

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ
ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΖΥΓΟΥ ΕΞΙ ΣΥΝΙΣΤΩΣΩΝ ΓΙΑ ΤΙΣ
ΑΕΡΟΣΗΡΑΓΓΕΣ ΤΟΥ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ
ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ.

MODELING AND CONSTRUCTION OF A SIX
COMPONENT AERODYNAMIC BALANCE FOR THE
WIND-TUNNEL FACILITIES OF THE INDUSTRIAL
MEASUREMENT LABORATORY.

Αποστολίδης Κωνσταντίνος του Σώζων

A.M.: 27178

Επιβλέπων καθηγητής Λεκάκης Ιωάννης

ΠΕΙΡΑΙΑΣ 2020

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εστιάζει στη μοντελοποίηση και την κατασκευή ενός εσωτερικού αεροδυναμικού ζυγού έξι συνιστωσών με επιμηκυνσιόμετρα, για τις αεροσήραγγες του εργαστηρίου μετρήσεων τεχνικών μεγεθών. Γίνεται αναφορά στις αρχές λειτουργίας του ζυγού, στη θεωρία της αεροδυναμικής, τη λειτουργία των αεροσηράγγων και των επιμηκυνσιομέτρων. Στη συνέχεια γίνεται περιγραφή του μοντέλου και της εργασίας που βασίστηκε ο ζυγός, η αναπροσαρμογή του σχεδίου και η μελέτη αντοχής και ανάλυση των δυνάμεων και η επιλογή του υλικού για τη χρήση του στην αεροσήραγγα του εργαστηρίου. Έπειτα γίνεται η περιγραφή της κατασκευής και το φασεολόγιο. Τέλος, αναφέρονται τα συμπεράσματα και οι δυσκολίες που αντιμετωπίστηκαν κατά τη διάρκεια εκπόνησης της πτυχιακής εργασίας, καθώς και μελλοντικές εργασίες που αφορούν το ζυγό.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θέλω να ευχαριστήσω θερμά όλους όσους βοήθησαν στην ολοκλήρωση της παρούσας πτυχιακής εργασίας.

Ιδιαίτερα, ευχαριστώ τον επιβλέποντα καθηγητή μου Ιωάννη Λεκάκη για την υπομονή του και τη βοήθεια του καθ' όλη την διάρκεια της εργασίας.

Επίσης θέλω να ευχαριστήσω θερμά τον Άγγελο Ατσά και τον Θοδωρή Παπαδόπουλο για την καθοδήγησή τους και τις πολύτιμες συμβουλές τους.

Ευχαριστώ πολύ τον Αντώνη Καλύμνιο και το μηχανουργείο Κορφιάτης για την κατασκευή του ζυγού

Τέλος θέλω να ευχαριστήσω τους καθηγητές Ιωάννη Σιδέρη, Κάρμεν Μεντρέα και τον υποψήφιο διδάκτορα Δημήτρη Παπαγεωργίου για τις συμβουλές τους και τη βοήθεια τους.

Η πτυχιακή αυτή είναι αφιερωμένη στους γονείς μου.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	5
ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΟΙ ΖΥΓΟΙ	5
ΤΥΠΟΙ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΖΥΓΩΝ	5
ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ	7
ΕΠΙΜΗΚΥΝΣΙΟΜΕΤΡΑ	8
ΑΕΡΟΣΗΡΑΓΓΕΣ	9
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ.....	11
ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΖΥΓΟΥ	12
ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΖΥΓΟΥ	13
ΥΛΙΚΟ	14
ΜΕΛΕΤΗ ΑΝΤΟΧΗΣ.....	15
ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ.....	25
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	51
ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ.....	52
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	53
ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΑ ΣΧΕΔΙΑ ΖΥΓΟΥ.....	54

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η κατασκευή ενός οργάνου μέτρησης για τις αεροσήραγγες του εργαστηρίου, που θα μπορεί να μετρά τις αεροδυναμικές δυνάμεις μοντέλων σε κλίμακα, όπως αεροπλάνα, αυτοκίνητα, κτήρια, φτερωτές κ.α. Για αυτό το σκοπό επιλέχθηκε η κατασκευή ζυγού εσωτερικού τύπου με επιμηκυνσιόμετρα (strain gauges), με δυνατότητα μέτρησης έξι συνιστωσών των δυνάμεων και των ροπών, lift, drag, side, roll, pitch, yaw. Ο ζυγός βασίστηκε σε προ υπάρχων σχέδιο από μελέτη του W. Ford από το CalITech, το οποίο σχεδιάστηκε από την αρχή σε CAD αναλύθηκε σε πρόγραμμα FEA και κατασκευάστηκε σε μηχανουργείο.

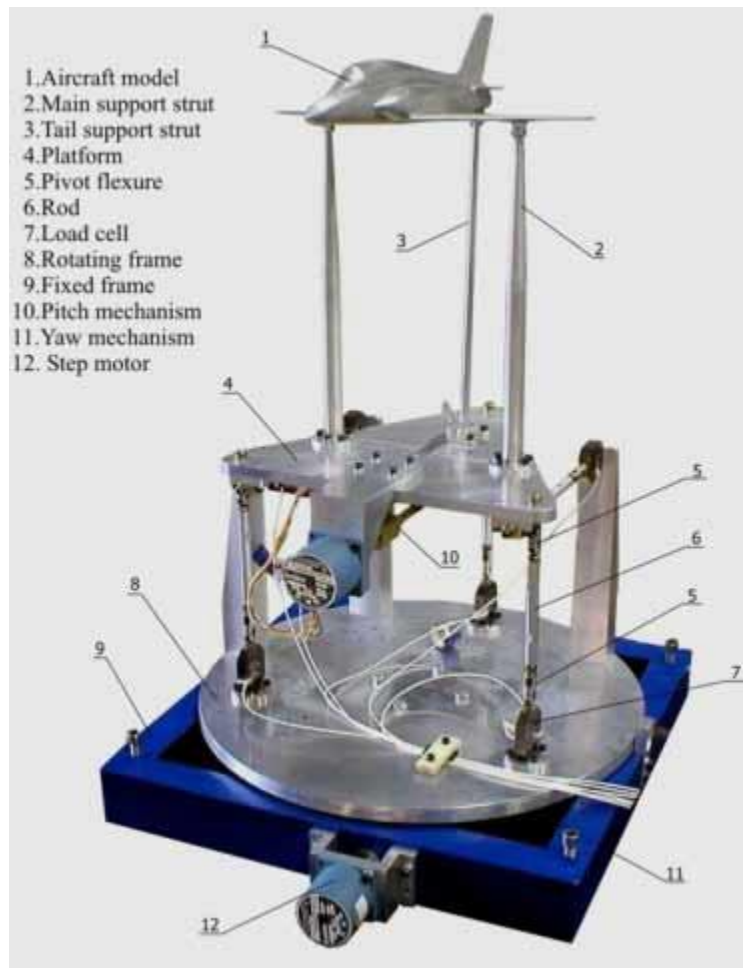
ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΟΙ ΖΥΓΟΙ

Οι αεροδυναμικοί ζυγοί είναι συστήματα μέτρησης δυνάμεων και ροπών. Χρησιμοποιούνται ευρέως σε αεροσήραγγες και παράγουν ακριβή αποτελέσματα σε σύντομο χρόνο. Έχουν μεγάλο εύρος μετρήσεων και γρήγορη απόκριση σε αλλαγές των φορτίων που ασκούνται σε αυτούς. Οι μετρήσεις αυτές είναι απαραίτητες για την αξιολόγηση των αεροδυναμικών χαρακτηριστικών των μοντέλων, όπως για παράδειγμα ενός αυτοκινήτου, ώστε να προσαρμοστεί ο σχεδιασμός τους. Αναλόγως με τη σχεδιάσή τους οι ζυγοί με επιμηκυνσιόμετρα μπορούν να μετρήσουν από μία έως έξι συνιστώσες. Όταν ασκείται δύναμη σε αυτά η παραμόρφωση που δημιουργείται έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή της ηλεκτρικής αντίστασής τους. Η μεταβολή αυτή της επιμήκυνσης μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα από τα επιμηκυνσιόμετρα που είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους σε γέφυρα Wheatstone. Το ηλεκτρικό σήμα είναι ανάλογο με τις δυνάμεις που ασκούνται στο μοντέλο. Με τον κατάλληλο σχεδιασμό και συνδεσμολογία των επιμηκυνσιομέτρων επιτυγχάνεται η ορθή μέτρηση χωρίς παρεμβολές μεταξύ τους, με το κάθε ένα στοιχείο να μετρά συγκεκριμένη συνιστώσα.

ΤΥΠΟΙ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΖΥΓΩΝ

Οι διάφοροι τύποι αεροδυναμικών ζυγών διακρίνονται από τον αριθμό των δυνάμεων και των ροπών που μπορούν να μετρήσουν ταυτόχρονα και από την τοποθέτησή τους στην αεροσήραγγα.

- Εξωτερικού τύπου: η τοποθέτησή τους γίνεται έξω από το μοντέλο η και την αεροσήραγγα. Η κατασκευή τους μπορεί να αποτελείται από ένα μόνο κομμάτι υλικού εξοπλισμένο με επιμηκυνσιόμετρα ή από μεταλλικό σκελετό με χρήση δυναμοκυψελών (load shells) στη βάση του, όπου και η μέτρηση λαμβάνεται. Οι δυνάμεις στο μοντέλο μεταδίδονται στη βάση σαν κύματα τάσης (stress waves). Καταλαμβάνουν αρκετό χώρο στην αεροσήραγγα και αυτό έχει επίδραση στη ροή του αέρα. Δημιουργούνται αρκετές παρεμβολές από τις επιδράσεις των διαφορετικών φορτίων.
- Εσωτερικού τύπου: η τοποθέτησή τους γίνεται μέσα στο μοντέλο. Είναι κατασκευασμένοι από μια κατάλληλα διαμορφωμένη ράβδο όπου επάνω της τοποθετούνται επιμηκυνσιόμετρα. Η μέτρηση γίνεται μέσα στο μοντέλο με αποτέλεσμα να υπάρχει μικρότερη παρεμβολή από αυτή των εξωτερικών ζυγών.



Εικόνα 1: Εξωτερικός αεροδυναμικός ζυγός.



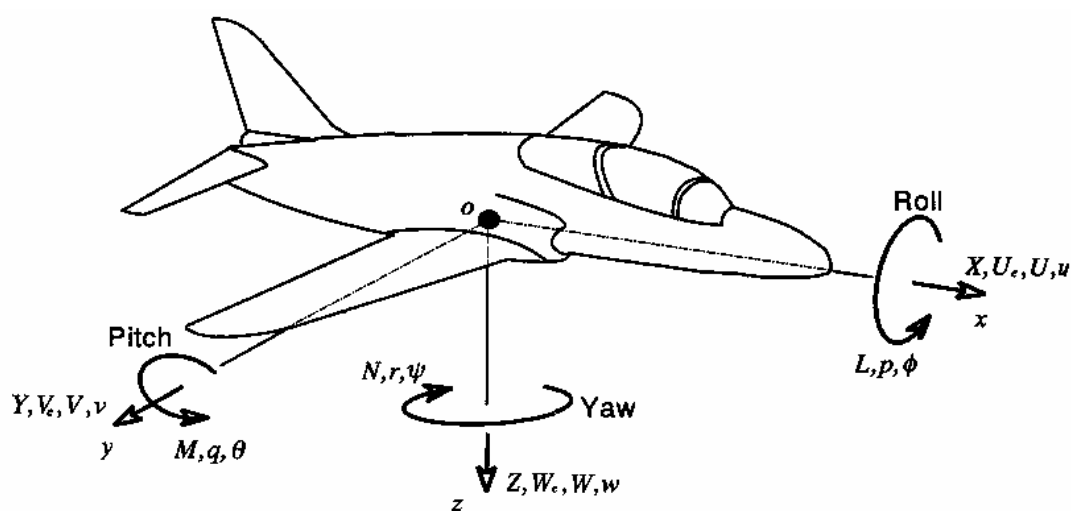
Εικόνα 2: Εσωτερικός αεροδυναμικός ζυγός.

ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ

Η αεροδυναμική περιγράφει την κίνηση των αερίων και τις δυνάμεις που ασκούνται σε ένα αντικείμενο σε κίνηση μέσα σε αυτά. Βασικό θεώρημα της αεροδυναμικής είναι το θεώρημα του Bernoulli το οποίο δηλώνει ότι, σε ένα οποιοδήποτε σημείο, μέσα σε έναν σωλήνα που ρέει ένα ρευστό, το άθροισμα της πίεσης, της δυναμικής και της κινητικής ενέργειας είναι σταθερό. Πειραματικά, σε ένα σωλήνα Venturi για να είναι η ποσότητα του αέρα στην είσοδο ίση με την ποσότητα του αέρα στην έξοδο, η ταχύτητα του αέρα θα αυξηθεί στη στένωση. Όσο η ταχύτητα αυξάνει ο αέρας πιέζει λιγότερο τα τοιχώματα του σωλήνα.

Οι συνιστώσες που ασκούνται σε ένα αντικείμενο που δέχεται μια ροή αέρα είναι οι εξής :

- Αξονική οπισθέλκουσα X (drag) και η αντίθετη της ώθηση (thrust)
- Πλάγια δύναμη Y (side)
- Κατακόρυφη άντωση Z (lift) και η αντίθετη της βάρους (weight)
- Ροπή διατοιχισμού L (roll)
- Ροπή πρόνευσης M (pitch)
- Ροπή εκτροπής N (yaw)



Εικόνα 3: Αεροδυναμικές συνιστώσες.

Η άντωση είναι η δύναμη που πρέπει να υπερτερεί του βάρους ενός αντικειμένου προκειμένου αυτό να πετάξει. Η μέγιστη άντωση είναι το ζητούμενο στη σχεδίαση των φτερών και των ελικών.

Η ώθηση είναι η δύναμη που κινεί ένα αντικείμενο σχετικά με το έδαφος και δημιουργεί την άντωση.

Η οπισθέλκουσα είναι η αντίσταση στην ώθηση και δημιουργείται από τη ροή του αέρα στην επιφάνεια του αντικειμένου.

Η πλάγια δύναμη είναι η κάθετη προς την άντωση και την οπισθέλκουσα.

Η ροπή διατοιχισμού είναι η ροπή που κάνει το αντικείμενο να στραφεί γύρω από τον άξονα της ώθησης.

Η ροπή πρόνευσης ασκείται στο επίπεδο που περιλαμβάνει την άντωση και την οπισθέλκουσα.

Η ροπή εκτροπής είναι η ροπή που κάνει το αντικείμενο να στραφεί γύρω από τον άξονα της άντωσης.

ΕΠΙΜΗΚΥΝΣΙΟΜΕΤΡΑ

Τα επιμηκυνσιόμετρα είναι αισθητήρες που μετράνε επιμήκυνση ή παραμόρφωση. Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στο ότι η αλλαγή στο μήκος ενός μεταλλικού αγωγού προκαλεί αλλαγή στην αντίστασή του.

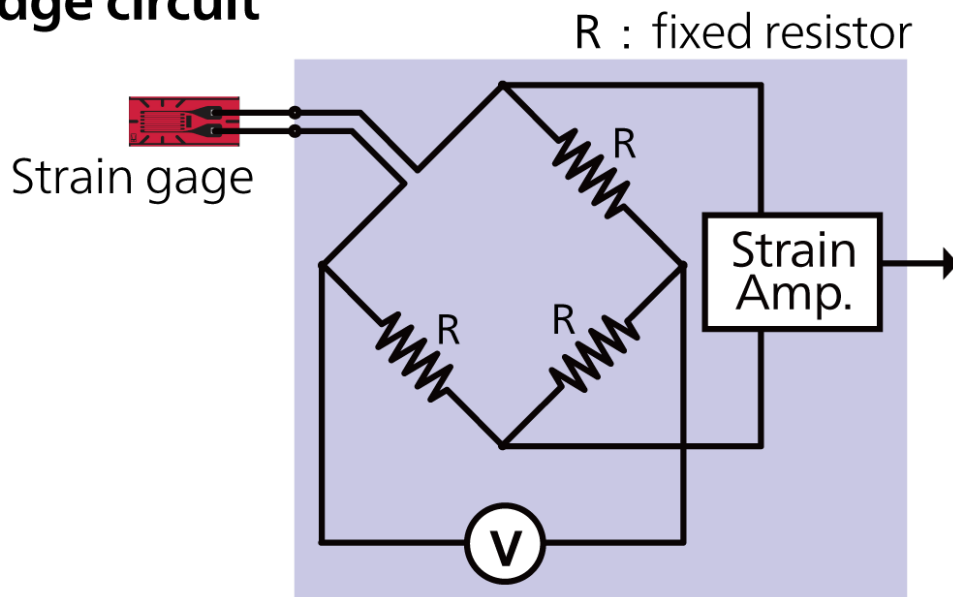
Η ηλεκτρική αντίσταση ενός αγωγού δίνεται από τον τύπο:

$$R = \frac{\rho l}{A},$$

όπου το R είναι η αντίσταση του αγωγού, l το μήκος του αγωγού, A η διατομή και ρ η ειδική αντίσταση.

