

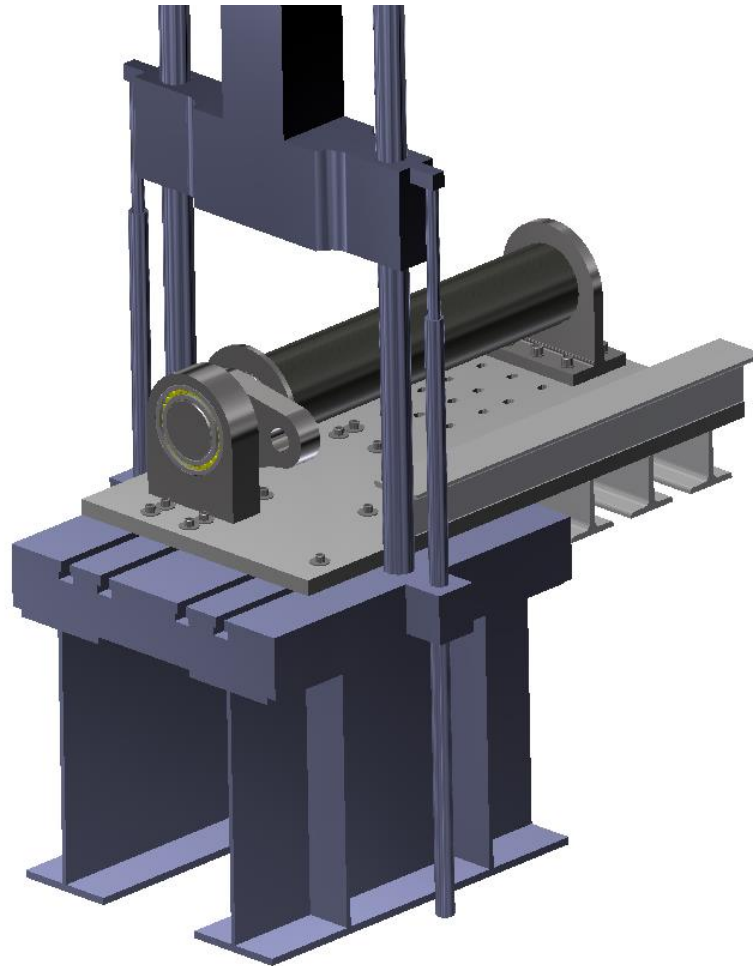


Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών
Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας

Διπλωματική Εργασία

Σχεδιασμός Ιδιοκατασκευής
Δοκιμών Στρέψης σε Άξονες από Σύνθετα Υλικά

Μαργαρίτης Ρομφαίας



Επιβλέπων: Ν. Γ. Τσούβαλης, Καθηγητής ΕΜΠ

Ιανουάριος 2021

Αφιερωμένη στον παππού μου, τον μεγαλύτερο μηχανικό που ξέρω.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα Καθηγητή Νικόλαο Τσούβαλη που μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με την παρούσα εργασία. Η συνεχής και ακούραστη καθοδήγηση, το έμπρακτο ενδιαφέρον και οι έγκαιρες παρεμβάσεις του, ήταν καταλυτικές για την ολοκλήρωσή της.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον υποψήφιο διδάκτορα Ηλία Μπιλάλη για την πολύτιμη συνεισφορά του σε όλους τους τομείς που αφορούν αυτή τη διπλωματική εργασία. Η βοήθειά του ήταν καθοριστική από την αρχή της έρευνας έως και την πραγματοποίηση των τελευταίων υπολογισμών.

Ευχαριστώ πολύ τον Καθηγητή Χρήστο Παπαδόπουλο για τον χρόνο που αφιέρωσε σχετικά με τα έδρανα της ιδιοκατασκευής.

Ευχαριστώ θερμά τα μέλη του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας, κ. Αθανάσιο Μαρκουλή και κ. Χάρη Ξάνθη για τις πληροφορίες τους σε τεχνικά ζητήματα του εξοπλισμού του Εργαστηρίου.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Carell S.A. και τον κ. Λεωνίδα Καρέλλη για την φιλοξενία του στις εγκαταστάσεις της εταιρίας και την προσφορά των γνώσεών του στις κατασκευές.

Ευχαριστώ πολύ την εταιρία Sielman S.A., τον κ. Αριστομένη Εφραιμίδη και τους συναδέλφους μηχανολόγους για τις συμβουλές τους σε τεχνικά θέματα.

Τέλος, είμαι ευγνώμων στους ανθρώπους που είναι κοντά μου, συγγενείς και φίλους, που με στηρίζουν όλα αυτά τα χρόνια με τον τρόπο τους, ιδιαίτερα αυτή τη δύσκολη τελευταία χρονιά.

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνήθηκε η εγκατάσταση διάταξης δοκιμών στρέψης σε άξονες από σύνθετα υλικά, στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, για την κάλυψη των αναγκών ερευνών και διπλωματικών εργασιών. Κύριο μέλημα της εργασίας είναι η αξιοποίηση του υπάρχοντος εξοπλισμού του εργαστηρίου.

Αρχικά, δίνονται οι προδιαγραφές των δοκιμών στρέψης, όπως έχουν θεσπιστεί από τους Νηογνώμονες (DNV-GL). Με βάση αυτές τις προδιαγραφές γίνεται μια μικρή έρευνα αγοράς διατάξεων στρέψης, με ειδοποιό διαφορά το είδος της κινητήριας μονάδας. Έπειτα, παρουσιάζεται ο υποψήφιος εξοπλισμός του εργαστηρίου, που μπορεί να αποτελέσει την παροχή κίνησης τέτοιων διατάξεων.

Αφού γίνει η επιλογή της καταλληλότερης μονάδας του εργαστηρίου, της μηχανής εφελκυσμού MTS 322.31, τίθενται οι προδιαγραφές στρέψης που στοχεύει η διάταξη. Στην συνέχεια, σχεδιάζονται πιθανές διατάξεις, που διαχωρίζονται με βάση το μηχανισμό απόδοσης της στρέψης και την σχετική θέση της διάταξης με την μονάδα εφελκυσμού. Η επιλογή γίνεται λαμβάνοντας υπόψη την αντοχή της μονάδας και την απλότητα της κατασκευής.

Η γεωμετρία της επιλεγμένης διάταξης αναπαρίσταται, μαζί με την μονάδα MTS, σε τρισδιάστατο σχέδιο στο πρόγραμμα Autodesk Inventor 2019, με σκοπό τον έλεγχο συνεργασίας διάταξης στρέψης - μηχανής εφελκυσμού. Ο έλεγχος πραγματοποιείται με αναλυτική μέθοδο, αλλά και στο πρόγραμμα ANSYS Workbench 19.2, καταστρώνοντας ένα μοντέλο άκαμπτων σωμάτων σε ανάλυση Rigid Dynamics. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η ισορροπία της διάταξης είναι εξασφαλισμένη.

Επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός των διαστάσεων των μερών της διάταξης, αφού τεθεί ο ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας και το μέγιστο αποδεκτό βέλος κάμψης των σωμάτων. Οι διαστάσεις προκύπτουν από έναν συνδυασμό γεωμετρικών περιορισμών και υπολογισμών στατικής αντοχής. Οι γεωμετρικοί περιορισμοί καθορίζονται από μια ελάχιστη απόσταση ασφαλείας μεταξύ των συνεργαζόμενων μερών. Οι υπολογισμοί αντοχής γίνονται στο πρόγραμμα ANSYS Workbench 19.2, αρχικά σε μεμονωμένα σώματα και τελικά στο συναρμολογημένο μοντέλο της διάταξης.

Η εργασία καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η ιδιοκατασκευή που σχεδιάστηκε είναι ικανή να πραγματοποιήσει στατικές δοκιμές στρέψης αξόνων μήκους έως και 1000 mm και διαμέτρου έως 300 mm. Η μέγιστη ροπή που επιτυγχάνει με ασφάλεια η διάταξη είναι τα 20 kN-m, ενώ η μέγιστη γωνία στροφής οι 10 deg. Τέλος, συμπεριλήφθηκε στους υπολογισμούς η αντοχή των συνδέσεων, για την περίπτωση αξιοποίησης της διάταξης για δοκιμές στρεπτικής κόπωσης.

Περιεχόμενα

1.	Εισαγωγή	9
1.1.	Προδιαγραφές Στρεπτικών Δοκιμών Αξόνων από Σύνθετα Υλικά.....	9
1.2.	Είδη Στρεπτικών Μηχανών	10
1.3.	Έρευνα Αγοράς.....	10
1.4.	Αξιοποιήσιμος Εξοπλισμός Εργαστηρίου.....	13
2.	Μηχανή Εφελκυσμού/Θλίψης του Εργαστηρίου	15
2.1.	Μηχανικά Μέρη και Λειτουργία	15
2.2.	Κύριες Διστάσεις, Μάζα και Μηχανική Αντοχή.....	16
3.	Σχεδίαση Πιθανών Διατάξεων.....	21
3.1.	Παράμετροι Σχεδίασης	21
3.2.	Διάταξη 1 ^η – Οδοντωτός Τροχός και Κανόνας	23
3.2.1.	Διάταξη 1.1 - Ομόκεντρα με Έμβολο	26
3.2.2.	Διάταξη 1.2 - Έκκεντρα από Έμβολο	28
3.3.	Διάταξη 2 ^η – Μοχλοβραχίονας.....	31
3.3.1.	Διάταξη 2.1 - Ομόκεντρα με Έμβολο	32
3.3.2.	Διάταξη 2.2 - Έκκεντρα από Έμβολο	36
3.4.	Επιλογή Τελικής Διατάξης.....	43
4.	Προκαταρκτικός Σχεδιασμός Διατάξης και Ανάλυση με Πεπερασμένα Στοιχεία ...	45
4.1.	Ισορροπία και Δυνάμεις στη Μηχανή Εφελκυσμού.....	45
4.1.1.	Δυναμική Ανάλυση Άκαμπτων Σωμάτων	49
4.2.	Βραχίονας.....	55
4.2.1.	Στατική Ανάλυση	56
4.3.	Ισοδύναμο Δοκίμιο από Χάλυβα.....	64
4.3.1.	Υπολογισμός Μέτρου Ελαστικότητας	65
4.4.	Άξονας Πρόσδεσης.....	65
4.4.1.	Υπολογισμός Διαστάσεων	66
4.4.2.	Στατική Ανάλυση	68
4.5.	Στήριξη Κίνησης.....	77
4.5.1.	Διερεύνηση Εδράνων	77
4.5.2.	Επιλογή Εδράνων.....	80
4.5.3.	Σχεδίαση Στήριξης Κίνησης	82

4.6.	Στήριξη Πάκτωσης	83
4.7.	Βάση.....	85
4.8.	Συναρμολογημένη Διάταξη - 1 ^η Στατική Ανάλυση.....	87
4.8.1.	Προ-επεξεργασία.....	88
4.8.2.	Επίλυση.....	95
4.8.3.	Μετ-Επεξεργασία	96
4.9.	Συναρμολογημένη Διάταξη – 2 ^η Στατική Ανάλυση	106
4.9.1.	Ενίσχυση Βάσης.....	107
4.9.2.	Προ-Επεξεργασία	109
4.9.3.	Επίλυση.....	113
4.9.4.	Μετ-Επεξεργασία	113
5.	Συνδέσεις & Ανάλυση Τελικής Συναρμολογημένης Διάταξης.....	123
5.1.	Σύνδεση Βραχίονα-Άξονα Πρόσδεσης.....	123
5.2.	Κοχλιοσυνδέσεις.....	125
5.2.1.	Στήριξη Κίνησης	126
5.2.2.	Στήριξη Πάκτωσης	130
5.2.3.	Ενισχυμένη Βάση.....	133
5.3.	Στατική Ανάλυση.....	136
5.3.1.	Προ-Επεξεργασία	136
5.3.2.	Σύγκλιση Πλέγματος.....	143
5.3.3.	Δημιουργία Πλέγματος.....	151
5.3.4.	Επίλυση.....	163
5.3.5.	Μετ-Επεξεργασία	164
6.	Οδηγίες Συναρμολόγησης – Αποσυναρμολόγησης.....	176
7.	Συμπεράσματα-Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα.....	180
	Βιβλιογραφία.....	181
	Παράρτημα Α. Τυπολόγιο Υπολογισμών Αντοχής Σύνδεσης Πολύσφηνου.....	182
	Παράρτημα Β. Τυπολόγιο Υπολογισμών Αντοχής Κοχλιοσύνδεσης.....	192

1. Εισαγωγή

1.1. Προδιαγραφές Στρεπτικών Δοκιμών Αξόνων από Σύνθετα Υλικά

Πριν ξεκινήσει η σχεδίαση οποιασδήποτε μηχανής δοκιμών, ο σχεδιαστής οφείλει να αναζητήσει τις απαιτήσεις που θέτουν οι εκάστοτε φορείς για την διεξαγωγή της συγκεκριμένης δοκιμής. Άξονες με διαφορετικές λειτουργικές εφαρμογές έχουν και διαφορετικές απαιτήσεις τόσο στις μηχανικές τους ιδιότητες, όσο και στις πειραματικές δοκιμές τους. Ως Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, το ενδιαφέρον μας στρέφεται στις δοκιμές αξόνων πλοίων. Οι φορείς σε αυτή την περίπτωση είναι οι Νηογνώμονες, οι οποίοι γεμίσαν το κενό που υπήρχε τα τελευταία χρόνια, θεσπίζοντας προδιαγραφές για την κατασκευή και την δοκιμή αξόνων από σύνθετα υλικά, με σκοπό την ασφαλέστερη λειτουργία των πλοίων που εξοπλίζονται με αυτούς. Μέρος των ευρύτερων προδιαγραφών για άξονες από σύνθετα υλικά στα πλοία αναγράφεται στη συνέχεια και αφορά κυρίως στις δοκιμές μη μεταλλικών αξόνων.

Σύμφωνα με τον Νηογνώμονα DNV-GL, οι άξονες από σύνθετα υλικά, πιο συγκεκριμένα υαλονήματος ή ανθρακονήματος με μήτρα εποξική ρητίνη, πρέπει να υποβάλλονται σε δοκιμή στρέψης υπό στατικό φορτίο και, αν απαιτείται, σε στρεπτική δοκιμή κόπωσης (DNV-GL 2015). Η κλάση προδιαγράφει τον απαραίτητο εξοπλισμό για τη δοκιμή στρέψης, ο οποίος υπερκαλύπτει και την δοκιμή κόπωσης, ως τον ακόλουθο:

- Εξοπλισμός για συνεχή μέτρηση της ροπής με αβεβαιότητα μικρότερη του 4%.
- Εξοπλισμός για συνεχή μέτρηση της γωνίας στροφής μεταξύ των φλαντζών των δύο άκρων με αβεβαιότητα ανάλογη του μεγέθους του άξονα.
- Εξοπλισμός για συνεχή καταγραφή ροπής-γωνίας στροφής.

Συνιστάται, επίσης, επιπλέον εξοπλισμός, όπως strain gauges, για την συλλογή περαιτέρω πληροφοριών για την απόδοση του άξονα και για την επαλήθευση των υπολογισμών σχεδίασης. Αναφορικά, η δοκιμή ενδείκνυται να πραγματοποιηθεί σε θερμοκρασία μεταξύ 17-27 βαθμών Κελσίου και σχετική υγρασία μεταξύ 35-90%.

Το δοκίμιο υποβάλλεται σε καθαρή στρέψη για τέσσερις διαφορετικές συνθήκες φόρτισης. Οι πρώτες τρεις θέλουν το δοκίμιο να φορτιστεί έως την μέγιστη ροπή σχεδίασης και να αποφορτιστεί πάλι έως το μηδέν. Στην τέταρτη αφαιρείται ο επιπλέον εξοπλισμός και το δοκίμιο στρέφεται μέχρι να επέλθει η θραύση του. Σε όλες τις δοκιμές, η φόρτιση/αποφόρτιση του δοκιμίου πρέπει να γίνει, το ελάχιστο, σε χρονικό διάστημα 1 λεπτού. Τέλος, αναφέρει πως όλες οι παρτίδες αξόνων, θα πρέπει να έχουν δοκιμαστεί στο 150% της προδιαγραφής μέγιστης ροπής τους, πριν εξοπλίσουν κάποιο πλοίο.

Από όλα τα παραπάνω, συμπεραίνουμε ότι μια διάταξη δοκιμών στρέψης, για να καλύπτει τις προδιαγραφές των Νηογνωμόνων, θα πρέπει αρχικά να σχεδιαστεί ώστε να συνεργάζεται ή να ενσωματώνει τον εξοπλισμό που αναφέρθηκε. Επιπλέον, μεγάλη σημασία έχουν οι ανοχές σχεδίασης και η στιβαρότητα της κατασκευής, ώστε να μην επιβάλλονται στο δοκίμιο άλλες φορτίσεις (π.χ. κάμψη) πέρα από καθαρή στρέψη. Επίσης ο κινητήριος μηχανισμός φόρτισης της διάταξης πρέπει να αποδίδει την ισχύ του γραμμικά και με ελεγχόμενη μικρή ταχύτητα. Η

ισχύς αυτή οφείλει να είναι τουλάχιστον αρκετή για καταστροφικές δοκιμές αξόνων μετάδοσης κίνησης που εξοπλίζουν πλοία.

1.2. Είδη Στρεπτικών Μηχανών

Ο κύριος διαχωρισμός μεταξύ των συστημάτων δοκιμών αξόνων σε στρέψη αφορά στην κινητήρια διάταξη που πραγματοποιεί τη στρέψη. Στο εμπόριο συναντώνται συνήθως δύο είδη διατάξεων, το καθένα με τις δικές του παραλλαγές. Η μία αξιοποιεί έναν υδραυλικό κινητήρα, είτε σε απευθείας σύνδεση με τον άξονα, είτε με παρεμβολή ενός μειωτήρα στροφών. Η άλλη χρησιμοποιεί ηλεκτρικό κινητήρα απαραίτητως σε σύνδεση με κάποιο κιβώτιο μείωσης στροφών για να επιτευχθεί η απαραίτητη ταχύτητα στροφής και ροπή. Οι δύο διαφορετικές διατάξεις θα αναπτυχθούν στη συνέχεια.

Υπάρχει επίσης η περίπτωση ιδιοκατασκευής που δεν συναντάται σε μαζική παραγωγή η οποία στρέφει άξονες με την χρήση ενός ή περισσότερων υδραυλικών εμβόλων, το οποίο (τα οποία) συνδέεται σε κάποιον μογλοβραχίονα για μεγιστοποίηση της ροπής. Τέτοιες διατάξεις είναι γνωστό πως δίνουν αξιόπιστα αποτελέσματα (Bilalis 2016) και μπορούν να φθάσουν σε ικανοποιητικές τιμές ροπής. Η περίπτωση της προηγούμενης βιβλιογραφικής αναφοράς θα εξεταστεί εκτενώς για την αξιοποίηση της υδραυλικής μηχανής εφελκυσμού που διαθέτει η Σχολή στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας. Εάν αυτό δεν είναι εφικτό, θα αναλυθεί η περίπτωση ιδιοκατασκευής χρησιμοποιώντας μηχανήματα και διατάξεις του εμπορίου.

Οι σερβοϋδραυλικές μηχανές, όπως αποκαλούνται, αποτελούνται από ένα υδραυλικό έμβολο που δημιουργεί την κίνηση, μια σερβοβαλβίδα που ελέγχει την κίνηση και ένα σύστημα παροχής λαδιού υψηλής πίεσης. Οι υδραυλικοί κινητήρες χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου απαιτείται υψηλή ροπή σε χαμηλές στροφές. Η λειτουργία τους βασίζεται στην μετατροπή της υδραυλικής ενέργειας που τους παρέχει μια αντλία σε μηχανική με αποτέλεσμα την περιστροφή μιας ατράκτου. Για να αντέξουν τις υψηλές πιέσεις πρέπει να είναι στιβαρές κατασκευές οι οποίες μπορούν να υπερφορτιστούν και να δώσουν υψηλή ροπή ακόμα και σε στατική κατάσταση, χαρακτηριστικό πολύ σημαντικό για μια μηχανή στρέψης.

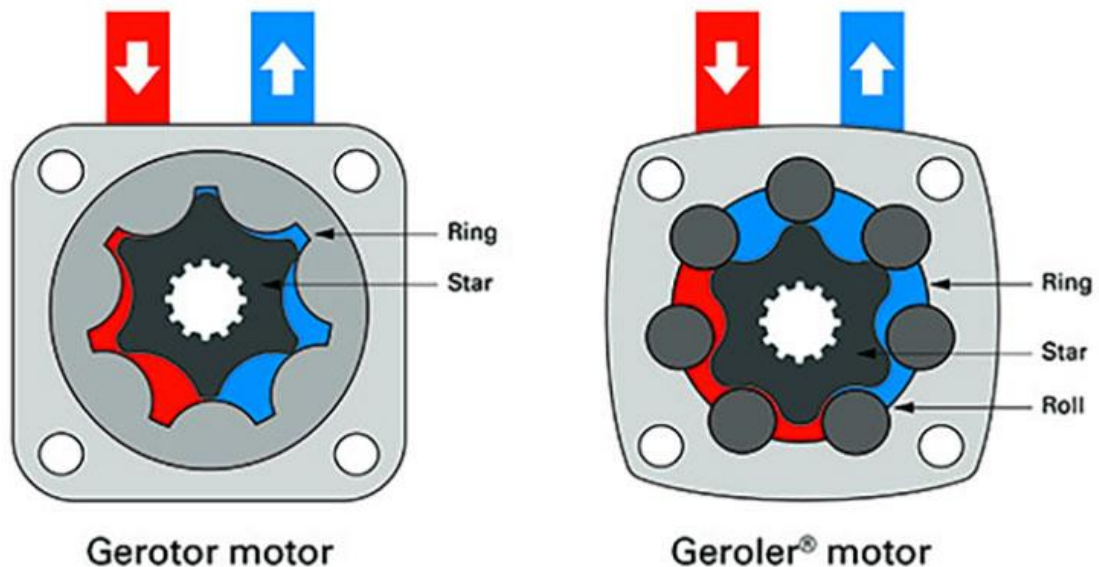
1.3. Έρευνα Αγοράς

Οι υδραυλικοί κινητήρες που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε μια μηχανή στρέψης είναι:

- Κινητήρες οδοντωτών τροχών
- Εμβολοφόροι κινητήρες (αξονικοί και ακτινικοί)

Οι κινητήρες οδοντωτών τροχών εσωτερικής οδόντωσης (βλ. Σχήμα 1.1) λειτουργούν όπως ένας περιστροφικός κινητήρας. Συγκεκριμένα οι επονομαζόμενοι “Gerotors” και “Gerolers®” έχουν υψηλή σχέση ροπής προς εκτόπισμα και είναι σχετικά βραδύστροφοι (λιγότερες από 300 σ.α.λ.). Σε συνδυασμό με την απόδοση ροπής που ξεπερνάει τα 3,000 Nm αποτελούν μια συμπαγή, μικρού μεγέθους λύση σε συνδυασμό με έναν μειωτήρα που ο λόγος μείωσής του

αυξάνει αντίστοιχα και την ροπή στην έξοδό του. Συνεπώς ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του κινητήρα, μπορούν να δοκιμαστούν άξονες μικρού έως και μεγάλου μεγέθους.



Σχήμα 1.1. Τομές Υδραυλικών Κινητήρων Εσωτερικής Οδόντωσης

Στην αγορά, παρόλο που οι περισσότερες εταιρίες δεν αναφέρουν το είδος του υδραυλικού κινητήρα, οι υδραυλικές μηχανές στρέψης έχουν συνήθως “Gerolers®”. Ένα ολοκληρωμένο πακέτο μηχανήματος στρέψης αποτελείται από τον υδραυλικό κινητήρα, την σερβοβαλβίδα μαζί με το δίκτυο σωληνώσεών της, τη ροποκυβέλη (διάταξη μέτρησης της επιβαλλόμενης ροπής, torque cell) και το τραπέζι αντίδρασης πάνω στο οποίο θα συναρμολογηθούν όλα τα μέρη. Με σκοπό την αγορά ενός τέτοιου πακέτου, η σχολή ήρθε σε επικοινωνία με την “MTS Systems GmbH”, η οποία προσέφερε το Νοέμβριο του 2018 το μηχάνημα στρέψης της σειράς MTS 215, μέγιστης δυνατότητας 11,3 kN-m και μέγιστου μήκους δοκιμίου 800 mm, στα 144.963,51€ (συμπεριλαμβανομένου 24% Φ.Π.Α) μαζί με τις υπηρεσίες συναρμολόγησής του. Από περαιτέρω αναζήτηση στο διαδίκτυο βρέθηκαν αρκετές ακόμα μηχανές δοκιμών στρέψης, με ή χωρίς τιμές πώλησης που παρατίθενται στη συνέχεια:

- MTS Series 216 με απόδοση 22 kN-m – 82 kN-m
(https://nanopdf.com/download/series-216-rotary-actuators_pdf)
- TestResources 960 Series με απόδοση έως 80 kN-m
- Walter + Bai LFV-T Servohydraulic Torsional Testing Systems για στατικές και δυναμικές δοκιμές αξόνων έως 16 kN-m
(https://www.walterbai.com/page/products/Materials_Testing_Systems/Torsional_Testing_Systems/LFV-T_Servohydraulic_Torsional_Testing_Systems.php)

Οι εμβολοφόροι κινητήρες (Σχήμα 1.2) παρουσιάζουν τους υψηλότερους βαθμούς απόδοσης από όλους τους κινητήρες. Από αυτούς οι ακτινικοί παρουσιάζουν τα καλύτερα χαρακτηριστικά για στρέψη. Η διάταξή τους είναι όμοια με των ακτινικών κινητήρων εσωτερικής καύσης, δηλαδή αποτελούνται από 3 και άνω έμβολα, ακτινικά τοποθετημένα προς

την άτρακτο. Η ροπή τους πολλές φορές ξεπερνάει τα 20,000 Nm σε όχι περισσότερες από 50 σ.α.λ., με υψηλή ροπή θεωρητικά από τις 0 σ.α.λ. Συμπερασματικά μπορούν να συνδεθούν απευθείας με τον άξονα στρέψης ή με κάποιο μειωτήρα για καλύτερο έλεγχο της γωνίας στροφής και μεγαλύτερες ροπές ώστε να δοκιμαστούν ακόμα και κύριοι άξονες πλοίων.



Σχήμα 1.2. Ακτινικός Υδραυλικός Εμβολοφόρος Κινητήρας

Οι περισσότερες διατάξεις στρέψης στην αγορά χρησιμοποιούν ηλεκτρομηχανική διάταξη (Σχήμα 1.3), που αποτελείται από έναν ηλεκτροκινητήρα και ένα σύστημα μείωσης στροφών με ένα ή παραπάνω γρανάζια. Ο ηλεκτροκινητήρας είναι συχνότερα εναλλασσόμενος, αλλά δεν αποκλείεται και συνεχούς ρεύματος, με ή χωρίς μόνιμους μαγνήτες ή βηματικός κινητήρας, ανάλογα με την απαίτηση ροπής. Το προτέρημα των διατάξεων αυτών είναι η δυνατότητα που δίνει στο χρήστη για μεγάλο εύρος ταχύτητας στρέψης, λόγω των διάφορων επιλογών μειωτήρα και του μεγάλου εύρους στροφών του ηλεκτροκινητήρα στο οποίο διατηρεί υψηλή ροπή. Επίσης, σε αντίθεση με τους υδραυλικούς, δεν απαιτείται παροχή λαδιού υψηλής πίεσης παρά μόνο μια παροχή ηλεκτρικού ρεύματος, γεγονός που κάνει ευκολότερη και φθηνότερη την εγκατάσταση. Τα μειονεκτήματα αφορούν κυρίως στον μειωτήρα, διότι σε περίπτωση υψηλών ροπών, η απαίτηση για υψηλές αντοχές οδηγούν στην αύξηση του όγκου και του βάρους του. Αποτέλεσμα αυτού είναι επιλογή ισχυρότερου ηλεκτροκινητήρα για να στραφεί η μειωτική διάταξη, με αντίστοιχο αντίκτυπο στο συνολικό κόστος της διάταξης.



Σχήμα 1.3. Συμβατική Ηλεκτρομηχανική Διάταξη

1.4. Αξιοποιήσιμος Εξοπλισμός Εργαστηρίου

Το κύριο μέλημα αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη αξιοποίησης του εξοπλισμού που διαθέτει το Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας. Ξεκινώντας από τον πιο ευέλικτο, στο χώρο του εργαστηρίου υπάρχει ηλεκτροκίνητος γερανός δυναμικότητας 5 τόνων, ο οποίος κινείται πάνω σε ράγες κοντά στην οροφή του κτηρίου. Η δύναμη που εφαρμόζει στον γάντζο του θα μπορούσε να αξιοποιηθεί από έναν αρθρωτό βραχίονα για την εφαρμογή ροπής σε διάταξη που βρίσκεται πακτωμένη στο δάπεδο του κτηρίου. Μειονεκτήματα αυτής της διάταξης είναι η εφαρμογή δύναμης μόνο προς μια κατεύθυνση, ο μη επαρκής, για διάταξη στρέψης, χειρισμός και έλεγχος της δύναμης του κινητήρα (κυρίως στην αποφόρτιση) και η δέσμευση μεγάλου χώρου.

Στο εργαστήριο υπάρχουν επιπλέον δύο μηχανές δοκιμών εφελκυσμού/θλίψης. Αξιοποιώντας μια τέτοια μονάδα, η ζητούμενη διάταξη αποτελείται από ένα μοχλοβραχίονα (ή κάτι ισοδύναμο), ο οποίος από τη μία πλευρά θα συνδέεται με άρθρωση στο υδραυλικό έμβολο της υπάρχουσας μηχανής και από την άλλη στο δοκίμιο που θα υποβληθεί σε στρέψη. Το δοκίμιο θα στηρίζεται από τη μία άκρη σε έδρανο, το οποίο θα παραλαμβάνει τις δυνάμεις αντίδρασης και από την άλλη θα προσδένεται σε άκτωση. Η μικρότερη μηχανή εφελκυσμού, με απόδοση δύναμης 100 kN, δεν διαθέτει μεγάλο πλατό αντίδρασης ή πρόσδεσης δοκιμών, συνεπώς αυτό πρέπει να επεκταθεί και να βιδωθεί στο έδαφος. Η μηχανή όμως δεν έχει σχεδιαστεί από τον κατασκευαστή για τέτοια στήριξη, η οποία μεταβάλλει τις φορτίσεις της μονάδας και περιπλέκει την διερεύνηση. Επίσης η μικρή δύναμη που αποδίδει, οδηγεί σε μεγαλύτερο μοχλοβραχίονα και κατάληψη μεγαλύτερου σχετικά χώρου.

Η κύρια υποψήφια για ενσωμάτωση μηχανής δοκιμών στρέψης, η οποία θα παρουσιαστεί στο επόμενο κεφάλαιο, είναι η μεγάλη μηχανή εφελκυσμού/θλίψης του εργαστηρίου. Αυτή διαθέτει μεγάλο πλατό (τραπέζι) πρόσδεσης δοκιμών, το οποίο θα μπορούσε να φέρει τη διάταξη στρέψης, χωρίς την ανάγκη πρόσδεσης της στο έδαφος. Κύριες ανησυχίες για τη χρήση αυτής, είναι η γωνία στρέψης που μπορεί να επιτευχθεί από την διάταξη, καθώς εξαρτάται τόσο από το ωφέλιμο μήκος λειτουργίας του εμβόλου αλλά και από την ωφέλιμη επιφάνεια του τραπεζιού. Επίσης πρέπει να ληφθούν υπόψη επιπλέον χωρικοί περιορισμοί που αφορούν την στήριξη του δοκιμίου και τις αποστάσεις ασφαλείας μεταξύ των μερών της διάταξης και της μηχανής. Παρόλα αυτά η απλότητα της κατασκευής, η ελευθερία σχεδίασης

σε συνδυασμό με το μικρό κόστος υλοποίησης, δεδομένου του υπάρχοντος υδραυλικού εμβόλου, κάνουν την διάταξη αυτή πιο προσιτή.

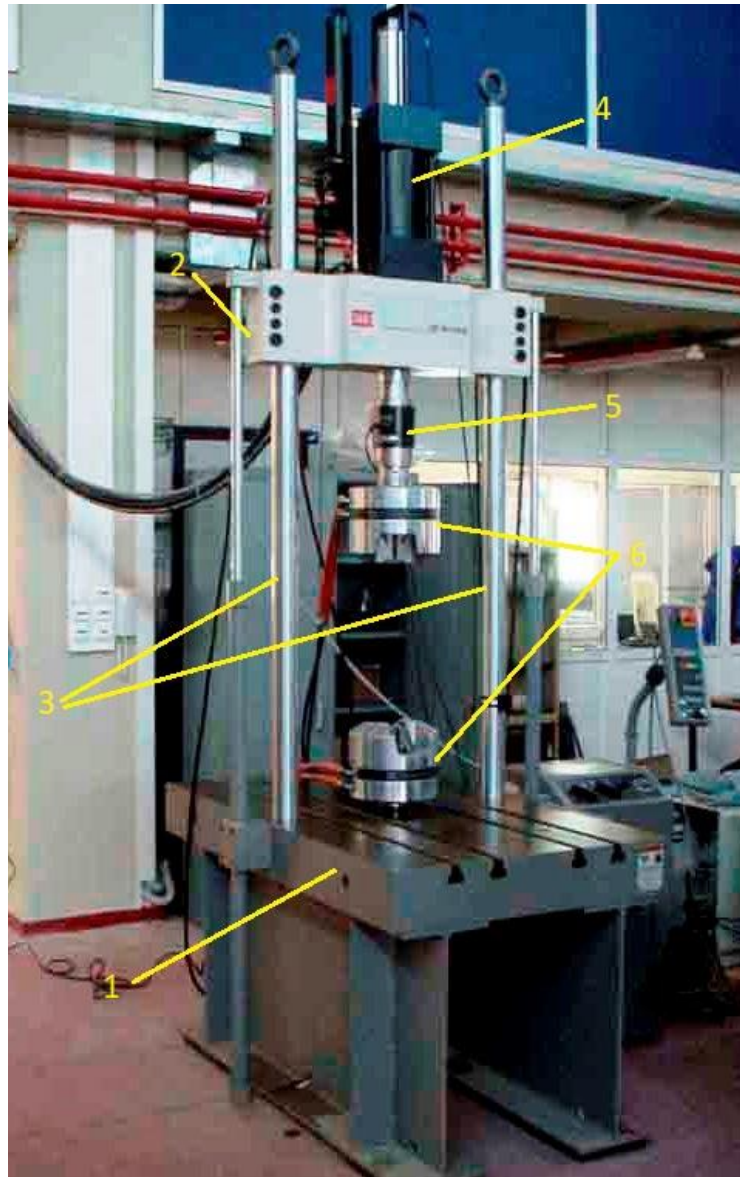
2. Μηχανή Εφελκυσμού/Θλίψης του Εργαστηρίου

2.1. Μηχανικά Μέρη και Λειτουργία

Στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας της Σχολής υπάρχει μηχανή εφελκυσμού (Σχήμα 2.1) που έχει τις προϋποθέσεις να αποτελέσει τη βάση μιας διάταξης δοκιμών στρέψης. Η εν λόγω μηχανή ή load unit όπως μπορεί να αποκαλείται στη συνέχεια, είναι κατασκευή της MTS Systems Corporation και αποτελείται από το “load frame” και άλλα μηχανικά μέρη της ίδιας εταιρίας τα οποία θα αναφερθούν ξεχωριστά στη συνέχεια. Εκτός από εφελκυσμό δίνεται η ευχέρεια δοκιμών θλίψης, κόπωσης.

Για να γίνει αντιληπτή η λειτουργία της προτεινόμενης διάταξης στρέψης πρέπει πρώτα να γίνει κατανοητή η διάταξη και η λειτουργία της υπάρχουσας μηχανής εφελκυσμού. Το load unit είναι της σειράς 322, μοντέλο 322.31 και είναι ικανό να φέρει φορτία έως και 250 kN. Βασικό μέρος αυτού είναι το load frame που αποτελεί την «μάζα αντίδρασης» για τις δυνάμεις που εφαρμόζονται. Απαρτίζεται ουσιαστικά από το τραπέζι (ή βάση) με εγκοπές τύπου T (Σχήμα 2.1, Αρ.1) και το “crosshead” (Σχήμα 2.1, Αρ.2), το οποίο ολισθαίνει σε δύο κολώνες (Σχήμα 2.1, Αρ.3) που στηρίζονται πάνω στο τραπέζι. Το τραπέζι και το “crosshead” είναι ουσιαστικά τα άκρα, μεταξύ των οποίων τοποθετούνται τα δοκίμια και εφαρμόζονται όλες οι δυνάμεις. Το “crosshead” έχει τη δυνατότητα ολίσθησης μεταξύ των δύο κολώνων με τη βοήθεια υδραυλικών εμβόλων, ώστε να γίνονται πειράματα με δοκίμια διαφορετικών μεγεθών και κλειδώνει στην εκάστοτε θέση του με υδραυλικά φρένα.

Ο υδραυλικός εμβολοφόρος κινητήρας MTS Model 244.31 (Σχήμα 2.1, Αρ.4) έχει ονομαστική δύναμη 250 kN, η οποία αποδίδεται μέσω ενός γραμμικού εμβόλου, η μέγιστη διαδρομή του οποίου είναι τα 300 mm. Λάδι υψηλής πίεσης διανέμεται από αντλία, μέσω δικτύου σωληνώσεων, στο έμβολο ενώ σερβοβαλβίδες, που είναι απαραίτητες για την λειτουργία του, καθορίζουν την κίνησή του. Στο σώμα του εμβόλου υπάρχει σταθερά τοποθετημένος “LVDT” (Linear Variable Differential Transformer), που μετράει την μετατόπιση του εμβόλου, ώστε να είναι δυνατός ο έλεγχος της θέσης του. Η εταιρία συνήθως τοποθετεί το έμβολο στη βάση του load frame, ωστόσο υπάρχει η δυνατότητα τροποποίησης και τοποθέτησής του πάνω στο “crosshead”, όπως και έγινε για την περιγραφόμενη διάταξη. Η μέτρηση της δύναμης που εφαρμόζεται στις δοκιμές γίνεται με την βοήθεια μιας δυναμοκυψέλης (Σχήμα 2.1, Αρ.5) (διάταξη μέτρησης της επιβαλλόμενης δύναμης, force transducer) που παρεμβάλλεται μεταξύ εμβόλου και δοκιμίου. Για την στερέωση των δοκιμίων πάνω στη μηχανή χρησιμοποιούνται δύο υδραυλικές αρπάγες (Σχήμα 2.1, Αρ.6), μία για κάθε άκρη.



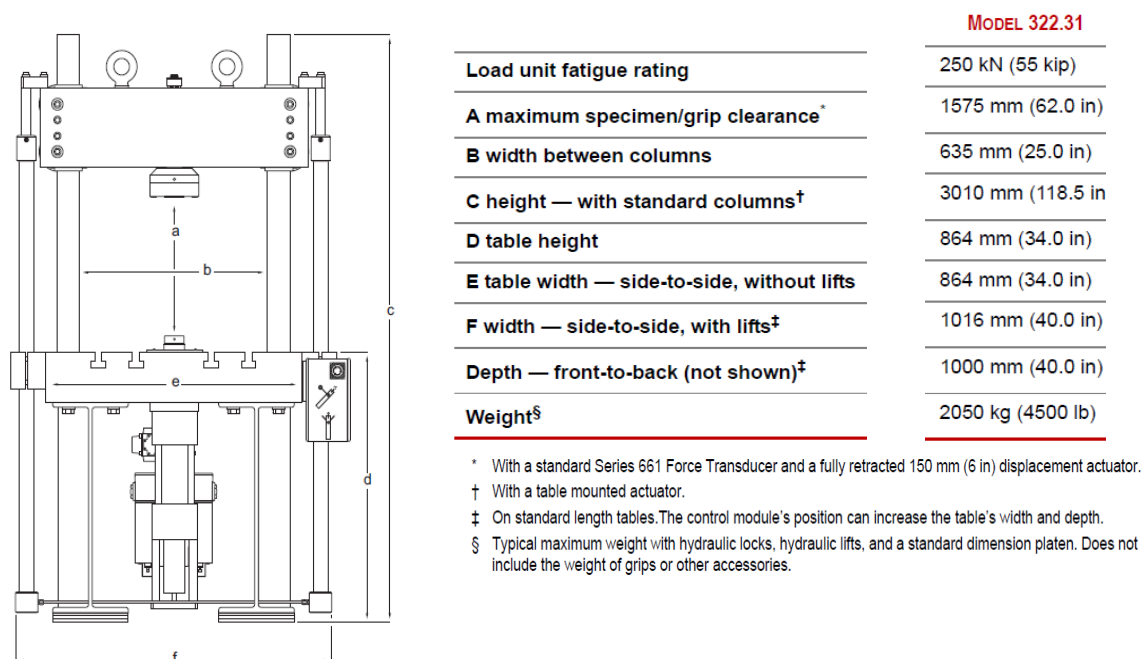
Σχήμα 2.1. Μηχανή Εφελκυσμού/Θλίψης Εργαστηρίου Ναυτικής Μηχανολογίας

2.2. Κύριες Διστάσεις, Μάζα και Μηχανική Αντοχή

Κατά τη λειτουργία μιας διάταξης δοκιμών στρέψης δημιουργούνται αντιδράσεις οι οποίες πολλές φορές, δρώντας ως ζεύγη, προκαλούν στρεπτική φόρτιση στην έδρασή της. Όταν μια τέτοια διάταξη εδράζεται σε στιβαρές βάσεις όπως το έδαφος ή τον τοίχο ενός κτηρίου, δεν τίθεται θέμα αντοχής, καθώς οι ροπές είναι αμελητέες σε σχέση με την αδράνεια και τη στρεπτική ακαμψία της στήριξης. Στην περίπτωση, όμως, που η στήριξη δίνεται από την ίδια τη μηχανή (στην περίπτωση μας το load frame), ο έλεγχος αντοχής είναι επιβεβλημένος. Όπως είναι λογικό, το βιβλίο του κατασκευαστή δεν προβλέπει δοκιμή στρέψης αξόνων με χρήση του load unit, συνεπώς η σχεδιάσή του σε μορφή CAD κρίθηκε απαραίτητη ώστε να γίνουν οι αναγκαίοι υπολογισμοί αντοχής. Ένας ακόμη λόγος σχεδίασης σε 3D είναι ο καθορισμός των μέγιστων διαστάσεων της διάταξης και του δοκιμίου, αλλά και των αποστάσεων ασφαλείας

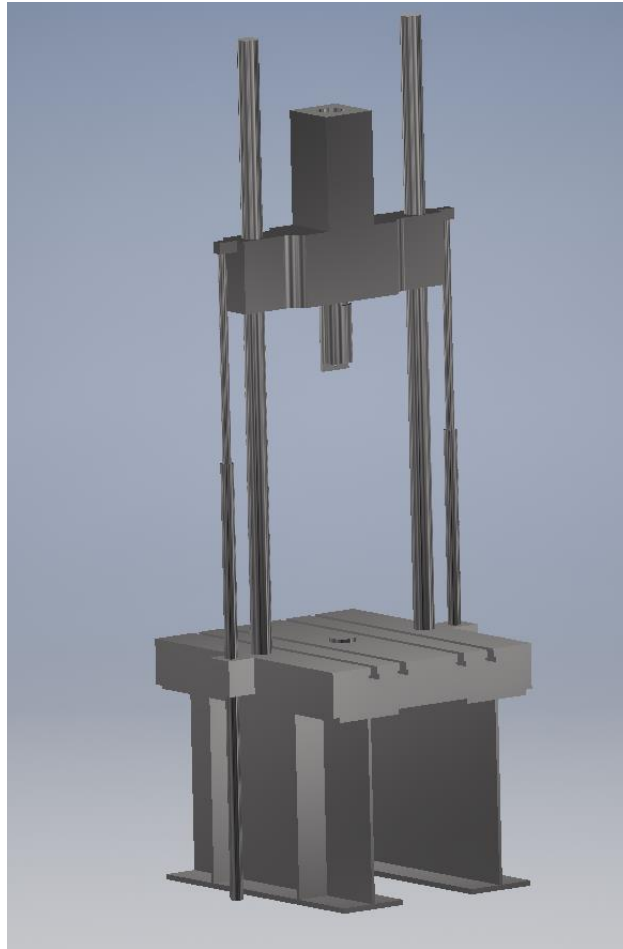
μεταξύ κρίσιμων μερών της μηχανής και της διάταξης στρέψης, ώστε σε περίπτωση αστοχίας της δεύτερης να αποφευχθεί κάποια καταστρεπτική για τη λειτουργία βλάβη της πρώτης.

Η εταιρία δεν παρέχει το μοντέλο της σε αρχείο CAD, ούτε δίνει πλήρη κατασκευαστικά σχέδια. Προμηθεύει μόνο ένα φυλλάδιο οδηγιών, στο οποίο αναγράφονται κάποιες κύριες διαστάσεις της μονάδας (Σχήμα 2.2). Για τις υπόλοιπες διαστάσεις, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στη μονάδα του εργαστήριου στα απαραίτητα σημεία, ώστε να σχεδιαστεί όσο πιο ρεαλιστικά γίνεται. Επειδή δεν μας ενδιαφέρει απόλυτα η απόδοση ολόκληρης της γεωμετρίας, αλλά κυρίως η επίτευξη της μάζας της μηχανής, η ακρίβεια των μετρήσεων ήταν στο χιλιοστόμετρο.



Σχήμα 2.2. Χαρακτηριστικά MTS 322.31

Η σχεδίαση ξεκίνησε από τα συμπαγή μεταλλικά μέρη της μηχανής, όπως το load frame με τις κολώνες και τα lifts, καθώς και το crosshead, τα οποία μπορούν να αποτυπωθούν με τη μεγαλύτερη ακρίβεια, επειδή όπως αναφέρθηκε είναι συμπαγή. Η δυσκολία χαρακτηρίζεται σχετικά μικρή, καθώς η μονάδα είναι συμμετρική ως προς δύο επίπεδα, συνεπώς αρκεί η σχεδίαση του ¼ του 3D μοντέλου (Σχήμα 2.3). Κατασκευαστικές λεπτομέρειες όπως οι εγκοπές T, που η ακριβής απόδοσή τους στο σχέδιο είναι κρίσιμη για την στήριξη της διάταξης στρέψης, δίνονται αναλυτικά στο εγχειρίδιο του κατασκευαστή. Τα πολύπλοκα μέρη όπως το υδραυλικό έμβολο, η δυναμοκυψέλη, η υδραυλική αρπάγη, δεν είναι συμπαγή, έχουν ιδιαίτερη γεωμετρία και αποτελούνται από υλικά διαφορετικών πυκνοτήτων. Επομένως, στόχος είναι η σωστή απόδοση της μάζας τους.



Σχήμα 2.3. 3D Απεικόνιση Μηχανής Εφελκυσμού/Θλίψης του E.N.T

Πληροφορίες για την μάζα συγκεκριμένων μερών της μηχανής δίνονται στα αντίστοιχα εγχειρίδια χρήσης από τον κατασκευαστή και παρουσιάζονται, μαζί με τις εκτιμήσεις μαζών σε χιλιόγραμμα από τα τρισδιάστατα σχέδια, στον Πίνακα 2.1 που ακολουθεί:

Πίνακας 2.1. Σύγκριση Μαζών Αληθινών Μερών – CAD σε χιλιόγραμμα

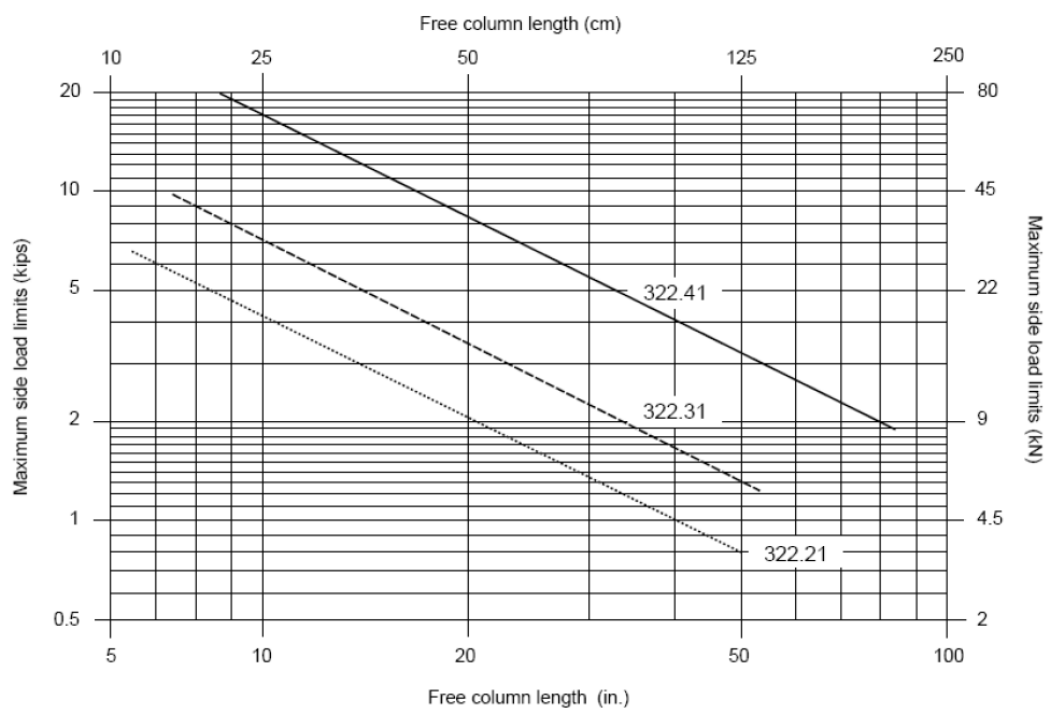
Parts		CAD [kg]	Actual [kg]
Actuator 244.31 Closed LVDT Housing	Actuator Body	106	133.8
	Actuator Rod	16.56	
Force Transducer 661.22-01		16.45	13.2
Crosshead with lifts		263	-
Platen with columns & lift housings		1511.15	-
Test frame 322.31 without grips or accessories		1916.16	2050
Difference %		6.53%	

Οι αποκλίσεις που παρατηρούνται στον πίνακα οφείλονται, αρχικά, στη μέθοδο και στην ακρίβεια μέτρησης των φυσικών μεγεθών. Επιπλέον, πολλές κατασκευαστικές λεπτομέρειες αμελήθηκαν λόγω του μικρού μεγέθους τους και συνεπώς της μικρής επίδρασης στο συνολικό βάρος. Τα διαφορετικά υλικά κατασκευής δεν συμπεριλήφθηκαν στις βασικές παραμέτρους

επιρροής μάζας όσον αφορά το CAD αρχείο. Ως υλικό για τους υπολογισμούς στο σχέδιο θεωρήθηκε ανοξειδωτος χάλυβας πυκνότητας 7.75 g/cm^3 . Από την άλλη, ο κατασκευαστής δεν δίνει πλήρη στοιχεία για την μάζα συγκεκριμένων εξαρτημάτων και δεν έχει συμπεριλάβει όλα τα πιθανά «μονταρίσματα», των διάφορων εξαρτημάτων που προσφέρει η εταιρία, στους υπολογισμούς βάρους. Παρόλα αυτά η απόκλιση είναι ικανοποιητικά μικρή και επαρκής για την ανάλυση που πραγματοποιείται.

Όσον αφορά τις μηχανικές ιδιότητες και την αντοχή του “load unit”, σημεία ενδιαφέροντος αποτελούν οι δύο κολώνες στήριξης του crosshead, το έμβολο και το έδρανο της υδραυλικής μηχανής, που είναι τα πιο αδύναμα σημεία όταν η μηχανή φορτίζεται κάθετα στην κίνηση του εμβόλου της. Οι φορτίσεις αυτές, οι οποίες στην συνέχεια θα αναφέρονται ως πλευρικές δυνάμεις, είναι επαγόμενες στο έμβολο διότι η υδραυλική μηχανή στη συναρμολόγηση που διατίθεται στο εργαστήριο, δεν έχει τη δυνατότητα περιστροφής ως προς οποιονδήποτε άξονα και ως αποτέλεσμα δεν μπορούν αυτές οι δυνάμεις να μεταφερθούν κατά την διεύθυνση της κίνησης.

Η αντοχή των κολώνων σε κάμψη δίνεται από τον κατασκευαστή στο διάγραμμα που ακολουθεί (Σχήμα 2.4). Λόγω της γραμμικότητας του καταλαβαίνουμε ότι αναφέρεται μόνο στις κολώνες, χωρίς την τοποθέτηση του crosshead, ή ότι η συνεισφορά του είναι αμελητέα, καθώς, υπό διαφορετικές συνθήκες, θα υπήρχε στο διάγραμμα η διεύθυνση της φόρτισης. Επίσης υποθέτουμε ότι αποτυπώνει την αντοχή τους σαν ζεύγος, διότι δεν αναφέρεται κάτι σχετικό οπότε λαμβάνουμε την δυσμενέστερη περίπτωση.



Σχήμα 2.4. Αντοχή Κολώνων σε Πλευρική Φόρτιση

Αναφορικά με την αντοχή της υδραυλικής μηχανής, το εγχειρίδιο χρήσης προτείνει τύπους για τον υπολογισμό μερικών κρίσιμων τιμών σχετικών με την αντοχή του εδράνου και του εμβόλου. Στον Πίνακα 2.2 που ακολουθεί θα δοθούν τα ανώτατα όρια αυτών των τιμών. Αναλυτική αναφορά των τύπων και αποτελέσματα αυτών ανά διάταξη θα παρουσιαστούν στο επόμενο κεφάλαιο.

Πίνακας 2.2. Ανώτατα Όρια Αντοχής Υδραυλικής Μηχανής

Μέγιστη Πίεση Ρουλεμάν Εμβόλου	950	psi
Μέγιστη Τάση στο Πιστόνι	40000	psi

3. Σχεδίαση Πιθανών Διατάξεων

Η αξιοποίηση της μηχανής εφελκυσμού του εργαστηρίου προϋποθέτει την μετατροπή της γραμμικής κίνησης του εμβόλου σε περιστροφική του δοκιμίου. Επίσης προϋποθέτει τη χρήση του τραπεζιού ως μέσο πρόσδεσης της διάταξης και παραλαβής των δυνάμεων αντίδρασης. Συνεπώς το δοκίμιο θα πρέπει να τοποθετηθεί με τέτοιο τρόπο ώστε οι ασκούμενες δυνάμεις να ελαχιστοποιηθούν και να αξιοποιηθεί το μήκος του τραπεζιού. Συνεπώς πρέπει να βρίσκεται όσο το δυνατόν πιο κοντά στο κέντρο βάρους και παράλληλο με τη μεγάλη διάσταση (μήκος) του τραπεζιού. Σε όλες τις διατάξεις που εξετάστηκαν ο άξονας του δοκιμίου έχει την διεύθυνση του μήκους του τραπεζιού και αλλάζει θέση κατά πλάτος, ανάλογα με τη περίπτωση που εξετάζουμε. Τα δεδομένα αυτά οδηγούν σε ορισμένες διατάξεις που αναφέρονται ύστερα από τον ορισμό των παραμέτρων σχεδίασης.

3.1. Παράμετροι Σχεδίασης

Η σχεδίαση των υποψήφιων διατάξεων προϋποθέτει να προκαθοριστούν κάποιες βασικές παράμετροι που επηρεάζουν καθοριστικά την λειτουργία, τις διαστάσεις και την αντοχή των επιμέρους μελών της συνεργασίας διάταξης-μηχανής. Ξεκινώντας από τις πιο βασικές που αφορούν άμεσα τις δοκιμές των αξόνων, έχουμε την μέγιστη ροπή λειτουργίας (M_{max}) και την γωνία περιστροφής (φ_{max}). Αυτές καθορίστηκαν ίσες με:

$$M_{max} = 20 \text{ kN} - m \text{ και } \varphi_{max} = 10^\circ$$

Οι τιμές αυτές είναι σύμφωνες με τις ανάγκες του εργαστηρίου και τις σχετικά μικρές γωνίες στις οποίες στοχεύουν τα δοκίμια από σύνθετα υλικά λόγω της μεγάλης στρεπτικής ακαμψίας τους. Πρέπει, σε αυτό το σημείο, να σημειωθεί ότι οι τιμές αυτές αποτελούν το στόχο της διάταξης και δεν είναι τελικές. Οποιαδήποτε αδυναμία επίτευξής τους θα οδηγήσει σε νέο ορισμό τους.

Ακολουθούν οι παράμετροι που αφορούν συγκεκριμένα μήκη, τα οποία περιορίζονται είτε γεωμετρικά, εξαιτίας της φυσικής παρουσίας του “load unit”, είτε λειτουργικά λόγω της μέγιστης αντοχής του εδράνου του εμβόλου και των κολώνων. Τέτοιες παράμετροι είναι:

- l , το ύψος του crosshead από το τραπέζι της μηχανής
- d , το ύψος του άξονα του δοκιμίου από το τραπέζι της μηχανής
- e , η απόσταση μεταξύ του άξονα του δοκιμίου και του σημείου απόδοσης της δύναμης στο σύστημα

Αυτές οι παράμετροι θα αναφερθούν εκτενώς στα επόμενα κεφάλαια, θα αποδοθούν σχηματικά και θα λάβουν τιμές για τον ακριβή προσδιορισμό τους. Η επιρροή τους στην διάταξη είναι άμεση, καθώς από αυτές εξαρτάται το μέγεθος της δύναμης που απαιτείται από την υδραυλική μηχανή και συνεπώς η αντοχή του εμβόλου. Σκόπιμο είναι συνεπώς να παρουσιαστούν πρώτα οι εξισώσεις υπολογισμού των κρίσιμων τιμών αντοχής του εμβόλου.

Σύμφωνα με τον κατασκευαστή, πρέπει να εξεταστούν τέσσερα σημεία σε περίπτωση εφαρμογής πλευρικού φορτίου:

- Πίεση στο έδρανο του εμβόλου κατά τη διάρκεια της δοκιμής
- Τάση στο έμβολο
- Μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα λειτουργίας εμβόλου
- Ελάχιστη επιτρεπόμενη συχνότητα επιβολή πλευρικής δύναμης

Από τα παραπάνω, θα μας απασχολήσουν τα τρία πρώτα. Πριν δοθούν οι τύποι, θα παρουσιαστεί πίνακας (Πίνακας 3.1) από το εγχειρίδιο του κατασκευαστή, με κάποιες σταθερές που σχετίζονται με το υδραυλικό έμβολο που διαθέτει το εργαστήριο και είναι απαραίτητες για τους υπολογισμούς. Επειδή στο εγχειρίδιο χρησιμοποιείται το αγγλοσαξονικό σύστημα, οι τιμές που ακολουθούν δίνονται σε ίντσες.

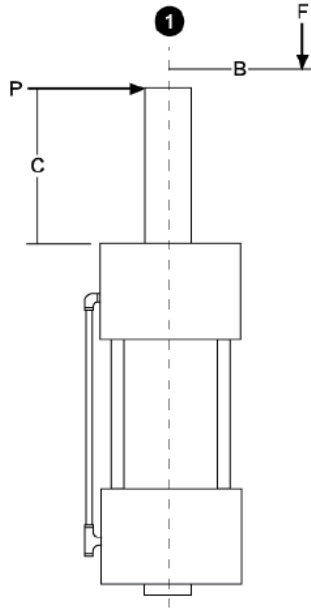
Πίνακας 3.1. Διαστάσεις Υπολογισμών Πλευρικής Δύναμης

A (Bearing Spacing)	5.825	inches
D (Bearing Length)	2.134	
E (Bearing Area)	10.03	
G (Piston Rod Diameter)	3.75	
K (Cyclic Load)	0.068	

Ο τύπος που ακολουθεί (MTS Systems Corp., 2013) αξιοποιείται για τον υπολογισμό της δύναμης που επάγεται στο έδρανο του εμβόλου (L):

$$L = \frac{P*(S+A+D+C)+(F*B)}{S+A}, \quad (3.1)$$

όπου S η διαδρομή του εμβόλου, F η συνιστώσα κατακόρυφη δύναμη και B η οριζόντια απόσταση του σημείου εφαρμογής της από το κέντρο του εμβόλου, P η συνιστώσα οριζόντια δύναμη και C αντίστοιχα η κατακόρυφη απόσταση του σημείου εφαρμογής της από το κέντρο όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.1 που ακολουθεί.



Σχήμα 3.1. Απεικόνιση Συνιστωσών Εμβόλου

Έπειτα διαιρούμε την δύναμη του εδράνου (L) με το εμβαδό του εδράνου (E) για να καταλήξουμε στην πίεση λειτουργίας του εδράνου (V):

$$V = \frac{L}{E} \quad (3.2)$$

Η μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση όπως αναφέρθηκε προηγουμένως είναι 950 psi. Ακολουθεί ο υπολογισμός της τάσης λόγω κάμψης του εμβόλου (PRS):

$$PRS = \frac{32 * P * (D + C) + (F * B)}{\pi * G^3} \quad (3.3)$$

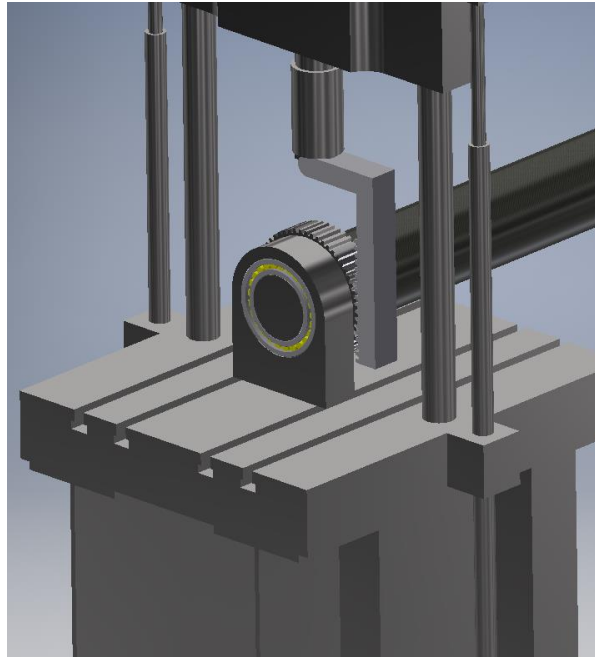
Η μέγιστη επιτρεπόμενη τάση όπως αναφέρθηκε είναι 40000 psi.

Η μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα λειτουργίας του εμβόλου καθορίζεται από την πίεση στο έδρανο του και δίνεται σε in/sec από τον τύπο που ακολουθεί:

$$MAPRV = \frac{5200}{V} \quad (3.4)$$

3.2. Διάταξη 1^η – Οδοντωτός Τροχός και Κανόνας

Η πρώτη διάταξη που εξετάστηκε είναι η συνεργασία οδοντωτού τροχού και κανόνα (βλ. Σχήμα 3.2). Φαινομενικά είναι απλή αλλά θεωρητικά έχει μεγαλύτερο κόστος κατασκευής από τις υπόλοιπες. Δεν είθισται αυτή η διάταξη να αποδίδει τέτοιου μεγέθους ροπή αλλά συνήθως μεταδίδει κίνηση. Παρόλα αυτά ένα τέτοιο εγχείρημα είναι δυνατό, αν ληφθεί υπόψη η μικρή ταχύτητα περιστροφής και συνεπώς η μικρή απαίτηση λίπανσης. Οι επιλογές της μορφής των οδόντων είναι δύο και έχουν η καθεμία τα προτερήματά της.



Σχήμα 3.2. Πρόομη Απεικόνιση 1ης Διάταξης

- Ευθείς (ή μετωπικοί) οδόντες (Σχήμα 3.3): πλεονέκτημα αυτής της μορφής είναι η δυνατότητα περιστροφής και προς τις δύο κατευθύνσεις. Το κόστος τους είναι μικρότερο αλλά και η επιφάνεια επαφής των οδόντων επίσης, με αποτέλεσμα την μη ομαλή απόδοση της περιστροφής και ροπής. Οι επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις του τροχού, εξαιτίας του σχετικά μικρού αριθμού συνεργαζόμενων οδόντων, θα μπορούσαν να δυσκολεύουν την ακριβή καταγραφή των δεδομένων της δοκιμής, κυρίως σε χαμηλή ταχύτητα λειτουργίας του εμβόλου. Όμως χωρίς αναλυτικότερη μελέτη δεν μπορεί να βγει συμπέρασμα.



Σχήμα 3.3. Σύστημα Κανόνα-Τροχού Μετωπικών Οδόντων

- Διπλοελικοειδείς οδόντες (ή βέλους) (Σχήμα 3.4): Το πλεονέκτημα των ελικοειδών γραναζιών σε σχέση με τα προηγούμενα, είναι το μεγαλύτερο πλήθος των συνεργαζόμενων οδόντων και συνεπώς η μεγαλύτερη επιφάνεια επαφής. Σε αυτή την περίπτωση απαιτούνται διπλοί ελικοειδείς, διότι ένας ελικοειδής τροχός δημιουργεί αξονικές δυνάμεις εξαιτίας της γωνίας κλίσης των οδόντων του. Συνεπώς δύο ελικοειδείς με αντίθετες γωνίες, αναπτύσσουν ίσες και αντίθετες δυνάμεις που αλληλοεξουδετερώνονται. Ως αποτέλεσμα η λειτουργία τους είναι πιο ομαλή με πιο ελαστική μεταφορά της ροπής εξαιτίας της μεγαλύτερης συνεργαζόμενης επιφάνειας. Μειονέκτημα σε αυτούς είναι η δυνατότητα φόρτισης προς τη μία μόνο κατεύθυνση και προβληματική αποφόρτιση προς την αντίθετη. Το κόστος κατασκευής τους επίσης είναι μεγαλύτερο.



Σχήμα 3.4. Διπλοελικοειδής Οδοντωτός Τροχός

Γενικά οι διατάξεις με οδοντωτούς τροχούς είναι συμπαγείς και δεν καταλαμβάνουν πολύ χώρο, που σημαίνει μικρότερο ύψος λειτουργίας του “crosshead” και μεγάλες αποστάσεις ασφαλείας από τα μέρη της μηχανής. Επιπλέον διευκολύνουν την καταγραφή της γωνίας στροφής και της εφαρμοζόμενης ροπής καθώς η κίνηση του εμβόλου έχει γραμμική επιρροή στην περιστροφή του πινιόν.

Το τίμημα της χρήσης της συγκεκριμένης διάταξης είναι η σταθερή ακτινική δύναμη που αναπτύσσεται εξαιτίας της εξειλιγμένης γωνίας (φ) των οδόντων. Αυτό συνεπάγεται σταθερή πλευρική δύναμη (F_x) στο έμβολο, η οποία εξαρτάται από την κατασκευή του γραναζιού και την εφαρμοζόμενη δύναμη (F_z) σε αυτό. Ο τύπος που δίνει την ακτινική δύναμη είναι:

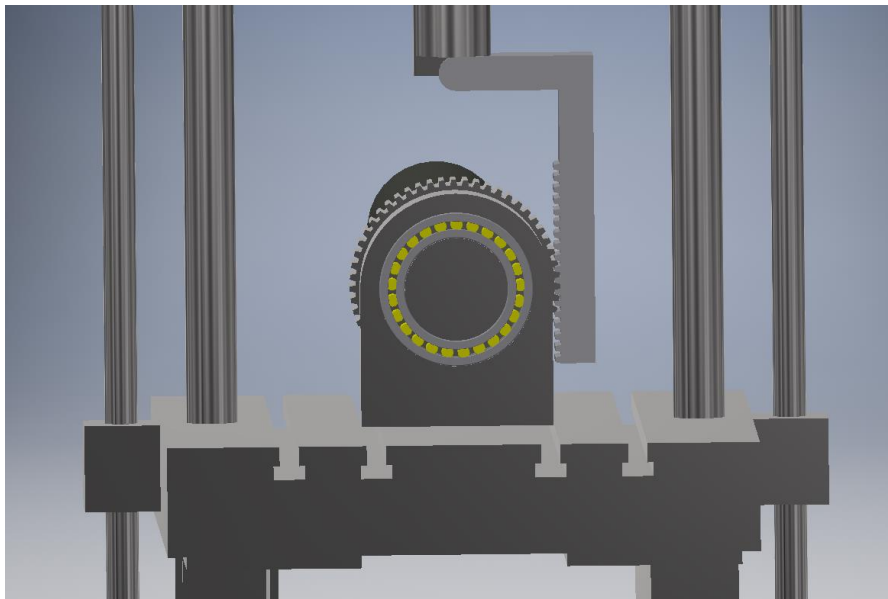
$$F_x = F_z * \tan\varphi \quad (3.5)$$

Η γωνία εξειλιγμένης μπορεί να ξεκινά θεωρητικά από τις 10 μοίρες, αλλά σε τυποποιημένα γρανάζια που κυκλοφορούν στην αγορά βρίσκεται κανείς 15 και πιο συχνά 20 μοίρες. Συνεπώς, γίνεται αντιληπτό πως η τιμή της πλευρικής δύναμης θα είναι σχετικά μεγάλη. Στα επόμενα δύο υποκεφάλαια θα αναλυθούν πλήρως δύο υποπεριπτώσεις της χρήσης οδοντωτών τροχών,

που διαχωρίζονται από την θέση του γραναζιού σε σχέση με το έμβολο. Η εξειλιγμένη και στις δύο περιπτώσεις λήφθηκε ίση με 20° που είναι η πιο κοινή του εμπορίου.

3.2.1. Διάταξη 1.1 - Ομόκεντρα με Έμβολο

Πρώτα εξετάζουμε την περίπτωση όπου το κέντρο του οδοντωτού τροχού, άρα και του δοκιμίου, συμπίπτει κατακόρυφα με τον άξονα του εμβόλου. Το στήσιμο αυτής της διάταξης πάνω στο τραπέζι της μηχανής είναι συμμετρικό ως προς το πλάτος του τραπεζίου, γεγονός που θεωρητικά μειώνει την καταπόνηση του “load unit”. Εφόσον λοιπόν ο άξονας του γραναζιού βρίσκεται ακριβώς κάτω από το έμβολο και η γραμμική κατακόρυφη κίνηση του εμβόλου πρέπει να στρέψει το δοκίμιο, η επαφή του οδοντωτού κανόνα με τον τροχό πρέπει να γίνει πλάγια και εφαπτομενικά σε αυτόν, με τον κανόνα κάθετο στο επίπεδο του τραπεζίου. Αποτέλεσμα αυτού είναι η τοποθέτηση κάποιας επέκτασης που θα φέρει τον κανόνα στο πλάι του τροχού. Η επέκταση αυτή σίγουρα προκαλεί κάμψη του εμβόλου, ανάλογη με τη συνισταμένη δύναμη της επαφής των οδόντων, που με την σειρά της εξαρτάται από την δύναμη που εφαρμόζει το έμβολο. Η περιγραφή που προηγήθηκε απεικονίζεται στο Σχήμα 3.5.



Σχήμα 3.5. Πρόσωση Διάταξης 1.1

Συμπερασματικά, η αλλαγή των παραμέτρων σχεδίασης δημιουργεί ένα φαύλο κύκλο καθώς, μειώνοντας τη διάμετρο του τροχού, μειώνεται και η πλευρική επέκταση του εμβόλου, αλλά τότε θα αυξηθεί η απαιτούμενη δύναμη για την επίτευξη της ροπής των 20 kN-m. Θα δούμε στην πορεία μια αριθμητική εφαρμογή των Εξισώσεων 3.1-3.5 που δόθηκαν παραπάνω, για να είναι δυνατή η σύγκριση με τις άλλες διατάξεις.

Οι τύποι υπολογισμών συντάχθηκαν παραμετρικά στο πρόγραμμα Office Excel, ώστε με την δοκιμή διαφορετικών παραμέτρων να γίνει δυνατός ο καθορισμός των καλύτερων διαστάσεων για την διάταξη αυτή. Οι δοκιμές έδειξαν πως κύρια επίδραση στην αντοχή του εμβόλου έχει η δύναμη που αυτό ασκεί, με συνέπεια την αύξηση της διαμέτρου του τροχού για

την ελαχιστοποίηση της δύναμης που εφαρμόζεται. Η ελάχιστη απόσταση των κολώνων της μηχανής είναι 635 mm, συνεπώς η ακτίνα του τροχού δεν θα μπορούσε να είναι πάνω από 300 mm, αλλά χάριν στρογγυλοποίησης η ακτίνα του τροχού (παράμετρος e) τέθηκε:

$$e = 300 \text{ mm}$$

Το ύψος του crosshead (παράμετρος l) και η απόσταση του δοκιμίου από το τραπέζι (παράμετρος d), δεν έχουν ιδιαίτερη σημασία σε αυτή τη διάταξη καθώς δεν εμφανίζονται στους υπολογισμούς. Δύνανται να είναι τόσο μικροί όσο επιτρέπει η γεωμετρία, οπότε παραλείπονται. Σε αντίθεση, αυτό που επηρεάζει τους τύπους είναι η κάθετη απόσταση του άξονα του δοκιμίου από το έμβολο. Αυτή μπορεί εύκολα να υπολογιστεί, προσθέτοντας στην ακτίνα του τροχού την διαδρομή του εμβόλου, το μήκος της δυναμοκυβέλης και της υδραυλικής αρπάγης, που θεωρείται ως το χειρότερο σενάριο. Με αυτά κατά νου παρουσιάζονται οι πίνακες υπολογισμών αυτής της διάταξης.

Στον Πίνακα 3.2 δίνεται η συνισταμένη δύναμη που ασκείται στο έμβολο και η ανάλυση της στην οφέλιμη για την διάταξη (κατακόρυφη) και την επαγόμενη από την επαφή των οδόντων (οριζόντια). Επίσης, φαίνεται η μέγιστη ροπή και γωνία στροφής που επιτυγχάνει η διάταξη σε αυτή την περίπτωση.

Στον Πίνακα 3.3 φαίνονται οι τιμές των απαραίτητων μεγεθών για τον υπολογισμό αντοχής του υδραυλικού εμβόλου, σύμφωνα με το εγχειρήδιο του κατασκευαστή. Η διαδρομή του εμβόλου S, σε αυτή τη διάταξη, ισούται με το μήκος του τόξου, κατά το οποίο στρέφεται ο οδοντωτός τροχός και είναι ίσο με:

$$S = \text{Ακτίνα Τροχού} * \text{Γωνία Στροφής} * \pi/180$$

Οι μη-αξονικές δυνάμεις ισούνται με τις δυνάμεις που ασκούνται στο έμβολο του, όπως φαίνονται στον Πίνακα 3.2. Οι αποστάσεις από το έδρανο ισούνται με τις αποστάσεις του σημείο σύζευξης του εμβόλου με τον διωστήρα από το έδρανο. Οι υπόλοιπες τιμές είναι σταθερές και έχουν παρουσιαστεί στον Πίνακα 3.1.

Στον Πίνακα 3.4 δίνονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών αντοχής, οι τύποι των οποίων έχουν παρουσιαστεί στο Κεφάλαιο 3.1 (Εξ. 3.1-3.4).

Πίνακας 3.2. Χαρακτηριστικά Δοκιμών Διάταξη 1.1.

Δύναμη Εμβόλου & Αποδιδόμενη Ροπή		
Δύναμη Εμβόλου	kN	lbf
Οριζόντια Συνιστώσα	24.39	5482
Κατακόρυφη Συνιστώσα	67	15062
Συνισταμένη	71.30	16028
Μέγιστη Ροπή [kN-m]	20.1	
Γωνία Στροφής [deg]	10.00	

Πίνακας 3.3. Τιμές Υπολογισμών Αντοχής Εμβόλου

Τιμές Υπολογισμών Αντοχής Υδραυλικού Εμβόλου		
Μη-Άξονικές Φορτίσεις [lbf]	P (Horizontal)	5482
	F (Vertical)	15062
Απόσταση από Έδρανο [in]	C (Vertical)	25.80
	B (Horizontal)	11.81
Διαστάσεις	A (Bearing Spacing)	5.825
	D (Bearing Length)	2.134
	E (Bearing Area)	10.03
	G (Rod Diameter)	3.75
	K (Cyclic Load)	0.068
	S (Actuator Stroke)	2.061

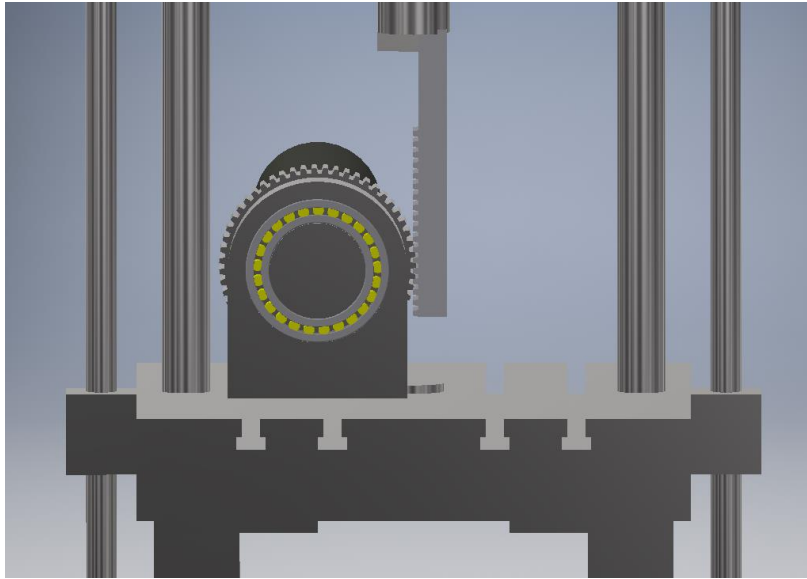
Πίνακας 3.4. Αντοχή Εμβόλου

Φόρτιση Εδράνου του Εμβόλου	
L	47457.33
Πίεση Εδράνου	
V [psi]	4731.54
Ανώτατη Πίεση	950
Τάση Πιστονιού	
P.R.S. [psi]	63941.11
Ανώτατη Τάση	40000
Μέγιστη Επιτρεπόμενη Ταχύτητα Πιστονιού	
[in/sec]	1.099

Όπως παρατηρείται από τα αποτελέσματα των υπολογισμών, η τεράστια πίεση στο έδρανο αλλά και οι υψηλές τάσεις στο πιστόνι οδηγούν σε αστοχία του υδραυλικού εμβόλου. Οποιαδήποτε πρόσθετη στήριξη του κανόνα, για την προστασία του εδράνου και του πιστονιού, περιπλέκει σημαντικά τους υπολογισμούς και την κατασκευή, οπότε δεν επιλέγεται. Συμπερασματικά, δεν είναι δυνατή η κατασκευή μιας τέτοιας διάταξης.

3.2.2. Διάταξη 1.2 - Έκκεντρα από Έμβολο

Για τη δεύτερη διάταξη, η οποία χρησιμοποιεί την ίδια αρχή κίνησης με την πρώτη, προτείνεται η τοποθέτηση του οδοντωτού τροχού έτσι, ώστε ο άξονας του εμβόλου να εφάπτεται στην περιφέρεια του τροχού. Δηλαδή το γρανάτζι μετατοπίζεται οριζόντια, σε σχέση με την πρώτη διάταξη, κατά την ακτίνα του, ώστε να διέρχεται ο νοητός άξονας του εμβόλου από την επαφή των οδόντων κανόνα-τροχού (Σχήμα 3.6).



Σχήμα 3.6. Πρόσοψη Διάταξης 1.2

Το πλεονέκτημα αυτής της διάταξης, σε σχέση με την προηγούμενη, είναι η σχετική θέση του εμβόλου, το οποίο δεν χρειάζεται πλευρική επέκταση. Έτσι η ασκούμενη δύναμη βρίσκεται στην διεύθυνση του πιστονιού και κατ' επέκταση μειώνονται οι καμπτικές τάσεις, σύμφωνα με την Εξ. (3.3). Αντιθέτως, η πίεση στο έδρανο του εμβόλου, ενώ αναμένεται να μειωθεί, εξαρτάται, εκτός από τις δυνάμεις και τις αποστάσεις εφαρμογής τους, και από την διαδρομή του εμβόλου. Η διαφορά λοιπόν σε αυτή τη διάταξη είναι ότι το διαθέσιμο πλάτος που μπορεί να καταλάβει ο τροχός, ισούται πλέον με το μισό του προηγούμενου (~300 mm), με αποτέλεσμα η μέγιστη ακτίνα του (παράμετρος e) να φτάνει οριακά:

$$e = 150 \text{ mm}$$

Η δύναμη που πρέπει να ασκήσει τώρα το έμβολο, για να εκπληρωθεί ο στόχος των 20 kN-m, αυξάνεται και η διαδρομή του εμβόλου, λόγω γεωμετρίας, μειώνεται. Τα δύο αυτά συμβάλουν αυξητικά στην πίεση του εδράνου, όπως φαίνεται από τις Εξισώσεις (3.1) και (3.2). Για τις άλλες παραμέτρους (l, d) ισχύει ό,τι και με την προηγούμενη διάταξη. Σύμφωνα με τα παραπάνω, δίνονται οι πίνακες υπολογισμών αυτής της διάταξης:

Στον Πίνακα 3.5 δίνεται η συνισταμένη δύναμη που ασκείται στο έμβολο και η ανάλυση της στην οφέλιμη για την διάταξη (κατακόρυφη) και την επαγόμενη από την επαφή των οδόντων (οριζόντια). Επίσης, φαίνεται η μέγιστη ροπή και γωνία στροφής που επιτυγχάνει η διάταξη σε αυτή την περίπτωση.

Στον

Πίνακα 3.6 φαίνονται οι τιμές των απαραίτητων μεγεθών για τον υπολογισμό αντοχής του υδραυλικού εμβόλου, σύμφωνα με το εγχειρίδιο του κατασκευαστή. Η διαδρομή του εμβόλου S , σε αυτή τη διάταξη, ισούται με το μήκος του τόξου, κατά το οποίο στρέφεται ο οδοντωτός τροχός και είναι ίσο με:

$$S = \text{Ακτίνα Τροχού} * \text{Γωνία Στροφής} * \pi/180$$

Οι μη-αξονικές δυνάμεις ισούνται με τις δυνάμεις που ασκούνται στο έμβολο του, όπως φαίνονται στον Πίνακα 3.5. Οι αποστάσεις από το έδρανο ισούνται με τις αποστάσεις του σημείο σύζευξης του εμβόλου με τον διωστήρα από το έδρανο. Οι υπόλοιπες τιμές είναι σταθερές και έχουν παρουσιαστεί στον Πίνακα 3.1.

Στον Πίνακα 3.7 δίνονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών αντοχής, οι τύποι των οποίων έχουν παρουσιαστεί στο Κεφάλαιο 3.1 (Εξ. 3.1-3.4).

Πίνακας 3.5. Χαρακτηριστικά Δοκιμών Διάταξη 1.2

Δύναμη Εμβόλου & Αποδιδόμενη Ροπή		
Δύναμη Εμβόλου	kN	lbf
Οριζόντια Συνιστώσα	48.77	10964
Κατακόρυφη Συνιστώσα	134	30123
Συνισταμένη	142.60	32056
Μέγιστη Ροπή [kN-m]	20.1	
Γωνία Στροφής [deg]	10.00	

Πίνακας 3.6. Τιμές Υπολογισμών Αντοχής Εμβόλου

Τιμές Υπολογισμών Αντοχής Υδραυλικού Εμβόλου		
Μη-Αξονικές Φορτίσεις [lbf]	P (Horizontal)	10964
	F (Vertical)	30123
Απόσταση από Έδρανο [in]	C (Vertical)	18.87
	B (Horizontal)	0.00
Διαστάσεις	A (Bearing Spacing)	5.825
	D (Bearing Length)	2.134
	E (Bearing Area)	10.03
	G (Rod Diameter)	3.75
	K (Cyclic Load)	0.068
	S (Actuator Stroke)	1.031

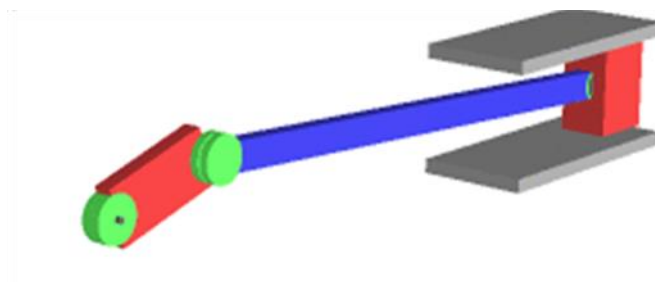
Πίνακας 3.7. Αντοχή Εμβόλου

Φόρτιση Εδράνου του Εμβόλου	
L	44547.04
Πίεση Εδράνου	
V [psi]	4441.38
Ανώτατη Πίεση	950
Τάση Πιστονιού	
P.R.S [psi]	44471.23
Ανώτατη Τάση	40000
Μέγιστη Επιτρεπόμενη Ταχύτητα Πιστονιού	
[in/sec]	1.171

Όπως αναμένεται, η τάση του πιστονιού κινείται σε χαμηλότερα επίπεδα από την προηγούμενη διάταξη, δεν είναι όμως κάτω από το μέγιστο όριο. Η πίεση του εδράνου φαίνεται να μειώθηκε ελάχιστα, ωστόσο απέχει πολύ από το ασφαλές όριο. Μπορεί η ακεραιότητα του πιστονιού να μην απειλείται, καθώς οι τάσεις είναι ελάχιστα πάνω από την ελαστική περιοχή, αλλά η αστοχία του εδράνου θα προκαλούσε ανεπανόρθωτη βλάβη στο υδραυλικό έμβολο. Οποιαδήποτε εξωτερική στήριξη του εμβόλου, για την προστασία του εδράνου, περιπλέκει σημαντικά τους υπολογισμούς και την κατασκευή, οπότε δεν επιλέγεται. Συμπερασματικά αυτή η διάταξη δεν ικανοποιεί τα κριτήρια που έχουν τεθεί.

