



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ
ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Διπλωματική Εργασία

Αριθμητική προσομοίωση προεντεταμένου κοχλία σε διάτμηση

Στέργιος Νασίκας

Δημήτριος Φαίδων Κάλλιας Ντρούμπης

Επιβλέπων Καθηγητής: Ευριπίδης Μωστακίδης

Βόλος, Ιούλιος 2015



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 14100/1
Ημερ. Εισ.: 07-09-2017
Δωρεά: Συγγραφείς
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ - ΠΜ
2015
ΝΑΣ

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η προσομοίωση και η ανάλυση ενός προεντεταμένου κοχλία σε μια μεταλλική διατμητική σύνδεση, με μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων. Πιο συγκεκριμένα, μελετήσαμε την συμπεριφορά του κοχλία και των συνδεόμενων μελών σε προένταση και σε διάτμηση.

Στο Α μέρος του πρώτου κεφαλαίου γίνεται μια εισαγωγή στις κατηγορίες κοχλιών ανάλογα με τον σκοπό που εξυπηρετούν, στην χρησιμότητα του σπειρώματος, στις δυνάμεις που δέχονται, στις κατηγορίες των υλικών καθώς και στις τιμές των συντελεστών τριβής. Στη συνέχεια γίνεται μια σύντομη αναφορά για τις κατηγορίες κοχλιωτών συνδέσεων ανάλογα με τον τρόπο καταπόνησής τους. Ακόμη επικεντρωνόμαστε στην προένταση των κοχλιών, τις υπάρχουσες μεθόδους προέντασης καθώς και τους κανόνες εφαρμογής των μεθόδων αυτών. Στο δεύτερο μέρος (Β) του κεφαλαίου αυτού παρουσιάζεται η διαδικασία και τα αποτελέσματα από τα πειράματα προέντασης που έγιναν στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αρχικά παρατίθενται συνοπτικά τα θεωρητικά στοιχεία για τους τύπους μη-γραμμικότητας που συναντώνται καθώς και για τις μεθόδους μη-γραμμικής ανάλυσης που χρησιμοποιούνται. Έπειτα, γίνεται αναλυτική περιγραφή του βασικού μοντέλου που δημιουργήθηκε όπως η γεωμετρία του, η διακριτοποίησή του, ο τύπος των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν, η επαφή των σωμάτων, οι συνοριακές συνθήκες, οι νόμοι υλικού κτλ. Στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζονται τα διάφορα μοντέλα που δημιουργήθηκαν για τις διαφορετικές ανάγκες των αναλύσεων.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται πρώτα τα αποτελέσματα των αναλύσεων της προέντασης και στη συνέχεια αυτά των αναλύσεων της διάτμησης σε προεντεταμένους και μη κοχλίες. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στα αποτελέσματα της αξονικής δύναμης, της ροπής αντίστασης, των τάσεων Von Mises, καθώς και των πλαστικών παραμορφώσεων της σύνδεσης. Τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης συγκρίνονται παράλληλα με τις καθορισμένες τιμές του Ευρωκώδικα 3 σε κάθε περίπτωση.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας καθώς και προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Α ΜΕΡΟΣ.....	8
1.A Κοχλίες	8
1.A.1 Είδη και τυποποίηση κοχλιών.....	8
1.A.2 Σπειρώμα	9
1.A.2.1 Τυποποίηση σπειρώματος	10
1.A.3 Κατηγορίες υλικών κοχλιών	10
1.A.4 Τριβή.....	12
1.A.5 Κοχλιωτές συνδέσεις.....	12
1.A.6 Κοχλίες σε εφελκυσμό	14
1.A.7 Κοχλίες σε διάτμηση.....	15
1.A.8 Χρήση Ροδελών	17
1.A.9 Προένταση Κοχλιών	17
1.A.10 Μέθοδοι προέντασης κοχλιών.....	19
1.A.10.1 Μέθοδος ελεγχόμενης ροπής.....	20
1.A.10.2 Μέθοδος ελεγχόμενης στροφής περικοχλίου	22
1.A.11 Κανόνες εφαρμογής.....	23
Β ΜΕΡΟΣ.....	25
1.B Πείραμα Προέντασης Κοχλιών	25
1.B.1 Ανάλυση και Περιγραφή Διαδικασίας.....	25
1.B.1.1 Προένταση	27

1.B.1.2 Μέθοδος Ελεγχόμενης Στροφής.....	28
1.B.1.3 Μέθοδος Ελεγχόμενης Ροπής.....	29
1.B.2 Παράθεση και ανάλυση πειραματικών δεδομένων	29
1.B.2.1 Αποτελέσματα κοχλία M36 – Μέθοδος ελεγχόμενης στροφής	29
1.B.2.2 Αποτελέσματα κοχλία M27 – Μέθοδος ελεγχόμενης στροφής	31
1.B.2.3 Αποτελέσματα κοχλιών M24 – Μέθοδος ελεγχόμενης ροπής.....	34
Κοχλίας Νο1	34
Κοχλίας Νο2	36
<u>2ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ</u>	
2.1 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων (FEM).....	38
2.2 Μη-γραμμική Ανάλυση.....	39
2.2.1 Γεωμετρική μη-γραμμικότητα.....	40
2.2.2 Μη-γραμμικότητα υλικού.....	40
2.2.3 Μη-γραμμικές συνοριακές συνθήκες.....	41
2.3 Αριθμητική προσομοίωση κοχλιωτής σύνδεσης	42
2.3.1 Διακριτοποίηση	42
2.3.2 Κοχλίας.....	44
2.3.3 Περικόχλιο	46
2.3.4 Ροδέλες.....	47
2.3.5 Σπείρωμα.....	48
2.3.6 Πλάκες.....	49
2.4 Ιδιότητες Υλικών	50

2.5 Επαφή και Τριβή.....	50
2.5.1 Επαφή.....	51
2.5.2 Τριβή.....	51
2.6 Μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων.....	52
2.6.1 Περιγραφή Διαδικασίας.....	52
2.7 Μοντέλο 1. Κοχλίας – Περικόχλιο.....	52
2.7.1 Συνοριακές συνθήκες.....	53
2.7.2 Ρυθμίσεις επαφής σωμάτων.....	54
2.8 Μοντέλο 2. Κοχλίας – Περικόχλιο – Πλάκες.....	54
2.8.1 Προένταση Κοχλία.....	55
2.8.2 Διάτμηση σε μη προεντεταμένο κοχλία.....	56
2.9 Μοντέλο 3. Κοχλίας – πλάκες.....	58
2.9.1 Συνοριακές Συνθήκες.....	58
2.9.2 Επαφή σωμάτων.....	60
2.10 Μοντέλο 4. Κοχλίας – περικόχλιο – πλάκες – ροδέλες.....	60
2.10.1 Συνοριακές συνθήκες.....	61
2.10.2 Ρυθμίσεις επαφής σωμάτων.....	62
<u>3^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ</u>	
3.1 Συμπεριφορά κοχλία σε εφελκυσμό.....	63
3.1.1 Εξέλιξη τάσεων - τροπών.....	63
3.1.2 Καθαρός εφελκυσμός.....	63
3.1.3 Εφελκυσμός μέσω σύσφιγξης.....	69

3.1.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων άμεσου εφελκυσμού και εφελκυσμού μέσω σύσφιγξης.....	74
3.2 Προένταση κοχλιωτής σύνδεσης μοντέλου πλακών.....	75
3.2.1 Σύγκριση αξονικής δύναμης	80
3.2.2 Ροπή σύσφιγξης προεντεταμένου κοχλία.....	81
3.2.3 Σχολιασμός και σύγκριση τιμών ροπής σύσφιγξης	83
3.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων πειράματος και ανάλυσης	84
3.4 Διάτμηση κοχλιωτής σύνδεσης.....	86
3.4.1 Διάτμηση σε μη προεντεταμένο κοχλία	86
3.4.2 Διάτμηση σε κοχλία ο οποίος έχει προηγουμένως υποβληθεί σε καθαρό εφελκυσμό	88
3.4.3 Διάτμηση σε κοχλία που έχει προηγουμένως προενταθεί με την μέθοδο της ελεγχόμενης στροφής για γωνιά 240°	91

4ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

4.1 Συμπεράσματα	95
4.2 Σχόλια.....	96
4.3 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	97
Βιβλιογραφία.....	98

1^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Α ΜΕΡΟΣ

1.Α Κοχλίες

Οι κοχλίες ανάλογα με την αποστολή τους διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: τους κοχλίες συνδέσεως και τους κοχλίες κινήσεως. Οι *κοχλίες συνδέσεως* έχουν ως στόχο την ασφαλή, μη μόνιμη σύνδεση, ανεξάρτητων στοιχείων μιας κατασκευής ή μηχανής μεταξύ τους. Οι *κοχλίες κινήσεως* μετατρέπουν την περιστροφική κίνηση του κορμού τους σε ευθύγραμμη κίνηση του περικοχλίου τους (π.χ. τόννος, ανυψωτήρας αυτοκινήτων κλπ). Οι δύο αυτές κατηγορίες έχουν διαφορετικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά (τύπος σπειρώματος, γεωμετρία σώματος κτλ) και μηχανικά χαρακτηριστικά (αντοχή, πλαστιμότητα κτλ). [1]

Η παρούσα εργασία αναφέρεται σε κοχλίες που χρησιμοποιούνται στις μεταλλικές κατασκευές, δηλαδή σε κοχλίες συνδέσεως.

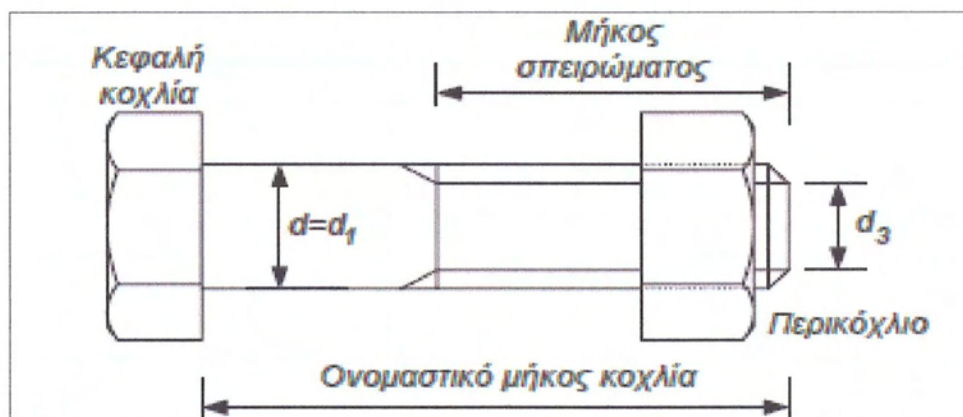
1.Α.1 Είδη και τυποποίηση κοχλιών

Οι κοχλίες σύνδεσης ανάλογα με την τη μορφή και τη χρήση τους διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες:

1. Τους κοχλίες συστήματος κοχλία-περικοχλίου (bolt-nut), οι οποίοι χρησιμοποιούνται για να συνδέσουν δύο ή περισσότερα ανεξάρτητα μέλη περνώντας τον κοχλία μέσα από τις αντίστοιχες οπές των προς σύνδεση στοιχείων και βιδώνοντας πάνω του το περικόχλιο.
2. Τους βιδωτούς κοχλίες (screws), οι οποίοι βιδώνονται σε τρύπες των προς σύνδεση μελών, που διαθέτουν οι ίδιες σπείρωμα, αντί του περικοχλίου.
3. Τους ακέφαλους κοχλίες, οι οποίοι διαθέτουν σπείρωμα και στις δυο άκρες, χωρίς να είναι κατ ανάγκη συμμετρικοί. [1]

Οι κοχλίες που εξετάζονται στα πλαίσια αυτής της εργασίας είναι συστήματος κοχλία-περικοχλίου. Η χαρακτηριστική μορφή ενός τέτοιου κοχλία δίνεται στο σχήμα 1.1. Πρόκειται για κοχλία και περικόχλιο εξαγωνικής κεφαλής και διαμέτρου d . Όπως φαίνεται, οι χαρακτηριστικές διαμέτροι του κοχλία είναι α) η διάμετρος d του κορμού βάσει της οποίας γίνεται η τυποποίηση του κοχλία, β) η εξωτερική διάμετρος d_1 του

σπειρώματος, όπου συνήθως ισχύει $d_1 = d$, γ) η εσωτερική διάμετρος d_3 του σπειρώματος, η οποία αντιστοιχεί στη μικρότερη καταπονούμενη επιφάνεια του κοχλία. Σημειώνεται ότι υπάρχουν και κοχλίες όπου η διάμετρος του κορμού είναι ίση με την εσωτερική διάμετρο του σπειρώματος $d = d_3$.



Εικόνα 1.1: Σύστημα κοχλία – περικοχλίου

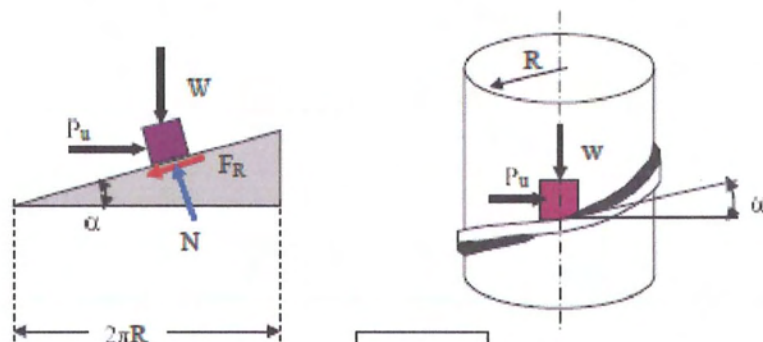
Οι κοχλίες στον ευρωπαϊκό χώρο διακρίνονται ανάλογα με τη διάμετρό τους στις κατηγορίες του πίνακα 1.1. Ο αριθμός υποδηλώνει τη διάμετρο d του κοχλία σε mm. Οι κοχλίες κάθε κατηγορίας βγαίνουν σε διάφορα μήκη, ώστε να ανταποκρίνονται στις ανάγκες χρήσεώς, αλλά πάντα σύμφωνα με συγκεκριμένες προδιαγραφές.

Πίνακας 1.1: Τυποποίηση κοχλιών

M12	M16	M20	M22	M24	M27	M30	M36
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

1.A.2 Σπείρωμα

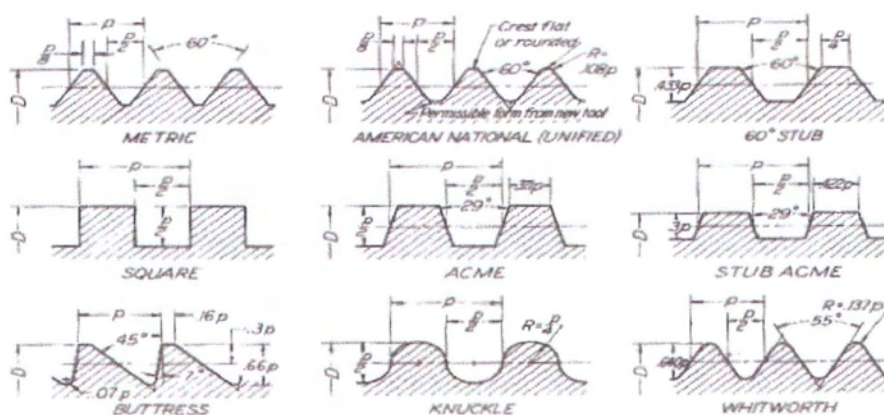
Ο κοχλίας λειτουργεί μετατρέποντας μέσω του σπειρώματος, την περιστροφική κίνηση του κορμού του, σε ευθύγραμμη κατακόρυφη κίνηση κατά τον άξονά του. Το σπείρωμα λειτουργεί σαν ένα κεκλιμένο επίπεδο γύρω από τον κορμό του κοχλία, το οποίο εκτείνεται ελικοειδώς κατά μήκος του κορμού του κοχλία. Η απόσταση μεταξύ δύο συνεχόμενων σπειρωμάτων ονομάζεται βήμα του κοχλία " p " ($p = \text{pitch}$) και αντιστοιχεί στην κατακόρυφη μετατόπιση του κοχλία μετά από μία πλήρη περιστροφή 2π , της κεφαλής του. Η γωνία κλίσης του σπειρώματος " α " δίνεται από τη σχέση: $\tan \alpha = L / (\pi d)$, όπου L το μήκος του σπειρώματος.[2]



Εικόνα 1.2: Ανάλυση δυνάμεων - Γωνία κλίσης σπειρώματος

1.A.2.1 Τυποποίηση σπειρώματος

Τα σπειρώματα των κοχλιών συνδέσεως είναι τυποποιημένα και διακρίνονται σε *Μετρικά (M)*, *Πριονωτά (S)* και *Στρογγυλά (Ra)*. Η γεωμετρία των σπειρωμάτων συνδέσεως έχει ως στόχο την ανάπτυξη της κατά το δυνατόν μέγιστης τριβής μεταξύ των επιφανειών των σπειρωμάτων, η οποία θα εξασφαλίσει τη σταθερότητα της συνδεσμολογίας. Όσον αφορά τους κοχλίες προέντασης, αυτοί διαθέτουν *Μετρικό* σπείρωμα.



Εικόνα 1.3: Τυποποίηση προφίλ σπειρώματος

1.A.3 Κατηγορίες υλικών κοχλιών

Η γνώση των ιδιοτήτων των υλικών όπως η αντοχή και η πλαστιμότητα, αποτελούν βασική προϋπόθεση για την ανάλυση ενός στατικού συστήματος. Οι ιδιότητες αυτές δίνονται από το διάγραμμα τάσεων – τροπών του υλικού, στην προκειμένη περίπτωση χάλυβα.

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3,[3], προδιαγράφονται 5 κατηγορίες υλικών για τους χαλύβδινους κοχλίες. Οι κατηγορίες αυτές αφορούν την αντοχή των κοχλιών και

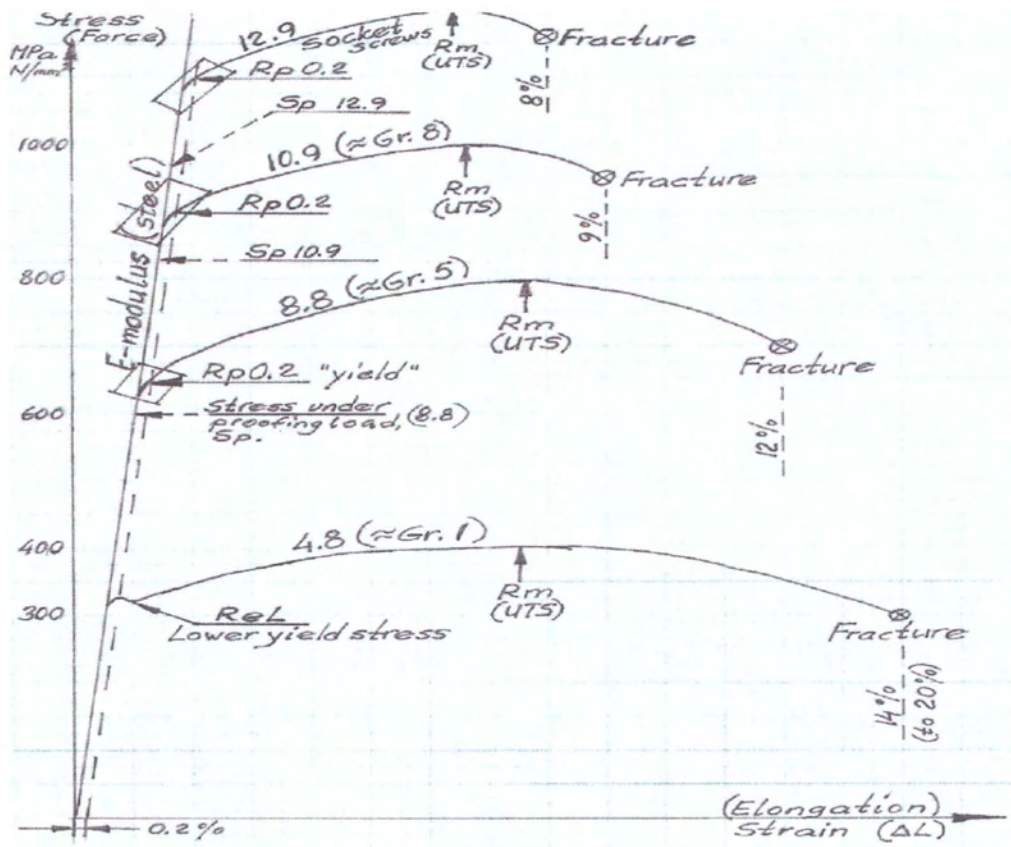
αναγράφονται ως X.Y, όπου X*100 είναι το όριο θραύσης f_u (MPa) και $0.1*Y*f_u$ το όριο διαρροής f_y (MPa). Οι 5 κατηγορίες υλικών κοχλίων και τα αντίστοιχα όρια διαρροής και θραύσης δίνονται στον πίνακα 1.2.

Πίνακας 1.2: Κατηγορίες υλικών κοχλίων

	4.6	5.6	6.8	8.8	10.9
f_y [MPa]	240	300	480	640	900
f_u [MPa]	400	500	600	800	1000

Οι επιτρεπόμενες κατηγορίες κοχλίων προς προένταση είναι οι 8.8 και 10.9. Οι κοχλίες αυτοί αναφέρονται στη βιβλιογραφία και ως κοχλίες υψηλής αντοχής.

Τα διαγράμματα τάσεων – τροπών των διάφορων κατηγοριών υλικών κοχλίων, δίνονται στην εικόνα 1.4.



Εικόνα 1.4: Διαγράμματα τάσεων – τροπών για τις κατηγορίες χάλυβα του Ευρωκώδικα, [4]

1.A.4 Τριβή

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

Πίνακας 1.3: Συντελεστές τριβής κοχλίων,[1]

ΥΛΙΚΟ		ΛΙΠΑΝΣΗ		
ΚΟΧΛΙΑ	ΠΕΡΙΚΟΧΛΙΟΥ	ΧΩΡΙΣ ΛΙΠΑΝΣΗ	ΛΙΠΑΝΣΗ ΜΕ ΛΑΔΙ	ΣΚΟΝΗ MoS 2
ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ				
Mn - Ph	ΧΩΡΙΣ	0.14 έως 0.18	0.14 έως 0.15	0.10 έως 0.11
Zn - Ph	ΧΩΡΙΣ	0.14 έως 0.21	0.14 έως 0.17	0.10 έως 0.12
Zn	ΧΩΡΙΣ	0.125 έως 0.18	0.125 έως 0.17	-
Cd	ΧΩΡΙΣ	0.08 έως 0.12	0.08 έως 0.11	-
Zn	Zn	0.125 έως 0.17	0.14 έως 0.19	-
Cd	Cd	0.08 έως 0.12	0.14 έως 0.15	-

1.A.5 Κοχλιωτές συνδέσεις

Μια γενική κατηγοριοποίηση των κοχλιωτών συνδέσεων προκύπτει ανάλογα με τον τρόπο καταπόνησης των κοχλίων τους σε: α) διάτμηση (δύναμη κάθετη στον άξονα του κορμού του κοχλία), β) εφελκυσμό (δύναμη παράλληλη στον άξονα του κορμού του κοχλία) και γ) σε συνδυασμό διάτμησης - εφελκυσμού. Τυπικά παραδείγματα συνδέσεων όπου οι κοχλίες υπόκεινται σε διάτμηση είναι οι πλάκες ενίσχυσης συνδέσεων. Αντίστοιχο παράδειγμα όπου οι κοχλίες εφελκύνονται είναι οι συνδέσεις δοκών – υποστυλωμάτων. Ωστόσο σε ορισμένες περιπτώσεις οι κοχλίες των τελευταίων μπορεί να υπόκεινται και σε συνδυασμένη καταπόνηση. Προκειμένου λοιπόν να μπορέσει να αναλυθεί μια κοχλιωτή σύνδεση, πρέπει να είναι γνωστή η συμπεριφορά των στοιχείων που την αποτελούν. Για τον λόγο αυτό δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στις περιπτώσεις φόρτισης ενός μεμονωμένου κοχλία στις παραπάνω καταπονήσεις.

Ο τύπος και κατ' επέκταση ο σχεδιασμός των κοχλιωτών συνδέσεων μεταλλικών κατασκευών προσδιορίζεται ανάλογα με την χρήση της κατασκευής, αλλά και τον τρόπο που καταπονούνται τα μέρη της (εφελκυσμός, διάτμηση, εναλλασσόμενη φόρτιση). Ο Ευρωκώδικας ENV 1993-1:1992 αναφέρει πέντε κατηγορίες κόμβων, οι οποίες παρουσιάζονται στον πίνακα 1.4.

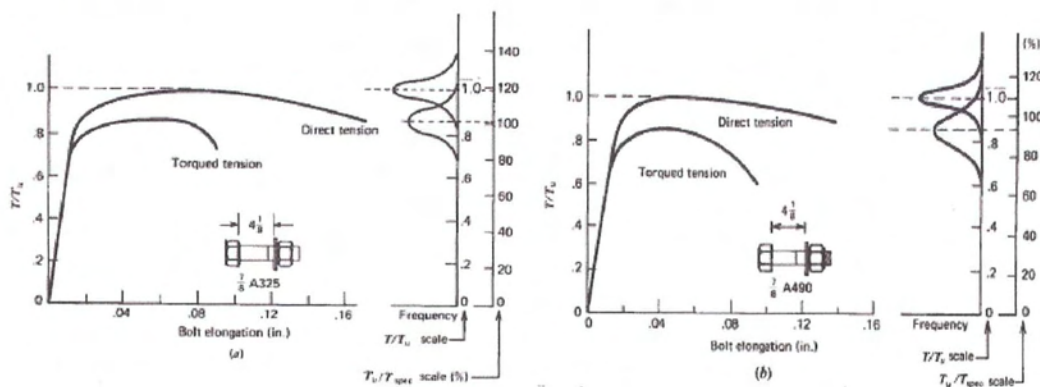
Πίνακας 1.4: Κατηγορίες κοχλιωτών κόμβων

Συνδέσεις διάτμησης		
Κατηγορία	Παρατηρήσεις	Εφαρμογές
A Συνδέσεις τύπου άντυγας	<ul style="list-style-type: none"> • Δεν απαιτείται προένταση • Έλεγχος κοχλιών σε διάτμηση • Έλεγχος ελασμάτων σε σύνθλιψη άντυγας οπών • Ποιότητα κοχλιών : 4.6 έως 10.9 	<ul style="list-style-type: none"> • Κοινές κατασκευές
B Κόμβοι τριβής στην οριακή κατάσταση λειτουργίας	<ul style="list-style-type: none"> • Προεντεταμένοι κοχλίες υψηλής αντοχής 8.8 ή 10.9 • Ολίσθηση (κατ. A) στην οριακή κατάσταση αστοχία 	<ul style="list-style-type: none"> • Εναλλασσόμενη φόρτιση (π.χ. γέφυρες)
C Κόμβοι τριβής στην οριακή κατάσταση αστοχίας	<ul style="list-style-type: none"> • Προεντεταμένοι κοχλίες υψηλής αντοχής 8.8 ή 10.9 • Αντοχή σε ολίσθηση στην οριακή κατάσταση αστοχία 	<ul style="list-style-type: none"> • Εναλλασσόμενη φόρτιση • Διατήρηση λειτουργικότητας στην κατάσταση αστοχία • Σχετική μετακίνηση επιφέρει κατάρρευση
Συνδέσεις εφελκυσμού		
Κατηγορία	Παρατηρήσεις	Εφαρμογές
D Μη προεντεταμένες	<ul style="list-style-type: none"> • Δεν απαιτείται προένταση • Ποιότητα κοχλιών 4.6 έως 10.9 	<ul style="list-style-type: none"> • Κοινές κατασκευές με σχετικά άκαμπτα ελάσματα
E Προεντεταμένες	<ul style="list-style-type: none"> • Προεντεταμένοι κοχλίες υψηλής αντοχής 8.8 ή 10.9 	<ul style="list-style-type: none"> • Εναλλασσόμενη φόρτιση (π.χ. γέφυρες) • Κόμβοι με εύκαμπτα ελάσματα

1.A.6 Κοχλίες σε εφελκυσμό

Η απόκριση ενός κοχλία που καταπονείται με αξονικό φορτίο καθορίζεται από την συμπεριφορά του σπειρώματός του. Το διάγραμμα αξονικού φορτίου – επιμήκυνσης του κοχλία, είναι ο πλέον ενδεδειγμένος τρόπος απεικόνισης της συμπεριφοράς του κοχλία.

Ο προσδιορισμός των μηχανικών ιδιοτήτων ενός κοχλία, προκύπτει μέσω πειράματος εφελκυσμού. Αυτό συνήθως πραγματοποιείται απαγορεύοντας την αξονική μετατόπιση κεφαλής και περικοχλίου και εισάγοντας μία βαθμονομημένη ροπή/στροφή η οποία στρίβει το περικόχλιο. Καθώς το περικόχλιο στρέφεται, η αναπτυσσόμενη τριβή από την επαφή των σπειρωμάτων κοχλία – περικοχλίου αναγκάζει τον κοχλία να στραφεί και συγχρόνως να επιμηκυνθεί. Αυτή η διαδικασία σύσφιξης καταλήγει σε μία συνδυασμένη κατάσταση φόρτισης στρέψης – εφελκυσμού (torqued tension). Ως αποτέλεσμα, η σχέση φορτίου – επιμήκυνσης που προκύπτει από μία δοκιμή στρέψης - εφελκυσμού διαφέρει από την αντίστοιχη που προκύπτει από μία δοκιμή άμεσου εφελκυσμού. Πιο συγκεκριμένα η μέθοδος στρέψης – εφελκυσμού, οδηγεί σε μείωση του μέγιστου φορτίου που μπορεί να φέρει ο κοχλίας, καθώς και σε μείωση της μέγιστης παραμόρφωσης. Χαρακτηριστικά διαγράμματα φορτίου – επιμήκυνσης για κοχλίες συγκεκριμένων μηχανικών και γεωμετρικών ιδιοτήτων δίνονται στα παρακάτω διαγράμματα,[5]:

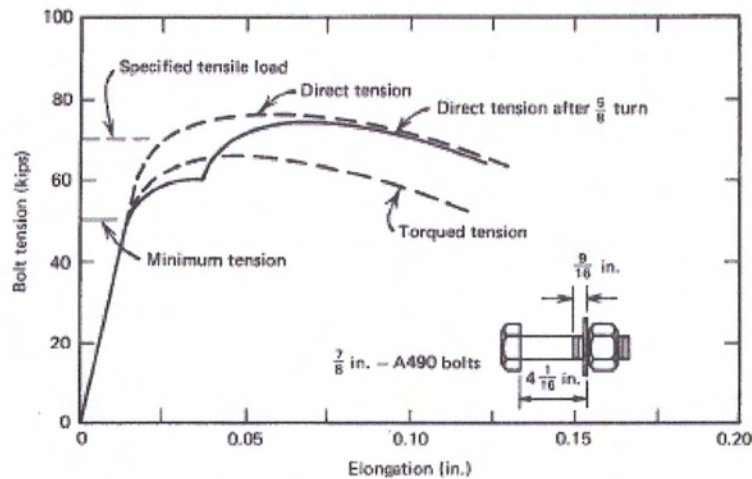


Εικόνα 1.5: Διάγραμμα Αξονικού φορτίου – Επιμήκυνσης, α)A325, β)A490

Στα διαγράμματα είναι εμφανείς η μείωση αντοχής και παραμόρφωσης, οι οποίες ανέρχονται στο 5 έως 25 %.

Η φόρτιση ενός κοχλία σε εφελκυσμό μετά από προένταση αυτού μέσω στροφής της κεφαλής του, δεν μειώνει σημαντικά την μέγιστη εφελκυστική αντοχή του. Οι τάσεις

που προκαλούνται από την στρέψη που ασκείται στον κοχλία έχουν αμελητέα επίδραση στην αντοχή του. Αυτό σημαίνει ότι οι κοχλίες που προεντείνονται μέσω σύσφιγξης είναι ικανοί να φέρουν αξονικά εφελκυστικά φορτία χωρίς εμφανή μείωση της μέγιστης αντοχής τους. Στις περιπτώσεις αυτές η μεγαλύτερη παραμόρφωση προκύπτει στον άξονα του κοχλία όπου βρίσκεται το σπείρωμα μεταξύ του περικοχλίου και του λείου τμήματος του κοχλία.



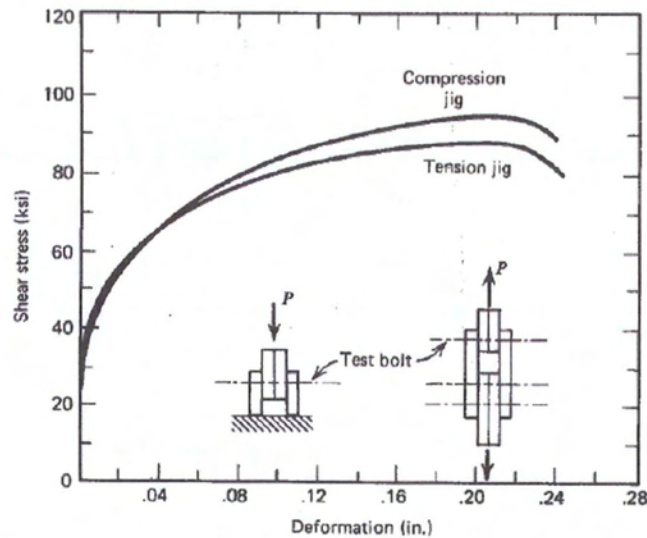
Εικόνα 1.6: Εναπομένουσα αντοχή προεντεταμένου μέσω σύσφιγξης κοχλία.

Στην ελαστική περιοχή, το μήκος σύσφιγξης δεν επηρεάζει σημαντικά την επιμήκυνση του κοχλία. Όταν όμως το φορτίο αυξάνεται πάνω από το ελαστικό όριο, το σπείρωμα του κοχλία πλαστικοποιείται, ενώ ο υπόλοιπος κορμός παραμένει ελαστικός. Το γεγονός αυτό διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην συμπεριφορά του κοχλία στην πλαστική περιοχή. Για κοντούς κοχλίες, σχεδόν όλη η παραμόρφωση προκύπτει στο σπείρωμα του κοχλία με αποτέλεσμα να μειώνεται η στρεπτική του ικανότητα.

1.A.7 Κοχλίες σε διάτμηση

Η σχέση διατμητικής δύναμης – μετατόπισης μπορεί να προέλθει είτε από πείραμα διάτμησης μέσω εφελκυσμού των πλακών είτε από πείραμα διάτμησης μέσω θλίψης των πλακών (εικόνα 1.7). Τα πειράματα διάτμησης μέσω εφελκυσμού των πλακών παρουσιάζουν μειωμένη αντίσταση σε διάτμηση περίπου 10% σε σχέση με αυτά της θλίψης. Αυτό συμβαίνει γιατί κατά την διάρκεια του εφελκυσμού των πλακών αναπτύσσεται το φαινόμενο “lap plate prying”, κατά το οποίο οι πλάκες κάμπτονται προς τα έξω, με αποτέλεσμα να δημιουργούν επιπλέον εφελκυστικές δυνάμεις στον

κοχλία. Γενικότερα, προτιμούνται τα δεδομένα της διάτμησης με εφελκυσμό διότι δίνουν πιο συντηρητικά και αξιόπιστα αποτελέσματα.



Εικόνα 1.7: Διάγραμμα δύναμης – παραμόρφωσης για διάτμηση μέσω εφελκυσμού και μέσω θλίψης των πλακών.

Η διατμητική αντοχή των προενταμένων κοχλίων, εξαρτάται από το διαθέσιμο διατμητικό εμβαδό (αν το επίπεδο διάτμησης βρίσκεται στον κορμό, ή στο σπείρωμα του κοχλία) και όχι από το βαθμό προέντασής του. Θεωρητικά, το διατμητικό φορτίο μπορεί να αλληλεπιδράσει α) με το φορτίο προέντασης, β) με την εφελκυστική δύναμη λόγω παραμόρφωσης των πλακών (lap plate prying action). Όμως, οι διατμητικές παραμορφώσεις που εισέρχονται στο σώμα του κοχλία ανακουφίζουν τις αξονικές που είχε δεχτεί κατά την προένταση και η εφελκυστική δύναμη που προέρχεται από την παραμόρφωση των πλακών είναι μικρή και δεν επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα.[5]

Πίνακας 1.5: Εμβαδόν, Ροπή σύσφιγξης και Αξονική δύναμη σχεδιασμού κοχλίων

NOMINAL DIAMETER D (mm)	NET AREA A_s (mm ²)	HSFG BOLTS	
		Ts (Nm)	Ns (kN)
16	157	250	100
20	245	450	160
22	303	650	190
24	353	800	220
27	459	1250	290
30	561	1650	350

1.A.8 Χρήση Ροδελών

Η χρήση ροδελών σε μία κοχλιωτή σύνδεση με κοχλίες υψηλής αντοχής, θεωρείται απαραίτητη για να τους παρακάτω λόγους:

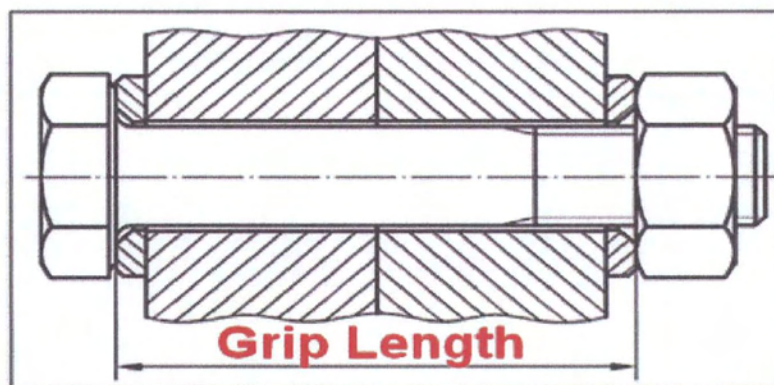
1. Για να προστατεύεται η εξωτερική επιφάνεια των συνδεόμενων υλικών από φθορά ή συγκόλληση λόγω τριβής, καθώς ο κοχλίας ή το περικόχλιο στρέφεται.
2. Για να διατηρηθεί υψηλή δύναμη σύσφιγξης στη σύνδεση.
3. Για να παρέχει στις επιφάνειες επαρκή σκληρότητα, ώστε η διασπορά στη σχέση ροπής-εφελκυσμού να ελαχιστοποιηθεί.

