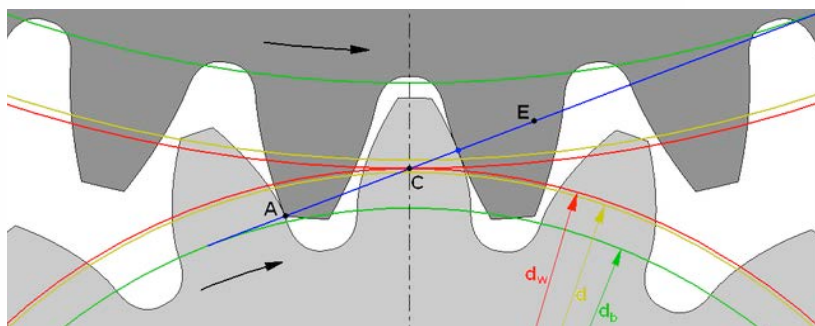




ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΙΚΡΟΚΟΠΗΣ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ



ΝΙΚΟΛΑΟΣ
ΜΑΚΑΡΟΓΛΟΥ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Παναγιώτης Αλευράς,
Επίκουρος Καθηγητής



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

Εκπαιδευτικά μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων στατικής και
δυναμικής αντοχής στοιχείων μηχανών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΜΑΚΑΡΟΓΛΟΥ

Τριμελής επιτροπή:

Παναγιώτης Αλευράς, Επίκουρος Καθηγητής (Επιβλέπων)

Αντωνιάδης Αριστομένης, Καθηγητής

Σταυρουλάκης Γεώργιος, Καθηγητής

Πρόλογος και Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία σημειώνει τη λήξη των προπτυχιακών μου σπουδών. Καθ' όλη τη διάρκεια αυτών αποκόμισα αρκετές γνώσεις, οι οποίες θα αποτελέσουν σημαντικά εφόδια για τη μελλοντική μου καριέρα. Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλο το προσωπικό του Πολυτεχνείου Κρήτης και της Σχολής Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, αλλά ιδιαίτερα τον επιβλέπων καθηγητή μου, Δρ. Παναγιώτη Αλευρά για την ανάθεση, καθοδήγηση και υποστήριξη της διπλωματικής εργασίας. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, τον αδελφό μου και τους συγγενείς μου για την αγάπη και την υποστήριξη τους κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζει αναλυτικές οδηγίες χρήσης για τα λογισμικά προσομοίωσης μηχανικής Ansys και Fusion 360. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν τρία παραδείγματα μοντέλων, δίνοντας στο χρήστη πληροφορίες για τις διαφορετικές περιπτώσεις που εξετάστηκαν. Αρχικά, πραγματοποιήθηκε ο επανυπολογισμός του συντελεστή συγκέντρωσης τάσεων (K_t), που υπάρχει στα διαγράμματα του Κεφαλαίου 5.3.6 από το σύγγραμμα «Στοιχεία Μηχανών» του συγγραφέα Χρήστος Α. Παπαδόπουλος, έκδοση 3^η, εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ. Για το κάθε διάγραμμα από τις σελίδες 134-139, δημιουργήθηκαν τα σχήματα, πάνω στα οποία έγιναν οι προσομοιώσεις στο λογισμικό Ansys. Για την πρώτη καμπύλη αλλάζοντας τις απαραίτητες διαστάσεις βρέθηκαν 6 σημεία και ο συντελεστής συγκέντρωσης τάσεων τους. Ο συντελεστής αυτός συγκρίθηκε με εκείνον που περιέχει το σύγγραμμα σε άξονα i) με σφηνόδρομο ημικυκλικού άκρου, ii) με μεταβολή διατομών, iii) με εγκοπές και iv) με οπή που υπόκεινται σε εφελκυσμό, κάμψη και στρέψη. Βρέθηκε ότι οι θεωρητικές και υπολογιστικές τιμές είναι παραπλήσιες, επαληθεύοντας την ορθότητα των μοντέλων. Στο δεύτερο στάδιο χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Fusion 360 με το οποίο σχεδιάστηκαν οδοντωτοί τροχοί 21 και 42 δοντιών. Έγινε σύγκριση της καμπτικής τάσης και επιφανειακής πίεσης, καθ' όσον διακυμαίνεται η στρεπτική δύναμη που ασκείται στον μικρό οδοντωτό τροχό. Επαληθεύθηκαν οι υπολογιστικές τιμές καμπτικής τάσης και επιφανειακής πίεσης μέσω των σχέσεων κατά AGMA για δύναμη ροπής από 100 έως 800 N-m. Στο τρίτο και τελευταίο στάδιο της διπλωματικής εργασίας, έγινε εκ νέου σύγκριση της καμπτικής τάσης και επιφανειακής πίεσης, αλλά σε τροχούς 20 και 40 δοντιών, σταθερής δύναμης, με περιστρεφόμενη κλίση επαφής. Βρέθηκε μία ευθεία πάνω στο σημείο επαφής τους, όπου σε όλα τα σημεία της υπάρχει επαφή ενός σετ δοντιών. Έπειτα, βρέθηκαν 8 σημεία πάνω στη ευθεία αυτή και μέσω μετακίνησης και των 2 τροχών κατά τον άξονα Z υπολογίστηκε η επιφανειακή πίεση στο σημείο επαφής τους για ροπή δύναμης 400 N-m. Όταν το σημείο επαφής απομακρύνεται από τη κορυφή του δοντιού προς τη ρίζα του pinion, μειώνεται η επιφανειακή πίεση. Επιπρόσθετα, συγκρίθηκε και η καμπτική τάση του pinion και του τροχού σε 8 διαφορετικά σημεία, κατά το οποίο παρατηρήθηκε ότι όσο το σημείο επαφής απομακρυνόταν από την κορυφή του δοντιού προς τη ρίζα του pinion, τόσο η καμπτική τάση αυξανόταν. Το ίδιο συνέβη και για τον τροχό. Επομένως, συμπεράστηκε ότι η επιφανειακή πίεση είναι αντιστρόφως ανάλογη της καμπτικής τάσης.

Abstract

This thesis presents detailed user instructions for the engineering simulation software Ansys and Fusion 360. For this purpose, three example models were used, giving the user information about the different cases considered. Initially, the stress concentration factor (K_t) was recalculated, which is present in the diagrams of Chapter 5.3.6 from the book "Elements of Machines" by the author Christos A. Papadopoulos, 3rd edition, TZIOLA publications. For each diagram from pages 134-139, the figures were created, on which the simulations were made in the Ansys software. For the first curve, by changing the necessary dimensions, 6 points and their stress concentration factor were found. This coefficient was compared to that contained in the book for axis i) with a hemispherical tip spline, ii) with changing cross-sections, iii) with notches and iv) with a hole subjected to tension, bending and torsion. The theoretical and calculated values were found to be close, verifying the correctness of the models. In the second stage, the Fusion 360 software was used, with which 21 and 42 tooth spur gears were designed. A comparison of bending stress and surface pressure was made as the torsional force applied to the small gear varies. The calculated bending stress and surface stress values were verified through the AGMA equations for torque force from 100 to 800 N-m. In the third and final stage of the thesis, the bending stress and surface pressure were again compared, but on 20 and 40 teeth spur gears, the force being constant, with rotating contact slope. A straight line was found on their point of contact, where at all its points there is contact of one set of teeth. Then, 8 points were found on this line and by moving both wheels along the Z axis, the surface pressure at their contact point was calculated for a torque of 400 N-m. As the contact point moves away from the top of the tooth towards the root of the pinion, the surface pressure is reduced. In addition, the bending stress of the pinion and wheel at 8 different points was compared, in which it was observed that as the contact point moved away from the top of the tooth towards the root of the pinion, the bending stress increased. The same happened for the wheel. Therefore, it was concluded that the surface pressure is inversely proportional to the bending stress.

Περιεχόμενα

Περίληψη	2
Abstract	3
Περιεχόμενα.....	4
Λίστα Εικόνων	6
Λίστα Πινάκων	10
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	11
1.1 Θεωρητικό υπόβαθρο.....	11
1.1.1 Εφελκυσμός	11
1.1.2 Θλίψη	13
1.1.3 Κάμψη	13
1.1.4 Στρέψη	14
1.1.5 Συντελεστής συγκέντρωσης τάσεων K_t	15
1.1.6 Οδοντωτοί τροχοί.....	17
1.2 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας	19
Κεφάλαιο 2: Πληροφορίες για το λογισμικό H/Y Ansys.....	20
2.1 Ξεκινώντας τη σχεδίαση	20
Κεφάλαιο 3: Αναλύσεις τάσεων σε άξονα με σφηνόδρομο ημικυκλικού άκρου και σε άξονες με μεταβολή διατομών, εγχοπών και οπών	23
3.1 Άξονας με σφηνόδρομο ημικυκλικού άκρου	23
3.1.1 Σχεδίαση άξονα με σφηνόδρομο.....	24
3.1.2 Παραμετροποίηση.....	34
3.1.3 Πληροφορίες για το Ansys Mechanical	38
3.1.4 Δημιουργία Mesh	43
3.1.5 Αλλαγή διαστάσεων	46
3.1.6 Κάμψη	48
3.1.7 Στρέψη	55
3.2 Ανάλυση τάσεων σε άξονες με μεταβολή διατομών, εγχοπών και οπών	58
Κεφάλαιο 4: Ανάλυση ανάπτυξης τάσεων σε οδοντωτούς τροχούς	60
4.1 Σύγκριση υπολογιστικών με θεωρητικών καμπτικών τάσεων και επιφανειακών πιέσεων 21 και 42 δοντιών.....	60

4.2 Ανάλυση επιφανειακών πιέσεων για διαφορετικές γωνίες επαφής σε οδοντωτούς τροχούς 20 και 40 δοντιών.....	63
Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα και Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	69
Βιβλιογραφία	71
Παράρτημα Α: Αναλυτική περιγραφή αξόνων με μεταβολή διατομών, εγκοπών, οπών.....	73
A1. Άξονας με μεταβολή διατομών	73
A1.1 Σχεδίαση.....	74
A1.2 Κάμψη	75
A1.3 Εφελκυσμός	77
A1.4 Στρέψη	79
A2. Άξονας με εγκοπές	81
A2.1 Σχεδίαση.....	82
A2.2 Κάμψη	83
A2.3 Εφελκυσμός	84
A2.4 Στρέψη	85
A3. Άξονας με οπή	86
A3.1 Σχεδίαση.....	86
A3.2 Κάμψη	87
A3.3 Εφελκυσμός	88
A3.4 Στρέψη	89
Παράρτημα Β: Αναλυτική περιγραφή δημιουργίας οδοντωτών τροχών και προετοιμασίας τους.....	91
B1. Δημιουργία οδοντωτών τροχών στο Autodesk Fusion 360.....	91
B2. Προετοιμασία οδοντωτών τροχών στο Ansys DesignModeler	96
B3. Επεξεργασία των οδοντωτών τροχών στο Ansys Mechanical	96

Λίστα Εικόνων

Εικόνα 1. Δυνάμεις εφελκυσμού ‘P’ και το αποτέλεσμα επιμήκυνσης μιας ράβδου.	12
Εικόνα 2. Καταπόνηση ράβδου σε θλίψη από την εφαρμογή δύο δυνάμεων προς το κέντρο της.	13
Εικόνα 3. Α) Κάμψη πακτωμένης δοκού λόγω εφαρμογής δύναμης στο ελεύθερο άκρο της και Β) απεικόνιση των τάσεων εφελκυσμού και θλίψης που σημειώνονται κατά την κάμψη μιας δοκού.	14
Εικόνα 4. Καταπόνηση πακτωμένης ράβδου σε στρέψη, λόγω εφαρμογής ζεύγους αντίθετων δυνάμεων.	15
Εικόνα 5. Συγκέντρωση τάσεων γύρω από μια οπή.	16
Εικόνα 6. Τύποι οδοντωτών τροχών.	17
Εικόνα 7. Επίδειξη του pinion gear (αριστερά) και του idler gear (δεξιά).	18
Εικόνα 8. Πλέξη οδοντωτών τροχών εξειλιγμένης.	18
Εικόνα 9. Τύπος εσωτερικών οδοντωτών τροχών.	19
Εικόνα 10. Αρχικά βήματα μέσα στο Ansys Workbench πριν τη σχεδίαση.	21
Εικόνα 11. Η αρχική οθόνη του ‘DesignModeler’.	22
Εικόνα 12. Επιλογή μονάδων μέτρησης στο ‘DesignModeler’.	22
Εικόνα 13. Σχήμα 5-6γ σελίδας 134 του συγγράμματος Παπαδόπουλος (2017): Συγκέντρωση τάσεων σε άξονα, λόγω εγχοπών σε κάμψη.	23
Εικόνα 14. Σχήμα 5-6δ σελίδας 135 του συγγράμματος Παπαδόπουλος (2017): Συγκέντρωση τάσεων σε άξονα, λόγω εγχοπών σε στρέψη.	24
Εικόνα 15. Επιλογή επιπέδου σχεδίασης.	25
Εικόνα 16. Εικονίδιο αξόνων.	25
Εικόνα 17. Εφαρμογή αξόνων YZ.	25
Εικόνα 18. Αλλαγή καρτέλας από Μοντελοποίησης (Sketching) σε Σχεδιασμού (Modelling).	26
Εικόνα 19. Ορθό κλειδίωμα του κέρσορα στην αρχή των αξόνων.	26
Εικόνα 20. Λανθασμένο κλειδίωμα του κέρσορα στην αρχή των αξόνων.	26
Εικόνα 21. Δημιουργία κύκλου.	27
Εικόνα 22. Οι διαθέσιμες εντολές για τη δημιουργία και τροποποίηση των διαστάσεων (Dimensions). .	27
Εικόνα 23. Η διάσταση ‘D1’ για τη διάμετρο του σχεδιασμένου κύκλου.	28
Εικόνα 24. Πληροφορίες για τη ‘D1’ διάσταση.	28
Εικόνα 25. Θέση της εντολής ‘Extrude’.	29
Εικόνα 26. Πληροφορίες της Εξώθησης (Extrude).	29
Εικόνα 27. Τελικό αποτέλεσμα της καρτέλας μετά τις τροποποιήσεις.	30
Εικόνα 28. Θέση της εντολής ‘Generate’.	30
Εικόνα 29. Εξώθηση κύκλου για τη δημιουργία του άξονα.	31
Εικόνα 30. Θέση του εικονιδίου δημιουργίας νέου σκίτσου.	31
Εικόνα 31. Αποτέλεσμα σχεδίασης του παραλληλογράμμου και του κύκλου.	32
Εικόνα 32. Θέση εντολών πλέγματος (Grid).	32
Εικόνα 33. Απεικόνιση πλέγματος (Grid).	33
Εικόνα 34. Αποτέλεσμα μετά από αφαίρεση ανεπιθύμητων γραμμών.	33
Εικόνα 35. Θέση εντολής παραμετροποίησης (Parameters).	34
Εικόνα 36. Δημιουργία παραμέτρου διαμέτρου ‘d’.	34
Εικόνα 37. Δημιουργία παραμετρικών σχέσεων.	35
Εικόνα 38. Δεύτερη εξώθηση με την εντολή αφαίρεσης υλικού.	35

Εικόνα 39. Δημιουργία παραμέτρου ‘FD1’ και σχέσεων της	36
Εικόνα 40. Θέση εντολής ‘Blend’	36
Εικόνα 41. Απεικόνιση κάθετων γωνιών	37
Εικόνα 42. Απεικόνιση οριζόντιων γωνιών	37
Εικόνα 43. Απεικόνιση ολοκληρωμένου αντικειμένου με το σφηνόδρομο ημικυκλικού άκρου.	38
Εικόνα 44. Θέση κελιού ‘Model’ στο ‘Workbench’	38
Εικόνα 45. Κύριο παράθυρο του ‘Ansys Mechanical’	39
Εικόνα 46. Καρτέλα ‘Outline’	39
Εικόνα 47. Πληροφορίες για το μοντέλο μέσω της καρτέλας ‘Details’	39
Εικόνα 48. Πληροφορίες για τη γεωμετρία του σχήματος	40
Εικόνα 49. Πληροφορίες για το υλικό του σχήματος	41
Εικόνα 50. Απεικόνιση των πιθανών εντολών του ‘Static Structural’	42
Εικόνα 51. Απεικόνιση των πιθανών αποτελεσμάτων του ‘Static Structural’	43
Εικόνα 52. Θέση εντολών δημιουργίας πλέγματος (Mesh).	44
Εικόνα 53. Αρχικό πλέγμα αντικειμένου	44
Εικόνα 54. Αλλαγή μεγέθους κομματιών του πλέγματος (Mesh).	45
Εικόνα 55. Απεικόνιση πλέγματος (Mesh) μεγαλύτερης ακρίβειας	45
Εικόνα 56. Αλλαγή διάστασης διαμέτρου κύκλου μέσω παραμέτρων.	46
Εικόνα 57. Αλλαγή διάστασης καμπύλης σφηνόδρομου.	46
Εικόνα 58. Μήνυμα προειδοποίησης τροποποιημένης γεωμετρίας.	47
Εικόνα 59. Ενημέρωση γεωμετρίας σχήματος μέσω του ‘Mechanical’	47
Εικόνα 60. Θέση εντολής ‘Moment’	48
Εικόνα 61. Απεικόνιση επιλεγμένης δεξιάς πλευράς αντικειμένου για την εφαρμογή της ροπής.	49
Εικόνα 62. Πεδίο εισαγωγής της ροπής.	49
Εικόνα 63. Απεικόνιση σημείου εφαρμογής ροπής	49
Εικόνα 64. Θέση του ‘Normal Stress’	50
Εικόνα 65. Εφαρμογή X άξονα ως προσανατολισμό του στρες	50
Εικόνα 66. Θέση εντολής ‘Fixed Support’	51
Εικόνα 67. Θέση εντολής ‘Weak Springs’	52
Εικόνα 68. Θέση εντολής ‘Solve’	52
Εικόνα 69. Τελικά αποτελέσματα του ‘Normal Stress’	53
Εικόνα 70. Διάγραμμα σύγκρισης Υπολογιστικού με Θεωρητικού K_t σε άξονα με σφηνόδρομο ημικυκλικού άκρου σε κάμψη	55
Εικόνα 71. Θέση ‘Maximum Shear Stress’	56
Εικόνα 72. Διάγραμμα σύγκρισης Υπολογιστικού με Θεωρητικού K_t σε άξονα με σφηνόδρομο ημικυκλικού άκρου σε στρέψη.	57
Εικόνα 73. Σχήμα 18-22β σελίδας 795 του συγγράμματος Παπαδόπουλος (2017): Συντελεστής γεωμετρίας J για μετωπικούς οδοντωτούς τροχούς ($\phi = 20^\circ$ και $h_k=m$).	61
Εικόνα 74. Σχήμα 18-36 σελίδας 805 του συγγράμματος Παπαδόπουλος (2017): Γεωμετρικός συντελεστής I για κανονικούς μετωπικούς οδοντωτούς τροχούς 20°	62
Εικόνα 75. Σύγκριση υπολογιστικών τάσεων pinion-τροχού και επιφανειακών πιέσεων, σε σχέση με τις αντίστοιχες που προκύπτουν από τις εξισώσεις κατά AGMA	63
Εικόνα 76. Τελικό αποτέλεσμα οδοντωτών τροχών με 20 και 40 δόντια	64
Εικόνα 77. Σχήμα 18-9 σελίδας 779 του συγγράμματος Παπαδόπουλος (2017): Λόγος επαφής σε μετωπικούς οδοντωτούς τροχούς γωνίας εξελιγμένης 20°	65

Εικόνα 78. Απεικόνιση των προαναφερθέντων κύκλων και ευθειών επαφής των οδοντωτών τροχών 20 και 40 δοντιών.....	65
Εικόνα 79. Διάγραμμα σύγκρισης επιφανειακής πίεσης για διαφορετικές γωνίες επαφής Pinion και Τροχού.	66
Εικόνα 80. Διάγραμμα σύγκρισης καμπτικής τάσης Pinion για διαφορετικές γωνίες επαφής Pinion.	67
Εικόνα 81. Διάγραμμα σύγκρισης καμπτικής τάσης Τροχού για διαφορετικές γωνίες επαφής Pinion.	67
Εικόνα 82. Σχήμα 5-7β σελίδας 137 του συγγράμματος Παπαδόπουλος (2017): Συντελεστές συγκέντρωσης τάσεων σε μεταβολές διατομών άξονα σε κάμψη, εφελκυσμό και στρέψη.	73
Εικόνα 83. Θέση εντολής ‘Selection Filter: Faces’.....	74
Εικόνα 84. Θέση εντολής δημιουργίας νέου επιπέδου (New Plane).....	74
Εικόνα 85. Απεικόνιση του νέου επιπέδου, ‘Plane4’, πάνω στην εξώθηση.....	75
Εικόνα 86. Απεικόνιση τελικού σχήματος άξονα με μεταβολή διατομών.	75
Εικόνα 87. Αποτέλεσμα αξονικής τάσης στην κάμψη σε άξονα με μεταβολή διατομών.	76
Εικόνα 88. Θέση εντολής ‘Force’	77
Εικόνα 89. Απεικόνιση ορθά τοποθετημένων εφελκυστικών δυνάμεων.	77
Εικόνα 90. Αποτέλεσμα αξονικής τάσης στον εφελκυσμό σε άξονα με μεταβολή διατομών.....	78
Εικόνα 91. Αποτέλεσμα διατμητικής τάσης στη στρέψη σε άξονα με μεταβολή διατομών.	79
Εικόνα 92. Σχήμα 5-8 σελίδας 138 του συγγράμματος Παπαδόπουλος (2017): Συντελεστές συγκέντρωσης τάσεων σε εγκοπές άξονα σε κάμψη, εφελκυσμό και στρέψη.....	81
Εικόνα 93. Παραμετροποιημένες τιμές διαμέτρων και εξωθήσεων.....	82
Εικόνα 94. Απεικόνιση τελικού σχήματος.....	82
Εικόνα 95. Αποτέλεσμα αξονικής τάσης στην κάμψη σε άξονα με εγκοπές.....	83
Εικόνα 96. Αποτέλεσμα αξονικής τάσης στον εφελκυσμό σε άξονα με εγκοπές.....	84
Εικόνα 97. Αποτέλεσμα διατμητικής τάσης στην στρέψη σε άξονα με εγκοπές.	85
Εικόνα 98. Σχήμα 5-9 σελίδας 139 του συγγράμματος Παπαδόπουλος (2017): Συντελεστές συγκέντρωσης τάσεων σε οπή άξονα σε εφελκυσμό, κάμψη και στρέψη.	86
Εικόνα 99. Απεικόνιση τελικού σχήματος.....	87
Εικόνα 100. Αποτέλεσμα αξονικής τάσης στη κάμψη σε άξονα με οπή.....	87
Εικόνα 101. Αποτέλεσμα αξονικής τάσης στον εφελκυσμό σε άξονα με οπή.	88
Εικόνα 102. Αποτέλεσμα διατμητικής τάσης στη στρέψη σε άξονα με οπή.....	89
Εικόνα 103. Θέση GF Gear Generator add-in.....	91
Εικόνα 104. Διαφορετικές επιλογές δημιουργίας οδοντωτών τροχών και επιλογή του Spur Gear για τη συγκεκριμένη εργασία.	91
Εικόνα 105. Διεπαφή χρήστη για τη δημιουργία οδοντωτών τροχών.....	92
Εικόνα 106. Ο νεο-δημιουργημένος οδοντωτός τροχός 21 δοντιών.	93
Εικόνα 107. Ο νεο-δημιουργημένος οδοντωτός τροχός 42 δοντιών.	93
Εικόνα 108. Τελική θέση οδοντωτών τροχών.	94
Εικόνα 109. Διεπαφή χρήστη για τη δημιουργία οπών.	94
Εικόνα 110. Τελικό αποτέλεσμα οδοντωτών τροχών στο Fusion 360 με τη δημιουργία οπών.....	95
Εικόνα 111. Θέση γωνιών και αποτέλεσμα εντολής ‘Fillet’ για τη δυνατότητα επιλογής εφαρμογής τάσεων σε μελλοντικό χρόνο.	95
Εικόνα 112. Απεικόνιση αλλαγών στις ρυθμίσεις επαφής για τους οδοντωτούς τροχούς στο Ansys Mechanical.....	97
Εικόνα 113. Οι επιλεγμένες άκρες για επαφή.	97
Εικόνα 114. Απεικόνιση ορθής θέσης υποστηρίξεων και ροπής.....	98

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 1. Διαφορά Υπολογιστικού με Θεωρητικού συντελεστή K_t , σε άξονα με σφηνόδρομο ημικυκλικού άκρου σε κάμψη.....	54
Πίνακας 2. Διαφορά Υπολογιστικού με Θεωρητικού συντελεστή K_t , σε άξονα με σφηνόδρομο ημικυκλικού άκρου σε στρέψη.	57
Πίνακας 3. Διαγράμματα σύγκρισης Υπολογιστικού με Θεωρητικού συντελεστή K_t στους άξονες με μεταβολή διατομών, εγχοπών και οπών σε κάμψη, εφελκυσμό και στρέψη.....	58
Πίνακας 4. Οι διαστάσεις του μοντελοποιημένου οδοντωτού τροχού και τα χαρακτηριστικά του υλικού του (Παπαδόπουλος, 2017).....	62
Πίνακας 5. Διαφορά Υπολογιστικού με Θεωρητικού συντελεστή K_t , σε άξονα με μεταβολή διατομών σε κάμψη για $D/d = 6$	76
Πίνακας 6. Διαφορά Υπολογιστικού με Θεωρητικού συντελεστή K_t , σε άξονα με μεταβολή διατομών σε εφελκυσμό για $D/d = 2$	78
Πίνακας 7. Διαφορά Υπολογιστικού με Θεωρητικού συντελεστή K_t , σε άξονα με μεταβολή διατομών σε στρέψη για $D/d = 2$	80
Πίνακας 8. Διαφορά Υπολογιστικού με Θεωρητικού συντελεστή K_t , σε άξονα με εγχοπές σε κάμψη για $D/d = 2$	83
Πίνακας 9. Διαφορά Υπολογιστικού με Θεωρητικού συντελεστή K_t , σε άξονα με εγχοπές σε εφελκυσμό για $D/d = 2$	84
Πίνακας 10. Διαφορά Υπολογιστικού με Θεωρητικού συντελεστή K_t , σε άξονα με εγχοπές σε στρέψη για $D/d = 2$	85
Πίνακας 11. Διαφορά Υπολογιστικού με Θεωρητικού συντελεστή K_t , σε οπή άξονα σε κάμψη.....	88
Πίνακας 12. Διαφορά Υπολογιστικού με Θεωρητικού συντελεστή K_t , σε οπή άξονα σε εφελκυσμό.....	89
Πίνακας 13. Διαφορά Υπολογιστικού με Θεωρητικού συντελεστή K_t , σε οπή άξονα σε στρέψη.	90

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα λογισμικά H/Y, αυτά είναι: Ansys Workbench, Ansys Mechanical και Ansys DesignModeler, που αποτελούν μέρος της σουίτας λογισμικού Ansys και παρέχουν εργαλεία για διάφορες απόψεις της μηχανικής προσομοίωσης. Πιο συγκεκριμένα, το Ansys Workbench είναι ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον εργασίας που επιτρέπει τη δημιουργία, διαμόρφωση και εκτέλεση προσομοιώσεων σε διάφορους τομείς της μηχανικής. Παρέχει γραφικές διεπαφές για τη δημιουργία και την ανάλυση μοντέλων, καθώς και εργαλεία για τη διαχείριση των προσομοιώσεων και την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων. Το Ansys DesignModeler είναι ένα εργαλείο για τη δημιουργία και την επεξεργασία γεωμετρικών μοντέλων. Παρέχει δυνατότητες για την εισαγωγή, τη μετατροπή και τον σχεδιασμό 3D μοντέλων. Επιτρέπει επίσης την εφαρμογή διάφορων μετασχηματισμών και λειτουργιών για τη βελτιστοποίηση της γεωμετρίας του μοντέλου. Το Ansys Mechanical είναι ένα εξειδικευμένο λογισμικό προσομοίωσης που επικεντρώνεται στη μηχανική δομών. Παρέχει προηγμένες δυνατότητες για την ανάλυση της μηχανικής συμπεριφοράς, τη διάγνωση προβλημάτων, τη βελτιστοποίηση των σχεδίων, καθώς και την προσομοίωση δυναμικών φαινομένων και θερμικής ανάλυσης. Αυτά τα λογισμικά συνεργάζονται μεταξύ τους στο περιβάλλον του Ansys Workbench, επιτρέποντας στους χρήστες να δημιουργούν, να αναλύουν και να βελτιστοποιούν πολύπλοκα μηχανικά συστήματα (Ansys, Inc., 2024). Τέλος, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Fusion 360, το οποίο είναι μια περιεκτική πλατφόρμα σχεδίασης υποβοηθούμενης από υπολογιστή (CAD), μηχανικής υποβοηθούμενης από υπολογιστή (CAE) και κατασκευής υποβοηθούμενης από υπολογιστή (CAM), αναπτυγμένη από την Autodesk. Πρόκειται για ένα λογισμικό που βασίζεται στην τεχνολογία νέφους (cloud), το οποίο επιτρέπει στους χρήστες να σχεδιάζουν, προσομοιώνουν και κατασκευάζουν τρισδιάστατα μοντέλα για μια ευρεία γκάμα βιομηχανιών. Το Fusion 360 διευκολύνει τη συνεργατική εργασία, επιτρέποντας σε ομάδες να εργάζονται ταυτόχρονα σε έργα, και περιλαμβάνει χαρακτηριστικά όπως παραμετρική μοντελοποίηση, συναρμολόγηση μοντέλων, προσομοίωση, αποτύπωση και δημιουργία διαδρομών εργαλείων CAM (Autodesk Fusion, 2024).

1.1 Θεωρητικό υπόβαθρο

1.1.1 Εφελκυσμός

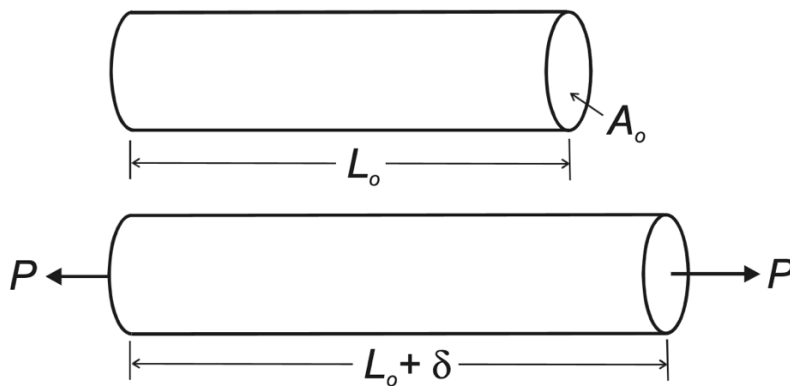
Ο εφελκυσμός εμφανίζεται όταν σε ένα αντικείμενο όπως ράβδο, σχοινί, καλώδιο ή σύρμα ασκούνται δυνάμεις σε αντίθετες κατευθύνσεις κατά μήκος του άξονά του ή του μήκους του. Η δύναμη περνά μέσα από το αντικείμενο και δρα για να το επιμηκύνει (ή να το τεντώσει), τοποθετώντας το υπό τάση

εφελκυσμού. Όταν η τάση ‘σ’ προκύπτει από εφελκυστική δύναμη ονομάζεται ορθή εφελκυστική τάση ή απλά εφελκυστική τάση και θεωρείται θετική. Η εφελκυστική τάση που ασκείται σε ένα αντικείμενο (Εικόνα 1) δίνεται από την παρακάτω σχέση (1) (Breitsprecher, 2023; Dourmashkin, 2020; Learn Civil Engineering.com, 2024; Zavatsky, 2024; Μεταξά, 2024).

$$\sigma = \frac{P}{A_o} \quad (1)$$

Όπου:

- σ [MPa]: η ορθή τάση
- P [N]: η δύναμη που ασκείται κατά μήκος της ράβδου
- A_o [mm²]: το αρχικό εμβαδόν εγκάρσιας διατομής της ράβδου



Εικόνα 1. Δυνάμεις εφελκυσμού ‘P’ και το αποτέλεσμα επιμήκυνσης μιας ράβδου.

Οι δυνάμεις που ασκούνται στη ράβδο της Εικόνα 1 προκαλούν μία παραμόρφωση (ορθή τροπή) στο αντικείμενο, η οποία ονομάζεται επιμήκυνση. Η ορθή τροπή ή normal strain ‘ε’ υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση (2).

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L_o} \quad (2)$$

Όπου:

- ε [αδιάστατο]: η ορθή τροπή (παραμόρφωση) ενός αντικειμένου έπειτα από την εφαρμογή εφελκυστικής τάσης
- δ [mm]: η διαφορά μήκους της παραμορφωμένης ράβδου από το αρχικό μήκος
- L_o [mm]: το αρχικό μήκος ράβδου

1.1.2 Θλίψη

Σε αντίθεση με τις δυνάμεις τάσης (ενότητα 1.1.1), οι δυνάμεις συμπίεσης δρουν για να ωθήσουν μαζί, ή να συμπίεσουν ένα αντικείμενο (Εικόνα 2). Με τις δυνάμεις να ασκούνται προς τα μέσα αντί προς τα έξω, αλλάζει η μοριακή σύνθεση του αντικειμένου, καθώς και η ποσότητα της κινητικής ενέργειας. Καθώς οι εξωτερικές δυνάμεις ωθούν προς τα μέσα, η θλιπτική δύναμη αυξάνεται. Εάν η δύναμη επενεργεί θλιπτικά, η επιφανειακή τάση ονομάζεται ορθή θλιπτική τάση ή απλά θλιπτική τάση και θεωρείται αρνητική. Η τάση υπολογίζεται από τη σχέση (1). Θεωρούμε ότι το βάρος του αντικειμένου κατανέμεται ομοιόμορφα κατά μήκος της περιοχής εφαρμογής (Breitsprecher, 2023; Dourmashkin, 2020; Learn Civil Engineering.com, 2024; Zavatsky, 2024; Μεταξά, 2024).



Εικόνα 2. Καταπόνηση ράβδου σε θλίψη από την εφαρμογή δύο δυνάμεων προς το κέντρο της.

