



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

**Βέλτιστος σχεδιασμός περικοχλίου για μεγιστοποίηση της ικανότητας
μεταφοράς φορτίου σε μετρικά σπειρώματα σύνδεσης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΘΕΟΔΟΣΑΚΗΣ ΓΡΗΓΟΡΙΟΣ

Επιβλέπων: Σπιτάς Βασίλειος
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2019

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι ο σχεδιασμός μιας κοχλιοσύνδεσης για αύξηση της αντοχής και ισοκατανομή της αξονικής δύναμης στις συνεργαζόμενες σπείρες. Ο σχεδιασμός του μοντέλου έγινε στο λογισμικό Solidworks, ενώ οι προσομοιώσεις για το στατικό μοντέλο πραγματοποιήθηκαν στο λογισμικό ANSYS. Η κατανομή των δυνάμεων κατά μήκος του συμβατικού κοχλία και περικοχλίου ακολουθεί εκθετική κατανομή γεγονός που οφείλεται στο φαινόμενο shear lag. Τα δύο τεμάχια μοντελοποιήθηκαν ως γραμμικά ελαστικά στοιχεία. Γίνεται, λοιπόν, προσπάθεια ισοκατανομής των αξονικών δυνάμεων ανά σπείρα επηρεάζοντας τη σταθερά ελατηρίου της κάθε σπείρας του περικοχλίου με στόχο αυτό να ακολουθεί αντίστοιχα εκθετική κατανομή για την εξάλειψη του φαινομένου. Οι τροποποιήσεις πραγματοποιούνται στην εξωτερική διάμετρο του περικοχλίου μεταβάλλοντας έτσι την επιφάνειά του η οποία όπως αποδεικνύεται παρακάτω έχει άμεση επίδραση στην σταθερά ελατηρίου του. Ως κριτήρια σύγκρισης του συμβατικού και τροποποιημένου μοντέλου επιλέχθηκαν η κατανομή των διατμητικών τάσεων στη μέση ελικοειδή γραμμή του σπειρώματος του κοχλία και η κατανομή της εφαρμοζόμενης αξονικής δύναμης κατά μήκος των σπειρών του περικοχλίου. Τέλος, κατασκευάζεται η τροποποιημένη κοχλιοσύνδεση σε 3D εκτυπωτή για εξακρίβωση της κατασκευασιμότητας του μοντέλου.

Abstract

The purpose of this thesis is to design a screw connection to increase the strength and equilibrium of the axial force in the coils. The model was designed in Solidworks software, while the static model simulations were performed in ANSYS software. The distribution of forces along the conventional screw and nut follows an exponential distribution due to the shear lag effect. The two pieces were modeled as linear elastic elements. Therefore, an attempt is made to equilibrate the axial forces per coil by affecting the spring constant of each coil of the nut in order to follow a corresponding exponential distribution to eliminate the phenomenon. Modifications are made to the outer diameter of the nut thus altering its surface which as shown below has a direct effect on its spring constant. The criteria for comparing the conventional and modified model were the distribution of shear stresses in the middle helical line of the screw thread and the distribution of the applied axial force along the screw threads. Finally, the modified screw is manufactured on a 3D printer to verify the model's buildability.

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας τις προπτυχιακές μου σπουδές θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους εκείνους που με τη βοήθειά τους συνέβαλαν στην εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής.

Ειδικότερα θα ήθελα να εκφράσω τις εγκάρδιες ευχαριστίες μου προς τον επιβλέποντά μου κ. Βασίλειο Σπιτά για την πολυετή καθοδήγησή και τις συμβουλές του κατά τη διάρκεια των σπουδών μου. Επίσης, ένα μεγάλο ευχαριστώ στα μέλη του εργαστηρίου με ιδιαίτερη μνεία στον υποψήφιο διδάκτορα κ. Ανδρέα Μαυρίδη για την ανέλπιστα βοήθειά του στα αρχικά στάδια της εργασίας.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στους ήρωες των παρασκηνίων, την οικογένειά μου και τους φίλους μου οι οποίοι μου στάθηκαν σε όλους αυτούς τους μήνες της προσπάθειάς μου.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή	10
Κεφάλαιο 2 Δημιουργία γεωμετρίας μοντέλου κοχλιοσύνδεσης	13
2.1 Χαρακτηριστικά εκλογής κοχλιοσύνδεσης	13
2.1.1 Ανάλυση επιλογής σπειρώματος	13
2.1.2 Εκλογή κοχλία	14
2.1.3 Εκλογή περικοχλίου	15
2.1.4 Ενδιάμεσο κυλινδρικό τεμάχιο	16
2.2 Δημιουργία κοχλιοσύνδεσης στο λογισμικό Solidworks	17
2.2.1 Σχεδιασμός τεμαχίων	17
2.2.2 Συναρμολόγηση κοχλιοσύνδεσης	19
Κεφάλαιο 3 Δημιουργία μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων	22
3.1 Κύριοι άξονες μοντελοποίησης	22
3.1.1. Επιλογή υλικού προσομοίωσης	22
3.1.2 Επιλογή πεπερασμένων στοιχείων και πλεγματοποίηση	23
3.1.3. Επιβαλλόμενα Φορτία	26
3.2.4. Στηρίξεις	27
3.2.5. Συνεργαζόμενες επιφάνειες	28
3.3. Έλεγχος συνεργαζόμενων επιφανειών	30
Κεφάλαιο 4 Έλεγχος πρώτων αποτελεσμάτων	32
4.1 Εξαγωγή αποτελεσμάτων πλεγματοποίησης	32
4.2 Ανάλυση τάσεων στην ελικοειδή γραμμή	33
Κεφάλαιο 5 Ανάλυση προτεινόμενης τροποποίησης περικοχλίου ...	37
5.1 Εισαγωγή	37
5.2 Προσδιορισμός καμπύλης τροποποίησης	37
Κεφάλαιο 6 Δημιουργία μοντέλου κοχλιοσύνδεσης με τροποποιημένο περικόχλιο	42
6.1 Εισαγωγή	42
6.2 Περιγραφή σχεδιασμού νέου περικοχλίου	42
Κεφάλαιο 7 Ανάλυση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων	44
7.1 Εισαγωγή	44
7.2 Κατανομή τάσεων Von Mises	45
7.3 Κατανομή διατμητικών τάσεων στη μέση ελικοειδή γραμμή	46

7.4 Κατανομή εφελκυστικών δυνάμεων κατά μήκος του κοιλία	47
Κεφάλαιο 8 Κατασκευή κοχλιοσύνδεσης σε 3D εκτυπωτή,.....	51
8.1 Εισαγωγή.....	51
8.2 Κατασκευή κοχλιοσύνδεσης	51
Κεφάλαιο 9 Συμπεράσματα και μελλοντικές βελτιώσεις	54
9.1 Εισαγωγή.....	54
9.2 Συμπεράσματα	54
9.3 Μελλοντικές βελτιώσεις στο παρόν μοντέλο	55
9.4 Προτάσεις για έρευνα.....	55
Κεφάλαιο 10 Βιβλιογραφία	56

Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1.1 Περιοχές συγκέντρωσης τάσεων σε κοχλίες.....	11
Εικόνα 2.1 Γεωμετρία μετρικού σπειρώματος	13
Εικόνα 2.2 Βασικά τμήματα κοχλία	14
Εικόνα 2.3 Διαμόρφωση με εξαγωνική κεφαλή (αριστερά) και χωρίς περιττές ακμές (δεξιά)....	15
Εικόνα 2.4 Περικόχλιο με εξαγωνική κεφαλή (αριστερά) και χωρίς περιττές ακμές και αυξημένο μήκος (δεξιά).....	16
Εικόνα 2.5 Υλοποίηση ενδιάμεσου κυλινδρικού τεμαχίου (KT).....	16
Εικόνα 2.6 Μέση ελικοειδής γραμμή και σώμα κορμού κοχλία (αριστερά). Σώμα σπειρώματος σε μεγένθυση (δεξιά).....	18
Εικόνα 2.7 Ακμές για αποτελέσματα μέσης πίεσης επιφανείας στο περικόχλιο. Πρόοψη σε τομή (αριστερά) και ισομετρική όψη (δεξιά).....	18
Εικόνα 2.8 Δημιουργία πρώτης σπείρας κοχλία. Πρόοψη σε μεγένθυση (δεξιά) και πρόοψη (αριστερά).....	19
Εικόνα 2.9 Distance Mate (Κάτω βάση κορμού κοχλία – κάτω βάση περικοχλίου).....	19
Εικόνα 2.10 Parallel Planes (3D view).....	20
Εικόνα 2.11 Bolt – nut interference (αριστερά) και nut – KT interference (δεξιά).....	20
Εικόνα 2.12 Κοχλιοσύνδεση σε τομή (πρόοψη).....	21
Εικόνα 3.1 Διάγραμμα σ-ε για χάλυβα	22
Εικόνα 3.2 TARGE170 Elements.....	24
Εικόνα 3.3 ANSYS Elements.....	24
Εικόνα 3.4 CONTA174 Elements	24
Εικόνα 3.5 SOLID187 Elements.....	24
Εικόνα 3.6 Πλεγματοποίηση κοχλία (αριστερά) και πλεγματοποίηση με μεγένθυση στις σπείρες του κοχλία (δεξιά).....	25
Εικόνα 3.7 Πλεγματοποίηση περικοχλίου (αριστερά) και πλεγματοποίηση KT (δεξιά).....	26
Εικόνα 3.8 Μετατόπιση (displacement).....	26
Εικόνα 3.9 Frictionless Support (κύλιση).....	27
Εικόνα 3.10 Fixed Support (πάκτωση).....	27
Εικόνα 3.11 Contact Tool.....	30
Εικόνα 4.1 Equivalent Von Mises (Overall).....	31
Εικόνα 4.2 Μέση ελικοειδής γραμμή.....	32
Εικόνα 4.3 Equivalent Stress Bolt Path	32
Εικόνα 5.1 Αρχική τροποποίηση με καμπύλη τροποποίησης και επίπεδα.....	39

Εικόνα 5.2 Αρχική τροποποίηση με καμπύλη.....	39
Εικόνα 5.3 Περικόχλιο με εξωτερικό σπείρωμα.....	39
Εικόνα 5.4 Ισομετρική όψη (αριστερά) και πρόοψη σε τομή (δεξιά).....	40
Εικόνα 6.1 Αυλακώσεις στο τροποποιημένο μοντέλο.....	41
Εικόνα 6.2 Πλεγματοποίηση τροποποιημένου περικοχλίου (αριστερά) και σε μεγένθυση (δεξιά)	42
Εικόνα 7.1 Κατανομή von-Mises στο τροποποιημένο (αριστερά) και το συμβατικό (δεξιά) μοντέλο.....	44
Εικόνα 7.2 Κατανομή τάσεων von-Mises στο τροποποιημένο περικόχλιο (αριστερά) και στο συμβατικό περικόχλιο (δεξιά).....	44
Εικόνα 7.3 Διατμητικές τάσεις στη μέση ελικοειδή γραμμή για το μοντέλο με το τροποποιημένο περικόχλιο (αριστερά) και για το μη τροποποιημένο(δεξιά).....	47
Εικόνα 7.4 Υπολογισμός δύναμης στο επίπεδο Z0 (αριστερά) και στο επίπεδο Z26 (δεξιά).....	47
Εικόνα 8.1 Πρώτη δοκιμή με χρήση μεθόδου FDM (αδυναμία συναρμογής).....	51
Εικόνα 8.2 Δεύτερη δοκιμή με χρήση μεθόδου FDM και αστοχία στις κάτω οριζόντιες στρώσεις.....	51
Εικόνα 8.3 Τρίτη δοκιμή με μέθοδο SLA και αστοχία εξωτερικού περιβλήματος.....	52
Εικόνα 8.4 Τεμάχια (αριστερά) και συναρμολόγηση (δεξιά) τελικού μοντέλου.....	52

Πίνακας Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1 Κατανομή von-Mises στην μέση ελικοειδή γραμμή.....	33
Διάγραμμα 2 Κατανομή μέσης πίεσης επιφανείας σε ακμές στην παράπλευρη επιφάνεια του σπειρώματος του κοχλίου.....	33
Διάγραμμα 3 Κατανομή μέσης πίεσης επιφανείας σε ακμές στην παράπλευρη επιφάνεια του σπειρώματος του περικοχλίου.....	34
Διάγραμμα 4 Κατανομή αξονικής δύναμης κατά μήκος του ενεργού σπειρώματος του κοχλίου...36	
Διάγραμμα 5 Κατανομή δύναμης ανά σπείρα στο ενεργό σπείρωμα του κοχλίου.....	37
Διάγραμμα 6 Σύγκριση τροποποιημένων κοχλιοσυνδέσεων ως προς τη δύναμη στις σπείρες....40	
Διάγραμμα 7 Διατμητικές τάσεις στη μέση ελικοειδή γραμμή του κοχλίου.....	45
Διάγραμμα 8 Σύγκριση επιθυμητής καμπύλης (σκούρο πράσινο), καμπύλης από τροποποιημένο μοντέλο (μπλε) και καμπύλης συμβατικού μοντέλου κοχλιοσύνδεσης (ανοιχτό πράσινο).....	48

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

Οι κοχλίες (βίδες ή μπουλόνια) είναι το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο στοιχείο στις κατασκευές, καθότι είναι απαραίτητοι για τη συναρμολόγηση μηχανών αλλά και για την πραγματοποίηση σταθερών ή προσωρινών συνδέσεων σε δομικές εφαρμογές.

Ορισμένες επιπλέον χρήσεις των κοχλίων είναι οι εξής:

- Ως μέσο λυόμενης σύνδεσης (π.χ. κοχλίας σύνδεσεως)
- Για τη δημιουργία προέντασης (π.χ. κοχλίας τάσης)
- Για τον πωματισμό οπών
- Ως ρυθμιστικός κοχλίας για τη ρύθμιση του διακένου (π.χ. κοχλίας καρμπυρατέρ)
- Ως κοχλίας μέτρησης (π.χ. μικρόμετρο)
- Για τη μεταβολή της περιστροφικής κίνησης σε γραμμική (π.χ. μέγγενη) και το αντίστροφο (π.χ. χειροκίνητο τρυπάνι)
- Για μικρές μετατοπίσεις με χρήση κοινών σπειρωμάτων (π.χ. μικρομετρικός κοχλίας)
- Για ανύψωση φορτίων και κίνηση μηχανών (κοχλίας κίνησης)

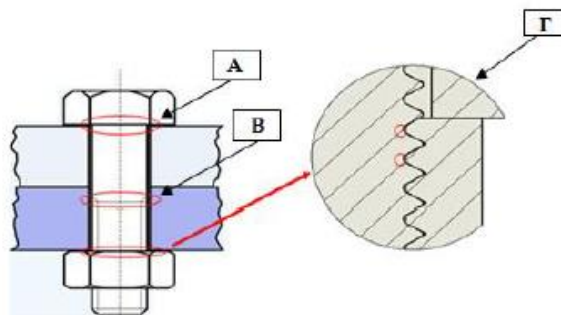
Οι κοχλίες αποτελούνται από τον κορμό και την κεφαλή, ενώ στον κορμό διακρίνεται το αυλακωτό τμήμα (σπείρωμα) και το τμήμα χωρίς αυλάκωση (αυχένας). Συχνά συνοδεύονται από περικόχλιο (παξιμάδι), το οποίο είναι απαραίτητο για τη στερέωσή τους.

Οι κοχλιοσυνδέσεις, λοιπόν, όπως αναφέρονται οι συνδέσεις κοχλίων που περιλαμβάνουν το ζεύγος κοχλίας-περικοχλίου, πέρα από τη χρήση τους για σύνδεση και στερέωση τεμαχίων παρέχουν επίσης τη δυνατότητα λύσης και επανασύνδεσης καθιστώντας τους χρήσιμους σε περιπτώσεις όπου απαιτείται αποσυναρμολόγηση μηχανημάτων για λόγους συντήρησης ή αντικατάστασης εξαρτημάτων.

Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, υπάρχουν τρεις περιοχές (Εικόνα 1.1) στις κοχλιοσυνδέσεις όπου εμφανίζονται συγκεντρώσεις τάσεων οδηγώντας στην αστοχία τους. Ειδικότερα οι περιοχές αυτές είναι:

1. Η περιοχή κάτω από την κεφαλή του κοχλίου ως τον κορμό του.
2. Η βάση (fillet) των σπειρών στην αρχή του σπειρώματος του κοχλίου
3. Οι πρώτες σπείρες του κοχλίου που συνεργάζονται με το περικόχλιο

Η περιοχή που στατιστικά, 60%-70%, οδηγεί σε αστοχία την κοχλιοσύνδεση είναι αυτή της περιπτώσεως 3 (Εικόνα 1.1 Γ), καθότι ύστερα από μελέτες φαίνεται ότι οι δύο πρώτες σπείρες παραλαμβάνουν περίπου το 50% του αξονικού φορτίου. Το παραπάνω φαινόμενο συνδέεται με το φαινόμενο του shear lag σύμφωνα με το οποίο δύο επιφάνειες που παρουσιάζουν σχετική κίνηση μεταξύ τους παρουσιάζουν πλαστική παραμόρφωση στην αρχή της συνεργασίας τους που συνεπάγεται συγκεντρώσεις τάσεων στα σημεία αυτά και μειωμένες τάσεις.



Εικόνα 1.1 Περιοχές συγκέντρωσης τάσεων σε κοχλίες

Ειδικότερα, στο παρόν πρόβλημα, οι πρώτες σπείρες συνεργασίας της κοχλιοσύνδεσης παραμορφώνονται, ώστε να υπάρχει συνεργασία μεταξύ των επιφανειών οδηγώντας σε συγκεντρώσεις τάσεων στην αρχή του σπειρώματος και σε ανισοκατανομή των διαμηθικών τάσεων και των αξονικών δυνάμεων κατά το μήκος του κορμού. Οι τελευταίες σπείρες μάλιστα, φαίνεται να μην επιδρούν καθόλου στην παραλαβή φορτίου της κατασκευής με αποτέλεσμα τη μείωση της απόδοσης του στοιχείου μηχανών, πιθανότητα θραύσης ή και αποσύσφιξη της κατασκευής.

Οι δύο επικρατέστεροι τύποι περικοχλίων είναι:

- a) Τα περικόχλια εφελκυσμού – θλίψεως, στα οποία η κατανομή του φορτίου κατά μήκος του σπειρώματος του περικοχλίου είναι λιγότερο ανισομερές από ότι στα περικόχλια θλίψεως, με την τάση που αναπτύσσεται στο πρώτο βήμα τους να είναι 20 έως 40% μικρότερη από την αντίστοιχη τάση σε ένα περικόχλιο θλίψεως.
- b) Τα περικόχλια εφελκυσμού, στα οποία η τάση που αναπτύσσεται στο πρώτο βήμα του σπειρώματος τους είναι περίπου 60% μικρότερη από την αντίστοιχη τάση ενός περικοχλίου θλίψεως διότι το αξονικό φορτίο του κοχλίου κατανέμεται περισσότερο ισομερώς σε ένα μεγαλύτερο αριθμό βημάτων.

Στην παρούσα διπλωματική γίνεται προσπάθεια ισοκατανομής της αξονικής δύναμης κατά μήκος του σπειρώματος του κοχλίου και του περικοχλίου επηρεάζοντας τη γεωμετρία του περικοχλίου και ειδικότερα την εξωτερική διάμετρο του τελευταίου οδηγώντας έτσι σε αύξηση της αντοχής του κοχλίου σε στατική φόρτιση.

Η τροποποίηση που εξετάζεται αφορά τη σταδιακή αύξηση της εξωτερικής διαμέτρου του περικοχλίου από την πρώτη έως την τελευταία σπείρα συνεργασίας. Η απώλεια του υλικού στο περικόχλιο οδηγεί σε αύξηση της ενδοτικότητας των πρώτων σπειρών, οδηγώντας σε παραμόρφωση τους ως προς την ακτινική διεύθυνση και σε μείωση της ενεργής επιφάνειας συνεργασίας (άρα και μείωση των μεταφερόμενων τάσεων σε αυτές).