1.A.9 Προένταση Κοχλίων

Προένταση ενός κοχλία είναι η διαδικασία κατά την οποία ο κοχλίας μιας κοχλιωτής σύνδεσης συσφίγγεται, με αποτέλεσμα να αναπτύσσεται σε αυτόν μια εφελκυστική δύναμη, η οποία ονομάζεται **δύναμη προέντασης**. Ως αποτέλεσμα, αναπτύσσεται ένα θλιπτικό εντατικό πεδίο στα υπόλοιπα μέρη της σύνδεσης, τέτοιο ώστε αυτή να βρίσκεται σε εσωτερική ισορροπία. Οι δυνάμεις οι οποίες αναπτύσσονται ονομάζονται **δυνάμεις σύσφιγξης**.

Η σχετική στροφή κεφαλής κοχλία – περικοχλίου που προκύπτει κατά τη διαδικασία της προέντασης, εξαναγκάζει το περικόχλιο να κινηθεί μεταφορικά κατά τον άξονα του κοχλία. Αυτή η σχετική μετακίνηση κεφαλής κοχλία - περικοχλίου, τείνει να μειώσει την απόσταση μεταξύ των φερουσών επιφανειών τους. Η απόσταση αυτή

ονομάζεται *μήκος σύσφιγξης* (εικόνα 1.8) της κοχλιωτής σύνδεσης. Καθώς ο κοχλίας προεντείνεται, το μήκος σύσφιγξης μειώνεται και τα μέρη της κοχλιωτής σύνδεσης μέσα στο μήκος σύσφιγξης συμπιέζονται.



Εικόνα 1.8: Μήκος σύσφιγξης κοχλιωτής σύνδεσης

Η χρήση προεντεταμένων κοχλίων σε μια κοχλιωτή σύνδεση έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη τριβής στη διεπιφάνεια των ελασμάτων της σύνδεσης, η οποία αντιστέκεται στη σχετική τους ολίσθηση. Οι κόμβοι αυτοί ονομάζονται κόμβοι τριβής. Οι κόμβοι τριβής χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις κατασκευών οι οποίες υπόκεινται σε εναλλασσόμενες φορτίσεις, προκειμένου να περιορίζονται οι σχετικές μετακινήσεις στους κόμβους (μεταξύ του κοχλία και των ελασμάτων σύνδεσης). Μέσω της προέντασης μειώνεται η πιθανότητα αστοχίας μίας κοχλιωτής σύνδεσης λόγω κόπωσης, χαλάρωσης λόγω κραδασμών ή αποκόλλησης.[6]

Η προένταση της σύνδεσης είναι απαραίτητη για τη στεγανότητα της σύνδεσης όσο και για την ασφάλειά της σε συνθήκες λειτουργίας. όταν το σύστημα συναρμολογηθεί και τεθεί σε λειτουργία, η σύνδεση αναλαμβάνει επιπρόσθετα φορτία, τα οποία ονομάζονται φορτία λειτουργίας. Ο κοχλίας και η σύνδεση πρέπει να είναι ικανοί να αναλάβουν με ασφάλεια τόσο τα φορτία προέντασης, όσο και τα φορτία λειτουργίας.

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα ENV 1993-1:1992, οι προεντεταμένοι κοχλίες χρησιμοποιούνται στις κατηγορίες κοχλιωτών συνδέσεων B, C και E (πίνακας 1.4). Η ποιότητα κοχλίων πρέπει υποχρεωτικά να είναι υψηλής αντοχής 8.8, ή 10.9, ώστε ο κοχλίας να είναι ικανός να φέρει επαρκή δύναμη προέντασης.

Η αντοχή σε ολίσθηση ενός προεντεταμένου κοχλία υψηλής αντοχής, σε κόμβο με κανονική οπή και για μία διεπιφάνεια ολίσθησης, δίνεται σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3 ως:

$$F_{s,Rd} = \frac{\mu}{\gamma_{Ms}} F_p \quad (1.1)$$

Όπου:

μ = ο συντελεστής ολίσθησης/τριβής, ο οποίος λαμβάνει τιμές 0.20 – 0.50, ανάλογα με την προδιαγεγραμμένη κατηγορία τραχύτητας των ελασμάτων

γ_{Ms} = μερικός συντελεστής ασφαλείας, ίσος με 1.10 για οριακή κατάσταση λειτουργικότητας και ίσος 1.25 για οριακή κατάσταση αστοχίας

$$F_p = 0.7 f_{ub} A_s \quad (1.2)$$

Όπου:

F_p = η δύναμη προέντασης σχεδιασμού

f_{ub} = η εφελκυστική αντοχή του υλικού

A_s = η διατομή του σπειρώματος

Ακόμη, η αντίσταση σε διάτμηση για ένα επίπεδο διάτμησης, δίνεται σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3 ως:

$$F_{v,Rd} = \frac{a_v F_{ub} A}{\gamma_{M2}} \quad (1.3)$$

- όταν το επίπεδο διάτμησης διέρχεται από την πλήρη διατομή του κοχλία: $a_v = 0,6$

- $\gamma_{M2} = 1.25$ για οριακή κατάσταση αστοχίας

1.A.10 Μέθοδοι προέντασης κοχλιών

Οι αναγνωρισμένες μέθοδοι προέντασης κοχλιών σύμφωνα με τους κανονισμούς (BS 4604, ENV 1090-1,[7]) είναι οι:

- (a) Μέθοδος ελεγχόμενης ροπής σύσφιξης
- (b) Μέθοδος ελεγχόμενης στροφής περικοχλίου
- (c) Μέθοδος με απευθείας ένδειξη προέντασης
- (d) Μικτή μέθοδος ελεγχόμενης ροπής σύσφιξης και στροφής περικοχλίου

Από αυτές τις μεθόδους, οι πιο διαδεδομένες και αυτές που παρουσιάζονται σε αυτή την εργασία, είναι η “μέθοδος ελεγχόμενης ροπής σύσφιξης” και η “μέθοδος ελεγχόμενης στροφής περικοχλίου”. Τα απαιτούμενα μεγέθη αξονικής δύναμης

κοχλία και ροπής σύσφιγξης σύμφωνα με τον DIN 18800,[8], δίνονται στον πίνακα 1.6.

Πίνακας 1.6: Δύναμη προέντασης και Ροπή σύσφιγξης σχεδιασμού

Required tightening forces and angles of rotation							
1		2	3	4	5	6	
	Bolt	Required prestressing force F_v	Prestressing of bolt by				
			A) Torque		B) angular momentum	C) rotation momentum	
			Tightening momentum to be applied M_v		Prestressing force to be applied $F_v2)$	Prestressing moment to be applied $M_v2)$	
			Greased with MoS21)	Lightly lubricated			
			kN	Nm	Nm	kN	Nm
1	M 12	50	100	120	60	10	
2	M 16	100	250	350	110	50	
3	M 20	160	450	600	175		
4	M 22	190	650	900	210	100	
5	M 24	220	800	1100	240		
6	M 27	290	1250	1650	320	200	
7	M 30	350	1650	2200	390		
8	M 36	510	2800	3800	560		
<p>1) Since the values for M_v depend to a large extent on the lubricant used on the thread, compliance with these levels is to be confirmed by the bolt manufacturer</p> <p>2) Irrespective of the lubricant used on the thread and the bearing surfaces of nuts and bolt</p>							

1.A.10.1 Μέθοδος ελεγχόμενης ροπής

Η εφαρμογή αυτής της μεθόδου γίνεται με βαθμονομημένο ροπό-κλειδο, με το οποίο εφαρμόζεται η απαιτούμενη ροπή στρέψης στο περικόχλιο. Αυτά τα ροπό-κλειδα μπορεί να είναι χειροκίνητα, αέρος, ή ηλεκτρικά, ενώ ορισμένα από αυτά μπορεί να

είναι εξοπλισμένα και με “κόφτη” ο οποίος σταματά τη σύσφιξη στην προκαθορισμένη τιμή ροπής.

Από την εφαρμοζόμενη ροπή στο περικόχλιο, ένα μέρος καταναλώνεται για να υπερνικήσει τη τριβή που αναπτύσσεται ανάμεσα στις επιφάνειες των σπειρωμάτων κοχλία - περικοχλίου καθώς και στις υπόλοιπες επιφάνειες επαφής κοχλία, περικοχλίου, ελασμάτων και ροδελών. Το υπόλοιπο μέρος χρησιμοποιείται για να επιμηκύνει και επομένως να προεντείνει τον κοχλία.

Γίνεται συνεπώς αντιληπτό ότι τόσο η γεωμετρία των σπειρωμάτων, όσο και οι συντελεστές τριβής των διαφόρων επιφανειών επαφής, επηρεάζουν άμεσα την απαιτούμενη ροπή σύσφιξης.

Η απαιτούμενη ροπή σύσφιξης δίνεται από τη παρακάτω σχέση,[6]:

$$M_c = 0.88 K d f_{ub} A_s / 1000 \text{ (Nm)} \quad (1.4)$$

Όπου:

d = η διάμετρος του κοχλία (mm)

K = ο συντελεστής τριβής, ο οποίος λαμβάνει τιμές 0.12 – 0.20. Οι τιμές του συντελεστή K εξαρτώνται από τον τύπο του λιπαντικού που χρησιμοποιείται.

Για να επιτευχθεί η δύναμη προέντασης σχεδιασμού, η ροπή σύσφιξης πρέπει να υπερνικήσει την αντίσταση από:

α) την ροπή που αναπτύσσεται από την μηχανική αλληλεπίδραση των σπειρωμάτων του κοχλία και του περικοχλίου, λόγω της γεωμετρίας τους (εικόνα 1.1) κατά τη διάρκεια της σύσφιξης. Το μέγεθος αυτής της ροπής είναι ανεξάρτητο από τον συντελεστή τριβής και είναι χαρακτηριστικό της γεωμετρίας του σπειρώματος και των μηχανικών ιδιοτήτων του συστήματος κοχλία – περικοχλίου.

β) την ροπή που αναπτύσσεται λόγω τριβής στις διεπιφάνειες των διαφόρων σωμάτων της σύνδεσης. Ο υπολογισμός αυτής της ροπής είναι πιο σύνθετος, καθώς εξαρτάται από τον συντελεστή τριβής μεταξύ των σωμάτων “μ”, τη συνολική επιφάνεια επαφής μεταξύ των σωμάτων και την κάθετη αντίδραση στις επιφάνειες αυτές.

Για την προένταση μίας κοχλιωτής σύνδεσης πλακών και συστήματος κοχλία - περικοχλίου υπάρχουν άλλοι δυο τύποι υπολογισμού της ροπής σύσφιγξης,[2]. Ο τύπος 1.5 προκύπτει θεωρητικά μέσω ανάλυσης δυνάμεων στον κοχλία, ενώ ο τύπος 1.6 προκύπτει εμπειρικά.

$$M_{\text{theoretical}} = P_i \frac{d_m}{2} \frac{\mu_0 \sec\theta + \text{tga}}{1 - \mu \sec\theta \text{tga}} + \mu P_i \frac{d_{m\pi}}{2} \quad (\text{Nm}) \quad (1.5)$$

P_i = η δύναμη προέντασης σχεδιασμού

$d_m = \frac{d_3 + d}{2}$ όπως ορίζεται στον DIN 13.1 (εικόνα 1.1)

θ = η γωνία των δοντιών του σπειρώματος DIN 13.1

$\text{tga} = \frac{p}{\pi d}$, η γωνία κλίσης του σπειρώματος (εικόνα 1.2)

p = το βήμα του σπειρώματος

$d_{m\pi} = \frac{d_1 + d}{2}$ όπως ορίζεται στον DIN 13.1 (εικόνα 1.1)

$$M_{\text{empirical}} = K d P_i \quad (\text{Nm}) \quad (1.6)$$

$K = 0.2$, μια στρεπτική σταθερά

1.A.10.2 Μέθοδος ελεγχόμενης στροφής περικοχλίου

Κατά την μέθοδο της ελεγχόμενης στροφής περικοχλίου, το περικόχλιο στρέφεται ως προς τον κορμό του κοχλία κατά μία προκαθορισμένη γωνία. Η γωνία αυτή ανάλογα με το βήμα του σπειρώματος, προκαλεί συγκεκριμένη επιμήκυνση στον κορμό του κοχλία, η οποία με τη σειρά της προκαλεί την αντίστοιχη δύναμη προέντασης. Η γωνία στροφής του περικοχλίου μετράται από την στιγμή που όλα τα μέρη της σύνδεσης (κοχλίας, περικόχλιο, ροδέλες, ελάσματα) έρθουν σε πλήρη επαφή μεταξύ τους. Παράγοντες όπως η διάμετρος d και το μήκος σύσφιγξης l_k του κοχλία επηρεάζουν την απαιτούμενη γωνία στροφής.

Οι προτεινόμενες από τους κανονισμούς (DIN 18800-part 7, ENV 1090 - 1) τιμές στροφής για κοχλίες υψηλής αντοχής, δίνονται στον πίνακα 1.7.

Πίνακας 1.7: Απαιτούμενη γωνία στροφής

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	l_k mm	$l_k \leq 50$		$51 \leq l_k \leq 100$		$101 \leq l_k \leq 170$		$171 \leq l_k \leq 240$	
		φ	U	φ	U	φ	U	φ	U
1	M12 to M 22	180°	½	240°	2/3	270°	3/4	360°	1
2	M14 to M 36							270°	3/4

1.A.11 Κανόνες εφαρμογής

Αρχικά τοποθετείται ο κοχλίας και γίνεται λίπανση μεταξύ της ροδέλας, των λεπίδων και του περικοχλίου. Επίσης τοποθετείται λιπαντικό μεταξύ του σπειρώματος και του περικοχλίου. Στη συνέχεια οι κοχλίες συσφίγγονται με την ροπή σύσφιξης συναρμογής, ώστε να έρθουν οι πλάκες σε πλήρη επαφή (πίνακας 1.6-στήλη 6).

Σύμφωνα με τον ENV 1090-1, προκρινόμενου να επιτευχθεί η επιθυμητή ροπή σύσφιξης, πρέπει να βαθμονομείται κάθε ροπό-κλειδο, πραγματοποιώντας δοκιμές σύσφιξης κοχλιών σε πρότυπη συσκευή διακρίβωσης εφελκυσμού. Πρέπει να πραγματοποιούνται δοκιμές στο χώρο εργασίας, σε τουλάχιστον τρεις κοχλίες ίδιων χαρακτηριστικών (χάλυβα, διαμέτρου και μήκους). Ως ροπή σύσφιξης λαμβάνεται ο αριθμητικός μέσος όρος των τιμών των ροπών, για τις οποίες επιτυγχάνεται προένταση ίση με $1.05 F_p$. Η διαδικασία πρέπει να επαναλαμβάνεται για κάθε ξεχωριστό ροπό-κλειδο και για κάθε φορά που υπάρχουν αλλαγές στα χαρακτηριστικά των κοχλιών ή στην κατάσταση της επιφάνειάς τους (συνθήκες τριβής). Για να μην μεταβληθούν οι λιπαντικές συνθήκες της σύνδεσης, η προένταση πρέπει να πραγματοποιείται άμεσα μετά την τοποθέτηση των κοχλιών στον κόμβο. Πιθανή μεταβολή των λιπαντικών συνθηκών επιφέρει αύξηση των τριβών στο σπείρωμα, με αποτέλεσμα την αύξηση της απαιτούμενης ροπής σύσφιξης για την επίτευξη δεδομένης δύναμης προέντασης. Εφίσταται η προσοχή κατά την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου, η οποία θα πρέπει να αποφεύγεται σε περίπτωση που οι κοχλίες προεντείνονται μετά από μεγάλο χρονικό διάστημα από την τοποθέτησή τους.

Όταν εφαρμόζεται η μέθοδος της ελεγχόμενης στροφής περικοχλίου, η απαιτούμενη στροφή σύσφιξης, πρέπει επίσης να προκύπτει σε συνδυασμό με δοκιμές σύσφιξης κοχλιών σε πρότυπη συσκευή διακρίβωσης εφελκυσμού. Πρέπει να

πραγματοποιούνται δοκιμές στο χώρο εργασίας, σε τουλάχιστον τρεις κοχλίες ίδιων χαρακτηριστικών (χάλυβα, διαμέτρου και μήκους). Σε αντίθεση με την μέθοδο ελεγχόμενης ροπής, η απαιτούμενη στροφή σύσφιγξης δεν εξαρτάται από την βαθμονόμηση του ροπό-κλειδου, ή τις συνθήκες τριβής. Αντιθέτως, καθορίζεται εξολοκλήρου από τη γεωμετρία των σπειρωμάτων και τα μηχανικά χαρακτηριστικά του υλικού. Καθώς αυτά τα χαρακτηριστικά είναι γνωστά και λιγότερο μεταβλητά, η μέθοδος ελεγχόμενης στροφής δίνει πιο αξιόπιστα αποτελέσματα.[6]

B ΜΕΡΟΣ

1.B Πείραμα Προέντασης Κοχλιών

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται περιγραφή μιας σειράς πειραμάτων προέντασης κοχλιών που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Στόχος είναι η παρουσίαση, η ανάλυση, η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που λήφθηκαν και σύγκρισή τους με τα αποτελέσματα που λήφθηκαν από τα αριθμητικά προσομοιώματα της εργασίας.

Η διαδικασία προέντασης εκτελέστηκε σε συνθήκες εργοταξίου σε σύνολο πέντε δειγμάτων κατηγορίας M36, M27 και M24. Για τους κοχλίες M36 και M27 πραγματοποιήθηκε προένταση μέσω της μεθόδου ελεγχόμενης στροφής, ενώ για τους κοχλίες M24 χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ελεγχόμενης ροπής. Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε τοποθετώντας κάθε κοχλία μεταξύ δύο μεταλλικών πλακών οι οποίες εσώκλειαν μία δυναμοκυψέλη και στη συνέχεια προεντείνοντάς τον με την αντίστοιχη μέθοδο. Κατά την διαδικασία του πειράματος μετρήθηκαν οι γωνίες στροφής της κεφαλής του κοχλία, η εφαρμοζόμενη σε κάθε στάδιο ροπή και η αξονική δύναμη του κοχλία.

1.B.1 Ανάλυση και Περιγραφή Διαδικασίας

Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση του πειράματος αποτελούνταν από δύο μεταλλικές πλάκες πάχους 60 mm η κάθε μία, οι οποίες είχαν συγκολληθεί πάνω σε μια ακλόνητη βάση. Ανάμεσα στις δύο πλάκες είχε τοποθετηθεί μεταλλική δυναμοκυψέλη πάχους 55,5 mm, η οποία σε κάθε στάδιο της διαδικασίας μετρούσε την ορθή ένταση που αναπτύσσονταν μεταξύ των δύο επιφανειών. Η επιφάνεια της πάνω πλάκας σημαδεύτηκε με ανεξίτηλο μαρκαδόρο, ακτινικά γύρω από την τρύπα τοποθέτησης του κοχλία, ώστε να μπορεί να γίνει μέτρηση της στροφής. Η διάταξη και οι σχετικές λεπτομέρειες φαίνονται παρακάτω, στις εικόνες 1.9 έως 1.11:



Εικόνα 1.9: Διάταξη προέντασης κοχλίων



Εικόνα 1.10: Δυναμοκουψέλη



Εικόνα 1.11: Μέτρηση γωνίας στροφής κοχλία

1.B.1.1 Προένταση

Αρχικά τοποθετήθηκε ο κοχλίας και έγινε λίπανση μεταξύ της ροδέλας, των πλακών και του περικοχλίου. Επίσης τοποθετήθηκε λιπαντικό στα σπειρώματα του κοχλία και του περικοχλίου. Στη συνέχεια οι κοχλίες συσφίχθηκαν με ροπή σύσφιξης συναρμογής, ώστε να έρθουν οι πλάκες σε πλήρη επαφή.

Η ροπή σύσφιξης συναρμογής για ποιότητα 10.9 είναι (σε Nm):

Πίνακας 2.8: Ροπή σύσφιξης συναρμογής

M24	M27	M36
100	200	250

Η διαδικασία σύσφιξης πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια ρυθμιζόμενου δυναμόκλειδου με κόφτη, όπως αυτό φαίνεται στις εικόνες 1.9 και 1.12.



Εικόνα 1.12: Ρύθμιση δυναμόκλειδου με κόφτη ροπής

Μετά την ολοκλήρωση της αρχικής σύσφιξης σηματοδεύτηκαν με ανεξίτηλο μαρκαδόρο τα περικόχλια, ώστε να μπορεί να μετρηθεί η περιστροφή τους (βλέπε εικόνα 1.11).

Στη συνέχεια ανάλογα με τη μέθοδο προέντασης ακολουθήθηκε και η αντίστοιχη διαδικασία, όπως αυτή περιγράφεται παρακάτω :

1.B.1.2 Μέθοδος Ελεγχόμενης Στροφής

Κατά την εφαρμογή αυτής της μεθόδου το περικόχλιο περιστράφηκε με συγκεκριμένο βήμα και στο τέλος κάθε βήματος καταγράφηκαν τα αντίστοιχα εντατικά μεγέθη.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση υπολογίστηκε η αξονική δύναμη μέσω της δυναμοκυψέλης, ενώ από το μηχάνημα σύσφιξης (εικόνα 1.13) μετρήθηκε η ασκούμενη πίεση σε psi, η οποία στη συνέχεια μετασχηματίστηκε σε ροπή περιστροφής σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή.



Εικόνα 1.13: Συσκευή Εφαρμογής Πίεσης

1.B.1.3 Μέθοδος Ελεγχόμενης Ροπής

Κατά την εφαρμογή αυτής της μεθόδου, ο κοχλίας συσφίχθηκε εφαρμόζοντας προκαθορισμένη ροπή. Για κάθε βήμα της φόρτισης μετρήθηκε η γωνία στροφής και η ένδειξη της δυναμοκυψέλης. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια ρυθμιζόμενου δυναμόκλειδου.

1.B.2 Παράθεση και ανάλυση πειραματικών δεδομένων

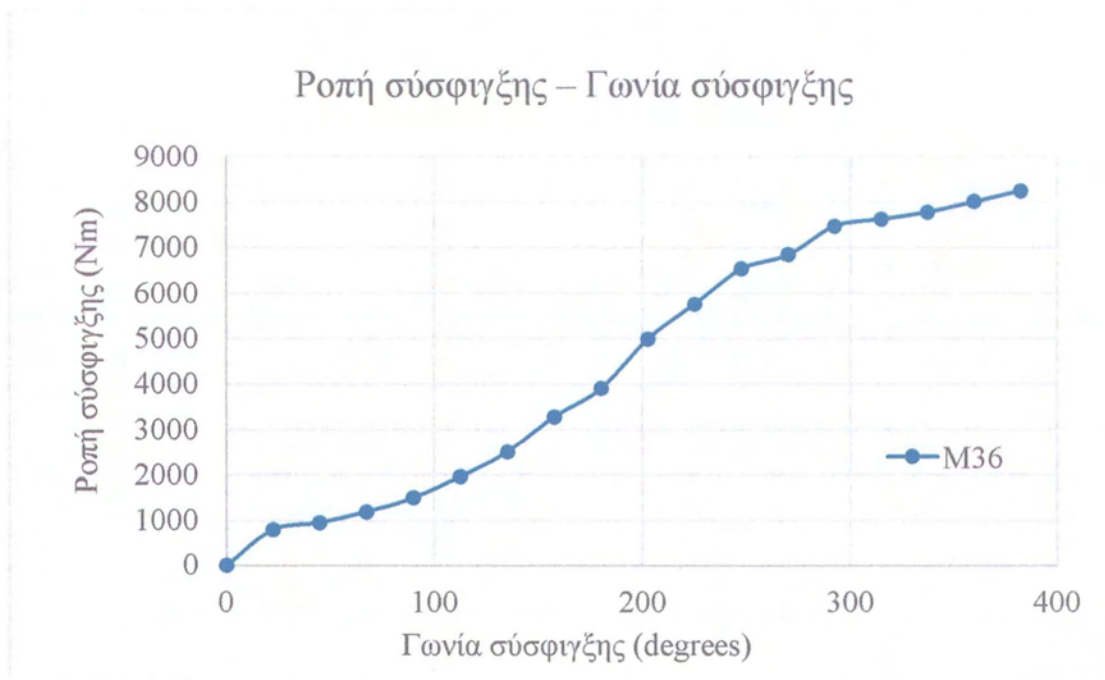
1.B.2.1 Αποτελέσματα κοχλία M36 – Μέθοδος ελεγχόμενης στροφής

Ο συγκεκριμένος κοχλίας τοποθετήθηκε στη διάταξη με μία ροδέλα κάτω από την κεφαλή και 8 κάτω από το περικόχλιο. Το συνολικό μήκος προέντασης ήταν 229 mm. Η διαδικασία προέντασης ξεκίνησε από το βήμα “0” (εικόνα 1.11), το οποίο αντιστοιχεί στη στροφή του περικοχλίου μετά την εφαρμογή της ροπής συναρμογής. Τα αποτελέσματα του πειράματος παραθέτονται στον πίνακα 1.9.

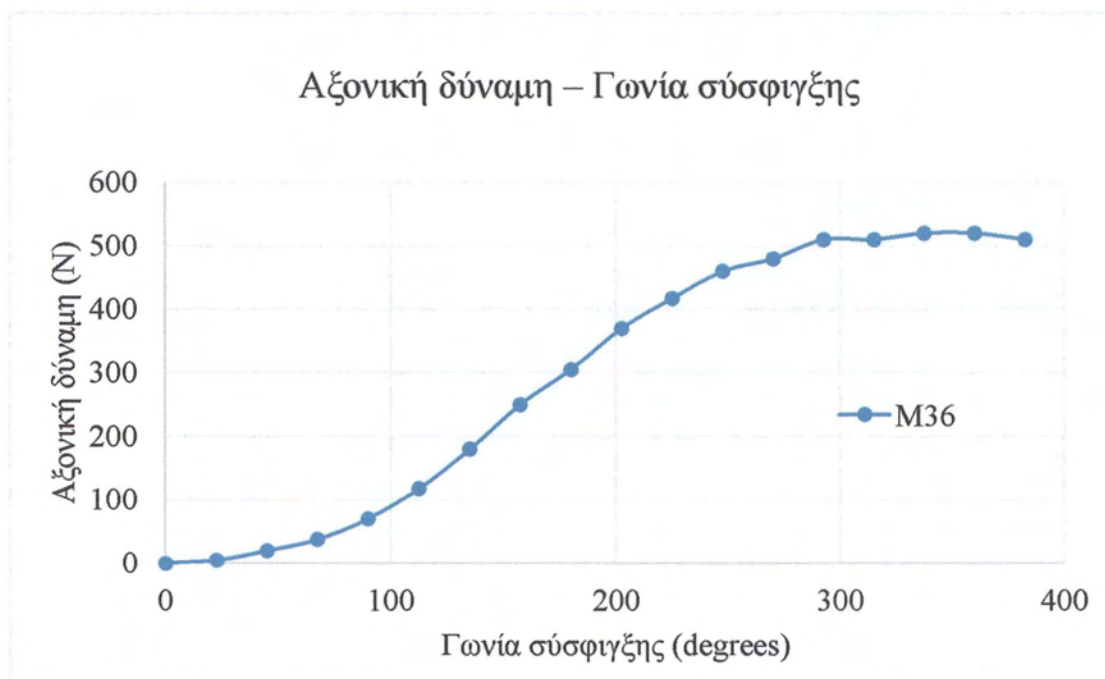
Πίνακας 1.9: Προένταση κοχλίου M36

Βήμα	Στροφή	Πίεση (psi)	Ροπή (Nm)	Δυναμοκυψέλη (kN)
0	0	-	-	20
1	1	500	793.872	25
2	2	600	949.112	40
3	3	750	1181.97	57.5
4	4	950	1492.45	90
5	5	1250	1958.17	137.5
6	6	1600	2501.51	200
7	7	2100	3277.71	270
8	8	2500	3898.67	325
9	9	3200	4985.35	390
10	10	3700	5761.55	437.5
11	11	4200	6537.75	480
12	12	4400	6848.23	500
13	13	4800	7469.19	530
14	14	4900	7624.43	530
15	15	5000	7779.67	540
16	16	5150	8012.53	540
17	16+1	5300	8245.39	530

Από τα δεδομένα του πίνακα 1.9 προκύπτουν τα διαγράμματα ροπής – στροφής και αξονικής δύναμης – στροφής, όπως αυτά παραθέτονται παρακάτω.



Εικόνα 1.14: Διάγραμμα Ροπής σύσφιγξης-γωνίας σύσφιγξης



Εικόνα 1.15: Διάγραμμα Αξονικής δύναμης-γωνίας σύσφιγξης

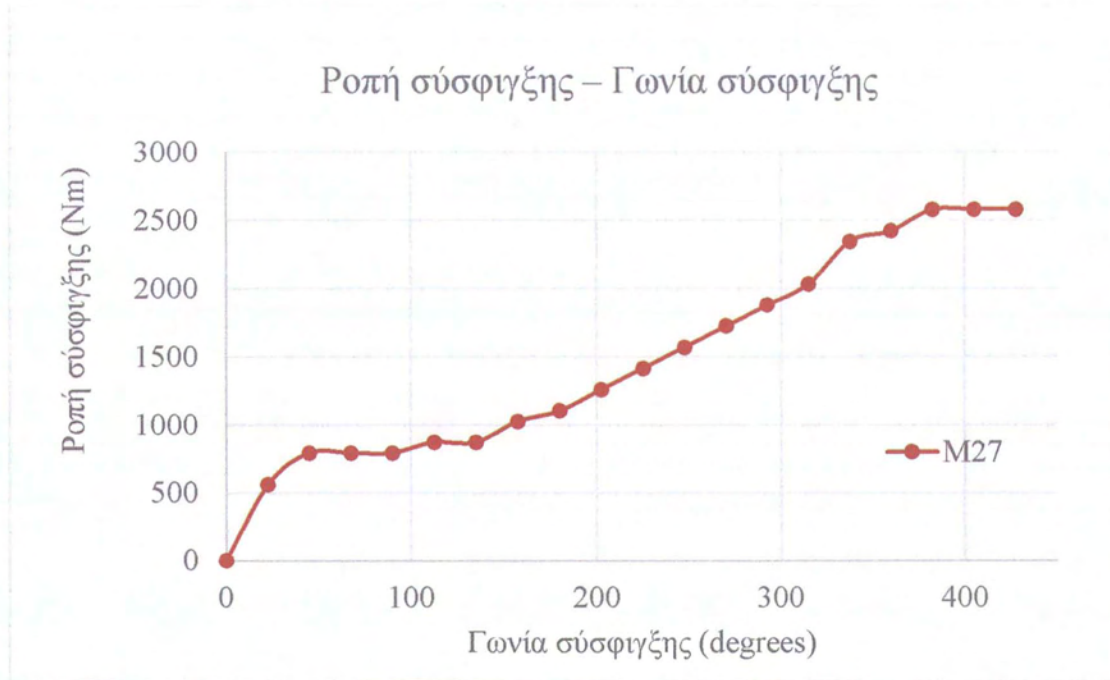
1.Β.2.2 Αποτελέσματα κοχλίου M27 – Μέθοδος ελεγχόμενης στρωφής

Ο κοχλίας τοποθετήθηκε στη διάταξη με μία ροδέλα κάτω από την κεφαλή και καμία κάτω από το περικόχλιο. Το συνολικό μήκος προέντασης ήταν 208 mm. Τα αποτελέσματα του πειράματος παραθέτονται στον παρακάτω πίνακα.

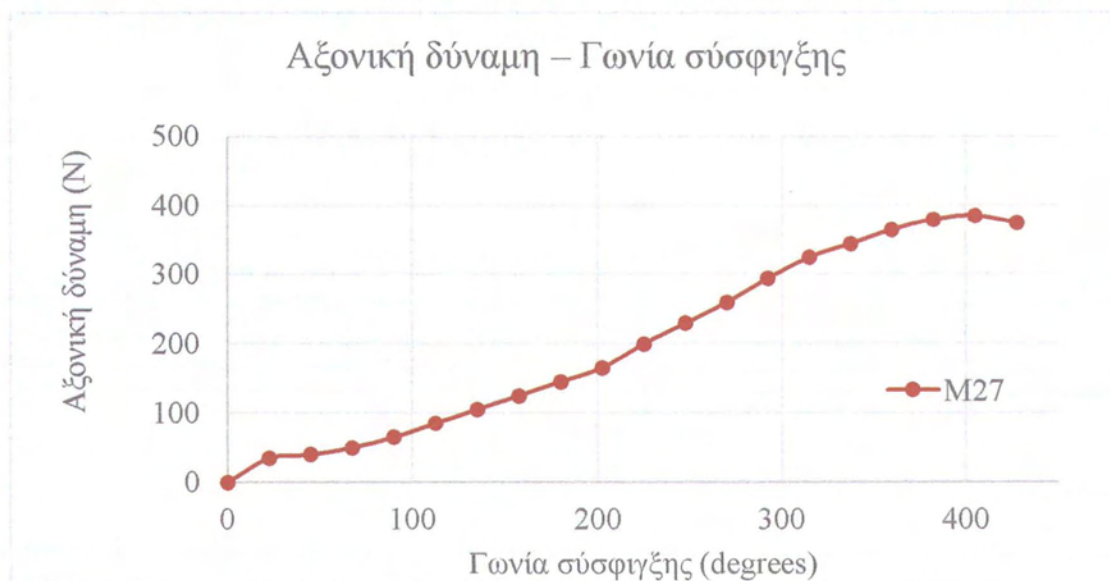
Πίνακας 1.10: Προένταση κοχλίου M27

Βήμα	Στροφή	Πίεση (psi)	Ροπή (Nm)	Δυναμοκυψέλη (kN)
0	0	-	-	0
1	1	350	561.012	35
2	2	500	793.872	40
3	3	500	793.872	50
4	4	500	793.872	65
5	5	550	871.492	85
6	6	550	871.492	105
7	7	650	1026.73	125
8	8	700	1104.35	145
9	9	800	1259.59	165
10	10	900	1414.83	200
11	11	1000	1570.07	230
12	12	1100	1725.31	260
13	13	1200	1880.55	295
14	14	1300	2035.79	325
15	15	1500	2346.27	345
16	16	1550	2423.89	365
17	16+1	1650	2579.13	380
18	16+2	1650	2579.13	385
19	16+3	1650	2579.13	375

Από τα δεδομένα του πίνακα 2 προκύπτουν τα διαγράμματα ροπής – στροφής και αξονικής δύναμης – στροφής, όπως αυτά παραθέτονται παρακάτω. Μετά το τέλος της φόρτισης ο κοχλίας αποφορτίστηκε και η παραμένουσα παραμόρφωση - στροφή υπολογίστηκε στο σημείο 6.