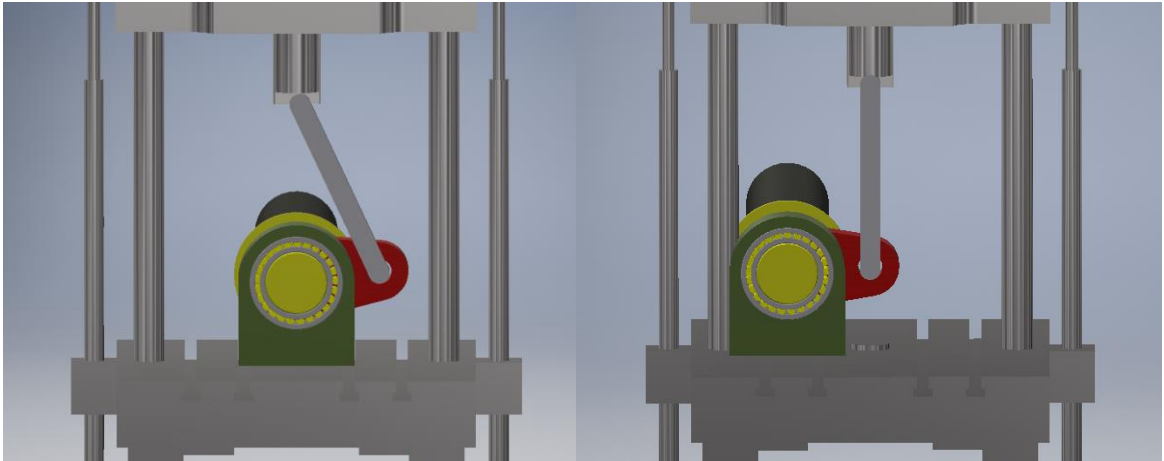
3.3. Διάταξη 2^η – Μοχλοβραχίονας

Η πιο διαδεδομένη διάταξη μετατροπής της ευθύγραμμης κίνησης σε περιστροφική είναι η χρήση βραχίονα που, σε συνεργασία με έναν μοχλό (διωστήρα), μετατρέπει την δύναμη που ασκεί το έμβολο της μηχανής σε ροπή στον άξονα (Σχήμα 3.7). Σαν αντιστοιχία, μπορεί να σκεφτεί κανείς την συνεργασία εμβόλου-διωστήρα-στροφάλου των εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ. για να αντιληφθεί ευκολότερα τις διατάξεις που θα ακολουθήσουν. Ενδεχομένως να φαίνεται απλοϊκή στην κατασκευή, η πολυπλοκότητα της όμως κρύβεται πίσω από την γεωμετρία της κίνησης και το πλήθος των εξισώσεων, που χρειάζονται για την πλήρη περιγραφή της.



Σχήμα 3.7. Διάταξη Μοχλοβραχίονα

Οι δύο περιπτώσεις αυτής της διάταξης προέκυψαν, όπως και στις δύο προηγούμενες διατάξεις, από την σχετική οριζόντια απόσταση του δοκιμίου από το υδραυλικό έμβολο της μηχανής. Στη μία το έμβολο και ο άξονας του δοκιμίου βρίσκονται στην ίδια οριζόντια θέση (βλ. Σχήμα 3.8, αριστερά), ενώ στην άλλη, το σημείο σύνδεσης του βραχίονα με τον διωστήρα βρίσκεται στην ίδια οριζόντια θέση με το έμβολο, όταν ο βραχίονας με τον διωστήρα σχηματίζουν ορθή γωνία μεταξύ τους (βλ. Σχήμα 3.8, δεξιά).

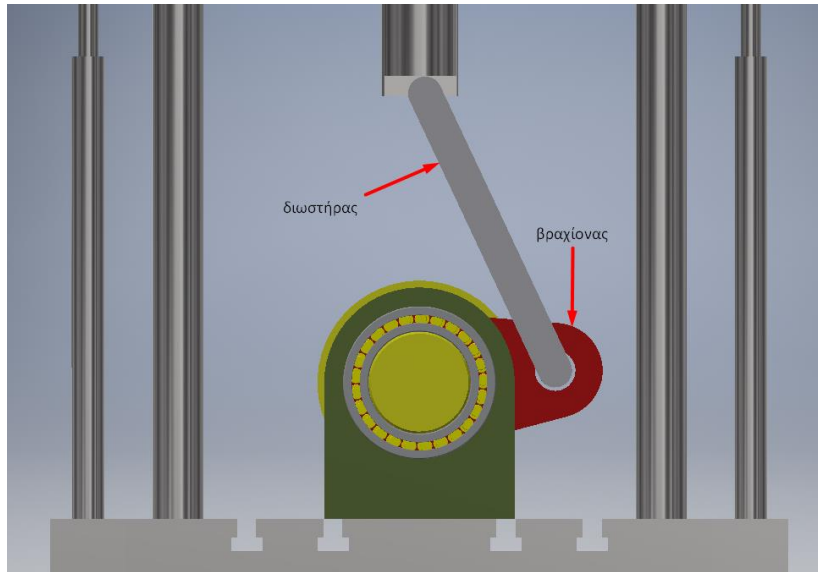


Σχήμα 3.8. Διατάξεις 2.1 (αριστερά) & 2.2 (δεξιά)

Πλεονέκτημα αυτών των διατάξεων, είναι ο μικρός χώρος που απαιτείται κατά το πλάτος του τραπέζιού, αφού το σημείο στο οποίο ασκείται η δύναμη είναι μοναδικό, σε αντίθεση με το πλήθος δοντιών στην περιφέρεια του τροχού. Από την άλλη, για την αποφυγή μεγάλης πλευρικής δύναμης, το crosshead πρέπει να τοποθετηθεί αρκετά ψηλά, ώστε η γωνία που συμβάλει στην πλευρική δύναμη που επάγεται στο έμβολο, να μικρύνει. Στα κεφάλαια που ακολουθούν, καταγράφεται πλήρης γεωμετρική ανάλυση των διατάξεων και δίνονται οι εξισώσεις που περιγράφουν την κίνηση με αριθμητικά παραδείγματα, με στόχο τον καθορισμό των παραμέτρων που έχουν τεθεί.

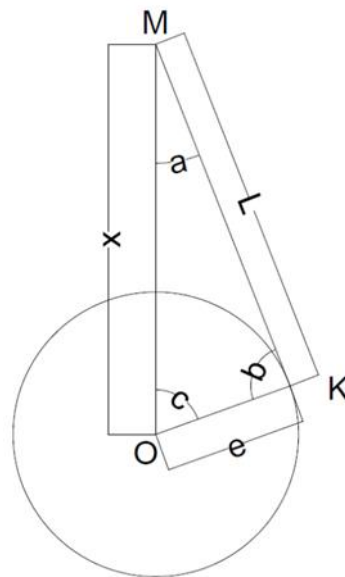
3.3.1. Διάταξη 2.1 - Ομόκεντρα με Έμβολο

Στην πρώτη υποπερίπτωση εξετάζεται, όπως στην πρώτη διάταξη, η θέση του δοκιμίου στο ίδιο κατακόρυφο επίπεδο με το έμβολο. Η θέση αυτή είναι απόλυτα συμμετρική ως προς το πλάτος, με αποτέλεσμα να μην προκαλείται επιπλέον καμπτική φόρτιση στην υπάρχουσα μηχανή. Επίσης, οι αποστάσεις των κινούμενων μερών της διάταξης που διερευνάται από το load unit είναι μεγάλες, με μικρή πιθανότητα καταστροφικής ζημιάς από πιθανή αστοχία της διάταξης. Η κίνηση της διάταξης ακολουθεί αυτή εμβολοφόρου κινητήρα. Η ευθύγραμμη κίνηση του εμβόλου, μετατρέπεται σε περιστροφική στον βραχίονα, εξαιτίας της γενικής επίπεδης κίνησης του διωστήρα που τα συνδέει (Σχήμα 3.9). Όμως η γωνία στροφής που στοχεύει η διάταξη είναι οι 10 μοίρες, συνεπώς η κίνηση θα περιοριστεί σε 5 μοίρες εκατέρωθεν της οριζόντιας θέσης του βραχίονα. Καθ' όλη τη διάρκεια της συγκεκριμένης κίνησης, η γεωμετρία αυτή δημιουργεί ανεπιθύμητες για το έμβολο πλευρικές δυνάμεις. Από αυτές, θα ασχοληθούμε μόνο με την συνιστώσα στο οριζόντιο επίπεδο.



Σχήμα 3.9. Απεικόνιση Μερών Διάταξης 2.1

Στο σχέδιο που ακολουθεί (Σχήμα 3.10), απεικονίζεται η γεωμετρία της διάταξης. Το κέντρο του κύκλου “Ο” συμπίπτει με το κέντρο του άξονα που θα στραφεί. Το σημείο “Κ” απεικονίζει την άρθρωση του διωστήρα με τον βραχίονα και το σημείο “Μ” του διωστήρα με τη μηχανή. Όπως γίνεται αντιληπτό, το σημείο “Μ” δεν είναι σταθερό αλλά μετακινείται κατακόρυφα, σύμφωνα με την κίνηση του εμβόλου. Άρα, το ευθύγραμμο τμήμα “ΜΚ” προσομοιάζει το διωστήρα και το “ΟΚ” τον βραχίονα.



Σχήμα 3.10. Γεωμετρία Ομόκεντρης Διάταξης Μοχλοβραχίονα

Τις μεταβλητές που φαίνονται στο Σχήμα 3.10, συνδέει ο νόμος συνημίτονων, που ισχύει για όλα τα τρίγωνα:

$$L^2 = e^2 + x^2 - 2 * e * x * \cos c \quad (3.6)$$

Επίσης από τον νόμο ημιτόνων προκύπτει:

$$\sin a = \frac{e}{L} * \sin c \quad (3.7)$$

Η κατακόρυφη δύναμη που εφαρμόζει η υδραυλική μηχανή στο σημείο “Μ”, συμβολίζεται με F_z και η αντίδραση στον οριζόντιο άξονα με F_x , που προκύπτει από την συνισταμένη με κατεύθυνση το διωστήρα “ΜΚ”. Συνεπώς, τις δύο δυνάμεις συνδέει η σχέση :

$$F_x = F_z * \tan a \quad (3.8)$$

Από τις εξ. (3.7), (3.8) προκύπτει :

$$F_x = F_z * \tan\left(a \sin\left(\frac{e}{L} * \sin c\right)\right) \quad (3.9)$$

Η μεταβλητή x του σχήματος, δίνει την θέση της άρθρωσης εμβόλου-διωστήρα σε σχέση με το κέντρο του δοκιμίου. Αυτή καθορίζει και την διαδρομή του εμβόλου (S) κατά την κίνηση, αν αφαιρεθεί από την τελική θέση, η αρχική. Συνεπώς λύνοντας την εξ. (3.6) ως προς x έχουμε:

$$x = e * \cos c + \sqrt{L^2 - e^2 * \sin^2 c} \quad (3.10)$$

, και τελικά:

$$S = x_{\text{τελικο}} - x_{\text{αρχικο}} \quad (3.11)$$

Τέλος, η ροπή στον άξονα προκύπτει από την κάθετη στον βραχίονα δύναμη που εφαρμόζεται στο σημείο K, επί το μήκος του βραχίονα :

$$M_t = F * \sin b * e = \frac{F_z}{\cos a} * \sin b * e \quad (3.12)$$

Από τον νόμο ημιτόνων έχουμε :

$$\sin b = \frac{x}{L} * \sin c \quad (3.13)$$

Από εξ. (3.12), (3.13) η ροπή τελικά δίνεται από τον τύπο:

$$M_t = F_z * \frac{x}{L} * \frac{\sin c}{\cos a} * e \quad (3.14)$$

Ακολουθούν οι Πίνακες 3.8-3.11 με αριθμητική εφαρμογή των παραπάνω τύπων στη δυσμενέστερη θέση των δοκιμών, που είναι η μέγιστη γωνία στροφής των 10 μοιρών ή αλλιώς 5 μοίρες κάτω της οριζόντιας θέσης του βραχίονα, υποθέτοντας ότι το έμβολο πιέζει προς τα κάτω.

Πίνακας 3.8. Παράμετροι Διάταξης 2.1

Γεωμετρία Διάταξης		
Ονοματολογία	Σύμβολο	Μέγεθος
Ύψος Crosshead [m]	l	1.40
Απόσταση Άξονα Δοκιμίου από το Τραπέζι [m]	d	0.10
Μήκος Βραχίονα [m]	e	0.12
Μήκος Διωστήρα [m]	L	0.99
Θέση Περιστροφής [deg]	ϕ	0.00
Γωνία Βραχίονα από τον Ορίζοντα [rad]	c	1.658
Απόσταση Άξονα Δοκιμίου από την Άρθρωση M [m]	x	0.976

Πίνακας 3.9. Χαρακτηριστικά Δοκιμών Διάταξης

Δύναμη Εμβόλου & Αποδιδόμενη Ροπή		
Δύναμη Εμβόλου	kN	lbf
Οριζόντια Συνιστώσα	21.57	4849
Κατακόρυφη Συνιστώσα	169	37991
Συνισταμένη	166.34	38299
Γωνία Πλάγιας Δύναμης (a) [deg]	6.91	
Γωνία Ροπής (b) [deg]	77.73	
Μέγιστη Ροπή [k-Nm]	20.0	

Πίνακας 3.10. Τιμές Υπολογισμών Αντοχής Εμβόλου

Τιμές Υπολογισμών Αντοχής Υδραυλικού Εμβόλου		
Μη-Αξονικές Φορτίσεις [lbf]	P (Horizontal)	4849
	F (Vertical)	37991
Απόσταση από Έδρανο [in]	C (Vertical)	22.792
	B (Horizontal)	0
Διαστάσεις	A (Bearing Spacing)	5.825
	D (Bearing Length)	2.134
	E (Bearing Area)	10.03
	G (Rod Diameter)	3.75
	K (Cyclic Load)	0.068
	S (Actuator Stroke)	0.824

Πίνακας 3.11. Αντοχή Εμβόλου

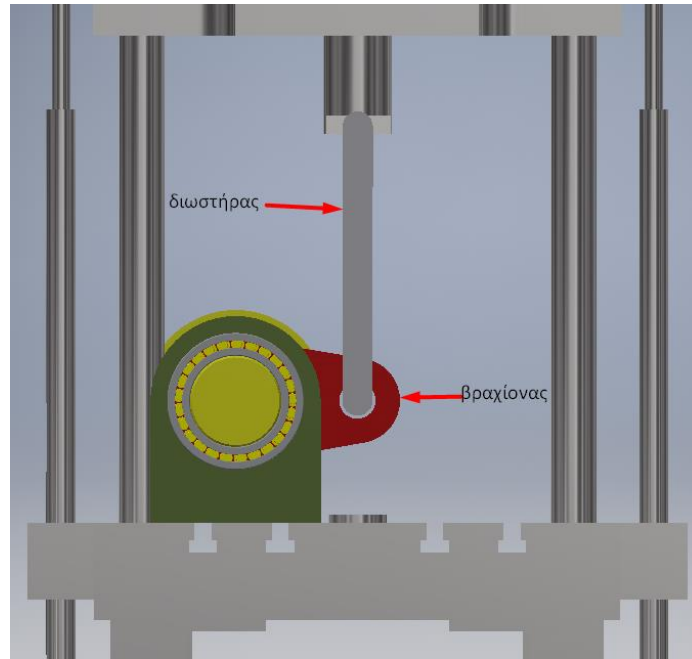
Φόρτιση Εδράνου του Εμβόλου	
L	23029.99
Πίεση Εδράνου	
V [psi]	2296.11
Ανώτατη Πίεση	950
Τάση Πιστονιού	
P.R.S [psi]	23347.52
Ανώτατη Τάση	40000
Μέγιστη Επιτρεπόμενη Ταχύτητα Πιστονιού	
[in/sec]	2.265

Στους παραπάνω πίνακες, οι μεταβλητές σχεδίασης έλαβαν τις πιο ευνοϊκές για την διάταξη τιμές, μετά από δοκιμές. Το ύψος του crosshead (παράμετρος I) πήρε την μεγαλύτερη δυνατή τιμή του για την αποφυγή μεγάλης πλευρικής δύναμης, εφόσον αυτή εξαρτάται από την γωνία α (εξ. 3.8). Όσο πιο ψηλά τοποθετηθεί το crosshead τόσο μικρότερη είναι η γωνία α και κατ' επέκταση η πίεση στο έδρανο, αλλά τόσο μικρότερη είναι και η αντοχή των κολώνων. Το ύψος του άξονα του δοκιμίου (d) έλαβε αντιθέτως την μικρότερη τιμή, χωρίς να είναι γνωστή ακόμα η διάμετρος του δοκιμίου. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα και το Σχήμα 2.4, το ύψος του crosshead στο οποίο οι κολώνες είναι ικανές να φέρουν τέτοια δύναμη, είναι περίπου 320 mm, πολύ μικρότερο από τα 1400 mm που βρίσκεται σε αυτό το παράδειγμα.

Επιπλέον, όσο αυξάνεται το μήκος του βραχίονα (παράμετρος e), μεγαλώνει αμελητέα η πλευρική δύναμη, οπότε δεν επηρεάζει τη διάταξη. Όπως γίνεται αντιληπτό η αλλαγή της μεταβλητής I δημιουργεί έναν φαύλο κύκλο μεταξύ αστοχίας κολώνων και αστοχίας του εδράνου, συνεπώς η περαιτέρω ενασχόληση δεν οδηγεί σε λύση του προβλήματος. Γι' αυτό το λόγο δεν παρουσιάστηκαν στη διπλωματική εργασία περισσότερες τιμές των μεταβλητών σχεδίασης αυτής της διάταξης. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.11, παρόλο που οι τάσεις στο πιστόνι βρίσκονται κάτω από το όριο διαρροής, η πίεση στο έδρανο του εμβόλου οδηγεί σε αστοχία του υδραυλικού εμβόλου. Πριν από αυτή την αστοχία θα έχει προηγηθεί μεγάλη κάμψη των κολώνων της μηχανής, που καθιστά αδύνατη τη διεξαγωγή δοκιμών. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι η διάταξη, σε αυτή τη μορφή της, δεν αποτελεί βιώσιμη λύση.

3.3.2. Διάταξη 2.2 - Έκκεντρα από Έμβολο

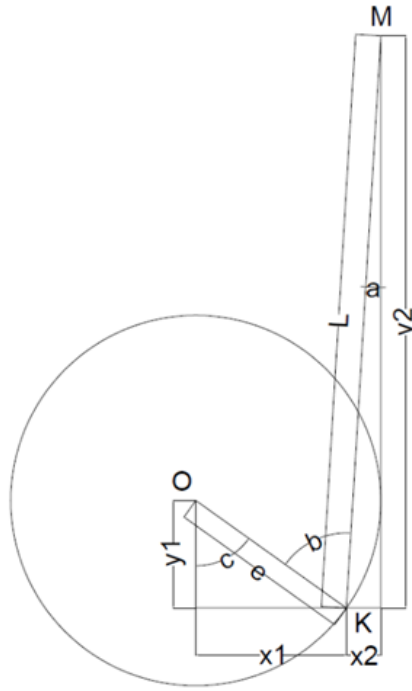
Η τελευταία διάταξη που εξετάζεται θέλει το δοκίμιο μετατοπισμένο κατά ένα μήκος βραχίονα, ως προς το πλάτος του τραπεζιού (Σχήμα 3.11). Σε αναλογία με τη διάταξη 1.2, με την μετατόπιση επιδιώκεται η μείωση της πλευρικής δύναμης που δέχεται το έμβολο, ώστε να μειωθεί η τάση του εδράνου του. Η θέση της διάταξης πάνω στο τραπέζι δεν είναι συμμετρική και πλησιάζει την μια κολώνα του load unit, γεγονός που απαιτεί καθορισμό αποστάσεων ασφαλείας. Με αυτό θα ασχοληθούμε σε επόμενο κεφάλαιο.



Σχήμα 3.11. Απεικόνιση Μερών Διάταξης 2.2

Η γεωμετρία της κίνησης αλλάζει ελάχιστα από την προηγούμενη διάταξη, καθώς η μόνη διαφορά τους είναι η σχετική μετατόπιση του εμβόλου σε σχέση με τον βραχίονα. Πάλι η κίνηση προσομοιάζει μέρος της κίνησης εμβολοφόρου Μ.Ε.Κ. Για την ακρίβεια 10 μοίρες της κίνησης αυτής, η οποία τερματίζει με τον βραχίονα σε οριζόντια θέση και ξεκινάει 10 μοίρες πριν. Η σχετική οριζόντια μετατόπιση του άξονα με το έμβολο μεγιστοποιεί την αποδιδόμενη ροπή και μειώνει την πλευρική δύναμη, εφόσον βραχίονας και διωστήρας είναι κάθετοι στο τέλος της κίνησης. Αυτά επιβεβαιώνονται από τις γεωμετρικές σχέσεις περιγραφής κίνησης της διάταξης που ακολουθούν.

Η γεωμετρία της διάταξης αναλύεται εύκολα με 2 τρίγωνα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.12. Τα σημεία Ο, Κ, Μ αντιστοιχούν, όπως και στην προηγούμενη διάταξη, στην έδραση του βραχίονα, στην άρθρωση του βραχίονα με τον διωστήρα και στην άρθρωση του διωστήρα με το έμβολο. Το ευθύγραμμο τμήμα “ΟΚ” αναπαριστά το βραχίονα και το “ΚΜ” τον διωστήρα. Το σημείο Μ, όντας η άκρη του εμβόλου, κινείται κατακόρυφα και ευθύγραμμα.



Σχήμα 3.12. Γεωμετρία Έκκεντρης Διάταξης Μοχλοβραχίονα

Υποθέτοντας ότι ο βραχίονας είναι στην οριζόντια θέση, εύκολα παρατηρείται ότι:

$$x_1 + x_2 = e \quad (3.15)$$

Για να περιγράψουμε τη θέση του σημείου K, αρκεί να βρούμε σχέσεις για τις συντεταγμένες (x_1, y_1) και (x_2, y_2) . Επειδή τα τρίγωνα είναι ορθά για οποιαδήποτε θέση του K, ισχύουν:

$$x_1 = \sin c * e \quad (3.16)$$

$$y_1 = e * \cos c \quad (3.17)$$

$$x_2 = \sin a * L \quad (3.18)$$

$$y_2 = \cos a * L \quad (3.19)$$

$$x_2^2 + y_2^2 = L^2 \quad (3.20)$$

Όπως και στην προηγούμενη διάταξη, η κατακόρυφη δύναμη που εφαρμόζει η υδραυλική μηχανή στο σημείο M, συμβολίζεται με F_z και η αντίδραση στον οριζόντιο άξονα με F_x , που προκύπτει από την συνισταμένη δύναμη με κατεύθυνση το διωστήρα MK.

Συνεπώς τις δύο δυνάμεις συνδέει η σχέση :

$$F_x = F_z * \tan a \quad (3.21)$$

Η γωνία a εκφράζεται συναρτήσει των μεταβλητών σχεδίασης που έχουμε ορίσει (e , L , c), λύνοντας τις εξισώσεις (3.15), (3.16), (3.20):

$$a = \arccos \sqrt{1 - \frac{e^2}{L^2} * (1 - \sin c)^2} \quad (3.22)$$

Συνεπώς η κατακόρυφη δύναμη F_x δίνεται, συναρτήσει γνωστών μεταβλητών, από τον τύπο:

$$Fx = Fz * \tan \left(\arccos \sqrt{1 - \frac{e^2}{L^2} * (1 - \sin c)^2} \right) \quad (3.23)$$

Η διαδρομή του εμβόλου αντιστοιχεί στην κίνηση του σημείου M, το οποίο κινείται μόνο κατακόρυφα. Το σημείο M βρίσκεται, για κάθε χρονική στιγμή, σε απόσταση από το σημείο O ίση με:

$$Y = y_2 - y_1 = \sqrt{L^2 - e^2 * (1 - \sin c)^2} - e * \cos c \quad (3.24)$$

Γνωρίζοντας ότι το O είναι σταθερό σημείο, η διαδρομή του εμβόλου (S) υπολογίζεται ως η απόσταση μεταξύ των δύο ακραίων θέσεων του σημείου M:

$$S = Y_{start} - Y_{finish} \quad (3.25)$$

Η ροπή που αποδίδει η διάταξη, οφείλεται στην δύναμη που ασκείται κάθετα στον βραχίονα OK και είναι συνιστώσα της ολικής δύναμης F που αποδίδει το έμβολο. Όπως και στην προηγούμενη διάταξη, η τιμή της ροπής δίνεται από τη σχέση:

$$M_t = F * \sin b * e = \frac{Fz}{\cos a} * \sin b * e \quad (3.26)$$

Επειδή τα τρίγωνα του παραπάνω σχήματος είναι ορθά, η γωνία b εκφράζεται συναρτήσει των μεταβλητών σχεδίασης, ως εξής:

$$b = 180 - (90 - c) - (90 - a) = a + c \quad (3.27)$$

Άρα τελικά η ροπή σχεδίασης προκύπτει από τον τύπο:

$$M_t = Fz * \frac{\sin(c+a)}{\cos a} * e \quad (3.28)$$

Για να έχουμε μια πρώτη εικόνα του ρόλου των μεταβλητών σχεδίασης (l, e, d), δοκιμάστηκαν διαφορετικές τιμές, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.12, στον οποίο παρουσιάζονται κρίσιμα για την διάταξη μεγέθη. Αυτό γίνεται για να κατανοήσουμε την επιρροή των μεταβλητών σχεδίασης στην αντοχή της διάταξης και όχι απαραίτητα για τον καθορισμό των τελικών τιμών τους, καθώς εξαρτώνται και από χωρικούς περιορισμούς (κ.ά. που ανακαλύπτουμε στη συνέχεια).

Πίνακας 3.12. Επιρροή Μεταβλητών Σχεδίασης

Ύψος Crosshead (l)	Απόσταση άξονα από τραπέζι (d)	Μήκος Βραχίονα (e)	Ροπή [kN-m]	Κατακόρυφη Δύναμη (Fz) [kN]	Πλάγια Δύναμη (Fx) [kN]	Μήκος Διωστήρα [m]	Πίεση Εδράνου [psi]	Πίεση Διωστήρα Εμβόλου [psi]
1.2	0.2	0.12	19.9	166	0.387	0.782	23.73	193.87
		0.2	20	100	0.389	0.782	23.34	203.88
	0.3	0.12	19.9	166	0.444	0.682	27.21	222.3
		0.2	20	100	0.446	0.682	26.76	233.77
1	0.2	0.12	19.9	166	0.52	0.582	31.89	260.49
		0.2	20	100	0.522	0.582	31.36	273.94
	0.3	0.12	19.9	166	0.628	0.482	38.5	314.54
		0.2	20	100	0.63	0.482	37.87	330.78
0.8	0.2	0.12	19.9	166	0.792	0.382	48.58	396.88
		0.2	20	100	0.795	0.382	47.78	417.38
	0.3	0.12	19.9	166	1.073	0.282	65.81	537.62
		0.2	20	100	1.078	0.282	64.72	565.41

Αρχικά, παρατηρείται ότι οι τιμές των πιέσεων που αφορούν στο υδραυλικό έμβολο έχουν πέσει πολύ χαμηλά σε σχέση με όλες τις άλλες διατάξεις και τα όρια που προτείνονται από τον κατασκευαστή. Συνεπώς, προτού προχωρήσουμε στην επιλογή των μεταβλητών, γνωρίζουμε ότι η διάταξη είναι ικανοποιητικά ασφαλής για την διεξαγωγή δοκιμών. Στη συνέχεια, φαίνεται αδιαμφησβήτητα πως κύρια επιρροή των πιέσεων στο έμβολο έχει το ύψος του crosshead (l), καθώς όσο πιο ψηλά βρίσκεται, τόσο πιο μικρές είναι αυτές. Η απόσταση του άξονα του δοκιμίου από το τραπέζι (d) έχει μια παρόμοια επιρροή στις πιέσεις αλλά αρκετά μικρότερη.

Το μήκος του βραχίονα (e) αντιθέτως, αλλάζει τις πιέσεις αμελητέα, αλλά σύμφωνα με την εξίσωση (3.28) επηρεάζει αντιστρόφως ανάλογα την κατακόρυφη δύναμη F_z , από μαθηματική σκοπιά. Στην πραγματικότητα ο συντελεστής αναλογίας αλλάζει μαζί με τις μεταβλητές σχεδίασης, καθώς αλλάζει και η γεωμετρία. Επίσης υποθέτουμε ότι η ροπή M_t είναι σταθερή. Κάνοντας αυτές τις παραδοχές καταλήγουμε ότι, αυξάνοντας το μήκος του βραχίονα (e), μειώνεται η κατακόρυφη δύναμη. Μικρή κατακόρυφη δύναμη συνεπάγεται και μικρές ασκούμενες δυνάμεις αντίδρασης στη στήριξη του στρεφόμενου άκρου του δοκιμίου, όπως θα δούμε σε επόμενα κεφάλαια.

Άρα η επιλογή των μεταβλητών σχεδίασης σε αυτό το στάδιο της εργασίας, γίνεται όχι μόνο λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, αλλά και τα προβλήματα που αντιμετωπίστηκαν στη συνέχεια. Μπορεί μερικές μεταβλητές να επιλέχθηκαν επιδρώντας αρνητικά σε μεγέθη της διάταξη, σε αυτή τη φάση της μελέτης, όμως, όπως φαίνεται και στον προηγούμενο πίνακα, όλες οι τιμές των πιέσεων είναι εντός των ασφαλών ορίων του κατασκευαστή και συνεπώς είναι αποδεκτές. Η εξήγηση για την επιλογή της κάθε μεταβλητής ξεχωριστά θα δοθεί όταν παρουσιαστεί και το εκάστοτε πρόβλημα.

Ακολουθούν οι Πίνακες 3.13-3.16 που δίνουν στοιχεία για την λειτουργία της διάταξης και όλα τα μεγέθη των εξισώσεων που αποτυπώθηκαν παραπάνω. Σημειώνεται ότι τελική θέση του πειράματος, στην οποία το δοκίμιο έχει στραφεί 10 μοίρες, θεωρείται η οριζόντια θέση. Η αρχική θέση βρίσκεται 10 μοίρες είτε αριστερόστροφα είτε δεξιόστροφα της τελικής, ανάλογα με την κίνηση του εμβόλου (έκταση ή σύμπτυξη). Το κατάλληλο μήκος διωστήρα αλλάζει για κάθε περίπτωση, αλλά οι περισσότερες τιμές παραμένουν σταθερές λόγω συμμετρίας ή αλλάζουν αμελητέα. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι πίνακες σε περίπτωση σύμπτυξης του εμβόλου:

Πίνακας 3.13. Παράμετροι Διάταξης 2.2

Γεωμετρία Διάταξης		
Ονοματολογία	Σύμβολο	Μέγεθος
Ύψος Crosshead [m]	l	0.84
Απόσταση Άξονα Δοκιμίου από το Τραπέζι [m]	d	0.24
Μήκος Βραχίονα [m]	e	0.20
Μήκος Διωστήρα [m]	L	0.262
Θέση Περιστροφής [deg]	φ	0.00
Γωνία Βραχίονα από τον Ορίζοντα [rad]	c	1.40

Πίνακας 3.14. Χαρακτηριστικά Δοκιμών Διάταξης

Δύναμη Εμβόλου & Αποδιδόμενη Ροπή		
Δύναμη Εμβόλου	kN	lbf
Οριζόντια Συνιστώσα	1.02	230
Κατακόρυφη Συνιστώσα	100	22480
Συνισταμένη	100.01	22481
Γωνία Πλάγιας Δύναμης (a) [deg]	0.59	
Γωνία Ροπής (b) [deg]	80.59	
Μέγιστη Ροπή [k-Nm]	20.0	

Πίνακας 3.15. Τιμές Υπολογισμών Αντοχής Εμβόλου

Τιμές Υπολογισμών Αντοχής Υδραυλικού Εμβόλου		
Μη-Αξονικές Φορτίσεις [lbf]	P (Horizontal)	230
	F (Vertical)	22480
Απόσταση από Έδρανο [in]	C (Vertical)	23.34
	B (Horizontal)	0
Διαστάσεις	A (Bearing Spacing)	5.825
	D (Bearing Length)	2.134
	E (Bearing Area)	10.03
	G (Rod Diameter)	3.75
	K (Cyclic Load)	0.068
	S (Actuator Stroke)	1.368

Πίνακας 3.16. Αντοχή Εμβόλου

Φόρτιση Εδράνου του Εμβόλου	
L	1044.41
Πίεση Εδράνου	
V [psi]	104.13
Μέγιστη Πίεση	950
Τάση Πιστονιού	
P.R.S [psi]	1131.51
Μέγιστη Τάση	40000
Μέγιστη Επιτρεπόμενη Ταχύτητα Πιστονιού	
[in/sec]	49.94

3.4. Επιλογή Τελικής Διάταξης

Η επιλογή της τελικής διάταξης, λαμβάνοντας υπόψη τα αριθμητικά αποτελέσματα των υπολογισμών όλων των διατάξεων, είναι αρκετά εύκολη. Τις δύο μορφές διατάξεων που παρουσιάστηκαν σε αυτό το κεφάλαιο (οδοντωτού τροχού και μοχλοβραχίονα), χαρακτηρίζει ένα κοινό στοιχείο. Όταν ο άξονας του αξονικού δοκιμίου της διάταξης βρίσκεται στην ίδια κατακόρυφο με το έμβολο (δηλαδή ακριβώς κάτω από αυτό), η πλευρική δύναμη και κατ' επέκταση οι τάσεις στο υδραυλικό έμβολο είναι πολύ μεγαλύτερες από την άλλη περίπτωση (έκκεντρα). Συνεπώς γίνεται κατανοητό ότι ανεξαρτήτως της διάταξης, κύριο ρόλο στις ανεπιθύμητες δυνάμεις έχει η σχετική θέση του δοκιμίου με το έμβολο (γεωμετρικός παράγοντας).

Από τις δύο έκκεντρες διατάξεις, η μοναδική που δεν απαιτεί επέκταση των δυνατοτήτων της υπάρχουσας μηχανής εφελκυσμού, ή στήριξη κάποιου μέρους της, είναι η διάταξη 2.2, που χρησιμοποιεί μοχλοβραχίονα έκκεντρα του υδραυλικού εμβόλου. Οι τιμές των τάσεων στο υδραυλικό έμβολο βρίσκονται πολύ χαμηλά στην ελαστική περιοχή και πολύ μακριά από τα ανώτατα όρια του κατασκευαστή, οποιεσδήποτε και αν είναι οι τιμές των μεταβλητών σχεδίασης που έχουμε ορίσει. Βασικό πλεονέκτημα λοιπόν αυτής της διάταξης είναι η μεγάλη ελευθερία σχεδίασης, που δίνει ευελιξία για αποφυγή τυχόν ζητημάτων που ίσως προκύψουν στην αναλυτική σχεδίαση. Η απλότητα της κατασκευής και το χαμηλό κόστος είναι ακόμα ένα θετικό της. Όσο αυξάνεται το πλήθος και η πολυπλοκότητα της γεωμετρίας των μερών της διάταξης, τόσο αυξάνεται και το κόστος κατασκευής της. Επιπλέον, ανταλλακτικά για μια οποιαδήποτε ιδιοκατασκευή προφανώς δεν υπάρχουν στο εμπόριο, γι' αυτό η αντικατάσταση ενός κομματιού που έχει αστοχήσει πρέπει να είναι μια εύκολη και φθηνή διαδικασία.

Από την άλλη, η διάταξη με οδοντωτό τροχό διευκολύνει ιδιαίτερα την διεξαγωγή των δοκιμών. Η γωνία στροφής μπορεί εύκολα να αποτυπωθεί στον τροχό και με αναλογικό και ψηφιακό τρόπο. Επίσης, τα μαθηματικά και η γεωμετρία που περιγράφουν την κίνηση της διάταξης είναι πιο απλά και οι δυνάμεις αντίδρασης που σχετίζονται με την αντοχή, δεν μεταβάλλονται τόσο. Το μέγεθος όμως αυτών των αντιδράσεων οδηγεί σε πιο ανθεκτικά υλικά, μεγαλύτερες διαστάσεις, που αυξάνουν το κόστος κτήσης. Οι μεγάλες τάσεις στο υδραυλικό έμβολο επιβάλλουν εξωτερική στήριξη της υδραυλικής μηχανής και διεύρυνση των δυνατοτήτων της, απαιτήσεις που ξεφεύγουν από το σκοπό αυτής της εργασίας.

Συμπερασματικά, η διάταξη που επιλέγεται για αναλυτική σχεδίαση και υπολογισμούς είναι η διάταξη 2.2 (μοχλοβραχίονας έκκεντρα του υδραυλικού εμβόλου). Ακολουθεί συγκεντρωτικός πίνακας (Πίνακας 3.17) με τις μεταβλητές σχεδίασης και τα χαρακτηριστικά της διάταξης.

Πίνακας 3.17. Κύρια Χαρακτηριστικά Δοκιμών Στρέψης

Κύρια Χαρακτηριστικά Συνεργασίας Διάταξης & Μονάδας MTS		
Ύψος Crosshead [mm]	l	840
Απόσταση Άξονα Δοκιμίου από Τραπέζι [m]	d	240
Μήκος Βραχίονα [mm]	e	200
Μήκος Διωστήρα [mm]	L	262
Μέγιστη Γωνία Στρέψης [deg]	ϕ	10.00
Μέγιστη Αποδιδόμενη Ροπή [kN-m]	M_{max}	20.00
Δύναμη Εμβόλου για Μέγιστη Ροπή [kN]	F_x	100.00
Θεωρητική Πλάγια Αντίδραση σε Μέγιστη Ροπή [kN]	F_z	1.02
Διαδρομή Εμβόλου [mm]	S	34.7

4. Προκαταρκτικός Σχεδιασμός Διάταξης και Ανάλυση με Πεπερασμένα Στοιχεία

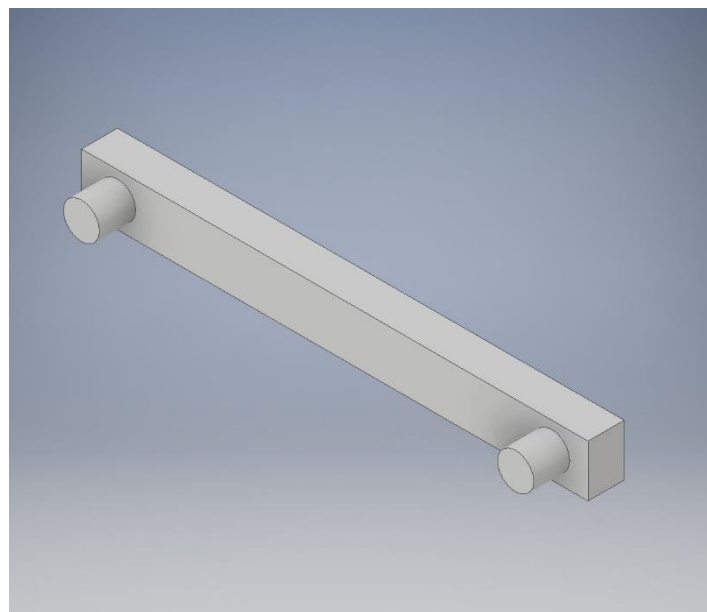
Αρχικά, σε αυτό το κεφάλαιο θα επαληθευτούν τα αποτελέσματα των αναλυτικών υπολογισμών που πραγματοποιήθηκαν στο Κεφάλαιο 3.3.2, με την βοήθεια του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ANSYS Workbench. Πριν ξεκινήσει η λεπτομερής σχεδίαση της διάταξης, ελέγχεται η ισορροπία του συστήματος υδραυλικής μηχανής δοκιμών – διάταξης δοκιμών στρέψης, με δυναμική ανάλυση μη-παραμορφώσιμων σωμάτων. Στη συνέχεια δίνεται μορφή στα κύρια μέρη της διάταξης, χρησιμοποιώντας το σχεδιαστικό πρόγραμμα Autodesk Inventor και εκτελείται στατική ανάλυση σε όσο μεμονωμένα μέρη είναι γνωστές οι οριακές συνθήκες, μέσω του ANSYS Workbench 19.2. Το κεφάλαιο κλείνει με πρόωπη μορφή της διάταξης και καθορισμό κρίσιμων διαστάσεων, που προκύπτουν από στατική φόρτιση παραμορφώσιμων σωμάτων, με συντελεστή ασφαλείας τουλάχιστον 2.

4.1. Ισορροπία και Δυνάμεις στη Μηχανή Εφελκυσμού

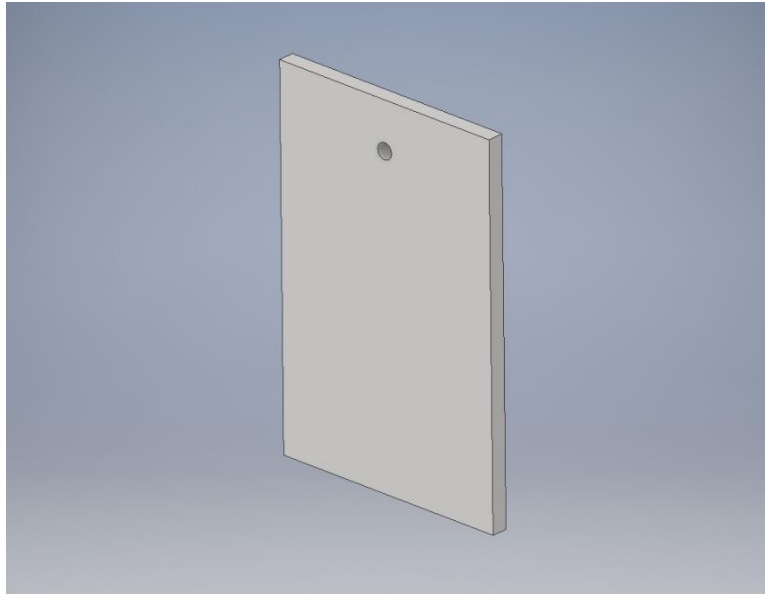
Για να επαληθεύσουμε τα αποτελέσματα της λύσης των εξισώσεων που περιγράφουν την κίνηση της διάταξης, αλλά και την ισορροπία και κατ' επέκταση την ασφαλή λειτουργία του συστήματος, αρκεί να δημιουργήσουμε ένα μοντέλο στιβαρών, μη-παραμορφώσιμων σωμάτων που προσομοιάζει την λειτουργία της διάταξης δοκιμών στρέψης. Το μοντέλο αποτελείται από την μονάδα MTS που διαθέτει το εργαστήριο, το έδρανο που στηρίζει το κινούμενο άκρο του δοκιμίου, τον βραχίονα και τον διωστήρα. Επειδή τα σώματα θεωρούνται απαραμόρφωτα, η γεωμετρία τους είναι απλουστευμένη σε απλά ελάσματα με κατάλληλες διαμορφώσεις οι οποίες παίρνουν τον ρόλο των αρθρώσεων. Το load unit της MTS έχει ήδη σχεδιαστεί, άρα απομένει η σχεδίαση του διωστήρα (Σχήμα 4.1), του βραχίονα (Σχήμα 4.2) και της στήριξης του δοκιμίου (Σχήμα 4.3), αλλά και η συναρμογή όλων (Σχήμα 4.4).



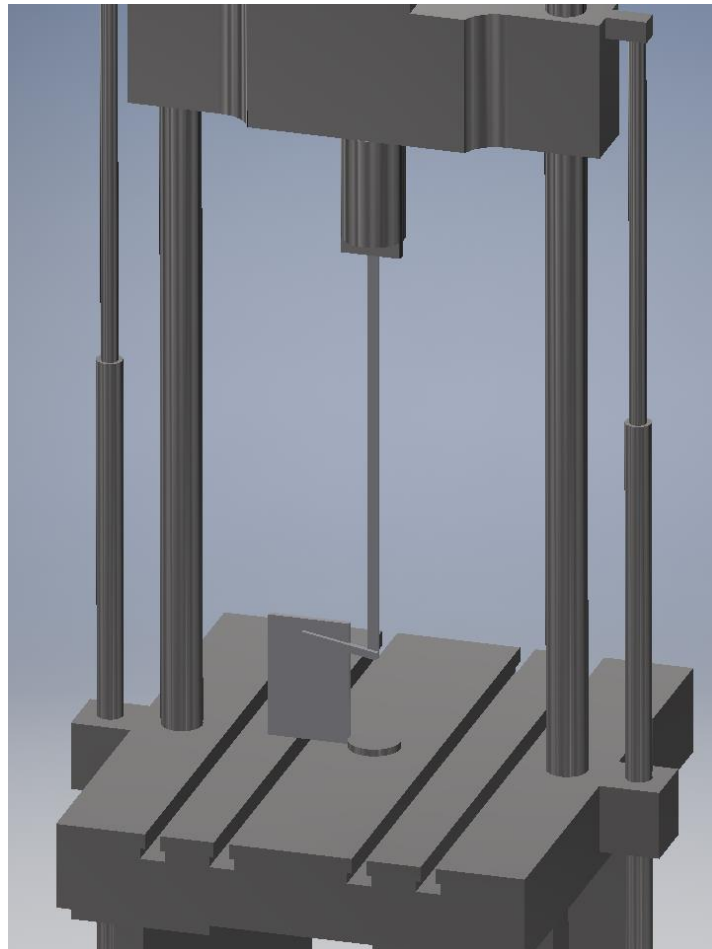
Σχήμα 4.1. Διωστήρας-Rigid Analysis



Σχήμα 4.2. Βραχίονας-Rigid Analysis



Σχήμα 4.3. Στήριξη Περιστρεφόμενου Άκρου-Rigid Analysis



Σχήμα 4.4. Assembly-Rigid Analysis

Στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 4.1), δίνονται οι μεταβλητές σχεδίασης (l,d,e) για αυτή την προσομοίωση. Αυτές επιλέχθηκαν με βάση τα γνωστά έως τη στιγμή αυτή δεδομένα

και δεν είναι οι τελικές. Το μοντέλο, όμως, έχει σκοπό να επιβεβαιώσει τις εξισώσεις και εφόσον η μέγιστη ροπή δεν αλλάζει, τότε δεν επηρεάζεται και το αποτέλεσμα της ανάλυσης. Οι υπόλοιπες τιμές προκύπτουν από τις εξισώσεις της Διάταξης 2.2 για ροπή 20 kN-m και γωνία στροφής 10 μοίρες. Η εκκίνηση βρίσκεται 10 μοίρες κάτω από την οριζόντια θέση του βραχίονα. Ο τερματισμός της δοκιμής γίνεται σε αυτή την οριζόντια θέση. Εδώ κάνουμε την παραδοχή ότι η μέγιστη ροπή εφαρμόζεται από την θέση εκκίνησης και παραμένει σταθερή, ώστε να συμβαδίσουμε με τις εξισώσεις και να γίνει πιο εύκολα η επαλήθευση. Άλλωστε αυτή η υπόθεση είναι δυσμενέστερη από την πραγματικότητα και δεν οδηγεί σε λάθος συμπεράσματα ούτε για την ισορροπία της διάταξης, ούτε για την επιβεβαίωση των εξισώσεων.

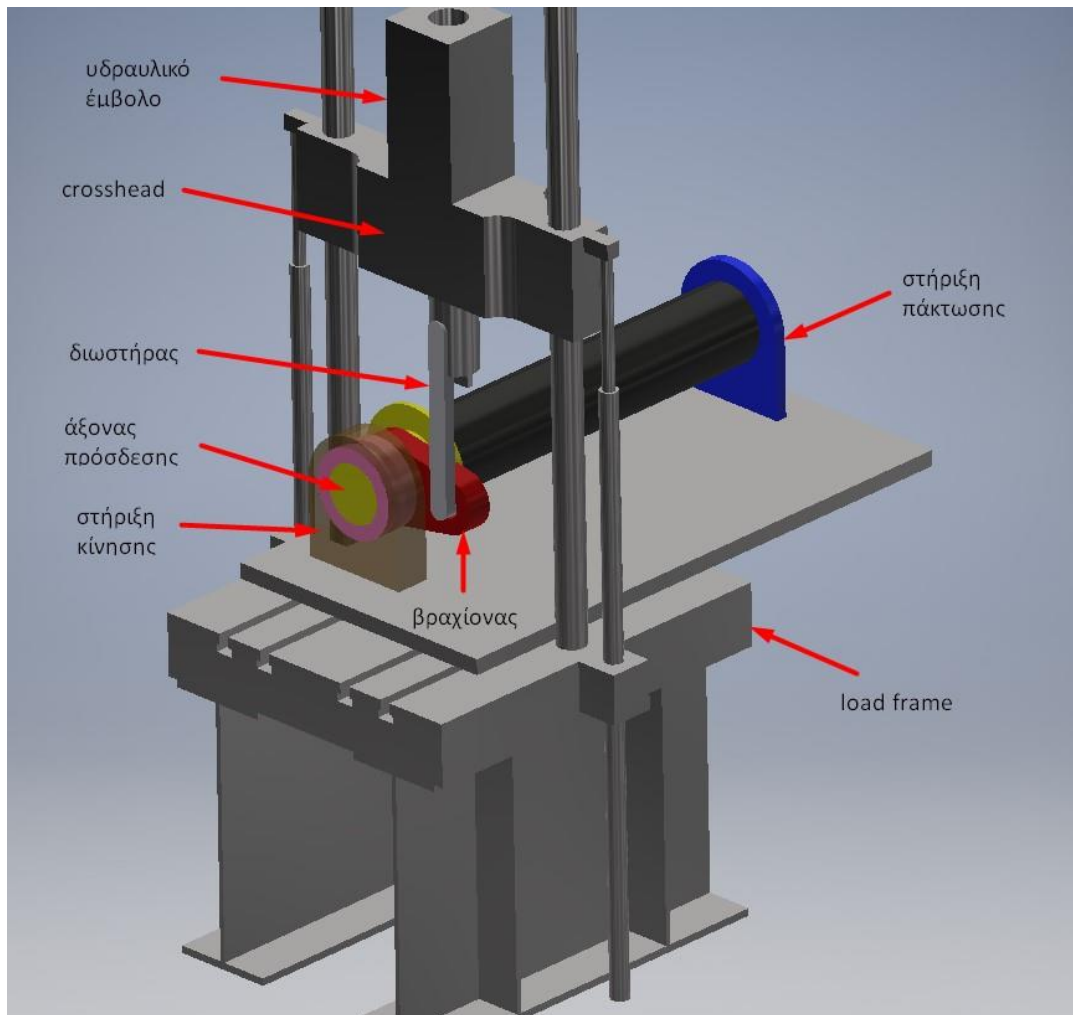
Πίνακας 4.1. Μεταβλητές Σχεδίασης από Εξισώσεις

Ύψος Crosshead [mm]	l	1200
Απόσταση Άξονα Δοκιμίου από Τραπέζι [mm]	d	200
Μήκος Βραχίονα [mm]	e	120
Μήκος Διωστήρα [mm]	L	782
Μέγιστη Δύναμη Εμβόλου [kN]	F_x	169.17
Μέγιστη Πλάγια Αντίδραση [kN]	F_z	0.442
Διαδρομή Εμβόλου [mm]	S	20.8

Σύμφωνα με νόμο της μηχανικής ($1^{ος}$ Νόμος Νεύτωνα), ένα σώμα ισορροπεί, δηλαδή διατηρεί την αρχική κινητική του κατάσταση, όταν ισχύει:

- $\sum F = 0$
- $\sum M = 0$

Στην περίπτωση της διάταξης στρέψης, στο σύστημα ασκούνται μόνο εσωτερικές δυνάμεις με αποτέλεσμα την στρέψη του δοκιμίου και την κίνηση του εμβόλου. Οι κινήσεις αυτές έχουν σταθερή ταχύτητα (γωνιακή και γραμμική αντίστοιχα), συνεπώς επιβεβαιώνουν τον παραπάνω νόμο. Πιο αναλυτικά, σε μια τυχαία χρονική στιγμή του πειράματος, η δύναμη που ασκεί το υδραυλικό έμβολο στη στήριξη του δοκιμίου, δημιουργεί αντίδραση ίση και αντίθετη στον υδραυλικό κινητήρα. Αυτά όμως τα σώματα συνδέονται άκαμπτα μεταξύ τους μέσω του “load frame”, άρα οι δυνάμεις είναι εσωτερικές και δεν δημιουργούν ροπές. Επίσης η ροπή που ασκείται στο κινούμενο άκρο του δοκιμίου εξουδετερώνεται από την αντίδρασή της στο πακτωμένο άκρο του δοκιμίου. Συμπερασματικά, δεν αναμένεται μετατόπιση ή στρέψη του συστήματος, παρά μόνο ανάπτυξη εσωτερικών τάσεων. Το Σχήμα 4.5 που ακολουθεί παρουσιάζει την συναρμολογημένη διάταξη στην $1^{η}$ μορφή της και δίνεται σε αυτό το σημείο για την καλύτερη κατανόηση των παραπάνω και όσων θα ακολουθήσουν.

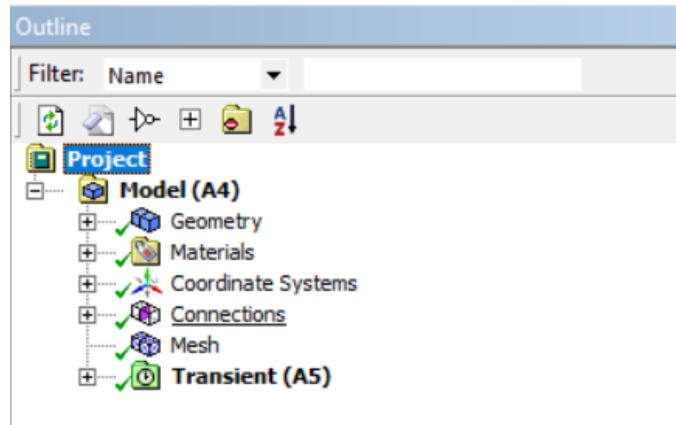


Σχήμα 4.5. Όψη Πρώιμης Συναρμολογημένης Διάταξης

4.1.1. Δυναμική Ανάλυση Άκαμπτων Σωμάτων

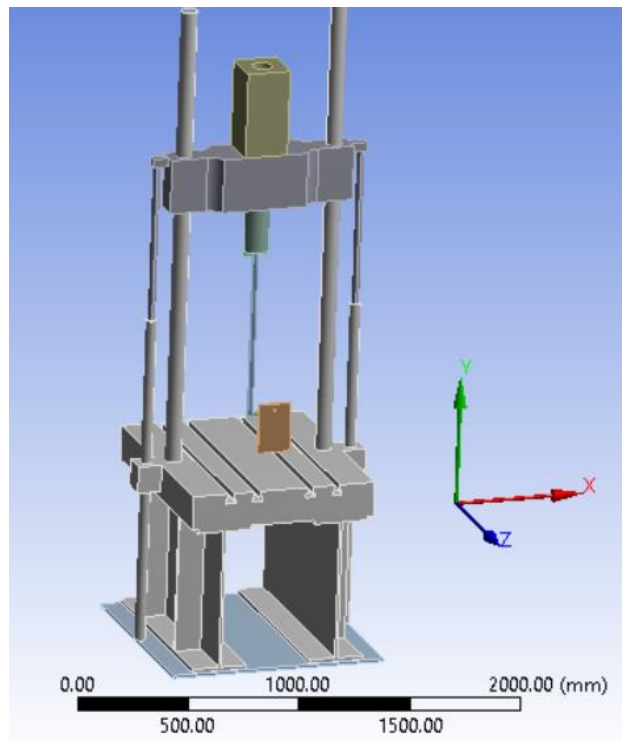
Το πρόβλημα θα λυθεί με την βοήθεια του προγράμματος ANSYS Workbench 19.2 και συγκεκριμένα με το Rigid Dynamics Analysis System που διαθέτει. Η επικοινωνία του Inventor με το ANSYS δεν γίνεται αυτόματα. Το αρχείο “assembly” (.iam) του συστήματος που σχεδιάστηκε, πρέπει να μετατραπεί πρώτα σε “step format” (.stp) και να εισαχθεί ως γεωμετρία στο σύστημα του ANSYS. Αφού η γεωμετρία ανέβει στο πρόγραμμα, η υπόλοιπη εργασία συνεχίζεται στο περιβάλλον του Mechanical APDL. Εκεί θα δοθούν περιορισμοί και συνοριακές συνθήκες, μετατοπίσεις και ροπές και θα επεξεργαστούν κατάλληλα τα αποτελέσματα για την διεξαγωγή συμπερασμάτων

Το Mechanical του ANSYS είναι ένα φιλικό προς το χρήστη περιβάλλον, το οποίο επιτρέπει την εισαγωγή των παραμέτρων της ανάλυσης και έχει την δυνατότητα να συνδέσει τα διάφορα εργαλεία σε ένα παράθυρο. Αρχικά, παρατηρεί κανείς στο παράθυρο outline στα αριστερά το «δένδρο», το οποίο διαχωρίζει τα εργαλεία του συστήματος σε παρακλάδια (Σχήμα 4.6).



Σχήμα 4.6. Outline του Mechanical

Αναλύοντας το Geometry, εμφανίζονται τα διαφορετικά μέρη της γεωμετρίας που εισήχθη. Ως υλικό, στο παρακλάδι Materials, το πρόγραμμα έχει προεπιλογή τον κατασκευαστικό χάλυβα. Επειδή η ανάλυση ασχολείται με απαραμόρφωτα σώματα, το υλικό επιλέγεται τυπικά για να τρέξει η λύση. Έτσι ορίζεται για όλα τα μέρη της γεωμετρίας ο κατασκευαστικός χάλυβας. Το Γενικό Σύστημα Συντεταγμένων έχει ληφθεί από το πρόγραμμα ίδιο με το αρχείο του Inventor. Στην ανάλυση αυτή δεν μας απασχολεί η θέση του Γ.Σ.Σ., αλλά μόνο η φορά του (Σχήμα 4.7).



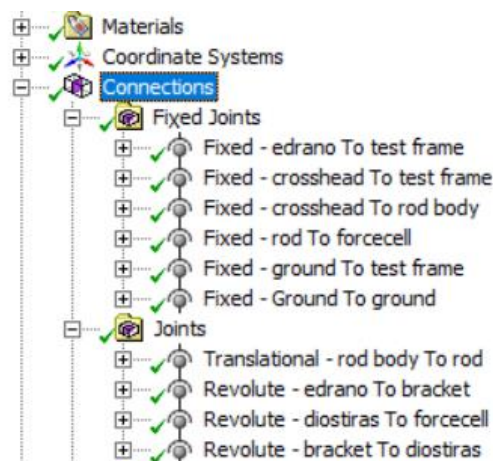
Σχήμα 4.7. Όψη Συστήματος Συντεταγμένων

Στο παρακλάδι Connections (Σχήμα 4.8) ορίζονται ουσιαστικά οι συνοριακές συνθήκες και οι περιορισμοί των σωμάτων του συστήματος. Το πρόγραμμα τις απλοποιεί σε δύο ομάδες, των επαφών (Contacts) και των ενώσεων (Joints). Σε δυναμικά συστήματα απαραμόρφωτων

σωμάτων συνηθίζεται να χρησιμοποιούνται περισσότερο οι ενώσεις, διότι δεν απαιτούν την δημιουργία πλέγματος στοιχείων και μπορούν να αντικαταστήσουν 2 ή 3 εντολές με μία μόνο ένωση. Ο διαχωρισμός των ενώσεων έγινε σε πακτώσεις και μη. Οι πακτώσεις κατά τη σειρά του Σχήμα 4.8 είναι:

- Πάκτωση του εδράνου στο τραπέζι του load frame
- Πάκτωση του crosshead στις κολώνες του load frame
- Πάκτωση του υδραυλικού κινητήρα στο crosshead
- Πάκτωση του εμβόλου με τη δυναμοκυψέλη
- Πάκτωση του load frame με το έδαφος
- Πάκτωση εδάφους με εικονικό έδαφος

Όπως είναι αντιληπτό η σχεδίαση του εδάφους δεν είναι απαραίτητη, αφού το πρόγραμμα διαθέτει πάκτωση σώματος με το έδαφος, χωρίς αυτό να έχει φυσική παρουσία. Σχεδιάστηκε μόνο για αναπαράσταση και σε περίπτωση που χρειαστεί αντικατάσταση της πάκτωσης από κάποια επαφή. Σε αυτό το σημείο είναι πολύ σημαντικό να αναφερθεί ότι η πάκτωση της μηχανής στο έδαφος δεν αντικατοπτρίζει την πραγματικότητα. Η μηχανή στο εργαστήριο στηρίζεται μόνο με το βάρος της στο έδαφος και δεν συγκρατείται από εξωτερικά μέσα. Αυτή η παραδοχή της πάκτωσης γίνεται για να είναι επαρκώς ορισμένο το σύστημα και εξυπηρετεί τη διάταξη στην μορφή που της έχουμε δώσει (χωρίς δοκίμιο).



Σχήμα 4.8. Παρακλάδι Connections

Οι υπόλοιπες ενώσεις, στην επόμενη ομάδα (Joints) είναι κατά σειρά:

- Αξονική μετατόπιση του εμβόλου μέσα στο σώμα του υδραυλικού κινητήρα (βαθμός ελευθερίας στο ΓΣΣ: Y)
- Περιστροφή μεταξύ εδράνου και βραχίονα (βαθμός ελευθερίας στο ΓΣΣ: RZ)
- Περιστροφή μεταξύ διωστήρα και δυναμοκυψέλης (βαθμός ελευθερίας στο ΓΣΣ: RZ)
- Περιστροφή μεταξύ διωστήρα και βραχίονα (βαθμός ελευθερίας στο ΓΣΣ: RZ)

Σημείωση: Για τους βαθμούς ελευθερίας, το γράμμα R μπροστά από άξονα του ΓΣΣ χαρακτηρίζει περιστροφή γύρω από το συγκεκριμένο άξονα.

Το πλέγμα δεν μας απασχολεί σε αυτή την ανάλυση, διότι κάθε σώμα συνιστά και ένα στοιχείο. Οι ρυθμίσεις του δεν χρειάζονται αλλαγή. Αρκούν οι προεπιλεγμένες εντολές του προγράμματος για να τρέξει η λύση, χωρίς επίδραση στο αποτέλεσμα.

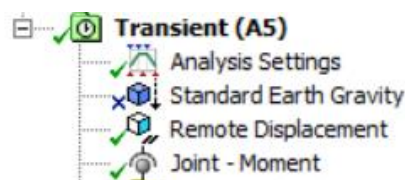
Τελευταίο εργαλείο πριν την επεξεργασία της λύσης είναι το Transient (Σχήμα 4.9), όπου ορίζονται οι αρχικές συνθήκες της ανάλυσης. Για την κίνηση του συστήματος αρκεί να μετατοπιστεί το έμβολο κατά :

20.8 mm κατά τον Y άξονα,

που πραγματοποιείται εισάγοντας την εντολή Remote Displacement. Επειδή το Rigid Dynamics δεν τρέχει με παραμορφώσιμα σώματα, η εναλλακτική για την προσομοίωση της αντίστασης που θα προβάλλει το δοκίμιο στη στρέψη είναι η εφαρμογή ροπής στην άρθρωση βραχίονα-εδράνου. Αυτή εφαρμόζεται με την εντολή Joint-Moment και ισούται με:

$$2 * 10^7 N - mm,$$

σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια της κίνησης. Έτσι ασκείται μια εξωτερική δύναμη στο σύστημα, η οποία υπό πραγματικές συνθήκες πειράματος θα αντισταθμιζόταν από την πάκτωση του δοκιμίου. Στην περίπτωση της προσομοίωσης, έχει πακτωθεί η μηχανή στο έδαφος ώστε να αποφευχθεί η μετατόπιση της. Εναλλακτικά θα μπορούσε να ασκηθεί ροπή ή δύναμη αντίστοιχη με αυτή της πάκτωσης, οπότε το σύστημα πάλι θα ισορροπούσε. Επιλέχθηκε η πάκτωση για πιο εύκολη ανάλυση των αποτελεσμάτων της ένωσης και την αποφυγή επαφών που απαιτούν δημιουργία πλέγματος. Τέλος, δόθηκε στο πρόγραμμα ο έλεγχός των ρυθμίσεων ανάλυσης καθώς υπάρχουν λίγα στοιχεία και η λύση αναμένεται σύντομη. Η επιτάχυνση της βαρύτητας που προσθέσαμε, απενεργοποιείται προς το παρόν, ώστε να απλοποιηθεί η ανάλυση των αποτελεσμάτων.



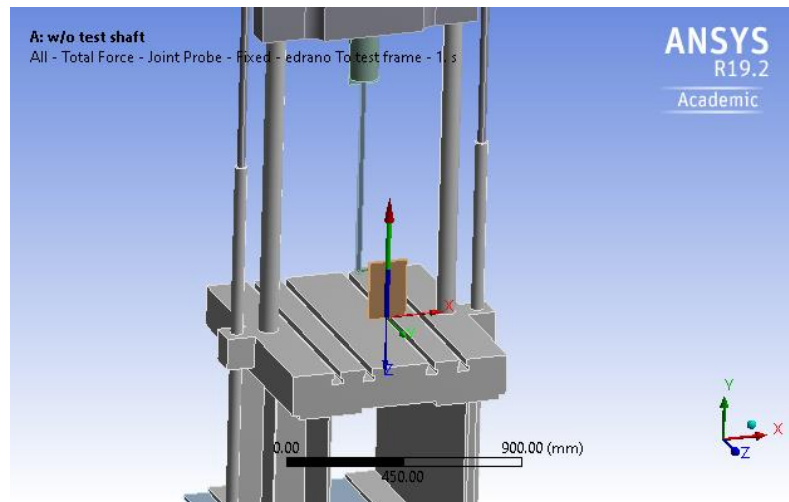
Σχήμα 4.9. Παρακλάδι Transient

Το πρόγραμμα επέλεξε την ολοκληρωτική μέθοδο Runge-Kutta 4 και η λύση ήρθε σε λιγότερο από 1 δευτερόλεπτο με μία μόνο επανάληψη. Για την ανάλυση, αρκεί να επιβεβαιωθούν οι δυνάμεις του Πίνακα 4.1 και να σιγουρευτούμε ότι δεν ασκούνται οριζόντιες δυνάμεις στην πάκτωση του τραπεζιού με το έδαφος. Ο έλεγχος των δυνάμεων διεξάγεται με διερεύνηση των πακτώσεων εδράνου-load frame, crosshead-load frame και εδάφους-load frame στην αρχή της κίνησης (0 s). Αναμένεται οι συνιστώσες στον X-άξονα των 2 πρώτων πακτώσεων να είναι ίσες σε μέτρο και αντίθετες σε φορά. Επίσης η κάθετη δύναμη αντίδρασης στην πάκτωση του εδράνου, που στην προκειμένη περίπτωση δημιουργείται από την ροπή στην άρθρωση, αναμένεται να εξουδετερωθεί από αντίθετη

δύναμη στην πάκτωση της μηχανής με το έδαφος. Ακολουθούν πίνακες με τις εξετάσεις των ενώσεων:

Πίνακας 4.2. Διερεύνηση Ένωσης Εδράνου-Load Frame

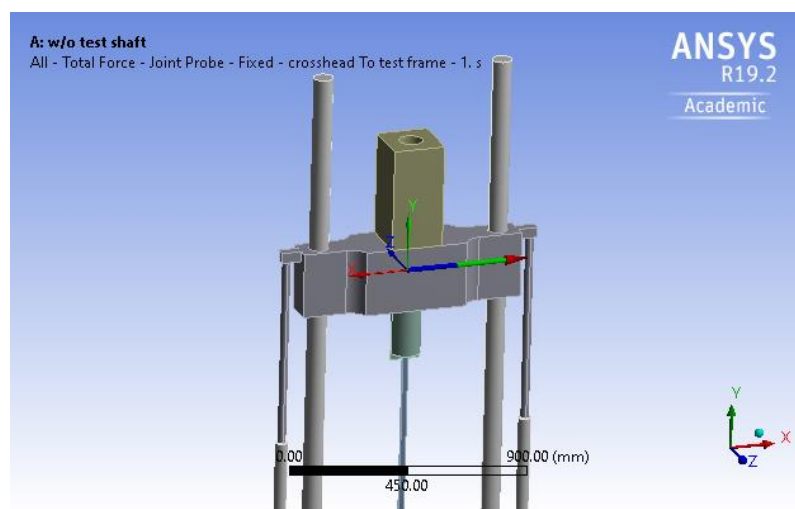
Διερεύνηση Ένωσης - Πάκτωση Εδράνου με Load Frame			
Χρόνος [s]	Δύναμη X-άξονα [N]	Δύναμη Y-άξονα [N]	Δύναμη Z-άξονα [N]
0	-394	-169170	~0



Σχήμα 4.10. Απεικόνιση Δύναμης Εδράνου-Load Frame

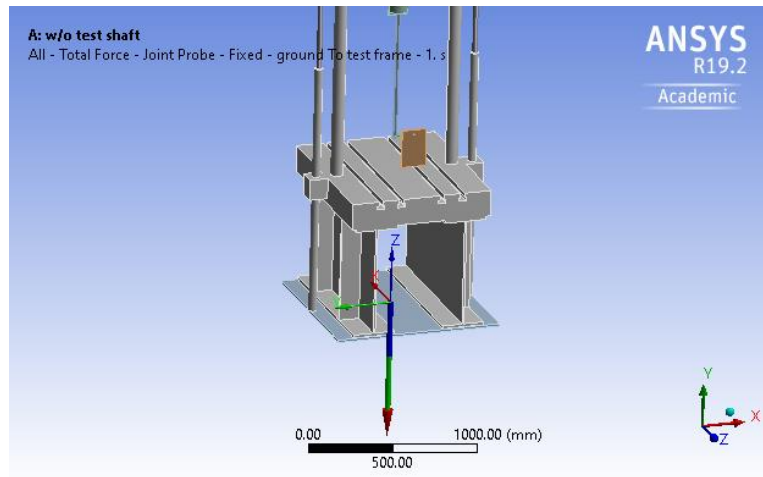
Πίνακας 4.3. Διερεύνηση Ένωσης Crosshead-Load Frame

Διερεύνηση Ένωσης - Πάκτωση Crosshead με Load Frame			
Χρόνος [s]	Δύναμη X-άξονα [N]	Δύναμη Y-άξονα [N]	Δύναμη Z-άξονα [N]
0	394	~0	~0



Σχήμα 4.11. Απεικόνιση Δύναμης Crosshead-Test Frame

Διερεύνηση Ένωσης - Πάκτωση Εδάφους με Load Frame			
Χρόνος [s]	Δύναμη X-άξονα [N]	Δύναμη Y-άξονα [N]	Δύναμη Z-άξονα [N]
0	~0	-169170	~0



Σχήμα 4.12. Απεικόνιση Δύναμης Εδάφους-Test Frame

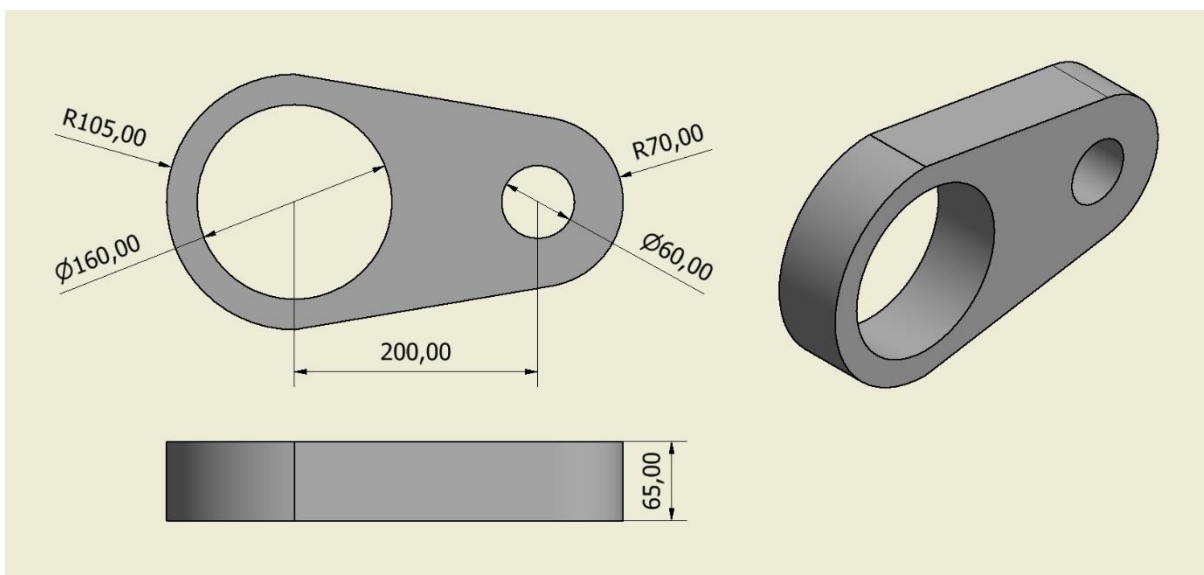
Παρατηρείται, σε αντίθεση με τα αναμενόμενα, ότι οι δυνάμεις στον Y-άξονα έχουν την ίδια φορά. Αυτό είναι προφανώς ζήτημα ορισμού της ένωσης. Το πρόγραμμα δίνει την δύναμη που ασκεί το δεύτερο σώμα (load frame), στο πρώτο (έδαφος). Άρα η δύναμη που ασκείται στο σύστημα από το έδαφος είναι ίση και αντίθετη από αυτή στον Y-άξονα του Πίνακας 4.2. Έπειτα, η πλάγια αντίδραση στον X-άξονα (Δύναμη X-άξονα) είναι κατά 48 N μικρότερη από την υπολογισμένη του Πίνακας 4.1. Όπως έχει αναφερθεί στη διάταξη 2.2, η πλάγια δύναμη εξαρτάται, εκτός από την ολική δύναμη του εμβόλου, κυρίως από την γωνία της με τον κατακόρυφο άξονα. Πιθανότατα λοιπόν, υπάρχει κάποια ατέλεια στη συναρμογή του συστήματος στην άρθρωση εμβόλου-διωστήρα ή εξαιτίας της στρογγυλοποίησης διαστάσεων, δημιουργήθηκε κάποια μικρή αλλαγή της γωνίας. Όμως η διαφορά, σαν τάξη μεγέθους, είναι μικρή και δεν αξίζει περαιτέρω διερεύνηση, καθώς οι εξισώσεις επαληθεύονται πολλές φορές στη συνέχεια της εργασίας.

Η κατακόρυφη δύναμη του εμβόλου επαληθεύεται επακριβώς και μαζί η ισορροπία του συστήματος. Η μεγαλύτερη οριζόντια δύναμη που ασκείται στην πάκτωση του test frame με το έδαφος, σύμφωνα με το πρόγραμμα, είναι της τάξης των $3 \cdot 10^{-3}$ N περίπου, που θεωρείται μηδενική. Τέτοια δύναμη δεν είναι ικανή να προκαλέσει ανατροπή του συστήματος. Η κατακόρυφη δύναμη που ασκείται από το έδαφος είναι η αναμενόμενη, εξαιτίας της παραδοχής ότι η μονάδα MTS είναι πακτωμένη στο έδαφος και της ασκείται εξωτερική ροπή ίση με τη μέγιστη των δοκιμών. Υπό πραγματικές συνθήκες πειράματος, ροπή και δύναμη εξουδετερώνονται από αντιδράσεις του “load frame”.

4.2. Βραχίονας

Η λεπτομερής σχεδίαση των εξαρτημάτων της διάταξης στρέψης ξεκινάει από τον βραχίονα, ο οποίος συνδέει ουσιαστικά το υδραυλικό έμβολο με την νέα διάταξη που θα προσαρτηθεί. Η σύνδεση είναι η λέξη-κλειδί για την μορφή αυτού του κύριου μέρους της διάταξης. Από την μία πλευρά, ο βραχίονας είναι άρρηκτα συνδεδεμένος με τον άξονα, στον οποίο προσδένεται το δοκίμιο. Από την άλλη, αρθρώνεται ο διωστήρας που μεταφέρει την κίνηση στο σύστημα. Συνεπώς, ο βραχίονας φαντάζει ως μία δοκός με δυο διαμετρικές οπές. Η μια πακτώνεται σε άξονα μεγάλης διατομής και η άλλη θα φιλοξενήσει κάποιου είδους άρθρωση για την σύνδεση με τον διωστήρα. Η απόσταση των οπών, υπενθυμίζεται πως υπολογίστηκε στα 200 mm. Η σχεδίαση έγινε στο πρόγραμμα Autodesk Inventor παραμετρικά, ώστε να διευκολύνουμε τις αλλαγές των διαστάσεων που επιφέρουν οι επάλληλες δοκιμές στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων.

Το σχέδιο που ακολουθεί (Σχήμα 4.13), παρουσιάζει τον βραχίονα στην βέλτιστη του μορφή μετά από δοκιμές στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων. Η αρχική και ενδιάμεσες σχεδιάσεις παραλείπονται επειδή έχουν την ίδια μορφή και ακολουθούν την ίδια στατική ανάλυση. Η διάσταση που άλλαξε μεταξύ των ενδιάμεσων μοντέλων είναι μόνο του πάχους. Βελτιστοποίηση της τοπολογίας του μοντέλου δεν απαιτείται, καθώς το πρόβλημα που μας απασχολεί δεν είναι η ενεργειακή απόδοση της διάταξης αλλά η λειτουργία της με ασφάλεια. Συνεπώς η σχεδίαση ως πρώτο στόχο έχει την απλή γεωμετρία και ευκολία κατασκευής. Να τονιστεί ακόμα μια φορά ότι η διάταξη είναι ιδιοκατασκευή που θα προκύψει από απλές κατεργασίες και δεν αποτελεί προϊόν γραμμής παραγωγής.



Σχήμα 4.13. Σκαρίφημα Βραχίονα

4.2.1. Στατική Ανάλυση

Προ-Επεξεργασία

Στο περιβάλλον του ANSYS Workbench 19.2, ανοίγουμε σύστημα Static Structural, όπου εισάγεται η γεωμετρία του βραχίονα σε μορφή step (.stp), την οποία έχουμε εξάγει από το Inventor. Πρώτα ορίζουμε το υλικό από την βιβλιοθήκη του προγράμματος. Όπως έχει αναφερθεί, το πρόγραμμα έχει ως προεπιλογή τον κατασκευαστικό χάλυβα ή “Structural Steel” όπως παρουσιάζεται στο πρόγραμμα (ANSYS Materials 2020), ο οποίος είναι ο επιθυμητός. Οι ιδιότητες του συγκεκριμένου, που αφορούν το μοντέλο, φαίνονται στον Πίνακα 4.5. Στο εξής, όταν αναφερόμαστε σε κατασκευαστικό χάλυβα, θα ανατρέχουμε σε αυτό το σημείο για τις ιδιότητες του. Αν δεν γίνει αναφορά σε άλλο υλικό, εννοείται πως χρησιμοποιείται ο συγκεκριμένος χάλυβας.

Πίνακας 4.5. Ιδιότητες Κατασκευαστικού Χάλυβα (Βιβλιοθήκη ANSYS 19.2)

Structural Steel (ANSYS 19.2 Material Library)	
Density [kg/m ³]	7850
Young’s Modulus [GPa]	200
Poisson’s Ratio	0.3
Bulk Modulus [GPa]	166.67
Shear Modulus [GPa]	76.92
Tensile Yield Strength [MPa]	250
Compressive Yield Strength [MPa]	250

Προφανώς το μοντέλο είναι επιθυμητό να λειτουργεί στην ελαστική περιοχή του υλικού με συντελεστή ασφαλείας από το σημείο διαρροής, τουλάχιστον 2. Άρα δεν απαιτούνται πληροφορίες για την πλαστική περιοχή του. Στον βραχίονα, που είναι βασικό κινούμενο μέρος της διάταξης, ο συντελεστής ασφαλείας αποφασίστηκε ίσος με 3. Επίσης η μέγιστη παραμόρφωση που είναι αποδεκτή, δεν πρέπει να ξεπερνά το 1/100 της διάστασης της διεύθυνσης φόρτισης.

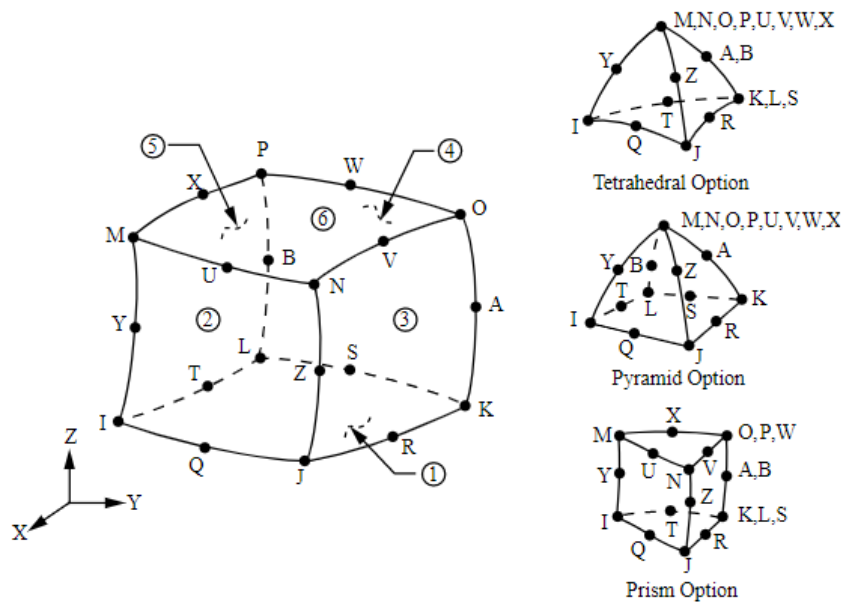
Στην συνέχεια ανοίγουμε το Mechanical APDL και ορίζουμε στο τρισδιάστατο σώμα το υλικό του, αναπτύσσοντας το παρακλάδι Geometry και επιλέγοντας Structural Steel, όπως στην εικόνα που ακολουθεί (Σχήμα 4.14). Η διαφορά με το προηγούμενο μοντέλο (Rigid Dynamics) είναι η επιλογή Flexible (προεπιλεγμένο).

Details of "bracket3-FreeParts"	
+ Graphics Properties	
- Definition	
<input type="checkbox"/> Suppressed	No
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
Behavior	None
- Material	
Assignment	Structural Steel
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes
+ Bounding Box	
+ Properties	
+ Statistics	

Σχήμα 4.14. Παράθυρο Σώματος (Βραχίονας) στη Γεωμετρία

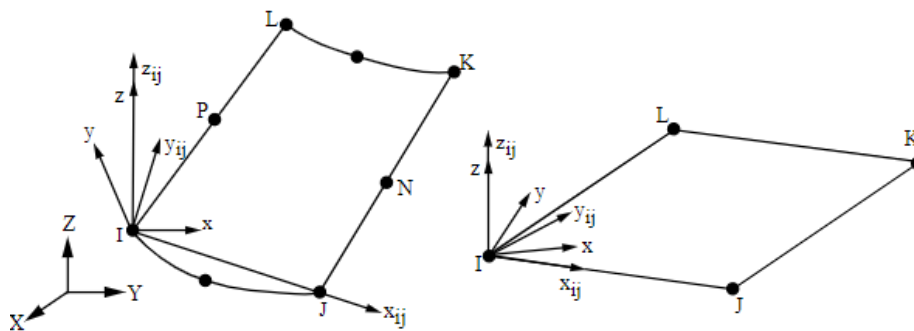
Σειρά έχει η δημιουργία κατάλληλου πλέγματος ώστε να πάρουμε σωστά αποτελέσματα. Το πλέγμα είναι ένα σύνολο πεπερασμένων στοιχείων (ή αλλιώς κελιών), τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με κόμβους και σχηματίζουν τη γεωμετρία που έχουμε ορίσει. Το Workbench, ανάλογα με τις ρυθμίσεις που κάνει ο χρήστης, επιλέγει το κατάλληλο στοιχείο από την βιβλιοθήκη του. Ο χρήστης μπορεί με προσθήκη εντολής να αλλάξει τα στοιχεία του πλέγματος σε αυτά που επιθυμεί. Στην προκειμένη περίπτωση το πρόγραμμα επιλέγει τα στοιχεία SOLID186 και τα στοιχεία επαφών SURF154. Πριν προχωρήσουμε στις ρυθμίσεις του πλέγματος, ας αναφέρουμε μερικά δεδομένα για τα στοιχεία αυτά.

Το στοιχείο SOLID186 είναι ένα στερεό τρισδιάστατο στοιχείο, που παρουσιάζει τετραγωνική μετατόπιση και ορίζεται από 20 κόμβους, ο καθένας εκ των οποίων διαθέτει 3 βαθμούς ελευθερίας, δηλαδή μετακίνηση ως προς x, y, z. Το στοιχείο SOLID186 υποστηρίζει, πέρα από μηχανικές ιδιότητες όπως πλαστικότητα, υπερελαστικότητα, ερπυσμό, μεγάλες παραμορφώσεις και εκτροπές. Οι μεγάλες παραμορφώσεις (Large Deflections), που ενεργοποιούνται στις ρυθμίσεις της ανάλυσης, είναι και ο λόγος που το στοιχείο αυτό είναι κατάλληλο για το μοντέλο μας. Επίσης το συναντάμε, είτε ως ομογενές στερεό (Homogenous Solid Element), είτε ως στρωσιγενές στερεό (Layered Solid Element). Επειδή το σώμα μας είναι από ομογενές ισοτροπικό υλικό, τα στοιχεία δίνονται ως ομογενή στερεά. Ακόμα, το στοιχείο αυτό προτείνεται για ακανόνιστα πλέγματα που δημιουργούνται από ασύμμετρες γεωμετρίας, όπως του βραχίονα που μελετάται. Στο Σχήμα 4.15 παρουσιάζεται το στοιχείο SOLID186, ως ομογενές στερεό, στην κανονική μορφή εξαέδρου και τις ισοδύναμες τετραέδρου, πυραμίδας και πρίσματος.



