

Α.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ Τ.Τ.

Σ.Τ.ΕΦ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

<< Αντοχή κοινών διατομών ατράκτων με πεπερασμένα στοιχεία και μελέτη αντοχής με τις μεθόδους Thum και Petersen (Μέρος 2^ο) >>



Σπουδαστής: Καρούσης Γεώργιος – 42231

Υπεύθυνος Καθηγητής: Τσολάκης Αντώνιος

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα από καρδιάς να ευχαριστήσω τον υπεύθυνο καθηγητή της πτυχιακής μου εργασίας κ. Τσολάκη Αντώνιο για την αφιέρωση του χρόνου του αλλά και για την υπομονή που έδειξε για την ολοκλήρωσή της. Πολύτιμη αποδείχθηκε φυσικά και η βοήθειά του σε κάποια προβλήματα που παρουσιάστηκαν κατά την εξέλιξη της εργασίας.

Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω θερμά τους γονείς μου που στάθηκαν δίπλα μου και με στήριζαν με τον καλύτερο δυνατό τρόπο κατά τη διάρκεια των σπουδών μου όλα αυτά τα χρόνια.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη δύο σπάνιων διατομών ατράκτων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (FEM). Συγκεκριμένα, οι δύο αυτές διατομές θα δοκιμαστούν σε στρέψη και κάμψη ώστε τα αποτελέσματα να συγκριθούν με εκείνα των μεθόδων συγκέντρωσης τάσεων των Thum και Petersen. Απαραίτητη είναι η κατασκευή διαγραμμάτων για κάθε περίπτωση ξεχωριστά, όπου θα απεικονίζονται στοιχεία της μελέτης, δηλαδή ο συντελεστής K_t και ο λόγος r/d . Οι γραφικές παραστάσεις κάθε διαγράμματος έχουν συγκεκριμένο λόγο D/d η καθεμιά, ο οποίος μεταβάλλεται κάθε φορά λόγω της αύξησης της διαμέτρου D του εκάστοτε μοντέλου. Αυτό συμβαίνει με σκοπό να συλλεχθούν όσα περισσότερα αποτελέσματα γίνεται και κατά συνέπεια η μελέτη να έχει μεγαλύτερη ακρίβεια. Επίσης, με τον τρόπο αυτό γίνεται εφικτή η σύγκριση των αποτελεσμάτων τα οποία προήλθαν από δύο διαφορετικές μεθόδους.

ABSTRACT

The purpose of this project is the study of two rare fuselage sections with the finite element method (FEM). Specifically, these two sections will be tested in torsion and bending, so the results to be compared with those of stress concentration methods by Thum and Petersen. Diagrams construction is necessary for each case where data from the study will be shown, the coefficient K_t and the ratio r/d . The graphs chart have a specific D/d ratio each, which varies each time due to the increasing diameter D of each model. This is in order to gather as much results as possible and therefore the study have a greater accuracy. In the end, the comparison of the results obtained from two different methods would be made possible.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο: Εισαγωγή

- 1.1 Σκοπός της εργασίας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: Θεωρητικό υπόβαθρο

- 2.1 Συντελεστής K_t για εγκοπές - Διαγράμματα
- 2.2 Μέθοδοι Thum & Petersen
- 2.3 Μέθοδος FEA

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: Μοντελοποίηση & Υπολογισμός τάσεων

- 3.1 Παράμετροι μοντελοποίησης
- 3.2 Μοντελοποίηση σε FEA
- 3.3 Υπολογισμός τάσεων και σύγκλιση

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο: Διαγράμματα & Αποτελέσματα

- 4.1 Αριθμητικά αποτελέσματα
- 4.2 Σύγκριση διαγραμμάτων - Συμπεράσματα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο: Συναφή δημοσιευμένες εργασίες

- 5.1 «Peterson's Stress Concentration Factors»
- 5.2 «Notch size effects on high cycle fatigue limit stress of Udimet 720»
- 5.3 «Failure analysis of an elevator drive shaft»
- 5.4 «Fatigue notch sensitivity and the notch size effect»
- 5.5 «Practical expressions for the notch stress concentration factors of round bars under torsion»

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

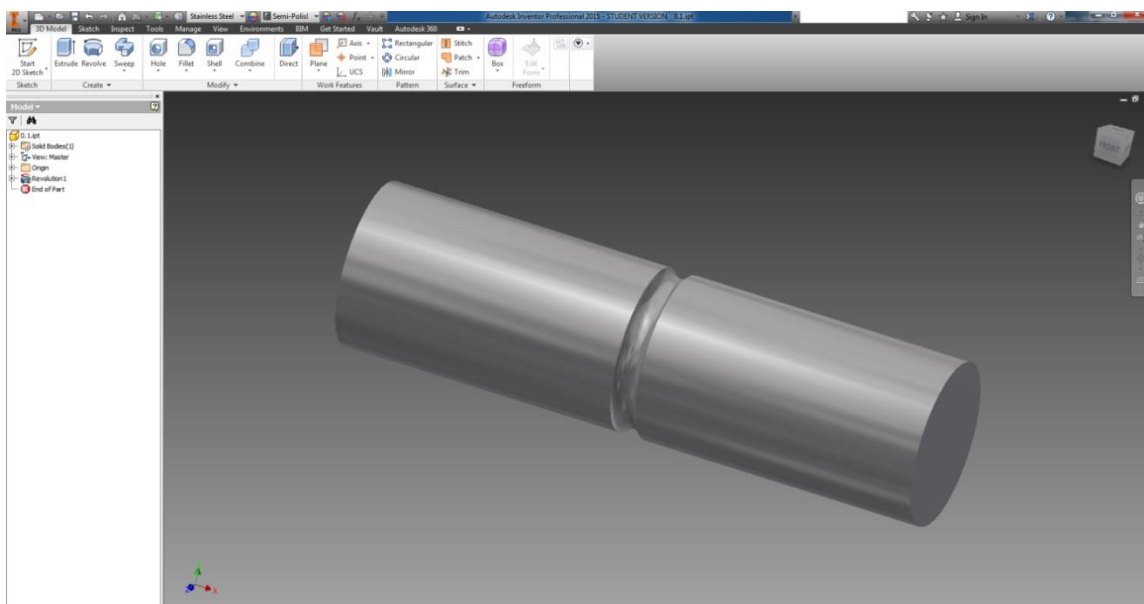
1.1 Σκοπός της εργασίας

Η παρούσα εργασία έχει σαν στόχο τη μελέτη και ανάλυση δύο διατομών με διαβάθμιση των διαμέτρων τους χρησιμοποιώντας το λογισμικό των πεπερασμένων στοιχείων. Μετά από έναν συγκεκριμένο αριθμό μοντελοποιήσεων και πειραμάτων και μέσω της ανάλυσης αυτής (FEA) θα προκύψει ο συντελεστής συγκέντρωσης τάσεων K_t για τον οποίο θα γίνει αναφορά στο επόμενο κεφάλαιο με το θεωρητικό υπόβαθρο το οποίο έχει αναπτυχθεί τα προηγούμενα χρόνια. Με βάση το συντελεστή αυτόν θα κατασκευαστούν διαγράμματα με τις τιμές του και τα οποία θα συγκριθούν με τα αποτελέσματα των μεθόδων συγκέντρωσης τάσεων των Thum και Petersen. Τα εν λόγω διαγράμματα θα εξαρτώνται και από άλλες παραμέτρους όπως π.χ. οι λόγοι r/d και D/d , όπου με r ισούται η ακτίνα καμπυλότητας, D η εξωτερική διάμετρος και d η εσωτερική διάμετρος. Τόσο η ανάλυση όσο και η κατασκευή των διαγραμμάτων θα αφορούν την καταπόνηση σε κάμψη και στρέψη. Επίσης, θα αναλυθεί βήμα - βήμα η δημιουργία των μαθηματικών μοντέλων από το 2D sketch έως την τελική μοντελοποίηση για την εκτέλεση των πειραμάτων και τη συλλογή των αποτελεσμάτων.

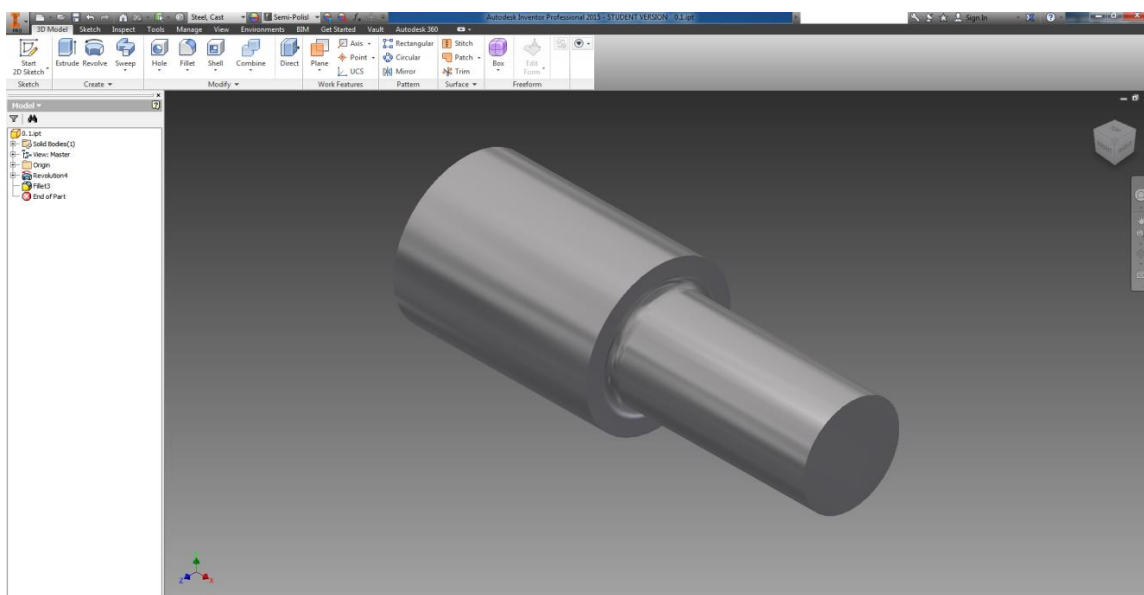
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2.1 Συντελεστής K_t για εγκοπές – Διαγράμματα

Συχνό φαινόμενο σε μηχανολογικές κατασκευές είναι η παρουσία εγκοπών με διαφορετικές μορφές κάθε φορά. Στην παρούσα εργασία θα μελετηθούν συγκεκριμένα δύο εγκοπές οι οποίες φαίνονται στις παρακάτω φωτογραφίες.



Εικόνα 2.1 Πρώτο μοντέλο με εγκοπή σε μορφή περιφερειακής αύλακας.



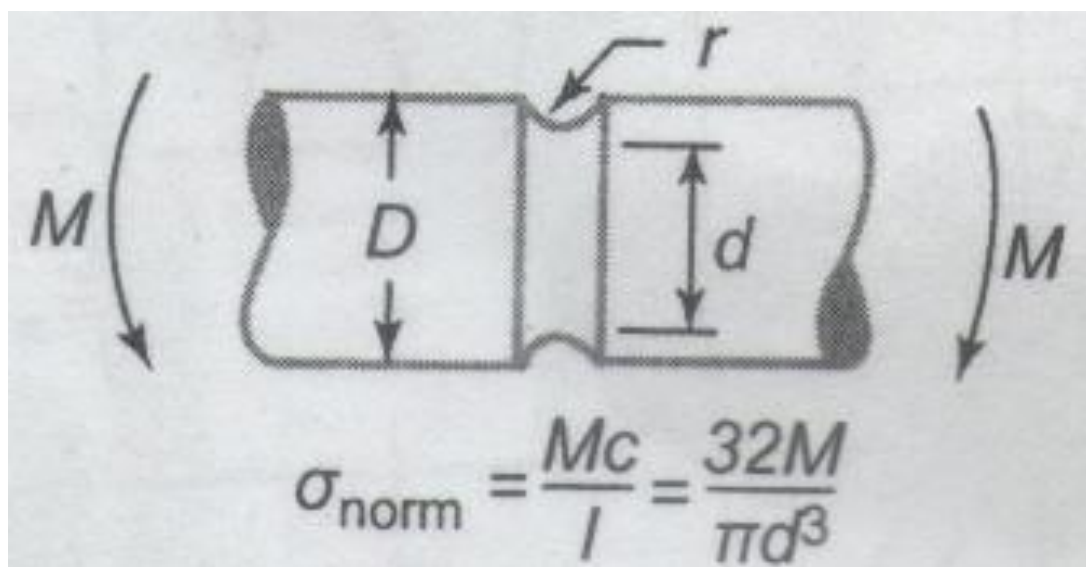
Εικόνα 2.2 Δεύτερο μοντέλο με εγκοπή σε μορφή διαβάθμισης διαμέτρου.

Σε αυτές τις περιπτώσεις, λοιπόν, όπως δείχνουν οι παραπάνω φωτογραφίες παρουσιάζεται απότομη αλλαγή από την εξωτερική διάμετρο D σε εσωτερική d με συνέπεια να καταγράφεται μεγάλη συγκέντρωση τάσεων στα σημεία αυτά. Ο συντελεστής ο οποίος μπορεί να προβλέψει την αλλαγή αυτή ονομάζεται συντελεστής συγκέντρωσης τάσεων και συμβολίζεται με K . Ο θεωρητικός συντελεστής στον οποίο γίνεται αναφορά συμβολίζεται με K_t . Οι μαθηματικές σχέσεις οι οποίες είναι απαραίτητες για τη λύση του προβλήματος είναι οι παρακάτω.

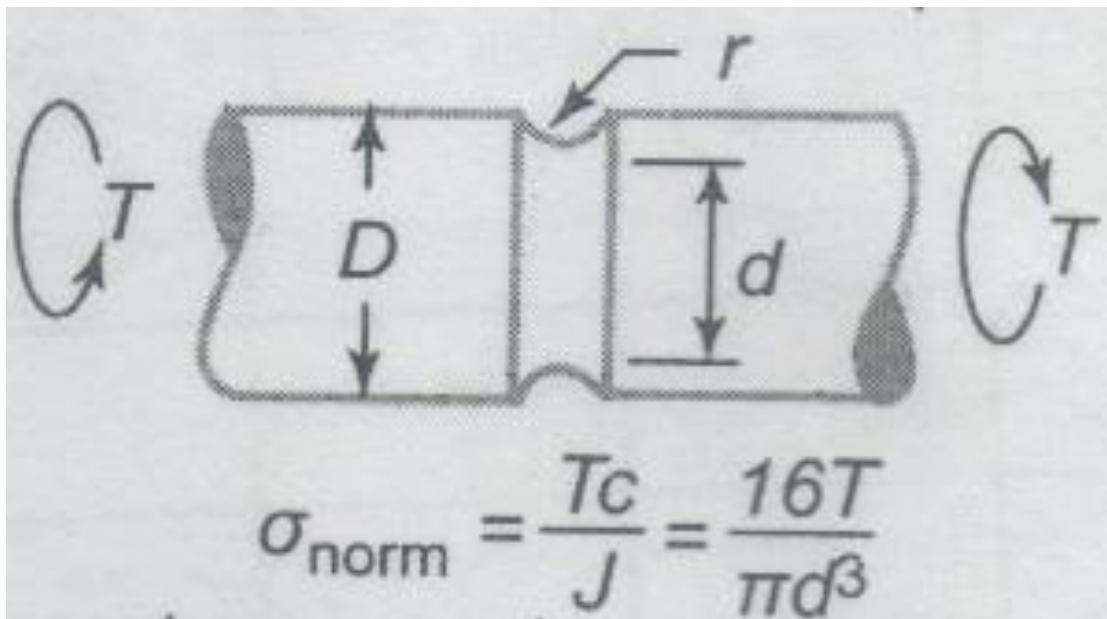
- $K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}}$ για ορθές τάσεις (κάμψη)
- $K_t = \frac{\tau_{max}}{\tau_{nom}}$ για διατμητικές τάσεις (στρέψη)

Όπου σ_{max} και τ_{max} αντιπροσωπεύουν τις μέγιστες αναπτυσσόμενες τάσεις σε κάμψη και στρέψη αντίστοιχα, στην περιοχή της εγκοπής. Τα σ_{nom} και τ_{nom} αντιστοιχούν στις ονομαστικές (υπολογισθείσες) τάσεις. [1]

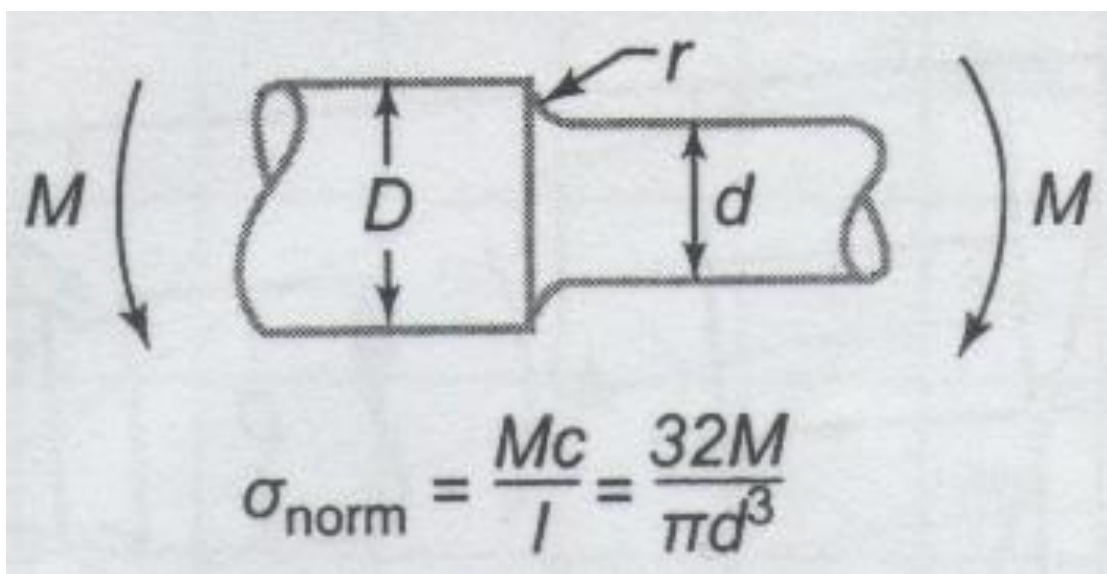
Στα παρακάτω σχήματα αναπαρίστανται οι μαθηματικές σχέσεις υπολογισμού των ονομαστικών τάσεων κάμψης και στρέψης των δύο προαναφερθείσων διατομών.



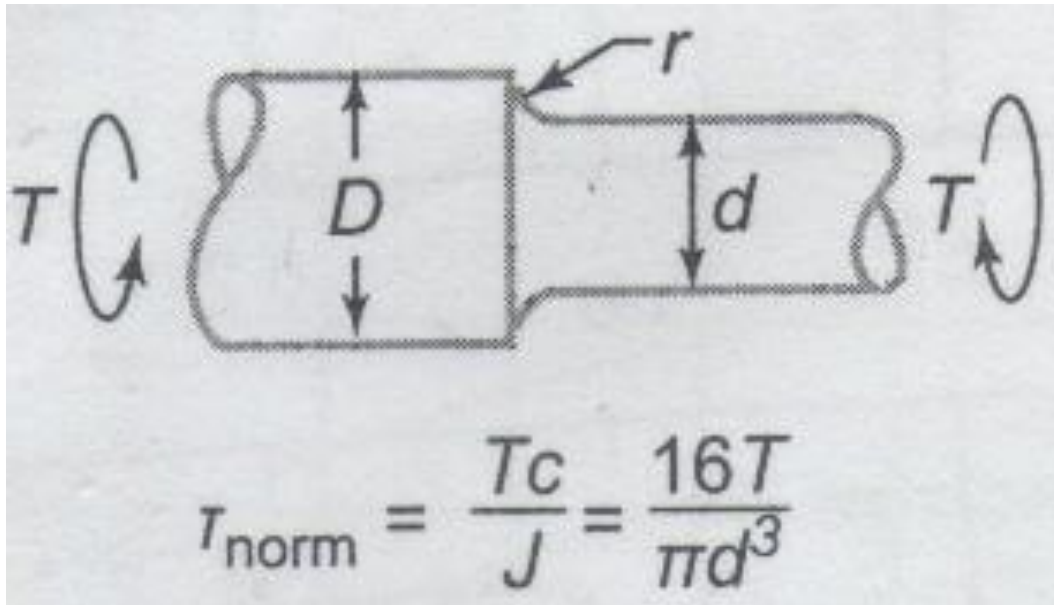
Εικόνα 2.3 Μαθηματική σχέση υπολογισμού ονομαστικών καμπτικών τάσεων σε μοντέλο με περιφερειακή αύλακα.



Εικόνα 2.4 Μαθηματική σχέση υπολογισμού ονομαστικών στρεπτικών τάσεων σε μοντέλο με περιφερειακή αύλακα

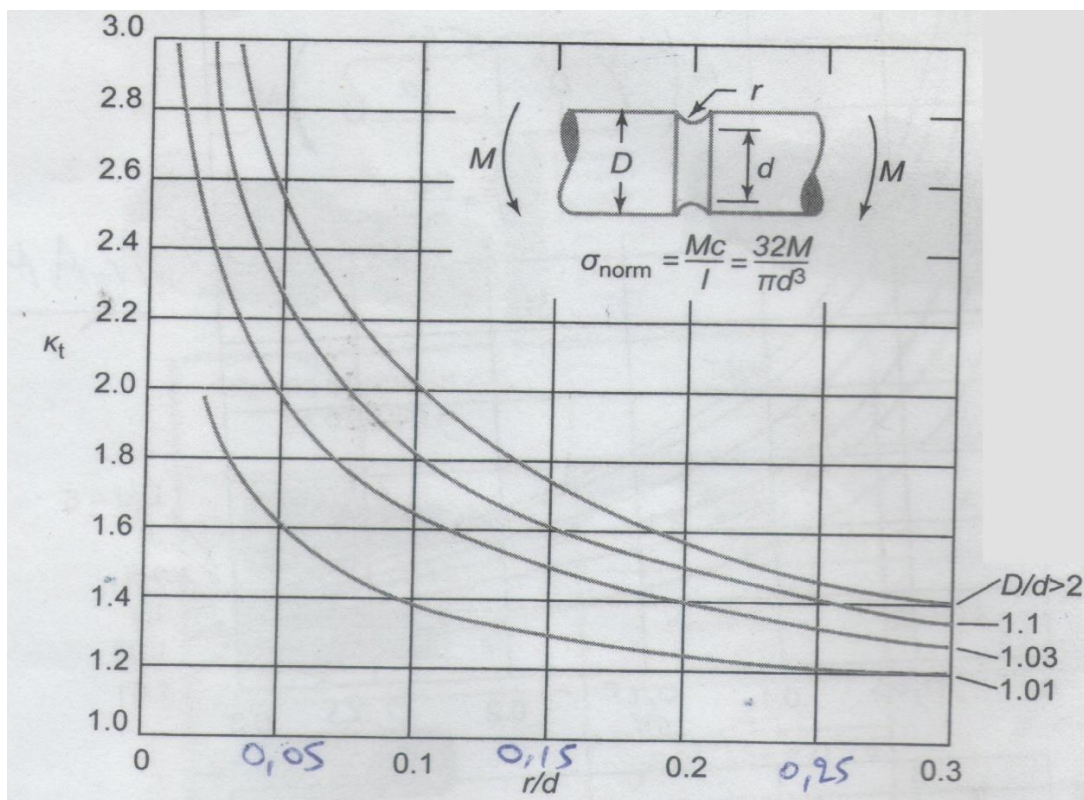


Εικόνα 2.5 Μαθηματική σχέση υπολογισμού ονομαστικών καμπτικών τάσεων σε μοντέλο με διαβάθμιση διαμέτρου.

