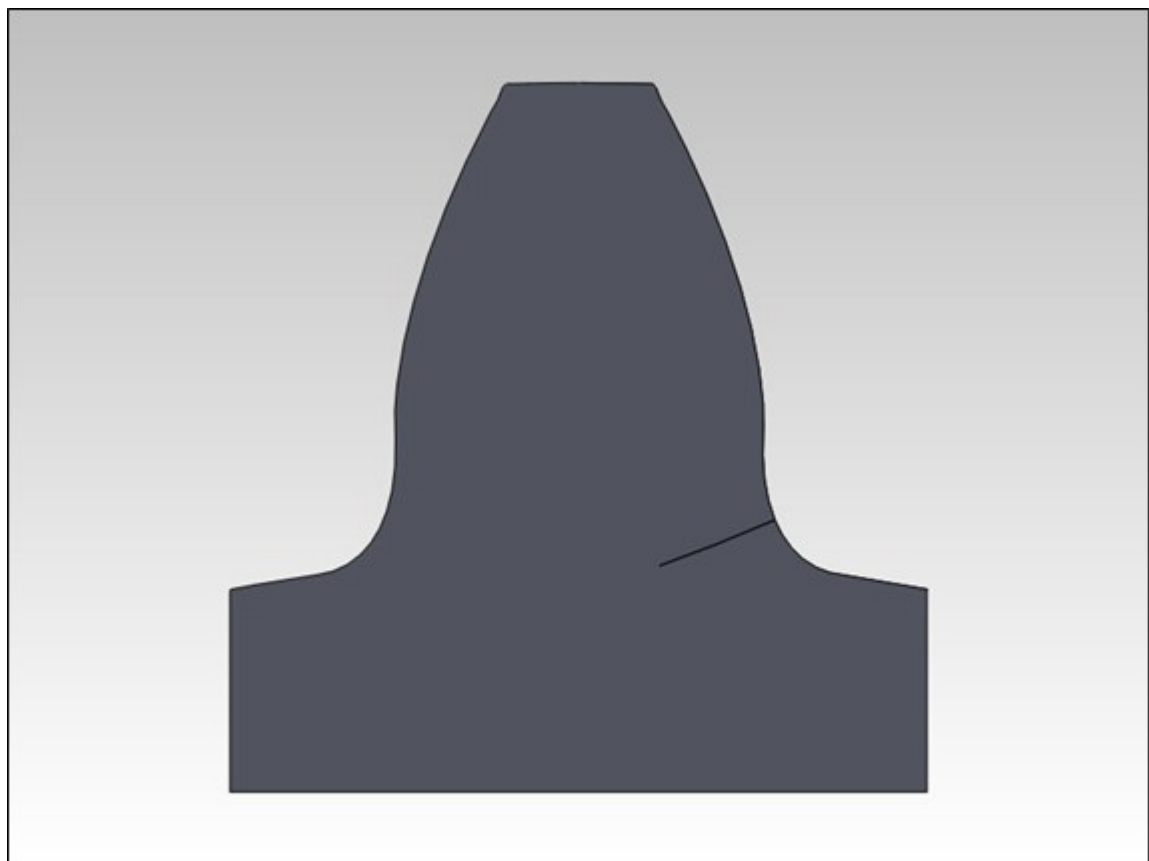
Σχήμα 4.8: Ρωγμή, 30% επί του ουδέτερου άξονα.



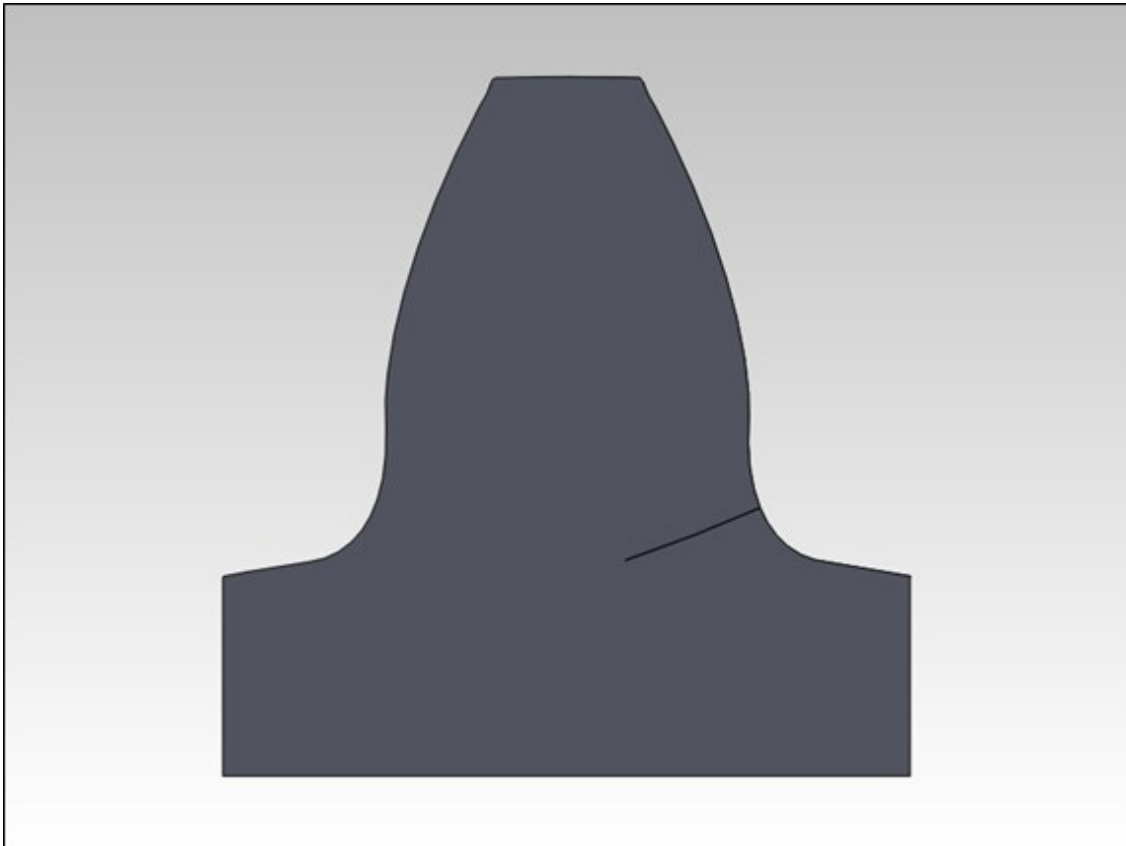
Σχήμα 4.9: Ρωγμή, 40% επί του ουδέτερου άξονα.



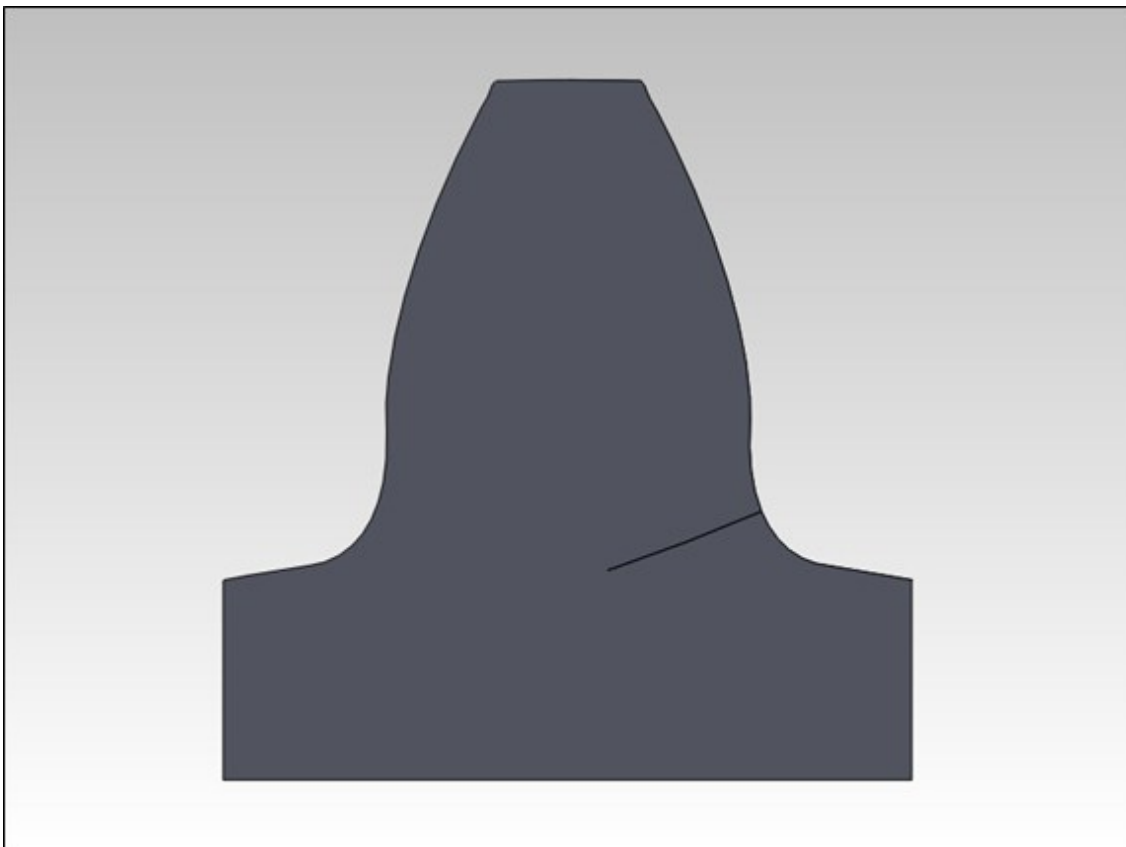
Σχήμα 4.10: Ρωγμή, 50% επί του ουδέτερου άξονα.



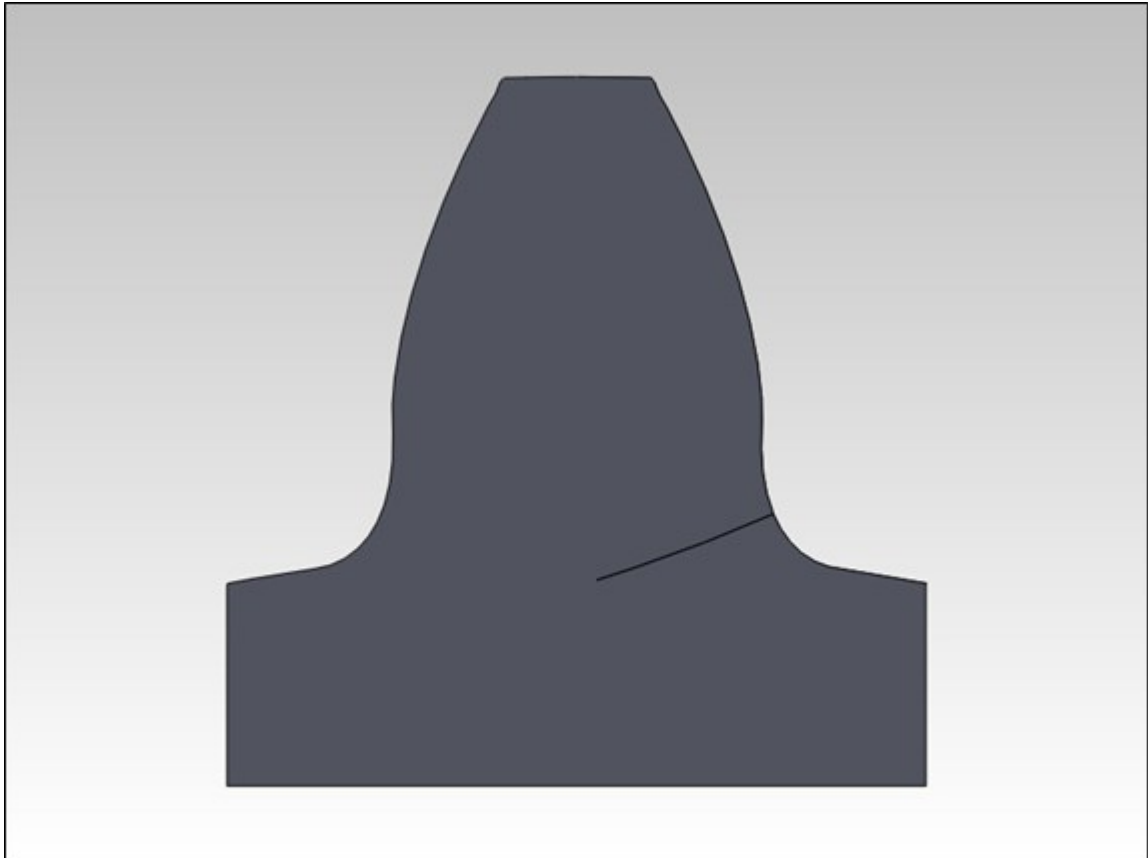
Σχήμα 4.11: Ρωγμή, 60% επί του ουδέτερου άξονα.



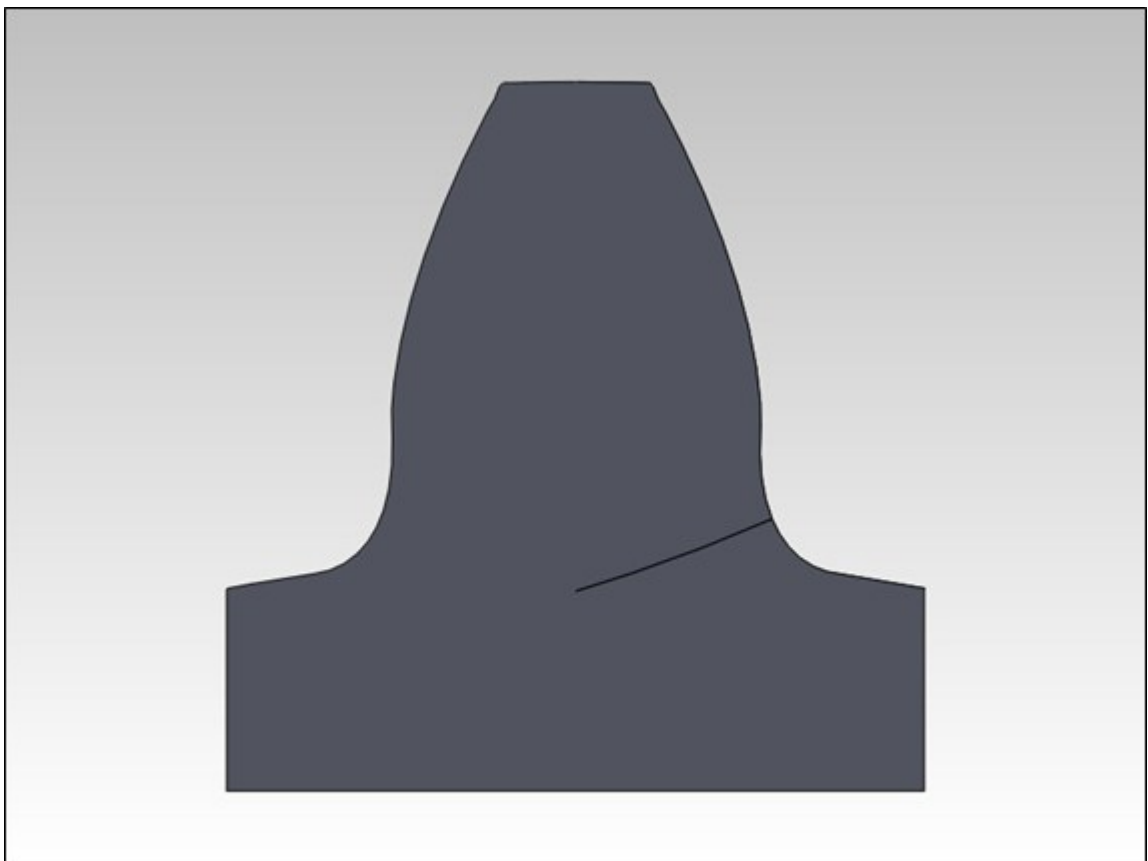
Σχήμα 4.12: Ρωγμή, 70% επί του ουδέτερου άξονα.



Σχήμα 4.13: Ρωγμή, 80% επί του ουδέτερου άξονα.



Σχήμα 4.14: Ρωγμή, 90% επί του ουδέτερου άξονα.



Σχήμα 4.15: Τελική ρωγμή, 100% επί του ουδέτερου άξονα.

5. ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΤΩΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ

5.1. Τοποθέτηση Ηλεκτροδίων

Η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων πραγματοποιήθηκε στο Ansys Multiphysics v. 12 [17] για τον μετωπικό οδόντα ($Z=20$, $\epsilon=1.2$) με τις ρωγμές που έχουν ήδη σχεδιασθεί (Σχ.) και για τον οδόντα χωρίς ρωγμή, δηλαδή για συνολικά έντεκα δοκίμια.

Για κάθε ανάλυση, χρησιμοποιούνται δύο ηλεκτρόδια για την εισαγωγή του συνεχούς ρεύματος και δύο ηλεκτρόδια για την μέτρηση του δυναμικού, που όμως και τα τέσσερα βρίσκονται στην ίδια, αδιαστατοποιημένη θέση ως προς τον ουδέτερο άξονα.

Στην επιφάνεια των δοκιμίων τοποθετούνται οκτώ ηλεκτρόδια (4 ζεύγη) εκατέρωθεν της ρωγμής, όπως φαίνεται στο Σχ. 5.1. Εισάγεται συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα σταθερής έντασης και η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων πραγματοποιείται κάθε φορά μεταξύ ενός εκ των τεσσάρων ζευγαριών ηλεκτροδίων (Ηλεκτρόδια 1-2, 3-4, 5- 6 και 7-8). Αντίστοιχα, κάθε φορά μετράται η διαφορά δυναμικού για το αντίστοιχο ζεύγος

ηλεκτροδίων (Θέσεις A-B, C-D, E-F και G-H). Η ακριβής θέση κάθε ζεύγους ηλεκτροδίων, είναι αδιαστατοποιημένη ως προς τον ουδέτερο άξονα του οδόντος με τον ίδιο τρόπο που είναι αδιαστατοποιημένο και το μήκος της κάθε ρωγμής (Παράγραφος 4.3), δηλαδή τα ζευγάρια 1-2 και A-B είναι τοποθετημένα στο 10% επί της συνολικής απόστασης ως τον ουδέτερο άξονα, τα ζευγάρια 3-4 και C-D στο 20% της αντίστοιχης απόστασης κ.ο.κ.

Για την εκτέλεση των μετρήσεων, ένα συνεχές ρεύμα I_{12} περνάει μέσω των ηλεκτροδίων 1-2 δημιουργώντας μια κατανομή ηλεκτρικού δυναμικού στην επιφάνεια της περιοχής μέτρησης του οδόντος. Η πτώση δυναμικού μετράται συνεχώς μεταξύ των A και B καθώς η ρωγμή διαδίδεται.

