



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

Μοντελοποίηση και διερεύνηση της βέλτιστης γεωμετρίας
συνεργαζόμενων σπειρωμάτων για μεγιστοποίηση της αντοχής
τους

Διπλωματική Εργασία

ΑΝΔΡΕΑΣ ΚΑΡΑΓΙΩΡΓΟΣ

Επιβλέπων: Λέκτορας Δρ. Β. Σπιτάς

ΑΘΗΝΑ 2015

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνάται η βέλτιστη γεωμετρία συνεργαζόμενων σπειρωμάτων με σκοπό την μεγιστοποίηση της αντοχής τους. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε κυρίως με την χρήση υπολογιστικών - σχεδιαστικών προγραμμάτων που εφαρμόζουν την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Αρχικά περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την μοντελοποίηση ενός αξιόπιστου μοντέλου κοχλιοσύνδεσης. Στην συνέχεια αναλύεται η προτεινόμενη τροποποίηση του σπειρώματος του περικοχλίου και η μοντελοποίηση του. Έπειτα, αφότου πραγματοποιηθεί έλεγχος για την εύρεση των πιο αξιόπιστων και ωφέλιμων από πλευράς υπολογιστικού κόστους μοντέλων, ακολουθεί η ανάλυση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων και διεξάγεται πειραματικός έλεγχος για την επιβεβαίωση τους. Τέλος παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της μελέτης και προτείνονται τρόποι για την μελλοντική βελτίωση της εξεταζόμενης τροποποίησης.

ABSTRACT

The subject of this thesis is the research of the optimal geometry of cooperating threads in order to maximize their tolerance. The study was carried out mostly with the usage of computing and design software, where the finite element method is applied. In the first part of the paper, there is the description of the procedure followed, so as to create a reliable screw connection model. The second part is referred to the thorough analysis of the proposed screw thread's amendment, as well as its manufacture. After many tests concerning the selection of the most reliable and less time consuming models, the analysis of the simulations results are processed thoroughly, along with the transaction of the experimental tests aiming at their verification. In the end of the paper the conclusions of the study are being presented, along with proposals for future improvement of the amendment analyzed in this thesis.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Φθάνοντας στο τέλος των προπτυχιακών μου σπουδών οφείλω να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν στην ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας. Καταρχήν θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή και επιβλέποντα της εργασίας Δρ. Β. Σπιτά για την εμπιστοσύνη και την καθοδήγηση του, καθώς και για τις γνώσεις που μου μετέδωσε κατά την διάρκεια της εκπόνησης της πρώτης μου ολοκληρωμένης μελέτης μου ως εν δυνάμει μηχανικό.

Συνεχίζοντας, θα ήταν παράλειψη εκ μέρους μου να μην ευχαριστήσω τους συναδέλφους στο εργαστήριο Στοιχείων Μηχανών που προσφέρθηκαν να συνεισφέρουν με τις γνώσεις τους στην επίπονη και χρονοβόρα αυτή ερευνητική διαδικασία που πραγματοποιήθηκε σκοπεύοντας στην ολοκλήρωση των σπουδών μου. Θα ήταν μεγάλο ατόπημα να μην ευχαριστήσω ονομαστικά έστω και κάποιους από αυτούς, που η συμβολή τους ήταν καθοριστική, όπως τον Χρηστοφοράκη Γεώργιο, τον Νταρούι Αριστοτέλη, τον Γιακουμή Γεώργιο, τον Κουγιουμτζόγλου Χρηστόδουλο, τον Μπεζμέρτη Φίλιππο και τον Αποστολάκη Μηνά.

Επιπρόσθετα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Διευθυντή της Εταιρείας Μορφή Καλούπια Ε.Π.Ε, Δάκα Αθανάσιο με τη βοήθεια του οποίου πραγματοποιήθηκε η κατεργασία των περικοχλίων που θα εξετάζονταν πειραματικώς.

Ευχαριστώ επίσης τον Δρ. Μανωλάκο Δ. καθηγητή της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π. και τον Δρ. Κουρκουλή Σ. καθηγητή της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών Ε.Μ.Π. για την παραχώρηση εργαστηριακού εξοπλισμού αναγκαίου για την διεκπεραίωση της πειραματικής διαδικασίας.

Τέλος, δεν θα μπορούσαν να μην πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στη οικογένεια μου για την αμέριστη στήριξη της καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

Αφιερώνεται,
στους γονείς και στα αδέρφια μου

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Εισαγωγή.....	14
2. Δημιουργία Γεωμετρίας Μοντέλου Κοχλιοσύνδεσης	19
2.1. Εισαγωγή.....	19
2.2. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά κοχλιοσύνδεσης.....	19
2.2.1. Σπειρώμα	19
2.2.2. Κοχλίας.....	21
2.2.3. Περικόχλιο	24
2.4. Ενδιάμεσο κυλινδρικό τεμάχιο	25
2.3. Συναρμολόγηση κοχλιοσύνδεσης στο Solidworks	26
3. Δημιουργία Μοντέλου Πεπερασμένων Στοιχείων	30
3.1. Εισαγωγή.....	30
3.2. Βασικές επιλογές μοντελοποίησης.....	30
3.2.1. Επιλογή Υλικού.....	30
3.2.2. Επιλογή πεπερασμένων στοιχείων και πλεγματοποίηση.....	32
3.2.3. Επιβαλλόμενα Φορτία.....	34
3.2.4. Στήριξη.....	35
3.2.5. Συνεργαζόμενες επιφάνειες	35
3.3. Έλεγχος σωστής επαφής συνεργαζόμενων επιφανειών	38
4. Έλεγχος πρώτων αποτελεσμάτων	41
4.1. Εισαγωγή.....	41
4.2. Αρχικός έλεγχος τάσεων για το μοντέλο με κανονικό περικόχλιο	41
4.3. Κατανομή τάσεων von Mises και της μέσης πίεσης επιφανείας κατά μήκος του σπειρώματος του κοχλία και του περικοχλίου	43
5. Ανάλυση προτεινόμενης τροποποίησης περικοχλίου	49
5.1. Εισαγωγή.....	49
5.2. Προσδιορισμός καμπύλης τροποποίησης του περικοχλίου	50
6. Δημιουργία μοντέλου κοχλιοσύνδεσης με τροποποιημένο περικόχλιο	55
6.1. Εισαγωγή.....	55
6.2. Περιγραφή σχεδιασμού νέου περικοχλίου	55
7. Εύρεση καταλληλότερης πυκνότητας πλέγματος.....	59

7.1. Εισαγωγή.....	59
7.2. Εύρεση καταλληλότερης πυκνότητας πλέγματος για το μοντέλο με κανονικό περικόχλιο.....	61
7.3. Εύρεση καταλληλότερης πυκνότητας πλέγματος για τα μοντέλα με τροποποιημένο περικόχλιο.....	66
8. Ανάλυση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων.....	68
8.1. Εισαγωγή.....	68
8.2. Ανάλυση της κατανομής των τάσεων von Mises και της μέσης πίεσης επιφανείας.....	68
8.3. Έλεγχος της επίδρασης της τροποποίησης στις συγκεντρώσεις τάσεων του σπειρώματος του κοχλίου.....	70
8.4. Έλεγχος της επίδρασης της τροποποίησης στις συγκεντρώσεις τάσεων του σπειρώματος του περικοχλίου.....	72
9. Πειραματικός έλεγχος.....	75
9.1. Εισαγωγή.....	75
9.2. Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας.....	75
9.3. Ανάλυση πειραματικών αποτελεσμάτων.....	81
10. Συμπεράσματα και μελλοντικές βελτιώσεις.....	83
10.1. Εισαγωγή.....	83
10.2. Συμπεράσματα.....	83
10.3. Μελλοντικές Βελτιώσεις.....	84
11. Βιβλιογραφία.....	86

1.Εισαγωγή

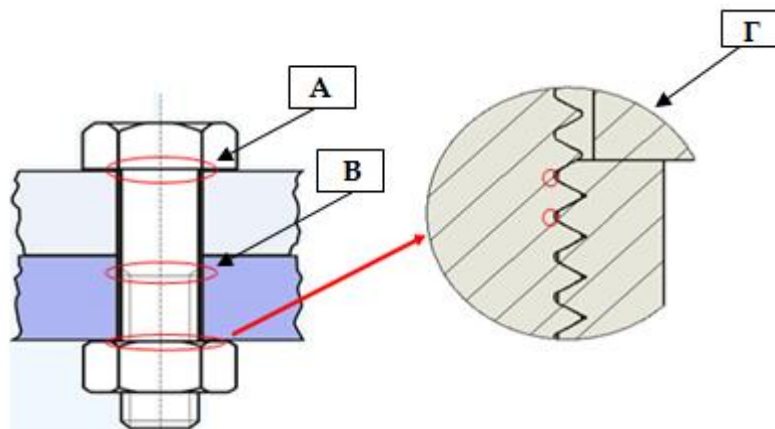
Η σύνδεση τεμαχίων με κοχλία-περικόχλιο αποτελεί έναν από τους βασικούς τρόπους σύνδεσης που χρησιμοποιούνται στα μηχανήματα και γενικότερα στις κατασκευές με αποτέλεσμα να διαδραματίζουν έναν πολύ σημαντικό ρόλο στην ασφάλεια και την αξιοπιστία τους.

Οι κοχλιοσυνδέσεις όπως ονομάζονται κοινώς οι συνδέσεις κοχλίων με περικόχλια, εκτός από την βασική τους ιδιότητα που είναι η σύνδεση-σύσφιξη διαφόρων τεμαχίων, παρέχουν και την δυνατότητα λύσης και επανασύνδεσης που αποτελεί έναν επιπλέον λόγο για να χρησιμοποιηθούν σε περιπτώσεις όπου απαιτείται αποσυναρμολόγηση για λόγους συντήρησης ή αντικατάστασης εξαρτημάτων.

Ωστόσο, σύμφωνα με την διεθνή βιβλιογραφία, στις συνδέσεις αυτού του είδους υπάρχουν τρεις περιοχές στις οποίες εμφανίζονται υψηλές τιμές συγκέντρωσης τάσεων. Αυτές είναι:

- α) Η θέση μεταξύ του κάτω μέρους της κεφαλής του κοχλία και του κορμού του. (ΘΕΣΗ Α)
- β) Η βάση (fillet) των σπειρών στην αρχή του σπειρώματος του κοχλία (ΘΕΣΗ Β)
- γ) Η βάση των πρώτων σπειρών του κοχλία που συνεργάζονται με το περικόχλιο (ΘΕΣΗ Γ)

Ο κύριος όμως λόγος για τον οποίο συνήθως οδηγούνται σε αστοχία οι κοχλιοσυνδέσεις, οφείλεται στην τρίτη, από τις παραπάνω αναφερόμενες περιπτώσεις.



Σχήμα 1.1: Περιοχές υψηλών τιμών συγκέντρωσης τάσεων

Το γεγονός ότι οι πρώτες συνεργαζόμενες σπείρες μεταξύ κοχλία και περικοχλίου εμφανίζουν πολύ υψηλότερες τιμές τάσεων συγκριτικά με τις υπόλοιπες σπείρες που βρίσκονται σε συνεργασία, επηρεάζει άμεσα την κατανομή του αξονικού φορτίου, του κοχλία κατά μήκος του τμήματος του σπειρώματος του, που εμπλέκεται με το με το αντίστοιχο σπείρωμα του περικοχλίου. Η εν λόγω κατανομή εμφανίζει ιδιαίτερα υψηλή ανισομέρεια, η οποία είναι πιο έντονη στα περικόχλια θλίψεως που χρησιμοποιούνται στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές. Στις πρώτες δύο σπείρες του σπειρώματος του περικοχλίου παραλαμβάνεται περίπου το 50% του αξονικού φορτίου του κοχλία ^[1].

Για να σχεδιαστεί μια πιο εύλογη δομή κατασκευής ώστε να βελτιωθεί η ικανότητα παραλαβής φορτίου είναι σημαντικό να γνωρίζουμε τις κατανομές των τάσεων και του αξονικού φορτίου στις συνδέσεις. Προς το παρόν υπάρχουν τρεις τρόποι για να μελετηθούν οι κοχλιοσυνδέσεις: η αναλυτική μέθοδος, η πειραματική μέθοδος και η αριθμητική μέθοδος. Μια λεπτομερής αναλυτική θεωρία για την πρόβλεψη της κατανομής του φορτίου στα σπειρώματα προτάθηκε από τον Sorwith^[2]. Στην ερευνά του η δράση ενός αριθμού ελατηρίων-στελεχών, προσομοίαζε την αξονική επέκταση του κοχλία και συμπίεση του περικοχλίου. Η αναλυτική μέθοδος του Yamamoto^[3] έκανε την υπόθεση της επίπεδης παραμόρφωσης για την αντιμετώπιση της περιοχής του σπειρώματος. Ως εκ τούτου το συναρμολόγημα κοχλίας-περικόχλιο μπορεί να απλοποιηθεί στο αξονοσυμμετρικό μοντέλο για τον υπολογισμό της κατανομής του φορτίου κατά μήκος της αξονικής κατεύθυνσης του κοχλία.

Οι αναλύσεις των τάσεων σε μία κοχλιοσύνδεση πραγματοποιήθηκαν με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για πρώτη φορά από τον Maruyama^[4,5]. Ο Grewal, ο Sabbaghian^[6] και οι Fukuoka, Yamasaki, Kitagawa^[7], μελέτησαν την κατανομή του φορτίου ανάμεσα στις σπείρες, αλλά η πλεγματοποίηση δεν ήταν αρκετά καλή εξαιτίας της περιορισμένης υπολογιστικής ικανότητας. Οι Lehnhoff και Bunyard^[8], Venkatesa και Kinzel^[9], Chen και Shih^[10], χρησιμοποίησαν αξονοσυμμετρικά μοντέλα, προκειμένου να μελετήσουν την επίδραση της έλικας στις κοχλιοσυνδέσεις βασιζόμενοι στην ελαστική ανάλυση. Μια από τις πιο πρόσφατα δημοσιευμένες μελέτες (2009), που αφορούσε, την κατανομή του αξονικού φορτίου και των τάσεων σε μια κοχλιοσύνδεση έγινε από τους Ridong, Yujuan και Meizheng^[11]. Στην μελέτη τους προτείνεται ένα νέο κριτήριο σύγκλισης για τη μη γραμμική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων κατά την διαδικασία φόρτισης-εκφόρτισης της κοχλιοσύνδεσης.

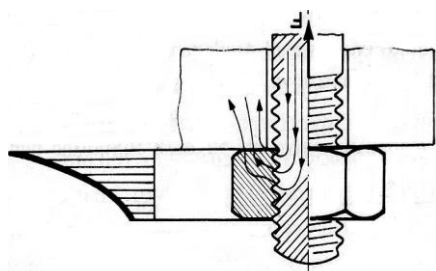
Πολλές μελέτες έχουν αφιερωθεί στο να ερευνηθούν πως καθίσταται εφικτό να μειωθούν οι υψηλές τιμές των τάσεων που εμφανίζονται στις κοχλιοσυνδέσεις. Οι έρευνες του Hetenyi^[12] (1941) με τη χρήση τρισδιάστατων φωτοελαστικών μοντέλων είναι ευρέως γνωστές. Οι Patterson και Kenny^[13] (1987), επίσης πραγματοποίησαν μια ολοκληρωμένη μελέτη για έναν κοχλία M30 με χρήση της μεθόδου φωτοελαστικότητας και πρότειναν ότι ένα τροποποιημένο περικόχλιο με μια ευθεία λοξοτομή στην επιφάνεια έδρασης ήταν αποτελεσματικό για την μείωση της υψηλής συγκέντρωσης τάσεων στην πρώτη σπείρα. Ο

Fukuoka^[14] χρησιμοποίησε αξονοσυμμετρικά μοντέλα για να ερευνήσει τον τρόπο με τον οποίο θα μπορούσε να μειώσει τις μέγιστες τάσεις στη ρίζα του σπειρώματος της κοχλιοσύνδεσης. Στην μελέτη του ένα λεπτότερο-καλύτερο πλέγμα χρησιμοποιήθηκε στην ρίζα της πρώτης σπείρας όπου εμφανίζεται η μέγιστη τάση. Το πλέγμα όμως ήταν αραιό/χειρότερο στις υπόλοιπες σπείρες και δεν μπόρεσε να δώσει μια αξιόπιστη κατανομή των τάσεων. Εντούτοις φαίνεται να είναι δύσκολο να εκτιμήσει κανείς πειραματικά τις επιδράσεις της τριβής, της ακτίνας καμπυλότητας του ποδός και τη μη γραμμική συμπεριφορά που προκαλείται από τις διακυμάνσεις στα εφαρμοσμένα φορτία.

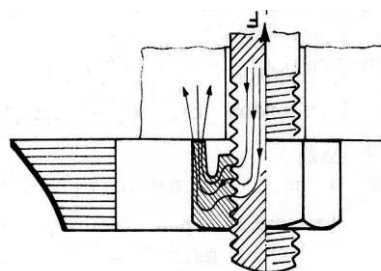
Δύο γνωστοί τύποι τροποποιημένων περικοχλίων είναι :

α) Τα περικόχλια εφελκυσμού – θλίψεως, στα οποία η κατανομή του φορτίου κατά μήκος του σπειρώματος του περικοχλίου είναι λιγότερο ανισομερής 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.

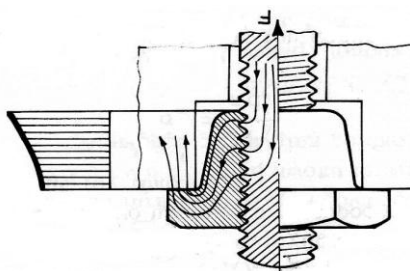
β) Τα περικόχλια εφελκυσμού, στα οποία η τάση που αναπτύσσεται στο πρώτο βήμα του σπειρώματος τους, είναι περίπου 60% μικρότερη από την αντίστοιχη τάση ενός περικοχλίου θλίψεως, διότι το αξονικό φορτίο του κοχλία κατανέμεται περισσότερο ισομερώς σε ένα μεγαλύτερο αριθμό βημάτων.



Σχήμα 1. 2: Περικόχλιο θλίψεως



Σχήμα 1. 3: Περικόχλιο θλίψεως-εφελκυσμού



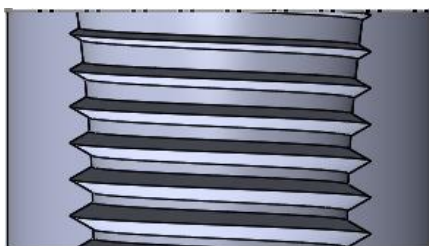
Σχήμα 1.4: Περικόχλιο εφελκυσμού

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη μιας νέας τροποποίησης της γεωμετρίας του περικοχλίου και πιο συγκεκριμένα του σπειρώματος του, που αποσκοπεί στην βελτίωση της κατανομής του αξονικού φορτίου κατά μήκος των συνεργαζόμενων σπειρών, με απώτερο σκοπό την αύξηση της στατικής αντοχής της κοχλιοσύνδεσης.

Η τροποποίηση που εξετάζεται αφορά την σταδιακή μείωση της επιφάνειας επαφής των σπειρών του περικοχλίου μέσω της αφαίρεσης υλικού, έτσι ώστε οι πρώτες σπείρες που παραλαμβάνουν και το μεγαλύτερο μέρος του αξονικού φορτίου να εμφανίζουν και την μικρότερη παράπλευρη κατατομή.

Η συγκεκριμένη τροποποίηση προτάθηκε με το σκεπτικό της βελτίωσης της ελαστικής συμπεριφοράς της κοχλιοσύνδεσης. Ουσιαστικά κάνοντας πιο μικρή την επιφάνεια των σπειρών του περικοχλίου, αυτές γίνονται περισσότερο άκαμπτες ανάλογα με το μέγεθος της αφαίρεσης υλικού που υπέστησαν ενώ οι αντίστοιχες συνεργαζόμενες σπείρες του κοχλίου γίνονται πιο ενδοτικές.

Προκειμένου να γίνει πιο κατανοητή η ανωτέρω περιγραφή, παρουσιάζεται στη παρακάτω εικόνα ένα τροποποιημένο περικόχλιο σε τομή.



Σχήμα 1.5: Τροποποιημένο περικόχλιο σε τομή

2. Δημιουργία Γεωμετρίας Μοντέλου Κοχλιοσύνδεσης

2.1. Εισαγωγή

Έχοντας ως αρχικό σκοπό τον σχεδιασμό ενός μοντέλου που να προσομοιάζει, όσο το δυνατόν περισσότερο το τασικό πεδίο που επικρατεί στα συνεργαζόμενα σπειρώματα μιας πραγματικής κοχλιοσύνδεσης αποφασίστηκε να δημιουργηθεί ένα μοντέλο τριών διαστάσεων, λαμβάνοντας επίσης υπόψη ότι ο σχεδιασμός του θα πρέπει να είναι τέτοιος που να μην επιβαρύνει τον χρόνο επίλυσης κατά την προσομοίωση.

