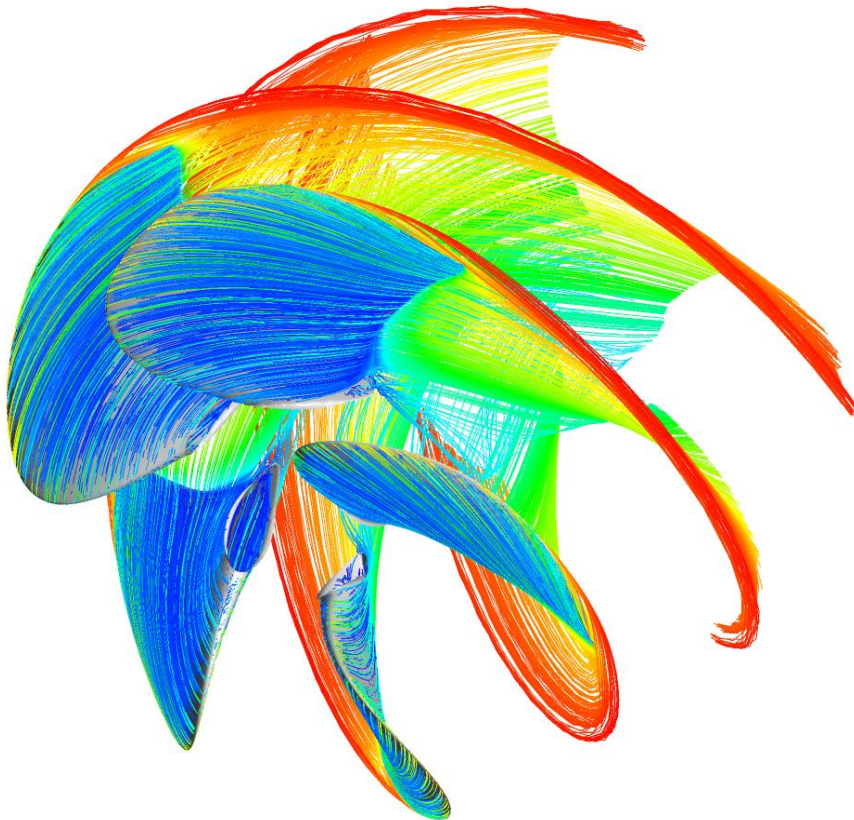




Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Πολυτεχνική Σχολή

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΠΡΟΠΕΛΑΣ ΓΙΑ ΜΕΓΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΒΑΘΜΟΥ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΜΕ
ΧΡΗΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ**



ΖΙΟΥΤΑΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

ΑΕΜ: 1893

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΟΥΡΛΙΔΑΚΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ

Κοζάνη, Ιούλιος 2021

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΠΡΟΠΕΛΑΣ ΓΙΑ ΜΕΓΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΒΑΘΜΟΥ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΜΕ
ΧΡΗΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ**

ΖΙΟΥΤΑΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

ΑΕΜ: 1893

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

ΤΟΥΡΛΙΔΑΚΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ

Κοζάνη, Ιούλιος 2021

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η προβληματική της παρούσας εργασίας επικεντρώνεται στη διερεύνηση της ροής ρευστού γύρω από ναυτική προπέλα και την απόπειρα βελτίωσης της γεωμετρίας της, με σκοπό την αύξηση του βαθμού απόδοσής της. Αφού αναφέρθηκαν οι κύριες παράμετροι μοντελοποίησης και τα βασικά χαρακτηριστικά μίας ναυτικής προπέλας, μεγάλη σημασία δόθηκε στην προσομοίωση του προβλήματος. Η γεωμετρία της προπέλας εισήχθη στο λογισμικό Solidworks, όπου σχεδιάστηκε ο περιβάλλον όγκος ελέγχου. Με τη χρήση του λογισμικού ANSA διακριτοποιήθηκε ο όγκος ελέγχου και στο λογισμικό ANSYS-CFX ορίστηκαν οι παράμετροι και έγινε επίλυση της προσομοίωσης. Ακολούθησε σύγκριση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων με έτοιμα πειραματικά δεδομένα και η αξιολόγηση της συμπεριφοράς του ρευστού γύρω από την προπέλα. Για τη βελτίωση της απόδοσης σχεδιάστηκαν βοηθητικά πτερύγια στο λογισμικό Solidworks ,εκτελέστηκε η παραπάνω διαδικασία προσομοίωσης και εκτιμήθηκε η επιρροή τους στη συμπεριφορά της προπέλας στο ρευστό, λαμβάνοντας υπόψη τους συντελεστές ώσης, ροπής, πρόωσης, τον βαθμό απόδοσης και τις ροϊκές γραμμές του ρευστού. Εν τέλει, η προσθήκη φράκτη ακροπτερυγίων βοήθησε στην αύξηση του βαθμού απόδοσης της προπέλας, μειώνοντας το φαινόμενο της δίνης στο άκρο των πτερυγίων της προπέλας.

ABSTRACT

The present thesis pertains to the investigation of the flow around a marine propeller and the attempt of its geometrical improvement, targeting efficiency maximization. After the mention of the main modelling parameters and the basic marine propeller characteristics, it focuses on the simulation of the problem. The propeller geometry was inserted into Solidworks, where the surrounding control volume was designed. With the use of ANSA the mesh of the control volume was generated and in ANSYS-CFX the parameter definition and the simulation solving took place. The results were measured against the experimental data, followed by the evaluation of the flow around the propeller. Extra fins were created, for the control of the flow, in a manner that the propeller becomes more efficient. After following the same modelling procedure, the effect of the extra fins was calculated, considering the thrust, torque and advance coefficients, the efficiency and the fluid streamlines. Lastly, the addition of winglets on the wingtip of the blades, helped the propeller operate more efficiently, reducing the wingtip vortices.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας συνέβαλλαν αρκετοί παράγοντες, ανθρωπίνοι και μη. Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου δρ. Αντώνιο Τουρλιδάκη, για την εμπιστοσύνη του και την ενεργή παρουσία του, μέσω προτάσεων και συμβουλών. Επιπλέον, ευχαριστώ τον δρ. Κυριάκο Βαφειάδη, για το ενδιαφέρον και τη βοήθειά του σε θέματα πρόσβασης και οργάνωσης στο εργαστήριο του πανεπιστημίου, ειδικά λόγω της περιόδου απαγορεύσεως μετακινήσεων και της εξ' αποστάσεως εκπαίδευσης.

Δε θα μπορούσα να παραλείψω την έμμεση, αλλά ουσιαστική συμβολή της φοιτητικής ομάδας Typhoon MotoRacing UoWM, των μελών της, και του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας, από τα οποία απέκτησα εμπειρία σε θέματα οργάνωσης και υλοποίησης ερευνητικού έργου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους κοντινούς μου ανθρώπους και κυρίως την οικογένειά μου, για την αδιάκοπη στήριξή τους, καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	- 4 -
ABSTRACT	- 5 -
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	- 6 -
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	- 8 -
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	- 11 -
1.1 Ιστορική αναδρομή	- 11 -
1.2 Σκοπός της εργασίας	- 14 -
1.3 Πειραματικά δεδομένα	- 15 -
1.3.1 Ιδρυμα SVA-Potsdam	- 15 -
1.3.2 Συμπόσιο SMP'11	- 15 -
1.4 Οργάνωση Κεφαλαίων	- 18 -
2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	- 19 -
2.1 Υδροπτέρυγα	- 19 -
2.1.1 Γεωμετρία υδροπτέρυγας	- 19 -
2.1.2 Δυνάμεις	- 20 -
2.2 Προπέλα	- 20 -
2.2.1 Βήμα προπέλας	- 20 -
2.2.2 Επιδόσεις Προπέλας	- 22 -
2.2.3 Διαστατική ανάλυση δυνάμεων προπέλας	- 22 -
2.3 Δίνη στο άκρο πτερυγίου	- 23 -
2.4 Αποκόλληση της ροής	- 24 -
2.5 Θεωρία Ροής Ρευστού	- 25 -
2.5.1 Διαφορική ανάλυση της ροής των ρευστών	- 25 -
2.5.2 Εξισώσεις	- 26 -
2.5.3 Στρωτή, Τυρβώδης Ροή και αριθμός Reynolds	- 28 -
2.5.4 Οριακό στρώμα	- 29 -
2.6 Υπολογιστική Ρευστοδυναμική	- 30 -
2.6.1 Πλέγμα	- 30 -
2.6.2 Ποιότητα πλέγματος	- 31 -

2.6.3	Δομημένο, μη δομημένο, υβριδικό πλέγμα	- 32 -
2.6.4	Οριακές Συνθήκες	- 33 -
2.6.5	Μέγεθος περιβάλλοντος όγκου	- 33 -
2.6.6	Y+ και Ιξώδες Τύρβης	- 33 -
2.6.7	Μοντέλα τύρβης	- 34 -
2.6.8	Επίλυση	- 36 -
3	ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΟΠΕΛΑΣ	- 37 -
3.1	Γεωμετρία	- 37 -
3.1.1	Γεωμετρία προπέλας	- 37 -
3.1.2	Σχεδίαση όγκων	- 38 -
3.2	Διακριτοποίηση	- 39 -
3.3	Οριακές συνθήκες	- 40 -
4	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	- 42 -
4.1	Αποτελέσματα πειραματικών δεδομένων PPTC	- 42 -
4.2	Πυκνότητα πλέγματος στα πτερύγια της προπέλας	- 43 -
4.2.1	A – B	- 43 -
4.3	Πάχος, βαθμός ανάπτυξης και αριθμός στρωμάτων οριακού στρώματος	- 46 -
4.3.1	B – Γ	- 46 -
4.4	Περιβάλλον όγκος και διακριτοποίηση	- 50 -
4.4.1	Γ – Δ	- 50 -
4.5	Y+	- 53 -
4.5.1	Γ – E	- 53 -
4.6	Πάχος οριακού στρώματος	- 57 -
4.6.1	Εκτίμηση πάχους οριακού στρώματος	- 57 -
4.6.2	Γ – ΣΤ	- 59 -
4.7	Συμπεράσματα αναλύσεων	- 62 -
5	ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ	- 66 -
5.1	Αξιολόγηση VP1304	- 66 -
5.2	Γεννήτριες στροβίλων	- 66 -
5.2.1	Δημιουργία	- 66 -
5.2.2	Αποτελέσματα	- 68 -

