



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

*Σχεδιασμός καλουπιού χύτευσης ρητίνης για την αγκύρωση
πολυμερών σχοινιών βέλτιστης κατανομής φορτίου κατά
το μήκος τους με χρήση πεπερασμένων στοιχείων*

Διπλωματική εργασία

ΑΠΟΣΤΟΛΑΚΗΣ ΜΗΝΑΣ

Επιβλέπων : Β. Σπιτάς, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2018

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύσσεται και περιγράφεται μια μέθοδος εύρεσης της βέλτιστης γεωμετρίας ενός συνδετήρα σχοινιών παράλληλων ινών με σκοπό την εξάλειψη φαινομένων συγκέντρωσης τάσεων, τα οποία οδηγούν στην καταστροφή του σχοινιού σε φορτία μικρότερα του ονομαστικού. Για την ανάλυση του προβλήματος χρησιμοποιήθηκε ένα αξονοσυμμετρικό μοντέλο με τέσσερις παραμέτρους και αναλύθηκε στο εύρος τους. Στη συνέχεια γίνεται ανάλυση και κατασκευή ενός ιξωδόμετρου τύπου Couette για την μέτρηση του δυναμικού ιξώδους ρευστών και πραγματοποιείται ένα πείραμα για την βαλβολίνη 75w90. Τέλος σχεδιάζεται ένα καλούπι χύτευσης ρητίνης υποβοηθούμενη από κενό για την κατασκευή ενός τέτοιου συνδετήρα.

Abstract

Thesis title: **'Design of resin transfer mold for anchoring polymeric ropes with optimized stress transfer along their length using finite element analysis'**

In this diploma thesis a method of finding the optimum geometry of a parallel fiber rope connector is developed and described for the purpose of eliminating stress concentration phenomena which lead to failure of the rope at loads lesser than the nominal. For the analysis of the problem an axiomasimetric model with four parameters was used and analyzed in their range. Thereafter, a Couette viscometer is designed and constructed to measure the dynamic viscosity of the fluid. In order to calibrate the viscometer an experiment is performed for the 75w90 valvoline. Finally, a vacuum-assisted resin casting mold is designed to make such a connector.

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί το επιστέγασμα των σπουδών μου στη σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ. Εκπονήθηκε στο εργαστήριο στοιχείων μηχανών και πραγματοποιήθηκε υπό την επίβλεψη του καθηγητή κ. Βασίλειο Σπιτά.

Για το λόγο αυτό, θα ήθελα πρωτίστως να ευχαριστήσω τον κ. Σπιτά για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με αυτό το ενδιαφέρον θέμα και για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου.

Οφείλω επίσης, να ευχαριστήσω τον φίλο και συνάδελφο κ. Χρήστο Βακουφτσή, ο οποίος με τις υποδείξεις και ιδέες του, συνέβαλε καταλυτικά στην εκπόνηση της παρούσας εργασίας. Επίσης, ευχαριστώ τους συναδέλφους μου στο εργαστήριο για το άριστο κλίμα συνεργασίας μας και τις χρήσιμες παρατηρήσεις τους κατά την εκπόνηση της διπλωματικής μου.

Τέλος, τις θερμότερες ευχαριστίες μου θα ήθελα να τις εκφράσω προς τους γονείς μου και τις αδελφές μου για την αμέριστη ηθική και υλική στήριξη που μου προσφέρουν όλα αυτά τα χρόνια. Σας ευχαριστώ για την υπομονή σας...

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1

- 1.1 Γενική περιγραφή σχοινιών.....σελ.11
- 1.2 Τύποι σχοινιών και υλικά.....σελ.12
- 1.3 Τρόποι στερέωσης.....σελ.14

Κεφάλαιο 2

- 2.1 Περιγραφή του μοντέλου του συνδετήρα.....σελ.19
- 2.2 Περιγραφή της γεωμετρίας του μοντέλου.....σελ.22

Κεφάλαιο 3

- 3.1 Προσέγγιση καμπυλών μέσω πολυωνύμων Bézier-Bernstein.....σελ.25
- 3.2 Αλγόριθμος παρεμβολής Bezier.....σελ.27
- 3.3 Βελτιστοποίηση με 4 παραμέτρους.....σελ.30
- 3.4 Διαδικασία αξιολόγησης.....σελ.32
- 3.5 Αποτελέσματα προσομοιώσεων.....σελ.35

Κεφάλαιο 4

- 4.1 Πολυεστερικές ρητίνες.....σελ.45
- 4.2 Μελέτη ροής ανάμεσα στις ίνες.....σελ.47
- 4.3 Κατασκευή ιξωδόμετρου τύπου Couette.....σελ.54
- 4.4 Βαθμονόμηση ιξωδόμετρου.....σελ.67

Κεφάλαιο 5

- 5.1 Συμπεριφορά ρητίνης με καταλύτη.....σελ.71
- 5.2 Επιλογή στερέωσης του συνδετήρα.....σελ.72
- 5.3 Σχεδιασμός καλουπιού.....σελ.74
- 5.4 Συμπεράσματα – Προτάσεις για μελλοντική εργασία.....σελ.77

- Βιβλιογραφία.....σελ.79

Παραρτήματα

- Παράρτημα Α.....σελ.81
- Παράρτημα Β.....σελ.91
- Παράρτημα Γ.....σελ.109

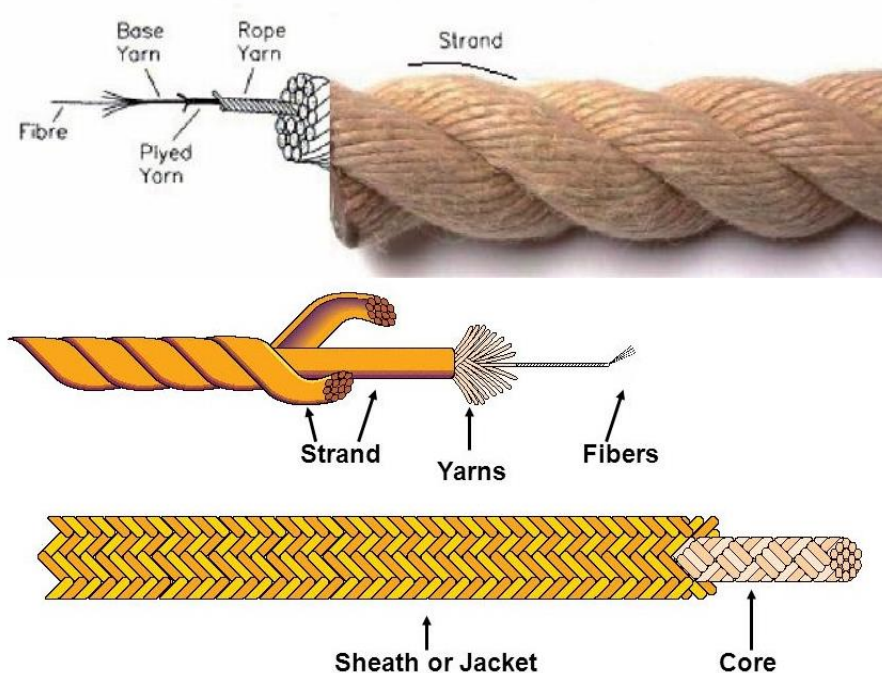
Κεφάλαιο 1

1.1 Γενική Περιγραφή Σχοινιών

Τα σχοινιά είναι μακριές, εύκαμπτες κατασκευές από ίνες, συνήθως φυτικές ή συνθετικές, που χρησιμεύουν κυρίως για τη στήριξη ή τη συγκράτηση αντικειμένων, καθώς και για τη μετάδοση ελκτικών ή ανθιστάμενων δυνάμεων. Το σχήμα του σχοινιού είναι κυλινδρικό και μπορεί να αποτελείται από πλεγμένες ίνες σε μια ή περισσότερες ομάδες.

Κατόπιν ειδικής κατεργασίας οι ίνες στρίβονται συνήθως προς τα δεξιά και σχηματίζουν έτσι το γνωστό "νήμα" (yarn). Στη συνέχεια τα νήματα στρίβονται προς τ' αριστερά, αντίθετα δηλαδή της φοράς συστροφής των ινών και σχηματίζουν έτσι το "κλώνο" (strand). Τρεις συνήθως τέτοιοι κλώνοι στριβόμενα προς τα δεξιά δημιουργούν ένα "δεξιόστροφο μονόπλοκο σχοινί", (hawser-laid rope). Τα συνηθέστερα σχοινιά του εμπορίου είναι δεξιόστροφα μονόπλοκα. Η εναλλαγή της φοράς συστροφής των ινών, κλωσμάτων και κλώνων εξασφαλίζει τη διατήρηση της μορφής του σχοινιού.

Σχοινιά από τέσσερις κλώνους καλούμενα "εντέταρτα" (shroud-laid ropes) κατασκευάζονται πολύ σπάνια. Στο είδος όμως αυτό οι κλώνοι στρίβονται γύρω από ένα άλλο κεντρικό κλώνο από το ίδιο υλικό που καλείται "ψυχή" (core), η οποία αφενός διευκολύνει την κανονική στροφή των κλώνων, αφετέρου διατηρεί τη μορφή του σχοινιού. Επειδή το μήκος της ψυχής είναι σαφώς μικρότερο του μήκους των κλώνων που στρέφονται περί αυτής, συνεπάγεται πως όταν η ασκούμενη τάση υπερβεί το όριο αντοχής του σχοινιού τότε αυτό θα κοπεί σε σημείο της ψυχής.

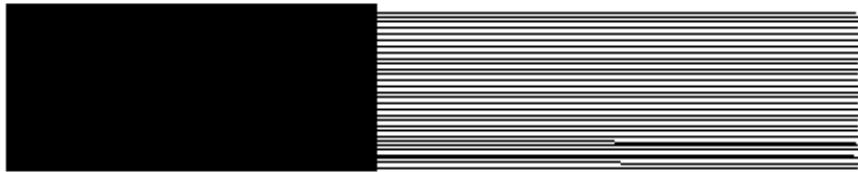


Σχήμα 1.1 Μέρη σχοινιών

1.2 Τύποι Σχοινιών Και Υλικά

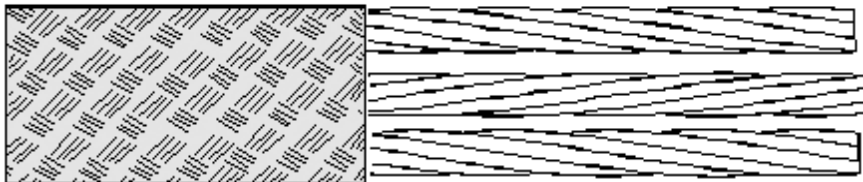
Στην ναυτιλία υπάρχουν τέσσερις κύριοι τύποι σχοινιών. Κάθε ένας από αυτούς έχει διαφορετικές ιδιότητες.

1. Σχοινιά με πυρήνα από παράλληλες ίνες και εξωτερικό χιτώνιο (Parallel Yarn core). Παρουσιάζουν υψηλή αντοχή και συνήθως τερματίζουν με βαρελοειδή στήριξη με σφήνα (barrel and spike termination).



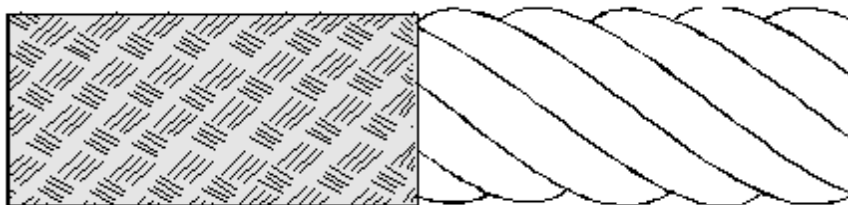
Σχήμα 1.2.1 Parallel Yarn core

2. Σχοινιά με παράλληλες δέσμες, πλεγμένες ή απλωμένες, και εξωτερικό πλεκτό χιτώνιο (Parallel Strand). Είναι εύκολα στην συνδεσμολογία και χρησιμοποιούνται συνήθως στην πρόσδεση πλωτών πλατφόρμων.



Σχήμα 1.2.2 Parallel Strand

3. Σχοινιά κατασκευασμένα από κλώνους συρματόσχοινου (Stranded Wire Rope Construction). Παρουσιάζουν υψηλή αντοχή και χρησιμοποιούνται σε δυναμικές εφαρμογές όπως η ανύψωση.

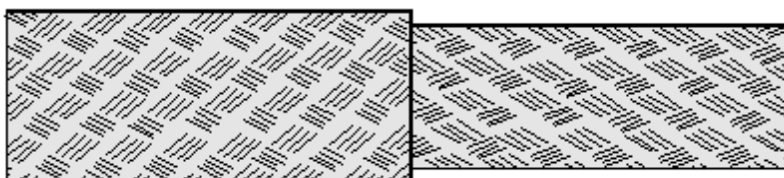


Σχήμα 1.2.3 Stranded Wire Rope

4. Πλεκτά (Plaited) και πλεγμένα (Braided) σχοινιά. Παρουσιάζουν χαμηλότερη αντοχή σε σχέση με τους προηγούμενους τύπους σχοινιών αλλά έχουν εξαιρετική δομική ακεραιότητα. Χρησιμοποιούνται στην αγκυροβόληση πλοίων.



Σχήμα 1.2.4 Πλεκτά (Plaited)



Σχήμα 1.2.5 Πλεγμένα (Braided)

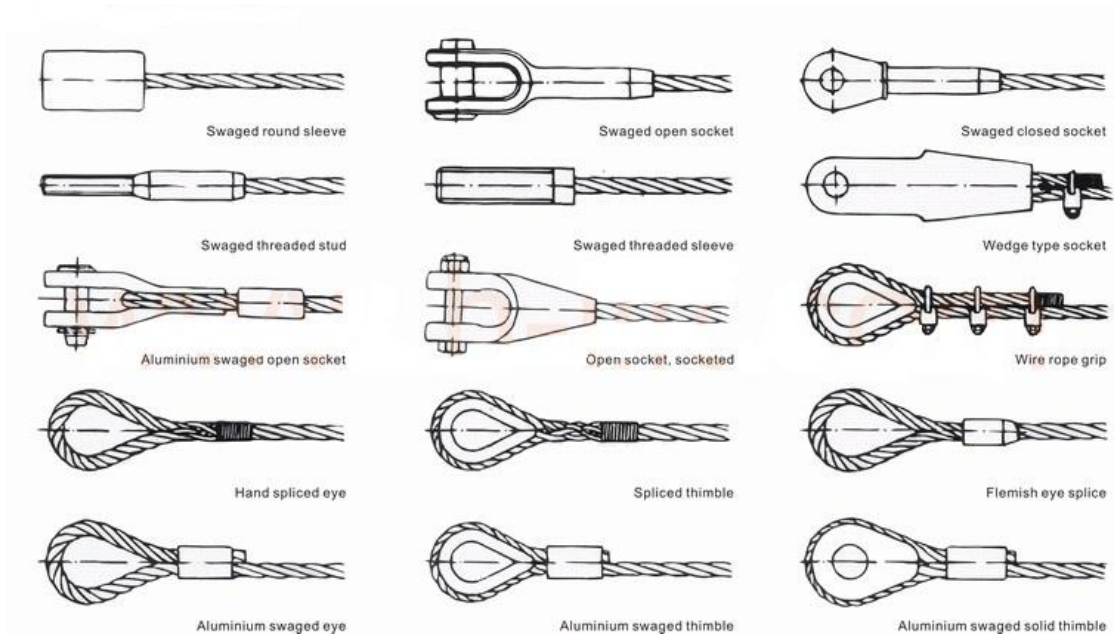
Τα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των σχοινιών αποτελούνται από φυσικές ίνες, από σύνθετες ίνες και ορισμένες φορές από μείγματα πολλών ιών ή συν-πολυμερείς ίνες. Οι φυσικές ίνες είναι από λινό, βαμβάκι, κοκοφοίνικα, γιούτα, άχυρο και σιζάλ. Οι συνθετικές ίνες περιλαμβάνουν πολυπροπυλένιο, νάιλον, πολυεστέρα (π.χ. PET, LCP, Vectran), πολυαιθυλένιο (π.χ. Dyneema and Spectra), αραμίδια (π.χ. Twaron, Technora και Kevlar) και ακρυλικά (π.χ. Dralon). Τέλος, τα συρματόσχοινα είναι κατασκευασμένα από χάλυβα ή άλλα κράματα μετάλλων.

1.3 Τρόποι Στερέωσης

Για να μεταδοθεί δύναμη μέσω ενός σχοινιού χρειάζεται ένας τρόπος στερέωσης, είτε πρόκειται για κάτι μόνιμο, όπως μία θηλιά, μια μηχανική λαβή ή ένας συνδετήρας, είτε για κάτι προσωρινό, όπως π.χ. ένα κόμπος γύρω από μια θέση. Ένας αποτελεσματικός τρόπος στερέωσης είναι ουσιαστικός για σχεδόν κάθε εφαρμογή που θέτει ένα σχοινί υπό ένταση.

Ένα σχοινί είναι τόσο ισχυρό όσο ο ασθενέστερος κρίκος του, και αυτός βρίσκεται συχνά στην στερέωσή του. Μια τοπική διαταραχή της δομής του σχοινιού στην περιοχή της στήριξής του μπορεί να προκαλέσει μείωση της αντοχής του. Επίσης, η ανάπτυξη κυκλικής τάσης, τριβής, ολίσθησης ή συστροφής στην στήριξη μπορεί να οδηγήσει σε σταδιακή απώλεια αντοχής και αποτυχία.

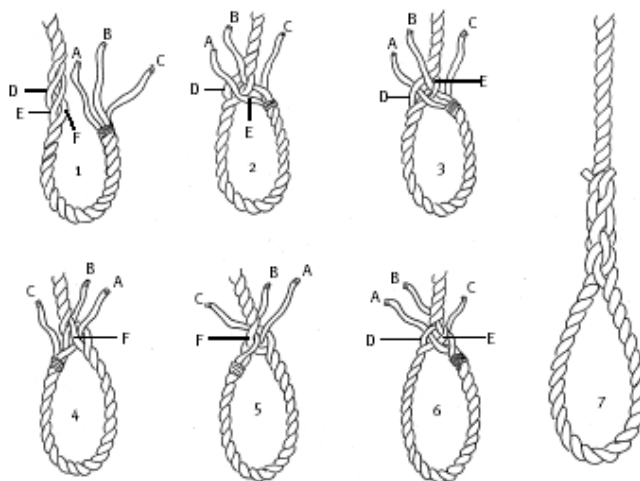
Παρακάτω περιγράφονται οι πιο συνηθισμένοι τρόποι στερέωσης.



Σχήμα 1.3.1 Τρόποι στερέωσης

‘Θηλιά’ (eye termination)

Η πιο συνηθισμένη μέθοδος στερέωσης των σχοινιών από ίνες είναι η θηλιά, η οποία μπορεί να τοποθετηθεί γύρω από ένα κατάλληλο εξάρτημα. Αυτή η σύνδεση γίνεται με τον διαχωρισμό των κλώνων στα άκρα του σχοινιού, διαμορφώνοντας τους σε μια θηλιά, και έπειτα πλέκοντας τους μέσα στο σώμα του σχοινιού. Αυτή η μέθοδος βασίζεται στην δύναμη αντίστασης της τριβής. Η ελικοειδής δομή των πλεγμένων σχοινιών δημιουργεί πίεση που επιτρέπει στην τριβή να συγκρατεί τους κλώνους που έχουν εισαχθεί μέσα στο σώμα του σχοινιού. Μια άλλη προσέγγιση είναι οι διαχωρισμένοι κλώνοι μετά την θηλιά να πλέκονται πάνω στο εξωτερικό του σχοινιού και σφίγγουν καθώς τάση εφαρμόζεται στο σχοινί.

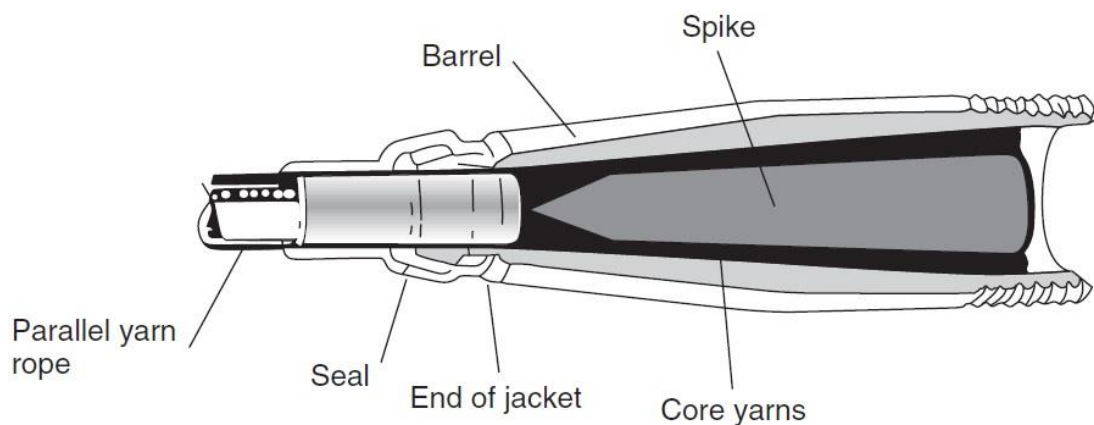
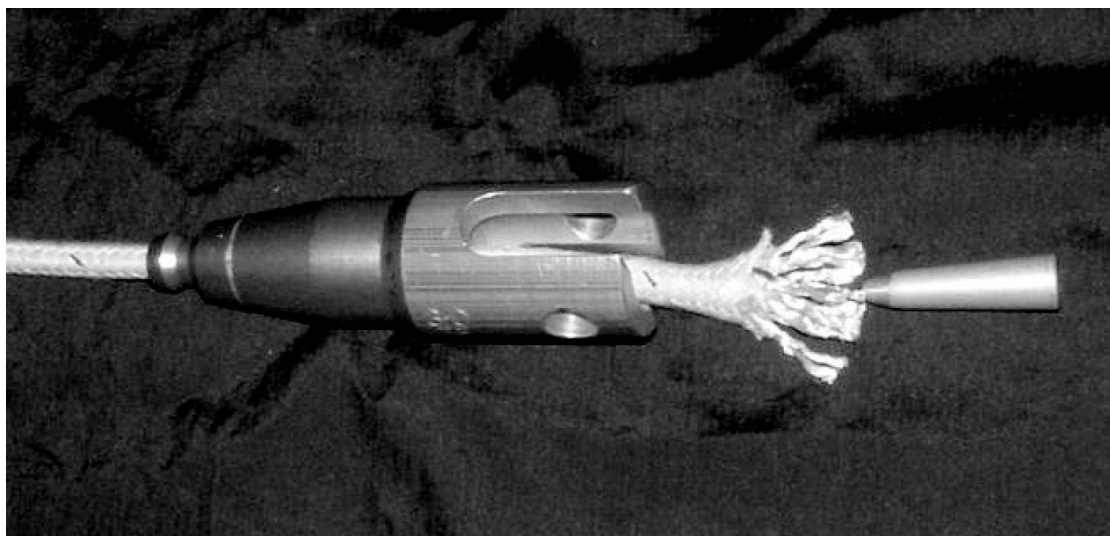


Σχήμα 1.3.2 Θηλιά

Το βασικότερο πλεονέκτημα αυτού του τύπου πρόσδεσης είναι το γεγονός ότι δεν απαιτείται η χρήση άλλων εξαρτημάτων, παρά μόνο το ίδιο το σχοινί με το οποίο σχηματίζεται η απαραίτητη για την πρόσδεση θηλιά. Παρά την μεγάλη αντοχή του σε καταπόνηση και κόπωση ο συγκεκριμένος τύπος πρόσδεσης παρουσιάζει αρκετά μειονεκτήματα. Κατ' αρχάς απαιτείται αρκετός χρόνος και δουλειά από έμπειρο τεχνίτη, ώστε το τελικό αποτέλεσμα να έχει υψηλή αντοχή και αξιοπιστία. Παρ' όλα αυτά, ακόμα και σε αυτή την περίπτωση, δεν είναι δυνατή η επίτευξη του βέλτιστου αποτελέσματος κάθε φορά. Επίσης, λόγω της μορφής της θηλιάς, υπάρχουν σημεία του σχοινιού τα οποία φορτίζονται περισσότερο από άλλα. Αυτή η τοπική υπερφόρτιση μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία του υλικού σε φορτία πολύ μικρότερα από το ονομαστικό. Τέλος, ένα αρκετά σημαντικό πρόβλημα εμφανίζεται σε σχοινιά μεγάλης διαμέτρου, όπου απαιτείται μεγάλο μήκος καλωδίου (αρκετά μέτρα), καθιστώντας την μέθοδο αρκετά δαπανηρή και δύσκολη στην υλοποίηση.

Βαρελοειδής στήριξη με σφήνα (barrel and spike termination).

Η συγκεκριμένη στήριξη χρησιμοποιεί πίεση και τριβή στο σχοινί που δημιουργείται από την εσωτερική επιφάνεια ενός κωνικού σώματος (βαρέλι) και την εξωτερική κωνική μορφή του σχοιλιού σε συνδυασμό με μια σφήνα που αυξάνει την πίεση καθώς εφαρμόζεται τάση. Απαιτείται κάποια αρχική σύσφιξη, έτσι ώστε η σφήνα ή ο δακτύλιος να κινούνται στην κωνικότητα καθώς εφαρμόζεται τάση, προκειμένου να αναπτυχθεί μια συνεχής αύξηση της πίεσης. Μερικές φορές προστίθενται περιφερικές αυλακώσεις ή δόντια για να ασφαλίσουν καλύτερα την ίνα ή για να δημιουργήσουν επιπλέον τοπική πίεση για αύξηση της πρόσφυσης.



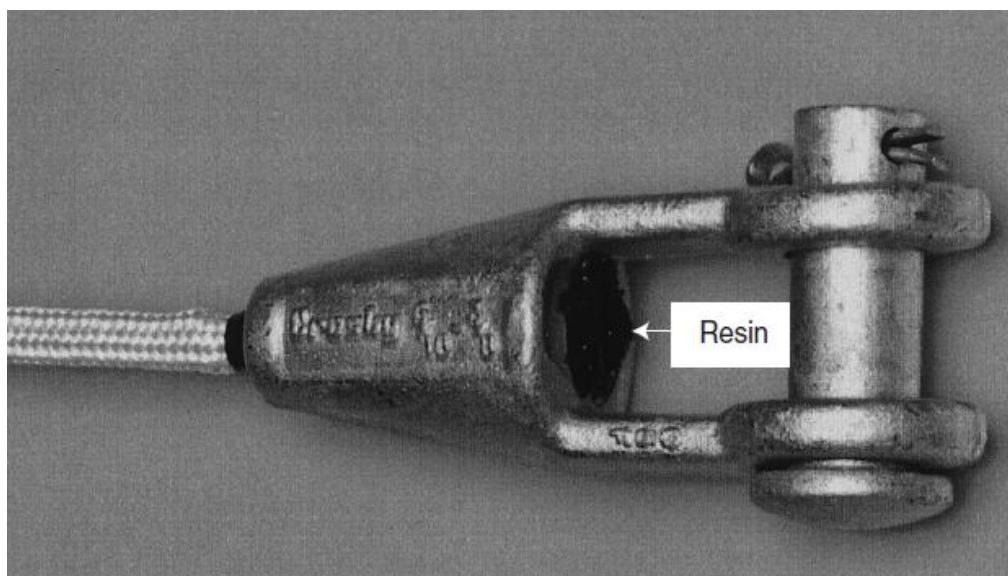
Σχήμα 1.3.3 Βαρελοειδής στήριξη με σφήνα

Συνδετήρας (θήκη)

Οι συνδετήρες παράγονται διαχωρίζοντας τους κλώνους, εξαπλώνοντας τις ίνες και διανέμοντάς τες μέσα σε μια κωνική θήκη. Στη συνέχεια εισάγεται μια ρητίνη, συνήθως πολυεστερική ή εποξική, η οποία ενθυλακώνει τις ίνες. Ο μηχανισμός αυτού του σχεδιασμού είναι δύσκολο να αναλυθεί. Τόσο το μέτρο ελαστικότητας της ίνας όσο και της ρητίνης ενθυλάκωσης είναι γνωστό ότι σχετίζονται με την απόδοση. Ωστόσο, η πρόβλεψη της απόδοσής τους με αναλυτικά μέσα παραμένει ασαφής. Η τοποθέτηση του σχοινιού πραγματοποιείται κατά το μεγαλύτερο μέρος χωρίς κάποια φόρτιση, έτσι ώστε η διάμετρός του καθώς εισέρχεται στην θήκη να σταθεροποιείται στο επίπεδο μηδενικής τάσης. Ωστόσο, όταν φορτίζεται το σχοινί, η διάμετρος του μειώνεται, αλλά η ρητίνη στην υποδοχή δεν συμπιέζεται και δεν κινείται. Αυτό το φαινόμενο προκαλεί ένα απότομο πλευρικό βήμα ανάμεσα στο σχοινί και την ρητίνη στην είσοδο του συνδετήρα. Αυτή η πλευρική μετατόπιση αυξάνεται σε μέγεθος καθώς αυξάνεται το μέγεθος του σχοινιού και γι' αυτό μια προτεινόμενη λύση για τα μεγάλα σχοινιά είναι να χωρίζουν τις δέσμες ινών σε τμήματα.

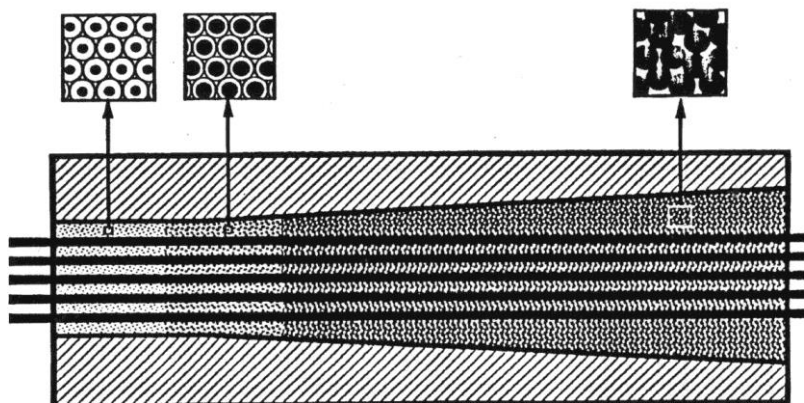
Η παραγωγή ενός συνδετήρα που θα επιτύχει καλά και προβλέψιμα αποτελέσματα αποτελεί μια απαιτητική εργασία. Οποιοδήποτε συνδετήρας χρησιμοποιείται για μια κρίσιμη εφαρμογή πρέπει να κατασκευαστεί με μια διαδικασία που αποδεικνύεται ή επαληθεύεται με δοκιμές πρωτοτύπου. Τα μικρά μεγέθη που κυμαίνονται από 12 έως 24 mm έχουν παρουσιάσει μεγαλύτερη επιτυχία από τα μεγαλύτερα μεγέθη.

Οι συνδετήρες χρησιμοποιούνται συνήθως για συρματόσχοινα χάλυβα και αρχικά χρησιμοποιούσαν λιωμένο μέταλλο αλλά πλέον κυρίως ρητίνη.



Σχήμα 1.3.4 Συνδετήρας

Η ΕΜΡΑ, με την πατέντα no. 5.713.169, πρότεινε ένα βελτιωμένο σχέδιο προκειμένου να μειώσει την συγκέντρωση τάσεων λόγω της αναντιστοιχίας στις ενδοτικότητες. Ειδικότερα, πρότεινε την χρήση ενός υλικού διαβαθμισμένου μέτρου ελαστικότητας, ώστε να πετύχει μια σταθερή ενδοτικότητα κατά μήκος του συνδετήρα. Η συγκεκριμένη ιδέα βελτιώνει σημαντικά την συμπεριφορά του συνδετήρα και θεωρητικά θα μπορούσε να εξαλείψει την ανεπιθύμητη συγκέντρωση τάσεων. Η συγκεκριμένη προσέγγιση ιδανικά θα απαιτούσε ένα υλικό με ομοιόμορφα μεταβαλλόμενο μέτρο ελαστικότητας, κάτι που είναι πρακτικά πολύ δύσκολο να υλοποιηθεί. Για αυτό τον λόγο χρησιμοποιήθηκε ένας διαβαθμισμένος συνδετήρας, αποτελούμενος από 5-7 ζώνες διαφορετικών υλικών με διαφορετικά μέτρα ελαστικότητας.



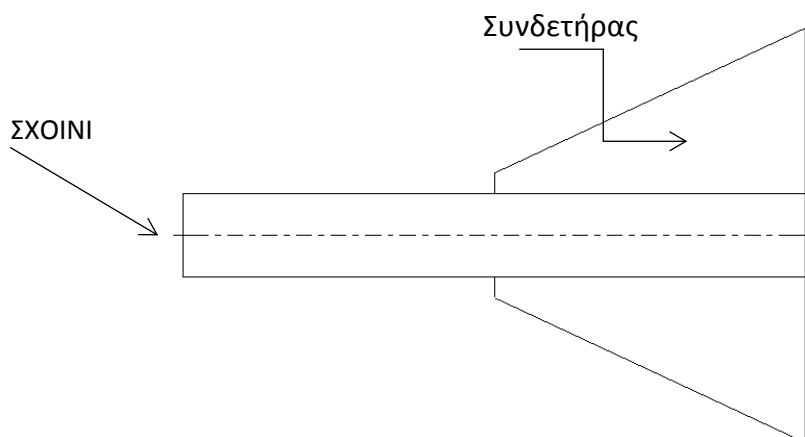
Σχήμα 1.3.5 Συνδετήρας της ΕΜΡΑ

Ωστόσο και το παραπάνω σχέδιο δεν καταφέρνει να εξαλείψει τις συγκεντρώσεις τάσεων, οι οποίες τώρα εμφανίζονται στις περιοχές ανάμεσα στα διαφορετικά υλικά λόγω της αναντιστοιχίας στα μέτρα ελαστικότητας.

Κεφάλαιο 2

2.1 Περιγραφή του μοντέλου του συνδετήρα

Ένας αρκετά συνηθισμένος τύπος συνδετήρα είναι αυτός που εμφανίζεται στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 2.1).



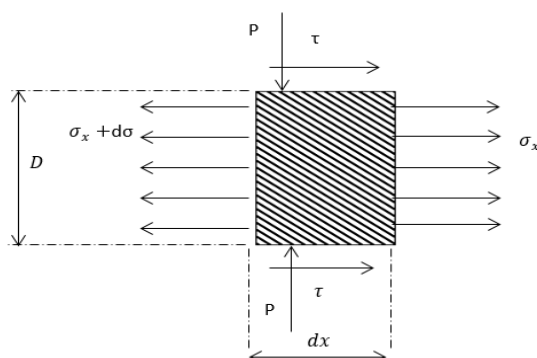
Σχήμα 2.1.1 Γεωμετρία συνδετήρα

Το σχοινί εισέρχεται και συσφίγγεται στον συνδετήρα. Η πίεση σύσφιξης δημιουργεί, λόγω τριβής μεταξύ της εσωτερικής επιφάνειας του συνδετήρα και της επιφάνειας του σχοινοῦ, διατμητικές τάσεις μέσω των οποίων συγκρατείται το σχοινί. Τα βασικά μειονεκτήματα αυτού του σχεδίου, που είναι και υπεύθυνα τις περισσότερες φορές για την αστοχία του σχοινοῦ, είναι δυο.

Πρώτον δημιουργείται συγκέντρωση τάσεων (ορθών) στην είσοδο του σχοινοῦ, στην αρχή του συνδετήρα, λόγω της διαβάθμισης του (συγκέντρωση τάσεων λόγω αλλαγής της γεωμετρίας). Το συγκεκριμένο φαινόμενο είναι εύκολο να αντιμετωπιστεί με μία ομαλά μεταβαλλόμενη γεωμετρία συνδετήρα. Έτσι, όσο οι ορθές τάσεις είναι μικρότερες από την οριακή τιμή αντοχής δεν υπάρχει πρόβλημα.

Το δεύτερο και σημαντικότερο μειονέκτημα αυτού του τύπου συνδετήρα είναι η εμφάνιση μιας μη ομοιόμορφης κατανομής διατμητικών τάσεων κατά μήκος του σχοινοῦ, η οποία οδηγεί σε συγκέντρωση διατμητικών τάσεων σε κάποια σημεία και αστοχία σε φορτία πολύ μικρότερα από το ονομαστικό. Η ανεπιθύμητη αυτή συγκέντρωση τάσεων προκαλείται διότι η ενδοτικότητα του συνδετήρα αυξάνεται κατά μήκος του, ενώ η ενδοτικότητα του σχοινοῦ παραμένει σταθερή, και από την αναντιστοιχία τους προκύπτει μια ανομοιόμορφη κατανομή διατμητικών τάσεων.

Προκειμένου να γίνει καλύτερα κατανοητός ο μηχανισμός συγκέντρωσης τάσεων και η σχέση που έχει με την κατανομή ορθών τάσεων κατά μήκος του σχοινιού, μελετάται η ισορροπία μια στοιχειώδους λωρίδας πάχους dx .



Σχήμα 2.1.2 Ισορροπία στοιχειώδους λωρίδας σχοινιού

Θεωρείται η στοιχειώδη λωρίδα σχοινιού του σχήματος και μελετάται η ισορροπία της. Η λωρίδα αυτή ισορροπεί υπό την επίδραση των παρακάτω δυνάμεων:

Μίας αξονικής δύναμης προς τα αριστερά η οποία οφείλεται στις ορθές τάσεις $(\sigma_x + d\sigma)$ που αναπτύσσονται στην αριστερή πλευρά του σχοινιού και ισούται με $\pi R^2(\sigma_x + d\sigma)$.

Μίας αξονικής δύναμης προς τα δεξιά η οποία οφείλεται στις ορθές τάσεις σ_x που αναπτύσσονται στη δεξιά πλευρά του σχοινιού και ισούται με $\pi R^2(\sigma_x)$.

Δύο δυνάμειν προς τα δεξιά, οι οποίες οφείλονται στις διατμητικές τάσεις που εμφανίζονται λόγω τριβής μεταξύ της επιφάνειας του σχοινιού και της εσωτερικής επιφάνειας της θήκης. Το μέτρο αυτών των δύο δυνάμεων είναι ίσο με $\tau 2\pi R dx$.