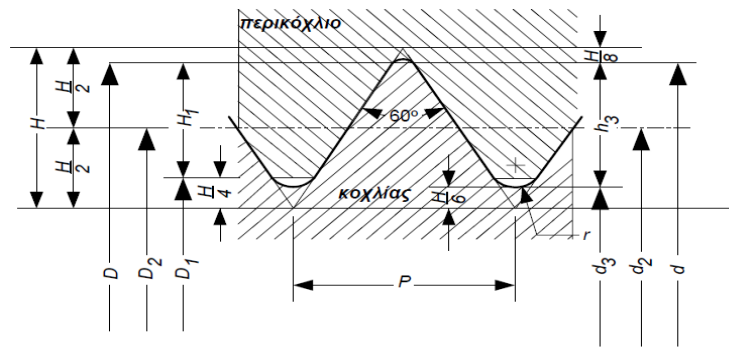
Το τρισδιάστατο μοντέλο της κοχλιοσύνδεσης αποτελείται από τρία τεμάχια. Έναν κοχλία που συνεργάζεται με ένα περικόχλιο και ένα κυλινδρικό τεμάχιο με διαμπερή οπή στο κέντρο του, το οποίο βρίσκεται τοποθετημένο μεταξύ τους. Παρακάτω γίνεται αναφορά στα κριτήρια με τα οποία έγινε η επιλογή των συγκεκριμένων τεμαχίων, όπως επίσης παρουσιάζονται αναλυτικά για το κάθε επιμέρους τεμάχιο τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του και ο τρόπος σχεδιασμού του.

Για την δημιουργία της γεωμετρίας του μοντέλου επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί το σχεδιαστικό – υπολογιστικό πακέτο Solidworks έκδοσης 2013, χάριν της ευκολίας που παρέχει στον σχεδιασμό πολύπλοκων γεωμετριών .

2.2. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά κοχλιοσύνδεσης

2.2.1. Σπείρωμα

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 προτυποποίησης ISO.



Σχήμα 2. 1: Διαστάσεις τριγωνικού-μετρικού σπειρώματος

Οι παρακάτω τύποι ισχύουν τόσο για κανονικό όσο και για λεπτό σπείρωμα με μόνη διαφορά το βήμα (P) για δεδομένη ονομαστική διάμετρο (d).

$$d_2 = D_2 = d - 0,64953P \quad (2.1)$$

$$d_3 = d - 1,22687P \quad (2.2)$$

$$D_1 = d - 1,08253P \quad (2.3)$$

$$\alpha = \tan^{-1}(P/(\pi d - 2,04056P)) \quad (2.4)$$

$$h_3 = 0,61343P \quad (2.5)$$

$$R = 0,14434P \quad (2.6)$$

$$H = 0,86603P \quad (2.7)$$

$$H_1 = 0,54127P \quad (2.8)$$

$$A_s = (\pi/4)((d_2 + d_3)/2) \quad (2.9)$$

Όπου:

- d_2, D_2 : Μέση διάμετρος σπειρώματος
- d_3 : Εσωτερική διάμετρος σπειρώματος
- R : Ακτίνα καμπυλότητας
- D_1 : Εσωτερική διάμετρος περικοχλίου

- H : Ύψος κατατομής
- α : Γωνία ελίκωσης (κλίση έλικας)
- H_1 : Βάθος σπειρώματος περικοχλίου
- h_3 : Βάθος σπειρώματος κοχλία
- A_s : Διατομή σπειρώματος

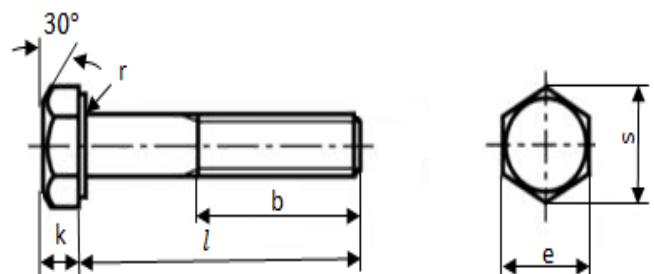
2.2.2. Κοχλίας

Ο κοχλίας που επιλέχθηκε να μελετηθεί είναι ένας M16×40 DIN 931 και ανήκει στην κατηγορία κοχλιών με εξαγωνικό κεφάλι .

Ο κύριος λόγος για τον οποίο επιλέχθηκε ο συγκεκριμένος κοχλίας είναι γιατί εμφανίζει ιδιαίτερα μεγάλη σε πλάτος παράπλευρη επιφάνεια σπειρώματος γεγονός που διευκολύνει στην πλεγματοποίηση (μεγάλη αναλογία πεπερασμένων στοιχείων) και στην ευκολότερη κατεργασία του σπειρώματος . Παράλληλα ο τύπος αυτός του κοχλία είναι ευρέως διαδεδομένος με αποτέλεσμα να μπορεί εύκολα να ευρεθεί στην αγορά.

Για το κοχλία που επιλέχθηκε, ισχύουν:

$d = 16$	[mm]
$b = 21$	[mm]
$l = 40$	[mm]
$k = 10$	[mm]
$e = 26.75$	[mm]
$S = 24$	[mm]
$r = 1$	(°)



Σχήμα 2. 2: Διαστάσεις κοχλία ,DIN931

Επίσης με βάση τις προηγούμενες σχέσεις που περιγράφουν την γεωμετρία του σπειρώματος, προκύπτουν τα παρακάτω μεγέθη :

$$d_2 = 14.70094 \text{ mm}$$

$$d_3 = 13.54626 \text{ mm}$$

$$R = 28868 \text{ mm}$$

$$D_1 = 13.83494 \text{ mm}$$

$$a = 2.479627 (^{\circ})$$

$$H_1 = 1.08254 \text{ mm}$$

$$h_3 = 1.22686 \text{ mm}$$

$$H = 1.73206 \text{ mm}$$

$$A_s = 156.6649 \text{ mm}^2$$

Όπου:

- d: Ονομαστική διάμετρος
- b: Μήκος σπειρώματος
- l : Μήκος κορμού
- K: Ύψος κεφαλής
- e: Διαγώνιος εξαγώνου
- S: Άνοιγμα κλειδιού
- r: ακτίνα καμπυλότητας (fillet)
- z1: Διαμόρφωση άκρου (chamfer)

Οι κοχλίες του συγκεκριμένου κανονισμού κατασκευάζονται κατά κανόνα από υλικά ποιότητας 6G, 8G, 10K και 12K. Προτιμητέα μήκη l του κορμού: 6 8 10 12 15 18 20 22 25 30 35 ανά 5 mm έως 80 90 100 110 mm ανά 10 mm έως 200 mm.

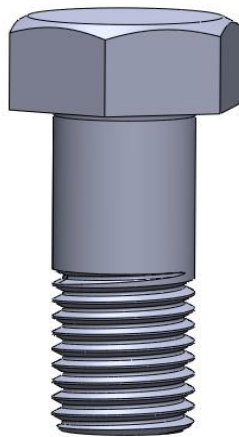
Το μήκος του σπειρώματος (**b**), υπολογίστηκε από την σχέση **b=2d+6**, η οποία ισχύει για μήκη κορμού **l ≤ 125**. Επομένως για ονομαστική διάμετρο d=16mm, έχουμε : **b=38 [mm]**

Η ανάγκη όμως για την δημιουργία ενός μοντέλου που θα απαιτούσε όσο το δυνατόν λιγότερα πεπερασμένα στοιχεία χωρίς όμως να χαθεί η ακρίβεια των αποτελεσμάτων, οδήγησε στην απόφαση να μειωθεί το μήκος του ελεύθερου σπειρώματος του κοχλία, δηλαδή αφαιρέθηκαν μερικές από τις σπείρες του οι οποίες δεν ήταν απαραίτητες για την συνεργασία του με το περικόχλιο. Με αποτέλεσμα το τελικό μήκος του σπειρώματος του κοχλία να γίνει: **b=21mm**

Για την δημιουργία ενός τέτοιου μικρότερου διαστασιολογικά μοντέλου θα μπορούσε να εκλεγεί κάποιος άλλος κοχλίας με μικρότερη ονομαστική διάμετρο και με μικρότερο μήκος κορμού, όμως θεωρήθηκε προτιμότερο η μελέτη να γίνει για τον επιλεγμένο κοχλία M16×2, για τον κύριο λόγο που αρχικά επιλέχθηκε.

Θεωρώντας όμως ότι είναι προτιμότερο να αφαιρεθούν από τον κοχλία οι γεωμετρικές διαμορφώσεις οι οποίες δεν έχουν ουσιαστική επίδραση στο τασικό πεδίο που χαρακτηρίζει την κοχλιοσύνδεση ώστε να επιτευχθεί περαιτέρω μείωση στον αριθμό των απαιτούμενων πεπερασμένων στοιχείων. Αποφασίστηκε να αφαιρεθούν οι κάθετες ακμές οι οποίες βρίσκονται περιμετρικά της κεφαλής του κοχλία.

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται ο κοχλίας κατά την αρχική και τελική του απλοποιημένη σχεδίαση.



Σχήμα 2. 3: Αρχική σχεδίαση κοχλία



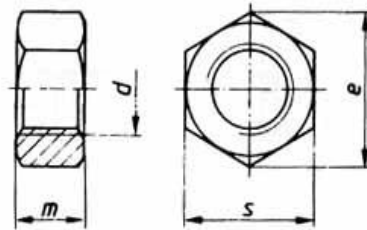
Σχήμα 2.4: Τελική σχεδίαση κοχλία

2.2.3. Περικόχλιο

Το περικόχλιο που επιλέχθηκε να μελετηθεί ανήκει στην κατηγορία των εξαγωνικών περικοχλίων, τα οποία είναι τυποποιημένα κατά DIN 934.

Χαρακτηριστικές διαστάσεις εκλεγμένου περικοχλίου :

$$\begin{aligned} m &= 13 \text{ [mm]} \\ S &= 24 \text{ [mm]} \\ e &= 1,155S \\ d &= 16 \text{ [mm]} \end{aligned}$$

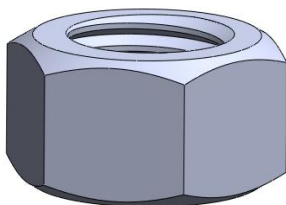


Σχήμα 2.5 : Διαστάσεις περικοχλίου, DIN934

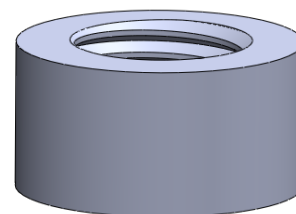
Όπου:

- m: Ύψος
- S: Άνοιγμα κλειδιού
- e: Διαγώνιος εξαγώνου
- d: Ονομαστική διάμετρος

Επίσης η απλοποίηση του σχεδιασμού, για την περαιτέρω μείωση του υπολογιστικού κόστους προχώρησε και στο περικόχλιο όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στις δύο παρακάτω εικόνες.



Σχήμα 2.6 : Αρχική σχεδίαση περικοχλίου



Σχήμα 2. 6: Τελική σχεδίαση περικοχλίου

2.4. Ενδιάμεσο κυλινδρικό τεμάχιο

Το κυλινδρικό τεμάχιο σχεδιάστηκε κυρίως για την προσομοίωση της τριβής στην επιφάνεια έδρασης του περικοχλίου και για την αποφυγή επιπλέον τάσεων που θα εισαγόταν στην περίπτωση που στην εν λόγω επιφάνεια τοποθετούνταν στηρίξεις για την δέσμευση της περιστροφής και της κατακόρυφης μετατόπισης της, παίζοντας έτσι το ρόλο της φλάντζας στην κοχλιοσύνδεση.

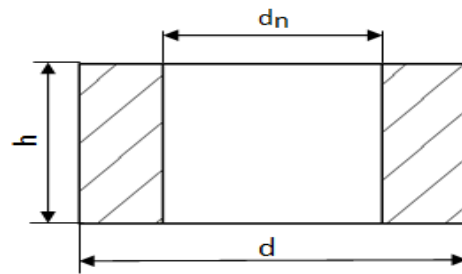
Κατά την επιλογή των διαστάσεων του κυλινδρικού τεμαχίου δόθηκε κυρίως προσοχή ώστε το εμβαδόν της κυκλικής επιφάνειας του, που θα εφάπτεται της επιφάνειας του περικοχλίου, να μην είναι μικρότερο αυτής και ο όγκος του, να είναι τέτοιος που να μην απαιτεί μεγάλο αριθμό πεπερασμένων στοιχείων κατά την προσομοίωση και παράλληλα να του προσδίδει την απαιτούμενη στιβαρότητα και ακαμψία.

Χαρακτηριστικές διαστάσεις κυλινδρικού τεμαχίου:

$$d_n = 17 \text{ [mm]}$$

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

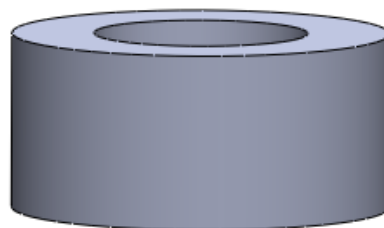
$$H = 15 \text{ [mm]}$$



Σχήμα 2. 7: Διαστάσεις κυλινδρικού τεμαχίου

Όπου:

- d_n : Διάμετρος οπής
- d : Εξωτερική διάμετρος
- H : Ύψος



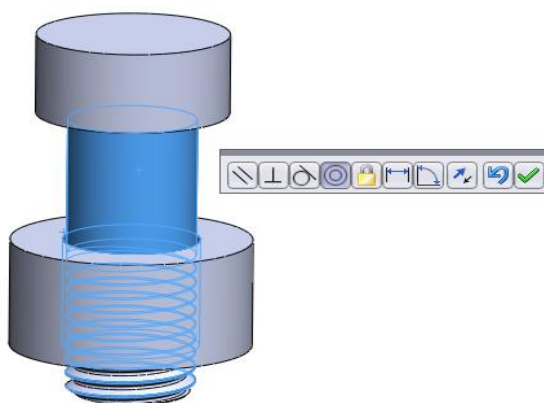
Σχήμα 2. 8: Κυλινδρικό τεμάχιο

2.3. Συναρμολόγηση κοχλιοσύνδεσης στο Solidworks

Το επόμενο βήμα μετά τον σχεδιασμό των τρισδιάστατων τεμαχίων της κοχλιοσύνδεσης ήταν η συναρμολόγηση τους σε ένα ενιαίο λειτουργικό σύνολο.

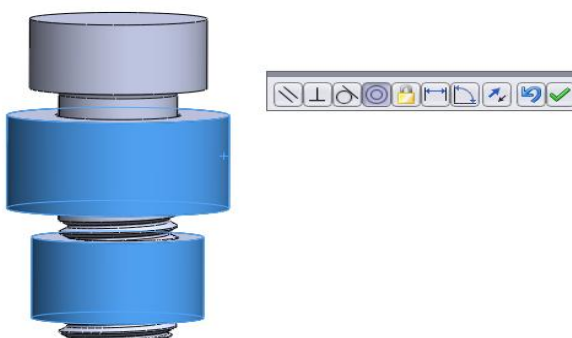
Αρχικά δημιουργήθηκε στο Solidworks αρχείο τύπου assembly στο οποίο τοποθετήθηκαν τα τρία τεμάχια (κοχλία, περικόχλιο, κυλινδρικό τεμάχιο) ώστε να μπορέσουν να επιτευχθούν οι μεταξύ τους συνδέσεις (**mates**).

Το πρώτο βήμα αφορούσε την τοποθέτηση του κορμού του κοχλία ομόκεντρα στο εσωτερικό του κυλινδρικού τεμαχίου, κάτι το οποίο πραγματοποιήθηκε εύκολα μέσω της εντολής “**concentric**” για τις επιλεγμένες κυλινδρικές επιφάνειες του κοχλία και του κυλινδρικού τεμαχίου όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



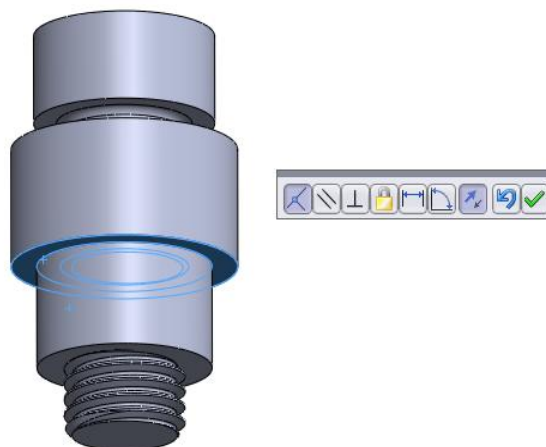
Σχήμα 2. 9: Ομόκεντρη σύνδεση κυλινδρικού τεμαχίου-κοχλία

Στην συνέχεια ξανά με την βοήθεια του “**concentric**” (mate) τοποθετήθηκε και το περικόχλιο ομοαξονικά του κυλινδρικού τεμαχίου και επομένως και του κοχλία.



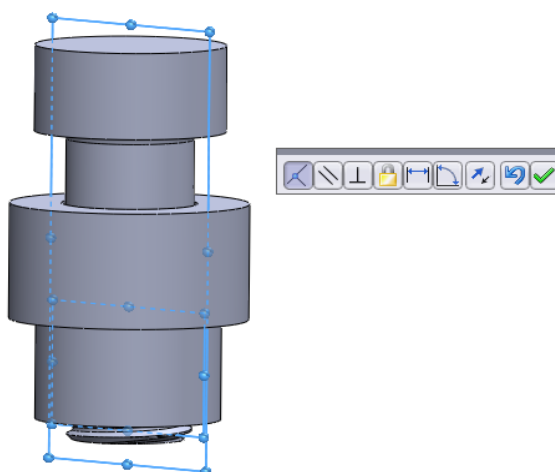
Σχήμα 2. 10: Ομοαξονική σύνδεση περικοχλίου-κυλινδρικού τεμαχίου

Έπειτα επιδιώκοντας να μην υπάρχει κενό μεταξύ του περικοχλίου και του κυλινδρικού τεμαχίου χρησιμοποιήθηκε η εντολή “**coincident**”, η οποία έφερε σε επαπτομενική σύνδεση τις δύο γειτονικές κυκλικές επιφάνειες του κυλινδρικού τεμαχίου και του περικοχλίου.



Σχήμα 2. 11: Εφαπτομενική σύνδεση περικοχλίου-κυλινδρικού τεμαχίου

Η επόμενη κίνηση ήταν να συνδεθούν με “**coincident**” (mate) τα επίπεδα (planes) του περικοχλίου και του κοχλία, πάνω στα οποία βρίσκεται η αρχή της έλικας που ακολουθεί το κοπτικό εργαλείο δηλαδή τα επίπεδα πάνω στα οποία σχεδιάστηκε το τριγωνικό προφίλ του σπειρώματος. Τα εν λόγω επίπεδα αποτελούν το Right plane του κοχλία και του περικοχλίου αντίστοιχα.



Σχήμα 2. 12 : Ταύτιση επιπέδων (Right planes)

Με το συγκεκριμένο “**coincident**” (mate) τα δύο επίπεδα (Right planes), συνέπεσαν το ένα επάνω στο άλλο με αποτέλεσμα η έλικα που σχεδιάστηκε για την δημιουργία του σπειρώματος του κοχλία και η αντίστοιχη έλικα του περικοχλίου να ξεκινούν ουσιαστικά από το ίδιο επίπεδο.

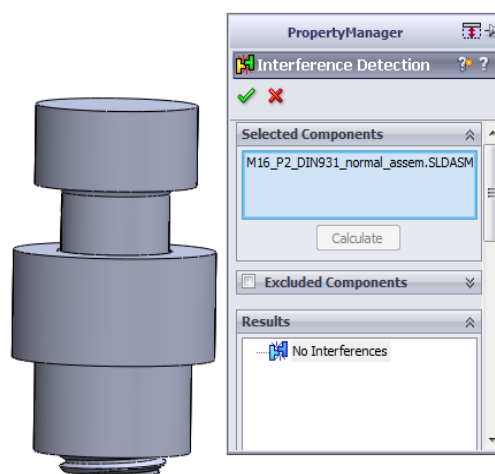
Ο λόγος για τον οποίο αποφασίστηκε οι δύο έλικες να ξεκινούν από το ίδιο επίπεδο προέκυψε αργότερα, αφού είχαν προηγηθεί κάποιες δοκιμαστικές προσομοιώσεις στο Ansys, οι οποίες δεν είχαν καθόλου αναμενόμενα προφίλ τάσεων στις συνεργαζόμενες επιφάνειες των σπειρών. Το αρνητικό όμως αυτό φαινόμενο εξαλείφτηκε πλήρως όταν στο μοντέλο συμπεριελήφθη το αναφερόμενο “coincident”(mate).

Το βασικό όμως πρόβλημα που σχετιζόταν με τις συνδέσεις των τεμαχίων αφορούσε την επαφή των συνεργαζόμενων επιφανειών του σπειρώματος του κοχλία και του περικοχλίου. Οι ελικοειδείς αυτές επιφάνειες έπρεπε να βρίσκονται σε επαφή μεταξύ τους κάτι το οποίο ήταν αδύνατο να επιτευχθεί με την χρήση κάποιου από τα mates που διέθετε το Solidworks.

Η λύση στο συγκεκριμένο πρόβλημα δόθηκε εμμέσως, χάριν της δυνατότητας που παρέχει το Solidworks για ανίχνευση διείσδυσης μεταξύ συνεργαζόμενων επιφανειών μέσω της λειτουργίας που ονομάζεται “**interference detection**”. Ο σκοπός ήταν να μην υπάρχει καθόλου διείσδυση μεταξύ των συνεργαζόμενων τεμαχίων όπως συμβαίνει και στην πραγματικότητα, ώστε να επιτευχθούν όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστα αποτελέσματα κατά τις επικείμενες προσομοιώσεις στο Ansys.