5.3 Φράκτης ακροπτερυγίων	- 70 -
5.3.1 Δημιουργία	- 70 -
5.3.2 Αποτελέσματα	- 71 -
6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ	- 74 -
7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	- 76 -
8 ΚΩΔΙΚΑΣ ΜΑΤLAB	- 77 -

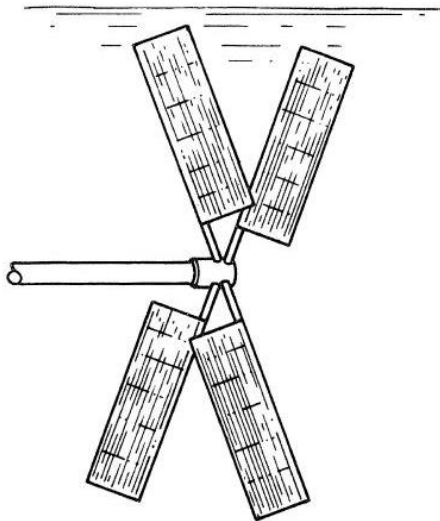
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ιστορική αναδρομή

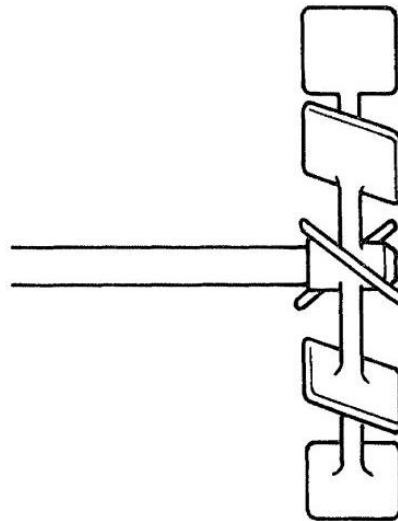
Τα πρώτα σχέδια και οι πρώτες ιδέες σχετικά με τη ναυτική προπέλα θα μπορούσαν να θεωρηθούν αυτά του Αρχιμήδη, περίπου το 250 π.Χ., τα οποία αφορούν μία αντλία «βίδα», όπως επικαλούνταν από τους μηχανικούς του χώρου της ναυσιπλοΐας το 19^ο αιώνα. Στην ίδια περίπτωση ανήκει και ο Leonardo Da Vinci, με τα σχέδιά του να περιγράφουν περίπου 1700 χρόνια αργότερα μία ιδέα πρόωσης με τη χρήση πτερυγίων που μοιάζουν σε αυτά που χρησιμοποιούνται σήμερα σε εφαρμογές ψύξης.

Το 1681 ο Robert Hooke, γνωστός για το έργο του στην ελαστικότητα των υλικών, περιέγραψε το σχέδιο ενός οριζόντιου νερόμυλου, αναγνωριζόμενο ως η αρχή της εξέλιξης της ναυτικής πρόωσης. Αποτελούνταν από έξι ξύλινες σημαίες, περιστρεφόμενες κατά 180° ως προς τον άξονά τους, για κάθε πλήρη περιστροφή του κεντρικού άξονα.

Το 1752 η Ακαδημία Επιστημών του Παρισιού πρόσφερε μια σειρά βραβείων για έρευνα στις θεωρητικές μεθόδους, δελεώντας πολλούς μαθηματικούς και επιστήμονες της εποχής, όπως ο d' Alembert, ο Euler και ο Bernoulli, και οδήγησε σε αξιοσημείωτη ανάπτυξη της ναυτικής αρχιτεκτονικής.

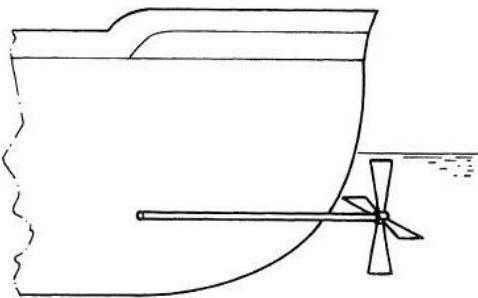


Σχήμα 1.1: η προπέλα του Hooke (1683) [1]

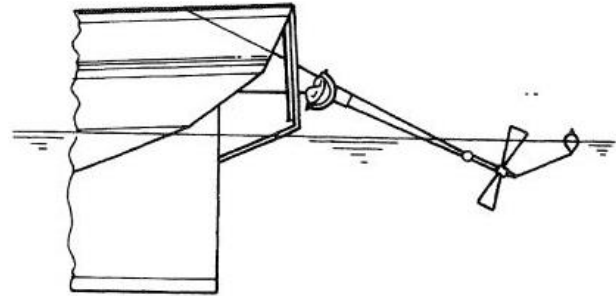


Σχήμα 1.2: η προπέλα του Bernoulli (1752) [1]

Λίγα χρόνια αργότερα ο Joseph Bramah πρότεινε μία διάταξη πρόωσης, η οποία μοιάζει με αυτήν που χρησιμοποιούμε σήμερα, χωρίς να υπάρχουν αποδείξεις εφαρμογής της. Πρόκειται για μία προπέλα μικρού αριθμού πτερυγίων, τοποθετημένη στην άκρη ενός οριζώντιου άξονα, ο οποίος διέρχεται μέσα από το κέλυφος, κάτω από την επιφάνεια του νερού. Το 1802, ο Edward Shorter, εφαρμόζοντας μία παραλλαγή της διάταξης του Bramah, σχεδίασε μία διάταξη, της οποίας ο άξονας περνούσε μέσα από το σκάφος επάνω από την επιφάνεια του νερού, εξαλείφοντας την ανάγκη για μόνωση.

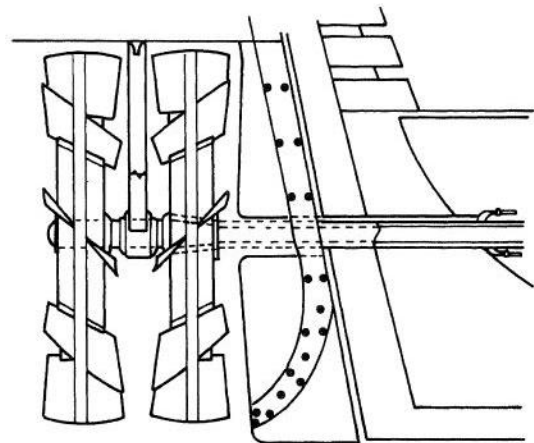


Σχήμα 1.3: η διάταξη του Bramah (1785) [1]



Σχήμα 1.4: η διάταξη του Shorter (1802) [1]

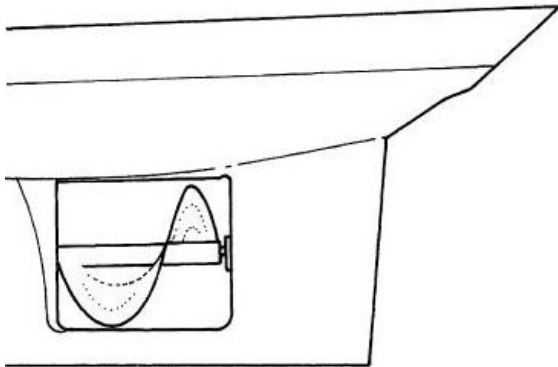
Το 1824 στη Γαλλία, ο Monsieur Dollman παράγει ένα ζευγάρι προπελών με δύο πτερύγια, τοποθετημένα στον ίδιο άξονα, με αντίθετη φορά περιστροφής, το οποίο πατένταρε ο John Ericsson στην Αγγλία λίγα χρόνια αργότερα. Η πατέντα περιγράφει δύο προπέλες, όμοιες με αυτές του Bernoulli, με ελικοειδή μορφή και αντίθετη φορά περιστροφής, πακτωμένες σε ένα εξωτερικό δαχτυλίδι.



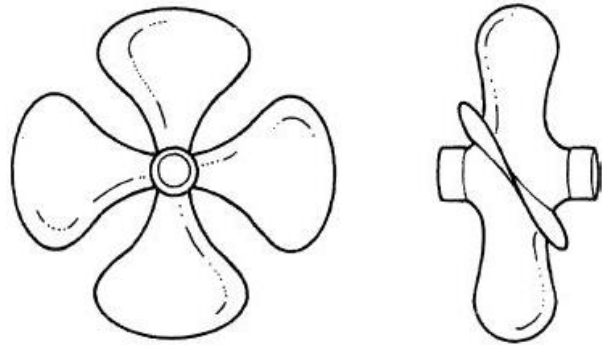
Σχήμα 1.5: οι προπέλες αντίθετης περιστροφής του Ericsson (1836) [1]

Την ίδια περίοδο, ο Francis Petit Smith διαμόρφωσε μία διάταξη αποτελούμενη από προπέλα όμοια με αυτήν του Αρχιμήδη, τοποθετημένη με τελείως διαφορετικό τρόπο. Κατασκεύασε ένα πρωτότυπο πλοίο έξι τόνων με μία ατμομηχανή ισχύος 6hp και τοποθέτησε μία ξύλινη προπέλα τύπου Αρχιμήδη. Στις δοκιμές που έκανε, η προπέλα υπέστη φθορά και έσπασε στη μέση, αυξάνοντας ακαριαία την ταχύτητα του πλοίου. Ο Smith, εξετάζοντας το συμβάν, τροποποίησε την προπέλα ανάλογα και το 1830 κατασκεύασε μαζί με τον Wright και τα αδέρφια Rennie ένα μεγαλύτερο πλοίο, το οποίο

ονόμασε “Archimedes”. Έτσι, σταδιακά, δημιουργήθηκε η προπέλα με πτερύγια, των οποίων η προέκταση διαμορφώνει νοητά το σχήμα βίδας, όπως αυτή του πλοίου Napoleon το 1842.