Δεδομένου ότι το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για τους οδόντες είναι χάλυβας, από πίνακες είναι γνωστό ότι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση για το υλικό αυτό είναι $\rho = 1.43 \times 10^{-7} \Omega\text{m}$ στους 20 °C. Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση ορίζεται ως το πηλίκο της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου προς την πυκνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος που το δημιουργεί, δηλαδή :

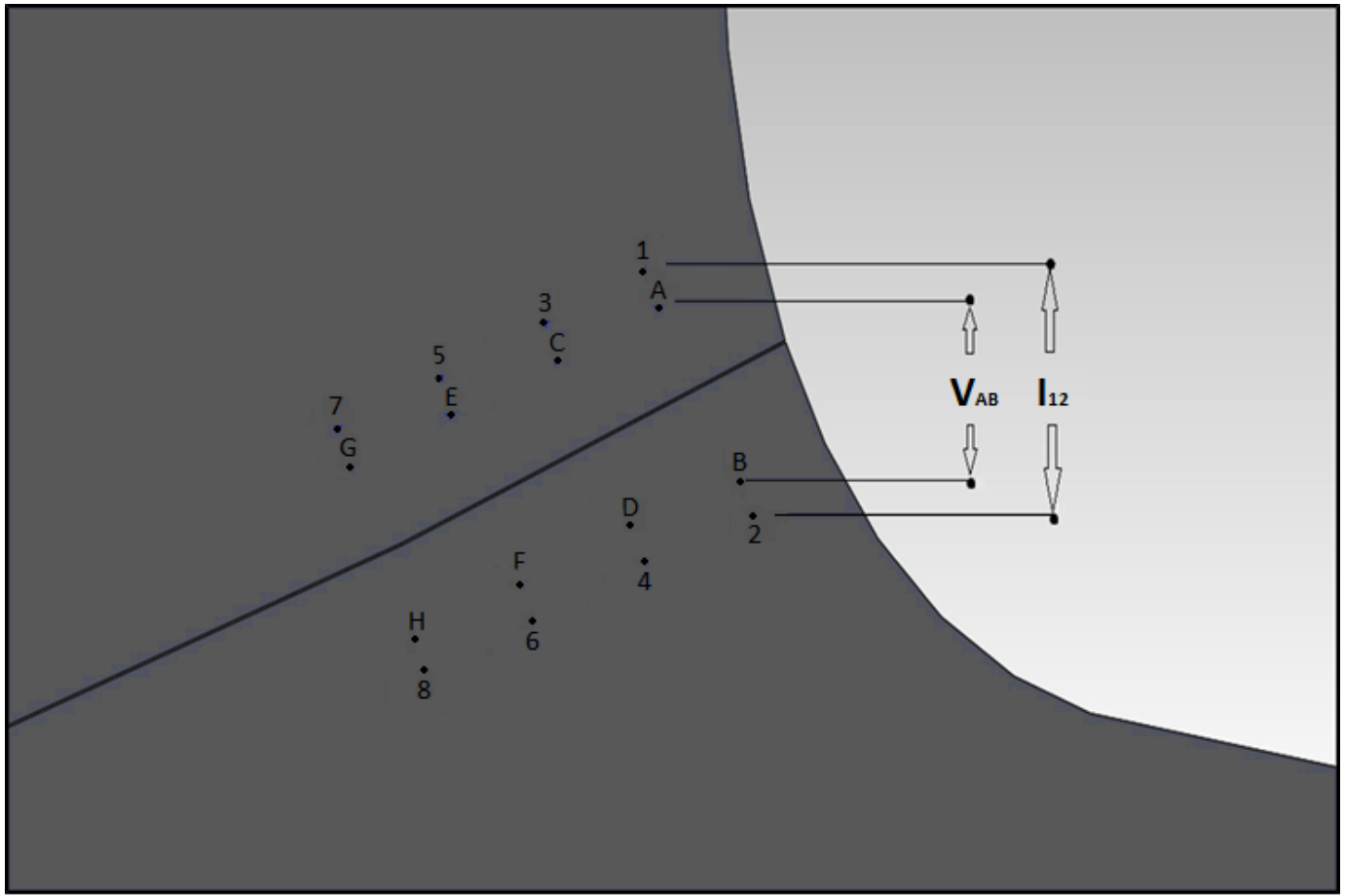
$$\rho = \frac{E}{J} \quad (5.1)$$

όπου:

ρ είναι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση (μετρούμενη σε Ωm)

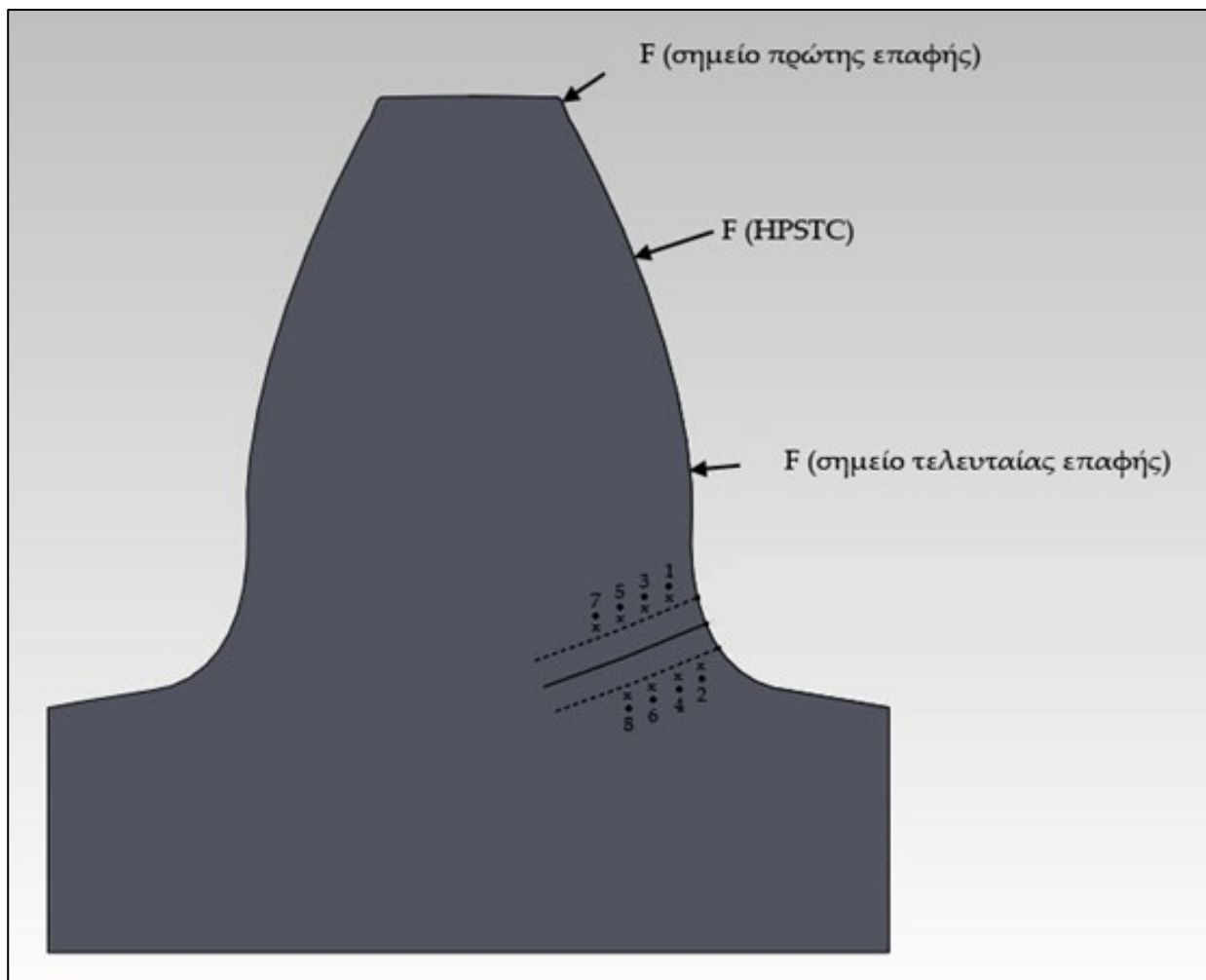
E είναι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου (Vm^{-1})

J είναι η πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος (Am^{-2})



Σχήμα 5.1 : Ζεύγη Ηλεκτροδίων, εστίαση στον πόδα του οδόντος.

Στις Παραγράφους 3.2 και 3.3 πραγματοποιήθηκε στατική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων εφαρμόζοντας ένα ομοιόμορφα κατανομημένο μοναδιαίο φορτίο κάθετα στο ανώτερο σημείο μονής επαφής και στη συνέχεια, εντοπίστηκε το σημείο της μέγιστης κύριας τάσης σ_1 και κατ' επέκταση το σημείο έναρξης της ρωγμής. Ωστόσο, αυτό το σημείο, απλά, συγκεντρώνει τις περισσότερες πιθανότητες να ξεκινήσει η ρωγμή (από αυτό). Συνεπώς, για λόγους πληρότητας πραγματοποιείται η ίδια ανάλυση και στο σημείο πρώτης επαφής αλλά και στο σημείο τελευταίας επαφής του οδόντος και έτσι, εντοπίζονται τα αντίστοιχα σημεία με την μέγιστη κύρια τάση σ_1 , από τα οποία είναι, επίσης, πιθανό να ξεκινήσει η ρωγμή. Στο Σχ. 5.2, με διακεκομμένες γραμμές είναι οι υποθετικές ρωγμές που έχουν ξεκινήσει από τα σημεία με την μέγιστη κύρια τάση σ_1 (του σημείου πρώτης και του σημείου τελευταίας επαφής αντίστοιχα).



Σχήμα 5.2 : Ζώνη μέσα στην οποία είναι πιθανό να ξεκινήσει η ρωγμή.

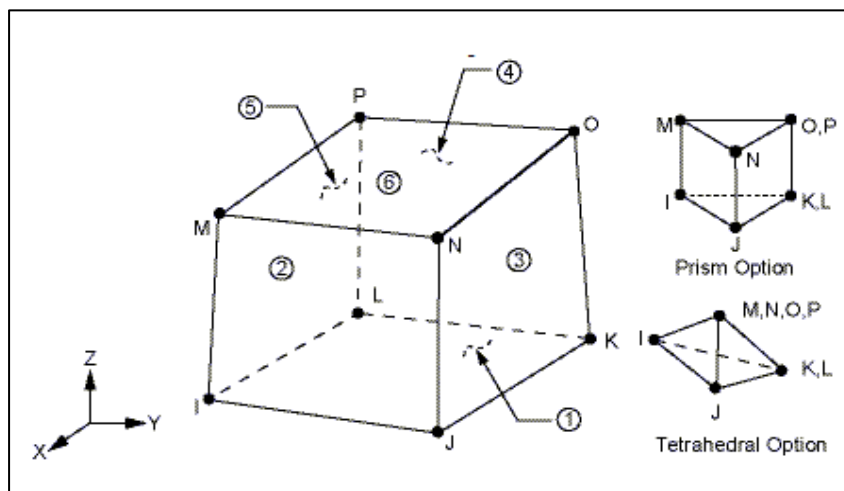
Ανάμεσα απ' αυτές τις διακεκομμένες γραμμές-υποθετικές ρωγμές, δημιουργήθηκε μια ζώνη μέσα στην οποία μπορεί, θεωρητικά, να ξεκινήσει οπουδήποτε η αρχική ρωγμή. Συνεπώς, για χάρη επιστημονικής πληρότητας, τα ζεύγη των ηλεκτροδίων (που έχουν σχεδιασθεί στο Σχ. 5.1) τοποθετούνται έξω απ' αυτή τη ζώνη.

Σκοπός των αναλύσεων είναι σε πρώτη φάση να βρεθεί ποια είναι η βέλτιστη θέση τοποθέτησης των ηλεκτροδίων ως προς τη συνολική απόσταση του σημείου έναρξης της ρωγμής από τον ουδέτερο άξονα και σε δεύτερη φάση ποια είναι η βέλτιστη απόσταση που πρέπει να έχουν μεταξύ τους τα ηλεκτρόδια.

5.2. Ηλεκτροστατική Ανάλυση Πεπερασμένων Στοιχείων στο Ansys

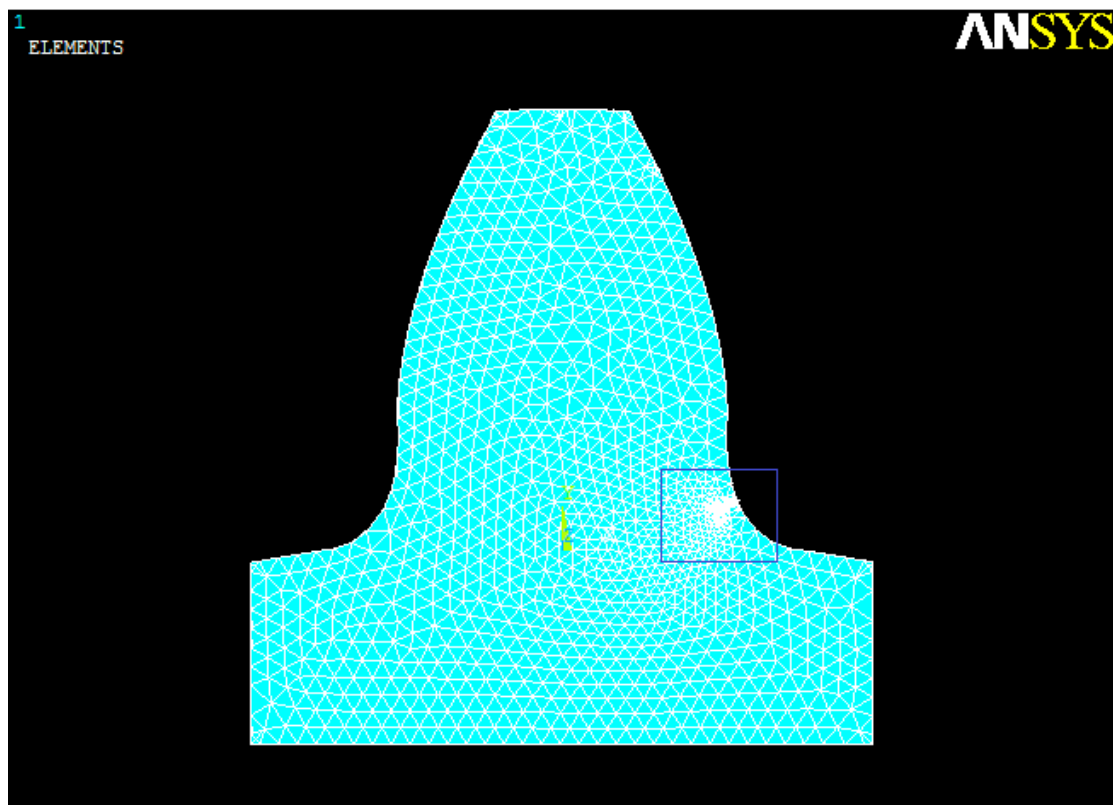
Αρχικά εισάγεται η γεωμετρία κάθε οδόντος στο Ansys Multiphysics (αρχεία τύπου *.sat). Όπως αναφέρθηκε στην Παράγραφο 3.2, το υλικό που θα χρησιμοποιηθεί είναι χάλυβας (μέτρο ελαστικότητας $E=210000\text{N/mm}^2$ και Λόγος Poisson $\nu = 0,28$). Στις ιδιότητες του υλικού προστίθεται η ειδική ηλεκτρική αντίσταση $\rho = 1.43 \times 10^{-7} \Omega\text{m}$.

Στη συνέχεια, εκλέγονται τα 8-κομβικά πεπερασμένα στοιχεία με α/α 69, τα οποία είναι τρισδιάστατα με 2 βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο.



Σχήμα 5.3: Γεωμετρία πεπερασμένου στοιχείου 8-node 69.

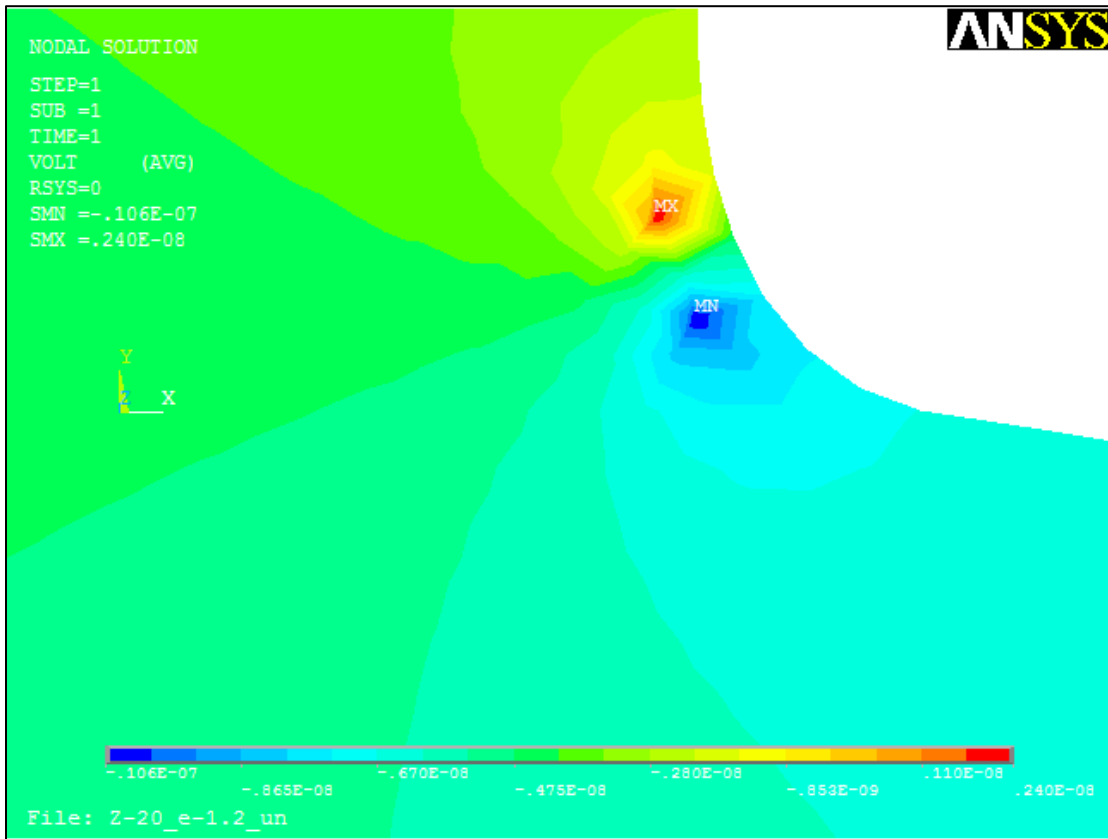
Έπειτα, εισάγονται οι συντεταγμένες των σημείων, στα οποία θα τοποθετηθούν τα ηλεκτρόδια εισαγωγής του ρεύματος και τη μέτρησης του ηλεκτρικού δυναμικού. Τα σημεία αυτά εισάγονται μέσω της σχεδίασης "hardpoint", δηλαδή τα σημεία αυτά δεν μετατοπίζονται μετά τη δημιουργία του πλέγματος. Συνεχίζοντας, δημιουργείται αυτόματο πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων, του οποίου η θέση και το μέγεθος των στοιχείων επιλέγονται αυτόματα από το πρόγραμμα. Στο Σχ. 5.4, απεικονίζεται ενδεικτικά το πλέγμα για τον οδόντα με την ρωγμή που έχει φτάσει στο 10% της μέγιστης. Στο μπλε ορθογώνιο περίγραμμα στον πόδα του οδόντος που εστιάζει στην περιοχή ανάπτυξης της μέγιστης τάσης, φαίνεται ότι το πλέγμα που είναι κοντά στη ρωγμή είναι βελτιωμένο για να προκύπτουν πιο ακριβή αποτελέσματα.



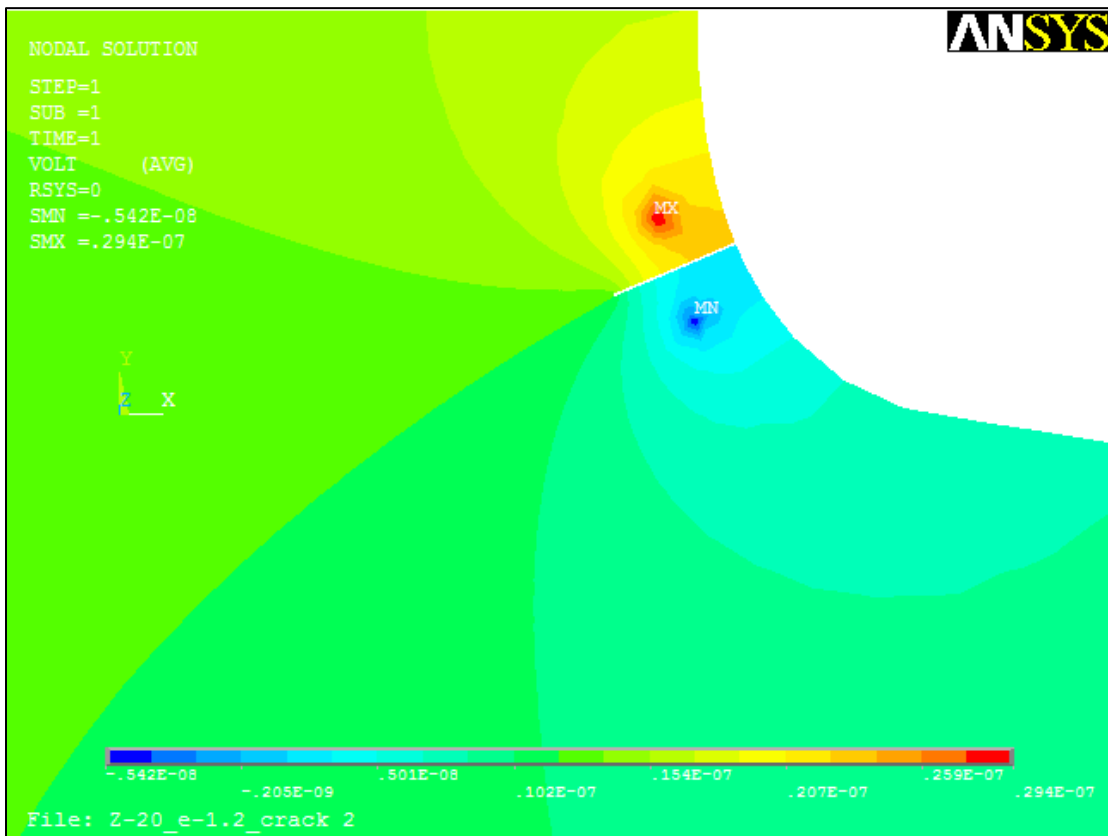
Σχήμα 5.4: Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων οδόντος του τροχού των 20 οδόντων.