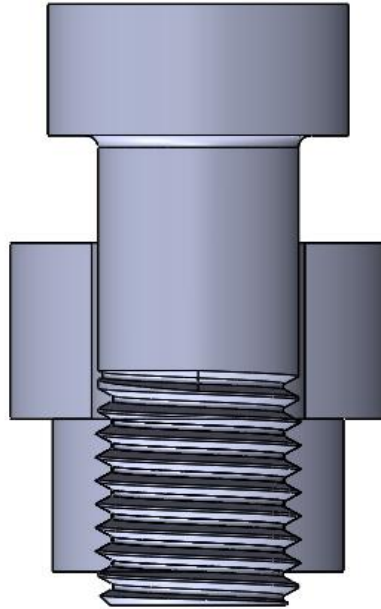
Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι είχε γίνει αντιληπτό ότι, η ακρίβεια με την οποία υπολογίζεται η απόσταση μεταξύ των τεμαχίων στο Solidworks δεν σήμαινε ότι θα ήταν ίδια με την αντίστοιχη ακρίβεια στο Ansys και όπως αποδείχθηκε αργότερα, εντοπιζόταν μια μικρή διείσδυση των συνεργαζόμενων επιφανειών στο Ansys, η οποία όμως είχε αμελητέα επίδραση στο υπολογιζόμενο τασικό πεδίο.

Εν ολίγοις, μετά την ολοκλήρωση των παραπάνω αναφερόμενων συνδέσεων (mates), μεταξύ των τεμαχίων πραγματοποιήθηκε προσπάθεια με οπτικό έλεγχο για την όσο το δυνατόν σωστότερη επαφή των συνεργαζόμενων σπειρών η οποία ελέγχθηκε μέσω της λειτουργίας “interference detection” έτσι ώστε να μην υπάρχει καθόλου διείσδυση.



Σχήμα 2. 13: Έλεγχος διείσδυσης (Interference Detection)

Προκειμένου να γίνει πιο εμφανής η συνεργασία μεταξύ των σπειρωμάτων, παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα η κοχλιοσύνδεση σε τομή.



Σχήμα 2. 14: Μοντέλο κοχλιοσύνδεσης σε τομή

3. Δημιουργία Μοντέλου Πεπερασμένων Στοιχείων

3.1. Εισαγωγή

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται αναλυτικά οι επιλογές που έγιναν για την δημιουργία ενός αξιόπιστου μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων το οποίο θα αποτελέσει τη βάση για την στατική βελτίωση του εξεταζόμενου τύπου κοχλιοσύνδεσης. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται προσπάθεια για μια σαφή περιγραφή που αφορά την επιλογή, του υλικού, του είδους των πεπερασμένων στοιχείων, της πλεγματοποίησης και των επιβαλλόμενων οριακών συνθηκών.

Η στατική μελέτη του μοντέλου της κοχλιοσύνδεσης, πραγματοποιήθηκε κάνοντας χρήση του υπολογιστικού και σχεδιαστικού πακέτου Ansys Workbench, έκδοσης 15.0 σε έναν υπολογιστή με επεξεργαστή Intel® Core™ i7 στα 3.07 GHz ,εγκατεστημένη μνήμη Ram 24 GB και δύο κάρτες γραφικών AMD Radeon HD 6900 Series.

Με σκοπό να μπορούν να είναι συμβατά με το Ansys, τα αρχεία που είχαν δημιουργηθεί στο Solidworks, εισάγωνταν υπό την μορφή parasolid.x_t.

3.2. Βασικές επιλογές μοντελοποίησης

3.2.1 Επιλογή Υλικού

Το υλικό που συναντάται επί το πλείστον στις κοχλιοσυνδέσεις, λόγω της ιδιαίτερα αυξημένης αντοχής του, είναι ο χάλυβας, ως εκ τούτου αποτέλεσε και το υλικό που επιλέχθηκε για τα τρία τεμάχια του συναρμολογήματος. Θα πρέπει όμως να αναφερθεί ότι δεν ήταν απαραίτητη η επιλογή κάποιου συγκεκριμένου είδους χάλυβα μιας και το μέτρο ελαστικότητας του, παραμένει το ίδιο ανεξάρτητα από την αντοχή του και στην συγκεκριμένη μελέτη δεν σκόπευαν να εφαρμοστούν φορτία που θα παραμόρφωναν πλαστικά το υλικό.

Παράλληλα, χρήσιμο θα ήταν να αναφερθεί ότι οι κοχλίες και τα περικοχλία που χρησιμοποιούνται συνήθως σε κοχλιοσυνδέσεις έχουν τις περισσότερες φορές υποστεί και επιπρόσθετες επιφανειακές κατεργασίες με συνηθέστερες την επικαδμίωση και την επιψευδαργύρωση για την βελτίωση ιδιοτήτων τους όπως είναι ο συντελεστής τριβής και η αντίσταση στην διάβρωση.

Το επιλεγμένο υλικό αναφέρεται στο Ansys με την ονομασία **structural steel** (δομικός χάλυβας).

Χαρακτηριστικά structural steel :

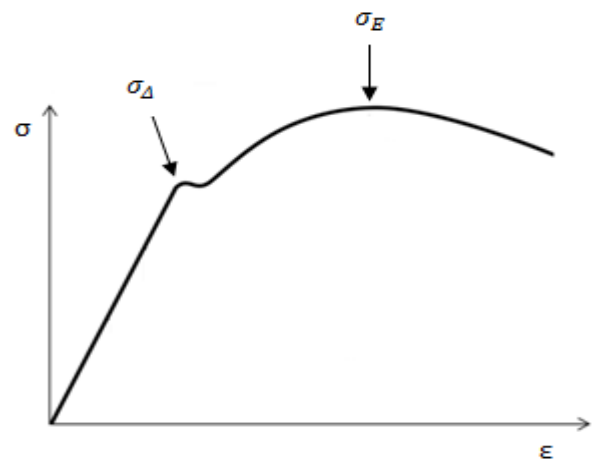
$$E = 200 \text{ [GPa]}$$

$$\nu = 0.3$$

$$G = 76.923 \text{ [GPa]}$$

$$\sigma_{\Delta} = 250 \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_E = 460 \text{ [MPa]}$$



Σχήμα 3. 15: Διάγραμμα σ-ε χάλυβα

Όπου:

- E : Μέτρο ελαστικότητας του Young
- ν : Λόγος του Poisson
- G : Μέτρο διάτμησης
- σ_{Δ} : Όριο διαρροής σε εφελκυσμό
- σ_E : Αντοχή σε εφελκυσμό

Παρόλο που το επιλεγέν υλικό έχει πολύ χαμηλότερα όρια σ_{Δ} και σ_E απ' ότι ο χάλυβας των κοχλιών-περικοχλίων, εντούτοις έχει παρόμοιες σταθερές όπως το μέτρο ελαστικότητας (E) και ο λόγος Poisson (ν).

3.2.2. Επιλογή πεπερασμένων στοιχείων και πλεγματοποίηση

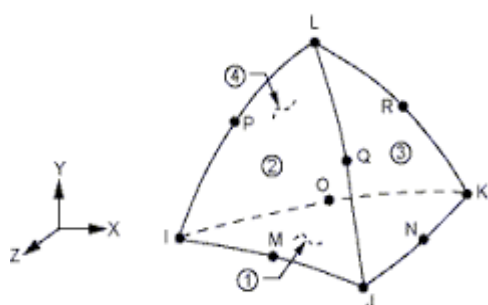
Ενώ θα ήταν προτιμότερο η πλεγματοποίηση του μοντέλου να πραγματοποιηθεί με την χρήση εξαεδρικών πεπερασμένων στοιχείων (brick elements) λόγω της ευκολίας με την οποία επιτυγχάνεται υψηλή ακρίβεια, τελικά αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί ο προτεινόμενος "default" από το Ansys τύπος πεπερασμένων στοιχείων, λόγω του γεγονότος ότι εμφάνιζε μεγαλύτερη ευκολία στην δημιουργία πλέγματος για τις σπείρες όπου απαιτούνταν ανομοιογενής πλεγματοποίηση.

Τα πεπερασμένα στοιχεία που συνθέτουν το πλέγμα ανήκουν σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει αυτά που χρησιμοποιούνται για την πλεγματοποίηση των στερεών γεωμετριών του μοντέλου τα οποία αποτελούν τα SOLID187 και SOLID186. Ενώ η δεύτερη κατηγορία αφορά αυτά χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση της επαφής και της ολίσθησης μεταξύ των συνεργαζόμενων επιφανειών, τα οποία είναι τα CONTA174 και TARGE170

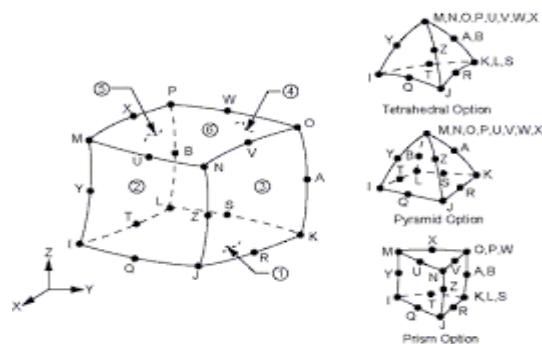
Όσον αφορά τα SOLID187 και SOLID186, χρήσιμο θα ήταν να αναφερθεί ότι και τα δύο είναι τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία με τρεις βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο τις μετατοπίσεις κατά τις διευθύνσεις των αξόνων x, y, z , με τα πρώτα να είναι δεκακομβικά και τα δεύτερα εικοσακομβικά. Τα συγκεκριμένα πεπερασμένα στοιχεία προτιμούνται συνήθως σε περιπτώσεις που απαιτείται μοντελοποίηση με ανομοιογενή πλεγματοποίηση.

Από την άλλη, τα CONTA174 και TARGE170, είναι πεπερασμένα στοιχεία που τοποθετούνται επάνω στην επιφάνεια, τρισδιάστατων στερεών (solid elements) ή κελυφωτών (shell elements) πεπερασμένων στοιχείων και αποκτούν τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας του πεπερασμένου στοιχείου με την οποία συνδέονται.

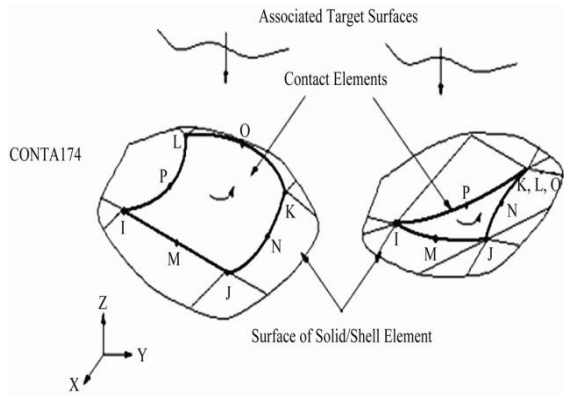
Η επαφή εμφανίζεται όταν η επιφάνεια του CONTA στοιχείου διεισδύει στην απέναντι επιφάνεια ενός TARGE πεπερασμένου στοιχείου.



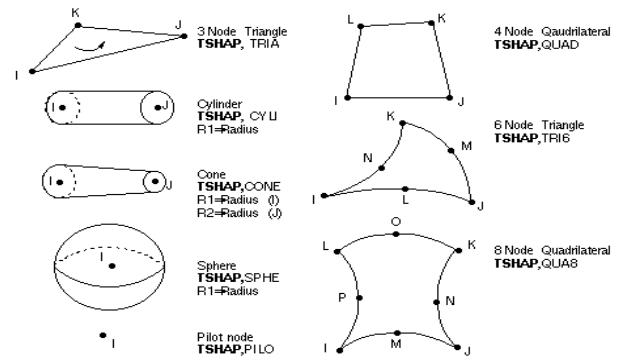
Σχήμα 3. 16: SOLID187



Σχήμα 3. 17: SOLID186

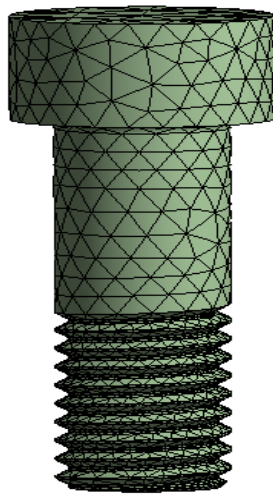


Σχήμα 3. 18: CONTA174

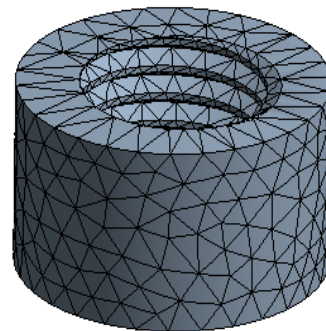


Σχήμα 3. 19: TARGET170

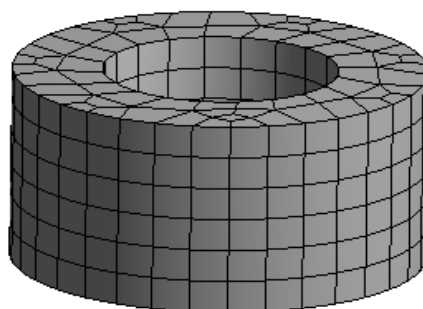
Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται τα τρία τεμάχια της κοχλιοσύνδεσης σε μια πρώτη πλεγματοποίηση με αραιό πλέγμα (coarse mesh).



Σχήμα 3. 20: Κοχλίας (αραιό πλέγμα)



Σχήμα 3. 21: Περικόχλιο (αραιό πλέγμα)



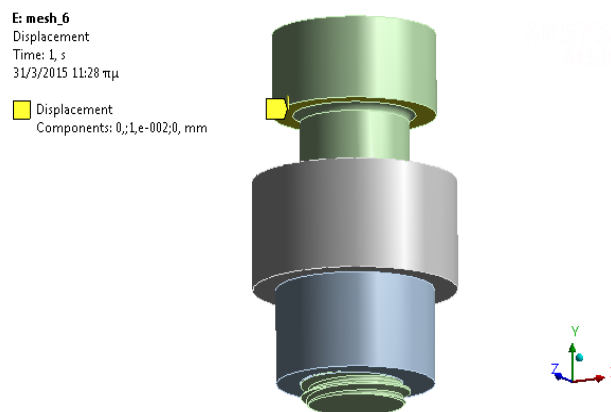
Σχήμα 3. 22: Κυλινδρικό τεμάχιο (αραιό πλέγμα)

3.2.3. Επιβαλλόμενα Φορτία

Η αδυναμία του υπολογιστικού προγράμματος Ansys, να επιλύσει το συγκεκριμένο πρόβλημα στην περίπτωση που εφαρμοζόταν κάποια εξωτερική δύναμη ή πίεση στην επιλεγμένη επιφάνεια της κεφαλής του κοχλία, οδήγησε στο να επιβάλλεται στην θέση αυτή μια ορισμένη τιμή μετατόπισης.

Το μέγεθος της μετατόπισης επιλέχθηκε να είναι τέτοιο ώστε να μπορούμε να έχουμε μια σαφή εικόνα για το τασικό πεδίο της κοχλιοσύνδεσης χωρίς όμως οι σπείρες να έχουν οδηγηθεί σε πλαστική παραμόρφωση. Συνεπώς για να μπορούμε να εργαστούμε στην γραμμική περιοχή του υλικού, μετά από κάποιες προσομοιώσεις αποφασίστηκε η κεφαλή του κοχλία να εφελκύεται κατά 0,01 [mm].

Όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα το επιβαλλόμενο φορτίο επιλέχθηκε να ασκείται κάθε φορά στην κάτω επιφάνεια της κεφαλής του κοχλία.



Σχήμα 3. 23: Φόρτιση κοχλιοσύνδεσης

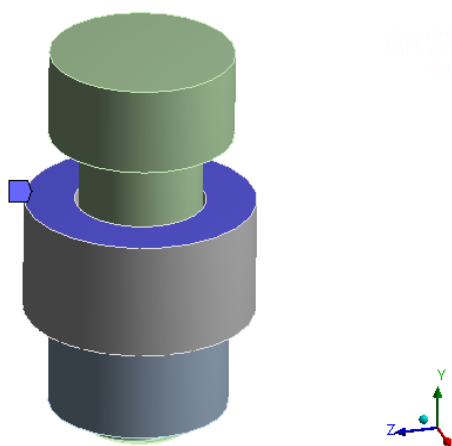
Επειδή όμως προέκυψε η ανάγκη να είναι γνωστό το επιβαλλόμενο φορτίο, αυτό υπολογιζόταν κάθε φορά μετά το τέλος της προσομοίωσης ως δύναμη αντίδρασης στην επιβαλλόμενη μετατόπιση, μέσω της εντολής “**reaction forces**”.

3.2.4. Στήριξη

Για την στήριξη του μοντέλου θεωρήθηκε σωστό να τοποθετηθεί κύλιση στην επάνω πλευρά του κυλινδρικού τεμαχίου περιορίζοντας του με αυτό τον τρόπο μόνο την κατακόρυφη μετατόπιση του κατά τον άξονα(y), όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Η κύλιση στον Ansys workbench αντιστοιχεί στην εντολή “**frictionless support**”.

G: mesh_1 (coarse)
Frictionless Support
Time: 1, s
31/3/2015 12:31 μμ

Frictionless Support

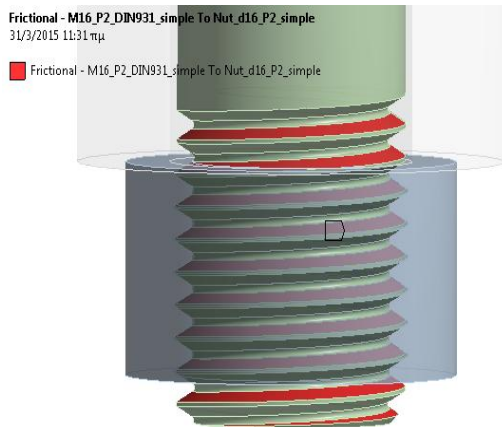


Σχήμα 3. 24: Στήριξη Κοχλιοσύνδεσης

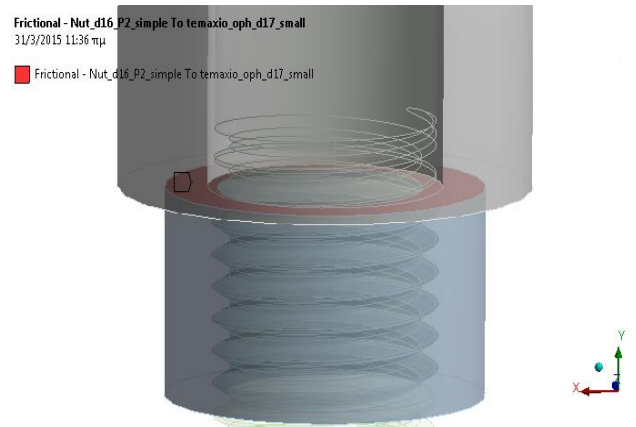
3.2.5. Συνεργαζόμενες επιφάνειες

Οι επιφάνειες του μοντέλου οι οποίες έρχονται σε επαφή κατά την προσομοίωση είναι οι συνεργαζόμενες επιφάνειες των σπειρωμάτων του κοχλία και του περικοχλίου και οι επιφάνειες μεταξύ κυλινδρικού τεμαχίου και περικοχλίου. Προκειμένου να μπορεί να αναγνωριστεί από το ansys η επαφή μεταξύ των επιφανειών αυτών, έπρεπε να δηλωθεί η CONTACT και η αντίστοιχη TARGET επιφάνεια για το κάθε ζευγάρι, ώστε στις πρώτες να τοποθετηθούν τα contact elements (CONTA174) και στις δεύτερες τα αντίστοιχα target elements (TARGE170).

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται οι επιφάνειες στις οποίες τοποθετήθηκαν τα contact elements.

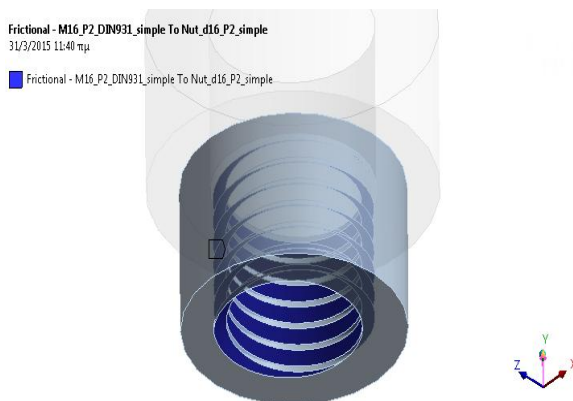


Σχήμα 3. 25: Contact surface – σπείρωμα κοχλίας

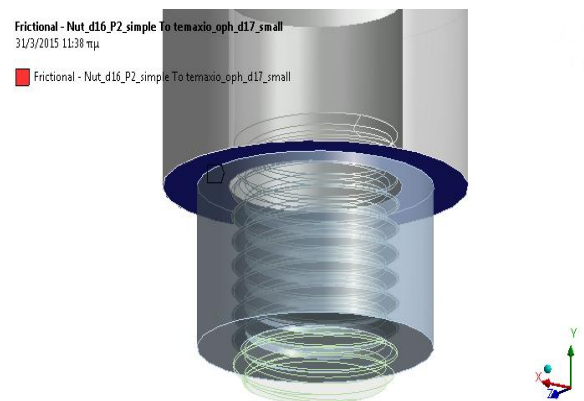


Σχήμα 3. 26: Contact surface – Επιφάνεια έδρασης περικοχλίου

Ενώ στις επόμενες δύο εικόνες παρουσιάζονται οι επιφάνειες στις οποίες τοποθετήθηκαν τα target elements.