Υπάρχουν διαφορετικοί τύποι επιμηκυνσιομέτρων όπως, μεταλλικά, ημιαγώγημα, φωτοηλεκτρικά. Η σύνδεση μεταξύ τους σε γέφυρα Wheatstone αυξάνει την ευαισθησία τους και επιτρέπει μικρές αλλαγές στο μήκος να μετρηθούν. Έχουν υψηλή ακρίβεια και δεν επηρεάζονται από τις αλλαγές της θερμοκρασίας. Έχουν μεγάλη διάρκεια λειτουργίας και συντηρούνται εύκολα. Η παραγωγή τους είναι εύκολη λόγω της απλής λειτουργίας τους και του μικρού αριθμού των εξαρτημάτων τους. Είναι κατάλληλα για μακροχρόνιες εγκαταστάσεις ωστόσο απαιτείται ειδική προσοχή κατά την τοποθέτησή τους. Χρησιμοποιούνται κυρίως για ελέγχους σε εφαρμογές αεροναυπηγικής, σε κατασκευές, στο σιδηρόδρομο, σε γέφυρες, φράγματα και κτήρια.

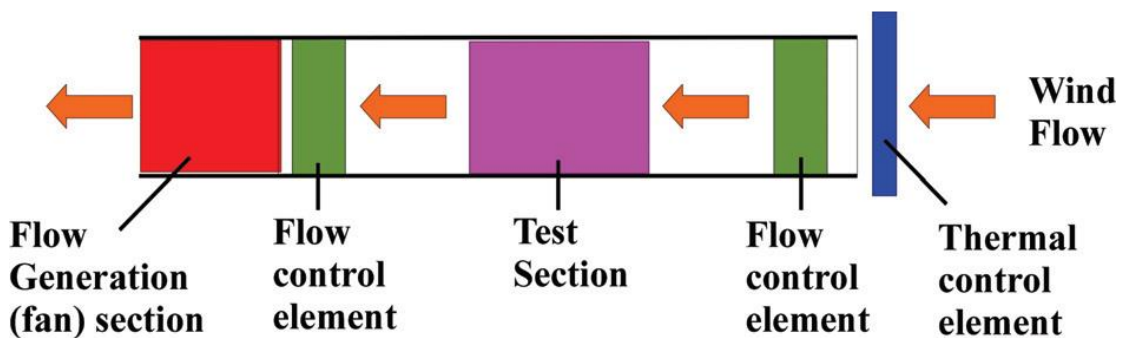
Bridge circuit



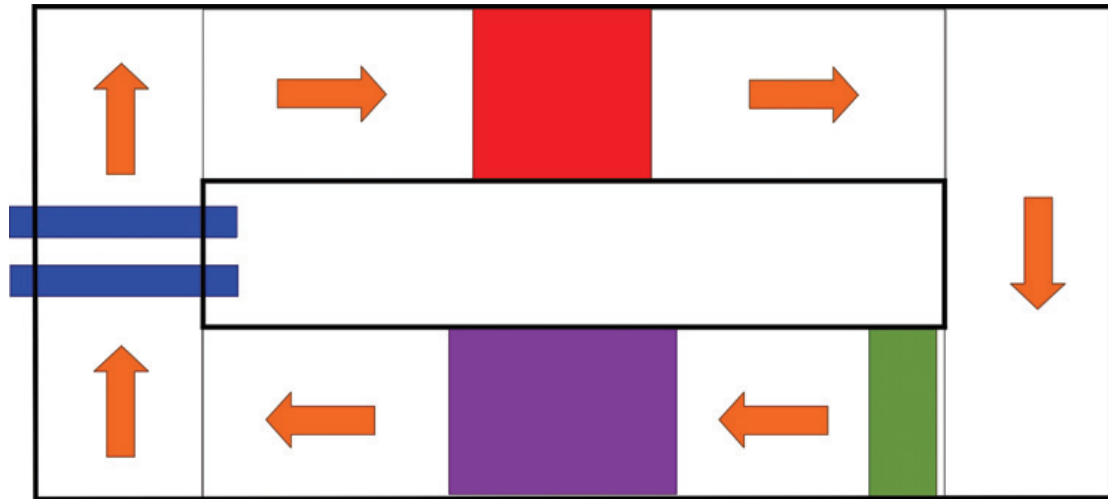
Εικόνα 4: Επιμηκυνσιόμετρο με γέφυρα Wheatstone.

ΑΕΡΟΣΗΡΑΓΓΕΣ

Οι αεροσήραγγες χρησιμοποιούνται εκτενώς στη βιομηχανία και σε εφαρμογές έρευνας. Ποικίλουν σε μέγεθος και σχήματα και μπορούν να τεστάρουν από μικρά αεροσκάφη μέχρι μικρά μοντέλα. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι αεροσήραγγων, οι κλειστού και οι ανοιχτού τύπου. Σε μια ανοιχτού τύπου αεροσήραγγα ο αέρας από το περιβάλλον εισέρχεται στην είσοδο και αποβάλλεται στην έξοδο, ενώ στη κλειστού τύπου ο αέρας στην έξοδο ανατροφοδοτείται στην είσοδο.



Εικόνα 5: Ανοιχτού τύπου αεροσήραγγα.



Εικόνα 6: Κλειστού τύπου αεροσήραγγα.

Οι αεροσήραγγες ανοικτού τύπου έχουν μικρό αρχικό κόστος αλλά μεγάλο λειτουργικό συγκρινόμενες με τις αεροσήραγγες κλειστού κυκλώματος μιας και δεν εκμεταλλεύονται την κινητική ενέργεια του αέρα που αποβάλλουν στον περιβάλλοντα χώρο. Είναι πιο θορυβώδεις αλλά δεν έχουν προβλήματα αύξησης της θερμοκρασίας. Τέλος είναι πιο πρακτικές για πραγματοποίηση πειραμάτων με χρήση καπνού για απεικόνιση της ροής εφόσον δεν απαιτούν καθαρισμό.

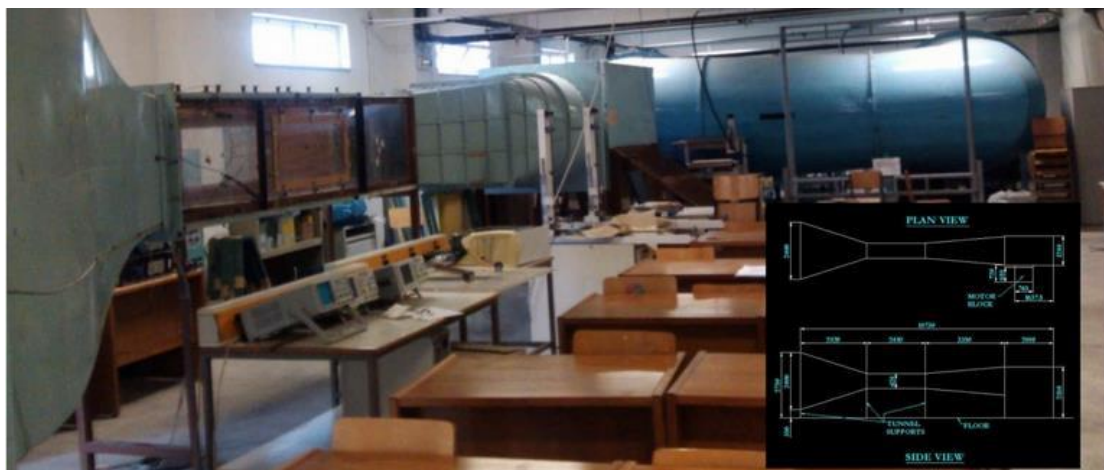
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ

Το εργαστήριο των μετρήσεων τεχνικών μεγεθών έχει εγκατεστημένες δύο αεροσήραγγες.

- αεροσήραγγα, κλειστού κυκλώματος ροής σε σχήμα 8 με δύο ανοικτά τμήματα δοκιμών ελλειπτικής διατομής $1.0\text{ m} \times 0.69\text{ m}$ και μέγιστης ταχύτητας 30 m/s
- αεροσήραγγα, ανοικτού κυκλώματος ροής με κλειστό τμήμα δοκιμών $0.61\text{ m} \times 0.61\text{ m} \times 2.4\text{ m}$ και μέγιστης ταχύτητας 30 m/s .



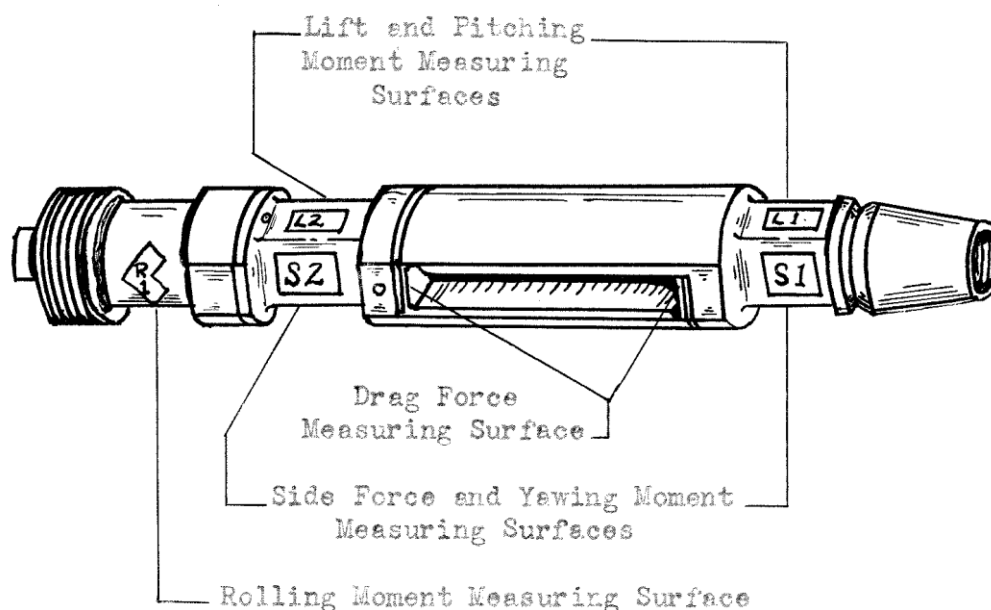
Εικόνα 7: Αεροσήραγγα κλειστού κυκλώματος ροής του εργαστηρίου.



Εικόνα 8: Αεροσήραγγα ανοικτού κυκλώματος ροής του εργαστηρίου.

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΖΥΓΟΥ

Για την πραγματοποίηση πειραμάτων στις αεροσήραγγες, επιλέχθηκε να κατασκευαστεί αεροδυναμικός ζυγός εσωτερικού τύπου βασισμένος στο σχέδιο από τη μελέτη του W. Ford, Design of a six component internal strain gage balance system (1949). Στην μελέτη του W. Ford ο ζυγός αποτελείται από δύο μέρη. Το μπροστινό μέρος, κατασκευασμένο από ανοξείδωτο χάλυβα θερμικά κατεργασμένο να αντέχει στα 150.000psi (1034MPa). Στην μια άκρη υπάρχει κωνικό τμήμα και οπή με σπείρωμα για την σύνδεση με το μοντέλο και στην άλλη άκρη σπείρωμα για την σύνδεση του με το πίσω μέρος. Δίπλα από τις άκρες υπάρχουν δύο παραλληλεπίπεδα τμήματα που τοποθετούνται τα επιμηκυνσιόμετρα για την άντωση, την πλάγια δύναμη και την ροπή πρόνευσης και εκτροπής. Στο κεντρικό τμήμα υπάρχει διαμερές άνοιγμα και στις άκρες του τοποθετούνται τα επιμηκυνσιόμετρα για την οπισθέλκουσα. Το πίσω μέρος του ζυγού είναι κατασκευασμένο από κράμα αλουμινίου 75 ST και έχει γίνει επεξεργασία ανοδίωσης. Στην μια άκρη του υπάρχει οπή με σπείρωμα για την σύνδεση του με το μπροστά μέρος του ζυγού και στο άλλο άκρο σπείρωμα για τη σύνδεση του ζυγού με βάση της αεροσήραγγας. Στο κεντρικό κυλινδρικό τμήμα τοποθετούνται τα επιμηκυνσιόμετρα για τη ροπή διατοιχισμού.



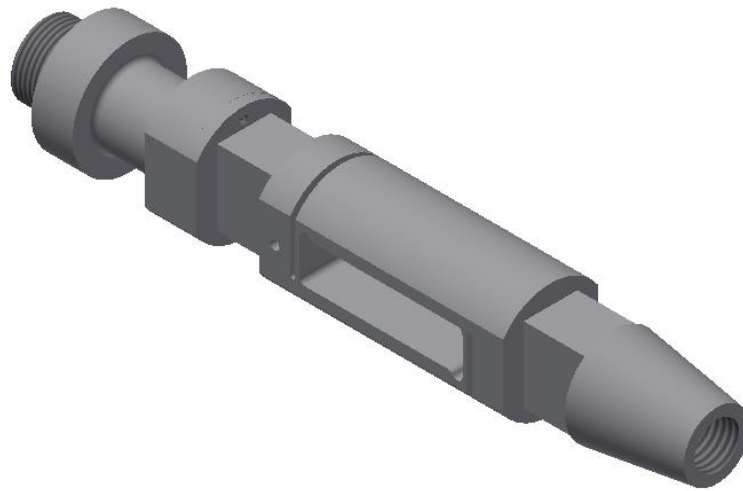
Εικόνα 9: Πρωτότυπο σκαρίφημα ζυγού με σημεία τοποθέτησης επιμηκυνσιομέτρων.

Ο ζυγός του W.Ford είναι σχεδιασμένος για τα παρακάτω φορτία που υπολογίστηκαν με την χρήση καμπυλών βαθμονόμησης :

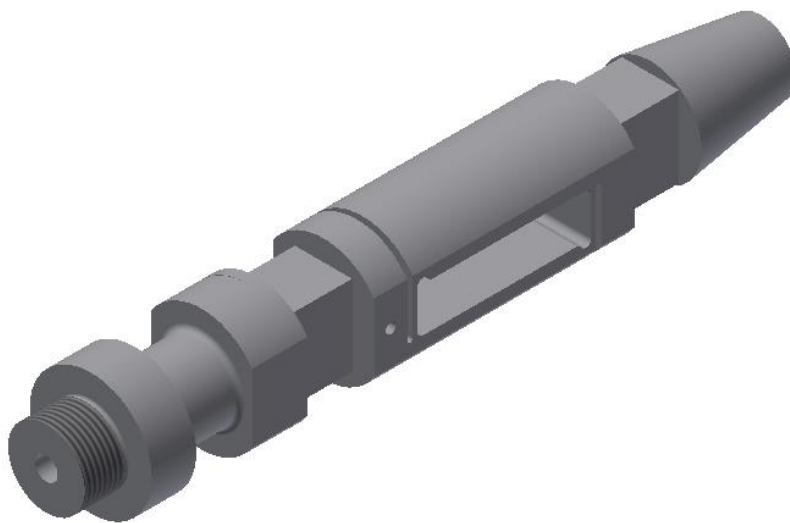
- | | | |
|---------------------|-------------|----------|
| - Άντωση | 300 lbs | (1350N) |
| - Οπισθέλκουσα | 75 lbs | (333N) |
| - Πλάγια δύναμη | 150 lbs | (667N) |
| - Ροπή πρόνευσης | 2000 in lbs | (226Nm) |
| - Ροπή διατοιχισμού | 200 in lbs | (22,6Nm) |
| - Ροπή εκτροπής | 1000 in lbs | (113Nm) |

ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΖΥΓΟΥ

Το πρώτο βήμα για την κατασκευή του ζυγού για το εργαστήριο ήταν να σχεδιαστεί τρισδιάστατο μοντέλο. Επιλέχθηκε το πρόγραμμα Autodesk Inventor 2018. Έγινε προσαρμογή των διαστάσεων στο μετρικό σύστημα και αλλαγή των σπειρωμάτων στα πρότυπα ISO. Τα σημεία σύνδεσης με την βάση της αεροσήραγγας και το μοντέλο απλοποιήθηκαν και προσαρμόστηκαν σε αυτά του εργαστηρίου. Τα πάχη στα σημεία που τοποθετούνται τα επιμηκυνσιόμετρα μεγάλωσαν για λόγους κατεργασίας.



Σχέδιο 1: Τρισδιάστατο μοντέλο ζυγού εμπρός.



Σχέδιο 2: Τρισδιάστατο μοντέλο ζυγού πίσω.

ΥΛΙΚΟ

Στη συνέχεια επιλέχθηκε το υλικό κατασκευής του ζυγού. Αποφασίστηκε και τα δύο μέρη του ζυγού να γίνουν από το ίδιο υλικό. Έγινε αναζήτηση στην αγορά για ανοξείδωτο χάλυβα με όριο διαρροής μεγαλύτερο από 1000 N/mm^2 και προτιμήθηκε ανοξείδωτος χάλυβας CORRAX της εταιρίας Uddeholm. Ο χάλυβας CORRAX έχει εξαιρετική αντοχή στην διάβρωση σε σχέση με τους κοινούς ανοξείδωτους χάλυβες και με θερμική κατεργασία γήρανσης το όριο διαρροής του στα 46 HRC φτάνει τα 1400 N/mm^2 . Έγινε παραλαβή ενός τεμαχίου χάλυβα CORRAX, διαστάσεων $\Phi 43 \times 350 \text{ mm}$ και βάρους 4 κιλών σκληρότητας 45 - 47 HRC μετά από κατεργασία γήρανσης, από την εταιρία ΣΤΑΣΙΝΟΠΟΥΛΟΣ - UDDEHOLM ΧΑΛΥΒΕΣ Α.Ε.Β.Ε. Από το τεχνικό φυλλάδιο της εταιρείας αντλήθηκαν οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Έγινε δημιουργία νέου υλικού στη βιβλιοθήκη υλικών του Inventor για να χρησιμοποιηθεί στην μελέτη αντοχής.