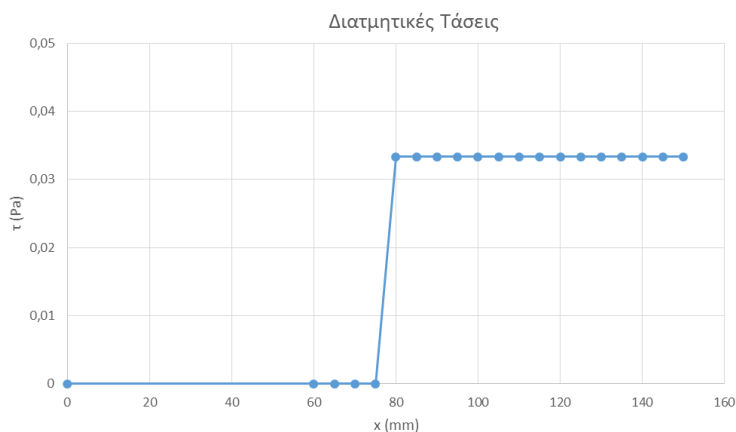
Τέλος, στην στοιχειώδη λωρίδα του σχήματος ασκούνται δύο ακτινικές δυνάμειν, ίδιου μέτρου $\rho 2\pi R dx$ και αντίθετης φοράς (όπως φαίνονται στο παραπάνω σχήμα). Αυτές οι δυνάμειν οφείλονται στην πίεση που δέχεται το σχοινί από την επιφάνεια της θήκης και αναφέρονται για λόγους πληρότητας, αφού έχουν ίδιο μέτρο και αντίθετη φορά οπότε η συνισταμένη τους είναι μηδέν και για αυτό τον λόγο μπορούν να αμεληθούν από την ανάλυση. Έτσι η εξίσωση ισορροπίας προκύπτει:

$$\tau \pi D dx + \frac{1}{4} \pi D^2 d\sigma_x = 0 \quad (2.1)$$

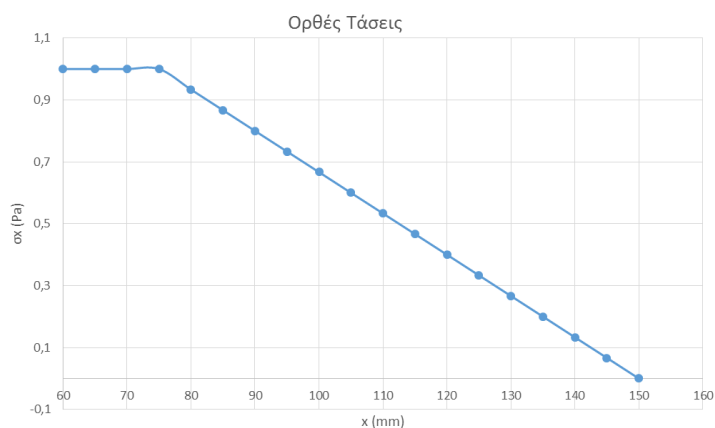
$$2\tau dx = -\frac{D}{2} d\sigma_x \quad (2.2)$$

$$\tau = \frac{d\sigma_x}{dx} \frac{D}{4} \quad (2.3)$$

Στην παραπάνω εξίσωση φαίνεται άμεσα η επίδραση της κατανομής των ορθών τάσεων στη δημιουργία των διατμητικών, καθώς και στην κατανομή τους. Η συγκέντρωση διατμητικών τάσεων οφείλεται στην ανομοιόμορφη κατανομή των πρώτων κατά μήκος του σχοινιού. Για μια σταθερή κατανομή διατμητικών τάσεων απαιτείται, όπως φαίνεται και από την παραπάνω εξίσωση, μια γραμμική πτώση των ορθών τάσεων.



Σχήμα 2.1.3 Βέλτιστη θεωρητική κατανομή διατμητικών τάσεων



Σχήμα 2.1.4 Βέλτιστη θεωρητική κατανομή ορθών τάσεων

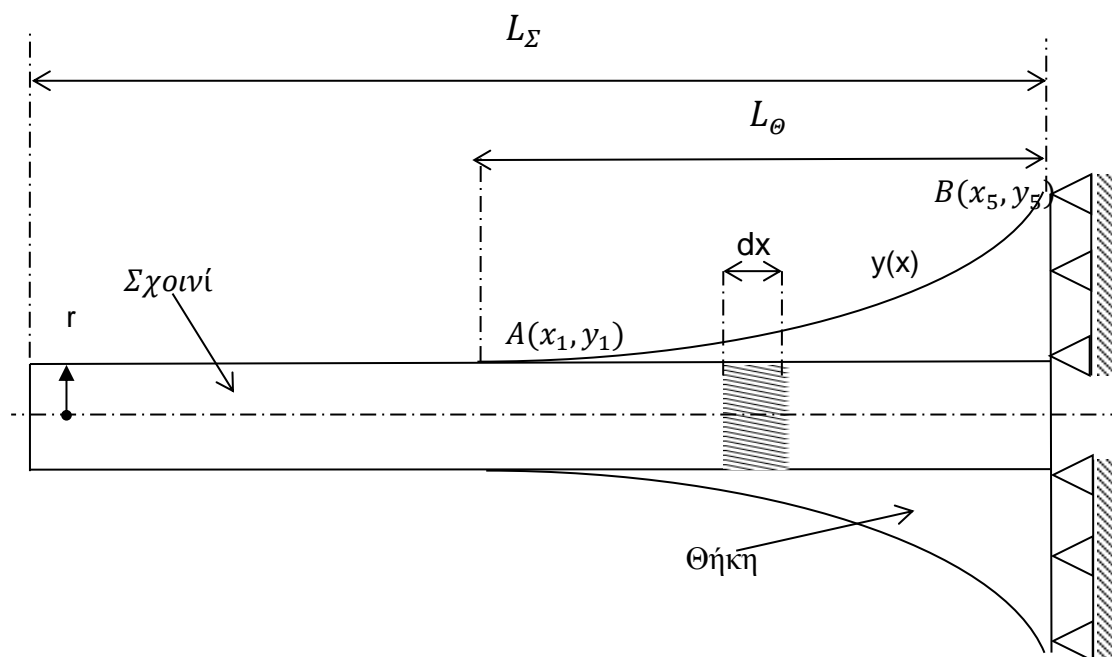
Αυτή η γραμμική κατανομή ορθών τάσεων οδηγεί στην επιθυμητή σταθερή κατανομή διατμητικών τάσεων

$$\frac{dy}{dx} = \text{const}, \quad \sigma = ax, \quad \frac{d\sigma}{dx} = \text{const} \quad (2.4)$$

και θα αποτελέσει μέτρο σύγκρισης όλων των μοντέλων διαφορετικών γεωμετριών αυτής της εργασίας.

2.2 Περιγραφή της γεωμετρίας του μοντέλου

Το σχοινί μοντελοποιείται ως ένας κύλινδρος σταθερής ακτίνας r σε όλο του το μήκος (μήκος L_{Σ}), ενώ ο συνδετήρας μοντελοποιείται ως ένας κύλινδρος μήκους L_{θ} και μεταβλητού πάχους $y(x)$.



Σχήμα 2.2. Γεωμετρία μοντέλου συνδετήρα

Οι αρχικές διαστάσεις για την μοντελοποίηση στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής επιλέχθηκαν:

- Ακτίνα σχοινιού $r=5\text{mm}$
- Μήκος σχοινιού $L_{\Sigma} =150\text{mm}$
- Μήκος συνδετήρα $L_{\theta}=75\text{mm}$

Με βάση τις παραπάνω διαστάσεις προσδιορίζονται οι συντεταγμένες του σημείου A: $x_1=75$, $y_1 = 5$, όπου είναι το αρχικό σημείο του συνδετήρα και η τετμημένη του σημείου B $x_5=150$. Η γεωμετρία του συνδετήρα θα αναλυθεί από μία εξίσωση Bézier με 5 σημεία ελέγχου: $N_1(x_1, y_1)$, $N_2(x_2, y_2)$, $N_3(x_3, y_3)$, $N_4(x_4, y_4)$ και $N_5(x_5, y_5)$.

και θα είναι την μορφής: $y(t) = P_0 + P_1t + P_2t^2 + P_3t^3 + P_4t^4$, $x(t) = 75 + 75t$ με $t \in [0,1]$

Διαιρώντας το τμήμα x_1, x_5 σε 4 ίσα μέρη προκύπτουν οι τετμημένες των σημείων ελέγχου $x_1=75, x_2=93.75, x_3=112.5, x_4=131.25$ και $x_5=150$.

Σε σχετική προηγούμενη διπλωματική εργασία (κ. Χρήστου Βακουφτσή [2]) μελετήθηκε ο προσδιορισμός της βέλτιστης γεωμετρίας του συνδετήρα, περιγράφοντας την γεωμετρία του συνδετήρα από μία εξίσωση spline της μορφής:

$$y = a_3x^3 + a_2x^2 + a_1x + a_0. \quad (2.5)$$

Οι αρχικές διαστάσεις για την μοντελοποίηση που ήταν:

- Ακτίνα σχοινιού $r=10\text{mm}$
- Μήκος σχοινιού $L_S = 150\text{mm}$
- Μήκος συνδετήρα $L_\theta = 75\text{mm}$

Με βάση τις παραπάνω διαστάσεις προσδιορίστηκαν οι συντεταγμένες του σημείου A(x_1, y_1) $x_1=75, y_1 = 10$ και η τετμημένη του σημείου B $x_2=150$. Για να εξαιληθεί η συγκέντρωση ορθών τάσεων στην αρχή του συνδετήρα, επιλέχθηκε η κλίση της σε αυτό το σημείο να είναι ίση με μηδέν.

Οπότε:

$$\frac{dy}{dx} = 0 \Rightarrow 3a_3x_1^2 + 2a_2x_1 + a_1 = 0 \quad (2.6)$$

Συνοψίζοντας τις εξισώσεις που προσδιορίζουν την γεωμετρία, προκύπτει το παρακάτω σύστημα με δύο παραμέτρους $y_2, \frac{dy}{dx} |_B$

$$\begin{aligned} 421875a_3 + 5625a_2 + 75a_1 + a_0 &= 10 \\ 16875a_3 + 150a_2 + a_1 &= 0 \\ 3375000a_3 + 22500a_2 + 150a_1 + a_0 &= y_2 \end{aligned} \quad (2.7)$$

$$67500a_3 + 300a_2 + a_1 = \frac{dy}{dx} |_B$$

Για την πρώτη παράμετρο του προβλήματος y_2 έγινε μελέτη από 30mm έως 90mm, ενώ για την κλίση έγινε μελέτη για κλίσεις από 0 έως 3. Η γεωμετρία που πλησιάζει την βέλτιστη βρέθηκε για $y_2=30$ και $\frac{dy}{dx} |_B = 0.5$

Και έχει $RMS=0.02828$

Κεφάλαιο 3

3.1 Προσέγγιση καμπυλών μέσω πολυωνύμων Bézier-Bernstein

Οι καμπύλες Bezier-Bernstein αποτελούν έναν πολύ απλό και ευέλικτο τρόπο να προσεγγιστεί μια γεωμετρική μορφή χρησιμοποιώντας έναν περιορισμένο αριθμό σημείων ελέγχου. Βασική ιδιότητα των καμπυλών αυτών είναι ότι η καμπύλη ξεκινά από το πρώτο σημείο ελέγχου και τερματίζει στο τελευταίο και ότι το ζεύγος των δύο πρώτων και το ζεύγος των δύο τελευταίων σημείων καθορίζει την κλίση της καμπύλης στο πρώτο και στο τελευταίο σημείο της. Βάση για την δημιουργία των καμπυλών Bezier αποτελεί ο αλγόριθμος του de Casteljau.

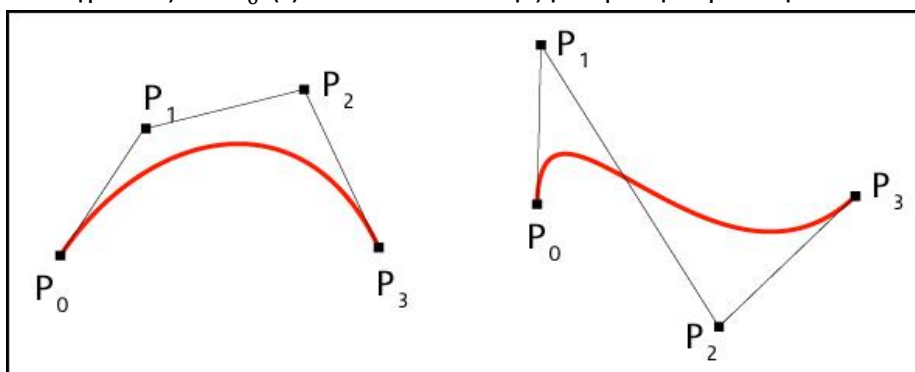
Αλγόριθμος de Casteljau: Ο αλγόριθμος de Casteljau αποτελεί ένα βασικό εργαλείο για την σχεδίαση καμπυλών αλλά και επιφανειών. Ο αναδρομικός αυτός αλγόριθμος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παραχθεί μια καμπύλη ή μια επιφάνεια Bezier. Μαθηματικά εκφράζεται με την παρακάτω σχέση:

$$r_i^a(t) = (1-t)r_i^{a-1}(t) + t r_{i+1}^{a-1}(t) \quad (3.1)$$

Ο παραπάνω αναδρομικός τύπος έχει δύο μεταβλητές, το a και το i . Όταν γίνεται ο υπολογισμός με το χέρι είναι χρήσιμο να καταγράφονται οι συντελεστές σχηματίζοντας ένα τρίγωνο όπως αυτό που ακολουθεί:

$$\begin{bmatrix} r_0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_n & \cdots & r_0^n \end{bmatrix}$$

Ο παραπάνω σχηματισμός ονομάζεται και σχηματισμός de Casteljau και αναδρομικά η κάθε στήλη δημιουργεί την επόμενη στα δεξιά της με ένα στοιχείο λιγότερο καταλήγοντας στο $r_0^N(t)$ όπου είναι και η ζητούμενη καμπύλη Bezier.



Σχήμα 3.1 Πολυώνυμα Bernstein

Παρά την απλότητα του αλγορίθμου de Casteljau η καμπύλες Bezier συνήθως εκφράζονται μαθηματικά με χρήση των πολυωνύμων Bernstein με την παρακάτω αναλυτική έκφραση:

$$r_0^t(t) = \sum_{i=1}^n r_i B_i^N(t) \quad (3.2)$$

η οποία είναι γραμμικός συνδυασμός των διανυσμάτων θέσης των σημείων ελέγχου και των συντελεστών οι οποίοι προσδιορίζονται από τα πολυώνυμα Bernstein τα οποία δίνονται από την παρακάτω σχέση:

$$B_i^N(t) = \binom{N}{i} t^i (1-t)^{N-i} \quad (3.3)$$

$$\text{όπου: } \binom{N}{i} = \frac{N!}{i!(N-i)!} \quad (3.4)$$

Οι συντελεστές-πολυώνυμα Bernstein μπορούν να παρασταθούν και σε μητρική μορφή:

$$\begin{bmatrix} B_0^0(t) & \cdots & B_0^N(t) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & B_N^N(t) \end{bmatrix}$$

Οπότε έχοντας υπολογίσει τα πολυώνυμα Bernstein, τα σημεία μιας καμπύλης Bezier μπορούν να υπολογιστούν από τις παρακάτω σχέσεις:

$$x^N(t) = \sum_{i=0}^N B_i^N(t) x_i \quad (3.5)$$

$$y^N(t) = \sum_{i=0}^N B_i^N(t) y_i \quad (3.6)$$

$$z^N(t) = \sum_{i=0}^N B_i^N(t) z_i \quad (3.7)$$

Η μητρική γραφή μιας καμπύλης Bezier: Μια πιο κομψή και βολική απεικόνιση της θεωρίας Bezier γίνεται μέσα από την μητρική γραφή της, η οποία δίνει κάθε σημείο της καμπύλης Bezier από την παρακάτω σχέση:

$$P(t) = \sum_{i=0}^n P_i C_i^N(t) \quad (3.8)$$

ενώ οι συντεταγμένες του κάθε σημείου δίνονται:

$$\begin{aligned} x(t) &= \sum_{i=0}^N x_i C_i^N(t) \\ y(t) &= \sum_{i=0}^N y_i C_i^N(t) \\ z(t) &= \sum_{i=0}^N z_i C_i^N(t) \end{aligned} \quad (3.9)$$

όπου

$$\begin{bmatrix} C_0(t) \\ \vdots \\ C_N(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{0,0} & \cdots & m_{0,N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{N,0} & \cdots & m_{N,N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t^0 \\ \vdots \\ t^N \end{bmatrix}$$

$$\text{και τα στοιχεία } m_{i,j} \text{ ορίζονται ως: } m_{i,j} = (-1)^{j-i} \binom{N}{j} \binom{j}{i} \quad (3.10)$$

Πέραν των μαθηματικών διατυπώσεων, τα σημεία ελέγχου μιας καμπύλης Bezier πρέπει να γίνουν κατανοητά ως πόλοι έλξης της καμπύλης. Μετακινώντας ένα οποιοδήποτε σημείο ελέγχου υπάρχει επίδραση σε ολόκληρη την καμπύλη ενώ η τάση είναι να παρατηρούμε την καμπύλη να μετακινείται (κυρίως τοπικά) προς τη νέα θέση του σημείου ελέγχου που μετακινήθηκε.

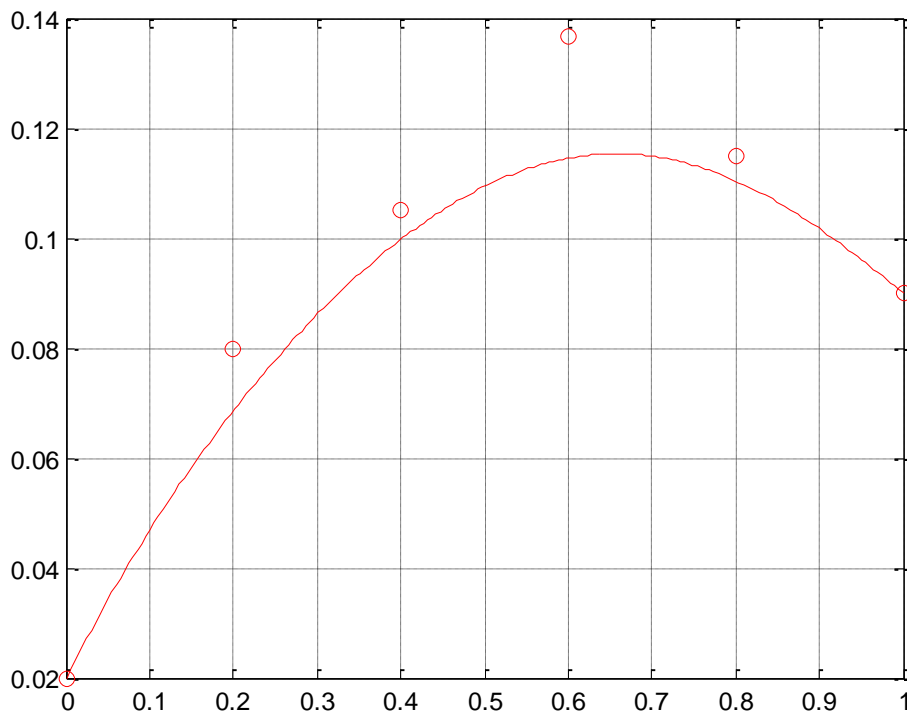
3.2 Αλγόριθμος παρεμβολής Bezier

Οι καμπύλες και οι επιφάνειες Bezier, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, χρησιμοποιούνται για την προσέγγιση σημείων και όχι για παρεμβολή. Στην παρούσα πειραματική ανάλυση θα χρησιμοποιηθεί ο επαναληπτικός αλγόριθμος που ανέπτυξε ο κ. Χρήστος Βακουφτσής στην διπλωματική εργασία του, ο οποίος δημιουργεί ένα σύνολο ψευδο-σημείων ελέγχου κατά τέτοιο τρόπο ώστε η παραγόμενη από αυτά επιφάνεια να περνά από τα ζητούμενα προς παρεμβολή σημεία. Προκειμένου να γίνει αυτό επαναληπτικά απαιτείται ένας μηχανισμός ο οποίος να μεταβάλλει τα σημεία ελέγχου και παράλληλα να ελέγχει την επίδραση των αλλαγών στην παραγόμενη επιφάνεια, λαμβάνοντας κάποιο είδος ανάδρασης μετά από κάθε επανάληψη ώστε να εξασφαλίζεται η σύγκλισή του.

Παρακάτω περιγράφονται αναλυτικά τα βήματα του αλγορίθμου για την περίπτωση της παρεμβολής μια καμπύλης σε ένα σύνολο σημείων.

Βήμα 1: Εισαγωγή των σημείων προς παρεμβολή (target points)

Βήμα 2: Ο αλγόριθμος σε αυτό μόνο το βήμα χρησιμοποιεί τα σημεία (target points) ως σημεία ελέγχου (control points) και εφαρμόζοντας την θεωρία Bezier-Bernstein σε μητρική μορφή δημιουργεί μια καμπύλη ή επιφάνεια. Η καμπύλη ή η επιφάνεια που δημιουργείται, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα, περνά από ελάχιστα σημεία, κυρίως στα άκρα της επιφάνειας, ενώ τα εσωτερικά σημεία ελέγχου καθορίζουν μόνο την καμπυλότητα της επιφάνειας.

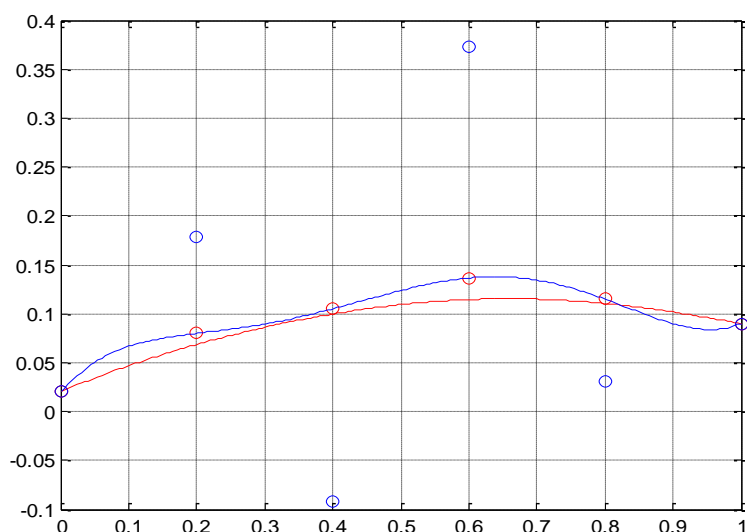


Σχήμα 3.2.1 Καμπύλη Bezier με σημεία ελέγχου τα σημεία προς προσέγγιση

Βήμα 3: Υπολογίζεται η απόσταση ανάμεσα στα ζητούμενα προς προσέγγιση σημεία(target points) και στα αντίστοιχα προς αυτά (σημεία με ίδιες τιμές των αδιάστατων μεταβλητών)σημεία της επιφάνειας. Στην συνέχεια μεταβάλλονται τα σημεία ελέγχου(control points) κατά αυτή την απόσταση και παράγεται ένα νέο σύνολο σημείων ελέγχου.

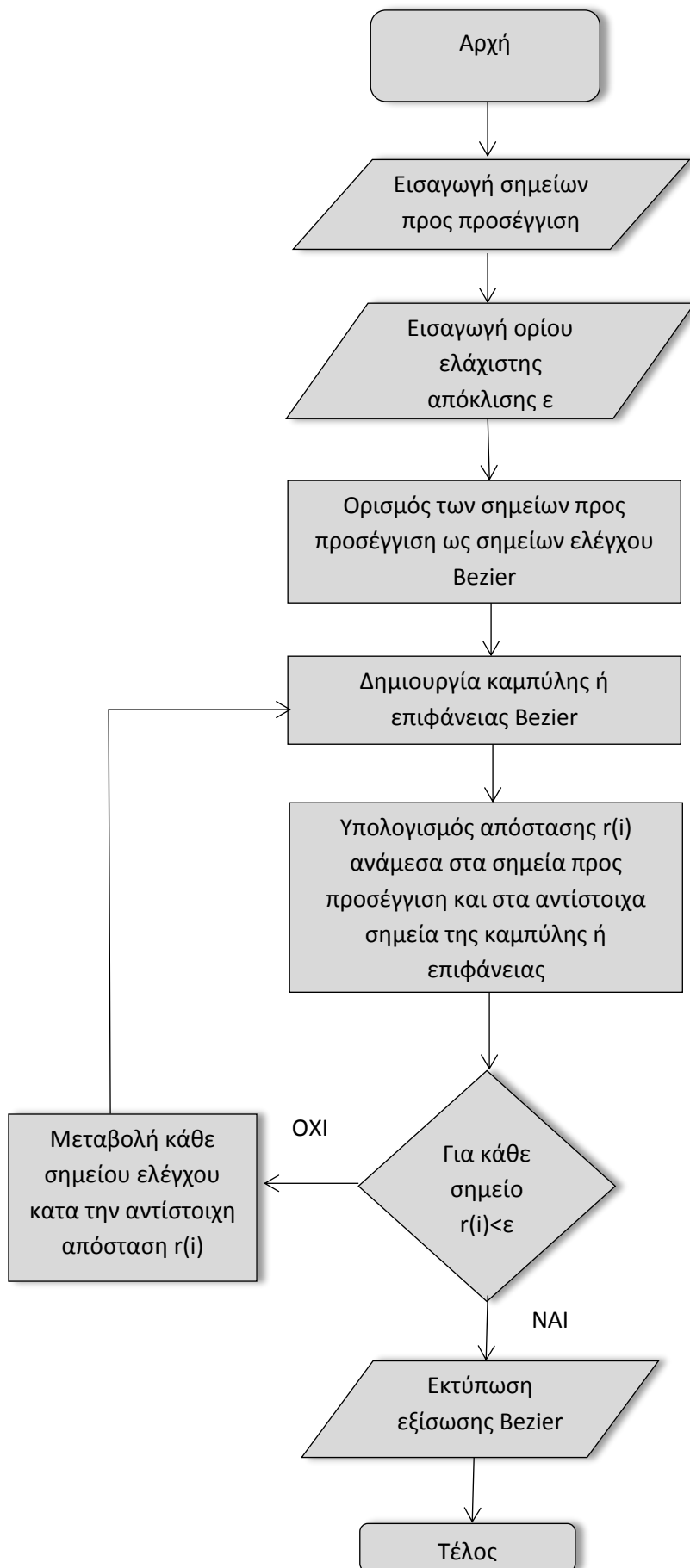
Βήμα 4: Με τα νέα σημεία ελέγχου δημιουργείται μια νέα επιφάνεια και υπολογίζεται ξανά η απόσταση ανάμεσα στα ζητούμενα προς προσέγγιση σημεία και τα αντίστοιχα σημεία της επιφάνειας.

Ο αλγόριθμος επαναλαμβάνεται έως ότου η απόκλιση όλων των σημείων της επιφάνειας από τα ζητούμενα σημεία προσέγγισης γίνει μικρότερη από ένα όριο που θέτει ο χρήστης.Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η προσέγγιση που έγινε στα σημεία (σημεία με κόκκινο) με χρήση του αλγορίθμου σε σύγκριση με την καμπύλη Bezier.



Σχήμα 3.2.2 Σύγκριση καμπυλών

Στο Σχήμα 3.2.2 με κόκκινο παριστάνεται η καμπύλη Bezier ενώ με μπλε χρώμα η καμπύλη που προκύπτει με χρήση του αλγορίθμου παρεμβολής. Με μπλε χρώμα παριστάνονται τα σημεία ελέγχου που παράγουν την καμπύλη ενώ με κόκκινο τα ζητούμενα προς προσέγγιση σημεία. Το βασικό πλεονέκτημα του συγκεκριμένου αλγορίθμου είναι ο τρόπος που γίνεται η μεταβολή των σημείων ελέγχου καθώς εξασφαλίζεται η σύγκλιση και η προσέγγιση των σημείων με μεγάλη ακρίβεια. Η δυνατότητα σύγκλισης του αλγορίθμου μπορεί να γίνει αντιληπτή αν εξεταστεί η χειρότερη περίπτωση που μπορεί να αντιμετωπίσει κατά τις επαναλήψεις: την περίπτωση δηλαδή η επιφάνεια να περάσει κάτω από τα σημεία ελέγχου. Σε αυτή την περίπτωση η απόσταση των σημείων γίνεται αρνητική, οπότε μεταβάλλοντας τα σημεία ελέγχου κατά μια αρνητική ποσότητα η καμπύλη ή η επιφάνεια τείνει να επανέλθει στα ζητούμενα προς παρεμβολή σημεία.



Σχήμα 3.2.3 Διάγραμμα ροής αλγορίθμου

3.3 Βελτιστοποίηση με 4 παραμέτρους

Χρησιμοποιώντας τον παραπάνω αλγόριθμο παρεμβολής στην γεωμετρία του συνδετήρα για διάμετρο σχοινιού 10mm προκύπτει η εξίσωση Bezier:

$$y = 5 - 1.3332t + 28.3998t^2 - 49.0668t^3 + 32.0002t^4 \quad (3.11)$$

$$x(t) = 75 + 75t \quad (3.12)$$

Με σημεία ελέγχου (control points):

N1 (75, 5), N2 (93.75, 4.6667), N3 (112.5, 9.0667), N4 (131.25, 5.9333) και N5 (150, 15)

Ύστερα από στρωγγυλοποίηση στις τεταγμένες των control points:

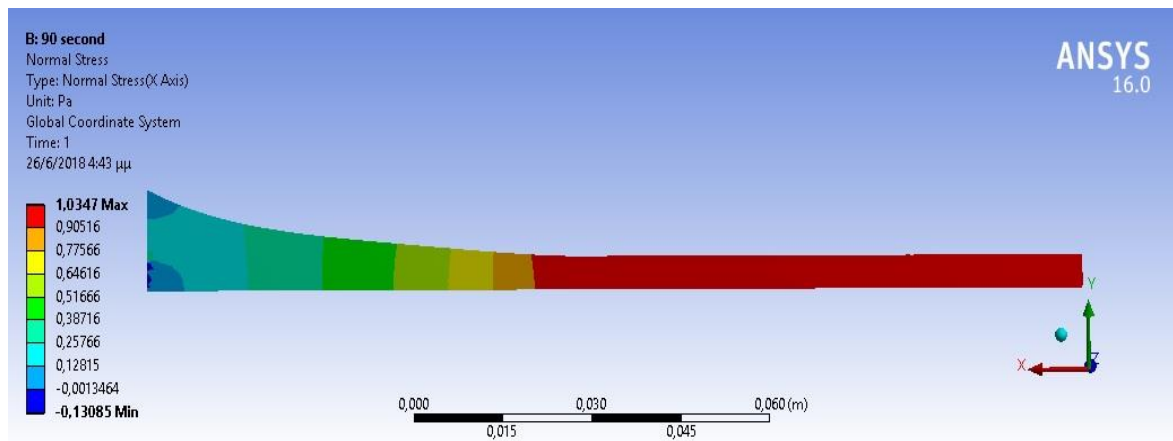
N1 (75, 5), N2 (93.75, 4.5), N3 (112.5, 9), N4 (131.25, 6) και N5 (150, 15)

προκύπτει η εξίσωση Bezier:

$$y = 5 - 2t + 30t^2 - 50t^3 + 32t^4 \quad (3.13)$$

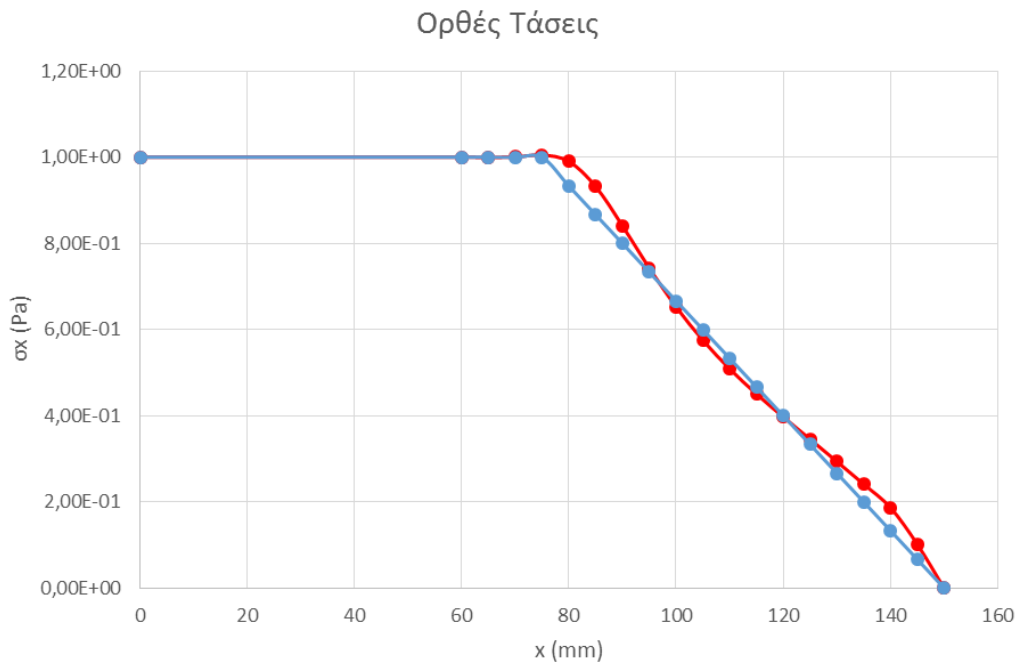
$$x(t) = 75 + 75t \quad (3.14)$$

Με RMS=0,030489

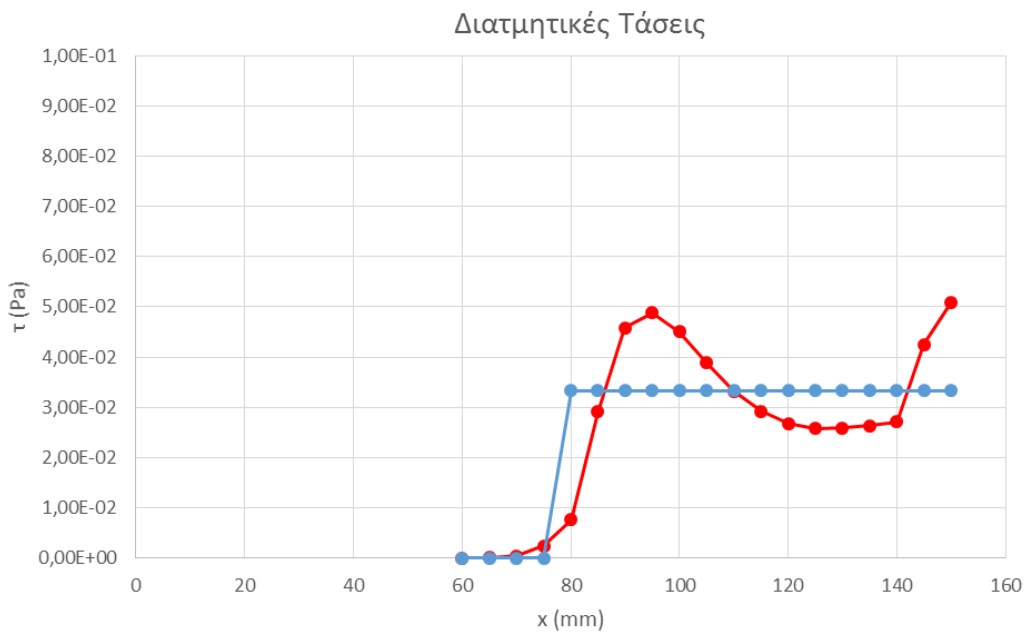


Σχήμα 3.3.1: Αποτέλεσμα ανάλυσης στο Ansys

Στο Σχήμα 3.3.2 και στο Σχήμα 3.3.3 απεικονίζονται με κόκκινο χρώμα οι ορθές και διατμητικές τάσεις της αρχικής εξίσωσης σε σχέση με τις αντίστοιχες βέλτιστες με μπλε χρώμα.



Σχήμα 3.3.2 Σύγκριση ορθών τάσεων με θεωρητικές βέλτιστες



Σχήμα 3.3.3 Σύγκριση διατμητικών τάσεων με θεωρητικές βέλτιστες

Το πρώτο σημείο ελέγχου N1 βρίσκεται στην αρχή του συνδετήρα οπότε μένει σταθερό. Θα μελετηθεί ο προσδιορισμός της βέλτιστης γεωμετρίας του συνδετήρα έχοντας σαν παραμέτρους τις τεταγμένες των 4 control points (N2, N3, N4, N5) της εξίσωσης Bezier.

3.4 Διαδικασία αξιολόγησης

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως κατά την ανάλυση του μηχανισμού που δημιουργεί την συγκέντρωση διατμητικών τάσεων κατά μήκος του σχοινιού, η βέλτιστη κατανομή των ορθών τάσεων, που οδηγεί σε μια σταθερή κατανομή διατμητικών, είναι μια γραμμικά μειούμενη κατανομή (Σχήμα 2.1.4).