Διερευνώνται, λοιπόν, οι δέκα οδόντες με ρωγμές που σχεδιάστηκαν στην Παράγραφο 4.3 (Σχήματα 4.6-4.15) και ο αντίστοιχος χωρίς ρωγμή στο Ansys Multiphysics επιλέγοντας ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων αγωγής σταθερού ρεύματος (Steady-State Current Conduction Analysis). Μέσω της ανάλυσης αυτής μπορεί να βρεθεί η πυκνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος και η κατανομή του ηλεκτρικού δυναμικού (potential difference) που προκαλείται από την εισαγωγή συνεχούς ρεύματος στο δοκίμιο. Το συνεχές ρεύμα που εισήχθη κάθε φορά μεταξύ των δύο κατάλληλα τοποθετημένων ηλεκτροδίων είναι 5 mA.

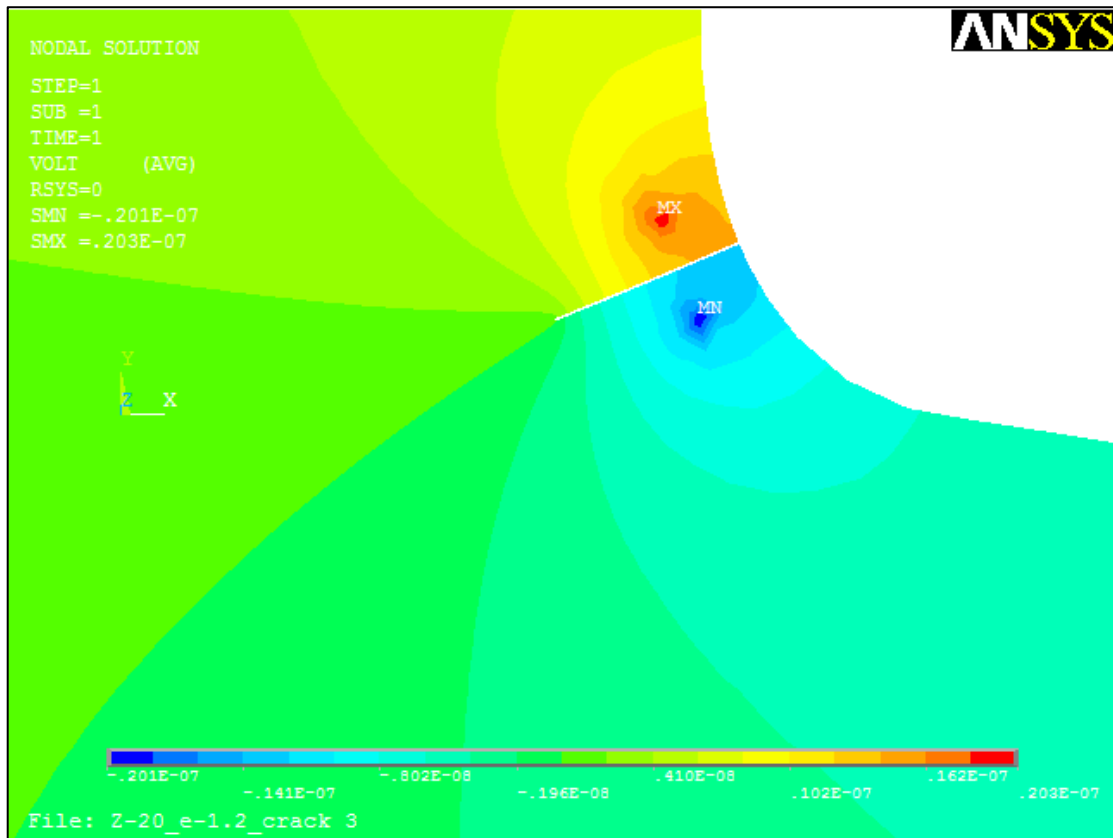
Στα Σχήματα 5.5-5.14 παρουσιάζονται, ενδεικτικά, τα διαγράμματα των ισοδυναμικών γραμμών που προκύπτουν από την ηλεκτροστατική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων για το ζεύγος ηλεκτροδίων που είναι τοποθετημένο στο 10% για τους οδόντες με ρωγμή, καθώς και για τον οδόντα χωρίς ρωγμή. Οι εικόνες είναι εστιασμένες στην περιοχή που περικλείει το σημείο έναρξης της ρωγμής και τον ουδέτερο άξονα.



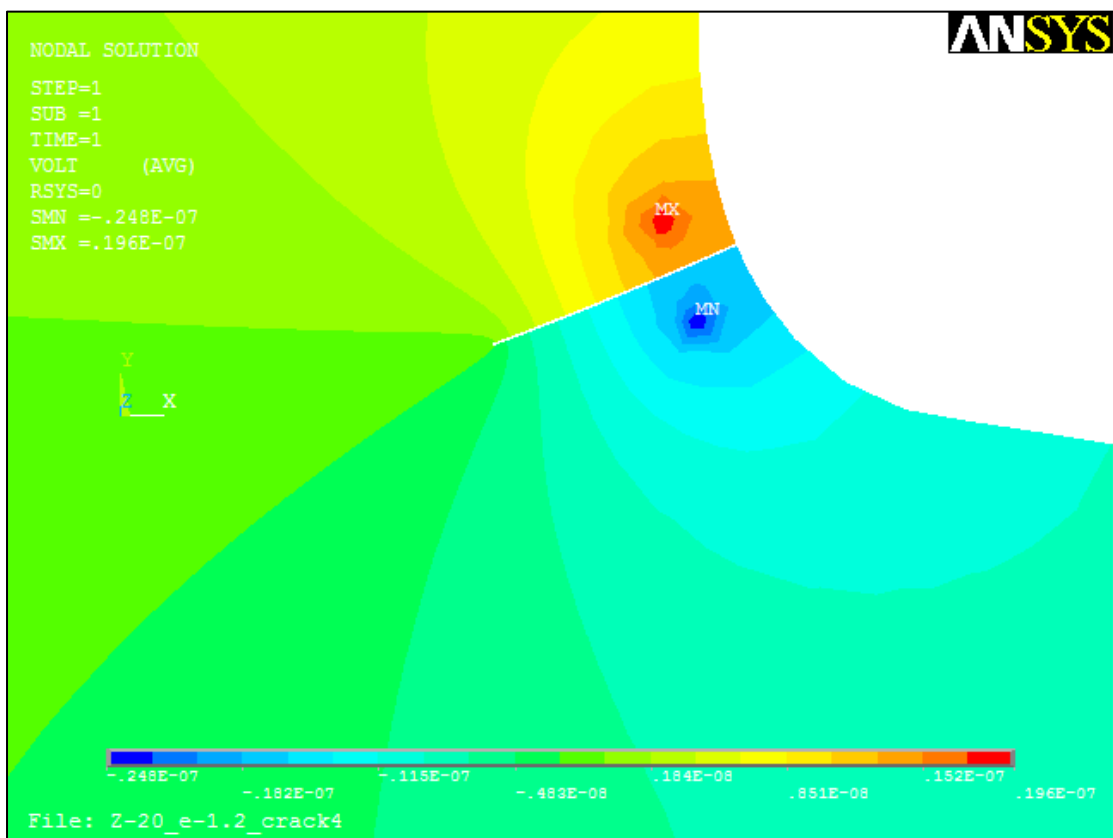
Σχήμα 5.5: Ισοδυναμικές γραμμές - οδόντας χωρίς ρωγμή.



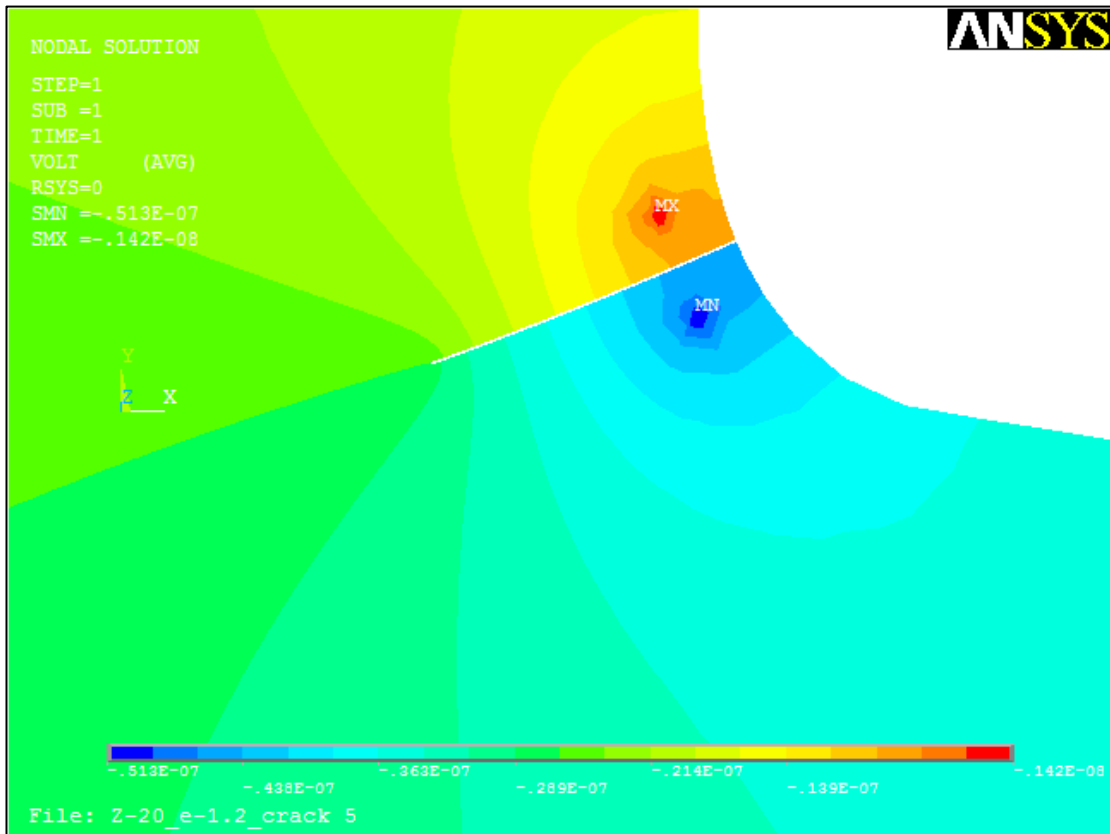
Σχήμα 5.6: Ισοδυναμικές γραμμές - οδόντας με ρωγμή 20%.



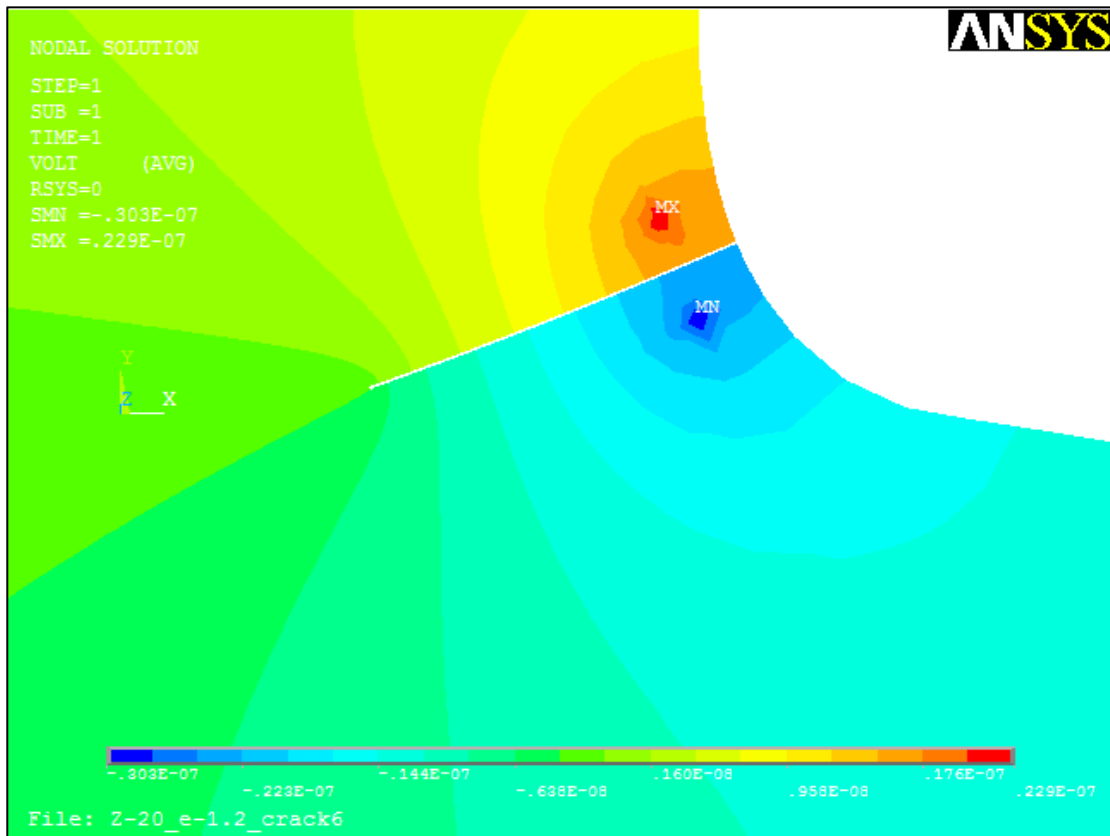
Σχήμα 5.7: Ισοδυναμικές γραμμές - οδόντας με ρωγμή 30%.



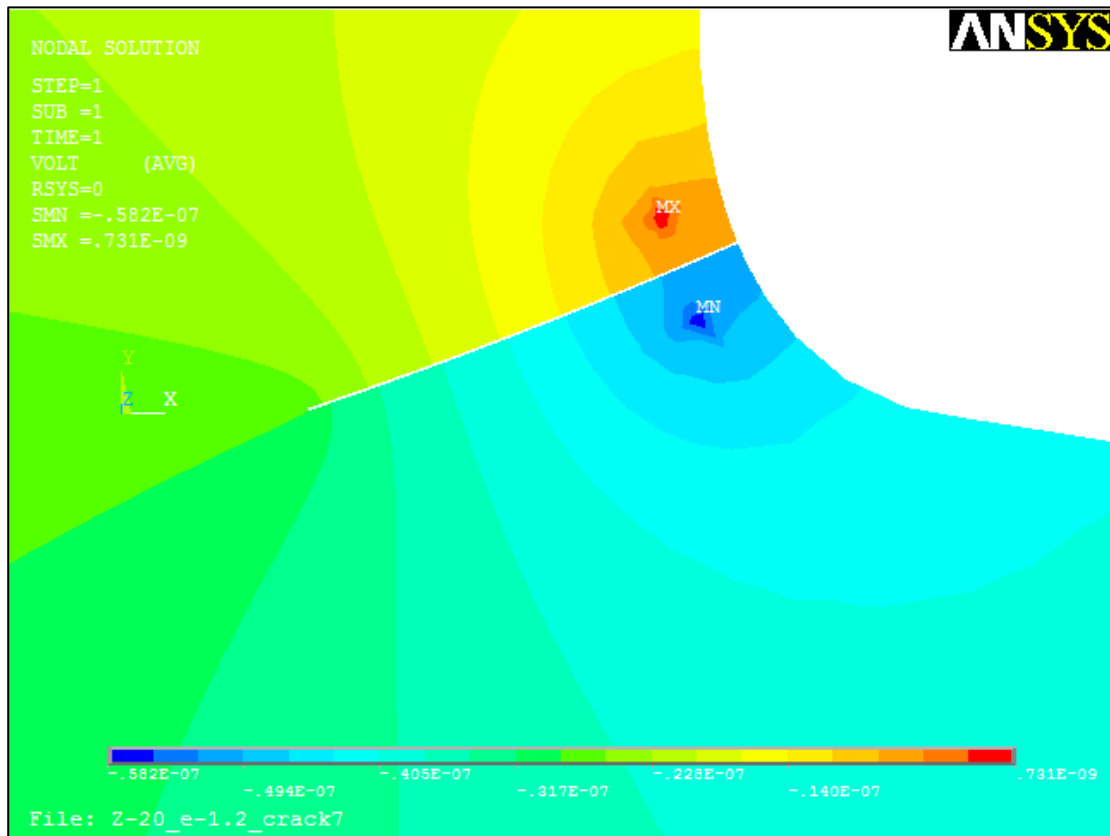
Σχήμα 5.8: Ισοδυναμικές γραμμές - οδόντας με ρωγμή 40%.



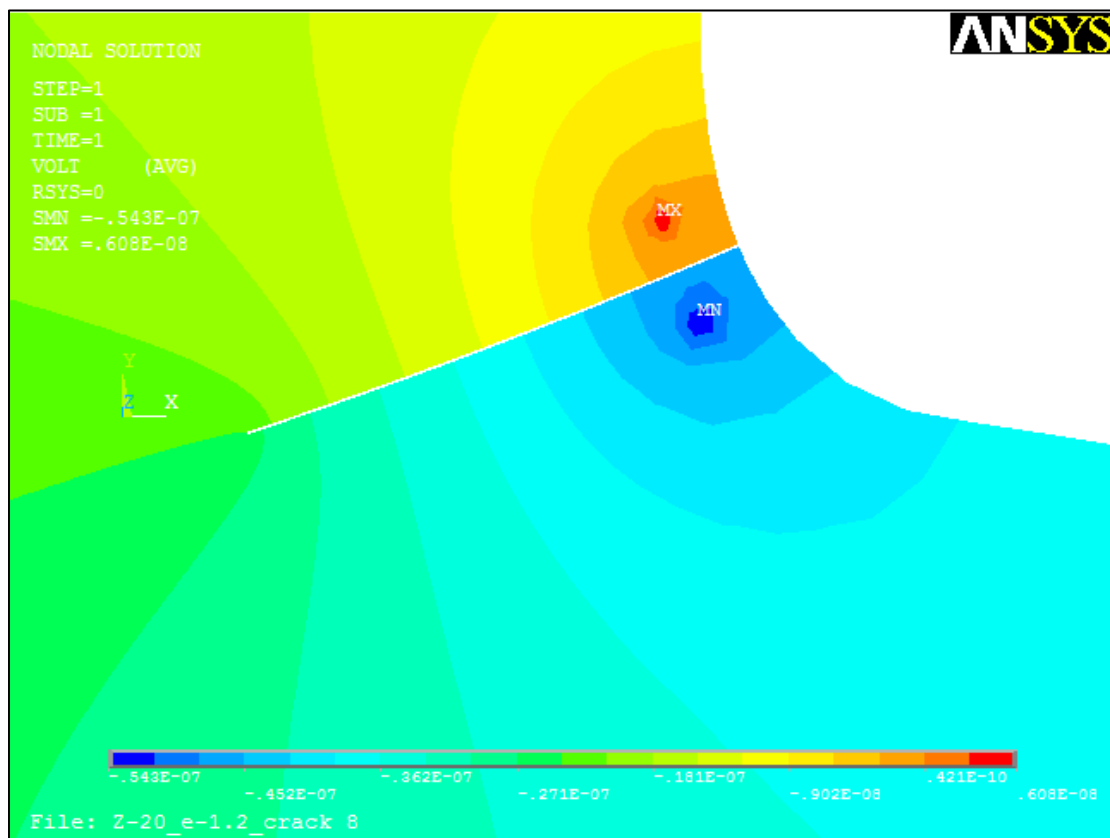
Σχήμα 5.9: Ισοδυναμικές γραμμές - οδόντας με ρωγμή 50%.