1.1.3 Κάμψη

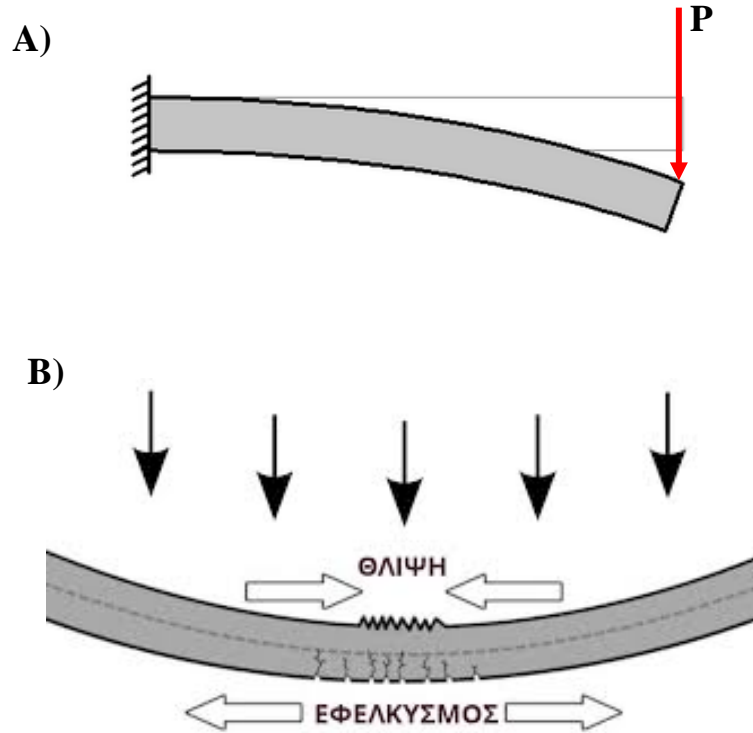
Η κάμψη προκαλείται σε ένα αντικείμενο (πχ. δοκό) όταν τοποθετείται ένα μεγάλο βάρος πάνω της ή εφαρμόζοντας φορτίο σε πακτωμένη δοκό. Προκαλείται ταυτόχρονα εφελκυσμός και θλίψη. Το βάρος προκαλεί θλίψη στο πάνω μέρος και προκαλεί τάση εφελκυσμού στην κάτω πλευρά της δοκού, συνεπώς, η δοκός κονταίνει στο ένα μέρος της λόγω συμπίεσης και επιμηκύνεται στο άλλο μέρος λόγω τάσης (Εικόνα 3). Από το κέντρο του αντικειμένου περνάει ο ουδέτερος άξονας, πάνω στο οποίο δεν εφαρμόζονται τάσεις. Όλες οι δομές πρέπει να είναι σε θέση να χειριστούν τις δυνάμεις που δρουν πάνω τους, διαφορετικά δεν θα έμεναν όρθιες. Ένα μεγάλο μέρος της επιστήμης, του σχεδιασμού και της μηχανικής πηγάζει στην πρόβλεψη των ειδών φορτίων που μπορεί να συναντήσει μια κατασκευή (Learn Civil Engineering.com, 2024). Η ορθή τάση κατά την κάμψη δίνεται από την παρακάτω σχέση (3) (Γαλιώτης, 2022).

$$\sigma_x = \frac{M_y}{I_y} \cdot z \quad (3)$$

Όπου:

- σ_x [MPa]: η ορθή τάση μιας δοκού στον x άξονα κατά την κάμψη
- M_y [N-mm]: η ροπή κάμψης που ασκείται στον y άξονα

- $I_y [\text{mm}^4]$: η ροπή αδράνειας επιφάνειας κατά τον y άξονα
- $z [\text{mm}]$: η απόσταση εφαρμογής της δύναμης



Εικόνα 3. Α) Κάμψη πακτωμένης δοκού λόγω εφαρμογής δύναμης στο ελεύθερο άκρο της και Β) απεικόνιση των τάσεων εφελκυσμού και θλίψης που σημειώνονται κατά την κάμψη μιας δοκού.

1.1.4 Στρέψη

Ένας άξονας ή μια ράβδος καταπονείται σε στρέψη όταν επάνω σε αυτή επενεργούν ζεύγη ίσων και αντίθετων δυνάμεων που τα επίπεδα τους είναι κάθετα στον κεντροβαρικό της άξονα (Εικόνα 4). Η στρέψη αποτελεί ένα είδος απλής καταπόνησης όπως αυτό της κάμψης και του εφελκυσμού. Το ζεύγος των δυνάμεων προκαλεί σε κάθε διατομή της ράβδου μια ροπή, που ονομάζεται ροπή στρέψης. Αυτό το είδος καταπόνησης τείνει να περιστρέψει την ράβδο γύρω από τον άξονά της. Η διατμητική (στρεπτική) τάση για μια ακτίνα δίνεται από τη σχέση (4), ενώ η μέγιστη διατμητική (στρεπτική) τάση από τη σχέση (5) (Παπακωνσταντίνου, 2024).

$$\tau = \left(\frac{2M_t}{\pi R^4} \right) r \quad (4)$$

$$\tau_{max} = \frac{2M_t}{\pi R^3} \quad (5)$$

Όπου:

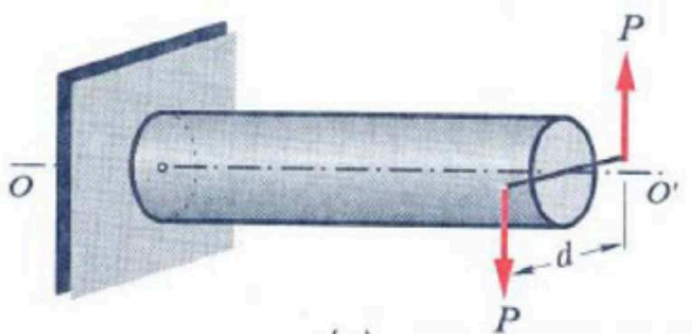
- τ [MPa]: η διατμητική τάση λόγω στρέψης
- M_t [N-mm]: η ροπή στρέψης
- R [mm]: η ακτινική απόσταση που εφαρμόζεται η ροπή στρέψης
- r [mm]: η ακτίνα της ράβδου

Η γωνία στροφής της ράβδου λόγω στρέψης ορίζεται από τη σχέση (6).

$$\varphi = \frac{M_t \cdot l}{G \cdot I_p} \quad (6)$$

Όπου:

- φ [rad]: η γωνία στροφής της ράβδου, λόγω ροπής στρέψης
- M_t [N-m]: η ροπή στρέψης
- l [m]: το μήκος ράβδου
- G [GPa]: το μέτρο διάτμησης του υλικού
- I_p [m⁴]: η ροπή αδράνειας της ράβδου



Εικόνα 4. Καταπόνηση πακτωμένης ράβδου σε στρέψη, λόγω εφαρμογής ζεύγους αντίθετων δυνάμεων.

1.1.5 Συντελεστής συγκέντρωσης τάσεων K_t

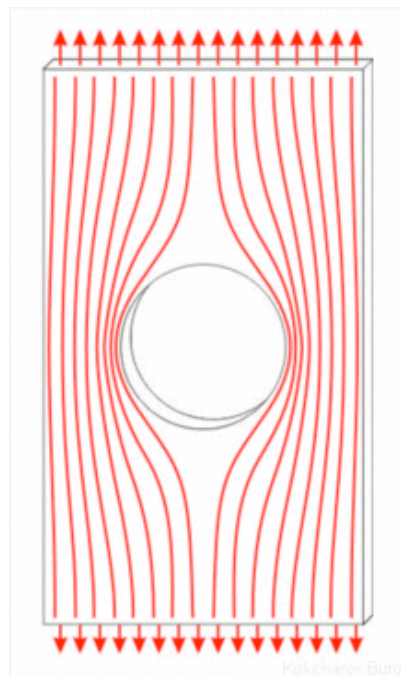
Ο συντελεστής συγκέντρωσης τάσης (K_t) είναι ένας αδιάστατος παράγοντας που χρησιμοποιείται για να ποσοτικοποιήσει πόσο συγκεντρωμένη είναι η τάση σε ένα μηχανικό μέρος. Ορίζεται ως ο λόγος

της υψηλότερης τάσης στο τμήμα σε σύγκριση με μια τάση αναφοράς. Μια συγκέντρωση τάσης είναι ένα σημείο σε ένα τμήμα όπου η πίεση είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την γύρω περιοχή (Εικόνα 5). Οι συγκεντρώσεις τάσεων εμφανίζονται ως αποτέλεσμα ανωμαλιών στη γεωμετρία ή στο υλικό μιας δομής συστατικού που προκαλούν διακοπή της ροής τάσης. Αυτές οι διακοπές συνήθως προκύπτουν από ασυνέχειες όπως τρύπες, αυλακώσεις, εγχοπές και φιλέτα. Οι συγκεντρώσεις τάσεων μπορεί επίσης να προκληθούν από τυχαία ζημιά, όπως εγχοπές και γρατσουνιές. Ο βαθμός συγκέντρωσης μιας ασυνέχειας υπό τυπικά εφελκυστικά φορτία εκφράζεται συνήθως από τον αδιάστατο παράγοντα συγκέντρωσης τάσης (K_t), ο οποίος δίνεται από τη σχέση (7) (Corrosionpedia, 2023).

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{norm}} \quad (7)$$

Όπου:

- K_t [αδιάστατο]: ο συντελεστής συγκέντρωσης τάσεων
- σ_{max} [MPa]: η μέγιστη τάση που συγκεντρώνεται στο υλικό γύρω από την οπή
- σ_{norm} [MPa]: η ονομαστική τάση



Εικόνα 5. Συγκέντρωση τάσεων γύρω από μια οπή.

1.1.6 Οδοντωτοί τροχοί

Οι οδοντωτοί τροχοί με παράλληλες ατράκτους είναι ο απλούστερος τύπος (Εικόνα 6). Αποτελούνται από έναν κύλινδρο ή δίσκο με δόντια που προεξέχουν ακτινικά. Βλέποντας τον τροχό σε 90 μοίρες από το μήκος του άξονα (πλευρά προς τα πάνω), οι όψεις των δοντιών είναι ευθείες και ευθυγραμμισμένες παράλληλα με τον άξονα περιστροφής. Κοιτάζοντας προς τα κάτω το μήκος του άξονα, η διατομή ενός δοντιού συνήθως δεν είναι τριγωνική. Αντί να είναι ευθείες (όπως σε ένα τρίγωνο), οι πλευρές της διατομής έχουν καμπύλη μορφή (συνήθως ελικοειδής και σπανιότερα κυκλοειδής) για να επιτευχθεί σταθερή αναλογία κίνησης. Οι οδοντωτοί τροχοί εμπλέκονται σωστά μόνο εάν έχουν τοποθετηθεί σε παράλληλους άξονες (Nice & Hall-Geisler, 2023). Δε δημιουργείται αξονική ώθηση από τα φορτία των δοντιών. Αυτός ο τύπος οδοντωτών τροχών είναι εξαιρετικός σε μέτριες ταχύτητες, αλλά τείνουν να είναι θορυβώδη σε υψηλές ταχύτητες (Oberge, 2012). Άλλοι τύποι οδοντωτών τροχών που υπάρχουν στο εμπόριο μπορεί να είναι: i) κωνικοί, ii) με ατέρμονα κοχλία και iii) με οδοντωτό κανόνα (Εικόνα 6). Ο οδοντωτός τροχός που δίνει κίνηση και συνήθως είναι ο μικρότερος ονομάζεται pinion, ενώ αυτός που δέχεται την κίνηση είναι ο gear (Εικόνα 7). Δύναται μεταξύ των τροχών αυτών να υπάρχει ο idler gear, ο οποίος χρησιμοποιείται για την αλλαγή της φοράς περιστροφής του άξονα εξόδου ή για την πλήρωση ενός μεγάλου κενού μεταξύ των αξόνων εισόδου και εξόδου χωρίς να επηρεάζεται η αναλογία ταχύτητας (Εικόνα 7).



Παράλληλοι
Οδοντωτοί Τροχοί



Κωνικοί Οδοντωτοί
Τροχοί



Οδοντωτός Τροχός &
Ατέρμονας Κοχλίας



Οδοντωτός Κανόνας &
Οδοντωτός Τροχός

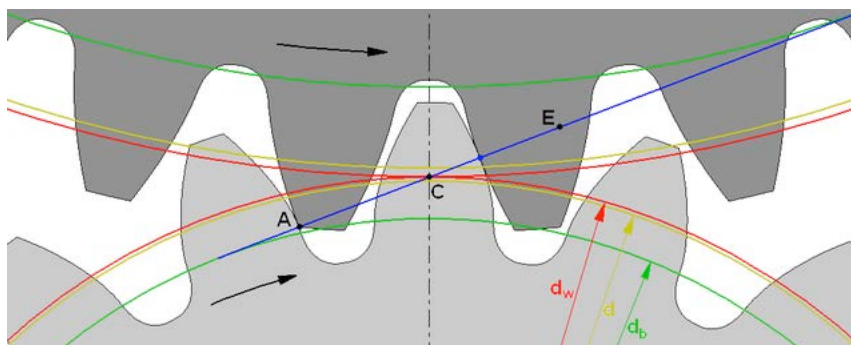
Εικόνα 6. Τύποι οδοντωτών τροχών.



Εικόνα 7. Επίδειξη του pinion gear (αριστερά) και του idler gear (δεξιά).

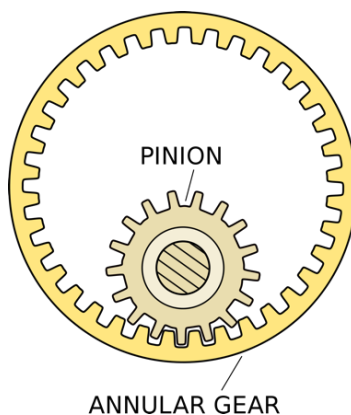
Οι οδοντωτοί τροχοί μπορεί να έχουν διαφορετικούς τύπους οδοντώσεων. Τα βασικά είδη είναι οι οδοντώσεις εξειλιγμένης (involute gears) και οι κυκλοειδής οδοντώσεις (cycloidal gears). Οι τελευταίες χωρίζονται σε επικυκλοειδής, υποκυκλοειδής και ορθοκυκλοειδής (Καρκάνης, 2012). Στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκαν για τις μοντελοποιήσεις, οδοντωτοί τροχοί εξειλιγμένης, οι οποίοι χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά στην μηχανολογία.

Οι οδοντωτοί τροχοί εξειλιγμένης (Εικόνα 8) διακρίνονται από το ειδικό προφίλ των δοντιών τους με βάση την έλικα ενός κύκλου. Αυτός ο σχεδιασμός εξασφαλίζει μια σταθερή αναλογία ταχύτητας μεταξύ της εμπλοκής των τροχών, που οδηγεί σε ομαλή και αποτελεσματική μετάδοση ισχύος. Το προφίλ της έλικας είναι πλεονεκτικό επειδή επιτρέπει μικρές λανθασμένες ευθυγραμμίσεις χωρίς να επηρεάζει σημαντικά την απόδοση, ενισχύοντας έτσι την αντοχή και μειώνοντας το θόρυβο. Αυτά τα γρاناζία χρησιμοποιούνται ευρέως σε διάφορες εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένων των κιβωτίων ταχυτήτων αυτοκινήτων, των βιομηχανικών μηχανημάτων και της ρομποτικής λόγω της ικανότητάς τους να διατηρούν υψηλή ακρίβεια και ικανότητα φόρτωσης. Η γεωμετρία των ελικοειδών τροχών διευκολύνει επίσης ευκολότερες διαδικασίες κατασκευής και επιθεώρησης, καθιστώντας τα μια προτιμώμενη επιλογή στο σχεδιασμό και τη μηχανική των γρاناζιών (Maitra, 1994; Radzevich & Dudley, 1994).



Εικόνα 8. Πλέξη οδοντωτών τροχών εξειλιγμένης.

Οι παράλληλοι οδοντωτοί τροχοί μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κύριες κατηγορίες: Εξωτερικοί (Εικόνα 6) και Εσωτερικοί (Εικόνα 9). Ένας εξωτερικός οδοντωτός τροχός μπορεί να συνδεθεί με ένα εξωτερικό ή ένα εσωτερικό. Όταν δύο εξωτερικοί τροχοί συνδέονται μεταξύ τους, περιστρέφονται προς τις αντίθετες κατευθύνσεις. Αντιθέτως, ένας εσωτερικός τροχός μπορεί να συνδεθεί μόνο με ένα εξωτερικό, οι οποίοι περιστρέφονται προς την ίδια κατεύθυνση. Λόγω της στενής τοποθέτησης των αξόνων, οι εσωτερικοί τροχοί είναι πιο συμπαγή αποφέροντας σημαντική μείωση χώρου όπου τοποθετούνται (Marples Gears Inc., 2020).



Εικόνα 9. Τύπος εσωτερικών οδοντωτών τροχών.

1.2 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι αφενός να παρουσιάσει οδηγίες χρήσης για τα λογισμικά προσομοίωσης μηχανικής Ansys και Fusion 360 και αφετέρου να γίνουν σχεδιασμοί και προσομοιώσεις για την εύρεση τάσεων σε άξονα i) με σφηνόδρομο ημικυκλικού άκρου, ii) με μεταβολή διατομών, iii) με εγκοπές και iv) με οπή, καθώς και σε ζεύγη οδοντωτών τροχών (21 & 42 και 20 & 40 δοντιών). Συγκεκριμένα, πρωταρχικός σκοπός είναι ο υπολογισμός του συντελεστή συγκέντρωσης τάσεων K_t με τη χρήση του λογισμικού Ansys για τη σύγκριση του με τον θεωρητικό συντελεστή που υπάρχει διαθέσιμος στη βιβλιογραφία για άξονα με σφηνόδρομο ημικυκλικού άκρου υπό κάμψη και στρέψη, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Για τα ζεύγη οδοντωτών τροχών που αναφέρθηκαν παραπάνω, σκοπός είναι η σύγκριση της καμπτικής τάσης και επιφανειακή πίεσης, καθ' όσον διακυμαίνεται η στρεπτική δύναμη που ασκείται στον μικρό οδοντωτό τροχό με τη χρήση του λογισμικού Fusion 360. Με όμοιο τρόπο, τελικός σκοπός είναι η σύγκριση της καμπτικής τάσης του pinion και του τροχού σε 8 διαφορετικά σημεία.

Κεφάλαιο 2: Πληροφορίες για το λογισμικό H/Y Ansys

Η εκπαιδευτική έκδοση του λογισμικού H/Y Ansys είναι διαθέσιμη μέσω της ιστοσελίδας <https://www.ansys.com/academic/students/ansys-student>. Η έκδοση αυτή περιέχει όλα τα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν για τη διεκπεραίωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας (Workbench, DesignModeler, Mechanical). Τα βήματα εγκατάστασης αναφέρονται αναλυτικά στον ίδιο σύνδεσμο.

Όσον αφορά την εκμάθηση του λογισμικού, παρέχονται αρκετά δωρεάν μαθήματα στην ιστοσελίδα <https://courses.ansys.com/>. Για τη συγκεκριμένη περίπτωση, απαιτείται η υποενοότητα ‘Structures’ (<https://courses.ansys.com/index.php/structures/>) και ειδικότερα το μάθημα ‘Getting Started with Ansys Mechanical’ <https://courses.ansys.com/index.php/courses/getting-started-with-ansys-mechanical/> (το lesson 2 είναι πιο επεξηγηματικό). Για την παρακολούθηση των μαθημάτων, απαραίτητη προϋπόθεση είναι η σύνδεση στην ιστοσελίδα του Ansys μέσω του ιδρυματικού λογαριασμού (username@tuc.gr).

Επιπρόσθετα, άλλα βοηθητικά μαθήματα είναι τα εξής:

Mechanical Strain in Deformation Analysis:

<https://courses.ansys.com/index.php/courses/mechanical-strain/>

Stress Analysis in Solid Mechanics:

<https://courses.ansys.com/index.php/courses/stress-analysis/>

Fundamental Topics in Contact:

<https://courses.ansys.com/index.php/courses/fundamental-topics-in-contact/>

Connecting Parts Together Using Ansys Mechanical:

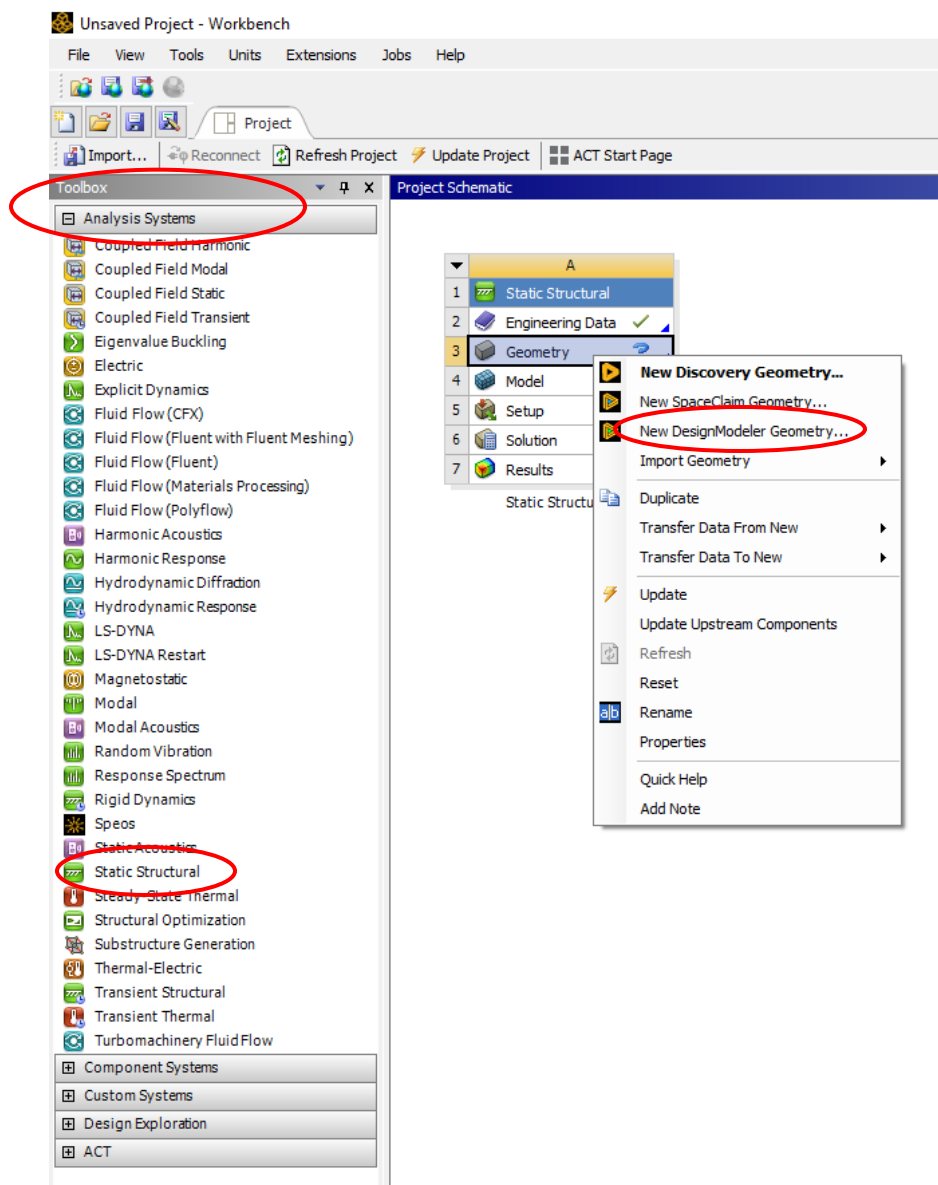
<https://courses.ansys.com/index.php/courses/connecting-parts-together/>

Structural Boundary Conditions for Stress Analysis using Ansys Mechanical:

<https://courses.ansys.com/index.php/courses/structural-boundary-conditions/>

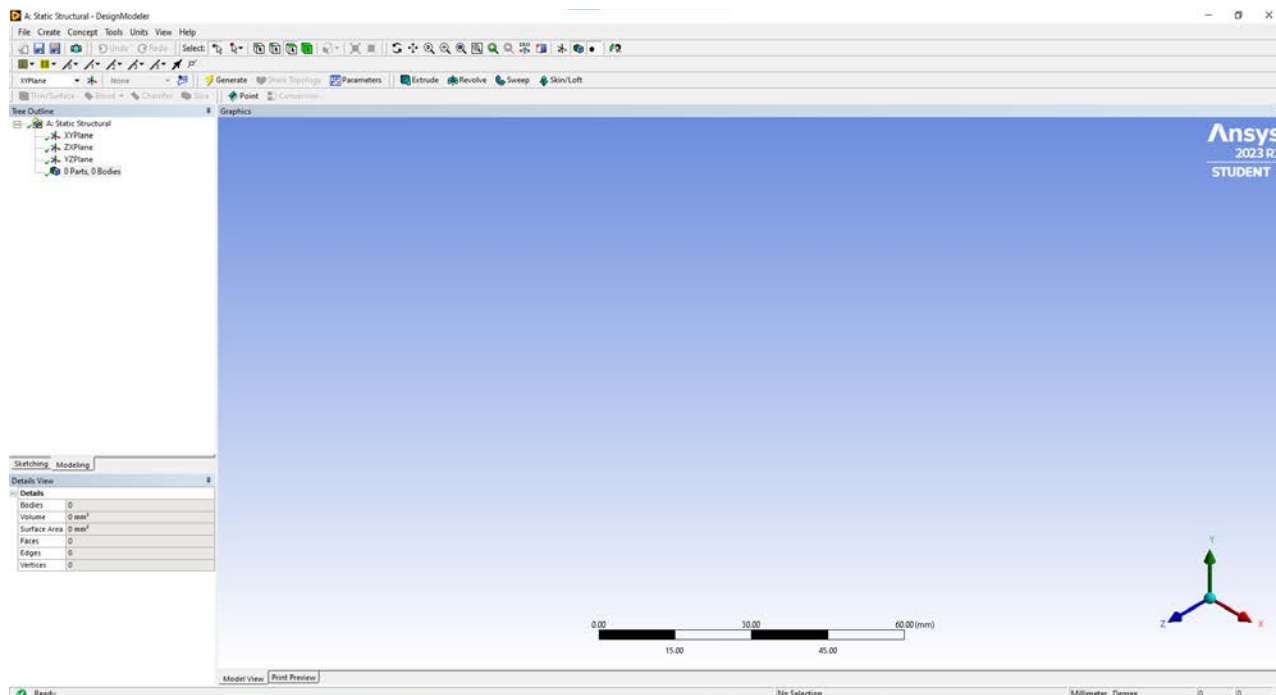
2.1 Ξεκινώντας τη σχεδίαση

Έχοντας εγκαταστήσει το Ansys στον υπολογιστή και έχοντας παρακολουθήσει ορισμένα μαθήματα ώστε να έχουμε μια βασική γνώση, προχωράμε στη σχεδίαση. Αρχικά, ανοίγουμε το Workbench του Ansys, όπου στην εργαλειοθήκη (toolbox) που βρίσκεται στο αριστερό μέρος της οθόνης, κάνουμε διπλό κλικ στο Static Structural, μέσα στην κατηγορία Analysis Systems. Έπειτα, πηγαίνουμε τον κέρσορα στο κελί Geometry μέσα στο νεο-δημιουργημένο κουτί του ‘Static Structural’ και μέσω δεξί κλικ πατάμε ‘New DesignModeler Geometry’ (Εικόνα 10).



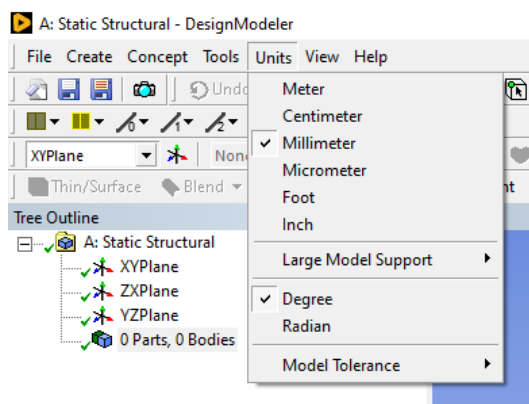
Εικόνα 10. Αρχικά βήματα μέσα στο Ansys Workbench πριν τη σχεδίαση.

Το νέο παράθυρο που ανοίγει είναι το 'DesignModeler', μέσω του οποίου δημιουργήθηκαν όλα τα σχήματα που σχεδιάστηκαν για τους σκοπούς της διπλωματικής εργασίας (Εικόνα 11).



Εικόνα 11. Η αρχική οθόνη του ‘DesignModeler’.

Οι μονάδες μέτρησης είναι τα χιλιοστά (Millimeter) και οι μοίρες (Degree), τα οποία μπορούν να τροποποιηθούν όπως φαίνεται στην παρακάτω Εικόνα 12:



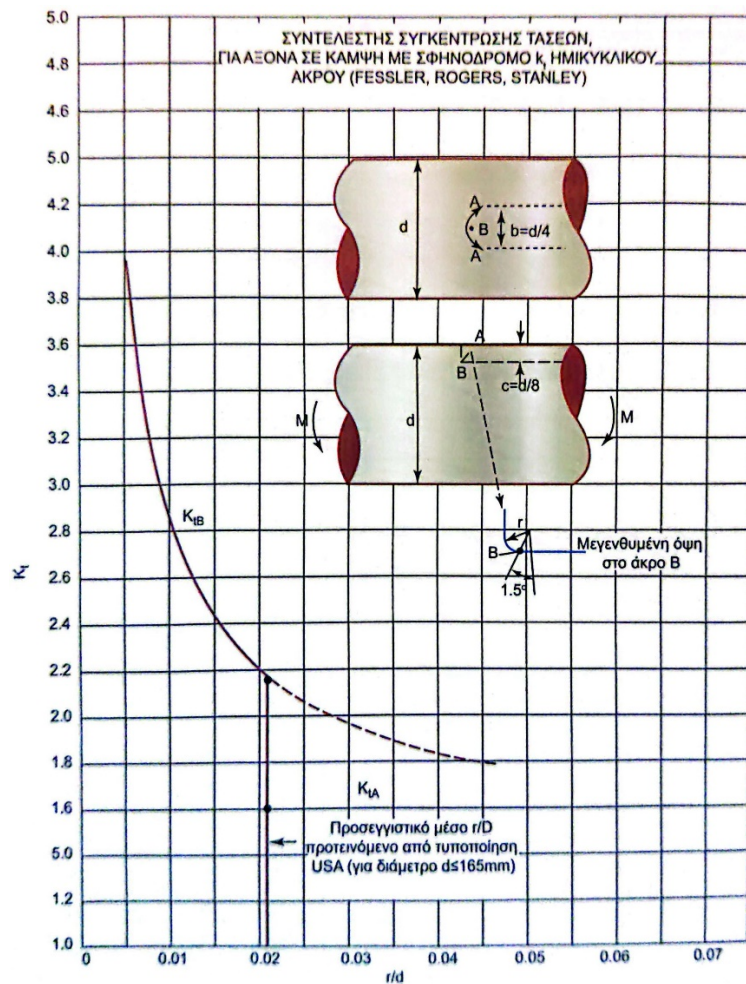
Εικόνα 12. Επιλογή μονάδων μέτρησης στο ‘DesignModeler’.

Κεφάλαιο 3: Αναλύσεις τάσεων σε άξονα με σφηνόδρομο ημικυκλικού άκρου και σε άξονες με μεταβολή διατομών, εγκοπών και οπών

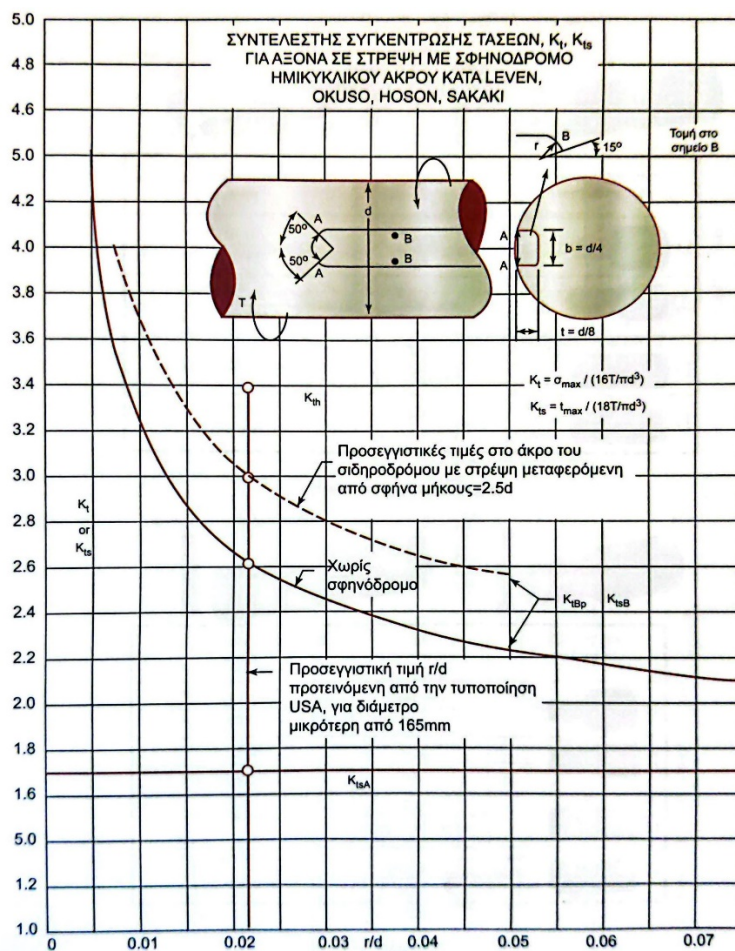
Παρακάτω ακολουθούν τα βήματα με το πως δημιουργήθηκαν τα σχήματα, όπως επίσης και οι προσομοιώσεις που τους έγιναν.

3.1 Άξονας με σφηνόδρομο ημικυκλικού άκρου

Από το σύγγραμμα του Παπαδόπουλος (2017) χρησιμοποιήθηκαν τα δύο παρακάτω διαγράμματα (Εικόνα 13-14), τα οποία απεικονίζουν τον θεωρητικό συντελεστή συγκέντρωσης τάσεων K_t για άξονα με σφηνόδρομο σε κάμψη και στρέψη, σε σχέση με το r/d .



Εικόνα 13. Σχήμα 5-6γ σελίδας 134 του συγγράμματος Παπαδόπουλος (2017): Συγκέντρωση τάσεων σε άξονα, λόγω εγκοπών σε κάμψη.

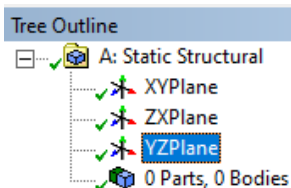


Εικόνα 14. Σχήμα 5-6δ σελίδας 135 του συγγράμματος Παπαδόπουλος (2017): Συγκέντρωση τάσεων σε άξονα, λόγω εγχοπών σε στρέψη.

3.1.1 Σχεδίαση άξονα με σφηνόδρομο

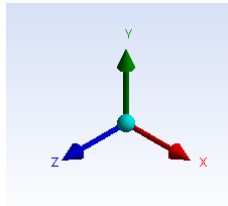
Με βάση την απεικόνιση του άξονα με σφηνόδρομο από τα διαγράμματα των Εικόνων 13-14, έγινε ο σχεδιασμός του στο 'DesignModeler'. Τα βήματα που ακολουθήθηκαν αναφέρονται παρακάτω.

Επιλέγουμε το επιθυμητό επίπεδο, στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι το 'YZPlane' (Εικόνα 15).

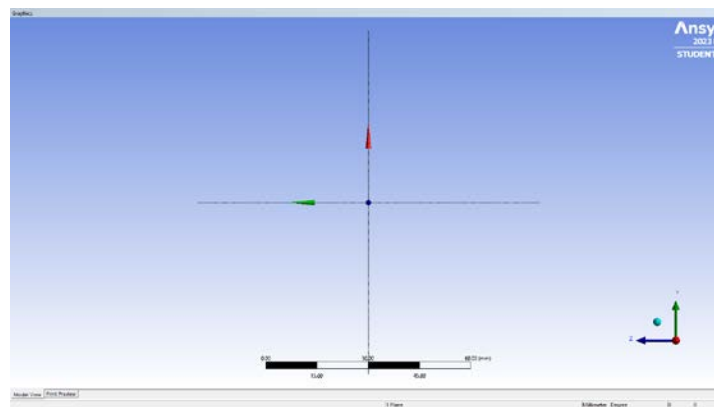


Εικόνα 15. Επιλογή επιπέδου σχεδίασης.