Προκειμένου να αξιολογηθούν τα διαφορετικά γεωμετρικά μοντέλα (διαφορετικές γεωμετρίες συνδετήρα) που εξετάζονται στην παρούσα, γίνεται σύγκριση της κατανομής των ορθών τάσεων κατά μήκος του σχοινιού, με την βέλτιστη γραμμικά μειούμενη που απεικονίζεται στο ανωτέρω σχήμα. Ως μέτρο αξιολόγησης χρησιμοποιείται η ρίζα της μέσης τετραγωνικής απόκλισης (root mean square) ή RMS ανάμεσα σε κάθε κατανομή τάσεων και στην βέλτιστη.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\sigma_{xi} - \sigma_{ji})^2} \quad (3.15)$$

όπου

σ_{xi} είναι η τιμή της ορθής τάσης στην θέση i

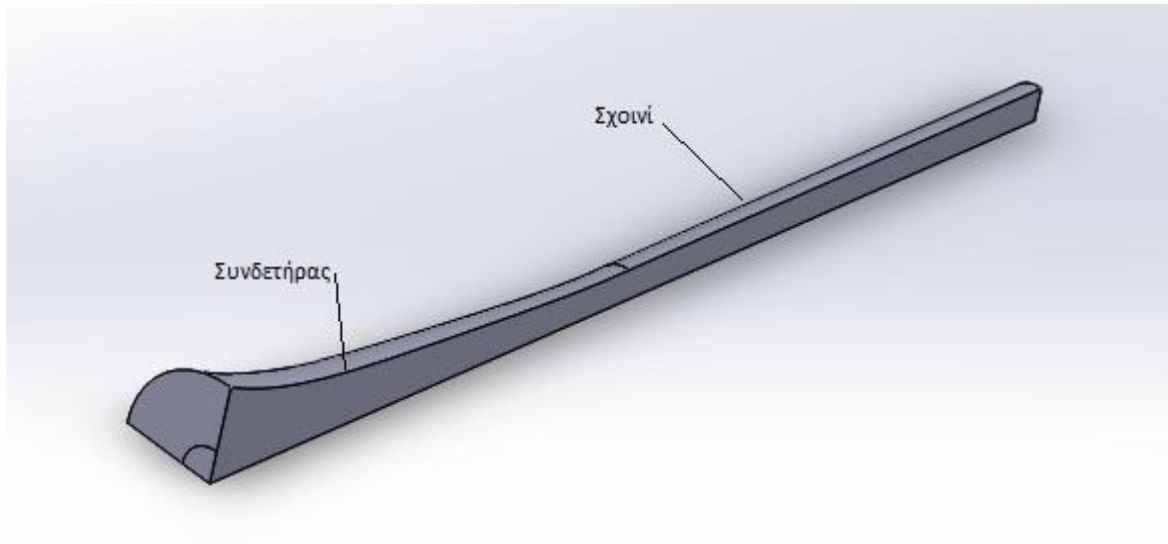
σ_{ji} είναι η τιμή της ορθής τάσης στην θέση i που αντιστοιχεί στην βέλτιστη γραμμική κατανομή τάσεων

Αυτή η ποσότητα εκφράζει για κάθε διαφορετικό συνδετήρα την απόκλιση που έχει η κατανομή των ορθών τάσεων κατά μήκος του σχοινιού από την βέλτιστη γραμμική.

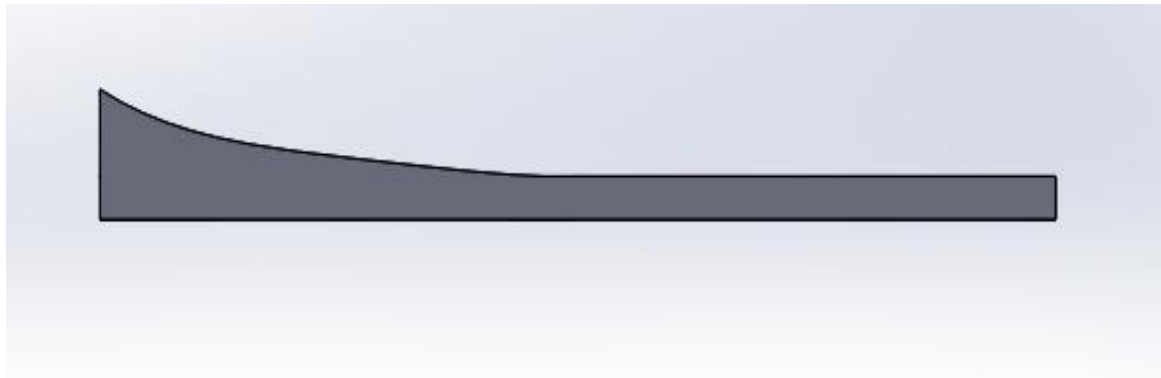
Κατά αυτό τον τρόπο δημιουργήθηκε ένας μαθηματικός δείκτης αξιολόγησης της κάθε γεωμετρίας με βέλτιστη αυτή την γεωμετρία θήκης με το ελάχιστο RMS.

Με αυτό τον τρόπο η διαδικασία εύρεσης της βέλτιστης γεωμετρίας συνδετήρα μετασχηματίζεται σε ένα μαθηματικό πρόβλημα ελαχιστοποίησης του RMS.

Ο σχεδιασμός της γεωμετρίας πραγματοποιήθηκε στο Solidworks 2016 με parametric equation driven curve και η μελέτη θα γίνει στο ένα τέταρτο της γεωμετρίας για την διευκόλυνση των προσομοιώσεων.

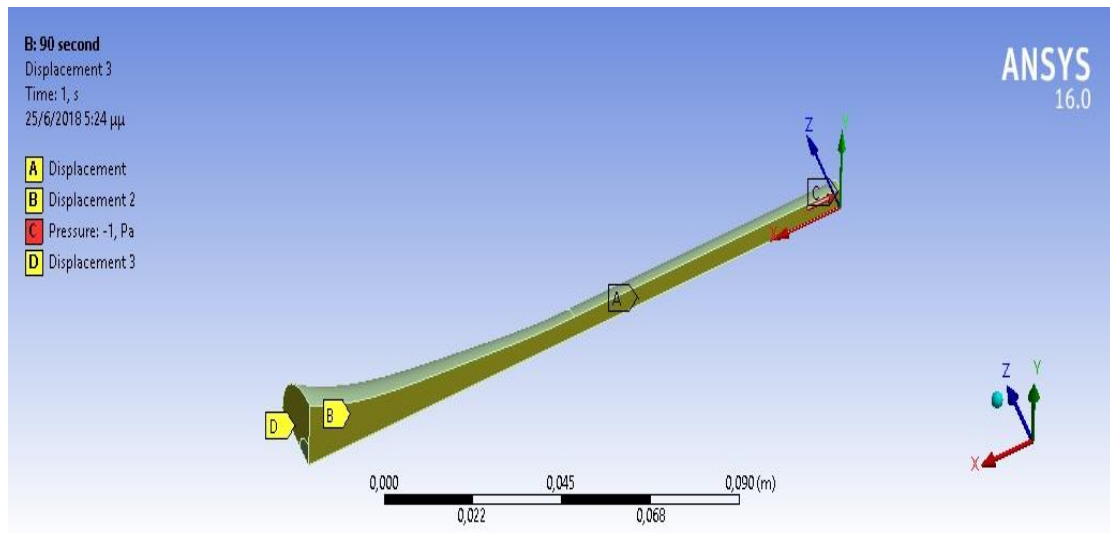


Σχήμα 3.4.1 Γεωμετρία μοντέλου στο Solidworks

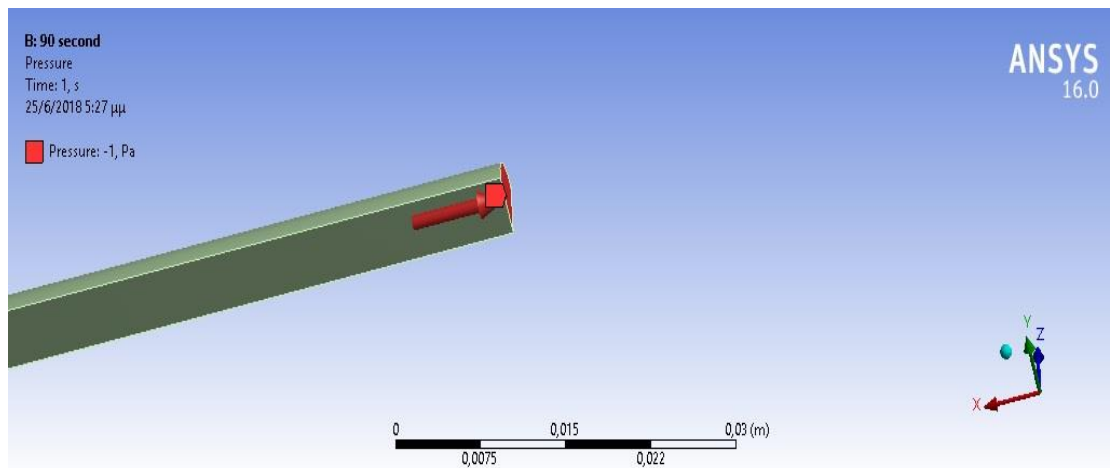


Σχήμα 3.4.2 Πρόσψη γεωμετρίας μοντέλου στο Solidworks

Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν στο Ansys 16.0 στο static structural με την γεωμετρία που δημιουργήθηκε στο Solidworks. Οι αρχικές συνθήκες αποτελούνται από τρεις κινηματικούς περιορισμούς, έναν για κάθε άξονα x , y , z στις τρεις πλευρές του συνδετήρα και μια πίεση (1Pa) στην αρχή του σχοινοῦ.



Σχήμα 3.4.3 Μοντέλο γεωμετρίας στο Ansys



Σχήμα 3.4.4 Εφαρμογή πίεσης στην αρχή του σχοινιού

Στην συνέχεια τοποθετήθηκαν probes στον άξονα x στην γεωμετρία του συνδετήρα, ανά 5 χιλιοστά, ώστε να μετρηθούν οι τιμές των ορθών τάσεων και να υπολογιστεί την τιμή του RMS σε κάθε προσομοίωση.

3.5 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

Σε μια πρώτη προσπάθεια προσέγγισης της βέλτιστης γεωμετρίας θα εξεταστεί η μεταβολή των τεταγμένων των σημείων ελέγχου (control points) στο εύρος:

$$N1 = 5$$

$$N2 \in [3.5, 4.5, 5.5]$$

$$N3 \in [7, 9, 11]$$

$$N4 \in [4, 6, 8]$$

$$N5 \in [14, 15, 16]$$

Στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων με μια τιμή RMS και μια τιμή μέγιστης ορθής τάσης (Pa), όπου εμφανίζεται στο σημείο N1 στην αρχή της γεωμετρίας του συνδετήρα, για το εύρος τιμών των τεταγμένων των control points.

N5	14												
N4	4												
N3	7	RMS	0,2178		N3	7	RMS	0,14		N3	7	RMS	0,09812
N2	3,5	MAX PRES	1,18		N2	4,5	MAX PRES	1,04		N2	5,5	MAX PRES	1,04
N3	9	RMS	0,1156		N3	9	RMS	0,0654		N3	9	RMS	0,05711
N2	3,5	MAX PRES	1,13		N2	4,5	MAX PRES	1,03		N2	5,5	MAX PRES	1,04
N3	11	RMS	0,06157		N3	11	RMS	0,05056		N3	11	RMS	0,07813
N2	3,5	MAX PRES	1,11		N2	4,5	MAX PRES	1,04		N2	5,5	MAX PRES	1,05

N5	14												
N4	6												
N3	7	RMS	0,1609		N3	7	RMS	0,09001		N3	7	RMS	0,04702
N2	3,5	MAX PRES	1,17		N2	4,5	MAX PRES	1,04		N2	5,5	MAX PRES	1,04
N3	9	RMS	0,0844		N3	9	RMS	0,03555		N3	9	RMS	0,04812
N2	3,5	MAX PRES	1,13		N2	4,5	MAX PRES	1,03		N2	5,5	MAX PRES	1,04
N3	11	RMS	0,05718		N3	11	RMS	0,0596		N3	11	RMS	0,08982
N2	3,5	MAX PRES	1,12		N2	4,5	MAX PRES	1,04		N2	5,5	MAX PRES	1,05

N5	14												
N4	8												
N3	7	RMS	0,1279		N3	7	RMS	0,0575		N3	7	RMS	0,01961
N2	3,5	MAX PRES	1,17		N2	4,5	MAX PRES	1,04		N2	5,5	MAX PRES	1,04
N3	9	RMS	0,07264		N3	9	RMS	0,0416		N3	9	RMS	0,06396
N2	3,5	MAX PRES	1,13		N2	4,5	MAX PRES	1,04		N2	5,5	MAX PRES	1,04
N3	11	RMS	0,06972		N3	11	RMS	0,0789		N3	11	RMS	0,1065
N2	3,5	MAX PRES	1,11		N2	4,5	MAX PRES	1,04		N2	5,5	MAX PRES	1,05

Σχήμα 3.5.1 Προσομοιώσεις για N5=14

N5	15																		
N4	4																		
N3	7 RMS	0,2023		N3	7 RMS	0,1305		N3	7 RMS	0,08518									
N2	3,5 MAX PRES	1,18		N2	4,5 MAX PRES	1,04		N2	5,5 MAX PRES	1,04									
N3	9 RMS	0,108		N3	9 RMS	0,05457		N3	9 RMS	0,04762									
N2	3,5 MAX PRES	1,13		N2	4,5 MAX PRES	1,03		N2	5,5 MAX PRES	1,04									
N3	11 RMS	0,05614		N3	11 RMS	0,04599		N3	11 RMS	0,07623									
N2	3,5 MAX PRES	1,11		N2	4,5 MAX PRES	1,04		N2	5,5 MAX PRES	1,05									

N5	15																		
N4	6																		
N3	7 RMS	0,1555		N3	7 RMS	0,08295		N3	7 RMS	0,03672									
N2	3,5 MAX PRES	1,17		N2	4,5 MAX PRES	1,04		N2	5,5 MAX PRES	1,04									
N3	9 RMS	0,08095		N3	9 RMS	0,03036		N3	9 RMS	0,04635									
N2	3,5 MAX PRES	1,13		N2	4,5 MAX PRES	1,03		N2	5,5 MAX PRES	1,04									
N3	11 RMS	0,05728		N3	11 RMS	0,06072		N3	11 RMS	0,09091									
N2	3,5 MAX PRES	1,11		N2	4,5 MAX PRES	1,04		N2	5,5 MAX PRES	1,04									

N5	15																		
N4	8																		
N3	7 RMS	0,1255		N3	7 RMS	0,05459		N3	7 RMS	0,01683									
N2	3,5 MAX PRES	1,17		N2	4,5 MAX PRES	1,04		N2	5,5 MAX PRES	1,04									
N3	9 RMS	0,07279		N3	9 RMS	0,04271		N3	9 RMS	0,06603									
N2	3,5 MAX PRES	1,13		N2	4,5 MAX PRES	1,04		N2	5,5 MAX PRES	1,05									
N3	11 RMS	0,07201		N3	11 RMS	0,08142		N3	11 RMS	1,0861									
N2	3,5 MAX PRES	1,11		N2	4,5 MAX PRES	1,04		N2	5,5 MAX PRES	1,04									

Σχήμα 3.5.2 Προσομοιώσεις για N5=15

N5	16																		
N4	4																		
N3	7 RMS	0,19442		N3	7 RMS	0,121		N3	7 RMS	0,0735									
N2	3,5 MAX PRES	1,18		N2	4,5 MAX PRES	1,04		N2	5,5 MAX PRES	1,04									
N3	9 RMS	0,1018		N3	9 RMS	0,0454		N3	9 RMS	0,1305									
N2	3,5 MAX PRES	1,13		N2	4,5 MAX PRES	1,03		N2	5,5 MAX PRES	1,31									
N3	11 RMS	0,05287		N3	11 RMS	0,04388		N3	11 RMS	0,07577									
N2	3,5 MAX PRES	1,11		N2	4,5 MAX PRES	1,04		N2	5,5 MAX PRES	1,05									

N5	16																		
N4	6																		
N3	7 RMS	0,15115		N3	7 RMS	0,07727		N3	7 RMS	0,02764									
N2	3,5 MAX PRES	1,17		N2	4,5 MAX PRES	1,04		N2	5,5 MAX PRES	1,04									
N3	9 RMS	0,07884		N3	9 RMS	0,02856		N3	9 RMS	0,04689									
N2	3,5 MAX PRES	1,13		N2	4,5 MAX PRES	1,04		N2	5,5 MAX PRES	1,05									
N3	11 RMS	0,05857		N3	11 RMS	0,06275		N3	11 RMS	0,0927									
N2	3,5 MAX PRES	1,11		N2	4,5 MAX PRES	1,04		N2	5,5 MAX PRES	1,04									

N5	16																		
N4	8																		
N3	7 RMS	0,12366		N3	7 RMS	0,05296		N3	7 RMS	0,018008									
N2	3,5 MAX PRES	1,17		N2	4,5 MAX PRES	1,04		N2	5,5 MAX PRES	1,04									
N3	9 RMS	0,07376		N3	9 RMS	0,0457		N3	9 RMS	0,06872									
N2	3,5 MAX PRES	1,13		N2	4,5 MAX PRES	1,03		N2	5,5 MAX PRES	1,05									
N3	11 RMS	0,07478		N3	11 RMS	0,08429		N3	11 RMS	0,11098									
N2	3,5 MAX PRES	1,11		N2	4,5 MAX PRES	1,04		N2	5,5 MAX PRES	1,04									

Σχήμα 3.5.3 Προσομοιώσεις για N5=16

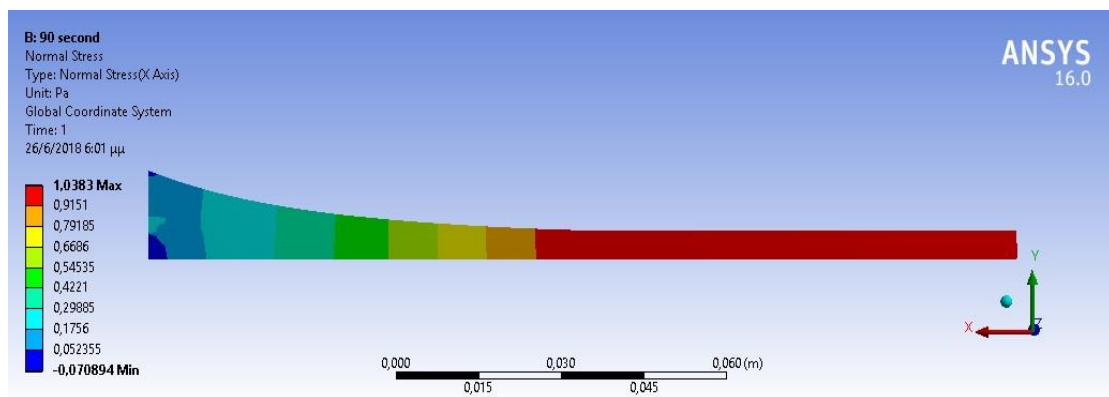
Προκύπτει ότι η γεωμετρία που πλησιάζει περισσότερο τη βέλτιστη εμφανίζεται για $N2=5.5$, $N3=7$, $N4=8$ και $N5=15$

με $RMS=0,01683$

και εξίσωση:

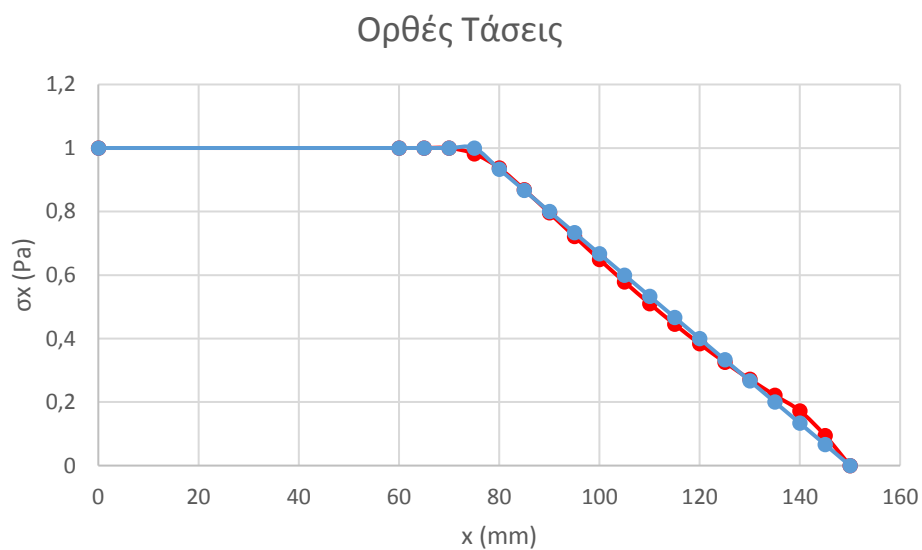
$$y(t) = 5 + 2t + 6t^2 - 6t^3 + 8t^4 \quad (3.16)$$

$$x(t) = 75 + 75t \quad (3.17)$$

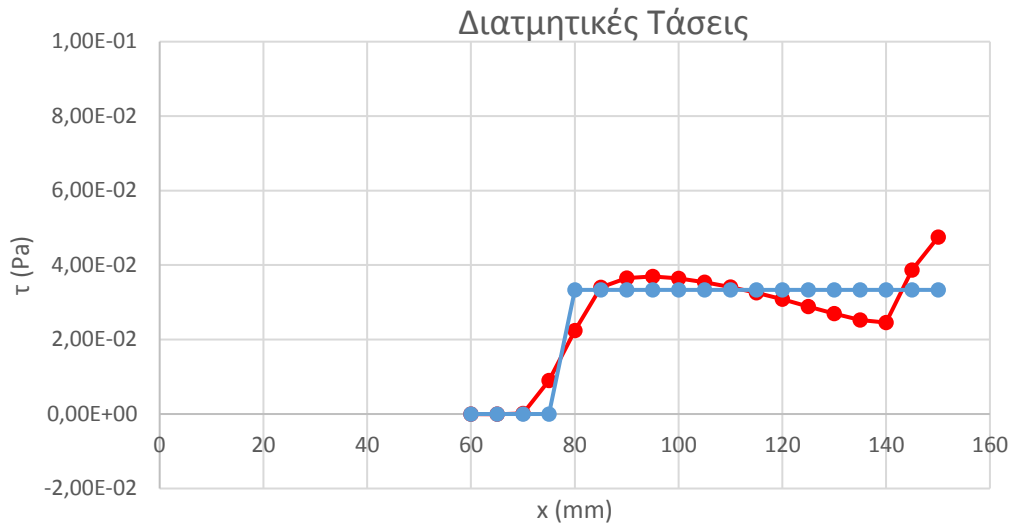


Σχήμα 3.5.4: Αποτέλεσμα ανάλυσης στο Ansys

Στα Σχήματα 3.5.5 και 3.5.6 απεικονίζονται με κόκκινο χρώμα οι ορθές και διατμητικές τάσεις της αρχικής εξίσωσης σε σχέση με τις αντίστοιχες θεωρητικές βέλτιστες με μπλε χρώμα.



Σχήμα 3.5.5 Σύγκριση ορθών τάσεων με θεωρητικές βέλτιστες



Σχήμα 3.5.6 Σύγκριση διατμητικών τάσεων με θεωρητικές βέλτιστες

Από το διάγραμμα ορθών τάσεων προκύπτει ότι ύστερα από 81 επαναλήψεις η γεωμετρία πλησιάζει αρκετά την βέλτιστη και έχει επιτευχθεί μείωση του RMS κατά 44,67%.

Στην συνέχεια θα υπολογιστεί μια πιο στοχευμένη προσπάθεια προσέγγισης της βέλτιστης γεωμετρίας μεταβάλλοντας τις τεταγμένες των σημείων ελέγχου (control points) στο εύρος:

$$N1 = 5$$

$$N2 \in [5, 5.5, 6]$$

$$N3 \in [6.5, 7, 7.5]$$

$$N4 \in [7.5, 8, 8.5]$$

$$N5 \in [15, 16]$$

Στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων με μια τιμή RMS και μια τιμή μέγιστης ορθής τάσης (Pa) για το νέο εύρος τιμών των τεταγμένων των control points.

N5	15												
N4	7,5												
N3	6,5	RMS	0,04572	N3	6,5	RMS	0,02203	N3	6,5	RMS	0,02299		
N2	5	MAX PRES	1,01	N2	5,5	MAX PRES	1,03	N2	6	MAX PRES	1,07		
N3	7	RMS	0,03073	N3	7	RMS	0,01566	N3	7	RMS	0,03142		
N2	5	MAX PRES	1,01	N2	5,5	MAX PRES	1,04	N2	6	MAX PRES	1,06		
N3	7,5	RMS	0,02164	N3	7,5	RMS	0,0232	N3	7,5	RMS	0,042959		
N2	5	MAX PRES	1,01	N2	5,5	MAX PRES	1,04	N2	6	MAX PRES	1,07		

N5	15												
N4	8												
N3	6,5	RMS	0,03905	N3	6,5	RMS	0,015866	N3	6,5	RMS	0,02351		
N2	5	MAX PRES	1,01	N2	5,5	MAX PRES	1,04	N2	6	MAX PRES	1,08		
N3	7	RMS	0,0267	N3	7	RMS	0,01703	N3	7	RMS	0,03486		
N2	5	MAX PRES	1,01	N2	5,5	MAX PRES	1,04	N2	6	MAX PRES	1,07		
N3	7,5	RMS	0,02242	N3	7,5	RMS	0,02816	N3	7,5	RMS	0,04767		
N2	5	MAX PRES	1,01	N2	5,5	MAX PRES	1,04	N2	6	MAX PRES	1,08		

N5	15												
N4	8,5												
N3	6,5	RMS	0,03428	N3	6,5	RMS	0,01434	N3	6,5	RMS	0,02734		
N2	5	MAX PRES	1,01	N2	5,5	MAX PRES	1,04	N2	6	MAX PRES	1,07		
N3	7	RMS	0,02554	N3	7	RMS	0,02166	N3	7	RMS	0,04001		
N2	5	MAX PRES	1,01	N2	5,5	MAX PRES	1,03	N2	6	MAX PRES	1,08		
N3	7,5	RMS	0,02614	N3	7,5	RMS	0,03421	N3	7,5	RMS	0,053		
N2	5	MAX PRES	1,01	N2	5,5	MAX PRES	1,04	N2	6	MAX PRES	1,07		

Σχήμα 3.5.7 Προσομοιώσεις για N5=15

N5	16												
N4	7,5												
N3	6,5	RMS	0,04162	N3	6,5	RMS	0,01583	N3	6,5	RMS	0,02007		
N2	5	MAX PRES	1,01	N2	5,5	MAX PRES	1,04	N2	6	MAX PRES	1,07		
N3	7	RMS	0,02756	N3	7	RMS	0,012979	N3	7	RMS	0,03144		
N2	5	MAX PRES	1,01	N2	5,5	MAX PRES	1,04	N2	6	MAX PRES	1,07		
N3	7,5	RMS	0,02076	N3	7,5	RMS	0,02417	N3	7,5	RMS	0,04421		
N2	5	MAX PRES	1,01	N2	5,5	MAX PRES	1,04	N2	6	MAX PRES	1,07		

N5	16												
N4	8												
N3	6,5	RMS	0,03641	N3	6,5	RMS	0,012902	N3	6,5	RMS	0,02362		
N2	5	MAX PRES	1,01	N2	5,5	MAX PRES	1,04	N2	6	MAX PRES	1,07		
N3	7	RMS	0,02569	N3	7	RMS	0,01809	N3	7	RMS	0,036626		
N2	5	MAX PRES	1,01	N2	5,5	MAX PRES	1,03	N2	6	MAX PRES	1,07		
N3	7,5	RMS	0,02388	N3	7,5	RMS	0,03068	N3	7,5	RMS	0,04978		
N2	5	MAX PRES	1,01	N2	5,5	MAX PRES	1,04	N2	6	MAX PRES	1,08		

N5	16												
N4	8,5												
N3	6,5	RMS	0,03332	N3	6,5	RMS	0,03738	N3	6,5	RMS	0,02913		
N2	5	MAX PRES	1,01	N2	5,5	MAX PRES	1,04	N2	6	MAX PRES	1,07		
N3	7	RMS	0,02663	N3	7	RMS	0,02474	N3	7	RMS	0,04257		
N2	5	MAX PRES	1,01	N2	5,5	MAX PRES	1,04	N2	6	MAX PRES	1,07		
N3	7,5	RMS	0,02895	N3	7,5	RMS	0,03735	N3	7,5	RMS	0,0556		
N2	5	MAX PRES	1,01	N2	5,5	MAX PRES	1,04	N2	6	MAX PRES	1,08		

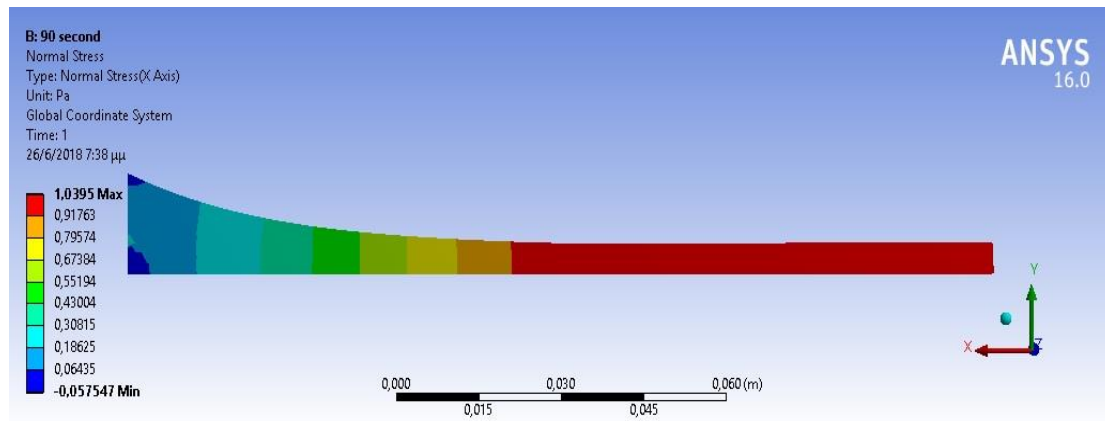
Σχήμα 3.5.8 Προσομοιώσεις για N5=16

Προκύπτει ότι ύστερα από 54 επαναλήψεις έχει επιτευχθεί περαιτέρω μείωση του RMS. Η γεωμετρία που αντιστοιχεί στο ελάχιστο RMS ίσο με 0,012902 προκύπτει για N2=5.5, N3=6.5, N4=8 και N5=16

Και έχει εξίσωση:

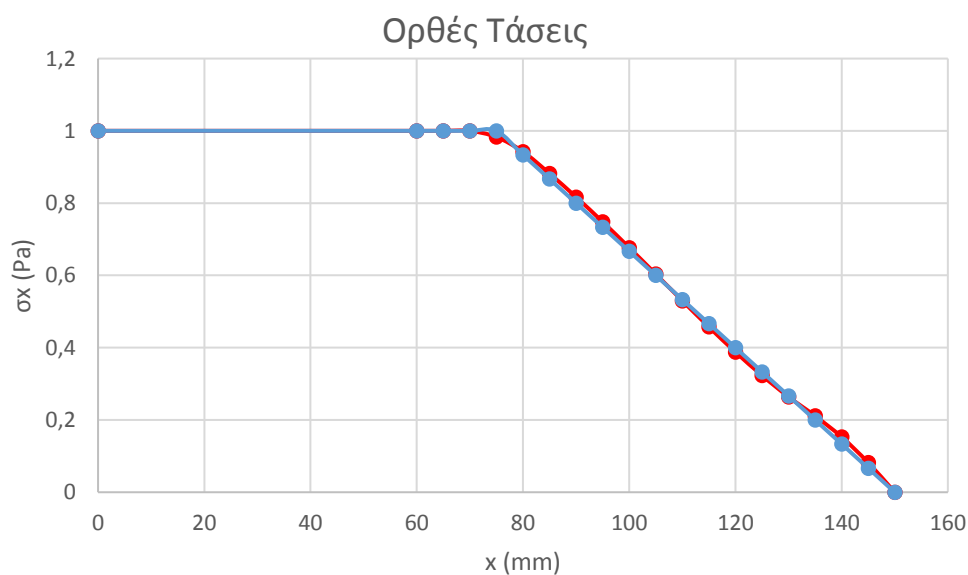
$$y(t) = 5 + 2t + 3t^2 + 6t^4 \quad (3.18)$$

$$x(t) = 75 + 75t \quad (3.19)$$

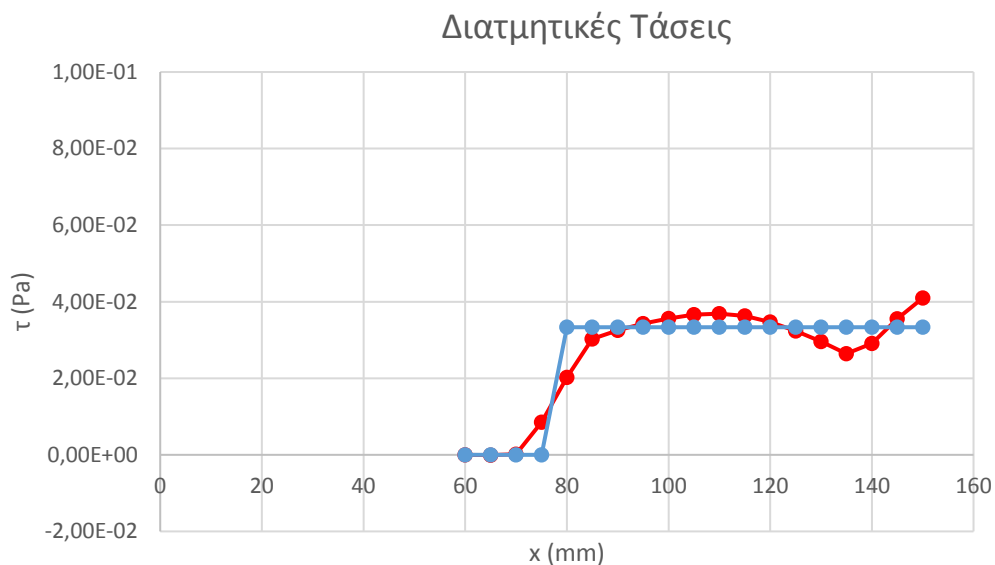


Σχήμα 3.5.9 Αποτέλεσμα ανάλυσης στο Ansys

Στα Σχήματα 3.5.10 και 3.5.11 απεικονίζονται με κόκκινο χρώμα οι ορθές και διατμητικές τάσεις της αρχικής εξίσωσης σε σχέση με τις αντίστοιχες βέλτιστες με μπλέ χρώμα. Προκύπτει ότι στο διάγραμμα ορθών τάσεων ότι οι ορθές τάσεις σχεδόν ταυτίζονται με τις βέλτιστες και στο διάγραμμα διατμητικών τάσεων τις προσεγγίζουν σε ικανοποιητικό βαθμό.



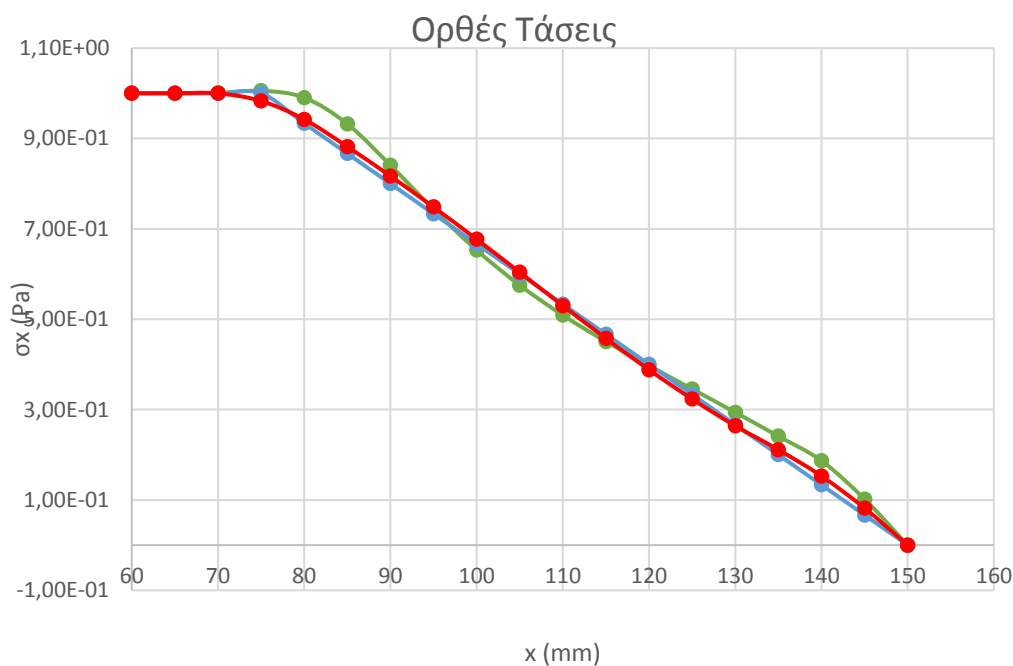
Σχήμα 3.5.10 Σύγκριση ορθών τάσεων με θεωρητικές βέλτιστες



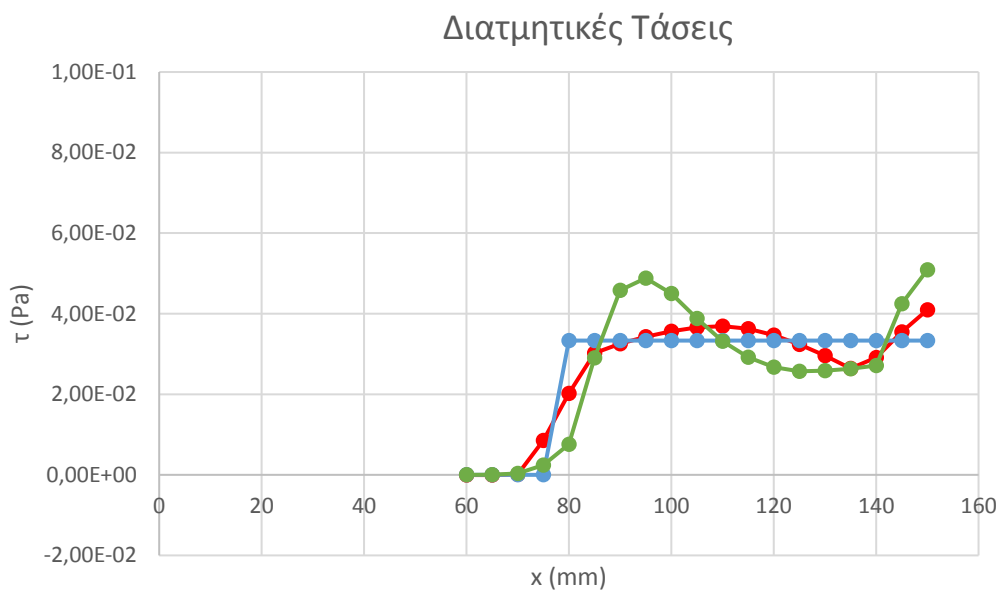
Σχήμα 3.5.11: Σύγκριση διατμητικών τάσεων με θεωρητικές βέλτιστες

Στην τελική γεωμετρία, ύστερα από 54 επαναλήψεις, έχει επιτευχθεί μείωση του RMS κατά 23,34% σε σχέση με την προηγούμενη γεωμετρία και ύστερα από συνολικά 135 επαναλήψεις έχει επιτευχθεί μείωση του RMS κατά 57.68% σε σχέση με την αρχική γεωμετρία.

Στα παρακάτω διαγράμματα με μπλε χρώμα απεικονίζεται η θεωρητική βέλτιστη κατανομή τάσεων, με πράσινο χρώμα η αρχική κατανομή προς βελτίωση και με κόκκινο χρώμα η κατανομή που υπολογίστηκε με ελάχιστο RMS.