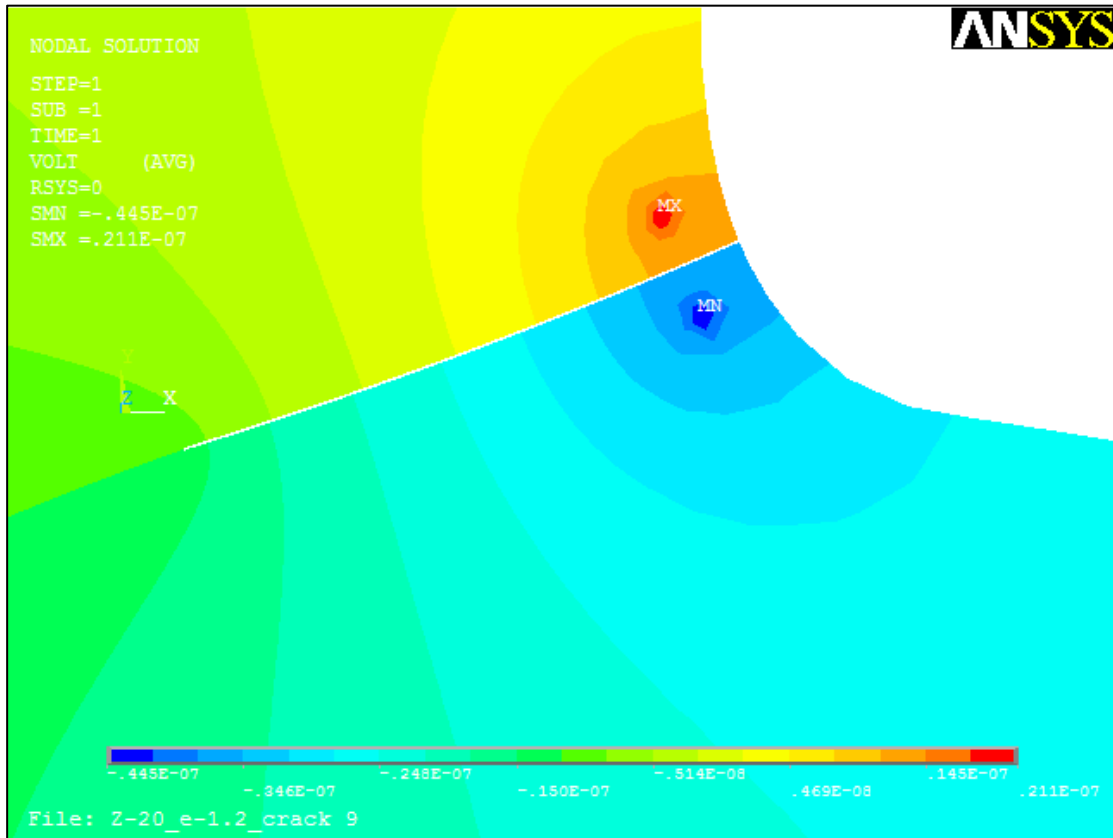
Σχήμα 5.10: Ισοδυναμικές γραμμές - οδόντας με ρωγμή 60%.



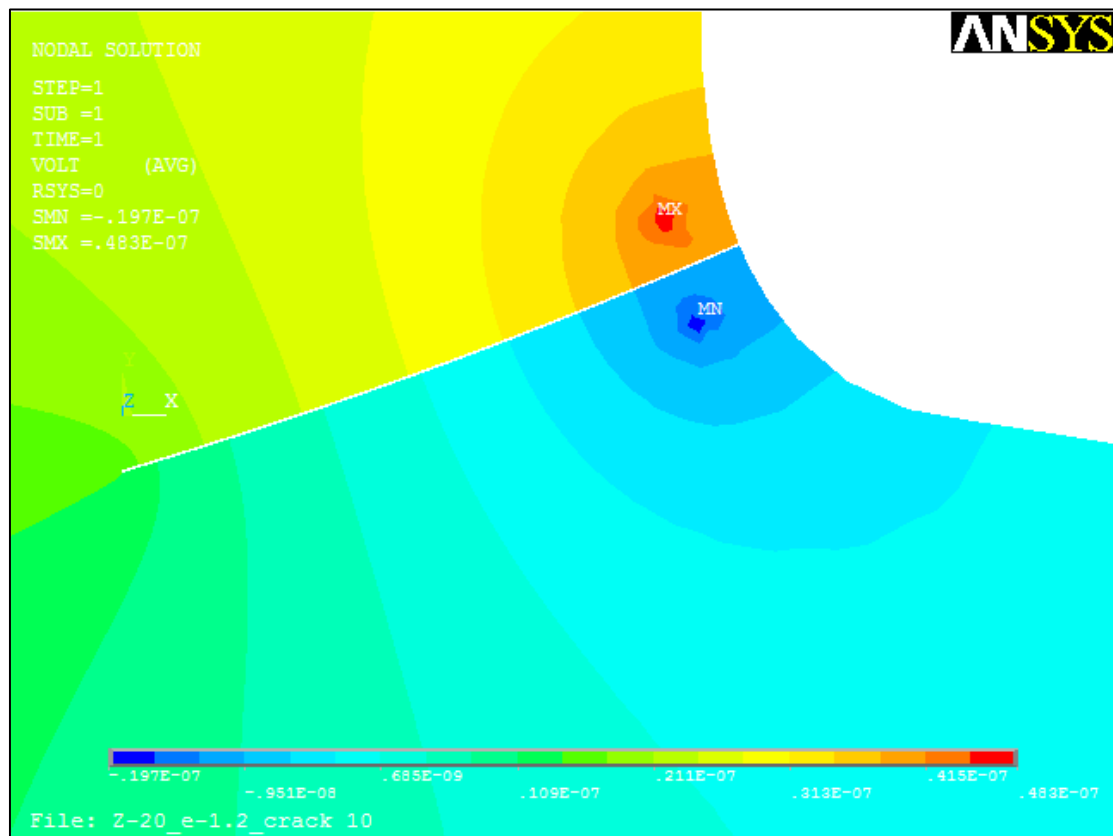
Σχήμα 5.11: Ισοδυναμικές γραμμές - οδόντας με ρωγμή 70%.



Σχήμα 5.12: Ισοδυναμικές γραμμές - οδόντας με ρωγμή 80%.



Σχήμα 5.13: Ισοδυναμικές γραμμές - οδόντας με ρωγή 90%.



Σχήμα 5.14: Ισοδυναμικές γραμμές - οδόντας με ρωγή 100%.

5.3. Ανάλυση από τη θέση στο 10% ως τη θέση στο 40%

Για τα έντεκα δοκίμια, δηλαδή για τον ίδιο οδόντα με τις δέκα ρωγμές και για τον οδόντα χωρίς ρωγμή, και για τα 4 ζεύγη ηλεκτροδίων πραγματοποιείται ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων αγωγής σταθερού ρεύματος, συνεπώς η ανάλυση εκτελείται σαράντα τέσσερις φορές.

Το Σχ. 5.15 παρουσιάζει τη σχέση μεταξύ του μήκους της ρωγμής και της κατανομής του δυναμικού στην περιοχή μέτρησης του οδόντος. Το ηλεκτρικό δυναμικό παρουσιάζεται αδιαστατοποιημένο, καθώς όλα τα αποτελέσματα έχουν διααιρεθεί με το ΔV_0 , δηλαδή τη διαφορά δυναμικού του οδόντος χωρίς ρωγμή. Πιο συγκεκριμένα, στο Σχ. 5.15, στον άξονα y απεικονίζεται το μέγεθος:

$$\text{Αδιαστατοποιημένο Δυναμικό} = \frac{\Delta V}{\Delta V_0} \quad (5.2)$$

όπου:

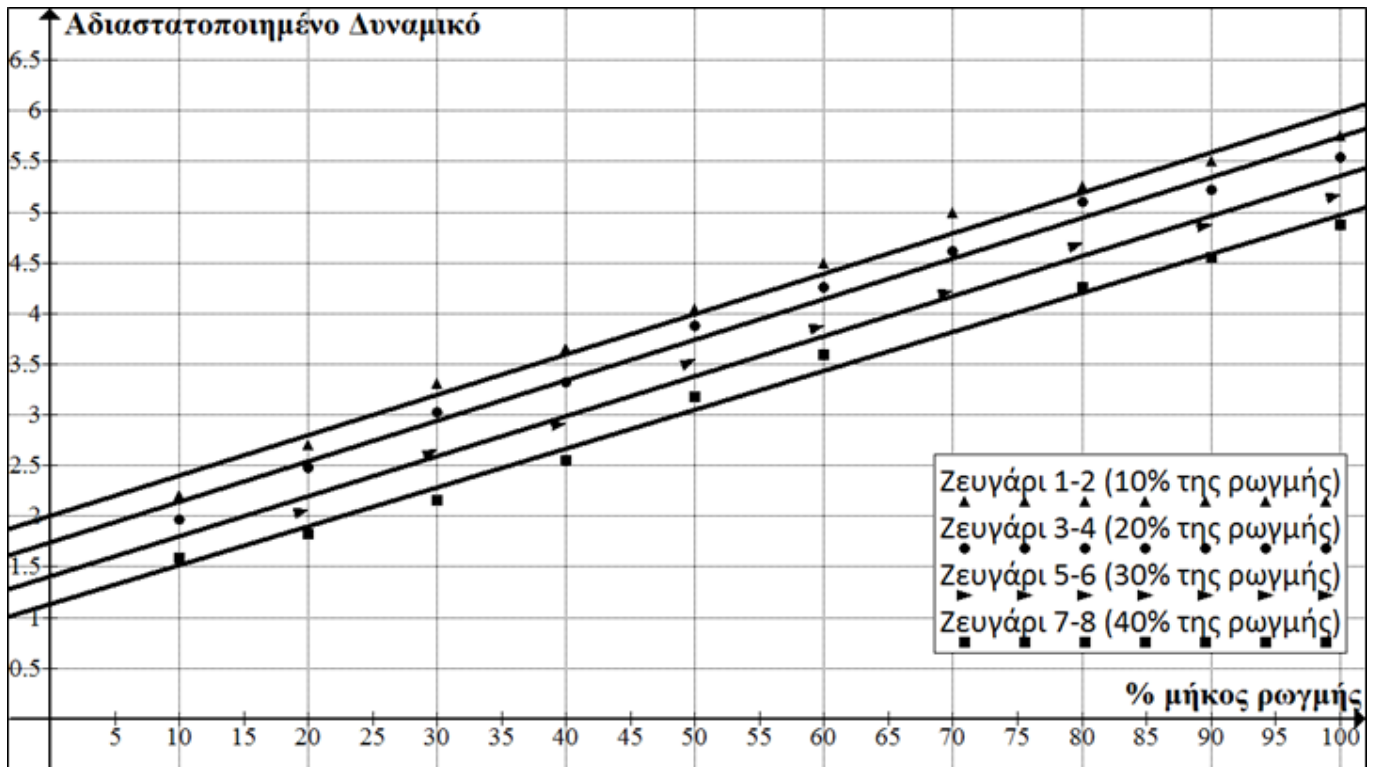
ΔV είναι η διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων στον εκάστοτε οδόντα με ρωγμή

ΔV_0 είναι η διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο αντίστοιχων ηλεκτροδίων στον οδόντα χωρίς ρωγμή.

Στο Σχ. 5.15, για να μοντελοποιηθεί μαθηματικά η σχέση μεταξύ των δύο μεταβλητών, δηλαδή του αδιαστατοποιημένου δυναμικού και του επί % μήκους της ρωγμής, χρησιμοποιούνται συναρτήσεις γραμμικής αναδρομής, διότι ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης παίρνει τιμές κοντά στη μονάδα (~ 99%). Ισχύει ότι:

$$\text{Αδιαστατοποιημένο Δυναμικό} = \alpha(\% \text{μήκος ρωγμής}) + c \quad (5.3)$$

Ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης R^2 (coefficient of correlation) εκφράζει το βαθμό συσχέτισης μεταξύ δύο μεταβλητών.



Σχήμα 5.15: Αδιαστατοποιημένο Δυναμικό για ζευγάρια ηλεκτροδίων μεταξύ 10% και 40%.

Όπως έχει ήδη αναφέρει στην Παράγραφο 4.3, το μήκος της ρωγμής είναι αδιαστατοποιημένο ως προς τη συνολική απόσταση του σημείου έναρξης της ρωγμής από τον ουδέτερο άξονα.

Μπορούν να εξαχθούν κάποια πρώτα, χρήσιμα συμπεράσματα από το Σχ. 5.15. Καταρχήν, είναι σαφές ότι το ζεύγος των ηλεκτροδίων όσο πιο κοντά είναι στο σημείο έναρξης της ρωγμής, τόσο μεγαλύτερο είναι το αδιαστατοποιημένο δυναμικό $\Delta V/\Delta V_0$. Αυτό μπορεί να ερμηνευθεί από το γεγονός ότι τα ηλεκτρόδια που είναι πιο κοντά στο σημείο έναρξης της ρωγμής είναι περισσότερο ευαίσθητα σε μικρά μήκη ρωγμών. Επίσης, τα ηλεκτρόδια αυτά «αντιλαμβάνονται» καλύτερα και τις ρωγμές, των οποίων το μήκος έχει ξεπεράσει τη θέση στην οποία βρίσκονται (τα ηλεκτρόδια), διότι το ρεύμα χρειάζεται να διασχίσει μεγαλύτερη διαδρομή, άρα αυξάνεται η ηλεκτρική αντίσταση και συνεπακόλουθα η πτώση δυναμικού. Επιπρόσθετα, είναι προφανές ότι όσο η θέση των ηλεκτροδίων πλησιάζει το σημείο έναρξης της ρωγμής, η μικρότερη αντίστοιχη τιμή $\Delta V/\Delta V_0$ μεγαλώνει.

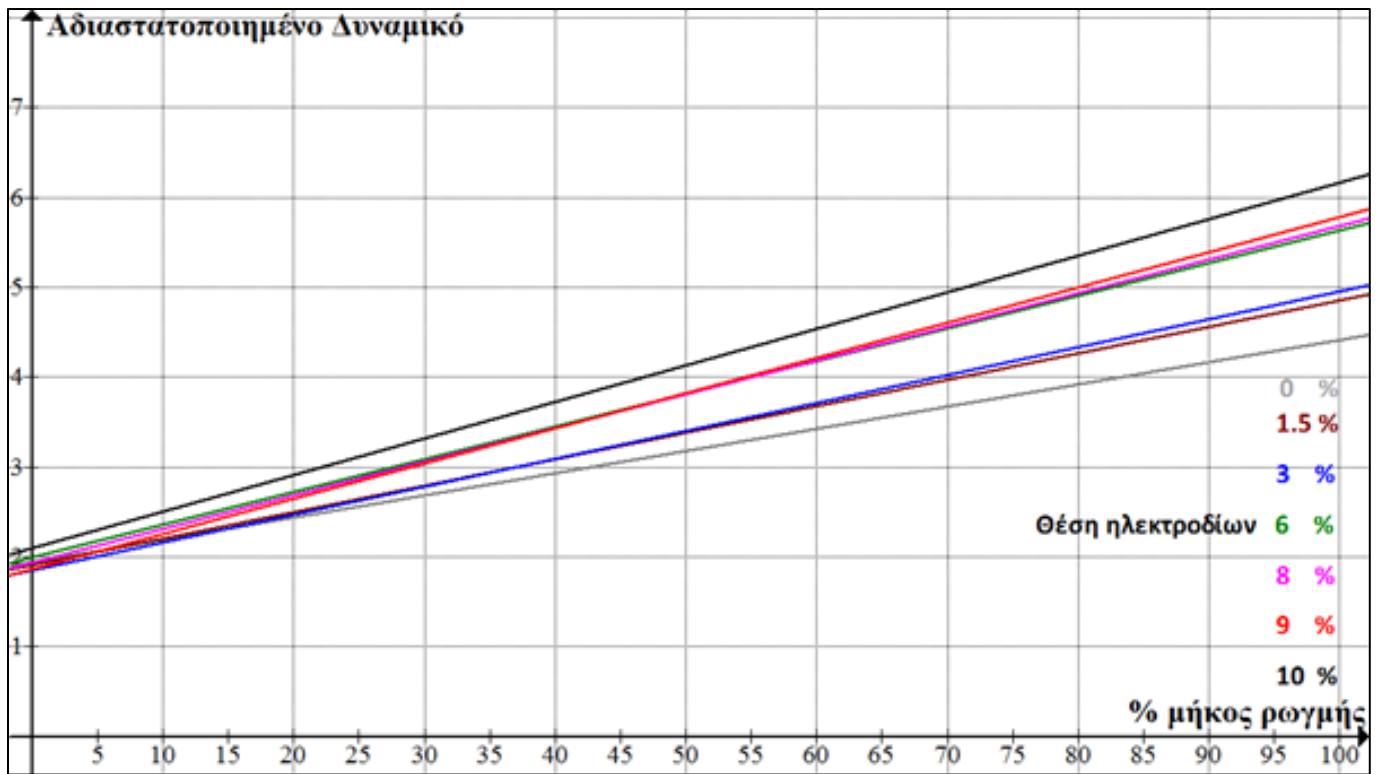
Γενικά, όσο μεγαλύτερες τιμές του αδιαστατοποιημένου δυναμικού αντιλαμβάνεται ο αισθητήρας, τόσο μεγαλύτερη θεωρείται και η ακρίβειά του. Συνεπώς, υιοθετώντας το κριτήριο αυτό, συμπεραίνεται, σε πρώτο στάδιο, ότι η βέλτιστη θέση τοποθέτησης των ηλεκτροδίων είναι όσο πιο κοντά γίνεται στο σημείο έναρξης της ρωγμής.

5.4. Ανάλυση από τη θέση στο 0 ως τη θέση στο 10%

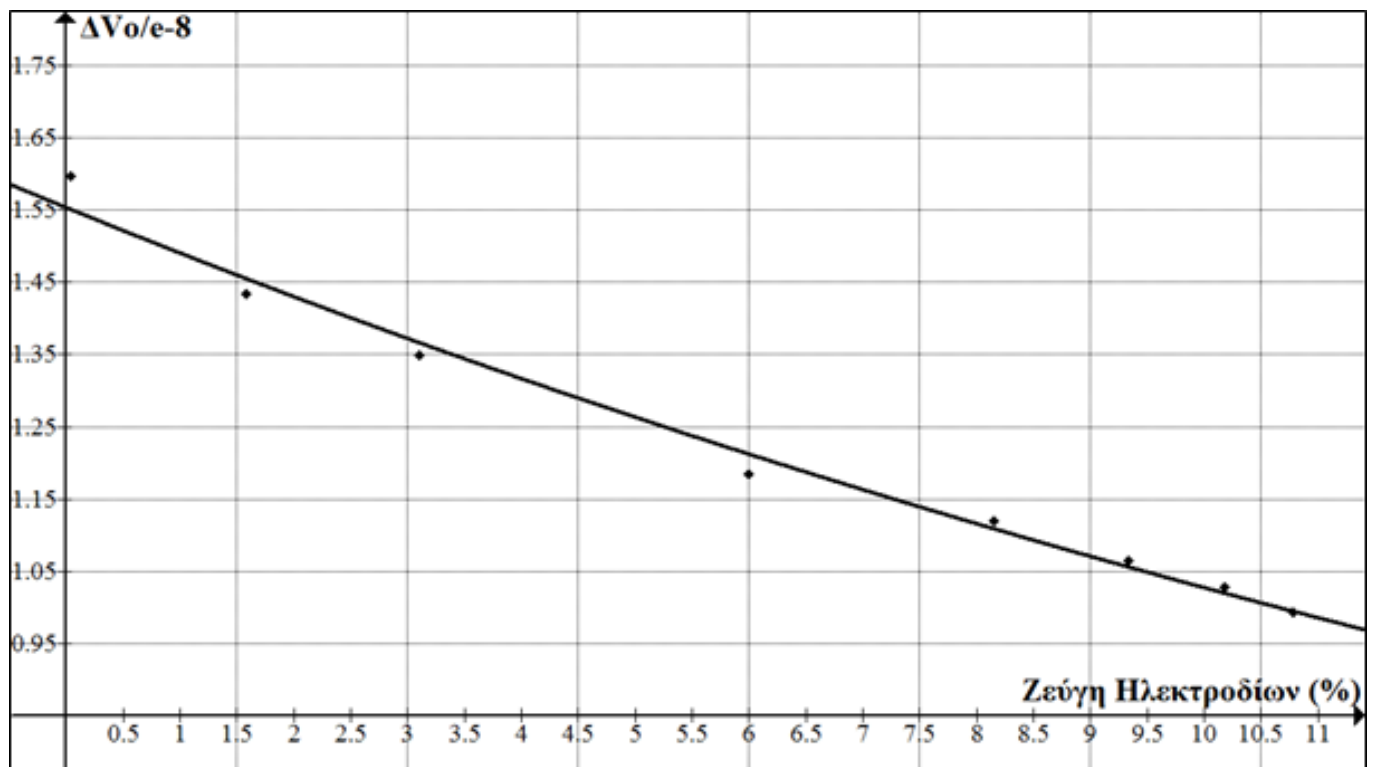
Προκειμένου να καταστεί αναμφισβήτητο, ότι η βέλτιστη θέση των ηλεκτροδίων είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στην έναρξη της ρωγμής, ηλεκτροστατική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων εκτελέστηκε για έξι ακόμα ζεύγη ηλεκτροδίων τοποθετημένα μεταξύ του 0 και του 10% της συνολικής ρωγμής. Πιο συγκεκριμένα, τα ζεύγη των ηλεκτροδίων τοποθετούνται στο 0, 1.5, 3, 6, 8, και στο 9% επί της μέγιστης ρωγμής. Για κάθε ζεύγος η ανάλυση γίνεται πάνω στους δέκα μετωπικούς οδόντες που έχουν ήδη σχεδιασθεί (Παράγραφος 4.4) και τα αποτελέσματα των αναλύσεων (σύνολο 66) παρουσιάζονται στο Σχ. 5.16.