Επιλέγουμε τον X άξονα, έτσι ώστε η σχεδίαση πάνω στους YZ να είναι πιο εύκολη (Εικόνα 16-17).

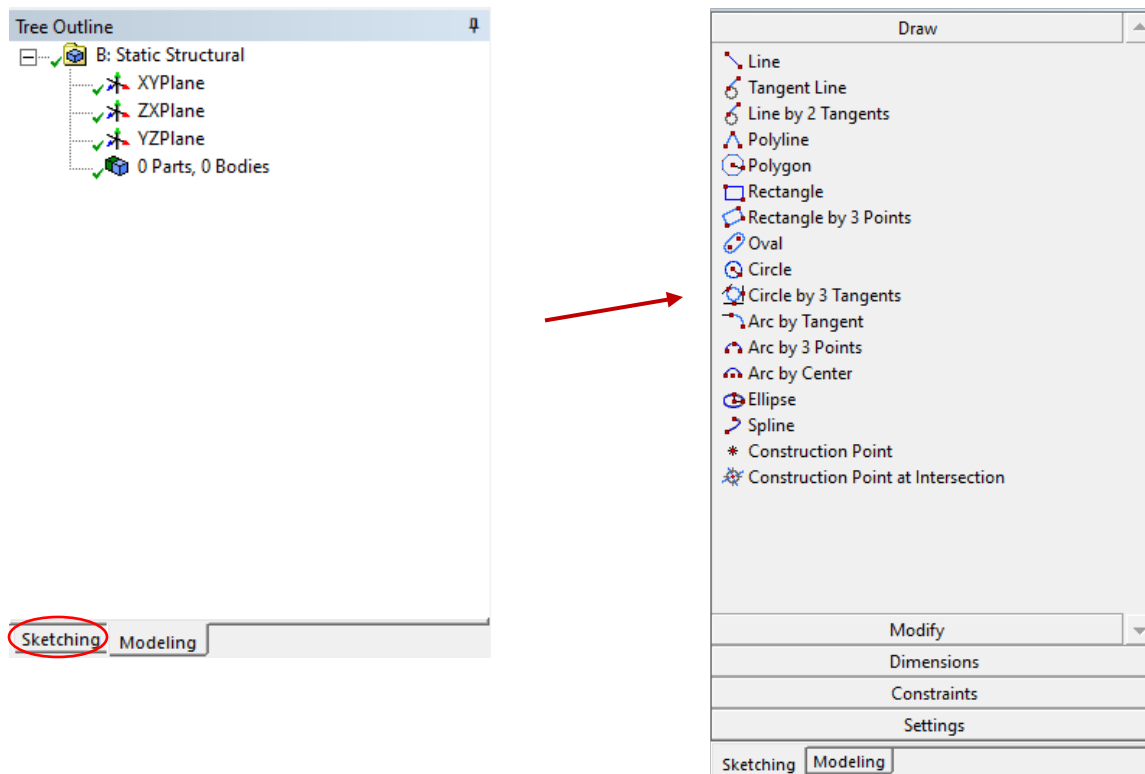


Εικόνα 16. Εικονίδιο αξόνων.



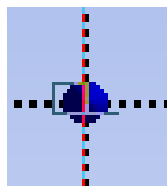
Εικόνα 17. Εφαρμογή αξόνων YZ.

Επιλέγουμε το 'Sketching' στην καρτέλα 'Tree Outline', η οποία περιέχει το 'Sketching Toolbox' και εκεί υπάρχουν όλες οι εντολές σχεδίασης (Draw), τροποποίησης (Modify), εισαγωγής διαστάσεων (Dimensions), περιορισμών (Constraints) και τέλος διάφορες ρυθμίσεις (Settings) που αφορούν το πλέγμα (Grid) (Εικόνα 18).

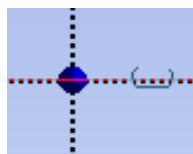


Εικόνα 18. Αλλαγή καρτέλας από Μοντελοποίησης (Sketching) σε Σχεδιασμού (Modelling).

Στην καρτέλα 'Draw' επιλέγουμε τον κύκλο (Circle) και μετακινούμε τον κέρσορα στην αρχή των αξόνων. Θα έχει γίνει σωστά εάν βλέπουμε το εικονίδιο της Εικόνα 19, αλλιώς της Εικόνα 20:

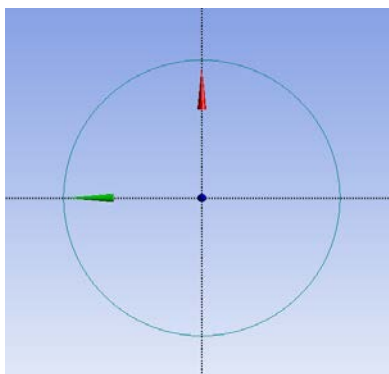


Εικόνα 19. Ορθό κλείδωμα του κέρσορα στην αρχή των αξόνων.



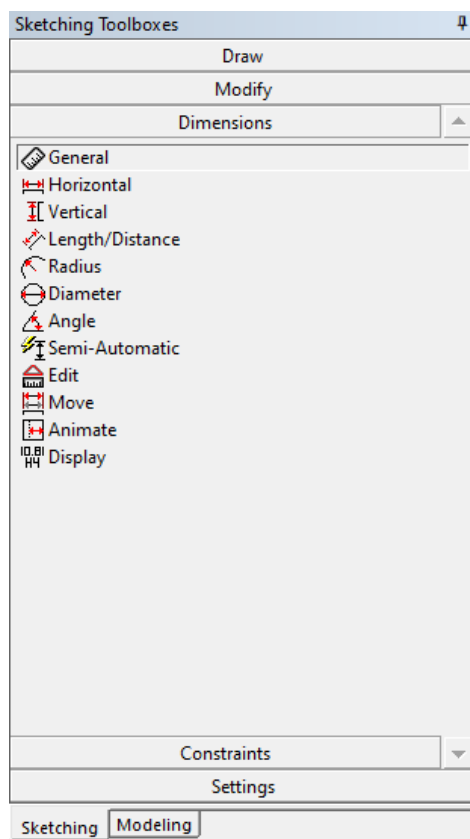
Εικόνα 20. Λανθασμένο κλείδωμα του κέρσορα στην αρχή των αξόνων.

Όταν είναι ο κέρσορας στη σωστή θέση, κάνουμε ένα κλικ και έπειτα σέρνουμε έως την επιθυμητή διάσταση. Κάνουμε ξανά κλικ για να δημιουργηθεί ο κύκλος (Εικόνα 21).



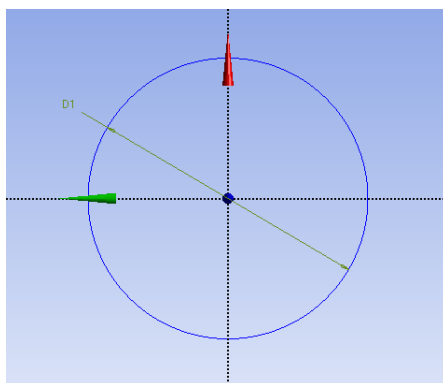
Εικόνα 21. Δημιουργία κύκλου.

Για να καθοριστούν οι διαστάσεις, πηγαίνουμε στην υποκατηγορία ‘Dimensions’ (Εικόνα 22).



Εικόνα 22. Οι διαθέσιμες εντολές για τη δημιουργία και τροποποίηση των διαστάσεων (Dimensions).

Υπάρχουν αρκετές διαθέσιμες επιλογές διαστάσεων και για αυτό το λόγω είναι προτιμότερο να επιλεγθεί η επιλογή ‘Semi-Automatic’, όπου το λογισμικό από μόνο του θα διαλέξει όλες διαφορετικές διαστάσεις χρειάζονται και ο χρήστης διαλέγει τη θέση ή/και την ονομασία της. Στη συγκεκριμένη περίπτωση επιλέχθηκε μόνο η διάσταση ‘D1’, η οποία δείχνει τη διάμετρο του κύκλου (Εικόνα 23).



Εικόνα 23. Η διάσταση ‘D1’ για τη διάμετρο του σχεδιασμένου κύκλου.

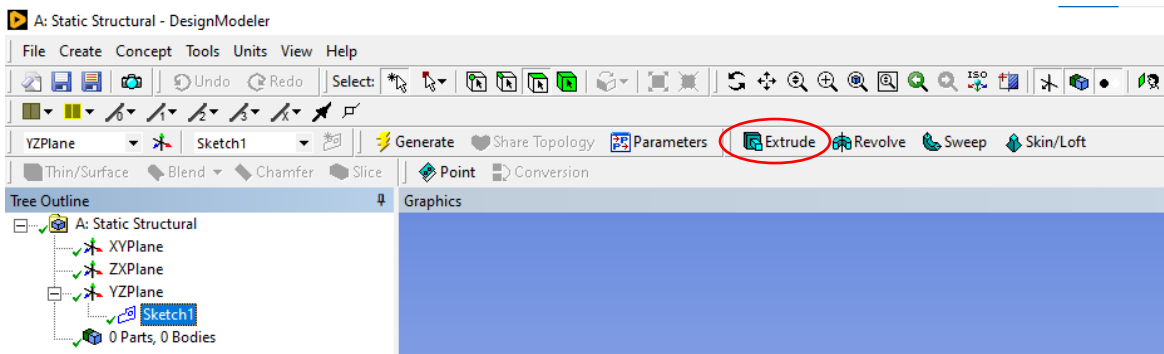
Εάν επιθυμούμε να αλλάξουμε κάποια διάσταση, πηγαίνουμε στην καρτέλα ‘Details View’. Όταν πατηθεί, είτε η γραμμή της διαμέτρου, είτε η ονομασία ‘D1’ τότε θα εμφανιστούν τα παρακάτω (Εικόνα 24):

Details View	
Details of D1	
Diameter	D1
Value	40 mm
Cr7	Sketch1
Reference Only?	No
Update position with geometry?	Yes

Εικόνα 24. Πληροφορίες για τη ‘D1’ διάσταση.

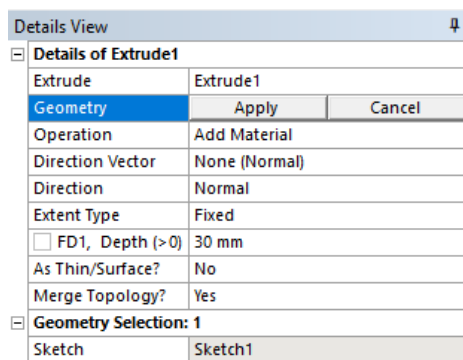
Στην καρτέλα ‘Details View’ υπάρχει το είδος της διάστασης (Diameter) και η ονομασία της (D1), η τιμή (Value), η οποία για να τροποποιηθεί κάνουμε κλικ στο κελί με την αριθμητική τιμή και εισάγουμε μία νέα. Προς το παρόν εισάγουμε 8 mm στη γραμμή με το κελί ‘Value’. Έπειτα, το κελί ‘Cr7’ αναφέρει σε ποιο σκίτσο βρίσκεται η διάσταση, όπως ‘Sketch1’ στη συγκεκριμένη περίπτωση. Οι υπόλοιπες δύο γραμμές δίνουν τη δυνατότητα να εισάγουμε τη διάσταση ως αναφορά μόνο (Reference Only). Δηλαδή εάν αλλάξουμε την τιμή της, δε θα αλλάξει κάτι. Τέλος, είναι η επιλογή ‘Update position with geometry’, το οποίο δίνει τη δυνατότητα να ενημερώνεται η θέση της διάστασης όταν αλλάζει η γεωμετρία.

Εφόσον δημιουργήθηκε ο κύκλος, το επόμενο μέρος είναι να γίνει η εξώθηση του (Extrude), ώστε να δημιουργηθεί ο άξονας. Πηγαίνουμε στην καρτέλα ‘Modeling’ και έχοντας κάνει κλικ το σκίτσο (Sketch1) που δημιουργήσαμε μόλις, πατάμε το ‘Extrude’ που βρίσκεται στη γραμμή εντολών (Εικόνα 25).



Εικόνα 25. Θέση της εντολής ‘Extrude’.

Στο παράθυρο ‘Details’ εμφανίζονται τα παρακάτω (Εικόνα 26):



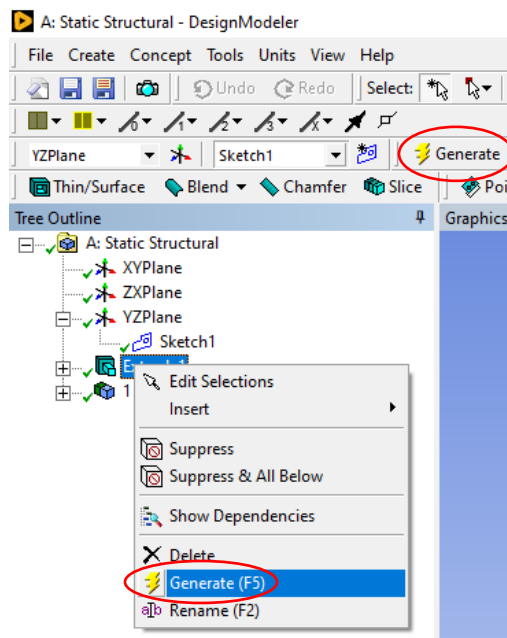
Εικόνα 26. Πληροφορίες της Εξώθησης (Extrude).

Το πρώτο που ζητείται είναι ποια γεωμετρία επιθυμούμε να εξωθήσουμε. Το Sketch1 είναι ήδη επιλεγμένο εφόσον το είχαμε επιλέξει από πριν, ειδάλλως επιλέγεται είτε πατώντας την ονομασία του, είτε τον κύκλο. Στη συνέχεια, επιλέγουμε ‘Apply’ και η επόμενη επιλογή είναι η διεύθυνση (Direction). Για να μη χρειαστεί να κάνουμε 2 φορές εξώθηση, πατάμε την επιλογή ‘Both-Symmetric’. Έτσι, θα γίνει η εξώθηση και στις 2 πλευρές ομοίως. Έπειτα, εισάγουμε έναν αριθμό που αντιστοιχεί στο πόσο θέλουμε να εξωθηθεί ο κύκλος. Το όνομα της μεταβλητής είναι ‘FD1’ και μπορούμε να θέσουμε τιμή 10 mm (δε βάζουμε την κλίμακα, αλλά μόνο την αριθμητική τιμή) (Εικόνα 27).

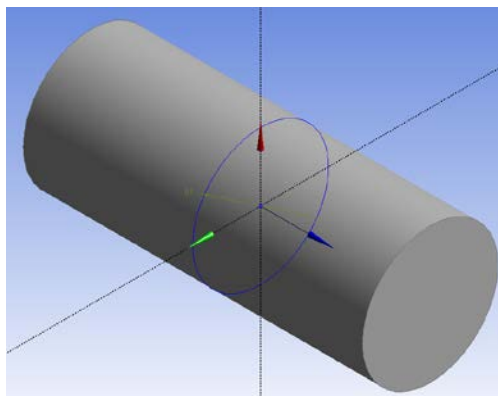
Details View	
Details of Extrude1	
Extrude	Extrude1
Geometry	Sketch1
Operation	Add Material
Direction Vector	None (Normal)
Direction	Both - Symmetric
Extent Type	Fixed
FD1, Depth (>0)	10 mm
As Thin/Surface?	No
Merge Topology?	Yes
Geometry Selection: 1	
Sketch	Sketch1

Εικόνα 27. Τελικό αποτέλεσμα της καρτέλας μετά τις τροποποιήσεις.

Τέλος, για τη δημιουργία της εξώθησης επιλέγουμε την εντολή ‘Παραγωγή (Generate)’, είτε κάνοντας δεξί κλικ στο Extrude1 στην καρτέλα ‘Tree Outline’, είτε από τη γραμμή εντολών (Εικόνα 28-29).

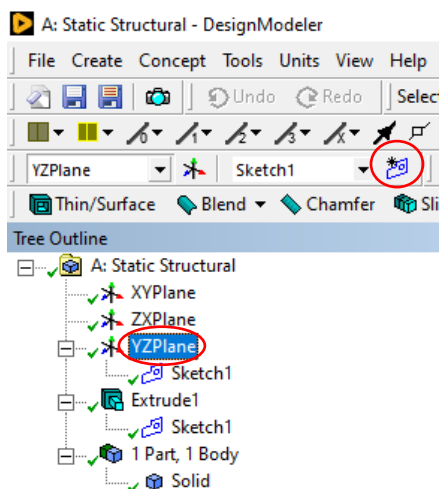


Εικόνα 28. Θέση της εντολής ‘Generate’.



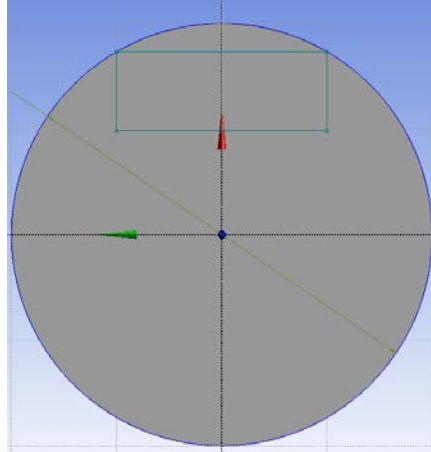
Εικόνα 29. Εξώθηση κύκλου για τη δημιουργία του άξονα.

Για να δημιουργηθεί ο σφηνόδρομος, αρχικά θα πρέπει να φτιάξουμε ένα νέο σκίτσο στο YZ επίπεδο κάνοντας κλικ στο επίπεδο YZ και μετά στο εικονίδιο για να δημιουργηθεί ένα νέο σκίτσο (Εικόνα 30).



Εικόνα 30. Θέση του εικονιδίου δημιουργίας νέου σκίτσου.

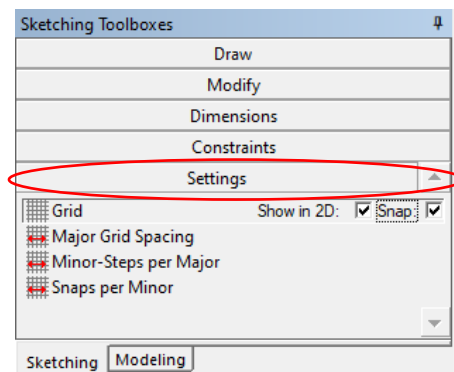
Έπειτα, πηγαίνουμε στην καρτέλα 'Sketching' και σχεδιάζουμε ένα ορθογώνιο παραλληλόγραμμο στο πάνω μέρος του άξονα μαζί με έναν κύκλο όμοιο με τον αρχικό, όπως στην παρακάτω Εικόνα 31.



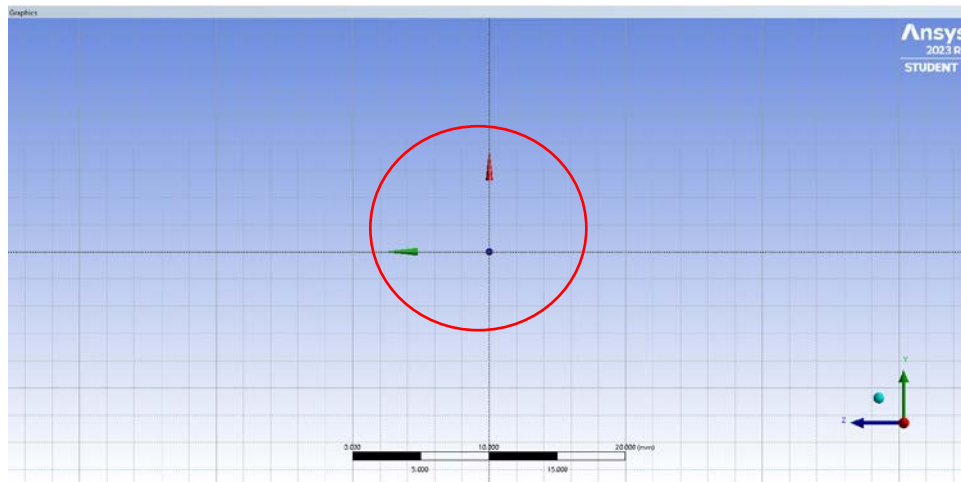
Εικόνα 31. Αποτέλεσμα σχεδίασης του παραλληλογράμμου και του κύκλου.

Υποσημείωση: Υπάρχει και η δυνατότητα να δημιουργήσουμε ένα πλέγμα (Grid) (Εικόνα 32-33), το οποίο μπορεί να βοηθήσει να μετρηθούν οι διαστάσεις που θέλουμε να δημιουργήσουμε με το μάτι, όπως επίσης ο κέρσορας να μπορεί να κολλήσει πάνω στο πλέγμα αυτό (Snap). Η δυνατότητα αυτή γίνεται μέσω των παρακάτω βημάτων:

Settings → Grid → Show in 2D ✓ → Snap ✓



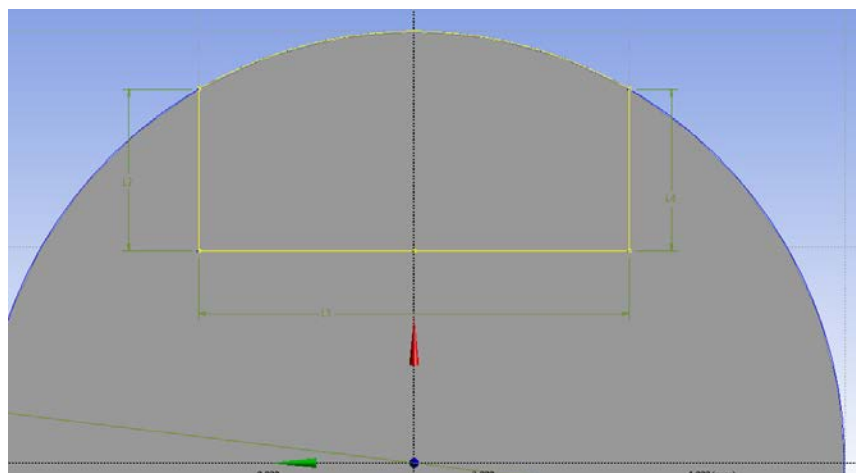
Εικόνα 32. Θέση εντολών πλέγματος (Grid).



Εικόνα 33. Απεικόνιση πλέγματος (Grid).

Κάθε πλευρά του μεγάλου τετραγώνου είναι 10 χιλιοστά (mm), δεδομένου ότι η μονάδα μέτρησης του μήκους είναι σε χιλιοστά.

Πηγαίνουμε στην κατηγορία 'Modify' και επιλέγουμε το εργαλείο 'Trim', το οποίο δίνει τη δυνατότητα να αφαιρέσουμε γραμμές που δε θέλουμε από το σκίτσο. Στη συγκεκριμένη περίπτωση θα αφαιρέσουμε την πάνω πλευρά του παραλληλόγραμμου, όπως και όλες τις πλευρές του κύκλου εκτός αυτή που είναι στην πάνω πλευρά του παραλληλόγραμμου (Εικόνα 34). Έπειτα, βάζουμε τις απαραίτητες διαστάσεις μέσω της επιλογής 'Semi-Automatic'.



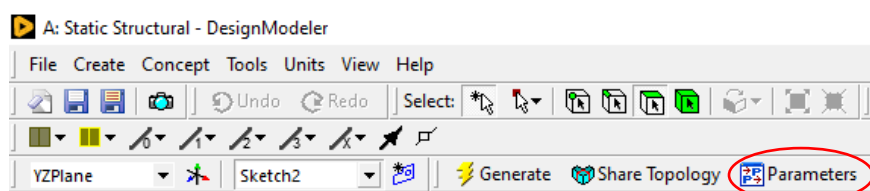
Εικόνα 34. Αποτέλεσμα μετά από αφαίρεση ανεπιθύμητων γραμμών.

Εφαρμογή παραμέτρων στις διαστάσεις:

Από τις Εικόνες 13 και 14 παρατηρούμε πως το πλάτος του σφηνόδρομου είναι $d/4$ και το ύψος $d/8$, όπου d η διάμετρος όλου του άξονα. Οι τιμές εξαρτώνται από το d , οπότε σε περίπτωση που αλλάξει, θα πρέπει να γίνει παραμετροποίηση.

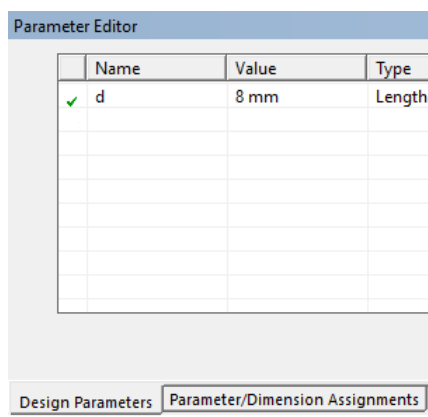
3.1.2 Παραμετροποίηση

Αρχικά, πατάμε το 'Parameters' από τη γραμμή εντολών όπου ανοίγει το παράθυρο 'Parameter Editor' (Εικόνα 35).



Εικόνα 35. Θέση εντολής παραμετροποίησης (Parameters).

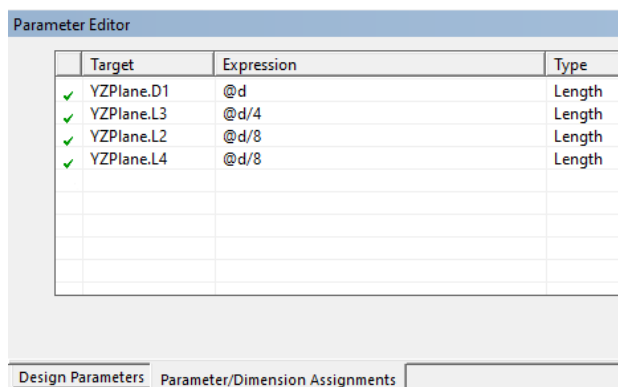
Στην καρτέλα 'Design Parameters' και συγκεκριμένα στο κελί 'Name' μπορούμε να εισάγουμε την ονομασία της μεταβλητής d για τη διάμετρο και στο κελί 'Value' την τιμή της. Εάν επιθυμούμε να αλλάξουμε, το είδος της μεταβλητής, αυτό γίνεται μέσα από το κελί 'Type' (Εικόνα 36).



Εικόνα 36. Δημιουργία παραμέτρου διαμέτρου 'd'.

Στην καρτέλα 'Parameter/Dimension Assignments' προσδιορίζουμε τις διάφορες σχέσεις που χρειαζόμαστε (ύψος/πλάτος). Στη στήλη 'Target' αναφέρουμε σε ποιο επίπεδο είναι η μεταβλητή που θέλουμε να παραμετροποιήσουμε και ποια είναι αυτή (πχ: YZPlane.D1= Επίπεδο YZ και D1 μεταβλητή).

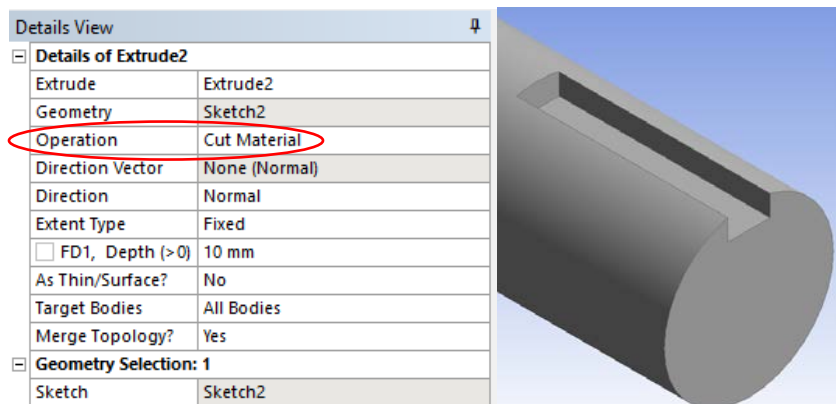
Στη στήλη 'Expression' εισάγουμε τη σχέση, όπου η μεταβλητή που ορίστηκε στην καρτέλα 'Design Parameters' πρέπει να έχει πάντα από μπροστά της το σύμβολο '@' (πχ: $A+B = @A+@B$ ή $2AB = 2* @A* @B$). Το 'D1' είναι η διάμετρος του κύκλου, 'L3' είναι το πλάτος του σφηνόδρομου, ενώ τα 'L2' και 'L4' αφορούν το ύψος (Εικόνα 37).



Εικόνα 37. Δημιουργία παραμετρικών σχέσεων.

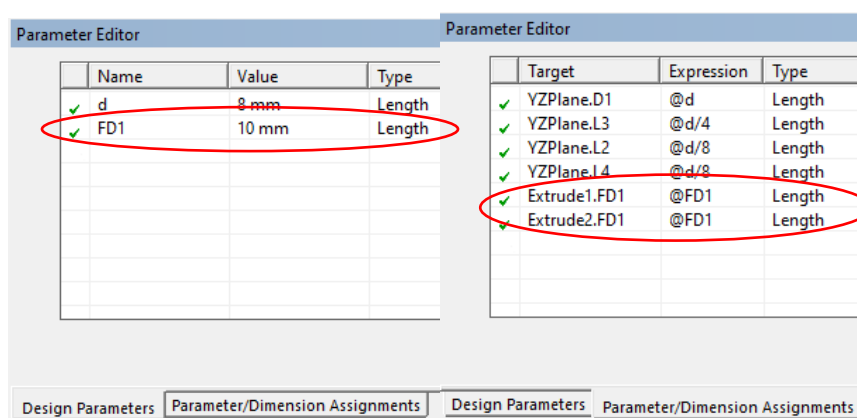
Εξώθηση του σφηνόδρομου:

Έχοντας σχεδιάσει το σφηνόδρομο με τις σωστές διαστάσεις, το επόμενο βήμα είναι η εξώθηση του. Έχοντας κάνει κλικ στο Sketch2, πατάμε την εντολή 'Extrude' και 'Apply' στο 'Geometry'. Η τιμή θα είναι 10 mm και επιλέγουμε 'Generate'. Όμως, πρέπει με τη δεύτερη εντολή 'Extrude' να αφαιρεθεί υλικό για να δημιουργηθεί το κενό του σφηνόδρομου. Για να γίνει αυτό, στη γραμμή 'Operation' αντί για 'Add Material' που εμφανιζόταν στο πρώτο 'Extrude', θα επιλέξουμε 'Cut Material' (Εικόνα 38).



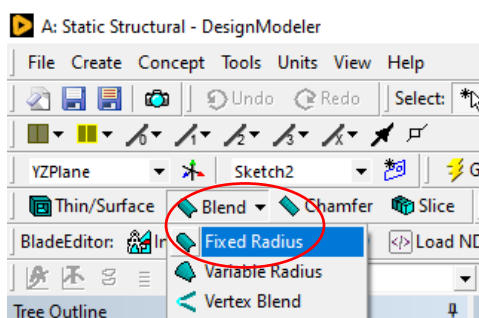
Εικόνα 38. Δεύτερη εξώθηση με την εντολή αφαίρεσης υλικού.

Για να μην υπάρξει κάποιο πρόβλημα όταν αλλάζουν οι μεταβλητές, μπορούμε να παραμετροποιήσουμε το μήκος του 'Extrude2' για να είναι ίδιο με το 'Extrude1' (Εικόνα 39).



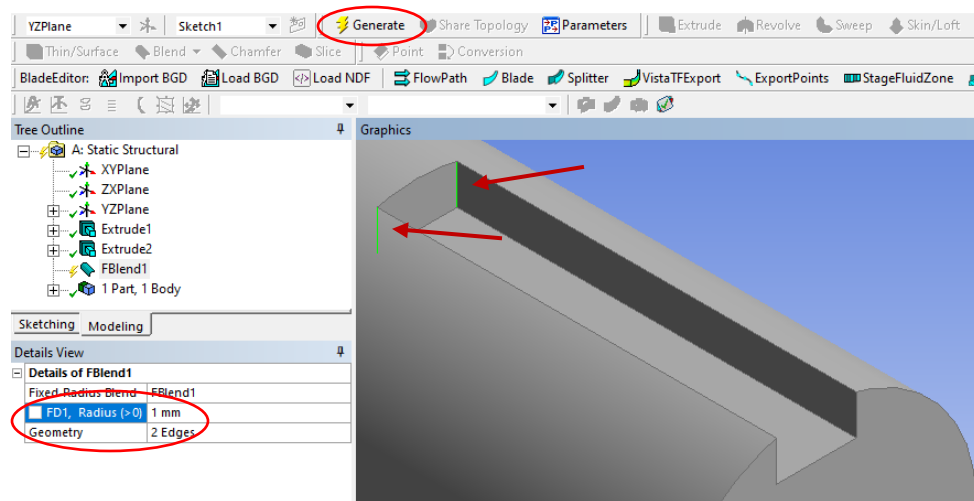
Εικόνα 39. Δημιουργία παραμέτρου 'FD1' και σχέσεων της.

Τέλος, μέσω της εντολής 'Blend' → 'Fixed Radius' θα δημιουργηθούν 2 καμπύλες ακτίνας 1 mm στην αρχή του σφηνόδρομου (Εικόνα 40).



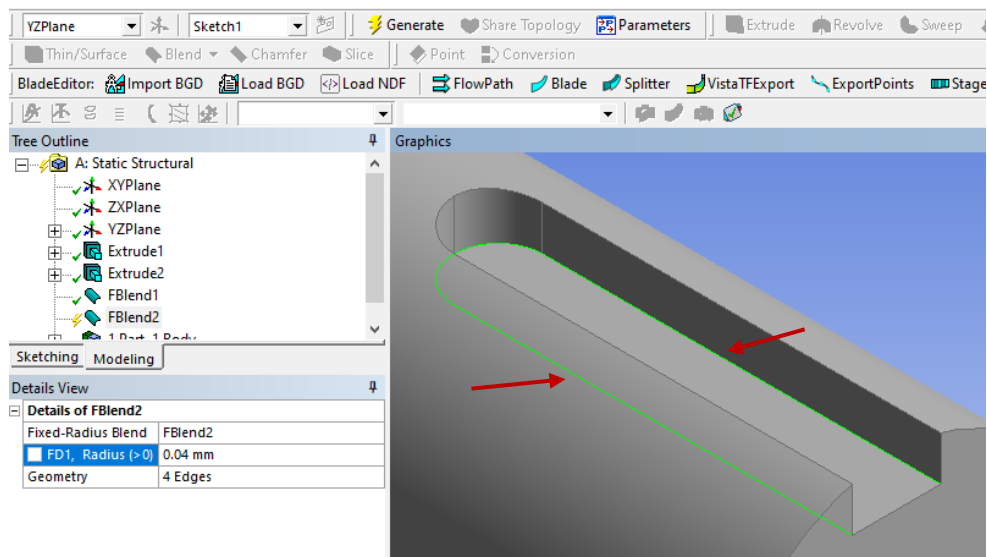
Εικόνα 40. Θέση εντολής 'Blend'.