Σχήμα 1.6: η προπέλα του “Archimedes” (1839) [1]



Σχήμα 1.7: η προπέλα του “Napoleon” (1842) [1]

Τα παραπάνω, μεταξύ άλλων, αποτελούν τη βάση της ναυτικής προπέλας, όπως τη γνωρίζουμε σήμερα. Κατά τη διάρκεια του 19^{ου} αιώνα, δημιουργήθηκαν πολλές παραλλαγές αυτής, όπως η προπέλα ρυθμιζόμενου βήματος, το δίπλωμα των πτερυγίων για ιστιοπλοϊκά σκάφη και γεωμετρίες αποφυγής του φαινομένου σπηλαιώσης.

1.2 Σκοπός της εργασίας

Κατά τη χρήση της προπέλας ως μέσο πρόωσης πλοίων, προέκυψαν διάφορα φαινόμενα, για τα οποία οι επιστήμονες στο χώρο της ναυσιπλοΐας προσπαθούν να βρουν λύσεις. Μερικά βασικά από αυτά αναφέρονται παρακάτω. Αρχικά, με τη χρήση πλοίων ως το βασικότερο μέσο μεταφοράς υλικών αγαθών, έχει δημιουργηθεί η ανάγκη μείωσης του κόστους μεταφοράς τους και των παραγόμενων ρύπων. Η βελτίωση της απόδοσης της προπέλας συμβάλλει σε αυτό, απαιτώντας λιγότερο καύσιμο για την εκτέλεση μίας διαδρομής. Επιπλέον, παρατηρούνται φαινόμενα σπηλαιώσης επάνω στα πτερύγια της προπέλας, τα οποία φθείρουν το υλικό τους και προκαλούν ανάγκες επισκευής ή και αντικατάστασης, οι οποίες κοστίζουν. Τέλος, η παραγωγή θορύβου, κυρίως μέσω του φαινομένου της σπηλαιώσης κατά τη λειτουργία μίας προπέλας μέσα στο νερό έχει κεντρίσει το ενδιαφέρον των μηχανικών σε εφαρμογές υποβρυχίων.

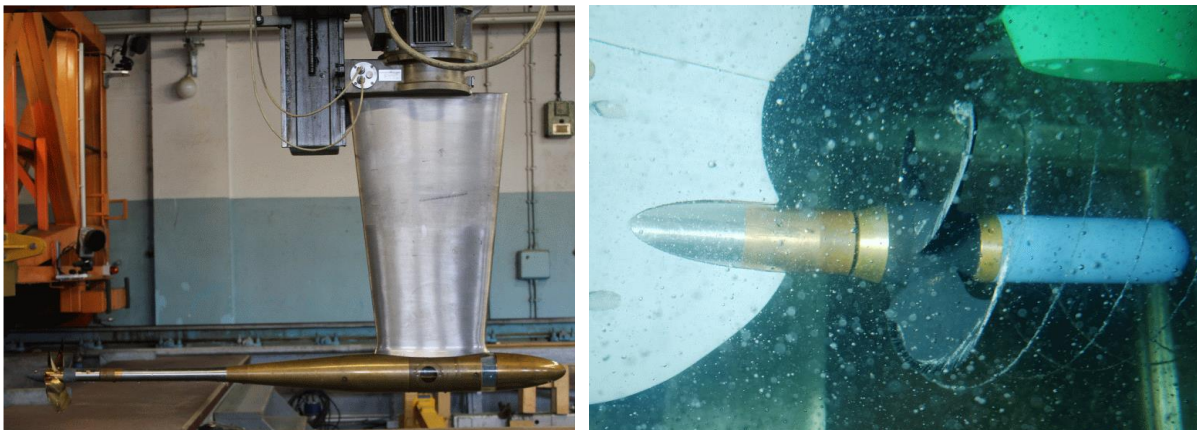
Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η συμβολή της στην προσπάθεια δημιουργίας οικολογικών μέσων μεταφοράς στο χώρο της ναυσιπλοΐας, με τη βελτίωση του βαθμού απόδοσης της ναυτικής προπέλας, η οποία με τη σειρά της μειώνει κόστους χρήσης των πλοίων και της παραγωγής καυσαερίων. Για την εκτίμηση της βελτίωσης του βαθμού απόδοσης, απαιτούνται υπολογιστικές μέθοδοι, οι οποίες αντιπροσωπεύουν την πραγματικότητα σε ικανοποιητικό βαθμό. Για το λόγο αυτό, σημαντικό κομμάτι της εργασίας είναι ο έλεγχος εγκυρότητας των αποτελεσμάτων, μέσω της σύγκρισής τους με πειραματικά δεδομένα, τα οποία παρουσιάζονται στην επόμενη ενότητα.

1.3 Πειραματικά δεδομένα

1.3.1 Ιδρυμα SVA-Potsdam

Το SVA (Schiffbau-Versuchsanstalt) είναι ένα ανεξάρτητο ίδρυμα έρευνας στη ναυπηγική με βάση το Potsdam της Γερμανίας. Το έργο της αποτελεί κομμάτι της, πάνω από 120 χρόνων, παράδοσης στην έρευνα και ανάπτυξη στον χώρο της ναυσιπλοΐας. Το SVA δημοσίευσε τα πειραματικά δεδομένα της προπέλας μεταβλητού βήματος VP1304 αναφερόμενα στο εξής με τα αρχικά PPTC (Potsdam Propeller Test Case) για να δώσουν τη δυνατότητα σε όποιον επιθυμεί να επαληθεύσει τους υπολογισμούς του.

Κατά την εκλογή προπέλας για τη χρήση της στην παρούσα εργασία ήταν σημαντικό να υπάρχουν πειραματικά δεδομένα των επιδόσεών της. Η αξιοποίησή τους ως μέτρο σύγκρισης με τις υπολογιστικές αναλύσεις είναι αναγκαία κατά τον έλεγχο εγκυρότητας των παραγόμενων αποτελεσμάτων. Για την εργασία ελήφθησαν η γεωμετρία της παραπάνω προπέλας και τα πειραματικά δεδομένα της για το τεστ ελεύθερης ροής, τα οποία παρουσιάζονται αναλυτικά στην ενότητα 3.1.



Σχήμα 1.8: εικόνες από τις εγκαταστάσεις του ιδρύματος SVA [9]

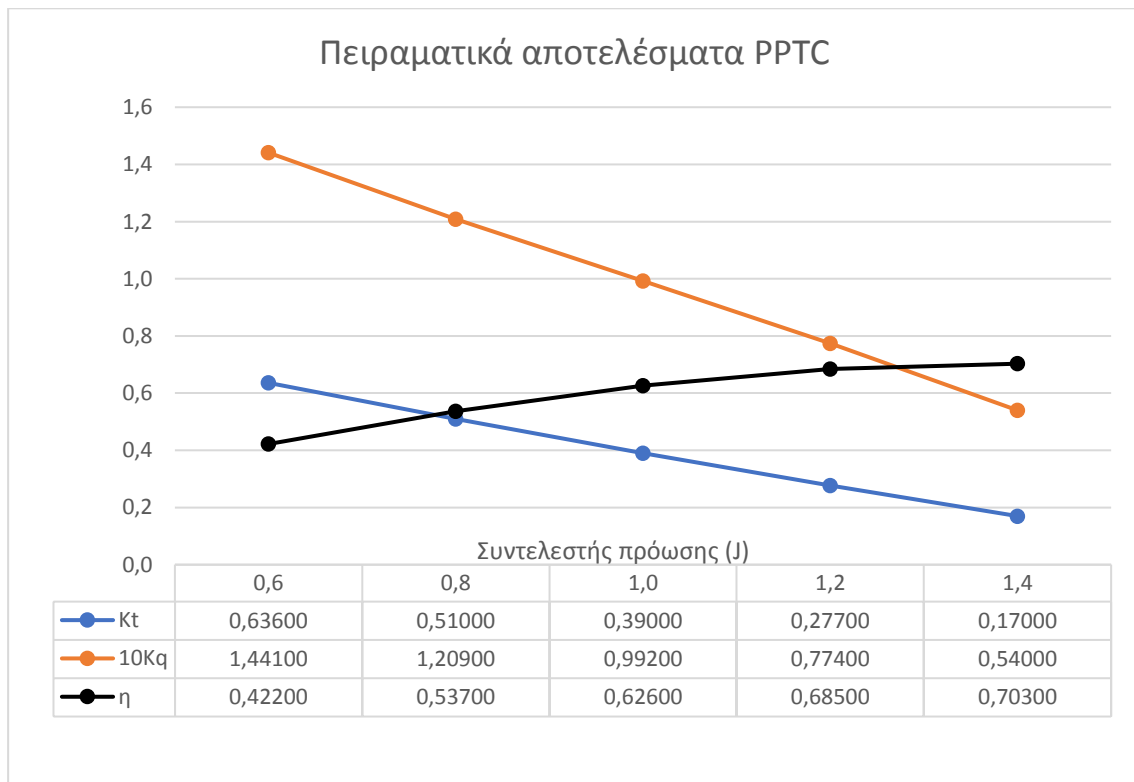
1.3.2 Συμπόσιο SMP'11

Η προπέλα VP1304 δοκιμάστηκε σε συνθήκες έλξης μέσα σε δεξαμενή ρυμούλκησης, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.8. Οι μετρήσεις έγιναν υπό τις παρακάτω συνθήκες, με αριθμό Reynolds μεταξύ $8.32E + 05 < Re < 9.25E + 05$, με βάση την ταχύτητα πρόωσης στην τομή $r/R = 0,7$.