Σχήμα 3. 27: Target surface – σπείρωμα περικοχλίου



Σχήμα 3. 28: Target surface – επιφάνεια κυλινδρικού τμαχίου

Για την συνεργασία των επιφανειών που έρχονται σε επαφή, επιλέχθηκε η ασύμμετρη συμπεριφορά (asymmetric behavior) κατά την οποία οι κόμβοι των πεπερασμένων στοιχείων της contact επιφάνειας δεν μπορούν να διεισδύσουν στη target επιφάνεια. Όπως διαπιστώθηκε μετά από κάποιες προσομοιώσεις, η συγκεκριμένη επιλογή απαιτούσε λιγότερο υπολογιστικό χρόνο, συγκριτικά με τις υπόλοιπες επιλογές (symmetric, auto asymmetric) και απέδιδε με ευκολία και ακρίβεια τα αναζητούμενα τασικά πεδία στις επιλεγμένες contact επιφάνειες.

Εξαιτίας του γεγονότος ότι μεταξύ των συνεργαζομένων επιφανειών σε μια πραγματική κοχλιοσύνδεση υπάρχει τριβή, θεωρήθηκε σωστό για λόγους ακρίβειας του μοντέλου, η εμφανιζόμενη τριβή να συμπεριληφθεί και επομένως να προσομοιωθεί. Συνεπώς για τις συνεργαζόμενες επιφάνειες έπρεπε να καθοριστεί το μέγεθος του συντελεστή τριβής.

Οι συντελεστές τριβής στους κοχλίες εξαρτώνται από την ποιότητα κατεργασίας των επιφανειών και την λίπανση ή όχι των σπειρωμάτων.

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:

$$M_A = F \frac{d_A}{2} \mu' \quad (3.1)$$

$$M = F \frac{d_2}{2} \tan(a + \rho') \quad (3.2)$$

$$\rho' = \frac{\mu}{\cos(\beta/2)} \quad (3.3)$$

$M_A = M$, απ' όπου συμπεραίνουμε με την βοήθεια των εξισώσεων (3.1) και (3.2):

$$F \frac{d_A}{2} \mu' = F \frac{d_2}{2} \tan(a + \rho') \quad (3.4)$$

Και τελικά ο συντελεστής τριβής προκύπτει:

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

Είναι γνωστό ότι:

$$d_2 = 14.7 [mm]$$

$$d_A = 22.4 [mm]$$

$$a = 2.48^\circ$$

$$\mu = 14$$

$$\beta = 60^\circ$$

Άρα με βάση τις παραπάνω τιμές, προκύπτουν:

$$(3.3) \rightarrow \rho' = 9.185^\circ$$

$$(3.4) \rightarrow \mu' = 135$$

Όπου:

- M_A : Στρεπτική ροπή στην επιφάνεια έδρασης του περικοχλίου
- M : Ροπή σύσφιγξης κοχλίου
- 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

Με βάση λοιπόν τις παραπάνω πληροφορίες ορίστηκαν οι παρακάτω συντελεστές τριβής:

- Συντελεστής τριβής σπειρωμάτων: **0,14**
- Συντελεστής τριβής επιφανειών επαφής κυλινδρικού τεμαχίου-περικοχλίου: **0,2**

3.3. Έλεγχος σωστής επαφής συνεργαζόμενων επιφανειών

Εκτός από τον έλεγχο (interference detection) που πραγματοποιούνταν μετά την συναρμολόγηση του κοχλίου με το περικόχλιο, ώστε να διαπιστωθεί ότι δεν υπάρχει διείσδυση μεταξύ των συνεργαζόμενων επιφανειών τους, γινόταν και ένας δεύτερος αντίστοιχος έλεγχος στο Ansys, προκειμένου να επιβεβαιωθεί πλήρως η ορθότητα της επαφής τους.

Ο δεύτερος αυτός έλεγχος πραγματοποιούνταν μέσω ενός ιδιαίτερα χρήσιμου εργαλείου που παρέχει το Ansys, το οποίο ονομάζεται “**contact tool**”.

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται ο έλεγχος της επαφής των επιφανειών, μέσω του “contact tool”, σε μία πρώτη πλεγματοποίηση του μοντέλου με ιδιαίτερα αραιό πλέγμα (coarse mesh).

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)
Frictional - M16_P2_DIN931_simple To Nut_d16_P2_simple	Contact	Frictional	Closed	2,	2,2974e-005	0,	0,
Frictional - M16_P2_DIN931_simple To Nut_d16_P2_simple	Target	Frictional	Inactive	N/A	N/A	N/A	N/A
Frictional - Nut_d16_P2_simple To temaxio_oph_d17_small	Contact	Frictional	Closed	157,	1,0658e-014	0,	1,0658e-014
Frictional - Nut_d16_P2_simple To temaxio_oph_d17_small	Target	Frictional	Inactive	N/A	N/A	N/A	N/A

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.



Geometric Gap (mm)	Resulting Pinball (mm)	Real Constant
4,2887e-005	0,31819	4,
N/A	N/A	0,
3,5527e-015	0,60687	6,
N/A	N/A	7,

Σχήμα 3. 29: Έλεγχος επαφών (Contact tool)

Μετά από αρκετές προσομοιώσεις διαπιστώθηκε ότι το μέγεθος της διείσδυσης (penetration) και των κενών (gaps), διαδραμάτιζε ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων και πολλές φορές ήταν καταλυτικό για την επίτευξη σύγκλισης.

Προς επεξήγηση της παραπάνω εικόνας, σημειώνεται ότι ως, “Geometric Gap” και “Geometric penetration” ορίζεται το πραγματικό κενό και η πραγματική διείσδυση αντίστοιχα, που εντοπίζονται στις συνεργαζόμενες επιφάνειες πριν αυτές πλεγματοποιηθούν, ενώ τα “Gap” και “Penetration” είναι το κενό και η διείσδυση αντίστοιχα που εμφανίζεται σε αυτές μετά την πλεγματοποίησή τους. Αξίζει να αναφερθεί ότι το κενό και η διείσδυση μπορούσαν να ελεγχθούν έως ένα βαθμό με ειδικές ρυθμίσεις του προγράμματος, έτσι ώστε να έρθουν στα επιθυμητά μεγέθη, που στην προκειμένη περίπτωση επιδιώχθηκε να είναι μικρότερα της τάξης του 10^{-4} .

4. Έλεγχος πρώτων αποτελεσμάτων

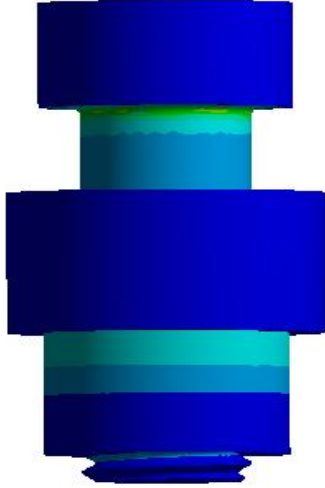
4.1. Εισαγωγή

Έχοντας πλέον ολοκληρωθεί όλες οι απαραίτητες επιλογές που αφορούσαν την μοντελοποίηση του προς επίλυση στατικού προβλήματος, κρίθηκε αναγκαίο να πραγματοποιηθεί μια αρχική προσομοίωση του, ώστε να ελεγχθεί σε πρώτη φάση αν η συμπεριφορά του μοντέλου είναι αυτή που θα περίμενε κανείς σε μια πραγματική κοχλιοσύνδεση.

Σημειώνεται, ότι η πυκνότητα του πλέγματος που χρησιμοποιήθηκε στη συγκεκριμένη προσομοίωση δεν έχει ακόμη ελεγχθεί εάν είναι η καταλληλότερη. Έχει γίνει όμως μια αρχική προσπάθεια ώστε το πλέγμα να είναι πιο πυκνό στην βάση του σπειρώματος του κοχλία.

4.2. Αρχικός έλεγχος τάσεων για το μοντέλο με κανονικό περικόχλιο

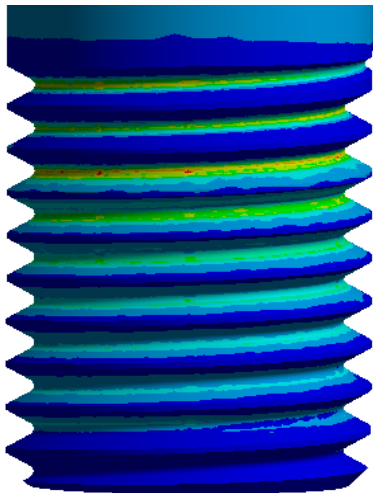
Με την βοήθεια των παρακάτω εικόνων, εξετάζεται αν οι υψηλές τιμές της συγκέντρωσης τάσεων εμφανίζονται στις αναμενόμενες περιοχές του μοντέλου.



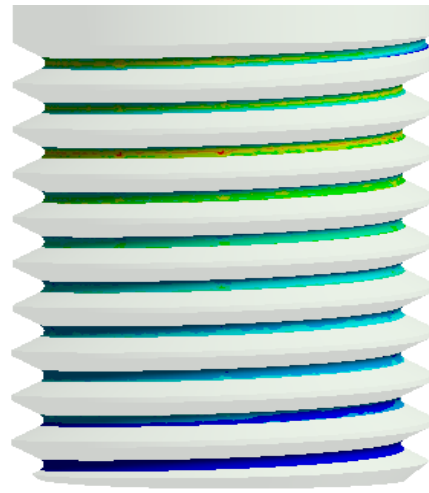
Σχήμα 4. 1: von Mises - κοχλιοσύνδεση



Σχήμα 4. 2: von Mises – κοχλιοσύνδεση σε τομή



Σχήμα 4. 3: von Mises – σπείρωμα κοχλία



Σχήμα 4. 4: von Mises – βάση σπειρώματος κοχλία

Παρατηρώντας τις παραπάνω εικόνες διαπιστώνεται, ότι οι υψηλότερες τιμές των τάσεων εμφανίζονται ακριβώς στις αναμενόμενες περιοχές, δηλαδή στο κάτω μέρος της κεφαλής του κοχλία, στη βάση του σπειρώματος στις αρχικές σπείρες και στις βάση των πρώτων συνεργαζόμενων σπειρών.

4.3. Κατανομή τάσεων von Mises και της μέσης πίεσης επιφανείας κατά μήκος του σπειρώματος του κοχλία και του περικοχλίου

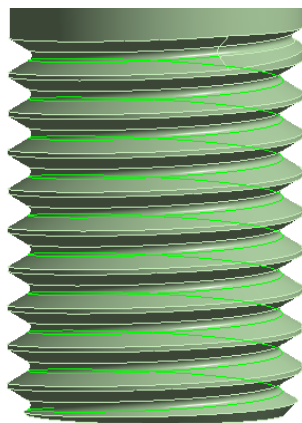
Προκειμένου να επιβεβαιωθεί πλήρως η ορθότητα της συνεργασίας του κοχλία και του περικοχλίου, εξετάζεται αν οι κατανομή των τάσεων von Mises και της μέσης πίεσης επιφανείας στο σπείρωμα του κοχλία έχουν την αναμενόμενη μορφή.

Θα πρέπει να σημειωθεί, ότι τα διαγράμματα των κατανομών των τάσεων von Mises στη βάση του σπειρώματος του κοχλία, αφορούν την μία από τις δύο ελικοειδείς ακμές που εμφανίζονται στο μοντέλο στην περιοχή αυτή και όχι το κέντρο της ρίζας του σπειρώματος όπου εμφανίζονται οι μέγιστες τάσεις von Mises.

Το γεγονός ότι δεν υπήρχε καμία τέτοιου είδους ακμή στο κέντρο της βάσεως του σπειρώματος δεν επέτρεπε στον άμεσο προσδιορισμό των εν λόγω διαγραμμάτων, ως εκ τούτου υπολογίστηκαν λίγο πιο έξω με την βοήθεια της υπάρχουσας ελικοειδούς ακμής.

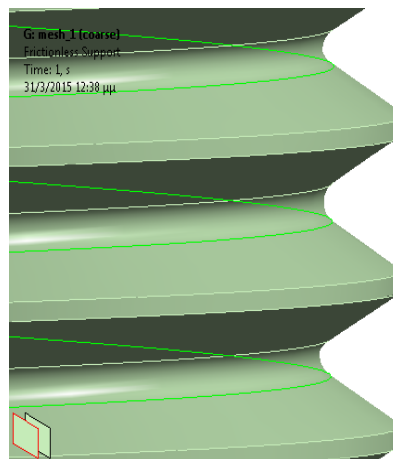
Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται η ελικοειδής ακμή, κατά μήκος της οποίας έγινε ο υπολογισμός των τάσεων von Mises.

Geometry
31/3/2015 11:26 πμ



Σχήμα 4. 5: Έλικα για τον υπολογισμό των τάσεων von Mises (κοχλίας)

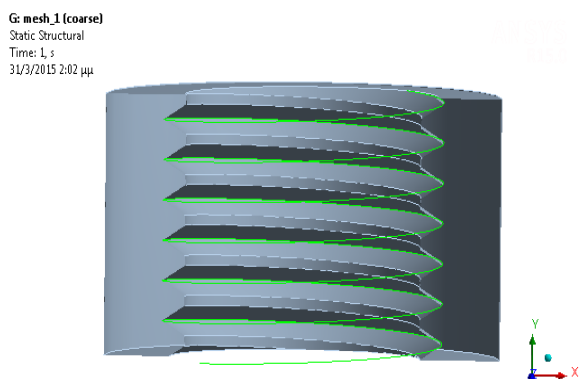
G: mesh_1 (coarse)
Frictionless Support
Time: 1, s
31/3/2015 12:38 πμ



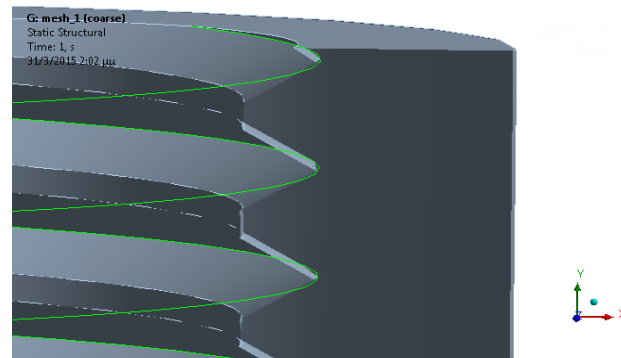
Σχήμα 4. 6: Μεγέθυνση στη βάση του σπειρώματος

Όπως φαίνεται και από την παραπάνω εικόνα τα διαγράμματα των τάσεων von Mises δεν θα αφορούν μόνο την περιοχή του κοχλία με τις σπείρες που βρίσκονται σε συνεργασία αλλά ολόκληρο το σπείρωμα.

Στο περικόχλιο η κατανομή των τάσεων von Mises, υπολογίστηκε ακριβώς στη βάση του σπειρωματός του, κατά μήκος της ελικοειδούς ακμής που παρουσιάζεται στις παρακάτω εικόνες.



Σχήμα 4. 7: Έλικα για τον υπολογισμό των τάσεων von Mises (περικόχλιο)

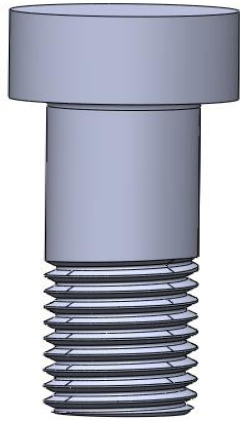


Σχήμα 4. 8: Μεγέθυνση στη βάση του σπειρώματος του περικοχλίου

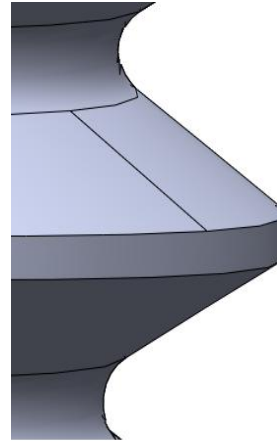
Ο υπολογισμός των τάσεων von Mises, αποδείχθηκε ευχερής διότι το λογισμικό Ansys, μπορούσε μετά το τέλος των προσομοιώσεων να εξάγει τις εν λόγω τάσεις αυτόματα στην επιλεγμένη περιοχή. Αφετέρου για τον υπολογισμό της μέσης πίεσης στην συνεργαζόμενη κατατομή του σπειρώματος του κοχλίου, η διαδικασία που προέκυψε ήταν πιο χρονοβόρα.

Αποφασίστηκε, σε πρώτο στάδιο, να υπολογιστεί η μέση πίεση κατά το πλάτος του σπειρώματος σε θέσεις που βρίσκονται περιμετρικά της κάθε σπείρας και στην συνέχεια να γίνει σύνθεση των τιμών αυτών σε ένα γράφημα, το οποίο κατά συνέπεια θα παρουσιάζει την κατανομή της μέσης πίεσης επιφανείας κατά το μήκος του τμήματος του σπειρώματος του κοχλίου που συνεργάζεται με το σπείρωμα του περικοχλίου.

Για τον σκοπό αυτό ο κοχλίας του μοντέλου τροποποιήθηκε έτσι ώστε να εμφανίζονται οι επιθυμητές ακμές κατά το πλάτος του σπειρωματός του, πάνω στις οποίες θα μπορούσε πλέον εύκολα να υπολογιστεί το προφίλ της πίεσης. Οι εν λόγω ακμές δημιουργήθηκαν στα σημεία όπου, δυο κάθετα μεταξύ τους επίπεδα στην αξονική γραμμή του κοχλίου, τέμνουν την επιφάνεια του σπειρώματος του.



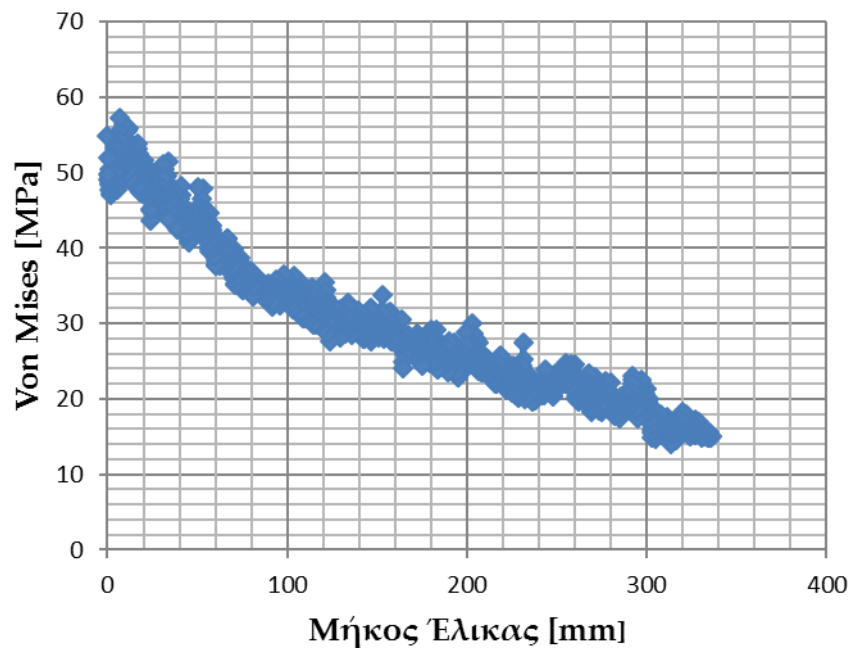
Σχήμα 4. 9: Κοχλίας με ακμές



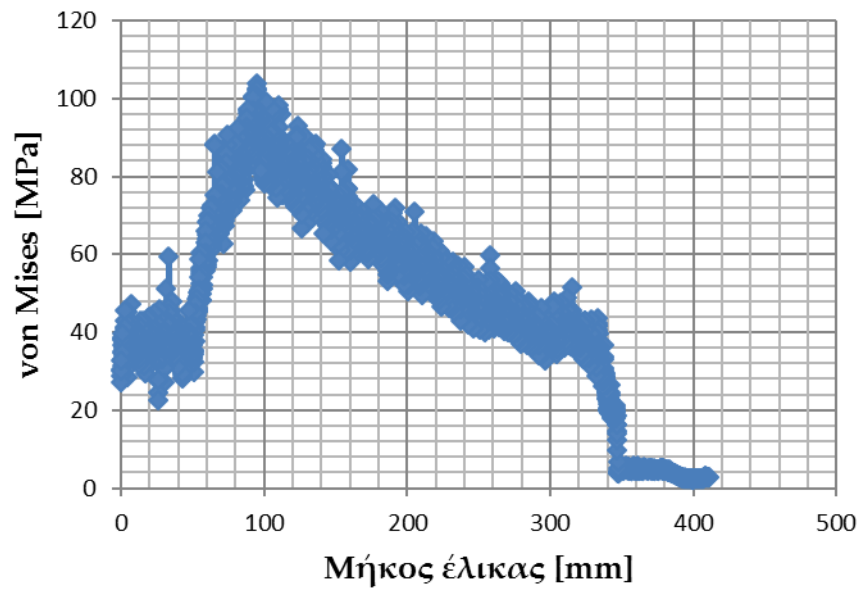
Σχήμα 4. 10: Ακμή στο σπείρωμα του κοχλίας

Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα της κατανομής των τάσεων von Mises κατά μήκος της βάσης του σπειρώματος του κοχλίας και του περικοχλίου.

