



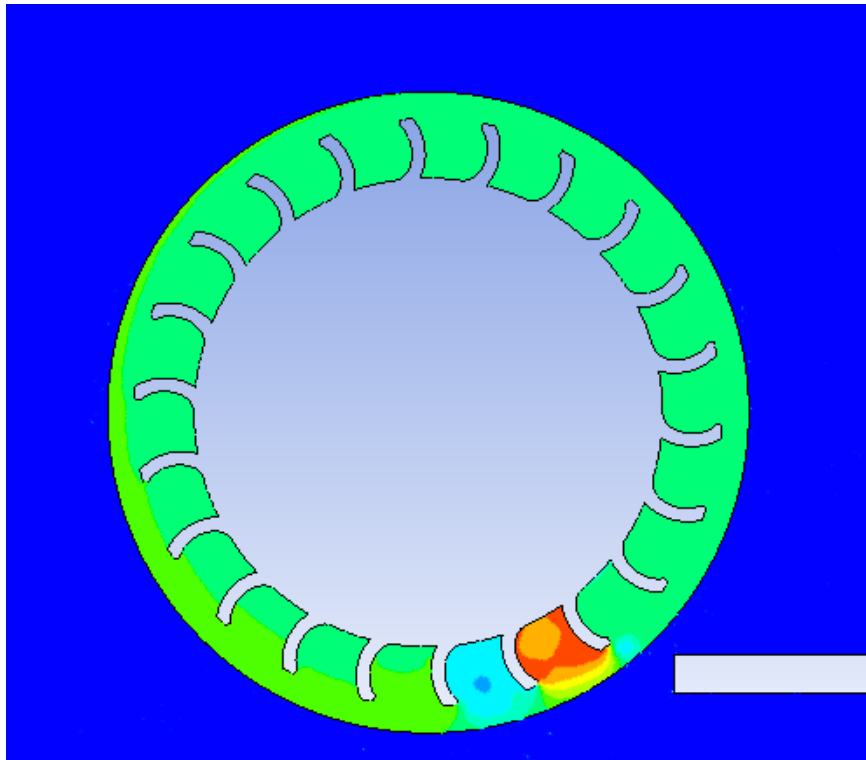
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ ΤΥΠΟΥ RELTON



ΦΟΙΤΗΤΗΣ: ΚΑΡΒΕΛΑΣ ΑΡΙΣΤΟΜΕΝΗΣ Α.Μ.(7149)

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΣΚΟΥΡΑΣ ΕΥΓΕΝΙΟΣ ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΠΑΤΡΑ 2021

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί την πτυχιακή μου εργασία που εκπονήθηκε στο τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου και πραγματεύεται τον σχεδιασμό και την προσομοίωση της ρευστοδυναμικής συμπεριφοράς υδροστροβίλου δράσης τύπου Pelton. Αρχικά, γίνεται μια σύντομη αναδρομή στην ιστορία της υδροϊσχύος και του υδροστροβίλου Pelton. Στη συνέχεια παρατίθενται βασικά στοιχεία Μηχανικής των Ρευστών και της θεωρίας των υδροστροβίλων με έμφαση στον υδροστρόβιλο Pelton. Επιπρόσθετα, διεξάγονται οι αριθμητικοί υπολογισμοί για την διαστασιολόγηση του υδροστροβίλου και οι οποίοι χρησιμοποιούνται στην μετέπειτα σχεδίαση του, με αναλυτική περιγραφή των βημάτων που ακολουθούνται. Τελικά, πραγματοποιείται η προσομοίωση της ροής εντός του ακροφυσίου καθώς και του συστήματος στροφείου-ακροφυσίου ώστε να μελετηθεί η ροή εντός του. Στόχος αυτής της πτυχιακής εργασίας είναι η παράθεση ορισμένων βασικών τεχνικών ηλεκτρονικής σχεδίασης και η λεπτομερής μελέτη των ρευστοδυναμικών φαινομένων που παρουσιάζονται κατά την λειτουργία του υδροστροβίλου. Απώτερος σκοπός μου είναι να προσφέρω και εγώ το δικό μου λιθαράκι στο τεράστιο οικοδόμημα που αποκαλείται επιστήμη και να διανθίσω την υπάρχουσα βιβλιογραφία που καλύπτει το παρόν θέμα.

Οφείλω να ομολογήσω πως το αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτέλεσε για μένα μια προσωπική πρόκληση λόγω του αυξημένου βαθμού δυσκολίας που θεωρώ ότι εμφανίζει. Συνεπώς θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Επιβλέποντα Καθηγητή μου κ. Ευγένιο Σκούρα, Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου προσέφερε για την πραγματοποίηση και την ολοκλήρωση της εργασίας.

Τέλος, θα επιθυμούσα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου προς τους γονείς μου οι οποίοι με στήριξαν καθόλη την διάρκεια των σπουδών μου, βοηθώντας με να αποκτήσω τα απαραίτητα εφόδια για ένα καλύτερο μέλλον.

Καρβελάς Αριστομένης

Μάρτιος 2021

Υπεύθυνη Δήλωση Φοιτητή: Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Φοιτητής έχω επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνω υπεύθυνα ότι είμαι συγγραφέας αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, έχω δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μου όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποίησα και έλαβα ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνω επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχω ενσωματώσει στην εργασία μου προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχω πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχω αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Ο Φοιτητής

(Ονοματεπώνυμο)

Καρβελάς Αριστομένης

(Υπογραφή)



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία αναφέρεται στον σχεδιασμό των βασικών εξαρτημάτων του υδροστροβίλου τύπου Pelton με την βοήθεια του προγράμματος ηλεκτρονικής σχεδίασης Solidworks 2014 Premium καθώς και στην προσομοίωση της συμπεριφοράς του, όσον αφορά τα ρευστοδυναμικά φαινόμενα που παρατηρούνται κατά την αλληλεπίδραση της ελεύθερης δέσμης του ρευστού με το στροφέιο. Η προσομοίωση έγινε εφικτή με το υπολογιστικό πακέτο Ansys Fluent 2020 R2 Student Edition της εταιρείας ANSYS.

Η ανάπτυξη του θέματος γίνεται σε έξι κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο έχουμε μια συνοπτική ιστορική αναδρομή της υδροισχύος σε διεθνές επίπεδο καθώς και του υδροστροβίλου τύπου Pelton.

Στο δεύτερο κεφάλαιο κρίθηκε αναγκαία η προσθήκη βασικών εννοιών της Μηχανικής των ρευστών ώστε να επιτευχθεί βαθύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς που εμφανίζει το ρευστό κατά την κίνηση του όπως και των φυσικών ιδιοτήτων αυτού. Πολύτιμα εργαλεία στα χέρια των επιστημόνων είναι και οι νόμοι διατήρησης της μάζας, της ορμής και της ενέργειας οι οποίοι περιγράφονται επίσης και στην παρούσα πτυχιακή εργασία, μαζί με τις αποδείξεις τους.

Στο τρίτο κεφάλαιο έγινε μια προσπάθεια αποσαφήνισης εννοιών που σχετίζονται με τον τομέα των υδροστροβίλων γενικότερα, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στην μελέτη του υδροστροβίλου τύπου Pelton. Ακολούθησε η παρουσίαση των βασικών εξαρτημάτων που απαρτίζουν τον υδροστροβίλο με μια σύντομη αλλά περιεκτική περιγραφή του ρόλου που επιτελούν. Επιπρόσθετα, θεωρήθηκε μια υποθετική περίπτωση ύψους πτώσης και αναμενόμενης ωφέλιμης ισχύος εξόδου και πραγματοποιήθηκαν οι βασικοί αναλυτικοί υπολογισμοί με σκοπό την διαστασιολόγηση του υδροστροβίλου.

Στο τέταρτο κεφάλαιο δόθηκε ο ορισμός της ηλεκτρονικής σχεδίασης με την αποσαφήνιση του όρου CAD (Computer Aided Design). Ένας από τους κύριους πυλώνες της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι ο σχεδιασμός των εξαρτημάτων που αποτελούν τον υδροστροβίλο, με τις διαστάσεις του να υπολογίζονται στο δεύτερο κεφάλαιο. Αρχικά, έγινε μια λεπτομερής περιγραφή της πορείας που ακολουθήθηκε για την σχεδίαση της ακίδας, του περιβλήματος του ακροφυσίου και την τελική συναρμολόγηση τους. Ομοίως καταγράφηκε και η πορεία σχεδίασης για τα σκαφίδια, την πλήμνη, τα δύο είδη κοχλιών με τα αντίστοιχα περικόχλια τους και την ένταξη τους σε μια κοινή οριστική συναρμολόγηση, αυτή του υδροστροβίλου.

Το πέμπτο κεφάλαιο αναφέρεται στο Επιστημονικό πεδίο της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής και στους τομείς όπου εφαρμόζεται. Μελετάται εκτεταμένα το πώς δουλεύει ο υπολογιστικός κώδικας με την ανάλυση των επιμέρους στοιχείων του. Περιγράφεται η διαδικασία της προσομοίωσης της ροής εντός του ακροφυσίου του υδροστροβίλου, η οποία περιλαμβάνει την κατασκευή της γεωμετρίας του προβλήματος, την διακριτοποίηση της υπολογιστικής περιοχής, την δημιουργία των συνοριακών συνθηκών, και την εξαγωγή συμπερασμάτων για τα ροϊκά φαινόμενα που εμφανίζονται.

Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο υλοποιήθηκε η προσομοίωση της ροής για το σύστημα ακροφυσίου-στροφείου, με τα στάδια της όπως είναι η κατασκευή της γεωμετρίας, η κατασκευή του υπολογιστικού πλέγματος, ο καθορισμός του προβλήματος, η επίλυση και η εξαγωγή αποτελεσμάτων, να παρουσιάζονται και να καταγράφονται λεπτομερώς. Η προσομοίωση της ροής στον υδροστροβίλο αρχικά πραγματοποιήθηκε για μη μόνιμη ροή

και στην συνέχεια διεξήχθησαν τρεις προσομοιώσεις στην μόνιμη κατάσταση με χρήση τριών διαφορετικών μοντέλων τύρβης.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|---|-----|
| ΠΡΟΛΟΓΟΣ | iii |
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ | v |
| ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... | 1 |
| 1. ΣΥΝΤΟΜΗ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ | 1 |
| 1. ΘΕΜΕΛΙΩΔΕΙΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ | 3 |
| 1.1 Η ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ..... | 3 |
| 1.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΡΕΥΣΤΟΥ | 3 |
| 1.3 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ | 4 |
| 1.3.1 Πίεση | 4 |
| 1.3.2 Πυκνότητα, ειδικός όγκος και ειδικό βάρος..... | 4 |
| 1.3.3 Συμπιεστότητα | 5 |
| 1.3.4 Ιξώδες..... | 5 |
| 1.4 ΕΙΔΗ ΡΟΗΣ | 7 |
| 1.4.1 Μονοδιάστατη, δυσδιάστατη και τρισδιάστατη | 7 |
| 1.4.2 Άτριβη και ιξώδης | 7 |
| 1.4.3 Μόνιμη και μεταβατική ροή | 7 |
| 1.4.4 Ομοιόμορφη και ανομοιόμορφη ροή..... | 8 |
| 1.4.5 Ασυμπίεστη και συμπιεστή ροή | 9 |
| 1.4.6 Στρωτή, μεταβατική και τυρβώδης ροή | 9 |
| 1.5 ΝΟΜΟΙ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ..... | 11 |
| 1.5.1 Διατήρηση της μάζας | 11 |
| 1.5.2 Διατήρηση της ορμής | 13 |
| 1.5.3 Διατήρηση της ενέργειας | 16 |
| 1.6 ΘΕΩΡΙΑ ΤΟΥ ΟΡΙΑΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ | 19 |
| 1.7 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΤΡΙΒΗΣ ΕΝΤΟΣ ΣΩΛΗΝΟΓΡΑΜΜΗΣ | 20 |
| 2. ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΣ ΡΕΛΤΟΝ-ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ..... | 24 |
| 2.1 ΓΕΝΙΚΑ..... | 24 |
| 2.2 ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ | 24 |
| 2.2.1 Ανάλογα τον τρόπο παραλαβής της ενέργειας του νερού | 24 |
| 2.2.2 Ανάλογα τον βαθμό αντίδρασης..... | 26 |
| 2.2.3 Ανάλογα του διαθέσιμου ύψους..... | 27 |
| 2.2.4 Ανάλογα τη διεύθυνση ροής του νερού στον υδροστρόβιλο | 27 |
| 2.2.5 Ανάλογα με τον προσανατολισμό του άξονα..... | 27 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| 2.3 | ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ PELTON | 28 |
| 2.4 | ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ PELTON | 30 |
| 2.4.1 | Ακροφύσιο και ακίδα (Nozzle and spear) | 30 |
| 2.4.2 | Εκτροπέας (Deflector) | 31 |
| 2.4.3 | Δρομέας (Runner) | 32 |
| 2.4.4 | Κέλυφος (Casing) | 33 |
| 2.4.5 | Υδραυλικό φρένο (Braking Jet) | 33 |
| 2.4.6 | Διώρυγα απαγωγής | 34 |
| 2.5 | ΕΞΙΣΩΣΗ EULER | 34 |
| 2.6 | ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟ PELTON | 35 |
| 2.7 | ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΓΙΑ ΤΟΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΤΟΥ ΔΡΟΜΕΑ | 36 |
| 2.8 | ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΙΣΧΥΣ | 43 |
| 2.9 | ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΩΛΕΙΕΣ | 43 |
| 3. | ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ SOLIDWORKS | 46 |
| 3.1 | ΟΡΙΣΜΟΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ | 46 |
| 3.1.1 | Κύρια στοιχεία συστημάτων CAD | 46 |
| 3.1.2 | Πλεονεκτήματα συστημάτων CAD | 47 |
| 3.1.3 | Τρεις προσεγγίσεις βελτίωσης των συστημάτων CAD | 47 |
| 3.2 | ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΓΧΥΤΗΡΑ | 48 |
| 3.2.1 | Σχεδιασμός ακίδας | 48 |
| 3.2.2 | Σχεδιασμός ακροφυσίου | 50 |
| 3.2.3 | Συναρμολόγηση Ακίδας και Ακροφυσίου | 52 |
| 3.3 | ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΤΡΟΦΕΙΟΥ | 55 |
| 3.4 | ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΟΧΛΙΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΚΟΧΛΙΩΝ | 65 |
| 3.4.1 | Σχεδιασμός εξαγωνικού κοχλίου M24 | 67 |
| 3.4.2 | Σχεδίαση εξαγωνικού περικοχλίου M24 | 72 |
| 3.4.3 | Συναρμολόγηση κοχλίου και περικοχλίου | 75 |
| 3.5 | ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΟΥ ΣΤΡΟΦΕΙΟΥ | 79 |
| 3.6 | ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ | 81 |
| 4. | ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗ | 84 |
| 4.1 | ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ | 84 |
| 4.1.1 | Πορεία επίλυσης φυσικών προβλημάτων με χρήση CFD και αύξηση αξιοπιστίας υπολογιστικής λύσης | 85 |
| 4.1.2 | Πλεονεκτήματα θεωρητικού υπολογισμού | 86 |
| 4.1.3 | Τομείς εφαρμογών | 86 |
| 4.1.4 | Ασάθεια-Ακρίβεια-Οικονομία | 87 |

| | |
|---|-----|
| 4.2 ΤΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΠΑΚΕΤΟ ANSYS FLUENT | 88 |
| 4.2.1 Προ-επεξεργαστής (Pre processor) | 88 |
| 4.2.2 Επιλύτης (Solver)..... | 89 |
| 4.2.3 Μετά-επεξεργαστής (Post-Processor)..... | 89 |
| 4.3 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ | 89 |
| 4.3.1 Γεωμετρία..... | 89 |
| 4.3.2 Υπολογιστικό πλέγμα..... | 90 |
| 4.3.3 Κατηγοριοποίηση υπολογιστικών πλεγμάτων ανάλογα με την συνδεσιμότητα τους..... | 91 |
| 4.3.4 Ποιότητα πλέγματος (Mesh Quality)..... | 92 |
| 4.4 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ (SET UP) | 93 |
| 4.4.1 Επιλογή επιλύτη | 93 |
| 4.4.2 Επιλογή ροϊκού μοντέλου..... | 94 |
| 4.4.3 Καθορισμός ιδιοτήτων υλικών | 94 |
| 4.4.4 Καθορισμός συνοριακών συνθηκών | 94 |
| 4.4.5 Καθορισμός μεθόδου επίλυσης | 96 |
| 4.4.6 Καθορισμός κριτηρίου σύγκλισης..... | 97 |
| 4.4.7 Αρχικοποίηση της λύσης..... | 97 |
| 4.4.8 Μοντελοποίηση της τύρβης..... | 97 |
| 4.4.9 Μοντέλο k-ε..... | 97 |
| 4.4.10 Μοντέλο k-ε Realizable..... | 99 |
| 4.4.11 Μοντέλο k-ε RNG..... | 99 |
| 4.4.12 Μοντέλο k-ω | 100 |
| 4.4.13 Μοντέλο k-ω SST | 100 |
| 5. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΡΟΗΣ ΕΝΤΟΣ ΤΟΥ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ | 101 |
| 5.1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ (GEOMETRY)..... | 101 |
| 5.2 ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ (MESHING)..... | 102 |
| 5.3 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ (SET UP)..... | 106 |
| 5.3.1 Επιλογή επιλύτη | 106 |
| 5.3.2 Επιλογή ροϊκού μοντέλου..... | 106 |
| 5.3.3 Καθορισμός υλικού και των ιδιοτήτων του..... | 107 |
| 5.3.4 Καθορισμός Συνοριακών συνθηκών | 108 |
| 5.3.5 Καθορισμός μεθόδου επίλυσης | 110 |
| 5.3.6 Καθορισμός συντελεστών υποχαλάρωσης και τιμών αναφοράς | 111 |
| 5.3.7 Αρχικοποίηση επιλύτη | 111 |
| 5.4 ΕΠΙΛΥΣΗ..... | 112 |

| | |
|---|-----|
| 5.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ | 113 |
| 6. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ-ΣΤΡΟΦΕΙΟΥ | 115 |
| 6.1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ (GEOMETRY) | 115 |
| 6.2 ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ | 117 |
| 6.3 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ (SET UP) | 121 |
| 6.3.1 Εκλογή επιλύτη | 121 |
| 6.3.2 Εκλογή ροϊκού μοντέλου | 122 |
| 6.3.3 Επιλογή υλικού | 123 |
| 6.3.4 Καθορισμός συντοριακών συνθηκών | 123 |
| 6.3.5 Καθορισμός μεθόδου επίλυσης | 126 |
| 6.3.6 Καθορισμός συντελεστών υποχαλάρωσης και τιμών αναφοράς | 127 |
| 6.3.7 Καθορισμός κριτηρίου σύγκλισης | 127 |
| 6.3.8 Αρχικοποίηση επιλύτη | 128 |
| 6.4 ΕΠΙΛΥΣΗ | 128 |
| 6.4.1 Αριθμός Courant | 129 |
| 6.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ-ΣΤΡΟΦΕΙΟΥ ΣΤΗΝ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ | 130 |
| 6.6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ-ΣΤΡΟΦΕΙΟΥ ΣΤΗ ΜΟΝΙΜΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ | 132 |
| 6.6.1 Μοντέλο k-ε Realizable | 132 |
| 6.6.2 Μοντέλο k-ε RNG | 134 |
| 6.6.3 Μοντέλο k-ω SST | 135 |
| 6.7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΗΣ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ | 137 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ | 139 |

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1. ΣΥΝΤΟΜΗ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

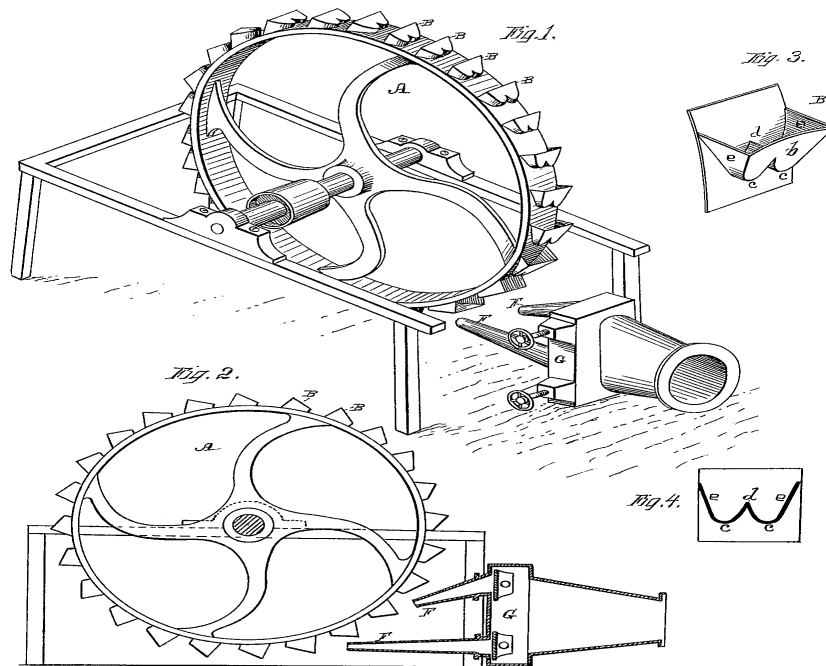
Τα έως τώρα ιστορικά δεδομένα καταδεικνύουν πως η ενέργεια του νερού αξιοποιήθηκε για πρώτη φορά πριν από περίπου 5000 χρόνια ενώ η πρώτη αναφορά γίνεται στην Αρχαία Ελλάδα κατά τον 2^ο αιώνα π.Χ. από τον Αντίπατρο τον Θεσσαλονικέα. Αργότερα στη Ρωμαϊκή Αυτοκρατορία είχαν κατασκευαστεί και λειτουργούσαν δεκάδες νερόμυλοι. Κατά τον 1^ο αιώνα μ.Χ. ο Βιτρούβιος είχε περιγράψει στο έργο του περί αρχιτεκτονικής, το σχεδιασμό υδρόμυλων. Η διάταξη των πρώτων υδροτροχών ήταν κατακόρυφου άξονα και αργότερα αντικαταστάθηκε από υδροτροχούς οριζοντίου άξονα. Οι κύριες εφαρμογές της υδροισχύος για αιώνες στις χώρες της δυτικής Ευρώπης και έως τα μέσα του 20^{ου} αιώνα στην Ελλάδα ήταν η άλεση των σιτηρών, την κοπή ξυλείας, ανύψωση φορτίων και μια πληθώρα βιομηχανικών εφαρμογών οι οποίες ενίσχυσαν και τόνωσαν την οικονομία των κοινωνιών που την εκμεταλλεύτηκαν.

Κατά την περίοδο του Μεσαίωνα και έως τα τέλη του 18^{ου} αιώνα η υδροισχύς αποτελούσε την κύρια πηγή μηχανικής ενέργειας η οποία ήταν εκμεταλλεύσιμη από την ανθρωπότητα. Η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση για ενέργεια εξώθησε την ανθρωπότητα στην αναζήτηση τρόπων και τεχνικών για την βελτιστοποίηση της απόδοσης των υδροτροχών. Κατά τη χρονική περίοδο μεταξύ 1650 και 1800 έγιναν πολλές δοκιμές με αποτέλεσμα να αποδειχθεί πως οι υδροτροχοί αποδίδουν ενέργεια με βέλτιστο τρόπο όταν το νερό προσκρούει στην άνω πλευρά των πτερυγίων.

Το πρώτο μισό του 19^{ου} αιώνα ήταν κομβικής σημασίας στην ανάπτυξη τεχνολογιών για την αποδοτικότερη εκμετάλλευση της ενέργειας του νερού. Το 1827 ο Γάλλος Μηχανικός Benoit Fourneyron ανέπτυξε έναν στρόβιλο ο οποίος ήταν ικανός να παράγει ισχύ ίση με περίπου 6 HP και ήταν η πρώτη έκδοση του υδροστροβίλου δράσης τύπου Fourneyron. Το 1849 ο Αγγλοαμερικανός Μηχανικός James Francis ανέπτυξε τον πρώτο σύγχρονο υδροστρόβιλο, τον υδροστρόβιλο τύπου Francis, ο οποίος έως και σήμερα είναι πιο διαδεδομένος υδροστρόβιλος στον κόσμο.

Ο Αμερικανός εφευρέτης Lester Allan Pelton ήταν αυτός που εφηύρε πρώτος έναν υδροστρόβιλο ο οποίος αρμόζει σε περιπτώσεις όπου υπάρχει υψηλό ύψος πτώσης και μικρές παροχές ύδατος. Το 1864 εργαζόταν στα ορυχεία εξόρυξης χρυσού, ως εργάτης στο μύλο, εκεί ήταν όπου έκανε την ανακάλυψη που έμελλε να τον αναδείξει ως ένα από τα σπουδαιότερα πρόσωπα της υδροηλεκτρικής ενέργειας. Στα ορυχεία, παρατήρησε τροχούς να χρησιμοποιούνται για την παροχή μηχανικής ενέργειας στον εξοπλισμό των ορυχείων όπως είναι συμπιεστές αέρα, αντλίες και σε άλλα παρόμοια μηχανήματα. Η ενέργεια για την περιστροφή των υδροτροχών παρέχονταν από ισχυρές δέσμες νερού οι οποίες πρόσκρουαν στα επίπεδα πτερύγια του τροχού. Η εξέλιξη αυτών των πτερυγίων ήταν να μετατραπούν σε ημισφαιρικά κύπελλα, με την ελεύθερη δέσμη να προσπίπτει στο κέντρο τους. Επιπλέον, παρατήρησε πως ένας

τροχός περιστρεφόταν ταχύτερα σε σχέση με άλλους παρόμοιων μηχανών. Με μια πρώτη εκτίμηση διαπιστώθηκε πως ο τροχός είχε χαλαρώσει και είχε μετατοπιστεί πάνω στον άξονα του. Το νερό πρόσκρουε στην εσωτερική άκρη των σκαφιδίων και εξερχόταν από την άλλη πλευρά του. Ο Pelton στις προσπάθειες του να αναβαθμίσει την εφεύρεση του έκανε μια μετατροπή στον τροχό του τοποθετώντας τα σκαφίδια στο κέντρο του τροχού με αποτέλεσμα να περιστρέφεται ταχύτερα. Επιπρόσθετα, έβγαλε το συμπέρασμα πως η χρήση διαχωρισμένων σκαφιδίων ενίσχυε το φαινόμενο αυτό. Το 1879 μια δοκιμή του πρωτοτύπου του στο Πανεπιστήμιο της Καλιφόρνια στέφθηκε με επιτυχία και το 1890 του απονεμήθηκε το πρώτο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας.



Εικόνα 1: Σκαρίφημα αυθεντικής πατέντας του Pelton. [143]

Τα πρώτα υδροηλεκτρικά εργοστάσια που λειτούργησαν ήταν στο Surrey της Αγγλίας το μακρινό 1881 και στο Wisconsin των Η.Π.Α το 1882. Το έτος 1891 η ηλεκτρική ενέργεια που παραγόταν από τα υδροηλεκτρικά εργοστάσια κάλυπτε τις ανάγκες οικιών και βιομηχανιών σε μια εμβέλεια που ξεπερνούσε τα 150 χιλιόμετρα. Στις μέρες μας η υδροηλεκτρική ενέργεια είναι αρκετά διαδεδομένη με το 20% των αναγκών για ηλεκτρική ενέργεια παγκοσμίως να καλύπτονται από την ενέργεια που έχει παραχθεί σε υδροηλεκτρικά εργοστάσια.

1. ΘΕΜΕΛΙΩΔΕΙΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

1.1 Η ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ

Η μηχανική είναι η παλαιότερη φυσική επιστήμη η οποία μελετά σώματα που είτε είναι ακίνητα είτε κινούνται υπό την επίδραση κάποιων δυνάμεων. Ο κλάδος της μηχανικής που μελετά τα σώματα σε ηρεμία, καλείται στατική ενώ ο κλάδος που απασχολείται με την κίνηση των σωμάτων ονομάζεται δυναμική. Η μηχανική των ρευστών είναι μια υποκατηγορία της μηχανικής η οποία ορίζεται ως η επιστήμη που έχει ως αντικείμενο μελέτης την συμπεριφορά των ρευστών σε ηρεμία (υδροστατική) ή τα ρευστά που βρίσκονται σε κίνηση (ρευστοδυναμική), καθώς και την αλληλεπίδραση των ρευστών με στερεά σώματα ή άλλα ρευστά.

Η Μηχανική των ρευστών δύναται και αυτή να διαιρεθεί σε επιμέρους υποκατηγορίες. Η μελέτη των ρευστών σε κίνηση τα οποία προσεγγιστικά μπορεί να θεωρηθούν ασυμπύεστα (όπως είναι κυρίως τα υγρά, ειδικά το νερό και τα αέρια που κινούνται με μικρές ταχύτητες) συχνά αναφέρεται ως υδροδυναμική. Μια υποκατηγορία της υδροδυναμικής είναι η υδραυλική, η οποία ασχολείται με την ροή των υγρών εντός κλειστών αγωγών και σε ανοικτά κανάλια. Η αεροδυναμική είναι η επιστήμη που ερευνά την ροή των αερίων (ειδικά του αέρα), γύρω από στερεά σώματα όπως είναι τα αεροσκάφη, οι πύραυλοι και αυτοκίνητα που κινούνται με υψηλές ή χαμηλές ταχύτητες. Άλλες ειδικές κατηγορίες όπως είναι η μετεωρολογία, η ωκεανολογία και η υδρολογία μελετούν ροές που εμφανίζονται στη φύση.

1.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΡΕΥΣΤΟΥ

Ρευστό είναι το υλικό σώμα το οποίο παραμορφώνεται συνεχώς υπό την επίδραση διαμητικής τάσης όσο ανεπαίσθητη και αν είναι. Τα μόρια του ρευστού είναι τυχαία κατανομημένα στον χώρο και συγκρατούνται με ασθενείς δεσμούς από τις συνεκτικές δυνάμεις και εσωτερικές δυνάμεις που εμφανίζονται. Τα ρευστά είναι είτε υγρά είτε αέρια.

1.3 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ

1.3.1 Πίεση

Η πίεση είναι το μέτρο της δύναμης που εφαρμόζεται κάθετα σε μια επιφάνεια ενός αντικειμένου ανά μονάδα εμβαδού της επιφάνειας αυτής, δηλαδή:

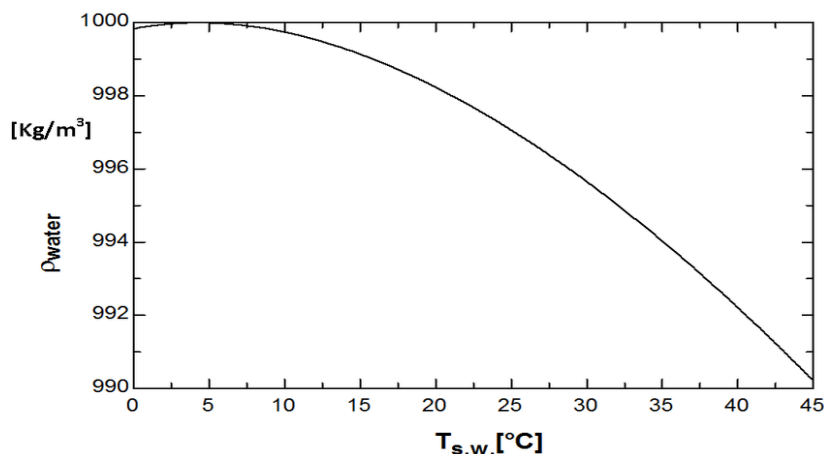
$$P = \frac{F}{A} \quad (1.1)$$

Η μονάδα μέτρησης της πίεσης στο διεθνές σύστημα μονάδων είναι το Pascal (Pa), που αντιστοιχεί σε δύναμη 1 Newton που εφαρμόζεται ανά τετραγωνικό μέτρο m^2 .

1.3.2 Πυκνότητα, ειδικός όγκος και ειδικό βάρος

Η πυκνότητα μάζας ρ είναι μια θεμελιώδης και σημαντική φυσική ιδιότητα του ρευστού και εκφράζει την μάζα m που περιέχεται στη μονάδα του όγκου V . Η μονάδα μέτρησης της στο διεθνές σύστημα μονάδων (S.I) είναι το 1 kg/m^3 . Ενδεικτικά η πυκνότητα του νερού στη θερμοκρασία των 20°C είναι $\rho_{\text{νερού}} = 998 \text{ kg/m}^3$ και η πυκνότητα του αέρα στους 0°C είναι $\rho_{\text{αέρα}} = 1.3 \text{ kg/m}^3$. Η μαθηματική σχέση της πυκνότητας για ομοιογενή σώματα είναι η εξής:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1.2)$$



Εικόνα 1-1: Διάγραμμα ρ - T για το νερό. [150]

Όταν το σώμα έχει ανομοιόμορφη κατανομή μάζας τότε θεωρούμε τη μέση τιμή εντός ενός απειροστού όγκου ΔV_0 , με κέντρο το σημείο \vec{r} ως:

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow \Delta V_0} \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (1.3)$$

Όπου Δm είναι η μάζα του ρευστού στον όγκο ΔV . Στην σχέση (1.3) ο όγκος ΔV_0 είναι απειροστά μικρός αλλά επαρκής ώστε να περιέχει αρκετά μόρια ρευστού προκειμένου να έχει νόημα η εύρεση της μέσης τιμής. Γενικότερα η πυκνότητα μιας ουσίας είναι συνάρτηση της πίεσης και της θερμοκρασίας, δηλαδή $\rho = \rho(p, T)$ και με αύξηση της πίεσης, αυξάνεται η πυκνότητα ενώ η αύξηση της θερμοκρασίας επιφέρει μείωση της πυκνότητας. Στην Εικόνα 1-1 είναι εμφανές ένα διάγραμμα $\rho - T$ για το νερό.

Ο ειδικός όγκος v του ρευστού είναι το αντίστροφο της πυκνότητας και ορίζεται από την σχέση:

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho} \quad (1.4)$$

Το ειδικό βάρος γ ορίζεται ως το βάρος (δύναμη της βαρύτητας) ($B = mg$) ανά μονάδα όγκου του ρευστού. Η μαθηματική έκφραση του περιγράφει το φυσικό μέγεθος που ονομάζεται ειδικό βάρος είναι η εξής:

$$\gamma = \frac{B}{V} = \rho g \quad (1.5)$$

1.3.3 Συμπιεστότητα

Ως συμπιεστότητα κ νοείται η παραμόρφωση που λαμβάνουν τα ρευστά καθώς δέχονται την επίδραση μιας εξωτερικής πίεσης υπό σταθερή θερμοκρασία. Τα υγρά για συνηθισμένες πιέσεις θεωρούνται ασυμπίεστα ($\rho = \text{σταθερή}$) ενώ τα αέρια συμπιεστά.

$$\kappa = \frac{1}{E} \quad (1.6)$$

Όπου $E =$ Μέτρο ελαστικότητας

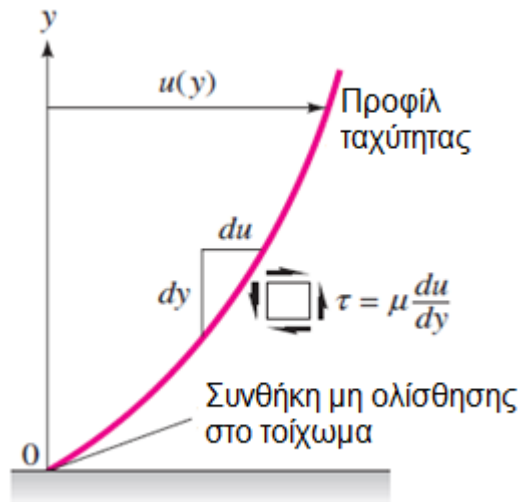
1.3.4 Ιξώδες

Το ιξώδες μ αποτελεί την ιδιότητα η οποία είναι ένα μέτρο της αντίστασης στην σταδιακή παραμόρφωση του ρευστού, έπειτα από εμφάνιση συνθηκών διατμητικής τάσης και καθορίζει το πόσο εύκολα ή δύσκολα ρέει. Επιπρόσθετα το μέτρο του ιξώδους συνδέεται και με τις απώλειες ενέργειας που λαμβάνουν χώρα κατά την ροή εντός σωλήνων, στομίων, αεραγωγών και καναλιών. Από διαισθητική σκοπιά, το ιξώδες ταυτίζεται με την εσωτερική τριβή που εμφανίζεται στο ρευστό και εκφράζει κατά πόσο είναι παχύρρεστο ή όχι. Παραδείγματος χάρη το μέλι παρουσιάζει μικρή ρευστότητα σε σχέση με το νερό, οπότε το μέλι έχει υψηλότερο ιξώδες από το νερό. Η μονάδα μέτρησης του δυναμικού ιξώδους μ στο SI είναι το [Pa s]. Το δυναμικό ιξώδες συνδέεται με την διατμητική τάση μέσω της έκφρασης του 2^{ου} Νόμου του Νεύτωνα για

τα ρευστά, καθώς είναι η σταθερά αναλογίας της διατμητικής τάσης και του ρυθμού παραμόρφωσης, δηλαδή:

$$\tau = \mu \frac{du(y)}{dy} \Leftrightarrow \mu = \frac{\tau}{\frac{du(y)}{dy}} \quad (1.7)$$

Όπου τ η διατμητική τάση και $\frac{du(y)}{dy}$ είναι ο ρυθμός διάτμησης.



Εικόνα 1-2: Διαφοροποίηση της ταχύτητας ροής κοντά σε στερεά επιφάνεια. [22]

Τα ρευστά για τα οποία ισχύει η σχέση (1-7) καλούνται Νευτώνεια. Σε αντίθετη περίπτωση όπου το ιξώδες συναρτάται από την ταχύτητα, η εξίσωση των διατμητικών τάσεων είναι μη γραμμική και το ρευστό ονομάζεται μη Νευτώνειο.

Το ιξώδες οφείλεται στους εξής παράγοντες:

- Συνεκτικές δυνάμεις.
- Στον ρυθμό μεταφοράς της μοριακής ορμής ανάμεσα στα γειτονικά παράλληλα στρώματα ρευστού.

1.4 ΕΙΔΗ ΡΟΗΣ

1.4.1 Μονοδιάστατη, δυσδιάστατη και τρισδιάστατη

Μονοδιάστατη ονομάζεται η ροή της οποίας η ταχύτητα μεταβάλλεται στη μια διάσταση του χώρου και ίσως ως προς τον χρόνο. Δηλαδή στην περίπτωση όπου η ταχύτητα μεταβάλλεται ως προς τον άξονα x , μπορούμε να γράψουμε την εξής σχέση: $u = u(x, t)$

Δυσδιάστατη ροή ονομάζεται η ροή της οποίας η ταχύτητα μεταβάλλεται στις δύο διαστάσεις του χώρου και ίσως ως προς τον χρόνο. Δηλαδή, ισχύει: $u = u(x, y, t)$

Τρισδιάστατη ροή ονομάζεται η ροή της οποίας η ταχύτητα μεταβάλλεται στις τρεις διαστάσεις του χώρου και ενδεχομένως ως προς τον χρόνο. Δηλαδή: $u = u(x, y, z, t)$

1.4.2 Άτριβη και ιξώδης

Άτριβη είναι η ροή για την οποία το ιξώδες θεωρείται μηδέν. Αυτά τα ρευστά που χαρακτηρίζονται από αυτή την ιδιότητα ονομάζονται ιδανικά. Φυσικά αυτά τα ρευστά είναι ένα ιδεατό κατασκεύασμα που έχουμε επινοήσει και δεν υπάρχουν στη φύση. Η άτριβη ροή είναι ένα θεωρητικό εργαλείο που μας βοηθά στην απλοποίηση των φαινομένων της ροής των πραγματικών ρευστών και να γίνει μια πρώτη προσέγγιση των φαινομένων.

Ιξώδης ροή είναι η ροή όλων των πραγματικών ρευστών όπου το ιξώδες κατέχει μια συγκεκριμένη αριθμητική τιμή. Στην περίπτωση της άτριβης ροής η ταχύτητα του ρευστού το οποίο ρέει σε επαφή με μία ακίνητη επιφάνεια είναι αμετάβλητη σε οποιαδήποτε απόσταση από την επιφάνεια. Από την άλλη πλευρά στην ιξώδη ροή η ταχύτητα μεταβάλλεται από στρώμα σε στρώμα του ρευστού και το προφίλ της εμφανίζει μια κατανομή. Το στρώμα του ρευστού που εφάπτεται στην επιφάνεια έχει μηδενική ταχύτητα λόγω της συνθήκης μη ολίσθησης. Η απομάκρυνση από την επιφάνεια συνεπάγεται και αύξηση της ταχύτητας κατά την x διεύθυνση μέχρις ότου αποκτήσει μια οριακή τιμή u_∞ . Η περιοχή πάχους $\delta(x)$ του ρευστού κατά την οποία λαμβάνει χώρα η μεταβολή της ταχύτητας κατά την διεύθυνση y από $u = 0$ μέχρι $u = 0.99u_\infty$ καλείται οριακό στρώμα.

1.4.3 Μόνιμη και μεταβατική ροή

Μόνιμη χαρακτηρίζεται η ροή κατά την οποία το διάνυσμα της ταχύτητας σε κάθε σημείο του πεδίου ροής παραμένει σταθερό ως προς το χρόνο.

Επομένως ισχύει:

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = 0 \quad (1.8)$$

Στη μόνιμη ροή η ταχύτητα δύναται να μεταβάλλεται μόνο χωρικά και σε κάθε σημείο παραμένει σταθερή ως προς τον χρόνο. Στη περίπτωση λοιπόν, της μόνιμης ροής η ταχύτητα είναι συνάρτηση αποκλειστικά των χωρικών συντεταγμένων $u = u(x, y, z)$ (τρισδιάστατη περίπτωση). Το ίδιο ισχύει και για τις υπόλοιπες μεταβλητές που χαρακτηρίζουν τη ροή όπως είναι η πίεση και η πυκνότητα κ.α. Δηλαδή μπορούμε να γράψουμε ότι:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = 0 \quad , \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (1.9)$$

Μη μόνιμη ροή χαρακτηρίζεται η ροή κατά την οποία το διάνυσμα της ταχύτητας σε ένα σημείο είναι χρονικά μεταβαλλόμενο. Η ταχύτητα λοιπόν είναι συνάρτηση και του χώρου αλλά και του χρόνου $u = u(x, y, z, t)$, άρα:

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} \neq 0 \quad (1.10)$$

1.4.4 Ομοιόμορφη και ανομοιόμορφη ροή

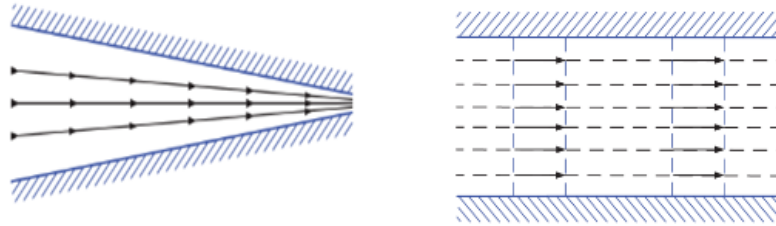
Ομοιόμορφη καλείται η ροή της οποίας όλα τα διανύσματα της ταχύτητας είναι πανομοιότυπα σε κάθε σημείο της ροής για κάθε δεδομένη χρονική στιγμή. Δηλαδή κατά μήκος μιας ροϊκής γραμμής του πεδίου ροής η ταχύτητα δεν μεταβάλλεται στο χώρο. Συνεπώς οι ροϊκές γραμμές θα πρέπει να είναι ευθείες και παράλληλες μεταξύ τους διότι δεν μεταβάλλεται το διάνυσμα της ταχύτητας (βλέπε Εικόνα 1-3). Τα χαρακτηριστικά της ομοιόμορφης ροής μπορούν να εκφραστούν με την παρακάτω μαθηματική σχέση:

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial s} = 0 \quad (1.11)$$

Όπου το s είναι η μετατόπιση κατά μήκος της ροϊκής γραμμής.

Στην αντίθετη περίπτωση όπου το διάνυσμα της ταχύτητας είναι διαφορετικό σε κάθε σημείο του ρευστού όπως είναι εμφανές στην Εικόνα 1-3, τότε η ροή ονομάζεται ανομοιόμορφη και ισχύει η εξής μαθηματική έκφραση:

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial s} \neq 0 \quad (1.12)$$



Εικόνα 1-3: Ανομοιόμορφη (αριστερά) και ομοιόμορφη ροή (δεξιά). [20]

1.4.5 Ασυμπίεστη και συμπιεστή ροή

Ασυμπίεστη ροή καλείται όταν η πυκνότητα του ρευστού σε κάθε σημείο του, παραμένει σταθερή ως προς τον χρόνο. Η υλική παράγωγος για κάθε σωματίδιο του ρευστού είναι μηδέν, δηλαδή:

$$\frac{D\rho}{Dt} = 0 \quad (1.13)$$

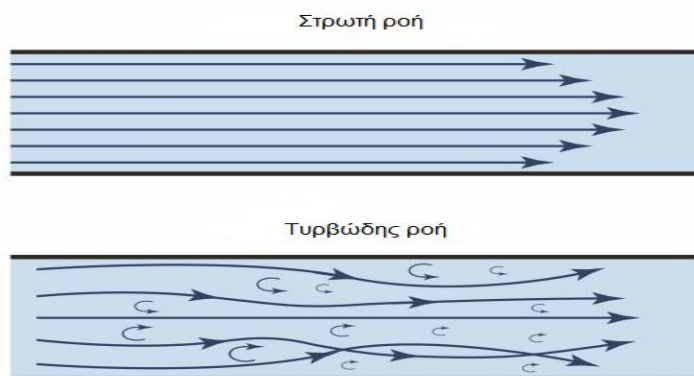
Από την άλλη πλευρά η συμπιεστή ροή έχει ως χαρακτηριστικό την μεταβολή της πυκνότητας ως προς τον χρόνο.

1.4.6 Στρωτή, μεταβατική και τυρβώδης ροή

Στρωτή χαρακτηρίζεται η ροή της οποίας τα σωματίδια κινούνται με σταθερή ταχύτητα κατά στρώσεις όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 1-4. Δηλαδή τα σωματίδια του ρευστού που καταλαμβάνουν το ίδιο στρώμα κινούνται με την ίδια ταχύτητα κατά την διεύθυνση της ροής, ανεξάρτητα από την θέση στην οποία βρίσκονται. Μακροσκοπικά δεν παρατηρείται ανάμειξη των γειτονικών στρωμάτων του ρευστού ωστόσο μικροσκοπικά υπάρχει ανταλλαγή ορμής μεταξύ των στρωμάτων. Στη στρωτή ροή οι διατμητικές τάσεις λόγω ιξώδους που επενεργούν στο ρευστό, εξισορροπούν οποιαδήποτε αστάθεια και δημιουργία δινών.

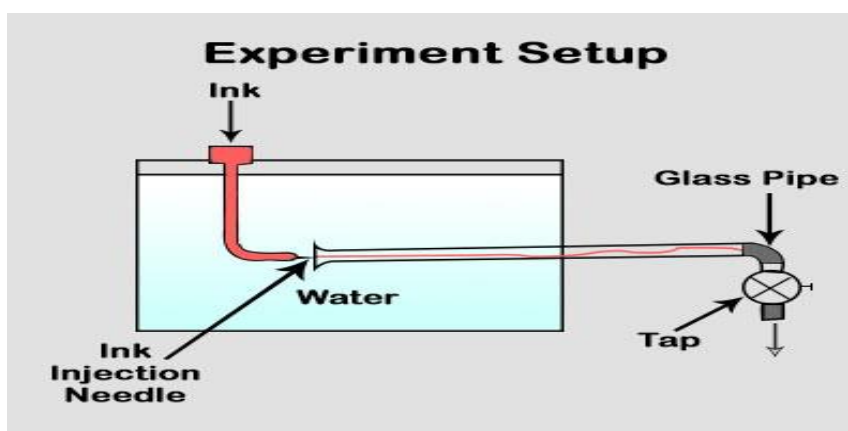
Τυρβώδης ονομάζεται η ιξώδης ροή της οποίας τα σωματίδια κινούνται χαοτικά δηλαδή το πεδίο ροής μεταβάλλεται κατά τυχαίο και απρόβλεπτο τρόπο (βλέπε Εικόνα 1-4). Υπάρχει τυχαία και ακανόνιστη μεταφορά ορμής ανάμεσα στα σωματίδια του ρευστού. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι ιδιότητες του ρευστού να μεταβάλλονται και αυτές κατά τυχαίο τρόπο ως προς τον χρόνο και τη θέση. Σε αυτή την περίπτωση ο προσδιορισμός των φυσικών ιδιοτήτων της ροής περιλαμβάνει κυρίως στατιστική μελέτη με την εξαγωγή των μέσων τιμών.

Η κατάσταση που μεσολαβεί ανάμεσα στη στρωτή και στη τυρβώδη ροή καλείται μεταβατική.



Εικόνα 1-4: Ροϊκές γραμμές στρωτής και τυρβώδους ροής. [I49]

Ο Osborne Reynolds (1883) πρώτος μελέτησε εις βάθος το πρόβλημα του προσδιορισμού του είδους της ροής ως στρωτής ή τυρβώδους. Στα πλαίσια των ερευνών του, οργάνωσε την πειραματική διάταξη της Εικόνας 1-5 και η οποία αποτελείται από μια δεξαμενή που περιέχει νερό και εντός της βρίσκεται βυθισμένος σε οριζόντια θέση ένας γυάλινος σωλήνας με καμπυλωμένα τα τοιχώματα του στο ένα άκρο από το οποίο εισρέει το ρευστό. Στην είσοδο του σωλήνα βρίσκεται κατάλληλο ακροφύσιο από το οποίο γίνεται εκροή μελανιού προς το εσωτερικό του σωλήνα. Επιπλέον είναι δυνατή η ρύθμιση της ταχύτητας ροής του νερού εντός του σωλήνα με τη βοήθεια της βαλβίδας στο άκρο εκροής του. Καθώς το νερό ρέει, συμπαρασύρει το μελάνι το οποίο σχηματίζει νηματοειδή φλέβα. Η μορφή της φλέβας υποδηλώνει το είδος της ροής. Για μικρές παροχές το νήμα του μελανιού παραμένει στον άξονα του σωλήνα γεγονός που σημαίνει ότι το ρευστό κινείται υπό μορφή παραλλήλων στρωμάτων δηλαδή έχουμε στρωτή ροή. Αντιθέτως, όταν η ταχύτητα ροής αυξηθεί σημαντικά τότε η νηματοειδής φλέβα διασπάται σε μικρούς στροβίλους με αποτέλεσμα τον διασκορπισμό της προς όλες τις κατευθύνσεις. Το νερό χρωματίζεται σε όλη την έκταση του, πράγμα που υποδηλώνει τυρβώδη ροή λόγω της ανάμειξης των στρωμάτων της ροής.



Εικόνα 1-5: Αναπαράσταση της πειραματικής διάταξης του Reynolds. [I10]

Ο Reynolds χρησιμοποίησε σωλήνες ποικίλων διαμέτρων και νερό διαφόρων θερμοκρασιών και συμπέρανε πώς το είδος της ροής εξαρτάται από την τιμή που έχει η αδιάστατη παράμετρος η οποία αργότερα έλαβε το όνομα του Reynolds, ο αριθμός Re ο οποίος δίνεται από τον τύπο:

$$Re = \frac{\rho u d}{\mu} \quad (1.14)$$

Συγκεκριμένα, κατέληξε στα εξής συμπεράσματα:

- Η ροή χαρακτηρίζεται ως στρωτή όταν $Re \leq 2300$
- Η ροή είναι μεταβατική όταν $2300 < Re \leq 4000$
- Η ροή χαρακτηρίζεται ως τυρβώδης όταν $Re > 4000$

1.5 ΝΟΜΟΙ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ

Οι νόμοι διατήρησης αποτελούν πολύτιμα όπλα στη φαρέτρα των επιστημόνων για τη κατανόηση του φυσικού κόσμου καθώς περιγράφουν διαδικασίες οι οποίες μπορούν να συμβούν και απαγορεύουν άλλες οι οποίες είναι αδύνατο να συμβούν. Στη ρευστομηχανική, τα σημαντικότερα φυσικά μεγέθη που διατηρούνται και με τα οποία θα ασχοληθούμε εκτενέστερα είναι η μάζα, η ορμή και η ενέργεια.

1.5.1 Διατήρηση της μάζας

Αρχικά θα μελετηθεί η αρχή διατήρησης της μάζας για την περίπτωση της μονοδιάστατης ροής. Στοιχειώδης <<ροϊκός σωλήνας>> είναι ο υποθετικός αγωγός ο οποίος αποτελείται από ένα σύνολο εσώκλειστων ροϊκών γραμμών. Εξ ορισμού επειδή δεν υφίσταται ροή η οποία να είναι κάθετη προς τις ροϊκές γραμμές, το ρευστό εισέρχεται εντός του ροϊκού σωλήνα και εξέρχεται από τα άκρα του. Έστω ότι τα στοιχειώδη εμβαδά των διατομών της εισόδου του είναι δA_1 και της εξόδου είναι δA_2 , ενώ οι αντίστοιχες στοιχειώδεις ταχύτητες είναι u_1 και u_2 . Η στοιχειώδης παροχή δQ , δηλαδή η ποσότητα ρευστού ΔV στη μονάδα του χρόνου Δt , δίνεται από την σχέση:

$$\delta Q = u_1 \delta A_1 = u_2 \delta A_2 \quad (1.15)$$

Έπειτα από ολοκλήρωση σε όλο τον χώρο ροής, η παροχή Q είναι:

$$Q = U_1 A_1 = U_2 A_2 \quad (1.16)$$

Όπου U_1 και U_2 οι μέσες τιμές των ταχυτήτων, ενώ A_1 και A_2 τα εμβαδά των διατομών στην είσοδο 1 και στην έξοδο 2 του αγωγού. Η τελική εξίσωση της συνέχειας της μάζας μπορεί να γραφεί ως:

$$Q = UA = \text{σταθερή} \quad (1.17)$$

Η εξίσωση που δίνει τη ποσότητα όγκου δV του ρευστού που διέρχεται από την διατομή A στη μονάδα του χρόνου δt , δηλαδή την ογκομετρική παροχή είναι η εξής:

$$Q = \frac{\delta V}{\delta t} \quad (1.18)$$

Αρκετά χρήσιμη είναι και η μαζική παροχή $\dot{m} = \delta m / \delta t$. Όμως ισχύει ότι $m = \rho V$, τότε για σταθερή πυκνότητα ισχύει $\delta m = \rho \delta V$ και στη μονάδα του χρόνου:

$$\dot{m} = \frac{\delta m}{\delta t} = \rho \frac{\delta V}{\delta t} = \rho Q = \rho U A \quad (1.19)$$

Για τα δύο σημεία του αγωγού 1 και 2, η ανωτέρω εξίσωση λαμβάνει τη μορφή:

$$\rho_1 U_1 A_1 = \rho_2 U_2 A_2 \quad (1.20)$$

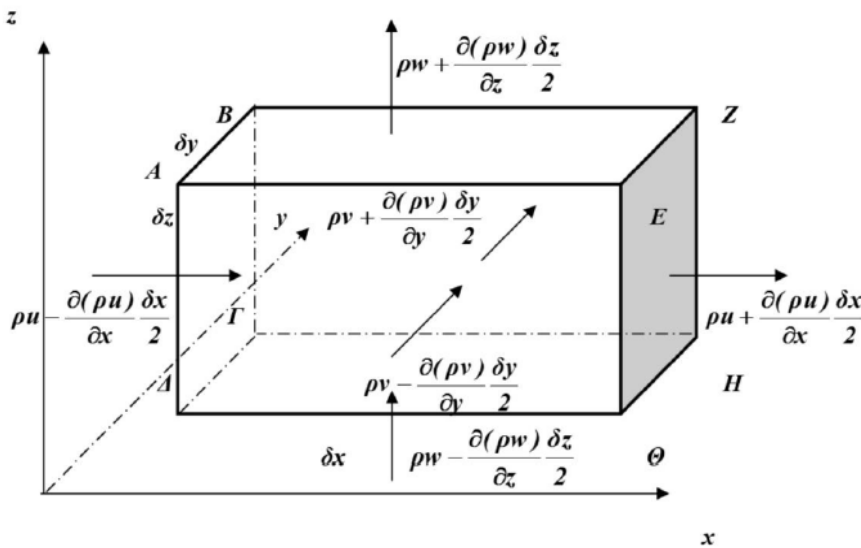
Όπου ρ_1 και ρ_2 οι πυκνότητες του ρευστού στις θέσεις 1 και 2 αντίστοιχα. Για ασυμπιεστή ροή όπου η πυκνότητα διατηρείται σταθερή, δηλαδή $\rho_1 = \rho_2$, τότε ισχύει η εξίσωση (1-17). Το σύνολο των περιπτώσεων που αναλύθηκαν έως τώρα, περιγράφουν σταθερή ροή.

Όταν η ροή είναι ασταθής, εντός του όγκου ελέγχου που περικλείεται μεταξύ των διατομών 1 και 2, η διαφορά της εισερχόμενης μάζας $\rho_1 U_1 A_1$ από την εξερχόμενη μάζα $\rho_2 U_2 A_2$ ισούται με την μεταβολή μάζας κατά το χρονικό διάστημα δt . Όταν $\delta t \rightarrow 0$.

$$\frac{dm}{dt} = \rho_1 U_1 A_1 - \rho_2 U_2 A_2 \quad (1.21)$$

Στην συνέχεια θα πραγματοποιηθεί η ανάλυση για την εξαγωγή της διαφορικής μορφής της εξίσωσης της διατήρησης της μάζας. Έστω ο στοιχειώδης όγκος του σχήματος της Εικόνας 1-6. Η πυκνότητα στο κέντρο του στοιχειώδους όγκου είναι ρ και οι συνιστώσες της ταχύτητας οι οποίες είναι παράλληλες προς τους άξονες x, y, z είναι u, v, w , αντίστοιχα. Η ροή της μάζας $\delta \dot{m}_{AB\Gamma\Delta}$ στην επιφάνεια ABΓΔ, η οποία είναι κάθετη προς τη u συνιστώσα της ταχύτητας δίνεται από τη σχέση:

$$\delta \dot{m}_{AB\Gamma\Delta} = \left[\rho u - \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{\delta x}{2} \right] \delta y \delta z \quad (1.22)$$



Εικόνα 1-6: Ροή μάζας μέσω στοιχειώδους όγκου ελέγχου. [16]

Αντιστοίχως η ροή μάζας που εξέρχεται από την επιφάνεια ΕΖΗΘ, προκύπτει:

$$\delta \dot{m}_{EZH\Theta} = \left[\rho u + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{\delta x}{2} \right] \delta y \delta z \quad (1.23)$$

Συνεπώς η καθαρή εισροή μέσω αυτών των δύο επιφανειών που είναι κάθετες προς τον άξονα των x είναι:

$$\delta \dot{m}_x = - \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \delta x \delta y \delta z \quad (1.24)$$

Οι μαθηματικές σχέσεις είναι παρόμοιες για την καθαρή ροή μέσω των έτερων ζευγαριών των επιφανειών που είναι κάθετες προς τον άξονα των y και z. Συνεπώς, η ολική καθαρή εισροή θα είναι το άθροισμα των επιμέρους καθαρών εισροών, μέσα στον όγκο ελέγχου, δηλαδή $\delta \dot{m} = \delta \dot{m}_x + \delta \dot{m}_y + \delta \dot{m}_z$. Τελικά θα είναι:

$$\delta \dot{m} = - \left[\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \right] \delta x \delta y \delta z \quad (1.25)$$

Η αύξηση της ροής της μάζας στον όγκο ελέγχου προκύπτει:

$$\delta \dot{m} = \frac{\partial m}{\partial t} = \frac{\partial(\rho \delta x \delta y \delta z)}{\partial t} \quad (1.26)$$

Εάν εξισωθούν οι εξισώσεις 1.25 και 1.26, τότε έχουμε:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1.27)$$

Η ανωτέρω εξίσωση ισχύει για το σύνολο των ρευστών και αποτελεί την διαφορική μορφή της εξίσωσης της διατήρησης της μάζας. Για ασυμπίεστα ρευστά η πυκνότητα διατηρείται σταθερή με αποτέλεσμα ο όρος της εξίσωσης 1.27 που την περιέχει να μηδενίζεται, άρα:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1.28)$$

1.5.2 Διατήρηση της ορμής

Ακολουθεί η ανάλυση για την εξαγωγή της μαθηματικής σχέσης της διατήρησης της ορμής στην απλή περίπτωση της μονοδιάστατης ροής. Σύμφωνα με τον δεύτερο του Νεύτωνα, η δύναμη F που αναπτύσσεται στο σώμα του ρευστού είναι ίση με τη μεταβολή της ορμής στον χρόνο. Άρα, ισχύει:

$$F = \frac{d(mu)}{dt} \quad (1.29)$$

Στο χρονικό διάστημα δt η ορμή στην θέση 1 είναι ίση με $\rho \delta Q_1 \delta t u_1$ και στη θέση 2 ισούται με $\rho \delta Q_2 \delta t u_2$. Όμως η αρχή διατήρησης της μάζας επιτάσσει ότι θα πρέπει να ισχύει, $\delta Q_1 = \delta Q_2$. Επομένως η στοιχειώδης δύναμη δF που είναι απαραίτητη για την συντήρηση της μεταβολής της ορμής μεταξύ των θέσεων 1 και 2 στο χρονικό διάστημα δt , δίνεται από τη σχέση :

$$\delta F = \frac{\rho \delta Q \delta t u_2 - \rho \delta Q \delta t u_1}{\delta t} = \rho \delta Q (u_2 - u_1) \quad (1.30)$$

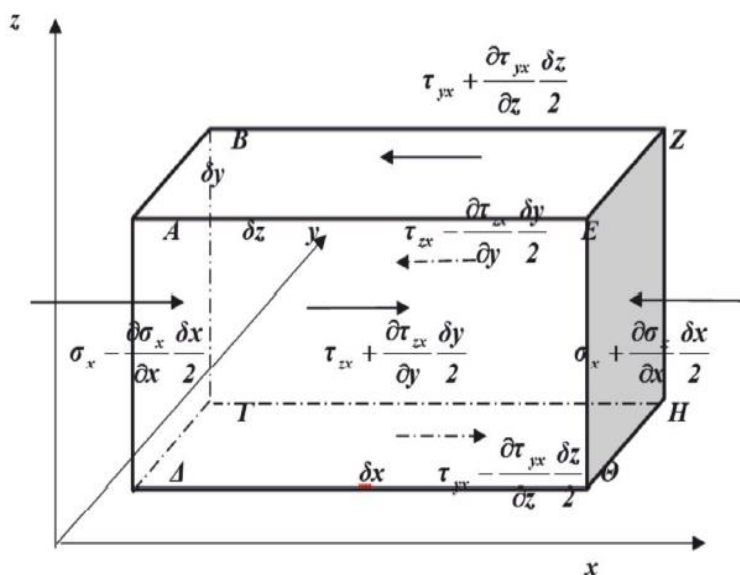
Με ολοκλήρωση και με την παραδοχή ότι οι ταχύτητες στις διατομές 1 και 2 είναι ομοιόμορφες, προκύπτει η σχέση:

$$F = \rho Q(U_2 - U_1) \quad (1.31)$$

Ή σε όρους παροχής μάζας:

$$F = \dot{m}(U_2 - U_1) \quad (1.32)$$

Στην συνέχεια θα πραγματωθεί η ανάλυση για την εξαγωγή των σχέσεων της γραμμικής ορμής στην διαφορική μορφή. Θεωρούμε τον στοιχειώδη όγκο ελέγχου του σχήματος της Εικόνας 1-7.