Πρακτικά οι σπείρες που εξωτερικά τους έχουν περισσότερο υλικό γίνονται πιο άκαμπτες, ενώ αντίστοιχα εκείνες με λιγότερο υλικό πιο ενδοτικές. Η ανάγκη, λοιπόν, παραλαβής του φορτίου

ενεργοποιεί περισσότερες σπείρες από ένα συμβατικό περικόγλιο ελαττώνοντας έτσι το φαινόμενο αστοχίας του μοντέλου στις πρώτες σπείρες του κοχλία.

Το φυσικό νόημα του φαινομένου της διατμητικής υστέρησης αφορά τη ροή της δύναμης μέσα στο υλικό (εν προκειμένω χάλυβα κοχλίων). Η διαδικασία μεταφοράς της δύναμης γίνεται διαδοχικά μεταξύ των σπειρών του κοχλία και του περικοχλίου. Συνεπώς, στις πρώτες σπείρες συνεργασίας η δύναμη οφείλει να μεταφερθεί ομοιόμορφα προς τις επόμενες σπείρες, το οποίο δεν συμβαίνει καθότι οι τελευταίες επιλέγουν την ευκολότερη διαδρομή για τη μεταδοσή τους. Γίνεται λοιπόν προσπάθεια διευκόλυνσης της διαδρομής αυτής καθιστώντας τις πρώτες σπείρες συνεργασίας πιο ενδοτικές επιτρέποντας στη δύναμη να μεταφερθεί στις υπόλοιπες. Επιδίωξη της έρευνας η ενεργοποίηση όσο το δυνατόν περισσότερων σπειρών και ισοκατανομή του συνολικού αξονικού φορτίου μεταξύ τους.

Κεφάλαιο 2 Δημιουργία γεωμετρίας μοντέλου κοχλιοσύνδεσης

2.1 Χαρακτηριστικά εκλογής κοχλιοσύνδεσης

2.1.1 Ανάλυση επιλογής σπειρώματος

Για την κοχλιοσύνδεση επιλέχθηκε το τριγωνικό δεξιόστροφο σπείρωμα, το οποίο είναι τυποποιημένο κατά το γερμανικό σύστημα DIN 13/1 που χρησιμοποιείται και στο διεθνές σύστημα τυποποίησης ISO.

Παρατίθενται οι τύποι υπολογισμού των διαστάσεων του μετρικού σπειρώματος όπως λαμβάνονται από το βιβλίο του Χρήστου Α. Παπαδόπουλου [5] (Εικόνα 2.1 και 2.2):

$$d_2 = D_2 = d - 0.64953P \quad (2.1)$$

$$d_3 = d - 1.22687P \quad (2.2)$$

$$D_1 = d - 1.08253P \quad (2.3)$$

$$a = \tan^{-1}\left(\frac{P}{(\pi d - 2.04056P)}\right) \quad (2.4)$$

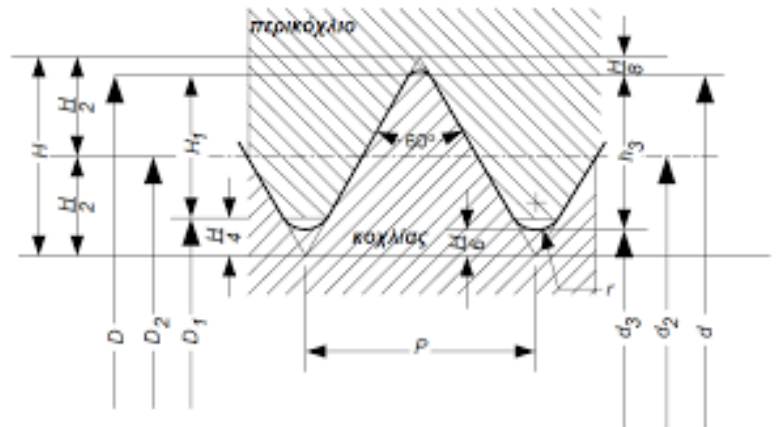
$$h_3 = 0.61343P \quad (2.5)$$

$$R = 0.14434P \quad (2.6)$$

$$H = 0.86603P \quad (2.7)$$

$$H_1 = 0.54127P \quad (2.8)$$

$$A_s = \left(\frac{\pi}{4}\right) \frac{d_2 + d_3}{2} \quad (2.9)$$



Εικόνα 2.1 Γεωμετρία μετρικού σπειρώματος

Όπου:

- d_2 ή D_2 : μέση διάμετρος σπειρώματος
- d_3 : εσωτερική διάμετρος σπειρώματος
- D_1 : εσωτερική διάμετρος σπειρώματος περικοχλίου
- a : γωνία ελικώσεως
- h_3 : βάθος σπειρώματος κοχλία
- R : ακτίνα καμπυλότητας
- H : ύψος κατατομής
- H_1 : βάθος σπειρώματος περικοχλίου
- A_s : διατομή σπειρώματος

2.1.2 Εκλογή κοχλία

Ο κοχλίας που επιλέχθηκε είναι M16x40x2 DIN 931 και ανήκει στους κοχλίες με εξαγωνική κεφαλή. Η εκλογή του έγινε για λόγους υπολογιστικού κόστους και ακρίβειας, καθότι η παράπλευρη επιφάνεια του σπειρώματος διευκολύνει την πλεγματοποίηση του κατά το πλάτος του σπειρώματος (δημιουργία αρκετών πεπερασμένων στοιχείων και αύξηση ακρίβειας). Περαιτέρω ανάλυση στην ενότητα (3.1.2). Επιπροσθέτως, ο συγκεκριμένος κοχλίας έχει μελετηθεί στην διπλωματική εργασία του Α. Καραγιώργου [8], ενώ είναι εύκολο να ευρεθεί στην αγορά.

Τυποποιημένα χαρακτηριστικά (Εικόνα 2.2):

$$d = 16 \text{ [mm]}$$

$$b = 30 \text{ [mm]}$$

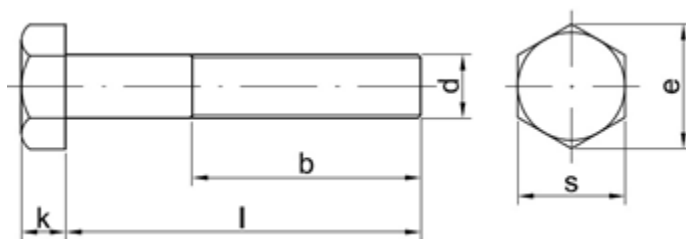
$$l = 40 \text{ [mm]}$$

$$k = 10 \text{ [mm]}$$

$$e = 26,75 \text{ [mm]}$$

$$S = 24 \text{ [mm]}$$

$$r = 1^\circ$$



Εικόνα 2.2 Βασικά τμήματα κοχλία

Εφαρμόζοντας τις εξισώσεις (2.1)-(2.9) προκύπτουν τα παρακάτω μεγέθη:

$$D_1 = 13.835 \text{ mm}$$

$$d_2 = 14.701 \text{ mm}$$

$$d_3 = 13.546 \text{ mm}$$

$$R = 0.289 \text{ mm}$$

$$a = 2.279^\circ$$

$$H = 1.732 \text{ mm}$$

$$H_1 = 1.083 \text{ mm}$$

$$h_3 = 1.227 \text{ mm}$$

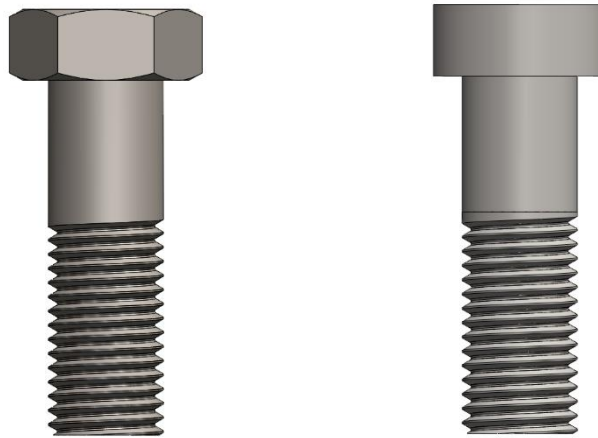
$$A_s = 156.668 \text{ mm}^2$$

Το μήκος του σπειρώματος (b) υπολογίστηκε από τη σχέση $b=2d+6$, η οποία εφαρμόζεται για μήκη κορμού $l \leq 125 \text{ mm}$. Συνεπώς, για ονομαστική διάμετρο $d=16 \text{ mm}$ επιλέγεται $b=38 \text{ mm}$.

Ωστόσο, προκειμένου το υπολογιστικό κόστος της ανάλυσης να μην είναι ιδιαίτερα αυξημένο, μειώθηκε το μήκος του σπειρώματος και άρα η ανάγκη της ακριβούς πλεγματοποίησης (στο σπείρωμα είναι αναγκαία η πλεγματοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία μικρού μήκους) σε βαθμό τέτοιο ώστε να μην επηρεάζει τις συνεργαζόμενες επιφάνειες κοχλία-περικοχλίου και να είναι μεγαλύτερο του μήκους του περικοχλίου (Κεφάλαιο 2.1.3). Για τους παραπάνω λόγους, το τελικό μήκος σπειρώματος επελέγη $b=30 \text{ mm}$.

Όσον αφορά την πολυπλοκότητα της γεωμετρίας και την αποτύπωση της στο λογισμικό Solidworks, αφαιρέθηκαν ορισμένες γεωμετρικές διαμορφώσεις και ακμές του τεμαχίου με σκοπό

να μειωθεί ακόμη περισσότερο ο αριθμός των πεπερασμένων στοιχείων που απαιτώνται για την ανάλυση. Ειδικότερα, αφαιρέθηκαν οι κάθετες ακμές περιμετρικά της κεφαλής του κοχλία με αποτέλεσμα η κεφαλή πλέον να είναι κυλινδρική. Εν τέλει η εξωτερική διάμετρος της κεφαλής του κοχλία καθορίζεται στα 24 mm όσο δηλαδή το άνοιγμα κλειδιού του εξαγώνου (Εικόνα 2.3).



Εικόνα 2.3 Διαμόρφωση με εξαγωνική κεφαλή (αριστερά) και χωρίς περιττές ακμές (δεξιά)

2.1.3 Εκλογή περικοχλίου

Το περικόχλιο που μελετάται είναι εξαγωνικό και σχεδιάζεται βάση της τυποποίησης DIN 934.

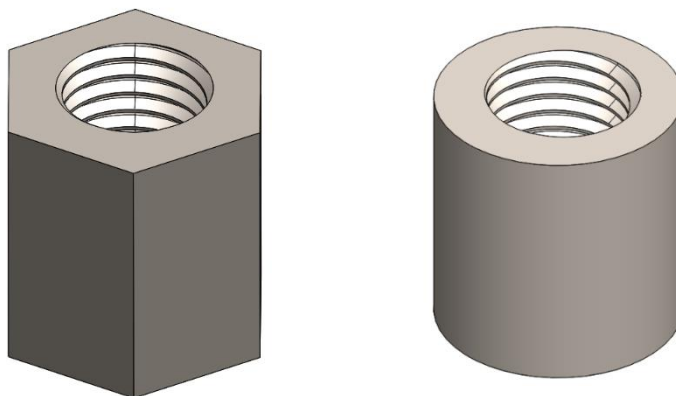
Χαρακτηριστικές διαστάσεις περικοχλίου:

$$m = 26 \text{ mm}$$

$$S = 24 \text{ mm}$$

$$e = 1.155S = 27.72 \text{ mm}$$

$$d = 16 \text{ mm}$$



Εικόνα 2.4 Περικόχλιο με εξαγωνική κεφαλή (αριστερά) και χωρίς περιττές ακμές και αυξημένο μήκος (δεξιά)

Ομοίως με την κεφαλή του κοχλίου, έγινε αφαίρεση ακμών και διαμορφώσεις και στην κεφαλή του περικοχλίου, μειώνοντας ακόμα περισσότερο την πολυπλοκότητα του μοντέλου.

Αξιοσημείωτο είναι το ύψος της κεφαλής του περικοχλίου το οποίο ορίστηκε στα 26 mm, διπλάσιο από την τυποποιημένη τιμή του που υπολογίζεται στα 13 mm. Ο λόγος για την επιλογή αυτή είναι η ανάδειξη του φαινομένου διατμητικής υστέρησης (shear lag) και η μεγάλη αντίθεση στην κατανομή τάσεων και δυνάμεων μεταξύ πρώτης και τελευταίας σπείρας συνεργασίας. Τα τυποποιημένα περικόχλια σχεδιάζονται για τον περιορισμό του φαινομένου που μελετάται, συνεπώς επιλέχθηκαν τα 26 mm.

Τέλος, η εξωτερική διάμετρος του περικοχλίου εκλέγεται στα 24 mm (αντίστοιχα ίση με το άνοιγμα του κλειδιού όπως και στην κεφαλή του κοχλίου).

2.1.4 Ενδιάμεσο κυλινδρικό τεμαχίο

Χαρακτηριστικές διαστάσεις κυλινδρικού τεμαχίου:

$$d_n = 16.50 \text{ mm}$$

$$d = 30 \text{ mm}$$

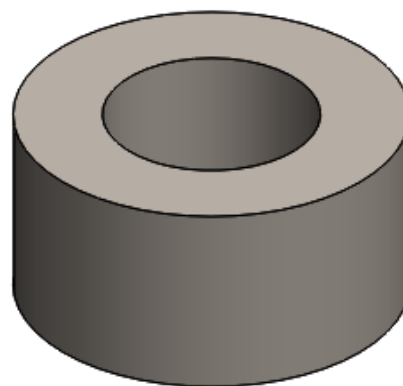
$$H = 15 \text{ mm}$$

$$d_m = 24.210 \text{ mm}$$

Όπου:

d_m : μέση γεωμετρική διάμετρος

Η διάμετρος της οπής του τεμαχίου ορίζεται στα 16.5 mm ώστε να μην έρχεται σε επαφή με τον κορμό του κοχλίου ακόμα και αν ο τελευταίος παραμορφωθεί ακτινικά, αλλάζοντας το προφίλ των τάσεων. Εξάλλου, οι δυνάμεις που αναπτύσσονται στις ενδιάμεσες φλάντζες δεν χρήζουν περαιτέρω ανάλυσης στην παρούσα διπλωματική.



Εικόνα 2.5 Υλοποίηση ενδιάμεσου κυλινδρικού τεμαχίου (KT)

2.2 Δημιουργία κοχλιοσύνδεσης στο λογισμικό Solidworks

2.2.1 Σχεδιασμός τεμαχίων

Ο αρχικός σχεδιασμός του κοχλία πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό Solidworks λόγω των ευκολιών που παρέχει για την κατασκευή και σχεδίαση σύνθετων γεωμετριών (π.χ. thread tool). Βασικά κριτήρια του σχεδιασμού υπήρξαν η δυνατότητα εξαγωγής αποτελεσμάτων στην μέση ελικοειδή γραμμή της ρίζας του σπειρώματος του κοχλία (I) και σε ακμές κατά το πλάτος των σπειρών για υπολογισμό πίεσης επιφανείας (II).

Τα δύο αυτά σχεδιαστικά κριτήρια ορίστηκαν με απώτερο σκοπό:

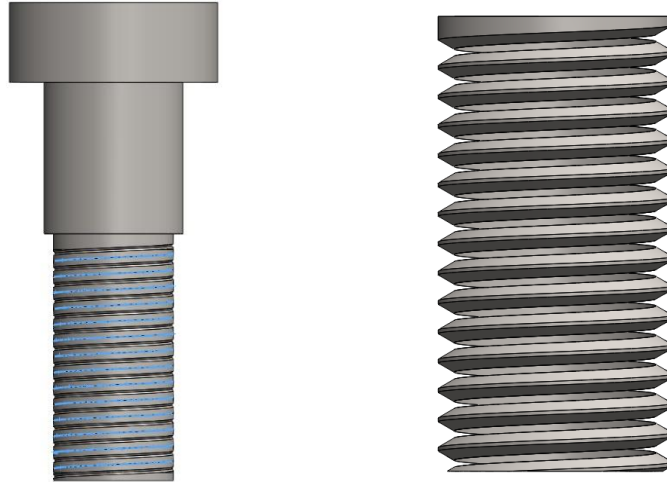
- I. Την εξαγωγή των τάσεων von-Mises, μέγιστων και ελάχιστων κυρίων τάσεων (maximum & minimum principal stress) και μέγιστης διατμητικής τάσης (maximum shear stress) στη μέση ελικοειδή γραμμή, παρέχοντας ποιοτικές και ποσοτικές πληροφορίες σχετικά με το μοντέλο (για σύγκριση με τα διαγράμματα της βιβλιογραφίας)
- II. Την εξαγωγή της ελάχιστης κύριας τάσης (minimum principal stress, ουσιαστικά πίεση επιφανείας) παρέχοντας πληροφορίες για την κατανομή της μέσης πίεσης κατά μήκος του ενεργού τμήματος του κορμού του κοχλία.

I. Δυνατότητα εξαγωγής αποτελεσμάτων στη μέση ελικοειδή γραμμή στη βάση των σπειρών κοχλία και περικοχλίου αντίστοιχα.

Δεδομένων των απαιτήσεων της παρούσας διπλωματικής και της ανάγκης μελλοντικών αλλαγών στη γεωμετρία του μοντέλου χρησιμοποιήσαμε τις ήδη υπάρχουσες μεθόδους υλοποίησης (αντί του Thread Tool). Ειδικότερα, με το εργαλείο Helix/Spiral δημιουργήσαμε την ελικοειδή γραμμή πάνω στην οποία κόβουμε τον κορμό του κοχλία με τη χρήση του τριγώνου ‘κοπής’ (Εικόνα 2.8 δεξιά).

Η δημιουργία της μέσης ελικοειδούς γραμμής αποδείχθηκε το πιο δύσκολο κομμάτι της παρούσας διπλωματικής και γι’ αυτό το λόγο, ενώ ανήκει στο σχεδιαστικό κομμάτι, αξίζει η αναφορά για τη διευκόλυνση μελλοντικών μελετών. Η εν λόγω γεωμετρία αφορά στην μέση ελικοειδή γραμμή που βρίσκεται στη βάση της ρίζας του σπειρώματος, συνεπώς με κάποιον τρόπο έπρεπε να διαχωριστεί η κυλινδρική επιφάνεια κάτω από το σπείρωμα. Δημιουργήθηκε λοιπόν μια κυλινδρική επιφάνεια διαμέτρου ίση με την εσωτερική διάμετρο του κοχλία, η οποία εν συνεχεία με την εντολή ‘Intersect’ ενσωματώθηκε στο ήδη υπάρχον μοντέλο. Με την επιφάνεια αυτή διαθέσιμη, υλοποιήθηκε γεωμετρία σε επίπεδο κάθετο στο κυλινδρικό και κατεύθυνση παράλληλη στην ελικοειδή γραμμή με την οποία υλοποιήθηκε το σπείρωμα. Τέλος, το τεμάχιο αυτό που δημιουργήθηκε ενσωματώθηκε με τη σειρά του στο μοντέλο με την εντολή ‘Intersect’ καθιστώντας δυνατή την εκλογή αποτελεσμάτων στην ακμή χωρίς να επηρεάζει τις διαστάσεις. Η συγκεκριμένη τροποποίηση στο σχεδιασμό οδηγεί στην ύπαρξη δύο διακριτών σωμάτων σε ένα κομμάτι. Υπάρχει λοιπόν η ανάγκη για ορισμό της επαφής μεταξύ τους, γεγονός που θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο της διπλωματικής (Κεφάλαιο 3.1.2 και Εικόνα 2.7).