Στο Σχ. 5.16, η απεικόνιση των σημείων, από τα οποία προέκυψαν οι γραμμικές συναρτήσεις αναδρομής (linear trendlines), παραλείπεται τόσο για λόγους ευκρίνειας του γραφήματος, όσο και για το λόγο ότι ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης R^2 κάθε γραμμικής συνάρτησης κυμαίνεται σε ψηλά επίπεδα, περίπου στο 99%.

Παρατηρείται για τα ζεύγη που είναι τοποθετημένα στο 1,5 και στο 3%, ότι ενώ αρχικά το $\Delta V/\Delta V_0$ παίρνει μεγαλύτερες τιμές για το ζεύγος ηλεκτροδίων που είναι τοποθετημένο στο 1,5%, καθώς αυξάνεται το μήκος της ρωγμής αυτό γίνεται μικρότερο από το $\Delta V/\Delta V_0$ του ζευγαριού στο 3%. Το ίδιο παρατηρείται και για τις περιπτώσεις των ζευγών 6-8% αλλά και για τα ζεύγη στις θέσεις 8% και 9%. Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι το ζεύγος που είναι στο 1,5% για μικρά μήκη ρωγμών έχει μεγαλύτερη ευαισθησία, επειδή είναι πιο κοντά στο σημείο έναρξης της ρωγμής. Το πλεονέκτημα αυτό όμως μειώνεται, καθώς η ρωγμή διαδίδεται. Αντίθετα με το συμπέρασμα στο τέλος της Παραγράφου 5.3, το Σχ. 5.16 αποδεικνύει ότι μεταξύ των θέσεων 0 και 10%, καθώς η θέση των ηλεκτροδίων πλησιάζει το σημείο έναρξης της ρωγμής, το αδιαστατοποιημένο δυναμικό μειώνεται σημαντικά.



Σχήμα 5.16: Αδιαστατοποιημένο Δυναμικό για ζευγάρια ηλεκτροδίων μεταξύ 0 και 10%.



Σχήμα 5.17: Δυναμικό ΔV_0 του οδόντα χωρίς ρωγμή για τα ζευγάρια ηλεκτροδίων μεταξύ 0 και 10%.

Ο βασικός λόγος για αυτό το συμπέρασμα είναι ότι το δυναμικό ΔV_0 των δοκιμίων χωρίς ρωγμή, μειώνεται εκθετικά (Σχ. 5.17) όταν η θέση των ηλεκτροδίων πλησιάζει από το 0 στο 10%.

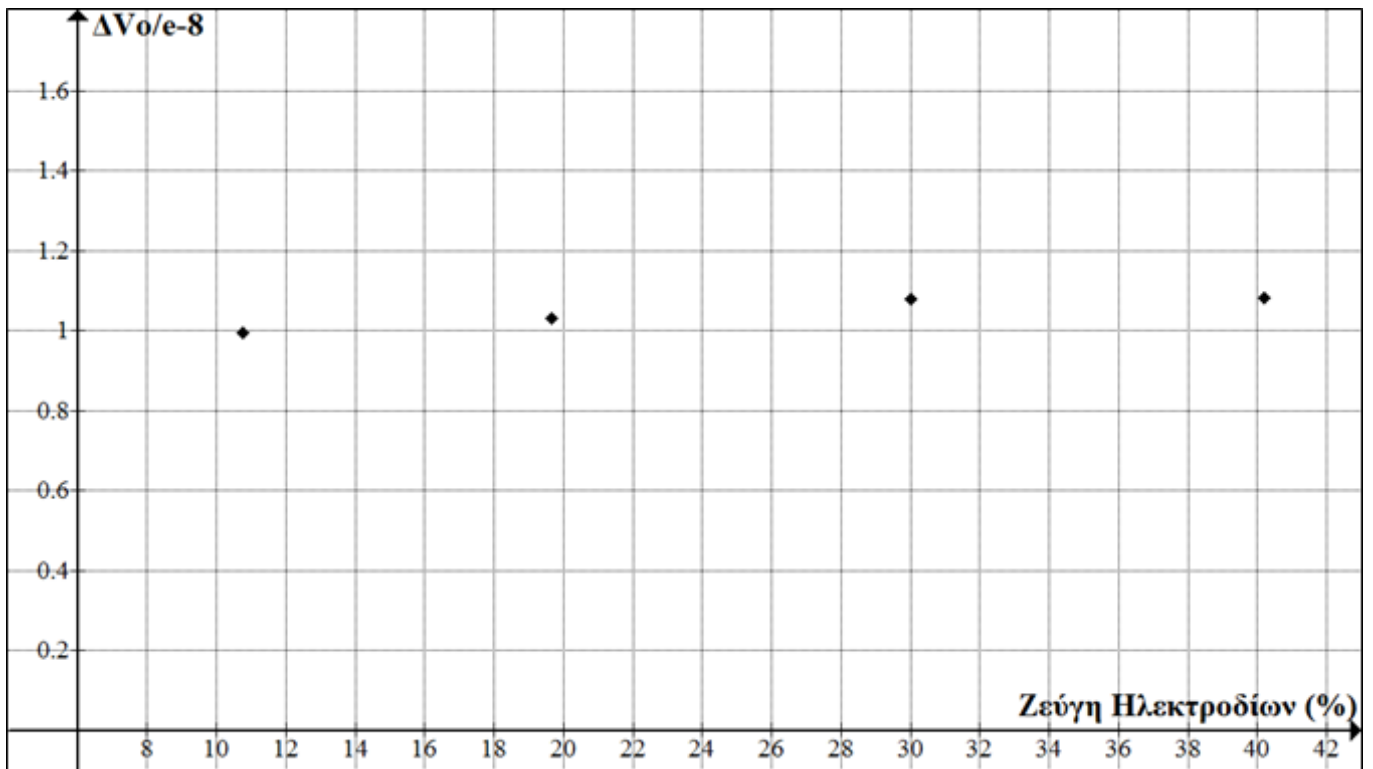
Αυτό συμβαίνει μόνο μεταξύ των θέσεων 0 και 10%, καθώς από το Σχ. 5.18 φαίνεται ότι το δυναμικό ΔV_0 διαφοροποιείται ανεπαίσθητα μεταξύ των θέσεων 10% και 40%.

Το γεγονός ότι η πτώση ηλεκτρικού δυναμικού στους οδόντες χωρίς ρωγμή (ΔV_0) μειώνεται μεταξύ των θέσεων 0 και 10% εκθετικά, απορρέει από το ότι όσο πιο κοντά στο σημείο έναρξης της ρωγμής ρέει το συνεχές ρεύμα, τόσο αυτό τείνει να κινείται μόνο στον ένα ημιχώρο της περιοχής μέτρησης του οδόντος και γι' αυτό το λόγο η ηλεκτρική αντίσταση αυξάνεται εκθετικά, άρα το ίδιο συμβαίνει και με το ΔV_0 .

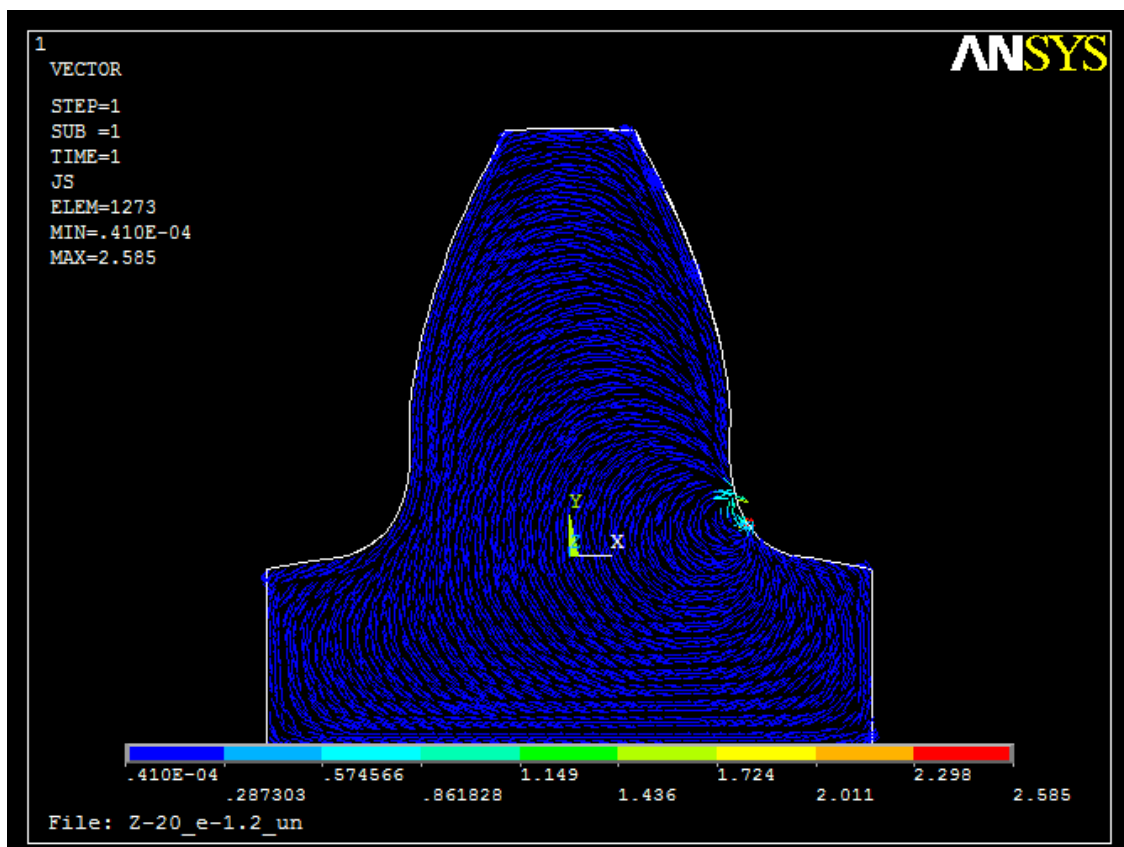
Για να γίνουν πιο κατανοητά τα παραπάνω, στα Σχήματα 5.19,5.20 παρουσιάζεται το διανυσματικό πεδίο της πυκνότητας ηλεκτρικού ρεύματος για τα ζεύγη ηλεκτροδίων στις θέσεις 0 και 20% αντίστοιχα, για τον οδόντα χωρίς ρωγμή. Είναι προφανές ότι στη θέση 0 (Σχ. 5.19) τα διανύσματα του ρεύματος μπορούν να κινηθούν αποκλειστικά προς τον αριστερό ημιχώρο του οδόντος. Αντίθετα, στη θέση 20% (Σχ. 5.20), το ρεύμα μπορεί να κινηθεί και προς τη δεξιά πλευρά της επιφάνειας του οδόντος, καθώς υπάρχει ελεύθερος χώρος μεταξύ των ηλεκτροδίων και του σημείου έναρξης της ρωγμής.

Δεδομένου, ότι η βέλτιστη θέση τοποθέτησης των ηλεκτροδίων ως προς το μήκος της ρωγμής είναι εκεί όπου έχουμε τις μεγαλύτερες δυνατές τιμές του αδιαστατοποιημένου δυναμικού και έχοντας λάβει υπόψη τα παραπάνω ευρήματα, συμπεραίνεται ότι η θέση στο 10% είναι η βέλτιστη, δηλαδή σε πρώτη φάση, τα ηλεκτρόδια τοποθετούνται στις θέσεις 1, 2 του Σχήματος 5.1.

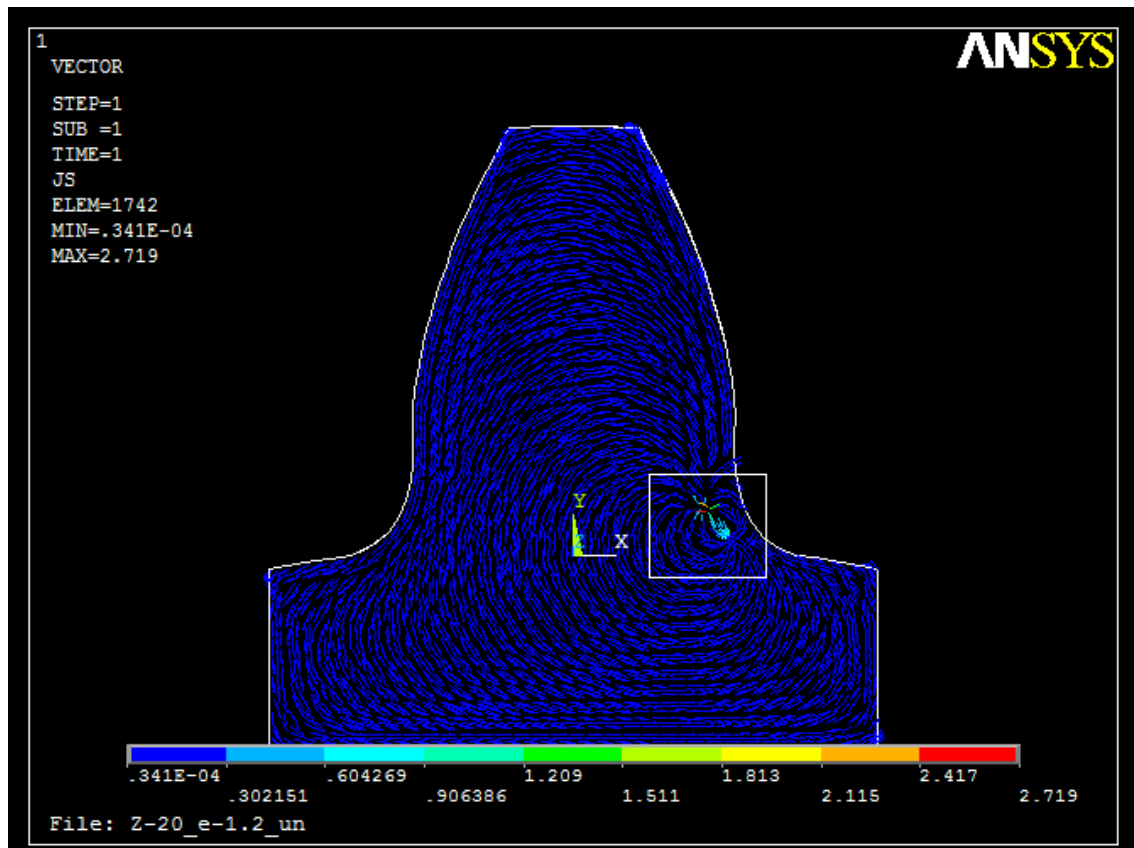
Στο Σχ. 5.21 απεικονίζεται το ζεύγος των ηλεκτροδίων τοποθετημένο στη βέλτιστη θέση πάνω στον οδόντα μετωπικού οδοντωτού τροχού με τη μεγαλύτερη ρωγμή που φτάνει ως τον ουδέτερο άξονα.



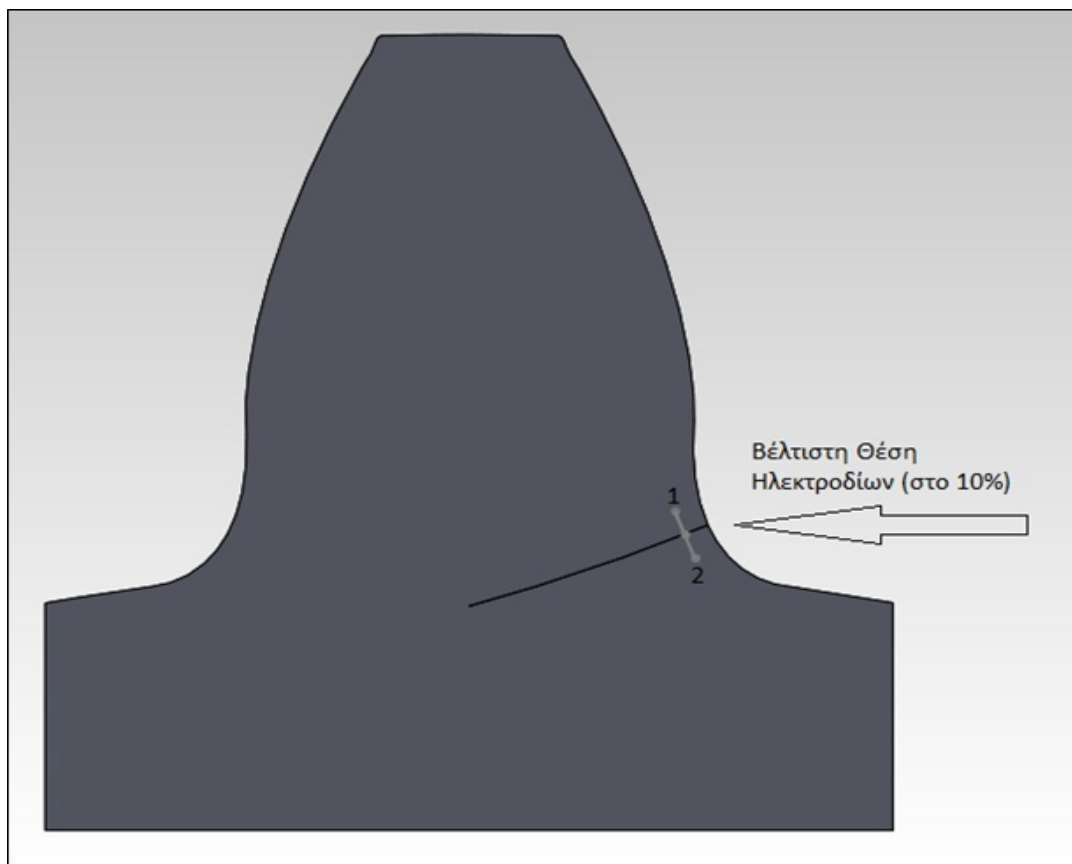
Σχήμα 5.18: Δυναμικό ΔV_o του οδόντα χωρίς ρωγμή για τα ζευγάρια ηλεκτροδίων μεταξύ 10% και 40%.



Σχήμα 5.19: Διανυσματικό πεδίο πυκνότητας ηλεκτρικού ρεύματος, Θέση 0.



Σχήμα 5.20: Διανυσματικό πεδίο πυκνότητας ηλεκτρικού ρεύματος, Θέση 20 %.



Σχήμα 5.21: Βέλτιστη θέση τοποθέτησης των ηλεκτροδίων ως προς τη μέγιστη ρωγμή.

5.5. Ανάλυση ανεξάρτητη της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ρ

Η ηλεκτροστατική ανάλυση επαναλαμβάνεται για τα ζεύγη ηλεκτροδίων μεταξύ των θέσεων 10% ως το 40% (Παράγραφος 5.3) υποθέτοντας, αυτή τη φορά, ότι $\rho = 1 \Omega\text{m}$ και εφαρμόζοντας μοναδιαίο συνεχές ρεύμα (μεγέθους 1 A) μεταξύ των ηλεκτροδίων σε κάθε θέση.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης είναι ταυτόσημα με αυτά της Παραγράφου 5.3 και το γράφημα είναι πανομοιότυπο με το Σχ. 5.15, άρα προκύπτει ότι η ηλεκτροστατική ανάλυση είναι ανεξάρτητη της τιμής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και συνεπώς και της αγωγιμότητας

5.6. Επίδραση της απόστασης μεταξύ των ηλεκτροδίων στην ακρίβεια της μέτρησης

Λαμβάνοντας ως δεδομένο το συμπέρασμα στο τέλος της ενότητας 5.4, δηλαδή ότι η θέση στο 10% (επί της μέγιστης ρωγμής) είναι η βέλτιστη για το ζεύγος των ηλεκτροδίων, στην παρούσα ενότητα θα μελετηθεί, όσον αφορά τη θέση 10% ως προς την μέγιστη ρωγμή, ποια είναι η βέλτιστη απόσταση που πρέπει να έχουν μεταξύ τους τα ηλεκτρόδια.

Θέλοντας τα αποτελέσματα να έχουν όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ευρύτητα, οι αποστάσεις των ηλεκτροδίων πάνω στις οποίες βασίζονται οι επόμενες αναλύσεις αδιαστατοποιούνται. Η αδιαστατοποίηση έγινε ως προς την απόσταση στην οποία τοποθετήθηκαν αρχικά τα δύο ηλεκτρόδια στη θέση 10%.

Αν αυτή η αρχική απόσταση = λ , μελετώνται οι περιπτώσεις που η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων έχει μέτρο ίσο με 0.2λ , η περίπτωση που η απόσταση τους έχει μέτρο 0.4λ , 0.6λ , 0.8λ κ.ο.κ. ως την περίπτωση που η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων έχει μέτρο ίσο με 2.0λ . Ισοδύναμα, θα μπορούσαμε να πούμε ότι η αδιαστατοποίηση έχει γίνει και ως προς την απόσταση του κάθε ηλεκτροδίου από τη ρωγμή.