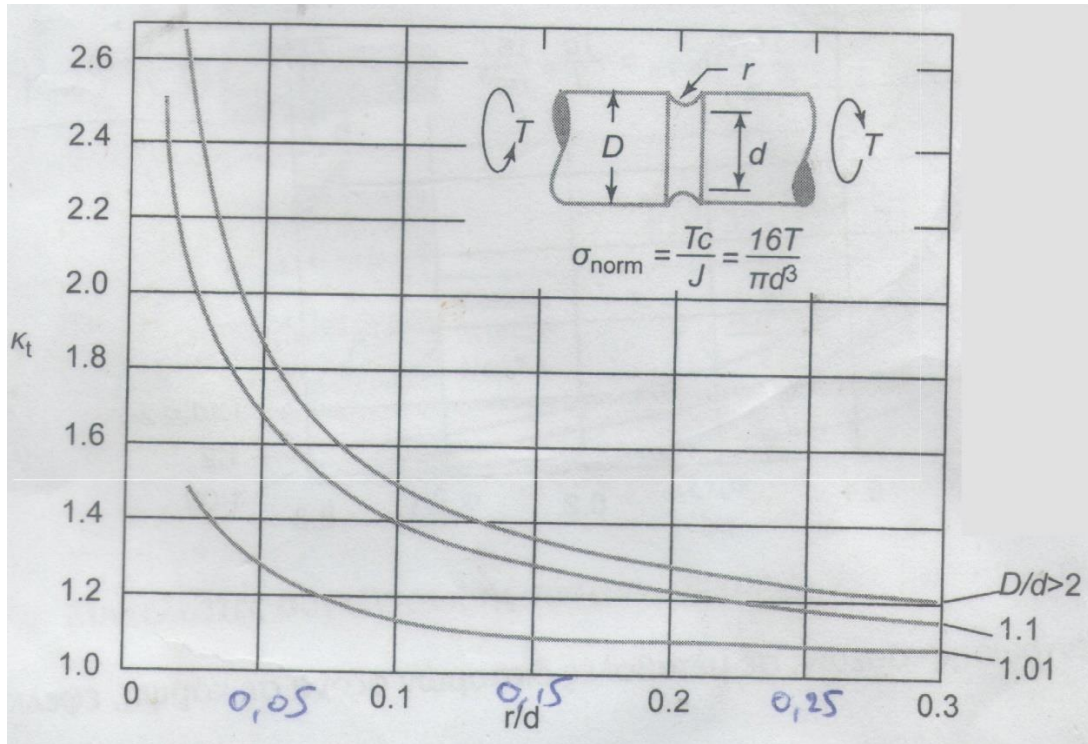


Εικόνα 2.6 Μαθηματική σχέση υπολογισμού ονομαστικών στρεπτικών τάσεων σε μοντέλο με διαβάθμιση διαμέτρου.

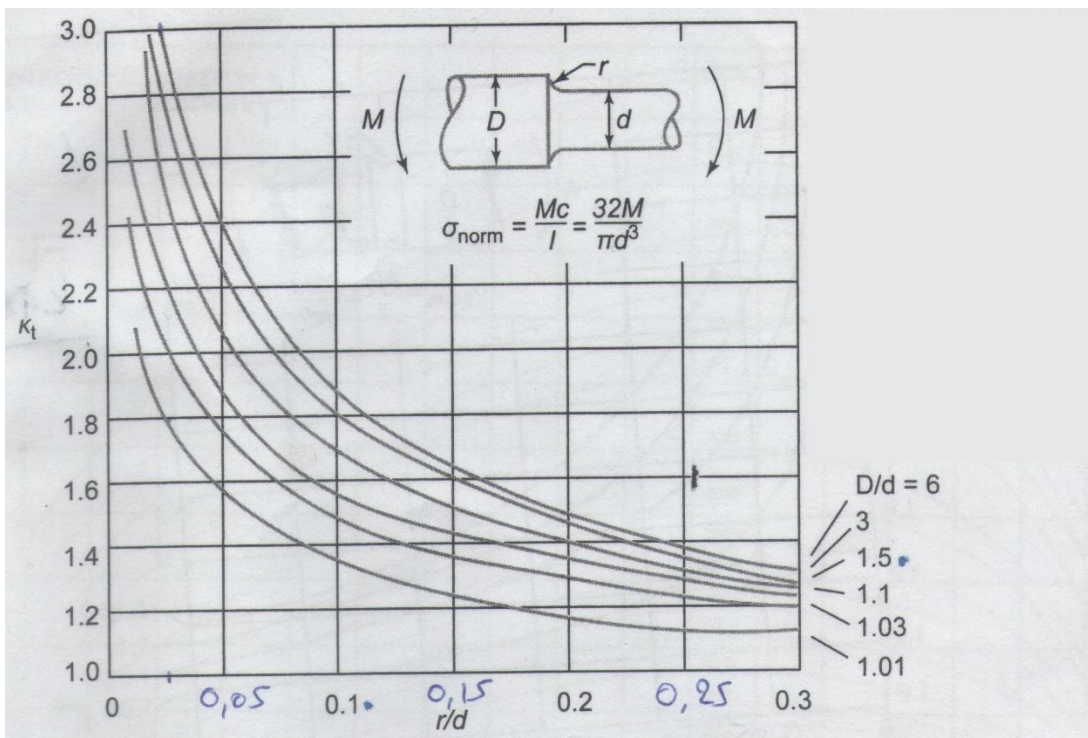
Όπως φαίνεται στις παραπάνω εικόνες, υπάρχουν παράμετροι όπως το D , το d και το r οι οποίοι μαζί με τον θεωρητικό συντελεστή K_t δημιουργούν τα ακόλουθα διαγράμματα και τα οποία είναι αποτελούν τον κύριο στόχο μελέτης της εργασίας.



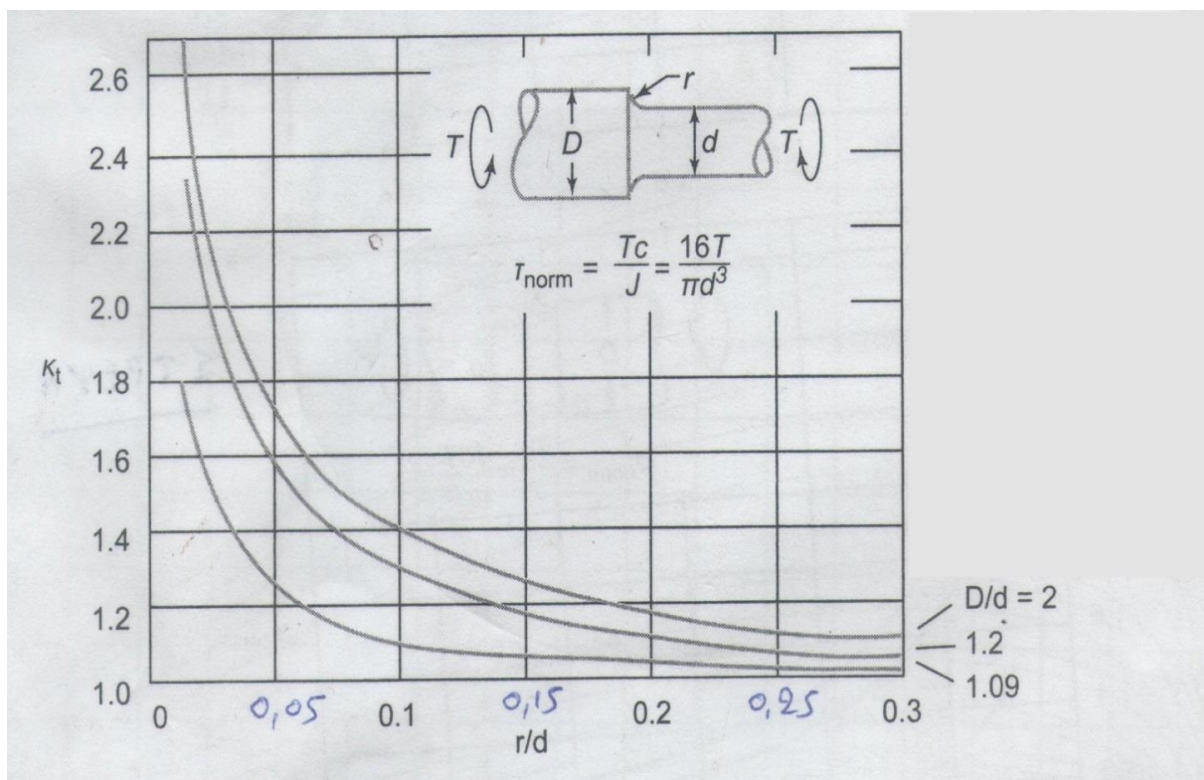
Σχήμα 2.1 Διάγραμμα συντελεστή K_t του πρώτου μοντέλου για κάμψη.



Σχήμα 2.2 Διάγραμμα συντελεστή K_t του πρώτου μοντέλου για στρέψη.



Σχήμα 2.3 Διάγραμμα συντελεστή K_t του δεύτερου μοντέλου για κάμψη.



Σχήμα 2.4 Διάγραμμα συντελεστή K_t του δεύτερου μοντέλου για στρέψη.

Τα ανωτέρω διαγράμματα είναι αυτά που θα μελετηθούν και θα συγκριθούν σε επόμενο κεφάλαιο. Όπως φαίνεται, στον άξονα Y υπάρχει ο συντελεστής K_t και στον άξονα X ο λόγος r/d ο οποίος αντιπροσωπεύει την αναλογία της ακτίνας καμπυλότητας με την εσωτερική διάμετρο d . Επίσης, κάθε γραφική παράσταση αντιστοιχεί σε μία συγκεκριμένη, κάθε φορά, τιμή του λόγου D/d ο οποίος με τη σειρά του συσχετίζει την εξωτερική διάμετρο D με την εσωτερική d όπου με βάση αυτήν υπολογίζονται τα σ_{nom} και τ_{nom} . Χαρακτηριστικό είναι ότι η τιμή του K_t θα πρέπει σε κάθε περίπτωση να είναι μεγαλύτερη ή ίση του 1 ($K \geq 1$).

2.2 Μέθοδοι Thum & Petersen

Μέθοδος Thum

- Η μέθοδος υπολογισμού δυναμικής αντοχής κατά *Thum* είναι αρκετά εύχρηστη και στηρίζεται στα παρακάτω δύο μεγέθη:
- στον συντελεστή εγκοπής β_k
 - στον συντελεστή ευαισθησίας υλικού η_k

Ο συντελεστής εγκοπής β_k , ορίζεται ως ο λόγος του ορίου δυναμικής αντοχής $(\sigma_A)_0$ του υλικού για δοκίμιο χωρίς εγκοπή προς το όριο δυναμικής αντοχής $(\sigma_A)_{I0}$ ενός δοκιμίου με εγκοπή. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι τα δύο δοκίμια να είναι από το ίδιο υλικό, να έχουν κυκλική διατομή, λεία επιφάνεια, διάμετρο $d=10$ mm και να βρίσκονται κάτω από την ίδια καταπόνηση.

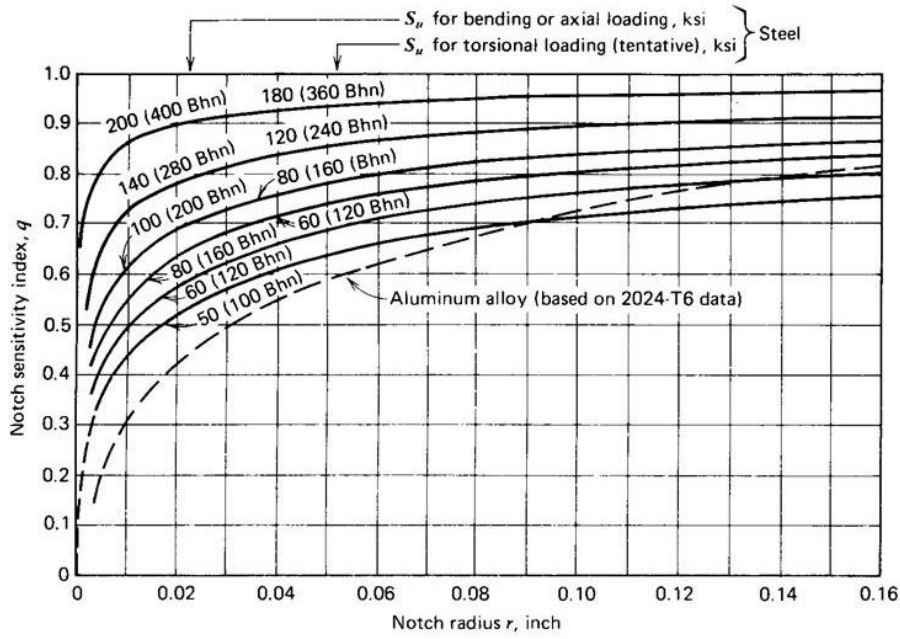
Επομένως:

$$\beta_k = \frac{(\sigma_A)_0}{(\sigma_A)_{I0}}$$

Ο συντελεστής ευαισθησίας η_k προσδιορίζεται ως εξής:

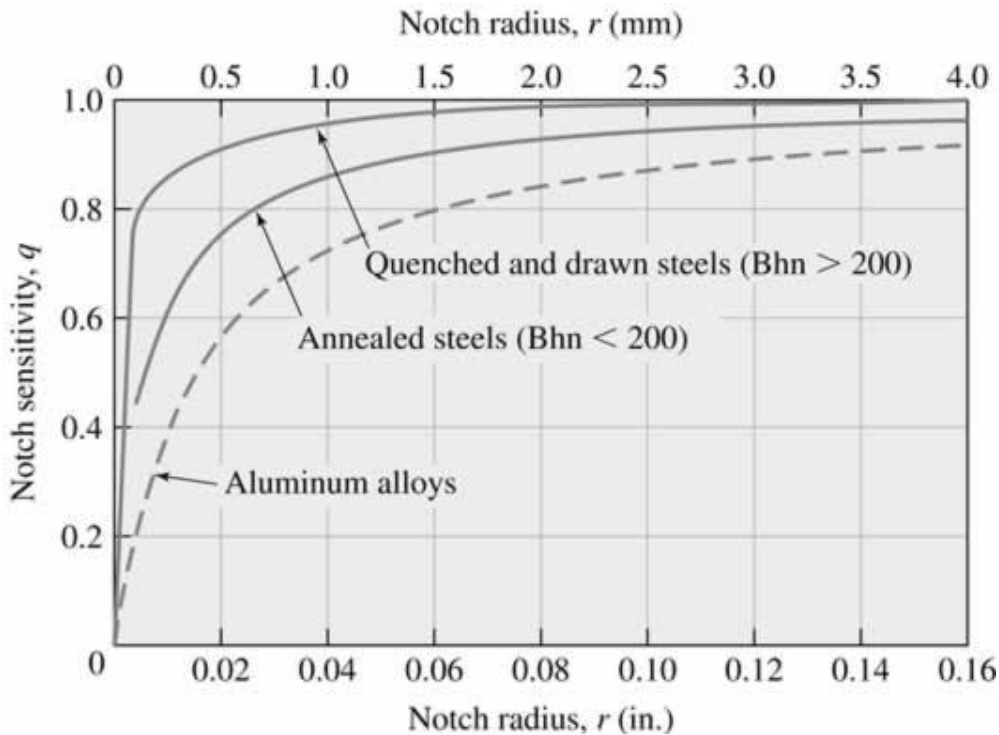
$$\eta_k = \frac{\beta_k - 1}{\alpha_k - 1}$$

Ο η_k εξαρτάται από τους συντελεστές εγκοπής β_k και μορφής α_k , άρα έχει να κάνει με το υλικό, το είδος φόρτισης, τη μορφή και το μέγεθος της εγκοπής. Τα ακόλουθα διαγράμματα δίνουν παρουσιάζουν το συντελεστή.



Σχήμα

2.5 Διάγραμμα συντελεστή ευαισθησίας για χάλυβες και κράματα αλουμινίου για καμπτική, στρεπτική ή αξονική φόρτιση.

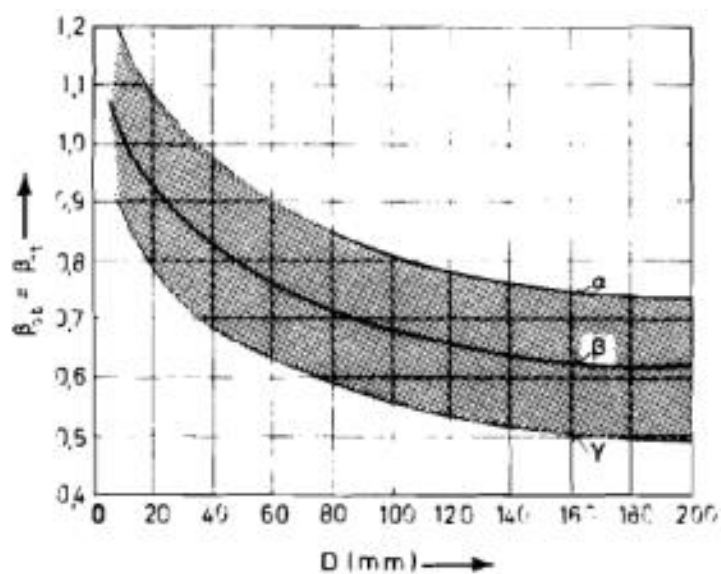


Σχήμα 2.6 Διάγραμμα συντελεστή ευαισθησίας για επιβεβλιωμένους και ανοπυμένους χάλυβες και κράματα αλουμινίου.

Το επιτρεπόμενο όριο δυναμικής αντοχής μιας διατομής $(\sigma_A)_{επ}$ κατά *Thum* προκύπτει από τη σχέση:

$$(\sigma_A)_{επ} = (\sigma_A)_{I0} \beta_0 \beta_1 \beta_2$$

Όπου β_0 είναι ο συντελεστής μεγέθους, β_1 ο συντελεστής επιφάνειας και β_2 ο συντελεστής διατομής. Ο συντελεστής β_0 σχετίζεται με τη μείωση της δυναμικής αντοχής του υλικού όσο αυξάνεται το μέγεθος της διατομής του όταν καταπονείται σε κάμψη ή στρέψη.



Σχήμα 2.7 Διάγραμμα συντελεστή μεγέθους β_0 για καμπτική ή στρεπτική καταπόνηση.

Σημειώνεται πως στις παραπάνω γραφικές παραστάσεις με δείκτες α , β και γ , συνθηθέστερα επιλέγονται τιμές από την παράσταση β διότι αντιπροσωπεύει τις μέσες τιμές του εύρους που απεικονίζεται.

Ο συντελεστής επιφάνειας β_1 συνδέεται με το φαινόμενο μείωσης της δυναμικής αντοχής ενός υλικού όσο αυξάνεται η επιφανειακή τραχύτητά του και μπορεί να προσδιοριστεί από ειδικούς πίνακες και διαγράμματα. Ακόμη, ο τελευταίος παράγοντας της εξίσωσης του επιτρεπόμενου ορίου δυναμικής αντοχής κατά Thum είναι ο συντελεστής διατομής β_2 ο οποίος εξαρτάται από τη μορφή της διατομής. Για παράδειγμα, όταν το αντικείμενο αποτελείται από τετραγωνική διατομή που καταπονείται σε δυναμική καμπτική φόρτιση ο συντελεστής β_2 θα πάρει την τιμή 0,8 δηλαδή το όριο αντοχής του τροποποιείται στο 80%. Αντίστοιχα, σε άλλες περιπτώσεις διατομών μπορεί να παρατηρηθεί αύξηση του ορίου αντοχής, όταν δηλαδή $\beta_2 > 1$. [2]

Μέθοδος Petersen

- Η μέθοδος υπολογισμού δυναμικής αντοχής κατά *Petersen* δίνει έμφαση στα φαινόμενα της αντιστήριξης, της ευαισθησίας του υλικού σε εγκοπές και της αύξησης της τάσης στο εσωτερικό της εγκοπής. Οι παράγοντες από τους οποίους επηρεάζεται είναι:
 - Η ακτίνα καμπυλότητας r η οποία παίζει σημαντικό ρόλο στην καταπόνηση και τις αναπτυσσόμενες τάσεις ενός μεταλλικού κομματιού που φέρει εγκοπές.
 - Η σχετική πτώση τάσης χ με την οποία λαμβάνεται υπόψη ο συντελεστής αντιστηρίξεως. Όταν ένα μεταλλικό κομμάτι ατράκτου χωρίς εγκοπές φορτιστεί εφελκυστικά, τότε οι τάσεις που θα αναπτυχθούν χαρακτηρίζονται από ομοιογένεια σε όλο το μήκος του, κάτι που δε ισχύει σε στρεπτικές και καμπτικές καταπονήσεις. Βέβαια, όταν το κομμάτι αυτό φέρει εγκοπή, τότε η ανάπτυξη των τάσεων γίνεται ανομοιογενώς ανεξάρτητα με το είδος φόρτισης.

Η παρακάτω μαθηματική εξίσωση χρησιμοποιείται για το υπολογισμό της σχετικής πτώσης τάσης.

$$\chi = \left(\frac{d\sigma/dx}{\sigma} \right)_{\sigma=\sigma_{\text{μεγ}}}$$

Με τη βοήθεια της ακτίνας καμπυλότητας r της εγκοπής και της σχετικής πτώσης τάσης υπολογίζεται ο συντελεστής δυναμικής αντιστήριξης με την παρακάτω εξίσωση.

$$\delta_A = 1 + \sqrt{rx}$$

Ο συντελεστής δ_A ορίζεται ως ο λόγος του ορίου δυναμικής αντοχής μιας διατομής με εγκοπή τυχαίας διαμέτρου και τυχαίας φόρτισης ως προς το όριο δυναμικής αντοχής δοκιμίου διαμέτρου $d=10$ mm χωρίς εγκοπή.

$$\delta_A = \frac{\sigma_A}{(\sigma_{zA})_0}$$

Συνεπώς, το επιτρεπόμενο όριο δυναμικής αντοχής $(\sigma_A)_{\text{επ}}$ ενός μεταλλικού τμήματος ατράκτου με εγκοπή κατά *Petersen* προσδιορίζεται με βάση την εξίσωση:

$$(\sigma_A)_{\text{επ}} = \sigma_A \beta_1 \beta_2 = (\sigma_{zA})_0 \delta_A \beta_1 \beta_2$$

2.3 Μέθοδος FEA

Σχεδόν σε όλες τις μηχανολογικές κατασκευές καθώς και στις περισσότερες ατράκτους παρατηρείται κάποια εγκοπή ή διαβάθμιση της διαμέτρου. Αυτές οι αλλαγές στη διάμετρο του υλικού αποτελούν σημεία συγκέντρωσης τάσεων μεγαλύτερων από εκείνων που μπορεί να έχει το υπόλοιπο κομμάτι ατράκτου. Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας και την πάροδο των χρόνων δημιουργήθηκε η πιο γρήγορη και ίσως η πιο αποτελεσματική μέθοδος υπολογισμού των τάσεων αυτών. Ονομάζεται «Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων» ή FEM (Finite Element Method) και χρησιμοποιείται ευρέως για τον υπολογισμό και άλλων στοιχείων όπως π.χ. θερμοκρασιακές καταπονήσεις, ιδιοσυχνότητες, συντελεστής ασφαλείας. Βρίσκει εφαρμογή σε πολλά επιστημονικά πεδία όπως είναι η αυτοκινητοβιομηχανία, οι μεταλλικές κατασκευές, η ναυπηγική, η αεροναυπηγική κ.ά.