Για το διάγραμμα των τάσεων von Mises, το αρχικό σημείο από το οποίο μετράται το μήκος της έλικας έχει ληφθεί στην αρχή του σπειρώματος του κοχλίας. Για το διάγραμμα της μέσης πίεσης το μήκος της έλικας ξεκινάει να μετράται από τη θέση στην οποία αρχίζει η συνεργασία των σπειρωμάτων.

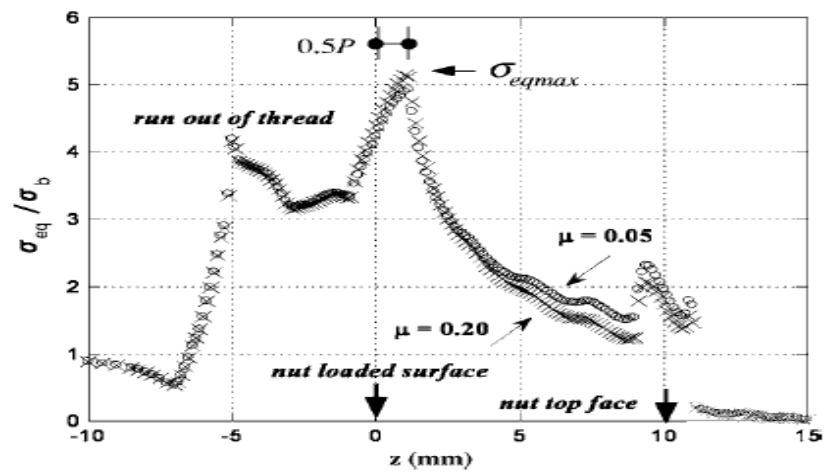


Σχήμα 4. 11: Κατανομή τάσεων von Mises στη βάση του σπειρώματος του περικοχλίου

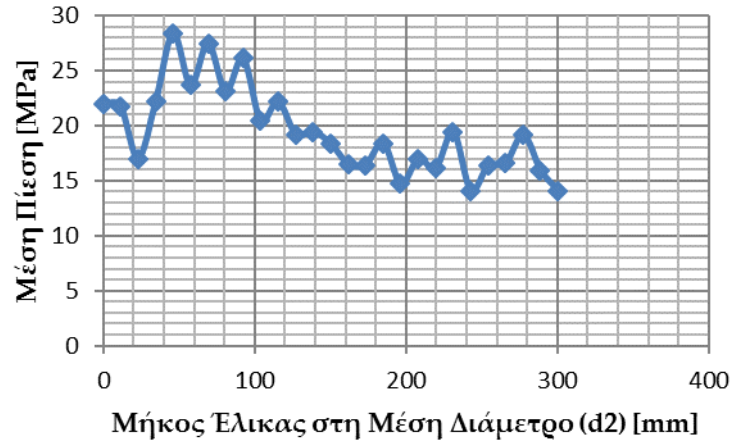


Σχήμα 4. 12: Κατανομή τάσεων von Mises στη βάση του σπειρώματος του κοχλία

Στο παρακάτω γράφημα παρουσιάζεται η κατανομή των τάσεων von Mises κατά μήκος της βάσης του σπειρώματος ενός κοχλία M16, κανονικοποιημένη ως προς το εφαρμοζόμενο στον κορμό του αξονικό φορτίο, για ένα εύρος συντελεστών τριβής. [14]



Σχήμα 4. 13: Κατανομή τάσεων von Mises στη βάση του σπειρώματος του κοχλία (μελέτη Fukuoaka T.)



Σχήμα 4. 14: Κατανομή μέσης πίεσης επιφανείας – σπείρωμα κοχλία

Παρατηρώντας τις κατανομές των τάσεων von Mises που παρουσιάζονται στα σχήματα..., διαπιστώνεται ότι έχουν μια αρκετά παραπλήσια μορφή, γεγονός που αποτελεί σημαντική επιβεβαίωση για την ορθότητα της μοντελοποίησης των σπειρωμάτων, όπως επίσης επιβεβαίωση της σωστής συνεργασίας του περικοχλίου με τον κοχλία αποτελεί και η κατανομή της μέσης πίεσης επιφανείας που παρουσιάζεται στο σχήμα 4.14, διότι το προφίλ που ακολουθεί είναι παρόμοιο με αυτό των τάσεων von Mises, οπού φαίνεται ότι η μεγαλύτερη πίεση εμφανίζεται στις πρώτες συνεργαζόμενες σπείρες όπως ήταν αναμενόμενο.

5. Ανάλυση προτεινόμενης τροποποίησης περικοχλίου

5.1. Εισαγωγή

Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή, το βασικό πρόβλημα που οδηγεί στην αστοχία έναν κοχλία που συνεργάζεται με ένα περικόχλιο είναι οι υψηλές τιμές της συγκέντρωσης τάσεων στη βάση των πρώτων συνεργαζόμενων σπειρών που βρίσκονται πιο κοντά στην κεφαλή του κοχλία. Προκειμένου να αντιμετωπιστεί το εν λόγω πρόβλημα προτείνεται η τροποποίηση της γεωμετρίας των σπειρών του περικοχλίου σύμφωνα με την μέθοδο που περιγράφεται στην παρούσα ενότητα.

Πριν ξεκινήσει η περιγραφή της προτεινόμενης τροποποίησης, θεωρείται χρήσιμο να αναφερθεί ότι κατά τη σύσφιξη του κοχλία, στο σπειρώμα του συμβαίνουν οι ακόλουθες καταπονήσεις :

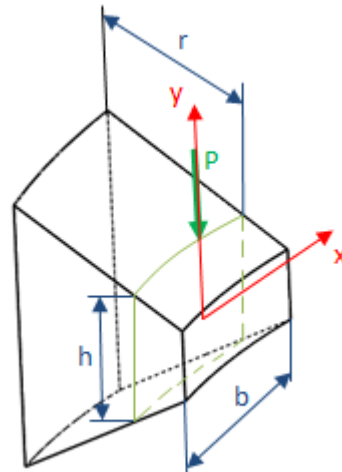
- α) Πίεση επιφανείας στην παράπλευρη επιφάνεια του σπειρώματος λόγω της αξονικής δύναμης.
- β) Καμπτική καταπόνηση στη βάση της κατατομής του σπειρώματος λόγω της αξονικής δύναμης.
- γ) Διατμητική καταπόνηση λόγω της αξονικής δύναμης.
- δ) Διατμητική καταπόνηση λόγω της στρέψης που μεταβιβάζεται κατά τη σύσφιξη του κοχλία στη βάση του σπειρώματος

Από τις παραπάνω καταπονήσεις έχει διαπιστωθεί ότι, κυρίως η κάμψη είναι αυτή που ευθύνεται για την υψηλές τιμές συγκέντρωσης τάσεων στη βάση του σπειρώματος.

5.2. Προσδιορισμός καμπύλης τροποποίησης του περικοχλίου

Εξετάζεται λοιπόν, η τροποποίηση της επιφάνειας των σπειρών του περικοχλίου με στόχο την μείωση του καμπτικού φορτίου στη βάση των συνεργαζόμενων σπειρών που εμφανίζουν τις μεγαλύτερες τιμές συγκέντρωσης τάσεων.

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται ένα τμήμα μίας σπείρας ενός περικοχλίου, με την βοήθεια του οποίου πραγματοποιήθηκε προσπάθεια για την εύρεση της σχέσης μεταξύ της κάμψης του τμήματος αυτού, με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του και με το επιβαλλόμενο σε αυτό αξονικό φορτίο.



Σχήμα 5. 1: Τμήμα σπείρας περικοχλίου

Έστω ότι στο κέντρο της παραπάνω τυχαίας ορθογωνικής διατομής, βρίσκεται τοποθετημένο ένα καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων.

Η ροπή αδρανείας ως προς τον άξονα x, δίνεται από την σχέση:

$$I_x = \frac{h^3 b}{12} \quad (5.1)$$

Όμως για το ύψος h , της τυχαίας διατομής και την ακτινική απόσταση r από την βάση του σπειρώματος, ισχύει:

$$h = \kappa r \quad , \quad \text{όπου } \kappa \text{ μια σταθερά αναλογίας} \quad (5.2)$$

Άρα η σχέση (2.1), λόγω της (2.2), γίνεται:

$$I_x = \frac{\kappa^3 r^3 b}{12} \quad (5.3)$$

Το βέλος κάμψης του εν λόγω τμήματος είναι:

$$\delta = \frac{Pr}{EI_x} \quad (5.4)$$

Η σχέση (5.4), λόγω της (5.3), γίνεται:

$$\delta = \frac{Pr}{E} \frac{12}{\kappa^3 r^3 b} \quad , \quad \text{άρα} \quad \frac{P}{\delta} = \frac{E \kappa^3 r^2 b}{12} \quad , \quad \text{επομένως} \quad (5.5)$$

$$\frac{P}{\delta} = Kr^2 \quad (5.6)$$

$$\text{Όπου } K = \frac{E \kappa^3 b}{12} \quad , \quad \text{σταθερά αναλογίας.} \quad (5.7)$$

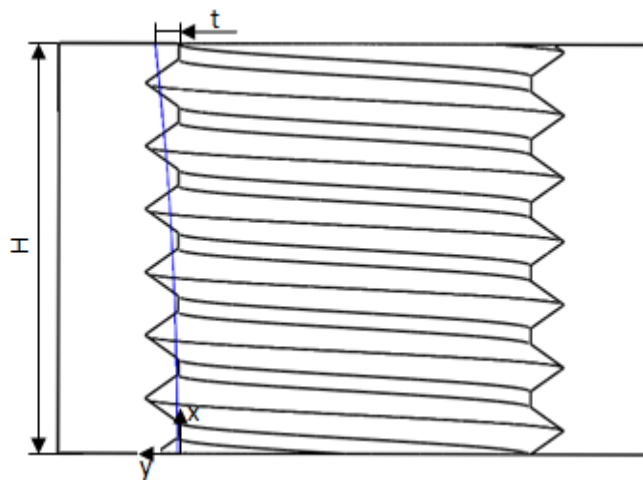
Συνεπώς, σύμφωνα με τη σχέση (5.6), είναι: $\frac{P}{\delta}$ ανάλογο του r^2 .

Προκειμένου να διατηρηθεί η παραπάνω αναλογία αποφασίστηκε για την τροποποίηση του σπειρώματος του περικοχλίου να γίνει η εισαγωγή μιας πολυωνυμικής καμπύλης δευτέρου βαθμού.

Επομένως η καμπύλη που εισάγεται για τον σχεδιασμό του νέου περικοχλίου, είναι η εξής:

$$f(x) = ax^2 + bx + c \quad (5.8)$$

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται σχηματικά ο τρόπος με τον οποίο η καμπύλη που εισάγεται για την τροποποίηση του περικοχλίου.



Σχήμα 5. 2: Καμπύλη τροποποίησης περικοχλίου

Το εύρος της παραμέτρου (t), επιλέχθηκε έτσι ώστε ακόμη και η σπείρα που θα έχει υποστεί την μεγαλύτερη αφαίρεση υλικού να μπορεί να παραλαμβάνει φορτίο, όπως και οι υπόλοιπες σπείρες του περικοχλίου.

Επομένως, για να βρίσκονται σε επαφή όλες οι σπείρες του περικοχλίου θα πρέπει:

$$t = (0, H1) \rightarrow t = (0, 1.08254) \text{ [mm]}$$

Όπου για λόγους πληρότητας υπενθυμίζεται ότι ($H1$) είναι το βάθος του σπειρώματος του περικοχλίου.

Προκειμένου να προσδιοριστεί πλήρως η παραπάνω εξίσωση θα πρέπει να υπολογιστούν οι τρεις άγνωστες παράμετροι της.

Γνωρίζουμε ότι η καμπύλη ξεκινάει από την αρχή του συστήματος συντεταγμένων, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα. Συνεπώς :

$$f(0) = 0 \text{ άρα } c = 0 \tag{5.9}$$

Επιπλέον για την αποφυγή συγκέντρωσης τάσεων στην πρώτη σπείρα του περικοχλίου από όπου και ξεκινάει η καμπύλη, επιλέχθηκε στο αρχικό αυτό σημείο η κλίση της να είναι μηδενική. Επομένως:

$$\frac{df(0)}{dx} = 0 \text{ άρα } b = 0 \tag{5.10}$$

Παράλληλα είμαστε σε θέση γνωρίζουμε και τις συντεταγμένες του τελικού σημείου της καμπύλης στο οποίο η τετμημένη είναι ίση με το ύψος του περικοχλίου (H) και η τεταγμένη αντιστοιχεί στην παράμετρο (t). Οπότε:

$$f(H) = t \quad (5.11)$$

Με βάση λοιπόν τις εξισώσεις (3.2), (3.3) και (3.4), η εξίσωση (3.1), γίνεται:

$$t = aH^2 \quad \text{άρα} \quad a = \frac{t}{H^2} \quad (5.12)$$

Συνεπώς, η τελική μορφή της εξίσωσης (3.1), είναι :

$$f(x) = \frac{t}{H^2} x^2 \quad (5.13)$$

Με $t=(0, 1.08254)$ [mm] και $H=13$ [mm]

6. Δημιουργία μοντέλου κοχλιοσύνδεσης με τροποποιημένο περικόχλιο

6.1. Εισαγωγή

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιήθηκε ο σχεδιασμός της γεωμετρίας του προτεινόμενου τροποποιημένου περικοχλίου, με την βοήθεια του σχεδιαστικού προγράμματος Solidworks, όπως έγινε και με την υπόλοιπη γεωμετρία του μοντέλου που παρουσιάστηκε στην ενότητα 2.

6.2. Περιγραφή σχεδιασμού νέου περικοχλίου

Το γεγονός ότι είχε ήδη δημιουργηθεί το κανονικό περικόχλιο στο Solidworks, βοήθησε ώστε εύκολα με μια απλή επεξεργασία του να παράγεται κάθε φορά το επιθυμητό τροποποιημένο περικόχλιο, χωρίς να απαιτείται η σχεδίαση του από την αρχή.

Όπως αποδείχθηκε και στην ενότητα 2, η καμπύλη που εισαγόταν κάθε φορά, τροποποιούνταν ανάλογα με την επιλεγόμενη τιμή τις παραμέτρου (t).

Για λόγους πληρότητας αναφέρεται ξανά ότι η παράμετρος (t), μπορεί να λάβει τιμές στο διάστημα $(0, 1.08254)$ [mm], έτσι όλες οι σπείρες του περικοχλίου να μπορούν να παραλάβουν φορτίο.

Οι τιμές επιλέχθηκαν για την παράμετρο (t), είναι: 0.3, 0.7, 0.9 [mm]

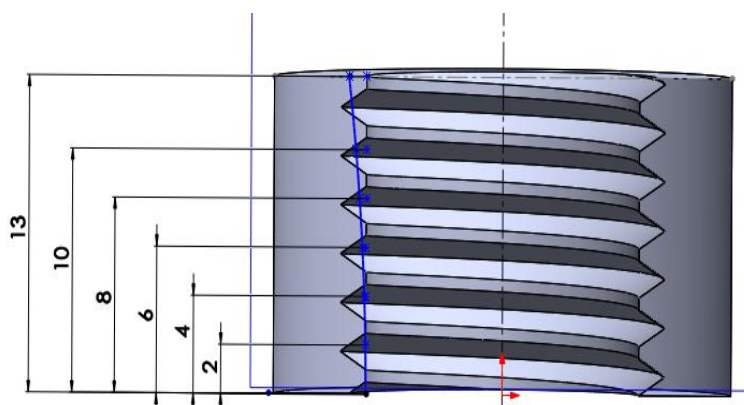
Αρχικά, ανάλογα με την τιμή της παραμέτρου (t), πραγματοποιούνταν ο υπολογισμός των συντεταγμένων ($x, f(x)$) για επτά σημεία της καμπύλης, σε υπολογιστικό φύλο του προγράμματος Excel.

Στο παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι συντεταγμένες των υπολογισμένων σημείων:

t=0.3 mm		t=0.7 mm		t=0.9 mm	
x (mm)	f(x) (mm)	x (mm)	f(x) (mm)	x (mm)	f(x) (mm)
0	0	0	0	0	0
2	0.007101	2	0.016568	2	0.021302
4	0.028402	4	0.066272	4	0.085207
6	0.063905	6	0.149112	6	0.191716
8	0.113609	8	0.265089	8	0.340828
10	0.177515	10	0.414201	10	0.532544
13	0.3	13	0.7	13	0.9

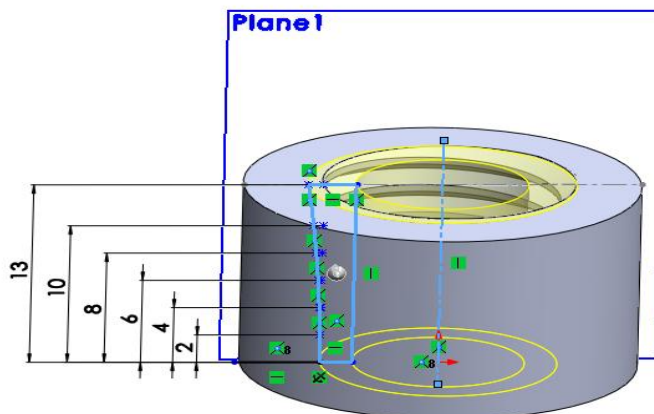
Πίνακας 6. 1: Συντεταγμένες σημείων καμπύλης τροποποίησης περικοχλίου

Στην συνέχεια τα σημεία εισάγονταν στο Solidworks, επάνω σε επίπεδο που διέρχονταν από το κέντρο του περικοχλίου και ενώνονταν ένα προς ένα με μια καμπύλη spline, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα.



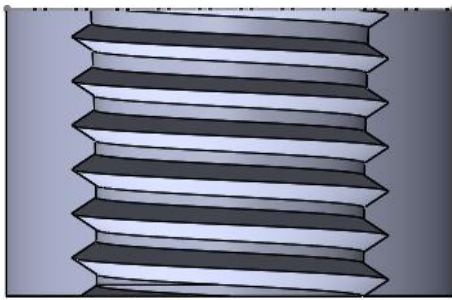
Σχήμα 6. 2: Σχεδίαση καμπύλης τροποποίησης περικοχλίου

Μετά την εισαγωγή της επιθυμητής καμπύλης πραγματοποιούνταν αφαίρεση υλικού, μέσω της λειτουργίας του Solidworks που ονομάζεται “cut revolve”.

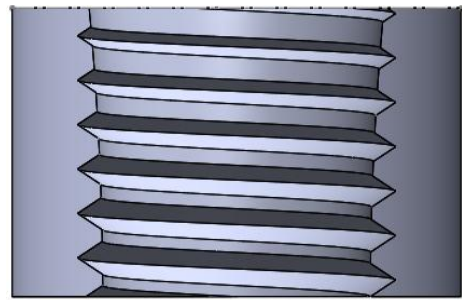


Σχήμα 6. 3: Αφαίρεση υλικού από κανονικό περικόχλιο

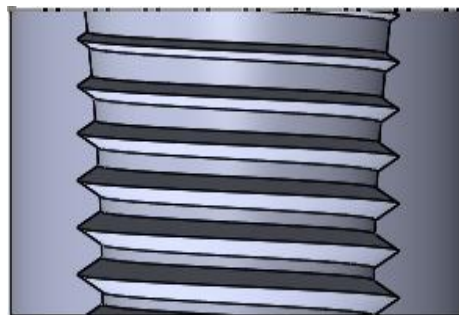
Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται τα τρία τροποποιημένα περικόχλια σε τομή.



Σχήμα 6. 4: Περικόχλιο $t=0.3$ mm



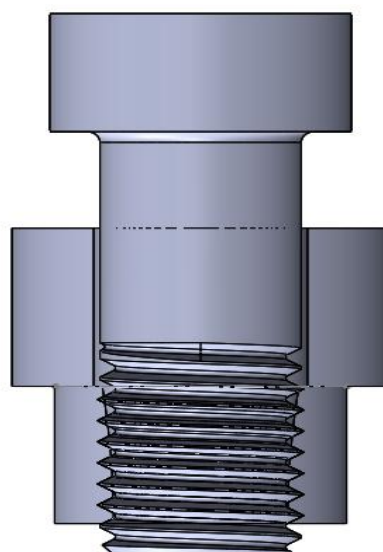
Σχήμα 6. 5: Περικόχλιο $t=0.7$ mm



Σχήμα 6. 6: Περικόχλιο $t=0.9$ mm

Η συναρμολόγηση της κοχλιοσύνδεσης με το νέο περικόχλιο πραγματοποιήθηκε ακριβώς με τον ίδιο τρόπο που έγινε και με το κανονικό περικόχλιο όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 3.3.

