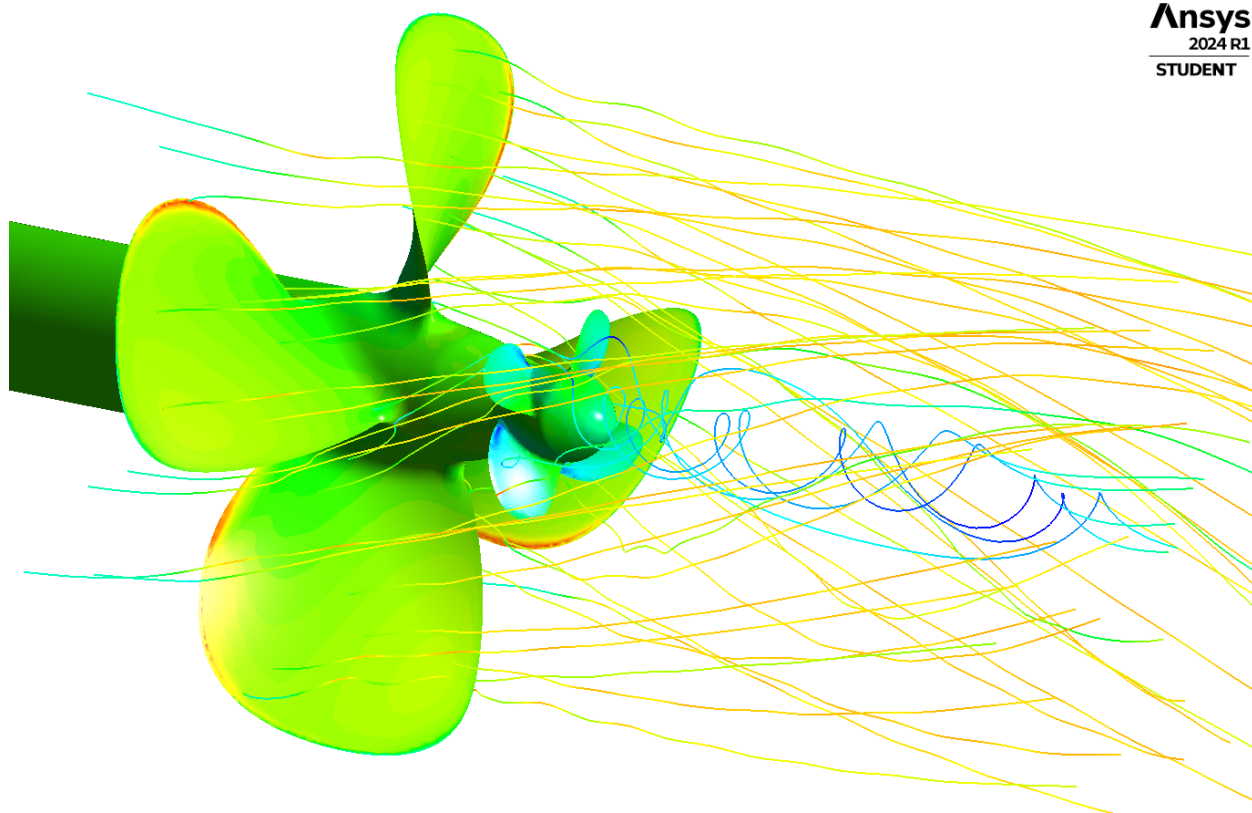




ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΒΟΗΘΗΤΙΚΩΝ
ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ (PBCF) ΚΑΙ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ ΑΝΤΙΘΕΤΗΣ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ (CRPBCF) ΣΕ
ΠΡΟΠΕΛΑ ΝΑΥΤΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ



Ansys
2024 R1
STUDENT

ΚΑΡΑΝΙΚΟΛΑΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΑΕΜ: 2241

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΔΡ ΒΑΦΕΙΑΔΗΣ ΚΥΡΙΑΚΟΣ

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΒΟΗΘΗΤΙΚΩΝ
ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ (PBCF) ΚΑΙ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ ΑΝΤΙΘΕΤΗΣ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ (CRPBCF) ΣΕ
ΠΡΟΠΕΛΑ ΝΑΥΤΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ**

ΚΑΡΑΝΙΚΟΛΑΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΑΕΜ: 2241

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΔΡ ΒΑΦΕΙΑΔΗΣ ΚΥΡΙΑΚΟΣ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης των βοηθητικών πτερυγίων κεφαλής (Propeller-Boss-Cap-Fins-PBCF) και των πτερυγίων κεφαλής αντίστροφης περιστροφής (Contra-Rotating-Propeller-Boss-Cap-Fins-CRPBCF) στην προπέλα ναυτικών εφαρμογών INSEAN E779A. Σκοπός είναι η εξέταση των μεταβολών στους συντελεστές ώσης, ροπής και απόδοσης με την προσθήκη των βοηθητικών πτερυγίων. Αρχικά, η γεωμετρία της προπέλας καθώς και οι γεωμετρίες των πτερυγίων κεφαλής εισήχθησαν στο λογισμικό Solidworks όπου έγινε η ένωση τους με σκοπό τη δημιουργία της νέας προπέλας. Με τη χρήση του λογισμικού Ansys σχεδιάστηκαν οι όγκοι ελέγχου που περιβάλλουν τη γεωμετρία της προπέλας και πραγματοποιήθηκε η διακριτοποίηση τους. Ο ορισμός των οριακών και αρχικών συνθηκών καθώς και η επίλυση του προβλήματος έγινε στο λογισμικό Ansys CFX. Ακολούθησε σύγκριση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων της αρχικής προπέλας με τα πειραματικά δεδομένα και με τις προσθήκες των PBCF και CRPBCF. Τα αριθμητικά αποτελέσματα παρουσίασαν αύξηση στην πίεση του όμορου της προπέλας που συμβάλλει στην ταυτόχρονη αύξηση της παραγόμενης ώσης. Οι συντελεστές ώσης της προπέλας αυξήθηκαν σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν, όμως οι συνολικοί συντελεστές ώσης παρουσίασαν μείωση. Τα βοηθητικά πτερύγια συνέβαλαν θετικά στη μείωση του συντελεστή ροπής του συστήματος. Τέλος, ο βαθμός απόδοσης σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν ήταν χαμηλότερος από τον αρχικό που ωθεί στο συμπέρασμα πως η γεωμετρία των βοηθητικών πτερυγίων που επιλέχθηκε δεν συμβάλλει θετικά στην βελτίωση των επιδόσεων της αρχικής προπέλας.

ABSTRACT

The subject of this thesis is the study of the effect of the Propeller Boss Cap Fins (PBCF) and the Contra Rotating Propeller Boss Cap Fins (CRPBCF) on the INSEAN E779A propeller for naval applications. The purpose is to examine the changes in thrust, torque and efficiency coefficients with the addition of the auxiliary blades. Initially, the propeller geometry as well as the geometries of the head blades were imported into Solidworks software where they were joined to create the new propeller. Using Ansys software, the control volumes surrounding the propeller geometry were designed and their discretization was performed. The definition of the boundary and initial conditions and the solution of the problem was done in Ansys CFX software. The results of the simulations of the initial propeller were then compared with the experimental data and with the additions of the PBCF and CRPBCF. The numerical results showed an increase in the propeller's boundary pressure which contributes to the simultaneous increase in the generated thrust. Propeller thrust coefficients increased in all cases tested, but the overall thrust coefficients showed a decrease. The auxiliary blades contributed positively to the reduction in the system's torque coefficient. Finally, the performance grade in all cases tested was lower than the original one which leads to the conclusion that the auxiliary blade geometry chosen does not contribute positively to improving the performance of the original propeller.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες για την ευκαιρία που μου δόθηκε να εργαστώ πάνω στη διπλωματική εργασία μου. Είμαι υπόχρεος σε πολλούς ανθρώπους για τη στήριξή τους και τη βοήθεια τους κατά τη διάρκεια αυτού του ταξιδιού. Θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Βαφειάδη Κυριάκο για τις συμβουλές και την καθοδήγησή του, καθώς και τους φίλους και την οικογένειά μου για τη στήριξή τους σε αυτήν την πορεία. Επιπλέον, θέλω να ευχαριστήσω την ακαδημαϊκή κοινότητα για την έμπνευση και τη γνώση που μοιράστηκε μαζί μου κατά τη διάρκεια της έρευνάς μου. Η εμπειρία αυτή μου έδωσε πολλά νέα ερεθίσματα και γνώσεις που θα με συνοδεύουν για πολλά χρόνια στο μέλλον. Είμαι ευγνώμων για όλα αυτά και ανυπομονώ να μοιραστώ τα αποτελέσματα της έρευνάς μου με την κοινότητα.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή	7
1.1 Ιστορική αναδρομή	7
1.2 Σκοπός της εργασίας.....	13
2. Θεωρητικό υπόβαθρο.....	14
2.1 Προπέλα	14
2.1.1 Λειτουργία της προπέλας.....	14
2.1.2 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά.....	15
2.1.3 Υδροπτέρυγα και δυνάμεις.....	20
2.1.4 Διαστατική ανάλυση δυνάμεων	22
2.2 Μηχανική των ρευστών	25
2.2.1 Κυρίαρχες εξισώσεις.....	25
2.2.2 Οριακό στρώμα.....	28
2.2.3 Είδη ροής και ο αριθμός Reynolds	29
2.3 Εκλυόμενες δίνες ακροπτερυγίων.....	32
2.4 Σπηλαίωση	33
2.4.1 Τύποι σπηλαίωσης λόγω στροβιλισμού προπέλας	34
2.4.2 Βλάβες που προκαλούνται από σπηλαίωση.....	36
2.5 Υπολογιστή Ρευστοδυναμική	37
2.5.1 Μέθοδοι Πλέγματος και Διακριτοποίηση.....	37
2.5.2 Οριακές Συνθήκες και y^+	38
2.5.3 Μοντέλα τύρβης.....	39
3. Μεθοδολογία.....	42
3.1 Γεωμετρία	42
3.1.1 Γεωμετρία κύριας προπέλας INSEAN E779A	42
3.1.2 Γεωμετρία της δευτερεύουσας προπέλας	44
3.2 Σχεδίαση υπολογιστικών χωρίων.....	46
3.3 Διακριτοποίηση πλέγματος.....	47
3.4 Οριακές συνθήκες.....	51
4. Σύγκριση αποτελεσμάτων.....	53
4.1 Πειραματικά δεδομένα της κύριας προπέλας INSEAN E779A	53
4.1.1 Περιγραφή των πειραματικών εγκαταστάσεων της INSEAN.....	54

4.2	Μελέτη ανεξαρτησίας πλέγματος	55
4.3	Υ+	59
4.4	Επίδραση PBCF και CRPBCF	62
4.5	Περιγράμματα πιέσεων	66
4.6	Περιγράμματα ταχυτήτων	73
4.7	Ροϊκές γραμμές και Στροβιλότητα	77
5.	Συμπεράσματα και περαιτέρω έρευνα	82
	Βιβλιογραφία	83

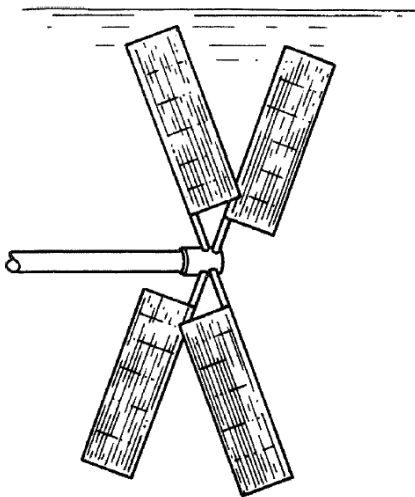
1. Εισαγωγή

Ο τομέας της ναυτικής πρόωσης έχει γνωρίσει αξιοσημείωτες εξελίξεις σε όλη την ιστορική του διαδρομή, παρακολουθώντας τη μετάβαση από τα ανθρωποκινούμενα σκάφη με τη χρήση κουπιών σε εξαιρετικά εξελιγμένα συστήματα πρόωσης που αξιοποιούν το ενεργειακό δυναμικό του ατμού, των μηχανών εσωτερικής καύσης και της πυρηνικής ενέργειας. Η παρούσα ενότητα έχει ως στόχο να ξεκινήσει μια ολοκληρωμένη διερεύνηση της εξέλιξης της ναυτικής πρόωσης, εντοπίζοντας τις ρίζες της, εξετάζοντας βασικά ορόσημα και εμβαθύνοντας στις τεχνολογικές ανακαλύψεις που διαμόρφωσαν τη σύγχρονη κατάστασή της.

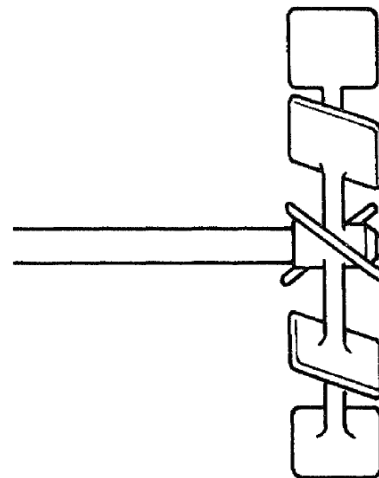
1.1 Ιστορική αναδρομή

Ο Αρχιμήδης και ο Leonardo da Vinci συνέβαλαν σημαντικά στην ανάπτυξη της πρόωσης των πλοίων πολλά χρόνια πριν οι μηχανικοί εξερευνήσουν τις ιδέες τους. Ο Αρχιμήδης επικεντρώθηκε στην αντλία με κοχλία, η οποία αργότερα ενέπνευσε τους μηχανικούς ναυτικής πρόωσης του 19ου αιώνα. Ωστόσο, αυτό οδήγησε επίσης σε παρανοήσεις σχετικά με τη σύγκριση της δράσης της προπέλας με το σπείρωμα ενός κοχλία. Από την άλλη πλευρά, ο Leonardo da Vinci σχεδίασε μια εναλλακτική μορφή πρόωσης χρησιμοποιώντας πτερύγια που μοιάζουν με τους σύγχρονους ανεμιστήρες ψύξης.

Η ανάπτυξη της πρόωσης, όπως είναι γνωστή σήμερα, μπορεί να αποδοθεί στο έργο του Robert Hooke, γνωστού για την έρευνά του σχετικά με την ελαστικότητα των υλικών. Ο Hooke εξερεύνησε επίσης τον τομέα της μετρολογίας και ανέπτυξε έναν μετρητή ροής αέρα με βάση την αρχή του ανεμόμυλου. Το 1683, τροποποίησε το όργανο αυτό για να μετρά τα ρεύματα του νερού και προέβλεψε τις δυνατότητές του ως μέσο πρόωσης των πλοίων. Το 1752, ο Bernoulli παρουσίασε τον ελικοφόρο τροχό στην Ακαδημία Επιστημών στο Παρίσι, ο οποίος προοριζόταν να κινείται από την ατμομηχανή Newcomen. Ωστόσο, εξακολουθούσαν να διχάζονται οι απόψεις σχετικά με την καταλληλότερη διαμόρφωση του έλικα, συμπεριλαμβανομένης της αρχής του Αρχιμήδειου κοχλία που πρότεινε ο Γάλλος μαθηματικός Paucton.



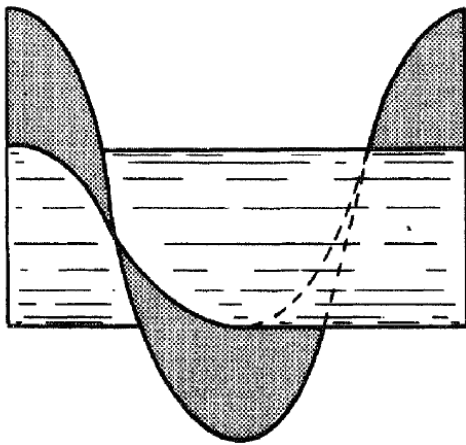
Εικόνα 1.1. Η προπέλα του Hooke (1683) [1].



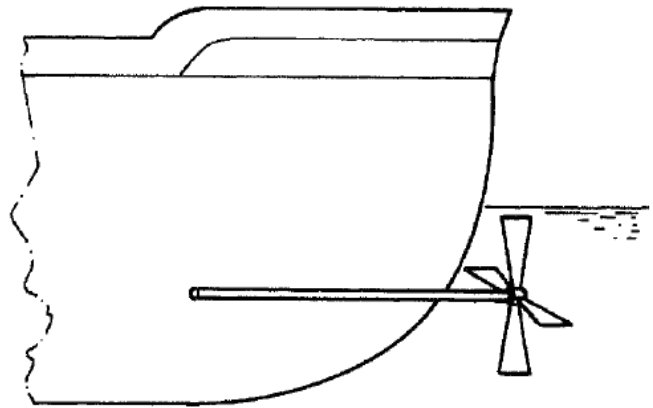
Εικόνα 1.2. Η προπέλα του Bernoulli (1752) [1]

Αυτές οι πρώιμες συνεισφορές έθεσαν τα θεμέλια για περαιτέρω εξελίξεις στην τεχνολογία των ελίκων, σηματοδοτώντας ένα κρίσιμο βήμα προς την ανάπτυξη αποδοτικών και αποτελεσματικών ναυτικών συστημάτων πρόωσης.

Στην Αγγλία, ο Joseph Bramah πρότεινε μια διάταξη με έλικα για την πρύμνη ενός πλοίου, η οποία περιελάμβανε πολλά χαρακτηριστικά που συνδέονται με τη σύγχρονη ελικοειδή πρόωση. Διέθετε μια έλικα με μικρό αριθμό πτερυγίων που κινούνταν από έναν οριζόντιο άξονα που περνούσε μέσα από το κύτος του πλοίου κάτω από την ίσαλο γραμμή. Ωστόσο, δεν υπάρχουν στοιχεία που να αποδεικνύουν ότι αυτή η σχεδίαση έλικας δοκιμάστηκε σε πλοίο με ατμομηχανή. Παρ' όλα αυτά, το 1802, ο Edward Shorter χρησιμοποίησε μια παραλλαγή της ιδέας του Bramah για να βοηθήσει τα ιστιοφόρα πλοία να κινηθούν όταν βρίσκονταν σε ακινησία. Στο σχέδιο του Shorter, ο άξονας εισερχόταν στο κύτος του πλοίου πάνω από την ίσαλο γραμμή, εξαλείφοντας την ανάγκη για στεγανοποιήσεις. Η ισχύς της πρόωσης παρέχονταν από άνδρες που γύριζαν ένα κάβο.



Εικόνα 1.3. Αρχιμήδειος κοχλίας του Paucton [1].

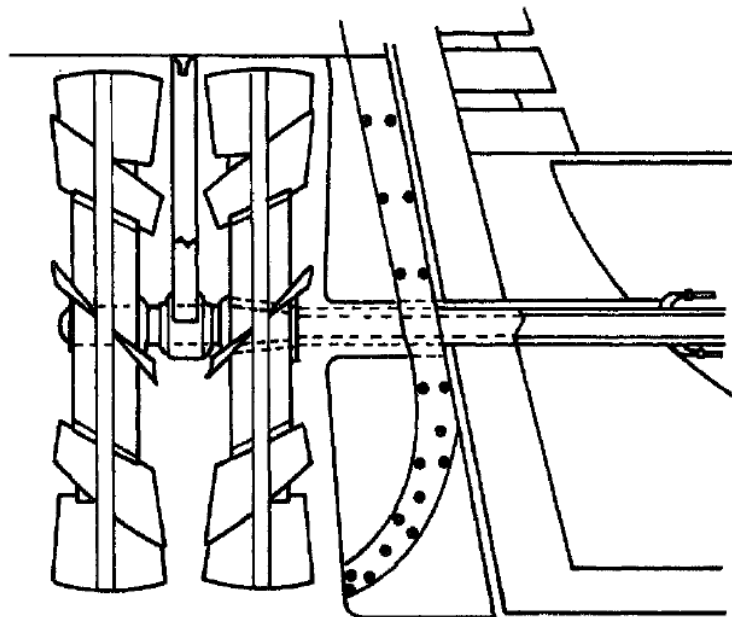


Εικόνα 1.4. Σχεδιασμός της έλικας του Bramah (1785) [1].

Το 1824, ο Dollman εισήγαγε στη Γαλλία προπέλες με αντίθετη κίνηση. Το σχέδιό του περιλάμβανε ένα ζεύγος προπελών τύπου ανεμόμυλου με δύο πτερύγια η καθεμία, που περιστρέφονταν προς αντίθετες κατευθύνσεις στον ίδιο άξονα για την κίνηση ενός μικρού σκάφους. Αυτή τη γαλλική εξέλιξη ακολουθούσαν οι πρόοδοι στην Αγγλία, όπου ο John Ericsson, πρώην αξιωματικός του σουηδικού στρατού που διέμενε στο Λονδίνο, σχεδίασε και κατοχύρωσε ένα σύστημα πρόωσης το 1836. Το σύστημα του Ericsson αποτελούνταν από δύο αντίθετους τροχούς έλικας, όπως απεικονίζεται στην εικόνα 1.5. Οι επιμέρους τροχοί έμοιαζαν με την προηγούμενη πρόταση του Bernoulli και αποτελούνταν από οκτώ μικρά, πλατιά πτερύγια τοποθετημένα σε ελικοειδή διάταξη. Τα πτερύγια συνδέονταν στις άκρες τους με έναν περιφερειακό μάντα. Σε αυτή τη διάταξη, οι δύο τροχοί μπορούσαν να περιστρέφονται με διαφορετικές ταχύτητες, ενδεχομένως για να αντιμετωπιστούν ζητήματα που σχετίζονται με τις διαφορετικές διαμορφώσεις ροής που προκαλούνται από τους μπροστινούς και τους πίσω τροχούς, καθώς και με τις συχνότητες διέλευσης των πτερυγίων.

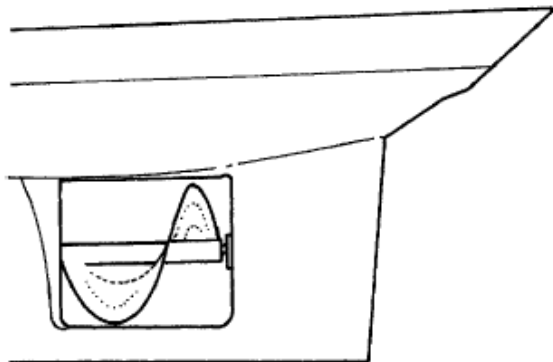
Ο Ericsson πραγματοποίησε αρχικές δοκιμές σε ένα μοντέλο 1 μέτρου, οι οποίες απέδωσαν επιτυχή αποτελέσματα, γεγονός που τον παρακίνησε να κατασκευάσει ένα σκάφος 14 μέτρων με

την ονομασία Francis B. Ogden. Το σκάφος ήταν εξοπλισμένο με το σύστημα πρόωσης του Ericsson. Ωστόσο, στον αρχικό σχεδιασμό που έκανε ο Ericsson, η έλικα ήταν τοποθετημένη πίσω από το πηδάλιο, επηρεάζοντας αρνητικά τόσο τα χαρακτηριστικά διεύθυνσης του πλοίου όσο και τη ροή του νερού στην έλικα.

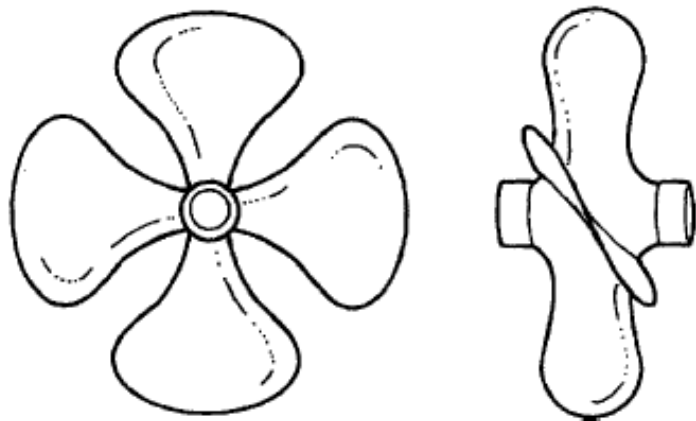


Εικόνα 1.5. Η προπέλα του Ericsson (1836) [1].

Η εξέλιξη της προπέλας δεν εξαρτιόταν μόνο από την τεχνολογική πρόοδο αλλά και από τους οικονομικούς πόρους, τις πολιτικές επιρροές και τα προσδοκώμενα οικονομικά οφέλη που θα μπορούσαν να αποκομίσουν ο εφευρέτης ή οι υποστηρικτές του. Σε σύγκριση με τον Ericsson, ο Francis Petit Smith σημείωσε μεγαλύτερη επιτυχία σε αυτές τις πτυχές. Ο Smith απέκτησε δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για ένα σχέδιο έλικας που έμοιαζε με τον Αρχιμήδειο κοχλία, αλλά το πιο σημαντικό ήταν ότι διέθετε διαφορετική τοποθέτηση της έλικας σε σχέση με το πηδάλιο. Αυτό συνέβη λίγες εβδομάδες πριν από την εξασφάλιση της πατέντας του Ericsson, και λίγο μετά τη διεξαγωγή των πειραμάτων του Ericsson, το βρετανικό Ναυαρχείο αναθεώρησε την άποψή του για τη πρόωση ως αποτέλεσμα του έργου του Smith. Τον Μάρτιο του 1830, ο Smith, μαζί με τους υποστηρικτές του να κατασκευάσαν ένα πλοίο με το όνομα Αρχιμήδης. Το πλοίο Αρχιμήδης ήταν εξοπλισμένο με δύο κινητήρες 45 ίππων για την πρόωση και επιλέχθηκε να εφοδιαστεί με έναν Αρχιμήδειο κοχλία μονής στροφής για σύστημα πρόωσης όπως φαίνεται στην εικόνα 1.6. Έτσι, σταδιακά, δημιουργήθηκε η προπέλα με πτερύγια, των οποίων η προέκταση διαμορφώνει νοητά το σχήμα βίδα, όπως αυτή του πλοίου Napoleon το 1842.

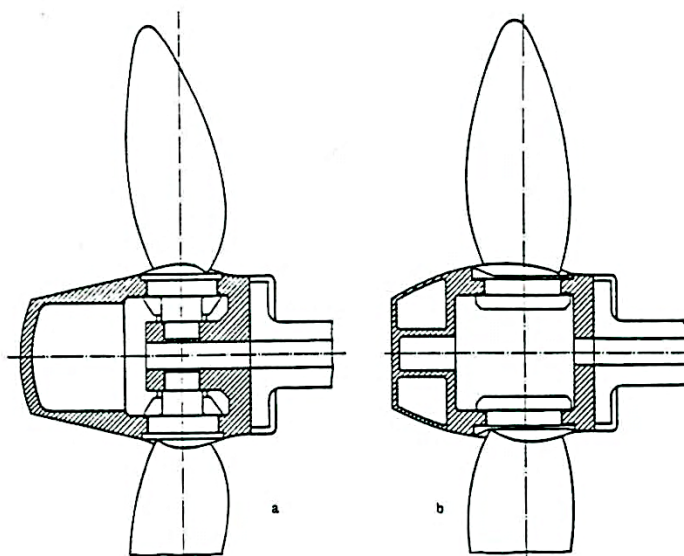


Εικόνα 1.6. Προπέλα που τοποθετήθηκε στο Archimedes (1839) [1].



Εικόνα 1.7. Προπέλα του Napoleon (1842) [1].

Κατά τη διάρκεια του 19ου αιώνα, αναπτύχθηκαν πολυάριθμες προσαρμογές και παραλλαγές των προπελών. Μεταξύ αυτών ήταν η έλικα ρυθμιζόμενου βήματος, η οποία επέτρεπε τη ρύθμιση των γωνιών των πτερυγίων, καθώς και η εφαρμογή πτυσσόμενων πτερυγίων για ιστιοφόρα σκάφη. Επιπλέον, διερευνήθηκαν διάφορες γεωμετρίες για την πρόληψη ή τον μετριασμό της εμφάνισης σπηλαίωσης, ενός φαινομένου που μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την απόδοση της προπέλας.



Εικόνα 1.8. Προπέλα ρυθμιζόμενου βήματος. Πηγή: [PDF] Design of a controllable pitch underwater thruster system | Semantic Scholar

Στις αρχές της δεκαετίας του 1890 ο Charles Myers από το Μάντσεστερ πρωτοπόρησε σχεδιάζοντας την προπέλα τοροειδούς γεωμετρίας η οποία συχνά περιγράφεται ως έχουσα «διπλά πτερύγια». Τα τελευταία χρόνια έχουν σημειωθεί σημαντικές εξελίξεις στην τεχνολογία των τοροειδών ελίκων. Το 2013, η Sharrow Marine παρουσίασε τον σχεδιασμό της τοροειδούς προπέλας και υπέβαλε αίτηση για δίπλωμα ευρεσιτεχνίας. Επικεντρώθηκαν στην ανάπτυξη ελίκων ειδικά για θαλάσσια χρήση σε σκάφη, δίνοντας έμφαση στα δυνητικά οφέλη της χαμηλότερης κατανάλωσης καυσίμου, της υψηλότερης απόδοσης και του μειωμένου θορύβου, ιδίως σε θαλάσσιες εφαρμογές.

(Model.)
 C. MYERS.
 SCREW PROPELLER.
 No. 467,322. Patented Jan. 19, 1892.
 3 Sheets—Sheet 1.

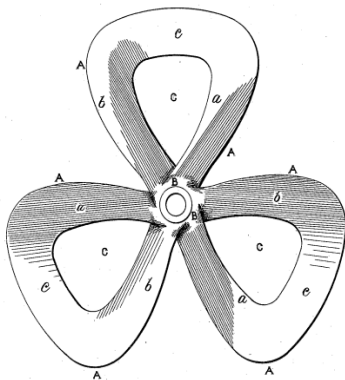


FIG. 1

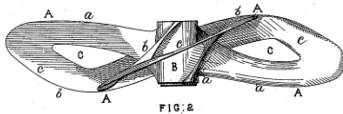


FIG. 2

WITNESSES
 William H. S. Carter
 Charles S. S. Carter

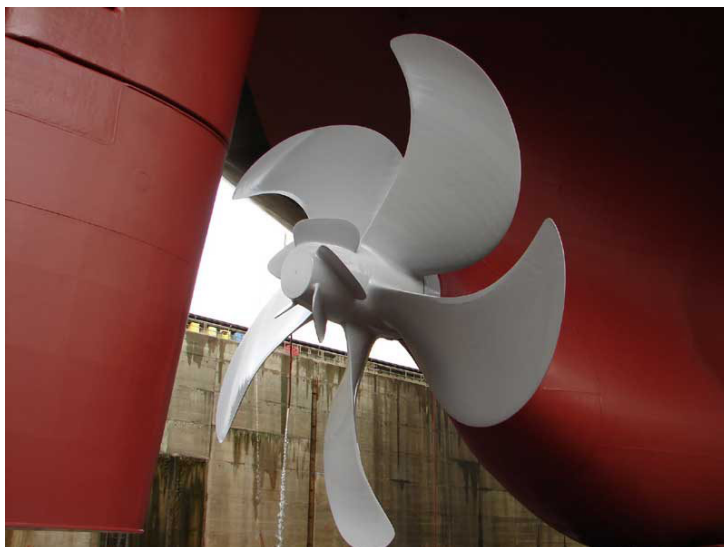
INVENTOR
 Charles Myers
 by W. H. S. Carter
 atty.



Εικόνα 1.9. Η πατέντα του Myers (1892).

Εικόνα 1.10. Προπέλα τοροειδούς γεωμετρίας.

Το 1987 αναπτύχθηκαν τα πτερύγια κεφαλής προπέλας ή Propeller Boss Cap Fins (PBCF) μέσω της συνεργασίας μεταξύ της Mitsui O.S.K. Lines, του West Japan Fluid Engineering Laboratory και της Mikado Propeller (τόρα Nakashima Propeller). Τα PBCF , είναι μια ναυτιλιακή τεχνολογία που έχει σχεδιαστεί για τη βελτίωση της απόδοσης των προπελών των πλοίων. Αποτελείται από πτερύγια που εγκαθίστανται στη κεφαλή της προπέλας, τα οποία βοηθούν στην ανακατεύθυνση της ροής του νερού μειώνοντας τις απώλειες ενέργειας λόγω στροβιλισμού των ροών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της απόδοσης της πρόωσης, τη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου, τη μείωση των εκπομπών ρύπων και τη μείωση του παραγόμενου θορύβου. Όταν χρησιμοποιείται ένα συμβατικό κάλυμμα κεφαλής, δημιουργείται μια ισχυρή δίνη που ονομάζεται "δίνη πλήμνης" και έχει ως αποτέλεσμα την απώλεια της απόδοσης της έλικας. Όταν μια συσκευή PBCF εγκαθίσταται στην κεφαλή της προπέλας, η δίνη της πλήμνης θα εξαλειφθεί, καθώς οι καθοδικές ροές μετά το πτερύγιο εμποδίζονται από τα πτερύγια των PBCF. Ως αποτέλεσμα, η διάταξη PBCF αυξάνει την ώση και μειώνει τη ροπή του άξονα, βελτιώνοντας την απόδοση της έλικας. Μέχρι σήμερα, η τεχνολογία αυτή έχει εγκατασταθεί σε άνω από 4,000 πλοία παγκοσμίως.



Εικόνα 1.11. Παράδειγμα εγκατεστημένων πτερυγίων κεφαλής προπέλας. Πηγή: [Le site français de la marine marchande \(marine-marchande.net\)](http://Le site français de la marine marchande (marine-marchande.net))

Παρόμοια τεχνολογία με τα πτερύγια κεφαλής προπέλας είναι τα αντίθετα περιστρεφόμενα πτερύγια κεφαλής προπέλας ή Contra-Rotating Propeller Boss Cap Fins (CRPBCF). Το σύστημα αυτό χρησιμοποιεί δύο ομοαξονικές έλικες που περιστρέφονται προς αντίθετες κατευθύνσεις για τη βελτίωση της και για τη μείωση των απωλειών ενέργειας από τη δίνη πλήμνης. Το αποτέλεσμα είναι η βελτιωμένη απόδοση της πρόωσης, η μειωμένη κατανάλωση καυσίμου και οι χαμηλότερες εκπομπές ρύπων.

1.2 Σκοπός της εργασίας

Τα πλοία αποτελούν ζωτικό κομμάτι του παγκόσμιου συστήματος μεταφορών αγαθών, προσφέροντας τη δυνατότητα αποτελεσματικής και οικονομικής μεταφοράς μεγάλων ποσοτήτων εμπορευμάτων σε όλο τον κόσμο. Η ανάπτυξη και η βελτίωση των ναυτικών προπελών αναδεικνύεται ως κρίσιμης σημασίας ενέργεια στον τομέα της ναυτιλίας, καθώς οι προπέλες αποτελούν τον πυρήνα του κινητήριου συστήματος ενός πλοίου. Η αποδοτικότητα της προπέλας επηρεάζει την οικονομία και την απόδοση του πλοίου, καθώς και το περιβάλλον και την ασφάλεια στη θάλασσα. Με τη συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση για θαλάσσιες μεταφορές, η μείωση του κόστους καυσίμων και η ελάφρυνση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των πλοίων αποτελούν προτεραιότητες. Οι βελτιώσεις στις ναυτικές προπέλες είναι καθοριστικές για την επίτευξη αυτών των στόχων, προωθώντας την ανάπτυξη και την καινοτομία σε έναν κρίσιμο τομέα της παγκόσμιας οικονομίας.

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης των βοηθητικών πτερυγίων κεφαλής (Propeller-Boss-Cap-Fins-PBCF) και των πτερυγίων κεφαλής αντίστροφης περιστροφής (Contra-Rotating-Propeller-Boss-Cap-Fins-CRPBCF) στην προπέλα ναυτικών εφαρμογών INSEAN E779A. Σκοπός είναι η εξέταση των μεταβολών στους συντελεστές ώσης, ροπής και απόδοσης με την προσθήκη των βοηθητικών πτερυγίων καθώς και εντοπισμός των αλλαγών των πιέσεων και των ταχυτήτων στον ομόρροου της προπέλας.

2. Θεωρητικό υπόβαθρο

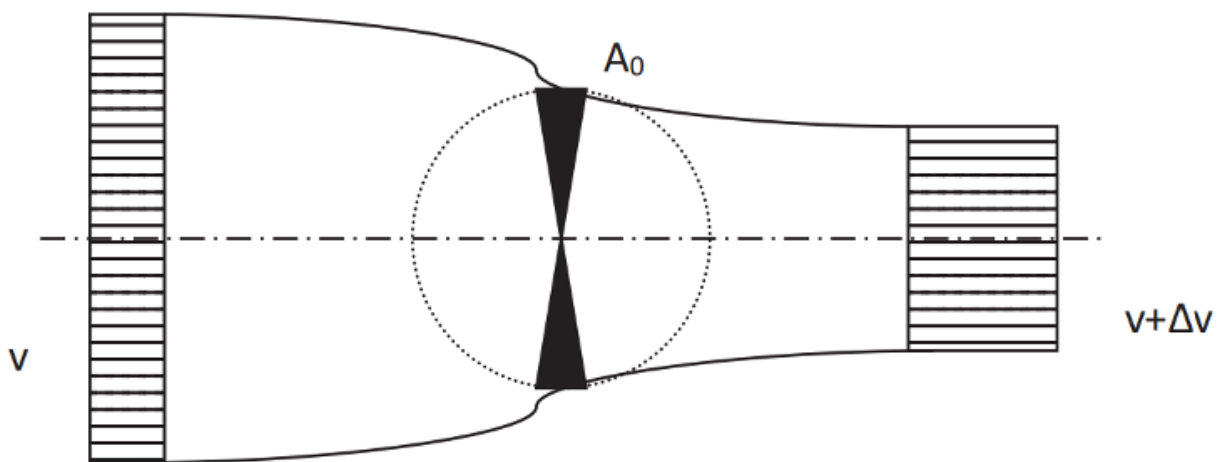
2.1 Προπέλα

2.1.1 Λειτουργία της προπέλας

Η λειτουργία της προπέλας ενός πλοίου, που είναι υπεύθυνη για τη μετατροπή της περιστροφικής ισχύος σε ώση, μπορεί να εξηγηθεί μέσω διαφόρων προσεγγίσεων επίλυσης και εξέτασης. Δύο συχνά χρησιμοποιούμενες προσεγγίσεις είναι η θεώρηση της αεροτομής και η θεωρία της έλικας Froude-Rankine (Jet theory).

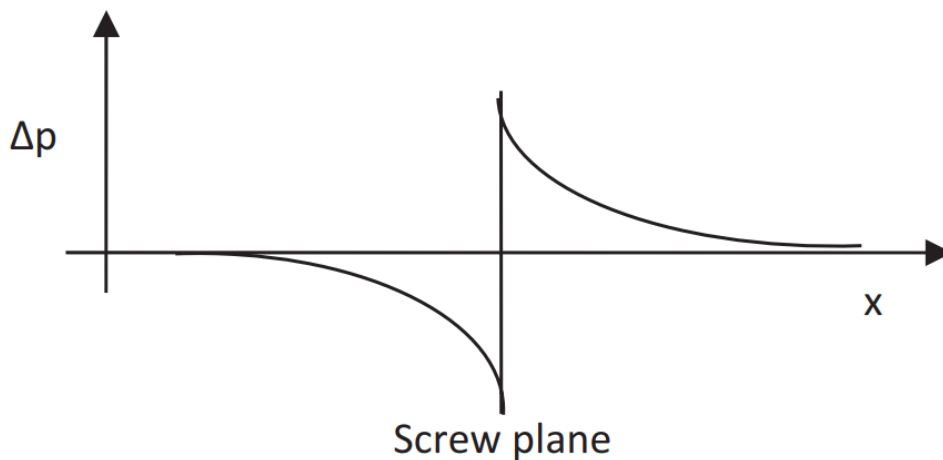
Η προσέγγιση της θεώρησης της αεροτομής θεωρεί ότι η έλικα λειτουργεί παρόμοια με μια αεροτομή, η οποία είναι ένα σχήμα σχεδιασμένο να δημιουργεί άωση καθώς κινείται μέσα σε ένα ρευστό όπως ο αέρας ή το νερό. Στην προσέγγιση αυτή, τα πτερύγια της έλικας θεωρούνται ως τμήματα αεροτομής. Καθώς η έλικα περιστρέφεται, τα πτερύγια δημιουργούν άωση, η οποία αντιστοιχεί στην ώθηση που παράγεται από την έλικα. Οι αρχές της αεροδυναμικής, ιδίως η δημιουργία άωσης, μπορούν να εφαρμοστούν για την κατανόηση της λειτουργίας της έλικας σε διαφορετικά τμήματα πτερυγίων.