Εικόνα 1-7: Ροή σε στοιχειώδη όγκο ελέγχου. Επιφανειακές τάσεις. [16]

Κατά την κατεύθυνση του άξονα x και στο κέντρο του όγκου ελέγχου, οι τάσεις είναι, σ_x (ορθή), τ_{yx} (διατμητική), τ_{zx} (διατμητική). Γενικότερα, οι ορθές τάσεις σ_x , σ_y , σ_z δεν λαμβάνονται ότι είναι ίσες με την πίεση p . Ισχύει ότι:

$$p = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3} \quad (1.33)$$

Η δύναμη που ασκείται στην επιφάνεια $ABGA$ κατά την x κατεύθυνση ισούται με το γινόμενο της ορθής τάσης $\sigma_x - \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} \frac{\delta x}{2}$ επί το εμβαδόν της στοιχειώδους επιφάνειας $ABGA$ ($= \delta y \delta z$). Ομοίως η δύναμη που ασκείται στην απέναντι πλευρά $EZHΘ$ ισούται με το γινόμενο της κάθετης τάσης $\sigma_x + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} \frac{\delta x}{2}$ επί το εμβαδό της στοιχειώδους επιφάνειας $\delta y \delta z$. Συνεπώς, η καθαρή δύναμη στις δύο επιφάνειες, στην x κατεύθυνση είναι ίση με $-\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} \delta x \delta y \delta z$. Παρόμοιες σχέσεις, επίσης στην κατεύθυνση x , δύναται να εξαχθούν και για τις διατμητικές τάσεις τ_{yx}, τ_{zx} που επενεργούν στις πλευρές του όγκου ελέγχου $ABZE$ και $AEΘΔ$ αντίστοιχα. Εάν επιπρόσθετα θεωρηθούν και οι δυνάμεις του

σώματος του ρευστού όπως είναι η βαρύτητα ($\rho X \delta x \delta y \delta z$) όπου X η δύναμη ανά μονάδα μάζας του ρευστού, τότε η ολική δύναμη που δρα στον όγκο ελέγχου κατά την x διεύθυνση είναι η εξής:

$$F_x = \left(\rho X + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} - \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} \right) \delta x \delta y \delta z \quad (1.34)$$

Η παροχή της μάζας στη x κατεύθυνση είναι $\delta \dot{m}_x = \rho u \delta y \delta z$ και οι ορμές στις τρεις διευθύνσεις του χώρου x, y, z είναι $(\rho u \delta y \delta z)u$, $(\rho u \delta y \delta z)v$ και $(\rho u \delta y \delta z)w$. Όλες οι προαναφερθείσες δυνάμεις αφορούν το κέντρο του όγκου ελέγχου.

Εάν θεωρήσουμε τις δυνάμεις στη x διεύθυνση τότε στην επιφάνεια ΑΒΓΔ η δύναμη θα είναι $\left[\rho u^2 + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} \frac{\delta x}{2} \right] \delta y \delta z$ και στην απέναντι επιφάνεια ΕΖΗΘ είναι $\left[\rho u^2 - \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} \frac{\delta x}{2} \right] \delta y \delta z$, άρα η καθαρή δύναμη στον όγκο ελέγχου στη κατεύθυνση x θα είναι $\frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} \delta x \delta y \delta z$. Επιπρόσθετα, η άθροιση των δυνάμεων σε όλες τις πλευρές του όγκου ελέγχου κατά τη x διεύθυνση δίνει τη σχέση $\left[\frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} \right] \delta x \delta y \delta z$. Η χρονική μεταβολή της ορμής στον όγκο ελέγχου είναι $\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} \delta x \delta y \delta z$, με την γενική εξίσωση της ορμής στην x διεύθυνση που θα προκύψει έπειτα από εξισορρόπηση του συνόλου των δυνάμεων που επενεργούν, να είναι η εξής:

x -ορμή,

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = \rho X + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} - \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} \quad (1.35)$$

Ομοίως εργαζόμαστε και για την εξαγωγή των εξισώσεων για τη y -ορμή και τη z -ορμή.

y -ορμή,

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = \rho Y + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} - \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} \quad (1.36)$$

z -ορμή,

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} = \rho Z + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} - \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} \quad (1.37)$$

Οι ανωτέρω εξισώσεις είναι γνωστές ως εξισώσεις Navier-Stokes. Για μη συνεκτικές ροές οι διατμητικές τάσεις δεν λαμβάνονται υπόψιν και οι εξισώσεις πλέον ονομάζονται εξισώσεις Euler και παίρνουν την μορφή:

x -ορμή,

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = \rho X - \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} \quad (1.38)$$

y -ορμή,

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = \rho Y - \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} \quad (1.39)$$

z -ορμή,

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} = \rho Z - \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} \quad (1.40)$$

Όταν το ρευστό είναι ακίνητο τότε οι ορθές τάσεις στις τρεις διαστάσεις του χώρου $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ είναι ίσες με την ασκούμενη πίεση. Κατά την κίνηση ασυμπίεστου ρευστού οι μαθηματικές σχέσεις των καθέτων τάσεων έχουν τη μορφή:

$$\sigma_x = p - 2\mu \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \sigma_y = p - 2\mu \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \sigma_z = p - 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \quad (1.41)$$

Για Νευτώνια, ασυμπίεστα ρευστά στην περίπτωση της στρωτής ροής, ισχύουν οι σχέσεις:

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (1.42)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \quad (1.43)$$

$$\tau_{zx} = \tau_{xz} = \mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (1.44)$$

Με αντικατάσταση των ανωτέρω εξισώσεων στις εξισώσεις (1.35, 1.36, 1.37) και με συνδυασμό της εξίσωσης (1.27), προκύπτουν οι εξής σχέσεις:

x-ορμής,

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (1.45)$$

y-ορμής,

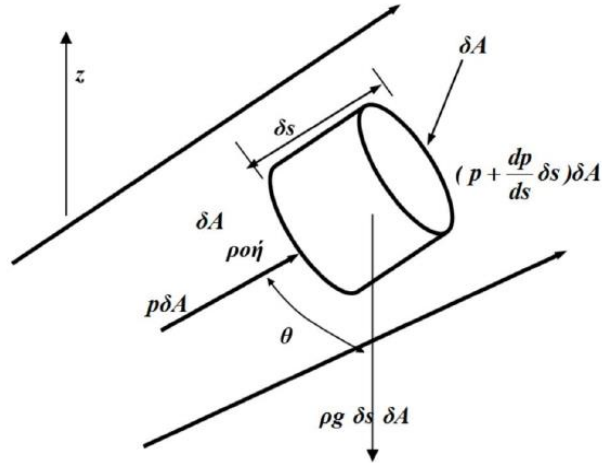
$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = Y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (1.46)$$

z-ορμής,

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (1.47)$$

1.5.3 Διατήρηση της ενέργειας

Ενέργεια στη μονοδιάστατη ροή. Έστω ένα κυλινδρικό στοιχείο του ροϊκού σωλήνα κατά μήκος μιας ροϊκής γραμμής όπως ακριβώς διακρίνεται στην Εικόνα 1-8.



Εικόνα 1-8: Εξισορρόπηση δυνάμεων σε ροϊκό κυλινδρικό στοιχείο. [16]

Στο μήκος και στο εμβαδόν της διατομής αποδίδονται τα σύμβολα δs και δA , αντίστοιχα. Το βάρος του στοιχείου είναι το γινόμενο, $\rho g \delta s \delta A$. Η δύναμη που ασκείται στην αριστερή πλευρά (διατομή) του κυλινδρικού στοιχείου είναι το γινόμενο της στατικής πίεσης και του εμβαδού της διατομής, δηλαδή είναι $p \delta A$, ενώ στη δεξιά διατομή είναι $\left[p + \left(\frac{dp}{ds} \right) \delta s \right] \delta A$, όπου p η στατική πίεση. Οι κάθετες δυνάμεις που επενεργούν στα πλευρικά τοιχώματα του στοιχειώδους κυλινδρικού στοιχείου, ισορροπούν. Οι διατμητικές τάσεις είναι ίσες με το μηδέν διότι το ρευστό θεωρείται ότι είναι ιδεατό, δηλαδή μη συνεκτικό. Η ταχύτητα μεταβάλλεται κατά μήκος της ροϊκής γραμμής και αυτό το γεγονός έχει ως συνέπεια την εμφάνιση μιας δύναμης αδράνειας, την οποία θα πρέπει να την συμπεριλάβουμε στην εξισορρόπηση των δυνάμεων που δρουν κατά μήκος του άξονα της ροής. Λαμβάνοντας υπόψιν και το ίδιο βάρος του στοιχειώδους όγκου ισχύουν τα εξής:

$$-\rho g \delta s \delta A \cos \theta + p \delta A - \left(p + \frac{dp}{ds} \delta s \right) \delta A = \frac{\rho g \delta s \delta A}{g} \frac{dU}{dt} \quad (1.48)$$

Ή

$$-\rho g \cos \theta - \frac{dp}{ds} = \rho \frac{dU}{dt} \quad (1.49)$$

Επιπλέον, ισχύει ότι:

$$\cos \theta = \frac{dz}{ds} \quad (1.50)$$

Όπου z είναι ο κατακόρυφος άξονας (Εικόνα 1-8). Επειδή:

$$U = \frac{ds}{dt} \quad (1.51)$$

Και:

$$\frac{dU}{dt} = U \frac{dU}{ds} \quad (1.52)$$

Συνεπώς η εξίσωση (1.49) μπορεί να γραφεί:

$$\frac{d}{ds} \left(z + \frac{p}{\rho g} + \frac{UdU}{g} \right) = 0 \quad (1.53)$$

Με ολοκλήρωση κατά μήκος της ροϊκής γραμμής, προκύπτει:

$$z + \frac{p}{\rho g} + \frac{U^2}{2g} = \text{σταθερό} = H \quad (1.54)$$

Η ανωτέρω εξίσωση καλείται εξίσωση Bernoulli και εκφράζει την αρχή διατήρησης της ενέργειας κατά τη ροή του ρευστού. Πολλαπλασιάζοντας τον κάθε όρο της εξίσωσης με το σταθερό ποσό $\rho g Q$, έχουμε:

$$(\rho g Q)z + (\rho g Q) \frac{p}{\rho g} + (\rho g Q) \frac{U^2}{2g} = \text{σταθερό} \quad (1.55)$$

Οι όροι της ανωτέρω εξίσωσης κατέχουν μονάδες ισχύος. Στην εξίσωση (1.54) ο κάθε όρος της έχει μονάδες μήκους και επομένως θα πρέπει να περιγράφεται με την έκφραση <<ύψος>>. Για παράδειγμα, ο πρώτος όρος είναι το ύψος λόγω θέσης του ρευστού, δεύτερος όρος είναι το ύψος λόγω πίεσης και τέλος, ο τρίτος όρος είναι το ύψος λόγω κίνησης. Αν αθροίσουμε όλους τους όρους θα λάβουμε το ολικό ενεργειακό ύψος $H(m)$.

Στην πραγματικότητα υπάρχουν πάντοτε απώλειες ενέργειας που οφείλονται στην τριβή που αναπτύσσεται κατά την κίνηση αυτού του πραγματικού ρευστού. Οι απώλειες αυτές ΔH αποτελούνται από δύο συνιστώσες, το άθροισμα των γραμμικών απωλειών $\sum_{i=1}^n h_{fi}$, όπου n το πλήθος των αγωγών και το άθροισμα των τοπικών απωλειών $\sum_{j=1}^m h_{Lj}$, όπου m είναι το πλήθος των τοπικών απωλειών. Συνεπώς:

$$\Delta H = \sum_{i=1}^n h_{fi} + \sum_{j=1}^m h_{Lj} \quad (1.56)$$

Η ενεργειακή εξίσωση λαμβάνει την εξής μορφή:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + a_1 \frac{U_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + a_2 \frac{U_2^2}{2g} + \Delta H_{12} \quad (1.57)$$

Όπου a_1 και a_2 οι συντελεστές διόρθωσης του κινητικού ύψους στις αντίστοιχες διατομές και χάριν απλοποίησης λαμβάνουν τιμή ίση με τη μονάδα.

Διαφορική μορφή της εξίσωσης της ενέργειας. Η απόδειξη της διαφορικής μορφής της ενεργειακής εξίσωσης ακολουθεί παρόμοια πορεία με την απόδειξη της διαφορικής εξίσωσης της γραμμικής ορμής. Μια εκ των μορφών της είναι η εξής:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \left[\rho \left(e + \frac{q^2}{2} \right) \right]}{\partial t} + \frac{\partial \left[\rho u \left(e + \frac{q^2}{2} \right) \right]}{\partial x} + \frac{\partial \left[\rho v \left(e + \frac{q^2}{2} \right) \right]}{\partial y} + \frac{\partial \left[\rho w \left(e + \frac{q^2}{2} \right) \right]}{\partial z} = - \frac{\partial (pu)}{\partial x} - \frac{\partial (pv)}{\partial y} - \frac{\partial (pw)}{\partial z} + \frac{\partial \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right)}{\partial x} + \\ \frac{\partial \left(K \frac{\partial T}{\partial y} \right)}{\partial y} + \frac{\partial \left(K \frac{\partial T}{\partial z} \right)}{\partial z} + \frac{\partial (u\tau_{xx} + v\tau_{yx} + w\tau_{zx})}{\partial x} + \frac{\partial (u\tau_{yx} + v\tau_{yy} + w\tau_{zy})}{\partial y} + \frac{\partial (u\tau_{zx} + v\tau_{yz} + w\tau_{zz})}{\partial z} \end{aligned} \quad (1.58)$$

Στην ανωτέρω εξίσωση $q^2 = u^2 + v^2 + w^2$, K ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, T η θερμοκρασία, ενώ η εσωτερική ενέργεια δίνεται ως $e = c_v T$, όπου c_v ο συντελεστής θερμοχωρητικότητας υπό σταθερό όγκο.

1.6 ΘΕΩΡΙΑ ΤΟΥ ΟΡΙΑΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ

Λόγω της ύπαρξης του ιξώδους και της ανάπτυξης διατμητικών τάσεων κατά τη ροή του ρευστού υπάρχει μια βαθμιαία αύξηση της ταχύτητας του ρευστού από τα τοιχώματα προς τον άξονα του αγωγού. Η ταχύτητα της ροής έχει την τιμή 0 στα τοιχώματα του αγωγού (λόγω της συνθήκης μη ολίσθησης) και αυξάνει βαθμιαία μέχρις ότου να φθάσει την τιμή της ταχύτητας της κύριας μάζας του ρευστού u_∞ . Το οριακό στρώμα είναι η περιοχή όπου παρατηρείται μεταβολή της ταχύτητας μέχρι την τιμή $0.99u_\infty$. Το πάχος του οριακού στρώματος είναι σχετικά μικρό για υγρά που έχουν μικρό ιξώδες.

Το 1904 ο Γερμανός Μηχανικός Ludwig Prandtl πρότεινε την θεωρία του οριακού στρώματος. Με βάση αυτή την θεωρία, η ροή ενός ρευστού μπορεί να χωριστεί σε δύο επιμέρους τμήματα:

Στο οριακό στρώμα, όπου η μεταβολή της ταχύτητας με την απόσταση από τα τοιχώματα του αγωγού είναι μεγάλη, εμφανίζονται ισχυρές διατμητικές τάσεις. Στην περιοχή μετά το οριακό στρώμα, η βάρθρωση της ταχύτητας είναι πολύ μικρή και συνεπώς η επίδραση του ιξώδους και η εμφάνιση διατμητικών τάσεων μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα. Ο διαχωρισμός των δύο περιοχών δεν είναι εντελώς σαφής, διότι η ταχύτητα τείνει ασυμπτωτικά προς την ταχύτητα της κύριας μάζας του ρευστού.

Πάχος οριακού στρώματος καλείται η κάθετη απόσταση από την στερεά επιφάνεια μέχρι το σημείο όπου η ταχύτητα ροής εντός του οριακού στρώματος φθάσει το 99% της ταχύτητα ροής της κύριας μάζας του ρευστού u_∞ .

$$\delta = y_{u=0.99u_\infty} \quad (1.59)$$

Πάχος Μετατόπισης δ_1 :

Το πάχος μετάθεσης ή πάχος μετατόπισης ορίζεται ως το πάχος ενός ιδεατού στρώματος ρευστού, ταχύτητας ίσης με του ελεύθερου ρεύματος μέσα στο οποίο η παροχή του ρευστού είναι ίση με την μείωση της παροχής εντός του οριακού στρώματος, λόγω επιβράδυνσης της ροής. Ή διαφορετικά η απόσταση κατά την οποία μετατίθεται η εξωτερική ροή (διότι η ταχύτητα στο οριακό στρώμα ελαττώνεται) για να διατηρηθεί η συνέχεια της μάζας στο οριακό στρώμα πάχους δ . Η επιβράδυνση του ρευστού μέσα στο οριακό στρώμα έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της παροχής σε σχέση με την παροχή που θα υπήρχε εάν η πλάκα δεν ήταν στην πορεία της ροής. Η αρχή διατήρησης της μάζας επιτάσσει μια προς τα πάνω μετατόπιση των ροικών γραμμών, ώστε να αυξάνονται οι διατομές και να διατηρείται σταθερή η παροχή.

$$\delta_1 = \int_0^\infty \left(1 - \frac{u}{u_\infty}\right) dy \quad (1.60)$$

Πάχος απώλειας ορμής δ_2 :

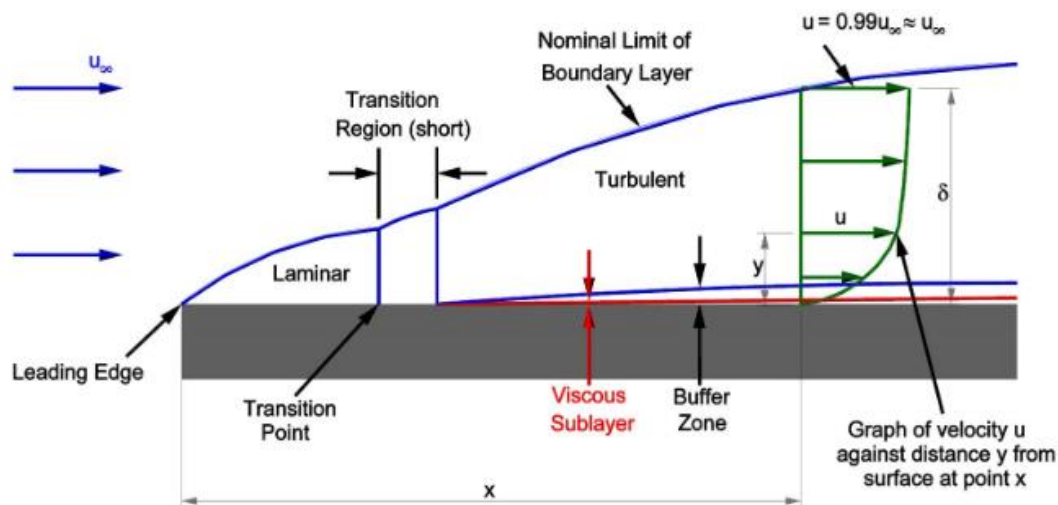
Το πάχος απώλειας ορμής ορίζεται ως το πάχος ενός ιδεατού στρώματος ρευστού, ταχύτητας ίσης με του ελεύθερου ρεύματος, για το οποίο η εισροή ορμής είναι ίση με την αντίστοιχη μείωση αυτής δια μέσου του οριακού στρώματος, λόγω της επιβράδυνσης της ροής.

$$\delta_2 = \frac{u}{u_\infty} \int_0^\infty \left(1 - \frac{u}{u_\infty}\right) dy \quad (1.61)$$

Πάχος απώλειας κινητικής ενέργειας δ_3

Σε μόνιμη ροή, αντί των δ_1 και δ_2 παρουσιάζεται το πάχος απώλειας κινητικής ενέργειας το οποίο ορίζεται ως το πάχος του ιδεατού στρώματος ενέργειας ίσης με την απώλεια ενέργειας στο πραγματικό οριακό στρώμα πάχους δ .

Το οριακό στρώμα στη περιοχή κοντά στο τοίχωμα διαχωρίζεται σε τρία επιμέρους στρώματα (βλέπε Εικόνα 1-9). Το στρώμα που εφάπτεται στο τοίχωμα καλείται **υπόστρωμα στρωτής ροής** (Viscous Sublayer), με την ροή εντός του να είναι σχεδόν στρωτή και το μοριακό ιξώδες να είναι αυτό που να κυριαρχεί στον μηχανισμό της μεταφορά ορμής, θερμότητας και μάζας. Οι διατμητικές τάσεις σε αυτή την περιοχή ταυτίζονται με αυτή του στερεού τοιχώματος. Το αμέσως επόμενο στρώμα ονομάζεται **στρώμα απόσβεσης** ή μεταβατικό στρώμα (Buffer layer), με την επίρροη της τύρβης να είναι εφάμιλλη με αυτήν του μοριακού ιξώδους. Η έκταση του στρώματος είναι εξαρτώμενη από την ύπαρξη αύξησης πίεσης κατά την διεύθυνση x , από το εάν υπάρχει μεταφορά θερμότητας και από τις διαταραχές που υφίσταται η ταχύτητα του ελεύθερου ρεύματος u_∞ . Το τελευταίο στρώμα καλείται **στρώμα τυρβώδους ροής** με την τύρβη να διαδραματίζει τον σημαντικότερο ρόλο διότι οι μεγάλες κλίσεις της μέσης ταχύτητας έχουν την ιδιότητα να παράγουν τυρβώδη κινητική ενέργεια με αποτέλεσμα την ραγδαία αύξηση της τύρβης. Στην περίπτωση όπου η επιφάνεια κατέχει υψηλή τραχύτητα τότε το στρώμα μπορεί να εμφανιστεί αμέσως μετά την πλάκα.



Εικόνα 1-9: Ροή εντός του οριακού στρώματος.[19]

1.7 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΤΡΙΒΗΣ ΕΝΤΟΣ ΣΩΛΗΝΟΓΡΑΜΜΗΣ

Οι απώλειες ενέργειας που εμφανίζονται κατά την ροή ενός ρευστού εντός μιας σωληνογραμμής είναι δύο ειδών, οι ολικές (μείζονες) και οι τοπικές (ελάσσονες). Οι

ολικές απώλειες εμφανίζονται στα ευθύγραμμα τμήματα της σωλήνωσης και οφείλονται στο ιξώδες του ρευστού καθώς και στην τριβή που εμφανίζεται μεταξύ του ρευστού και της εσωτερικής επιφάνειας του αγωγού και είναι αποτέλεσμα των διατμητικών δυνάμεων που αναπτύσσονται. Αυτές οι διατμητικές δυνάμεις αντιτίθενται στην κίνηση του ρευστού και παράγουν αρνητικό έργο με αποτέλεσμα να έχουμε την ελάττωση του ολικού ύψους ενέργειας. Ειδικότερα αυτού του είδους οι απώλειες εξαρτώνται άμεσα από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του σωλήνα (διάμετρο), το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένος (σχετική τραχύτητα) και από το είδος του ρευστού.

Για σταθερή και ομοιόμορφη ροή οι απώλειες ενέργειας h_f σε έναν κλειστό ευθύγραμμο αγωγό δίνονται από την σχέση των Darcy-Weisbach:

$$h_f = f \frac{l u^2}{D 2g} \quad (1.62)$$

Όπου f ο συντελεστής τριβής, l το μήκος αγωγού, D η διάμετρος του αγωγού, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ η επιτάχυνση της βαρύτητας και u η μέση ταχύτητα του ρευστού.

Ο συντελεστής τριβής εξαρτάται κυρίως από το είδος της ροής και από το είδος του αγωγού, δηλαδή:

Όταν $Re < 2000$, τότε η ροή είναι στρωτή και ο συντελεστής τριβής δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (1.63)$$

Ο συντελεστής τριβής στην περίπτωση της τυρβώδους ροής ανάλογα την περίπτωση δίνεται από τις εξής σχέσεις:

- Λείος αγωγός, με $Re > 3000$, τότε:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -0.8 + 0.87 \ln Re \sqrt{f} \quad (1.64)$$

Αν $2.5 \times 10^3 < Re < 10^5$, τότε:

$$f = \frac{0.316}{Re^{1/4}} \quad (1.65)$$

Για αριθμούς Reynolds $2.5 \cdot 10^3 < Re < 10^5$ μπορεί να γίνει χρήση της σχέσης:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2.5 \ln(Re \sqrt{f}) + 0.3 \quad (1.66)$$

- Μη λείοι αγωγοί, τυρβώδης ροή:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.5 \ln \left(0.27 \frac{\varepsilon}{d} + 0.855 \frac{1}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (1.67)$$

- Πλήρως Τυρβώδης ροή:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -0.86 \ln \frac{\varepsilon}{3.7d} \quad (1.68)$$

- Πλήρως Τυρβώδης ροή με $Re > 4000$:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -0.80 \ln \left(\frac{\varepsilon}{3.7d} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (1.69)$$

Όπου ε είναι η τραχύτητα του αγωγού.

Τοπικές ή ελάχιστες απώλειες h_L είναι οι απώλειες που οφείλονται σε αλλαγές κατεύθυνσης, τοπικές αυξομειώσεις της διαμέτρου, βαλβίδες ή βάνες και σε άλλους παρόμοιους παράγοντες.

Συνεπώς σε έναν κλειστό αγωγό ο οποίος μεταφέρει εντός του ένα ρευστό, θα εμφανίζονται επιπλέον των απωλειών τριβής και τοπικές απώλειες ενέργειας οι οποίες οφείλουν την ύπαρξή τους σε:

1. Στην είσοδο ή έξοδο του αγωγού.
2. Απότομη ή προοδευτική διεύρυνση ή συστολή της διατομής του αγωγού.
3. Σε γωνία, καμπύλωση, διακλάδωση ή και άλλων μετατροπών του αγωγού.
4. Ανοικτή ή μερικά κλειστή βαλβίδα ή βάνα.

Η πολυπλοκότητα του ροϊκού πεδίου δεν επιτρέπει την επακριβή θεωρητική διερεύνηση για τον υπολογισμό των τοπικών ενεργειακών απωλειών. Έτσι οι απώλειες αυτού του είδους προσδιορίζονται πειραματικά και συναρτώνται με το ύψος των απωλειών της ταχύτητας (ή της κινητικής ενέργειας) που δίνεται από τον όρο $\frac{u^2}{2g}$. Οι τοπικές απώλειες υπολογίζονται από την παρακάτω σχέση:

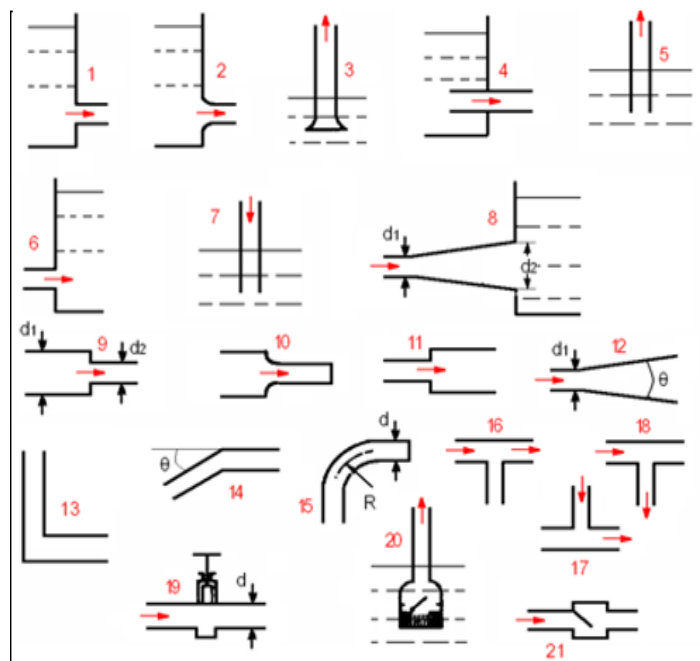
$$h_L = K \frac{u^2}{2g} \quad (1.70)$$

Όπου K ο αδιάστατος συντελεστής τοπικών απωλειών του εκάστοτε εξαρτήματος και u η μέση ταχύτητα του ρευστού. Ο συντελεστής K μπορεί να υπολογιστεί μέσω πειράματος αλλά υπάρχουν και αναλυτικοί πίνακες όπου οι τιμές του συντελεστή έχουν προκύψει από πειραματικά δεδομένα όπως είναι ο Πίνακας 1-1 για τα εξαρτήματα της Εικόνας 1-10.

Πίνακας 1-1: Τιμές συντελεστή τοπικών απωλειών διαφόρων εξαρτημάτων. [14]

| α/α | Περιγραφή | Συντελεστής K |
|-----|---|--|
| | Είσοδος υγρού σε σωλήνα | |
| 1 | Επιστόμιο με οξεία γωνία | 0.5 |
| 2 | Επιστόμιο με στρογγυλεμένη γωνία | 0.05 |
| 3 | Σωλήνας αναρροφήσεως με κωδωνοειδές χείλος | 0.05-1 |
| 4 | Εισέρχον επιστόμιο | 0.9-1 |
| 5 | Σωλήνας αναρροφήσεως με επίπεδο χείλος | 0.9 |
| | Έξοδος υγρού από σωλήνα | |
| 6,7 | Σε δεξαμενή | 1 |
| 8 | Βαθμιαία διεύρυνση | Γωνία θ : $40^\circ \rightarrow 0.9$, $20^\circ \rightarrow 0.5$, $10^\circ \rightarrow 0.2$ |
| | Μεταβολή διαμέτρου | |
| 9 | Απότομη στένωση | d_2/d_1 : $0.2 \rightarrow 0.43$, $0.4 \rightarrow 0.38$, $0.6 \rightarrow 0.3$, $0.8 \rightarrow 0.15$ |
| 10 | Απότομη στένωση | d_2/d_1 : $0.2 \rightarrow 0.93$, $0.4 \rightarrow 0.7$, $0.6 \rightarrow 0.4$, $0.8 \rightarrow 0.15$ |
| 11 | Βαθμιαία διεύρυνση Γωνία $\theta=10^\circ$, Γωνία $\theta=20^\circ$ | d_2/d_1 : $0.2 \rightarrow 0.35$, $0.4 \rightarrow 0.2$, d_2/d_1 : $0.2 \rightarrow 0.15$, $0.4 \rightarrow 0.1$ |
| 12 | Στρογγυλεμένη στένωση | d_2/d_1 : $0.2 \rightarrow 0.1$, $0.4 \rightarrow 0.05$ |

| Αλλαγή διεύθυνσης | | |
|--------------------|------------------------|--|
| 13 | Γωνία | $90^\circ \rightarrow 1.2$, $60^\circ \rightarrow 0.6$, $45^\circ \rightarrow 0.4$, $22^\circ \rightarrow 0.15$ |
| Συνδέσεις | | |
| 15 | Κάμψη | Λόγος R/d: $1 \rightarrow 0.7$, $2 \rightarrow 0.4$, $>5 \rightarrow 0.3$ |
| 16 | Ταυ | 0.25 |
| 17 | Ταυ | 1.2 |
| 18 | Ταυ | 1.4 |
| Βαλβίδες-Δικλείδες | | |
| 19 | Ολισθαίνουσα δικλείδα | 0.1-0.2 |
| 20 | Ποδοβαλβίδα και φίλτρο | ≥ 2.5 |
| 21 | Βαλβίδα μη επιστροφής | ≥ 1 |



Εικόνα 1-10: Εξαρτήματα που προκαλούν τοπικές απώλειες. [14]

2. ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΣ PELTON-ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ

2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Ο υδροστρόβιλος ουσιαστικά αποτελεί την μηχανολογική διάταξη που μετατρέπει την μηχανική ενέργεια του νερού σε περιστροφική κινητική ενέργεια του άξονα. Το νερό που διέρχεται εντός του υδροστρόβιλου προσπίπτει σε κατάλληλα διαμορφωμένες υδροδυναμικές επιφάνειες (πτερύγια ή σκαφίδια) και μεταφέρει ένα μέρος της ενέργειας του στο στροφέιο περιστρέφοντας το. Ο Μηχανικός είναι αναγκαίο προτού εξετάσει και μελετήσει επαρκώς το πρόβλημα να επιλέξει τον κατάλληλο τύπο υδροστρόβιλου, προκειμένου η διάταξη να πραγματοποιεί την μετατροπή ενέργειας με το βέλτιστο δυνατό τρόπο δηλαδή με το μέγιστο βαθμό απόδοσης.

2.2 ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ

2.2.1 Ανάλογα τον τρόπο παραλαβής της ενέργειας του νερού

Η διάκριση των υδροστρόβιλων με βάση τον τρόπο παραλαβής της ενέργειας του νερού είναι η εξής:

- Υδροστρόβιλος δράσης (Τύπου Pelton)

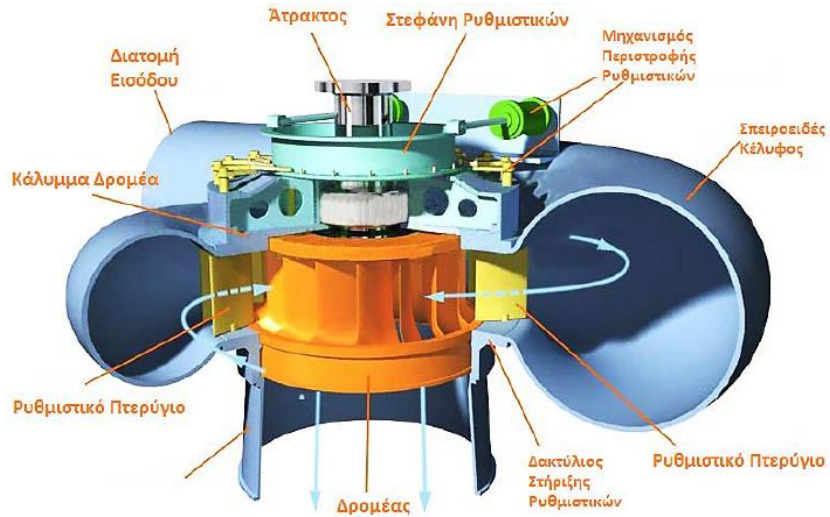
Αρχικά το νερό κατέχει δυναμική ενέργεια λόγω της υψομετρικής διαφοράς από το επίπεδο αναφοράς (επίπεδο μηδενικής δυναμικής ενέργειας), αυτή μετασχηματίζεται σε κινητική ενέργεια μέσω του ακροφυσίου εξόδου το οποίο βρίσκεται στο πέρας του αγωγού προσαγωγής. Το νερό υπό μορφή δέσμης υψηλής ταχύτητας προσκρούει στα σκαφίδια, τα πληρώνει κατά ένα ποσοστό και εξέρχεται από αυτά με αλλαγμένη κατεύθυνση καθώς το νερό ακολουθεί πιστά την μορφολογία των επιφανειών τους. Τα σκαφίδια βρίσκονται περιμετρικά του στροφέιου του υδροστρόβιλου και το οποίο περιστρέφεται λόγω της δύναμης που δέχεται από την προσπίπτουσα ελεύθερη δέσμη. Μια τυπική διάταξη υδροστρόβιλου τύπου Pelton δύο εγχυτήρων απεικονίζεται στην Εικόνα 2-1.



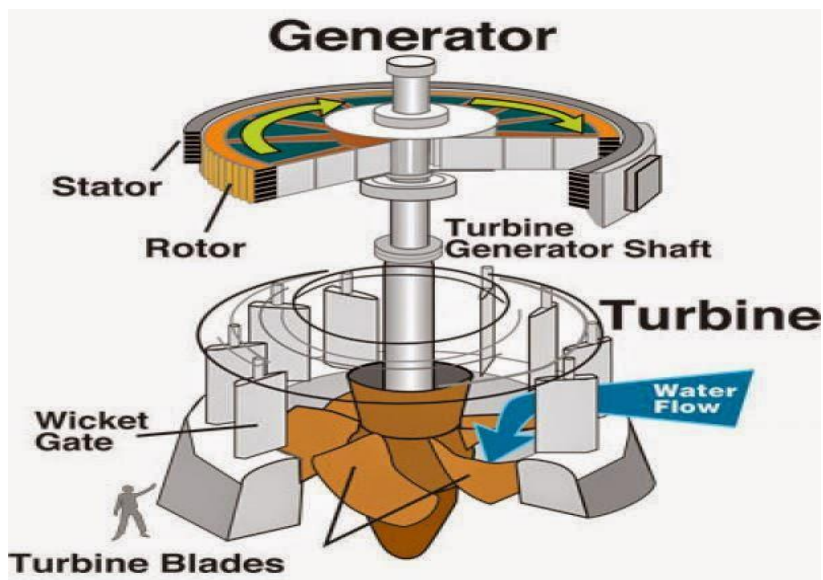
Εικόνα 2-1: Υδροστροβίλος Pelton δυο εγχυτήρων. [151]

- Υδροστροβίλος αντίδρασης (τύπου Francis, Kaplan)

Σε αυτού του είδους τους στροβίλους το νερό διαθέτει κυρίως δυναμική ενέργεια. Με την βοήθεια των καθοδηγητικών πτερυγίων που βρίσκονται εντός του κελύφους, ένα μέρος της αρχικά δυναμικής ενέργειας του νερού μετατρέπεται σε κινητική. Επομένως ένα ποσοστό της διαθέσιμης πίεσης μετατρέπεται σε ταχύτητα και στη συνέχεια το νερό προσπίπτει με αυτή την αυξημένη ταχύτητα στα πτερύγια του στροφείου. Το νερό που καταλαμβάνει τον χώρο ανάμεσα στα πτερύγια βρίσκεται σε μια κατάσταση υπερπίεσης και εξέρχεται από τα πτερύγια του στροφείου επιταχυνόμενο με αυξημένη ταχύτητα και ελαττωμένη πίεση. Αυτή η διαδικασία έχει ως αποτέλεσμα το νερό να ασκεί μια εφαπτομενική δύναμη εξ αντιδράσεως στο στροφείο. Στους υδροστροβίλους αντίδρασης η παραγωγή ωφέλιμης ισχύος είναι αποτέλεσμα κατά μεγαλύτερο ποσοστό της δυναμικής ενέργειας του ρευστού και λιγότερο της κινητικής ενέργειας αυτού. Η προσαρμογή ενός διαχύτη στη έξοδο του υδροστροβίλου αντίδρασης κρίνεται αναγκαία λόγω της υψηλής πίεσεως (έως και 8mΣΥ) με την οποία εκρέει το νερό. Τυπική διάταξη υδροστροβίλου αντίδρασεως τύπου Francis και τύπου Kaplan απεικονίζεται στην Εικόνα 2-2 και στην Εικόνα 2-3 αντίστοιχα.



Εικόνα 2-2: Υδροστρόβιλος Francis. [6]



Εικόνα 2-3: Υδροστρόβιλος Kaplan. [152]

2.2.2 Ανάλογα τον βαθμό αντίδρασης

* Αντίδρασης ή ολικής προσβολής. Στους υδροστρόβιλους αντίδρασης ή ολικής προσβολής ολόκληρος ο δρομέας λειτουργεί αξονοσυμμετρικά, με τη στατική πίεση του ρευστού να μεταβάλλεται (ελαττώνεται) μεταξύ εισόδου και εξόδου της πτερωτής. Η

πτερωτή είναι ολικής προσβολής διότι λειτουργεί ομοιόμορφα κατά την περιφερειακή διεύθυνση. Έχουν βαθμό αντίδρασης διαφορετικό του μηδενός.

* Δράσης ή μερικής προσβολής. Σε αυτού του είδους τους υδροστροβίλους κάθε χρονική στιγμή μόνο ένα τμήμα του στροφείου συμβάλλει στη μετατροπή της ενέργειας του νερού. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα υδροστροβίλου δράσης είναι ο υδροστροβίλος τύπου Pelton. Έχουν βαθμό αντίδρασης, $r = 0$.

2.2.3 Ανάλογα του διαθέσιμου ύψους

❖ Για υψηλές τιμές υδραυλικής πτώσης ($H > 500mΣΥ$) προτιμητέος είναι ο υδροστροβίλος δράσης τύπου Pelton.

❖ Για μεσαίες τιμές υδραυλικής πτώσης ($H = 50mΣΥ$ έως και $H = 500mΣΥ$) χρησιμοποιείται υδροστροβίλος αντίδρασης τύπου Francis.

❖ Για χαμηλές τιμές υδραυλικής πτώσης ($H < 50mΣΥ$) ο υδροστροβίλος αντίδρασης τύπου Kaplan είναι ο καταλληλότερος.

2.2.4 Ανάλογα τη διεύθυνση ροής του νερού στον υδροστροβίλο

➤ Αξονικής ροής. Σε αυτού του είδους τους υδροστροβίλους το ρευστό κινείται κατά τον ίδιο άξονα σε σχέση με τον άξονα περιστροφής του στροφείου. Η λειτουργία του στροβίλου τύπου Kaplan ουσιαστικά είναι αντίστροφη από της προπέλας αξονικής ροής. Το στροφείο των υδροστροβίλων αξονικής ροής αποτελείται συνήθως από 3-8 πτερύγια. Διακρίνουμε δύο τύπους υδροστροβίλων αξονικής ροής: Στρόβιλοι Kaplan και στρόβιλοι προπέλας. Στους στροβίλους Kaplan είναι εφικτή η ρύθμιση της ροής με δύο τρόπους, είτε με αλλαγή του βήματος των πτερυγίων του δρομέα είτε στρέφοντας τις θύρες διόδου. Οι στρόβιλοι προπέλας είναι παρόμοιοι με τους Kaplan με την διαφορά πως το βήμα των πτερυγίων δεν δύναται να μεταβληθεί.

➤ Εφαπτομενικής ροής (Pelton). Στους υδροστροβίλους εφαπτομενικής ροής το νερό ρέει εφαπτομενικά ως προς το στροφείο.

➤ Ακτινικής ή μικτής ροής. Ο στρόβιλος Francis είναι σχετικά όμοιος ως προς την γεωμετρία του, με μια φυγοκεντρική αντλία ή με μια μικτής ροής, μόνο που η ροή κινείται προς την αντίθετη κατεύθυνση. Αξίζει να σημειωθεί πως μια τυπική αντλία που λειτουργεί ανάποδα δεν αποτελεί αποδοτικό στρόβιλο. Ένας μεγάλος στρόβιλος Francis δύναται να έχει 16 ή περισσότερα πτερύγια δρομέα και η απόδοση του στροβίλου να είναι της τάξης του 90 με 95%.

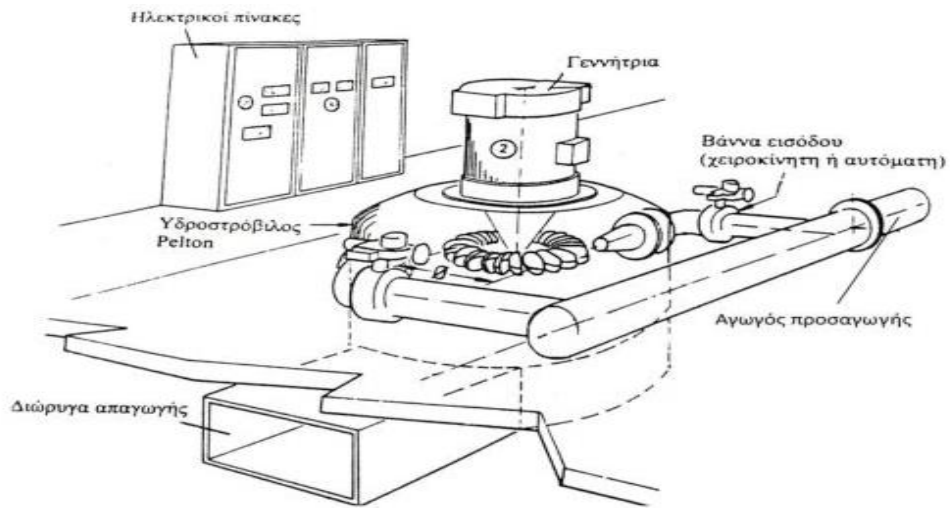
2.2.5 Ανάλογα με τον προσανατολισμό του άξονα

Ανάλογα με τον προσανατολισμό του άξονα περιστροφής του υδροστροβίλου διακρίνονται σε κατακόρυφου και οριζοντίου άξονα. Οι υδροστροβίλοι κατακόρυφου άξονα χρησιμοποιούνται για λόγους οικονομίας του χώρου και για μεγάλη ισχύ πτώσεως. Ο μέγιστος αριθμός ακροφυσίων που μπορούν να συνεργαστούν με το

στροφείο στην κατακόρυφη διάταξη είναι 6 σε αντιδιαστολή με τους υδροστροβίλους οριζοντίου άξονα όπου επιδέχονται έως και 2 ακροφύσια.

2.3 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ PELTON

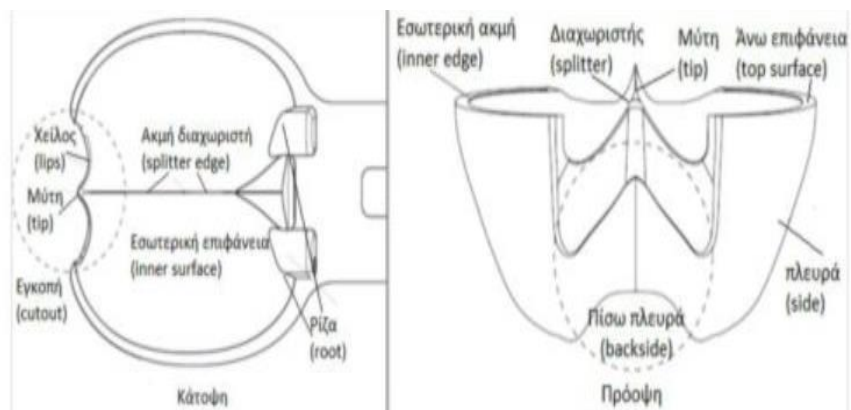
Η αρχή λειτουργίας του υδροστροβίλου τύπου Pelton (βλέπε Εικόνα 2-4) είναι σχετικά απλή στη βάση της. Αρχικά, η ροή εντός του αγωγού προσαγωγής η οποία κατέχει υψηλή πίεση μεταβαίνει εντός του ακροφυσίου. Στη συνέχεια, καθώς η ροή εξέρχεται από το ακροφύσιο, η πίεση της μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια, με την ροή να έχει περιοριστεί σε μια στενή ελεύθερη δέσμη υψηλής ταχύτητας (Jet), προσκρούει στον δρομέα υπό ατμοσφαιρική πίεση. Με αυτό τον τρόπο η υδραυλική ενέργεια που φέρει η ροή μετασχηματίζεται σε μηχανική ενέργεια στη περιστρεφόμενη άτρακτο της μηχανής. Έπειτα η ροή απομακρύνεται από το στροφείο με σαφώς ελαττωμένη ταχύτητα εξόδου, αποδίδοντας του το μεγαλύτερο μέρος της κινητικής της ενέργειας. Τέλος, η μηχανική ενέργεια του άξονα του δρομέα μετατρέπεται σε ηλεκτρική με την βοήθεια γεννήτριας και διατίθεται στο ηλεκτρικό δίκτυο. Η ρευστοδυναμική διαδικασία μετατροπής ενέργειας (κινητικής) είναι ισόθλιπη διότι πραγματοποιείται σε ισοβαρές περιβάλλον (ατμοσφαιρική πίεση) και επομένως διεκπεραιώνεται με μηδενικό βαθμό αντίδρασης. Τα πτερύγια είναι διαμορφωμένα σαν σκαφίδια και βρίσκονται περιφερειακά του στροφείου (δες Εικόνα 2-5 και 2-6). Το κάθε σκαφίδιο φέρει δυο κοιλότητες δηλαδή διαχωρίζεται σε δύο μέρη με την βοήθεια μιας ακμής κατά τον διαμήκη άξονα του, η οποία διαμοιράζει την ελεύθερη δέσμη σε δυο συμμετρικές. Το κάθε συμμετρικό μέρος της δέσμης καθοδηγείται από την καμπυλότητα του πτερυγίου, εκτρέποντας το κατά $160 - 170^\circ$. Όπως αποδεικνύεται η αμφίπλευρη αλλαγή κατεύθυνσης της ροής κατά περίπου 180° επιφέρει την μετατροπή της κινητικής ενέργειας του νερού σχεδόν εξ ολοκλήρου σε περιστροφική κινητική ενέργεια του άξονα. Επιπλέον, ο διαμοιρασμός της δέσμης γίνεται και για λόγους συμμετρίας των φορτίσεων που εμφανίζονται στα σκαφίδια και για να μην δημιουργούνται καμπτικές ροπές στον άξονα της πτερωτής. Το εξωτερικό άκρο των σκαφιδίων φέρει εγκοπή η οποία αποσκοπεί στη προσβολή και πλήρωση του κατάλληλου σκαφιδίου από την ελεύθερη δέσμη νερού αλλά και στην έγκαιρη και άμεση απόρριψη του νερού των εξερχόμενων ροών. Το εύρος της εγκοπής είναι περίπου 10% μεγαλύτερο από την διατομή της δέσμης. Το υλικό κατασκευής των σκαφιδίων είναι είτε χυτοσίδηρος, είτε ανοξείδωτος χάλυβας υψηλής μηχανικής αντοχής, είτε χυτά κράματα χάλυβα-μπρούντζου. Το μανομετρικό ύψος και ο κίνδυνος διάβρωσης είναι οι παράγοντες που καθορίζουν τα κριτήρια επιλογής του υλικού κατασκευής του στροφείου.



Εικόνα 2-4: Σχεδιάγραμμα διάταξης υδροστροβίλου Pelton.[10]



Εικόνα 2-5: Κάτοψη σκαφιδίου υδροστροβίλου.[153]

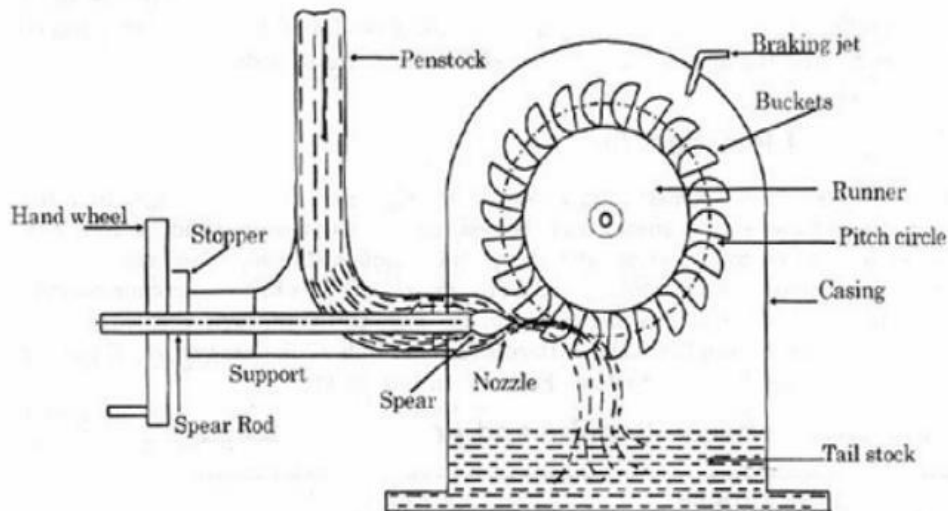


Εικόνα 2-6: Σύγχρονο σκαφίδιο Pelton. [10]

2.4 ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ PELTON

Τα βασικά επιμέρους εξαρτήματα (βλέπε Εικόνα 2-7) από τα οποία αποτελείται ο υδροστροβίλος τύπου Pelton είναι τα εξής:

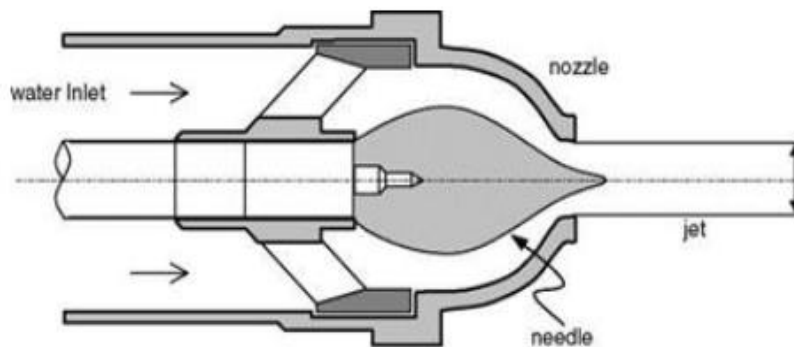
- Ακροφύσιο και ακίδα (Εγγυτήρας)
- Εκτροπέας (Deflector)
- Δρομέας (Runner)
- Κέλυφος (Casing)
- Υδραυλικό φρένο (Braking jet)
- Διώρυγα απαγωγής



Εικόνα 2-7: Σχηματική τομή διάταξης υδροστροβίλου Pelton. [154]

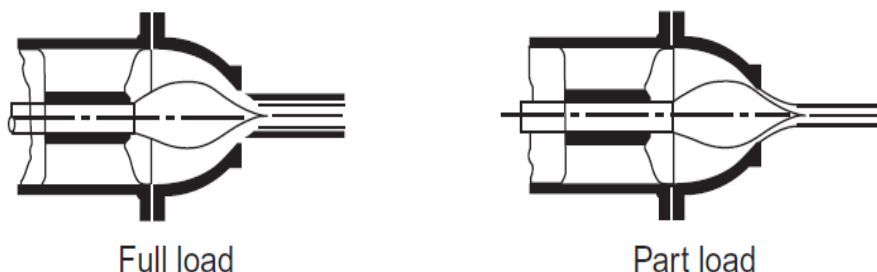
2.4.1 Ακροφύσιο και ακίδα (Nozzle and spear)

Το ακροφύσιο είναι υπεύθυνο για την ανύψωση της ταχύτητας του νερού και την συγκέντρωση του σε μια ενιαία δέσμη (βλέπε Εικόνα 2-8). Το υλικό κατασκευής του ακροφυσίου είναι χυτοχάλυβας υψηλής μηχανικής αντοχής ενώ η ακίδα κατασκευάζεται από ανοξείδωτο χάλυβα υψηλής σκληρότητας. Η ακίδα λόγω της έντονης διάβρωσης που δέχεται από τα στερεά (άμμος) σωματίδια που βρίσκονται εντός του νερού έχει πεπερασμένη διάρκεια ζωής και είναι επιτακτική η ανάγκη της αντικατάστασης της ύστερα από ορισμένο χρονικό διάστημα λειτουργίας.



Εικόνα 2-8: Ακροφύσιο υδροτροβίλου Pelton. [118]

Η ρύθμιση της παροχής γίνεται με τη χρήση αξονικά μετατιθέμενης ακίδας η οποία βρίσκεται στην άκρη του ακροφυσίου (βλέπε Εικόνα 2-9). Η μεταβολή της παροχής έχει ως αποτέλεσμα και την μεταβολή της ωφέλιμης ισχύος. Η μετατόπιση της ακίδας γίνεται δυνατή με τη χρήση υδραυλικών συστημάτων ή αντιστοίχων ελαιοδυναμικών τα οποία βρίσκονται εντός του ακροφυσίου. Τα συστήματα αυτά είναι σημαντικό να μην διαταράσσουν την ροή σε μεγάλο βαθμό ώστε να μην δημιουργούνται δίνες και άλλα τυρβώδη φαινόμενα που έχουν ως συνέπεια την απώλεια μηχανικής ενέργειας του ρευστού. Οι αγωγοί προσαγωγής του νερού στα ακροφύσια έχουν την κατάλληλη καμπυλότητα ούτως ώστε τα ακροφύσια να προσανατολίζονται καταλλήλως την ελεύθερη δέσμη σε σχέση με το στροφείο.

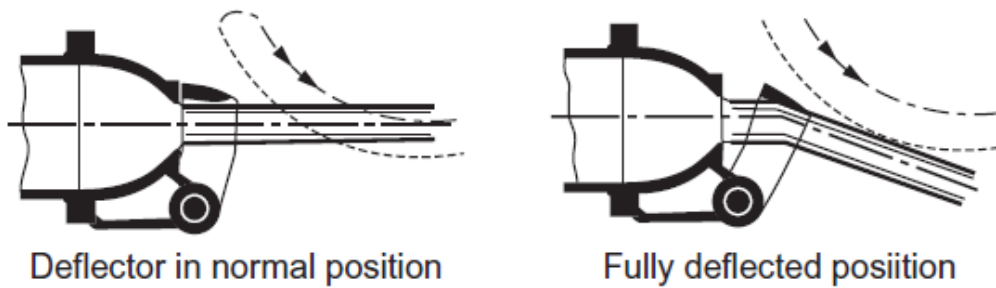


Εικόνα 2-9: Ακροφύσιο σε θέση μέγιστης παροχής (αριστερά) και σε θέση μερικής παροχής (δεξιά). [24]

2.4.2 Εκτροπέας (Deflector)

Ο εκτροπέας είναι ένας μηχανισμός που παρεμβάλλεται μεταξύ της ελεύθερης δέσμης του νερού και του στροφείου. Τον χρησιμοποιούμε όταν επιθυμούμε να μεταβάλλουμε ταχέως και κατά ένα σημαντικό ποσοστό την παροχή του νερού χωρίς

να έχουμε τον κίνδυνο ενός πιθανού υδραυλικού πλήγματος στον αγωγό προσαγωγής. Ο εκτροπέας προσεγγίζει και εισέρχεται στην δέσμη πλευρικά, με αποτέλεσμα την καθοδήγηση (παρεκτροπή) ενός τμήματος της δέσμης εκτός των σκαφιδίων του στροφείου (βλέπε Εικόνα 2-10). Η ελάττωση της παροχής του νερού που προσπίπτει στα πτερύγια επιφέρει και ραγδαία μείωση της ισχύος της μηχανής. Στη συνέχεια λαμβάνει χώρα η προσαρμογή της ακίδας του ακροφυσίου στη νέα επιθυμητή θέση λειτουργίας προκειμένου να καθοριστεί η εκ νέου απαιτούμενη παροχή.



Εικόνα 2-10: Εκτροπέας σε κανονική θέση (αριστερά) και σε θέση εκτροπής (δεξιά). [24]

2.4.3 Δρομέας (Runner)

Όπως προαναφέρθηκε υπάρχουν δύο επιλογές για τον προσανατολισμό του δρομέα, είτε οριζόντιος, είτε κατακόρυφος. Στην περίπτωση της κατακόρυφης διάταξης το βάρος της γεννήτριας και του δρομέα παραλαμβάνεται από ωστικό έδρανο. Το στροφείο κατασκευάζεται είτε ολόσωμο (βλέπε Εικόνα 2-11) είτε αποτελείται από επιμέρους συναρμολογούμενα εξαρτήματα όπως είναι τα σκαφίδια, οι κοχλίες σύνδεσης και η πλήμνη πάνω στην οποία κοχλιώνονται τα σκαφίδια.



Εικόνα 2-11: Ολόσωμο στροφείο υδροστροβίλου Pelton. [111]

2.4.4 Κέλυφος (Casing)

Το κέλυφος του υδροστροβίλου καλύπτει το στροφέιο και παρεμποδίζει την εξερχόμενη ροή από το να διασκορπιστεί προς τον περιβάλλοντα χώρο, παροχετεύοντας την προς την διώρυγα απαγωγής με την βοήθεια της βαρύτητας. Προφανώς το κέλυφος δεν συμμετέχει στη υδραυλική διαδικασία μετατροπής ενέργειας. Το κέλυφος θα πρέπει να είναι στεγανό και έχει την κατάλληλη γεωμετρία, ώστε να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες που εμφανίζονται κατά την αλληλεπίδραση της εξερχόμενης ροής από το στροφέιο με τις ελεύθερες δέσμες και τον δρομέα. Επιπλέον, το κέλυφος θα πρέπει να χαρακτηρίζεται από στιβαρότητα και να πακτώνεται στο έδαφος για την μείωση των κραδασμών. Στο κέλυφος στηρίζονται τα ακροφύσια και τα έδρανα που φέρουν τον άξονα (βλέπε Εικόνα 2-12).