Εικόνα 1.16: Διάγραμμα Ροπής σύσφιγξης-γωνίας σύσφιγξης

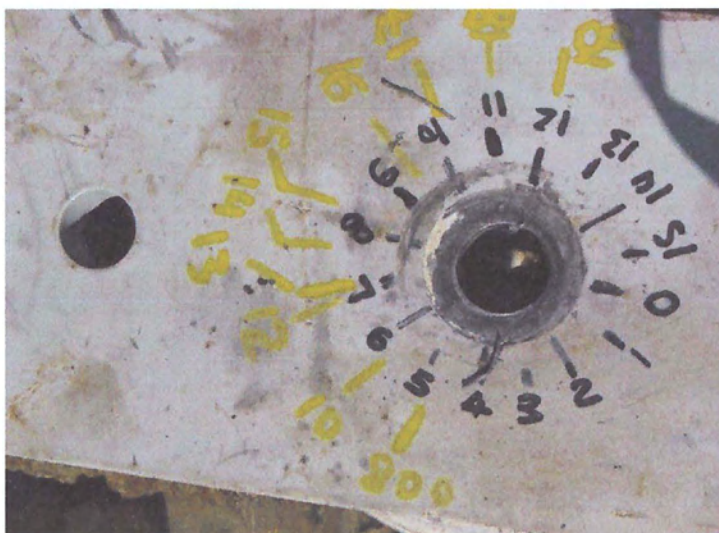


Εικόνα 1.17: Διάγραμμα Αξονικής δύναμης-γωνίας σύσφιγξης

1.B.2.3 Αποτελέσματα κοχλιών M24 – Μέθοδος ελεγχόμενης ροπής

Οι κοχλίες αυτοί τοποθετήθηκαν στη διάταξη με μία ροδέλα κάτω από την κεφαλή και μία κάτω από το περικόχλιο. Το συνολικό μήκος προέντασης ήταν 208 mm. Η φόρτιση ξεκίνησε από τα 800 Nm, τιμή που αποτελεί τι κάτω όριο του διαστήματος εμπιστοσύνης του δυναμόκλειδου που χρησιμοποιήθηκε. Τα αποτελέσματα του πειράματος παραθέτονται στους παρακάτω πίνακες:

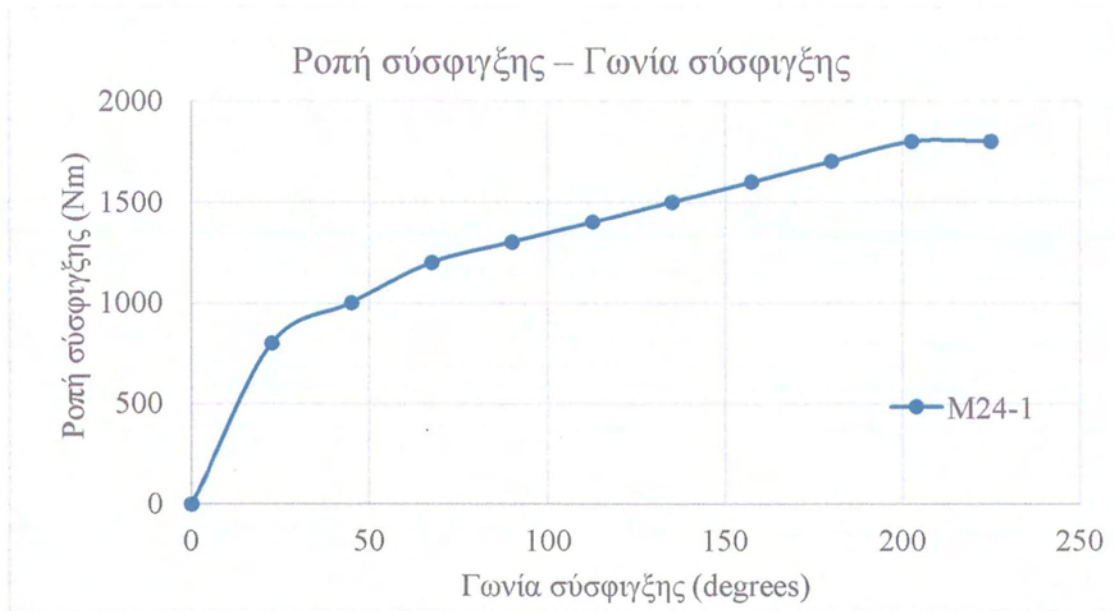
Κοχλίας Νο1



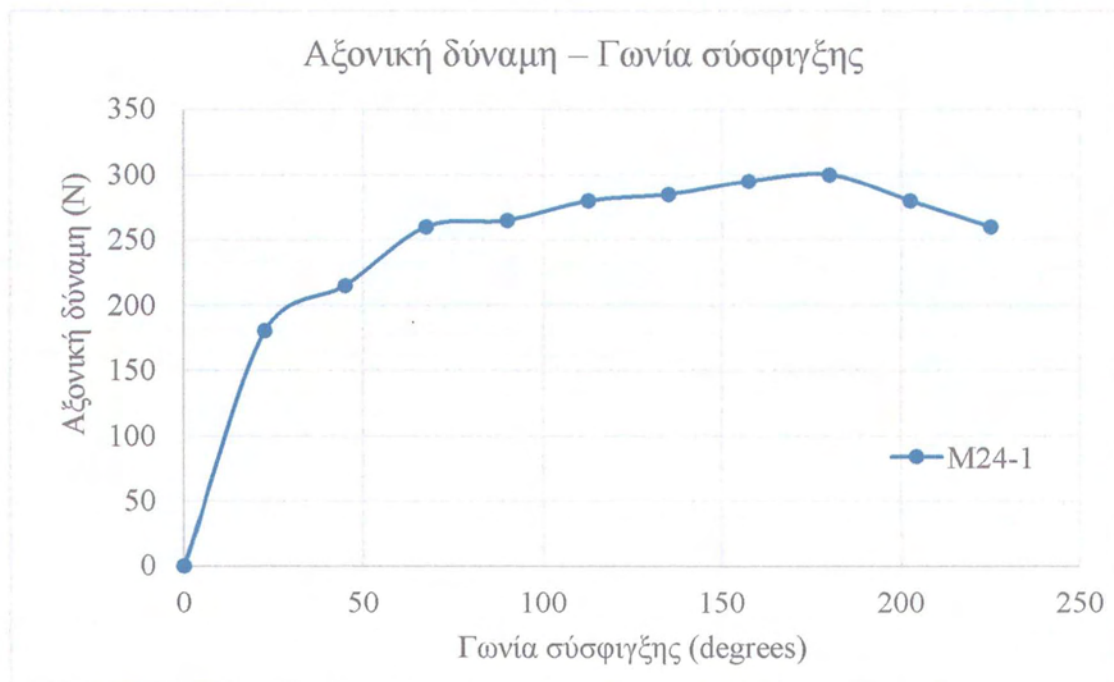
Εικόνα 1.18: Προένταση κοχλιών M24 - 1

Πίνακας 1.11: Προένταση κοχλία M24-1

Βήμα	Στροπή	Δυναμοκυψέλη (kN)	Εφαρμοζόμενη Ροπή (Nm)
0	0	30	100
1	5-	180	800
2	5~6	215	1000
3	7	260	1200
4	7+	265	1300
5	8-	280	1400
6	8+	285	1500
7	9.5	295	1600
8	10+	300	1700
9	11	280	1800
10	12	260	1800

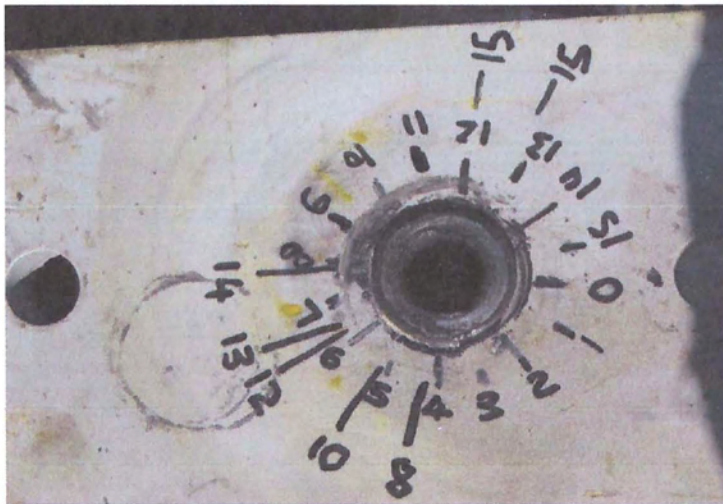


Εικόνα 1.19: Διάγραμμα Ροπής σύσφιγξης-γωνίας σύσφιγξης



Εικόνα 1.20: Διάγραμμα Αξονικής δύναμης-γωνίας σύσφιγξης

Κοχλίας Νο2

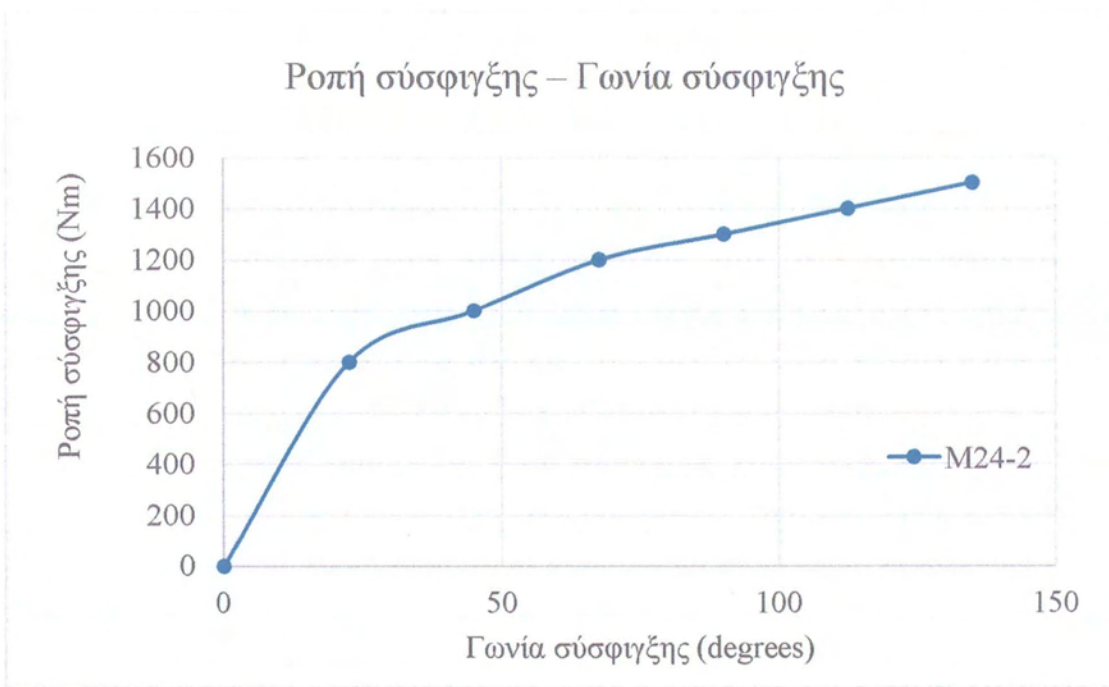


Εικόνα 1.21: Προένταση κοχλίας M24 – 2

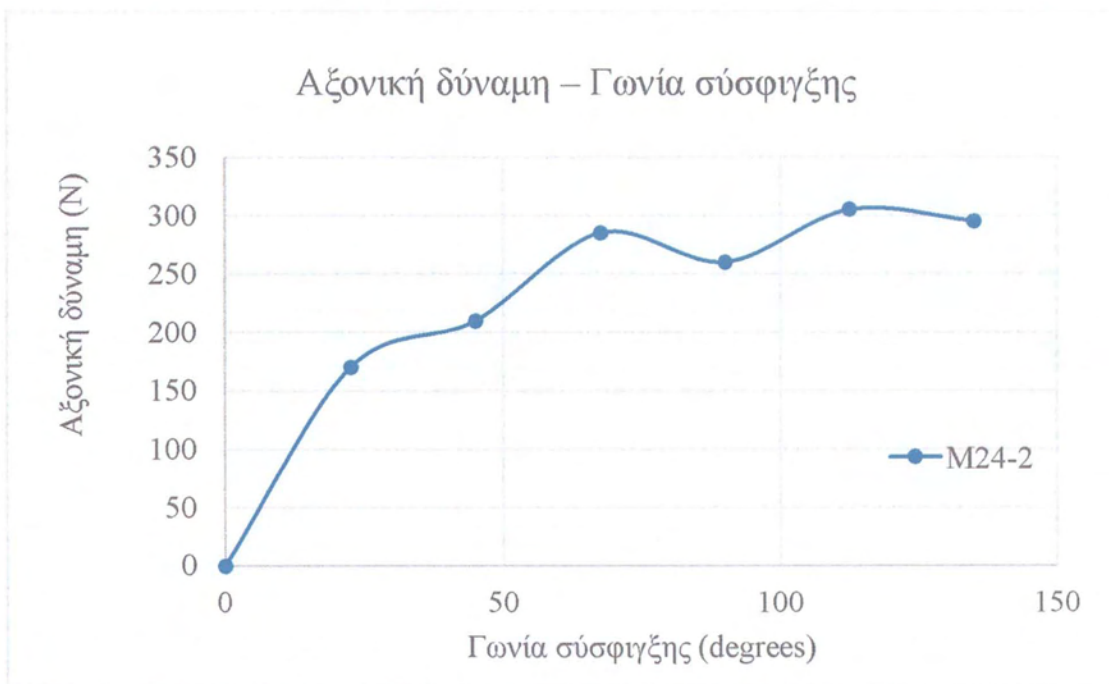
Πίνακας 1.12: Προένταση κοχλίας M24-2

Βήμα	Στροφή	Δυναμοκυψέλη (kN)	Εφαρμοζόμενη Ροπή (Nm)
0	0	15	100
1	4+	170	800
2	5+	210	1000
3	6+	285	1200
4	6.5	260	1300
5	8-	305	1400
6	12	295	1500

Ο κοχλίας Νο2 μετά το τέλος της φόρτισης αποφορτίστηκε και μετρήθηκε μόνιμη παραμόρφωση – στροφή στο σημείο 2. Στη συνέχεια επαναφορτίστηκε με ροπή 1500 Nm και έφτασε μέχρι το σημείο 12, αλλά η τιμή της αξονικής δύναμης έφτασε τα 160 kN.



Εικόνα 1.22: Διάγραμμα Ροπής σύσφιγξης-γωνίας σύσφιγξης



Εικόνα 1.23: Διάγραμμα Αξονικής δύναμης-γωνίας σύσφιγξης

2^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Η διαδικασία της προέντασης και η συμπεριφορά της σύνδεσης σε διάτμηση είναι φαινόμενα των οποίων η μαθηματική και μηχανική ανάλυση καθίσταται ιδιαίτερα πολύπλοκη. Στην παρούσα μελέτη δημιουργήθηκαν αριθμητικά προσομοιώματα μιας προεντεταμένης κοχλιωτής σύνδεσης. Το πρόβλημα επιλύθηκε με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, κάνοντας χρήση του εξειδικευμένου λογισμικού μη-γραμμικής ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων MSCMARC, [9]. Στη συνέχεια του κεφαλαίου παρατίθενται συνοπτικά τα θεωρητικά στοιχεία και οι αρχές της αριθμητικής προσομοίωσης και της μεθόδου επίλυσης του προβλήματος.

2.1 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων (FEM)

Η αναλυτική λύση των εξισώσεων με τις οποίες περιγράφονται διάφορα προβλήματα δεν είναι πάντα εφικτή λόγω πολυπλοκότητας του φαινομένου, της γεωμετρίας και των καταπονήσεων. Η ανάγκη επίλυσης τέτοιων σύνθετων προβλημάτων οδήγησε στην ανάπτυξη διαφόρων προσεγγιστικών αριθμητικών μεθόδων επίλυσης. Μια από αυτές τις μεθόδους, με ευρύ πεδίο εφαρμογής, είναι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, η οποία αποτελεί μία εξέλιξη των μητρωϊκών μεθόδων αριθμητικής επίλυσης διαφορικών εξισώσεων.

Αν και η προσεγγιστική επίλυση του μαθηματικού προβλήματος διαφέρει από την αναλυτική, μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα σε ένα μεγάλο εύρος προβλημάτων των φυσικών επιστημών, της μηχανικής και των εφαρμοσμένων μαθηματικών.

Η μέθοδος αυτή ωστόσο, παρουσιάζει το σημαντικό μειονέκτημα αυξημένης υπολογιστικής ισχύος, ειδικά όταν εφαρμόζεται σε σύνθετα μοντέλα. Η ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών τα τελευταία χρόνια έχει βοηθήσει να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα.

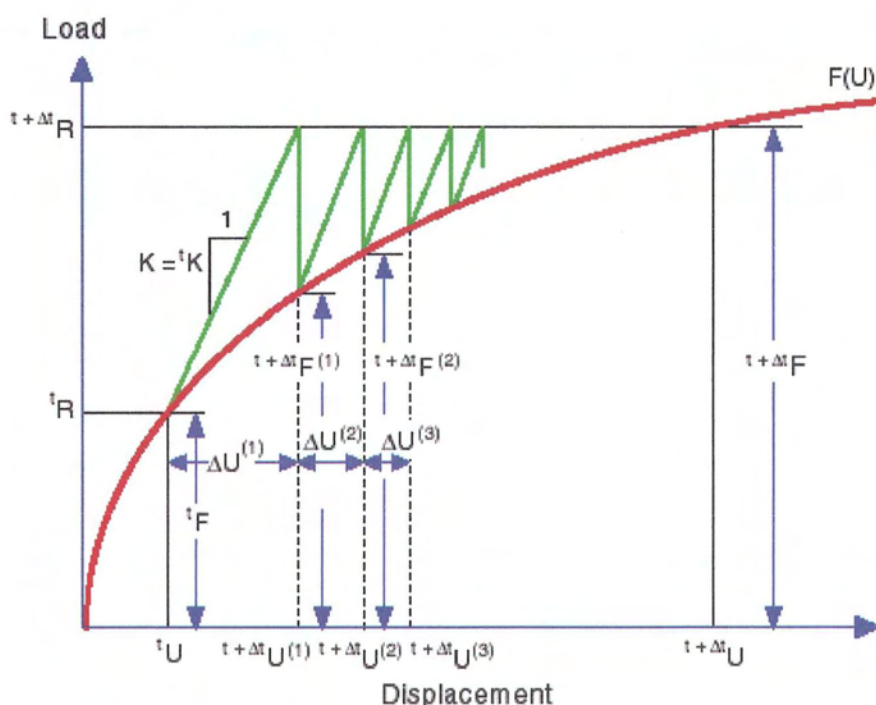
Η εφαρμογή της μεθόδου χωρίζεται στα παρακάτω στάδια:

1. Δημιουργείται το γεωμετρικό προσομοίωμα του προβλήματος.
2. Το γεωμετρικό προσομοίωμα διακριτοποιείται, δηλαδή χωρίζεται σε μικρότερα κομμάτια (πεπερασμένα στοιχεία), τα οποία έχουν συγκεκριμένες γεωμετρικές, μαθηματικές και φυσικές ιδιότητες.
3. Επιβάλλονται οι συνοριακές συνθήκες του προβλήματος.



4. Μορφώνεται το σύστημα εξισώσεων του προβλήματος.
5. Επίλυνται οι εξισώσεις με κάποια προκαθορισμένη μέθοδο αριθμητικής επίλυσης.

Η επίλυση των εξισώσεων γίνεται με τη μέθοδο Newton-Raphson. Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο η επίλυση γίνεται μέσω επαναληπτικών σειρών γραμμικών προσεγγίσεων του προβλήματος, όπου στο τέλος τη κάθε μιας γίνονται διορθώσεις. Η επίλυση χωρίζεται σε βήματα και στο τέλος του κάθε βήματος το σύστημα επίλυσης διαμορφώνεται από την αρχή. Στην εικόνα 1.1 φαίνεται η γραφική αναπαράσταση της μεθόδου, σύμφωνα με την οποία επιτυγχάνεται η επιθυμητή προσέγγιση, ύστερα από έναν αριθμό επαναλήψεων.



Εικόνα 2.9: Σύγκλιση μεθόδου Newton – Raphson

2.2 Μη-γραμμική Ανάλυση

Η γραμμική ελαστική ανάλυση ενός φορέα βασίζεται πάνω σε απλουστευτικές παραδοχές και προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως απλοποιημένους και γρήγορους υπολογισμούς, καθώς και την ισχύ της αρχής της επαλληλίας. Αυτό συνεπάγεται ελάττωση του υπολογιστικού κόστους, ακόμα και για φορείς με σύνθετη γεωμετρία. Η εφαρμογή της προϋποθέτει την γνώση ενός γραμμικά ελαστικού νόμου υλικού, για τον προσδιορισμό του οποίου αρκεί η γνώση του μέτρου ελαστικότητας E και του λόγου του Poisson ν .

Ωστόσο υπάρχουν περιπτώσεις φορέων όπου η θεώρηση γραμμικής ελαστικής συμπεριφοράς δεν είναι ικανή να περιγράψει επακριβώς την πραγματική τους συμπεριφορά. Σε τέτοιες περιπτώσεις γίνεται χρήση μη-γραμμικών μεθόδων επίλυσης, οι οποίες λαμβάνουν υπόψη πιο σύνθετα φαινόμενα και παρέχουν πιο ακριβή αποτελέσματα. Σημαντικό μειονέκτημα της μη-γραμμικής ανάλυσης είναι η σύνθετη περιγραφή του προβλήματος και το αυξημένο υπολογιστικό κόστος.

Υπάρχουν τρεις γενικές περιπτώσεις όπου ένα πρόβλημα απαιτεί την χρήση μη-γραμμικών μεθόδων επίλυσης:

- Μη-γραμμικότητα υλικού
- Γεωμετρική μη-γραμμικότητα
- Μη-γραμμικές συνοριακές συνθήκες

2.2.1 Γεωμετρική μη-γραμμικότητα

Κατασκευές των οποίων η δυσκαμψία εξαρτάται από τις μετατοπίσεις που προκύπτουν κατά τη φόρτισή τους, ορίζονται ως γεωμετρικά μη-γραμμικές. Κατά τη θεώρηση μεγάλων παραμορφώσεων, όταν οι γενικευμένες μετακινήσεις (μετατοπίσεις/στροφές) ενός φορέα είναι μεγάλες, οι εξισώσεις ισορροπίας του μορφώνονται στην παραμορφωμένη κατάσταση. Στη διάρκεια της επίλυσης ενός τέτοιου φορέα, η γεωμετρία του μεταβάλλεται σε κάθε βήμα της ανάλυσης και οι εξισώσεις ισορροπίας ακολουθούν αυτή την αλλαγή, με αποτέλεσμα να καθίστανται μη γραμμικές. Εάν δεν ληφθούν υπόψη τα φαινόμενα γεωμετρικής μη-γραμμικότητας, η υπολογιστική προσομοίωση ίσως αποτύχει να προβλέψει την πραγματική συμπεριφορά ενός φορέα.

2.2.2 Μη-γραμμικότητα υλικού

Η μη-γραμμικότητα υλικού αναφέρεται στην ικανότητα ενός υλικού να παρουσιάζει μια μη-γραμμική σχέση (καταστατικός νόμος) τάσεων-παραμορφώσεων. Συνήθη παραδείγματα μη-γραμμικής συμπεριφοράς υλικού είναι η ελαστοπλαστικότητα, η υπερελαστικότητα, η ρηγμάτωση, καθώς και άλλοι καταστατικοί νόμοι εξαρτώμενοι από την θερμοκρασία ή τον χρόνο, όπως η βισκοελαστικότητα, ή η βισκοπλαστικότητα (ερπυσμός). Η μη-γραμμικότητα υλικών συχνά, αλλά όχι πάντα,

χαρακτηρίζεται από μια σταδιακή μείωση της απόκρισής τους καθώς εφαρμόζεται μια αυξανόμενη δύναμη, εξαιτίας κάποιας μορφής εσωτερικής αποσύνθεσης.

Για την πλήρη περιγραφή της μη-γραμμικής συμπεριφοράς ενός υλικού είναι απαραίτητη η υιοθέτηση ενός κριτηρίου διαρροής, ενός νόμου ροής και ενός νόμου κράτυνσης (Bathe 1996).

Το κριτήριο διαρροής ενός υλικού καθορίζει το τέλος της ελαστικής περιοχής και την αρχή της διαρροής, αλλά όχι την συμπεριφορά μετά από αυτό το σημείο. Το πιο διαδεδομένο κριτήριο διαρροής για τον χάλυβα είναι το κριτήριο von Mises, σύμφωνα με το οποίο προκύπτει μια μονοδιάστατη ισοδύναμη τάση σ_e , ίση με:

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (2.1)$$

Όπου: $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ είναι οι κύριες τάσεις στις τρεις διευθύνσεις

Το υλικό θεωρείται ότι διαρρέει όταν η ισοδύναμη τάση υπερβεί την τάση διαρροής του εκάστοτε υλικού.

Η συμπεριφορά του υλικού μετά τη διαρροή καθορίζεται μέσω του νόμου ροής, ο οποίος συσχετίζει τη μικροαύξηση των τάσεων με τη μικροαύξηση της πλαστικής παραμόρφωσης στην ανελαστική περιοχή.

Ο νόμος κράτυνσης περιγράφει την αύξηση της αντοχής ενός υλικού, με την αύξηση της πλαστικής παραμόρφωσης. περιγράφει πώς μεταβάλλεται το αρχικό κριτήριο διαρροής με τις διαδοχικές πλαστικές παραμορφώσεις και πώς μεταβάλλεται η επιφάνεια διαρροής με την πλαστική ροή. Ακόμη, προσδιορίζει τις συνθήκες διαρροής του υλικού στην περίπτωση αναστροφής της φόρτισης. [10]

2.2.3 Μη-γραμμικές συνοριακές συνθήκες

Κατά την διάρκεια φόρτισης μίας κατασκευής/συνδεσμολογίας, μπορεί να αναπτυχθεί ή να χαθεί επαφή μεταξύ δύο ή περισσότερων σωμάτων αυτής, καθώς και μεταξύ διαφορετικών σημείων του ίδιου σώματος. Η αναπτυσσόμενη επαφή μπορεί να συνοδεύεται από την ανάπτυξη, ή μη, τριβής. Αυτή η μεταβολή των συνθηκών επαφής μεταξύ δύο σωμάτων ή δύο τμημάτων του ίδιου σώματος είναι μία συνήθης πηγή μη-γραμμικότητας σε πολλά προβλήματα της πράξης (Cook 1995, Bathe 1996).

Τυπικά παραδείγματα αποτελούν οι κοχλιωτές συνδέσεις, τα οδοντωτά γρανάζια και διάφορες μορφές μηχανισμών σφράγισης.

2.3 Αριθμητική προσομοίωση κοχλιωτής σύνδεσης

Στην εργασία αυτή γίνεται η προσομοίωση της διαδικασίας προέντασης μίας κοχλιωτής σύνδεσης. Τα μοντέλα που δημιουργήθηκαν αποτελούνται από έναν κοχλία και το αντίστοιχο περικόχλιο, δύο παξιμάδια και δύο τμήματα πλακών. Η γεωμετρία των σωμάτων της σύνδεσης σχεδιάστηκε με τη βοήθεια του λογισμικού SolidWorks 2013,[11]. Τα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά των μοντέλων επιλέχθηκαν σύμφωνα με τις αντίστοιχες διατάξεις του DIN.

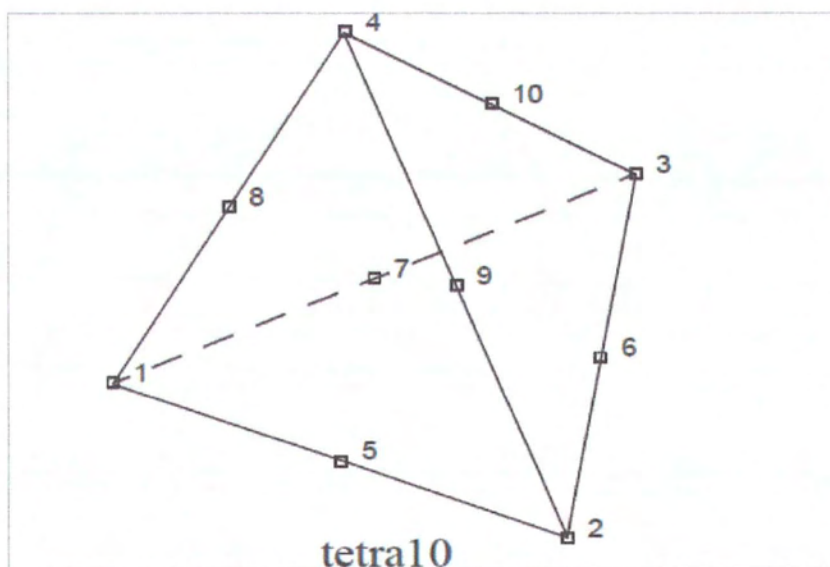
Κατά τη διαδικασία διακριτοποίησης των μοντέλων, προκειμένου να αναπαρασταθούν επακριβώς οι καμπύλες των τμημάτων της σύνδεσης χωρίς στρέβλωση της γεωμετρίας τους, απαιτούνταν μεγάλος αριθμός πεπερασμένων στοιχείων. Μεγάλος αριθμός πεπερασμένων στοιχείων ωστόσο, επιβαρύνει την διαδικασία διακριτοποίησης και ανάλυσης, καθώς ταυτόχρονα αυξάνει τον χρόνο επίλυσης. Για λόγους λοιπόν εξοικονόμησης υπολογιστικού χρόνου και όγκου, αλλά και ευχέρειας ανάγνωσης των αποτελεσμάτων, το μοντέλο έχει σχεδιαστεί με μικρές διαφοροποιήσεις, για τις οποίες κρίθηκε ότι δεν επηρεάζουν σημαντικά τα αποτελέσματα. Οι τροποποιήσεις αυτές και η επιρροή τους στα αποτελέσματα της ανάλυσης αναφέρονται στη συνέχεια.

2.3.1 Διακριτοποίηση

Τα διάφορα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν αποτελούνται από σώματα τριών διαστάσεων, για τη διακριτοποίηση των οποίων επιλέχθηκαν τρισδιάστατα τετραεδρικά πεπερασμένα στοιχεία τυχαίας γεωμετρίας τύπου tetra10 (εικόνα 2.2). Τα στοιχεία αυτά έχουν δέκα συνολικά κόμβους το καθένα, από έναν σε κάθε κορυφή του τετράεδρου και έξι επιπλέον, έναν στο μέσο κάθε ακμής. Οι ενδιάμεσοι κόμβοι δίνουν τη δυνατότητα για πιο ακριβή αποτελέσματα σε σχέση με τα αντίστοιχα στοιχεία tetra4. Ο κάθε ένας από αυτούς τους κόμβους διαθέτει τρεις μεταφορικούς και τρεις στροφικούς βαθμούς ελευθερίας, έναν για κάθε δυνατή διεύθυνση (x,y,z).

Η ακανόνιστη γεωμετρία αυτών των πεπερασμένων στοιχείων, η οποία επιλέγεται κατά τη διάρκεια της διακριτοποίησης σύμφωνα με συγκεκριμένους αλγόριθμους,

είναι και ο λόγος για τον οποίο δεν μπορεί να αναπαρασταθεί επακριβώς η γεωμετρία σωμάτων με καμπύλα τμήματα, όπως πχ το σπείρωμα.



Εικόνα 2.2: Γεωμετρία πεπερασμένων στοιχείων τύπου tetra10

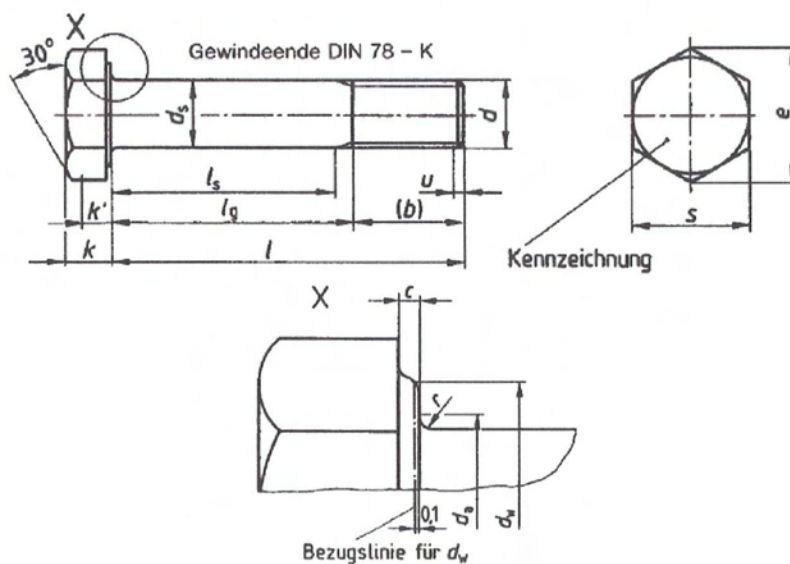
Η διακριτοποίηση της γεωμετρίας του μοντέλου πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό MSC Patran, [12]. Στόχοι της διακριτοποίησης αποτέλεσαν η αναπαράσταση των μελών του μοντέλου χωρίς την αλλοίωση της γεωμετρίας τους, αριθμός και μέγεθος στοιχείων ικανός να παρέχει αξιόπιστα αποτελέσματα χωρίς δυσανάλογο υπολογιστικό και χρονικό κόστος. Έτσι, ανάλογα με την πολυπλοκότητα της γεωμετρίας του κάθε τμήματος και με την επιθυμητή ακρίβεια αποτελεσμάτων της κάθε περιοχής επιλέχθηκαν διαφορετικά χαρακτηριστικά διακριτοποίησης. Κατά αυτόν τον τρόπο χρησιμοποιήθηκε διαφορετικό μέγιστο μήκος πλευράς πεπερασμένων στοιχείων σε κάθε μέλος, αλλά και από περιοχή σε περιοχή του ίδιου μέλους. Ως μέγιστο μέγεθος στοιχείου επιλέχθηκε για κάθε μέλος η ελάχιστη διάσταση αυτού. Στον πίνακα 2.1 δίνονται τα διάφορα σώματα της σύνδεσης και στοιχεία της διακριτοποίησής τους.

Πίνακας 2.1: Διακριτοποίηση

Σώμα		στοιχεία	κόμβοι
Κοχλίας	Μοντέλο α	29707	9642
	Μοντέλο β	27089	11206
Πλάκα	Μοντέλο α	1771	1512
	Μοντέλο β	2438	2000
	Μοντέλο γ	2952	2084
Περικόχλιο	Μοντέλο α	48466	28176
	Μοντέλο β	22862	10348
Ροδέλα	Μοντέλο	1555	1980

2.3.2 Κοχλίας

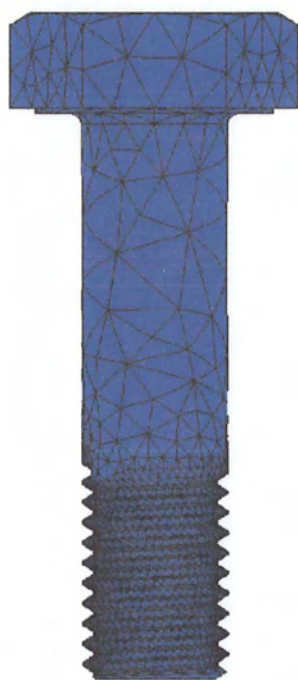
Ο κοχλίας είναι κατηγορίας M24 σύμφωνα με τις κατασκευαστικές λεπτομέρειες του DIN 6914,[13]. Χαρακτηριστική εικόνα στην οποία φαίνονται οι κατασκευαστικές λεπτομέρειες του κοχλίου είναι η 2.3. Στον Πίνακα 2.2 δίνονται οι τιμές των παραμέτρων της εικόνας 2.3.



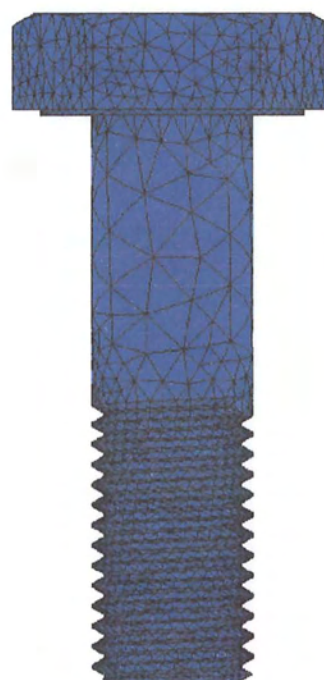
Εικόνα 2.3: Κατασκευαστική λεπτομέρεια κοχλίου M24 βάσει του DIN 6914

Πίνακας 2.2: Τιμές παραμέτρων κοχλία M24

		Κεφαλή				
Παράμετρος	s	e	k	c	r_{min}	d_{wmin}
DIN6914	41	47.34	15	0.8	1.5	39
Μοντέλο α	41	47.34	15	0.8	1.5	39
Μοντέλο β	41	47.34	15	0.8	0	39
		Σώμα				
Παράμετρος	d	l	l_{gmax}	l_{smin}	b_{min}	l_k
DIN6914	24	90	53	44	34	52-53
Μοντέλο α	24	84	53	53	31	52
Μοντέλο β	24	84	43	43	41	52

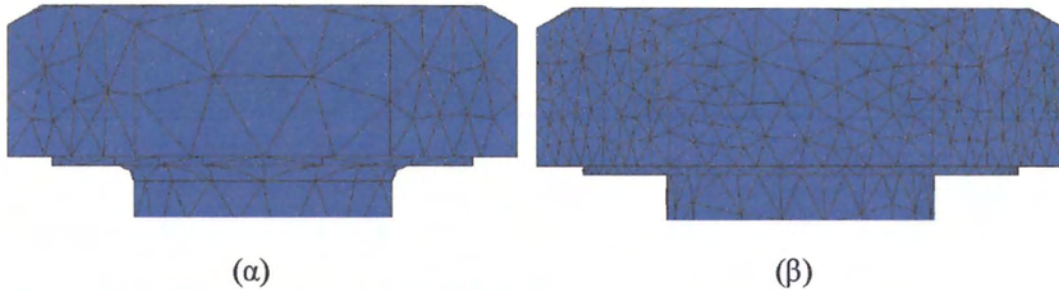


(α)



(β)

Εικόνα 2.4: Κοχλίας

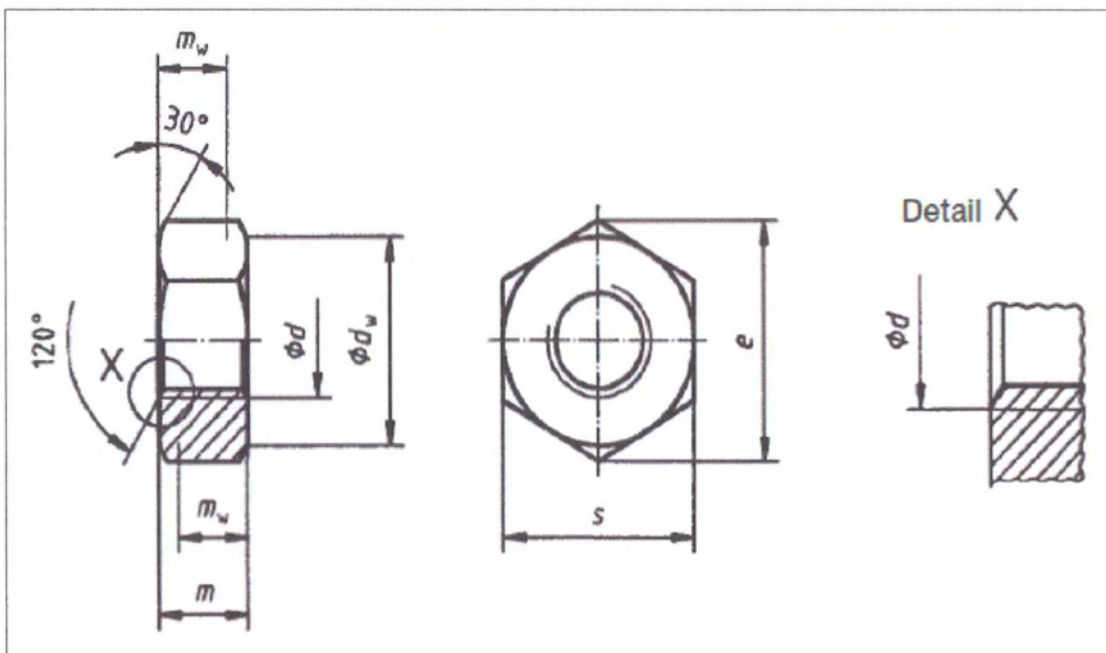


Εικόνα 2.5: Λεπτομέρεια κεφαλής του κοχλία

Για λόγους οικονομίας υπολογιστικού όγκου και χρόνου, το σώμα του κοχλία τροποποιήθηκε κατά το μήκος του. Πιο συγκεκριμένα, θεωρήθηκε ότι $l_g=l_s=53\text{mm}$, δηλαδή ότι το σπείρωμα του κοχλία διακόπτεται απότομα χωρίς την ύπαρξη μεταβατικού τμήματος βαθμιαίας αύξησης της διαμέτρου της έλικας οδηγού. Επιπρόσθετα αφαιρέθηκαν 6mm από το μήκος του σπειρώματος το οποίο προεξέχει του περικοχλίου και δεν θεωρήθηκε μεταβατικό τμήμα u , καθώς τα στοιχεία αυτά δεν επηρεάζουν την συμπεριφορά του μοντέλου.

2.3.3 Περικόχλιο

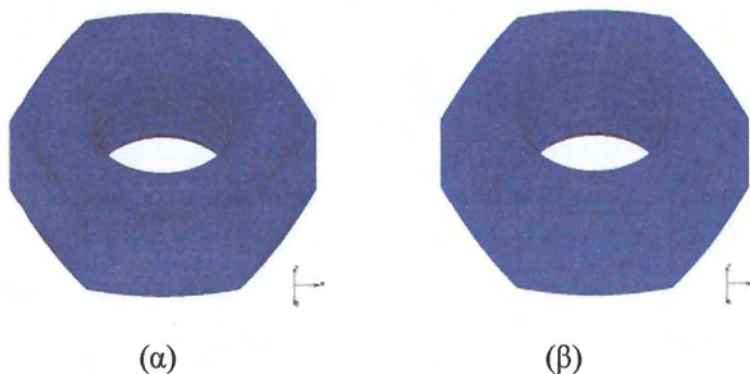
Το περικόχλιο σχεδιάστηκε σύμφωνα με το DIN 6915, [14]. Στην εικόνα 2.6 φαίνονται οι κατασκευαστικές λεπτομέρειες του περικοχλίου, ενώ οι τιμές τους δίνονται στον πίνακα 2.3 .