PROPERTIES

PHYSICAL DATA

Aged to approx. 46 HRC.

Temperature	20°C (68°F)	200°C (390°F)	400°C (750°F)
Density kg/m ³ lbs/m ³	7 700 0.28	- -	- -
Modulus of elasticity N/mm ² psi	200 000 29 x 10 ⁶	190 000 28 x 10 ⁶	170 000 25 x 10 ⁶
Coefficient of thermal expansion per°C from 20°C per°F from 68°F	- -	11.7 x 10 ⁻⁶ 6.5 x 10 ⁻⁶	12.3 x 10 ⁻⁶ 6.8 x 10 ⁻⁶
Thermal conductivity W/m °C Btu in/ft ² h °F	- -	18 125	21 146

MECHANICAL DATA

Tensile strength at room temperature.

	Solution treated ~34 HRC	Aged to ~40 HRC	Aged to ~46 HRC	Aged to ~50 HRC
Yield strength R _{0.2} N/mm ² psi	700 100 000	1 000 150 000	1 400 200 000	1 600 230 000
Tensile strength R _m N/mm ² psi	1 100 160 000	1 200 170 000	1 500 220 000	1 700 250 000

Material Editor: CORRAX

Identity Appearance Physical

▼ Information

Name: CORRAX

Description: metal

Keywords:

Type: Generic

Subclass:

Source:

Source URL:

► Basic Thermal

▼ Mechanical

Behavior: Isotropic

Young's Modulus: 200,000 GPa

Poisson's Ratio: 0,29

Shear Modulus: 77519,000 MPa

Density: 7,700 g/cm³

▼ Strength

Yield Strength: 1400,000 MPa

Tensile Strength: 1500,000 MPa

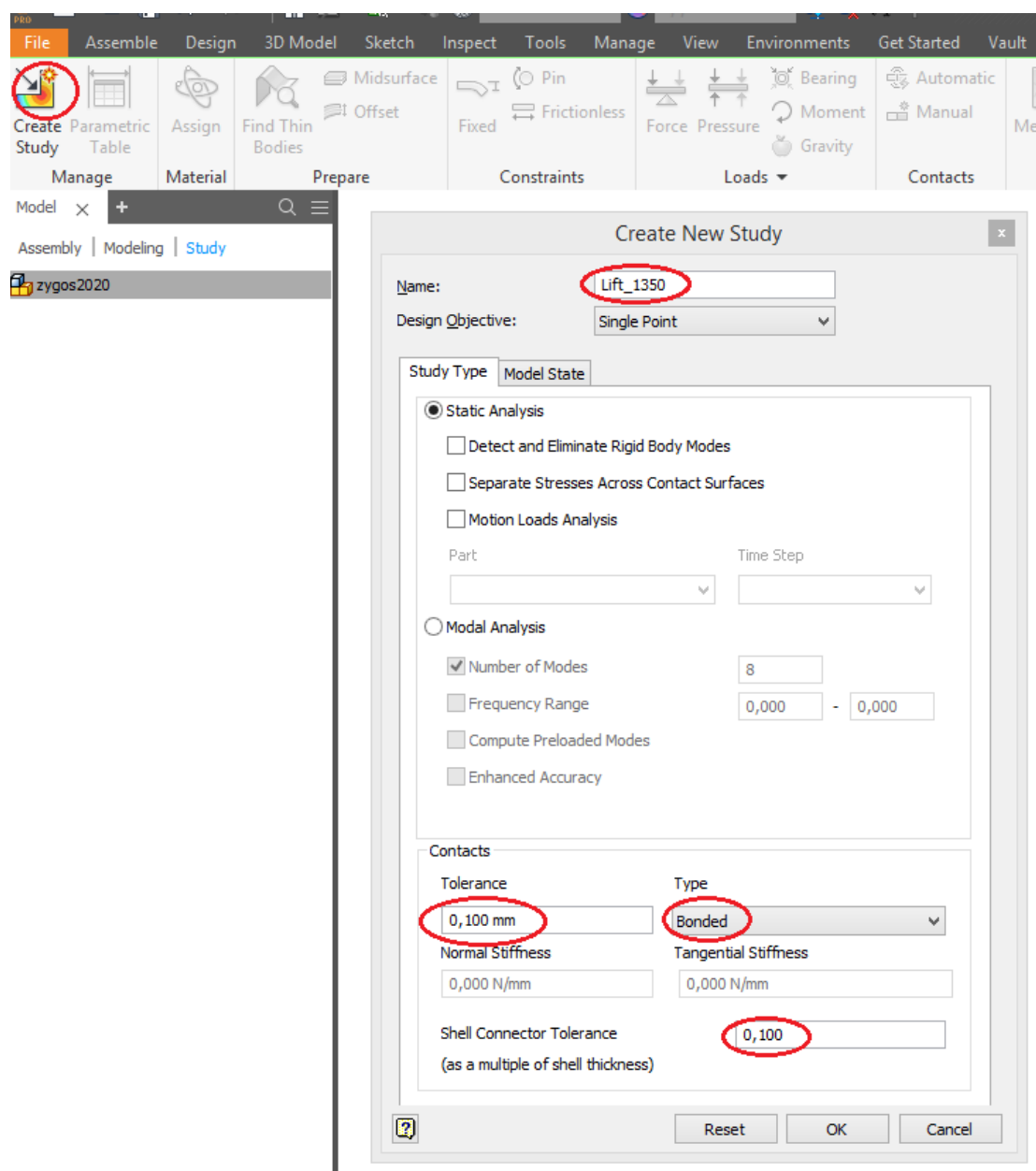
OK Cancel Apply

Εικόνα 10: Δημιουργία υλικού στο Inventor.

ΜΕΛΕΤΗ ΑΝΤΟΧΗΣ

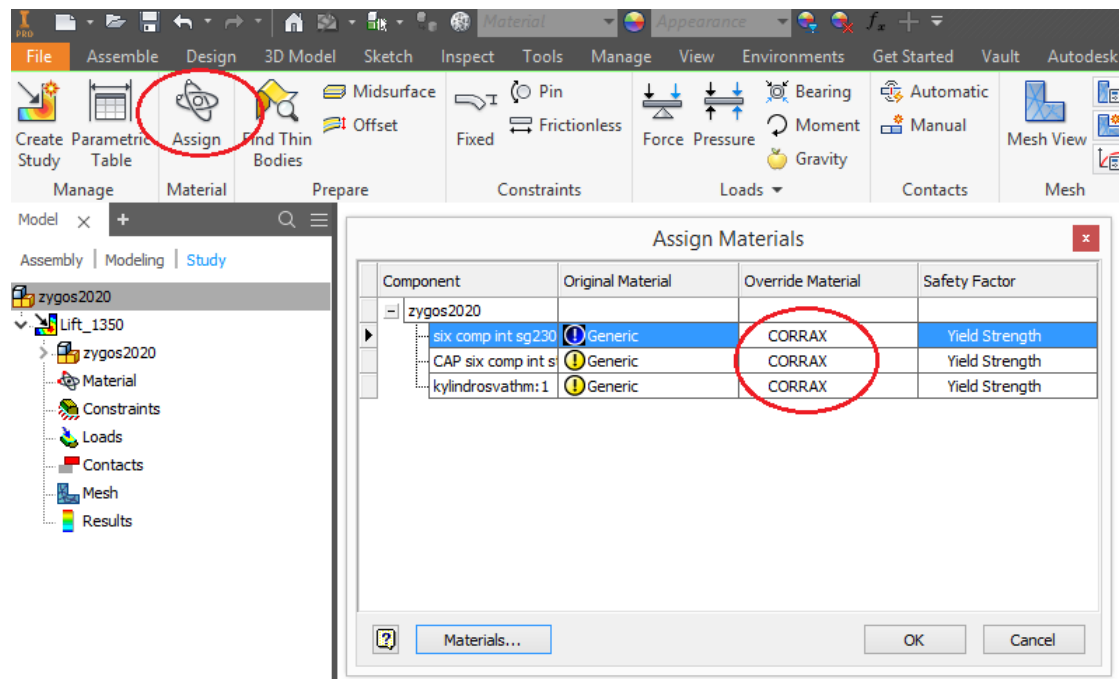
Ακολούθησε η μελέτη αντοχής με πεπερασμένα στοιχεία (FEA) του μοντέλου στο Autodesk Inventor. Στην μπροστινή μεριά του ζυγού τοποθετήθηκε κύλινδρος διαμέτρου 16mm και μήκους 27mm με σπείρωμα M16, για να χρησιμοποιηθεί ως επιφάνεια αναφοράς για τις φορτίσεις του ζυγού. Δημιουργήθηκε στο περιβάλλον Stress Analysis νέα μελέτη για κάθε μια από τις έξι συνιστώσες με το αντίστοιχο μέγιστο φορτίο, που αναφέρεται στην μελέτη του W.Ford. Υπολογίστηκαν, η μέγιστη τάση Von Mises και οι τάσεις στα σημεία τοποθέτησης των επιμηκυνσιομέτρων, καθώς επίσης και ο συντελεστής ασφαλείας και η παραμόρφωση. Η διαδικασία είναι η εξής.

Επιλέγουμε την δημιουργία νέας μελέτης και επιλέγουμε την ανοχή στις συνδέσεις των μερών του ζυγού να είναι 0,1mm και ο τύπος τις σύνδεσης να είναι Bonded.



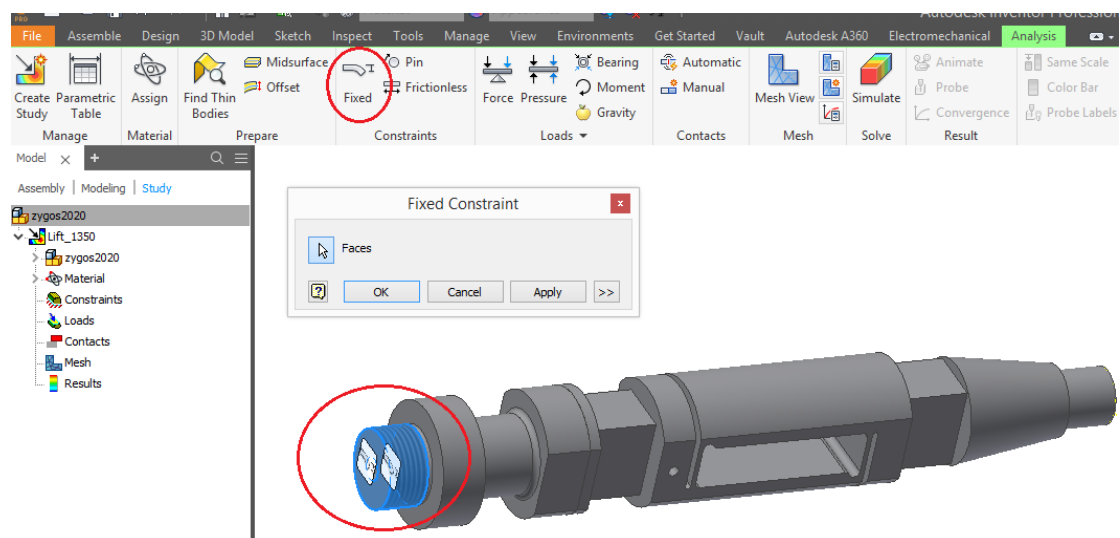
Εικόνα 12: Δημιουργία νέας μελέτης στο simulation.

Επιλέγουμε το υλικό για τα τρία μέρη του ζυγού.



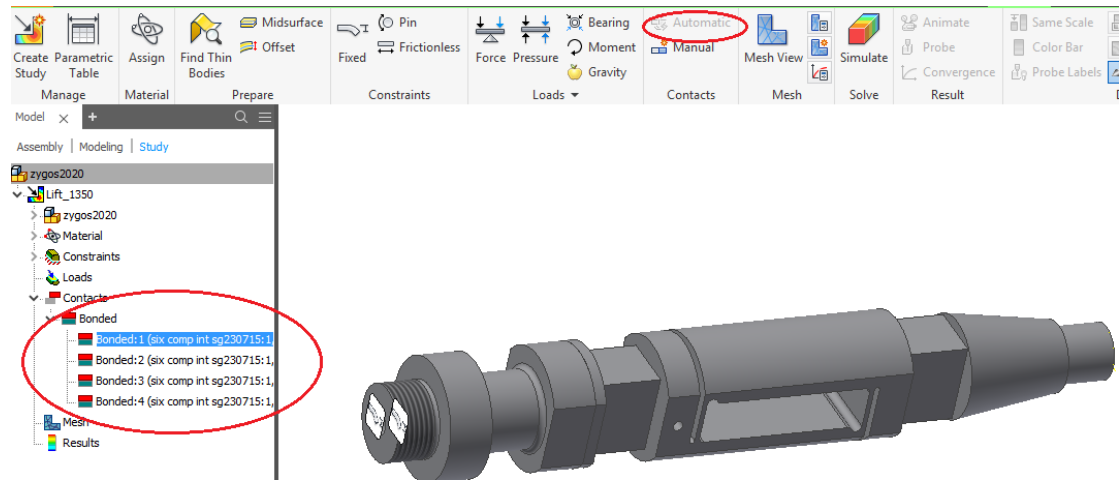
Εικόνα 13: Επιλογή υλικού.

Στη συνέχεια ορίζουμε το σημείο στήριξης του ζυγού και το θεωρούμε πακτωμένο στην πίσω μεριά.



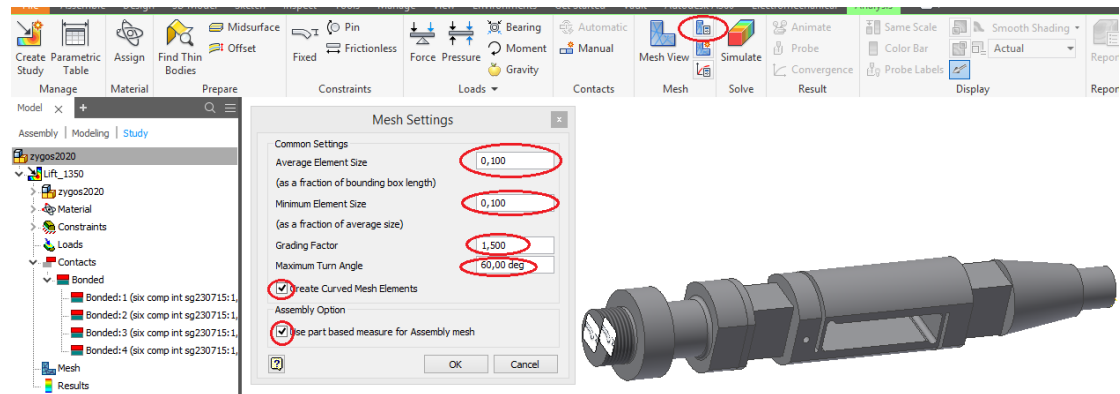
Εικόνα 14: Επιλογή σημείων στήριξης.

Έχοντας επιλέξει στην αρχή τις συνδέσεις να είναι bonded επιλέγουμε την αυτόματη δημιουργία τους.



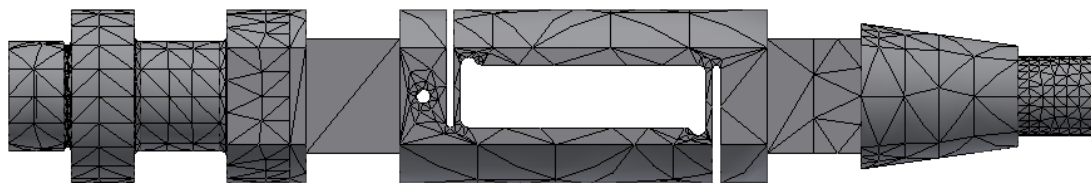
Εικόνα 15: Δημιουργία συνδέσεων.

Για να γίνει η ανάλυση πρέπει να δημιουργηθεί γεωμετρία στοιχείων από το πλέγμα του μοντέλου. Το μικρό το μέγεθος των στοιχείων προσφέρει μεγαλύτερη ακρίβεια στον υπολογισμό. Το μέσο μέγεθος των στοιχείων επιλέχθηκε να είναι το 10% του πλέγματος και το ελάχιστο μέγεθος των στοιχείων στο 10% του μέσου μεγέθους. Ο παράγοντας διαβάθμισης ορίστηκε στο 1,5 για πιο ομαλή μετάβαση μεταξύ των στοιχείων και η μέγιστη κλίση στις 60°. επιλέχθηκε επίσης η δημιουργία καμπυλωτών στοιχείων και η δημιουργία των στοιχείων για κάθε μέρος του ζυγού ξεχωριστά.