Για να επιλέξουμε πάνω από μία γωνία, κάνουμε αριστερό κλικ την πρώτη και πριν κάνουμε κλικ για τη δεύτερη, πατάμε στο πληκτρολόγιο το κουμπί 'Control'. Έπειτα, πατάμε 'Apply' στο κελί 'Geometry' και 'Generate' (Εικόνα 41).



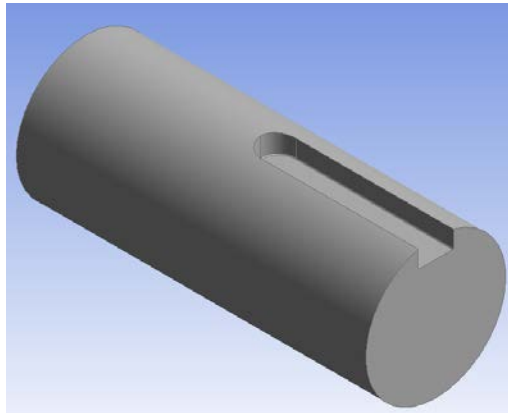
Εικόνα 41. Απεικόνιση κάθετων γωνιών.

Ομοίως, θα δημιουργηθούν 2 καμπύλες ακτίνας 0.04 mm στις γωνίες στο κάτω μέρος του σφηνόδρομου.



Εικόνα 42. Απεικόνιση οριζόντιων γωνιών.

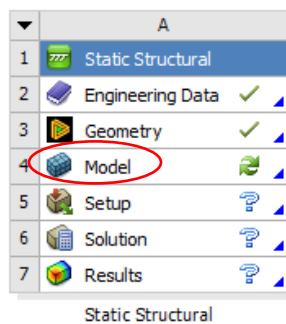
Το τελικό αποτέλεσμα απεικονίζεται στην Εικόνα 43:



Εικόνα 43. Απεικόνιση ολοκληρωμένου αντικειμένου με το σφηνόδρομο ημικυκλικού άκρου.

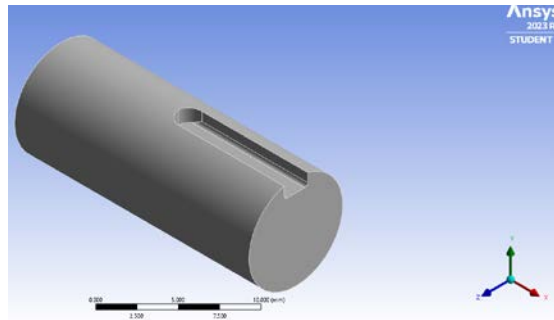
3.1.3 Πληροφορίες για το Ansys Mechanical

Εφόσον το σχέδιο δημιουργήθηκε, κλείνουμε το ‘DesignModeler’ και πηγαίνουμε πίσω στο ‘Workbench’. Για να ανοίξουμε το ‘Ansys Mechanical’ κάνουμε διπλό κλικ στο κελί ‘Model’ (Εικόνα 44).



Εικόνα 44. Θέση κελιού ‘Model’ στο ‘Workbench’.

Ανοίγοντας το ‘Mechanical’ βλέπουμε στο κύριο παράθυρο το σχέδιο που έχει σχεδιαστεί (Εικόνα 45).



Εικόνα 45. Κύριο παράθυρο του ‘Ansys Mechanical’.

Στην πάνω αριστερή πλευρά βρίσκεται η καρτέλα ‘Outline’ (Εικόνα 46).

Εικόνα 46. Καρτέλα ‘Outline’.

Κάτω από την καρτέλα ‘Outline’ βρίσκεται η καρτέλα ‘Details’ που εμφανίζει διάφορες πληροφορίες για οτιδήποτε κάνουμε κλικ στο ‘Outline’ (Εικόνα 47).

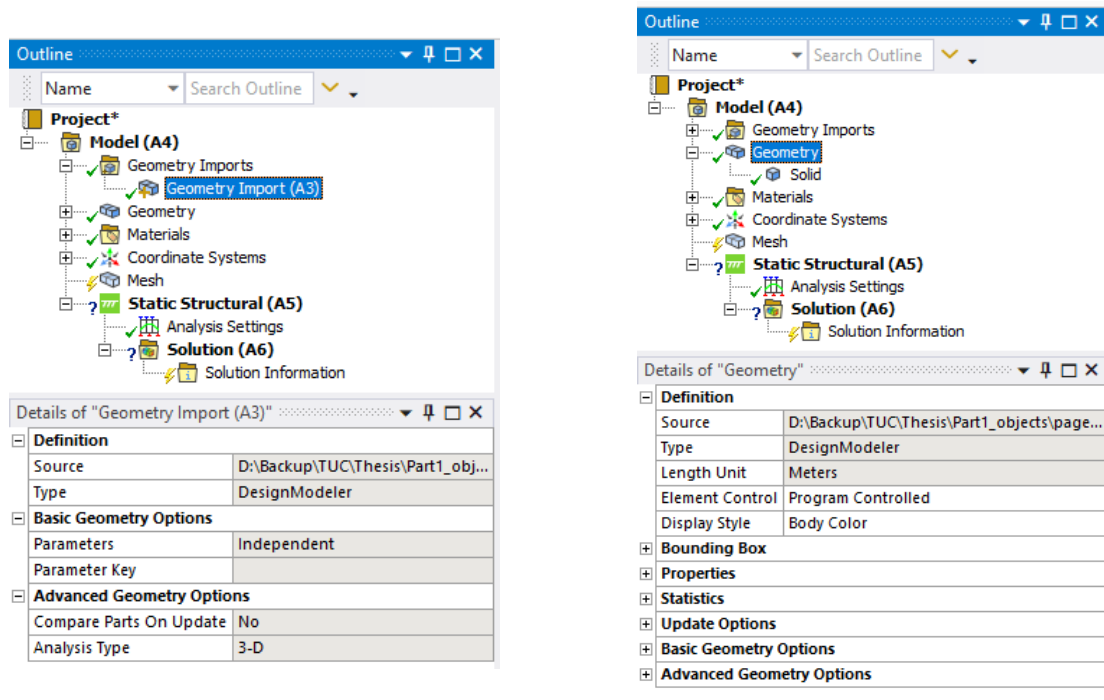
Εικόνα 47. Πληροφορίες για το μοντέλο μέσω της καρτέλας ‘Details’.

Πιο συγκεκριμένα:

Model (A4): Είναι το όνομα του μοντέλου και μέσα στην παρένθεση είναι το κελί στο οποίο βρίσκεται μέσα στο 'Workbench' (Εικόνα 47).

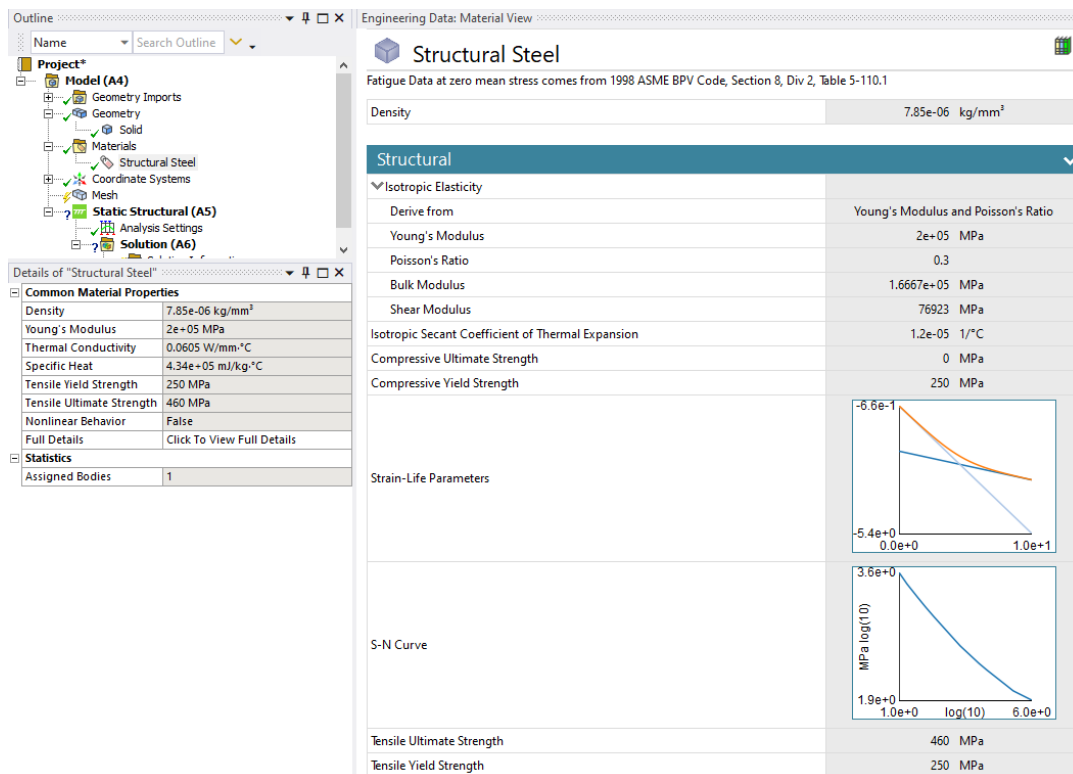
Geometry Imports: Επιλέγουμε από που πήραμε τη γεωμετρία του σχήματος (Εικόνα 48).

Geometry: Όλα τα κομμάτια με τις ονομασίες τους, όπου στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι μόνο ένα με την ονομασία 'Solid' (Εικόνα 48).



Εικόνα 48. Πληροφορίες για τη γεωμετρία του σχήματος.

Materials: Διάφορες πληροφορίες για το υλικό από το οποίο είναι φτιαγμένο το αντικείμενο. Η προεπιλεγμένη επιλογή του Ansys είναι ο δομικός χάλυβας (Structural Steel) (Εικόνα 49).

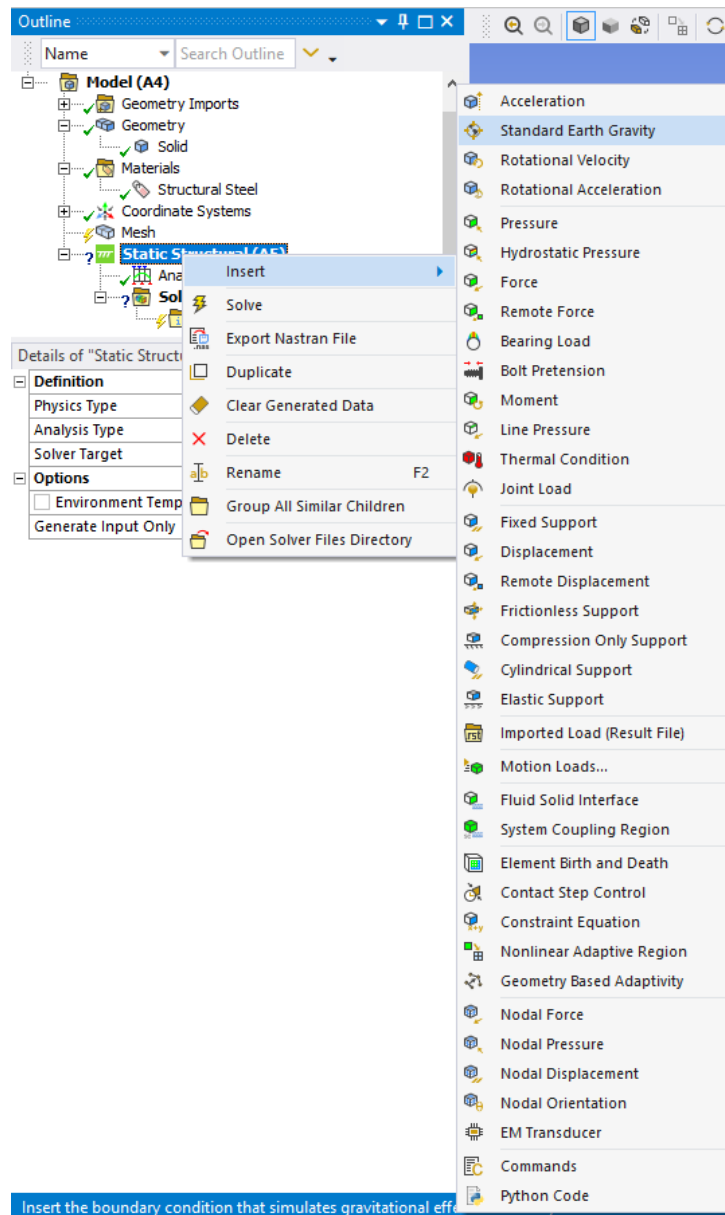


Εικόνα 49. Πληροφορίες για το υλικό του σχήματος.

Coordinate Systems: Το σημείο στο οποίο βρίσκεται η αρχή των αξόνων.

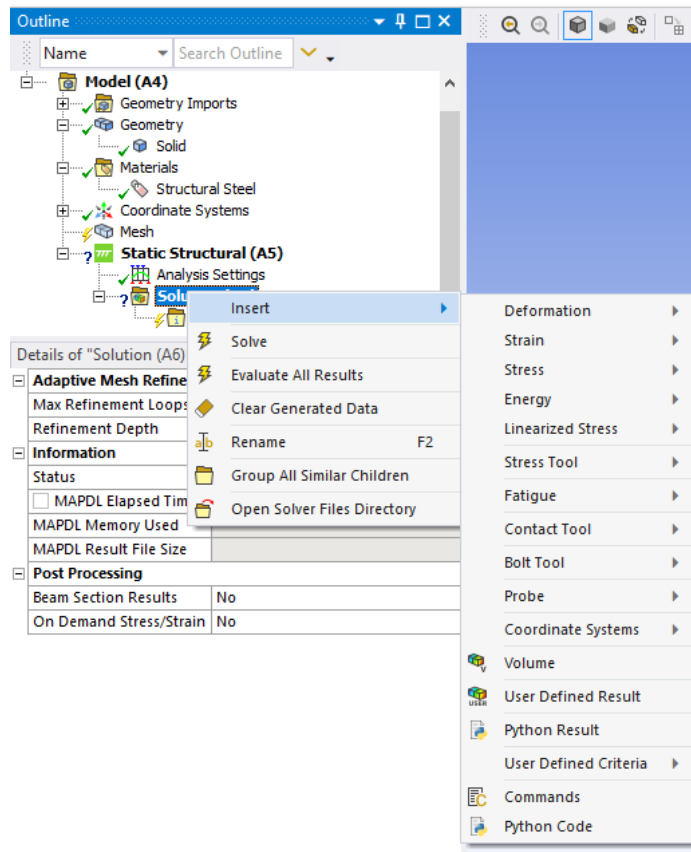
Mesh: Το πλέγμα αυτό δημιουργείται έτσι ώστε να μπορούμε να βλέπουμε σε ποιο κομμάτι του αντικείμενου είναι οι δυνάμεις πιο εμφανείς. Στην ενότητα 3.4 δίνονται αναλυτικές οδηγίες σχετικά με τη δημιουργία του.

Static Structural: Εδώ μπορούν να δημιουργηθούν οι δυνάμεις που θα εφαρμοστούν πάνω στο αντικείμενο (Εικόνα 50).



Εικόνα 50. Απεικόνιση των πιθανών εντολών του 'Static Structural'.

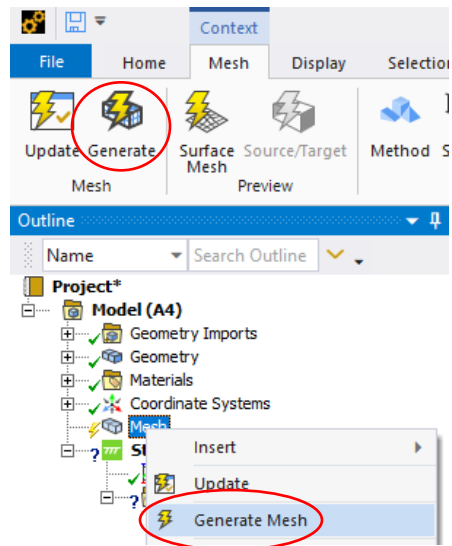
Solution: Σε αυτό το σημείο εισάγουμε το είδος των αποτελεσμάτων που θα χρειαστούμε για να εμφανιστούν στο τέλος της προσομοίωσης (Εικόνα 51).



Εικόνα 51. Απεικόνιση των πιθανών αποτελεσμάτων του ‘Static Structural’.

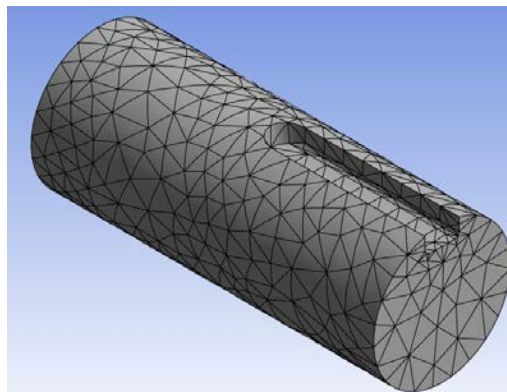
3.1.4 Δημιουργία Mesh

Τα πρώτα βήματα αφορούν τη δημιουργία του Mesh για τη δημιουργία πολυγώνων στο σχέδιο. Μπορούμε είτε να πατήσουμε δεξί κλικ και ‘Generate’, είτε από την κύρια γραμμή εντολών (Εικόνα 52).



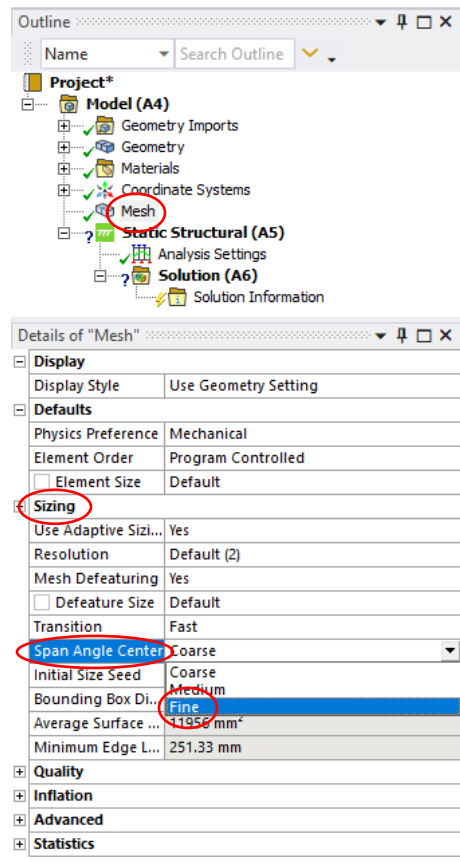
Εικόνα 52. Θέση εντολών δημιουργίας πλέγματος (Mesh).

Παρατηρούμε ότι δημιουργείται ένα πλέγμα (mesh) στο αντικείμενο που έχει σχεδιαστεί (Εικόνα 53).



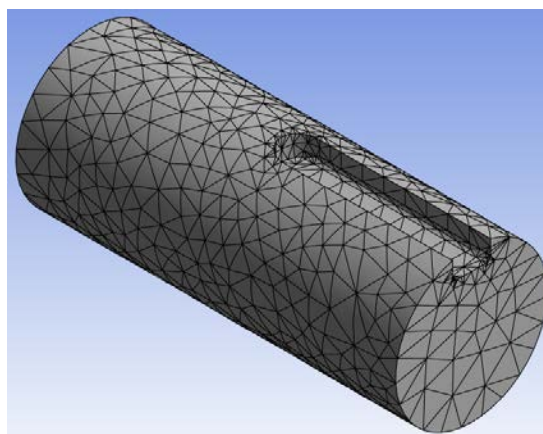
Εικόνα 53. Αρχικό πλέγμα αντικειμένου.

Κάθε κομμάτι του πλέγματος είναι αρκετά μεγάλο, συνεπώς πρέπει να χωριστεί σε μικρότερα ώστε το τελικό αποτέλεσμα να έχει μεγαλύτερη λεπτομέρεια. Γι' αυτό το λόγο, πηγαίνουμε από το παράθυρο 'Details', έχοντας κάνει ήδη κλικ το 'Mesh' στο 'Outline', στην καρτέλα 'Sizing' → 'Span Angle Center' και αντί για 'Coarse' επιλέγουμε το 'Fine' (Εικόνα 54).



Εικόνα 54. Αλλαγή μεγέθους κομματιών του πλέγματος (Mesh).

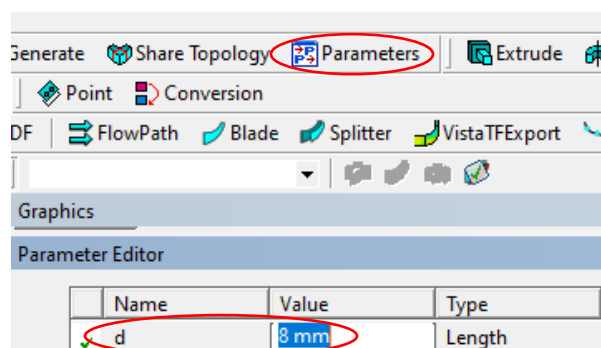
Επιλέγουμε ξανά το 'Generate' και έχουμε το νέο 'Mesh' (Εικόνα 55).



Εικόνα 55. Απεικόνιση πλέγματος (Mesh) μεγαλύτερης ακρίβειας.

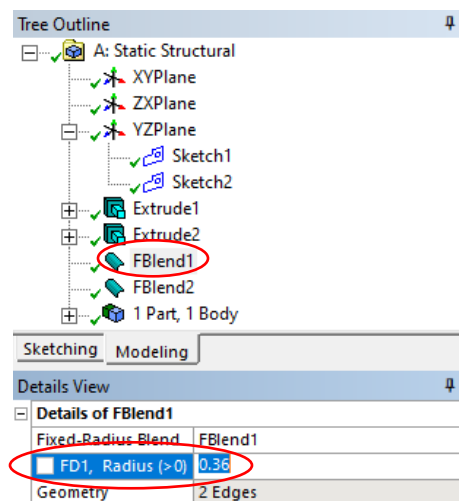
3.1.5 Αλλαγή διαστάσεων

Για να αλλάξουμε τις διαστάσεις του αντικειμένου θα πρέπει να ανοίξουμε ξανά το 'DesignModeler' μέσω του 'Workbench' όπως είχαμε κάνει στην αρχή της σχεδίασης, δηλαδή κάνοντας διπλό κλικ στο κελί 'Geometry' (Εικόνα 10). Έπειτα πηγαίνουμε στη γραμμή εντολών και επιλέγουμε το 'Parameters', έτσι ώστε να αλλάξουμε τη διάμετρο του κύκλου του σκίτσου 'Sketch1' που βρίσκεται μέσα στο επίπεδο 'YZPlane' (Εικόνα 56).



Εικόνα 56. Αλλαγή διάστασης διαμέτρου κύκλου μέσω παραμέτρων.

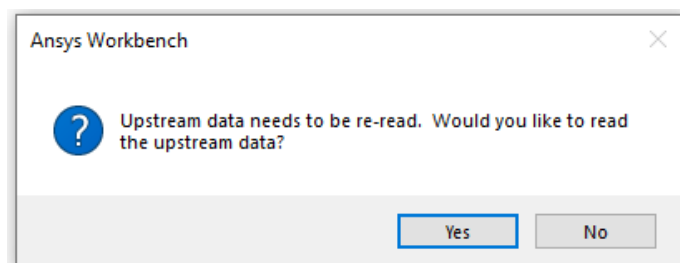
Στη γραμμή 'FBlend1' του παραθύρου 'Details' μπορούμε να αλλάξουμε το μέγεθος της καμπύλης (Εικόνα 57).



Εικόνα 57. Αλλαγή διάστασης καμπύλης σφηνόδρομου.

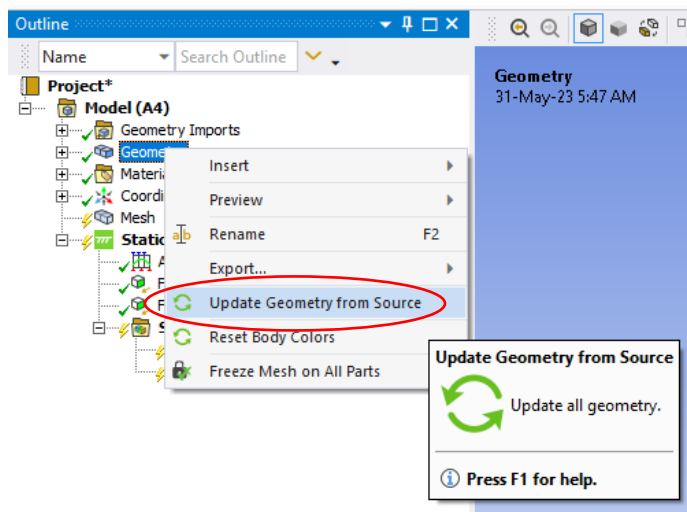
Για τις εξωθήσεις 'Extrude1' και 'Extrude2' η αριθμητική τους τιμή θα παραμείνει η ίδια. Στη συγκεκριμένη περίπτωση ορίστηκε ως 10 mm.

Σε περίπτωση που το παράθυρο του 'Mechanical' ήταν κλειστό, τότε αν πάμε να το ανοίξουμε ξανά θα εμφανιστεί το παρακάτω αναδυόμενο παράθυρο (Εικόνα 58).



Εικόνα 58. Μήνυμα προειδοποίησης τροποποιημένης γεωμετρίας.

Κάνουμε κλικ στο 'Yes' έτσι ότι τιμές που έχουμε αλλάξει να εφαρμοστούν μέσα στο 'Mechanical'. Εάν το είχαμε αφήσει ανοιχτό τότε όταν είμαστε πίσω στο 'Mechanical' οι διαστάσεις θα ενημερωθούν πηγαίνοντας στο 'Geometry' με δεξί κλικ και 'Update Geometry from Source' (Εικόνα 59).

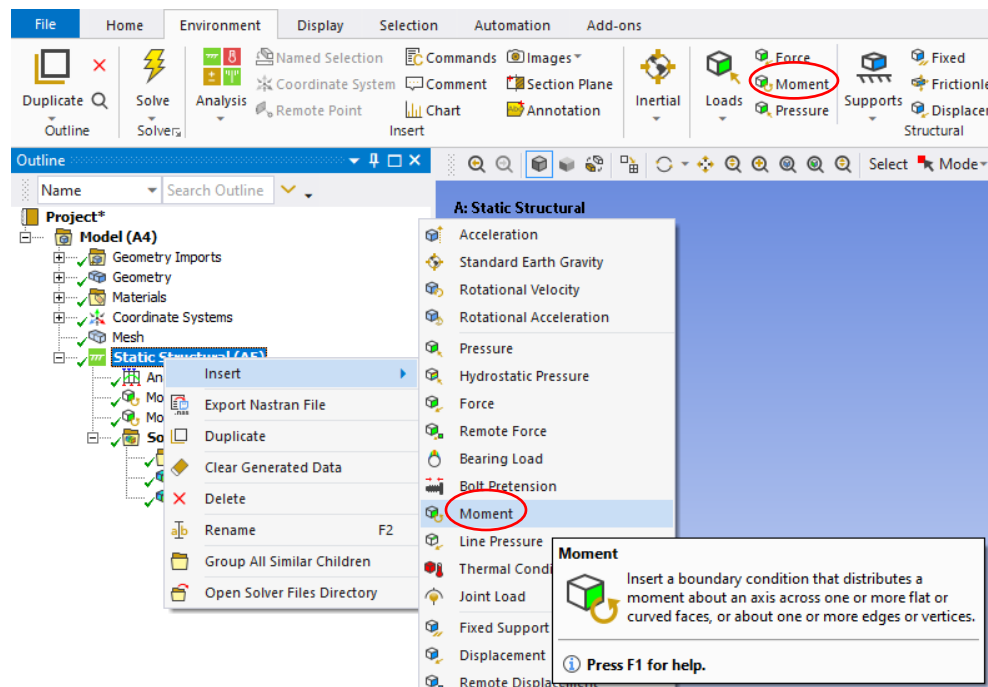


Εικόνα 59. Ενημέρωση γεωμετρίας σχήματος μέσω του 'Mechanical'.

Έχοντας γίνει όλες οι απαραίτητες αλλαγές, δημιουργούμε ξανά το πλέγμα (Mesh).

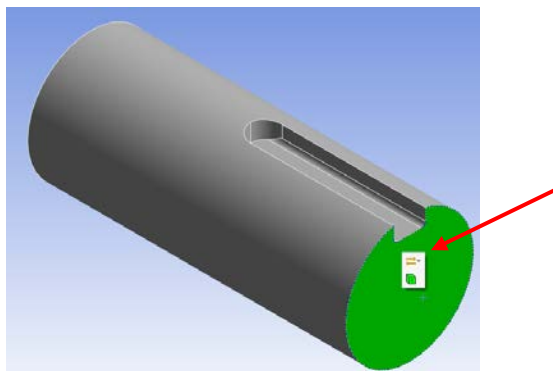
3.1.6 Κάμψη

Έπειτα από τη δημιουργία του Mesh, πηγαίνουμε στο ‘Static Structural’ και μετά είτε δεξί κλικ ‘Insert’ → ‘Moment’, είτε από την γραμμή εντολών κάνουμε κλικ το ‘Moment’ ώστε να εφαρμόσουμε τις 2 καμπτικές δυνάμεις (Εικόνα 60).



Εικόνα 60. Θέση εντολής ‘Moment’.

Έπειτα, πηγαίνουμε τον κέρσορα στη δεξιά πλευρά του αντικειμένου και την πατάμε μια φορά ώστε να γίνει πράσινη (Εικόνα 61).



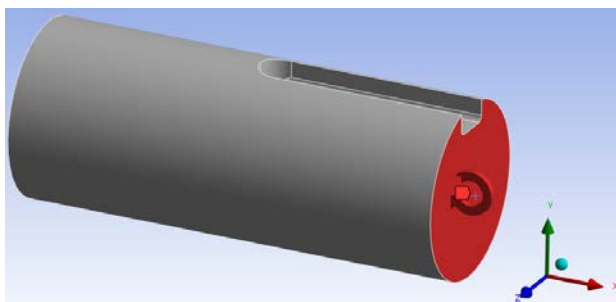
Εικόνα 61. Απεικόνιση επιλεγμένης δεξιάς πλευράς αντικειμένου για την εφαρμογή της ροπής.

Πατάμε 'Apply' στο κελί 'Geometry' και στη συνέχεια στο κελί 'Define By', αντί για την επιλογή 'Vector', βάζουμε 'Components'. Θα εμφανίσει 3 κελιά με τους X, Y, Z άξονες. Εισάγουμε στο κελί 'Z Component' την τιμή '-5,000' και πατάμε Enter (Εικόνα 62).

Details of "Moment"	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face
Definition	
Type	Moment
Define By	Components
Coordinate System	Global Coordinate System
<input type="checkbox"/> X Component	0. N-mm (ramped)
<input type="checkbox"/> Y Component	0. N-mm (ramped)
<input checked="" type="checkbox"/> Z Component	-5000. N-mm (ramped)
Suppressed	No
Behavior	Deformable
Advanced	

Εικόνα 62. Πεδίο εισαγωγής της ροπής.

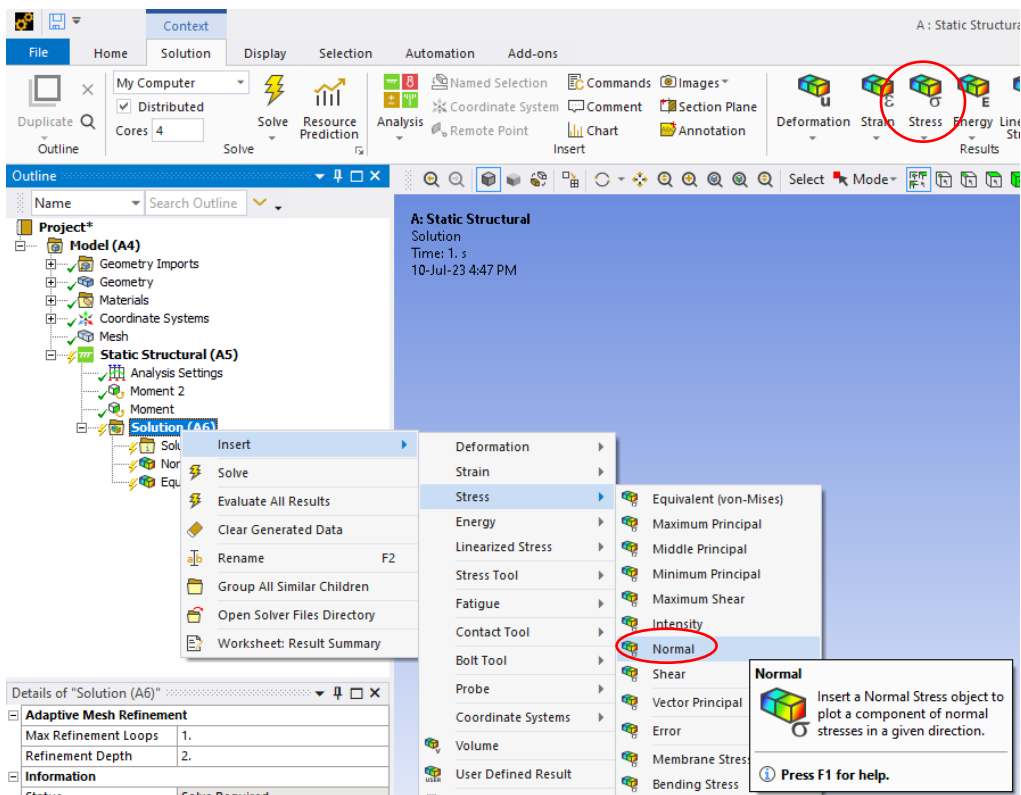
Έτσι δημιουργήθηκε μία ροπή των 5,000 N-mm ως προς τον Z άξονα (Εικόνα 63).



Εικόνα 63. Απεικόνιση σημείου εφαρμογής ροπής.

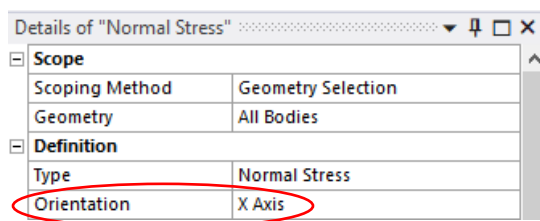
Με τα ίδια ακριβώς βήματα, δημιουργούμε άλλη μια ροπή των 5,000 N-mm στην αντίθετη πλευρά του αντικείμενου.

Για να έχουμε αποτελέσματα, πρέπει να τα προσθέσουμε στη λύση (Solution). Σκοπός είναι να βρούμε τι στρες δημιουργούν αυτές οι 2 δυνάμεις. Μπορούμε να πάμε από το 'Solution' → δεξί κλικ 'Insert' → 'Stress' → 'Normal' (Εικόνα 64) ή από τη γραμμή εντολών.