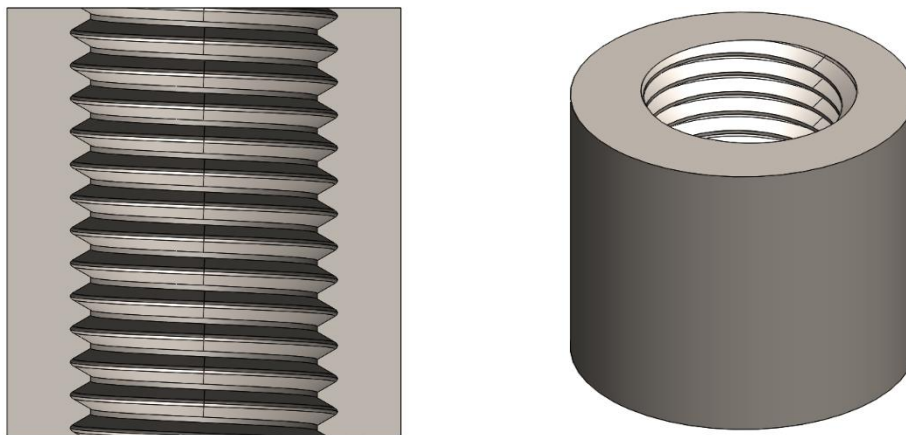
Τέλος, για την ύπαρξη των κατάλληλων διαμορφώσεων στα άκρα του σπειρώματος χρησιμοποιήθηκε η εντολή Extrude Cut με την οποία κόβεται το ‘περιττό’ σπείρωμα περιμετρικά του κοχλία δίνοντας του έτσι την τελική του διάμετρο (16 mm).



Εικόνα 2.6 Μέση ελικοειδής γραμμή και σώμα κορμού κοχλία (αριστερά). Σώμα σπειρώματος σε μεγένθυση (δεξιά).

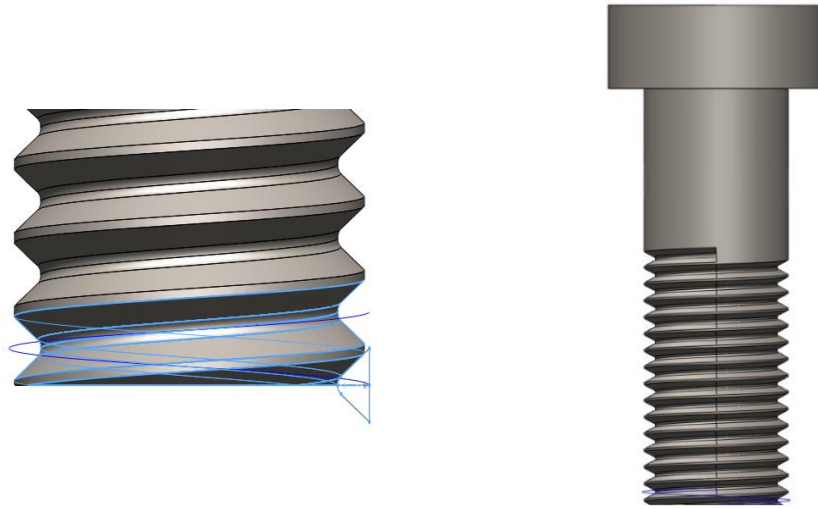
II. Δυνατότητα εξαγωγής αποτελεσμάτων κατά το πλάτος των σπειρών για υπολογισμό πίεσης επιφανείας.

Η δημιουργία των συγκεκριμένων ακμών έγινε πάλι με τμηματικό σχεδιασμό του μοντέλου ώστε να υπάρχει διαχωρισμός των επιφανειών.



Εικόνα 2.7 Ακμές για αποτελέσματα μέσης πίεσης επιφανείας στο περικόχλιο. Πρόοψη σε τομή (αριστερά) και ισομετρική όψη (δεξιά).

Ειδικότερα, κατά τη δημιουργία της καμπύλης (curve) Helix/Spiral πάνω στην οποία θα γίνει η κοπή του κορμού του κοχλία, σχεδιάσαμε μόνο την πρώτη σπείρα. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα, με χρήση του εργαλείου Linear Pattern να δημιουργήσουμε τις υπόλοιπες σπείρες κατά μήκος του κορμού, δημιουργώντας έτσι ξεχωριστά και διακριτά σχεδιαστικά τμήματα (Εικόνα 2.7 και 2.8).



Εικόνα 2.8 Δημιουργία πρώτης σπείρας κοχλία. Πρόοψη σε μεγέθυνση (δεξιά) και πρόοψη (αριστερά).

2.2.2 Συναρμολόγηση κοχλιοσύνδεσης

Η δημιουργία των επιμέρους τεμαχίων ακολουθείται από την συναρμολόγηση και σύνδεση τους σε ένα ενιαίο λειτουργικό σύνολο μέσω του λογισμικού Solidworks.

Το πρώτο βήμα αποτελείται από τον ορισμό του κοχλία ομόκεντρα με το κυλινδρικό τεμάχιο χρησιμοποιώντας την εντολή “Coincentric” από τα διαθέσιμα mates του λογισμικού Solidworks.

Εν συνεχεία, τοποθετήθηκε το κυλινδρικό τεμάχιο (Κ.Τ.) σε συγκεκριμένη απόσταση από το πέρας του κοχλία, “distance” mate, ορίζοντας έτσι με σαφήνεια το στατικό πρόβλημα που αντιμετωπίζουμε σε σημείο κατάλληλο για αποφυγή διείσδυσης μεταξύ των επιφανειών, ενώ παράλληλα ορίζεται έμμεσα η ακριβής θέση του περικοχλίου σε σχέση με την κεφαλή του κοχλία (Εικόνα 2.9).

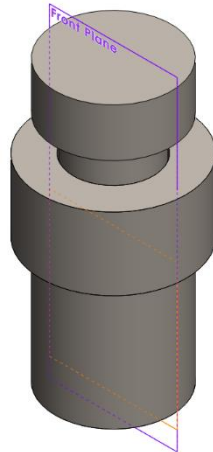


Εικόνα 2.9 Distance Mate (Κάτω βάση κορμού κοχλία – κάτω βάση περικοχλίου)

Επόμενο βήμα, ο ορισμός του περικοχλίου ομόκεντρα με την κεφαλή του κοχλία και επομένως με το κυλινδρικό τεμάχιο.

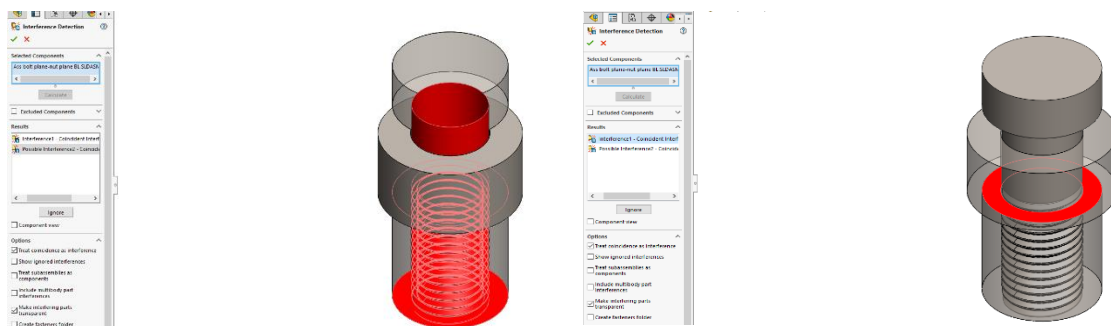
Ύστερα, με την εντολή “coincident” το περικόχλιο τοποθετείται εφαπτομενικά με την κάτω επιφάνεια του Κ.Τ. (Εικόνα 2.9), ορίζοντας έτσι και την ακριβή θέση του περικοχλίου σε σχέση με τον κοχλία (αθροιστικά με το distance mate).

Τέλος, παραλληλίζοντας τα επίπεδα (front planes) του περικοχλίου και του κοχλία και ειδικότερα το επίπεδο της πρόοψης του κοχλία με το επίπεδο που ορίζει η επιφάνεια της αρχής της έλικας του περικοχλίου (Εικόνα 2.10). Η εφαπτομενική σύνδεση των επιπέδων επιτεύχθηκε με τη χρήση της εντολής “Coincident”.



Εικόνα 2.10 Parallel Planes (3D view)

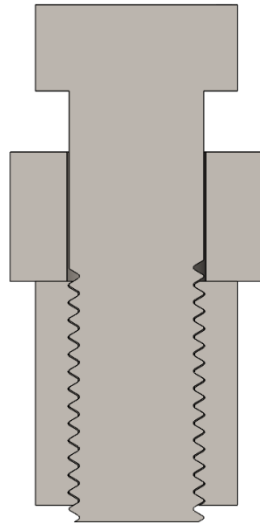
Με το παραπάνω mate, επιτεύχθηκε η έλικα του κοχλία και του περικοχλίου να εκκινούν από το ίδιο επίπεδο γεγονός που δημιουργούσε διαφοροποιήσεις απ’ το αναμενόμενο προφίλ τάσεων. Αποφεύγουμε έτσι φαινόμενα εμφάνισης διείσδυσης των συνεργαζόμενων επιφανειών κοχλία-περικοχλίου, τα οποία έγιναν εμφανή με τη χρήση του εργαλείου ανίχνευσης διείσδυσης των εργαλείων για εκτιμήσεις μεγεθών που διαθέτει το πρόγραμμα (Εικόνα 2.11).



Εικόνα 2.11 Bolt – nut interference (αριστερά) και nut – KT interference (δεξιά)

Η χρήση ωστόσο του εργαλείου “interference detection” δεν συνεπάγεται και αντίστοιχη απουσία διείσδυσης επιφανειών στο πρόγραμμα ANSYS, καθότι διαφέρει το λογισμικό τους και ο τρόπος επεξεργασίας των δεδομένων. Ωστόσο, με ταυτόχρονο οπτικό έλεγχο, πέρα από λογισμικό, επιτυγχάνεται μηδενική διείσδυση.

Η επαφή μεταξύ των συνεργαζόμενων επιφανειών των σπειρωμάτων ήταν αδύνατο να επιτευχθεί με τη χρήση κάποιου από τα mates που διαθέτει το Solidworks. Πραγματοποιήθηκε, λοιπόν, με χρήση της εντολής Move Part ύστερα από ακριβή υπολογισμό του διακένου μεταξύ αρσενικού και θηλυκού σπειρώματος το οποίο ανέρχεται στα 0.125 mm (Εικόνα 2.12).



Εικόνα 2.12 Κοχλιοσύνδεση σε τομή (πρόοψη)

Κεφάλαιο 3 Δημιουργία μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων

3.1 Κύριοι άξονες μοντελοποίησης

3.1.1. Επιλογή υλικού προσομοίωσης

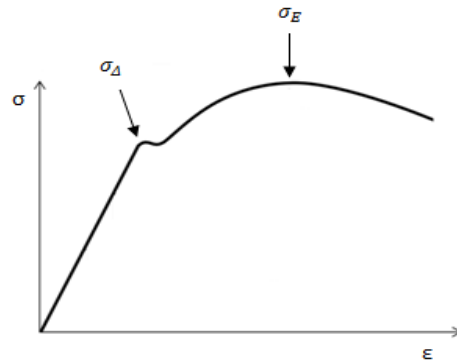
Το υλικό που επιλέχθηκε για τη συνδεσμολογία είναι ο χάλυβας, το οποίο είναι το κυριότερο υλικό κατασκευής κοχλιοσυνδέσεων, ενώ παράλληλα διαθέτει την απαιτούμενη αντοχή συναρτήσει κόστους και ευκολίας στην αγορά του. Επιπλέον, υπήρχε η ανάγκη για επιλογή συγκεκριμένου είδους χάλυβα καθότι το μέτρο ελαστικότητας και ο συντελεστής Poisson παραμένουν τα ίδια. Μεταβάλλεται όμως η αντοχή σε εφελκυσμό, ωστόσο στην κατασκευή δεν ασκούνται δυνάμεις ικανές να οδηγήσουν σε αστοχία του υλικού, συνεπώς δεν αποτελεί σημαντική παράμετρο της μοντελοποίησης (Εικόνα 3.1).

Παρακάτω παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του υλικού structural steel (δομικός χάλυβας) που χρησιμοποιήθηκε από τη βιβλιοθήκη του ANSYS με ορισμένες παραλλαγές:

- $E = 200 \text{ GPa}$
- $\nu = 0.3$
- $G = 76.923 \text{ GPa}$
- $\sigma_{\Delta} = 250 \text{ MPa}$
- $\sigma_E = 460 \text{ MPa}$
- $\sigma_C = 460 \text{ MPa}$
- $d = 7850 \text{ kg / m}^3$

Όπου:

- E: Μέτρο ελαστικότητας
- ν : Λόγος Poisson
- G: Μέτρο διάτμησης
- σ_{Δ} : Όριο διαρροής σε εφελκυσμό
- σ_E : Αντοχή σε εφελκυσμό
- σ_C : Μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό
- d: Πυκνότητα υλικού



Εικόνα 3.1 Διάγραμμα σ-ε για χάλυβα

Αξίζει να αναφερθεί ότι η τιμή της παραμέτρου σ_C δεν αποτελεί αντικείμενο της παρούσας μελέτης, ωστόσο έπρεπε να της αποδοθεί τιμή στο Engineering Data του ANSYS. Ύστερα από σχετική μελέτη, διαπιστώθηκε ότι η τιμή της δε διαφέρει συνήθως από αυτή της σ_E , συνεπώς ορίστηκαν και οι δύο στα 460 MPa (αντιστοιχεί σε ποιότητα κοχλία 4.6).

Επίσης, ο συγκεκριμένος χάλυβας παρουσιάζει μικρότερα όρια διαρροής (σ_{Δ}) και αντοχής (σ_E) σε εφελκυσμό από αυτών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των κοχλιοσυνδέσεων, ωστόσο προσομοιάζει ικανοποιητικά το μέτρο ελαστικότητας (E) και τον λόγο Poisson (ν), όπως αναφέρθηκε παραπάνω (σελ. 18).

3.1.2 Επιλογή πεπερασμένων στοιχείων και πλεγματοποίηση

Οι πιο συνήθεις τρόποι πλεγματοποίησης είναι αυτοί με εξαεδρικά πεπερασμένα στοιχεία λόγω της ευκολίας επίτευξης αυξημένης ακρίβειας. Ωστόσο, λόγω της πολυπλοκότητας της γεωμετρίας στα σπειρώματα θα χρησιμοποιηθούν συγκεκριμένες πλεγματοποιήσεις ανάλογα με την ακρίβεια και την συνθετότητα της εκάστοτε περιοχής.

Ειδικότερα, στο σώμα του ενδιάμεσου κυλινδρικού τεμαχίου χρησιμοποιήθηκε Body Sizing με 1.5 mm το εκάστοτε στοιχείο (καθότι δεν είναι μείζονος η πληροφορία που παρέχει το τεμάχιο). Εισάγεται Hex Dominant Method στην επιφάνεια επαφής του ΚΤ με το περικόχλιο λόγω της ακρίβειας των αποτελεσμάτων και της συμμετρικότητας του μοντέλου. Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε η εντολή "Multizone Method" καθότι λόγω της επαφής του με το περικόχλιο και την πλεγματοποίηση του τελευταίου, προέκυψε η ανάγκη "ορισμού" του είδους του mesh στο ΚΤ. Οι επιλεχθείσες ρυθμίσεις στη μέθοδο αυτή, αφορούν την κυρίως χρήση Hexaedron Elements για την πλεγματοποίηση του εκκινώντας παράλληλα την πλεγματοποίηση από την επιφάνεια του ΚΤ που έρχεται σε επαφή με το περικόχλιο για την επίτευξη ομαλότητας των στοιχείων από την επιφάνεια επαφής στο υπόλοιπο σώμα (το μήκος των στοιχείων στην επιφάνεια επαφής ορίστηκε στα 1 mm).

Εν συνεχεία, στις περιοχές επαφής με τριβή (Frictional Contact), δηλαδή στις επιφάνειες επαφής των σπειρωμάτων μεταξύ κοχλία και περικοχλίου χρησιμοποιήθηκε η επιλογή Contact Sizing με μέγεθος πεπερασμένων στοιχείων στα 0.5 mm με βασικό κριτήριο την ύπαρξη τριών διαφορετικών στοιχείων κατά το πλάτος του σπειρώματος (ύψος κατατομής $H=1.732\text{mm}$).

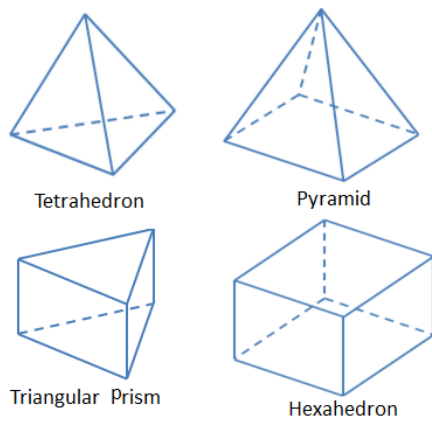
Στον κοχλία εφαρμόστηκε διαχωρισμός του σε δύο Faces με τη χρήση της εντολής Face Split στον μοντελοποιητή του ANSYS. Το πρώτο εξ' αυτών ορίζεται από ένα οριζόντιο plane σε απόσταση 18mm από το κάτω μέρος της κεφαλής του κοχλία, περιοχή η οποία παρουσιάζει μικρό ενδιαφέρον από άποψη εξαγωγής αποτελεσμάτων οδηγώντας σε ορισμό πεπερασμένων στοιχείων με διάσταση. Η υπόλοιπη επιφάνεια (κάτω από το προαναφερθέν επίπεδο) ορίζεται κατά βάση από το Contact Sizing Mesh που τονίστηκε ανωτέρω. Ύστερα από δοκιμές, υπήρξε η ανάγκη για τον ορισμό Edge Sizing στις ακμές της κεφαλής του κοχλία για επίτευξη συμμετρίας στο άνω μέλος του κοχλία (ύστερα από το διαχωρισμό) και ειδικότερα τον ορισμό αριθμού διαμερίσεων η οποία εκλέχθηκε συναρτήσει της διαμέτρου των ακμών αυτών (προσπάθεια για ύπαρξη περισσότερων του 1 element/mm). Τέλος, στα δύο διαφορετικά σώματα που δημιουργήθηκαν για την ύπαρξη της μέσης ελικοειδούς γραμμής ορίστηκε "Patch Conforming Method" με τετραεδρικά πεπερασμένα στοιχεία, εντολή η οποία παρέχει τη συνέχεια του πλέγματος μεταξύ σύνθετων γεωμετριών εκκινώντας από την εξωτερική γεωμετρία (εν προκειμένω οι σπείρες του κοχλία).

Τέλος, το περικόχλιο παρουσιάζει παρόμοια πλεγματοποίηση με αυτή του κοχλία. Αναλυτικότερα, χρησιμοποιήθηκε η εντολή "Patch Conforming Method" για λόγους ίδιους με την αντίστοιχη επιλογή στον κοχλία (ομοιομορφία πλεγματοποίησης στα δύο διακριτά σώματα σπειρώματος και περικοχλίου) και επιμέρους εντολές εφαρμογής μεγέθους σώματος με στοιχεία μήκους 2 mm στο σώμα του περικοχλίου και 0.5 mm στις σπείρες.

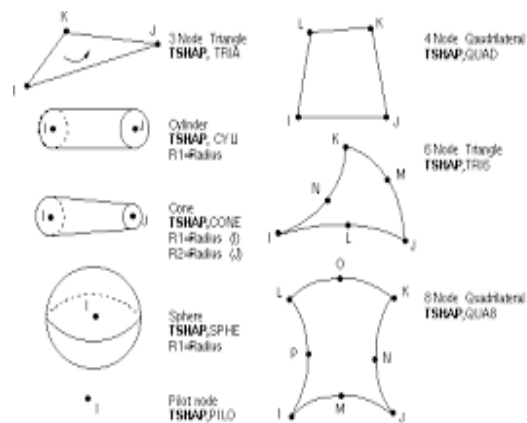
Όσον αφορά το είδος των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν, το ‘‘Solution Information’’ μας δίνει τις ακόλουθες πληροφορίες:

- Number of total nodes = 184807
- Number of contact elements = 143162
- Number of spring elements = 0
- Number of bearing elements = 0
- Number of solid elements = 94819
- Number of total elements = 237981

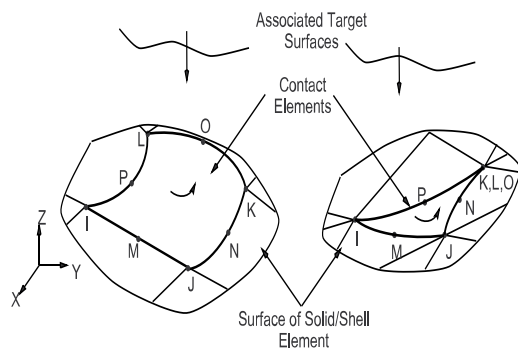
Ειδικότερα, για τις στερεές γεωμετρίες του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν τα στοιχεία SOLID187, ενώ για τις περιοχές όπου είχαμε επαφή, η μοντελοποίηση της έγινε με στοιχεία CONTA174, TARGE170. Τέλος, η επίλυση εμφάνιζε και στοιχεία COMBIN14 τα οποία χρησιμοποιούνται για μοντελοποίηση ελατηρίου και εμφανίζονται στις σπείρες (Εικόνες 3.2-3.5).