Σχήμα 3.5.12 Σύγκριση ορθών τάσεων



Σχήμα 3.5.13 Σύγκριση διατμητικών τάσεων

Στο σημείο αυτό, θα μελετηθεί πόσο αποτελεσματική είναι η προσέγγιση που χρησιμοποιήθηκε παραπάνω, όπου η εξίσωση της γεωμετρίας περιγράφηκε με μια εξίσωση Bezier με 5 control points.

Αυξάνοντας τις παραμέτρους της εξίσωσης της γεωμετρίας από 4 σε 6 ή 8, δηλαδή περιγράφοντας την εξίσωση Bezier με 7 και 9 control point αντίστοιχα, και μεταβάλλοντας τις τεταγμένες των control points σε παρόμοιο εύρος με την προηγούμενη προσέγγιση, δημιουργούνται τα παρακάτω συστήματα:

Για 7 control points:

Πρώτη Βελτιστοποίηση		Δεύτερη βελτιστοποίηση	
N1	1	N1	1
N2	$[\gamma_2-1, \gamma_2, \gamma_2+1]$	N2	$[\gamma_2-0.5, \gamma_2, \gamma_2+0.5]$
N3	$[\gamma_3-1, \gamma_3, \gamma_3+1]$	N3	$[\gamma_3-0.5, \gamma_3, \gamma_3+0.5]$
N4	$[\gamma_4-2, \gamma_4, \gamma_4+2]$	N4	$[\gamma_4-0.5, \gamma_4, \gamma_4+0.5]$
N5	$[\gamma_5-2, \gamma_5, \gamma_5+2]$	N5	$[\gamma_5-0.5, \gamma_5, \gamma_5+0.5]$
N6	$[\gamma_6-2, \gamma_6, \gamma_6+2]$	N6	$[\gamma_6-0.5, \gamma_6, \gamma_6+0.5]$
N7	$[\gamma_7-1, \gamma_7, \gamma_7+1]$	N7	$[\gamma_7, \gamma_7+1]$

Σχήμα 3.5.14 Εύρος τιμών για 7 control points

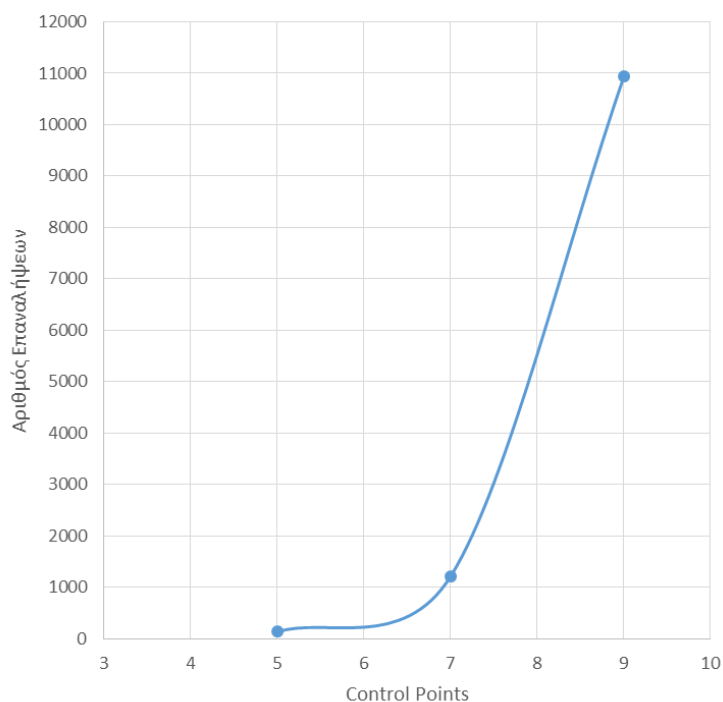
Για την πρώτη βελτιστοποίηση χρειάζονται 729 επαναλήψεις ενώ για την δεύτερη χρειάζονται 486. Σύνολο για 7 control points 1215 επαναλήψεις.

Για 9 control points:

Πρώτη Βελτιστοποίηση		Δεύτερη βελτιστοποίηση	
N1	1	N1	1
N2	$[\gamma_2-1, \gamma_2, \gamma_2+1]$	N2	$[\gamma_2-0.5, \gamma_2, \gamma_2+0.5]$
N3	$[\gamma_3-1, \gamma_3, \gamma_3+1]$	N3	$[\gamma_3-0.5, \gamma_3, \gamma_3+0.5]$
N4	$[\gamma_4-2, \gamma_4, \gamma_4+2]$	N4	$[\gamma_4-0.5, \gamma_4, \gamma_4+0.5]$
N5	$[\gamma_5-2, \gamma_5, \gamma_5+2]$	N5	$[\gamma_5-0.5, \gamma_5, \gamma_5+0.5]$
N6	$[\gamma_6-2, \gamma_6, \gamma_6+2]$	N6	$[\gamma_6-0.5, \gamma_6, \gamma_6+0.5]$
N7	$[\gamma_7-2, \gamma_7, \gamma_7+2]$	N7	$[\gamma_7-0.5, \gamma_7, \gamma_7+0.5]$
N8	$[\gamma_8-1, \gamma_8, \gamma_8+1]$	N8	$[\gamma_8-0.5, \gamma_8, \gamma_8+0.5]$
N9	$[\gamma_9-1, \gamma_9, \gamma_9+1]$	N9	$[\gamma_9, \gamma_9+1]$

Σχήμα 3.5.15 Εύρος τιμών για 9 control points

Για την πρώτη βελτιστοποίηση χρειάζονται 6561 επαναλήψεις ενώ για την δεύτερη χρειάζονται 4374. Σύνολο για 9 control points 10935 επαναλήψεις.



Σχήμα 3.5.16 Σύγκριση αριθμού επαναλήψεων με αριθμού control points

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι όσο αυξάνονται οι παράμετροι της εξίσωσης που περιγράφει την γεωμετρία, ο αριθμός των επαναλήψεων αυξάνεται εκθετικά, και ταυτόχρονα αυξάνεται και ο συνολικός χρόνος προσέγγισης, ενώ τα περιθώρια βελτίωσης είναι αρκετά χαμηλά.

Κεφάλαιο 4

4.1 Πολυεστερικές ρητίνες

Η πολυεστερική ρητίνη είναι ένα παχύρρευστο κολλώδες ημιδιαφανές υγρό με χαρακτηριστική οσμή στυρενίου (σε αποχρώσεις μπλε, ροζ, γκρίζο, διαφανές κ.α.). Από τις πολυεστερικές ρητίνες σε συνδυασμό με τα Fiber Glass (υαλοπιλήματα) ή άλλες ενισχυτικές ίνες κατασκευάζονται προϊόντα πολύ ανθεκτικά στις καιρικές συνθήκες και στο χρόνο, ελαφριά, αδιάβροχα, άριστα φινιρισμένα και οικονομικά με εξαιρετικές ιδιότητες στις πιο αντίξοες συνθήκες χρήσης που είναι αδύνατον να παραχθούν με άλλο τρόπο. Η εφαρμογή της πολυεστερικής ρητίνης γίνεται κυρίως σε καλούπια (π.χ. παραγωγή σκάφους) ή επάνω σε διάφορες άλλες επιφάνειες (πλαστικοποιήσεις ξύλινων σκαφών, ενισχύσεις, επισκευές κ.τ.λ.). Συγκριτικά με άλλα υλικά όπως το ξύλο, το σίδηρο, το αλουμίνιο, το τσιμέντο κ.α. οι κατασκευές από πολυεστερική ρητίνη έχουν πολλά πλεονεκτήματα όπως μεγάλη αντοχή στις χημικές και περιβαλλοντικές προσβολές, πολύ υψηλές μηχανικές αντοχές, απαιτούν ελάχιστη συντήρηση, παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή σε σχέση με το μικρό τους βάρος, έχουν εξαιρετική αντοχή στην διάβρωση και είναι εξαιρετικά ανθεκτικά στην παρατεταμένη υγρασία. Υπάρχουν πολυεστερικές ρητίνες για κάθε κατασκευή, ανάλογα με τις απαιτήσεις και ανάλογα με την χρήση για την οποία προορίζεται το τελικό προϊόν. Έτσι λοιπόν οι ρητίνες επιλέγονται με βάση την μέθοδο παραγωγής, τις μηχανικές ή χημικές τους ιδιότητες και την αντοχή τους στις διαφορές κλιματολογικές και περιβαλλοντικές συνθήκες.

Η πολυεστερική ρητίνη έχει μια αρχική υγρή μορφή και ύστερα από πολυμερισμό, πήζει και στερεοποιείται χωρίς να υπάρχει δυνατότητα να επανέλθει στην αρχική της μορφή. Ο πολυμερισμός γίνεται από την αντίδραση του επιταχυντή με τον καταλύτη που προστίθεται μέσα στον πολυεστέρα ξεχωριστά (πρώτα ο επιταχυντής και μετά ο καταλύτης) σε συγκεκριμένες αναλογίες, προκαλώντας χημική αντίδραση η οποία με τη σειρά της παράγει θερμότητα. Υπάρχουν δυο κατηγορίες πολυεστερικών ρητινών, οι προεπιταχυνόμενες και οι μη προεπιταχυνόμενες. Οι προεπιταχυνόμενες ρητίνες περιέχουν επιταχυντή από την παραγωγή τους και ο χρήστης πρέπει να προσθέτει μόνο καταλύτη, συγκεκριμένης δραστηριότητας, στην αναλογία που προτείνει ο κατασκευαστής της. Συνήθως αυτή η αναλογία είναι 1-2% κατά βάρος. Οι μη προεπιταχυνόμενες ρητίνες δεν περιέχουν επιταχυντή στην σύνθεσή τους, είναι περιορισμένης έκτασης και αφορούν ειδικούς τομείς παραγωγής, κυρίως στη χύτευση. Οι αναλογίες των καταλυτών και επιταχυντών καθώς και η δραστηριότητα τους, πρέπει αυστηρά να καθορίζονται από τον κατασκευαστή των ρητινών ειδικά αν μέσα στην ρητίνη προστίθενται και αδρανή

(fillers) τα οποία δυσχεραίνουν την σκλήρυνση του προϊόντος. Απαγορεύεται αυστηρά η απευθείας ανάμιξη καταλύτη και επιταχυντή γιατί έχει σαν αποτέλεσμα φωτιά και έκρηξη. Πρέπει να προστίθεται πρώτα ο επιταχυντής, με καλό ανακάτεμα μέσα στη ρητίνη, και μετά ο καταλύτης ο οποίος επίσης πρέπει να ανακατευτεί καλά. Οι αναλογίες επιταχυντή είναι συνήθως 0,5% κατά βάρος και του καταλύτη 1- 2% κατά βάρος.

Μετά την προσθήκη του καταλύτη, ο οποίος ενεργοποιεί την αντίδραση, η ρητίνη πρέπει να χρησιμοποιηθεί μέσα σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Ο χρόνος αυτός ονομάζεται χρόνος ζελατινοποίησης (gel time) και κυμαίνεται από 10-20 λεπτά και διαφοροποιείται ανάλογα με την σχέση καταλύτη – επιταχυντή, καθώς και την θερμοκρασία περιβάλλοντος. Μετά τον χρόνο ζελατινοποίησης αρχίζει η σκλήρυνση (cure time) της ρητίνης, ο χρόνος της οποίας κυμαίνεται ανάμεσα στις 3 - 4 ώρες, υπό την προϋπόθεση ότι οι συνθήκες είναι κανονικές, δηλαδή 18 έως 20°C και κάτω από 70% υγρασία.

Η ρητίνη που επιλέχθηκε για την χύτευση είναι προεπιταχυνόμενη, της εταιρίας Scott Badder, με αριθμό προϊόντος 446MPALV. Έχει πυκνότητα 1.1 gr/cm³, ιξώδες 300cP στους 25 βαθμούς Κελσίου στην αρχική της μορφή και χρόνο έτοιμου μείγματος (gel time) 15-20' σε συνθήκες περιβάλλοντος.



Σχήμα 4.1.1 Ρητίνη 446MPALV

4.2 Μελέτη ροής ανάμεσα στις ίνες

Για τη σωστή λειτουργία του συνδετήρα χρειάζεται να υπάρχει ομοιογένεια σε όλη την γεωμετρία του. Συνεπώς θα πρέπει στην χύτευση η ρητίνη πολυεστέρα να περάσει ανάμεσα από όλες τις ίνες του σχοινιού. Θα πραγματοποιηθεί μια ανάλυση στο Ansys για τον προσδιορισμό ενός συντελεστή αντίστασης, από την διαφορά πίεσης στην ροή, αντιδιαμετρικά του σχοινιού. Για την μελέτη αυτή χρειάζονται η τιμή της διαμέτρου κάθε ίνας όπως επίσης και η μεταξύ τους απόσταση.

Το σχοινί που επιλέχτηκε για την παρούσα ανάλυση είναι το ΚΑΡΑ TAPE 2 από την εταιρεία Koronakis S.A. Ο λόγος που επιλέχθηκε είναι ότι είναι πολυεστερικό με παράλληλες ίνες και μετά την αφαίρεση του μανδύα του έχει διάμετρο 10mm. Η συγκεκριμένη διάμετρος επιλέχθηκε ώστε ο έλεγχος για την αντοχή του σχοινιού να πραγματοποιηθεί πιο εύκολα. Στην παρακάτω φωτογραφία έχει ξεπλεχτεί ο εξωτερικός μανδύας του σχοινιού για να φανεί ο πυρήνας του.



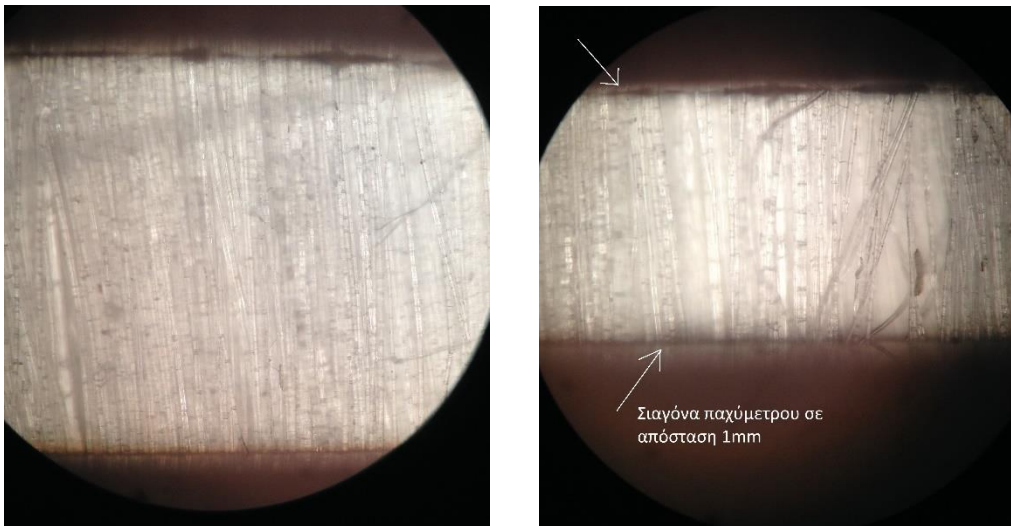
Σχήμα 4.2.1 Kara Tape 2

Για τον προσδιορισμό της διαμέτρου των ινών και της μεταξύ τους απόσταση τοποθετήθηκε το σχοινί σε ένταση σε ένα μικροσκόπιο. Επίσης χρησιμοποιήθηκε ένα παχύμετρο πάνω στην επιφάνεια μέτρησης του μικροσκοπίου πάνω στο σχοινί έχοντας ορίσει την απόσταση στα σιαγόνια του στο 1mm (Σχήμα 4.2.2).



Σχήμα 4.2.2 Παχύμετρο με απόσταση 1mm

Οι εικόνες που λήφθηκαν από το μικροσκόπιο είναι οι παρακάτω:



Σχήμα 4.2.3 Εικόνες μικροσκοπίου

Για την ανάλυση της εικόνας χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα imageJ το οποίο έχει την δυνατότητα, όταν δηλωθεί μια συγκεκριμένη απόσταση πάνω σε μια εικόνα, να μετράει αναλογικά και άλλες αποστάσεις στην ίδια εικόνα. Θέτοντας λοιπόν την γνωστή απόσταση ανάμεσα στα σιαγόνα του παχύμετρου στο 1mm προκύπτουν οι παρακάτω μετρήσεις.

Για τη διάμετρο:

Σύνολο μετρήσεων: $v=31$

x_i (mm)	n_i	ϕ_i	$x_i n_i$	x_i^2	$x_i^2 n_i$
0,017	4	0,129032	0,068	0,000289	0,001156
0,018	5	0,16129	0,09	0,000324	0,00162
0,019	2	0,064516	0,038	0,000361	0,000722
0,02	6	0,193548	0,12	0,0004	0,0024
0,021	2	0,064516	0,042	0,000441	0,000882
0,022	5	0,16129	0,11	0,000484	0,00242
0,023	2	0,064516	0,046	0,000529	0,001058
0,024	4	0,129032	0,096	0,000576	0,002304
0,025	1	0,032258	0,025	0,000625	0,000625
sum	31	1	0,635		0,013187

$$\text{Με μέση τιμή: } \bar{x} = \frac{\sum x_i v_i}{v} = 0,0204 \text{ mm} \quad (4.1)$$

$$\text{Διακύμανση: } s^2 = \frac{1}{v} \left(\sum_{i=1}^v x_i^2 v_i - \frac{\left(\sum_{i=1}^v x_i v_i \right)^2}{v} \right) = 5,8 * 10^{-6} \text{ mm} \quad \text{και} \quad (4.2)$$

$$\text{Τυπική απόκλιση: } s = 0,0024 \text{ mm} \quad (4.3)$$

Για την απόσταση μεταξύ των ινών:

Σύνολο μετρήσεων: $v=31$

x_i (mm)	n_i	ϕ_i	$x_i n_i$	x_i^2	$x_i^2 n_i$
0,006	4	0,129032	0,024	0,000036	0,000144
0,007	1	0,032258	0,007	0,000049	0,000049
0,008	7	0,225806	0,056	0,000064	0,000448
0,009	6	0,193548	0,054	0,000081	0,000486
0,01	3	0,096774	0,03	0,0001	0,0003
0,011	5	0,16129	0,055	0,000121	0,000605
0,012	3	0,096774	0,036	0,000144	0,000432
0,013	1	0,032258	0,013	0,000169	0,000169
0,014	1	0,032258	0,014	0,000196	0,000196
sum	31	1	0,289		0,002829

$$\text{Με μέση τιμή: } \bar{x} = \frac{\sum x_i \nu_i}{\nu} = 0,0093 \text{ mm} \quad (4.4)$$

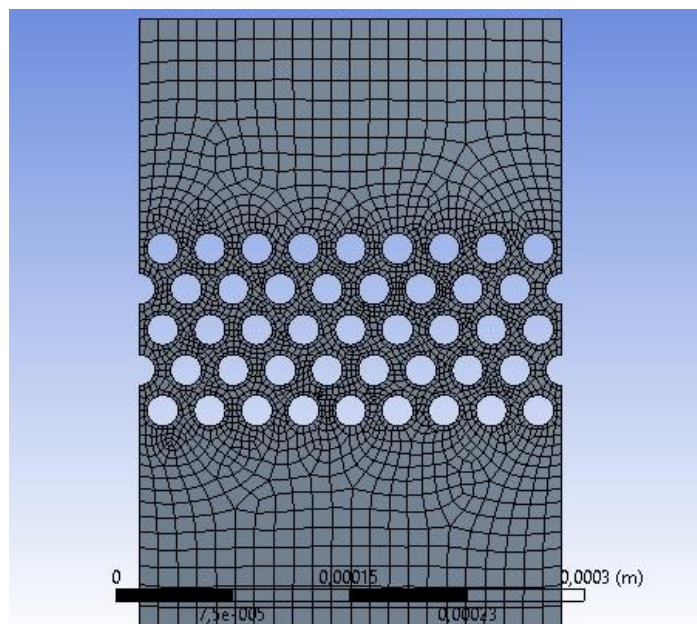
$$\text{Διακύμανση: } s^2 = \frac{1}{\nu} \left(\sum_{i=1}^{\nu} x_i^2 \nu_i - \frac{\left(\sum_{i=1}^{\nu} x_i \nu_i \right)^2}{\nu} \right) = 4.3 * 10^{-6} \text{ mm} \quad (4.5)$$

$$\text{Τυπική απόκλιση: } s = 0,00208 \text{ mm} \quad (4.6)$$

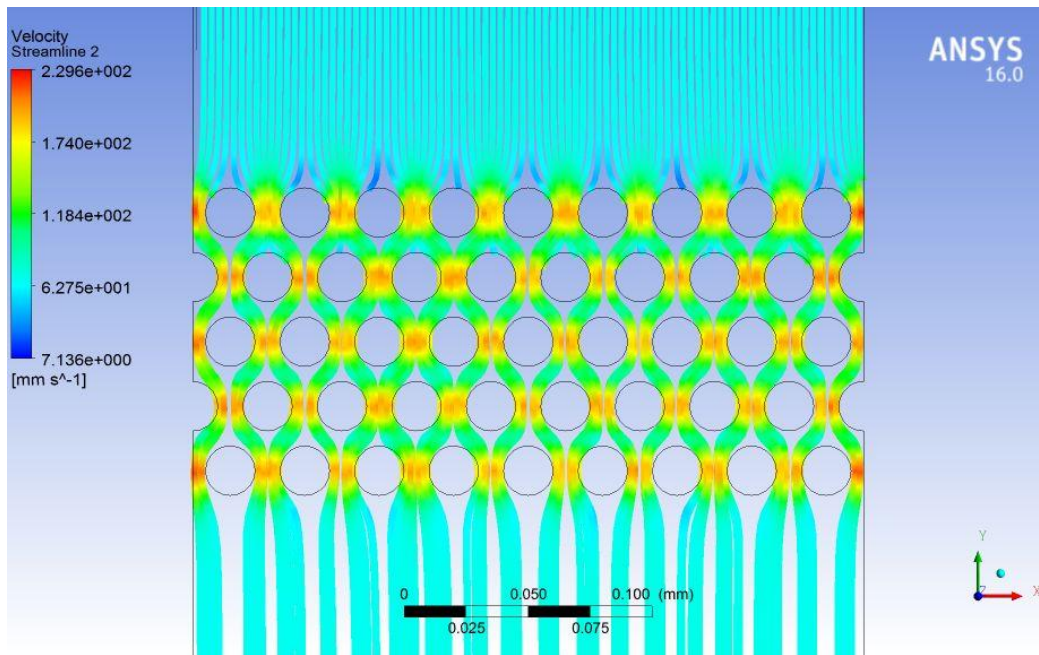
Σύμφωνα με τα παραπάνω προκύπτει ότι η διάμετρος κάθε ίνας είναι 0,02 χιλιοστά και η απόσταση μεταξύ τους 0,01 χιλιοστά. Άρα σε μια διάμετρο 10 χιλιοστών περιέχονται 333 σειρές με ίνες.

Με τα παραπάνω δεδομένα θα δημιουργηθούν πέντε μοντέλα στο Ansys (το πρώτο θα περιέχει μια σειρά από ίνες, το δεύτερο δύο σειρές από ίνες και ούτω καθεξής) και για κάθε ένα από τα μοντέλα αυτά, θα μελετηθεί η συσχέτιση της διαφοράς πίεσης, ανάμεσα στην πρώτη και στην τελευταία ίνα. Τα μοντέλα δημιουργήθηκαν στο Fluid Flow του Ansys και οι αρχικές συνθήκες που επιλέχτηκαν είναι: ελεύθερη ολίσθηση στα τοιχώματα, κίνηση χωρίς ολίσθηση στην επιφάνεια των ινών, ταχύτητα ρευστού στην είσοδο 70mm/s και πίεση στην έξοδο 0,01 atm (κενό). Σε κάθε μοντέλο έγινε προσομοίωση για τρεις διαφορετικές τιμές του ιξώδους του πολυεστέρα 300cP, 1000cP και 1500cP αντίστοιχα.

Στις παρακάτω φωτογραφίες απεικονίζεται το πλέγμα που επιλέχθηκε για το μοντέλο με 5 σειρές ινών και την ροή ανάμεσα σε αυτές.



Σχήμα 4.2.4 Mesh ροής ανάμεσα στις ίνες

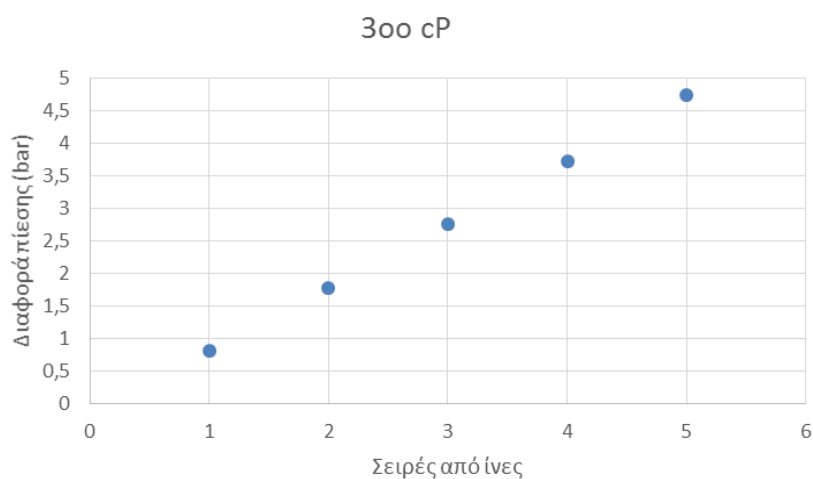


Σχήμα 4.2.5 Ροή ανάμεσα στις ίνες

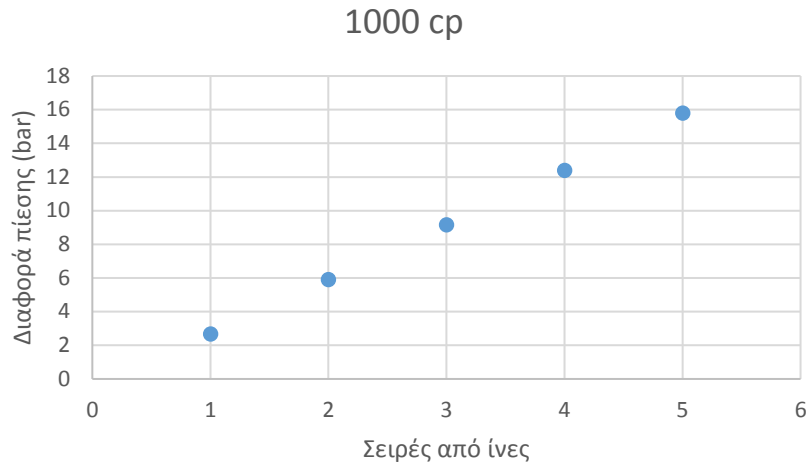
Από τις προσομοιώσεις προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:

	300cP	1000cP	1500cP
Αρ. σειρών	ΔP (bar)	ΔP (bar)	ΔP (bar)
1	0,802255	2,67409	4,01111
2	1,7701	5,90012	8,85013
3	2,74687	9,15592	13,7338
4	3,71943	12,3976	18,5963
5	4,73692	15,7891	23,6836

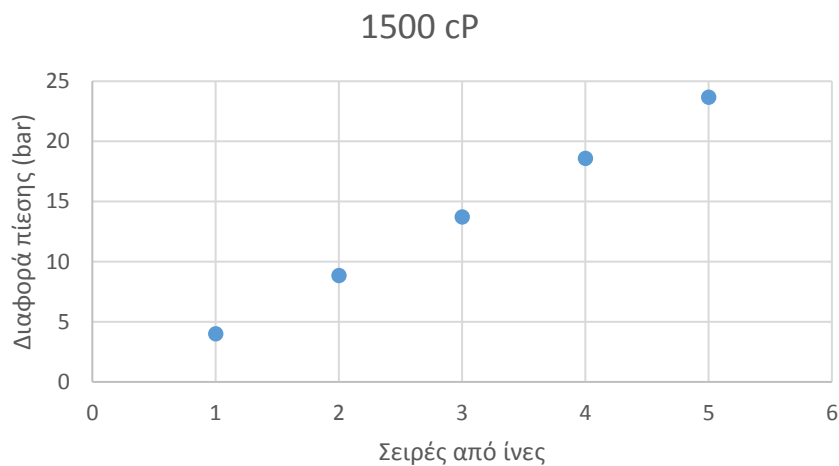
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα με την μορφή διαγραμμάτων:



Σχήμα 4.2.6 Προσομοίωση για 300 cP



Σχήμα 4.2.7 Προσομοίωση για 1000 cP



Σχήμα 4.2.8 Προσομοίωση για 1500 cP

Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτει ότι η σχέση της διαφοράς πίεσης με τις σειρές ινών είναι σχεδόν γραμμική. Στην περίπτωση όπου το ιξώδες του πολυεστέρα είναι 1500 cP και για διάμετρο σχοινιού 10mm όπου περιέχονται 333 σειρές από ίνες η διαφορά πίεσης θα είναι:

$$\Delta p = 23,6836 \frac{333}{5} = 1531.8 \text{ bar} \quad (4.7)$$

Από τον τύπο της πτώσης πίεσης:

$$\Delta p = K \frac{1}{2} \rho u^2 \quad (4.8)$$

Θεωρώντας έναν συντελεστή αντίστασης $C = K \frac{1}{2} \rho$ προκύπτει:

$$\Delta p = Cu^2 \quad (4.9)$$

Για $\Delta p=1531,8$ bar και $u=70\text{mm/s}^2$ προκύπτει $C = 0.31 \frac{\text{bar}}{(\text{mm/s})^2}$

Η διαφορά πίεσης που δημιουργείται στο καλούπι είναι 1 bar:

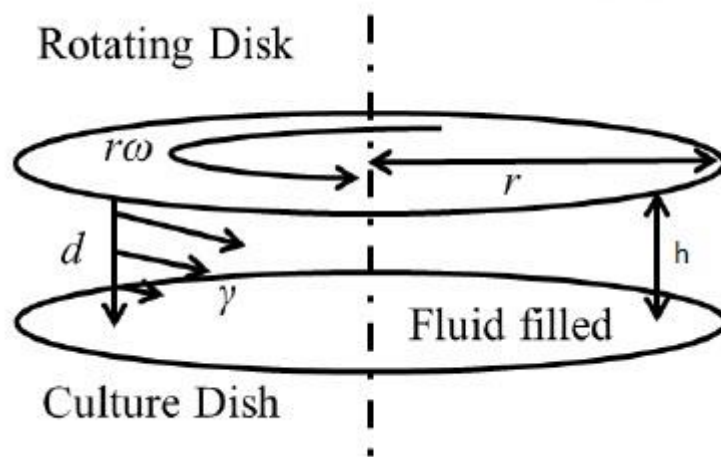
$$1\text{bar} = Cu^2 \Leftrightarrow u = \sqrt{\frac{1}{C}} = 1.79\text{mm/s} \quad (4.10)$$

Άρα, στην περίπτωση όπου το ιξώδες του πολυεστέρα είναι 1500 cP και με διαφορά πίεσης στο καλούπι 1 bar, θα χρειαστούν $\frac{10}{1,79} = 5,59\text{sec}$, ώστε η ρητίνη πολυεστέρα να εμπλουτίσει τις ίνες.

Συνεπώς με αυτήν την μέθοδο, για διάφορες τιμές του ιξώδους του πολυεστέρα, μπορεί να υπολογιστεί ένας συντελεστή αντίστασης C για την πτώση πίεσης αντιδιαμετρικά του σχοινιού και να υπολογιστεί ο χρόνος που χρειάζεται η ρητίνη πολυεστέρα να εμπλουτίσει τις ίνες σε σχέση με τον χρόνο σκλήρυνσής της (cure time). Προφανώς η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε σχοινιά με διαφορετικές διαμέτρους.

4.3 Κατασκευή Ιξωδόμετρου τύπου Couette

Για τον προσδιορισμό του ιξώδους του πολυεστέρα θα γίνει η μελέτη και η κατασκευή ενός ιξωδόμετρου τύπου Couette. Στα ρευστά, η ροή Couette είναι η ροή ενός υγρού μεταξύ δύο επιφανειών όπου η μία από τις δύο κινείται σε σχέση με την άλλη. Η διαμόρφωση συχνά λαμβάνει τη μορφή δύο παράλληλων πλακών ή δύο ομόκεντρων κυλίνδρων. Η ροή κινείται χάρη στην ιξώδη δύναμη οπισθέλκουσας που επενεργεί επί του ρευστού. Η ροή Couette συχνά χρησιμοποιείται σε ιξωδόμετρα και για να αποδείξει τις προσεγγίσεις της αναστρεψιμότητας. Αυτός ο τύπος ροής ονομάζεται προς τιμήν του Maurice Couette, καθηγητή φυσικής στο γαλλικό πανεπιστήμιο Angers στα τέλη του 19ου αιώνα.



Σχήμα 4.3.1 Ροή Couette ανάμεσα σε δύο παράλληλους δίσκους

Θα εξεταστεί η επίπεδη ροή που δημιουργείται μεταξύ δύο επίπεδων δίσκων οι οποίοι έχουν απόσταση h κατά την διεύθυνση y και είναι παράλληλοι στον άξονα x (Σχήμα 4.3.1).

Ο κάτω δίσκος είναι ακίνητος ενώ ο πάνω κινείται με σταθερή ταχύτητα $u=r\omega$. Δεν υπάρχει διαφορά πίεσης ανάμεσα στις δύο άκρες των δίσκων και η ροή μπορεί να θεωρηθεί μόνιμη.

Σύμφωνα με τον νόμο του Newton για μονοδιάστατη, στρωτή ροή ισχύει:

$$\frac{\text{ιξώδης διατμητική τάση}}{\text{ρυθμός γωνιακής παραμόρφωσης}} = \text{ιξώδες} \rightarrow$$

$$\frac{\tau_{yx}}{\gamma_{yx}} = \mu \quad (4.11)$$

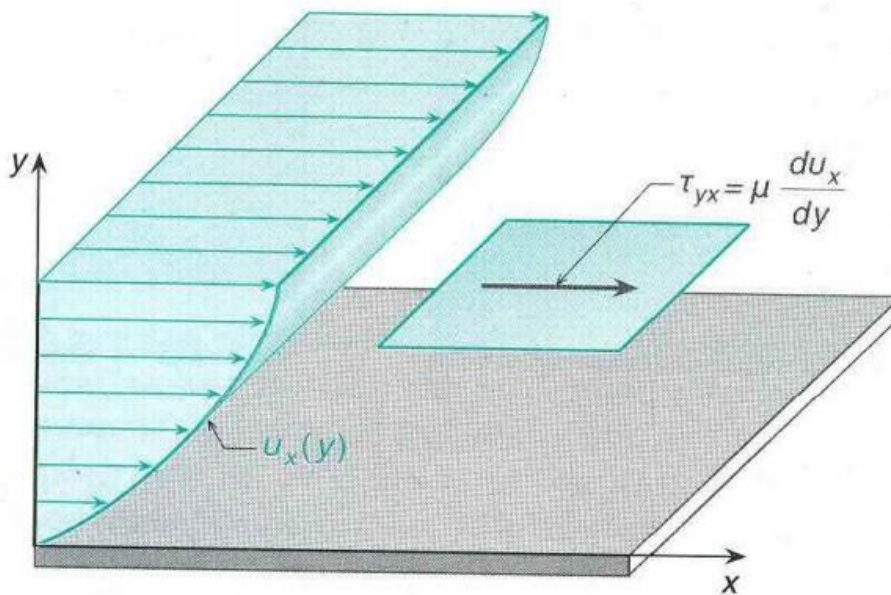
Ο ρυθμός γωνιακής παραμόρφωσης ισούται με:

$$\gamma_{yx} = \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \text{ και } \frac{\partial u_y}{\partial x} = 0 \text{ άρα:} \quad (4.12)$$

$$\gamma_{yx} = \frac{\partial u_x}{\partial y} \quad (4.13)$$

Συνεπώς η ιξώδης διατμητική τάση ισούται με:

$$\tau_{yx} = \mu \frac{du_x}{dy} = \mu \frac{u}{h} = \mu \frac{\omega r}{h} \Leftrightarrow \tau_{yx} = \frac{\mu \omega r}{h} \quad (4.14)$$



Σχήμα 4.3.2 ιξώδης διατμητική τάση

Στην συνέχεια θα μελετηθεί η ροή στον άνω κινούμενο δίσκο ακτίνας R.

Έστω dr η μέση ακτίνα στοιχειώδους δακτυλίου (Σχήμα 4.3.3).