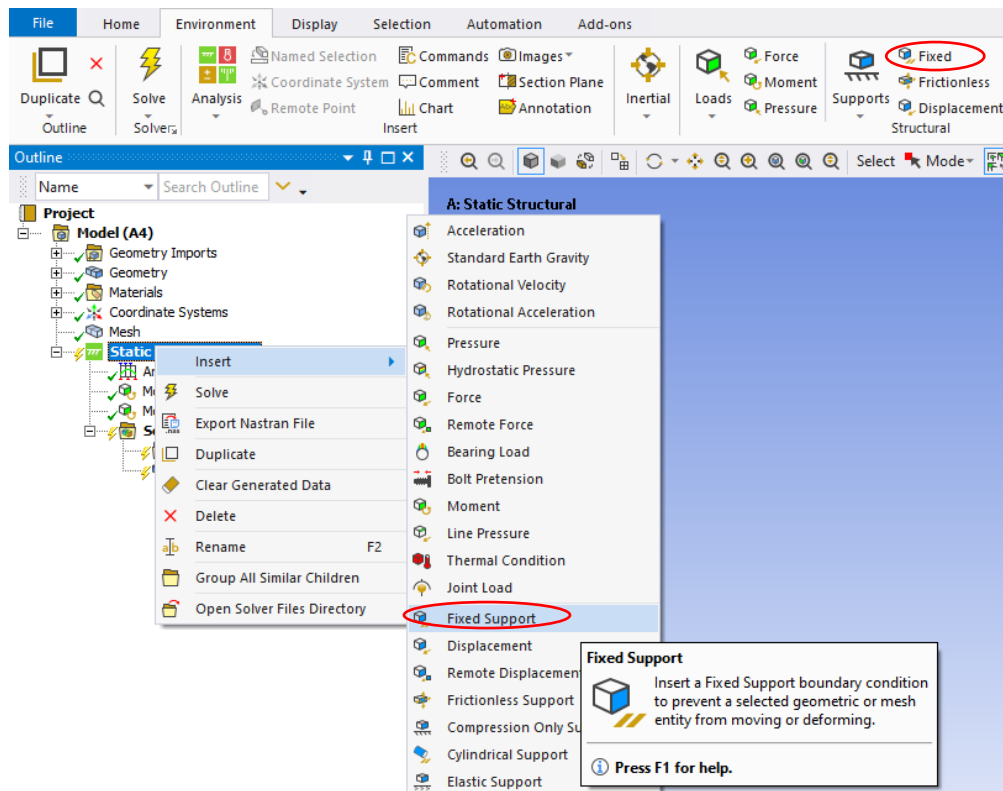
Εικόνα 64. Θέση του ‘Normal Stress’.

Επιπρόσθετα, εφόσον θέλουμε να βρούμε την ορθή αξονική τάση θα βάλουμε τον X άξονα στο κελί του προσανατολισμού (Orientation) (Εικόνα 65).



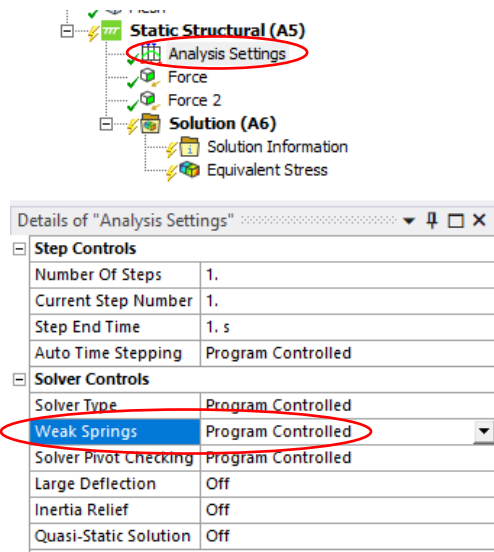
Εικόνα 65. Εφαρμογή X άξονα ως προσανατολισμό του στρες.

Ακόμη δεν μπορούμε να λάβουμε τα αποτελέσματα, εφόσον το αντικείμενο δεν είναι σωστά περιορισμένο. Επομένως, η άκαμπτη κίνηση του σώματος (rigid body motion) δε θα αποτραπεί. Μπορούμε να εφαρμόσουμε ένα σταθερό σημείο πάνω στο αντικείμενο μέσω της εντολής ‘Fixed Support’ (Εικόνα 66).



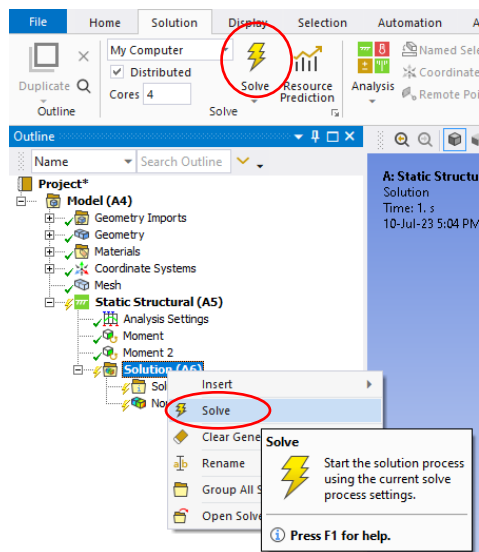
Εικόνα 66. Θέση εντολής ‘Fixed Support’.

Όμως, εφόσον αυτό το σταθερό σημείο θα πρέπει να είναι σε κάποιο από τα 2 σημεία που έχουμε εφαρμόσει τις ροπές, θα χάσουμε τη μία. Αντιθέτως, στο διάγραμμα της Εικόνα 13 υπάρχουν και οι 2 ροπές, έτσι θα χρησιμοποιήσουμε μία διαφορετική μέθοδο, τα ‘Weak Strings’, τα οποία βρίσκονται στο ‘Analysis Settings’ → ‘Solver Controls’ και από ‘off’ το βάζουμε σε ‘Program Controlled’ (Εικόνα 67).



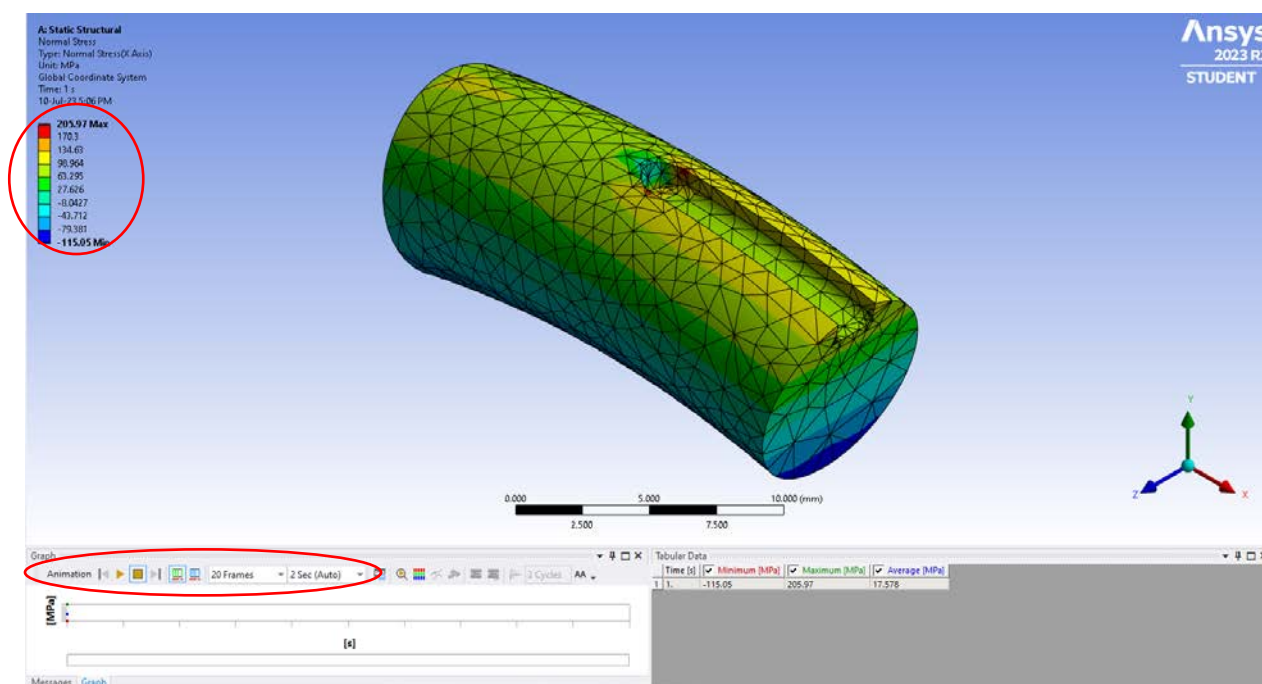
Εικόνα 67. Θέση εντολής ‘Weak Springs’.

Το παραπάνω έχει ως αποτέλεσμα τυχόν άκαμπτες κινήσεις του αντικειμένου που τυχόν δημιουργηθούν κατά τη λύση, τα ‘Weak Strings’ δεν θα τα αφήσουν. Τέλος, για να λάβουμε τα αποτελέσματα επιλέγουμε το ‘Solve’ από τη γραμμή εντολών ή μέσω δεξί κλικ στο ‘Solution’ και μετά ‘Solve’ (Εικόνα 68).



Εικόνα 68. Θέση εντολής ‘Solve’.

Τα αποτελέσματα και πολλές άλλες πληροφορίες δίνονται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια στο ‘Solution Information’, αλλά δεν είναι απαραίτητο. Μπορούμε να πατήσουμε το ‘Normal Stress’, το οποίο δίνει την παρακάτω εικόνα στο αντικείμενο (Εικόνα 69). Στα αριστερά βρίσκονται τα αποτελέσματα, όπου με το κόκκινο χρώμα είναι το μέγιστο στρες που δέχθηκε το αντικείμενο και με μπλε το κατώτερο. Στη συγκεκριμένη περίπτωση χρειαζόμαστε μόνο τη μέγιστη τιμή. Επιπρόσθετα, κάτω αριστερά υπάρχει η δυνατότητα να δούμε τη μεταβολή του στρες κατά την πάροδο του χρόνου μέσω της επιλογής ‘Animation’. Στη συνέχεια, συγκρίθηκε η θεωρητική τιμή του συντελεστή συγκέντρωσης τάσεων (K_t), με αυτή που βρέθηκε μέσω υπολογισμών, αλλάζοντας κάθε φορά τις απαραίτητες διαστάσεις του αντικειμένου.



Εικόνα 69. Τελικά αποτελέσματα του ‘Normal Stress’.

3.1.6.1 Υπολογισμοί

Αρχικά, υπολογίστηκαν οι διαφορετικές τιμές του συντελεστή συγκέντρωσης τάσεων (K_t) για τα διαφορετικά r/d της καμπύλης που υπάρχει στο διάγραμμα της Εικόνα 13.

Όπου, το d είναι η διάμετρος του κύκλου και r η ακτίνα των δύο οριζόντιων καμπυλών, στο κενό του σφηνόδρομου. Οι μονάδες μέτρησης και των δύο είναι τα χιλιοστά (mm). Επίσης, έχουμε και την καμπτική δύναμη M , σε Newton-millimeter (N-mm) που ασκείται στα άκρα του αντικείμενου.

Ο υπολογισμός του normal stress γίνεται από την παρακάτω σχέση (8) (Παπαδόπουλος, 2017).

$$\sigma_{\text{norm}} = \frac{MC}{I} = \frac{32M}{\pi d^3} \quad (8)$$

Οι διαστάσεις των d , r και M δεν είναι τυχαίες. Πιο συγκεκριμένα, το M επιλέχθηκε ως 5,000 N-mm, εφόσον το $d = 8$ mm και θέλουμε το $\sigma_{\text{norm}} \approx 100$ MPa. Επίσης, το $r = 0.04$ mm, εφόσον θέλουμε το αρχικό $r/d = 0.005$ mm.

Με τις παραπάνω τιμές βρίσκουμε το stress, μέσω του Ansys να είναι $\sigma_{\text{max}} = 352.67$ MPa.

Μετά βρίσκουμε το $\sigma_{\text{norm}} = \frac{MC}{I} = \frac{32M}{\pi d^3} = 99.47$ MPa.

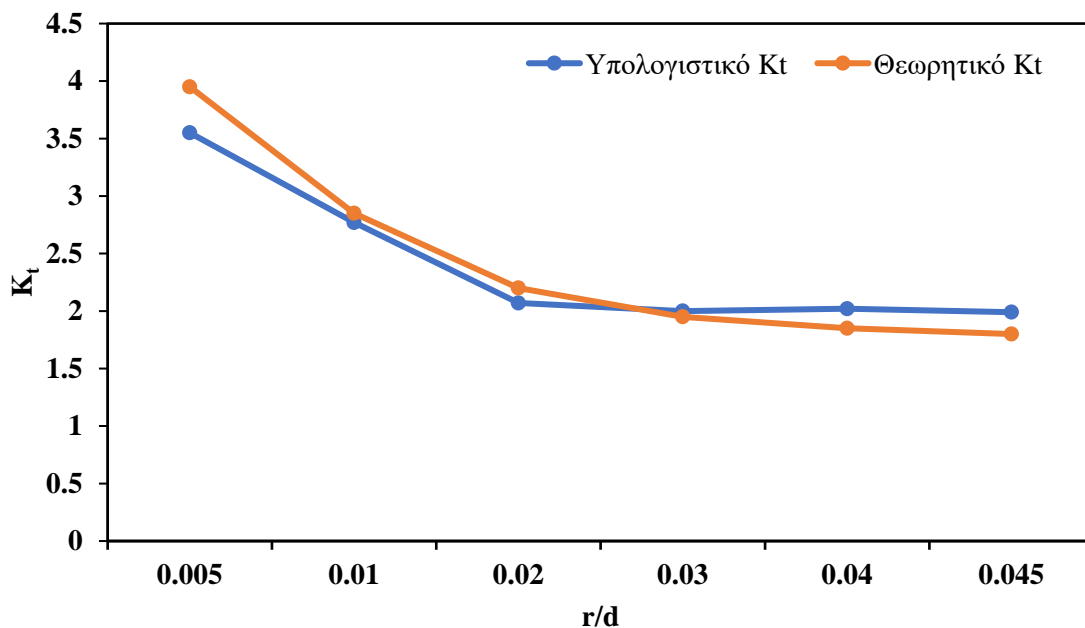
Ξέρουμε από τη σχέση (7) ότι $K_t = \frac{\sigma_{\text{max}}}{\sigma_{\text{norm}}} = 3.55$.

Μέσω του διαγράμματος της Εικόνα 13, για $r/d=0.005$, έχουμε $K_t = 3.95$.

Παρατηρούμε μια διαφορά τιμής -0.40 ανάμεσα στο Υπολογιστικό και στο Θεωρητικό συντελεστή συγκέντρωσης τάσεων K_t . Ομοίως έγιναν και οι υπόλοιποι υπολογισμοί, όπου αλλάζει μόνο το r ανάλογα με τον r/d περιορισμό (Πίνακας 1, Εικόνα 70).

Πίνακας 1. Διαφορά Υπολογιστικού με Θεωρητικού συντελεστή K_t , σε άξονα με σφηνόδρομο ημικυκλικού άκρου σε κάμψη.

r/d	r (mm)	σ_{max} (MPa)	Υπολογιστικό K_t	Θεωρητικό K_t	Διαφορά
0.005	0.04	352.67	3.55	3.95	-0.40
0.010	0.08	275.96	2.77	2.85	-0.08
0.020	0.16	206.14	2.07	2.20	-0.13
0.030	0.24	199.41	2.00	1.95	0.05
0.040	0.32	200.61	2.02	1.85	0.17
0.045	0.36	198.46	1.99	1.80	0.19

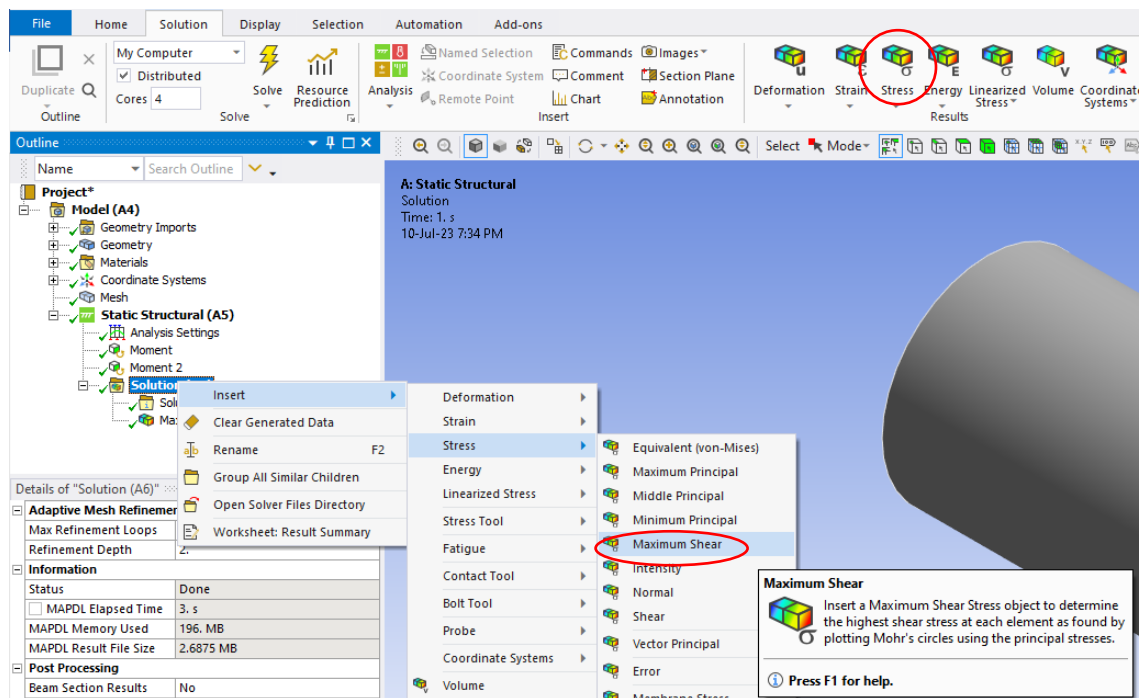


Εικόνα 70. Διάγραμμα σύγκρισης Υπολογιστικού με Θεωρητικού K_t σε άξονα με σφηνόδρομο ημικυκλικού άκρου σε κάμψη.

3.1.7 Στρέψη

Σημείωση: Οι εντολές που έχουν αναφερθεί ήδη δε θα αναγράφονται ξανά με μεγάλη λεπτομέρεια.

Μετά τη δημιουργία του Mesh πηγαίνουμε στο 'Static Structural' ώστε να εφαρμόσουμε στις 2 πλευρές του σχήματος τις 2 στρεπτικές δυνάμεις όπως στο διάγραμμα της Εικόνα 14, με τη 'Moment' εντολή όπως στην Κάμψη (ενότητα 3.6). Βάζουμε '10,000' στο X component στη δεξιά πλευρά και '-10,000' στο X component στην αριστερή πλευρά του αντικειμένου. Θέλουμε να βρούμε τις διατμητικές τάσεις, άρα στο 'Solution' θα προσθέσουμε το 'Maximum Shear Stress' (Εικόνα 71). Δεν ξεχνάμε να εφαρμόσουμε τα 'Weak Springs' και πατάμε 'Solve'.



Εικόνα 71. Θέση ‘Maximum Shear Stress’.

3.1.7.1 Υπολογισμοί

Από την εξίσωση στρεπτικής δύναμης έχουμε (Παπαδόπουλος, 2017):

$$T_{\text{norm}} = \frac{Tc}{J} = \frac{16T}{\pi d^3} \quad (9)$$

Όπου:

- T [N-mm]: η στρεπτική δύναμη που ασκείται στα άκρα του αντικείμενου

Έχουμε $d = 8 \text{ mm}$, $T = 10,000 \text{ N-mm}$ άρα $T_{\text{norm}} = \frac{16T}{\pi d^3} = 99.47 \text{ MPa}$.

Για $r/d = 0.01$:

$r = 0.08$

Και μέσω του Ansys $\sigma_{\text{max}} = 306.17 \text{ MPa}$.

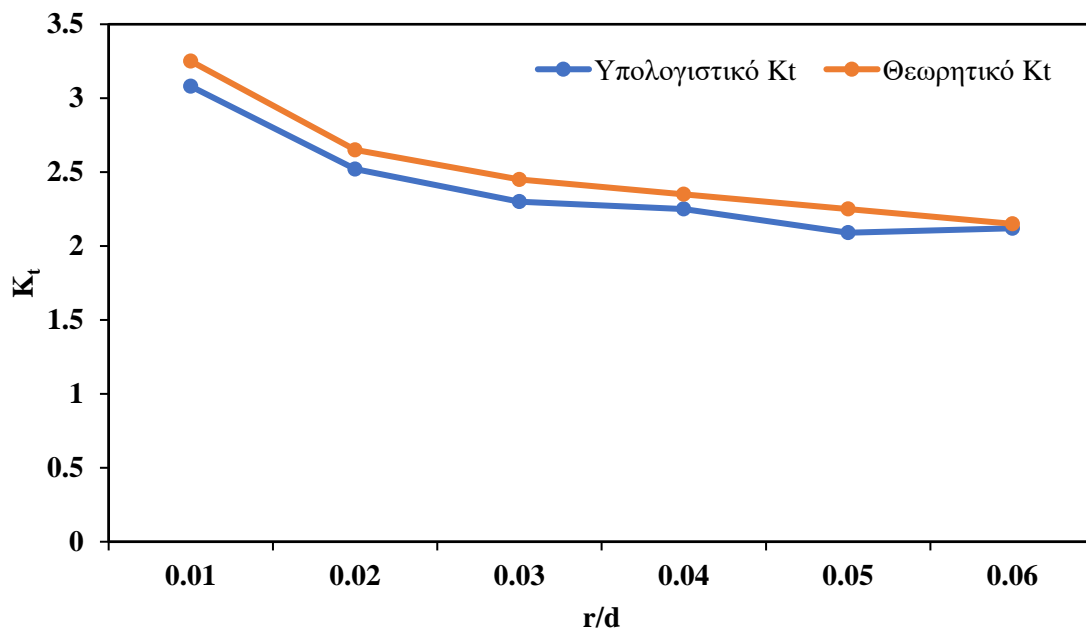
$$K_t = \frac{\sigma_{\text{max}}}{\sigma_{\text{norm}}} = 3.08$$

Μέσω του διαγράμματος (Εικόνα 14) για $r/d=0.01$, έχουμε $K_t = 3.25$.

Παρατηρούμε μια διαφορά του -0.08 ανάμεσα στο Υπολογιστικό και Θεωρητικό συντελεστή συγκέντρωσης τάσεων. Ομοίως έγιναν και οι υπόλοιποι υπολογισμοί, όπου αλλάζει μόνο το r , ανάλογα με τον r/d περιορισμό (Πίνακας 2, Εικόνα 72).

Πίνακας 2. Διαφορά Υπολογιστικού με Θεωρητικού συντελεστή K_t , σε άξονα με σφηνόδρομο ημικυκλικού άκρου σε στρέψη.

r/d	r (mm)	σ_{\max} (MPa)	Υπολογιστικό K_t	Θεωρητικό K_t	Διαφορά
0.01	0.08	306.17	3.08	3.25	-0.17
0.02	0.16	250.50	2.52	2.65	-0.13
0.03	0.24	228.59	2.30	2.45	-0.15
0.04	0.32	224.39	2.25	2.35	-0.10
0.05	0.40	208.12	2.09	2.25	-0.16
0.06	0.48	211.02	2.12	2.15	-0.03

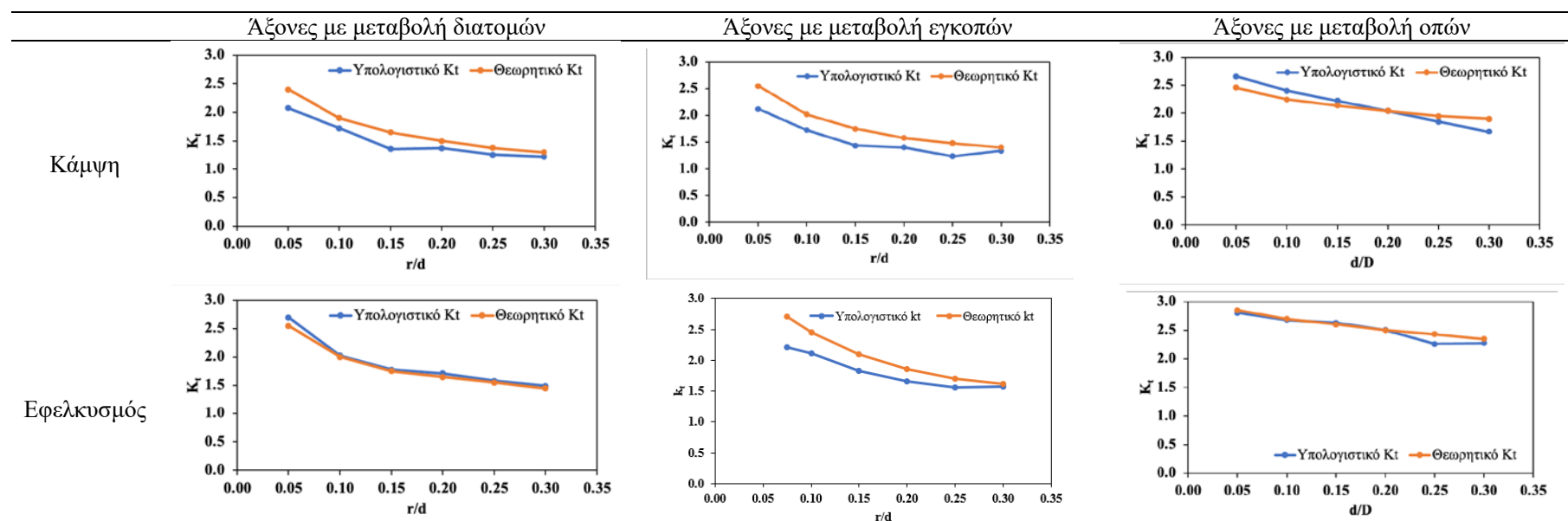


Εικόνα 72. Διάγραμμα σύγκρισης Υπολογιστικού με Θεωρητικού K_t σε άξονα με σφηνόδρομο ημικυκλικού άκρου σε στρέψη.

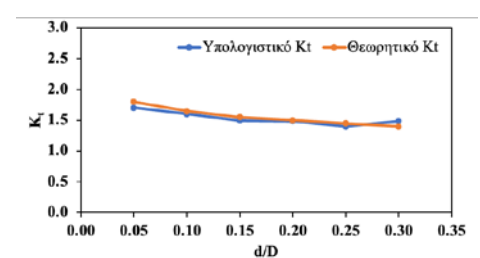
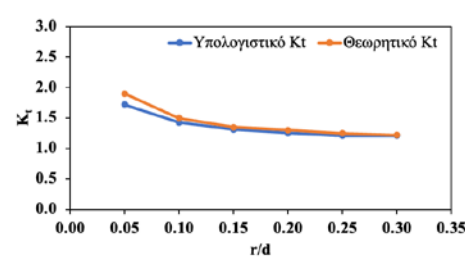
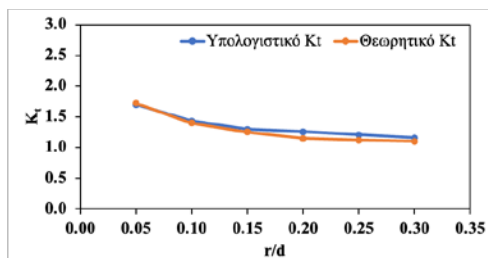
3.2 Ανάλυση τάσεων σε άξονες με μεταβολή διατομών, εγκοπών και οπών

Με τον ίδιο τρόπο όπως στις ενότητες 3.1.6 και 3.1.7 αναλύουμε και τις επόμενες περιπτώσεις, δηλαδή τους άξονες με μεταβολή διατομών, εγκοπών και οπών (Πίνακας 3). Περαιτέρω πληροφορίες για τη δημιουργία των σχημάτων και οδηγίες για τη δημιουργία των εφελκυστικών δυνάμεων βρίσκονται στο Παράρτημα Α. Τα στοιχεία των παρακάτω διαγραμμάτων αποτυπώνονται στους Πίνακες 5-13.

Πίνακας 3. Διαγράμματα σύγκρισης Υπολογιστικού με Θεωρητικού συντελεστή K_t στους άξονες με μεταβολή διατομών, εγκοπών και οπών σε κάμψη, εφελκυσμό και στρέψη.



Στρέψη



Όπως παρατηρήθηκε στον Πίνακα 3, οι κύριες αποκλίσεις βρέθηκαν στις προσομοιώσεις καμπτικών δυνάμεων για τους άξονες μεταβολής διατομών και εγκοπών, όπως και στην προσομοίωση εφελκυστικών δυνάμεων για άξονα με μεταβολή εγκοπών. Οι αποκλίσεις αυτές μπορούν να μειωθούν με χρήση λεπτομερούς πλέγματος (Mesh), το οποίο για τη συγκεκριμένη εργασία δεν ήταν εφικτό λόγω της εκπαιδευτικής έκδοσης του Ansys και του αριθμητικού ορίου που επιβάλλει. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις επαληθεύονται οι προσομοιώσεις που έγιναν στο Ansys για τον συντελεστή K_t και επιβεβαιώθηκαν τα μοντέλα μέσω των αναλύσεων αυτών.

Κεφάλαιο 4: Ανάλυση ανάπτυξης τάσεων σε οδοντωτούς τροχούς

Οι οδοντωτοί τροχοί που χρησιμοποιήθηκαν στις παρακάτω αναλύσεις δημιουργήθηκαν μέσω του λογισμικού Fusion 360 του οίκου Autodesk. Μέσω του ιδρυματικού λογαριασμού του Πολυτεχνείου Κρήτης υπάρχει η δυνατότητα να κατεβάσει ο κάθε ενδιαφερόμενος φοιτητής το λογισμικό ή οποιοδήποτε άλλο λογισμικό της Autodesk δωρεάν για ένα χρόνο. Υπάρχει και η δυνατότητα ανανέωσης αυτής της εκπαιδευτικής πρόσβασης σε μελλοντικό χρόνο, εφόσον διατηρείται ακόμα η φοιτητική ιδιότητα. Μπορεί να γίνει λήψη του Fusion 360 μέσω της παρακάτω ιστοσελίδας:

<https://www.autodesk.com/education/edu-software/overview?sorting=featured&filters=individual>

Στο Παράρτημα Β, γίνεται επεξήγηση του τρόπου με τον οποίο δημιουργήθηκαν οι οδοντωτοί τροχοί, όπως και η προετοιμασία που έγινε στη γεωμετρία τους για την εύρεση των αποτελεσμάτων που δίνονται στις ενότητες 4.1 και 4.2.

4.1 Σύγκριση υπολογιστικών με θεωρητικών καμπτικών τάσεων και επιφανειακών πιέσεων 21 και 42 δοντιών

Οι δυνάμεις που ασκούνται σε δύο δόντια μετωπικών οδοντωτών τροχών προκαλούν κάμψη και επιφανειακή πίεση. Υπολογίζονται με βάση τα κεφάλαια 18.12 και 18.13 του συγγράμματος Παπαδόπουλος (2017). Η μέθοδος υπολογισμού παρουσιάζεται παρακάτω κατά την American Gear Manufacturers Association (AGMA). Αυτή είναι το παγκόσμιο δίκτυο για τεχνικά πρότυπα, εκπαίδευση και επιχειρηματικές πληροφορίες για κατασκευαστές, προμηθευτές και χρήστες εξαρτημάτων μηχανικής μετάδοσης ισχύος (American Gear Manufacturers Association, 2024).

Η καμπτική τάση σ_t σε MPa προσδιορίζεται από τη σχέση (10) (Παπαδόπουλος, 2017):

$$\sigma_t = \frac{F_t}{m * b * J} * K_o * K_v * K_s * K_m * K_B \quad (10)$$

Η επιφανειακή πίεση σ_c σε MPa προσδιορίζεται από τη σχέση (10) (Παπαδόπουλος, 2017):

$$\sigma_c = C_p * \sqrt{\frac{F_t}{b * d_1 * I} * K_o * K_v * K_s * K_m * C_f} \quad (11)$$

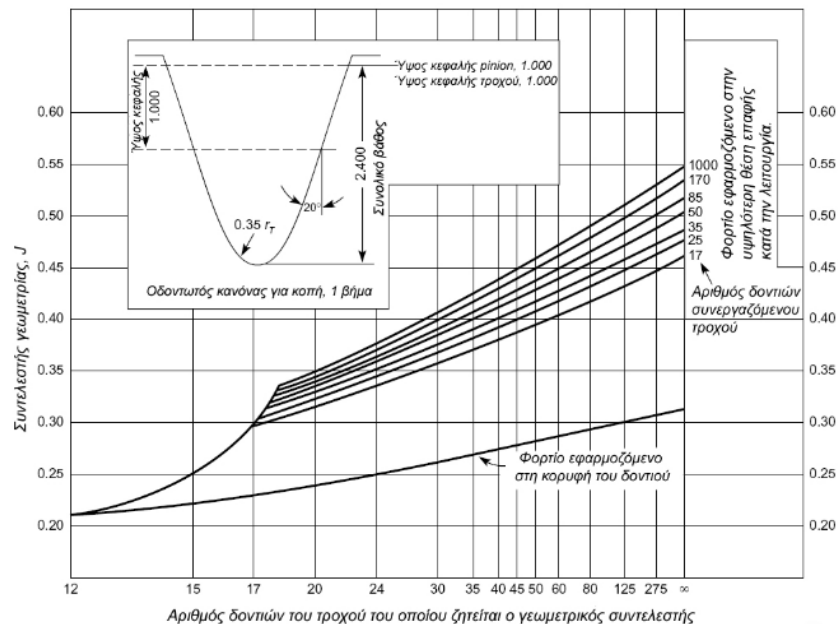
Όπου:

- F_t [N]: η ασκούμενη δύναμη στο δόντι
- m [mm]: το module για τους μετωπικούς οδοντωτούς τροχούς
- b [mm]: το πλάτος
- d_1 [mm]: η αρχική διάμετρος του pinion
- J [αδιάστατο]: ο γεωμετρικός συντελεστής. Βρίσκεται βάσει του σχήματος 18.22β (Εικόνα 73) του συγγράμματος Παπαδόπουλος (2017)
- I [αδιάστατο]: ο γεωμετρικός συντελεστής αντίστασης σε επιφανειακή φθορά. Βρίσκεται βάσει του σχήματος 18.36 (Εικόνα 74) του συγγράμματος Παπαδόπουλος (2017)
- Οι K_o , K_v , K_s , K_m , K_B και C_f [αδιάστατο]: είναι συντελεστές διόρθωσης AGMA για κατάσταση υπερφόρτωσης, δυναμική, διόρθωση μεγέθους, διανομής φορτίου, πάχους στεφάνης και επιφανειακών συνθηκών για αντίσταση στη φθορά αντίστοιχα. Δεδομένου ότι η μελέτη γίνεται σε στατικές συνθήκες, όλοι αυτοί οι παράγοντες θεωρούνται 1 για λόγους απλότητας.
- C_p [αδιάστατο]: ο ελαστικός συντελεστής, του οποίου η τιμή υπολογίζεται από τη σχέση (12) (Παπαδόπουλος, 2017):

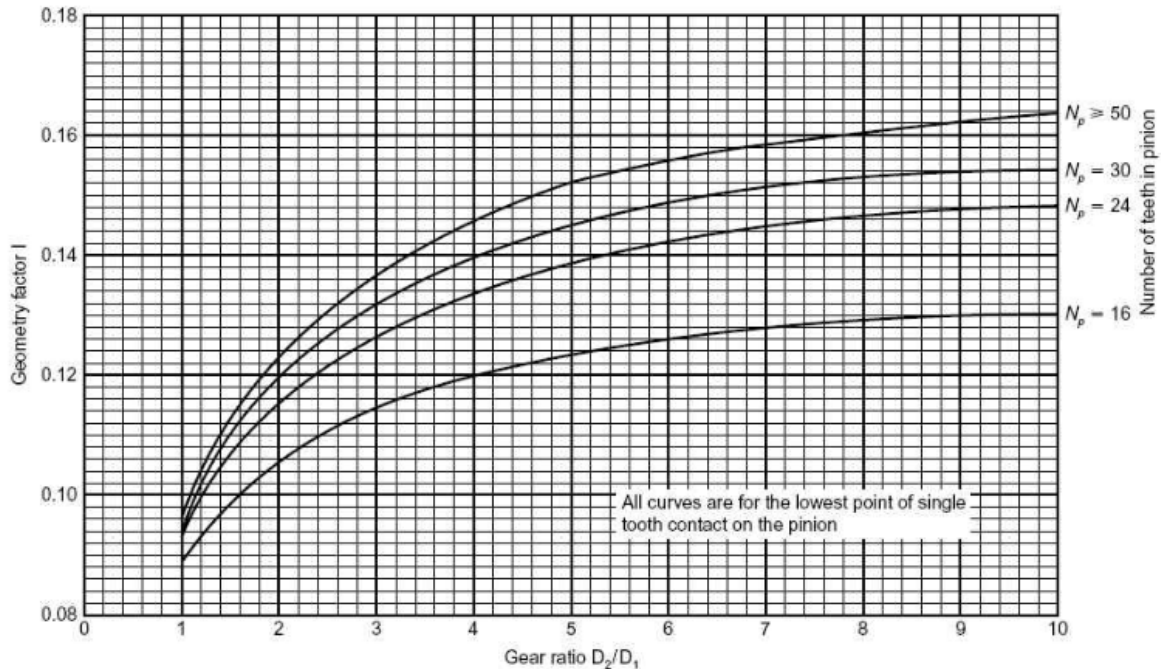
$$C_p = \sqrt{\frac{1}{\pi * \left[\frac{(1 - \nu_p^2)}{E_p} + \frac{(1 - \nu_g^2)}{E_g} \right]}} \quad (12)$$

Όπου:

- E_p , E_g [MPa]: τα μέτρα ελαστικότητας του pinion και του τροχού, αντίστοιχα
- ν_p , ν_g [αδιάστατο]: οι λόγοι Poisson του pinion και του τροχού, αντίστοιχα



Εικόνα 73. Σχήμα 18-22β σελίδας 795 του συγγράμματος Παπαδόπουλος (2017): Συντελεστής γεωμετρίας J για μετωπικούς οδοντωτούς τροχούς ($\phi = 20^\circ$ και $h_k=m$).