Πίνακας 1.1: Δεδομένα πειράματος PPTC [9]

Πυκνότητα νερού (για $T = 17.5^{\circ}\text{C}$)	ρ	$[\text{kg}/\text{m}^3]$	998,67
Κινηματικό ιξώδες νερού (για $T = 17.5^{\circ}\text{C}$)	ν	$[\text{m}^2/\text{s}]$	$1,07 \cdot 10^{-6}$
Περιστροφική ταχύτητα προπέλας	n	$[\text{1}/\text{s}]$	15
Ταχύτητα πρόωσης	V_A	$[\text{m}/\text{s}]$	2,25 – 5,25

Τα απαιτούμενα δεδομένα είναι οι συντελεστές ώσης και ροπής (K_T και $10K_Q$ αντίστοιχα), καθώς και η απόδοση σε ελεύθερη ροή (η_0) για τους συντελεστές πρόωσης $J = 0,6, 0,8, 1,0, 1,2$ και $1,4$, όπως προκύπτουν από την περιστροφική ταχύτητα και τις ταχύτητες πρόωσης του πίνακα 1.1. Τα αποτελέσματα του πειράματος παρουσιάζονται στο σχήμα 1.9 και οι αποκλίσεις των προσομοιώσεων, ανά σενάριο, από τα πειραματικά δεδομένα φαίνονται στο σχήμα 1.10.

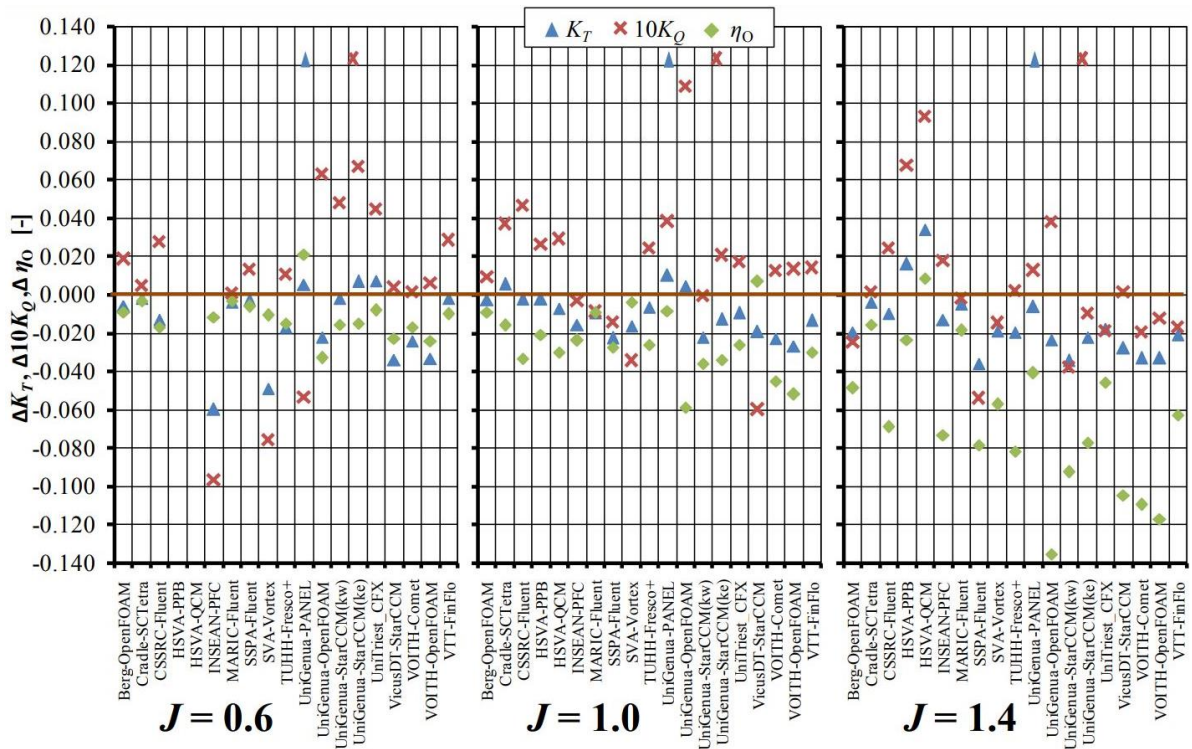


Σχήμα 1.9: Πειραματικά δεδομένα PPTC [9]

Τα πειραματικά δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν στο συνέδριο SMP (Symposiums on Marine Propulsors) το 2011 και συγκρίθηκαν με 13 διαφορετικούς υπολογιστικούς λύτες από 14 διαφορετικές ομάδες (πανεπιστημίων και μη), υποβάλλοντας 19 διαφορετικά σενάρια ανάλυσης (πίνακας 1.2).

Πίνακας 1.2: Τα 19 διαφορετικά σενάρια ανάλυσης του συμποσίου SMP'11 [9]

Ομάδα	Λύτης	Ακρωνύμιο
Berg-Propulsion	OpenFOAM	Berg-OpenFOAM
Cradle	SC/Tetra	Cradle-SC/Tetra
CSSRC	ANSYS Fluent	CSSRC-Fluent
HSVA	PPB	HSVA-PPB
	QCM	HSVA-QCM
INSEAN	PFC	INSEAN-PFC
MARIC	ANSYS Fluent	MARIC-Fluent
SSPA	ANSYS Fluent	SSPA-Fluent
SVA	Vortex	SVA-Vortex
TUHH	FreSCO+	TUHH-FreSCO
University of Genua	Panel	UniGenua-Panel
	OpenFOAM	UniGenua-OpenFOAM
	StarCCM+	UniGenua-StarCCM(kw)
	StarCCM+	UniGenua-StarCCM(ke)
University of Trieste	ANSYS CFX	UniTriest-CFX
VicusDT	StarCCM+	VicusDT-StarCCM
VOITH	Comet	VOITH-Comet
	OpenFOAM	VOITH-OpenFOAM
VTT	FinFlo	VTT-FinFlo



Σχήμα 1.10: Απόλυτη διαφορά (απόκλιση) των προσομοιώσεων από τα πειραματικά δεδομένα [9]

1.4 Οργάνωση Κεφαλαίων

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάστηκε συνοπτικά η ιστορική αναδρομή της ναυτικής προπέλας και ο τρόπος με τον οποίο προέκυψε σήμερα να έχει αυτήν τη μορφή. Επιπλέον αναφέρθηκαν οι ανάγκες για εκτίμηση της επίδοσης της προπέλας και παρουσιάστηκαν τα πειραματικά δεδομένα του ιδρύματος SVA, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τη συγκεκριμένη εργασία.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά μίας προπέλας και οι δυνάμεις που ασκούνται σε αυτήν. Αναφέρονται δύο βασικά προβλήματα της ροής των ρευστών σε πτερύγια και η επίλυσή τους. Παρουσιάζονται τα βασικότερα χαρακτηριστικά της ροής των ρευστών και οι διαφορικές εξισώσεις που χρησιμοποιούμε στον υπολογιστή για την προσομοίωση προβλημάτων ροής ρευστού. Τέλος, αναγράφονται οι βασικότερες παράμετροι της υπολογιστικής προσομοίωσης και του τρόπου με τον οποίο λαμβάνει χώρα, σχολιάζοντας μερικά από αυτά με βάση τη βιβλιογραφία.

Ακολουθεί το τρίτο κεφάλαιο, στο οποίο παρουσιάζονται η γεωμετρία της προπέλας που χρησιμοποιήθηκε για την παρούσα εργασία, ο σχεδιασμός των όγκων ελέγχου, ο τρόπος μοντελοποίησής τους και τα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις.

Στο τέταρτο κεφάλαιο συγκρίνονται περιπτώσεις μοντελοποίησης των οποίων τα χαρακτηριστικά διαφέρουν, και κρίνονται ως προς τη διαφορά τους με τα πειραματικά δεδομένα. Τέλος γίνεται η επιλογή μίας εκ των περιπτώσεων για τη χρήση της στο επόμενο κεφάλαιο.

Το περιεχόμενο του πέμπτου κεφαλαίου αφορά την αξιολόγηση της συμπεριφοράς του ρευστού γύρω από την προπέλα, με βάση την επιλεγμένη περίπτωση του προηγούμενου κεφαλαίου. Διακρίνονται δύο βασικά φαινόμενα που δείχνουν να επηρεάζουν την απόδοση της προπέλας και σχεδιάζονται πιθανές λύσεις τους. Η κάθε λύση μοντελοποιείται ξεχωριστά και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και η σύγκρισή τους με την επιλεγμένη περίπτωση.

Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο γίνεται μία ανακεφαλαίωση της εργασίας, σχολιάζοντας όσα έγιναν σε αυτήν. Αξιολογούνται τα αποτελέσματα της εργασίας και προτείνεται περαιτέρω ερευνητικό έργο.