Εικόνα 2.6: Κατασκευαστικές λεπτομέρειες περικοχλίου βάσει του DIN 6915

Πίνακας 2.3: Τιμές παραμέτρων κοχλία M24

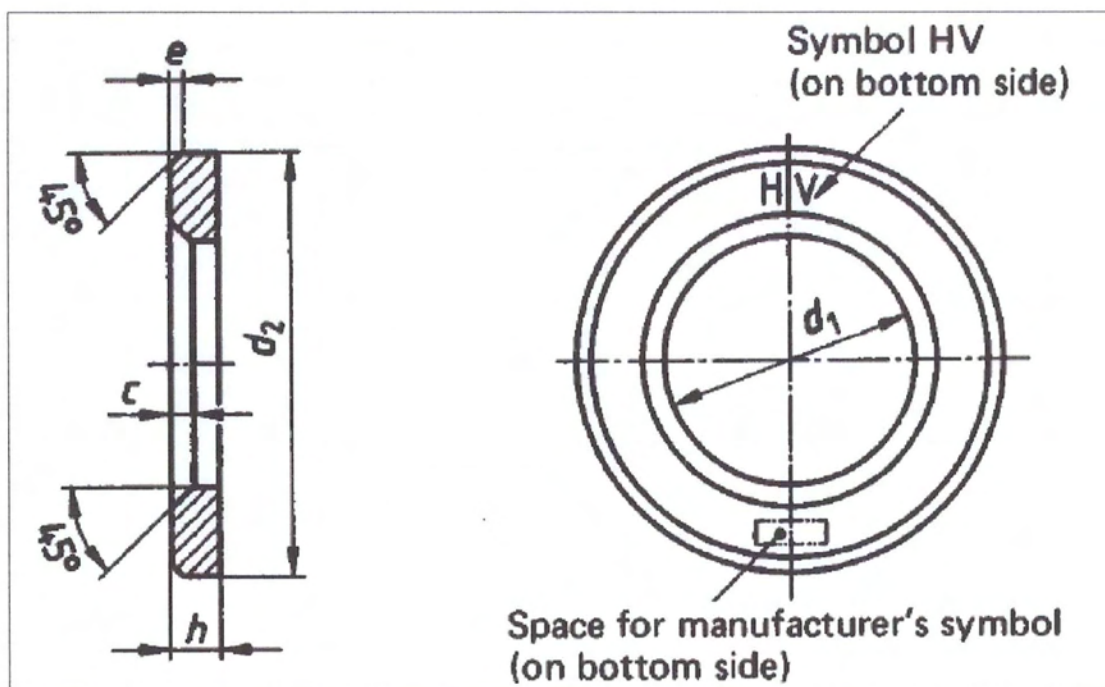
Παράμετρος	s	e	m	m _{wmin}	d	d _{wmin}
DIN6914	41	47.34	20	14.96	24	39
Μοντέλο	41	47.34	20	17.19	24	41



Εικόνα 2.7: Περικόχλιο

2.3.4 Ροδέλες

Οι ροδέλες σχεδιάστηκαν σύμφωνα με το DIN 6916, [15]. Στην εικόνα 2.8 φαίνονται οι κατασκευαστικές λεπτομέρειες, ενώ οι τιμές τους δίνονται στον πίνακα 2.4.



Εικόνα 2.8: Κατασκευαστικές λεπτομέρειες ροδέλας βάσει του DIN 6915

Πίνακας 2.4: Τιμές παραμέτρων ροδέλας

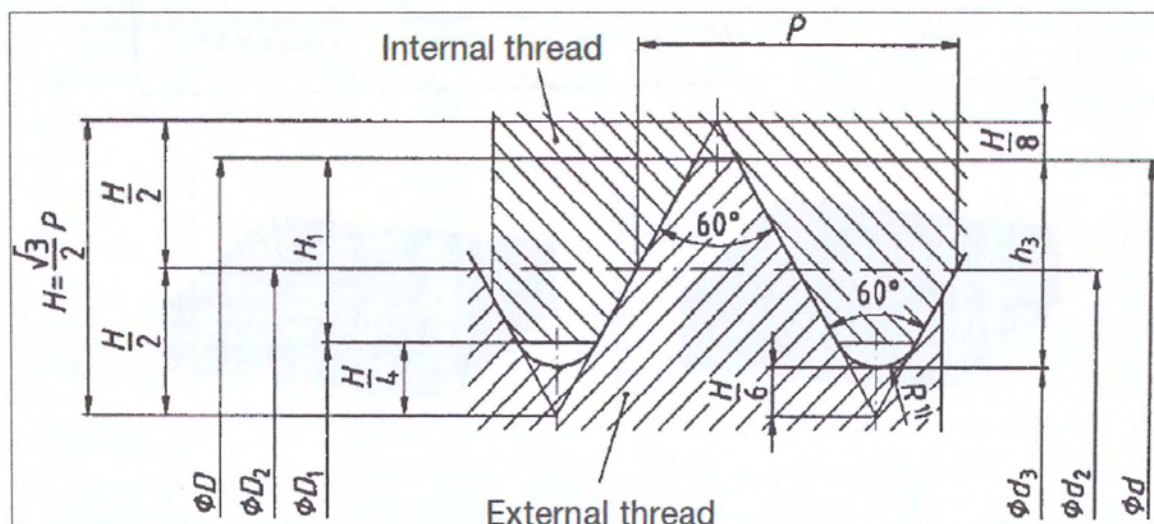
Παράμετρος	d_{1nom}	d_{2nom}	h_{nom}	c_{nom}	e
DIN6916	25	44	4	2	1
Μοντέλο	25	44	4	2	1



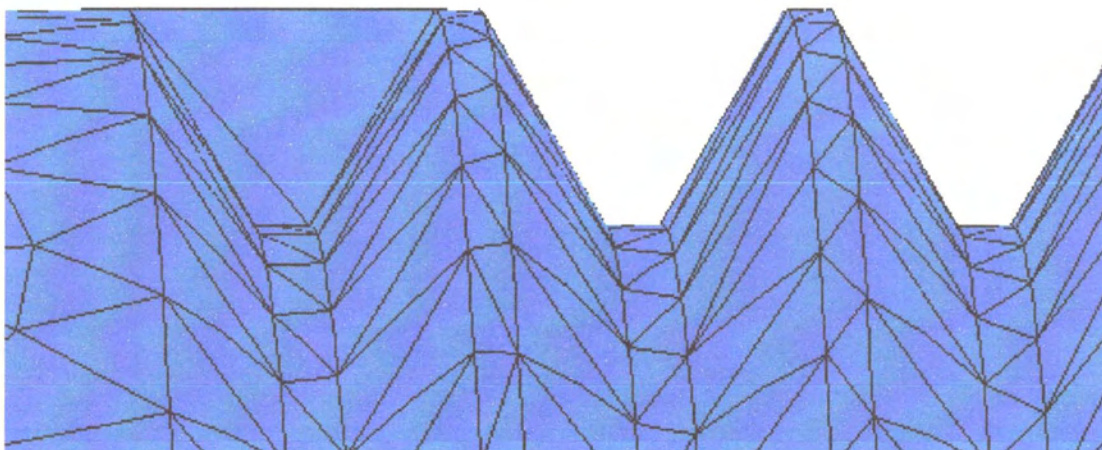
Εικόνα 2.9: Ροδέλα

2.3.5 Σπειρώμα

Το σπείρωμα σχεδιάστηκε σύμφωνα με το DIN 13.1, [16], παράλληλα με ορισμένες τροποποιήσεις. Στην εικόνα 2.10 φαίνονται οι κατασκευαστικές λεπτομέρειες κατά DIN 13.1, ενώ στην εικόνα 2.11 φαίνεται το προφίλ του σπειρώματος που χρησιμοποιήθηκε στο μοντέλο. Στο νέο προφίλ δεν υπάρχει το ημικυκλικό τμήμα που ορίζει τον πόδα του σπειρώματος και ότι αυτό αντικαθίσταται από αντίστοιχο γραμμικό. Η τροποποίηση έγινε για ευχέρεια διακριτοποίησης, καθώς κατά την διακριτοποίηση του μοντέλου τα καμπύλα τμήματα απαιτούν αυξημένο αριθμό πεπερασμένων στοιχείων για να μην αλλοιωθεί η γεωμετρία του σώματος, με συνέπεια ασύμφορη σχέση αριθμού στοιχείων – υπολογιστικού κόστους.



Εικόνα 2.10: Κατασκευαστικές λεπτομέρειες σπειρώματος βάσει του DIN 13.1



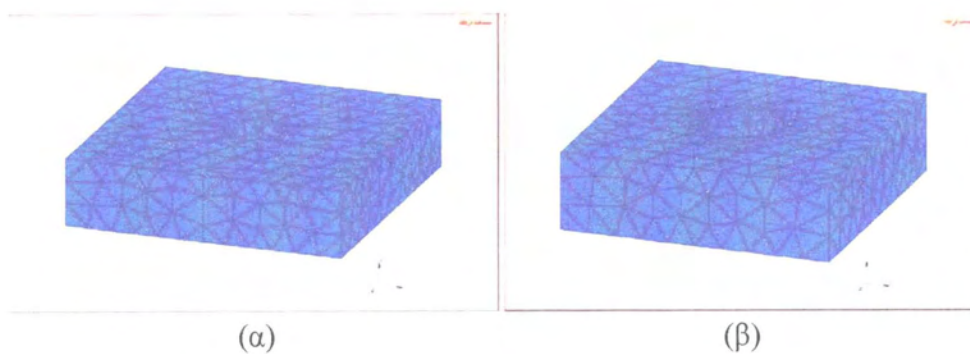
Εικόνα 2.11: Λεπτομέρεια σπειρώματος

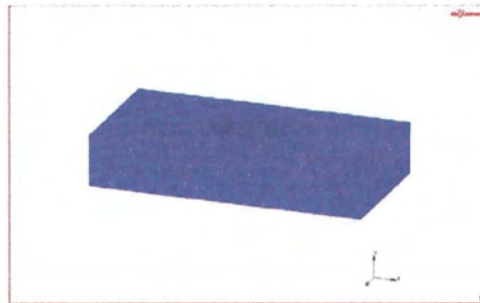
2.3.6 Πλάκες

Στο μοντέλο εμπεριέχονται τμήματα δύο πλακών, τα οποία υποβάλλονται σε σύνθλιψη, μέσω του προεντεινόμενου κοχλία. Στον Πίνακα 2.5 φαίνονται οι διαστάσεις σε mm των διάφορων πλακών που χρησιμοποιήθηκαν για τις ανάγκες των αναλύσεων.

Πίνακας 2.5: Διαστάσεις πλακών

Διάσταση (mm)	X	Y	Z	Διάμετρος οπής d
Μοντέλο α	120	30	120	25
Μοντέλο β	90	26	90	26
Μοντέλο γ	160	30	80	25



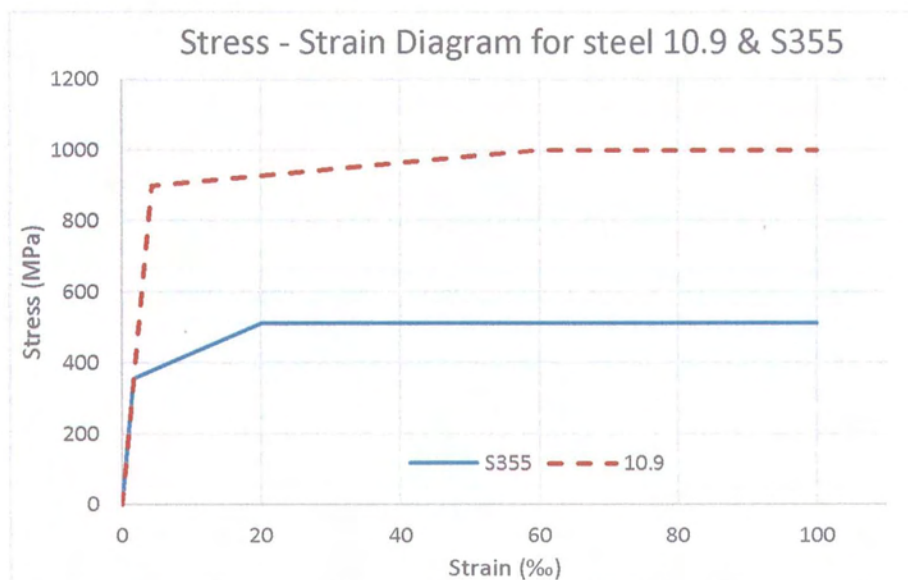


(γ)

Εικόνα 2.12: Πλάκες

2.4 Ιδιότητες Υλικών

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν είναι χάλυβας τύπου 10.9 για όλα τα μέρη της κοχλιωτής σύνδεσης, πλην των πλακών, όπου επιλέχθηκε χάλυβας S355. Το μέτρο ελαστικότητας (E) και ο λόγος Poisson (ν), επιλέχθηκαν ίδια και για τις δύο κατηγορίες και ίσα με 210 GPa και 0.3 αντίστοιχα. Τα διαγράμματα τάσεων – τροπών για κάθε υλικό δίνονται στην εικόνα 2.13.



Εικόνα 10.13: Διάγραμμα τάσεων – τροπών των υλικών της σύνδεσης

2.5 Επαφή και Τριβή

Η προένταση είναι μία διαδικασία που εξαρτάται άμεσα από την επαφή και κατ' επέκταση τη τριβή μεταξύ των διαφόρων τμημάτων της σύνδεσης. Τόσο η ροπή σύσφιγξης, η δύναμη προέντασης όσο και η σταθερότητα της σύνδεσης εξαρτώνται από την αλληλεπίδραση των σωμάτων που έρχονται σε επαφή όπως π.χ. ο

συντελεστής τριβής και η κατάσταση της επιφανείας τους. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας εξετάστηκαν περιπτώσεις διαφόρων συντελεστών τριβής, αλλά και η περίπτωση μηδενικού συντελεστή.

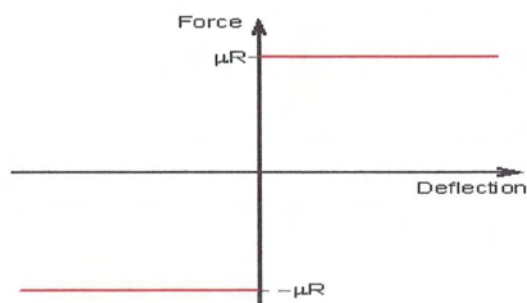
2.5.1 Επαφή

Τα μέλη των μοντέλων ορίστηκαν ως παραμορφώσιμα σώματα (deformable) σε επαφή (touching). Αυτό σημαίνει ότι κατά τη διάρκεια της επίλυσης, σε περίπτωση που ο κόμβος ενός σώματος έρθει σε επαφή με ένα άλλο σώμα, αυτός συγκρατείται στη κάθετη ως προς το σώμα επαφής διεύθυνση με ταυτόχρονη παραμόρφωση των δύο σωμάτων.

Η επαφή μεταξύ δύο σωμάτων ορίστηκε να πραγματοποιείται με τη μέθοδο “node to segment”, όπου το πρόγραμμα ελέγχει για κάθε κόμβο την απόσταση μεταξύ αυτού και των στοιχείων ενός σώματος. Άμα η απόσταση αυτή είναι μικρότερη από μία προκαθορισμένη τιμή τα σώματα θεωρούνται ότι βρίσκονται σε επαφή. Ο έλεγχος επαφής μεταξύ δύο σωμάτων πραγματοποιείται είτε αμφίπλευρα (double – sided), ελέγχοντας και τα δύο σώματα το ένα ως προς το άλλο, είτε μονόπλευρα (single – sided), ελέγχοντας μόνο για το ένα από αυτά σε σχέση με το δεύτερο. Σε κάθε περίπτωση, η διαδικασία ανίχνευσης επαφής πραγματοποιείται για κάθε κόμβο κάθε σώματος και σε κάθε διαφορετικό βήμα της ανάλυσης.

2.5.2 Τριβή

Ο νόμος τριβής που θεωρήθηκε ότι υπακούει το φαινόμενο, είναι ο νόμος Coulomb. Σύμφωνα με τον νόμο Coulomb, η τριβή αναπτύσσεται από τη σχετική μετατόπιση δύο επιφανειών σε επαφή όπου η μία πιέζει την άλλη, ενώ δεν εξαρτάται από την ταχύτητα ολίσθησης αυτών (εικόνα 2.14).



Εικόνα 2.14: Νόμος τριβής Coulomb

2.6 Μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων

2.6.1 Περιγραφή Διαδικασίας

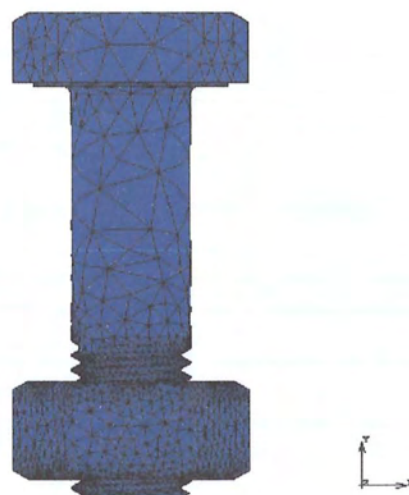
Στα πλαίσια αυτής της εργασίας διερευνήθηκαν οι διαδικασίες προέντασης και διάτμησης ενός μεμονωμένου κοχλία στο ευρύτερο πλαίσιο μιας κοχλιωτής σύνδεσης. Η κοχλιωτή σύνδεση εξετάστηκε σε εφελκυσμό, σε διάτμηση και σε συνδυασμό διάτμησης εφελκυσμού. Επίσης διερευνήθηκε η επιρροή του συντελεστή τριβής στη προένταση του κοχλία, καθώς και η επιρροή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του κοχλία στην απόκριση της κοχλιωτής σύνδεσης.

Πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις σε τέσσερα διαφορετικά μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων τα οποία παρουσιάζονται στη συνέχεια. Το μοντέλο 1 χρησιμοποιήθηκε για την μελέτη της συμπεριφοράς ενός μεμονωμένου κοχλία σε εφελκυσμό. Το μοντέλο 2 προσομοιώνει μια κοχλιωτή σύνδεση τμημάτων δύο πλακών. Εξετάστηκε η διαδικασία προέντασης της σύνδεσης και η διάτμησή της χωρίς προένταση ξεχωριστά. Το μοντέλο 3 αποτελείται από έναν κοχλία και τμήματα δύο πλακών και χρησιμοποιήθηκε για την απλουστευτική προσομοίωση προέντασης στη συνέχεια διάτμησης της σύνδεσης. Τέλος το μοντέλο 4 αποτελείται από το σύστημα κοχλία – περικοχλίου, τμήματα πλακών και ροδέλες και χρησιμοποιήθηκε για την ακριβή προσομοίωση της διάτμησης της προεντεταμένης σύνδεσης.

2.7 Μοντέλο 1. Κοχλίας – Περικόχλιο

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 1, ο σχεδιασμός των κοχλιωτών συνδέσεων μεταλλικών κατασκευών εξαρτάται από τον τρόπο καταπόνησης των κοχλιών τους. Αναλύθηκαν οι περιπτώσεις φόρτισης αξονικής φόρτισης του κοχλία σε “καθαρό εφελκυσμό” (direct tension) και “σύσφιγξης – εφελκυσμού” (torqued tension).

Το μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για την κατανόηση της συμπεριφοράς του κοχλία σε εφελκυσμό ανάλογα με τον τρόπο καταπόνησης του, και αποτέλεσε μια απλουστευτική προσέγγιση της διαδικασίας προέντασης. Στις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν διερευνήθηκε επίσης η επίδραση του συντελεστή τριβής “μ” στη συμπεριφορά του κοχλία.



Εικόνα 2.15: Μοντέλο 1, Κοχλία – Περικοχλίου

2.7.1 Συνοριακές συνθήκες

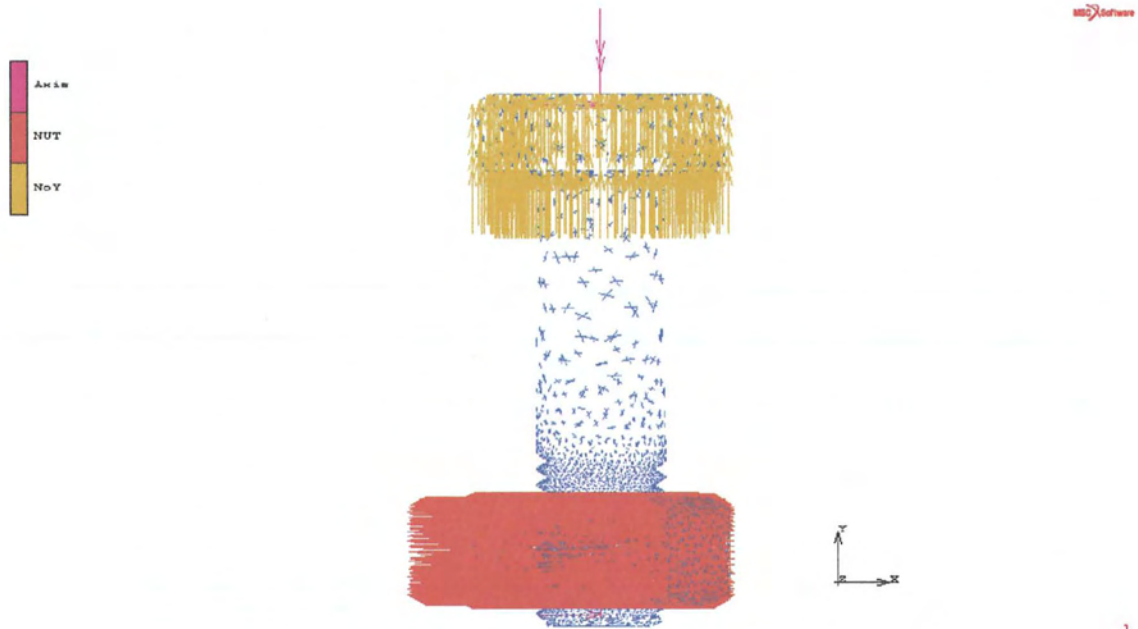
Η κατάσταση καθαρού εφελκυσμού (direct tension) προσομοιώθηκε δεσμεύοντας την μετατόπιση του περικοχλίου και εφαρμόζοντας γραμμικά αυξανόμενη με το χρόνο ανάλυσης, κατακόρυφη μετατόπιση στη κεφαλή του κοχλία.

Η κατάσταση σύσφιγξης – εφελκυσμού (torqued tension) προσομοιώθηκε δεσμεύοντας με παρόμοιο τρόπο το περικόχλιο, δεσμεύοντας την κατακόρυφη μετατόπιση της κεφαλής του κοχλία και εφαρμόζοντας σε αυτή στροφή γραμμικά αυξανόμενη με τον χρόνο ανάλυσης.

Οι συνοριακές συνθήκες του μοντέλου παρατίθενται περιγραφικά στον πίνακα 2.6 και γραφικά στην εικόνα 2.16.

Πίνακας 2.6: Συνοριακές συνθήκες

	Direct Tension	Torqued Tension
Κεφαλή κοχλία	Μετατόπιση 2mm κατά τη θετική φορά του άξονα του κοχλία y'y, γραμμικά αυξανόμενη με τον χρόνο ανάλυσης.	Αρνητική στροφή 240° γύρω από τον άξονα του κοχλία y'y, γραμμικά αυξανόμενη με τον χρόνο ανάλυσης . Δέσμευση κατακόρυφης μετατόπισης (y).
Περικόχλιο	Δέσμευση κατακόρυφης μετατόπισης (y) των κόμβων της άνω επιφάνειας.	
	Δέσμευση της οριζόντιας μετατόπισης (x, z) των κόμβων των πλευρικών επιφανειών	



Εικόνα 2.16: Συνοριακές συνθήκες μοντέλου 1

2.7.2 Ρυθμίσεις επαφής σωμάτων

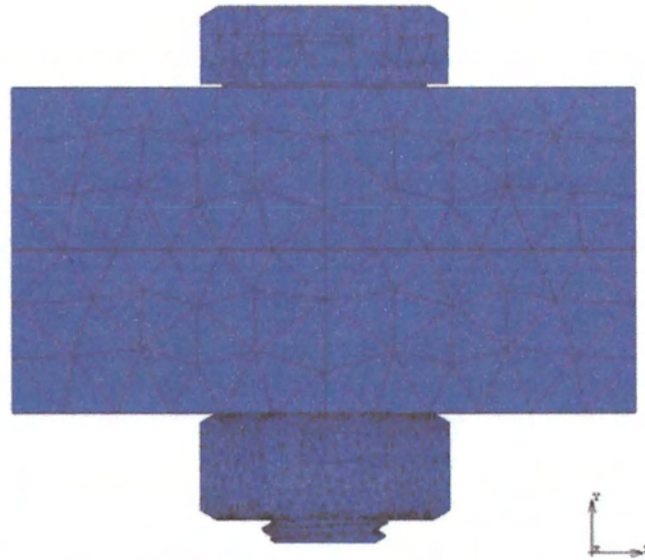
Στον Πίνακα 2.7 δίνονται οι ρυθμίσεις επαφής μεταξύ των δύο σωμάτων (κοχλίας και περικόχλιο). Τα σώματα ορίστηκαν ως παραμορφώσιμα σώματα (deformable) σε επαφή (touching) και επιλέχθηκε αμφίπλευρη (double – sided) ανίχνευση επαφής.

Πίνακας 2.7: Ρυθμίσεις επαφής κοχλία – περικόχλιου

CONTACT TABLE PROPERTIES				SECOND	
FIRST		BODY NAME	BODY TYPE	1	2
	1	BOLTcontact	deformable	T	T
	2	NUTcontact2	deformable	T	T

2.8 Μοντέλο 2. Κοχλίας – Περικόχλιο – Πλάκες

Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση μιας κοχλιωτής σύνδεσης τμήματος δύο πλακών. Αναλύθηκε η περίπτωση η σύνδεση σε προένταση και σε διάτμηση χωρίς αρχική προένταση.



Εικόνα 2.17: Μοντέλο 2, Κοχλία – Περικοχλίου - Πλακών

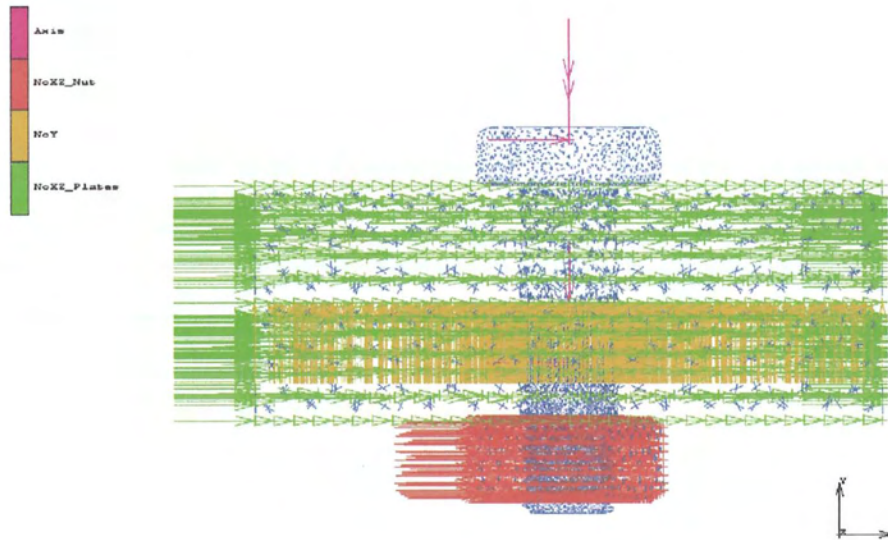
2.8.1 Προένταση Κοχλία

2.8.1.1 Συνοριακές συνθήκες

Το μοντέλο δεσμεύτηκε κατά την κατακόρυφη διεύθυνση, απαγορεύοντας την μετατόπιση στη διεπιφάνεια των πλακών. Περιορίστηκε η πλευρική μετατόπιση πλακών και περικοχλίου και συσφίχτηκε ο κοχλίας, εφαρμόζοντας στροφή στη κεφαλή του. Οι συνοριακές συνθήκες του μοντέλου για την ανάλυση προέντασης παρατίθενται περιγραφικά στον πίνακα 2.8 και γραφικά στην εικόνα 2.18.

Πίνακας 2.8: Συνοριακές συνθήκες

Κεφαλή κοχλία	Αρνητική στροφή 240° γύρω από τον άξονα του κοχλίου $y'y$, γραμμικά αυξανόμενη με τον χρόνο ανάλυσης .
Περικόχλιο	Δέσμευση της οριζόντιας μετατόπισης (x,z) των κόμβων των πλευρικών επιφανειών.
Πλάκες	Δέσμευση της οριζόντιας μετατόπισης (x,z) των κόμβων των πλευρικών επιφανειών.
	Δέσμευση της κατακόρυφης μετατόπισης (y) των κόμβων της κάτω επιφάνειας της άνω πλάκας.



Εικόνα 2.18: Συνοριακές συνθήκες μοντέλου 2 - Προένταση

2.8.1.2 Ρυθμίσεις επαφής σωμάτων

Στον Πίνακα 2.9 δίνονται οι ρυθμίσεις επαφής μεταξύ των σωμάτων (κοχλίας, περικόχλιο και δύο πλάκες). Τα σώματα ορίστηκαν ως παραμορφώσιμα (deformable) σώματα σε επαφή (touching) και επιλέχθηκε αμφίπλευρη (double – sided) ανίχνευση επαφής.

Πίνακας 2.9: Ρυθμίσεις επαφής κοχλία-περικόχλιου-πλακών

CONTACT TABLE PROPERTIES				SECOND			
FIRST		BODY NAME	BODY TYPE	1	2	3	4
	1	BOLT	deformable	T	T	T	T
	2	NUT	deformable	T	T	T	T
	3	PLATE_UP	deformable	T	T	T	T
	4	PLATE_DOWN	deformable	T	T	T	T

2.8.2 Διάτμηση σε μη προεντεταμένο κοχλία

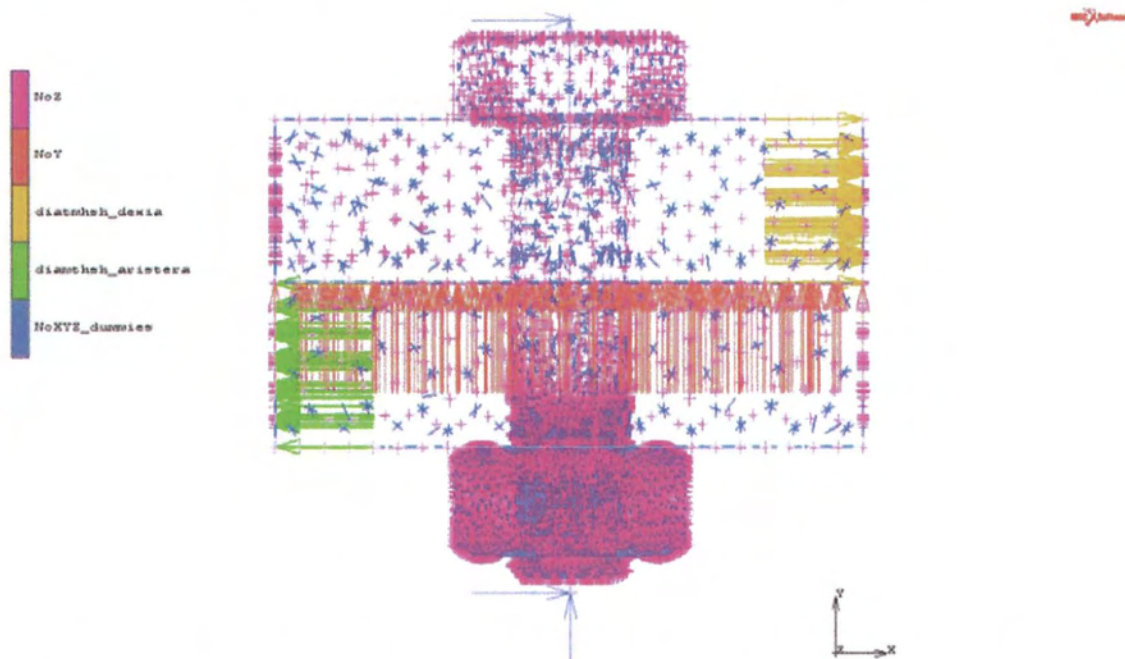
2.8.2.1 Συνοριακές συνθήκες

Στη περίπτωση καταπόνησης του σε διάτμηση, το μοντέλο δεσμεύτηκε στην κατακόρυφη διεύθυνση στην διεπιφάνεια των πλακών. Επίσης όλα τα σώματα δεσμεύτηκαν στην οριζόντια διεύθυνση “z”. Η διάτμηση επιβλήθηκε εφαρμόζοντας μετατόπιση, στα άκρα των δύο πλακών. Οι συνοριακές συνθήκες του μοντέλου για

την ανάλυση διάτμησης παρατίθενται περιγραφικά στον πίνακα 2.10 και γραφικά στην εικόνα 2.19.

Πίνακας 2.10: Συνοριακές συνθήκες

Περικόχλιο		Δέσμευση της οριζόντιας πλευρικής μετατόπισης "z" των κόμβων των πλευρικών επιφανειών.
Πλάκες	άνω	Δέσμευση της οριζόντιας πλευρικής μετατόπισης "z" των κόμβων των πλευρικών επιφανειών.
		Δέσμευση της κατακόρυφης μετατόπισης (y) των κόμβων της κάτω επιφάνειας.
		Οριζόντια μετατόπιση 3mm των κόμβων της δεξιάς επιφάνειας κατά x', γραμμικά αυξανόμενη με τον χρόνο ανάλυσης. Εφαρμογή μετά το πέρας της επιμήκυνσης του κοχλία.
	κάτω	Δέσμευση της οριζόντιας πλευρικής μετατόπισης "z" των κόμβων των πλευρικών επιφανειών.
		Οριζόντια αρνητική μετατόπιση 3mm των κόμβων της αριστερής επιφάνειας κατά x', γραμμικά αυξανόμενη με τον χρόνο ανάλυσης. Εφαρμογή μετά το πέρας της επιμήκυνσης του κοχλία.



Εικόνα 2.19: Συνοριακές συνθήκες μοντέλου 2 - Διάτμηση χωρίς προένταση

2.8.2.2 Ρυθμίσεις επαφής σωμάτων

Στον Πίνακα 2.11 δίνονται οι ρυθμίσεις επαφής μεταξύ των δύο σωμάτων (κοχλίας, περικόχλιο και δύο πλάκες). Τα σώματα ορίστηκαν ως παραμορφώσιμα (deformable)

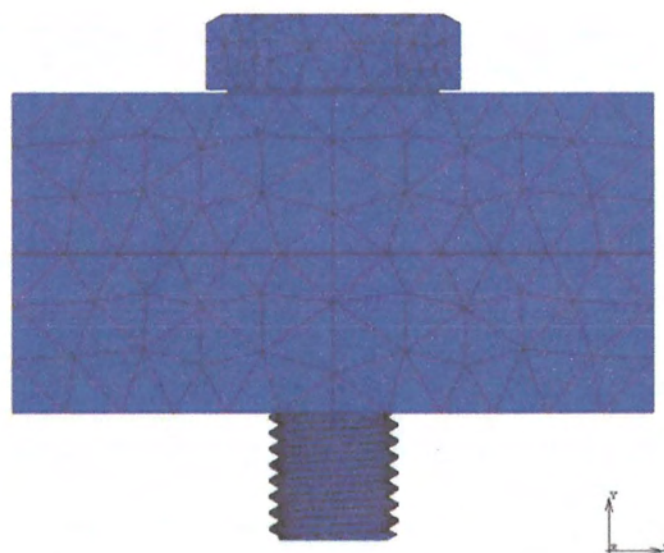
σώματα σε επαφή (touching) και επιλέχθηκε αμφίπλευρη (double – sided) ανίχνευση επαφής.

Πίνακας 2.11: Επαφή σωμάτων μοντέλου 2

CONTACT TABLE PROPERTIES			SECOND			
FIRST	BODY NAME	BODY TYPE	1	2	3	4
1	BOLT	deformable	T	T	T	T
2	NUT	deformable	T	T	T	T
3	PLATE_UP	deformable	T	T	T	T
4	PLATE_DOWN	deformable	T	T	T	T

2.9 Μοντέλο 3. Κοχλίας – πλάκες

Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιήθηκε ως μία πρώτη απλουστευτική προσέγγιση της ανάλυσης της σύνδεσης σε διάτμηση υπό προένταση.



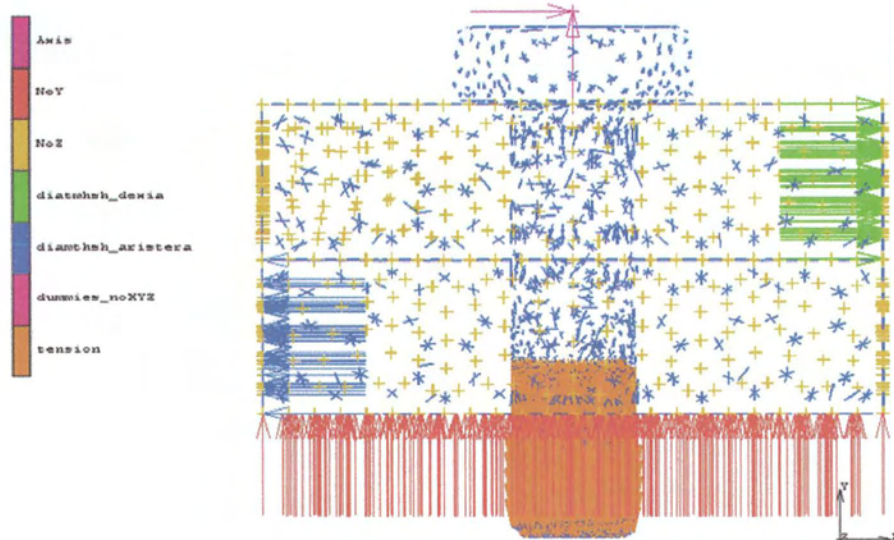
Εικόνα 2.20: Μοντέλο 3, Κοχλίας - Πλάκες

2.9.1 Συνοριακές Συνθήκες

Το μοντέλο δεσμεύτηκε στην κατακόρυφη διεύθυνση απαγορεύοντας την μετατόπιση της κάτω επιφάνειας της κάτω πλάκας. Στη συνέχεια ο κοχλίας υποβλήθηκε σε καθαρό εφελκυσμό, επιβάλλοντας κατακόρυφη μετατόπιση στο κάτω άκρο του. Η διάτμηση επιβλήθηκε εφαρμόζοντας μετατόπιση, στα άκρα των δύο πλακών. Οι συνοριακές συνθήκες του μοντέλου για την ανάλυση διάτμησης παρατίθενται περιγραφικά στον πίνακα 2.12 και γραφικά στην εικόνα 2.21.