Εικόνα 2-12: Κέλυφος υδροστροβίλου Pelton. [10]

2.4.5 Υδραυλικό φρένο (Braking Jet)

Στην περίπτωση που είναι αναγκαία η παύση της λειτουργίας του υδροστροβίλου, η βαλβίδα εισόδου θα κλείσει και η δέσμη νερού δεν θα υφίσταται και ο υδροστροβίλος θα σταματήσει να παράγει ισχύ. Λόγω αδράνειας ο δρομέας θα διατηρήσει για ορισμένο χρονικό διάστημα την κεκτημένη ταχύτητα του, επιβραδύνοντας αργά (λόγω μηχανικών τριβών) και σταδιακά θα σταματήσει. Το υδραυλικό φρένο υποβοηθά στο να σταματήσει να περιστρέφεται σε σύντομο χρονικό διάστημα, καθώς μια ελεύθερη δέσμη εξέρχεται από ένα μικρό ακροφύσιο και προσκρούει στην πίσω επιφάνεια των σκαφιδίων, επιβραδύνοντας έτσι την περιστροφική τους κίνηση.

2.4.6 Διώρυγα απαγωγής

Το τελευταίο μέρος του υδροστροβίλου είναι η διώρυγα απαγωγής. Η διώρυγα απαγωγής θα πρέπει να έχει ικανοποιητικό βάθος ώστε η εξερχόμενη ροή να μην αναπηδά και να επηρεάζει τις ελεύθερες δέσμες σε συνδυασμό με το κατάλληλο μέγεθος ώστε να αποχετεύει έγκαιρα την μέγιστη παροχή του νερού που μπορεί να προκύψει με την στάθμη του να διατηρείται σε φυσιολογικά επίπεδα. Τέλος, η ροή απάγεται προς την κοίτη του ποταμού.

2.5 ΕΞΙΣΩΣΗ EULER

Με εφαρμογή του θεωρήματος της ροπής της ορμής σε υδροστροβίλο μπορούμε να υπολογίσουμε την αναπτυσσόμενη ροπή στον δρομέα του υδροστροβίλου ως προς τον άξονα περιστροφής του και στη συνέχεια με τον πολλαπλασιασμό της με την γωνιακή ταχύτητα, θα λάβουμε την περιφερειακή ισχύ που παράγει η ρευστοδυναμική μηχανή.

$$N_u = M_u \omega = \dot{m}_u (r_1 c_{u1} - r_2 c_{u2}) \omega = \rho Q (u_1 c_{u1} - u_2 c_{u2}) \quad (2.1)$$

Όπου N_u η περιφερειακή ισχύς, M_u η ροπή της μηχανής, c_{ui} η περιφερειακή συνιστώσα της απόλυτης ταχύτητας της ροής στην είσοδο ($i = 1$) και έξοδο ($i = 2$) του υδροστροβίλου, ω η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής, \dot{m}_u η μαζική παροχή, Q η ογκομετρική παροχή, r_i και u_i η ακτίνα και η περιφερειακή ταχύτητα αντίστοιχα.

Βασικές προϋποθέσεις για την εγκυρότητα της σχέσης (2.1) είναι να επικρατούν ομοιόμορφες συνθήκες ροής και η παροχή μάζας να είναι σταθερή. Προφανώς η περιφερειακή συνιστώσα της απόλυτης ταχύτητας είναι το αποκλειστικό αίτιο για την περιστροφή του στροφείου. Συνεπώς, η περιφερειακή ισχύς του δρομέα N_u μπορεί να δοθεί συναρτήσει του ειδικού βάρους γ , της ισχύουσας ογκομετρικής παροχής και του ύψους H_u ως:

$$N_u = \gamma Q_u H_u \quad (2.2)$$

Γενικά, στον τομέα των στροβιλομηχανών έχει επικρατήσει, η ολική ενέργεια και η πίεση να εκφράζονται σε όρους μέτρων στήλης ύδατος, δηλαδή:

$$H = \frac{p}{\rho g} = \frac{p}{\gamma} \quad (2.3)$$

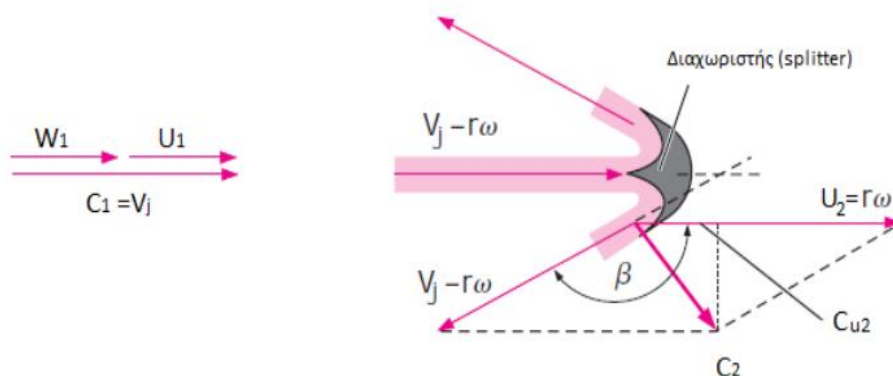
Με συνδυασμό των εξισώσεων (2.1) και (2.2), προκύπτει ότι:

$$H_u = \frac{1}{g} (u_1 c_{u1} - u_2 c_{u2}) \quad (2.4)$$

Η ανωτέρω εξίσωση καλείται εξίσωση Euler.

2.6 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟ PELTON

Με εφαρμογή της εξίσωσης του Euler στα τρίγωνα ταχυτήτων της Εικόνας 2-13, θα καθοριστεί η παραγόμενη ισχύς σε έναν υδροστρόβιλο Pelton.



Εικόνα 2-13: Τρίγωνα ταχυτήτων στην είσοδο (1) και στην έξοδο (2). [13]

Με την διανυσματική εξίσωση των ταχυτήτων στην είσοδο (1) προκύπτει ότι:

$$\vec{c} = \vec{u} + \vec{w} \quad (2.5)$$

Όπου: \vec{c} , \vec{u} και \vec{w} η απόλυτη, η περιστροφική και η σχετική ταχύτητα αντίστοιχα. Επίσης ισχύει ότι $v_j = c_1$, όπου v_j , η ταχύτητα ροής της ελεύθερης δέσμης. Συνεπώς προκύπτει ότι:

$$w_1 = c_1 - u_1 = v_j - u_1 \quad (2.6)$$

Κατά προσέγγιση, υποθέτουμε ότι ολόκληρη η ελεύθερη δέσμη προσπίπτει στο σκαφίδιο που είναι στο κάτω μέρος του στροφείου και ότι το μέγεθος του σκαφιδίου και της ελεύθερης δέσμης μπορούν να θεωρηθούν αμελητέα σε σχέση με την διάμετρο του στροφείου. Συνεπώς ισχύει ότι: $r_1 = r_2 = r$ και $u_1 = u_2 = u$ (ίσες περιφερειακές ταχύτητες στην είσοδο και στην έξοδο).

Στην πραγματικότητα σαφώς και εμφανίζεται τριβή μεταξύ της ροής και της επιφάνειας του σκαφιδίου, άρα ισχύει ότι: $w_2 = kw_1$, όπου k ο βαθμός απόδοσης της διερχόμενης ροής από το σκαφίδιο και οι συνήθεις τιμές που λαμβάνει είναι 0.98 – 0.99.

Η εξίσωση του Euler περιλαμβάνει τις περιφερειακές συνιστώσες της απόλυτης ταχύτητας στην είσοδο και στην έξοδο, c_{u1} και c_{u2} αντίστοιχα. Θα προχωρήσουμε στον υπολογισμό τους. Προφανώς για την είσοδο ισχύει ότι $c_{u1} = c_1$, ενώ για την έξοδο με τριγωνομετρία και την σχέση $\sin(\beta - 90^\circ) = -\cos \beta$, προκύπτει ότι:

$$c_{u2} = u + (c_1 - u)k \cos \beta \quad (2.7)$$

Η παραγόμενη περιφερειακή ισχύς της μηχανής προκύπτει με αντικατάσταση της ανωτέρω εξίσωσης στην εξίσωση του Euler, δηλαδή:

$$N_u = \rho u Q (c_1 - u) (1 - k \cos \beta) = \rho u Q w_1 (1 - k \cos \beta) \quad (2.8)$$

Εναλλακτικά, με αντικατάσταση στην εξίσωση (2.4), προκύπτει:

$$H_u = \frac{u}{g} (c_1 - u) (1 - k \cos \beta) \quad (2.9)$$

Προς απλούστευση του προβλήματος θα θεωρήσουμε την περίπτωση της ιδεατής ροής που δεν εμφανίζεται τριβή μεταξύ αυτής και των στερεών επιφανειών των σκαφιδίων, δηλαδή $k = 1$.

Θεωρητικά η μέγιστη ισχύς επιτυγχάνεται για γωνία $\beta = 180^\circ$, αλλά σε μια τέτοια περίπτωση θα εμφανιζόταν αλληλεπίδραση της εξερχόμενης ροής από το σκαφίδιο και της ελεύθερης δέσμης ή και θα υπήρχε πρόσκρουση της (εξερχόμενης ροής) στην εξωτερική πλευρά του επερχόμενου σκαφιδίου, με αποτέλεσμα την μείωση της παραγόμενης ισχύος. Πρακτικά η βέλτιστη δυνατή γωνία εξόδου του νερού από το σκαφίδιο εκλέγεται να είναι $160^\circ - 165^\circ$. Αυτή η υποχρεωτική ελάττωση της γωνίας β επιδρά επιβαρυντικά στον βαθμό απόδοσης, με αυτόν να προκύπτει:

$$\eta_\beta = \frac{N_{u,πραγμ.}}{N_{u,θεωρ.}} = \frac{1 - \cos \beta}{1 - \cos 180^\circ} = \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (2.10)$$

Για παράδειγμα, αν αντικαταστήσουμε την γωνία 160° , λαμβάνουμε βαθμό απόδοσης ίσο με 96.98% δηλαδή εμφανίζονται απώλειες της τάξης του 3.02%.

Αν θέσουμε την εξίσωση (2.8) ίση με το μηδέν τότε θα λάβουμε τα σημεία στα οποία η παραγόμενη ροπή είναι μηδενική. Αυτό συμβαίνει σε δύο περιπτώσεις, είτε όταν ο δρομέας βρίσκεται σε κατάσταση ακινησίας, δηλαδή αν ισχύει $u = 0$ είτε όταν ο δρομέας κινείται με την ταχύτητα της ελεύθερης δέσμης, δηλαδή αν $u = c_1$ όπου σε αυτή την περίπτωση η δέσμη δεν θα προσπίπτει ποτέ στα σκαφίδια.

Η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα όπου θεωρητικά επιτυγχάνεται η παραγωγή της μέγιστης μηχανικής ισχύος μπορεί να βρεθεί όταν θέσουμε την παράγωγο της εξίσωσης του Euler, ως προς την περιφερειακή ταχύτητα, ίση με το μηδέν και τότε θα προκύψει το εξής:

$$\frac{\partial N_u}{\partial u} = \rho Q (1 - \cos \beta) (c_1 - 2u) \quad (2.11)$$

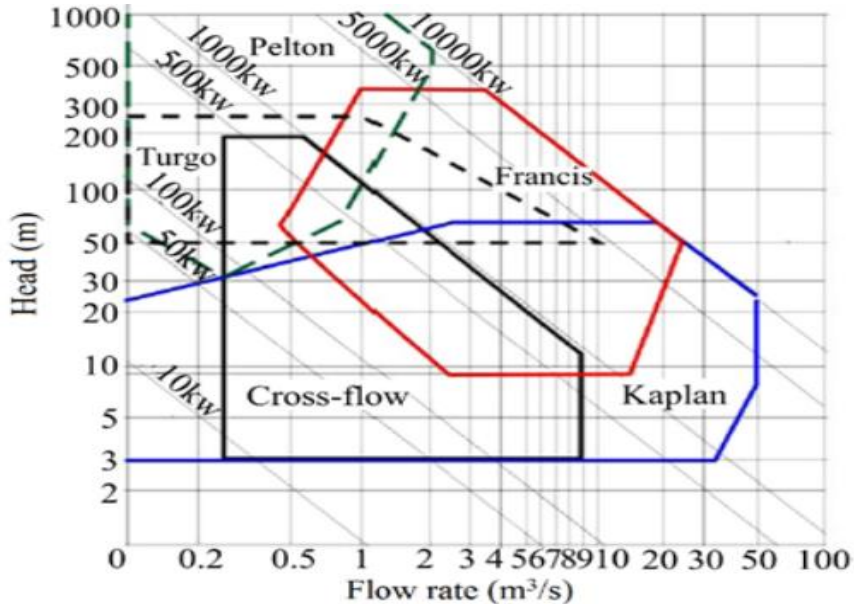
Συνεπώς η μέγιστη ισχύς επιτυγχάνεται όταν: $u = \frac{c_1}{2}$, δηλαδή όταν δρομέας κινείται με την μισή ταχύτητα της ελεύθερης δέσμης και ισούται με:

$$N_{u,max} = \frac{1}{4} (\rho Q c_1^2) (1 - \cos \beta) \quad (2.12)$$

2.7 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΓΙΑ ΤΟΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΤΟΥ ΔΡΟΜΕΑ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εστιάζει στην πορεία σχεδιασμού του υδροστροβίλου σε συνδυασμό με την προσομοίωση της ροής που εισέρχεται από αυτόν. Θα θεωρήσουμε λοιπόν μια υποθετική περίπτωση προκειμένου να προβούμε στις ανωτέρω ενέργειες. Επιλέγω καθαρό ύψος υδατόπτωσης H_{net} και μια αναμενόμενη

ωφέλιμη μηχανική ισχύ εξόδου P , με το σημείο που ορίζουν αυτά τα δύο μεγέθη να βρίσκεται εντός των ενδεδειγμένων ορίων για την χρήση υδροστροβίλου τύπου Pelton (βλέπε Εικόνα 2-14). Το διάγραμμα της Εικόνας 2-14 υποδεικνύει τις περιοχές όπου συνίσταται η χρήση του συγκεκριμένου τύπου υδροστροβίλου.



Εικόνα 2-14: Περιοχές τιμών ύψους πτώσης-παροχής για την εφαρμογή υδροστροβίλων διαφόρων τύπων. [144]

Έστω $H_{net} = 100 \text{ m}$, το καθαρό ύψος υδατόπτωσης με αναμενόμενη ωφέλιμη μηχανική ισχύ εξόδου $P = 200 \text{ kW}$. Ο υδροστροβίλος μας θα είναι οριζοντίου άξονα και θα φέρει ένα ακροφύσιο. Προκειμένου να προβούμε στον σχεδιασμό του στροφείου θα πρέπει να υπολογίσουμε τις απαραίτητες διαστάσεις του, κάνοντας παράλληλα ορισμένες παραδοχές.

Η συνολική απόδοση η_o , εκτιμάται σε:

$$\eta_o = 78\%$$

Η παράμετρος της ταχύτητας C_v , εκλέχθηκε ως:

$$C_v = 0.98$$

Με το εύρος των τιμών της παραμέτρου της ταχύτητας να είναι:

$$C_v = 0.97 - 0.99$$

Ο λόγος C_u της περιφερειακής ταχύτητας u_{per} προς την ταχύτητα ροής της ελεύθερης δέσμης u_{jet} , εκλέγεται ως :

$$C_u = \frac{u_{per}}{u_{jet}} = 0.46 \quad (2.13)$$

Το εύρος των τυπικών τιμών του συντελεστή C_u είναι:

$$C_u = 0.43 - 0.48$$

Με την βοήθεια της σχέσης $P = \eta_o \rho g Q H_{net}$, λύνοντας ως προς την ογκομετρική παροχή Q και αντικαθιστώντας τιμές των γνωστών μεταβλητών (πυκνότητα ρ , επιτάχυνση της βαρύτητας g , συνολική απόδοση η_o , καθαρό ύψος υδατόπτωσης H_{net}), προκύπτει ότι:

$$Q = \frac{P}{\eta_o \rho g H_{net}} = \frac{200kW}{0.78 \cdot 1000 \frac{kg}{m^3} \cdot 9.81 \frac{m}{s^2} \cdot 100m} = 0.26137 \frac{m^3}{s} \quad (2.14)$$

Η ταχύτητα της ελεύθερης δέσμης u_{jet} προκύπτει ως εξής:

$$u_{jet} = C_V \sqrt{2gH_{net}} = 0.98 \sqrt{2 \cdot 9.81 \frac{m}{s^2} \cdot 100m} = 43.408 \frac{m}{s} \quad (2.15)$$

Η περιφερειακή ταχύτητα u_{per} για την λειτουργία του υδροστροβίλου στο βέλτιστο σημείο λειτουργίας, υπολογίστηκε ως:

$$u_{per} = 0.46u_{jet} = 0.46 \cdot 43.408 \frac{m}{s} = 19.9677 \frac{m}{s} \quad (2.16)$$

Το εμβαδό της διατομής της ελεύθερης δέσμης A_{jet} , δίνεται από την εξίσωση:

$$A_{jet} = \pi \frac{d_{jet}^2}{4} \quad (2.17)$$

Από την εξίσωση της συνέχειας (εξίσωση 2.18) και σε συνδυασμό με την εξίσωση (2.17) προκύπτει η σχέση για τον υπολογισμό της διαμέτρου της ελεύθερης δέσμης d_{jet} ως:

$$Q = u_{jet} A_{jet} \quad (2.18)$$

$$d_{jet} = \sqrt{\frac{4Q}{\pi u_{jet}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0.26137 \frac{m^3}{s}}{\pi \cdot 43.408 \frac{m}{s}}} = 0.087555m \quad (2.19)$$

Ο λόγος των διαμέτρων m , της διαμέτρου του κύκλου δέσμης D και της διαμέτρου ελεύθερης δέσμης d_{jet} , επιλέχθηκε ως ο μέσος όρος των δύο ακραίων τιμών ($12 \leq m \leq 15$) του εύρους της παραμέτρου m :

$$m = \frac{D}{d_{jet}} = 13.5 \quad (2.20)$$

Η διάμετρος του κύκλου δέσμης D , δηλαδή η διάμετρος του δρομέα που μετριέται από τα κέντρα δύο αντιδιαμετρικών σκαφιδίων (βλέπε Εικόνα 2-17), υπολογίστηκε ως:

$$D = 13.5d_{jet} = 13.5 \cdot 0.087555m = 1.182m \quad (2.21)$$

Ο αριθμός των στροφών N του δρομέα προκύπτει:

$$N = \frac{60u_{per}}{\pi D} = \frac{60 \cdot 19.9677}{\pi \cdot 1.182} = 322.66 \text{ RPM} \quad (2.22)$$

Η γωνιακή ταχύτητα ω , προκύπτει:

$$\omega = \frac{2\pi N}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 322.66}{60} = 33.7878 \frac{rad}{s} \quad (2.23)$$

Το πλήθος των σκαφιδίων είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος που πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψιν στο σχεδιασμό του στροφείου. Το πλήθος των σκαφιδίων z θα πρέπει να είναι τέτοιο ώστε σε κάθε χρονική στιγμή ένα μέρος του στροφείου να βάλλεται πάντα από την ελεύθερη δέσμη και προσδιορίζεται βάσει της εμπειρικής σχέσης:

$$z = \frac{D}{2d_{jet}} + z_0 \quad \text{με} \quad z_0 = 14 \quad \text{εώς} \quad 16 \quad (2.24)$$

Επιλέγω $z_0 = 15$, και προκύπτει ότι:

$$z = \frac{D}{2d_{jet}} + z_0 = \frac{13.5}{2} + 15 = 21.75 \approx 22 \text{ σκαφίδια}$$

Στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι βασικές διαστάσεις των σκαφιδίων, βάσει του διαθέσιμου εύρους των διαστάσεων οι οποίες δίνονται συναρτήσει της διαμέτρου της ελεύθερης δέσμης και παρουσιάζονται στον Πίνακα 2-1.

Πίνακας 2-1: Βασικές διαστάσεις σκαφιδίων. [144]

| Διάσταση | Ελάχιστη τιμή | Μέγιστη τιμή | Τιμή (m) |
|--|---------------|---------------|----------|
| Μήκος σκαφιδίου, L | $2.28d_{jet}$ | $3.3d_{jet}$ | 0.21889 |
| Πλάτος σκαφιδίου, B | $2.8d_{jet}$ | $4d_{jet}$ | 0.27142 |
| Βάθος εγκοπής, S | $0.44d_{jet}$ | $0.70d_{jet}$ | 0.06001 |
| Πλάτος εγκοπής, M | $1.12d_{jet}$ | $1.6d_{jet}$ | 0.11382 |
| Βάθος σκαφιδίου, E | $0.8d_{jet}$ | $1.2d_{jet}$ | 0.07786 |
| Διάμετρος του κύκλου δέσμης, D | $12d_{jet}$ | $15d_{jet}$ | 1.182 |
| Διάμετρος πτερωτής, D_{Rotor} | - | - | 1.425 |

Μήκος σκαφιδίου, L :

$$L = 2.5 \cdot d_{jet} = 2.5 \cdot 0.087556 \text{ m} = 0.21889 \text{ m} \quad (2.25)$$

Πλάτος σκαφιδίου, B :

$$B = 3.1 \cdot d_{jet} = 3.1 \cdot 0.087556 \text{ m} = 0.27142 \text{ m} \quad (2.26)$$

Βάθος εγκοπής, S :

$$S = 0.7 \cdot d_{jet} = 0.7 \cdot 0.08557 \text{ m} = 0.06001 \text{ m} \quad (2.27)$$

Πλάτος εγκοπής, M :

$$M = 1.3 \cdot d_{jet} = 1.3 \cdot 0.087556 \text{ m} = 0.11382 \text{ m} \quad (2.28)$$

Βάθος σκαφιδίου, E :

$$E = 0.8893 \cdot d_{jet} = 0.8893 \cdot 0.087556 \text{ m} = 0.07786 \text{ m} \quad (2.29)$$

Διάμετρος κύκλου δέσμης, D :

$$D = 13.5 \cdot d_{jet} = 13.5 \cdot 0.087556 \text{ m} = 1.182 \text{ m} \quad (2.30)$$

Διάμετρος πτερωτής (προέκυψε ύστερα από μέτρηση στο πρόγραμμα Solidworks), D_{Rotor} :

$$D_{Rotor} = 1.425 \text{ m}$$

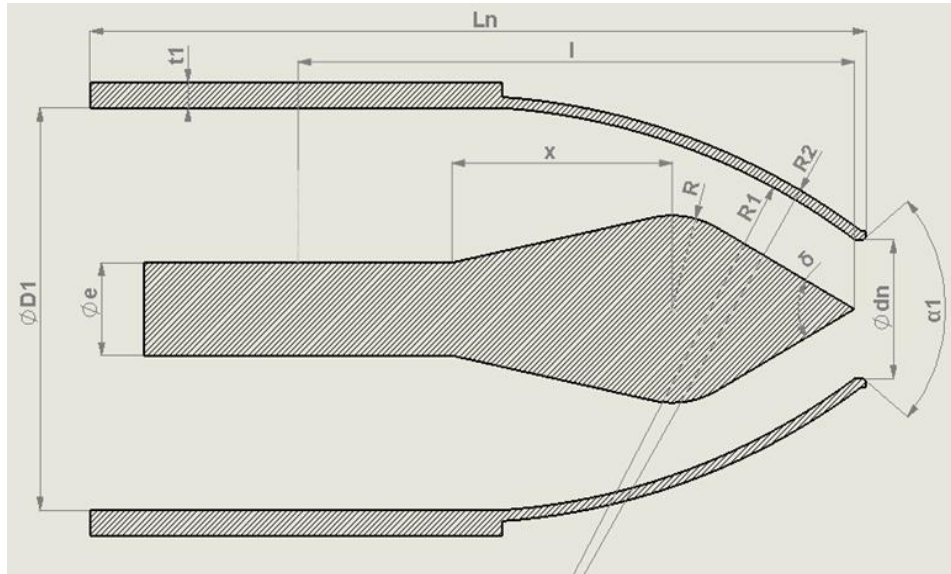
Οι τιμές των βασικών διαστάσεων των σκαφιδίων καταχωρήθηκαν στον Πίνακα 2-1.

Ακολουθεί η διαστασιολόγηση του συστήματος του ακροφυσίου και της ακίδας. Η πλειοψηφία των διαστάσεων του ακροφυσίου και της ακίδας δίνονται συναρτήσει της διαμέτρου της οπής του ακροφυσίου d_n (υπολογίστηκε στο αμέσως επόμενο βήμα), ενώ για την εκλογή ορισμένων έτερων διαστάσεων έγιναν κάποιες παραδοχές και επιλέχθηκαν τιμές που προτείνονται στην αντίστοιχη βιβλιογραφία. Οι υπολογισθείσες τιμές των παραμέτρων καθώς και οι μαθηματικές σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν για τον καθορισμό τους, καταχωρήθηκαν στον κάτωθι συγκεντρωτικό Πίνακα 2-2. Οι βασικές διαστάσεις του ακροφυσίου και της ακίδας απεικονίζονται στην Εικόνα 2-15 και στην Εικόνα 2-16.

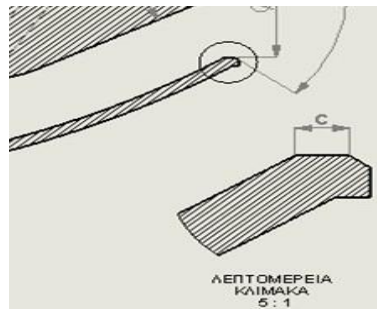
Πίνακας 2-2 : Βασικές διαστάσεις ακροφυσίου και ακίδας. [141]

| Ακροφύσιο-Ακίδα | | | | |
|------------------------|--|-------------------------------|-------------|-------------------------|
| A/α | Σύμβολο | Μαθηματική έκφραση | Τιμή | Μονάδες μέτρησης |
| 1 | Μήκος ακροφυσίου, L_n | $(D_1 - d_{jet}) / \tan\beta$ | 623.25 | mm |
| 2 | Διάμετρος αγωγού προσαγωγής, D_1 | $2.9d_n$ | 314.36 | mm |
| 3 | Γωνία εγκοπής ακροφυσίου, α_1 | Επιλογή | 80 | Μοίρες |
| 4 | Διάμετρος οπής ακροφυσίου, d_n | Υπολογισμός | 108.4 | mm |
| 5 | Γωνία κωνικότητας ακίδας, δ | Επιλογή | 60 | Μοίρες |
| 6 | Γωνία κλίσης ακροφυσίου, β | Επιλογή | 20 | Μοίρες |
| 7 | Απόσταση μεταξύ των κορυφών της ακίδας για $Q=0$ και $Q=Max$, s | $0.88d_n$ | 95.39 | mm |
| 8 | Διάμετρος κύκλου ακίδας, R | $1.35d_n$ | 146.34 | mm |
| 9 | X | $1.63d_n$ | 176.69 | mm |
| 10 | R_2 | $R_1 + t_1$ | 552.67 | mm |
| 11 | R_1 | $5.02d_n$ | 544.17 | mm |
| 12 | E | $0.67d_n$ | 72.628 | mm |
| 13 | C | $0.06d_n$ | 6.51 | mm |
| 14 | I | $4.12d_n$ | 446.61 | mm |
| 15 | Πάχος τοιχώματος ακροφυσίου, t_1 | Επιλογή | 8.5 | mm |

| | | | | |
|----|---|---------|------|----------------------|
| 16 | Πάχος τοιχώματος αγωγού προσαγωγής ακροφυσίου, t_2 | Επιλογή | 20 | mm |
| 17 | Συντελεστής εκροής, μ_1 | Επιλογή | 0.84 | Αδιάστατο μέγεθος |



Εικόνα 2-15: Βασικές διαστάσεις ακροφυσίου και ακίδας.



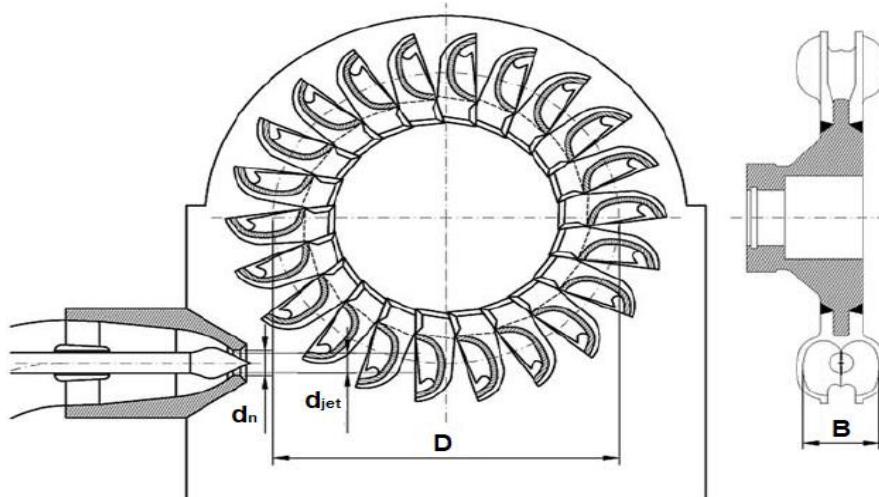
Εικόνα 2-16: Λεπτομέρεια της εξόδου του ακροφυσίου.

Η διάσταση της διαμέτρου της οπής εξόδου του ακροφυσίου θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε να επιτρέπει την διέλευση της υπολογισθείσας ογκομετρικής παροχής (βλέπε Εικόνα 2-17). Συνεπώς η διάμετρος οπής του ακροφυσίου d_n στην έξοδο θα πρέπει να είναι ευρύτερη σε σχέση με την διάμετρο της ελεύθερης δέσμης d_{jet} , λόγω της στένωσης που υφίσταται η δέσμη καθώς εξέρχεται από το ακροφύσιο. Η διάμετρος της οπής του ακροφυσίου υπολογίστηκε ως εξής:

Ο συντελεστής εκροής μ_1 επιλέχθηκε βάσει του εύρους των συνηθών τιμών που λαμβάνει (Πίνακας 2-2):

$$\mu_1 = 0.8 \text{ έως } 0.88$$

$$d_n = \sqrt{\frac{Q \sin a_1}{2.66 \mu_1 C_v \sqrt{H_{net}}}} = \sqrt{\frac{0.26137 \cdot 0.984807}{2.66 \cdot 0.84 \cdot 0.98 \cdot \sqrt{100}}} = 0.1084 \text{ m} \quad (2.31)$$



Εικόνα 2-17: Βασικές διαστάσεις του υδροστροβίλου. [112]

Διάμετρος άξονα του στροφείου:

Ο άξονας του υδροστροβίλου μεταφέρει την περιστροφική κίνηση του δρομέα στην γεννήτρια. Στις περισσότερες εφαρμογές η διατομή του άξονα είναι πλήρης κυκλική και καταπονείται είτε σε καθαρή στρέψη είτε σε συνδυασμό στρέψης και κάμψης. Η διάμετρος του άξονα που δύναται να μεταφέρει την υφιστάμενη μηχανική ισχύ μπορεί να υπολογιστεί με την εξής σχέση:

$$d_s = \sqrt[3]{\frac{1.77 \cdot 10^6 P}{N}} = \sqrt[3]{\frac{1.77 \cdot 10^6 \cdot 200}{322.66}} = 103.138 \text{ mm} \quad (2.32)$$

Οι μονάδες της ισχύος είναι σε KW και των στροφών σε RPM. Η ανωτέρω τιμή της διαμέτρου του άξονα αποτελεί μια αρχική εκτίμηση.

2.8 ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΙΣΧΥΣ

Η υδροδυναμική ισχύς P_h προσδιορίζεται από την σχέση:

$$P_h = \rho g Q H \quad (2.33)$$

Όπου P_h : η υδροδυναμική ισχύς (W)

g : η επιτάχυνση της βαρύτητας

ρ : η πυκνότητα του νερού

Q : η ογκομετρική παροχή (m^3/s)

H : το ολικό ύψος υδατόπτωσης (m)

Η μηχανική ισχύς P που προκύπτει στον άξονα της γεννήτριας μπορεί να υπολογιστεί με την κάτωθι εξίσωση:

$$P = \eta_o \rho g Q H_{net} \quad (2.34)$$

Όπου P : η ωφέλιμη μηχανική ισχύς (kW)

η_o : ο συνολικός βαθμός απόδοσης του υδροστροβίλου

g : η επιτάχυνση της βαρύτητας (m/s^2)

ρ : η πυκνότητα του νερού (kg/m^3)

Q : η ογκομετρική παροχή (m^3/s)

H_{net} : το καθαρό ύψος υδατόπτωσης (m)

2.9 ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΩΛΕΙΕΣ

Ο υδροστρόβιλος ουσιαστικά αξιοποιεί μόνο ένα μέρος της διαθέσιμης υδραυλικής ενέργειας λόγω των απωλειών που εμφανίζονται κατά τις διεργασίες μετατροπής ενέργειας. Ορίζονται λοιπόν τριών ειδών επιμέρους αποδόσεις:

- Υδραυλική απόδοση

Υδραυλική απόδοση η_h καλείται ο λόγος του ύψους υδατόπτωσης που αξιοποιεί ο υδροστρόβιλος προς το καθαρό ύψος. Ένας εναλλακτικός ορισμός της υδραυλικής απόδοσης είναι ο λόγος του καθαρού ύψους πτώσης προς το ολικό ύψος υδατόπτωσης. Άρα, ο υδραυλικός βαθμός η_h απόδοσης δίνεται από την σχέση:

$$\eta_h = \frac{H_u}{H_{net}} = \frac{H_{net}}{H_{gross}} \quad (2.35)$$

Όπου:

H_u : Το ύψος υδατόπτωσης που αξιοποιείται από τον υδροστρόβιλο.

H_{net} : Το καθαρό ύψος υδατόπτωσης.

H_{gross} : Το ολικό ύψος υδατόπτωσης.

- Ογκομετρική απόδοση

Ο λόγος της ογκομετρικής παροχής που αξιοποιείται από τον υδροστρόβιλο προς την ογκομετρική παροχή που διέρχεται από τον υδροστρόβιλο καλείται ογκομετρική απόδοση η_v και δίνεται από την σχέση:

$$\eta_v = \frac{Q - Q_L}{Q} \quad (2.36)$$

Όπου:

Q : Η συνολική ογκομετρική παροχή που τροφοδοτεί τον υδροστρόβιλο.

Q_L : Η απομακρυνόμενη από τον υδροστρόβιλο ογκομετρική παροχή η οποία δεν αξιοποιείται για την παραγωγή μηχανικής ισχύος.

- Μηχανική απόδοση

Μηχανική απόδοση η_m καλείται ο λόγος της διαθέσιμης ισχύος στον άξονα του υδροστροβίλου προς το άθροισμα της διαθέσιμης ισχύος (στον άξονα του υδροστροβίλου) και των απωλειών ισχύος λόγω της μηχανικής τριβής, με την μαθηματική σχέση που την περιγράφει να είναι η εξής:

$$\eta_m = \frac{b_p}{b_p + f_p} \quad (2.37)$$

Όπου:

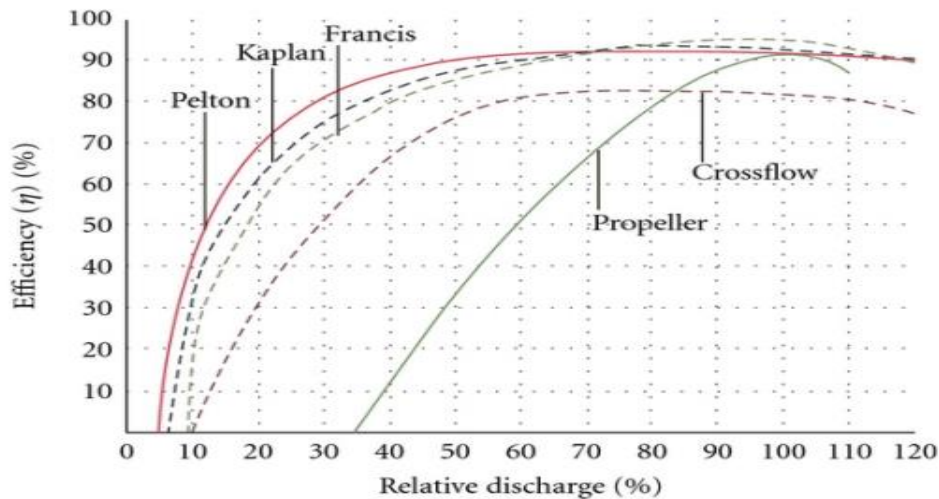
b_p : Η διαθέσιμη ισχύς πέδης στον άξονα.

f_p : Οι μηχανικές απώλειες λόγω τριβής στα έδρανα.

Συνεπώς ο βαθμός απόδοσης του υδροστροβίλου είναι ο λόγος της ωφέλιμης μηχανικής ισχύος που αποδίδει ο υδροστρόβιλος προς την υδραυλική ισχύ που απορροφά ο υδροστρόβιλος. Άρα:

$$\eta_o = \frac{P}{P_{υδρ.}} \quad (2.38)$$

Ο βαθμός απόδοσης του υδροστροβίλου αποτελεί συνάρτηση των χαρακτηριστικών και του τύπου υδροστροβίλου καθώς και των στιγμιαίων παραμέτρων όπως είναι η παροχή και το ύψος (σημείο λειτουργίας). Ένα τυπικό διάγραμμα του βαθμού απόδοσης συναρτήσει της σχετικής παροχής, παρουσιάζεται στην Εικόνα 2-18.



Εικόνα 2-18: Καμπύλες βαθμού απόδοσης για διαφόρους τύπους υδροστροβίλων. [9]

Τα είδη των απωλειών ενέργειας στους υδροστροβίλους είναι:

- **Υδραυλικές:** Υδραυλικές απώλειες λόγω τριβής κατά μήκος των γραμμών ροής από την είσοδο έως την διατομή εξόδου και απώλειες κρούσεως που οφείλονται στη διαφορά της γωνίας πρόσπτωσης της ροής στα πτερύγια του στροφείου σε σχέση με την αντίστοιχη γωνία των πτερυγίων. Οι απώλειες κρούσεως στα ρυθμιστικά πτερύγια δεν είναι σημαντικές διότι στην περιοχή αυτή η ροή είναι έντονα επιταχυνόμενη.
- **Μηχανικές:** Απώλειες ενέργειας λόγω τριβής στα έδρανα και απώλειες ενέργειας στρεφόμενου δίσκου. Οι απώλειες στρεφόμενου δίσκου οφείλονται στην τριβή που αναπτύσσεται μεταξύ του ύδατος και των εξωτερικών επιφανειών της πλήμνης και της στεφάνης του στροφείου (στα στροφεία αξονικής ροής η στεφάνη απουσιάζει). Στους υδροστροβίλους δράσεως δεν έχουμε απώλειες στρεφόμενου δίσκου διότι προφανώς η πτερωτή δεν είναι βυθισμένη στο νερό αλλά έχουμε την εμφάνιση απωλειών αερισμού που οφείλονται στην αλληλεπίδραση του στροφείου και του περιβάλλοντος αέρα.
- **Ογκομετρικές:** Οφείλουν την ύπαρξη τους στις απώλειες παροχής διακένου που σχηματίζεται στους μεν φυγοκεντρικούς αντιδράσεως μεταξύ της εξωτερικής επιφάνειας της στεφάνης και του εξωτερικού κελύφους του υδροστροβίλου, στους δε αξονικής ροής αντιδράσεως μεταξύ των ακροπτερυγίων του στροφείου και του εξωτερικού κελύφους. Οι υδροστροβίλοι δράσεως δεν εμφανίζουν ογκομετρικές απώλειες λόγω της ισόθλιπτης λειτουργίας του στροφείου τους.

3. ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ SOLIDWORKS

3.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ

Η σχεδίαση με την βοήθεια Η/Υ (Computer-Aided Design) είναι μια τεχνολογία που χρησιμοποιεί Η/Υ για την υποβοήθηση της δημιουργίας, τροποποίησης, ανάλυσης και βελτιστοποίησης ενός σχεδιασμού. Τα υπολογιστικά συστήματα κάνουν χρήση της τεχνολογίας γραφικών, των βάσεων δεδομένων, της μαθηματικής μοντελοποίησης, της προσομοίωσης και του ελέγχου των δεδομένων για την δημιουργία ενός ψηφιακού μοντέλου. Με τον όρο CAD εννοούμε τη δημιουργία γεωμετρικών απεικονίσεων στον ηλεκτρονικό υπολογιστή και μάλιστα τρισδιάστατης απεικόνισης κατασκευών ή δομών, όπου χρησιμοποιούνται αυτοματοποιημένες διαδικασίες προσέγγισης επιφανειών (μέσω των παρεμβολών Coons, Bezier και Nubs) ή και όγκων. Με αυτό τον τρόπο είναι πολύ πιο διαχειρίσιμη και ευκολότερη η παραλλαγή της γεωμετρίας ενός μηχανολογικού εξαρτήματος. Ωστόσο, ο όρος Computer Aided Design (CAD) (Σχεδιασμός ή Σχεδίαση με τη βοήθεια Η/Υ) δεν έχει αυστηρά καθορισμένο περιεχόμενο. Συνήθως, ο όρος αυτός χρησιμοποιείται για μια ή και περισσότερες από τις παρακάτω τρεις διαδικασίες:

- Σχεδίαση, δηλαδή τη γεωμετρική αναπαράσταση στοιχείων μηχανών, αντικειμένων.
- Μελέτη απλών ή σύνθετων αντικειμένων (μεμονωμένων στοιχείων μηχανών ή πολύπλοκων μηχανολογικών κατασκευών) με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων για την μηχανική αντοχή και την λειτουργικότητα τους.
- Ανάλυση κατά αυτοματοποιημένο τρόπο και σχεδίαση αντικειμένων λαμβάνοντας υπόψιν εκ των προτέρων τις λειτουργικές τους απαιτήσεις.

3.1.1 Κύρια στοιχεία συστημάτων CAD

Τα βασικότερα στοιχεία που συνθέτουν ένα σύστημα CAD είναι:

- ✓ Τα Γραφικά Άμεσης Επικοινωνίας με τον Η/Υ (Interactive Computer Graphics - ICG).
- ✓ Ο σχεδιαστής (designer)

Το σύστημα γραφικών είναι το εργαλείο με την βοήθεια του οποίου ο σχεδιαστής (μηχανικός) μπορεί να διευκολυνθεί στην επίλυση ενός σχεδιαστικού προβλήματος. Ο σχεδιαστής μπορεί να σχεδιάσει στην οθόνη μια καινούργια ή να κάνει μετατροπή-βελτίωση μιας παλαιότερης σύλληψης. Προφανώς με τη βοήθεια των γραφικών οι δυνατότητες του μηχανικού εκτοξεύονται. Ο μηχανικός διεκπεραιώνει το μέρος εκείνο της διαδικασίας σχεδιασμού που αντιστοιχεί στις ανθρώπινες διανοητικές ικανότητες (σύλληψη ιδέας, σύνθεση, αυτόνομη σκέψη), αντιθέτως ο Η/Υ εκτελεί το κομμάτι εκείνο που αρμόζει στις ικανότητες του (ταχύτητα, εκτέλεση πολύπλοκων αριθμητικών υπολογισμών, οπτικοποίηση αντικειμένου, αποθήκευση μεγάλου όγκου πληροφοριών,

κλπ.). Το σύστημα που προκύπτει από τον συνδυασμό αυτών των δύο στοιχείων, υπερβαίνει σε μεγάλο βαθμό, τις δυνατότητες και την αποτελεσματικότητα του αθροίσματος των δυνατοτήτων του καθενός ξεχωριστά.

3.1.2 Πλεονεκτήματα συστημάτων CAD

Οι κυριότεροι λόγοι για τους οποίους συνίσταται η χρησιμοποίηση ενός συστήματος CAD είναι:

- ✚ Η παραγωγικότητα του σχεδιαστή αυξάνεται. Με τα συστήματα CAD γίνεται σαφέστερη και πληρέστερη απεικόνιση του αντικειμένου και των συστατικών του και ο χρόνος που απαιτείται για τη σύνθεση, την ανάλυση και την τεκμηρίωση ενός σχεδίου, ελαχιστοποιείται. Η αύξηση αυτή της παραγωγικότητας συνεπάγεται και τη μείωση του κόστους σχεδιασμού (Design cost).
- ✚ Βελτίωση ποιότητας σχεδιαστικής λύσης. Ένα σύστημα CAD επιτρέπει τη διεξοδικότερη μηχανική ανάλυση καθώς και τη διερεύνηση πληθώρας εναλλακτικών σχεδιαστικών λύσεων. Τα λάθη σχεδιασμού σχεδόν εξαλείφονται μέσω της μεγαλύτερης ακρίβειας του σχεδιασμού που μας παρέχει το σύστημα CAD. Το σύνολο αυτών των παραγόντων οδηγούν τελικά σε αισθητή αναβάθμιση της ποιότητας της σχεδιαστικής λύσης.
- ✚ Βελτίωση επικοινωνίας μεταξύ των σχεδιαστών σε διαφορετικά μέρη, η οποία ενθαρρύνει την ανταλλαγή απόψεων, προβληματισμών και γνώσεων στα πλαίσια συναδελφικής αλληλεγγύης.
- ✚ Με τη χρήση ενός συστήματος CAD δημιουργούνται (κατασκευαστικά) μηχανολογικά σχέδια ανώτερης ποιότητας και μεγαλύτερης ευκρίνειας, με ταυτόχρονη τήρηση των σχεδιαστικών προδιαγραφών τυποποίησης και τεκμηρίωσης.
- ✚ Δημιουργία βάσης δεδομένων για την κατασκευή (επιμέρους και ολοκληρωμένες λύσεις) η οποία συμβάλλει και αυτή στην μείωση του χρόνου ολοκλήρωσης του έργου.

3.1.3. Τρεις προσεγγίσεις βελτίωσης των συστημάτων CAD

Η πρωταρχική έκδοση του CAD ήταν ένα σύνολο σχεδιαστικών εργαλείων που χαρακτηρίζονται από τον γενικό τίτλο Computer-aided Drafting. Σ' αυτά τα αρχικά στάδια των συστημάτων ψηφιακής σχεδίασης λόγω των περιορισμένων δυνατοτήτων τους απλώς αντικαθιστούσαν τον πίνακα σχεδίασης. Κομβικό σημείο στην βελτίωση των αρχικών εκδόσεων ήταν η απόκτηση δυναμικής ευελιξίας όσον αφορά την πραγματοποίηση εναλλακτικών σχεδίων με την εισαγωγή τριών προσεγγίσεων .

- Σχεδιασμός με γνωρίσματα (features). Η πλειοψηφία των σύγχρονων συστημάτων CAD έχουν ενστερνιστεί τον σχεδιασμό με βάση τα γνωρίσματα. Τα γνωρίσματα εμφανίζονται ως σύνολα πληροφοριών που σχετίζονται με πτυχές της μορφής ή άλλα χαρακτηριστικά ενός αντικειμένου και συμβάλλουν στην τελική διαμόρφωση του σχεδιασμού. Η σχεδίαση με προκαθορισμένα χαρακτηριστικά μορφής επιφέρει σημαντική μείωση του πλήθους των εντολών.

- Παραμετρική σχεδίαση (Parametric design). Η παραμετρική σχεδίαση συνδέει τις διαστάσεις και τις μεταβλητές με την γεωμετρία του εξαρτήματος. Η αλλαγή μιας διάστασης επηρεάζει όλο το σχέδιο και δίνει επακριβώς τα όρια των αλλαγών οι οποίες είναι εφικτές.
- Μεταβολική σχεδίαση (Variational design). Η μεταβολική σχεδίαση είναι ένα υπερσύνολο της παραμετρικής σχεδίασης. Στην μεταβολική σχεδίαση οι περιορισμοί θεωρούνται τυπικά είδη μέσων μοντελοποίησης.

Εκτός από την γεωμετρία, τα συστήματα CAD έχουν την δυνατότητα να αποθηκεύσουν το ιστορικό και την διαδικασία σχεδίασης. Τα συστήματα αυτά χαρακτηρίζονται ως συστήματα με βάση το ιστορικό και είναι προτιμητέα για τον σχεδιασμό αντικειμένων που περιλαμβάνουν μεγάλες ομάδες ομοειδών αντικειμένων με μικρές αλλαγές (π.χ. μήκος, ύψος). Η εναλλακτική προσέγγιση των συστημάτων CAD τα οποία καταγράφουν μόνο γεωμετρικές πληροφορίες χωρίς δεσμεύσεις ιστορικής σχεδίασης παρέχουν τη δυνατότητα για γρήγορες και ευέλικτες αλλαγές στο μοντέλο σχεδιασμού. Τα συστήματα άνευ ιστορικού σχεδίασης αρμόζουν σε R&D διαδικασίες.

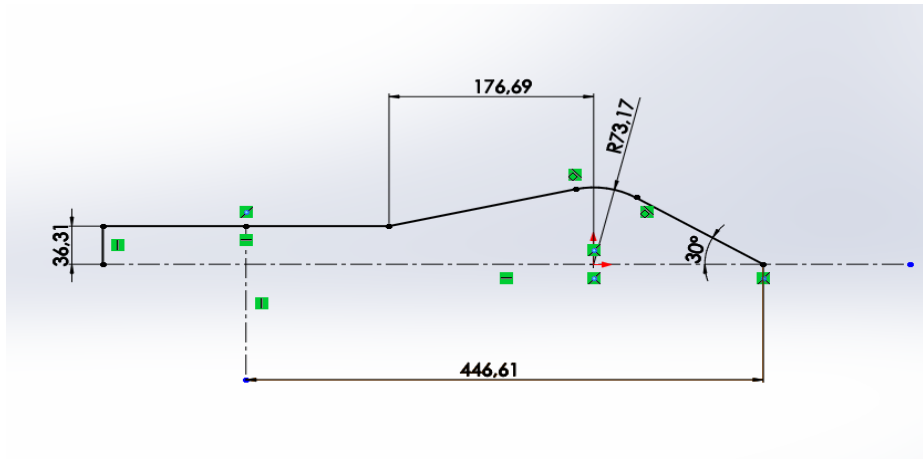
3.2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΓΧΥΤΗΡΑ

Η διαστασιολόγηση των εξαρτημάτων του υδροστροβίλου Pelton που έγινε στο 2^ο κεφάλαιο θα ληφθεί υπόψιν για τον σχεδιασμό τους εντός του σχεδιαστικού περιβάλλοντος του προγράμματος SolidWorks 2014. Αρχικά, έγινε ο σχεδιασμός των εξαρτημάτων από τα οποία αποτελείται ο εγχυτήρας.

3.2.1 Σχεδιασμός ακίδας

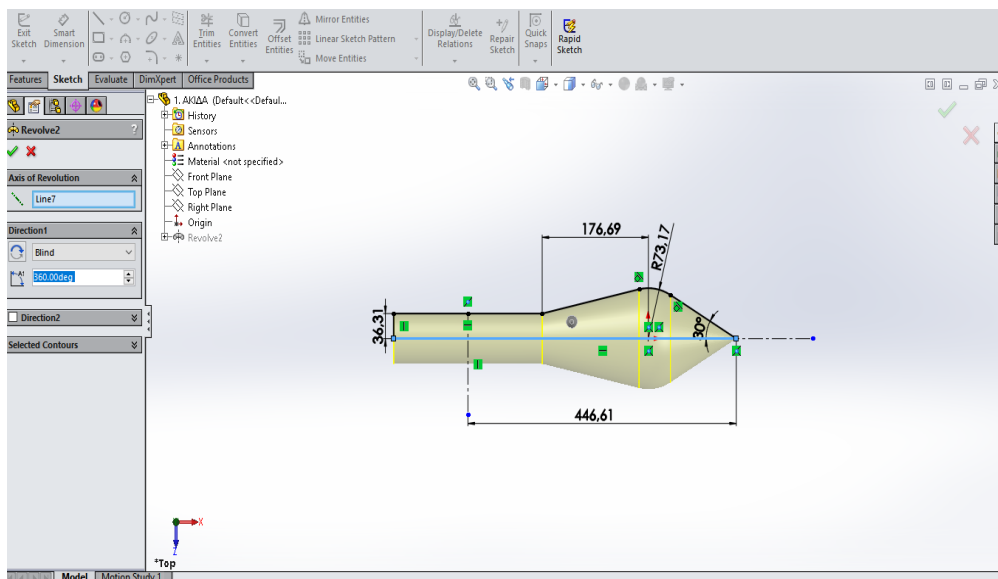
Η πορεία που ακολουθήθηκε για την σχεδίαση της ακίδας του ακροφυσίου είναι η εξής:

I. Δημιουργία του προφίλ της ακίδας (βλέπε Εικόνα 3-1).



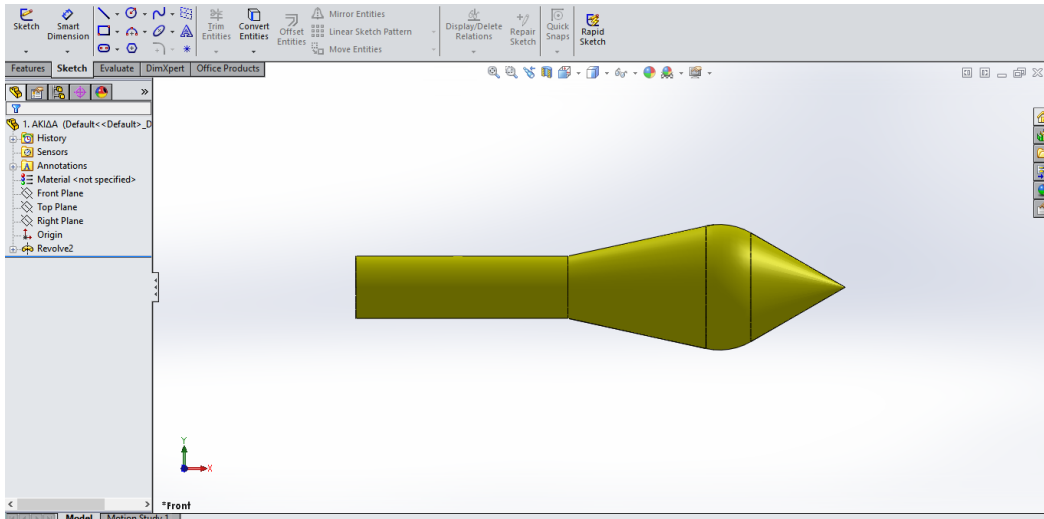
Εικόνα 3-1: Σκίτσο ακίδας.

II. Περιστροφή του προφίλ της ακίδας κατά 360 μοίρες ως προς την αξονική γραμμή (**Line7**) για δημιουργία στερεού εκ περιστροφής με ενεργοποίηση της εντολής **Revolved Boss/Base** (βλέπε Εικόνα 3-2).



Εικόνα 3-2: Δημιουργία στερεού εκ περιστροφής.

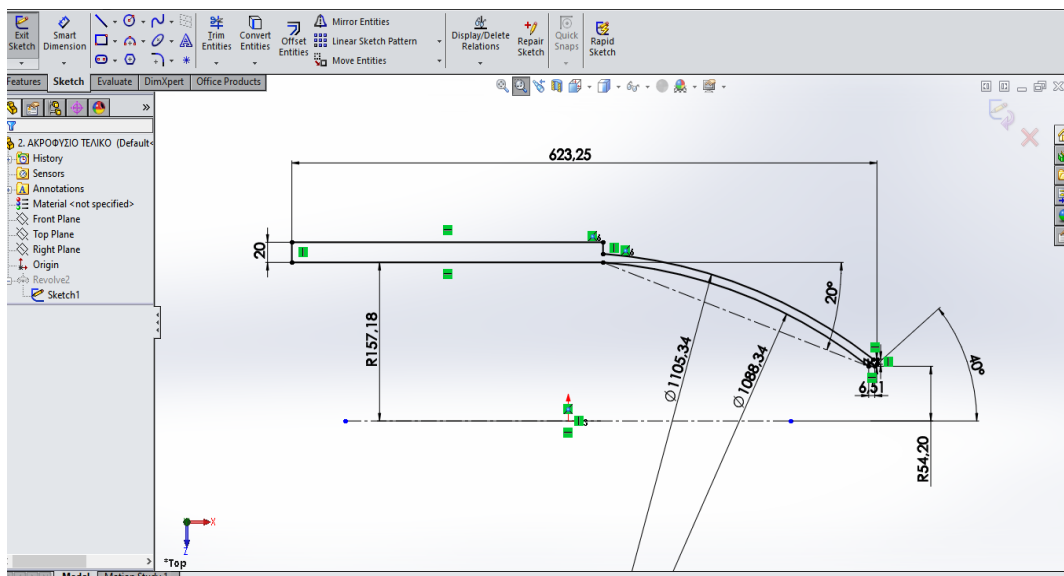
III. Το τελικό σχεδιαστικό αποτέλεσμα είναι εμφανές στην Εικόνα 3-3.



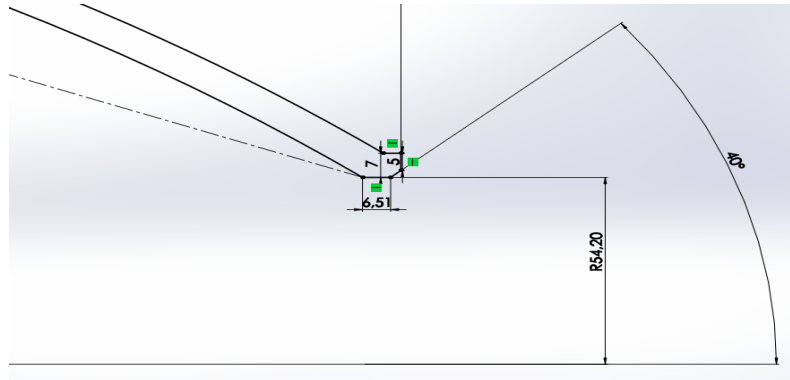
Εικόνα 3-3: Πρόοψη Ακίδας.

3.2.2 Σχεδιασμός ακροφυσίου

- Σχεδίαση του προφίλ του κελύφους του ακροφυσίου (βλέπε Εικόνες 3-4 και 3-5).

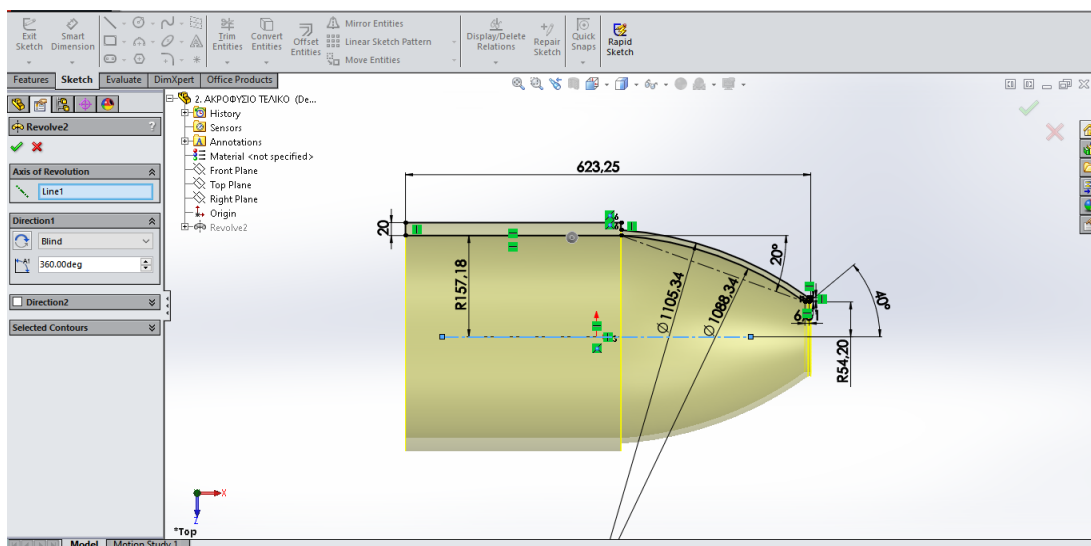


Εικόνα 3-4: Σκίτσο ακροφυσίου.



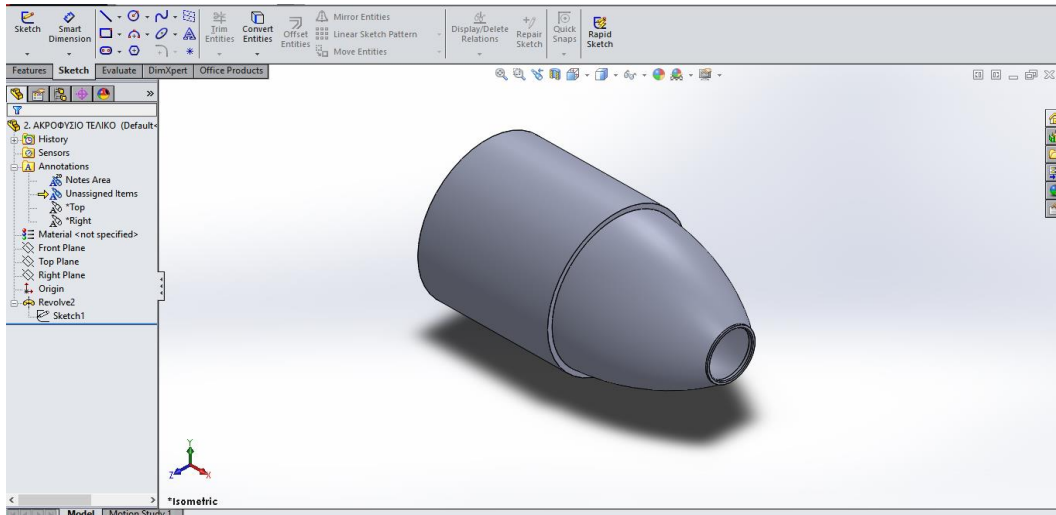
Εικόνα 3-5: Λεπτομέρεια της εξόδου του ακροφυσίου.

- Περιστροφή του προφίλ του ακροφυσίου κατά 360 μοίρες ως προς την αξονική γραμμή (**Line1**) του με χρήση της εντολής **Revolved Boss/Base** για την δημιουργία του κελύφους του (βλέπε Εικόνα 3-6).



Εικόνα 3-6: Δημιουργία ακροφυσίου.

- Το ολοκληρωμένο εξάρτημα απεικονίζεται στην Εικόνα 3-7.