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται σε τομή το μοντέλο της κοχλιοσύνδεσης που φέρει το τροποποιημένο περικόχλιο παραμέτρου $t=0.9$ [mm] .



Σχήμα 6. 7: Κοχλιοσύνδεση με περικόχλιο $t=0.9$ mm σε τομή

7. Εύρεση καταλληλότερης πυκνότητας πλέγματος

7.1. Εισαγωγή

Στην παρούσα ενότητα περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε προκειμένου να ευρεθεί η καταλληλότερη από πλευράς υπολογιστικού κόστους και ακρίβειας αποτελεσμάτων, πυκνότητα πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων.

Είναι γνωστό ότι, όσο αυξάνεται η πυκνότητα του πλέγματος αυξάνεται και το υπολογιστικό κόστος. Με κατάλληλο να θεωρείται το πλέγμα, το κατά το δυνατόν χαμηλού υπολογιστικού κόστους στο οποίο η επιπλέον αύξηση της πυκνότητας του θα επέφερε ασήμαντη μεταβολή στο εξεταζόμενο προς σύγκλιση μέγεθος.

Στο εξεταζόμενο μοντέλο, λόγω της αυξημένης πολυπλοκότητας της γεωμετρίας του, εξαιτίας της παρουσίας του σπειρώματος, υπήρξε ιδιαίτερα αυξημένη η δυσκολία για την επίτευξη μιας ικανοποιητικής πλεγματοποίησης που θα παρείχε με σχετικά μικρό αριθμό πεπερασμένων στοιχείων υψηλή ακρίβεια στις περιοχές υψηλών τιμών συγκέντρωσης τάσεων. Συνεπώς για λόγους ταχύτητας επίλυσης των προσομοιώσεων του μοντέλου, κρίθηκε σκόπιμο η μελέτη να επικεντρωθεί κυρίως στην βάση του σπειρώματος του κοχλία και του περικοχλίου μιας και αποτελούν τις βασικές περιοχές για τις οποίες πραγματοποιείται προσπάθεια βελτίωσης του τασικού πεδίου της.

Η αξιοπιστία του μοντέλου ελέγχθηκε με βάση τα εξής δύο κριτήρια:

α) Την ακρίβεια που επιτεύχθηκε κατά τον έλεγχο σύγκλισης των τάσεων von Mises στη ρίζα του σπειρώματος του κοχλία

β) Την ακρίβεια με την οποία η θεωρητική μέση πίεση επιφανείας του σπειρώματος του κοχλία προσεγγίζει την μέση πίεση επιφανείας που υπολογίζεται με βάση τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων.

Πληροφοριακά, όσον αφορά την τάση von Mises, σημειώνεται ότι δεν αποτελεί άμεσα μετρίσιμο μέγεθος. Είναι αποτέλεσμα της ομώνυμης θεωρίας αστοχίας των von Mises - Hencky, η οποία ονομάζεται Θεωρία Παραμόρφωσης ή Θεωρία Ενέργειας Διατμητικής Παραμόρφωσης.

Η παραπάνω θεωρία προτείνει ότι η ολική ενέργεια παραμόρφωσης αποτελείται από δύο συνιστώσες: την ογκομετρική (υδροστατική) ενέργεια παραμόρφωσης και την ενέργεια παραμόρφωσης μορφής (παραμόρφωσης ή διάτμησης). Η αστοχία επέρχεται όταν η συνιστώσα μορφής ξεπεράσει την αντίστοιχη συνιστώσα μορφής του υλικού όταν αυτό φθάσει στο σημείο διαρροής κατά την απλή δοκιμή εφελκυσμού.

Αναλυτικός τύπος υπολογισμού τάσεων von Mises:

$$\begin{aligned}\sigma_v &= \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2}} \\ &= \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)}{2}}\end{aligned}\quad (7.1)$$

Ο μαθηματικός τύπος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της μέσης πίεσης επιφανείας στα σπειρώματα, είναι:

$$P_m = \frac{F_v / [n \cos(\beta/2)]}{\pi d_2 t_2 / \cos(\beta/2)} \quad \rightarrow \quad P_m = \frac{F_v}{n \pi d_2 t_2} \quad (7.2)$$

Όπου n ο αριθμός των σπειρών που μοιράζονται εξ ίσου την αξονική δύναμη F_v .

Υπενθυμίζεται ότι, η αξονική δύναμη F_v υπολογιζόταν κάθε φορά μετά το τέλος των προσομοιώσεων, ως δύναμη αντίδρασης στην επιβαλλόμενη μετατόπιση.

Προκειμένου όμως, ο υπολογισμός της μέσης πίεσης επιφανείας να είναι ακόμη πιο ακριβής, προτιμήθηκε ο παρονομαστής στο μαθηματικό τύπο (7.2), να αντικατασταθεί με το πραγματικό εμβαδόν της επιφάνειας επαφής των συνεργαζόμενων σπειρών, το οποίο εύκολα μπορούσε να υπολογιστεί στο Solidworks.

Επομένως, τώρα η σχέση (7.2), έχει ως εξής:

$$P_m = \frac{F_v}{A_{threads} \cos(\beta/2) \cos \alpha} \quad (7.3)$$

Όπου:

- $A_{threads}$: Εμβαδόν επιφάνειας επαφής συνεργαζόμενων σπειρών

Επίσης για λόγους πληρότητας, υπενθυμίζεται ότι $\beta = 60 (^{\circ})$, είναι η γωνία του σπειρώματος και $\alpha = 2,479627 (^{\circ})$, η γωνία ελίκωσης.

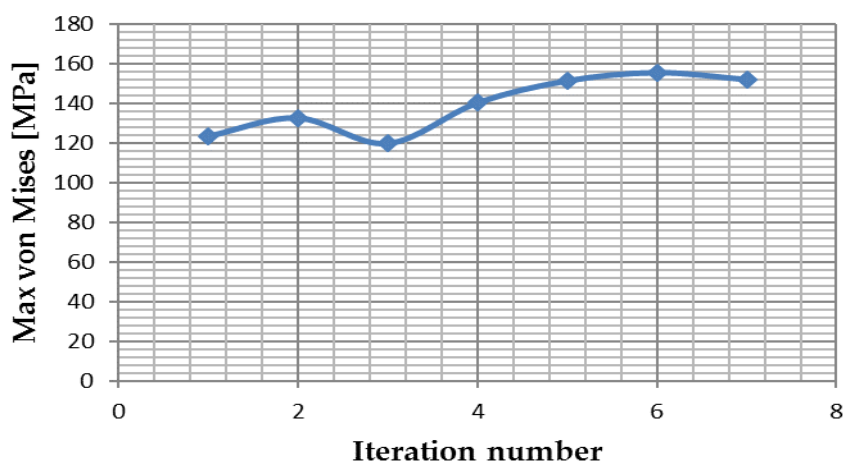
Ο όρος $\cos(\beta/2) \cos \alpha$, που βρίσκεται στον παρονομαστή της σχέσης (7.3) χρησιμοποιήθηκε εξαιτίας του γεγονότος η αξονική δύναμη F_v , δεν ασκούνται κάθετα στην επιφάνεια του σπειρώματος λόγω της κλίσης του και της κλίσης της έλικας.

Η μέση πίεση επιφανείας που προέκυπτε από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων θα δίνεται με τον συμβολισμό: P_{FEA}

7.2. Εύρεση καταλληλότερης πυκνότητας πλέγματος για το μοντέλο με κανονικό περικόχλιο

Θα πρέπει να αναφερθεί, ότι παράλληλα με την σταδιακή μείωση του μεγέθους των πεπερασμένων στοιχείων στη βάση του σπειρώματος, πραγματοποιούνταν και μείωση του μεγέθους τους, στις κατατομές του σπειρώματος, ώστε στην εξεταζόμενη περιοχή να μην εμφανίζονται απότομες αλλαγές στην πυκνότητα του πλέγματος, οι οποίες έδειξαν ότι δυσκόλευαν την επίτευξη σύγκλισης κατά την προσομοίωση.

Αρχικά πραγματοποιήθηκε προσπάθεια για την σύγκλιση των τάσεων von Mises στη βάση του σπειρώματος του κοχλίου. Η πορεία της σύγκλισης παρουσιάζεται στο παρακάτω γράφημα.



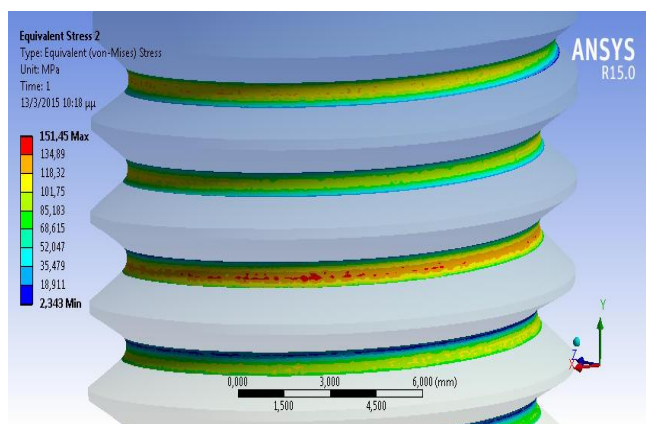
Σχήμα 7. 1: Πορεία σύγκλισης τάσεων von Mises (βάση σπειρώματος κοχλίου)

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται χαρακτηριστικά στοιχεία που αφορούν τις προσομοιώσεις, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την επιλογή της καταλληλότερης πυκνότητας πλέγματος.

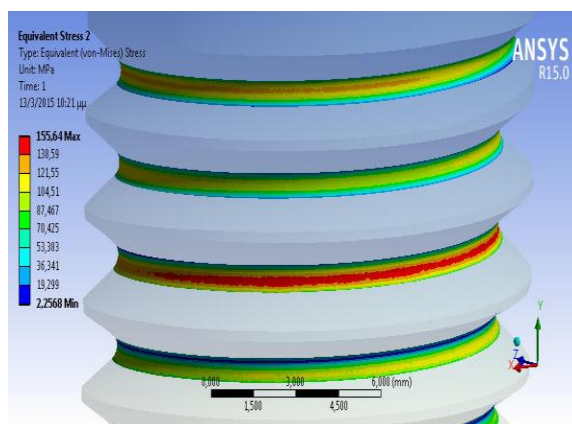
Iteration number	Von Mises [MPa]	Change (%)	Element size (root) [mm]	Nodes (total)	Elements (total)	Run time (minutes)
1	123.5	-	0.6 (coarse mesh)	23230	11952	3
2	132.87	7.052	0.6 (medium)	63385	30578	1
3	119.92	-1798	0.5 (medium)	144044	79255	4
4	1435	14.556	0.25 (medium)	233480	133072	5
5	151.45	7.329	0.12 (medium)	603693	362729	20
6	155.64	2.692	0.06 (medium)	1541187	934580	70
7	152.14	-2.300	0.04 (medium)	2601029	1584578	141

Πίνακας 7. 2: Χαρακτηριστικά στοιχεία προσομοιώσεων (βάσης σπειρώματος κοχλίας)

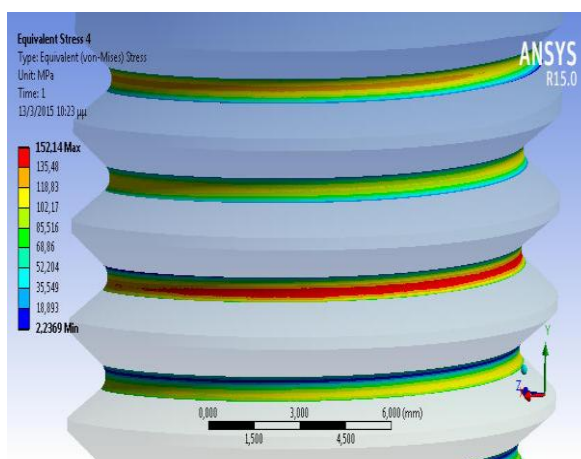
Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται το προφίλ των τάσεων von Mises κατά τις τρεις τελευταίες επαναλήψεις.



Σχήμα 7. 3: von Mises – Iteration 5



Σχήμα 7. 4: von Mises – Iteration 6



Σχήμα 7. 5: von Mises – Iteration 7

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα, κατά τις τελευταίες τρεις προσομοιώσεις παρατηρούνται μικρές διαφορές σε σχέση με την τιμή της μέγιστης τάσης von Mises, αλλά σχετικά μεγάλες διαφορές όσον αφορά τον χρόνο επίλυσης των προσομοιώσεων και λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι οι τελευταίες δύο προσομοιώσεις εμφανίζουν τα πιο ομοιογενή (χρωματικά) προφίλ τάσεων, αποφασίστηκε ότι η καταλληλότερη πυκνότητα πλέγματος για τις μετέπειτα προσομοιώσεις ήταν αυτή που πραγματοποιήθηκε κατά την έκτη προσομοίωση.

Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε έλεγχος, προκειμένου να επιβεβαιωθεί ότι και η πυκνότητα του πλέγματος στις κατατομές του σπειρώματος που χρησιμοποιήθηκε στην έκτη προσομοίωση, ήταν και αυτή επαρκώς ικανοποιητική.

Ο έλεγχος αυτός περιελάμβανε την εξέταση του βαθμού απόκλισης της μέσης πίεσης επιφανείας από την αναμενόμενη θεωρητική και πραγματοποιήθηκε με τον τρόπο που περιγράφηκε στην αρχή της παρούσας ενότητας.

Θεωρητική μέση πίεση επιφανείας:

$$F_v = 5824 \text{ [N]}$$

$$A_{threads} = 380 \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$\cos(\beta/2) \cos \alpha = 86521$$

$$(5.3) \rightarrow P_m = 17.714 \text{ [MPa]}$$

Μέση πίεση επιφανείας με βάση τα αποτελέσματα της προσομοίωσης:

$$P_{FEA} = 18.132 \text{ [MPa]}$$

Απόκλιση μεταξύ θεωρητικής μέσης πίεσης επιφανείας με αυτή που προκύπτει σύμφωνα με τα αποτελέσματα της έκτης προσομοίωσης:

$$\frac{|P_m - P_{FEA}|}{P_m} = 0,02305 \text{ ή } 2,305 \text{ (\%)}$$

Επομένως παρατηρείται, ότι η μέση πίεση επιφανείας βρίσκεται ικανοποιητικά κοντά στην αναμενόμενη τιμή, συνεπώς η πυκνότητα του πλέγματος στις συνεργαζόμενες κατατομές των σπειρωμάτων που πραγματοποιήθηκε κατά την έκτη προσομοίωση, θα μπορεί πλέον με ασφάλεια να χρησιμοποιηθεί και στις μετέπειτα προσομοιώσεις.

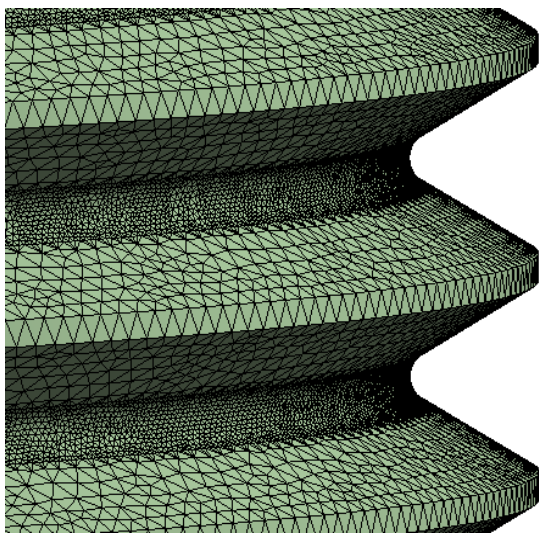
Χαρακτηριστικά μεγέθη πεπερασμένων στοιχείων κατά την έκτη επανάληψη:

α) Βάση σπειρώματος κοχλία: 0.6 [mm]

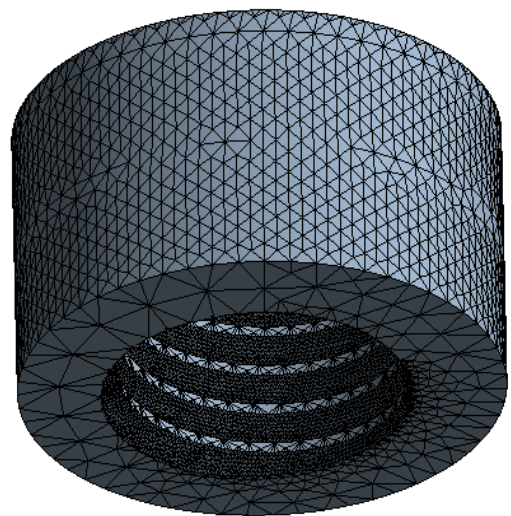
β) Συνεργαζόμενες κατατομές σπειρών: 0.2 [mm]

γ) Επιφάνεια περικοχλίου που εφάπτεται με ενδιάμεσο τεμάχιο: 0.4 [mm]

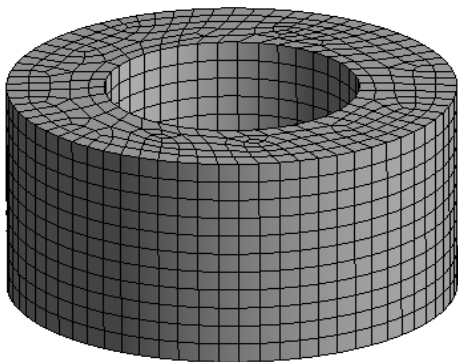
Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται η πλεγματοποίηση του μοντέλου, στην καταλληλότερη για τις επόμενες προσομοιώσεις, έκτη προσομοίωση.



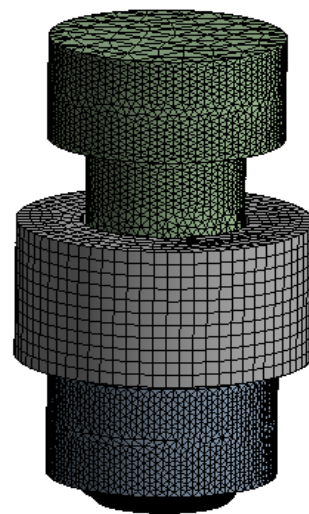
Σχήμα 7. 6: Πλέγμα – βάση σπειρώματος κοχλία
(iteration 6)



Σχήμα 7. 7: Πλέγμα – κατατομή σπειρώματος περικοχλίου
(iteration 6)

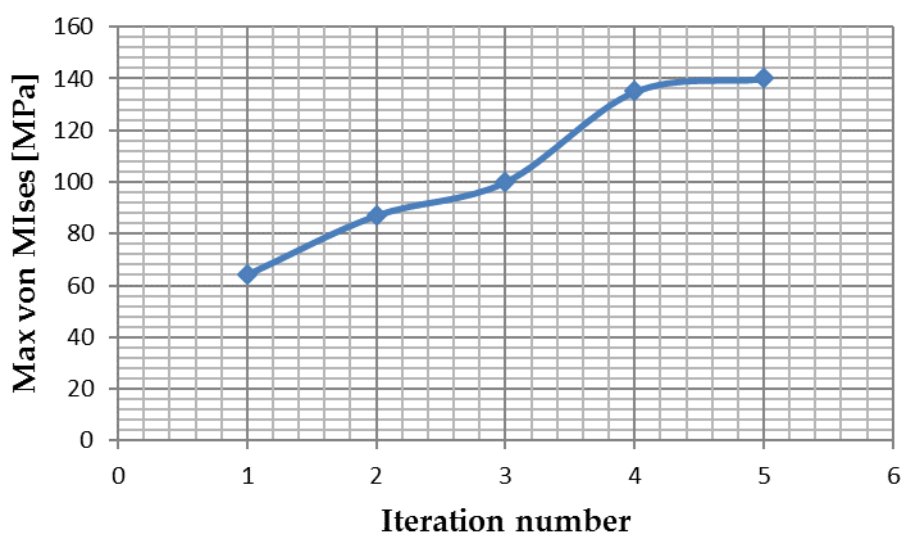


Σχήμα 7. 8: Πλέγμα – κυλινδρικό τεμάχιο
(iteration 6)



Σχήμα 7. 9: Πλέγμα – κοχλιοσύνδεση
(iteration 6)

Έπειτα εξετάστηκε η σύγκλιση των τάσεων von Mises στη βάση του σπειρώματος του περικοχλίου. Ο συγκεκριμένος έλεγχος για λόγους υπολογιστικού κόστους κρίθηκε προτιμότερο να πραγματοποιηθεί σε ένα άλλο μοντέλο στο οποίο η μελέτη θα επικεντρωνόταν αποκλειστικά στη βάση του σπειρώματος του περικοχλίου.



Σχήμα 7. 10: Πορεία σύγκλισης τάσεων von Mises (βάση σπειρώματος περικοχλίου)

Iteration number	Von Mises [MPa]	Change (%)	Element size (root) [mm]	Nodes (total)	Elements (total)	Run time (minutes)
1	64		2	615330	360704	26
2	87	26.44	1	667466	395527	37
3	100	13	0.5	737142	452785	26
4	135	25.93	0.2	1196873	763563	60
5	140	3.57	0.1	1786325	1167574	120

Πίνακας 7. 11: Χαρακτηριστικά στοιχεία προσομοιώσεων (βάσης σπειρώματος περικοχλίου)

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα, κατά τελευταίες δύο επαναλήψεις παρουσιάζεται ιδιαίτερα μικρή απόκλιση όσον αφορά τον υπολογισμό των τάσεων von Mises, με την προτελευταία προσομοίωση να απαιτεί το μισό υπολογιστικό χρόνο, επομένως η πλεγματοποίηση που χρησιμοποιήθηκε στην τέταρτη προσομοίωση θεωρείται η καταλληλότερη για τις μετέπειτα προσομοιώσεις των μοντέλων που φέρουν τροποποιημένο περικόχλιο.