Πίνακας 2.12: Συνοριακές συνθήκες

Κοχλίας		Κατακόρυφη αρνητική μετατόπιση 2mm των κόμβων του σπειρώματος κατά y'y, γραμμικά αυξανόμενη με τον χρόνο ανάλυσης.
Πλάκες	κάτω	Δέσμευση της οριζόντιας πλευρικής μετατόπισης "z" των κόμβων των πλευρικών επιφανειών.
		Δέσμευση της κατακόρυφης μετατόπισης (y) των κόμβων της κάτω επιφάνειας.
	άνω	Οριζόντια αρνητική μετατόπιση 3mm των κόμβων της αριστερής επιφάνειας κατά x'x, γραμμικά αυξανόμενη με τον χρόνο ανάλυσης. Εφαρμογή μετά το πέρας της επιμήκυνσης του κοχλίου.
		Οριζόντια μετατόπιση 3mm των κόμβων της δεξιάς επιφάνειας κατά x'x, γραμμικά αυξανόμενη με τον χρόνο ανάλυσης. Εφαρμογή μετά το πέρας της επιμήκυνσης του κοχλίου.



Εικόνα 2.21: Συνοριακές συνθήκες μοντέλου 3

2.9.2 Επαφή σωμάτων

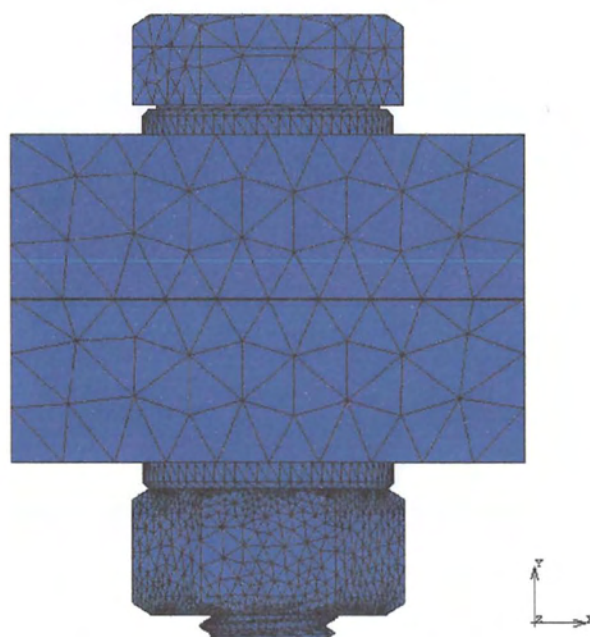
Στον Πίνακα 2.13 δίνονται οι ρυθμίσεις επαφής μεταξύ των δύο σωμάτων (κοχλίας και δύο πλάκες). Τα σώματα ορίστηκαν ως παραμορφώσιμα (deformable) σώματα σε επαφή (touching) και επιλέχθηκε μονόπλευρη (single – sided) ανίχνευση επαφής.[17]

Πίνακας 2.13: Ρυθμίσεις επαφής κοχλία-πλακών

CONTACT TABLE PROPERTIES				SECOND		
FIRST		BODY NAME	BODY TYPE	1	2	3
	1	BOLT	deformable		T	T
	2	PLATE_UP	deformable			T
	3	PLATE_DOWN	deformable			

2.10 Μοντέλο 4. Κοχλίας – περικόχλιο – πλάκες – ροδέλες

Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιήθηκε για την ακριβή προσομοίωση τμήματος μιας προεντεταμένης σύνδεσης, ενός κοχλία ο οποίος συσφίγγει τμήματα δύο πλακών και δύο ροδέλες. Ο κοχλίας προεντείνεται και στη συνέχεια επιβάλλεται διάτμηση στη σύνδεση.



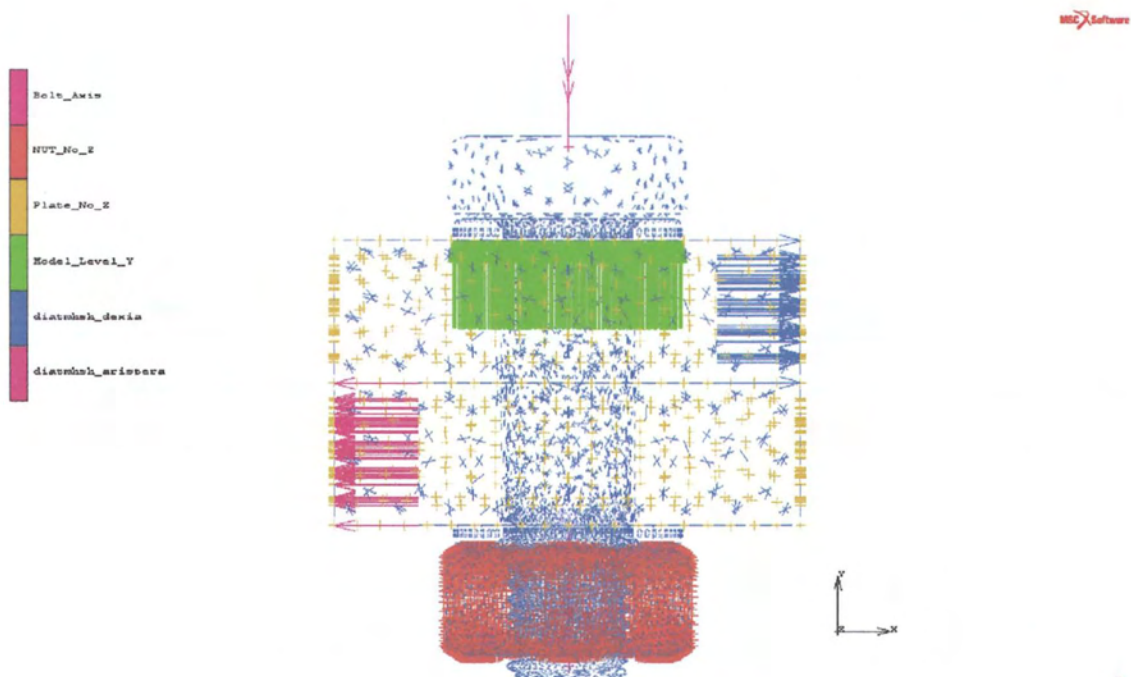
Εικόνα 2.22: Μοντέλο 4, Κοχλίας – Περικόχλιο – Πλάκες – Ροδέλες

2.10.1 Συνοριακές συνθήκες

Το μοντέλο δεσμεύτηκε στην κατακόρυφη διεύθυνση απαγορεύοντας την μετατόπιση της κάτω επιφάνειας της πάνω ροδέλας. Δεσμεύτηκε η στροφή του περικοχλίου και ο κοχλίας προεντάθηκε μέσω σύσφιγξης εφαρμόζοντας στροφή στην κεφαλή του. Μετά το πέρας της προέντασης επιβλήθηκε διάτμηση στη σύνδεση εφαρμόζοντας μετατόπιση στα άκρα των δύο πλακών. Οι συνοριακές συνθήκες του μοντέλου για την ανάλυση διάτμησης παρατίθενται περιγραφικά στον πίνακα 2.14 και γραφικά στην εικόνα 2.23.

Πίνακας 2.14: Συνοριακές συνθήκες

Κεφαλή κοχλία		Αρνητική στροφή 240° γύρω από τον άξονα του κοχλία $y'y$, γραμμικά αυξανόμενη με τον χρόνο ανάλυσης .
Περικόχλιο		Δέσμευση της οριζόντιας πλευρικής μετατόπισης "z" των κόμβων των πλευρικών επιφανειών.
Πλάκες	άνω	Δέσμευση της οριζόντιας πλευρικής μετατόπισης "z" των κόμβων των πλευρικών επιφανειών.
		Οριζόντια μετατόπιση 3mm των κόμβων της δεξιάς επιφάνειας κατά $x'x$, γραμμικά αυξανόμενη με τον χρόνο ανάλυσης. Εφαρμογή μετά το πέρας προέντασης του κοχλία.
	κάτω	Δέσμευση της οριζόντιας πλευρικής μετατόπισης "z" των κόμβων των πλευρικών επιφανειών.
		Οριζόντια αρνητική μετατόπιση 3mm των κόμβων της αριστερής επιφάνειας κατά $x'x$, γραμμικά αυξανόμενη με τον χρόνο ανάλυσης. Εφαρμογή μετά το πέρας προέντασης του κοχλία.
Ροδέλες	άνω	Δέσμευση της κατακόρυφης μετατόπισης (y) των κόμβων της κάτω επιφάνειας.
	κάτω	Δεν εφαρμόστηκαν περιορισμοί στις συνοριακές συνθήκες.



Εικόνα 2.23: Συνοριακές συνθήκες μοντέλου 4

2.10.2 Ρυθμίσεις επαφής σωμάτων

Στον πίνακα 2.15 δίνονται οι ρυθμίσεις επαφής μεταξύ των σωμάτων (κοχλίας, περικόχλιο δύο ροδέλες και δύο πλάκες). Τα σώματα ορίστηκαν ως παραμορφώσιμα (deformable) σώματα σε επαφή (touching) και επιλέχθηκε αμφίπλευρη (double – sided) ανίχνευση επαφής.

Πίνακας 2.15: Ρυθμίσεις επαφής μοντέλου 4

CONTACT TABLE PROPERTIES				SECOND					
FIRST		BODY NAME	BODY TYPE	1	2	3	4	5	6
1		BOLT	deformable	T	T	T	T	T	T
2		NUT	deformable	T	T	T	T	T	T
3		PLATE_UP	deformable	T	T	T	T	T	T
4		PLATE_DOWN	deformable	T	T	T	T	T	T
5		WASHER_UP	deformable	T	T	T	T	T	T
6		WASHER_DOWN	deformable	T	T	T	T	T	T

3^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

3.1 Συμπεριφορά κοχλίου σε εφελκυσμό

3.1.1 Εξέλιξη τάσεων - τροπών

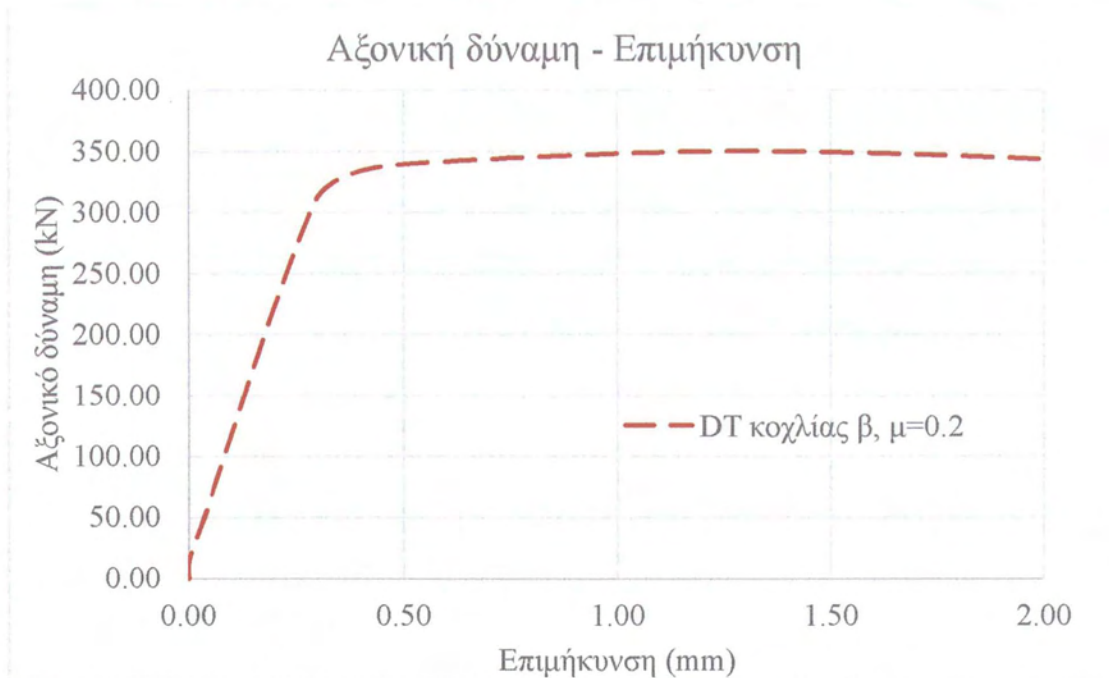
Η συμπεριφορά ενός κοχλίου σε εφελκυσμό καθορίζεται είτε μέσω της διαδικασίας καθαρού εφελκυσμού, είτε πιο συχνά μέσω της διαδικασίας σύσφιγξης – εφελκυσμού (βλέπε κεφάλαιο 1). Η διαδικασία είναι παρόμοια και στις δύο περιπτώσεις, καθώς επιβάλλεται εξωτερική μετατόπιση στα άκρα του κοχλίου (άμεση, ή μέσω της γεωμετρίας του σπειρώματος). Με αυτό τον τρόπο ο κοχλίας επιμηκύνεται και αναπτύσσεται αξονική εφελκυστική ένταση στο σώμα του.

Στην αρχή της φόρτισης οι τάσεις αυξάνονται γραμμικά και ο κοχλίας συμπεριφέρεται ελαστικά. Καθώς η επιμήκυνση του κοχλίου αυξάνει, οι τάσεις υπερβαίνουν το όριο διαρροής του υλικού και το σπείρωμα σταδιακά εισέρχεται στην πλαστική περιοχή. Η δύναμη του κοχλίου συνεχίζει να αυξάνει καθώς η πλαστικοποίηση του σπειρώματος συνεχίζει, μέχρις ότου σχηματιστεί μία πλήρως πλαστικοποιημένη διατομή. Από το σημείο αυτό και μετά οι παραμορφώσεις αυξάνονται έντονα χωρίς σημαντική αύξηση της αναπτυσσόμενης δύναμης. Αυτό συνεχίζει μέχρι η παραμόρφωση σε κάποιο σημείο να ξεπεράσει το όριο κράτυνσης του υλικού και η τάση στο σημείο αυτό να φθάσει την μέγιστη τιμή της. Στη συνέχεια της φόρτισης, η τάση στο σημείο αυτό παραμένει σταθερή και ίση με την αντοχή του υλικού. Όταν σε όλα τα σημεία μίας διατομής του κοχλίου οι τάσεις φθάσουν την αντοχή του υλικού, τότε ο κοχλίας παρουσιάζει την μέγιστη φέρουσα ικανότητα σε εφελκυσμό. Ωστόσο, καθώς ο κοχλίας επιμηκύνεται παρουσιάζεται στένωση της διατομής του σπειρώματός του και μειώνεται το συνολικό ενεργό εμβαδόν αυτής. Αυτό επιφέρει ως αποτέλεσμα μία ταυτόχρονη μείωση της ικανότητας του κοχλίου να φέρει αξονικά φορτία. Το σημείο της φόρτισης και η ταχύτητα με την οποία θα εμφανιστεί η στένωση της διατομής του κοχλίου καθορίζει την συμπεριφορά του.

3.1.2 Καθαρός εφελκυσμός

Το πείραμα καθαρού εφελκυσμού προσομοιώθηκε για τον κοχλίο β και το περικόχλιο β. Ο κοχλίας υποβλήθηκε σε καθαρό εφελκυσμό, για συνολική επιμήκυνση 2mm, η οποία θεωρητικά αντιστοιχεί σε στροφή 240°, σύμφωνα με όσα ορίστηκαν για το

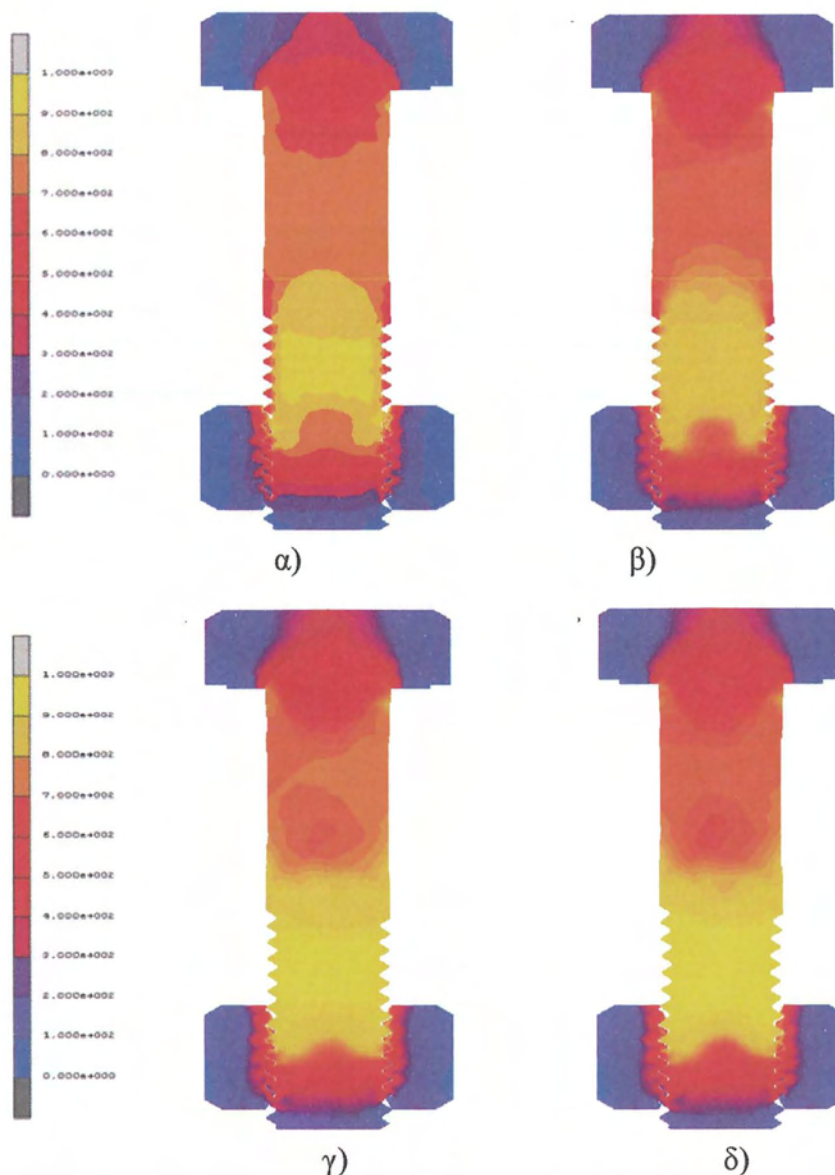
μοντέλο 1. Το διάγραμμα Αξονικής δύναμης – Επιμήκυνσης του κοχλία σε καθαρό εφελκυσμό δίνεται στην εικόνα 3.1.



Εικόνα 3.11: Διάγραμμα Αξονικής δύναμης – Επιμήκυνσης, κοχλία β, για συντελεστή τριβής $\mu=0.2$

Στο διάγραμμα είναι εμφανής ο ελαστικός κλάδος στην αρχή της φόρτισης, μέχρι περίπου τα 300 kN. Στη συνέχεια ο κοχλίας αρχίζει να διαρρέει και να συμπεριφέρεται πλαστικά. Η παραμόρφωση (επιμήκυνση) αυξάνει, μέχρι ο κοχλίας να φθάσει την μέγιστη αντοχή του σε εφελκυσμό 350.6 kN. Μετά από αυτό το σημείο το διάγραμμα παρουσιάζει έναν φθίνων κλάδο, λόγω της στένωσης που παρουσιάζεται στο σπείρωμα του κοχλία, η οποία επιφέρει αντιστοιχεί μείωση στη φέρουσα ικανότητά του.

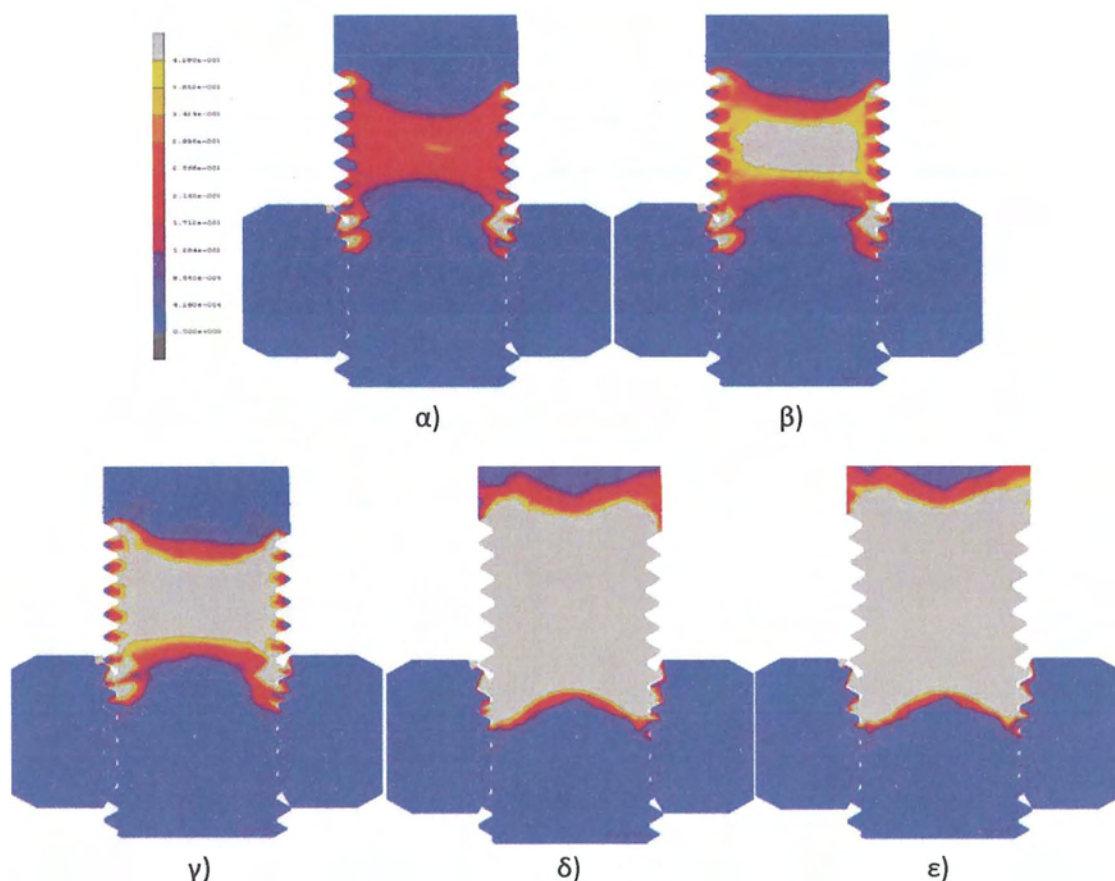
Στην εικόνα 3.2 φαίνεται η εντατική κατάσταση που αναπτύσσεται στο εσωτερικό του κοχλία, για τέσσερα στάδια φόρτισης, όταν αυτός υποβάλλεται σε άμεσο εφελκυσμό. Οι τιμές των τάσεων είναι πολύ υψηλές στα δόντια του σπειρώματος τα οποία έρχονται σε επαφή και φθάνουν τη μέγιστη τιμή τους (αντοχή του υλικού 1000 MPa) στο εσωτερικό του σπειρώματος. Όπως εύκολα διαπιστώνεται, η κρίσιμη περιοχή του κοχλία είναι το κομμάτι του σπειρώματος που περικλείεται από το περκόχλιο και το οποίο εκτείνεται μέχρι και το σημείο που αρχίζει το σώμα του κοχλία. Για τον λόγο αυτό η εντατική κατάσταση στον κοχλία εξετάζεται στη συνέχεια και σε σχέση με την παραμορφωσιακή κατάσταση στο σώμα του.



Εικόνα 3.2: Ισοδύναμες τάσεις Von Mises στον κοχλία σε άμεσο εφελκυσμό, για: α) 1^η διαρροή μιας ολόκληρης διατομής του σπειρώματος (0.37mm), β) 1^η υπέρβαση του ορίου κράτνσης σε μία διατομή του σπειρώματος (0.43mm), γ) βήμα φόρτισης όπου εμφανίζεται η μέγιστη αξονική δύναμη στον κοχλία (1.33mm), δ) τέλος φόρτισης (2mm)

Στην εικόνα 3.3 φαίνεται η εξέλιξη των πλαστικών παραμορφώσεων στο σπείρωμα του κοχλία, όπως περιγράφονται πιο πάνω. Οι πλαστικές παραμορφώσεις εμφανίζονται αρχικά στο εσωτερικό του σπειρώματος και στη συνέχεια εξαπλώνονται προς τα έξω. Μόλις πλαστικοποιηθεί πλήρως μια διατομή του κοχλία, η πλαστικοποίηση συνεχίζει καθ' ύψος του σπειρώματος, το οποίο πλαστικοποιείται μέχρι το τέλος της φόρτισης. Καθ' όλη τη διάρκεια της φόρτισης το σπείρωμα του κοχλία συμπεριφέρεται έντονα πλαστικά, ενώ το σώμα του κοχλία παραμένει στην

ελαστική περιοχή. Το μέρος του σπειρώματος το οποίο περικλείεται από το περικόχλιο, πλαστικοποιείται μόνο στο πάνω μέρος του, ενώ το υπόλοιπο, όπως και το σώμα του κοχλία, παραμένουν ουσιαστικά απαραμόρφωτα.

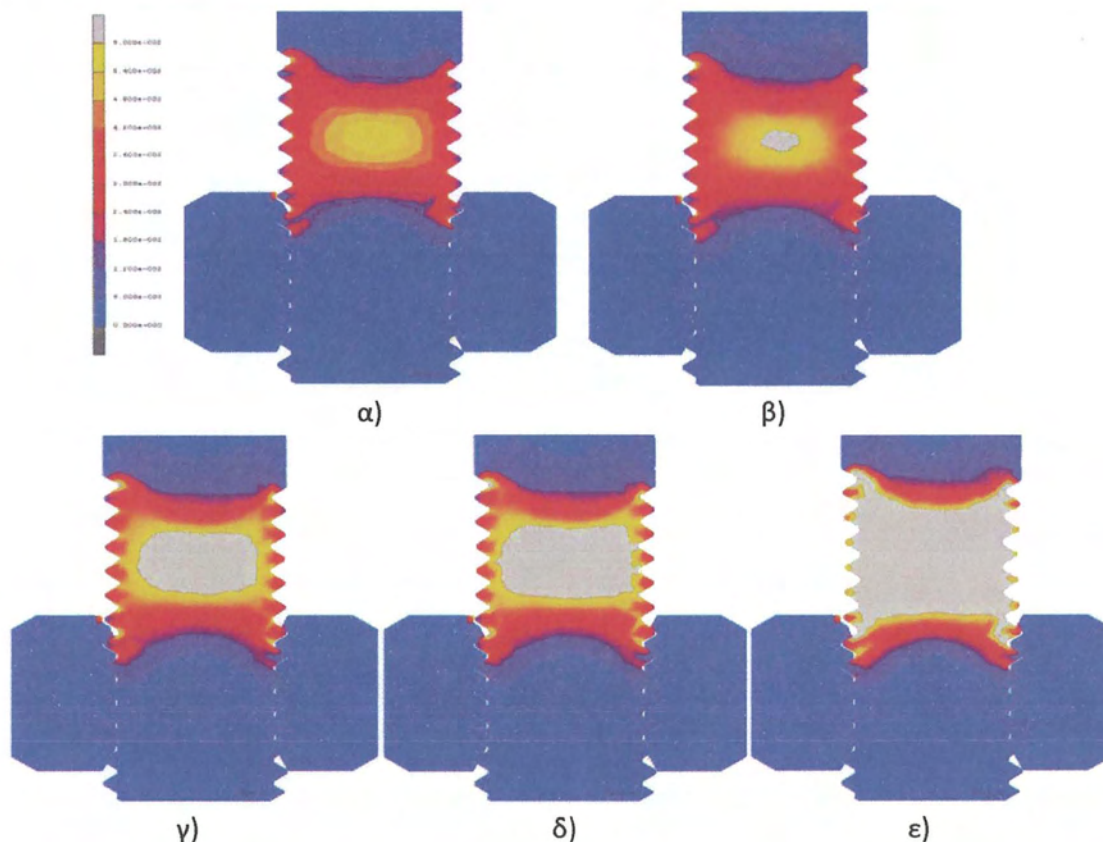


Εικόνα 3.3: Ισοδύναμη πλαστική τροπή στο σπείρωμα του κοχλία β, για όριο ελαστικής περιοχής 0.428% : α) τέλος ελαστικής περιοχής (0.37mm), β) εξάπλωση πλαστικών παραμορφώσεων (0.4mm), γ) δημιουργία πρώτης πλήρως πλαστικοποιημένης διατομής στον κοχλία (0.43mm), δ) τέλος φόρτισης (2mm)

Στην εικόνα 3.2 δίνεται μια γενική εικόνα της διαρροής του υλικού του κοχλία, χωρίς καθόλου όμως πληροφορίες για την μετέπειτα συμπεριφορά του μέχρι την κράτυνση και το τέλος της φόρτισης. Το σημείο της φόρτισης όπου ο κοχλίας φέρει το μέγιστο αξονικό φορτίο και πώς η τιμή αυτή διαμορφώνεται με την εξέλιξη των παραμορφώσεων καθορίζουν τη συμπεριφορά του κοχλία σε εφελκυσμό. Για να γίνει αυτή η διαδικασία αντιληπτή μελετάται η εξέλιξη των πλαστικών παραμορφώσεων οι οποίες υπερβαίνουν το όριο κράτυνσης του υλικού και οι οποίες επιφέρουν την ανάπτυξη της μέγιστης τάσης στο υλικό. Σταδιακά τα διάφορα στοιχεία του σπειρώματος φθάνουν την μέγιστη αντοχή τους με αποτέλεσμα η αύξηση της αξονικής δύναμης στον κοχλία να γίνεται όλο και πιο μικρή, μέχρις ότου όλα τα

σημεία μιας διατομής του σπειρώματος να φθάσουν τις μέγιστες τάσεις και ο κοχλίας να εμφανίσει τη μέγιστη αξονική δύναμη. Τονίζεται ότι κατά τη διάρκεια της φόρτισης, μόνο το σπείρωμα του κοχλίου εισέρχεται στη πλαστική περιοχή, ενώ το περικόχλιο και το υπόλοιπο σώμα του κοχλίου παραμένουν στην ελαστική.

Στην εικόνα 3.4 δίνεται η εξέλιξη των πλαστικών παραμορφώσεων πέραν του ορίου κράτνσης 6%, στο σώμα του κοχλίου.



Εικόνα 3.4: Ισοδύναμη πλαστική τροπή στο σπείρωμα του κοχλίου μεγαλύτερη του ορίου κράτνσης 6%, για: α) προσέγγιση ορίου, β) πρώτη υπέρβαση του ορίου, γ) εξάπλωση στη διατομή, δ) δημιουργία πρώτης πλαστικής διατομής στον κοχλίου σε κράτνση (1.33mm), ε) τέλος φόρτισης (2mm)

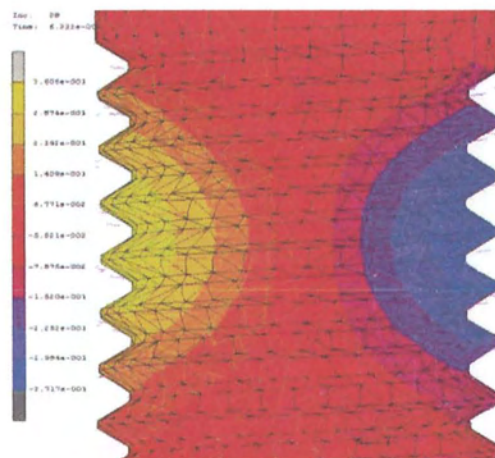
Η εξάπλωση των πλαστικών παραμορφώσεων μεγαλύτερων του ορίου κράτνσης του υλικού στον κοχλίο, ακολουθούν την ίδια πορεία που περιγράφηκε για την εικόνα 3.3. Ο κοχλίας αρχίζει να κρατύνεται με την αύξηση των παραμορφώσεων και σταδιακά τα σημεία της διατομής του φθάνουν την μέγιστη αντοχή του υλικού. Όταν όλα τα σημεία μιας διατομής του ξεπεράσουν το όριο του 6%, τότε η διατομή έχει φθάσει τη μέγιστη φέρουσα ικανότητά της σε εφελκυσμό. Στη συνέχεια της φόρτισης, οι παραμορφώσεις συνεχίζουν να αυξάνουν και να εξαπλώνονται καθ' ύψος της διατομής.

Στον πίνακα 3.1 δίνονται οι χαρακτηριστικές για την αντοχή του κοχλία παραμορφώσεις του κοχλία, όπως αυτές φαίνονται στο διάγραμμα της εικόνας 3.1.

Πίνακας 3.3: Χαρακτηριστικές παραμορφώσεις του κοχλία β

Άμεσος εφελκυσμός			
1 ^ο σημείο που διαρρέει	1 ^η πλήρως πλαστικοποιημένη διατομή	μέγιστη δύναμη	1η διατομή του κοχλία που φθάνει την αντοχή του υλικού
0,37 mm	0,43 mm	1,33 mm	1,33 mm

Θεωρητικά η μέγιστη αξονική δύναμη στον κοχλία εμφανίζεται όταν όλα τα σημεία μιας διατομής του φθάσουν την αντοχή του υλικού. Ωστόσο, καθώς η παραμόρφωση του σπειρώματος αυξάνει πέρα από κάποιο όριο, η διατομή του αρχίζει να μειώνεται λόγω της στένωσης της διατομής του κοχλία. Υπάρχουν περιπτώσεις όπου η διατομή του κοχλία ξεκινά να μειώνεται πριν προλάβουν όλα της τα σημεία να φθάσουν τη μέγιστη τάση, με αποτέλεσμα όταν όλα τα σημεία της διατομής φθάσουν τη μέγιστη τάση, το εμβαδόν της διατομής να είναι μικρότερο του αρχικού, και αντίστοιχα μικρότερη να είναι και η αξονική δύναμη του κοχλία. Το φαινόμενο αυτό έχει έντονη επίδραση σε κοντούς κοχλίες και επηρεάζει σημαντικά την ικανότητά τους να φέρουν αξονικά φορτία.



Εικόνα 3.5: Λεπτομέρεια στένωσης σπειρώματος – Πεδίο οριζόντιων μετατοπίσεων y

Στον πίνακα 3.2 γίνεται σύγκριση της αξονικής δύναμης που εμφανίζεται στον κοχλία κατά την προσομοίωση του πειράματος άμεσου εφελκυσμού, με α) την αντοχή του κοχλία σύμφωνα με τον EN3 σε εφελκυσμό και β) την πλήρη αξιοποίηση της αντοχής του κοχλία, για τις τέσσερις χαρακτηριστικές διαστάσεις d, d2, d3 και dm όπως αυτές ορίζονται στην εικόνα 1.1.

Πίνακας 3.4: Αξονική δύναμη του κοχλία για θεώρηση πλήρους αξιοποίησης της αντοχής, διαφορετικού μέρους της διατομής του.

	d	d2	d3	dm
$F_{tRd}=0.9 \cdot A_s \cdot f_{ub} / \gamma$ (kN)	325.60	274.80	233.50	253.70
$F_u = A_s \cdot f_{ub}$ (kN)	452.16	381.70	324.10	352.30
Αποτέλεσμα ανάλυσης (kN)	350.6			

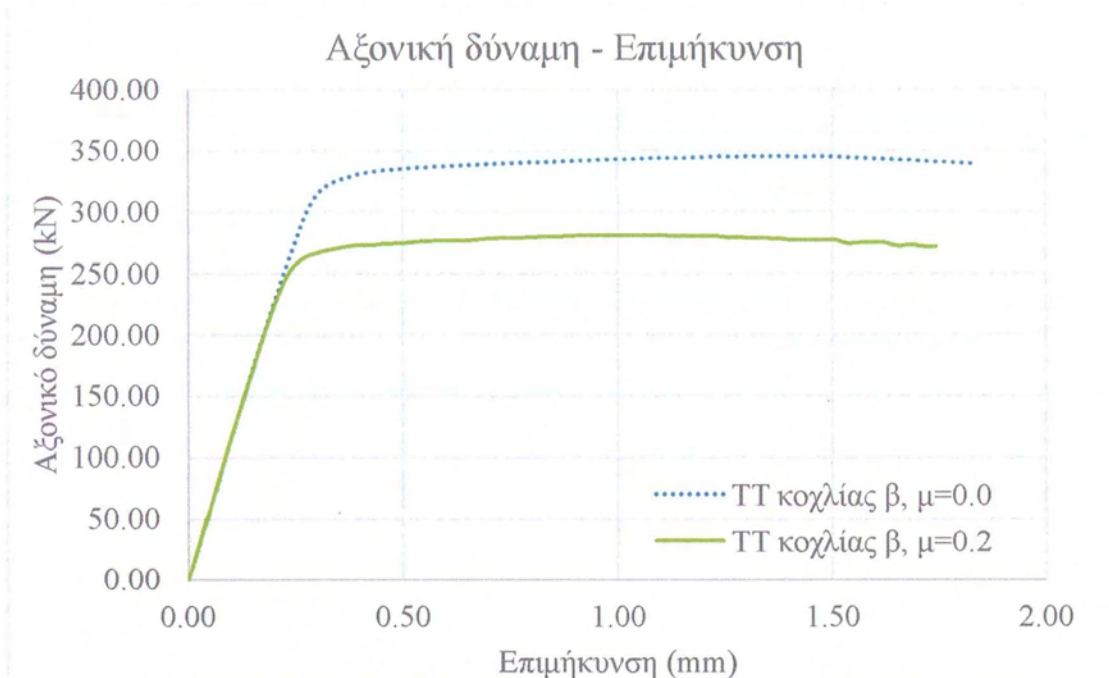
Είναι εμφανές ότι κατά τη διαδικασία άμεσου εφελκυσμού, τα αποτελέσματα του μοντέλου προσεγγίζουν σε πολύ καλό βαθμό αυτά που δίνει ο EN3 για δύναμη F_u , με θεώρηση πλήρους αξιοποίησης διατομής ίση με $d_m = \frac{d_3 + d}{2}$. Η αντοχή του κοχλία σε εφελκυσμό F_{tRd} είναι αρκετά μικρότερη από αυτή που δίνει το μοντέλο, ακόμα και αν θεωρηθεί πλήρης αξιοποίηση της εφελκυστικής αντοχής της διατομής του κοχλία.