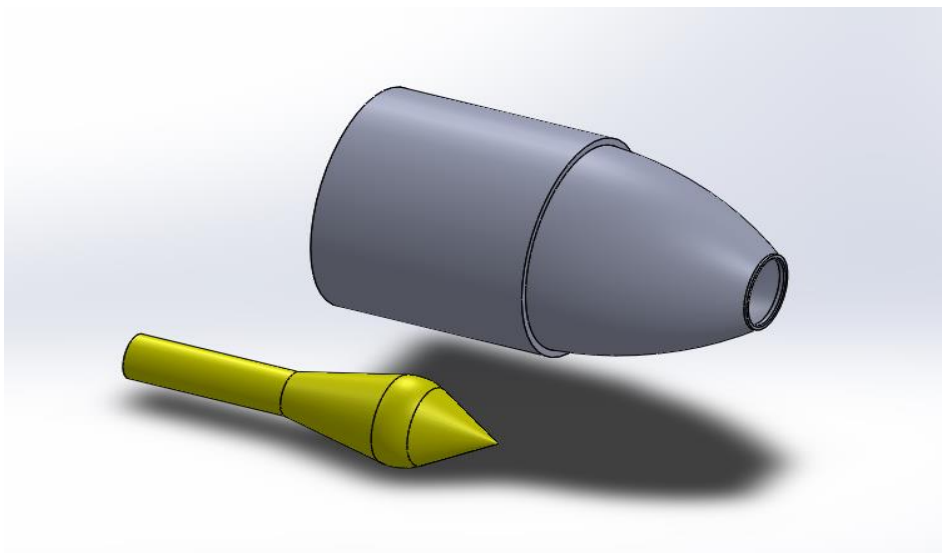


Εικόνα 3-7: Ισομετρική όψη ακροφυσίου.

3.2.3 Συναρμολόγηση Ακίδας και Ακροφυσίου

Στην συνέχεια θα πρέπει να προβούμε στην συναρμολόγηση της ακίδας και του ακροφυσίου. Με την διαδικασία που ακολουθήθηκε να είναι:

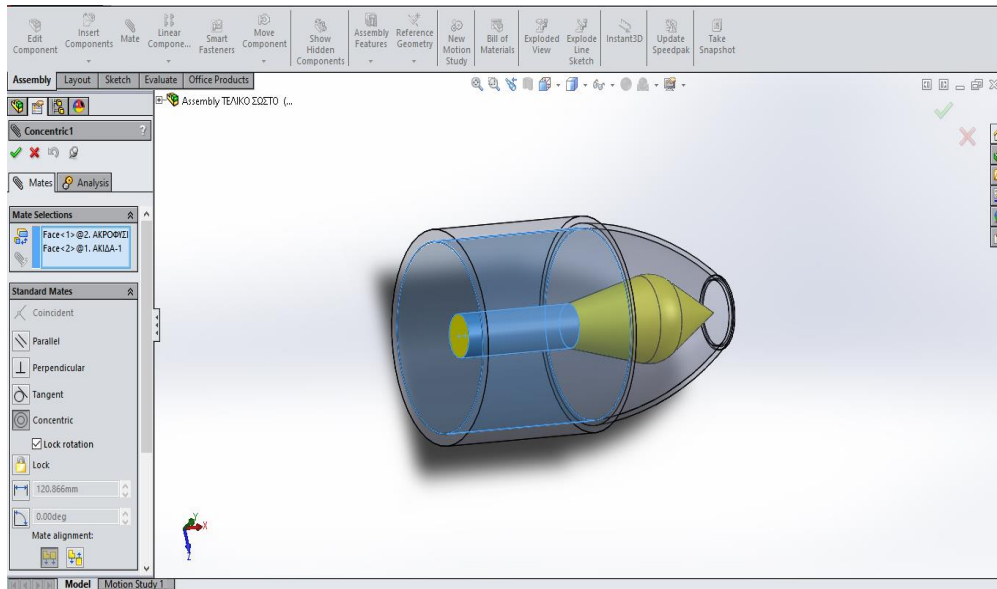
- Εισαγωγή των δύο εξαρτημάτων σε μια κοινή συναρμολόγηση (**Assembly**) (βλέπε Εικόνα 3-8).



Εικόνα 3-8: Έναρξη συναρμολόγησης ακίδας-ακροφυσίου.

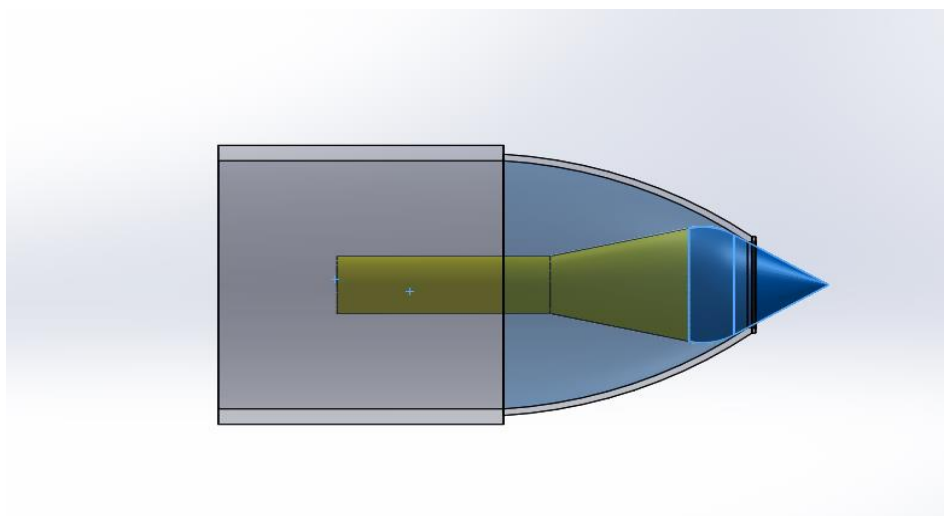
- Καταχώριση της σχέσης μεταξύ των δύο εξαρτημάτων ως ομόκεντρα (**Concentric Relation**) με ενεργοποίηση του χαρακτηριστικού Mate και επιλογή των δυο

κυλινδρικών επιφανειών της ακίδας (**Face<2>**) και του εσωτερικού τοιχώματος του ακροφυσίου (**Face<1>**). Τέλος, απαγορεύεται η περιστροφή τους με ενεργοποίηση της επιλογής **Lock rotation** (βλέπε Εικόνα 3-9).



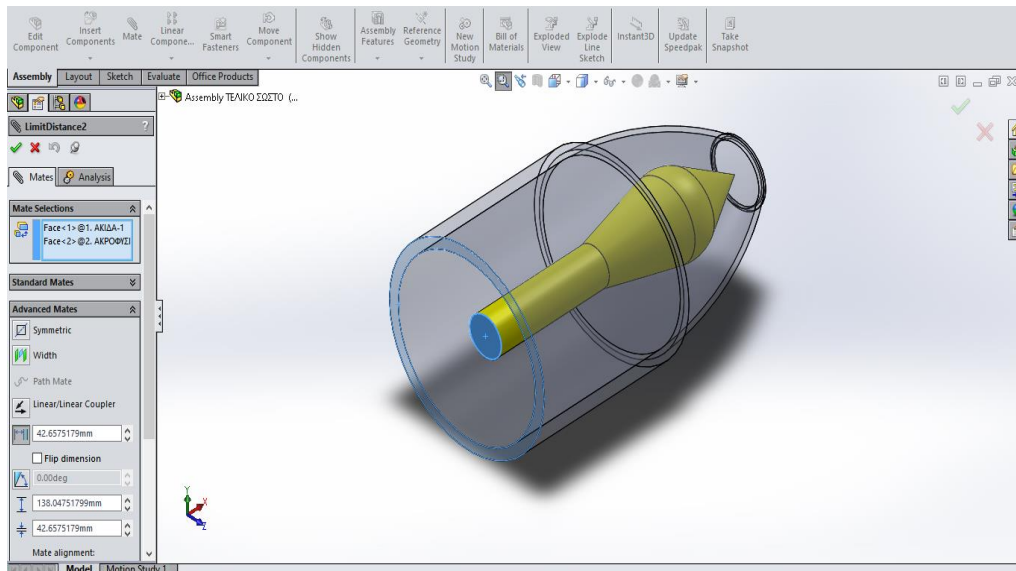
Εικόνα 3-9: Ομόκεντρη σύζευξη ακίδας-ακροφυσίου.

- Επόμενο βήμα είναι ο έλεγχος σύγκρουσης μεταξύ της ακίδας και των εσωτερικών τοιχωμάτων του ακροφυσίου μέσω της γραμμικής μετακίνησης της ακίδας έως ότου ανιχνευθεί επαφή (**Collision detection**) (βλέπε Εικόνα 3-10). Προβαίνουμε σε αυτόν τον έλεγχο προκειμένου να θέσουμε όρια στην γραμμική μετατόπιση της ακίδας. Έτσι εξασφαλίζεται αφενός πως το άνοιγμα του ακροφυσίου ανταποκρίνεται στην τιμή της μέγιστης ογκομετρικής παροχής που έχει καθοριστεί κατά την διαστασιολόγηση και αφετέρου πώς η ακίδα σφραγίζει πλήρως την οπή του αγωγού.

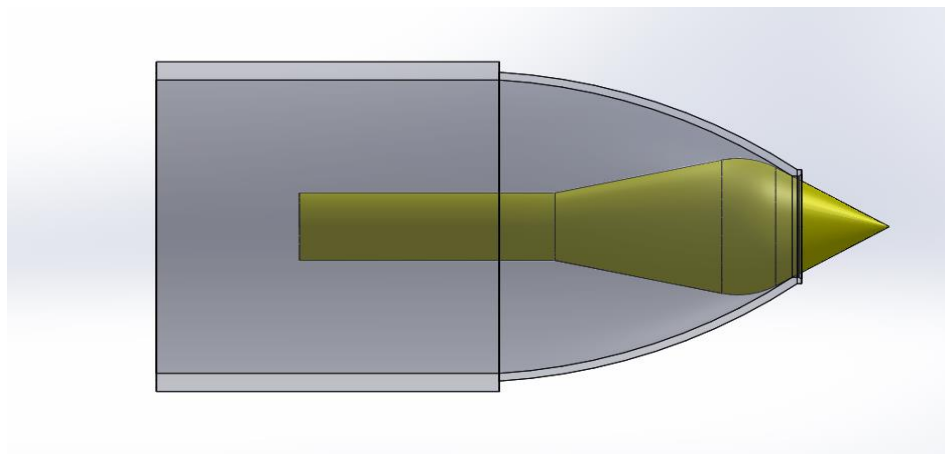


Εικόνα 3-10: Ένδειξη επαφής ακροφυσίου-ακίδας.

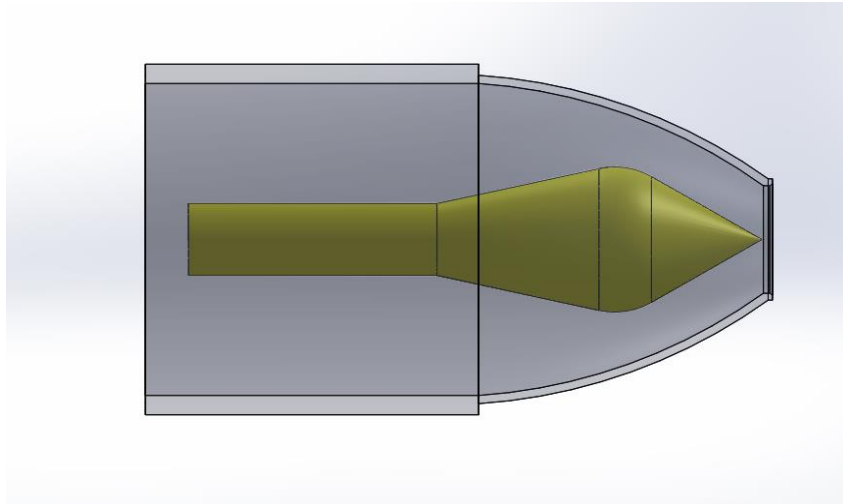
Ακολουθεί η οριοθέτηση της γραμμικής μετατόπισης της ακίδας η οποία προσδιορίζεται με τον καθορισμό της απόστασης s μεταξύ της κορυφής της ακίδας για $Q = 0$ (βλέπε Εικόνα 3-12) και για $Q = 0.26 \text{ m}^3/\text{s}$ (βλέπε Εικόνα 3-13). Συγκεκριμένα, τέθηκε περιορισμός της γραμμικής μετακίνησης της ακίδας με χρήση της εντολής σύζευξης (**Limit Distance Mate**) με την τιμή 42.657 mm να καταχωρείται ως η ελάχιστη απόσταση μεταξύ των επιφανειών **Face<1>** και **Face<2>** και την τιμή 138.047 mm ως η αντίστοιχη μέγιστη απόσταση όπως είναι εμφανές στην Εικόνα 3-11.



Εικόνα 3-11: Οριοθέτηση γραμμικής μετατόπισης της ακίδας.



Εικόνα 3-12: Σχετική θέση ακίδας-ακροφυσίου για μηδενική ογκομετρική παροχή.

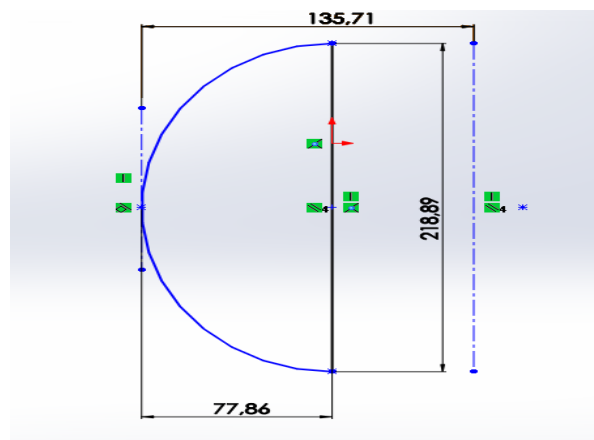


Εικόνα 3-13: Σχετική θέση ακίδας-ακροφυσίου για μέγιστη ογκομετρική παροχή.

3.3 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΤΡΟΦΕΙΟΥ

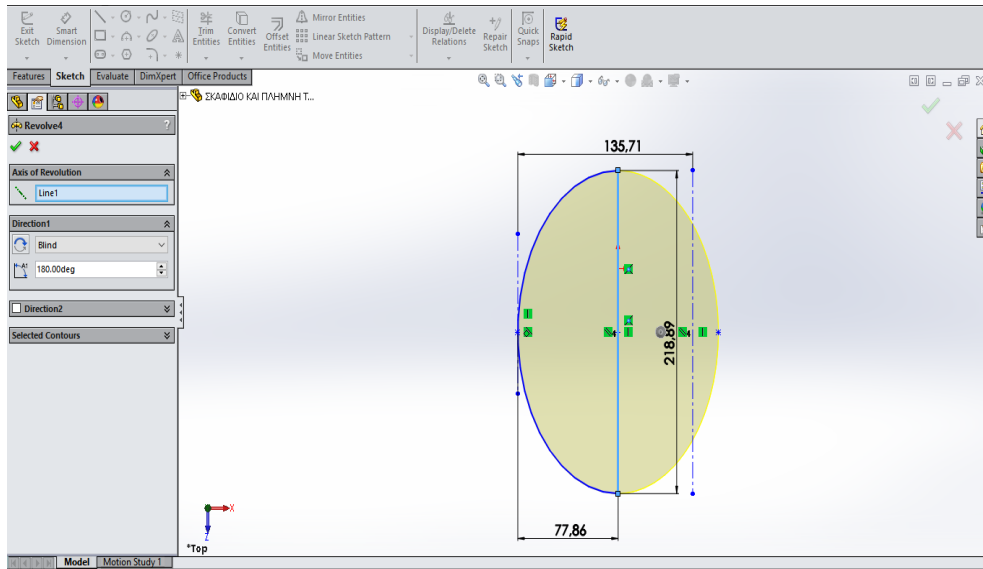
Ο σχεδιασμός του στροφείου έγινε και αυτός με γνώμονα τους υπολογισμούς του 2^{ου} κεφαλαίου. Η πορεία σχεδίασης ήταν η εξής:

ι. Σχεδίαση του σκίτσου του σκαφιδίου (βλέπε Εικόνα 3-14). Η καμπύλη κατασκευάστηκε με την εντολή **Spline**. Η καμπύλη είναι ως επί το πλείστον τυχαία με τους μοναδικούς περιορισμούς που να έχουν τεθεί να είναι η μέγιστη απόσταση από την αρχή των αξόνων ώστε να τηρηθεί η τιμή που έχει υπολογισθεί για το πλάτος του σκαφιδίου καθώς και το μήκος αυτού.



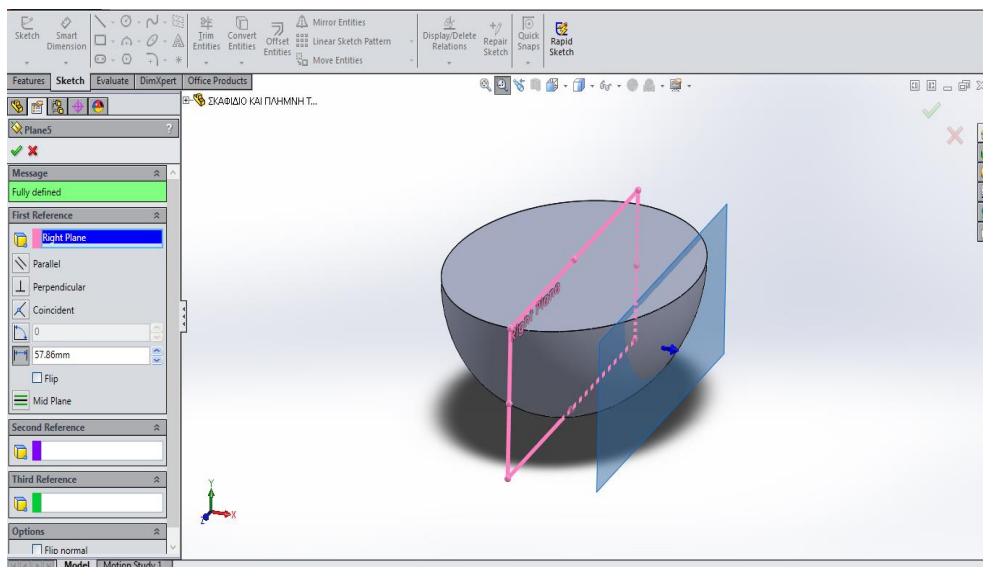
Εικόνα 3-14: Σκίτσο σκαφιδίου.

ii. Περιστροφή της κλειστής περιοχής του σκίτσου κατά 180 μοίρες ως προς την κατακόρυφη γραμμή (**Line1**) για την δημιουργία στερεού εκ περιστροφής (βλέπε Εικόνα 3-15) με ενεργοποίηση της εντολής **Revolved Boss/Base**.



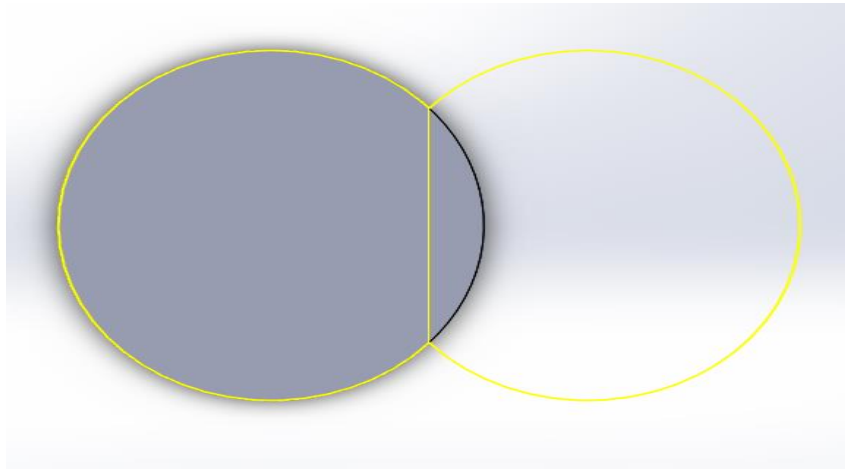
Εικόνα 3-15: Δημιουργία στερεού εκ περιστροφής.

iii. Δημιουργία επιπέδου (**Plane 5**) με την βοήθεια της εντολής **Reference Geometry** έχοντας ως επίπεδο αναφοράς το επίπεδο Right Plane, προκειμένου να προβούμε στον κατοπτρισμό του ημί-ελλειψοειδούς στερεού. Το νέο επίπεδο (**Plane 5**) απέχει απόσταση 57.86mm από το επίπεδο **Right Plane**, όπως διακρίνεται στην Εικόνα 3-16.



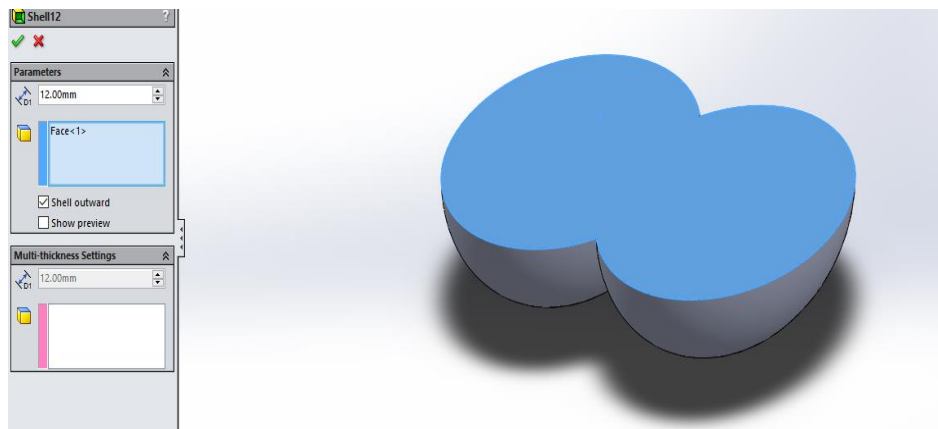
Εικόνα 3-16: Κατασκευή νέου επιπέδου.

iv. Κατοπτρισμός του ημι-ελλειψοειδούς στερεού εκ περιστροφής ως προς επίπεδο **Plane 5** με χρήση της εντολής **Mirror** (βλέπε Εικόνα 3-17).



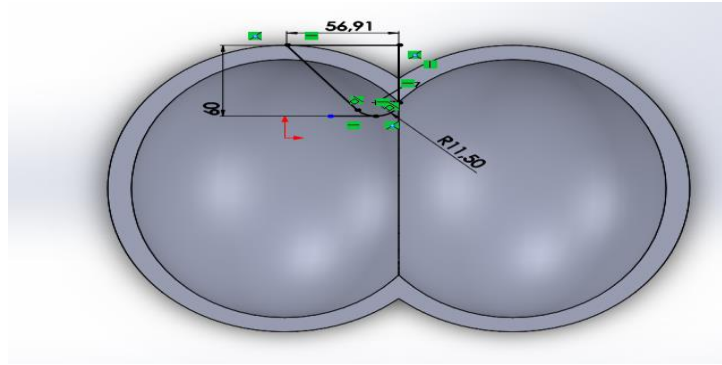
Εικόνα 3-17: Κατοπτρισμός του στερεού.

v. Εφαρμογή της εντολής **Shell** στο ανωτέρω στερεό (στην επιφάνεια **Face<1>**) για την δημιουργία του κελύφους του σκαφιδίου με πάχος ίσο με 12mm. Η επιλογή **Shell outward** είναι ενεργοποιημένη (βλέπε Εικόνα 3-18).



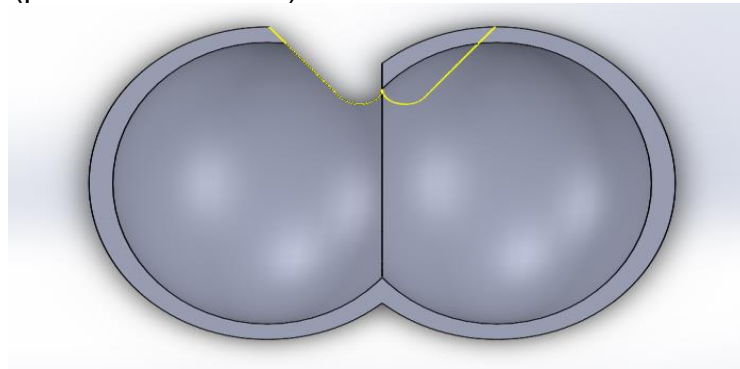
Εικόνα 3-18: Δημιουργία κελύφους.

vi. Σχεδίαση του σκίτσου της εγκοπής του σκαφιδίου στο επίπεδο της κάτοψης (**Top Plane**) του σκαφιδίου (βλέπε Εικόνα 3-19).



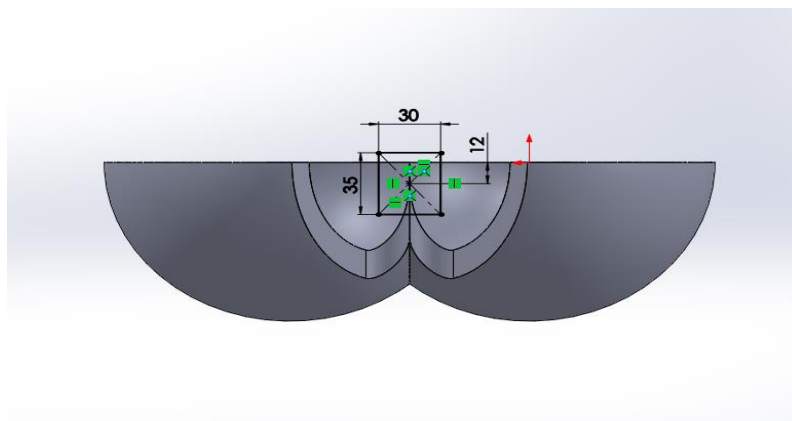
Εικόνα 3-19: Σκίτσο εγκοπής σκαφιδίου.

vii. Ακολουθεί η αποκοπή της εγκοπής (**Extruded Cut**) και στη συνέχεια ο κατοπτρισμός (**Mirror**) αυτής ως προς το επίπεδο που έχουμε παραγάγει νωρίτερα, δηλαδή το επίπεδο Plane 5 (βλέπε Εικόνα 3-20).



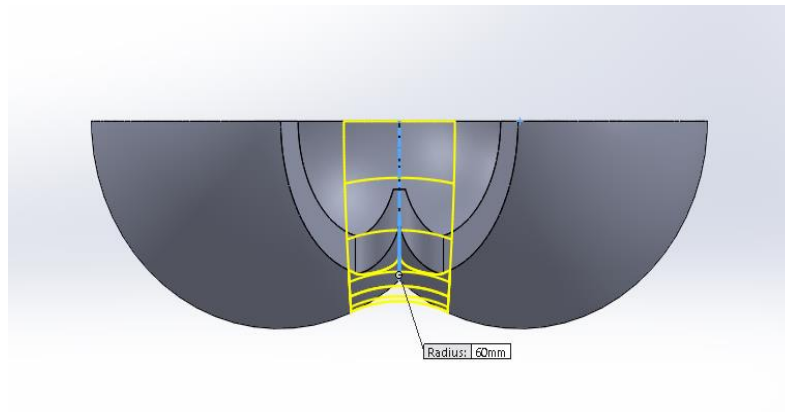
Εικόνα 3-20: Κατοπτρισμός της εγκοπής.

viii. Δημιουργία τυχαίου σκίτσου για την αποκοπή μέρους της ακμής πρόσπτωσης της δέσμης του νερού με σκοπό την βελτιστοποίηση της μορφής της. Αποκοπή με χρήση της εντολής **Extruded Cut** (βλέπε Εικόνα 3-21).



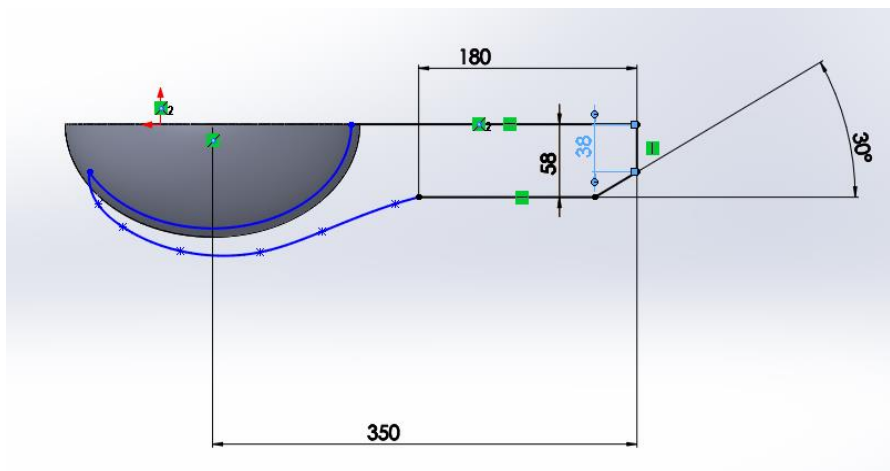
Εικόνα 3-21: Αποκοπή μέρους της ακμής.

ix. Χρήση της εντολής **Fillet**, προκειμένου να ενισχυθεί το σκαφίδιο κατά τον διαμήκη άξονα. Η ακτίνα καμπυλότητας (**Radius**) είναι ίση με 60mm (βλέπε Εικόνα 3-22).



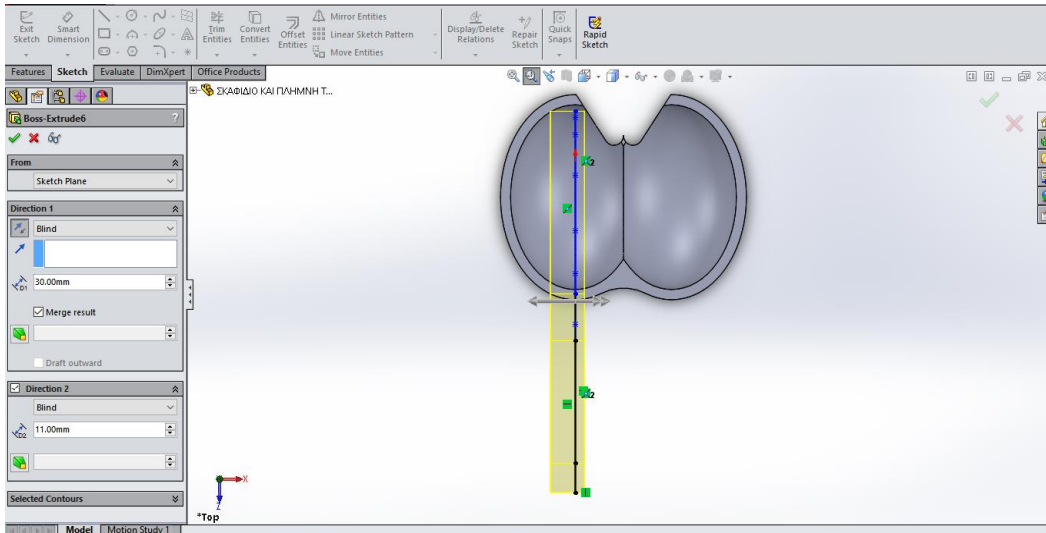
Εικόνα 3-22: Εφαρμογή καμπυλότητας.

x. Ακολουθεί ο σχεδιασμός του βραχίονα του σκαφιδίου με την προσθήκη του νεύρου δυσκαμψίας (μπλε τεθλασμένη γραμμή). Οι διαστάσεις του βραχίονα έχουν ληφθεί εν μέρει αυθαίρετα, έχοντας υπόψιν μόνο τις βασικές διαστάσεις του στροφείου (διάμετρος κύκλου δέσμης) (βλέπε Εικόνα 3-23).

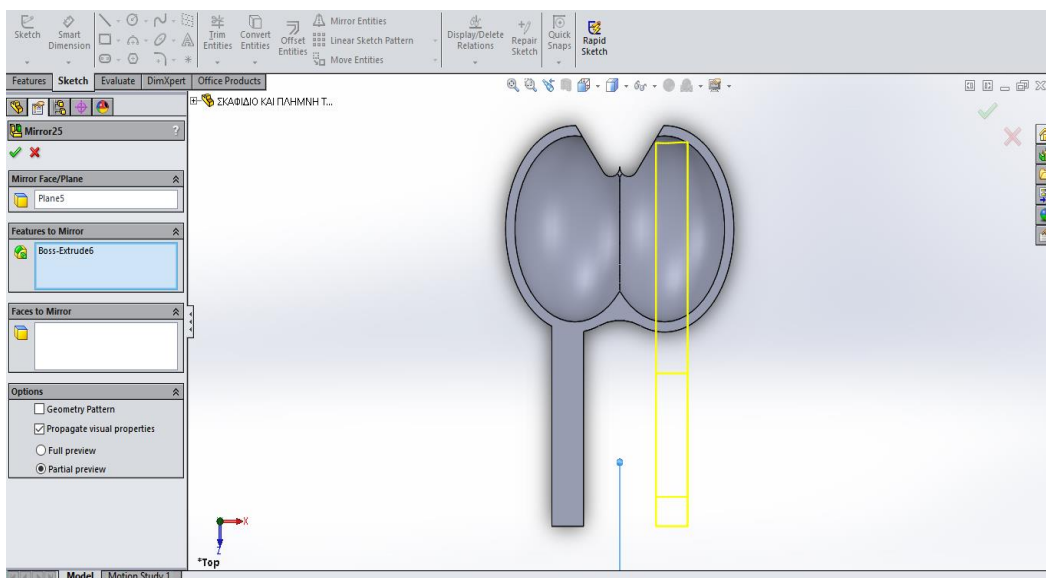


Εικόνα 3-23: Σκίτσο βραχίονα σκαφιδίου.

xi. Εξώθηση (**Extruded Boss/Base**) του σκίτσου του βραχίονα κατά 30 mm προς την διεύθυνση 1 (**Direction 1**) και 11 mm προς την διεύθυνση 2 (**Direction 2**). Η επιλογή **Merge Result** τέθηκε σε ισχύ, ώστε ο βραχίονας και το σκαφίδιο να θεωρούνται από το πρόγραμμα ως ένα ενιαίο σώμα (βλέπε Εικόνα 3-24). Τέλος, έγινε ο κατοπτρισμός (**Mirror**) του βραχίονα ως προς το συμμετρικό επίπεδο Plane 5 (βλέπε Εικόνα 3-25).

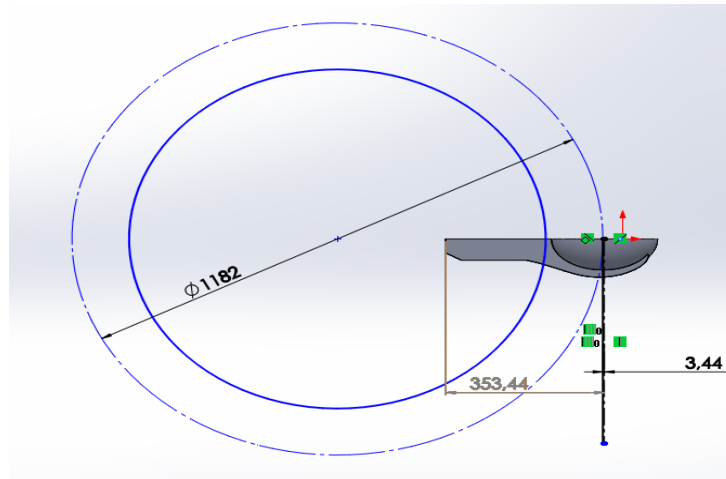


Εικόνα 3-24: Απόδοση όγκου στο σκίτσο του βραχίονα του σκαφιδίου.

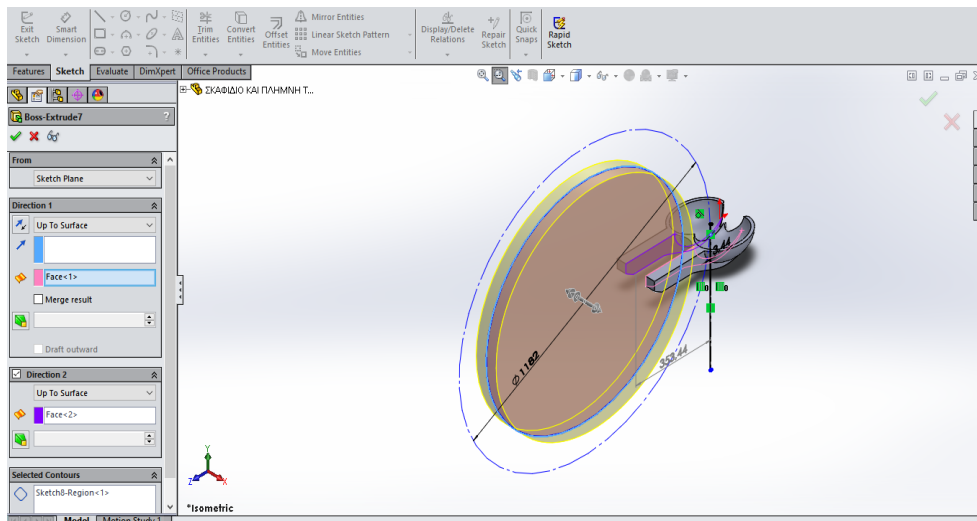


Εικόνα 3-25: Κατοπτρισμός βραχίονα.

xii. Η δημιουργία του σκίτσου της πλήμνης και της διαμέτρου κύκλου δέσμης D (κατασκευαστικός κύκλος) απεικονίζεται στην Εικόνα 3-26. Εξώθηση (**Extruded Boss/Base**) του σκίτσου της πλήμνης προς δύο κατευθύνσεις (**Direction1** και **Direction 2**), έως ότου οι μετωπικές επιφάνειες της να εφάπτονται (**Up to Surface**) των εσωτερικών επιφανειών (**Face<1>** και **Face<2>**) των βραχιόνων του σκαφιδίου (βλέπε Εικόνα 3-27). Όπως προαναφέραμε ο κατασκευαστικός κύκλος (αξονική γραμμή) αντιπροσωπεύει τον κύκλο δέσμης και σχεδιάστηκε ώστε να χρησιμεύσει ως ένα σημείο αναφοράς για την ορθή τοποθέτηση της θέσης του σκαφιδίου ως προς το κέντρο περιστροφής του στροφείου.

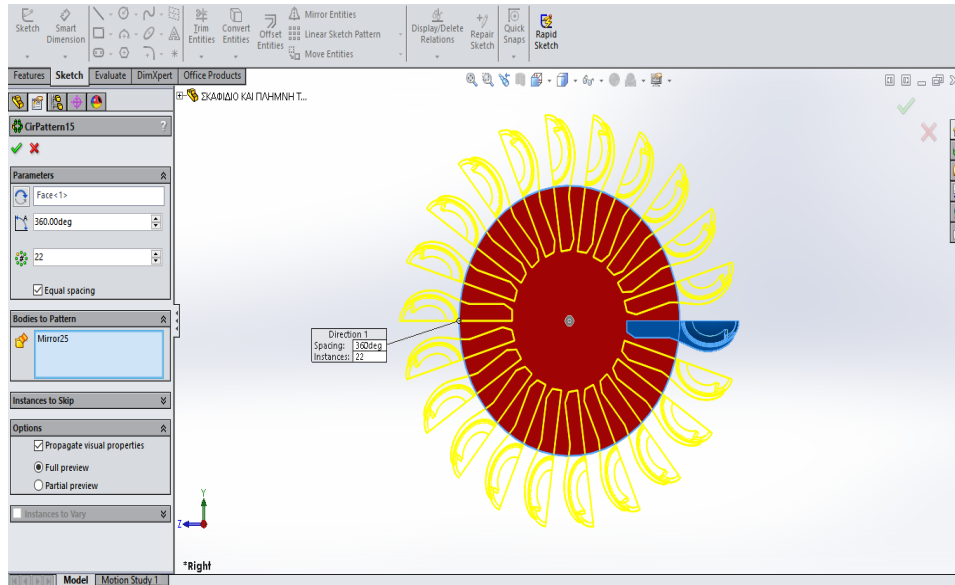


Εικόνα 3-26: Σκίτσο πλήμνης και σκίτσο του κύκλου δέσμης.



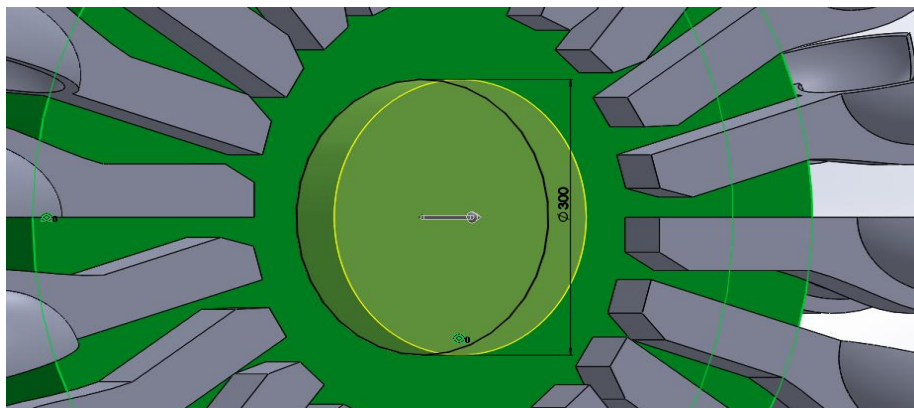
Εικόνα 3-27: Απόδοση όγκου στο σκίτσο της πλήμνης.

xiii. Δημιουργία κυκλικού μοτίβου του σκαφιδίου με την εντολή **Circular Pattern** περιφερειακά της πλήμνης, με παράμετρο αναφοράς την επιφάνεια της πλήμνης **Face<1>**, ακολουθώντας ανθρωπολογική φορά κατά 360 μοίρες και πλήθος σκαφιδίων ίσο με 22. Η επιλογή **Equal Spacing** είναι ενεργοποιημένη για την κατανομή των σκαφιδίων κατά ίσα τόξα (βλέπε Εικόνα 3-28).

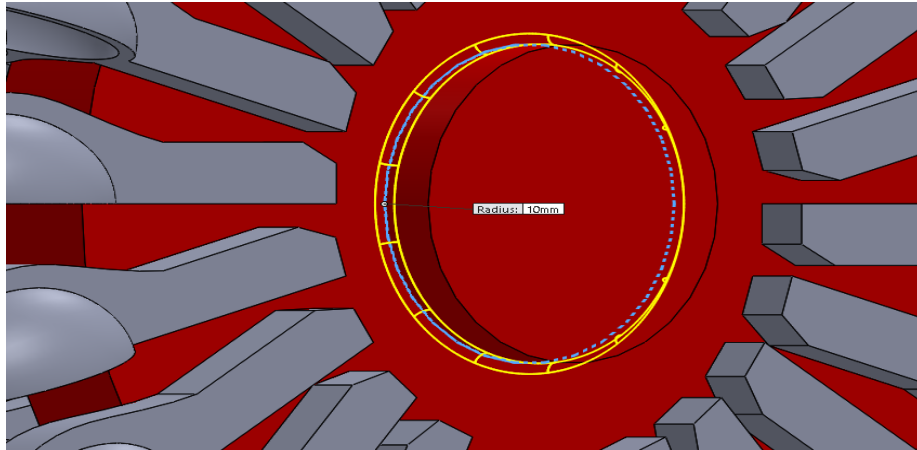


Εικόνα 3-28: Κυκλικό μοτίβο σκαφιδίου.

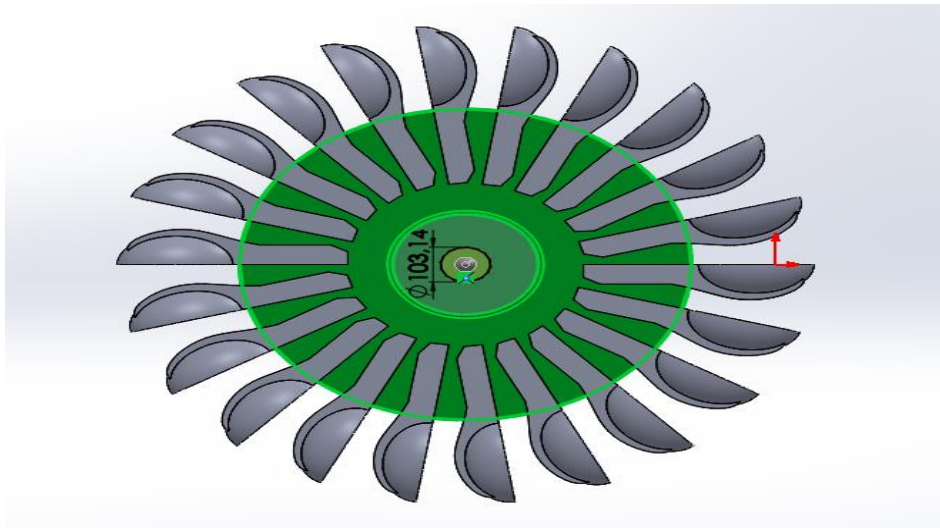
xiv. Ενίσχυση (**Extruded Boss/Base**) της πλήμνης και διάνοιξη οπής (**Extruded Cut**) στο κέντρο της με διάμετρο ίση με την υπολογισθείσα διάμετρο του άξονα του υδροστροβίλου (βλέπε Εικόνα 3-29). Στην Εικόνα 3-30 απεικονίζεται η εφαρμογή καμπυλότητας (**Fillet**) στην πλήμνη με ακτίνα ίση με 10 mm, ενώ στην Εικόνα 3-31 παρουσιάζεται η διάνοιξη της οπής στο κέντρο της πλήμνης με διάμετρο 103.14 mm με εφαρμογή της εντολής **Extruded Cut**.



Εικόνα 3-29: Ενίσχυση πλήμνης.

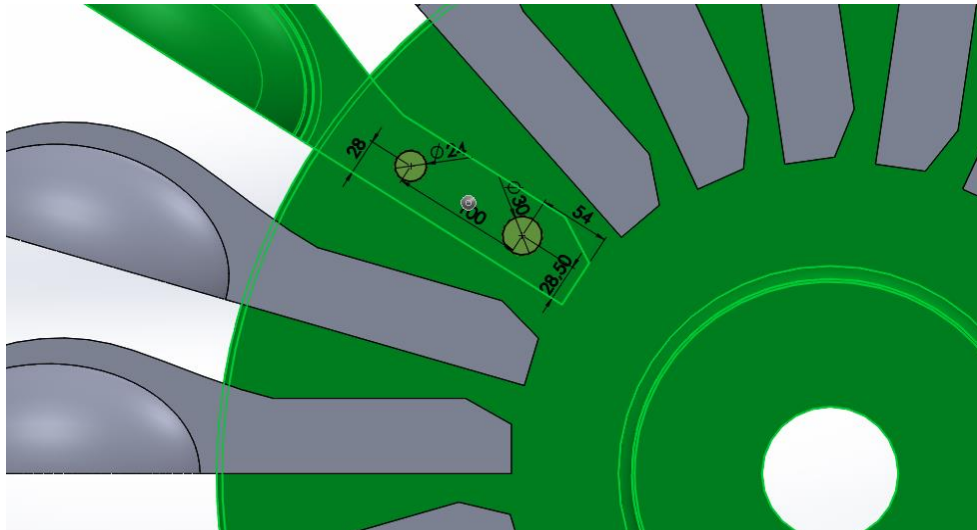


Εικόνα 3-30: Εφαρμογή καμπυλότητας.

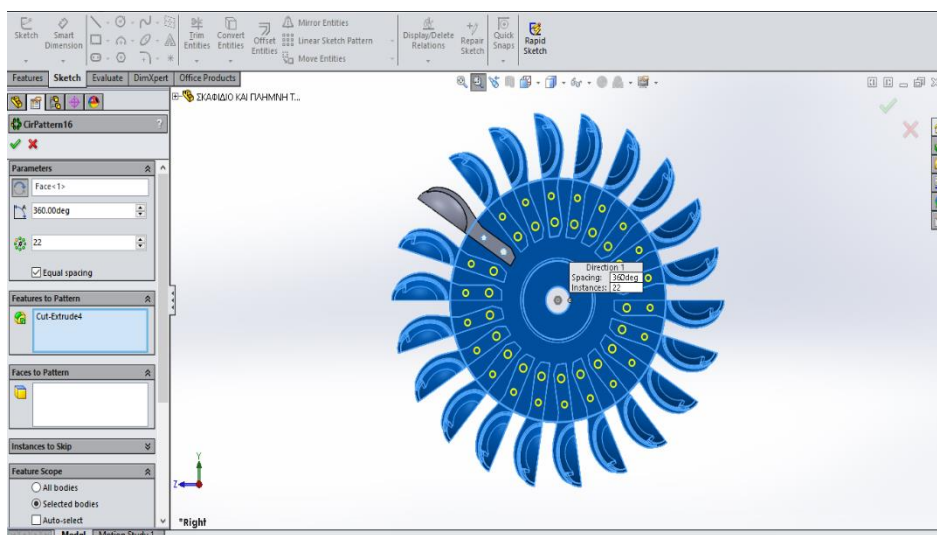


Εικόνα 3-31: Διάνοιξη οπής στη πλήμνη.

χν. Σχεδίαση των οπών των σκαφιδίων και της πλήμνης (βλέπε Εικόνα 3-32). Οι διάμετροι των οπών των βραχιόνων είναι ίσες με τις αντίστοιχες ονομαστικές διαμέτρους των κοχλιών που θα σχεδιαστούν στη συνέχεια. Η απόσταση μεταξύ των οπών καθώς και η σχετική θέση τους στον βραχίονα έχουν ληφθεί αυθαίρετα. Κατασκευή κυκλικού μοτίβου των οπών κατά 360 μοίρες με χρήση της εντολής **Circular pattern** (βλέπε Εικόνα 3-33).

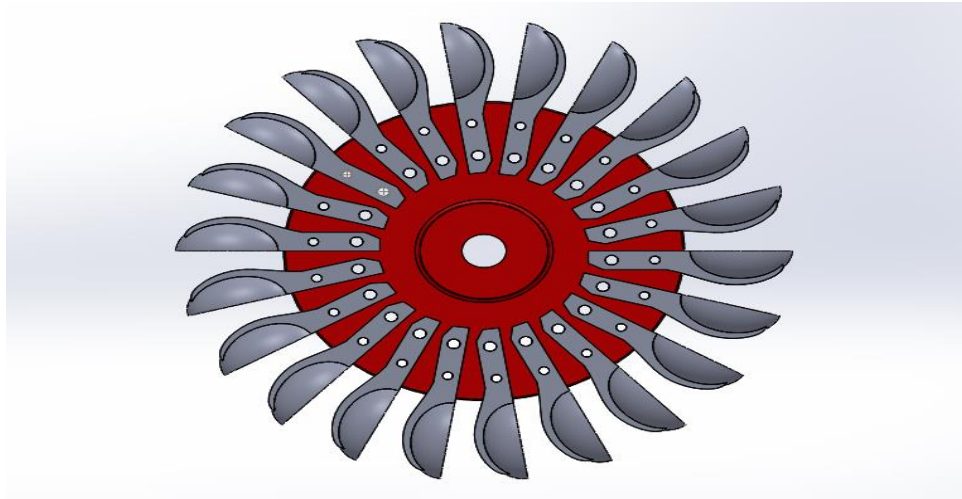


Εικόνα 3-32: Σχεδίαση οπών.



Εικόνα 3-33: Κυκλικό μοτίβο οπών.

χνί. Το οριστικό αποτέλεσμα της σχεδίασης των σκαφιδίων και της πλήμνης απεικονίζεται στην Εικόνα 3-34.



Εικόνα 3-34: Πρόοψη σκαφιδίων και πλήμνης.

3.4 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΟΧΛΙΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΚΟΧΛΙΩΝ

Τα σκαφίδια στερεώνονται πάνω στην πλήμη με την βοήθεια των κοχλιών και των περικοχλίων. Οι διαστάσεις των κοχλιών και των περικοχλίων εκλέχθηκαν βάσει των διαστάσεων του τυποποιημένου κοχλία DIN931 με ορισμένες μεταβολές όπως είναι το άνοιγμα του κλειδιού, το μήκος του σπειρώματος κ.α. Το σύγγραμμα Στοιχεία Μηχανών Ι των Ιωάννη Κ. Στεργίου και Κωνσταντίνου Ι. Στεργίου αποτέλεσε την κύρια πηγή πληροφοριών για την εκλογή των διαστάσεων που χρησιμοποιήθηκαν για τον σχεδιασμό των κοχλιών και των περικοχλίων. Το είδος του σπειρώματος που επιλέχθηκε ήταν το μετρικό κανονικό σπείρωμα κατά ISO. Οι Πίνακες 3-1, 3-2, 3-3, 3-4 περιέχουν τις βασικές διαστάσεις των εξαγωνικών κοχλιών και περικοχλίων M24 και M30 που χρησιμοποιήθηκαν για τον σχεδιασμό τους.

Πίνακας 3-1: Βασικές διαστάσεις εξαγωνικού κοχλία M24.

| Εξαγωνικός Κοχλίας M24 | | | |
|-------------------------------|---|-------------|-------------------------|
| α/α | Διάσταση-Σύμβολο | Τιμή | Μονάδες μέτρησης |
| 1 | Μήκος Κοχλία L_{M24} | 220 | mm |
| 2 | Ύψος κεφαλής k_{M24} | 15 | mm |
| 3 | Άνοιγμα κλειδιού e_{M24} | 46 | mm |
| 4 | Μήκος σπειρώματος b_{M24} | 73 | mm |
| 5 | Βήμα σπειρώματος P_{M24} | 3 | mm |
| 6 | Ονομαστική διάμετρος κορμού $D_{n,M24}$ | 24 | mm |

| | | | |
|----|---|-------|--------|
| 7 | Γωνία κορυφής σπειρώματος $\beta_{1,M24}$ | 60 | Μοίρες |
| 8 | Βάθος σπειρώματος H_{M24} | 2.13 | mm |
| 9 | Διαγώνιος εξαγώνου S_{M24} | 39.84 | mm |
| 10 | «Σκαλοπάτι» C_{M24} | 0.5 | mm |
| 11 | Διάμετρος πυρήνα $d_{1,M24}$ | 19.74 | mm |

Πίνακας 3-2: Βασικές διαστάσεις εξαγωνικού περικοχλίου M24.

| Εξαγωνικό Περικόχλιο M24 | | | |
|---------------------------------|---|-------------|-------------------------|
| α/α | Διάσταση-Σύμβολο | Τιμή | Μονάδες μέτρησης |
| 1 | Ύψος περικοχλίου $m_{M24,ΠΕΡ.}$ | 24.65 | mm |
| 2 | Διαγώνιος εξαγώνου $S_{M24,ΠΕΡ.}$ | 39.84 | mm |
| 3 | Βήμα σπειρώματος $P_{M24,ΠΕΡ.}$ | 3 | mm |
| 4 | Βάθος σπειρώματος $H_{M24,ΠΕΡ.}$ | 1.95 | mm |
| 5 | Εσωτερική Ονομαστική διάμετρος $D_{M24,ΠΕΡ.}$ | 24 | mm |
| 6 | Άνοιγμα κλειδιού $e_{M24,ΠΕΡ.}$ | 46 | mm |
| 7 | Εξωτερική Διάμετρος $D_{1,M24,ΠΕΡ.}$ | 20.1 | mm |

Πίνακας 3-3: Βασικές διαστάσεις εξαγωνικού κοχλίας M30.

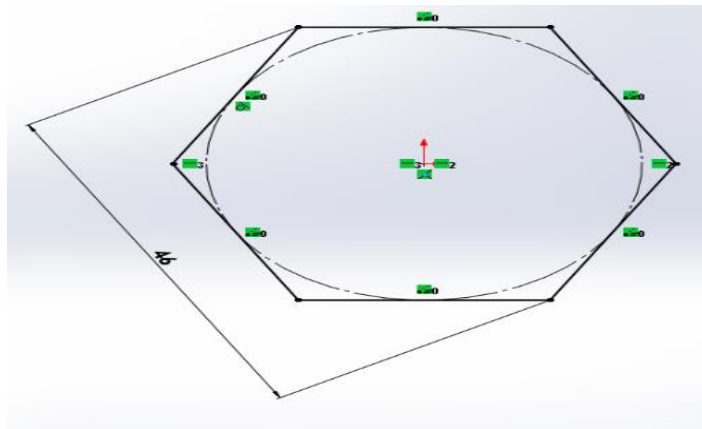
| Εξαγωνικός Κοχλίας M30 | | | |
|-------------------------------|---|-------------|-------------------------|
| α/α | Διάσταση-Σύμβολο | Τιμή | Μονάδες μέτρησης |
| 1 | Μήκος Κοχλίας L_{M30} | 220 | mm |
| 2 | Ύψος κεφαλής k_{M30} | 18.5 | mm |
| 3 | Άνοιγμα κλειδιού e_{M30} | 56 | mm |
| 4 | Μήκος σπειρώματος b_{M30} | 85 | mm |
| 5 | Βήμα σπειρώματος P_{M30} | 3.5 | mm |
| 6 | Ονομαστική διάμετρος κορμού $D_{n,M30}$ | 30 | mm |
| 7 | Γωνία κορυφής σπειρώματος $\beta_{1,M30}$ | 60 | Μοίρες |
| 8 | Βάθος σπειρώματος H_{M30} | 2.53 | mm |
| 9 | Διάμετρος πυρήνα $d_{1,M30}$ | 24.94 | mm |
| 10 | Διαγώνιος εξαγώνου S_{M30} | 48.5 | mm |
| 11 | «Σκαλοπάτι» C_{M30} | 0.6 | mm |

Πίνακας 3-4: Βασικές διαστάσεις εξαγωνικού περικοχλίου M30.

| Εξαγωνικό περικόχλιο M30 | | | |
|---------------------------------|---|-------------|-------------------------|
| α/α | Διάσταση-Σύμβολο | Τιμή | Μονάδες μέτρησης |
| 1 | Ύψος περικοχλίου $m_{M30,ΠΕΡ.}$ | 30.5 | mm |
| 2 | Διαγώνιος εξαγώνου $s_{M30,ΠΕΡ.}$ | 48.5 | mm |
| 3 | Βήμα σπειρώματος $P_{M30,ΠΕΡ.}$ | 3.5 | mm |
| 4 | Βάθος σπειρώματος $H_{M30,ΠΕΡ.}$ | 2.27 | mm |
| 5 | Άνοιγμα κλειδιού $e_{M30,ΠΕΡ.}$ | 56 | mm |
| 6 | Εσωτερική Ονομαστική διάμετρος $D_{M30,ΠΕΡ.}$ | 30 | mm |
| 7 | Εξωτερική διάμετρος $D_{1,M30,ΠΕΡ.}$ | 25.46 | mm |

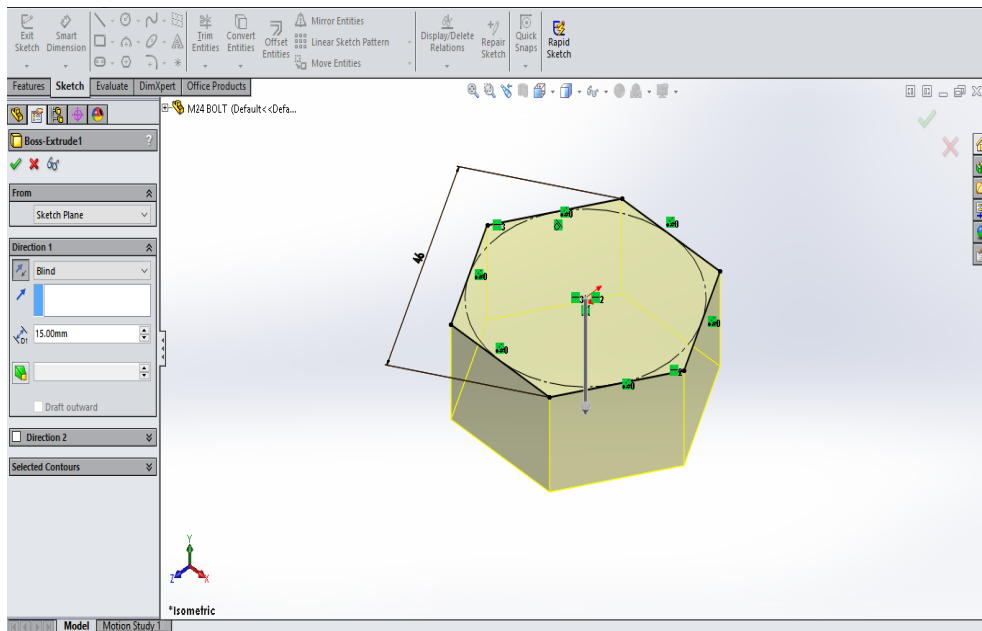
3.4.1 Σχεδιασμός εξαγωνικού κοχλία M24

1) Δημιουργία του σκίτσου της εξαγωνικής κεφαλής του κοχλία M24 (βλέπε Εικόνα 3-35).

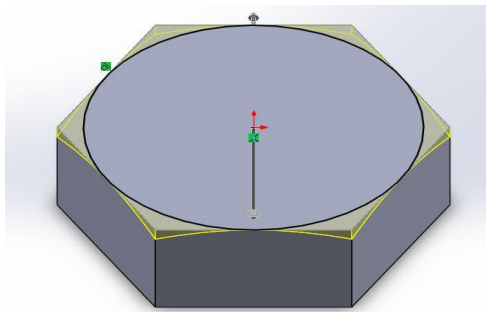


Εικόνα 3-35: Σκίτσο εξαγωνικής κεφαλής κοχλία M24.

2) Απόδοση όγκου στο σκίτσο της εξαγωνικής κεφαλής του κοχλία με την εντολή **Extruded Boss/Base** κατά 15mm (βλέπε Εικόνα 3-36) και αποκοπή της λεπτομέρειας της κεφαλής (βλέπε Εικόνα 3-37).