Σαν μέθοδος είναι αρκετά ακριβής καθώς χωρίζει το προς υπολογισμό τρισδιάστατο αντικείμενο σε άλλα μικρότερα (πεπερασμένα στοιχεία) κι έπειτα από μία σειρά μαθηματικών εξισώσεων ολοκληρώνεται η μοντελοποίηση μαζί με όποια αποτελέσματα ζητηθούν από τον χρήστη. Ταυτόχρονα, όμως, απαιτείται μεγάλη επεξεργαστική ισχύ για την επίλυση σύνθετων αντικειμένων, κάτι που δε θεωρείται ιδιαίτερο πρόβλημα στις μέρες μας λόγω του ότι η επιστήμη των Η/Υ έχει γνωρίσει μεγάλη άνοδο. [3]

Η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων ως τεχνική χωρίζεται σε μερικά απλά βήματα όπως:

- i) Η σχεδίαση ή εισαγωγή της απαιτούμενης προς μελέτη 3D μοντέλου σε λογισμικό CAD.
- ii) Εισαγωγή καταπονήσεων (δυνάμεις ή ροπές) και στηρίξεων του μοντέλου.
- iii) Εκτέλεση της εντολής προσομοίωσης (Simulation) και ανάλυση των στοιχείων.
- iv) Εξαγωγή αριθμητικών αποτελεσμάτων (Von Mises Stress, Safety Factor κ.ά.)

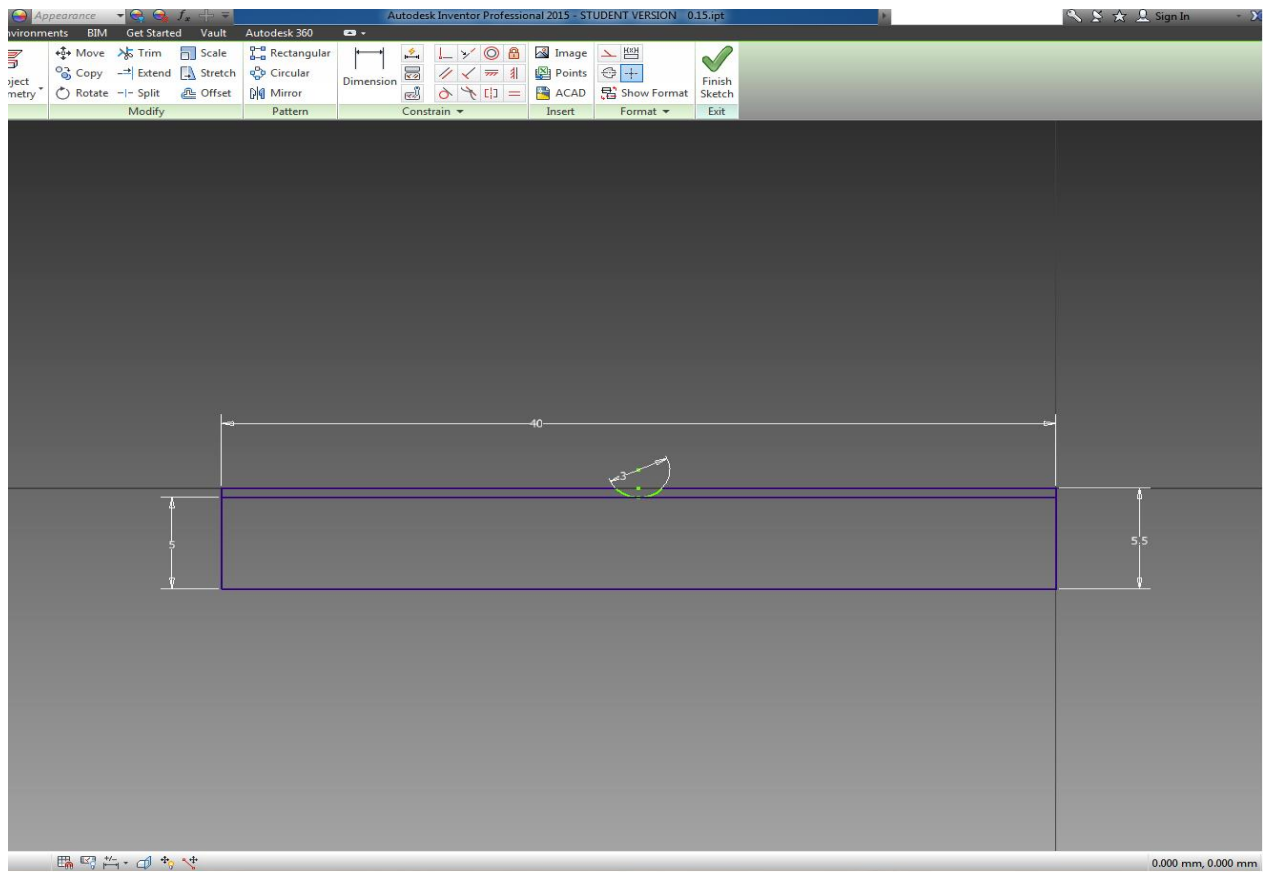
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3.1 Παράμετροι μοντελοποίησης

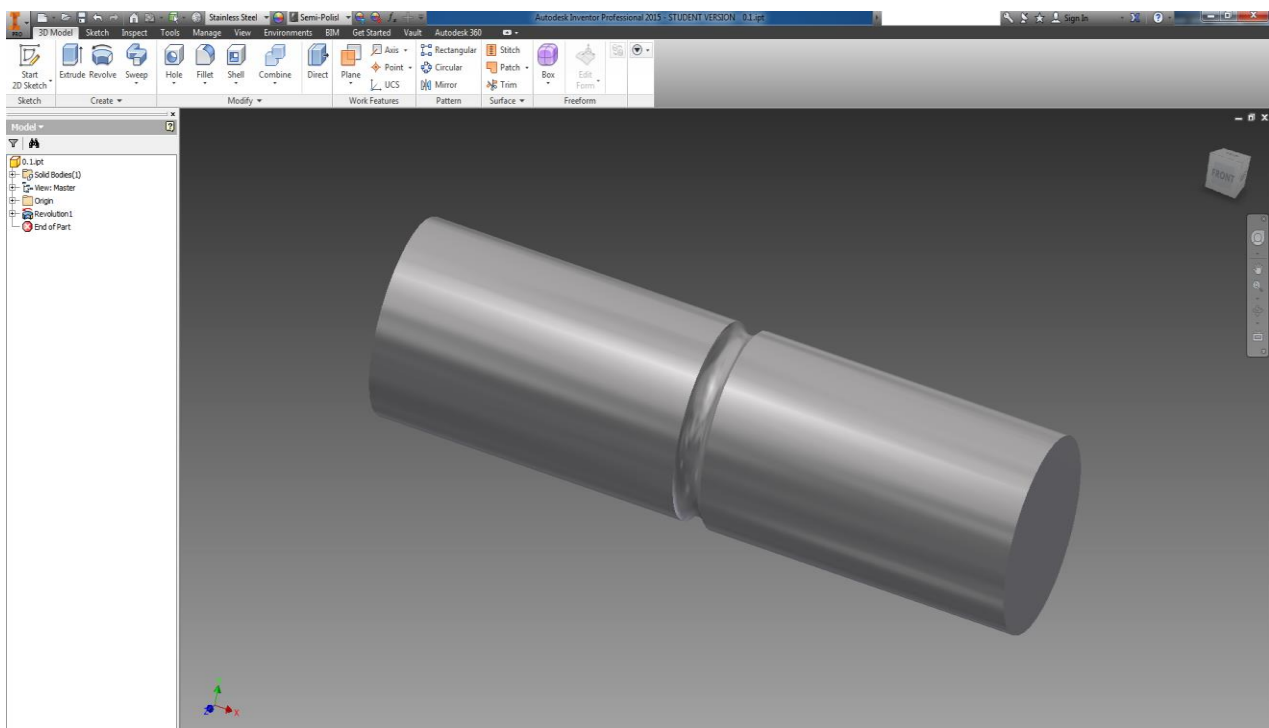
Η μοντελοποίηση των κομματιών ξεκίνησε με την 2D σχεδίασή τους στο Inventor, έπειτα δόθηκε μορφή 3D λαμβάνοντας ως σημείο αναφοράς τη μικρότερη διάμετρο d η οποία και μένει σταθερή κατά τη διάρκεια των πειραμάτων. Η εξωτερική διάμετρος D μεταβάλλεται σε κάθε δοκιμή ώστε να ικανοποιείται ο λόγος D/d ο οποίος είναι διαφορετικός και αντιστοιχεί σε κάθε γραφική παράσταση που σχεδιάζεται στα διαγράμματα για κάμψη και στρέψη. Αντιστοίχως, μεταβάλλεται κάθε φορά και η ακτίνα καμπυλότητας r της εκάστοτε εγκοπής για να ικανοποιεί το λόγο r/d ο οποίος παίζει βασικό ρόλο στην κατασκευή των διαγραμμάτων καθώς θα χωριστεί σε 12 διαδοχικά τμήματα παίρνοντας τις αντίστοιχες τιμές.

Όσο αφορά τις παραμέτρους πριν την εκτέλεση της προσομοίωσης, κάθε μοντέλο έχει σχεδιαστεί με μήκος **L=40 mm** και σταθερή εσωτερική διάμετρο **d=10 mm**. Για το λόγο ότι η μελέτη για την τελική κατασκευή των διαγραμμάτων αφορά περίπου 150 δοκιμές, θα χρησιμοποιηθεί παραμετρική σχεδίαση. Με λίγα λόγια, σε κάθε δοκιμή θα μεταβάλλεται μόνο η ακτίνα καμπυλότητας r και η εξωτερική διάμετρος D καθώς τα υπόλοιπα στοιχεία πρέπει να παραμένουν σταθερά.

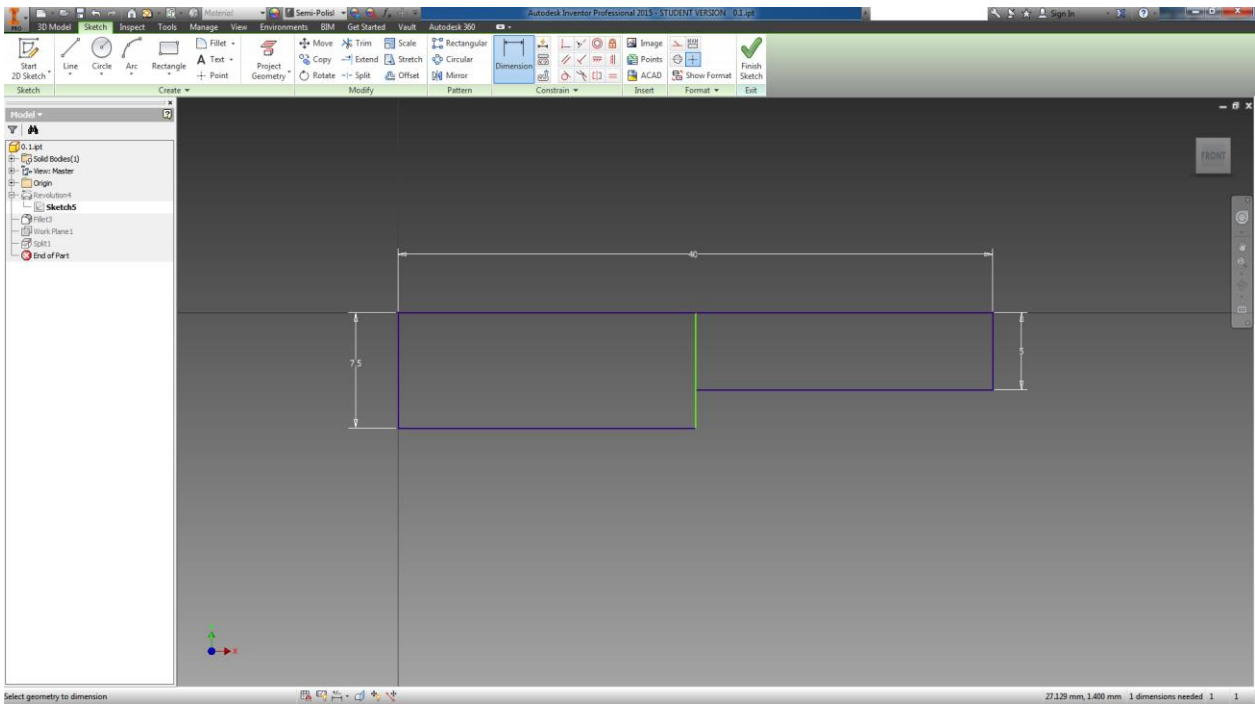
Εκτός από τη διάμετρο D , η ακτίνα καμπυλότητας μεταβάλλεται σε κάθε μοντέλο με διαφορετικό τρόπο. Αναλυτικότερα, στο πρώτο μοντέλο πραγματοποιείται με την αλλαγή της διαμέτρου του ημικυκλίου, όπου φαίνεται παρακάτω με πράσινο χρώμα, χρησιμοποιώντας την εντολή Dimension. Στο δεύτερο μοντέλο προστίθεται κάθε φορά η ακτίνα r με τη βοήθεια της εντολής Fillet και επιλέγεται η αριθμητική διάσταση που αρμόζει στην περίπτωση. Οι εικόνες που ακολουθούν απεικονίζουν τα μοντέλα στην 2D και 3D μορφή τους.



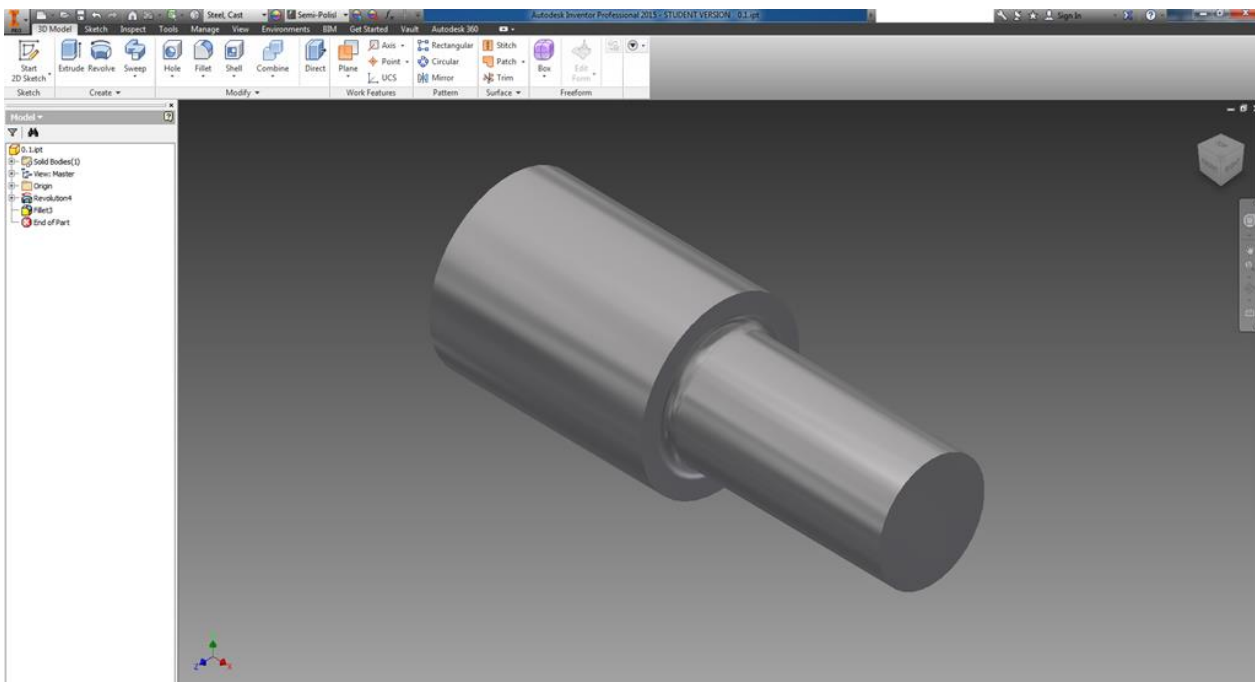
Εικόνα 3.1 Σχεδίαση πρώτου μοντέλου σε μορφή 2D.



Εικόνα 3.2: Άτρακτος με περιφερειακή αύλακα σε μορφή 3D.



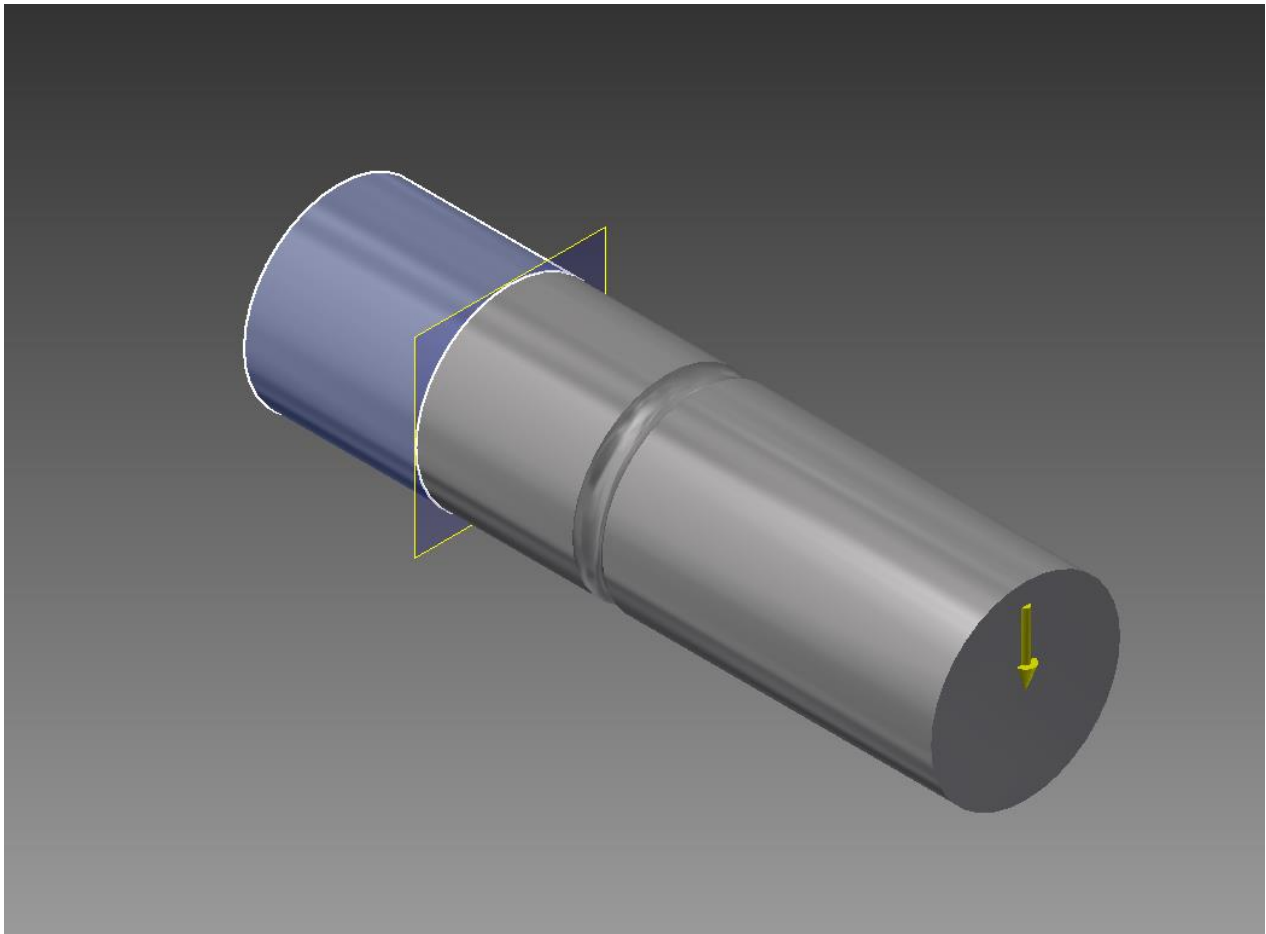
Εικόνα 3.3 Σχεδίαση δεύτερου μοντέλου σε 2D μορφή.



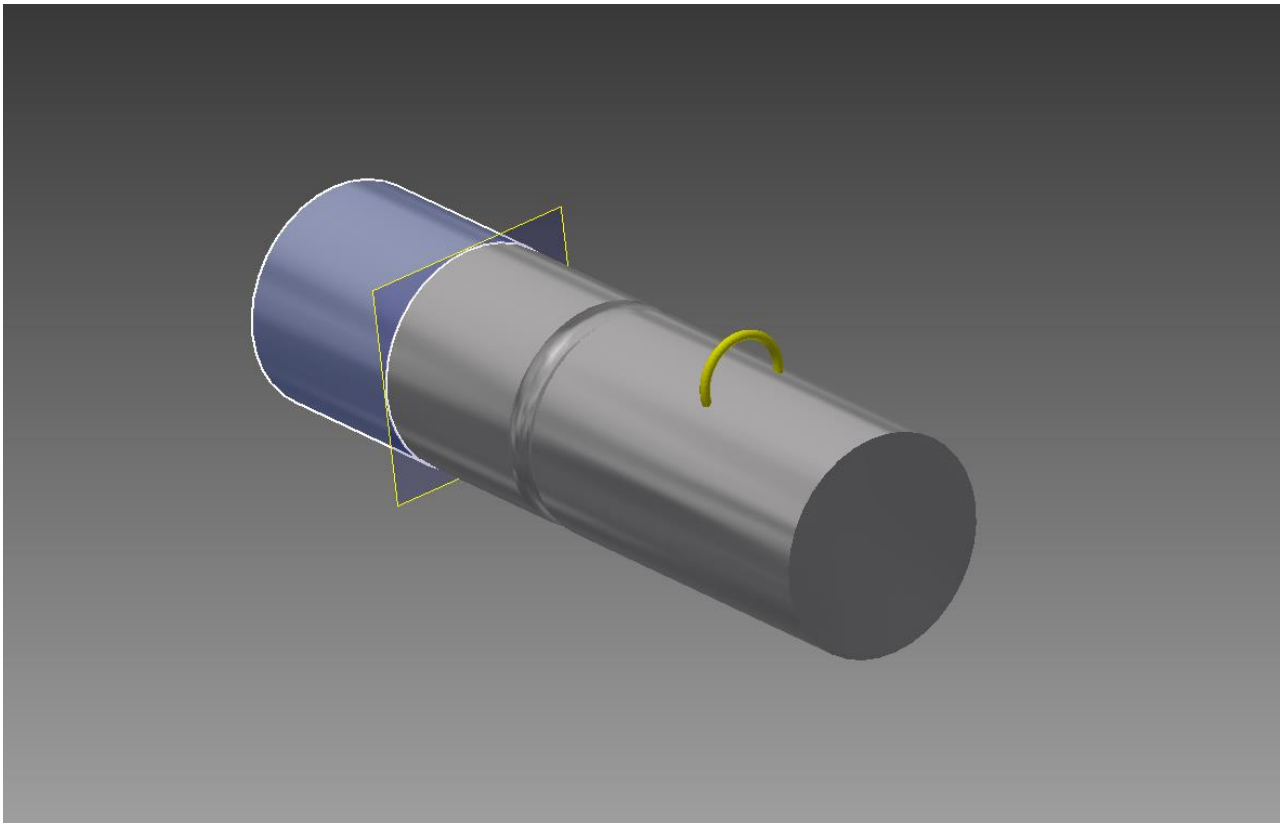
Εικόνα 3.4 Ατρακτός με διαβάθμιση και ακτίνα καμπυλότητας στο σημείο της διαβάθμισης σε μορφή 3D.