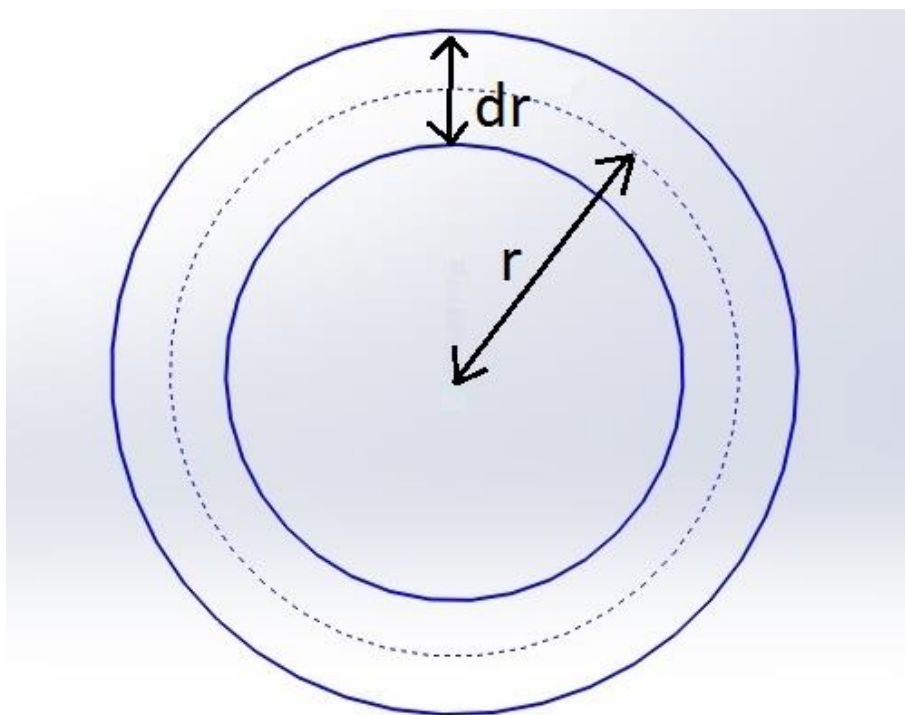
$$\text{Η επιφάνεια του ισούται με: } A = 2\pi r dr \quad (4.15)$$

Και συνδυάζοντας τους τύπους της δύναμης ($F=\tau A$) και ροπής ($M=Fr$) προκύπτει ο τύπος της στοιχειώδους ροπής:

$$dM = \tau(r) r 2\pi r dr = \frac{\mu\omega}{h} 2\pi r^3 dr = \frac{2\pi\mu\omega}{h} r^3 dr \quad (4.16)$$

Ολοκληρώνοντας στην επιφάνεια του άνω δίσκου προκύπτει η ροπή στην άνω επιφάνεια του υγρού:

$$M = \int_0^R \frac{2\pi\mu\omega}{h} r^3 dr \rightarrow$$
$$M = \frac{\pi\mu\omega}{2h} R^4 \quad (4.17)$$



Σχήμα 4.3.3 Άνω κινούμενος δίσκος σε κάτοψη

Για τον υπολογισμό του αριθμού Reynolds θα χρησιμοποιηθεί ο τύπος:

$$Re = \frac{uh}{\nu} \quad (4.18)$$

Όπου το κινηματικό ιξώδες ν , είναι το μέτρο της αντίστασης στη ροή ενός ρευστού κάτω από την επίδραση της βαρύτητας, και ισούται με:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (4.19)$$

Όπου ρ η πυκνότητα του ρευστού, άρα:

$$Re = \frac{uh}{\frac{\mu}{\rho}} \Rightarrow Re = \frac{\rho\omega Rh}{\mu} \quad (4.20)$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω οι παράγοντες, από τους οποίους εξαρτάται η ροπή που δημιουργείται στον δίσκο και ο αριθμός Reynolds, είναι:

ω : η γωνιακή ταχύτητα του πάνω δίσκου,

R : η ακτίνα του πάνω δίσκου,

h : η απόσταση ανάμεσα στους δύο δίσκους,

μ : το ιξώδες του υγρού και

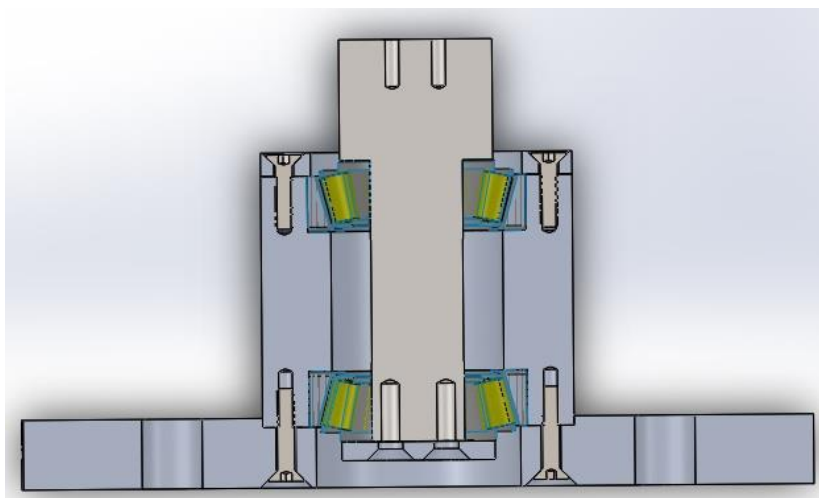
ρ : η πυκνότητα του

Για την κίνηση του άνω δίσκου θα προσαρμοστεί το ιξωδόμετρο στο υπάρχον δράπανο του εργαστηρίου Στοιχείων Μηχανών. Το δράπανο είναι της εταιρίας WMW με αριθμό μοντέλου BS16 (Σχήμα 4.3.4).



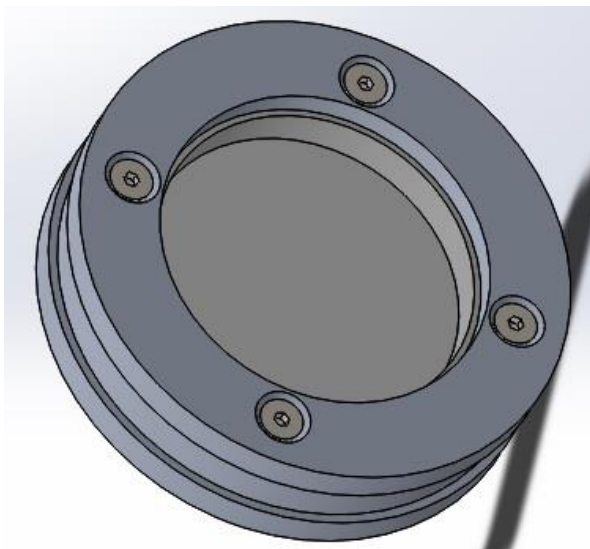
Σχήμα 4.3.4 Δράπανο WMW BS16

Η ισχύς του δραπάνου είναι 1,2 kW και οι στροφές λειτουργίας του κυμαίνονται από 180 μέχρι 2000rpm. Στο τραπέζι του δραπάνου τοποθετήθηκε μια βάση που στεγάζει έναν κάθετο άξονα με δύο κωνικά ρουλεμάν τοποθετημένα αμφίπλευρα (Σχήμα 4.3.5). Τα κωνικά ρουλεμάν είναι τα 30204 J2/Q της SKF με εσωτερική διάμετρο 20mm και εξωτερική 47mm. Ο λόγος που χρησιμοποιήθηκαν κωνικά ρουλεμάν, στην συγκεκριμένη διάταξη, είναι για την ορθή παραλαβή των αξονικών φορτίων.



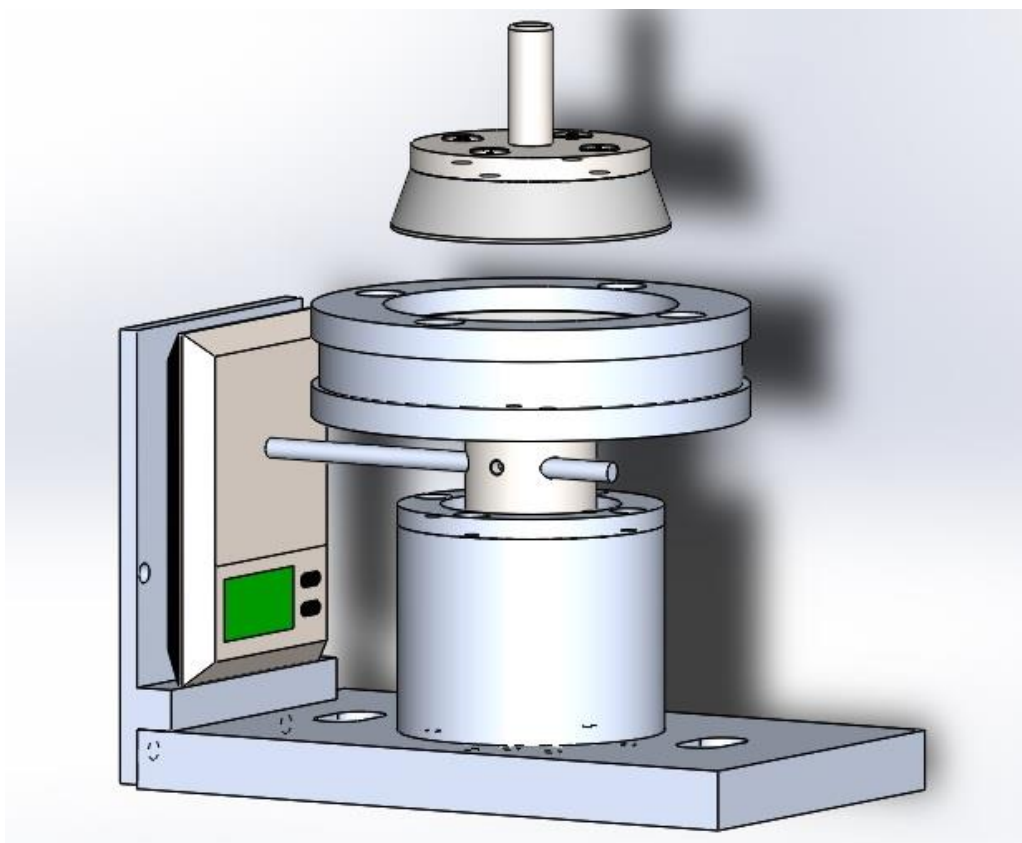
Σχήμα 4.3.5 Housing για ρουλεμάν σε τομή

Στο πάνω μέρος του άξονα καταλήγει ο κάτω, ακίνητος δίσκος του ιξωδόμετρου ο οποίος περικλείεται από έναν κύλινδρο και στεγανώνει την περιοχή του μετρούμενου υγρού (Σχήμα 4.3.6).



Σχήμα 4.3.6 Housing κάτω ακίνητου δίσκου

Κάθετα στον άξονα και σε απόσταση 10mm από το κέντρο του, τοποθετήθηκε μια οριζόντια ράβδος, διαμέτρου 5mm, η οποία καταλήγει σε μία ζυγαριά ακριβείας με διακριτική ικανότητα 0.01 γραμμάρια (Σχήμα 4.3.7).



Σχήμα 4.3.7 Ιξωδόμετρο

Στην παραπάνω διάταξη, ο άνω κινούμενος δίσκος τοποθετείται μέσω ενός μικρού άξονα στο τσοκ του δραπάνου. Στο δοχείο που έχει δημιουργηθεί, από τον κάτω δίσκο και τον κύλινδρο που τον περιβάλλει, γίνεται έγχυση του υγρού του οποίου το ιξώδες θα μετρηθεί. Η περιστρεφόμενη επιφάνεια του άνω δίσκου ακουμπάει επαπτομενικά στην επιφάνεια του υγρού και αναπτύσσεται η ροή Couette που περιγράφηκε. Λόγω της διατμητικής τάσης, που αναπτύσσεται από τον περιστρεφόμενο δίσκο και την επιφάνεια του υγρού, τείνει να περιστραφεί και ο κάτω, ακίνητος δίσκος. Αυτή η ροπή μεταφέρεται στον άξονα όπου με την σειρά της μεταφέρεται με την μορφή δύναμης στην οριζόντια ράβδο. Η ζυγαριά που βρίσκεται στην άλλη άκρη της ράβδου λειτουργεί σαν αντίσταση της κίνησης και μετράει την δύναμη αυτή. Η ζυγαριά ακριβείας που επιλέχθηκε χρησιμοποιείται για την μέτρηση του βάρους πολύτιμων λίθων και έχει διακριτική ικανότητα 0.01 γραμμάρια.

Η ρητίνη πολυεστέρα στην αρχική της μορφή, πριν την προσθήκη καταλύτη, έχει πυκνότητα $\rho=1.1 \text{ gr/cm}^3$ και ιξώδες, στους 25°C , $\mu=300 \text{ cP}$. Με την προσθήκη καταλύτη αρχίζει και αυξάνεται το ιξώδες και η θερμοκρασία της.

Η μεταβολή αυτή του ιξώδους θα μετρηθεί από τον τύπο της ροπής που υπολογίστηκε παραπάνω:

$$M = \frac{\pi\mu\omega}{2h} R^4 \rightarrow \mu = \frac{2hM}{\pi\omega R^4} \quad (4.21)$$

Από τις στροφές που δίνει το δράπανο προκύπτει η τιμή της γωνιακής ταχύτητας, και από τη ζυγαριά μετριέται η ροπή μεταφρασμένη σε δύναμη.

$$\omega = \frac{2\pi\eta}{60} \text{ rad / s} \quad (4.22)$$

Έστω B η ένδειξη της ζυγαριάς, σε γραμμάρια, για μία χρονική στιγμή t. Πολλαπλασιάζοντας την τιμή αυτή με την επιτάχυνση της βαρύτητας $g=9.81\text{m/s}^2$ προκύπτει η δύναμη στην ράβδο και πολλαπλασιάζοντας την δύναμη αυτή με 0,01m, που είναι απόσταση της ράβδου από το κέντρο του άξονα, προκύπτει η ροπή M.

$$M(Nm) = 0.01m \cdot g \frac{m}{s^2} \cdot \frac{B}{1000} Kg \rightarrow \quad (4.23)$$

$$M = g \cdot 10^{-5} \cdot B(Nm)$$

Συνεπώς ο τύπος του ιξώδους μετασχηματίζεται σε:

$$\mu = \frac{2hg10^{-5} B}{\pi\omega R^4} \text{ (Pa} \cdot \text{s)} \quad (4.24)$$

Οι παράμετροι που προκύπτουν για την μέτρηση του ιξώδους είναι η γωνιακή ταχύτητα, η ακτίνα του άνω δίσκου (R) και η απόσταση ανάμεσα στους δίσκους (h). Επίσης θα πρέπει ο αριθμός Reynolds να είναι κάτω από 20, ώστε η ροή να είναι στρωτή και τα αδρανειακά φαινόμενα αμελητέα (και μπορούν να αγνοηθούν).

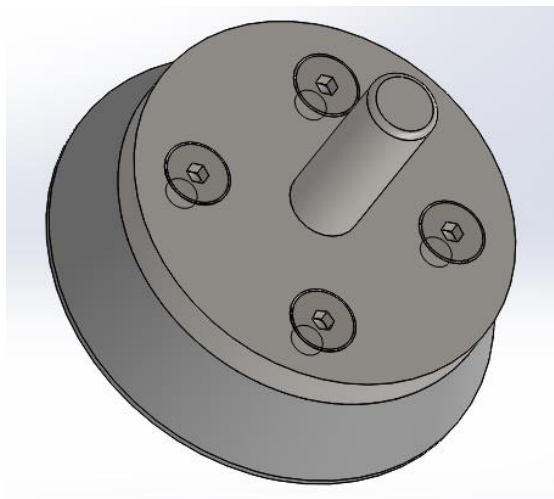
Θέτοντας αρχική τιμή του ιξώδους 300 cP και αριθμό Reynolds < 20 μελετήθηκε μία ανάλυση για διάφορες τιμές της γωνιακής ταχύτητας, της ακτίνας του άνω δίσκου και της απόστασης ανάμεσα στους δίσκους. Προκύπτει ότι για $\omega = 18,84 \text{ rad/s}$ ($n = 180 \text{ rpm}$), $R = 0,035 \text{ m}$ και $h = 0,005$ ικανοποιούνται οι παραπάνω συνθήκες και στον παρακάτω πίνακα απεικονίζονται οι διάφορες τιμές του ιξώδους σε σχέση με την ροπή που προκύπτουν από αυτές. Ολόκληρη η ανάλυση βρίσκεται στο Παράρτημα Α της παρούσας διπλωματικής.

rpm	180						
μ (cP)	μ (Pa s)	h(m)	R (m)	ω (rad/s)	ρ (kg/m ³)	Re	M (Nm)
100	0,1	0,005	0,035	18,8496	1100	36,28548	0,000888637
200	0,2	0,005	0,035	18,8496	1100	18,14274	0,001777273
300	0,3	0,005	0,035	18,8496	1100	12,09516	0,00266591
400	0,4	0,005	0,035	18,8496	1100	9,07137	0,003554546
500	0,5	0,005	0,035	18,8496	1100	7,257096	0,004443183
600	0,6	0,005	0,035	18,8496	1100	6,04758	0,00533182
700	0,7	0,005	0,035	18,8496	1100	5,18364	0,006220456
800	0,8	0,005	0,035	18,8496	1100	4,535685	0,007109093
900	0,9	0,005	0,035	18,8496	1100	4,03172	0,007997729
1000	1	0,005	0,035	18,8496	1100	3,628548	0,008886366
1100	1,1	0,005	0,035	18,8496	1100	3,29868	0,009775002
1200	1,2	0,005	0,035	18,8496	1100	3,02379	0,010663639
1300	1,3	0,005	0,035	18,8496	1100	2,791191	0,011552276
1400	1,4	0,005	0,035	18,8496	1100	2,59182	0,012440912
1500	1,5	0,005	0,035	18,8496	1100	2,419032	0,013329549
1600	1,6	0,005	0,035	18,8496	1100	2,267843	0,014218185
1700	1,7	0,005	0,035	18,8496	1100	2,13444	0,015106822
1800	1,8	0,005	0,035	18,8496	1100	2,01586	0,015995459
1900	1,9	0,005	0,035	18,8496	1100	1,909762	0,016884095
2000	2	0,005	0,035	18,8496	1100	1,814274	0,017772732
2100	2,1	0,005	0,035	18,8496	1100	1,72788	0,018661368

Σχήμα 4.3.8 Σχέση ιξώδους και ροπής για 180rpm, απόσταση ανάμεσα στους δίσκους $h = 0,005 \text{ m}$ και ακτίνα άνω περιστρεφόμενου δίσκου $R = 0,035 \text{ m}$

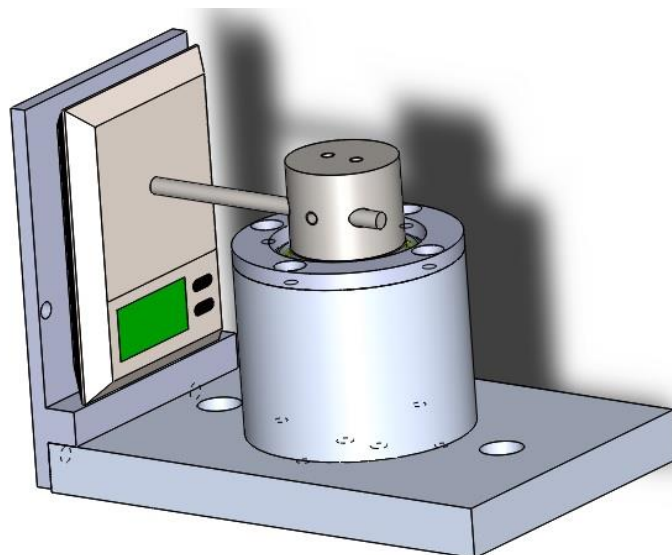
Έχοντας τις τιμές της ακτίνας του άνω δίσκου και την απόσταση μεταξύ των δίσκων πραγματοποιείται ο σχεδιασμός και η κατασκευή του ιξωδόμετρο. Η σχεδιάσή του έγινε στο Solidworks και τα σχέδια περιλαμβάνονται στο παράρτημα Β. Το ιξωδόμετρο αποτελείται από 3 κύρια μέρη.

Πρώτο είναι το έμβολο, το οποίο αποτελείται από 2 κομμάτια: τον άξονα που μπαίνει στο τσόκ του δραπάνου και τον άνω περιστρεφόμενο δίσκο (Σχήμα 4.3.9).



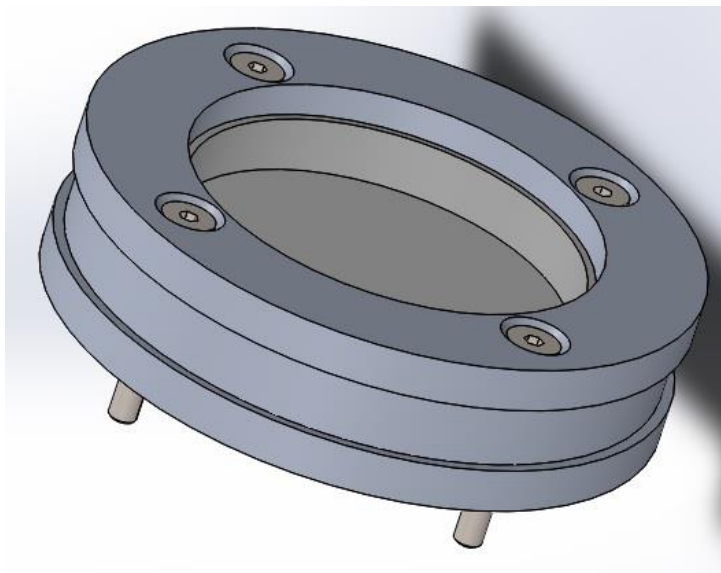
Σχήμα 4.3.9 Έμβολο

Δεύτερον, την βάση με την ζυγαριά και την στέγαση των ρουλεμάν και του άξονα (Σχήμα 4.3.10).



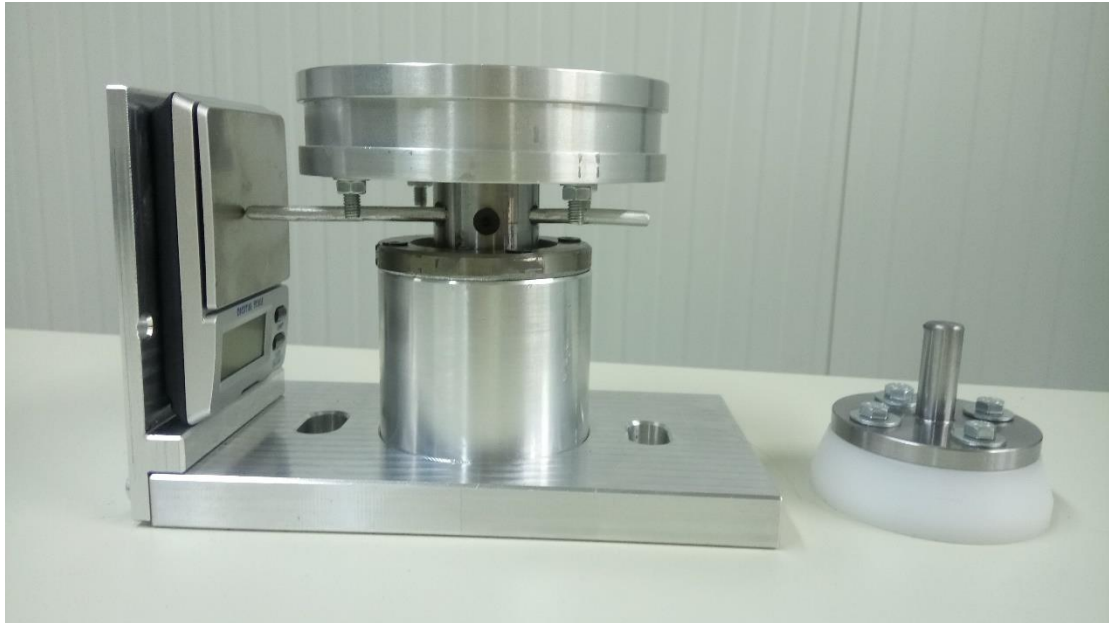
Σχήμα 4.3.10 Βάση με housing άξονα

Τρίτο κύριο μέρος αποτελεί ο κάτω δίσκος, ο κύλινδρος που τον περικλείει και η στέγαση τους (Σχήμα 4.3.11).



Σχήμα 4.3.11 Βάση με housing του κάτω δίσκου

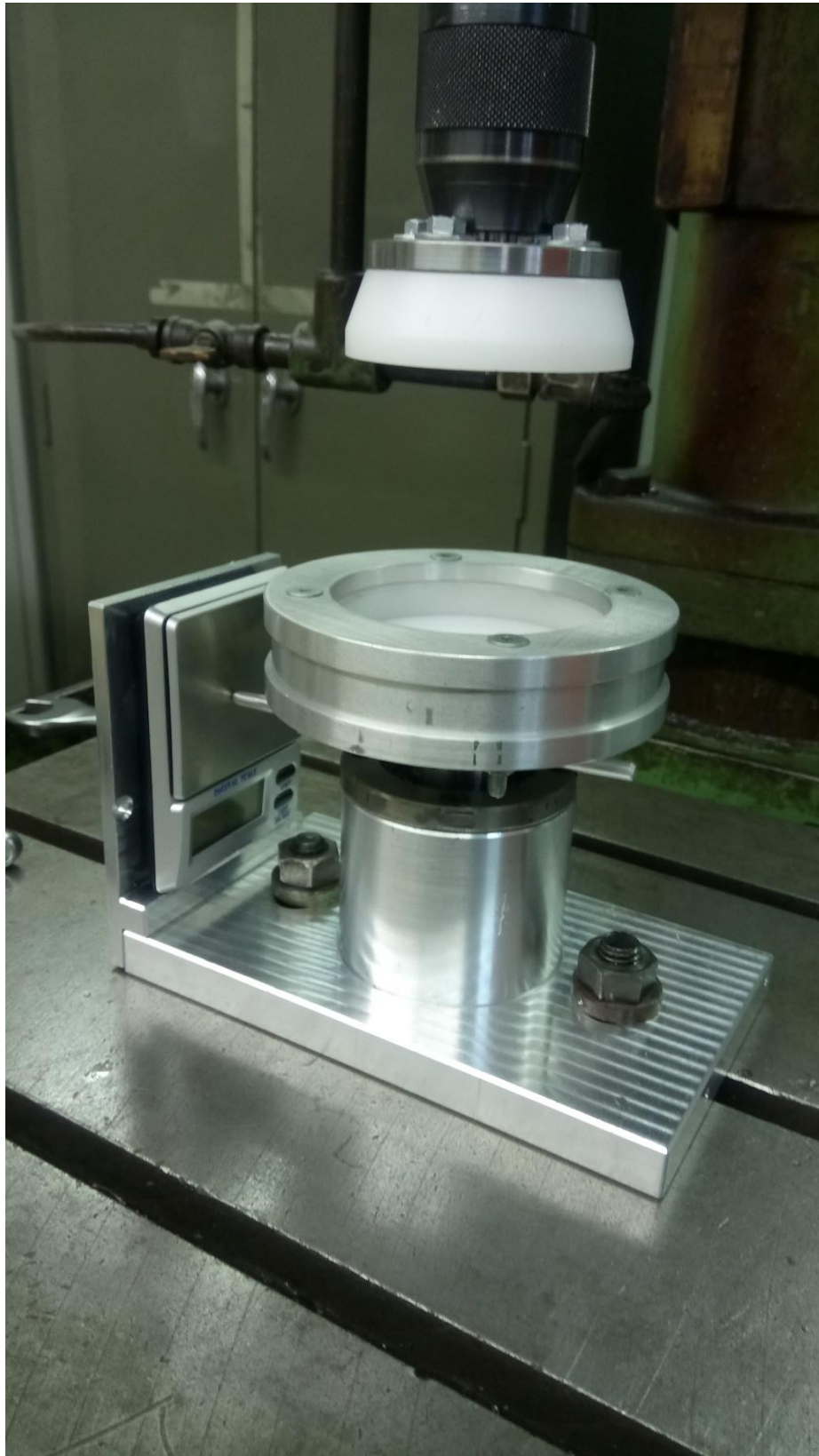
Το υλικό των παράλληλων δίσκων και του κυλίνδρου, που περικλείει τον κάτω είναι τεφλόν ώστε μετά την αλλοίωση τους από το πείραμα να αντικαθίστανται με άλλα κομμάτια για την πραγμάτωση άλλου πειράματος (όπως επίσης μπορούν να αντικατασταθούν και με κομμάτια με άλλη ακτίνα άνω δίσκου) για την μέτρηση του ιξώδους διάφορων ρευστών. Επίσης το δράπανο είναι εξοπλισμένο με ψηφιακό μετρητή θέσης, διακριτικής ικανότητας 0.001mm, ώστε να μετριέται η απόσταση μεταξύ των δίσκων με μεγάλη ακρίβεια.



Σχήμα 4.3.12 Ιξωδόμετρο σε πρόοψη



Σχήμα 4.3.13 Ιξωδόμετρο σε κάτωψη



Σχήμα 4.3.14 Ιξωδόμετρο προσαρμοσμένο στο δρέπανο



Σχήμα 4.3.15 Ιξωδόμετρο με το δράπανο σε λειτουργία

4.4 Βαθμονόμηση ιξωδόμετρου

Για την αρχική βαθμονόμηση του ιξωδόμετρου επιλέχθηκε ένα υγρό με γνωστό ιξώδες, η βαλβολίνη 75w90, η οποία χρησιμοποιείται στα κιβώτια ταχυτήτων. Η κινηματική της συνεκτικότητα είναι 115 cSt στους 40°C, και 15.7 cSt στους 100°C και η πυκνότητα της $\rho=860 \text{ kg/m}^3$. Για να υπολογιστεί το ιξώδες της στους 25°C θα χρησιμοποιήσουμε τον τύπο της συνεκτικότητας:

$$\mu_t = \mu_{15^\circ\text{C}} e^{\lambda(t-15^\circ\text{C})} \quad (4.25)$$

$$\text{Για } t=40^\circ\text{C}: \quad 115 = \mu_{15^\circ\text{C}} e^{25\lambda}$$

$$\text{Για } t=100^\circ\text{C}: \quad 15.7 = \mu_{15^\circ\text{C}} e^{85\lambda}$$

Λύνοντας το παραπάνω σύστημα προκύπτει:

$$\lambda = -0,033 \quad (4.26)$$

$$\mu_{15} = 258,5 \text{ cSt} \quad (4.27)$$

Οπότε για $t=25^\circ\text{C}$

$$\mu_{25} = 258,5 e^{-0,033 \cdot 10} = 185,84 \text{ cSt} = 185,84 \frac{\text{mm}^2}{\text{s}} = 185,84 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

Για για το δυναμικό ιξώδες ισχύει:

$$\mu = \nu\rho = 185,84 \cdot 10^{-6} \cdot 860 = 0,16 \text{ Pas} = 160 \text{ cP} \quad (4.28)$$

Συνεπώς το δυναμικό ιξώδες τη βαλβολίνης 75w90 στους 25°C είναι 160 cP

Προετοιμασία πειράματος:

Το δράπανο ρυθμίστηκε στις 180 στροφές το λεπτό ($\omega=18,849 \text{ rad/s}$).



Σχήμα 4.3.1 Στροφές δραπάνου

Ο όγκος της βαλβολίνης που χρησιμοποιήθηκε είναι 10ml.



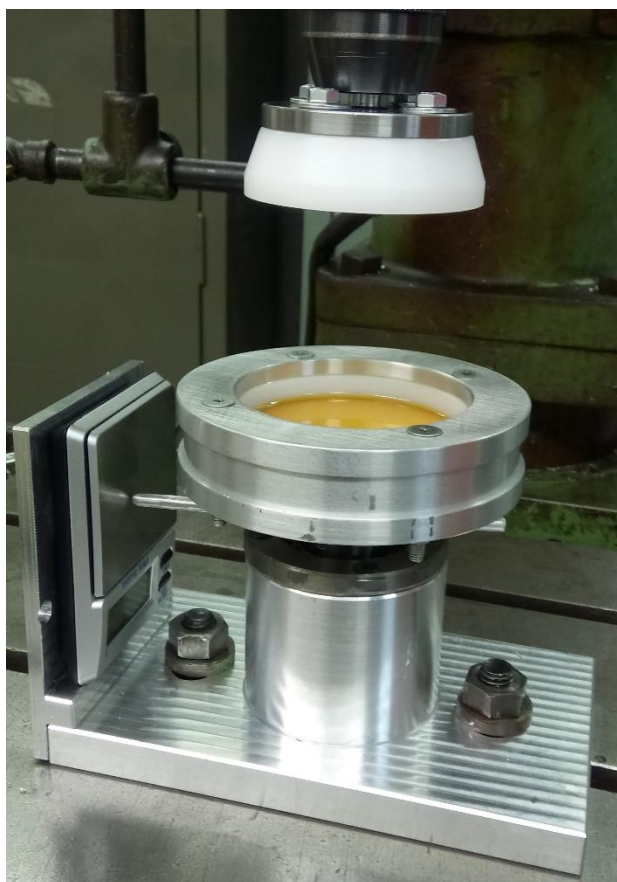
Σχήμα 4.3.2 Δοσολογία βαλβολίνης

Από τον τύπο του όγκου υπολογίστηκε η απόσταση ανάμεσα στις δύο πλάκες του ιξωδόμετρου (ακτίνα άνω δίσκου $r=35\text{mm}$):

$$V = \pi r^2 h \Leftrightarrow$$

$$h = \frac{V}{\pi r^2} = 2.598\text{mm} \quad (4.29)$$

Στην συνέχεια τοποθετήθηκε η βαλβολίνη μέσα στο ιζωδόμετρο.



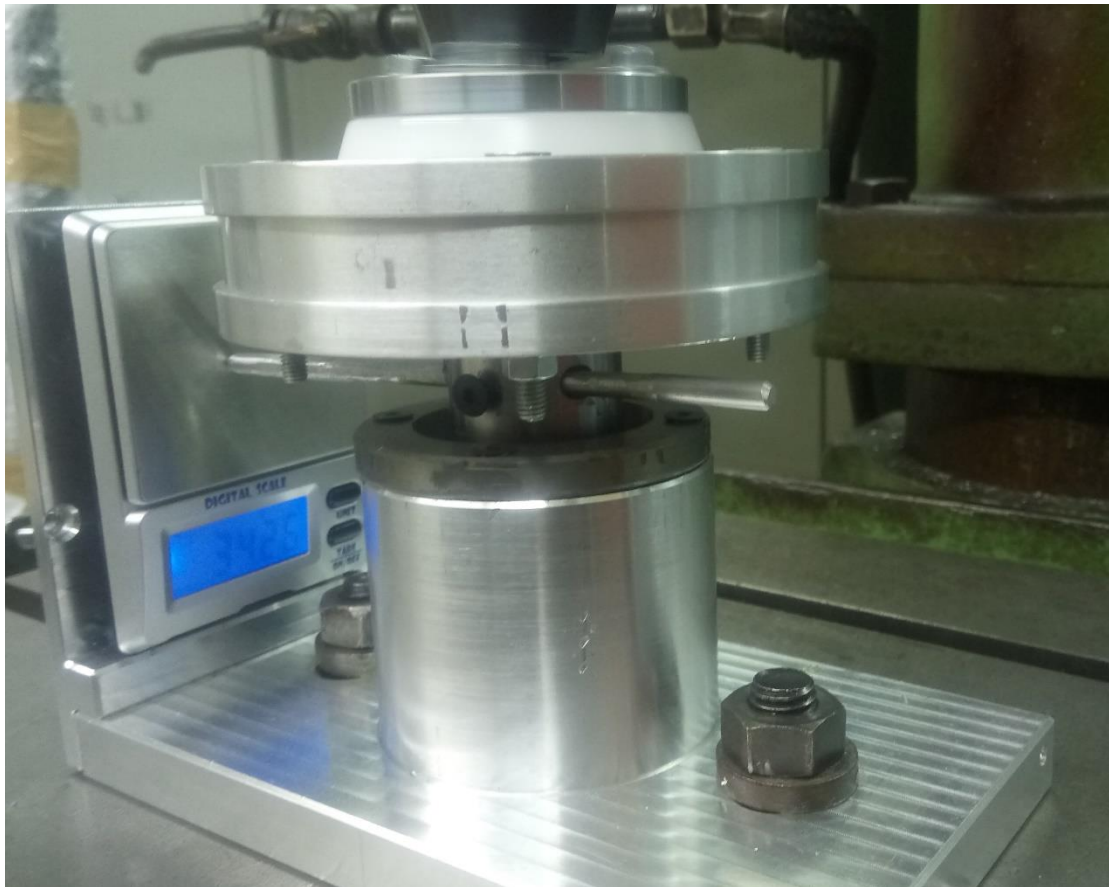
Σχήμα 4.3.3 Διάταξη μέτρησης

Χρησιμοποιώντας τον ψηφιακό μετρητή θέσης, που είναι προσαρμοσμένος στο δράπανο ρυθμίστηκε η απόσταση ανάμεσα στους δύο δίσκους, ένα χιλιοστό παραπάνω από ότι στον υπολογισμό, στα 3.6mm. Στην συνέχεια, με αργά βήματα, μειώθηκε η απόσταση μεταξύ τους μέχρις ότου ο άνω δίσκος να ακουμπήσει επαφτομενικά στην επιφάνεια της βαλβολίνης και η ζυγαριά ακριβείας να ξεκινήσει την μέτρηση. Η απόσταση αυτή μετρήθηκε 2.645mm.



Σχήμα 4.3.4 Ψηφιακός μετρητής θέσης

Όταν σταθεροποιήθηκε η ένδειξη στην ζυγαριά ακριβείας μετρήθηκε η τιμή 34.26g.



Σχήμα 4.3.4 Ένδειξη ζυγαριάς

Χρησιμοποιώντας τους τύπους που υπολογίστηκαν στο Κεφάλαιο 4.3 και την ένδειξη της ζυγαριάς υπολογίστηκε το ιώδες της βαλβολίνης στους 25°C.

$$m = \frac{2hg10^{-5} B}{\rho\omega R^4} = \frac{2 \times 0.0026 \times 9.81 \times 10^{-5} \times 34.26}{3.14 \times 18.8496 \times 0.035^4} = 0.1967 \text{ Pas} \quad (4.30)$$

Συνεπώς το ιώδες της βαλβολίνης μετρήθηκε 196,7 cP.

Κεφάλαιο 5

5.1 Συμπεριφορά ρητίνης με καταλύτη

Για να πολυμεριστεί (σκληρύνει) η ρητίνη, είναι απαραίτητη η προσθήκη καταλύτη ο οποίος ενεργοποιεί την αντίδραση και βοηθά να συνδεθούν τα μόρια της ρητίνης, δημιουργώντας δεσμούς ανάμεσα στα μονομερή ή σχηματίζοντας γέφυρες ανάμεσα στις αλυσίδες μακρομορίων. Κατά την διαδικασία αυτή, η ρητίνη μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (gel time) και μετά το πέρας αυτού αρχίζει η σκλήρυνση της ρητίνης (cure time). Κατά την διαδικασία της σκλήρυνσης, αναπτύσσεται θερμότητα, ενώ προκύπτει μία πολύ μικρή συρρίκνωση της μάζας της ρητίνης. Για το λόγο αυτό, τα τεμάχια αποκολλώνται εύκολα από τα καλούπια. Για την ρητίνη 446MPALV που θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα μελέτη, το ποσοστό συρρίκνωσης όγκου που δίνει η εταιρεία παραγωγής είναι 8.3%. Ενα απλό πείραμα πραγματοποιήθηκε με την συγκεκριμένη ρητίνη, ώστε να υπολογιστεί το πραγματικό ποσοστό συρρίκνωσης. Σε ένα πλαστικό κυλινδρικό δοχείο, εσωτερικής διαμέτρου 65 χιλιοστών, εγχύονται 150ml ρητίνη πολυεστέρα μαζί με καταλύτη και αφήνεται προς σκλήρυνση για 4 ώρες. Έπειτα, αφαιρείται το πλαστικό δοχείο και μετράται ο όγκος του πολυεστέρα. Η τελική διάμετρος του μετρήθηκε με παχύμετρο 63.36 χιλιοστά, ενώ η πτώση του ύψους (Σχήμα 5.1) μετρήθηκε με μετρητικό ρολόι στα 1.4 χιλιοστά.