Από την άλλη πλευρά, η θεωρία των ελίκων Froude-Rankine βασίζεται στις αρχές που πρότειναν οι William Froude και William Rankine. Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή, η έλικα δημιουργεί μια απότομη αύξηση της πίεσης στο επίπεδο περιστροφής της (εικόνες 2.1 και 2.2). Αυτή η διαφορά πίεσης οδηγεί σε υψηλότερη ταχύτητα ροής πίσω από την έλικα σε σύγκριση με την ταχύτητα ροής μπροστά από αυτήν. Ως αποτέλεσμα, υπάρχει μια αλλαγή στην ορμή του ρευστού, δημιουργώντας την ώθηση. Η θεωρία αυτή θεωρεί τη λειτουργία της έλικας ανάλογη με την εκτόξευση μιας δέσμης ρευστού προς τα πίσω, με αποτέλεσμα την άσκηση δύναμης προς τα εμπρός στο πλοίο.



Εικόνα 2.1. Επιτάχυνση της δέσμης νερού [2].

Και οι δύο προσεγγίσεις παρέχουν διαφορετικές προοπτικές για το πώς η προπέλα ενός πλοίου παράγει ώθηση. Η θεώρηση της αεροτομής εστιάζει στη δημιουργία άνωσης, ενώ η θεωρία της έλικας Froude-Rankine δίνει έμφαση στη μεταβολή της ορμής και των διαφορών πίεσης. Οι θεωρίες αυτές συμβάλλουν στην κατανόηση των υποκείμενων αρχών της πρόωσης της έλικας και διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στο σχεδιασμό και την ανάλυση των συστημάτων πρόωσης πλοίων [2].



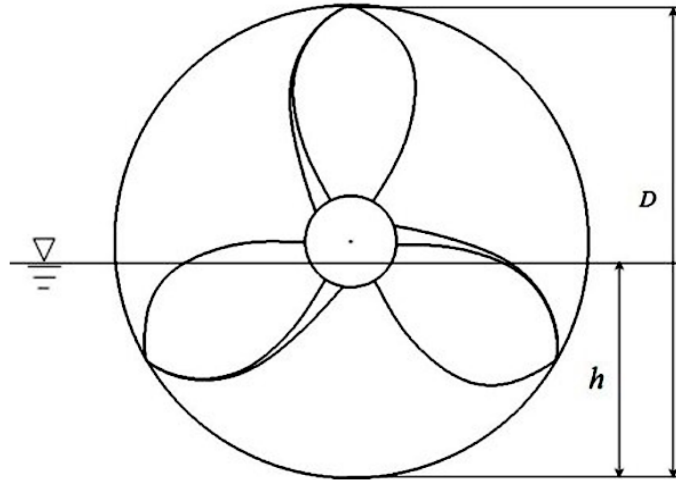
Εικόνα 2.2. Άλλα πίεσης στο επίπεδο πτερυγίου βίδας της προπέλας [2].

2.1.2 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά

Στη ναυπηγική, η γεωμετρία μιας έλικας παίζει καθοριστικό ρόλο στον καθορισμό της απόδοσης και της αποδοτικότητάς της. Τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά μιας ναυτικής έλικας περιλαμβάνουν τη διάμετρο, το βήμα, την κλίση και λοξότητα, τον αριθμό των πτερυγίων και το σχήμα των πτερυγίων.

2.1.2.1 Διάμετρος προπέλας

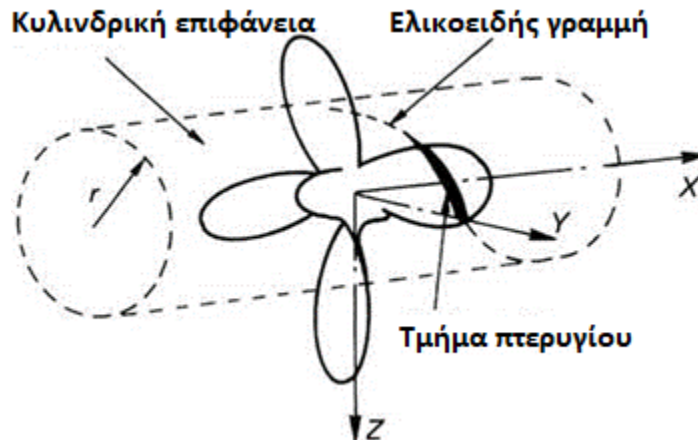
Η διάμετρος της έλικας αναφέρεται στην απόσταση του κύκλου που σχηματίζουν οι άκρες των πτερυγίων της έλικας. Η διάμετρος επηρεάζει την ικανότητα της έλικας να παράγει ώθηση και συνήθως επιλέγεται με βάση το μέγεθος και την ισχύ του σκάφους.



Εικόνα 2.3. Ο λόγος βύθισης, ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος του βάθους βύθισης h προς τη διάμετρο της έλικας D [3].

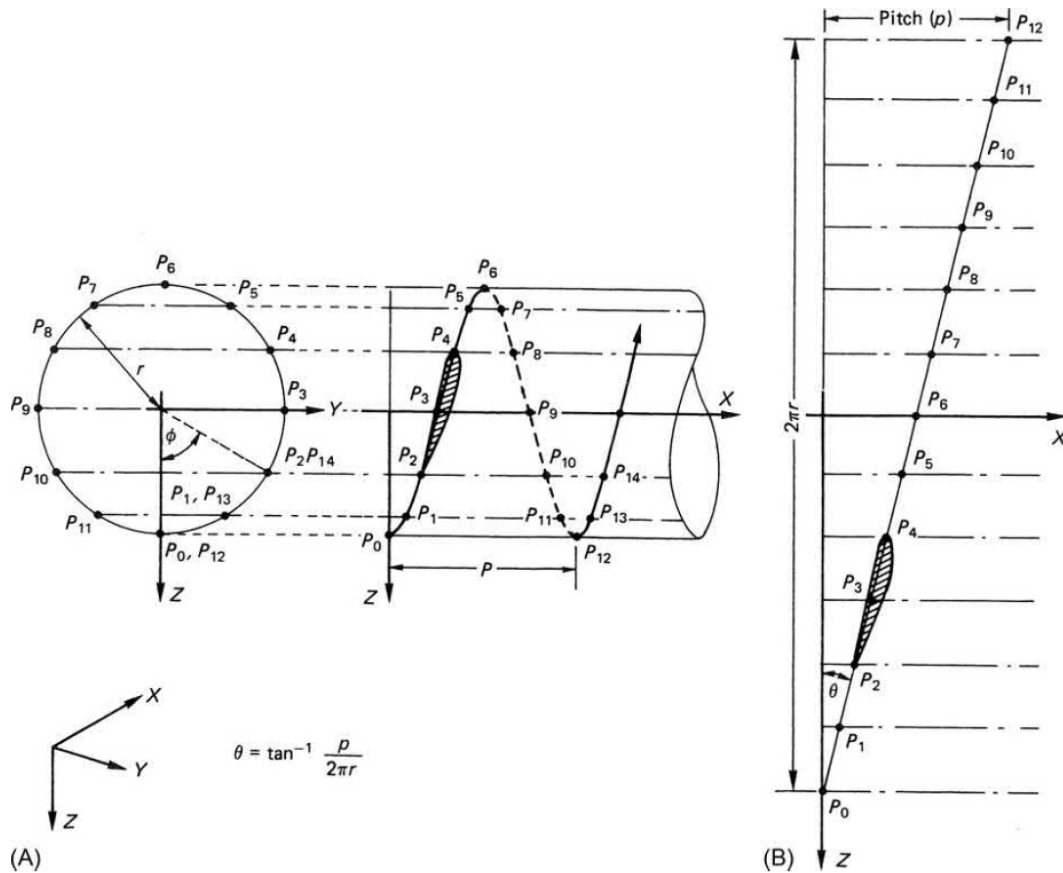
2.1.2.2 Βήμα προπέλας

Το βήμα μιας προπέλας αναφέρεται στην απόσταση που η έλικα θα μπορούσε να κινηθεί προς τα εμπρός σε μια πλήρη περιστροφή, εάν περιστρεφόταν μέσα από ένα στερεό υλικό (όπως μια βίδα μέσα από το ξύλο) χωρίς να γλιστρήσει ή να συναντήσει αντίσταση. Είναι ένα κρίσιμο χαρακτηριστικό, καθώς επηρεάζει τη ποσότητα νερού που μπορεί να μετακινήσει η προπέλα και συνεπώς καθορίζει την ικανότητα της προπέλας να παράγει ώση και να κινεί αποτελεσματικά το σκάφος ή το πλοίο μέσα στο νερό.



Εικόνα 2.4. Τομή του πτερυγίου προπέλας σε ακτίνα r [1].

Αν θεωρηθεί μια θεωρητική κυλινδρική επιφάνεια που τέμνει το πτερύγιο της έλικας σε τυχαία ακτίνα, με αποτέλεσμα το σχηματισμό μιας τοπικής υδροπτέρυγας (όπως απεικονίζεται στην εικόνα 2.4). Η επέκταση της χορδής της υδροπτέρυγας στη θεωρητική κυλινδρική επιφάνεια παράγει μια ελικοειδή γραμμή κατά μήκος του κυλίνδρου. Όταν ξεδιπλώνεται ο κύλινδρος σε μια επίπεδη επιφάνεια, αυτή η ελικοειδής γραμμή μετατρέπεται σε ευθεία γραμμή, δημιουργώντας μια τριγωνική διαμόρφωση. Σε αυτό το σημείο, η γωνία θ εντός του τριγώνου αναφέρεται ως γωνία βήματος. Η πλευρά που εφάπτεται της θ αντιστοιχεί στην περιφέρεια του κυλίνδρου, ενώ η απέναντι πλευρά αντιπροσωπεύει το βήμα της έλικας (εικόνα 2.5). Με την κατάλληλη ρύθμιση των πτερυγίων της έλικας σε διαφορετικές ακτίνες κατά μήκος αυτής της καμπύλης επιφάνειας, μπορεί να επιτευχθεί ένας συγκεκριμένος λόγος βήματος $\frac{P}{D} = \frac{\text{βήμα}}{\text{Διάμετρος}}$. Αυτό το βήμα είναι ένας κρίσιμος παράγοντας που επηρεάζει την αποτελεσματικότητα της έλικας στην προώθηση ενός σκάφους μέσα στο νερό και ο ακριβής έλεγχός του είναι σημαντικός για τη βέλτιστη απόδοση σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας.

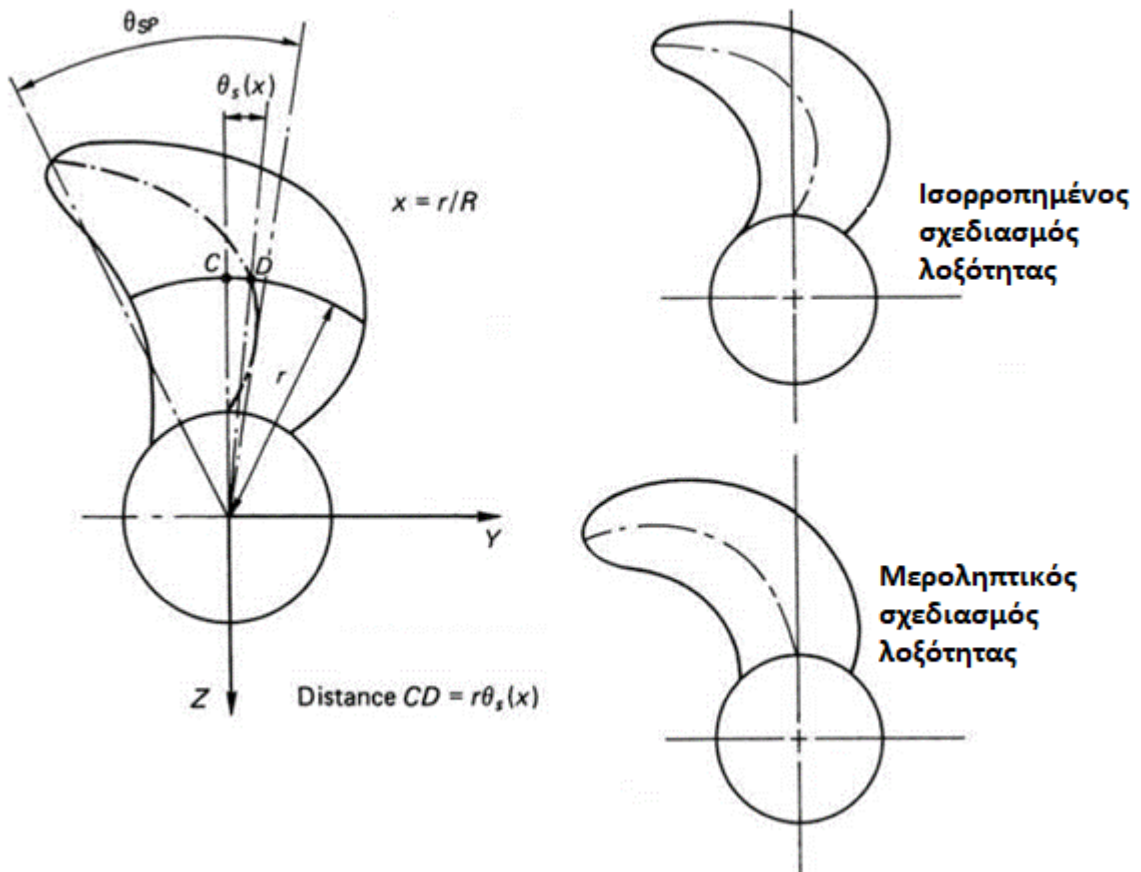


Εικόνα 2.5. Ορισμός του βήματος της προπέλας [1].

2.1.2.3 Κλίση και λοξότητα προπέλας

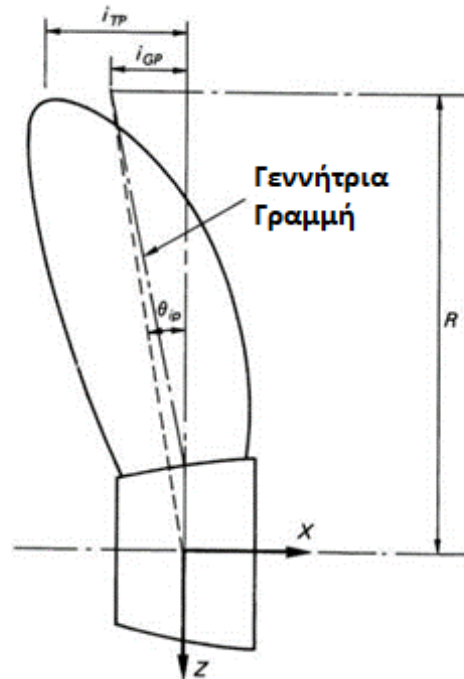
Η κλίση και η λοξότητα είναι δύο διαφορετικοί όροι που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τη γεωμετρία μιας προπέλας και αφορούν διαφορετικά επίπεδα αναφοράς. Ωστόσο, υπάρχει ένα φαινόμενο διασταύρωσης μεταξύ τους που προκαλείται από το ελικοειδές σχήμα των τμημάτων του πτερυγίου.

Η γωνία λοξότητας της έλικας (θ_{SP}) ορίζεται ως η μεγαλύτερη γωνία, μετρούμενη στην κεντρική γραμμή του άξονα, στο προβαλλόμενο επίπεδο, η οποία μπορεί να χαραχθεί μεταξύ των γραμμών που περνούν από την κεντρική γραμμή του άξονα μέσω της θέσης της μεσαίας χορδής οποιωνδήποτε δύο τμημάτων. Η λοξότητα της έλικας τείνει να ταξινομείται σε γενικές γραμμές σε δύο κατηγορίες-τύπους: ισορροπημένη (balanced) και κεκλιμένη (biased) όπως φαίνεται στην εικόνα 2.6.



Εικόνα 2.6. Ορισμός της λοξότητας [1].

Η κλίση των πτερυγίων είναι η γωνία υπό την οποία τα πτερύγια έχουν κλίση προς τα πίσω ή προς τα εμπρός σε σχέση με μια κάθετη γραμμή που διέρχεται από την πλήμνη (εικόνα 2.7). Τα πτερύγια με κλίση μπορούν να βελτιώσουν την απόδοση και να μειώσουν τον κίνδυνο εμπλοκής θραυσμάτων.



Εικόνα 2.7 Ορισμός κλίσης της προπέλας [1].

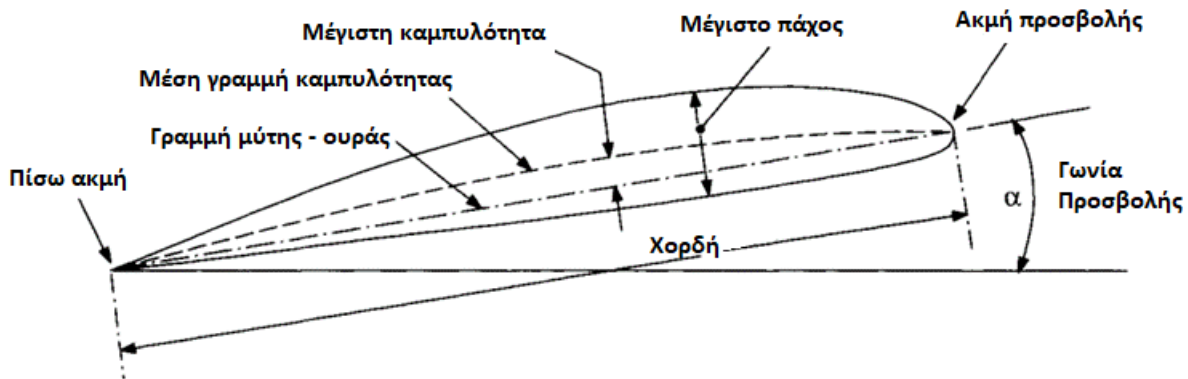
2.1.2.4 Αριθμός και σχήμα πτερυγίων

Ο αριθμός των πτερυγίων μιας ναυτικής προπέλας είναι μια κρίσιμη σχεδιαστική παράμετρος που επηρεάζει σημαντικά την απόδοσή της. Οι έλικες μπορούν να έχουν διαφορετικό αριθμό πτερυγίων, με συνήθεις διατάξεις με 3, 4 ή 5 πτερύγια, αν και σε ειδικές περιπτώσεις χρησιμοποιούνται και περισσότερα ή λιγότερα πτερύγια. Η επιλογή του αριθμού των πτερυγίων βασίζεται σε μια προσεκτική ισορροπία παραγόντων όπως το μέγεθος του σκάφους, η προβλεπόμενη χρήση και οι συνθήκες λειτουργίας. Κάθε πτερύγιο συμβάλλει στην παραγωγή ώσης και στην απόδοση της έλικας και ο βέλτιστος αριθμός πτερυγίων εξαρτάται από την επίτευξη της σωστής ισορροπίας μεταξύ της παραγωγής επαρκούς ώσης για την κίνηση του σκάφους και της ελαχιστοποίησης πιθανών μειονεκτημάτων όπως οι κραδασμοί και η σπηλαίωση. Ως εκ τούτου, η επιλογή του αριθμού των πτερυγίων αποτελεί κρίσιμο παράγοντα στο σχεδιασμό της έλικας, προκειμένου να διασφαλιστεί η αποτελεσματική και αξιόπιστη πρόωση των θαλάσσιων σκαφών.

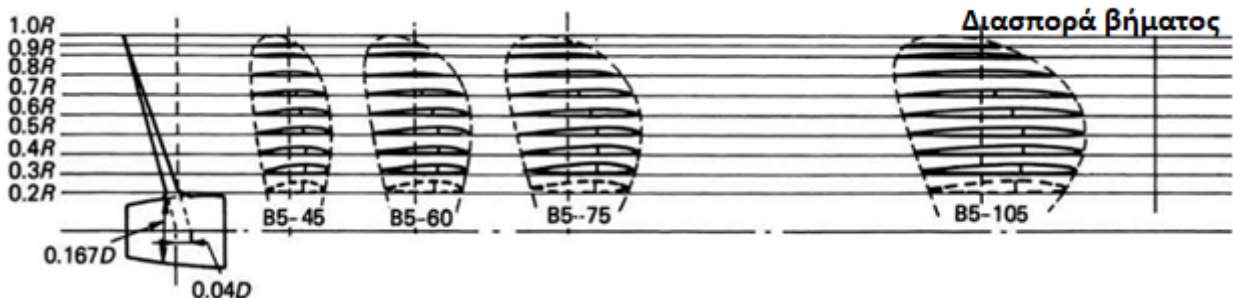
2.1.3 Υδροπτέρυγα και δυνάμεις

Μια διάταξη που συναντάται συχνά μέσα στα ρευστά είναι ένα ειδικά σχεδιασμένο φύλλο που παράγει μια ανυψωτική δύναμη προσανατολισμένη κάθετα προς τη διεύθυνση της εισερχόμενης ροής. Αυτό το φύλλο ονομάζεται αεροτομή εάν το ρευστό που κινείται γύρω του είναι ο αέρας και υδροπτέρυγα στην περίπτωση των υγρών. Οι υδροπτέρυγες και οι αεροτομές έχουν παρόμοιες γεωμετρίες που συχνά βασίζονται στο σχεδιασμό που προτείνει η NACA (National Advisory Committee for Aeronautics) των Ηνωμένων Πολιτειών, γνωστή σήμερα ως NASA.

Η εικόνα 2.8 περιγράφει τον ορισμό των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των αεροτομών και των υδροτομών αντίστοιχα. Αρχικά, η μέση γραμμή, ή γραμμή καμπυλότητας, είναι το σύνολο των σημείων που βρίσκονται ακριβώς στη μέση μεταξύ των δύο εξωτερικών πλευρών της, με τα άκρα της να αποτελούν το σημείο προσβολής και το σημείο φυγής. Το ευθύγραμμο τμήμα μεταξύ των δύο παραπάνω σημείων ονομάζεται χορδή της αεροτομής. Η καμπή της αεροτομής είναι η μέγιστη απόσταση μεταξύ της χορδής και της μέσης γραμμής. Το πάχος της αεροτομής είναι η μέγιστη, κάθετη στη χορδή, απόσταση μεταξύ των δύο εξωτερικών γραμμών της αεροτομής. Τέλος η γωνία προσβολής α είναι η γωνία που σχηματίζει η χορδή με την κατεύθυνση της ροής. Ενώνοντας «φύλλα» αεροτομών δημιουργείται το πτερύγιο μιας προπέλας όπως φαίνεται στην εικόνα 2.9.

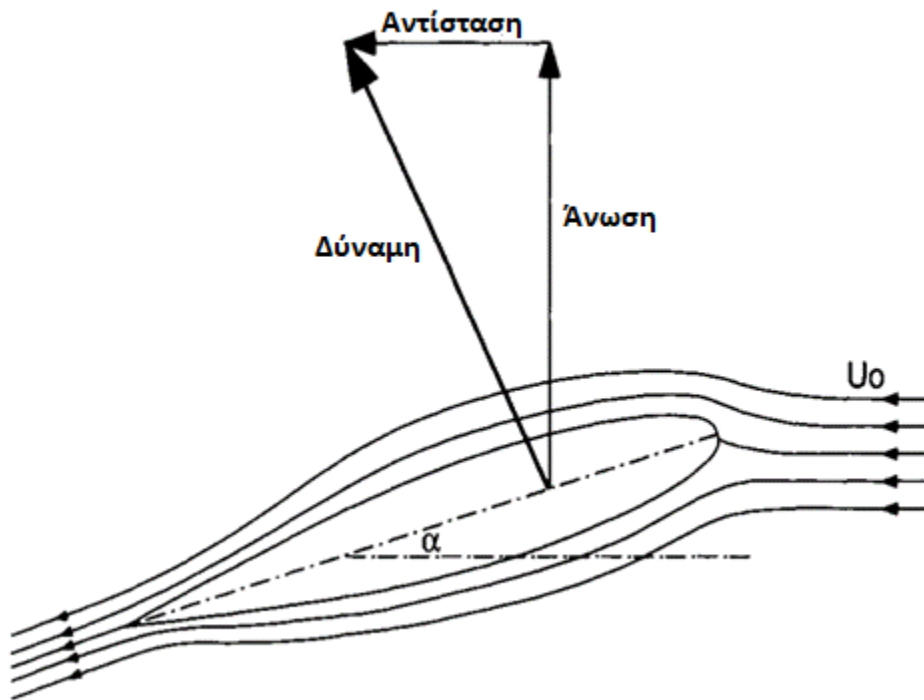


Εικόνα 2.8. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά αεροτομής [5].



Εικόνα 2.9. Ένωση υδροτομών που δημιουργούν το πτερύγιο μιας προπέλας [1].

Όταν μία κυρτή αεροτομή βρίσκεται μέσα σε ένα κινούμενο ρευστό, ενεργούν πάνω της δύο κύριες δυνάμεις. Η άνωση που είναι η ανοδική δύναμη που δημιουργείται κάθετα προς την επερχόμενη ροή του ρευστού και παράγεται λόγω της διαφοράς πίεσης μεταξύ της άνω και της κάτω επιφάνειας της αεροτομής. Η καμπυλωμένη άνω επιφάνεια επιταχύνει τη ροή του αέρα, οδηγώντας σε χαμηλότερη πίεση σύμφωνα με την αρχή του Bernoulli, ενώ η πιο επίπεδη κάτω επιφάνεια έχει υψηλότερη πίεση. Αυτή η διαφορά πίεσης έχει ως αποτέλεσμα μια καθαρή ανοδική δύναμη. Η δεύτερη κύρια δύναμη ονομάζεται οπισθέλκουσα. Η οπισθέλκουσα είναι η αντίσταση που αναπτύσσεται στην αεροτομή καθώς κινείται σε σχέση με τον αέρα. Ενεργεί αντίθετα προς την κατεύθυνση της κίνησης και προκαλείται από την τριβή μεταξύ του αέρα και των επιφανειών της αεροτομής, της διαφοράς πίεσης μεταξύ του εμπρός και του οπίσθιου τμήματος της αεροτομής, καθώς και των διατμητικών τάσεων που δημιουργούνται στα τοιχώματα. Ο συνδυασμός των παραπάνω δυνάμεων δίνει μία συνολική δύναμη που ονομάζεται αεροδυναμική δύναμη. Στην εικόνα 2.10 φαίνεται αναλυτικά ο σχεδιασμός των προηγούμενων δυνάμεων.



Εικόνα 2.10. Δυνάμεις που ενεργούν σε μία αεροτομή [5].

Το μέγεθος των δυνάμεων αυτών εξαρτάται από ένα πλήθος παραγόντων όπως το σχήμα του αντικειμένου, τη σχετική ταχύτητα σώματος-ρευστού, την πυκνότητα και το ιξώδες του ρευστού καθώς και την συμπίεστικότητα (ή μη) της ροής.

Προκειμένου να διευκολυνθεί η μελέτη των αεροδυναμικών χαρακτηριστικών διαφόρων αεροτομών, και να επιτευχθεί μια εύκολη σύγκριση των διαφόρων αποτελεσμάτων, γίνεται χρήση δύο αδιάστατων συντελεστών οι οποίοι αντιστοιχούν στις κύριες συνιστώσες της αεροδυναμικής δύναμης. Συγκεκριμένα ορίζεται ο συντελεστής δυναμικής άνωσης ή άντωσης, που συμβολίζεται με C_L και ο συντελεστής αντίστασης ή οπισθέλκουσας, ο οποίος συμβολίζεται ως C_d . Οι δύο αυτοί συντελεστές ορίζονται ως εξής:

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho U^2 A} \quad \text{και} \quad C_d = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho U^2 A}$$

όπου:

- L η συνιστώσα της δύναμης άνωσης [N].
- D η συνιστώσα της δύναμης αντίστασης [N].
- ρ η πυκνότητα του ρευστού [kg/m^3]
- U η σχετική ταχύτητα μεταξύ πτερυγίου και ρευστού [m^2/s]
- A η επιφάνεια του πτερυγίου [m^2]

2.1.4 Διαστατική ανάλυση δυνάμεων

Για αναλυτικούς σκοπούς, τα χαρακτηριστικά απόδοσης μιας έλικας μπορούν εύκολα να χωριστούν σε δύο κατηγορίες: ιδιότητες ελεύθερης ροής και ιδιότητες πίσω από το κύτος του σκάφους. Τα χαρακτηριστικά ανοικτού νερού περιλαμβάνουν την περιγραφή των δυνάμεων και των ροπών που ασκούνται στην προπέλα ενώ αυτή λειτουργεί μέσα σε μια ομοιόμορφη ροή ρευστού. Η ροή αυτή είναι ευθυγραμμισμένη παράλληλα με την κεντρική γραμμή του άξονα. Αντίθετα, τα χαρακτηριστικά πίσω από το κύτος εκδηλώνονται όταν η έλικα λειτουργεί μέσα σε ένα μικτό πεδίο κυματισμού που βρίσκεται πίσω από ένα στερεό αντικείμενο, όπως ένα σώμα θαλάσσιου σκάφους. Τα εν λόγω χαρακτηριστικά αποτελούνται από τη φύση τους τόσο από σταθερές όσο και από ασταθείς συνιστώσες λόγω της δυναμικής κατάστασης του περιβάλλοντος στο οποίο λειτουργεί η προπέλα. Η παρούσα διπλωματική εργασία θα επικεντρωθεί στην ανάλυση των επιδόσεων της προπέλας σε συνθήκες ελεύθερης ροής.

Ο συνδυασμός των υδροδυναμικών δυνάμεων μιας προπέλας οδηγεί στην εμφάνιση δύο πρωταρχικών δυνάμεων. Η αξονική ώθηση μεταξύ της έλικας και του ρευστού αποτελεί τη συνολική άνωση των βασικών στοιχείων της υδροπτερυγας. Από την άλλη πλευρά, η αντίσταση του ρευστού στην περιστροφή της έλικας, η οποία περιλαμβάνει τη συνολική δύναμη αντίστασης των στοιχειωδών υδροπτερυγών της, δημιουργεί την απαιτούμενη ροπή για την περιστροφή της.

Η έκφραση των δυνάμεων και των ροπών που παράγει η προπέλα σε αδιάστατους όρους δίνει μια σειρά συντελεστών που καθορίζουν την απόδοση της έλικας σε συνθήκες ελεύθερης ροής. Αυτοί οι συντελεστές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη σύγκριση ελίκων διαφορετικής γεωμετρίας ή

μεγέθους. Οι αδιάστατοι όροι που χρησιμοποιούνται για να εκφράζουν τα γενικά χαρακτηριστικά απόδοσης είναι οι ακόλουθοι:

$$\text{Συντελεστής } \Omega \text{σης} \quad K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \quad (2.1)$$

$$\text{Συντελεστής Ροπής} \quad K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5} \quad (2.2)$$

$$\text{Συντελεστής Πρόωσης} \quad J = \frac{V_A}{nD} \quad (2.3)$$

$$\text{Αριθμός Σπηλαίωσης} \quad \sigma = \frac{p_0 - e}{\frac{1}{2}\rho V^2} \quad (2.4)$$

Στις παραπάνω σχέσεις εμπεριέχονται:

- Η διάμετρος της προπέλας (D)
- Η ταχύτητα πρόωσης (V_A)
- Η ταχύτητα περιστροφής (n)
- Η πυκνότητα του ρευστού (ρ)
- Η ώση της προπέλας (T)
- Η ροπή της προπέλας (Q)
- Η στατική πίεση του ρευστού στο σημείο της προπέλας ($p_0 - e$)

όπου p_0 είναι η απόλυτη στατική πίεση στο κέντρο του άξονα και e είναι η πίεση ατμών σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Επιπλέον, ο βαθμός απόδοσης της προπέλας ορίζεται ως ο λόγος της παραγόμενης ισχύς από την προπέλα προς την αποδιδόμενη ισχύ στην προπέλα.

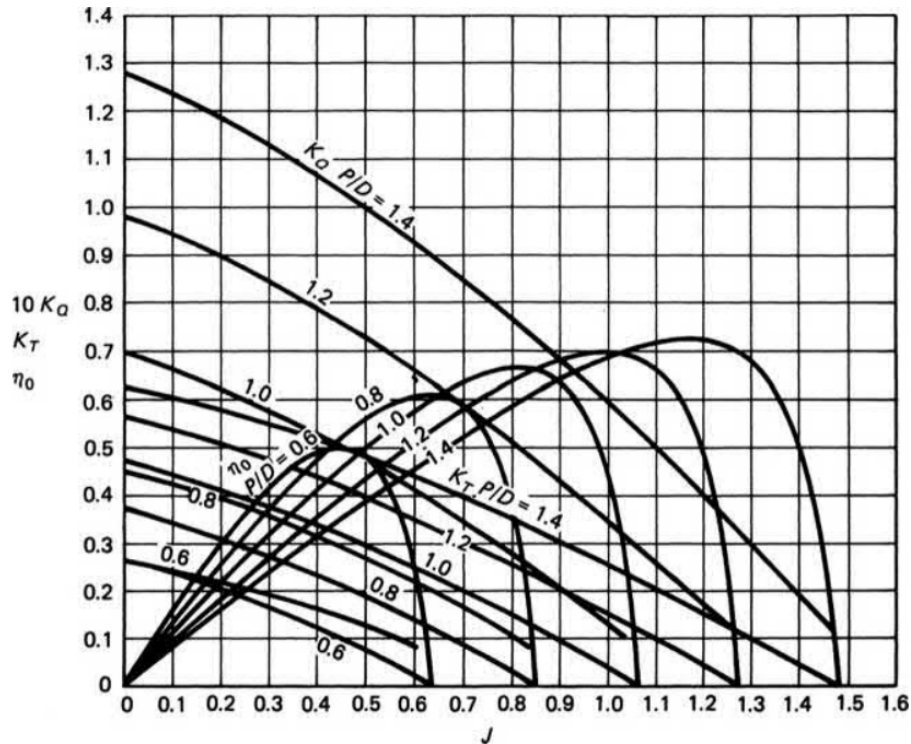
$$\text{Βαθμός απόδοσης} \quad \eta_0 = \frac{TV_A}{Q2\pi n} = \frac{K_T J}{K_Q 2\pi} \quad (2.5)$$

Στο διάγραμμα 2.1, παρουσιάζεται ένα τυπικό διάγραμμα ελεύθερης ροής που απεικονίζει τη συμπεριφορά ενός συνόλου προπελών σταθερού βήματος που λειτουργούν σε περιβάλλον χωρίς σπηλαίωση με θετικό συντελεστή πρόωσης. Το διάγραμμα αυτό παρέχει μια ολοκληρωμένη παρουσίαση των συνθηκών λειτουργίας της προπέλας υπό αυτές τις συνθήκες, που περιλαμβάνει τόσο την πρόωση όσο και την ταχύτητα περιστροφής. Σε σταθερή

κατάσταση λειτουργίας, η προπέλα μπορεί να λειτουργήσει μόνο κατά μήκος της χαρακτηριστικής γραμμής που ορίζεται από το λόγο βήματος P/D.

Αυτό που κάνει το διάγραμμα αυτό ιδιαίτερα χρήσιμο είναι η γενική του εφαρμογή. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί, με τη δέουσα προσοχή στα φαινόμενα κλίμακας, για οποιαδήποτε έλικα έχει τον ίδιο γεωμετρικό σχεδιασμό με αυτόν από τον οποίο προέκυψαν αυτές οι χαρακτηριστικές καμπύλες. Επιπλέον, το διάγραμμα αυτό μπορεί να προσαρμοστεί σε έλικες διαφορετικών διαμέτρων ή αναλογιών κλίμακας και μπορεί να λειτουργήσει σε διαφορετικά ρευστά, λαμβάνοντας υπόψη συγκεκριμένες επιδράσεις του αριθμού Reynolds.

Ωστόσο, όταν χρησιμοποιούμε το διάγραμμα K_T (συντελεστής ώσης) και K_Q (συντελεστής ροπής) σε σχέση με το J (συντελεστής πρόωσης) για μια προπέλα συγκεκριμένου γεωμετρικού μεγέθους που λειτουργεί σε ένα συγκεκριμένο ρευστό μέσο, ορισμένοι παράγοντες, όπως η πυκνότητα του ρευστού και η διάμετρος της προπέλας, γίνονται σταθερές. Κατά συνέπεια, το διάγραμμα αυτό καθίσταται ιδιαίτερα αποτελεσματικό για την ανάλυση και την κατανόηση της απόδοσης της προπέλας εντός αυτών των παραμέτρων.



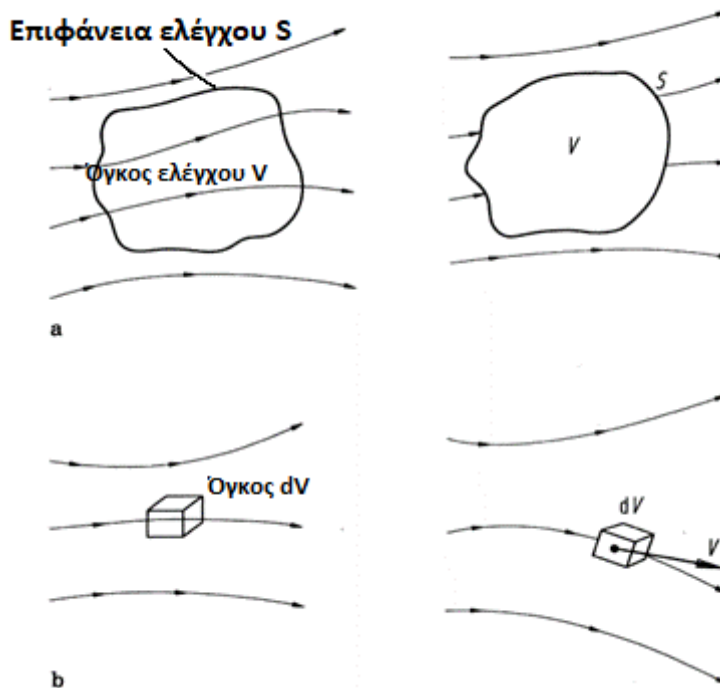
Διάγραμμα 2.1. : Συντελεστής ώσης, συντελεστής ροπής και βαθμός απόδοσης μίας Wageningen τύπου B προπέλας συναρτήσει του βήματος και του συντελεστή πρόωσης [1].

2.2 Μηχανική των ρευστών

Η μηχανική των ρευστών συμβάλλει καθοριστικά στην ανάλυση των θαλάσσιων προπελών, καθώς αποκαλύπτει την περίπλοκη δυναμική μεταξύ αυτών και του νερού. Εφαρμόζοντας έννοιες όπως η άνωση, η αντίσταση και η διατήρηση της μάζας, η ρευστομηχανική βοηθά στην αξιολόγηση της απόδοσης και της αποδοτικότητας της προπέλας. Επιτρέπει στους μηχανικούς να υπολογίζουν την ώθηση που παράγεται από την προπέλα, να προβλέπουν και να μετριάζουν ζητήματα όπως η σπηλαιώση και να βελτιστοποιούν το σχεδιασμό των πτερυγίων για μέγιστη πρόωση. Επιπλέον, η ρευστομηχανική εξετάζει τις μορφές των κυμάτων που δημιουργούνται από την προπέλα, επηρεάζοντας το χειρισμό και την ευελιξία του πλοίου. Στην ουσία, η ρευστομηχανική είναι βασική για την ανάλυση των προπελών, επιτρέποντας τον σχεδιασμό και την αξιολόγηση τους.