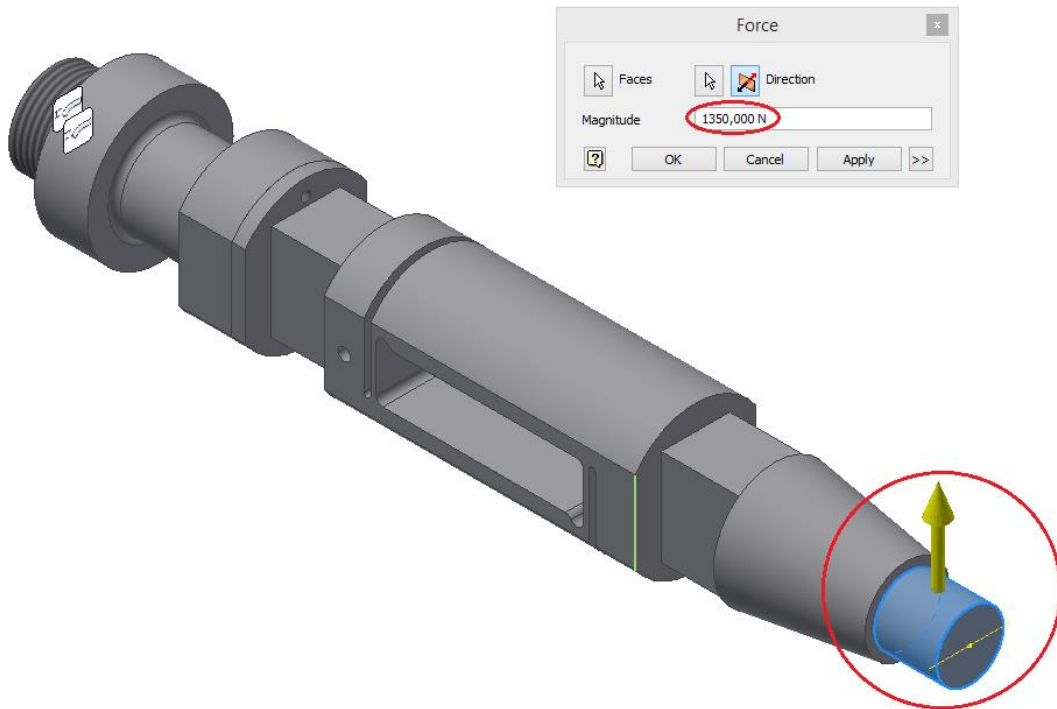
Εικόνα 16: Δημιουργία πλέγματος.

Nodes:24703
Elements:14819



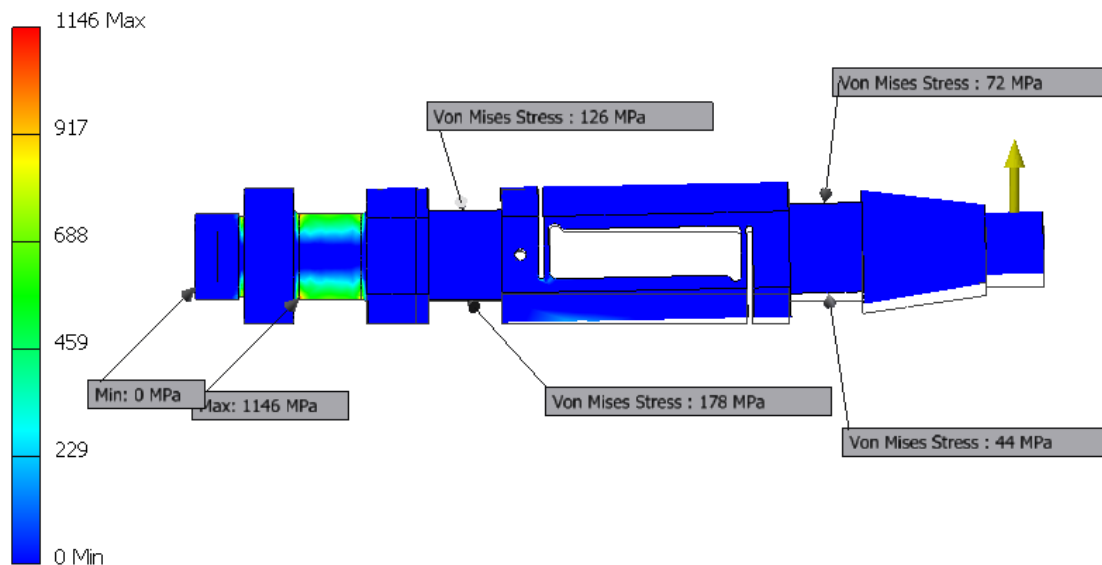
Εικόνα 17: Πλέγμα.

Για να ορίσουμε το φορτίο επιλέγουμε την επιφάνεια και τη διεύθυνση και δίνουμε την τιμή σε Newton.

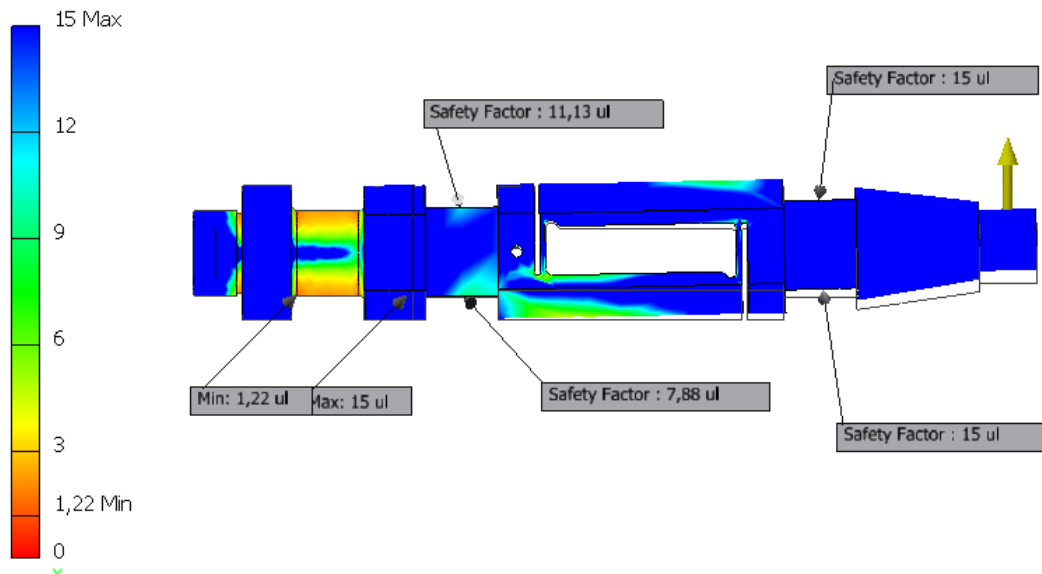


Εικόνα 18: Ορισμός φορτίου.

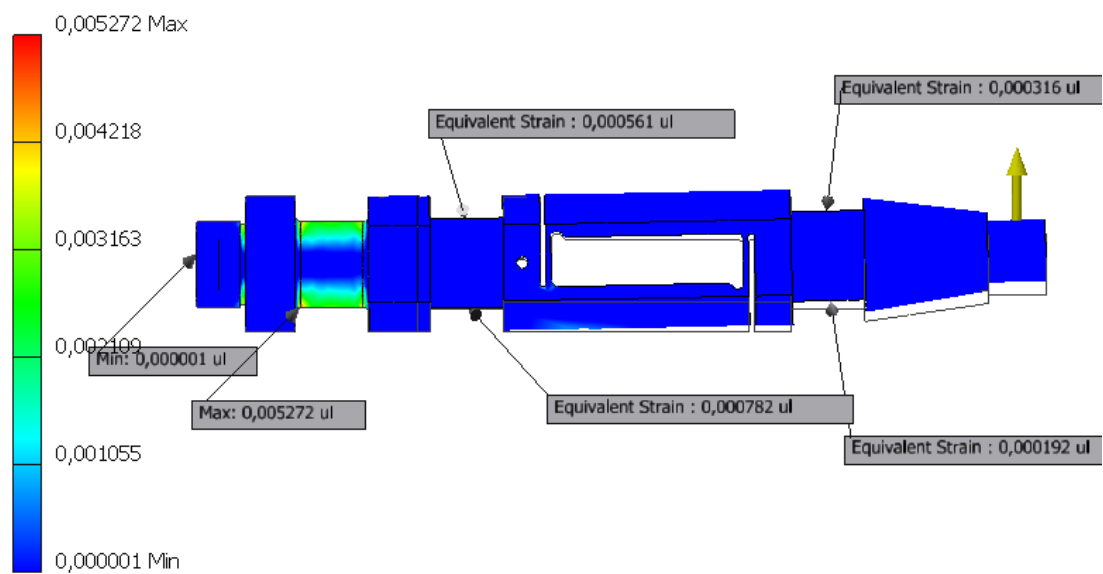
Τέλος έχοντας ορίσει όλες τις παραμέτρους, το πρόγραμμα αναλύει το ζυγό. Τα αποτελέσματα δίνονται παρακάτω.



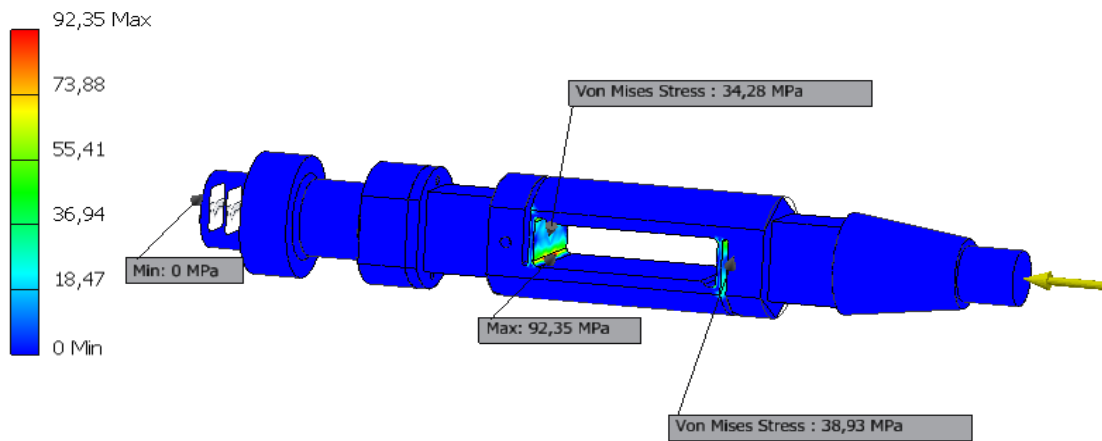
Γράφημα 1: Τάση Von Mises άντωσης για φορτίο 1350N



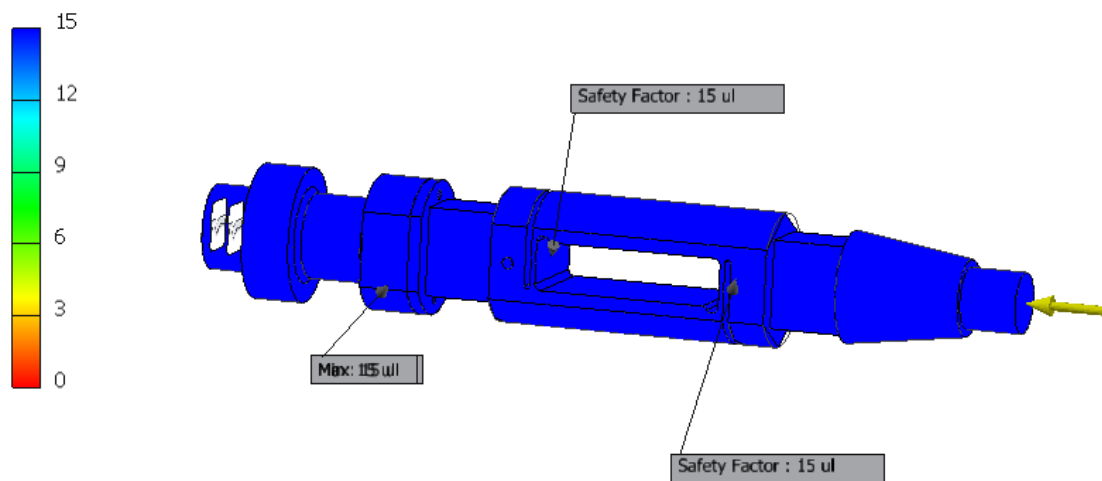
Γράφημα 2: Συντελεστής ασφαλείας άντωσης για φορτίο 1350N



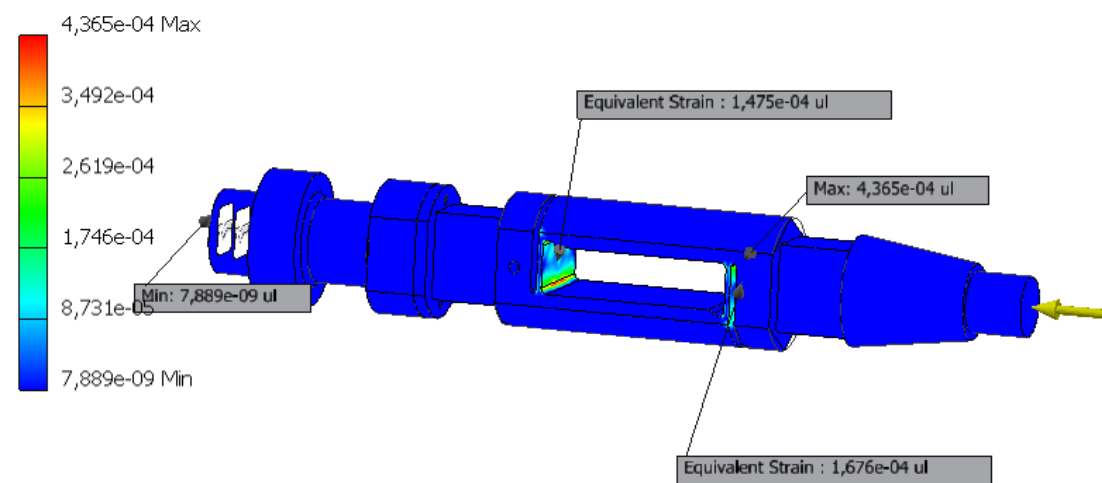
Γράφημα 3: Ισοδύναμη παραμόρφωση άντωσης για φορτίο 1350N



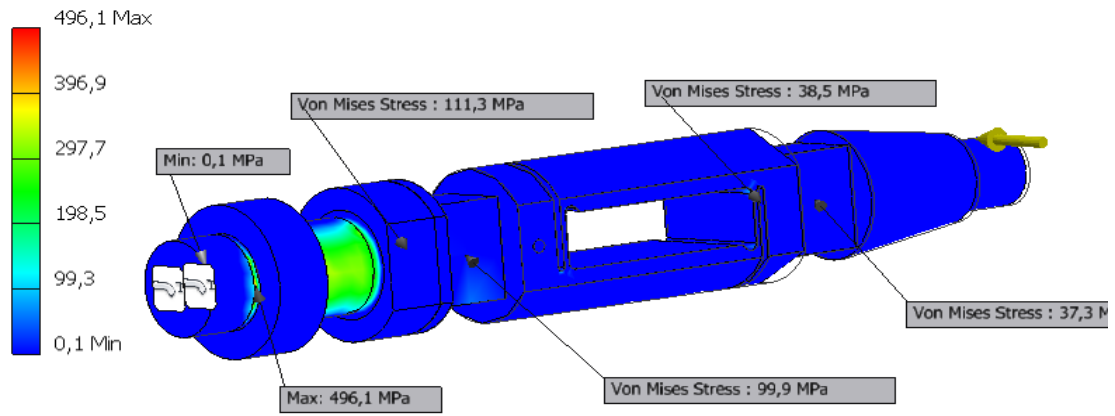
Γράφημα 4: Τάση Von Mises οπισθέλκουσας για φορτίο 350N



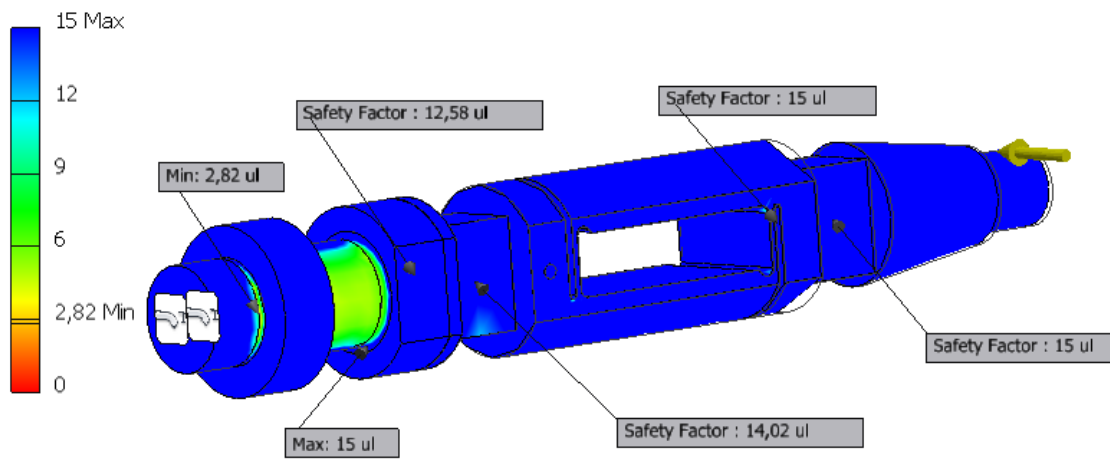
Γράφημα 5: Συντελεστής ασφαλείας οπισθέλκουσας για φορτίο 350N