Ο τελικός όγκος υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$V = \pi r^2 h = \frac{3.14 \cdot 31.68^2 \cdot 43.8}{1000} = 138.03ml \quad (5.1)$$

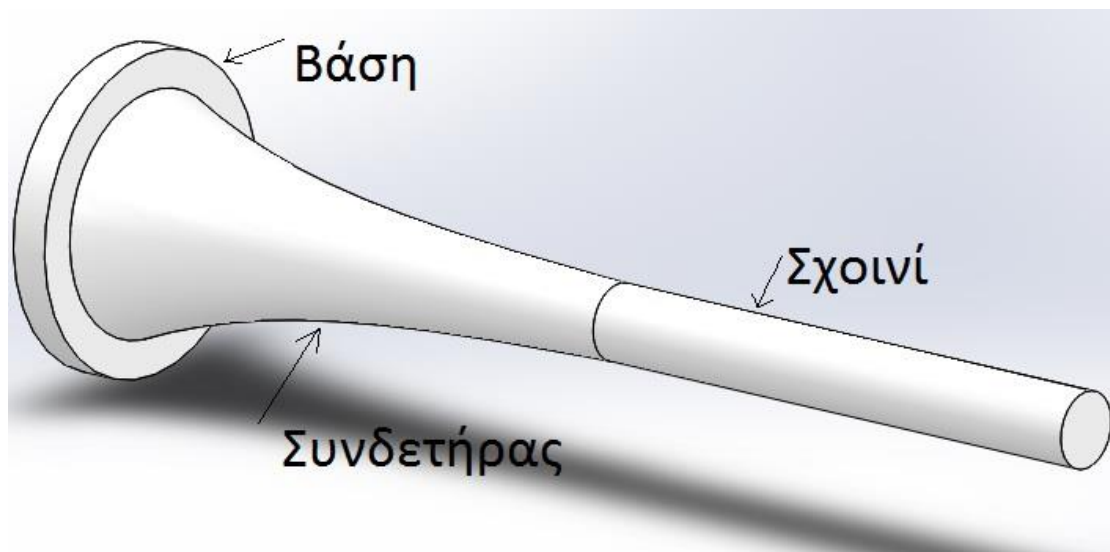
Αφαιρώντας την τιμή του όγκου της σκληρυμένης ρητίνης από την αρχική, προκύπτει το ποσοστό συρρίκνωσης όγκου 7.98% το οποίο πλησιάζει αρκετά στην δεδομένη τιμή. Η συρρίκνωση του όγκου έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της πυκνότητας κατά το ίδιο ποσοστό αντίστοιχα.



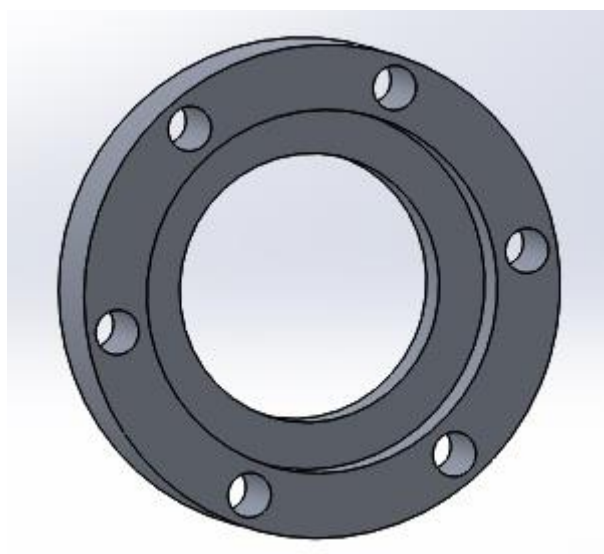
Σχήμα 5.1 πτώση ύψους

5.2 Επιλογή στερέωσης του συνδετήρα

Έχοντας υπολογίσει την γεωμετρία του συνδετήρα, με κατανομή ορθών τάσεων που προσεγγίζει την βέλτιστη, μένει να υπολογιστεί ένας τρόπος στερέωσης του. Στο τέλος της γεωμετρίας δημιουργήθηκε μια βάση (Σχήμα 5.2.1) όπου μπορεί να τοποθετηθεί μια φλάντζα και να αγκυρωθεί σε οποιαδήποτε επιφάνεια με κοχλίες (Σχήμα 5.2.2). Η βάση σχεδιάστηκε στο Solidworks, ενώ πραγματοποιήθηκε μια ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων στο Ansys για διάφορες τιμές του μήκους και του ύψους της.



Σχήμα 5.2.1 Βάση συνδετήρα



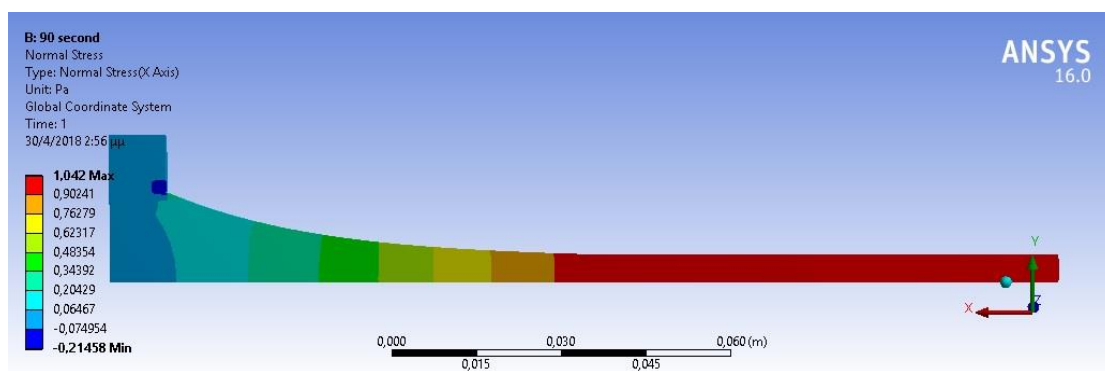
Σχήμα 5.2.2 Φλάτζα

Χρησιμοποιώντας στο Ansys τις ίδιες αρχικές συνθήκες με τις προηγούμενες αναλύσεις, τρεις κινηματικούς περιορισμούς, έναν για κάθε άξονα x, y, z στις τρεις πλευρές του συνδετήρα και μια πίεση (1Pa) στην αρχή του σχοινιού, και δίνοντας τιμές 10, 15 και 20mm στο πλάτος και στο ύψος της βάσης, προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:

x, y	RMS	Μέγιστη Τάση (Pa)
10x10	0,01249	1,0418
10x15	0,01571	1,0393
15x10	0,01298	1,03878
15x15	0,01585	1,0352
15x20	0,01702	1,039
20x15	0,01295	1,036
20x20	0,01706	1,0349

Σχήμα 5.2.3 Τιμές RMS

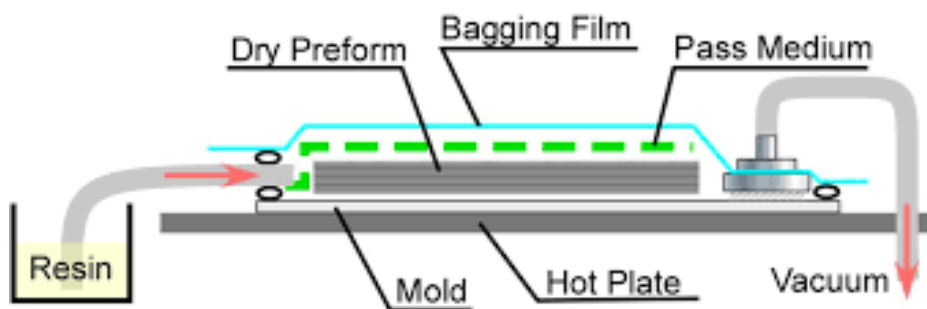
Παρατηρείται ότι οι τιμές 10x10mm, μήκους και ύψους της βάσης, δεν επηρεάζουν την τιμή του RMS της γεωμετρίας, ενώ εάν αυξηθούν, αυξάνεται και ο αριθμός RMS, με αποτέλεσμα να χαλάει η ομοιομορφία της κατανομής ορθών τάσεων.



Σχήμα 5.2.4 Κατανομή ορθών τάσεων για διαστάσεις βάσης 10x10 mm

5.3 Σχεδιασμός καλουπιού

Έχοντας υπολογίσει την τελική γεωμετρία του συνδετήρα με κατανομή τάσεων που προσεγγίζει την βέλτιστη, και γνωρίζοντας το ποσοστό συρρίκνωσης της ρητίνης πολυεστέρα, απομένει η σχεδίαση του καλουπιού χύτευσης. Η διαδικασία της χύτευσης, για την οποία θα σχεδιαστεί το καλούπι, ονομάζεται υποβοηθούμενη από κενό χύτευση ρητίνης (*Vacuum assisted resin transfer molding – VA RTM*). Στην συγκεκριμένη μέθοδο, χρησιμοποιείται μια αντλία κενού όπου το κύκλωμα αέρα υποπίεσης στεγανώνεται μέσω μίας σακούλας κενού με την έξοδο του καλουπιού. Η είσοδος του καλουπιού είναι συνδεδεμένη με ένα δοχείο με ρητίνη πολυεστέρα. Με αυτήν την διαμόρφωση, η αντλία κενού απομακρύνει τον αέρα μέσα από το καλούπι και δημιουργείται μια διαφορά πίεσης που έχει ως αποτέλεσμα να γεμίζει το καλούπι με ρητίνη (Σχήμα 5.3.1). Η πιο σημαντική προϋπόθεση για να επιτευχθεί αυτή η διαδικασία, είναι η αποφυγή δημιουργίας διαρροών αέρα. Οι διαρροές αυτές μπορούν να προκαλέσουν λανθασμένη ροή της ρητίνης στο καλούπι και να οδηγήσουν στη δημιουργία φυσαλίδων αέρα μέσα στο τελικό τεμάχιο. Οι διαρροές αυτές συνήθως οφείλονται σε ελάττωμα της σακούλας κενού, λανθασμένη εφαρμογή της στεγανωτικής ταινίας ή σε ακατάλληλη σφράγιση στα σημεία, όπου ο σωλήνας από την αντλία κενού συναντά την σακούλα κενού. Το σύστημα τοποθετείται πάνω σε μια δονητική μηχανή (Σχήμα 5.3.2), ώστε να βοηθηθεί ο εμποτισμός των ινών με ρητίνη.



Σχήμα 5.3.1 Σχηματική απεικόνιση διεργασίας VA RTM



Σχήμα 5.3.2 Δονητική μηχανή

Ο σχεδιασμός του καλουπιού πραγματοποιήθηκε στο Solidworks και οι διαστάσεις του συνδετήρα αυξήθηκαν κατά 8%, ίσο με το ποσοστό συρρίκνωσης όγκου της ρητίνης.

Το καλούπι αποτελείται από δύο κύρια κομμάτια:

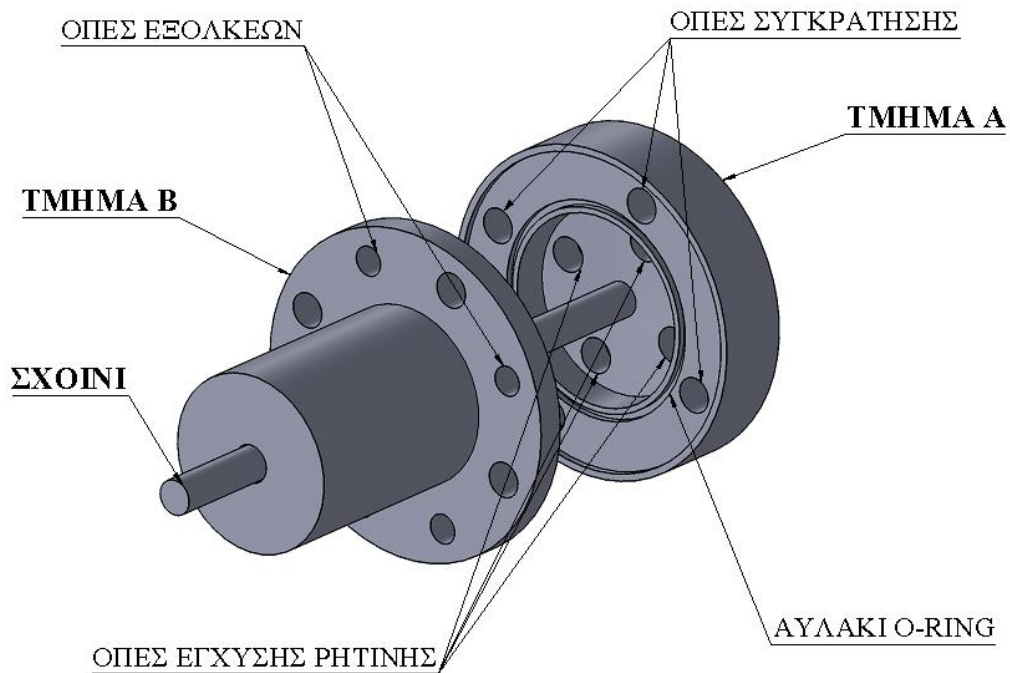
- Το κομμάτι στέρεωσης (ακίνητο κομμάτι-A)
- Το κομμάτι έγχυσης (κινητό κομμάτι-B).

Πιο αναλυτικά, το **κομμάτι A** είναι κυλινδρικής γεωμετρίας με εσωτερική διαμόρφωση, προκειμένου να δημιουργηθεί το κυλινδρικό τμήμα του συνδετήρα. Έχει μια αξονοκεντρική οπή μέσα από την οποία περνά το προς εμποτισμό σχοινί και 4 τρύπες για την έγχυση της ρητίνης. Επιπλέον, έχουν δημιουργηθεί 4 οπές για τη σύνδεσή του με το κομμάτι B και, ταυτόχρονα, τη στερέωση της συναρμογής στη μηχανή δόνησης. Τέλος, έχει δημιουργηθεί ένα αυλάκι για λόγους στεγάνωσης της συναρμογής με τη χρήση O-ring.

Το **κομμάτι Β**, επίσης κυλινδρικής γεωμετρίας, έχει εσωτερική διαμόρφωση για τη δημιουργία της γεωμετρίας Bezier για την ενίσχυση του σχοινιού, μια αξονοκεντρική οπή μέσα από την οποία διέρχεται το σχοινί και 4 οπές συγκράτησης με το κομμάτι Α και τη μηχανή δόνησης. Με το πέρας της διαδικασίας εμποτισμού, το καλούπι αποσυνδέεται από τη μηχανή δόνησης και, με τη χρήση βιδών ως εξολκείς, όπου με τη σύσφιξή τους το κομμάτι Α αποχωρίζεται από το κομμάτι Β.

Για το λόγο αυτό, έχουν κατασκευαστεί 4 επιπλέον οπές με σπείρωμα.

Στο ακόλουθο σχήμα, απεικονίζεται σχηματικά το προς σχεδιασμό καλούπι. Στο Παράρτημα Γ υπάρχουν τα κατασκευαστικά σχέδια των τμημάτων του καλουπιού.



Σχήμα 5.3.3 Συναρμογή του καλουπιού

5.4 Συμπεράσματα – Προτάσεις για μελλοντική εργασία

Αρχικά μπορεί να παρατηρηθεί ότι η ομαλή αλλαγή στην γεωμετρία του συνδετήρα που υπολογίστηκε οδηγεί σε μία κατανομή ορθών τάσεων που είναι πάρα πολύ κοντά στην βέλτιστη γραμμική, καθώς και σε μία κατανομή διατμητικών τάσεων με πολύ μικρές αποκλίσεις από την βέλτιστη σταθερή. Είναι εμφανές ότι όλο το υλικό του συνδετήρα είναι ενεργοποιημένο και συμμετέχει στην μεταφορά των τάσεων από το σχοινί σε αυτόν, κάτι το οποίο είναι απαραίτητο για την εξάλειψη των συγκεντρώσεων τάσεων που οδηγούν στην καταστροφή του σχοινού. Μελετήθηκε η ροή ανάμεσα στις ίνες κατά την διαδικασία της χύτευσης. Πραγματοποιήθηκε ανάλυση και κατασκευή ιξωδόμετρου. Και τέλος σχεδιάστηκε το καλούπι για την χύτευση ρητίνης και την δημιουργία του συνδετήρα.

Στα επόμενα βήματα περιλαμβάνεται η υλοποίηση της μελέτης αυτής, δηλαδή η μέτρηση του ιξώδους του υγρού πολυεστέρα σε διάφορες χρονικές στιγμές μετά την παρασκευή του, με σκοπό την εξαγωγή μιας καμπύλης εξάρτησης του ιξώδους από τον χρόνο ανάμιξης. Με βάση αυτά επιλογή των ακριβών συνθηκών λειτουργίας του καλουπιού, κατασκευή του καλουπιού, προετοιμασία και χύτευση της ρητίνης πολυεστέρα επάνω στο σχοινί. Πειραματική ανάλυση για την μείωση της συρρίκνωσης της ρητίνης πολυεστέρα με τον εμπλουτισμό της με συνθετικά υλικά, όπως μικροσφαιρίδια γυαλιού, μαρμάρινη σκόνη, σκόνη ταλκ, ασβεστολιθική άμμος, ίνες γυαλιού, ίνες άνθρακα και άλλα. Τέλος έλεγχος της αντοχής του σχοινού και σύγκριση της με άλλους τρόπους στερέωσης.

Βιβλιογραφία

- [1] Spitas, V., Spitas, C., Zouridaki, E., Modelling of a novel optimized termination for high tenacity cables, 4th International Conference from Scientific Computing to Computational Engineering, (2010)
- [2] Βακουφτσής Χ., Διπλωματική εργασία, Σχεδιασμός βέλτιστου τερματικού συνδετήρα πολυμερών σχοινιών υψηλής αντοχής για ομοιόμορφη κατανομή των διατμητικών τάσεων (2014)
- [3] McKenna, Henry A., John WS Hearle, and Nick O'Hear. Handbook of fibre rope technology. Elsevier, 2004.
- [4] Bucknall, Clive B., Ivana K. Partridge, and Martin J. Phillips. "Mechanism of shrinkage control in polyester resins containing low-profile additives." *Polymer* 32.4 (1991): 636-640.
- [5] Rudd, Chris D., et al. Liquid moulding technologies: Resin transfer moulding, structural reaction injection moulding and related processing techniques. Elsevier, 1997.
- [6] Potter, Kevin. Resin transfer moulding. Springer Science & Business Media, 2012.
- [7] Cao, Xia, and L. James Lee. "Control of shrinkage and residual styrene of unsaturated polyester resins cured at low temperatures: I. Effect of curing agents." *Polymer* 44.6 (2003): 1893-1902.
- [8] Tuncol, Goker. Modeling the Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (VARTM) Process for Fabrication of Fiber/metal Hybrid Laminates. Michigan State University. Mechanical Engineering, 2010.
- [9] SUGIMOTO, Hiromi, et al. "Effect of Couette Type of Shear Flow by Rotating Disk on Migration of Cell."
- [10] Cros, A., and P. Le Gal. "Spatiotemporal intermittency in the torsional Couette flow between a rotating and a stationary disk." *Physics of Fluids* 14.11 (2002): 3755-3765.
- [11] Browne, William RK. "Wire rope termination." U.S. Patent No. 4,043,690. 23 Aug. 1977.

- [12]Humbert, Dell Raymond. Modeling of resin transfer molding of composite materials with oriented unidirectional plies. MS thesis. Montana State University, Bozeman, 1996.
- [13]Meier, Urs. "Carbon fiber reinforced polymer cables: Why? Why not? What if?." *Arabian Journal for Science and Engineering* 37.2 (2012): 399-411.
- [14]Barandun, Gion Andrea. Injection strategies for liquid composite moulding processes. Diss. ETH Zurich, 2009.
- [15]Higham, Desmond J., and Nicholas J. Higham. *MATLAB guide*. Vol. 150. Siam, 2016.
- [16]Henne, Markus. Modelling of thermal aspects in liquid composite moulding for industrial applications. Diss. ETH Zurich, 2003.
- [17]Davallo, M., H. Pasdar, and M. Mohseni. "Mechanical properties of unsaturated polyester resin." *International Journal of ChemTech Research* 2.4 (2010): 2113-2117.
- [18]Parker, Earl E., and E. W. Moffett. "Physical properties of polyester resin." *Industrial & Engineering Chemistry* 46.8 (1954): 1615-1618.
- [19]Meier, U., Meier, H., Kim P., (1998), Anchorage device for high – performance fiber composite cables, US Patent No 5,713,169
- [20]Yang, Yeong-Show, and Laurent Suspene. "Curing of unsaturated polyester resins: Viscosity studies and simulations in pre-gel state." *Polymer Engineering & Science* 31.5 (1991): 321-332.
- [21]ANSYS, ICEM. "CFD tutorial manual, Release 14.5, Accessed on 30 October 2012."
- [22]Κ.Χ Γιαννάκογλου 'Αριθμητική ανάλυση για μηχανικούς'
- [23]Γ.Τ. Τσαμασφύρος, «Μηχανική Παραμορφωσίμου Σώματος Ι», εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1991
- [24]Σ. Τσαγγάρης, «Μηχανική των Ρευστών θεωρία & ασκήσεις», εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 2013
- [25]Μ.Μ. Σφατζικοπούλου, «Σχεδιασμός Μηχανολογικών Κατασκευών Ι», Αθήνα 1992
- [26]Σ.Ε. Σιμοπούλου, «Μετρήσεις τεχνικών μεγεθών», Αθήνα 1989
- [27]Wikipedia-the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Plastic>

Παράρτημα Α

rpm	180			rpm	180		
ω (rad/s)	18,8496			ω (rad/s)	18,8496		
ρ (kg/m ³)	1100			ρ (kg/m ³)	1100		
h(m)	0,005			h(m)	0,005		
R (m)	0,035			R (m)	0,03		
μ (cP)	μ (Pa s)	Re	M (Nm)	μ (cP)	μ (Pa s)	Re	M (Nm)
100	0,1	36,28548	0,000889	100	0,1	31,10184	0,0004797
200	0,2	18,14274	0,001777	200	0,2	15,55092	0,0009593
300	0,3	12,09516	0,002666	300	0,3	10,36728	0,001439
400	0,4	9,07137	0,003555	400	0,4	7,77546	0,0019187
500	0,5	7,257096	0,004443	500	0,5	6,220368	0,0023983
600	0,6	6,04758	0,005332	600	0,6	5,18364	0,002878
700	0,7	5,18364	0,00622	700	0,7	4,44312	0,0033576
800	0,8	4,535685	0,007109	800	0,8	3,88773	0,0038373
900	0,9	4,03172	0,007998	900	0,9	3,45576	0,004317
1000	1	3,628548	0,008886	1000	1	3,110184	0,0047966
1100	1,1	3,29868	0,009775	1100	1,1	2,82744	0,0052763
1200	1,2	3,02379	0,010664	1200	1,2	2,59182	0,005756
1300	1,3	2,791191	0,011552	1300	1,3	2,392449	0,0062356
1400	1,4	2,59182	0,012441	1400	1,4	2,22156	0,0067153
1500	1,5	2,419032	0,01333	1500	1,5	2,073456	0,007195
1600	1,6	2,267843	0,014218	1600	1,6	1,943865	0,0076746
1700	1,7	2,13444	0,015107	1700	1,7	1,82952	0,0081543
1800	1,8	2,01586	0,015995	1800	1,8	1,72788	0,008634
1900	1,9	1,909762	0,016884	1900	1,9	1,636939	0,0091136
2000	2	1,814274	0,017773	2000	2	1,555092	0,0095933
2100	2,1	1,72788	0,018661	2100	2,1	1,48104	0,0100729

Πίνακας 1 Σχέση ιξώδους και ροπής για 180rpm, απόσταση ανάμεσα στους δίσκους $h=0,005m$ και ακτίνα άνω περιστρεφόμενου δίσκου $R=0,035$ και $0,03m$

rpm	180			rpm	180		
ω (rad/s)	18,8496			ω (rad/s)	18,8496		
ρ (kg/m ³)	1100			ρ (kg/m ³)	1100		
h(m)	0,005			h(m)	0,01		
R (m)	0,04			R (m)	0,035		
μ (cP)	μ (Pa s)	Re	M (Nm)	μ (cP)	μ (Pa s)	Re	M (Nm)
100	0,1	41,46912	0,001516	100	0,1	72,57096	0,000444
200	0,2	20,73456	0,003032	200	0,2	36,28548	0,000889
300	0,3	13,82304	0,004548	300	0,3	24,19032	0,001333
400	0,4	10,36728	0,006064	400	0,4	18,14274	0,001777
500	0,5	8,293824	0,00758	500	0,5	14,51419	0,002222
600	0,6	6,91152	0,009096	600	0,6	12,09516	0,002666
700	0,7	5,92416	0,010612	700	0,7	10,36728	0,00311
800	0,8	5,18364	0,012128	800	0,8	9,07137	0,003555
900	0,9	4,60768	0,013644	900	0,9	8,06344	0,003999
1000	1	4,146912	0,01516	1000	1	7,257096	0,004443
1100	1,1	3,76992	0,016676	1100	1,1	6,59736	0,004888
1200	1,2	3,45576	0,018192	1200	1,2	6,04758	0,005332
1300	1,3	3,189932	0,019708	1300	1,3	5,582382	0,005776
1400	1,4	2,96208	0,021224	1400	1,4	5,18364	0,00622
1500	1,5	2,764608	0,02274	1500	1,5	4,838064	0,006665
1600	1,6	2,59182	0,024256	1600	1,6	4,535685	0,007109
1700	1,7	2,43936	0,025772	1700	1,7	4,26888	0,007553
1800	1,8	2,30384	0,027288	1800	1,8	4,03172	0,007998
1900	1,9	2,182585	0,028804	1900	1,9	3,819524	0,008442
2000	2	2,073456	0,030319	2000	2	3,628548	0,008886
2100	2,1	1,97472	0,031835	2100	2,1	3,45576	0,009331

Πίνακας 2 Σχέση ιξώδους και ροπής για 180rpm, απόσταση ανάμεσα στους δίσκους $h=0,005$ και $0,01m$ και ακτίνα άνω περιστρεφόμενου δίσκου $R=0,04$ και $0,035m$

rpm	180			rpm	250		
ω (rad/s)	18,8496			ω (rad/s)	26,18		
ρ (kg/m ³)	1100			ρ (kg/m ³)	1100		
h(m)	0,002			h(m)	0,005		
R (m)	0,035			R (m)	0,035		
μ (cP)	μ (Pa s)	Re	M (Nm)	μ (cP)	μ (Pa s)	Re	M (Nm)
100	0,1	14,51419	0,002222	100	0,1	50,3965	0,001234
200	0,2	7,257096	0,004443	200	0,2	25,19825	0,002468
300	0,3	4,838064	0,006665	300	0,3	16,7988333	0,003703
400	0,4	3,628548	0,008886	400	0,4	12,599125	0,004937
500	0,5	2,902838	0,011108	500	0,5	10,0793	0,006171
600	0,6	2,419032	0,01333	600	0,6	8,39941667	0,007405
700	0,7	2,073456	0,015551	700	0,7	7,1995	0,00864
800	0,8	1,814274	0,017773	800	0,8	6,2995625	0,009874
900	0,9	1,612688	0,019994	900	0,9	5,59961111	0,011108
1000	1	1,451419	0,022216	1000	1	5,03965	0,012342
1100	1,1	1,319472	0,024438	1100	1,1	4,5815	0,013576
1200	1,2	1,209516	0,026659	1200	1,2	4,19970833	0,014811
1300	1,3	1,116476	0,028881	1300	1,3	3,87665385	0,016045
1400	1,4	1,036728	0,031102	1400	1,4	3,59975	0,017279
1500	1,5	0,967613	0,033324	1500	1,5	3,35976667	0,018513
1600	1,6	0,907137	0,035545	1600	1,6	3,14978125	0,019747
1700	1,7	0,853776	0,037767	1700	1,7	2,9645	0,020982
1800	1,8	0,806344	0,039989	1800	1,8	2,79980556	0,022216
1900	1,9	0,763905	0,04221	1900	1,9	2,65244737	0,02345
2000	2	0,72571	0,044432	2000	2	2,519825	0,024684
2100	2,1	0,691152	0,046653	2100	2,1	2,39983333	0,025919

Πίνακας 3 Σχέση ιξώδους και ροπής για 180 και 250rpm, απόσταση ανάμεσα στους δίσκους $h=0,002$ και $0,005m$ και ακτίνα άνω περιστρεφόμενου δίσκου $R=0,035m$

rpm	250			rpm	250		
ω (rad/s)	26,18			ω (rad/s)	26,18		
ρ (kg/m ³)	1100			ρ (kg/m ³)	1100		
h(m)	0,005			h(m)	0,005		
R (m)	0,03			R (m)	0,04		
μ (cP)	μ (Pa s)	Re	M (Nm)	μ (cP)	μ (Pa s)	Re	M (Nm)
100	0,1	43,197	0,000666	100	0,1	57,596	0,002106
200	0,2	21,5985	0,001332	200	0,2	28,798	0,004211
300	0,3	14,399	0,001999	300	0,3	19,19867	0,006317
400	0,4	10,79925	0,002665	400	0,4	14,399	0,008422
500	0,5	8,6394	0,003331	500	0,5	11,5192	0,010528
600	0,6	7,1995	0,003997	600	0,6	9,599333	0,012633
700	0,7	6,171	0,004663	700	0,7	8,228	0,014739
800	0,8	5,399625	0,00533	800	0,8	7,1995	0,016844
900	0,9	4,799667	0,005996	900	0,9	6,399556	0,01895
1000	1	4,3197	0,006662	1000	1	5,7596	0,021055
1100	1,1	3,927	0,007328	1100	1,1	5,236	0,023161
1200	1,2	3,59975	0,007994	1200	1,2	4,799667	0,025266
1300	1,3	3,322846	0,008661	1300	1,3	4,430462	0,027372
1400	1,4	3,0855	0,009327	1400	1,4	4,114	0,029477
1500	1,5	2,8798	0,009993	1500	1,5	3,839733	0,031583
1600	1,6	2,699813	0,010659	1600	1,6	3,59975	0,033688
1700	1,7	2,541	0,011325	1700	1,7	3,388	0,035794
1800	1,8	2,399833	0,011992	1800	1,8	3,199778	0,037899
1900	1,9	2,273526	0,012658	1900	1,9	3,031368	0,040005
2000	2	2,15985	0,013324	2000	2	2,8798	0,04211
2100	2,1	2,057	0,01399	2100	2,1	2,742667	0,044216

Πίνακας 4 Σχέση ιξώδους και ροπής για 250rpm, απόσταση ανάμεσα στους δίσκους $h=0,005m$ και ακτίνα άνω περιστρεφόμενου δίσκου $R=0,03$ και $0,04m$

rpm	250			rpm	250		
ω (rad/s)	26,18			ω (rad/s)	26,18		
ρ (kg/m ³)	1100			ρ (kg/m ³)	1100		
h(m)	0,01			h(m)	0,002		
R (m)	0,035			R (m)	0,035		
μ (cP)	μ (Pa s)	Re	M (Nm)	μ (cP)	μ (Pa s)	Re	M (Nm)
100	0,1	100,793	0,000617	100	0,1	20,1586	0,003086
200	0,2	50,3965	0,001234	200	0,2	10,0793	0,006171
300	0,3	33,59767	0,001851	300	0,3	6,719533	0,009257
400	0,4	25,19825	0,002468	400	0,4	5,03965	0,012342
500	0,5	20,1586	0,003086	500	0,5	4,03172	0,015428
600	0,6	16,79883	0,003703	600	0,6	3,359767	0,018513
700	0,7	14,399	0,00432	700	0,7	2,8798	0,021599
800	0,8	12,59913	0,004937	800	0,8	2,519825	0,024684
900	0,9	11,19922	0,005554	900	0,9	2,239844	0,02777
1000	1	10,0793	0,006171	1000	1	2,01586	0,030855
1100	1,1	9,163	0,006788	1100	1,1	1,8326	0,033941
1200	1,2	8,399417	0,007405	1200	1,2	1,679883	0,037027
1300	1,3	7,753308	0,008022	1300	1,3	1,550662	0,040112
1400	1,4	7,1995	0,00864	1400	1,4	1,4399	0,043198
1500	1,5	6,719533	0,009257	1500	1,5	1,343907	0,046283
1600	1,6	6,299563	0,009874	1600	1,6	1,259913	0,049369
1700	1,7	5,929	0,010491	1700	1,7	1,1858	0,052454
1800	1,8	5,599611	0,011108	1800	1,8	1,119922	0,05554
1900	1,9	5,304895	0,011725	1900	1,9	1,060979	0,058625
2000	2	5,03965	0,012342	2000	2	1,00793	0,061711
2100	2,1	4,799667	0,012959	2100	2,1	0,959933	0,064796

Πίνακας 5 Σχέση ιξώδους και ροπής για 250rpm, απόσταση ανάμεσα στους δίσκους $h=0,01$ και $0,002m$ και ακτίνα άνω περιστρεφόμενου δίσκου $R=0,035m$

rpm	355			rpm	355		
ω (rad/s)	37,1756			ω (rad/s)	37,1756		
ρ (kg/m ³)	1100			ρ (kg/m ³)	1100		
h(m)	0,005			h(m)	0,005		
R (m)	0,035			R (m)	0,03		
μ (cP)	μ (Pa s)	Re	M (Nm)	μ (cP)	μ (Pa s)	Re	M (Nm)
100	0,1	71,56303	0,001753	100	0,1	61,33974	0,000946
200	0,2	35,78152	0,003505	200	0,2	30,66987	0,001892
300	0,3	23,85434	0,005258	300	0,3	20,44658	0,002838
400	0,4	17,89076	0,00701	400	0,4	15,33494	0,003784
500	0,5	14,31261	0,008763	500	0,5	12,26795	0,00473
600	0,6	11,92717	0,010516	600	0,6	10,22329	0,005676
700	0,7	10,22329	0,012268	700	0,7	8,76282	0,006622
800	0,8	8,945379	0,014021	800	0,8	7,667468	0,007568
900	0,9	7,951448	0,015773	900	0,9	6,815527	0,008514
1000	1	7,156303	0,017526	1000	1	6,133974	0,00946
1100	1,1	6,50573	0,019278	1100	1,1	5,57634	0,010406
1200	1,2	5,963586	0,021031	1200	1,2	5,111645	0,011352
1300	1,3	5,504848	0,022784	1300	1,3	4,718442	0,012298
1400	1,4	5,111645	0,024536	1400	1,4	4,38141	0,013244
1500	1,5	4,770869	0,026289	1500	1,5	4,089316	0,01419
1600	1,6	4,472689	0,028041	1600	1,6	3,833734	0,015136
1700	1,7	4,20959	0,029794	1700	1,7	3,60822	0,016082
1800	1,8	3,975724	0,031547	1800	1,8	3,407763	0,017028
1900	1,9	3,766475	0,033299	1900	1,9	3,228407	0,017974
2000	2	3,578152	0,035052	2000	2	3,066987	0,01892
2100	2,1	3,407763	0,036804	2100	2,1	2,92094	0,019866

Πίνακας 6 Σχέση ιξώδους και ροπής για 355rpm, απόσταση ανάμεσα στους δίσκους $h=0,005m$ και ακτίνα άνω περιστρεφόμενου δίσκου $R=0,035$ και $0,03m$

rpm	355			rpm	355		
ω (rad/s)	37,1756			ω (rad/s)	37,1756		
ρ (kg/m ³)	1100			ρ (kg/m ³)	1100		
h(m)	0,005			h(m)	0,01		
R (m)	0,04			R (m)	0,035		
μ (cP)	μ (Pa s)	Re	M (Nm)	μ (cP)	μ (Pa s)	Re	M (Nm)
100	0,1	81,78632	0,00299	100	0,1	143,1261	0,000876
200	0,2	40,89316	0,00598	200	0,2	71,56303	0,001753
300	0,3	27,26211	0,00897	300	0,3	47,70869	0,002629
400	0,4	20,44658	0,011959	400	0,4	35,78152	0,003505
500	0,5	16,35726	0,014949	500	0,5	28,62521	0,004381
600	0,6	13,63105	0,017939	600	0,6	23,85434	0,005258
700	0,7	11,68376	0,020929	700	0,7	20,44658	0,006134
800	0,8	10,22329	0,023919	800	0,8	17,89076	0,00701
900	0,9	9,087369	0,026909	900	0,9	15,9029	0,007887
1000	1	8,178632	0,029898	1000	1	14,31261	0,008763
1100	1,1	7,43512	0,032888	1100	1,1	13,01146	0,009639
1200	1,2	6,815527	0,035878	1200	1,2	11,92717	0,010516
1300	1,3	6,291255	0,038868	1300	1,3	11,0097	0,011392
1400	1,4	5,84188	0,041858	1400	1,4	10,22329	0,012268
1500	1,5	5,452421	0,044848	1500	1,5	9,541737	0,013144
1600	1,6	5,111645	0,047837	1600	1,6	8,945379	0,014021
1700	1,7	4,81096	0,050827	1700	1,7	8,41918	0,014897
1800	1,8	4,543684	0,053817	1800	1,8	7,951448	0,015773
1900	1,9	4,304543	0,056807	1900	1,9	7,532951	0,01665
2000	2	4,089316	0,059797	2000	2	7,156303	0,017526
2100	2,1	3,894587	0,062787	2100	2,1	6,815527	0,018402

Πίνακας 7 Σχέση ιξώδους και ροπής για 355rpm, απόσταση ανάμεσα στους δίσκους $h=0,005$ και $0,01m$ και ακτίνα άνω περιστρεφόμενου δίσκου $R=0,04$ και $0,035m$

rpm	355			rpm	500		
ω (rad/s)	37,1756			ω (rad/s)	52,36		
ρ (kg/m ³)	1100			ρ (kg/m ³)	1100		
h(m)	0,002			h(m)	0,005		
R (m)	0,035			R (m)	0,035		
μ (cP)	μ (Pa s)	Re	M (Nm)	μ (cP)	μ (Pa s)	Re	M (Nm)
100	0,1	28,62521	0,004381	100	0,1	100,793	0,002468
200	0,2	14,31261	0,008763	200	0,2	50,3965	0,004937
300	0,3	9,541737	0,013144	300	0,3	33,59767	0,007405
400	0,4	7,156303	0,017526	400	0,4	25,19825	0,009874
500	0,5	5,725042	0,021907	500	0,5	20,1586	0,012342
600	0,6	4,770869	0,026289	600	0,6	16,79883	0,014811
700	0,7	4,089316	0,03067	700	0,7	14,399	0,017279
800	0,8	3,578152	0,035052	800	0,8	12,59913	0,019747
900	0,9	3,180579	0,039433	900	0,9	11,19922	0,022216
1000	1	2,862521	0,043815	1000	1	10,0793	0,024684
1100	1,1	2,602292	0,048196	1100	1,1	9,163	0,027153
1200	1,2	2,385434	0,052578	1200	1,2	8,399417	0,029621
1300	1,3	2,201939	0,056959	1300	1,3	7,753308	0,03209
1400	1,4	2,044658	0,061341	1400	1,4	7,1995	0,034558
1500	1,5	1,908347	0,065722	1500	1,5	6,719533	0,037027
1600	1,6	1,789076	0,070104	1600	1,6	6,299563	0,039495
1700	1,7	1,683836	0,074485	1700	1,7	5,929	0,041963
1800	1,8	1,59029	0,078866	1800	1,8	5,599611	0,044432
1900	1,9	1,50659	0,083248	1900	1,9	5,304895	0,0469
2000	2	1,431261	0,087629	2000	2	5,03965	0,049369
2100	2,1	1,363105	0,092011	2100	2,1	4,799667	0,051837