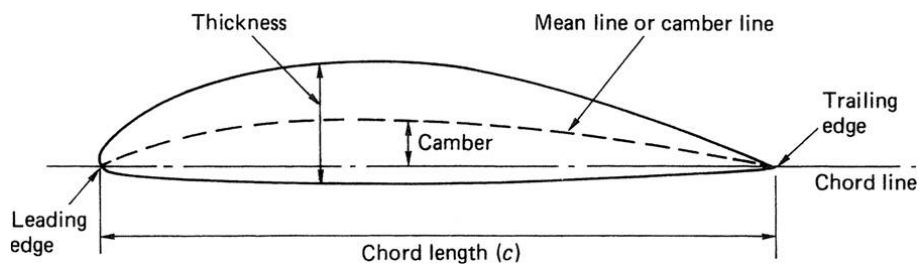
2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

2.1 Υδροπτέρυγα

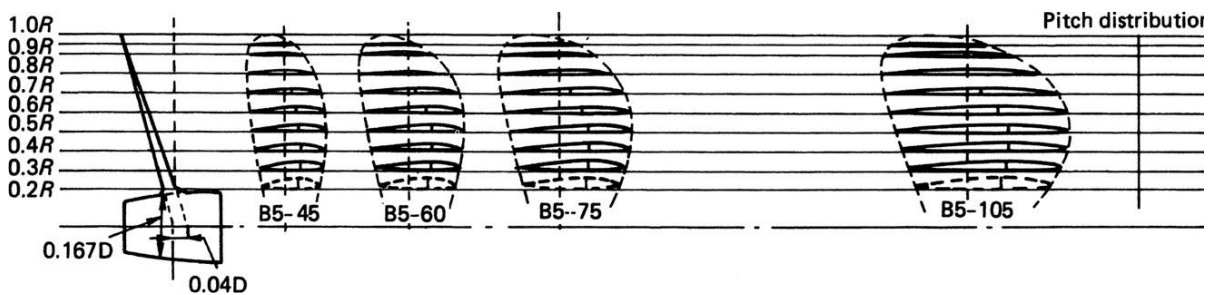
2.1.1 Γεωμετρία υδροπτέρυγας

Η γεωμετρία μίας υδροπτέρυγας βασίζεται στις κυρτές αεροτομές NACA (National Advisory Committee for Aeronautics) των Ηνωμένων Πολιτειών, γνωστή ως NASA, μερικές εκ των οποίων υιοθετήθηκαν για τη σχεδίαση ναυτικών προπелών και αποτελούν τις τομές των πτερυγίων μιας προπέλας.

Μία κυρτή NACA αεροτομή ορίζεται από τα εξής. Αρχικά υπάρχει η πλευρά πίεσης και η πλευρά υποπίεσης, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1. Μέση γραμμή, ή γραμμή καμπυλότητας, είναι το άθροισμα 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 αποκοπής. Η ευθεία μεταξύ των δύο παραπάνω σημείων σχηματίζει τη 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. Στο σχήμα 2.2 φαίνονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά μίας NACA αεροτομής.



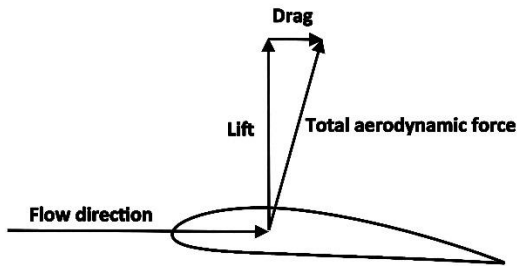
Σχήμα 2.1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά αεροτομής [1]



Σχήμα 2.2: Η ένωση αεροτομών δημιουργούν το πτερύγιο μίας προπέλας [1]

2.1.2 Δυνάμεις

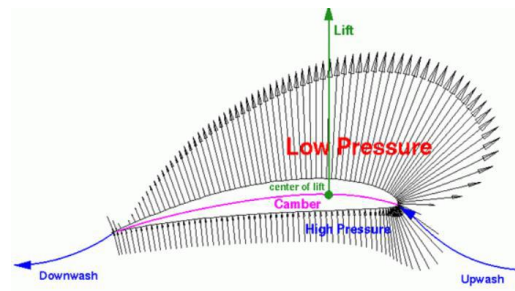
Η ροή ενός ρευστού γύρω από μία κυρτή αεροτομή προκαλεί δύο δυνάμεις σε αυτήν, όπως φαίνονται στο σχήμα 2.3. Την οπισθέλκουσα δύναμη, παράλληλη με τη ροή, η οποία προκαλείται από το συνδυασμό της διατμητικής τάσης στα τοιχώματα και της διαφοράς πίεσης μεταξύ του εμπρός και του οπίσθιου τμήματος της αεροτομής, και την άνωση, κάθετη στη ροή, η οποία προκαλείται από τη διαφορά πίεσης μεταξύ των πλευρών πίεσης και υποπίεσης (σχήμα 2.4).



Σχήμα 2.3: Δυνάμεις του ρευστού σε αεροτομή

Πηγή:

https://en.wikipedia.org/wiki/File:Airfoil_lift_and_drag.jpg



Σχήμα 2.4: Κατανομή πίεσης στις πλευρές αεροτομής [12]

Κύριος ρόλος μίας κυρτής αεροτομής στις βιομηχανικές εφαρμογές είναι η παραγωγή της μέγιστης δυνατής άνωσης με την ελάχιστη δυνατή οπισθέλκουσα δύναμη. Η γωνία μεταξύ της χορδής μιας αεροτομής με την ροή του ρευστού ονομάζεται γωνία προσβολής. Με διαφορετική γωνία προσβολής επέρχονται και διαφορετικές δυνάμεις οπισθέλκουσας και άνωσης. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι τα φτερά ενός αεροπλάνου και η αεροτομή ενός αγωνιστικού αυτοκινήτου, με τη διαφορά ότι στο αυτοκίνητο η αεροτομή είναι αντεστραμμένη για τη δημιουργία αρνητικής άνωσης.

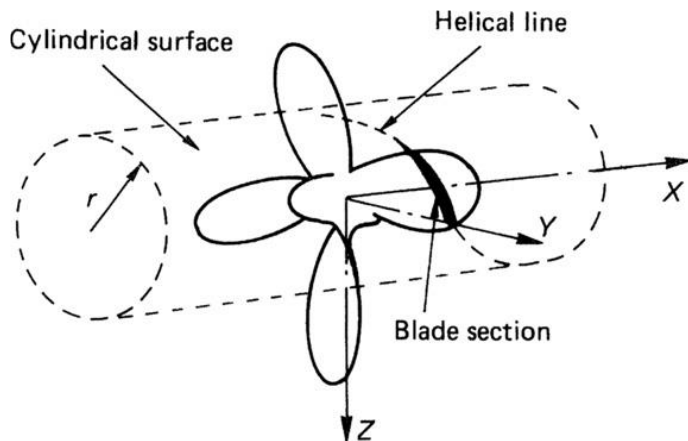
2.2 Προπέλα

2.2.1 Βήμα προπέλας

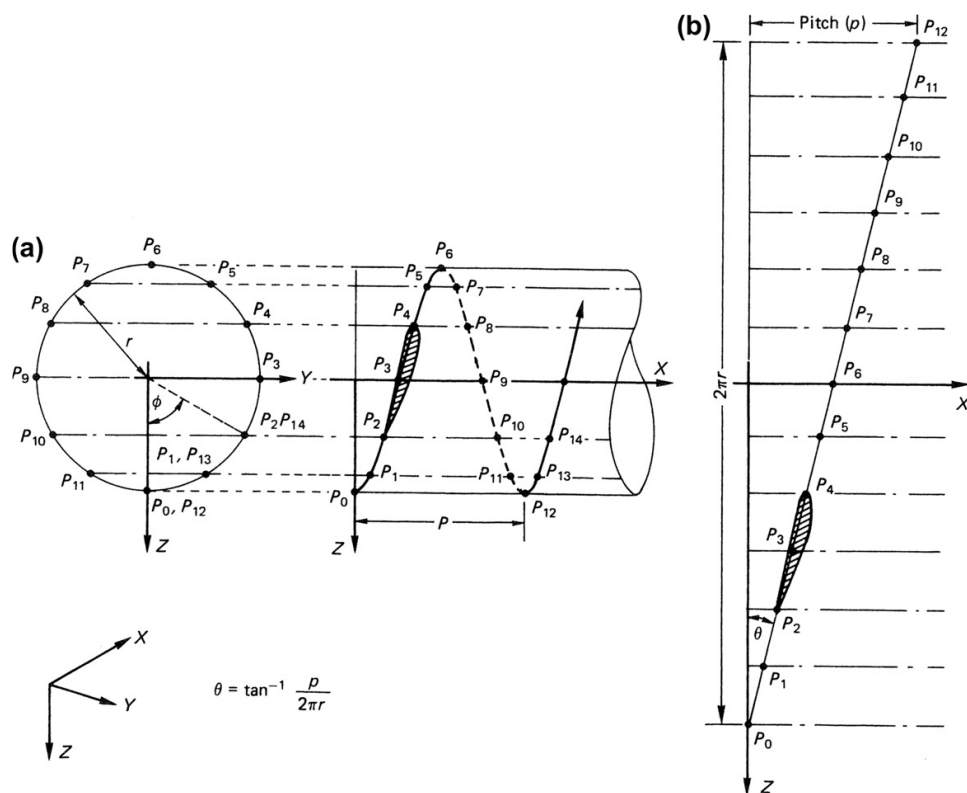
Βήμα είναι το θεωρητικό μήκος διείσδυσης της προπέλας κατά μία πλήρη περιστροφή της μέσα σε ένα ρευστό.