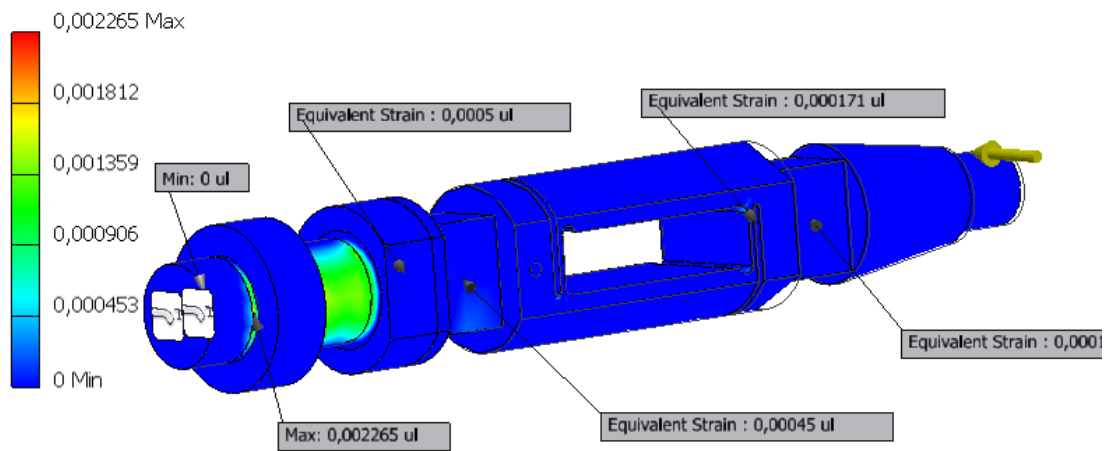
Γράφημα 6: Ισοδύναμη παραμόρφωση οπισθέλκουσας για φορτίο 350N



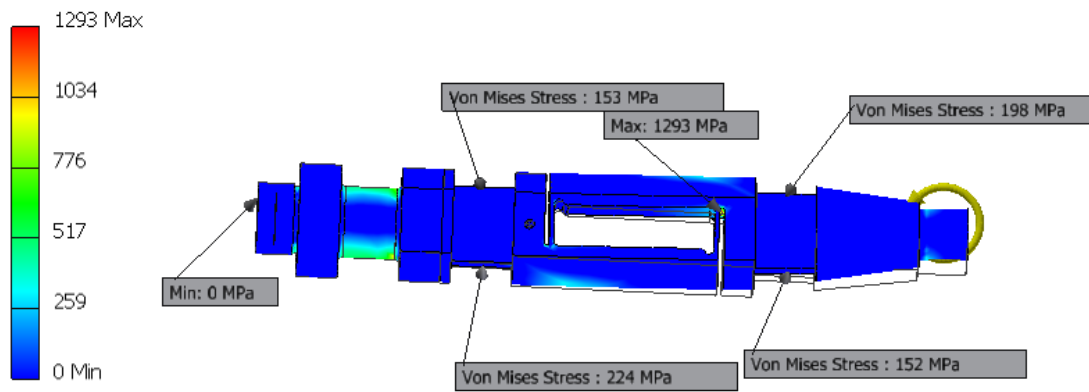
Γράφημα 7: Τάση Von Mises πλάγιας δύναμης για φορτίο 670N



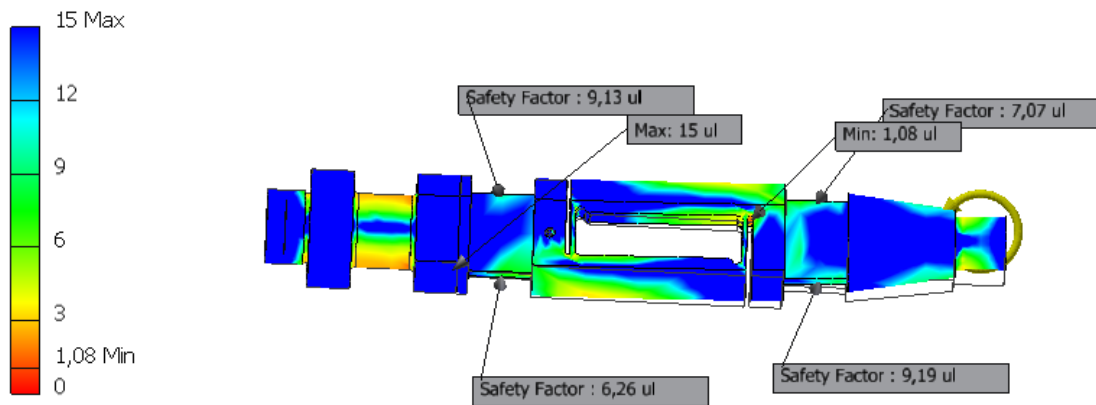
Γράφημα 8: Συντελεστής ασφαλείας πλάγιας δύναμης για φορτίο 670N



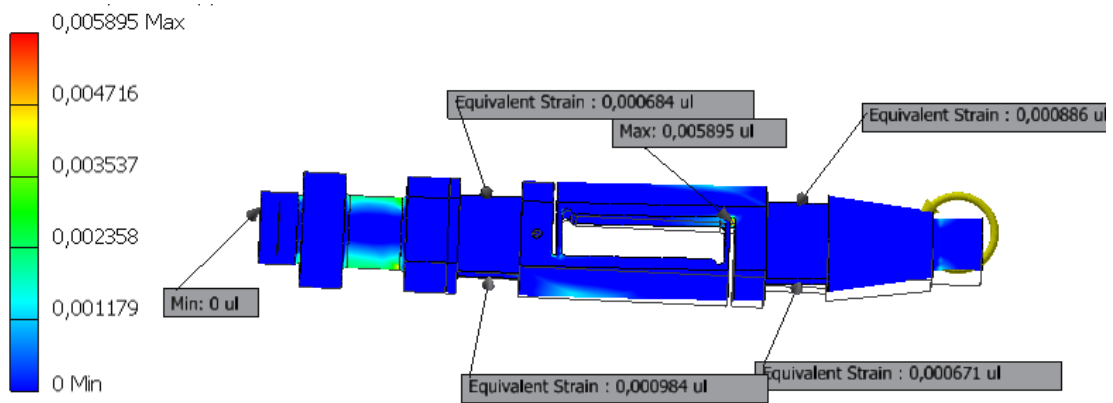
Γράφημα 9: Ισοδύναμη παραμόρφωση πλάγιας δύναμης για φορτίο 670N



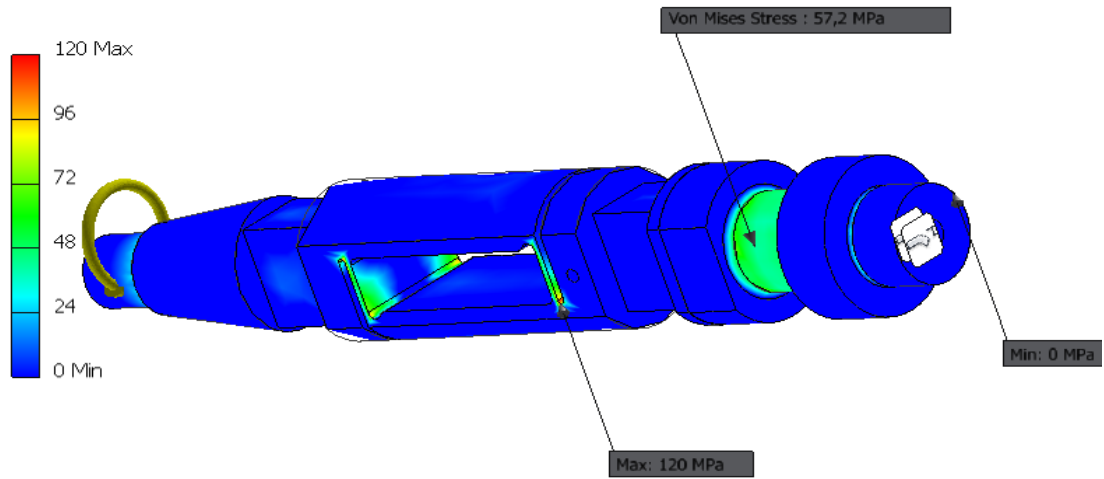
Γράφημα 10: Τάση Von Mises ροπής πρόνευσης για φορτίο 230.000 Nmm



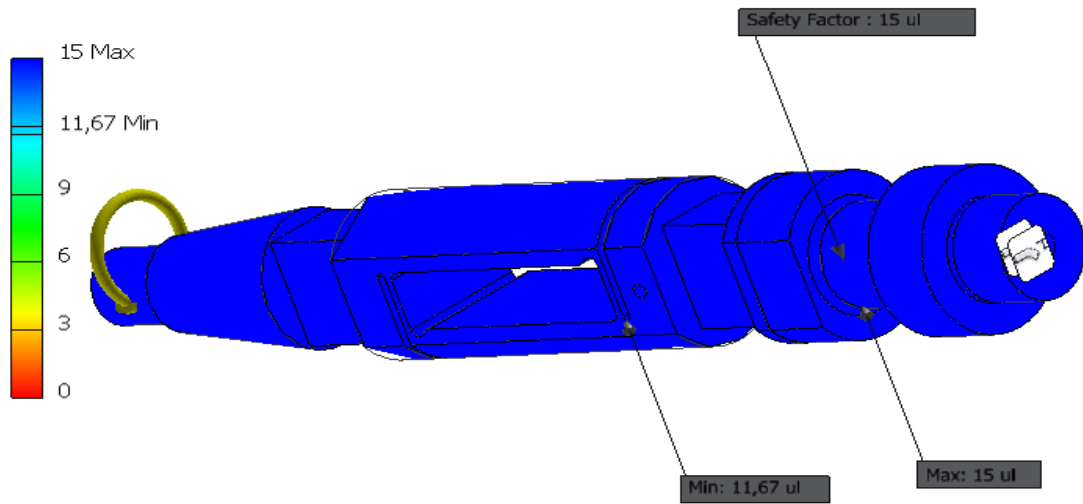
Γράφημα 11: Συντελεστής ασφαλείας ροπής πρόνευσης για φορτίο 230.000 Nmm



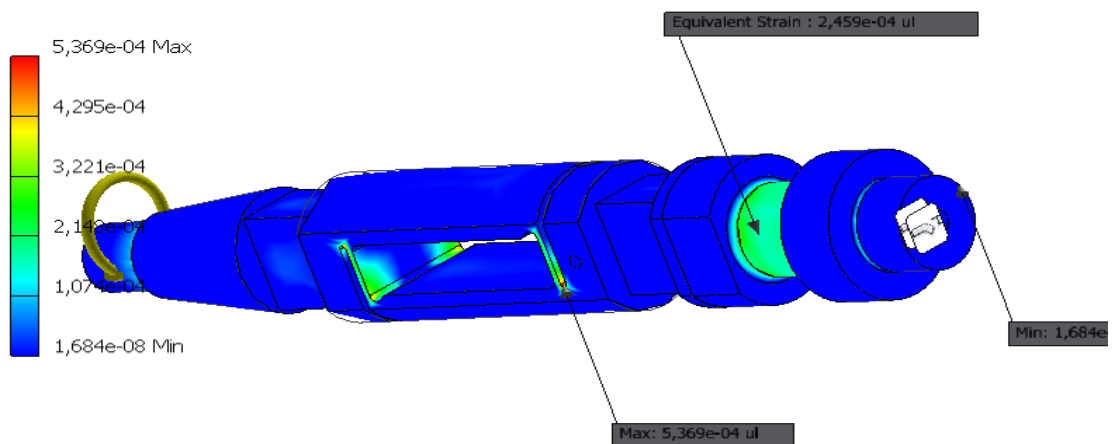
Γράφημα 12: Ισοδύναμη παραμόρφωση ροπής πρόνευσης για φορτίο 230.000 Nmm



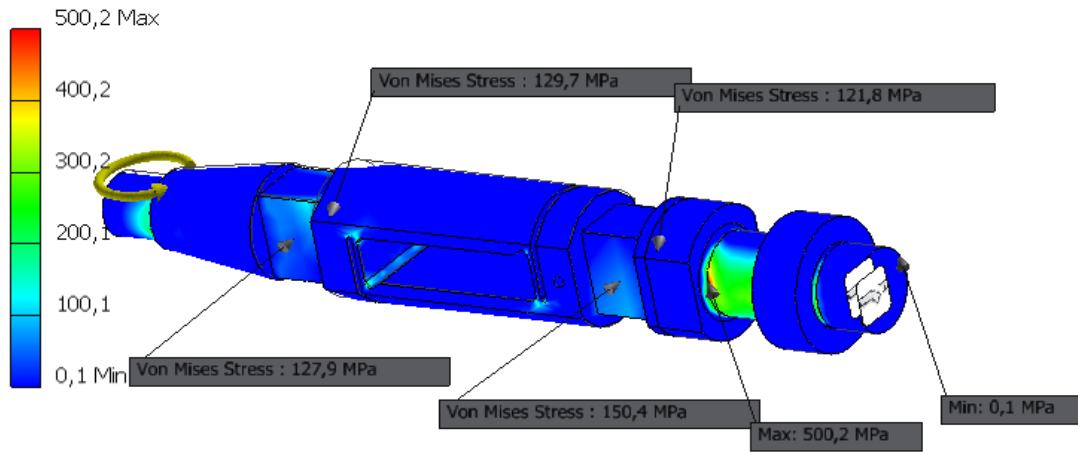
Γράφημα 13: Τάση Von Mises ροπής διατοιχισμού για φορτίο 22.600 Nmm



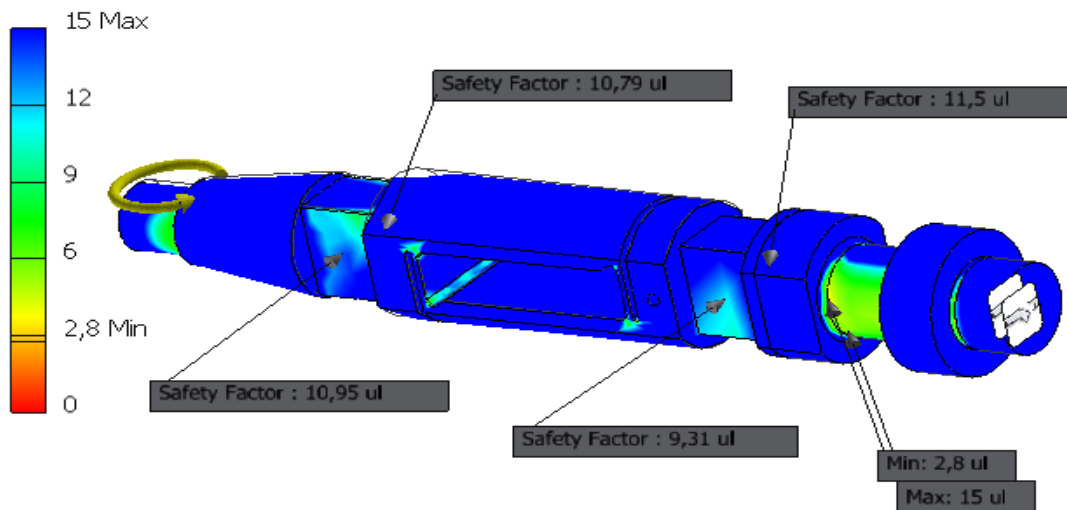
Γράφημα 14: Συντελεστής ασφαλείας ροπής διατοιχισμού για φορτίο 22.600 Nmm



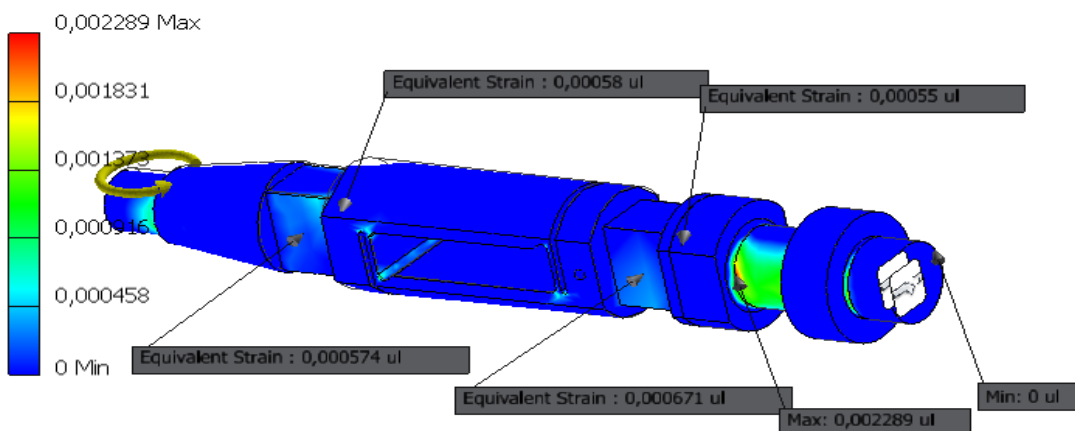
Γράφημα 15: Ισοδύναμη παραμόρφωση ροπής διατοιχισμού για φορτίο 22.600 Nmm



Γράφημα 16: Τάση Von Mises ροπής εκτροπής για φορτίο 113.000 Nmm



Γράφημα 17: Συντελεστής ασφαλείας ροπής εκτροπής για φορτίο 113.000 Nmm



Γράφημα 18: Ισοδύναμη παραμόρφωση ροπής εκτροπής για φορτίο 113.000 Nmm

	Τάση σ MPa	Συντελεστής ασφαλείας	Παραμόρφωση ε $\times 10^{-4}$
Άντωση	1146	1,2	52,72
Οπισθέλκουσα	92,35	>5	4,36
Πλάγια δύναμη	496,1	2,82	22,65
Ροπή πρόνευσης	1293	1,08	58,95
Ροπή διατοιχισμού	120	>5	5,36
Ροπή εκτροπής	500,2	2,8	22,89

Πίνακας 1: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα αντοχής.

ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ

Η πρώτη φάση κατασκευής του ζυγού έγινε σε κέντρο κατεργασίας CNC με τα εξής χαρακτηριστικά:

- Πέντε άξονες κατεργασίας
- Μέγιστη διάμετρος κατεργασίας 660mm
- Μέγιστο μήκος κατεργασίας 1542mm
- Δυο περιστροφικές κεφαλές 4000rpm
- Κεφαλή για κατεργασίες φρέζας 12000rpm
- 239 θέσεις εργαλείων.

Το τεμάχιο χάλυβα CORRAX διατάσεων $\Phi 43 \times 350$ mm κόπηκε σε ηλεκτρικό σιδηροπρίονο σε τεμάχια μήκους 160mm και 60mm που χρησιμοποιήθηκαν για τα δύο μέρη του ζυγού.

Οι συνθήκες κοπής επιλέχθηκαν λαμβάνοντας υπ' όψιν το υλικό, το είδος της κατεργασίας, το κοπτικό εργαλείο και την γεωμετρία του κομματιού.

Συγκεκριμένα υπολογίστηκαν τα παρακάτω μεγέθη:

- Στροφές ατράκτου ανά λεπτό n (rpm)
- Ταχύτητα πρόωσης f σε χιλιοστά ανά λεπτό (mm/min)
- Η ταχύτητα κοπής V_c σε μέτρα ανά λεπτό (m/min)
- Το βάθος κοπής a σε χιλιοστά (mm)
- Ο αριθμός των πάσων v
- Χρόνος κατεργασίας T σε λεπτά (min)

Οι τύποι που χρησιμοποιήθηκαν για κατεργασίες τορναρίσματος είναι:

$$V_c = \frac{\pi \cdot D_{\text{αρχ}} \cdot n}{1000}$$

όπου

Δαρχ. : η αρχική διάμετρος του αντικειμένου πριν την κατεργασία (mm)

n : ο αριθμός των στροφών της ατράκτου ανά λεπτό (rpm)

$$f = s \cdot n$$

όπου

s : η πρόωση που πραγματοποιεί το κοπτικό εργαλείο σε μία περιστροφή του αντικειμένου (mm/rev)

n : ο αριθμός των στροφών της ατράκτου ανά λεπτό (rpm)

$$T = \frac{v \cdot L}{f}$$

όπου

v : ο αριθμός πάσων

L : το μήκος κοπής (mm)

f : η ταχύτητα πρόωσης (mm/min)

Για κατεργασίες φρεζαρίσματος χρησιμοποιήθηκαν οι τύποι

$$V_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000}$$

όπου

D : η διάμετρος του κοπτήρα (mm)

n : ο αριθμός στροφών του κοπτήρα (rpm)

$$f = s_z \cdot n \cdot z$$

όπου

f : η ταχύτητα πρόωσης (mm/min)

n : ο αριθμός στροφών του κοπτικού (rpm)

Z : ο αριθμός δοντιών του κοπτικού

$$T = \frac{L}{f}$$

όπου

L : η απόσταση που διανύει το κοπτικό (mm)

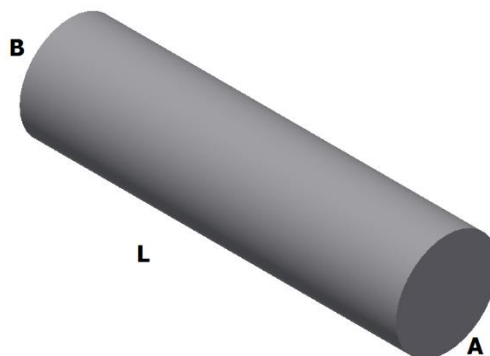
f : η ταχύτητα πρόωσης του κοπτικού (mm/min)

Το βάθος κοπής, η ταχύτητα κοπής, και η πρόωση ανά περιστροφή επιλεχθήκαν με βάση τις προτεινόμενες από το τεχνικό φυλλάδιο του υλικού και των εργαλείων.

Οι φάσεις κατεργασίας και τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για το κυρίως μέρος του ζυγού δίνονται παρακάτω.

Όνομα τεμαχίου	scisg
Τύπος υλικού	Uddeholm Corrax
Διαστάσεις πρώτης ύλης	43 mm X 160 mm
Αριθμός φάσεων κατεργασίας	12
Εργαλειομηχανή	Mori Seiki NT-4250 DCG
Εργαλεία συγκράτησης	<ul style="list-style-type: none">• Τσοκ τόρνου

Πίνακας 2: Στοιχεία κατεργασίας κυρίως μέρους ζυγού.

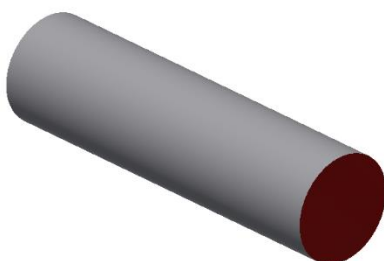


Σχέδιο 3: Πρώτη ύλη

Φάση 1

Συγκράτηση του τεμαχίου στο τσοκ από πλευρά Β στα 14,1mm και κατεργασία προσώπου Α

Κοπτικό εργαλείο	καρβιδίου τρίγωνο		
Διαστάσεις	Dαρχ=43mm	Dτελ=43mm	Lκατ=21,5mm
Συνθήκες κατεργασίας	n=444rpm		f=89mm/min
	a=1mm		Vc=60m/min
	v=1		T=15sec

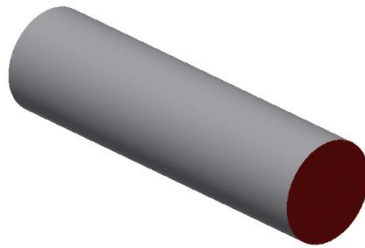


Σχέδιο 4: Ξεχόνδρισμα προσώπου

Φάση 2

Κατεργασία φινίρισμα προσώπου Α

Κοπτικό εργαλείο	καρβιδίου τρίγωνο		
Διαστάσεις	Dαρχ=43mm	Dτελ=43mm	Lκατ=21,5mm
Συνθήκες κατεργασίας	n=667rpm		f=67mm/min
	a=0,5mm		Vc=90m/min
	v=1		T=20sec



Σχέδιο 5: φινίρισμα προσώπου

Φάση 3

Ξεχόνδρισμα εξωτερικής διαμέτρου 43mm

Κοπτικό εργαλείο	καρβιδίου τρίγωνο		
Διαστάσεις	Dαρχ=43mm	Dτελ=20,8mm	Lκατ=144,4mm
Συνθήκες κατεργασίας	n=444rpm		f=89mm/min
	a=1,25mm a _{semi} =0,25mm		Vc=90m/min
	v=9 v _{semi} =7		T=650sec



Σχέδιο 6: Ξεχόνδρισμα εξωτερικής διαμέτρου.

Φάση 4

Φινίρισμα εξωτερικής διαμέτρου

Κοπτικό εργαλείο	καρβιδίου τρίγωνο		
Διαστάσεις	Dαρχ=35,5mm	Dτελ=20,3mm	Lκατ=144,4mm
Συνθήκες κατεργασίας	n=807rpm		f=81mm/min
	a=0,25mm		Vc=90m/min
	v=1		T=106sec

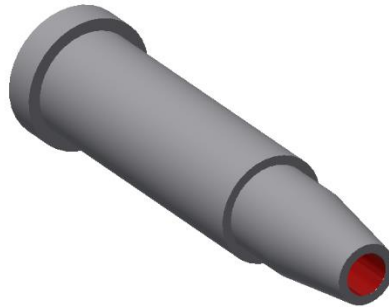


Σχέδιο 7: Φινίρισμα εξωτερικής διαμέτρου

Φάση 5

Άνοιγμα οπής Φ14mm X 55.5 mm

Κοπτικό εργαλείο	τρυπάνι Φ14 καρβιδίου		
Διαστάσεις	Dαρχ=14mm	Dτελ=14mm	Lκατ=55,5mm
Συνθήκες κατεργασίας	n=1820rpm		f=182mm/min
	a=1,5mm		Vc=80m/min
	v=37		T=19sec

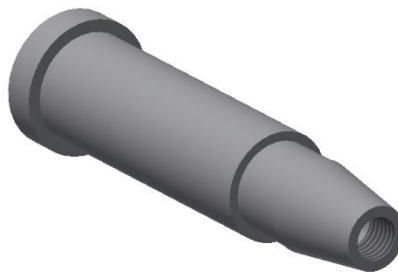


Σχέδιο 8: Άνοιγμα οπής.

Φάση 6

Διάνοιξη σπειρώματος M16X2 X13mm

Κοπτικό εργαλείο	Σπειρώματος καρβιδίου		
Διαστάσεις	Dαρχ=14mm	Dτελ=16mm	Lκατ=13mm
Συνθήκες κατεργασίας	n= 139rpm		f=278mm/min
	a=0,2		Vc=7m/min
	v=10		T=30sec

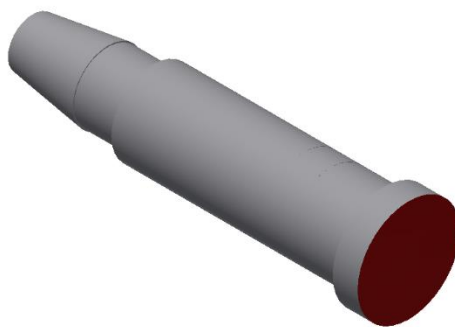


Σχέδιο 9: Διάνοιξη σπειρώματος

Φάση 7

συγκράτηση τεμαχίου από τη μεριά Β με μαλακές σιαγόνες και κατεργασία προσώπου.

Κοπτικό εργαλείο	καρβιδίου τρίγωνο		
Διαστάσεις	Dαρχ=43mm	Dτελ=43	Lκατ=21,5
Συνθήκες κατεργασίας	n=444rpm		f=89mm/min
	a=1mm		Vc=60m/min
	v=1		T=15sec

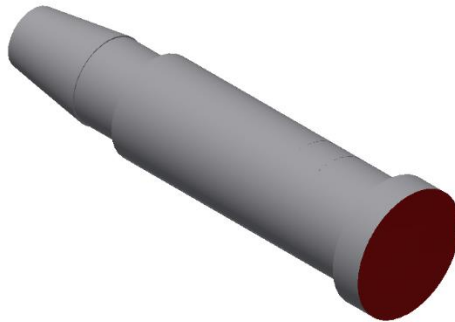


Σχέδιο 10: Κατεργασία προσώπου.

Φάση 8

φινίρισμα προσώπου Β.

Κοπτικό εργαλείο	καρβιδίου τρίγωνο		
Διαστάσεις	Dαρχ=43mm	Dτελ=43mm	Lκατ=21,5
Συνθήκες κατεργασίας	n=667rpm		f=67mm/min
	a=0,4mm		Vc=90m/min
	v=1		T=20sec

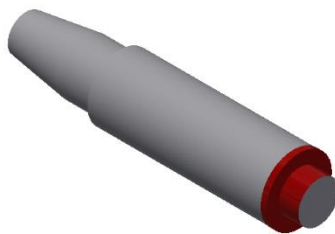


Σχέδιο 11: Φινίρισμα προσώπου

Φάση 9

Ξεχόνδρισμα εξωτερικής διαμέτρου.

Κοπτικό εργαλείο	καρβιδίου τρίγωνο		
Διαστάσεις	Dαρχ=43mm	Dτελ=22,5mm	Lκατ=12,7mm
Συνθήκες κατεργασίας	n=444rpm		f=89mm/min
	a=1,25mm		Vc=60m/min
	v=8		T=69sec

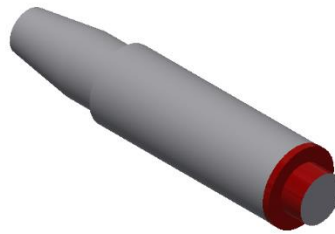


Σχέδιο 12: Ξεχόνδρισμα εξωτερικής διαμέτρου.

Φάση 10

Φινίρισμα εξωτερικής διαμέτρου.

Κοπτικό εργαλείο	καρβιδίου τρίγωνο		
Διαστάσεις	Dαρχ=35,5	Dτελ=22mm	Lκατ=19,2
Συνθήκες κατεργασίας	n=807rpm		f=81mm/min
	a=0,25mm		Vc=90m/min
	v=1		T=15sec



Σχέδιο 13: Φινίρισμα εξωτερικής διαμέτρου.

Φάση 11

Κατεργασία σπειρώματος M22X1,5 X 9,5mm

Κοπτικό εργαλείο	καρβιδίου τρίγωνο		
Διαστάσεις	Dαρχ=22mm	Dτελ=20,5mm	Lκατ=9,5mm
Συνθήκες κατεργασίας	n= 101rpm		f= 151mm/min
	a= 0,3 mm		Vc= 7m/min
	v= 5		T= 19sec



Σχέδιο 14: Κατεργασία σπειρώματος.

Φάση 12

Διάνοιξη οπής Φ14 X35mm

Κοπτικό εργαλείο	Τρυπάνι Φ14 καρβιδίου		
Διαστάσεις	Daρχ=14	Dτελ=14	Lκατ=35mm
Συνθήκες κατεργασίας	n=1820rpm		f=182mm/min
	a=1,4		Vc=80m/min
	v=25		T=12sec

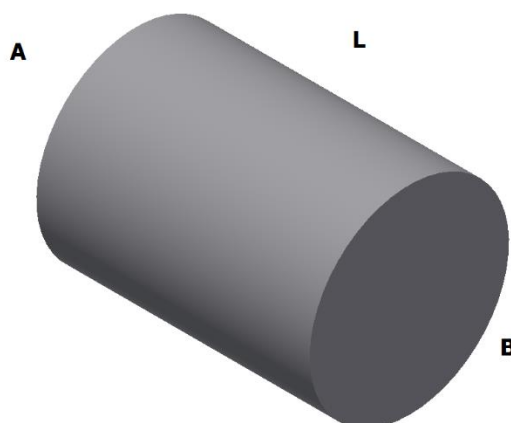


Σχέδιο 15: Διάνοιξη οπής

Οι φάσεις κατεργασίας και τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για το πίσω μέρος του ζυγού δίνονται παρακάτω.

Όνομα τεμαχίου	cscisg
Τύπος υλικού	Uddeholm Corrax
Διαστάσεις πρώτης ύλης	43 mm X 60 mm
Αριθμός φάσεων κατεργασίας	14
Εργαλειομηχανή	Mori Seiki NT-4250 DCG
Εργαλεία συγκράτησης	<ul style="list-style-type: none"> • Τσοκ τόρνου

Πίνακας 3: Στοιχεία κατεργασίας πίσω μέρους ζυγού.

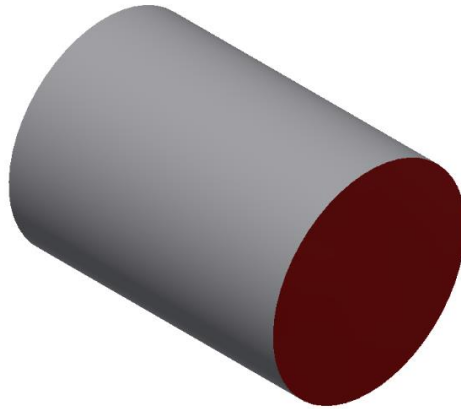


Σχέδιο 16: Πρώτη ύλη.

Φάση 1

Συγκράτηση στο τσοκ από μεριά Α και κατεργασία προσώπου Β

Κοπτικό εργαλείο	καρβιδίου τρίγωνο		
Διαστάσεις	Daρχ=43mm	Dτελ=43mm	Lκατ=21,5mm
Συνθήκες κατεργασίας	n=444rpm		f=89mm/min
	a=1		Vc=60m/min
	v=1		T=15sec

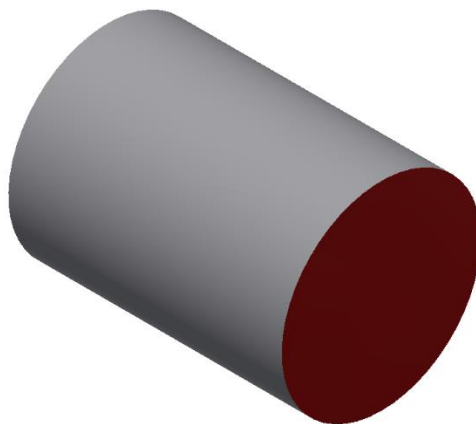


Σχέδιο 17: Ξεχόνδρισμα προσώπου.

Φάση 2

Φινίρισμα προσώπου Β

Κοπτικό εργαλείο	καρβιδίου τρίγωνο		
Διαστάσεις	Daρχ=43mm	Dτελ=43mm	Lκατ=21.5mm
Συνθήκες κατεργασίας	n=667rpm		f=67mm/min
	a=0,5		Vc=90m/min
	v=1		T=20sec

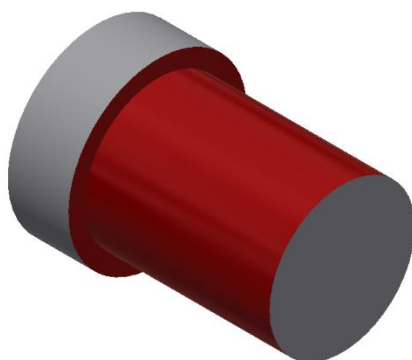


Σχέδιο 18: Φινίρισμα προσώπου.