7.3. Εύρεση καταλληλότερης πυκνότητας πλέγματος για τα μοντέλα με τροποποιημένο περικόχλιο

Γνωρίζοντας σύμφωνα με την ανάλυση που προηγήθηκε με το συνηθισμένου τύπου περικόχλιο, για το ποια πρέπει να είναι η καταλληλότερη πυκνότητα του πλέγματος στην εξεταζόμενη περιοχή του μοντέλου, η μελέτη πλέον θα μπορούσε να επεκταθεί και στον έλεγχο της αξιοπιστίας των μοντέλων που φέρουν τροποποιημένο περικόχλιο.

Για τον έλεγχο της αξιοπιστίας των μοντέλων με τροποποιημένο περικόχλιο θεωρήθηκε επαρκές να εξεταστεί μόνο αν η τιμή της αναμενόμενης θεωρητικής μέσης πίεσης επιφανείας των συνεργαζόμενων κατατομών βρίσκεται ικανοποιητικά κοντά με την τιμή που υπολογιζόταν με βάση την ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων.

Ο παρακάτω πίνακας περιλαμβάνει τα αποτελέσματα που αφορούν στον αναλυτικό υπολογισμό της μέσης πίεσης επιφανείας στο σπείρωμα του κοχλία όπως επίσης και τις τιμές της μέσης πίεσης επιφανείας, που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις τριών μοντέλων με περικόχλια διαφορετικής παραμέτρου (t).

t [mm]	0.3	0.7	0.9
F_v [N]	4969.9	4761.1	4336.2
$A_{threads}$ (mm ²)	345.11	3082	277.03
P_m [MPa]	15.116	18.293	18.09
P_{FEA} [MPa]	15.517	17.469	17.696
$\frac{ P_m - P_{FEA} }{P_m}$ (%)	2.65	4.5	2.18

Πίνακας 7. 12: Σύγκλιση μέσης πίεσης επιφανείας

Κοιτάζοντας τα παραπάνω αποτελέσματα, παρατηρούμε ότι και στις τρεις περιπτώσεις, η απόκλιση της τιμής της μέσης πίεσης επιφανείας P_{FEA} , από την προσδοκώμενη P_m , βρίσκεται σε επαρκές μικρό ποσοστό, επομένως η πυκνότητα του πλέγματος που χρησιμοποιήθηκε στις εν λόγω περιπτώσεις μπορεί να θεωρηθεί αρκετά ικανοποιητική.

8. Ανάλυση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων

8.1. Εισαγωγή

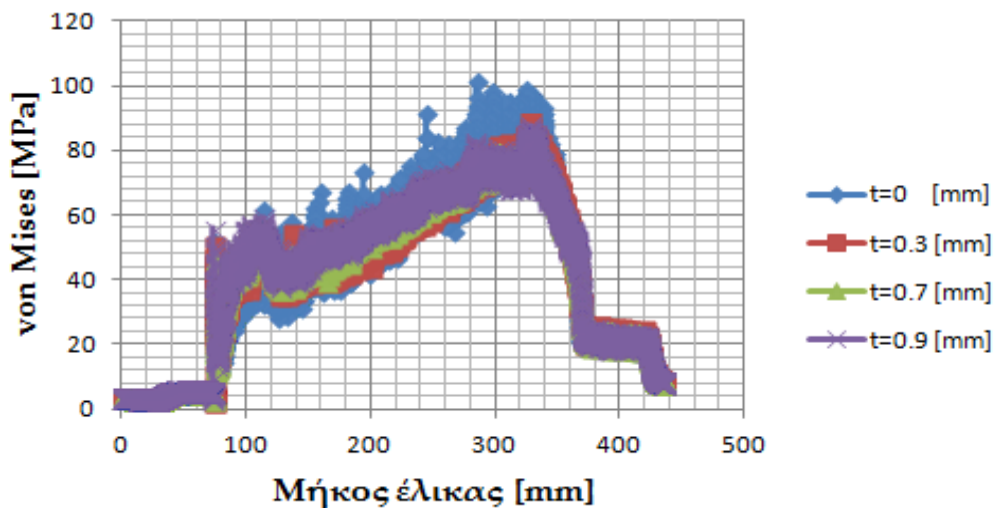
Έχοντας πλέον πραγματοποιηθεί με επιτυχία ο έλεγχος της αξιοπιστίας των εξεταζόμενων μοντέλων ως προς την σύγκλιση, των τάσεων von Mises στη βάση του σπειρώματος του κοχλία και του περικοχλίου και της μέσης πίεσης επιφανείας στις συνεργαζόμενες κατατομές των σπειρωμάτων, δίνεται η δυνατότητα να επιτευχθεί με ασφάλεια η εξαγωγή μιας αρχικής εκτίμησης για την επίδραση που έχει στο τασικό πεδίο της μελετώμενης περιοχής η προτεινόμενη τροποποίηση του περικοχλίου.

8.2. Ανάλυση της κατανομής των τάσεων von Mises και της μέσης πίεσης επιφανείας

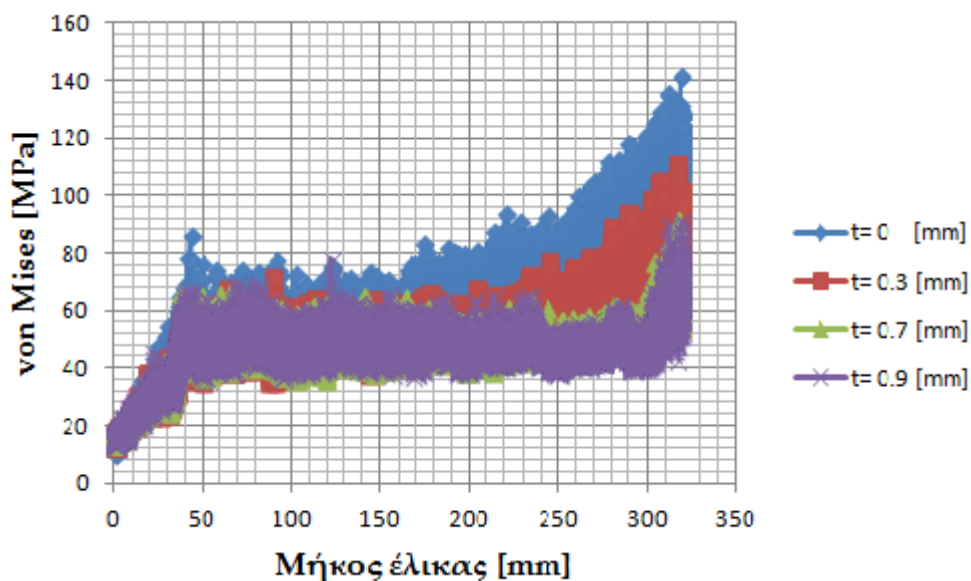
Προκειμένου να γίνει αντιληπτή η επίδραση της προτεινόμενης τροποποίησης στον τρόπο με τον οποίο κατανέμεται το επιβαλλόμενο αξονικό φορτίο κατά μήκος των συνεργαζόμενων σπειρών, εξετάζονται τα διαγράμματα της κατανομής των τάσεων von Mises στη βάση του σπειρώματος του κοχλία και του περικοχλίου και της κατανομής της μέσης πίεσης επιφανείας για το εμπλεκόμενο τμήμα των κατατομών.

Όσον αφορά τα διαγράμματα των κατανομών της μέσης πίεσης επιφανείας που παρουσιάζονται στις αμέσως επόμενες παραγράφους, θα πρέπει να σημειωθεί ότι, οι τιμές της πίεσης έχουν αντιστοιχηθεί με το μήκος της έλικας στη μέση διάμετρο, χωρίς όμως να είναι να γνωστή η ακριβής θέση των τιμών αυτών κατά το πλάτος του σπειρώματος. Συνεπώς η θεώρηση ότι η μέση πίεση επιφανείας εμφανίζεται στην μέση διάμετρο του σπειρώματος δεν είναι επιβεβαιωμένη και έγινε αποκλειστικά και μόνο για την δημιουργία διαγραμμάτων, τα οποία θα μας δίνουν μια εικόνα για την κατανομή της, στην επιφάνεια των συνεργαζόμενων σπειρών. Επίσης, θα πρέπει να αναφερθεί ότι η αρχή μέτρησης του μήκους στα παρακάτω διαγράμματα είναι τοποθετημένη στο τελικό σημείο του σπειρώματος του κοχλία και του περικοχλίου, ως εκ τούτου παρουσιάζονται ανεστραμμένα σε σχέση με τα διαγράμματα που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 4.

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι, στα διαγράμματα που ακολουθούν, το αξονικό φορτίο που εφαρμόστηκε στα μοντέλα που φέρουν τροποποιημένο περικόχλιο, έχει αναχθεί στην τιμή του αξονικού φορτίου που επιβλήθηκε στο μοντέλο που φέρει κανονικό (μη τροποποιημένο) περικόχλιο.



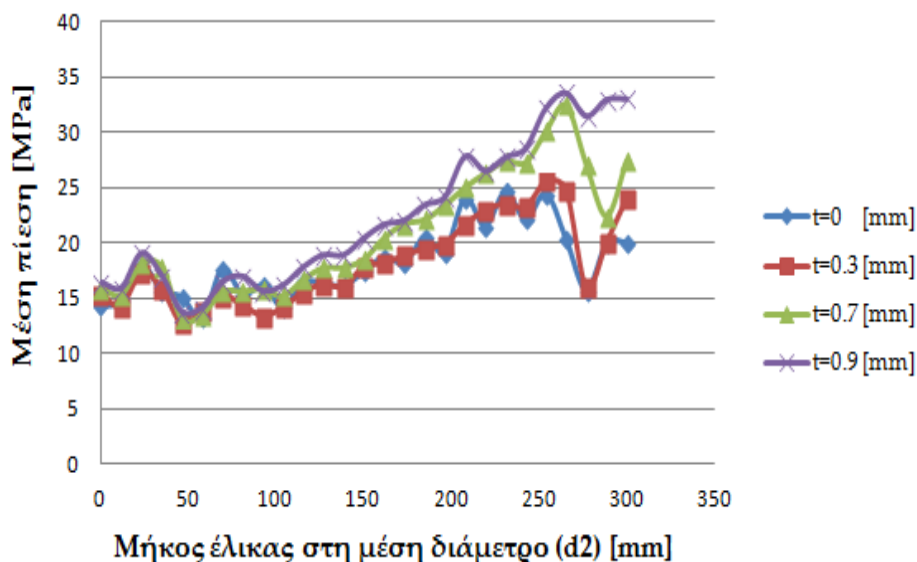
Σχήμα 8. 1: Συγκεντρωτικό διάγραμμα κατανομής τάσεων von Mises στη βάση του σπειρώματος του κοχλίου



Σχήμα 8. 2: Συγκεντρωτικό διάγραμμα κατανομής τάσεων von Mises στη βάση του σπειρώματος του περικοχλίου

Παρατηρώντας τα διαγράμματα στα δύο παραπάνω σχήματα, διαπιστώνεται ότι η προτεινόμενη τροποποίηση τείνει να ισοκατανέμει τις τάσεις στη βάση των συνεργαζόμενων σπειρών και μάλιστα η εν λόγω ισοκατανομή είναι εντονότερη στο

σπείρωμα του περικοχλίου. Παράλληλα παρατηρείται ότι αυξάνοντας την τιμή της παραμέτρου t , το φαινόμενο αυτό γίνεται πιο εμφανές, όμως επίσης φαίνεται και ότι η επίδραση των τροποποιημένων περικοχλίων με παράμετρο $t=0.7$ mm και $t=0.9$ mm, στο τασικό πεδίο των συνεργαζόμενων σπειρωμάτων είναι περίπου η ίδια.



Σχήμα 8. 3:Συγκεντρωτικό διάγραμμα κατανομής μέσης πίεσης επιφανείας

Σύμφωνα με τα διαγράμματα που παρουσιάζονται στο παραπάνω γράφημα παρατηρείται ότι η μέση πίεση επιφανείας είναι περίπου η ίδια για το περικόχλιο με παράμετρο τροποποίησης $t=0.3$ mm και το κανονικό περικόχλιο, όπως επίσης φαίνεται να παρουσιάζει μια παρόμοια αλλά σημαντική αύξηση του μεγέθους της στις πρώτες συνεργαζόμενες σπείρες για τα περικόχλια με παράμετρο τροποποίησης $t=0.7$ mm και $t=0.9$ mm.

8.3. Έλεγχος της επίδρασης της τροποποίησης στις συγκεντρώσεις τάσεων του σπειρώματος του κοχλία

Ο πίνακας που ακολουθεί περιέχει τις τιμές των μέγιστων τάσεων von Mises που εμφανίζονται στην βάση του σπειρώματος του κοχλία για όλες τις περιπτώσεις των μοντέλων που εξετάστηκαν.

Υπενθυμίζεται στο σημείο αυτό, ότι τα παρακάτω αποτελέσματα προκύπτουν από τον εφελκυσμό του κοχλίου κατά 0,01[mm].

t [mm]	0	0.3	0.7	0.9
Force [N]	5824	4969.9	4761.1	4336.2
Max von Mises [MPa]	157.83	128.96	121.9	109.93

Πίνακας 8. 4: Max von Mises

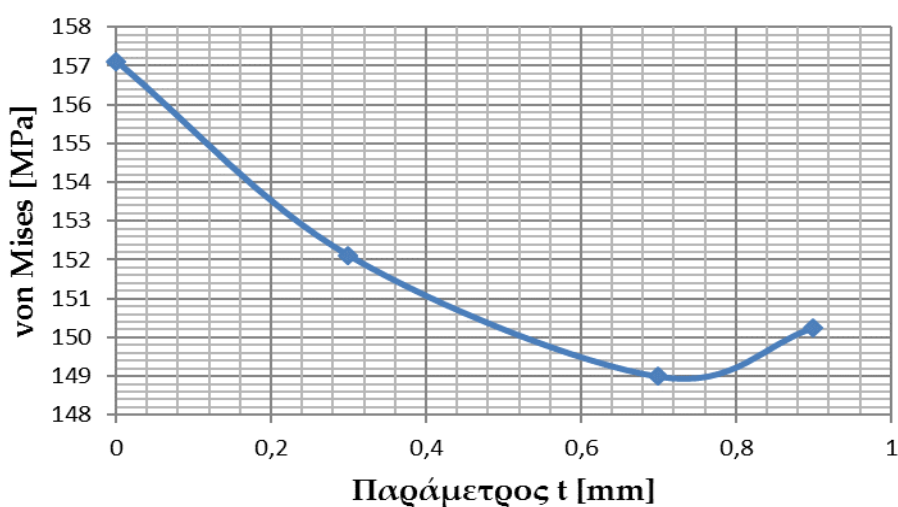
Για τον λόγο ότι τα παραπάνω αποτελέσματα δεν αντιστοιχούν στο ίδιο επιβαλλόμενο φορτίο, θα ήταν εσφαλμένο να προβούμε στην εξαγωγή κάποιου συμπεράσματος. Ως εκ τούτου αποφασίστηκε οι τάσεις που παρουσιάζονται στον παραπάνω πίνακα να αναχθούν στο φορτίο που εφαρμόζεται στο μοντέλο με το κανονικό περικόχλιο.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι μέγιστες τάσεις von Mises στην βάση του σπειρώματος του κοχλίου για όλες τις περιπτώσεις των μοντέλων που εξετάστηκαν, με το επιβαλλόμενο φορτίο να έχει αναχθεί στο φορτίο που επιβάλλεται στο μοντέλο με το κανονικό περικόχλιο.

t [mm]	0	0.3	0.7	0.9
Force [N]	5824	5824	5824	5824
Max von Mises [MPa]	157.830	152.106	148.994	152.49

Πίνακας 8. 5: Ανηγμένες μέγιστες τάσεις von Mises στο φορτίο που επιβάλλεται στο μοντέλο με κανονικό περικόχλιο

Για καλύτερη εποπτεία των τάσεων που παρουσιάζονται στον παραπάνω πίνακα, δημιουργήθηκε το ακόλουθο γράφημα.



Σχήμα 8. 6: Πορεία των μέγιστων τάσεων von Mises (βάση σπειρώματος κοχλίου)

Με βάση το παραπάνω γράφημα παρατηρείται ότι, οι μέγιστες τάσεις von Mises που αφορούν την βάση του σπειρώματος του κοχλία, ακολουθούν μέχρι ενός σημείου μια συνεχόμενη πτωτική πορεία, ενώ όταν η εν λόγω παράμετρος αρχίζει να αγγίζει σχετικά μεγάλες τιμές όπως αυτή των 0.9 mm, παρατηρείται μια σταδιακή αύξηση του μεγέθους τους.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζεται, η ποσοστιαία μείωση των τάσεων von Mises, στα μοντέλα που φέρουν τροποποιημένο περικόχλιο, σε σύγκριση με το μοντέλο που φέρει κανονικό περικόχλιο.

t [mm]	0.3	0.7	0.9
Μείωση τάσεων von Mises (%)	3.63	5.60	4.80

Πίνακας 8. 7: Ποσοστιαία μεταβολή τάσεων von Mises (βάση σπειρώματος κοχλία)

Με βάση τα αποτελέσματα του παραπάνω πίνακα συμπεραίνεται ότι η προτεινόμενη τροποποίηση είναι ικανή να επιτύχει μείωση των επικίνδυνων τάσεων στη βάση του σπειρώματος του κοχλία αλλά όχι σε ένα ιδιαίτερα σημαντικό ποσοστό.

8.4. Έλεγχος της επίδρασης της τροποποίησης στις συγκεντρώσεις τάσεων του σπειρώματος του περικόχλιου

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές των μέγιστων τάσεων von Mises που εμφανίζονται στην βάση του σπειρώματος του περικόχλιου σε όλες τις περιπτώσεις των μοντέλων που εξετάστηκαν, για μετατόπιση της κεφαλής του κοχλία κατά 0,01 [mm].

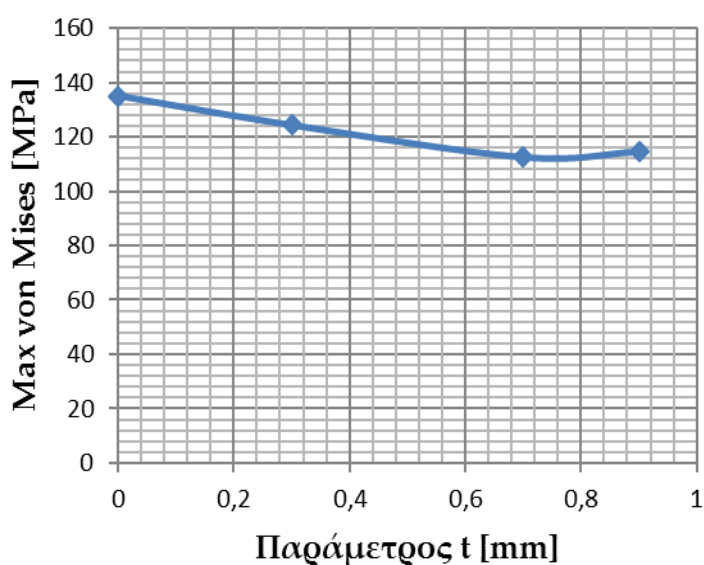
t [mm]	0	0.3	0.7	0.9
Force [N]	6034.6	5395.5	4935.1	4934.5
Max von Mises [MPa]	135	110	88	90

Πίνακας 8. 8: Μέγιστες τάσεις von Mises στην βάση του σπειρώματος του περικόχλιου

Προκειμένου να υπάρχει μία πιο σαφής εικόνα για τις μέγιστες τιμές των τάσεων von Mises, πραγματοποιήθηκε η αναγωγή τους στο αξονικό φορτίο με το οποίο καταπονήθηκε το μοντέλο που φέρει κανονικό περικόχλιο.

t [mm]	0	0.3	0.7	0.9
Force [N]	6034.6	6034.6	6034.6	6034.6
Max von Mises [MPa]	135	124.32	112.60	114.60

Πίνακας 8. 9: Ανοιγμένες μέγιστες τάσεις von Mises στη βάση του σπειρώματος του περικοχλίου στο επιβαλλόμενο φορτίο για τον μοντέλο που φέρει κανονικό περικόχλιο.



Σχήμα 8. 10: Πορεία των μέγιστων τάσεων von Mises (βάση σπειρώματος περικοχλίου)

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζεται, η ποσοστιαία μείωση των τάσεων von Mises, των μοντέλων που φέρουν τροποποιημένο περικόχλιο, σε σύγκριση με το μοντέλο που φέρει κανονικό περικόχλιο.

t [mm]	0.3	0.7	0.9
Μείωση τάσεων von Mises (%)	7.9	34.8	33.3

Πίνακας 8. 11: Ποσοστιαία μεταβολή τάσεων von Mises (βάση σπειρώματος περικοχλίου)

Σύμφωνα με τα προηγούμενα αποτελέσματα, διαπιστώνεται ότι η προτεινόμενη τροποποίηση για μεγάλες τιμές της παραμέτρου t όπως είναι η τιμή 0.7 mm, είναι ικανή να επιφέρει μια ιδιαίτερα σημαντική μείωση των τάσεων von Mises στην βάση του σπειρώματος του περικοχλίου.