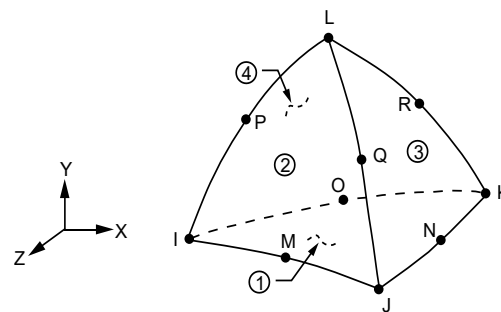
Εικόνα 3.2 ANSYS Elements



Εικόνα 3.3 TARGE170 Elements



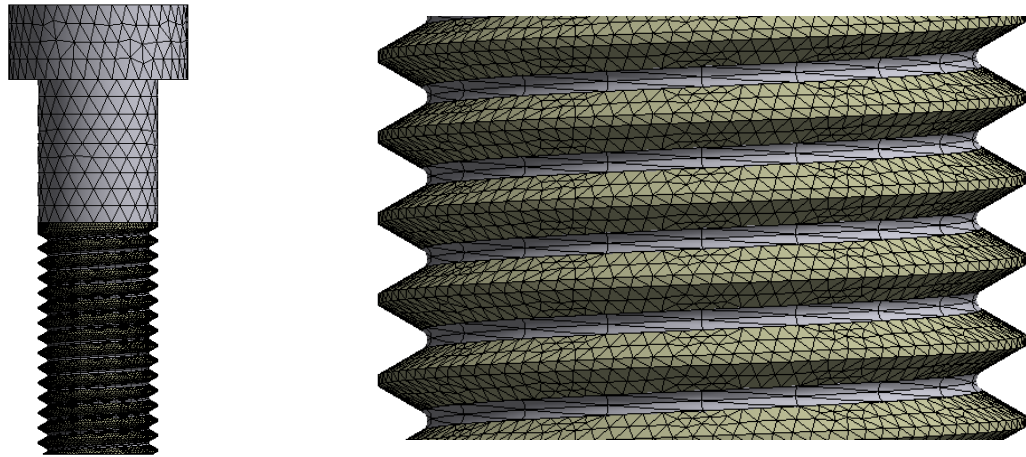
Εικόνα 3.4 CONTA174 Elements



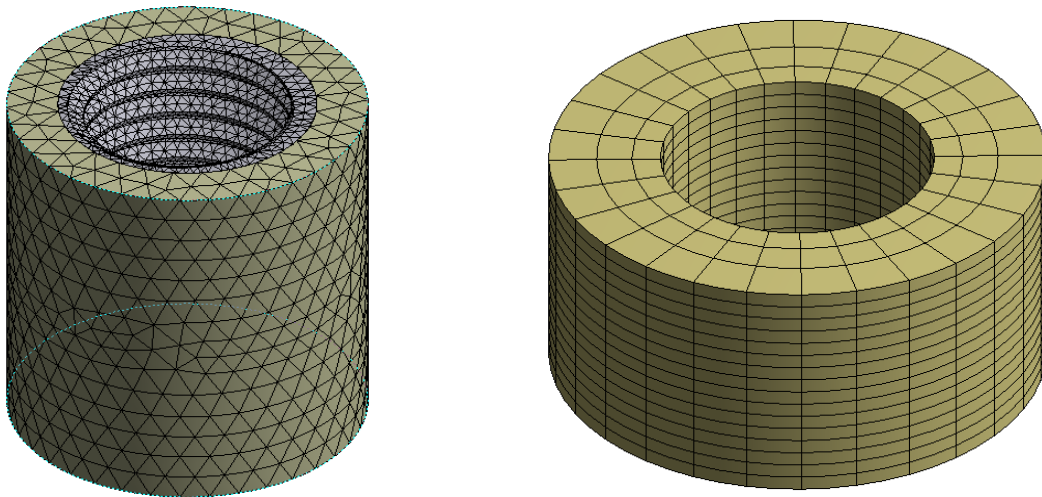
Εικόνα 3.5 SOLID187 Elements

Παρακάτω φαίνονται οι πλεγματοποιήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο μοντέλο μας για την εξαγωγή αποτελεσμάτων, ώστε να έχουμε εικόνα για την αρτιότητα του μοντέλου και την συνέχιση του σχεδιασμού στα τροποποιημένα μοντέλα (Εικόνα 3.6-3.7).

Για την αρτιότητα του μοντέλου ως προς την πλεγματοποίηση επιλέχθηκαν τα κριτήρια της ορθογωνικής ποιότητας (orthogonal quality) και της λοξότητας (skewness) που παρέχει το λογισμικό ANSYS, κριτήρια τα οποία πρέπει να λαμβάνουν τιμές 0.65-0.85 και 0.25-0.4 αντίστοιχα για την ύπαρξη ικανοποιητικού πλέγματος σύμφωνα με πηγές στο διαδίκτυο. Στην προκειμένη περίπτωση η ποιότητα της πλεγματοποίησης λαμβάνει τιμή 0.73 για το κριτήριο της ορθογωνικής ποιότητας και 0.35 για το κριτήριο της λοξότητας των πεπερασμένων στοιχείων.



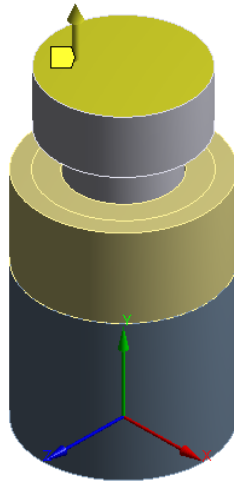
Εικόνα 3.6 Πλεγματοποίηση κοχλία (αριστερά) και πλεγματοποίηση με μεγέθυνση στις σπείρες του κοχλία (δεξιά)



Εικόνα 3.7 Πλεγματοποίηση περικοχλίου (αριστερά) και πλεγματοποίηση ΚΤ (δεξιά)

3.1.3. Επιβαλλόμενα Φορτία

Ο σκοπός της διπλωματικής είναι η ισοκατανομή των δυνάμεων ανά τις σπείρες του κοχλία, συνεπώς το μέγεθος σύγκρισης είναι κατά κύριο λόγο η δύναμη. Φαίνεται, λοιπόν, λογική η επιβολή φορτίου στο μοντέλο. Ύστερα από προσπάθεια επιβολής φορτίου / ροπής στην άνω επιφάνεια της κεφαλής του κοχλία, δεν εμφανίζονται τα αναμενόμενα προφίλ τάσεων, καθιστώντας αναγκαία την εφαρμογή μετατόπισης (displacement) στην άνω επιφάνεια του κοχλία μεγέθους 0.01 mm (Εικόνα 3.8). Ύστερα από έρευνα στο διαδίκτυο προέκυψε ότι το λογισμικό ANSYS αντιδρά καλύτερα όταν ως αρχική συνθήκη ορίζεται μετατόπιση αντί δύναμης.



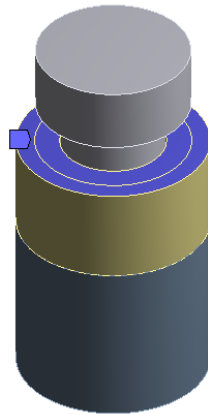
Εικόνα 3.8 Μετατόπιση
(displacement)

Η γνώση του επιβαλλόμενου φορτίου για τις μετέπειτα αναλύσεις ήταν απαραίτητη. Χρησιμοποιήθηκε γι' αυτό το λόγο η εντολή “Force Reaction” στο Solution tab η οποία υπολογίζει το φορτίο αντίδρασης στο Boundary Condition του Displacement.

3.2.4. Στηρίξεις

Για τη στήριξη του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν μία πάκτωση (fixed support) και μία κύλιση (frictionless support) ως περιορισμοί.

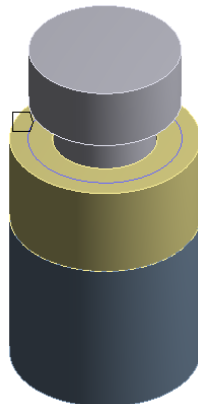
Η κύλιση χρησιμοποιήθηκε για την μοντελοποίηση του περιορισμού της κάθετης κίνησης στην άνω επιφάνεια του περικοχλίου. Οι δύο επιφάνειες που φαίνονται στην Εικόνα 3.9 οφείλονται στον διαχωρισμό των επιφανειών με την εντολή Split Line που παρέχει το Solidworks και το ANSYS (Split Face) με σκοπό να είναι δυνατή η εφαρμογή της κινηματικής συνθήκης (πάκτωση) στην επιφάνεια αυτή.



Εικόνα 3.9 Frictionless Support (κύλιση)

Η πάκτωση χρησιμοποιήθηκε πάνω στη μέση γεωμετρική διάμεσο της άνω επιφάνειας του περικοχλίου (Εικόνα 3.10) η οποία αποτελεί για την επίτευξη συμμετρικότητας (Εξίσωση 2.10).

$$D_{geo} = \sqrt{\frac{D_{outer}^2 + D_{inner}^2}{2}} \quad (3.1)$$



Εικόνα 3.10 Fixed Support (πάκτωση)

3.2.5. Συνεργαζόμενες επιφάνειες.

Για τα στοιχεία που υλοποιούν την επαφή των συνεργαζόμενων επιφανειών, χωρίζονται σε CONTA και TARGE επιφάνειες, όπως φαίνεται στις παρακάτω φωτογραφίες.

Η πολυπλοκότητα κατά το σχεδιασμό του μοντέλου είχε σαν αποτέλεσμα την ύπαρξη πολλών επαφών μεταξύ των διαφορετικών Bodies που προέκυψαν για το ίδιο τεμάχιο (π.χ. κοχλίας και περικόχλιο αποτελούνται από δύο bodies το καθένα). Κατά την εισαγωγή της γεωμετρίας του μοντέλου από το Solidworks στο ANSYS παρουσιάστηκε αδυναμία ακριβούς προσδιορισμού των επαφών μεταξύ των κομματιών, συνεπώς ορίστηκαν χειροκίνητα. Ειδικότερα, υπάρχουν πέντε περιοχές επαφών, οι συνεργαζόμενες επιφάνειες των σπειρωμάτων κοχλίας – περικοχλίου, το άνω και κάτω μέρος περικοχλίου και ΚΤ αντίστοιχα, η εξωτερική επιφάνεια στον κορμό του κοχλίας με την εσωτερική του ΚΤ, και οι επαφές μεταξύ των 2 δημιουργημένων Bodies όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, για το κάθε Part. Με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι contact επιφάνειες (άρα και στοιχεία CONTA174) ενώ με μπλε οι targe (TARGE170 elements).

Οι επαφές που αφορούν το ΚΤ, δηλαδή αυτή της έδρασης με το περικόχλιο και η επαφή του με τον κορμό του κοχλίας μοντελοποιήθηκαν ως επαφή χωρίς τριβή (frictionless contact) καθώς η ύπαρξη του συγκεκριμένου κομματιού είναι η μοντελοποίηση της αξονικής στήριξης του μοντέλου και όχι η εξαγωγή λεπτομερών αποτελεσμάτων που να δικαιολογεί την ανάγκη ύπαρξης τριβής. Επιπροσθέτως, σε δοκιμές που γίνανε με ύπαρξη τριβής τα αποτελέσματα δεν παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές, επομένως έγινε η παραπάνω παραδοχή. Για τα 2 αυτά contacts χρησιμοποιήθηκε η επίλυση με χρήση της μεθόδου Augmented Lagrange.

Για την μοντελοποίηση της επαφής μεταξύ των σωμάτων που προέκυψαν στα μέλη του κοχλίας και του περικοχλίου αντίστοιχα, χρησιμοποιήθηκε η εντολή ‘‘Bonded’’ κατά την οποία τα δύο σώματα ενώνονται σαν ‘‘κολλημένα’’, περιορίζοντας την σχετική κίνηση μεταξύ τους. Επιπροσθέτως, κατά την εισαγωγή του μοντέλου στο ANSYS, τροποποιήθηκε στον γεωμετρικό μοντελοποιητή (Design Modeler) στο πλαίσιο ‘‘Shared Topology Method’’ η επιλογή από ‘‘Automatic’’ σε ‘‘Imprints’’, η οποία παρέχει συνέχεια στην πλεγματοποίηση των δύο σωμάτων, συνεπώς πιο ομοιόμορφο πλέγμα. Ως μέθοδος για την επίλυση της πλεγματοποίησης ορίστηκε η μέθοδος MPC, η οποία είναι κατάλληλη για συσσωματώματα (Bonded Contacts, ουσιαστικά το λογισμικό αντιλαμβάνεται το μοντέλο ως απολύτως στερεό σώμα).

Όσον αφορά την συμπεριφορά των συνεργαζόμενων επιφανειών για όλες τις περιπτώσεις, από τις επιλογές του ANSYS επιλέχθηκε η συμμετρική συμπεριφορά (symmetric behavior), σύμφωνα με την οποία επιτρέπεται η διείδυση των κόμβων των Π.Σ. (πεπερασμένων στοιχείων) από την CONTACT στην TARGET επιφάνεια, το οποίο είναι λογικό εφόσον αναφερόμαστε σε εύκαμπτα σώματα (flexible bodies). Όπως ερευνήθηκε, η παραπάνω επιλογή αυξάνει το υπολογιστικό κόστος, είναι όμως απαραίτητη για την μελέτη της επαφής μεταξύ δύο εύκαμπτων σωμάτων. Στην περίπτωση που μελετούσαμε την επαφή μεταξύ στερεού και εύκαμπτου σώματος τότε η καταλληλότερη επιλογή θα ήταν αυτή της ασύμμετρης συμπεριφοράς (asymmetric behavior).

Στις περιπτώσεις επαφής με τριβή και χωρίς τριβή ορίστηκε ως Interface Treatment η επιλογή Adjust to Touch, εντολή η οποία μεταβάλλει την απόσταση μεταξύ των Surface Contact Elements της εκάστοτε επιφάνειας ώστε να επιτυγχάνεται μηδενικό γεωμετρικό κενό (geometric gap), συνεπώς απλά επαφή.

Η δημιουργία contacts στο ANSYS επιτρέπει τον ορισμό συντελεστών τριβής για αύξηση της ακρίβειας των υπολογισμών και την καλύτερη μοντελοποίηση της επαφής. Όπως λοιπόν σε μια πραγματική κοχλιοσύνδεση υπάρχει τριβή, έτσι και εδώ υπολογίστηκαν συντελεστές τριβής.

Βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν τους συντελεστές τριβής είναι τα υλικά που συνεργάζονται (εδώ χάλυβας κατασκευών - structural steel σε όλα τα τεμάχια), η ποιότητα κατεργασίας και η λίπανση ή μη των επιφανειών.

Οι τιμές του συντελεστή στατικής τριβής στα σπειρώματα για υλικό κοχλία και περικοχλίου χάλυβα και με την προσθήκη λιπαντικού, σύμφωνα με σχετική έρευνα που πραγματοποιήθηκε στο διαδίκτυο βρέθηκε ότι κυμαίνονται μεταξύ των τιμών 0,08-0,23 .

Όπως επίσης βρέθηκε ότι ο συντελεστής στατικής τριβής για στεγνές και καθαρές επιφάνειες από χάλυβα βρίσκεται μεταξύ των τιμών 0,5-0,8. Λόγω όμως του γεγονότος ότι, με την επιλογή συντελεστών τριβής μεγαλύτερων της τιμής 0,2, ο χρόνος επίλυσης των προσομοιώσεων αυξανόταν σε απαγορευτικό βαθμό, θεωρήθηκε προτιμότερο οι τιμές που θα οριστούν να μην υπερβαίνουν τη τιμή 0,2.

Παράλληλα όμως το γεγονός ότι το περικόχλιο δεν έπρεπε να αποκοχλιώνεται κατά την επιβολή του αξονικού φορτίου στον κοχλία, οδήγησε στον υπολογισμό του ελάχιστου συντελεστής τριβής στην επιφάνεια έδρασης του περικοχλίου.

Για να μην περιστραφεί το περικόχλιο, θα πρέπει η ροπή που αναπτύσσεται στην επιφάνεια επαφής του με το ενδιάμεσο κυλινδρικό τεμάχιο, να αντισταθμίζεται από την ροπή σύσφιγξης. Έτσι μπορεί να πραγματοποιηθεί ο παρακάτω υπολογισμός:

$$M_A = F \frac{d_A}{2} \mu' \quad (3.2)$$

$$M = F \frac{d_2}{2} \tan(a + \rho') \quad (3.3)$$

$$\rho' = \frac{\mu}{\cos\left(\frac{\beta}{2}\right)} \quad (3.4)$$

$M_A = M$, απ' όπου συμπεραίνουμε με τη βοήθεια των εξισώσεων (3.2) και (3.3):

$$F \frac{d_A}{2} \mu' = F \frac{d_2}{2} \tan(a + \rho')$$

$$\mu' = \frac{d_2}{d_A} \tan(a + \rho') \quad (3.5)$$

Από τις εξισώσεις (3.4) και (3.5) προκύπτουν οι εξής τιμές:

- $\rho' = 7.125$
- $\mu' = 0.135$

Όπου:

- M_A : Στρεπτική ροπή στην επιφάνεια έδρασης του περικοχλίου
- M : Ροπή σύσφιγξης κοχλία
- F : Επιβαλλόμενο αξονικό φορτίο
- d_A : Μέση διάμετρος στη επιφάνεια έδρασης του περικοχλίου στην οποία αναπτύσσεται η δύναμη τριβής.

- d_2 : Μέση διάμετρος
- α : Γωνία ελίκωσης
- β : Κλίση σπειρώματος
- ρ' : Γωνία τριβής σπειρωμάτων
- μ' : Ελάχιστος συντελεστής τριβής στην επιφάνεια έδρασης του περικοχλίου για την αποφυγή περιστροφής του

Ορίζεται ο παρακάτω συντελεστής τριβής:

- Συντελεστής τριβής σπειρωμάτων: **0.14** ο οποίος είναι τυποποιημένος κατά DIN 13.

3.3. Έλεγχος συνεργαζόμενων επιφανειών

Ο πρώτος έλεγχος ελέγχου διείσδυσης (interference detection) πραγματοποιήθηκε στο πρόγραμμα Solidworks, όπως αναφέρθηκε σε παλαιότερη ενότητα. Όμως, καθότι πλέον δουλεύουμε τις προσομοιώσεις στο ANSYS, το οποίο διαθέτει διαφορετικό λογισμικό, θεωρείται χρήσιμο να γίνει έλεγχος για τυχόν διείσδυση στο παρόν μοντέλο.