2.2.1 Κυρίαρχες εξισώσεις

Σύμφωνα με τον J.Anderson στο βιβλίο του «Computational Fluid Dynamics An Introduction» [6], μία από τις κυρίαρχες εξισώσεις που χρησιμοποιούνται στη μηχανική των ρευστών είναι η εξίσωση συνέχειας ή όπως την αναφέρει η αρχή διατήρησης της μάζας.



Εικόνα 2.11. (a) Προσέγγιση πεπερασμένου όγκου ελέγχου. (b) Προσέγγιση με απειροελάχιστα στοιχεία ρευστού [6].

Αρχικά, θεωρείται το μοντέλο ενός κινούμενου στοιχείου ρευστού. Η μάζα αυτού του στοιχείου είναι σταθερή και ορίζεται ως δm . Ο όγκος αυτού του στοιχείου συμβολίζεται με δV . Επομένως:

$$\delta m = \rho \delta V \quad (2.6)$$

Επειδή η μάζα παραμένει σταθερή, μπορεί να θεωρηθεί ότι, καθώς το ρευστό στοιχείο κινείται με τη ροή, δεν υπάρχει μεταβολή στη μάζα του με την πάροδο του χρόνου. Αυτό βασίζεται στην έννοια της ολικής παραγωγού, η οποία έχει σαφή φυσική ερμηνεία.

$$\frac{D(\delta m)}{Dt} = 0 \quad (2.7)$$

Από τις εξισώσεις 2.6 και 2.7 εξάγεται:

$$\frac{D(\rho \delta V)}{Dt} = \delta V \frac{D\rho}{Dt} + \frac{D(\rho V)}{Dt} = 0$$

ή μπορεί να γραφεί σε άλλη μορφή όπως παρακάτω:

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \left[\frac{1}{\delta V} \frac{D(\delta V)}{Dt} \right] = 0 \quad (2.8)$$

Ως εκ τούτου, επιλέγοντας το μοντέλο να κινείται με τη ροή, εξάγεται η μη διατηρητική μορφή της εξίσωσης συνέχειας και συνδυάζοντας την εξίσωση (2.8) με την απόκλιση της ταχύτητας, $\nabla \cdot \vec{V}$:

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (2.9a)$$

Επιπλέον, επιλέγοντας το σώμα να είναι σταθερό στο χώρο, λαμβάνεται η διατήρηση της εξίσωσης συνέχειας.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (2.9b)$$

Η εξίσωση 2.9 είναι η εξίσωση συνέχειας, η οποία ανοιγμένη σε καρτεσιανές συντεταγμένες παίρνει τη μορφή:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2.10)$$

Στην περίπτωση της ασυμπίεστης ροής η πυκνότητα δεν επηρεάζεται από το χρόνο ή το χώρο, με αποτέλεσμα να προκύπτει η ασυμπίεστη εξίσωση της συνέχειας:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0 \quad (2.11)$$

Η οποία σε καρτεσιανές συντεταγμένες γράφεται:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.12)$$

Σύμφωνα με τον 2^ο νόμο του Νεύτωνα, ο ρυθμός μεταβολής της ορμής ενός συστήματος ως προς τι χρόνο είναι ίσος με το άθροισμα των εξωτερικών δυνάμεων που ασκούνται στο σύστημα. Με δεδομένο ότι η ορμή ορίζεται ως το γινόμενο της μάζας επί την ταχύτητα, η ορμή ενός στοιχείου ρευστού μάζας ρdV θα είναι $\vec{V}(\rho dV)$, έτσι η ορμή ολόκληρου του συστήματος θα είναι $\int_{sys} \vec{V}(\rho dV)$, ώστε ο 2^{ος} νόμος του Νεύτωνα να διατυπωθεί ως:

$$\frac{D}{Dt} \int_{sys} \vec{V}(\rho dV) = \sum \vec{F}_{sys} \quad (2.13)$$

Ή σε άλλη μορφή:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{CV} \vec{V}(\rho dV) + \int_{CS} \vec{V}\rho(\vec{V}\vec{n})dA = \sum \vec{F} \quad (2.14)$$

Η εξίσωση 2.14 είναι η εξίσωση ορμής για έναν όγκο ελέγχου. Χρησιμοποιώντας το θεώρημα της απόκλισης, εύκολα προκύπτει η γενική διαφορική εξίσωση γραμμικής ορμής γνωστή ως εξίσωση Cauchy.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\vec{V}) + \vec{\nabla} \cdot (\rho\vec{V}\vec{V}) = \rho\vec{g} + \vec{\nabla} \cdot \sigma_{ij} \quad (2.15)$$

Όπου σ_{ij} είναι ο τανυστής των τάσεων:

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xa} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}$$

Για ένα ρευστό σε ηρεμία η μοναδική τάση που δρα σε όλες τις επιφάνειες του όγκου ελέγχου είναι η υδροστατική πίεση:

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} -P & 0 & 0 \\ 0 & -P & 0 \\ 0 & 0 & -P \end{bmatrix}$$

Στην περίπτωση ενός κινούμενου ρευστού η υδροστατική πίεση συνεχίζει να δρα στις επιφάνειες του όγκου ελέγχου, αλλά προστίθενται και οι συνεκτικές τάσεις.

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} -P & 0 & 0 \\ 0 & -P & 0 \\ 0 & 0 & -P \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tau_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \tau_{zz} \end{bmatrix}$$

Περιορίζοντας την τις συνεκτικές τάσεις σε ασυμπίεστη, ισοθερμοκρασιακή ροή, σταθερών ιδιοτήτων, για ένα Νευτώνειο ρευστό, όπως το νερό:

$$\tau_{ij} = 2\mu\varepsilon_{ij} \quad (2.16)$$

Έτσι, συνδυάζοντας τις παραπάνω εξισώσεις εξάγεται η ασυμπίεστη εξίσωση Navier-Stokes:

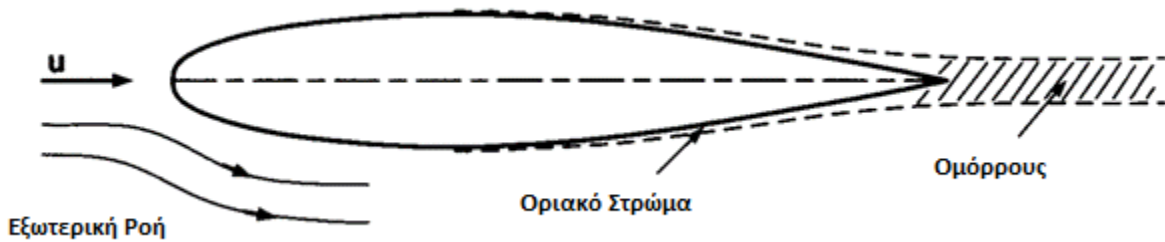
$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\vec{\nabla}P + \rho\vec{g} + \mu\nabla^2\vec{V} \quad (2.17)$$

«Η εξίσωση Navier - Stokes αποτελεί τον ακρογωνιαίο λίθο της μηχανικής των ρευστών» [7]. Οι εξισώσεις Navier-Stokes είναι εξαιρετικά πολύπλοκες και μη γραμμικές μερικές διαφορικές εξισώσεις, γεγονός που καθιστά δύσκολη την αναλυτική επίλυσή τους για πολλά πρακτικά προβλήματα ροής ρευστών. Οι λύσεις συχνά αναζητούνται μέσω αριθμητικών προσομοιώσεων και υπολογιστικών μεθόδων. Οι εξισώσεις αυτές χρησιμοποιούνται εκτενώς στη μηχανική, τη φυσική και διάφορους επιστημονικούς κλάδους για τη μελέτη και την πρόβλεψη της συμπεριφοράς των ρευστών σε διάφορα πλαίσια, από τη ροή του νερού σε σωλήνες έως την αεροδυναμική των αεροσκαφών.

2.2.2 Οριακό στρώμα

Όταν ένα συνεκτικό ρευστό κινείται γύρω από ένα σώμα, οι ισχυρές διατμητικές δυνάμεις εμφανίζονται κυρίως σε μια λεπτή περιοχή κοντά στην επιφάνεια του σώματος. Η περιοχή αυτή είναι γνωστή ως οριακό στρώμα. Επιπλέον, οι ιξώδεις δυνάμεις δημιουργούν ένα κύμα ρευστού κατάντη του αντικειμένου, εντός του οποίου οι διατμητικές τάσεις είναι επίσης σημαντικές. Αυτό το οριακό στρώμα γίνεται προοδευτικά παχύτερο καθώς κινούμαστε κατά μήκος του αντικειμένου και συνήθως φτάνει σε πάχος περίπου 2-3% του μήκους του αντικειμένου στο πίσω άκρο του. Γενικά, στο εσωτερικό του οριακού στρώματος η ταχύτητα του ρευστού μεταβάλλεται από μηδέν (λόγω της συνθήκης μη ολίσθησης κοντά στα τοιχώματα) σε αυτή της ελεύθερης ροής.

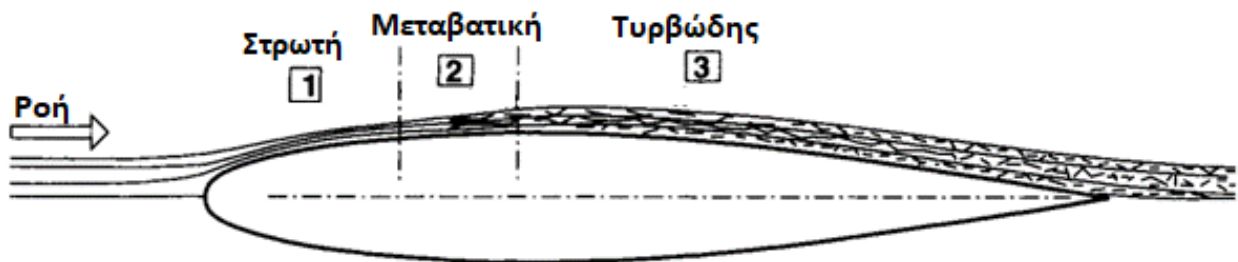
Η ύπαρξη του οριακού στρώματος, και η ενδελεχής μελέτη του, παρουσιάζει σημαντικό ερευνητικό και πρακτικό ενδιαφέρον σε ένα μεγάλο εύρος της μηχανικής ρευστών, όπως στα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας, στην απώλεια στήριξης πτερυγίων και στον υπολογισμό της αντίστασης διαφόρων σωμάτων.



Εικόνα 2.12. Οριακό στρώμα και εξωτερική ροή γύρω από μία αεροτομή [5].

2.2.3 Είδη ροής και ο αριθμός Reynolds

Οι ροές εντός ενός οριακού στρώματος παρουσιάζουν χαρακτηριστικά αστάθειας. Όταν μια ροή ξεκινά αρχικά μέσα στο οριακό στρώμα, μπορεί να είναι ομαλή και σταθερή κοντά στο μέτωπο του οριακού στρώματος. Ωστόσο, καθώς εξελίσσεται, τείνει να γίνεται ιδιαίτερα ασταθής και τυρβώδης και αυτές οι διακυμάνσεις μπορεί να επεκταθούν σε μεγάλο μέρος του οριακού στρώματος. Αυτή η μετάβαση από μια ομαλή και σταθερή ροή σε μια ασταθή, τυρβώδη ροή είναι ένα συνηθισμένο φαινόμενο στη ρευστοδυναμική. Στην εικόνα 2.13 δίνεται μία οπτική περιγραφή του οριακού στρώματος που αναπτύσσεται γύρω από μία αεροτομή.



Εικόνα 2.13. Ανάπτυξη του οριακού στρώματος γύρω από μία αεροτομή [5].

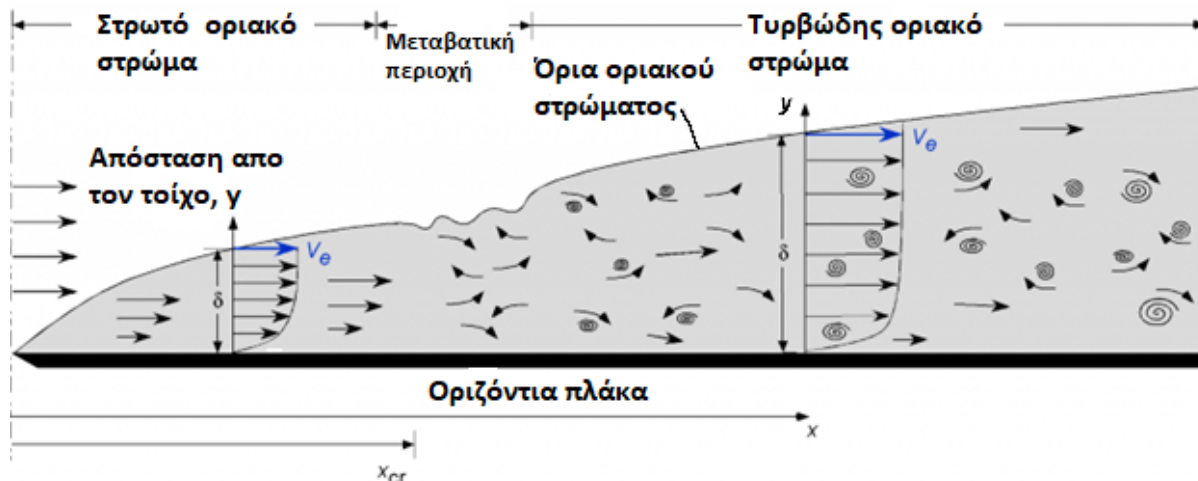
Στο οριακό στρώμα μπορούν να εντοπιστούν τρεις περιοχές, όπως απεικονίζεται στην εικόνα 2.13:

- **Περιοχή στρωτής ροής:** Σε αυτή την αρχική περιοχή, η ροή εντός του οριακού στρώματος χαρακτηρίζεται από την ομαλή, τακτική και σταθερή φύση της. Παρουσιάζει ελάχιστες αναταράξεις ή διαταραχές και τυπικά μεταβάλλεται αργά με το χρόνο.
- **Περιοχή μετάβασης:** Αυτή η ενδιάμεση περιοχή σηματοδοτεί το σημείο στο οποίο η προηγούμενος ομαλή στρωτή ροή αρχίζει να διαταράσσεται. Εδώ, η ροή παρουσιάζει μετάβαση από στρωτή σε τυρβώδη και οι διαταραχές γίνονται αισθητές.
- **Περιοχή τυρβώδους ροής:** Καθώς η ροή προχωρεί περαιτέρω κατά μήκος του οριακού στρώματος, εισέρχεται στην περιοχή τυρβώδους ροής. Σε αυτή την περιοχή, η ροή γίνεται ιδιαίτερα ασταθής και χαρακτηρίζεται από τυχαία κίνηση. Το οριακό στρώμα πυκνώνει καθώς εντείνεται η τύρβη. Εντός της τυρβώδους περιοχής, η ροή μπορεί να περιγραφεί ως ένας συνδυασμός σταθερής ή αργά μεταβαλλόμενης μέσης ροής, η οποία επικαλύπτεται από συνιστώσες ταχύτητας τύρβης. Αξίζει να σημειωθεί ότι ακόμη και στο τυρβώδες οριακό στρώμα, υπάρχει ένα λεπτό στρωτό υπόστρωμα κοντά στην επιφάνεια του στερεού σώματος. Είναι σημαντικό ότι η τυρβώδης ροή δεν είναι αποκλειστικά αποτέλεσμα της κακής διαμόρφωσης του σώματος μπορεί να εμφανιστεί ακόμη και σε επίπεδες πλάκες.

Η μετάβαση από στρωτή σε τυρβώδη ροή εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως η ταχύτητα του ρευστού (v), η απόσταση που έχει διανύσει το ρευστό κατά μήκος του σώματος (l) ή το χαρακτηριστικό μήκος για οποιαδήποτε άλλη γεωμετρία και το κινηματικό ιξώδες του ρευστού (ν). Η μετάβαση αυτή χαρακτηρίζεται από ένα μέγεθος χωρίς διαστάσεις, γνωστό ως αριθμός Reynolds (Re). Ο αριθμός Reynolds ορίζεται ως εξής:

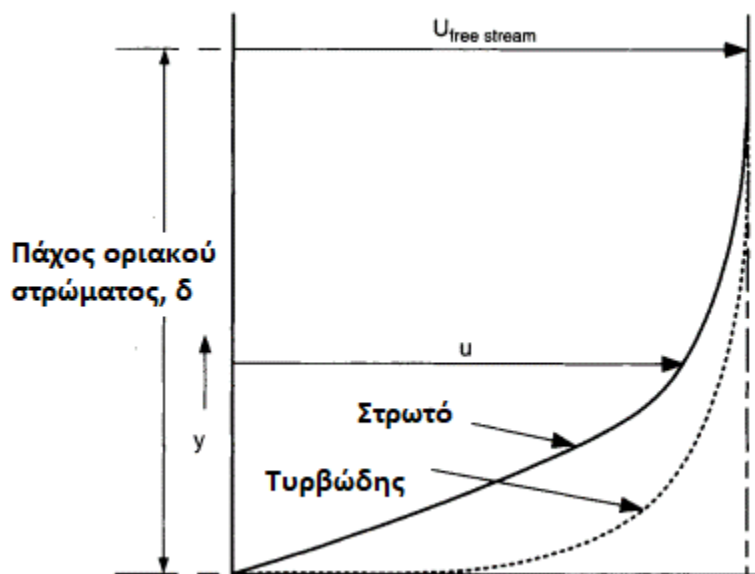
$$Re = \frac{vl}{\nu} = \frac{\text{Αδρανειακές Δυνάμεις}}{\text{Συνεκτικές Δυνάμεις}}$$

Εδώ φαίνεται ότι όσο πιο μεγάλο είναι το μήκος του σώματος τόσο μεγαλύτερος θα είναι και ο αριθμός Reynolds. Για μία λεία επίπεδη πλάκα η διαδικασία μετάβασης από στρωτή σε τυρβώδη ροή ξεκινάει σε έναν κρίσιμο αριθμό Reynolds $Re_{ex,critical} \cong 1 \times 10^5$ και καταλήγει πλήρως τυρβώδης στον μεταβατικό αριθμό Reynolds $Re_{ex,transitional} \cong 1 \times 10^6$.



Εικόνα 2.14. Μετάβαση ροής από στρωτή σε τυρβώδη πάνω σε μία λεία πλάκα [8].

Έχει παρατηρηθεί ότι μόλις ο αριθμός Reynolds ξεπεράσει περίπου το $0,5 \times 10^6$, ακόμη και όταν πρόκειται για λεία επιφάνεια, η ροή τείνει να γίνει τυρβώδης. Ωστόσο, τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας του αντικείμενου, όπως η τραχύτητά του, μπορούν επίσης να επηρεάσουν τη μετάβαση από τη στρωτή στη τυρβώδη ροή. Αυτή η μετάβαση δεν εξαρτάται μόνο από την επιφάνεια του αντικείμενου βασίζεται επίσης στο υπάρχον επίπεδο τύρβης εντός του ρευστού μέσα στο οποίο κινείται το αντικείμενο.



Εικόνα 2.15. Τυπικά προφίλ ταχύτητας οριακού στρώματος [5].

Το πάχος του οριακού στρώματος εξαρτάται κυρίως από το είδος της ροής και την απόσταση που διανύει το ρευστό. Έτσι, ύστερα από σχετικές αναλύσεις, προκύπτει κατά White [8]:

$$\text{Στρωτή ροή:} \quad \delta = \frac{5x}{Re_x^{1/2}} \quad Re_x \leq 1 \times 10^6 \quad (2.18)$$

$$\text{Τυρβώδης ροή:} \quad \delta = \frac{0.16x}{Re_x^{1/7}} \quad Re_x \geq 1 \times 10^6 \quad (2.19)$$

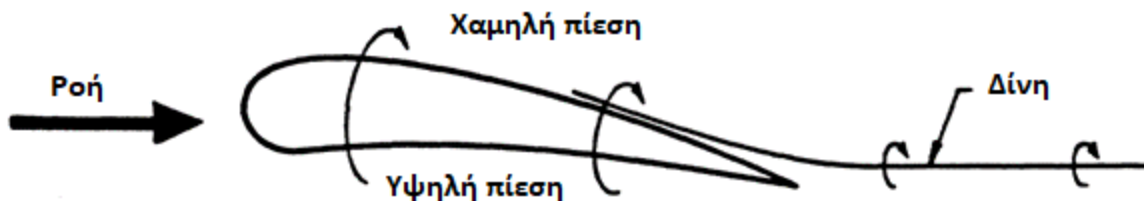
και κατά Cengel – Cimbala [7]:

$$\text{Στρωτή ροή:} \quad \delta = \frac{4.91x}{Re_x^{1/2}} \quad Re_x \leq 5 \times 10^5 \quad (2.20)$$

$$\text{Τυρβώδης ροή:} \quad \delta = \frac{0.38x}{Re_x^{1/5}} \quad Re_x \geq 5 \times 10^5 \quad (2.21)$$

2.3 Εκλυόμενες δίνες ακροπτερυγίων

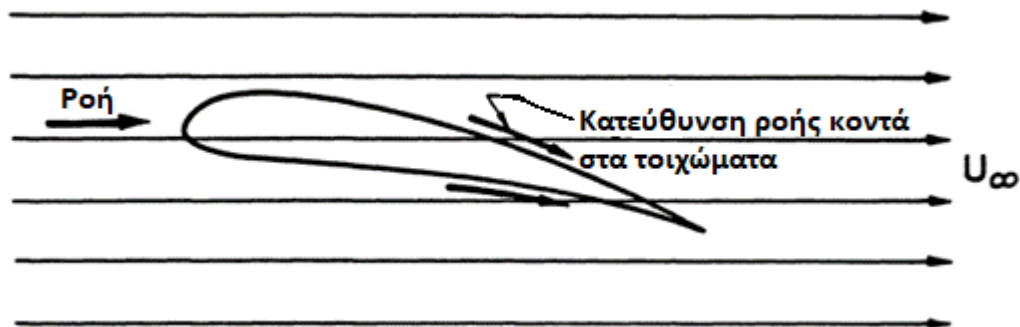
Ένα από τα εντυπωσιακά φαινόμενα που παρατηρούνται όταν ένα αεροπλάνο πετάει σε μεγάλη ύψη είναι ο σχηματισμός ενός λευκού ίχνους. Αυτά τα ίχνη είναι το αποτέλεσμα της συμπύκνωσης των υδρατμών από την εξάτμιση του κινητήρα. Είναι ενδιαφέρον ότι αυτά τα ίχνη χρησιμεύουν ως ορατοί δείκτες, περιγράφοντας σαφώς τις θέσεις των δινών στα άκρα των πτερύγων που δημιουργούνται από το αεροσκάφος. Οι δίνες ακροπτερυγίων δημιουργούνται οπουδήποτε μια επιφάνεια άνωσης έρχεται στο τέλος της σε ένα ρευστό μέσο. Ο λόγος ύπαρξης του φαινομένου αυτού είναι η διαφορά πίεσης μεταξύ της άνω και της κάτω επιφάνειας που δημιουργείται σε ένα αεροδυναμικό σώμα που παράγει άνωση όπως μία αεροτομή.



Εικόνα 2.16. Διατύπωση του πεδίου πίεσης των δινών ακροπτερυγίου [10].

Το ρευστό που κινείται κατά μήκος της επιφάνειας υψηλής πίεσης έχει την τάση να επιταχύνεται προς την πλευρά χαμηλότερης πίεσης με αποτέλεσμα να δημιουργούνται στροβιλισμοί σε εκείνη την περιοχή.

Οι δίνες ακροπτερυγίου μπορούν επίσης να εξηγηθούν από την άποψη ενός διατμητικού στρώματος που υπάρχει κοντά στην άκρη της πτέρυγας. Η εικόνα 2.17 είναι μια εσωτερική όψη μιας πτέρυγας που καταλήγει σε ένα ρευστό. Οι παράλληλες γραμμές στην κατεύθυνση του U_{∞} αντιπροσωπεύουν την αδιατάρακτη ροή σε απόσταση κατά μήκος του ανοίγματος από την πτέρυγα και τα βέλη παράλληλα προς την πτέρυγα αντιπροσωπεύουν την εντός του επιπέδου συνιστώσα της ροής πάνω από την πτέρυγα (η ροή δεν έχει διαχωριστεί). Η μη παραλληλία των διανυσμάτων ταχύτητας της επιφάνειας της πτέρυγας και της ελεύθερης ροής συνεπάγεται στροβιλισμό προσανατολισμένο μεταξύ των δύο κατευθύνσεων

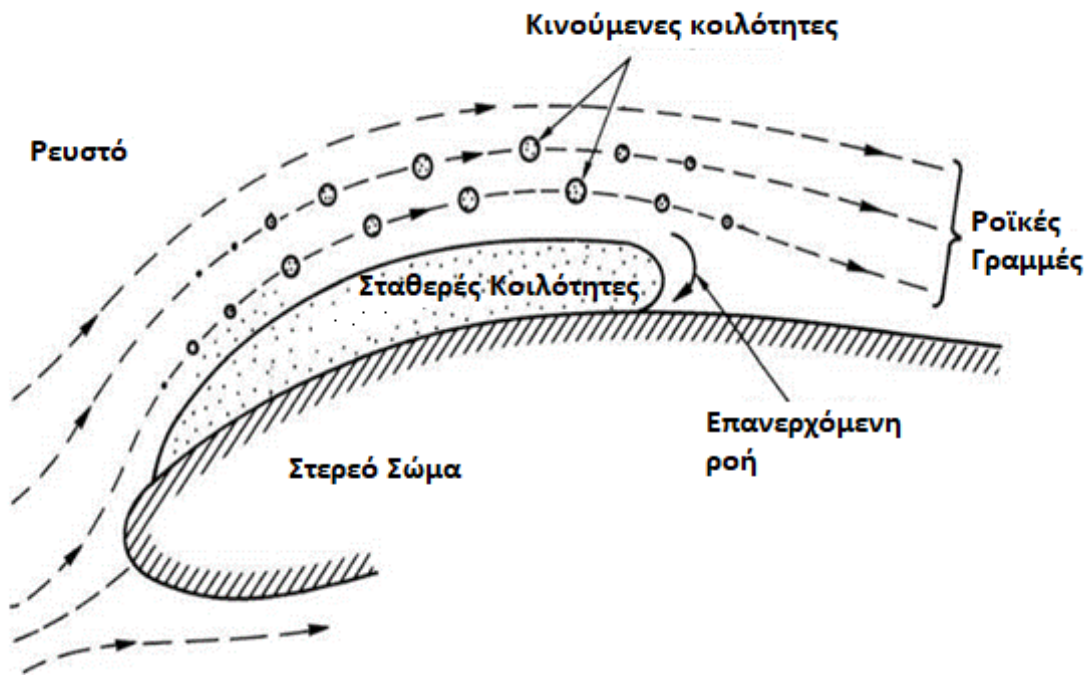


Εικόνα 2.17. Ερμηνεία του διατμητικού στρώματος των δινών του ακροπτερυγίου [10].

Σε θαλάσσιες εφαρμογές, στις οποίες οι ταχύτητες στην άκρη της προπέλας μπορεί να αρκετά υψηλές, η μείωση της πίεσης στον πυρήνα της δίνης του άκρου μπορεί να είναι 1MPa ή περισσότερο. Αυτή η μείωση της πίεσης είναι αρκετά σημαντική ώστε να προκαλέσει σπηλαιώση (τοπικό βρασμό λόγω υδροδυναμικά χαμηλής πίεσης) σε μέρος του υγρού της δίνης, ακόμη και σε μεγάλα βάθη βύθισης και να δημιουργήσει πολύ θόρυβο και κραδασμούς.

2.4 Σπηλαιώση

Η σπηλαιώση είναι ένα ενδιαφέρον αλλά και πολύπλοκο φαινόμενο στη δυναμική των ρευστών. Συμβαίνει όταν ένα ρευστό, όπως το νερό, ρέει μέσα σε ένα περιβάλλον με μεταβαλλόμενες συνθήκες πίεσης. Σε περιοχές όπου η πίεση πέφτει σημαντικά, συχνά κοντά σε αιχμηρές ακμές ή προπέλες υψηλής ταχύτητας, η πίεση του ρευστού μπορεί να πέσει κάτω από ένα κρίσιμο σημείο. Σε αυτό το σημείο, το υγρό αρχίζει να εξατμίζεται, σχηματίζοντας μικροσκοπικές κοιλότητες ή φυσαλίδες γεμάτες ατμούς. Αυτές οι φυσαλίδες είναι πολύ ασταθείς λόγω του περιβάλλοντος υψηλής πίεσης που τις περιβάλλει, με αποτέλεσμα την ταχεία κατάρρευσή τους. Όταν αυτές οι φυσαλίδες καταρρέουν, απελευθερώνουν ενέργεια με τη μορφή κρουστικών κυμάτων. Η σπηλαιώση μπορεί να έχει τόσο αρνητικές όσο και θετικές επιπτώσεις. Στα αρνητικά, μπορεί να προκαλέσει ζημιά στον εξοπλισμό, να διαβρώσει τις επιφάνειες και να δημιουργήσει θόρυβο. Αντίθετα, η ελεγχόμενη σπηλαιώση αξιοποιείται για θετικούς σκοπούς σε εφαρμογές όπως ο καθαρισμός με υπερήχους και οι ιατρικές συσκευές, όπου τα μικρά κρουστικά κύματα που παράγονται βοηθούν στην απομάκρυνση των ρύπων. Συνήθως η ταξινόμηση της σπηλαιώσης γίνεται σε σταθερές, κινητές ή δονητικές μορφές, οι δύο πρώτες έχουν μεγαλύτερο ενδιαφέρον στο πλαίσιο της τεχνολογίας των προπελών ναυτικής πρόωσης.



Εικόνα 2.18. Σταθερό και κινούμενο φαινόμενο σπηλαίωσης [1].

2.4.1 Τύποι σπηλαίωσης λόγω στροβιλισμού προπέλας

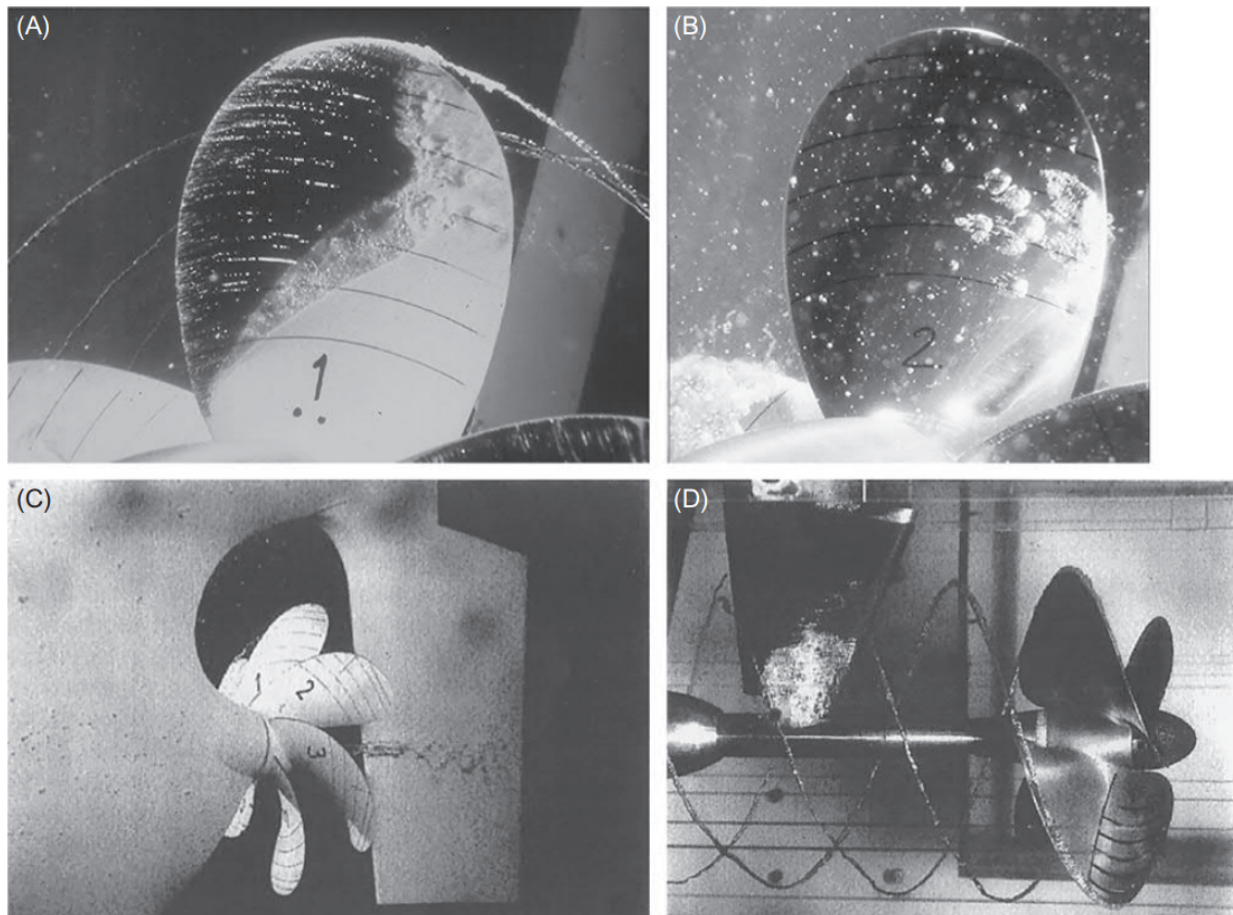
Η σπηλαίωση που προκαλείται από στροβιλισμό, με λίγες μόνο εξαιρέσεις, εμφανίζεται συνήθως σε συγκεκριμένα σημεία της προπέλας: στις άκρες των πτερυγίων, στη μπροστινή ακμή και στην πλήμνη. Αυτά τα φαινόμενα σπηλαίωσης προέρχονται από τον πυρήνα χαμηλής πίεσης των στροβίλων που αποβάλλει η προπέλα. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η ορατή όψη μιας δίνης περιορίζεται στο τμήμα σπηλαίωσης όπου οι πιέσεις είναι χαμηλές. Ωστόσο, η δίνη εκτείνεται πολύ πέρα από αυτό που είναι παρατηρήσιμο, συνεχίζοντας στο περιβάλλον ρευστό. Υπάρχουν τέσσερα είδη σπηλαίωσης που εμφανίζονται λόγω των επαγόμενων δινών των πτερυγίων μιας προπέλας.

Σπηλαίωση στη πλήμνη της προπέλας: Η δίνη της πλήμνης δημιουργείται όταν οι δίνες που δημιουργούνται από τη ρίζα κάθε πτερυγίου ενώνονται. Ενώ αυτοί οι μεμονωμένοι στροβίλοι δεν είναι επιρρεπείς σε σπηλαίωση από μόνοι τους, γίνονται ιδιαίτερα επιρρεπείς σε σπηλαίωση όταν συγκλίνουν λόγω του σχήματος του κώνου της έλικας. Όταν συμβαίνει σπηλαίωση, αυτή τείνει να είναι σταθερή και μοιάζει με σχοινί με κλωστές που αντιστοιχούν στον αριθμό των πτερυγίων της έλικας σε έναν παρατηρητή.

Σπηλαίωση στο ακροπτερύγιο της προπέλας: Η σπηλαίωση λόγω των δινών ακροπτερυγίων συνήθως παρατηρείται αρχικά λίγο πίσω από τις άκρες των πτερυγίων της προπέλας. Κατά τη διάρκεια αυτού του σταδίου, η δίνη ακροπτερυγίου θεωρείται «αδέσμευτη». Ωστόσο, καθώς ο στροβίλος γίνεται πιο έντονος, είτε λόγω αυξημένου φορτίου πτερυγίου είτε λόγω μείωσης των συνθηκών σπηλαίωσης, μετακινείται πιο κοντά στην άκρη του πτερυγίου και τελικά προσκολλάται.

Σηλαιώση του σημείου προσβολής του πτερυγίου: Η σηλαιώση στο σημείο προσβολής του πτερυγίου της προπέλας, ξεκινά συχνά στις εσωτερικές ακτίνες. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι οι περιοχές αυτές υφίστανται συνήθως υψηλότερη φόρτιση του πτερυγίου και κυρίως, έχουν μεγαλύτερη γεωμετρική καμπυλότητα στην εμπρόσθια ακμή του πτερυγίου. Η καμπυλότητα αυτή είναι ιδιαίτερα έντονη σε πολύ κυρτές προπέλες. Αυτός ο τύπος δίνης εξαρτάται από τη στροβιλότητα που αναπτύσσεται στην εμπρόσθια ακμή του πτερυγίου και μεταφέρεται προς το άκρο του πτερυγίου. Αυτό βασίζεται στη αρνητική βαθμίδα πίεσης κοντά στην ακμή προσβολής και στη συνιστώσα της ταχύτητας κατά μήκος της ακμής προσβολής, η οποία, με τη σειρά της, είναι συνάρτηση της μορφής λοξότητας του πτερυγίου.

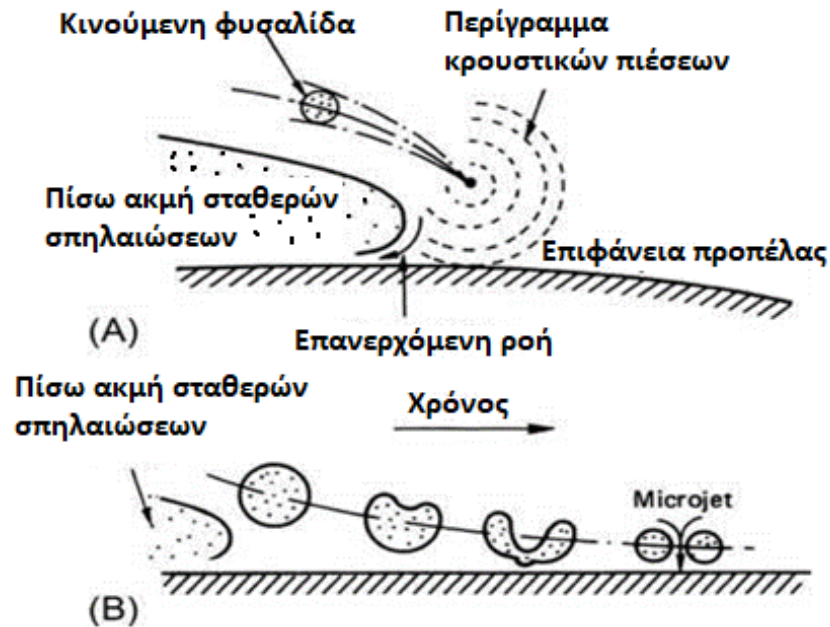
Σηλαιώση οπισθογενούς δίνης: Η φύση της οπισθογενούς δίνης επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την ακτινική κατανομή στα εξωτερικά τμήματα του πτερυγίου. Προκειμένου όμως να δημιουργηθούν οι απαιτούμενες ιδιότητες απορρόφησης ισχύος στα εσωτερικά τμήματα του πτερυγίου, η κλίση φόρτισης πρέπει να εξισορροπηθεί στο άκρο με αύξηση εκεί. Μια δίνη στην εμπρόσθια ακμή έχει μεγαλύτερη πιθανότητα να αναπτυχθεί εάν οι εσωτερικές ακτίνες είναι φορτισμένες.



Εικόνα 2.19. Τύποι σηλαιώσης σε προπέλες: (A) φύλλο και σύννεφο σηλαιώσης μαζί με μια δίνη κορυφής, (B) σηλαιώση φουσαλίδων στο μέσο της χορδής μαζί με μια δίνη κορυφής και λίγη σηλαιώση λωρίδας στο μπροστινό άκρο, (C) σηλαιώση στροβίλου στην πλήμνη με ίχνη δίνης στην ακμή προσβολής και στην κορυφή του δίσκου της προπέλας, (D) σηλαιώση στις δίνες ακροπτερυγίων [1].