Σχήμα 4.15. Στοιχείο του ANSYS-SOLID186

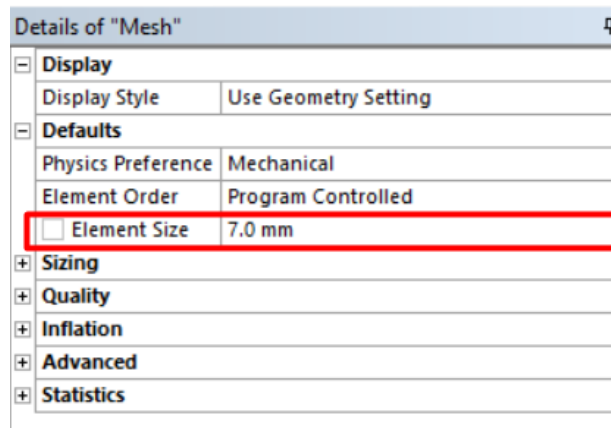
Το στοιχείο SURF154 χαρακτηρίζεται ως στοιχείο-επιφάνεια και μπορεί να επικαλύψει οποιοδήποτε τρισδιάστατο στοιχείο. Το πλήθος των κόμβων του ποικίλει από 3 έως 9, ανάλογα με την επιφάνεια που επικαλύπτει. Συνήθως χρησιμοποιείται σε επιφάνειες συνοριακών συνθηκών ή εφαρμογής δυνάμεων και μεταφέρει τα αποτελέσματα τους στα στοιχεία που συνορεύει. Στο Σχήμα 4.16 που ακολουθεί, παρουσιάζεται το στοιχείο SURF154 σε τετραγωνική μορφή με 9 (αριστερό) και 4 (δεξί) κόμβους.



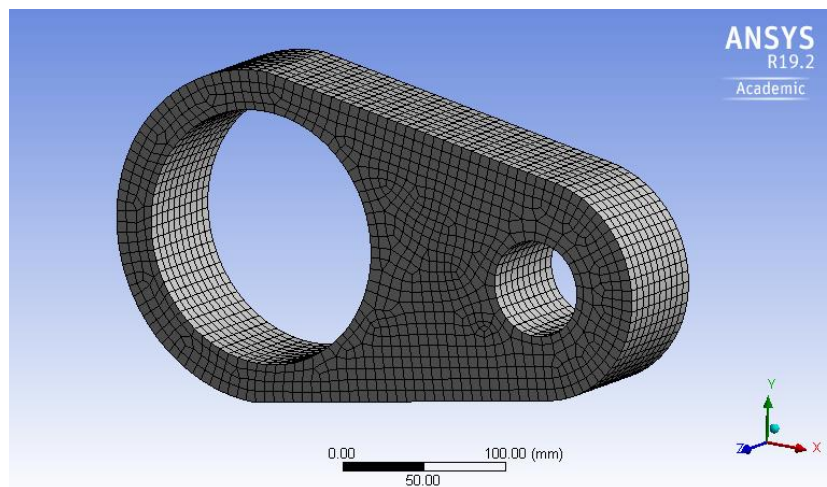
Σχήμα 4.16. Στοιχείο του ANSYS-SURF154

Εφόσον αναφέρθηκαν τα στοιχεία του, θα παρουσιαστεί στη συνέχεια η κατασκευή του Πλέγματος (Mesh), με την χρήση ρυθμίσεων στο παράθυρό του. Συνήθως το επιθυμητό πλέγμα, που δίνει καλύτερα αποτελέσματα με σχετικά μικρό πλήθος στοιχείων είναι το δομημένο πλέγμα. Δηλαδή ένα πλέγμα το οποίο αποτελείται εξ' ολοκλήρου από εξαεδρικά στοιχεία και ακολουθεί την γεωμετρία του μοντέλου. Το μη-δομημένο πλέγμα αποτελείται από τετράεδρα ή και άλλα στοιχεία και χρησιμοποιείται σε πολύπλοκες γεωμετρίες, που δεν παρουσιάζουν συμμετρία και δεν μπορούν να αποδομηθούν σε απλά σχήματα.

Μια τέτοια γεωμετρία είναι και ο βραχίονας που μοντελοποιείται. Το μοντέλο είναι σχετικά μικρό, με μικρές υπολογιστικές απαιτήσεις. Το πλέγμα που δημιουργεί το πρόγραμμα, χωρίς την εισαγωγή κάποιας μεθόδου, αποτελείται κυρίως από εξαεδρικά στοιχεία, με τη χρήση πρισμάτων σε περιοχές ασυνέχειας. Συνεπώς θεωρείται μη-δομημένο αλλά επαρκεί για το συγκεκριμένο μοντέλο. Γι' αυτό η μόνη αλλαγή που θα γίνει στις ρυθμίσεις του, είναι το μέγεθος των στοιχείων του (7 mm), όπως φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα (Σχήμα 4.17). Η μορφή του πλέγματος φαίνεται στο Σχήμα 4.18.



Σχήμα 4.17. Παράθυρο Πλέγματος-Βραχίονας



Σχήμα 4.18. Πλέγμα Βραχίονα

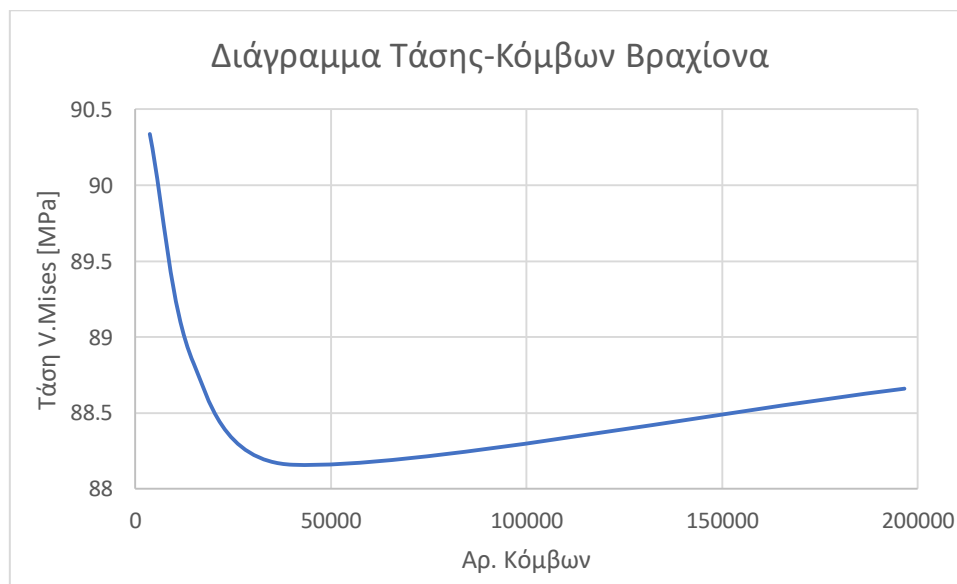
Το μέγεθος, και κατ' επέκταση το πλήθος, των στοιχείων επηρεάζει άμεσα το χρόνο επίλυσης. Όσο πιο αραιό είναι το πλέγμα τόσο λιγότερες πράξεις και λιγότερος αποθηκευτικός χώρος απαιτείται για την λύση του συστήματος. Από την άλλη, με αραιό πλέγμα τα αποτελέσματα έχουν μεγαλύτερη απόκλιση από την πραγματικότητα. Μια μεσαία λύση που βελτιστοποιεί το πρόβλημα χρόνου-αποδεκτού αποτελέσματος, καθορίζεται από την μέθοδο σύγκλισης πλέγματος. Η μέθοδος βασίζεται στην δημιουργία διαφορετικών πλεγμάτων, με ειδοποιό διαφορά το μέγεθος των στοιχείων. Σε αυτό το μεμονωμένο μοντέλο θα γίνει σύγκλιση πλέγματος τυπικά, ώστε να υπάρχει μια πρώτη εικόνα των μεγεθών. Στα υπόλοιπα

μεμονωμένα μοντέλα θα επιλέγεται αυθαίρετα ένα πυκνό πλέγμα. Στο τελικό συναρμολογημένο μοντέλο, που είναι το πιο ρεαλιστικό, θα γίνει πλήρης μέθοδος σύγκλιση πλέγματος για όλα τα μέρη της διάταξης.

Εφόσον το χαρακτηριστικό του σώματος είναι το σταθερό του πάχος, το χρησιμοποιούμε για να δημιουργήσουμε τα 4 διαφορετικά πλέγματα. Το 1^ο πλέγμα διαθέτει 4 στοιχεία κατά το πάχος (μέγεθος 17 mm), το 2^ο διαθέτει 7 (μέγεθος 10 mm), το 3^ο 10 (μέγεθος 7 mm) και το 4^ο 17 (μέγεθος 4 mm). Ο παραλληλισμός των πλεγμάτων γίνεται με τη σύγκριση είτε κάποιας παραμόρφωσης είτε των τάσεων. Σε αυτό το μοντέλο συγκρίνουμε και με τα 2 αποτελέσματα, ώστε να έχουμε μια πρώτη εικόνα για τα μεγέθη στη συνέχεια. Ακολουθεί ο Πίνακας 4.6 και το Σχήμα 4.19 με τη μέθοδο σύγκλισης πλέγματος.

Πίνακας 4.6. Μέθοδος Σύγκλισης Πλέγματος Βραχίονα

Βραχίονας				
	Πλέγμα 1	Πλέγμα 2	Πλέγμα 3	Πλέγμα 4
Μέγεθος Στοιχείων [mm]	17	10	7	4
Πλήθος Στοιχείων	648	2954	8510	44540
Πλήθος Κόμβων	3727	14953	40316	196585
Παραμόρφωση γ [mm]	-6.053E-02	-6.076E-02	-6.067E-02	-6.057E-02
Τάση V. Mises [Mpa]	90.337	88.825	88.159	88.66
% Μεταβολή Τάσης	-	-1.70%	-0.76%	0.57%
% Μεταβολή Παραμόρφωσης	-	0.37%	-0.15%	-0.16%



Σχήμα 4.19. Διάγραμμα Τάσης-Κόμβων Βραχίονα

Όπως φαίνεται στον πίνακα, υπάρχει μια αυξομείωση των μεταβολών των αποτελεσμάτων, με ταυτόχρονη όμως σύγκλιση προς την τελική τιμή. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στο μη-δομημένο πλέγμα και την αλλαγή της κατανομής των τάσεων στους κόμβους, αλλά επειδή οι διαφορές είναι μικρής τάξης μεγέθους, δεν επηρεάζουν το αποτέλεσμα. Γεγονός είναι ότι σε όλα τα πλέγματα, μέγιστη τάση και μέγιστη παραμόρφωση παρατηρήθηκαν στις ίδιες

περιοχές, συνεπώς δεν υπάρχει κόμβος συγκέντρωσης τάσεων. Επειδή όμως η διαφορά στις παραμορφώσεις βρίσκεται στο 4^ο δεκαδικό ψηφίο, ως κύριο κριτήριο θεωρήθηκε η διαφορά τάσης. Από το διάγραμμα συμπεραίνουμε ότι από την περιοχή των 20000 κόμβων και άνω τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά. Έτσι επιλέχθηκε ως πλέγμα του μοντέλου το 3^ο πλέγμα, με μέγεθος στοιχείων 7 mm, επειδή έχει μικρή απόκλιση στις τάσεις από το πυκνότερο 4^ο και ακόμα μικρότερη στις παραμορφώσεις.

Επίλυση

Ακολουθεί ο καθορισμός των οριακών συνθηκών του συστήματος (Σχήμα 4.22), στον υποφάκελο Static Structural. Ο βραχίονας, όπως έχει αναφερθεί, στην τελική θέση που θεωρείται η δυσμενέστερη, δέχεται κατακόρυφη δύναμη από το έμβολο και εξαναγκάζεται σε στρέψη μαζί με τον άξονα πρόσδεσης. Συνεπώς πρέπει να οριστούν δύο συνθήκες, μία της δύναμης και μια του περιορισμού από τον άξονα. Η πρώτη εισάγεται ως Δύναμη Εδράνου (Bearing Load) (Σχήμα 4.20) που ασκείται στην επιφάνεια της μικρής διαμπερούς οπής (κόκκινη επιφάνεια, Σχήμα 4.22). Έτσι η δύναμη κατανέμεται ομοιόμορφα στην επιφάνεια της οπής και το αποτέλεσμα είναι πιο κοντά στην πραγματικότητα, καθώς στην οπή αυτή θα τοποθετηθεί κάποιου είδους ρουλεμάν.

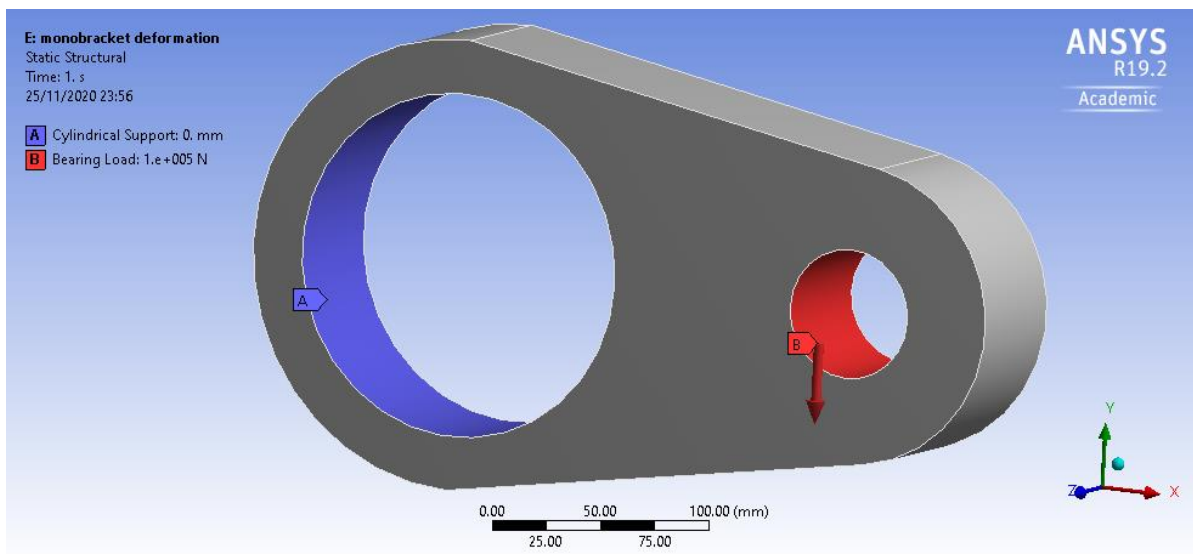
Details of "Bearing Load"	
[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face
[-] Definition	
Type	Bearing Load
Define By	Components
Coordinate System	Global Coordinate System
<input type="checkbox"/> X Component	0. N
<input type="checkbox"/> Y Component	-1.e+005 N
<input type="checkbox"/> Z Component	0. N
Suppressed	No

Σχήμα 4.20. Δύναμη Εδράνου-Μοντέλο Βραχίονα

Η δεύτερη συνθήκη δεν αντικατοπτρίζει την πραγματικότητα, αλλά δημιουργεί χειρότερες συνθήκες για τον βραχίονα. Για να λυθούν οι εξισώσεις πρέπει το σώμα να ισορροπεί. Επειδή η εφαρμογή ροπής και αρθρωτής στήριξης στην ίδια επιφάνεια οδηγεί σε σφάλμα, επιλέγεται Κυλινδρική Στήριξη (Cylindrical Support) (Σχήμα 4.21) στην μεγάλη διαμπερή οπή (μπλε επιφάνεια, Σχήμα 4.22), με κανένα βαθμό ελευθερίας. Το ίδιο αποτέλεσμα θα είχε και Πάκτωση (Fixed Support) της επιφάνειας, αλλά επιλέχθηκε η κυλινδρική στήριξη επειδή βρίσκεται πιο κοντά στην πραγματικότητα. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να αυξάνεται το φορτίο στον βραχίονα, αλλά βρισκόμαστε από την ασφαλή πλευρά. Πραγματικές τάσεις και παραμορφώσεις θα βρεθούν στο τελευταίο μοντέλο.

Details of "Cylindrical Support"	
[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face
[-] Definition	
Type	Cylindrical Support
Radial	Fixed
Axial	Fixed
Tangential	Fixed
Suppressed	No

Σχήμα 4.21. Κυλινδρική Στήριξη-Μοντέλο Βραχίονα



Σχήμα 4.22. Συνοριακές Συνθήκες Βραχίονα

Τις ρυθμίσεις ανάλυσης αφήνουμε για άλλη μια φορά στην κρίση του προγράμματος. Το βήμα της λύσης είναι 1 ως προεπιλογή. Η ανάλυση θεωρείται γραμμική καθώς οι παραμορφώσεις αναμένονται μικρές, εξαιτίας του συντελεστή ασφαλείας που έχουμε θέσει. Άρα δεν χρειάζονται ιδιαίτερες ρυθμίσεις της για την ελαχιστοποίηση του χρόνου επίλυσης.

[-] Step Controls	
Number Of Steps	1.
Current Step Number	1.
Step End Time	1. s
Auto Time Stepping	Program Controlled
[-] Solver Controls	
Solver Type	Program Controlled
Weak Springs	Off
Solver Pivot Checking	Program Controlled
Large Deflection	On
Inertia Relief	Off

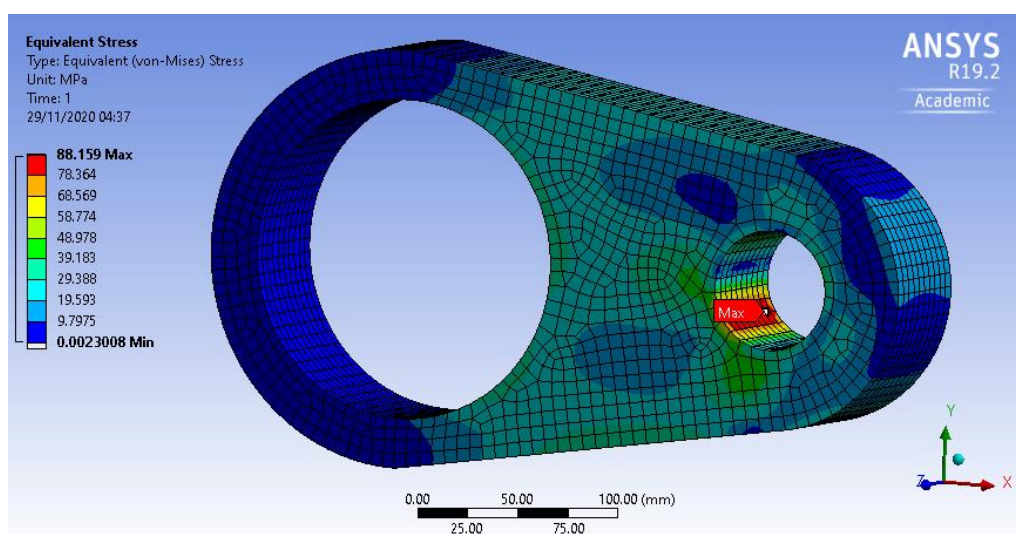
Σχήμα 4.23. Μέρος Ρυθμίσεων Ανάλυσης-Βραχίονας

Μετ-Επεξεργασία

Τελευταίο στάδιο της μελέτης είναι η ανάλυση των αποτελεσμάτων (post-processing). Η ανάλυση γίνεται με κατάλληλα εργαλεία που αφορούν το μέγεθος που ενδιαφέρει τον χρήστη. Στο συγκεκριμένο μοντέλο, έχουμε αναφέρει, πως μας ενδιαφέρει η διαφορά από την τάση διαρροής, καθώς σκοπός είναι η επίτευξη συντελεστή ασφαλείας τουλάχιστον 2. Επίσης, οι παραμορφώσεις δεν πρέπει να ξεπερνούν το 1/100 του μήκους του βραχίονα. Για να ανακτήσουμε τις τιμές που επιθυμούμε, εισάγουμε στον υποφάκελο Solution τα ακόλουθα εργαλεία:

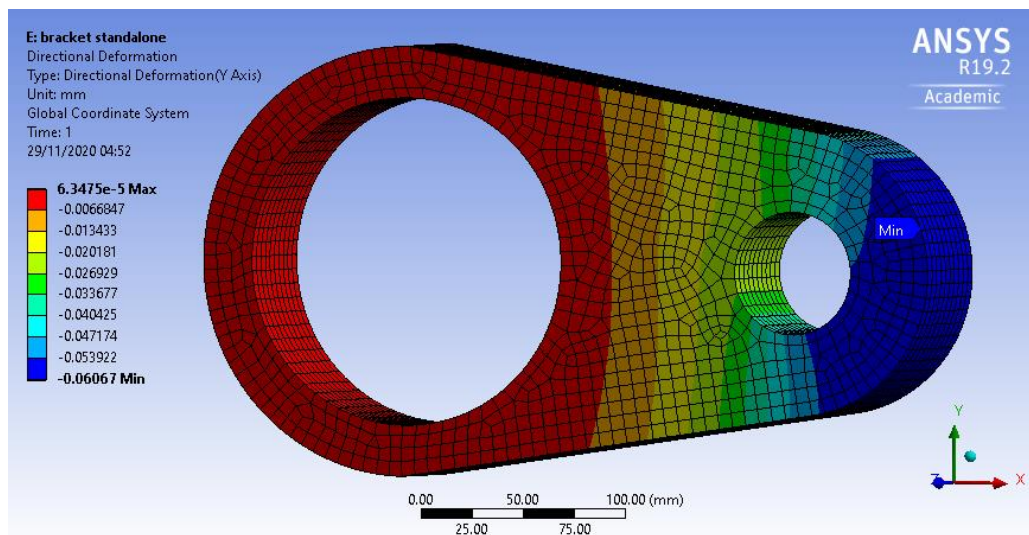
- Equivalent Stress (V. Mises)
- Stress Tool
- Direction Deformation (Y Axes)

Το πρώτο εργαλείο μας δίνει την γενική εικόνα κατανομής των τάσεων στο μοντέλο (Σχήμα 4.24). Όπως αναμενόταν, το σώμα καταπονείται σημαντικά στην επιφάνεια εφαρμογής της δύναμης, με αποκορύφωμα τη μέγιστη τάση των 88.16 MPa στην κόκκινη περιοχή. Ο συντελεστής ασφαλείας, σύμφωνα με το Stress Tool, είναι ίσος με 2.84. Όταν ο βραχίονας εισαχθεί στην τελική διάταξη αναμένεται ο συντελεστής να πλησιάσει περισσότερο το 3, σύμφωνα με τις παραδοχές των οριακών συνθηκών που έγιναν σε αυτό το μοντέλο.



Σχήμα 4.24. Κατανομή Τάσεων Von Mises-Βραχίονας

Επειδή η δύναμη ασκείται μόνο στον Y άξονα, μπορούμε με ασφάλεια να θεωρήσουμε ότι η ολική παραμόρφωση δεν διαφέρει σημαντικά από αυτή στον Y. Οι παραμορφώσεις στον άξονα Y δίνονται στο Σχήμα 4.25. Στην πραγματικότητα το πρόγραμμα υπολογίζει τις μετατοπίσεις των στοιχείων, αλλά το σώμα είναι πακτωμένο. Άρα οι μετατοπίσεις στην περίπτωση αυτή ισούνται με τις παραμορφώσεις. Η μέγιστη παραμόρφωση (0.061 mm) αποτελεί το 1/3500 του μεγαλύτερου μεγέθους του βραχίονα στον Y άξονα. Άρα μπορούμε να πούμε με ασφάλεια ότι οι συνθήκες τάσης και παραμόρφωσης που τέθηκαν, ικανοποιούνται.



Σχήμα 4.25. Μετατοπίσεις Βραχίονα κατά τον Y άξονα

4.3. Ισοδύναμο Δοκίμιο από Χάλυβα

Το δοκίμιο δεν αποτελεί άμεσα μέρος της διάταξης και γι' αυτό δεν θα μοντελοποιηθεί ξεχωριστά. Όμως συμβάλει στην μεταφορά δυνάμεων και ροπών μεταξύ στήριξης κίνησης και στήριξης πάκτωσης. Οι αντιδράσεις του κατά την φόρτισή του είναι αδύνατο να προβλεφθούν χωρίς στατική ανάλυση, συνεπώς η σχεδίαση και εισαγωγή του στο τελικό μοντέλο είναι υποχρεωτική. Το ολικό μήκος δοκιμίου (μαζί με τις φλάντζες) ορίστηκε ίσο με 1000 mm. Από σχετικές δοκιμές σε άξονες από σύνθετα υλικά (Bilalis 2016), η άκρη της μεταλλικής φλάντζας απέχει συνήθως από την άκρη του άξονα 150-200 mm. Έτσι το καθαρό μήκος του δοκιμίου μπορεί να θεωρηθεί 700 mm το μέγιστο. Για να είναι έγκυρες οι μετρήσεις της δοκιμής, θα πρέπει η εξωτερική διάμετρος του άξονα να μην ξεπερνά το 1/3 του καθαρού μήκους (DNV-GL 2015). Δηλαδή η μέγιστη διάμετρος των αξόνων που θα δοκιμαστούν στη διάταξη είναι περίπου 233 mm.

Παρόλο που η διάταξη προορίζεται για την δοκιμή αξόνων από σύνθετα υλικά, το υλικό του δοκιμίου στο μοντέλο μπορεί να διαφέρει. Για την απλοποίηση της μοντελοποίησης και των υπολογισμών, επιλέγεται δοκίμιο από κατασκευαστικό χάλυβα. Το δοκίμιο πρέπει να είναι ισοδύναμο με το μεγαλύτερο δοκίμιο που προορίζεται για την διάταξη. Συνεπώς έχει ολικό μήκος 1000 mm και διάμετρο που στρογγυλοποιείται στα 200 mm. Οι φλάντζες δεν είναι απαραίτητο να μοντελοποιηθούν, καθώς δεν μας ενδιαφέρει η αντοχή τους. Σε αντίθεση με τα δοκίμια από σύνθετα υλικά, ο συγκεκριμένος άξονας είναι συμπαγής. Για να επιφέρει τα αποτελέσματα που αναμένονται κατά την λειτουργία της διάταξης στις μέγιστες συνθήκες, πρέπει να εισαχθεί στο μοντέλο ένας «θεωρητικός» κατασκευαστικός χάλυβας, με διαφορετικό μέτρο διάτμησης και κατ' επέκταση μέτρο ελαστικότητας από τις κανονικές τιμές.

4.3.1. Υπολογισμός Μέτρου Ελαστικότητας

Για τον υπολογισμό του μέτρου διάτμησης ανατρέχουμε στην θεωρία στρέψης (Παπαδόπουλος 2019), όπου για συμπαγείς άξονες ισχύει ο τύπος:

$$T = \frac{G J \theta}{L}, \quad (4.1)$$

όπου T η ροπή που εφαρμόζεται, G το μέτρο διάτμησης, θ η γωνία στροφής, L το μήκος και J η πολική ροπή του άξονα ίση με:

$$J = \pi \frac{D^4}{64} \quad (4.2)$$

Λύνοντας ως προς G και αντικαθιστώντας τις τιμές της ροπής ίση με 20,000,000 N-mm, θ με 0.1745 rad ($=10^\circ$), L με 1000 mm και D με 200 mm προκύπτουν:

$$J = \pi \frac{D^4}{64} = 78539816 \text{ mm}^4$$

Και

$$G = \frac{T L}{J \theta} = 1459 \text{ MPa}$$

Από τη σχέση που συνδέει το μέτρο ελαστικότητας (E), το μέτρο διάτμησης (G) και το λόγο Poisson (ν), λυμένη ως προς E, έχουμε:

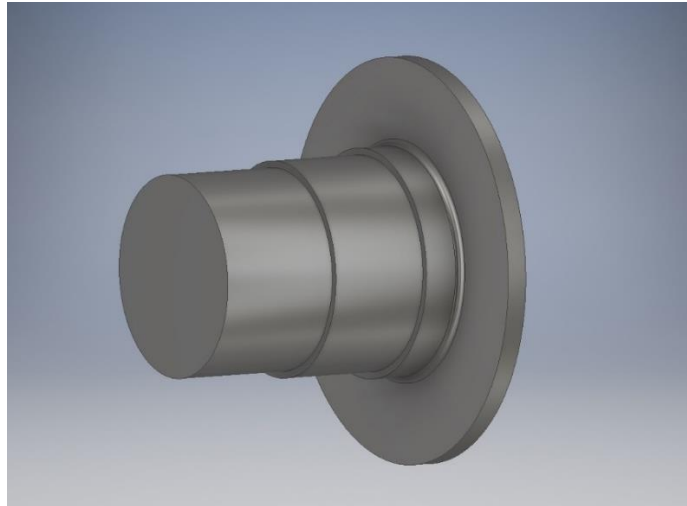
$$E = 2 G (1 + \nu) \quad (4.3)$$

Αντικαθιστώντας το G που υπολογίστηκε και το λόγο Poisson για χάλυβες ίσο με 0.3, το μέτρο ελαστικότητας του νέου κατασκευαστικού χάλυβα που δημιουργήθηκε για το μοντέλο είναι:

$$E_{\text{δοκιμίου}} = 3793 \text{ MPa}$$

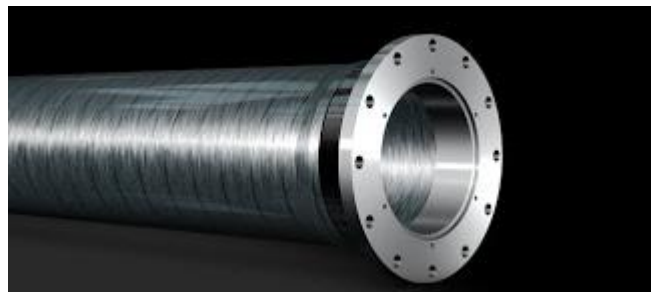
4.4. Άξονας Πρόσδεσης

Ο Άξονας Πρόσδεσης (Σχήμα 4.26) συντελεί στην μεταφορά των ανεπιθύμητων πλευρικών και κατακόρυφων δυνάμεων στην στήριξη κίνησης, η οποία τις παραλαμβάνει. Επίσης είναι αυτός που τελικά περιστρέφει το δοκίμιο, το οποίο προσδένεται πάνω του. Η μορφή του είναι κυλινδρική και παρουσιάζει «σκαλοπάτια» (περιοχές διαφορετικής διαμέτρου), τα οποία διαχωρίζουν τις επιφάνειες όπου συνδέονται η στήριξη και ο βραχίονας. Αυτές οι περιοχές, εμποδίζουν τα προσαρτώμενα μέρη από μικρές σχετικές κινήσεις, οι οποίες θα επηρέαζαν τη δοκιμή, ή και μεγάλες σχετικές κινήσεις που θα οδηγούσαν σε καταστροφική λύση των συνδέσεων.



Σχήμα 4.26. Όψη Άξονα Πρόσδεσης

Η πρόσδεση των δοκιμίων στον άξονα θα γίνεται με περαστούς κοχλίες. Οι άξονες από σύνθετα υλικά, στα άκρα τους διαθέτουν μεταλλικές φλάντζες (Σχήμα 4.27), οι οποίες είναι κολλημένες ή βιδωμένες πάνω τους, ή συνδυασμός αυτών. Αντίστοιχα διαμορφώνεται φλάντζα στο ένα άκρο του άξονα πρόσδεσης που θα εξυπηρετεί την πρόσδεση των δοκιμίων με περαστούς κοχλίες. Επειδή στην πίσω πλευρά της φλάντζας βρίσκεται ο βραχίονας, δίνεται χάρη μερικών εκατοστών (στο σχήμα το τελευταίο σκαλοπάτι) για την διευκόλυνση της προσάρτησης και σύσφιξης των κοχλίων. Οι θέσεις των οπών στην φλάντζα θα αποφασιστούν επί της κατασκευής.



Σχήμα 4.27. Άξονας CFRP με φλάντζα

4.4.1. Υπολογισμός Διαστάσεων

Σύμφωνα με εξισώσεις της θεωρίας στρέψης (Παπαδόπουλος 2009) για συμπαγείς άξονες στην ελαστική περιοχή, μαζί με τις Εξ. (4.1) και (4.2) που δόθηκαν προηγουμένως, ισχύει:

$$\tau = \frac{16T}{\pi D^3} \quad (4.4)$$

όπου τ η μέγιστη διατμητική τάση (στην περιφέρεια του άξονα), T η ροπή που εφαρμόζεται και D η διάμετρος του.

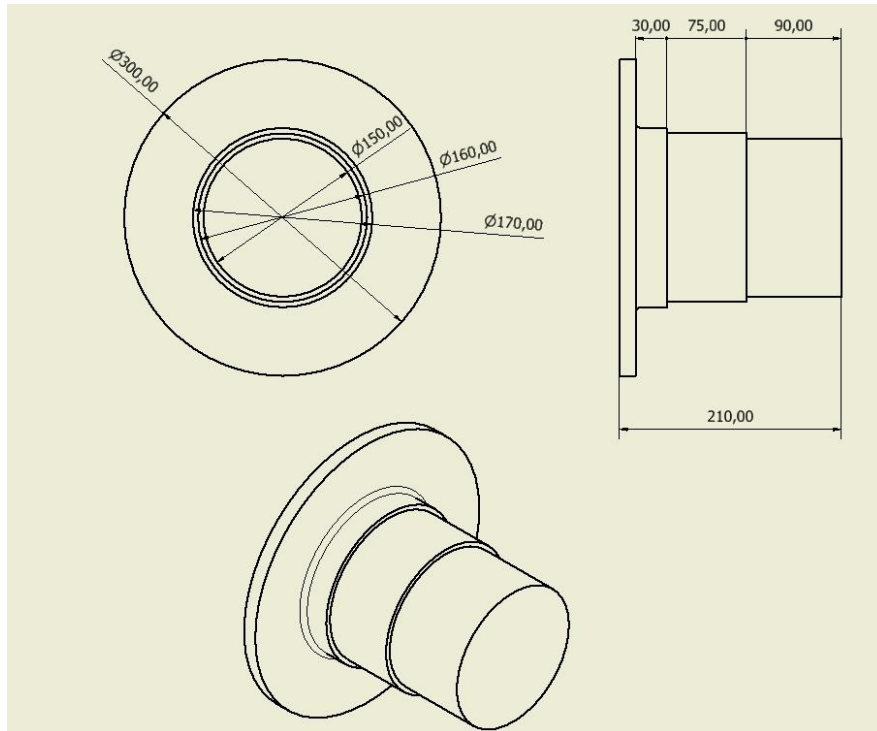
Η στρεπτική παραμόρφωση αυτού του άξονα παίζει καθοριστικό ρόλο στις μετρήσεις των δοκιμών. Αποφασίστηκε πως πρέπει να παραμείνει σε γωνία μικρότερη της 0.1 μοίρας. Η ροπή

στον άξονα υποθέτουμε πως είναι τα 20 kN-m στην χειρότερη περίπτωση. Το μήκος του άξονα εξαρτάται από το πάχος του βραχίονα, της στήριξης κίνησης και των κοχλιών σύνδεσης με το δοκίμιο. Οι διαστάσεις αυτές, παρόλο που δεν έχουν παρουσιαστεί ακόμα, εξαρτώνται η μια από την άλλη και έχουν υπολογιστεί μετά από κύκλους δοκιμών του τελικού συστήματος. Δίνονται προς το παρόν αυθαίρετα για χάρη των υπολογισμών. Ακολουθεί ο Πίνακας 4.7 όπου εφαρμόζονται οι παραπάνω εξισώσεις:

Πίνακας 4.7. Υπολογισμός Διαστάσεων Άξονα Πρόσδεσης Χωρίς Φλάντζα

Άξονας Πρόσδεσης		
Ονοματολογία	Σύμβολο	Τιμή
Εφαρμοσμένη Ροπή	T [N-mm]	20000000
Μέτρο Διάτμησης Χάλυβα	G [GPa]	81
Ελάχιστη Διάμετρος Άξονα Πρόσδεσης	D [mm]	153
Πολική Ροπή Άξονα Πρόσδεσης	J [mm ⁴]	26898968
Μήκος Άξονα Πρόσδεσης	L [mm]	195
Γωνιά Στρέψης	θ [deg]	0.10
Διατμητική Τάση Διαρροής	τ_{yield} [MPa]	139.2
Διατμητική Τάση Άξονα Πρόσδεσης	τ [Mpa]	28.44
Συντελεστής Ασφαλείας	Safety Factor	4.89

Παρατηρείται ότι οποιαδήποτε διάμετρος D άνω των 153 mm, ικανοποιεί την συνθήκη για χαμηλή στρεπτική παραμόρφωση και απέχει πολύ από το όριο διατμητικής διαρροής. Η κυλινδρική επιφάνεια του άξονα χωρίζεται σε τρία μέρη, τα οποία, όπως προαναφέρθηκε, καθορίζουν τις περιοχές σύνδεσης των υπόλοιπων μερών της διάταξης. Πιο συγκεκριμένα, από δεξιά προς τα αριστερά του Σχήμα 4.28, σε μήκος 90 mm (ίσο με το πάχος της στήριξης κίνησης) η διάμετρος είναι 150 mm ίση με την οπή των εδράνων που θα χρησιμοποιηθούν εκεί. Στη διάμετρο των 160 mm πακτώνεται ο βραχίονας και επιπλέον δίνεται απόσταση ασφαλείας από την στήριξη ίση με 10 mm. Το σκαλοπάτι των 170 mm εμποδίζει την αξονική μετατόπιση του άξονα σε σχέση με τον βραχίονα προς τη μια κατεύθυνση και αφήνει 30 mm μήκος για τους περαστούς κοχλίες του δοκίμιου. Η διάμετρος της φλάντζας (300 mm) είναι λίγο μεγαλύτερη από την εξωτερική διάμετρο (233 mm) του μεγαλύτερου δοκίμιου που ενδείκνυται να φέρει η διάταξη, σε περίπτωση επέκτασης ή άλλο λόγο.



Σχήμα 4.28. Διαστάσεις Άξονα Πρόσδεσης

4.4.2. Στατική Ανάλυση

Προ-Επεξεργασία

Για αρχή, ακολουθείται η ίδια διαδικασία με αυτή του βραχίονα. Δημιουργείται νέο σύστημα Static Structural Analysis στο πρόγραμμα ANSYS Workbench και εισάγεται η γεωμετρία που εξήχθη από το Inventor σε μορφή step (.stp). Στο τμήμα Engineering Data, επιλέγουμε για υλικό πάλι τον Κατασκευαστικό Χάλυβα (Structural Steel) από την βιβλιοθήκη του ANSYS, τα στοιχεία του οποίου έχουν δοθεί στην πρώτη ανάλυση (Πίνακας 4.5). Στο Mechanical, επεκτείνουμε το παρακλάδι της γεωμετρίας και ορίζουμε το υλικό του σώματος (Σχήμα 4.29).

Details of "aksonas_flatza2_1-FreeParts"	
+	Graphics Properties
-	Definition
<input type="checkbox"/>	Suppressed
	No
	Stiffness Behavior
	Flexible
	Coordinate System
	Default Coordinate System
	Reference Temperature
	By Environment
	Behavior
	None
-	Material
	Assignment
	Structural Steel
	Nonlinear Effects
	Yes
	Thermal Strain Effects
	Yes
+	Bounding Box
+	Properties
+	Statistics

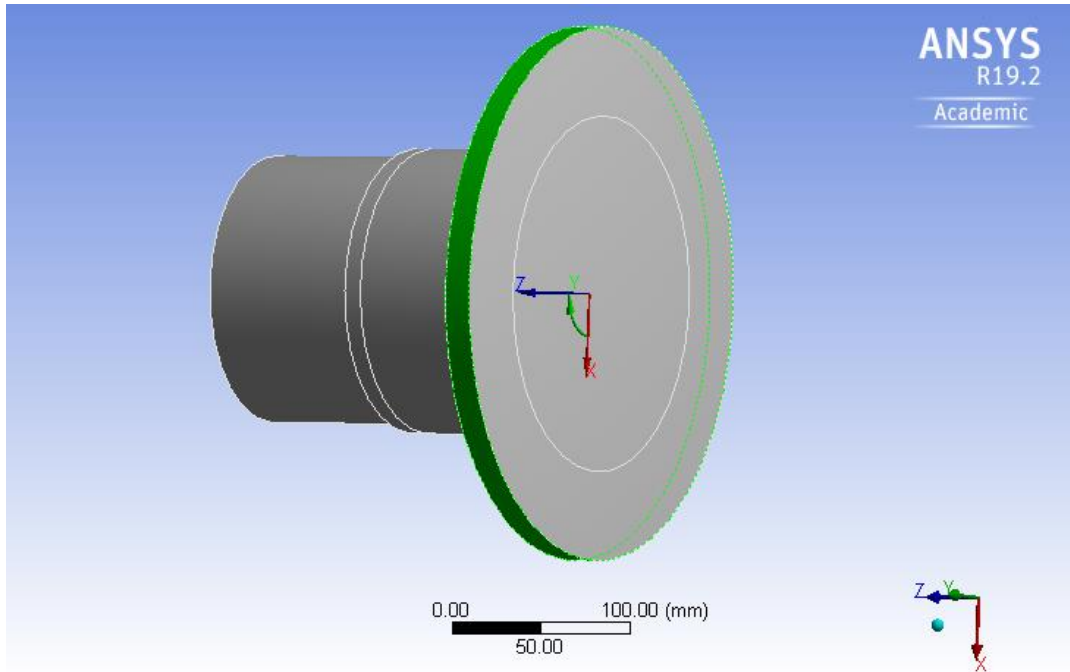
Σχήμα 4.29. Παράθυρο Σώματος (Άξονα Πρόσδεσης) στη Γεωμετρία

Επειδή το μοντέλο είναι κυλινδρικό, πρέπει να εισάγουμε ένα νέο σύστημα συντεταγμένων που θα βοηθήσει στην ανάλυση των στρεπτικών παραμορφώσεων. Γι' αυτό εισάγεται κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων με τα ακόλουθα βήματα:

1. Κάνοντας δεξί κλικ στο παρακλάδι Coordinate Systems, εισάγουμε νέο Σύστημα Συντεταγμένων (Insert>Coordinate System).
2. Κάτω από την ομάδα Definition, επιλέγουμε τον τύπο του ως κυλινδρικό (Cylindrical) (Σχήμα 4.30)
3. Στην ομάδα Origin επιλέγουμε την κυλινδρική γεωμετρία που ορίζει το σύστημα συντεταγμένων, όπως στο Σχήμα 4.31, που επιλέχθηκε η περιφέρεια της φλάντζας (πράσινη επιφάνεια).

Details of "Coordinate System"	
[-] Definition	
Type	Cylindrical
Coordinate System	Program Controlled
APDL Name	
Suppressed	No
[-] Origin	
Define By	Geometry Selection
Geometry	Click to Change
Origin X	0. mm
Origin Y	-9.1849e-015 mm
Origin Z	-7.5 mm
[-] Principal Axis	
Axis	X
Define By	Global X Axis
[-] Orientation About Principal Axis	
Axis	Y
Define By	Default
+ Directional Vectors	
+ Transformations	

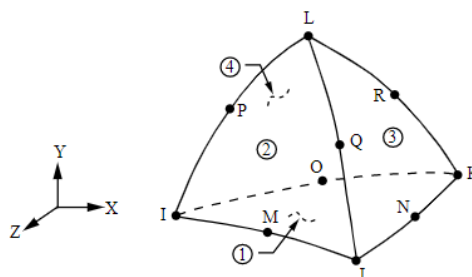
Σχήμα 4.30. Παράθυρο Νέου Συστήματος Συντεταγμένων



Σχήμα 4.31. Επιφάνεια Ορισμού και Νέο Σύστημα Συντεταγμένων

Όπως φαίνεται και στα παραπάνω σχήματα, οι X και Z άξονες έχουν την κατεύθυνση των αντίστοιχων στο γενικό σύστημα συντεταγμένων. Ο Y άξονας ακολουθεί την περιφέρεια της επιφάνειας που επιλέχθηκε.

Σειρά έχει η δημιουργία του πλέγματος. Τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται σε αυτό το μοντέλο ονομάζονται SOLID187. Το τρισδιάστατο αυτό στοιχείο χαρακτηρίζεται από 10 κόμβους και συμπεριφορά τετραγωνικής μετατόπισης. Είναι κατάλληλο για μη-δομημένα πλέγματα και είναι τετραεδρικό. Κάθε κόμβος έχει 3 βαθμούς ελευθερίας, δηλαδή μετακίνηση ως προς x, y, z. Το στοιχείο SOLID187 υποστηρίζει μηχανικές ιδιότητες όπως πλαστικότητα, υπερελαστικότητα, ερπυσμό, αποδυνάμωση λόγω τάσεων (stress stiffening), μεγάλες παραμορφώσεις και εκτροπές. Ακολουθεί το Σχήμα 4.32 με τη γεωμετρία του στοιχείου.

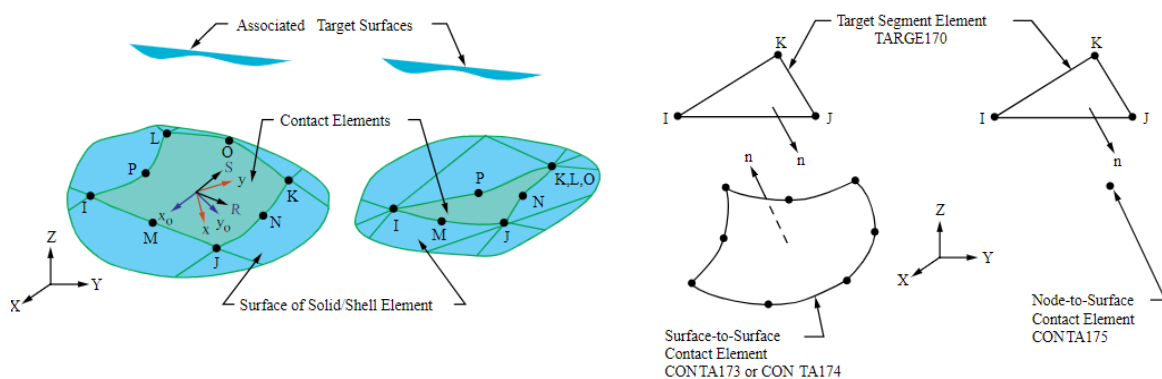


Σχήμα 4.32. Γεωμετρία Στοιχείου SOLID187

Στοιχεία SURF154 χρησιμοποιούνται στην επιφάνεια πάκτωσης του άξονα. Γι' αυτά έχει γίνει αναφορά στο υποκεφάλαιο του βραχίονα.

Τα στοιχεία CONTA174 αντιπροσωπεύουν επαφή και ολίσθηση μεταξύ της παραμορφώσιμης επιφάνειας που ορίζουν (στην προκειμένη περίπτωση την επιφάνεια της φλάντζας) και τρισδιάστατων στοιχείων-στόχων. Εντοπίζονται στην επιφάνεια άλλων

τριδιάστατων στοιχείων που έχουν κόμβους στο μέσο της πλευράς τους (όπως τα SOLID187) και αφομοιώνουν τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά. Το στοιχείο-στόχος που συνδέεται με τα CONTA174 είναι το TARGE170. Το συγκεκριμένο μπορεί να υποβληθεί από το χρήστη σε μετατόπιση ή στρέψη, θερμοκρασιακές αλλαγές, ηλεκτρική τάση, μαγνητικές ιδιότητες, και πιέσεις πόρων. Συνήθως όμως, τα στοιχεία-στόχοι χρησιμοποιούνται για την επιβολή δυνάμεων και ροπών. Συνεπώς στο μοντέλο αυτό, το στοιχείο TARGE170 εφαρμόζει τη ροπή, η οποία μεταφέρεται στα CONTA174 που με τη σειρά τους μεταδίδουν το αποτέλεσμα της στα στοιχεία SOLID187 που καλύπτουν. Στο Σχήμα 4.33 που ακολουθεί δίνονται οι γεωμετρίες των CONTA174 και TARGE170.



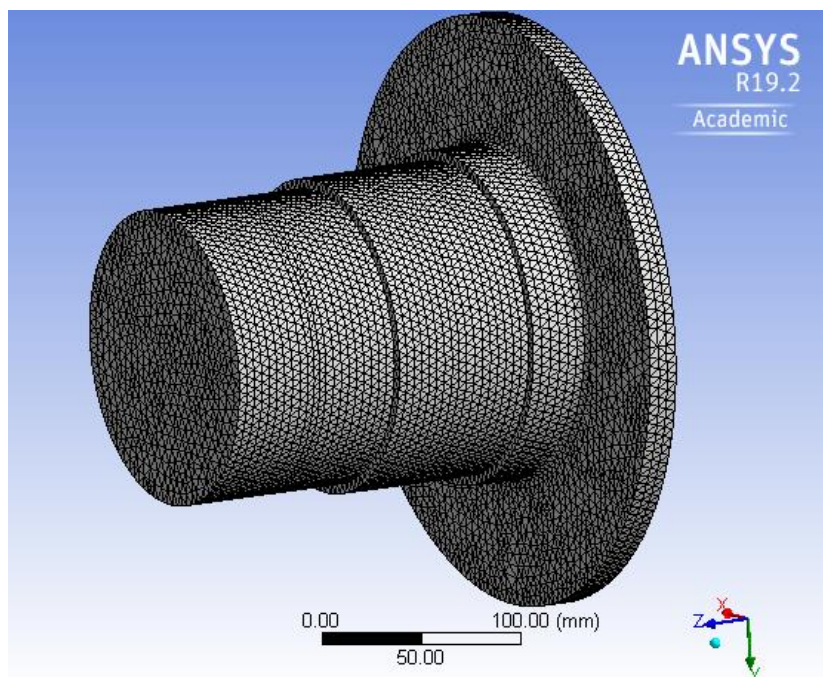
Σχήμα 4.33. Γεωμετρίες CONTA174 και TARGE170

Εξαιτίας της κυλινδρικής γεωμετρίας και των απότομων αλλαγών στη διάμετρο του μοντέλου, το μη-δομημένο πλέγμα είναι μονόδρομος. Η μέθοδος σύγκλισης πλέγματος δεν χρησιμοποιείται εδώ, καθώς το σώμα υπόκειται σε διαφορετικές φορτίσεις από τη συναρμολογημένη. Αυτό οφείλεται στις παραδοχές που γίνονται στην συνέχεια για να λυθεί το στατικό πρόβλημα. Μέθοδος σύγκλισης γι' αυτό και τα υπόλοιπα μεμονωμένα μοντέλα θα γίνει στην τελική διάταξη που είναι η πιο ρεαλιστική. Σε αυτό, αρκούμαστε σε ένα πυκνό πλέγμα που είναι σίγουρο ότι θα δώσει σωστά αποτελέσματα. Άλλωστε η δυσκολία επίλυσης ενός μεμονωμένου συστήματος, όπως έδειξε και ο βραχίονας, είναι μικρή.

Επιλέγοντας το παρακλάδι του Πλέγματος (Mesh), αλλάζουμε το μέγεθος των στοιχείων σε 5 mm (Σχήμα 4.34). Τώρα τα στοιχεία είναι ίσα με την ακτινική απόσταση των επιφανειών των «σκαλοπατιών», η οποία είναι η μικρότερη διάσταση της γεωμετρίας και αναμένεται σε αυτή συγκέντρωση τάσεων. Το πρόγραμμα αυτόματα δημιουργεί μη-δομημένο πλέγμα τετραεδρικών στοιχείων που φαίνεται στο Σχήμα 4.35.

Details of "Mesh"	
[-] Display	
Display Style	Use Geometry Setting
[-] Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Element Order	Program Controlled
<input type="checkbox"/> Element Size	5.0 mm
[+] Sizing	
[+] Quality	
[+] Inflation	
[+] Advanced	
[-] Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	160591
<input type="checkbox"/> Elements	106219

Σχήμα 4.34. Ρυθμίσεις Πλέγματος-Άξονας Πρόσδεσης



Σχήμα 4.35. Πλέγμα Άξονα Πρόσδεσης

Επίλυση

Στον υποφάκελο Static Structural ορίζονται οι οριακές συνθήκες και οι φορτίσεις του συστήματος. Για να μπορέσει το πρόγραμμα να λύσει το πρόβλημα, πρέπει το μοντέλο να ισορροπεί. Στην πραγματικότητα, ο άξονας πρόσδεσης είναι ελεύθερος να περιστρέφεται μέσα στα έδρανα της στήριξης κίνησης και είναι μόνο στερεά συνδεδεμένος με τον βραχίονα και το δοκίμιο. Επειδή το μοντέλο είναι στατικό, γίνεται η παραδοχή ότι ο άξονας είναι πακτωμένος στην πλευρά που συνδέεται με τη στήριξη κίνησης. Αυτό οδηγεί σε μεγαλύτερες τάσεις (και παραμορφώσεις) από την πραγματικότητα, οι οποίες μόνο στο τελικό μοντέλο κατανομονται σωστά. Επειδή όμως ο άξονας στοχεύει σε συντελεστή ασφαλείας τουλάχιστον 2, δεν αναμένεται να πλησιάσουν την περιοχή διαρροής του υλικού.

Η πάκτωση του άξονα γίνεται εισάγοντας Κυλινδρική Στήριξη (Cylindrical Support) στην επιφάνεια με την μικρότερη διάμετρο, με κανένα βαθμό ελευθερίας (Σχήμα 4.36). Ίδιο αποτέλεσμα θα είχε και η χρήση Fixed Support, αλλά προτιμάται η πρώτη λόγω γεωμετρίας.

Details of "Cylindrical Support"	
[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face
[-] Definition	
Type	Cylindrical Support
Radial	Fixed
Axial	Fixed
Tangential	Fixed
Suppressed	No

Σχήμα 4.36. Παράθυρο Κυλινδρικής Στήριξης-Άξονας Πρόσδεσης

Στην κυλινδρική επιφάνεια που πακτώνεται ο βραχίονας, δηλαδή στο σκαλοπάτι διαμέτρου 160 mm, εισάγουμε δύναμη (Force) ίση με την δύναμη που ασκεί το υδραυλικό έμβολο στον βραχίονα στην τελική θέση. Ο βραχίονας με τη σειρά του τη μεταφέρει στον άξονα πρόσδεσης εξαιτίας της πάκτωσής τους. Αφού οριστεί η επιφάνεια εφαρμογής, επιλέγεται ο ορισμός της σε συνιστώσες (Σχήμα 4.37). Η δύναμη εφαρμόζεται γραμμικά από το μηδέν μέχρι την τελική τιμή της, κατά την διάρκεια της λύσης (ramped).

[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face
[-] Definition	
Type	Force
Define By	Components
Coordinate System	Global Coordinate System
<input type="checkbox"/> X Component	0. N (ramped)
<input type="checkbox"/> Y Component	-1.e+005 N (ramped)
<input type="checkbox"/> Z Component	0. N (ramped)
Suppressed	No

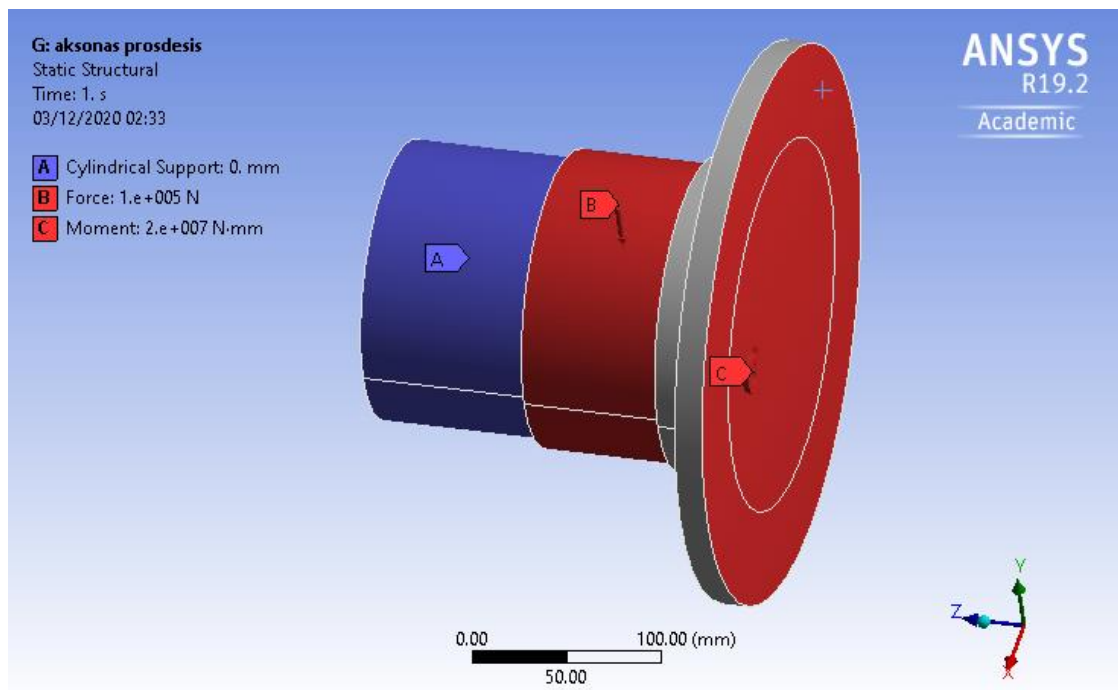
Σχήμα 4.37. Παράθυρο Δύναμης-Άξονας Πρόσδεσης

Τέλος εφαρμόζεται στο μοντέλο η αντίδραση του δοκιμίου, που θεωρείται ροπή (Moment) ίση με την μέγιστη των 20 kN-m. Η επιφάνεια εφαρμογής της είναι αυτή της φλάντζας, όπου το δοκίμιο θα προσαρτάται κατά τις δοκιμές. Η επιφάνεια αυτή έχει χωριστεί σε 2 μικρότερες για μελλοντική χρήση (Σχήμα 4.39). Η ροπή πάλι ορίστηκε σε συνιστώσες και εισάχθηκε η τιμή της στον άξονα Z (Σχήμα 4.38).

Details of "Moment"	
[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	2 Faces
[-] Definition	
Type	Moment
Define By	Components
Coordinate System	Global Coordinate System
<input type="checkbox"/> X Component	0. N-mm (ramped)
<input type="checkbox"/> Y Component	0. N-mm (ramped)
<input type="checkbox"/> Z Component	2.e+007 N-mm (ramped)
Suppressed	No
Behavior	Deformable
[+] Advanced	

Σχήμα 4.38. Παράθυρο Ροπής-Άξονας Πρόσδεσης

Ακολουθεί εικόνα με τρισδιάστατη απεικόνιση των επιφανειών που αναφέρθηκαν στον υποφάκελο Static Structural.



Σχήμα 4.39. Όψη Επιφανειών Οριακών Συνθηκών-Άξονας Πρόσδεσης

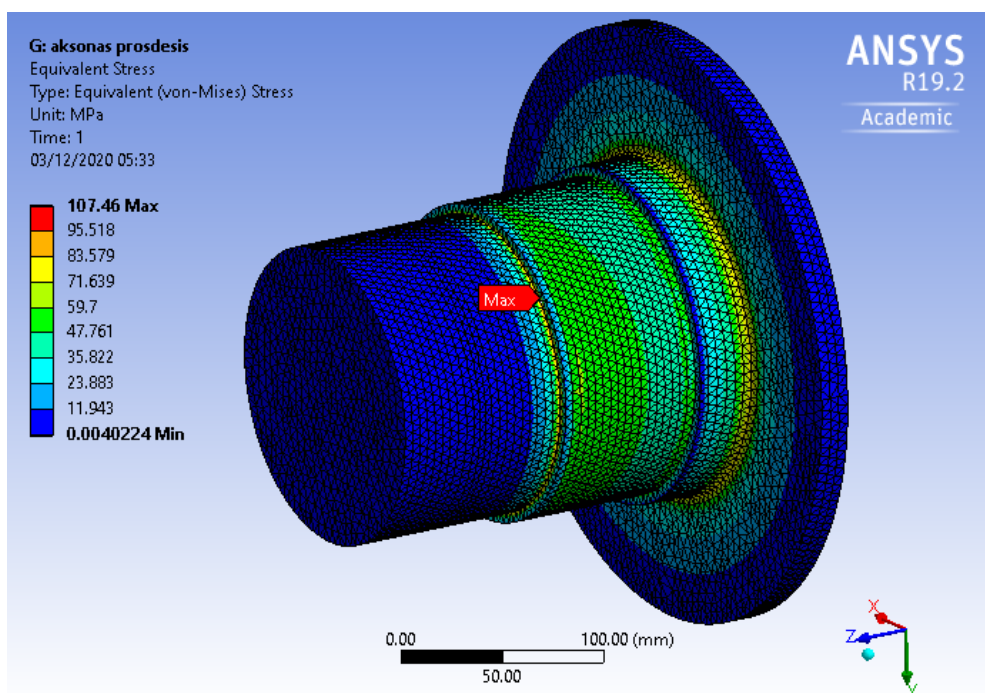
Οι ρυθμίσεις ανάλυσης είναι ίδιες με του πρώτου μοντέλου, δηλαδή οι προεπιλεγμένες. Το βήμα της λύσης είναι 1 ως προεπιλογή. Η ανάλυση θεωρείται γραμμική καθώς οι παραμορφώσεις αναμένονται μικρές και οι τάσεις στην ελαστική περιοχή, εξαιτίας του συντελεστή ασφαλείας που έχουμε θέσει. Άρα δεν χρειάζονται ιδιαίτερες ρυθμίσεις της ανάλυσης για την ελαχιστοποίηση του χρόνου επίλυσης.

Μετ-Επεξεργασία

Τελευταίο στάδιο της μελέτης είναι η ανάλυση των αποτελεσμάτων (post-processing). Η ανάλυση γίνεται με κατάλληλα εργαλεία που δίνουν το μέγεθος που ενδιαφέρει τον χρήστη. Στο συγκεκριμένο μοντέλο, έχουμε αναφέρει, πως μας ενδιαφέρει η διαφορά από την τάση διαρροής, καθώς σκοπός είναι η επίτευξη συντελεστή ασφαλείας τουλάχιστον 2. Επίσης, οι παραμορφώσεις δεν πρέπει να ξεπερνούν το 1/100 του μήκους του άξονα πρόσδεσης και η γωνία στρέψης του να μην ξεπερνά την 0.1 μοίρα. Για να ανακτήσουμε τις τιμές που επιθυμούμε, εισάγουμε στον υποφάκελο Solution τα ακόλουθα εργαλεία:

- Equivalent Stress (V. Mises)
- Stress Tool
- Direction Deformation (Y Axes) (στο Κυλινδρικό Σύστημα Συντεταγμένων).
- Direction Deformation (Z Axes)

Το πρώτο εργαλείο μας δίνει την γενική εικόνα κατανομής των τάσεων στο μοντέλο (Σχήμα 4.40). Όπως αναμενόταν, το σώμα καταπονείται σημαντικά στην περιοχή απότομης αλλαγής γεωμετρίας που βρίσκεται πιο κοντά στην πάκτωση, με μέγιστη τιμή τα 107.46 MPa στην κόκκινη περιοχή. Ο συντελεστής ασφαλείας, σύμφωνα με το Stress Tool, είναι ίσος με 2.33.



Σχήμα 4.40. Κατανομή Τάσεων v.Mises-Άξονας Πρόσδεσης

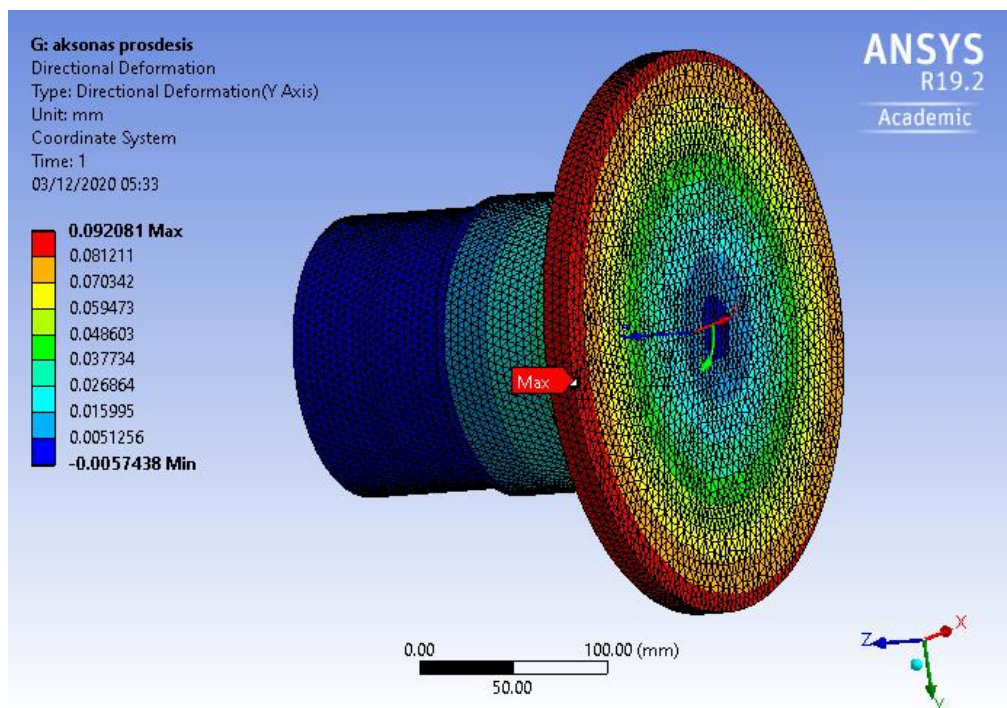
Μετά την εισαγωγή εργαλείου Directional Deformation, το ρυθμίζουμε κατάλληλα για να μας δώσει τα αποτελέσματα στο σύστημα συντεταγμένων που δημιουργήσαμε στην αρχή. Το πρόγραμμα υπολογίζει με αυτό το εργαλείο τις μετατοπίσεις των στοιχείων, αλλά το σώμα είναι πακτωμένο. Συνεπώς παίρνουμε τις παραμορφώσεις του. Στην επιλογή Coordinate System, κάτω από το Definition, επιλέγουμε το σύστημα συντεταγμένων που επιθυμούμε, όπως στο Σχήμα 4.41.

Details of "Directional Deformation"	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
Definition	
Type	Directional Deformation
Orientation	Y Axis
By	Time
<input type="checkbox"/> Display Time	Last
Coordinate System	New Coordinate System
Calculate Time History	Yes
Identifier	
Suppressed	No
Results	
Information	

Σχήμα 4.41. Ρυθμίσεις Εργαλείου Μετατοπίσεων-Άξονας Πρόσδεσης

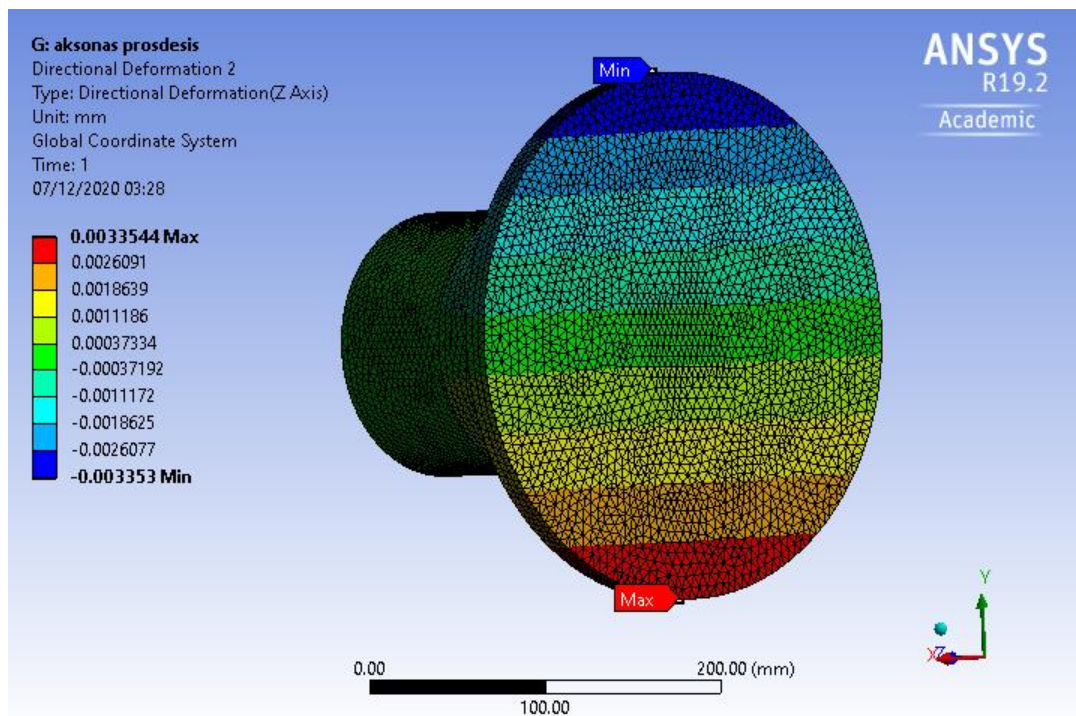
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.42, η μέγιστη παραμόρφωση στον Y-άξονα του Κυλινδρικού Συστήματος Συντεταγμένων είναι ίση με 0.0921 mm και βρίσκεται στην περιφέρεια της φλάντζας. Για να την μετατρέψουμε σε μοίρες, σύμφωνα με την απλή μέθοδο των τριών:

$$\varphi_{max} = 0.0921 * \frac{180}{\pi * R} = 0.035^{\circ}$$



Σχήμα 4.42. Μετατοπίσεις στο Κ.Σ.Σ-Άξονας Πρόσδεσης

Οι μετατοπίσεις στον Z-άξονα του Γενικού Συστήματος Συντεταγμένων, δίνονται στο Σχήμα 4.43. Η μέγιστη απόλυτη τιμή τους είναι ίση με 0.0033. Αυτός σημαίνει ότι η κάμψη στον άξονα λόγω της δύναμης του εμβόλου είναι αμελητέα. Ο λόγος παραμόρφωσης είναι τόσο μικρός που δεν αξίζει να υπολογιστεί.



Σχήμα 4.43. Μετατοπίσεις Z-άξονα του Γ.Σ.Σ

Σχολιάζοντας τα αποτελέσματα, οι παραμορφώσεις του άξονα είναι κατά πολύ μικρότερες από τα όρια που τέθηκαν. Οι τάσεις φαίνεται να κατανέμονται σωστά, χωρίς κάποια περιοχή συγκέντρωσης που να δημιουργείται από το πλέγμα. Ο συντελεστής ασφαλείας ξεπερνάει το 2 που θέσαμε ως κατώτατο όριο. Μπορεί μάλιστα να αυξηθεί στο συναρμολογημένο μοντέλο, καθώς η φόρτιση θα είναι πιο ευνοϊκή. Συνολικά τα αποτελέσματα το άξονα πρόσδεσης είναι ικανοποιητικά βάση των στόχων που τέθηκαν.

4.5. Στήριξη Κίνησης

Η Στήριξη Κίνησης αποτελεί το πιο στιβαρό μέρος της διάταξης. Βρίσκεται στην πλευρά του περιστρεφόμενου άκρου του δοκιμίου, όπου εφαρμόζονται οι περισσότερες δυνάμεις. Παραλαμβάνει τις δυνάμεις που ασκεί το υδραυλικό έμβολο, αλλά και τις δυνάμεις αντίδρασης του δοκιμίου, και τις μεταφέρει στο test frame με το οποίο είναι άρρηκτα συνδεδεμένο. Είναι δηλαδή ένα από τα δύο μέσα που μεταφέρουν τις δυνάμεις πίσω στην μηχανή εφελκυσμού. Επίσης, φέρει άρθρωση που επιτρέπει την περιστροφή του άξονα πρόσδεσης, με τη χρήση συγκεκριμένου εδράνου(-ων). Πριν γίνει ο λεπτομερής σχεδιασμός της, παρουσιάζεται η διερεύνηση για την επιλογή του κατάλληλου εδράνου.

4.5.1. Διερεύνηση Εδράνων

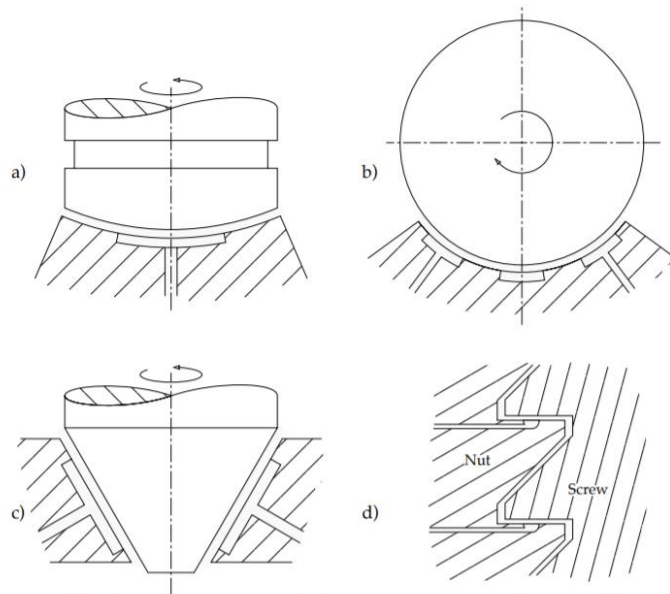
Για την καλύτερη εξέταση των επιλογών μας, πρέπει να σημειωθούν τα χαρακτηριστικά της λειτουργίας αυτής της άρθρωσης, ώστε να ελαχιστοποιηθεί το εύρος της έρευνας. Οι

προδιαγραφές των δοκιμών του 1^{ου} Κεφαλαίο αναγράφουν ότι η μέγιστη ταχύτητα περιστροφής είναι 1 στροφή/λεπτό. Το δοκίμιο έχει μόνο ένα βαθμό ελευθερίας, δηλαδή την περιστροφή ως προς τον άξονά του. Οποιαδήποτε άλλη κίνηση είναι ανεπιθύμητη. Επίσης, η μέγιστη ακτινική δύναμη λειτουργίας του εδράνου θα πρέπει να ξεπερνά τα 100 kN, με ένα ικανοποιητικό συντελεστή ασφαλείας. Τέλος θα πρέπει να έχει τις κατάλληλες διαστάσεις, ώστε να ενσωματωθεί εύκολα στην Στήριξη Κίνησης και να μην περιπλέκει την κατασκευή της. Συγκεντρωτικά και συμπυκνμένα, τα χαρακτηριστικά του εδράνου που αναζητούνται είναι τα εξής:

- Μικρή ταχύτητα περιστροφής: max. 1 rpm
- Δυνατότητα παραλαβής αξονικών δυνάμεων
- Ακτινική ονομαστική δύναμη τουλάχιστον 100 kN
- Μικρές διαστάσεις και απλότητα κατασκευής

Με τις παραμέτρους υπόψη, οι επιλογές εδράνων είναι δύο. Η πρώτη είναι η χρήση υδροστατικού εδράνου εξωτερικής πίεσης (βλέπε c, Σχήμα 4.44). Τα υδροστατικά έδρανα χρησιμοποιούν ένα λεπτό φιλμ ασυμπίεστου ρευστού, το οποίο παρέχεται από υδραυλικό σύστημα με αντλία. Τα έδρανα αυτά βρίσκουν εφαρμογή από μικρές συσκευές υψηλής ακρίβειας έως σε εφαρμογές με μεγάλες μάζες (Stachowiak 2014). Η λειτουργία τους βασίζεται στο φιλμ του υπό πίεση ρευστού, το οποίο αποτρέπει της επιφάνειες να έρθουν σε επαφή. Έτσι ακόμα και σε μηδενικές θεωρητικά ταχύτητες, οι τριβές στο έδρανο είναι μηδενικές. Θεωρητικά, λοιπόν, χωρίς τριβές το μηχανικά μέρη διατηρούνται αναλλοίωτα στο χρόνο. Επιπλέον, μηδενικές τριβές σημαίνει μηδενική απαίτηση ισχύος για τη στρέψη του άξονα, επειδή ο άξονας ουσιαστικά επιπλέει στο ρευστό.

Τα ρευστά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα υδροστατικά έδρανα, εκτός από λιπαντικά έλαια που είναι τα πιο κοινά, μπορούν να είναι αέρια (π.χ. αέρας, ήλιο, άζωτο), νερό ή και υγρά μέταλλα (Booser 1983). Η επιφάνεια του εδράνου δεν είναι απαραίτητο να μεγαλώσει, όταν το φορτίο αυξάνεται. Αντ' αυτού υπάρχουν κατάλληλα σχεδιασμένα έδρανα που αντέχουν υψηλές πιέσεις ρευστού και φέρουν υψηλές δυνάμεις. Έτσι υπάρχει η δυνατότητα σε μικρή επιφάνεια, όπως της Στήριξης Κίνησης, να κατασκευαστεί υδροστατικό έδρανο που παραλαμβάνει υψηλά φορτία.



Typical geometries of non-flat hydrostatic bearings: a) footstep, b) spherical, c) conical and d) hydrostatic screw thread.

Σχήμα 4.44. Τυπικές Γεωμετρίες Μη-Επίπεδων Υδροστατικών Εδράνων

Η δεύτερη επιλογή, πιο απλή και προσιτή, είναι τα έδρανα κυλίσεως. Τα γνωστά σε όλους ρουλεμάν χρησιμοποιούν σφαιρικά, κυλινδρικά ή άλλα στοιχεία, τα οποία κυλιόνται μεταξύ δύο δακτυλίων. Ο εξωτερικός δακτύλιος είναι ακλόνητα τοποθετημένος σε κάποια διαμόρφωση, ενώ ο εσωτερικός περιστρέφεται μαζί με τον άξονα. Στο σύστημα μας αναζητούμε έδρανα που είναι ικανά να φέρουν κυρίως ακτινικές, αλλά και αξονικές δυνάμεις. Τέτοια έδρανα είναι τα κυλινδρικά έδρανα κυλίσεως (Σχήμα 4.45). Αυτά έχουν κυλινδρικά σώματα κυλίσεως που κυλιόνται σε διαδρόμους κυλινδρικής μορφής (Κωστόπουλος 2010).



Σχήμα 4.45. Κυλινδρικό Έδρανο Κυλίσεως

Συγκαταλέγονται στην κατηγορία των εγκάρσιων ή ακτινικών εδράνων, που είναι κατάλληλα κυρίως για ακτινικά φορτία. Όμως, ειδικά σχεδιασμένοι κυλινδρικοί τριβείς μπορούν να παραλάβουν και μικρό αξονικό φορτίο. Τα ρουλεμάν αυτά απαιτούν θέσεις έδρασης πολύ καλά ευθυγραμμισμένες, διότι έχουν πολύ μικρή γωνία αυτορρύθμισης. Παρόλα

αυτά, η απόδοση τους είναι υψηλή με ελάχιστες απώλειες τριβών. Με τη σωστή συντήρηση και το γεγονός ότι η ταχύτητα περιστροφής των δοκιμών είναι ελάχιστη, υπόσχονται μεγάλη διάρκεια ζωής,

4.5.2. Επιλογή Εδράνων

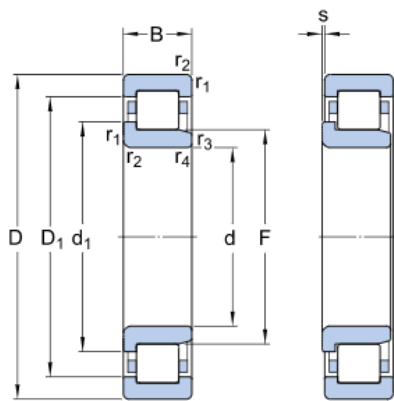
Συγκρίνοντας τις δύο επιλογές, πρέπει να αναλογιστούμε κυρίως την ευκολία σχεδίασης και κατασκευής, την συντήρηση και αντικατάσταση και το συνολικό κόστος. Είναι προφανές πως το υδροστατικό έδρανο έχει κάποια μικρά προτερήματα όσον αφορά την λειτουργία και απόδοση του. Όμως η σχεδίαση ενός τέτοιου εδράνου περιλαμβάνει πολύπλοκους υπολογισμούς και σύνθετες γεωμετρίες, που ξεφεύγουν από τα όρια αυτής της εργασίας. Επίσης απαιτεί την εγκατάσταση υδραυλικού συστήματος παροχής ρευστού υπό υψηλή πίεση. Η κατασκευή του απαιτεί μεγάλη ακρίβεια, τάξης εκατοντάδων μm , και σε συνδυασμό με τα υπόλοιπα που προαναφέρθηκαν εκτοξεύει το κόστος κτίσης.

Από την άλλη τα κυλινδρικά έδρανα κυλίσεως συναντώνται στην αγορά, σε διάφορα εύρη διαστάσεων και ονομαστικών φορτίσεων. Οι θέσεις έδρασής τους, παρόλο που απαιτούν υψηλή ακρίβεια κατασκευής, είναι απλές διαμορφώσεις που διευκολύνουν τη σχεδίαση. Σε συνδυασμό με την υψηλή απόδοση και σχετικά χαμηλό κόστος, τα κυλινδρικά έδρανα κύλισης αποτελούν την ιδανική επιλογή για την διάταξη μας. Μένει μόνο η εύρεση τους στην αγορά.

Η διάμετρος του άξονα στην περιοχή της άρθρωσης είναι 150 mm. Το πάχος της Στήριξης Κίνησης (υπολογίζεται στη συνέχεια) ισούται με 90 mm. Συνεπώς για τη σωστή στήριξη του άξονα πρόσδεσης, χρειάζονται 2 ρουλεμάν εσωτερικής διαμέτρου 150 mm, με δυνατότητα παραλαβής δύναμης άνω των 50 kN το ένα. Η εταιρία SKF διαθέτει κυλινδρικά ρουλεμάν κύλισεως μονής σειράς σωμάτων, με όνομα μοντέλου NJ 1030 ML και μέγιστη στατική φόρτιση 290 kN. Τα ρουλεμάν αυτά είναι ικανά να φέρουν αξονικές δυνάμεις προς μια κατεύθυνση. Άρα το ζεύγος είναι ικανό να φέρει αξονικές δυνάμεις και προς τις 2 κατευθύνσεις. Ακολουθούν ο Πίνακας 4.8 και το Σχήμα 4.46 με τις τεχνικές προδιαγραφές.

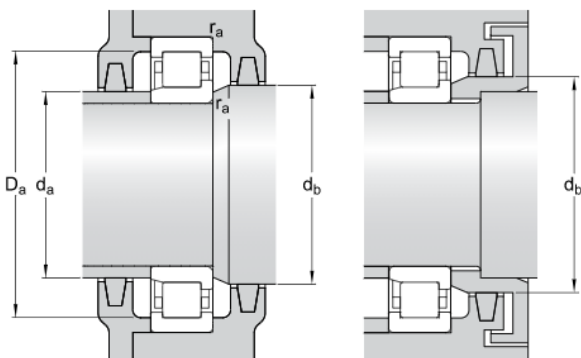
Πίνακας 4.8. Βασικά Δεδομένα Ρουλεμάν NJ 1030 ML

Ασφαλές Όριο Δυναμικών Φορτίσεων	C	198 kN
Ασφαλές Όριο Στατικών Φορτίσεων	C ₀	290 kN
Όριο Κόπωσης	P _u	31.5 kN
Αναφερόμενη Ταχύτητα Περιστροφής		3200 rpm
Συντελεστής Αξονικού Φορτίου	Y	0.6
Μάζα		5.05 kg



DIMENSIONS

d	150 mm
D	225 mm
B	35 mm
d ₁	≈ 176 mm
D ₁	≈ 199.05 mm
F	169.5 mm
r _{1,2}	min. 2.1 mm
r _{3,4}	min. 1.5 mm
s	max. 4.9 mm



ABUTMENT DIMENSIONS

d _a	min. 157 mm
d _a	max. 167 mm
d _b	min. 180 mm
D _a	max. 215 mm
r _a	max. 2 mm

Σχήμα 4.46. Κύριες Διαστάσεις και Ανοχές Ρουλεμάν NJ 1030 ML

Για τον υπολογισμό της αξονικής δύναμης που μπορεί να παραλάβει το ρουλεμάν η SKF μας δίνει τον τύπο:

$$P_0 = X_0 F_r + Y_0 F_a,$$

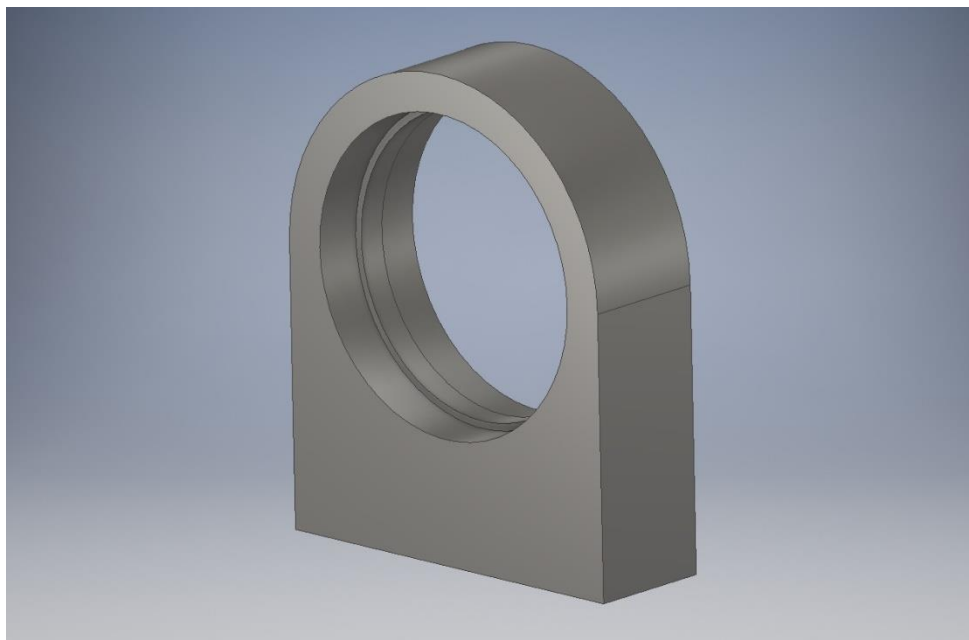
όπου P_0 η συνισταμένη στατική φόρτιση, F_r και F_a η μέγιστη ακτινική και αξονική δύναμη αντίστοιχα και X_0, Y_0 οι αντίστοιχοι συντελεστές που δίνονται από τον κατασκευαστή 0.4 και 0.6. Η συνισταμένη στατική φόρτιση προκύπτει από την μέγιστη (C_0) εάν διαιρέσουμε με κατάλληλο συντελεστή ασφαλείας. Ο κατασκευαστής, βάση εμπειρίας, προτείνει για εφαρμογές με μη-σταθερές φορτίσεις συντελεστή ασφαλείας 2. Λύνοντας ως προς F_a και αντικαθιστώντας τις τιμές:

$$F_a = \frac{P_0 - X_0 F_r}{Y_0} = 175 \text{ kN}$$

Είναι κατανοητό ότι οι αξονικές δυνάμεις, που αντέχει ένα ρουλεμάν τέτοιου τύπου, είναι πολύ μεγαλύτερες από αυτές που θα αναπτυχθούν στην διάταξη στρέψης. Συνεπώς είναι κατάλληλα για την εφαρμογή που αναζητούμε.