3.2 Μοντελοποίηση σε FEA

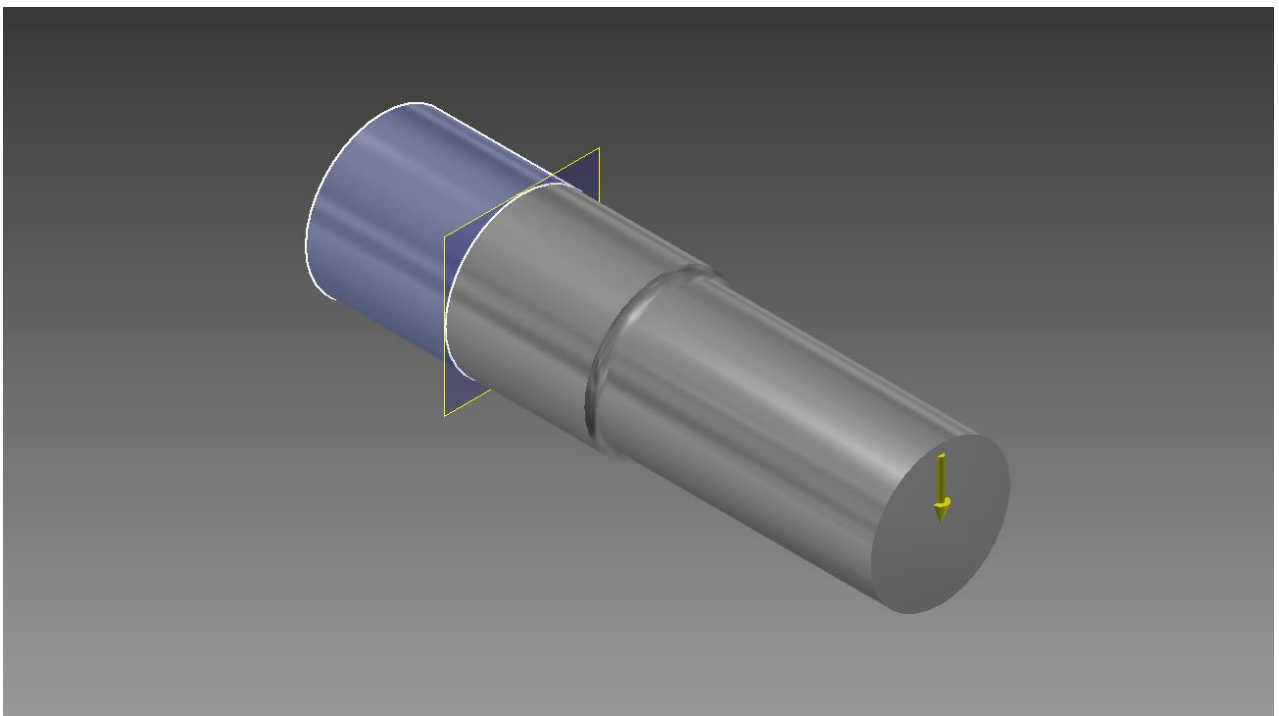
Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιαστούν τα βήματα που ακολουθήθηκαν ώστε να εισαχθούν δυνάμεις, ροπές, στηρίξεις καθώς και μερικές ρυθμίσεις στα μοντέλα πριν την εκτέλεση των δοκιμών (simulation).



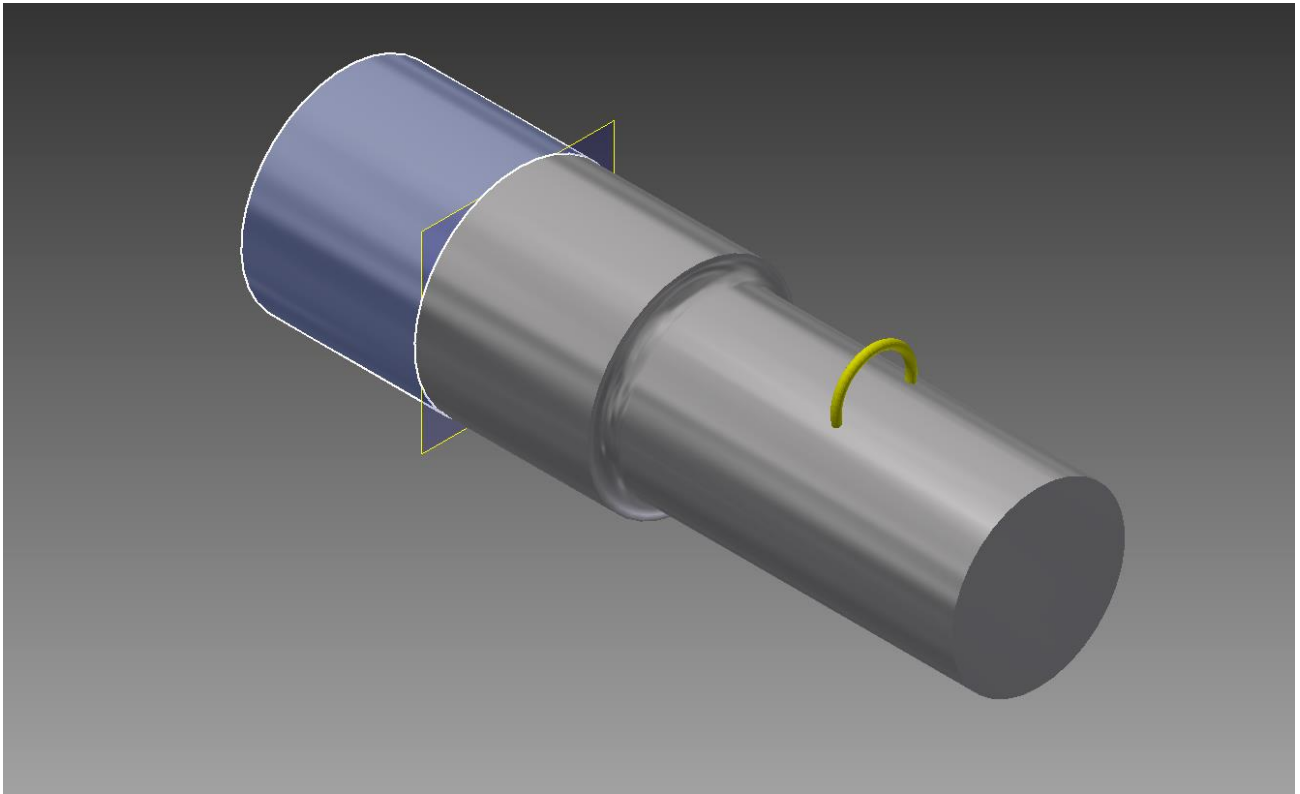
Εικόνα 3.5 Εφαρμογή πάκτωσης και δύναμης στο πρώτο μοντέλο.



Εικόνα 3.6 Εφαρμογή στήριξης και ροπής στρέψης στο πρώτο μοντέλο.



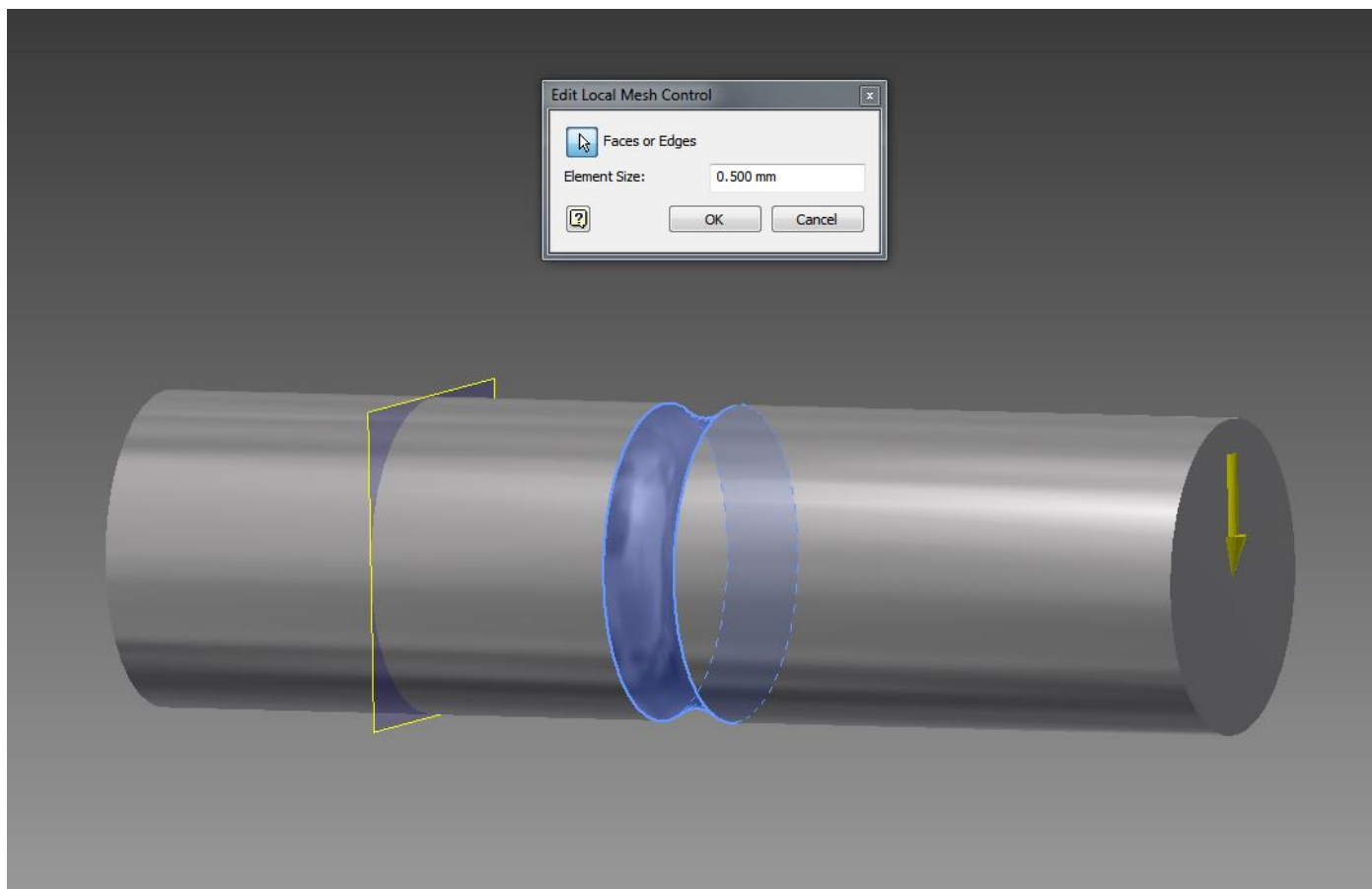
Εικόνα 3.7 Εφαρμογή δύναμης και στήριξης στο δεύτερο μοντέλο.



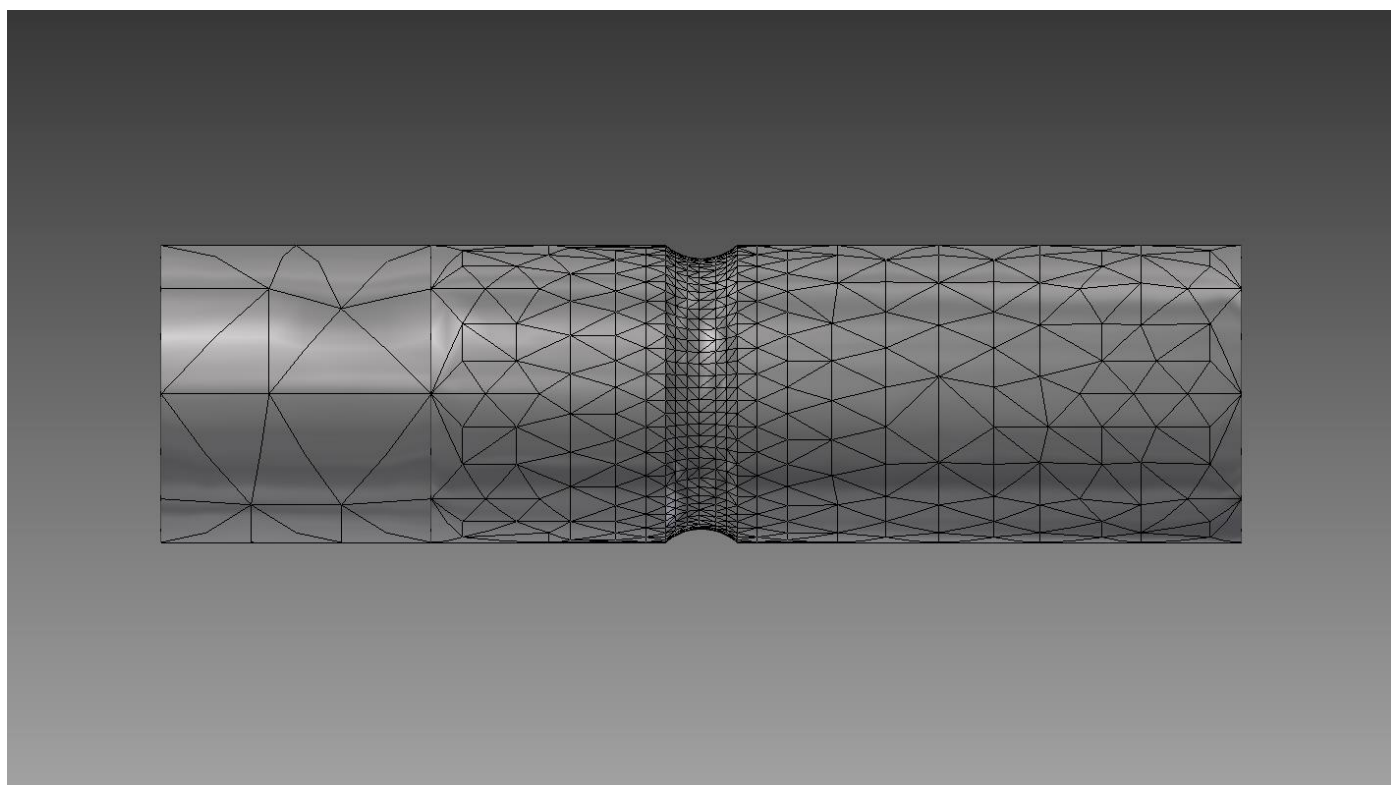
Εικόνα 3.8 Εφαρμογή στήριξης και ροπής στρέψης στο δεύτερο μοντέλο.

Όπως φαίνεται στις παραπάνω φωτογραφίες, χρησιμοποιήθηκε η εντολή Plane ώστε να εφαρμοστεί στήριξη (πάκτωση) στο $\frac{1}{4}$ του μήκους των μοντέλων και με τη βοήθεια της εντολής Split η οποία απομονώνει νοητά τα δύο κομμάτια. Έπειτα, τοποθετήθηκαν οι απαραίτητες δυνάμεις και ροπές.

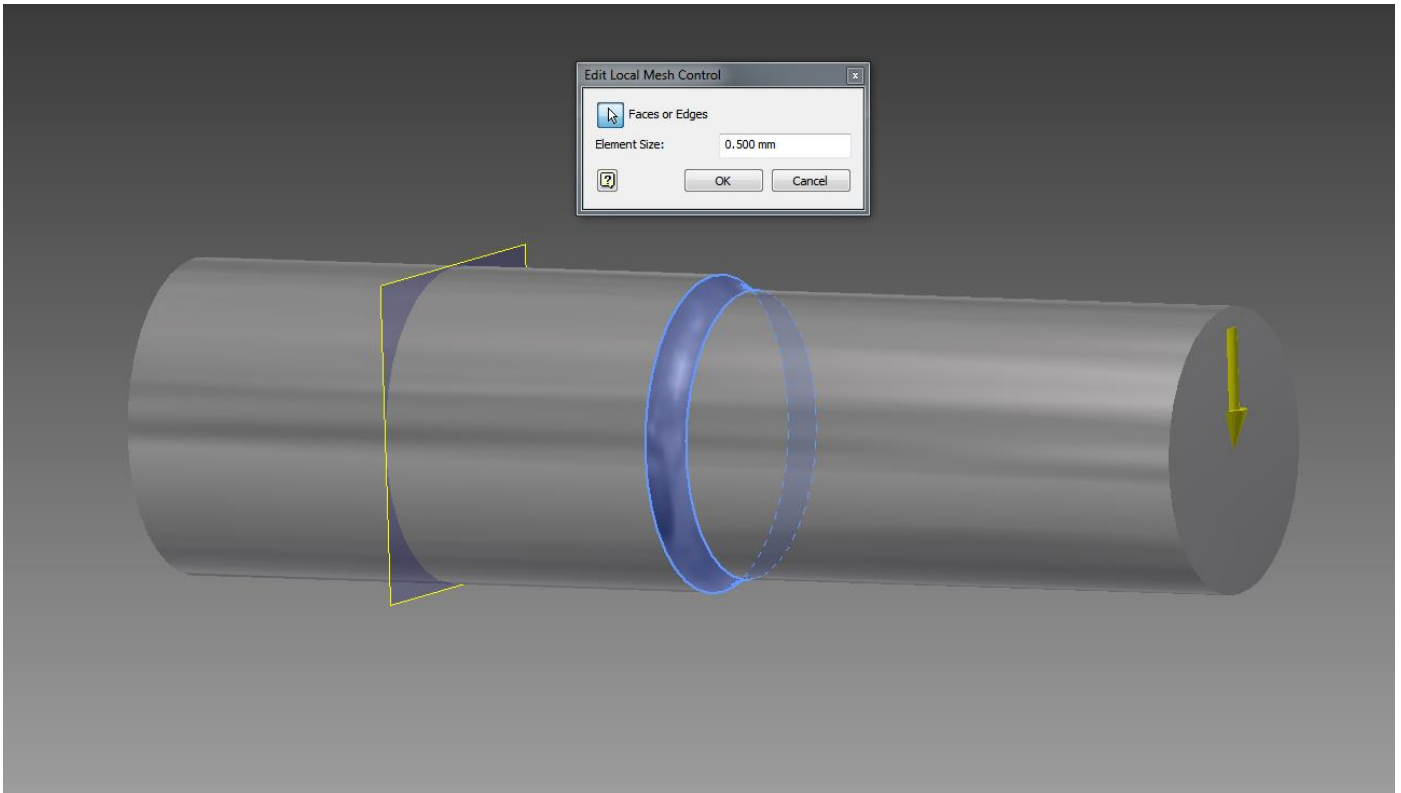
Στις επόμενες φωτογραφίες παρουσιάζεται το πλέγμα (Mesh) στην περιοχή της εκάστοτε εγκοπής, το οποίο ρυθμίστηκε στο 0,5 mm για καλύτερη ανάλυση των στοιχείων προς μελέτη και ακριβότερα αριθμητικά αποτελέσματα.



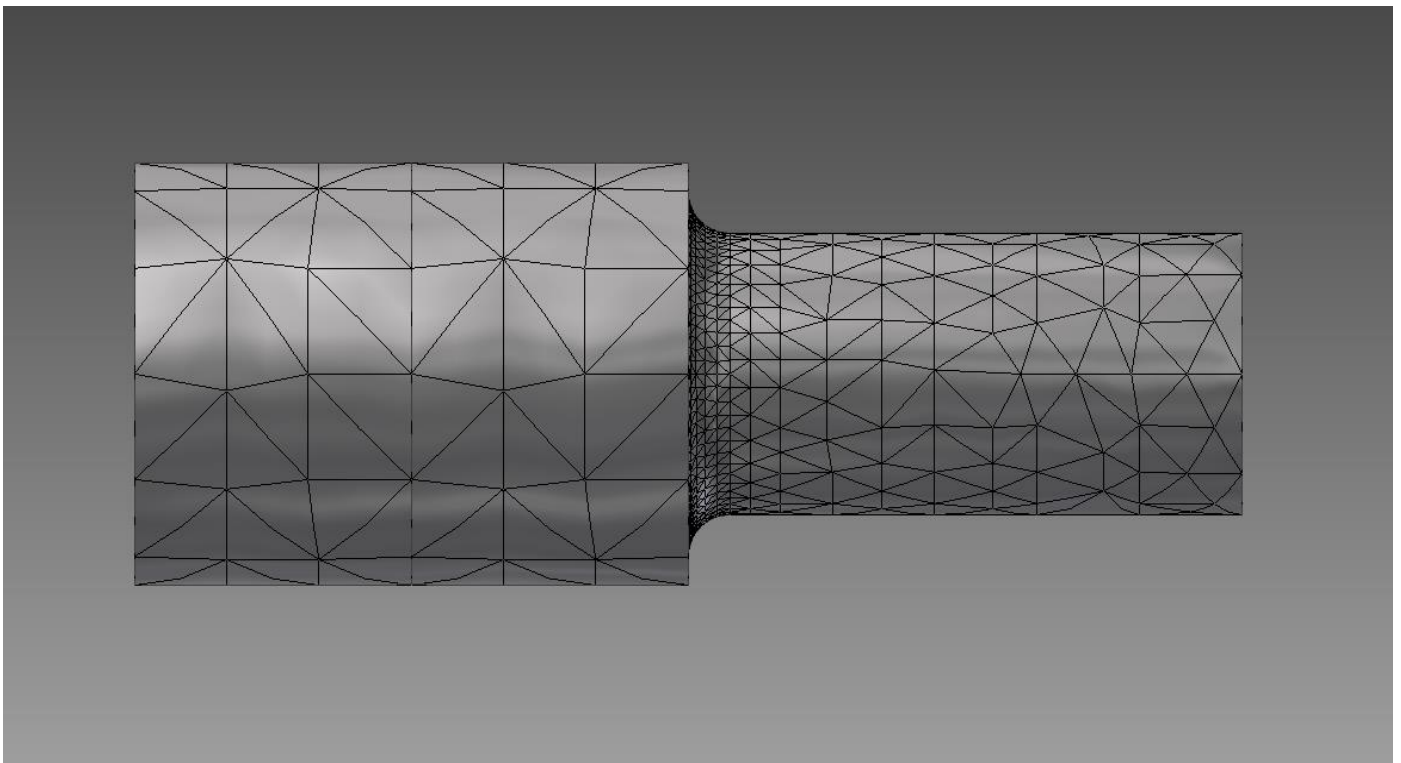
Εικόνα 3.9 Απεικόνιση του Mesh Control για το πρώτο μοντέλο.



Εικόνα 3.10 Απεικόνιση της πύκνωσης του πλέγματος μέσα στην εγκοπή.



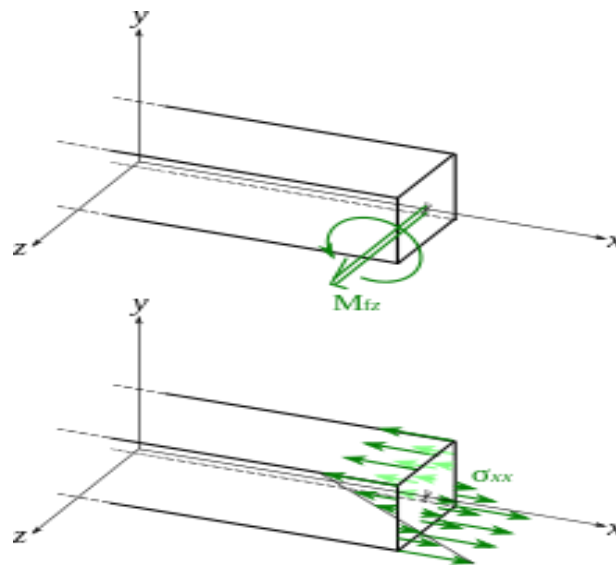
Εικόνα 3.11 Απεικόνιση του Mesh Control για το δεύτερο μοντέλο.