Αρχικά, παρουσιάζει ενδιαφέρον το πως αλλάζει το αρχικό ΔV_0 , καθώς μεταβάλλεται η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων. Γι' αυτό το λόγο, στον μετωπικό οδόντα χωρίς

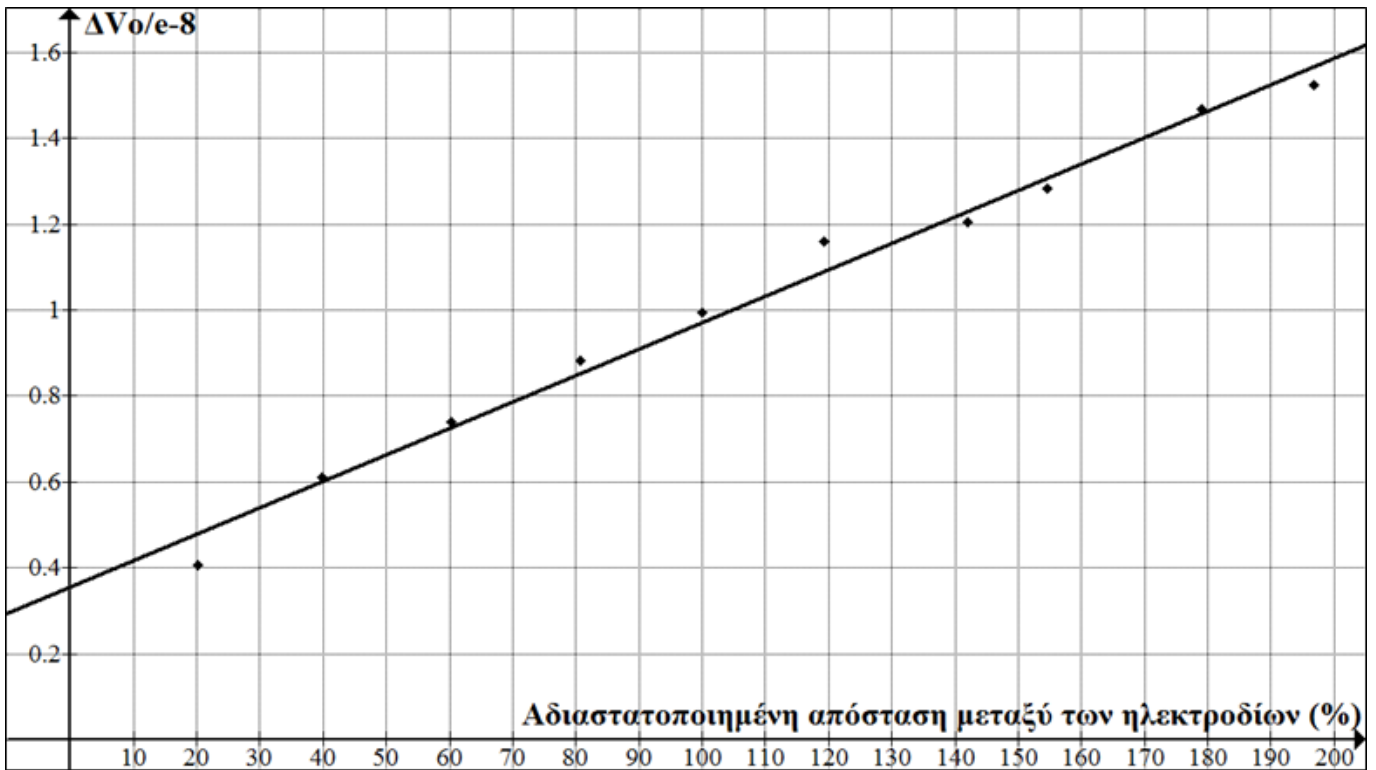
ρωγμή πραγματοποιείται ηλεκτροστατική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων για τα δέκα ζεύγη ηλεκτροδίων, που βρίσκονται στην ίδια θέση (10%) ως προς τη συνολική ρωγμή, αλλά μεταβάλλεται η μεταξύ τους απόσταση.

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων αυτών παρουσιάζονται στο Σχ. 5.22. Παρατηρείται, ότι καθώς μεγαλώνει η εγκάρσια απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων, το ηλεκτρικό δυναμικό ΔV_0 αυξάνεται γραμμικά. Καθίσταται έτσι σαφές, πως όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων τόσο μεγαλύτερο είναι το ΔV_0 . Αυτό συμβαίνει, διότι καθώς αυξάνεται η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων, μεγαλώνει αντίστοιχα και η διαδρομή που πρέπει να διασχίσει το ρεύμα, συνεπώς αυξάνεται η ηλεκτρική αντίσταση άρα και η πτώση του ηλεκτρικού δυναμικού.

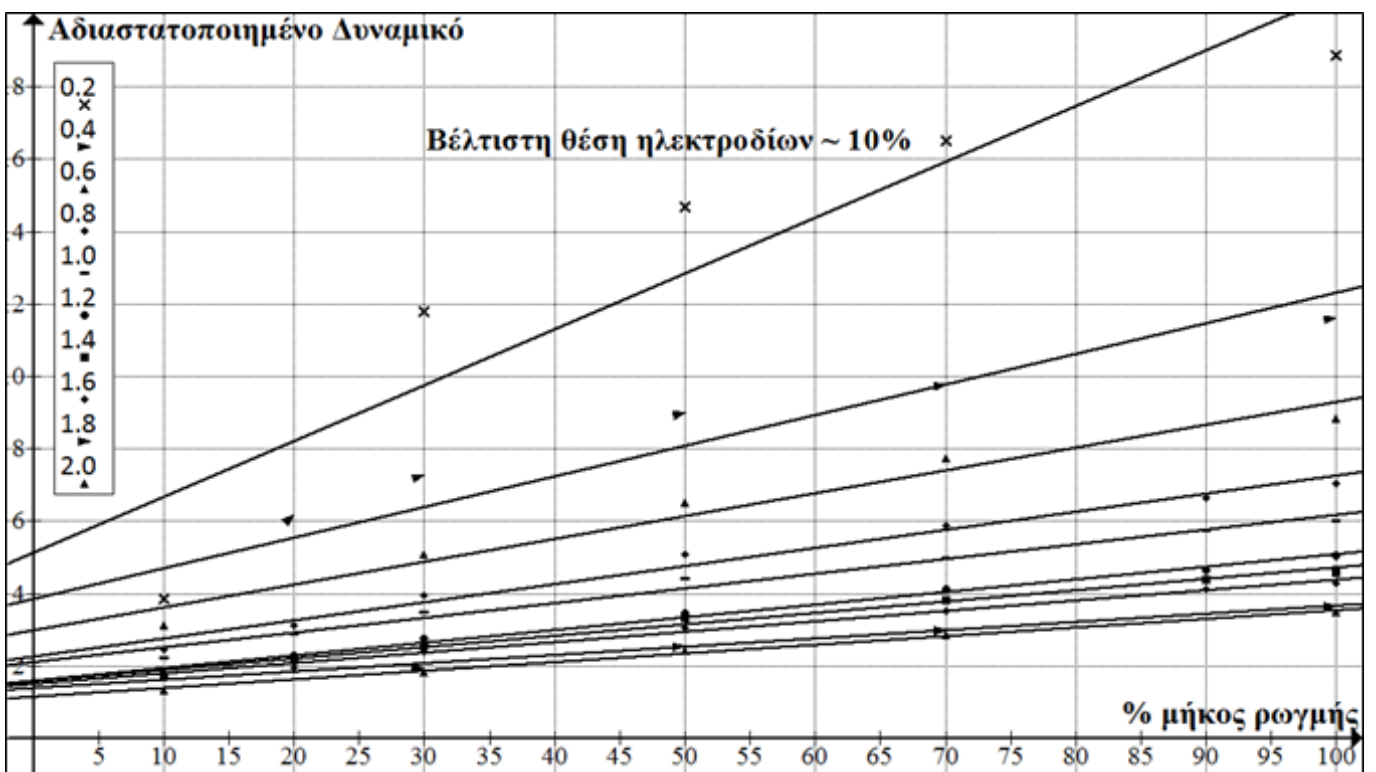
Στη συνέχεια εκτελείται η ηλεκτροστατική ανάλυση για τους δέκα οδόντες με ρωγμές (Σχ. 4.6-4.15) καθώς και για τον οδόντα χωρίς ρωγμή, εφαρμόζοντας ρεύμα μεταξύ των δέκα, διαφοροποιημένων ως προς την μεταξύ τους απόσταση, ζευγών ηλεκτροδίων για τις δέκα ρωγμές. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα Σχήματα 5.23, 5.24.

Όπως ήταν αναμενόμενο, όσο μικρότερη είναι η απόσταση των ηλεκτροδίων, τόσο μεγαλύτερο είναι το αδιαστατοποιημένο δυναμικό. Ο βασικός λόγος γι' αυτό είναι ότι, όπως εδείχθη από το Σχ. 5.23, καθώς μεγαλώνει η απόσταση των ηλεκτροδίων από την ρωγμή, το ηλεκτρικό δυναμικό ΔV_0 αυξάνεται γραμμικά, άρα το πηλίκο $\Delta V/\Delta V_0$ (δηλαδή το αδιαστατοποιημένο δυναμικό) αυξάνεται.

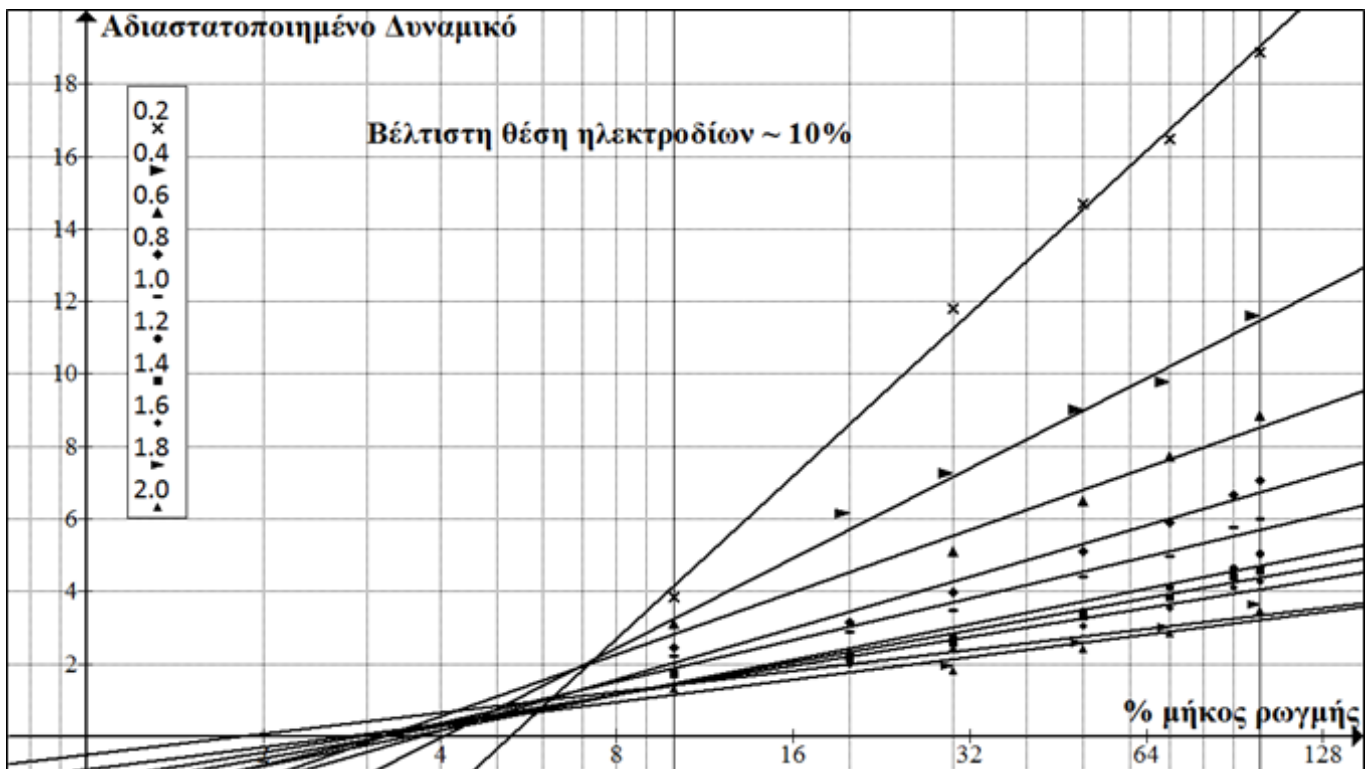
Ως εκ τούτου, η βέλτιστη απόσταση των ηλεκτροδίων είναι όσο το δυνατόν γίνεται μικρότερη, άρα τα ηλεκτρόδια τοποθετούνται στα όρια της ζώνης (Σχ. 5.2) που αναλύθηκε στην Παράγραφο 5.1.



Σχήμα 5.22: Δυναμικό ΔV_0 του οδόντα χωρίς ρωγμή για τα ζεύγη ηλεκτροδίων με διαφορετική μεταξύ τους απόσταση.



Σχήμα 5.23: Αδιαστατοποιημένο Δυναμικό για τα δέκα, διαφοροποιημένα ως προς την μεταξύ τους απόσταση, ζεύγη ηλεκτροδίων - Γραμμικές συναρτήσεις αναδρομής.



Σχήμα 5.24: Αδιαστατοποιημένο Δυναμικό για τα δέκα, διαφοροποιημένα ως προς την μεταξύ τους απόσταση, ζεύγη ηλεκτροδίων - Λογαριθμικές συναρτήσεις αναδρομής.

Οι γραμμικές συναρτήσεις αναδρομής που προκύπτουν είναι οι εξής:

$$\frac{\Delta V}{\Delta V} = 0.154x + 5.123 \quad (5.4)$$

$$\frac{\Delta V}{\Delta V} = 0.084x + 3.84 \quad (5.5)$$

$$\frac{\Delta V}{\Delta V} = 0.063x + 2.973 \quad (5.6)$$

$$\frac{\Delta V}{\Delta V} = 0.050x + 2.247 \quad (5.7)$$

$$\frac{\Delta V}{\Delta V} = 0.041x + 2.094 \quad (5.8)$$

$$\frac{\Delta V}{\Delta V} = 0.035x + 1.581 \quad (5.9)$$

$$\frac{\Delta V}{\Delta V} = 0.031x + 1.562 \quad (5.10)$$

$$\frac{\Delta V}{\Delta V} = 0.029x + 1.491 \quad (5.11)$$

$$\frac{\Delta V}{\Delta V} = 0.023x + 1.378 \quad (5.12)$$

$$\frac{\Delta V}{\Delta V} = 0.022x + 1.137 \quad (5.13)$$

όπου x = αδιαστατοποιημένο (%) μήκος κάθε ρωγμής

Η πρώτη εξίσωση είναι για την αδιαστατοποιημένη απόσταση $0.2x(\lambda)$, η δεύτερη είναι για την απόσταση $0.4x(\lambda)$ κ.ο.κ.

Αντίστοιχα, οι λογαριθμικές συναρτήσεις αναδρομής που προκύπτουν είναι οι εξής:

$$\frac{\Delta V}{\Delta V} = 6.473 \ln(x) - 10.768 \quad (5.14)$$

$$\frac{\Delta V}{\Delta V} = 3.578 \ln(x) - 5.012 \quad (5.15)$$

$$\frac{\Delta V}{\Delta V} = 2.479 \ln(x) - 2.903 \quad (5.16)$$

$$\frac{\Delta V}{\Delta V} = 2.043 \ln(x) - 2.689 \quad (5.17)$$

$$\frac{\Delta V}{\Delta V} = 1.658 \ln(x) - 1.951 \quad (5.18)$$

$$\frac{\Delta V}{\Delta V} = 1.411 \ln(x) - 1.806 \quad (5.19)$$

$$\frac{\Delta V}{\Delta V} = 1.275 \ln(x) - 1.503 \quad (5.20)$$

$$\frac{\Delta V}{\Delta V} = 1.150 \ln(x) - 1.252 \quad (5.21)$$

$$\frac{\Delta V}{\Delta V} = 0.835 \ln(x) - 0.520 \quad (5.22)$$

$$\frac{\Delta V}{\Delta V} = 0.896 \ln(x) - 0.929 \quad (5.23)$$

όπου x = αδιαστατοποιημένο (%) μήκος κάθε ρωγμής

Και σε αυτή την περίπτωση, η πρώτη εξίσωση είναι για την αδιαστατοποιημένη απόσταση $0.2x(\lambda)$, η δεύτερη είναι για την απόσταση $0.4x(\lambda)$ κ.ο.κ.

Αδιαστατοποιημένη απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων	R ² - Γραμμικές Συναρτήσεις	R ² - Λογαριθμικές Συναρτήσεις
0,2	0,8609	0,9964
0,4	0,8779	0,9889
0,6	0,9624	0,9763
0,8	0,9824	0,97
1,0	0,9879	0,9636
1,2	0,9926	0,9558
1,4	0,9892	0,961
1,6	0,9938	0,9378
1,8	0,9938	0,8751
2,0	0,995	0,8631

Πίνακας 5.1: Διακύμανση του συντελεστή γραμμικής συσχέτισης R²

Ένα ενδιαφέρον στοιχείο που προκύπτει από τα Σχήματα 5.23 και 5.24 είναι πως ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης των λογαριθμικών συναρτήσεων τείνει στη μονάδα, καθώς η απόσταση των ηλεκτροδίων από τη ρωγμή μειώνεται. Το αντίστροφο συμβαίνει για το συντελεστή γραμμικής συσχέτισης των γραμμικών συναρτήσεων: τείνει στη μονάδα καθώς η απόσταση των ηλεκτροδίων από τη ρωγμή αυξάνεται.

Στον πίνακα 5.1 αποτυπώνονται τα προαναφερθέντα συμπεράσματα.

Μπορεί, συνεπώς να εξαχθεί το συμπέρασμα, ότι για τα ζεύγη ηλεκτροδίων, των οποίων η απόσταση κυμαίνεται από το 0,2 ως το 0,4x(λ), η συσχέτιση μεταξύ του αδιαστατοποιημένου δυναμικού και του % μήκους ρωγμής επιλέγεται να είναι αποκλειστικά λογαριθμική, ενώ για τα ζεύγη ηλεκτροδίων, των οποίων η απόσταση κυμαίνεται από το 1,6 ως το 2,0x(λ), επιλέγεται η γραμμική συσχέτιση. Για τις ενδιάμεσες αποστάσεις, τόσο η γραμμική όσο και η λογαριθμική συνάρτηση συσχετίζουν ικανοποιητικά το αδιαστατοποιημένο δυναμικό και το % μήκος ρωγμής.

5.6.1. Εμπειρικός τύπος για το αδιαστατοποιημένο δυναμικό και το % αδιαστατοποιημένο μήκος κάθε ρωγμής

Παραλείποντας τις περιπτώσεις των αποστάσεων 0.2 και 0.4x(λ) για τους λόγους που προαναφέρθηκαν και με βάση τις γραμμικές συναρτήσεις αναδρομής και τη γενική σχέση της ευθείας $y = ax + \beta$, από τις Εξισώσεις 5.6-5.13 μπορούν να βρεθούν οι παρακάτω εμπειρικές σχέσεις για τις συναρτήσεις $a(\kappa)$ και $c(\kappa)$.

$$a(\kappa) = 0.041\kappa^{(-0.862)} \quad (5.24)$$

$$c(\kappa) = -1.746 \ln(\kappa) + 2.165 \quad (5.25)$$

όπου κ = αδιαστατοποιημένη απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων

Οι Εξισώσεις 5.24, 5.25 προέκυψαν από την συσχέτιση των οκτώ σημείων που απορρέουν από τις Εξισώσεις 5.6-5.13. Στα Σχήματα 5.25, 5.26 απεικονίζεται οι συναρτήσεις αναδρομής $a(x)$ και $c(x)$.