4.5.3. Σχεδίαση Στήριξης Κίνησης

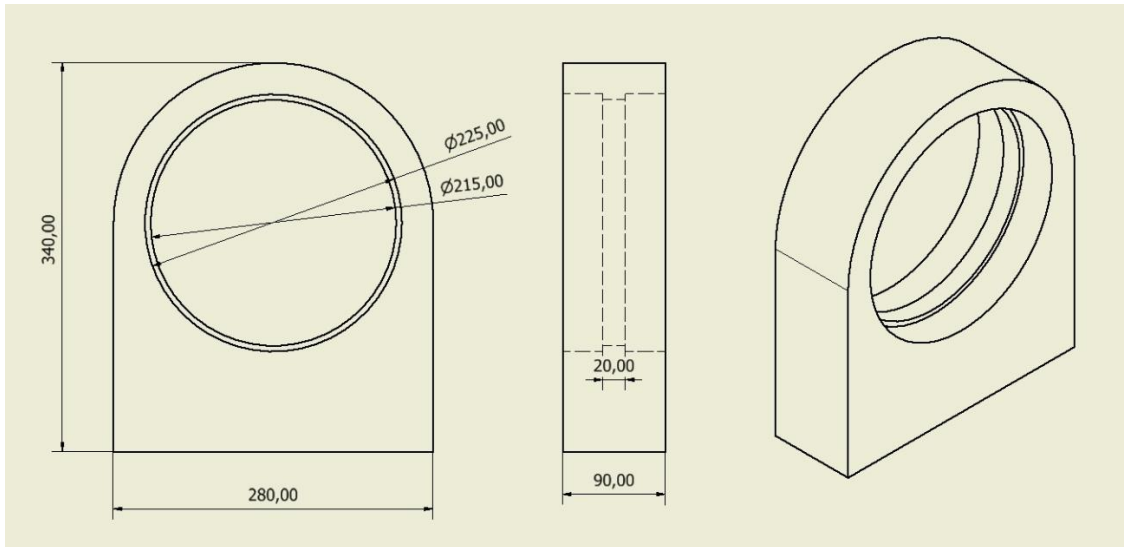
Η στήριξη κίνησης (Σχήμα 4.47) έχει την τυπική μορφή εδράνων στήριξης αξόνων που συναντώνται σε εμπορικά πλοία ή άλλες αργόστροφες εφαρμογές. Στην διαμερή οπή μεγάλης διαμέτρου, απ' όπου περνάει ο άξονας, σχηματίζονται 2 διαμορφώσεις, κατάλληλες για την έδραση των ρουλεμάν. Το μεγάλο πάχος, την ενισχύει ως προς τις καμπτικές φορτίσεις, που επάγονται εξαιτίας της ασύμμετρης φόρτισης που δέχεται από τον άξονα πρόσδεσης. Σε περίπτωση τοποθέτησης 2 στηρίξεων ή 2 βραχιόνων για την αποφυγή καμπτικών φορτίσεων, η ευθυγράμμιση του άξονα δυσκολεύει, διότι εμπλέκονται περισσότερα μέρη σε αυτή. Άρα απαιτείται περισσότερη ακρίβεια στην κατασκευή των κομματιών. Επιπλέον, περισσότερα μέρη στη διάταξη οδηγούν σε πολύπλοκη συναρμολόγηση και αποσυναρμολόγηση της και αύξηση του μήκους της. Έτσι επιλέχθηκε μία στήριξη έκκεντρα της διεύθυνσης φόρτισης, παρά την επαγωγή κάμψης σε αυτή.



Σχήμα 4.47. Όψη Στήριξης Κίνησης

Στο παραπάνω σχήμα οι διαμορφώσεις που διακρίνονται στην οπή, είναι οι θέσεις έδρασης των ρουλεμάν. Ο δακτύλιος που σχηματίζεται στο κέντρο της οπής, τα εμποδίζει να πλησιάσουν μεταξύ τους κατά την λειτουργία. Επειδή όμως είναι σφικτά συνδεδεμένα με τον άξονα, το ένα εμποδίζει την μετατόπιση του άλλου. Συνεπώς δεν μπορούν να κινηθούν αξονικά. Η εσωτερική διάμετρος του δακτυλίου είναι σύμφωνη με τη μέγιστη (D_a) που προτείνει ο κατασκευαστής των ρουλεμάν (Σχήμα 4.46). Το ύψος του σώματος είναι τόσο μικρό, ώστε να έχει ικανοποιητική δυσκαμψία σε φορτίσεις κατά τη διεύθυνση του πάχους,

αλλά αρκετό ώστε η φλάντζα του άξονα πρόσδεσης να απέχει 50 mm από το οριζόντιο επίπεδο. Έτσι συνδυάζεται καλή αντοχή με εύκολη και ασφαλή πρόσδεση των δοκιμίων στη φλάντζα. Η σύνδεση της στήριξης με την μηχανή προς το παρόν θεωρείται πάκτωση. Στο Σχήμα 4.48 που ακολουθεί δίνονται οι διαστάσεις της στήριξης κίνησης.

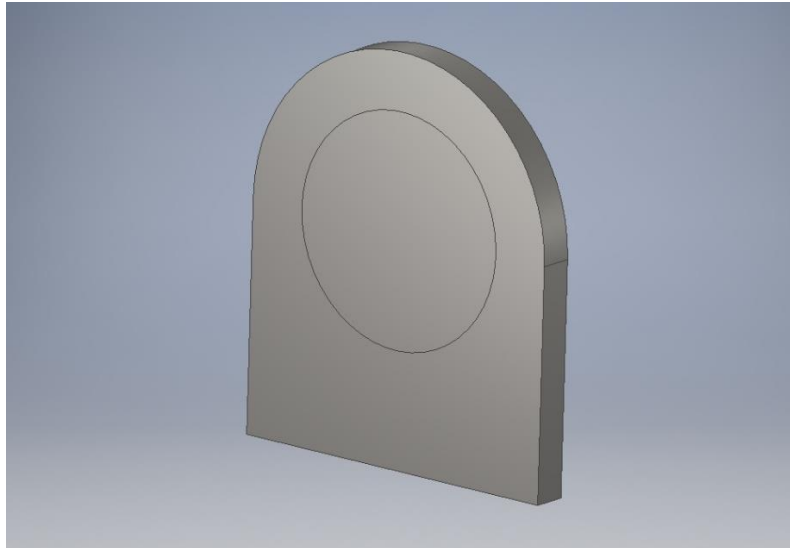


Σχήμα 4.48. Διαστασιολογημένο Σχέδιο Στήριξης Κίνησης

Επειδή η προσέγγιση “a priori” των φορτίσεων που θα δεχθεί η στήριξη κίνησης είναι αδύνατη, δεν γίνεται στατική ανάλυση αυτού του μέρους ως μεμονωμένο.

4.6. Στήριξη Πάκτωσης

Σε μια δοκιμή στρέψης, το άκρο του δοκιμίου που δεν στρέφεται, πακτώνεται σε μια στιβαρή επιφάνεια που φέρει τις αντιδράσεις. Μια τέτοια επιφάνεια που υπάρχει ήδη στο εργαστήριο μπορεί να είναι για παράδειγμα μια κολώνα του κτηρίου. Όμως για να εξασφαλιστεί η ισορροπία της μηχανής πρέπει όλες οι δυνάμεις που ασκούνται στη διάταξη να είναι εσωτερικές. Συνεπώς, για στήριξη της πάκτωσης σχεδιάζεται μια μεταλλική πλάκα (Σχήμα 4.49), η οποία θα έχει διαμπερείς οπές (απουσιάζουν από την μοντελοποίηση) αντίστοιχες με την φλάντζα του άξονα πρόσδεσης και θα συνδέεται, με περαστούς κοχλίες, με το δοκίμιο. Η μορφή της είναι όμοια με την στήριξη κίνησης, με διαφορά την απουσία της κεντρικής διαμπερούς οπής, από την οποία διέρχεται ο άξονας. Προφανώς το πάχος της είναι μικρότερο επειδή φέρει μόνο της αντιδράσεις του δοκιμίου.



Σχήμα 4.49. Όψη Στήριξης Πάκτωσης

Πέρα από την ροπή που δέχεται από το δοκίμιο, δεν είναι δυνατό να προβλεφθούν οι δυνάμεις που θα δεχθεί αυτή η στήριξη. Γι' αυτό δεν δημιουργήθηκε μεμονωμένο μοντέλο για στατική ανάλυση. Η διαστασιολόγηση της στήριξης πάκτωσης (Σχήμα 4.50) έγινε με βάση τις καταπονήσεις των υπόλοιπων μεμονωμένων μοντέλων. Η μόνη διάσταση που δεν καθορίζεται από γεωμετρικούς περιορισμούς είναι το πάχος της. Επειδή οι αξονικές δυνάμεις του δοκιμίου αναμένονται μικρές, σαν πρώτη εκτίμηση το πάχος σχεδιάζεται ίσο με το διπλάσιο της φλάντζας πρόσδεσης. Άλλωστε δεν αναμένονται υψηλές καμπτικές φορτίσεις ώστε να χρειαστεί μεγαλύτερη ενίσχυση κατά το πάχος. Η κυκλική επιφάνεια που φαίνεται στο Σχήμα 4.50, καθορίζει την σύνδεση με το δοκίμιο. Από την θέση του κέντρου αυτού του κύκλου διέρχεται ο νοητός άξονας του δοκιμίου.

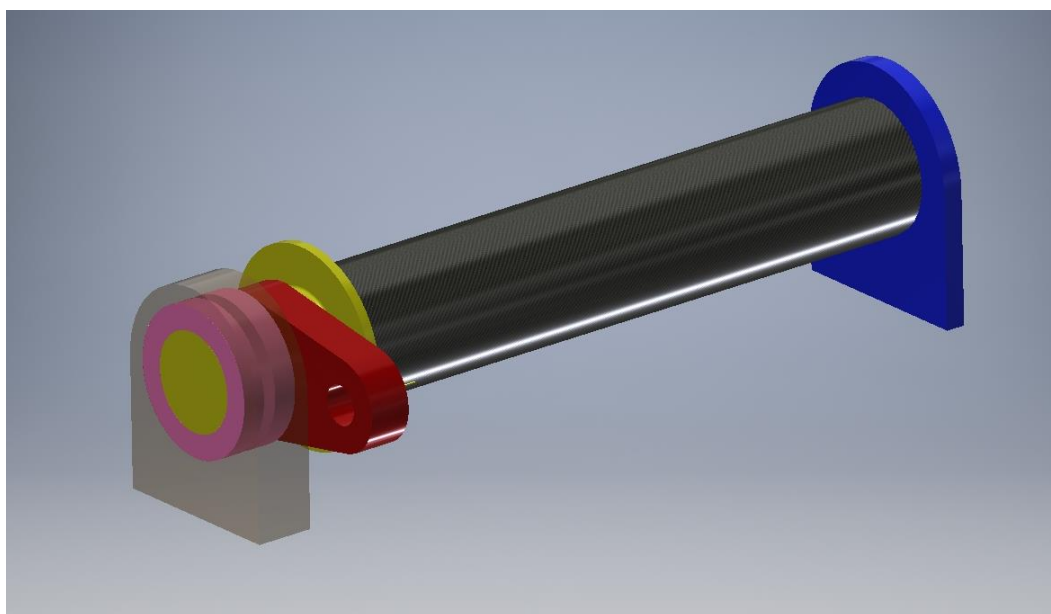


Σχήμα 4.50. Διαστάσεις Στήριξης Πάκτωσης

4.7. Βάση

Η απαίτηση για δοκιμές αξόνων μήκους έως και 1 m, γέννησε την ανάγκη για επέκταση του τραπέζιού της μηχανής εφελκυσμού. Ο πιο εύκολος τρόπος επέκτασης είναι η χρήση ενός ελάσματος που θα τοποθετηθεί πάνω στο τραπέζι σαν πρόβολος. Πάνω σε αυτό το έλασμα, που ονομάζουμε βάση, θα τοποθετηθούν οι δύο στηρίξεις της διάταξης. Δηλαδή πέρα από επέκταση, η βάση μεταφέρει όλες τις δυνάμεις πίσω στο load frame. Η μάζα της αποτελεί το μεγαλύτερο ποσοστό της μάζας της διάταξης και η μεταφορά της απαιτεί χρήση γερανού. Επειδή αρκετό μήκος της είναι ανυποστήρικτο, οι τάσεις και παραμορφώσεις της αναμένονται υψηλότερες από την υπόλοιπη διάταξη. Αυτό ισχύει και για τα μέρη της διάταξης που βρίσκονται σε αυτό το ανυποστήρικτο μήκος, όπως η στήριξη πάκτωσης. Γι' αυτό, αυτά τα μέρη της διάταξης στοχεύουν σε μικρότερο συντελεστή ασφαλείας.

Οι κύριες διαστάσεις της βάση εξαρτώνται από το συνολικό μήκος της διάταξης, τη θέση της στο τραπέζι και την σύνδεση της με αυτό. Το συνολικό μήκος της διάταξης μπορεί να βρεθεί εύκολα συναρμολογώντας τα μέρη που έχουν σχεδιαστεί ως τώρα. Στο πρόγραμμα Inventor ανοίγουμε νέο αρχείο “assembly” και τοποθετούμε όλα τα τρισδιάστατα σχέδια, που παρουσιάστηκαν σε αυτό το κεφάλαιο. Για την απλοποίηση των υπολογισμών της στατικής ανάλυσης που θα ακολουθήσει, τα ρουλεμάν αντικαθίστανται από δακτυλίους ίσων διαστάσεων. Μετά την συναρμολόγηση η διάταξη έχει τη μορφή που φαίνεται στο Σχήμα 4.51. Στα σώματα δόθηκαν διαφορετικά χρώματα, ώστε να διακρίνονται ευκολότερα.

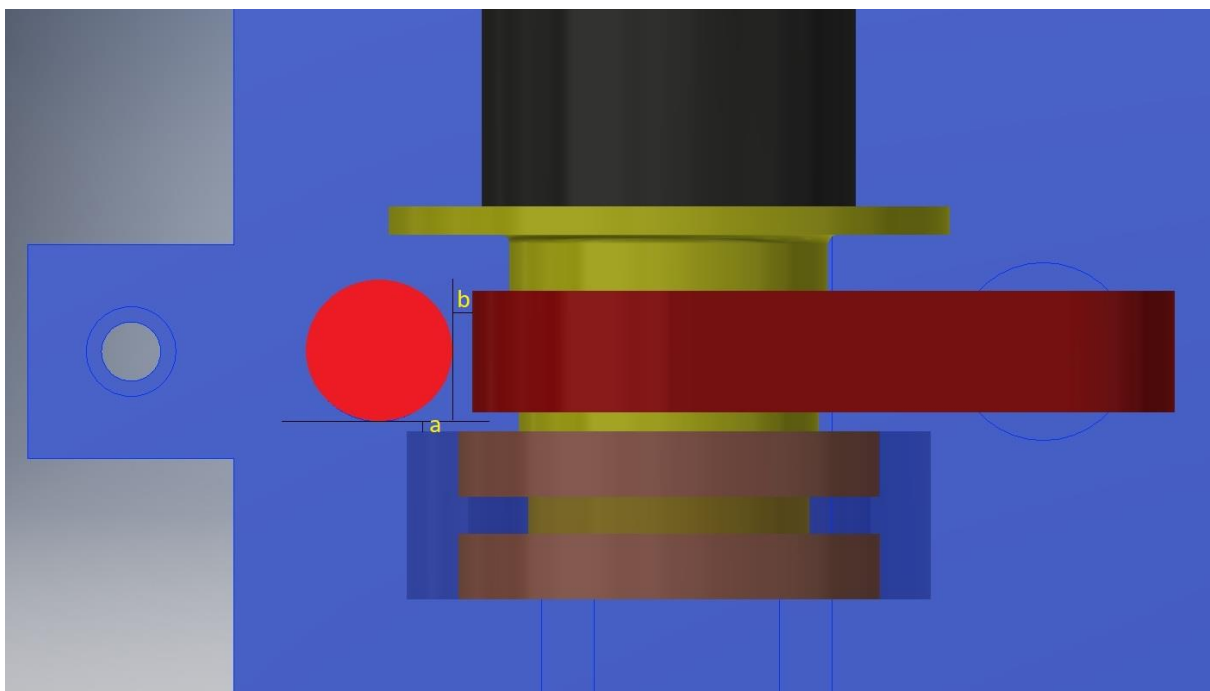


Σχήμα 4.51. Συναρμολογημένη Διάταξη Χωρίς Βάση

Στην καρτέλα Tools του προγράμματος, χρησιμοποιούμε την εντολή Measure για να μετρήσουμε την απόσταση μεταξύ των 2 ακραίων επιφανειών της διάταξης. Το συνολικό μήκος της διάταξης σε αυτή τη μορφή είναι 1240 mm. Η θέση της διάταξης πάνω στο τραπέζι της μηχανής εφελκυσμού είναι γνωστή από προηγούμενο κεφάλαιο. Υπενθυμίζεται ότι το κέντρο της άρθρωσης βραχίονα-διωστήρα, στην τελική θέση μιας δοκιμής, βρίσκεται στον

νοητό άξονα του υδραυλικού εμβόλου. Δηλαδή το κέντρο της μικρής διαμπερούς οπής του κόκκινου σώματος σε αυτή τη οριζόντια θέση (Σχήμα 4.51), πρέπει να τοποθετηθεί ακριβώς κάτω από έμβολο, ώστε ο διωστήρας (δεν υπάρχει στο σχήμα) να είναι κατακόρυφος.

Τοποθετούμε λοιπόν στο “assembly” και την μηχανή εφελκυσμού, για να πάρουμε τις διαστάσεις για την σχεδίαση της βάσης. Στο Σχήμα 4.52, φαίνεται η κάτοψη του “assembly” διάταξης-test frame. Ο κόκκινος δίσκος οριοθετεί την κολώνα που βρίσκεται κοντά στην διάταξη. Ως απόσταση ασφαλείας μεταξύ των μερών της διάταξης και του Load Unit ορίστηκαν τα 5 mm. Αυτός είναι ο λόγος που μερικές από τις διαστάσεις των μερών της διάταξης δόθηκαν αυθαίρετα κατά την σχεδίαση. Όπως φαίνεται από την κάτοψη, το πάχος του βραχίονα είναι τέτοιο ώστε η απόσταση της ακμής της στήριξης κίνησης από την κολώνα να είναι μεγαλύτερη από 5 mm. Πράγματι, η διαγώνιος αυτή είναι λίγο μεγαλύτερη από 7 mm. Η διαμήκης απόσταση των δυο σωμάτων (κολώνας-στήριξης κίνησης) είναι ακριβώς 5 mm (βλ. Σχήμα 4.52, απόσταση a), ώστε η εγκοπή της βάσης που παρακάμπτει την κολώνα, να απέχει και αυτή 5 mm. Η ελάχιστη απόσταση από τον βραχίονα υπολογίστηκε στα 12.5 mm (βλ. Σχήμα 4.52, απόσταση b), ενώ η απόσταση από την πίσω επιφάνεια της φλάντζας στη διάμετρο που θα τοποθετηθούν οι κοχλίες είναι λίγο μικρότερη από 30 mm. Άρα αφού ικανοποιούνται οι αποστάσεις ασφαλείας ακολουθεί η σχεδίαση της βάσης.

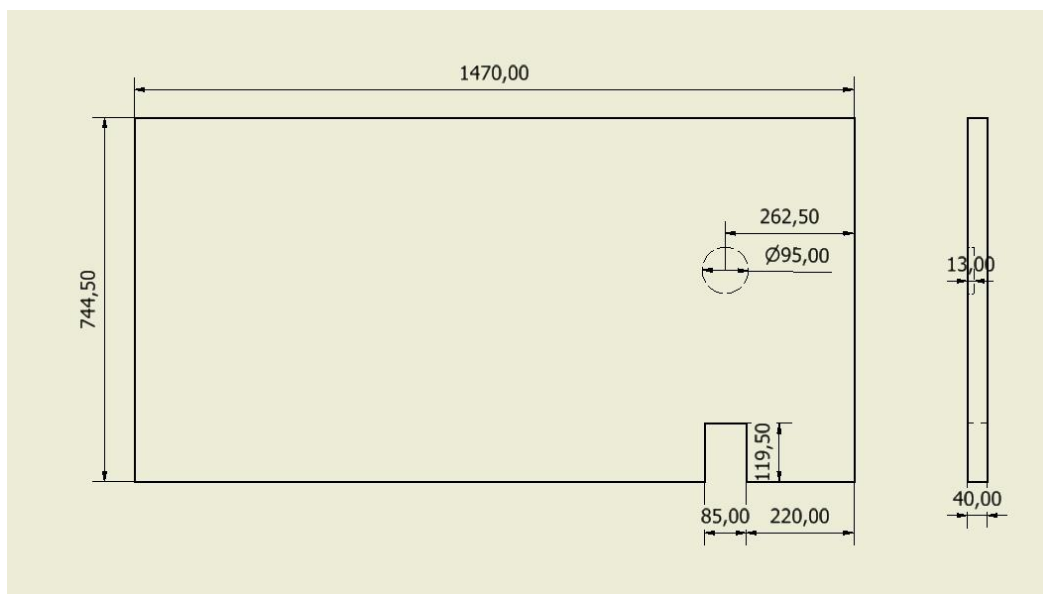


Σχήμα 4.52. Κάτοψη Διάταξης-Αποστάσεις Ασφαλείας

Το μήκος της βάσης πρέπει να ξεπερνάει το ολικό μήκος της διάταξης (1240 mm), ώστε να υπάρχει χώρος για την τοποθέτηση των κοχλίων σύνδεσης με το test frame. Γι’ αυτό, δίνεται περιθώριο 130 mm πέρα από την στήριξη κίνησης και μια χάρη 100 mm από τη στήριξη πάκτωσης διότι θα αναθεωρηθεί το σχέδιο της στη συνέχεια. Άρα το συνολικό μήκος της βάσης ισούται με 1470 mm. Στο πλάτος, η βάση εκτείνεται από την ακμή του τραπεζιού

πλησιέστερα στη διάταξη, έως 5 mm πριν την επιφάνεια της άλλης κολώνας. Στην περιοχή της κοντινότερης κολώνας διαμορφώνεται εγκοπή σύμφωνη με τις αποστάσεις ασφαλείας. Επίσης διαμορφώνεται εσοχή στην κάτω πλευρά της βάσης, ώστε να εισέρχεται κυλινδρική εξοχή που εντοπίζεται στο κέντρο του τραπεζιού.

Το πάχος του ελάσματος πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερο, διότι η στρεπτική φόρτιση που καλείται να παραλάβει είναι μεγάλη. Στο εμπόριο τα παχύτερα ελάσματα που κυκλοφορούν δεν ξεπερνούν τα 50 mm. Εδώ επιλέγεται ένα πάχος 40 mm που εντοπίζεται πιο εύκολα στην αγορά και δεν αυξάνει υπερβολικά το βάρος της διάταξης. Τέλος η επιφάνεια της κάτω πλευράς της βάσης διαχωρίστηκε κατάλληλα σε μικρότερες, που αποτυπώνουν της αντίστοιχες ακμές των T-εγκοπών και των ορίων του τραπεζιού, με σκοπό την καλύτερη ανάθεση των οριακών συνθηκών στην στατική ανάλυση που ακολουθεί. Το διαστασιολογημένο σχέδιο της βάσης φαίνεται στο Σχήμα 4.53.



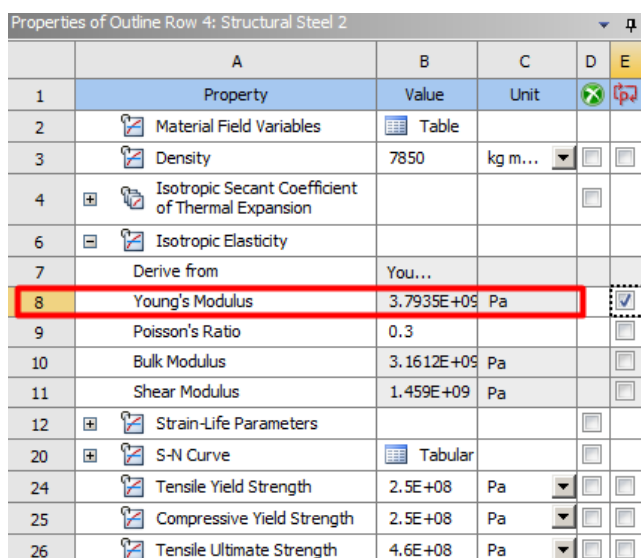
Σχήμα 4.53. Διαστασιολόγηση Βάσης

4.8. Συναρμολογημένη Διάταξη - 1^η Στατική Ανάλυση

Όλα τα μέρη της διάταξης στρέψης έχουν σχεδιαστεί και πρέπει να ενωθούν κατάλληλα για να προχωρήσουμε σε στατική ανάλυση. Στο προηγούμενο υποκεφάλαιο έγινε η συναρμολόγηση χωρίς τη βάση. Συνεχίζουμε λοιπόν στο υπάρχον assembly του Inventor και προσθέτουμε την βάση. Τοποθετούμε την βάση πάνω στο τραπέζι της μηχανής, έχοντας σημείο αναφοράς την εγκοπή που σχεδιάσαμε για την κολώνα. Κάθε πλευρά της εγκοπής απέχει από την επιφάνεια της κολώνας 5 mm. Η υπόλοιπη διάταξη είχε τοποθετηθεί ήδη στη σωστή θέση. Μένει μόνο να την ανυψώσουμε από το τραπέζι ίσα με το πάχος της βάσης. Το load unit αποκρύπτεται από το assembly, διότι δεν τίθεται ζήτημα της αντοχής του και έχουμε εξασφαλίσει την ισορροπία του. Τέλος το αρχείο εξάγεται σε μορφή step (.stp) για να είναι έτοιμο να εισαχθεί στο ANSYS.

4.8.1. Προ-επεξεργασία

Η πρώτη ενέργεια στο νέο σύστημα στατικής ανάλυσης είναι ο ορισμός του υλικού του δοκιμίου που υπολογίστηκε στο υποκεφάλαιο 4.3. Στο υποσύστημα “Engineering Data” υπάρχει ως προεπιλογή ο κατασκευαστικός χάλυβας που θα αναθέσουμε σε όλα τα μέρη της διάταξης, εκτός από το δοκίμιο. Κλωνοποιούμε (Duplicate) τον κατασκευαστικό χάλυβα και αλλάζουμε το μέτρο ελαστικότητας του E σε 3793.5 MPa στο παράθυρο των ιδιοτήτων του υλικού (Σχήμα 4.54). Παραμετροποιούμε την τιμή αυτή, με τη σκέψη ότι στο Project ενδέχεται να υπάρξουν συστήματα με διαφορετικές τιμές του μέτρου ελαστικότητας του νέου υλικού.



	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	<input type="checkbox"/> Material Field Variables	Table			
3	<input type="checkbox"/> Density	7850	kg m...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	<input type="checkbox"/> Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			<input type="checkbox"/>	
6	<input type="checkbox"/> Isotropic Elasticity				
7	Derive from	You...			
8	Young's Modulus	3.7935E+09	Pa	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9	Poisson's Ratio	0,3		<input type="checkbox"/>	
10	Bulk Modulus	3.1612E+09	Pa	<input type="checkbox"/>	
11	Shear Modulus	1.459E+09	Pa	<input type="checkbox"/>	
12	<input type="checkbox"/> Strain-Life Parameters			<input type="checkbox"/>	
20	<input type="checkbox"/> S-N Curve	Tabular		<input type="checkbox"/>	
24	<input type="checkbox"/> Tensile Yield Strength	2.5E+08	Pa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
25	<input type="checkbox"/> Compressive Yield Strength	2.5E+08	Pa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
26	<input type="checkbox"/> Tensile Ultimate Strength	4.6E+08	Pa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Σχήμα 4.54. Ιδιότητες Νέου Υλικού Δοκιμίου

Ανοίγουμε το Mechanical για την δημιουργία του μοντέλου. Η διαδικασία ανάθεσης υλικού θεωρείται γνωστή πλέον. Στο δοκίμιο ανατίθεται το νέο υλικό (Structural Steel 2) και στα υπόλοιπα ο κατασκευαστικός χάλυβας που έχει ξαναχρησιμοποιηθεί. Τα ρουλεμάν έχουν αντικατασταθεί στο μοντέλο από 2 δακτυλίους. Επειδή γνωρίζουμε ότι η ονομαστική τους φόρτιση υπερβαίνει κατά πολύ τις φορτίσεις του μοντέλου και η γεωμετρία τους στο μοντέλο διαφέρει, θεωρούμε ότι η άκαμπτη μοντελοποίηση τους (Σχήμα 4.55) δεν απέχει από την πραγματικότητα και μειώνει την υπολογιστική ισχύ.

Details of "bearing_sub"	
+ Graphics Properties	
- Definition	
<input type="checkbox"/> Suppressed	No
Stiffness Behavior	Rigid
Reference Temperature	By Environment
Behavior	None
- Material	
Assignment	Structural Steel
+ Bounding Box	
+ Properties	
+ Statistics	

Σχήμα 4.55. Ρυθμίσεις "Γεωμετρίας" Δακτύλιου-Άκαμπτη Συμπεριφορά

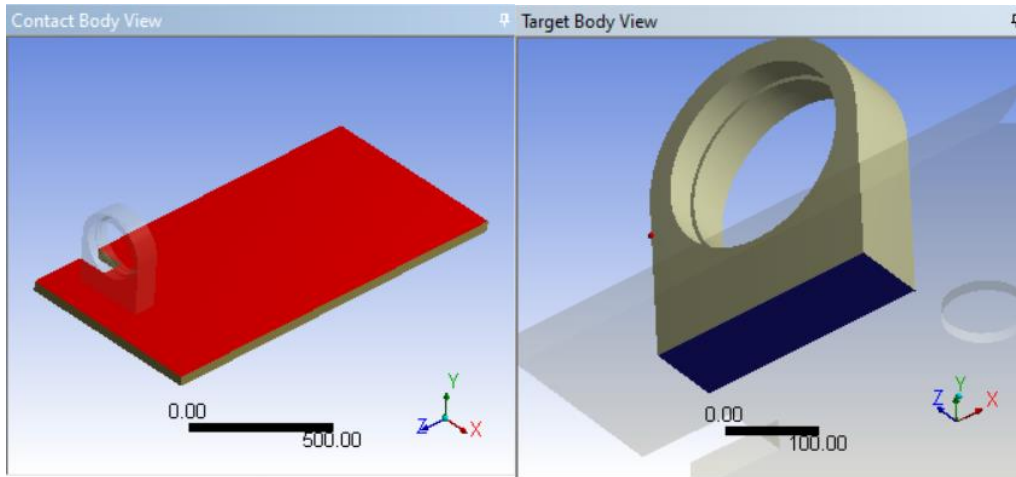
Στη συνέχεια ορίζονται οι επαφές των σωμάτων. Μια επαφή ορίζεται πάντα από το σώμα επαφής (Contact Body) και το σώμα στόχο (Target Body). Η επαφή δημιουργείται επιλέγοντας τις κατάλληλες επιφάνειες των σωμάτων που την ορίζουν. Εάν το ένα από τα δύο σώματα είναι άκαμπτο, τότε θέτεται πάντα ως το σώμα στόχος. Αφήνουμε το πρόγραμμα να καθορίσει τις υπόλοιπες ρυθμίσεις των επαφών. Οποιαδήποτε αλλαγή των ρυθμίσεων θα αναφερθεί στην εκάστοτε επαφή. Από την Στήριξη Κίνησης και προχωρώντας από επαφή σε επαφή μέχρι τη στήριξη πάκτωσης, έχουμε:

1. Πάκτωση της Βάσης με την Στήριξη Κίνησης (Bonded)

Η επιλογή των επιφανειών φαίνεται στα Σχήμα 4.56 Σχήμα 4.57.

Details of "Bonded - base To kinisi"	
- Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Contact	1 Face
Target	1 Face
Contact Bodies	base
Target Bodies	kinisi
Protected	No
- Definition	
Type	Bonded
Scope Mode	Manual
Behavior	Program Controlled
Trim Contact	Program Controlled
Suppressed	No
+ Advanced	
+ Geometric Modification	

Σχήμα 4.56. Ρυθμίσεις-Bonded Contact

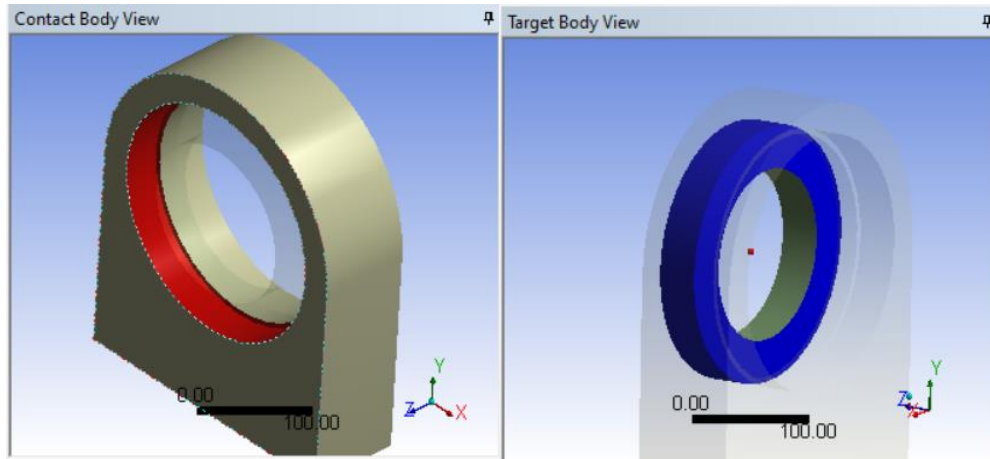


Σχήμα 4.57. Επιφάνειες Επαφής Βάσης-Στήριξης Κίνησης

2. Επαφή χωρίς τριβή της Στήριξης Κίνησης με τους Δακτύλιους 1 και 2 (Frictionless). Επειδή οι δακτύλιοι που σχεδιάστηκαν αντικαθιστούν τα ρουλεμάν πρέπει να επιτρέπουν την κίνηση του άξονα. Αυτό γίνεται με δύο τρόπους. Ο πρώτος είναι η πάκτωση τους στην Στήριξη Κίνησης και ολίσθηση χωρίς τριβές μεταξύ δακτυλίων-άξονα. Ο δεύτερος, που επιλέχθηκε εδώ, αντιστρέφει της επαφές σε ολίσθηση και πάκτωση αντίστοιχα. Η διαφορά τους βρίσκεται στην συμμετοχή των δακτυλίων στην αντοχή της Στήριξης. Η πάκτωση των δακτυλίων στην Στήριξη την ενισχύει, γι' αυτό επιλέχθηκε η δυσμενέστερη περίπτωση. Τα ρουλεμάν στην πραγματικότητα αυξάνουν ελάχιστα έως καθόλου την ακαμψία της στήριξης, καθώς συνδέονται με συναρμογή και όχι κάποια πάκτωση. Άρα η δεύτερη επιλογή είναι και πιο ρεαλιστική. Στο Σχήμα 4.58 και Σχήμα 4.59 δίνεται μόνο η μια επαφή. Η δεύτερη ακολουθεί την ίδια λογική και παραλείπεται.

Details of "Frictionless - kinisi To bearing_sub[1]"	
[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Contact	2 Faces
Target	2 Faces
Contact Bodies	kinisi
Target Bodies	bearing_sub[1]
Protected	No
[-] Definition	
Type	Frictionless
Scope Mode	Manual
Behavior	Program Controlled
Trim Contact	Program Controlled
Suppressed	No
[+] Advanced	
[+] Geometric Modification	

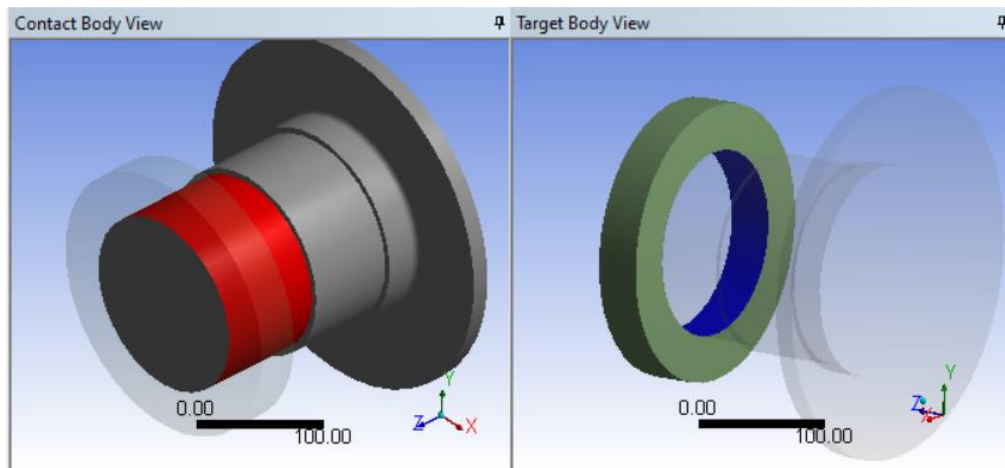
Σχήμα 4.58. Ρυθμίσεις- Frictionless Contact



Σχήμα 4.59. Επιφάνειες Επαφής Στήριξης Κίνησης-Δακτυλίου

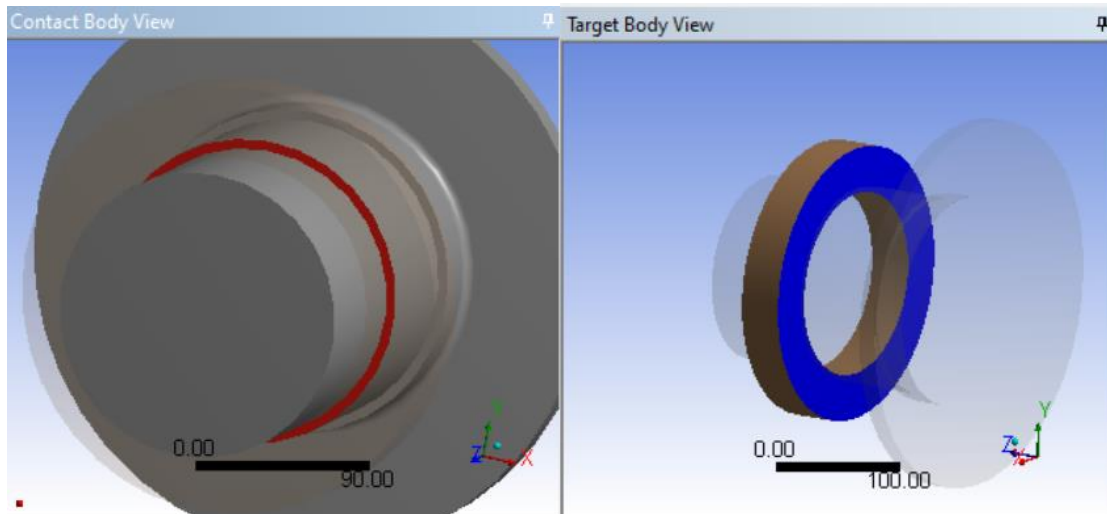
3. Πάκτωση του Άξονα Πρόσδεσης με τους Δακτυλίους (Bonded)

Σε αυτή την επαφή, και τις υπόλοιπες που ακολουθούν, δεν δίνονται οι ρυθμίσεις καθώς ακολουθούν την λογική των προηγούμενων. Μόνο η επιλογή των επιφανειών χρειάζεται για τον ορισμό τους (Σχήμα 4.60).



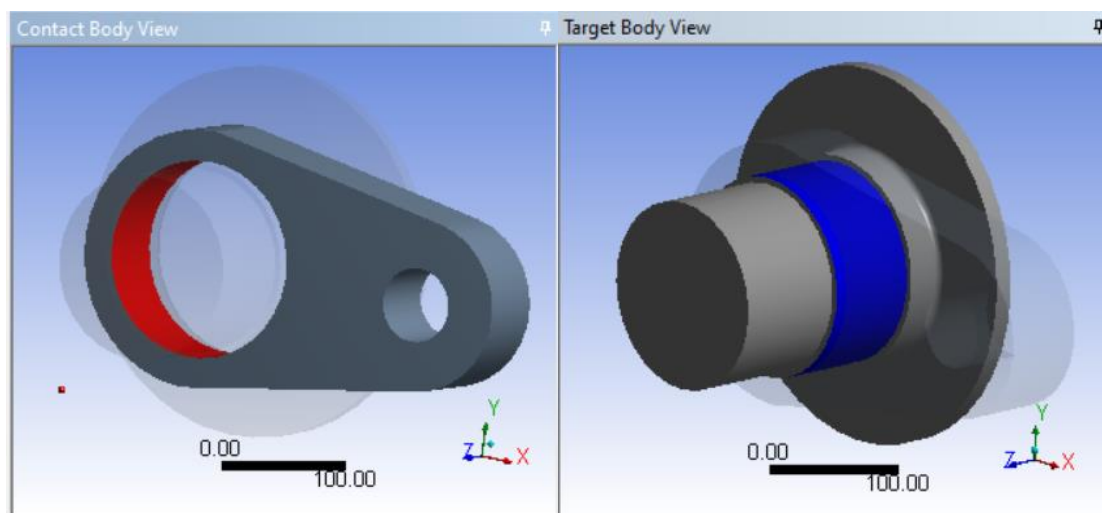
Σχήμα 4.60. Επιφάνειες Επαφής Άξονα Πρόσδεσης-Δακτυλίου

4. Επαφή χωρίς τριβή του Άξονα Πρόσδεσης με τον Δακτύλιο 2 (Σχήμα 4.61).



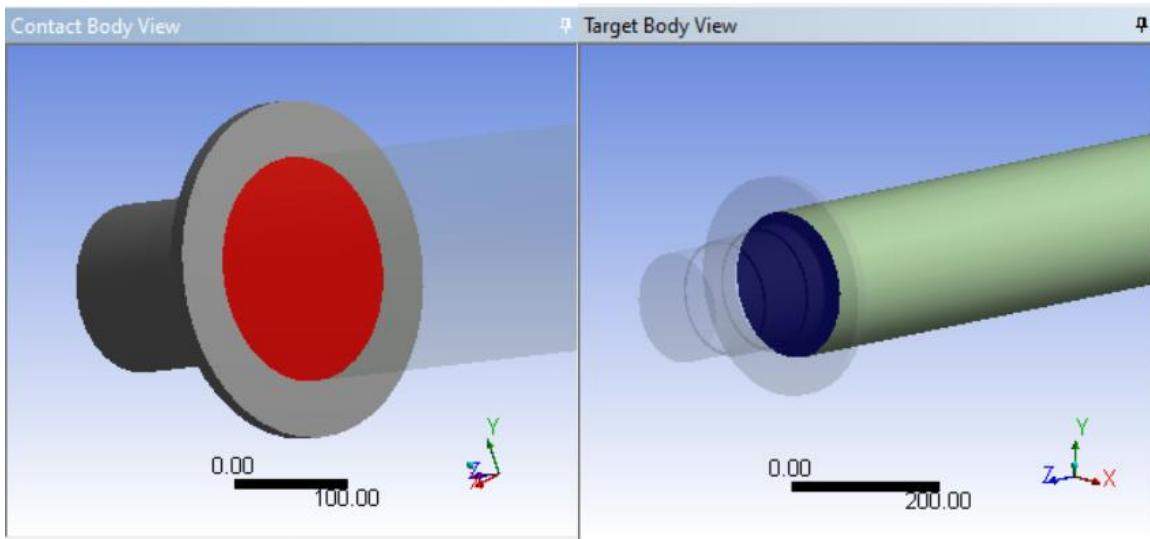
Σχήμα 4.61. Επιφάνειες Επαφής Άξονα Πρόσδεσης-Δακτύλιου 2

5. Πάκτωση του Βραχίονα με τον Άξονα Πρόσδεσης (Bonded) (Σχήμα 4.62).



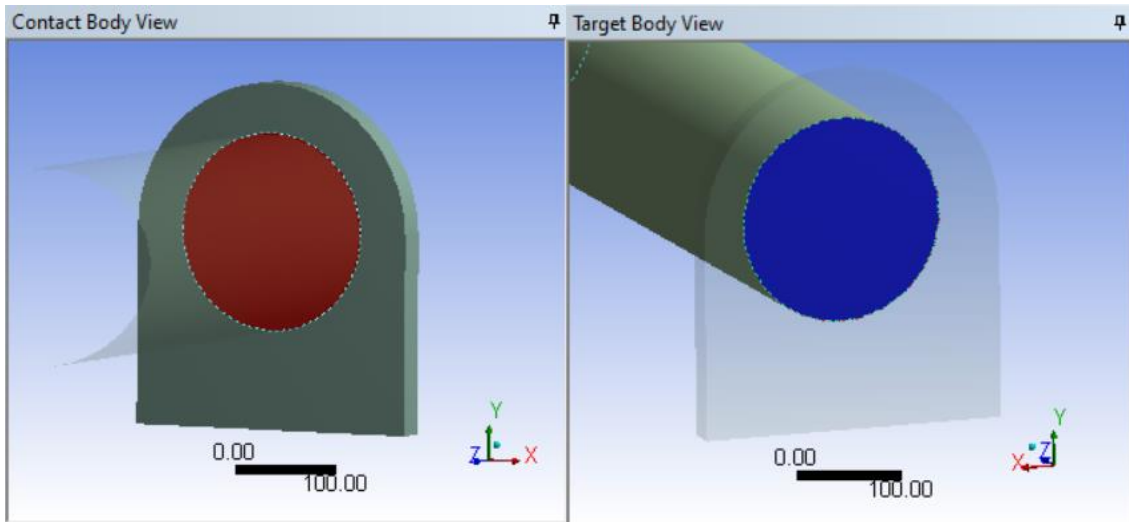
Σχήμα 4.62. Επιφάνειες Επαφής Βραχίονα-Άξονα Πρόσδεσης

6. Πάκτωση του Άξονα Πρόσδεσης με το Δοκίμιο (Bonded) (Σχήμα 4.63).



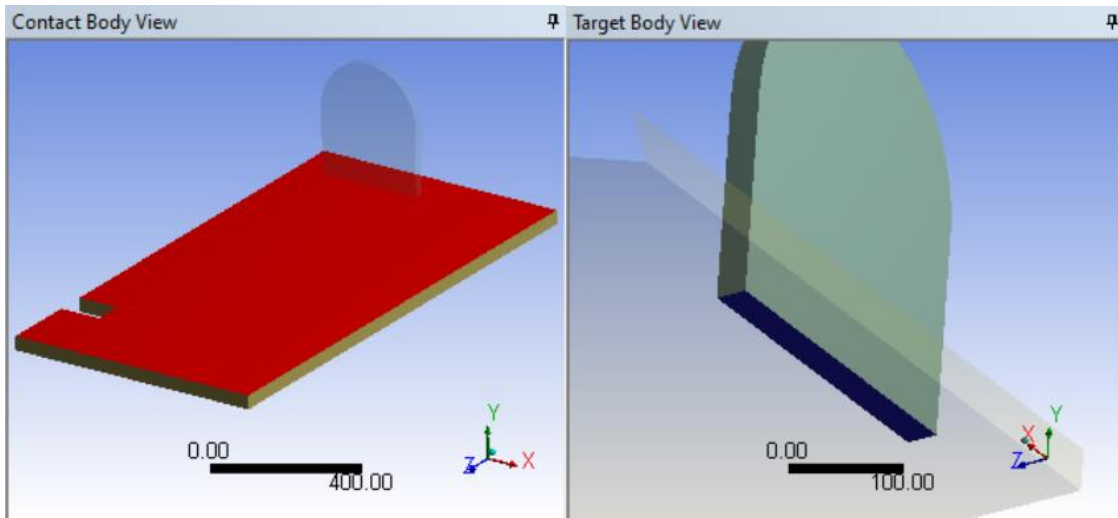
Σχήμα 4.63. Επιφάνειες Επαφής Άξονα Πρόσδεσης-Δοκιμίου

7. Πάκτωση της Στήριξης Πάκτωσης με το Δοκίμιο (Bonded) (Σχήμα 4.64).



Σχήμα 4.64. Επιφάνειες Επαφής Στήριξης Πάκτωσης-Δοκιμίου

8. Πάκτωση της Βάσης με την Στήριξη Πάκτωσης (Bonded) (Σχήμα 4.65).



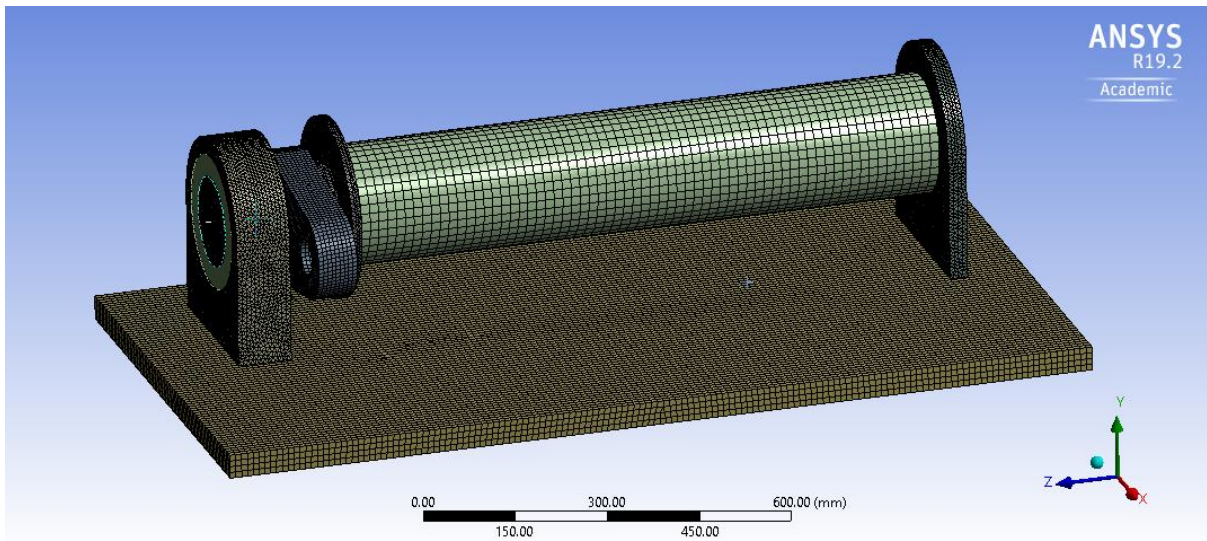
Σχήμα 4.65. Επιφάνειες Επαφής Βάσης-Στήριξης Πάκτωσης

Ακολουθεί η δημιουργία πλέγματος του μοντέλου. Το πρόγραμμα σε αυτό το μοντέλο χρησιμοποιεί τα στοιχεία SOLID186 στα σώματα με εξαεδρικά κελιά και SOLID187 στα σώματα με τετραεδρικά και πενταεδρικά κελιά, που έχουμε ξανασυναντήσει. Επίσης για τις επαφές και τις συνοριακές συνθήκες χρησιμοποιεί τα CONTA174, TARGE170 και SURF154, που έχουμε συναντήσει. Τέλος για τους άκαμπτους δακτύλιους χρησιμοποιεί τα στοιχεία MASS21, τα οποία είναι στοιχεία-σημεία με 6 βαθμούς ελευθερίας. Στον κάθε από τους 3 άξονες του στοιχείου ανατίθεται μια τιμή μάζας και μια ροπή αδράνειας.

Έχει ξαναειπωθεί ότι σύγκλιση πλέγματος θα γίνει μόνο στο τελικό μοντέλο, που είναι πιο κοντά στην πραγματικότητα. Σε αυτό το μοντέλο, οι συνδέσεις των σωμάτων γίνονται κυρίως με πακτώσεις που οδηγούν σε πιο ευνοϊκές κατανομές τάσεων και μικρότερες παραμορφώσεις-μετατοπίσεις. Άλλωστε αυτή η μορφή της διάταξης δεν είναι τελική, αλλά δίνεται ως μέτρο σύγκρισης για την βελτίωση του σχεδιασμού. Άρα οδηγούμαστε ακόμα μια φορά στην δημιουργία πυκνού πλέγματος, εξασφαλίζοντας σωστά αποτελέσματα.

Η γεωμετρία των περισσότερων σωμάτων παρουσιάζουν διάφορες ιδιαιτερότητες που καθιστούν αδύνατη τη δημιουργία δομημένου πλέγματος. Το δοκίμιο, που μπορεί να φέρει δομημένο πλέγμα, δεν αποτελεί αντικείμενο διερεύνησης. Υπάρχει στην ανάλυση μόνο για τη μεταφορά δυνάμεων και ροπών στα 2 άκρα της διάταξης. Συνεπώς δεν μας ενδιαφέρει ούτε η μορφή ούτε το πλήθος των στοιχείων του. Έτσι ορίζουμε, με την εισαγωγή εργαλείου “Body Sizing”, ένα μέσο μέγεθος στοιχείων ίσο με 15 mm, επειδή είναι αρκετά μεγάλο σώμα. Η Βάση, επειδή είναι μεγαλύτερη από τα υπόλοιπα σώματα, έχει μέγεθος στοιχείων ίσο με το ¼ του πάχους της, δηλαδή 10 mm. Τα υπόλοιπα στοιχεία ομαδοποιούνται σε ένα “Base Sizing” με μέγεθος 7 mm. Όπως φάνηκε από τη σύγκλιση πλέγματος του μεμονωμένου μοντέλου του βραχίονα, αυτό το μέγεθος οδηγεί σε αρκετά πυκνό πλέγμα με ικανοποιητικά αποτελέσματα.

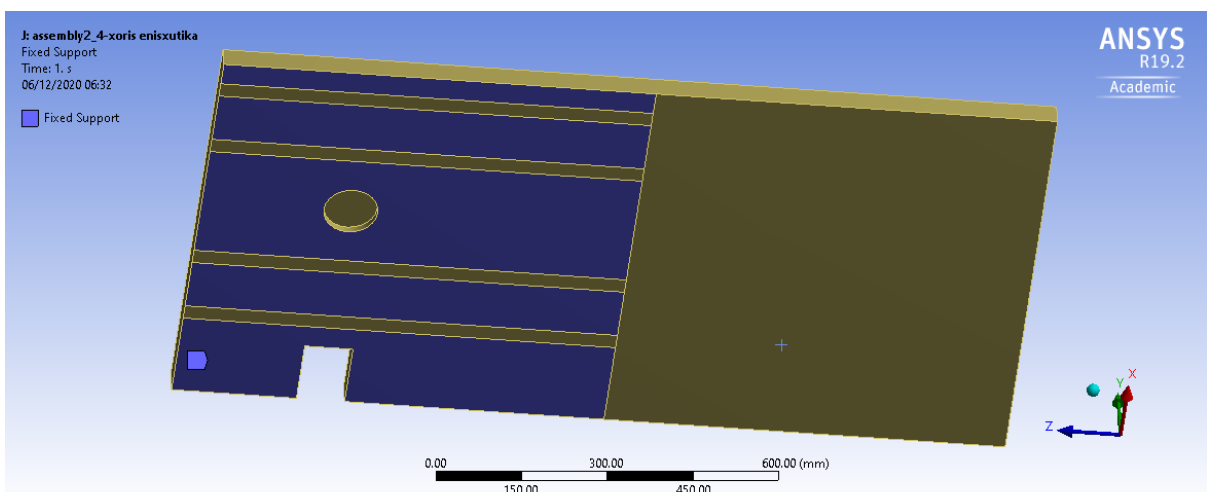
Στο μέγεθος στοιχείων του “Mesh” βάζουμε επίσης 7 mm, διότι με βάση αυτό γίνεται το πλέγμα των επαφών των άκαμπτων στοιχείων. Το πλέγμα του μοντέλου φαίνεται στο Σχήμα 4.66 που ακολουθεί.



Σχήμα 4.66. Πλέγμα 1^{ης} Μορφής Διάταξης

4.8.2. Επίλυση

Στο στάδιο αυτό ορίζονται οι συνοριακές συνθήκες του προβλήματος μαζί με τις ρυθμίσεις της ανάλυσης. Αρχικά, εισάγουμε την δύναμη που ασκείται στη διάταξη. Αυτή είναι ίδια με του μοντέλου του βραχίονα και εφαρμόζεται στην μικρή οπή του. Για να την ορίσουμε, προσθέτουμε στην ανάλυση “Bearing Load”, επιλέγουμε την επιφάνεια της οπής του βραχίονα και αναγράφουμε 100000 N στη συνιστώσα Y του παραθύρου των λεπτομερειών. Επόμενη είναι η συνθήκη που προσομοιάζει την σύνδεση της βάσης με το τραπέζι. Η Βάση πακτώνεται με την προσθήκη “Fixed Support” και επιλέγονται οι επιφάνειες που διαχωρίσαμε κατά την σχεδίαση της, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.67.



Σχήμα 4.67. Επιφάνειες Fixed Support

Η ανάλυση θεωρείται μη-γραμμική, κυρίως επειδή το δοκίμιο αποτελείται από ένα φανταστικό υλικό με πολύ μικρή ακαμψία και αναμένουμε να έχει μεγάλες παραμορφώσεις. Ως αποτέλεσμα ενεργοποιούμε στις ρυθμίσεις της ανάλυσης (Analysis Settings) την επιλογή “Large Deflection”. Άλλος ένας λόγος που χρειαζόμαστε αυτή τη ρύθμιση είναι ότι μερικά σώματα μπορεί να μην παραμορφώνονται αλλά τα στοιχεία τους μετατοπίζονται. Επειδή η ανάλυση είναι στατική, το πρόγραμμα δεν διακρίνει την μετατόπιση από την παραμόρφωση και χωρίς τη ρύθμιση αναγράφει μήνυμα σφάλματος. Η λύση γίνεται σε 1 βήμα (step) χωρίς τον ορισμό υποβημάτων, διότι η δυσκολία της λύσης αναμένεται μικρή. Τέλος, επιλέγεται στα “Output Controls” η επιλογή υπολογισμού “Nodal Forces” (Σχήμα 4.68). Αυτή μας επιτρέπει να δούμε τις εσωτερικές δυνάμεις και ροπές που αναπτύσσονται στις επαφές.

Details of "Analysis Settings"	
⊕ Step Controls	
⊖ Solver Controls	
Solver Type	Program Controlled
Weak Springs	Off
Solver Pivot Checking	Program Controlled
Large Deflection	On
Inertia Relief	Off
⊕ Rotordynamics Controls	
⊕ Restart Controls	
⊕ Nonlinear Controls	
⊖ Output Controls	
Stress	Yes
Strain	Yes
Nodal Forces	Yes
Contact Miscellaneous	No
General Miscellaneous	No
Store Results At	All Time Points
⊕ Analysis Data Management	
⊕ Visibility	

Σχήμα 4.68. Ρυθμίσεις Ανάλυσης-1^η Μορφή Διάταξης

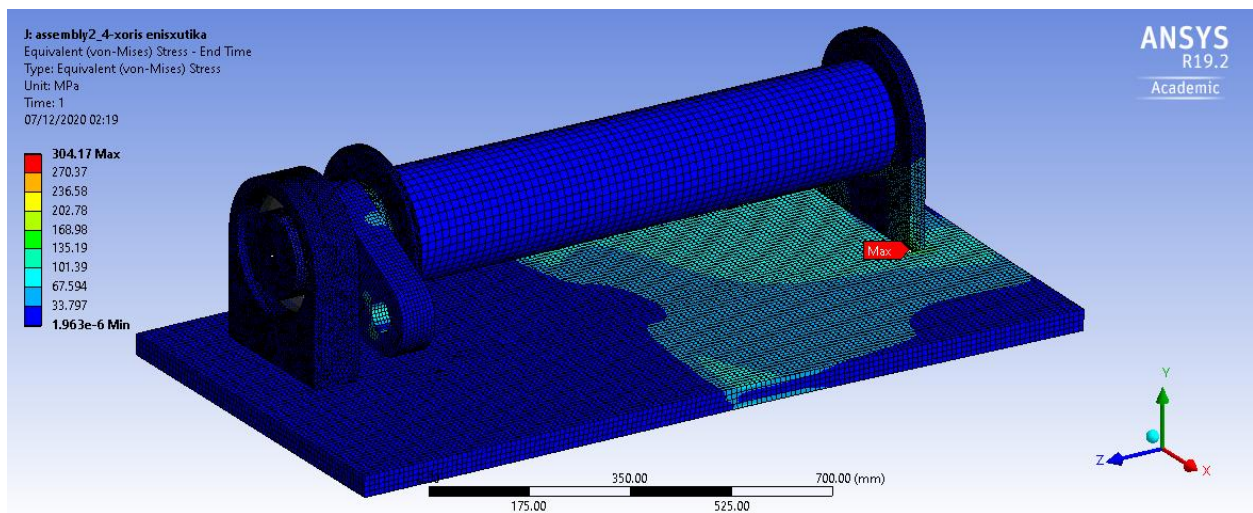
4.8.3. Μετ-Επεξεργασία

Στο στάδιο αυτό, που είναι το τελευταίο της ανάλυσης, ο χρήστης αναλύει τα αποτελέσματα με την βοήθεια εργαλείων. Τα εργαλεία αυτά παρουσιάζουν τα αποτελέσματα σε πίνακες και χρωματικές απεικονίσεις για την καλύτερη κατανόηση τους. Στις μεμονωμένες στατικές αναλύσεις που προηγήθηκαν, πέρα από μια πρώτη εικόνα των κατανομών τάσεων, θέλαμε κυρίως τις παραμορφώσεις των σωμάτων σε στατική φόρτιση. Τα σώματα αυτά (άξονας πρόσδεσης, βραχίονας) στο συναρμολογημένο μοντέλο μετατοπίζονται περιστροφικά. Έτσι δεν μπορούμε να ξεχωρίσουμε τις παραμορφώσεις από τις μετατοπίσεις τους, σε αυτή την κατεύθυνση. Έχουμε εξασφαλίσει όμως από τα μεμονωμένα μοντέλα ότι μετατοπίζονται ελάχιστα. Άρα θα ελεγχθούν μόνο οι ισοδύναμες τάσεις τους.

Στα υπόλοιπα σώματα μας ενδιαφέρουν τόσο οι παραμορφώσεις όσο και οι τάσεις που αναπτύσσονται. Υπενθυμίζεται ότι ο συντελεστής ασφαλείας, που στοχεύει να επιτύχει η διάταξη, είναι ίσος με 2 και οι παραμορφώσεις δεν πρέπει να ξεπερνούν το 1/100 της μεγαλύτερης διάστασης κατά την διεύθυνση φόρτισης. Σε κάποια σώματα όμως, θα δούμε ότι

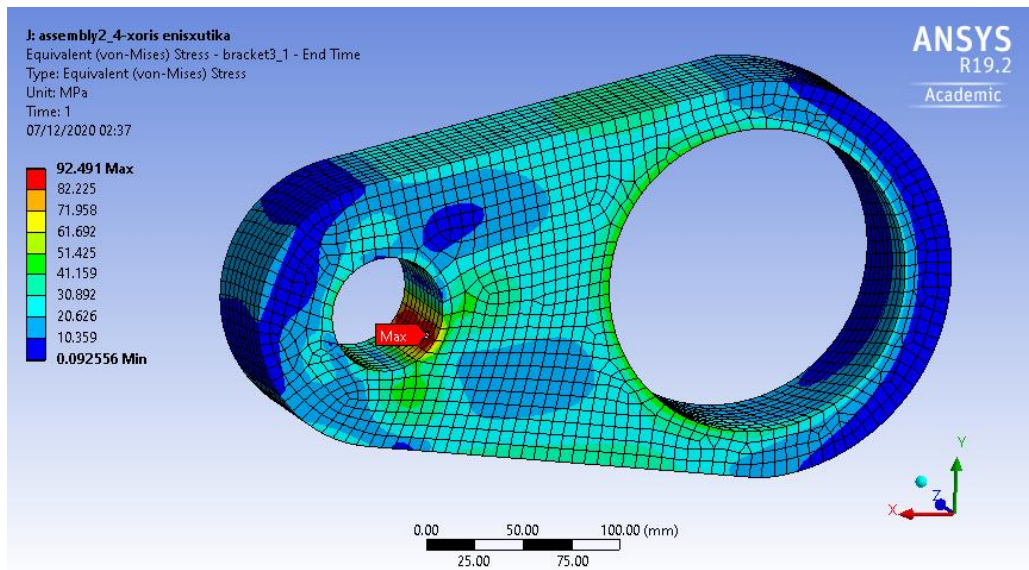
οι παραμορφώσεις πρέπει να είναι ακόμα μικρότερες για να αποφευχθούν ανεπιθύμητες επαγόμενες δυνάμεις και ροπές. Τέλος, πρέπει να επαληθεύσουμε ότι οι αξονικές δυνάμεις στο δοκίμιο και κατ' επέκταση στα ρουλεμάν, είναι μικρότερες από τις επιτρεπτές και ότι το δοκίμιο υπόκειται κυρίως σε στρέψη.

Αρχικά εισάγουμε στα αποτελέσματα ένα εργαλείο Τάσεων Von Mises (Equivalent Stress [Von Mises]) για όλα τα σώματα, ώστε να έχουμε μια γενική εικόνα της κατανομής και των ακραίων τιμών των τάσεων (Σχήμα 4.69). Η μέγιστη τάση εντοπίζεται στην επιφάνεια επαφής Στήριξης Πάκτωσης και Βάσης. Η τιμή της είναι ίση με 304 MPa, ενώ η μέση τάση του μοντέλου είναι 14 MPa. Το φαινόμενο είναι μεμονωμένο και εντοπίζεται κυρίως στο ανυποστήρικτο μέρος της βάσης. Προφανώς το σχέδιο χρήζει αναθεώρησης και συγκεκριμένα χρειάζεται ενίσχυση της βάσης. Συνεχίζουμε όμως με την επεξεργασία των αποτελεσμάτων, για να εντοπίσουμε και άλλα σημεία αδυναμίας και να έχουμε ένα μέτρο σύγκρισης με τις επόμενες αναλύσεις.



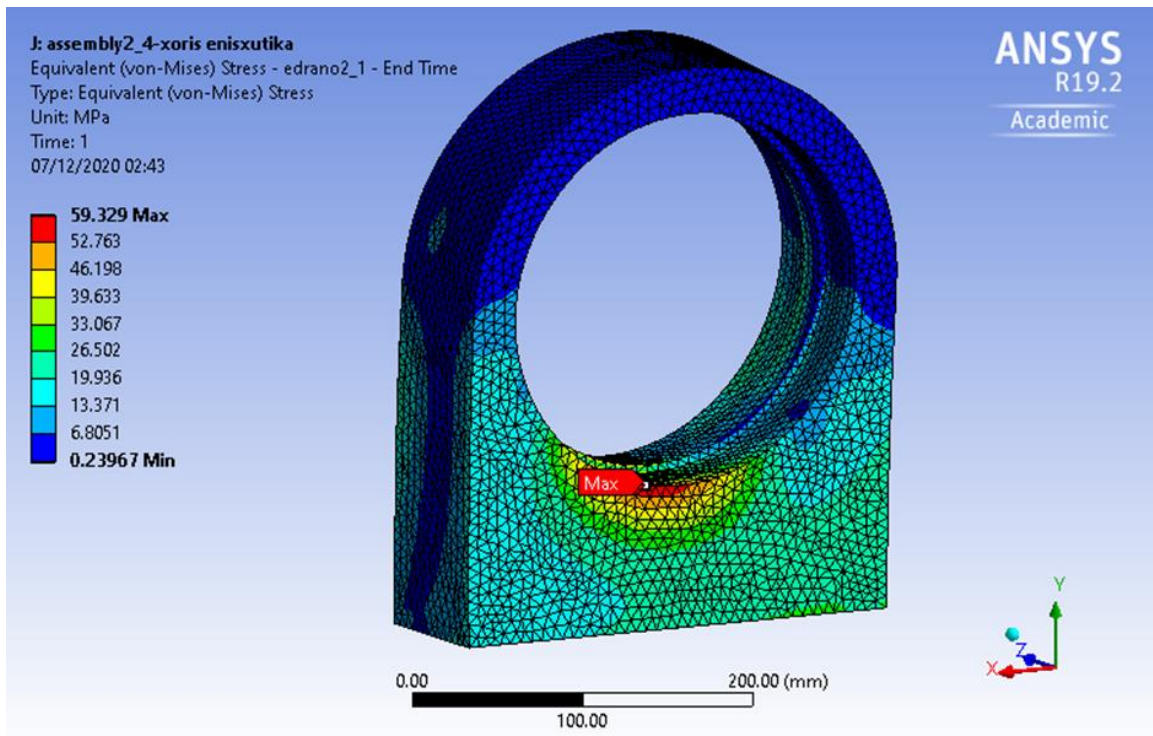
Σχήμα 4.69. Τάσεις V. Mises-1^ο Συναρμολογημένο Μοντέλο

Συνεχίζουμε με τον Βραχίονα, που έχουμε μοντελοποιήσει και χωριστά. Εξετάζουμε μόνο τις τάσεις Von Mises (Equivalent Stress [Von Mises]) (Σχήμα 4.70), καθώς έχουμε σιγουρευτεί για μικρή παραμόρφωση στον Y-άξονα, από το μεμονωμένο μοντέλο. Οι παραμορφώσεις στους υπόλοιπους άξονες είναι αμελητέες επειδή δεν ασκούνται δυνάμεις σε αυτούς. Η μέγιστη τάση ανέρχεται στα 92.5 MPa, δηλαδή 4 MPa περίπου μεγαλύτερη από την ήδη υπολογισμένη. Η περιοχή που εντοπίζεται είναι ίδια με αυτή του μεμονωμένου μοντέλου. Η αύξηση οφείλεται προφανώς σε κάποια κάμψη άλλου σώματος που συνδέεται με αυτόν και η κατανομή των τάσεων φανερώνει το ίδιο. Ο συντελεστής ασφαλείας είναι ίσος με 2.7, που είναι αρκετά κοντά στο στόχο μας και αρκετά πάνω από τον ελάχιστο. Άρα ο βραχίονας ικανοποιεί τα κριτήρια και δεν απαιτεί αναθεώρηση.

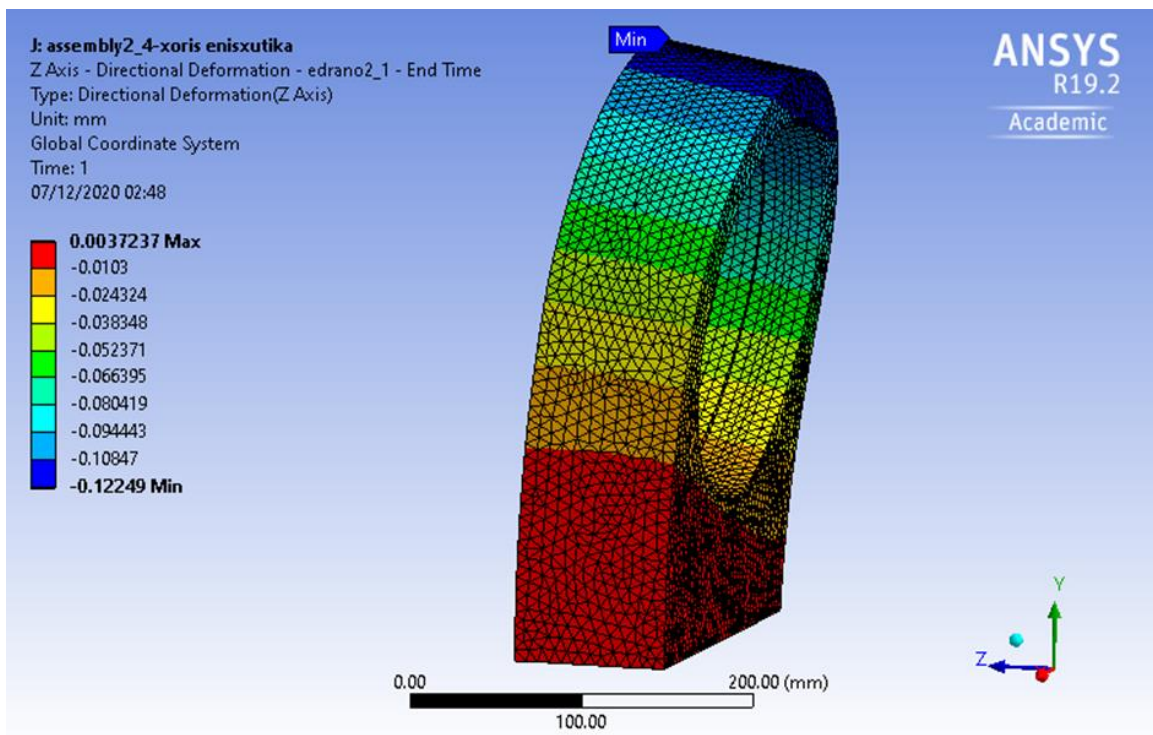


Σχήμα 4.70. Τάσεις Βραχίονα-1^ο Συναρμολογημένο Μοντέλο

Ακολουθεί η ανάλυση των αποτελεσμάτων της Στήριξης Κίνησης. Το ενδιαφέρον μας στρέφεται στις τάσεις που αναπτύσσονται και κυρίως στις παραμορφώσεις στον Z άξονα λόγω κάμψης από την δημιουργία ζεύγους δυνάμεων στον άξονα. Επειδή ο άξονας είναι πιο άκαμπτος σε αυτή τη διεύθυνση αναμένεται σημαντική παραμόρφωση στη Στήριξη Κίνησης. Οι τάσεις φαίνεται να μην αποτελούν πρόβλημα για το σώμα, με μέγιστη τιμή τα 59.3 MPa (Σχήμα 4.71). Ο συντελεστής ασφαλείας ισούται με 4.2, άρα οι τάσεις είναι αρκετά κάτω από το ασφαλές όριο. Οι μετατοπίσεις στον Z-άξονα, που ισούνται με τις παραμορφώσεις σε αυτό τον άξονα, παρόλο που είναι μικρές (max: -0.122 mm) (Σχήμα 4.72) και απέχουν πολύ (1/2700) από το όριο του 1/100 που θέσαμε, μπορούν να προκαλέσουν ανεπιθύμητη κάμψη στο δοκίμιο. Σε αυτό το μοντέλο δεν μπορεί να βγει συμπέρασμα επειδή η κάμψη της βάσης συνεισφέρει σε ένα βαθμό στις παραμορφώσεις του σώματος αυτού. Σημειώνουμε όμως αυτό το σώμα ως πιθανό για αναθεώρηση και το ελέγχουμε στο επόμενο μοντέλο. Τονίζεται ότι σε όλα τα σχήματα τα σώματα στρεβλώνονται σε μεγαλύτερη κλίμακα.



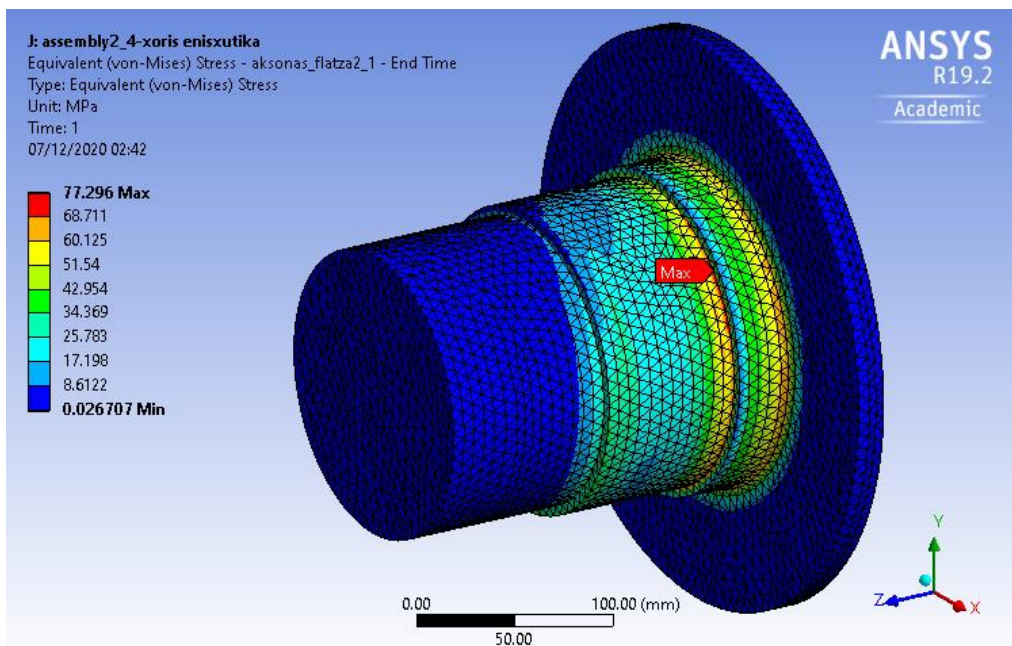
Σχήμα 4.71. Τάσεις Άξονα Πρόσδεσης-1^ο Συναρμολογημένο Μοντέλο



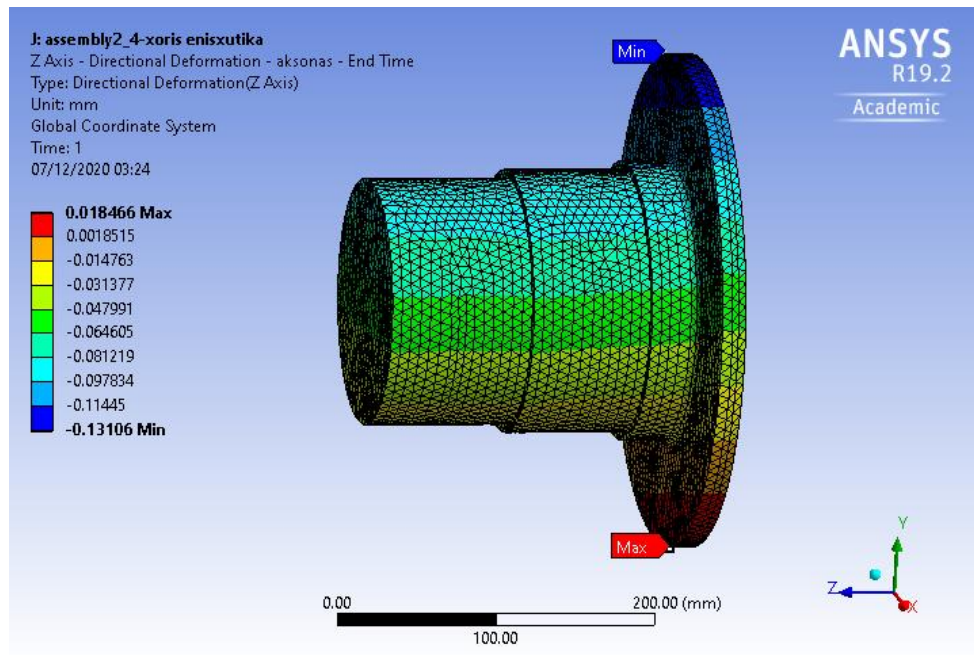
Σχήμα 4.72. Μετατοπίσεις Άξονα Z-1^ο Συναρμολογημένο Μοντέλο

Επόμενος είναι ο Άξονας Πρόσδεσης. Στο μεμονωμένο μοντέλο του, είχαμε εξηγήσει τις παραδοχές που έγιναν για να λυθεί το πρόβλημα της κίνησης. Σε αυτό το μοντέλο το σώμα περιστρέφεται, συνεπώς οι παραμορφώσεις στους X και Y άξονες δεν μπορούν να υπολογιστούν, διότι προστίθενται στις μετατοπίσεις. Στο μεμονωμένο μοντέλο όμως είχαμε υπολογίσει ελάχιστη στρεπτική παραμόρφωση, άρα δεν αναμένεται σημαντική διαφορά. Η κάμψη λόγω της δύναμης του εμβόλου είχε υπολογιστεί επίσης αμελητέα. Στο Σχήμα 4.74 παρατηρούμε πολύ μεγαλύτερες παραμορφώσεις, που στην πραγματικότητα είναι μετατοπίσεις, η οποίες οφείλονται στην παραμόρφωση της Στήριξης Κίνησης. Υπολογίζοντας την διαφορά μεταξύ των μέγιστων τιμών των 2 σωμάτων, βλέπουμε ότι η παραμόρφωση στον Z, του Άξονα Πρόσδεσης, είναι μικρότερη του 0.01 mm. Αυτό φανερώνει και η χρωματική απεικόνιση του Σχήματος, όπου οι χρωματικές ζώνες ίσων μετατοπίσεων είναι σχεδόν παράλληλες με τον άξονα Z.

Οι τάσεις του σώματος (Σχήμα 4.73) έχουν μειωθεί σημαντικά σε σύγκριση με το μεμονωμένο μοντέλο, όπως αναμενόταν. Η μέγιστη τιμή έπεσε από τα 107.4 στα 77.3 MPa και ο συντελεστής ασφαλείας ισούται πλέον με 3.2. Συμπερασματικά ενώ υπάρχουν περιοχές συγκέντρωσης τάσεων, η τιμή τους δεν αποτελεί πρόβλημα και το σώμα αποδίδει ικανοποιητικά.