Το εργαλείο που διαθέτει το ANSYS για την πραγματοποίηση ελέγχου διείσδυσης ονομάζεται contact tool. Το προαναφερθέν εργαλείο επιτρέπει τον υπολογισμό του γεωμετρικού κενού (Gap), της διείσδυσης μεταξύ των επιφανειών (Penetration) και της κατάστασης στην επαφή (π.χ. near, sliding, no contact)

Με το πέρας των δοκιμών, διαπιστώθηκε ότι το μέγεθος της διείσδυσης (penetration) και των κενών (gaps) κατείχε σημαντικό ρόλο στην σύγκλιση των αποτελεσμάτων. Ειδικότερα, “Geometric Gap” και “Geometric Penetration” ορίζονται το πραγματικό κενό και η πραγματική διείσδυση αντίστοιχα πριν τη δημιουργία δηλαδή του πλέγματος, ενώ “Gap” και “Penetration” είναι το κενό και η διείσδυση μετά τη δημιουργία του πλέγματος. Ύστερα από κατάλληλη επεξεργασία, οι τιμές που λάμβαναν οι προαναφερθείσες τιμές ήταν αρκούντως μικρές ώστε να μην επηρεάζουν σημαντικά την ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

Παρακάτω φαίνεται εικόνα από το πρόγραμμα ANSYS, όπου επιβεβαιώνεται η απουσία διείσδυσης μεταξύ των επιφανειών. Ωστόσο, όπως φαίνεται υπάρχει μια αμελητέα διείσδυση μεταξύ των επιφανειών ΚΤ και περικοχλίου της τάξεως του 10^{-14} mm η οποία όμως δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, ενώ η διείσδυση μεταξύ των συνεργαζόμενων σπειρωμάτων κοχλία – περικοχλίου είναι αναμενόμενη και κυμαίνεται σε λογικά επίπεδα της τάξεως του 10^{-4} mm. Η γεωμετρία του κοχλία που περιλαμβάνει τη δημιουργία της μέσης ελικοειδούς γραμμής με εισχώρηση υλικού στην ήδη υπάρχουσα επιφάνεια και παρουσιάζει γεωμετρική διείσδυση της τάξης του 10^{-3} mm, εμφανίζεται με πορτοκαλί καθότι εμφανίζει μεγάλη διείσδυση για τα δεδομένα του ANSYS. Ωστόσο, ύστερα από προσομοιώσεις με μοντέλα που δεν είχαν την παραπάνω διαμόρφωση προέκυψε ότι δεν επηρεάζει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

Initial Information

For additional options, please visit the context menu for this table (right mouse button)

Name	Contact Side	Type	Status	Number Contacting	Penetration (mm)	Gap (mm)	Geometric Penetration (mm)	Geometric Gap (mm)	Resulting Pinball (mm)	Real Constant
Frictionless - Bride Final BL MOD 4-1 To Multiple	Contact	Frictionless	Inactive	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	6.
Frictionless - Bride Final BL MOD 4-1 To Multiple	Target	Frictionless	Closed	773.	0.	0.	1.8471e-006	1.3312e-009	1.0336	7.
Frictionless - Bride Final BL MOD 4-1 To Multiple	Contact	Frictionless	Inactive	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	8.
Frictionless - Bride Final BL MOD 4-1 To Multiple	Target	Frictionless	Closed	906.	2.4614e-014	0.	0.	0.25003	0.52329	9.
Bonded - Split Line6 To Intersect2[2]	Contact	Bonded	Inactive	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	10.
Bonded - Split Line6 To Intersect2[2]	Target	Bonded	Closed	15092	0.	0.	3.4128e-003	8.8057e-002	9.4277e-002	11.
Bonded - Cut-Extrude 11 To Intersect1[1]	Contact	Bonded	Inactive	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	12.
Bonded - Cut-Extrude 11 To Intersect1[1]	Target	Bonded	Closed	12475	0.	0.	4.1299e-006	7.1205e-010	8.3876e-002	13.
Frictional - Intersect2[2] To Intersect1[1]	Contact	Frictional	Closed	6087.	6.0807e-006	0.	6.5611e-004	5.2572e-008	0.125	14.
Frictional - Intersect2[2] To Intersect1[1]	Target	Frictional	Closed	6015.	1.7967e-014	0.	7.0312e-004	1.2192e-008	0.125	15.

Color Legend

Red	The contact status is open but the type of contact is meant to be closed. This applies to bonded and no separation contact types.
Yellow	The contact status is open. This may be acceptable.
Orange	The contact status is closed but has a large amount of gap or penetration. Check penetration and gap compared to pinball and depth.
Gray	Contact is inactive. This can occur for MPC and Normal Lagrange formulations. It can also occur for auto asymmetric behavior.

Εικόνα 3.11 Contact Tool

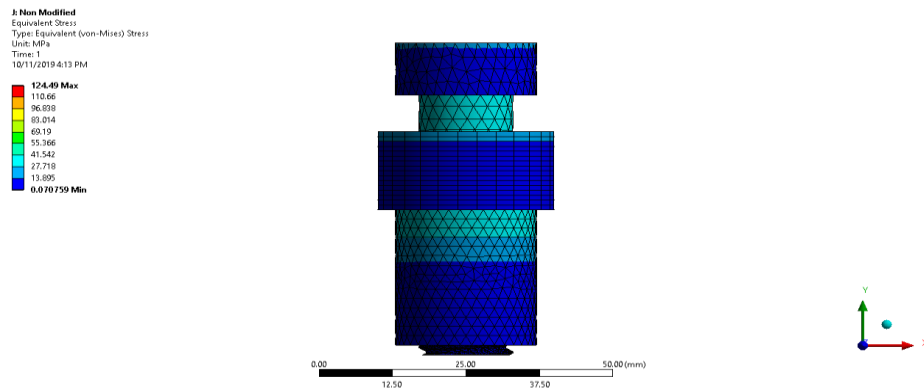
Κεφάλαιο 4 Έλεγχος πρώτων αποτελεσμάτων

4.1 Εξαγωγή αποτελεσμάτων πλεγματοποίησης

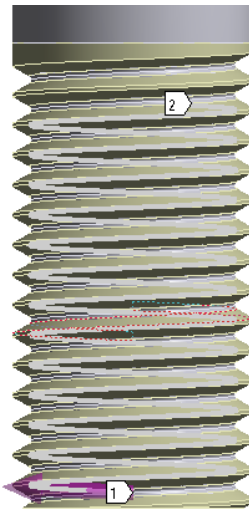
Το μοντέλο της κοχλιοσύνδεσης με το συμβατικό περικόχλιο είναι επαρκώς ορισμένο πλέον ώστε να πραγματοποιηθεί μια πρώτη προσομοίωση και να εξάγουμε αποτελέσματα τα οποία θα επιβεβαιώσουν ότι τα προφίλ τάσεων και οι μετατοπίσεις είναι παρόμοιες με αυτά που αναμένονται.

Ως βασικό μέγεθος σύγκρισης με τη βιβλιογραφία επιλέγουμε τις τάσεις von-Mises, ελάχιστη κύρια τάση, μέγιστη κύρια τάση, μέγιστη διατμητική τάση, μεγέθη τα οποία μπορούν εύκολα να εξαχθούν ως αποτελέσματα στο λογισμικό ANSYS. Η εξαγωγή των αποτελεσμάτων έγινε στη μέση ελικοειδή γραμμή του κοχλίου. Ο υπολογισμός των τάσεων γίνεται για όλο το μήκος της σπείρας και όχι μονάχα για τις συνεργαζόμενες περιοχές της κοχλιοσύνδεσης, ώστε να έχουμε μια καλύτερη εικόνα της κατανομής τους και αν αυτή ακολουθεί την προβλεπόμενη από τη βιβλιογραφία. Η ελικοειδής γραμμή που επιλέχθηκε είναι αυτή στη βάση της σπείρας του περικοχλίου καθότι εκεί προβλέπεται να εμφανιστούν οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις τάσεων. Ειδικότερα, αναμένεται οι μεγαλύτερες τάσεις να εμφανίζονται στις πρώτες συνεργαζόμενες σπείρες, ενώ οι τελευταίες να μην καταπονούνται τόσο.

Παρακάτω παρουσιάζονται εικόνες από τις τάσεις von-Mises σε όλο το μοντέλο και από την ελικοειδή ακμή του κοχλίου από την οποία ελήφθησαν τα αποτελέσματα που θα αναλυθούν σε επόμενη ενότητα.



Εικόνα 4.1 Equivalent Von Mises (Overall)

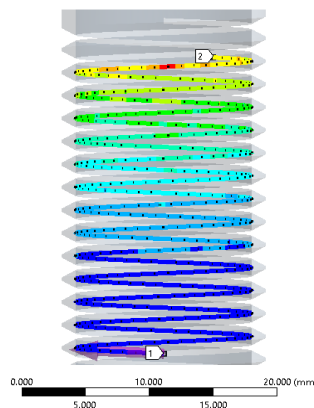
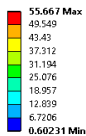


Εικόνα 4.2 Μέση ελικοειδής γραμμή

Από τις παραπάνω εικόνες είναι εμφανής η υψηλή συγκέντρωση των τάσεων στις πρώτες σπείρες συνεργασίας κοχλία-περικοχλίου και η σταδιακή μείωση του στις επόμενες. Παρατηρείται επίσης αυξημένη παραμόρφωση στην επιφάνεια έδραση ΚΤ-περικοχλίου. Η μέγιστη τάση von-Mises που εμφανίζεται είναι στις πρώτες σπείρες συνεργασίας με τιμή 124 MPa η οποία είναι ανεκτή από άποψη αντοχής του υλικού και γενικότερα της κατασκευής.

4.2 Ανάλυση τάσεων στην ελικοειδή γραμμή

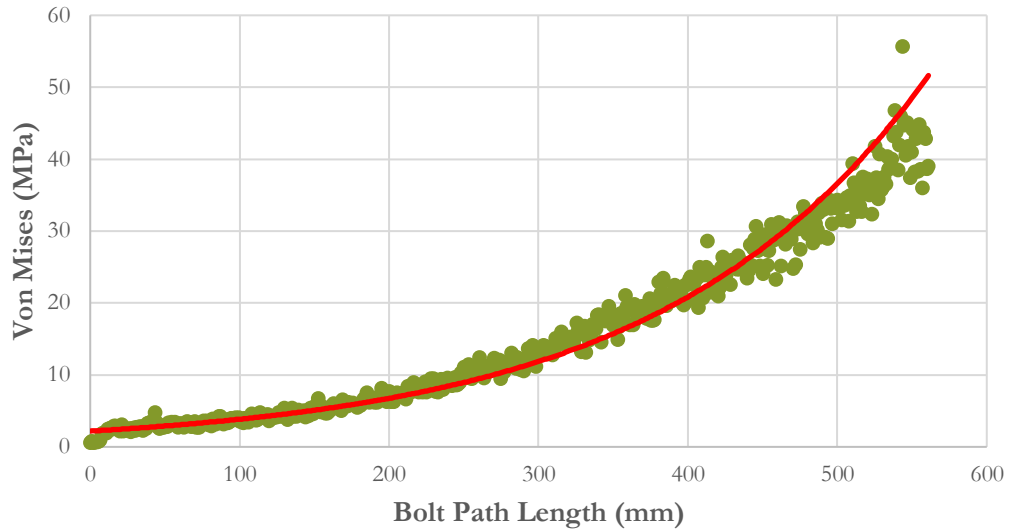
J: Non Modified
 Equivalent Stress Bolt Path
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress
 Unit: MPa
 Time: 1
 10/11/2019 4:17 PM



Εικόνα 4.3 Equivalent Stress Bolt Path

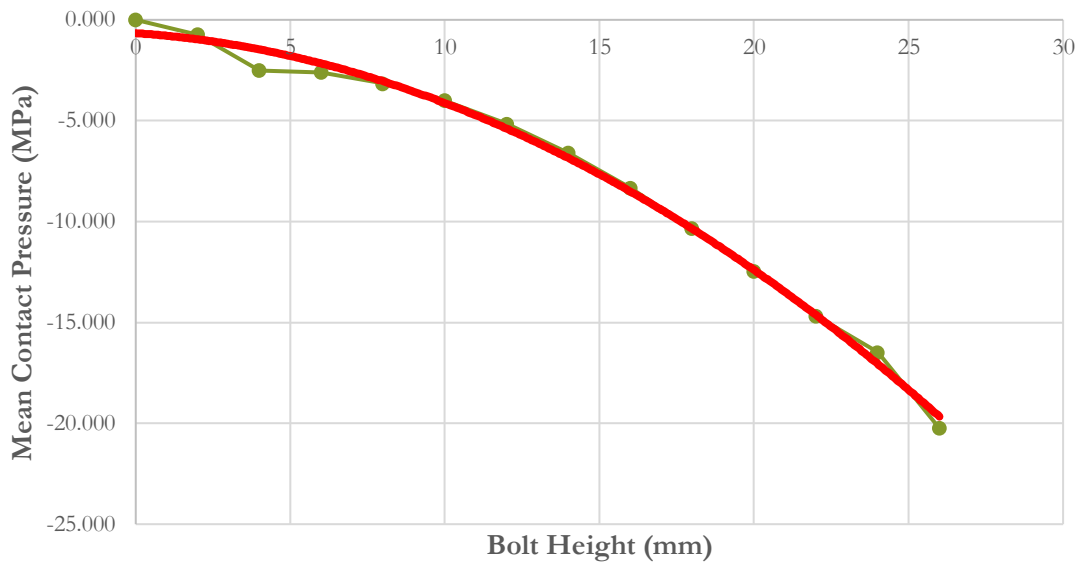
Η (Εικόνα 4.3) επιβεβαιώνει τις προηγούμενες παρατηρήσεις σχετικά με την ανισοκατανομή των τάσεων στις σπείρες και ειδικότερα στις συγκεντρώσεις τάσεων στις πρώτες σπείρες συνεργασίας.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα των προαναφερθέντων τάσεων συναρτήσει του μήκους της ελικοειδούς γραμμής, από τη βάση του κοχλία προς τις πρώτες σπείρες συνεργασίας.

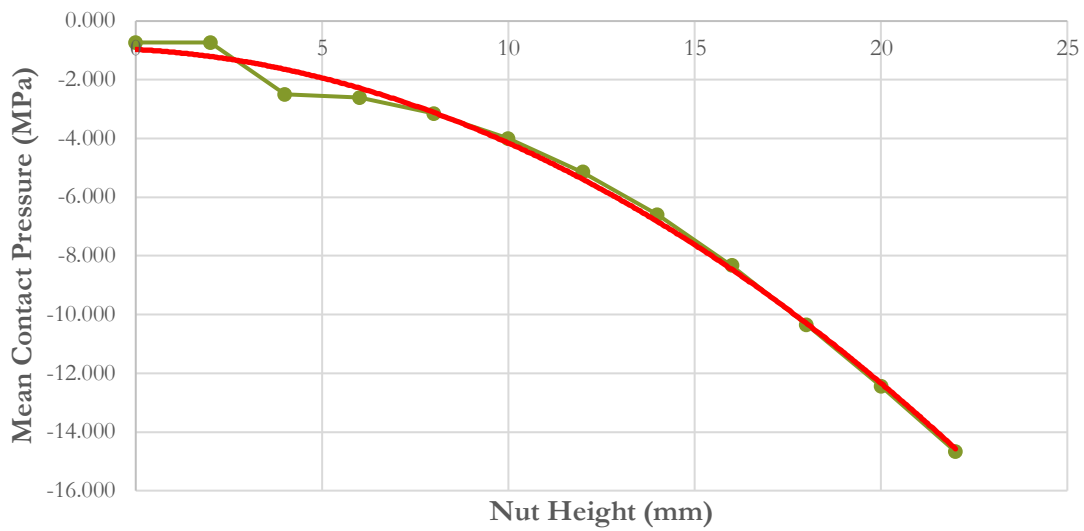


Διάγραμμα 1 Κατανομή von-Mises στην μέση ελικοειδή γραμμή

Στο Διάγραμμα 1 λαμβάνονται ποιοτικά αποτελέσματα σχετικά με την κατανομή των τάσεων στον κοχλία, επιβεβαιώνοντας το φαινόμενο της διατμητικής υστέρησης και της ανισοκατανομής της δύναμης. Υπάρχει αύξηση των τάσεων με το πέρασμα των σπειρών μέχρι την πρώτη σπείρα συνεργασίας. Η επιλογή της ελικοειδούς γραμμής αφορά μόνο τις συνεργαζόμενες σπείρες, συνεπώς δε διακρίνονται ανωμαλίες όπως πτώση τάσης και το μήκος της υπολογίζεται στα 560.95 mm.



Διάγραμμα 2 Κατανομή μέσης πίεσης επιφανείας σε ακμές στην παράπλευρη επιφάνεια του σπειρώματος του κοχλία



Διάγραμμα 3 Κατανομή μέσης πίεσης επιφανείας σε ακμές στην παράπλευρη επιφάνεια του σπειρώματος του περικοχλίου

Μήκος σπειρώματος κοχλία	Μέση πίεση επιφανείας	Μήκος σπειρώματος περικοχλίου	Μέση πίεση επιφανείας
0	0.000E+00	0	0.000E+00
2	-7.301E-01	2	-6.415E-01
4	-2.505E+00	4	-3.480E+00
6	-2.607E+00	6	-3.010E+00
8	-3.151E+00	8	-3.291E+00
10	-4.001E+00	10	-4.120E+00
12	-5.153E+00	12	-5.361E+00
14	-6.605E+00	14	-7.055E+00
16	-8.332E+00	16	-8.782E+00
18	-1.035E+01	18	-1.065E+01
20	-1.245E+01	20	-1.275E+01
22	-1.467E+01	22	-1.497E+01
24	-1.649E+01	24	-1.679E+01
26	-2.025E+01	26	-2.055E+01

Πίνακας 1 Κατανομή μέσης πίεσης επιφανείας κατά μήκος του ενεργού σπειρώματος κοχλία και περικοχλίου αντίστοιχα

Τα διαγράμματα της μέσης πίεσης επιφανείας (Διάγραμμα 2-3) ελήφθησαν με σκοπό την ποιοτική παρατήρηση της ροής της δύναμης και την επιτυχή μεταφορά των δυνάμεων μεταξύ των σπειρών του κοιλία και του περικοιλίου. Όπως φαίνεται στα διαγράμματα, η πίεση επιφανείας αυξάνεται στις πρώτες σπείρες συνεργασίας και οι δύο καμπύλες παρουσιάζουν παρεμφερή κατανομή. Η πίεση επιφανείας μεταξύ συνεργαζόμενων επιφανειών πρέπει να παρουσιάζει πλήρη ομοιότητα μεταξύ των δύο τεμαχίων λόγω δράσης αντίδρασης, το οποίο δεν επιτυγχάνεται ακριβώς πιθανότατα λόγω ‘artifacts’ στις δημιουργημένες επιφάνειες, όπως φαίνεται στους πίνακες παρακάτω. Η ασυμφωνία των τιμών παρουσιάζεται μετά την 6^η σπείρα όπου οι δυνάμεις είναι μεγαλύτερες και παρουσιάζονται συγκεντρώσεις τάσεων στις άκρες των ακμών απ’ όπου πάρθηκαν οι τιμές και εν συνεχεία ο μέσος όρος τους σε κάθε ακμή. Συμπερασματικά, εφόσον υπάρχει πίεση επιφανείας και ειδικότερα είναι οριακά ταυτόσημες σε κοιλία και περικόχλιο, υπάρχει επιτυχής συνεργασία των επιφανειών.