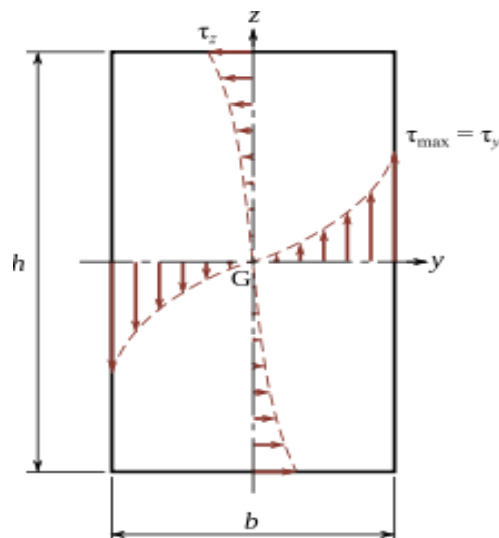
Εικόνα 3.12 Απεικόνιση της πυκνώσεως του πλέγματος στην εγκοπή.

3.3 Υπολογισμός τάσεων και σύγκλιση

Κατά την ολοκλήρωση των μοντελοποιήσεων στα πεπερασμένα στοιχεία κάθε μοντέλο διαφορετικών διαστάσεων θα πρέπει να εξετάζεται ως προς τις μέγιστες ορθές και διατμητικές του τάσεις τις οποίες προκαλεί η κάμψη και η στρέψη αντίστοιχα.

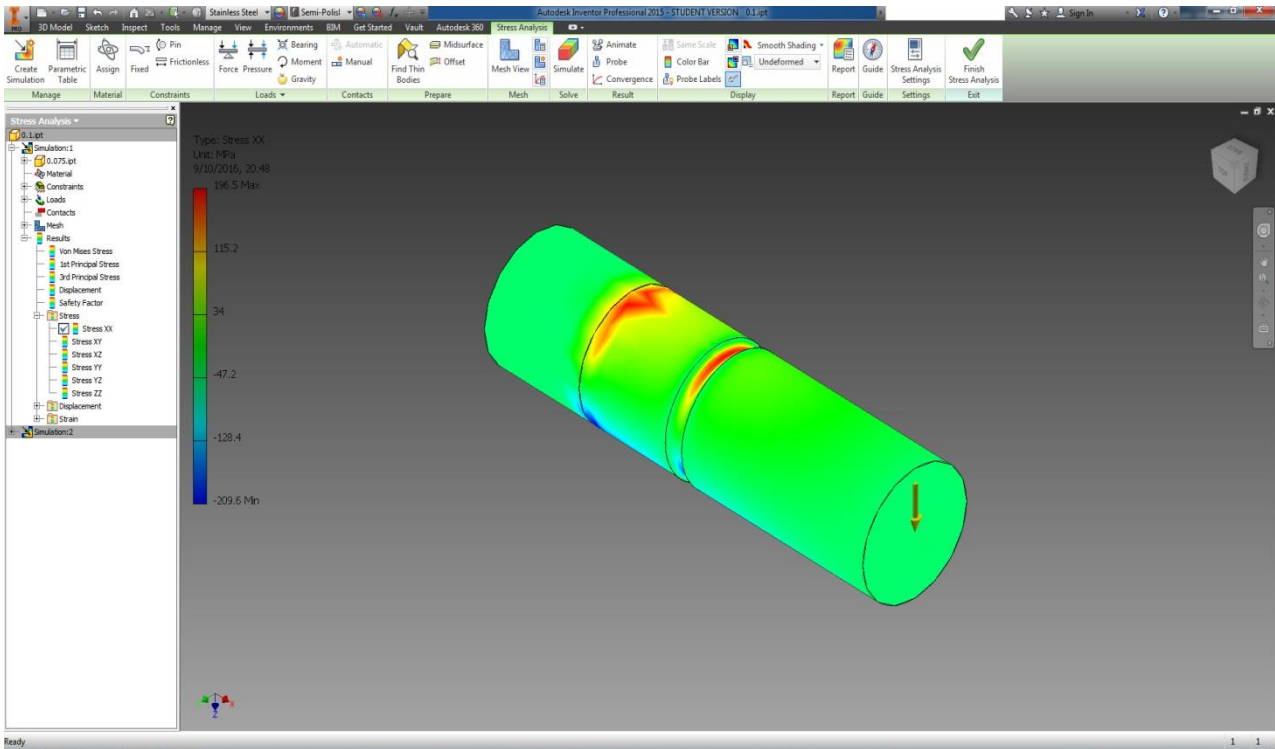


Εικόνα 3.13 Παράδειγμα ανάπτυξης ορθών τάσεων λόγω καμπτικής φόρτισης σε δοκό ορθογωνικής διατομής.



Εικόνα 3.14 Παράδειγμα ανάπτυξης διατμητικών τάσεων δοκό κάτω από συνθήκες στρεπτικής καταπόνησης.

Στις παρακάτω φωτογραφίες φαίνονται παραδείγματα από την εκτέλεση των δοκιμών μαζί με τα χρωματικά αποτελέσματα του προγράμματος, όπου με έντονο μπλε και κόκκινο φαίνονται οι μέγιστες τάσεις και οι οποίες συλλέχθηκαν.

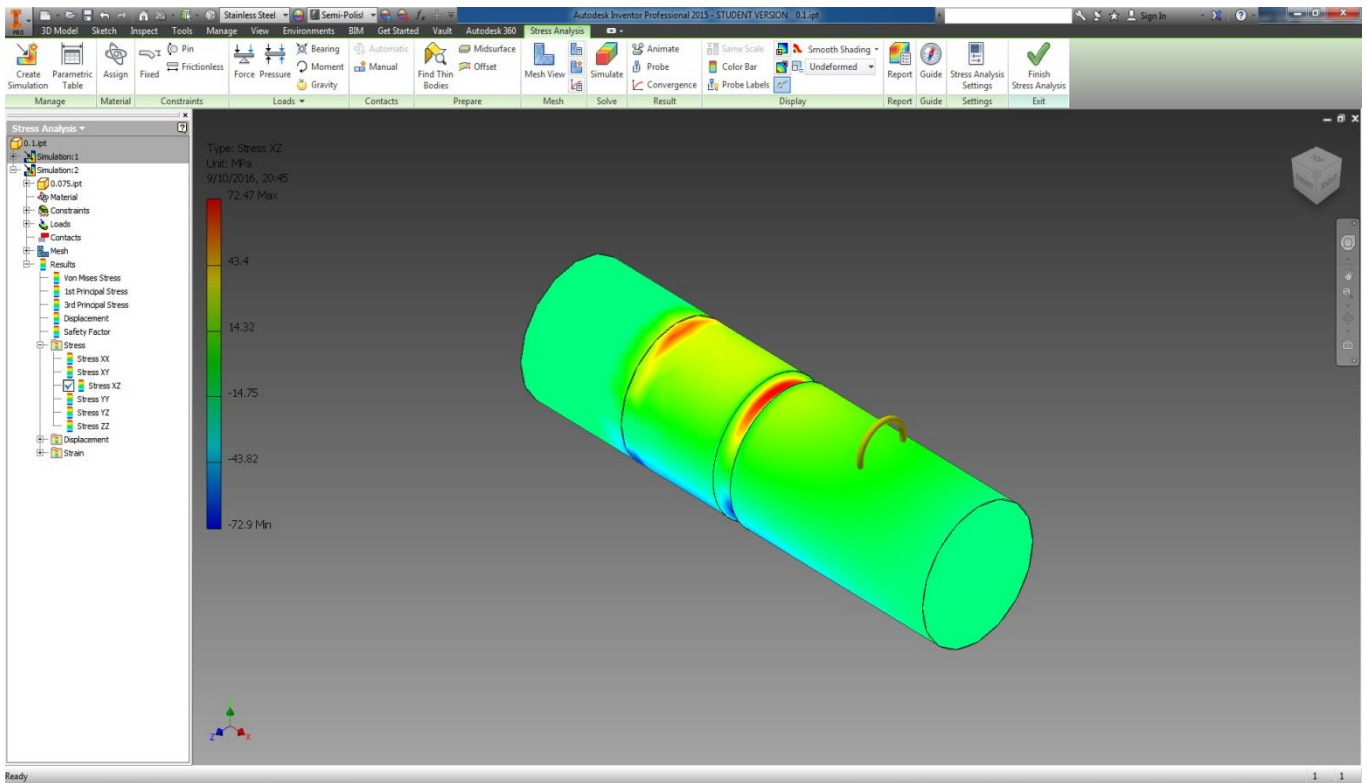


Εικόνα 3.15 Καταπόνηση δοκιμίου περιφερειακής αύλακας σε κάμψη.

- Περιγραφή: Εκτελώντας την παραπάνω εικονιζόμενη δοκιμή για όλα τα μοντέλα διαφορετικών διαστάσεων (μεταβολή των D και r) συλλέγονται τα αποτελέσματα των μέγιστων ορθών τάσεων σ_{xx} που αναπτύσσονται στην περιοχή της εγκοπής.
- Οι ονομαστικές τάσεις σ_{nom} υπολογίζονται από τον παρακάτω τύπο:

$$\sigma_{nom} = \frac{32M}{\pi d^3} = \frac{32 \cdot 500 \text{ N} \cdot 20 \text{ mm}}{3,14 \cdot (10 \text{ mm})^3} = 102 \text{ MPa}$$

Όπου M είναι η ροπή κάμψης που αναπτύσσεται ως το σημείο της εγκοπής (L/2), δηλαδή σε απόσταση 20 mm.

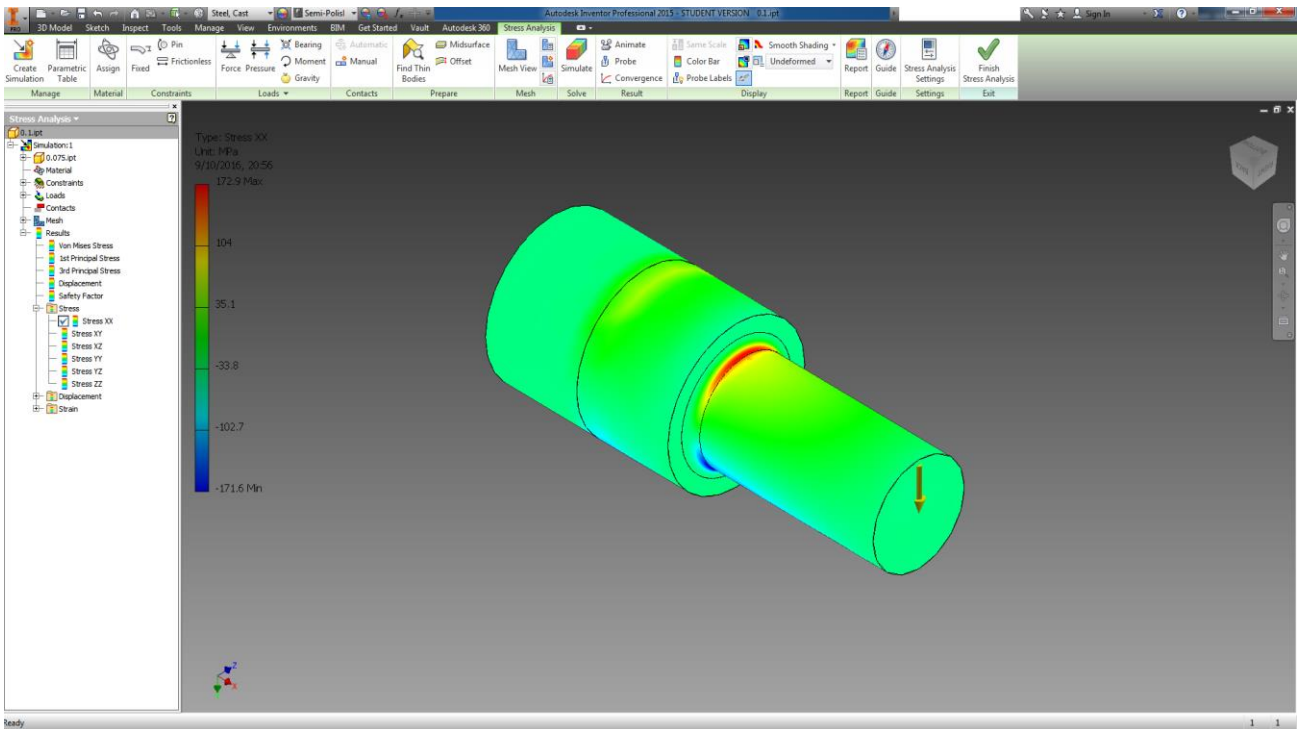


Εικόνα 3.16 Καταπόνηση δοκιμίου περιφερειακής αύλακας σε στρέψη.

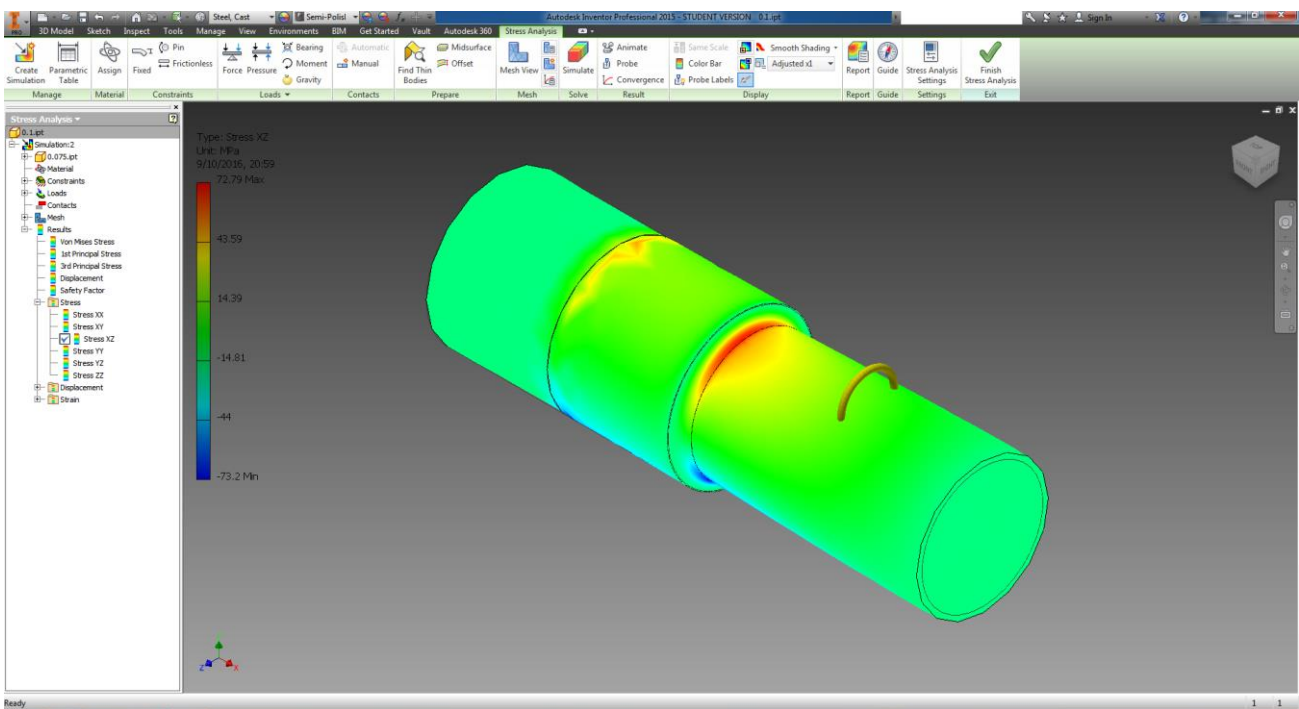
- Περιγραφή: Κατά τον ίδιο τρόπο πραγματοποιήθηκαν και οι δοκιμές στρέψης με τη διαφορά ότι στο μοντέλο τοποθετήθηκε συγκεντρωμένη ροπή στρέψης. Σε αυτήν την καταπόνηση καταγράφηκαν οι διατμητικές τάσεις τ_{xz} που είναι συγκεντρωμένες στην περιοχή της εγκοπής.
- Οι ονομαστικές τάσεις τ_{nom} υπολογίζονται από:

$$\tau_{nom} = \frac{16T}{\pi d^3} = \frac{16 \cdot 10.000 \text{ Nm}}{3,14 \cdot (10 \text{ mm})^3} = 51 \text{ Mpa}$$

Όπου T είναι η ροπή στρέψης που χρησιμοποιήθηκε κατά τις δοκιμές.



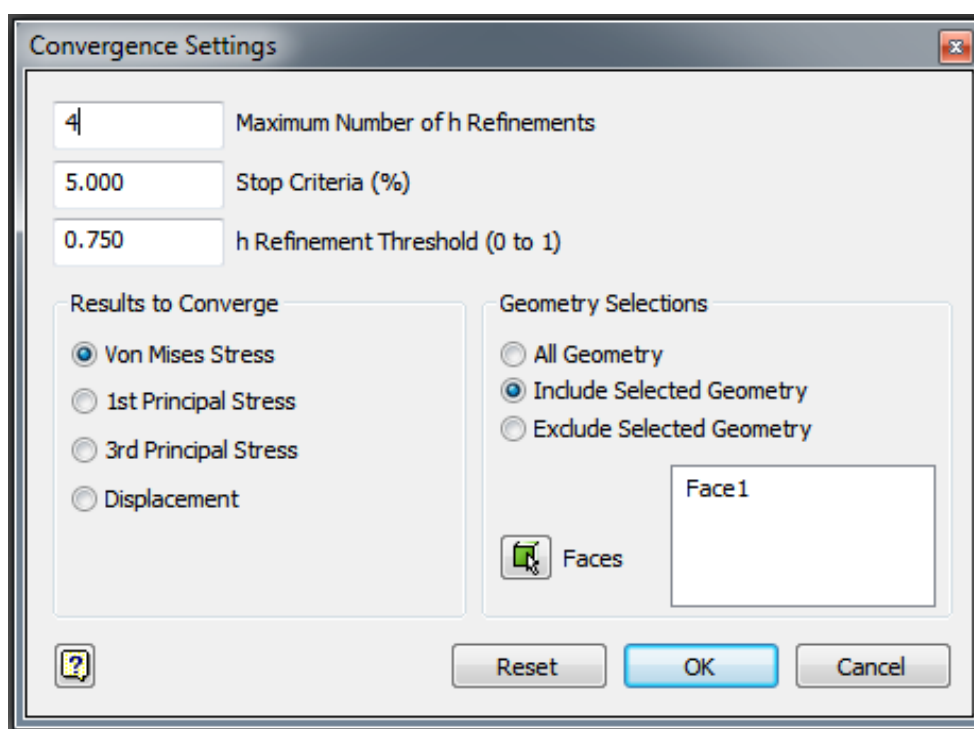
Εικόνα 3.17 Καταπόνηση δοκιμίου με διαβάθμιση διαμέτρου σε κάμψη.



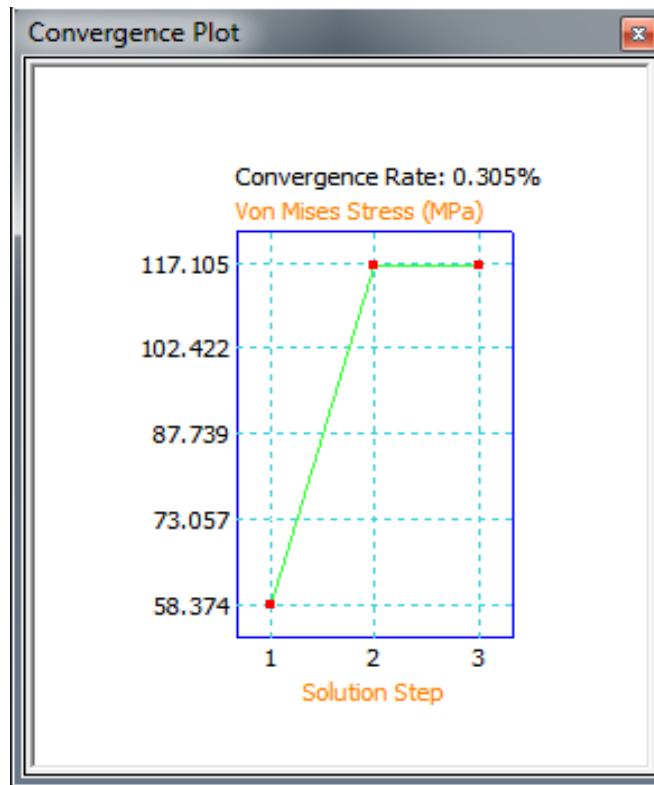
Εικόνα 3.18 Καταπόνηση δοκιμίου με διαβάθμιση διαμέτρου σε στρέψη.

- Με τον ίδιο τρόπο και με τα ίδια αριθμητικά στοιχεία πραγματοποιούνται οι δοκιμές κάμψης και στρέψης και στο δεύτερο μοντέλο.

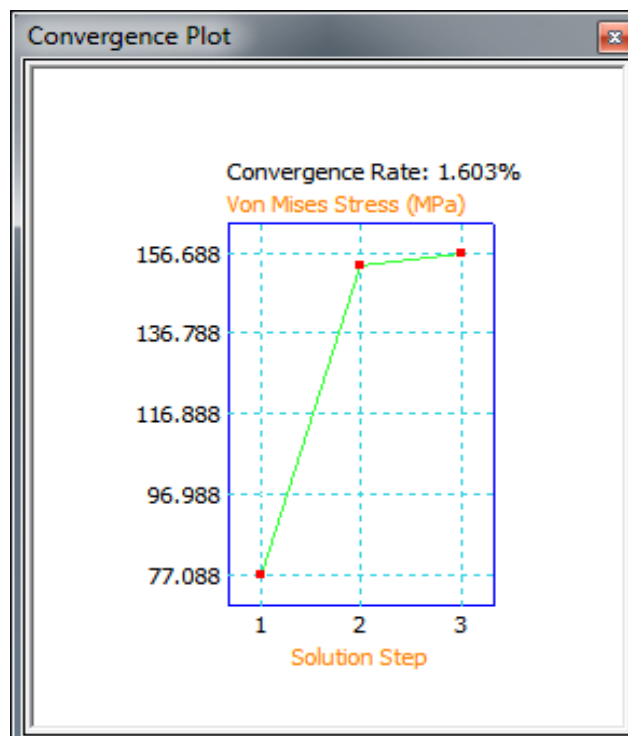
Μία άλλη εντολή που χρησιμοποιήθηκε και αφορά τις δοκιμές, είναι η σύγκλιση των αριθμητικών αποτελεσμάτων (Convergence Plot), της οποίας τα κριτήρια είναι να "τρέχει" την εκάστοτε δοκιμή και να σταματάει όταν η γραφική παράσταση των αποτελεσμάτων πάρει κλίση μικρότερη του 5% (Stop Criteria) και με την προϋπόθεση ότι η προσομοίωση θα επαναληφθεί το πολύ 4 φορές (Max. Number of h Refinements). Αυτές οι ρυθμίσεις είναι εφικτό να αλλάξουν οποιαδήποτε στιγμή από τον χρήστη του λογισμικού. Κάθε φορά που το πρόγραμμα επαναλαμβάνει κάποια δοκιμή, τότε μικραίνει το πλέγμα του αντικειμένου με βάση τον συντελεστή h ο οποίος παίρνει τιμές από 0 ως 1. Για παράδειγμα, αν ο συντελεστής αυτός πάρει την τιμή 0,5 αυτό σημαίνει ότι σε κάθε επανάληψη τα στοιχεία του πλέγματος γίνονται δύο φορές μικρότερα, δηλαδή θα αποτελεί το μισό σε μέγεθος από το προηγούμενό του.