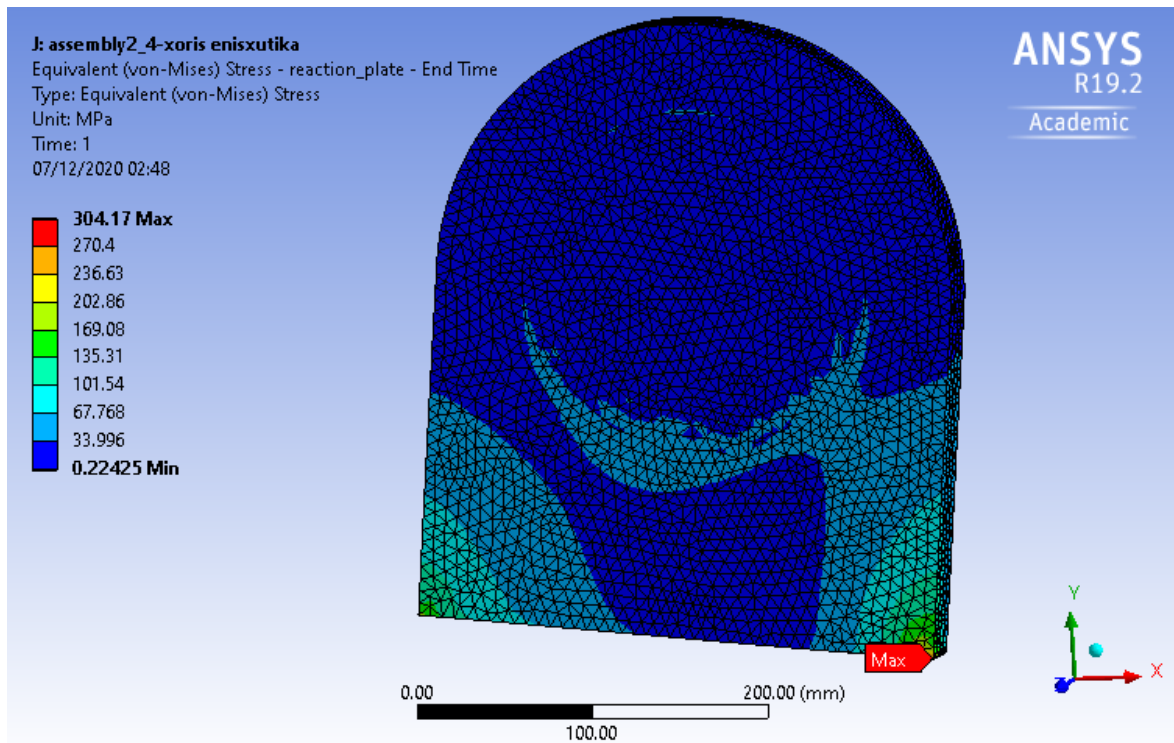
Σχήμα 4.73. Τάσεις Άξονα Πρόσδεσης-1^ο Συναρμολογημένο Μοντέλο



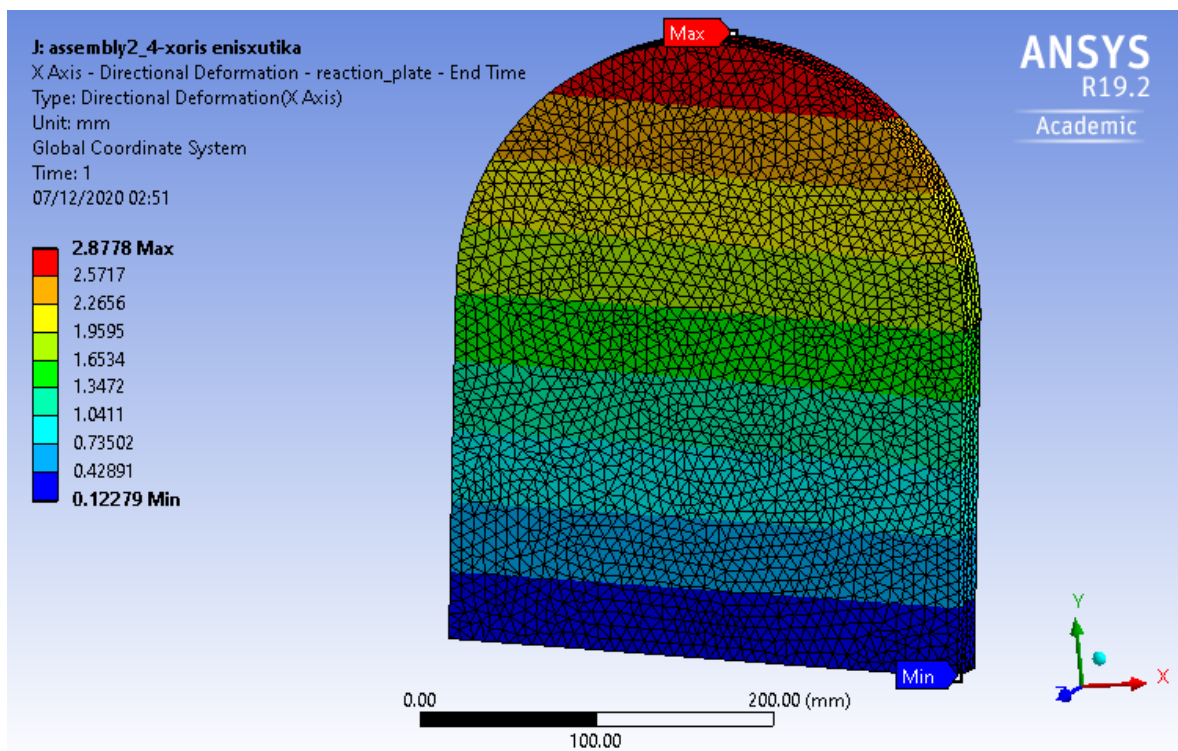
Σχήμα 4.74. Μετατοπίσεις στον άξονα Z-1^ο Συναρμολογημένο Μοντέλο

Η Στήριξη Πάκτωσης είναι το σώμα με την υψηλότερη τιμή τάσης. Στο Σχήμα 4.75 φαίνεται η κατανομή με απόδοση χρώματος, με αποκορύφωμα την τάση των 304 MPa, σε μια ακμή της επιφάνειας σύνδεσης με την Βάση. Στο υπόλοιπο σώμα οι τάσεις φαίνονται πολύ χαμηλότερες, γεγονός που φανερώνει σίγουρα μεγάλες παραμορφώσεις στη Βάση, οι οποίες δημιουργούν συγκέντρωση τάσεων στην πάκτωση των δύο σωμάτων. Προφανώς στην αντίστοιχη περιοχή της Βάσης η τάση αναμένεται μικρότερη λόγω μεγαλύτερου πάχους.

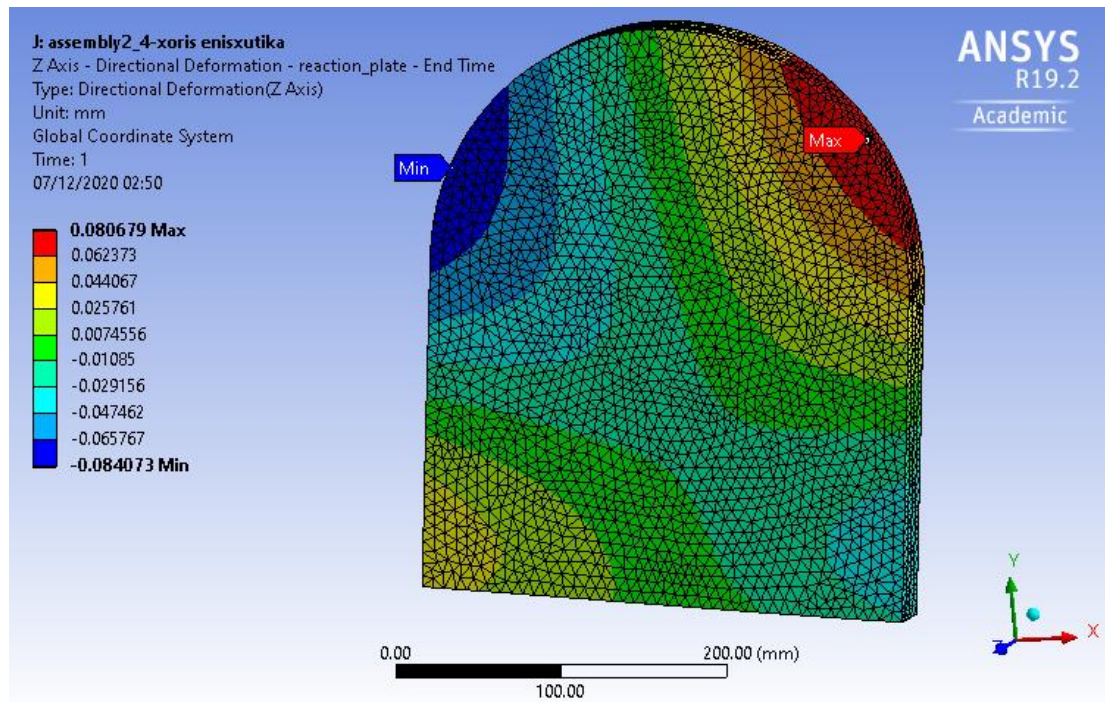
Οι μετατοπίσεις στον άξονα X οφείλονται κυρίως στην Βάση, η οποία παρασύρει και μετατοπίζει την Στήριξη. Αυτό που μας φανερώνει το Σχήμα 4.76 είναι ότι το σώμα μετατοπίζεται κατά τον X και στρέφεται γύρω από τον Z. Οι μετατοπίσεις στον Z (Σχήμα 4.77) μας φανερώνουν επίσης μια μικρή στροφή γύρω από τον Y άξονα. Επειδή οι μεγάλες παραμορφώσεις της Βάσης κυρίως, δεν επιτρέπουν την αξιολόγηση αυτού του σώματος, αναμένουμε μέχρι την επόμενη ανάλυση για να εξαγάγουμε συμπεράσματα.



Σχήμα 4.75. Τάσεις Στήριξης Πάκτωσης-1^ο Συναρμολογημένο Μοντέλο

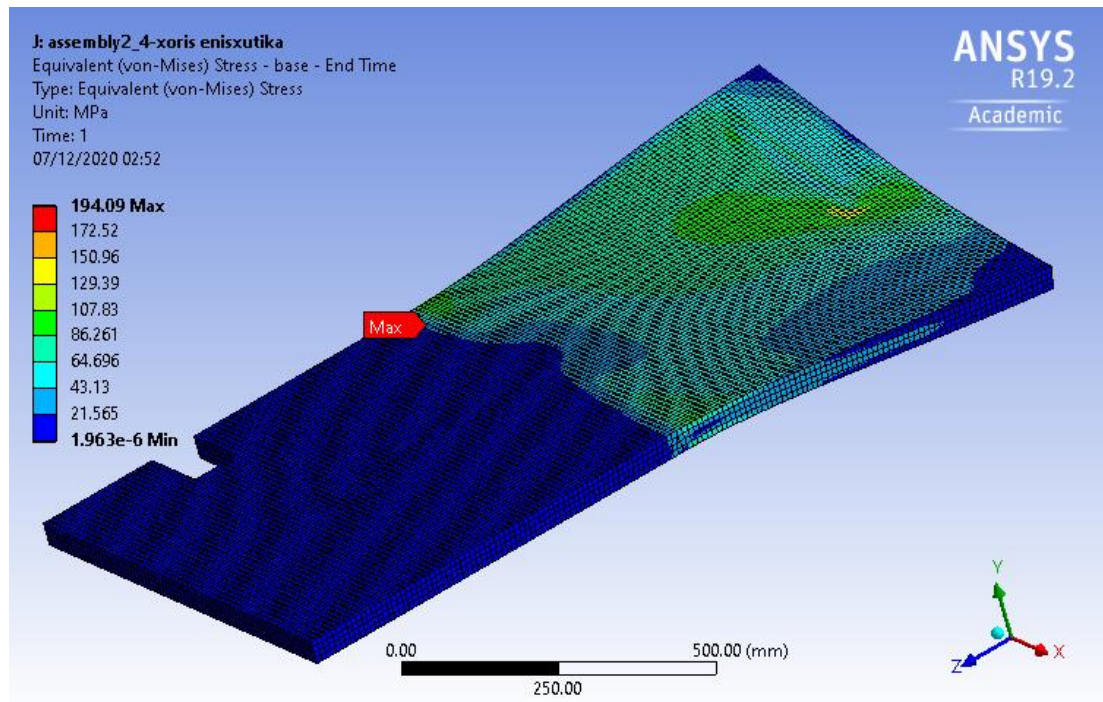


Σχήμα 4.76. Μετατοπίσεις Στήριξης Κίνησης στον Άξονα X-1^ο Συναρμολογημένο Μοντέλο

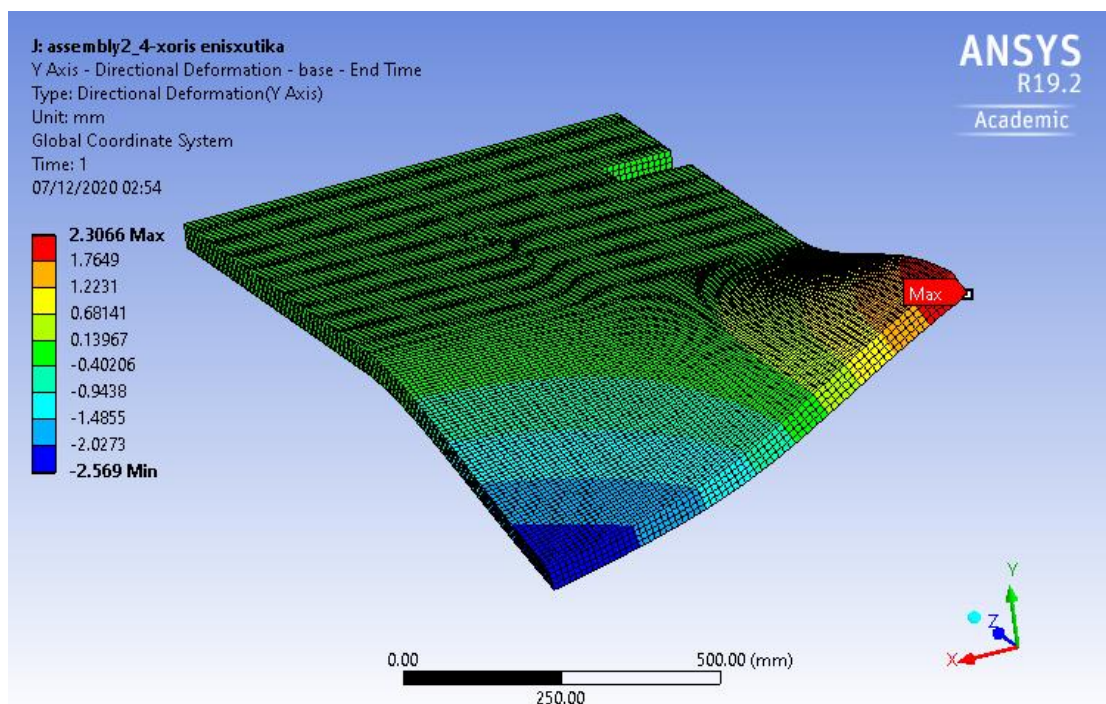


Σχήμα 4.77. Μετατοπίσεις Στήριξης Κίνησης στον Άξονα Z-1^ο Συναρμολογημένο Μοντέλο

Το τελευταίο σώμα με το μεγαλύτερο ενδιαφέρον είναι η Βάση. Λογικό είναι η μέγιστες τάσεις να παρουσιάζονται στην αρχή της προβόλου (Σχήμα 4.78). Η τιμή τους όμως (194 MPa) είναι απαγορευτική για την ασφαλή λειτουργία της διάταξης. Ο ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας έχει τεθεί ίσος με 2. Συνεπώς οι τάσεις πρέπει να κατέβουν στην περιοχή των 120-130 MPa. Επιπλέον, οι μετατοπίσεις στον άξονα Y (Σχήμα 4.79), που ισούνται με τις παραμορφώσεις επειδή το σώμα είναι πακτωμένο, αυξάνουν τις τάσεις στην σύνδεση με την Στήριξη Πάκτωσης. Σημαντικότερα, οδηγούν σε κάμψη του δοκιμίου. Η κάμψη παρόλο που δεν μπορεί να αποφευχθεί, είναι ανεπιθύμητη κατά τις δοκιμές και διακυβεύει την εγκυρότητα των μετρήσεων. Για την αποφυγή της, η Βάση πρέπει να ενισχυθεί ώστε να αυξηθεί η ακαμψία και η στρεπτική ακαμψία της.



Σχήμα 4.78. Τάσεις Βάσης - 1^ο Συναρμολογημένο Μοντέλο



Σχήμα 4.79. Μετατοπίσεις Βάσης στον Άξονα Y - 1^ο Συναρμολογημένο Μοντέλο

Κλείνοντας την ανάλυση, χρησιμοποιούμε τα εργαλεία ανάκτησης δύναμης (Force Reaction) και ροπής (Moment Reaction) αντίδρασης, που αναπτύσσονται στην επαφή Δοκιμίου-Στήριξης Πάκτωσης, σύμφωνα με τις ρυθμίσεις των Σχήμα 4.80 και Σχήμα 4.81. Από την δύναμη αντίδρασης, μας ενδιαφέρει η συνιστώσα στον άξονα Z, ώστε να

επαληθεύσουμε ότι είναι μικρότερη από την αξονική που μπορούν να φέρουν τα ρουλεμάν. Πράγματι, στο Σχήμα 4.80 φαίνεται πως η αξονική δύναμη ισούται με 6.5 kN. Βέβαια το μέγεθος της δύναμης εξαρτάται από το υλικό του άξονα, το οποίο έχει πολύ μικρό μέτρο ελαστικότητας και επιπλέον το μοντέλο δεν είναι το τελικό. Αλλά δεν υπάρχει πιθανότητα να πλησιάσει το όριο των 175 kN που έχει το ένα ρουλεμάν. Συνεπώς δεν θα επανελεγχθεί αυτή η δύναμη διότι είναι 2 τάξεις μεγέθους μικρότερη από το όριο. Συμπερασματικά, τα ρουλεμάν κρίνονται κατάλληλα να φέρουν τις επαγόμενες αξονικές δυνάμεις που τους ασκούνται, κατά την λειτουργία της διάταξης.

Details of "All - Force Reaction - Bonded - reacti..."	
[-] Definition	
Type	Force Reaction
Location Method	Contact Region
Contact Region	Bonded - paktosi To dokimio
Orientation	Global Coordinate System
Extraction	Contact (Underlying Element)
Suppressed	No
[+] Options	
[-] Results	
<input type="checkbox"/> X Axis	-4162.6 N
<input type="checkbox"/> Y Axis	-1973.8 N
<input checked="" type="checkbox"/> Z Axis	-6549.3 N
<input type="checkbox"/> Total	8007.2 N
[+] Maximum Value Over Time	
[+] Minimum Value Over Time	
[+] Information	

Σχήμα 4.80. Δύναμη Αντίδρασης Δοκιμίου-Στήριξης Πάκτωσης - 1ο Συναρμοσολογημένο Μοντέλο

Οι ροπές που αναπτύσσονται στην επαφή είναι η ροπή στρέψης των δοκιμών μαζί με ανεπιθύμητες καμπτικές ροπές, λόγω παραμορφώσεων των μερών της διάταξης. Στο Σχήμα 4.81 βλέπουμε την καθαρή επιρροή των μεγάλων παραμορφώσεων της Βάσης, στις καμπτικές ροπές που δέχεται το δοκίμιο. Η συνισταμένη των ροπών των X και Y αξόνων ισούται περίπου με το 10% της ροπής στρέψης (του άξονα Z). Τόσο μεγάλη κάμψη του δοκιμίου καθιστά τα αποτελέσματα των πειραμάτων αναξιόπιστα. Επίσης, η ροπή στρέψης στον άξονα των Z είναι ελάχιστα μικρότερη από 20 kN-m (19.7 kN-m), εξαιτίας της μεγάλης κάμψης και του υλικού του δοκιμίου.

Details of "All - Moment Reaction - Bonded - re..."	
Definition	
Type	Moment Reaction
Location Method	Contact Region
Contact Region	Bonded - paktosi To dokimio
Orientation	Global Coordinate System
Summation	Centroid
Extraction	Contact (Underlying Element)
Suppressed	No
Options	
Results	
<input type="checkbox"/> X Axis	8.5879e+005 N-mm
<input type="checkbox"/> Y Axis	-1.9953e+006 N-mm
<input type="checkbox"/> Z Axis	-1.9693e+007 N-mm
<input type="checkbox"/> Total	1.9813e+007 N-mm
Maximum Value Over Time	
Minimum Value Over Time	
Information	

Σχήμα 4.81. Ροπή Αντίδρασης Δοκιμίου-Στήριξης Πάκτωσης - 1ο Συναρμολογημένο Μοντέλο

Συγκεντρωτικά, η επεξεργασία των αποτελεσμάτων έδειξε ότι ο Βραχίονας και ο Άξονας Πρόσδεσης καλύπτουν τους στόχους που έχουν τεθεί και δεν θα μας απασχολήσουν στην συνέχεια. Η Στήριξη Κίνησης ικανοποιεί τις απαιτήσεις των τάσεων αλλά έχει μικρές παραμορφώσεις στον άξονα Z που επιφέρουν κάμψη στο δοκίμιο κατά τον άξονα Y. Οι τάσεις στην Στήριξη Πάκτωσης ξεπερνούν το όριο διαρροής αλλά προκύπτουν από τις παραμορφώσεις της Βάσης. Η Βάση δεν ικανοποιεί τα κριτήρια της τάσης και παρουσιάζει μεγάλες παραμορφώσεις στον άξονα Y. Το εργαλείο ροπής αντίδρασης στην επαφή Δοκιμίου-Στήριξης Πάκτωσης φανερώνει μεγάλες καμπτικές ροπές στο δοκίμιο. Αυτές προφανώς προκύπτουν από τις παραμορφώσεις των μερών της διάταξης και είναι ανεπιθύμητες σε μια δοκιμή στρέψης.

Σίγουρα η ύπαρξη σημαντικής κάμψης, ενώ ικανοποιούνται οι συνθήκες παραμόρφωσης, οδηγεί σε αναθεώρηση του τρόπου αξιολόγησης της διάταξης. Στο εξής, κύριο κριτήριο αξιολόγησης είναι οι καμπτικές φορτίσεις στο δοκίμιο. Επειδή δεν γνωρίζουμε το ποσοστό συνεισφοράς του κάθε σώματος στην κάμψη του δοκιμίου, ξεκινούμε την αναθεώρηση με ενίσχυση της Βάσης. Έτσι συγκρίνοντας το νέο μοντέλο με το υπάρχον, θα κατανοήσουμε καλύτερα την επίδραση του κάθε σώματος στην κάμψη του δοκιμίου.

4.9. Συναρμολογημένη Διάταξη – 2^η Στατική Ανάλυση

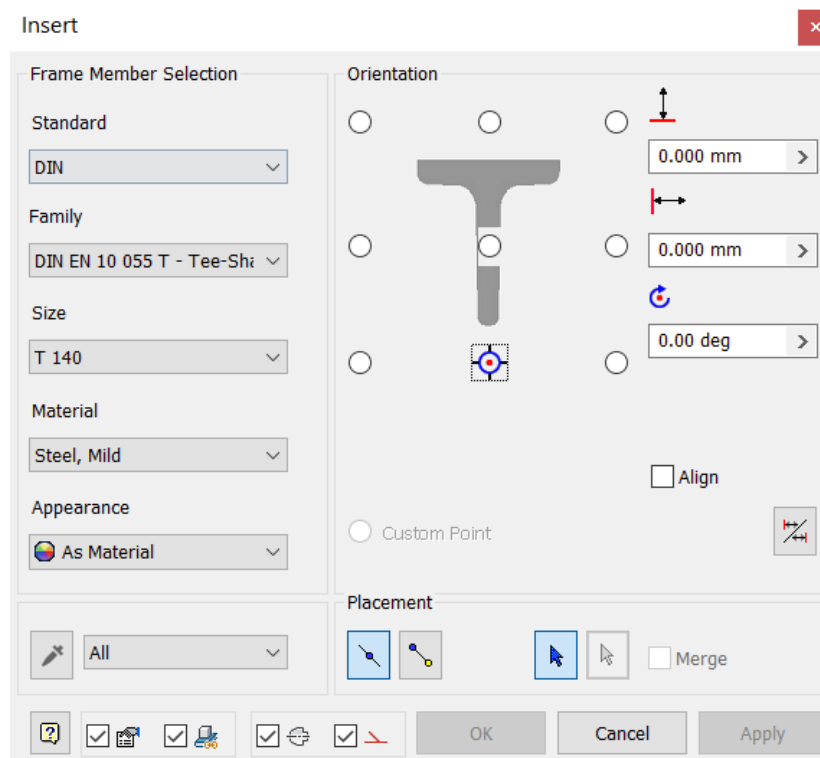
Η στατική ανάλυση που θα ακολουθήσει δίνεται για σύγκριση και κατανόηση των παραμέτρων που επηρεάζουν την αντοχή της διάταξης στρέψης. Στην προηγούμενη ανάλυση, παρατηρήθηκε ότι κύριο ρόλο στην αντοχή της διάταξης και την εγκυρότητα των δοκιμών έχουν η ακαμψία της ενισχυμένης βάσης και η παραμόρφωση στον Z άξονα της Στήριξης Κίνησης. Επίσης, πριν προχωρήσουμε στην εισαγωγή κοχλιοσυνδέσεων και απαλλαγούμε από τις πακτώσεις, πρέπει να παρουσιάσουμε ένα μοντέλο που ομοιάζει με το τελικό, ώστε να

κατανοήσουμε την επιρροή των νέων συνδέσεων. Το μοντέλο αυτό, όπως και τα περισσότερα, προέκυψε από συνεχείς δοκιμές και δεν είναι το μόνο ενδιαμέσο μεταξύ του προηγούμενου και του τελικού. Είναι όμως το πιο αντιπροσωπευτικό σε αυτή την μεταβατική φάση.

4.9.1. Ενίσχυση Βάσης

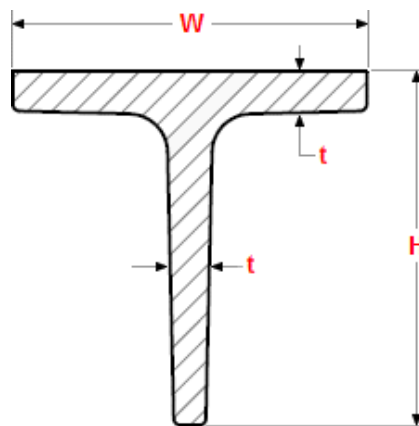
Παρόλο που το έλασμα της Βάσης έχει μεγάλο πάχος, οι τάσεις και παραμορφώσεις της καθιστούν ανίκανη τη διάταξη να πραγματοποιήσει δοκιμές στρέψης. Η ενίσχυση της θα γίνει με την τοποθέτηση ενισχυτικών με τέτοιο τρόπο ώστε να αυξηθεί η στρεπτική ακαμψία του ελάσματος κατά τον άξονα του μήκους. Η αναλυτική υπολογιστική προσέγγιση της ενίσχυσης δεν είναι εύκολη, συνεπώς προτιμάται η τοποθέτηση ενισχυτικών, η μοντελοποίηση και δοκιμές στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων.

Το πρόγραμμα του Inventor μας δίνει την δυνατότητα να τοποθετήσουμε ενισχυτικά από την βιβλιοθήκη του σχεδόν αυτόματα, μέσω μιας λειτουργίας των “assembly” αρχείων. Ανοίγοντας το αρχείο της διάταξης που έχουμε ήδη δημιουργήσει, επιλέγουμε την λειτουργία “Insert Frame”, που βρίσκεται στην καρτέλα του “Design”. Στο παράθυρο που εμφανίζεται (Σχήμα 4.82) έχουμε την δυνατότητα να επιλέξουμε την κλάση και το είδος ενισχυτικού που επιθυμούμε, το τυποποιημένο του μέγεθος, το υλικό του. Στη συνέχεια επιλέγουμε μια ακμή ως σημείο αναφοράς, η οποία καθορίζει και το μήκος του ενισχυτικού και εισάγουμε αν επιθυμούμε μετατοπίσεις ως προς αυτή.



Σχήμα 4.82. Προσθήκη Ενισχυτικών-Inventor

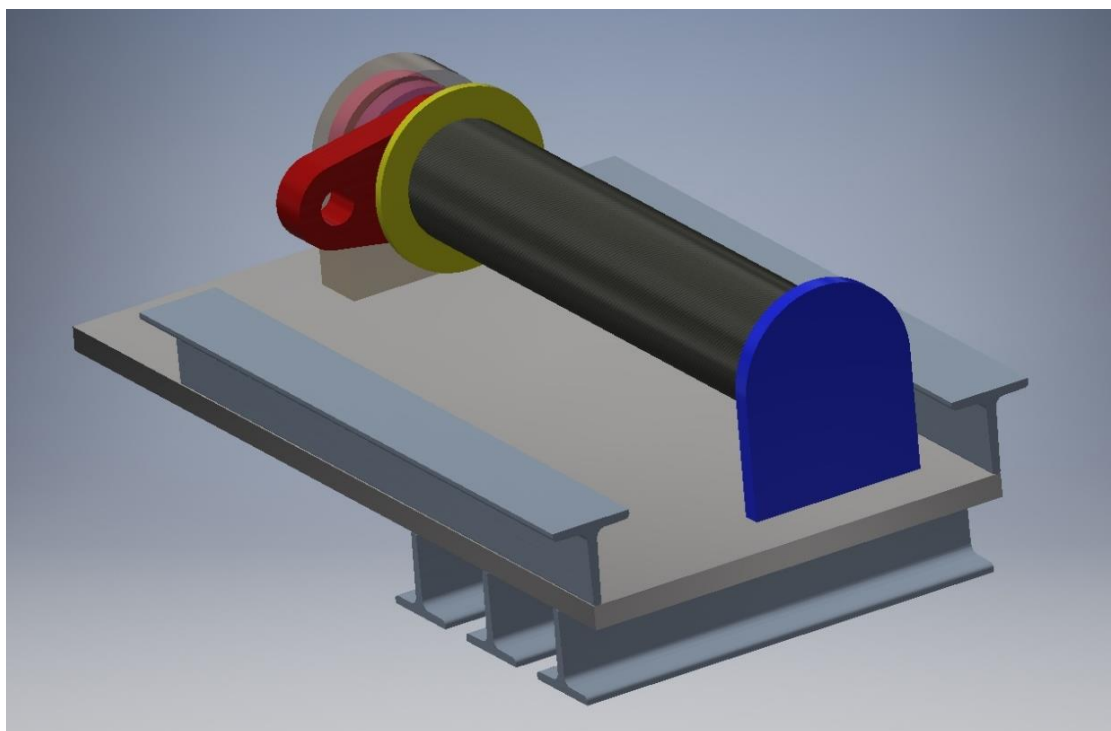
Τα ενισχυτικά που επιλέχθηκαν είναι μορφής T, ευρωπαϊκής κλάσης DIN EN 10055:1995 και τυποποιημένου μεγέθους T 140 (Σχήμα 4.83). Είναι κοινά ενισχυτικά θερμής διέλασης με διαστάσεις 140x140 (WxH) και πάχος $t=15$ mm. Το βάρος τους ισούται με 31.3 kg/m και το υλικό τους είναι ο κοινός χάλυβας. Οι διαστάσεις τους είναι οι μεγαλύτερες της κλάσης, γι' αυτό και επιλέχθηκαν. Αν τα αποτελέσματα δείξουν ότι προσφέρουν μεγαλύτερη ακαμψία από αυτή που απαιτείται, μπορούμε να επιστρέψουμε στο Inventor, να δώσουμε τις φορτίσεις που υπολογίστηκαν στο ANSYS, και μέσω εφαρμογής (Beam Calculator) να μας υπολογίσει το μέγεθος που χρειαζόμαστε. Όμως κύριο κριτήριο πλέον σχεδίασης της διάταξης είναι η κάμψη του δοκιμίου και ύστερα οι τάσεις και παραμορφώσεις. Όπως φάνηκε στην προηγούμενη στατική ανάλυση, η ακαμψία της Βάσης ίσως χρειάζεται να είναι ακόμα μεγαλύτερη από αυτή που προκύπτει, σύμφωνα με τα κριτήρια ασφαλείας. Αυτό μας το εξασφαλίζουν μόνο οι δοκιμές στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων.



Σχήμα 4.83. T-Ενισχυτικά DIN EN 10055

Οι θέσεις των ενισχυτικών στην διάταξη φαίνονται στο Σχήμα 4.84. Το πρώτο ενισχυτικό που τοποθετήθηκε είναι το διάμηκες που βρίσκεται κοντά στο δοκίμιο. Οι αποστάσεις του από την κολώνα της μηχανής και την στήριξη κίνησης είναι ίσες με το όριο ασφαλείας (5 mm). Το άλλο διάμηκες ενισχυτικό τοποθετήθηκε στην απέναντι ακμή και το μήκος του καθορίστηκε από το πρώτο με την εντολή “Trim/Extend”. Τα ενισχυτικά της βιβλιοθήκης του Inventor τροποποιούνται μόνο με εντολές της ομάδας “Frame” και δεν αναγνωρίζονται ως σχέδια.

Τα εγκάρσια ενισχυτικά τοποθετούνται ώστε να βρίσκονται στο ίδιο μήκος με την Στήριξη Πάκτωσης. Επειδή η διάταξη προορίζεται για δοκιμές αξόνων μήκους 600, 800 και 1000 mm τοποθετούμε ένα ενισχυτικό σε κάθε διαμήκη θέση που θα βρεθεί η στήριξη. Ξέρουμε ότι όσο πλησιάζουμε στο τραπέζι, τόσο μικραίνουν οι παραμορφώσεις άρα και η ανάγκη για ενίσχυση, αλλά η μέγιστη φόρτιση σε όλες τις θέσεις είναι ίδια (20 kN-m), οπότε δεν υπάρχει λόγος να επιλέξουμε διαφορετικού μεγέθους ενισχυτικά.



Σχήμα 4.84. Διάταξη με Ενισχυμένη Βάση

Ο επικρατέστερος τρόπος σύνδεσης των T-ενισχυτικών με τη Βάση είναι κάποια μέθοδος ηλεκτροσυγκόλλησης. Στις αυχενικές συγκολλήσεις, συχνό φαινόμενο είναι η δημιουργία γωνιακής μεταβολής από την ανομοιόμορφη κατανομή της εγκάρσιας συστολής στη διεύθυνση του πάχους του ελάσματος (Παντελής 2017). Όμως, το μεγάλο πάχος της Βάσης βοηθάει στην αποφυγή αυτού του φαινομένου, καθώς η ακαμψία του είναι πολύ μεγάλη σε σχέση με τις τάσεις που αναπτύσσονται. Επίσης αν το έλασμα δεν περιορίζεται από στηρίξεις, ή ακόμα καλύτερα, αν δημιουργηθεί κατάλληλη προένταση ή προθερμαθεί, οι παραμορφώσεις θα είναι μηδενικές. Οι παραμορφώσεις των ενισχυτικών δεν επηρεάζουν τις δοκιμές στρέψης. Υπάρχουν πολλοί παράμετροι επιπλέον που επηρεάζουν την ποιότητα της συγκόλλησης αλλά αφορούν τον σχεδιασμό της συγκόλλησης και δεν απασχολούν αυτή την εργασία. Ως συμπέρασμα, σημειώνεται ότι μπορεί να επιτευχθεί συγκολλητή σύνδεση μεταξύ Βάσης και ενισχυτικών, χωρίς την παραμόρφωση της πρώτης.

4.9.2. Προ-Επεξεργασία

Η μόνη αλλαγή από την προηγούμενη ανάλυση είναι η προσθήκη των ενισχυτικών. Το νέο μοντέλο συνεπώς θα κατασκευαστεί με τον ίδιο τρόπο με το προηγούμενο, προσθέτοντας κάποιες νέες ρυθμίσεις για τα ενισχυτικά. Τα βήματα που επαναλαμβάνονται, θα αναφερθούν περιγραφικά. Συνεχίζοντας στο ίδιο project, κλωνοποιούμε το σύστημα του προηγούμενου μοντέλου και αντικαθιστούμε την γεωμετρία με την νέα που έχουμε εξάγει από το Inventor σε μορφή step (.stp). Το πρόγραμμα αναγνωρίζει τα σώματα που έχουμε ήδη μοντελοποιήσει και έχει αποθηκευμένες τις ρυθμίσεις τους.

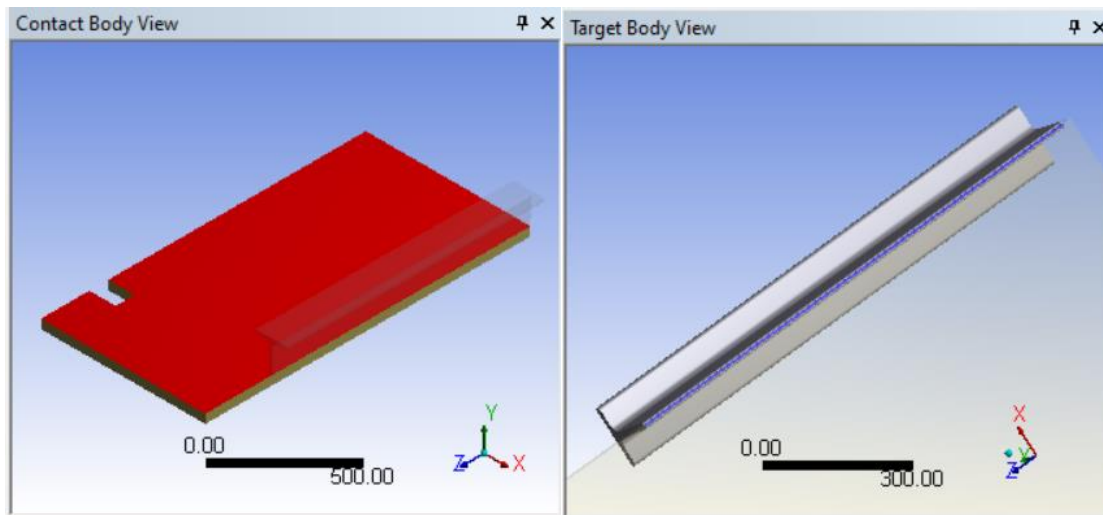
Ξεκινώντας με τα υλικά της ανάλυσης, θα χρησιμοποιήσουμε για άλλη μια φορά τον κατασκευαστικό χάλυβα (Structural Steel) και το νέο υλικό που ορίζουμε στο δοκίμιο (Structural Steel 2). Στα 5 νέα ενισχυτικά του μοντέλου ορίζουμε τον κατασκευαστικό χάλυβα με τον γνωστό τρόπο. Οι συνδέσεις (Connections) του προηγούμενου μοντέλου έχουν μεταβιβαστεί και στο νέο, εφόσον δεν έγιναν αλλαγές στην γεωμετρία των σωμάτων (βλ. Κεφ. 4.8.1). Οι νέες συνδέσεις των ενισχυτικών με την Βάση είναι όλες επαφές (Contacts). Θα δοθεί η σύνδεση ενός διαμήκους και ενός εγκάρσιου ενισχυτικού ως παραδείγματα. Για τα υπόλοιπα ακολουθείται η ίδια διαδικασία:

1) Πάκτωση Διαμήκων Ενισχυτικών-Βάσης

Η μοντελοποίηση της συγκόλλησης γίνεται με μια απλή πάκτωση. Μια καλή συγκόλληση χάλυβα δεν επηρεάζει την αντοχή των συγκολλητών μερών. Οι παραμένουσες τάσεις που δημιουργεί μπορεί να επηρεάσουν την αντοχή σε κόπωση, αλλά δεν μελετάται σε αυτή την εργασία. Συνεπώς η πάκτωση είναι η σύνδεση που προσεγγίζει καλύτερα την πραγματικότητα. Οι επιφάνειες που επιλέχθηκαν στις ρυθμίσεις της επαφής (Σχήμα 4.85) είναι η πάνω επιφάνεια της Βάσης και η κάτω επιφάνεια του κορμού του ενισχυτικού, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.86. Οι επιφάνειες δεν είναι απαραίτητο να έχουν τις ίδιες διαστάσεις, διότι το πρόγραμμα εντοπίζει αυτόματα την περιοχή αλληλεπίδρασης των σωμάτων.

Details of "Bonded - base To Frame 15869819114...	
[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Contact	1 Face
Target	1 Face
Contact Bodies	base
Target Bodies	Frame 1586981911469 DIN 1024...
Protected	No
[-] Definition	
Type	Bonded
Scope Mode	Manual
Behavior	Program Controlled
Trim Contact	Program Controlled
Suppressed	No
[+] Advanced	
[+] Geometric Modification	

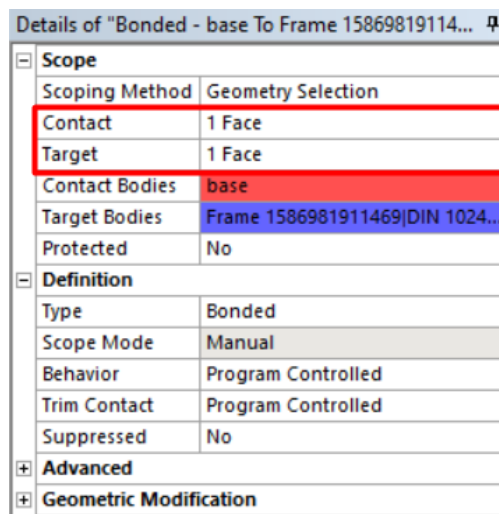
Σχήμα 4.85. Ρυθμίσεις Πάκτωσης Βάσης-Διαμήκων Ενισχυτικών - 2^ο Συναρμολογημένο Μοντέλο



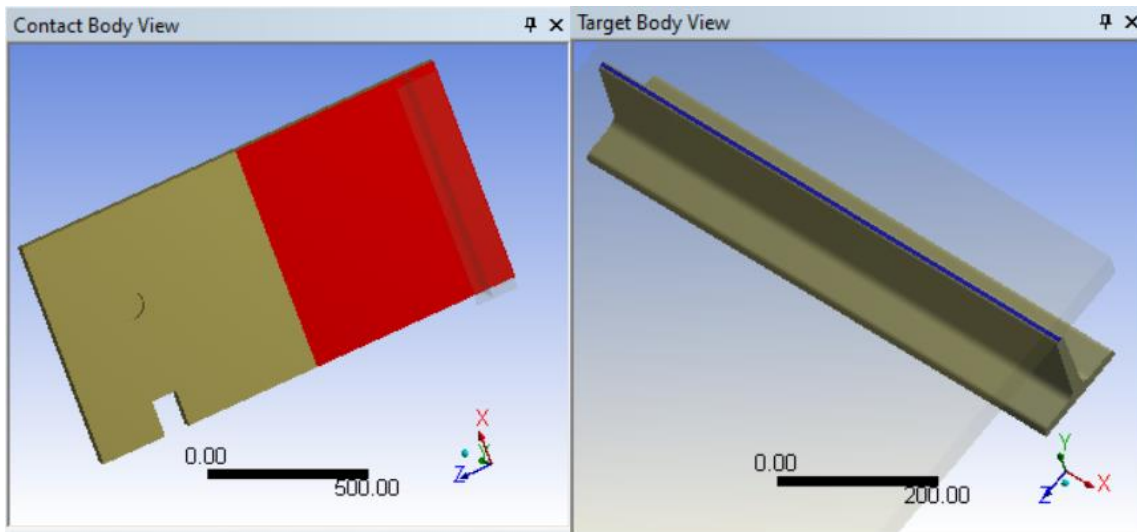
Σχήμα 4.86. Επιφάνειες Επαφής Βάσης-Διάμηκων Ενισχυτικών - 2^ο Συναρμολογημένο Μοντέλο

2) Πάκτωση Εγκάρσιων Ενισχυτικών-Βάσης

Η πάκτωση επιλέχθηκε πάλι, επειδή προσεγγίζει καλά την συγκόλληση και αρκεί για την μελέτη που κάνουμε. Οι επιφάνειες που επιλέχθηκαν είναι η κάτω πλευρά της Βάσης που προεξέχει από το τραπέζι και η κατάλληλη επιφάνεια του κορμού του ενισχυτικού, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.88 και οι ρυθμίσεις φαίνονται στο Σχήμα 4.87.

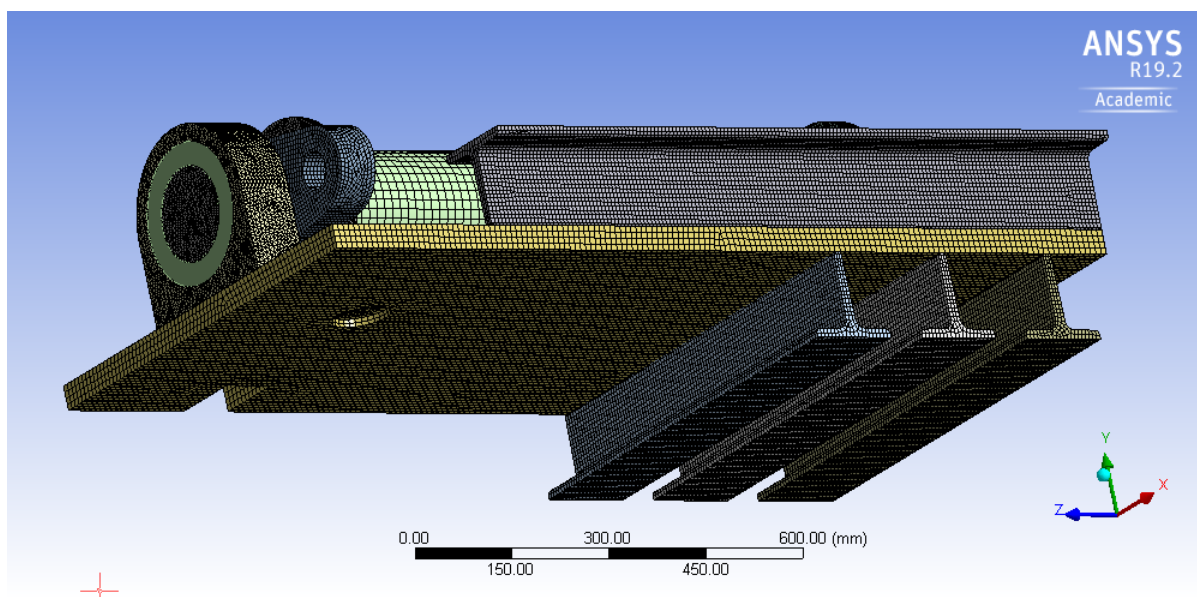


Σχήμα 4.87. Ρυθμίσεις Πάκτωσης Βάσης-Εγκάρσιων Ενισχυτικών - 2^ο Συναρμολογημένο Μοντέλο



Σχήμα 4.88. Επιφάνειες Επαφής Βάσης-Εγκάρσιων Ενισχυτικών - 2^ο Συναρμολογημένο Μοντέλο

Τα στοιχεία της μοντελοποίησης των σωμάτων παραμένουν τα ίδια. Αναφορικά, το πρόγραμμα χρησιμοποιεί τα τρισδιάστατα στοιχεία SOLID186 και SOLID187, τα στοιχεία κόμβους MASS21 και τα δισδιάστατα στοιχεία CONTA174, TARGE170 και SURF154. Τα σώματα που μεταφέρθηκαν απaráλαχτα στο νέο μοντέλο μεταφέρουν και το πλέγμα τους. Επειδή το μοντέλο δεν είναι το τελικό, αντί για σύγκλιση πλέγματος αποφασίστηκε η δημιουργία ενός πυκνού πλέγματος (Σχήμα 4.89), ώστε τα αποτελέσματα να είναι ρεαλιστικά. Τα ενισχυτικά μοντελοποιήθηκαν με κυρίως εξαεδρικά κελιά, μεγέθους 7 mm, αλλά το πλέγμα τους δεν είναι δομημένο. Η διαδικασία παραγωγής τους δημιουργεί μικρές στρογγυλές διαμορφώσεις (fillets), που δυσκολεύουν την τοποθέτηση εξαεδρικών στοιχείων. Το πλέγμα όμως είναι αρκετά πυκνό ώστε να μην υπάρχει συγκέντρωση τάσεων. Αναφορικά το δοκίμιο και η βάση έχουν κυρίως εξαεδρικά στοιχεία μεγέθους 15 και 10 mm αντίστοιχα. Τα υπόλοιπα σώματα έχουν τετραεδρικά στοιχεία 7 mm, εκτός από τον βραχίονα που έχει εξαεδρικά κυρίως.



Σχήμα 4.89. Πλέγμα 2^ο Συναρμολογημένου Μοντέλου

4.9.3. Επίλυση

Στο στάδιο αυτό ορίζονται οι συνοριακές συνθήκες του προβλήματος μαζί με τις ρυθμίσεις της ανάλυσης. Δεν έχει αλλάξει κάτι σε αυτές από το προηγούμενο μοντέλο, οπότε παρουσιάζονται εν συντομία. Αρχικά εισάγουμε την δύναμη των 100 kN που ασκείται στον βραχίονα, σε μορφή “Bearing Load”, όπως στο μεμονωμένο μοντέλο του. Στην συνέχεια πακτώνουμε τις επιφάνειες επαφής με το τραπέζι με την εντολή “Fixed Support”.

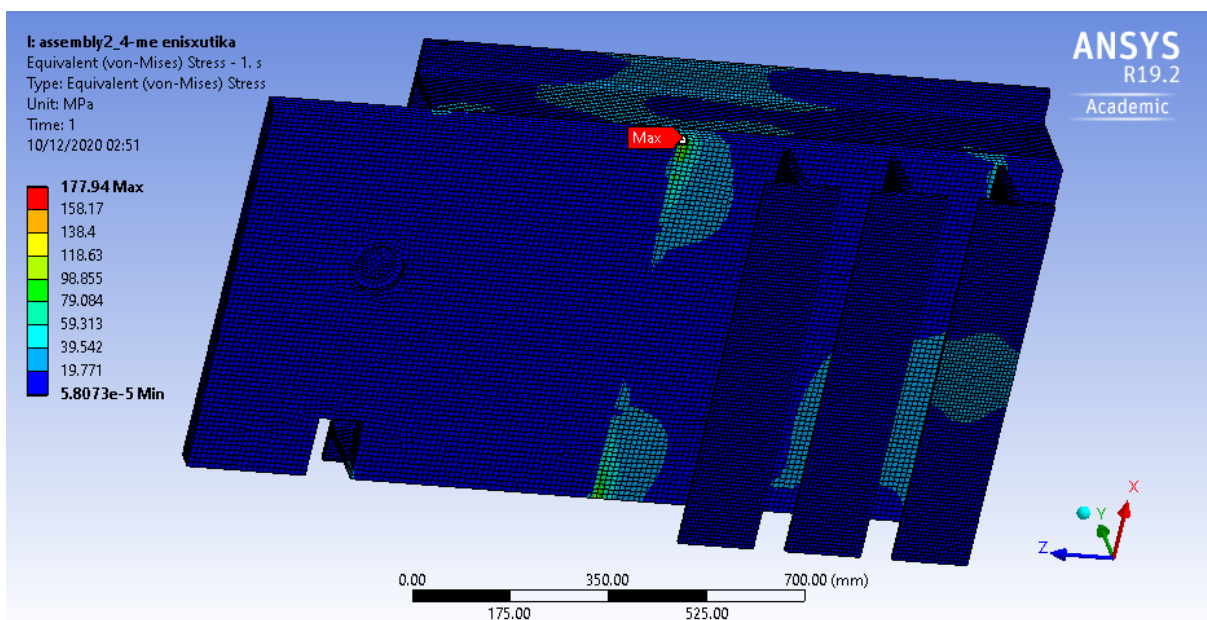
Η ανάλυση θεωρείται μη-γραμμική, κυρίως επειδή το δοκίμιο αποτελείται από ένα φανταστικό υλικό με πολύ μικρή ακαμψία και αναμένουμε να έχει μεγάλες παραμορφώσεις. Ως αποτέλεσμα ενεργοποιούμε στις ρυθμίσεις της ανάλυσης (Analysis Settings) την επιλογή “Large Deflection”. Άλλος ένας λόγος που χρειαζόμαστε αυτή τη ρύθμιση είναι ότι μερικά σώματα δεν παραμορφώνονται πολύ, αλλά τα στοιχεία τους μετατοπίζονται αρκετά. Επειδή η ανάλυση είναι στατική, το πρόγραμμα δεν διακρίνει την μετατόπιση από την παραμόρφωση και χωρίς τη ρύθμιση αναγράφει μήνυμα σφάλματος. Η λύση γίνεται σε 1 βήμα (step) χωρίς τον ορισμό υποβημάτων, διότι η δυσκολία της λύσης αναμένεται μικρή. Τέλος, επιλέγεται στα “Output Controls” η επιλογή υπολογισμού “Nodal Forces”. Αυτή μας επιτρέπει να δούμε τις εσωτερικές δυνάμεις και ροπές που αναπτύσσονται στις επαφές.

4.9.4. Μετ-Επεξεργασία

Στο στάδιο αυτό, που είναι το τελευταίο της ανάλυσης, ο χρήστης αναλύει τα αποτελέσματα με την βοήθεια εργαλείων. Τα εργαλεία αυτά παρουσιάζουν τα αποτελέσματα σε πίνακες και χρωματικές απεικονίσεις για την καλύτερη κατανόηση τους. Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων στα σώματα είναι η ίδια με της προηγούμενης διάταξης. Επιπλέον, θα ελεγχθεί η τάση στα ενισχυτικά που τοποθετήθηκαν. Οι αξονικές δυνάμεις στα ρουλεμάν δεν μας ενδιαφέρουν πλέον και δεν θα εξεταστούν. Υπενθυμίζεται ότι ο συντελεστής ασφαλείας που

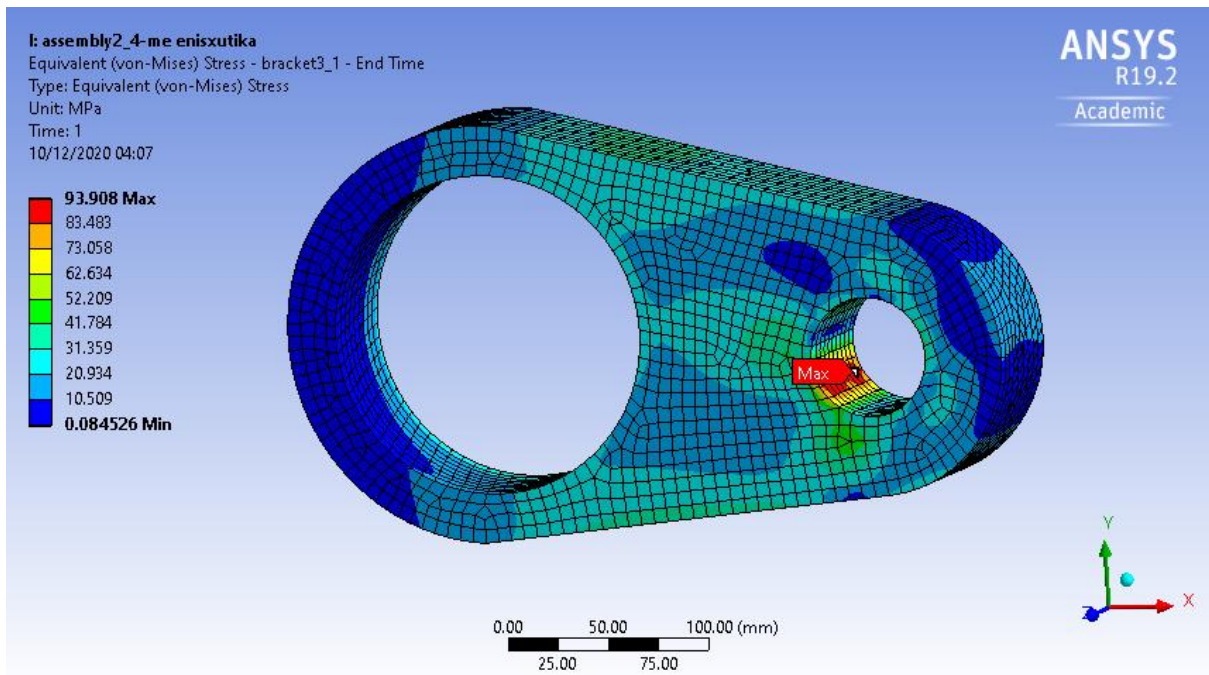
σκοπεύει να επιτύχει η διάταξη είναι ίσος με 2 και οι παραμορφώσεις δεν πρέπει να ξεπερνούν το 1/100 της διάστασης κάθετη στην διεύθυνση φόρτισης. Στην προηγούμενη στατική ανάλυση αποδείχθηκε ότι το κριτήριο των παραμορφώσεων που έχει τεθεί, δεν αρκεί αν οι καμπτικές ροπές που επάγονται στο δοκίμιο είναι υψηλές.

Αρχικά εισάγουμε στα αποτελέσματα ένα εργαλείο Τάσεων Von Mises (Equivalent Stress (Von Mises)) για όλα τα σώματα, ώστε να έχουμε μια γενική εικόνα της κατανομής και των ακραίων τιμών των τάσεων (Σχήμα 4.90). Η μέγιστη τάση αυτή τη φορά εντοπίζεται σε πλευρά της βάσης, όπου αρχίζει το ανυποστήρικτο μήκος της. Αναμενόμενο για ένα έλασμα που υπόκειται σε στρέψη, το σημείο υψηλών τάσεων να βρίσκεται αμέσως μετά την πακτωμένη του επιφάνεια. Η μέγιστη τιμή βρίσκεται κάτω από το όριο διαρροής του χάλυβα και έχει σχεδόν υποδιπλασιαστεί σε σχέση με το προηγούμενο μοντέλο. Βρίσκεται όμως ακόμα σε υψηλά επίπεδα και δεν είναι θεμιτή με βάση τον συντελεστή ασφαλείας. Ας δούμε όμως την κατανομή αναλυτικά σε όλη τη διάταξη.



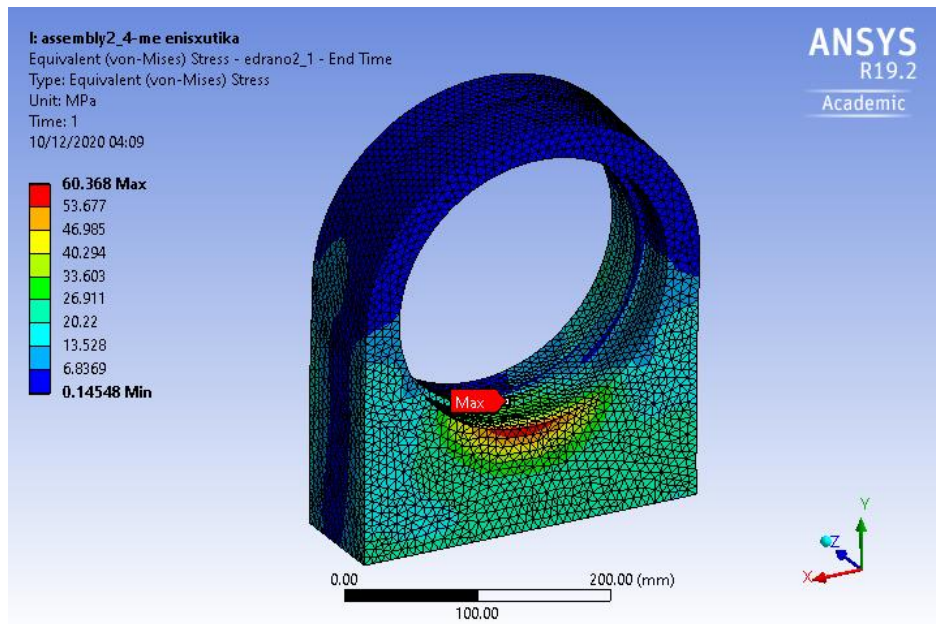
Σχήμα 4.90. Κατανομή Τάσης - 2ο Συναρμολογημένο Μοντέλο

Οι τάσεις στο Βραχίονα (Σχήμα 4.91) παραμένουν κοντά στην περιοχή της τιμής του μεμονωμένου μοντέλου. Η μικρή αύξηση του 1 MPa, οφείλεται στην προσθήκη των ενισχυτικών και την μεγαλύτερη ακαμψία της βάσης. Τα κριτήρια ασφαλείας πληρούνται ακόμα, με συντελεστή ασφαλείας να ισούται με 2.66. Άρα ο Βραχίονας μπορεί να εισαχθεί χωρίς αλλαγές στο τελικό μοντέλο.

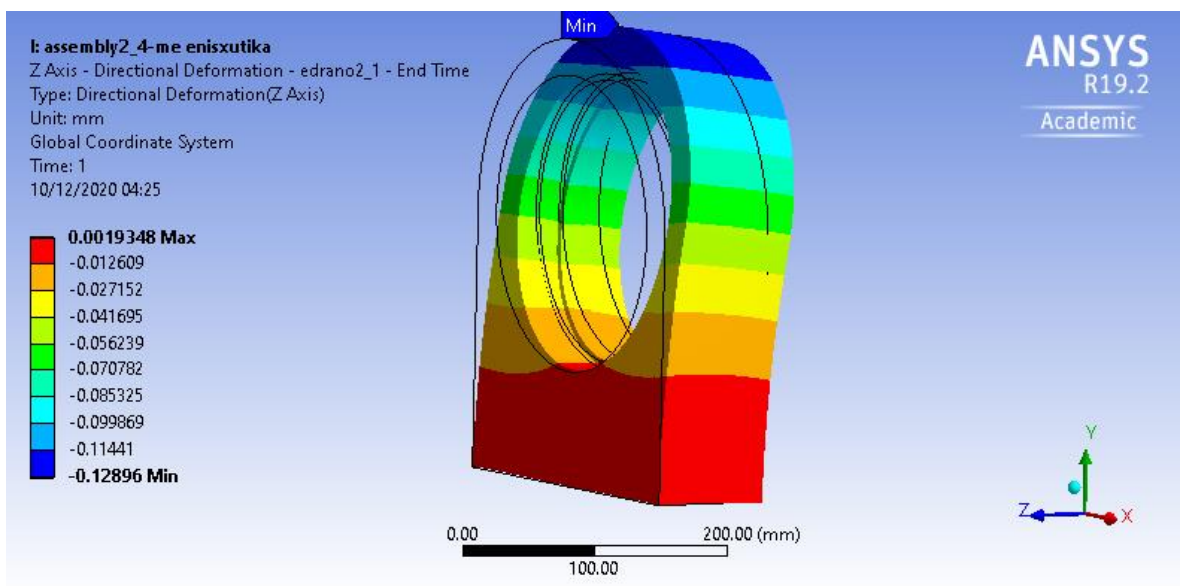


Σχήμα 4.91. Κατανομή Τάσεων Βραχίονα- 2ο Συναρμολογημένο Μοντέλο

Στη Στήριξη Κίνησης, όπως και στον βραχίονα, οι τάσεις δεν άλλαξαν σημαντικά. Η μέγιστη τάση κυμαίνεται στην περιοχή των 60 MPa (Σχήμα 4.92), με το συντελεστή ασφαλείας να είναι άνω του 4. Οι μετατοπίσεις, δηλαδή σε αυτό το σώμα οι παραμορφώσεις, φαίνεται να αυξήθηκαν ελάχιστα σε σχέση με το προηγούμενο μοντέλο (Σχήμα 4.93). Αυτό οφείλεται στην προσθήκη των ενισχυτικών και την αύξηση της ακαμψίας της Βάσης. Παρόλο που η τιμή της μέγιστης παραμόρφωσης είναι ακόμα μικρή, μπορεί να είναι αρκετή ώστε να προκαλέσει αρκετή κάμψη στο δοκίμιο. Το συμπέρασμα θα δοθεί μετά την επεξεργασία όλων των αποτελεσμάτων. Τονίζεται ότι σε όλα τα σχήματα τα σώματα στρεβλώνονται σε μεγαλύτερη κλίμακα.

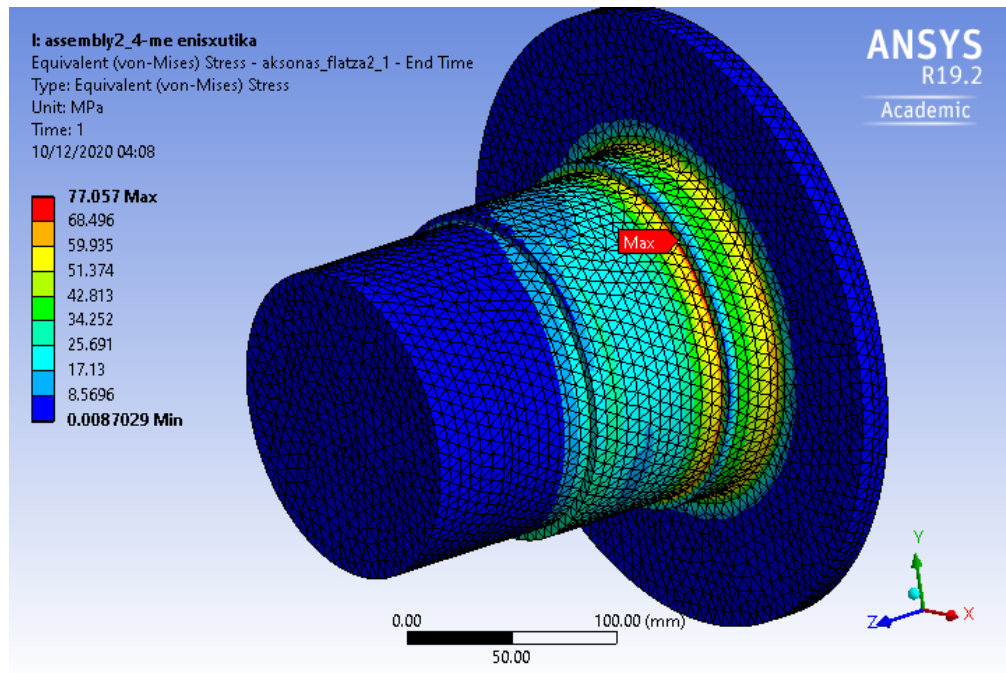


Σχήμα 4.92. Κατανομή Τάσεων Στήριξης Κίνησης - 2ο Συναρμολογημένο Μοντέλο



Σχήμα 4.93. Μετατοπίσεις Στήριξης Κίνησης - 2ο Συναρμολογημένο Μοντέλο

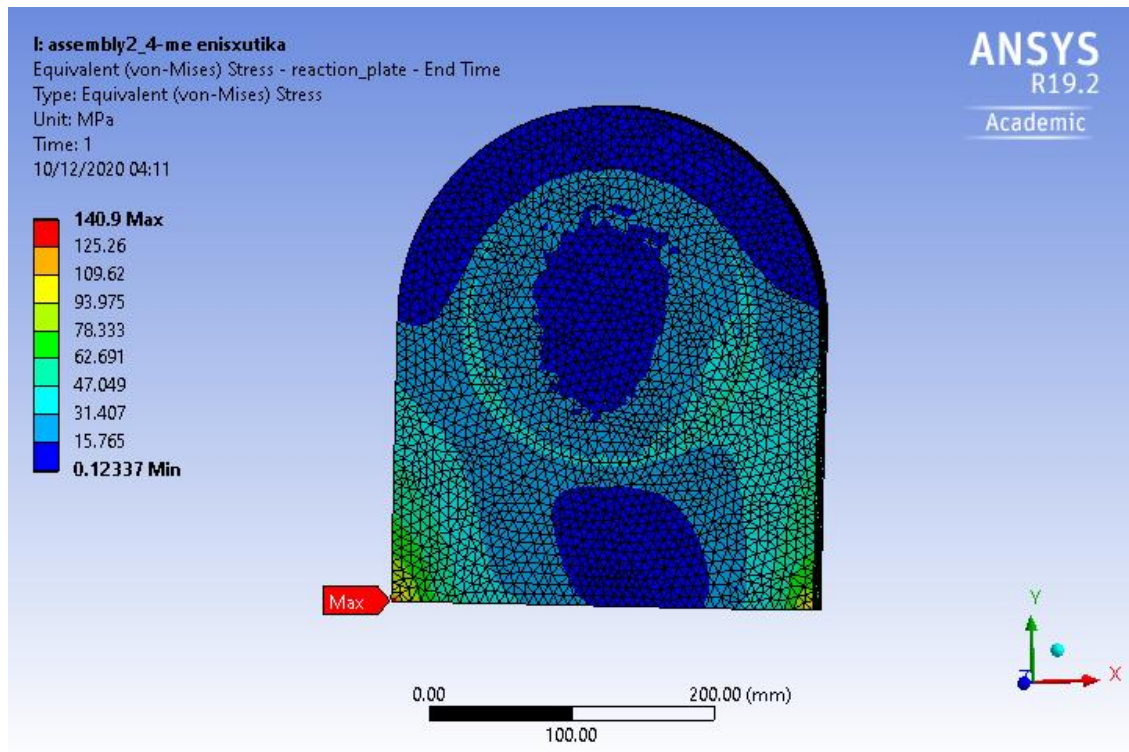
Όπως και στα άλλα δύο σώματα, ο Άξονας Πρόσδεσης έχει όμοιες τάσεις Von Mises με το προηγούμενο μοντέλο (Σχήμα 4.94). Η μεγάλη ακαμψία του οφείλεται στην διάμετρο του η οποία του εξασφαλίζει τις μικρές παραμορφώσεις που απαιτούνται. Οι μεταβολές είναι αμελητέες, άρα ο άξονας πρόσδεσης μπορεί να εισαχθεί στο τελικό μοντέλο.



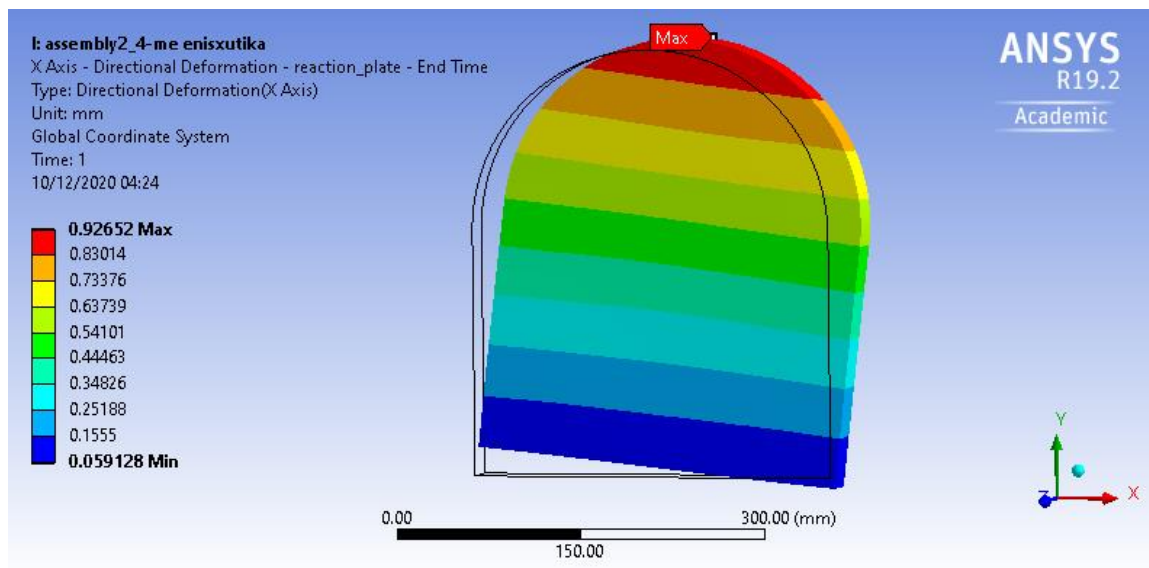
Σχήμα 4.94. Κατανομή Τάσεων Άξονα Πρόσδεσης - 2ο Συναρμολογημένο Μοντέλο

Η Στήριξη Πάκτωση δίνει μια τελείως διαφορετική εικόνα από το προηγούμενο μοντέλο. Η ενίσχυση της βάσης μείωσε τις τάσεις σε αυτή τη στήριξη στα 140 MPa. Οι περιοχές που καταπονούνται ιδιαίτερα είναι αυτές κοντά στην επαφή των 2 σωμάτων (Σχήμα 4.95). Συνεπώς επάγονται από τις παραμορφώσεις της Βάσης. Αυτό είναι λογικό, καθώς το πλάτος της στήριξης είναι πολύ μικρότερο από αυτό της Βάσης, η οποία έχει μικρότερη ακαμψία σε αυτή την κατεύθυνση. Ο συντελεστής ασφαλείας μπορεί να μην έφτασε πάνω από το 2 που στοχεύουμε, αλλά με χρήση χάλυβα υψηλής αντοχής ή μικρή αναθεώρηση του σχεδίου είναι εύκολο να φτάσει.

Οι μετατοπίσεις στον X άξονα μειώθηκαν (Σχήμα 4.96) ως αποτέλεσμα της μείωσης των παραμορφώσεων στην Βάση. Το σώμα όπως φαίνεται στο σχήμα δεν παραμορφώνεται αλλά μετατοπίζεται από τις παραμορφώσεις της Βάσης. Συνεπώς, το σώμα δεν ευθύνεται για τις τιμές των παραμορφώσεων και μπορεί να εισαχθεί στο τελικό μοντέλο με μικρές αλλαγές.



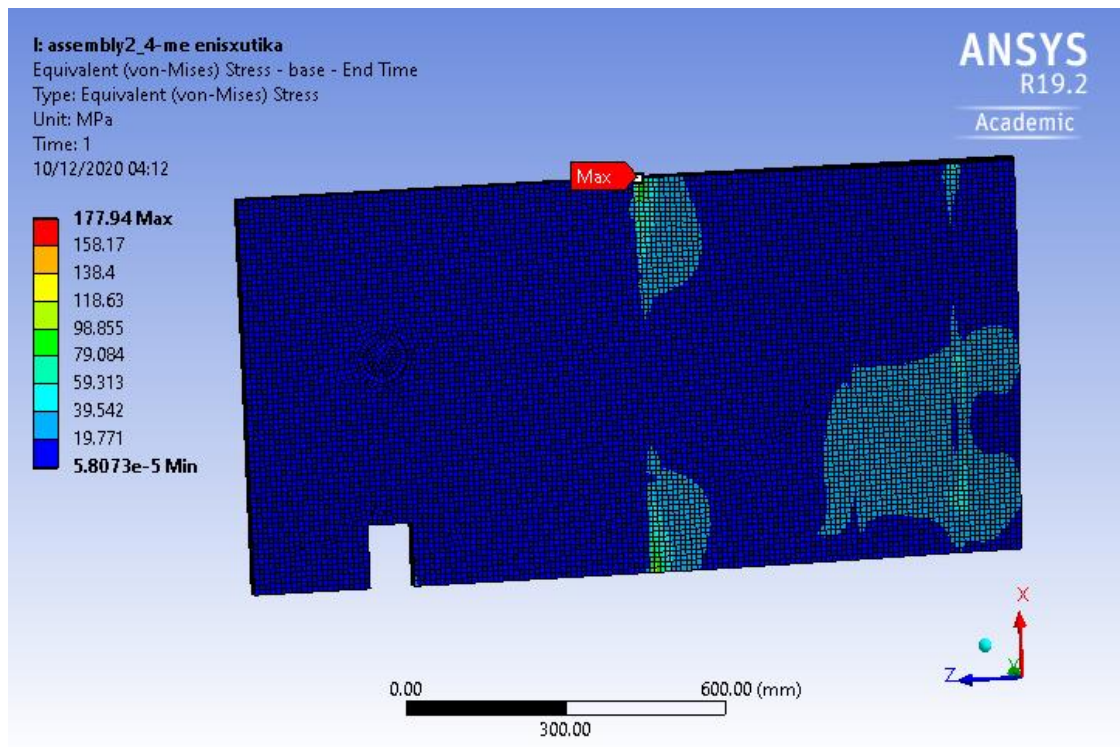
Σχήμα 4.95. Κατανομή Τάσεων Στήριξης Πάκτωσης - 2ο Συναρμολογημένο Μοντέλο



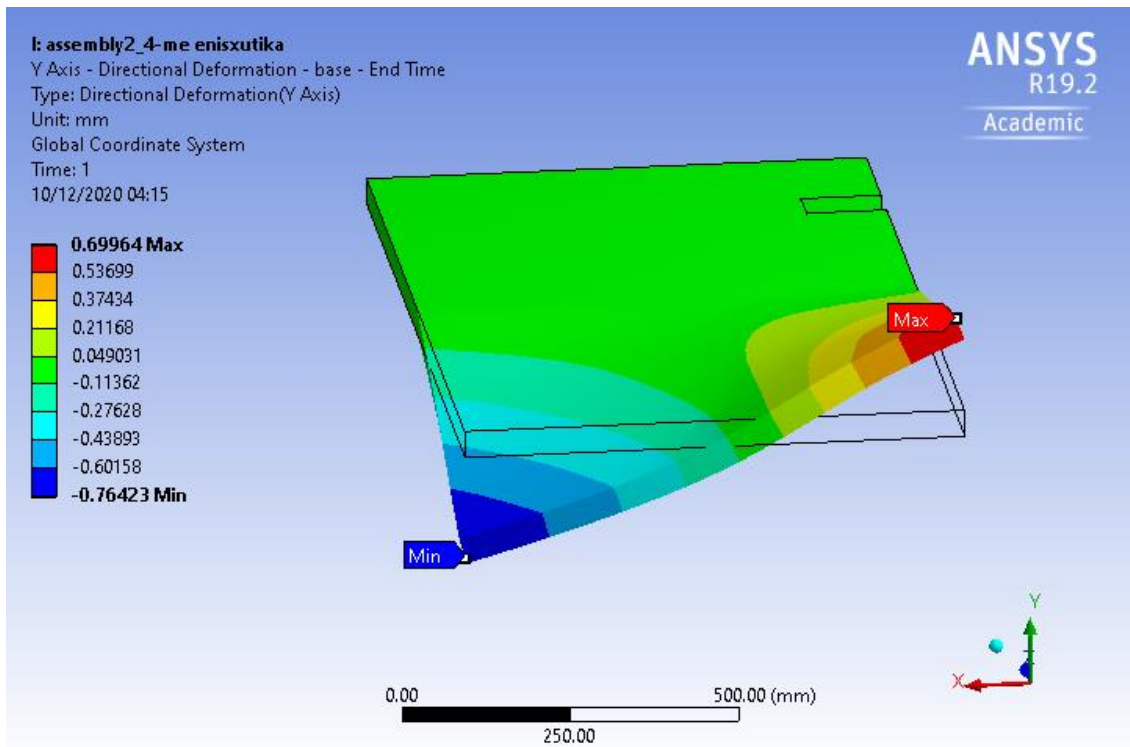
Σχήμα 4.96. Μετατοπίσεις Στήριξης Πάκτωσης - 2ο Συναρμολογημένο Μοντέλο

Συγκρίνοντας με το 1^ο μοντέλο, παραμορφώσεις και τάσεις στην Βάση έχουν μειωθεί αρκετά. Η μέγιστη τάση πλέον φτάνει τα 177.9 MPa, πέφτοντας περίπου 17 μονάδες (Σχήμα 4.97). Ο συντελεστής ασφαλείας δεν έφτασε τον στόχο του 2, αλλά δεν αποτελεί πρόβλημα. Με τη χρήση χάλυβα υψηλής αντοχής μπορεί εύκολα να το ξεπεράσει. Επίσης με την εισαγωγή των κοχλιών και την κατάργηση των πακτώσεων στο μοντέλο, οι τάσεις στα σημεία που φορτίζονται τώρα περισσότερο αναμένεται να μειωθούν.

Οι μετατοπίσεις (=παραμορφώσεις) από την άλλη μειώθηκαν ακόμα περισσότερο (Σχήμα 4.98), αλλά δεν έφτασαν σε συγκρίσιμες τιμές με αυτές της Στήριξης Πάκτωσης. Ως αποτέλεσμα, η Βάση μετατοπίζει κατά τον X και δημιουργεί τάσεις στην στήριξη. Σίγουρο είναι ότι προκαλεί ακόμα καμπτικές φορτίσεις στο δοκίμιο. Άρα δεν είμαστε ακόμα βέβαιοι για την αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης που προστέθηκε. Με την επεξεργασία των ροπών στο δοκίμιο, θα φανεί η ανάγκη ή όχι, για περαιτέρω ενίσχυση.

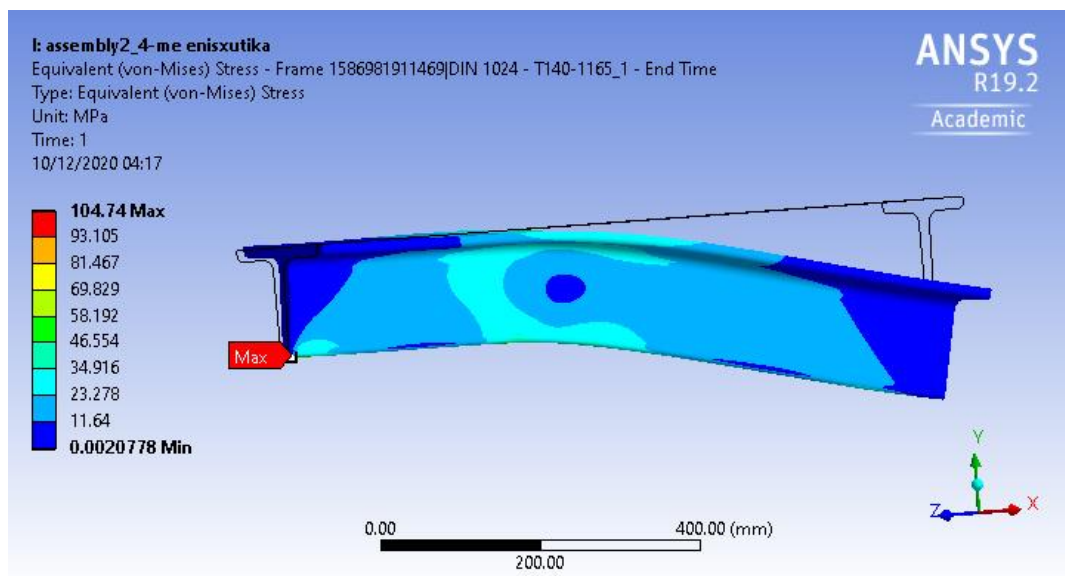


Σχήμα 4.97. Κατανομή Τάσεων Βάσης - 2ο Συναρμολογημένο Μοντέλο

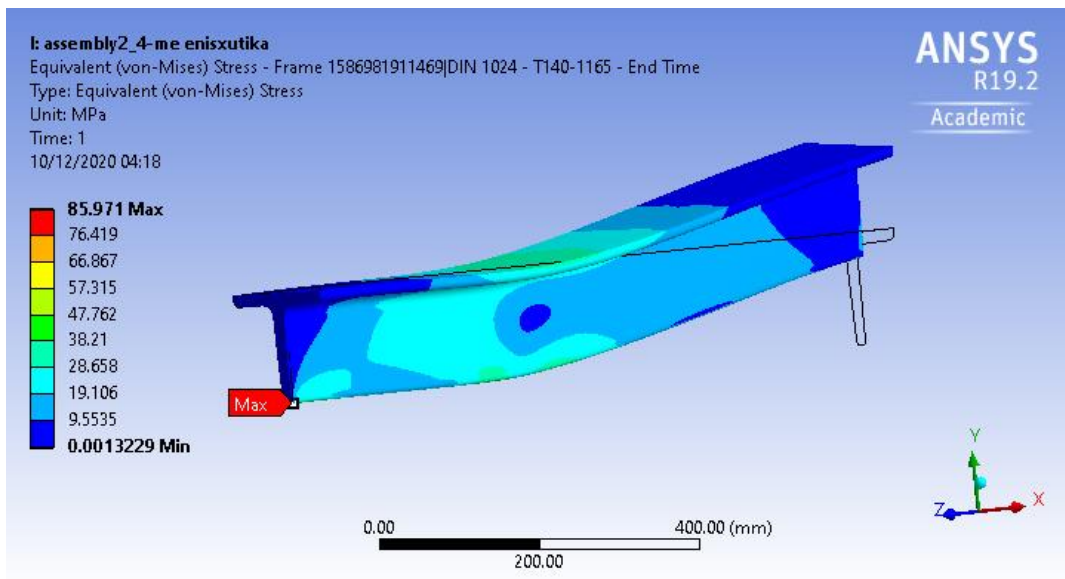


Σχήμα 4.98. Μετατοπίσεις Βάσης στον Y-Άξονα - 2^ο Συναρμολογημένο Μοντέλο

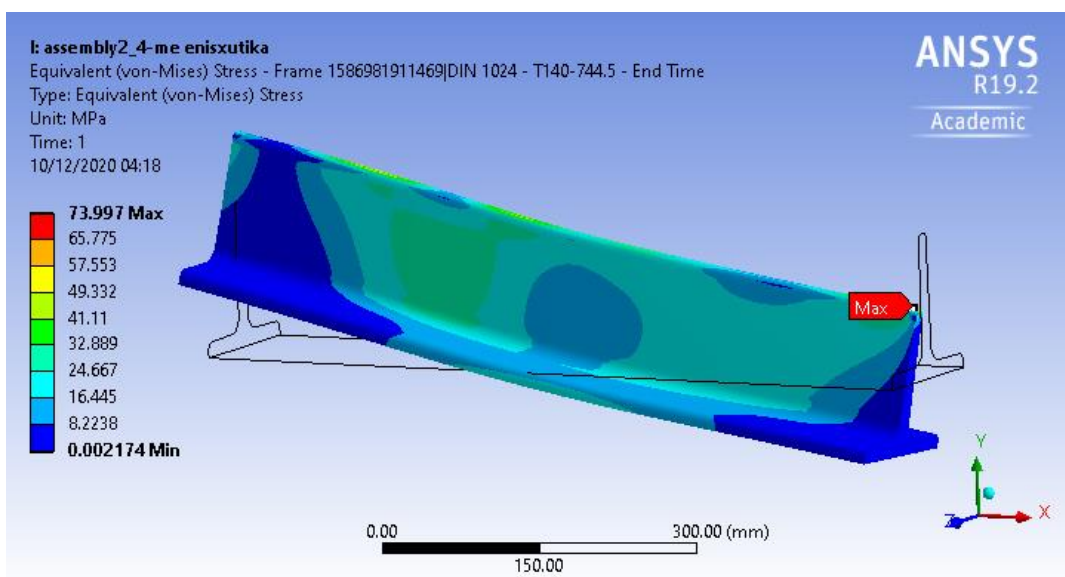
Στα Σχήμα 4.99,100,101 φαίνονται οι κατανομές των τάσεων στα ενισχυτικά που μας ενδιαφέρουν, δηλαδή τα δύο διαμήκη και το εγκάρσιο κάτω από την πάκτωση του δοκιμίου. Οι μέγιστες τάσεις τους ικανοποιούν το κριτήριο του ελάχιστου συντελεστή ασφαλείας (=2). Οι παραμορφώσεις τους είναι προφανώς αντίστοιχες των παραμορφώσεων της Βάσης, εξαιτίας των συνδέσεων πάκτωσης και γι' αυτόν τον λόγο δεν αναφέρονται. Τα υπόλοιπα εγκάρσια ενισχυτικά έχουν πολύ μικρότερες τάσεις, καθώς βρίσκονται σε περιοχές μακριά από τις φορτίσεις, οπότε δεν χρειάζεται να παρουσιαστούν.