9. Πειραματικός έλεγχος

9.1. Εισαγωγή

Στην ανάλυση που προηγήθηκε με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, αποδείχτηκε ότι η προτεινόμενη τροποποίησης στο σπείρωμα του περικοχλίου είναι ικανή να συμβάλει στην πτώση των υψηλών τιμών των τάσεων στη βάση των πρώτων συνεργαζόμενων σπειρών και παράλληλα υπολογίστηκε και το ποσοστό της μείωσης των εν λόγω τάσεων, που μπορεί να επιτευχθεί για τρία περικόχλια με διαφορετικό μέγεθος τροποποίησης (t : 0.3 mm, 0.7 mm, 0.9 mm). Προκειμένου όμως να διαπιστωθεί και στην πράξη η εγκυρότητα της προηγούμενης ανάλυσης πραγματοποιήθηκε ο πειραματικός έλεγχος που περιγράφεται στην παρούσα ενότητα.

9.2. Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας

Στο πείραμα που έγινε, υπολογίστηκε η μέση τιμή του ορίου θραύσεως των σπειρωμάτων για τα δύο τροποποιημένα περικόχλια με παράμετρο $t=0.9$ [mm] και $t=0.3$ [mm] και το κανονικό (μη τροποποιημένο) περικόχλιο. Τα περικόχλια και οι κοχλίες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ονομαστικής διαμέτρου δεκαέξι χιλιοστών και έφεραν τριγωνικό, δεξιόστροφο, μετρικό σπείρωμα βήματος δύο χιλιοστών.

Όσον αφορά την αντοχή του κοχλία και του περικοχλίου που επιλέχθηκαν για το πείραμα, θα πρέπει να αναφερθεί ότι ο κοχλίας ανήκει στην κατηγορία 12.9, ενώ το περικόχλιο στην κατηγορία 8. Πιο συγκεκριμένα:

Κατηγορία κοχλία 12.9 :

$$\sigma_{\theta}=1200 \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_{\Delta}=1080 \text{ [MPa]}$$

Κατηγορία περικοχλίου 8:

$$\sigma_{\theta}=800 \text{ [MPa]}$$

Όπου:

- σ_{θ} : Όριο θραύσης υλικού
- σ_{Δ} : Όριο διαρροής υλικού

Επομένως ο κοχλίας είναι κατασκευασμένος από υλικό υψηλότερης αντοχής σε σχέση με το περικόχλιο και συνεπώς αναμένεται το σπείρωμα του περικοχλίου να είναι αυτό που θα οδηγηθεί πρώτο σε αστοχία.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο κοχλίας που τελικά αγοράστηκε φέρει σπείρωμα σε όλο το μήκος του κορμού του, ενώ στον κοχλία που μελετήθηκε με την με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων το σπείρωμα καταλαμβάνει μόνο ένα τμήμα του. Ωστόσο η διαφορά αυτή δεν επηρεάζει το συγκεκριμένο πείραμα, μιας και αυτό επικεντρώνεται μόνο στην περιοχή συνεργασίας του σπειρώματος του κοχλία και του περικοχλίου.

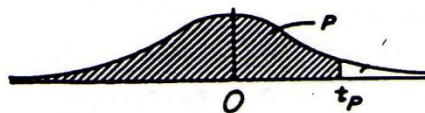
Στη παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται ο κοχλίας και το περικόχλιο που επιλέχθηκαν να χρησιμοποιηθούν για το πείραμα.



Σχήμα 9. 1: Πειραματικά εξεταζόμενα κοχλίας και περικόχλιο

Όσον αφορά την ποσότητα των κοχλιών και των περικοχλιών που θα μελετούνταν, επιλέχθηκε να είναι τέτοια που θα μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα χωρίς να απαιτούνται υψηλά ποσά για την αγορά τους.

Στην συγκεκριμένη επιλογή καθοριστικό ρόλο έπαιξε η συμμετρική κατανομή Student.



ν	$t_{.99}$	$t_{.975}$	$t_{.95}$	$t_{.9}$	$t_{.85}$	$t_{.8}$	$t_{.75}$	$t_{.7}$
1	.325	.727	1.376	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657
2	.289	.617	1.061	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925
3	.277	.584	.978	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841
4	.271	.569	.941	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604
5	.267	.559	.920	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032
6	.265	.553	.906	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707
7	.263	.549	.896	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499
8	.262	.546	.889	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355
9	.261	.543	.883	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250
10	.260	.542	.879	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169
11	.260	.540	.876	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106
12	.259	.539	.873	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055
13	.259	.538	.870	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012
14	.258	.537	.868	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977
15	.258	.536	.866	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947

Σχήμα 9. 2: Πίνακας κατανομής Student

Για την προκειμένη περίπτωση όπου η παράμετρος που εξετάζεται είναι η μέση τιμή του ορίου θραύσης, ισχύει:

$$\nu = N - 1 \tag{9.1}$$

Όπου:

- ν : Βαθμοί ελευθερίας
- N : Μέγεθος δείγματος

Επομένως για $N=6$ τεμάχια, λόγω της σχέσης (9.1), είναι $\nu=5$ και σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα για πιθανότητα 96%, είναι: $t_{.96}=2.015$.

Το διάστημα που συμμετρικά περιβάλλει τη μέση τιμή είναι:

$$(\mu_P - t_{.96} \sigma_P, \mu_P + t_{.96} \sigma_P) \tag{9.2}$$

Όπου:

- μ : Μέση τιμή μέγιστου αξονικού φορτίου
- σ : Τυπική απόκλιση μέσης τιμής μέγιστου αξονικού φορτίου

Συνεπώς, η επιλογή των 6 τεμαχίων αναμένεται να δώσει με πολύ καλή πιθανότητα ένα σχετικά μικρό και ικανοποιητικό διάστημα που θα περιβάλλει συμμετρικά την μέση τιμή.

Με βάση λοιπόν τις παραπάνω πληροφορίες αποφασίστηκε να εξεταστούν 6 κοχλίες και 6 περικόχλια για την κάθε μια από τις τρεις περιπτώσεις εξεταζόμενων περικοχλίων.

Η κατεργασία (αφαίρεση υλικού) των τροποποιημένων περικοχλίων (6 περικόχλια με $t=0.3$ [mm] και 6 περικόχλια με $t=0.9$ [mm]), πραγματοποιήθηκε σε κέντρο τόννευσης CNC.

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται δυο στιγμιότυπα από την διαδικασία της τόννευσης για την δημιουργία των τροποποιημένων περικοχλίων.



Σχήμα 9. 3: Συγκράτηση περικοχλίου στο τσοκ



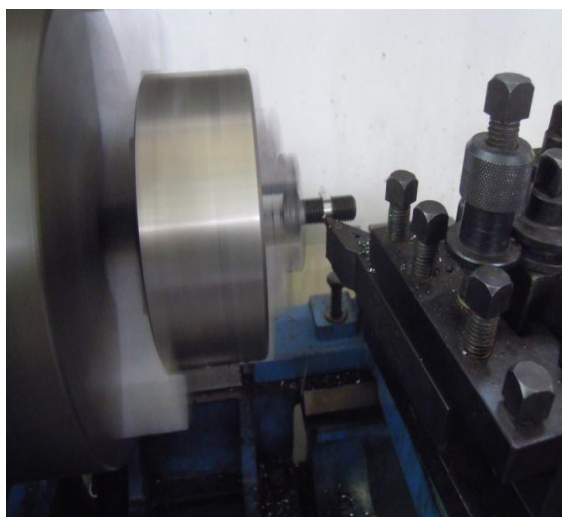
Σχήμα 9. 4: Κοπτικό εργαλείο

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε στην μηχανή δοκιμών INSTRON (300 kN) του Εργαστηρίου Αντοχής των Υλικών του τομέα Μηχανικής της σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Ε.Μ.Π. .

Το γεγονός ότι, οι άρπαγες που διέθετε η μηχανή δοκιμών ήταν σχεδιασμένες για να συγκρατούν δοκίμια με πλάτος μικρότερο από αυτό της κεφαλής του προς εξέταση κοχλία M16, οδήγησε στην μετατροπή του πειράματος εφελκυσμού της κεφαλής του κοχλία σε πείραμα θλίψεως του περικοχλίου, μιας και το δεύτερο έδειξε ότι θα πραγματοποιούνταν

πιο εύκολα με την βοήθεια μιας απλής ιδιοσυσκευής, χωρίς να υπάρχει κάποια ουσιαστική αλλαγή όσον αφορά την καταπόνηση του σπειρώματος.

Για την ορθότητα του πειράματος κρίθηκε σκόπιμο να αφαιρεθούν οι σπείρες του κοχλία που θα βρίσκονται μεταξύ της κεφαλής του και του περικοχλίου, ούτως ώστε να είμαστε βέβαιοι ότι το αξονικό φορτίο έχει παραληφθεί μόνο από τις συνεργαζόμενες σπείρες.



Σχήμα 9. 5: Αφαίρεση ενδιάμεσων σπειρών κοχλία



Σχήμα 9. 6: Κοχλίας χωρίς ενδιάμεσες σπείρες

Η ιδιοσυσκευή που κατασκευάστηκε αποτελείται από δύο ξεχωριστά μεταλλικά τμήματα:

- α) Μία πλάκα η οποία φέρει μια οπή στο κέντρο της, μέσα στην οποία τοποθετείται η επαπτομενικά κεφαλή του κοχλία, έτσι ώστε να αποφευχθεί οποιαδήποτε μετακίνηση του.
- β) Ένα κυλινδρικό τεμάχιο, το οποίο φέρει μία οπή στο κέντρο του για να διέρχεται ο κορμός του κοχλία και χρησιμοποιείται για την μεταφορά του θλιπτικού φορτίου στο περικόχλιο.



Σχήμα 9. 7: Τεμάχια ιδιοσυσκευής

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται ένα στιγμιότυπο κατά τη διάρκεια του πειράματος όπου διακρίνεται ο τρόπος με τον οποίο έγινε η τοποθέτηση του κοχλίου με το περικόχλιο και τα δύο τμήματα της ιδιοσυσκευής.



Σχήμα 9. 8: Πειραματική εξέταση



**Σχήμα 9. 9: Καταστροφή σπειρώματος περικοχλίου
(μετά το πείραμα)**

9.3. Ανάλυση πειραματικών αποτελεσμάτων

Για την κάθε μία περίπτωση από τις τρεις παραπάνω περιπτώσεις πειραμάτων, υπολογίστηκε το διάστημα που περιβάλλει συμμετρικά τη μέση τιμή..

t [mm]	0	0.3	0.9
μ_P [KN]	139.638	141.785	128.633
σ_P [KN]	4.026	1.813	8.279
$(\mu_P - t.\% \sigma_P, \mu_P + t.\% \sigma_P)$ [KN]	(131.53, 147.75)	(138.13, 145.44)	(111.95, 145.32)

Πίνακας 9.10: Στατιστικά στοιχεία πειράματος

Όπου:

- μ_P : Μέση τιμή μέγιστου αξονικού φορτίου
- σ_P : Τυπική απόκλιση μέσης τιμής μέγιστου αξονικού φορτίου

t [mm]	0.3	0.9
Μεταβολή μέγιστου αξονικού φορτίου (%)	1.52	-8.59

Πίνακας 9.11: Ποσοστιαία μεταβολή μέγιστου αξονικού φορτίου

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα, αρχικά σε σύγκριση με τα κανονικά περικοχλία παρατηρείται μία ελαφρά μεγαλύτερη αντοχή των περικοχλίων με παράμετρο τροποποίησης $t=0.3$ mm και μία σημαντικά μικρότερη αντοχή των περικοχλίων με παράμετρο τροποποίησης $t=0.9$ mm. Όμως θα πρέπει να σημειωθεί ότι η εγκυρότητα των αποτελεσμάτων είναι εύκολα αμφισβητήσιμη, διότι το διάστημα που περιβάλλει συμμετρικά την μέση τιμή του μέγιστου αξονικού φορτίου για τις τρεις περιπτώσεις, εμφανίζεται αρκετά μεγάλο με αποτέλεσμα οι περιοχές αυτές να εμπλέκονται μεταξύ τους, έτσι ώστε να μην μπορούν να εξαχθούν ακριβή αποτελέσματα.

Θα πρέπει όμως να υπογραμμιστεί, ότι στην περίπτωση των περικοχλίων με παράμετρο τροποποίησης $t=0.3$ mm, μπορεί να εξαχθεί η ακριβέστερη σε σχέση με τις υπόλοιπες περιπτώσεις εκτίμηση του μέγιστου αξονικού φορτίου θραύσης των σπειρών, λόγω της μικρότερης τυπικής απόκλισης. Επομένως θεωρείται δόκιμο να ειπωθεί ότι η προτεινόμενη τροποποίηση του σπειρώματος του περικοχλίου όταν πραγματοποιείται σε σχετικά μικρή κλίμακα όπως συμβαίνει στα περικοχλία με $t=0.3$ mm, δεν δημιουργεί προβλήματα στην αντοχή του σπειρώματος του περικοχλίου ενώ δείχνει ότι μπορεί ακόμη και να την βελτιώσει.

10. Συμπεράσματα και μελλοντικές βελτιώσεις

10.1. Εισαγωγή

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής αφορούσε την μοντελοποίηση συνεργαζόμενων σπειρωμάτων για την διερεύνηση της γεωμετρίας τους, που θα μεγιστοποιούσε την αντοχή τους. Το πρώτο τμήμα της μελέτης που αφορούσε την μοντελοποίηση του επιλεγμένου τύπου κοχλιοσύνδεσης αποτέλεσε και το πιο χρονοβόρο τμήμα της εργασίας με τις κυριότερες δυσκολίες να αποτελούν, ο τρόπος σύνδεσης του σπειρώματος του περικοχλίου με το σπείρωμα του κοχλία χωρίς να διεισδύει η επιφάνεια του ενός στην επιφάνεια του άλλου, και η επίτευξη σύγκλισης των αρχικών προσομοιώσεων κατά τις οποίες πολύ συχνά έπρεπε να αντιμετωπισθούν διάφορα σφάλματα άγνωστων αιτιών. Όσον αφορά το δεύτερο τμήμα της μελέτης που σχετιζόταν με την εξέταση της προτεινόμενης τροποποίησης του σπειρώματος του περικοχλίου, οι δυσκολίες που εμφανίστηκαν ήταν λιγότερες αλλά θα πρέπει να συμπεριληφθεί ότι πλέον είχε αποκτηθεί κάποια βασική εμπειρία που διευκόλυνε την μελέτη.

Στην παρούσα ενότητα γίνεται μια προσπάθεια να δοθεί μια συνολική εικόνα των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων και της πειραματικής διαδικασίας, με μια παράλληλη παρουσίαση των τελικών συμπερασμάτων.

10.2. Συμπεράσματα

Αρχικά, με βάση τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων μπορούμε να πούμε ότι η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την μοντελοποίηση των σπειρωμάτων αποδείχθηκε αρκετά ικανοποιητική μιας και το μοντέλο της κοχλιοσύνδεσης εμφάνιζε λογικά τασικά πεδία, με τις υψηλότερες τιμές των τάσεων να εμφανίζονται στις αναμενόμενες περιοχές και τις κατανομές της μέσης πίεσης επιφανείας και των τάσεων von Mises κατά μήκος του σπειρώματος του κοχλία να εμφανίζουν την αναμενόμενη μορφή.

Στην συνέχεια, με βάση τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τα μοντέλα που φέρουν τροποποιημένο περικόχλιο, διαπιστώθηκε ότι η προτεινόμενη τροποποίηση του σπειρώματος του περικοχλίου είναι ικανή να μειώσει τις υψηλές τιμές της συγκέντρωσης των τάσεων που εμφανίζονται στην βάση των πρώτων σπειρών του κοχλία που συνεργάζονται με τις αντίστοιχες του περικοχλίου, χωρίς όμως τα αποτελέσματα να είναι

ιδιαίτερα ενθαρρυντικά. Αντιθέτως όμως η εξεταζόμενη τροποποίηση φαίνεται να οδηγεί σε σημαντική πτώση τις επικίνδυνες τάσεις στην βάση του σπειρώματος του περικοχλίου, αγγίζοντας το ποσοστό του 30%.

Ακολούθως, τα αποτελέσματα που υπολογίστηκαν κατά τον πειραματικό έλεγχο, σαφώς όπως προέκυψε δεν έδειξαν να επιβεβαιώνουν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, όμως θα πρέπει να συμπεριληφθεί το γεγονός ότι η ποσότητα των κοχλιών και αντίστοιχα των περικοχλίων που εξετάστηκαν φάνηκε να μην είναι αρκετή λόγω της ιδιαίτερα υψηλής τυπικής απόκλισης των αποτελεσμάτων και επίσης θα πρέπει να σημειωθεί ότι η μέση τιμή του μέγιστου αξονικού φορτίου για περικόχλια με παράμετρο τροποποίησης $t=3$ mm, φανερώνει ότι η προτεινόμενη τροποποίηση θα μπορούσε να επιφέρει κάποια βελτίωση, όσον αφορά την αντοχή των κανονικών περικοχλίων.

10.3. Μελλοντικές Βελτιώσεις

Όπως διαπιστώθηκε από την ανάλυση που προηγήθηκε στην ενότητα 9, μια πρώτη βελτίωση των αποτελεσμάτων θα ήταν η διεξαγωγή πειράματος με ένα αρκετά μεγαλύτερο και συνεπώς πιο αντιπροσωπευτικό δείγμα κοχλιών και περικοχλίων. Τέλος, θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί μια επιπλέον μελέτη που θα αφορούσε την βελτίωση της προτεινόμενης, στην παρούσα εργασία, τροποποίησης. Διότι, όπως διαπιστώθηκε η εξεταζόμενη τροποποίηση παρουσιάζει υποσχόμενα στοιχεία όσον αφορά την κατανομή του επιβαλλόμενου αξονικού φορτίου στις συνεργαζόμενες σπείρες.

11. Βιβλιογραφία

- [1] SOPWITH D G. The distribution of load in screw thread[J]. Inst. Mech Engrs. Appl. Mech. Proc., 1948, 159:373-383.
- [2] YAMAMOTO A. The theory and computation of thread connection[M]. Tokyo: Youkendo, 1980: 39-54. (in Japanese)
- [3] MARUYAMA K. Stress analysis of a nut-bolt joint by the finite element method and the copper-electroplating method(1st report) [J]. Bulletin of ISME, 1973, 16 (94):671-678.
- [4] MARUYAMA K. Stress analysis of a nut-bolt joint by the finite element method and the copper-electroplating method(2st report) [J]. Bulletin of ISME, 1974, 442-45
- [5] GREWAL A S, SABBAGIAN M. Load distribution between threads in threaded connections [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 1997, 119 (1):91-95.
- [6] FUKUOKA T, YAMASAKI N, KITAGAWA H, et al. Ratio of flank loads of screw threads in hollow bolt[J]. Bulletin of ISME, 1986, 29 (247): 265-272.
- [7] LEHNOFF T F, BUNYARD B A. Bolt thread and head fillet stress concentration factors[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 200, 122(2): 180-185.
- [8] VENKATESAN S, KINZEL G L. Reduction of stress concentration in bolt-nut connectors[J]. Journal of Mechanical Design, 2006, 128 (6): 1 337-1 342.
- [9] CHEN J J, SHIH Y S. A study of the helical effect on the thread connection by three dimensional finite element analysis [J]. Nuclear Engineering and Design, 1999, 191 (2): 109-116.
- [10] RIDONG, YUJUAN, WEIZHENG. Nonlinear analysis of axial load and stress distribution for threaded connection [J]. Chinese journal of mechanical engineering, 2009
- [11] HETENYI, M., 1943, "A Photoelastic study of Bolt and Nut Fastening." ASME Journal of Applied Mechanics, Vol. 10-2, A-93
- [12] PATERSON, E. A., KENNY, B., 1987, "Stress Analysis of Some Nut-Bolt Connections With Modifications to the External Shape of the Nut, "Journal of Strain Analysis, Vol. 22-4, pp. 187-193.
- [13] FUKUOKA T. Evaluation of the method for lowering stress at the thread root of bolted joints with modifications of nut shape [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 1997, 119 (1): 1-9.
- [14] FUKUOKA T., Nomura M. Proposition of helical thread modeling with accurate geometry and finite element analysis [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2008 vol. 130/011204-5
- [15] Γραϊκούσης Ρ. Στοιχεία Μηχανών Ι, Τόμος Ι :Στοιχεία Συνδέσεως, Εκδόσεις Γιαχούδη 1983
- [16] Μακρής Π., Στοιχεία Μηχανών Ι, Έκδοση 2004
- [17] Σιμόπουλος Σ., Μετρήσεις τεχνικών μεγεθών, Έκδοση 1989
- [18] [www. engineeringtoolbox.com](http://www.engineeringtoolbox.com)
- [19] [www. roymech.co.uk](http://www.roymech.co.uk)
- [20] Ansys help