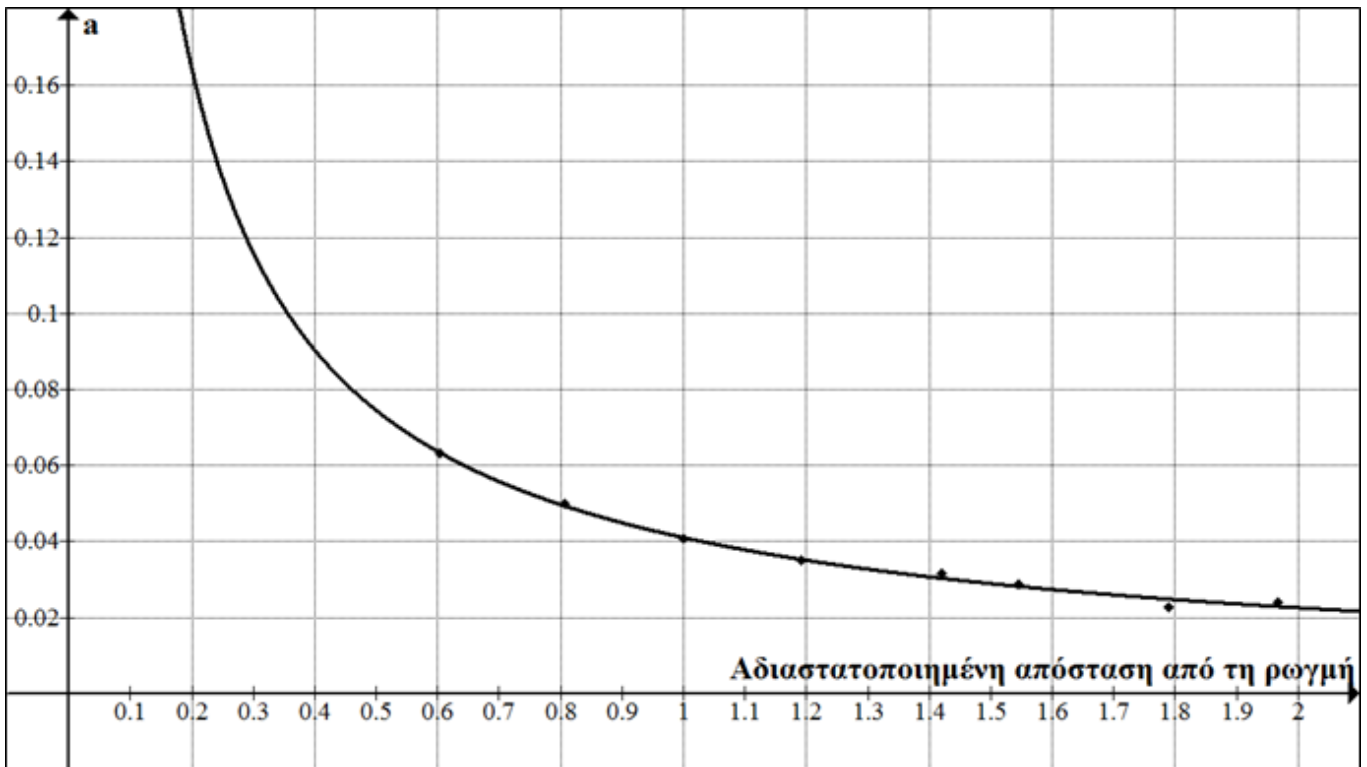
Με δεδομένη την Εξίσωση 5.3 (Παράγραφος 5.3) και τις υπολογισθέντες Εξισώσεις 5.24, 5.25 προκύπτει ο αναδρομικός τύπος (Εξίσωση 5.26) που δίνει το αδιαστατοποιημένο δυναμικό συναρτήσει της αδιαστατοποιημένης απόστασης ηλεκτροδίων από τη ρωγμή (x) και του αδιαστατοποιημένου μήκους κάθε ρωγμής (ω):

$$\frac{\Delta V}{\Delta V_0}(\kappa, x) = [0.041\kappa^{(-0.862)}]x - 1.746 \ln(\kappa) + 2.165 \quad (5.26)$$

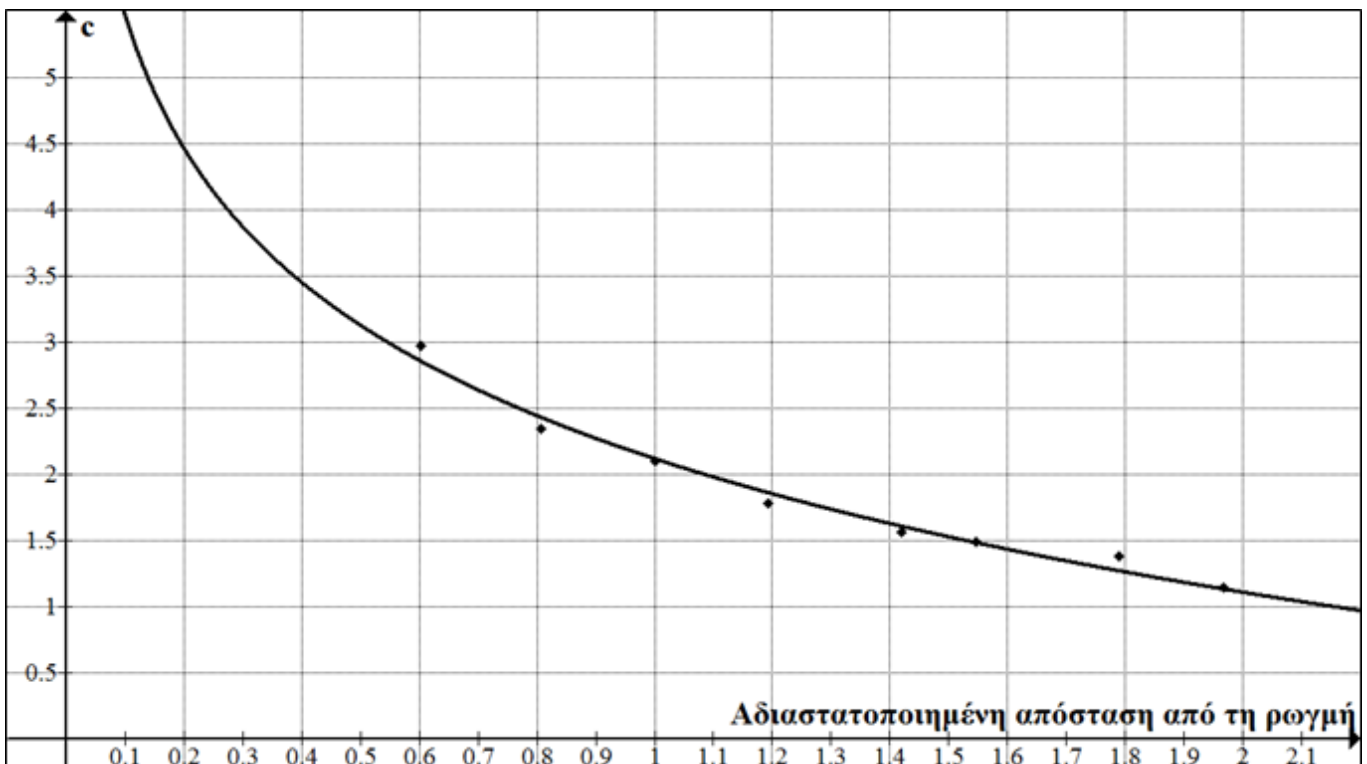
όπου:

κ είναι η αδιαστατοποιημένη απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων

x είναι το (%) αδιαστατοποιημένο μήκος κάθε ρωγμής



Σχήμα 5.25: Μοντελοποίηση της μορφής $f(x) = cx^a$ για τη συνάρτηση $\alpha(x)$.



Σχήμα 5.26: Λογαριθμική παλινδρόμηση για τη συνάρτηση $c(x)$.

Πραγματοποιούνται δοκιμές, δηλαδή δίνονται διάφορες τιμές στο x και στο ω και συγκρίνονται τα αποτελέσματα της παραπάνω σχέσης με τα πραγματικά αποτελέσματα της ηλεκτροστατικής ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Συμπεραίνεται ότι το σφάλμα των αποτελεσμάτων του παραπάνω εμπειρικού τύπου κυμαίνεται από 1%-8%, εύρος ικανοποιητικό αν ληφθεί υπόψη ότι η σχέση αυτή αποτελεί προϊόν αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων και στατιστικών προσεγγίσεων, οι οποίες από μόνες τους παρουσιάζουν μικρά σφάλματα. Συνεπώς, η παραπάνω σχέση προσφέρει μια καλή προσέγγιση των πραγματικών αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων.

Λύνοντας την παραπάνω σχέση ως προς ω , προκύπτει η παρακάτω αναδρομική σχέση:

$$x\left(\frac{\Delta V}{\Delta V_0}, \kappa\right) = \frac{\frac{\Delta V}{\Delta V_0} + 1.746 \ln(\kappa) - 2.165}{0.041\kappa^{(-0.862)}} \quad (5.27)$$

Η Εξίσωση 5.27 είναι σημαντική, καθώς έχοντας εγκαταστήσει τον αισθητήρα στη βέλτιστη θέση ως προς το μήκος της ρωγμής, από τις τιμές του αδιαστατοποιημένου δυναμικού που δίνει ο αισθητήρας και γνωρίζοντας την απόσταση (κ) μεταξύ των ηλεκτροδίων μπορεί να προβλεφτεί το ποσοστό (%) του μήκους της ρωγμής ως προς τον ουδέτερο άξονα.

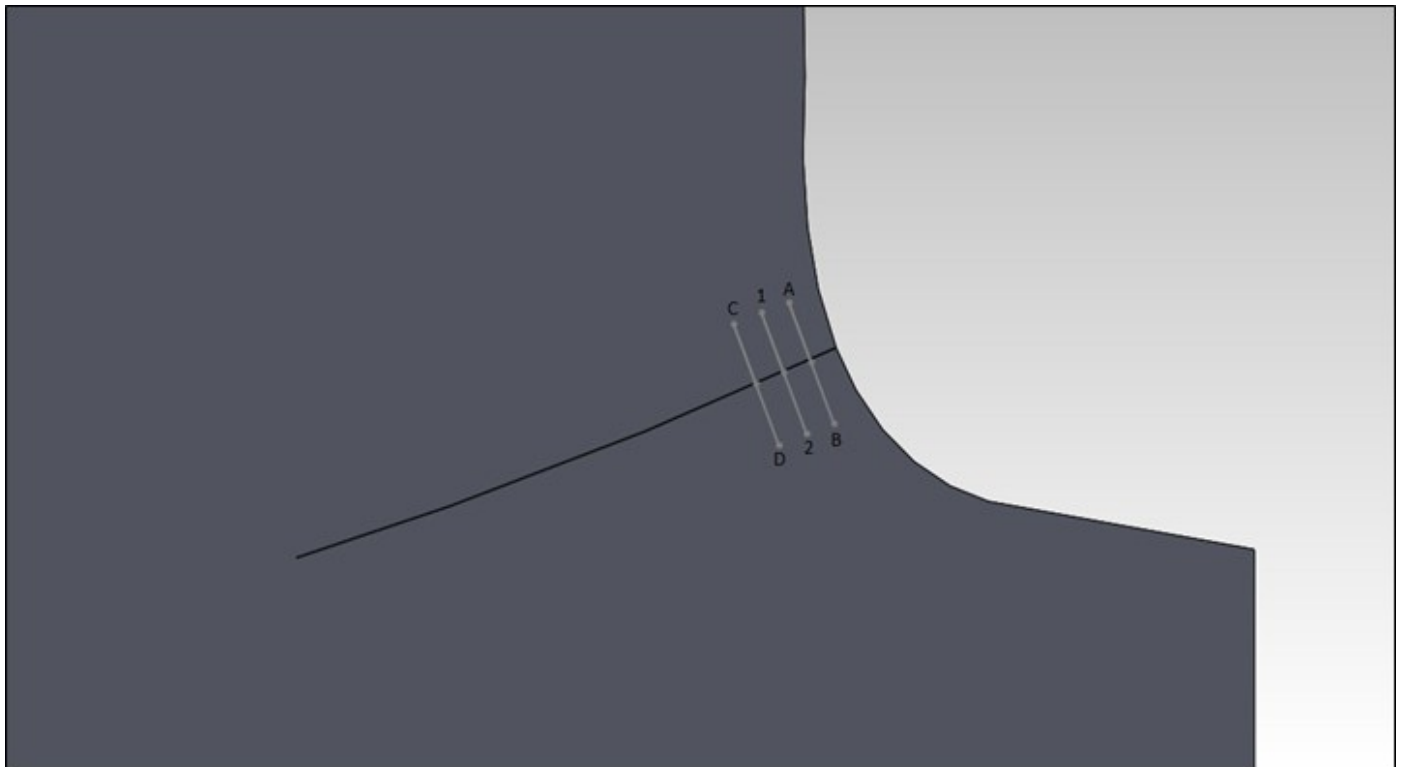
5.7. Μέτρηση του ηλεκτρικού δυναμικού σε διαφορετική θέση από αυτή της εισαγωγής του ρεύματος

Μέχρι τώρα, κάθε φορά που πραγματοποιήθηκε ηλεκτροστατική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων η μέτρηση του ηλεκτρικού δυναμικού έγινε από ένα ζεύγος ηλεκτροδίων τοποθετημένο στην αντίστοιχη θέση με αυτή των ηλεκτροδίων εισαγωγής του ρεύματος. Στην ενότητα αυτή, το ρεύμα εισάγεται από το ζεύγος ηλεκτροδίων (1-2) που βρίσκεται στη βέλτιστη θέση ως προς το μήκος της ρωγμής αλλά το αδιαστατοποιημένο δυναμικό μετράται από δύο διαφορετικά ζευγάρια ηλεκτροδίων (A-B και C-D), τοποθετημένα στις θέσεις 5% και 15%, δηλαδή ισαπέχουν από τα ηλεκτρόδια του ρεύματος. Η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων του κάθε ζευγαριού είναι ίση και για τα τρία ζευγάρια. Στο Σχ. 5.27, έχουν σχεδιαστεί τα τρία ζευγάρια ηλεκτροδίων στην επιφάνεια του οδόντος μετωπικού οδοντωτού τροχού με τη μεγαλύτερη δυνατή ρωγμή (που φτάνει στον ουδέτερο άξονα).

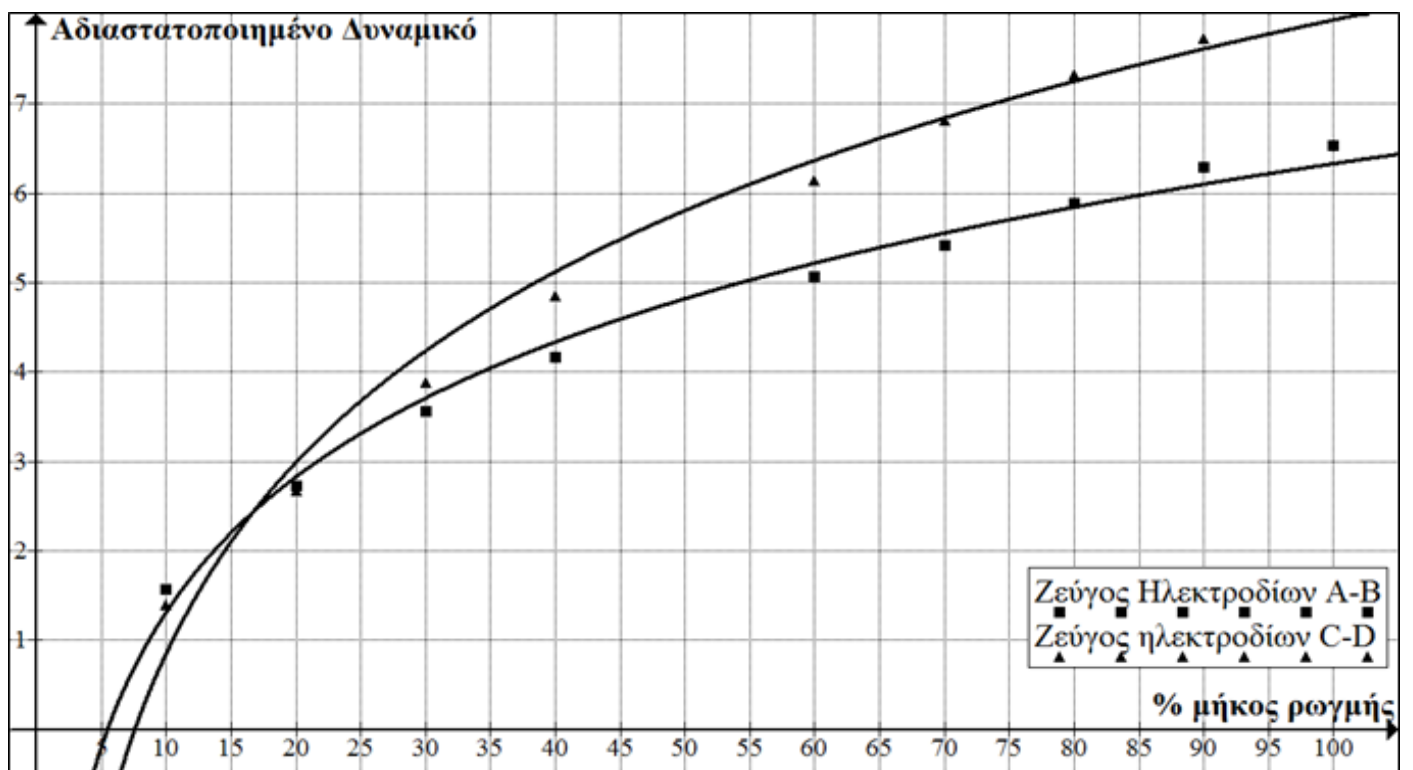
Έτσι, πραγματοποιείται ηλεκτροστατική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων στο Ansys για τους δέκα οδόντες με ρωγμή και για τον οδόντα χωρίς ρωγμή, εισάγοντας ρεύμα από το ζεύγος ηλεκτροδίων 1-2 και μετρώντας το δυναμικό από τα ζεύγη A-B και C-D. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων απεικονίζονται στο Σχ. 5.28.

Η συνάρτηση αναδρομής που προσεγγίζει καλύτερα τα αριθμητικά αποτελέσματα είναι λογαριθμική με συντελεστή γραμμικής συσχέτισης $\sim 98,5\%$ και για τις δυο συναρτήσεις.

Από το Σχ. 5.28, εξάγεται ότι το ζεύγος των ηλεκτροδίων που είναι στη θέση 5% αντιλαμβάνεται μεγαλύτερες τιμές του αδιαστατοποιημένου δυναμικού για ρωγμές που δεν ξεπερνούν το 18% της μέγιστης ρωγμής. Από το σημείο αυτό και μετά, το ζεύγος ηλεκτροδίων στο 15% παρέχει μεγαλύτερη ευαισθησία αποτελεσμάτων, δηλαδή μεγαλύτερο αδιαστατοποιημένο δυναμικό. Τα αποτελέσματα αυτά ήταν αναμενόμενα, καθώς είναι λογικό το ζεύγος των ηλεκτροδίων A-B που είναι πιο κοντά στο σημείο έναρξης της ρωγμής να δίνει καλύτερα αποτελέσματα για ρωγμές που είναι ακόμα στα πρώτα στάδια διάδοσής τους.



Σχήμα 5.27: Ζεύγη Ηλεκτροδίων, A-B στο 5%, 1-2 στο 10% και C-D στο 15% επί του ουδέτερου άξονα.



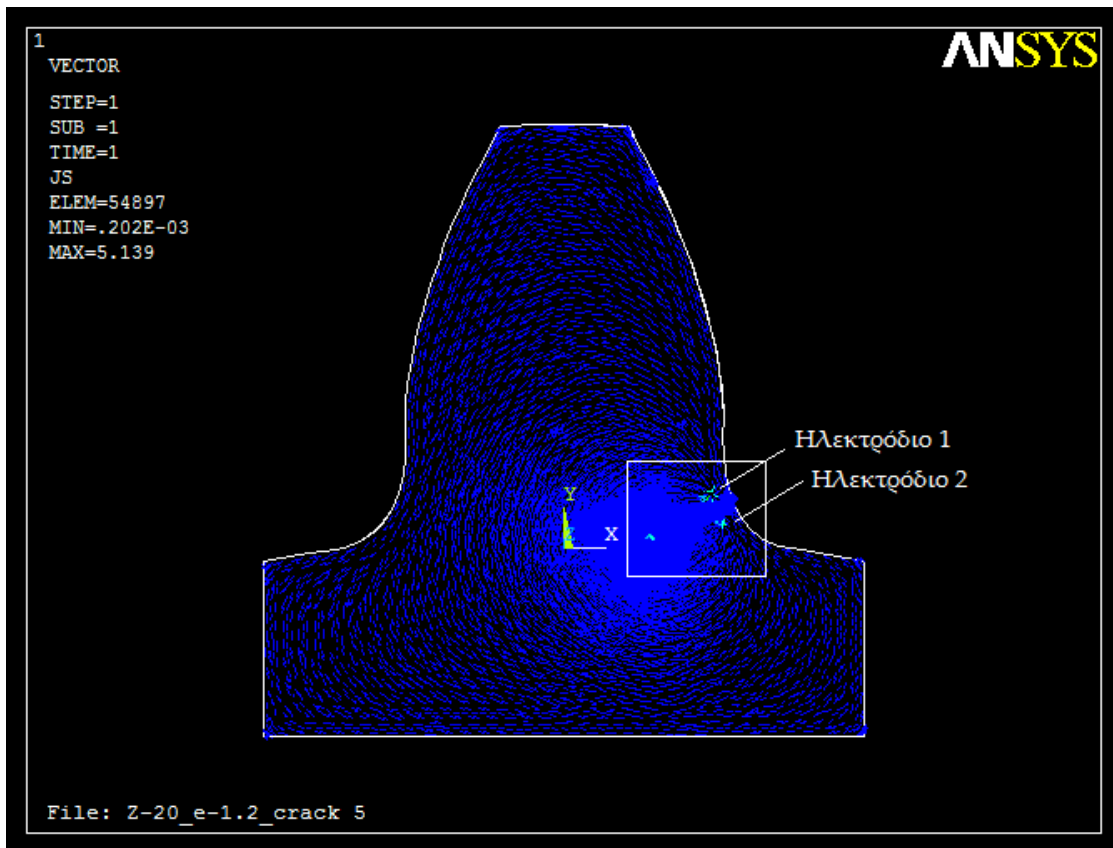
Σχήμα 5.28: Αδιαστατοποιημένο Ηλεκτρικό Δυναμικό μετρημένο από δύο διαφορετικά ζεύγη ηλεκτροδίων.