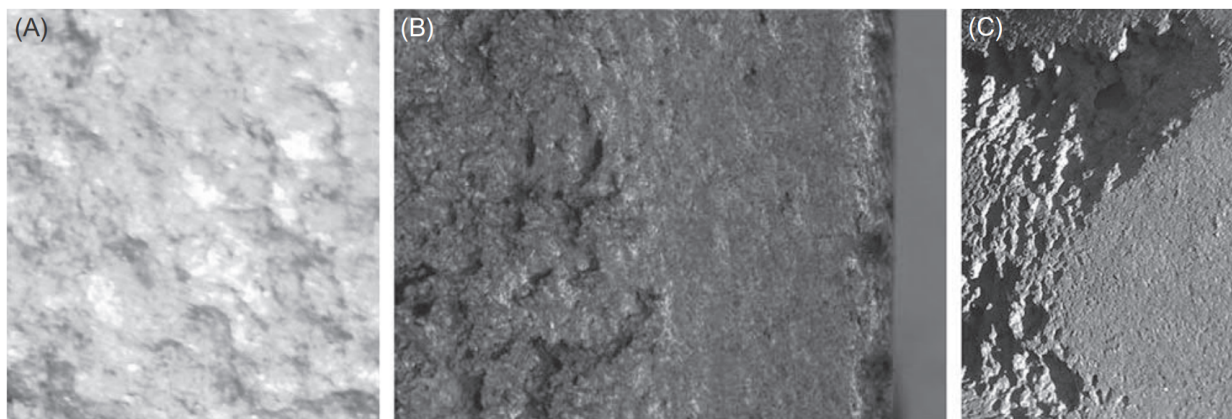
2.4.2 Βλάβες που προκαλούνται από σπηλαιώση

Δεν προκαλούν όλες οι προπέλες που έχουν σχεδιαστεί για πλοία σπηλαιώση εντός του δίσκου της έλικας, και ακόμη και όταν η σπηλαιώση εμφανίζεται στα πτερύγια κατά τη διάρκεια μιας περιστροφής, δεν οδηγεί απαραίτητα σε διάβρωση του υλικού της έλικας. Τα πρώιμα μοντέλα πρόβλεψης των ζημιών από σπηλαιώση βασίζονταν συχνά σε εμπειρικές παρατηρήσεις των τύπων σπηλαιώσης που παρατηρήθηκαν σε πρότυπες προπέλες σε σήραγγες σπηλαιώσης. Αυτά τα μοντέλα ενσωμάτων επίσης ευρετικές εκτιμήσεις σχετικά με τη σταθερότητα της σπηλαιώσης ή βασίζονταν σε εμπειρικούς συντελεστές ασφαλείας.



Εικόνα 2.20. Μηχανισμοί διάβρωσης που σχηματίζονται κατά την κατάρρευση της φυσαλίδας: (Α) κύματα πίεσης από την κατάρρευση της φυσαλίδας και (Β) σχηματισμός microjet κοντά στην επιφάνεια.

Στην πλειονότητα των περιπτώσεων, η διάβρωση λόγω σπηλαιώσης πιστεύεται ότι προκαλείται από τη συμπεριφορά των φυσαλίδων που κινούνται. Αυτές οι φυσαλίδες μπορούν είτε να περιφέρονται γύρω από μια υδροπτέρυγα, είτε να παρακάμπτουν μια σταθερή κοιλότητα, είτε να αποσπώνται από μια σταθερή κοιλότητα. Στην εικόνα 2.20Α απεικονίζεται μια σχηματική αναπαράσταση μιας φυσαλίδας που καταρρέει. Σε αυτό το σενάριο, η φυσαλίδα έχει ταξιδέψει γύρω από το εξωτερικό ενός σταθερού τμήματος μιας κοιλότητας που βρίσκεται στην επιφάνεια ενός τμήματος υδροπτέρυγας. Καθώς η πίεση αρχίζει να επανέρχεται, η φυσαλίδα φτάνει στο σημείο κατάρρευσης στην περιοχή στασιμότητας πίσω από το κατάντη άκρο της σταθερής κοιλότητας. Αυτός ο μηχανισμός κατάρρευσης παράγει μια σειρά από κρουστικά προφίλ πίεσης, με το μέγεθος της πίεσης σε κάθε προφίλ να είναι αντιστρόφως ανάλογο της απόστασης από το σημείο κατάρρευσης. Επιπλέον, όταν ο μηχανισμός κατάρρευσης εμφανίζεται κοντά σε ένα στερεό όριο, παράγει έναν μικροπίδακα που κατευθύνεται προς την επιφάνεια, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.20Β. Αποτελέσματα της έκθεσης των πτερυγίων σε σπηλαιώση παρουσιάζονται στην εικόνα 2.21.



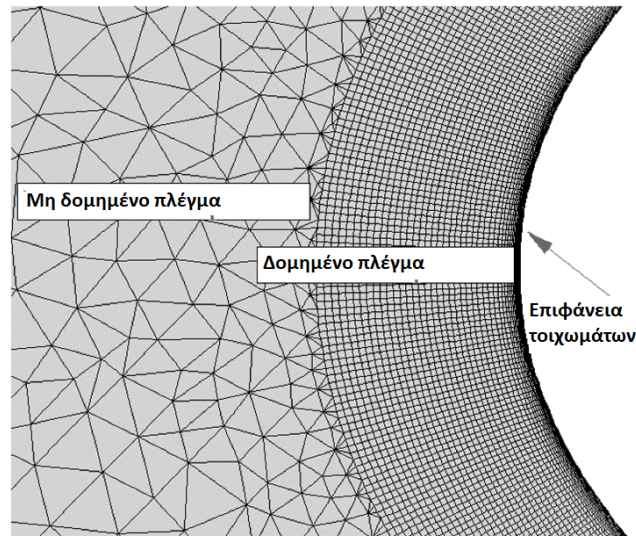
Εικόνα 2.21. Τυπική μορφολογία βλάβης στην επιφάνεια της λεπίδας (Α) φλοιός πορτοκαλιού, (Β) εξέλιξη σε ελαφριά διάβρωση και (Γ) σοβαρή διάβρωση με κάποια πλήρη διείσδυση [10].

2.5 Υπολογιστή Ρευστοδυναμική

Η Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (Computational Fluid Dynamics – CFD) αποτελεί μια σύνθετη, αλλά πανίσχυρη τεχνική που εκμεταλλεύεται την υπολογιστική ικανότητα και τα μαθηματικά μοντέλα για τη μελέτη της κίνησης των ρευστών και της αλληλεπίδρασής τους με άλλα σώματα. Μέσω της ανάλυσης CFD, είναι δυνατόν να αποτυπωθούν και να κατανοηθούν οι συμπεριφορές των ρευστών, όπως ο αέρας και το νερό, σε συνθήκες που είναι εξαιρετικά δύσκολο να διερευνηθούν πειραματικά. Αυτή η τεχνολογία είναι πολύ χρήσιμη σε εφαρμογές όπως η ανάπτυξη και βελτιστοποίηση προπελών σε ναυτικά οχήματα, όπου η ανάγκη για ακρίβεια, αποδοτικότητα και αξιοπιστία είναι αυξημένη. Μέσω της ανάλυσης CFD, οι επιστήμονες και οι μηχανικοί μπορούν να εξετάσουν διάφορες παραμέτρους και σενάρια, βελτιώνοντας έτσι σημαντικά τη σχεδίαση και τη λειτουργία των ναυτικών συστημάτων.

2.5.1 Μέθοδοι Πλέγματος και Διακριτοποίηση

Το πλέγμα αποτελεί την εικονική απεικόνιση του υπολογιστικού τομέα και είναι ουσιαστικό στοιχείο κάθε ανάλυσης CFD. Χωρίζει τον υπολογιστικό χώρο σε διακριτές περιοχές (κόμβους, στοιχεία, όγκους) όπου γίνονται οι υπολογισμοί. Τα πλέγματα μπορούν να καταταχθούν ως δομημένα, μη δομημένα και υβριδικά. Τα δομημένα πλέγματα είναι τακτικά και προσαρμόζονται καλύτερα σε απλές γεωμετρίες, ενώ τα μη δομημένα πλέγματα είναι πιο ευέλικτα και μπορούν να προσαρμοστούν σε πιο πολύπλοκες γεωμετρίες. Οι βασικές μορφές των δισδιάστατων στοιχείων είναι τα τρίγωνα και τα τετράγωνα, με τα τρίγωνα να μεταβάλλονται σε τετράεδρα και πρίσματα στις τρισδιάστατες αναλύσεις, και τα τετράγωνα σε πυραμίδες και εξάεδρα. Είναι επίσης απαραίτητο να τονιστεί η σημασία της διαμόρφωσης του πλέγματος. Μια σωστή διαμόρφωση μπορεί να αντικατοπτρίσει με ακρίβεια τη γεωμετρία του υπολογιστικού τομέα και να βελτιστοποιήσει την απόδοση και την ακρίβεια της ανάλυσης. Επομένως, η επιλογή του τύπου, της πυκνότητας και της διαμόρφωσης του πλέγματος είναι ουσιαστική για την επιτυχία μιας ανάλυσης.



Εικόνα 2.22. Απεικόνιση ενός υβριδικού πλέγματος, δομημένα κελιά κοντά στα τοιχώματα και μη δομημένα μακριά τους.

2.5.2 Οριακές Συνθήκες και y^+

Ο ορθός καθορισμός των οριακών συνθηκών είναι απαραίτητος για την επίτευξη αξιόπιστων και ακριβών αποτελεσμάτων. Οι οριακές συνθήκες διαμορφώνουν το περιβάλλον εντός του οποίου εκτελούνται οι ρευστοδυναμικές εξισώσεις, διασφαλίζοντας ότι το σύστημα αντικατοπτρίζει σωστά τη φυσική συμπεριφορά του ρευστού. Προσδιορίζουν τον τύπο της ροής, τις τιμές των μεταβλητών στα όρια του υπολογιστικού πεδίου και είναι κρίσιμες για την ποιότητα της λύσης, διαφέροντας έτσι από άλλες παραμέτρους όπως το πλέγμα και η γεωμετρία που μπορεί να παραμένουν αμετάβλητες σε διαφορετικές αναλύσεις. Οι βασικότερες οριακές συνθήκες περιλαμβάνουν τις συνθήκες τοιχώματος, εισροής, και εκροής, οι οποίες ορίζουν παραμέτρους όπως την ταχύτητα, την πίεση και τη θερμοκρασία στα όρια του υπολογιστικού πεδίου. Η επιλογή των κατάλληλων οριακών συνθηκών και η εξατομίκευσή τους σε σχέση με το εκάστοτε πρόβλημα είναι κρίσιμη για την επιτυχία της ανάλυσης.

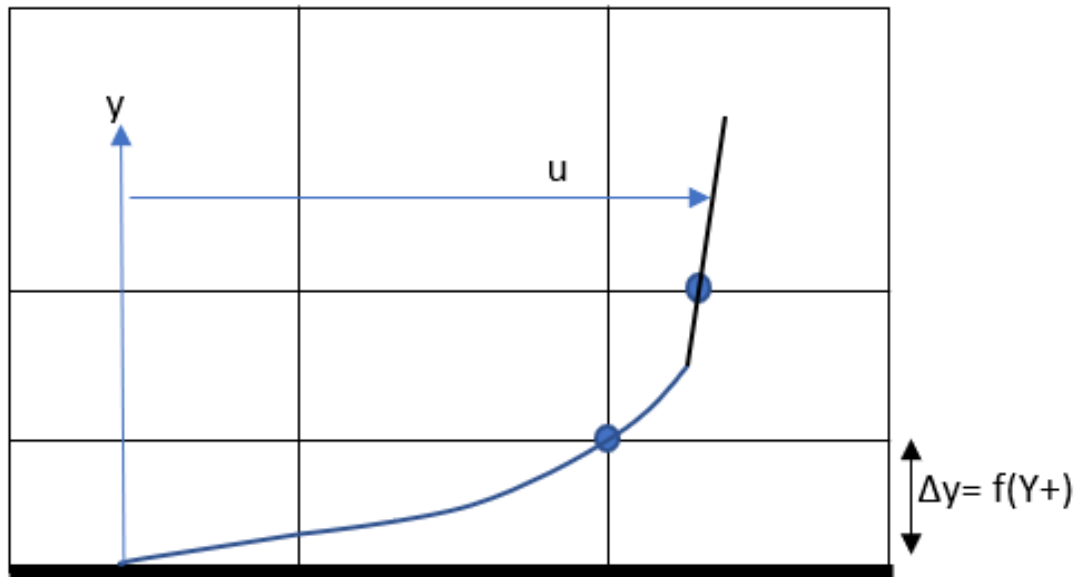
Για να είναι αξιόπιστα τα αποτελέσματα μιας προσομοίωσης, πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη πολύ στα σημεία όπου το ρευστό συναντά ένα εμπόδιο, όπως τα πτερύγια της προπέλας. Σε αυτά τα σημεία, το οριακό στρώμα, δηλαδή η λεπτή στρώση ρευστού κοντά στην επιφάνεια του στερεού, είναι πολύ σημαντικό για την ακρίβεια της προσομοίωσης. Ο παράγοντας y^+ μας βοηθάει στην κατανόηση του πόσο καλά περιγράφεται το οριακό στρώμα στην προσομοίωση και να βεβαιωθούμε ότι τα αποτελέσματα μας είναι αξιόπιστα.

Το y^+ είναι ένας αδιάστατος συντελεστής που χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη θέση του πρώτου κόμβου κοντά σε ένα τοίχωμα σε σχέση με το πάχος του υδροδυναμικού στρώματος. Είναι ιδιαίτερα σημαντικός στην υπολογιστική ρευστοδυναμική καθώς επηρεάζει την ακρίβεια των προσομοιώσεων κοντά στα τοιχώματα.

Ορίζεται ως:

$$y^+ = \frac{y u_*}{\nu} \quad (2.22)$$

Όπου, u_* είναι η ταχύτητα τριβής του τοιχώματος, y^+ είναι η κανονική απόσταση από το τοίχωμα και ν είναι το κινηματικό ιξώδες του ρευστού. Η σωστή επιλογή του y^+ είναι ουσιαστική για να εξασφαλίσει ότι το πλέγμα είναι αρκετά λεπτό για να περιγράψει σωστά τις υδροδυναμικές επιδράσεις κοντά στο τοίχωμα και για να παράγει αξιόπιστα αποτελέσματα. Ένα καλά επιλεγμένο y^+ συμβάλλει στην ακρίβεια και στην αξιοπιστία των υπολογιστικών προσομοιώσεων και βοηθά στην επίτευξη σωστών οριακών συνθηκών.



Εικόνα 2.23. Απεικόνιση της έννοιας του y^+ .

2.5.3 Μοντέλα τύρβης

Οι εξισώσεις Navier-Stokes περιγράφουν με λεπτομέρεια τη ροή των ρευστών, αλλά η ανάλυση της τύρβης μπορεί να είναι πολύ πολύπλοκη και χρονοβόρα. Γι' αυτό, χρησιμοποιούμε τα μοντέλα τύρβης, που βασίζονται στις μέσες εξισώσεις Navier-Stokes κατά Reynolds (RANS), για να προβλεφθούν οι επιπτώσεις της τύρβης στη ροή, παραβλέποντας τις μικροδιακυμάνσεις. Αυτό επιτρέπει την εφαρμογή ειδικευμένων μοντέλων σε διάφορες καταστάσεις, διευκολύνοντας την ανάλυση σε περιπτώσεις όπου η λεπτομερής προσομοίωση της τύρβης δεν είναι πρακτική ή εφικτή. Αναφορικά, παρουσιάζονται μερικά από τα μοντέλα τύρβης παρακάτω.

2.5.3.1 Το μοντέλο $k-\varepsilon$

Το $k - \varepsilon$ είναι ένα από τα πιο γνωστά και εδραιωμένα μοντέλα τύρβης δυο εξισώσεων. Χρησιμοποιεί την τυρβώδη κινητική ενέργεια k και τον ρυθμό σκέδασης της τυρβώδους ενέργειας ε . Θεωρείται η βάση των μοντέλων τύρβης που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία, δείχνοντας να καλύπτει με ικανοποιητική ακρίβεια ένα μεγάλο εύρος ρευστοδυναμικών προβλημάτων. Από την άλλη, υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες δεν είναι κατάλληλο. Τέτοιες περιπτώσεις, μεταξύ άλλων, είναι ροές όπου εμφανίζεται διαχώριση του οριακού στρώματος, ροές σε καμπύλες επιφάνειες και ροές, όπου το ρευστό περιστρέφεται. Μοντέλα βασισμένα στη διάχυση της ενέργειας τείνουν να υποεκτιμούν την αποκόλληση της ροής και να καταλήγουν σε σφάλματα.

2.5.3.2 Το μοντέλο $k-\omega$

Ένα από τα επίσης δημοφιλέστερα μοντέλα τύρβης είναι το $k - \omega$, το οποίο δείχνει να λειτουργεί καλύτερα από το $k - \varepsilon$ σε περιοχές οριακού στρώματος, καθώς η παράμετρος που χρησιμοποιεί είναι η συχνότητα τύρβης ω , αντί για το ρυθμό σκέδασης της τυρβώδους ενέργειας ε . Αντίθετα, σε περιοχές εκτός του οριακού στρώματος δείχνει να είναι ασταθές, καθώς, ειδικά σε περιστρεφόμενες ροές ρευστού, ανάλογα με την προσδιοριζόμενη γωνιακή ταχύτητα του ρευστού, παρατηρείται μία αξιοσημείωτη ποικιλία αποτελεσμάτων. Επιπλέον, απαιτεί την πυκνότερη διακριτοποίηση στην περιοχή του οριακού στρώματος, με πρισματικά στοιχεία ή εξάεδρα, αυξάνοντας τον αριθμό των στοιχείων και το χρόνο εκτέλεσης της προσομοίωσης.

2.5.3.3 Το μοντέλο $k-\omega$ Shear Stress Transport ($k - \omega$ SST)

Το $k - \omega$ SST είναι ο συνδυασμός των δύο παραπάνω μοντέλων, εκμεταλλευόμενο το $k - \omega$ στη σωστότερη πρόβλεψη της συμπεριφοράς του ρευστού στο οριακό στρώμα και το $k - \varepsilon$ για την υπόλοιπη περιοχή του όγκου ελέγχου.

2.5.3.4 Το μοντέλο RNG $k-\varepsilon$

Το μοντέλο RNG αναπτύχθηκε με τη χρήση των μεθόδων Re-Normalisation Group (RNG) των Yakhot et. al [12] για την επανακανονικοποίηση των εξισώσεων Navier-Stokes, ώστε να ληφθούν υπόψη οι επιπτώσεις των μικρότερων κλιμάκων κίνησης. Στο τυπικό μοντέλο $k-\varepsilon$ το τυρβώδες ιξώδες προσδιορίζεται από μία μόνο κλίμακα μήκους της τύρβης, οπότε η υπολογισμένη τυρβώδης διάχυση είναι αυτή που συμβαίνει μόνο στη συγκεκριμένη κλίμακα, ενώ στην πραγματικότητα όλες οι κλίμακες κίνησης συμβάλλουν στην τυρβώδη διάχυση. Η προσέγγιση RNG, η οποία είναι μια μαθηματική τεχνική που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξαγωγή ενός μοντέλου τύρβης παρόμοιου με το $k-\varepsilon$, οδηγεί σε μια τροποποιημένη μορφή της εξίσωσης του ε η οποία επιχειρεί να λάβει υπόψη τις διαφορετικές κλίμακες κίνησης μέσω αλλαγών στον όρο παραγωγής

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται χρήση του μοντέλου **RNG k-epsilon** το οποίο χρησιμοποιεί τις παρακάτω εξισώσεις:

Για την τυρβώδη κινητική ενέργεια k :

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (2.22)$$

Για το ρυθμό τυρβώδους καταστροφής ε :

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{2\varepsilon}^* \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.23)$$

Όπου:

- u_i αντιπροσωπεύει τη συνιστώσα της ταχύτητας στην αντίστοιχη κατεύθυνση
- P_k αντιπροσωπεύει το ρυθμό παραμόρφωσης
- μ_t αντιπροσωπεύει το ιξώδες των στροβίλων και $\mu_t = \rho C_\mu \frac{\varepsilon^2}{k}$
- $C_{2\varepsilon}^* = C_{2\varepsilon} + \frac{C_\mu \eta^3 (1-\eta)/\eta_0}{1+\beta\eta^3}$
- $\eta = Sk/\varepsilon$ και $S = (2S_{ij}S_{ij})^{1/2}$

Οι εξισώσεις αποτελούνται επίσης από ορισμένες ρυθμιζόμενες σταθερές C_μ , σ_k , σ_ε , $C_{1\varepsilon}$ και $C_{2\varepsilon}$, η_0 , β . Οι τιμές αυτών των σταθερών προέκυψαν από πολυάριθμες επαναλήψεις προσαρμογής δεδομένων για ένα ευρύ φάσμα τυρβωδών ροών. Οι τιμές αυτές έχουν ως εξής:

$$C_\mu=0,09 \quad \sigma_k=1,00 \quad \sigma_\varepsilon=1,30 \quad C_{1\varepsilon}=1,44 \quad C_{2\varepsilon}=1,92 \quad \eta_0=4,38$$

$$\beta=0,012$$

2.5.3.5 Εφαρμογή και χρήση του μοντέλου RNG $k-\varepsilon$

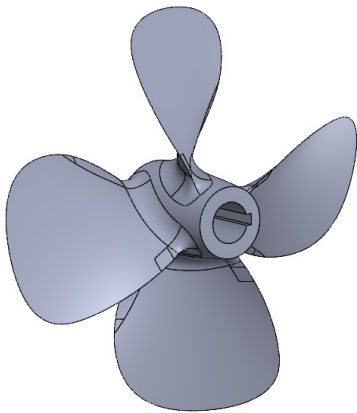
Παρόλο που η τεχνική για την εξαγωγή των εξισώσεων RNG ήταν αρκετά επαναστατική εκείνη την εποχή, η χρήση της ήταν πιο διακριτική. Ορισμένοι εργαζόμενοι ισχυρίζονται ότι προσφέρει βελτιωμένη ακρίβεια σε περιστρεφόμενες ροές, αν και υπάρχουν ανάμεικτα αποτελέσματα από αυτή την άποψη. Έχει δείξει βελτιωμένα αποτελέσματα για τη μοντελοποίηση περιστρεφόμενων κοιλοτήτων, αλλά δεν έδειξε καμία βελτίωση σε σχέση με το τυπικό μοντέλο για την πρόβλεψη της εξέλιξης των στροβίλων. Προτιμάται για προσομοιώσεις εσωτερικού αέρα.

3. Μεθοδολογία

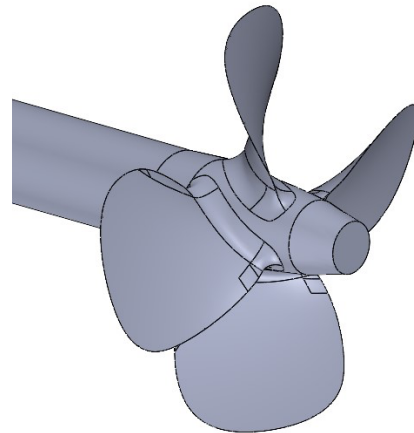
3.1 Γεωμετρία

3.1.1 Γεωμετρία κύριας προπέλας INSEAN E779A

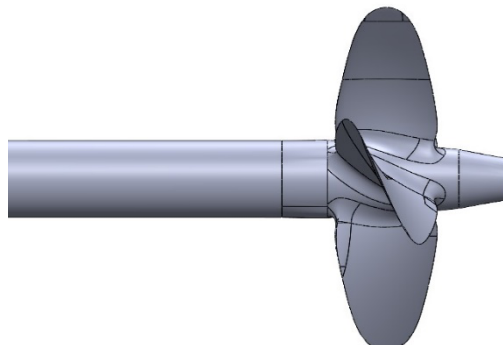
Αρχικά, η γεωμετρία της προπέλας εισήχθη στο λογισμικό SolidWorks της Dassault Systems. Η γεωμετρία της προπέλας λήφθηκε από την ιστοσελίδα GrabCad από τον K. Steen Winther ο οποίος παρέθεσε το εξής σχόλιο μαζί με το αρχείο της προπέλας «*Τα αρχικά δεδομένα δεν παράγουν ομαλές καμπύλες ή επιφάνειες, οπότε έχω αποκλίνει από αυτές προκειμένου να παράγω ένα ομαλό μοντέλο*». Έτσι η προπέλα που μελετάτε στην παρούσα διπλωματική εργασία δεν είναι η πραγματική της INSEAN E779A αλλά μία ελαφρά παραλλαγή της. Παρατηρήθηκε ότι, όντας προπέλα που χρησιμοποιείται σε πολλές εφαρμογές στο εμπόριο, υπήρχε ένα κενό στον άξονα περιστροφής που αποσκοπεί στην σύνδεση της προπέλας με το σύστημα μετάδοσης κίνησης. Για την παρούσα εργασία και την υπολογιστική της ανάλυση αυτό το κενό στον άξονα περιστροφής δεν ήταν χρήσιμο. Επίσης, υπήρχε η ανάγκη δημιουργίας επιπλέον επιφάνειας για την εγκατάσταση των συστημάτων PBCF και CRPBCF. Για τον λόγο αυτό, η προπέλα επεξεργάστηκε και έκλεισε το κενό στον άξονα περιστροφής καθώς και τροποποιήθηκε η πλήμνη της.



Εικόνα 3.1. INSEAN E779A πριν την τροποποίηση της πλήμνης.



Εικόνα 3.2. INSEAN E779A μετά την τροποποίηση της πλήμνης.



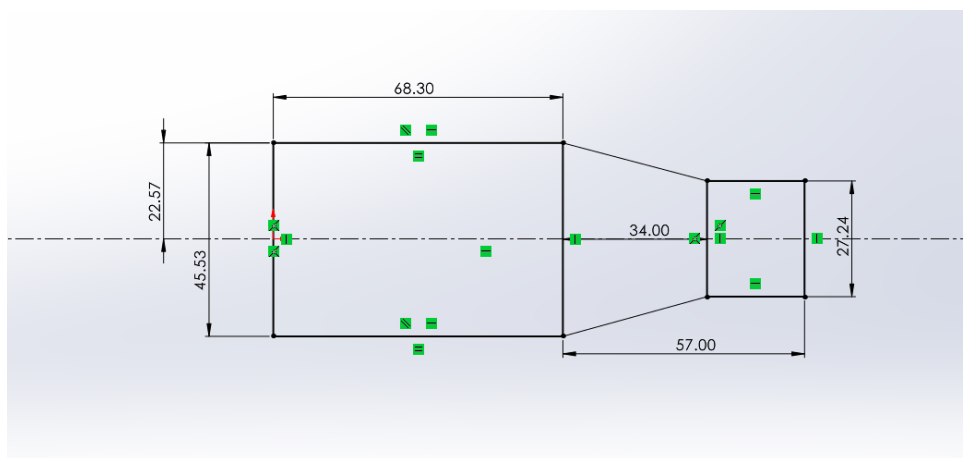
Εικόνα 3.3. Πλάγια όψη της προπέλας INSEAN E779A μετά την τροποποίησή της.

Η INSEAN E779A είναι μια τετραπτέρυγη προπέλα σταθερού βήματος, δεξιόστροφης κατεύθυνσης, που σχεδιάστηκε αρχικά το 1959 για ένα οχηματαγωγό πλοίο και δεν κατασκευάστηκε ποτέ σε πλήρη κλίμακα. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα

Διάμετρος προπέλας	$D=227,27\text{mm}$
Αριθμός πτερυγίων	$Z=4$
Αναλογία βήματος (ονομαστική)	$P/Dp=1,1$
Γωνία τοποθέτησης (λοξότητας) στο ακροπτερύγιο	$\theta^{tip_S} = 4.8^\circ$ (Θετική)
Rake (ονομαστική)	$i=4.58^\circ$ (εμπρός κατεύθυνση)
Αναλογία διευρυμένης περιοχής	$EAR=0,689$
Διάμετρος πλήμνης	$D_H=45,53\text{mm}$
Μήκος πλήμνης	$L_H=68,30$

Πίνακας 3.1. Βασικά γεωμετρικά στοιχεία της προπέλας INSEAN E779A.

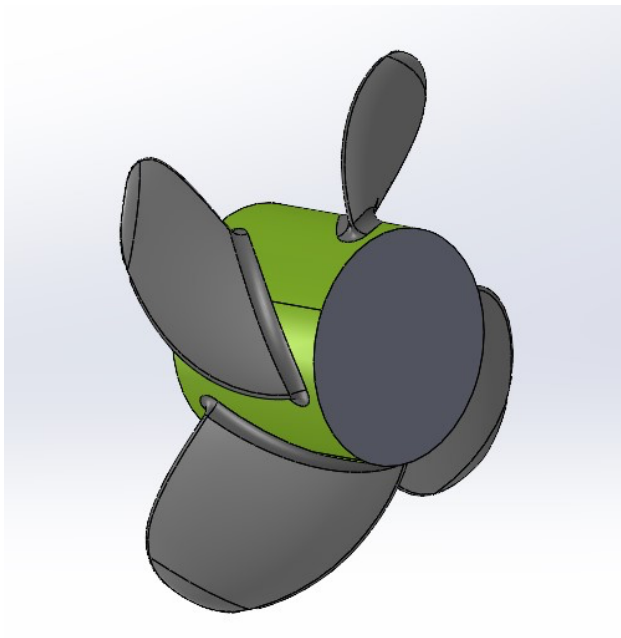
Οι τροποποιήσεις που έγιναν στην πλήμνη παρουσιάζονται στην εικόνα 3.4 παρακάτω. Η πλήμνη αποτελείται από δύο κυλίνδρους και έναν κυκλικό αποκομμένο κώνους. Οι ακτίνες του μεγαλύτερου και του μικρότερου κυλίνδρου είναι 0,3R και 0,12R, αντίστοιχα. Η απόσταση μεταξύ της δεξιάς ακραίας επιφάνειας του μεγαλύτερου κυλίνδρου και του κέντρου της έλικας είναι 0,2R. Το γεωμετρικό μοντέλο της έλικας αναφοράς απεικονίζεται στην εικόνα 3.3.



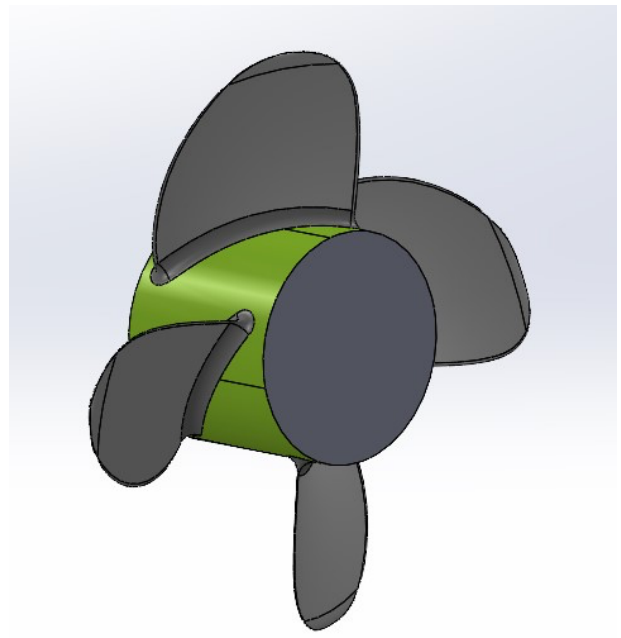
Εικόνα 3.4. Τροποποιήσεις στην πλήμνη της προπέλας με σκοπό την εγκατάσταση PBCF και CRPBCF.

3.1.2 Γεωμετρία της δευτερεύουσας προπέλας

Για την ευκολία της έκφρασης, τα δύο μοντέλα προπέλας με τις προσθήκες των PBCF και CRPBCF ονομάζονται κύρια και βοηθητική προπέλα αντίστοιχα. Οι κεντρικοί άξονες της κύριας και της βοηθητικής προπέλας συμπίπτουν. Οι δομικές διαστάσεις των πτερυγίων και της πλήμνης της κύριας είναι ίδιες με εκείνες της προπέλας αναφοράς. Με άλλα λόγια, η διαφορά μεταξύ της αρχικής προπέλας INSEAN E779A και των προπελών με PBCF και CRPBCF είναι η προσθήκη μιας βοηθητικής έλικας. Το γεωμετρικό μοντέλο της βοηθητικής προκύπτει από το μετασχηματισμό της κύριας προπέλας. Η ακτίνα της βοηθητικής έλικας είναι 0,3 φορές μεγαλύτερη από την ακτίνα της κύριας ενώ τα υπόλοιπα γεωμετρικά χαρακτηριστικά παραμένουν ίδια. Η κατεύθυνση περιστροφής της βοηθητικής προπέλας με PBCF ίδια με εκείνη της κύριας προπέλας, ενώ της CRPBCF είναι αντίθετη. Το κέντρο της βοηθητικής έλικας απέχει 0,6R από το κέντρο της κύριας έλικας. Ο λόγος της πλήμνης της βοηθητικής προπέλας είναι 0,4, οπότε η ακτίνα της πλήμνης της βοηθητικής έλικας είναι 0,12R. Στις εικόνες 3.5 και 3.6 απεικονίζονται οι βοηθητικές προπέλες που σχεδιάστηκαν.

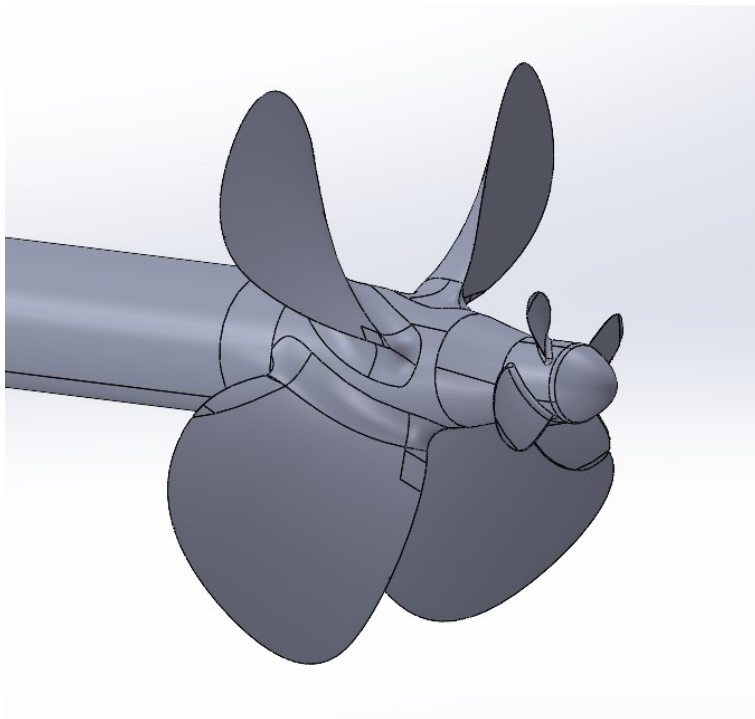


Εικόνα 3.5. Βοηθητική προπέλα PBCF.

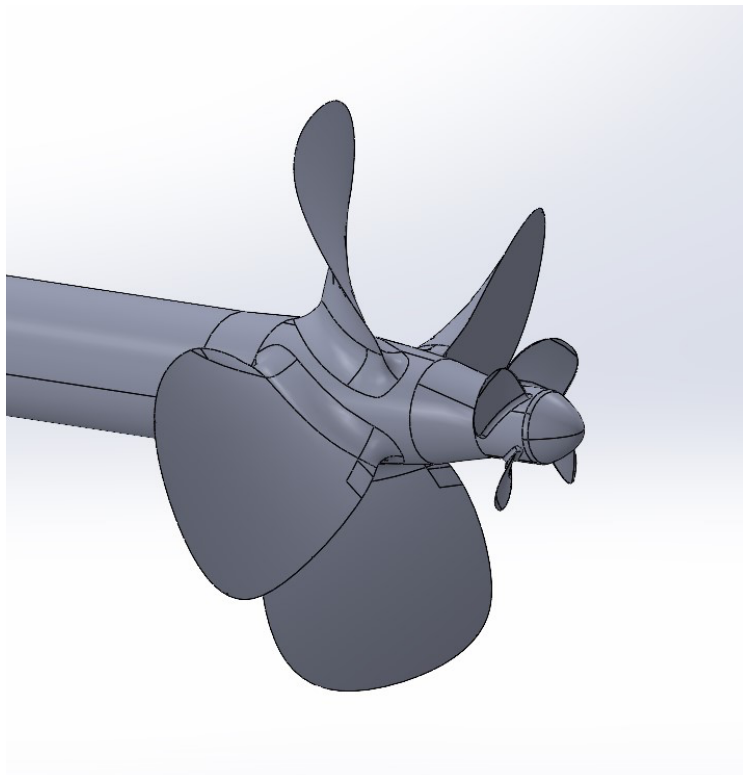


Εικόνα 3.6. Βοηθητική προπέλα CRPBCF.

Επιπλέον, το κέντρο των πτερυγίων του καλύμματος της κεφαλής συμπίπτει με το κέντρο της βοηθητικής έλικας, όπως φαίνεται στις εικόνες 3.7 και 3.8. Η διάμετρος των πτερυγίων της PBCF είναι η ίδια με εκείνη της CRPBF. Τα πτερύγια της κεφαλής και η βοηθητική έλικα έχουν τις ίδιες δομικές διαστάσεις, μόνο η κατεύθυνση περιστροφής είναι διαφορετική.



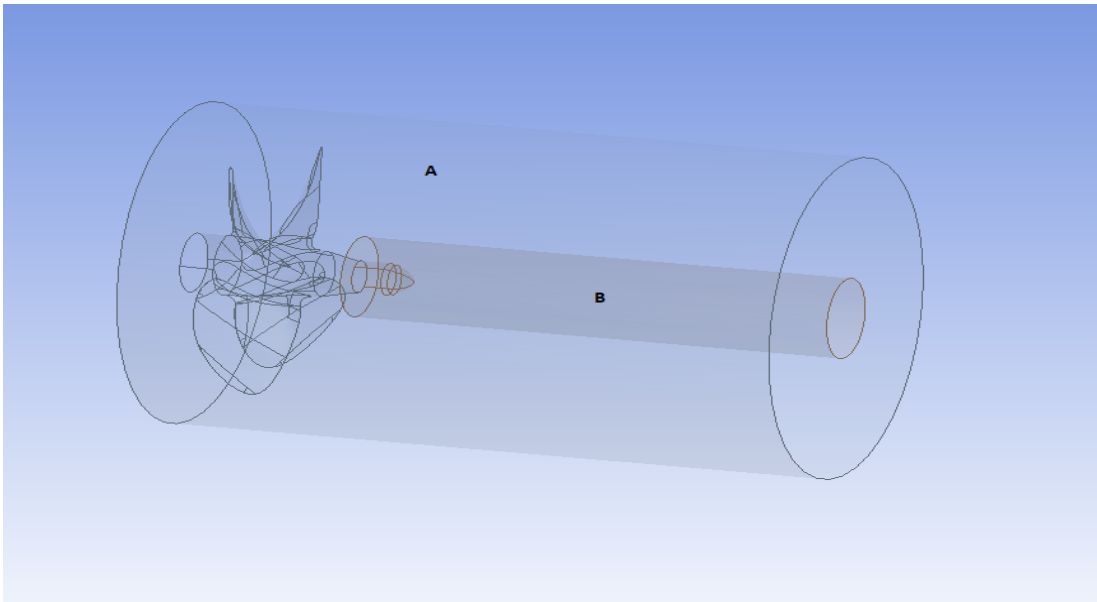
Εικόνα 3.7. Προπέλα INSEAN E779A με βοηθητικά πτερύγια PBCF.