Εικόνα 3.19 Απεικόνιση χρησιμοποιημένων ρυθμίσεων του Convergence Plot.



Εικόνα 3.20 Διάγραμμα Convergence Rate για δοκιμή κάμψης.



Εικόνα 3.21 Διάγραμμα Convergence Rate για δοκιμή στρέψης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4.1 Αριθμητικά αποτελέσματα

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται αναλυτικοί πίνακες με τα στοιχεία όλων των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν.

– Όσον αφορά τις δοκιμές κάμψης για το πρώτο μοντέλο έχουμε τα παρακάτω:

a/a	$\sigma_{\text{υπολ}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{πειρ}}$ (MPa)	D (mm)	d (mm)	r (mm)	D/d	r/d	F (N)	M_b (Nmm)	K_t
1	102	188,5	10,1	10	0,25	1,01	0,025	500	10000	1,848
2	102	156,6	10,1	10	0,5	1,01	0,05	500	10000	1,535
3	102	145,3	10,1	10	0,75	1,01	0,075	500	10000	1,425
4	102	139	10,1	10	1	1,01	0,1	500	10000	1,363
5	102	135,5	10,1	10	1,25	1,01	0,125	500	10000	1,328
6	102	133	10,1	10	1,5	1,01	0,15	500	10000	1,304
7	102	130	10,1	10	1,75	1,01	0,175	500	10000	1,275
8	102	127,8	10,1	10	2	1,01	0,2	500	10000	1,253
9	102	125,8	10,1	10	2,25	1,01	0,225	500	10000	1,233
10	102	123,9	10,1	10	2,5	1,01	0,25	500	10000	1,215
11	102	122,6	10,1	10	2,75	1,01	0,275	500	10000	1,202
12	102	121,7	10,1	10	3	1,01	0,3	500	10000	1,193

Πίνακας 4.1 Αριθμητικά στοιχεία δοκιμών κάμψης πρώτου μοντέλου για $D/d=1,01$.

a/a	$\sigma_{\text{υπολ}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{πειρ}}$ (MPa)	D (mm)	d (mm)	r (mm)	D/d	r/d	F (N)	M_b (Nmm)	K_t
1	102	241	10,3	10	0,25	1,03	0,025	500	10000	2,363
2	102	192,8	10,3	10	0,5	1,03	0,05	500	10000	1,890
3	102	171,5	10,3	10	0,75	1,03	0,075	500	10000	1,681
4	102	161,2	10,3	10	1	1,03	0,1	500	10000	1,580
5	102	155,8	10,3	10	1,25	1,03	0,125	500	10000	1,527
6	102	148,6	10,3	10	1,5	1,03	0,15	500	10000	1,457
7	102	145	10,3	10	1,75	1,03	0,175	500	10000	1,422
8	102	140,8	10,3	10	2	1,03	0,2	500	10000	1,380
9	102	137,5	10,3	10	2,25	1,03	0,225	500	10000	1,348
10	102	135,6	10,3	10	2,5	1,03	0,25	500	10000	1,329
11	102	133,7	10,3	10	2,75	1,03	0,275	500	10000	1,311
12	102	132,3	10,3	10	3	1,03	0,3	500	10000	1,297

Πίνακας 4.2 Αριθμητικά στοιχεία δοκιμών κάμψης πρώτου μοντέλου για $D/d=1,03$.

a/a	$\sigma_{\text{υπολ}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{πειρ}}$ (MPa)	D (mm)	d (mm)	r (mm)	D/d	r/d	F (N)	M_b (Nmm)	K_t
1	102	315,2	11	10	0,25	1,1	0,025	500	10000	3,090
2	102	239,6	11	10	0,5	1,1	0,05	500	10000	2,349
3	102	208,5	11	10	0,75	1,1	0,075	500	10000	2,044
4	102	190,1	11	10	1	1,1	0,1	500	10000	1,864
5	102	177	11	10	1,25	1,1	0,125	500	10000	1,735
6	102	168,8	11	10	1,5	1,1	0,15	500	10000	1,655
7	102	162,2	11	10	1,75	1,1	0,175	500	10000	1,590
8	102	156,7	11	10	2	1,1	0,2	500	10000	1,536
9	102	152,4	11	10	2,25	1,1	0,225	500	10000	1,494
10	102	148,5	11	10	2,5	1,1	0,25	500	10000	1,456
11	102	145,4	11	10	2,75	1,1	0,275	500	10000	1,425
12	102	143	11	10	3	1,1	0,3	500	10000	1,402

Πίνακας 4.3 Αριθμητικά στοιχεία δοκιμών κάμψης πρώτου μοντέλου για $D/d=1,1$.

a/a	$\sigma_{\text{υπολ}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{πειρ}}$ (MPa)	D (mm)	d (mm)	r (mm)	D/d	r/d	F (N)	M_b (Nmm)	K_t
1	102	382,6	22	10	0,25	> 2	0,025	500	10000	3,751
2	102	281,3	22	10	0,5	> 2	0,05	500	10000	2,758
3	102	235,8	22	10	0,75	> 2	0,075	500	10000	2,312
4	102	210,6	22	10	1	> 2	0,1	500	10000	2,065
5	102	192,9	22	10	1,25	> 2	0,125	500	10000	1,891
6	102	181,2	22	10	1,5	> 2	0,15	500	10000	1,776
7	102	171,9	22	10	1,75	> 2	0,175	500	10000	1,685
8	102	164,7	22	10	2	> 2	0,2	500	10000	1,615
9	102	158,7	22	10	2,25	> 2	0,225	500	10000	1,556
10	102	153,6	22	10	2,5	> 2	0,25	500	10000	1,506
11	102	150,2	22	10	2,75	> 2	0,275	500	10000	1,473
12	102	146,7	22	10	3	> 2	0,3	500	10000	1,438

Πίνακας 4.4 Αριθμητικά στοιχεία δοκιμών κάμψης πρώτου μοντέλου για $D/d=2,2$ (>2).

– Όσον αφορά τις δοκιμές στρέψης στο ίδιο μοντέλο ακολουθούν τα παρακάτω:

a/a	$\tau_{\text{υπολ}}$ (MPa)	$\tau_{\text{πειρ}}$ (MPa)	D (mm)	d (mm)	r (mm)	D/d	r/d	T (Nmm)	K_t
1	51	71,7	10,1	10	0,25	1,01	0,025	10000	1,406
2	51	66,2	10,1	10	0,5	1,01	0,05	10000	1,298
3	51	63	10,1	10	0,75	1,01	0,075	10000	1,235
4	51	60,8	10,1	10	1	1,01	0,1	10000	1,192
5	51	60	10,1	10	1,25	1,01	0,125	10000	1,176
6	51	59,3	10,1	10	1,5	1,01	0,15	10000	1,163
7	51	58,7	10,1	10	1,75	1,01	0,175	10000	1,151
8	51	58,1	10,1	10	2	1,01	0,2	10000	1,139
9	51	57,4	10,1	10	2,25	1,01	0,225	10000	1,125
10	51	57	10,1	10	2,5	1,01	0,25	10000	1,118
11	51	56,5	10,1	10	2,75	1,01	0,275	10000	1,108
12	51	56,2	10,1	10	3	1,01	0,3	10000	1,102

Πίνακας 4.5 Αριθμητικά στοιχεία δοκιμών στρέψης πρώτου μοντέλου για $D/d=1,01$.

α/α	$\tau_{\text{υπολ}}$ (MPa)	$\tau_{\text{πειρ}}$ (MPa)	D (mm)	d (mm)	r (mm)	D/d	r/d	T (Nmm)	K_t
1	51	104,5	11	10	0,25	1,1	0,025	10000	2,049
2	51	85,5	11	10	0,5	1,1	0,05	10000	1,676
3	51	77,5	11	10	0,75	1,1	0,075	10000	1,520
4	51	72,8	11	10	1	1,1	0,1	10000	1,427
5	51	69,6	11	10	1,25	1,1	0,125	10000	1,365
6	51	67,5	11	10	1,5	1,1	0,15	10000	1,324
7	51	65,7	11	10	1,75	1,1	0,175	10000	1,288
8	51	64,4	11	10	2	1,1	0,2	10000	1,263
9	51	63,3	11	10	2,25	1,1	0,225	10000	1,241
10	51	62,4	11	10	2,5	1,1	0,25	10000	1,224
11	51	61,6	11	10	2,75	1,1	0,275	10000	1,208
12	51	60,9	11	10	3	1,1	0,3	10000	1,194

Πίνακας 4.6 Αριθμητικά στοιχεία δοκιμών στρέψης πρώτου μοντέλου για $D/d=1,1$.

α/α	$\tau_{\text{υπολ}}$ (MPa)	$\tau_{\text{πειρ}}$ (MPa)	D (mm)	d (mm)	r (mm)	D/d	r/d	T (Nmm)	K_t
1	51	130	22	10	0,25	> 2	0,025	10000	2,549
2	51	100,1	22	10	0,5	> 2	0,05	10000	1,963
3	51	87,4	22	10	0,75	> 2	0,075	10000	1,714
4	51	80,1	22	10	1	> 2	0,1	10000	1,571
5	51	75,5	22	10	1,25	> 2	0,125	10000	1,480
6	51	72,1	22	10	1,5	> 2	0,15	10000	1,414
7	51	69,4	22	10	1,75	> 2	0,175	10000	1,361
8	51	67,6	22	10	2	> 2	0,2	10000	1,325
9	51	66,1	22	10	2,25	> 2	0,225	10000	1,296
10	51	64,8	22	10	2,5	> 2	0,25	10000	1,271
11	51	63,7	22	10	2,75	> 2	0,275	10000	1,249
12	51	62,8	22	10	3	> 2	0,3	10000	1,231

Πίνακας 4.7 Αριθμητικά στοιχεία δοκιμών στρέψης πρώτου μοντέλου για $D/d=2.2 (>2)$

– Τα παρακάτω αφορούν τις δοκιμές κάμψης για το δεύτερο μοντέλο.

a/a	$\sigma_{\text{υπολ}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{πειρ}}$ (MPa)	D (mm)	d (mm)	r (mm)	D/d	r/d	F (N)	M_b (Nmm)	K_t
1	102	149,3	10,1	10	0,25	1,01	0,025	500	10000	1,464
2	102	133,5	10,1	10	0,5	1,01	0,05	500	10000	1,309
3	102	125,6	10,1	10	0,75	1,01	0,075	500	10000	1,231
4	102	122,8	10,1	10	1	1,01	0,1	500	10000	1,204
5	102	120,9	10,1	10	1,25	1,01	0,125	500	10000	1,185
6	102	119,5	10,1	10	1,5	1,01	0,15	500	10000	1,172
7	102	118,6	10,1	10	1,75	1,01	0,175	500	10000	1,163
8	102	117,3	10,1	10	2	1,01	0,2	500	10000	1,150
9	102	116,2	10,1	10	2,25	1,01	0,225	500	10000	1,139
10	102	115,2	10,1	10	2,5	1,01	0,25	500	10000	1,129
11	102	114,3	10,1	10	2,75	1,01	0,275	500	10000	1,121
12	102	113,5	10,1	10	3	1,01	0,3	500	10000	1,113

Πίνακας 4.8 Αριθμητικά στοιχεία δοκιμών κάμψης δεύτερου μοντέλου για $D/d=1,01$.

a/a	$\sigma_{\text{υπολ}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{πειρ}}$ (MPa)	D (mm)	d (mm)	r (mm)	D/d	r/d	F (N)	M_b (Nmm)	K_t
1	102	176,5	10,3	10	0,25	1,03	0,025	500	10000	1,730
2	102	156	10,3	10	0,5	1,03	0,05	500	10000	1,529
3	102	145,4	10,3	10	0,75	1,03	0,075	500	10000	1,425
4	102	138	10,3	10	1	1,03	0,1	500	10000	1,353
5	102	133,9	10,3	10	1,25	1,03	0,125	500	10000	1,313
6	102	129,8	10,3	10	1,5	1,03	0,15	500	10000	1,273
7	102	126,9	10,3	10	1,75	1,03	0,175	500	10000	1,244
8	102	123,7	10,3	10	2	1,03	0,2	500	10000	1,213
9	102	121,6	10,3	10	2,25	1,03	0,225	500	10000	1,192
10	102	120,8	10,3	10	2,5	1,03	0,25	500	10000	1,184
11	102	119,4	10,3	10	2,75	1,03	0,275	500	10000	1,171
12	102	118,3	10,3	10	3	1,03	0,3	500	10000	1,160

Πίνακας 4.9 Αριθμητικά στοιχεία δοκιμών κάμψης δεύτερου μοντέλου για $D/d=1,03$.

α/α	$\sigma_{\text{υπολ}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{πειρ}}$ (MPa)	D (mm)	d (mm)	r (mm)	D/d	r/d	F (N)	M_b (Nmm)	K_t
1	102	224,6	11	10	0,25	1,1	0,025	500	10000	2,202
2	102	188,1	11	10	0,5	1,1	0,05	500	10000	1,844
3	102	167,7	11	10	0,75	1,1	0,075	500	10000	1,644
4	102	155,9	11	10	1	1,1	0,1	500	10000	1,528
5	102	147,8	11	10	1,25	1,1	0,125	500	10000	1,449
6	102	142	11	10	1,5	1,1	0,15	500	10000	1,392
7	102	137,1	11	10	1,75	1,1	0,175	500	10000	1,344
8	102	133,5	11	10	2	1,1	0,2	500	10000	1,309
9	102	130,3	11	10	2,25	1,1	0,225	500	10000	1,277
10	102	127,6	11	10	2,5	1,1	0,25	500	10000	1,251
11	102	124,2	11	10	2,75	1,1	0,275	500	10000	1,218
12	102	122,3	11	10	3	1,1	0,3	500	10000	1,199

Πίνακας 4.10 Αριθμητικά στοιχεία δοκιμών κάμψης δεύτερου μοντέλου για $D/d=1,1$.

α/α	$\sigma_{\text{υπολ}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{πειρ}}$ (MPa)	D (mm)	d (mm)	r (mm)	D/d	r/d	F (N)	M_b (Nmm)	K_t
1	102	297,2	15	10	0,25	1,5	0,025	500	10000	2,914
2	102	222,7	15	10	0,5	1,5	0,05	500	10000	2,183
3	102	192,3	15	10	0,75	1,5	0,075	500	10000	1,885
4	102	172,9	15	10	1	1,5	0,1	500	10000	1,695
5	102	161,5	15	10	1,25	1,5	0,125	500	10000	1,583
6	102	152,2	15	10	1,5	1,5	0,15	500	10000	1,492
7	102	144	15	10	1,75	1,5	0,175	500	10000	1,412
8	102	137,5	15	10	2	1,5	0,2	500	10000	1,348
9	102	132,5	15	10	2,25	1,5	0,225	500	10000	1,299
10	102	128,2	15	10	2,5	1,5	0,25	500	10000	1,257
11	102	124	15	10	2,75	1,5	0,275	500	10000	1,216
12	102	120,3	15	10	3	1,5	0,3	500	10000	1,179

Πίνακας 4.11 Αριθμητικά στοιχεία δοκιμών κάμψης δεύτερου μοντέλου για $D/d=1,5$.

a/a	$\sigma_{\text{υπολ}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{πειρ}}$ (MPa)	D (mm)	d (mm)	r (mm)	D/d	r/d	F (N)	M_b (Nmm)	K_t
1	102	311,6	30	10	0,25	3	0,025	500	10000	3,055
2	102	228,8	30	10	0,5	3	0,05	500	10000	2,243
3	102	196,5	30	10	0,75	3	0,075	500	10000	1,926
4	102	177,6	30	10	1	3	0,1	500	10000	1,741
5	102	163,8	30	10	1,25	3	0,125	500	10000	1,606
6	102	153,5	30	10	1,5	3	0,15	500	10000	1,505
7	102	145,5	30	10	1,75	3	0,175	500	10000	1,426
8	102	138,6	30	10	2	3	0,2	500	10000	1,359
9	102	133,2	30	10	2,25	3	0,225	500	10000	1,306
10	102	128,1	30	10	2,5	3	0,25	500	10000	1,256
11	102	123,8	30	10	2,75	3	0,275	500	10000	1,214
12	102	120,1	30	10	3	3	0,3	500	10000	1,177

Πίνακας 4.12 Αριθμητικά στοιχεία δοκιμών κάμψης δεύτερου μοντέλου για $D/d=3$.

a/a	$\sigma_{\text{υπολ}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{πειρ}}$ (MPa)	D (mm)	d (mm)	r (mm)	D/d	r/d	F (N)	M_b (Nmm)	K_t
1	102	309,4	60	10	0,25	6	0,025	500	10000	3,033
2	102	229,5	60	10	0,5	6	0,05	500	10000	2,250
3	102	196,7	60	10	0,75	6	0,075	500	10000	1,928
4	102	177,3	60	10	1	6	0,1	500	10000	1,738
5	102	163,3	60	10	1,25	6	0,125	500	10000	1,601
6	102	153,5	60	10	1,5	6	0,15	500	10000	1,505
7	102	145,3	60	10	1,75	6	0,175	500	10000	1,425
8	102	138,5	60	10	2	6	0,2	500	10000	1,358
9	102	132,9	60	10	2,25	6	0,225	500	10000	1,303
10	102	128	60	10	2,5	6	0,25	500	10000	1,255
11	102	123,7	60	10	2,75	6	0,275	500	10000	1,213
12	102	120	60	10	3	6	0,3	500	10000	1,176

Πίνακας 4.13 Αριθμητικά στοιχεία δοκιμών κάμψης δεύτερου μοντέλου για $D/d=6$.

– Τα παρακάτω αφορούν τις δοκιμές στρέψης για το δεύτερο μοντέλο.

α/α	$\tau_{\text{υπολ}}$ (MPa)	$\tau_{\text{πειρ}}$ (MPa)	D (mm)	d (mm)	r (mm)	D/d	r/d	T (Nmm)	K_t
1	51	85,6	10,9	10	0,25	1,09	0,025	10000	1,678
2	51	75,2	10,9	10	0,5	1,09	0,05	10000	1,475
3	51	70,6	10,9	10	0,75	1,09	0,075	10000	1,384
4	51	67,9	10,9	10	1	1,09	0,1	10000	1,331
5	51	65,8	10,9	10	1,25	1,09	0,125	10000	1,290
6	51	64,7	10,9	10	1,5	1,09	0,15	10000	1,269
7	51	63,8	10,9	10	1,75	1,09	0,175	10000	1,251
8	51	63,1	10,9	10	2	1,09	0,2	10000	1,237
9	51	62,7	10,9	10	2,25	1,09	0,225	10000	1,229
10	51	62,3	10,9	10	2,5	1,09	0,25	10000	1,222
11	51	61,8	10,9	10	2,75	1,09	0,275	10000	1,212
12	51	61,5	10,9	10	3	1,09	0,3	10000	1,206

Πίνακας 4.14 Αριθμητικά στοιχεία δοκιμών στρέψης δεύτερου μοντέλου για $D/d=1,09$.

α/α	$\tau_{\text{υπολ}}$ (MPa)	$\tau_{\text{πειρ}}$ (MPa)	D (mm)	d (mm)	r (mm)	D/d	r/d	T (Nmm)	K_t
1	51	90,2	12	10	0,25	1,2	0,025	10000	1,769
2	51	78,6	12	10	0,5	1,2	0,05	10000	1,541
3	51	73,7	12	10	0,75	1,2	0,075	10000	1,445
4	51	70,4	12	10	1	1,2	0,1	10000	1,380
5	51	68,2	12	10	1,25	1,2	0,125	10000	1,337
6	51	66,5	12	10	1,5	1,2	0,15	10000	1,304
7	51	65,4	12	10	1,75	1,2	0,175	10000	1,282
8	51	65	12	10	2	1,2	0,2	10000	1,275
9	51	64,1	12	10	2,25	1,2	0,225	10000	1,257
10	51	63,6	12	10	2,5	1,2	0,25	10000	1,247
11	51	63	12	10	2,75	1,2	0,275	10000	1,235
12	51	62,3	12	10	3	1,2	0,3	10000	1,222

Πίνακας 4.15 Αριθμητικά στοιχεία δοκιμών στρέψης δεύτερου μοντέλου για $D/d=1,2$.

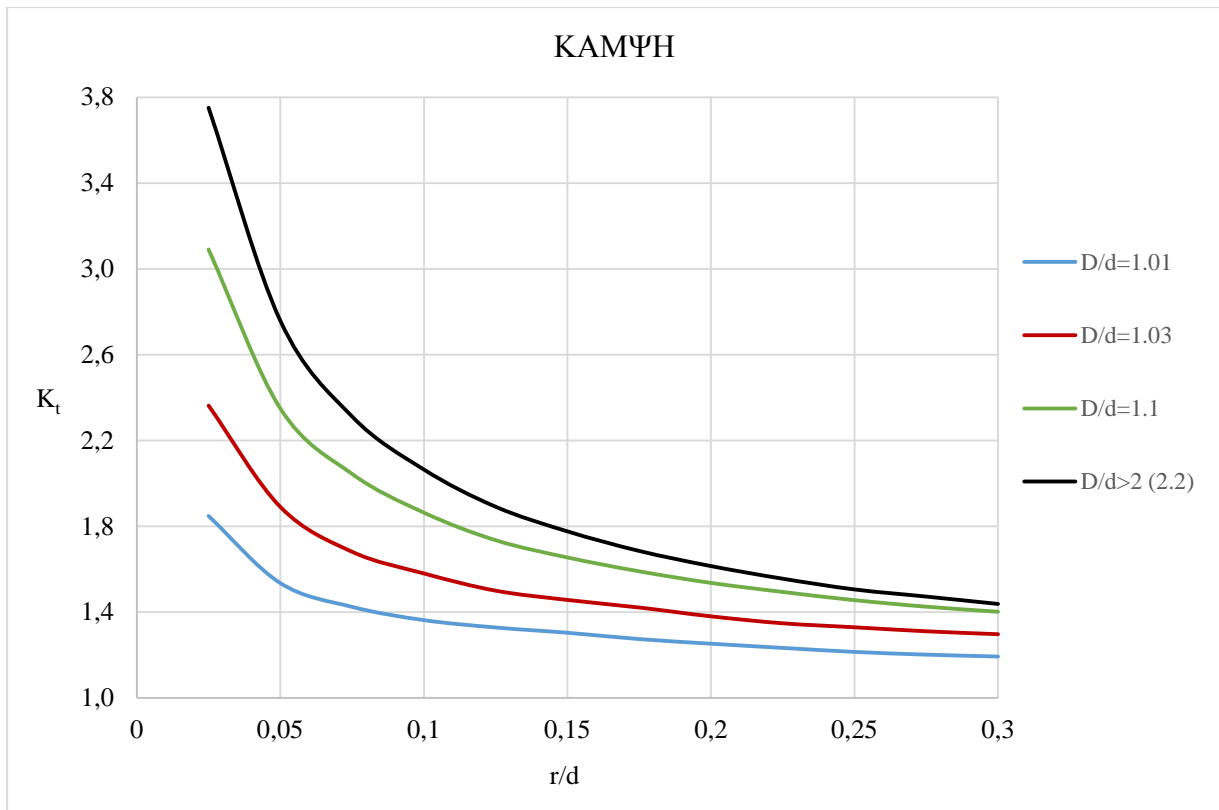
a/a	$\tau_{\text{υπολ}}$ (MPa)	$\tau_{\text{πειρ}}$ (MPa)	D (mm)	d (mm)	r (mm)	D/d	r/d	T (Nmm)	K_t
1	51	109,9	20	10	0,25	2	0,025	10000	2,155
2	51	89,4	20	10	0,5	2	0,05	10000	1,753
3	51	78,8	20	10	0,75	2	0,075	10000	1,545
4	51	72,5	20	10	1	2	0,1	10000	1,422
5	51	69,9	20	10	1,25	2	0,125	10000	1,371
6	51	67,6	20	10	1,5	2	0,15	10000	1,325
7	51	66,5	20	10	1,75	2	0,175	10000	1,304
8	51	65,5	20	10	2	2	0,2	10000	1,284
9	51	65	20	10	2,25	2	0,225	10000	1,275
10	51	64,3	20	10	2,5	2	0,25	10000	1,261
11	51	63,7	20	10	2,75	2	0,275	10000	1,249
12	51	63,4	20	10	3	2	0,3	10000	1,243

Πίνακας 4.16 Αριθμητικά στοιχεία δοκιμών στρέψης δεύτερου μοντέλου για $D/d=2$.