5.8. Απεικόνιση του διανυσματικού πεδίου της πυκνότητας ηλεκτρικού ρεύματος στο δοκίμιο

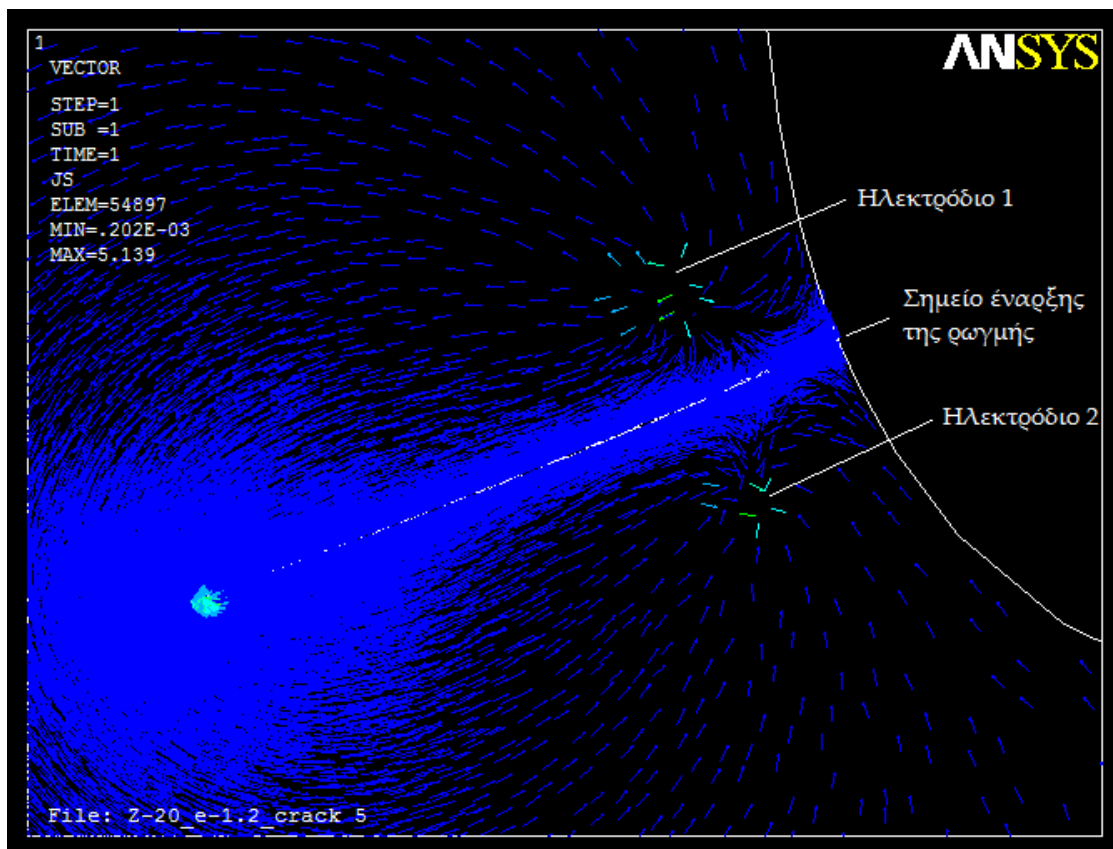
Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται, ενδεικτικά, κάποια διαγράμματα της περιοχής μέτρησης του δυναμικού, που έχουν προκύψει από την ηλεκτροστατική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων στο Ansys. Τα διαγράμματα είναι για τον μετωπικό οδόντα (Σχ. 4.10) που έχει φτάσει στο 50% της απόστασης από τον ουδέτερο άξονα με το ζεύγος ηλεκτροδίων να έχει τοποθετηθεί στη βέλτιστη θέση 10%, που βρέθηκε στις Παραγράφους 5.4 και 5.6. Τα Σχήματα 5.29-5.31 απεικονίζουν το διανυσματικό πεδίο της πυκνότητας του ηλεκτρικού ρεύματος. Το μέγεθος των διανυσμάτων, για λόγους ευκρίνειας των σχημάτων, επιλέχθηκε να είναι ομοιόμορφο.

Παρατηρείται, ότι η πυκνότητα του πεδίου γύρω από τη ρωγμή και κοντά σε αυτή είναι σαφώς πολύ μεγαλύτερη απ' ό τι στην υπόλοιπη επιφάνεια του οδόντος. Αυτό το στοιχείο μπορεί να εξηγηθεί απ' την εκ φύσεως τάση του ρεύματος να επιλέγει τη διαδρομή στην οποία συναντά τη μικρότερη δυνατή (ηλεκτρική) αντίσταση. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, μικρότερη αντίσταση συνεπάγεται τη μικρότερη δυνατή διαδρομή, γι' αυτό και το ρεύμα συγκεντρώνεται γύρω από τη ρωγμή και κοντά σε αυτή. Αυτό το εύρημα, φαίνεται ακόμα καλύτερα στα Σχήματα 5.30, 5.31. Το Σχ. 5.30 αποτελεί απεικόνιση της περιοχή μέτρησης του δυναμικού (ορθογώνιο περίγραμμα στο Σχ. 5.29).

Στο Σχ. 5.31 φαίνεται το διανυσματικό πεδίο πυκνότητας ρεύματος στην άκρη της ρωγμής. Και σε αυτή την περίπτωση, παρατηρείται η τάση του ρεύματος να ακολουθεί τη μικρότερη δυνατή διαδρομή, καθώς η πυκνότητά του στην άκρη της ρωγμής είναι σημαντικά μεγαλύτερη απ' ό τι στην υπόλοιπη επιφάνεια του οδόντος.

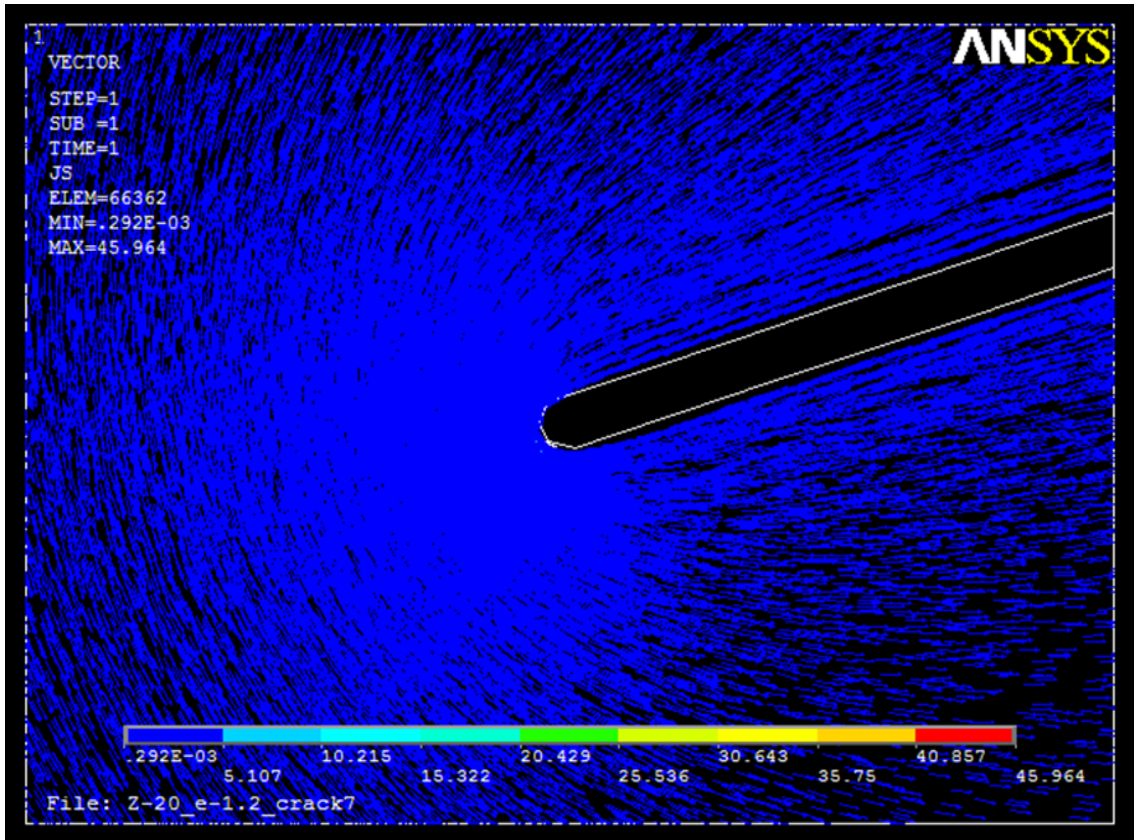


Σχήμα 5.29: Διανυσματικό πεδίο πυκνότητας ρεύματος ολόκληρου του οδόντος.



Σχ.

Σχήμα 5.30: Διανυσματικό πεδίο πυκνότητας ρεύματος στην περιοχή μέτρησης του δυναμικού.



Σχήμα 5.31: Διανυσματικό πεδίο πυκνότητας ρεύματος στην άκρη της ρωγμής.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, αναπτύχθηκε μια μέθοδος που βασίζεται στην πτώση του ηλεκτρικού δυναμικού, η οποία επιτρέπει τον προσδιορισμό σε πραγματικό χρόνο του μήκους της ρωγμής στον πόδα οδόντος μετωπικού οδοντωτού τροχού ευθείας, μετωπικής οδοντώσεως.

Από τη στατική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων που πραγματοποιήθηκε, τόσο στο Solidworks όσο και στο Ansys Multiphysics, για τους οδόντες που σχεδιάστηκαν στο Κεφάλαιο 2, διαπιστώθηκε ότι, η μέγιστη κύρια τάση εμφανίστηκε στον πόδα του οδόντος. Επιπρόσθετα, παρατηρήθηκε ότι όσο αυξάνεται ο βαθμός επικάλυψης, η κύρια τάση μειώνεται αντίστοιχα στην επικίνδυνη - για την έναρξη της ρωγμής- διατομή του ποδός του οδόντος.

Γνωρίζοντας ότι η ρωγμή στον πόδα του οδόντος ξεκινάει από το σημείο, όπου η τιμή της κύριας τάσης μεγιστοποιείται και ότι διαδίδεται κάθετα στις γραμμές της ίσης μέγιστης διατμητικής τάσης (οι οποίες έχουν βρεθεί από την στατική ανάλυση που έχει προηγηθεί), σχεδιάστηκε η τροχιά που θα ακολουθήσει η ρωγμή (crack path). Με βάση αυτή την τροχιά, η οποία αδιαστατοποιήθηκε ως προς τον ουδέτερο άξονα,

σχεδιάσθηκαν στο Solidworks δέκα ρωγμές στον ίδιο μετωπικό οδόντα ($Z=20$, $\epsilon=1.2$), που κάθε μία είναι συνέχεια της προηγούμενης, δηλαδή η τελευταία ρωγμή φτάνει στον ουδέτερο άξονα.

Πάνω σε αυτά τα δέκα δοκίμια, καθώς επίσης και στον οδόντα χωρίς ρωγμή, πραγματοποιήθηκε ικανός αριθμός αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων του ηλεκτροστατικού πεδίου, από τις οποίες εξήχθησαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Για την ανάλυση των ηλεκτροδίων από το 10% ως το 40%, όσο πιο κοντά είναι το ζευγάρι των ηλεκτροδίων εισαγωγής του ρεύματος στο σημείο έναρξης της ρωγμής, τόσο μεγαλύτερο είναι το αδιαστατοποιημένο δυναμικό $\Delta V/\Delta V_0$. Αυτό μπορεί να ερμηνευθεί από το γεγονός ότι τα ηλεκτρόδια που είναι πιο κοντά στο σημείο έναρξης της ρωγμής είναι περισσότερο ευαίσθητα σε μικρά μήκη ρωγμών. Επίσης, τα ηλεκτρόδια αυτά «αντιλαμβάνονται» καλύτερα και τις ρωγμές, των οποίων το μήκος έχει ξεπεράσει τη θέση στην οποία βρίσκονται (τα ηλεκτρόδια), διότι το ρεύμα χρειάζεται να διασχίσει μεγαλύτερη διαδρομή, άρα αυξάνεται η ηλεκτρική αντίσταση και συνεπακόλουθα η πτώση ηλεκτρικού δυναμικού.
- Το παραπάνω συμπέρασμα ισχύει μέχρι τη θέση στο 10%. Διαπιστώθηκε ότι μεταξύ των θέσεων 0 και 10%, καθώς η θέση των ηλεκτροδίων πλησιάζει το σημείο έναρξης της ρωγμής, το αδιαστατοποιημένο δυναμικό μειώνεται σημαντικά. Ο βασικός λόγος για αυτό το συμπέρασμα είναι ότι το δυναμικό ΔV_0 των δοκιμίων χωρίς ρωγμή, αυξάνεται εκθετικά (Σχ. 5.17) όταν η θέση των ηλεκτροδίων πλησιάζει από το 10% στο 0.
- Δεδομένου, ότι η βέλτιστη θέση τοποθέτησης των ηλεκτροδίων ως προς το μήκος της ρωγμής είναι εκεί όπου έχουμε τις μεγαλύτερες δυνατές τιμές του αδιαστατοποιημένου δυναμικού και έχοντας λάβει υπόψη τα παραπάνω ευρήματα, συμπεραίνεται ότι η θέση στο 10% είναι η βέλτιστη, δηλαδή, σε πρώτη φάση, τα ηλεκτρόδια τοποθετούνται στις θέσεις 1, 2 του Σχ. 5.1.
- Στη συνέχεια, για να βρεθεί ποια είναι η βέλτιστη απόσταση που πρέπει να έχουν τα ηλεκτρόδια μεταξύ τους, πραγματοποιήθηκε ηλεκτροστατική ανάλυση για τους δέκα οδόντες με ρωγμές καθώς και για τον οδόντα χωρίς ρωγμή, εισάγοντας ρεύμα μεταξύ των δέκα, διαφοροποιημένων ως προς την μεταξύ τους απόσταση, ζευγών

ηλεκτροδίων. Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων φαίνεται ότι όσο μικρότερη είναι η απόσταση των ηλεκτροδίων, τόσο μεγαλύτερο είναι το αδιαστατοποιημένο ηλεκτρικό δυναμικό. Ο βασικός λόγος γι' αυτό είναι ότι, καθώς μεγαλώνει η απόσταση των ηλεκτροδίων από την ρωγμή, το ηλεκτρικό δυναμικό ΔV_0 αυξάνεται γραμμικά, άρα το πηλίκο $\Delta V/\Delta V_0$ (δηλαδή το αδιαστατοποιημένο δυναμικό) αυξάνεται.

- Ως εκ τούτου, η βέλτιστη απόσταση των ηλεκτροδίων είναι όσο το δυνατόν γίνεται μικρότερη, άρα τα ηλεκτρόδια τοποθετούνται στα όρια της ζώνης του Σχήματος 5.2.
- Από τις γραμμικές συναρτήσεις που χρησιμοποιήθηκαν για τη μαθηματική μοντελοποίηση του αδιαστατοποιημένου δυναμικού για διαφοροποιημένα, ως προς την μεταξύ τους απόσταση, ζεύγη ηλεκτροδίων δημιουργήθηκε ένας αναδρομικός τύπος από τον οποίο μπορεί να προβλεφθεί το ποσοστό (%) του μήκους της ρωγμής ως προς τον ουδέτερο άξονα, εισάγοντας ως δεδομένα το αδιαστατοποιημένο δυναμικό που δίνει ο αισθητήρας και την αδιαστατοποιημένη απόσταση (x) μεταξύ των ηλεκτροδίων.
- Από επιπλέον ηλεκτροστατικές αναλύσεις (υποθέτοντας ότι $\rho = 1 \text{ } \Omega\text{m}$ και εφαρμόζοντας μοναδιαίο συνεχές μεταξύ των ηλεκτροδίων σε κάθε θέση), προέκυψε ότι η ηλεκτροστατική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων είναι ανεξάρτητη της τιμής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.
- Εισάγοντας ρεύμα από το ζεύγος ηλεκτροδίων στη βέλτιστη θέση στο 10% και μετρώντας το αδιαστατοποιημένο δυναμικό από δύο διαφορετικά ζευγάρια ηλεκτροδίων, τοποθετημένα στις θέσεις 5% και 15%, φάνηκε ότι το ζεύγος των ηλεκτροδίων που είναι πιο κοντά στο σημείο έναρξης της ρωγμής (δηλαδή στη θέση 5%) δίνει καλύτερα αποτελέσματα για ρωγμές που είναι ακόμα στο πρώτα στάδια διάδοσής τους.

Προτάσεις για μελλοντική εργασία

Η παρούσα μέθοδος θα μπορούσε να εφαρμοστεί πειραματικά στο εργαστήριο, δηλαδή να κατασκευαστούν πραγματικά δοκίμια οδόντων με ρωγμές, στην επιφάνεια των οποίων θα εισαγάγουμε συνεχές ρεύμα και θα βρούμε τη συσχέτιση μεταξύ της πτώσης του ηλεκτρικού δυναμικού και του % μήκους της ρωγμής.

Επιπρόσθετα, η παρούσα μέθοδος μπορεί να γενικευθεί, μελετώντας την εφαρμογή της σε οδόντες με διαφορετικά προφίλ κατατομών, καθώς επίσης, μπορούν να γίνουν δοκιμές εισαγωγής και μέτρησης του ρεύματος από πολλά ζεύγη ηλεκτροδίων και να βρεθεί πως επηρεάζεται η μέθοδος.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Θ.Ν. Κωστόπουλος, *Οδοντώσεις και μειωτήρες στροφών*, Εκδόσεις Συμμεών, Αθήνα, 1991.
- [2] B. Abersek, J. Flaker, *How gears break*, WITpress Publications, 2004.
- [3] G.R. Irwin, *Fracture Dynamics. Fracturing of Metals*, Am. Soc. Publications, Cleveland, 1948.
- [4] V. Wowk, *Machinery Vibration: Measurement and Analysis*, McGraw-Hill Prof Med/Tech, 1991.
- [5] I. Howard, J. Shengxiang, J. Wang, *The dynamic modelling of a spur gear in mesh including friction and a crack*, Mechanical Systems and Signal Processing 15(5), 831-853, 2001.
- [6] T. Toutountzakis, C. Keong Tan, D. Mba, *Application of acoustic emission to seeded gear fault detection*, NDT&E International 38, 27–36, 2005.
- [7] Saxena, C.L. Muhlstein., *Fatigue crack growth testing*, in : H. Kuhn, D. Medlin (Eds.), *Mechanical Testing and Evaluation*, ASM Handbook, vol. 8, ASM International, Materials Park, Ohio, 2000.

- [8] R. Ghajarieh, M. Saka, H. Abe, I. Komura, H. Sakamoto, *Simplified NDE of multiple cracks by means of the potential drop technique*, NDT & E International, Vol. 28, No. 1, 23-28, 1995.
- [9] V. Spitas, C. Spitas, P. Michelis, *Real-time measurement of shear fatigue crack propagation at high-temperature using the potential drop technique*, Measurement 41, 424-432, 2008.
- [10] 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.
- [11] P. Michelis, *European Patent EP 0687899*.
- [12] P. Michelis, *Specimen Geometric Configuration for Uniform Shear Distribution During Testing*, European Patent EP 0687899, 1997.
- [13] *Manual*, Solidworks 2011, Dassault Systèmes.
- [14] T.N. Costopoulos, *Generalized Theory of Gearing and Tooth Stress*, Proceedings of Ninth World Congress on the Theory of Machines and Mechanisms, Vol. 1, p. 369, Milan, Italy, 1995.
- [15] T.N. Costopoulos, V. Spitas, *Analytical Mechanics of Spur Gears*, Proceedings of the 4th National Congress of Mechanics, Vol. 1, 187-194, Xanthi, Greece, 1994.
- [16] V. Spitas, C. Spitas, *Numerical and experimental comparative study of strength-optimised AGMA and FZG spur gears*, Acta Mechanica 193, 113-126, 2007.
- [17] *User's Guide*, Ansys Multiphysics, version 12.
- [18] Γ.Τ. Τσαμασφύρος, *Μηχανική Παραμορφώσιμων Σώματος Ι*, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, 1991.