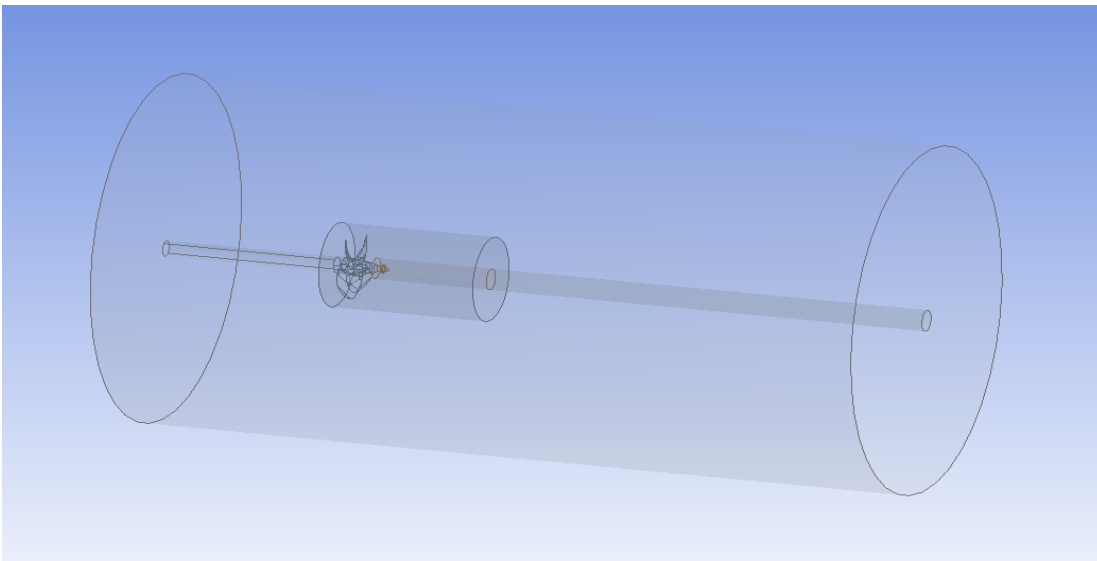
Εικόνα 3.8. Προπέλα INSEAN E779A με βοηθητικά πτερύγια αντίθετης περιστροφής CRPBCF.

3.2 Σχεδίαση υπολογιστικών χωρίων

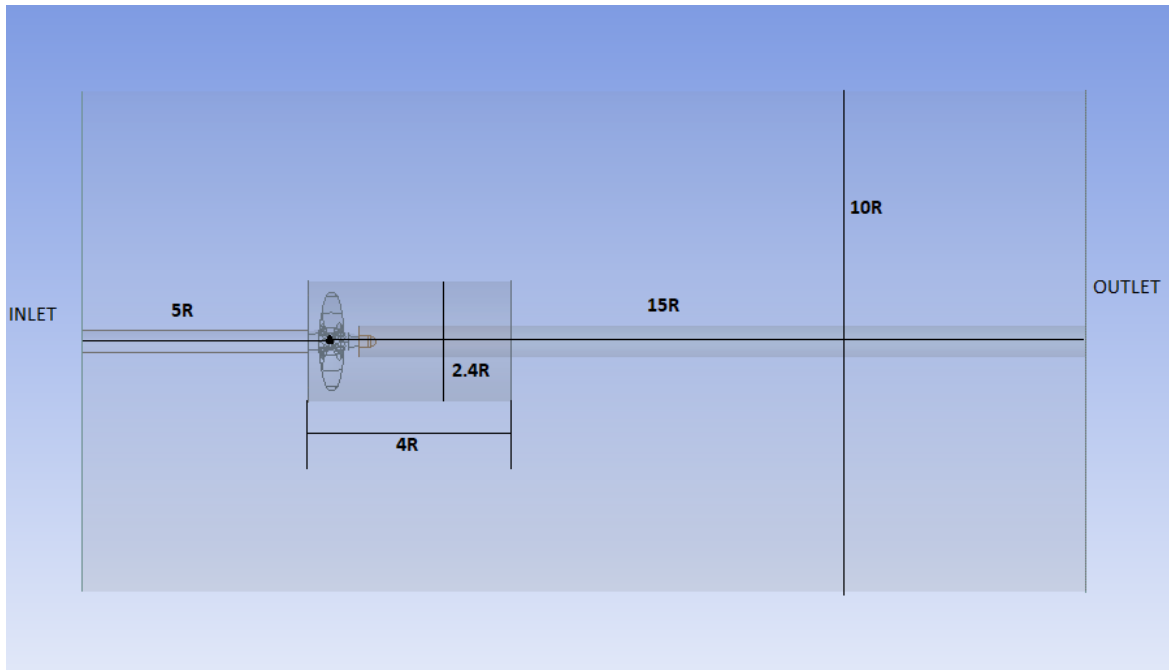
Η γεωμετρία της προπέλας εισήχθησαν στο λογισμικό σχεδίασης της Ansys με σκοπό την δημιουργία των περιβαλλόντων όγκων για την υπολογιστική ανάλυση. Γύρω από την προπέλα σχεδιάστηκαν 4 όγκοι. Ένας κύλινδρος A στον οποίο βρίσκεται η προπέλα, ένας κύλινδρος B μπροστά από την προπέλα που περιέχει τις βοηθητικές προπέλες, ένας κύλινδρος Γ γύρω από τους προηγούμενους δύο και ένας τελευταίος μετά από τον B για να μπορεί να γίνει η κατάλληλη σύνδεση των πλεγμάτων μεταξύ τους. Οι κύλινδροι δημιουργήθηκαν για το πύκνωμα των στοιχείων κοντά στην προπέλα και οι πρώτοι εκ αυτών για την περιστροφή τους σχετικά με τον ακίνητο κύλινδρο Γ. Συγκεκριμένα, οι όγκοι καθώς και οι διαστάσεις τους απεικονίζονται παρακάτω.



Εικόνα 3.9. Οι δύο κυλινδρικοί όγκοι A και B γύρω από την προπέλα. ο A περιέχει την κύρια προπέλα και ο B τις βοηθητικές.



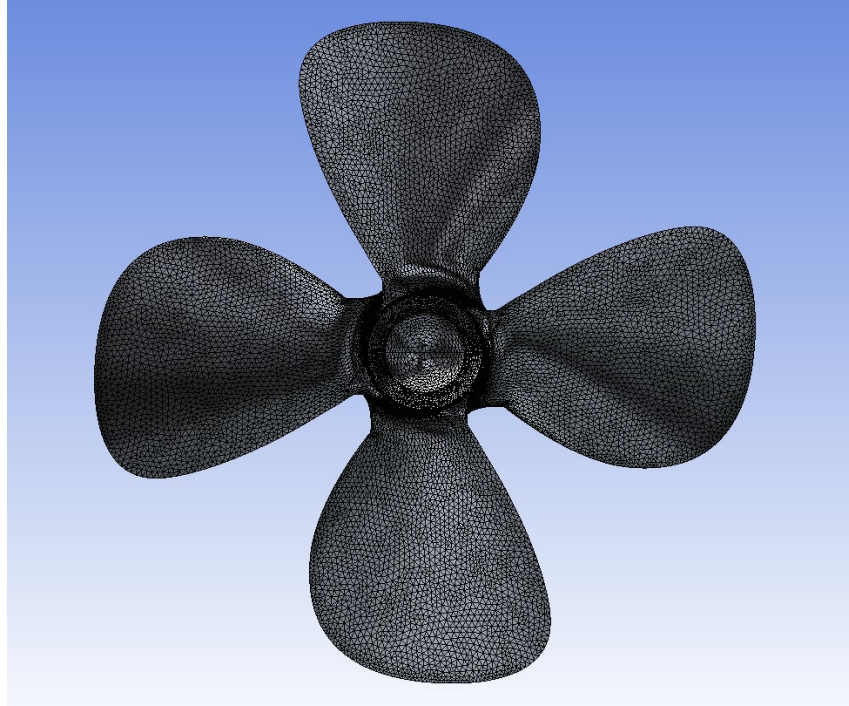
Εικόνα 3.10. Το υπολογιστικό χωρίο χωρισμένο σε κυλίνδρους.



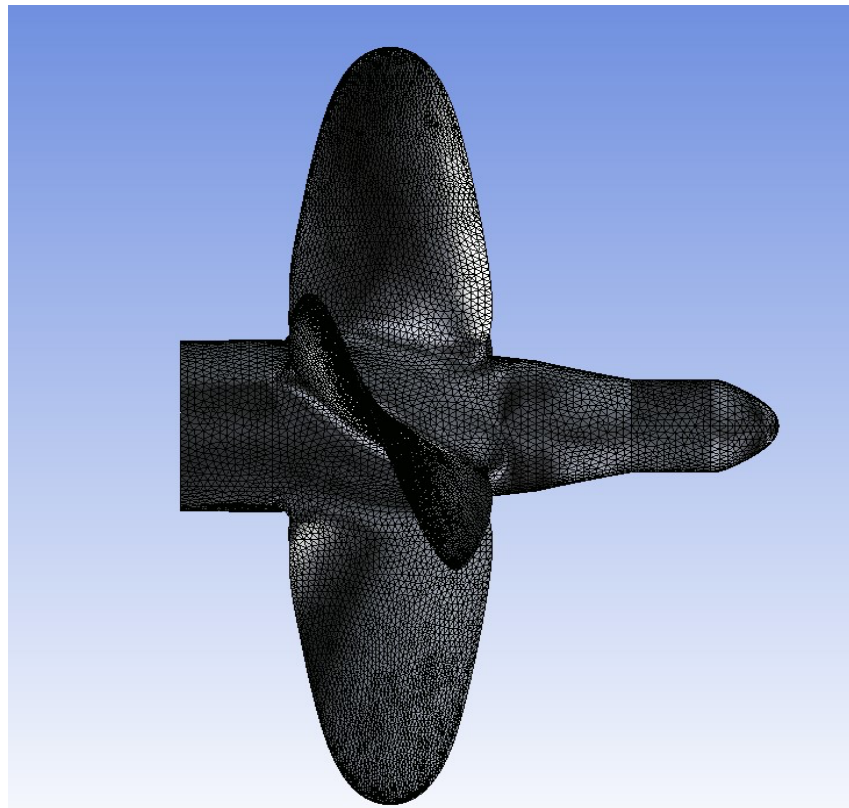
Εικόνα 3.11. Οι διαστάσεις του υπολογιστικού χωρίου.

3.3 Διακριτοποίηση πλέγματος

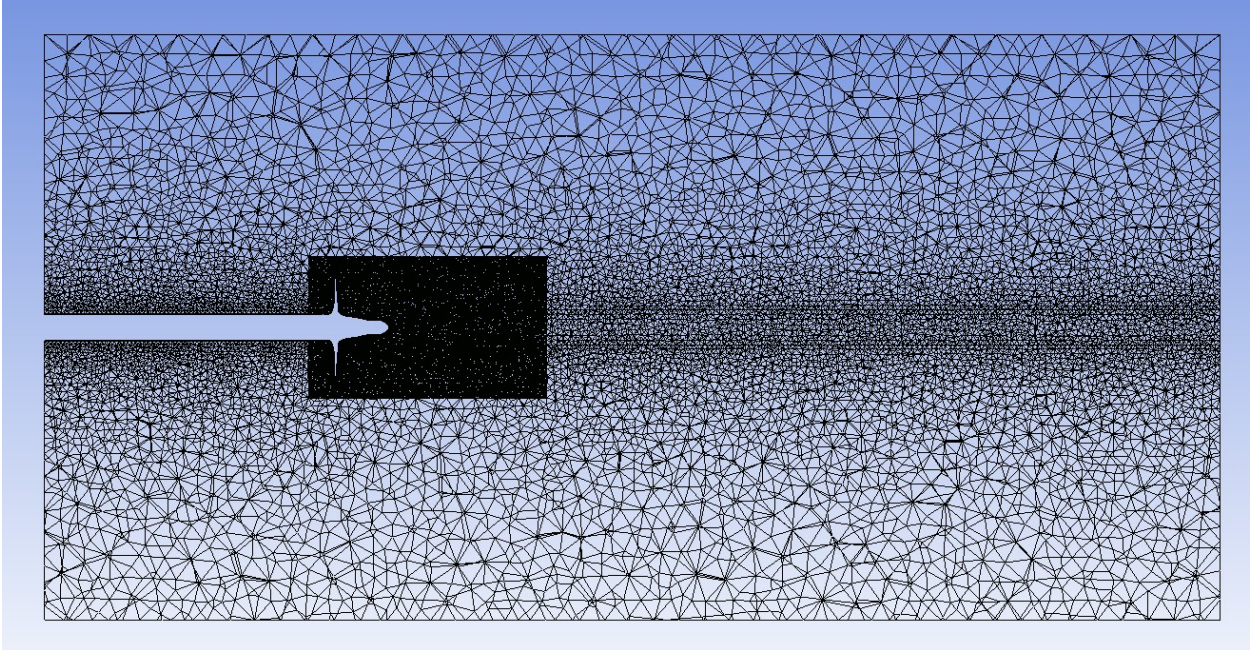
Στο τμήμα αυτό λαμβάνεται ως παράδειγμα το πλέγμα της προπέλας αναφοράς για να απεικονιστούν τα χαρακτηριστικά του πλέγματος. Η διακριτοποίηση των χωρίων που δημιουργήθηκαν έγινε στο ANSYS Meshing. Χρησιμοποιήθηκε υβριδικό πλέγμα κατά την τρισδιάστατη διακριτοποίηση, με στοιχεία πρίσματος στο οριακό στρώμα και τετράεδρα για τον υπόλοιπο όγκο. Δεδομένου ότι το πεδίο ροής μακριά από την προπέλα έχει μικρή επίδραση στα αποτελέσματα της δυναμικής, ένα σχετικά μεγάλο μέγεθος πλέγματος χρησιμοποιείται στο μακρινό πεδίο από την προπέλα, συγκεκριμένα κοντά στην είσοδο, έξοδο και των ορίων των τοιχωμάτων. Το μέγεθος του πλέγματος έχει μεγάλη επίδραση στην ώθηση και τους συντελεστές ροπής της προπέλας. Στην παρούσα εργασία δημιουργήθηκαν τρία πλέγματα, πυκνό, μεσαίο και αραιό. Ωστόσο, το μεσαίο και το λεπτό πλέγμα παρουσιάζουν παρόμοια αποτελέσματα. Ενώ μια υψηλότερη ανάλυση πλέγματος μπορεί να βελτιώσει τις προβλέψεις, η αύξηση του αριθμού των κελιών θα έχει ως αποτέλεσμα μικρές αλλαγές στα χαρακτηριστικά της ροής. Οι παράμετροι του πλέγματος της προπέλας αναφοράς και των δύο που σχεδιάστηκαν διατηρούνται οι ίδιες για να αποφευχθεί η περιττή επίδραση στα αριθμητικά αποτελέσματα λόγω διαφορετικές τοπολογίες πλέγματος. Στα παρακάτω σχήματα απεικονίζεται το πλέγμα που δημιουργήθηκε.



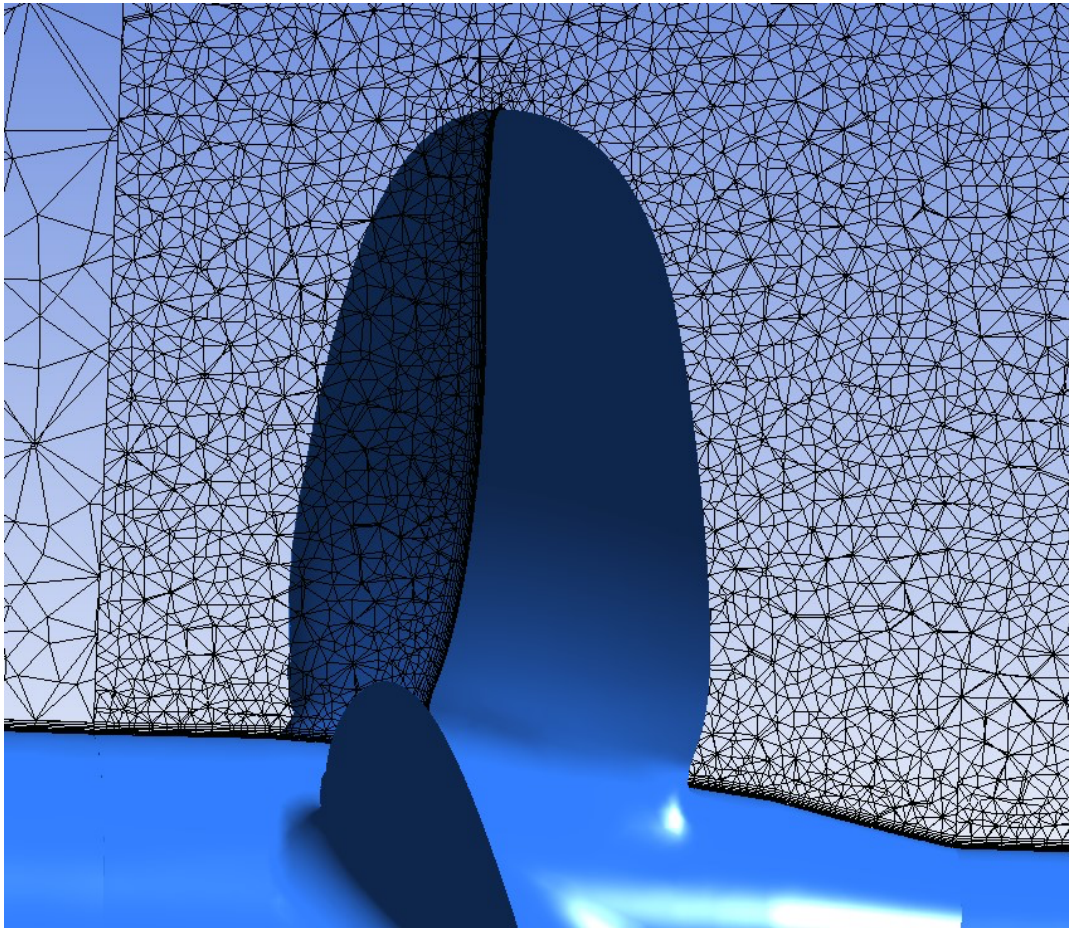
Εικόνα 3.13.2. Διακριτοποίηση επιφάνειας προπέλας στο $x-y$ επίπεδο.



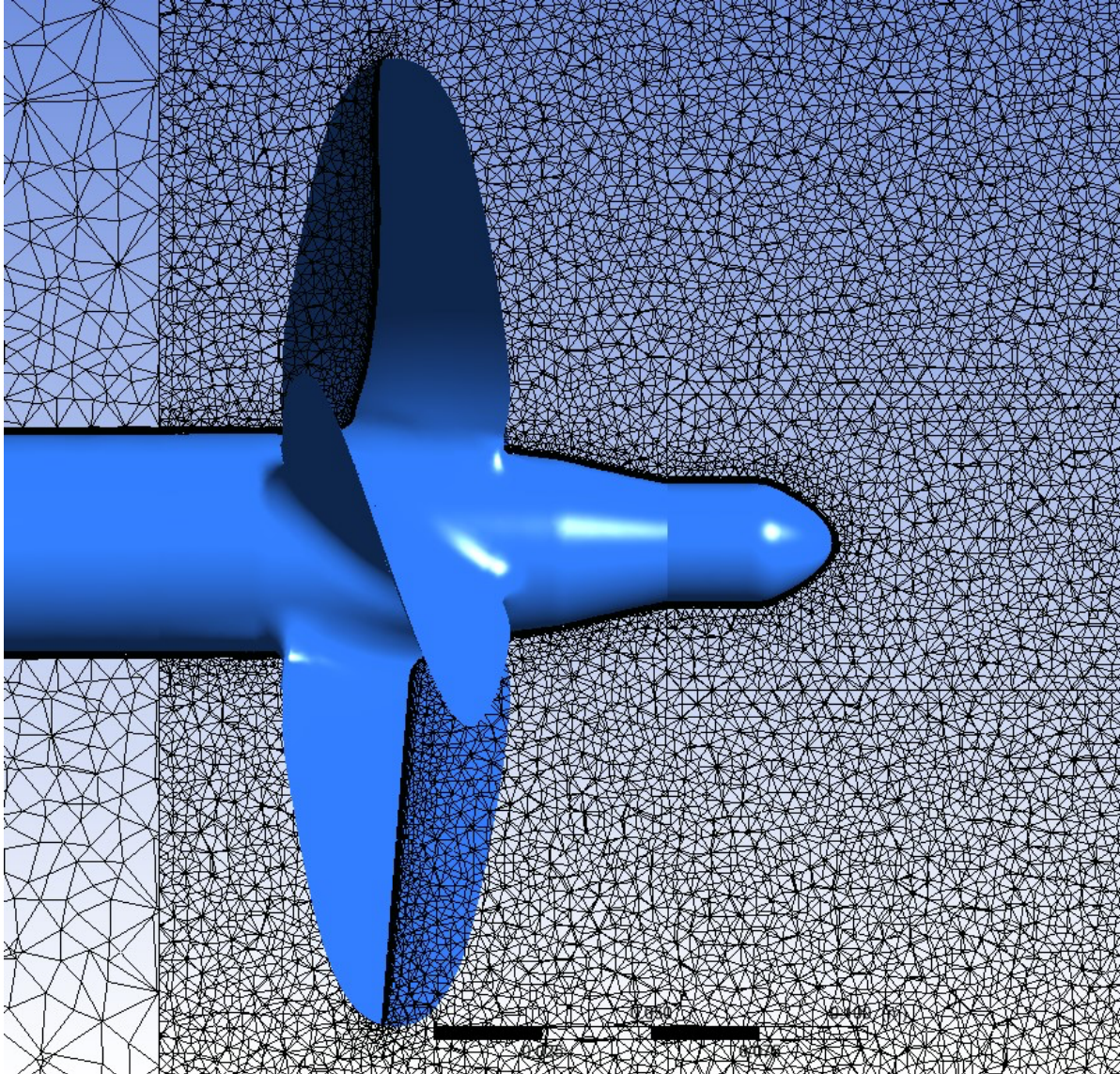
Εικόνα 3.13.3. Διακριτοποίηση επιφάνειας προπέλας στο $x-z$ επίπεδο.



Εικόνα 3.13.4. Διακριτοποίηση υπολογιστικών χωρίων.



Εικόνα 3.13.5. Διακριτοποίηση κελιών γύρω από τα περύγια.

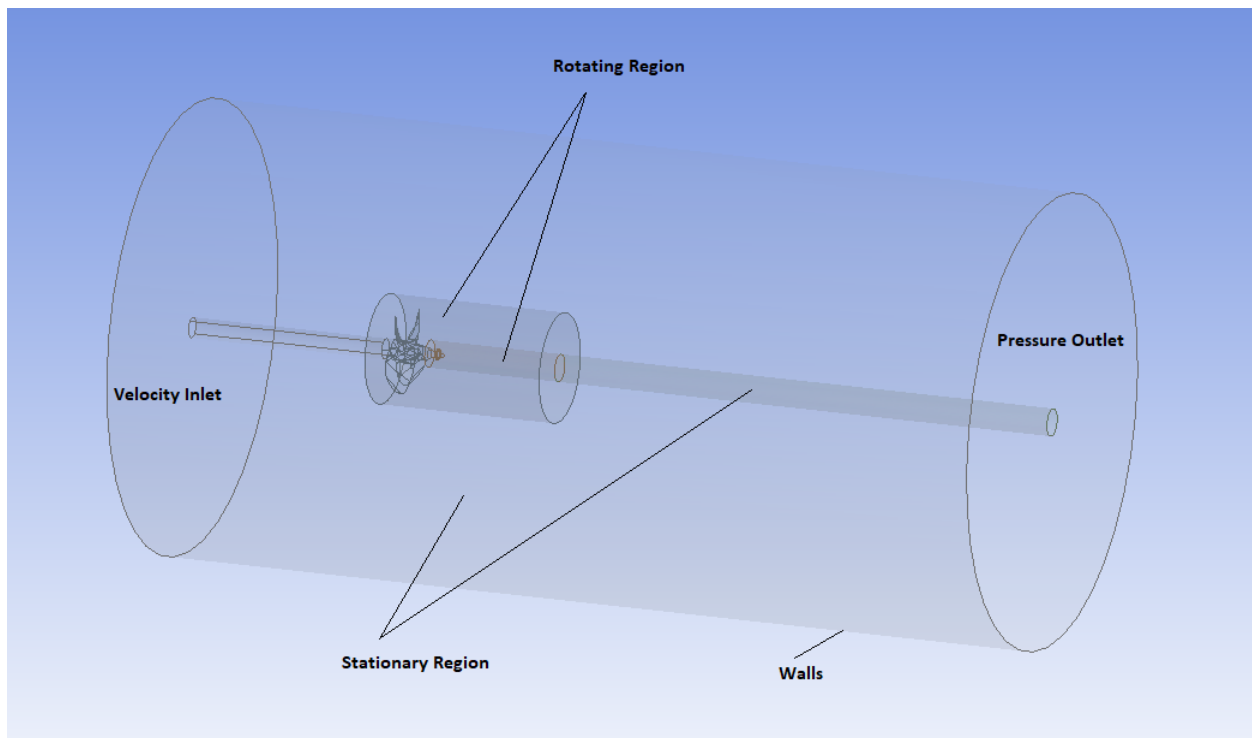


Εικόνα 3.13.6. Το πλέγμα που περιβάλλει την αρχική προπέλα.

Οι ακριβείς τιμές του μεγέθους και γενικά των ιδιοτήτων του πλέγματος θα αναφερθούν στο τέταρτο κεφάλαιο, όπου τα αποτελέσματά τους συγκρίνονται με τα πειραματικά δεδομένα.

3.4 Οριακές συνθήκες

Για τον καθορισμό των οριακών συνθηκών και την εξέταση του εν λόγω ανάλυσης, χρησιμοποιήθηκε το CFX από το λογισμικό ANSYS. Αρχικά, καθορίστηκαν οι χώροι, με τους κυλίνδρους που περιέχουν την κύρια προπέλα αλλά και τις βοηθητικές να θεωρούνται ως περιστρεφόμενοι και την ίδια την προπέλα να παραμένει σταθερή, χρησιμοποιώντας την εντολή Frozen Rotor. Αυτή η εντολή βοηθά στην καλύτερη απεικόνιση της ροής του ρευστού στην προπέλα, λόγω του γεγονότος ότι το ρευστό είναι αυτό που κινείται σε σχέση με τη σταθερή προπέλα. Στην περίπτωση της CRPBCF η περιστροφική ταχύτητα ορίστηκε ίση και αντίστροφη από αυτή της κύριας προπέλας.



Εικόνα 3.17. Οριακές συνθήκες που ανατέθηκαν στο CFX pre του λογισμικού ANSYS.

Οι χαρακτηριστικές ιδιότητες του ρευστού καθορίστηκαν σε θερμοκρασία με σταθερή τιμή $T=20^{\circ}\text{C}$, η συνολική πίεση του ρευστού στην αρχική κατάσταση $P_{tot}=1\text{ atm}$, ενώ δεν λήφθηκε υπόψη η πλευστότητα, καθώς αυτό θα απαιτούσε μια μη στατική, χρονικά εξαρτημένη ανάλυση. Τα πλαϊνά τοιχώματα του κυλίνδρου θεωρήθηκαν ως τοίχοι (WALLS) με μηδενική τριβή για να μην επηρεάζεται η ροή κοντά σε αυτά. Τα τοιχώματα της κύριας και των βοηθητικών προπελών ορίστηκαν ως τοίχοι μη ολίσθησης. Στο σημείο εισαγωγής του ρευστού υπήρχε μια εισροή (INLET) με σταθερή ταχύτητα, από $V_A=5,1\text{ m/s}$ για περιστροφική ταχύτητα 25 rps, μέχρι $V_A=8\text{ m/s}$ για περιστροφική ταχύτητα 50 rps και 5% ένταση τύρβης. Στην έξοδο του ρευστού, ορίστηκε μια εκροή (OUTLET) με σταθερή σχετική πίεση $P_{out}=0\text{ atm}$ κατά μέσο όρο σε όλη την επιφάνεια εκροής. Αυτή η μέθοδος επιβολής των οριακών συνθηκών, που συνιστάται στον οδηγό χρήσης του λογισμικού, εφαρμόστηκε σε όλες τις αναλύσεις για πιο γρήγορη και ακριβή σύγκλιση των αποτελεσμάτων. Στον πίνακα 3.2 παρουσιάζονται οι αρχικές συνθήκες που εφαρμόστηκαν στην ανάλυση.

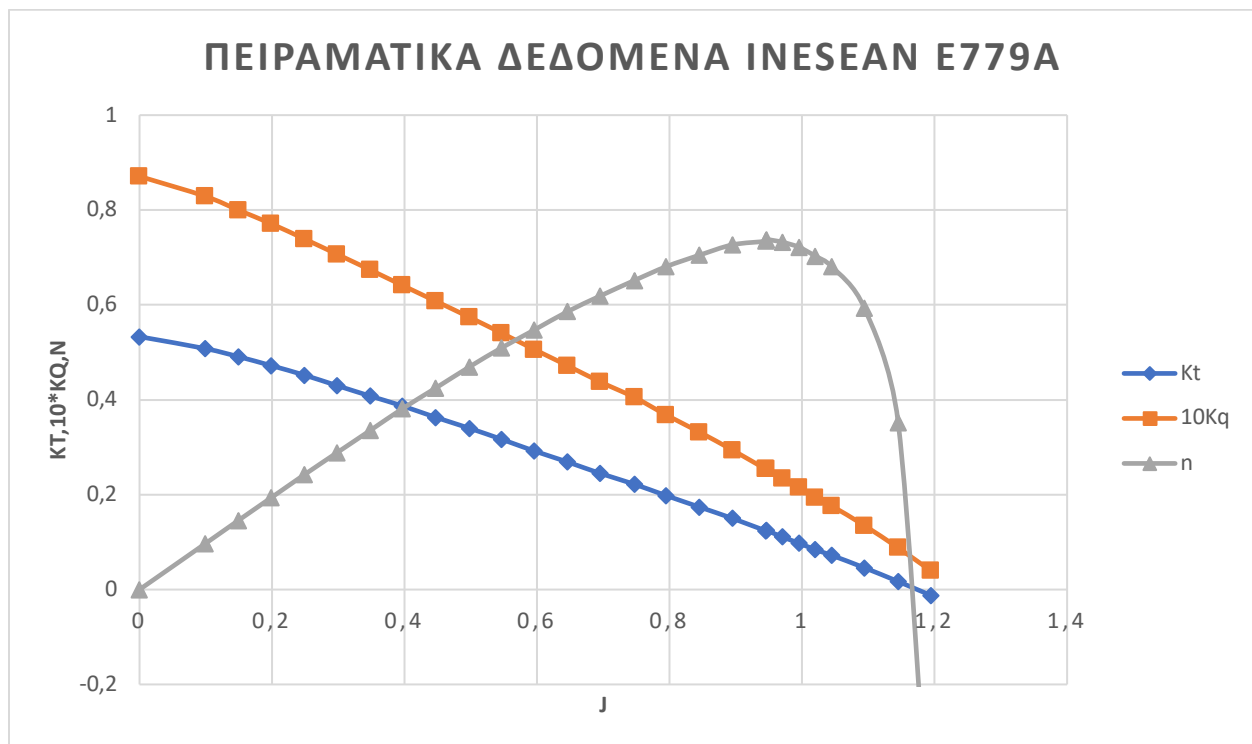
N [rps]	V_A [m/s]	J
25	5,1	0,9
30	5,65	0,83
40	7	0,77
50	8	0,71

Πίνακας 3.2. Αρχικές συνθήκες ροής για κάθε περίπτωση.

4. Σύγκριση αποτελεσμάτων

4.1 Πειραματικά δεδομένα της κύριας προπέλας INSEAN E779A

Τα πειραματικά αποτελέσματα των συντελεστών ώσης και ροπής (K_T και $10K_Q$ αντίστοιχα), καθώς και του βαθμού απόδοσης σε ελεύθερη ροή (η) για συντελεστές πρόωσης από 0 ώ 1.2 σύμφωνα με την τεχνική αναφορά της INSEAN. Λαμβάνονται διαφορετικές τιμές του συντελεστή πρόωσης μεταβάλλοντας την ταχύτητα ροής και διατηρώντας την ταχύτητα περιστροφής της προπέλας σταθερή σε $n=11,79$ rps. Συγκεκριμένα οι συνθήκες που διεξήχθησαν τα πειράματα δίνονται παρακάτω στον πίνακα 4.1.



Διάγραμμα 4.1. Πειραματικά αποτελέσματα της INSEAN E779A. [13]

Ταχύτητα περιστροφής	11,79 [rps]
Θερμοκρασία νερού	16,0 [°C]
Πυκνότητα νερού	102,6 [kg s ² /m ⁴]
Ιξώδες νερού	1,1099x10 ⁻⁶ [m ² /s]

Πίνακας 4.1. Συνθήκες δοκιμής για μετρήσεις προπέλας ελεύθερης ροής στη δεξαμενή INSEAN. [13]

4.1.1 Περιγραφή των πειραματικών εγκαταστάσεων της INSEAN.

Δύο εγκαταστάσεις χρησιμοποιήθηκαν από τους ερευνητές και τους τεχνικούς της INSEAN για την εκτέλεση των πειραμάτων και την συγκέντρωση των απαιτούμενων μετρήσεων και δεδομένων. Τα βασικά χαρακτηριστικά αυτών των εγκαταστάσεων περιγράφονται παρακάτω λεπτομερώς.

Οι δοκιμές της προπέλας σε συνθήκες ελεύθερης ροής από την INSEAN πραγματοποιήθηκαν στη δεξαμενή ροής. Αυτή είναι μια μεσαίου μεγέθους διαμήκης δεξαμενή, τα χαρακτηριστικά της οποίας συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα.

Μήκος	220 m
Πλάτος	9 m
Βάθος	3,5 m
Μέγιστη ταχύτητα ροής	10 m/s

Πίνακας 4.2. Βασικά χαρακτηριστικά της δεξαμενής ροής της INSEAN. [13]

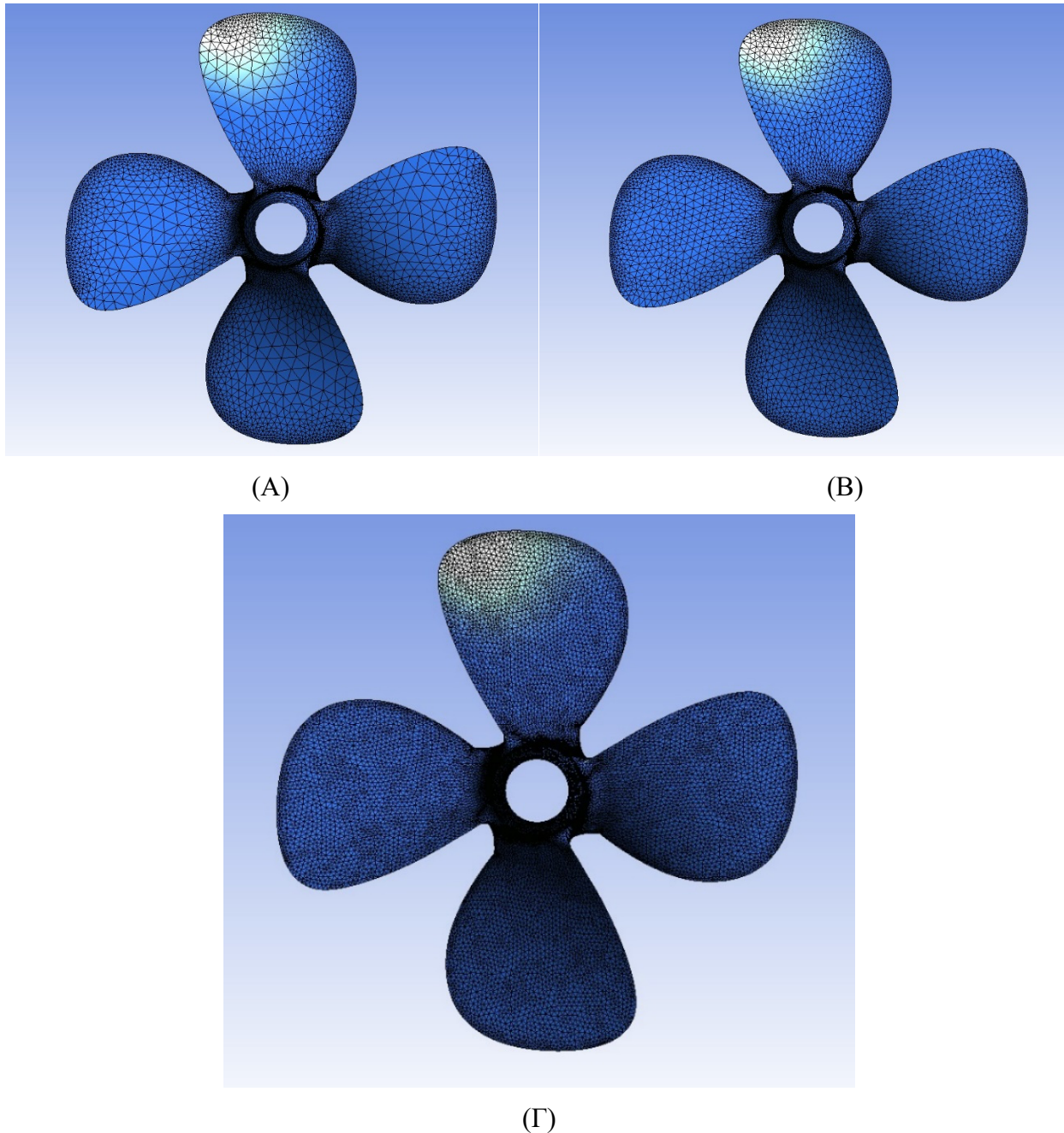
Η δεξαμενή είναι εξοπλισμένη με γεννήτριες κυμάτων τόσο για κανονικά όσο και για μη κανονικά πρότυπα κυμάτων για δοκιμές θαλασσοταραχής και ομαλή οδήγηση. Το μέγιστο μήκος κύματος είναι 10 m και το μέγιστο ύψος κύματος είναι 0,5 m.



Εικόνα 4.1. Διάταξη σήραγγας της προπέλας και η γεννήτρια κυμάτων. [13]

4.2 Μελέτη ανεξαρτησίας πλέγματος

Για να γίνει η μελέτη ανεξαρτησίας του πλέγματος δημιουργήθηκαν τρία πλέγματα διαφορετικής πυκνότητας. Η πυκνωση έγινε μόνο στα πτερύγια των προπελών καθώς και στους κυλίνδρους που περιβάλλανε τις προπέλες για τον λόγο ότι η ροή μακριά από τις προπέλες και τους περιβάλλοντες κυλίνδρους είναι μικρής σημασίας και δεν επηρεάζουν τα αποτελέσματα των αναλύσεων. Η πυκνωση στα πτερύγια της προπέλας για τις τρεις περιπτώσεις των πλεγμάτων απεικονίζονται στις εικόνες παρακάτω.



Εικόνα 4.2. Διακριτοποίηση των επιφανειών των πτερυγίων της προπέλας. (Α) Αραιό πλέγμα, (Β) Μέτριο και (Γ) Πυκνό πλέγμα.

Η πύκνωση του πλέγματος για το οριακό στρώμα έγινε με την επιλογή Inflation στο λογισμικό Meshing της ANSYS. Συγκεκριμένα, ορίστηκε το ύψος του πρώτου κελιού ίσο με 0,1 mm, ο ρυθμός αύξησης των στρωμάτων ίσος με 1,2 και συνολικά δημιουργήθηκαν 8 στρώματα πρισματικών κελιών. Η επιλογή αυτή έγινε με σκοπό την επίτευξη του κατάλληλου Y+ του οποίου οι τιμές θα παρουσιαστούν στην συνέχεια. Στον παρακάτω πίνακα δίνονται τα χαρακτηριστικά των πλεγμάτων που δημιουργήθηκαν καθώς και ο συνολικός αριθμός κελιών και κόμβων σε κάθε περίπτωση.