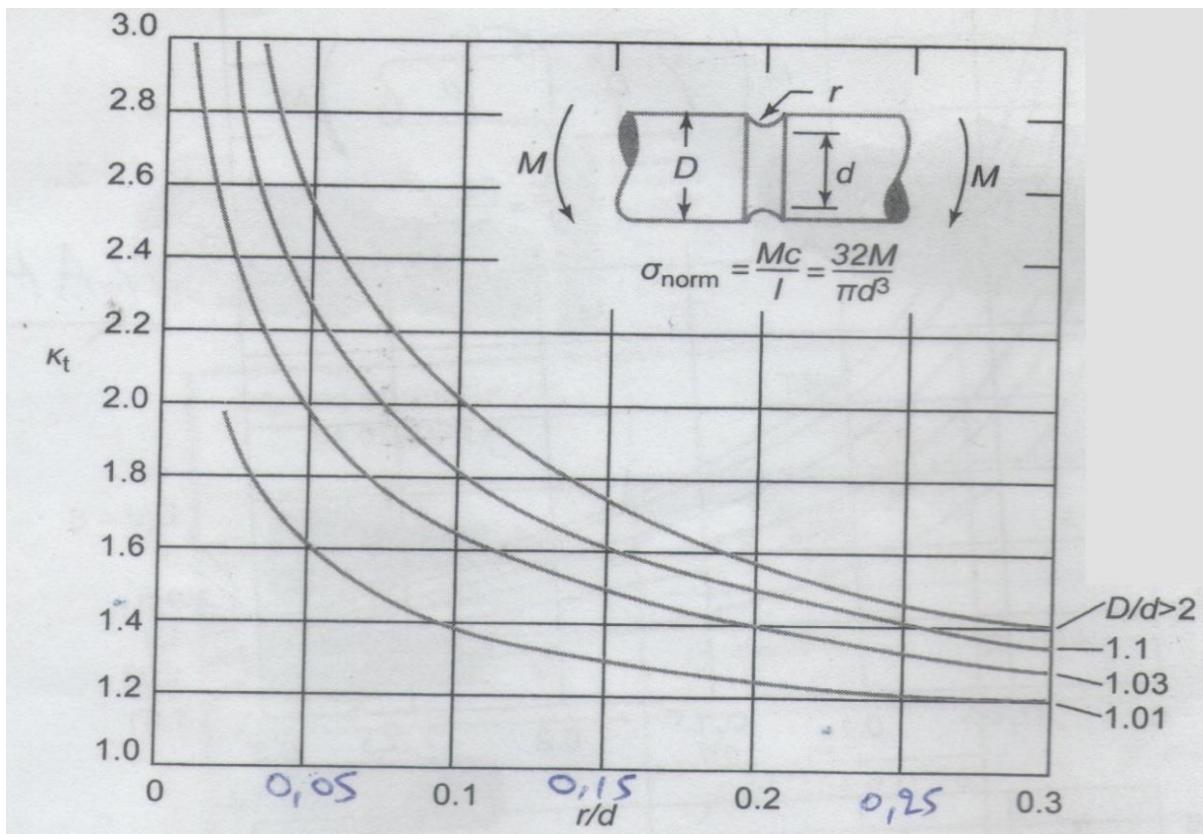
4.2 Σύγκριση διαγραμμάτων – Συμπεράσματα

Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα τα οποία προέκυψαν από τις συγκεντρωμένες αριθμητικές τιμές των πινάκων που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα και τα οποία θα συγκριθούν με εκείνα που επισυνάφτηκαν στο κεφάλαιο 2.

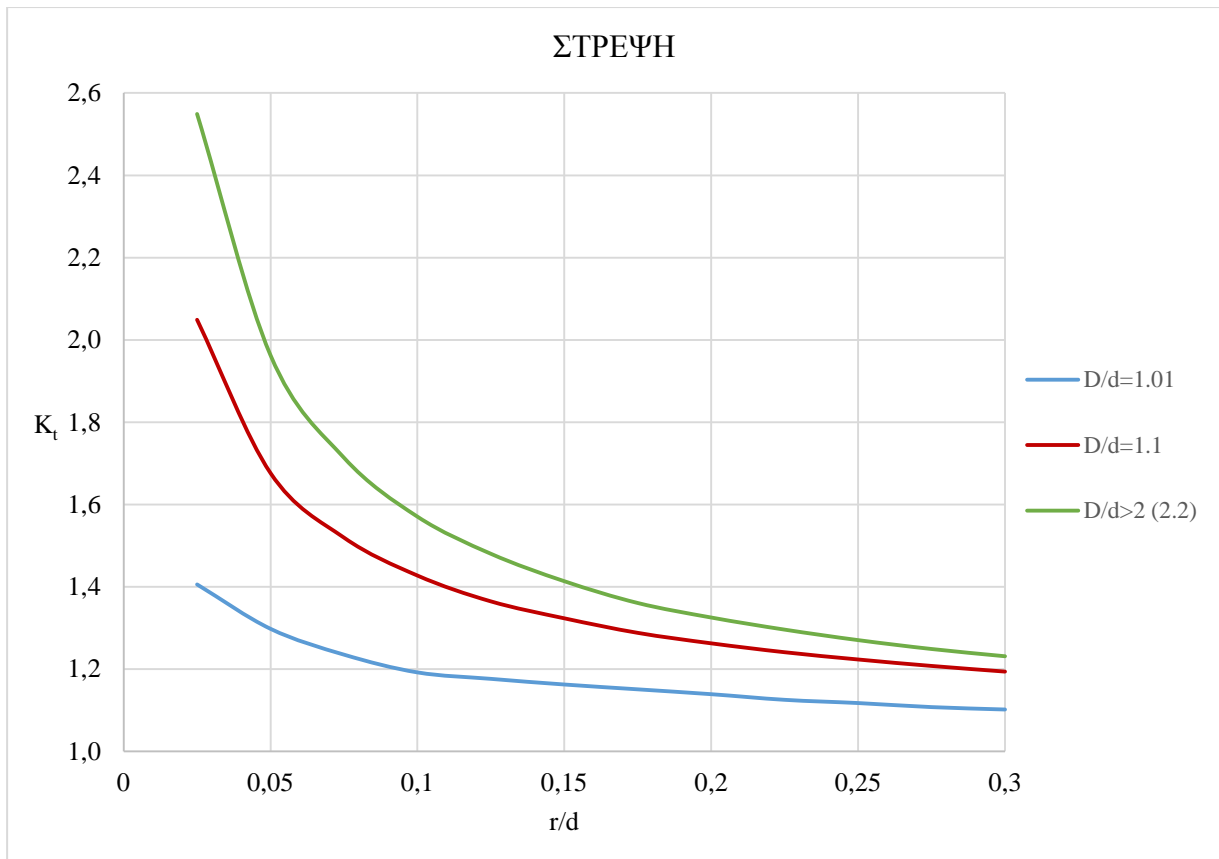
Έπειτα, θα αναλυθεί ο βαθμός στον οποίο ταιριάζουν οι τιμές του συντελεστή K_t και θα παρουσιαστούν τα συμπεράσματα από τυχόν αποκλίσεις που θα έχουν δημιουργηθεί μεταξύ των γραφημάτων.



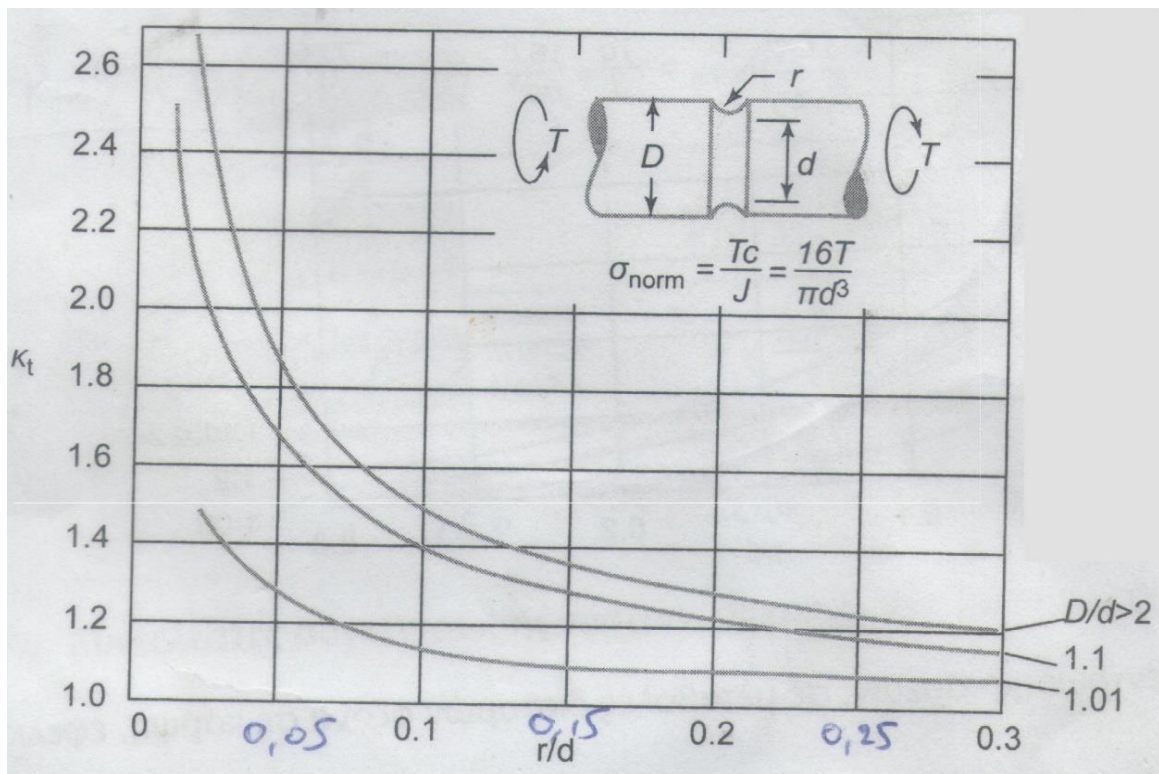
Σχήμα 4.1 Διάγραμμα κάμψης για το πρώτο μοντέλο.



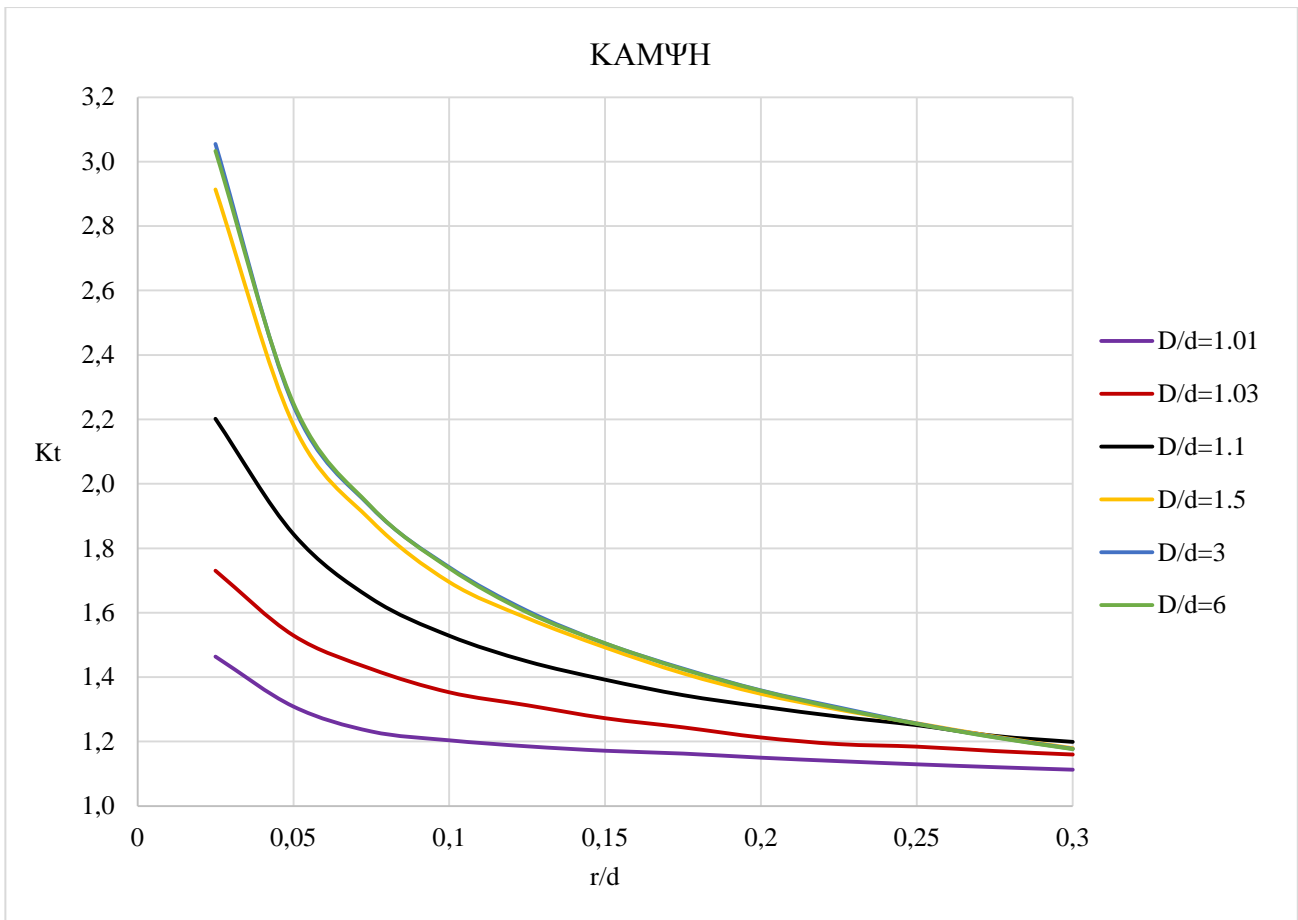
Σχήμα 4.2 Διάγραμμα κάμψης K_t για περιφερειακή αόλακα.



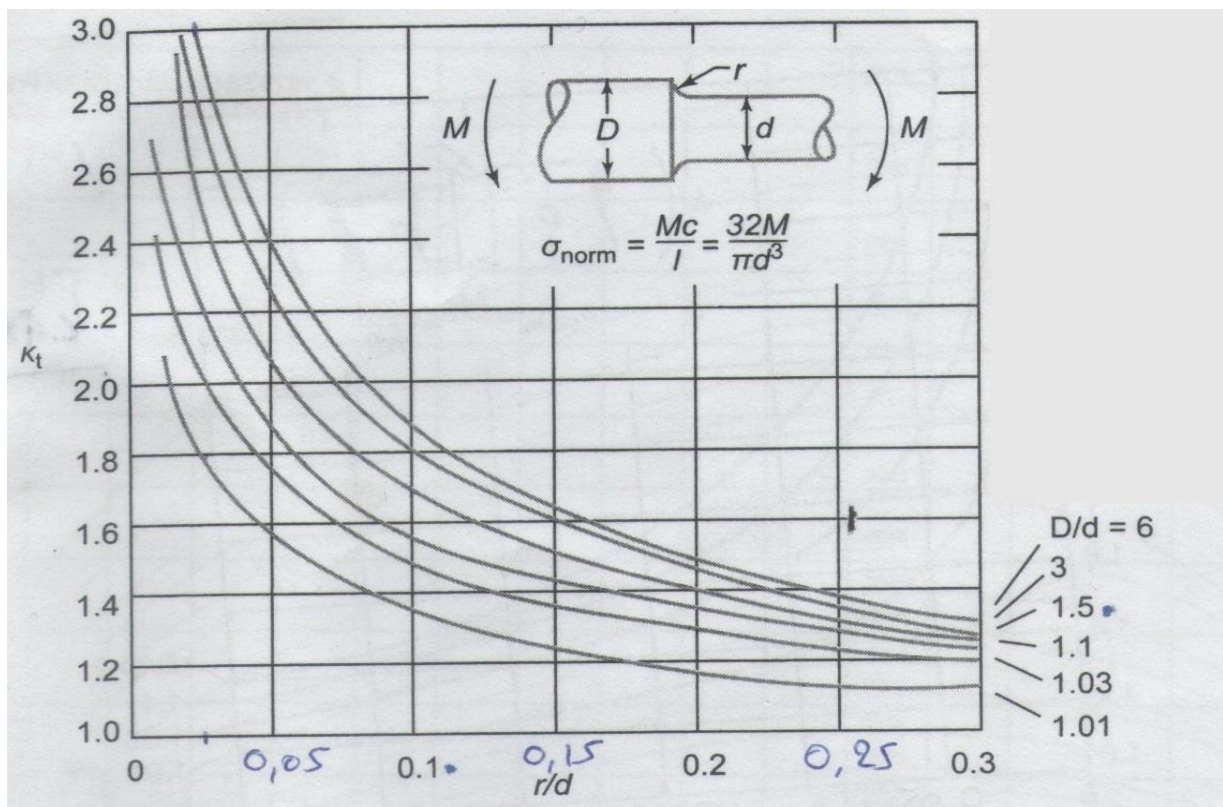
Σχήμα 4.3 Διάγραμμα στρέψης με τον συντελεστή K_t για περιφερειακή αόλακα.



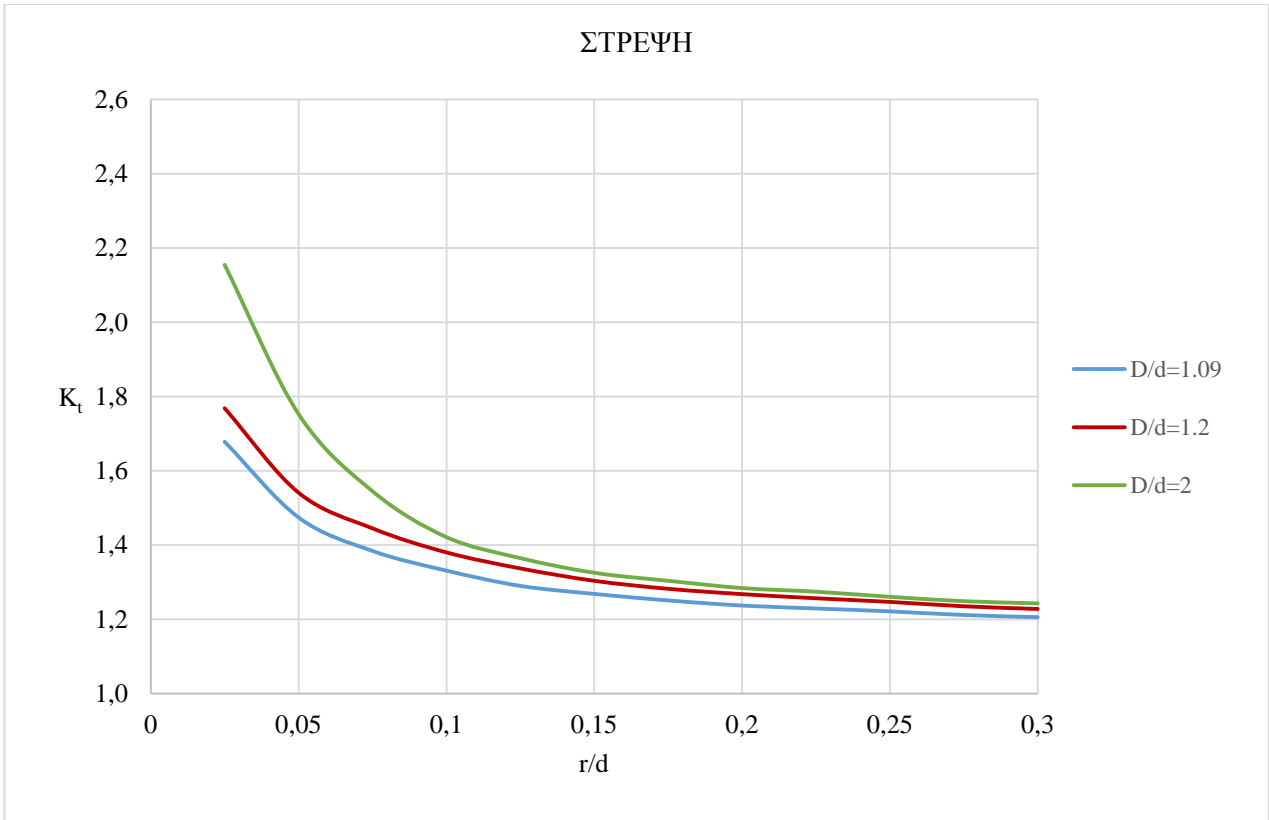
Σχήμα 4.4 Διάγραμμα στρέψης συντελεστή K_t για το πρώτο μοντέλο.



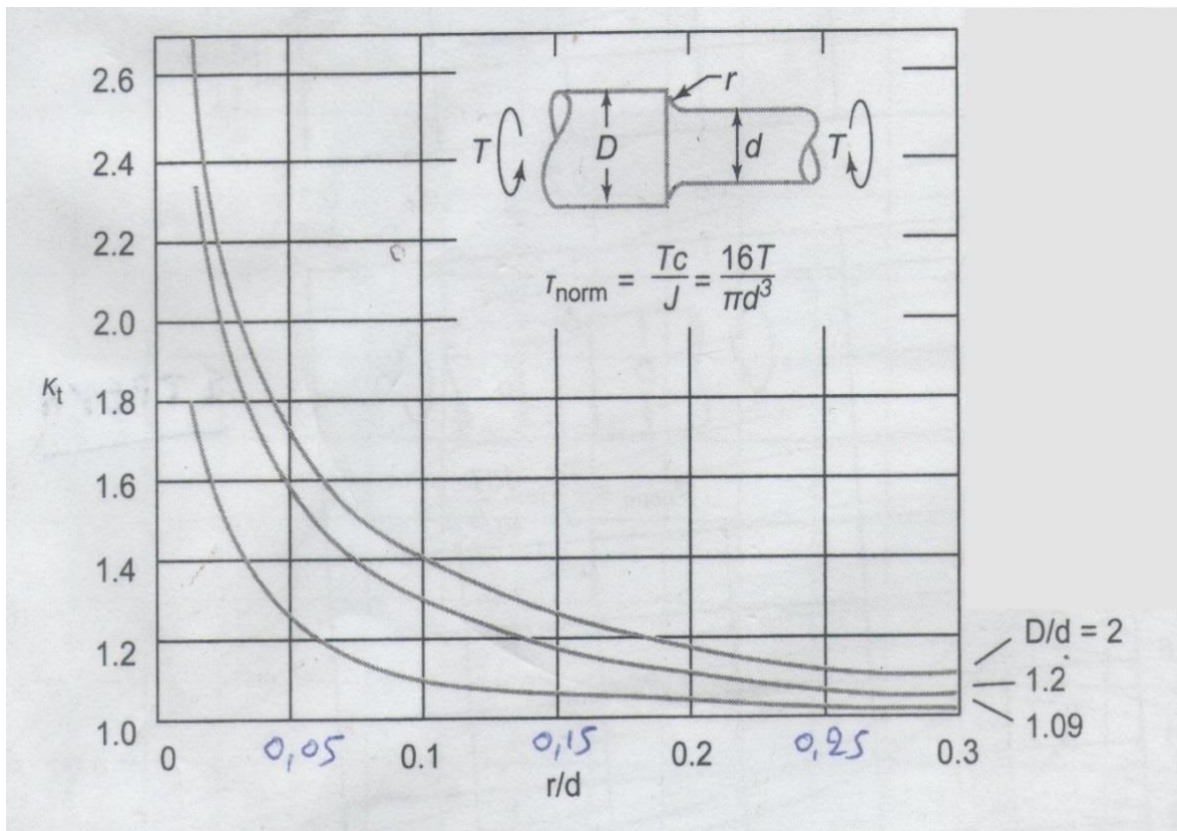
Σχήμα 4.5 Διάγραμμα κάμψης με συντελεστή K_t για το δεύτερο μοντέλο.