Φάση 3

Ξεχόνδρισμα εξωτερικής διαμέτρου L

Κοπτικό εργαλείο	καρβιδίου τρίγωνο		
Διαστάσεις	Dαρχ=43mm	Dτελ=35,5mm	Lκατ=44,4mm
Συνθήκες κατεργασίας	n=444rpm		f=89mm/min
	a=1,25mm		Vc=60m/min
	v=3		T=90sec

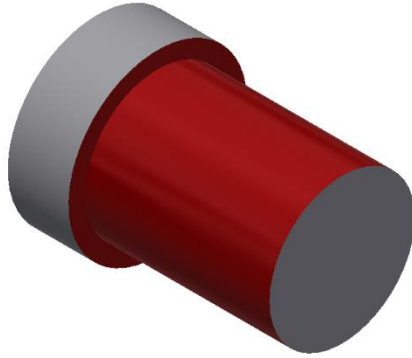


Σχέδιο19: Ξεχόνδρισμα εξωτερικής διαμέτρου.

Φάση 4

Φινίρισμα εξωτερικής διαμέτρου

Κοπτικό εργαλείο	καρβιδίου τρίγωνο		
Διαστάσεις	Dαρχ=35,5mm	Dτελ=35mm	Lκατ=44,4mm
Συνθήκες κατεργασίας	n=807rpm		f=81mm/min
	a=0,5mm		Vc=90m/min
	v=1		T=33sec

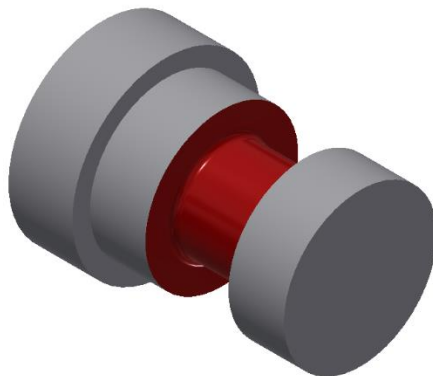


Σχέδιο 20: Φινίρισμα εξωτερικής διαμέτρου

Φάση 5

Κατεργασία groove

Κοπτικό εργαλείο	καρβιδίου τρίγωνο		
Διαστάσεις	Dαρχ=35mm	Dτελ=22.5mm	Lκατ=19mm
Συνθήκες κατεργασίας	n=546rpm		f=60mm/min
	a=0,25mm		Vc=60m/min
	v=25		T=475sec

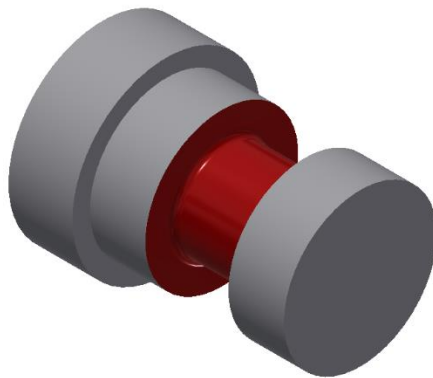


Σχέδιο 21: Κατεργασία groove.

Φάση 6

Κατεργασία groove φινίρισμα

Κοπτικό εργαλείο	καρβιδίου groove		
Διαστάσεις	Dαρχ=22,5mm	Dτελ=22mm	Lκατ=32mm
Συνθήκες κατεργασίας	n=819rpm		f=82mm/min
	a=0,25mm		Vc=90m/min
	v=1		T=24sec

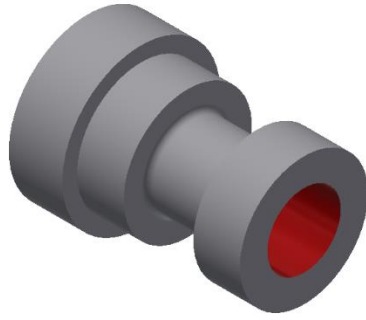


Σχέδιο 22: Κατεργασία groove φινίρισμα.

Φάση 7

Διάνοιξη οπής Φ20mm X 37,7

Κοπτικό εργαλείο	καρβιδίου τρίγωνο		
Διαστάσεις	Dαρχ=20mm	Dτελ=20mm	Lκατ=37,7mm
Συνθήκες κατεργασίας	n=1274rpm		f=127mm/min
	a=1,3mm		Vc=80m/min
	v=29		T=18sec

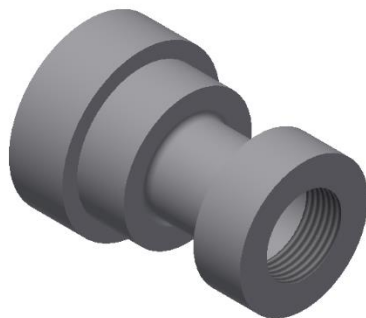


Σχέδιο 23: Διάνοιξη οπής

Φάση 8

Κατεργασία σπειρώματος M22X1,5 X 9,5

Κοπτικό εργαλείο	καρβιδίου τρίγωνο		
Διαστάσεις	Dαρχ=20mm	Dτελ=22mm	Lκατ=9,5mm
Συνθήκες κατεργασίας	n= 101rpm		f= 151mm/min
	a= 0,3 mm		Vc= 7m/min
	v= 5		T= 19sec

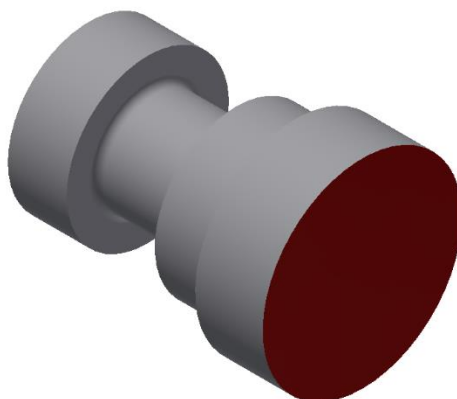


Σχέδιο 24: Κατεργασία σπειρώματος.

Φάση 9

Συγκράτηση τεμαχίου στο τσοκ από μεριά Β με μαλακές σιαγόνες και κατεργασία προσώπου

Κοπτικό εργαλείο	καρβιδίου τρίγωνο		
Διαστάσεις	Dαρχ=43mm	Dτελ=43mm	Lκατ=21,5mm
Συνθήκες κατεργασίας	n=444rpm		f=89mm/min
	a=1mm		Vc=60m/min
	v=1		T=15sec

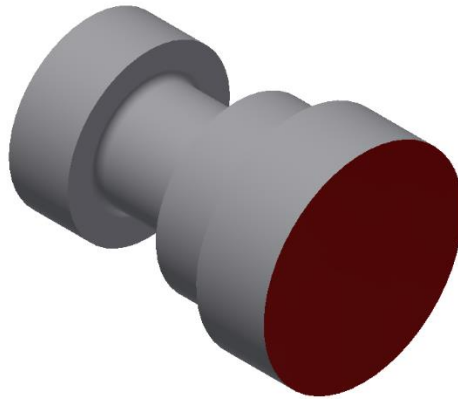


Σχέδιο 25: Ξεχόνδρισμα προσώπου.

Φάση 10

Φινίρισμα προσώπου Α

Κοπτικό εργαλείο	καρβιδίου τρίγωνο		
Διαστάσεις	Dαρχ=43mm	Dτελ=43mm	Lκατ=21,5mm
Συνθήκες κατεργασίας	n=667rpm		f=67mm/min
	a=0,4mm		Vc=90m/min
	v=1		T=20sec

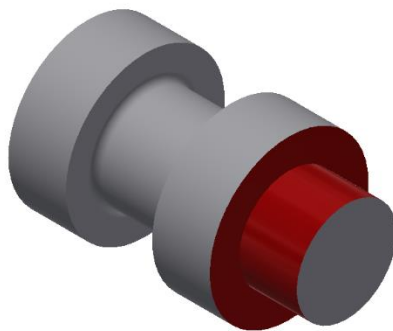


Σχέδιο 26: Φινίρισμα προσώπου.

Φάση 11

Ξεχόνδρισμα εξωτερικής διαμέτρου

Κοπτικό εργαλείο	καρβιδίου τρίγωνο		
Διαστάσεις	Dαρχ=43mm	Dτελ=22,5mm	Lκατ=12,7mm
Συνθήκες κατεργασίας	n=546rpm		f=109mm/min
	a=1mm a _{semi} =0,25		Vc=60m/min
	v=11		T=77sec

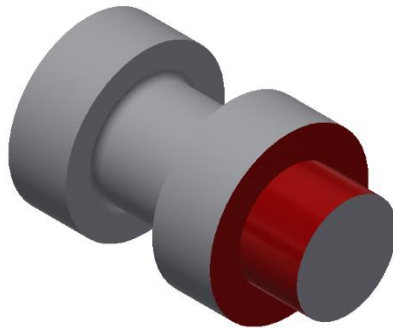


Σχέδιο 27: Ξεχόνδρισμα εξωτερικής διαμέτρου.

Φάση 12

Φινίρισμα εξωτερικής διαμέτρου.

Κοπτικό εργαλείο	καρβιδίου τρίγωνο		
Διαστάσεις	Dαρχ=22,5mm	Dτελ=22mm	Lκατ=19,2mm
Συνθήκες κατεργασίας	n=819rpm		f=82mm/min
	a=0,5mm		Vc=90m/min
	v=1		T=14sec

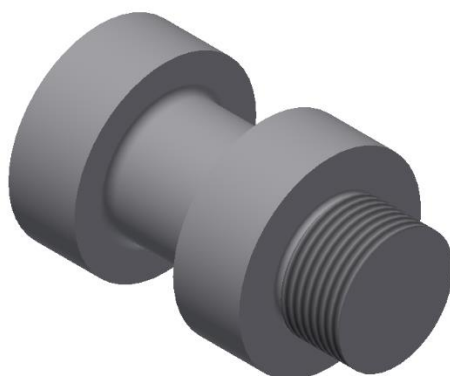


Σχέδιο 28: Φινίρισμα εξωτερικής διαμέτρου.

Φάση 13

Κατεργασία σπειρώματος M22X1.5 X 11,2 mm

Κοπτικό εργαλείο	καρβιδίου τρίγωνο		
Διαστάσεις	Dαρχ=22mm	Dτελ=20,5mm	Lκατ=11,2mm
Συνθήκες κατεργασίας	n= 101rpm		f= 151mm/min
	a= 0,3 mm		Vc= 7m/min
	v= 5		T= 23sec

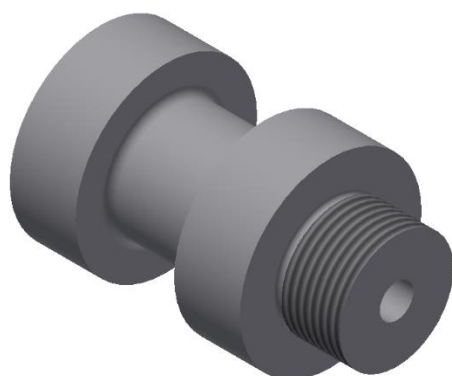


Σχέδιο 29: Κατεργασία σπειρώματος

Φάση 14

Διάνοιξη οπής Φ6,5

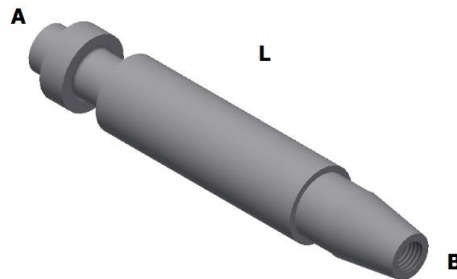
Κοπτικό εργαλείο	Τριπάνι Φ6,5 καρβιδίου		
Διαστάσεις	Δαρχ=6,5mm	Δτελ=6,5mm	Λκατ=20mm
Συνθήκες κατεργασίας	n=3900rpm		f=310mm/min
	a=1mm		Vc=80m/min
	v=20		T=4sec



Σχέδιο 30: Διάνοιξη οπής

Όνομα τεμαχίου	zygos
Τύπος υλικού	Uddeholm Corrax
Διαστάσεις πρώτης ύλης	35 mm X 204,7 mm
Αριθμός φάσεων κατεργασίας	4
Εργαλειομηχανή	Mori Seiki NT-4250 DCG
Εργαλεία συγκράτησης	<ul style="list-style-type: none"> • Τσοκ τόρνου • Πόντα

Πίνακας 4 : Στοιχεία κατεργασίας φρεζαρίσματος ζυγού.

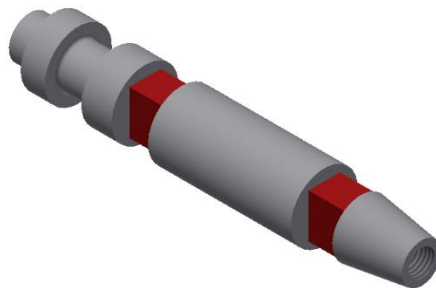


Σχέδιο 31: Ζυγός πριν το φρεζάρισμα.

Φάση 1

Με συναρμολογημένο το ζυγό γίνεται συγκράτηση στο τσοκ από τη μεριά Α και συγκράτηση με πόντα από την μεριά Β. γίνεται Ξεχόνδρισμα και φινίρισμα με εργαλείο φρέζας στις τέσσερις έδρες με περιστροφή του τεμαχίου 90° κάθε φορά.

Κοπτικό εργαλείο	Κονδύλι Φ12 καρβιδίου τετράφτερο	
Διαστάσεις	Lκατ=508mm	L _{d1} =5,95mm L _{d2} =9,3mm
Συνθήκες κατεργασίας	n=2000rpm	f= 320mm/min
	a=0,4mm	V _c =60 m/min
	v=76	T=121min

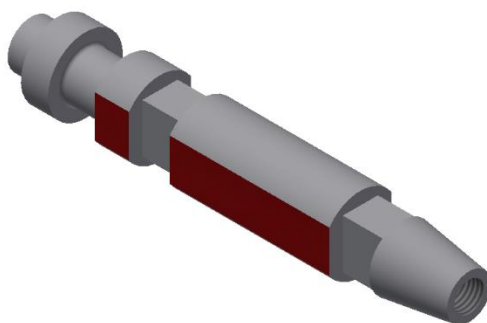


Σχέδιο 32: Ξεχόνδρισμα και φινίρισμα εδρών.

Φάση 2

Ξεχόνδρισμα και φινίρισμα πλευράς C και D

Κοπτικό εργαλείο	μανέλα Φ16 με βίντια καρβιδίου τετράφτερη	
Διαστάσεις	$L_{κατ}=251\text{mm}$	$L_d=3$
Συνθήκες κατεργασίας	$n=1500\text{rpm}$	$f=350\text{mm/min}$
	$a=0,4\text{mm}$	$V_c=60\text{ m/min}$
	$v=16$	$T=11,5\text{min}$

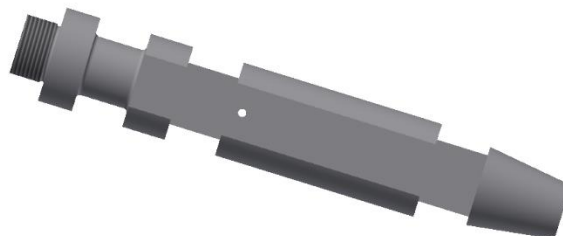


Σχέδιο 33: Ξεχόνδρισμα και φινίρισμα πλευρών.

Φάση 3

Διάνοιξη οπής 3mm

Κοπτικό εργαλείο	Τρυπάνι Φ3 καρβιδίου		
Διαστάσεις	Δαρχ=3mm	Δτελ=3mm	Λκατ=31mm
Συνθήκες κατεργασίας	n=3000rpm		f=150 mm/min
	a=1mm		Vc=80m/min
	v=31		T=13sec

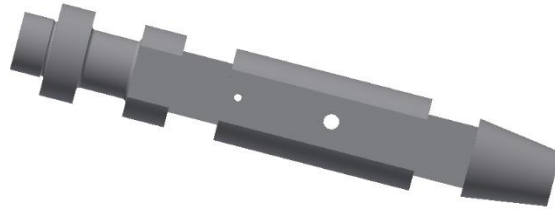


Σχέδιο 34: Διάνοιξη οπής.

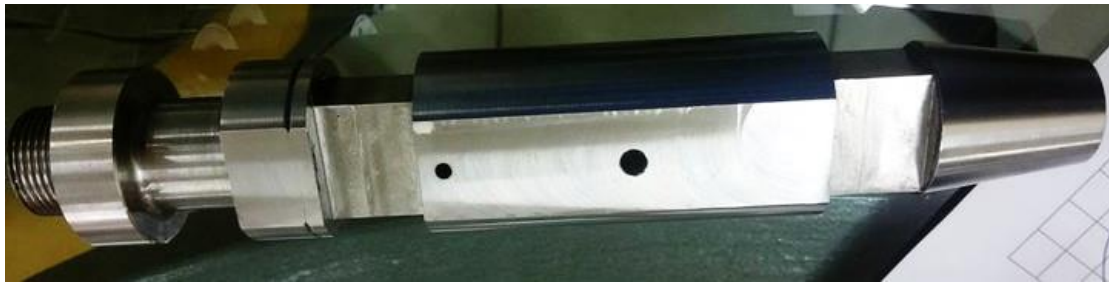
Φάση 4

Διάνοιξη οπής 6mm

Κοπτικό εργαλείο	Τρυπάνι Φ6 καρβιδίου		
Διαστάσεις	Δαρχ=6mm	Δτελ=6mm	Λκατ=31mm
Συνθήκες κατεργασίας	n=6000 rpm		f=300 mm/min
	a=1mm		Vc=60m/min
	v=31		T=7sec



Σχέδιο 35: Διάνοιξη οπής.