Τύπος Πλέγματος	Μέγεθος κελιών [mm]			Αριθμός στοιχείων		Αριθμός κόμβων		Σύνολο	
	Πτερύγια	Κύλινδροι	Εξ. Κύλινδρος	Εσ. Κύλινδρος	Εξ. Κύλινδρος	Εσ. Κύλινδρος	Εξ. Κύλινδρος	Κόμβοι	Στοιχεία
Πυκνό	2	4	50	4.188.479	611.622	847.334	116.970	964.304	4.800.101
Μέτριο	4	9	50	905.212	611.622	220.700	116.970	337.670	1.516.834
Αραιό	8	12	50	591.178	611.622	157.829	116.970	274.799	1.202.800

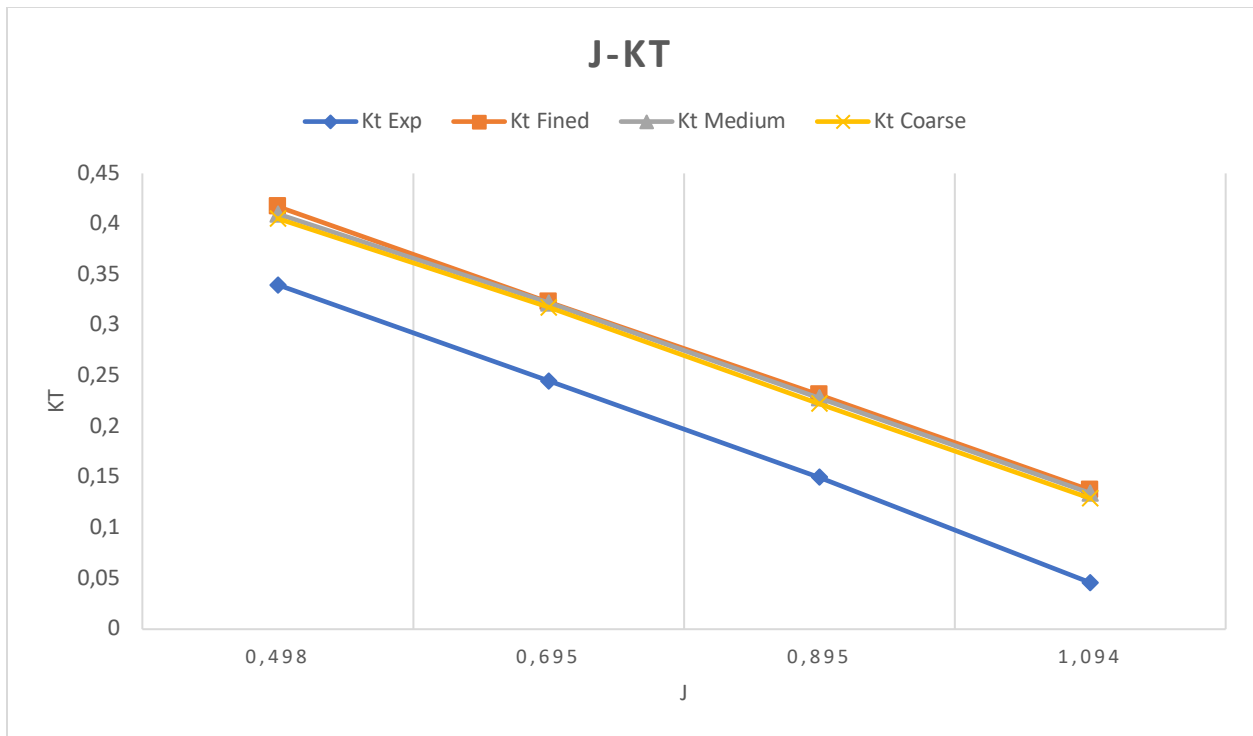
Πίνακας 4.3. Χαρακτηριστικά των πλεγμάτων που δημιουργήθηκαν.

Διατηρώντας την περιστροφική ταχύτητα της προπέλας σταθερή όπως στα πειραματικά δεδομένα της INSEAN, δημιουργήθηκαν τέσσερις αναλύσεις που καλύπτουν το μεγαλύτερο εύρος λειτουργίας της κύριας προπέλας. Συγκεκριμένα, μεταβάλλοντας την ταχύτητα εισόδου V_A εξετάστηκαν τέσσερις τιμές του συντελεστή πρόωσης για τις περιπτώσεις των τριών πλεγμάτων που δημιουργήθηκαν και στη συνέχεια έγινε σύγκριση με τα πειραματικά δεδομένα. Τα σημεία λειτουργίας που εξετάστηκαν παρουσιάζονται στον πίνακα 4.4.

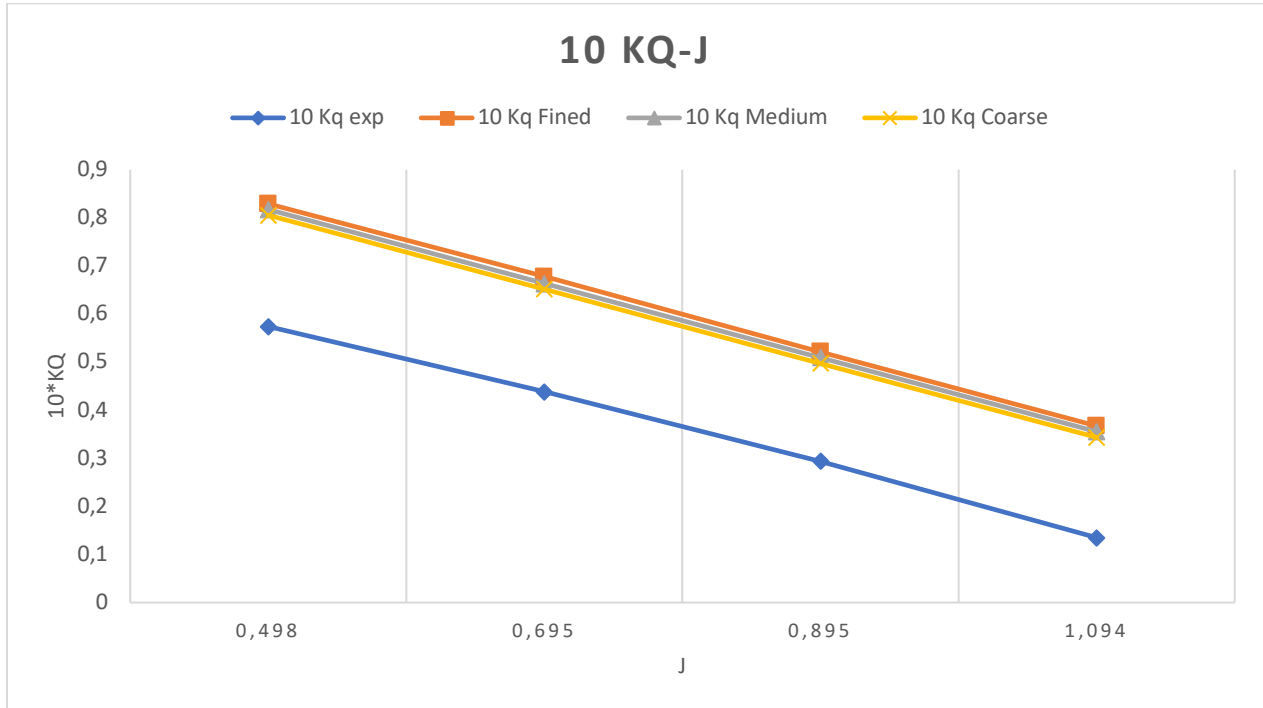
J	rps	Va [m/s]
0,498	11,8	1,335
0,695	11,8	1,862
0,895	11,8	2,411
1,094	11,8	2,93

Πίνακας 4.4. Σημεία λειτουργίας της κύριας προπέλας που αναλύθηκε η ανεξαρτησία του πλέγματος.

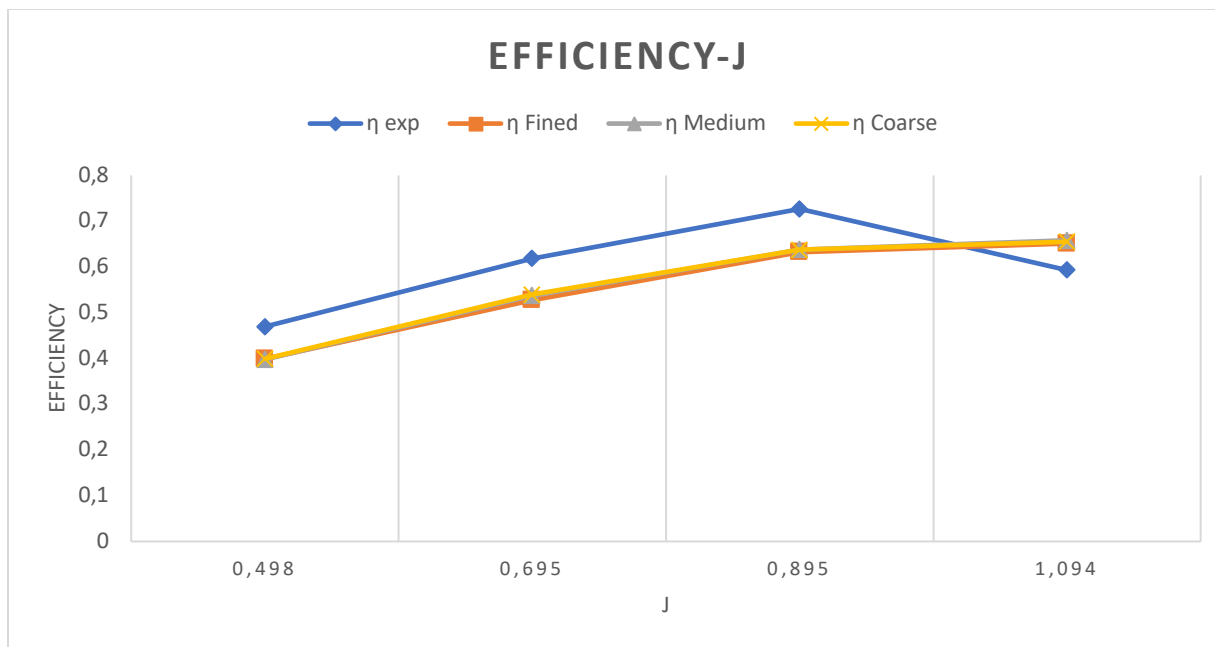
Τα αποτελέσματα των αναλύσεων έδειξαν σημαντική απόκλιση από τα πειραματικά δεδομένα που δίνονται από την INSEAN. Ωστόσο, τα σφάλματα μεταξύ τους είναι πολύ μικρά. Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα πως η γεωμετρία της INSEAN που εισάχθηκε στις αναλύσεις είναι διαφορετική από την πραγματική γεωμετρία της προπέλας όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3,1,1. Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας όμως είναι να μελετήσει την επίδραση των PBCF και των CRPBCF στην απόδοση της κύριας προπέλας. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων παρουσιάζονται στα διαγράμματα παρακάτω.



Διάγραμμα 4.2. Σύγκριση αποτελεσμάτων του Συντελεστή ώσης των αναλύσεων με τα πειραματικά δεδομένα.



Διάγραμμα 4.3. Σύγκριση αποτελεσμάτων του συντελεστή ροπής των αναλύσεων με τα πειραματικά δεδομένα.

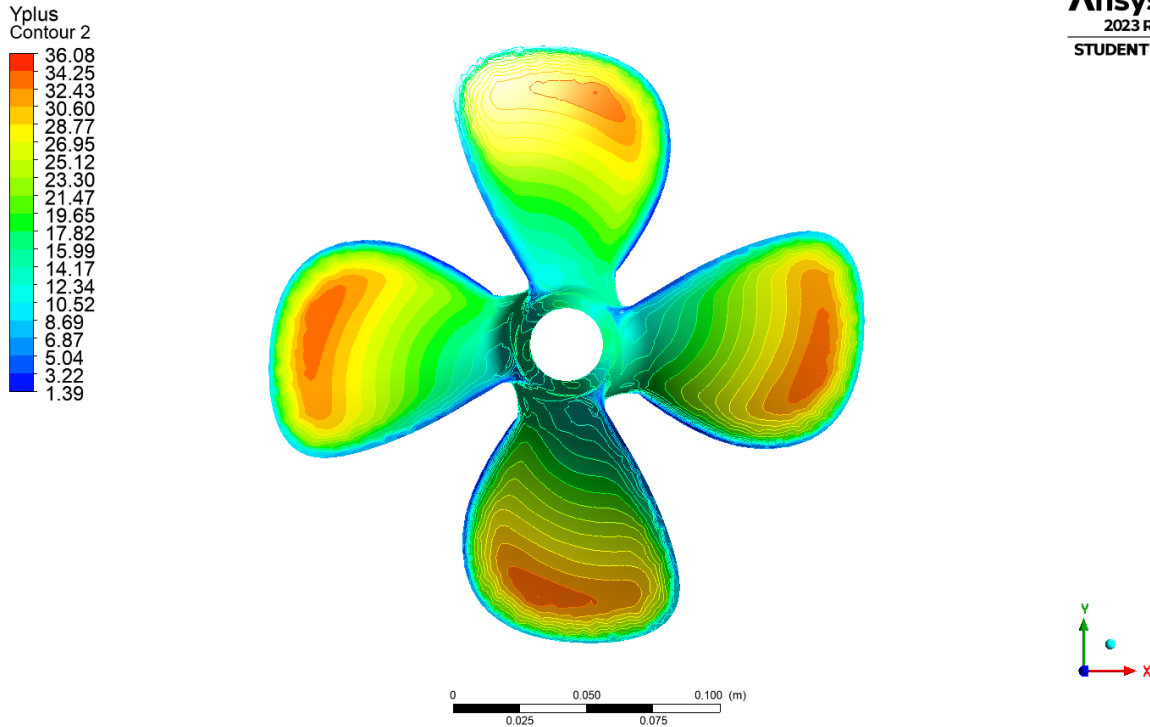


Διάγραμμα 4.4. Σύγκριση αποτελεσμάτων του συντελεστή απόδοσης των αναλύσεων με τα πειραματικά δεδομένα.

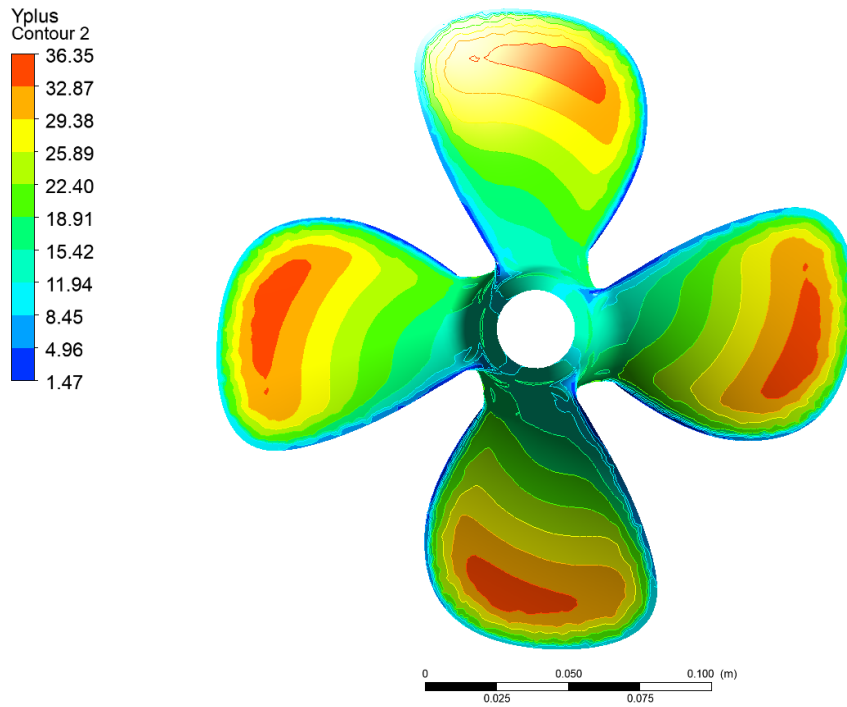
Κατά τη μελέτη ανεξαρτησίας του πλέγματος, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD) σε τρεις διαφορετικές πυκνότητες πλέγματος - χονδροειδές, μεσαίο και λεπτό - για να εκτιμηθεί η υδροδυναμική απόδοση μιας τροποποιημένης γεωμετρίας έλικας. Αυτές οι αρχικές προσομοιώσεις έχουν μεγάλη σημασία για τη δημιουργία μιας βασικής κατανόησης της συμπεριφοράς της προπέλας πριν από την εισαγωγή των τροποποιήσεων, όπως τα πετρώγια κεφαλής (Propeller Boss Cap Fins - PBCF) και τα αντιπεριστρεφόμενα πετρώγια κεφαλής (Counter Rotating Propeller Boss Cap Fins - CRPBF). Είναι σημαντικό να διευκρινιστεί ότι ο πρωταρχικός στόχος αυτών των προσομοιώσεων δεν είναι η άμεση σύγκριση με τα πειραματικά δεδομένα της αρχικής προπέλας INSEAN E779A, αλλά η κατανόηση των θεμελιωδών υδροδυναμικών χαρακτηριστικών του τροποποιημένου σχεδιασμού. Τα συνεπή αποτελέσματα που προέκυψαν σε όλα τα μεγέθη πλέγματος υπογραμμίζουν την αξιοπιστία της διαδικασίας προσομοίωσης, παρά τις ουσιαστικές διαφορές από τον αρχικό σχεδιασμό της INSEAN E779A. Αυτή η συνέπεια είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς παρέχει μια αξιόπιστη βάση από την οποία μπορεί να αναλυθεί η επόμενη επίδραση των PBCF και CRPBF. Επομένως, ενώ τα τρέχοντα αποτελέσματα παρουσιάζουν αποκλίσεις από τα πειραματικά δεδομένα της μη τροποποιημένης έλικας INSEAN E779A, θέτουν τις βάσεις για την ανάλυση των επιδράσεων των PBCF και CRPBF στην απόδοση της προπέλας, η οποία αποτελεί τον κεντρικό στόχο της παρούσας έρευνας. Τέλος να σημειωθεί πως παρά τις ασήμαντες αποκλίσεις που παρουσίασαν τα αποτελέσματα των αναλύσεων των τριών πλεγμάτων, επιλέχθηκε ως καταλληλότερο το πυκνό πλέγμα για τον λόγο ότι μπορεί να γίνει καλύτερη απεικόνιση των αποτελεσμάτων στη συνέχεια της εργασίας.

4.3 Y^+

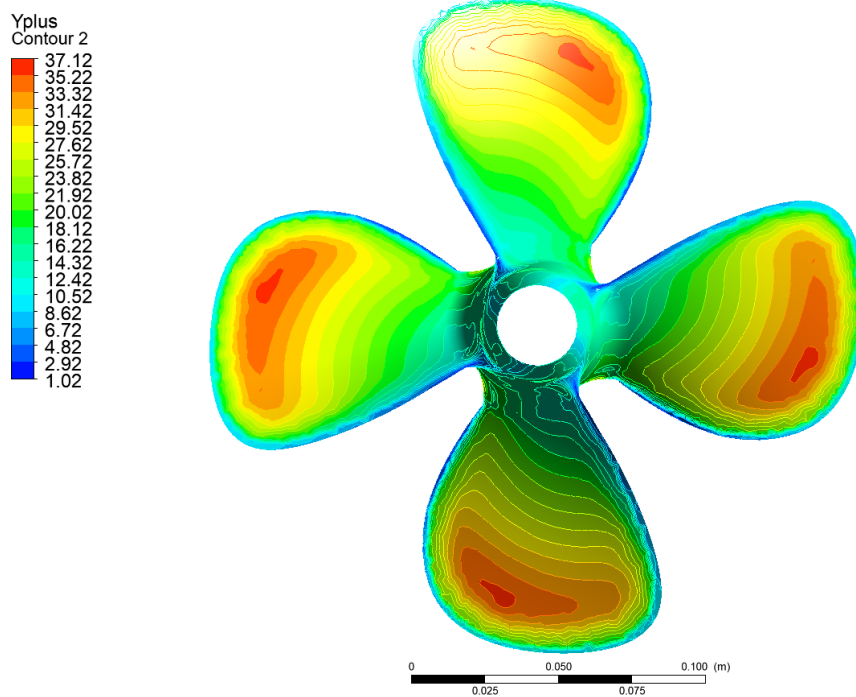
Η επιλογή της κατάλληλης τιμής y^+ είναι σημαντική για την ακριβή αποτύπωση της φυσικής του οριακού στρώματος και τη διασφάλιση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Για την παρούσα μελέτη, οι τιμές y^+ βρίσκονται κυρίως μεταξύ 20 και 38 στο μεγαλύτερο μέρος των επιφανειών του περυγίου της προπέλας, με χαμηλότερες τιμές y^+ να παρατηρούνται στη μπροστά ακμή. Αυτή η κατανομή αποτελεί ένδειξη μιας στρατηγικής βελτίωσης του πλέγματος, προσαρμοσμένης στα μοναδικά χαρακτηριστικά ροής που συναντούν οι διάφορες περιοχές της προπέλας. Οι χαμηλότερες τιμές y^+ στη μπροστινή ακμή, μια περιοχή υψηλών κλίσεων ροής και πιθανού διαχωρισμού, επιτρέπουν μια λεπτότερη ανάλυση του ιξώδους υποστρώματος, κρίσιμη για την καταγραφή της λεπτομερούς δυναμικής της ροής και την ακριβή πρόβλεψη της απόδοσης της έλικας. Αντίθετα, οι υψηλότερες τιμές y^+ στην περιοχή 20-38 στο υπόλοιπο περύγιο ευθυγραμμίζονται με τη χρήση κλιμακούμενων συναρτήσεων τοιχώματος (scalable wall functions) στο μοντέλο τύρβης RNG k-ε. Αυτό το εύρος είναι βέλτιστο για την αποτύπωση του τυρβώδους οριακού στρώματος, διατηρώντας παράλληλα την υπολογιστική απόδοση. Εξασφαλίζει ότι η ροή είναι καλά διαχωρισμένη στην περιοχή του λογαριθμικού νόμου του οριακού στρώματος, που είναι κρίσιμη για την ακριβή προσομοίωση των δυνάμεων και των χαρακτηριστικών απόδοσης της προπέλας. Συνολικά, το επιλεγμένο εύρος y^+ δείχνει μια ισορροπημένη προσέγγιση, βελτιστοποιώντας το πλέγμα για την αποτύπωση της βασικής φυσικής της ροής σε όλη την προπέλα, λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη τους περιορισμούς των υπολογιστικών πόρων, έναν βασικό παράγοντα για την επιτυχή προσομοίωση πολύπλοκων γεωμετριών. Παρακάτω απεικονίζονται οι τιμές του y^+ στα περύγια της προπέλας για κάθε περίπτωση που αναλύθηκε.



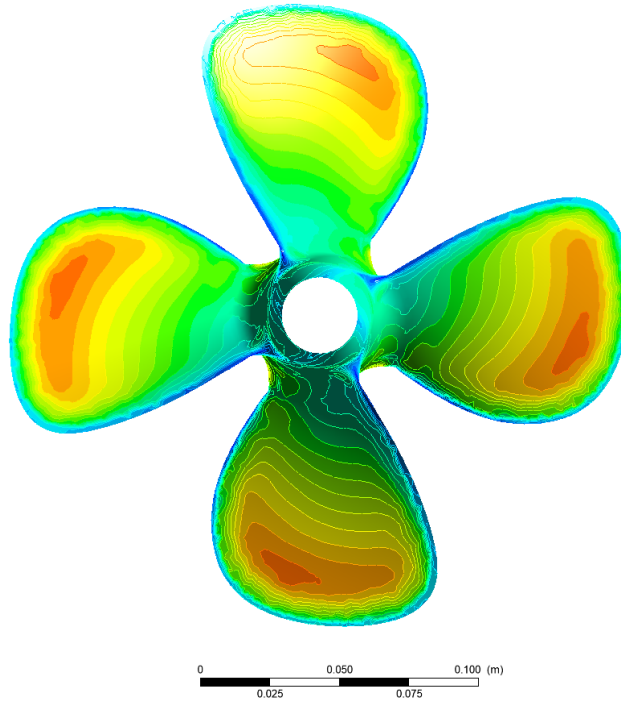
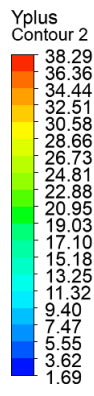
Εικόνα 4.3. Τιμές Y^+ για συντελεστή πρόωσης $J=0,498$.



Εικόνα 4.4. Τιμές Y^+ για συντελεστή πρόωσης $J=0,695$.



Εικόνα 4.5. Τιμές Y^+ για συντελεστή πρόωσης $J=0,895$.



Εικόνα 4.6. Τιμές Y^+ για συντελεστή πρόωσης $J=0.1,094$.

4.4 Επίδραση PBCF και CRPBCF

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, η μελέτη της επίδρασης των βοηθητικών πτερυγίων στην κύρια προπέλα πήρε μέρος για τιμές του συντελεστή πρόωσης από 0,7 ως 0,9. Το εύρος αυτό επιλέχθηκε με βάση τα πειραματικά δεδομένα της INESEAN E779A που δείχνουν πως στις τιμές αυτές παρουσιάζονται οι μεγαλύτεροι συντελεστές απόδοσης. Στην παρούσα ενότητα θα παρουσιαστούν οι τιμές και τα διαγράμματα των συντελεστών ώσης, ροπής, απόδοσης, καθώς και τα περιγράμματα πιέσεων, οι ροϊκές γραμμές και οι οπτικοποιήσεις της στροβιλότητας. Ενώ μόνο η καθαρή ώση και η ροπή μπορούν να μετρηθούν στο πείραμα, στις προσομοιώσεις μπορούν να υπολογιστούν σε «κομμάτια» [20]. Για παράδειγμα, ο συντελεστής ώσης μπορεί να αναλυθεί ως εξής:

$$K_T = K_{T,blade} + K_{T,boss} + K_{T,fins} \quad (4.1)$$

όπου $K_{T,blade}$, $K_{T,boss}$ και $K_{T,fin}$ είναι οι συνεισφορές στον συντελεστή ώσης του πτερυγίου, της κεφαλής και των βοηθητικών πτερυγίων, αντίστοιχα. Ο συντελεστής ροπής μπορεί να αναλυθεί με τον ίδιο τρόπο ως εξής:

$$K_Q = K_{Q,blade} + K_{Q,boss} + K_{Q,fins} \quad (4.2)$$

Στον σχεδιασμό των όγκων ελέγχου της παρούσας εργασίας όμως, στην περίπτωση των PBCF και CRPBCF οι συντελεστές ώσης και ροπής της πλήμνης και των βοηθητικών πτερυγίων προσμετρούνται. Η προσμέτρηση αυτή δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα των αναλύσεων, απλά τα κατηγοριοποιεί διαφορετικά. Στους πίνακες 4.5, 4.6 και 4.7 παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα των συντελεστών ώσης, ροπής και απόδοσης αντίστοιχα.

		Πτερύγια	Πλήμνη	β' πτερύγια	Σύνολο	%	
KT	J=0,9	w/o PBCF	0,2410	-0,0058	0,0000	0,2352	
		PBCF	0,2484	0,0000	-0,0268	0,2217	-5,8
		CRPBCF	0,2456	0,0000	-0,0287	0,2169	-7,8
	J=0,83	w/o PBCF	0,2744	-0,0072	0,0000	0,2671	
		PBCF	0,2813	0,0000	-0,0261	0,2552	-4,5
		CRPBCF	0,2782	0,0000	-0,0282	0,2500	-6,4
	J=0,77	w/o PBCF	0,3031	-0,0085	0,0000	0,2946	
		PBCF	0,3096	0,0000	-0,0258	0,2839	-3,6
		CRPBCF	0,3067	0,0000	-0,0280	0,2786	-5,4
	J=0,70	w/o PBCF	0,3350	-0,0099	0,0000	0,3251	
		PBCF	0,3414	0,0000	-0,0256	0,3158	-2,9
		CRPBCF	0,3382	0,0000	-0,0280	0,3102	-4,6

Πίνακας 4.5. Αποτελέσματα του συντελεστή ώσης.

			Πτερύγια	Πλήμνη	β' πτερύγια	Σύνολο	%
10*ΚQ	J=0,9	w/o PBCF	0,5215	-1.8472E-05	0,0000	0,5215	
		PBCF	0,5294	0,0000	-0,0121	0,5173	-0,8
		CRPBCF	0,5227	0,0000	-0,0082	0,5146	-1,3
	J=0,83	w/o PBCF	0,5739	-2.3739E-05	0,0000	0,5739	
		PBCF	0,5810	0,0000	-0,0119	0,5691	-0,8
		CRPBCF	0,5772	0,0000	-0,0075	0,5697	-0,7
	J=0,77	w/o PBCF	0,6182	-2.6641E-05	0,0000	0,6182	
		PBCF	0,6247	0,0000	-0,0119	0,6129	-0,9
		CRPBCF	0,6216	0,0000	-0,0070	0,6146	-0,6
	J=0,70	w/o PBCF	0,6683	-2.9807E-05	0,0000	0,6682	
		PBCF	0,6743	0,0000	-0,0120	0,6623	-0,9
		CRPBCF	0,6711	0,0000	-0,0064	0,6647	-0,5

Πίνακας 4.6. Αποτελέσματα του συντελεστή ροπής.

		Απόδοση η			Δη %	
		w/o PBCF	PBCF	CRPBCF	PBCF	CRPBCF
J	0,9	0,65	0,62	0,61	-3,52	-6,31
	0,83	0,61	0,60	0,58	-2,45	-5,19
	0,77	0,58	0,57	0,56	-1,75	-4,34
	0,7	0,54	0,54	0,52	-1,09	-3,66

Πίνακας 4.7. Αποτελέσματα του συντελεστή απόδοσης.

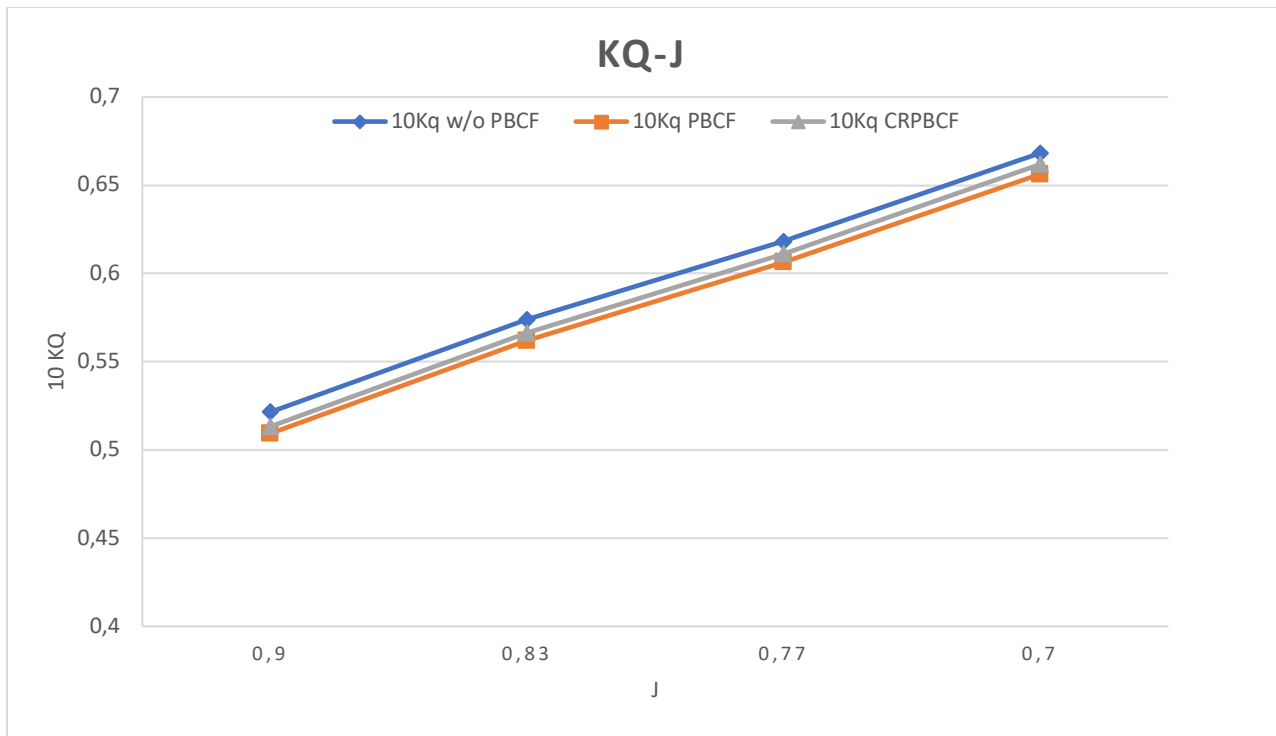
Στην περίπτωση του συντελεστή ώσης παρατηρείται πως ενώ με την προσθήκη των PBCF και CRPBCF ο συντελεστής ώσης στα πτερύγια της κύριας προπέλας αυξάνεται, τα βοηθητικά πτερύγια επιδρούν αρνητικά στην παραγωγή ώσης με αποτέλεσμα ο συνολικός συντελεστής και στις δύο περιπτώσεις να είναι μικρότερος του αρχικού. Συγκεκριμένα η μεγαλύτερη απώλεια εμφανίζεται για συντελεστή πρόωσης $J=0,9$ με συνολική μείωση 5,8% και 7,8% για τα βοηθητικά πτερύγια PBCF και CRPBCF αντίστοιχα. Ακόμα, εμφανίζεται μία ταυτόχρονη τάση στην οποία μειώνεται η ποσοστιαία μείωση του συντελεστή ώσης με τη μείωση του συντελεστή πρόωσης. Έτσι, μία υπόθεση που μπορεί να γίνει είναι η εξής: Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των βοηθητικών πτερυγίων δεν είναι κατάλληλα για τις υπάρχουσες τιμές του συντελεστή πρόωσης της παρούσας διπλωματικής εργασίας και πιθανώς να εξυπηρετούν θετικά στην απόδοση της προπέλας για μικρότερες τιμές του συντελεστή πρόωσης.

Στην περίπτωση του συντελεστή ροπής παρατηρείται μία θετική μείωση σε σχέση με τις αρχικές τιμές του και στις τέσσερις περιπτώσεις του συντελεστή πρόωσης. Ακολούθως, η μείωση αυτή συνεισφέρει στην βελτίωση της απόδοσης της προπέλας και αυτό σημαίνει ότι η προπέλα είναι σε θέση να παράγει την απαιτούμενη ώθηση με μικρότερη περιστροφική δύναμη, γεγονός που συνήθως οδηγεί σε χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου και βελτιωμένη συνολική απόδοση του συστήματος πρόωσης.

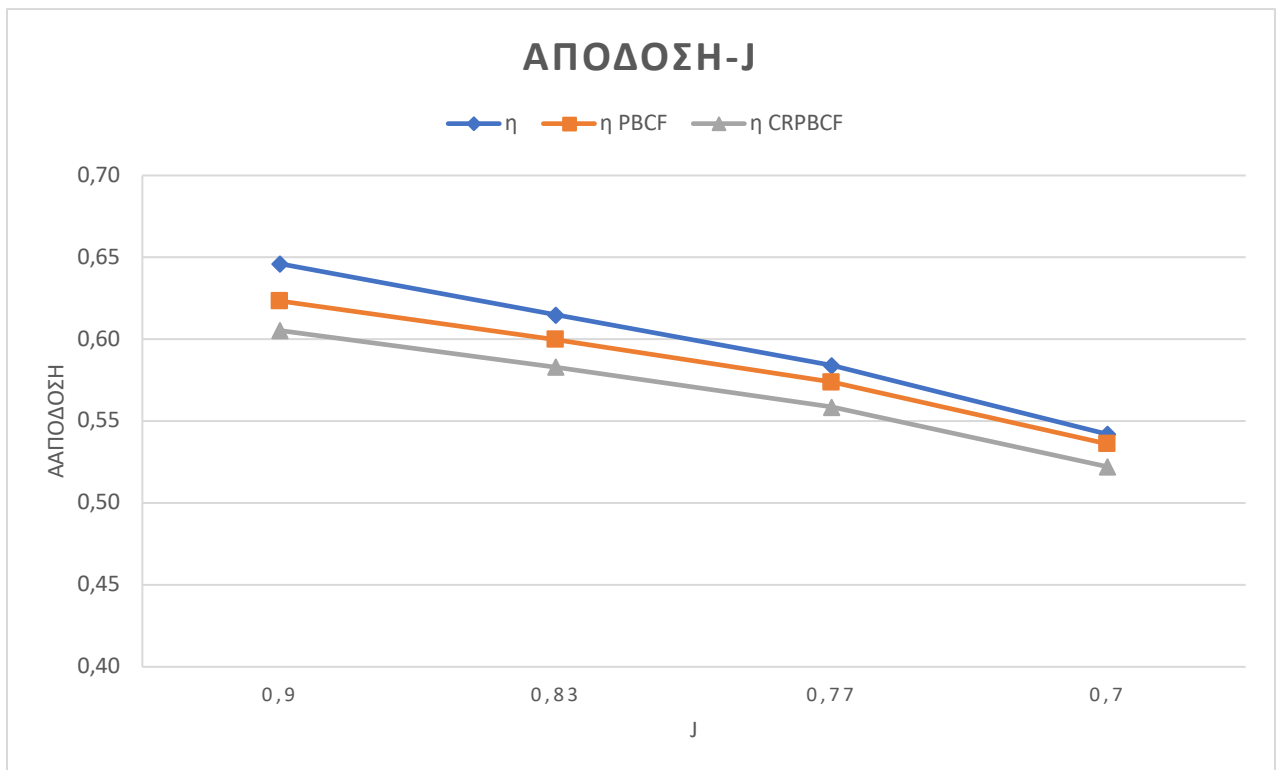
Συνοψίζοντας, η προσθήκη των βοηθητικών προπελών μείωσε την απαιτούμενη ροπή της προπέλας για την παραγωγή της απαιτούμενης ώσης, αλλά παράλληλα μείωσε και την παραγωγή της συνολικής ώσης της προπέλας. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα και στις τέσσερις περιπτώσεις του συντελεστή πρόωσης που εξετάστηκαν, να μειωθεί η συνολική απόδοση της. Έτσι, γίνεται αντιληπτό πως η προσθήκη των συγκεκριμένων πτερυγίων δεν συνεισφέρει θετικά στην λειτουργία της αρχικής προπέλας. Μία αλλαγή στην γεωμετρία των βοηθητικών πτερυγίων και στην απόστασή τους με την αρχική προπέλα πιθανόν να επηρέαζε με θετικό τρόπο την λειτουργία της. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα των συντελεστών ώσης, ροπής και απόδοσης.



Διάγραμμα 4.5. Αποτελέσματα των συντελεστών ώσης της προπέλας χωρίς και με την προσθήκη βοηθητικών πτερυγίων.