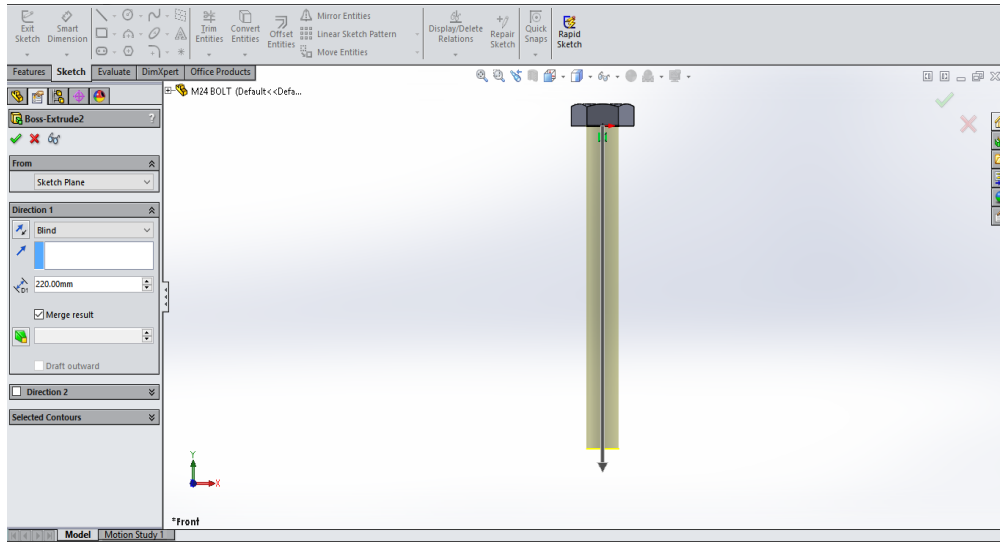


Εικόνα 3-36: Απόδοση όγκου.

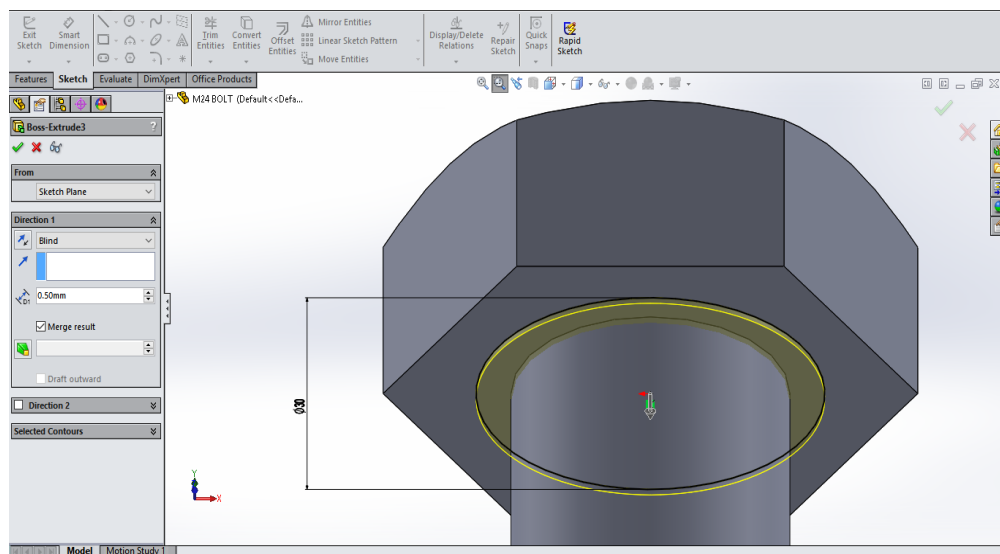


Εικόνα 3-37: Αποκοπή λεπτομέρειας της κεφαλής του κοχλία.

3) Χρήση της εντολής **Extruded Boss/Base** για την δημιουργία του κορμού του κοχλία, με εξώθηση του σκίτσου του κατά 220mm (βλέπε Εικόνα 3-38) και εξώθηση του σκίτσου του <<σκαλοπατιού>> κατά 0.5mm (Δες Εικόνα 3-39).

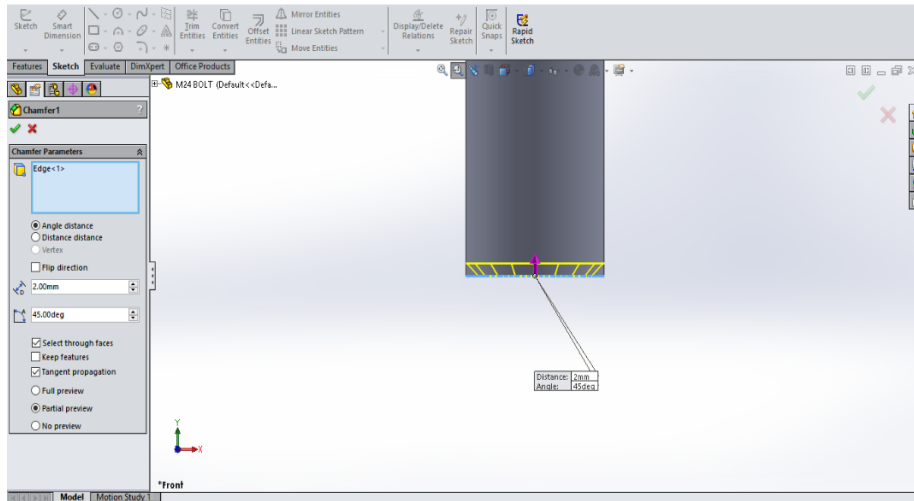


Εικόνα 3-38: Κατασκευή κορμού του κοχλία.



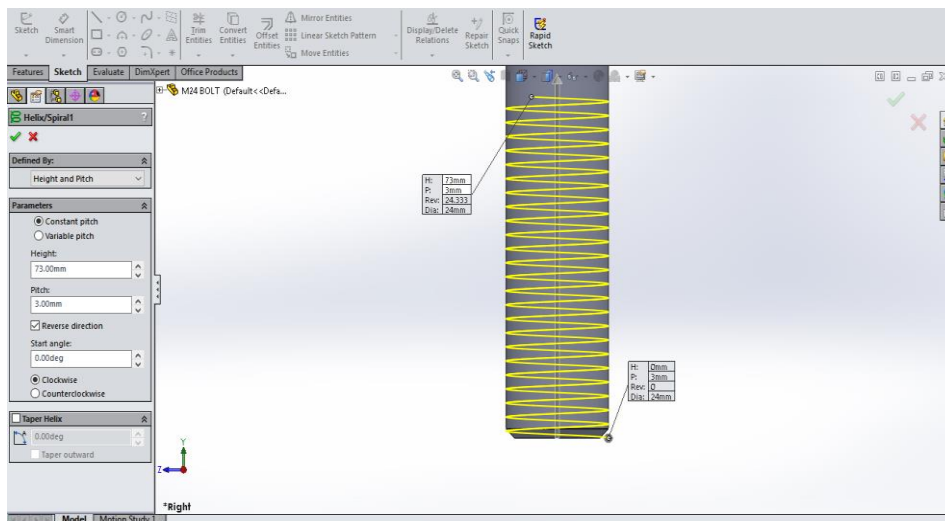
Εικόνα 3-39: Δημιουργία <<σκαλοπατιού>> του κοχλία M24.

4) Λοξότμηση του κάτω άκρου του κοχλία με ενεργοποίηση της εντολής **Chamfer** και εφαρμογή της στην ακμή (**Edge<1>**) του κορμού του κοχλία. Οι παράμετροι της λοξότμησης (**Chamfer Parameters**) εκλέχθηκαν ως η γωνία και η απόσταση (**Angle distance**). Οι διαστάσεις της λοξότμησης που συμπληρώθηκαν στην καρτέλα των ρυθμίσεων είναι $2 \times 45^\circ$ (βλέπε Εικόνα 3-40).



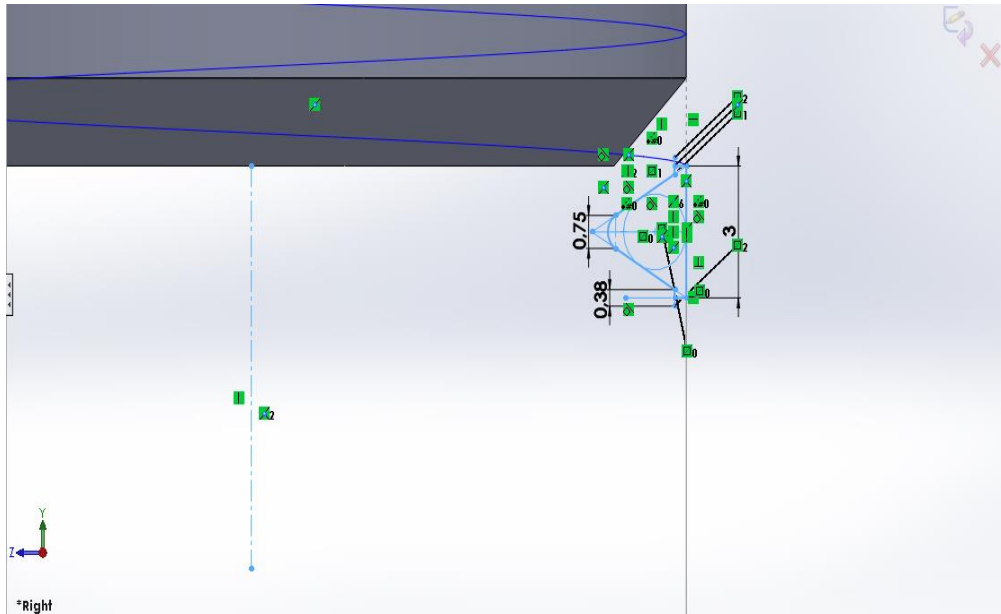
Εικόνα 3-40: Εντολή Chamfer.

5) Το παρόν βήμα περιλαμβάνει την έναρξη της δημιουργίας του σπειρώματος με την χρήση της εντολής **Helix/Spiral**, η οποία βοηθά στον σχεδιασμό μιας ελικοειδούς γραμμής που θα καθοδηγήσει το προφίλ του σπειρώματος (αμέσως επόμενο βήμα) για την αποκοπή αυτού. Η γραμμή αυτή έχει σταθερό βήμα (**Pitch**) που ισούται με το βήμα του σπειρώματος του κοχλία M24, δηλαδή 3 mm. Το ύψος (**Height**) της γραμμής αντιπροσωπεύει το μήκος του σπειρώματος του κοχλία το οποίο έχει την τιμή 73 mm. Τέλος, η ελικοειδής γραμμή εκλέγεται να έχει φορά ίδια με αυτή των δεικτών του ρολογιού (**Clockwise**) (βλέπε Εικόνα 3-41).



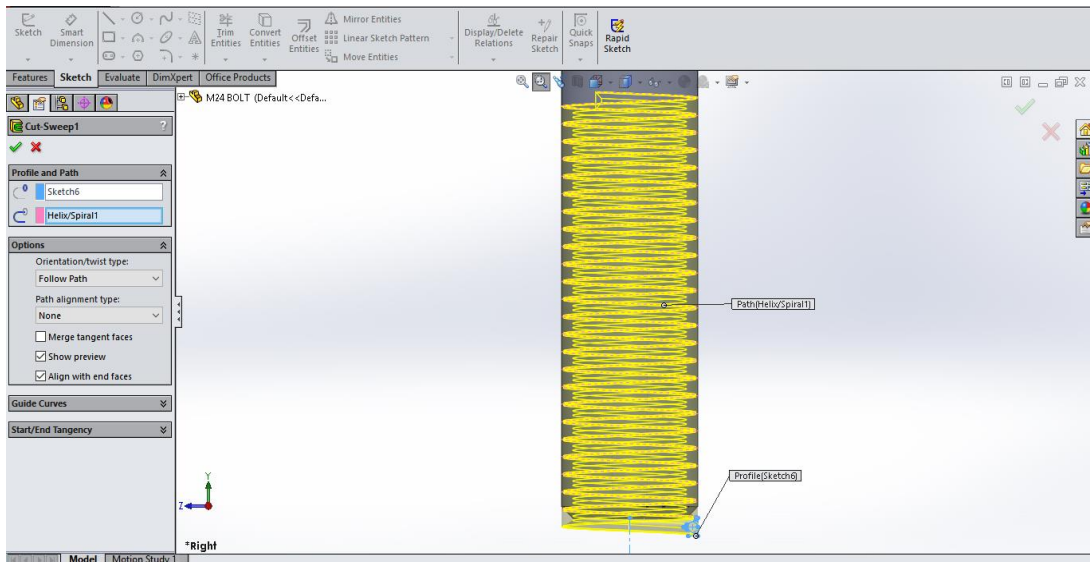
Εικόνα 3-41: Ελικοειδής καμπύλη σπειρώματος.

6) Σχεδίαση του σκίτσου του προφίλ του σπειρώματος στην δεξιά πλάγια όψη (**Right Plane**) (Δες Εικόνα 3-42).

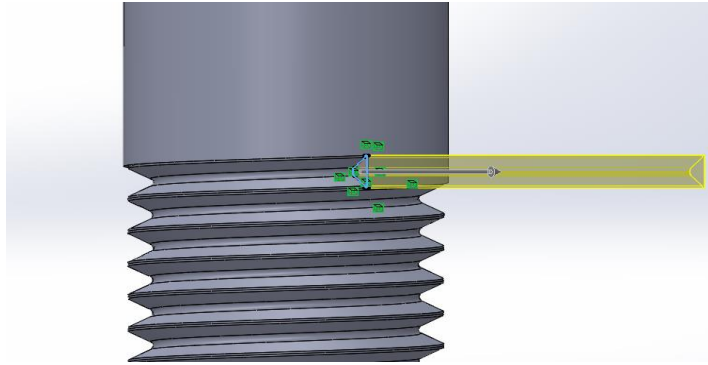


Εικόνα 3-42: Προφίλ του σπειρώματος.

7) Δημιουργία του σπειρώματος του κοχλία με την ενεργοποίηση της εντολής **Swept Cut**. Το σκίτσο του προφίλ του σπειρώματος (**Sketch6**) καθοδηγήθηκε από την ελικοειδή γραμμή (**Helix/Spiral1**) με αποτέλεσμα την αποκοπή του σπειρώματος (δες Εικόνα 3-43 και Εικόνα 3-44).

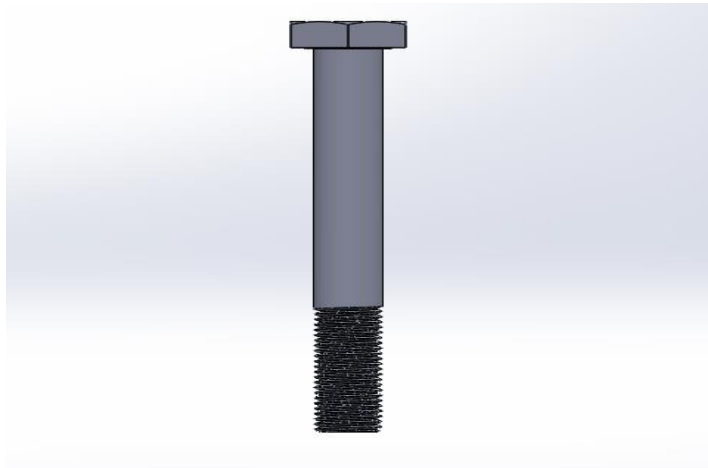


Εικόνα 3-43: Κοπή σπειρώματος κοχλία.



Εικόνα 3-44: Λεπτομέρεια σπειρώματος κοχλίας.

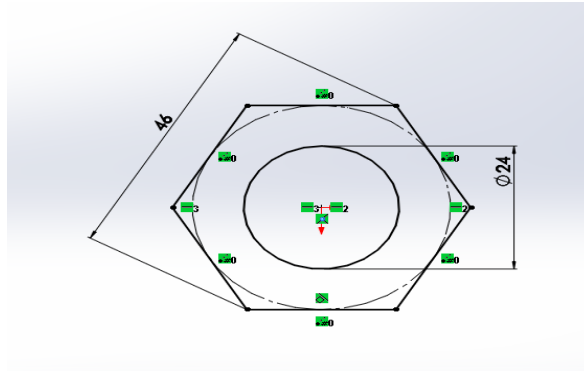
8) Ο ολοκληρωμένος κοχλίας M24 απεικονίζεται στην Εικόνα 3-45.



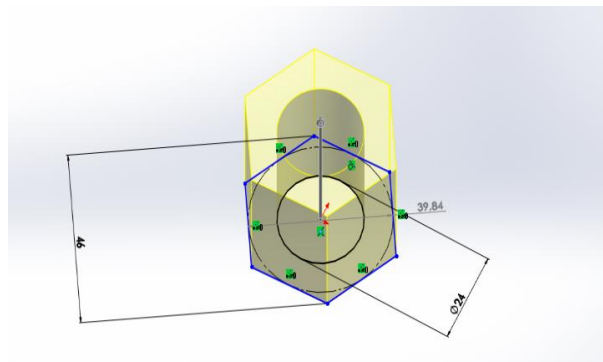
Εικόνα 3-45: Πρόοψη εξαγωνικού κοχλίας M24.

3.4.2. Σχεδίαση εξαγωνικού περικοχλίου M24

1. Σχεδιασμός του σκίτσου του εξαγωνικού περικοχλίου M24 (βλέπε Εικόνα 3-46) και εξώθηση του κατά 24.65 mm για την απόδοση όγκου (βλέπε Εικόνα 3-47).

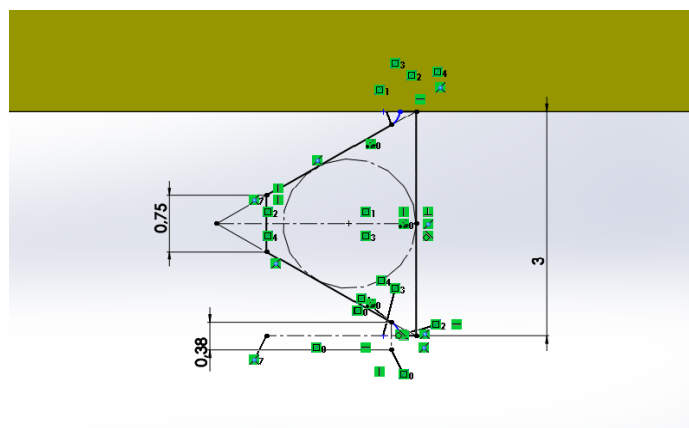


Εικόνα 3-46: Σκίτσο εξαγωνικού περικοχλίου M24.



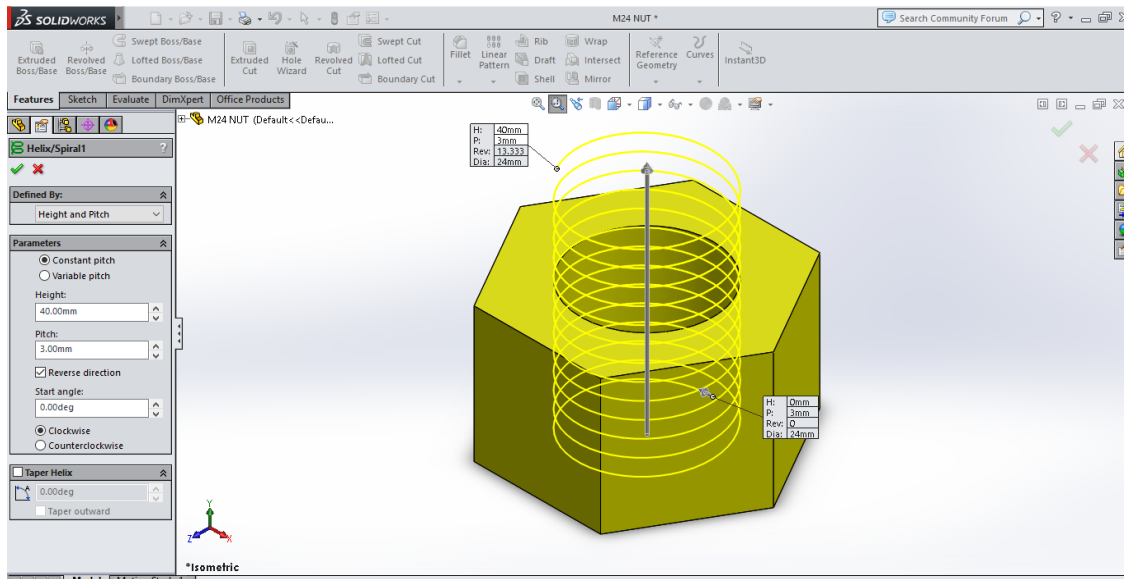
Εικόνα 3-47: Απόδοση όγκου στο σκίτσο του εξαγωνικού περικοχλίου.

2. Δημιουργία του σκίτσου του προφίλ για την κατασκευή του εσωτερικού σπειρώματος του εξαγωνικού περικοχλίου (βλέπε Εικόνα 3-48).



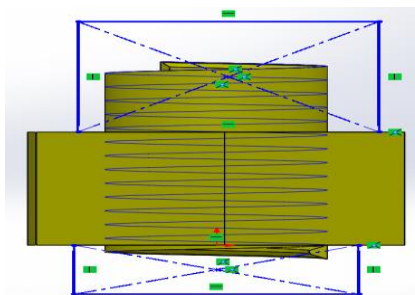
Εικόνα 3-48: Προφίλ σπειρώματος περικοχλίου M24.

3. Σχεδίαση της καμπύλης που θα καθοδηγήσει το προφίλ για την κατασκευή του εσωτερικού σπειρώματος του περικοχλίου, με την εντολή **Helix/Spiral** (βλέπε Εικόνα 3-49), με τις παραμέτρους της ελικοειδούς καμπύλης να είναι το ύψος (**Height: 40 mm**) και το σταθερό βήμα (**Constant Pitch: 3 mm**). Η κατασκευή του σπειρώματος πραγματοποιήθηκε με την εντολή **Swept Boss/ Base** λαμβάνοντας υπόψιν το προφίλ και την ελικοειδή καμπύλη.

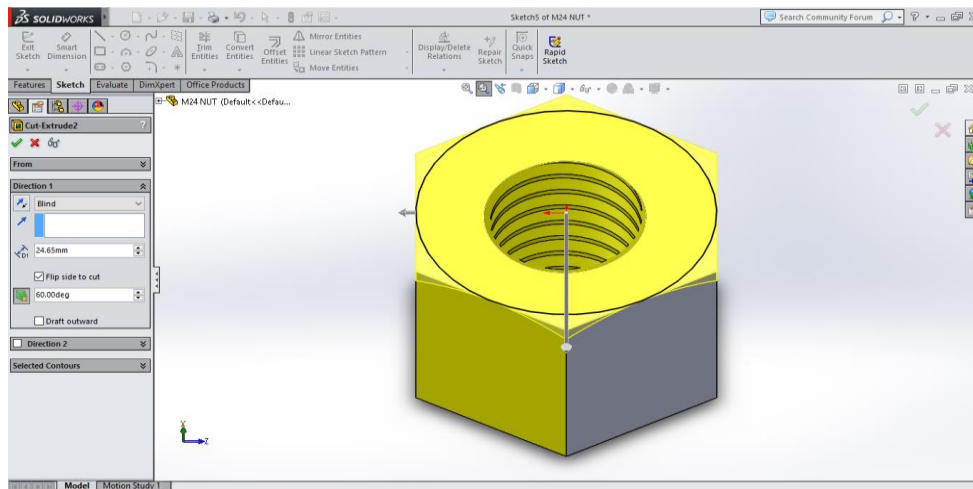


Εικόνα 3-49: Ελικοειδής καμπύλη σπειρώματος.

Ακολουθεί η σχεδίαση δύο τυχαίων ορθογώνιων για την αποκοπή του πλεονάζοντος σπειρώματος με την εντολή **Extruded Cut** (δες Εικόνα 3-50) και η αποκοπή της λεπτομέρειας του περικοχλίου M24 (δες Εικόνα 3-51).

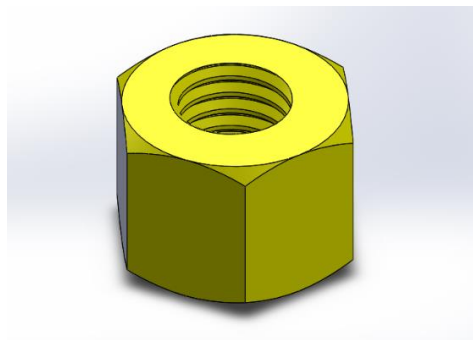


Εικόνα 3-50: Αποκοπή πλεονάζοντος σπειρώματος.



Εικόνα 3-51: Αποκοπή λεπτομέρειας περικοχλίου M24.

4. Η τελική μορφή του περικοχλίου M24 είναι εμφανής στην Εικόνα 3-52.



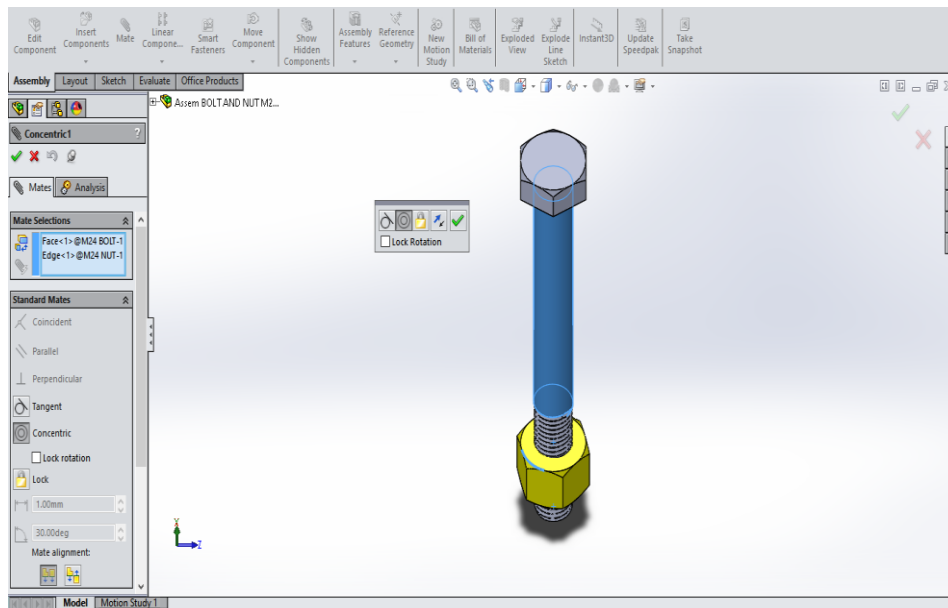
Εικόνα 3-52: Περικόχλιο M24.

Παρόμοια ήταν και η πορεία σχεδίασης και για τον κοχλία και το περικόχλιο M30.

3.4.3 Συναρμολόγηση κοχλία και περικοχλίου

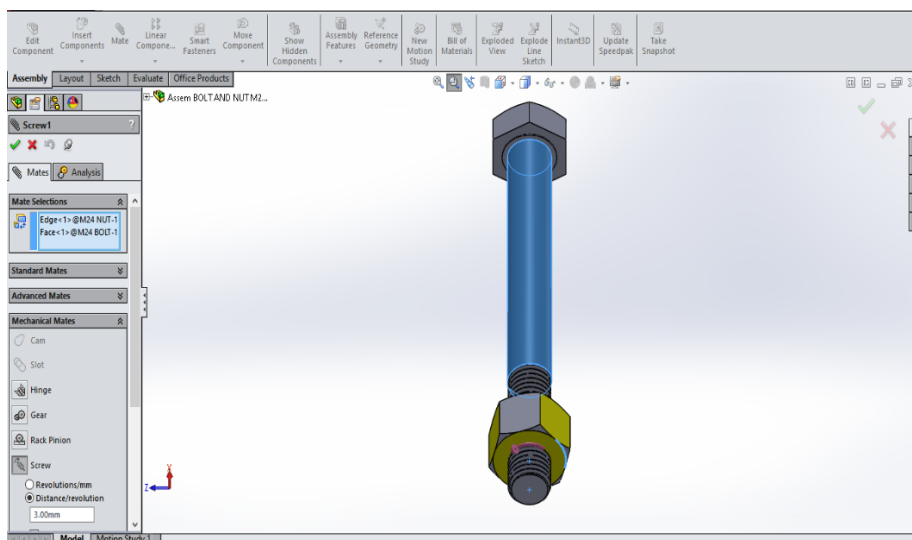
Η συναρμολόγηση του κοχλία και του περικοχλίου έγινε ως εξής:

- ι. Ομόκεντρη σύζευξη (**Concentric Mate**). Ο κυλινδρικός κορμός του κοχλία (**Face<1>@M24 BOLT**) ορίζεται ως ομόκεντρος σε σχέση με το τόξο του κύκλου (**Edge<1>@M24 NUT**) της ακμής του περικοχλίου όπως στην Εικόνα 3-53.



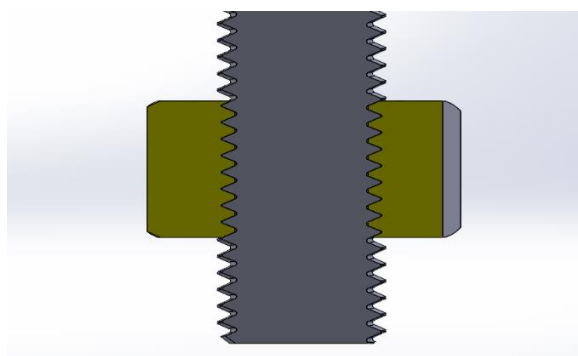
Εικόνα 3-53: Ομόκεντρη σύζευξη.

ii. Εντολή **Mechanical screw mate** (βλέπε Εικόνα 3-54). Αυτή η εντολή συμβάλλει στην μηχανολογικά ορθή συναρμολόγηση των δύο τεμαχίων. Η εντολή απαιτεί την επιλογή των δύο οντοτήτων (**Edge<1>**, **Face<1>**) και την ενεργοποίηση της επιλογής **Screw** στην καρτέλα **Mechanical Mates** και τελικά την ενεργοποίηση της επιλογής **Distance/revolution** με την καταχώριση της τιμής 3mm η οποία προφανώς ταυτίζεται με το βήμα του σπειρώματος. Η επιλογή **Reverse** είναι ενεργή για τον ορισμό της φοράς περιστροφής του περικοχλίου ως αριστερόστροφη κατά την αποσυναρμολόγηση του. Έτσι, το περικόχλιο δύναται να βιδώνει και να ξεβιδώνει ακριβώς όπως συμβαίνει και στην πραγματικότητα.



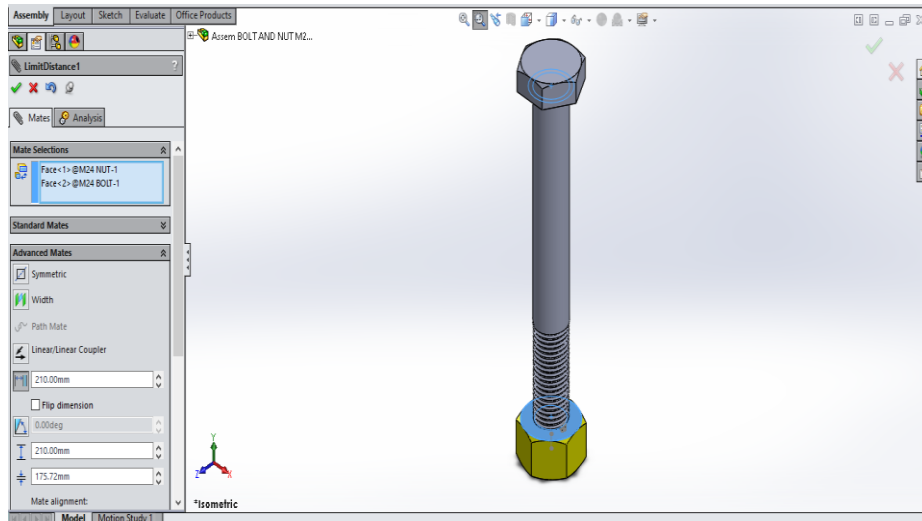
Εικόνα 3-54: Εντολή σύζευξης Mechanical Screw.

Προ της εφαρμογής της εντολής σύζευξης **Mechanical Screw Mate** θα πρέπει να γίνει μετακίνηση του περικοχλίου σε σχέση με τον κοχλία προκειμένου να προσδιοριστεί η σωστή συναρμογή τους, με τα σπειρώματά τους να ταιριάζουν απόλυτα (βλέπε Εικόνα 3-55). Αυτή η προεργασία είναι αναγκαία για την αποφυγή της διείδυσης των συνεργαζόμενων επιφανειών κοχλία-περικοχλίου. Έγινε μια σχηματική τομή της συναρμογής κοχλία-περικοχλίου με την βοήθεια της εντολής **Section Cut**, ώστε να γίνει εμφανέστερη η ορθότητα του ορισμού της συναρμογής.



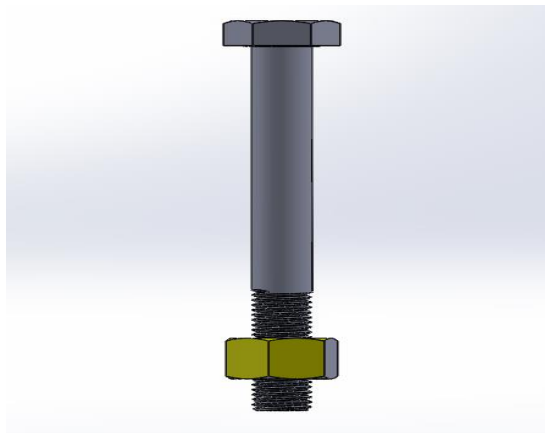
Εικόνα 3-55: Τομή της συναρμογής κοχλία-περικοχλίου M24.

iii. Καθορισμός της απόστασης μεταξύ της κεφαλής του κοχλία και του περικοχλίου με χρήση της εντολής σύζευξης περιορισμού της απόστασης εντός κάποιων ορίων, **Limit Distance Mate** (βλέπε Εικόνα 3-56). Η ελάχιστη απόσταση καθορίζεται με βάση το πάχος της πλήμνης και του συνολικού πάχους των δύο βραχιόνων των σκαφιδίων ώστε να επιτυγχάνεται η σωστή συναρμολόγηση. Η κατάλληλη ελάχιστη απόσταση προσδιορίζεται από μέτρηση των παραπάνω αποστάσεων εντός του προγράμματος SolidWorks με χρήση της εντολής **Measure**. Τελικά, αυτή καθορίστηκε ως 175.72 mm. Η αντίστοιχη μέγιστη απόσταση μεταξύ της κεφαλής του κοχλία και του περικοχλίου τέθηκε ως 210 mm (βλέπε Εικόνα 3-56).

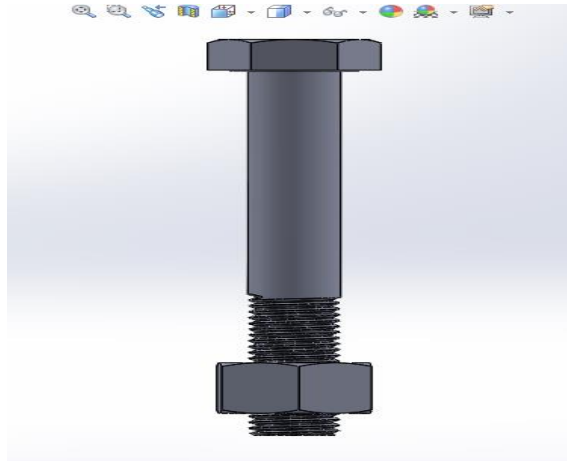


Εικόνα 3-56: Οριοθέτηση της μετακίνησης του περικοχλίου M24 (θέση μέγιστης απόστασης).

iv. Πρόψη της τελικής συναρμογής κοχλία-περικοχλίου M24 και M30 απεικονίζεται στις Εικόνες 3-57 και Εικόνες 3-58.



Εικόνα 3-57: Πρόψη συναρμογής κοχλία-περικοχλίου M24.

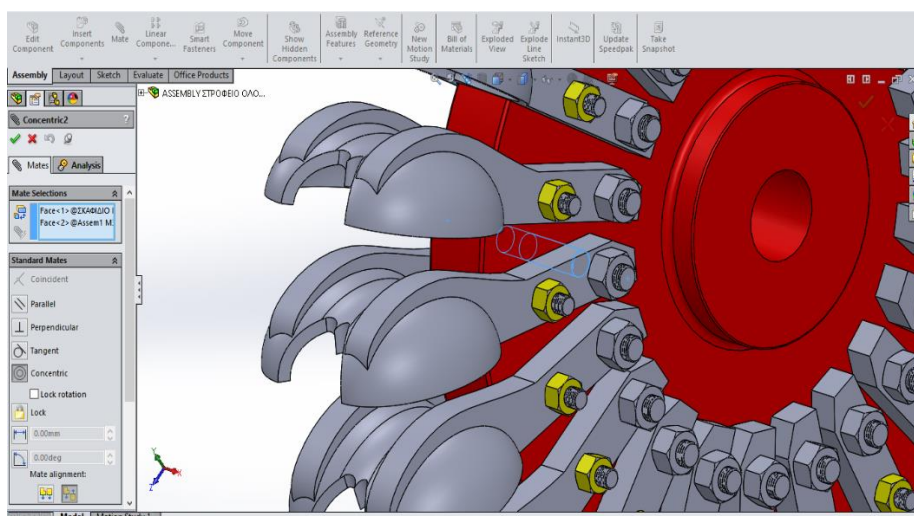


Εικόνα 3-58: Πρόοψη συναρμογής κοχλία-περικοχλίου M30.

3.5 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΟΥ ΣΤΡΟΦΕΙΟΥ

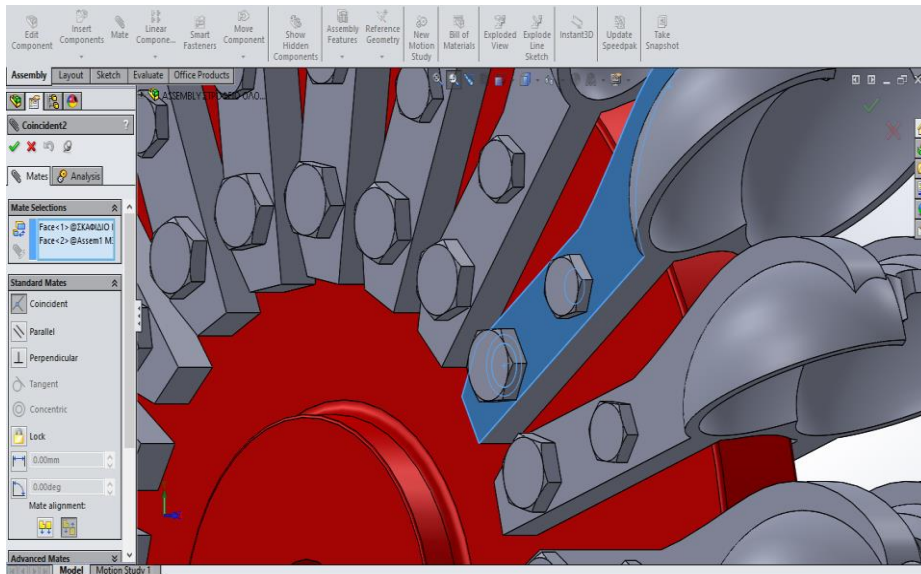
Η τελική συναρμολόγηση του στροφείου περιλαμβάνει την τοποθέτηση των συναρμολογήσεων των δύο κοχλιών στην πλήμνη ώστε να στερεωθούν τα σκαφίδια στις κατάλληλες θέσεις.

1. **Concentric Mate** (βλέπε Εικόνα 3-59). Η οπή της πλήμνης (**Face<1>@ΣΚΑΦΙΔΙΟ**) που υποδέχεται τον κοχλία καθορίζεται ως ομόκεντρη σε σχέση με την κυλινδρική επιφάνεια του κοχλία (**Face<2>@Assem1**). Οι συναρμολογήσεις των κοχλιών-περικοχλίων που εισήχθησαν στην συναρμολόγηση του στροφείου είχαν το περικόχλιο τους στην θέση της ελάχιστης απόστασης (**175.72mm**).



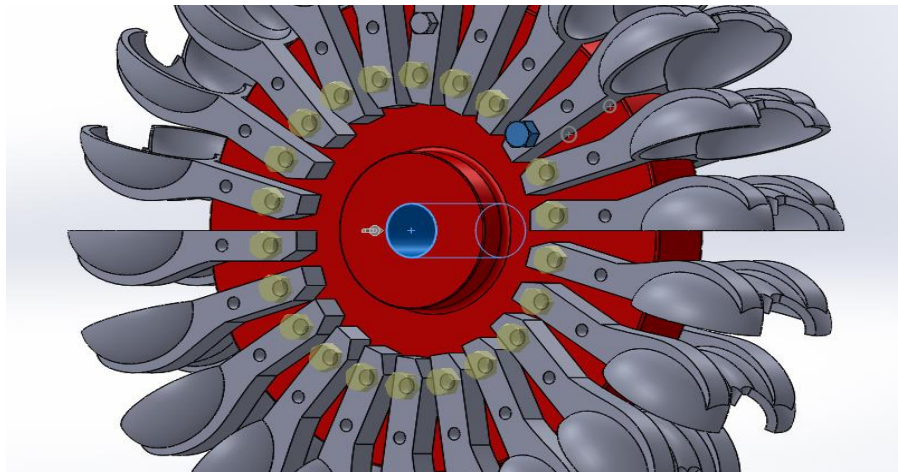
Εικόνα 3-59: Ομόκεντρη σύζευξη.

2. **Coincident Mate** (βλέπε Εικόνα 3-60). Ακολουθεί ταύτιση της εξωτερικής επιφάνειας του βραχίονα του σκαφιδίου με την επιφάνεια του “σκαλοπατιού” των κοχλιών.



Εικόνα 3-60: Σύζευξη ταύτισης επιφανειών.

3. **Circular pattern** (βλέπε Εικόνα 3-61). Ορισμός κυκλικού μοτίβου της συναρμογής κοχλιών-περικοχλιών M30 ως προς το κέντρο του στροφείου. Ομοίως εργαζόμαστε και για την συναρμογή των κοχλιών-περικοχλιών M24.

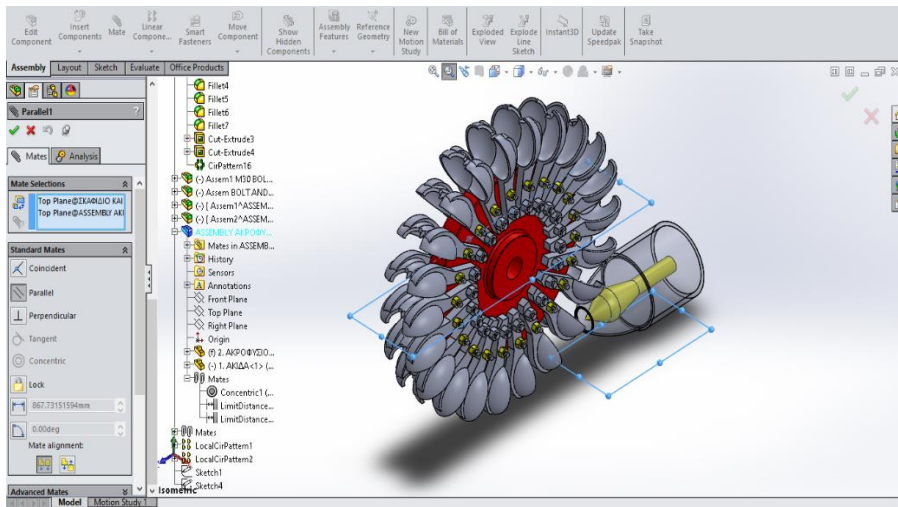


Εικόνα 3-61: Κυκλικό μοτίβο κοχλιών-περικοχλιών M30.

3.6 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΙΟΥ

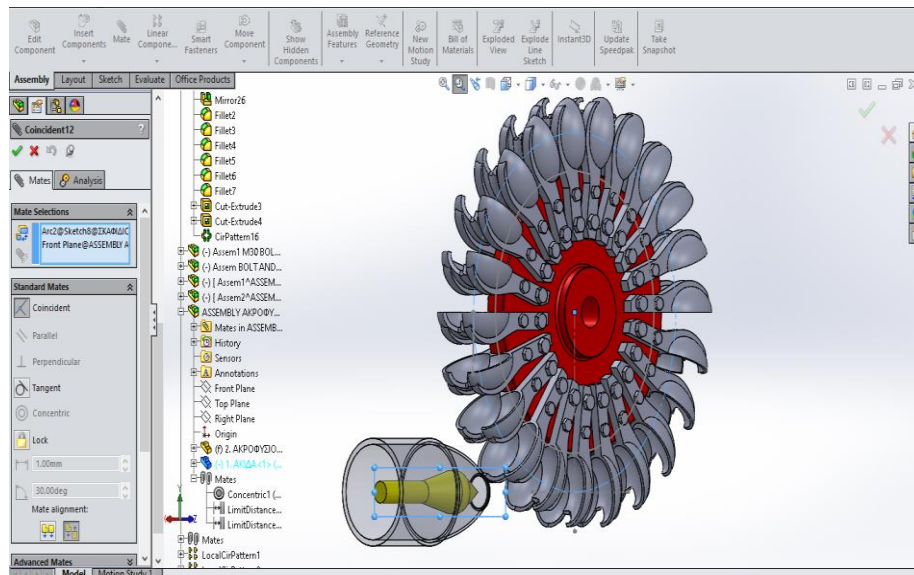
Η διαδικασία συναρμολόγησης του υδροστροβίλου περιλαμβάνει την εισαγωγή της συναρμολόγησης του ακροφυσίου-ακίδας και της συναρμολόγησης του στροφείου σε μια κοινή συναρμολόγηση, ώστε να τεθούν οι απαραίτητες σχέσεις μεταξύ αυτών των δύο (συναρμολογήσεων) και να ολοκληρωθεί η τελική συναρμολόγηση όλων των εξαρτημάτων του υδροστροβίλου Pelton.

1) Ορισμός του επιπέδου της κάτοψης (**Top Plane@ΣΚΑΦΙΔΙΟ ΚΑΙ ΠΛΗΜΝΗ**) του στροφείου ως παράλληλο (**Parallel**) με το αντίστοιχο επίπεδο κάτοψης (**Top Plane@ASSEMBLY**) της συναρμολόγησης ακροφυσίου-ακίδας (βλέπε Εικόνα 3-62).



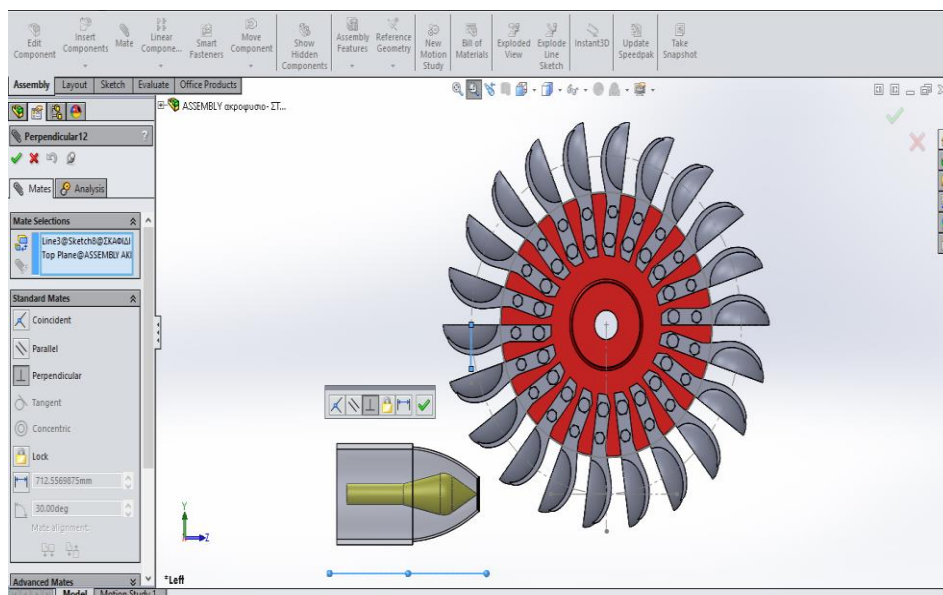
Εικόνα 3-62: Παράλληλη σύζευξη επιπέδων.

2) Ο κύκλος δέσμης (**Arc2@Sketch8@ΣΚΑΦΙΔΙΟ**) του στροφείου και το επίπεδο πρόοψης (**Front Plane@ASSEMBLY**) της συναρμολόγησης του ακροφυσίου-ακίδας ταυτίζονται με χρήση της εντολής **Coincident Mate** (βλέπε Εικόνα 3-63).



Εικόνα 3-63: Σύζευξη ταύτισης.

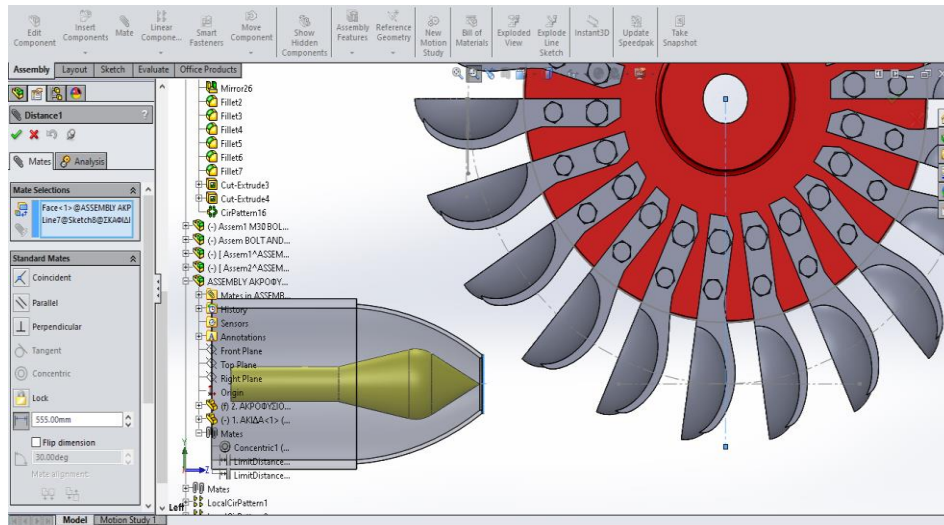
3) Το επίπεδο της κάτοψης (**Top Plane@ASSEMBLY**) της συναρμολόγησης του ακροφυσίου ορίστηκε ως κάθετο (**Perpendicular**) σε σχέση με την βοηθητική γραμμή (**Line3@Sketch8@ΣΚΑΦΙΔΙΟ**) η οποία είναι εφαπτομένη του κύκλου δέσμης του στροφείου (βλέπε Εικόνα 3-64).



Εικόνα 3-64: Κάθετη σύζευξη.

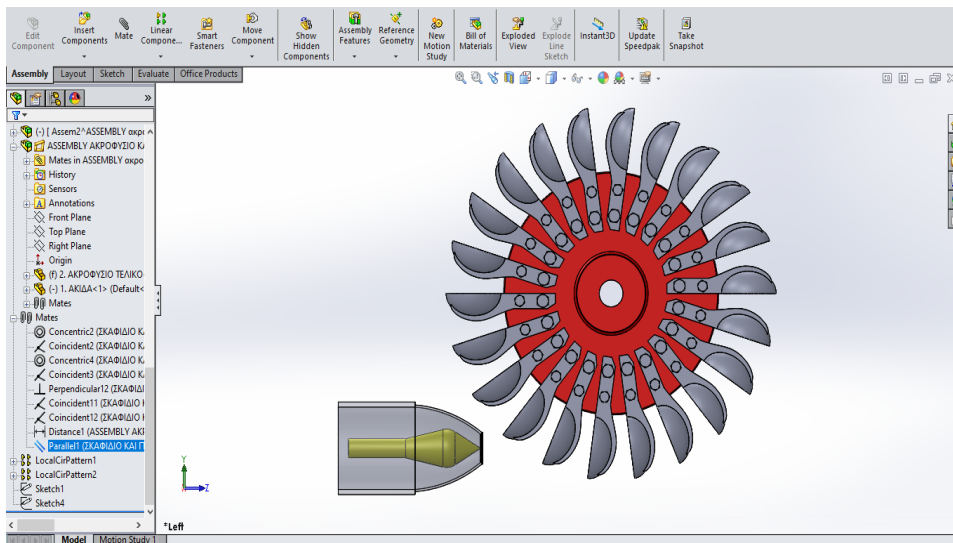
4) Καθορισμός της απόστασης μεταξύ της συναρμολόγησης ακίδας-ακροφυσίου και του στροφείου. Η απόσταση μεταξύ της μετωπικής επιφάνειας της εξόδου του ακροφυσίου (**Face<1>@ASSEMBLY**) και της κατακόρυφης ακτινικής βοηθητικής

γραμμής (**Line7@Sketch8ΣΚΑΦΙΔΙΟ**) ορίζεται ως 555mm με την βοήθεια της εντολής σύζευξης **Distance Mate** (βλέπε Εικόνα 3-65).

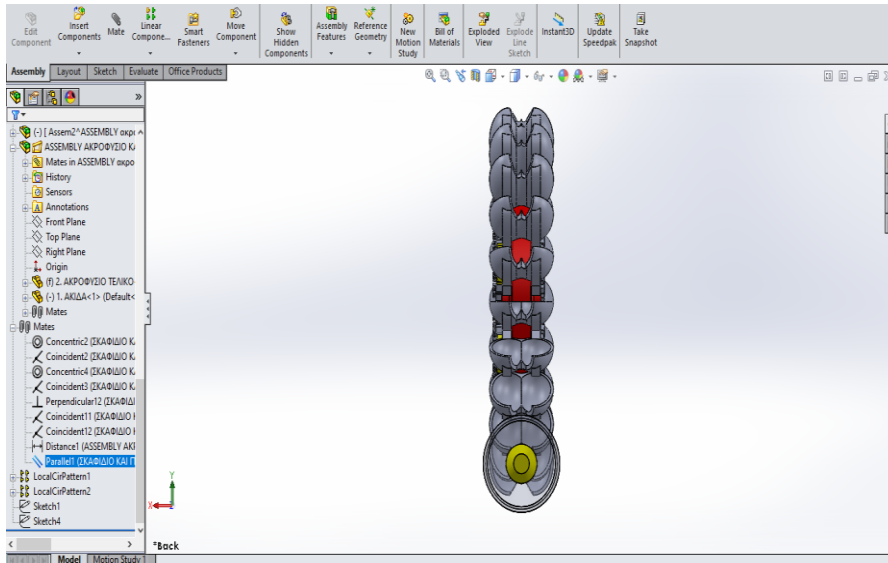


Εικόνα 3-65: Ορισμός απόστασης ακροφυσίου-στροφείου.

5) Η τελική συναρμολόγηση του υδροστροβίλου απεικονίζεται στην Εικόνα 3-66 και Εικόνα 3-67.



Εικόνα 3-66: Πρόοψη του υδροστροβίλου Pelton.



Εικόνα 3-67: Πλάγια όψη του υδροστροβίλου Pelton.

4. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗ

4.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ

Η Υπολογιστική Ρευστοδυναμική είναι ένας κλάδος της μηχανικής των ρευστών η οποία χρησιμοποιεί αριθμητικές μεθόδους και αλγορίθμους για την επίλυση προβλημάτων που αφορούν την ροή των ρευστών. Γίνεται χρήση υπολογιστών για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς των ρευστών αξιοποιώντας και επιλύοντας με αριθμητικές μεθόδους τις εξισώσεις συνέχειας και ορμής (εξισώσεις Navier-Stokes) με ταυτόχρονη χρήση και των αρχών διατήρησης μάζας και ενέργειας. Ο χρήστης καθορίζει την γεωμετρία και τις άλλες παραμέτρους σύμφωνα με τις απαιτήσεις του εκάστοτε προβλήματος. Ο εύκολος χειρισμός και η μεγάλη αποτελεσματικότητα αποτελούν ένα σημαντικό εργαλείο στα χέρια του μελετητή των φυσικών φαινομένων. Ένα πρόγραμμα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής χαρακτηρίζεται από σχετικά χαμηλό κόστος σχεδιασμού, υψηλή ταχύτητα λήψης αξιόπιστων αποτελεσμάτων, παροχή ολοκληρωμένης πληροφορίας για όλο το εύρος του χώρου του πεδίου μελέτης και τέλος, ρεαλιστική απεικόνιση των φυσικών φαινομένων.

4.1.1 Πορεία επίλυσης φυσικών προβλημάτων με χρήση CFD και αύξηση αξιοπιστίας υπολογιστικής λύσης

Η πορεία που ακολουθούμε για την επίλυση ενός φυσικού προβλήματος με τη χρήση CFD είναι η εξής:

- Ο σχεδιασμός της κατάλληλης γεωμετρίας και ο καθορισμός των γεωμετρικών συνόρων του προβλήματος.
- Η κατασκευή του υπολογιστικού πλέγματος για τη διακριτοποίηση της γεωμετρίας του χώρου σε στοιχεία (κελία).
- Η μετατροπή των μερικών διαφορικών εξισώσεων σε ένα σύστημα όμοιων αλγεβρικών εξισώσεων πεπερασμένων διαφορών οι οποίες συσχετίζουν τις τιμές των εκάστοτε μεταβλητών στους κόμβους του πεδίου με τις τιμές στους γειτονικούς κόμβους.
- Η επίλυση τους με χρήση επαναληπτικών μεθόδων.
- Η παρουσίαση, ανάλυση και η αξιολόγηση των πληροφοριών και των αποτελεσμάτων που προέκυψαν μετά το πέρας επαναληπτικής διαδικασίας επίλυσης.

Επιπρόσθετα, οι όροι που μεγαλώνουν την αξιοπιστία της υπολογιστικής λύσης είναι οι εξής:

- ✚ Γενικότητα εφαρμογής: Ο υπολογιστικός κώδικας θα πρέπει να είναι δομημένος με τέτοιο τρόπο ώστε να έχει ένα ευρύ πεδίο εφαρμογής και να καλύπτει όσο το δυνατόν περισσότερες ροϊκές περιπτώσεις, με τις λιγότερες δυνατές αλλαγές.
- ✚ Ακρίβεια λύσης: Οι αλγεβρικές εξισώσεις αποτελούν προσεγγίσεις των μερικών διαφορικών εξισώσεων. Η διαφορά μεταξύ των αριθμητικών λύσεων των πρώτων και των αναλυτικών λύσεων των δεύτερων δηλαδή το υπολογιστικό λάθος, πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο.
- ✚ Σύγκλιση: Ιδιότητα μιας επαναληπτικής μεθόδου επίλυσης ενός συστήματος όμοιων αλγεβρικών εξισώσεων που οδηγεί στην ομαλή επίλυση τους. Μια αξιόπιστη μέθοδος συγκλίνει ανεξαρτήτως των συνθηκών που επικρατούν.
- ✚ Οικονομία λύσης: Η μέθοδος πρέπει να χαρακτηρίζεται από οικονομία υπολογιστικού χώρου και χρόνου. Αυτή η ανάγκη για υπολογιστική οικονομία παίζει σημαντικό ρόλο στη δημιουργία κάθε υπολογιστικής μεθόδου.

Προβλέψεις στη ρευστομηχανική μπορούν να ληφθούν με δύο βασικές μεθόδους, την πειραματική έρευνα και τον θεωρητικό υπολογισμό. Τις τελευταίες δεκαετίες οι ραγδαίες εξελίξεις στην πληροφορική με την αύξηση της χωρητικότητας των υπολογιστών, η βελτίωση των μεθόδων επίλυσης των εξισώσεων Navier-Stokes και η βελτίωση των τυρβωδών μοντέλων που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των τυρβωδών τάσεων που εμφανίζονται στις εξισώσεις Reynolds, σε συνδυασμού με την ανάγκη για μεθόδους σχεδιασμού χαμηλού κόστους, οδήγησαν στην εκτενή χρήση των μεθόδων της Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής σαν ένα επιπρόσθετο εργαλείο της διεξαγωγής των πειραμάτων και της σχεδιαστικής διαδικασίας.

4.1.2 Πλεονεκτήματα θεωρητικού υπολογισμού

Τα πλεονεκτήματα του θεωρητικού υπολογισμού σε σχέση με αντίστοιχη πειραματική έρευνα είναι:

- Το σπουδαιότερο πλεονέκτημα μιας υπολογιστικής πρόβλεψης είναι το μικρό υπολογιστικό κόστος. Στις περισσότερες εφαρμογές το κόστος προγραμματισμού και τρεξίματος ενός υπολογιστικού προγράμματος είναι κατά πολλές τάξεις χαμηλότερο από το κόστος μιας αντίστοιχης πειραματικής διερεύνησης.
- Η ταχύτητα κατασκευής και διεκπεραίωσης μιας υπολογιστικής διερεύνησης σε αντιπαράθεση με μια αντίστοιχη πειραματική διερεύνηση.
- Η πληρότητα των πληροφοριών που συλλέγονται (με την λύση ενός προβλήματος με υπολογιστική μέθοδο) από ολόκληρη την επιφάνεια λύσης που μας ενδιαφέρει και σε αντίθεση με το πείραμα, υπάρχουν ελάχιστες απρόσιτες περιοχές υπολογισμού και επίσης δεν διαταράσσεται η ροή από τα όργανα μέτρησης.
- Η δυνατότητα εύκολης προσομοίωσης σε ένα θεωρητικό υπολογισμό των πραγματικών συνθηκών. Ένα υπολογιστικό πρόγραμμα δεν αντιμετωπίζει πρόβλημα στο να εξομοιώνει μικρές ή μεγάλες διαστάσεις, να διαχειρίζεται χαμηλές ή υψηλές θερμοκρασίες, τοξικές ή εύφλεκτες ουσίες ή να ακολουθεί πολύ γρήγορες ή πολύ αργές διαδικασίες.