Πίνακας 8 Σχέση ιξώδους και ροπής για 355 και 500rpm, απόσταση ανάμεσα στους δίσκους $h=0,002$ και $0,005m$ και ακτίνα άνω περιστρεφόμενου δίσκου $R=0,035m$

rpm	500			rpm	500		
ω (rad/s)	52,36			ω (rad/s)	52,36		
ρ (kg/m ³)	1100			ρ (kg/m ³)	1100		
h(m)	0,005			h(m)	0,005		
R (m)	0,03			R (m)	0,04		
μ (cP)	μ (Pa s)	Re	M (Nm)	μ (cP)	μ (Pa s)	Re	M (Nm)
100	0,1	86,394	0,001332	100	0,1	115,192	0,004211
200	0,2	43,197	0,002665	200	0,2	57,596	0,008422
300	0,3	28,798	0,003997	300	0,3	38,39733	0,012633
400	0,4	21,5985	0,00533	400	0,4	28,798	0,016844
500	0,5	17,2788	0,006662	500	0,5	23,0384	0,021055
600	0,6	14,399	0,007994	600	0,6	19,19867	0,025266
700	0,7	12,342	0,009327	700	0,7	16,456	0,029477
800	0,8	10,79925	0,010659	800	0,8	14,399	0,033688
900	0,9	9,599333	0,011992	900	0,9	12,79911	0,037899
1000	1	8,6394	0,013324	1000	1	11,5192	0,04211
1100	1,1	7,854	0,014656	1100	1,1	10,472	0,046321
1200	1,2	7,1995	0,015989	1200	1,2	9,599333	0,050532
1300	1,3	6,645692	0,017321	1300	1,3	8,860923	0,054744
1400	1,4	6,171	0,018654	1400	1,4	8,228	0,058955
1500	1,5	5,7596	0,019986	1500	1,5	7,679467	0,063166
1600	1,6	5,399625	0,021318	1600	1,6	7,1995	0,067377
1700	1,7	5,082	0,022651	1700	1,7	6,776	0,071588
1800	1,8	4,799667	0,023983	1800	1,8	6,399556	0,075799
1900	1,9	4,547053	0,025316	1900	1,9	6,062737	0,08001
2000	2	4,3197	0,026648	2000	2	5,7596	0,084221
2100	2,1	4,114	0,02798	2100	2,1	5,485333	0,088432

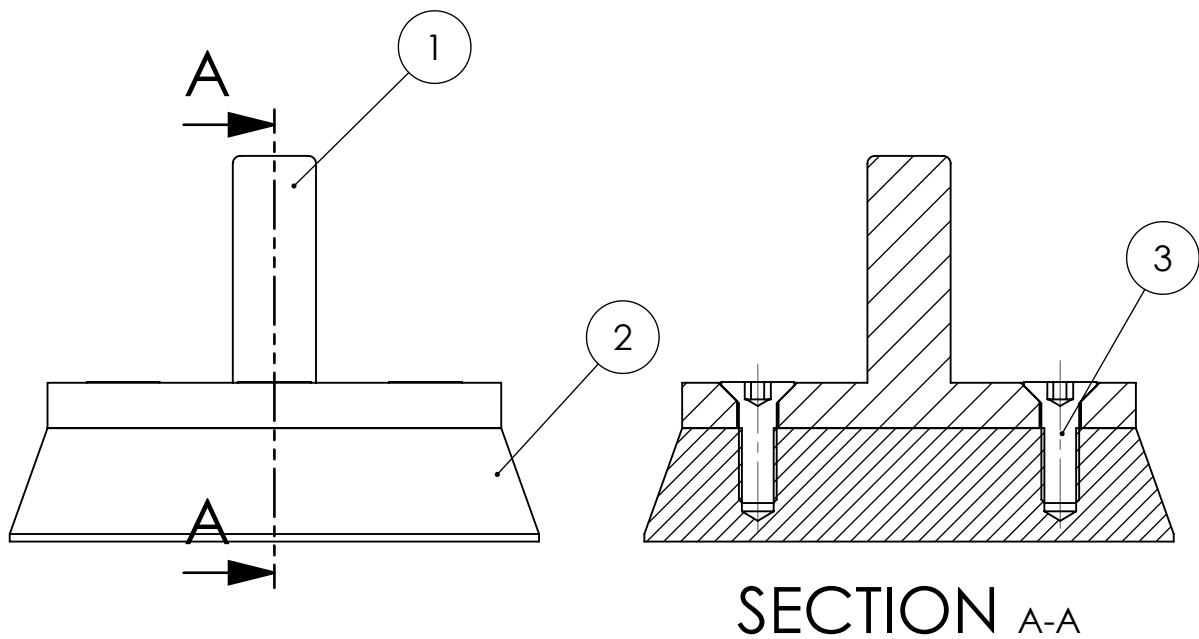
Πίνακας 9 Σχέση ιξώδους και ροπής για 500rpm, απόσταση ανάμεσα στους δίσκους $h=0,005m$ και ακτίνα άνω περιστρεφόμενου δίσκου $R=0,03$ και $0,04m$

rpm	500			rpm	500		
ω (rad/s)	52,36			ω (rad/s)	52,36		
ρ (kg/m ³)	1100			ρ (kg/m ³)	1100		
h(m)	0,01			h(m)	0,002		
R (m)	0,035			R (m)	0,035		
μ (cP)	μ (Pa s)	Re	M (Nm)	μ (cP)	μ (Pa s)	Re	M (Nm)
100	0,1	201,586	0,001234	100	0,1	40,3172	0,006171
200	0,2	100,793	0,002468	200	0,2	20,1586	0,012342
300	0,3	67,19533	0,003703	300	0,3	13,43907	0,018513
400	0,4	50,3965	0,004937	400	0,4	10,0793	0,024684
500	0,5	40,3172	0,006171	500	0,5	8,06344	0,030855
600	0,6	33,59767	0,007405	600	0,6	6,719533	0,037027
700	0,7	28,798	0,00864	700	0,7	5,7596	0,043198
800	0,8	25,19825	0,009874	800	0,8	5,03965	0,049369
900	0,9	22,39844	0,011108	900	0,9	4,479689	0,05554
1000	1	20,1586	0,012342	1000	1	4,03172	0,061711
1100	1,1	18,326	0,013576	1100	1,1	3,6652	0,067882
1200	1,2	16,79883	0,014811	1200	1,2	3,359767	0,074053
1300	1,3	15,50662	0,016045	1300	1,3	3,101323	0,080224
1400	1,4	14,399	0,017279	1400	1,4	2,8798	0,086395
1500	1,5	13,43907	0,018513	1500	1,5	2,687813	0,092566
1600	1,6	12,59913	0,019747	1600	1,6	2,519825	0,098737
1700	1,7	11,858	0,020982	1700	1,7	2,3716	0,104908
1800	1,8	11,19922	0,022216	1800	1,8	2,239844	0,11108
1900	1,9	10,60979	0,02345	1900	1,9	2,121958	0,117251
2000	2	10,0793	0,024684	2000	2	2,01586	0,123422
2100	2,1	9,599333	0,025919	2100	2,1	1,919867	0,129593

Πίνακας 10 Σχέση ιξώδους και ροπής για 500rpm, απόσταση ανάμεσα στους δίσκους $h=0,01$ και $0,002m$ και ακτίνα άνω περιστρεφόμενου δίσκου $R=0,035m$

Παράρτημα Β

ΣΧΕΔΙΑ ΙΞΩΔ'ΟΜΕΤΡΟΥ



ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	DTM_e01	Machine holding	1
2	DTM_e02	teflon plug	1
3	DTM_e03	DIN 7991 - M5 x 16 --- 10.8N	4

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
 SURFACE FINISH:
 TOLERANCES: ISO 2768-mK
 LINEAR:
 ANGULAR:

FINISH:

DEBUR AND
 BREAK SHARP
 EDGES

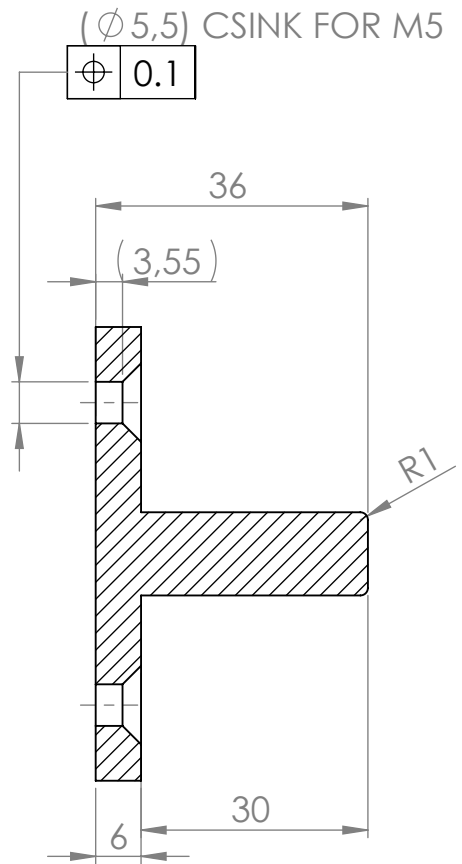
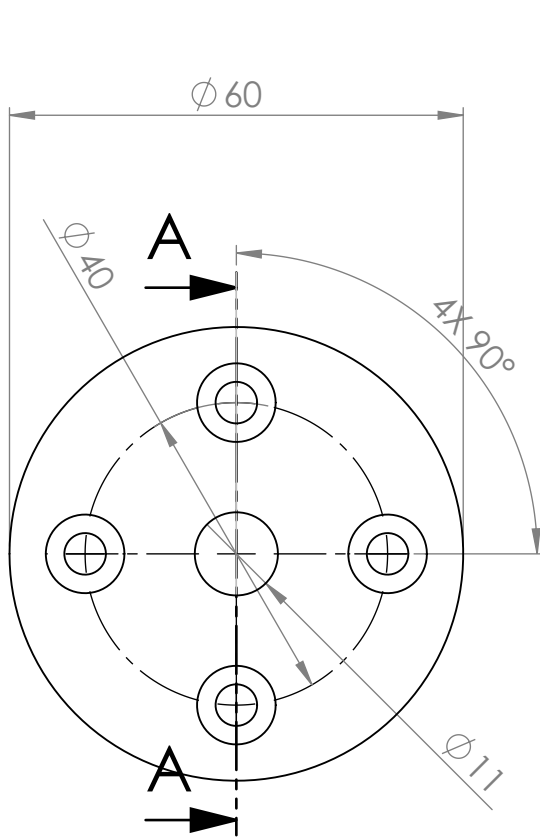
DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

1

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN	Apostolakis		7/3/2018		
CHK'D	Vasileiou				
APPV'D	Spitas				
MFG					
Q.A					
				MATERIAL:	
				WEIGHT: 206.89 gr	

TITLE:	
ASSEMBLY PART E	
DWG NO.	DTM_e
	A4
SCALE: 1:1	SHEET 1 OF 1



SECTION A-A

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
 SURFACE FINISH:
 TOLERANCES: ISO 2768-mk
 LINEAR:
 ANGULAR:

FINISH:

DEBUR AND
 BREAK SHARP
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION 1

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN	Apostolakis		7/3/2018		
CHK'D	Vasileiou				
APPV'D	Spitas				
MFG					
Q.A				MATERIAL:	
					C40
				WEIGHT:	147.96 gr

TITLE:

Machine holding

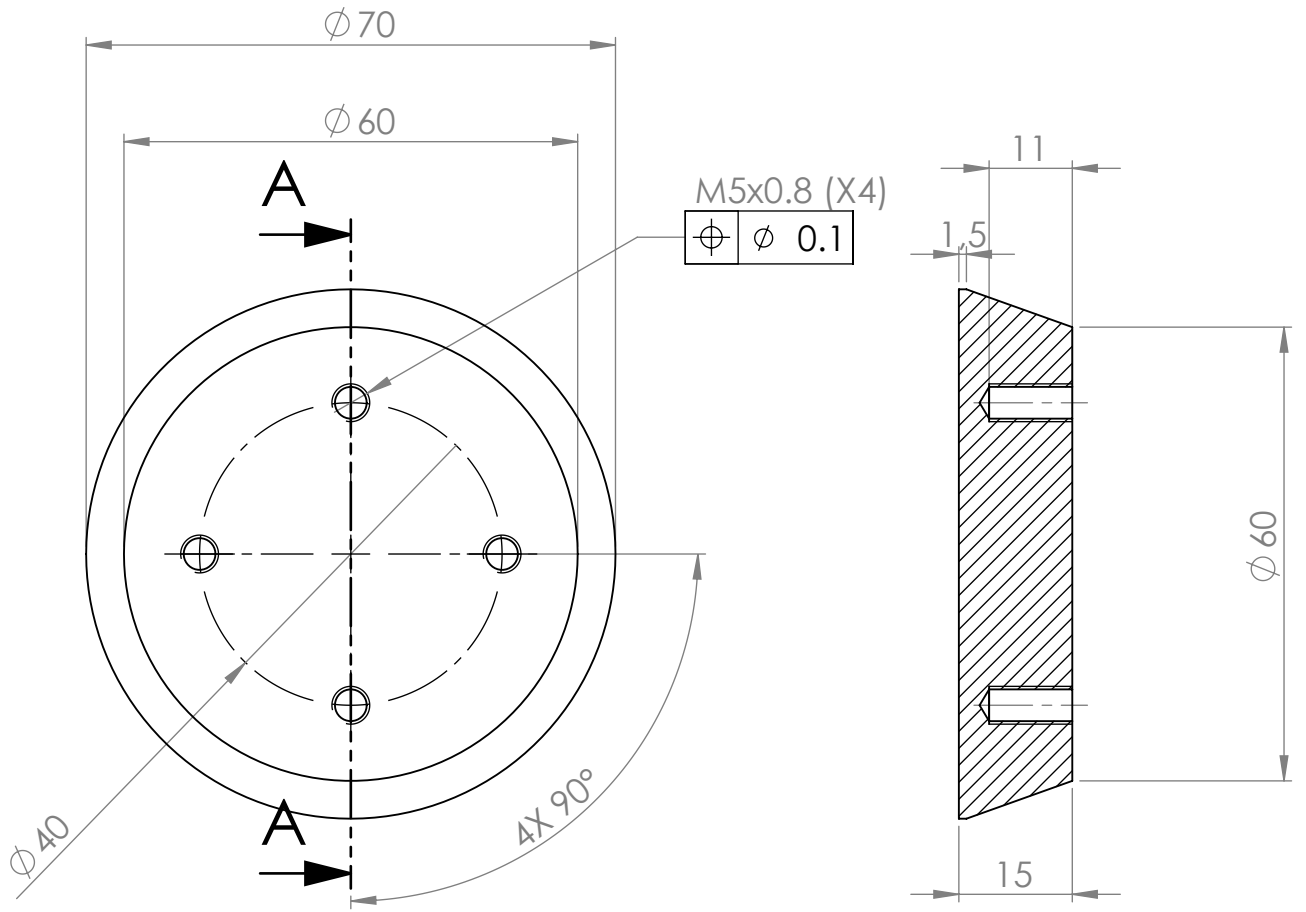
DWG NO.

DTM_e01

A4

SCALE:1:1

SHEET 1 OF 1



SECTION A-A

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
 SURFACE FINISH:
 TOLERANCES: ISO 2768-mk
 LINEAR:
 ANGULAR:

FINISH:

DEBUR AND
 BREAK SHARP
 EDGES

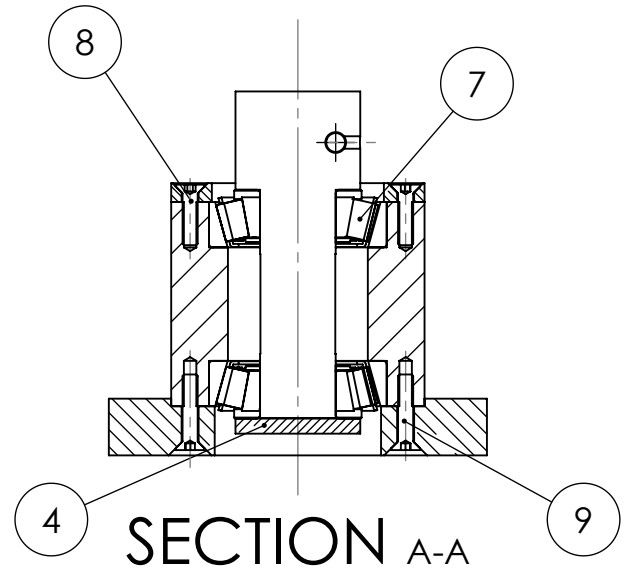
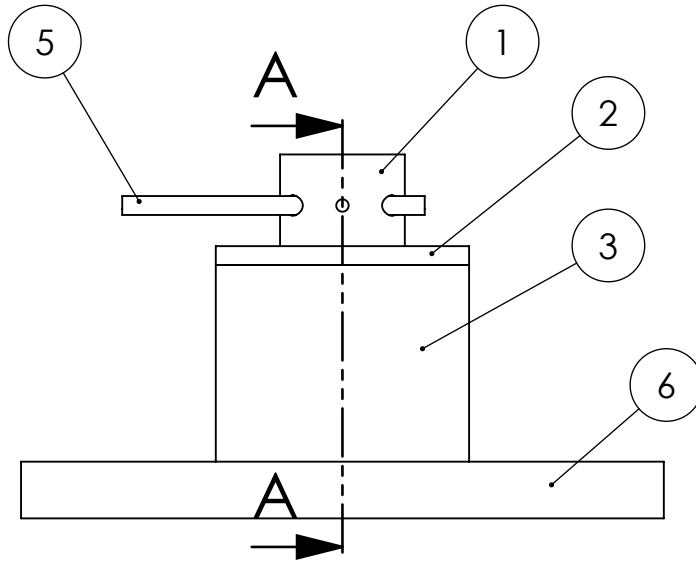
DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

1

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN	Apostolakis		7/3/2018		
CHK'D	Vasileiou				
APPV'D	Spitas				
MFG					
Q.A				MATERIAL:	Teflon
				WEIGHT:	57.73 gr

TITLE:		teflon plug	
DWG NO.	DTM_e02	A4	
SCALE: 1:1	SHEET 1 OF 1		



ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	DTM_h_01	main shaft	1
2	DTM_h_02	h top flange	1
3	DTM_h_03	h housing	1
4	DTM_h_04	h bottom flange	1
5	DTM_h_05	pin	1
6	DTM_h_06	base	1
7	DTM_h_07	skf 9 & 12 30204 J2_Q	2
8	DTM_h_08	DIN 7991 - M4 x 16 --- 16N	4
9	DTM_h_09	DIN 7991 - M4 x 20 --- 20N	4

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
 SURFACE FINISH:
 TOLERANCES: ISO 2768-mk
 LINEAR:
 ANGULAR:

FINISH:

DEBUR AND
 BREAK SHARP
 EDGES

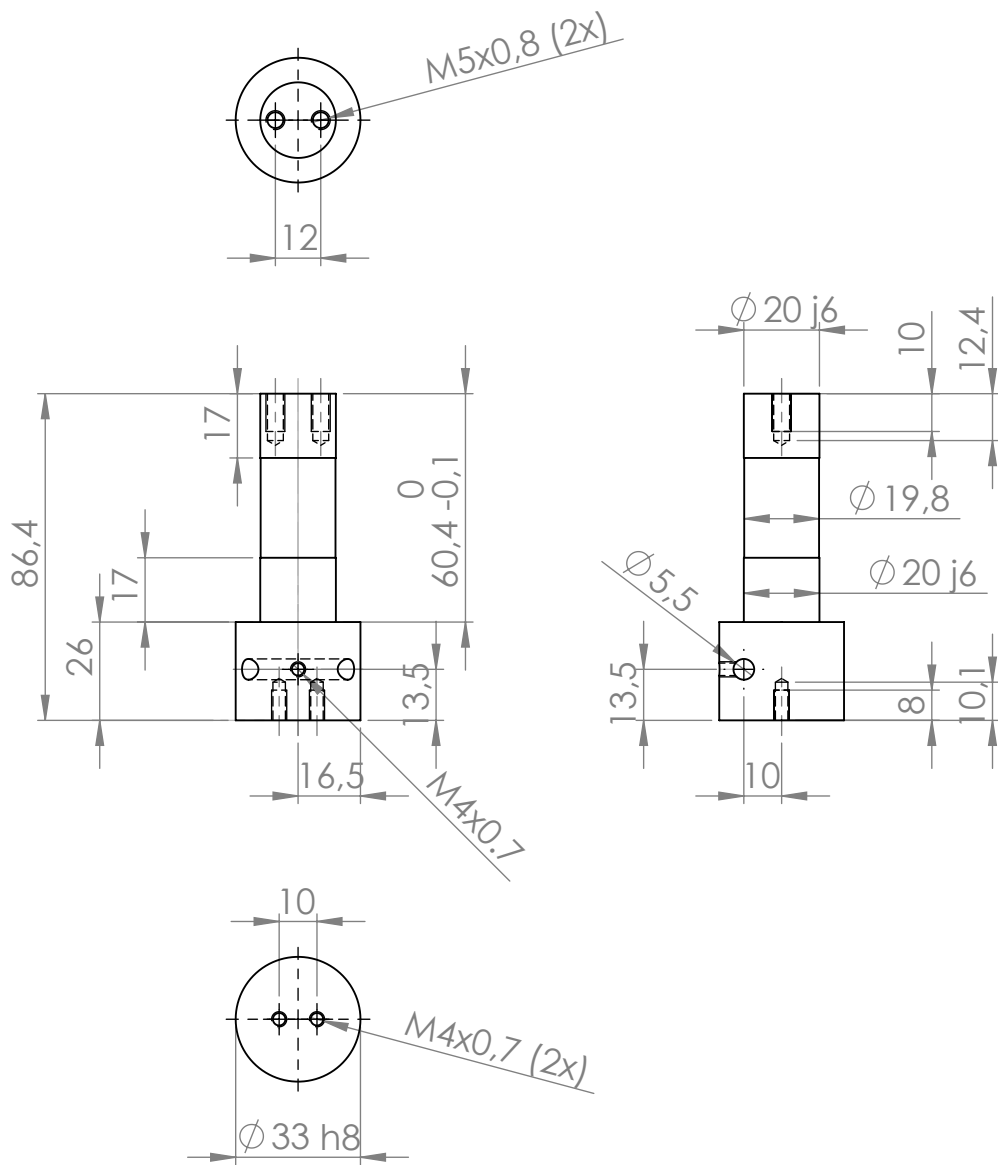
DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

1

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN	Apostolakis		7/3/2018		
CHK'D	Vasileiou				
APPV'D	Spitas				
MFG					
Q.A				MATERIAL:	
				WEIGHT: 1199.22 gr	

TITLE:		<h1>ASSEMBLY PART H</h1>	
DWG NO.			
<h2>DTM_h</h2>		A4	
SCALE:1:2		SHEET 1 OF 1	



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES: ISO 2768-mk
LINEAR:
ANGULAR:

FINISH:

DEBUR AND
BREAK SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

1

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN	Apostolakis		7/3/2018		
CHK'D	Vasileiou				
APPV'D	Spitas				
MFG					
Q.A				MATERIAL:	
				S235	
				WEIGHT: 310.93 gr	

TITLE:

MAIN SHAFT

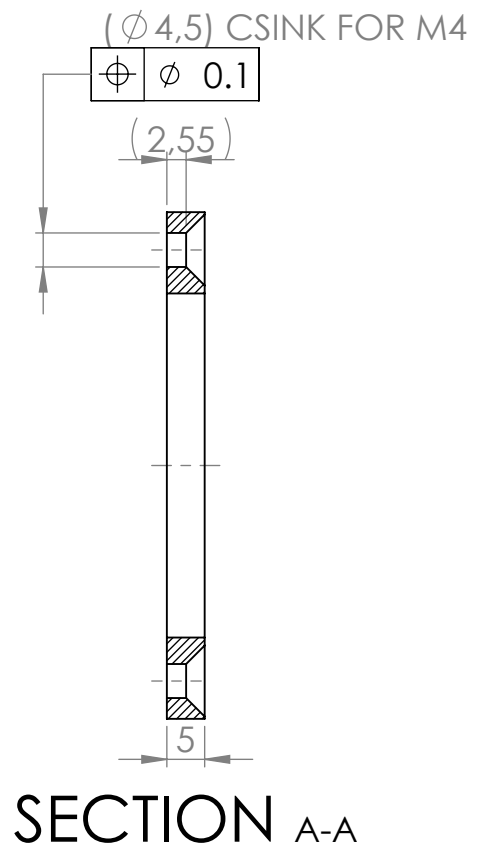
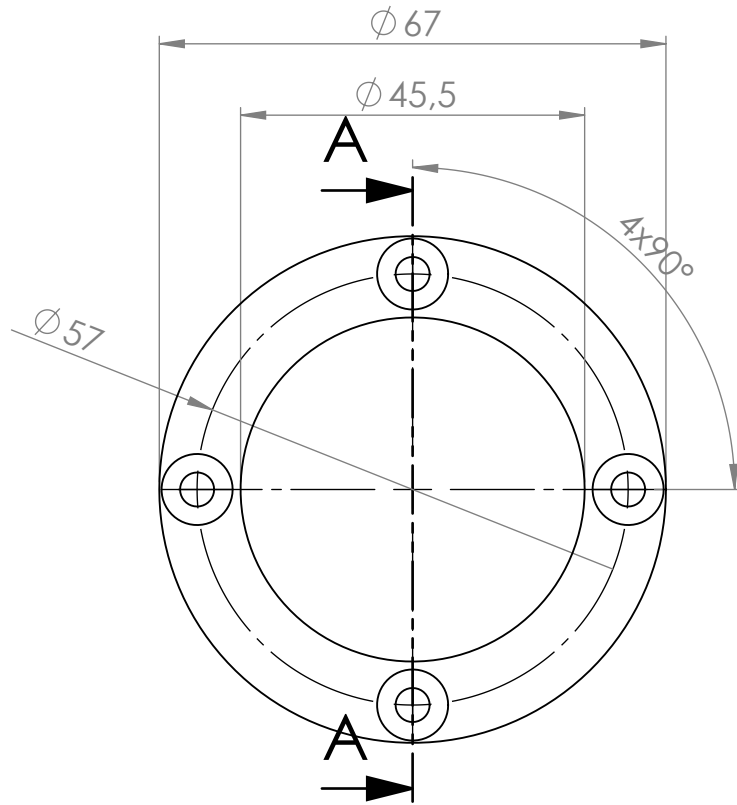
DWG NO.

DTM_h_01

A4

SCALE:1:2

SHEET 1 OF 1



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES: ISO 2768-mk
LINEAR:
ANGULAR:

FINISH:

DEBUR AND
BREAK SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

1

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN	Apostolakis		7/3/2018		
CHK'D	Vasileiou				
APPV'D	Spitas				
MFG					
Q.A				MATERIAL:	
					AL 6062
				WEIGHT:	24.16 gr

TITLE:

h top flange

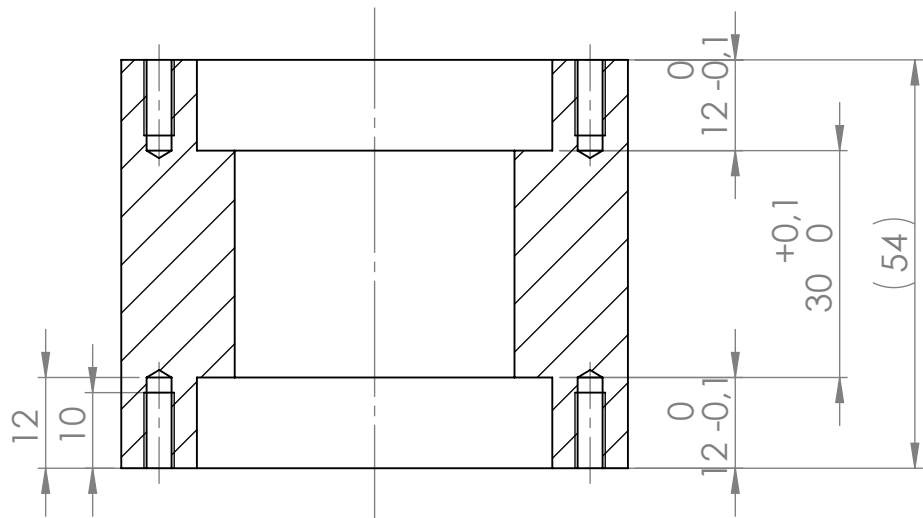
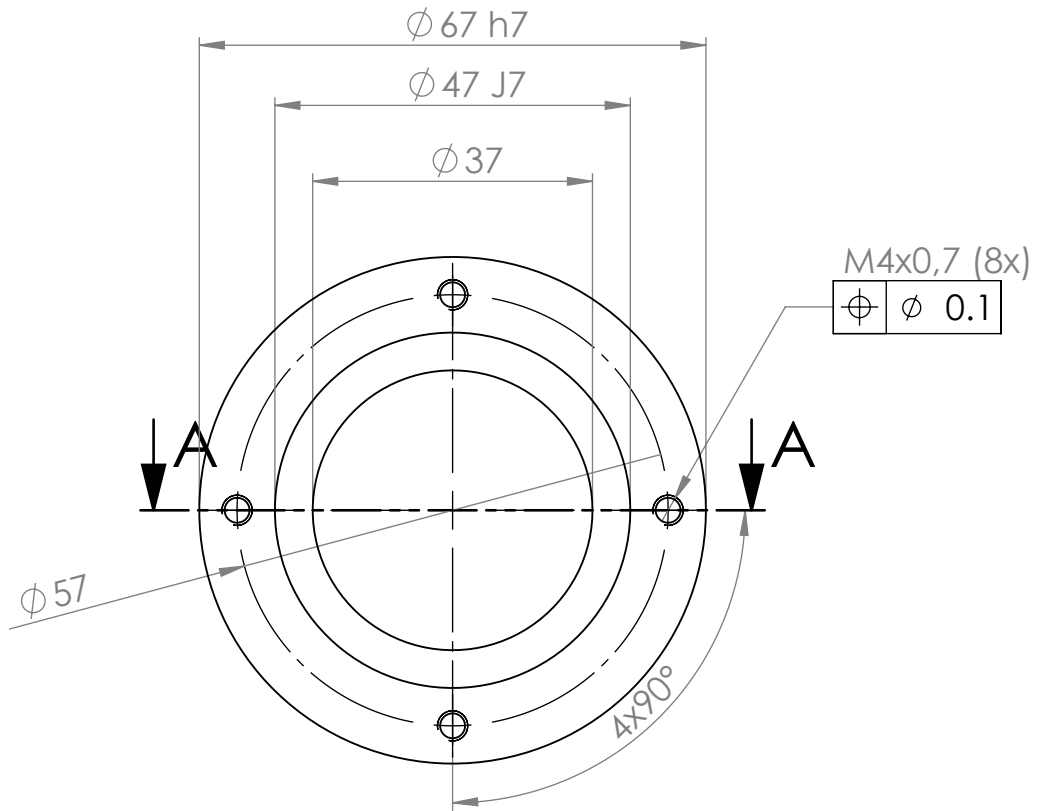
DWG NO.

DTM_h_02

A4

SCALE:1:1

SHEET 1 OF 1



SECTION A-A
SCALE 1 : 1

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES: ISO 2768-mk
LINEAR:
ANGULAR:

FINISH:

DEBUR AND
BREAK SHARP
EDGES

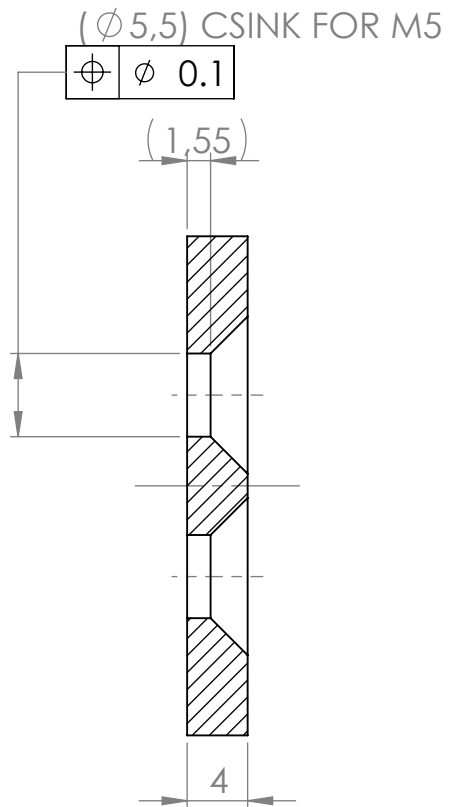
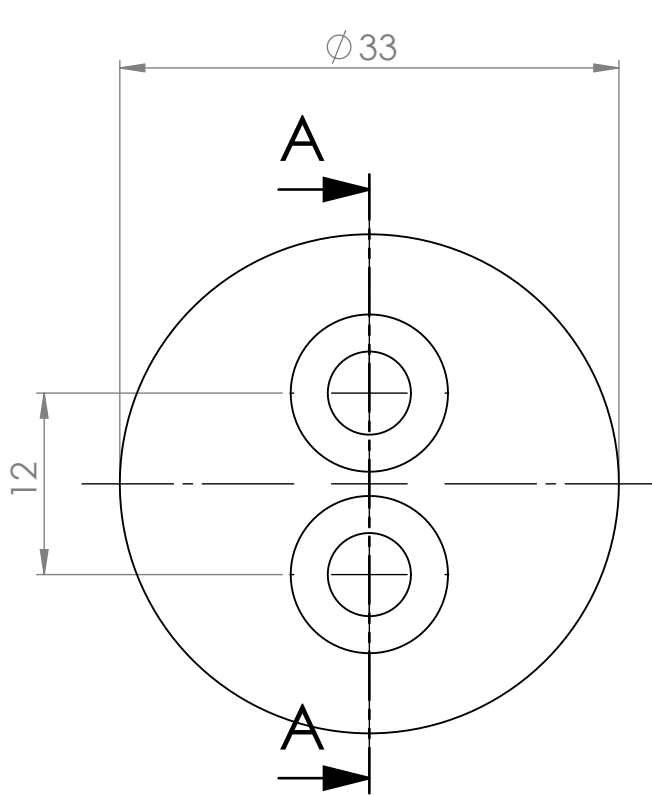
DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

1

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN	Apostolakis		7/3/2018		
CHK'D	Vasileiou				
APPV'D	Spitas				
MFG					
Q.A					
				MATERIAL:	
				AL 6062	
				WEIGHT: 312.25 gr	

TITLE:		h housing	
DWG NO.	DTM_h_03	A4	
SCALE: 1:1	SHEET 1 OF 1		



SECTION A-A

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
 SURFACE FINISH:
 TOLERANCES: ISO 2768-mk
 LINEAR:
 ANGULAR:

FINISH:

DEBUR AND
 BREAK SHARP
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

1

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN	Apostolakis		7/3/2018		
CHK'D	Vasileiou				
APPV'D	Spitas				
MFG					
Q.A				MATERIAL:	
					AL 6062
				WEIGHT:	8.36 gr

TITLE:

h bottom flange

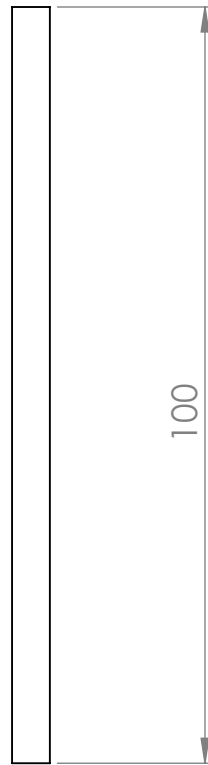
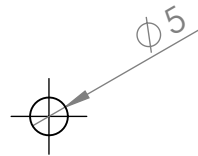
DWG NO.