Σχήμα 4.99. Κατανομή Τάσεων Απομακρυσμένου Διαμήκους Ενισχυτικού - 2ο Συναρμολογημένο Μοντέλο



Σχήμα 4.100. Κατανομή Τάσεων Κοντινού Διαμήκους Ενισχυτικού - 2ο Συναρμολογημένο Μοντέλο



Σχήμα 4.101. Κατανομή Τάσεων Εγκάρσιου Ενισχυτικού - 2ο Συναρμολογημένο Μοντέλο

Το εργαλείο της Ροπής Αντίδρασης αναγράφει τις συνιστώσες της ροπής που δέχεται το δοκίμιο, μέσω των αντιδράσεων στην πάκτωσή του. Σύμφωνα με τα συμπεράσματα του προηγούμενου μοντέλου, το μέγεθος των καμπτικών φορτίσεων (ροπές σε X,Y) είναι το καταλληλότερο κριτήριο αξιολόγησης της διάταξης. Σε μια δοκιμή στρέψης, η κάμψη, ενώ είναι αναπόφευκτη, είναι ανεπιθύμητη. Τα ενισχυτικά που τοποθετήθηκαν, κατάφεραν να μειώσουν την κάμψη στους άξονες X και Y (Σχήμα 4.102), σε σχέση με το προηγούμενο μοντέλο. Συγκεκριμένα στον Y άξονα, η κάμψη μειώθηκε σχεδόν κατά μια τάξη μεγέθους, σε 637 N-m ή 3.2% της μέγιστης ροπής στρέψης, έναντι των 2000 N-m της προηγούμενης. Στον X άξονα η τιμή είναι περίπου ίση, με την μέγιστη κάμψη να φτάνει τα 635 N-m ή 3.2% της

μέγιστης ροπής στρέψης. Προφανώς οι τιμές αυτές εξαρτώνται και από το υλικό του δοκιμίου. Όμως σε αυτό το στάδιο της μελέτης, η κάμψη αυτή θεωρείται αποδεκτή.

Details of "All - Moment Reaction - Bonded - reaction_plate To ..."	
Definition	
Type	Moment Reaction
Location Method	Contact Region
Contact Region	Bonded - reaction_plate To dokimio
Orientation	Global Coordinate System
Summation	Centroid
Extraction	Contact (Underlying Element)
Suppressed	No
Options	
Result Selection	All
<input type="checkbox"/> Display Time	End Time
Results	
<input type="checkbox"/> X Axis	6.3564e+005 N-mm
<input type="checkbox"/> Y Axis	-6.0372e+005 N-mm
<input type="checkbox"/> Z Axis	-1.9715e+007 N-mm
<input type="checkbox"/> Total	1.9734e+007 N-mm
Maximum Value Over Time	
Minimum Value Over Time	
Information	

Σχήμα 4.102. Εργολείο Ροπής Αντίδρασης Πάκτωσης Δοκιμίου

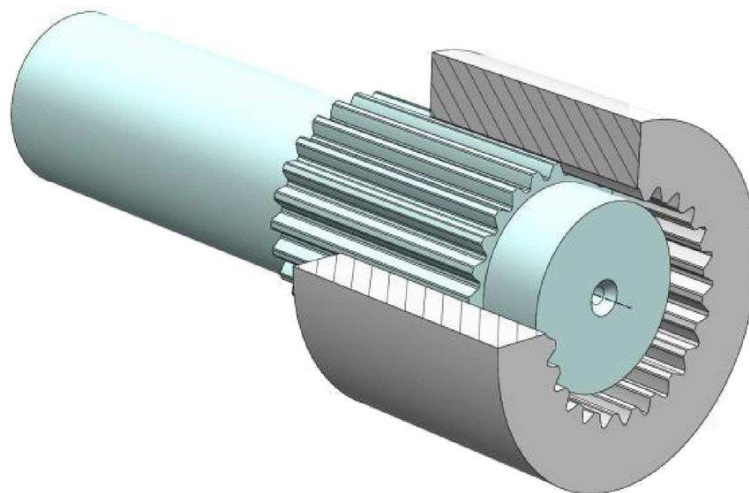
5. Συνδέσεις & Ανάλυση Τελικής Συναρμολογημένης Διάταξης

Σε αυτό το κεφάλαιο θα προταθούν οι συνδέσεις μεταξύ των μερών της διάταξης, θα σχεδιαστούν και θα υπολογισθεί η αντοχή τους στο Inventor και στην συνέχεια θα μοντελοποιηθούν στο ANSYS Workbench 19.2. Το κεφάλαιο κλείνει με την αξιολόγηση της διάταξης, μετά από επεξεργασία των αποτελεσμάτων της στατικής ανάλυσης.

5.1. Σύνδεση Βραχίονα-Άξονα Πρόσδεσης

Η σύνδεση Βραχίονα-Άξονα Πρόσδεσης αποτελεί ουσιαστικά μια πάκτωση μεταξύ κυλινδρικών επιφανειών. Ομοιάζει με συνδέσεις μεταξύ κοίλων και συμπαγών αξόνων που συναντώνται σε διατάξεις μετάδοσης κίνησης. Η διαφορά με τις συνήθεις συνδέσεις είναι οι πολύ χαμηλές στροφές και η μεγάλη ροπή και ακτινική δύναμη. Τα χαρακτηριστικά που αναζητούμε σε αυτή είναι ικανοποιητική αντοχή με ένα βαθμό ασφαλείας, μηδενικές σχετικές κινήσεις, ευκολία συναρμολόγησης και απλότητα κατασκευής. Στην συνέχεια θα δοθούν δύο πιθανές συνδέσεις και θα γίνει η επιλογή της καταλληλότερης.

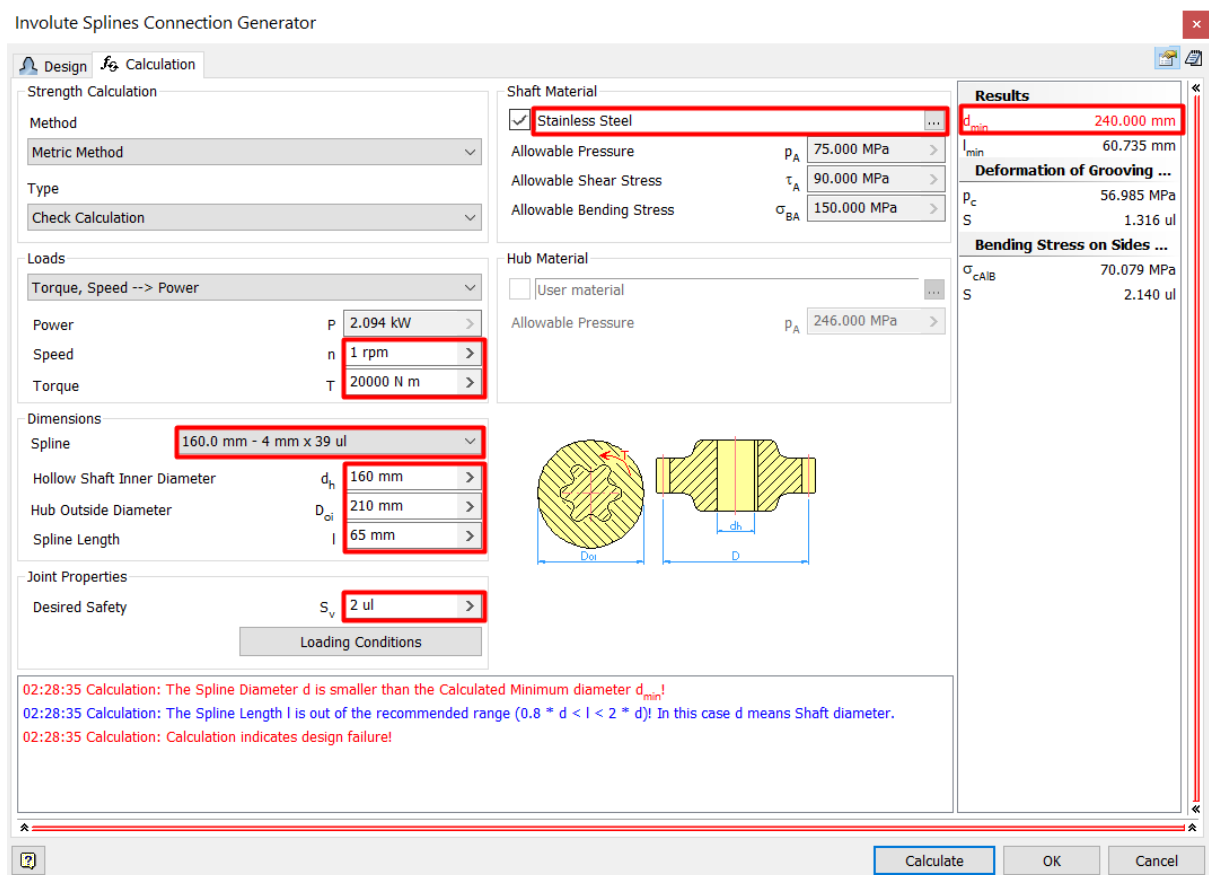
Η πιο εύκολη σύνδεση στην συναρμολόγηση και αποσυναρμολόγηση, η οποία χρησιμοποιείται ευρέως σε συνδέσεις αξόνων είναι η σύνδεση μορφής. Στην συγκεκριμένη εφαρμογή, όπου ασκούνται μεγάλες πιέσεις μεταξύ των επιφανειών, προτιμάται η χρήση πολύσφηνου (Σχήμα 5.1). Το πολύσφηνο, σε σχέση με τις απλές σφήνες, μπορεί να μεταφέρει μεγαλύτερες φορτίσεις, εξαιτίας της μεγαλύτερης επιφάνειας επαφής των 2 σωμάτων. Οι οδόντες των πολύσφηνων δέχονται μικρότερες πιέσεις με αποτέλεσμα την μικρότερη φθορά των 2 επιφανειών. Από την άλλη, το κόστος παραγωγής τέτοιων κομματιών είναι υψηλό και η ευθυγράμμιση της σύνδεσης δεν είναι ιδιαίτερα εύκολη.



Σχήμα 5.1. Spline Coupling

Οι οδόντες συναντώνται σε δύο μορφές, την “parallel spline” (με ευθείες πλευρές) και την “involute spline”. Στα αρχεία assembly του Inventor, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να σχεδιάσει και να υπολογίσει την αντοχή τέτοιων συνδέσεων αυτόματα. Αυτές βρίσκονται στην

καρτέλα “Design”, στην ομάδα “Power Transmission”. Αρχικά επιλέγουμε μια από τις δύο μορφές πολύσφηνου και στην συνέχεια την καρτέλα Calculation, για να ελέγξουμε την αντοχή της σύνδεσης, εισάγοντας τα χαρακτηριστικά της. Πρώτα πληκτρολογούμε την ροπή και την μέγιστη ταχύτητα περιστροφής, που είναι ίσες με 20000 N-m και 1 rpm αντίστοιχα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.2. Στις διαστάσεις, επιλέγεται μια spline με διάμετρο ίση με αυτή του άξονα. Ταυτόχρονα επιλέχθηκε ένα μέσο πλήθος δοντιών, ώστε το ελάχιστο επιτρεπόμενο μήκος της σύνδεσης να ισούται περίπου με το επιθυμητό. Στην συνέχεια εισάγονται διαστάσεις των εν λόγω σωμάτων για τους υπολογισμούς και ο επιθυμητός συντελεστής ασφαλείας. Τέλος επιλέγεται το υλικό των σωμάτων. Το τυπολόγιο των υπολογισμών δίνεται στο Παράρτημα Α.



Σχήμα 5.2. Υπολογισμοί "Involute Spline Coupling"

Από τους υπολογισμούς του Inventor, φαίνεται πως το κύριο πρόβλημα της σύνδεσης είναι η διάμετρος του Άξονα Πρόσδεσης, που πρέπει να ισούται τουλάχιστον με 240 mm. Αυτή η διάμετρος είναι απαγορευτική για τον άξονα, καθώς περιορίζεται ακτινικά από την κολώνα του test frame. Συνεπώς η σύνδεση με πολύσφηνου δεν είναι δυνατή, λόγω χωροταξικών περιορισμών από την μηχανή εφελκυσμού.

Η δεύτερη και μόνη επιλογή που απομένει είναι η σύνδεση τριβής. Συχνή εφαρμογή βρίσκεται μεταξύ έλικας και άξονα στα πλοία και στην τοποθέτηση των ρουλεμάν στις εδράσεις τους. Στην ουσία η σύνδεση δημιουργείται όταν οι δύο συνδεόμενες επιφάνειες ασκούν υψηλές πιέσεις η μια στην άλλη, με ή χωρίς την παρουσία κοχλίας. Η χρήση κοχλιών στην συγκεκριμένη εφαρμογή δεν αποτελεί λύση καθώς ο βραχίονας δεν έχει κυλινδρικό σχήμα

εξωτερικά. Εάν δεν τοποθετηθούν κοχλίες περιμετρικά όλης της επιφάνειας, υπάρχει πιθανότητα άνιση κατανομής των πιέσεων. Ως αποτέλεσμα, θα επέλθει λύση της σύνδεσης, λόγω θραύσης των κοχλιών από διάτμηση. Επίσης η χρήση κοχλιών συνεπάγεται δημιουργία οπών σε υψηλά φορτισμένα σώματα όπως ο Άξονας Πρόσδεσης. Αστοχία της σύνδεσης επομένως θα σημαίνει καταστροφή των σπειρωμάτων και αχρήστευση του άξονα.

Χωρίς κοχλία, τα συνδεόμενα μέρη κατασκευάζονται με κατάλληλες ανοχές ώστε να δημιουργείται μια σφιχτή συναρμογή μεταξύ τους. Για να επιτευχθεί η σύνδεση, συνήθως ο συμπαγής άξονας (Άξονας Πρόσδεσης) ψύχεται για να συσταλεί και εισέρχεται στην οπή (του Βραχίονα), με την εφαρμογή πίεσης (πρεσαριστά). Η σφιχτή συναρμογή μπορεί να συνδυαστεί και με σημειακές συγκολλήσεις περιμετρικά της σύνδεσης για αποφυγή αξονικών μετατοπίσεων. Ο υπολογισμός της αντοχής της σύνδεσης αυτής είναι αδύνατος χωρίς πειραματικές δοκιμές υπό κλίμακα, λόγω έλλειψης βιβλιογραφίας για τέτοιου είδους συνδέσεις. Ο μόνος τρόπος μοντελοποίησης της σύνδεσης τριβής στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, εν απουσία δεδομένων, είναι η πάκτωση. Συνεπώς στο τελικό μοντέλο θα εξακολουθεί να υφίσταται πακτωμένη επαφή μεταξύ των δύο σωμάτων.

5.2. Κοχλιοσυνδέσεις

Το πρόγραμμα του Inventor δίνει την δυνατότητα στο χρήστη να δημιουργήσει κοχλιοσυνδέσεις μεταξύ των μερών που θα επιλέξει, σε ένα αρχείο “assembly”. Αρκεί να οριστεί το κέντρο της σύνδεσης με συντεταγμένες, ή κέντρο κύκλου, ή σημείο, ή κάποια οπή. Η οπή της σύνδεσης, αν δεν προϋπάρχει, δημιουργείται αυτόματα, είτε είναι διαμπερής, είτε τυφλή. Στην συνέχεια δίνεται η δυνατότητα εισαγωγής των εξαρτημάτων της σύνδεσης (κοχλίας, περικόχλιο, ροδέλα κ.ά.), επιλέγοντας από την πλήρη βιβλιοθήκη της Autodesk. Υπάρχει ακόμα η δυνατότητα διαμόρφωσης εσωτερικής έδρασης της κεφαλής του κοχλίας, για να μην προεξέχει από την επιφάνεια σύσφιξης. Μετά την δημιουργία της σύνδεσης, το πρόγραμμα υπολογίζει την αντοχή της, βάση των δυνάμεων που ασκούνται σε αυτή και άλλων παραμέτρων που θα δοθούν στην συνέχεια. Η μεθοδολογία και οι τύποι που θα χρησιμοποιηθούν δίνονται στο Παράρτημα Β.

Στα υποκεφάλαια που ακολουθούν θα δοθούν, οι συνδέσεις των στηρίξεων με την βάση και της βάσης με το τραπέζι της μηχανής εφελκυσμού. Οι δυνάμεις που εισέρχονται στους υπολογισμούς, έχουν αντληθεί από τις πακτώσεις του προηγούμενου μοντέλου της διάταξης. Επειδή όμως η κατανομή των πιέσεων στις συνδεόμενες επιφάνειες δεν είναι σταθερή, λογικό είναι οι φορτίσεις σε κάθε κοχλία να διαφέρουν. Αρκεί λοιπόν να υπολογιστεί η αντοχή του κοχλίας με την μεγαλύτερη φόρτιση. Ο εντοπισμός των κοχλιών αυτών, για κάθε σύνδεση, γίνεται αφού λυθεί το τελικό μοντέλο, το οποίο θα δοθεί στο τέλος του κεφαλαίου. Συνεπώς τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την δημιουργία των κοχλιοσυνδέσεων είναι:

- Σχεδίαση και υπολογισμός αντοχής των τριών συνδέσεων στο Inventor, σύμφωνα με τις δυνάμεις που αναπτύσσονται στις πακτώσεις του συναρμολογημένου μοντέλου.
- Δημιουργία και επίλυση τελικού μοντέλου, όπου υπολογίζονται οι φορτίσεις του κάθε κοχλίας ξεχωριστά.

- Εντοπισμός του κοχλία με την υψηλότερη συνισταμένη φόρτιση για κάθε μια από τις τρεις συνδέσεις.
- Εκ νέου υπολογισμός αντοχής των συνδέσεων στο Inventor, με βάση τους κοχλίες με τις υψηλότερες φορτίσεις.
- Αναθεώρηση των συνδέσεων, όπου απαιτείται.

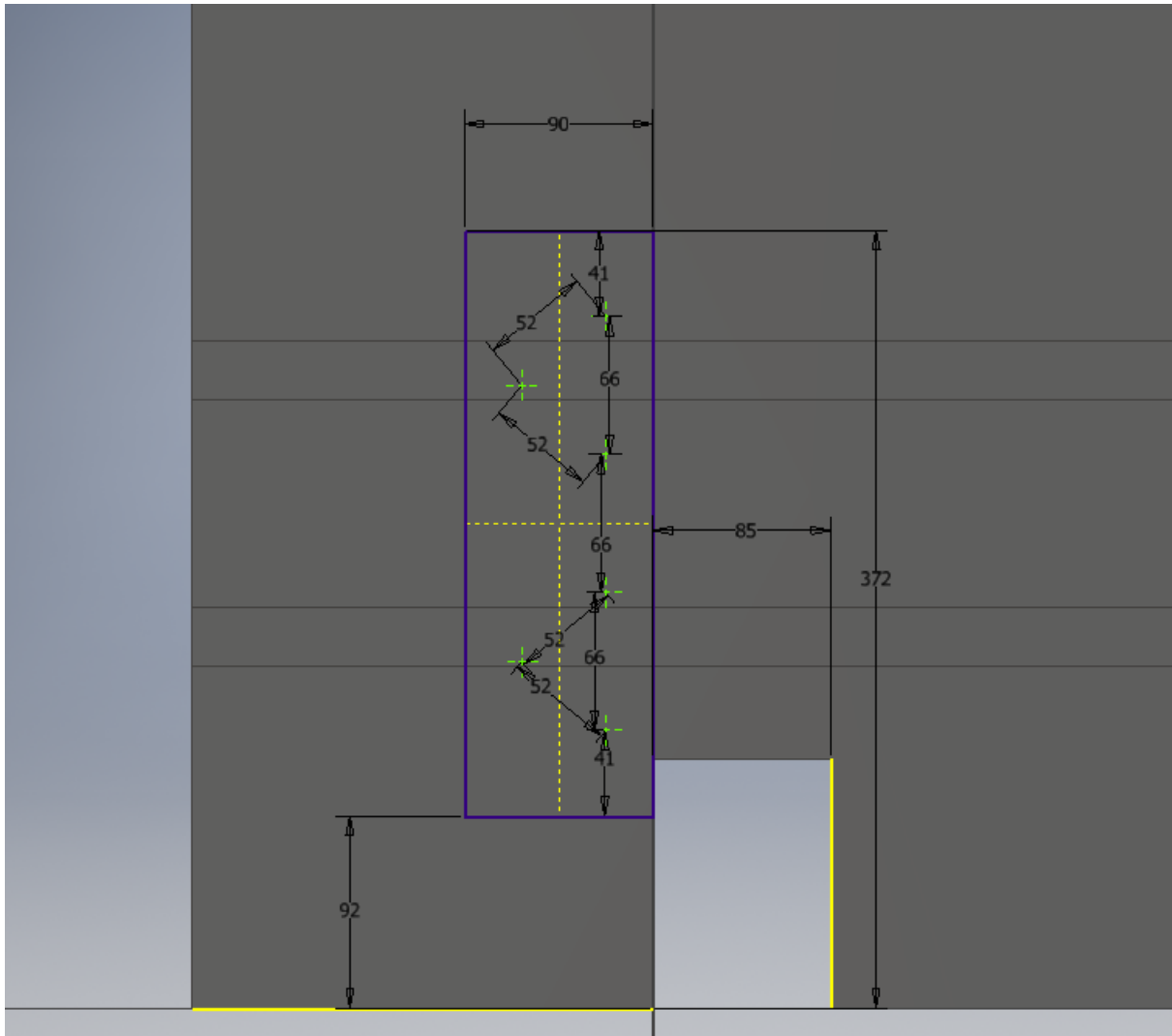
Επειδή αυτή είναι μια επαναληπτική διαδικασία, θεωρείται σκόπιμο να δοθούν μόνο οι αρχικοί και τελικοί υπολογισμοί, που μας ενδιαφέρουν για το τελικό μοντέλο.

5.2.1. Στήριξη Κίνησης

Η Στήριξη Κίνησης, εξαιτίας του μεγάλου πάχους της, μπορεί να συνδεθεί με φυτευτούς κοχλίες στην Βάση. Για να μην προεξέχουν και ακουμπούν στο τραπέζι, χρειάζεται διαμόρφωση με εσοχή που θα φιλοξενεί την ροδέλα και την κεφαλή του κοχλία. Ο αριθμός τους και η διάμετρος τους είναι μεγέθη που αλληλοεπηρεάζονται. Επειδή όμως η επιφάνεια σύνδεσης δεν είναι απεριόριστη, αποφασίστηκε να καθοριστεί πρώτα το πλήθος των κοχλιών και ύστερα, με βάση τους υπολογισμούς, να βρεθεί η κατάλληλη διάμετρος.

Η θέση των κοχλιών στην συνδεδεμένη επιφάνεια πρέπει να είναι ανάλογη με την κατανομή της δύναμης που ασκείται. Η διάταξη, εκτός από στατικές στρεπτικές δοκιμές, θα έχει την δυνατότητα και για δοκιμές στρεπτικής κόπωσης. Ως αποτέλεσμα, το έμβολο θα κινείται προς δύο κατευθύνσεις. Κατά την έκταση του εμβόλου (κίνηση προς τα κάτω), οι επιφάνειες σύνδεσης θλίνονται μεταξύ τους, συνεπώς η φόρτιση των κοχλιών είναι μικρή. Στην αντίθετη κίνηση (σύμπτυξη του εμβόλου), οι επιφάνειες θέλουν να απομακρυνθούν, δηλαδή οι κοχλίες εφελκύνονται. Μάλιστα επειδή η δύναμη εφαρμόζεται έκκεντρα της στήριξης και τα σώματα είναι παραμορφώσιμα, η κατανομή της στην επιφάνεια σύνδεσης είναι αυξημένη όσο πλησιάζουμε προς το σημείο εφαρμογής της.

Ο αριθμός των κοχλιών είναι έξι (6) για την συγκεκριμένη σύνδεση και η τοποθέτηση τους είναι ασύμμετρη ως προς το πάχος της στήριξης, για να κατανεμηθούν καλύτερα οι εφελκυστικές δυνάμεις, κατά την άνοδο του εμβόλου. Στο Σχήμα 5.3 φαίνεται σκαρίφημα με τα σημεία, με βάση τα οποία έγινε η τοποθέτηση των κοχλιών. Αναλυτικό σχέδιο των μερών της διάταξης θα δοθεί στο τέλος του υποκεφαλαίου. Στην συνέχεια, στο “assembly” της συναρμολογημένης διάταξης, κατευθυνόμαστε στην καρτέλα του “Design” και επιλέγουμε “Bolted Connection”. Επιλέγουμε σύνδεση με τυφλή οπή (Blind Connection Type) και στην τοποθέτηση πάνω σε σημεία (Placement-On point). Έπειτα επιλέγουμε το επίπεδο που ξεκινάει η διαμπερής οπή και το επίπεδο που ξεκινάει η τυφλή. Το μήκος του κοχλία θέλουμε να είναι όσο μεγάλο επιτρέπει η γεωμετρία για να κατανέμονται σε μεγαλύτερη επιφάνεια οι τάσεις στο σπείρωμα.

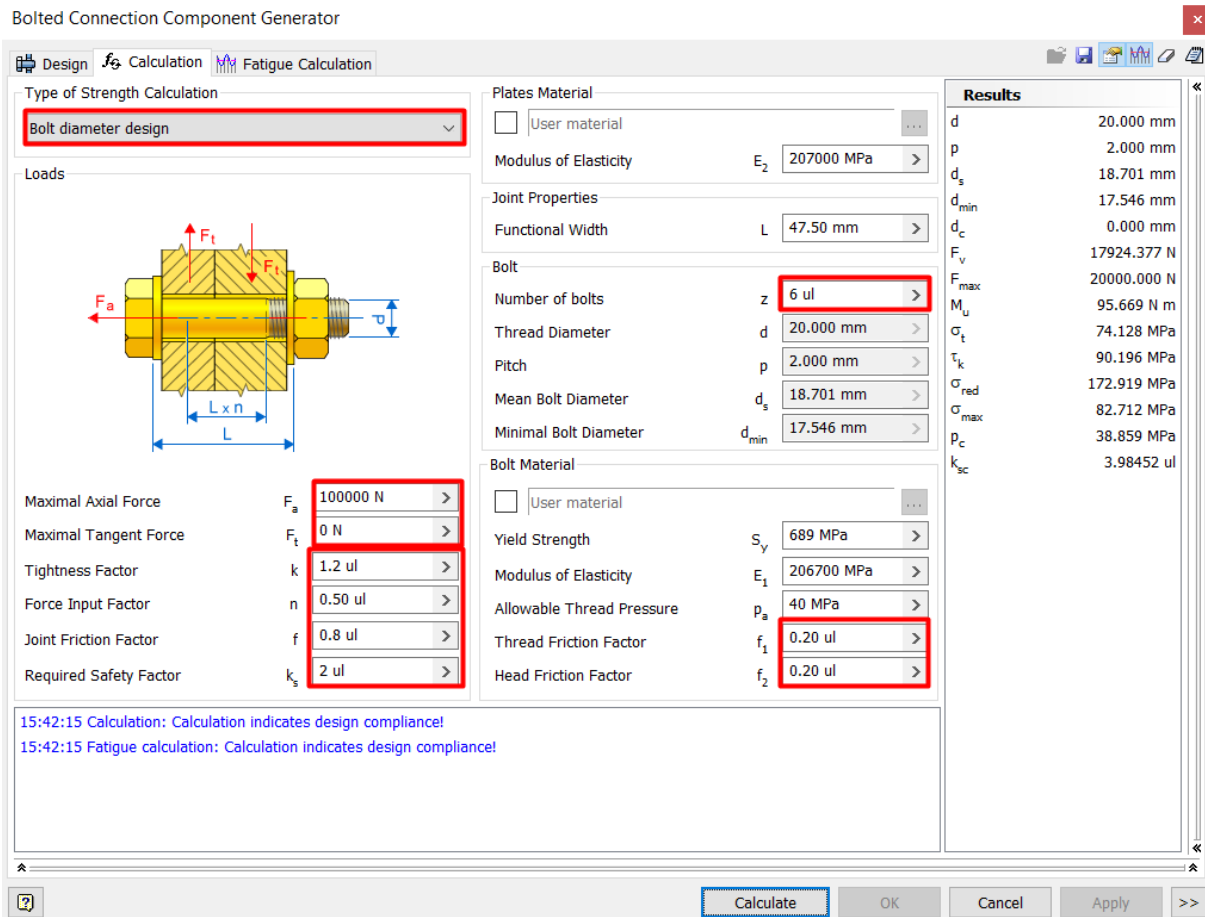


Σχήμα 5.3. Σκαρίφημα Σημείων Εισαγωγής Κοχλιών Στήριξης Κίνησης

Η διάμετρος υπολογίζεται αυτόματα στους υπολογισμούς (Σχήμα 5.4). Στην καρτέλα “Calculation” εισάγουμε την μέγιστη αξονική και μέγιστη διατμητική δύναμη των κοχλιών. Σύμφωνα με το προηγούμενο μοντέλο, αυτές οι δυνάμεις ισούνται με 100 kN και 0 αντίστοιχα. Οι υπόλοιπες παράμετροι, που επιλέγονται σύμφωνα με το Παράρτημα Β, είναι:

- Συντελεστής Σύσφιξης $k=1.2$
- Συντελεστής Δύναμης $n=0.75$
- Συντελεστής Τριβής Επιφανειών $f=0.8$
- Επιθυμητός Συντελεστής Ασφαλείας $k_s=2$
- Συντελεστής Τριβής Σπειρώματος $f_1=0.2$
- Συντελεστής Τριβής Κεφαλής $f_2=0.2$

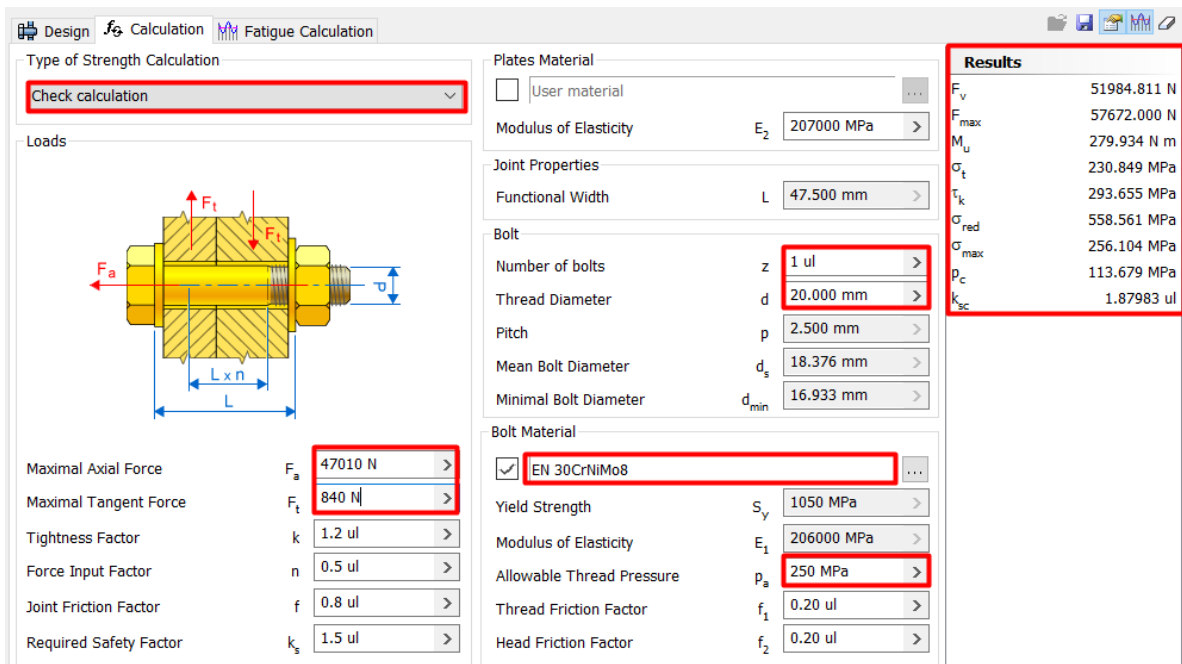
Προφανώς όλα τα υλικά της σύνδεσης είναι χαλύβδινα, για τα οποία ο συντελεστής τριβής σύμφωνα με τους τύπους του Inventor θεωρείται ίσος με 0.8. Όμως, στις επιφάνειες της κεφαλής και του σπειρώματος εφαρμόζουμε λιπαντικό, ώστε να μειωθούν οι επαγόμενες τάσεις στους κοχλίες. Άλλωστε δεν υπάρχει κίνδυνος λύσης της σύνδεσης, διότι τα μέρη δεν στρέφονται και οι δονήσεις θεωρούνται μηδενικές.



Σχήμα 5.4. Αρχικοί Υπολογισμοί Αντοχής Κοχλιοσύνδεσης Στήριξης Κίνησης

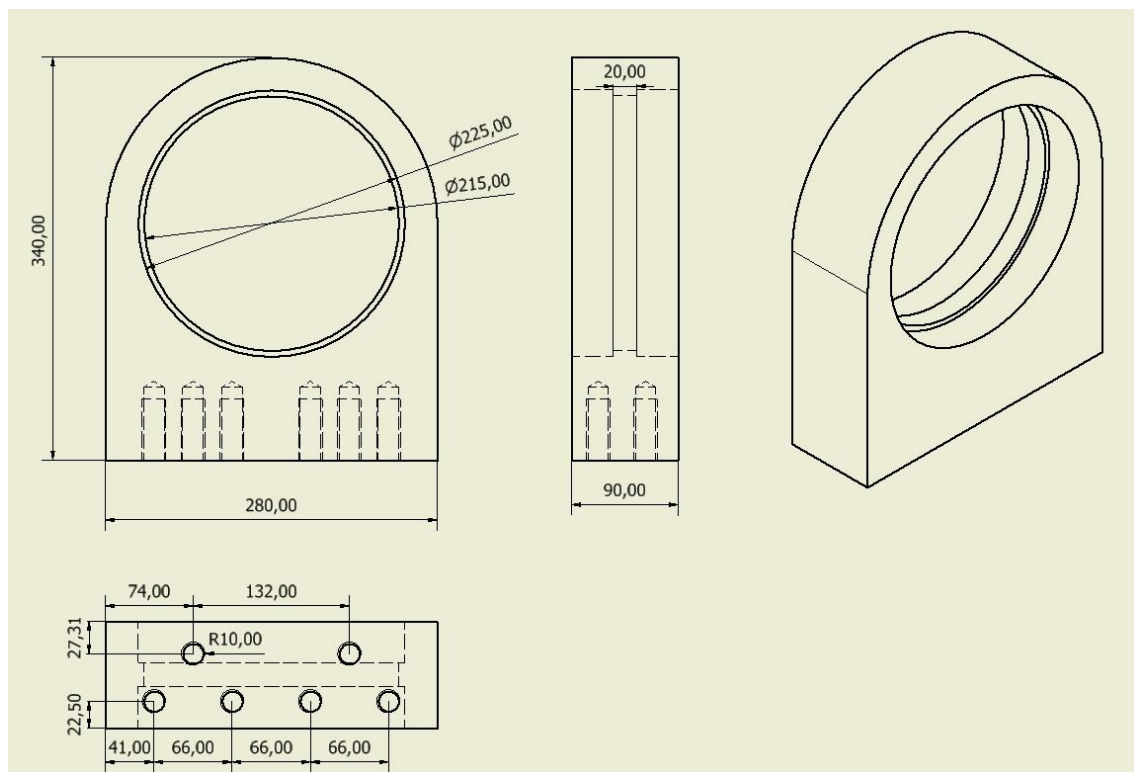
Όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα, για το προεπιλεγμένο υλικό κοχλία (Grade 8.8), επιτυγχάνεται συντελεστής ασφαλείας 4 με 6 κοχλίες, διαμέτρου 20 mm. Ο κάθε κοχλίας υποτίθεται ότι δέχεται μέγιστη συνισταμένη δύναμη 20 kN και αναπτύσσει συνολικές τάσεις $\sigma_{red}=172.9$ MPa. Αυτοί ήταν οι αρχικοί υπολογισμοί, πριν δημιουργηθεί το τελικό μοντέλο.

Με την επίλυση του τελικού μοντέλου, στο οποίο το έμβολο ανεβαίνει, η κατανομή της δύναμης σε κάθε κοχλία αλλάζει ανάλογα με την θέση της. Η μέγιστη εφελκυστική και διατμητική δύναμη που δέχεται ο πιο καταπονημένος κοχλίας αυτής της σύνδεσης, με στρογγυλοποίηση προς τα άνω, ισούται τώρα με 47010 N και 840 N αντίστοιχα. Εισάγουμε τα νέα δεδομένα στους υπολογισμούς του Inventor, αλλάζοντας το υλικό του κοχλία σε Grade 12.9 (Σχήμα 5.5). Ο νέος συντελεστής ασφαλείας που επιτυγχάνεται είναι λίγο μικρότερος από το 2 που θέσαμε ως στόχο για την διάταξη, αλλά αρκεί. Οι συνολικές τάσεις πλέον ανέρχονται στα 558.6 MPa από συνισταμένη μέγιστη δύναμη 57672 N. Εφόσον η αντοχή του πιο καταπονημένου κοχλία αυτής της σύνδεσης είναι επαρκής, είναι ασφαλές να υποθέσουμε το ίδιο και για τους υπόλοιπους 5.



Σχήμα 5.5 Τελικοί Υπολογισμοί Αντοχής Κοχλιοσύνδεσης Στήριξης Κίνησης

Το νέο διαστασιολογημένο σχέδιο της Στήριξης Κίνησης με τις τυφλές οπές για την σύνδεση με την Βάση φαίνεται στο Σχήμα 5.6.

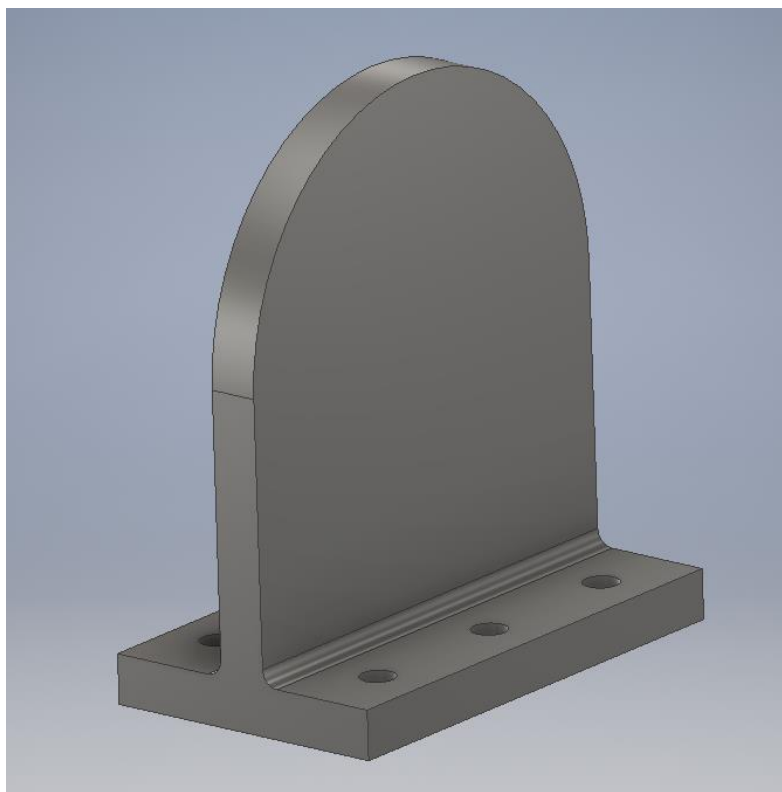


Σχήμα 5.6. Νέο Διαστασιολογημένο Σχέδιο Στήριξης Κίνησης

5.2.2. Στήριξη Πάκτωσης

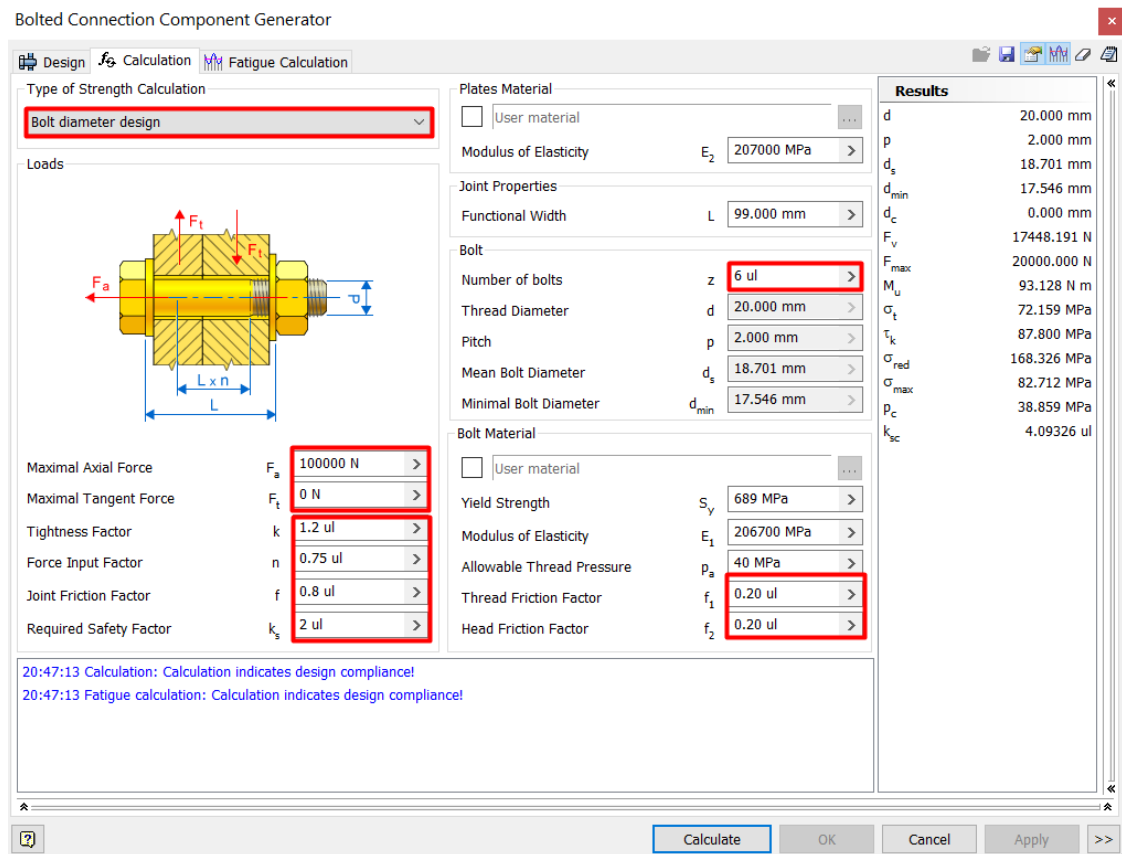
Στην σύνδεση της Στήριξης Πάκτωσης, όπως και στην άλλη στήριξη, έγινε μια αρχική εκτίμηση της αντοχής χωρίς να γνωρίζουμε την κατανομή της δύναμης στην επιφάνεια, δηλαδή θεωρώντας τα σώματα άκαμπτα. Μετά την μοντελοποίηση με την αρχική σχεδίαση της σύνδεσης και την επίλυση του συστήματος, λάβαμε νέα δεδομένα για την κατανομή της δύναμης στον κάθε κοχλία. Στην συνέχεια επιλέξαμε τον πιο επιβαρυσμένο, με βάση τη φόρτισή του και ελέγξαμε εκ νέου την αντοχή του. Επειδή η φόρτιση και αυτής της σύνδεσης, σύμφωνα με το προηγούμενο μοντέλο είναι αξονική και ίση με 100 kN, η αρχική εκτίμηση αναμένεται όμοια με αυτή της Στήριξης Κίνησης. Ανατρέχοντας στα δεδομένα της σύνδεσης που προηγήθηκε, παρατηρούμε ότι 6 κοχλίες είναι αρκετοί για το μέγεθος της δύναμης.

Η Στήριξη Πάκτωσης είναι ουσιαστικά ένα έλασμα πάχους 30 mm και πλάτους 300 mm. Δεν είναι εφικτό λοιπόν να τοποθετηθούν με κάποιο τρόπο 6 φυτευτοί κοχλίες, που αναμένεται να έχουν διάμετρο 20 mm τουλάχιστον, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της προηγούμενης σύνδεσης. Επίσης τα εγκάρσια ενισχυτικά της Βάσης βρίσκονται ακριβώς κάτω από την στήριξη, οπότε αποτρέπουν την σύνδεση με φυτευτούς κοχλίες απευθείας στο έλασμα. Συνεπώς το σχέδιο της στήριξης αυτής χρίζει αναθεώρησης. Ο πιο εύκολος τρόπος να αυξηθεί η επιφάνεια της σύνδεσης, που έρχεται σε επαφή με την βάση, είναι η τοποθέτηση ενός ακόμη ελάσματος, κάθετα στο αρχικό. Η θέση του πρέπει να είναι συμμετρική ως προς το πάχος, ώστε οι κοχλίες να μοιράζονται εκατέρωθεν της πάκτωσης. Τα πάχη των ελασμάτων είναι ίσα και η σύνδεση τους θα γίνει με ηλεκτροσυγκόλληση. Η νέα μορφή της στήριξης φαίνεται στο Σχήμα 5.7.



Σχήμα 5.7. Νέα Όψη Στήριξης Πάκτωσης

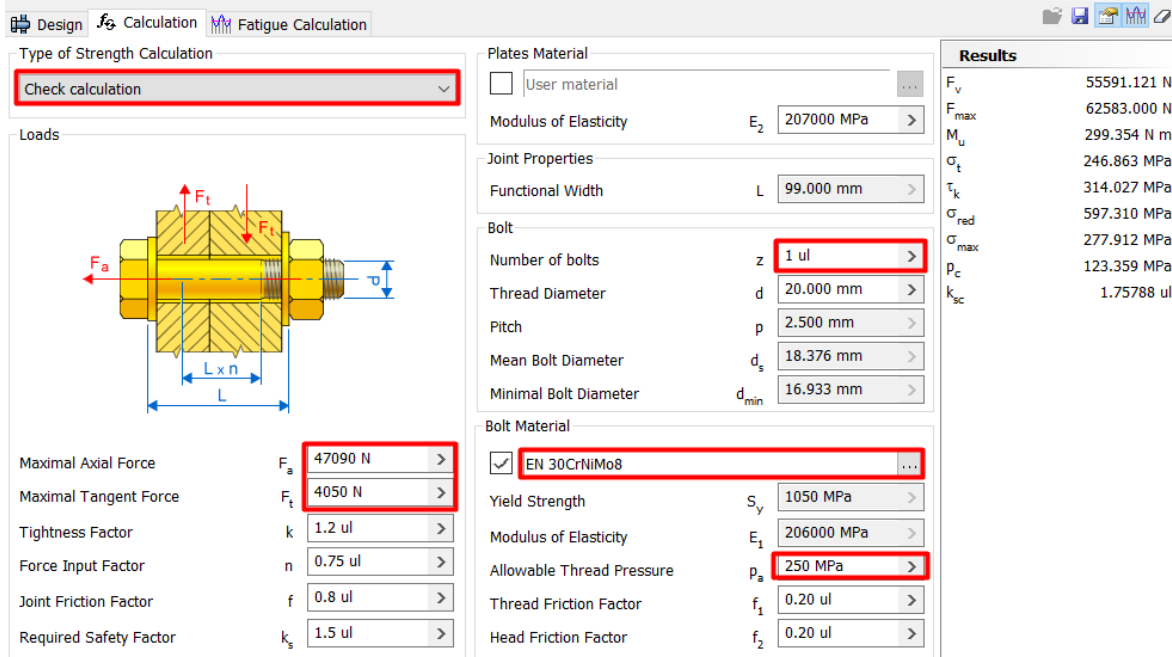
Οι αρχικοί υπολογισμοί, με δεδομένα την δύναμη και το πλήθος των κοχλιών και ζητούμενη την διάμετρό τους φαίνεται στο Σχήμα 5.8. Οι παράμετροι των υπολογισμών είναι ίδιοι με την προηγούμενη κοχλιοσύνδεση, εκτός από τον συντελεστή δύναμης ($n=0.75$). Ο συγκεκριμένος αλλάζει, επειδή οι κοχλίες είναι περαστοί. Το μήκος που δεν έχει σπείρωμα και συμμετέχει στην αντοχή, είναι μεγαλύτερο εδώ. Τα αποτελέσματα έδωσαν πάλι ελάχιστη διάμετρο κοχλία 20 mm. Ο συντελεστής ασφαλείας που υπολογίστηκε ισούται αρχικά με 4 για κοχλίες χάλυβα Grade 8.8.



Σχήμα 5.8. Αρχικοί Υπολογισμοί Αντοχής Κοχλιοσύνδεσης Στήριξης Πάκτωσης

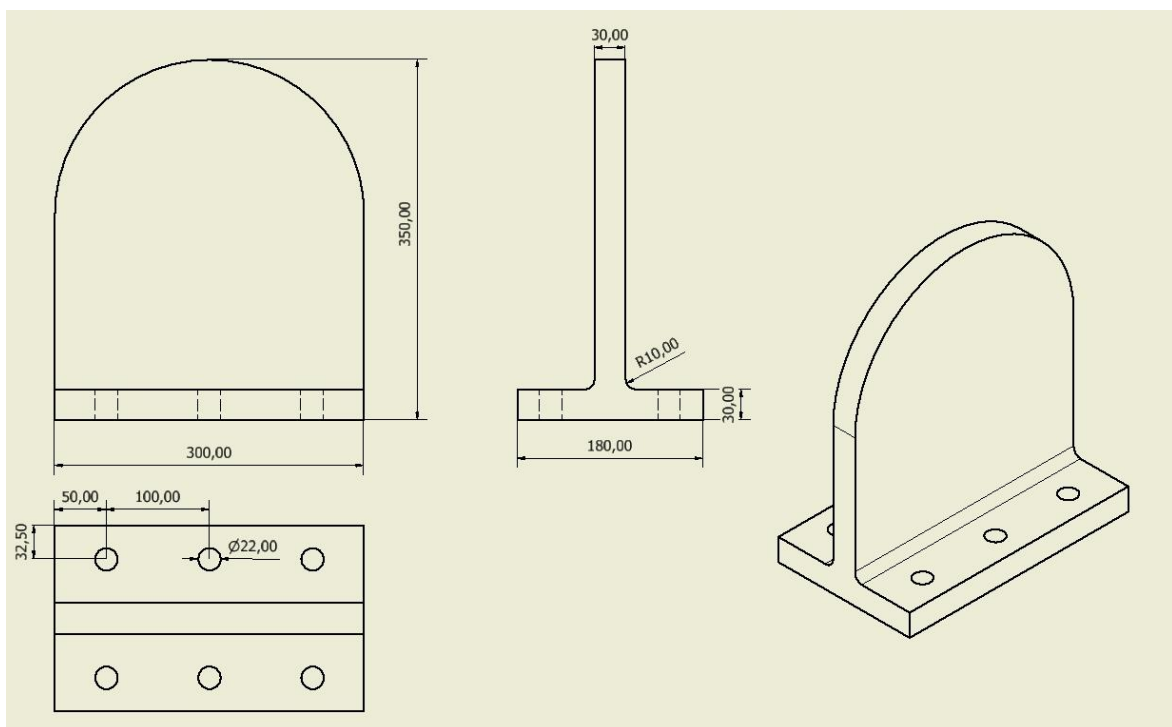
Επόμενο βήμα είναι η εύρεση του κοχλία που καταπονείται περισσότερο, εξαιτίας της παραμόρφωσης των σωμάτων και της ανομοιόμορφης κατανομής της δύναμης στην σύνδεση. Όπως αναφέρθηκε, αυτό γίνεται μετά την επίλυση του τελικού μοντέλου, που θα παρουσιαστεί στο τέλος του κεφαλαίου. Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων και για τις δύο περιπτώσεις κίνησης του εμβόλου, η μέγιστη εφελκυστική και διατμητική δύναμη παρουσιάζονται κατά την κίνηση του εμβόλου προς τα κάτω. Οι τιμές τους, με στρογγυλοποίηση προς τα άνω, είναι 47090 N και 4050 N αντίστοιχα. Οι υπόλοιπες παράμετροι μένουν σταθεροί, εκτός από το υλικό του κοχλία, που επιλέγεται ως χάλυβας Grade 12.9. Στο Σχήμα 5.9 φαίνονται οι παράμετροι και τα αποτελέσματα των υπολογισμών αντοχής του εν λόγω κοχλία. Ο συντελεστής ασφαλείας φαίνεται πως μειώθηκε σε 1.76, αλλά είναι αρκετός γι' αυτή τη σύνδεση. Η ολική τάση στον κοχλία φαίνεται να ισούται με 597.3 MPa, με άσκηση

συνισταμένης δύναμης 62583 N. Εφόσον η αντοχή του πιο καταπονημένου κοχλία είναι ικανοποιητική, είναι ασφαλές να υποθέσουμε το ίδιο και για τους υπόλοιπους πέντε.



Σχήμα 5.9 Τελικός Υπολογισμός Αντοχής Κοχλιοσύνδεσης Στήριξης Πάκτωσης

Το νέο διαστασιολογημένο σχέδιο της Στήριξης Πάκτωσης, φαίνεται στο Σχήμα 5.10 που ακολουθεί.



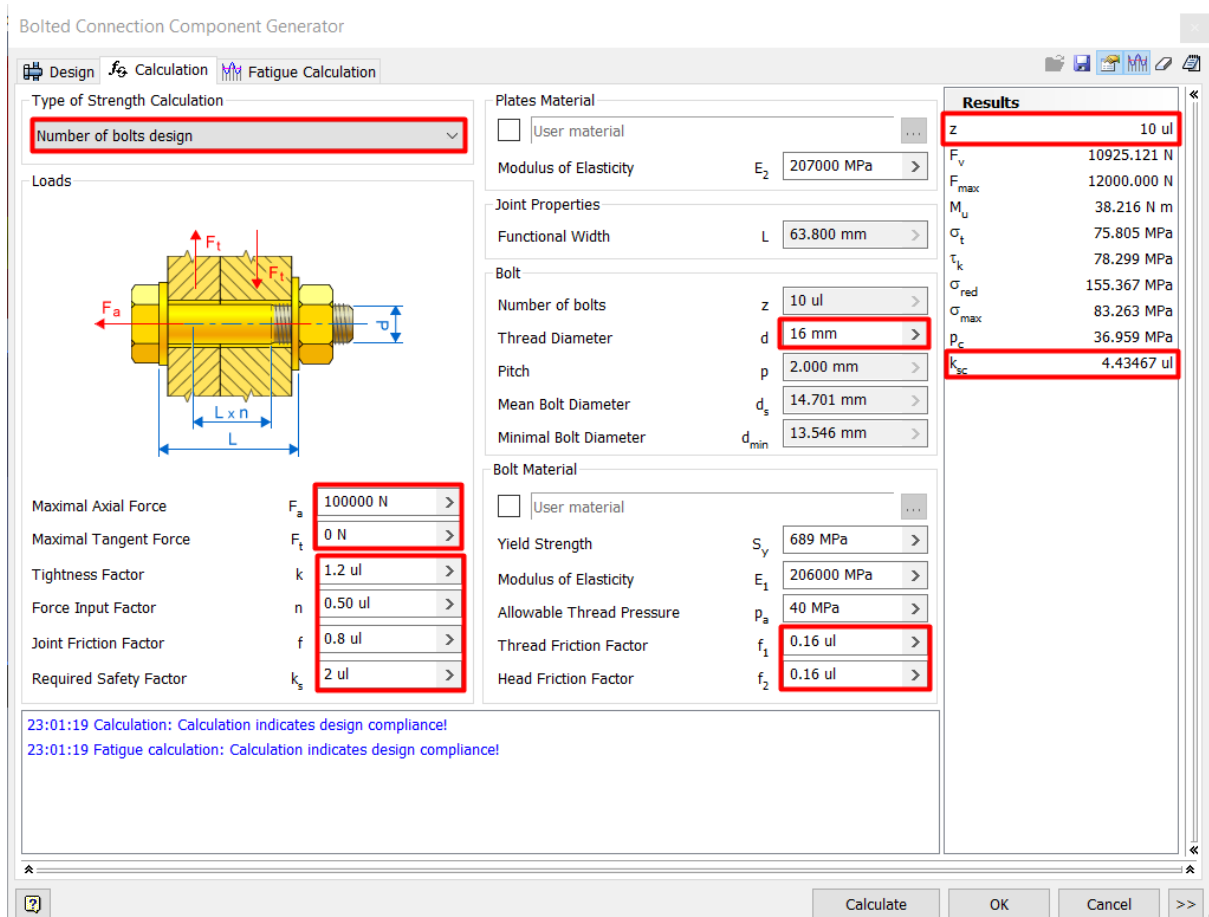
Σχήμα 5.10. Νέο Διαστασιολογημένο Σχέδιο Στήριξης Πάκτωσης

5.2.3. *Ενισχυμένη Βάση*

Η Βάση είναι το σώμα, πάνω στο οποίο θα συσφίξουν οι κοχλίες των προηγούμενων συνδέσεων και επιπλέον, οι κοχλίες με τους οποίους η διάταξη θα συνδέεται στο τραπέζι της μηχανής εφελκυσμού. Επίσης είναι το σώμα που φέρει όλα τα υπόλοιπα μέρη της διάταξης, γεγονός που περιορίζει τον διαθέσιμο χώρο για τις οπές της σύνδεσης. Οι οπές των στηρίξεων έχουν ήδη προκαθοριστεί στα 2 προηγούμενα υποκεφάλαια. Όμως η Στήριξη Πάκτωσης, ενώ κατά την διάρκεια των δοκιμών επιβάλλεται να είναι ακίνητη, πρέπει να της δοθεί η δυνατότητα μετατόπισης, κατά τον άξονα των δοκιμίων, για δύο λόγους. Ο πρώτος είναι οι ανοχές κατασκευής των δοκιμίων και των φλαντζών τους. Γι' αυτό το λόγο έγινε διάνοιξη 10 mm κατά το μήκος στις οπές της Βάσης, όπου θα συνδεθεί η στήριξη αυτή. Ο δεύτερος λόγος είναι η δυνατότητα δοκιμών αξόνων διαφορετικών μηκών. Η διάταξη πρέπει να έχει την δυνατότητα δοκιμής αξόνων 600 και 800 mm, πέρα από τον 1000 mm που μοντελοποιείται. Οπότε πρέπει να δημιουργηθούν άλλες 12 όμοιες οπές για τα συγκεκριμένα μήκη δοκιμίων.

Η σύνδεση της Βάσης στο τραπέζι της μηχανής πρέπει να επιτρέπει την εύκολη τοποθέτηση και απομάκρυνση της διάταξης, ώστε να διευκολύνει την διεξαγωγή των υπόλοιπων δοκιμών του εργαστηρίου. Επίσης προσπαθούμε να αποφύγουμε την οποιαδήποτε τροποποίηση της μηχανής εφελκυσμού, με κατεργασία ή προσθήκη νέων μερών σε αυτή. Συνεπώς, ο μόνος εύκολος τρόπος σύνδεσης είναι μέσω των εγκοπών-Τ, που ήδη διαθέτει. Για αυτό το σκοπό το εργαστήριο διαθέτει 11 κατάλληλα μεταλλικά μέρη, που έχουν την αντίστοιχη γεωμετρία των εγκοπών και ονομάζονται “clampings”. Τα “clampings” έχουν τις διαστάσεις της εγκοπής, ενώ στο πάχος υπάρχουν σε 3 μεγέθη, 6 των 50 mm, 4 των 52 mm και 1 των 90 mm. Το σπείρωμα τους είναι κατάλληλο για κοχλίες 16 mm.

Ας βρούμε αρχικά τον αριθμό των κοχλιών που απαιτούνται για την συγκράτηση της διάταξης στο τραπέζι. Κατευθυνόμαστε για άλλη μια φορά στην εφαρμογή “Bolted Connection” του Inventor. Στο είδος των υπολογισμών αντοχής επιλέγουμε αυτή τη φορά “number of bolt design”. Η δύναμη που ασκείται στην επιφάνεια της σύνδεσης γνωρίζουμε πως είναι αξονική και ίση με 100000 N, σύμφωνα με τη διερεύνηση δύναμης της συνοριακής συνθήκης “Fixed”, στο προηγούμενο μοντέλο. Οι υπόλοιπες παράμετροι φαίνονται στο Σχήμα 5.11. Τα αποτελέσματα δείχνουν πως αρκούν 10 κοχλίες για επιτυχή σύνδεση, με συντελεστή ασφαλείας πάνω από 4.



Σχήμα 5.11. Αρχικός Υπολογισμός Κοχλιοσύνδεσης Βάσης

Γνωρίζουμε ήδη από τις προηγούμενες κοχλιοσυνδέσεις, ότι η κατανομή της δύναμης δεν είναι ποτέ ομοιόμορφη στους κοχλίες. Μάλιστα στην Βάση, γνωρίζουμε εκ των προτέρων ότι οι παραμορφώσεις της είναι μεγάλες και αναμένουμε μεγάλη ανομοιομορφία στην κατανομή της δύναμης στους κοχλίες. Όπως αναγράφηκε στην αρχή, η κοχλιοσύνδεση αποτελεί μια ανατροφοδοτούμενη διαδικασία υπολογισμών, όπου σαν εισαγωγή έχουμε πληροφορίες από την επίλυση του τελικού μοντέλου. Η επεξεργασία της επίλυσης μας δείχνει ότι αναπτύσσονται ισχυρές δυνάμεις, κυρίως στις άκρες του τραπεζιού, επειδή δεν επιτρέπουμε την παραμόρφωση να προχωρήσει περαιτέρω. Μετά από μερικές επαναληπτικές διαδικασίες καταλήξαμε στον τελικό αριθμό κοχλιών και τις θέσεις τους.

Επειδή θέλουμε η διάταξη να έχει την δυνατότητα δοκιμών κόπωσης, δημιουργούμε 2 μοντέλα, όπου το έμβολο εκτελεί σύμπτυξη και έκταση. Το τελικό πλήθος των κοχλιών είναι 19 και προκύπτει από τον συνδυασμό των 2 μοντέλων. Στο μοντέλο όπου το έμβολο συμπύσσεται (ανεβαίνει), θα περίμενε κανείς να αναπτύσσονται οι μεγαλύτερες εφελκυστικές δυνάμεις στους κοχλίες. Όμως σε αυτό, οι δυνάμεις είναι καλύτερα κατανεμημένες. Η μεγαλύτερη φόρτιση κοχλία συναντάται στο μοντέλο όπου το έμβολο εκτείνεται (κατεβαίνει), παρόλο που εκεί, οι περισσότεροι κοχλίες φορτίζονται ελάχιστα. Η εφελκυστική δύναμη σε αυτόν ανέρχεται στα 47214 N ενώ η διατμητική ισούται με 746 N. Η δύναμη αυτή προφανώς οφείλεται στην μεγάλη διάθεση για παραμόρφωση της Βάσης. Στο Σχήμα 5.12 φαίνονται οι παράμετροι των νέων υπολογισμών αντοχής της κοχλιοσύνδεσης, μαζί με τα αποτελέσματα.

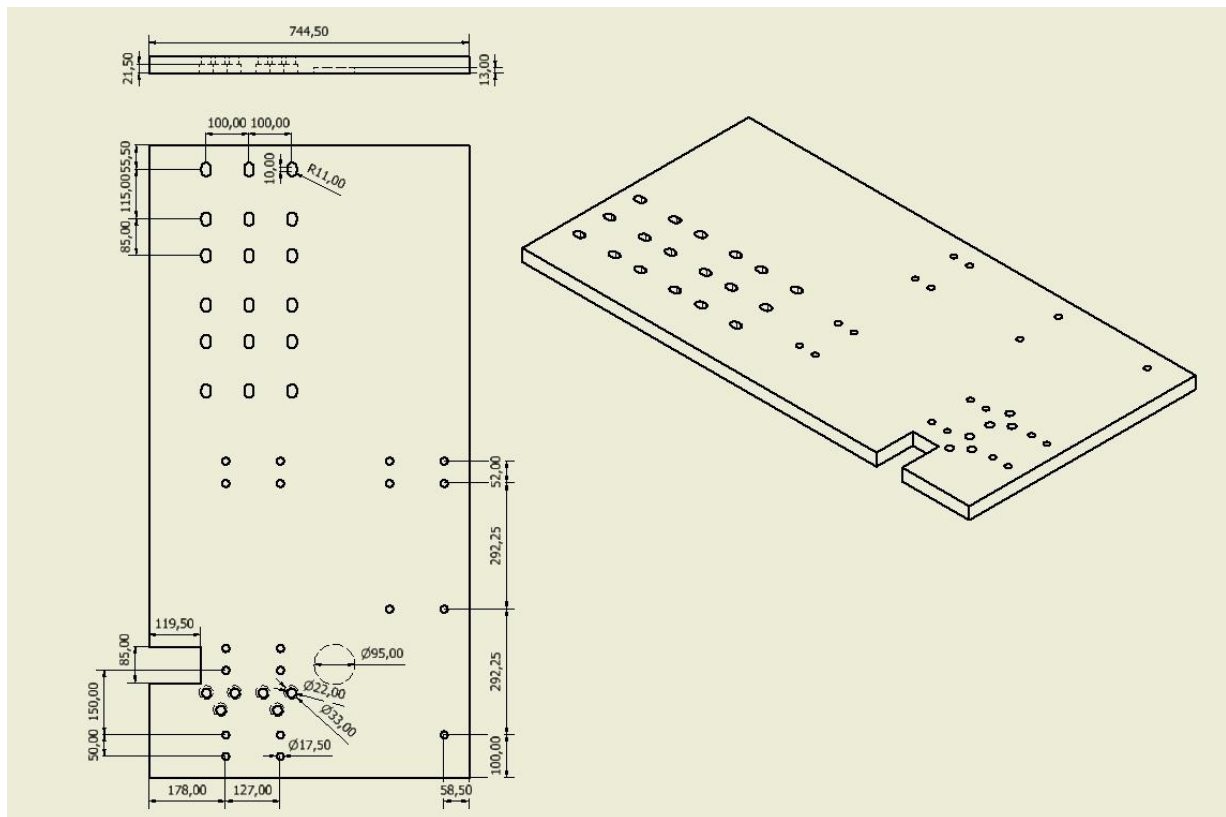
The screenshot shows a software interface for fatigue calculation. The central part features a diagram of a bolted joint with forces F_a , F_t , and F_t applied. The interface is divided into several sections:

- Type of Strength Calculation:** Check calculation
- Plates Material:** User material, Modulus of Elasticity $E_2 = 207000 \text{ MPa}$
- Joint Properties:** Functional Width $L = 63.800 \text{ mm}$
- Bolt:** Number of bolts $z = 1$, Thread Diameter $d = 16.000 \text{ mm}$, Pitch $p = 2.000 \text{ mm}$, Mean Bolt Diameter $d_s = 14.701 \text{ mm}$, Minimal Bolt Diameter $d_{min} = 13.546 \text{ mm}$
- Bolt Material:** EN 30CrNiMo8, Yield Strength $S_y = 1050 \text{ MPa}$, Modulus of Elasticity $E_1 = 206000 \text{ MPa}$, Allowable Thread Pressure $p_a = 250 \text{ MPa}$, Thread Friction Factor $f_1 = 0.16$, Head Friction Factor $f_2 = 0.16$
- Loads:** Maximal Axial Force $F_a = 47214 \text{ N}$, Maximal Tangent Force $F_t = 746 \text{ N}$, Tightness Factor $k = 1.2$, Force Input Factor $n = 0.50$, Joint Friction Factor $f = 0.8$, Required Safety Factor $k_s = 1$
- Results:**

F_v	52700.865 N
F_{max}	57775.800 N
M_u	184.348 N m
σ_t	365.670 MPa
τ_k	377.703 MPa
σ_{red}	749.461 MPa
σ_{max}	400.883 MPa
p_c	177.943 MPa
k_{sc}	1.40101 ul

Σχήμα 5.12. Τελικός Υπολογισμός Αντοχής Κοχλιοσύνδεσης Βάσης

Ο συγκεκριμένος κοχλίας αναπτύσσει τις υψηλότερες τάσεις της διάταξης. Ο συντελεστής ασφαλείας πέφτει στο 1.4 ενώ η συνισταμένη τάση αγγίζει τα 750 MPa. Ένας κοχλίας κλάσης 12.9, όπως αυτός των υπολογισμών, μπορεί να φτάσει με ασφάλεια έως τάσεις 950 MPa (ISO 898-1 2009). Άρα η αντοχή του θεωρείται επαρκής. Το ίδιο μπορούμε να θεωρήσουμε και για τους υπόλοιπους 18 κοχλίες της σύνδεσης αυτής. Στο Σχήμα 5.13 φαίνεται η διαστασιοποιημένη Βάση και η ακριβής θέση των οπών των κοχλιών.



Σχήμα 5.13. Διαστασιολογημένο Σχέδιο Βάσης

5.3. Στατική Ανάλυση

Αφού καθορίστηκαν όλες οι συνδέσεις, ακολουθεί η τελική στατική ανάλυση της συναρμολογημένης διάταξης. Στο τελικό μοντέλο ακολουθήθηκαν όλα τα βήματα ώστε τα αποτελέσματα να βρίσκονται κοντά στην πραγματικότητα. Ένα απόλυτα ρεαλιστικό μοντέλο απαιτεί τεράστια υπολογιστική ισχύ για να επιλυθεί, επομένως δεν μπορούσαν να λείψουν παραδοχές που το προσαρμόζουν στα διαθέσιμα μέσα. Στα επόμενα κεφάλαια θα ακολουθήσει αναλυτική παρουσίαση του μοντέλου, της λύσης και της επεξεργασίας των αποτελεσμάτων. Τέλος θα σχολιαστεί η λειτουργικότητα της διάταξης.

5.3.1. Προ-Επεξεργασία

Η προ-επεξεργασία ξεκινάει με την εισαγωγή του τρισδιάστατου σχεδίου, στη γεωμετρία (Geometry) ενός συστήματος Στατικής Ανάλυσης (Static Structural Analysis) του ANSYS Workbench. Πολλά από τα βήματα που θα ακολουθήσουν δεν έχουν αλλάξει από το προηγούμενο μοντέλο, αλλά θα δοθεί έμφαση σε όσα θεωρούνται σημαντικά. Στο μοντέλο χρησιμοποιούνται δύο υλικά που έχουμε ξανασυναντήσει. Ο Κατασκευαστικός Χάλυβας (Structural Steel) έχει παρουσιαστεί στο μεμονωμένο μοντέλο του Βραχίονα και αντλείται από την βιβλιοθήκη του προγράμματος. Το νέο «θεωρητικό» υλικό, που έχει οριστεί μόνο για το δοκίμιο, είναι αντιγραφή του κατασκευαστικού χάλυβα με αλλαγή στο μέτρο ελαστικότητας του. Υπενθυμίζεται ότι η αλλαγή έγινε ώστε το μεγαλύτερο δοκίμιο που μπορεί να φέρει η

διάταξη, να δέχεται μέγιστη ροπή 20 kN-m, στη μέγιστη γωνία στροφής των 10°, που έχουν ορισθεί ως ανώτατες τιμές των δοκιμών στρέψης της διάταξης που σχεδιάζεται. Η τιμή του μέτρου ελαστικότητας ορίστηκε ως παράμετρος για να δοκιμαστούν και άξονες με μικρότερη και μεγαλύτερη στρεπτική ακαμψία, όπως θα γίνει στην συνέχεια.

Στην συνέχεια ανοίγουμε το Mechanical και ορίζουμε τις συνδέσεις των μερών της διάταξης. Σε όσες συνδέσεις παραμένουν ίδιες με το προηγούμενο μοντέλο, θα γίνει απλή αναφορά. Σε όσες διαφοροποιούνται, και στις νέες, θα γίνει εκτενής αναφορά. Στις κοχλιοσυνδέσεις, θα παρουσιάζεται ο τρόπος σύνδεσης ενός κοχλία για κάθε ζεύγος σωμάτων. Οι υπόλοιποι εισάγονται ακολουθώντας την ίδια μέθοδο, οπότε παραλείπεται η καταγραφή τους. Οι συνδέσεις που χρησιμοποιήθηκαν για αυτό το μοντέλο χωρίζονται σε επαφές και συνδέσεις δοκών, οι οποίες προσομοιάζουν τους κοχλίες.

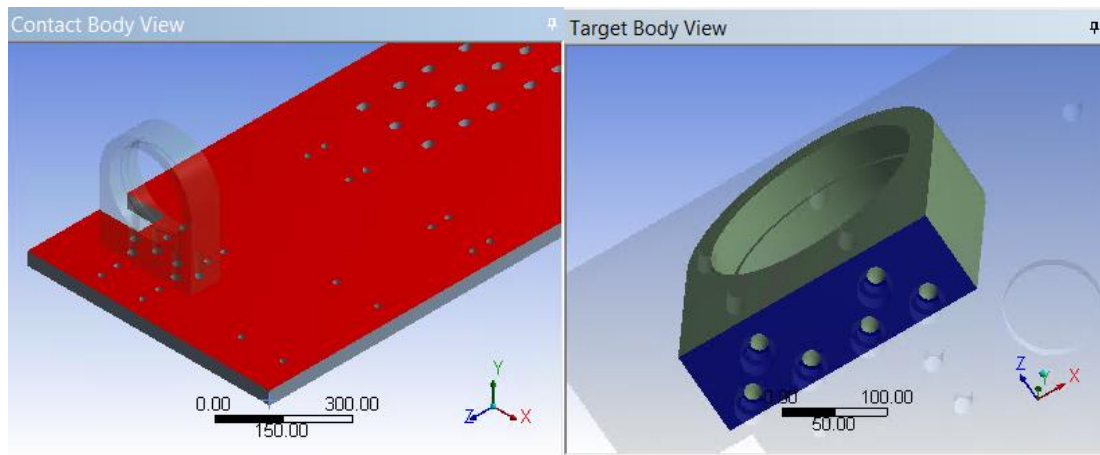
Οι επαφές αυτού του μοντέλου είναι:

1. Τραχεία (Rough) μεταξύ Βάσης-Στήριξης Κίνησης.

Η επαφή αυτή επιτρέπει την μετακίνηση κάθετα στις επιφάνειες (αποκόλληση), αλλά δεν επιτρέπει την παράλληλη κίνηση. Αντικαθιστά την πάκτωση που υπήρχε στο προηγούμενο μοντέλο για να προσομοιάσει την σύνδεση των 2 σωμάτων, παρουσία των κοχλιών. Στην πραγματικότητα, με την σύσφιξη των κοχλιών επιτυγχάνεται μεγάλη δύναμη τριβής μεταξύ των επιφανειών, ώστε να αποφεύγεται η διατμητική φόρτιση των κοχλιών. Όπως σε όλες τις επαφές, επιλέγουμε τις 2 επιφάνειες που θα συνδεθούν (Σχήμα 5.15) και αφήνουμε τις υπόλοιπες ρυθμίσεις στην προεπιλογή (Σχήμα 5.14).

Details of "Rough - base To edran... 4	
[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Contact	1 Face
Target	1 Face
Contact Bodies	base
Target Bodies	edrano2_1
Protected	No
[-] Definition	
Type	Rough
Scope Mode	Manual
Behavior	Program Controlled
Trim Contact	Program Controlled
Suppressed	No
[+] Advanced	
[+] Geometric Modification	

Σχήμα 5.14. Ρυθμίσεις Επαφής Βάσης-Στήριξης Κίνησης – Τελική Μοντελοποίηση

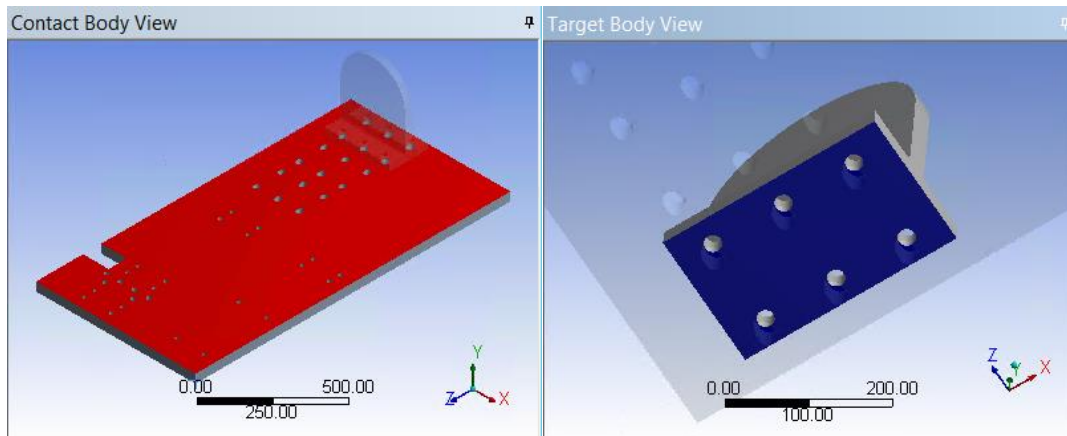


Σχήμα 5.15. Συνδεόμενες Επιφάνειες Βάσης-Στήριξης Κίνησης – Τελική Μοντελοποίηση

2. Χωρίς Τριβές (Frictionless) μεταξύ Στήριξης Κίνησης-Ρουλεμάν 1&2.
Δύο όμοιες επαφές με σκοπό να επιτρέπουν την περιστροφή του Άξονα Πρόσδεσης μέσα στην Στήριξη Κίνησης. Έχουν παρουσιαστεί στο προηγούμενο μοντέλο.
3. Πάκτωση (Bonded) μεταξύ Άξονα Πρόσδεσης-Ρουλεμάν 1&2.
Δύο όμοιες επαφές που προσομοιάζουν την λειτουργία των ρουλεμάν στην διάταξη. Έχουν παρουσιαστεί στον προηγούμενο μοντέλο.
4. Χωρίς Τριβές (Frictionless) μεταξύ Ρουλεμάν 2-Άξονα Πρόσδεσης.
Αυτή η επαφή αποτρέπει την διεύθυνση του Άξονα Πρόσδεσης στο ρουλεμάν που τον περιορίζει αξονικά.
5. Πάκτωση (Bonded) μεταξύ Βραχίονα-Άξονα Πρόσδεσης.
Στέρη συνδεση μεταξύ της επιφάνειας της μεγάλης διαμερούς οπής του Βραχίονα με τον Άξονα Πρόσδεσης, για να μεταδωθεί η κίνηση στην διάταξη.
6. Χωρίς Τριβές (Frictionless) μεταξύ Βραχίονα-Άξονα Πρόσδεσης.
Αυτή η επαφή αποτρέπει την διεύθυνση του Βραχίονα στον Άξονα Πρόσδεσης, στην πλευρά που τον περιορίζει αξονικά.
7. Πάκτωση (Bonded) μεταξύ Άξονα Πρόσδεσης-Δοκιμίου.
8. Πάκτωση (Bonded) μεταξύ Δοκιμίου-Στήριξης Πάκτωσης.
9. Τραχεία μεταξύ Στήριξης Πάκτωσης-Βάσης (Σχήμα 5.17).
Όπως και η πρώτη, αυτή η επαφή προσομοιάζει την σύνδεση των 2 σωμάτων παρουσία των κοχλιών, αντικαθιστώντας την πάκτωση που υπήρχε στο προηγούμενο μοντέλο. Επιτρέπει την αποκόλληση των δύο επιφανειών αλλά όχι την παράλληλη μετατόπιση. Οι ρυθμίσεις της φαίνονται στο Σχήμα 5.16.

Details of "Rough - base To reacti... ▾	
[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Contact	1 Face
Target	1 Face
Contact Bodies	base
Target Bodies	reaction_plate
Protected	No
[-] Definition	
Type	Rough
Scope Mode	Manual
Behavior	Program Controlled
Trim Contact	Program Controlled
Suppressed	No
[+] Advanced	
[+] Geometric Modification	

Σχήμα 5.16. Ρυθμίσεις Επαφής Βάσης-Στήριξης Πάκτωσης – Τελική Μοντελοποίηση



Σχήμα 5.17. Συνδεδεμένες Επιφάνειες Βάσης-Στήριξης Πάκτωσης – Τελική Μοντελοποίηση

10. Πακτώσεις (Bonded) μεταξύ Βάσης-Ενισχυτικών.

Οι συγκολλήσεις των Ενισχυτικών στην Βάση προσομοιάζονται με πακτώσεις, όπως και στο προηγούμενο μοντέλο.

Οι κοχλιοσυνδέσεις στα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων αντικαθίστανται συνήθως από συνδέσεις δοκών (Beam Connection) κυκλικής διατομής. Η μοντελοποίηση της πραγματικής γεωμετρίας τους απαιτεί πολύ πυκνό πλέγμα λόγω της παρουσίας του σπειρώματος. Η επίλυση ενός τέτοιου μοντέλου με μεγάλο πλήθος κοχλίων χρειάζεται μεγάλη υπολογιστική ισχύ. Σε αντίθεση, οι κυλινδρικοί δοκοί μοντελοποιούνται εύκολα, εισάγοντας την διάμετρο τους και τις περιοχές επαφής τους, που στην πραγματικότητα είναι οι επιφάνειες που εδράζουν οι ροδέλες του κοχλία, αν αυτός είναι περαστός, ή η ροδέλα και το σπείρωμα, αν αυτός είναι φυτευτός. Η λύση επιταχύνεται ακόμα περισσότερο, αν ορίσουμε άκαμπτη συμπεριφορά στις δοκούς, χωρίς να αποκλίνει το αποτέλεσμα από την πραγματικότητα. Για να γίνεται ονομαστική αναφορά στον κάθε κοχλία, ονοματίστηκαν με βάση τα σώματα που συνδέουν και αριθμήθηκαν από αριστερά προς τα δεξιά και από το άκρο της Βάσης που

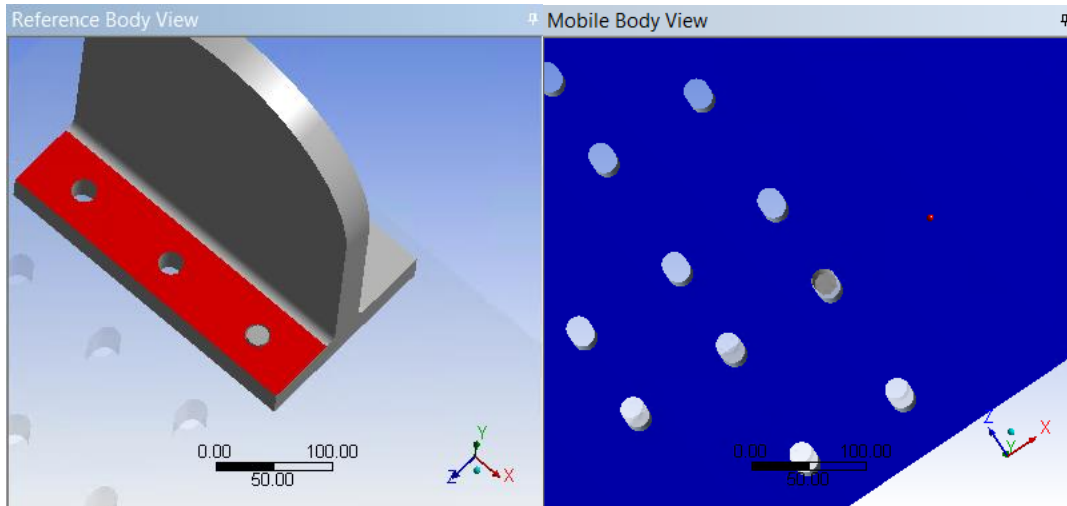
βρίσκεται στο τραπέζι, προς την άκρη της προβόλου. Στην συνέχεια θα δοθεί ένα παράδειγμα σύνδεσης με δοκό, για κάθε ένα από τα τρία ζεύγη κοχλιοσύνδεσης του μοντέλου:

1. Σύνδεση με δοκό (Beam) μεταξύ Βάσης-Στήριξης Πάκτωσης.

Έχουμε 6 κοχλίες σε αυτή την σύνδεση, άρα 6 δοκούς. Στις λεπτομέρειες της σύνδεσης (Σχήμα 5.18) επιλέγουμε το υλικό της δοκού και την ακτίνα της. Τα σώματα που συνδέει ορίζονται ως “Reference” και “Mobile”. Κάτω από το πρώτο μπορούμε να ορίσουμε την επιφάνεια της ροδέλας (Σχήμα 5.19), η οποία έρχεται σε επαφή με το σώμα στην πραγματικότητα. Επιλέγουμε στο “Scope” την επιφάνεια που εδράζει και στο “Reference Location” την κυκλική ακμή της οπής, ώστε το κέντρο της να είναι στις κατάλληλες συντεταγμένες. Στην συνέχεια αναγράφουμε την διάμετρό της στο “Pinball Region”. Επαναλαμβάνουμε την ίδια διαδικασία και στο “Mobile”. Στα σχήματα φαίνονται οι ρυθμίσεις και οι επιφάνειες μιας σύνδεσης από τις 6. Οι υπόλοιπες ακολουθούν την ίδια διαδικασία.