Ο θεωρητικός υπολογισμός παρουσιάζει πληθώρα πλεονεκτημάτων σε σχέση με την πειραματική διερεύνηση, όμως είναι χρήσιμο να τονιστούν επίσης τα μειονεκτήματα και οι περιορισμοί του. Ο υπολογισμός με την χρήση Ηλεκτρονικών Υπολογιστών επιλύει ένα μαθηματικό μοντέλο σε αντίθεση με πειραματική διερεύνηση η οποία παρατηρεί την πραγματικότητα. Τα όρια ισχύος ενός μαθηματικού μοντέλου θέτουν όρια στην χρησιμότητα του θεωρητικού υπολογισμού. Το αποτέλεσμα του θεωρητικού υπολογισμού εξαρτάται άμεσα από μαθηματικό μοντέλο που εφαρμόστηκε αλλά και από την αριθμητική μέθοδο. Μια ορθή προσπάθεια πρόβλεψης θα πρέπει να είναι ένας συνδυασμός θεωρητικού υπολογισμού και πειράματος. Το ποσοστό συνεισφοράς των δύο συνιστωσών (θεωρία και πείραμα) εξαρτάται από τη φύση του επιλυόμενου προβλήματος, από τους στόχους της πρόβλεψης και από τυχόν οικονομικούς περιορισμούς.

4.1.3 Τομείς εφαρμογών

Η υπολογιστική ρευστοδυναμική βρίσκει εφαρμογή σε μια μεγάλη ποικιλία επιστημονικών τομέων όπως είναι:

- Στον τομέα της παραγωγής ισχύος. Στις μηχανές εσωτερικής καύσης, στις ρευστοδυναμικές μηχανές, στους αεριοστροβίλους, στους καυστήρες και στους πυρηνικούς αντιδραστήρες.
- Στην αεροδιαστημική και στην αεροδυναμική για τον προσδιορισμό της οπισθέλκουσας και της άντωσης.

- Στις μελέτες περιβάλλοντος για την πρόβλεψη των ρύπων, την διάθεση των θερμικών, χημικών και ραδιενεργών αποβλήτων στην ατμόσφαιρα, στα ποτάμια και στον υδροφόρο ορίζοντα.
- Στον τομέα της θέρμανσης, ψύξης και αερισμό κτιρίων για την βελτίωση των συνθηκών διαβίωσης.
- Στη φυσιολογία για την πρόβλεψη της ροής του αέρα εντός των πνευμόνων και του αίματος εντός των αγγείων του ανθρώπινου σώματος.
- Στις χημικές εγκαταστάσεις στους εναλλάκτες θερμότητας και υψικαμίνους.

4.1.4 Αστάθεια-Ακρίβεια-Οικονομία

Στις πολύπλοκες ροές είναι υπαρκτός ο κίνδυνος να εμφανιστούν αριθμητικές αστάθειες οι οποίες χρήζουν την ενεργοποίηση πρόσθετων τεχνικών για να έχουμε επιτυχή σύγκλιση. Στις σχετικά απλές ροϊκές περιπτώσεις υπάρχουν τρεις κύριες αιτίες που οδηγούν σε αστάθεια. Ο εσφαλμένος καθορισμός του αρχικού πεδίου ενδέχεται να έχει ως αποτέλεσμα την αστάθεια. Δύναται να εξαλειφθεί είτε με προσεκτικότερο καθορισμό του αρχικού πεδίου είτε με την χρήση συντελεστών υποχαλάρωσης. Ένας δεύτερος λόγος για την παραγωγή εστιών αστάθειας είναι η επιλογή ακατάλληλων συντελεστών υποχαλάρωσης. Για διόρθωση γίνεται εκ νέου ρύθμιση των συντελεστών υποχαλάρωσης. Τέλος μια τρίτη αιτία είναι η ελλιπή επίλυση των εξισώσεων πεπερασμένων διαφορών κατά την διάρκεια της επανάληψης.

Η ακρίβεια συναρτάται πρώτον από τον βαθμό που η λύση ικανοποιεί τις εξισώσεις πεπερασμένων διαφορών. Ο βαθμός αυτός αντικατοπτρίζεται στην τάση των υπολειπόμενων πηγών. Δεύτερον, από τον βαθμό που οι εξισώσεις πεπερασμένων διαφορών ικανοποιούν τις μερικές διαφορικές εξισώσεις. Γενικά γίνεται χρήση μικρότερων μεγεθών πλεγμάτων, για την επίτευξη λύσης που να μην εξαρτάται από το πλέγμα. Τρίτον, οι συνθήκες που τίθενται στα όρια και οι θέσεις των ορίων ενδέχεται να επηρεάζουν την ακρίβεια της λύσης. Βελτίωση μπορεί να υπάρξει με ρύθμιση των συνθηκών και των θέσεων εφαρμογής. Και τέταρτον μια λύση που έχει συγκλίνει και είναι ανεξάρτητη του υπολογιστικού πλέγματος και η οποία βασίζεται σε ικανοποιητικές οριακές συνθήκες και θέσεις εφαρμογής, εξαρτάται αποκλειστικά από την επάρκεια του τυρβώδους μοντέλου, δηλαδή στο πόσο καλά οι προβλέψεις αντανακλούν την πραγματικότητα σε σύγκριση πάντα με τα πειραματικά δεδομένα.

Σε πολύπλοκες ροές η ανεπάρκεια του τυρβώδους μοντέλου συνήθως είναι η αιτία πρόκλησης διαφόρων ασταθειών. Είναι σημαντικό να διακρίνουμε μεταξύ υπολογιστικών λαθών και αστάθειας (που μπορούν να εξαλειφθούν), από εκείνα που οφείλονται στη μοντελοποίηση του φυσικού προβλήματος

Οι απαιτήσεις οικονομίας υπολογιστικού χρόνου και υπολογιστικού χώρου αποθήκευσης δύναται να ελαχιστοποιηθούν με ορισμένες τεχνικές. Πρώτον με ακριβή προσδιορισμό των αρχικών πεδίων, καθώς ξεκινώντας από σωστό προηγούμενο υπολογισμό μειώνεται δραστικά ο υπολογιστικός χρόνος. Δεύτερον με βέλτιστη διεύθυνση του πλέγματος, με την συγκέντρωση κόμβων πλέγματος σε περιοχές με απότομες κλίσεις και μείωσης σε περιοχές όπου οι κλίσεις είναι σχεδόν ομοιόμορφες. Επιπρόσθετα, η μείωση του μεγέθους της υπολογιστικής περιοχής είναι επίσης χρήσιμη για την οικονομία του πλέγματος. Τρίτον με την εύρεση μέσω πειράματος και δοκιμής των συντελεστών υποχαλάρωσης βελτιώνεται ο παράγοντας σύγκλισης. Και

τέλος με καθορισμό πιο ρεαλιστικού κριτηρίου σύγκλισης κυρίως για τις περιπτώσεις των σύνθετων ροών.

4.2 ΤΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΠΑΚΕΤΟ ANSYS FLUENT

Το υπολογιστικό πακέτο λογισμικού ANSYS FLUENT χρησιμοποιεί την μέθοδο των πεπερασμένων όγκων για την επίλυση προβλημάτων ρευστομηχανικής. Το πρόγραμμα αποτελείται από τρία τμήματα, τον **προ-επεξεργαστή**, τον **επιλύτη** και τον **μετά-επεξεργαστή**. Πριν από την έναρξη της προσομοίωσης είναι αναγκαίος ο ορισμός του προβλήματος με τον καθορισμό των στόχων της μοντελοποίησης, την εκλογή της επιθυμητής ακρίβειας και του χρόνου ολοκλήρωσης της. Μια άλλη πτυχή της διαδικασίας του ορισμού του προβλήματος είναι ο καθορισμός του προς εξέταση πεδίου (Αναπαράσταση Χώρου). Στην Εικόνα 4-1 είναι εμφανές το λογικό διάγραμμα των μεθόδων CFD.



Εικόνα 4-1: Λογικό διάγραμμα μεθόδων CFD για την επίλυση ροϊκών προβλημάτων. [15]

4.2.1 Προ-επεξεργαστής (Pre processor)

Ο προ-επεξεργαστής βοηθά στον επαρκή καθορισμό του προβλήματος που θέλουμε να επιλύσουμε, με τα δεδομένα του προβλήματος να εισάγονται σε τέτοια μορφή ώστε να είναι δυνατή η επεξεργασία τους από τον επιλύτη. Ο προ-επεξεργαστής χρησιμεύει εκτός των άλλων στην δημιουργία της γεωμετρίας του προς εξέταση προβλήματος μέσω της κατασκευής ενός στερεού μοντέλου το οποίο εκπροσωπεί τον

χώρο. Επιπρόσθετα, είναι υπεύθυνος για την δημιουργία του υπολογιστικού πλέγματος, την ρύθμιση της φυσικής που διέπει το πρόβλημα μέσω του καθορισμού των μοντέλων των φυσικών διεργασιών, των ιδιοτήτων των υλικών, των ιδιοτήτων του χώρου και των συνοριακών τιμών. Τελικά γίνεται ρύθμιση του λύτη και του κριτηρίου σύγκλισης.

4.2.2 Επιλύτης (Solver)

Ο επιλύτης είναι το λογισμικό που επιλύει τις διακριτοποιημένες μερικές διαφορικές εξισώσεις Navier-stokes κατά επαναληπτικό τρόπο μέχρις ότου να επιτευχθεί σύγκλιση, δηλαδή η λύση να προσεγγίσει μια τιμή. Η πορεία της σύγκλισης αλλά και επιλεγμένες αριθμητικές τιμές δύναται να παρακολουθούνται από τον χρήστη κατά την διάρκεια της επίλυσης. Ο ρευστοδυναμικός κώδικας εκμεταλλεύεται τεχνικές όπως είναι η μέθοδος των πεπερασμένων όγκων, των πεπερασμένων διαφορών, των πεπερασμένων στοιχείων και μέθοδοι σκόπευσης. Κατά την διαδικασία της διακριτοποίησης οι μεταβλητές της ροής προσεγγίζονται με καθορισμένο τρόπο ανάλογα την χρησιμοποιούμενη τεχνική. Παραδείγματος χάρη ο κώδικας CFD Fluent κάνει χρήση της μεθόδου πεπερασμένων όγκων.

4.2.3 Μετά-επεξεργαστής (Post-Processor)

Ο μετά-επεξεργαστής βοηθά στην απεικόνιση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν κατά την επίλυση της προσομοίωσης ώστε να προβούμε στην εξέταση της ορθότητας των αποτελεσμάτων και αν κριθεί αναγκαίο να γίνει αναθεώρηση του υπολογιστικού μοντέλου. Τα αποτελέσματα μπορούν να αναλυθούν με την χρήση δισδιάστατων και τρισδιάστατων απεικονίσεων της κατανομής μεγεθών της ροής, ισοϋψών καμπυλών και διανυσμάτων.

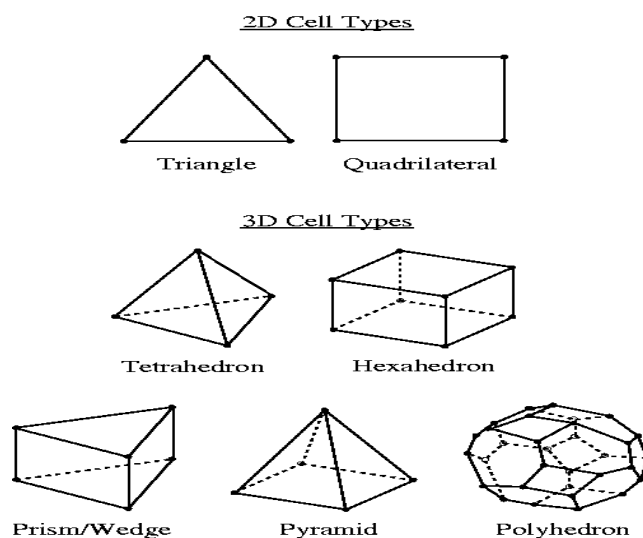
4.3 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

4.3.1 Γεωμετρία

Το περιβάλλον του Fluent προσφέρει εύκολη και γρήγορη σύνδεση με σχεδιαστικά πακέτα **CAD**, ώστε να γίνει η εισαγωγή της γεωμετρίας του προβλήματος η οποία έχει δημιουργηθεί νωρίτερα εντός αυτών των πακέτων. Ενδεικτικά, τέτοια προγράμματα σχεδιασμού είναι τα SolidWorks, CATIA, Inventor κ.α. Εναλλακτική διέξοδος για τη δημιουργία της γεωμετρίας είναι είτε μέσω του ενσωματωμένου στο πακέτο ANSYS εργαλείου **Design Modeler** είτε μέσω του **SpaceClaim**.

4.3.2 Υπολογιστικό πλέγμα

Η επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes γίνεται με αριθμητικές μεθόδους σε διακριτά σημεία ή κόμβους στο πεδίο της ροής. Η κατασκευή του υπολογιστικού πλέγματος είναι βασική διαδικασία για την έναρξη της προσομοίωσης του προβλήματος. Το υπολογιστικό πλέγμα απαρτίζεται από πεπερασμένα στοιχεία ή όγκους. Η διαμέριση του ροϊκού πεδίου σε έναν πεπερασμένο αριθμό αυτόνομων πεδίων γίνεται με τα λεγόμενα κελιά τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με κόμβους. Οι μορφές των κελιών ποικίλουν και μπορούν να είναι **τετράπλευρα (Quadrilateral)**, **τρίγωνα (Triangle)** για γεωμετρία δυο διαστάσεων και **τετραεδρικά (Tetrahedron)**, **εξαεδρικά (Hexahedron)**, **πολυεδρικά (Polyhedron)**, **πυραμιδοειδή (Pyramid)** ή **πρισματικά/σφηνοειδή (Prism/Wedge)** για χώρο τριών διαστάσεων (βλέπε Εικόνα 4-2). Η επιλογή της μορφής των κελίων γίνεται λαμβάνοντας υπόψιν ορισμένες παραμέτρους οι οποίες εξαρτώνται από την φύση του εκάστοτε προβλήματος. Η πολυπλοκότητα της γεωμετρίας του προβλήματος καθορίζει την μορφή των κελίων και το επιδιωκόμενο επίπεδο ακρίβειας υποδεικνύει με την σειρά του, την επιλογή της καταλληλότερης πυκνότητας του πλέγματος. Η μεγαλύτερη ακρίβεια της λύσης συνεπάγεται και αύξηση του πλήθους των κελίων επιβαρύνοντας όμως το υπολογιστικό κόστος της προσομοίωσης. Τροχοπέδη στην λεπτομερέστερη ανάλυση αποτελεί η διαθέσιμη υπολογιστική ικανότητα του υπολογιστή καθώς και ο αποδεκτός χρόνος ολοκλήρωσης της προσομοίωσης. Συνεπώς προκειμένου να εξοικονομήσουμε χρόνο και υπολογιστική μνήμη επιλέγουμε τις περιοχές όπου μας ενδιαφέρουν περισσότερο και χρησιμοποιούμε πλέγμα υψηλότερου βαθμού ανάλυσης τοπικά.

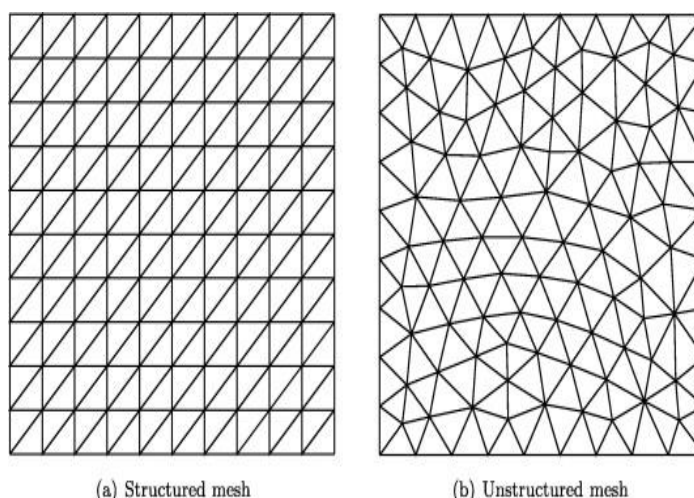


Εικόνα 4-2: Τύποι γεωμετρίας στοιχείων υπολογιστικού πλέγματος. [I29]

4.3.3 Κατηγοριοποίηση υπολογιστικών πλεγμάτων ανάλογα με την συνδεσιμότητα τους

Δομημένα

Χαρακτηριστικό γνώρισμα των δομημένων πλεγμάτων είναι η απλή συνδεσιμότητα των στοιχείων τους (βλέπε Εικόνα 4-3). Τα πιθανά στοιχεία από τα οποία δύναται να αποτελείται ένα δομημένο πλέγμα είναι τετράεδρα για δυσδιάστατο πλέγμα και εξάεδρα για τρισδιάστατο. Αυτό το μοντέλο παρουσιάζει υψηλή χωρική αποδοτικότητα, καλή σύγκλιση και υψηλή ανάλυση.



Εικόνα 4-3: Δομημένο (αριστερά) και μη δομημένο πλέγμα (δεξιά). [130]

Μη δομημένα

Ένα μη δομημένο πλέγμα αναγνωρίζεται από την ακανόνιστη συνδεσιμότητα των δομικών στοιχείων του (βλέπε Εικόνα 4-3). Τέτοιου είδους πλέγματα χαρακτηρίζονται από χαμηλή ποιότητα και ακρίβεια, παρουσιάζουν δυσκολία σύγκλισης και οι υπολογιστικές απαιτήσεις είναι αυξημένες σε σύγκριση με τα δομημένα πλέγματα. Τυπικά απαρτίζονται από τριγωνικά και τετράεδρα σε δυο και τρεις διαστάσεις αντίστοιχα. Σε προβλήματα όπου η γεωμετρία παρουσιάζει υψηλή πολυπλοκότητα, η χρήση μη δομημένων πλεγμάτων είναι αναπόφευκτη.

Υβριδικά

Τα υβριδικά πλέγματα είναι συνδυασμός των δομημένων και των μη δομημένων.

4.3.4 Ποιότητα πλέγματος (Mesh Quality)

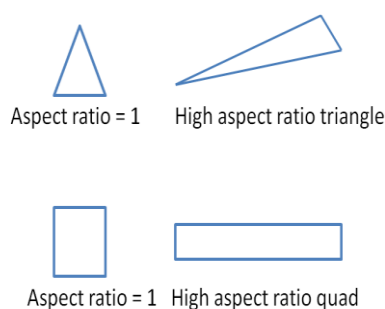
Τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα ενός ποιοτικού πλέγματος είναι η επίτευξη ακριβέστερης λύσης η οποία υπολογίζεται στο συντομότερο δυνατό χρονικό διάστημα σε συνδυασμό με την ταχεία σύγκλιση. Η μείωση του μεγέθους των στοιχείων επιφέρει αύξηση της ανάλυσης, αυξάνοντας ταυτόχρονα και το υπολογιστικό κόστος. Η ποιότητα του πλέγματος μπορεί να αξιολογηθεί βάσει των ακόλουθων κριτηρίων:

➤ Ποιότητα στοιχείου (Element quality)

Η ποιότητα του στοιχείου στηρίζεται στην αναλογία του όγκου προς το άθροισμα του τετραγώνου των μηκών ακμής για δυσδιάστατα στοιχεία ή την τετραγωνική ρίζα του κύβου του αθροίσματος του τετραγώνου των μηκών ακμής για τρισδιάστατα στοιχεία.

➤ Αναλογία διαστάσεων (Aspect ratio)

Η αναλογία διαστάσεων είναι ο λόγος της μέγιστης απόστασης του κέντρου του κελιού και μιας όψης προς την ελάχιστη απόσταση μεταξύ δύο κόμβων του κεντρικού του κελιού και του κεντρικού της όψης. Για την διαφύλαξη των βέλτιστων αποτελεσμάτων αυτή η αναλογία ιδανικά θα πρέπει να είναι ίση με 1 (βλέπε Εικόνα 4-4).



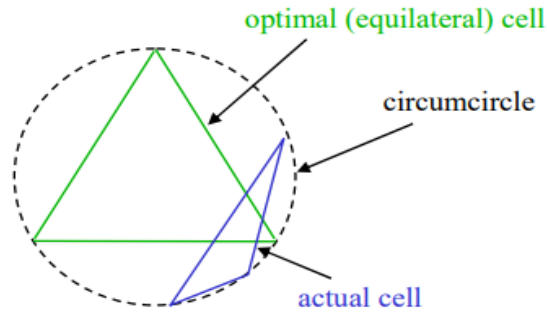
Εικόνα 4-4: Αναλογία διαστάσεων. [125]

➤ Λοξότητα όγκου (Skewness)

Ως λοξότητα όγκου ορίζεται η σύγκριση μεταξύ του όγκου του κελιού και του όγκου ενός ιδανικού κελιού (βλέπε Εικόνα 4-5). Ιδανικό κελί είναι αυτό το οποίο έχει ως πλευρές ισόπλευρα τρίγωνα εάν πρόκειται τετράεδρο ή ορθογώνια παραλληλεπίπεδα εάν έχουμε κελιά σε σχήμα εξάεδρων. Η λοξότητα δεν θα πρέπει να ξεπερνά την τιμή 0.95, με την μέση τιμή της να είναι σαφώς χαμηλότερη.

$$\text{Μέγιστη Λοξότητα} < 0.95$$

$$\text{Μέση Λοξότητα} < 0.33$$



Εικόνα 2-5: Λοξότητα. [I20]

4.4 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ (SET UP)

Το παρόν στάδιο δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να διατυπώσει την φυσική που διέπει το πρόβλημα καθώς μπορεί να επιλέξει τις ιδιότητες του ρευστού, τα φυσικά μοντέλα που περιγράφουν τα εξεταζόμενα φαινόμενα, την εφαρμογή των αρχικών και συνοριακών συνθηκών και τελικά να ορίσει τις ρυθμίσεις του επιλύτη και την επιθυμητή ακρίβεια.

4.4.1 Επιλογή επιλύτη

Εντός του λογισμικού Fluent είμαστε ελεύθεροι να επιλέξουμε τον αλγόριθμο επίλυσης, με τις διαθέσιμες επιλογές να είναι i) **Pressure Based επιλύτης** και ii) **Density Based επιλύτης**. Στην πρώτη περίπτωση οι επιλύτες **Pressure-Based** χρησιμοποιούν έναν αλγόριθμο ο οποίος λαμβάνει υπόψιν εξισώσεις με βάση την πίεση, το πεδίο των ταχυτήτων υπολογίζεται από τις εξισώσεις ορμής για τις τρεις διευθύνσεις του χώρου (εξισώσεις Navier-Stokes) και τέλος η πυκνότητα προσδιορίζεται βάσει της εξίσωσης συνέχειας. Σε πρώτη φάση εφαρμόζονταν σε ασυμπίεστες ροές χαμηλών ταχυτήτων καθώς είχε αναπτυχθεί για αυτό το σκοπό. Στη συνέχεια κατόπιν εκ νέου διαμόρφωσης, πλέον συμβαδίζει και εφαρμόζεται σε ένα μεγάλο εύρος ροϊκών καταστάσεων από συμπιεστές ροές που κινούνται με υψηλές ταχύτητες μέχρι ασυμπίεστες χαμηλών ταχυτήτων. Ο δεύτερος αλγόριθμος **Density-Based** κάνει χρήση εξισώσεων που έχουν ως γνώμονα την πυκνότητα, το πεδίο της πίεσης υπολογίζεται από την λύση εξίσωσης η οποία εξάγεται από τις εξισώσεις συνέχειας και ορμής. Αυτός ο αλγόριθμος είναι κατάλληλος και εφαρμόζεται σε συμπιεστές ροές υψηλών ταχυτήτων. Στους επιλύτες που έχουν ως βάση την πίεση υπάρχουν οι εξής διαθέσιμοι αλγόριθμοι: α) **Segregated Solver** β) **Coupled Solver**. Χαρακτηριστικό γνώρισμα του Segregated Solver είναι η διαδοχική επίλυση των εξισώσεων ορμής, συνέχειας με τα αποτελέσματα των λύσεων της εκάστοτε

προηγούμενης εξίσωσης να μεταβιβάζονται και να χρησιμοποιούνται για την επίλυση της επόμενης εξίσωσης. Αντίθετα, στους **Coupled Solver** γίνεται ταυτόχρονη επίλυση των εξισώσεων.

Στο επόμενο στάδιο καθορίζεται η φύση του προβλήματος ως προς τον χρόνο, ο οποίος δύναται να χαρακτηριστεί είτε ως σταθερός (**steady**) είτε ως μεταβατικός (**transient**). Συνεπώς με αυτό τον τρόπο καθορίζουμε τη ροή μόνιμη ή ως χρονικά μεταβαλλόμενη.

4.4.2 Επιλογή ροϊκού μοντέλου

Η σωστή επιλογή του ροϊκού μοντέλου που αρμόζει στις απαιτήσεις του εκάστοτε προβλήματος, αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων. Συγκεκριμένα μια ενδεχόμενη λανθασμένη εκλογή ενός μοντέλου μπορεί να επιφέρει αδυναμία επίτευξης σύγκλισης της λύσης καθώς και αναξιόπιστα και μη έγκυρα αποτελέσματα.

4.4.3 Καθορισμός ιδιοτήτων υλικών

Στο στάδιο αυτό μας παρέχεται η δυνατότητα της επιλογής των υλικών που θα καταλαμβάνουν τον χώρο της υπολογιστικής περιοχής. Επιπρόσθετα είμαστε σε θέση να καθορίσουμε τις φυσικές ιδιότητες των υλικών.

4.4.4 Καθορισμός συνοριακών συνθηκών

Όλα τα προβλήματα ρευστομηχανικής καθορίζονται μέσω των συνοριακών (Boundary conditions) και αρχικών συνθηκών (Initial conditions) που τα χαρακτηρίζουν (βλέπε Πίνακα 4-1). Όλα τα ροϊκά προβλήματα μπορούν να περιγραφούν από τις εξισώσεις Navier-Stokes στην γενική τους μορφή. Η μορφή και η μοναδικότητα των λύσεων των εξισώσεων Navier-Stokes εξαρτάται αποκλειστικά από τις συνοριακές και αρχικές συνθήκες που επικρατούν. Ο ρευστοδυναμικός κώδικας για να μπορέσει να προχωρήσει στην επίλυση των εξισώσεων θα πρέπει να έχει προηγηθεί ο ορισμός του πεδίου και να έχουν τεθεί οι οριακές συνθήκες. Οι συνοριακές συνθήκες είναι αυτές που υποδεικνύουν την κατεύθυνση της ροής και καθορίζουν την ροή της μάζας, της ορμής και της ενέργειας εντός του υπολογιστικού πλέγματος.

Πίνακας 4-1: Χωρία πεδίου και είδη συντοριακών συνθηκών για ασυμπίαση ροή. [13]

| | | |
|---|--|--|
| Χωρίο ρευστού (Cell zones-fluid) | Πρόκειται για χωρία του πεδίου στα οποία θα επιλυθούν οι εξισώσεις της ροής. Είναι απαραίτητο να καθοριστεί ένα υλικό το οποίο θα περιέχεται σε κάθε χωρίο, ενώ είναι δυνατόν να προστεθούν όροι πηγών ενέργειας, μάζας κλπ. | |
| | Είσοδος (Inlet) | στην οποία κυριαρχεί η είσοδος του ρευστού στο χωρίο και όπου διατηρούνται συνέχεια οι τιμές των μεγεθών (πίεση ή ταχύτητα) που ορίστηκαν στις αρχικές συνθήκες στα όρια του πεδίου. |
| | Έξοδος (Outlet) | στην οποία κυριαρχεί η έξοδος του ρευστού από το χωρίο και ορίζονται οι κλίσεις των μεταβλητών κατά τη διεύθυνση της ροής ίσες με μηδέν. |
| | Τοίχωμα (Wall) | το οποίο είναι αδιαπερατό από το χωρίο του ρευστού και οι κάθετες ταχύτητες είναι ίσες με μηδέν, ενώ υπάρχει η δυνατότητα καθορισμού της τραχύτητας του για τυρβώδη ροή. |
| | Συμμετρικό επίπεδο (Symmetry) | το οποίο εκφράζει τη γεωμετρική και ροϊκή συμμετρικότητα και θέτει τις ταχύτητες και τις κλίσεις των μεταβλητών της ροής κάθετα στο συμμετρικό επίπεδο ίσες με μηδέν. |
| | Αξονοσυμμετρικό επίπεδο (axis) | το οποίο χρησιμοποιείται στον άξονα συμμετρίας ενός δυσδιάστατου υπολογιστικού πλέγματος και ο οποίος είναι απαραίτητο να συμπίπτει με τον άξονα $y=0$. |
| | Περιοδικό επίπεδο (Periodic) | το οποίο χρησιμοποιείται στη περίπτωση περιστροφικής ή μεταφορικής περιοδικότητας. |
| Χωρίο στερεού (Cell zones-solid) | Δηλώνει τις εξωτερικές επιφάνειες του στερεού χωρίου στις οποίες δεν επιλύονται οι εξισώσεις ροής παρά μόνο η μετάδοση θερμότητας. Επίσης καθορίζεται το υλικό του και η πιθανή σχετική κίνηση του. | |
| | Τοίχωμα (Wall) | το οποίο είναι αδιαπερατό από το χωρίο του ρευστού και οι κάθετες ταχύτητες είναι ίσες με μηδέν. |
| | Συμμετρικό επίπεδο (Symmetry) | όπου εκφράζει τη γεωμετρική και ροϊκή συμμετρικότητα δύο χωρίων. |

4.4.5 Καθορισμός μεθόδου επίλυσης

Η σύζευξη πίεσης-ταχύτητας αναφέρεται σχετικά με την χρήση ενός αλγορίθμου ο οποίος χρησιμοποιεί έναν συνδυασμό της εξίσωσης της συνέχειας και των εξισώσεων ορμής ώστε να παραχθεί η εξίσωση διορθωτικής πίεσης.

Οι τρεις κύριοι αλγόριθμοι που είναι διαθέσιμοι στο FLUENT είναι οι εξής:

SIMPLE. Η μέθοδος **SIMPLE** είναι η προεπιλεγμένη μέθοδος του προγράμματος καθώς συνδυάζει την ευστάθεια και την αποδοτικότητα όσον αφορά την μνήμη. **SIMPLEC.** Η δεύτερη κατά σειρά μέθοδος που είναι διαθέσιμη και χρησιμοποιείται κυρίως σε ροές οι οποίες χαρακτηρίζονται από απλότητα παρέχοντας ταυτόχρονα ταχύτερη σύγκλιση. Ένα τυπικό παράδειγμα προβλήματος στο οποίο η επιλογή της **SIMPLEC** μεθόδου θα ήταν μονόδρομος θα περιλάμβανε στρωτή ροή δίχως να συμπεριληφθούν άλλα φυσικά μοντέλα. **PISO.** Η μέθοδος αυτή βρίσκει εφαρμογή σε μη μόνιμες ροές ή για πλέγματα που παρουσιάζουν υψηλή ασυμμετρία (Skewness).

Η διακριτοποίηση των κλίσεων και των βαθμίδων είναι επιτακτική ανάγκη καθώς οι κλίσεις χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των τιμών των βαθμωτών μεγεθών στις πλευρές των κελίων, για τον προσδιορισμό των δευτερευόντων όρων διάχυσης και των παραγώγων της ταχύτητας. Οι κλίσεις δύναται να υπολογιστούν μέσω του FLUENT με τις εξής μεθόδους:

Green-Gauss Cell Based. Αποτελεί μια ικανοποιητική μέθοδο η οποία παρουσιάζει μικρές υπολογιστικές απαιτήσεις, αλλά η λύση ενδέχεται να έχει εσφαλμένη αποτύπωση της διάχυσης. **Green-Gauss Node Based.** Συνιστά μια ακριβέστερη μέθοδο η οποία ελαχιστοποιεί τα σφάλματα στη διάχυση. Η χρήση αυτής της μεθόδου είναι ενδεδειγμένη σε υπολογιστικά πλέγματα που απαρτίζονται από τριγωνικά και τετραεδρικά στοιχεία καθώς και σε υβριδικά πλέγματα. **Least squares cell based.** Είναι η προεπιλεγμένη μέθοδος που προτείνει το πρόγραμμα. Είναι οικονομικότερη υπολογιστικά σε σχέση με την Node-Based μέθοδο και είναι ελαφρώς πιο ακριβή από την Cell-Based. Παρουσιάζει υψηλή ευελιξία καθώς αρμόζει σε κάθε είδος υπολογιστικού πλέγματος.

Στην μέθοδο των πεπερασμένων όγκων οι τιμές των αποτελεσμάτων που προκύπτουν κατά την επίλυση των εξισώσεων αποθηκεύονται πάντα στο κέντρο του εκάστοτε κελιού. Για να αποκτήσουμε μια πλήρη εικόνα σχετικά με τις ιδιότητες του ρευστού στο σύνολο του υπολογιστικού πεδίου θα πρέπει να γνωρίζουμε και τις τιμές των μεταβλητών στις έδρες των κελιών. Αυτό δύναται να επιτευχθεί μέσω των διαφόρων σχημάτων παρεμβολής που προσφέρει το πρόγραμμα. **First Order Upwind Scheme.** Αυτό το σχήμα παρεμβολής παρέχει ευκολότερη σύγκλιση αλλά ταυτόχρονα και περιορισμένη ακρίβεια (ακρίβεια πρώτης τάξης). **Power Law Scheme.** Αυτή η μέθοδος προσφέρει μεγαλύτερη ακρίβεια σε σχέση με την First Order Upwind, με την προϋπόθεση πως η ροή χαρακτηρίζεται από χαμηλό αριθμό Reynolds ($Re < 5$). **Second Order Upwind Scheme.** Η επιλογή **Second Order Upwind Scheme** χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου θέλουμε να επιτύχουμε ακρίβεια δεύτερου βαθμού. Εφαρμόζεται ιδιαίτερα σε προβλήματα των οποίων το υπολογιστικό πλέγμα αποτελείται τριγωνικά/τετραεδρικά στοιχεία ή σε ροές που δεν είναι ευθυγραμμισμένες με το πλέγμα. Το μοναδικό της μειονέκτημα είναι η πιο αργή σύγκλιση σε σύγκριση με άλλες μεθόδους. **Quadratic Upwind Interpolation.** Η μέθοδος (QUICK) εφαρμόζεται σε πλέγματα με τετραεδρικά/εξαεδρικά κελιά και σε υβριδικά πλέγματα ενώ είναι αρκετά

χρήσιμη για περιστρεφόμενες/στροβιλές ροές. Επιπλέον για ομοιόμορφα πλέγματα δύναται να επιτευχθεί ακρίβεια τρίτης τάξης.

4.4.6 Καθορισμός κριτηρίου σύγκλισης

Κατά την διαδικασία επίλυσης η σύγκλιση προσδιορίζεται στο τέλος κάθε επανάληψης με βάση το κριτήριο της υπολειπόμενης πηγής, σύμφωνα με το οποίο συγκρίνονται οι υπολειπόμενες πηγές κάθε εξίσωσης πεπερασμένων διαφορών με κάθε τιμή αναφοράς $R_{\phi, αναφ.}$ ($R_{\phi, αναφ.}$ είναι μια πολύ μικρή τιμή). Η λύση θεωρείται πώς έχει συγκλίνει μόνο στην περίπτωση όπου τα υπόλοιπα έχουν ικανοποιήσει αυτό το συγκεκριμένο όριο ανοχής ($R_{\phi, αναφ.}$) το οποίο τίθεται από τον χρήστη.

4.4.7 Αρχικοποίηση της λύσης

Η αρχικοποίηση της λύσης αποτελεί μια διαδραστική διαδικασία η οποία απαιτεί την αρχικοποίηση των μεταβλητών της επίλυσης προτού αρχίσει η επαναληπτική διαδικασία υπολογισμού. Η διάδραση μεταξύ χρήστη και υπολογιστή είναι αναγκαία καθώς ο χρήστης θα πρέπει να κάνει μια αρχική, όσο το δυνατόν ρεαλιστική εκτίμηση των τιμών των μεταβλητών και να τις θέσει στην καρτέλα της αρχικοποίησης. Αυτή η αρχική πρόβλεψη των τιμών επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την ακρίβεια της λύσης. Σε ορισμένες περιπτώσεις μια άστοχη αρχική πρόβλεψη ενδέχεται να οδηγήσει σε ματαίωση της λύσης λόγω σφάλματος από τις πρώτες κίολας επαναλήψεις.

4.4.8 Μοντελοποίηση της τύρβης

Εντός του προγράμματος Fluent υπάρχουν διάφορα μοντέλα τα οποία βοηθούν στην μοντελοποίηση ροών που παρουσιάζουν τύρβη. Τα κύρια μοντέλα που εφαρμόστηκαν στην παρούσα πτυχιακή παρουσιάζονται παρακάτω.

4.4.9 Μοντέλο k-ε

Το κανονικό μοντέλο k-ε είναι αρκετά δημοφιλές όσον αφορά την προσομοίωση ροών που περιλαμβάνουν τύρβη διότι εμφανίζει υπολογιστική ευστάθεια ακόμα και όταν εφαρμόζεται σε πολύπλοκα ροϊκά φαινόμενα.

Το τυρβώδες μοντέλο k-ε επιλύει δύο μεταβλητές: τη τυρβώδη κινητική ενέργεια και τον ρυθμό σκέδασης της τυρβώδους κινητικής ενέργειας. Ιστορικά, το μοντέλο είναι αρκετά διαδεδομένο στις βιομηχανικές εφαρμογές εξαιτίας του καλού ρυθμού

σύγκλισης και των χαμηλών απαιτήσεων σε υπολογιστική μνήμη. Παρουσιάζει μικρή ακρίβεια σε περιπτώσεις ροϊκών πεδίων όπου επιδεικνύουν μεγάλες κλίσεις πίεσης, υψηλή καμπυλότητα της ροής ή ισχυρή αποκόλληση της ροής. Ανταποκρίνεται επαρκώς σε προβλήματα που περιλαμβάνουν εξωτερική ροή γύρω από περίπλοκες γεωμετρίες. Το μοντέλο παρέχει μια καλή αρχική πρόβλεψη της μορφής του ροϊκού πεδίου.

Για την τυρβώδη κινητική ενέργεια k :

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (4.1)$$

Για την σκέδαση ε :

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (4.2)$$

Η φυσική σημασία των επιμέρους όρων των μερικών διαφορικών εξισώσεων είναι η εξής:

$$\begin{aligned} & \left[\begin{array}{l} \text{Ρυθμός μεταβολής} \\ \text{του } k \text{ ή του } \varepsilon \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{Μεταφορά του } k \text{ ή} \\ \text{του } \varepsilon \text{ με συναγωγή} \end{array} \right] \\ & = \left[\begin{array}{l} \text{Μεταφορά του } k \text{ ή} \\ \text{του } \varepsilon \text{ με διάχυση} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{Ρυθμός παραγωγής} \\ \text{του } k \text{ ή του } \varepsilon \end{array} \right] - \left[\begin{array}{l} \text{Ρυθμός καταστροφής} \\ \text{του } k \text{ ή του } \varepsilon \end{array} \right] \end{aligned}$$

Το τυρβώδες ιξώδες αποδεικνύεται πως είναι συνάρτηση της τυρβώδους κινητικής ενέργειας και του ρυθμού σκέδασης της, δηλαδή:

$$\mu_t = C_{\mu} \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4.3)$$

Όπου:

$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$ είναι σταθερές και λαμβάνουν τις αριθμητικές τιμές: $C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.92, C_{3\varepsilon} = 0.09$.

u_i : η συνιστώσα της ταχύτητας σε μια δεδομένη διεύθυνση του χώρου.

μ_t : το τυρβώδες ιξώδες.

G_k : η παραγωγή της κινητικής ενέργειας λόγω των παραγώγων των μέσων ταχυτήτων.

G_b : η παραγωγή της κινητικής ενέργειας λόγω άνωσης.

Y_M : σχετίζεται με την συμπίεστικότητα της ροής.

$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$: οι τυρβώδεις αριθμοί Prandtl για το k και το ε αντίστοιχα. Οι αριθμοί αυτοί λαμβάνουν τις τιμές, $\sigma_k = 1.00, \sigma_\varepsilon = 1.30$.

S_k, S_ε : οι όροι των πηγών.

4.4.10 Μοντέλο k-ε Realizable

Το μοντέλο k-ε Realizable έχει παρόμοια πλεονεκτήματα με το μοντέλο k-ε RNG, όμως παρουσιάζει μεγαλύτερη ακρίβεια σε συνδυασμό με ευκολότερη σύγκλιση. Προτιμάται σε περιπτώσεις ροών που παρουσιάζουν αποκόλληση, ανακυκλοφορίες, στροβιλότητα και σε οριακά στρώματα με έντονα ανασχετικές κλίσεις πίεσης.

Το μοντέλο k-ε Realizable παρουσιάζει δύο σημαντικές διαφορές σε σχέση με το κανονικό μοντέλο k-ε:

- Παραλλαγμένη μαθηματική έκφραση του τυρβώδους ιξώδους.
- Ελαφρώς τροποποιημένη εξίσωση μεταφοράς του ρυθμού σκέδασης της τυρβώδους κινητικής ενέργειας ϵ .

$$\frac{\partial(\rho\epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu\epsilon}} + \rho C_{1\epsilon} S_\epsilon \quad (4.4)$$

Το τυρβώδες ιξώδες δίνεται από την σχέση:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (4.5)$$

Το C_μ δεν είναι σταθερό αλλά είναι συνάρτηση των μεγεθών της μέσης ροής.

4.4.11 Μοντέλο k-ε RNG

Το μοντέλο k-ε RNG ουσιαστικά είναι μια τροποποίηση του κανονικού μοντέλου k-ε, έτσι ώστε το πρώτο να παρουσιάζει εγκυρότερα αποτελέσματα σε δύσκολες ροϊκές περιπτώσεις σε σχέση με το κανονικό μοντέλο k-ε. Το μοντέλο k-ε RNG βρίσκει εφαρμογή σε ροές με στροβιλισμούς, αποκόλληση και σε μεγάλο εύρος τιμών του αριθμού Reynolds παράγοντας ακριβέστερα αποτελέσματα από το κανονικό μοντέλο. Ένα σημαντικό μειονέκτημα του k-ε RNG είναι ότι δεν είναι τόσο ευσταθές όσο το κανονικό μοντέλο k-ε.

Οι εξισώσεις μεταφοράς που περιγράφουν το μοντέλο παρουσιάζουν ομοιότητα με αυτές του μοντέλου k-ε με την μόνη διαφορά την προσθήκη ενός επιπλέον όρου στην εξίσωση του ρυθμού σκέδασης της τυρβώδους κινητικής ενέργειας ϵ , για την αλληλεπίδραση μεταξύ της απόσβεσης της τύρβης και της μέσης διάτμησης της ροής.

Όλες οι τιμές των σταθερών εκτός της τιμής του β , προκύπτουν κατά την διαδικασία RNG. Η τιμή της σταθεράς β , λαμβάνεται από πειραματικά δεδομένα.

$$C_{1\epsilon} = 1.42 \quad , \quad C_{2\epsilon} = 1.68 \quad , \quad \sigma_k = 0.7194 \quad , \quad \sigma_\epsilon = 0.7194 \quad , \quad \beta = 0.012$$

4.4.12 Μοντέλο k-ω

Το τυρβώδες μοντέλο k-ω είναι παρόμοιο με το μοντέλο k-ε, μόνο που επιλύει για τον ειδικό ρυθμό σκέδασης της κινητικής ενέργειας ω . Στις ήδη υπάρχουσες εξισώσεις προστίθενται δύο επιπλέον εξισώσεις, η μία για τον προσδιορισμό της τυρβώδους κινητικής ενέργειας k και μια τον υπολογισμό του ειδικού ρυθμού σκέδασης της τυρβώδους κινητικής ενέργειας. Το ω εκφράζει την κλίμακα της τύρβης και το μέγεθος k την ενέργεια της. Το μοντέλο αυτό εφαρμόζεται σε ροές που χαρακτηρίζονται από χαμηλό αριθμό Reynolds και αποδίδει αξιόπιστα αποτελέσματα για τον υπολογισμό της τύρβης κοντά στα τοιχώματα. Είναι περισσότερο μη γραμμικό σε σχέση με το k-ε και έτσι είναι δυσκολότερο να επιτευχθεί η σύγκλιση παρόλο που είναι αρκετά ευαίσθητο στην αρχική πρόβλεψη της λύσης. Το μοντέλο k-ω χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου το μοντέλο k-ε αποτυγχάνει να πραγματοποιήσει ακριβείς προβλέψεις όπως είναι οι εσωτερικές ροές, οι ροές υπό μορφή ελεύθερης δέσμης, αποκολλημένες ροές κ.α. Το μοντέλο αυτό βρίσκει εφαρμογή στον τομέα της αεροδυναμικής και των στροβιλομηχανών.

Το τυρβώδες ιξώδες δίνεται συναρτήσει της τυρβώδους κινητικής ενέργειας και του ειδικού ρυθμού σκέδασης:

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \quad (4.6)$$

Οι εξισώσεις που περιγράφουν αυτό το μοντέλο είναι οι εξής:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \beta^* \rho k \omega \quad (4.7)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \omega u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + a_1 \frac{\omega}{k} G_k - \beta \rho k \omega^2 \quad (4.8)$$

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_\varepsilon}{\sigma_k} \quad (4.9)$$

$$\Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_\varepsilon}{\sigma_\omega} \quad (4.10)$$

$$\beta^* = 0.09 \quad \beta = 0.075 \quad \sigma_k = 0.5 \quad \sigma_\omega = 0.5 \quad \alpha_1 = \frac{5}{9}$$

G_k : αφορά την παραγωγή της τυρβώδους κινητικής ενέργειας λόγω των κλίσεων των μέσων ταχυτήτων.

Γ_k, Γ_ω : αντιπροσωπεύουν την ενεργή διάχυση των k και ω .

$\beta^*, \beta, \alpha_1, \sigma_k, \sigma_\omega, \varepsilon$: σταθερές.

4.4.13 Μοντέλο k-ω SST

Το μοντέλο k-ω SST χρησιμοποιείται για να περιγράψει ροές χαμηλού αριθμού Reynolds, δίδοντας ακριβή αποτελέσματα για τον υπολογισμό της τύρβης στις περιοχές της ροής όπου λαμβάνει χώρα αποκόλληση, ανασχετικές κλίσεις πίεσης και

αποδίδει κατά ιδανικό τρόπο στην ανάλυση οριακών στρωμάτων. Κυριότερο μειονέκτημα αυτού του μοντέλου είναι η μεγάλη ευαισθησία στην τιμή ω στις περιοχές της ελεύθερης ροής. Στην ουσία πρόκειται για ένα συνδυαστικό μοντέλο το οποίο χρησιμοποιεί το μοντέλο k- ω για τον υπολογισμό της τύρβης στο εσωτερικό πεδίο που εξετάζεται μέχρι τα όρια των τοιχωμάτων, ενώ χρησιμοποιεί μια τροποποιημένη μορφή του μοντέλου k- ϵ για να περιγράψει τη συμπεριφορά των τυρβωδών τάσεων στις περιοχές της ελεύθερης ροής.

Το τυρβώδες ιξώδες περιγράφεται από την εξής μαθηματική σχέση:

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \frac{1}{\max\left[\frac{1}{a^* a_1 \omega}\right]} \quad (4.11)$$

Οι αντίστοιχες μαθηματικές σχέσεις που καθορίζουν το μοντέλο είναι:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \beta' \rho k \omega \quad (4.12)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \omega u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \alpha_1 \frac{\omega}{k} G_k - \beta_1 \rho k \omega^2 + 2(1 - F_1) \rho \frac{1}{\omega \sigma_{\omega iz}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial v}{\partial x_j} \quad (4.13)$$

Ο όρος F_1 αποτελεί μια συνάρτηση η οποία υπεύθυνη για την ομαλή μετάβαση από το ένα μοντέλο στο άλλο και ισούται με την μονάδα πάνω στα στερεά τοιχώματα οπότε και τίθεται σε λειτουργία το μοντέλο k- ω ενώ είναι μηδέν στην ελεύθερη ροή όπου το μοντέλο k- ϵ ανταποκρίνεται με μεγαλύτερη επάρκεια, ενώ ενδιάμεσα η τιμή της είναι εξαρτώμενη από τις τοπικές βαθμίδες των μεταβλητών. Οι τιμές των σταθερών του μοντέλου είναι:

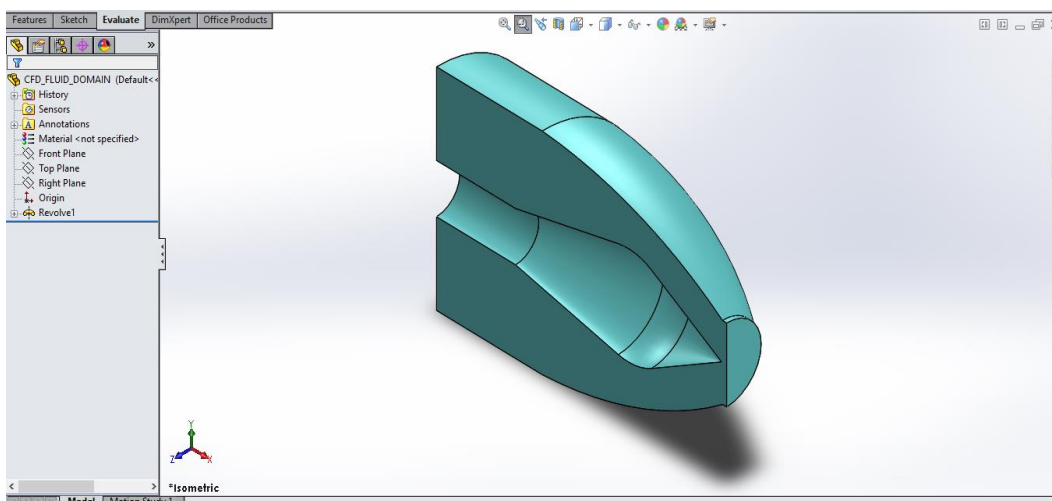
$$\beta' = 0.09 \quad , \quad \alpha_1 = \frac{5}{9} \quad , \quad \sigma_k = 0.85 \quad , \quad \sigma_\omega = 1.168$$

5. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΡΟΗΣ ΕΝΤΟΣ ΤΟΥ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ

5.1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ (GEOMETRY)

Η γεωμετρία του προβλήματος σχεδιάστηκε με την βοήθεια του προγράμματος SolidWorks 2014, λαμβάνοντας υπόψιν την συναρμολόγηση της ακίδας και του ακροφυσίου με την ακίδα να βρίσκεται στην θέση μέγιστης ογκομετρικής παροχής. Λόγω της συμμετρίας του συστήματος ακροφυσίου-ακίδας, σχεδιάζουμε μόνο το ένα συμμετρικό μέρος του (ως προς τον διαμήκη άξονα) καθώς επιδιώκουμε την ελάττωση του υπολογιστικού κόστους. Ο υπολογιστικός χώρος είναι ουσιαστικά ο χώρος που

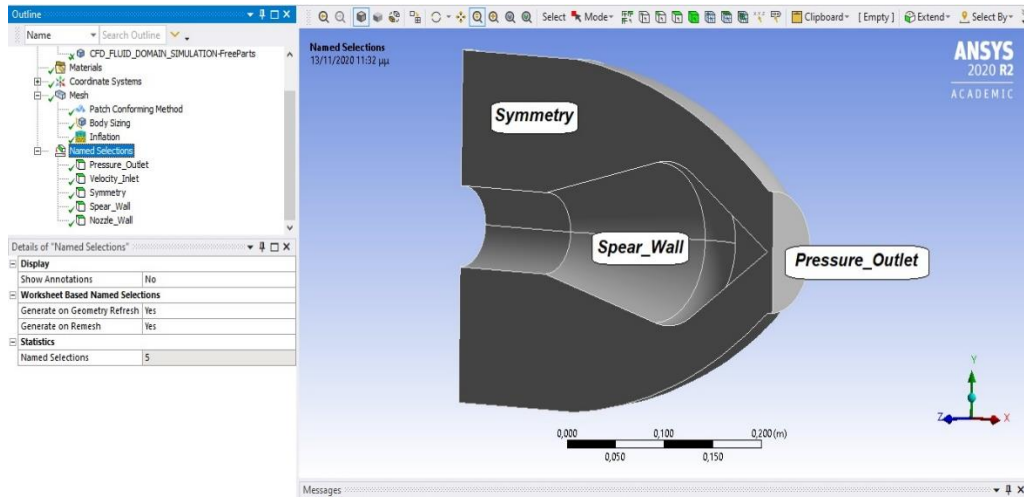
καταλαμβάνει το ρευστό εντός του ακροφυσίου με ευκρινή τα όρια που ορίζονται από τα στερεά τοιχώματα της ακίδας και τα εσωτερικά τοιχώματα του ακροφυσίου (βλέπε Εικόνα 5-1). Το αρχείο της γεωμετρίας προκειμένου να εισαχθεί επιτυχώς στο Fluent θα πρέπει να είναι καταλλήλου τύπου. Στη περίπτωση μας ύστερα από την ολοκλήρωση της δημιουργίας της γεωμετρίας εντός του Solidworks, αυτή αποθηκεύτηκε ως αρχείο IGS. Τέλος, έγινε η εισαγωγή της εντός του Fluent (Geometry).



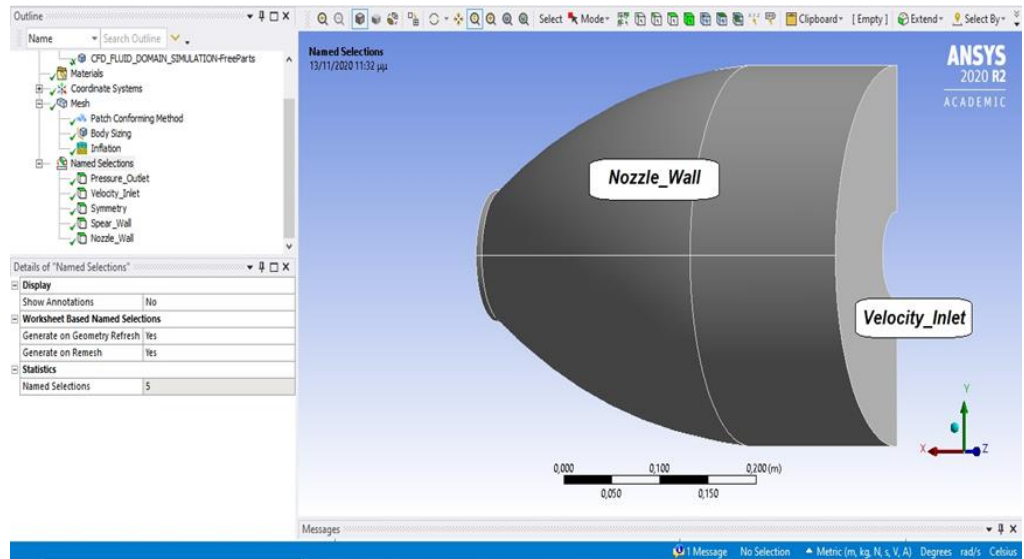
Εικόνα 5-1: Ισομετρική όψη της γεωμετρίας της υπολογιστικής περιοχής.

5.2 ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ (MESHING)

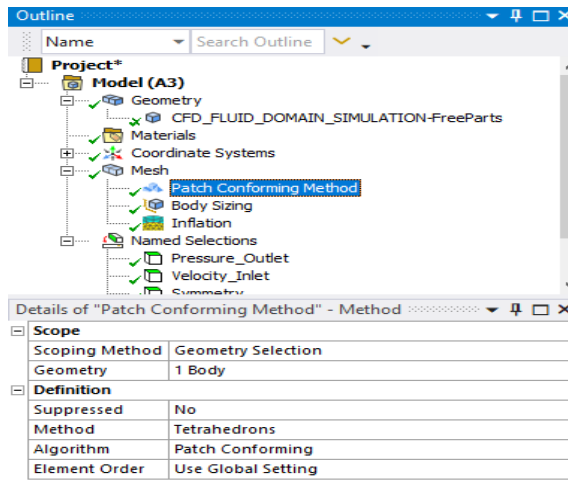
Πρωταρχικό βήμα εντός της διαδικασίας της διακριτοποίησης της υπολογιστικής περιοχής είναι ο ορισμός του υλικού της ως ρευστό (**Fluid**). Ακολουθεί η ονοματοδοσία των ορίων της γεωμετρίας (βλέπε Εικόνα 5-2 και Εικόνα 5-3). Η έξοδος του ακροφυσίου ορίζεται ως **Pressure Outlet** και η είσοδος του ως **Velocity Inlet**. Στα τοιχώματα της ακίδας αποδόθηκε το όνομα **Spear Wall** και στα εσωτερικά τοιχώματα του κελύφους του ακροφυσίου, το όνομα **Nozzle Wall**. Τέλος, η επιφάνεια της υπολογιστικής περιοχής η οποία εφάπτεται στο συμμετρικό επίπεδο της καθορίζεται ως **Symmetry**. Αυτή η διαδικασία της απόδοσης ονομάτων στα όρια της γεωμετρίας θα μας διευκολύνει στην συνέχεια να θέσουμε ορθά τις συνοριακές συνθήκες του προβλήματος. Το υπολογιστικό πλέγμα είναι αδόμητο και αποτελείται από τετραεδρικά (**Tetrahedrons**) κελιά καθώς εφαρμόστηκε η **Patch conforming** μέθοδος διακριτοποίησης (βλέπε Εικόνα 5-4). Τα στοιχεία έχουν μέγεθος ίσο με 6.5 mm (Body sizing) (δες Εικόνα 5-5). Για την λεπτομερέστερη αποτύπωση του οριακού στρώματος έγινε προσθήκη πρισματικών στρώσεων υψηλότερης ανάλυσης (**Inflation**) κοντά στα στερεά τοιχώματα της ακίδας και του ακροφυσίου (βλέπε Εικόνα 5-6). Τα στρώματα αυτά είναι 6 στο πλήθος με το πρώτο στρώμα (δηλαδή το στρώμα που είναι εφάπτομενο με τα στερεά τοιχώματα) να έχει πάχος ίσο με 1 mm και το πάχος τους αυξάνεται με ρυθμό ανάπτυξης (**Growth Rate**) 1.25 όσο απομακρυνόμαστε από τα τοιχώματα.



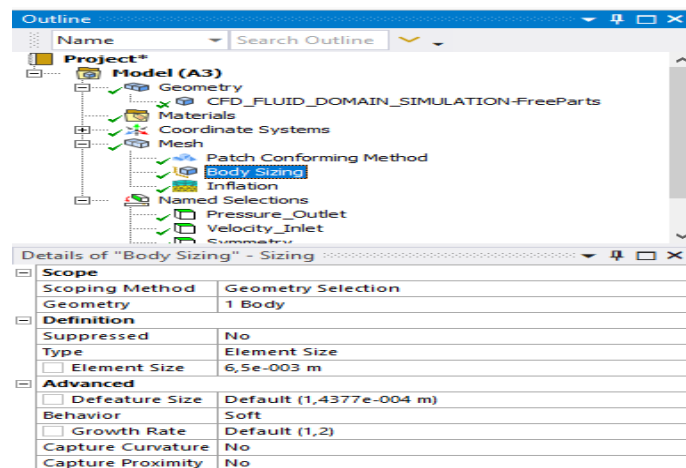
Εικόνα 5-2: Ονοματοδοσία ορίων γεωμετρίας.



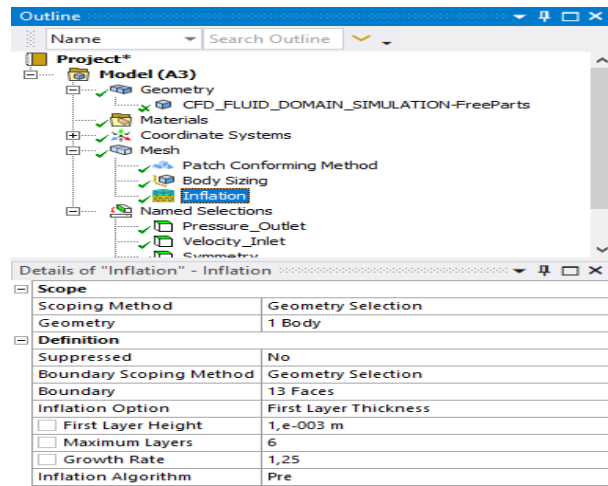
Εικόνα 5-3: Ονοματοδοσία ορίων γεωμετρίας.



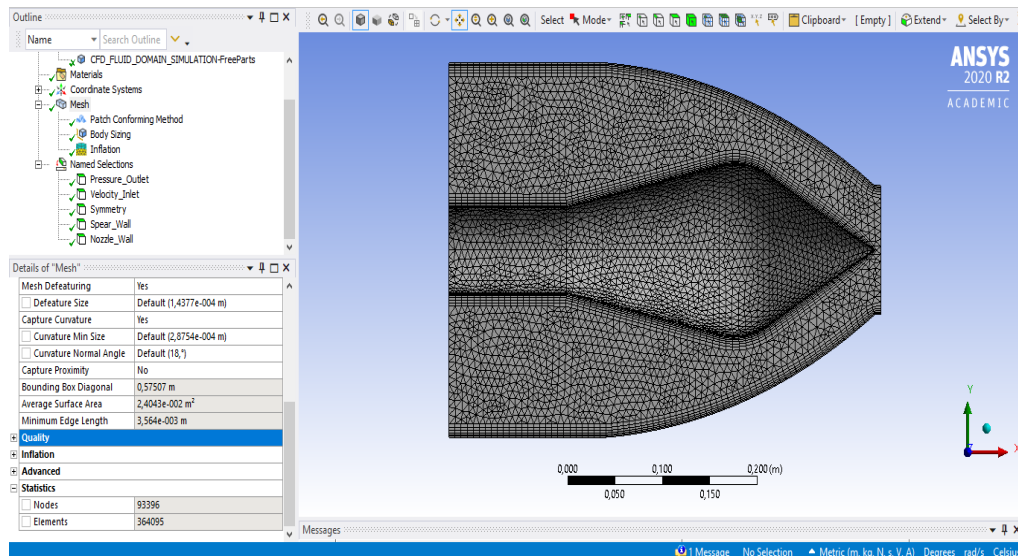
Εικόνα 5-4: Ρυθμίσεις διακριτοποίησης- Ορισμός μεθόδου διακριτοποίησης.



Εικόνα 5-5: Ρυθμίσεις διακριτοποίησης-Μέγεθος στοιχείων.