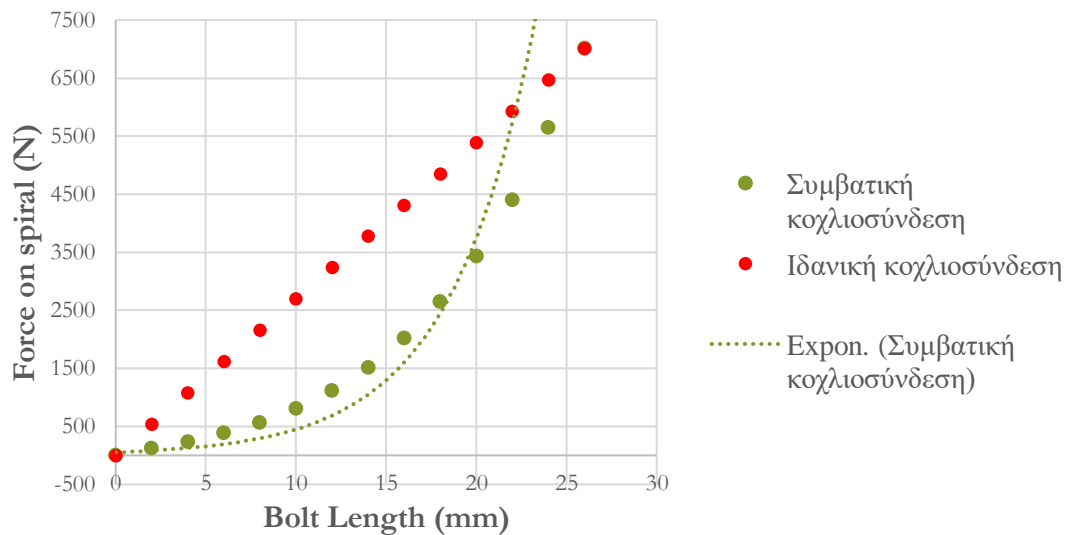
Κεφάλαιο 5 Ανάλυση προτεινόμενης τροποποίησης περικοχλίου

5.1 Εισαγωγή

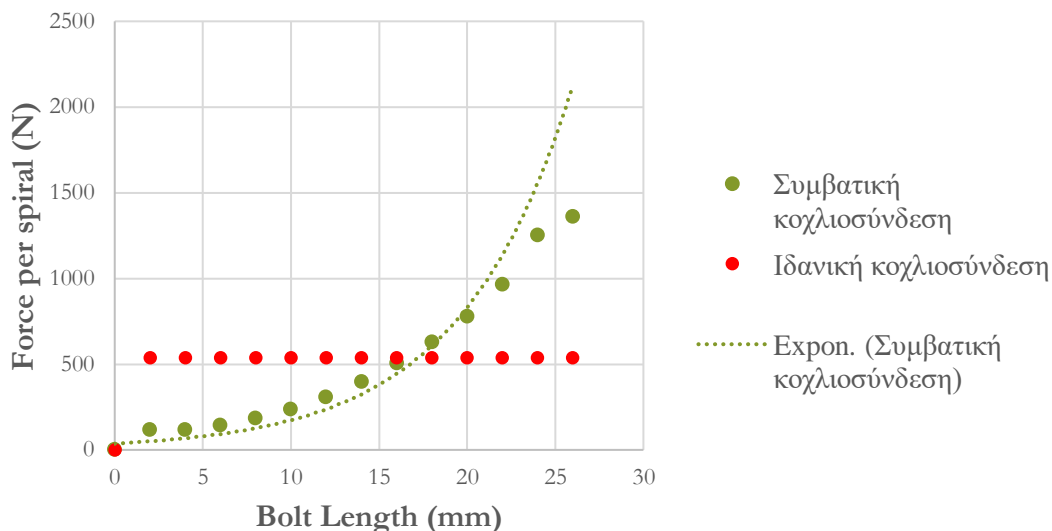
Βασική επιδίωξη της παρούσας διπλωματικής είναι η ισοκατανομή της αξονικής δύναμης που εφαρμόζεται στο μοντέλο σε κάθε σπείρα του κοχλίου. Για την κατανόηση και επεξεργασία της κοχλιοσύνδεσης δημιουργήθηκε η παρακάτω μοντελοποίηση κατά την οποία, πέραν της μοντελοποίησης του κοχλίου ως ελατήριο, υποθέσαμε ότι κάθε σπείρα του κοχλίου και του περικοχλίου αντίστοιχα λειτουργεί ως γραμμικό εφελκυστικό ελατήριο με σταθερά k . Στο τυποποιημένο μοντέλο, η τιμή της σταθεράς ελατηρίου για κάθε σπείρα έχει σταθερή τιμή, ενώ η δύναμη F σύμφωνα με τη θεωρία αλλά και την επίδραση του φαινομένου διατμητικής υστέρησης, ακολουθεί εκθετική κατανομή, συνεπώς και οι μετατοπίσεις. Γίνεται προσπάθεια αντικατάστασης αυτής της εκθετικής συνάρτησης με γραμμική μεταβάλλοντας εκθετικά το k ανά τις σπείρες, ώστε το γινόμενο kx να αποδίδει τη γραμμική κατανομή.

5.2 Προσδιορισμός καμπύλης τροποποίησης

Παρουσιάζεται παρακάτω το διάγραμμα $F-x$ (όπου x το μήκος του ενεργού σπειρώματος) απ' το οποίο προκύπτει η εκθετική κατανομή της δύναμης κατά μήκος του κοχλίου. Ο τρόπος με τον οποίο έγινε η εξαγωγή των αποτελεσμάτων για το διάγραμμα $F-x$ αναλύεται σε επόμενο κεφάλαιο.



Διάγραμμα 4 Κατανομή αξονικής δύναμης κατά μήκος του ενεργού σπειρώματος του κοχλίου



Διάγραμμα 5 Κατανομή δύναμης ανά σπείρα στο ενεργό σπείρωμα του κοχλία

Το Διάγραμμα 4 αφορά την κατανομή των αξονικών δυνάμεων στις σπείρες. Με κόκκινο χρώμα απεικονίζεται η επιθυμητή καμπύλη κατανομής της δύναμης στις σπείρες ενώ με πράσινο τα πραγματικά αποτελέσματα που προκύπτουν από την προσομοίωση στο συμβατικό μοντέλο. Η επιθυμητή καμπύλη αφορά γραμμική αύξηση της δύναμης στις σπείρες. Η συνάρτηση που εκφράζει την καμπύλη είναι η $y=53.793\exp(0.2122x)$ και με συντελεστή γραμμικής συσχέτισης $R^2=0.8$ ο οποίος την προσεγγίζει ικανοποιητικά.

Το Διάγραμμα 5 αφορά την κατανομή των αξονικών δυνάμεων ανά σπείρα. Ομοίως με το πρώτο διάγραμμα, η κόκκινη είναι η επιθυμητή καμπύλη και η πράσινη τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Στην προκειμένη περίπτωση, επιδιώκεται η καμπύλη που παραλαμβάνει κάθε σπείρα να έχει σταθερή τιμή, συνεπώς σταθερή συνάρτηση. Η συνάρτηση που ορίζει το παραπάνω διάγραμμα είναι η $y=36.178\exp(0.1567x)$ με συντελεστή γραμμικής συσχέτισης $R^2=0.75$ ο οποίος προσεγγίζει ικανοποιητικά στην καμπύλη.

Ως μέθοδος μοντελοποίησης, επιλέχθηκε στο δεύτερο διάγραμμα η εξομάλυνση της εκθετικής καμπύλης κατανομής ώστε στο τροποποιημένο μοντέλο να αποτελεί σταθερή συνάρτηση.

Ως γνωστόν, η τιμή της σταθεράς ελατηρίου προκύπτει από την εξίσωση:

$$k = \frac{EA}{L} \tag{5.1}$$

όπου:

E: μέτρο ελαστικότητας υλικού

A: ενεργός διατομή

L: μήκος ελατηρίου

Προκύπτει $k=16.97 \times 10^6$ (N/mm)

Από τις παραπάνω παραμέτρους γίνεται προσπάθεια μεταβολής της ενεργούς διατομής κατά μήκος του σπειρώματος με τρόπο τέτοιο ώστε το k πολλαπλασιαζόμενο με τη μετατόπιση x να αποδίδει σταθερή τιμή δύναμης ανά σπείρα.

Διατίθενται λοιπόν δύο εξισώσεις, αυτή του κλασσικού μοντέλου κοχλιοσύνδεσης και αυτή που θα προσδιορίζει το τροποποιημένο περικόχλιο:

$$F(x) = kx = ka e^{bx} \quad (5.2)$$

$$F'(x) = k(x) \cdot x = \frac{F_{total}}{n} \cdot a \cdot e^{bx} \cdot c \cdot e^{-bx} \quad (5.3)$$

Όπου n ο αριθμός των σπειρών.

Υποθέτοντας ότι η μετατόπιση ανά σπείρα θα διατηρήσει εκθετική κατανομή, προκύπτει η εξίσωση:

$$k(x) = \frac{F'(x) \cdot k}{F(x)} = 5 \cdot 10^8 \cdot e^{-0.1567x} \text{ (N/mm)} \quad (5.4)$$

απ' όπου προκύπτει η κατανομή του k κατά το μήκος του κορμού του κοχλίου.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η παράμετρος που μεταβάλλεται είναι η διατομή, συνεπώς αναμένεται σταδιακή μείωση της τελευταίας από τις τελευταίες προς τις πρώτες σπείρες συνεργασίας. Παρακάτω φαίνεται ο πίνακας με τη μεταβολή του k , η οποία με χρήση των εξισώσεων (5.1) και (5.4) μπορεί να μεταφραστεί σε μεταβολή της διατομής A και εν συνεχεία της εξωτερικής διαμέτρου D_{outer} .

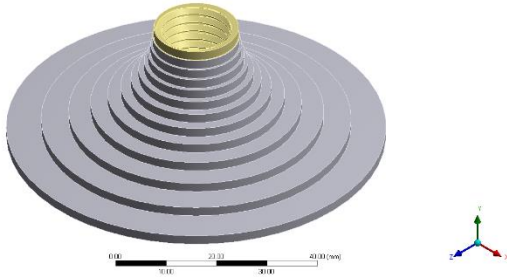
$$A = \frac{\pi}{4} (D_{outer}^2 - D_2^2) \quad (5.5)$$

Παρακάτω παρουσιάζονται οι πίνακες με τις επιδιωκόμενες μεταβολές:

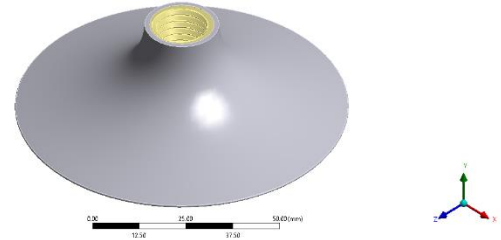
Length	K	A	D
0	5.37E+08	5.37E+03	8.40E+01
2	3.93E+08	3.93E+03	7.23E+01
4	2.87E+08	2.87E+03	6.23E+01
6	2.10E+08	2.10E+03	5.38E+01
8	1.53E+08	1.53E+03	4.66E+01
10	1.12E+08	1.12E+03	4.06E+01
12	8.19E+07	8.19E+02	3.56E+01
14	5.99E+07	5.99E+02	3.14E+01
16	4.38E+07	4.38E+02	2.79E+01
18	3.20E+07	3.20E+02	2.51E+01
20	2.34E+07	2.34E+02	2.28E+01
22	1.71E+07	1.71E+02	2.10E+01
24	1.25E+07	1.25E+02	1.95E+01
26	9.14E+06	9.14E+01	1.84E+01

Πίνακας 2 Μεταβολές της σταθεράς ελατηρίου, επιφανείας και εξωτερικής διαμέτρου ανά σπείρα

Όπως φαίνεται η διάμετρος στη βάση του σπειρώματος (τελευταία σπείρα συνεργασίας) είναι 84 mm, τιμή 5.25 φορές μεγαλύτερη σε σχέση με την ονομαστική διάμετρο του μοντέλου, δημιουργώντας αμφιβολίες για την πρακτικότητα της κοχλιοσύνδεσης (Εικόνα 5.1-5.2).

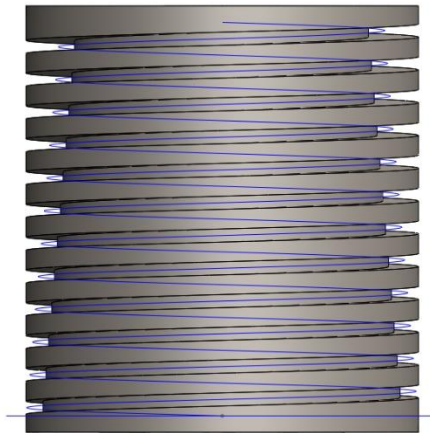


Εικόνα 5.1 Αρχική τροποποίηση με καμπύλη τροποποίησης και επίπεδα



Εικόνα 5.2 Αρχική τροποποίηση με καμπύλη τροποποίησης και επίπεδα

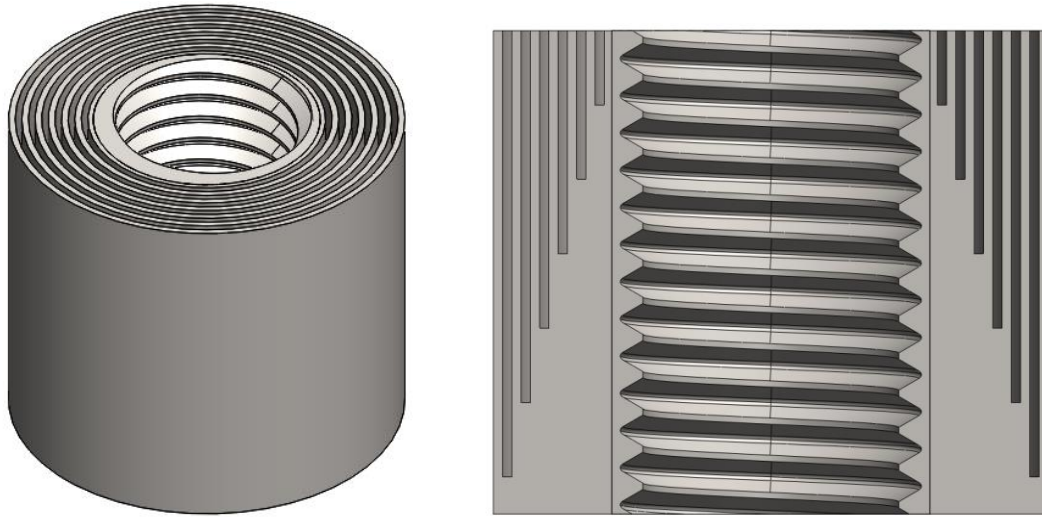
Η μοντελοποίηση με βάση την παραπάνω καμπύλη δεν παρείχε επαρκή βελτίωση στο μοντέλο, προέκυψαν όμως συμπεράσματα τα οποία ενίσχυσαν τη λογική σύμφωνα με την οποία προέκυψε το τελικό αποτέλεσμα. Η λογική αυτή αφορά τη σταδιακή μείωση της διατομής στο επίπεδο xz από τις τελευταίες προς τις πρώτες σπείρες συνεργασίας, χωρίς ωστόσο να αφαιρείται όλο το υλικό στις περιοχές αυτές. Μια πρώτη δοκιμή αφορούσε την δημιουργία σπειρώματος στην εξωτερική επιφάνεια του περικοχλίου με κλίση πέντε μοίρες από την κάτω προς τον άνω επιφάνεια του περικοχλίου (Εικόνα 5.3)



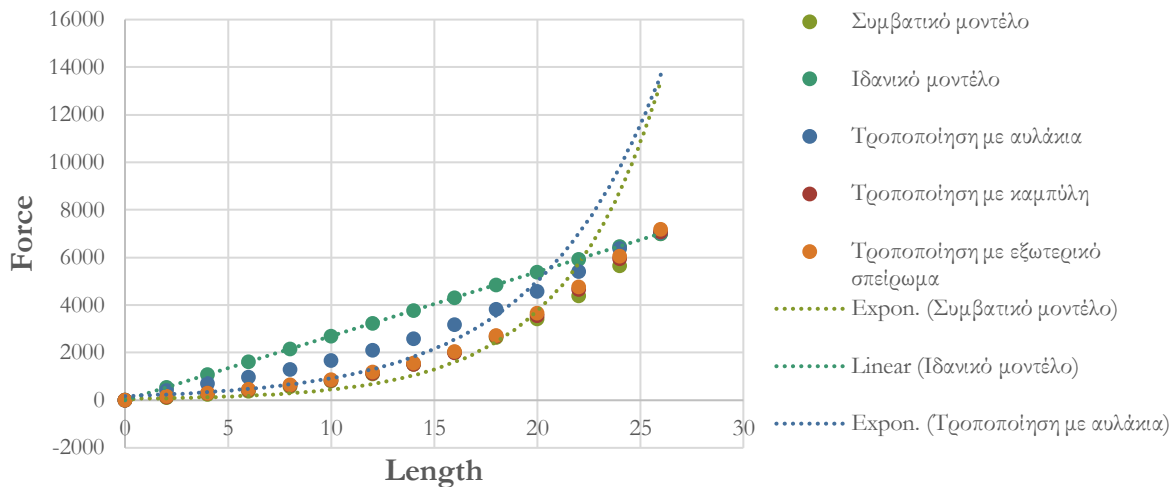
Εικόνα 5.3 Περικόχλιο με εξωτερικό σπείρωμα

Η τροποποίηση της εικόνας 5. παρουσίασε σημαντικές βελτιώσεις ως προς τις τροποποιήσεις με καμπύλες, ωστόσο δεν ήταν ικανοποιητική η ενεργοποίηση του σπειρώματος και η κατανομή των δυνάμεων στις σπείρες ως προς το επιδιωκόμενο αποτέλεσμα. Επιβεβαίωσε όμως την ορθότητα της σχεδιαστικής κατεύθυνσης που ακολουθήθηκε σχετικά με την μη καθολική αφαίρεση υλικού στις πρώτες σπείρες.

Η επικρατέστερη τροποποίηση παρουσιάζεται παρακάτω (Εικόνα 5.4):



Εικόνα 5.4 Ισομετρική όψη (αριστερά) και πρόοψη σε τομή (δεξιά)



Διάγραμμα 6 Σύγκριση τροποποιημένων κοχλιοσυνδέσεων ως προς τη δύναμη στις σπείρες

Ο σχεδιασμός προέκυψε από τις εξής απαιτήσεις – ανάγκες:

1. Αφαίρεση υλικού χωρίς ωστόσο να αφαιρείται εξ' ολοκλήρου η επιφάνεια έδρασης περικοχλίου – ΚΤ.
2. Αφαίρεση υλικού με τρόπο ώστε να είναι δυνατή η κατασκευή του με συμβατικά εργαλεία.
3. Αλλαγή στο ενεργό εμβαδόν ανά περίπου 3 σπείρες, ώστε, παρόλο που η καμπύλη δεν είναι απότομη όπως στα αρχικά μοντέλα, να υπάρχει αισθητή μεταβολή της επιφάνειας.

Κεφάλαιο 6 Δημιουργία μοντέλου κοχλιοσύνδεσης με τροποποιημένο περικόχλιο

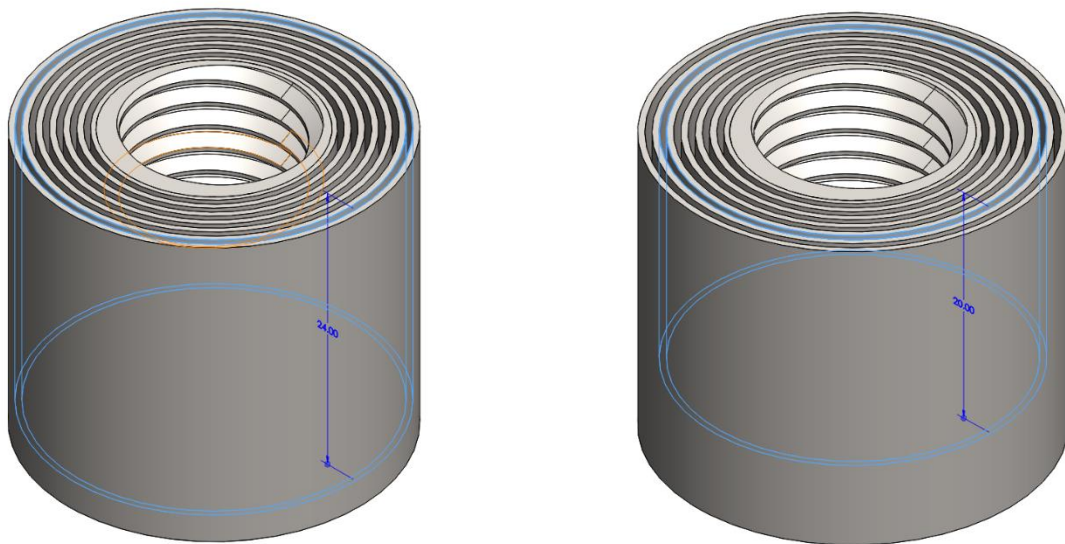
6.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο σχεδιάστηκε το νέο περικόχλιο στο λογισμικό Solidworks. Η χρήση του συγκεκριμένου προγράμματος επιτρέπει τη δημιουργία του νέου μοντέλου εισάγοντας μικρές αλλαγές στο ήδη υπάρχον μοντέλο.