3.1.3 Εφελκυσμός μέσω σύσφιγξης

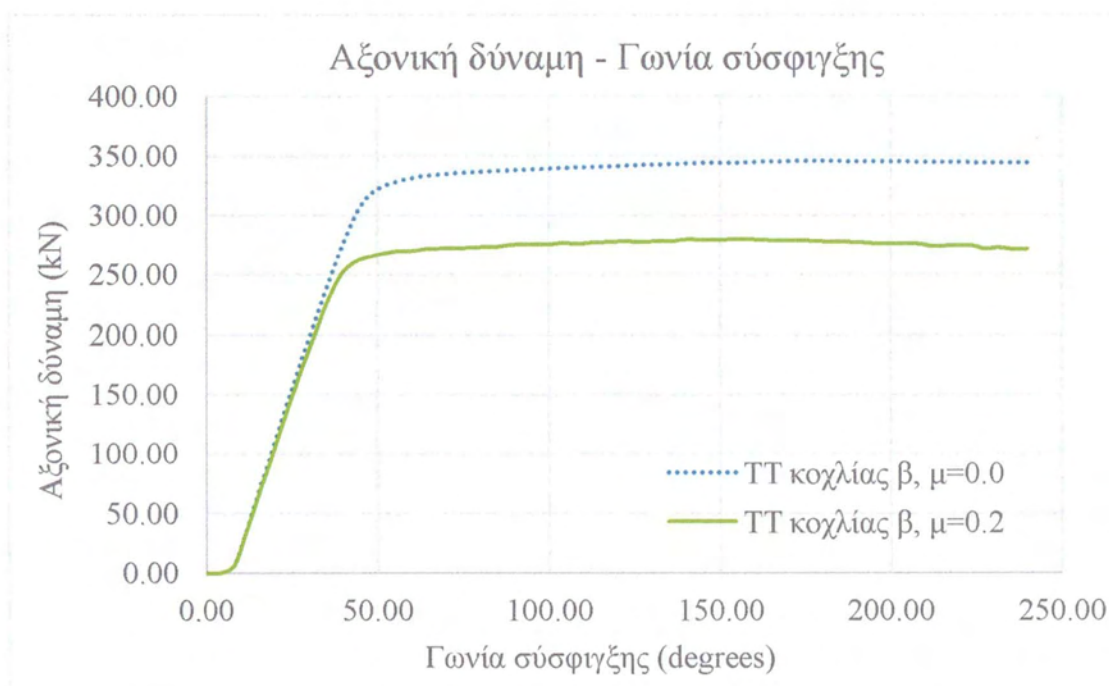
Το πείραμα εφελκυσμού μέσω σύσφιγξης προσομοιώθηκε για τον κοχλία β και το περικόχλιο β. Ο κοχλίας συσφίχτηκε για 240° , σύμφωνα με όσα ορίστηκαν για το μοντέλο 1. Για αυτό το μοντέλο πραγματοποιήθηκαν δύο αναλύσεις για διαφορετική θεώρηση τριβής ($\mu=0.0$ και $\mu=0.2$). Τα διαγράμματα Αξονικής δύναμης – Επιμήκυνσης και Αξονικής δύναμης – Γωνίας σύσφιγξης για την προσομοίωση του κοχλία σε εφελκυσμό μέσω σύσφιγξης δίνονται στην εικόνα 3.6 και 3.7 αντίστοιχα.

Η πορεία που ακολουθούν τα διαγράμματα της αξονικής δύναμης είναι παρόμοια με αυτή που περιγράφεται για το πείραμα άμεσου εφελκυσμού. Στην αρχή εμφανίζεται ο ελαστικός κλάδος του διαγράμματος, στη συνέχεια το τμήμα που αντιστοιχεί στη διαρροή και τη κράτυνση του υλικού και τέλος ο πτωτικός κλάδος λόγω στένωσης της διατομής του σπειρώματος.

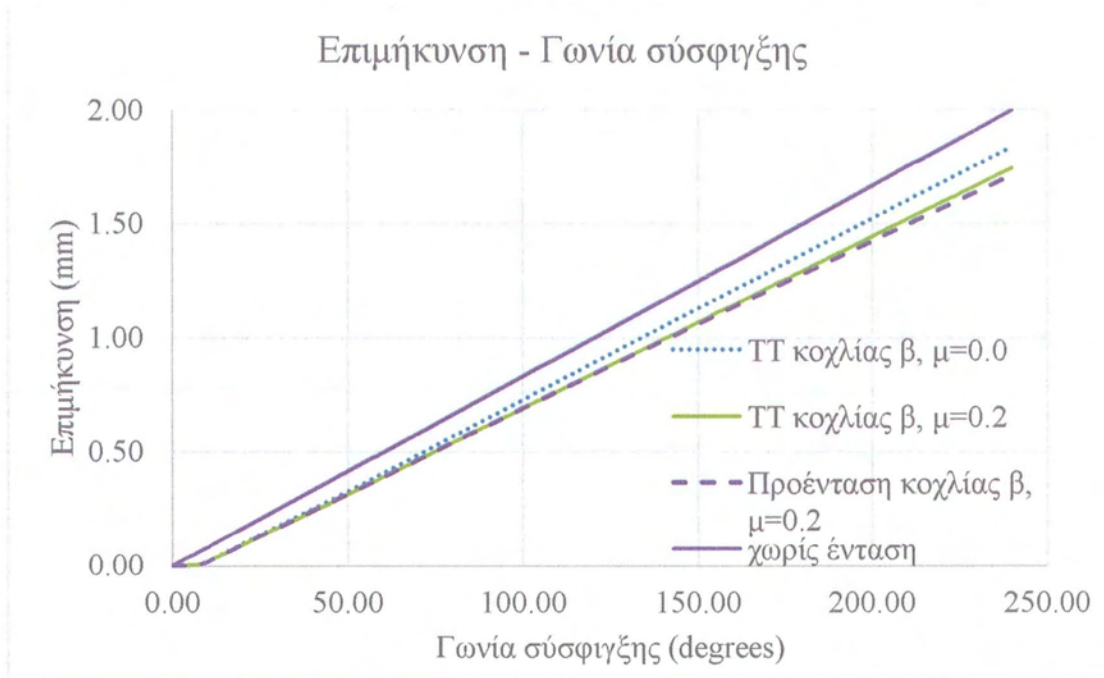
Το διάγραμμα Αξονικής δύναμης – Επιμήκυνσης του κοχλία και το αντίστοιχο Αξονικής δύναμης – Γωνίας σύσφιγξης ακολουθούν την ίδια πορεία. Πρακτικά πρόκειται για το ίδιο διάγραμμα, καθώς υπάρχει γραμμική συσχέτιση μεταξύ της επιβαλλόμενης γωνίας σύσφιγξης και της επιμήκυνσης του κοχλία. Η Σχέση αυτή δίνεται στη εικόνα 3.8.



Εικόνα 3.6: Διάγραμμα Αξονικής δύναμης – Επιμήκυνσης κοχλία β , για συντελεστή τριβής $\mu=0.0$ και $\mu=0.2$

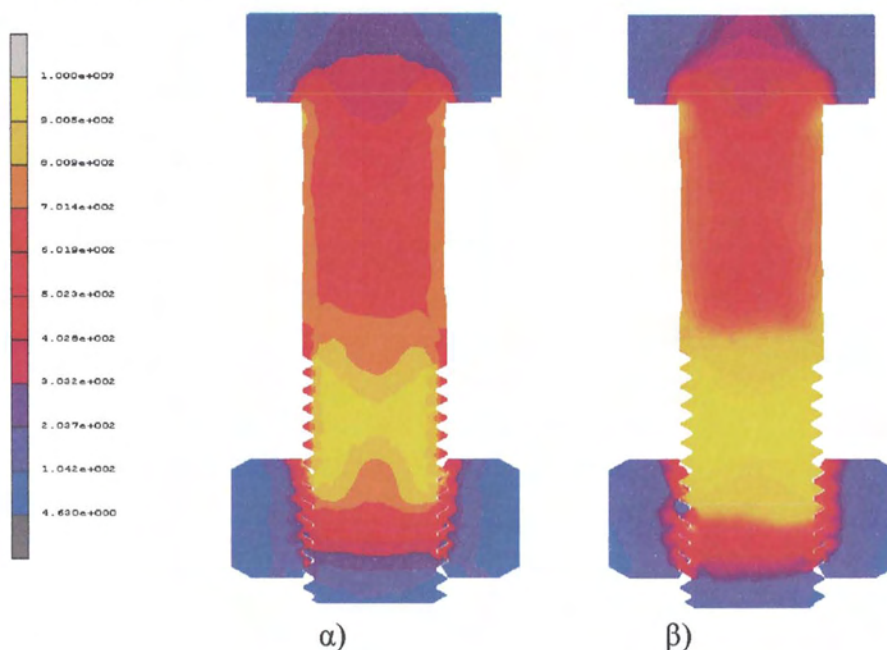


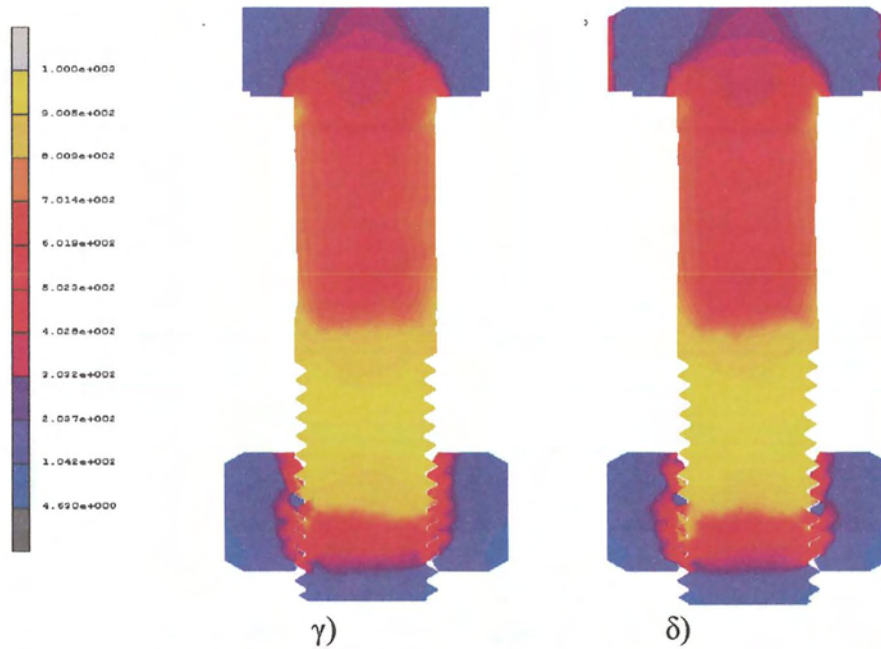
Εικόνα 3.7: Διάγραμμα Αξονικής δύναμης – Γωνίας σύσφιγξης κοχλία β , για συντελεστή τριβής $\mu=0.0$ και $\mu=0.2$



Εικόνα 3.8: Διάγραμμα Επιμήκυνσης – Γωνίας σύσφιγξης κοχλία β, για συντελεστή τριβής $\mu=0.0$ και $\mu=0.2$

Στην εικόνα 3.9 φαίνεται η εντατική κατάσταση που αναπτύσσεται στο εσωτερικό του κοχλία, για τέσσερα στάδια φόρτισης, όταν αυτός υποβάλλεται σε εφελκυσμό μέσω σύσφιγξης. Αντίθετα με τη διαδικασία άμεσου εφελκυσμού, στη περίπτωση αυτή, οι μέγιστες τάσεις στο σπείρωμα του κοχλία αρχίζουν να εμφανίζονται από τα πλευρικά δόντια προς το εσωτερικό του. Η εξάπλωση των τάσεων ωστόσο καθ' ύψος του σπειρώματος στη συνέχεια της φόρτισης ακολουθεί την ίδια πορεία που περιγράφηκε νωρίτερα.

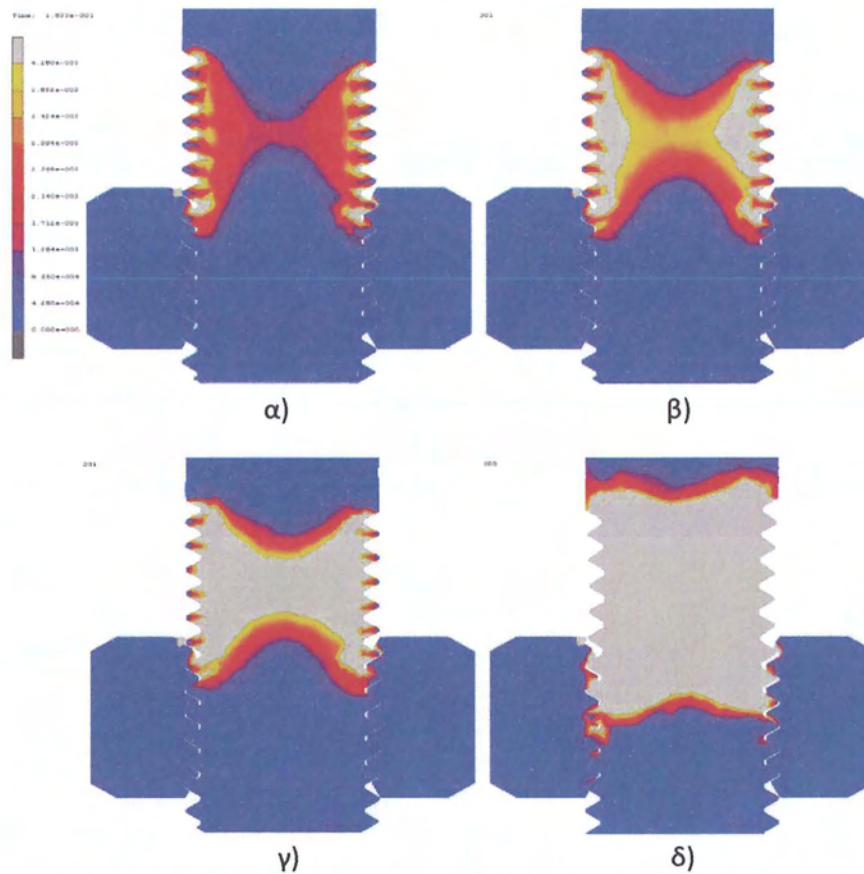




Εικόνα 3.9: Ισοδύναμες τάσεις Von Mises του κοχλία β σε εφελκυσμό μέσω σύσφιγξης, για: α) 1^η διαρροή μιας ολόκληρης διατομής του σπειρώματος (44°), β) 1^η υπέρβαση του ορίου κράτνσης σε μία διατομή του σπειρώματος (76°), γ) βήμα φόρτισης όπου εμφανίζεται η μέγιστη αξονική δύναμη στον κοχλία (132°), δ) τέλος φόρτισης (240°)

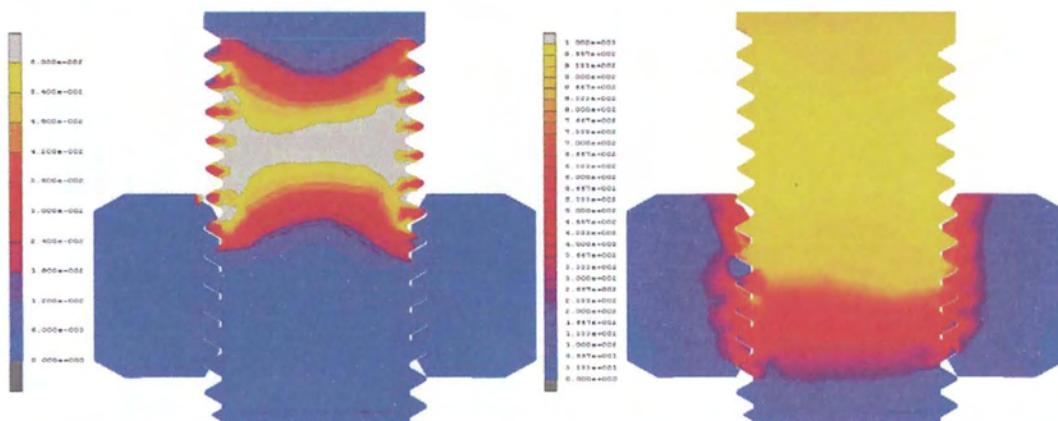
Για να γίνει πιο εύκολα κατανοητή η εντατική κατάσταση που αναπτύσσεται στο εσωτερικό του κοχλία παρουσιάζεται η εξέλιξη των πλαστικών παραμορφώσεων στο σπείρωμα του κοχλία (εικόνα 3.10). Οι πλαστικές παραμορφώσεις εμφανίζονται αρχικά στα δόντια του σπειρώματος και στη συνέχεια εξαπλώνονται προς το εσωτερικό. Μόλις πλαστικοποιηθεί πλήρως μια διατομή του κοχλία, η πλαστικοποίηση συνεχίζει καθ' ύψος του σπειρώματος πάνω από το περικόχλιο, το οποίο πλαστικοποιείται ολόκληρο μέχρι το τέλος της φόρτισης. Το μέρος του σπειρώματος το οποίο περικλείεται από το περικόχλιο δεν παραμορφώνεται ολόκληρο, παρά μόνο η κορυφή. Καθ' όλη τη διάρκεια της φόρτισης το σπείρωμα του κοχλία συμπεριφέρεται έντονα πλαστικά, ενώ το σώμα του παραμένει στην ελαστική περιοχή.

Αριθμητική προσομοίωση προεντεταμένου κοχλία σε διάτμηση



Εικόνα 3.10: Ισοδύναμη πλαστική τροπή στον κοχλία για: α) πρώτη διαρροή υλικού, β) εξέλιξη διαρροής, γ) σχηματισμός πρώτης πλήρως πλαστικοποιημένης διατομής, γ) στροφή 240°

Η μέγιστη αξονική δύναμη παρουσιάζεται για στροφή 132° η οποία επιφέρει επιμήκυνση στον κοχλία 1.05mm. Όπως και στην περίπτωση του καθαρού εφελκυσμού ο κοχλίας εμφανίζει τη μέγιστη φέρουσα ικανότητα σε αξονικό φορτίο, όταν όλα τα σημεία της διατομής του φθάσουν τη μέγιστη αντοχή του υλικού.

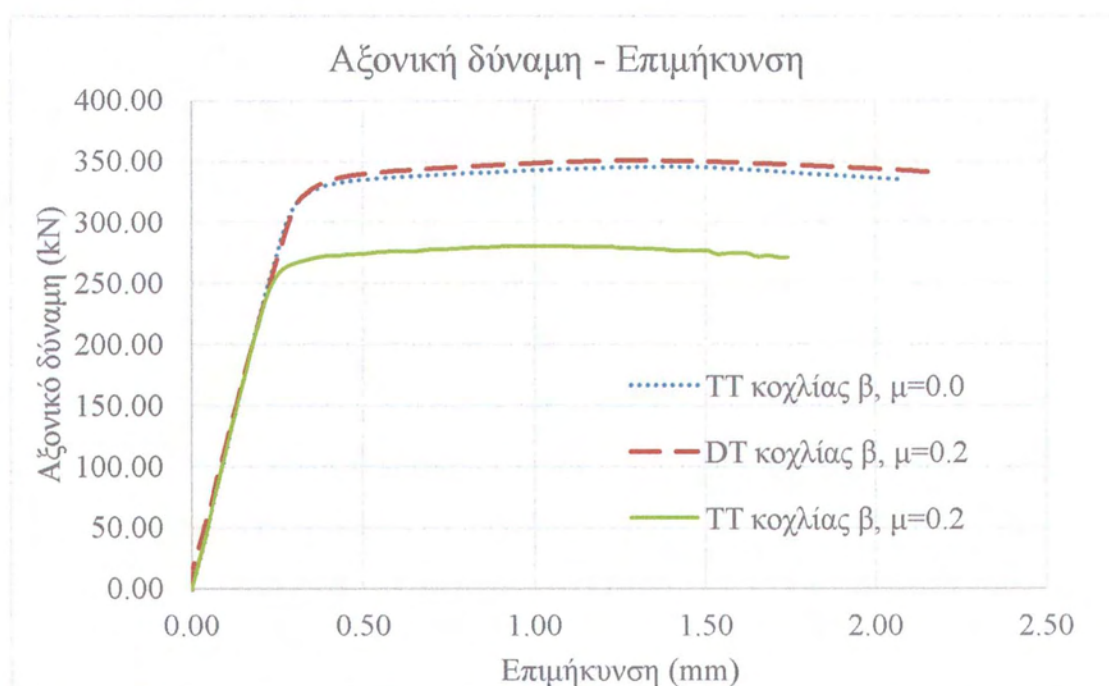


Εικόνα 3.11: Λεπτομέρεια σπειρώματος, για το βήμα φόρτισης μέγιστης αξονικής δύναμης στον κοχλία: α) Ισοδύναμες τροπές για όριο κράτησης 6%, β) Ισοδύναμες τάσεις Von Mises για όριο 1000 MPa

3.1.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων άμεσου εφελκυσμού και εφελκυσμού μέσω σύσφιγξης

Η μέθοδος σύσφιγξης – εφελκυσμού δημιουργεί μια πολύ πιο σύνθετη εντατική κατάσταση στο σύστημα κοχλία – περικοχλίου, επηρεάζοντας σημαντικά τη συμπεριφορά του. Καθώς ο κοχλίας συσφίγγεται, το ποσοστό της αναπτυσσόμενης δύναμης που δεν αντιστέκεται στην τριβή επιμηκύνει το σώμα του κοχλία, ενώ το ποσοστό που αντιστέκεται στην τριβή προκαλεί στρέψη στο σώμα του κοχλία. Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι μια συνδυασμένη εντατική κατάσταση στρέψης-εφελκυσμού στο σώμα του κοχλία.

Στην εικόνα 3.12 δίνεται το διάγραμμα Αξονικής δύναμης – Επιμήκυνσης του κοχλία σε καθαρό εφελκυσμό και εφελκυσμό μέσω σύσφιγξης (συντελεστής τριβής $\mu=0.0$ και $\mu=0.2$).



Εικόνα 3.12: Διάγραμμα Αξονικής δύναμης – Επιμήκυνσης του κοχλία β, σε άμεσο εφελκυσμό και σε εφελκυσμό μέσω σύσφιγξης, για συντελεστή τριβής $\mu=0.0$ και $\mu=0.2$

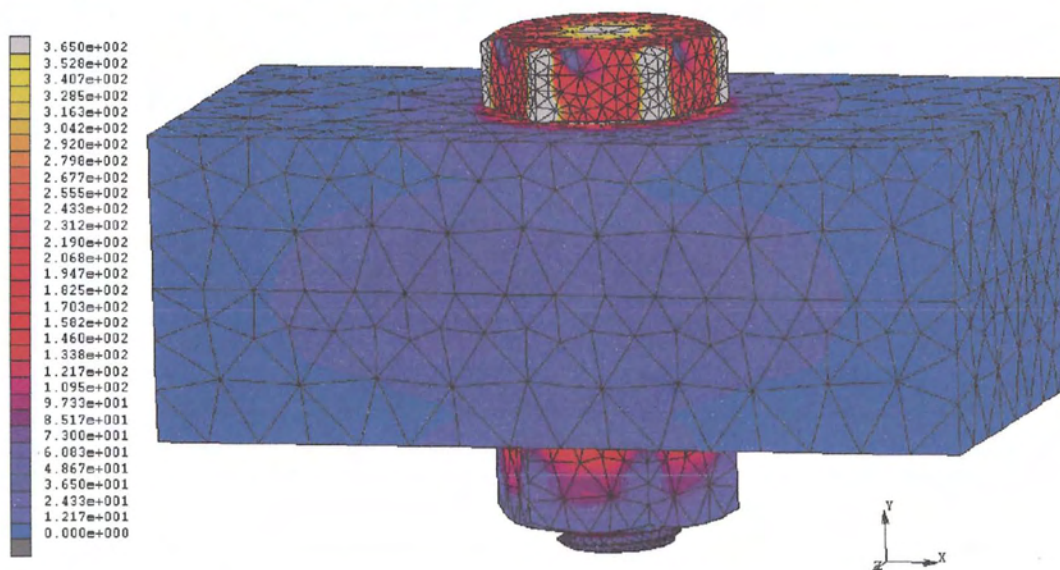
Συγκρίνοντας τα διαγράμματα αξονικής δύναμης – επιμήκυνσης του κοχλία γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η δυνατότητα του κοχλία να φέρει αξονικά φορτία, καθώς και η δυνατότητα να παραμορφώνεται αξονικά μειώνεται.

Πίνακας 5.3: Σύγκριση συμπεριφοράς κοχλία σε άμεσο εφελκυσμό και σε εφελκυσμό μέσω σύσφιγξης

	Μέγιστη αξονική δύναμη (kN)	Επιμήκυνση (mm)
DT κοχλίας β , $\mu=0.1$	350.57	2.00
TT κοχλίας β , $\mu=0.0$	345.74	1.84
TT κοχλίας β , $\mu=0.2$	281.60	1.74

Όταν δεν υπάρχει τριβή μεταξύ κοχλία – περικοχλίου τα αποτελέσματα της σύσφιγξης προσεγγίζουν αυτά του άμεσου εφελκυσμού. Η ύπαρξη τριβής μεταξύ των δύο σωμάτων, επιφέρει μείωση στη δυνατότητα του κοχλία να φέρει αξονικά φορτία κατά 70kN, η οποία αντιστοιχεί σε μείωση της τάξης του 20%. Αντίστοιχη μείωση υπάρχει και στην παραμόρφωση του κοχλία, ο οποίος για στροφή 240° επιμηκύνεται κατά 1.74mm (θεωρητική επιμήκυνση με βάση το βήμα του σπειρώματος 2mm).

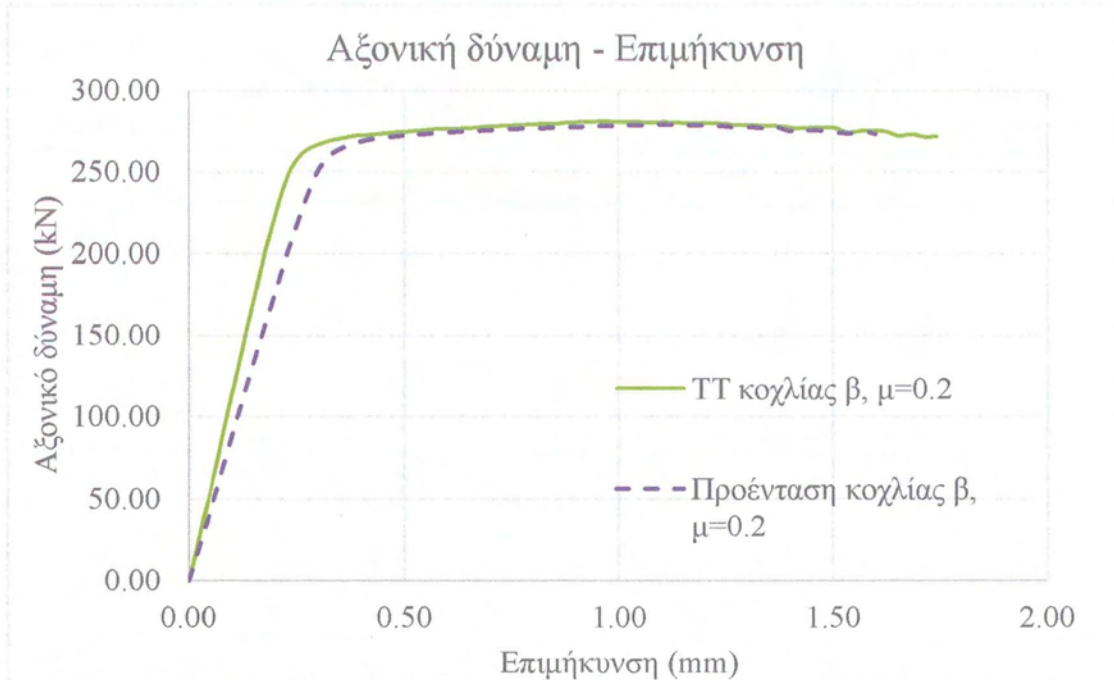
3.2 Προένταση κοχλιωτής σύνδεσης μοντέλου πλακών



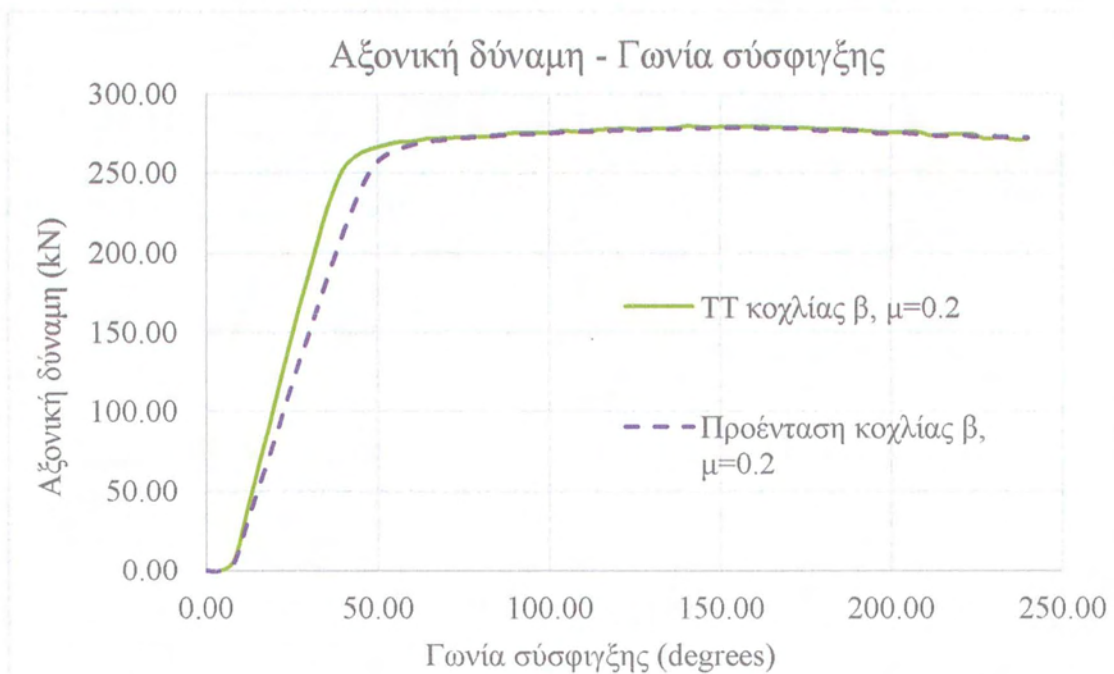
Εικόνα 3.13: Ισοδύναμες τάσεις Von Mises για μέγιστη αξονική στον κοχλία, όριο 355 MPa

Η διαδικασία προέντασης κοχλιωτής σύνδεσης δύο ελασμάτων, προσομοιώθηκε για τον κοχλία β , το περικόχλιο β και τις πλάκες γ . Ο κοχλίας συσφίχθηκε για στροφή 240°, σύμφωνα με όσα ορίστηκαν για το μοντέλο 2. Τα διαγράμματα Αξονικής δύναμης – Επιμήκυνσης και Αξονικής δύναμης – Γωνίας σύσφιγξης για την προένταση του κοχλία στις εικόνες 3.14 και 3.15 αντίστοιχα. Μαζί παρουσιάζεται και το διάγραμμα του κοχλία σε πείραμα σύσφιγξης – εφελκυσμού.

Στα διαγράμματα της αξονικής είναι και εδώ εμφανής ο ελαστικός κλάδος, το τμήμα διαρροής και κράτυνσης, καθώς και ο φθίνων κλάδος που οφείλεται στη στένωση της διατομής.



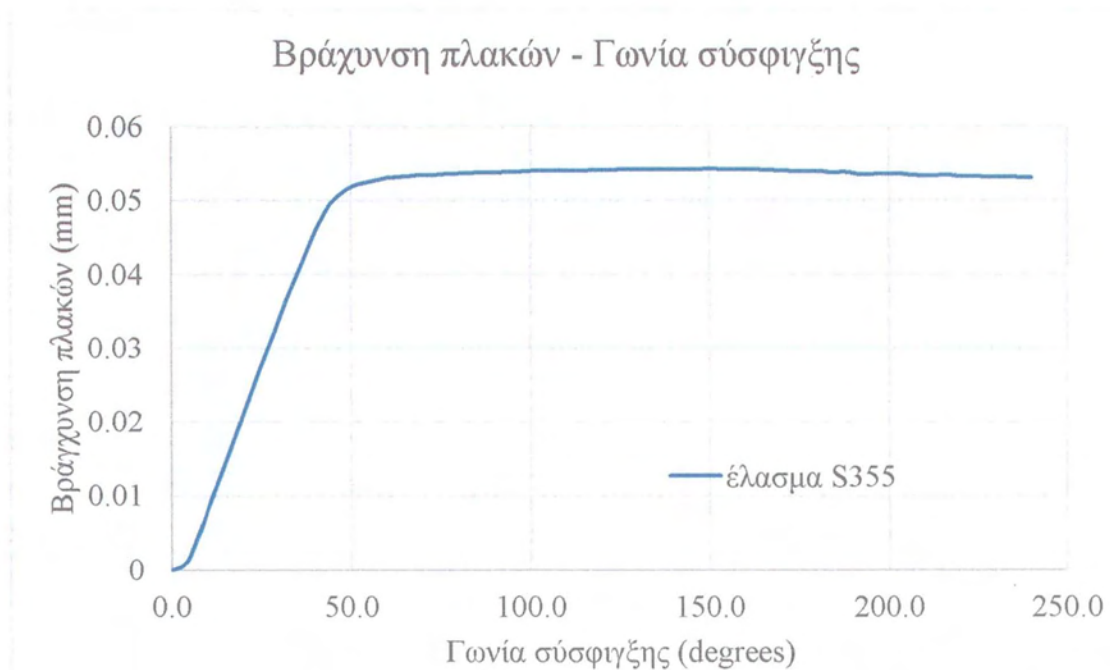
Εικόνα 3.14: Διάγραμμα Αξονικής δύναμης – Επιμήκυνσης κοχλία β, σε εφελκυσμό μέσω σύσφιγξης και προένταση κοχλιωτής σύνδεσης πλακών



Εικόνα 3.15: Διάγραμμα Αξονικής δύναμης – Γωνίας σύσφιγξης κοχλία β, σε εφελκυσμό μέσω σύσφιγξης και προένταση κοχλιωτής σύνδεσης πλακών

Συγκρίνοντας τα διαγράμματα προκύπτει ότι, ο κοχλίας που προεντείνεται σε μία κοχλιωτή σύνδεση ελασμάτων παρουσιάζει παρόμοια εφελκυστική συμπεριφορά με το πείραμα σύσφιγξης – εφελκυσμού. Αυτό γίνεται πιο εύκολα κατανοητό θεωρώντας τη σύσφιγξη του μοντέλου 1, κοχλίας – περικοχλίου, ως προένταση δύο άκαμπτων πλακών. Η ύπαρξη των πλακών επηρεάζει τη συμπεριφορά της σύνδεσης επιδρώντας στην αρχική δυσκαμψία της. Πιο συγκεκριμένα, για την ίδια τιμή αξονική δύναμης στην ελαστική περιοχή, το μοντέλο των ελασμάτων παρουσιάζει μεγαλύτερη επιμήκυνση. Στην τετριμμένη περίπτωση μηδενικής δυσκαμψίας των πλακών, ο κοχλίας θα ήταν ελεύθερος να κινηθεί κατακόρυφα, χωρίς την ανάπτυξη δύναμης.

Το διάγραμμα αξονικής δύναμης του μοντέλου 2, εμφανίζει μικρότερη αρχική κλίση (δυσκαμψία) συγκριτικά με το διάγραμμα του μοντέλου 1, λόγω της παραμόρφωσης των πλακών (εικόνα 3.16). Μετά τη διαρροή, η συμπεριφορά της σύνδεσης καθορίζεται από τη συμπεριφορά του κοχλίας σε εφελκυσμό. Ο κοχλίας παραμορφώνεται έντονα και στις πλάκες ασκείται σταθερή ένταση. Για το λόγο αυτό, οι τιμές στη συνέχεια μπορούν να θεωρηθούν σαν πλευρική μετατόπιση αυτών του μοντέλου 1. Ο κοχλίας φθάνει την ίδια μέγιστη τιμή αξονικού φορτίου, για την ίδια επιμήκυνση και στα δύο μοντέλα, αλλά σε διαφορετικό στάδιο φόρτισης.



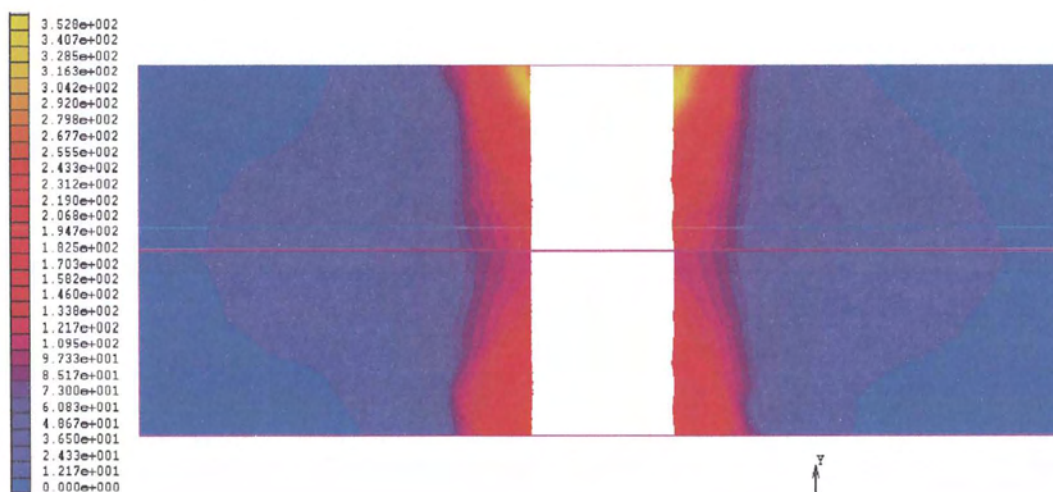
Εικόνα 3.16: Διάγραμμα βράχυνσης ελασμάτων – Γωνίας σύσφιγξης κατά την προένταση

Συμπερασματικά προκύπτει ότι η συμπεριφορά ενός κοχλία κατά την προένταση μιας κοχλιωτής σύνδεσης δύο ελασμάτων, μπορεί να προσεγγιστεί σε ικανοποιητικό βαθμό μέσω της διαδικασίας σύσφιγξης – εφελκυσμού. Η χρήση πλακών μπορεί να συνυπολογιστεί, λαμβάνοντας υπόψη τη διαφορά στην αρχική δυσκαμψία της σύνδεσης, καθώς τα υπόλοιπα μεγέθη είναι ίδια και για τα δύο μοντέλα (βλέπε πίνακα 3.4).