Εικόνα 74. Σχήμα 18-36 σελίδας 805 του συγγράμματος Παπαδόπουλος (2017): Γεωμετρικός συντελεστής I για κανονικούς μετωπικούς οδοντωτούς τροχούς 20°.

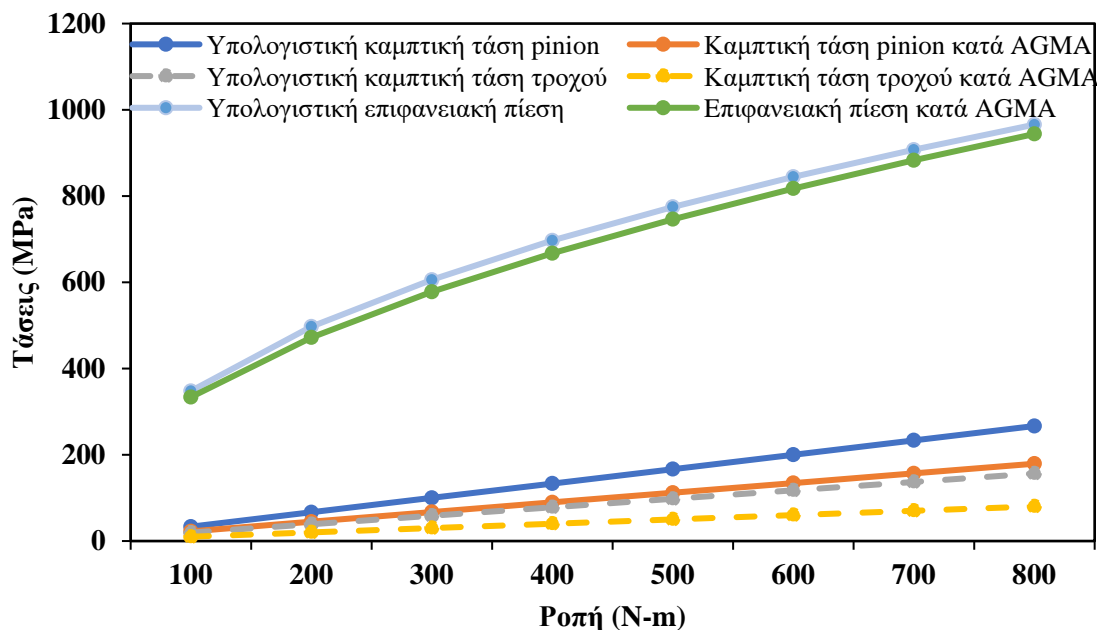
Πίνακας 4. Οι διαστάσεις του μοντελοποιημένου οδοντωτού τροχού και τα χαρακτηριστικά του υλικού του (Παπαδόπουλος, 2017).

Περιγραφή	Δεδομένα
Αριθμός Δοντιών	N = 21
Module	m = 5 mm
Αρχική διάμετρος Pinion	$d_1 = 105 \text{ mm} (= \text{Αριθμός δοντιών} * \text{Module})$
Πλάτος	b = 50 mm
Γεωμετρικός συντελεστής	J = 0.335
Γεωμετρικός συντελεστής αντίστασης σε επιφανειακή φθορά	I = 0.114
Μέτρα ελαστικότητας δομικού χάλυβα	$E_p, E_g = 200,000 \text{ MPa}$
Λόγοι Poisson	$\nu_p, \nu_g = 0.3$

Η ασκούμενη στο δόντι δύναμη F_t σε N, υπολογίζεται από τη σχέση (13) (Παπαδόπουλος, 2017).

$$F_t = \frac{\text{Moment}}{\text{Radium}_{\text{pinion}}} \quad (13)$$

Δηλαδή, είναι η διαίρεση της ροπής (moment) που προσθέσαμε στο pinion μέσα από το Ansys με την ακτίνα του pinion. Η ροπή κυμαίνεται από 100 έως 800 N-m.



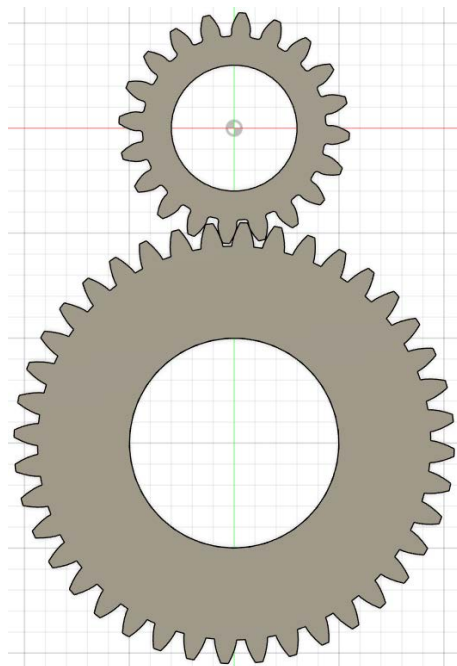
Εικόνα 75. Σύγκριση υπολογιστικών τάσεων pinion-τροχού και επιφανειακών πιέσεων, σε σχέση με τις αντίστοιχες που προκύπτουν από τις εξισώσεις κατά AGMA.

Όπως παρατηρείται στην Εικόνα 75, οι υπολογιστικές καμπτικές τάσεις για ροπές από 100 έως 800 N-m τόσο του pinion, όσο και του τροχού έχουν απόκλιση της κλίμακας 33% και 49% αντίστοιχα, σε σχέση με τις καμπτικές τάσεις που βρέθηκαν μέσω των υπολογισμών κατά AGMA. Τέτοιων ειδών αποκλίσεις μπορούν να μειωθούν μέσω της χρήσης βελτιωμένου πλέγματος, όπου στη συγκεκριμένη περίπτωση δεν ήταν εφικτό λόγω της εκπαιδευτικής έκδοσης του λογισμικού Ansys. Επιπρόσθετα, παρατηρούμε πως οι αποκλίσεις υπολογιστικής επιφανειακής πίεσης, σε σχέση με τις θεωρητικές μέσω AGMA κυμαίνονται από 2% έως 5%. Το χαμηλό αυτό ποσοστό αποκλίσεων προέκυψε λόγω της προσεκτικής δημιουργίας πλέγματος (mesh) πριν φτάσουμε το αριθμητικό όριο της εκπαιδευτικής έκδοσης, καθώς έπρεπε να γίνει επιλογή συγκεκριμένου σημείου πάνω στο σχήμα, το οποίο βελτιώνει την απόδοση του μοντέλου. Τέλος, τα αποτελέσματα επαληθεύονται, εφόσον η καμπτική τάση και η επιφανειακή πίεση ακολουθούν τις κατά AGMA τιμές.

4.2 Ανάλυση επιφανειακών πιέσεων για διαφορετικές γωνίες επαφής σε οδοντωτούς τροχούς 20 και 40 δοντιών

Για τη συγκεκριμένη ανάλυση δημιουργήθηκαν οδοντωτοί τροχοί 20 και 40 δοντιών στο Fusion 360 όπως περιγράφονται στο Παράρτημα Β, με διαφορά τη θέση των οδοντωτών τροχών. Πιο συγκεκριμένα, μετά τη δημιουργία τους, ο μεγάλος οδοντωτός τροχός μετακινήθηκε -150 mm κατά των y άξονα, -50 mm κατά των z άξονα και -2.25 μοίρες κατά τον z. Όσον αφορά τον μικρό οδοντωτό τροχό,

μετακινήθηκε -50 mm κατά των z άξονα και -4.5 μοίρες κατά των z. Έπειτα, δημιουργήθηκαν ομοίως οι οπές των 60 και 100 mm στο κέντρο των τροχών, αντίστοιχα. Τέλος, μέσω της εντολής 'Fillet', επιλέχθηκαν όλες οι ρίζες των δοντιών του μικρού οδοντωτού τροχού με ακτίνα 1.5 mm. Το τελικό αποτέλεσμα απεικονίζεται στην Εικόνα 76.



Εικόνα 76. Τελικό αποτέλεσμα οδοντωτών τροχών με 20 και 40 δόντια.

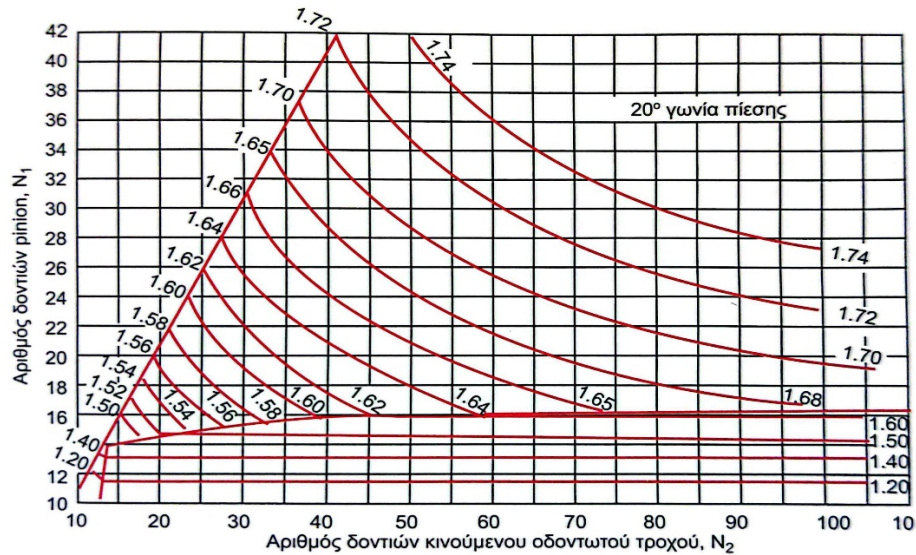
Παίρνοντας ως αρχικό σημείο αυτό που δημιουργήθηκε, θα βρεθούν άλλα 7. Αρχικά, επιλέγοντας την εντολή 'Create Sketch' από την καρτέλα 'SOLID' δημιουργήθηκαν 2 κύκλοι στο pinion, των 100 mm και 110 mm, όπως και άλλοι 2 στον μεγάλο οδοντωτό τροχό, των 200 mm και 210 mm. Έπειτα, τραβάμε μια οριζόντια γραμμή, που θα περνάει από το σημείο επαφής κύκλων με ακτίνα 100 και 200 mm. Στη συνέχεια, ξεκινώντας από το προαναφερόμενο σημείο και με κλίση 20 μοιρών δημιουργήθηκε άλλη μία γραμμή που θα φτάνει μέχρι τον κύκλο των 210 mm. Ομοίως και άλλη μία για τον κύκλο των 110 mm. Τέλος, μέσω της παρακάτω σχέσης βρέθηκαν 2 μήκη ευθειών όπου όλα τα σημεία πάνω σε αυτά θα είναι επαφή ενός σετ δοντιών.

$$\frac{0.635}{1.635} * (11.489 + 12.646) = 9.373$$

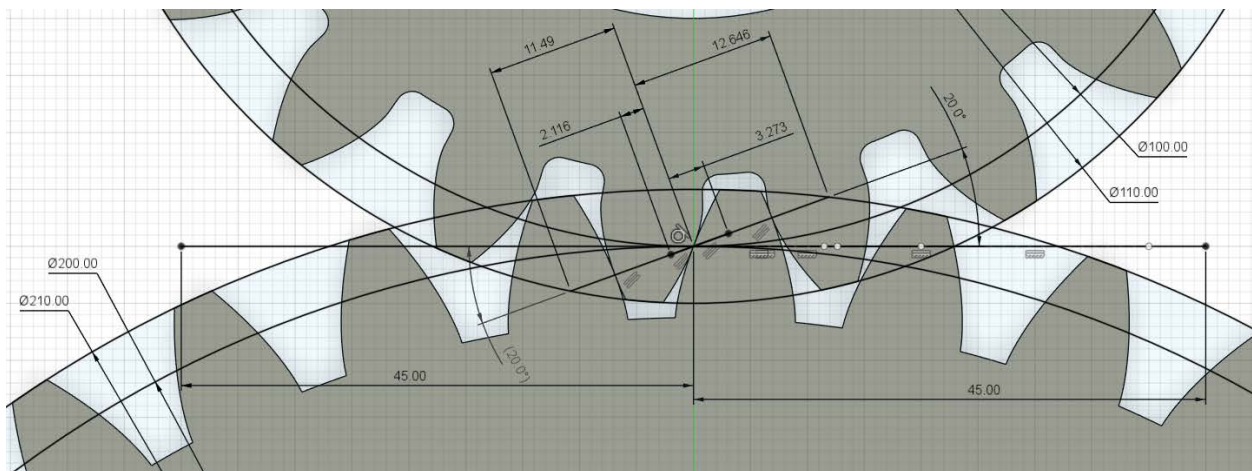
Αφαιρούμε το 9.373 από τις 11.489 και 12.646 ευθείες, ώστε να βρούμε τις 2 τελικές ευθείες.

Όπου (Εικόνα 78):

- 1.635 είναι ο λόγος επαφής σε μετωπικούς οδοντωτούς τροχούς γωνίας εξειλιγμένης 20° , που βρέθηκε γραφικά μέσω του Σχήματος 18.9 του συγγράμματος Παπαδόπουλος (2017) (Εικόνα 77).
- 0.635 είναι υποκομμάτι του λόγου επαφής και δείχνει ότι έχουμε ένα τμήμα ίσο με 0.635 στο σύνολο του λόγου επαφής, στο οποίο έχουμε επαφή με 2 δόντια. Εάν ο λόγος επαφής ισούται με 1 σημαίνει ότι έχουμε πάντα μόνο ένα δόντι να έρχεται σε επαφή με ένα άλλο.
- 11.489 είναι η απόσταση από το σημείο επαφής των 100 mm και 200 mm κύκλων προς την εσωτερική πλευρά του κύκλου 110 mm.
- 12.646 είναι η απόσταση από το σημείο επαφής των 100 mm και 200 mm κύκλων προς την εσωτερική πλευρά του κύκλου 210 mm.



Εικόνα 77. Σχήμα 18-9 σελίδας 779 του συγγράμματος Παπαδόπουλος (2017): Λόγος επαφής σε μετωπικούς οδοντωτούς τροχούς γωνίας εξειλιγμένης 20° .

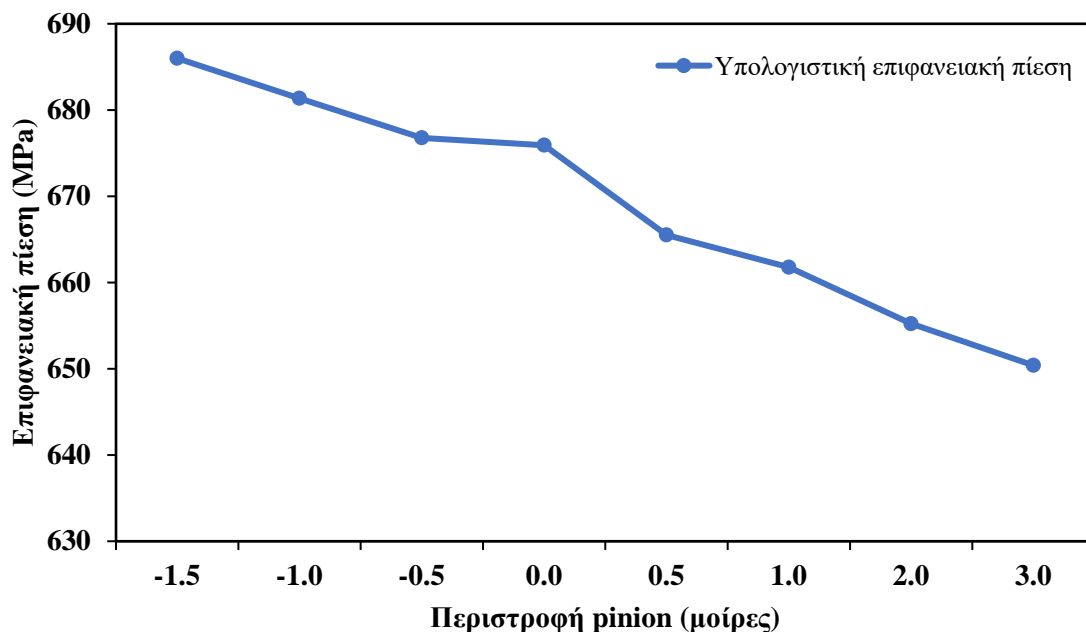


Εικόνα 78. Απεικόνιση των προαναφερθέντων κύκλων και ευθειών επαφής των οδοντωτών τροχών 20 και 40 δοντιών.

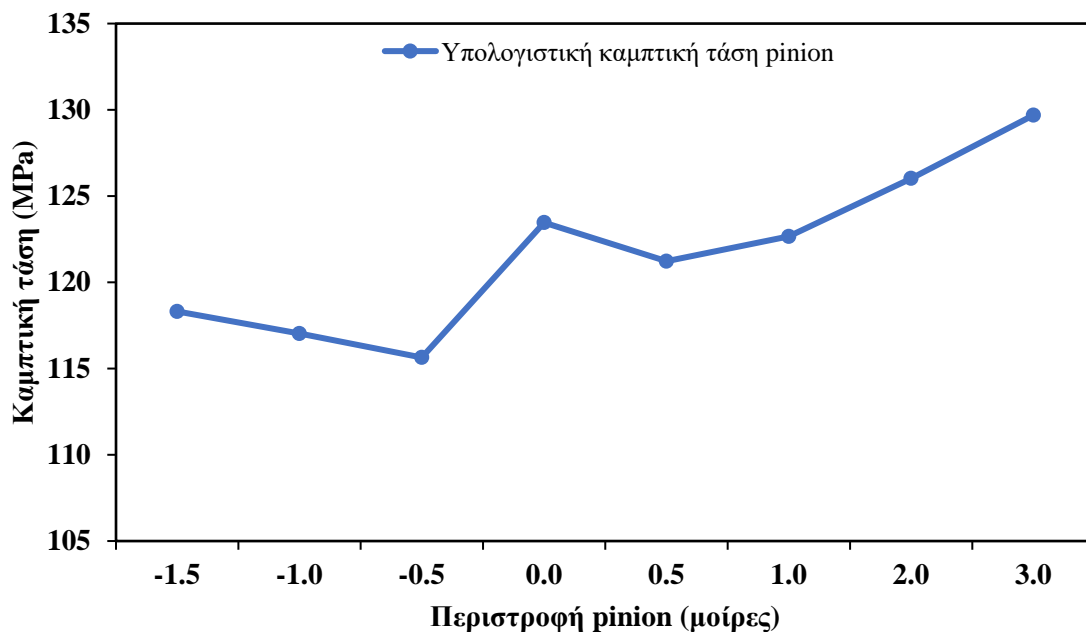
Ξεκινώντας, από το αρχικό αυτό σημείο για την 3.273 ευθεία έχουμε 4 διαφορετικά σημεία επαφής, τα οποία βρίσκουμε μετακινώντας τον μικρό οδοντωτό τροχό κατά των z άξονα για 0.5, 1, 2, 3 μοίρες και τον μεγάλο για -0.25, -0.5, -1, -1.5 μοίρες. Ομοίως, για την 2.116 ευθεία, έχουμε 3 σημεία επαφής όπου τα βρίσκουμε μετακινώντας τον μικρό οδοντωτό τροχό κατά των z άξονα για -0.5, -1, -1.5 μοίρες και τον μεγάλο για 0.25, 0.5, 0.75 μοίρες.

Σημείωση: Η κάθε προαναφερόμενη μετακίνηση είναι με βάση το αρχικό σημείο.

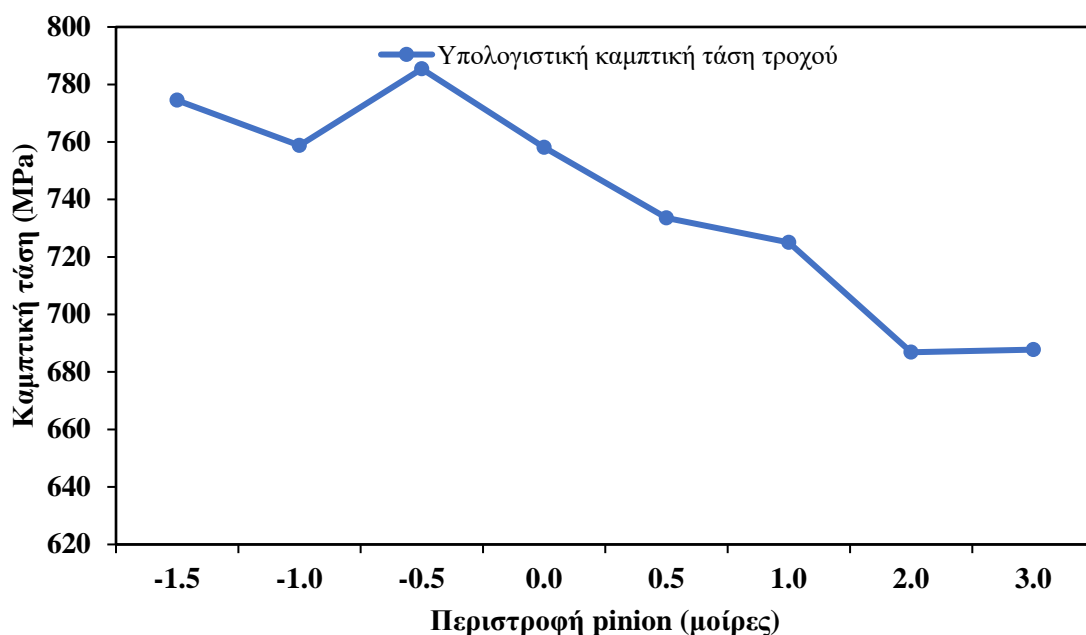
Έπειτα από την κάθε μετακίνηση του μικρού και του μεγάλου οδοντωτού τροχού γίνεται εξαγωγή του αρχείου και εισαγωγή στο Ansys για να βρεθεί η επιφανειακή πίεση στην επαφή των 2 δοντιών με στρεπτική δύναμη 400 N-m. Τα βήματα για τη μετατροπή του μοντέλου από 3D σε 2D στο 'DesignModeler', όπως και τα βήματα στο 'Mechanical' είναι τα ίδια με αυτά του Παραρτήματος Β και της Ενότητας 5.1. Τα τρία παρακάτω διαγράμματα απεικονίζουν την επιφανειακή πίεση (Εικόνα 79) και καμπτική τάση για το pinion (Εικόνα 80) και τον τροχό (Εικόνα 81) που ασκούνται γύρω από το σημείο επαφής των δύο δοντιών, για τις διαφορετικές γωνίες επαφής.



Εικόνα 79. Διάγραμμα σύγκρισης επιφανειακής πίεσης για διαφορετικές γωνίες επαφής Pinion και Τροχού.



Εικόνα 80. Διάγραμμα σύγκρισης καμπτικής τάσης Pinion για διαφορετικές γωνίες επαφής Pinion.



Εικόνα 81. Διάγραμμα σύγκρισης καμπτικής τάσης Τροχού για διαφορετικές γωνίες επαφής Pinion.

Μέσω των σχέσεων και σχεδιάσεων που αναφέρονται στην παρούσα εργασία βρέθηκαν οι 2 ευθείες στις οποίες υπάρχει επαφή ενός σετ δοντιών. Για την επιφανειακή πίεση (Εικόνα 79) παρατηρούμε

πως όταν η περιστροφή του *pinion* έχει θετικές τιμές, δηλαδή όταν το σημείο επαφής μετακινείται προς τη ρίζα του *pinion*, η επιφανειακή πίεση μειώνεται. Το αντίθετο συμβαίνει όταν το σημείο επαφής πλησιάζει την κορυφή του δοντιού. Στην Εικόνα 80, κατά τη μετακίνηση του σημείου επαφής προς τη ρίζα του *pinion* παρατηρούμε πως η καμπτική τάση του *pinion* αυξάνεται. Αντιθέτως, για τον τροχό (Εικόνα 81) όταν η περιστροφή του *pinion* έχει θετικές τιμές και το σημείο επαφής μετακινείται προς τη κορυφή του δοντιού, η υπολογιστική τάση μειώνεται. Αντίστοιχο αποτέλεσμα παρατηρήθηκε και από τους Patil et al. (2016); Phani Kumar et al. (2019), επαληθεύοντας τα αποτελέσματα που διαπιστώθηκαν.

Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα και Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η διπλωματική εργασία ξεκίνησε αρχικά με σκοπό τη δημιουργία οδηγιών και απόκτηση γνώσεων για τη χρήση των λογισμικών H/Y Ansys και Fusion 360. Αυτό επιτεύχθηκε με τη σχεδίαση διαφόρων αξόνων και την επιβεβαίωση των μοντέλων τους μέσω προσομοιώσεων για την επαλήθευση των συντελεστών συγκέντρωσης τάσεων τους (K_t). Επομένως, δημιουργείται μια εκπαιδευτική αξία στους μελλοντικούς φοιτητές ώστε χρησιμοποιώντας τα μοντέλα αυτά με τη δημιουργία διαφόρων τομών στους άξονες, να μπορούν να εξετάσουν την ανάπτυξη των τάσεων και να κατανοήσουν τον συντελεστή K_t . Στη συνέχεια, έπειτα από τη δημιουργία δύο οδοντωτών τροχών 21 και 42 δοντιών, συγκρίθηκαν οι υπολογιστικές τιμές καμπτικής τάσης. Βρέθηκαν αποκλίσεις με τις θεωρητικές τιμές της τάξης του 33% και 49% για το pinion και τον τροχό, αντίστοιχα και υπολογιστικής επιφανειακής πίεσης, όπου βρέθηκαν αποκλίσεις της τάξης του 2% έως 5% με τις θεωρητικές τιμές. Επαληθεύθηκαν όμως οι υπολογιστικές τιμές μέσω των σχέσεων κατά AGMA, εφόσον τις ακολουθούν για δύναμη ροπής από 100 έως 800 N-m. Τέλος, έπειτα από τη δημιουργία δύο οδοντωτών τροχών 20 και 40 δοντιών βρέθηκε μια ευθεία πάνω στο σημείο επαφής τους, όπου σε όλα της τα σημεία υπάρχει επαφή ενός σετ δοντιών. Έπειτα, βρέθηκαν 8 σημεία πάνω στη ευθεία αυτή και μέσω μετακίνησης και των 2 τροχών κατά τον άξονα Z βρέθηκε η επιφανειακή πίεση του σημείου επαφής των τροχών για ροπή δύναμης 400 N-m, όπου όταν το σημείο επαφής απομακρυνόταν από τη κορυφή του δοντιού προς τη ρίζα του pinion, έτσι και η επιφανειακή πίεση μειωνόταν. Επιπρόσθετα, συγκρίθηκε και η καμπτική τάση του pinion και του τροχού στα 8 διαφορετικά σημεία, όπου όταν το σημείο επαφής απομακρυνόταν από τη κορυφή του δοντιού προς τη ρίζα του pinion, η καμπτική τάση αυξανόταν. Το ίδιο διαπιστώθηκε και για τον μεγάλο τροχό. Συνεπώς, παρατηρήθηκε ότι η επιφανειακή πίεση είναι αντιστρόφως ανάλογη της καμπτικής τάσης.

Όσον αφορά την μελλοντική έρευνα στο συγκεκριμένο ερευνητικό πεδίο, θα μπορούσαν να προταθούν τα παρακάτω:

- Σχεδιασμός των αντικειμένων και πραγματοποίηση προσομοιώσεων με την πλήρη έκδοση των λογισμικών Ansys. Αυτό δίνει τη δυνατότητα μεγαλύτερης λεπτομέρειας ως προς το σχεδιασμό και την καλύτερη εκτέλεση των μοντέλων (πχ. χρήση 3D μοντέλων για τις αναλύσεις στους οδοντωτούς τροχούς).
- Μελέτη επίδρασης τύπου πεπερασμένων στοιχείων. Υπάρχουν διάφοροι τύποι πεπερασμένων στοιχείων, με διαφορετικές ιδιότητες το κάθε ένα, ενώ το Ansys διαλέγει αυτόματα όποιον τύπο θεωρεί καλύτερο. Έτσι, μπορεί να γίνει μια μελέτη επίδρασης του τύπου των πεπερασμένων στοιχείων για ακρίβεια των αναλύσεων των υπολογισμών.

- Δυναμική ανάλυση των τάσεων που αναπτύσσονται λόγω αντίδρασης στους οδοντωτούς τροχούς, εφόσον πάντα υπάρχει ένα διάκενο ανάμεσα στα δόντια το οποίο δημιουργεί κρουστικά φορτία ανάπτυξης μεγαλύτερων τάσεων.

Βιβλιογραφία

American Gear Manufacturers Association. (2024). <https://www.agma.org/>

Ansys, Inc. (2024). Engineering Simulation Software. <https://www.ansys.com/>

Autodesk Fusion. (2024). 3D CAD, CAM, CAE, & PCB Cloud-Based Software | Autodesk. <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview>

Breitsprecher, S. (2023). *Tension vs. Compression Force: What's the Difference?* US Cargo Control. <https://www.uscargocontrol.com/blogs/blog/tension-vs-compression-force-whats-the-difference>

Corrosionpedia. (2023). *Stress Concentration Factor*. Corrosionpedia. <https://www.corrosionpedia.com/definition/1035/stress-concentration-factor-kt>

Dourmashkin, P. (2020). 26.2: *Stress and Strain in Tension and Compression*. Massachusetts Institute of Technology. [https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Classical_Mechanics/Classical_Mechanics_\(Dourmashkin\)/26%3A_Elastic_Properties_of_Materials/26.02%3A_Stress_and_Strain_in_Tension_and_Compression](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Classical_Mechanics/Classical_Mechanics_(Dourmashkin)/26%3A_Elastic_Properties_of_Materials/26.02%3A_Stress_and_Strain_in_Tension_and_Compression)

Learn Civil Engineering.com. (2024). *Mechanics of Materials---Tension and Compression*. <https://learncivilengineering.com/wp-content/themes/thesis/images/structural-engineering/PE-reviewStructure-Mechanics-of-Materials-Tension-and-compression.pdf>

Maitra, G. M. (1994). *Handbook of Gear Design*. Tata McGraw-Hill.

Marples Gears Inc. (2020). *Internal Gears*. <https://www.marplesgears.com/2019/11/internal-gears/>

Nice, K., & Hall-Geisler. (2023). *How Gears Work*. HowStuffWorks. <https://science.howstuffworks.com/transport/engines-equipment/gear.htm#pt2>

Oberg, E. (2012). *Machinery's Handbook* (29th ed.). Industrial Press. <https://www.upcitemdb.com/upc/9780831129002>

Patil, S. S., Karuppanan, S., & Atanasovska, I. (2016). Experimental measurement of strain and stress state at the contacting helical gear pairs. *Measurement*, 82, 313–322. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.12.046>

Phani Kumar, S., Suman, K. N. S., Nagaraju, B., & Ramanjaneyulu, S. (2019). Contact Stress Analysis of Structural Steel Gears Under Misalignment of Shafts. In S. Pujari, S. Srikanth, & S. Subramanian (Eds.), *Recent Advances in Material Sciences* (pp. 283–296). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-13-7643-6_23

Radzevich, S. P., & Dudley, D. W. (1994). *Handbook of Practical Gear Design*. CRC Press.