DTM_h_04

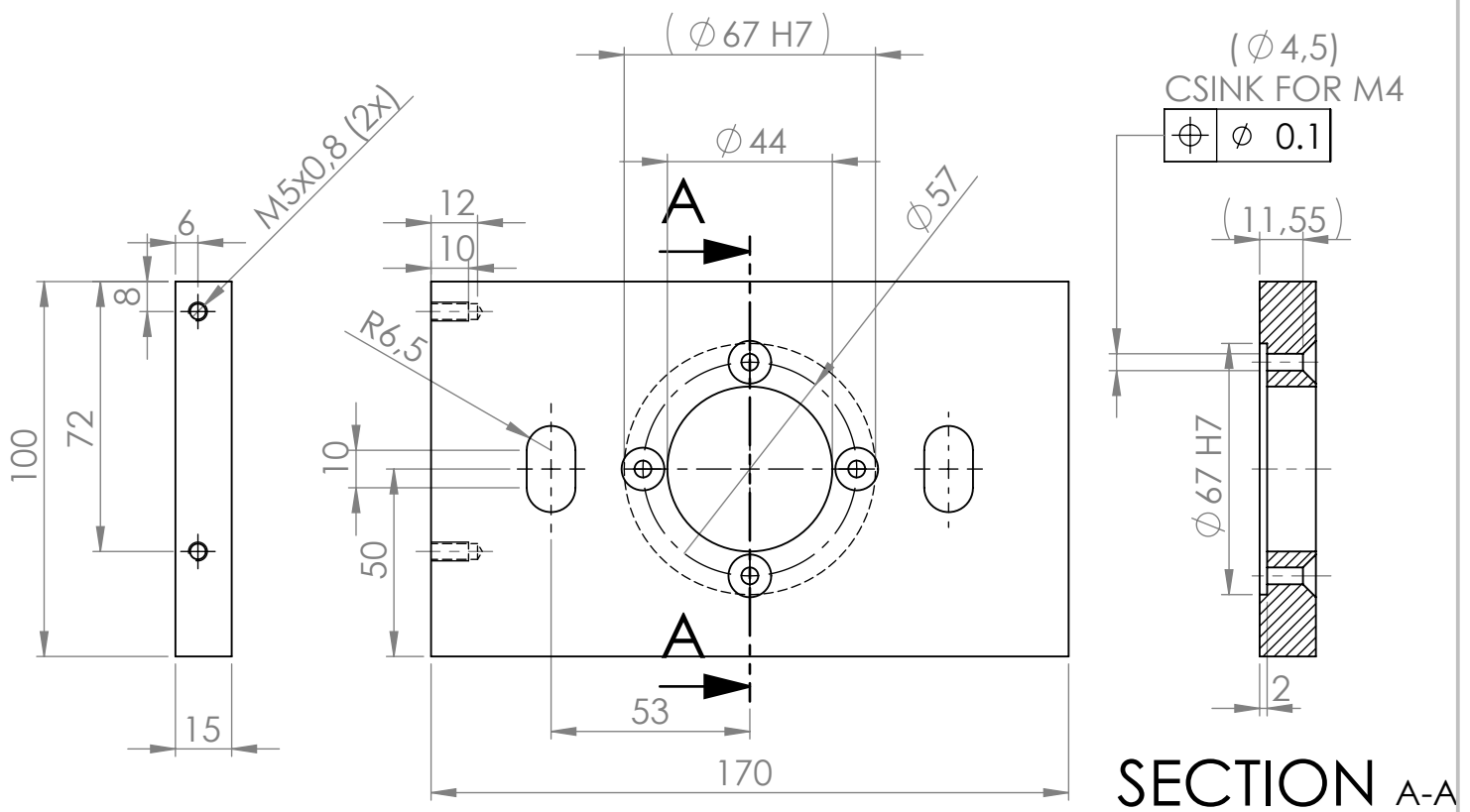
A4

SCALE:2:1

SHEET 1 OF 1



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: ISO 2768-mk LINEAR: ANGULAR:				FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION 1			
								TITLE: pin					
DRAWN		Apostolakis		SIGNATURE		DATE						7/3/2018	
CHK'D		Vasileiou											
APPV'D		Spitas											
MFG													
Q.A				MATERIAL: AL				DWG NO.		DTM_h_05		A4	
				WEIGHT: 4.24 gr				SCALE:1:1		SHEET 1 OF 1			



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
 SURFACE FINISH:
 TOLERANCES: ISO 2768-mk
 LINEAR:
 ANGULAR:

FINISH:

DEBUR AND
 BREAK SHARP
 EDGES

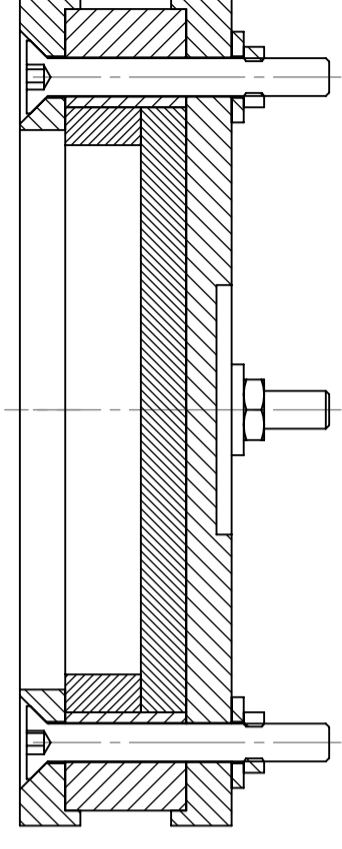
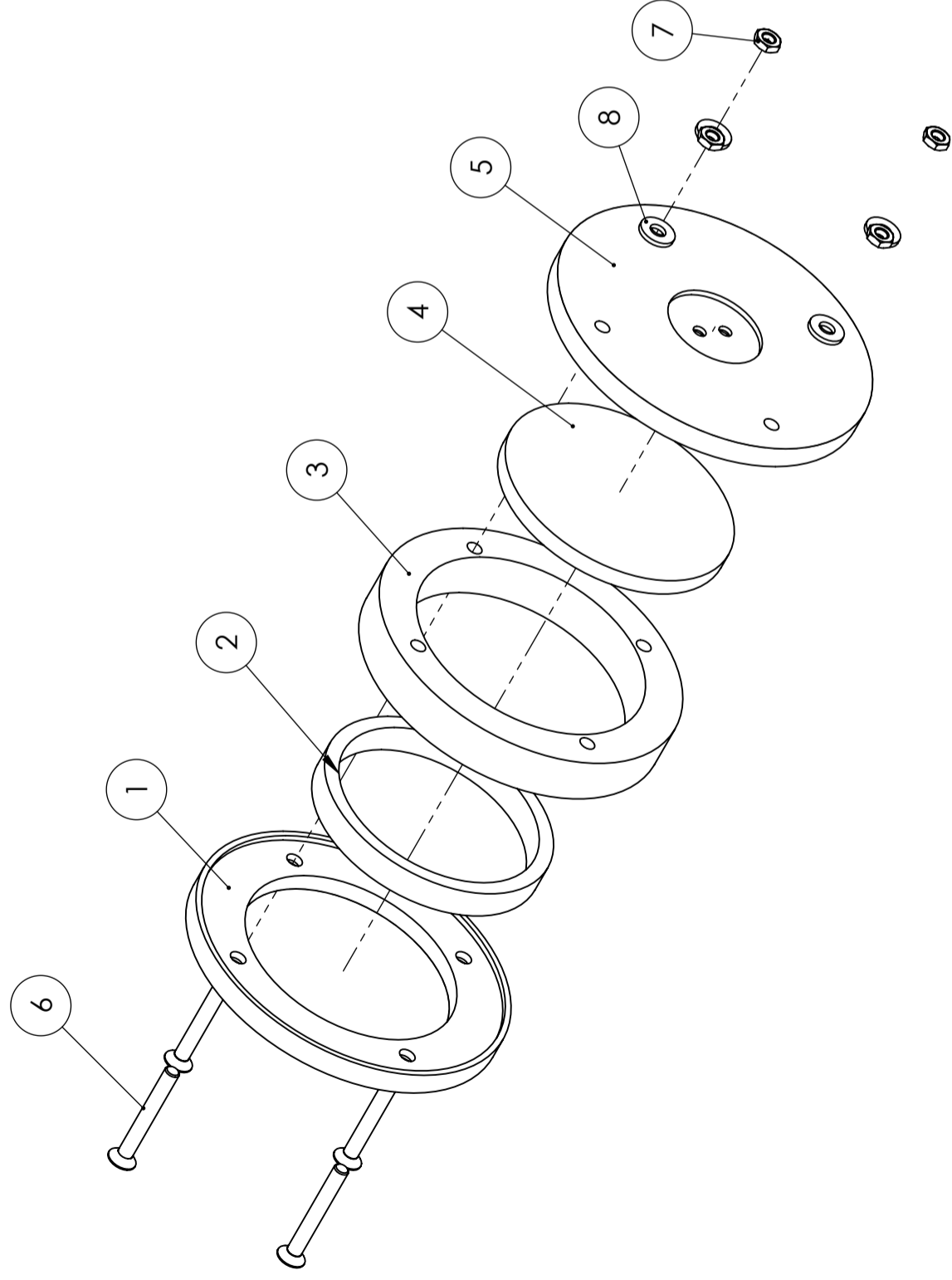
DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

1

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN	Apostolakis		7/3/2018		
CHK'D	Vasileiou				
APPV'D	Spitas				
MFG					
Q.A					
				MATERIAL:	
					AL 6062
				WEIGHT:	505.54 gr

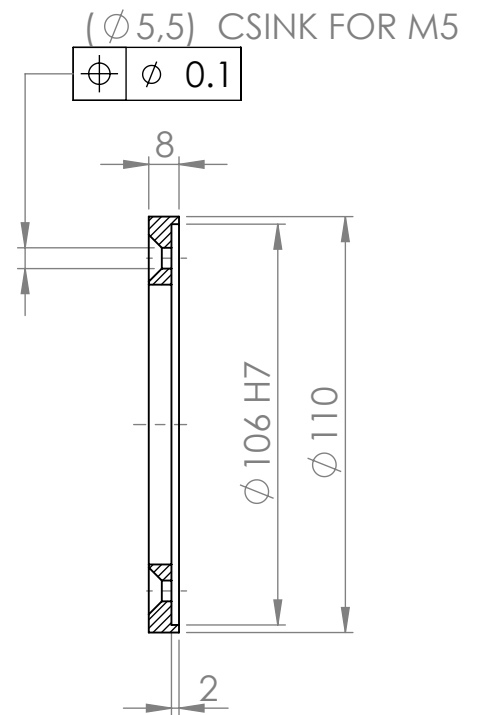
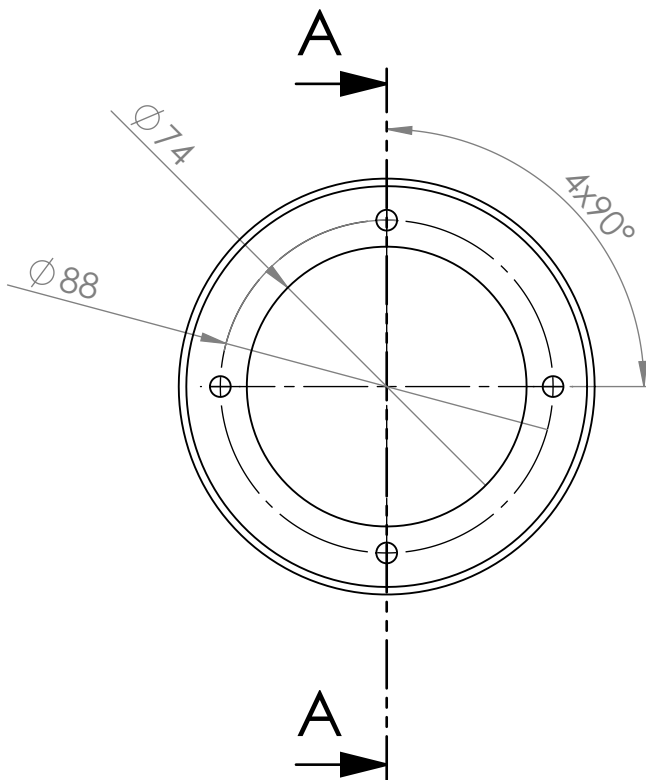
TITLE:		DWG NO.	
base			
DTM_h_06			A4
SCALE: 1:2		SHEET 1 OF 1	



SECTION A-A
SCALE 1:1

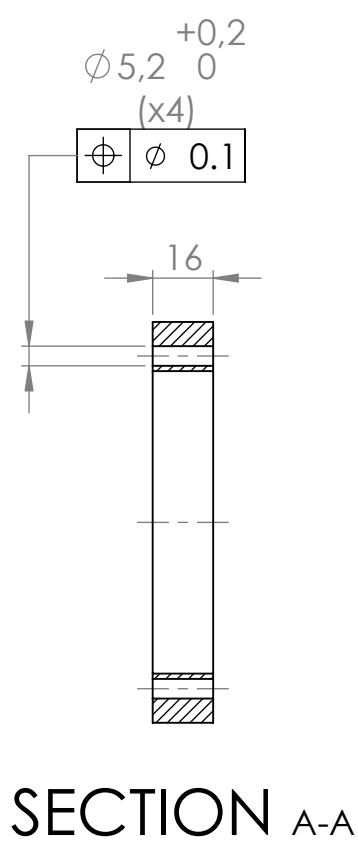
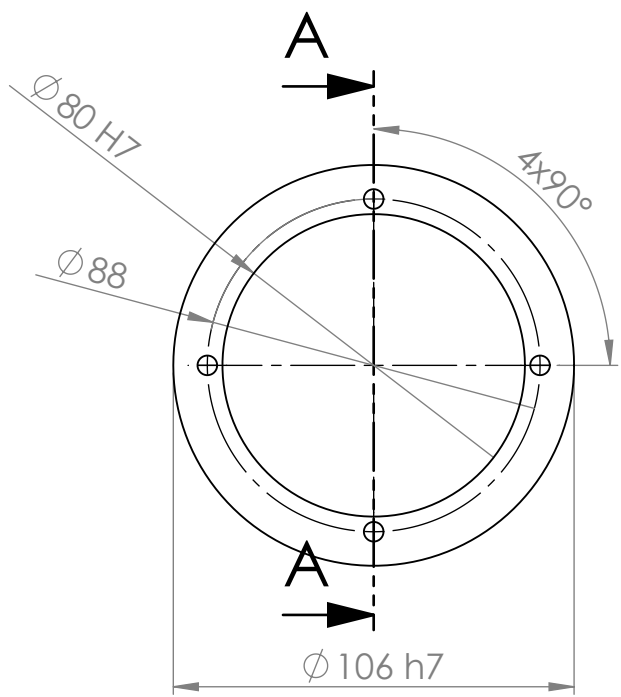
ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	DTM_k_01	k top flange	1
2	DTM_k_04	surrounding teflon	1
3	DTM_k_02	k housing	1
4	DTM_k_05	bottom teflon	1
5	DTM_k_03	k base	1
6	DTM_k_06	DIN 7991 - M5 x 40 --- 16N	4
7	DTM_k_07	Hexagon Thin Nut ISO 4035 - M5 - N	4
8	DTM_k_08	DIN 6902-A5.5	4

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISH:	
SURFACE FINISH: ISO 2768-mk		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES	
TOLERANCES: ISO 2768-mk		DO NOT SCALE DRAWING	
LINEAR:		REVISION 1	
ANGULAR:			
NAME	SIGNATURE	DATE	TITLE:
DRAWN Apostolakis		7/3/2018	ASSEMBLY PART K
CHK'D Vasileiou			
APP'VD Spitas			
MFG			
Q.A			
MATERIAL:		DWG NO.	A3
WEIGHT: 449.25 gr		SCALE:1:2	SHEET 1 OF 1

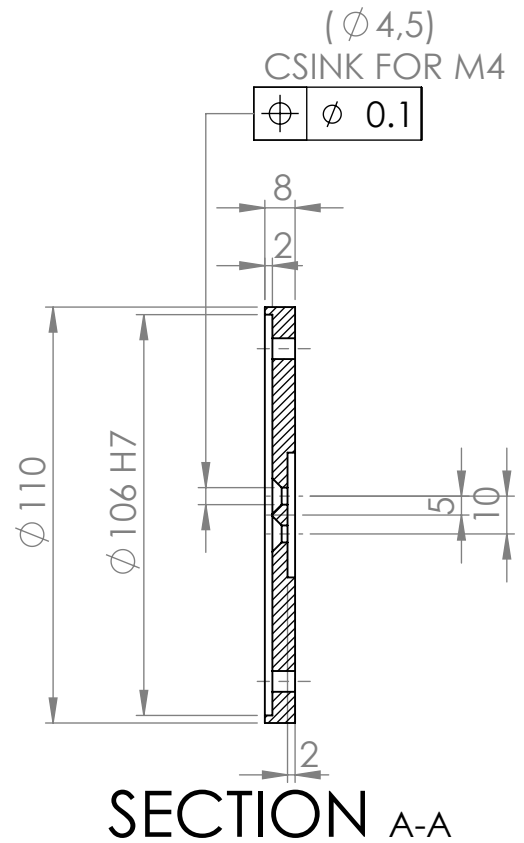
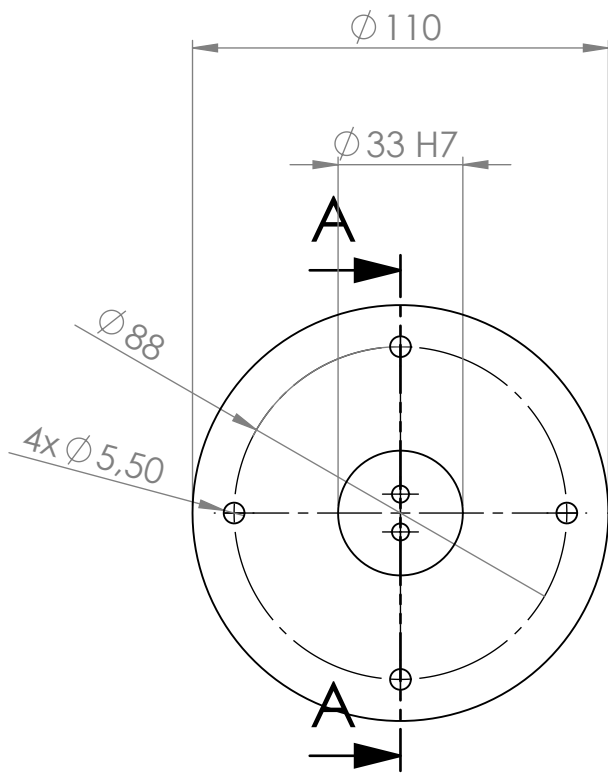


SECTION A-A

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: ISO 2768-mk LINEAR: ANGULAR:				FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION 1			
								TITLE: K top flange					
DRAWN		Apostolakis		SIGNATURE		DATE						7/3/2018	
CHK'D		Vasileiou		SIGNATURE		DATE							
APPV'D		Spitas		SIGNATURE		DATE							
MFG				SIGNATURE		DATE							
Q.A				MATERIAL: AL 6062				DWG NO.		DTM_k_01		A4	
				WEIGHT: 84.83 gr				SCALE:1:2		SHEET 1 OF 1			



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: ISO 2768-mk LINEAR: ANGULAR:				FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION 1			
								TITLE: k housing					
DRAWN		Apostolakis		SIGNATURE		DATE						7/3/2018	
CHK'D		Vasileiou											
APPV'D		Spitas											
MFG													
Q.A				MATERIAL: AL 6062				DWG NO.		DTM_k_02			
				WEIGHT: 160.41 gr				SCALE:1:2		SHEET 1 OF 1			
										A4			



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
 SURFACE FINISH:
 TOLERANCES: ISO 2768-mk
 LINEAR:
 ANGULAR:

FINISH:

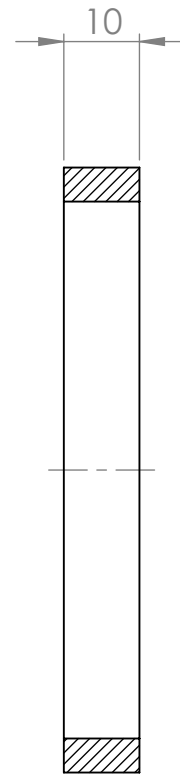
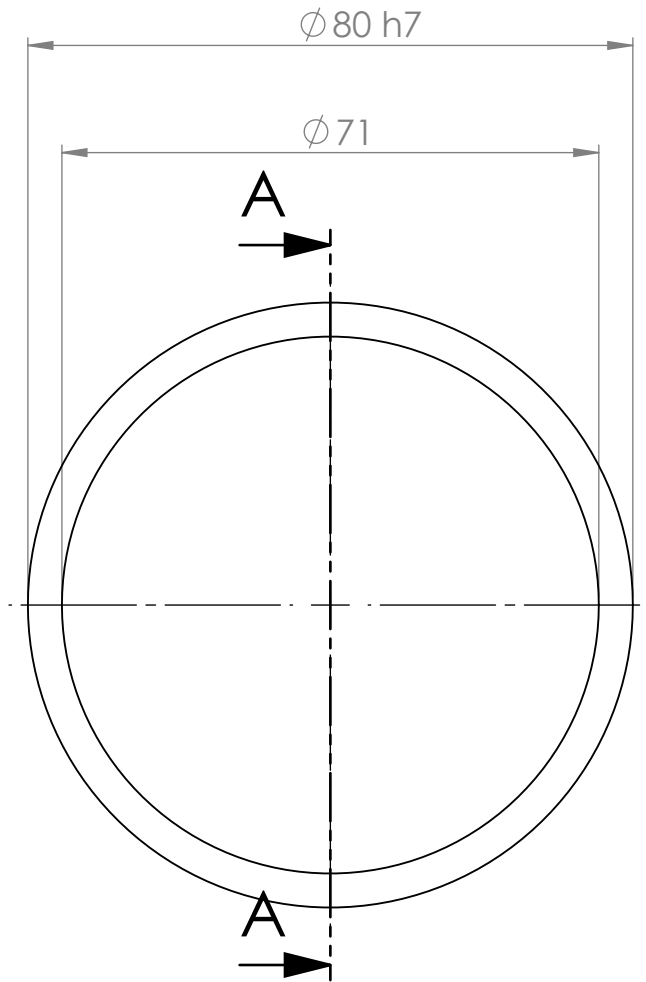
DEBUR AND
 BREAK SHARP
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION 1

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN	Apostolakis		7/3/2018		
CHK'D	Vasileiou				
APPV'D	Spitas				
MFG					
Q.A				MATERIAL:	
					AL 6062
				WEIGHT:	150.8 gr

TITLE:		<h1>k base</h1>	
DWG NO.		<h2>DTM_k_03</h2>	
SCALE: 1:2		A4	
SHEET 1 OF 1			



SECTION A-A

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES: ISO 2768-mk
LINEAR:
ANGULAR:

FINISH:

DEBUR AND
BREAK SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION 1

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN	Apostolakis		7/3/2018		
CHK'D	Vasileiou				
APPV'D	Spitas				
MFG					
Q.A				MATERIAL:	
				Teflon	
				WEIGHT: 13.67 gr	

TITLE:

surrounding teflon

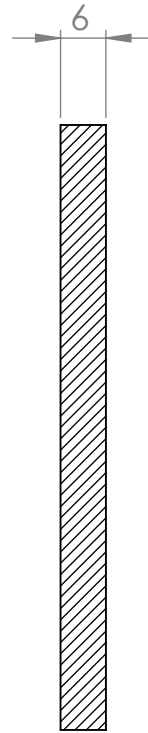
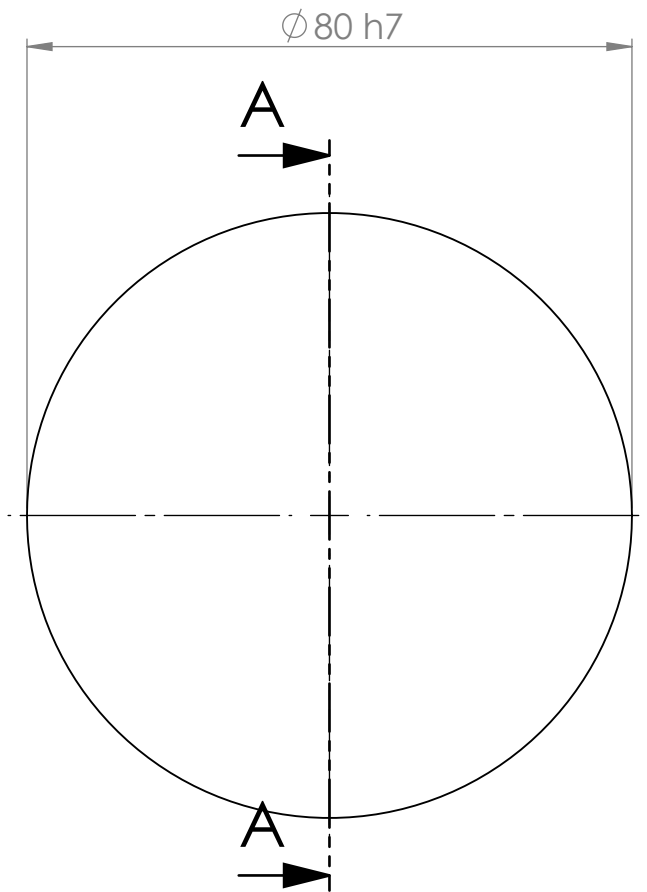
DWG NO.

DTM_k_04

A4

SCALE:1:1

SHEET 1 OF 1



SECTION A-A

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
 SURFACE FINISH:
 TOLERANCES: ISO 2768-mk
 LINEAR:
 ANGULAR:

FINISH:

DEBUR AND
 BREAK SHARP
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION 1

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN	Apostolakis		7/3/2018		
CHK'D	Vasileiou				
APPV'D	Spitas				
MFG					
Q.A				MATERIAL:	
				Teflon	
				WEIGHT: 34.98 gr	

TITLE:

bottom teflon

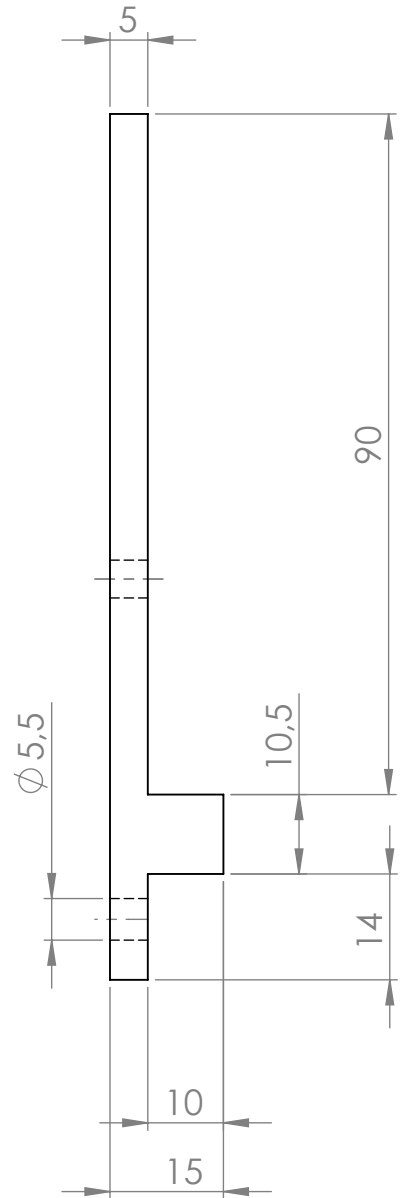
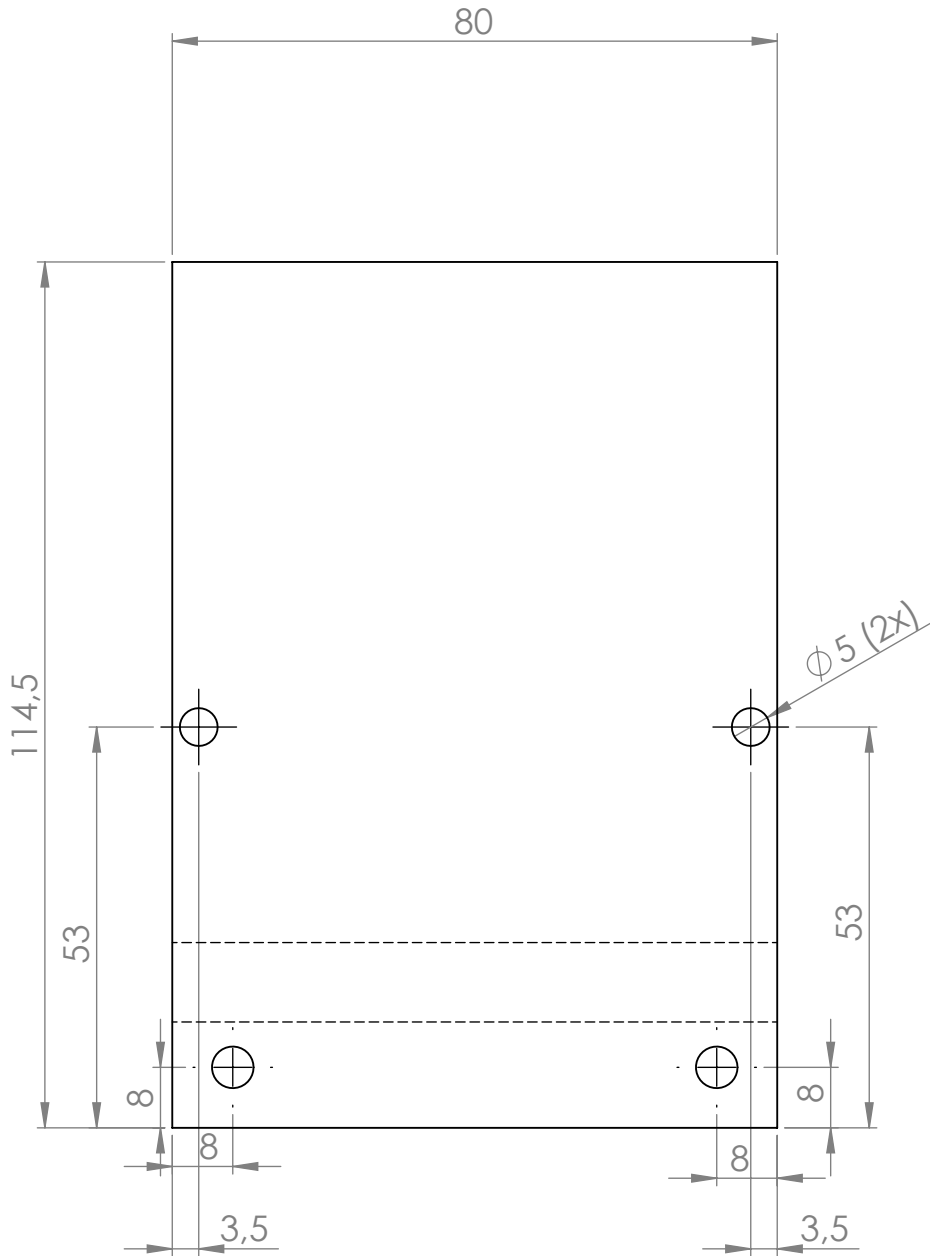
DWG NO.

DTM_k_05

A4

SCALE:1:1

SHEET 1 OF 1



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES: ISO 2768-mk
LINEAR:
ANGULAR:

FINISH:

DEBUR AND
BREAK SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

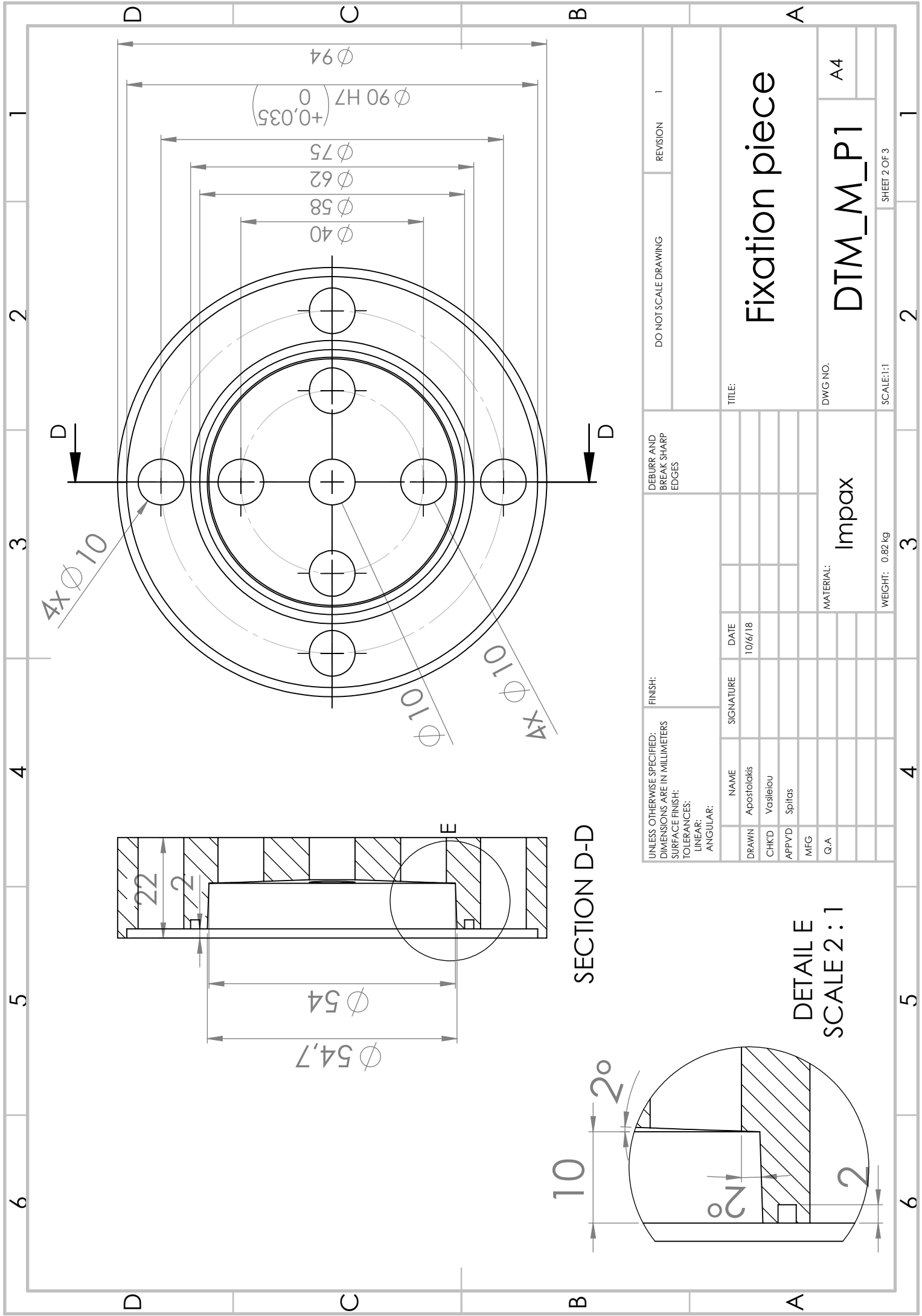
REVISION 1

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN	Apostolakis		7/3/2018		
CHK'D	Vasileiou				
APPV'D	Spitas				
MFG					
Q.A					
				MATERIAL:	
					AL6062
				WEIGHT:	145.77 gr

TITLE:	BACK PLATE	
DWG NO.		
		A4
SCALE:1:1	SHEET 1 OF 1	

Παράρτημα Γ

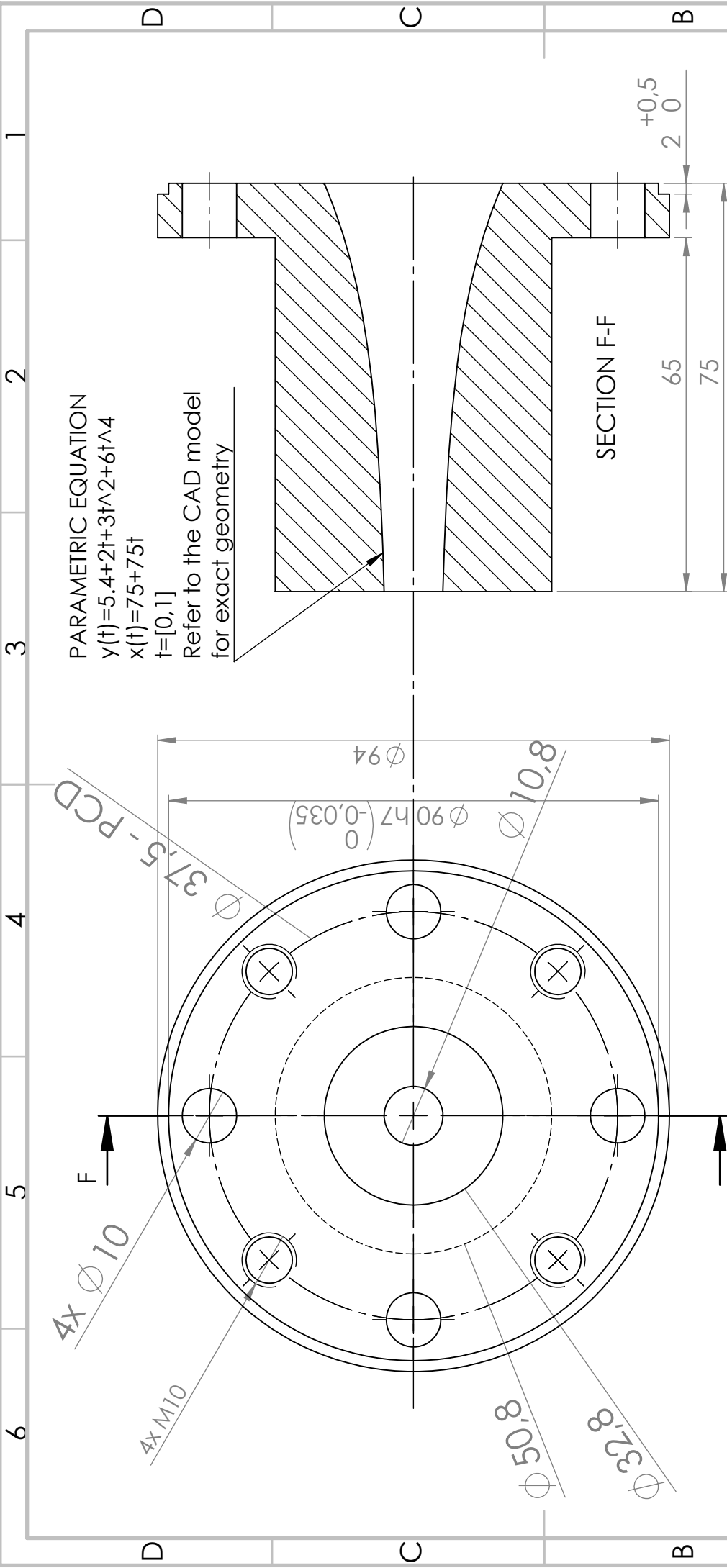
ΣΧΕΔΙΑ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION 1	
SURFACE FINISH:		ANGULAR:		MATERIAL: Impax		TITLE: Fixation piece		DWG NO. A4	
TOLERANCES:		LINEAR:		WEIGHT: 0.82 kg		SCALE: 1:1		SHEET 2 OF 3	
DRAWN		NAME		SIGNATURE		DATE			
CHK'D		Apostolidis				10/6/18			
APPV'D		Vasileiou							
MFG		Spiras							
Q/A									

SECTION D-D

DETAILE
SCALE 2 : 1



PARAMETRIC EQUATION
 $y(t) = 5.4 + 2t + 3t^2 + 6t^4$
 $x(t) = 75 + 75t$
 $t = [0, 1]$
 Refer to the CAD model
 for exact geometry

SECTION F-F

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISH:		DEBURRE AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION / 1	
SURFACE FINISH:		TOLERANCES:		NAME		SIGNATURE		DATE	
LINEAR:		ANGULAR:		DRAWN		CHK'D		APP'VD	
				MFG		Q.A			
				TITLE:		MATERIAL:		DWG NO.	
				Infusion piece		Impax		DTM_M_P2	
				WEIGHT: 1.36 kg		SCALE: 1:1		SHEET 3 OF 3	
								A4	

1 2 3 4 5 6

1 2 3 4 5 6

D

C

B

A

D

C

B

A