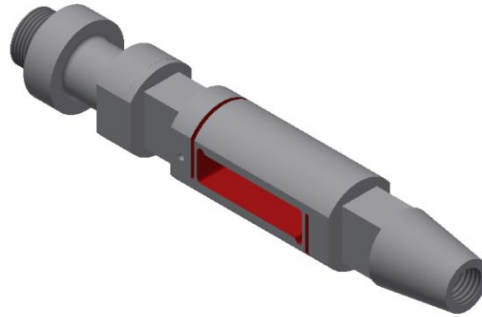


Εικόνα 19: Ο ζυγός μετρά την κατεργασία στο cnc

Για να ολοκληρωθεί η κατασκευή του ζυγού, χρειάστηκε κατεργασία με ηλεκτροδιάβρωση σύρματος. Η κατεργασία πραγματοποιήθηκε σε μηχανή MITSUBISHI FA20VS. Οι συνθήκες κατεργασίας οριστήκαν από το είδος του υλικού, το πάχος κατεργασίας και την τραχύτητα της επιφάνειας. Χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρόδιο διαμέτρου 0,25mm.

Υλικό	Χάλυβας
Πάχος κατεργασίας	29 mm
Τραχύτητα επιφάνειας	2,0 μm
Αριθμός πάσων	2

Πίνακας 5: συνθήκες κατεργασίας ηλεκτροδιάβρωσης σύρματος.



Σχέδιο 36: Κατεργασία σύρματος.

Wire Dia. and Type	Material Type	Material Thickness	Process	Flush cup clearance	
				Upper	Lower
0.25BS	A STEEL	30mm B	Standard	0.20mm	0.10mm

Cutting Process	Start Up	Rough Cut	Skim1	Skim2	Skim3	Skim4	Skim5	Skim6
E-pack Number	953	2031	2032	2033	2034			
Power Supply	KH	KH	KH	LC	LC			
Control	NM	NM	NM	SL	SL			
Voltage Open	Vo	4	8	7	12			
Power Setting	IP	8	10	5	3	2		
IP adjust	ΔIP	6	10	9	-	-		
Off Time	OFF	1	1	1	8	4		
Stabilizer A	SA	3	6	2	2	2		
Stabilizer B	SB	8	12	8	8	4		
Stabilizer C	SC	3	3	1	1	1		
Stabilizer E	SE	4	5	1	1	1		
Voltage Gap	VG	60 (58 ~ 62)	53 (50 ~ 56)	110 (108 ~ 112)	88 (86 ~ 90)	88 (86 ~ 90)		
Fine machining	FM	OFF	OFF	OFF	ON			
Wire Speed	WS	8	12	12	12			
Wire Tension	WT	9	10	13	14	14		
Pre-Tension	PT	14	14	14	14	14		
Flow Balance	FB	NM	NM	NM	NM	NM		
Liquid Quantity	LQ	12	14	4	4	4		
Liquid Resistivity	LR	9	9	9	9	9		
Feedrate Address	FA	0.7	2.5	4.0	8.2	7.5		
Upper Flow Rate		6.0	8.0	1.0	1.0	1.0		
Lower Flow Rate		5.0	6.0	1.0	1.0	1.0		

	Upper Value(s)					
Rough Cut	162					
Rough & 1 Skim	196	133				
Rough & 2 Skims	207	144	132			
Rough & 3 Skims	212	149	137	132		
Rough & 4 Skims						
Rough & 5 Skims						
Rough & 6 Skims						
Stepping Increment		63	12	5		

RESULTS							
Feedrate Cutting	FC	4.0 ~ 6.0	5.5 ~ 9.0	7.0 ~ 10.0	7.2 ~ 9.0		
Average Voltage Gap	VG	51 ~ 55	107 ~ 115	83 ~ 93	83 ~ 98		
Avg. Linear Feedrate	ALF	300.0	177.6	131.7	103.6		
Surface Finish(μm)	Ry	17.5 ~ 18.5	12.7 ~ 15.2	5.4 ~ 6.0	3.1 ~ 3.7		
	Ra	2.6 ~ 3.1	1.7 ~ 2.0	0.6 ~ 0.9	0.3 ~ 0.6		

A: MATERIAL

B: ΠΑΧΟΣ ΥΛΙΚΟΥ (approx)

D: ΤΕΛΙΚΗ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ Ra (μm)

E: ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΟΠΗΣ

C: ΑΡΙΘΜΟΣ E-PACK ΠΟΥ ΖΗΤΕΙΤΑΙ ΑΠΟ ΤΗ ΓΕΝΗΤΡΙΑ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΠΑΣΣΟ

D

Εικόνα 20: Πίνακας επιλογής συνθηκών κοπής.



Εικόνα 21: Τελική μορφή του ζυγού.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα βασικά συμπεράσματα από την μελέτη και την κατασκευή του αεροδυναμικού ζυγού είναι τα εξής:

- Η μοντελοποίηση του ζυγού με τη χρήση προγραμμάτων CAD επιτρέπει τη γρήγορη και με ακρίβεια σχεδίαση οποιασδήποτε γεωμετρίας του, την αναθεώρησή της ανάλογα με τις απαιτήσεις και την προσαρμογή των διαστάσεων, από το αγγλοσαξονικό σύστημα στο μετρικό. Στο σχέδιο υπάρχουν διαφορές σε σχέση με το πρωτότυπο κυρίως στα πάχη στα σημεία τοποθέτησης των επιμηκυνσιομέτρων για διευκόλυνση στην κατεργασία.
- Η ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία βοήθησε στην πρόβλεψη της μηχανικής συμπεριφοράς του ζυγού κατά την επίδραση των επιλεγμένων φορτίων για κάθε συνιστώσα. Παρατηρήθηκε ότι σε μεγάλα φορτία άντωσης και ροπής πρόνωσης, η τάση που δημιουργείται σε συγκεκριμένες περιοχές του ζυγού, είναι κοντά στο όριο διαρροής του υλικού. Η έκθεσή του σε αυτά τα φορτία θα πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή καθώς υπάρχει το ενδεχόμενο πλαστικής παραμόρφωσης. Στα σημεία τοποθέτησης, για μικρά φορτία, θα πρέπει να διαπιστωθεί πειραματικά για το αν είναι σε θέση να δώσουν μετρήσεις, οι παραμορφώσεις που δημιουργούνται και να καθοριστεί το εύρος λειτουργίας του ζυγού.
- Η κατασκευή του ζυγού κρίνεται επιτυχής καθώς οι διαστάσεις είναι μέσα στα όρια των ανοχών. Κατά την κατεργασία του ζυγού προέκυψαν δυσκολίες όπως, σπάσιμο εργαλείων κατά το άνοιγμα των σπειρωμάτων, πρόωρη φθορά εργαλείων λόγω της σκληρότητας του υλικού, ανωμαλίες στην επιφάνεια “σκαλοπάτι” κατά το φρεζάρισμα, πιθανών από μη σωστή συγκράτηση ή φθορά του εργαλείου.

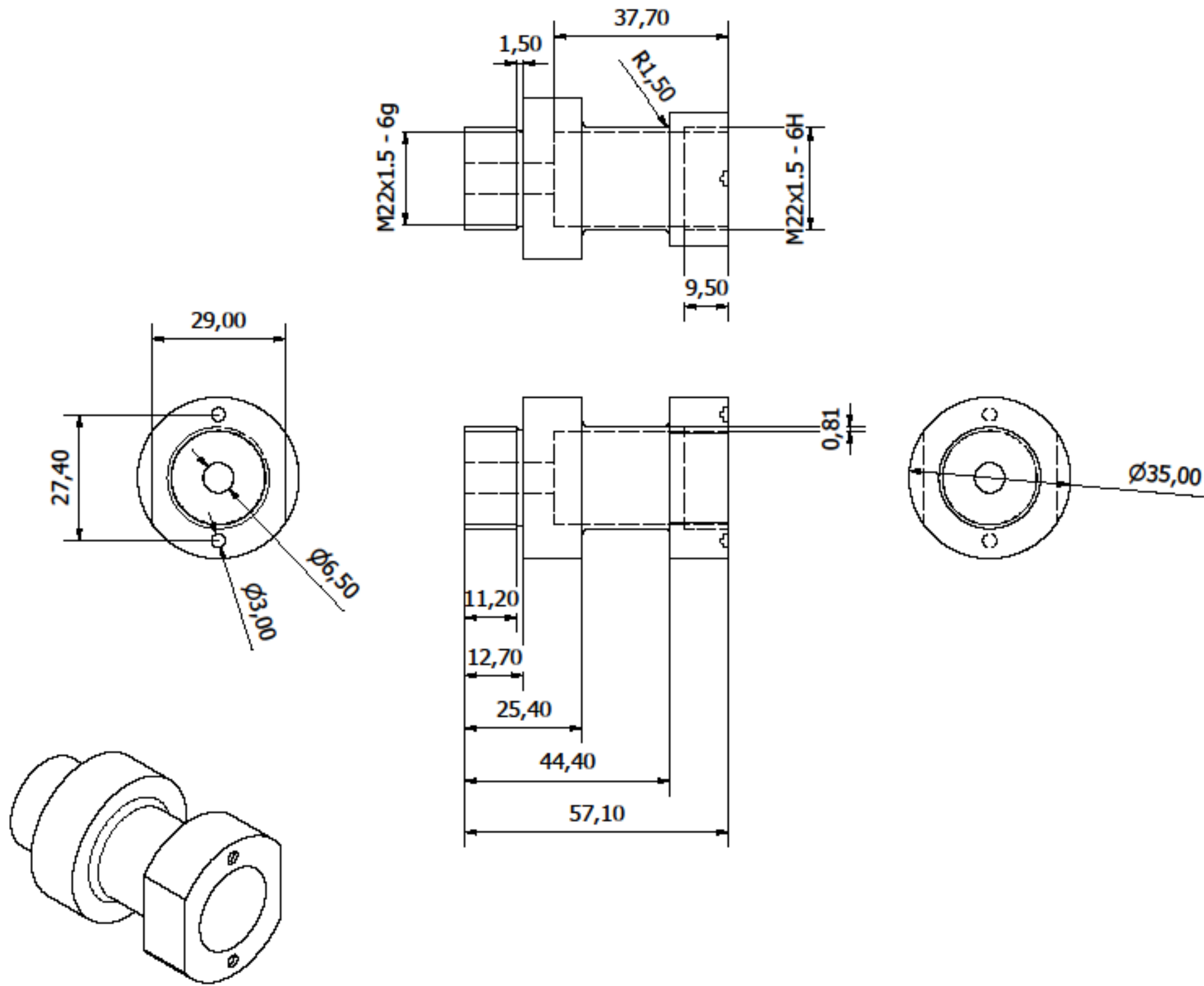
ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ

Η παρούσα εργασία κάλυψε το σχεδιαστικό και κατασκευαστικό μέρος του αεροδυναμικού ζυγού. Μελλοντικές εργασίες θα χρειαστούν για :

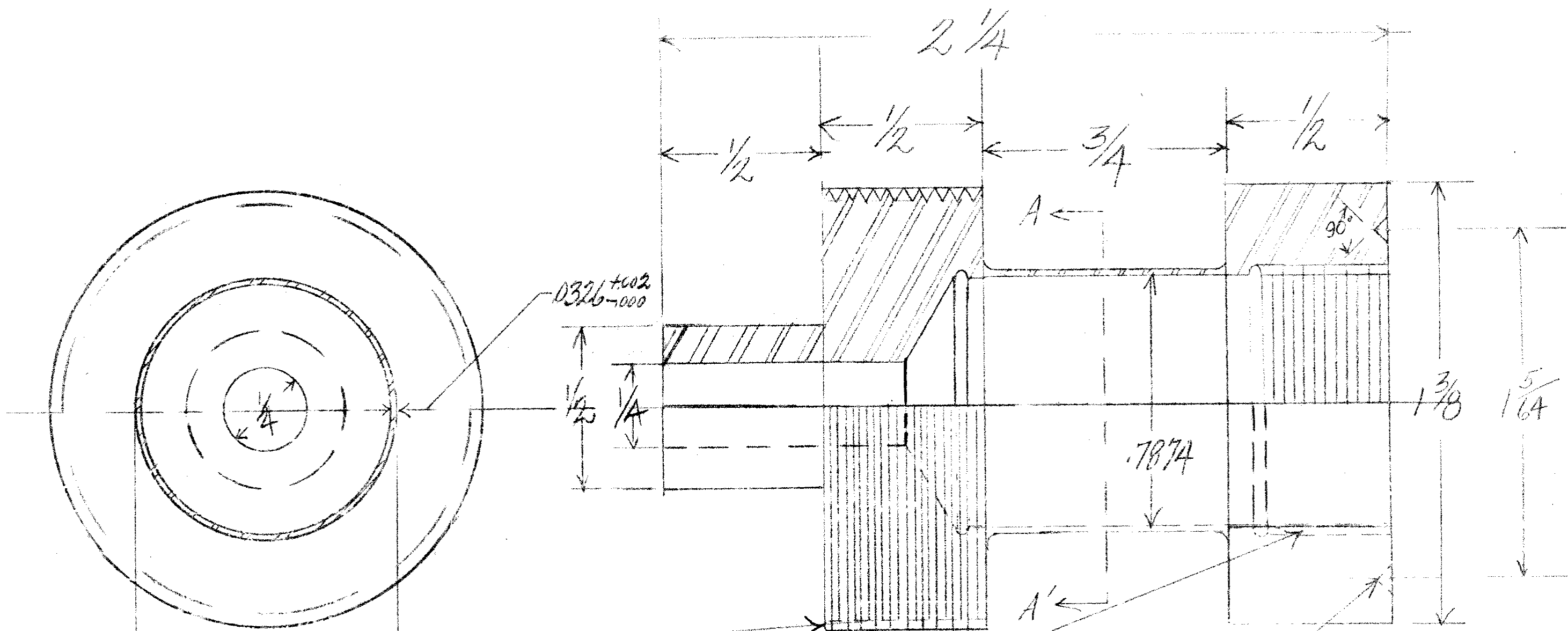
- Την επιλογή και τοποθέτηση των επιμηκυνσιομέτρων και την καταγραφή πιλοτικών μετρήσεων για την βαθμονόμηση του ζυγού.
- Την κατασκευή πρότυπων μοντέλων και πραγματική μέτρηση των αεροδυναμικών τους στοιχείων στις αεροσύραγγες.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ford, W. W. 1949. Design of a six component internal strain gage balance system. Engineer's thesis, California Institute of Technology.
- Tropea, Yarin & Foss, 2007. Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics. Springer.
- US Army Aviation Logistics School Fort Eustis. 1994. BASIC AERODYNAMICS.
- Miguel Gonzalez, Jose Miguel Ezquerro, Victoria Lapuerta, Ana Laveron and Jacobo Rodriguez. 2011. Components of a Wind Tunnel Balance: Design and Calibration, Wind Tunnels and Experimental Fluid Dynamics Research, Prof. Jorge Colman Lerner (Ed.). InTech
- N.M. Nouri, Karim Mostafapour, Maryam Kamran, Robab Bohadori. 2014. Design methodology of a six-component balance for measuring forces and moments in water tunnel tests. Elsevier Ltd.
- Pravin Vadassery. 2012. Design, calibration and testing of a force balance for a hypersonic shock tunnel. University of Texas at Arlington.
- Okamoto Satoru. 2011. Wind Tunnels. InTech.
- Δ. Ροζης. 2006. Επισκόπηση δυναμικών χαρακτηριστικών και χαρακτηριστικών ελέγχου πτήσης αεροσκαφών. Εθνικο Μετσοβιο Πολυτεχνειο Σχολη Μηχανολογων Μηχανικων.
- https://www.uddeholm.com/files/PB_Uddeholm_corrax_english.pdf



2 - ΠΙΣΩ ΜΕΡΟΣ ΖΥΓΟΥ	ΧΑΛΥΒΑΣ CORRAX			
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ		ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΖΥΓΟΣ		
		ΑΠΟΣΤΟΛΙΔΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ	1:1	2/2



.820
SEC A-A'

THREAD
1 3/8 - 24
TO FIT CWT STING

THREAD 7/8 - 14NF-3
P.D. 8286 +.0036
-.0000
TO FIT - 1

COUNTERSINK
2 HOLES
LOCATE FRONT

NOTE: BREAK ALL SHARP EDGES

75ST AL ALLOY 1 1/2 x 1 1/2 Dia		ANODIZE		2 1/2 x 1 1/2			TOLERANCES = .010 OR 1/64 UNLESS OTHERWISE NOTED
			Jard	Bowen			SCALE: TWICE SIZE
MATERIAL	FINISH	HEAT TREAT	DRAFTSMAN	CHECKED	APPROVED	ENGINEER	SECOND REVISION
GUGGENHEIM AERONAUTICAL LABORATORY CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY			CAP SIX COMPONENT INTERNAL STRAIN GAGE				1-2852
NAME						DRAWING NO.	