Έστω ότι μία θεωρητική κυλινδρική επιφάνεια κόβει το πτερύγιο της προπέλας σε μία τυχαία ακτίνα, δημιουργώντας μία τοπική υδροπτέρυγα στην τομή της (σχήμα 2.5). Η προέκταση της χορδής της υδροπτέρυγας επάνω στη θεωρητική κυλινδρική επιφάνεια δημιουργεί μία ελικοειδή γραμμή κατά μήκος του κυλίνδρου. Αν ανοίξει ο κύλινδρος, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.6, τότε η ελικοειδής γραμμή γίνεται μία ευθεία και δημιουργείται ένα τρίγωνο. Η γωνία θ ονομάζεται γωνία βήματος, η

προσκέιμενη πλευρά στη θ είναι η περίμετρος του κυλίνδρου και η απέναντι πλευρά είναι το βήμα. Με την περιστροφή των πτερυγίων της προπέλας με τέτοιο τρόπο, ώστε σε κάθε τυχαία ακτίνα της να προκύπτει ένας συγκεκριμένος λόγος $\frac{P}{D} = \frac{\beta\eta\mu\alpha}{\delta\iota\alpha\mu\epsilon\tau\rho\varsigma}$, διαμορφώνεται η ελικοειδής προπέλα.



Σχήμα 2.5: Τομή πτερυγίου προπέλας σε τυχαία ακτίνα r [1]



Σχήμα 2.6: Βήμα (pitch) προπέλας [1]

2.2.2 Επιδόσεις Προπέλας

Για τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς μίας ναυτικής προπέλας θα πρέπει πρώτα να καθοριστούν οι συνθήκες του περιβάλλοντος στο οποίο λειτουργεί. Έτσι, προκύπτουν δύο βασικές συνθήκες ροής. Η ελεύθερη ροή, κατά την οποία η προπέλα λειτουργεί σε μία ομοιόμορφη ροή ρευστού παράλληλη στον άξονα περιστροφής, και η ροή πίσω από πλοίο, κατά την οποία η ροή και οι συνθήκες του ρευστού έχουν επηρεαστεί από το προπορευόμενο σώμα (στην περίπτωση μας το ίδιο το πλοίο). Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στις επιδόσεις της προπέλας μόνο σε ελεύθερη ροή.

2.2.3 Διαστατική ανάλυση δυνάμεων προπέλας

Αθροίζοντας τις δυνάμεις των υδροτομών μιας προπέλας θα προκύψουν δύο βασικές δυνάμεις. Η ώθηση μεταξύ της προπέλας και του ρευστού κατά τον άξονα κατεύθυνσης, η οποία είναι το σύνολο της άνωσης των στοιχειωδών υδροτομών της. Η αντίσταση του ρευστού στην περιστροφή της προπέλας, η οποία είναι το σύνολο της οπισθέλκουσας δύναμης των στοιχειωδών υδροτομών της, απ' όπου προκύπτει η απαιτούμενη ροπή για την περιστροφή της.

Η αδιαστατοποίηση των δυνάμεων και των ροπών που παράγονται από την προπέλα ανάγει μία σειρά συντελεστών, οι οποίοι καθορίζουν τις επιδόσεις μίας προπέλας σε ελεύθερη ροή και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη σύγκριση προπελών με οποιαδήποτε γεωμετρία ή μέγεθος. Οι αδιάστατοι συντελεστές είναι οι εξής:

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

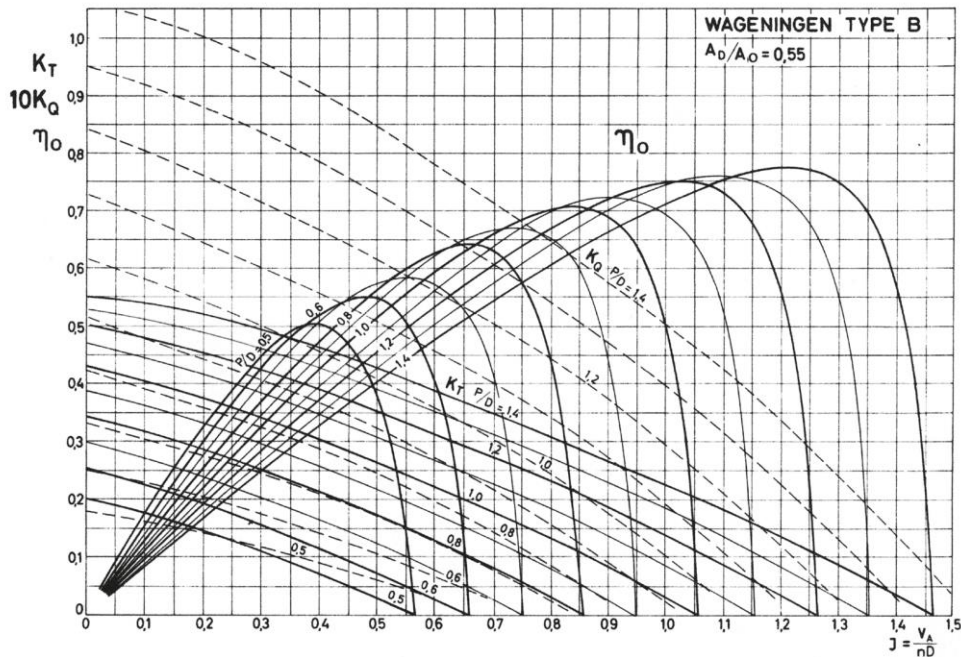
$$\text{Συντελεστής ροπής} \quad K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5} \quad (2.2)$$

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

,όπου D η διάμετρος της προπέλας, V_A η ταχύτητα πρόωσης, n η ταχύτητα περιστροφής, ρ η πυκνότητα του ρευστού, T η ώση και Q η ροπή.

Τέλος, ο βαθμός απόδοσης της προπέλας θα είναι η ισχύς που παράγεται προς την ισχύ που καταναλώνεται και δίνεται από τη σχέση:

$$\eta_0 = \frac{TV_A}{Q\omega} = \frac{K_T J}{K_Q 2\pi} \quad (2.4)$$

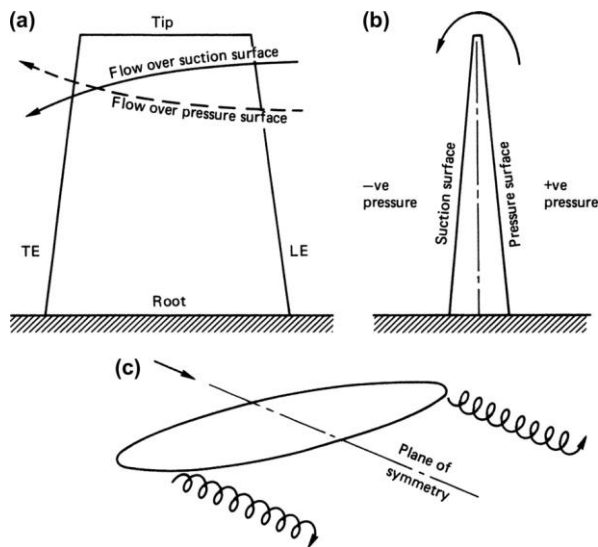


Σχήμα 2.7: Συντελεστής ώσης, συντελεστής ροπής και βαθμός απόδοσης μίας Wageningen τύπου B προπέλας συναρτήσει του βήματος και του συντελεστή πρόωσης [4]

Εδώ αξίζει να παρατηρηθεί ότι οι καμπύλες των αδιάστατων συντελεστών ώσης (K_T) και ροπής (K_Q), καθώς και του βαθμού απόδοσης (η_0) εξαρτώνται μόνο από το συντελεστή πρόωσης (J), το συνδυασμό δηλαδή της ταχύτητας πρόωσης με την περιστροφική ταχύτητα της προπέλας.

2.3 Δίνη στο άκρο πτερυγίου

Η διαφορά πίεσης που δημιουργείται μεταξύ των πλευρών πίεσης και υποπίεσης ενός πτερυγίου βοηθά στη δημιουργία δυνάμεων, την οποία εκμεταλλεύεται η βιομηχανία για διάφορες εφαρμογές, όπως η αρνητική άντωση σε οχήματα εδάφους, η πτήση ενός αεροπλάνου και στην περίπτωση μας η πρόωση ενός πλεούμενου, μέσω της προπέλας. Στο άκρο του πτερυγίου, όμως το ρευστό έχει την τάση να μεταβεί από την πλευρά πίεσης στην αντίθετη πλευρά, δημιουργώντας μία αθέμιτη δίνη (σχήματα 2.8 και 2.9), καθώς για τη δημιουργία της καταναλώνεται ενέργεια, η οποία μένει ανεκμετάλλευτη. Η ενέργεια που καταναλώνεται από τις παραγόμενες δίνες μειώνει την εκμεταλλεύσιμη ενέργεια που θα παρέχει εν τέλει στο σύστημα μία μονάδα παραγωγής ενέργειας, όπως ένας κινητήρας εσωτερικής καύσης.



Σχήμα 2.8: Δίνη στο άκρο πτερυγίου [1]



Σχήμα 2.9: Δίνη στο άκρο πτερυγίου αεροπλάνου [3]

Για το λόγο αυτόν έχουν δημιουργηθεί φράκτες ακροπτερυγίων, οι οποίες εμποδίζουν τη πρόκληση δινών στο άκρο των πτερυγίων. Η διαφορά πίεσης παύει να είναι τόσο άμεση μεταξύ των δύο πλευρών και εν τέλει δημιουργείται μία μικρότερη δίνη, η απαιτούμενη ενέργεια της οποίας είναι αισθητά μειωμένη σε σύγκριση με ένα πτερύγιο χωρίς φράκτη ακροπτερυγίου.