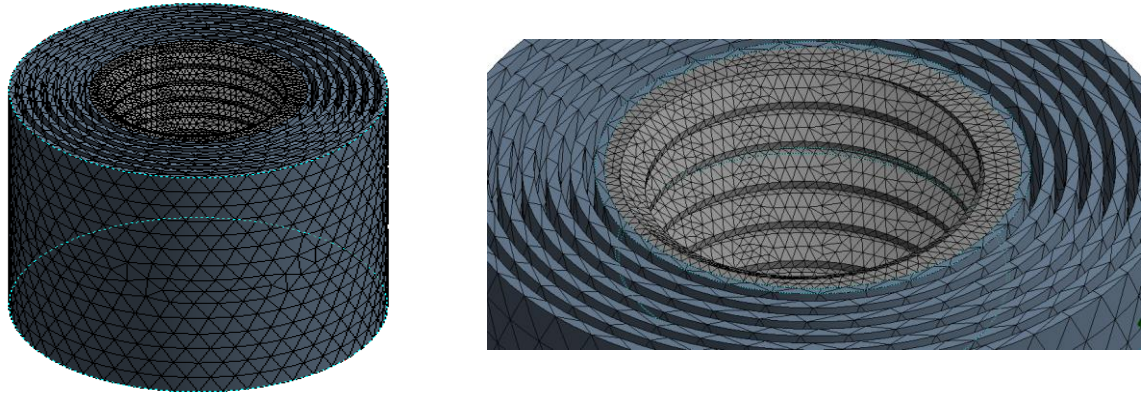
6.2 Περιγραφή σχεδιασμού νέου περικοχλίου

Η τροποποίηση που έλαβε χώρα στην παρούσα διπλωματική περιλαμβάνει τη δημιουργία αυλακιών διαφορετικών διαμέτρων και βάθους το καθένα, ώστε να μειώνεται η ενεργή επιφάνεια από τις τελευταίες προς τις πρώτες σπείρες όπως αναλύθηκε στην ενότητα 5 (Εικόνα 6.1).

Ειδικότερα, με χρήση της εντολής Extruded Cut σε διαφορετικές διαμέτρους εκκινώντας από την άνω επιφάνεια του περικοχλίου δημιουργήθηκαν τα αυλάκια.



Εικόνα 6.1 Αυλακώσεις στο τροποποιημένο μοντέλο



Εικόνα 6.2 Πλεγματοποίηση τροποποιημένου περικοχλίου(αριστερά) και σε μεγένθυνση (δεξιά)

Ως προς την πλεγματοποίηση του μοντέλου η διερεύνηση που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 3.1.2 είναι ικανοποιητική για τη δημιουργία μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων το οποίο θα προσδίδει την επιθυμητή ακρίβεια (Εικόνα 6.2). Ειδικότερα χρησιμοποιήθηκαν τα κριτήρια της λοξότητας και της ορθογωνικής ποιότητας για την ποιότητα της πλεγματοποίησης με μεγέθη 0.34 και 0.79 αντίστοιχα, τιμές ικανοποιητικές για την εξαγωγή αποτελεσμάτων.

Κεφάλαιο 7 Ανάλυση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων

7.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για το μοντέλο με το τροποποιημένο περικόχλιο και σύγκριση των αποτελεσμάτων με το συμβατικό μοντέλο κοχλιοσύνδεσης. Ακολουθεί ανάλυση των βασικών παραμέτρων σύγκρισης.

Βασικά κριτήρια προς σύγκριση:

- I. Κατανομή τάσεων von-Mises στο μοντέλο
- II. Κατανομή διατμητικών τάσεων στη μέση ελικοειδή γραμμή
- III. Κατανομή εφελκυστικών δυνάμεων κατά μήκος του κοχλία

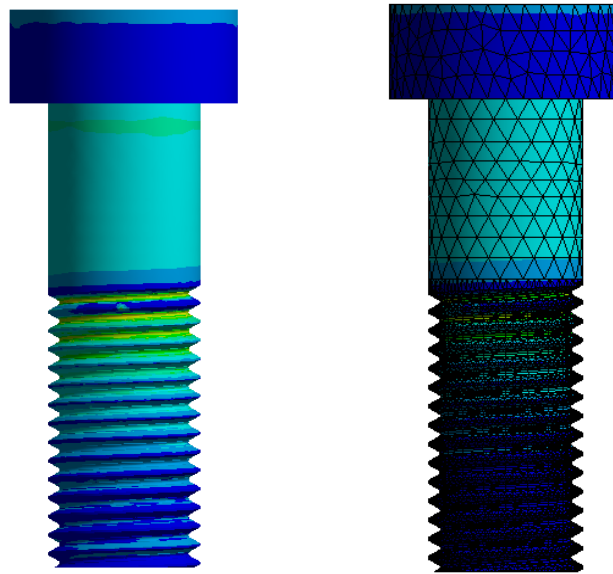
Στις περιπτώσεις (I) και (II) θα αναλυθούν ποιοτικά τα αποτελέσματα, ώστε να επιβεβαιωθεί η συνεργασία περισσότερων σπειρών και η ενεργοποίηση μεγαλύτερου μέρους του σπειρώματος, ενώ στην περίπτωση (III) θα συγκρίνουμε ποσοτικά τις δυνάμεις που κατανέμονται στις σπείρες του κοχλία με την ίδια μέθοδο που πάρθηκαν και στο συμβατικό μοντέλο όπως αναλύθηκε στην ενότητα 5.2.

Ένα βασικό πρόβλημα που προέκυψε είναι ότι ο αιώτερος σκοπός είναι η σύγκριση της κατανομής των δυνάμεων στα δύο μοντέλα, ενώ εφαρμόζεται μετατόπιση αντί δύναμης όπως αναλύθηκε σε προηγούμενη ενότητα. Συνεπώς, επειδή για την ίδια μετατόπιση προκύπτουν διαφορετικές δυνάμεις, στο τροποποιημένο περικόχλιο εφαρμόζεται μετατόπιση η οποία αντιστοιχεί στη μέγιστη αναπτυσσόμενη δύναμη στο κλασσικό μοντέλο. Ειδικότερα, με γραμμική παρεμβολή υπολογίζεται η απαιρούτητη τιμή μετατόπισης για την τελική εφαρμογή των 7000N περίπου. Η δύναμη αυτή υπολογίζεται όπως και στο συμβατικό μοντέλο με χρήση της εντολής ‘‘Reaction Forces’’ υπολογισμένο στην οριακή συνθήκη (boundary condition) της μετατόπισης (ενότητα 3.1.3).

$$x_2 = \frac{F_2}{F_1} x_1 = \frac{7014.2}{5010.14} \cdot 0.01 = 0.014mm \quad (7.1)$$

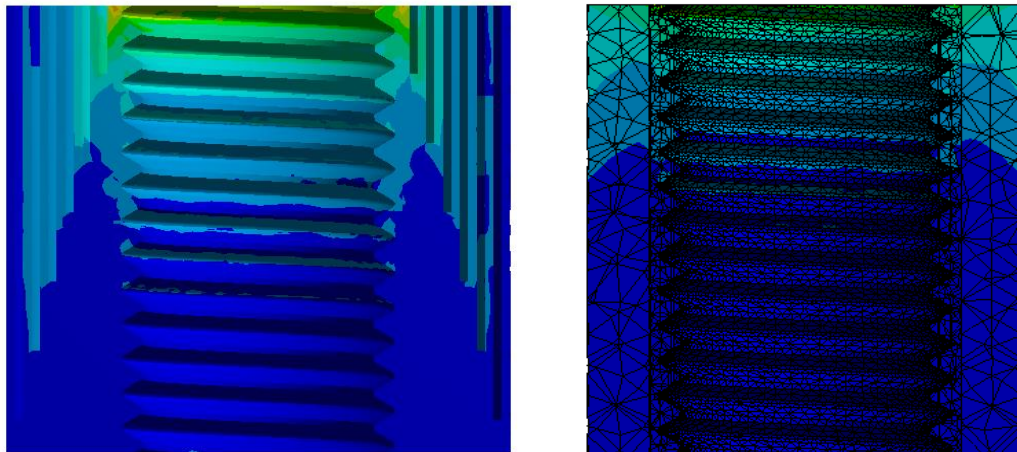
7.2 Κατανομή τάσεων Von Mises

Οι τάσεις von-Mises, όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 4.1, προσφέρουν ποιοτικά αποτελέσματα για την αξιολόγηση του μοντέλου. Ειδικότερα, αναμένεται μεγαλύτερη ενεργή περιοχή στο τροποποιημένο μοντέλο και μείωση των μέγιστων τάσεων που ασκούνται σε αυτό (Εικόνα 7.1).



Εικόνα 7.1 Κατανομή von-Mises στο τροποποιημένο (αριστερά) και το συμβατικό (δεξιά) μοντέλο

Το σκούρο μπλε αντιστοιχεί σε απουσία ή πολύ μικρή τιμή των τάσεων. Όπως φαίνεται στις εικόνες, ενεργοποιείται όλος ο κορμός του κοχλίου στο τροποποιημένο μοντέλο.

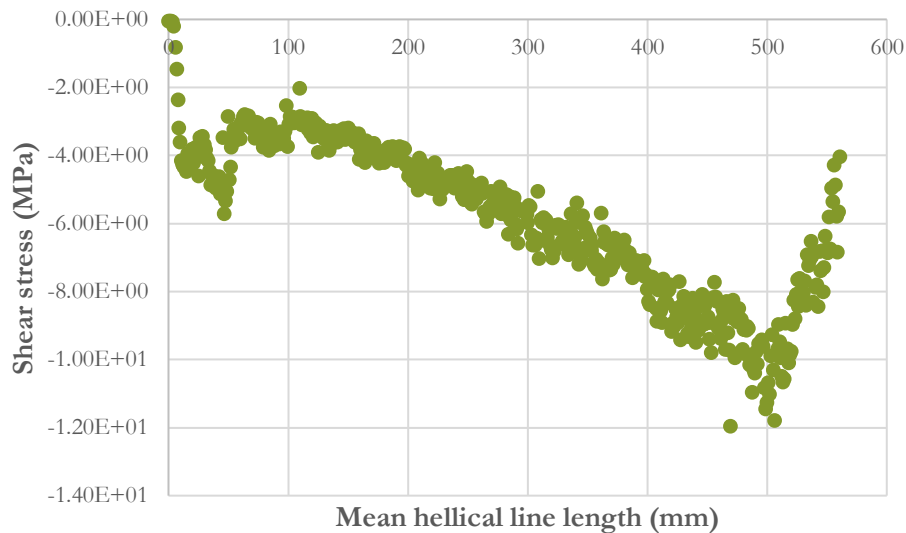


Εικόνα 7.2 Κατανομή τάσεων von-Mises στο τροποποιημένο περικόχλιο (αριστερά) και στο συμβατικό περικόχλιο (δεξιά)

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 7.2 η αύξηση της ενδοτικότητας στις πρώτες σπείρες λόγω της ενδοτικότητας των τοιχωμάτων δημιουργεί συγκεντρώσεις τάσεων σε αυτά. Οι πρώτες σπείρες καταλήγουν να παραλαμβάνουν μειωμένο φορτίο ενώ ταυτόχρονα ενεργοποιούνται περισσότερες σπείρες σε σχέση με το συμβατικό μοντέλο.

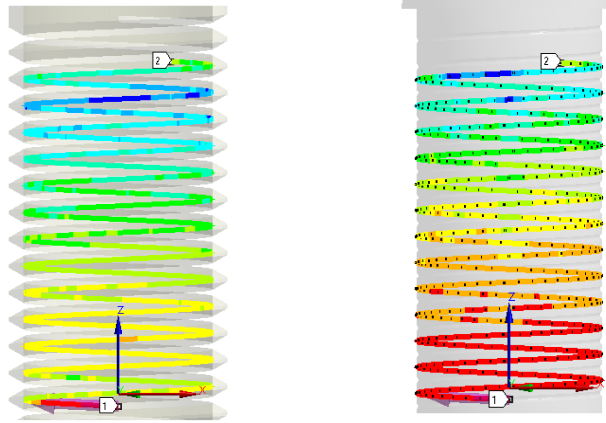
7.3 Κατανομή διατμητικών τάσεων στη μέση ελικοειδή γραμμή

Στην ενότητα αυτή αναλύονται τα διαγράμματα των διατμητικών τάσεων στη μέση ελικοειδή γραμμή στη ρίζα του σπειρώματος τα οποία παρέχουν ποιοτικές πληροφορίες για την επιτυχή ή μη συνεργασία των σπειρωμάτων κοχλία-περικοχλίου, σαν εναλλακτικό και βελτιωμένο metric σε σχέση με τις πιέσεις επιφανείας. Η ύπαρξη και η τιμή της διατμητικής τάσης συνεπάγονται λειτουργία της εκάστοτε σπείρας. Η καμπύλη κατανομής τους στην ελικοειδή γραμμή αναμένεται να έχει προφίλ παρόμοιο με αυτό των δυνάμεων ανά σπείρα.



Διάγραμμα 7 Διατμητικές τάσεις στη μέση ελικοειδή γραμμή του κοχλία

Το Διάγραμμα 7 επιβεβαιώνει την αυξητική πορεία των διατμητικών τάσεων από τις τελευταίες προς τις πρώτες σπείρες συνεργασίας. Η μείωση των τάσεων στο τέλος του διαγράμματος οφείλεται στο πέρας των συνεργαζόμενων σπειρών του κοχλία, καθότι το μήκος του σπειρώματός του είναι μεγαλύτερο απ' αυτό του περικοχλίου.

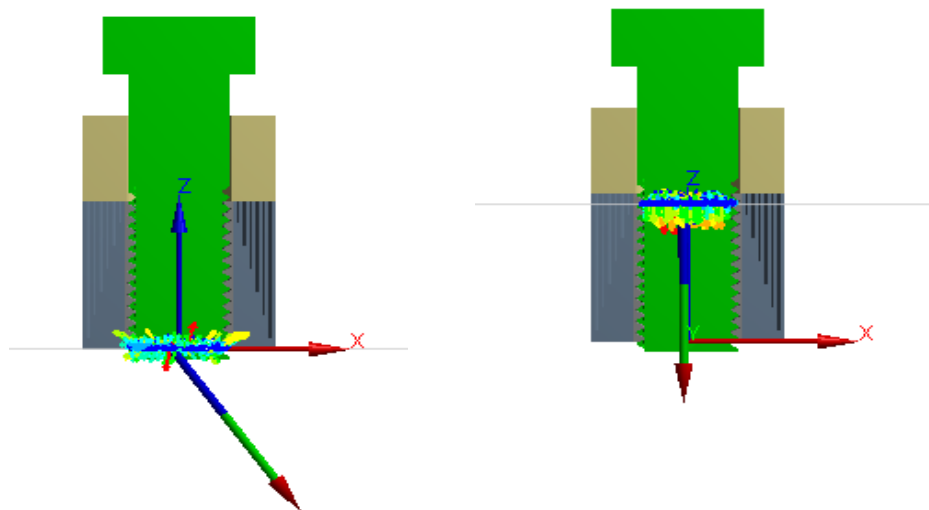


Εικόνα 7.3 Διατμητικές τάσεις στη μέση ελικοειδή γραμμή για το μοντέλο με το τροποποιημένο περικόχλιο (αριστερά) και για το μη τροποποιημένο(δεξιά)

Αρχικά, είναι εμφανής η αύξηση των διατμητικών τάσεων από τις τελευταίες προς τις πρώτες σπείρες συνεργασίας. Επίσης, το τροποποιημένο μοντέλο παρουσιάζει σαφή βελτίωση καθότι δεν υπάρχει κόκκινη περιοχή η οποία σημαίνει απουσία διατμητικών τάσεων, οδηγώντας στο συμπέρασμα ότι όλες οι σπείρες συνεισφέρουν στην παραλαβή των δυνάμεων. Προφανώς οι τελευταίες σπείρες (κίτρινη περιοχή) δεν ενεργοποιούνται τόσο όσο οι πρώτες. (Εικόνα 7.3)

7.4 Κατανομή εφελκυστικών δυνάμεων κατά μήκος του κοιλία

Στην παρούσα ενότητα γίνεται ανάλυση του τρόπου εξαγωγής των δυνάμεων ανά σπείρα, επεξεργασία και σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ συμβατικού και τροποποιημένου μοντέλου.



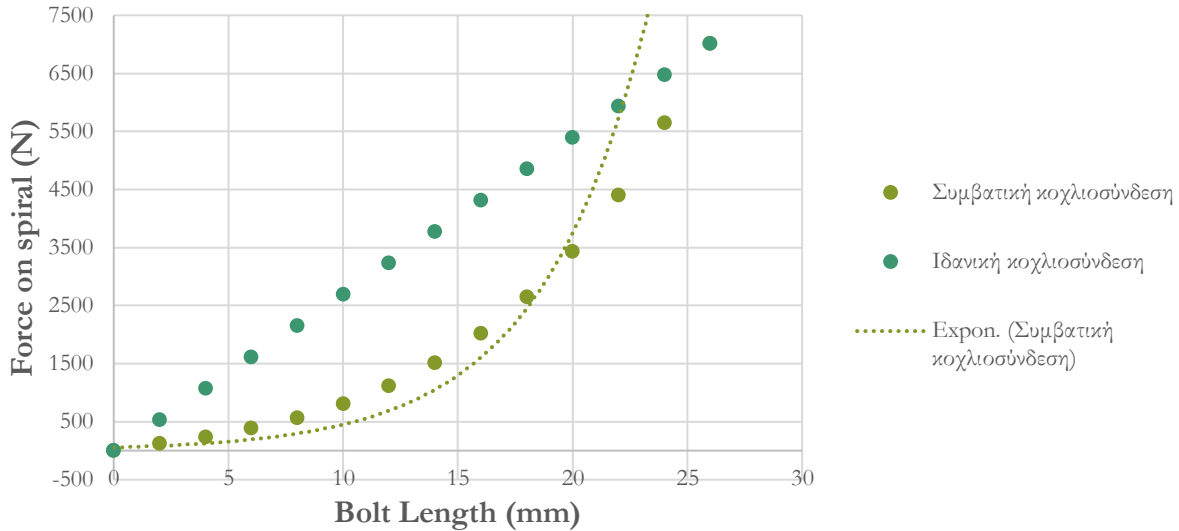
Εικόνα 7.4 Υπολογισμός δύναμης στο επίπεδο Z0 (αριστερά) και στο επίπεδο Z26 (δεξιά)

Το λογισμικό ANSYS παρέχει τη δυνατότητα εξαγωγής δυνάμεων σε κόμβους ορίζοντας στο πλαίσιο Analysis Settings → Output Controls → Nodal Forces → YES. Εν συνεχεία, ορίζονται τα οριζόντια επίπεδα στα οποία γίνεται η εξαγωγή των δυνάμεων ανά δύο χιλιοστά από τη βάση του περικοχλίου (σύνολο 13 επίπεδα για 26 χιλιοστά μήκους περικοχλίου και ενεργού μήκους κορμού κοχλία αντίστοιχα, Εικόνα 7.4). Οι δυνάμεις στα επίπεδα αυτά υπολογίστηκαν με την εντολή Force Reaction, όπου ουσιαστικά εφαρμόζεται η μέθοδος των τομών για τα προαναφερθέντα επίπεδα.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι δυνάμεις ανά σπείρα για τα δύο μοντέλα καθώς και κοινό διάγραμμα F-x (όπου x η απόσταση από τη βάση του περικοχλίου). Στο διάγραμμα εμφανίζεται και η επιδιωκόμενη καμπύλη για καλύτερη οπτική σύγκριση. Οι αποστάσεις των επιπέδων άντλησης των πληροφοριών είναι 2 mm, όσο και το βήμα του σπειρώματος. Συνεπώς, κάθε επίπεδο αντιστοιχεί στην αρχή και στο τέλος κάθε σπείρας. Για να υπολογιστεί ακριβώς η δύναμη που συμβάλλει κάθε σπείρα γίνεται αφαίρεση μεταξύ των δυνάμεων των δύο επιπέδων, όπως φαίνεται παρακάτω (στήλη per spiral του πίνακα).