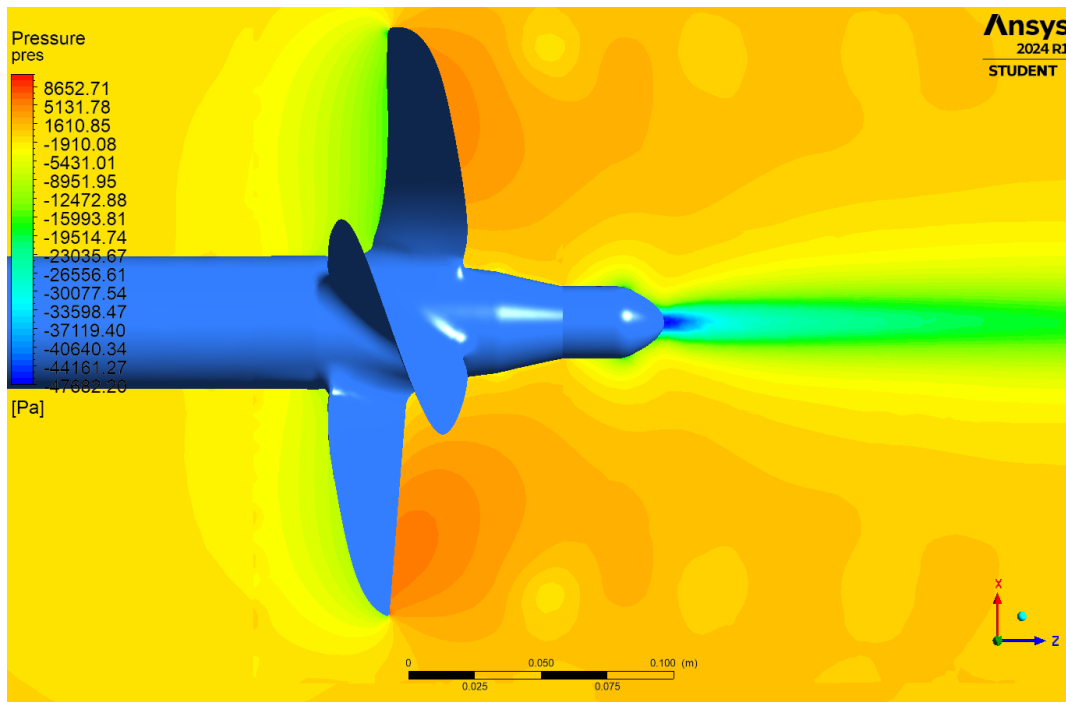
Διάγραμμα 4.6. Αποτελέσματα των συντελεστών ροπής της προπέλας χωρίς και με την προσθήκη βοηθητικών πτερυγίων.



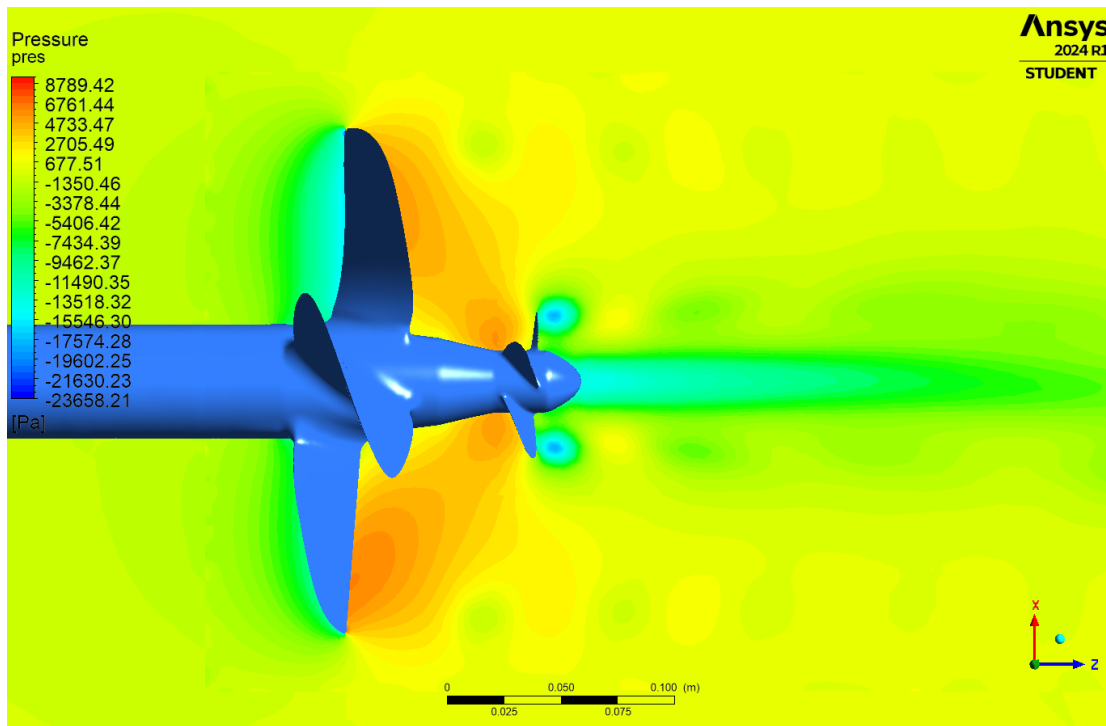
Διάγραμμα 4.7. Αποτελέσματα των συντελεστών απόδοσης της προπέλας χωρίς και με την προσθήκη βοηθητικών πτερυγίων.

4.5 Περιγράμματα πιέσεων

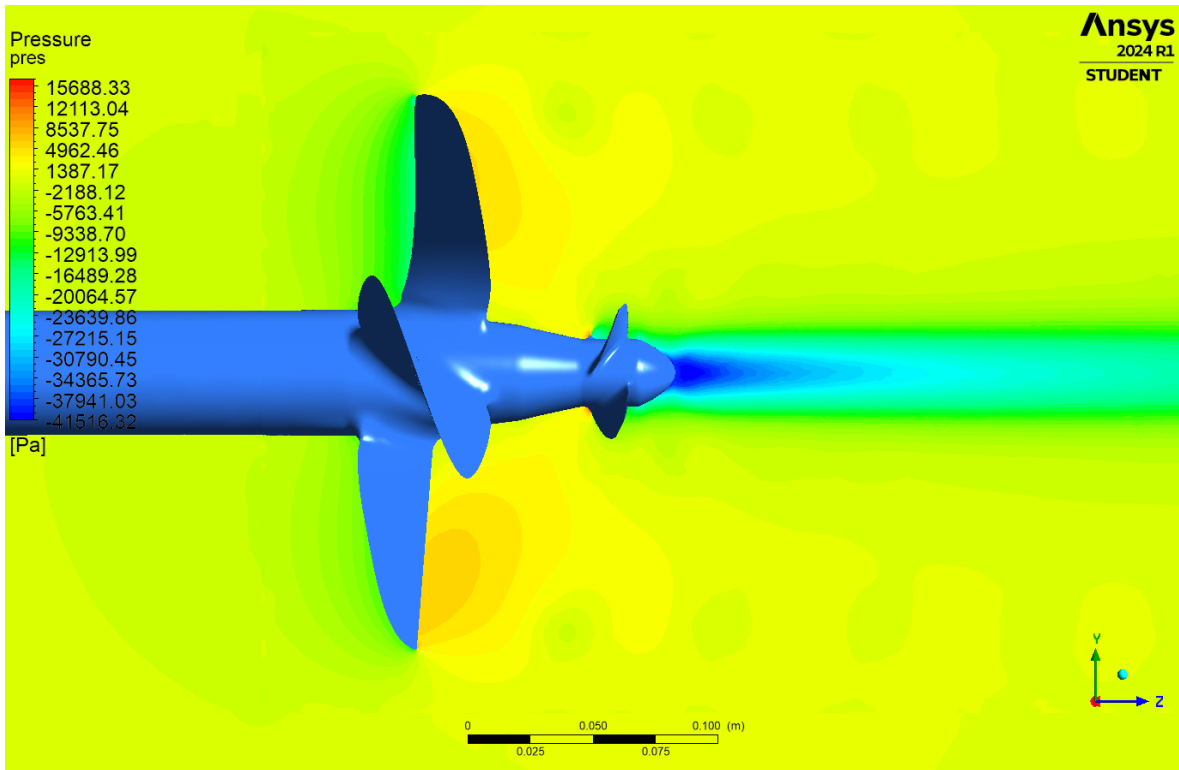
J=0,9



Εικόνα 4.7. Κατανομή πίεσης στο $x-z$ επίπεδο για την αρχική προπέλα σε $J=0,9$

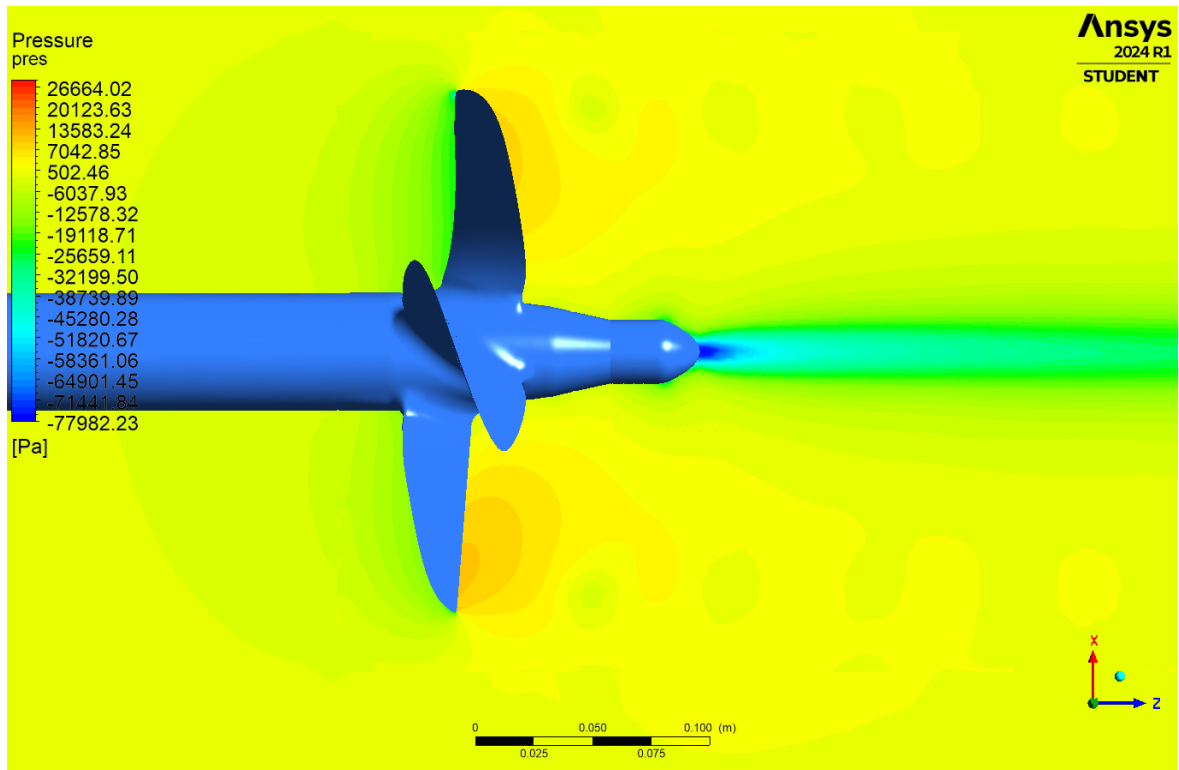


Εικόνα 4.8. Κατανομή πίεσης στο $x-z$ επίπεδο για την PBCF προπέλα σε $J=0,9$.

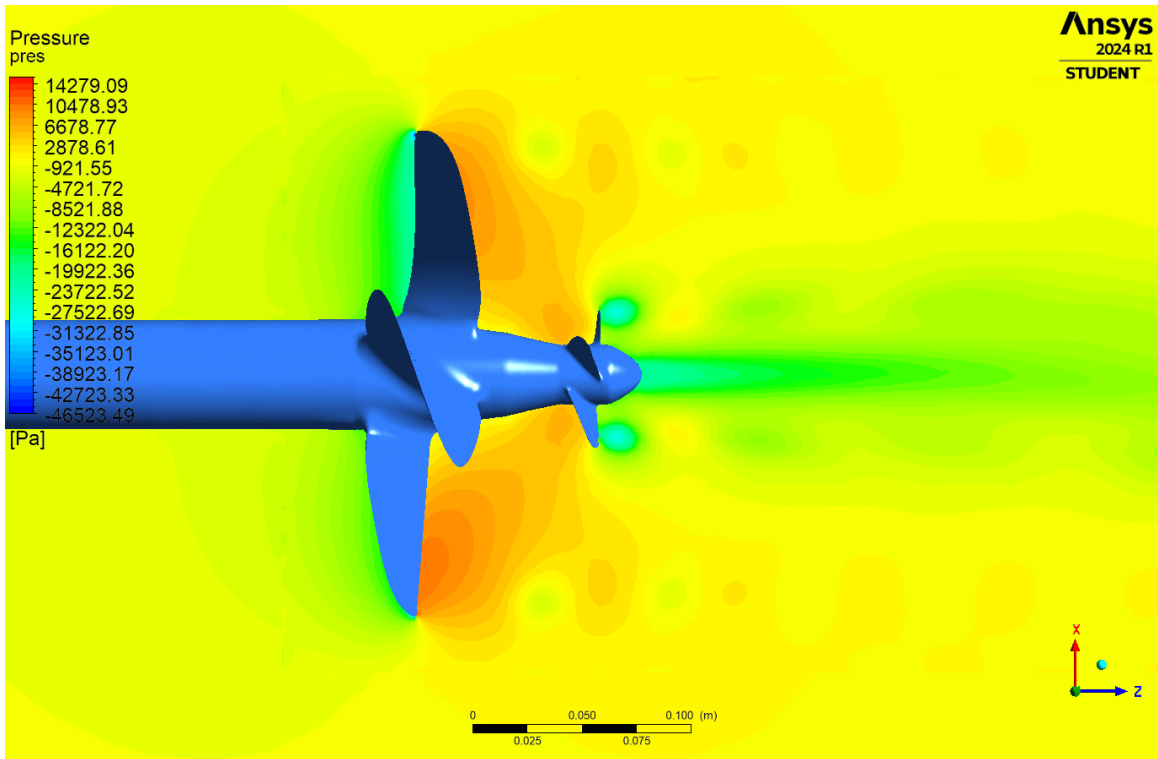


Εικόνα 4.9. Κατανομή πίεσης στο $x-z$ επίπεδο για την CRPBCF προπέλα σε $J=0,9$.

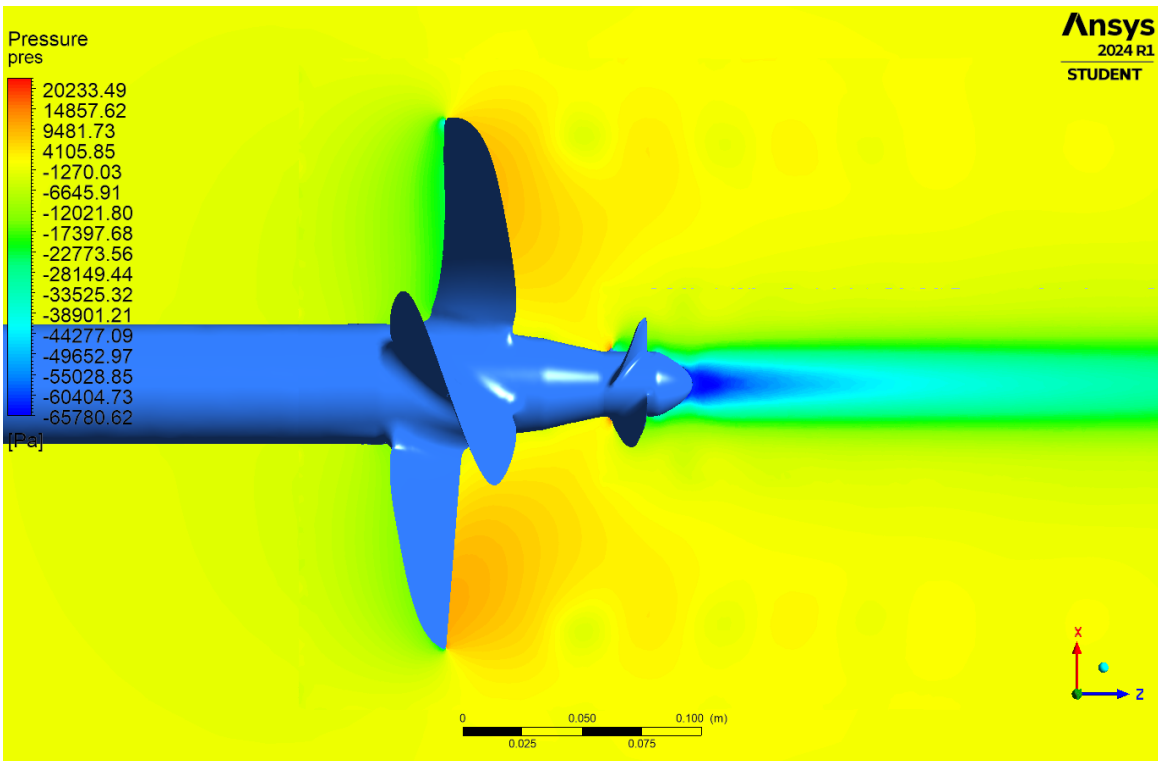
$J=0,83$



Εικόνα 4.10. Κατανομή πίεσης στο $x-z$ επίπεδο για την αρχική προπέλα σε $J=0,83$.

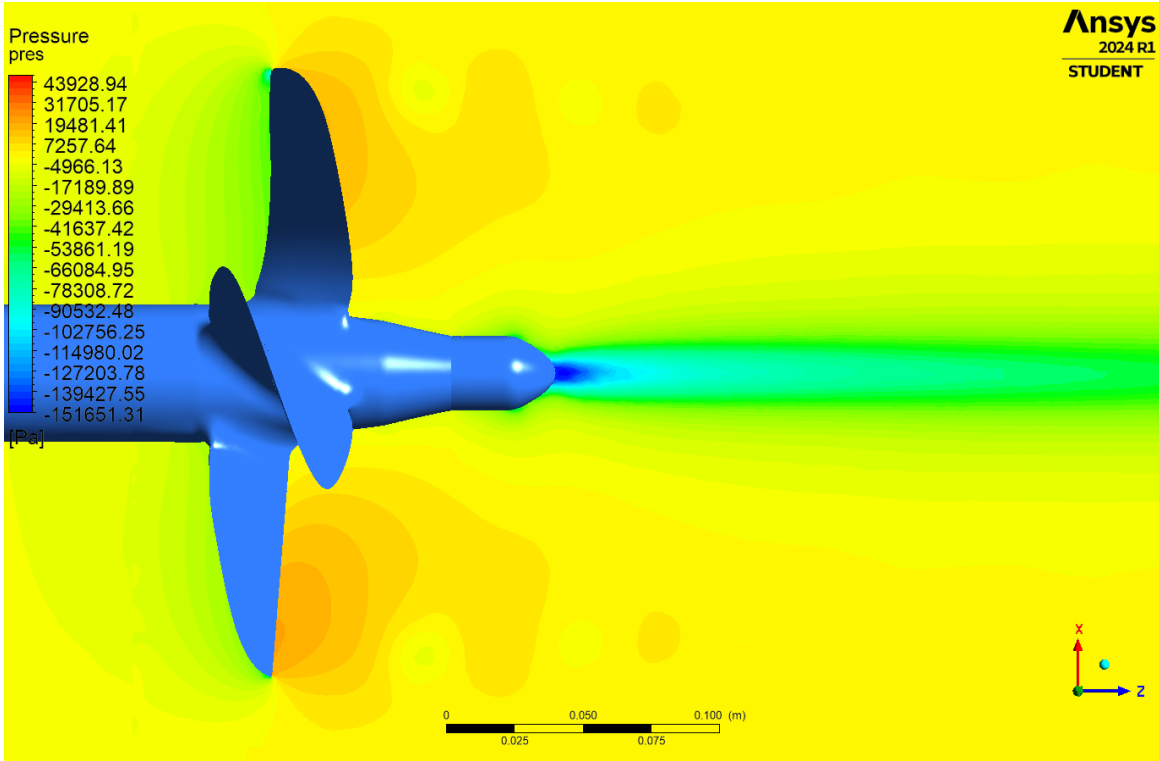


Εικόνα 4.11. Κατανομή πίεσης στο x - z επίπεδο για την PBCF προπέλα σε $J=0,83$.

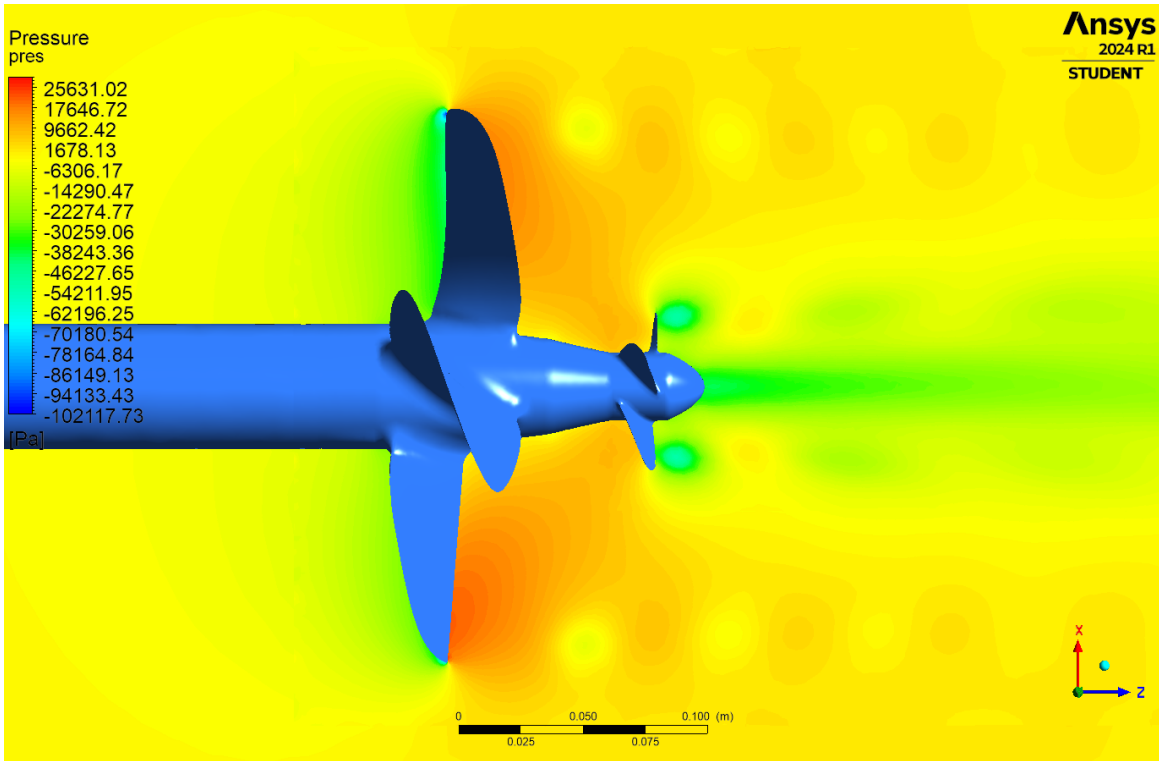


Εικόνα 4.12. Κατανομή πίεσης στο x - z επίπεδο για την CRPBCF προπέλα σε $J=0,83$.

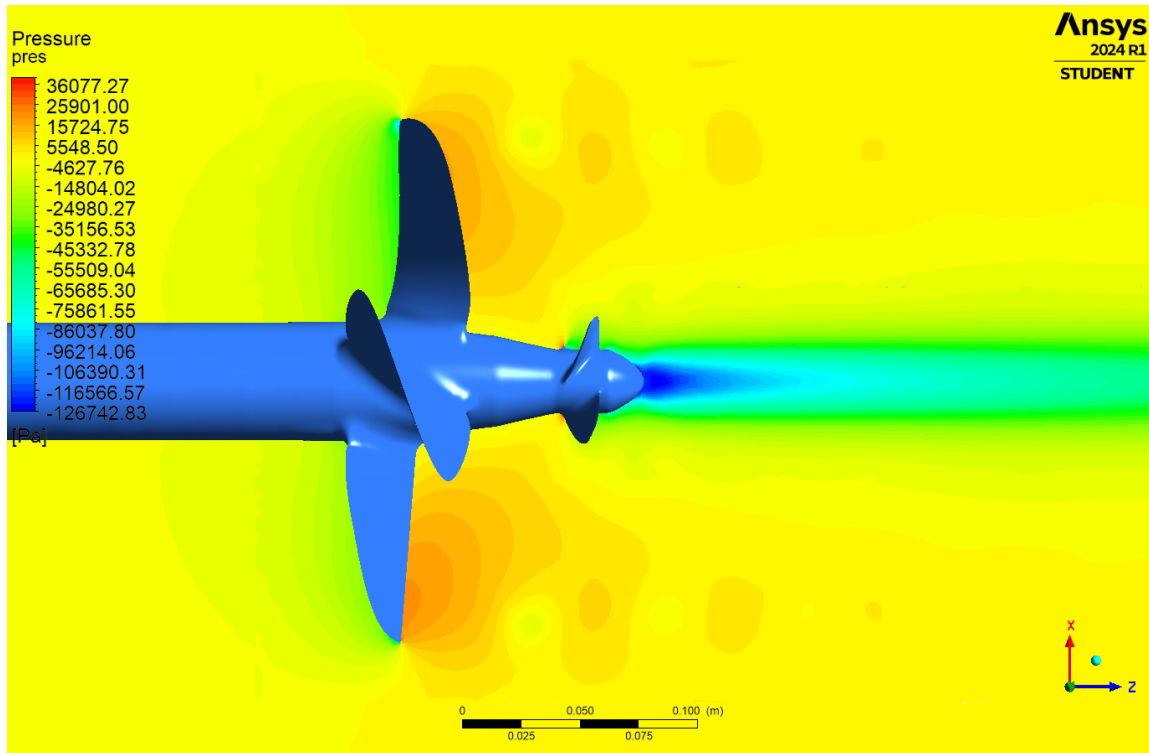
J=0,77



Εικόνα 4.13. Κατανομή πίεσης στο x-z επίπεδο για την αρχική προπέλα σε $J=0,77$.

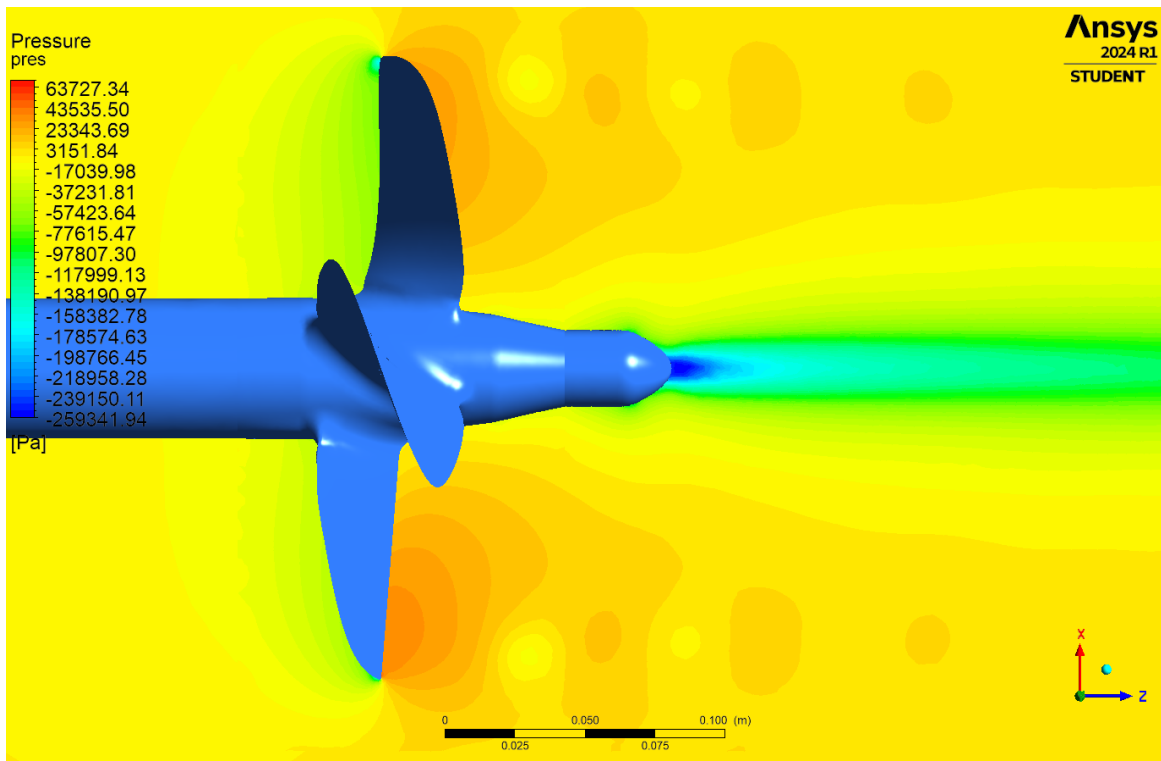


Εικόνα 4.14. Κατανομή πίεσης στο x-z επίπεδο για την PBCF προπέλα σε $J=0,77$.

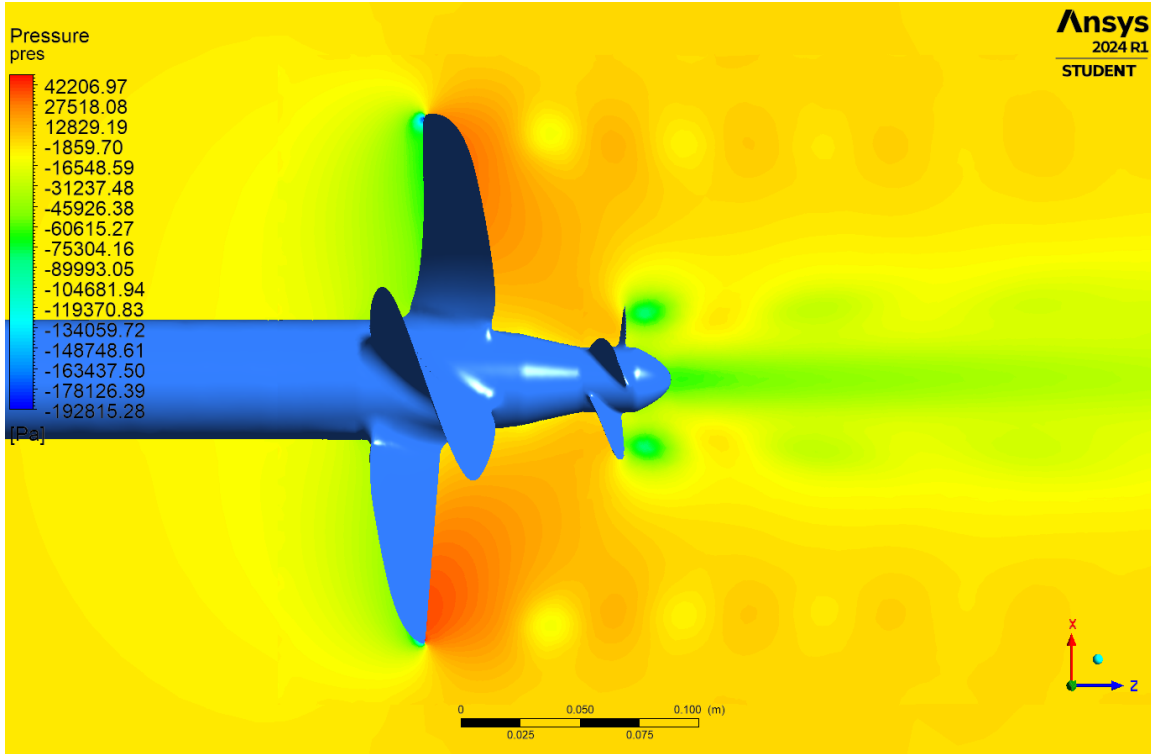


Εικόνα 4.15. Κατανομή πίεσης στο x-z επίπεδο για την CRPBCF προπέλα σε $J=0,77$.

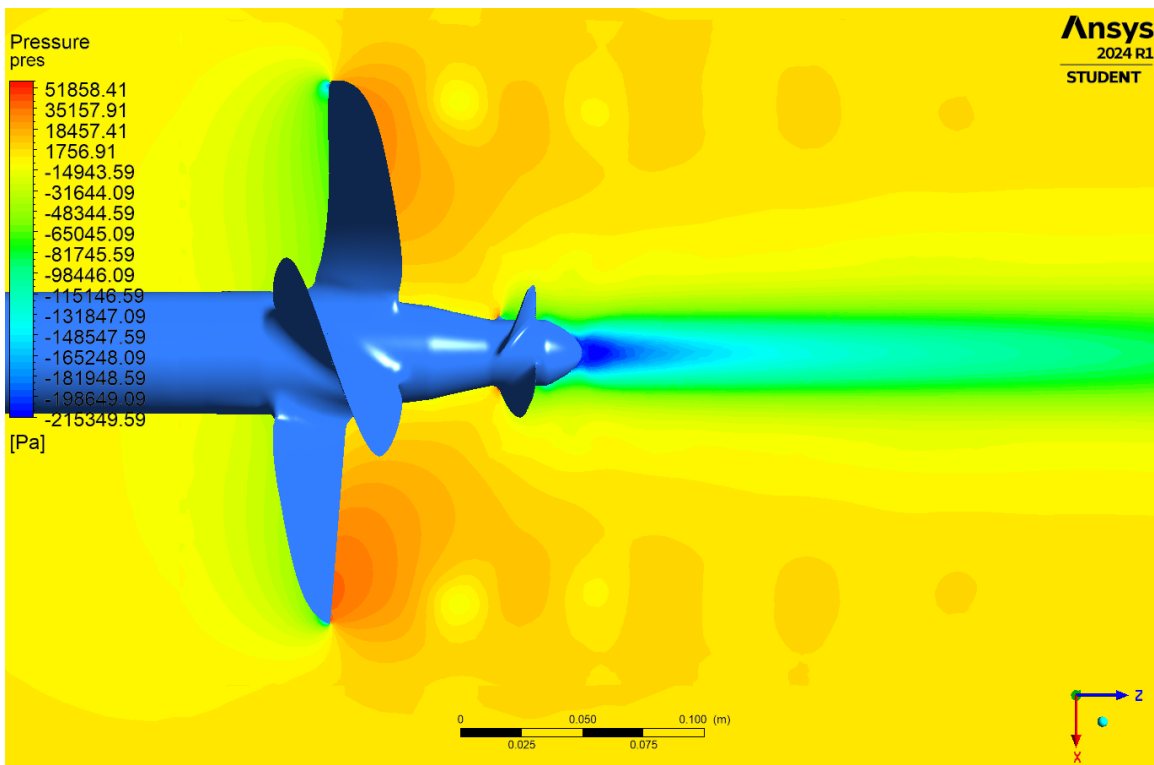
$J=0,71$



Εικόνα 4.15. Κατανομή πίεσης στο x-z επίπεδο για την αρχική προπέλα σε $J=0.71$



Εικόνα 4.16. Κατανομή πίεσης στο x-z επίπεδο για την PBCF προπέλα σε $J=0,71$.

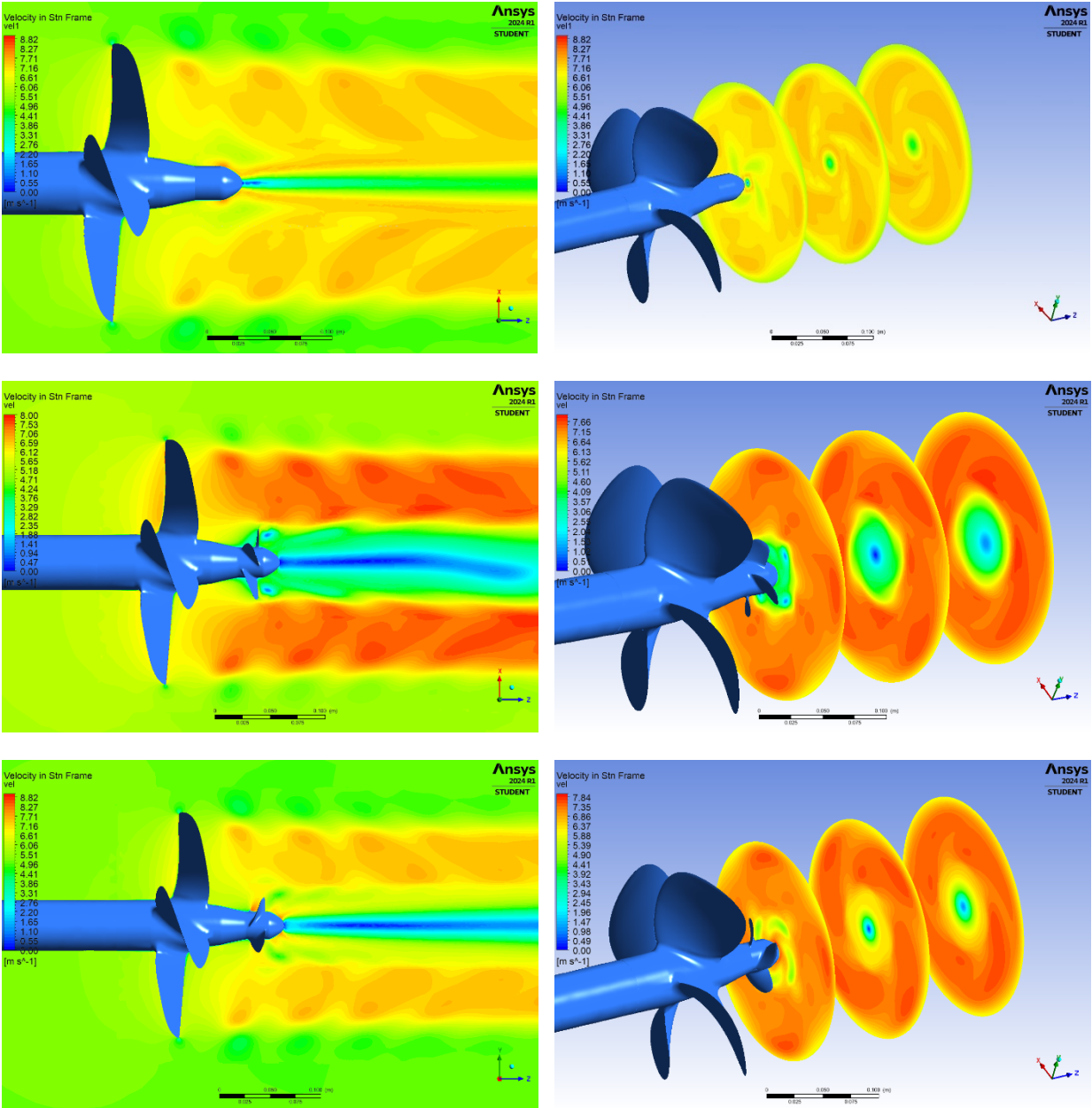


Εικόνα 4.17. Κατανομή πίεσης στο x-z επίπεδο για την CRPBCF προπέλα σε $J=0,71$.

Από τα αποτελέσματα των πιέσεων των αναλύσεων της αρχικής προπέλας και των προπελών με τα βοηθητικά πτερύγια PBCF και CRPBCF για τις τιμές του συντελεστή πρόωσης από 0,9 ως 0,71 μπορούν να ερμηνευτούν οι αλλαγές στους συντελεστές πρόωσης και απόδοσης των αναλύσεων. Συγκεκριμένα, για κάθε περίπτωση των συντελεστών πρόωσης της προπέλας παρατηρείται αύξηση της πίεσης στον ομόρρου της ροής. Τα PBCF παρουσιάζουν μεγαλύτερη αύξηση στην πίεση σε σύγκριση με τα CRPBCF πτερύγια. Αυτή η αύξηση στην πίεση επηρεάζει θετικά τον συντελεστή πρόωσης της κύριας προπέλας και στις δύο περιπτώσεις των βοηθητικών πτερυγίων. Παράλληλα όμως, παρατηρείται μία αλλαγή στα μεγέθη των πιέσεων στις πλευρές των δευτερευόντων πτερυγίων με αποτέλεσμα οι περιοχές χαμηλών πιέσεων στα πτερύγια αυτά να παρουσιάζονται στις πλευρές των υψηλών πιέσεων. Το φαινόμενο αυτό, πιθανώς να οφείλεται στην γεωμετρία που επιλέχθηκε για τα PBCF και CRPBCF πτερύγια καθώς και στην απόσταση που ορίστηκε μεταξύ αυτών και της κύριας προπέλας. Αυτή η αλλαγή των πιέσεων δικαιολογεί και την αρνητική συνεισφορά τους στους συνολικούς συντελεστές ώσης και απόδοσης του συστήματος.