Zavatsky, D. A. B. (2024). *Lecture 1 Tension and Compression*. University of Oxford. https://users.ox.ac.uk/~kneabz/Stress1_mt07.pdf

Γαλιώτης, Κ. (2022). *Κάμψη*. Πανεπιστήμιο Πάτρας, Τμήμα Χημικών Μηχανικών. https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://eclass.upatras.gr/modules/document/index.php%3Fcourse%3DCMNG2114%26download%3D/5a8f3939TyWN/621cbbaemEs/p/6282651bM0s8.pdf&ved=2ahUKEwia3Or1vquGAxXJYPEDHaknAvsQFnoECBAQAQ&usg=AOvVaw2H1W5V9AD5J_qu0OA2hSjX

Καρκάνης, Μ. (2012). *Μελέτη, σχεδιασμός και ανάπτυξη προϊόντος με έμφαση στην επιλογή υλικού και στις τεχνολογίες παραγωγής, περίπτωση οδοντωτού τροχού* [Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης]. <https://medilab.pme.duth.gr/wp-content/uploads/2020/07/Karkanis.pdf>

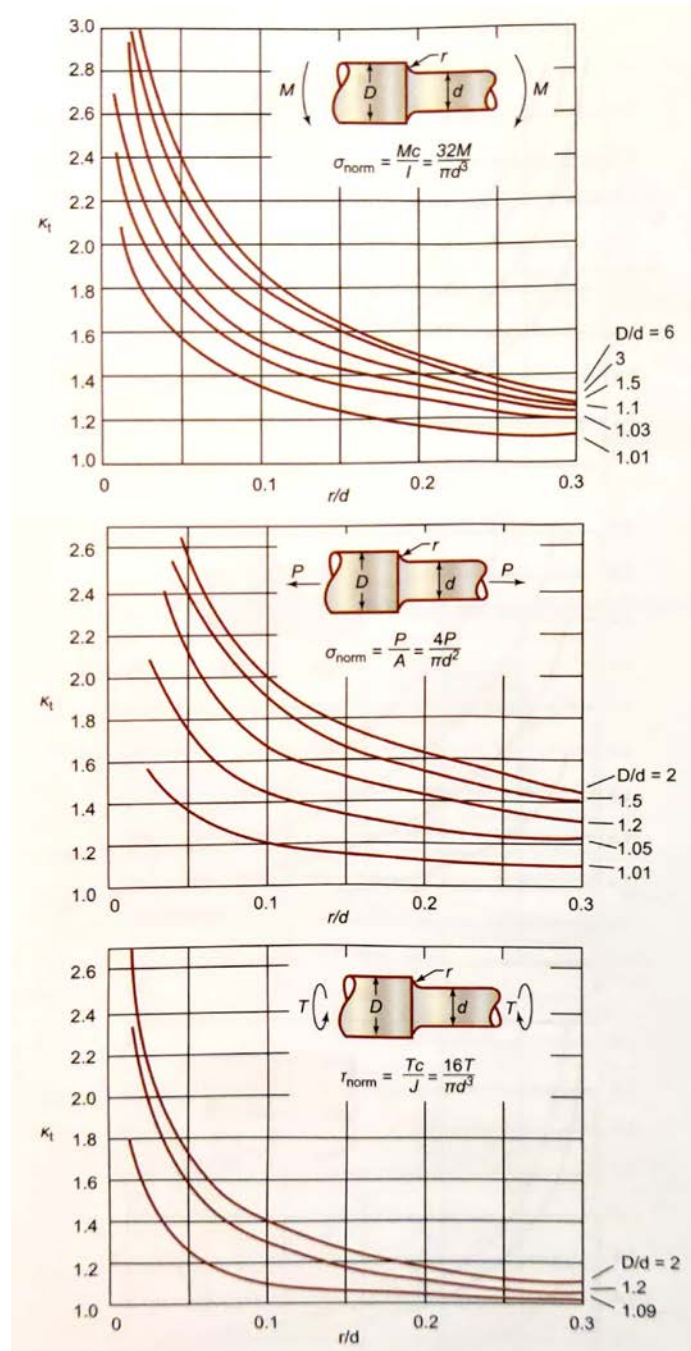
Μεταξά, Ζ. (2024). *Αντοχή των Υλικών. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή, Βασικές έννοιες, Ορθή και διατμητική τάση*. Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος. https://eclass.emt.ihu.gr/modules/document/file.php/PTD162/%CE%91%CE%BD%CF%84%CE%BF%CF%87%CE%AE%20%CF%84%CF%89%CE%BD%20%CE%A5%CE%BB%CE%B9%CE%BA%CF%8E%CE%BD_%CE%9A%CE%B5%CF%86%CE%AC%CE%BB%CE%B1%CE%B9%CE%BF1.pdf

Παπαδόπουλος, Χ. Α. (2017). *Στοιχεία Μηχανών* (3η Έκδοση). Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ.

Παπακωνσταντίνου, Χ. (2024). *Στρέψη*. Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών. <http://archive.eclass.uth.gr/eclass/modules/document/file.php/MHXC125/%CE%A3%CE%A4%CE%A1%CE%95%CE%A8%CE%97.pdf>

Παράρτημα Α: Αναλυτική περιγραφή αξόνων με μεταβολή διατομών, εγκοπών, οπών

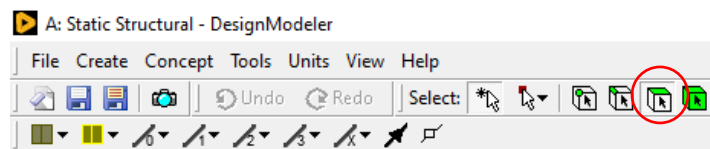
Α1. Άξονας με μεταβολή διατομών



Εικόνα 82. Σχήμα 5-7β σελίδας 137 του συγγράμματος Παπαδόπουλος (2017): Συντελεστές συγκέντρωσης τάσεων σε μεταβολές διατομών άξονα σε κάμψη, εφελκυσμό και στρέψη.

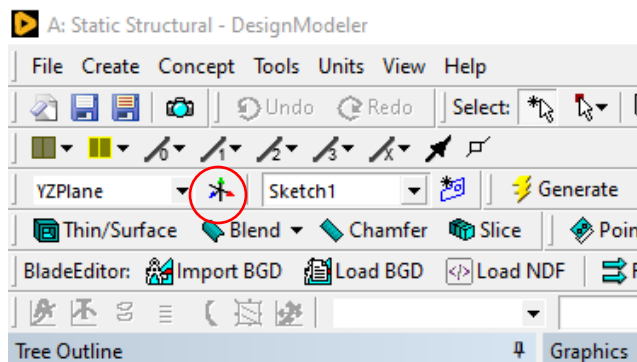
A1.1 Σχεδίαση

1. Δημιουργία ενός κύκλου 48 mm στο επίπεδο YZ (Sketch1).
2. 'Extrude' του Sketch1 κατά 60 mm ως προς τον X άξονα.
3. Για να δημιουργηθεί ο νέος μικρότερος κύκλος πάνω στην εξώθηση, θα πρέπει να δημιουργήσουμε ένα νέο επίπεδο πάνω της.
 - 3.1. Πατάμε από την γραμμή εντολών το 'Selection Filter: Faces' (Εικόνα 83).



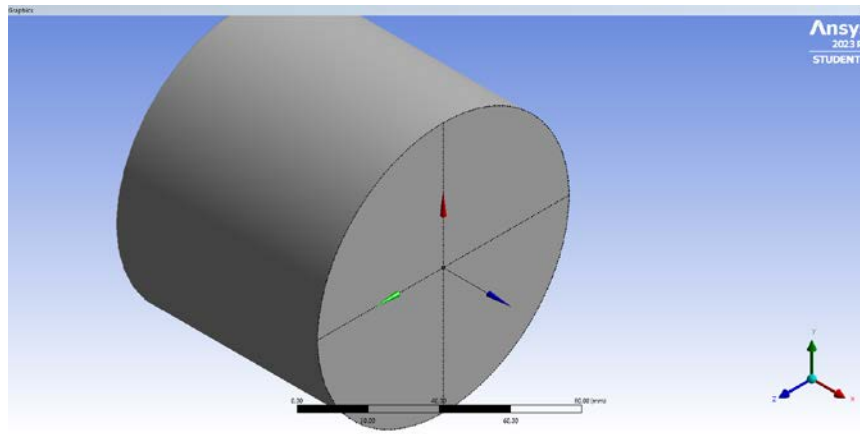
Εικόνα 83. Θέση εντολής 'Selection Filter: Faces'.

- 3.2. Κάνουμε κλικ πάνω στην δεξιά πλευρά της εξώθησης.
- 3.3. Πατάμε 'New Plane' (Εικόνα 84).



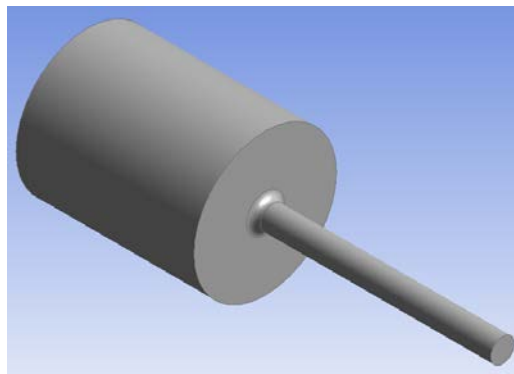
Εικόνα 84. Θέση εντολής δημιουργίας νέου επιπέδου (New Plane).

- 3.4. Εμφανίζονται μερικές λεπτομέρειες, τις οποίες δε χρειάζεται να αλλάξουμε και έπειτα πατάμε το 'Generate' (Εικόνα 85).



Εικόνα 85. Απεικόνιση του νέου επιπέδου, 'Plane4', πάνω στην εξώθηση.

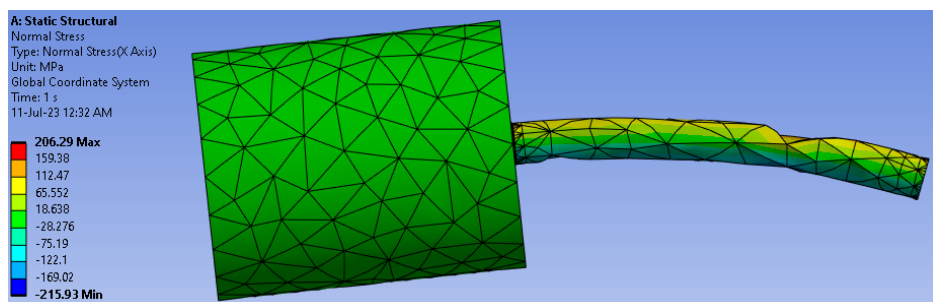
4. Πάνω σε αυτό το καινούριο επίπεδο σχεδιάζουμε ένα νέο κύκλο, διαμέτρου 8 mm.
5. 'Extrude' του νέου σκίτσου (Sketch3) κατά 80 mm ως προς τον X άξονα.
6. 'Fixed Radius Blend' των 0.4 mm στη βάση του μικρότερου κύκλου.
7. Τελικό Αποτέλεσμα (Εικόνα 86):



Εικόνα 86. Απεικόνιση τελικού σχήματος άξονα με μεταβολή διατομών.

A1.2 Κάμψη

Όπως στην ενότητα 3.1.6 και βάσει του 1^{ου} διαγράμματος της Εικόνα 82, μετά τη δημιουργία του Mesh προστέθηκαν 2 καμπτικές δυνάμεις, των -5,000 N-mm και 5,000 N-mm μέσω του 'Moment' στον Z άξονα. Βάζουμε το 'Normal Stress' με προσανατολισμό τον X άξονα. Ενεργοποιούμε τα 'Weak Springs' και πατάμε 'Solve' (Εικόνα 87).



Εικόνα 87. Αποτέλεσμα αξονικής τάσης στην κάμψη σε άξονα με μεταβολή διατομών.

A1.2.1 Υπολογισμοί

Από τη σχέση (8):

$$\sigma_{\text{norm}} = \frac{MC}{I} = \frac{32M}{\pi d^3}$$

Έχουμε $d = 8 \text{ mm}$, $M = 5,000 \text{ N-mm}$ άρα $\sigma_{\text{norm}} = \frac{32M}{\pi d^3} = 99.47 \text{ MPa}$

Για $D/d = 6$: $D = 48 \text{ mm}$

Για $r/d = 0.05$: $r = 0.4 \text{ mm}$

$$\sigma_{\text{max}} = 206.29 \text{ MPa} \text{ άρα από τη σχέση (7) έχουμε } K_t = \frac{\sigma_{\text{max}}}{\sigma_{\text{norm}}} = 2.07$$

Μέσω του διαγράμματος της Εικόνα 82, για $D/d = 6$ και $r/d = 0.05$, έχουμε $K_t = 2.4$.

Παρατηρούμε μια διαφορά του -0.33 ανάμεσα στον Υπολογιστικό και στο Θεωρητικό συντελεστή συγκέντρωσης τάσεων.

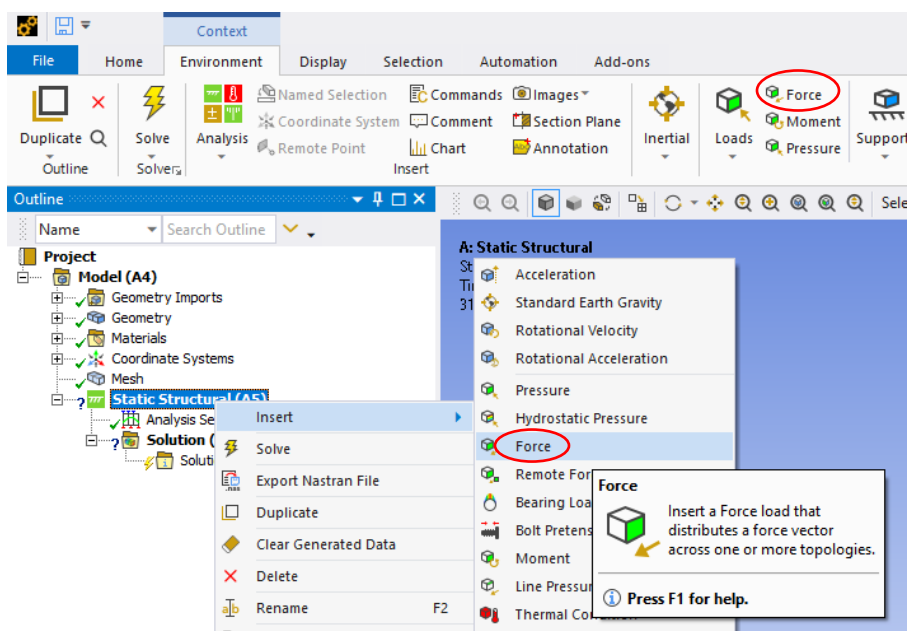
Ομοίως, έγιναν και οι υπόλοιποι υπολογισμοί, όπου αλλάζει μόνο το r , ανάλογα με τον r/d περιορισμό.

Πίνακας 5. Διαφορά Υπολογιστικού με Θεωρητικού συντελεστή K_t , σε άξονα με μεταβολή διατομών σε κάμψη για $D/d = 6$.

r/d	r (mm)	σ_{max} (MPa)	Υπολογιστικό K_t	Θεωρητικό K_t	Διαφορά
0.05	0.4	206.29	2.07	2.4	-0.33
0.10	0.8	171.44	1.72	1.90	-0.18
0.15	1.2	135.12	1.36	1.65	-0.29
0.20	1.6	136.45	1.37	1.50	-0.13
0.25	2.0	124.91	1.26	1.38	-0.12
0.30	2.4	121.45	1.22	1.30	-0.08

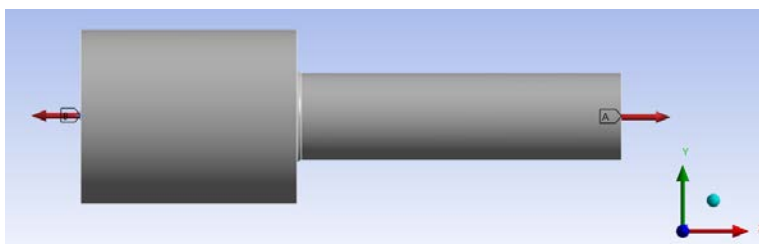
A1.3 Εφελκυσμός

Μετά τη δημιουργία του Mesh, πηγαίνουμε στο 'Static Structural' και μετά είτε δεξί κλικ 'Insert' → 'Force', είτε από την γραμμή εντολών πατάμε το 'Force', ώστε να εφαρμόσουμε τις 2 εφελκυστικές δυνάμεις, όπως στο 2^ο διάγραμμα της Εικόνα 82.



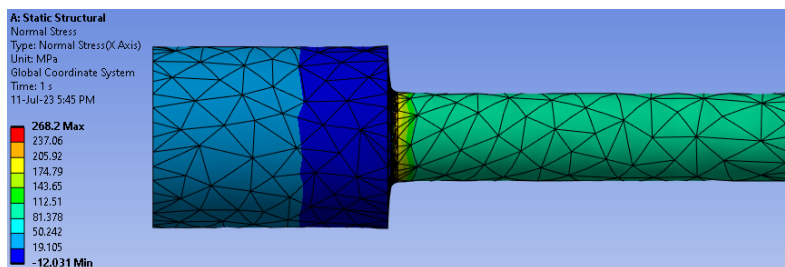
Εικόνα 88. Θέση εντολής 'Force'.

Έπειτα, όπως προστέθηκαν και οι δυνάμεις στις προηγούμενες ενότητες, έτσι θα βάλουμε τη μια στην δεξιά πλευρά του αντικειμένου κατά X, αξίας 5,000 N και την άλλη στην αριστερή κατά X, αξίας -5,000 N.



Εικόνα 89. Απεικόνιση ορθά τοποθετημένων εφελκυστικών δυνάμεων.

Προσθέτουμε το 'Normal Stress' κατά X στη λύση, ενεργοποιούμε τα 'Weak Springs' και πατάμε 'Solve'.



Εικόνα 90. Αποτέλεσμα αξονικής τάσης στον εφελκυσμό σε άξονα με μεταβολή διατομών.

A1.3.1 Υπολογισμοί

Από τη σχέση (1):

$$\sigma_{\text{norm}} = \frac{P}{A} = \frac{4P}{\pi d^2}$$

Έχουμε $d = 8 \text{ mm}$, $P = 5,000 \text{ N}$ άρα $\sigma_{\text{norm}} = \frac{4P}{\pi d^2} = 99.47 \text{ MPa}$.

Επίσης οι τιμές των ‘Extrude1’ = 20 mm και ‘Extrude2’ = 30 mm.

Για $D/d = 2$: $D = 16 \text{ mm}$

Για $r/d = 0.05$: $r = 0.4 \text{ mm}$

$$\sigma_{\text{max}} = 268.2 \text{ MPa} \text{ άρα από τη σχέση (7) έχουμε } K_t = \frac{\sigma_{\text{max}}}{\sigma_{\text{norm}}} = 2.7$$

Μέσω του 2^{ου} διαγράμματος (Εικόνα 82), για $D/d = 2$ και $r/d = 0.05$, έχουμε $K_t = 2.55$.

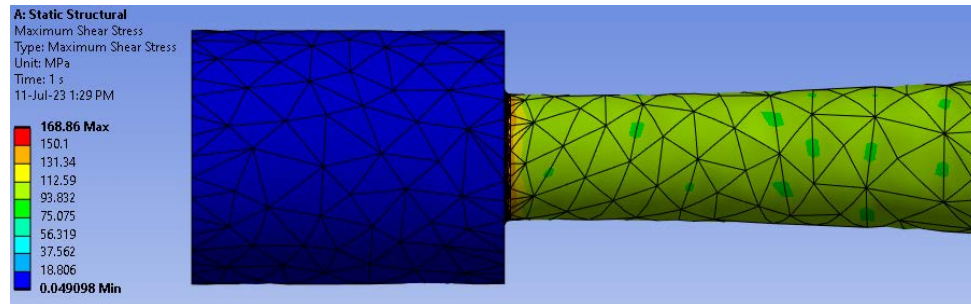
Παρατηρούμε μια διαφορά του 0.15 ανάμεσα στον Υπολογιστικό και Θεωρητικό συντελεστή συγκέντρωσης τάσεων K_t . Ομοίως, έγιναν και οι υπόλοιποι υπολογισμοί, όπου αλλάζει μόνο το r , ανάλογα με τον r/d περιορισμό (Πίνακας 6).

Πίνακας 6. Διαφορά Υπολογιστικού με Θεωρητικού συντελεστή K_t , σε άξονα με μεταβολή διατομών σε εφελκυσμό για $D/d = 2$.

r/d	r (mm)	σ_{max} (MPa)	Υπολογιστικό K_t	Θεωρητικό K_t	Διαφορά
0.05	0.4	268.20	2.70	2.55	0.15
0.10	0.8	201.55	2.03	2.00	0.03
0.15	1.2	176.55	1.77	1.75	0.02
0.20	1.6	170.30	1.71	1.65	0.06
0.25	2.0	156.94	1.58	1.55	0.03
0.30	2.4	148.22	1.49	1.45	0.04

A1.4 Στρέψη

Όπως στην ενότητα 3.1.7 και βάση του 3^{ου} διαγράμματος της Εικόνα 82, μετά τη δημιουργία του Mesh προστέθηκαν 2 στρεπτικές δυνάμεις των 10,000 N-mm και -10,000 N-mm μέσω του ‘Moment’ στον X άξονα. Βάζουμε το ‘Maximum Shear Stress’. Ενεργοποιούμε τα ‘Weak Springs’ και πατάμε ‘Solve’ (Εικόνα 91).



Εικόνα 91. Αποτέλεσμα διατμητικής τάσης στη στρέψη σε άξονα με μεταβολή διατομών.

A1.4.1 Υπολογισμοί

Από τη σχέση (9):

$$T_{\text{norm}} = \frac{Tc}{J} = \frac{16T}{\pi d^3}$$

Έχουμε $d = 8 \text{ mm}$, $T = 10,000 \text{ N-mm}$ άρα $T_{\text{norm}} = \frac{16T}{\pi d^3} = 99.47 \text{ MPa}$.

Για $D/d = 2$: $D = 16 \text{ mm}$

Για $r/d = 0.05$: $r = 0.4 \text{ mm}$

$$\sigma_{\text{max}} = 168.86 \text{ MPa} \text{ άρα } K_t = \frac{\sigma_{\text{max}}}{\sigma_{\text{norm}}} = 1.7$$

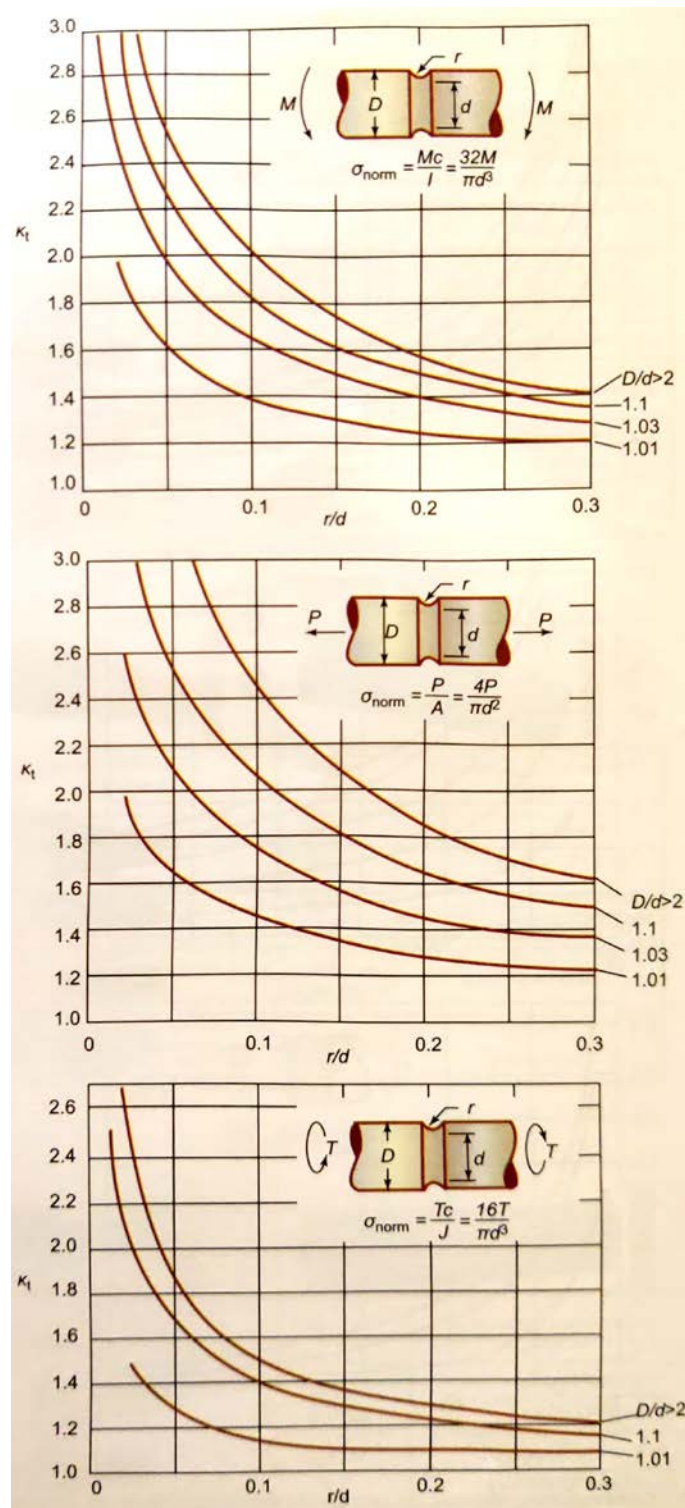
Μέσω του 3^{ου} διαγράμματος (Εικόνα 82) για $D/d = 2$ και $r/d=0.05$, έχουμε $K_t = 1.72$.

Παρατηρούμε μια διαφορά του -0.02 ανάμεσα στον Υπολογιστικό και στο Θεωρητικό συντελεστή συγκέντρωσης τάσεων K_t . Ομοίως, έγιναν και οι υπόλοιποι υπολογισμοί, όπου αλλάζει μόνο το r ανάλογα με τον r/d περιορισμό (Πίνακας 7).

Πίνακας 7. Διαφορά Υπολογιστικού με Θεωρητικού συντελεστή K_t , σε άξονα με μεταβολή διατομών σε στρέψη για $D/d = 2$.

r/d	r (mm)	σ_{\max} (MPa)	Υπολογιστικό K_t	Θεωρητικό K_t	Διαφορά
0.05	0.4	168.86	1.70	1.72	-0.02
0.10	0.8	142.46	1.43	1.40	0.03
0.15	1.2	128.81	1.29	1.25	0.04
0.20	1.6	125.25	1.26	1.15	0.14
0.25	2.0	120.19	1.21	1.12	0.09
0.30	2.4	115.17	1.16	1.10	0.06

Α2. Άξονας με εγκοπές



Εικόνα 92. Σχήμα 5-8 σελίδας 138 του συγγράμματος Παπαδόπουλος (2017): Συντελεστές συγκέντρωσης τάσεων σε εγκοπές άξονα σε κάμψη, εφελκυσμό και στρέψη.

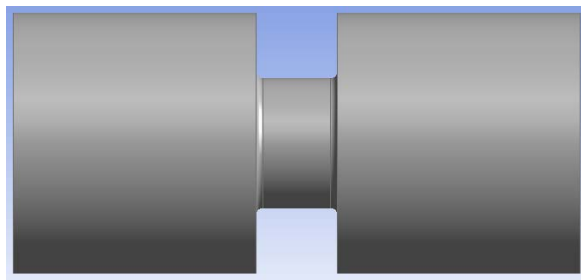
A2.1 Σχεδίαση

1. Δημιουργία ενός κύκλου 8 mm στο YZ επίπεδο (Sketch1).
2. 'Extrude' του Sketch1 κατά 2.5 mm ως προς τον x'x άξονα.
3. Δημιουργία ενός νέου επιπέδου YZ (Plane4) στην δεξιά πλευρά του 'Extrude1' και σχεδιάζουμε ένα κύκλο 16 mm (Sketch2).
4. 'Extrude' του 'Sketch2' κατά 20 mm ως προς τον x άξονα.
5. Δημιουργία ενός νέου επιπέδου (Plane5) στην αριστερή πλευρά του 'Extrude1' και σχεδιάζουμε ένα κύκλο 20 mm (Sketch3).
6. 'Extrude' του 'Sketch3' κατά 20 mm ως προς τον x' άξονα.
7. 'Fixed Radius Blend' των 0.4 mm στις γωνίες του αρχικού Extrude με τα άλλα δύο.
8. Δημιουργία παραμέτρων, τέτοιων ώστε η διάμετρος των 2 εξωτερικών κύκλων (Sketch2, Sketch3) να είναι ίδια, όπως επίσης και οι τιμές των 'Extrude2' και 'Extrude3' (Εικόνα 93):

			Target	Expression	Type
Name	Value	Type	Plane4.D1	@D	Length
D	16 mm	Length	Plane5.D1	@D	Length
FD1	15 mm	Length	Extrude2.FD1	@FD1	Length
			Extrude3.FD1	@FD1	Length

Εικόνα 93. Παραμετροποιημένες τιμές διαμέτρων και εξωθήσεων.

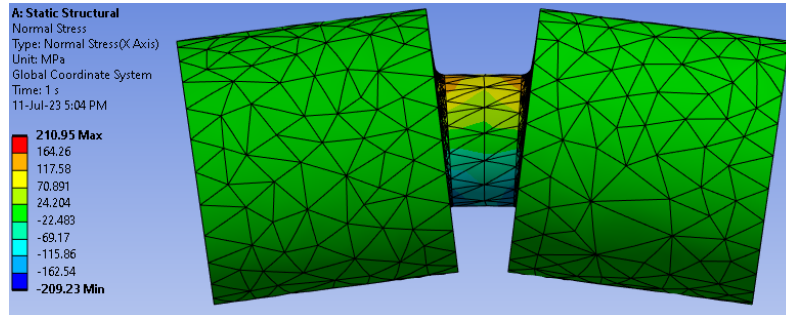
9. Τελικό αποτέλεσμα (Εικόνα 94):



Εικόνα 94. Απεικόνιση τελικού σχήματος.

A2.2 Κάμψη

Όπως στην ενότητα 3.1.6 και βάση του 1^{ου} διαγράμματος της Εικόνα 92, μετά τη δημιουργία του 'Mesh' προστέθηκαν 2 καμπτικές δυνάμεις των -5,000 N-mm και 5,000 N-mm μέσω του 'Moment' στον Z άξονα. Βάζουμε το 'Normal Stress' με προσανατολισμό τον X άξονα. Ενεργοποιούμε τα 'Weak Springs' και πατάμε 'Solve' (Εικόνα 95).



Εικόνα 95. Αποτέλεσμα αξονικής τάσης στην κάμψη σε άξονα με εγκοπές.

A2.2.1 Υπολογισμοί

Για $D/d = 2$: $D = 16 \text{ mm}$

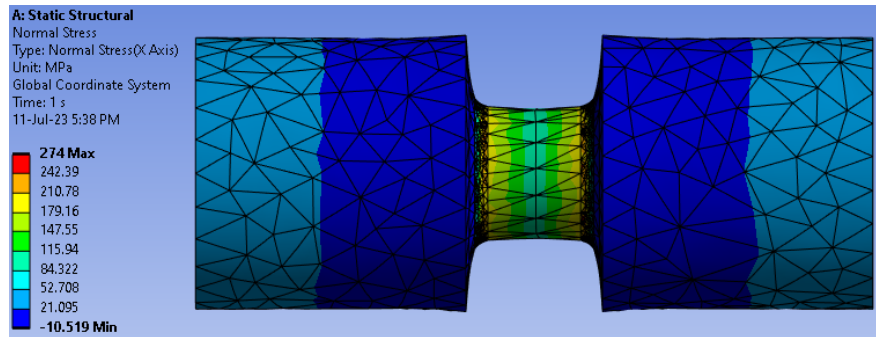
Για $r/d = 0.05$: $r = 0.4 \text{ mm}$

Πίνακας 8. Διαφορά Υπολογιστικού με Θεωρητικού συντελεστή K_t , σε άξονα με εγκοπές σε κάμψη για $D/d = 2$.

r/d	r (mm)	σ_{\max} (MPa)	Υπολογιστικό K_t	Θεωρητικό K_t	Διαφορά
0.05	0.4	210.95	2.12	2.55	-0.43
0.10	0.8	171.55	1.72	2.02	-0.30
0.15	1.2	142.72	1.43	1.75	-0.32
0.20	1.6	139.54	1.40	1.58	-0.18
0.25	2.0	122.94	1.24	1.48	-0.24
0.30	2.4	132.86	1.34	1.40	-0.06

A2.3 Εφελκυσμός

Όπως στην ενότητα A1.3 και βάση του 2^{ου} διαγράμματος της Εικόνα 92, μετά τη δημιουργία του Mesh προστέθηκαν 2 εφελκυστικές δυνάμεις των 5,000 N και -5,000 N μέσω του 'Force' στον X άξονα. Βάζουμε το 'Normal Stress' με προσανατολισμό τον X άξονα. Ενεργοποιούμε τα 'Weak Springs' και πατάμε 'Solve' (Εικόνα 96).



Εικόνα 96. Αποτέλεσμα αξονικής τάσης στον εφελκυσμό σε άξονα με εγκοπές.

A2.3.1 Υπολογισμοί

Για $D/d = 2$: $D = 16$ mm

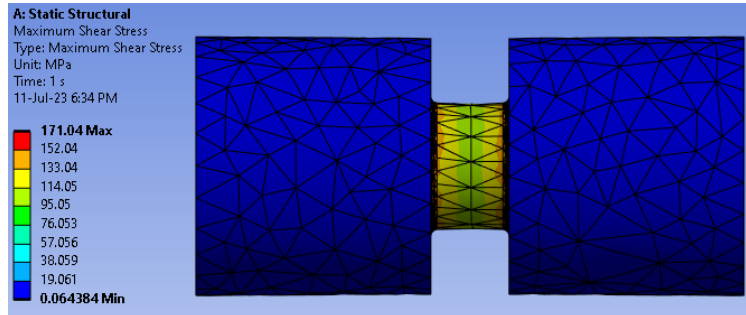
Για $r/d = 0.075$: $r = 0.6$ mm

Πίνακας 9. Διαφορά Υπολογιστικού με Θεωρητικού συντελεστή K_t , σε άξονα με εγκοπές σε εφελκυσμό για $D/d = 2$.

r/d	r (mm)	σ_{max} (MPa)	Υπολογιστικό K_t	Θεωρητικό K_t	Διαφορά
0.075	0.6	220.13	2.21	2.70	-0.49
0.100	0.8	209.81	2.11	2.45	-0.34
0.150	1.2	181.76	1.83	2.10	-0.27
0.200	1.6	164.63	1.65	1.85	-0.20
0.250	2.0	155.40	1.56	1.70	-0.14
0.300	2.4	156.55	1.57	1.62	-0.05

A2.4 Στρέψη

Όπως στην ενότητα 3.1.7 και βάση του 3^{ου} διαγράμματος της Εικόνα 92, μετά τη δημιουργία του Mesh προστέθηκαν 2 στρεπτικές δυνάμεις των 10,000 N-mm και -10,000 N-mm μέσω του ‘Moment’ στον X άξονα. Βάζουμε το ‘Maximum Shear Stress’. Ενεργοποιούμε τα ‘Weak Springs’ και πατάμε ‘Solve’ (Εικόνα 97).



Εικόνα 97. Αποτέλεσμα διατμητικής τάσης στην στρέψη σε άξονα με εγχοπές.