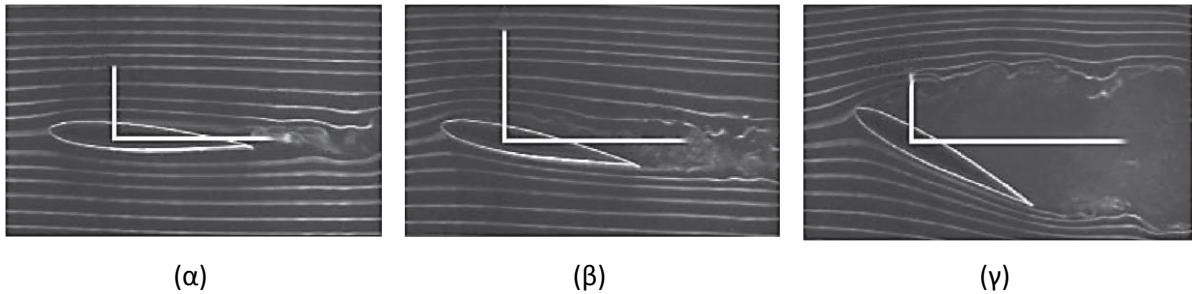
Εικόνα 2.10: Εφαρμογή φράκτη ακροπτερυγίου σε πτερύγιο αεροπλάνου

Πηγή: <https://www.hydro.aero/en/newsletter-details/what-you-should-know-about-winglets-and-wingtips.html>

2.4 Αποκόλληση της ροής

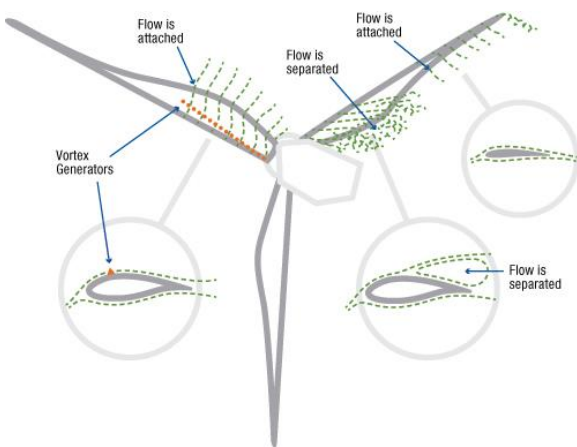
Η ροή του ρευστού γύρω από μία αεροτομή ή ένα πτερύγιο επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την γωνία πρόσπτωσης. Σε μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης η ροή αποκολλάται από την πλευρά ή επιφάνεια υποπίεσης, μειώνοντας τη δύναμη της άνωσης και αυξάνοντας την οπισθέλκουσα (σχήμα 2.11). Στην περίπτωση των φτερών ενός αεροπλάνου ένα τέτοιο φαινόμενο μπορεί να προκαλέσει αστάθεια του

αεροπλάνου και, στην ακραία του μορφή, έως και πτώση, λόγω αστάθειας και έλλειψης ελέγχου του οχήματος.



Εικόνα 2.11: Ροή γύρω από αεροτομή με μικρή (α), μεγάλη (β), και πολύ μεγάλη (γ) γωνία πρόσπτωσης [3]

Για το λόγο αυτό έχουν δημιουργηθεί γεννήτριες ακροπτερυγίων, οι οποίες όταν τοποθετούνται στο κατάλληλο σημείο με την κατάλληλη γωνία τοποθέτησης, ανακατεύουν τη ροή, παράγοντας στροβίλους, με αποτέλεσμα την αποφυγή αποκόλλησής της. Η εφαρμογή τους είναι ευρεία καθώς χρησιμοποιούνται και σε ανεμογεννήτριες για τη βελτίωση της ροής του ρευστού γύρω από τα πτερύγιά τους (σχήμα 2.12).



Σχήμα 2.12: Εφαρμογή γεννητριών στροβίλων σε ανεμογεννήτριες

Πηγή : https://en.wikipedia.org/wiki/Vortex_generator

2.5 Θεωρία Ροής Ρευστού

2.5.1 Διαφορική ανάλυση της ροής των ρευστών

Επιλύοντας τις εξισώσεις κίνησης (τη διατήρηση της μάζας και το δεύτερο νόμο του Νεύτωνα) ενός ρευστού σε άπειρα σημεία του όγκου ελέγχου, εξάγονται οι διαφορικές εξισώσεις τους, λαμβάνοντας λεπτομερή αποτελέσματα για οποιοδήποτε σημείο ενδιαφέροντος σε έναν όγκο ελέγχου. Η δυσκολία

επίλυσης τέτοιων εξισώσεων στη μηχανική των ρευστών απαιτεί συχνά τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή.

2.5.2 Εξισώσεις

Η διατήρηση της μάζας για έναν όγκο ελέγχου (CV) είναι:

$$0 = \int_{CV} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \int_{CS} \rho \vec{V} \cdot \vec{n} dA \quad (2.5)$$

Με το θεώρημα της απόκλισης (ή θεώρημα Gauss) η εξίσωση (2.5) γράφεται:

$$0 = \int_{CV} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \int_{CV} \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) dV = \int_{CV} \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) \right] dV \quad (2.6)$$

Για να ισχύει η (2.6) θα πρέπει οι όροι μέσα στις αγκύλες να είναι ταυτοχρόνως ίσοι με μηδέν. Έτσι προκύπτει η εξίσωση της συνέχειας:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (2.7)$$

, η οποία σε καρτεσιανές συντεταγμένες γίνεται:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2.8)$$

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

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0 \quad (2.9)$$

, η οποία σε καρτεσιανές συντεταγμένες γίνεται:

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

Για έναν όγκο ελέγχου, η γενική έκφραση της εξίσωσης για τη γραμμική ώση θα είναι:

$$\sum \vec{F} = \int_{CV} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{V}) dV + \int_{CS} (\rho \vec{V}) \vec{V} \cdot \vec{n} dA \quad (2.11)$$

Και χρησιμοποιώντας το θεώρημα της απόκλισης, εύκολα καταλήγουμε στη γενική διαφορική εξίσωση της γραμμικής ορμής, γνωστή και ως εξίσωση του Cauchy:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{V}) + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = \rho \vec{g} + \vec{\nabla} \cdot \sigma_{ij} \quad (2.12)$$

, όπου $\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}$ είναι ο ταυιστής των τάσεων.

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

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} -P & 0 & 0 \\ 0 & -P & 0 \\ 0 & 0 & -P \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

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

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} -P & 0 & 0 \\ 0 & -P & 0 \\ 0 & 0 & -P \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tau_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \tau_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

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

$$\tau_{ij} = 2\mu \varepsilon_{ij} \quad (2.15)$$

Έτσι συνδυάζοντας την 2.12 με την 2.14 και την 2.15, με λίγες αναδιατάξεις καταλήγουμε στην ασυμπιέστη εξίσωση Navier-Stokes :

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\vec{\nabla} P + \rho \vec{g} + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (2.16)$$

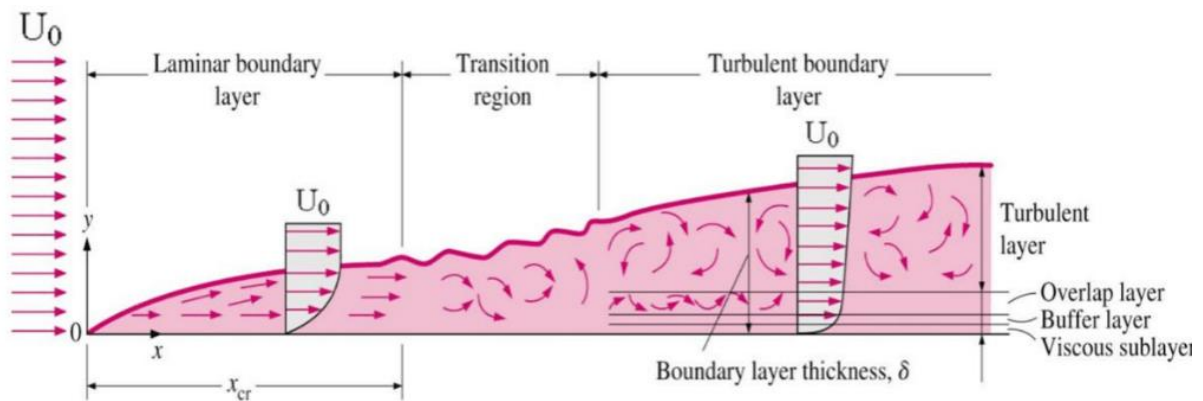
«Η εξίσωση Navier-Stokes αποτελεί τον ακρογωνιαίο λίθο της μηχανικής των ρευστών» [3]

Οι άγνωστοι της εξίσωσης (2.16) είναι οι τρεις συνιστώσες της ταχύτητας και η πίεση. Έχοντας μόνο τρεις εξισώσεις (μία για κάθε συνιστώσα της (2.10)) χρησιμοποιούμε την ασυμπίεστη εξίσωση της συνέχειας (2.9) για να μπορεί να επιλυθεί το πρόβλημα.