Εικόνα 5-6: Ρυθμίσεις διακριτοποίησης-Inflation.

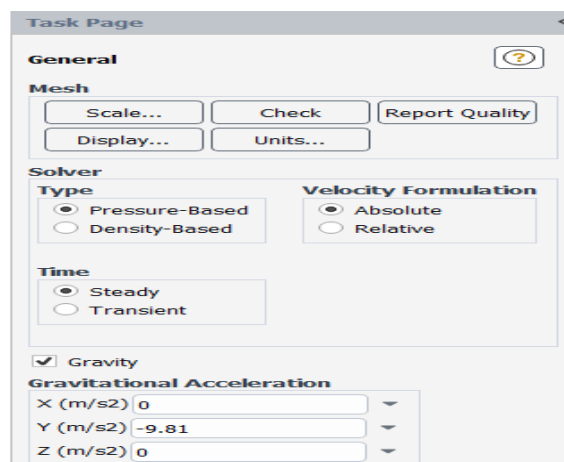


Εικόνα 5-7: Υπολογιστικό πλέγμα.

5.3 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ (SET UP)

5.3.1 Επιλογή επιλύτη

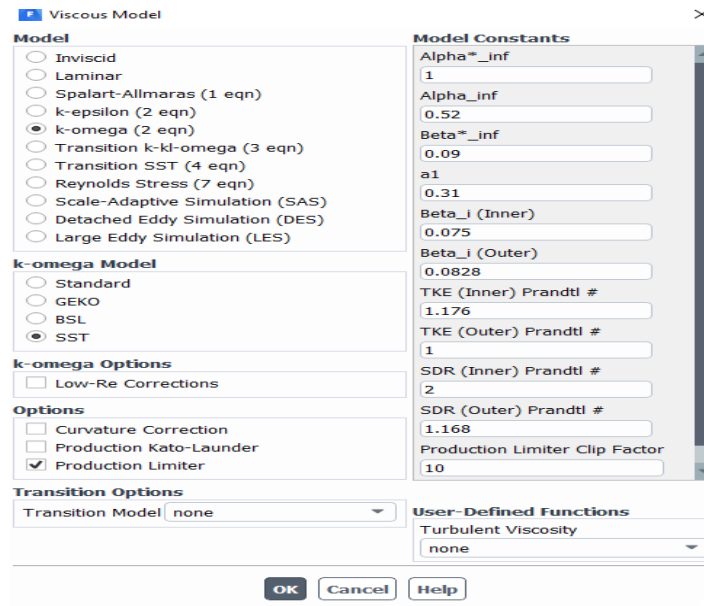
Ο τύπος του επιλύτη ρυθμίστηκε ως **Pressure-Based**, ο χρόνος τέθηκε ως σταθερός (**Steady**) και τέλος προστέθηκε η επίδραση της βαρύτητας (**Gravity**) με προσθήκη της τιμής της επιτάχυνσης της βαρύτητας στον κατακόρυφο άξονα γ'γ (βλέπε Εικόνα 5-8).



Εικόνα 5-8: Ρυθμίσεις επιλύτη.

5.3.2 Επιλογή ροϊκού μοντέλου

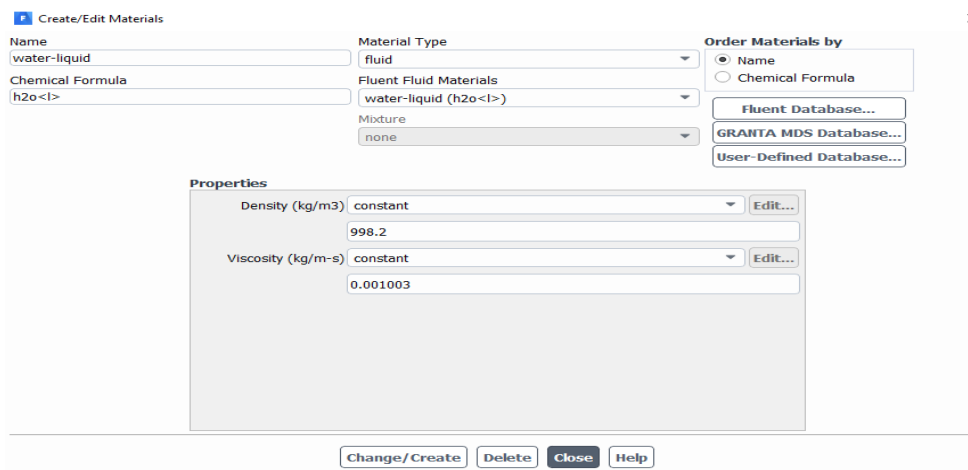
Η ροή εντός του ακροφυσίου είναι τυρβώδης και συνεπώς υπάρχει η ανάγκη της ενεργοποίησης ενός τυρβώδους μοντέλου. Το τυρβώδες μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της ροής εντός του ακροφυσίου είναι το **k- ω SST** καθώς είναι ικανό να αποτυπώσει τις τυρβώδεις κλίμακες σε περιοχές της ροής που εμφανίζουν υψηλή διαμητική τάση (βλέπε Εικόνα 5-9). Η σωστή επιλογή του μοντέλου θα επιφέρει ταχεία σύγκλιση και αξιόπιστα αποτελέσματα.



Εικόνα 5-9: Ορισμός τυρβώδους μοντέλου.

5.3.3 Καθορισμός υλικού και των ιδιοτήτων του

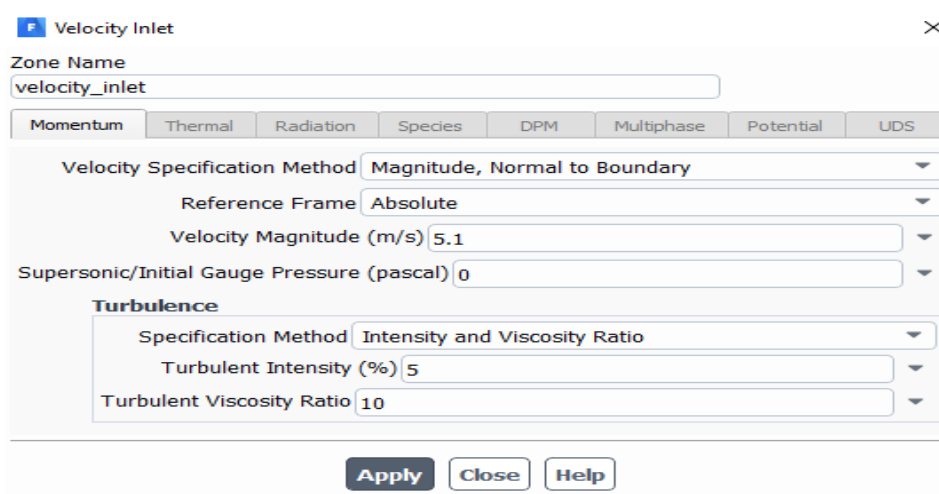
Ένα βασικό βήμα της διαδικασίας της προσομοίωσης είναι και ο καθορισμός του υλικού που θα καταλαμβάνει το χώρο της υπολογιστικής περιοχής με τις αντίστοιχες βασικές φυσικές του ιδιότητες όπως είναι η πυκνότητα και το δυναμικό ιξώδες (βλέπε Εικόνα 5-10).



Εικόνα 5-10: Ορισμός υλικού.

5.3.4 Καθορισμός Συνοριακών συνθηκών

Ο καθορισμός των συνοριακών συνθηκών για το ακροφύσιο περιλαμβάνει καταρχάς την καταχώριση της τιμής της ταχύτητας εισόδου στην διατομή εισόδου του ακροφυσίου. Το μέτρο της ταχύτητας εισόδου προέκυψε ύστερα από εφαρμογή της εξίσωσης της συνέχειας μεταξύ της διατομής εισόδου (**Velocity_Inlet**) και της διατομής εξόδου (**Pressure_Outlet**). Έτσι, η τιμή της υπολογίστηκε ως 5.1 m/s και καταχωρήθηκε στην καρτέλα. Οι ρυθμίσεις για την τύρβη στην είσοδο δεν μεταβλήθηκαν και αφέθηκαν οι επιλογές που προτείνει το πρόγραμμα εξ αρχής. Γενικά οι τιμές αυτών των δύο παραμέτρων δηλαδή της έντασης της τύρβης (**Turbulent Intensity**) και του λόγου του τυρβώδους ιξώδους (**Turbulent Viscosity Ratio**), δεν μεταβλήθηκαν σε κανέναν από τους μελλοντικούς ορισμούς των συνοριακών συνθηκών στη παρούσα πτυχιακή εργασία (βλέπε Εικόνα 5-11).



Velocity Inlet

Zone Name
velocity_inlet

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase Potential UDS

Velocity Specification Method: Magnitude, Normal to Boundary

Reference Frame: Absolute

Velocity Magnitude (m/s): 5.1

Supersonic/Initial Gauge Pressure (pascal): 0

Turbulence

Specification Method: Intensity and Viscosity Ratio

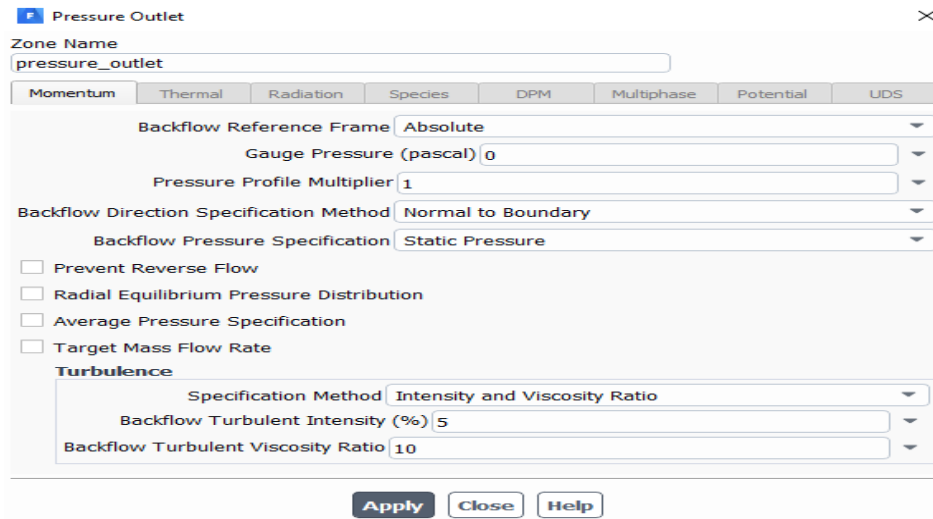
Turbulent Intensity (%): 5

Turbulent Viscosity Ratio: 10

Apply Close Help

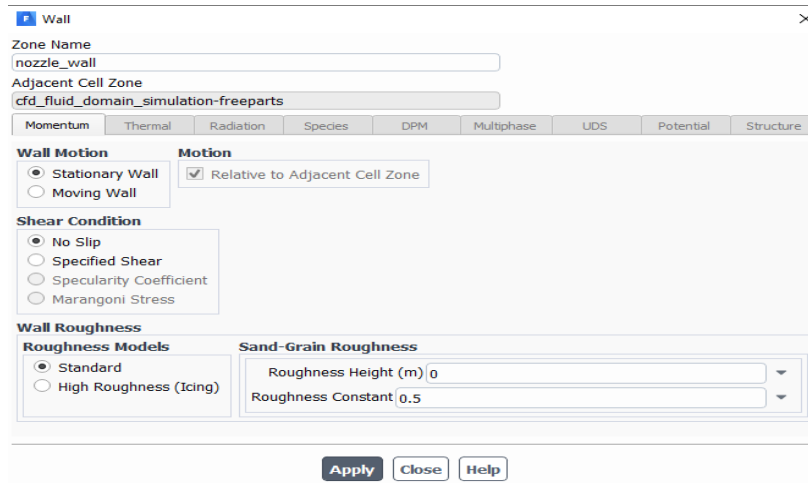
Εικόνα 5-11: Ρύθμιση συνθηκών στην είσοδο του ακροφυσίου.

Εν συνεχεία, καθορίστηκε η τιμή της σχετικής πίεσης (**Gauge Pressure**) στην έξοδο του ακροφυσίου ως 0 Pa (βλέπε Εικόνα 5-12).



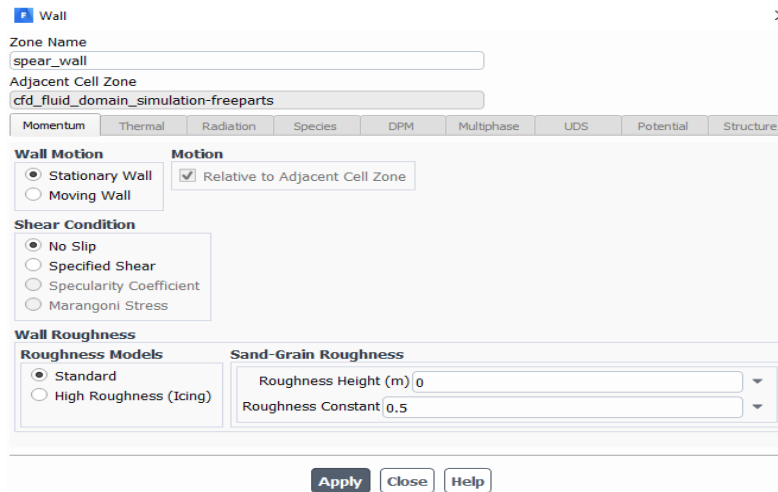
Εικόνα 5-12: Ρύθμιση συνθηκών στην έξοδο του ακροφυσίου.

Επιπρόσθετα, τέθηκαν οι συνοριακές συνθήκες στα στερεά τοιχώματα του ακροφυσίου (**Nozzle_Wall**) όπου εφαρμόστηκε η **συνθήκη μη ολίσθησης (No slip)**. Προφανώς τα τοιχώματα του ακροφυσίου είναι ακίνητα (**Stationary Wall**). Τελικά, ορίστηκε το μοντέλο της τραχύτητας ως **Standard** με σταθερά τραχύτητας (**Roughness Constant**) ίση με 0.5, όπως είναι εμφανές στην Εικόνα 5-13.



Εικόνα 5-13: Ρύθμιση συνθηκών στα τοιχώματα του ακροφυσίου.

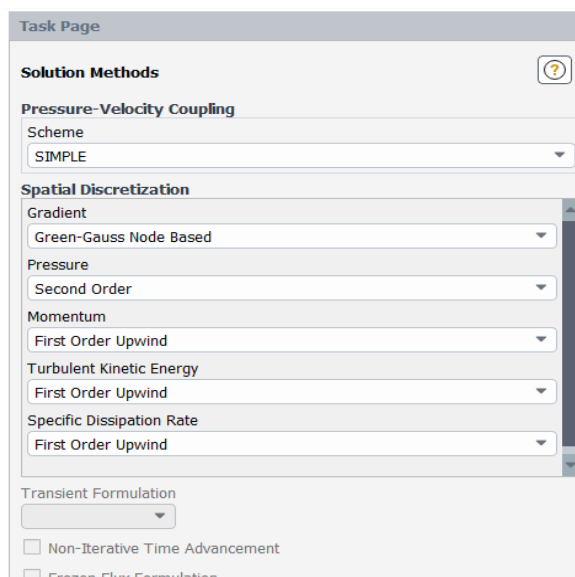
Ομοίως, έγινε και ο καθορισμός των στερεών τοιχωμάτων της ακίδας (**Spear_Wall**), τέθηκαν ως ακίνητα (**Stationary Wall**), με την συνθήκη μη ολίσθησης να εφαρμόζεται και σε αυτή την περίπτωση και να γίνεται η επιλογή του μοντέλου της τραχύτητας (**Standard Roughness Model**) και ο ορισμός της σταθεράς της τραχύτητας (**Roughness Constant**) με τιμή ίση με 0.5 (Δες Εικόνα 5-14).



Εικόνα 5-14: Ρύθμιση συνθηκών στα τοιχώματα της ακίδας.

5.3.5 Καθορισμός μεθόδου επίλυσης

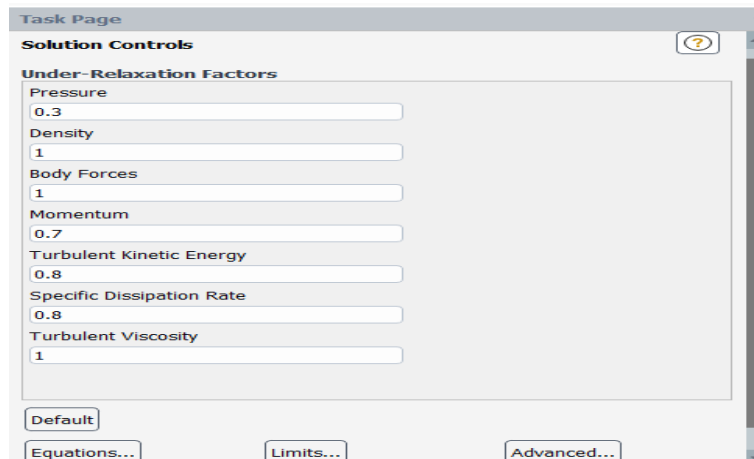
Επόμενο βήμα προς την ολοκλήρωση της προσομοίωσης του ακροφυσίου είναι η ρύθμιση των μεθόδων επίλυσης. Ο αλγόριθμος σύζευξης της πίεσης και της ταχύτητας που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο **SIMPLE** λόγω της οικονομίας και της ευστάθειας που παρέχει. Επίσης, ο προσδιορισμός των κλίσεων έγινε με την μέθοδο **Green-Gauss Node Based** καθώς ενδείκνυται στην περίπτωση μας διότι το πλέγμα αποτελείται από τετραεδρικά στοιχεία. Τελικά, η ακρίβεια στις σειρές Taylor που χρησιμοποιούνται ρυθμίστηκε ως δευτέρας τάξης για την πίεση και πρώτης τάξεως για την ορμή, την τυρβώδη κινητική ενέργεια και τον ειδικό ρυθμό σκέδασης (βλέπε Εικόνα 5-15).



Εικόνα 5-15: Ρύθμιση μεθόδου επίλυσης.

5.3.6 Καθορισμός συντελεστών υποχαλάρωσης και τιμών αναφοράς

Στην συνέχεια, ορίστηκαν οι συντελεστές υποχαλάρωσης για την πίεση, την πυκνότητα, την ορμή, την τυρβώδη κινητική ενέργεια κλπ. Επιπλέον, προστέθηκαν και οι τιμές αναφοράς (**Reference Values**) στην είσοδο του ακροφυσίου (**Velocity_Inlet**) όπως είναι το εμβαδόν της διατομής εισόδου ($A = 0.006m^2$), η πυκνότητα του νερού ($\rho = 998.2 kg/m^3$), η ειδική ενθαλπία ($h = 104860 j/kg$), η πίεση ($P = 101325 Pa$), η θερμοκρασία ($T = 298.16 K$) κλπ. (βλέπε Εικόνα 5-16).



Εικόνα 5-16: Ορισμός συντελεστών υποχαλάρωσης.

5.3.7 Αρχικοποίηση επιλύτη

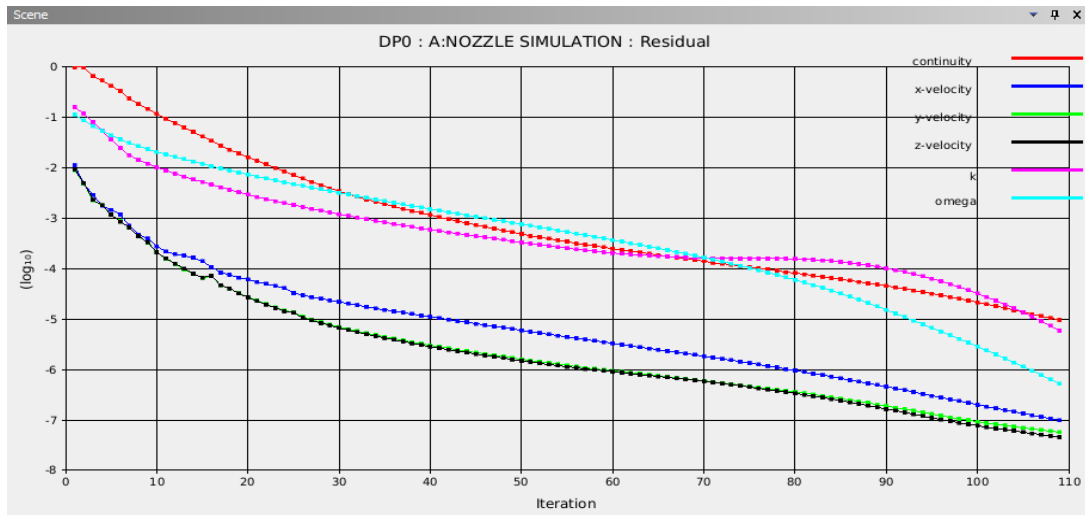
Η αρχικοποίηση έγινε με τον υβριδικό τρόπο διότι παρέχει μια γρήγορη προσέγγιση του πεδίου ροής καθώς επιλύεται η εξίσωση Laplace για την πρόβλεψη του πεδίου ροής και του πεδίου της πίεσης (βλέπε Εικόνα 5-17).

```
iter      scalar-0
1         1.000000e+00
2         2.924277e-04
3         4.879701e-05
4         1.734793e-05
5         4.428634e-06
6         1.497783e-06
7         4.830896e-07
8         1.722415e-07
9         6.195840e-08
10        2.372649e-08
Hybrid initialization is done.
```

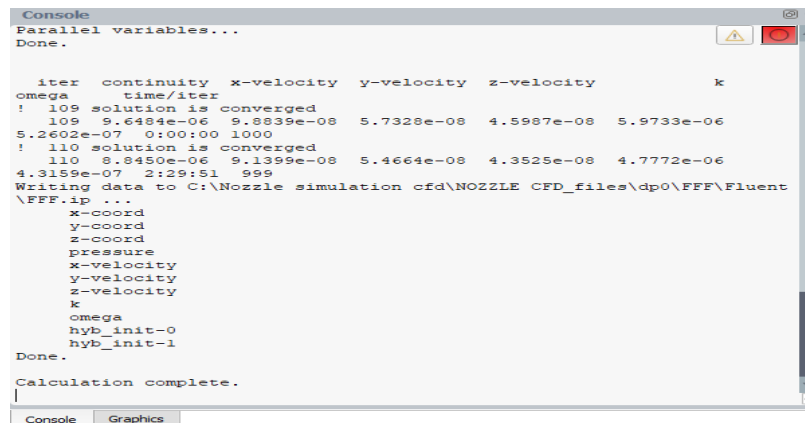
Εικόνα 5-17: Ένδειξη κονσόλας κατά την ολοκλήρωση της υβριδικής αρχικοποίησης του επιλύτη.

5.4 ΕΠΙΛΥΣΗ

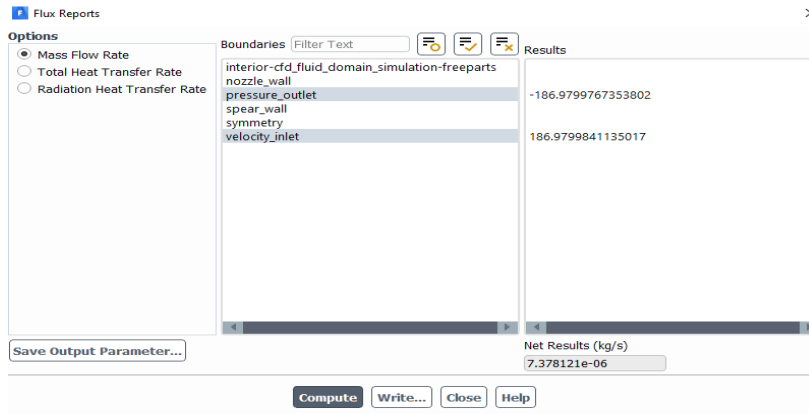
Για την επίλυση τέθηκε πλήθος επαναλήψεων ίσο με 1000. Κατά την διάρκεια της επίλυσης, εμποτεύθηκαν και καταγράφηκαν τα υπολείπτα (Residuals) συναρτήσει των επαναλήψεων (Iterations) όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 5-18 και στην Εικόνα 5-19. Τέλος, έγινε έλεγχος για την ισχύ της αρχής διατήρησης της μάζας (βλέπε Εικόνα 5-20).



Εικόνα 5-18: Μεταβολή της ακρίβειας σύγκλισης συναρτήσει του αριθμού των επαναλήψεων.



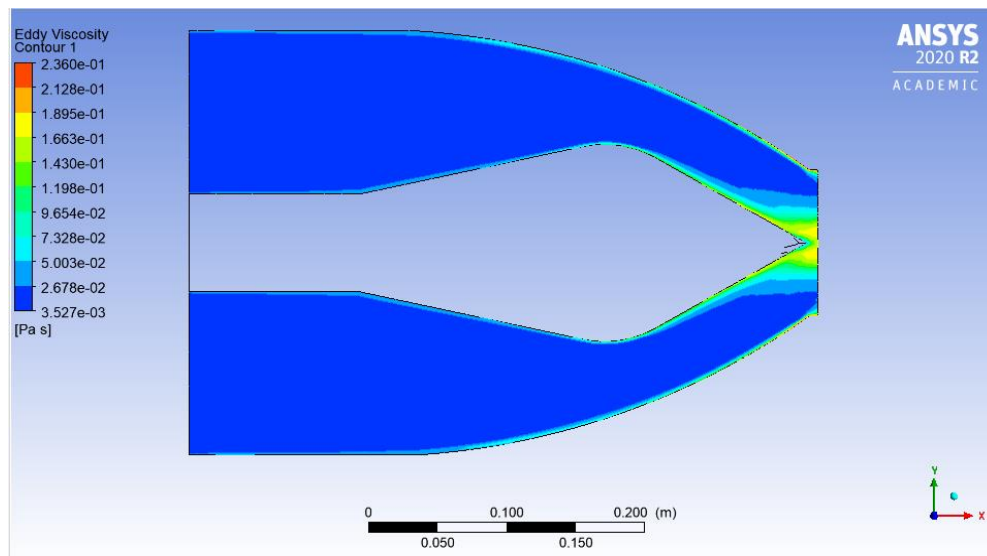
Εικόνα 5-19: Καταγραφή των υπολειπόμενων πηγών.



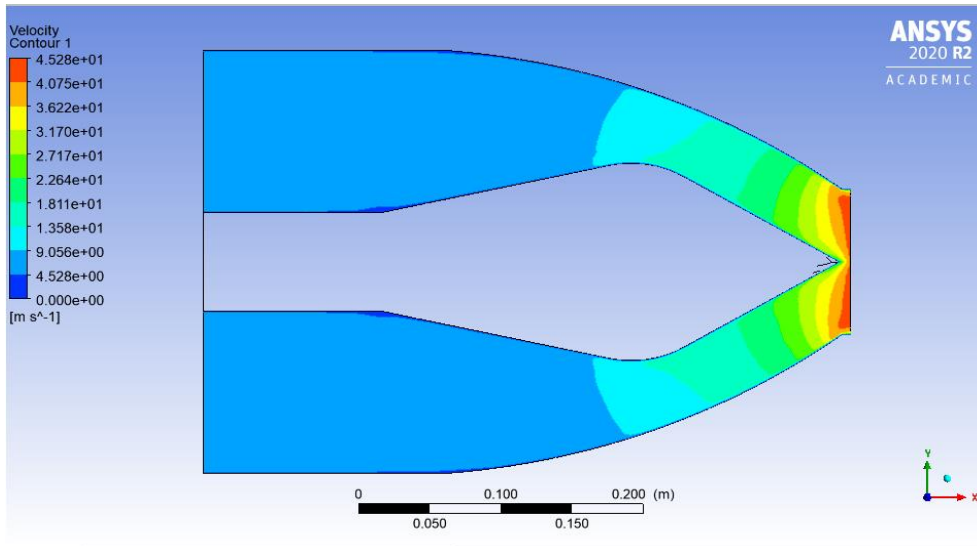
Εικόνα 5-20: Έλεγχος ισχύος της αρχής διατήρησης της μάζας μεταξύ εισόδου και εξόδου του ακροφυσίου.

5.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ

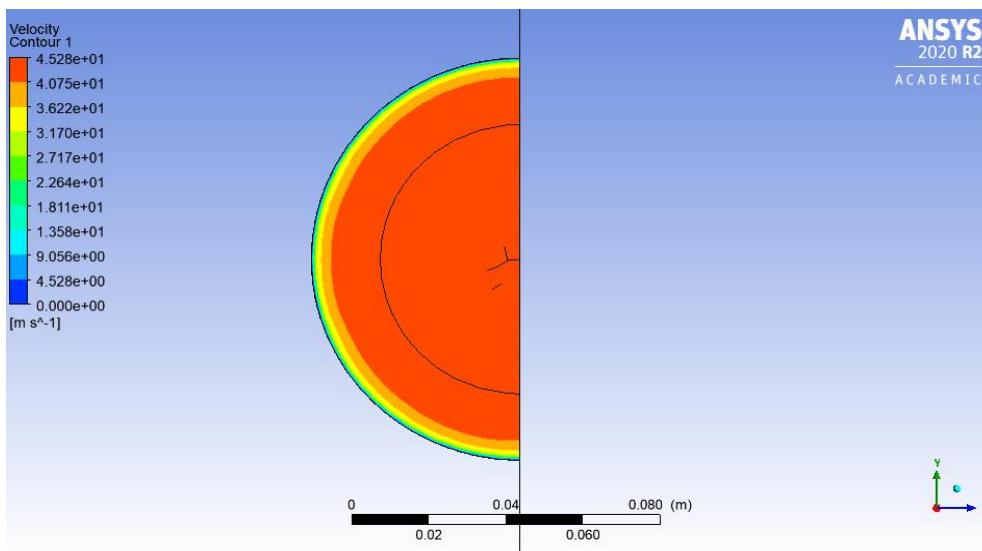
Στις Εικόνες 5-21, 5-22, 5-23 και 5-24, διακρίνονται τα διαγράμματα κατανομής του τυρβώδους ιξώδους, της ταχύτητας, της ταχύτητας στην έξοδο του ακροφυσίου και της πίεσης, αντίστοιχα.



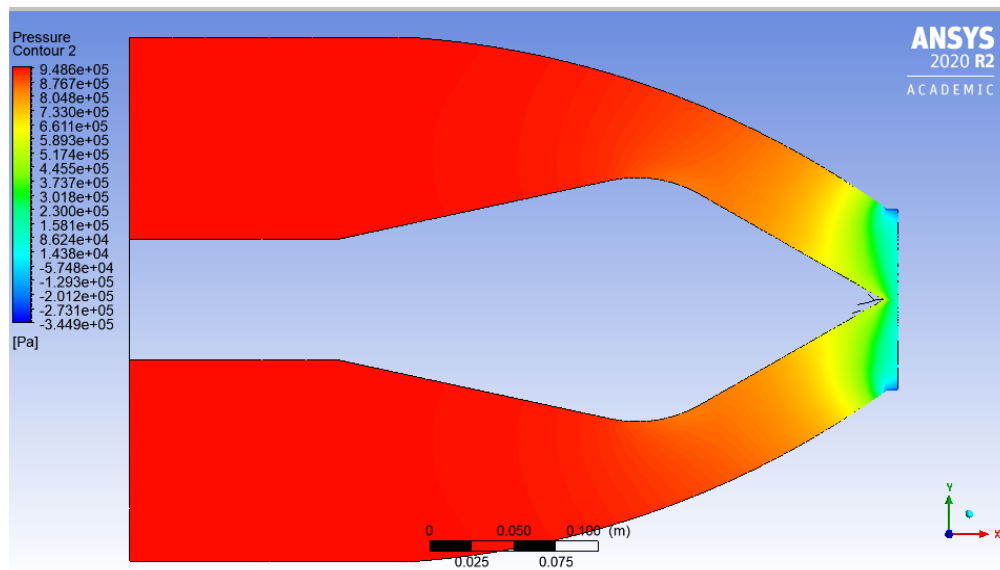
Εικόνα 5-21: Κατανομή του τυρβώδους ιξώδους στο συμμετρικό επίπεδο xy ($z = 0$).



Εικόνα 5-22: Κατανομή της ταχύτητας στο συμμετρικό επίπεδο xy ($z = 0$).



Εικόνα 5-23: Κατανομή της ταχύτητας στην έξοδο του ακροφυσίου.

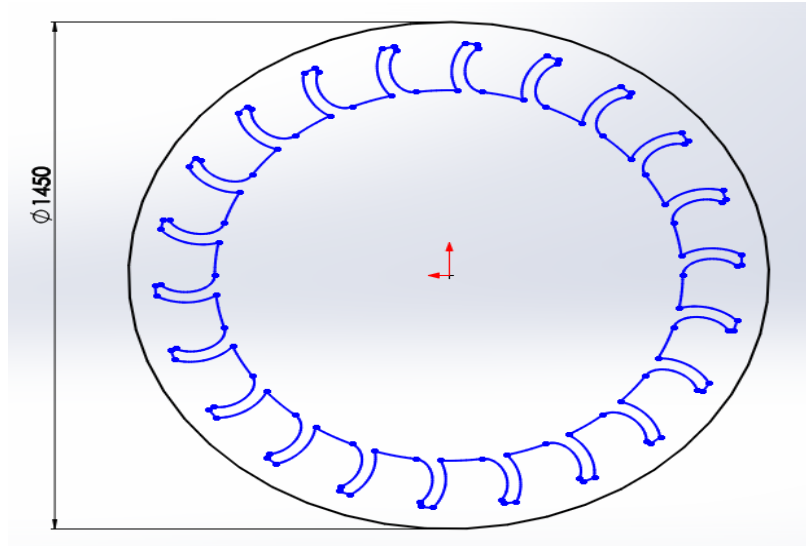


Εικόνα 5-24: Κατανομή της πίεσης στο συμμετρικό επίπεδο xy ($z = 0$).

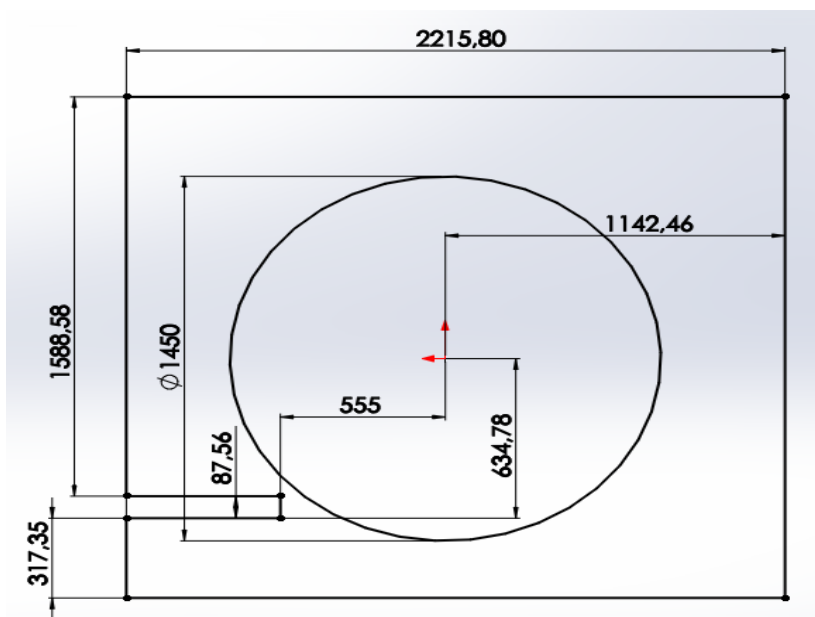
6. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ-ΣΤΡΟΦΕΙΟΥ

6.1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ (GEOMETRY)

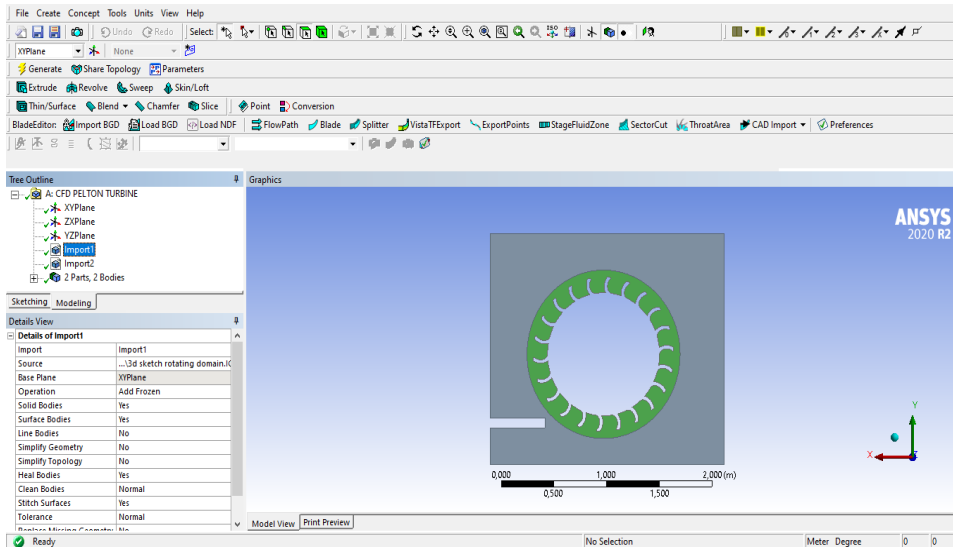
Αρχικό βήμα για την έναρξη της προσομοίωσης του συστήματος ακροφυσίου-στροφείου είναι η κατασκευή της γεωμετρίας του, η οποία δημιουργήθηκε με χρήση του προγράμματος **SolidWorks 2014**. Η γεωμετρία αποτελείται από δύο επιμέρους περιοχές, την στρεφόμενη υπολογιστική περιοχή (**Rotating Domain**) και την σταθερή υπολογιστική περιοχή (**Stationary Domain**) τα σκίτσα των οποίων απεικονίζονται στη Εικόνα 6-1 και στη Εικόνα 6-2, αντίστοιχα. Τα δύο σκίτσα εξωθήθηκαν προς τις δύο κατευθύνσεις κατά 2 mm με χρήση της εντολής Extruded Boss/Base (συνολικό πάχος υπολογιστικής περιοχής ίσο με 4mm). Αμφότερες οι περιοχές, εισάγονται διαδοχικά εντός του **DesignModeler** (βλέπε Εικόνα 6-3 και Εικόνα 6-4).



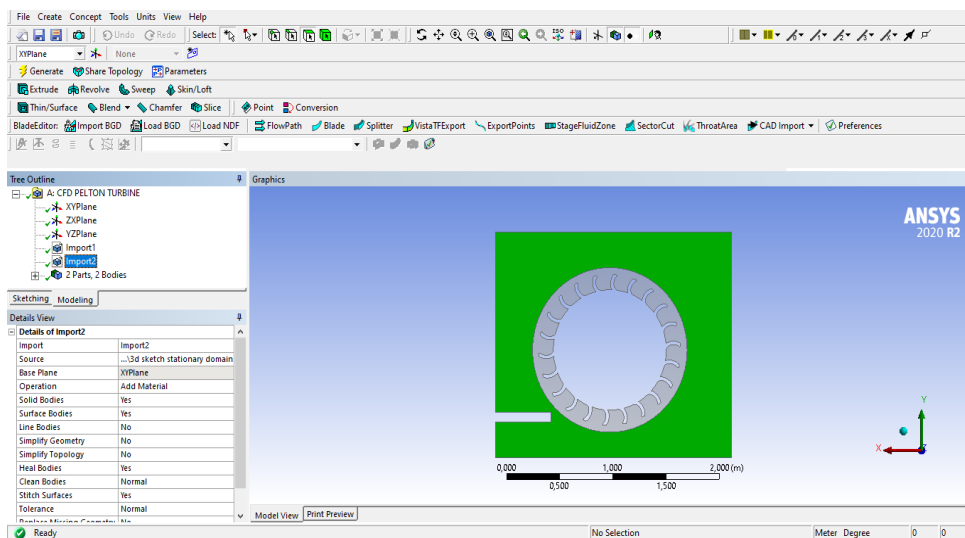
Εικόνα 6-1: Σκίσο στρεφόμενης υπολογιστικής περιοχής.



Εικόνα 6-2: Σκίσο σταθερής υπολογιστικής περιοχής.



Εικόνα 6-3: Εισαγωγή στρεφόμενης υπολογιστικής περιοχής.

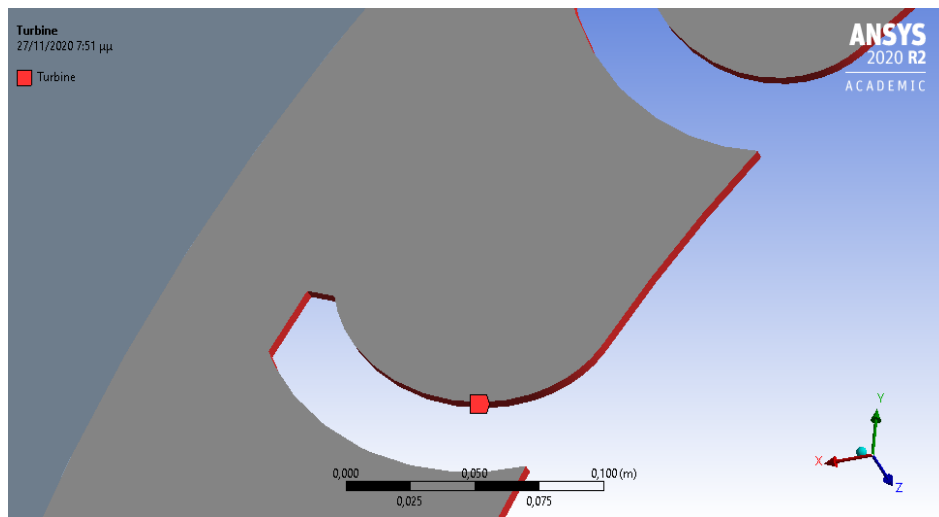


Εικόνα 6-4: Εισαγωγή σταθερής υπολογιστικής περιοχής.

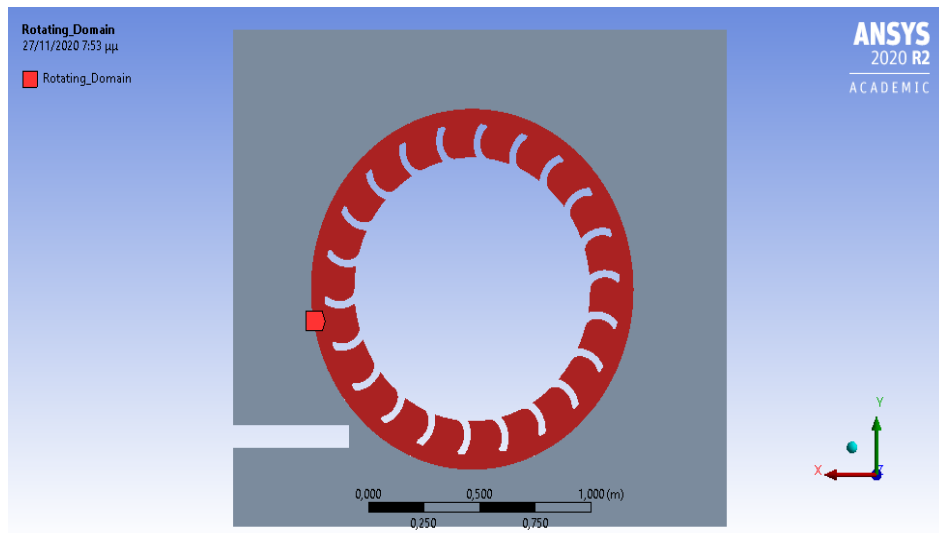
6.2 ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ

Πρωταρχική ενέργεια εντός της διαδικασίας της διακριτοποίησης είναι ο καθορισμός του υλικού των δύο υπολογιστικών περιοχών ως ρευστό (**Fluid**). Στην συνέχεια ακολουθεί η ονοματοδοσία των ορίων της γεωμετρίας του συστήματος καθώς είναι

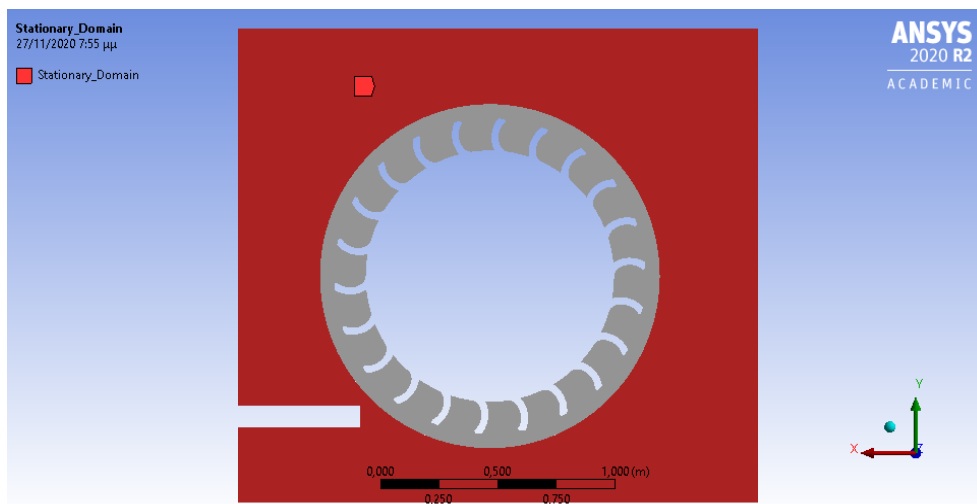
απαραίτητη για την εφαρμογή των συνοριακών συνθηκών. Στις επιφάνειες των στερεών τοιχωμάτων του υδροστροβίλου αποδόθηκε το όνομα **Turbine** (δες Εικόνα 6-5), ο χώρος που καταλαμβάνει η στρεφόμενη υπολογιστική περιοχή καθορίστηκε ως **Rotating_Domain** (δες Εικόνα 6-6), ο χώρος της σταθερής υπολογιστικής περιοχής ορίστηκε ως **Stationary_Domain** (δες Εικόνα 6-7), η είσοδος του ακροφυσίου ταυτίστηκε με την ονομασία **Jet_Inlet** (δες Εικόνα 6-8), τέλος ως **Outlet** (δες Εικόνα 6-9) ονομάστηκε η επιφάνεια από όπου αναμένεται η έξοδος του ρευστού από την σταθερή υπολογιστική περιοχή. Οι διεπαφές των δύο υπολογιστικών περιοχών εντοπίζεται και δημιουργείται αυτόματα από το πρόγραμμα εντός του σταδίου της διακριτοποίησης. Όπως και στην διακριτοποίηση του ακροφυσίου έτσι και εδώ επιλέχθηκε τρισδιάστατο πλέγμα με τετραεδρικά στοιχεία μεγέθους 7 mm με ταυτόχρονη την εφαρμογή στρωμάτων πρισματικών κελιών κοντά στην επιφάνεια των στερεών τοιχωμάτων του στροφέιου του υδροστροβίλου με χρήση του εργαλείου **Inflation**. Το πλήθος των στρωμάτων που επιλέχθηκε είναι 6 με το πάχος του πρώτου στρώματος να είναι ίσο με 1 mm. Τα στρώματα όσο απομακρύνονται από το στερεό τοίχωμα αυξάνονται σε πάχος σύμφωνα με έναν ρυθμό ανάπτυξης (**Growth Rate**) ο οποίος είναι ίσος με 1.3 (βλέπε Εικόνα 6-10).



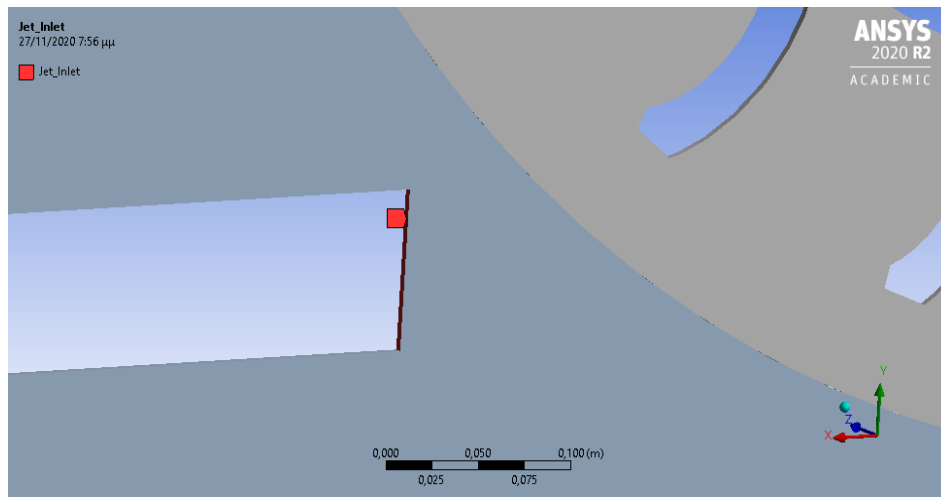
Εικόνα 6-5: Ονοματοδοσία ορίων γεωμετρίας - Τοιχώματα στροφέιου.



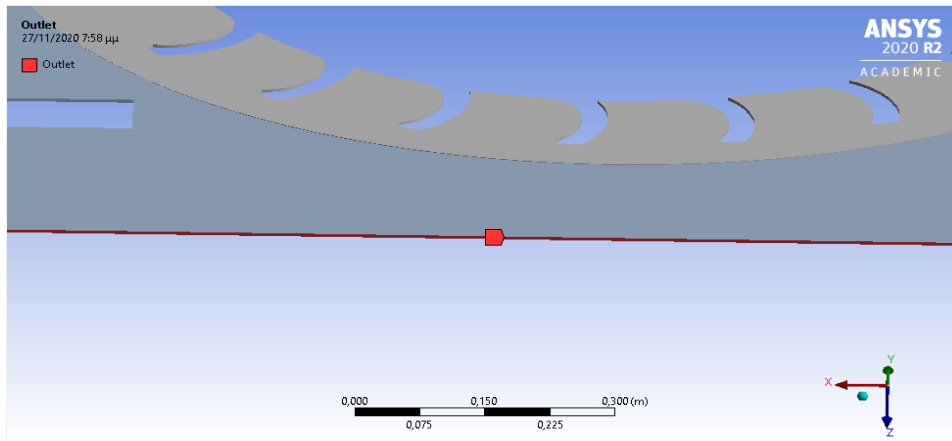
Εικόνα 6-6: Ονοματοδοσία ορίων γεωμετρίας – Στρεφόμενη περιοχή.



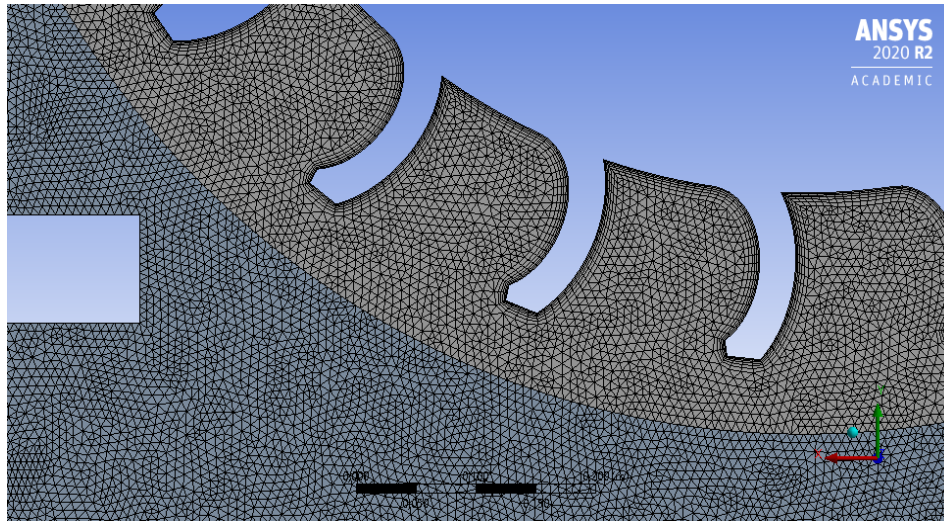
Εικόνα 6-7: Ονοματοδοσία ορίων γεωμετρίας – Σταθερή περιοχή.



Εικόνα 6-8: Ονοματοδοσία ορίων γεωμετρίας – Είσοδος.



Εικόνα 6-9: Ονοματοδοσία ορίων γεωμετρίας – Έξοδος.

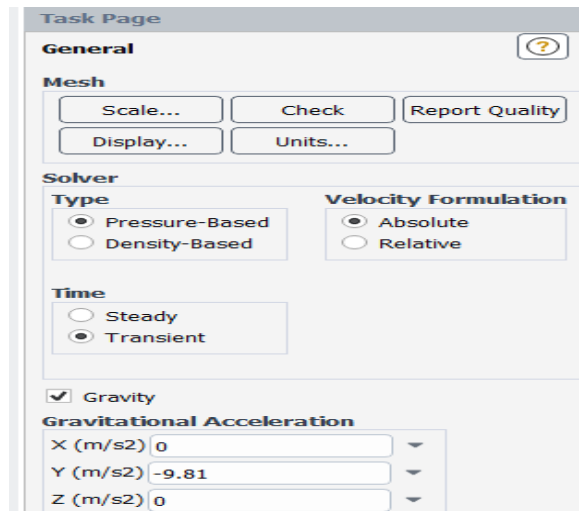


Εικόνα 6-10: Υπολογιστικό πλέγμα.

6.3 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ (SET UP)

6.3.1 Εκλογή επιλύτη

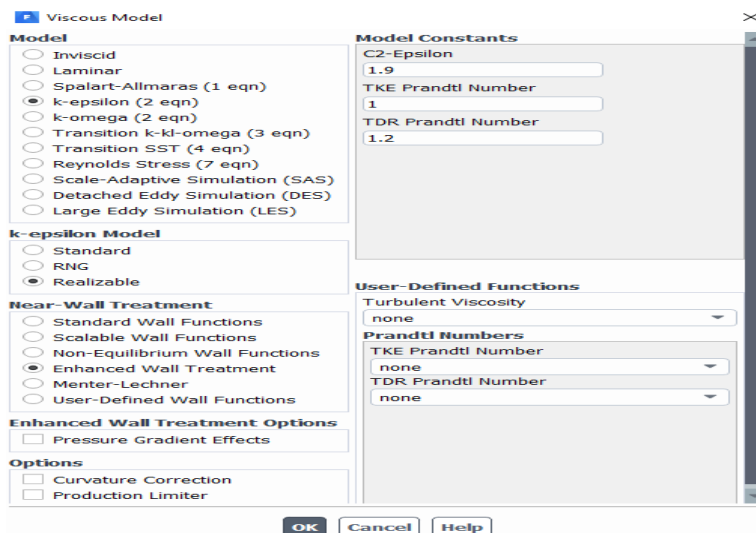
Ο καθορισμός των συνθηκών της προσομοίωσης προϋποθέτει την άριστη φυσική κατανόηση του προβλήματος η οποία επιτυγχάνεται με την ανάλυση των επιμέρους στοιχείων του. Εντός του προγράμματος παρέχεται μια πληθώρα επιλογών οι οποίες μας δίνουν την δυνατότητα να ορίσουμε επαρκώς το πρόβλημα. Ο τύπος του επιλύτη που επιλέχθηκε είναι τύπος με βάση την πίεση (**Pressure-Based Solver**) καθώς το ρευστό μας είναι ασυμπίεστο. Η ροή εντός του υδροστροβίλου είναι μεταβατική συνεπώς ενεργοποιήθηκε η επιλογή του χρόνου (Time) ως μεταβατικός (**Transient**). Επιπρόσθετα, το ρευστό εισάγεται στο σύστημα από στατικό τμήμα (**Jet_Inlet**) του, ως προς εξωτερικό παρατηρητή, και για αυτό το λόγο ενεργοποιήθηκε η επιλογή **Absolute Velocity Formulation**. Τέλος, προστέθηκε και η επιρροή της βαρύτητας στο σύστημα με την καταχώριση της τιμής της επιτάχυνσης της βαρύτητας $g = 9.81 \frac{m}{s^2}$ κατά τον άξονα των y (υδροστρόβιλος οριζοντίου άξονα) όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 6-11.



Εικόνα 6-11: Ρυθμίσεις επιλύτη.

6.3.2 Εκλογή ροϊκού μοντέλου

Στο βήμα αυτό καθορίστηκε το φυσικό μοντέλο που περιγράφει επαρκώς το σύστημα. Η ροή εντός του υδροστροβίλου χαρακτηρίζεται ως συνεκτική (**Viscous**). Το τυρβώδες μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε είναι το **k-ε Realizable Enhanced Wall Treatment** το οποίο συμπεριλαμβάνει και την επίδραση του οριακού στρώματος που εμφανίζεται κοντά στα στερεά τοιχώματα του στροφέιου (βλέπε Εικόνα 6-12).



Εικόνα 6-12: Ορισμός τυρβώδους μοντέλου.

6.3.3 Επιλογή υλικού

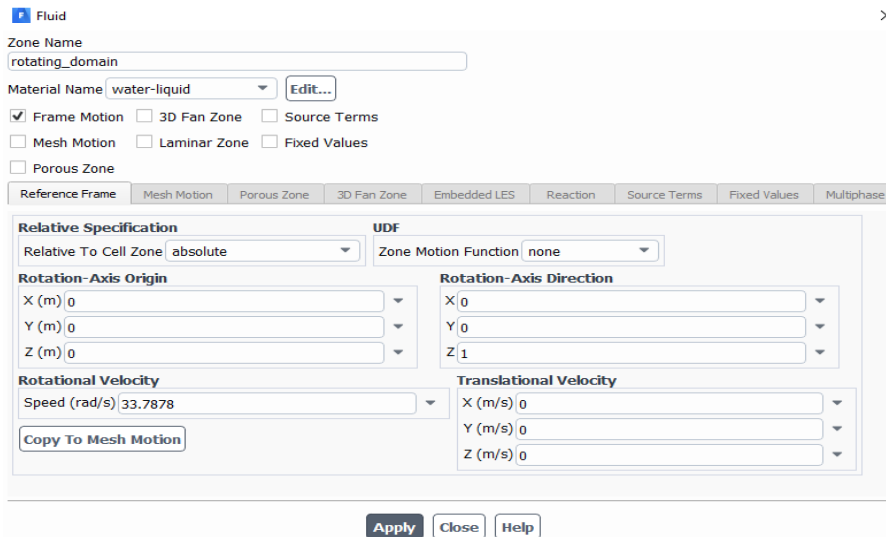
Επόμενο βήμα είναι ο καθορισμός των υλικών από τα οποία αποτελούνται τα στερεά τοιχώματα του στροφείου και το είδος του ρευστού που διαρρέει την ρευστοδυναμική μηχανή μας. Εντός του Fluent υπάρχει βάση δεδομένων με έτοιμα υλικά τα οποία μπορεί να χρησιμοποιήσει ο μελετητής αλλά μπορεί και να επέμβει και να ορίσει αυτός τις επιθυμητές φυσικές ιδιότητες του εκάστοτε υλικού όπως είναι η πυκνότητα, το δυναμικό ιξώδες, η θερμική αγωγιμότητα κλπ. Στην περίπτωση μας επιλέξαμε το νερό ως υλικό (βλέπε Εικόνα 6-13).

The screenshot shows the 'Create/Edit Materials' dialog box. The 'Name' field contains 'water-liquid' and the 'Chemical Formula' field contains 'h2o<|>'. The 'Material Type' dropdown is set to 'fluid' and the 'Mixture' dropdown is set to 'none'. The 'Order Materials by' section has 'Name' selected. The 'Properties' section shows 'Density (kg/m3)' set to 'constant' with a value of 998.2, and 'Viscosity (kg/m-s)' set to 'constant' with a value of 0.001003. The 'Fluent Database...' button is highlighted. At the bottom, there are buttons for 'Change/Create', 'Delete', 'Close', and 'Help'.

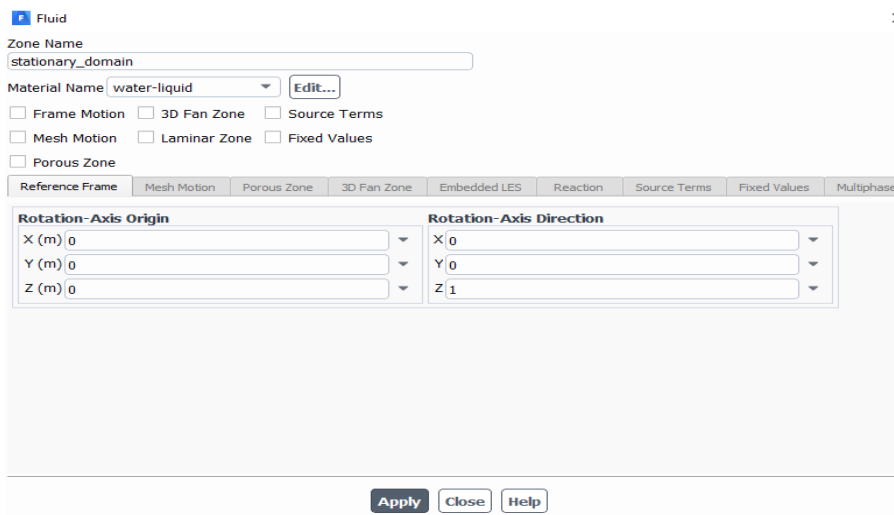
Εικόνα 6-13: Καθορισμός υλικού.

6.3.4 Καθορισμός συνοριακών συνθηκών

Στην συνέχεια, επιτακτική ανάγκη είναι ο καθορισμός των συνθηκών που επικρατούν στις επιμέρους υπολογιστικές περιοχές που συνθέτουν το πρόβλημα. Το πρόβλημα αποτελείται από δύο υπολογιστικές περιοχές, την σταθερή (**Stationary_Domain**) (δες Εικόνα 6-15) η οποία είναι προφανώς ακίνητη ως προς το απόλυτο σύστημα συντεταγμένων και την στρεφόμενη υπολογιστική περιοχή (**Rotating_Domain**) η οποία συμπεριλαμβάνει τα στερεά τοιχώματα του στροφείου. Η στρεφόμενη υπολογιστική περιοχή περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα (**Rotational Velocity**), $\omega = 33.7878 \text{ rad/s}$ ως προς το απόλυτο σύστημα συντεταγμένων (**Relative to Cell Zone, absolute**), με άξονα περιστροφής ο οποίος διέρχεται από την αρχή των αξόνων (**Rotation Axis Origin**) και αντιωρολογιακή φορά περιστροφής (δες Εικόνα 6-14).