A2.4.1 Υπολογισμοί

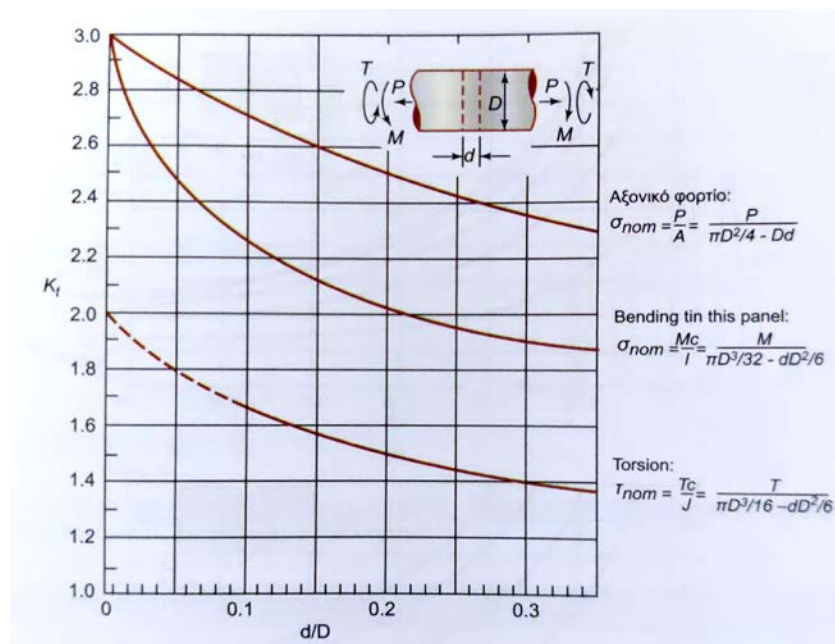
Για $D/d = 2$: $D = 16 \text{ mm}$

Για $r/d = 0.05$: $r = 0.4 \text{ mm}$

Πίνακας 10. Διαφορά Υπολογιστικού με Θεωρητικού συντελεστή K_t , σε άξονα με εγχοπές σε στρέψη για $D/d = 2$.

r/d	r (mm)	σ_{\max} (MPa)	Υπολογιστικό K_t	Θεωρητικό K_t	Διαφορά
0.05	0.4	171.04	1.72	1.90	-0.18
0.10	0.8	142.01	1.43	1.50	-0.07
0.15	1.2	130.47	1.31	1.35	-0.04
0.20	1.6	124.67	1.25	1.30	-0.05
0.25	2.0	120.62	1.21	1.25	-0.04
0.30	2.4	120.46	1.21	1.22	-0.01

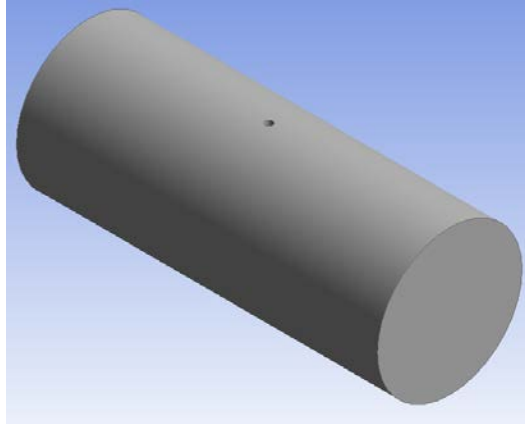
A3. Άξονας με οπή



Εικόνα 98. Σχήμα 5-9 σελίδας 139 του συγγράμματος Παπαδόπουλος (2017): Συντελεστές συγκέντρωσης τάσεων σε οπή άξονα σε εφελκυσμό, κάμψη και στρέψη.

A3.1 Σχεδίαση

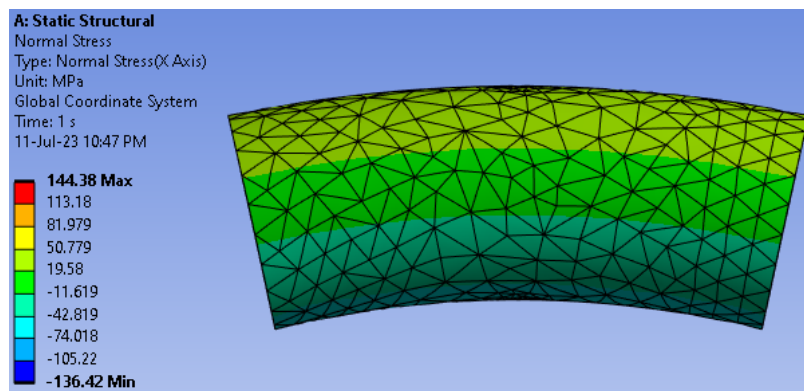
1. Δημιουργία ενός κύκλου 8 mm στο YZ επίπεδο (Sketch1).
2. 'Extrude' του Sketch1 κατά 10 mm ως προς τον x'x άξονα (Extrude1).
3. Δημιουργία ενός κύκλου 0.4 mm στο ZX επίπεδο (Sketch2).
4. 'Extrude' του Sketch2 κατά 10 mm ως προς τον y'y άξονα (Extrude2), χρησιμοποιώντας όμως στο κελί 'Operation' την επιλογή 'Cut Material', έτσι ώστε να αφαιρεθεί υλικό και να δημιουργηθεί μια τρύπα.
5. Τελικό αποτέλεσμα (Εικόνα 99):



Εικόνα 99. Απεικόνιση τελικού σχήματος.

A3.2 Κάμψη

Όπως στην ενότητα 3.1.6 και βάση της 2^{ης} καμπύλης του διαγράμματος της Εικόνα 98, μετά τη δημιουργία του ‘Mesh’ προστέθηκαν 2 καμπτικές δυνάμεις των -2,500 N-mm και 2,500 N-mm μέσω του ‘Moment’ στον Z άξονα. Βάζουμε το ‘Normal Stress’ με προσανατολισμό τον X άξονα. Ενεργοποιούμε τα ‘Weak Springs’ και πατάμε ‘Solve’ (Εικόνα 100).



Εικόνα 100. Αποτέλεσμα αξονικής τάσης στη κάμψη σε άξονα με οπή.

A3.2.1 Υπολογισμοί

Με βάση τη σχέση (8) έχουμε:

$$\sigma_{\text{norm}} = \frac{Mc}{I} = \frac{M}{\frac{\pi D^3}{32} - \frac{dD^2}{6}}$$

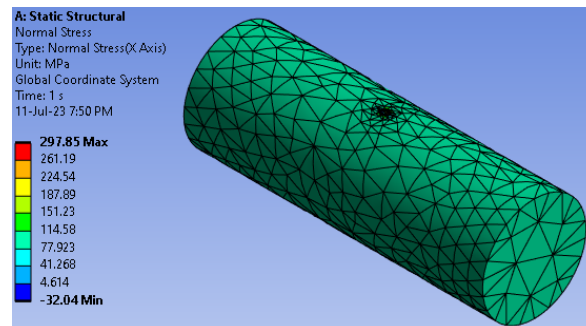
Εφόσον ο τύπος του σ_{norm} είναι διαφορετικός από αυτόν που χρησιμοποιήσαμε στους υπόλοιπους υπολογισμούς και επειδή έχει μέσα και τη διάμετρο του μικρού κύκλου, δηλαδή δεν θα παραμένει σταθερός, προσθέτουμε μια έξτρα στήλη έτσι ώστε να φαίνονται τα διαφορετικά σ_{norm} (Πίνακας 11).

Πίνακας 11. Διαφορά Υπολογιστικού με Θεωρητικού συντελεστή K_t , σε οπή άξονα σε κάμψη.

d/D	d (mm)	σ_{norm} (MPa)	σ_{max} (MPa)	Υπολογιστικό K_t	Θεωρητικό K_t	Διαφορά
0.05	0.4	54.35	144.38	2.66	2.46	0.20
0.10	0.8	59.91	144.14	2.41	2.25	0.16
0.15	1.2	66.73	148.56	2.23	2.14	0.09
0.20	1.6	75.30	153.50	2.04	2.04	0.00
0.25	2.0	86.41	159.87	1.85	1.95	-0.10
0.30	2.4	101.36	169.65	1.67	1.90	-0.23

A3.3 Εφελκυσμός

Όπως στην ενότητα A1.3 και βάση της 1^{ης} καμπύλης του διαγράμματος της Εικόνα 98, μετά τη δημιουργία του 'Mesh' προστέθηκαν 2 εφελκυστικές δυνάμεις των 5,000 N και -5,000 N μέσω του 'Force' στον X άξονα. Βάζουμε το 'Normal Stress' με προσανατολισμό τον X άξονα. Ενεργοποιούμε τα 'Weak Springs' και πατάμε 'Solve' (Εικόνα 101).



Εικόνα 101. Αποτέλεσμα αξονικής τάσης στον εφελκυσμό σε άξονα με οπή.

A3.3.1 Υπολογισμοί

Με βάση τη σχέση (1) έχουμε (Παπαδόπουλος, 2017):

$$\sigma_{\text{norm}} = \frac{P}{A} = \frac{P}{\frac{\pi D^2}{4} - Dd}$$

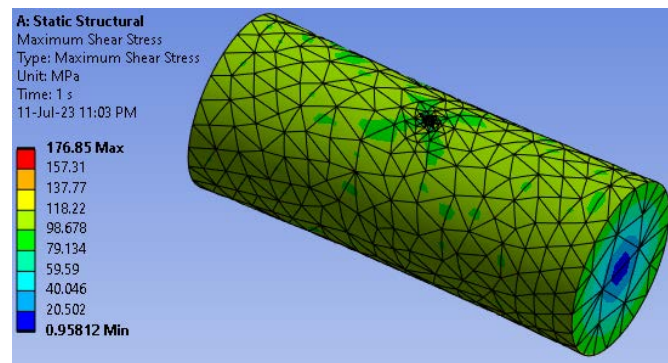
Εφόσον ο τύπος του σ_{norm} είναι διαφορετικός από αυτόν που χρησιμοποιήσαμε στους υπόλοιπους υπολογισμούς και επειδή έχει μέσα και τη διάμετρο του μικρού κύκλου, δηλαδή δεν θα παραμένει σταθερός, προσθέτουμε μία έξτρα στήλη έτσι ώστε να φαίνονται τα διαφορετικά σ_{norm} (Πίνακας 12).

Πίνακας 12. Διαφορά Υπολογιστικού με Θεωρητικού συντελεστή K_t , σε οπή άξονα σε εφελκυσμό.

d/D	D (mm)	σ_{norm} (MPa)	σ_{max} (MPa)	Υπολογιστικό K_t	Θεωρητικό K_t	Διαφορά
0.05	0.4	106.23	297.85	2.80	2.85	-0.05
0.10	0.8	113.98	305.42	2.68	2.70	-0.02
0.15	1.2	122.95	323.29	2.63	2.60	0.03
0.20	1.6	133.46	334.58	2.51	2.50	0.10
0.25	2.0	145.92	329.69	2.26	2.43	-0.17
0.30	2.4	160.95	366.09	2.27	2.35	-0.08

A3.4 Στρέψη

Όπως στην ενότητα 3.1.7 και βάση της 3^{ης} καμπύλης του διαγράμματος της Εικόνα 98, μετά τη δημιουργία του Mesh προστέθηκαν 2 στρεπτικές δυνάμεις των 10,000 N-mm και -10,000 N-mm μέσω του ‘Moment’ στον X άξονα. Βάζουμε το ‘Maximum Shear Stress’. Ενεργοποιούμε τα ‘Weak Springs’ και πατάμε ‘Solve’ (Εικόνα 102).



Εικόνα 102. Αποτέλεσμα διατμητικής τάσης στη στρέψη σε άξονα με οπή.

A3.4.1 Υπολογισμοί

Με βάση τη σχέση (8) έχουμε:

$$\sigma_{\text{norm}} = \frac{Mc}{I} = \frac{T}{\frac{\pi D^3}{16} - \frac{dD^2}{6}}$$

Εφόσον ο τύπος του σ_{norm} είναι διαφορετικός από αυτόν που χρησιμοποιούσαμε στους υπόλοιπους υπολογισμούς και επειδή έχει μέσα και τη διάμετρο του μικρού κύκλου, δηλαδή δεν θα παραμένει σταθερός, προσθέτουμε μια έξτρα στήλη έτσι ώστε να φαίνονται τα διαφορετικά σ_{norm} .

Πίνακας 13. Διαφορά Υπολογιστικού με Θεωρητικού συντελεστή K_t , σε οπή άξονα σε στρέψη.

d/D	d (mm)	σ_{norm} (MPa)	σ_{max} (MPa)	Υπολογιστικό K_t	Θεωρητικό K_t	Διαφορά
0.05	0.4	103.88	176.85	1.70	1.80	-0.10
0.10	0.8	108.70	174.13	1.60	1.65	-0.05
0.15	1.2	113.98	170.50	1.50	1.55	-0.05
0.20	1.6	119.81	177.98	1.48	1.50	-0.02
0.25	2.0	126.26	176.87	1.40	1.45	-0.05
0.30	2.4	133.46	198.63	1.49	1.40	0.09

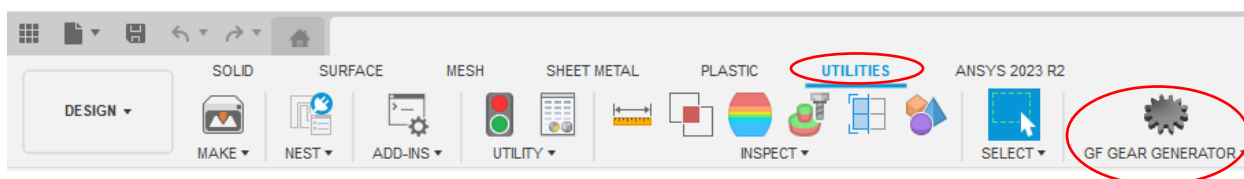
Παράρτημα Β: Αναλυτική περιγραφή δημιουργίας οδοντωτών τροχών και προετοιμασίας τους

B1. Δημιουργία οδοντωτών τροχών στο Autodesk Fusion 360

Για τη δημιουργία των οδοντωτών τροχών, χρειάζεται να γίνει λήψη από το διαδίκτυο του πρόσθετου (add-in) 'GF Gear Generator' add-in, μέσω της εξής ιστοσελίδας:

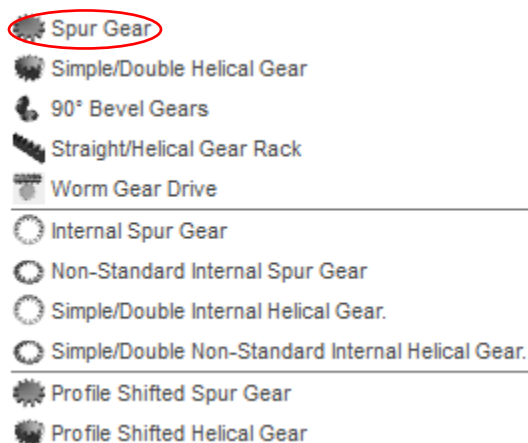
<https://apps.autodesk.com/FUSION/en/Detail/Index?id=1236778940008086660&appLang=en&os=Win64>

Μετά την ολοκλήρωση της εγκατάστασης, το νέο αυτό add-in εμφανίζεται στην καρτέλα 'Utilities' του Fusion 360 (Εικόνα 103).



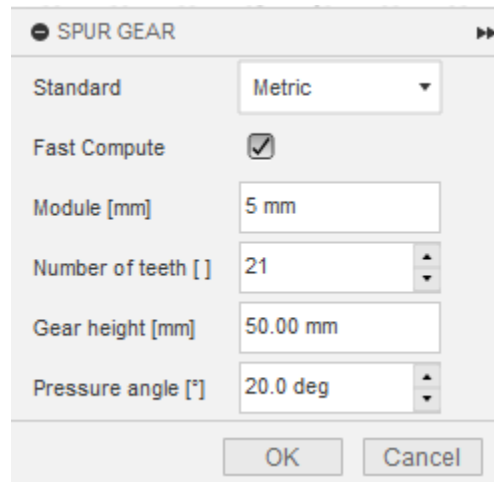
Εικόνα 103. Θέση GF Gear Generator add-in.

Η προσθήκη αυτή δίνει τη δυνατότητα να δημιουργήσουμε διαφορετικούς τύπους οδοντωτών τροχών. Για τη συγκεκριμένη περίπτωση δημιουργήθηκαν οδοντωτοί τροχοί Spur Gear (Εικόνα 104).



Εικόνα 104. Διαφορετικές επιλογές δημιουργίας οδοντωτών τροχών και επιλογή του Spur Gear για τη συγκεκριμένη εργασία.

Πατώντας το 'Spur Gear' θα εμφανιστεί το παρακάτω παράθυρο, με τις εξής επιλογές που μπορεί να ελέγξει ο χρήστης (Εικόνα 105).



Εικόνα 105. Διεπαφή χρήστη για τη δημιουργία οδοντωτών τροχών.

Standard: Δυνατότητα επιλογής μεταξύ του μετρικού και αγγλικού (imperial) συστήματος μονάδων μέτρησης.

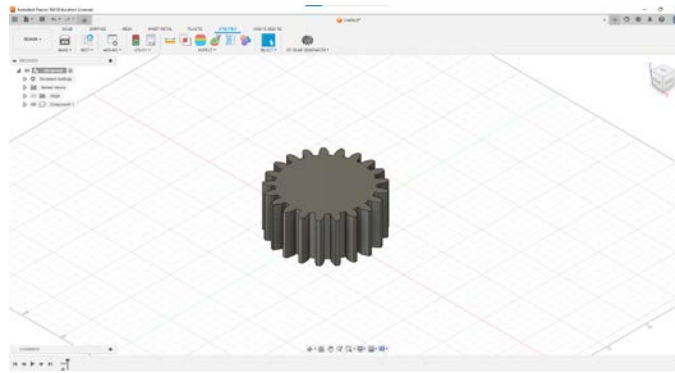
Module: Είναι η μονάδα μεγέθους που δείχνει πόσο μεγάλος ή μικρός είναι ένας συγκεκριμένος οδοντωτός τροχός. Υπολογίζεται διαιρώντας την αναλογία του βήματος του οδοντωτού τροχού ή της διαμέτρου αναφοράς με τον αριθμό των δοντιών.

Number of teeth: Δυνατότητα επιλογής του αριθμού δοντιών.

Gear height: Το ύψος του οδοντωτού τροχού.

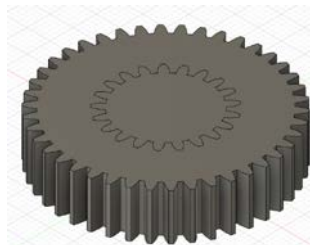
Pressure angle: Είναι η γωνία μεταξύ της όψης του δοντιού και της εφαπτομένης του οδοντωτού τροχού.

Για τους δύο οδοντωτούς τροχούς οι διαστάσεις είναι: Module 5 mm, Ύψος 50 mm και Γωνία 20 μοίρες. Η μόνη διαφορά είναι στον αριθμό των δοντιών, με 21 το ένα και 42 το άλλο. Πατώντας 'OK' εμφανίζεται ο πρώτος οδοντωτός τροχός στο κέντρο αξόνων του χώρου εργασίας (Εικόνα 106).



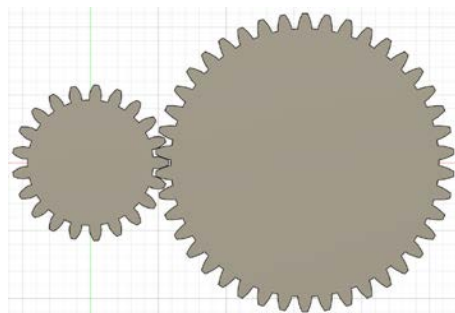
Εικόνα 106. Ο νεο-δημιουργημένος οδοντωτός τροχός 21 δοντιών.

Ομοίως, δημιουργήθηκε και ο οδοντωτός τροχός 42 δοντιών (Εικόνα 107).



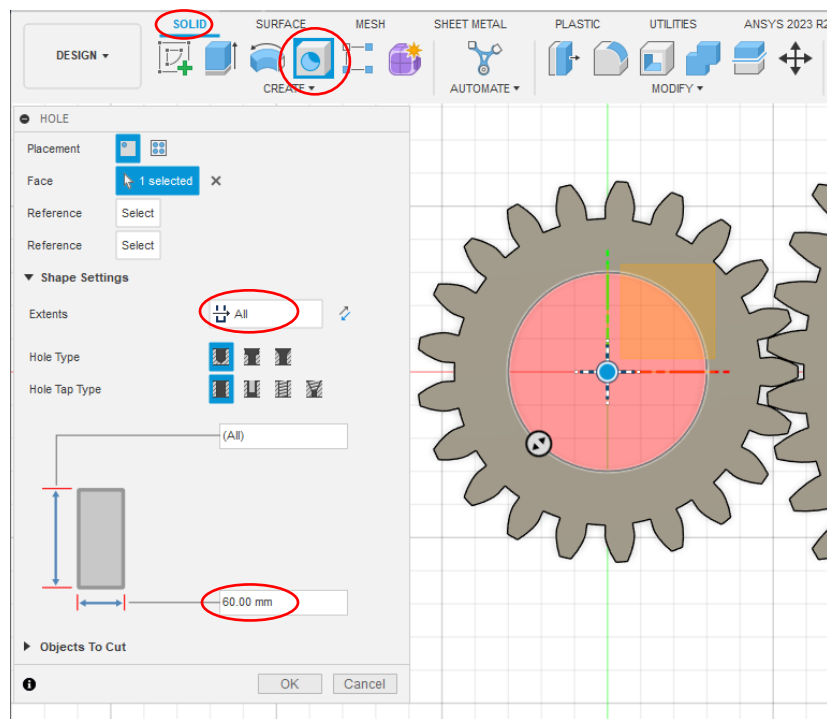
Εικόνα 107. Ο νεο-δημιουργημένος οδοντωτός τροχός 42 δοντιών.

Παρατηρούμε όμως ότι το ένα είναι μέσα στο άλλο, επομένως επιλέγουμε τον μεγάλο οδοντωτό τροχό από το κελί 'Browser', το οποίο θα είναι ονομασμένο 'Component2:1' αριστερά της επιφάνειας εργασίας. Έπειτα δεξί κλικ και 'Move/Copy'. Θα τον μετακινήσουμε 158 mm κατά των x άξονα και -50 mm κατά των z άξονα και -4.3 μοίρες κατά των z. Όσον αφορά τον μικρό οδοντωτό τροχό, θα τον μετακινήσουμε -50 mm κατά των z άξονα. Αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα να τον έχουμε μεταφέρει στη δεξιά πλευρά του μικρού οδοντωτού τροχού, με τα δόντια τους να βρίσκονται αρκετά κοντά, χωρίς όμως να γίνεται επαφή μεταξύ τους. Για ευκολία πατάμε το 'TOP', αριστερά πάνω ώστε να μεταφερθεί η οπτική γωνία σε κάτοψη (Εικόνα 108).



Εικόνα 108. Τελική θέση οδοντωτών τροχών.

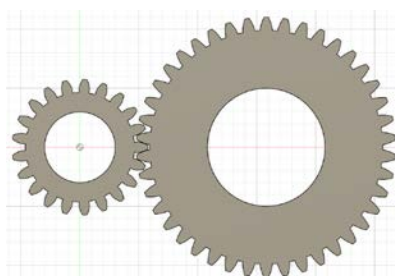
Έπειτα δημιουργήθηκαν οι 2 απαραίτητες τρύπες στο κέντρο των οδοντωτών τροχών, ώστε μελλοντικά στο Ansys να μπορούν να εφαρμοστούν δυνάμεις και υποστηρίξεις. Πατώντας στη 'Solid' καρτέλα την εντολή 'Hole' εμφανίζεται το εξής παράθυρο (Εικόνα 109):



Εικόνα 109. Διεπαφή χρήστη για τη δημιουργία οπών.

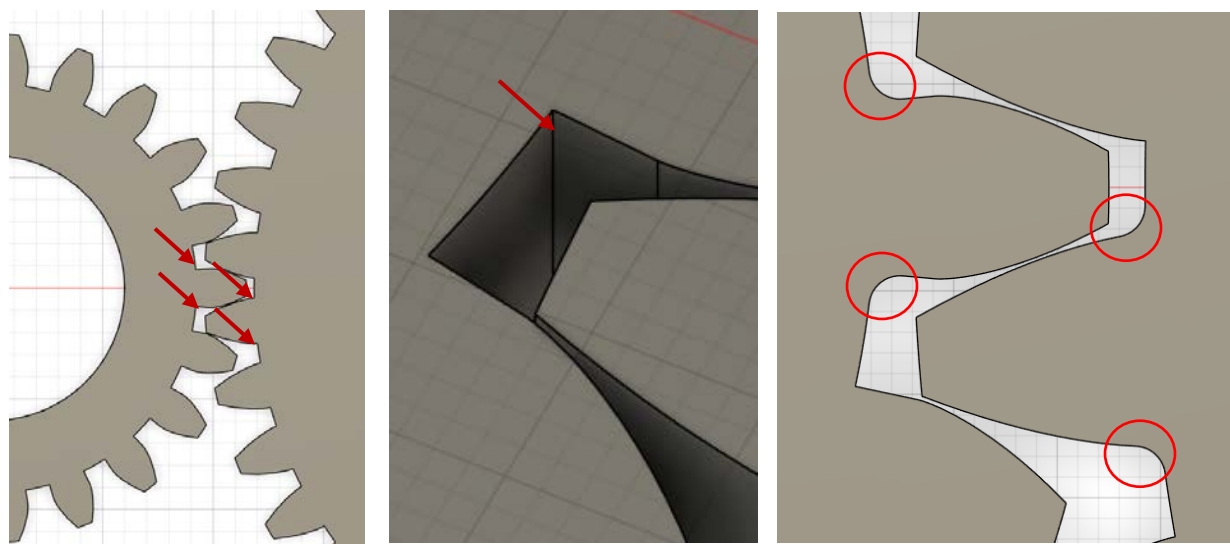
Στο 'Face' επιλέγουμε ένα τυχαίο σημείο πάνω στον οδοντωτό τροχό και έπειτα σύρουμε το κέντρο της οπής πάνω στο κέντρο του οδοντωτού τροχού. Με αυτόν τον τρόπο θα κουμπώσει πάνω στο κέντρο. Στην επιλογή 'Extends' πατάμε το 'All', τα 'Hole Type' και 'Hole Tap Type' τα αφήνουμε 'Simple' και

τέλος βάζουμε 60 mm να είναι η διάμετρος. Ομοίως και για τον μεγάλο οδοντωτό τροχό με τη διάμετρο να είναι 100 mm (Εικόνα 110).



Εικόνα 110. Τελικό αποτέλεσμα οδοντωτών τροχών στο Fusion 360 με τη δημιουργία σπών.

Επιπρόσθετα, χρησιμοποιούμε την εντολή ‘Fillet’ στην καρτέλα ‘Modify’ και πατώντας CTRL στο πληκτρολόγιο, επιλέγουμε τις 4 γωνίες στη βάση των 2 δοντιών που θα κάνουμε την ανάλυση μελλοντικά, μεγέθους 1.5 mm (Εικόνα 111).



Εικόνα 111. Θέση γωνιών και αποτέλεσμα εντολής ‘Fillet’ για τη δυνατότητα επιλογής εφαρμογής τάσεων σε μελλοντικό χρόνο.

Τέλος, επειδή το Fusion 360 χρησιμοποιεί το cloud ως κύριο μέσο αποθήκευσης, θα πρέπει να αποθηκεύσουμε στον υπολογιστή το αρχείο μέσω της ‘Export’ εντολής, που βρίσκεται πάνω αριστερά στην καρτέλα ‘File’. Ως επόμενο βήμα ανοίγουμε το ‘Workbench’ του Ansys, επιλέγουμε το ‘Static Structural’ και με δεξί κλικ στο ‘Geometry’ κελί → ‘Import Geometry’ → ‘Browse’, επιλέγουμε το αρχείου που

κάναμε εξαγωγή. Έπειτα, κάνουμε πάλι δεξί κλικ στο 'Geometry' κελί και 'Edit Geometry in DesignModeler'. Ανοίγοντας το 'DesignModeler', θα δούμε πως στην καρτέλα 'Tree Outline' υπάρχει το εισαγόμενο αρχείο και πατάμε 'Generate'.

B2. Προετοιμασία οδοντωτών τροχών στο Ansys DesignModeler

Λόγω της ακαδημαϊκής έκδοσης που παρέχεται δωρεάν για το Ansys, δεν υπάρχουν διαθέσιμες όλες οι δυνατότητες του. Για τη συγκεκριμένη περίπτωση, το Mechanical δεν μπορεί να κάνει λεπτομερή ανάλυση στους οδοντωτούς τροχούς, όσο θα θέλαμε. Για αυτό το λόγο θα μετατρέψουμε τα 3D μοντέλα σε 2D, έτσι ώστε τα αποτελέσματα που θα πάρουμε να είναι τα επιθυμητά.

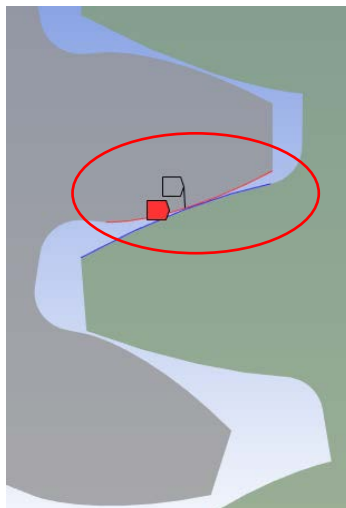
Έχοντας το εισαγόμενο αρχείο έτοιμο, πηγαίνουμε στη καρτέλα 'Concept', πατάμε την εντολή 'Surfaces From Faces', επιλέγουμε τα 2 πρόσωπα των οδοντωτών τροχών και 'Generate'. Έπειτα, πηγαίνουμε στη καρτέλα 'Create' → 'Delete' → 'Body Delete' και επιλέγουμε τους 2 οδοντωτούς τροχούς και 'Generate'. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να έχουν μείνει μόνο τα 2 πρόσωπα που δημιουργήσαμε, άρα τα μοντέλα είναι πλέον 2D. Κλείνουμε το 'DesignModeler' και πριν ανοίξουμε το 'Mechanical' πρέπει να αλλάξουμε το είδος της ανάλυσης. Αυτό γίνεται με δεξί κλικ στο κελί του 'Geometry' στο 'Workbench' → 'Properties' και στη καρτέλα που εμφανίστηκε δεξιά επιλέγουμε στο 'Analysis Type' κελί 2D, αντί για 3D. Έχοντας κάνει αυτό, διπλό κλικ το 'Model', ώστε να ανοίξει το 'Mechanical'.

B3. Επεξεργασία των οδοντωτών τροχών στο Ansys Mechanical

Ανοίγοντας το 'Mechanical' πηγαίνουμε στο 'Connections' → 'Contacts' → 'Contact Region' και κάνουμε τις παρακάτω αλλαγές (Εικόνα 112, 113):

Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Contact	1 Edge
Target	1 Edge
Contact Bodies	SYS-1\Surface
Target Bodies	SYS-1\Surface
Shell Thickness Effect	No
Protected	No
Definition	
Type	Frictionless
Scope Mode	Manual
Behavior	Program Controlled
Trim Contact	Program Controlled
Contact APDL Name	
Target APDL Name	
Suppressed	No
Display	
Element Normals	No
Advanced	
Formulation	Augmented Lagrange
Small Sliding	Program Controlled
Detection Method	Program Controlled
Penetration Tolerance	Program Controlled
Normal Stiffness	Program Controlled
Update Stiffness	Program Controlled
Stabilization Damping Factor	0.
Pinball Region	Program Controlled
Time Step Controls	None
Geometric Modification	
Interface Treatment	Adjust to Touch
Contact Geometry Correction	None
Target Geometry Correction	None
Flip Contact Normals	No
Flip Target Normals	No

Εικόνα 112. Απεικόνιση αλλαγών στις ρυθμίσεις επαφής για τους οδοντωτούς τροχούς στο Ansys Mechanical.

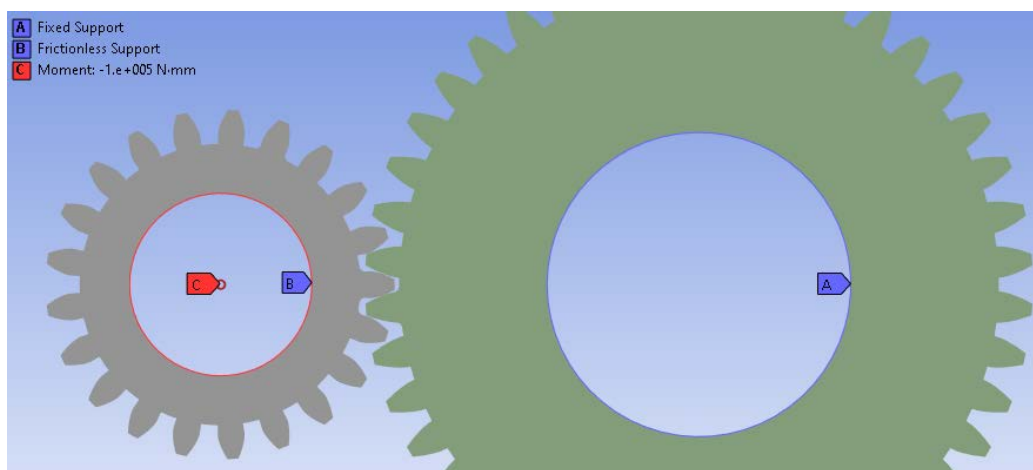


Εικόνα 113. Οι επιλεγμένες άκρες για επαφή.

Μειώνουμε τις πλευρές που γίνεται επαφή σε μία και πιο συγκεκριμένα κρατάμε την επαφή των δοντιών που δημιουργήσαμε το 'Fillet' μέσω των κελιών 'Contact' και 'Target'. Στο είδος της επαφής (Type) επιλέγουμε 'Frictionless'. Για τη διατύπωση (Formulation), επιλέγουμε 'Augmented LaGrange' και στην επεξεργασία διεπαφής (Interface Treatment) βάζουμε 'Adjust to Touch'.

Όσον αφορά το Mesh, το 'Element Size' του θα είναι 1.5 mm. Έπειτα, κάνουμε δεξί κλικ insert → Sizing και επιλέγουμε τις δύο άκρες των 2 δοντιών. Το 'Element Size' του 'Edge Sizing' θα είναι 0.03 mm. Επιπρόσθετα, κάνουμε δεξί κλικ 'Insert' → 'Refinement' και επιλέγουμε τις 4 γωνίες στη ρίζα των 2 δοντιών, με Level 3 στο κελί 'Refinement'.

Προσθέτουμε 'Fixed Support' στην οπή του μεγάλου οδοντωτού τροχού, 'Frictionless Support' στην οπή του μικρού και Στρεπτική ροπή (Moment), στην οπή του μικρού οδοντωτού τροχού δύναμης '-100,000 N-mm (Εικόνα 114).



Εικόνα 114. Απεικόνιση ορθής θέσης υποστηρίξεων και ροπής.

Όσον αφορά τη λύση (Solution), προσθέτουμε το 'Equivalent (Von-Mises)' Stress, όπου στο κελί 'Geometry' αντί τους 2 οδοντωτούς τροχούς που είναι ήδη επιλεγμένοι, επιλέγουμε τις 2 άκρες επαφής των δοντιών. Αυτή θα είναι η υπολογιστική επιφανειακή πίεση. Για τη καμπτική τάση του μικρού οδοντωτού τροχού (Pinion) θα ξανά προσθέσουμε το 'Equivalent (Von-Mises)' Stress, όπου στο κελί 'Geometry' επιλέγουμε τις 2 γωνίες στη ρίζα του δοντιού που γίνεται η επαφή. Ομοίως, θα γίνει και για την καμπτική τάση του μεγάλου οδοντωτού τροχού. Τέλος, πατάμε 'Solve'.