Πίνακας 3.6: Σύγκριση κοχλία σε προένταση ελασμάτων και διαδικασία σύσφιγξης - εφελκυσμού

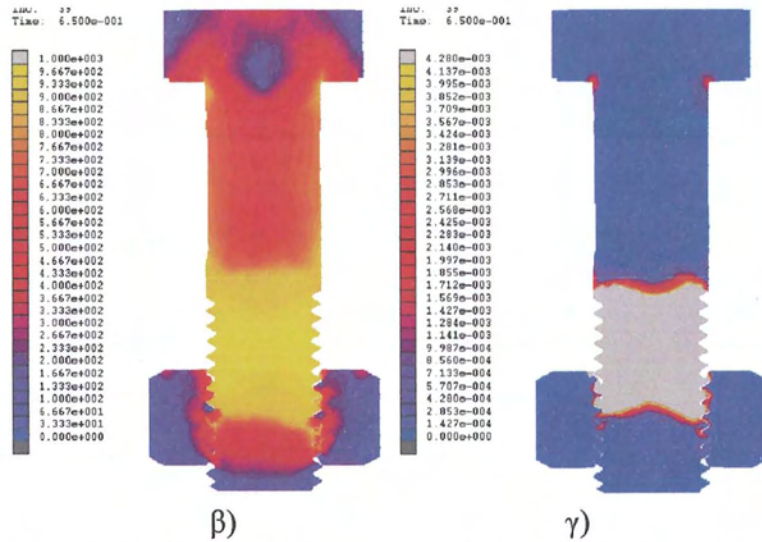
	μοντέλο 1	μοντέλο 2
Μέγιστη Αξονική δύναμη (kN)	281.10	279.20
Γωνία στροφής (degrees)	132.00	149.00
Επιμήκυνση κοχλία (mm)	1.11	1.11

Η εντατική κατάσταση της σύνδεσης και η πλαστική παραμόρφωση του κοχλία, δίνονται στις εικόνες 3.17 και 3.18. Η εικόνα 3.17 αντιστοιχεί στο βήμα φόρτισης όπου ο κοχλίας παρουσιάζει τη μέγιστη αξονική δύναμη και η εικόνα 3.18 παρουσιάζει τη σύνδεση στο τέλος της φόρτισης, μετά από στροφή 240° και για αξονική δύναμη ίση με τη δύναμη προέντασης σχεδιασμού.

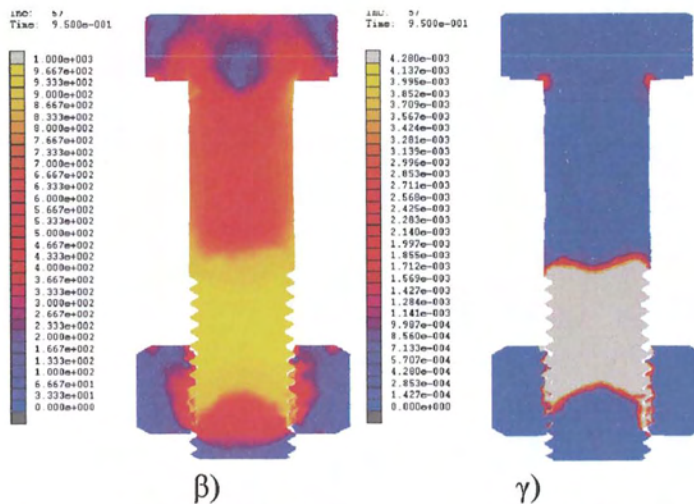
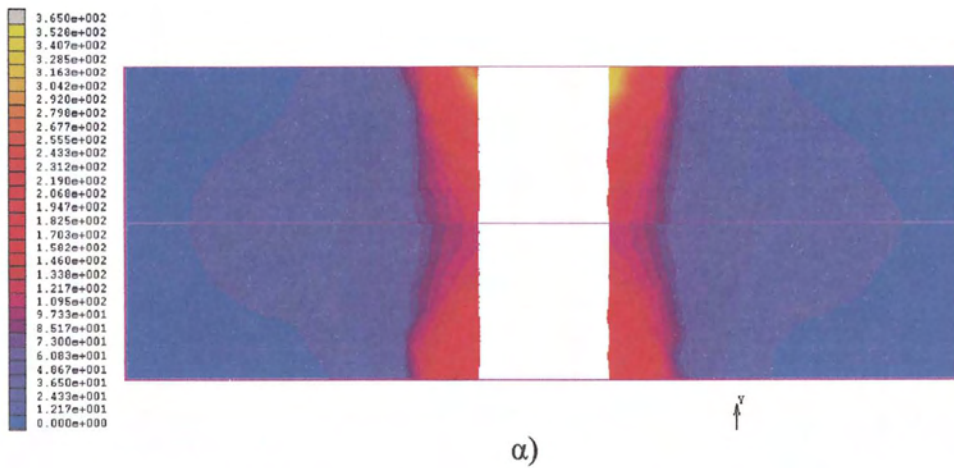


α)

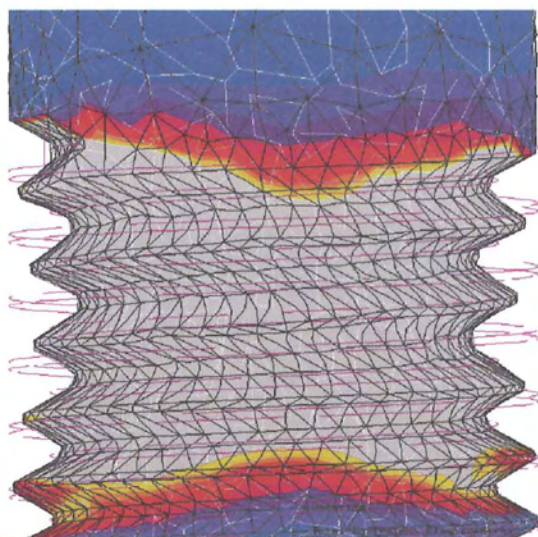
Αριθμητική προσομοίωση προεντεταμένου κοχλία σε διάτμηση



Εικόνα 3.17: Βήμα φόρτισης όπου επιτυγχάνεται η μέγιστη αξονική δύναμη στον κοχλία: α) ισοδύναμες τάσεις Von Mises στις πλάκες (όριο 355 MPa) και β) στον κοχλία (όριο 1000 MPa), γ) ισοδύναμη πλαστική τροπή στον κοχλία (όριο 0.428%)



Εικόνα 3.18: Τέλος φόρτισης: α) ισοδύναμες τάσεις Von Mises στις πλάκες (όριο 355 MPa) και β) στον κοχλία (όριο 1000 MPa), γ) ισοδύναμη πλαστική τροπή στον κοχλία (όριο 0.428%)



Εικόνα 3.19: Λεπτομέρεια πλαστικής παραμόρφωσης και στένωσης του σπειρώματος, στο τέλος της φόρτισης

Η παραμόρφωση και η πλαστικοποίηση του σπειρώματος του κοχλία, το οποίο περικλείεται από το περικόχλιο δίνεται στην εικόνα 3.19.

3.2.1 Σύγκριση αξονικής δύναμης

Στον πίνακα 3.5 γίνεται σύγκριση της αξονικής δύναμης που εμφανίζεται στον κοχλία κατά την προένταση με την δύναμη προέντασης σχεδιασμού F_p , σύμφωνα με τον EN3.

Πίνακας 3.7: Σύγκριση αξονικής δύναμης

$F_p=0.7 \cdot f_{ub} \cdot A_s$ (kN)	Σύσφιξη - Εφελκυσμός $\mu=0.00$	Σύσφιξη - Εφελκυσμός $\mu=0.20$	Προένταση κοχλιωτής σύνδεσης $\mu=0.20$
246.60	339.30	271.68	272.63

Είναι εμφανές ότι η τιμή αξονικής δύναμης του κοχλία κατά τη διαδικασία σύσφιξης – εφελκυσμού χωρία τριβή, δεν ανταποκρίνεται στα πρότυπα της συνδυασμένης καταπόνησης στρέψης – εφελκυσμού που εμφανίζεται στον κοχλία κατά τη διάρκεια της προέντασης. Οι τιμές που προκύπτουν προσεγγίζουν αυτές του κοχλία σε καθαρό εφελκυσμό.

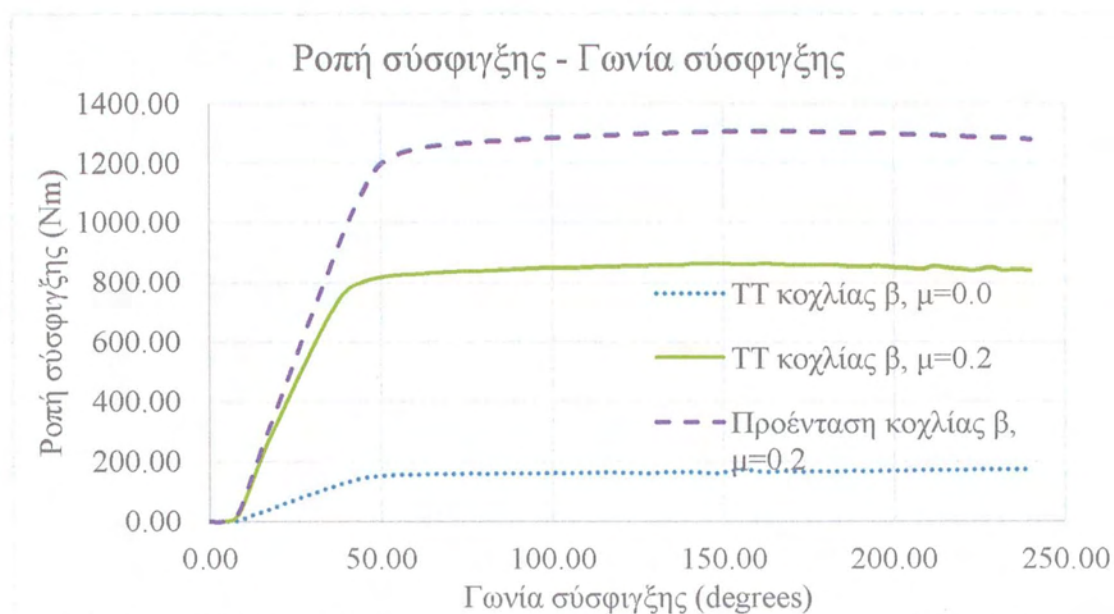
Όσο αυξάνει ωστόσο η τριβή, τόσο η αξονική δύναμη, όσο και η επιμήκυνση του κοχλία μειώνονται και η συμπεριφορά του κοχλία σε εφελκυσμό μέσω σύσφιξης προσεγγίζει αυτή της προέντασης ελασμάτων. Οι τιμές της αξονικής δύναμης των δύο

μοντέλων είναι πρακτικά ίδιες, αλλά διαφέρουν από τη τιμή προέντασης σχεδιασμού του EN3. Η τιμή που προτείνει ο EN3 είναι μικρότερη κατά 11% και αποτελεί αρκετά συντηρητική θεώρηση. Αγνοεί εντελώς την επιρροή του συντελεστή τριβής, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλες διαφορές στην τιμή της αξονικής δύναμης του κοχλίου. Στην πραγματικότητα υπάρχουν και άλλοι παράγοντες που ενδέχεται να οδηγήσουν σε αυξημένη τελική δύναμη προέντασης, όπως η ενδεχόμενη υπεραντοχή που μπορεί να εμφανίσει το υλικό.

Σχόλια: Η μέγιστη αξονική δύναμη στον κοχλία εμφανίζεται πριν το τέλος της σύσφιγξης και διαφέρει από την τελική δύναμη προέντασης στο τέλος της φόρτισης κατά περίπου 5-10% (βλέπε πίνακα 3.4). Η πορεία που θα ακολουθήσει η αξονική δύναμη του κοχλίου κατά τη διάρκεια της προέντασης εξαρτάται άμεσα από τον νόμο του υλικού του κοχλίου.

3.2.2 Ροπή σύσφιγξης προεντεταμένου κοχλίου

Όπως περιγράφηκε πιο πάνω, ο κοχλίας συσφίχθηκε επιβάλλοντας ελεγχόμενη στροφή στη κεφαλή του, σε κάθε βήμα φόρτισης. Η ροπή που αναπτύχθηκε ως αντίδραση στη στροφή της κεφαλής είναι η ροπή σύσφιγξης του κοχλίου. Στην εικόνα 3.20 δίνεται η απαιτούμενη ροπή σύσφιγξης που προέκυψε για τον κοχλία από προσομοίωση πειράματος σύσφιγξης εφελκυσμού ($\mu=0.0$ και $\mu=0.2$) και από προσομοίωση προέντασης κοχλιωτής σύνδεσης ($\mu=0.2$).



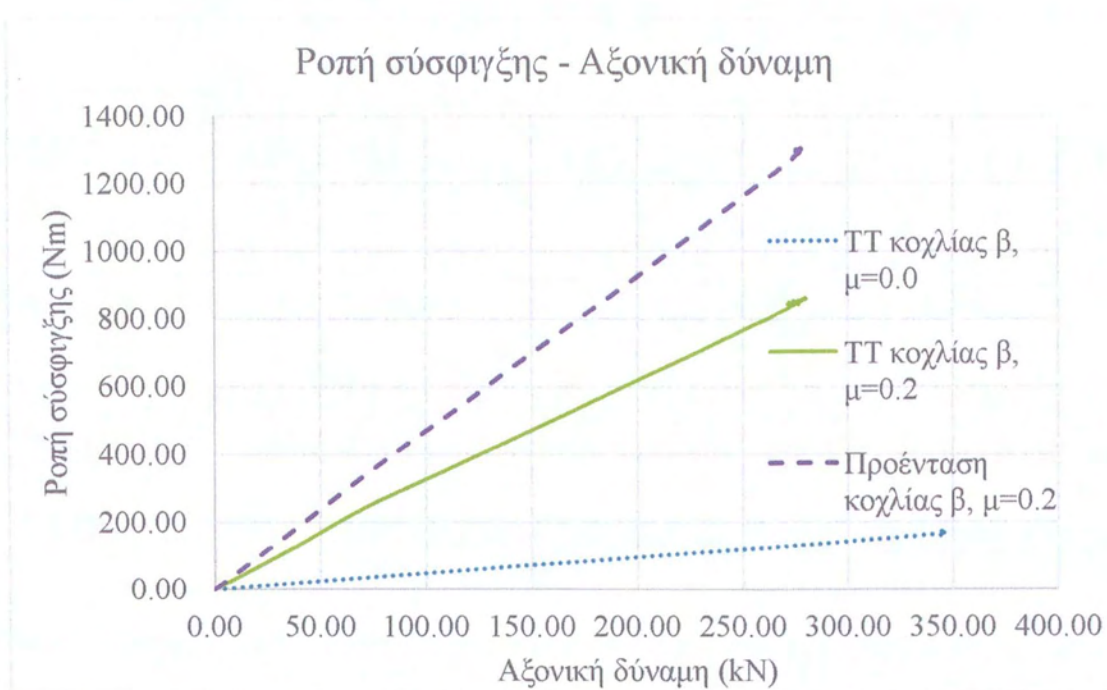
Εικόνα 3.20: Διάγραμμα Ροπής σύσφιγξης – Γωνίας σύσφιγξης για τον κοχλία σε εφελκυσμό μέσω σύσφιγξης ($\mu=0.0$ και $\mu=0.2$) και σε προένταση κοχλιωτής σύνδεσης

Το διάγραμμα ροπής για σύσφιγξη του κοχλία με μηδενικό συντελεστή τριβής, αντιστοιχεί στην ροπή η οποία εμφανίζεται αποκλειστικά λόγω των εντός οριζοντίου επιπέδου αντιδράσεων των σωμάτων που έρχονται σε επαφή στο σπειρώμα (εικόνα 1.2). Η τιμή της εξαρτάται μόνο από την γεωμετρία του σπειρώματος και από την δύναμη που εφαρμόζεται κατά τη σύσφιγξη.

Όταν ο κοχλίας συσφίγγεται με συντελεστή τριβής διάφορο του μηδενός ($\mu=0.2$), η απαιτούμενη ροπή σύσφιγξης αυξάνει. Η αύξηση αυτή οφείλεται στις εντός οριζοντίου επιπέδου δυνάμεις τριβής που εμφανίζονται λόγω της επαφής μεταξύ των επιφανειών των σπειρωμάτων του συστήματος κοχλία – περικοχλίου και οι οποίες αντιστέκονται στη στροφή του κοχλία.

Στην περίπτωση προέντασης μίας κοχλιωτής σύνδεσης δύο πλακών, στις παραπάνω τιμές προστίθεται η ροπή λόγω τριβής μεταξύ κεφαλής κοχλία και πλάκας. Η τιμή της εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά των επιφανειών, τον συντελεστή τριβής, αλλά και την αναπτυσσόμενη δύναμη προέντασης.

Αναλύοντας τη σχέση αξονικής δύναμης – ροπής σύσφιγξης των μοντέλων (βλέπε εικόνα 3.21), προκύπτει ότι σε κάθε μια από τις τρεις περιπτώσεις φόρτισης, η τιμή της απαιτούμενης ροπής σύσφιγξης εξαρτάται σχεδόν γραμμικά από την αναπτυσσόμενη αξονική δύναμη στον κοχλία. Αυτό διαφαίνεται και στη βιβλιογραφία, η οποία προτείνει τύπους υπολογισμού ροπής σύσφιγξης γραμμικά εξαρτώμενους από την δύναμη προέντασης [2 & 6]. Για το λόγο αυτό το διάγραμμα της ροπής σύσφιγξης ακολουθεί την ίδια πορεία με αυτό της αξονικής δύναμης του κοχλία σε σχέση με τη γωνία σύσφιγξης.



Εικόνα 3.21: Συσχέτιση Ροπής σύσφιγξης – Αξονικής δύναμης

3.2.3 Σχολιασμός και σύγκριση τιμών ροπής σύσφιγξης

Οι ροπές σύσφιγξης της κοχλιωτής σύνδεσης δύο ελασμάτων για κοχλία υψηλής αντοχής M24, σύμφωνα με τους τύπους 1.4 έως 1.6, δίνονται στον πίνακα 3.6.

Πίνακας 3.8: Σύγκριση τιμών ροπής σύσφιγξης

	Αξονική δύναμη (KN)	$M_{calculated}$ (Nm)	$M_{theoretical}$ (Nm)	$M_{empirical}$ (Nm)	M_c (Nm)
Προένταση κοχλιωτής σύνδεσης $\mu=0.2$	279.20	1309.70	1408.00	1344.00	1491.00
$F_p=0.7 \cdot f_{ub} \cdot A_s$	246.60	-	1240.30	1183.70	1491.00

Ως ροπή σύσφιγξης ικανή να προεντείνει τον κοχλία, θεωρείται η μέγιστη τιμή που παρουσιάστηκε σε κάθε διαδικασία φόρτισης. Αυτό σημαίνει ότι η τιμή της απαιτούμενης ροπής σύσφιγξης δεν μπορεί να ληφθεί με βάση την δύναμη προέντασης σχεδιασμού. Η δύναμη προέντασης σχεδιασμού είναι μικρότερη της μέγιστης αξονικής δύναμης που εμφανίζει ο κοχλίας, με αποτέλεσμα να οδηγεί και σε μικρότερες τιμές ροπής. Σε περίπτωση που υιοθετηθεί ένας τέτοιος τύπος υπολογισμού, υπάρχει κίνδυνος η τιμή της ροπής να μην επαρκεί για την ανάπτυξη της επιθυμητής δύναμης προέντασης στον κοχλία.

Οι τιμές της ροπής σύσφιξης του πίνακα 3.6 υπολογίζονται με βάση τη δύναμη σχεδιασμού F_p που προτείνεται από τον EN3. Παρατηρείται ότι αν και η τιμή της δύναμης είναι μικρότερη της αναπτυσσόμενης, οι τιμές της ροπής σύσφιξης είναι μεγαλύτερες της απαιτούμενης.

Η τιμή της M_c του EN3 είναι ανεξάρτητη της δύναμης προέντασης και παρέχει ένα όριο ασφαλείας, καθώς είναι μεγαλύτερη τουλάχιστον 100Nm από τις υπόλοιπες. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί με σχετική ασφάλεια, έτσι ώστε να επιφέρει κάποια ελάχιστη γωνία στροφής στον κοχλία.

3.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων πειράματος και ανάλυσης

Οι κοχλίες του πειράματος παρουσίασαν συμπεριφορά κατά τη προένταση αρκετά διαφορετική από αυτή που προσομοιώθηκε στο μοντέλο 2. Οι διαφορές βρίσκονται στη μορφή των διαγραμμάτων αξονικής δύναμης – γωνίας σύσφιξης / ροπής σύσφιξης, αλλά και στα αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη. Αυτές οι διαφορές οφείλονται πρωτίστως στο ότι τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε συνθήκες εργοταξίου, χωρίς οργανωμένο ακριβή τρόπο καταμέτρησης των εφαρμοζόμενων γωνιών σύσφιξης και εντατικών μεγεθών. Επίσης, στα δεδομένα του πειράματος επηρεάζονται πολλές αβεβαιότητες, όπως ο ακριβής νόμος συμπεριφοράς του υλικού και ενδεχόμενη υπεραντοχή αυτού, οι συνθήκες τριβής μεταξύ των επιφανειών και η κατάσταση αυτών καθώς και η χρήση ροδελών. Επίσης υπάρχουν στοιχεία της προσομοίωσης, όπως η εφαρμογή των συνοριακών συνθηκών και οι λοιπές διαφορές στη γεωμετρία των μοντέλων οι οποίες ενδέχεται να επηρεάζουν τα αποτελέσματα σε κάποιο βαθμό. Αυτό δεν σημαίνει σε καμία περίπτωση ωστόσο ότι δεν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των αποτελεσμάτων, ή ότι κάποια από αυτά δεν παρουσιάζουν χρησιμότητα στη μελέτη των κοχλιωτών συνδέσεων.

Στον πίνακα 3.7 δίνονται οι τιμές της αξονικής δύναμης F_{max} (μέγιστη) και στο τέλος της προέντασης F_p , καθώς και η απαιτούμενη ροπή σύσφιξης, για τους δύο κοχλίες M24 του πειράματος, τον κοχλία του μοντέλου 2 και οι προτεινόμενες τιμές του EN3.

Πίνακας 3.9: Σύγκριση μεγεθών προέντασης

	Fmax	Fp	Mmax
M24.1	300,00	280,00	1800,00
M24.2	305,00	295,00	1500,00
model 2	279,20	272,63	1309,00
Fp	-	246,60	1491,00

Οι κοχλίες του πειράματος παρουσιάζουν σημαντικά υψηλότερη τιμή αξονικής δύναμης από το μοντέλο. Αυτό οφείλεται στο ότι ο συντελεστής τριβής ($\mu=0.12\sim 0.2$) του σπειρώματος των κοχλίων του πειράματος είναι μειωμένος σε σχέση με τον συντελεστή που χρησιμοποιήθηκε στη προσομοίωση ($\mu=0.2$), λόγω της χρήσης λιπαντικού. Όπως αποδείχθηκε πιο πάνω, ο συντελεστής τριβής επηρεάζει την αναπτυσσόμενη δύναμη καθώς μικρότερος συντελεστής, οδηγεί σε μεγαλύτερες τιμές αξονικής δύναμης. Για τον ίδιο λόγο διαφέρουν και οι τελικές τιμές προέντασης της κοχλιωτής σύνδεσης, οι οποίες όπως και στο μοντέλο εμφανίζουν μείωση λόγω της στένωσης που παρουσιάζεται στο σπείρωμα.

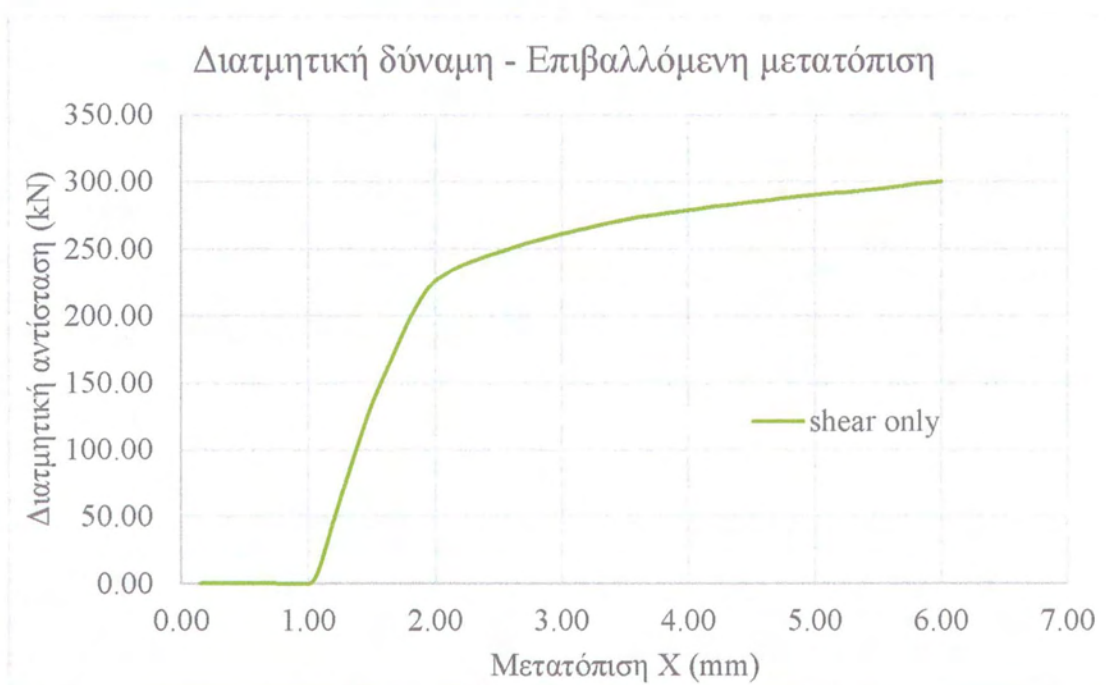
Οι τιμές της απαιτούμενης ροπής σύσφιξης παρουσιάζουν επίσης σημαντικές διαφορές για δύο λόγους. Πρώτον διότι η προένταση του πειράματος πραγματοποιήθηκε σε σύνδεση η οποία περιείχε ροδέλες, οι οποίες αυξάνουν τον αριθμό και το μέγεθος των επιφανειών που έρχονται σε επαφή και κατ' επέκταση και την αναπτυσσόμενη τριβή. Επίσης ο συντελεστής τριβής κοχλία – περικοχλίου είναι μικρότερος αυτού που χρησιμοποιήθηκε στην προσομοίωση ($\mu=0.2$) αλλά και ο συντελεστής τριβής μεταξύ κοχλία/περικοχλίου – ελασμάτων και ροδελών συνήθως εκλέγεται μεγαλύτερος ($\mu=0.5$). Δεύτερον, η αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στον κοχλία είναι υψηλότερη και όπως αναφέρθηκε πιο μπροστά, η ροπή σύσφιξης εξαρτάται άμεσα από την τιμή της.

Συγκρίνοντας τις τιμές του πειράματος και του μοντέλου με αυτές του EN3, φαίνεται ότι και η δύναμη προέντασης σχεδιασμού, αλλά και η ροπή σύσφιξης διαφέρουν. Η προτεινόμενη δύναμη προέντασης σχεδιασμού είναι μικρότερη κάνοντας συντηρητική εκτίμηση της φέρουσας ικανότητας του κοχλία, αλλά είναι υπέρ της ασφαλείας. Αντίθετα η ροπή σύσφιξης που απαιτείται για την προένταση των

κοχλίων του πειράματος είναι και στις δύο περιπτώσεις εμφανώς μεγαλύτερη. Αυτό χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή, καθώς ο υπολογισμός της M_c δεν λαμβάνει καθόλου υπόψη τον αριθμό, το είδος και την κατάσταση των επιφανειών των σωμάτων της κοχλιωτής σύνδεσης.

3.4 Διάτμηση κοχλιωτής σύνδεσης

3.4.1 Διάτμηση σε μη προεντεταμένο κοχλία



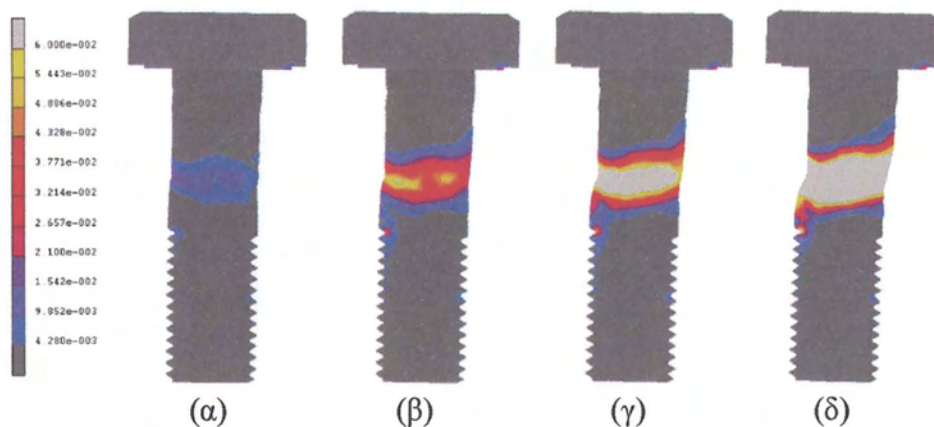
Εικόνα 3.22: Διάγραμμα διατμητικής δύναμης-μετατόπισης σε μη προεντεταμένο κοχλία

Παρατηρώντας το παραπάνω διάγραμμα βλέπουμε ότι διατμητική αντίσταση αναπτύσσεται μετά από μετατόπιση 1mm. Αυτό συμβαίνει διότι η διάμετρος της οπής των πλακών είναι 25mm ενώ ο κορμός του κοχλία 24mm. Οι δύο πλάκες έρχονται ταυτόχρονα σε επαφή με το σώμα του κοχλία και ο κοχλίας ξεκινά να παραμορφώνεται όταν οι τάσεις ξεπεράσουν το όριο διαρροής του υλικού. Η κρίσιμη περιοχή-διατομή βρίσκεται στο επίπεδο διάτμησης της σύνδεσης (μεταξύ των πλακών) και εκεί παρουσιάζονται οι μέγιστες παραμορφώσεις. (βλέπε εικόνα 3.22) Καθώς οι τάσεις αυξάνουν μέχρις ότου φτάσουν τις μέγιστες τάσεις-όριο κράτυνσης του υλικού, το σώμα του κοχλία στην κρίσιμη διατομή από κυκλικό παίρνει την μορφή έλλειψης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η αντίσταση σε διάτμηση να αυξάνει όχι

μόνο λόγω της αύξησης των τάσεων αλλά ταυτόχρονα και λόγω αύξησης του εμβαδού διάτμησης.

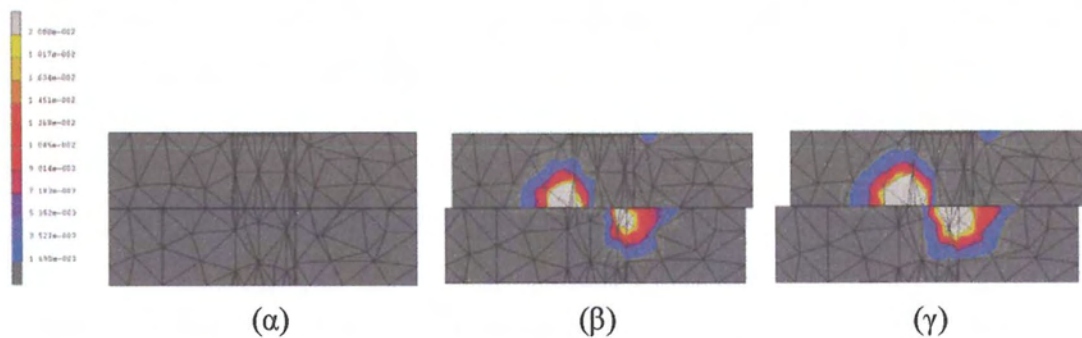
Μέγιστη διατμητική αντίσταση έχουμε όταν οι παραμορφώσεις στην κρίσιμη διατομή ξεπεράσουν το όριο κράτνσης του υλικού και αυτό συμβαίνει για $x=4.5mm$ όπου η αντίσταση σε διάτμηση είναι $F_{v,Rd} = 285 \text{ kN}$.

Στην εικόνα 3.23 φαίνεται η εξέλιξη των πλαστικών παραμορφώσεων στο σώμα του κοχλία καθώς αυξάνεται η μετατόπιση των πλακών.



Εικόνα 3.23: Ισοδύναμη πλαστική τροπή με κάτω όριο 4,28%(όριο διαρροής) και άνω όριο 6%(όριο κράτνσης): για: α) προσέγγιση ορίου διαρροής, β) εξάπλωση στη διατομή, γ) δημιουργία πρώτης πλαστικής διατομής σε κράτνση, δ) μετατόπιση 6mm

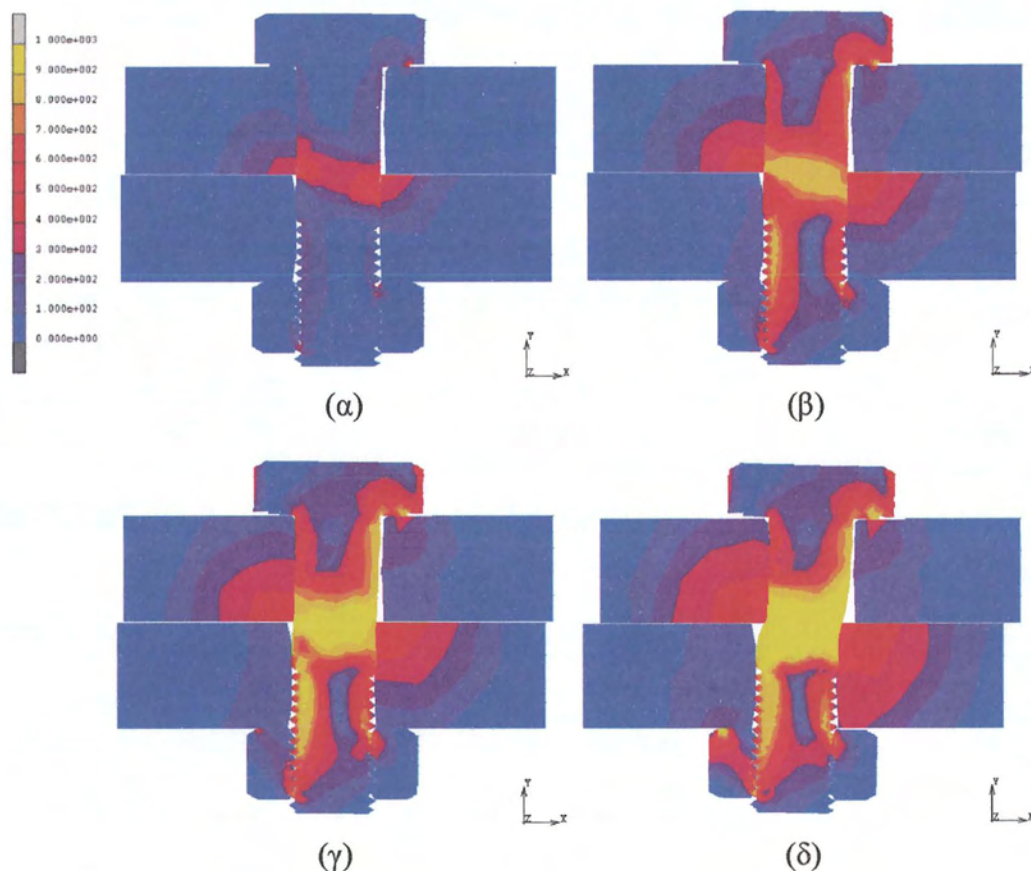
Στην εικόνα 3.24 φαίνεται η εξέλιξη των πλαστικών παραμορφώσεων στις πλάκες.



Εικόνα 3.24: Ισοδύναμη πλαστική τροπή με κάτω όριο 1.69%(όριο διαρροής) και άνω όριο 2%(όριο κράτνσης): για: α) $x=0mm$, β) $x=3mm$, γ) $x=6mm$

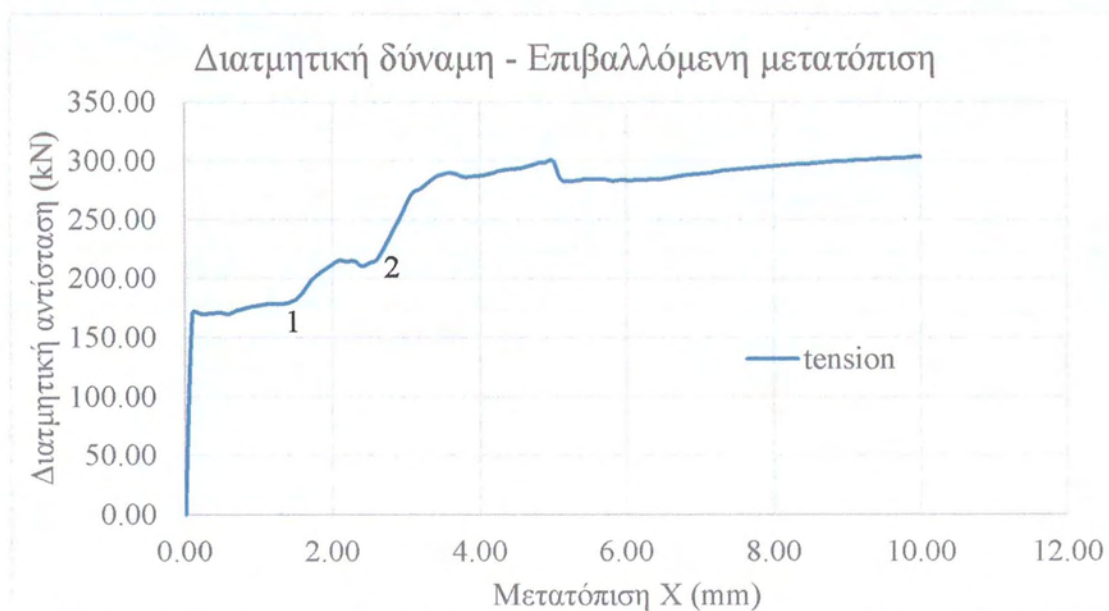
Στην εικόνα 3.25 φαίνεται η εξέλιξη των τάσεων στην σύνδεση καθώς αυξάνεται η μετατόπιση των πλακών.