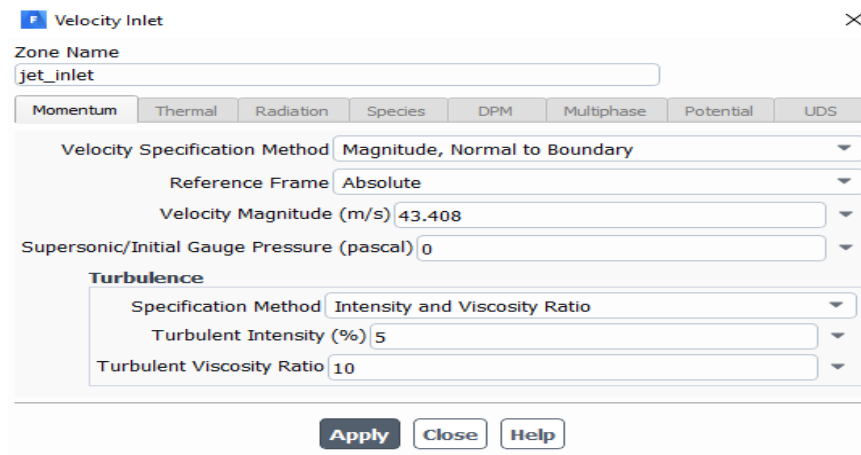


Εικόνα 6-14: Καθορισμός στρεφόμενης ζώνης.



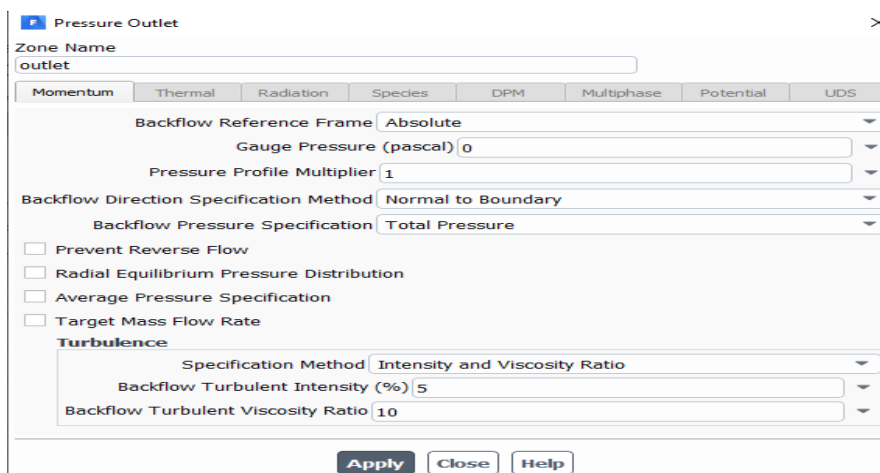
Εικόνα 6-15: Καθορισμός σταθερής ζώνης.

Στη συνέχεια, θα οριστούν οι συνοριακές συνθήκες του προβλήματος. Αυτή η διαδικασία σχετίζεται με τις συνθήκες που είτε επιβάλλονται στο σύστημα όπως είναι η συνθήκη μη ολίσθησης στα στερεά τοιχώματα είτε με τις συνθήκες που επικρατούν κατά την λειτουργία της μηχανής όπως είναι για παράδειγμα οι συνθήκες στις διατομές εισόδου και εξόδου του ρευστού. Αρχικά, τέθηκε το μέτρο της ταχύτητας (**Velocity Magnitude**) στο τμήμα εισόδου (**Jet_Inlet**) ως $u_{jet} = 43.408 \text{ m/s}$. Το διάνυσμα της ταχύτητας είναι κάθετο προς την διατομή εισόδου (**Normal to Boundary**) (βλέπε Εικόνα 6-16).



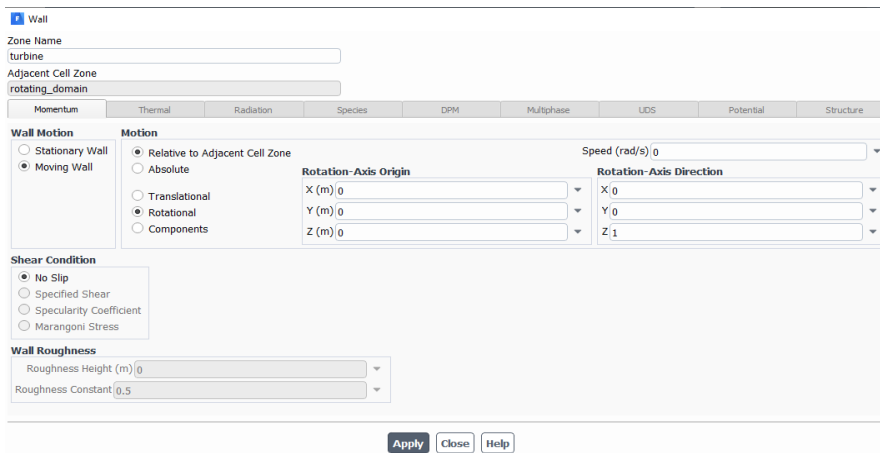
Εικόνα 6-16: Καθορισμός συνοριακής συνθήκης στην είσοδο.

Στο τμήμα εξόδου (**Outlet**) η τιμή της σχετικής πίεσης είναι ίση με **0 Pa** (ατμοσφαιρική πίεση) όπως είναι εμφανές στην Εικόνα 6-17.



Εικόνα 6-17: Ρύθμιση συνθηκών στην έξοδο.

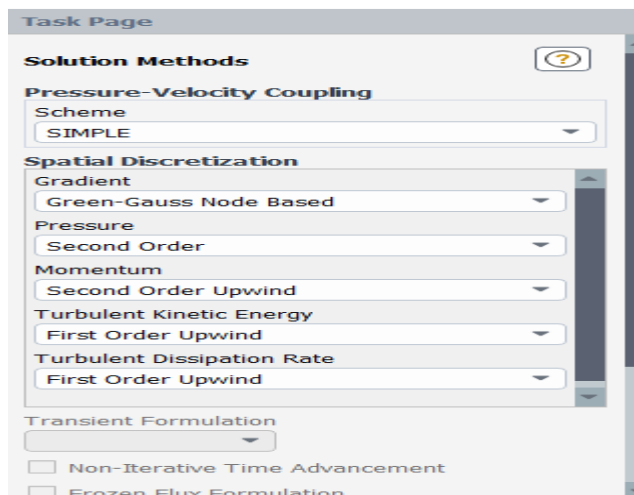
Τα στερεά τοιχώματα (**Turbine**) του στροφείου καθορίστηκαν ως κινούμενα (**Moving Wall**) και πιο συγκεκριμένα ως στρεφόμενα (**Rotational Motion**), με μηδενική γωνιακή ταχύτητα σε σχέση με την ευρύτερη πλεγματική ζώνη στην οποία ανήκουν δηλαδή την στρεφόμενη υπολογιστική περιοχή (**Rotating_Domain**). Επιπλέον, εφαρμόστηκε η **συνθήκη μη ολίσθησης (No slip)** στα τοιχώματα (Δες Εικόνα 6-18).



Εικόνα 6-18: Ρύθμιση συνθηκών στα τοιχώματα του υδροστροβίλου.

6.3.5 Καθορισμός μεθόδου επίλυσης

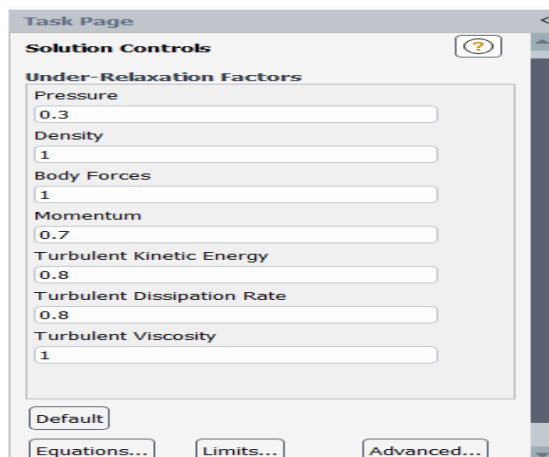
Στο ακόλουθο βήμα έγινε ο καθορισμός του σχήματος επίλυσης που θα χρησιμοποιηθεί για την επίλυση. Το σχήμα επίλυσης υποδηλώνει τον αλγόριθμο που θα «επιστρατευθεί» για την επίλυση της εξίσωσης ορμής και των εξισώσεων διορθωτικής πίεσης από την μία επανάληψη στην άλλη. Το σχήμα που εκλέχθηκε ήταν το **SIMPLE** λόγω της ευστάθειας που παρέχει. Στην συνέχεια επιλέχθηκε η μέθοδος για τον υπολογισμό των κλίσεων και των παραγώγων των μεταβλητών της ροής ως η **Green-Gauss Node Based** διότι το υπολογιστικό πλέγμα μας είναι αδόμητο και λόγω της ακρίβειας που μας παρέχει. Τέλος, η επιθυμητή ακρίβεια στις σειρές Taylor που χρησιμοποιούνται καθορίστηκε ως δευτέρας τάξης για την πίεση και την ορμή ενώ ως πρώτης τάξης για την τυρβώδη κινητική ενέργεια και τον ρυθμό σκέδασης της κινητικής ενέργειας (βλέπε Εικόνα 6-19).



Εικόνα 6-19: Ρυθμίσεις μεθόδου επίλυσης.

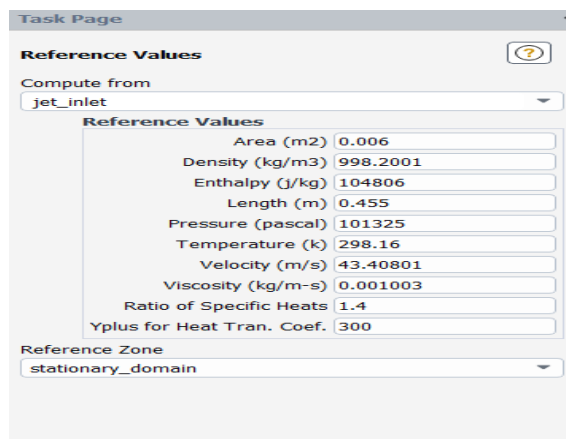
6.3.6 Καθορισμός συντελεστών υποχαλάρωσης και τιμών αναφοράς

Οι συντελεστές υποχαλάρωσης (Under-Relaxation Factors) δεν μεταβλήθηκαν από τις προεπιλεγμένες (Default) τιμές τους (δες Εικόνα 6-20).



Εικόνα 6-20: Ρύθμιση συντελεστών υποχαλάρωσης.

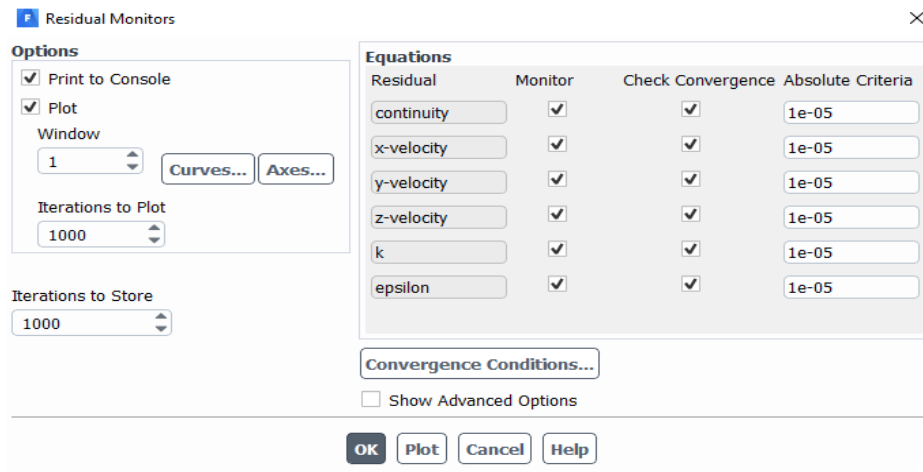
Οι τιμές αναφοράς (Reference Values) που καθορίστηκαν απεικονίζονται στην Εικόνα 6-21.



Εικόνα 6-21: Ορισμός τιμών αναφοράς.

6.3.7 Καθορισμός κριτηρίου σύγκλισης

Ο καθορισμός του κριτηρίου σύγκλισης έγινε με την πληκτρολόγηση της τιμής του ορίου ανοχής και η οποία εκλέχθηκε ως 10^{-5} (βλέπε Εικόνα 6-22).



Εικόνα 6-22: Ορισμός κριτηρίου σύγκλισης.

6.3.8 Αρχικοποίηση επιλύτη

Η αρχικοποίηση της λύσης έγινε με τον υβριδικό τρόπο (**Hybrid Initialization**) με την ένδειξη της κονσόλας κατά την ολοκλήρωση της διαδικασίας, να παρουσιάζεται στην Εικόνα 6-23.

```

iter          scalar-0
1             1.0000000e+00
2             2.976034e-04
3             7.657403e-05
4             5.132940e-05
5             1.811648e-05
6             1.348929e-05
7             5.474325e-06
8             2.835303e-06
9             1.255104e-06
10            7.356958e-07

Hybrid initialization is done.

```

Εικόνα 6-23: Ένδειξη κονσόλας κατά την ολοκλήρωση της αρχικοποίησης της λύσης.

6.4 ΕΠΙΛΥΣΗ

Για την μοντελοποίηση μη μόνιμων ροών γίνεται χρήση των κάτωθι παραμέτρων:

- **Time Step:** η διάρκεια του χρονικού βήματος της προσομοίωσης σε δευτερόλεπτα.
- **Number of Steps:** το πλήθος των χρονικών βημάτων.
- **Max iterations/time step:** ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων ανά χρονικό βήμα.

Σε όλες τις προσομοιώσεις μη μόνιμης ροής επιδιώκουμε την σύγκλιση, την ικανοποιητική ακρίβεια και τον μικρότερο δυνατό αριθμό Courant. Αρχικά, έγινε επιλογή χρονικού βήματος με τιμή 0.001 sec για αριθμό 20 χρονικών βημάτων. Στην συνέχεια, για πλήθος 40 χρονικών βημάτων ορίστηκε χρονικό βήμα 0.005 sec. Τελικά, εκλέχθηκε χρονικό βήμα με τιμή 0.01 sec, για πλήθος 40 βημάτων. Σύμφωνα με τα άνωθεν η προσομοίωση γίνεται για συνολική χρονική διάρκεια 0.62 sec που ισοδυναμεί με 3.33 περιόδους (δες Εικόνα 6-24).

```

step flow-time report-def-0 flow-time
100 6.2000e-01 1.9767e+01 6.2000e-01
Flow time = 0.6199999451637268s, time step = 100
60 more time steps
Done.

```

Εικόνα 6-24: Ένδειξη κονσόλας κατά τον τερματισμό της προσομοίωσης.

6.4.1 Αριθμός Courant

Ο αριθμός Courant είναι μια παράμετρος που βοηθά στον προσδιορισμό του χρονικού βήματος και δίνεται από τη σχέση:

$$C = \frac{u \Delta t}{\Delta x} \quad (6.1)$$

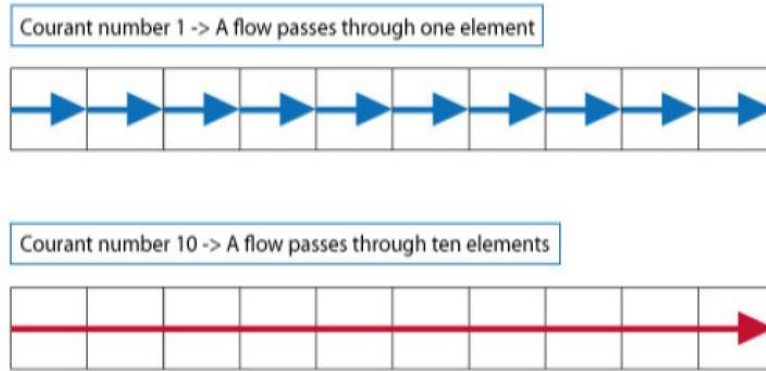
Όπου C : Αριθμός Courant

u : Ταχύτητα ροής (m/s)

Δt : Χρονικό βήμα (sec)

Δx : Πλάτος στοιχείου (m)

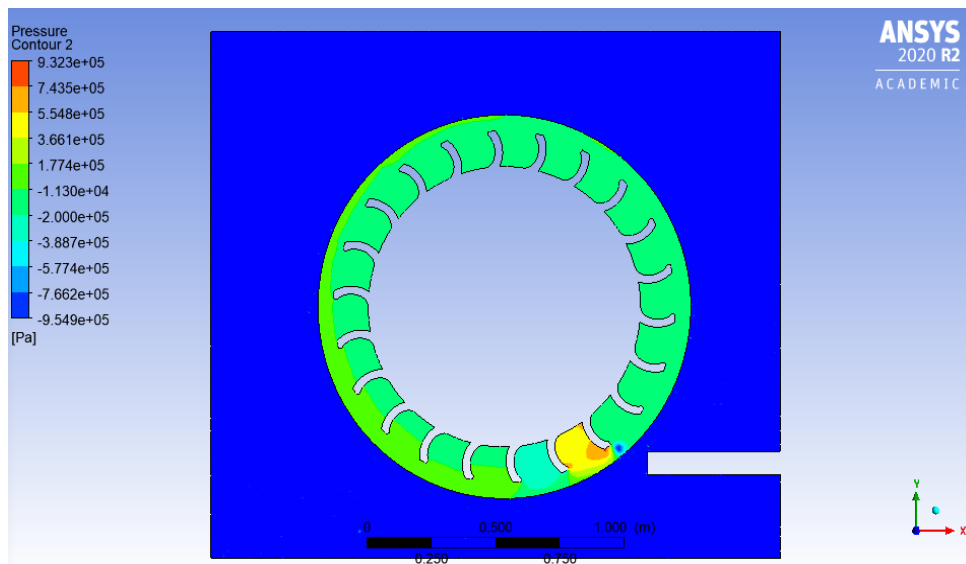
Ο αριθμός Courant έχει σχέση με το πλήθος των κελιών από τα οποία διέρχεται η ροή σε ένα χρονικό βήμα (Time Step), δηλαδή αν για παράδειγμα ο αριθμός Courant είναι 1, τότε η ροή από ένα συγκεκριμένο στοιχείο (element) μετακινείται στο γειτονικό του στοιχείο σε ένα χρονικό βήμα. Κατά αντιστοιχία, αν ο αριθμός Courant είναι ίσος με 10 τότε η ροή θα διέρχεται από 10 στοιχεία σε ένα χρονικό βήμα (βλέπε Εικόνα 6-25). Σε προσομοιώσεις που μελετούν την μη μόνιμη ροή εντός ρευστοδυναμικών μηχανών, ο αριθμός Courant θα πρέπει να διατηρείται σε τιμές μικρότερες του 80.



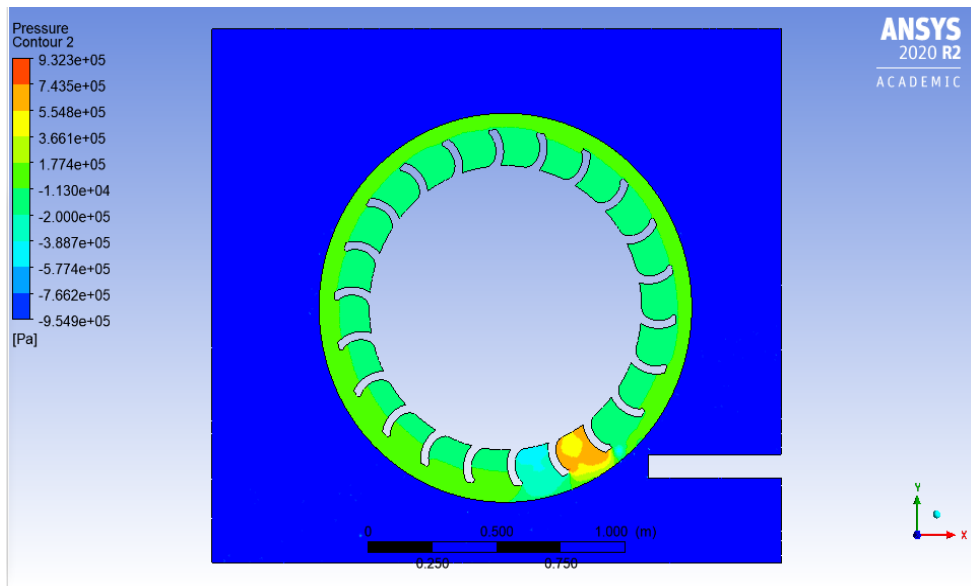
Εικόνα 6-25: Σχέση μεταξύ του αριθμού Courant και της διάρκειας του χρονικού βήματος προσομοίωσης. [3]

6.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ-ΣΤΡΟΦΕΙΟΥ ΣΤΗΝ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

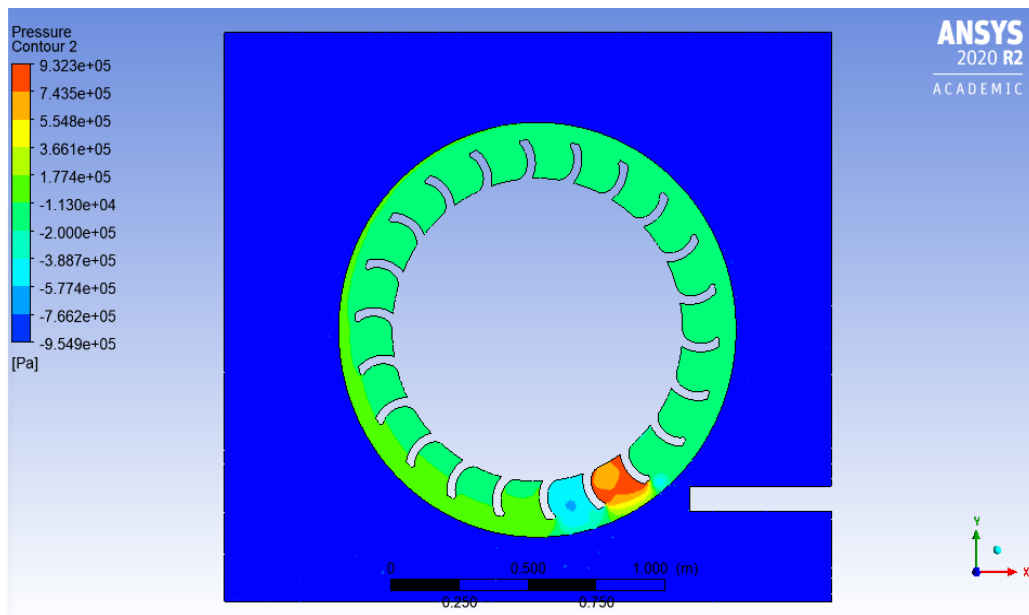
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στην μεταβατική κατάσταση ήταν τα διαγράμματα κατανομής της πίεσης στο επίπεδο xy για $z = +2 \text{ mm}$ σε διαφορετικές χρονικές στιγμές (βλέπε Εικόνες 6-26, 6-27 και 6-28).



Εικόνα 6-26: Κατανομή πίεσης την χρονική στιγμή $t = 0.02 \text{ s}$.



Εικόνα 6-27: Κατανομή πίεσης την χρονική στιγμή $t = 0.22$ s.



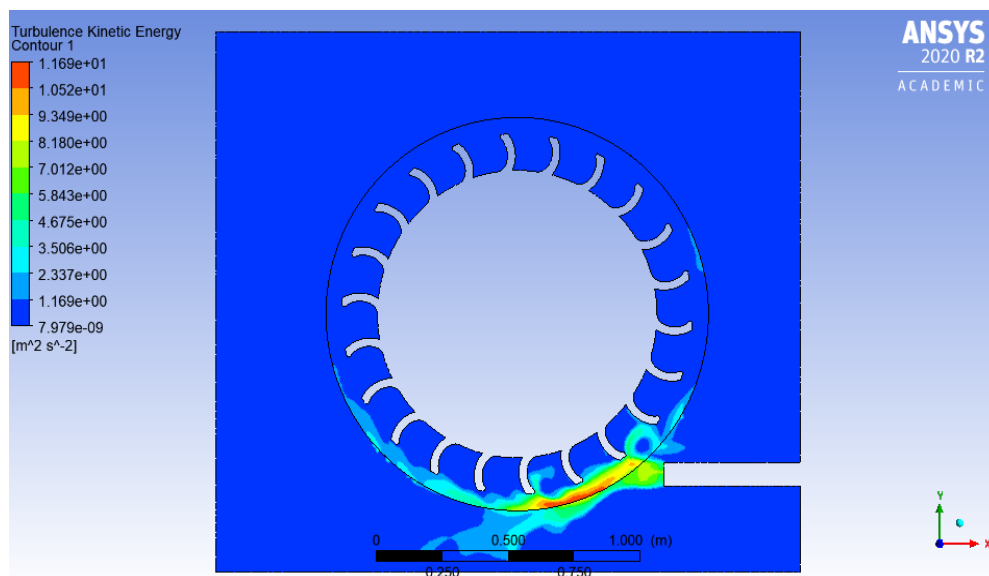
Εικόνα 6-28: Κατανομή πίεσης την χρονική στιγμή $t = 0.62$ s.

6.6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ-ΣΤΡΟΦΕΙΟΥ ΣΤΗ ΜΟΝΙΜΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

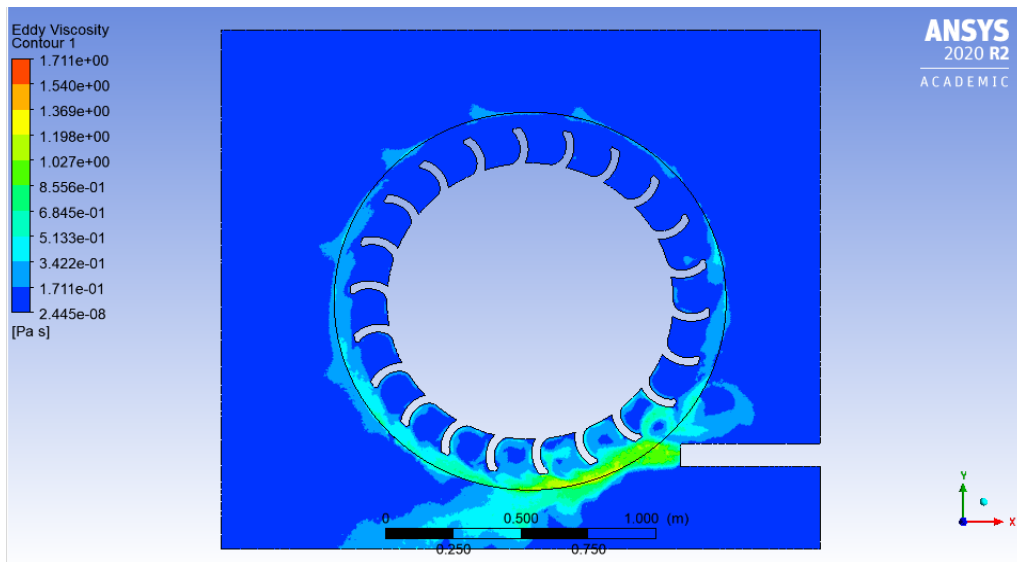
Η προσομοίωση του συστήματος στην μόνιμη κατάσταση πραγματοποιήθηκε για τρία διαφορετικά μοντέλα τύρβης, το μοντέλο k-ε Realizable, το μοντέλο k-ε RNG και το μοντέλο k-ω SST. Τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από αυτές τις προσομοιώσεις ήταν διαγράμματα κατανομής για την τυρβώδη κινητική ενέργεια, το τυρβώδες ιξώδες, την πίεση και την ταχύτητα (μόνο για το μοντέλο k-ε Realizable) στο συμμετρικό επίπεδο xy της γεωμετρίας με $z = 0$.

6.6.1 Μοντέλο k-ε Realizable

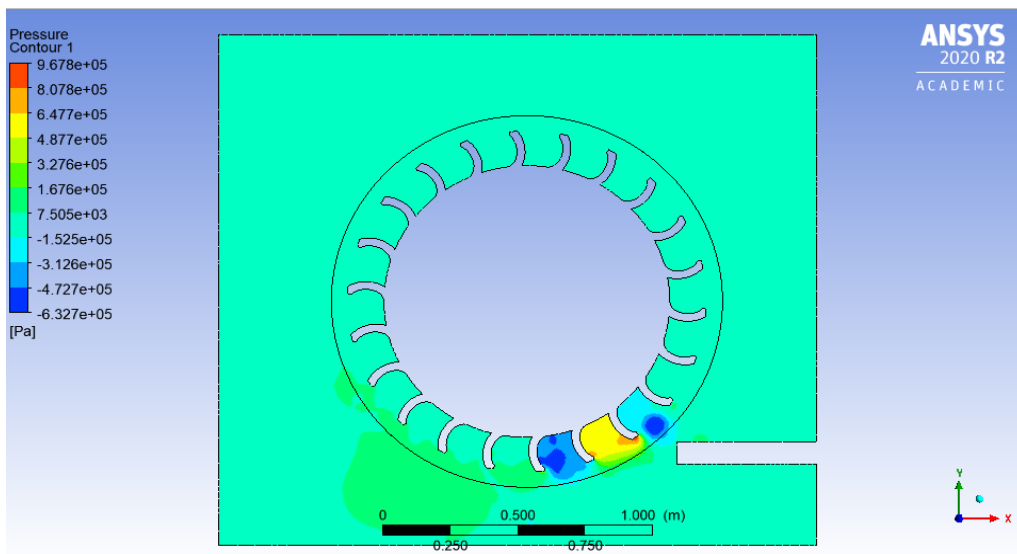
Στην Εικόνα 6-29 απεικονίζεται το διάγραμμα κατανομής της τυρβώδους κινητικής ενέργειας. Το διάγραμμα κατανομής του τυρβώδους ιξώδους είναι εμφανές στην Εικόνα 6-30. Τέλος, η κατανομή της πίεσης στο σύστημα οπτικοποιείται στο διάγραμμα της Εικόνας 6-31, ενώ η κατανομή της ταχύτητας στο αντίστοιχο διάγραμμα της Εικόνας 6-32.



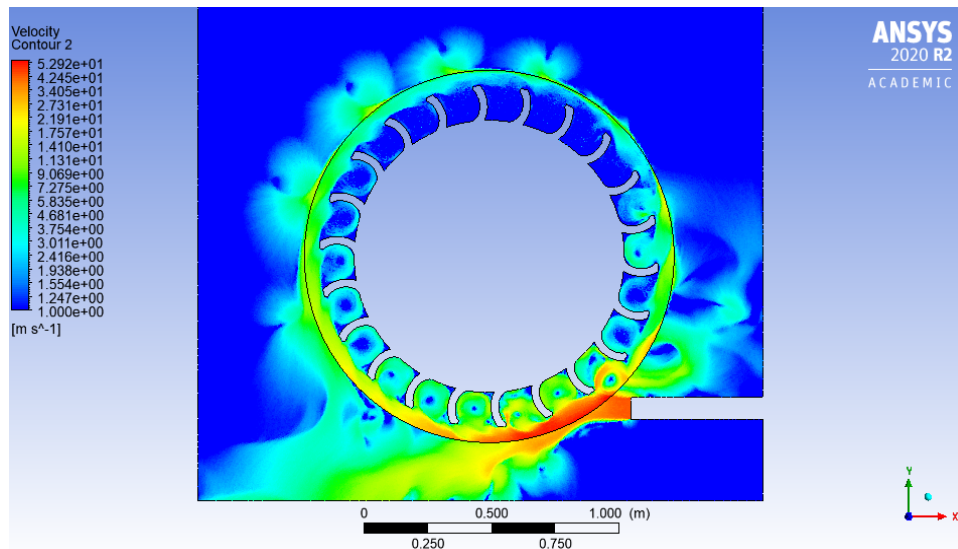
Εικόνα 6-29: Κατανομή τυρβώδους κινητικής ενέργειας για το μοντέλο k-ε Realizable.



Εικόνα 6-30: Κατανομή τυρβώδους ιξώδους για το μοντέλο k-ε Realizable.



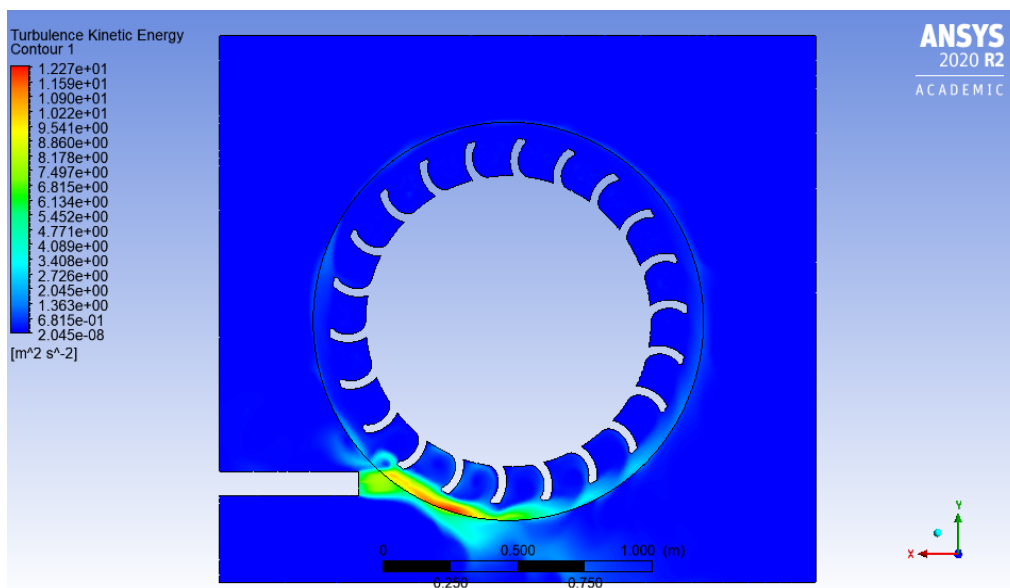
Εικόνα 6-31: Κατανομή πίεσης για το μοντέλο k-ε Realizable.



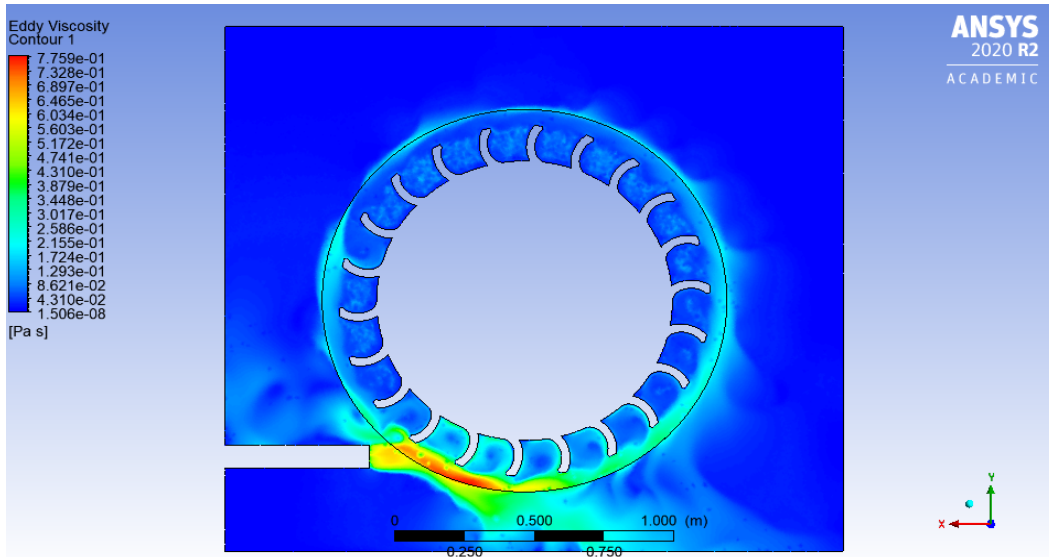
Εικόνα 6-32: Κατανομή της ταχύτητας για το μοντέλο k-ε Realizable.

6.6.2 Μοντέλο k-ε RNG

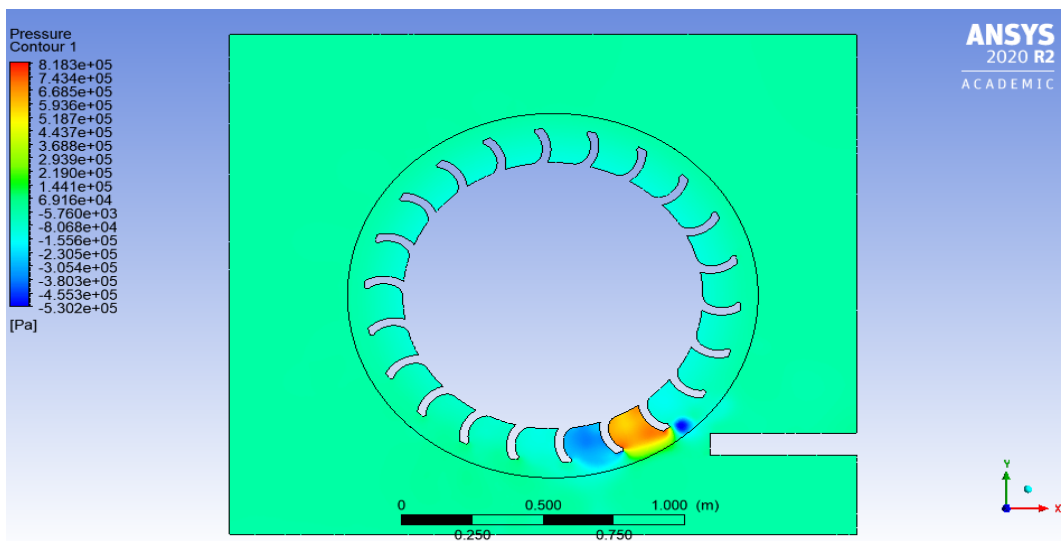
Στην Εικόνα 6-33 απεικονίζεται το διάγραμμα κατανομής της τυρβώδους κινητικής ενέργειας. Το διάγραμμα κατανομής του τυρβώδους ιξώδους είναι εμφανές στην Εικόνα 6-34. Τέλος, η κατανομή της πίεσης στο σύστημα οπτικοποιείται στο διάγραμμα της Εικόνας 6-35.



Εικόνα 6-33: Κατανομή τυρβώδους κινητικής ενέργειας για το μοντέλο k-ε RNG



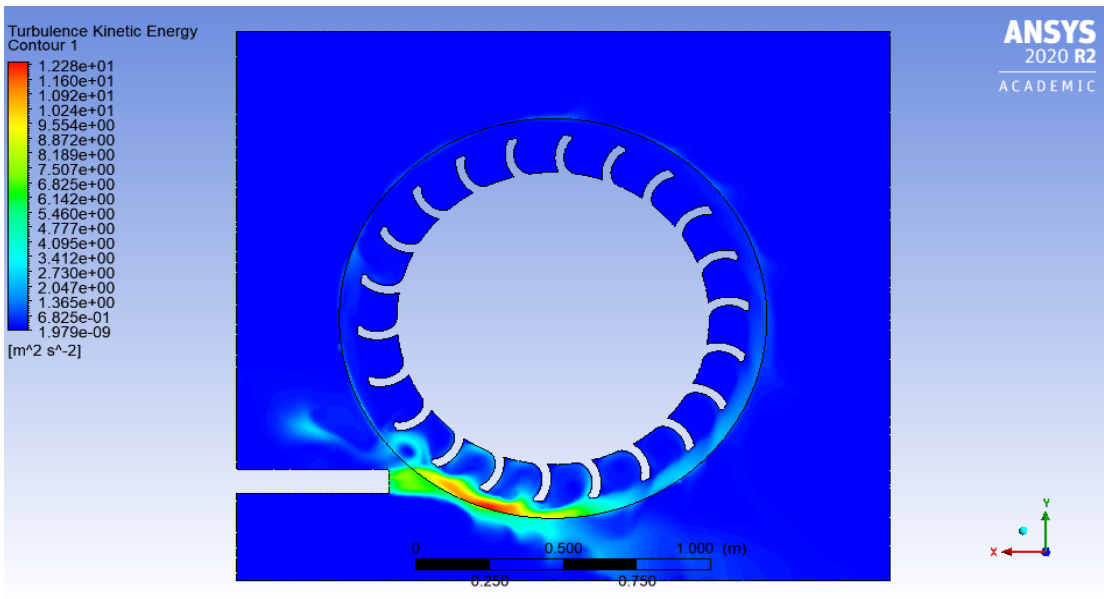
Εικόνα 6-34: Κατανομή τυρβώδους ιξώδους για το μοντέλο k-ε RNG.



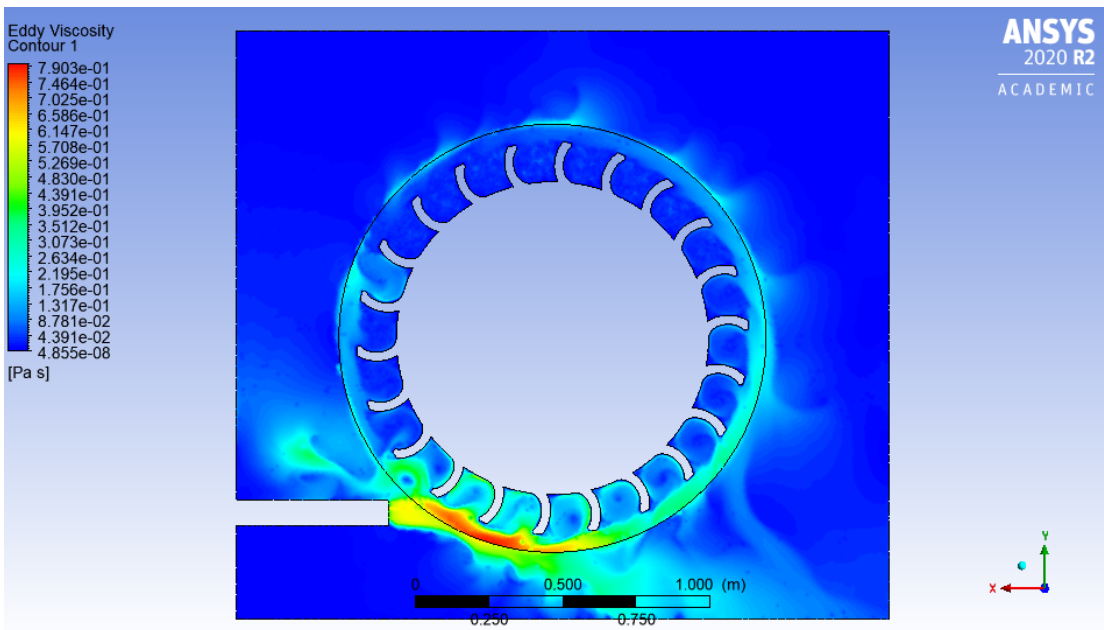
Εικόνα 6-35: Κατανομή πίεσης για το μοντέλο k-ε RNG.

6.6.3 Μοντέλο k-ω SST

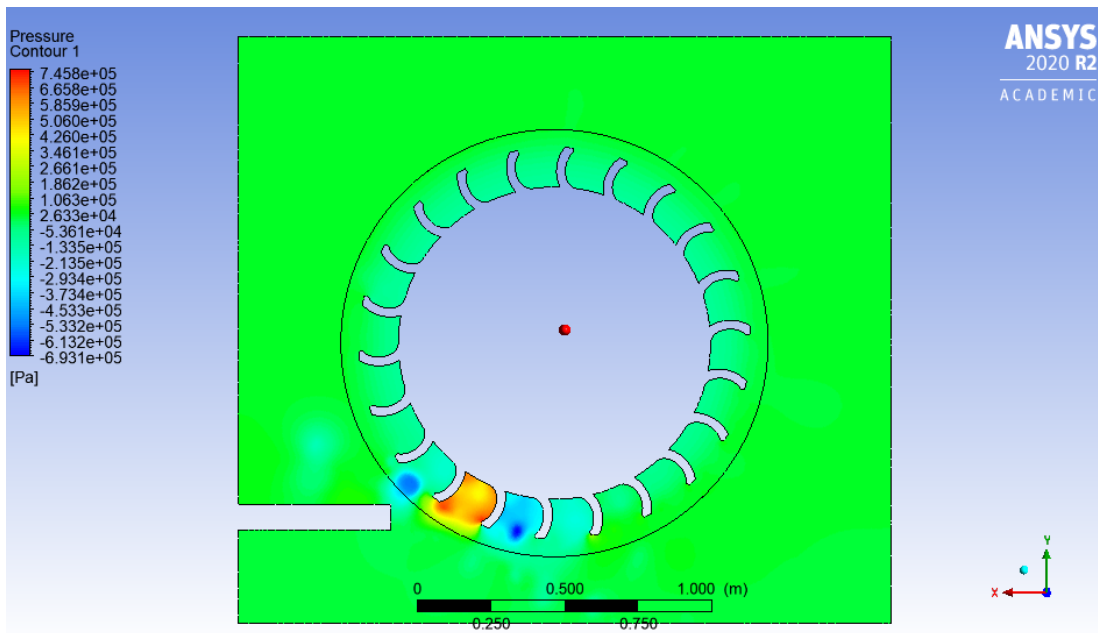
Στην Εικόνα 6-36 απεικονίζεται το διάγραμμα κατανομής της τυρβώδους κινητικής ενέργειας. Το διάγραμμα κατανομής του τυρβώδους ιξώδους είναι εμφανές στην Εικόνα 6-37. Τέλος, η κατανομή της πίεσης στο σύστημα οπτικοποιείται στο διάγραμμα της Εικόνας 6-38.



Εικόνα 6-36: Κατανομή τυρβώδους κινητικής ενέργειας για το μοντέλο k-ω SST.



Εικόνα 6-37: Κατανομή του τυρβώδους ιξώδους για το μοντέλο k-ω SST.



Εικόνα 6-38: Κατανομή πίεσης για το μοντέλο k- ω SST.

6.7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΗΣ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ

Με την προσομοίωση της ροής εντός του ακροφυσίου λάβαμε τα διαγράμματα κατανομής της πίεσης, του τυρβώδους ιξώδους και της ταχύτητας στο συμμετρικό επίπεδο. Η τιμή της ταχύτητας εξόδου της ελεύθερης δέσμης που προέκυψε από την προσομοίωση εμφανίζει απόκλιση της τάξης του 4.31% από την αντίστοιχη θεωρητική τιμή. Η προσομοίωση στη μεταβατική κατάσταση ροής του νερού εντός του συστήματος ακροφυσίου-στροφείου είχε ως αποτέλεσμα την εξαγωγή των διαγραμμάτων κατανομής της πίεσης για διαφορετικές χρονικές στιγμές στο επίπεδο $z = +2 \text{ mm}$. Για την αντίστοιχη προσομοίωση του συστήματος στη μόνιμη κατάσταση ελήφθησαν τα διαγράμματα κατανομής του τυρβώδους ιξώδους, την τυρβώδη κινητική ενέργεια και την πίεση στο συμμετρικό επίπεδο $z = 0$. Ο Πίνακας 6-1 περιέχει τις μέγιστες τιμές των μεταβλητών της ροής που λάβαμε ως αποτέλεσμα κατά τις προσομοιώσεις στη μόνιμη κατάσταση με την χρήση τριών διαφορετικών μοντέλων τύρβης.

Πίνακας 6-1: Μέγιστες τιμές των μεταβλητών της ροής για τα τρία μοντέλα τύρβης.

| A/α | ΤΥΡΒΩΔΕΣ ΜΟΝΤΕΛΟ | ΤΥΡΒΩΔΗΣ ΚΙΝΗΤΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ [m ² ·s ⁻²] | ΤΥΡΒΩΔΕΣ ΪΞΩΔΕΣ [Pa·s] | ΠΙΕΣΗ [Pa] |
|-----|------------------------|---|------------------------|----------------------|
| 1 | Μοντέλο k-ε Realizable | 11.69 | 1.71 | 9.68·10 ⁵ |
| 2 | Μοντέλο k-ε RNG | 12.27 | 0.7 | 8.18·10 ⁵ |
| 3 | Μοντέλο k-ω SST | 12.28 | 0.79 | 7.46·10 ⁵ |

Η παρούσα πτυχιακή σαφώς και θα μπορούσε να βελτιωθεί με διάφορες παρεμβάσεις. Μια τέτοια παρέμβαση θα ήταν μια προσομοίωση με δοκιμή διαφορετικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών των σκαφιδίων όπως είναι η ακμή του διαχωριστή της ελεύθερης δέσμης, το βάθος του σκαφιδίου, το μήκος, το πλάτος, το πάχος κλπ. Επιπλέον θα ήταν χρήσιμη η μελέτη διαφορετικών ειδών ακροφυσίων σε συνεργασία με ακίδες οι οποίες θα έχουν παραλλαγμένη γεωμετρική μορφή. Σε ορισμένες επιστημονικές μελέτες έχει τεθεί το ζήτημα της βέλτιστης απόστασης μεταξύ του ακροφυσίου και του στροφείου. Συνεπώς μια προσομοίωση σε αυτή την κατεύθυνση θα ήταν απολύτως θεμιτή και χρήσιμη.

Η ελάττωση του μεγέθους του υδροστροβίλου θα επιφέρει μείωση του κόστους λόγω του ότι θα μειωθεί η απαιτούμενη πρώτη ύλη για την κατασκευή του στροφείου. Τέλος, η ανάλυση των μηχανικών αντοχών, παραμορφώσεων και ο προσδιορισμός των φορτίσεων που δέχονται τα σκαφίδια είναι επιτακτική ανάγκη για την επιλογή του κατάλληλου υλικού κατασκευής του στροφείου και την ενδεχόμενη ελάττωση του υλικού από το οποίο αποτελείται το στροφείο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]Αλέξανδρος Τσεσμετζής, "Μελέτη και ανάλυση των φορτίων και των παραμορφώσεων σε μπάρα ρυμούλκησης ως φορέα, για την οπισθέλκυση βαρέου τύπου συσκευών", Μεταπτυχιακή Διατριβή, Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, Ελλάς, 2017.
- [2]Απόστολος Πολυζάκης, Ρευστοδυναμικές μηχανές-Στροβιλομηχανές - Υδροδυναμικές μηχανές (Θεωρία και λυμένες ασκήσεις), 2^η Έκδοση Εκδόσεις Power-Heat-Cool, 2019.
- [3]Βούλτσου Διονυσία-Μαρία, Υπολογιστική προσομοίωση αποκόλλησης σε απότομη διεύρυνση, Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πάτρα 2019.
- [4]Δεδούσης, Β., Γιαννατσής, Ι., Κανελλίδης, Β. 2015. Συστήματα CAD. [ηλεκτρ. βιβλ.] Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών. Διαθέσιμο στο: <http://hdl.handle.net/11419/4500>
- [5]Δημήτρης Γ. Παπανίκας, Ρευστοδυναμικές Μηχανές, 3^η Έκδοση, Εκδόσεις Media Guru, Αθήνα, 2012.
- [6]Ιωάννης Α. Νικολέτος, Αποτύπωση και Αριθμητική προσομοίωση μοντέλου Αντλίας-Υδροστροβίλου με χρήση Υπολογιστικών Εργαλείων και Επανασχεδίαση για Βελτίωση του Υδροδυναμικού του Σχεδιασμού, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τομέας Ρευστών, Αθήνα, Οκτώβριος 2016.
- [7]Καμπουρίδης Γεώργιος, Διαλέξεις θεωρίας ηλεκτρονικής σχεδίασης με υπολογιστή CAD, Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πάτρα.
- [8]Κωνσταντίνος Π. Μαυρίδης, Υπολογιστική Μεταφορά Θερμότητας και Ρευστομηχανική, Εκδόσεις Τ.Ε.Ι ΠΑΤΡΑΣ.
- [9]Παναγιώτης Σ. Δημολίκας, Μελέτη υδροηλεκτρικής εγκατάστασης μικρής ισχύος με ΥΣ τύπου Pelton, Μεταπτυχιακή εργασία, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής Τμήμα Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών μηχανικών, Αθήνα Δεκέμβριος, 2018.
- [10] Παναγιωτόπουλος Αλέξανδρος, Αριθμητική μεθοδολογία προσομοίωση της ροής και εναλλαγής ενέργειας σε υδροστροβίλους δράσης με πειραματική διερεύνηση και πιστοποίηση, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τομέας Ρευστών, 2016.
- [11] Παναγιωτόπουλος Βασίλειος, Σταυρόπουλος Ιωάννης, Υπολογιστική ρευστομηχανική ανάλυση ροής Φυσικού Αερίου σε αγωγούς υψηλής πίεσης,

Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Δυτικής Ελλάδας, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε, Πάτρα, 2017.

[12] Παπαντώνης, Δ. Ε., Υδροδυναμικές Μηχανές, Αντλίες-Υδροστροβίλοι-Υδροδυναμικές Μεταδόσεις, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, 2009.

[13] Σαμαρτζής Παναγιώτης, Αριθμητική ανάλυση της ροής και βελτιστοποίηση της γεωμετρίας ακροφυσίου υδροστροβίλου δράσης, Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τομέας Ρευστών εργαστήριο υδροδυναμικών μηχανών, Αθήνα 2014.

[14] Σκούρας Ευγένιος, Βούρος Ανδρέας, Διαλέξεις εργαστηρίου Μηχανικής των Ρευστών ΙΙ, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Δυτικής Ελλάδας, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε, Πάτρα.

[15] Σκούρας Ευγένιος, Διαλέξεις εργαστηρίου Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής, Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πάτρα.

[16] Σούλης, Ι., Υπολογιστικές τεχνικές υδραυλικής μηχανικής. [ηλεκτρ. βιβλ.] Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών, Αθήνα, 2015. Διαθέσιμο στο: <http://hdl.handle.net/11419/3997>

[17] Σταμάτης Α. Αυλωνίτης, Δημήτρης Α. Αυλωνίτης. Μηχανική των ρευστών, 4^η Έκδοση, Εκδόσεις Ίων, Αθήνα 2006.

[18] Στεργίου Ι., Στεργίου Κ., Στοιχεία Μηχανών Ι, Εκδόσεις Σύγχρονη Εκδοτική, Αθήνα, 2003.

[19] Τσιρίκογλου, Θ., Βλαχογιάννης, Μ., Ρευστοδυναμικές Μηχανές. [ηλεκτρ. βιβλ.] Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών, 2015.

[20] Φλυτζάνης, Ν., Εισαγωγή στη μηχανική των ρευστών. [ηλεκτρ. βιβλ.], Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών, Αθήνα, 2015.

[21] Cengel Yunus, C. J., Fluid Mechanics, Fundamentals and Applications, Mc Graw Hill, Higher Education, New York, 2006.

[22] Frank M. White, Fluid Mechanics, 7th Edition, Mc Graw Hill, 2011.

[23] R. K. Bansal, A Textbook of Fluid Mechanics and Hydraulic Machines, Revised 9th Edition, Laxmi Publications (P) Ltd, New Delhi, 2010.

[24] S.L Dixon. Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery, 4th Edition, Butterworth and Heinemann, Oxford, 1998.

[25] Young Hugh D., Freedman Roger A., University Physics with Modern Physics, 14th Edition, Pearson Publications, 2016.

[26] Zoeb Husain, Zulkifly Abdullah, Zainal Alimuddin, Basic Fluid Mechanics and Hydraulic Machines, BS Publications, 2008.

Διαδικτυακές πηγές

- [I1] https://en.wikipedia.org/wiki/Conservation_law
- [I2] https://en.wikipedia.org/wiki/Navier%E2%80%93Stokes_equations
- [I3] https://en.wikipedia.org/wiki/K-epsilon_turbulence_model
- [I4] <https://turbmodels.larc.nasa.gov/wilcox.html>
- [I5] <https://www.philadelphia.edu.jo/academics/adaraje/uploads/HY%20CHAPT%20ER2%202017-2018.pdf>
- [I6] https://en.wikipedia.org/wiki/Types_of_mesh
- [I7] <http://eclass.tepir.gr/openeclass/modules/document/file.php/MECH117/%CE%95%CE%B9%CF%83%CE%B1%CE%B3%CF%89%CE%B3%CE%AE.pdf>
- [I8] <https://philon.cheng.auth.gr/site/research/cfd>
- [I9] <http://www.examhill.com/boundary-layer-basic/>
- [I10] <https://sciencestruck.com/what-is-reynolds-number-what-are-its-applications>
- [I11] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kartell_Kraftwerk,_Pelton_Turbine.jpg
- [I12] https://www.researchgate.net/figure/Schematic-view-of-the-single-jet-Pelton-turbine_fig1_259811328
- [I13] <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A0%CE%AF%CE%B5%CF%83%CE%B7>
- [I14] <http://fmc-nitk.vlabs.ac.in/exp6/>
- [I15] https://www.thermexcel.com/english/tables/eau_atm.htm
- [I16] <https://www.simscale.com/docs/content/simulation/model/turbulenceModel/kOmegaSST.html>
- [I17] <https://www.cfd-online.com/>
- [I18] <http://energyprofessionalsymposium.com/?p=34484>
- [I19] <https://www.comsol.com/blogs/which-turbulence-model-should-choose-cfd-application/>
- [I20] <http://www.bakker.org/dartmouth06/engs150/07-mesh.pdf>

- [I21] <http://energyprofessionalsymposium.com/?p=34484>
- [I22] https://en.wikipedia.org/wiki/Computer-aided_design
- [I23] <https://eclass.upatras.gr/modules/units/?course=MECH1179&id=1930>
- [I24] https://en.wikipedia.org/wiki/Computational_fluid_dynamics#Discretization_methods
- [I25] https://en.wikipedia.org/wiki/Types_of_mesh#/media/File:Aspect_ratio_grid.PNG
- [I26] <http://ikaros.teipir.gr/fluidmech/%CE%91%CE%A3%CE%9A%CE%97%CE%A3%CE%95%CE%99%CE%A3%20%CE%95%CE%A6%CE%91%CE%A1%CE%9C%CE%9F%CE%A3%CE%9C%CE%95%CE%9D%CE%97%CE%A3%20%CE%A1%CE%95%CE%A5%CE%A3%CE%A4%CE%9F%CE%9C%CE%97%CE%A7%CE%91%CE%9D%CE%99%CE%9A%CE%97%CE%A3/%CE%B5%CF%86%CE%B1%CF%81%CE%BC%CE%BF%CF%83%CE%BC%CE%AD%CE%BD%CE%B7%201%CE%B7&2%CE%B7.pdf>
- [I27] <https://pt.slideshare.net/RahulBhatiya1/pelton-turbine-87387844>
- [I28] <https://tractionmech8.wordpress.com/2014/04/17/pelton-wheel-turbine/>
- [I29] <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/node161.htm>
- [I30] https://www.researchgate.net/profile/Matthew_Piggott2/publication/259159803/figure/fig3/AS:269519922921484@1441269965618/Example-of-a-structured-triangular-mesh-and-an-unstructured-triangular-mesh-in-a-unit-box.png
- [I31] https://www.youtube.com/watch?v=vrhHs6QbyTU&ab_channel=Haveaniceti
- [I32] https://www.youtube.com/watch?v=th85lqhsjqQ&t=426s&ab_channel=VirajGandhi
- [I33] https://www.youtube.com/watch?v=r1fOnWzcJs&ab_channel=ContourExamples
- [I34] https://www.youtube.com/watch?v=8NIOC8NI91E&t=540s&ab_channel=XSCIENECY
- [I35] https://www.youtube.com/watch?v=1FazGZwiN_w&list=PLEpES_WTfjdzrqcIv_QS1mrSF3VcUqyBO&ab_channel=abdouegy
- [I36] https://www.youtube.com/watch?v=WBWY46ynRk0&t=1450s&ab_channel=FluidMechanics101
- [I37] https://www.youtube.com/watch?v=0tOfaQ9pOGU&ab_channel=CADCAMCAETUTORIALS

- [I38] https://www.youtube.com/watch?v=VuStshJ5bSE&ab_channel=ArvindKumawat
- [I39] https://www.youtube.com/watch?v=fOB91zQ7HJU&ab_channel=FluidMechanics101
- [I40] https://eclass.duth.gr/modules/document/file.php/TMB170/5_YDROSTROBLOI-MIKRA-YDROHLEKTRIKA/1_YDROSTROBLOI.pdf
- [I41] <https://www.hydropower.org/discover/history-of-hydropower>
- [I42] [Pelton History \(oldpelton.net\)](http://oldpelton.net)
- [I43] https://en.wikipedia.org/wiki/Pelton_wheel
- [I44] <http://www.ijsrp.org/research-paper-0719/ijsrp-p9131.pdf>
- [I45] http://ijasret.com/VolumeArticles/FullTextPDF/609_3.DESIGN_AND_STRUCTURAL_ANALYSIS_OF_PELTON_WHEEL_TURBINE_BLADE.pdf
- [I46] <https://1library.net/document/q5wj9rrq-design-modeling-analysis-of-pelton-wheel-turbine-blade.html>
- [I47] http://www.arnjournals.org/jeas/research_papers/rp_2016/jeas_1016_5102.pdf
- [I48] https://eprints.lancs.ac.uk/id/eprint/74510/1/Manuscript_with_Figures.pdf
- [I49] <https://www.automation.com/en-us/articles/2018/demystifying-fluid-turbulence-velocity-and-flow-me>
- [I50] https://www.researchgate.net/figure/Water-density-vs-temperature_fig2_266352366/download
- [I51] https://ricklyhydrosystems.com/micro-mini-hydro_systems/turbines/pelton-wheel-turbine/
- [I52] <https://www.green-mechanic.com/2014/07/kaplan-turbine.html>
- [I53] <https://www.indiamart.com/proddetail/pelton-wheel-bucket-6173452997.html>
- [I54] <https://www.rgpvonline.com/answer/basic-mechanical-engineering/15.html>
- [I55] <https://www.dyballassociates.co.uk/a-brief-history-of-energy-hydro-power-dyball-associates>