Details of "Circular - 3 reaction_pl...	
[-] Definition	
Material	Structural Steel
Cross Section	Circular
Radius	10. mm
Suppressed	No
Beam Length	70. mm
Element APDL Name	
[-] Scope	
Scope	Body-Body
[-] Reference	
Scoping Method	Geometry Select...
Applied By	Remote Attach...
Scope	1 Face
Body	reaction_plate
Coordinate System	Global Coordin...
Reference X Coordinate	240. mm
Reference Y Coordinate	30. mm
Reference Z Coordinate	-799.03 mm
Reference Location	Click to Change
Behavior	Rigid
Pinball Region	18.5 mm
[-] Mobile	

Σχήμα 5.18. Ρυθμίσεις Σύνδεσης Δοκού Βάσης-Στήριξης Πάκτωσης- Τελική Μοντελοποίηση



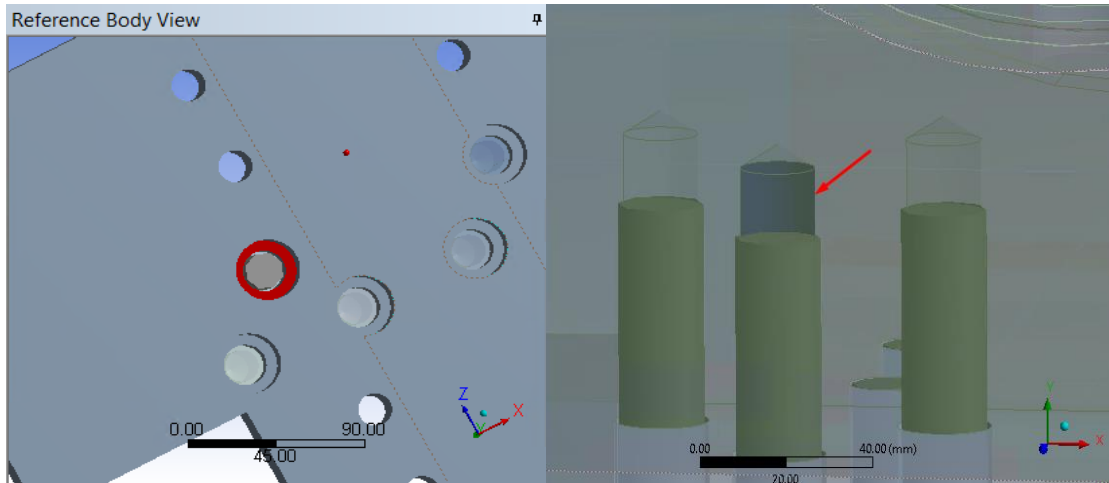
Σχήμα 5.19. Συνδεόμενες Επιφάνειες Κοχλίας Στήριξης Πάκτωσης– Τελική Μοντελοποίηση

2. Σύνδεση με δοκό (Beam) μεταξύ Βάσης-Στήριξης Κίνησης.

Πάλι έχουμε 6 κοχλίες άρα και 6 συνδέσεις δοκών. Επειδή στην προκειμένη περίπτωση οι κοχλίες είναι φυτευτοί, ακολουθείται η ίδια διαδικασία με την προαναφερθείσα για το “Reference” σώμα (Σχήμα 5.20), αλλά στο “Mobile” επιλέγεται η επιφάνεια της Στήριξης που βρίσκεται το σπείρωμα (Σχήμα 5.21).

Details of "Circular - 1 base To ed...	
[-] Definition	
Material	Structural Steel
Cross Section	Circular
Radius	10. mm
Suppressed	No
Beam Length	65. mm
Element APDL Name	
[-] Scope	
Scope	Body-Body
[-] Reference	
Scoping Method	Geometry Select...
Applied By	Remote Attach...
Scope	1 Face
Body	base
Coordinate System	Global Coordin...
Reference X Coordinate	74. mm
Reference Y Coordinate	-18.5 mm
Reference Z Coordinate	341.16 mm
Reference Location	Click to Change
Behavior	Rigid
Pinball Region	15. mm
[+] Mobile	

Σχήμα 5.20. Ρυθμίσεις Σύνδεσης Δοκού Βάσης-Στήριξης Κίνησης – Τελική Μοντελοποίηση



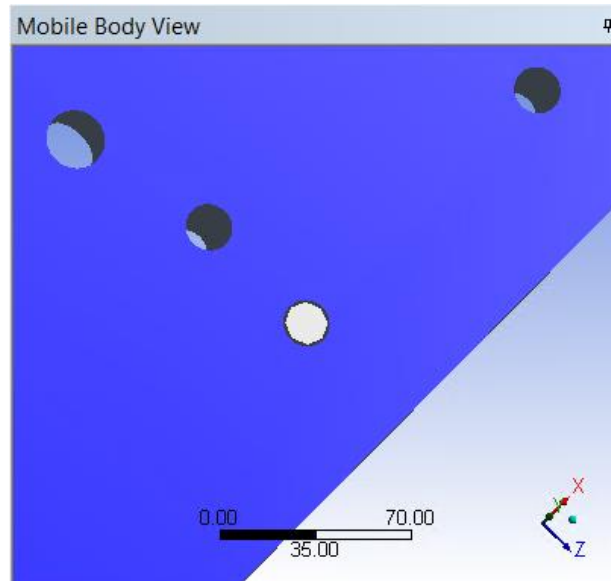
Σχήμα 5.21. Συνδεόμενες Επιφάνειες Κοχλία Στήριξης Κίνησης – Τελική Μοντελοποίηση

3. Σύνδεση με δοκό (Beam) μεταξύ Βάσης-Μηχανής Εφελκυσμού.

Η μηχανή εφελκυσμού δεν συμμετέχει στο μοντέλο, οπότε η Βάση θα συνδεθεί με το έδαφος, επιλέγοντας στις ρυθμίσεις (Σχήμα 5.22) “Body-Ground” κάτω από το “Scope”. Οι υπόλοιπες ρυθμίσεις είναι όμοιες με των προηγούμενων συνδέσεων. Ως “Reference” τοποθετείται αυτόματα το έδαφος. Το μήκος της δοκού δεν επηρεάζει το αποτέλεσμα εφόσον οι δοκοί είναι άκαμπτοι, αλλά για οπτικούς λόγους ισούται με το πάχος της Βάσης (Σχήμα 5.23).

Details of "Circular - 1 Ground To ..."	
Graphics Properties	
Definition	
Material	Structural Steel
Cross Section	Circular
Radius	8. mm
Suppressed	No
Beam Length	40. mm
Element APDL Name	
Scope	
Scope	Body-Ground
Reference	
Coordinate System	Global Coordinate ...
Reference X Coordinate	86. mm
Reference Y Coordinate	-40. mm
Reference Z Coordinate	448.47 mm
Reference Location	Click to Change
Mobile	

Σχήμα 5.22. Ρυθμίσεις Σύνδεσης Δοκού Βάσης-Εδάφους – Τελική Μοντελοποίηση



Σχήμα 5.23. Επιφάνεια Σύνδεσης Κοχλία Βάσης – Τελική Μοντελοποίηση

5.3.2. Σύγκλιση Πλέγματος

Σε αυτή την ανάλυση, καταλήξαμε στην τελική μορφή του πλέγματος, ακολουθώντας αρκετά διαφορετικό τρόπο από τις προηγούμενες. Όντας το τελικό συναρμολογημένο μοντέλο, ο αριθμός των στοιχείων και κόμβων του είναι πολλαπλάσιες φορές μεγαλύτερος από τα προηγούμενα, με συνέπεια την ανάγκη για βελτιστοποίηση, ώστε ο χρόνος επίλυσης να είναι όσο το δυνατόν μικρότερος. Αναφορικά, τα βήματα για την δημιουργία του πλέγματος είναι τα ακόλουθα. Πρώτα ακολουθήθηκε μέθοδος σύγκλισης πλέγματος, με ομοιόμορφο πλέγμα για κάθε σώμα, προσαρμοσμένο στις φορτίσεις που ήδη γνωρίζουμε από το προηγούμενο μοντέλο (όσον αφορά το μέγεθος). Έχοντας μια εικόνα για το κάθε σώμα ξεχωριστά, βάση των αποτελεσμάτων, επιλέχθηκε πυκνωση ή αραιωση σε περιοχές του κάθε σώματος, ανάλογα με την κατανομή των τάσεων.

Πιο αναλυτικά, η μέθοδος σύγκλισης πλέγματος βοηθάει στην επιλογή του κατάλληλου μεγέθους στοιχείων για την βέλτιστη επίλυση του προβλήματος. Με αυτό κατά νου, δημιουργούμε 4 διαφορετικά πλέγματα με φθίνουσες διαστάσεις στοιχείων. Σε αυτό το μοντέλο, επειδή το κάθε σώμα έχει διαφορετικές διαστάσεις και υπόκειται σε διαφορετικές φορτίσεις, τα σώματα ομαδοποιούνται ανάλογα με το μέγεθος των στοιχείων τους. Η μορφή του πλέγματος σε αυτή τη φάση είναι αδόμητη επειδή τα περισσότερα σώματα έχουν γεωμετρικές λεπτομέρειες, που είναι αδύνατον να δομηθούν με εξαεδρικά στοιχεία. Εξαίρεση αποτελεί το δοκίμιο, που έχει το ίδιο δομημένο πλέγμα σε όλα τα μοντέλα. Επίσης θέλουμε το πλέγμα να είναι ομοιόμορφο σε όλα τα σώματα, ώστε να εντοπιστεί εύκολα σε ποιες περιοχές η λύση συγκλίνει και σε ποιες όχι. Έτσι μπορούμε να αποφασίσουμε σε ποιες περιοχές των σωμάτων θα υπάρχει πυκνό πλέγμα και ποιες περιοχές θα έχουν ένα μέτριο ή πιο αραιό πλέγμα.

Έχουμε, λοιπόν, 4 μοντέλα με τέσσερα διαφορετικά αποτελέσματα. Οι ομάδες των σωμάτων, στην καθεμία από τις οποίες υπάρχει το ίδιο μέγεθος στοιχείων, είναι:

- Ομάδα Α: Βραχίονας, Άξονας Πρόσδεσης, Στήριξη Κίνησης, Στήριξη Πάκτωσης

- Ομάδα Β: Διαμήκη Ενισχυτικά 1&2, Εγκάρσια Ενισχυτικά 1&2&3
- Ομάδα Γ: Βάση

Συνεπώς στο πλέγμα των μοντέλων υπάρχουν τρία “Body Sizing”, για τις ομάδες που αναφέρθηκαν και οι ρυθμίσεις για το δοκίμιο, οι οποίες θα μας απασχολήσουν στο τελικό πλέγμα. Ο Πίνακας 5.1 παρουσιάζει τις διαστάσεις των στοιχείων των ομάδων για κάθε πλέγμα και δίνει το συνολικό πλήθος στοιχείων και κόμβων.

Πίνακας 5.1. Ομαδοποίηση Σωμάτων στη Σύγκλιση Πλέγματος

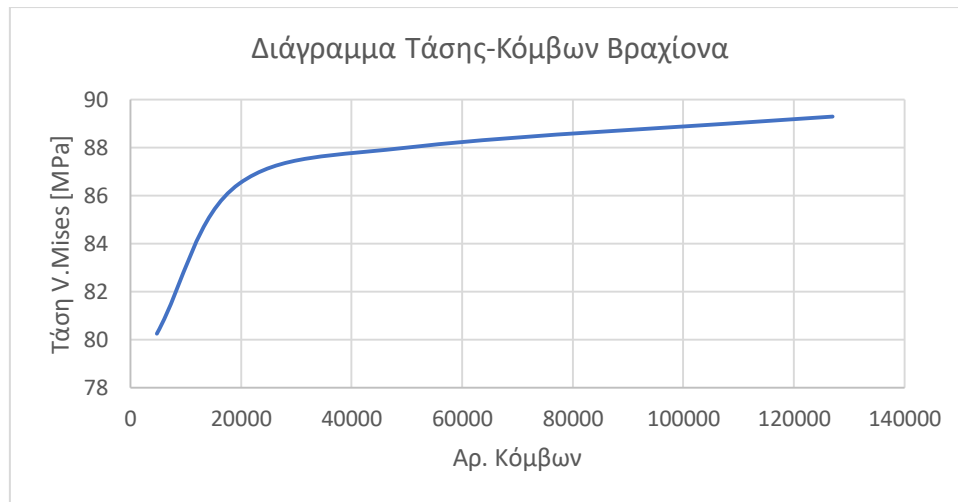
	Πλέγμα 1	Πλέγμα 2	Πλέγμα 3	Πλέγμα 4
Ομάδα Α	17	10	7	5
Ομάδα Β	15	10	7	5
Ομάδα Γ	15	12	10	8
Πλήθος Στοιχείων	165058	404917	894671	2114987
Πλήθος Κόμβων	308738	724539	1580566	3683384

Η μέθοδος σύγκλισης γίνεται, συγκρίνοντας τις μέγιστες τάσεις “Von Mises”, για κάθε σώμα ξεχωριστά, εκτός από τα εγκάρσια και διαμήκη ενισχυτικά, τα οποία έχουν ίδιες διαστάσεις και ίδιο πλέγμα. Από αυτά, επιλέγεται ένα εγκάρσιο και ένα διάμηκες ενισχυτικό, τα οποία δέχονται τις μεγαλύτερες φορτίσεις. Ακολουθούν πίνακες και διαγράμματα της μεθόδου για το κάθε σώμα. Πριν δοθούν, να σημειωθεί ότι στην Στήριξη Κίνησης και τον Άξονα Πρόσδεσης δεν συμπεριλήφθηκαν οι μέγιστες τάσεις τους στο πιο πυκνό πλέγμα, διότι εμφανίστηκαν σε περιοχές συγκέντρωσης τάσεων, όπως οπές και επαφές. Έτσι, μελετώντας την κατανομή των τάσεων σε συγκεκριμένες περιοχές των σωμάτων αυτών, μπορούμε να βγάλουμε καλύτερα συμπεράσματα για την σύγκλιση, αποκλείοντας περιοχές οι οποίες θέλουν πολύ πυκνότερο πλέγμα για να συγκλίνουν.

Στον Βραχίονα παρατηρείται ξεκάθαρη σύγκλιση που κυμαίνεται στα 89-90 MPa. Από το διάγραμμα (Σχήμα 5.24) και τον Πίνακα 5.2 παρατηρούμε ότι άνω των 20.000 κόμβων περίπου, η μεταβολή της μέγιστης τάσης είναι μικρότερη από 2%. Επειδή η μέγιστη τάση γνωρίζουμε πως εμφανίζεται στην επιφάνεια εφαρμογής της δύναμης, μπορούμε να πούμε πως το πλέγμα 2 είναι ικανοποιητικό γι’ αυτό το σώμα, με προσθήκη μικρής πύκνωσης στην επιφάνεια της μικρής οπής (επιφάνεια εφαρμογής δύναμης). Άρα κύριο μέγεθος στοιχείων του Βραχίονα θεωρούμε τα 10 mm.

Πίνακας 5.2. Αποτελέσματα Σύγκλισης Πλέγματος Βραχίονα

Βραχίονας				
	Πλέγμα 1	Πλέγμα 2	Πλέγμα 3	Πλέγμα 4
Μέγεθος Στοιχείων [mm]	17	10	7	5
Πλήθος Στοιχείων	1360	6370	17960	45266
Πλήθος Κόμβων	4785	19685	52279	126990
Μέγιστη Τάση V. Mises [Mpa]	80.26	86.50	88.055	89.29
% Μεταβολή Τάσης	-	7.21%	1.77%	1.38%

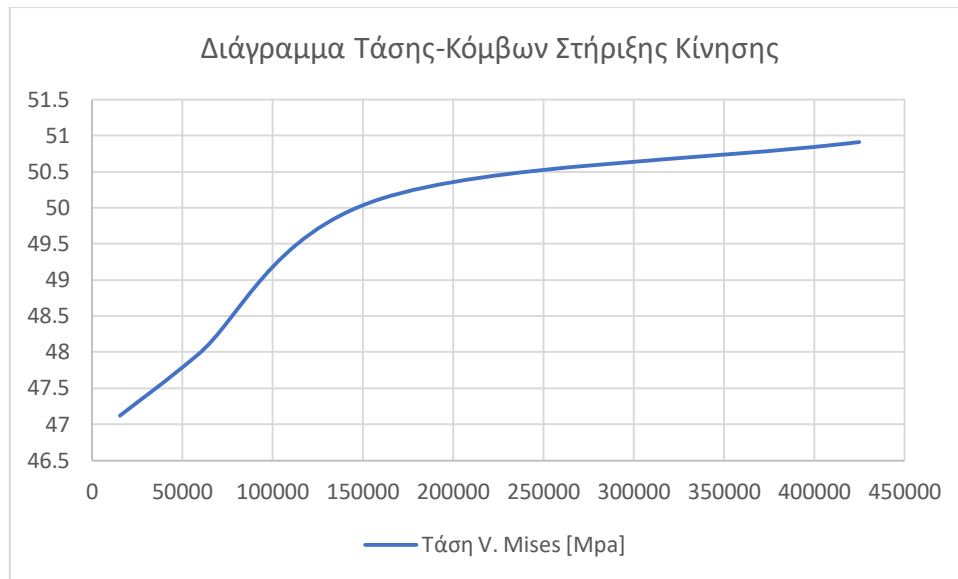


Σχήμα 5.24. Διάγραμμα Μέγιστης Τάσης-Κόμβων Βραχίονα

Στη μέθοδο σύγκλισης της Στήριξης Κίνησης παρατηρούμε πως το εύρος των μέγιστων τάσεων των τεσσάρων πλεγμάτων είναι περίπου 3 MPa (Πίνακας 5.3), δηλαδή πολύ μικρό. Έτσι υπολογίστηκαν και οι παραμορφώσεις στον άξονα Z, για να έχουμε έναν ακόμη τρόπο σύγκρισης. Οι παραμορφώσεις διαφέρουν εξίσου ελάχιστα συνεπώς δεν μπορούμε να βγάλουμε ξεκάθαρο συμπέρασμα. Αναλογιζόμενοι τη δυσκολία επίλυσης του μοντέλου και το πλήθος των στοιχείων συνολικά, μπορούμε να πούμε ότι άνω των 100000 κόμβων τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά, δηλαδή μέγεθος στοιχείων μικρότερο των 8 mm περίπου. Για την Στήριξη Κίνησης όμως, επιλέγεται μέγεθος στοιχείων 10 mm διότι βλέπουμε ότι οι παραμορφώσεις διαφέρουν απειροελάχιστα και η τιμή της μέγιστης τάσης απέχει λιγότερο από 3 MPa από αυτή του πλέγματος 4. Επειδή στο πλέγμα 4 παρατηρήθηκε συγκέντρωση τάσεων κοντά στις οπές των κοχλιών, στο τελικό μοντέλο η περιοχή των οπών θα έχει ακόμη πυκνότερο πλέγμα.

Πίνακας 5.3. Αποτελέσματα Σύγκλισης Πλέγματος Στήριξης Κίνησης

Στήριξη Κίνησης				
	Πλέγμα 1	Πλέγμα 2	Πλέγμα 3	Πλέγμα 4
Μέγεθος Στοιχείων [mm]	17	10	7	5
Πλήθος Στοιχείων	9489	38717	109810	299386
Πλήθος Κόμβων	15479	58370	159459	424876
Παραμόρφωση Z [mm]	1.857E-01	1.817E-01	1.786E-01	1.737E-01
Μέγιστη Τάση V. Mises [Mpa]	47.12	47.96	50.12	50.91
% Μεταβολή Τάσης	-	1.75%	4.31%	1.55%
% Μεταβολή Παραμόρφωσης	-	-2.20%	-1.74%	-2.82%

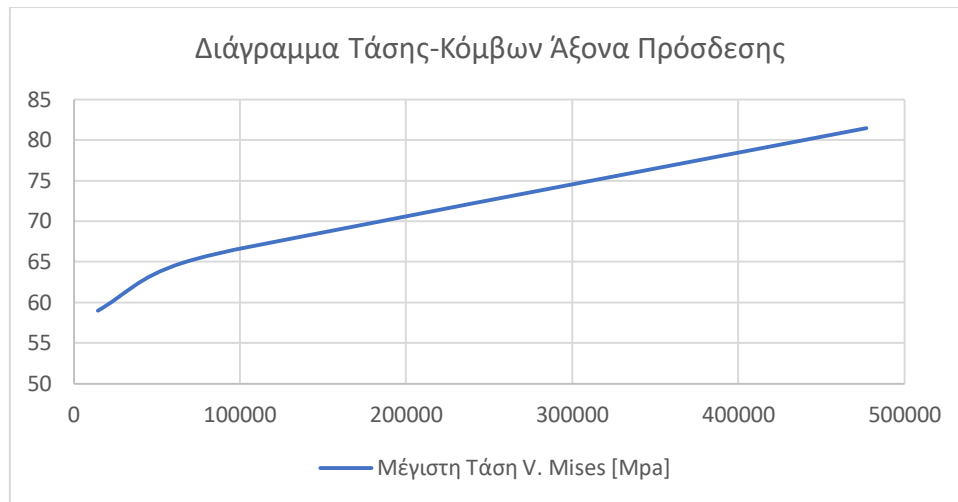


Σχήμα 5.25. Διάγραμμα Μέγιστης Τάσης-Κόμβων Στήριξης Κίνησης

Στον Άξονα Πρόσδεσης δεν παρατηρείται σύγκλιση (Σχήμα 5.26) εξαιτίας συγκέντρωσης τάσεων, λόγω απότομης αλλαγής της γεωμετρίας στο «σκαλοπάτι» πάκτωσης του Βραχίονα. Επειδή το σώμα κινείται, δεν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τις παραμορφώσεις ως κριτήριο. Ο μόνος τρόπος να μοντελοποιηθεί σωστά το σώμα αυτό είναι η χρήση ενός μέτριου πλέγματος, με μεγάλη πυκνωση στις επιφάνειες απότομης αλλαγής της γεωμετρίας. Ικανοποιητικά αποτελέσματα μπορούμε να έχουμε με μέγεθος στοιχείων 10 mm και πυκνωση στα σκαλοπάτια του άξονα.

Πίνακας 5.4. Αποτελέσματα Σύγκλισης Πλέγματος Άξονα Πρόσδεσης

Άξονας Πρόσδεσης				
	Πλέγμα 1	Πλέγμα 2	Πλέγμα 3	Πλέγμα 4
Μέγεθος Στοιχείων [mm]	17	10	7	5
Πλήθος Στοιχείων	9198	44512	126392	341018
Πλήθος Κόμβων	14473	65468	180392	477006
Μέγιστη Τάση V. Mises [Mpa]	58.98	64.87	69.82	81.47
% Μεταβολή Τάσης	-	9.08%	7.09%	14.30%

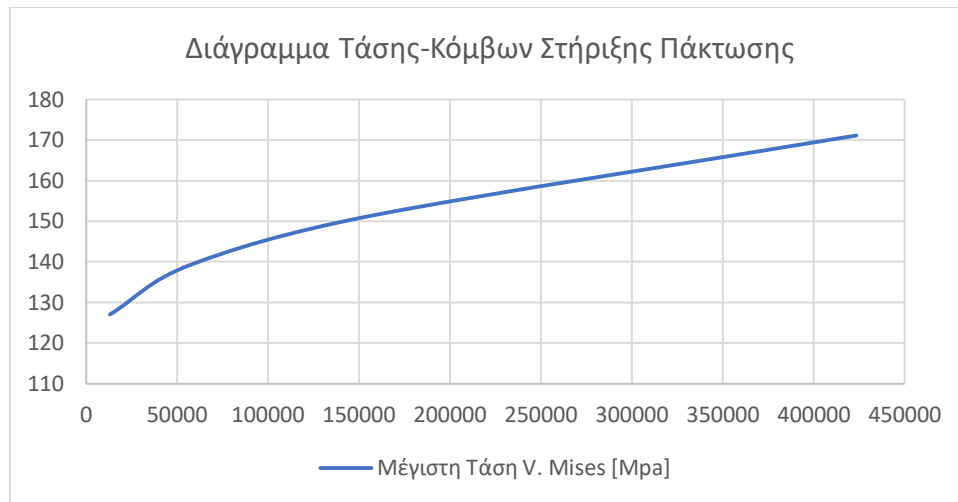


Σχήμα 5.26. Διάγραμμα Μέγιστης Τάσης-Κόμβων Άξονα Πρόσδεσης

Στην Στήριξη Πάκτωσης, επίσης παρατηρούμε άνοδο των τάσεων καθώς πυκνώνει το πλέγμα (Σχήμα 5.27). Έχουμε την γνώση από το προηγούμενο μοντέλο ότι στο σώμα αυτό επάγονται υψηλές τάσεις, που οφείλονται στις παραμορφώσεις της Βάσης. Αυτό παρατηρείται και στα αποτελέσματα της σύγκλισης, καθώς έχουμε συγκέντρωση τάσεων στην περιοχή συγκόλλησης των 2 ελασμάτων που απαρτίζουν την στήριξη. Επιπλέον παρατηρείται συγκέντρωση τάσεων γύρω από τις οπές της κοχλιοσύνδεσης. Το έλασμα που φέρει το δοκίμιο δεν φαίνεται να φορτίζεται ιδιαίτερα. Συνεπώς μπορούμε να ορίσουμε ένα μέτριο μέγεθος στοιχείων του σώματος (π.χ. 10 mm) και να πυκνώσουμε το πλέγμα στην περιοχή συγκόλλησης και τις οπές, όπου οι τάσεις είναι πολύ υψηλότερες.

Πίνακας 5.5. Αποτελέσματα Σύγκλισης Πλέγματος Στήριξης Πάκτωσης

Στήριξη Πάκτωσης				
	Πλέγμα 1	Πλέγμα 2	Πλέγμα 3	Πλέγμα 4
Μέγεθος Στοιχείων [mm]	17	10	7	5
Πλήθος Στοιχείων	7815	38037	108302	295978
Πλήθος Κόμβων	13150	58048	158963	423586
Μέγιστη Τάση V. Mises [Mpa]	127.01	139.36	151.55	171.13
% Μεταβολή Τάσης	-	8.86%	8.04%	11.44%



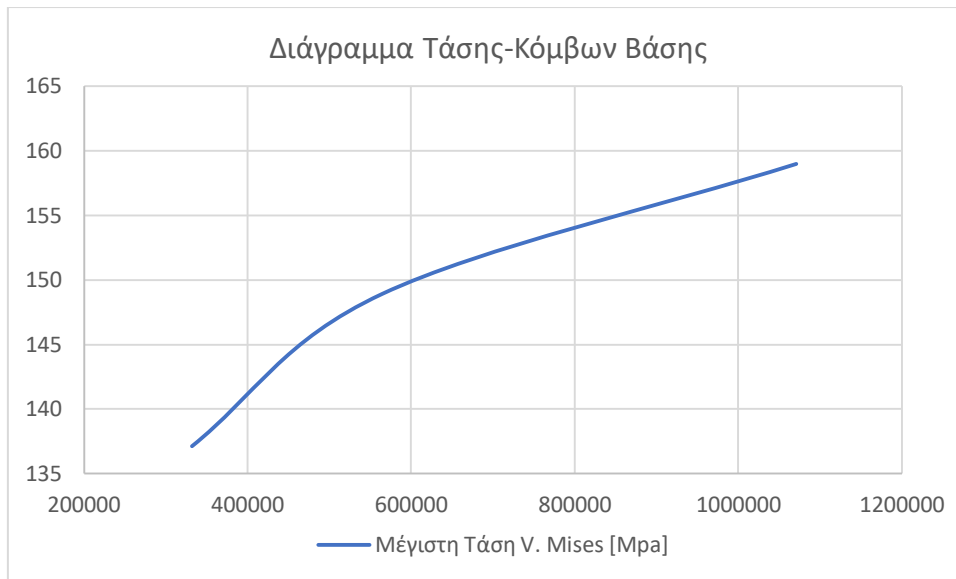
Σχήμα 5.27. Διάγραμμα Μέγιστης Τάσης-Κόμβων Στήριξης Πάκτωσης

Κοινό στοιχείο της Βάσης με τα προηγούμενα 2 σώματα είναι η μη σύγκλιση των τάσεων. Η μέγιστη τιμή στο πλέγμα 1 συναντάται σε κόμβο κοντά σε κοχλιοσύνδεση, συνεπώς δεν συμπεριλαμβάνεται στο διάγραμμα σύγκλισης. Παρόλα αυτά από το διάγραμμα τάσεων (Σχήμα 5.28) φαίνεται ότι δεν συγκλίνουν στο πυκνότερο πλέγμα. Η Βάση γνωρίζουμε πως είναι το μεγαλύτερο σώμα της διάταξης, με τις περισσότερες οπές και την μεγαλύτερη ανομοιομορφία κατανομής τάσεων. Συνεπώς καλύτερο κριτήριο αποτελεί η παραμόρφωση στον άξονα Y, που είναι η σημαντικότερη.

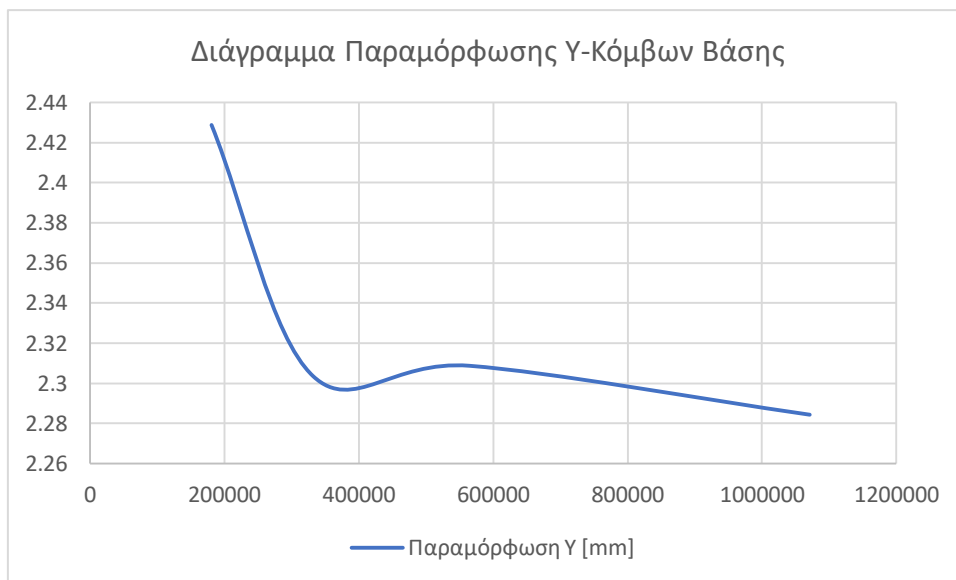
Με την πύκνωση του πλέγματος παρατηρείται μείωση των παραμορφώσεων, κυρίως μέχρι τους 400000 κόμβους περίπου (Σχήμα 5.29). Από το πλέγμα 2 και μετά δεν παρατηρείται ιδιαίτερη απόκλιση των τιμών της μέγιστης παραμόρφωσης (Πίνακας 5.6). Η μικρή αύξηση της παραμόρφωσης στο πλέγμα 3 οφείλεται κυρίως στην δυσανάλογη πύκνωση του πλέγματος των διαμήκων ενισχυτικών αλλά και των υπόλοιπων σωμάτων. Η διαφορά όμως είναι ελάχιστη (0.23%) άρα όχι ανησυχητική. Συνεπώς μπορούμε να μοντελοποιήσουμε την Βάση με στοιχεία μεγέθους 12 mm (πλέγμα 2) και να πυκνώσουμε το πλέγμα κοντά στα διαμήκη ενισχυτικά, όπου προκύπτουν οι μέγιστες παραμορφώσεις, και στις κοχλιοσυνδέσεις, όπου έχουμε συγκέντρωση τάσεων.

Πίνακας 5.6. Αποτελέσματα Σύγκλισης Πλέγματος Βάσης

	Βάση			
	Πλέγμα 1	Πλέγμα 2	Πλέγμα 3	Πλέγμα 4
Μέγεθος Στοιχείων [mm]	15	12	10	8
Πλήθος Στοιχείων	116629	221203	383808	740442
Πλήθος Κόμβων	180768	332022	564699	1070965
Παραμόρφωση Y [mm]	2.4288	2.3035	2.3087	2.2843
Μέγιστη Τάση V. Mises [Mpa]	178.24	137.13	148.92	158.98
% Μεταβολή Τάσης	-	-29.98%	7.92%	6.33%
% Μεταβολή Παραμόρφωσης	-	-5.44%	0.23%	-1.07%



Σχήμα 5.28. Διάγραμμα Μέγιστης Τάσης-Κόμβων Βάσης

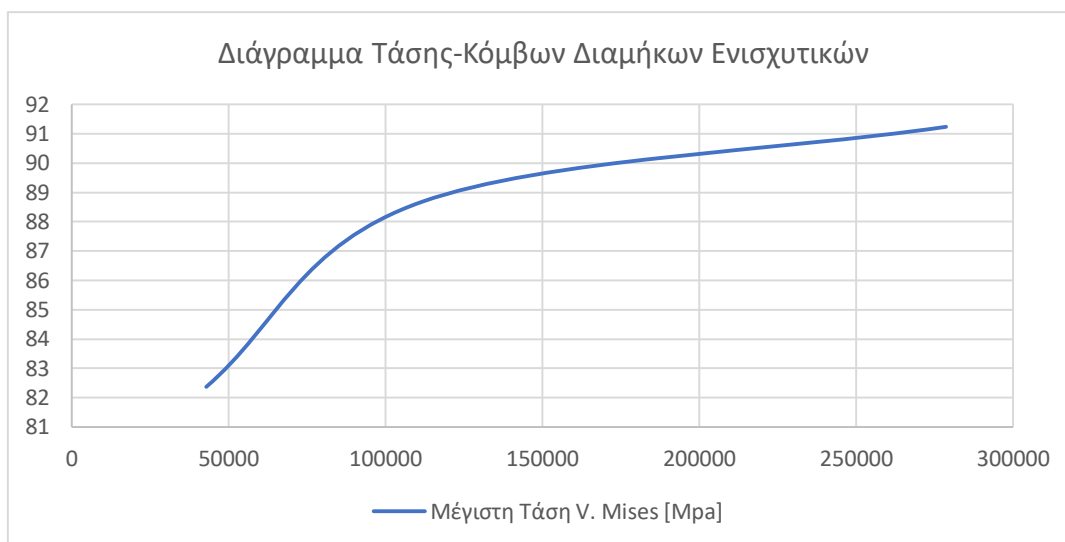


Σχήμα 5.29. Διάγραμμα Παραμόρφωσης(στον Υ Άξονα)-Κόμβων Βάσης

Στα διαμήκη ενισχυτικά οι τάσεις φαίνεται να συγκλίνουν στο πυκνότερο πλέγμα με ικανοποιητικό ρυθμό. Η διαφορά των τάσεων μεταξύ πλεγμάτων 3 και 4 είναι μικρότερη από 3 MPa (Πίνακας 5.7). Συνεπώς ένα μέγεθος στοιχείων κοντά στα 7 mm (πλέγμα 3) θεωρείται ικανοποιητικό.

Πίνακας 5.7. Αποτελέσματα Σύγκλισης Πλέγματος Διαμήκων Ενισχυτικών

Διαμήκη Ενισχυτικά				
	Πλέγμα 1	Πλέγμα 2	Πλέγμα 3	Πλέγμα 4
Μέγεθος Στοιχείων [mm]	15	10	7	5
Πλήθος Στοιχείων	4212	12870	36072	95530
Πλήθος Κόμβων	15751	42867	111570	278667
Μέγιστη Τάση V. Mises [Mpa]	90.22	82.37	88.68	91.24
% Μεταβολή Τάσης	-	-9.53%	7.12%	2.81%



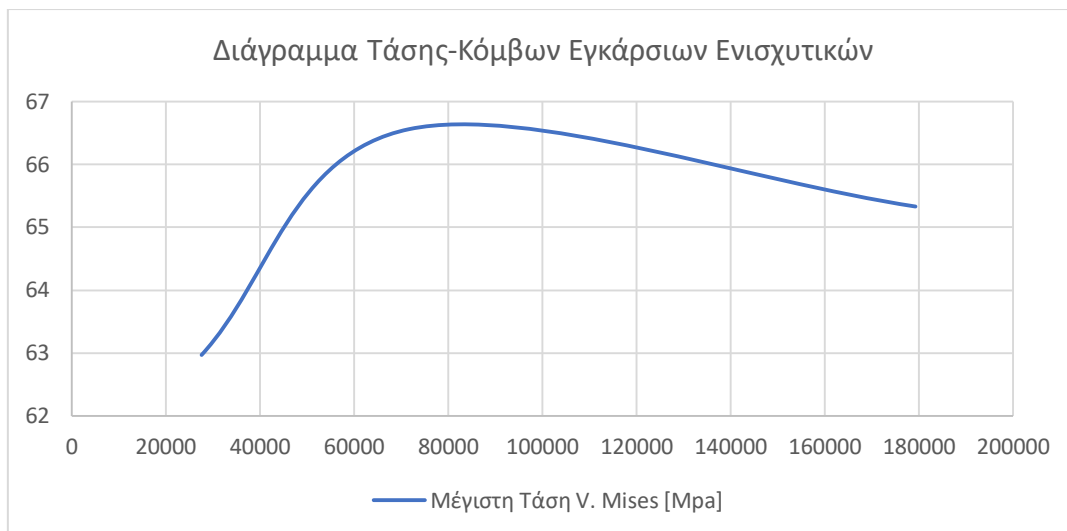
Σχήμα 5.30. Διάγραμμα Μέγιστης Τάσης-Κόμβων Διαμήκων Ενισχυτικών

Το πλέγμα 1 των εγκάρσιων ενισχυτικών εμφανίζει συγκέντρωση τάσεων σε κόμβο της επιφάνειας σύνδεσης, γι' αυτό δεν συμπεριλαμβάνεται στο διάγραμμα. Παρατηρούμε ότι η διαφορά των μέγιστων τάσεων μεταξύ πλεγμάτων 2 και 4 είναι μικρότερη από 3 MPa (Πίνακας 5.8). Συνεπώς ένα μέγεθος στοιχείων κοντά στα 10 mm (πλέγμα 2) θεωρείται ικανοποιητικό.

Σημειώνεται ότι στα ενισχυτικά, η επιφάνεια επαφής με την Βάση είναι μεγαλύτερη στην πραγματικότητα. Η συγκολλητή σύνδεση σίγουρα έχει μεγαλύτερο πλάτος από τον κορμό των ενισχυτικών, ο οποίος στο μοντέλο απλά πακτώνεται. Ως αποτέλεσμα, στην πραγματικότητα οι μέγιστες τάσεις στην επαφή θα είναι μικρότερες.

Πίνακας 5.8. Αποτελέσματα Σύγκλισης Πλέγματος Εγκάρσιων Ενισχυτικών

Εγκάρσια Ενισχυτικά				
	Πλέγμα 1	Πλέγμα 2	Πλέγμα 3	Πλέγμα 4
Μέγεθος Στοιχείων [mm]	15	10	7	5
Πλήθος Στοιχείων	2700	8250	23112	61388
Πλήθος Κόμβων	10151	27579	71670	179288
Μέγιστη Τάση V. Mises [Mpa]	71.49	62.97	66.56	65.33
% Μεταβολή Τάσης	-	-13.53%	5.39%	-1.88%



Σχήμα 5.31. Διάγραμμα Μέγιστης Τάσης-Κόμβων Εγκάρσιων Ενισχυτικών

5.3.3. Δημιουργία Πλέγματος

Τα αποτελέσματα της σύγκλισης πλέγματος, μας οδηγούνε στο συμπέρασμα ότι το πλέγμα του μοντέλου θα αποτελείται από πυκνές περιοχές, κοντά σε κατασκευαστικές λεπτομέρειες μικρών διαστάσεων και πιο αραιό πλέγμα, σε σώματα μεγάλης έκτασης και μικρής εντατικής κατάστασης. Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο συναρμολογημένο μοντέλο, πλήρες δομημένο πλέγμα είναι αδύνατο να δημιουργηθεί στα μέρη της διάταξης, πλην του δοκιμίου. Επειδή όμως το πλήθος των κόμβων, και συνεπώς η απαίτηση για υπολογιστική ισχύ, έχει αυξηθεί, η καλύτερη λύση είναι η κατασκευή υβριδικού πλέγματος, όπου μας δίνεται η δυνατότητα. Το υβριδικό πλέγμα συντίθεται από περιοχές δομημένου πλέγματος και περιοχές αδόμητου, στο ίδιο σώμα. Συναντάται σε σώματα με επιφάνειες που μπορούν να αναλυθούν σε απλά γεωμετρικά σχήματα και έχουν τουλάχιστον την ίδια γεωμετρία κατά το πάχος.

Στο πλέγμα αυτού του μοντέλου, ξεκινάμε με τον ορισμό των διαστάσεων των στοιχείων, που υπολογίστηκαν στην μέθοδο σύγκλισης. Όμως, προσθέτουμε νέες μεθόδους κατασκευής δομημένου πλέγματος, όπου είναι εφικτό και πυκνώνουμε αρκετά το πλέγμα στις περιοχές που τα αποτελέσματα δεν σύγκλιναν. Αυτή η διαδικασία γίνεται πλέον για κάθε σώμα ξεχωριστά, όχι σε ομάδες όπως στην μέθοδο σύγκλισης, και παρουσιάζεται στην συνέχεια.

➤ Δοκίμιο

Ξεκινάμε από το δοκίμιο στο οποίο το πλέγμα είναι πλήρως δομημένο. Στο δοκίμιο δεν μελετάμε την κατασκευαστική του αντοχή, γι' αυτό δεν συμπεριλήφθηκε και στην μέθοδο σύγκλισης. Βρίσκεται στην διάταξη μόνο για να μεταφέρει τις φορτίσεις από την μια στήριξη στην άλλη. Συνεπώς μπορούμε να το μοντελοποιήσουμε με στοιχεία σχετικά μεγάλου μεγέθους. Εισάγουμε αρχικά ένα εργαλείο “Sizing” στο υποσύστημα του “Mesh” και επιλέγουμε το τρισδιάστατο σώμα του δοκιμίου. Εισάγουμε το μέγεθος των στοιχείων του ίσο με 20 mm στην παράμετρο “Element Size”. Στην συνέχεια εισάγουμε μια νέα μέθοδο που δεν έχουμε παρουσιάσει, η οποία λέγεται “Multizone”. Η μέθοδος αυτή αποδομεί ένα σώμα με

πολλές και πολύπλοκες επιφάνειες, σε απλές γεωμετρίες, οι οποίες ύστερα, αφού δομηθούν σωστά, μπορούν να σαρώσουν το σώμα από επιφάνεια σε επιφάνεια, για την δημιουργία δομημένου πλέγματος. Ακόμα και αν δεν υπάρχει η δυνατότητα σάρωσης, μπορεί να γίνει χρήση του “Inflation”, δηλαδή από μια επιφάνεια-πηγή να προστεθούν στρώματα στοιχείων με τα ίδια χαρακτηριστικά της πηγής.

Στις ρυθμίσεις αυτής της μεθόδου, αρχικά επιλέγουμε το σώμα που θα εφαρμοστεί. Στην συνέχεια, μπορούμε να επιλέξουμε αν επιθυμούμε δομημένο ή αδόμητο πλέγμα και το είδος των στοιχείων, που φαίνονται στα κόκκινα πλαίσια του Σχήμα 5.32 (εξαεδρικά, πρισματικά κ.ά.). Οι υπόλοιπες ρυθμίσεις, που αφορούν τις επιφάνειες σάρωσης για την δημιουργία του πλέγματος, το μέγεθος των στοιχείων σάρωσης και τις προχωρημένες ρυθμίσεις για υπερκάλυψη γεωμετρικών λεπτομερειών, αφήνονται ως προεπιλογή. Όποτε εισάγεται αυτή η μέθοδος στη συνέχεια, οι ρυθμίσεις της θα δίνονται αναφορικά και θα αφορούν μόνο τα κόκκινα πλαίσια του ακόλουθου σχήματος.

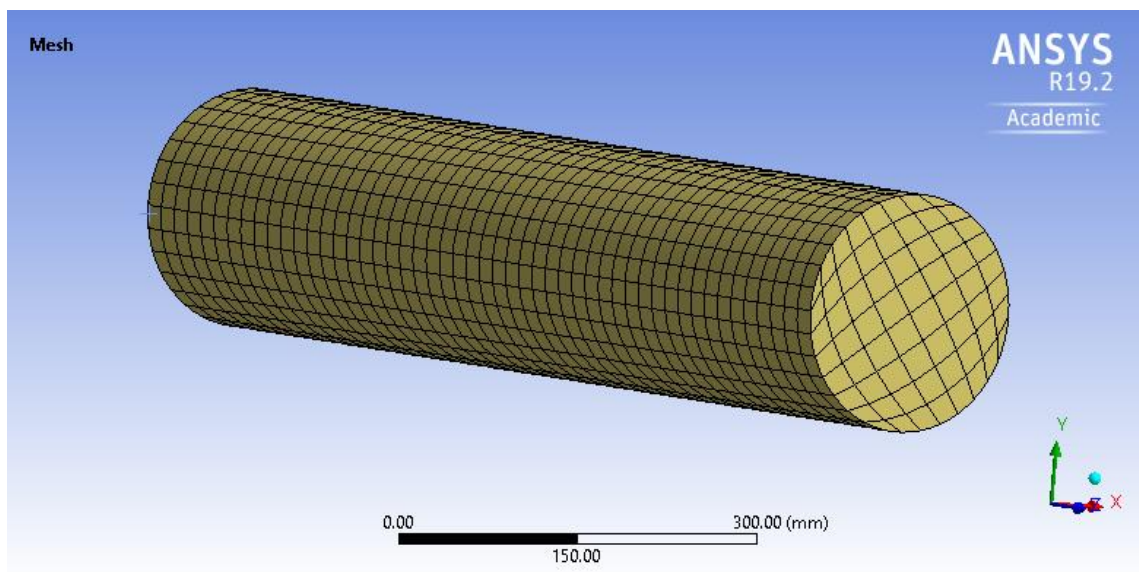
Details of "Method on dokimio" - Method	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
Definition	
Suppressed	No
Method	MultiZone
Mapped Mesh Type	Hexa
Surface Mesh Method	Program Controlled
Free Mesh Type	Not Allowed
Element Order	Use Global Setting
Src/Trg Selection	Automatic
Source Scoping Method	Program Controlled
Source	Program Controlled
Sweep Size Behavior	Sweep Element Size
<input type="checkbox"/> Sweep Element Size	Default
Advanced	
Preserve Boundaries	Protected
Mesh Based Defeaturing	Off
Minimum Edge Length	628.32 mm
Write ICEM CFD Files	No

Σχήμα 5.32. Ρυθμίσεις Μεθόδου "Multizone"

Το τελευταίο βήμα είναι η προσθήκη εργαλείου “Face Meshing”, για την δημιουργία δομημένου πλέγματος στην επιφάνεια σάρωσης, που θα χρησιμοποιήσει η μέθοδος που αναφέραμε προηγουμένως. Στις ρυθμίσεις αυτού του εργαλείου το δομημένο πλέγμα είναι προεπιλεγμένο (Σχήμα 5.33). Στην Γεωμετρία (Geometry), επιλέγουμε μια κυκλική επιφάνεια του δοκιμίου. Στο εξής, οι ρυθμίσεις αυτού του εργαλείου θα δίνονται αναφορικά και όχι σχηματικά. Το αποτέλεσμα της διαδικασίας κατασκευής πλέγματος του δοκιμίου φαίνεται στο Σχήμα 5.34.

Details of "Face Meshing on dokimio" - Mapped Face ...	
[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face
[-] Definition	
Suppressed	No
Mapped Mesh	Yes
Constrain Boundary	No
[-] Advanced	
Specified Sides	No Selection
Specified Corners	No Selection
Specified Ends	No Selection

Σχήμα 5.33. Ρυθμίσεις "Face Meshing"



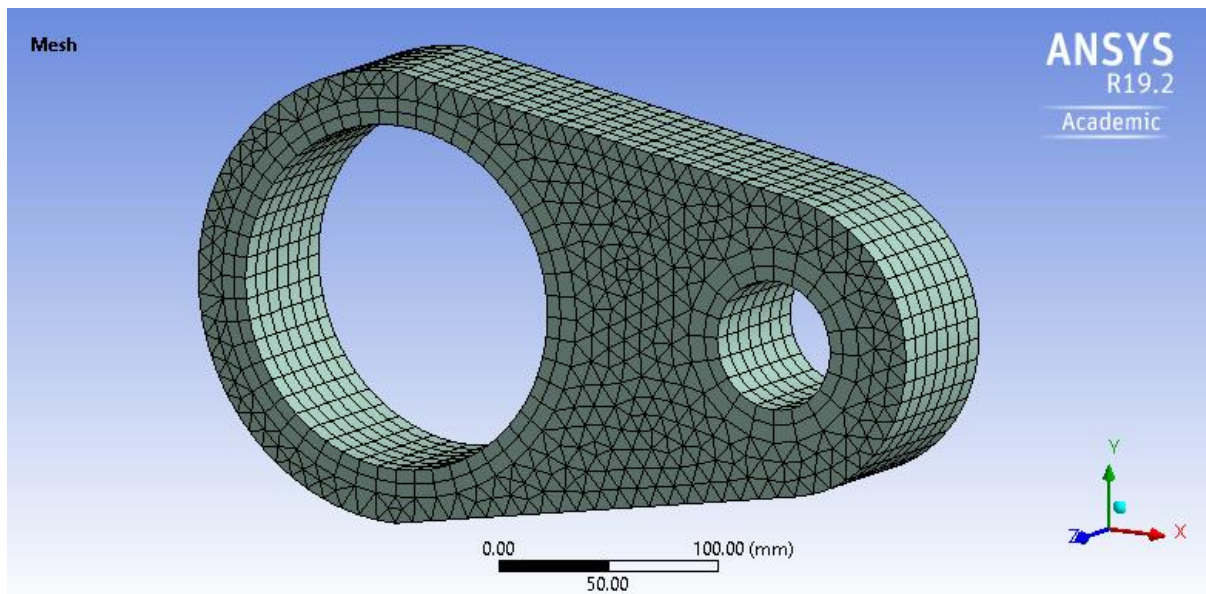
Σχήμα 5.34. Πλέγμα Δοκιμίου

➤ Βραχίονας

Σύμφωνα με την σύγκλιση πλέγματος ο Βραχίονας μοντελοποιείται ικανοποιητικά με στοιχεία μεγέθους 10 mm. Εισάγουμε λοιπόν ένα εργαλείο "Sizing" και επιλέγουμε το σώμα του Βραχίονα. Έπειτα εισάγουμε τη μέθοδο "Multizone" και στο "Mapped Mesh Type" επιλέγουμε πρισματικά στοιχεία. Κάνοντας δεξί κλικ στη μέθοδο αυτή, επιλέγουμε "Inflate this method". Έτσι εμφανίζεται μια μέθοδος "Inflation", για την δημιουργία στρωμάτων στοιχείων γύρω από τις οπές του σώματος, ώστε να δώσουμε ένα πυκνότερο πλέγμα, εξαεδρικών στοιχείων, γύρω από τις επιφάνειες εφαρμογής των συνοριακών συνθηκών. Επιλέγουμε τις 2 επιφάνειες των οπών και "First Layer Thickness" ως τη μέθοδο (Σχήμα 5.35). Το ύψος του στρώματος ισούται με το μέγεθος του πλέγματος 3 της μεθόδου σύγκλισης και ο αριθμός των στρωμάτων ίσος με 2. Ο ρυθμός ανάπτυξης αφήνεται ως προεπιλογή στο 1.2. Το πλέγμα που δημιουργείται χαρακτηρίζεται υβριδικό επειδή χρησιμοποιούμε πρισματικά και εξαεδρικά στοιχεία ταυτόχρονα. Το αποτέλεσμα φαίνεται στο Σχήμα 5.36.

Details of "Inflation" - Inflation	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
Definition	
Suppressed	No
Boundary Scoping Method	Geometry Selection
Boundary	2 Faces
Inflation Option	First Layer Thickness
<input type="checkbox"/> First Layer Height	7.0 mm
<input type="checkbox"/> Maximum Layers	2
<input type="checkbox"/> Growth Rate	1.2
Inflation Algorithm	Pre

Σχήμα 5.35. Ροθμίσεις "Inflation"



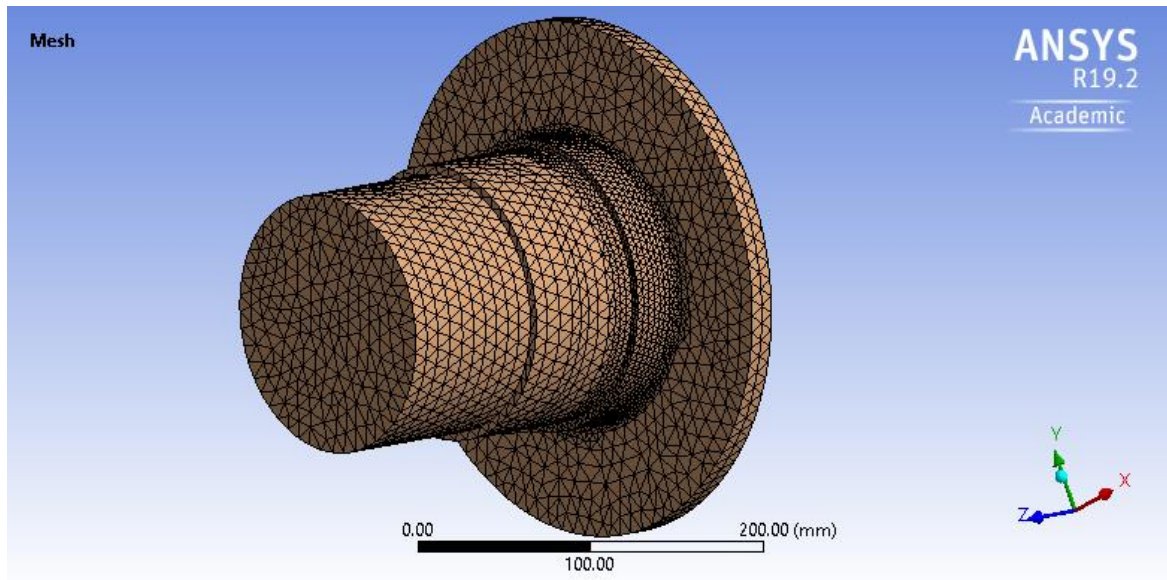
Σχήμα 5.36. Πλέγμα Βραχίονα

➤ Άξονας Πρόσδεσης

Στον Άξονα Πρόσδεσης εξαιτίας της απότομης αλλαγής γεωμετρίας στην φλάντζα αλλά και τα σκαλοπάτια, η μέθοδος "Multizone" δεν έχει ιδιαίτερο αποτέλεσμα. Άρα επιλέγουμε την δημιουργία αδόμητου πλέγματος με πυκνωση στα σημεία όπου δεν επιτεύχθηκε σύγκλιση των τάσεων. Εισάγουμε λοιπόν την Αυτόματη Μέθοδο και ένα εργαλείο "Sizing", με μέγεθος στοιχείων 10 mm. Τέλος, εισάγουμε εργαλείο "Refinement" (Σχήμα 5.37) το οποίο πυκνώνει το πλέγμα στην γεωμετρία και γύρω από αυτή, που επιλέγει ο χρήστης. Στη Γεωμετρία επιλέχθηκαν 2 ακμές, η μία στην βάση της φλάντζας και η άλλη στο τελευταίο σκαλοπάτι. Το μέγεθος της πυκνωσης καθορίζεται με κλίμακες. Εδώ επιλέχθηκε η 1^η κλίμακα. Τα αποτελέσματα του πλέγματος φαίνονται στο Σχήμα 5.38.

Details of "Refinement 2" - Refinement	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	2 Edges
Definition	
Suppressed	No
Refinement	1

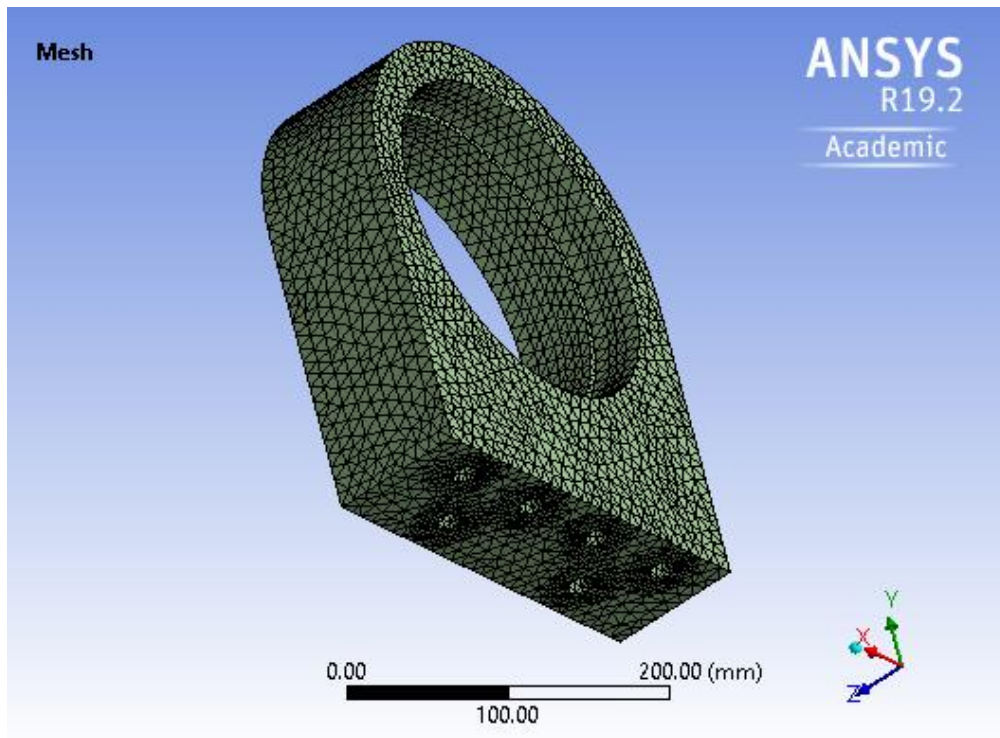
Σχήμα 5.37. Ρυθμίσεις "Refinement"



Σχήμα 5.38. Πλέγμα Άξονα Πρόσδεσης

➤ Στήριξη Κίνησης

Στην Στήριξη Κίνησης η μέθοδος "Multizone" δεν είναι εφαρμόσιμη λόγω της παρουσίας των τυφλών οπών της κοχλιοσύνδεσης. Συνεπώς το πλέγμα θα είναι αδόμητο, με πυκνωση κοντά στις οπές, όπως αποφάνθηκε στην μέθοδο σύγκλισης. Αρχικά εισάγουμε "Sizing" με μέγεθος στοιχείων 10 mm. Έπειτα εισάγουμε "Refinement" και επιλέγουμε τις ημικυκλικές ακμές των τυφλών οπών, που βρίσκονται στην επιφάνεια επαφής με την Βάση. Η κλίμακα του "Refinement" επιλέχθηκε ίση με 1. Το πλέγμα της Στήριξης φαίνεται στο Σχήμα 5.39.

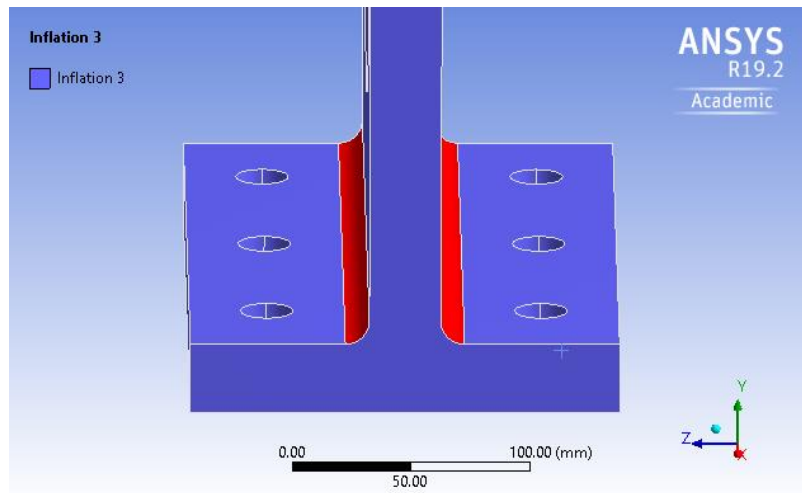


Σχήμα 5.39. Πλέγμα Στήριξης Κίνησης

➤ Στήριξη Πάκτωσης

Η Στήριξη Πάκτωσης είναι σώμα με αρκετές λεπτομέρειες και γι' αυτό στην μέθοδο σύγκλισης, οι τιμές της μέγιστης τάσης συνέχιζαν να αυξάνονται, ακόμα και στο πυκνό πλέγμα. Οι περιοχές που απαιτούν πυκνό πλέγμα βρίσκονται στο πέλμα της στήριξης, ή αλλιώς στο κάθετο στην πάκτωση έλασμα. Αρχικά εισάγουμε “Sizing” με μέγεθος στοιχείων 10 mm. Έπειτα χρησιμοποιούμε την μέθοδο “Multizone” επιλέγοντας δομημένο πλέγμα με εξαεδρικά και πρισματικά στοιχεία. Άρα στοχεύουμε σε δομημένο πλέγμα. Ξεκινώντας από την άνω περιοχή, εισάγουμε “Face Meshing” για να αντιστοιχήσουμε το πλέγμα του δοκιμίου με την επιφάνεια επαφής του με την στήριξη.

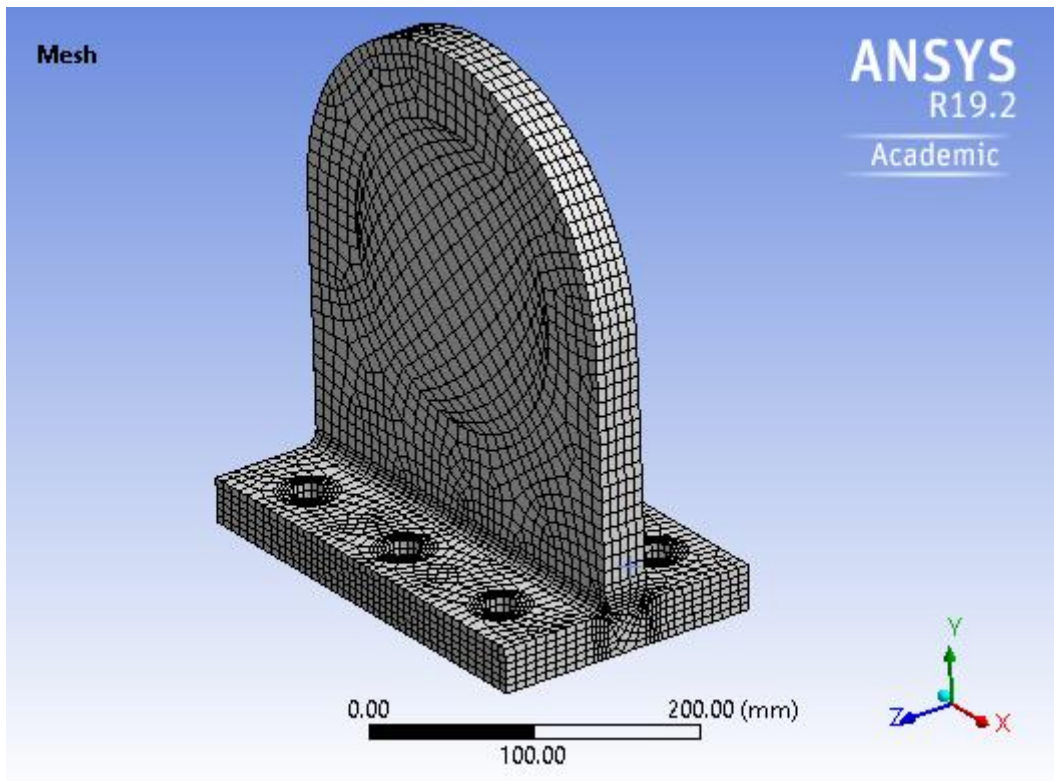
Επόμενο βήμα είναι η δημιουργία πυκνού δομημένου πλέγματος στην περιοχή μέγιστων τάσεων, που βρίσκεται στην ένωση των 2 ελασμάτων. Με δεξί κλικ στην “Multizone” επιλέγουμε “Inflate this method”. Δύο επιφάνειες μας ενδιαφέρουν, οι οποίες φαίνονται στο Σχήμα 5.40 (κόκκινο χρώμα).



Σχήμα 5.40. Επιφάνειες του "Inflation"

Οι ρυθμίσεις του "Inflation", πέρα από τον αριθμό των στρώσεων που είναι 4, δεν έχουν σημασία, εξαιτίας της γεωμετρίας των επιφανειών. Το μέγεθος των στοιχείων καθορίζουμε εισάγοντας "Edge Sizing", όπου επιλέγονται οι μικρές ακμές των κόκκινων επιφανειών. Αυτή τη φορά δεν δίνουμε το μέγεθος των στοιχείων, αλλά τον αριθμό των ισομεγεθών τμημάτων που χωρίζεται η ακμή που επιλέξαμε. Στην περίπτωση μας χωρίζουμε τις ακμές σε 5 μέρη.

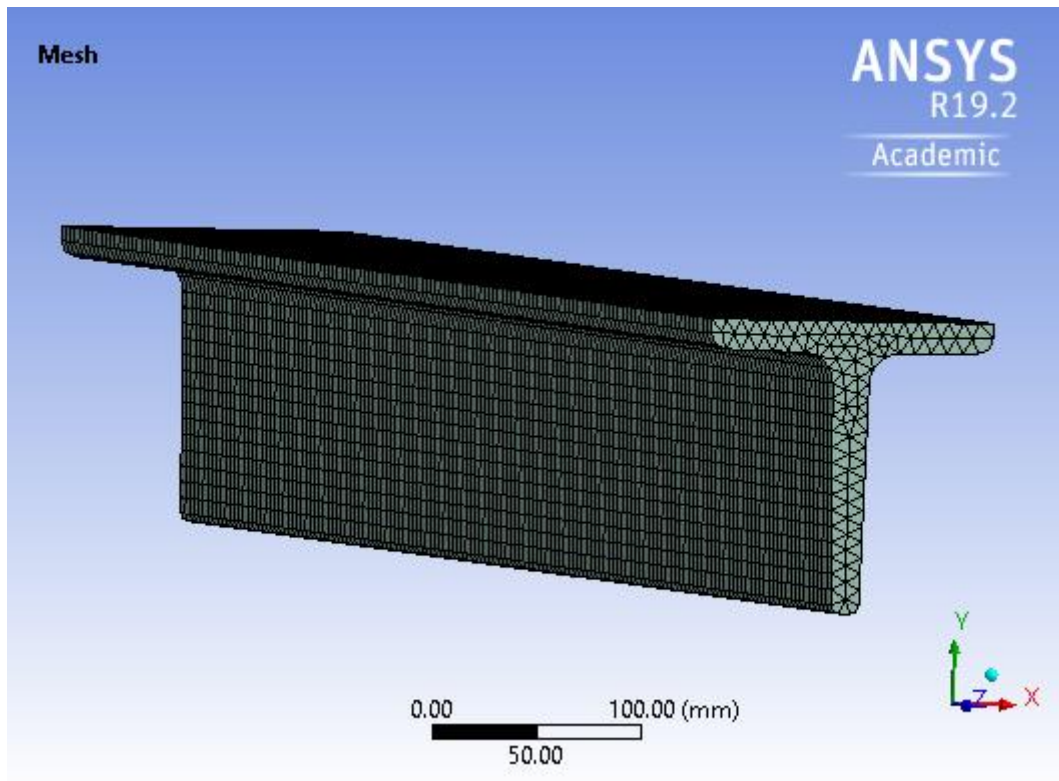
Για να δημιουργήσουμε πυκνό πλέγμα στις διαμετρικές οπές, επαναλαμβάνουμε το "Inflate this method" και επιλέγουμε τις 6 επιφάνειές τους. Η πυκνωση θέλουμε να είναι, σε διάμετρο από το κέντρο της οπής, όσο και (ή μεγαλύτερη) της ροδέλας που θα τοποθετηθεί εκεί. Η ροδέλα έχει εξωτερική ακτίνα 18.5 mm. Η οπή έχει ακτίνα 11 mm, συνεπώς θέλουμε το πάχος των στρώσεων να είναι τουλάχιστον 7.5 mm. Για να το επιτύχουμε αυτό, επιλέγουμε το "Total Thickness" στο "Inflation Option", 4 στρώματα με ρυθμό ανάπτυξης 1 και μέγιστη πυκνότητα 10 mm, δηλαδή λίγο μεγαλύτερη από τα 7.5 mm που χρειαζόμαστε. Αυτό σημαίνει ότι κάθε στοιχείο στο στρώμα, έχει πάχος 2.5 mm. Για να ορίσουμε και τις άλλες διαστάσεις των στοιχείων, εισάγουμε "Sizing" και επιλέγουμε τις 6 επιφάνειες των οπών. Το μέγεθος των στοιχείων ορίζεται ίσο με 5 mm. Επειδή έχουμε δημιουργήσει μεγάλη ανομοιομορφία μεταξύ των στοιχείων των 2 ελασμάτων, εισάγουμε άλλο ένα "Sizing" στις 2 επιφάνειες που εδράζονται οι ροδέλες, για να εισάγουμε ένα ενδιάμεσο μέγεθος στοιχείων, ίσο με 7 mm. Το αποτέλεσμα των παραπάνω μεθόδων φαίνεται στο Σχήμα 5.41.



Σχήμα 5.41. Πλέγμα Στήριξης Πάκτωσης

➤ Διαμήκη Ενισχυτικά

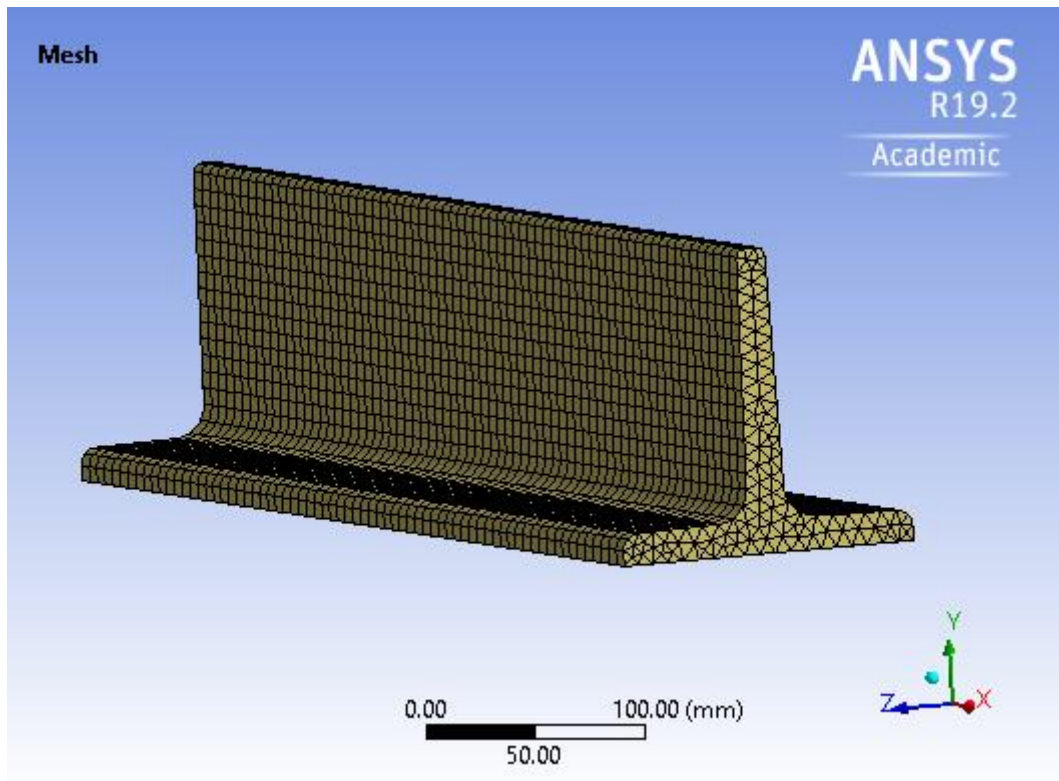
Η τομή των ενισχυτικών που έχουμε επιλέξει, δυσκολεύει την χρήση μόνο εξαεδρικών στοιχείων στο πλέγμα τους. Η χρήση εξ' ολοκλήρου πρισματικών στοιχείων είναι μονόδρομος για την δόμηση τους. Αυτό επιτυγχάνεται με τη μέθοδο "Multizone" και την επιλογή πρισμάτων στο "Mapped Mesh Type". Το μέγεθος των στοιχείων σε αυτά τα σώματα, καθορίζεται από ένα εργαλείο που ονομάζεται "Contact Sizing". Ο χρήστης επιλέγει την επαφή που επιθυμεί και το μέγεθος των στοιχείων, που για τα διαμήκη ενισχυτικά είναι 8 mm. Το πρόγραμμα αυτόματα πυκνώνει το πλέγμα στην επαφή και σε περιοχές κοντά σε αυτή, ανάλογα με το μέγεθος των σωμάτων που βρίσκονται σε σύνδεση. Επειδή η Βάση είναι πολύ μεγαλύτερη από τα ενισχυτικά, το μέγεθος των στοιχείων των ενισχυτικών ελέγχεται ολοκληρωτικά από το "Contact Sizing". Το πλέγμα των διαμήκων ενισχυτικών παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.42.



Σχήμα 5.42. Πλέγμα Διαμήκων Ενισχυτικών

➤ Εγκάρσια Ενισχυτικά

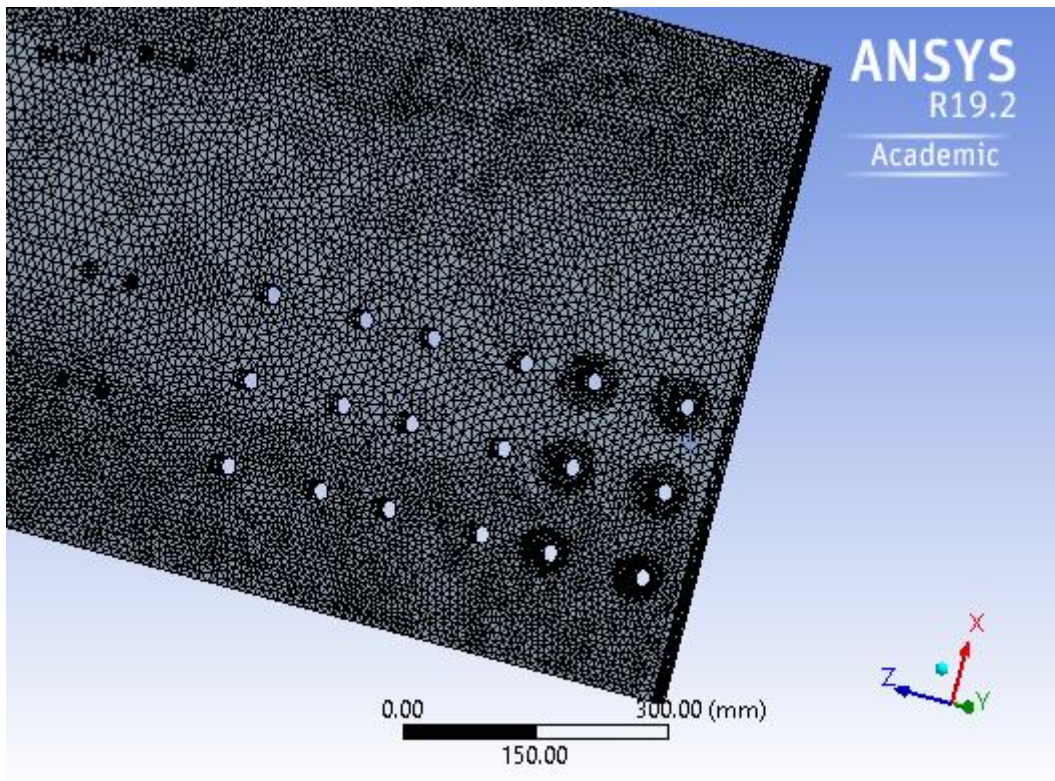
Στα εγκάρσια ενισχυτικά, η σύγκλιση πλέγματος δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα από το πλέγμα 2, δηλαδή μέγεθος στοιχείων 10 mm. Επειδή όμως το πάχος τους είναι μικρό, θα μοντελοποιηθούν καλύτερα με στοιχεία μικρότερων διαστάσεων στο πάχος. Αρχικά ορίζουμε το μήκος των στοιχείων με “Sizing” και κατακερματισμό μιας ακμής κατά το μήκος. Τα εγκάρσια ενισχυτικά έχουν μήκος 744.5 mm, οπότε διαχωρίζοντας την ακμή σε 70 μέρη, έχουμε μήκος στοιχείων κοντά στα 10 mm. Οι άλλες διαστάσεις των στοιχείων καθορίζονται από τις ρυθμίσεις του Πλέγματος (Mesh), όπου το μέγεθος των στοιχείων έχει δοθεί ίσο με 8 mm. Επίσης, και σε αυτά τα ενισχυτικά, η μέθοδος μοντελοποίησης είναι “Multizone” με δομημένο πλέγμα πρισματικών στοιχείων. Το πλέγμα των εγκάρσιων ενισχυτικών φαίνεται στο Σχήμα 5.43.



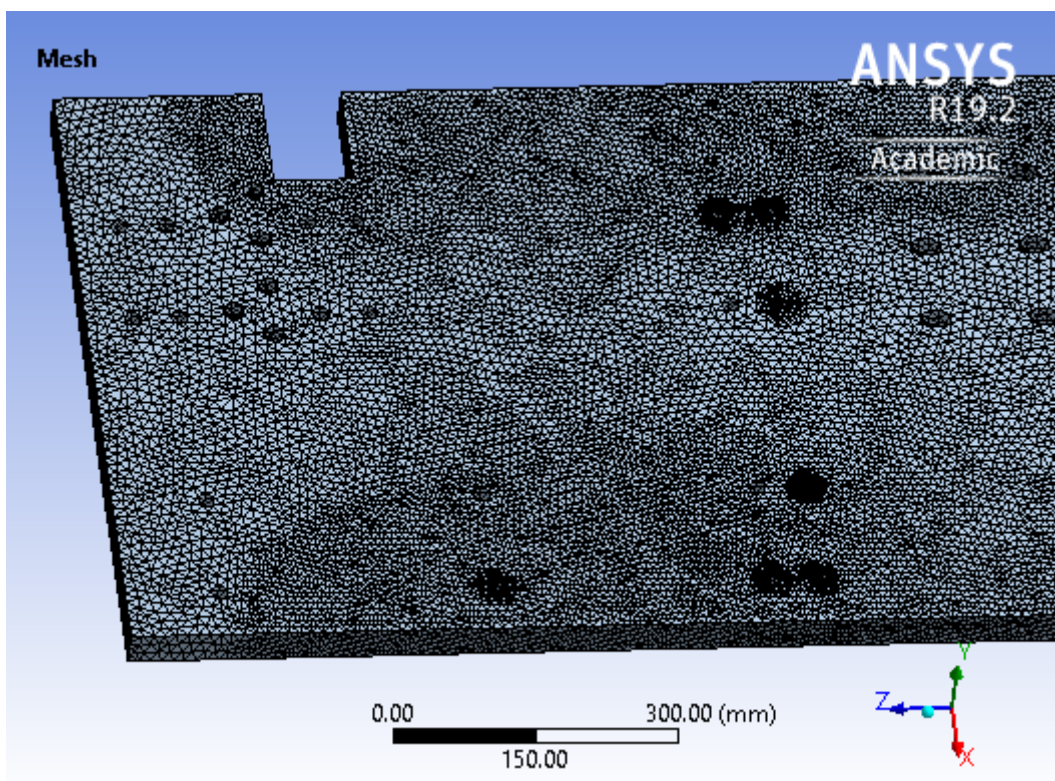
Σχήμα 5.43. Πλέγμα Εγκάρσιων Ενισχυτικών

➤ Βάση

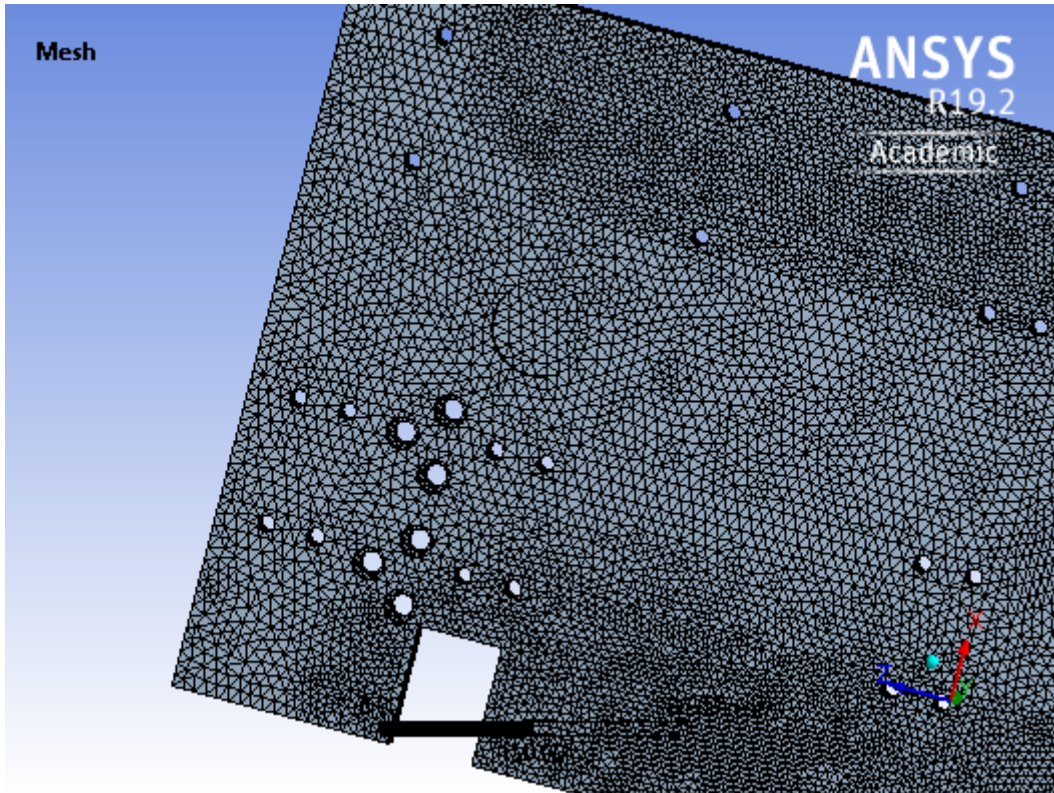
Η Βάση είναι ένα σώμα με πολλές λεπτομέρειες, όπως εγκοπές, εσοχές και διαμπερείς οπές. Η δημιουργία δομημένου πλέγματος είναι αδύνατη με οποιαδήποτε μέθοδο προσφέρει το πρόγραμμα. Η χρήση εξαεδρικών και πρισματικών στοιχείων οδηγεί σε μεγάλη ανομοιομορφία των διαστάσεων τους, συνεπώς η μόνη λύση είναι η δόμηση με τετραεδρικά στοιχεία. Από την μέθοδο σύγκλισης, γνωρίζουμε με αρκετή ακρίβεια την κατανομή των τάσεων στο σώμα. Οι περιοχές συγκέντρωσης τάσεων βρίσκονται στο μέγιστο πλάτος που αρχίζει το ανυποστήρικτο μήκος, στις εδράσεις μερικών κοχλιών της σύνδεσης με το τραπέζι και στους κοχλίες σύνδεσης με την Στήριξη Πάκτωσης. Επίσης, λόγω διαστάσεων, χρειάζεται πυκνωση στις εσοχές των κοχλιών σύνδεσης με την Στήριξη Κίνησης. Στο μέγιστο πλάτος, η πυκνωση προϋπάρχει από το “Contact Sizing” των διαμήκων ενισχυτικών, με μέγεθος στοιχείων 8 mm. Στις περιοχές των κοχλιών Βάσης και Στήριξης Πάκτωσης, εισάγεται εργαλείο “Refinement” σε 1^η κλίμακα (Σχήματα 5.44, 5.45). Στις επιφάνειες έδρασης των κοχλιών της Στήριξης Κίνησης, εισάγεται “Sizing” με μέγεθος στοιχείων 5 mm. Στην Βάση, ως κύριο μέγεθος επιλέγουμε τα 12 mm, από “Sizing” που έχει εισαχθεί για όλο το σώμα. Τα αποτελέσματα των παραπάνω, φαίνονται στα Σχήμα 5.44,45,46.



Σχήμα 5.44. Πλέγμα Βάσης-Ανοψη 1



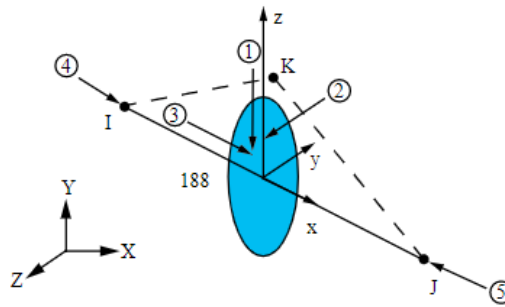
Σχήμα 5.45. Πλέγμα Βάσης στους Κοιλίες Σύνδεσης με Τραπέζι



Σχήμα 5.46. Πλέγμα Βάσης-Άνοψη 2

Οι ρυθμίσεις του Πλέγματος (Mesh) παραμένουν οι προεπιλεγμένες, εκτός από το μέγεθος των στοιχείων, που επιλέγουμε ίσο με 8 mm. Το μέγεθος αυτό καθορίζει τις διαστάσεις των στοιχείων των εγκάρσιων ενισχυτικών που αναφέραμε, αλλά και τα στοιχεία επαφών των άκαμπτων σωμάτων.

Κλείνοντας, γίνεται αναφορά στο είδος των στοιχείων που αξιοποιήθηκαν σε αυτό το μοντέλο. Τα περισσότερα είναι ήδη γνωστά, όπως τα τρισδιάστατα στοιχεία SOLID186, SOLID187 που απαρτίζουν το πλέγμα των παραμορφωσίων σωμάτων, τα MASS21 (σημειακά στοιχεία) που μοντελοποιούν τα άκαμπτα σώματα, τα δυσδιάστατα CONTA174 και TARGE170 που καλύπτουν τις επιφάνειες των επαφών και τα SURF154 που εντοπίζονται στις συνοριακές συνθήκες. Τα νέα στοιχεία ονομάζονται BEAM188, είναι δοκοί και μοντελοποιούν τους κοχλίες. Χρησιμοποιούνται για την ανάλυση λεπτών αλλά και ευμεγεθών δοκών και βασίζονται στην θεωρία δοκών Timoshenko, η οποία συμπεριλαμβάνει φαινόμενα διάτμησης-παραμόρφωσης. Αποτελούνται από 2 κόμβους με 6 βαθμούς ελευθερίας ο καθένας και είναι κατάλληλα για γραμμική ή μη-γραμμική, μεγάλων παραμορφώσεων, ανάλυση. Η γεωμετρία τους φαίνεται στο Σχήμα 5.47.