Αριθμητική προσομοίωση προεντεταμένου κοχλία σε διάτμηση



Εικόνα 3.25: Τάσεις Von Mises με όριο από 0 έως 1000MPa: για μετατόπιση: α) $x=1,25mm$, β) $x=1,75mm$, γ) $x=2,15mm$, δ) $x=6mm$

3.4.2 Διάτμηση σε κοχλία ο οποίος έχει προηγουμένως υποβληθεί σε καθαρό εφελκυσμό

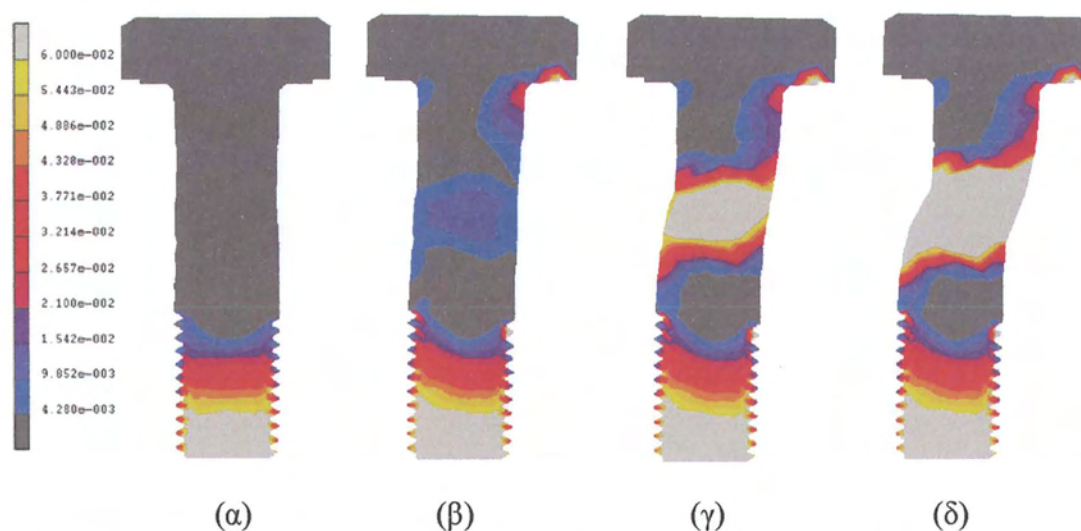


Εικόνα 3.26: Διάγραμμα διατμητικής δύναμης-μετατόπισης κοχλία ο οποίος έχει προηγουμένως υποβληθεί σε καθαρό εφελκυσμό

Η αρχική αντίσταση σε διάτμηση προέρχεται λόγω της επαφής των μελών και συνδέεται άμεσα με το βαθμό προέντασης του κοχλία αλλά και τον συντελεστή τριβής. Πρόκειται για την αντοχή σε ολίσθηση F_s, Rd . Στην συνέχεια η δύναμη παραμένει σχεδόν σταθερή μέχρι η πρώτη πλάκα να έρθει σε επαφή με το σώμα του κοχλία (σημείο 1). Από το σημείο αυτό και μετά η δύναμη αντίστασης αυξάνεται μέχρι η δεύτερη πλάκα να συναντήσει τον κοχλία (σημείο 2). Οι δύο πλάκες δεν έρχονται ταυτόχρονα σε επαφή με το σώμα του κοχλία διότι κατά την διαδικασία της προέντασης ο κοχλίας παίρνει μικρές μετατοπίσεις κατά τον άξονα X και όταν ξεκινάει το φαινόμενο της διάτμησης δεν είναι κεντραρισμένος.

Η αντίσταση σε διάτμηση συνεχίζει να αυξάνεται μέχρις ότου οι παραμορφώσεις στην κρίσιμη διατομή του σώματος του κοχλία ξεπεράσουν το όριο κράτνσης. Αυτό συμβαίνει για μετατόπιση $x=5,6\text{mm}$ όπου η αντίσταση σε διάτμηση είναι $F_v, Rd = 285,66 \text{ kN}$.

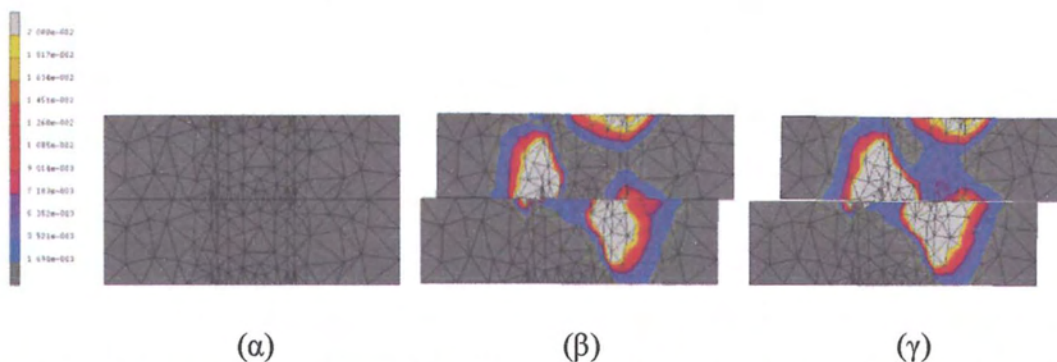
Στην εικόνα 3.27 φαίνεται η εξέλιξη των πλαστικών παραμορφώσεων στο σώμα του κοχλία μετά το τέλος της προέντασης καθώς αυξάνεται η μετατόπιση των πλακών.



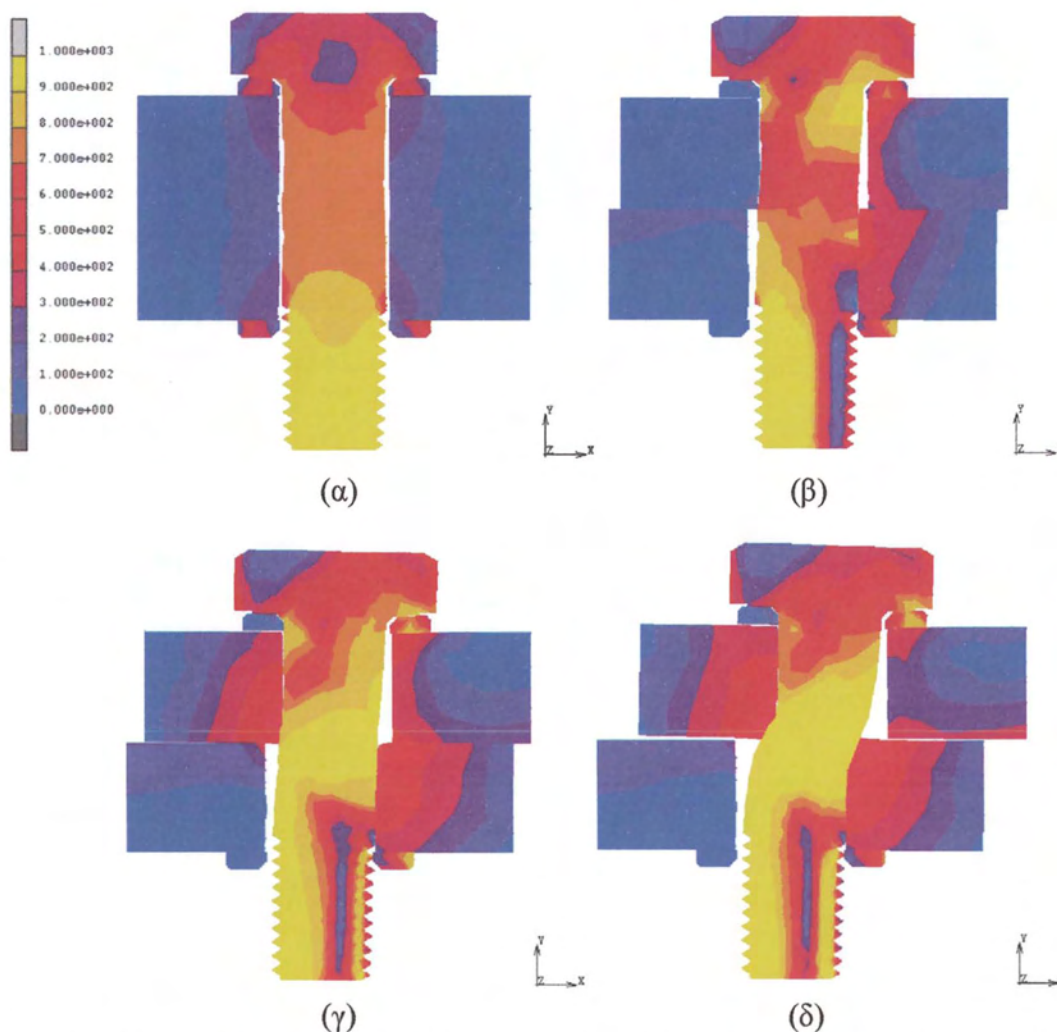
Εικόνα 3.27: Ισοδύναμη πλαστική τροπή με κάτω όριο 4,28‰(όριο διαρροής) και άνω όριο 6‰(όριο κράτνσης): για: α) τέλος καθαρού εφελκυσμού β) προσέγγιση ορίου διαρροής, γ) δημιουργία πρώτης πλαστικής διατομής σε κράτνση, δ) μετατόπιση 10mm

Στην εικόνα 3.28 φαίνεται η εξέλιξη των πλαστικών παραμορφώσεων στις πλάκες.

Αριθμητική προσομοίωση προεντεταμένου κοχλίου σε διάτμηση

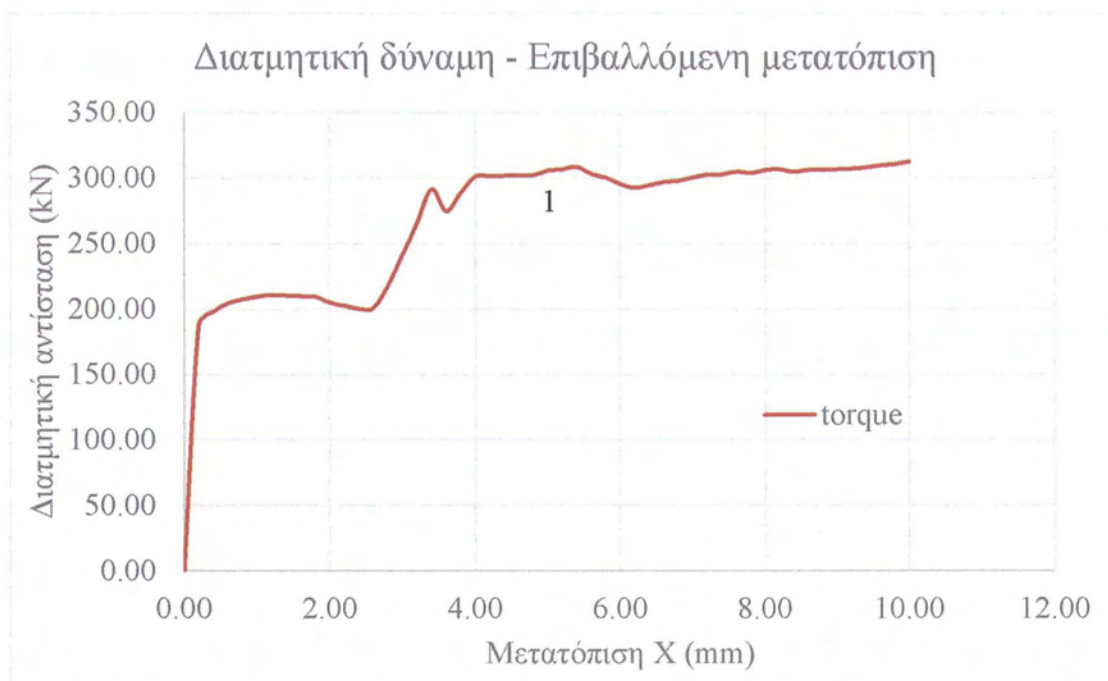


Εικόνα 3.28: Ισοδύναμη πλαστική τροπή με κάτω όριο 1.69% (όριο διαρροής) και άνω όριο 2% (όριο κράτησης): για: α) $x=0mm$, β) $x=5mm$, γ) $x=10mm$



Εικόνα 3.29: Τάσεις Von Mises με όριο από 0 έως 1000 MPa: για μετατόπιση: α) $x=0$, β) $x=2,5mm$, γ) $x=4,2mm$, δ) $x=10mm$

3.4.3 Διάτμηση σε κοχλία που έχει προηγουμένως προενταθεί με την μέθοδο της ελεγχόμενης στροφής για γωνιά 240°

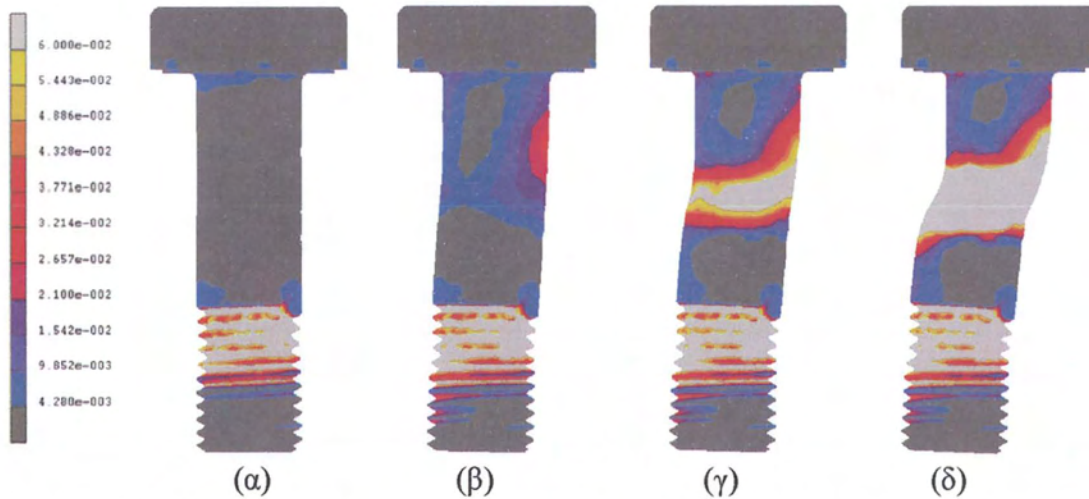


Εικόνα 3.30: Διάγραμμα διατμητικής δύναμης-μετατόπισης σε προεντεταμένο κοχλία ο οποίος έχει προενταθεί με την μέθοδο της στροφής για γωνία 240°

Το παραπάνω διάγραμμα έχει παρόμοια μορφή με το διάγραμμα διατμητικής αντίστασης-μετατόπισης για κοχλία ο οποίος προηγουμένως έχει δεχθεί εφελκυσμό. Αρχικά παρουσιάζει αντίσταση σε ολίσθηση και στην συνέχεια αυξάνεται η δύναμη αντίστασης σε διάτμηση του κοχλίου διότι οι πλάκες έρχονται σε επαφή με το σώμα του, καθώς σταδιακά αυξάνεται η μετατόπιση στον άξονα X.

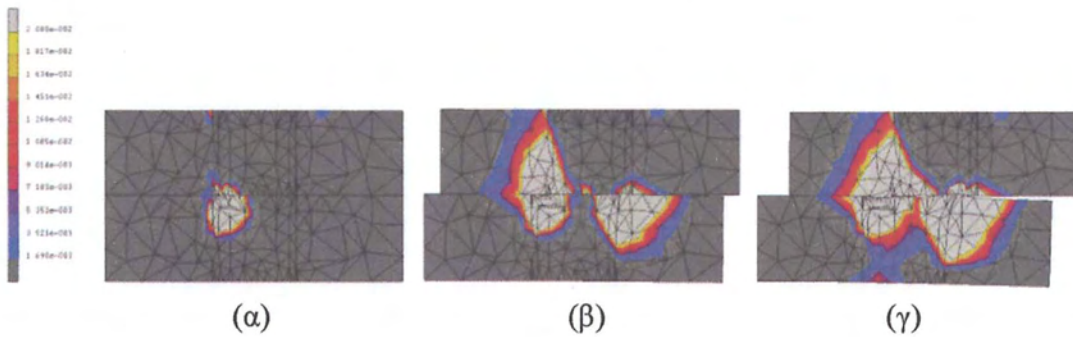
Μετά την μετατόπιση των 5mm όπου δημιουργείται η πρώτη πλαστική διατομή με κράτυνση παρατηρούμε ότι η διατμητική αντίσταση αυξάνεται λίγο (σημείο 1). Αυτό συμβαίνει λόγω αλλαγής του εμβαδού που συμμετέχει στην διάτμηση (ελλειψοειδής μορφή του σώματος του κοχλίου). Στην συνέχεια παρατηρούμε μια απότομη μείωση η οποία οφείλεται στην μερική ολίσθηση του ελάσματος ως προς τον κοχλία και έπειτα αφού ανακτήσει επαφή συνεχίζει με ανοδική πορεία.

Το μοντέλο αυτό παρουσιάζει την μέγιστη διατμητική αντοχή $F_v, Rd = 295.57 \text{ kN}$ για μετατόπιση $x=5\text{mm}$.

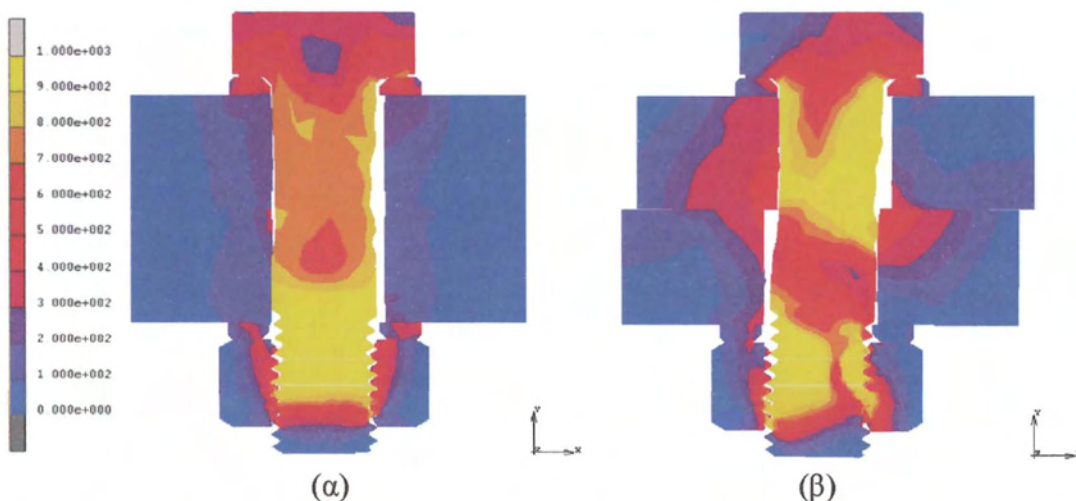


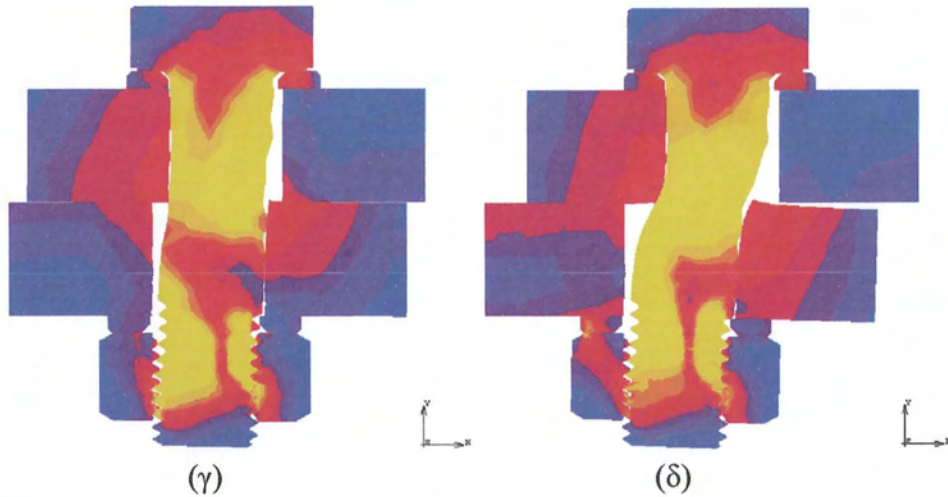
Εικόνα 3.31: Ισοδύναμη πλαστική τροπή με κάτω όριο 4,28%(όριο διαρροής) και άνω όριο 6%(όριο κράτνσης): για: α) τέλος προέντασης β) προσέγγιση ορίου διαρροής, γ) δημιουργία πρώτης πλαστικής διατομής σε κράτνση, δ) μετατόπιση 10mm

Στην εικόνα 3.32 φαίνεται η εξέλιξη των πλαστικών παραμορφώσεων στις πλάκες.



Εικόνα 3.32: Ισοδύναμη πλαστική τροπή με κάτω όριο 1,69%(όριο διαρροής) και άνω όριο 2%(όριο κράτνσης): για: α) $x=0mm$, β) $x=5mm$, γ) $x=10mm$



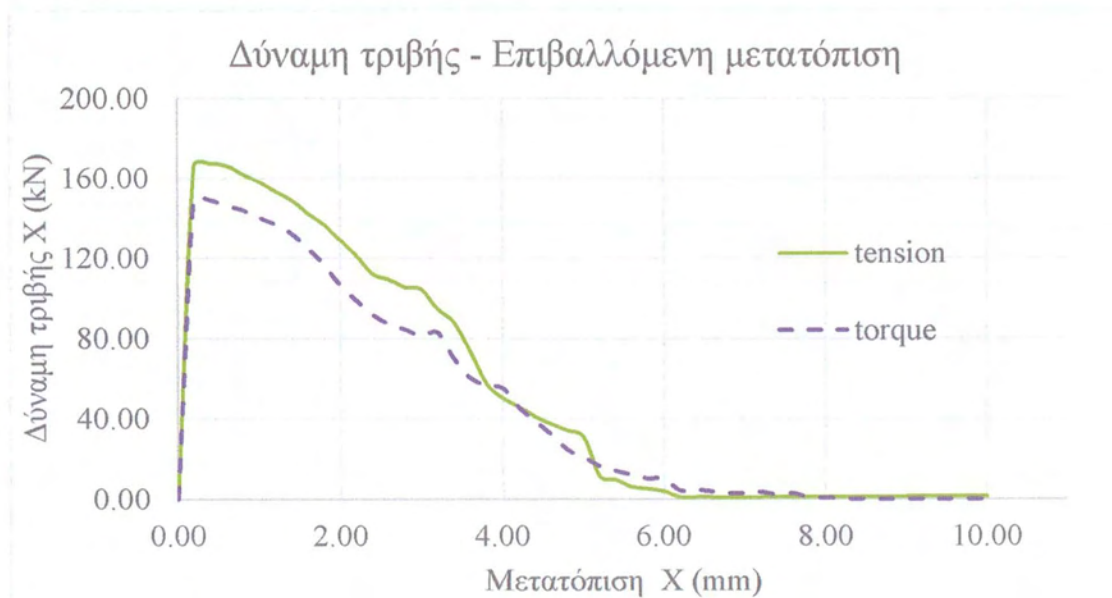


Εικόνα 3.33: Τάσεις Von Mises με όριο από 0 έως 1000MPa: για μετατόπιση: α) $x=0$, β) $x=2,5mm$, γ) $x=4,2mm$, δ) $x=10mm$

Παρατηρούμε ότι στα δύο μοντέλα που ο κοχλίας υποβάλλεται σε προένταση πριν την διάτμηση (καθαρός εφελκυσμός-σύσφιγξη 240°) η τελική αντοχή του κοχλίου δεν ξεπερνάει κατά πολύ την αντοχή που παρουσιάζει το μοντέλο στο οποίο ασκείται μόνο διάτμηση.

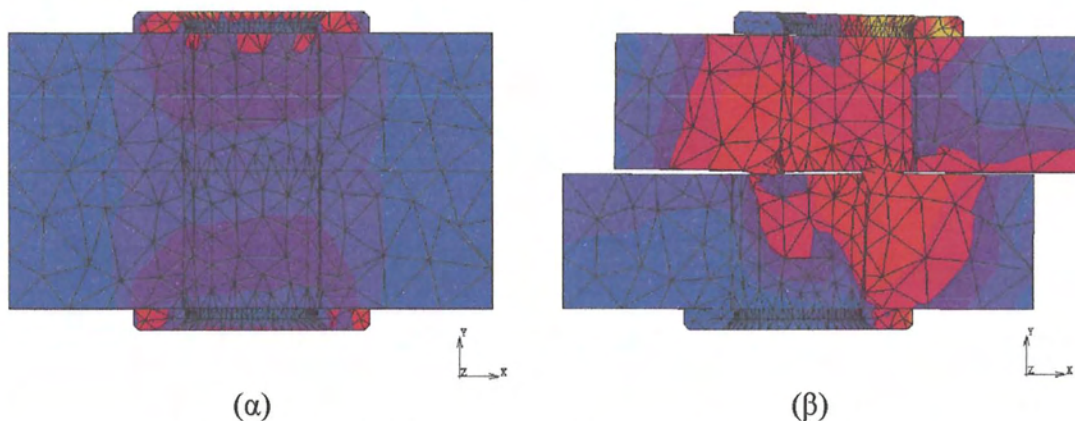
Αυτό συμβαίνει διότι ενώ η αντοχή σε διάτμηση του κοχλίου αυξάνεται καθώς αυξάνεται η μετατόπιση, αντίθετα η αντοχή σε ολίσθηση μειώνεται καθώς αυξάνεται η μετατόπιση αφού οι πλάκες χάνουν σταδιακά την επαφή μεταξύ τους.

Στην εικόνα 3.34 φαίνεται η μείωση της δύναμης τριβής μεταξύ των πλακών καθώς οι πλάκες μετατοπίζονται.



Εικόνα 3.34: Διάγραμμα δύναμης τριβής-μετατόπισης για κοχλίο που έχει υποβληθεί σε καθαρό εφελκυσμό και για κοχλίο που έχει σύσφιγξει για 240°

Στην εικόνα 3.35 φαίνεται η επαφή μεταξύ των πλακών πριν και μετά το τέλος της διάτμησης.



Εικόνα 3.35: Επαφή των πλακών για α) $x=0$, β) $x=10mm$

Η αρχική τιμή της αντίστασης σε ολίσθηση δίνεται στον πίνακα X και η τιμή της εξαρτάται από την τιμή της αξονικής στο τέλος της προέντασης. Το αξονικό φορτίο είναι 331 kN για τον καθαρό εφελκυσμό και 297 kN για την σύσφιγξη αντίστοιχα.

Στον πίνακα 3.8 παρουσιάζονται οι μέγιστες αντοχές σε ολίσθηση και διάτμηση των αριθμητικών μοντέλων καθώς και οι συνιστώμενες τιμές του Ευρωκώδικα 3.

Πίνακας 3.8: Μέγιστες αντοχές μοντέλων διάτμησης

	μέγιστη αντοχή σε ολίσθηση (kN)	μέγιστη αντοχή σε διάτμηση (kN)
μόνο διάτμηση	-	285
καθαρός εφελκυσμός	166	286
σύσφιγξη 240°	148	296
EN3 ($\mu=0.5$)	98.8	217

Πίνακας 3.9: Αποκλίσεις μέγιστων αντοχών αριθμητικών μοντέλων σε σχέση με τιμές του Ευρωκώδικα 3

	απόκλιση αντοχής ολίσθησης (%)	απόκλιση αντοχής διάτμησης (%)
μόνο διάτμηση	-	24
καθαρός εφελκυσμός	40	24
σύσφιγξη 240°	33	27
EN3 ($\mu=0.5$)	-	-

4^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

4.1 Συμπεράσματα

Η συμπεριφορά και η αποτελεσματικότητα μίας προεντεταμένης κοχλιωτής σύνδεσης τριβής, εξαρτάται από την εφελκυστική συμπεριφορά των κοχλιών της. Η αναπτυσσόμενη αξονική δύναμη στον κοχλία καθορίζει το εντατικό πεδίο της σύνδεσης, την αντοχή της σε ολίσθηση και διάτμηση.

Η αξονική δύναμη του κοχλία εξαρτάται άμεσα από τη τριβή που αναπτύσσεται στα μέρη της σύνδεσης, η οποία προκαλεί μια συνδυασμένη κατάσταση καταπόνησης εφελκυσμού – στρέψης στον κοχλία. Όσο ο συντελεστής τριβής “ μ ” αυξάνει, τόσο μειώνεται η ικανότητα του κοχλία να φέρει αξονικά φορτία και η επιμήκυνση του για δεδομένη γωνία σύσφιξης. Αντίθετα, όταν ο συντελεστής τριβής μειώνεται, η συμπεριφορά του κοχλία προσεγγίζει αυτή σε άμεσο εφελκυσμό. Σημαντικό ρόλο επίσης παίζει ο καταστατικός νόμος του υλικού, ο οποίος καθορίζει το πότε θα εμφανιστεί η μέγιστη δύναμη στον κοχλία. Το πώς αυτή θα εξελιχθεί στη συνέχεια της φόρτισης εξαρτάται από τον λόγο Poisson “ ν ” αλλά και από το διαθέσιμο μήκος σπειρώματος πάνω από το περικόχλιο, το οποίο έχει τη δυνατότητα να παραλάβει πλαστική παραμόρφωση.

Η συμπεριφορά του κοχλία κατά τη προένταση μιας κοχλιωτής σύνδεσης ελασμάτων μπορεί να προσομοιωθεί σε ικανοποιητικό βαθμό από ένα πείραμα σύσφιξης εφελκυσμού. Το πείραμα σύσφιξης – εφελκυσμού μπορεί να θεωρηθεί ως προένταση δύο άκαμπτων ελασμάτων. Η διαφορά μεταξύ των δύο περιπτώσεων βρίσκεται στην δυσκαμψία της σύνδεσης η οποία μειώνεται λόγω της παραμόρφωσης των πλακών. Τα εντατικά μεγέθη της προέντασης στη σύνδεση πρακτικά δεν επηρεάζονται από την χρήση των πλακών, καθώς εξαρτώνται αποκλειστικά από τη συμπεριφορά του κοχλία σε εφελκυσμό. Μετά τη διαρροή, η συμπεριφορά του κοχλία είναι ίδια και στα δύο μοντέλα.

Κατά τη διάρκεια της προέντασης οι μεγαλύτερες παραμορφώσεις και τάσεις εμφανίζονται στο κομμάτι του σπειρώματος του κοχλία, μεταξύ του περικοχλίου και του κορμού του. Το μέρος αυτό παραμορφώνεται έντονα πλαστικά κατά τη διάρκεια

της φόρτισης και είναι αυτό που ουσιαστικά καθορίζει την εφελκυστική συμπεριφορά του κοχλία. Αντίθετα, τα υπόλοιπα μέρη της σύνδεσης αλλά και ο κορμός του κοχλία παραμένουν στην ελαστική περιοχή καθ' όλη τη διάρκεια φόρτισης.

Η δύναμη προέντασης σχεδιασμού δεν είναι η μέγιστη δύναμη που αναπτύσσεται στον κοχλία κατά τη διάρκεια της φόρτισης. Αυτό οφείλεται στη στένωση που δημιουργείται στη διατομή του σπειρώματος του κοχλία με την αύξηση των παραμορφώσεων. Ο EN3 προτείνει συντηρητικές τιμές οι οποίες είναι αρκετά μικρότερες από αυτές που προκύπτουν στην πράξη και στα μοντέλα προσομοίωσης. Ωστόσο δεν λαμβάνει καθόλου υπόψη στον υπολογισμό τους παράγοντες που επηρεάζουν την τιμή της στο τέλος της προέντασης, όπως ο συντελεστής τριβής μεταξύ των σπειρωμάτων, ο νόμος και η υπεραντοχή του υλικού.

Η απαιτούμενη ροπή σύσφιξης της κοχλιωτής σύνδεσης αποτελείται από τρία διαφορετικά μέρη. Το πρώτο οφείλεται στην ανάπτυξη οριζοντίων δυνάμεων λόγω της μηχανικής εμπλοκής των σπειρωμάτων του συστήματος κοχλία – περικοχλίου. Η τιμή αυτή είναι ανεξάρτητη του συντελεστή τριβής. Το δεύτερο μέρος οφείλεται στη τριβή που αναπτύσσεται στα σπειρώματα κατά τη σύσφιξη και τα τρίτο στη τριβή που αναπτύσσεται μεταξύ των σωμάτων της σύνδεσης που έρχονται σε επαφή κατά τη διαδικασία της προέντασης. Το μέγεθος και των τριών ροπών εξαρτάται από την αναπτυσσόμενη αξονική δύναμη στον κοχλία. Η προτεινόμενη τιμή του EN3 είναι ανεξάρτητη από αριθμό, το είδος και την κατάσταση των επιφανειών των σωμάτων της κοχλιωτής σύνδεσης, παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την τελική τιμή της.

Η διατμητική αντοχή ενός κοχλία δεν επηρεάζεται από τον βαθμό προέντασής του. Εξαρτάται από τη θέση του επιπέδου διάτμησης καθ' ύψος του κοχλία αλλά και το εμβαδόν της διατομής του. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων παρουσιάζουν περίπου 25% μεγαλύτερη διατμητική αντοχή και τουλάχιστον 30% μεγαλύτερη αντοχή σε ολίσθηση από τις προτεινόμενες τιμές του EN3.

4.2 Σχόλια

Ο χρόνος και το υπολογιστικό κόστος που απαιτείται για την ανάλυση της προέντασης μιας κοχλιωτής σύνδεσης σε διάτμηση είναι υψηλό κάνοντας κάθε προσπάθεια έρευνας ιδιαίτερα κοπιαστική και χρονοβόρα. Επίσης η δυσχέρεια στη

χρήση του λογισμικού ανάλυσης, καθώς και η έλλειψη πηγών πληροφοριών εκμάθησης και υποστήριξης της χρήσης του αποτέλεσαν τροχοπέδη της εργασίας.

4.3 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Λόγω του αυξημένου υπολογιστικού κόστους, κρίνεται σκόπιμη η διερεύνηση άλλων τρόπων απλουστευτικής προσομοίωσης της διαδικασίας προέντασης. Αυτό θα διευκόλυνε την ανάλυση της συμπεριφοράς μιας πλήρους κοχλιωτής σύνδεσης τριβής. Επιπλέον, ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα παρουσίαζε η μελέτη της σύνδεσης αυτής κάτω από την επιβολή διαφορετικών θερμοκρασιακών συνθηκών. Τέλος, προτείνεται η διερεύνηση των τύπων του EN3 για τη δύναμη προέντασης σχεδιασμού και την απαιτούμενη ροπή σύσφιγξης, καθώς και η τροποποίησή τους ώστε να λαμβάνουν υπόψη την επίδραση του συντελεστή τριβής και των άλλων παραγόντων που επηρεάζουν την προένταση.

Βιβλιογραφία

- [1] Παπαδόπουλος, Α.Χ, εκπαιδευτικό υλικό, “Κοχλίες”, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών και Αεροναυπηγών
- [2] Κερμανίδης, Αλ., εκπαιδευτικό υλικό, “Κοχλίες”, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
- [3] Eurocode 3, Design of steel structures - Part 1-1, “General rules and rules for buildings”, 1993.
- [4] Blendulf, B., “Pushing the limits”
- [5] Kulak, G. L., Fisher, J. W., and Struik, J. H. A. (1987), “Guide to Design Criteria for Bolted and Riveted Joints, Chapter 4: Bolts”, Second Edition, Wiley-Interscience, New York.
- [6] Παπανικόλας, Π. (2005), “Προεντεταμένοι κοχλίες εφαρμογή στη γέφυρα Ρίου-Αντιρίου”, Μεταλλικές Κατασκευές, τεύχος 4.
- [7] Eurocode 0, Basis of structural design, 2001
- [8] DIN 18800, Part 1, “Structural steelwork – Design and construction”, 1990.
- [9] MSC.Marc 2011, User’s Guide, “Volume A: Theory and User Information”, MSC.Software Corporation
- [10] Γεωργιάδη-Στεφανίδη, Κ.,(2012), “Αριθμητική Προσομοίωση της Συμπεριφοράς Ινοπλισμένου Τσιμεντοκονιάματος για Δομικές Εφαρμογές”, Διδακτορική Διατριβή
- [11] DS SolidWorks 2013, What's New, “21, SolidWorks Simulation”, Dassault Systèmes SOLIDWORKS Corporation
- [12] MSC.Patran 2011, Patran Reference Manual, “Part 3: Finite Element Modeling”, chapter 1: “Introduction to Finite Element Modeling”, MSC.Software Corporation.
- [13] DIN 6914, High-strength hexagon head bolts with large widths across flats for structural steel bolting, 1989.
- [14] DIN 6915, Steel hexagon nuts with large width across flats for high-strength structural bolting, 1999.

- [15] DIN6916, Round washers for high-strength structural steel bolting, 1989
- [16] DIN 13-1, General purpose ISO metric screw threads, Part 1, “Nominal sizes for 1 mm to 68 mm diameter coarse pitch threads”, 1999.
- [17] McCarthy, C.T., McCarthy, M.A., Padhi, G.S. (2002), “Automated Three-Dimensional Finite Element Modelling of Composite Aircraft Bolted Joints - Modelling Issues”, Worldwide Aerospace Conference and Technology Showcase, Toulouse, 8-10 April.
- [18] Molnár, L., Váradi, K., Liktó, B. (2014), “Stress Analysis of Bolted Joints Part I: Numerical Dimensioning Method”, Modern Mechanical Engineering, Vol. 4 No. 1, pp. 35-45.
- [19] Brunesi, E., Nascimbene, R., Rassati, G.A., (2014), Response of partially-restrained bolted beam-to-column connections under cyclic loads, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 97, pp. 24-38.
- [20] Nasikas, S., Kallias Ntroumpis, D.F., Koukouselis, A., Mistakidis, E., (2015), “Simulation of bolt prestressing in steel shear connections”, 8th GRACM International Congress on Computational Mechanics, Volos, 12-15 July.



[11] DIXON, Ronald Warren for high-strength bolts and nuts. 1983.

[12] DIN 131. General purpose ISO metric screw threads. Part 1. Nominal sizes for 1 mm to 60 mm diameter coarse pitch threads. 1980.

[13] McElroy, C.T., McCarthy, M.V. Part 2: Automated Three-Dimensional Finite Element Modeling of Composite Aircraft Bolted Joints. *Aviation Space and Technology Progress*, Toulouse, 8-10 April.

[14] Mohr, E., Vural, K., Likor, B. (2014) Stress Analysis of Bolted Joints Part I: Numerical Dimensioning Method. *Modern Mechanical Engineering*, Vol. 4 No. 1, pp. 37-45.

[15] Binzel, E., Naeem, K., Rast, G.A. (2014) Response of partially-tensioned bolted beam-to-column connections under cyclic loads. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 97, pp. 24-38.

[16] Naeem, K., Khatib, M., Binzel, E., Khatib, M., Khatib, E. (2014) Simulation of bolt prestressing in steel beam connections. *8th GRACM International Conference on Computational Mechanics*, Vol. 13-14 July.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
 ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000125586