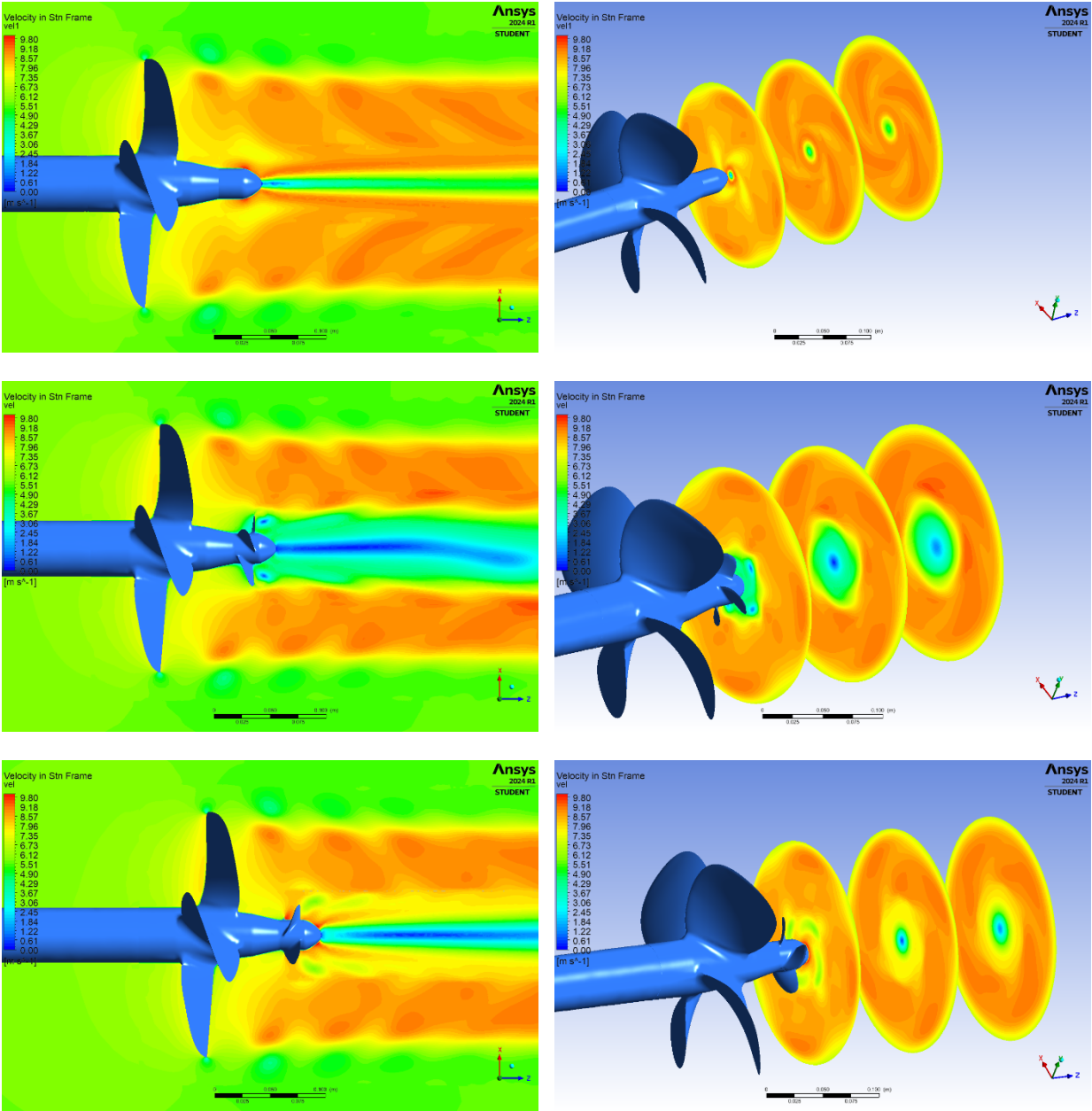
4.6 Περιγράμματα ταχυτήτων

$J=0,9$



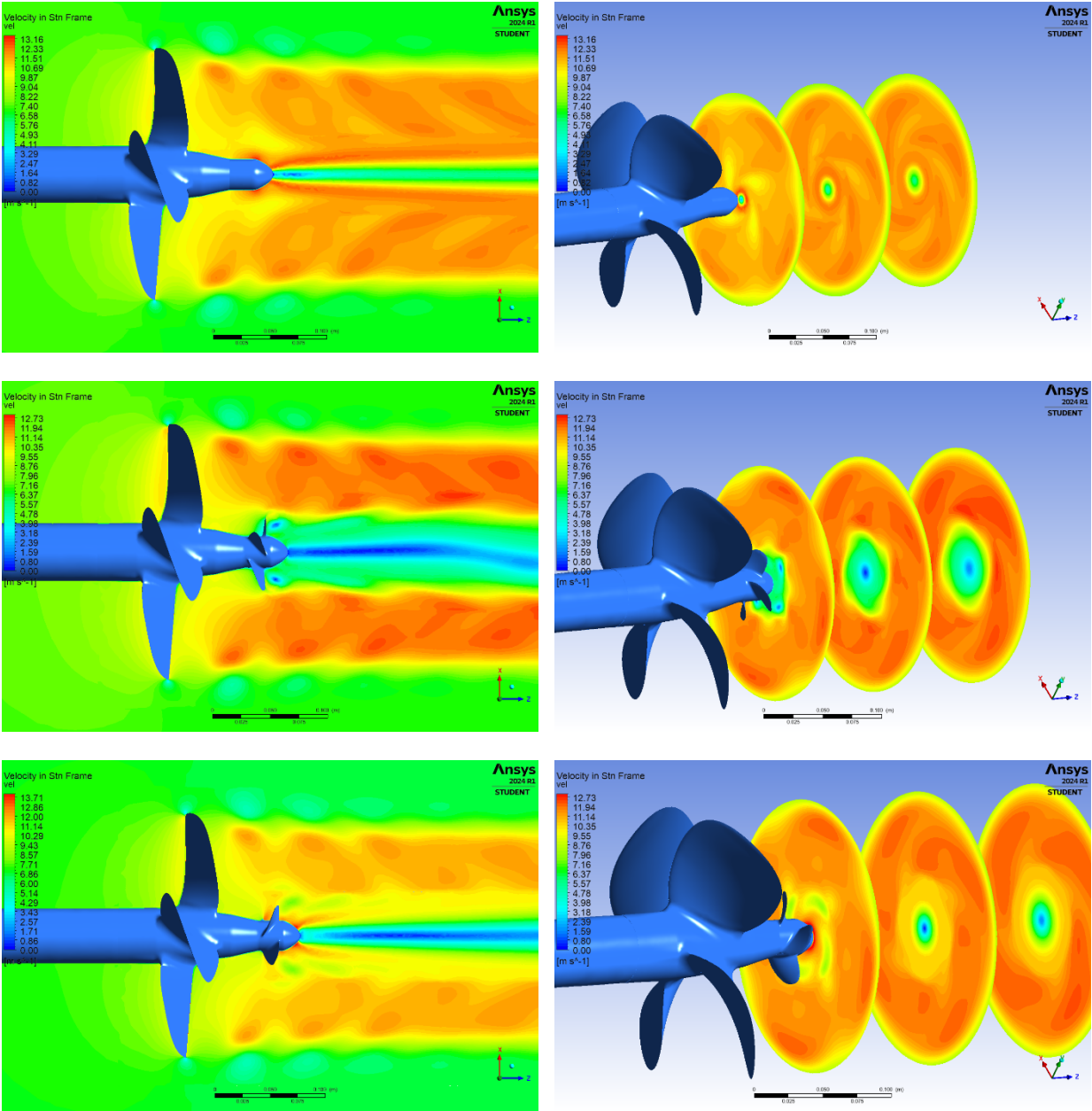
Εικόνα 4.18. Περιγράμματα ταχύτητας στο $y-z$ επίπεδο και στον ομόρρο της προπέλας για τις τρεις περιπτώσεις που αναλύθηκαν σε $J=0,9$.

$J=0,83$



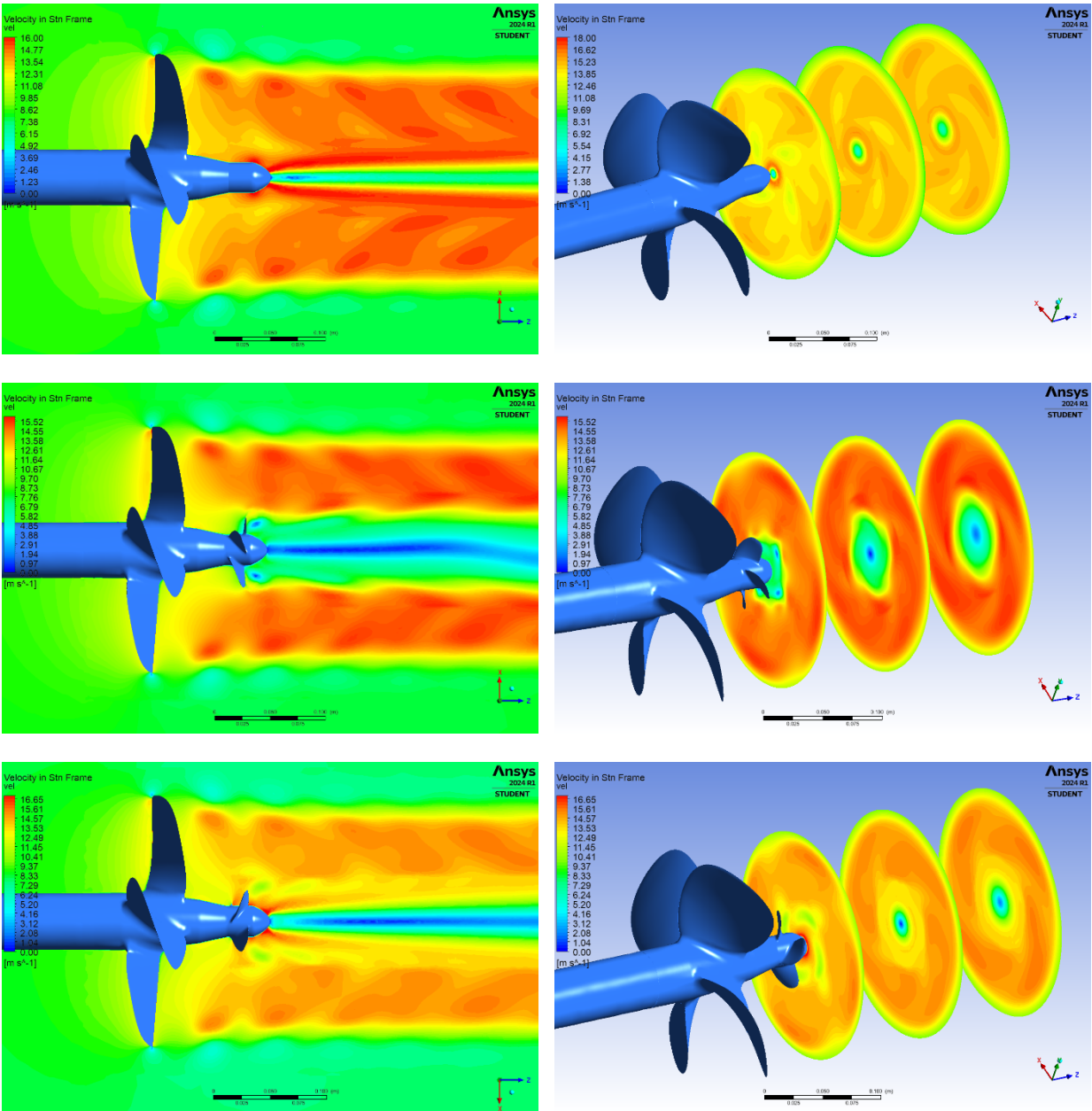
Εικόνα 4.19. Περιγράμματα ταχύτητας στο $y-z$ επίπεδο και στον ομόρρου της προπέλας για τις τρεις περιπτώσεις που αναλύθηκαν σε $J=0,83$.

$J=0,77$



Εικόνα 4.20. Περιγράμματα ταχύτητας στο $y-z$ επίπεδο και στον ομόρρου της προπέλας για τις τρεις περιπτώσεις που αναλύθηκαν σε $J=0,77$.

$$J=0,71$$

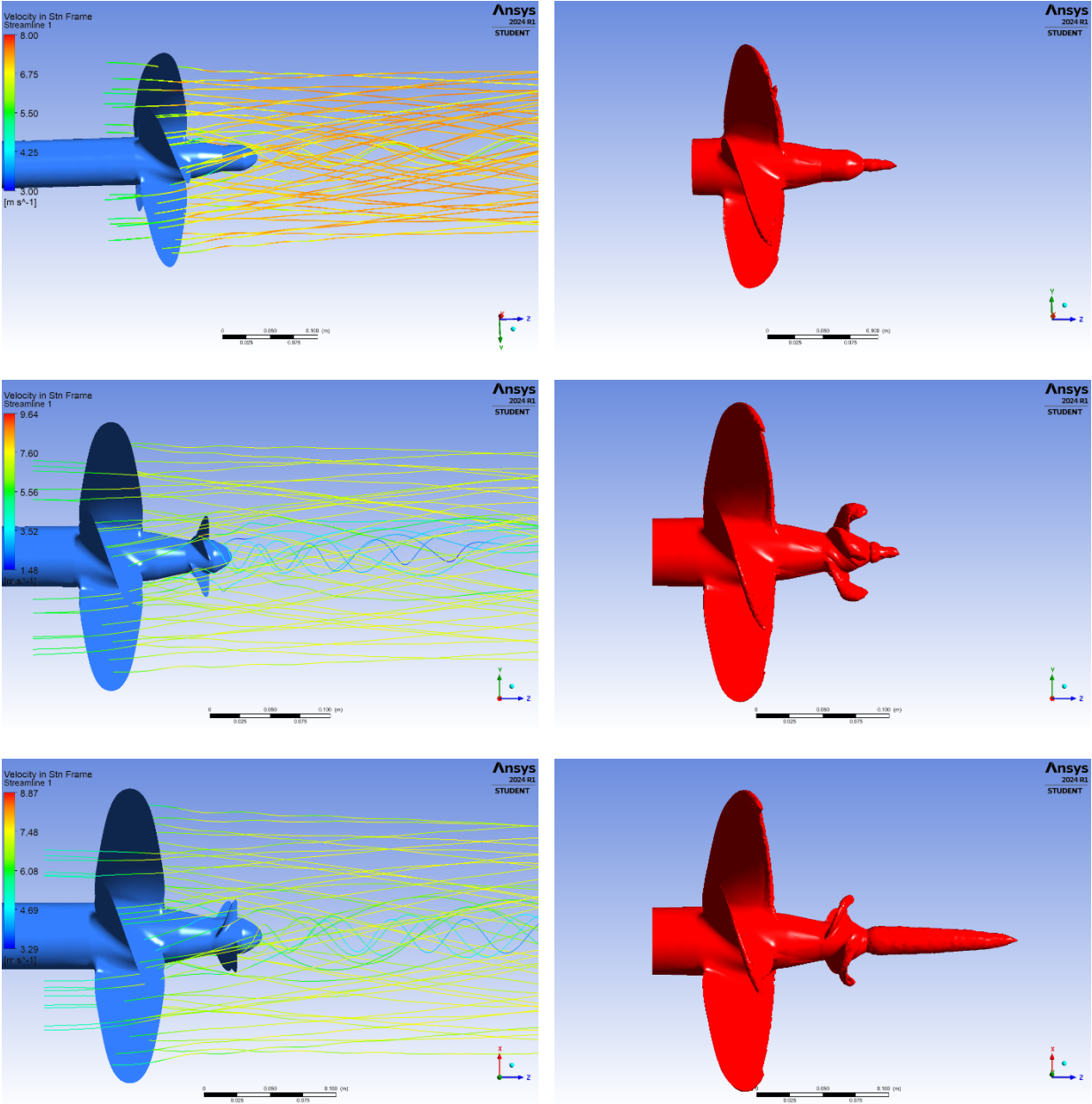


Εικόνα 4.21. Περιγράμματα ταχύτητας στο y - z επίπεδο και στον ομόρρου της προπέλας για τις τρεις περιπτώσεις που αναλύθηκαν σε $J=0,71$.

Στα περιγράμματα των μεγεθών των ταχυτήτων παράλληλα και κάθετα στο επίπεδο της ροής δεν παρατηρούνται κάποιες σημαντικές μεταβολές. Η κύρια μεταβολή βρίσκεται στον ομόρρου της ροής των βοηθητικών πτερυγίων και κυρίως στην περίπτωση των PBCF όπου εμφανίζεται σημαντική μείωση. Το αποτέλεσμα αυτό είναι φυσιολογικό μιας και η εξερχόμενη ροή από τα κύρια πτερύγια συγκρούεται με τα βοηθητικά. Έτσι αναπτύσσεται μία προστιθέμενη ροπή προς την κατεύθυνση περιστροφής της προπέλας που έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της ταχύτητας και του συντελεστή ροπής που συμβάλλει θετικά στον συνολικό συντελεστή απόδοσης του συστήματος.

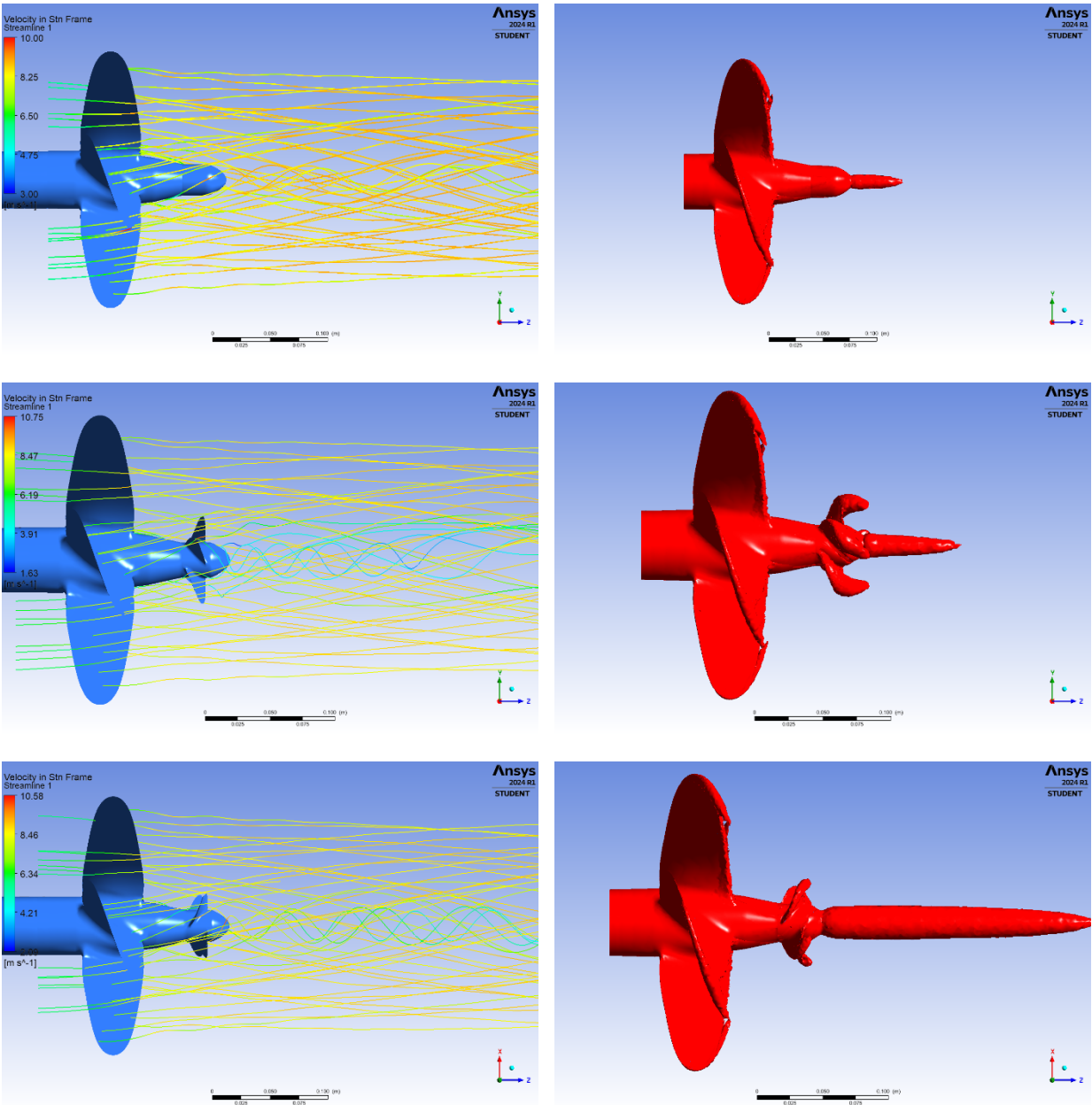
4.7 Ροϊκές γραμμές και Στροβιλότητα

$J=0,9$



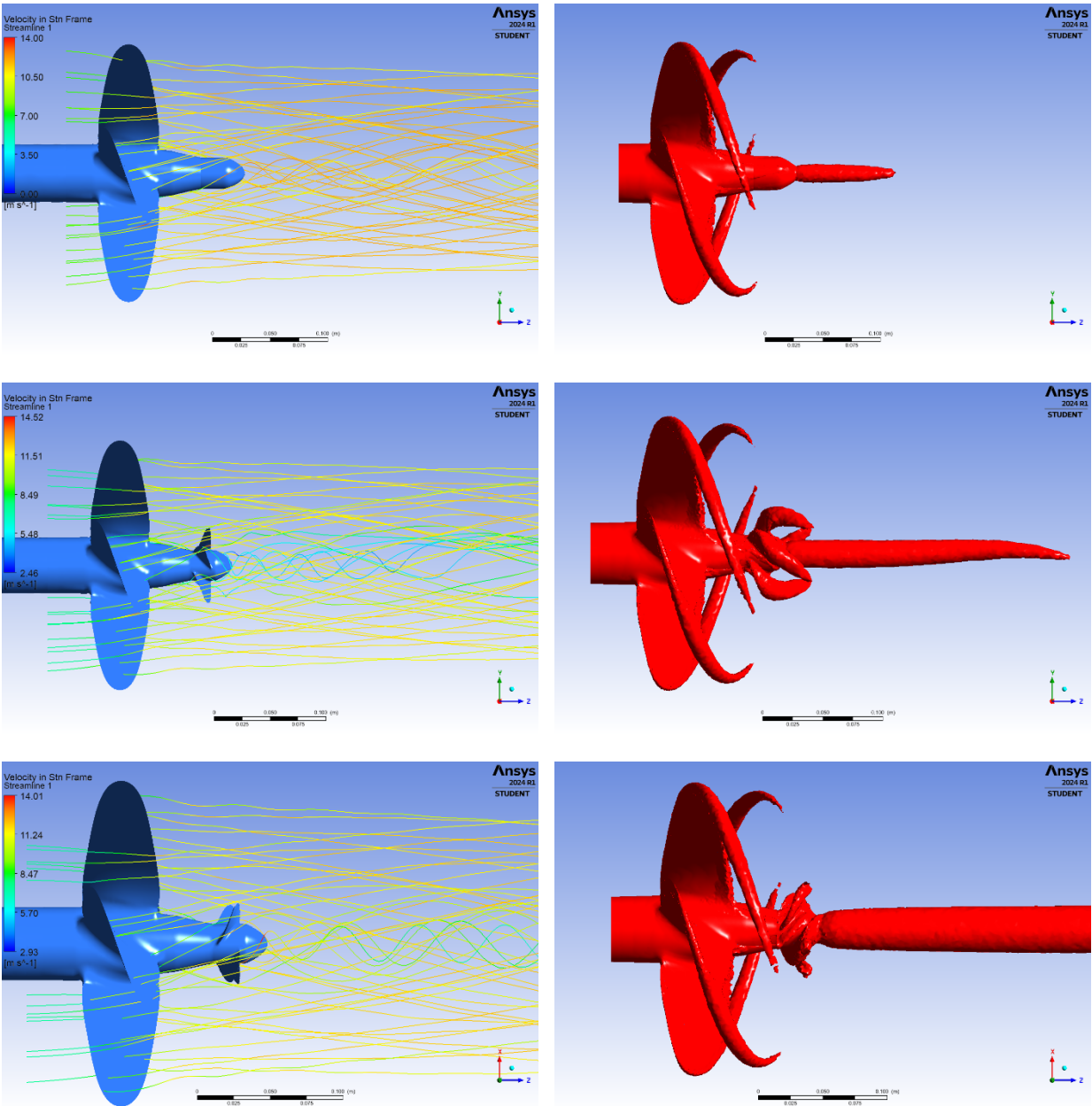
Εικόνα 4.22. Απεικόνιση των ροϊκών γραμμών και το μέγεθος της στροβιλότητας σε ρυθμό μεταβολής 1000s^{-1} για συντελεστή πρόωσης $J=0,9$.

J=0,83



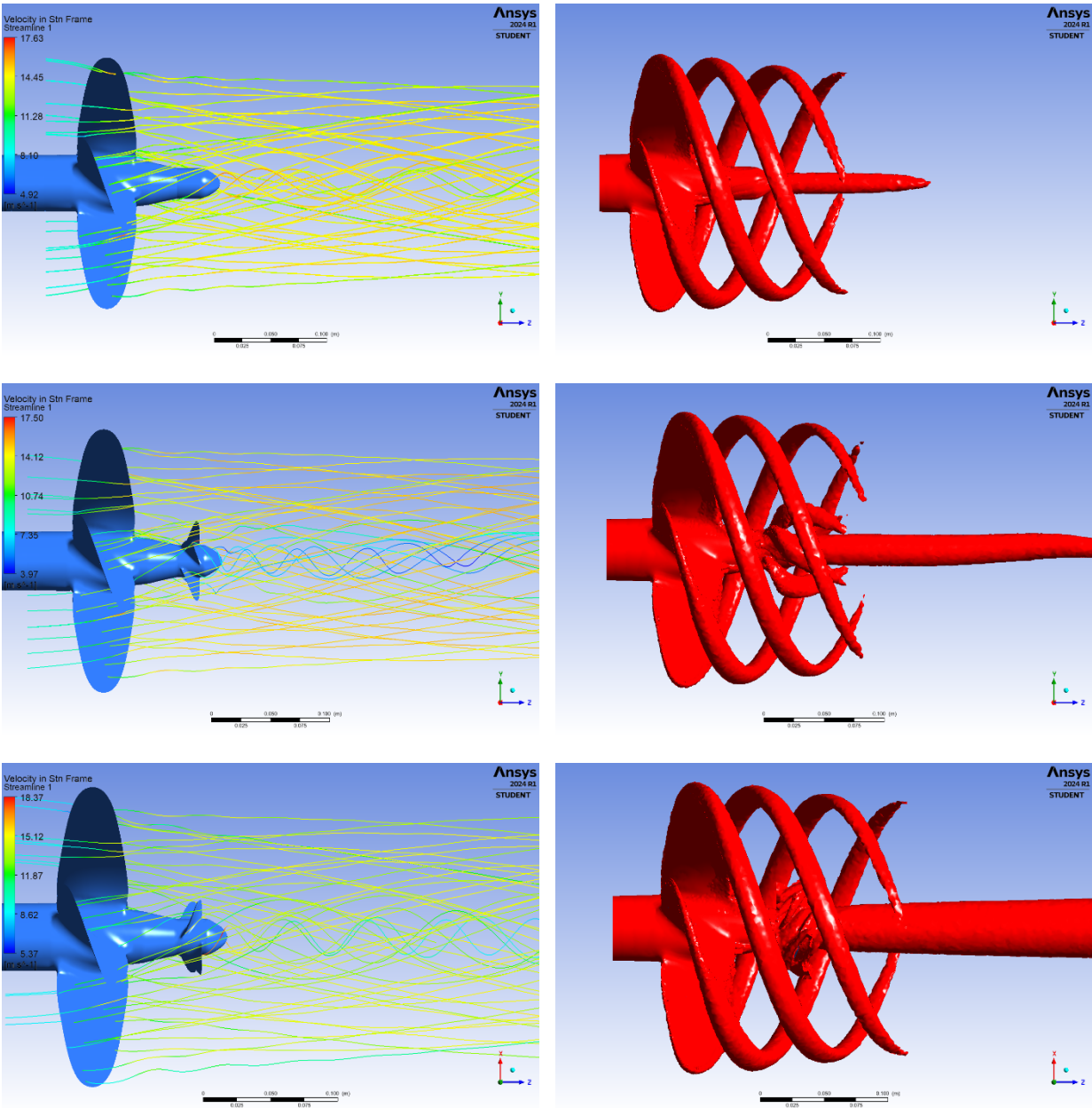
Εικόνα 4.23. Απεικόνιση των ροϊκών γραμμών και το μέγεθος της στροβιλότητας σε ρυθμό μεταβολής $1000s^{-1}$ για συντελεστή πρόωσης $J=0,83$.

$J=0,77$



Εικόνα 4.24. Απεικόνιση των ροϊκών γραμμών και το μέγεθος της στροβιλότητας σε ρυθμό μεταβολής $1000s^{-1}$ για συντελεστή πρόωσης $J=0,77$.

J=0,71



Εικόνα 4.25. Απεικόνιση των ροϊκών γραμμών και το μέγεθος της στροβιλότητας σε ρυθμό μεταβολής $1000s^{-1}$ για συντελεστή πρόωσης $J=0,71$.

Στις ροϊκές γραμμές που παρουσιάζονται στην υπό ενότητα παρατηρούνται σημαντικές αλλαγές στον ομόρρου της προπέλας με τη χρήση βοηθητικών πτερυγίων PBCF και CRPBCF. Στις δύο περιπτώσεις που αναλύθηκαν εμφανίζεται μείωση ταχύτητας στην ροή πίσω από την πλήμνη της προπέλας λόγω της διάσπασης των δινών που προκαλούν τα βοηθητικά πτερύγια. Συγκεκριμένα, τα PBCF εμφανίζουν μεγαλύτερη μείωση στις ταχύτητες του ομόρρους της πλήμνης συγκριτικά με τα CRPBCF σε όλες τις περιπτώσεις των συντελεστών πρόωσης που εξετάστηκαν. Επιπλέον, στην περίπτωση των PBCF παρατηρείται αλλαγή της κατεύθυνσης των ροϊκών γραμμών πίσω από

την πλήμνη. Όσον αφορά τα μεγέθη στροβιλότητας, παραμένουν χαμηλά στους υψηλούς συντελεστές πρόωσης $J=0.9$ και $J=0.83$ για ρυθμό μεταβολής $1000s^{-1}$ λόγω της χαμηλής περιστροφικής ταχύτητας που ορίστηκε. Στους χαμηλότερους συντελεστές πρόωσης, εμφανίζονται δίνες ακροπτερυγίου και δίνες πλήμνης σε όλες τις περιπτώσεις. Παρατηρείται πως οι δίνες που εμφανίζονται στα βοηθητικά περύγια έχουν αντίθετη φορά στις δύο περιπτώσεις PBCF και CRPBCF με τη δεύτερη να εμφανίζει μεγαλύτερη στροβιλότητα στον ομόρρου της πλήμνης.

5. Συμπεράσματα και περαιτέρω έρευνα

Τα βοηθητικά πτερύγια PBCF και CRPBCF λειτουργούν τροποποιώντας τη ροή του νερού σε προπέλες ναυτικών εφαρμογών. Σκοπός τους είναι να βελτιώσουν την πρόωση και απόδοση της προπέλας μειώνοντας την αντίσταση που προκαλείται από τα περιστρεφόμενα πτερύγια της. Αυτό οδηγεί σε εξοικονόμηση καυσίμων και μειωμένες εκπομπές, καθιστώντας το μια φιλική προς το περιβάλλον προσθήκη στα θαλάσσια σκάφη. Τα βοηθητικά πτερύγια σύμφωνα με την βιβλιογραφία, βοηθά επίσης στη μείωση της σπηλαιώσης, η οποία μπορεί να προκαλέσει ζημιά στα πτερύγια και να μειώσει την αποτελεσματικότητά τους με την πάροδο του χρόνου. Συνολικά, η PBCF βελτιώνει την απόδοση των συστημάτων πρόωσης της ναυτιλίας, συμβάλλοντας στην εξοικονόμηση κόστους και στην περιβαλλοντική βιωσιμότητα στη ναυτιλιακή βιομηχανία.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάστηκε η επίδραση των βοηθητικών πτερυγίων PBCF και CRPBCF σε προπέλα ναυτικών εφαρμογών σε συνθήκες ελεύθερης ροής με τη χρήση του λογισμικού Ansys CFX. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων έδειξαν μείωση του συντελεστή απόδοσης και στις δύο περιπτώσεις των PBCF και CRPBCF με τα πρώτα πτερύγια να εμφανίζουν μικρότερη μείωση. Συγκεκριμένα, παρατηρείται μείωση των συντελεστών ώσης για όλες τις τιμές του συντελεστή πρόωσης που εξετάστηκαν. Η μεγαλύτερη μείωση εμφανίζεται στον μεγαλύτερο συντελεστή πρόωσης $J=0,9$, ενώ η μικρότερη για $J=0,71$ και στις δύο περιπτώσεις των βοηθητικών πτερυγίων. Η μείωση του συντελεστή ώσης προκαλεί ταυτόχρονη μείωση του συντελεστή απόδοσης. Παράλληλα, οι συντελεστές ροπής της προπέλας παρουσιάζουν και αυτοί μείωση με την εφαρμογή των βοηθητικών πτερυγίων, με αποτέλεσμα της θετική συνεισφορά στον συντελεστή απόδοσης. Συγκρίνοντας τα PBCF και CRPBCF στην επίδρασή τους στην αρχική προπέλα, τα πρώτα παρουσιάζουν καλύτερα αποτελέσματα σε όλες τις περιπτώσεις εξαιρουμένης της ανάλυσης για $J=0.9$ όπου εμφανίζουν μικρότερη μείωση στον συντελεστή ροπής σε σχέση με τα δεύτερα. Τα περιγράμματα των πιέσεων έδειξαν αύξηση στο πεδίο πίεση στον ομόρρου της πλήμνης της ροής και στις δύο περιπτώσεις. Τα PBCF εμφάνισαν μεγαλύτερη αύξηση στην πίεση σε σύγκριση με τα CRPBCF όπου δικαιολογεί την καλύτερη απόδοση μεταξύ των δύο. Αντιθέτως, στα βοηθητικά πτερύγια παρουσιάστηκαν περιοχές χαμηλής πίεσης όπου συνέλαβαν αρνητικά στην παραγωγή ώσης και στον συνολικό συντελεστή απόδοσης. Συμπερασματικά, η μείωση της απόδοσης του συστήματος με την εφαρμογή των βοηθητικών πτερυγίων πιθανόν να οφείλεται στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους και στην απόσταση τοποθέτησής τους από την κύρια προπέλα. Τέλος, αποκτά μεγάλο ενδιαφέρον η μελλοντική μελέτη διαφορετικών γεωμετριών βοηθητικών πτερυγίων και η ανάλυση του φαινομένου σπηλαιώσης.

Βιβλιογραφία

- [1] Carlton, John. 2019. *Marine Propellers and Propulsion*. 4th ed.
- [2] Pfaff, Manfred. *Ship Operation Technology*. Springer, 2022. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-32729-3>.
- [3] Yang, Dongmei, Zhen Ren, Zhiqun Guo, and Zeyang Gao. 2018. “Numerical Analysis on the Hydrodynamic Performance of an Artificially Ventilated Surface-Piercing Propeller.” *Water* 10 (11): 1499. <https://doi.org/10.3390/w10111499>.
- [4] Kerwin, Justin E. *Lecture Notes Hydrofoils and Propellers*, 2001.
- [5] Molland, Anthony F., and Stephen R. Turnock. *Marine Rudders and Control Surfaces*. 1st ed. Elsevier Ltd, 2007.
- [6] Anderson, J. *Computational Fluid Dynamics An Introduction*. 3rd ed. Springer, 2009.
- [7] Cengel Y. and Cimbala J., Μηχανική Ρευστών Θεωρία και Εφαρμογές. Μεταφράστηκε από Αγγλικά από Ι. Κόλιας, Ν. Λαγανοπούλου και Μ. Γρηγορίου Φούντα. Αθήνα: FountasBooks
- [8] White F., 2011. *Fluid Mechanics*. 7th ed. New York: McGraw-Hill
- [9] Leishman, J. Gordon. “Boundary Layers,” 2022. <https://oer.pressbooks.pub/introductiontoaerospaceflightvehicles/chapter/introduction-to-boundary-layers/>.
- [10] Green, Sheldon I., ed. *Fluid Vortices*. Vol. 30. *Fluid Mechanics and Its Applications*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1995. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-0249-0>.
- [11] Brennen, Christopher E. *Cavitation and Bubble Dynamics*. Oxford Engineering Science Series 44. New York: Oxford University Press, 1995.
- [12] Yakhot, V, Orszag, S Thangam, and Gatski. 1992. “Development of Turbulence Models for Shear Flows by a Double Expansion Technique.”
- [13] Salvatore, Francesco, Francisco Alves Pereira, Mario Felli, Danilo Calcagni, and Fabio Di Felice. 2006. “Description of the INSEAN E779A Propeller Experimental Dataset.” Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6077997>.
- [14] Helal, Mohamed M., Tamer M. Ahmed, Adel A. Banawan, and Mohamed A. Kotb. 2018. “Numerical Prediction of Sheet Cavitation on Marine Propellers Using CFD Simulation with Transition-Sensitive Turbulence Model.” *Alexandria Engineering Journal* 57 (4): 3805–15. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2018.03.008>.
- [15] Viitanen, Ville, Tuomas Sipilä, Antonio Sánchez-Caja, and Timo Siikonen. 2022. “CFD Predictions of Unsteady Cavitation for a Marine Propeller in Oblique Inflow.” *Ocean Engineering* 266 (December): 112596. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112596>.
- [16] Vimala, V., K. Veeramanikandan, N. Viswanathan, B. Pitchia Krishnan, S. Hari, S. Madhavan, S. Dhinesh, and V. Karthikeyan. 2022. “Analysis of Marine Propeller Using Computational Fluid Dynamics.” *Materials Today: Proceedings*, 4th International Conference on Advances in Mechanical Engineering, 68 (January): 2375–81. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.09.105>.
- [17] Tan, Quan, Yu Ding, Jiacheng Liu, and Congbiao Sui. 2023. “CFD-Based Hull-Engine-Propeller Matching Study after Retrofitting Propeller Boss-Cap-Fin (PBCF).” *Ocean Engineering* 285 (October): 115364. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115364>.

- [18] Zhu, Wencai, Feng Zhou, Huijie Shu, and Guoliang Hu. 2022. “Effect of Contra-Rotating Propeller Boss Cap Fins (CRPBCF) on the Performance of Marine Propellers.” *Ocean Engineering* 266 (December): 112932. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112932>.
- [19] Gaggero, Stefano, and Mattia Martinelli. 2021. “Comparison of Different Propeller Boss Cap Fins Design for Improved Propeller Performances.” *Applied Ocean Research* 116 (November): 102867. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2021.102867>.
- [20] Ma, Cheng, Hao-peng Cai, Zheng-fang Qian, and Ke Chen. 2014. “The Design of Propeller and Propeller Boss Cap Fins (PBCF) by an Integrative Method.” *Journal of Hydrodynamics, Ser. B* 26 (4): 586–93. [https://doi.org/10.1016/S1001-6058\(14\)60066-4](https://doi.org/10.1016/S1001-6058(14)60066-4).
- [21] Sinaga, Nazaruddin, Dinesh Y. Dhande, and Bambang Yudianto. 2022. “A Numerical Investigation of the Effect of Blade Number on the Performance of an INSEAN E779A Marine Propeller in a Cavitating Flow Using Computational Fluid Dynamics.” *Ocean Engineering* 261 (October): 112063. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112063>.
- [22] Takafumi, Kawamura, Ouchi Kazuyuki, and Takeuchi Susumu. n.d. “Model and Full Scale CFD Analysis of Propeller Boss Cap Fins (PBCF).” *Third International Symposium on Marine Propulsors Smp'13, Launceston, Tasmania, Australia, May 2013*.