Σχήμα 5.47. Γεωμετρία BEAM188

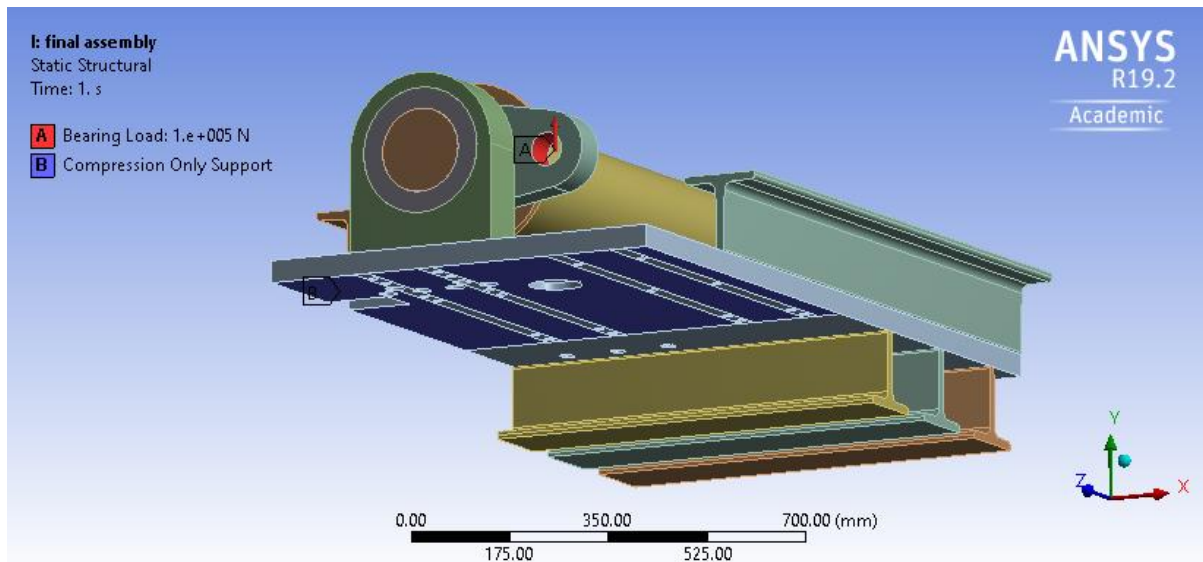
Συγκεντρωτικές πληροφορίες για το πλέγμα αυτού του μοντέλου δίνονται στον Πίνακα 5.9.

Πίνακας 5.9. Πληροφορίες Πλέγματος Τελικού Μοντέλου

Αριθμός Στοιχείων Τελικού Μοντέλου	1026439
Αριθμός Κόμβων Τελικού Μοντέλου	530822
Σύνολο Εξισώσεων	3250212

5.3.4. Επίλυση

Στο στάδιο αυτό ορίζονται οι συνοριακές συνθήκες του προβλήματος, μαζί με τις ρυθμίσεις της ανάλυσης. Αρχικά, εισάγουμε την δύναμη που ασκείται στη διάταξη, η οποία είναι ίδια σε όλα τα συναρμολογημένα μοντέλα που έχουν παρουσιαστεί. Για να την ορίσουμε, προσθέτουμε στην ανάλυση “Bearing Load” και επιλέγουμε την επιφάνεια της οπής του βραχίονα (κόκκινη επιφάνεια, Σχήμα 5.48). Επιλέγουμε “Define by Components” και αναγράφουμε 100000 N στη συνιστώσα Y του παραθύρου των λεπτομερειών. Σε αντίθεση με τα υπόλοιπα μοντέλα, η Βάση δεν είναι πακτωμένη στο τραπέζι, αλλά ακουμπάει σε εικονική επιφάνεια, που αντικαθιστά το τραπέζι. Αυτή η στήριξη μοντελοποιείται με “Compression Only Support”, η οποία δημιουργεί στήριξη χωρίς τριβές σε άκαμπτη εικονική επιφάνεια. Οι επιφάνειες στις οποίες εφαρμόζεται αυτή η στήριξη, είναι οι 5 μπλε του Σχήμα 5.48. Αυτή η στήριξη επιτρέπει στο μοντέλο να μετατοπιστεί μόνο στα θετικά του Y άξονα. Στους υπόλοιπους άξονες δεν ασκούνται δυνάμεις οπότε δεν απαιτείται κάποιος περιορισμός.



Σχήμα 5.48. Συνοριακές Συνθήκες Τελικού Συναρμολογημένου Μοντέλου

Η δυσκολία επίλυσης του μοντέλου έχει αυξηθεί σημαντικά. Το πλήθος των στοιχείων και ο αριθμός των επαφών οδηγούν σε μεγάλο αριθμό επαναλήψεων μέχρι να επέλθει σύγκλιση. Γι' αυτό ορίζουμε στις Ρυθμίσεις Ανάλυσης, 5 αρχικά υποβήματα, με ελάχιστα τα 5 και μέγιστα τα 10 (Step Controls). Ακόμα μια φορά, ενεργοποιούμε το “Large Deflection” (Solver Controls) και τα “Nodal Forces” (Output Controls)”. Η επίλυση θεωρείται μη-γραμμική εξαιτίας των παραμορφώσεων του δοκιμίου. Ο αριθμός των προσεγγίσεων ισορροπίας (Equilibrium Iterations) ισούται από προεπιλογή με 25. Για να αποφευχθεί το ενδεχόμενο σφάλματος, σε περίπτωση που οι προσεγγίσεις ξεπεράσουν τις 25, εισάγουμε την εντολή (Insert→ Commands):

NEQIT, 50

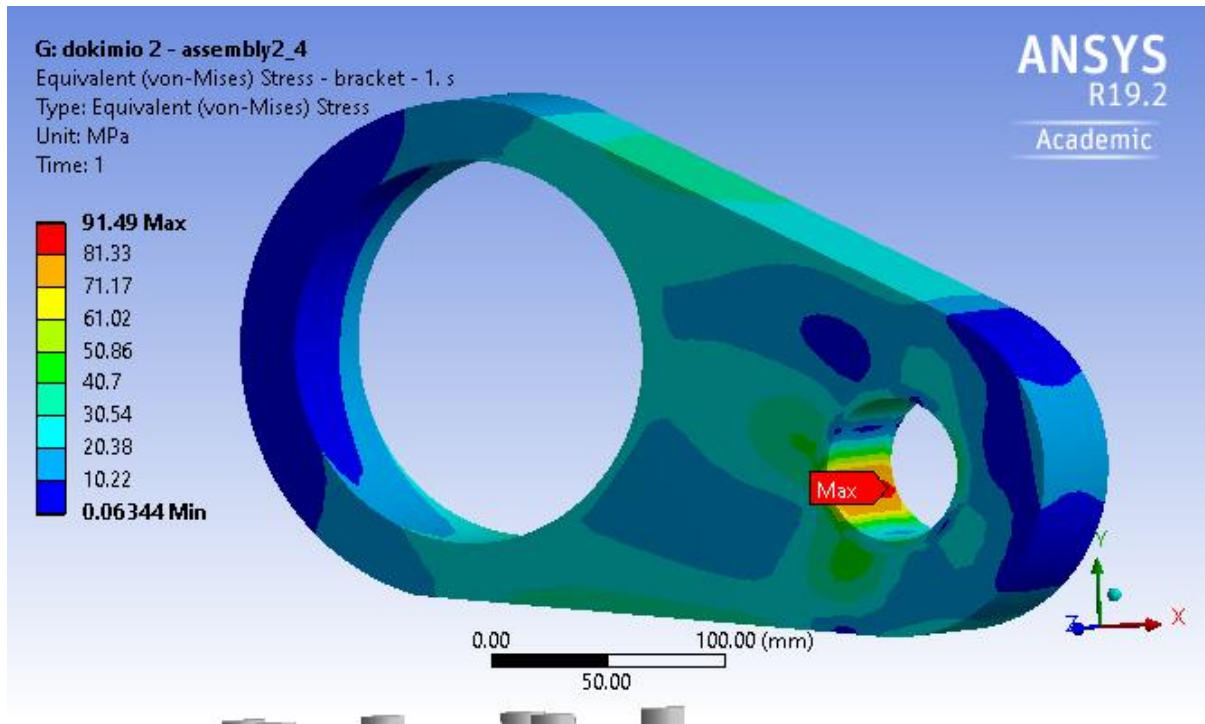
Έτσι ο αριθμός τους αυξάνεται στις 50, ώστε να εξασφαλίσουμε την σύγκλιση του πρώτου υποβήματος, που συνήθως απαιτεί τις περισσότερες προσεγγίσεις.

5.3.5. Μετ-Επεξεργασία

Στο στάδιο αυτό, που είναι το τελευταίο της ανάλυσης, ο χρήστης αναλύει τα αποτελέσματα με την βοήθεια εργαλείων. Τα εργαλεία παρουσιάζουν τα αποτελέσματα σε πίνακες και με χρωματικές απεικονίσεις, για την καλύτερη κατανόηση τους. Σε αυτό το μοντέλο θα προχωρήσουμε από σώμα σε σώμα, σχολιάζοντας τα αποτελέσματα. Υπενθυμίζεται ότι ο ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας, που σκοπεύει να επιτύχει η διάταξη, είναι ίσος με 2 και οι παραμορφώσεις κατά την διεύθυνση φόρτισης, δεν πρέπει να ξεπερνούν το 1/100 της μεγαλύτερης διάστασης. Όμως στο προηγούμενο κεφάλαιο αποδείχθηκε ότι το κριτήριο των παραμορφώσεων που έχει τεθεί, δεν αρκεί αν οι καμπτικές ροπές που επάγονται στο δοκίμιο είναι υψηλές. Με αυτό κατά νου, δοκιμάζονται άλλα 2 δοκίμια μικρότερης και μεγαλύτερης στρεπτικής δυσκαμψίας, ώστε να υπάρχει ολοκληρωμένη εικόνα για τις επαγόμενες κάμψεις στα δοκίμια.

➤ Βραχίονας

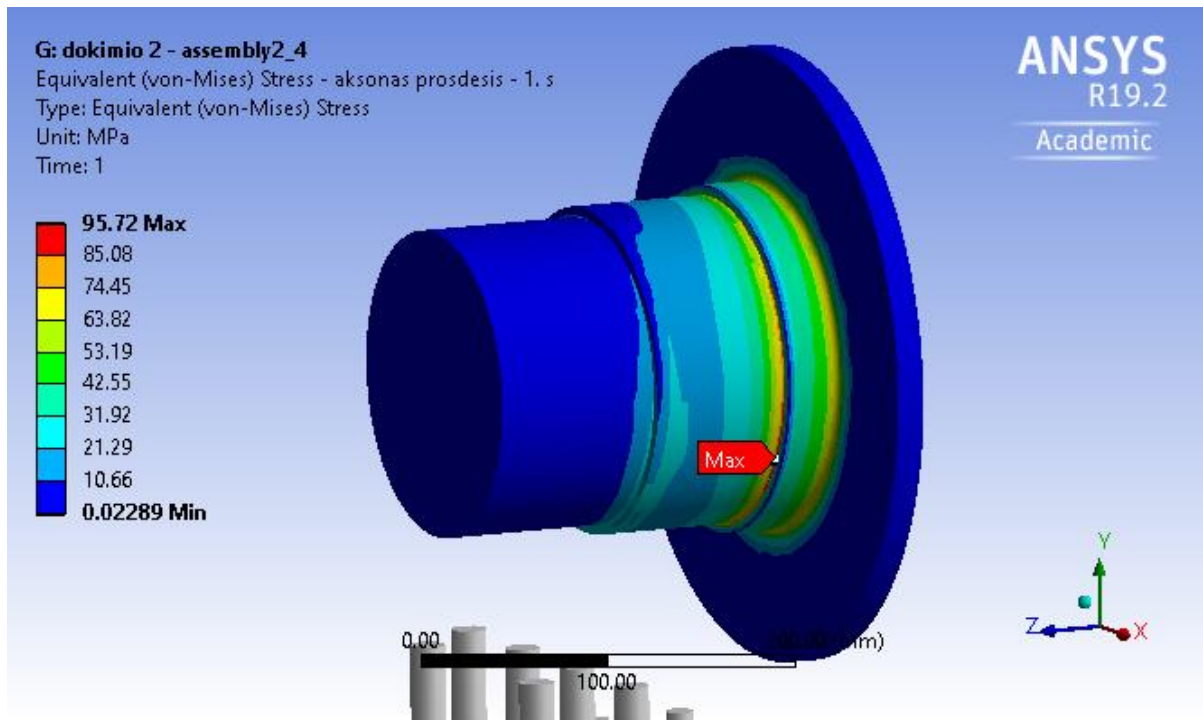
Ο Βραχίονας είναι σώμα που περιστρέφεται, συνεπώς εξετάζουμε μόνο τις αναπτυσσόμενες τάσεις “Von Mises”. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.49, τίποτα δεν έχει αλλάξει σε σχέση με τα προηγούμενα μοντέλα. Οι τάσεις κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα, με την μέγιστη να φτάνει τα 91.5 MPa. Δηλαδή ο συντελεστής ασφαλείας ισούται με 2.73, σύμφωνα με το “Stress Tool” του προγράμματος. Οι παραμορφώσεις έχουν εξεταστεί στο μεμονωμένο μοντέλο και είναι αποδεκτές. Γενικά, η ανάλυση δείχνει ότι ο Βραχίονας ξεπερνάει τις προδιαγραφές που έχουμε θέσει και έχει ικανοποιητική αντοχή.



Σχήμα 5.49. Κατανομή Τάσεων Βραχίονα- Τελικό Συναρμολογημένο Μοντέλο

➤ Άξονας Πρόσδεσης

Ο Άξονας Πρόσδεσης είναι επίσης σώμα που περιστρέφεται, συνεπώς εξετάζουμε μόνο τις αναπτυσσόμενες τάσεις Von Mises. Όπως βλέπουμε στο Σχήμα 5.50, η κατανομή των τάσεων στο σώμα είναι ίδια με αυτή του προηγούμενου μοντέλου, με την μέγιστη τάση να φτάνει τα 95.7 MPa. Άρα ο συντελεστής ασφαλείας ισούται με 2.61. Οι παραμορφώσεις γνωρίζουμε πως ικανοποιούν το κριτήριο της γωνίας στρέψης μικρότερης από 0.01 μοίρα αλλά και του βέλους κάμψης, από το μεμονωμένο μοντέλο τους σώματος. Συμπερασματικά, φαίνεται πως ο Άξονας Πρόσδεσης ικανοποιεί τις προδιαγραφές που έχουν τεθεί.



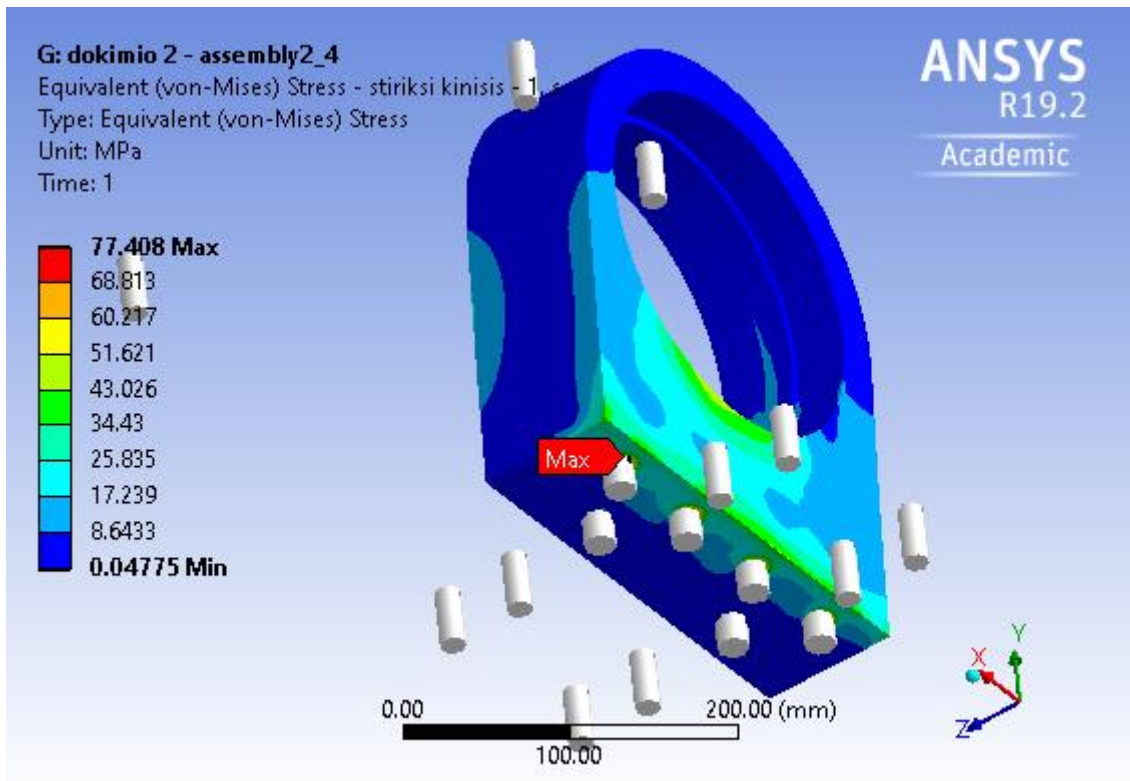
Σχήμα 5.50. Κατανομή Τάσεων Άξονα Πρόσδεσης - Τελικό Συναρμολογημένο Μοντέλο

➤ Στήριξη Κίνησης

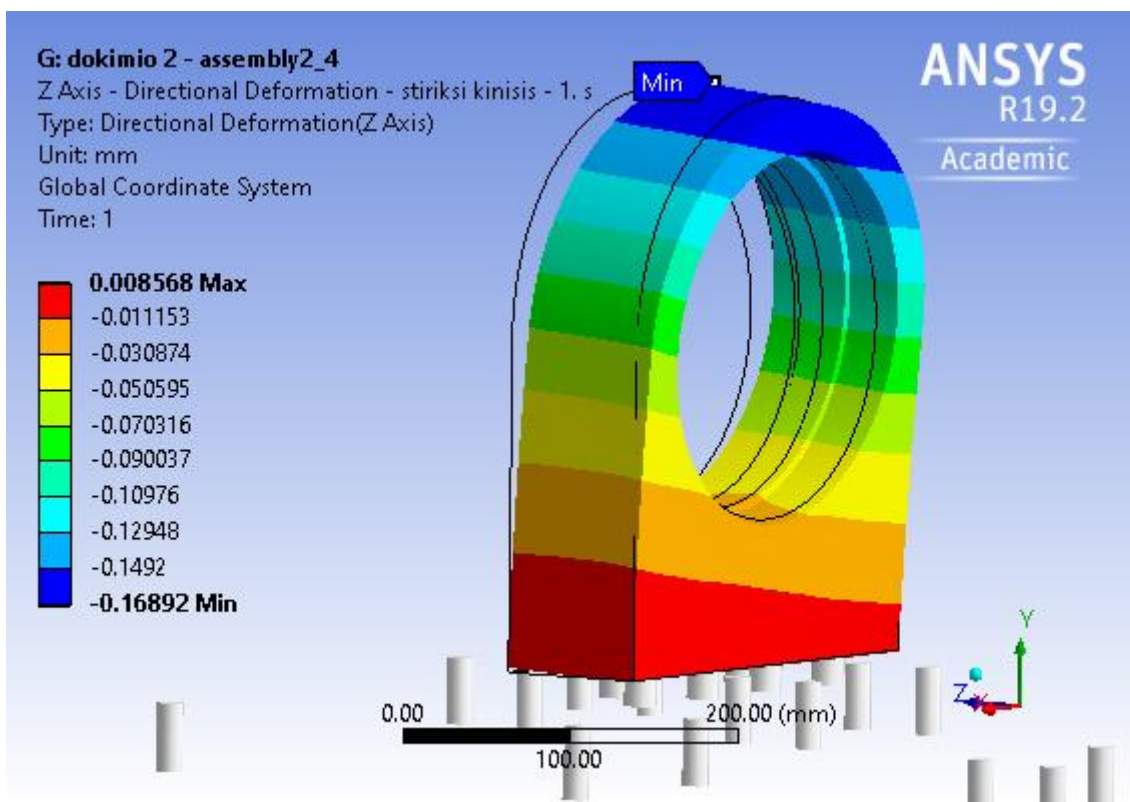
Σε αυτό το σώμα ελέγχουμε τις αναπτυσσόμενες τάσεις “Von Mises” και τις παραμορφώσεις στον άξονα της φόρτισης. Από το Σχήμα 5.51 φαίνεται ότι οι τάσεις αναπτύσσονται κυρίως στις οπές των κοχλιών και την κάτω πλευρά της κεντρικής οπής, που διέρχεται ο Άξονας Πρόσδεσης. Γνωρίζοντας την φόρτιση του σώματος, συμπεραίνουμε ότι οι τάσεις δημιουργούνται λόγω θλίψης, με μέγιστη τιμή ίση με 77.4 MPa. Ο συντελεστής ασφαλείας ισούται με 3.23, αρκετά πάνω από την ελάχιστη τιμή και κοντά στην επιθυμητή του 3.

Οι μετατοπίσεις στον άξονα Z (Σχήμα 5.52), που ισούνται με τις παραμορφώσεις σε αυτό τον άξονα, έχουν αυξηθεί σε σχέση με το προηγούμενο μοντέλο. Παρόλα αυτά είναι ακόμα πολύ μικρότερες (1/1420) από το ανώτατο όριο του 1/100. Άλλωστε η αύξηση είναι αναμενόμενη, καθώς όλες οι πακτώσεις του μοντέλου αντικαταστάθηκαν από κοχλιοσυνδέσεις, οι οποίες συνδέουν πολύ μικρότερη επιφάνεια, με αποτέλεσμα μεγαλύτερες παραμορφώσεις μακριά από αυτές. Τελικά, το σώμα υπερκαλύπτει τους στόχους για τάσεις και παραμορφώσεις. Τονίζεται ότι σε όλα τα σχήματα τα σώματα στρεβλώνονται σε μεγαλύτερη κλίμακα.

Αναφορικά για την κοχλιοσύνδεση με την Βάση, οι κοχλίες παρουσιάζουν θλιπτικές αξονικές δυνάμεις, οι οποίες θεωρούνται αμελητέες για την αντοχή χάλυβα κλάσης 12.9, που έχει επιλεγεί. Τα αποτελέσματα της δυσμενέστερης φόρτισης σε αυτό το μοντέλο, φαίνονται στο Σχήμα 5.53 και παρέχονται από εργαλείο “Beam Probe”. Η μεγαλύτερη φόρτιση της σύνδεσης, όμως, συμβαίνει κατά τις δοκιμές στις οποίες το έμβολο ανεβαίνει (συμπύσσεται). Ο κοχλίας 6 της σύνδεσης είναι αυτός με την μεγαλύτερη αξονική δύναμη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.54.



Σχήμα 5.51. Κατανομή Τάσεων Στήριξης Κίνησης- Τελικό Συναρμολογημένο Μοντέλο



Σχήμα 5.52. Μετατοπίσεις Z Αξονα Στήριξης Κίνησης- Τελικό Συναρμολογημένο Μοντέλο

Results	
<input type="checkbox"/> Axial Force	-1606.2 N
<input type="checkbox"/> Torque	-767.88 N-mm
<input type="checkbox"/> Shear Force At I	59.14 N
<input type="checkbox"/> Shear Force At J	58.789 N
<input type="checkbox"/> Moment At I	3434.3 N-mm
<input type="checkbox"/> Moment At J	7224.5 N-mm

Σχήμα 5.53. Φόρτιση Κοχλία 5 Στήριξης Κίνησης- Έκταση Εμβόλου

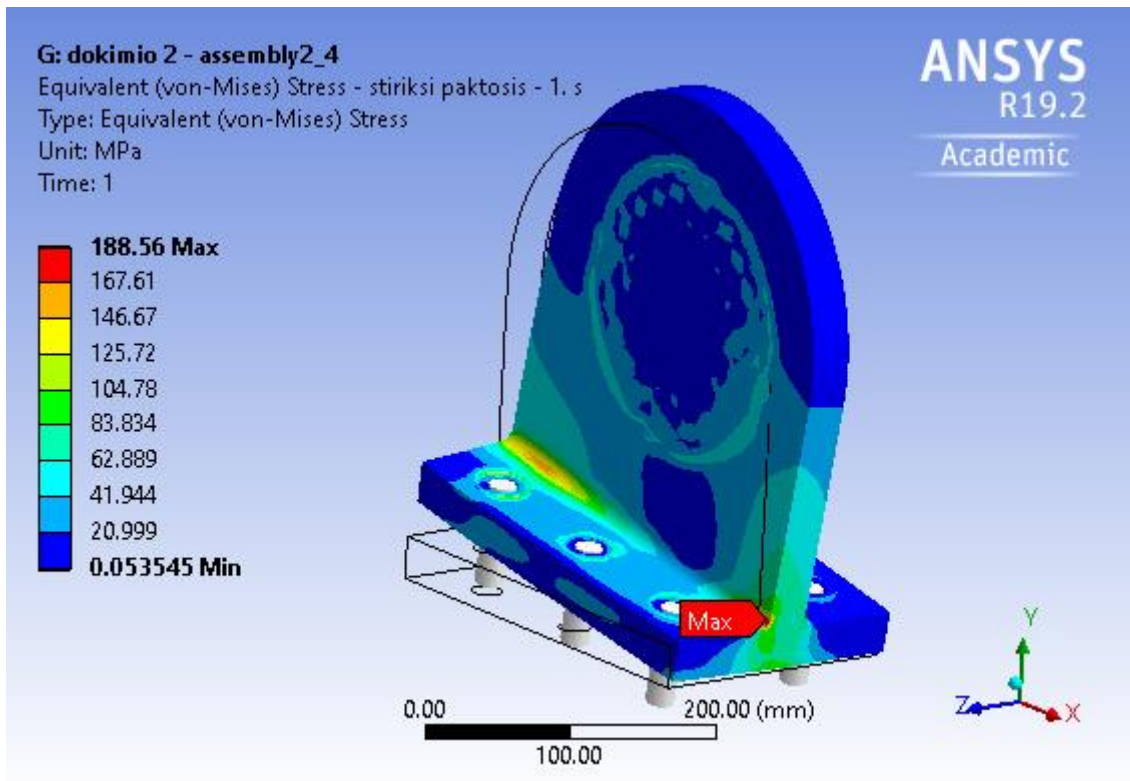
Results	
<input type="checkbox"/> Axial Force	27630 N
<input type="checkbox"/> Torque	1175. N-mm
<input type="checkbox"/> Shear Force At I	297.65 N
<input type="checkbox"/> Shear Force At J	292.93 N
<input type="checkbox"/> Moment At I	22574 N-mm
<input type="checkbox"/> Moment At J	18749 N-mm

Σχήμα 5.54. Φόρτιση Κοχλία 6 Στήριξης Κίνησης- Σύμπτυξη Εμβόλου

➤ Στήριξη Πάκτωσης

Σε αυτό το σώμα τα αποτελέσματα είναι τελείως διαφορετικά από αυτά που είδαμε στα προηγούμενα μοντέλα. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.55, η στήριξη φορτίζεται κυρίως στην περιοχή ένωσης των 2 ελασμάτων και στα σημεία επαφής των κοχλιοσυνδέσεων. Οι τάσεις που αναπτύσσονται από τις ροδέλες είναι θλιπτικές και δεν μας απασχολούν. Όμως η μέγιστη τάση των 188.6 MPa, επάγεται από τις παραμορφώσεις της Βάσης αλλά και την κάμψη του δοκιμίου. Ένα πιο άκαμπτο δοκίμιο προφανώς θα δημιουργούσε υψηλότερες τάσεις σε αυτό το σημείο. Συνεπώς προτείνεται η χρήση χάλυβα υψηλής αντοχής, ώστε να ικανοποιηθεί το κριτήριο ασφαλείας. Στην βιβλιοθήκη του ANSYS υπάρχει τυπικός χάλυβας υψηλής αντοχής (HSLA Steel) με όριο διαρροής 378 MPa (ANSYS Granta, 2020). Συνεπώς ο συντελεστής ασφαλείας με τέτοιο χάλυβα ισούται οριακά με 2. Άρα η λύση αυτή μπορεί να θεωρηθεί αποδεκτή.

Όσον αφορά την κοχλιοσύνδεση με τη Βάση σε αυτό το μοντέλο, ο κοχλίας 1 βρίσκεται στη δυσμενέστερη θέση. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 5.56. Κατά την κίνηση του εμβόλου προς την αντίθετη κατεύθυνση, ο κοχλίας 3 είναι ο πιο φορτισμένος, με τα αποτελέσματα που φαίνονται στο Σχήμα 5.57.



Σχήμα 5.55. Κατανομή Τάσεων Στήριξης Πάκτωσης- Τελικό Συναρμολογημένο Μοντέλο

Results	
<input type="checkbox"/> Axial Force	47081 N
<input type="checkbox"/> Torque	-976.46 N-mm
<input type="checkbox"/> Shear Force At I	2991.1 N
<input type="checkbox"/> Shear Force At J	2963.9 N
<input type="checkbox"/> Moment At I	1.1845e+005 N-mm
<input type="checkbox"/> Moment At J	92950 N-mm

Σχήμα 5.56. Φόρτιση Κοχλία 1 Στήριξης Πάκτωσης- Έκταση Εμβόλου

Results	
<input type="checkbox"/> Axial Force	43493 N
<input type="checkbox"/> Torque	-267.97 N-mm
<input type="checkbox"/> Shear Force At I	1774.8 N
<input type="checkbox"/> Shear Force At J	1739.9 N
<input type="checkbox"/> Moment At I	81959 N-mm
<input type="checkbox"/> Moment At J	47970 N-mm

Σχήμα 5.57. Φόρτιση Κοχλία 3 Στήριξης Πάκτωσης- Σύμπτυξη Εμβόλου

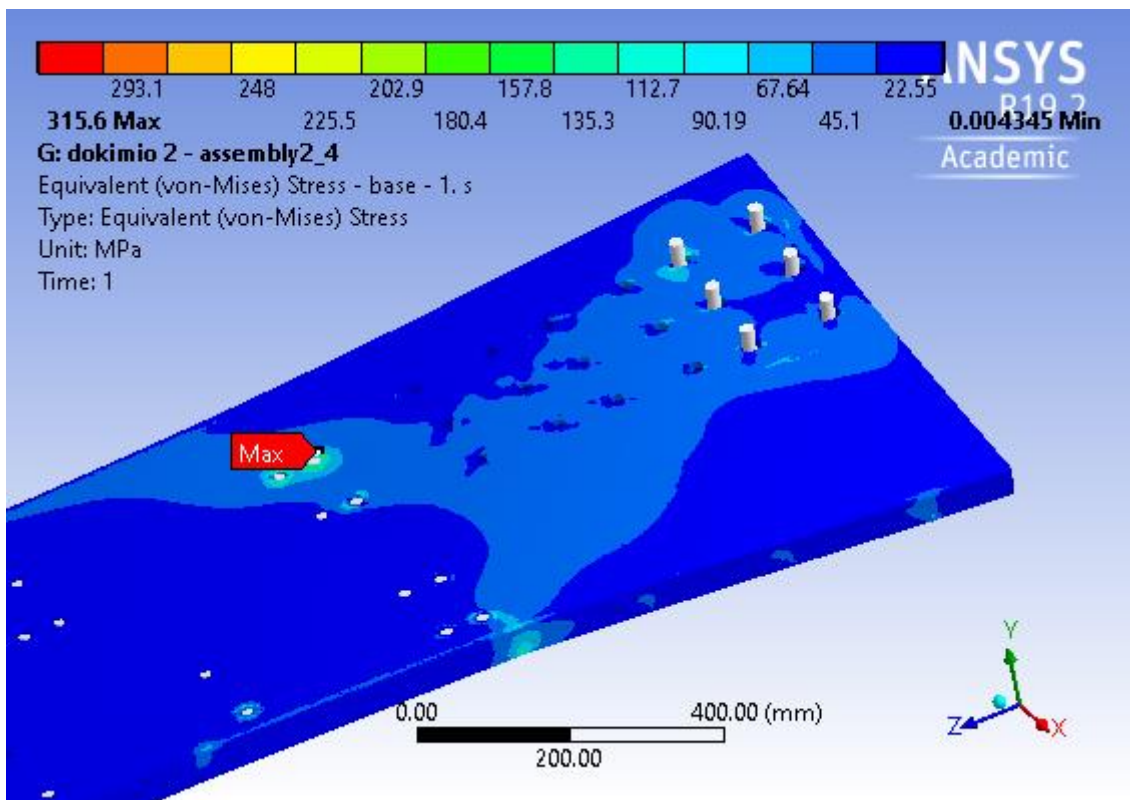
➤ Βάση

Η Βάση είναι το μέρος της διάταξης με το μεγαλύτερο ενδιαφέρον. Η κατανομή των τάσεων (Σχήμα 5.58) φαίνεται να έχει αλλάξει σημαντικά, εξαιτίας της παρουσίας των κοχλιών και της κατάργησης της πάκτωσης. Υψηλές τάσεις αναπτύσσονται στην περιοχή σύνδεσης των κοχλιών, με αποκορύφωμα τα 315.6 MPa στον κοχλία 17. Παρόλο που η τιμή αυτή ξεπερνάει

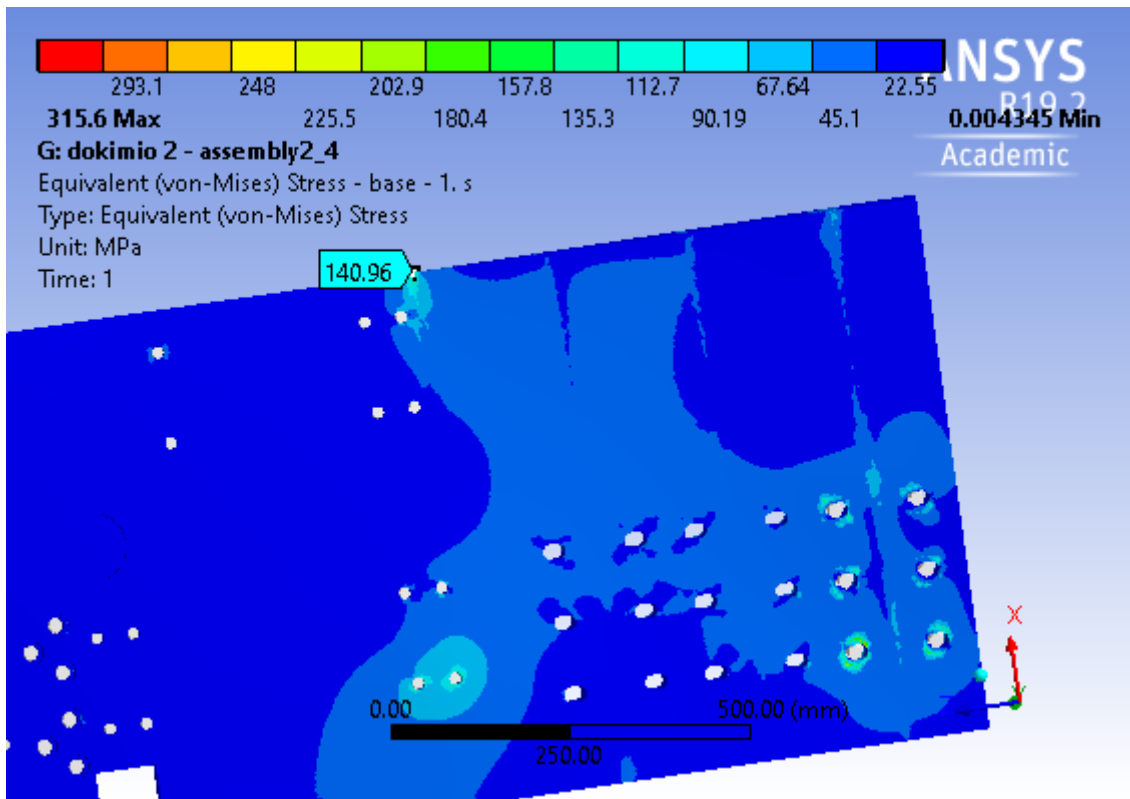
την τάση διαρροής του υλικού, οι φορτίσεις σε αυτές τις περιοχές είναι θλιπτικές, συνεπώς δεν υπάρχει κίνδυνος θραύσης του σώματος. Άλλωστε το υλικό της μοντελοποίησης βρίσκεται στην ελαστική περιοχή, οπότε στην πραγματικότητα οι τάσεις θα ισορροπήσουν χαμηλότερα, έπειτα από τοπική παραμόρφωση. Το άλλοτε σημείο μέγιστης τάσης, σύμφωνα με το προηγούμενο μοντέλο, φτάνει πλέον μέχρι τα 141 MPa (Σχήμα 5.59). Η μείωση της τάσης οφείλεται στην αντικατάσταση της πάκτωσης από τους κοχλίες, οπότε επιτρέπεται μια μικρή παραμόρφωση της Βάσης, κοντά στην αρχή της προβόλου. Αυτή είναι ουσιαστικά η μέγιστη τάση που μας ενδιαφέρει, γεγονός που ανεβάζει το συντελεστή ασφαλείας στα 1.77, σε σχέση με τα προηγούμενα μοντέλα. Μπορεί να μην ξεπερνάει το όριο του 2 που έχουμε θέσει, αλλά αρκεί για το συγκεκριμένο σώμα.

Οι μετατοπίσεις της Βάσης που έχουν ενδιαφέρον, είναι αυτές στον Y άξονα. Για άλλη μια φορά, επειδή το σώμα είναι πακτωμένο, οι μετατοπίσεις ισούνται με τις παραμορφώσεις. Πρακτικά οι παραμορφώσεις οφείλονται για τις επαγόμενες τάσεις στην Στήριξη Πάκτωσης και τις καμπτικές ροπές στο δοκίμιο. Η μέγιστη παραμόρφωση κατά τον Y ισούται με 2.309 mm (Σχήμα 5.60), που σημαίνει ότι το βέλος κάμψης στον X άξονα ισούται με 1/322. Συνεπώς ικανοποιείται και το κριτήριο παραμόρφωσης με ανώτατο βέλος κάμψης 1/100. Άρα η Βάση θεωρούμε πως ικανοποιεί τις προδιαγραφές που έχουν τεθεί.

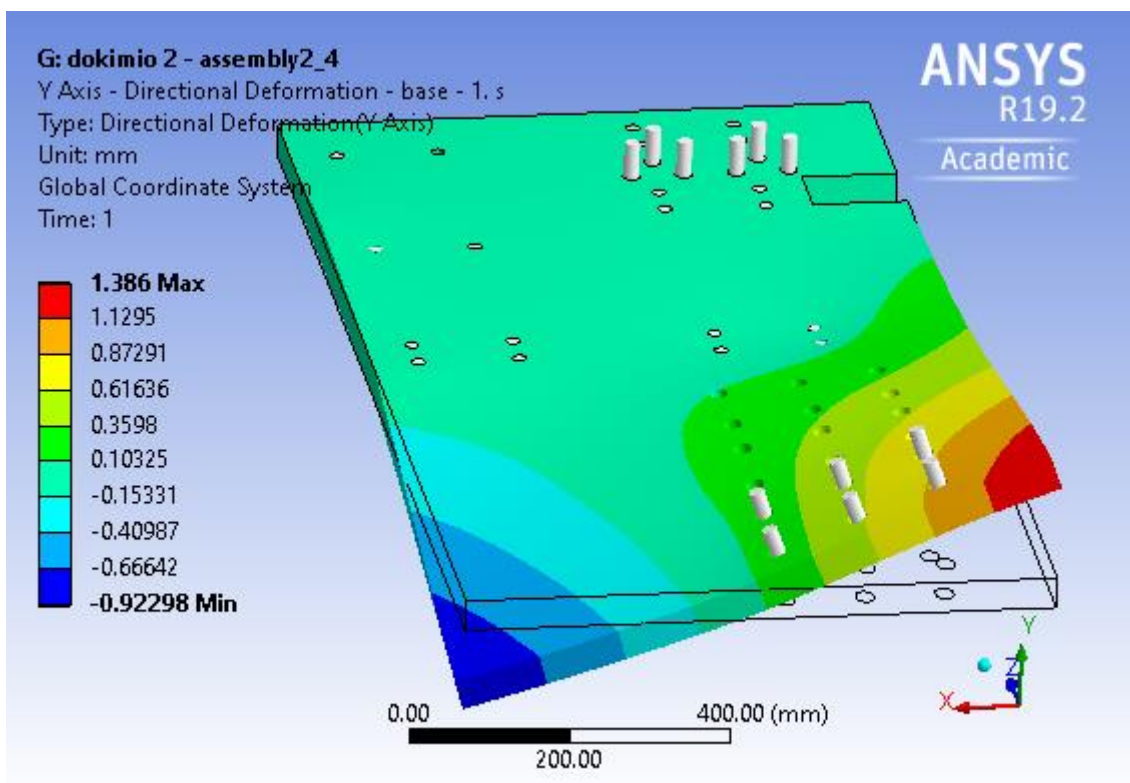
Όσον αφορά τις κοχλιοσυνδέσεις, μέγιστη φόρτιση σε αυτό το μοντέλο εμφανίζεται στον κοχλία 17. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 5.61. Στο μοντέλο όπου το έμβολο ανεβαίνει (συμπύσσεται), ο κοχλίας 20 βρίσκεται στην δυσμενέστερη θέση (Σχήμα 5.62).



Σχήμα 5.58. Κατανομή Τάσεων Άνω Επιφάνειας Βάσης- Τελικό Συναρμολογημένο Μοντέλο



Σχήμα 5.59. Κατανομή Τάσεων Κάτω Επιφάνειας Βάσης- Τελικό Συναρμολογημένο Μοντέλο



Σχήμα 5.60. Μετατοπίσεις Y Άξονα Βάσης- Τελικό Συναρμολογημένο Μοντέλο

Results	
<input type="checkbox"/> Axial Force	47214 N
<input type="checkbox"/> Torque	-355.79 N-mm
<input type="checkbox"/> Shear Force At I	509.18 N
<input type="checkbox"/> Shear Force At J	545.26 N
<input type="checkbox"/> Moment At I	12522 N-mm
<input type="checkbox"/> Moment At J	25978 N-mm

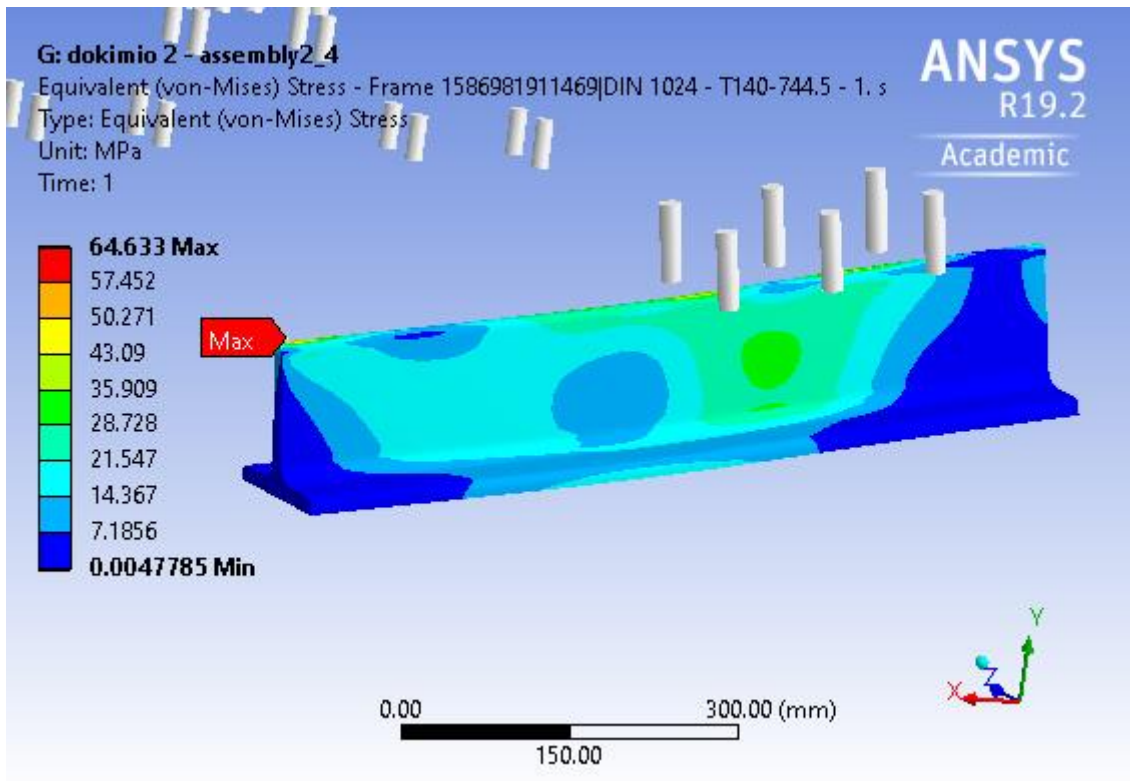
Σχήμα 5.61. Φόρτιση Κοχλία 17 Βάσης- Έκταση Εμβόλου

Results	
<input type="checkbox"/> Axial Force	44922 N
<input type="checkbox"/> Torque	311.15 N-mm
<input type="checkbox"/> Shear Force At I	619.03 N
<input type="checkbox"/> Shear Force At J	654.75 N
<input type="checkbox"/> Moment At I	8353.9 N-mm
<input type="checkbox"/> Moment At J	26852 N-mm

Σχήμα 5.62. Φόρτιση Κοχλία 20 Βάσης- Σύμπτυξη Εμβόλου

➤ Εγκάρσια Ενισχυτικά

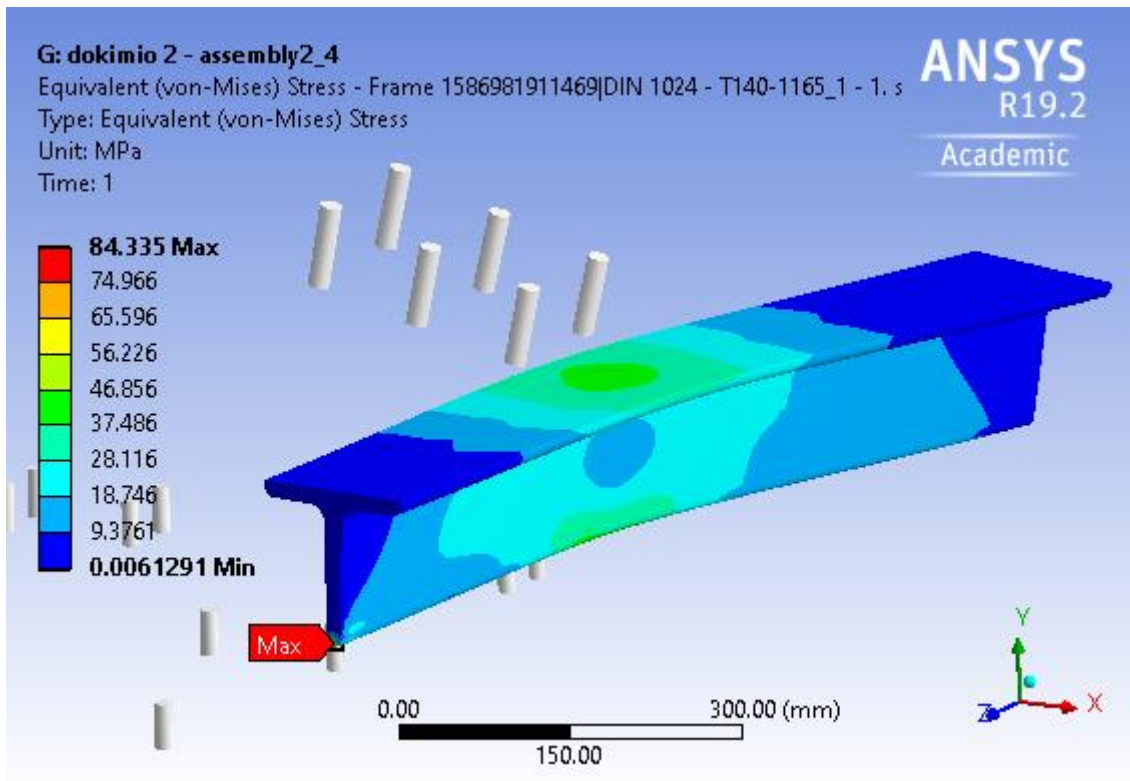
Αρκεί να ελέγξουμε τα αποτελέσματα για το πιο φορτισμένο ενισχυτικό, το οποίο βρίσκεται στο ίδιο μήκος με την Στήριξη Πάκτωσης. Το εργαλείο συνισταμένης τάσης “Von Mises”, δίνει μέγιστη τάση ίση με 64.63 MPa (Σχήμα 5.63). Αυτή η τιμή ισοδυναμεί με συντελεστή ασφαλείας 3.87. Ο στόχος που έχουμε θέσει για τα μέρη της διάταξης είναι 3, αλλά στα ενισχυτικά χρειαζόμαστε μεγάλη ακαμψία, ώστε να μειώσουμε τις παραμορφώσεις της Βάσης. Συνεπώς δεν προτείνεται να επιλέξουμε μικρότερο ενισχυτικό. Στην περίπτωση που έχουμε μικρότερο δοκίμιο, δηλαδή φορτίζεται κάποιο άλλο εγκάρσιο ενισχυτικό, λόγω του μικρότερου ανυποστήρικτου μήκους, περιμένουμε μικρότερες παραμορφώσεις της Βάσης. Άρα αναμένονται μικρότερες επαγόμενες τάσεις. Μπορούμε, λοιπόν, εύκολα να συμπεράνουμε ότι και τα υπόλοιπα εγκάρσια ενισχυτικά ικανοποιούν τις συνθήκες που έχουμε θέσει.



Σχήμα 5.63. Κατανομή Τάσεων Εγκάρσιου Ενισχυτικού- Τελικό Συναρμολογημένο Μοντέλο

➤ Διαμήκη Ενισχυτικά

Αρκεί να παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα για το πιο φορτισμένο ενισχυτικό, το οποίο είναι το πιο απόμακρο από το δοκίμιο. Η μέγιστη τάση του ισούται με 84.3 MPa (Σχήμα 5.64), που ισοδυναμεί με συντελεστή ασφαλείας ίσο με 2.86. Η τιμή αυτή ξεπερνάει το κατώτατο όριο του 2 που έχει τεθεί. Συνεπώς μπορούμε να υποθέσουμε με ασφάλεια ότι και τα 2 ενισχυτικά ικανοποιούν τις συνθήκες που έχουμε θέσει.



Σχήμα 5.64. Κατανομή Τάσεων Διαμήκους Ενισχυτικού- Τελικό Συναρμολογημένο Μοντέλο

➤ Κάμψη Δοκιμίου

Το ζήτημα της ανεπιθύμητης κάμψης του δοκιμίου που προέκυψε, απαιτεί περισσότερη διερεύνηση. Για να έχουμε πλήρη εικόνα του φαινομένου, πρέπει να επιλύσουμε μοντέλα με ένα τυπικό εύρος στρεπτικής ακαμψίας δοκιμίων. Προηγούμενες δοκιμές που διεξήχθησαν από συναδέλφους της Σχολής Ναυπηγών ξεκινούν από τιμές κοντά στο 0.1 kN-m/deg (Vavatsikos 2020) και φτάνουν έως και 20 kN-m/deg περίπου (Bilalis 2016). Επομένως, επιλύουμε δύο ακόμα φορές το μοντέλο, αλλάζοντας το μέτρο ελαστικότητας του δοκιμίου, ώστε να επιτύχουμε τις 2 ακραίες τιμές στρεπτικής ακαμψίας. Οι διαστάσεις του δοκιμίου παραμένουν ίδιες. Εφόσον έχουμε θέσει το μέτρο ελαστικότητας ως παράμετρο, μπορούμε εύκολα να αλλάξουμε την τιμή του από το υποσύστημα “Parameter Set” στο “Project Schematic”. Τα χαρακτηριστικά των 3 δοκιμίων και τα αποτελέσματα της επίλυσης φαίνονται στον Πίνακα 5.10 που ακολουθεί. Το δοκίμιο του μοντέλου που αναλύσαμε παραπάνω είναι το δοκίμιο 2, με ενδιάμεση στρεπτική ακαμψία.

Πίνακας 5.10. Κάμψη κατά τη Δοκιμή Στρέψης

Κάμψη Δοκιμίου Λόγω Παραμορφώσεων			
L=1000 mm, D=200 mm	Δοκίμιο 1	Δοκίμιο 2	Δοκίμιο 3
Ροπή Στρέψης [kN-m]	1	20	20
Γωνία Στροφής [deg]	10	10	1
Μέτρο Ελαστικότητας [MPa]	189.7	3793.5	37934.7
Στρεπτική Ακαμψία [kN-m/deg]	0.1	2	20
Βέλος Κάμψης Χ-άξονα [mm]	0.048	0.817	0.717
Βέλος Κάμψης Υ-άξονα [mm]	0.06	0.688	0.465
Βέλος Κάμψης/Μήκος στον Χ	0.000048	0.000817	0.000717
Βέλος Κάμψης/Μήκος στον Υ	0.000060	0.000688	0.000465
Ροπή Κάμψης Χ-άξονα [kN-m]	4.4110E-03	1.0765E+00	1.7536E+00
Ροπή Κάμψης Υ-άξονα [kN-m]	3.6980E-03	8.4240E-01	1.8460E+00
% Κάμψης/Στρέψη Χ-άξονα	0.4%	5.4%	8.8%
% Κάμψης/Στρέψη Υ-άξονα	0.4%	4.2%	9.2%

Παρατηρούμε ότι αυξάνοντας τη στρεπτική ακαμψία, αυξάνεται και η ροπή κάμψης του δοκιμίου στους 2 άξονες (Χ και Υ). Η διάταξη παραμορφώνεται ανάλογα με την συνολική ακαμψία της συμπεριλαμβανομένου και του δοκιμίου και την συνισταμένη ροπή κάμψης. Επομένως, αυξάνοντας τη στρεπτική ακαμψία του δοκιμίου υποχρεώνουμε την πειραματική διάταξη σε μεγαλύτερη κάμπτική παραμόρφωση, η οποία οδηγεί και σε μεγαλύτερη ροπή κάμψης στο δοκίμιο. Το ποσοστό της κάμψης προς στρέψη, στο πιο άκαμπτο δοκίμιο, μπορεί να είναι αρκετά μεγάλο, αλλά δεν δημιουργεί πρόβλημα στις μετρήσεις των δοκιμών. Ο λόγος βέλους κάμψης προς το μήκος του δοκιμίου σε αυτό, αλλά και στα υπόλοιπα δοκίμια, υποδεικνύει ότι η επαγόμενη κάμψη είναι αμελητέα. Συνεπώς η διάταξη είναι ικανή για δοκιμές στρέψης δοκιμίων στρεπτικής ακαμψίας από 0.1-20 kN-m/deg, με αρκετή ακρίβεια μετρήσεων.

6. Οδηγίες Συναρμολόγησης – Αποσυναρμολόγησης

Η διάταξη, στην τελική της μορφή, αποτελείται από μεγάλο αριθμό εξαρτημάτων, τα οποία συναρμολογούνται μόνο με έναν τρόπο. Το ίδιο ισχύει και για την αποσυναρμολόγηση. Οι οδηγίες που θα ακολουθήσουν αφορούν την προτεραιότητα των συνδέσεων και όχι λεπτομέρειες για τον εξοπλισμό ή τις μεθόδους σύνδεσης. Αυτές θα υποδειχθούν από τους τεχνικούς που θα πραγματοποιήσουν τις συνδέσεις. Πριν τις οδηγίες, βλέπουμε στον Πίνακα 6.1 όλα τα εξαρτήματα της διάταξης, που έχουν σχεδιαστεί και παρουσιαστεί σε αυτή τη διπλωματική εργασία.

Πίνακας 6.1. Εξαρτήματα Διάταξης

Εξάρτημα	Ποσότητα
Στήριξη Κίνησης	1
Άξονας Πρόσδεσης	1
Βραχίονας	1
Στήριξη Πάκτωσης	1
Βάση	1
Ενισχυτικό DIN EN 10055 T140 x 1165	2
Ενισχυτικό DIN EN 10055 T140 x 744.5	3
Ρουλεμάν SKF NJ 1030 ML	2
Κοχλίας 12.9 M20 x 60	6
Κοχλίας 12.9 M20 x 100	6
Περικόχλιο 12.9 M20	6
Ροδέλα για M20 Κοχλία	18
Κοχλίας 12.9 M16	19
Ροδέλα για M16 Κοχλία	19

Συναρμολόγηση

Θεωρείται δεδομένο ότι τα ενισχυτικά έχουν συγκολληθεί με την κατάλληλη μέθοδο και αλληλουχία, στην Βάση. Αυτή είναι και η πρώτη σύνδεση που πραγματοποιείται, η οποία είναι μόνιμη. Η επόμενη είναι η σφιχτή συναρμογή, ή και περιφερειακή σημειακή ηλεκτροκόλληση Βραχίονα - Άξονα Πρόσδεσης. Αρχικά ο Άξονας Πρόσδεσης ψύχεται (συνήθως με υγρό άζωτο) ώστε να συσταλεί και να εισέλθει με ευκολία στην μεγάλη οπή του Βραχίονα. Στην συνέχεια, αν κριθεί αναγκαίο, το συσσωμάτωμα προθερμίνεται και συγκολλείται σημειακά στην περιφέρεια της σύνδεσης. Αυτή η σύνδεση θεωρείται επίσης μόνιμη.

Η συναρμολόγηση ξεκινάει με την τοποθέτηση του Ρουλεμάν 2 στην Στήριξη Κίνησης. Αυτό γίνεται συνήθως με ψύξη του ρουλεμάν και ταυτόχρονα κάποια υδραυλική ή μηχανική υποβοήθηση ώστε να εισέλθει στην έδρασή του. Στην συνέχεια τοποθετείται, με τον ίδιο τρόπο, ο Άξονας Πρόσδεσης εντός του εδράνου και της στήριξης. Αυτό το σύμπλεγμα εξαρτημάτων στερεώνεται στην βάση με τους 6 κοχλίες M20x60 και τις ροδέλες τους. Με την Βάση καλά στερεωμένη και τον άξονα ευθυγραμμισμένο μπορούμε να τοποθετήσουμε και το άλλο έδρανο (Ρουλεμάν 1) όσο ο άξονας είναι ακόμα σε συστολή από την ψύξη.

Η συνέχεια περιλαμβάνει τον γερανό του εργαστηρίου. Τοποθετούμε δύο ιμάντες γύρω από την ενισχυμένη βάση σε κατάλληλα ασφαλή σημεία και με τρόπο που μπορεί να την στρέψει κατά το εγκάρσιο. Οι δυνάμεις κατά την ανύψωσή της, είναι πολύ μικρότερες από τις προβλεπόμενες για τις δοκιμές, συνεπώς δεν τίθεται θέμα αντοχής. Η Βάση πρέπει να ανυψωθεί κατά το πλάτος σε διαφορετικά ύψη, ώστε να μπορέσει να προχωρήσει εντός των κολώνων της μηχανής εφελκυσμού και στην συνέχεια να κατέβει στην θέση της στο τραπέζι, με την μια κολώνα ανάμεσα στην εγκοπή της Βάσης. Ακολουθεί ο Πίνακας 6.2 με στοιχεία του βάρους της διάταξης ως αυτό το σημείο και της ανύψωσης για την τοποθέτηση στο τραπέζι.

Πίνακας 6.2. Στοιχεία για Ανύψωση και Τοποθέτηση στο Τραπέζι

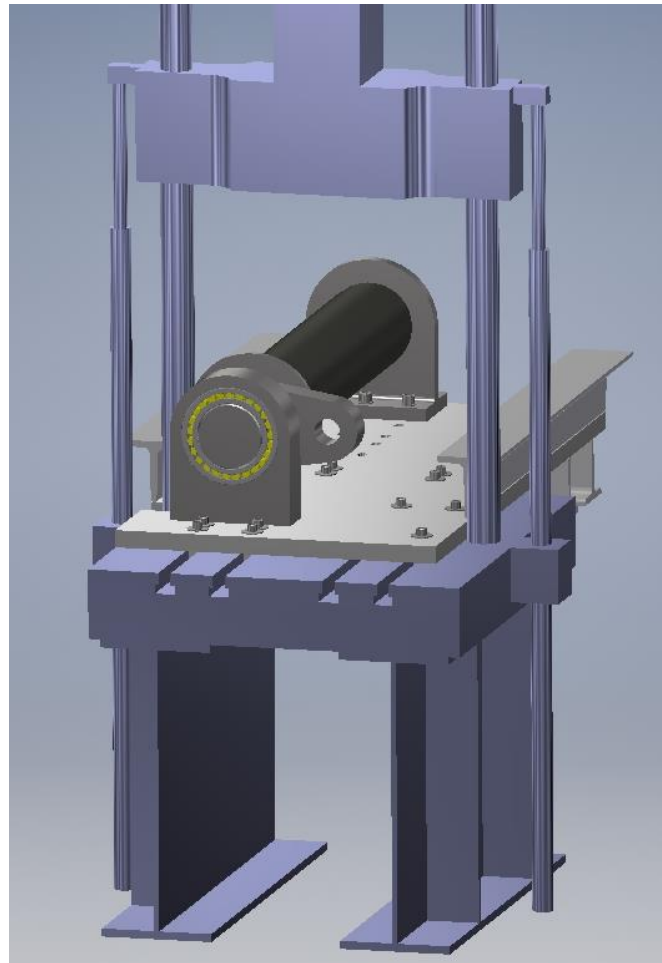
Τοποθέτηση Διάταξης στο Τραπέζι		
Διαγώνιος Ελάσματος κατά το Πλάτος	746	mm
Απόσταση Κολώνων	635	mm
Απόσταση Ασφαλείας	10	mm
Διαφορά Ύψους Πλευρών	408	mm
Γωνία με τον Ορίζοντα	29.8	deg
Βάρος	650.0	kg
Κέντρο Βάρους	[758.6, 341.6]	[mm,mm]

Το κέντρο βάρους μετριέται από την γωνία της Βάσης που βρίσκεται πιο κοντά στην εγκοπή της. Όπως φαίνεται στον παραπάνω πίνακα, η διαφορά καθ' ύψος μεταξύ των πλευρών, κατά το πλάτος, οφείλει να ισούται με 408 mm, ώστε η Βάση να περάσει με μια απόσταση 10 mm από τις κολώνες. Με άλλα λόγια, η ενισχυμένη βάση πρέπει να έχει κλίση κατά το εγκάρσιο ίση ή μεγαλύτερη από 29.8 μοίρες. Η πλευρά που ανυψώνεται, είναι πάντα η πλησιέστερη στις στηρίξεις, με αποτέλεσμα η Στηρίξη Κίνησης να στρέφεται προς το γεωμετρικό κέντρο της βάσης και να μην προεξέχει κατά το πλάτος.

Παράλληλα τοποθετούμε τα “clampings” στις θέσεις τους για να συνδέσουμε την Βάση στο τραπέζι. Για να εξασφαλίσουμε την ευθυγράμμιση τους με τις οπές της Βάσης, τοποθετούμε ανάμεσά τους αποστάτες, για να αποφευχθεί απευθυγράμμιση των “clampings”, στα οποία δεν υπάρχει πρόσβαση όταν κατέβει η Βάση. Εναλλακτικά, μπορούν να εισαχθούν στα “clampings” άξονες μικρότερης διαμέτρου από τις οπές της Βάσης, οι οποίοι θα χρησιμοποιηθούν σαν μοχλοί μετακίνησης τους, για να ευθυγραμμιστεί το σπείρωμα τους με τις οπές της Βάσης. Πρέπει να δώσουμε όμως μεγάλη προσοχή κατά την κάθοδο της βάσης για να αποφύγουμε πιθανές συγκρούσεις, με τους άξονες που προεξέχουν. Οι παραμορφώσεις που θα προκύψουν μπορεί να καταστρέψουν τους άξονες αυτούς, έως και να αχρηστεύσουν το σπείρωμα των “clampings”.

Όταν η Βάση κατέβει στην θέση της, αφήνουμε τον ένα ιμάντα να στηρίζει τον πρόβολο, για να μην ανατραπεί όσο τοποθετούνται οι κοχλίες. Αφού ευθυγραμμίσουμε τα “clampings” με τους τρόπους που αναφέραμε, τοποθετούμε και συσφίγγουμε τους 19 σε αριθμό M16 κοχλίες με τις ροδέλες τους. Αφαιρούμε και τον τελευταίο ιμάντα από την Βάση. Τέλος τοποθετούμε την Στηρίξη Πάκτωσης στο επιθυμητό μήκος και συνδέουμε με τους 6 M20x100

κοχλίες, τα 6 M20 περικόχλια και τις ροδέλες που απομένουν. Η συναρμολογημένη διάταξη στρέψης φαίνεται στο Σχήμα 6.1.



Σχήμα 6.1. Συναρμολογημένη Διάταξη Στρέψης

Αποσυναρμολόγηση

Οι οδηγίες αποσυναρμολόγησης είναι αναγκαίες, διότι στην Μηχανή Εφελκυσμού εκτελούνται διάφορες δοκιμές που αξιοποιούν το τραπέζι. Η διάταξη πρέπει να απομακρύνεται με ασφαλή τρόπο και να είναι έτοιμη για επανατοποθέτηση, όταν χρειάζεται. Η αποσυναρμολόγηση δεν είναι απλά η αντίθετη διαδικασία της συναρμολόγησης. Οι περισσότερες συνδέσεις είναι μόνιμες, εκτός από την περίπτωση που προκύψει βλάβη. Αρχικά τοποθετείται ένας ιμάντας από τον γερανό στο ελεύθερο άκρο της Βάσης. Λύνεται η κοχλιοσύνδεση της με το τραπέζι και τοποθετείται ο δεύτερος ιμάντας. Το κέντρο βάρους έχει μετατοπιστεί εξαιτίας της Στήριξης Πάκτωσης. Τα νέα στοιχεία φαίνονται στον Πίνακα 6.3.

Πίνακας 6.3. Κέντρο Βάρους Αποσυναρμολόγησης

Αποσυναρμολόγηση		
Βάρος	614.0	kg
Κέντρο Βάρους	[756.8, 346.8]	[mm,mm]

Η ανύψωση γίνεται με τον ίδιο τρόπο, δηλαδή δίνεται κλίση στη Βάση, κατά το εγκάρσιο, ίση με 29.8 μοίρες, με τέτοιο τρόπο ώστε οι στηρίξεις να στραφούν προς το γεωμετρικό κέντρο της Βάσης, για να μην προεξέχουν. Όταν η Βάση προσπεράσει τις κολώνες, τη φέρνουμε σε οριζόντια θέση και την απομακρύνουμε. Η αποσυναρμολόγηση των υπόλοιπων εξαρτημάτων δεν είναι αναγκαία, παραμόνο για την συντήρηση των εδράνων ή για αντικατάσταση κάποιου εξαρτήματος.

7. Συμπεράσματα-Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Συμπεράσματα

Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας ήταν η σχεδίασης ιδιοκατασκευής δοκιμών στρέψης αξόνων από σύνθετα υλικά, αξιοποιώντας τη μηχανή εφελκυσμού/θλίψης του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας.

Μετά από λεπτομερή σχεδίαση της διάταξης, δημιουργία και επίλυση μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων, καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα:

- Η αξιοποίηση της μηχανής εφελκυσμού του εργαστηρίου είναι δυνατή, με τη χρήση διάταξης που αξιοποιεί μογλοβραχίονα για να μετατρέψει την ευθύγραμμη κίνηση του εμβόλου σε περιστροφική.
- Οι στατικές δοκιμές στρέψης που θα πραγματοποιεί η διάταξη, συμμορφώνονται με τις οδηγίες των Νηογνομώνων και μπορούν να λάβουν την αντίστοιχη πιστοποίηση.
- Το μέγεθος των δοκιμών, μπορεί να φτάσει τα 1000 mm σε μήκος και τα 300 mm σε διάμετρο.
- Οι προδιαγραφές της διάταξης δοκιμών είναι μέγιστη ασκούμενη ροπή 20 kN-m και μέγιστη γωνία στροφής 10 deg.
- Σύμφωνα με το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, η διάταξη μπορεί αποδεδειγμένα να δοκιμάσει άξονες με στρεπτική ακαμψία που ξεκινάει από 0.1 kN-m/deg και φτάνει έως τα 20 kN-m/deg.
- Αυξανόμενη της στρεπτικής ακαμψίας των δοκιμών, αυξάνεται και η κάμψη που υφίστανται, εξαιτίας παραμορφώσεων της διάταξης (συγκεκριμένα της Βάσης), όμως δεν είναι σημαντική ώστε να επηρεάζει τα αποτελέσματα της δοκιμής στρέψης.

Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

- Περαιτέρω έρευνα επιρροής της κάμψης στις μετρήσεις των δοκιμών στρέψης.
- Διερεύνηση της συσχέτισης στρεπτικής ακαμψίας – κάμψης στην διάταξη.
- Πειραματική δοκιμή αντοχής, υπό κλίμακα, της σύνδεσης Βραχίονα-Άξονα Πρόσδεσης.
- Διεξαγωγή μελέτης κόπωσης της διάταξης και διερεύνηση αξιοποίησης της διάταξης για δυναμικές δοκιμές στρεπτικής κόπωσης.
- Κατασκευαστικός σχεδιασμός διωστήρα ή ισοδύναμου συστήματος για την μετάδοση της κίνησης του εμβόλου στον βραχίονα.
- Τεχνο-οικονομική μελέτη για την κατασκευή της διάταξης.

Βιβλιογραφία

- ANSYS Workbench Academic Research, Release 19.2, MATERIALS, Materials Data for Simulation, ANSYS Inc., 2020.
- ANSYS Workbench Academic Research, Release 19.2, GRANTA Selector Software Tool, ANSYS Inc., Canonsburg, U.S.A., 2020.
- Bilalis, E. (2016). ‘Experimental and Numerical Study of Composite Shafts’. Diploma Thesis. School of Naval Architecture and Marine Engineering, NTUA.
- Booser, R. E. (1983). Theory and Practise of Tribology Volume II. ‘CRC Handbook of Lubrication’. CRC Press. pp. 105.
- DNV-GL AS (2015). Composite drive shafts and flexible couplings. ‘Non-metallic materials’. Section 7.
- ISO 898-1:2009(E) (2009). Mechanical properties of fasteners made of carbon steel and alloy steel. ‘Bolts, screws and studs with specified property classes - Coarse thread and fine pitch thread’. Section 7.
- MTS Systems Corporation (2013). ‘Series 244 Actuators Product Information’. Operation Section. pp. 59-65.
- Stachowiak, G. W. (2014). Engineering Tribology Fourth Edition. Section 6. Elsevier.
- Vavatsikos, D. (2020). ‘Static Torsional Tests of Composite Driveshafts’. Diploma Thesis. School of Naval Architecture and Marine Engineering, NTUA.
- Κωστόπουλος, Θ. Ν. (2010). Οδοντώσεις και Μειωτήρες Στροφών. Εκδόσεις Συμεών.
- Παντελής, Δ. Ι., Παπάζογλου, Β. Ι., Χαϊδεμενόπουλος, Γ. Ν. (2017). Επιστήμη και Τεχνολογία των Συγκολλήσεων. Εκδόσεις Τζιόλα. pp. 289-292.
- Παπαδόπουλος, Γ. Α., Βαδαλούκα, Β. Γ. (2009). ‘Ελαστικότητα-Αντοχή’. Μηχανική των Υλικών. Εκδόσεις ΝΚ. pp. 126-129.

Παράρτημα Α. Τυπολόγιο Υπολογισμών Αντοχής Σύνδεσης Πολύσφηνου

Involute Spline Calculation Formulas in English Units

Transferred torque

$$T = \frac{30 \cdot 550 \cdot P}{\pi \cdot n} \quad [lb \cdot ft]$$

where:

P	transferred power [lb ft]
n	speed [min ⁻¹]

Minimum shaft diameter

1. shaft inside diameter $d_h > 0$

$$a) d_{\min} = 3 \sqrt{\frac{16 \cdot T \cdot K_a \cdot S_y}{\pi \cdot \tau_s \cdot K_f}} \quad [in]$$

b) if $d_{\min} \leq d_h \rightarrow d_{\min} = 1.1 d_h$ [in]

c) if $d_{\min} \leq 1.5 d_h \rightarrow d_{\min} = 1.5 d_h$ [in]

2. shaft inside diameter $d_h = 0$

$$d_{\min} = 3 \sqrt{\frac{16 \cdot T \cdot K_a \cdot S_y}{\pi \cdot \tau_s \cdot K_f}} \quad [in]$$

where:

d_{\min}	minimal shaft diameter [inm]
d_h	shaft inside diameter [in]
T	torque [lb ft]
K_a	application factor
K_f	fatigue-life factor
S_v	desired safety
τ_{Al}	Allowable Shear Stress

General calculation

Minimum splines length to transfer the torque

1. Fixed connection:

$$L_{\min} = \frac{T \cdot 12 \cdot K_a \cdot S_v}{d_s \cdot p_{D\min} \cdot \frac{h_g}{2} \cdot N \cdot K_m \cdot K_f} \quad [in]$$

2. Flexible connection:

$$L_{\min} = \frac{T \cdot 12 \cdot K_a \cdot S_v}{d_s \cdot p_{D\min} \cdot \frac{h_g}{2} \cdot N \cdot K_m \cdot K_w} \quad [in]$$

where:

T	torque [lb ft]
K_a	application factor
K_f	wear-life factor
K_w	application factor
K_m	load distribution factor
S_v	desired safety
d_s	middle diameter = $(D + d) / 2$ [in]
D	outside diameter of groove section [in]
d	inside diameter of groove section [in]
N	number of grooves [-]
h	height of groove = $(D - d) / 2$ [in]
s	chamfer [in]
h_{st}	connection height $h_{st} = h - 2s$ [in]
p_{Dmin}	allowable pressure on supporting surface of shaft or groove [psi]

Allowable pressure

1. Fixed connection::	$p_{\min} = \frac{T \cdot 12 \cdot K_a}{d_s \cdot l_f \cdot \frac{h_{st}}{2} \cdot N \cdot K_m \cdot K_f} \quad [psi]$
2. Flexible connection:	$p_{\min} = \frac{T \cdot 12 \cdot K_a}{d_s \cdot l_f \cdot \frac{h_{st}}{2} \cdot N \cdot K_m \cdot K_w} \quad [psi]$
where:	

T	torque [lb ft]
K _a	application factor
K _f	wear-life factor
K _w	application factor
K _m	load distribution factor
S _v	desired safety
d _s	middle diameter = (D + d) / 2 [in]
D	outside diameter of groove section [in]
d	inside diameter of groove section [in]
N	number of grooves [-]
h	height of groove = (D - d) / 2 [in]
s	chamfer [mm]
h _{st}	connection height h _{st} = h - 2s [in]
l _f	active key length [in]

Strength Check

$$P_{\min} \leq P_{Ds}$$

$$P_{\min} \leq P_{Dh}$$

where:

P_{\min}	minimal calculated h/2 pressure [psi]
P_{Ds}	allowable pressure in shaft [psi]
P_{Dh}	allowable pressure in hub [psi]

Shear stress under roots of external teeth

For a transmitted torque T, the torsional shear stress induced in the shaft under the root diameter of an external spline

For a solid shaft

$$S_s = \frac{16 \cdot T \cdot K_a}{\pi \cdot D_{re}^3 \cdot K_f} \quad [psi]$$

For a hollow shaft

$$S_s = \frac{16 \cdot T \cdot D_{re}^3 \cdot K_a}{\pi \cdot (D_{re}^4 - D_h^4) \cdot K_f} \quad [psi]$$

Note: The computed stress should not exceed the values in the table.

Shear stress at the pitch diameter of teeth

The shear stress at the pitch line of the teeth for a transmitted torque T

$$S_s = \frac{2 \cdot T \cdot K_a \cdot K_m}{D \cdot L_f \cdot N \cdot t \cdot K_f \cdot K_s} \quad [psi]$$

Calculated spline length:

$$L_f = \min \{L, L_e\} \text{ [in]}$$

Compressive stresses on sides of spline teeth

Allowable compressive stresses on splines are much lower than for gear teeth, since nonuniform load distribution and misalignment result in unequal load sharing and end loading of the teeth.

For flexible splines

$$S_c = \frac{2 \cdot T \cdot K_a \cdot K_m}{D \cdot L_f \cdot N \cdot h \cdot K_w} \quad \text{[psi]}$$

For fixed splines

$$S_c = \frac{2 \cdot T \cdot K_a \cdot K_m}{9 \cdot D \cdot L_f \cdot N \cdot h \cdot K_f} \quad \text{[psi]}$$

Note: The computed stress should not exceed the values in the [table](#).

where:

Calculated spline length	$L_f = \min \{L, L_e\} \text{ [in]}$
Depth of teeth engagement h $h \cong 0.9 / P \text{ [in]}$	for splines with flat groove bottom
$h \cong 1 / P \text{ [in]}$	for splines with filleted groove bottom

Bursting stresses on splines

Internal splines may burst due to tensile stress from the radial component of the transmitted load, centrifugal tensile stress, tensile stress due to the tangential force at the pitch line causing bending of the teeth.

1. Radial load tensile stress

$$S_1 = \frac{T \cdot \tan \Phi}{\pi \cdot D \cdot L \cdot t_w} \quad [\text{psi}]$$

where: Wall thickness of internal spline	$t_w = D_{oi} - D_{ri}$ [in]
2. Centrifugal tensile stress	
$S_2 = \frac{1,656 \cdot n^2 \cdot (D_{oi}^2 + 0,212 \cdot D_{ri}^2)}{1000000} \quad [\text{psi}]$	
3. Beam loading tensile stress	
$S_3 = \frac{4 \cdot T}{D^2 \cdot L_f \cdot Y \cdot K_s} \quad [\text{psi}]$	
where: Calculated spline length	$L_f = \min \{L, L_e\}$ [in]

4. The total tensile stress tending to burst the rim of the external member

$$S_T = \frac{K_a \cdot K_m \cdot (S_1 + S_3) + S_2}{K_f} \quad [\text{psi}]$$

Note: The computed stress should not exceed the values in the [table](#).

Crowned splines for large misalignments

Crowned splines can accommodate misalignments of up to about 5 degrees. Crowned splines have considerably less capacity than straight splines of the same size if both are operating with precise alignment. However, when large misalignments exist, the crowned spline has greater capacity.

American Standard tooth forms may be used for crowned external members so that they may be mated with straight internal members of Standard form.

Compressive stress on the teeth

$$S_c = 2290 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot T}{D \cdot N \cdot h \cdot r_2}} \quad [\text{psi}]$$

where:

Radius of curvature of the crowned tooth	$r_2 \cong F^2 / 8 A$ [in]
Radius of the crown	$r_1 = r_2 \tan \Phi$ [in]
Depth of teeth engagement h $h \cong 0.9 / P$ [in]	for splines with flat groove bottom
$h \cong 1 / P$ [in]	for splines with filleted groove bottom

Meaning of used variables

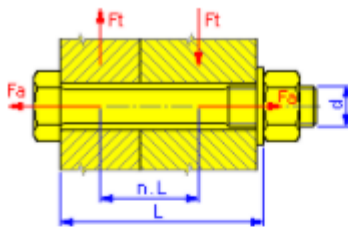
T	torque [lbft]
n	speed [min^{-1}]
D	pitch diameter [in]
D _{ri}	major (root) diameter of internal spline [in]
D _{re}	root diameter of external spline [in]
D _h	inside diameter of a hollow shaft [in]
D _{oi}	outside diameter of grooved hub [in]
N	number of grooves [-].
h	height of groove [in]
L _f	calculated spline length [in]
L	active spline length [in]
L _e	maximum effective length [in]
t	actual tooth thickness, circular [in]
t _w	wall thickness of internal spline = outside diameter of spline sleeve minus major diameter, all divided by two [in]
Φ	stroke angle [deg.]

Y	Lewis form factor obtained from a tooth layout. The Y = 1.5 value is used in the calculation.
F	pressure angle [deg]
S _v	desired safety
A	relief of crown at the ends of the teeth [in]
r ₁	fillet radius of crown spline [in]
r ₂	curvature radius of rounded teeth for crown spline [in]
K _a	application factor
K _f	wear-life factor
K _w	application factor
K _m	load distribution factor
K _s	factor of tooth side
	K _s = 0.5 for splines with common and higher accuracy of mounting (only one half of teeth carries the load)
	K _s = 0.3 for splines with lower production and assembly accuracy (only one third of teeth carries the load)

Παράρτημα Β. Τυπολόγιο Υπολογισμών Αντοχής Κοχλιοσύνδεσης

Basic Calculations for Bolted Connections

Calculation of a bolted connection with prestress. Loading by axial or tangential force. The calculation is carried out in metric or English units. With the ANSI standard set, the calculation is performed in English units, with corresponding bolt dimensions also included.



Input Parameters

Ψ	Tightness factor - With a prestressed bolted connection, the distance between materials is undesirable (due to the bad quality of surface, for example) and this safety factor is introduced to prevent it. Tightness factor $k = 1 + \Psi$ (additional tightness factor $\Psi = 0.5 - 1.5$). Recommended minimum value is 1.2.
F_a	maximum operation axial force
n	force input factor
F_t	maximum operation tangential force
f	joint friction factor (between the connected materials)
z	number of bolts
d	thread diameter
p	thread pitch
d_s	mean bolt diameter
d_{min}	minimum bolt diameter

S_y	Yield strength
k_s	safety factor (The value is selected according to the required safety level of the joint.)
p_A	allowable thread pressure (nut)
E_1	elasticity module of bolt
f_1	thread friction factor between the nut and the bolt
f_2	friction factor in the contact surface of the nut or bolt
L	width of connected material
E_2	elasticity module of connected material

Calculated Parameters

According to the following calculation formulas, the program calculates geometric dimensions of the bolt from the specified nominal bolt diameter:

Minimum diameter of the nut thread

$$D_1 = d - 1.082531 p$$

Pitch diameter of the thread

$$d_2 = d - 0.649519 p$$

Calculation of Bolted Connection:

Working force in the joint - determined by the axial force, has to secure the transfer of tangential force by friction of connected materials. Also affected by the requirement on tightness expressed by the factor of joint tightness.

$$F_{max} = \frac{\psi}{z} \cdot \left(F_a + \frac{F_t}{f} \right)$$

Prestress force - based on the working force of the joint, takes into account the elastic yielding of bolts and flanges by using the c_n yielding constants.

$$F_0 = F_{\max} \cdot \left(\frac{c_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2} \right) \cdot \frac{F_a}{z}$$

where:

	$c_1 = c_{10} + (1 - n) \cdot c_{20}$
	$c_2 = n \cdot c_{20}$
	$c_{10} = \frac{L + 0.8d}{E_1 \cdot \frac{\pi \cdot d_s^2}{4}}$
	$c_{20} = \frac{L}{E_2 \cdot \frac{\pi}{4} \left(\left(1.5d + \frac{L}{a} \right)^2 - 1.05d^2 \right)}$
	for steel $a = 10$
	for cast iron $a = 8$
	for aluminum and its alloys $a = 6$

Required tightening moment - determined by the prestress force and affected by the friction factor in threads between the nut and bolt, and by the friction factor in the contact surface of the nut or bolt.

$$M_u = F_0 \left[\frac{d_2}{2} \cdot \tan \left(\frac{p}{\pi \cdot d_2} + \frac{f_1}{\cos 30^\circ} \right) + 0.7d \cdot f_2 \right]$$

Calculated tensile stress in the bolt

$$\sigma_t = \frac{4 \cdot F_0}{\pi \cdot d_{\min}^2}$$

Calculated torsion stress in the bolt

$$\tau_k = \frac{16 \cdot M_u}{\pi \cdot d_{\min}^3}$$

Reduced stress in the bolt

$$\sigma_{\text{red}} = \sqrt{\sigma_t^2 + 3 \cdot \tau_k^2}$$

Stress caused by maximum force loading the bolt

$$\sigma_{\max} = \frac{4 \cdot F_{\max}}{\pi \cdot d_{\min}^2}$$

Calculated pressure in the thread

$$p_c = \frac{4F_{\max}}{\pi(d^2 - D_1^2) \frac{0.8d}{p}}$$

Calculation check - stress in the bolt during tightening the joint and during the operation (respecting the specified joint safety), and the check of allowable pressure in threads.

$$\sigma_{\text{red}} \leq S_y / k_s \text{ and } \sigma_{\max} \leq S_y / k_s \text{ and } p_c \leq p_A$$

Force Input Factor n in Bolted Connections

Examples of force loading

	$n = 1$ ($l_F = L$)	$n = 0,75$ ($l_F = 0,75 L$)	$n = 0,5$ ($l_F = 0,5 L$)	$n = 0,25$ ($l_F = 0,25 L$)

where: L ... width of the material loaded by the operation force

Friction Factor for Bolted Connections

Material	non-lubricated	lubricated
steel - steel	0.8	0.16
steel - cast iron	0.4	0.21
steel - brass	0.35	0.19
steel - brass	0.13	0.16
cast iron - cast iron	1	0.15 - 0.20
cast iron - bronze	0.25	0.08
bronze - bronze	0.25	0.10
aluminum - aluminum	1.35	0.30
copper - copper	1	0.08
steel - plexiglas	0.4 - 0.5	0.4 - 0.5
plexiglas - plexiglas	0.8	0.8