Σχήμα 4.6 Διάγραμμα κάμψης για το δεύτερο μοντέλο.



Σχήμα 4.7 Διάγραμμα στρέψης του συντελεστή K_t για το δεύτερο μοντέλο.



Σχήμα 4.8 Διάγραμμα στρέψης για το δεύτερο μοντέλο.

Αναλυτικότερα, όσο αφορά την περίπτωση της **περιφερειακής αύλακας** τα διαγράμματα παρουσιάζουν πάρα πολύ μικρές αποκλίσεις τόσο σε κάμψη όσο και στη στρέψη. Παρόλα αυτά, το ίδιο δεν ισχύει για την περίπτωση της **διαβάθμισης διαμέτρου** καθώς οι γραφικές παραστάσεις στο διάγραμμα της κάμψης συμπίπτουν για τις τιμές $D/d=3$ και $D/d=6$, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι για $D/d>2$ όλες οι τιμές οι οποίες αναπαράγονται από το λογισμικό τείνουν προς ένα σημείο. Για τις δοκιμές στρέψης του ίδιου μοντέλου, παρατηρούνται στο διάγραμμα αυξημένες τιμές σε σχέση με τις προβλεπόμενες, συνεπώς και οι γραφικές παραστάσεις είναι αντίστοιχα μετατοπισμένες προς τα πάνω.

Επομένως, οι πιθανές αιτίες δημιουργίας των αποκλίσεων αυτών είναι:

- 1) Τυχόν ατέλειες της κρυσταλλικής δομής του πραγματικού υλικού που χρησιμοποιήθηκε για τα πειράματα.
- 2) Τραχύτητα επιφάνειας η οποία δεν μπορεί να συμπεριληφθεί στους υπολογισμούς του προγράμματος μοντελοποίησης.
- 3) Σε εξωτερικούς παράγοντες όπως π.χ. οι θερμοκρασιακές μεταβολές, ο τρόπος κατασκευής των κομματιών κλπ.

Συμπερασματικά, φαίνεται πως η συγκέντρωση τάσεων και ο συντελεστής K_t μπορούν να προβλεφθούν και να υπολογιστούν με αρκετά μεγάλη ακρίβεια καθώς τα διαγράμματα παρουσίασαν ικανοποιητική ομοιότητα με τα ήδη κατασκευασμένα από προηγούμενες δοκιμές.

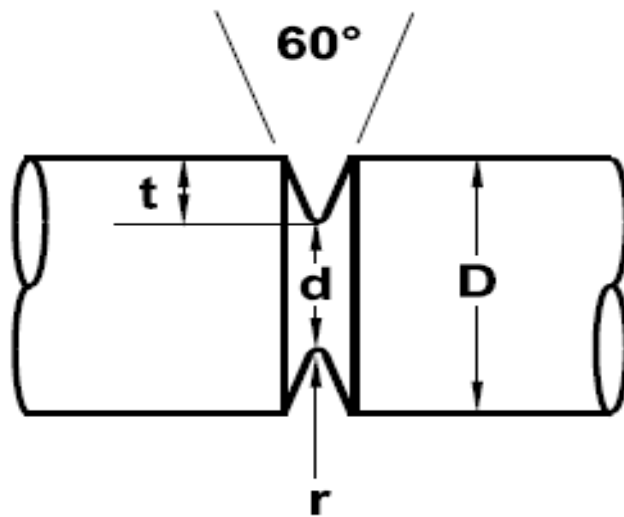
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται μερικές εργασίες και άρθρα που έχουν δημοσιευθεί διεθνώς κι έχουν αρκετά κοινά σημεία στο κύριο αντικείμενό τους με αυτό της παρούσας πτυχιακής. Παρακάτω παρατίθενται εικόνες και μια σύντομη περιγραφή για την κάθε εργασία καθώς και οι τίτλοι αυτών.

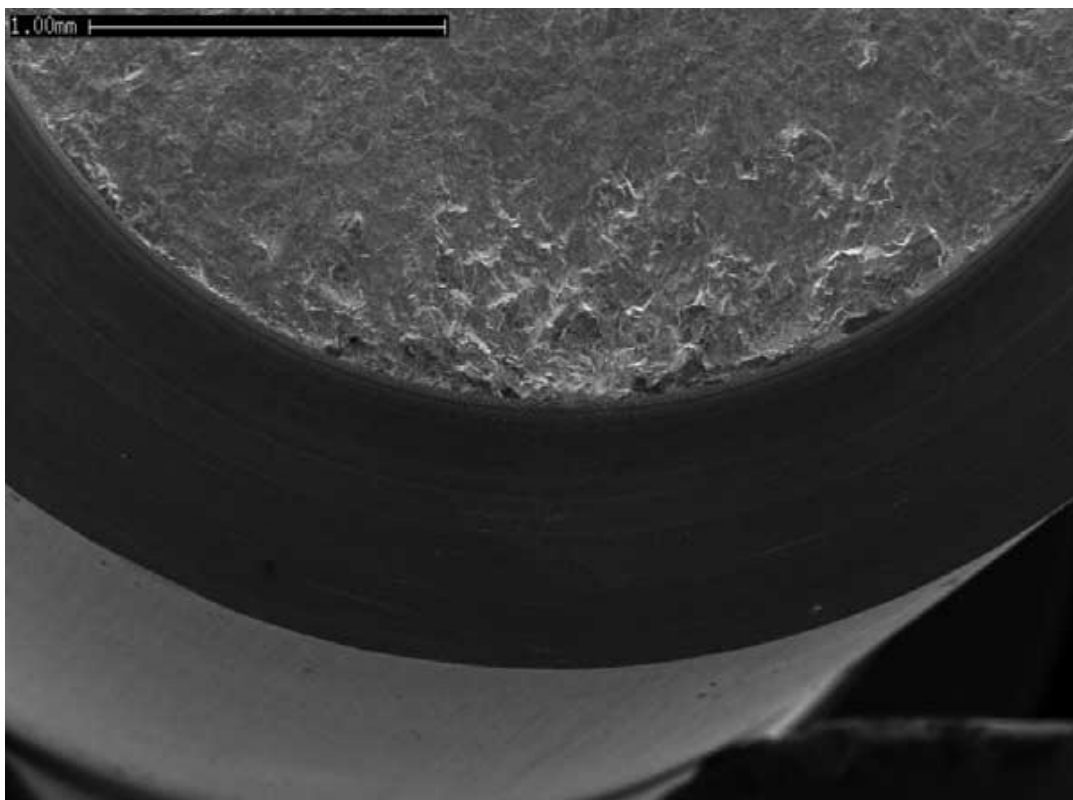
5.1 «Notch size effects on high cycle fatigue limit stress of Udimet 720»

Στη συγκεκριμένη εργασία μελετήθηκαν νικελιούχα δοκίμια κυλινδρικής μορφής και εμπορικής ονομασίας Udimet 720, με τρία διαφορετικά μεγέθη εγκοπής και συντελεστή $K_t = 2.74$, με σκοπό να προσδιοριστεί η επιρροή του μεγέθους μιας εγκοπής στο όριο κόπωσης. Οι αναπτυσσόμενες τάσεις υπολογίστηκαν με τη χρήση των πεπερασμένων στοιχείων (FEA) και τα δείγματα αναλύθηκαν χρησιμοποιώντας μικροσκοπία σάρωσης ηλεκτρονίων (SEM). Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι για την ίδια τιμή του K_t , το μέγεθος της εγκοπής μπορεί ελάχιστα να επηρεάσει το όριο αντοχής όταν υπάρχει πλαστική παραμόρφωση στη ρίζα της εγκοπής.

Επίσης, τα αποτελέσματα της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων και της μικροσκοπίας έδειξαν ότι οι συνέπειες του μεγέθους μιας εγκοπής εξαρτώνται από έναν περίπλοκο συνδυασμό πολλών παραγόντων. [6]



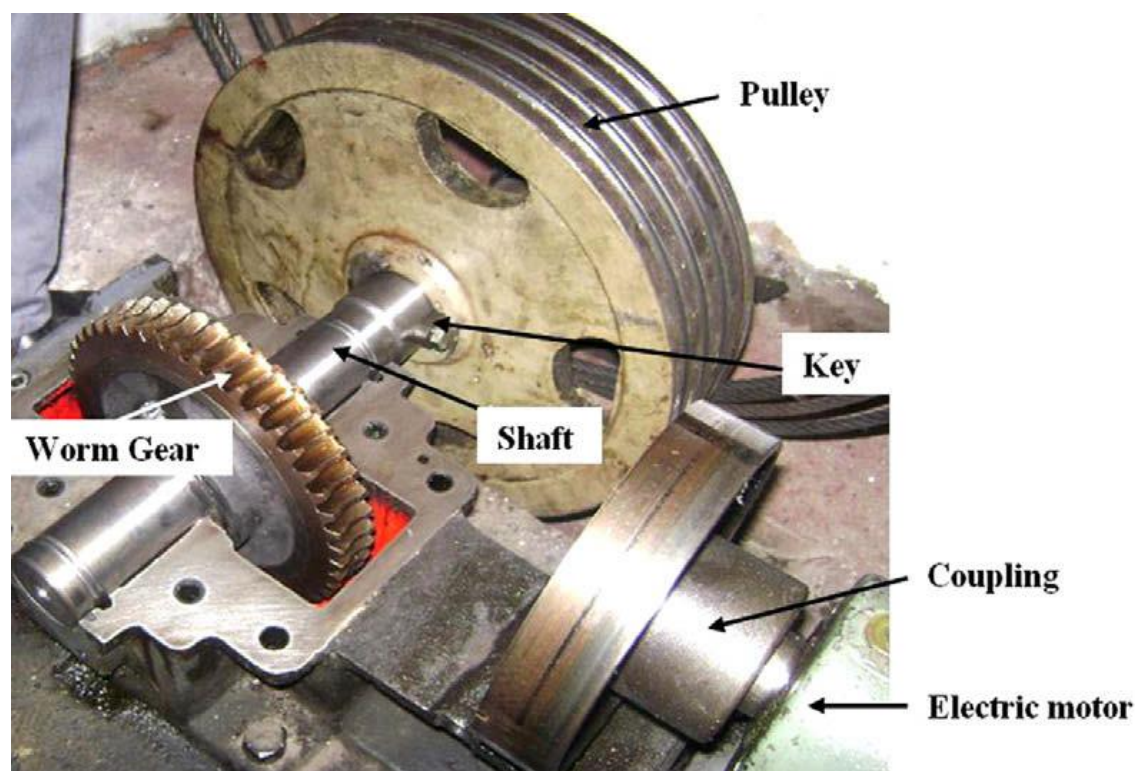
Εικόνα 5.1 Περιφερειακή εγκοπή γωνίας 60°.



Εικόνα 5.2 Δημιουργία ρωγμών λόγω κόπωσης στην άκρη της εγκοπής.

5.2 «Failure analysis of an elevator drive shaft»

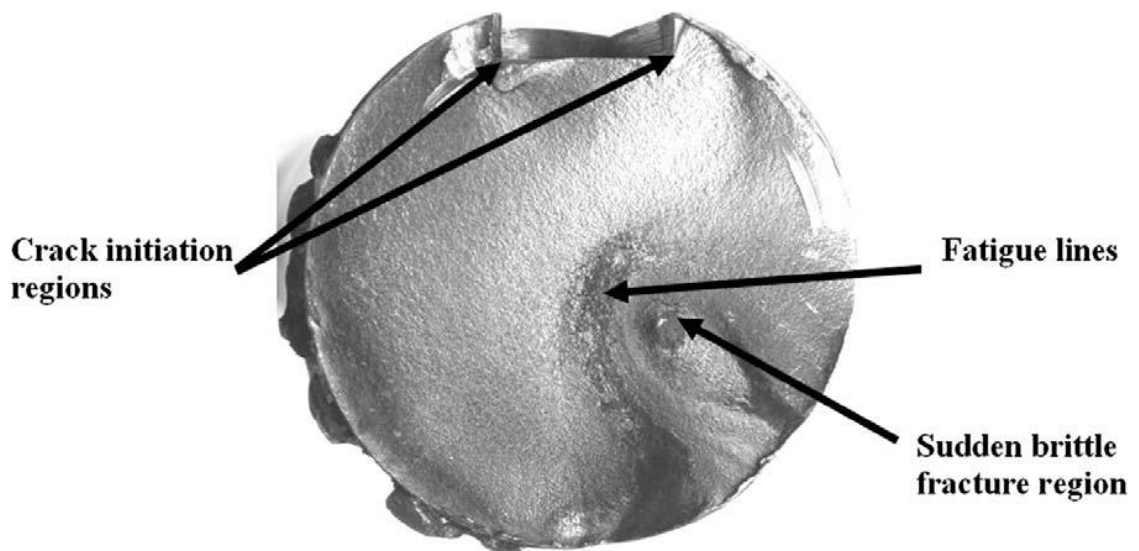
Στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται λεπτομερής ανάλυση αστοχίας του άξονα κίνησης ενός ανελκυστήρα και η οποία αστοχία παρουσιάστηκε στην εγκοπή (αύλακα) της ατράκτου. Έπειτα από οπτική διερεύνηση της επιφάνειας θραύσης βγήκε το συμπέρασμα ότι η θραύση επήλθε μετά από κόπωση λόγω καμπτικών και στρεπτικών φορτίσεων, όπου η ρωγμή ξεκίνησε να αναπτύσσεται στην άκρη της εγκοπής και το οποίο προκύπτει από το γεγονός ότι σε μία τέτοια κατασκευή ασκούνται μεγάλες δυνάμεις και ροπές στα κινητήρια συστήματα (άτρακτοι). Ωστόσο, πραγματοποιήθηκε ανάλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (FEM) όπου τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τα υπολογισθέντα, όπως επίσης υπολογίστηκαν το όριο αντοχής και ο συντελεστής ασφαλείας. Οι λόγοι της αστοχίας που προκύπτουν δηλώνουν είτε λανθασμένη σχεδίαση είτε ελαττωματική κατασκευή της εγκοπής (χαμηλή ακτίνα καμπυλότητας αυξάνοντας την επιρροή της εγκοπής στη δημιουργία τάσεων). Συμπερασματικά, η επίδραση της μεταβολής της ακτίνας καμπυλότητας μπορεί να προβλεφθεί με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (FEM). [7]



Εικόνα 5.3 Σύστημα μετάδοσης κίνησης ανελκυστήρα.



Εικόνα 5.4 Απεικόνιση αστοχίας ατράκτου 22 mm στη περιοχή της εγκοπής.



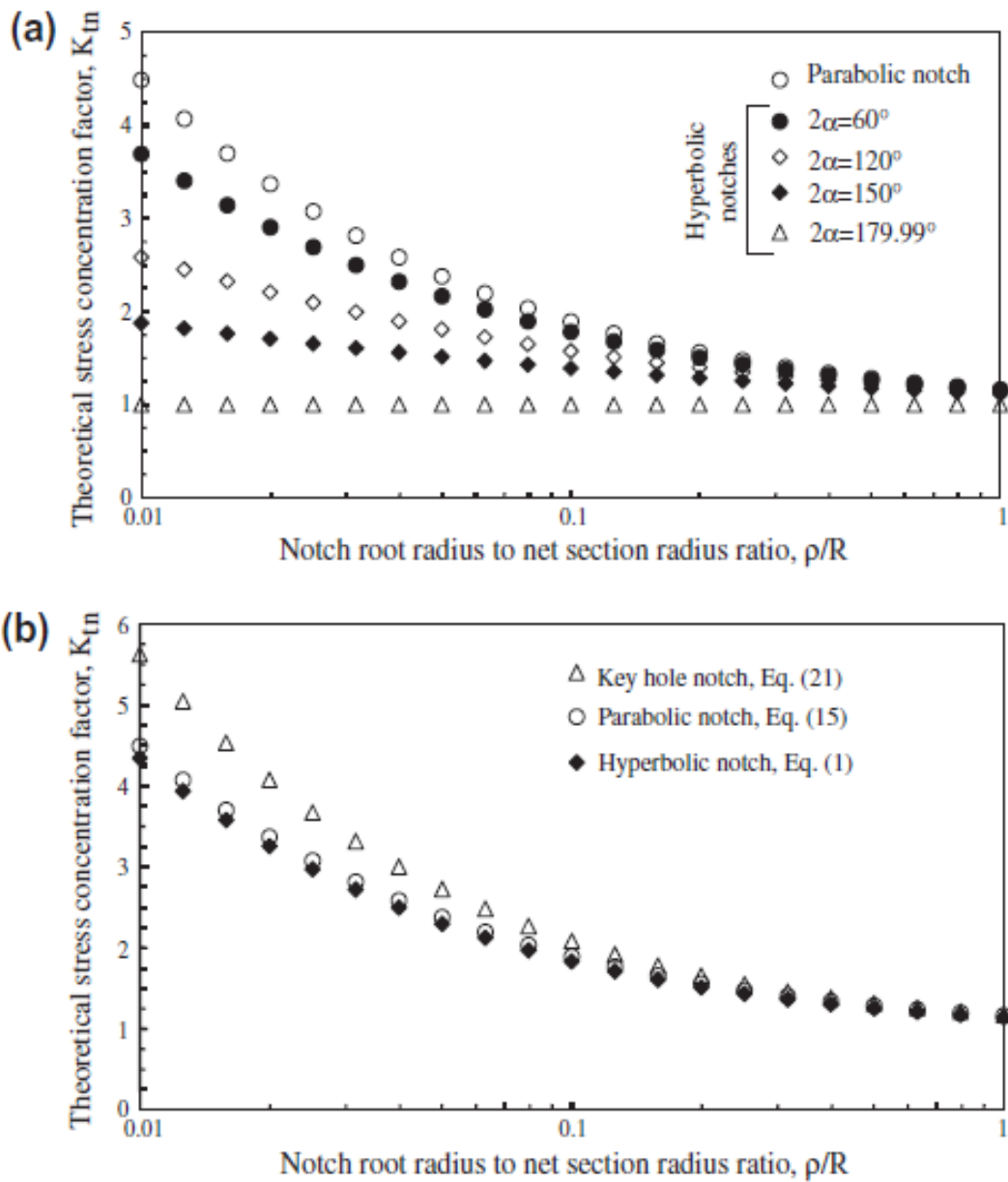
Εικόνα 5.5 Επιφάνεια θραύσης ατράκτου και σημείο δημιουργίας ρωγμών.

5.3 «Fatigue notch sensitivity and the notch size effect»

Η παρούσα εργασία έχει ως αντικείμενο ασχολίας μία εναλλακτική προσέγγιση της επιρροής των εγκοπών καθώς και της ευαισθησίας αυτών, βασισμένη σε μια μελέτη ανάπτυξης του κλεισίματος των ρωγμών κόπωσης. Όπως είναι γνωστό, ο συντελεστής εγκοπής για κόπωση K_F , ο οποίος υπολογίζεται από τον λόγο σ_{w0}/σ_w , όπου σ_{w0} είναι οι τάσεις στο μοντέλο αναφοράς και σ_w είναι οι τάσεις που αναπτύσσονται σε μοντέλο με εγκοπή, είναι μικρότερος από τον θεωρητικό συντελεστή συγκέντρωσης τάσεων K_t . Εμπειρικοί κανόνες υπολογισμού του συντελεστή K_F έχουν προταθεί από τους Peterson, Kuhn και Hardrath οι περιλαμβάνουν την ακτίνα καμπυλότητας της εγκοπής και μία σταθερά υλικού. [8]

5.4 «Practical expressions for the notch stress concentration factors of round bars under torsion»

Το θέμα της εργασίας αυτής αφορά τους συντελεστές συγκέντρωσης τάσεων για μοντέλα που φέρουν εγκοπή σχήματος U και V και έχουν κυκλική διατομή. Η μελέτη και ανάλυση των παραπάνω περιπτώσεων γίνεται κάτω από στρεπτική φόρτιση. Μία ακριβής σχέση είναι που συσχετίζει τους γενικευμένους συντελεστές έντασης τάσεων για κοινές εγκοπές (παραβολικού, ημιελλειπτικού και υπερβολικού σχήματος) που χαρακτηρίζονται από ένα συγκεκριμένο μαθηματικό προφίλ. Έπειτα, γίνεται προσπάθεια για μια νέα πιο αναλυτική συσχέτιση μεταξύ του συντελεστή έντασης τάσεων εγκοπής (NSIF) και των μέγιστων αναπτυσσόμενων διατμητικών τάσεων στην άκρη της εγκοπής. [9]



Εικόνα 5.6 Διαγράμματα διάφορων τύπων εγκοπών που αφορούν τον θεωρητικό συντελεστή συγκέντρωσης τάσεων K_{tn}

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Pilkey W., Pilkey D., «Peterson's Stress Concentration Factors», Third Edition, John Wiley & Sons, 2008
2. Thum A., «Festigkeitprüfung bei schwingender Beanspruchung. Siebel, Handbuch der Werkstoffprüfung», Verlag Springer Berlin, 1939
3. Fish J., Belytschko T., «A first course in finite elements», John Wiley & Sons, 2007
4. Παπαδόπουλος Χ., «Στοιχεία Μηχανών – Εισαγωγή στο Σχεδιασμό Μηχανών», Τόμος Α', Εκδόσεις Τζιόλα, 2009
5. Γραϊκούσης Ρ., «Στοιχεία Μηχανών Ι», Εκδόσεις Γιαχούδη, 1983
6. Weiju R., Theodore N., «Notch size effects on high cycle fatigue limit stress of Udimet 720», Air Force Research Laboratory, USA, 2003
7. Göksenli A., Eryürek I.B., «Failure analysis of an elevator drive shaft», Faculty of Mechanical Engineering, Istanbul, 2008
8. McEvily A.J., Endo M., Yamashita K., Ishihara S., Matsunaga H., «Fatigue notch sensitivity and the notch size effect», International Journal of Fatigue, 2008
9. Zappalorto M., Berto F., Lazzarin P., «Practical expressions for the notch stress concentration factors of round bars under torsion», International Journal of Fatigue Vol. 3, 2011