Μήκος	Δύναμη στο περικόχλιο με μετατροπές		Δύναμη στο συμβατικό μοντέλο	
	Στη σπείρα	Ανά σπείρα	Στη σπείρα	Ανά σπείρα
0	9.21E+00	9.21E+00	3.51E+00	3.51E+00
2	4.22E+02	4.13E+02	1.22E+02	1.18E+02
4	7.04E+02	2.82E+02	2.42E+02	1.20E+02
6	9.79E+02	2.75E+02	3.87E+02	1.45E+02
8	1.29E+03	3.13E+02	5.71E+02	1.85E+02
10	1.66E+03	3.71E+02	8.11E+02	2.39E+02
12	2.10E+03	4.38E+02	1.12E+03	3.09E+02
14	2.60E+03	5.01E+02	1.52E+03	3.98E+02
16	3.18E+03	5.79E+02	2.02E+03	5.06E+02
18	3.82E+03	6.39E+02	2.66E+03	6.32E+02
20	4.58E+03	7.59E+02	3.43E+03	7.79E+02
22	5.42E+03	8.44E+02	4.40E+03	9.65E+02
24	6.38E+03	9.59E+02	5.65E+03	1.25E+03
26	7.05E+03	6.64E+02	7.01E+03	1.36E+03

Πίνακας 3 Κατανομή δυνάμεων κατά μήκος του σπειρώματος (αριστερά στήλη) και δυνάμεων ανά σπείρα (δεξιά στήλη) κοχλία και περικοχλίου αντίστοιχα.



Διάγραμμα 8 Σύγκριση επιθυμητής καμπύλης (σκούρο πράσινο), καμπύλης από τροποποιημένο μοντέλο (μπλε) και καμπύλης συμβατικού μοντέλου κοχλιοσύνδεσης (ανοιχτό πράσινο)

Το ιδανικό αποτέλεσμα, αποτελεί την ισοκατανομή της αξονικής δύναμης που εφαρμόζεται στον κοχλία στις δεκατρείς διαθέσιμες σπείρες, συνεπώς $F_{\text{spiral}} = F_{\text{total}}/13 = 539.55 \text{ N}$. Είναι εμφανές ότι το τροποποιημένο μοντέλο παρουσιάζει αισθητή βελτίωση ως προς την ισοκατανομή των δυνάμεων (Διάγραμμα 8).

Από τους πίνακες παρατηρείται ότι η πρώτη σπείρα συνεργασίας του τροποποιημένου μοντέλου συγκρατεί μικρότερη δύναμη σε σχέση με τη δεύτερη σπείρα γεγονός που οφείλεται στο γεγονός ότι οι αυλακώσεις παραλαμβάνουν μεγάλο μέρος των δυνάμεων που δέχονται από το ΚΤ κατά την επαφή, συνεισφέροντας έτσι στην αποσυμφόρησή της.

Ειδικότερα, για την ποσοτική σύγκριση των δύο μοντέλων επιλέχθηκε η σύγκριση της τιμής RMS των καμπυλών ως προς την ιδανική καμπύλη ισοκατανομής (Εξίσωση 7.2).

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} (F_{xi} - F_{mi})^2} \quad (7.2)$$

Όπου:

F_{xi} : δύναμη ανά σπείρα στα ρεαλιστικά μοντέλα

F_{mi} : δύναμη ανά σπείρα στο ιδανικό μοντέλο

n : αριθμός συνεργαζόμενων σπειρών

Προκύπτουν δύο τιμές RMS, η πρώτη RMS_1 αφορά τη σύγκριση του συμβατικού μοντέλου με την ιδανική καμπύλη και η δεύτερη σύγκριση του τροποποιημένου μοντέλου με το ιδανικό σενάριο.

$$RMS_1 = 399.18$$

$$RMS_2 = 204.92$$

Υπάρχει συνεπώς βελτίωση στη σύγκλιση της καμπύλης της τάξεως του

$$RMS_{\%} = \frac{RMS_2 - RMS_1}{RMS_2} = 48.66\% \quad (7.3)$$

Η τιμή που λαμβάνει το μέγεθος RMS δείχνει σύγκλιση κατά 50% στην απόκριση του μοντέλου ως προς την ισοκατανομή των τάσεων, και άρα στην μείωση των περιπτώσεων αστοχίας του υλικού στις πρώτες δύο συνεργαζόμενες σπείρες του κοχλίου. Ωστόσο, καθότι τα κυλινδρικά νεύρα περιφερειακά του σπειρώματος παρουσιάζουν αυξημένη ενδοτικότητα μειώνεται η μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό της κοχλιοσύνδεσης λόγω πιθανής αστοχίας του υλικού σε αυτά.

Κεφάλαιο 8 Κατασκευή κοχλιοσύνδεσης σε 3D εκτυπωτή,

8.1 Εισαγωγή

Η κατασκευή του μοντέλου με χάλυβα και συμβατικά εργαλεία παρουσίαζε πρακτικές δυσκολίες λόγω των μικρών δακτυλίων – αυλακιών και του μεγάλου τους βάθους στο τροποποιημένο περικόχλιο. Συνεπώς προτιμήθηκε η κατασκευή του μοντέλου σε εκτυπωτή κατασκευής τρισδιάστατων μοντέλων. Η μοντελοποίηση πραγματοποιήθηκε με χρήση δύο διαφορετικών μεθόδων οι οποίες θα αναλυθούν στο επόμενο κεφάλαιο.

8.2 Κατασκευή κοχλιοσύνδεσης

Για την κατασκευή του μοντέλου δοκιμάστηκαν δύο μέθοδοι εκτύπωσης, η εκτύπωση με βύθιση σε ρητίνη (SLA) και αυτή της έκχυσης θερμοπλαστικού υλικού (FDM). Στην μέθοδο SLA η βάση κατασκευής τοποθετείται μέσα σε υγρή ρητίνη (φωτοπολυμερές) το οποίο στερεοποιείται με ρήψη συγκεντρωμένων ακτίνων φωτός ή UV φωτός στην επιφάνεια προς εκτύπωση (curing). Το τεμάχιο κατασκευάζεται σε επίπεδα (layers). Στην μέθοδο FDM πραγματοποιείται έκχυση θερμοπλαστικού υλικού μέσω εργαλείου μικρής διαμέτρου το οποίο θερμαίνει το υλικό και κατασκευάζει το τεμάχιο σε επίπεδα. Παρακάτω ακολουθεί σύγκριση των δύο μεθόδων [10] και ανάλυση των αποτελεσμάτων των εκτυπώσεων.

FDM Method	SLA Method
Δυνατότητα χρήσης πολλών διαφορετικών υλικών (PLA, PETG, ABS, nylon, PVA, TPU καθώς και μείγματα PLA με ξύλο, κεραμικά υλικά, μέταλλο).	Περιορισμός στα χρησιμοποιούμενα υλικά καθώς και σε αλλαγή υλικού μεταξύ εκτυπωτών διαφορετικών κατασκευαστών.
Δυνατότητα εκτύπωσης πολλών διαφορετικών χρωμάτων.	Περιορισμός στη χρήση των χρωμάτων (άσπρο, γκρι, μαύρο ή “καθαρά” χρώματα).
Η ακρίβεια εξαρτάται από τη διάμετρο του εργαλείου εκχύσεως υλικού και την ακρίβεια της μετακίνησης του εργαλείου στους άξονες XYZ.	Μεγάλη ακρίβεια καθότι εξαρτάται από την ακρίβεια φωτισμού του πομπού και του δέκτη, τα οποία είναι πολύ μικρά. Επίσης, στο μοντέλο ασκούνται μικρότερες δυνάμεις κατά τη δημιουργία του οδηγώντας έτσι στην ύπαρξη ομαλότερων επιφανειών.
Ευκολία στην αποκόλληση του τεμαχίου από την βάση κατασκευής.	Δύσκολη η αποκόλληση του τεμαχίου, πολλές φορές χρειάζεται η χρήση μαχαιριού.
Χαμηλό κόστος κατασκευής και υλικών.	Υψηλό κόστος κατασκευής και υλικών.

Το πρόβλημα με τη μέθοδο FDM ήταν η άμεση σκλήρυνση και συστολή του τεμαχίου με αποτέλεσμα την μείωση των διαμέτρων και των υπολογισμένων ανοχών οδηγώντας σε αδυναμία συναρμογής κοχλία-περικοχλίου (Εικόνα 8.1). Επίσης, σε ένα απ’ τα τεμάχια παρουσιάστηκε αστοχία του υλικού με αποκόλληση των οριζόντιων στρώσεων κατά τη σύσφιξη (Εικόνα 8.2).



Εικόνα 8.1 Πρώτη δοκιμή με χρήση μεθόδου FDM (αδυναμία συναρμογής)



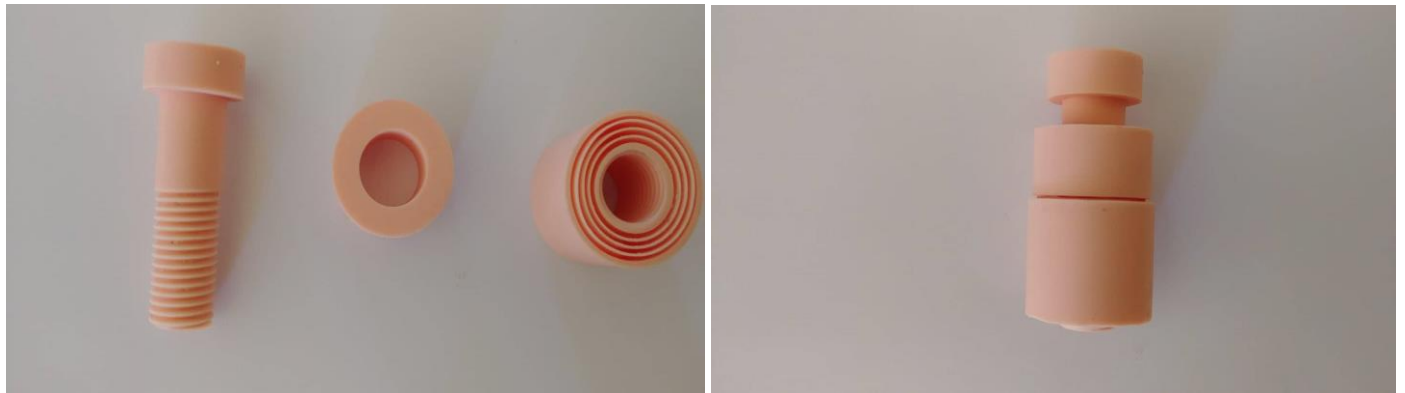
Εικόνα 8.2 Δεύτερη δοκιμή με χρήση μεθόδου FDM και αστοχία στις κάτω οριζόντιες στρώσεις

Η μέθοδος SLA παρουσίασε βελτιωμένα μοντέλα καθότι δεν υπήρχε το πρόβλημα της απότομης σκλήρυνσης και συστολής του υλικού (εφικτή συναρμογή) καθώς και στην ύπαρξη ομαλότερων επιφανειών.

Ωστόσο, σε μια πρώτη απόπειρα για την κατασκευή του μοντέλου παρατηρείται αστοχία του υλικού στην εξωτερική διάμετρο του περικοχλίου κατά τη σύσφιξη και ιδιαίτερη ενδοτικότητα του μοντέλου ως προς την ακτινική διεύθυνση (Εικόνα 8.3). Συνεπώς επιδιώχθηκε κατασκευή του με εξωτερικό δακτύλιο διπλάσιου πάχους σε σχέση με τους εσωτερικούς (ειδικότερα 1 mm). Η παραπάνω τροποποίηση βελτίωσε τη στιβαρότητα του μοντέλου. Ενώ αρχικά παρουσιάστηκε πρόβλημα συναρμογής, με την προσθήκη λιπαντικού και απανωτά περάσματα του κοχλία διαμέσου του περικοχλίου προέκυψε μικρή παραμόρφωση του περικοχλίου ως προς την ακτινική διεύθυνση όπως προβλέπεται και από την υπόθεση για τον σχεδιασμό. Στην Εικόνα 8.4 παρουσιάζονται τα τεμάχια και η συνδεσμολογία με το τελικό αποτέλεσμα.



Εικόνα 8.3 Τρίτη δοκιμή με μέθοδο SLA και αστοχία εξωτερικού περιβλήματος



Εικόνα 8.4 Τεμάχια (αριστερά) και συναρμολόγηση (δεξιά) τελικού μοντέλου

Κεφάλαιο 9 Συμπεράσματα και μελλοντικές βελτιώσεις

9.1 Εισαγωγή

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η ισοκατανομή της αξονικής δύναμης που εφαρμόζεται στον κοχλία στις σπείρες του περικοχλίου. Το πρώτο κομμάτι της διπλωματικής που αφορά τη δημιουργία του συμβατικού μοντέλου κοχλιοσύνδεσης για μελλοντική σύγκριση με το τροποποιημένο αποδείχθηκε ιδιαίτερα χρονοβόρο λόγω των δυσκολιών που παρουσίασαν τα λογισμικά Solidworks και ANSYS για τη δημιουργία των επιφανειών και ακμών απ' τις οποίες λαμβάνονται οι μετρήσεις, γι' αυτό και αναλύθηκε ενδελεχώς. Το δεύτερο κομμάτι, δηλαδή η διερεύνηση και δημιουργία της τροποποίησης που επιφέρει ισοκατανομή, παρουσίασε λιγότερες δυσκολίες στο σχεδιασμό και περισσότερες στο αναλυτικό κομμάτι (πλέον υπήρχε εμπειρία στη χρήση των προγραμμάτων).

Παρακάτω παρουσιάζεται μια αποτίμηση της εργασίας ως προς τα αποτελέσματα του συμβατικού και του τροποποιημένου μοντέλου κοχλιοσύνδεσης καθώς και την τελική κατασκευή του.

9.2 Συμπεράσματα

Αρχικά, όσον αφορά τον σχεδιασμό και την ανάλυση στο συμβατικό μοντέλο κοχλιοσύνδεσης τα αποτελέσματα φαίνεται να προσομοιάζουν ικανοποιητικά αυτά της βιβλιογραφίας, επιβεβαιώνοντας την αρτιότητα του. Ταυτόχρονα οι υψηλές συγκεντρώσεις τάσεων φαίνεται να συμφωνούν επίσης με τη βιβλιογραφία σύμφωνα με την υπόθεση του Κεφαλαίου 1 σχετικά με τις περιοχές αστοχίας της κοχλιοσύνδεσης.

Εν συνεχεία, το τροποποιημένο μοντέλο οδήγησε σε βελτίωση στην ισοκατανομή των δυνάμεων ανά σπείρα στον κοχλία κατά 50% σε σχέση με το συμβατικό μοντέλο. Ωστόσο, βάση της μοντελοποίησης φαίνεται να δημιουργούνται νέες περιοχές συγκέντρωσης τάσεων στα αυλάκια του περικοχλίου, μειώνοντας έτσι την συνολική αντοχή του. Συνεπώς, το μοντέλο καθίσταται κατάλληλο για χρήση σε περιπτώσεις όπου δεν ασκούνται μεγάλες δυνάμεις αλλά η κύρια καταπόνηση οφείλεται σε κόπωση εφόσον οι πρώτες σπείρες δεν αναλαμβάνουν όλο το φορτίο.

Τα μοντέλα που κατασκευάστηκαν σε 3D εκτυπωτή επιβεβαιώνουν τις υποθέσεις αυτές καθώς υπήρχε θραύση στην εξωτερική επιφάνεια του περικοχλίου ύστερα από τη συναρμογή του με τον κοχλία στα περισσότερα μοντέλα. Επίσης, παρουσιάζονται προβλήματα κατασκευασιμότητας τόσο με χάλυβα όσο και σε εκτυπωτή καθώς στην πρώτη περίπτωση απαιτούνται ειδικά εργαλεία για την κοπή των αυλακίων και στην δεύτερη περίπτωση είναι αναγκαία η χρήση της μεθόδου SLA για την επίτευξη ακρίβειας στο μοντέλο.

9.3 Μελλοντικές βελτιώσεις στο παρόν μοντέλο

Στο παρόν μοντέλο κρίνεται απαραίτητο να βρεθεί απλούστερος και οικονομικότερος τρόπος για την κατασκευή του. Μια πιθανή βελτίωση θα ήταν η αύξηση των τοιχωμάτων και του πάχους των αυλακιών ώστε τα πρώτα να είναι λιγότερο ενδοτικά και να είναι δυνατή η κατασκευή με χρήση εργαλείων. Ωστόσο σε αναλύσεις που έγιναν στο λογισμικό ANSYS, η αύξηση του πάχους οδηγούσε σε μειωμένη ισοκατανομή των δυνάμεων γι' αυτό και δεν υλοποιήθηκε. Η αλλαγή αυτή προβλέπεται να αυξήσει και τη συνολική αντοχή σε εφελκυσμό της κοχλιοσύνδεσης.

Μια ακόμα βελτίωση αποτελεί η αύξηση του πάχους στην εξωτερική επιφάνεια του περικοχλίου η οποία φάνηκε να αστοχεί στην πλειοψηφία των μοντέλων που κατασκευάστηκαν με τον τρισδιάστατο εκτυπωτή.

Προτείνεται επίσης εκπόνηση πειράματος εφελκυσμού των δοκιμίων για εξακρίβωση των αποτελεσμάτων. Στο πλαίσιο της διπλωματικής υπήρχε και η πειραματική διαδικασία ωστόσο η υλοποίηση των τρισδιάστατων μοντέλων υπήρξε πιο χρονοβόρα από τον προβλεπόμενο υπολογισμό.

9.4 Προτάσεις για έρευνα

Με το πέρας της διπλωματικής εργασίας υπάρχει πλέον η εμπειρία και η πληροφόρηση από τη σχετική βιβλιογραφία [5] σχετικά με την πρόταση μελλοντικών μελετών για την επίτευξη της ισοκατανομής της αξονικής δύναμης στις σπείρες του κοχλίου.

Προτείνονται λοιπόν τα παρακάτω:

- Αλλαγή της διαμέτρου του κορμού του κοχλίου
- Αλλαγή του βήματος σπειρώματος του κοχλίου
- Περαιτέρω μελέτη στο μοντέλο με το εξωτερικό σπείρωμα στο σώμα του περικοχλίου

Κεφάλαιο 10 Βιβλιογραφία

- [1] Loading and Contact Stress Analysis on the Thread Teeth in Tubing and Casing Premium Threaded Connection, 1 State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, School of Petroleum and Natural Gas Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China, R&D Center of Tianjin Pipe (Group) Corporation, Ltd., Tianjin 300301, China
- [2] Modeling Threaded Bolted Joints in ANSYS Workbench, By Michael Oliver, Oliver Testing and Consulting, Warner Robins, U.S.A.
- [3] Failure modes of bolt and nut assemblies under tensile loading, E.L. Grimsmo, A. Aalberg, M. Langseth, A.H. Clausen
- [4] Static Strength of Threaded Fasteners – The Basic of Thread Strength, by Toshimichi Fukuoka
- [5] Overall bolt stress optimization, by Niels L Pedersen
- [6] Shear Lag Effects in Steel Tension Members, W. SAMUEL EASTERLING and LISA GONZALEZ GIROUX
- [7] Determination of Load Distribution in a Threaded Connector with Yielding Threads, by W. Wang & K. M. Marshek
- Μοντελοποίηση και διερεύνηση της βέλτιστης γεωμετρίας συνεργαζόμενων σπειρωμάτων για μεγιστοποίηση της αντοχής τους, by Ανδρέας Καραγιώργος
- [9] Στοιχεία Μηχανών, Χρήστος Α. Παπαδόπουλος
- [10] Available link www.all3dp.com
- [11] Available link www.quora.com
- [12] ANSYS help