2.5.3 Στρωτή, Τυρβώδης Ροή και αριθμός Reynolds

Θεωρείται η ροή ενός ρευστού παράλληλα σε μία επίπεδη πλάκα. Κατά μήκος της επίπεδης πλάκας η ροή μπορεί να είναι στρωτή, αποτελούμενη από παράλληλες ροϊκές γραμμές, μεταβατική, όπου ξεκινάει να παρατηρείται μία ελαφρώς ακανόνιστη συμπεριφορά της ροής των σωματιδίων του ρευστού, και τυρβώδης.

Στην περίπτωση της τυρβώδους ροής μπορούν να χαρακτηριστούν τέσσερα διαφορετικά στρώματα. Το συνεκτικό υπόστρωμα, κατά το οποίο η ροή είναι σχεδόν παράλληλη με την πλάκα. Το μεταβατικό στρώμα, όπου τα συνεκτικά φαινόμενα συνεχίζουν να κυριαρχούν, αλλά παρατηρούνται τυρβώδη χαρακτηριστικά. Το στρώμα αλληλεπικάλυψης, στο οποίο τα τυρβώδη χαρακτηριστικά είναι πιο έντονα. Τέλος, υπάρχει το τυρβώδες στρώμα όπου τα συνεκτικά φαινόμενα υστερούν των τυρβώδων χαρακτηριστικών.



Εικόνα 2.13: Τα είδη της ροής στο οριακό στρώμα κατά μήκος μίας επίπεδης πλάκας [3]

Το αν και το πότε μία ροή θα καταλήξει από στρωτή σε μεταβατική και κατ' επέκταση σε τυρβώδη, εξαρτάται μεταξύ άλλων από τη γεωμετρία και τραχύτητα της πλάκας, το είδος του ρευστού, τη θερμοκρασία, την ταχύτητα της ροής, και προσδιορίζεται από τον αριθμό Reynolds.

Ο αριθμός Reynolds σε μία τέτοια ροή δίνεται από τη σχέση:

$$Re_x = \frac{\rho V x}{\mu} = \frac{V x}{\nu} \quad (2.17)$$

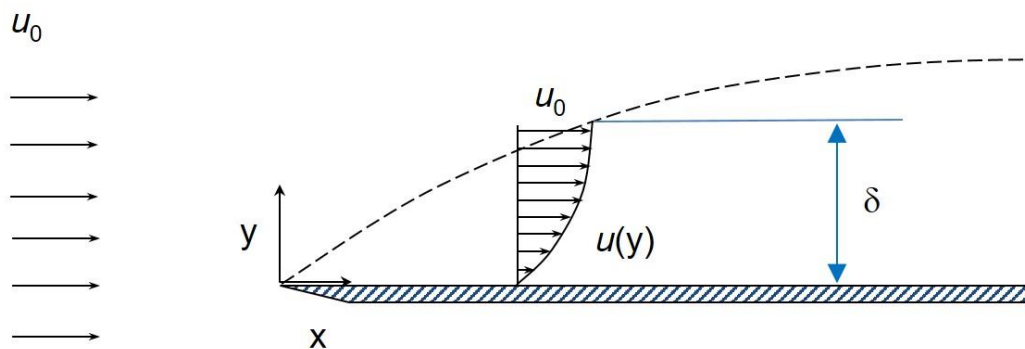
, όπου V η ταχύτητα του ρευστού και x το μήκος της πλάκας ή το χαρακτηριστικό μήκος για οποιαδήποτε άλλη γεωμετρία.

Εδώ φαίνεται ότι όσο πιο μεγάλο είναι το μήκος της πλάκας 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 $Re_{x,critical} \cong 1 \times 10^5$ και καταλήγει πλήρως τυρβώδης στον μεταβατικό αριθμό Reynolds $Re_{x,transitional} \cong 1 \times 10^6$.

Σύμφωνα με τη Μηχανική Ρευστών Θεωρία και Εφαρμογές (Yunus A. Cengel – John M. Cimbala) [3], στην πραγματικότητα η ροή θα γίνει μεταβατική και εντέλει τυρβώδης γρηγορότερα (σε μικρότερο αριθμό Re) σε σχέση με μία ροή σε θεωρητικά λεία επίπεδη επιφάνεια, καθώς η τραχύτητα της επιφάνειας, η καμπυλότητα του τοιχώματος κ.α. θα συμβάλλουν σε αυτό. Έτσι συνήθως χρησιμοποιείται ένας μηχανοτεχνικός κρίσιμος αριθμός Reynolds $Re_{x,cr} = 5 \times 10^5$ για τον προσδιορισμό της ροής από στρωτή σε τυρβώδη.

2.5.4 Οριακό στρώμα

Στην περίπτωση της ροής ενός ρευστού παράλληλα σε μία επίπεδη πλάκα, λόγω της συνθήκης μη ολίσθησης, τα σωματίδια του ρευστού επάνω στην πλάκα θα έχουν μηδενική ταχύτητα. Το ιξώδες του εκάστοτε ρευστού δημιουργεί μία αλληλεπίδραση μεταξύ των σωματιδίων του με αποτέλεσμα την επιβράδυνση του ρευστού κοντά στην πλάκα. Έτσι, διαμορφώνεται ένα προφίλ ταχύτητας στο οποίο του ρευστό κινείται με τη μέγιστη ταχύτητα εκτός του οριακού στρώματος και με μηδενική επάνω στην πλάκα. Η κάθετη απόσταση δ , στην οποία επικρατεί η επίδραση των συνεκτικών δυνάμεων είναι το πάχος ή ύψος του οριακού στρώματος (σχήμα 2.14). Πρακτικά, το πάχος του οριακού στρώματος θα είναι η κάθετη απόσταση του τοιχώματος από το σημείο, στο οποίο η ταχύτητα της ροής φτάνει περίπου στο 99% της μέγιστης τιμής της.



Σχήμα 2.14: Ανάπτυξη οριακού στρώματος κατά μήκος μίας επίπεδης πλάκας

Πηγή: https://en.wikipedia.org/wiki/File:Wikipedia_Picture_Boundary_Layer_Thickness.jpg

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 [2]:

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

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

και κατά Cengel – Cimbala [3]:

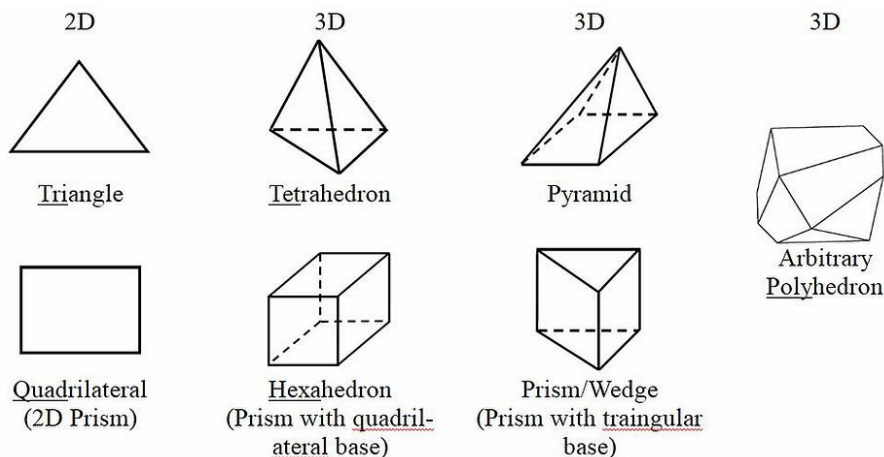
$$\text{Στρωτή ροή:} \quad \delta = \frac{4.91x}{Re_x^{1/2}} \quad Re_x \leq 5 \times 10^5 \quad (2.20)$$

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

2.6 Υπολογιστική Ρευστοδυναμική

2.6.1 Πλέγμα

Το πλέγμα και ο τρόπος διαμόρφωσής του είναι από τις σημαντικότερες διαδικασίες μίας ρευστοδυναμικής ανάλυσης. Είναι ένα σύνολο πεπερασμένων στοιχείων και κόμβων που αποτελούν το συνολικό όγκο της ροής του ρευστού, σε καθένα από τα οποία επιλύονται οι εξισώσεις διατήρησης. Σε προβλήματα δύο διαστάσεων τα στοιχεία αποτελούν επιφάνειες, ενώ σε τρεις διαστάσεις όγκους. Τα συνήθη σχήματα των στοιχείων δύο διαστάσεων είναι το τρίγωνο και το τετράπλευρο. Από το τρίγωνο προκύπτουν το τετράεδρο και το πρίσμα στις τρεις διαστάσεις, και αντίστοιχα από το τετράπλευρο η πυραμίδα και το εξαέδρο, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.15.



Σχήμα 2.15: Τα είδη των δισδιάστατων και τρισδιάστατων στοιχείων ενός πλέγματος

Πηγή: <https://www.manchestercfd.co.uk/post/all-there-is-to-know-about-different-mesh-types-in-cfd>

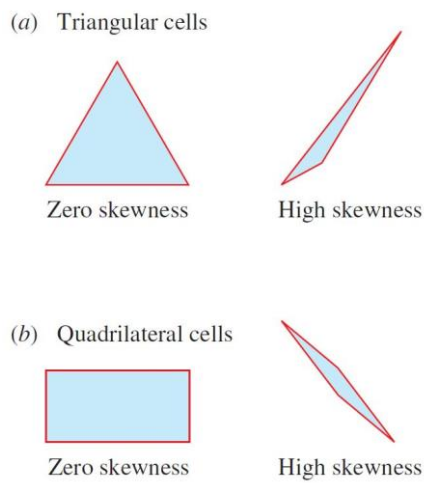
Η πυκνότητα του πλέγματος και τα σχήματα από τα οποία αποτελείται εξαρτάται από τις συνθήκες του εκάστοτε προβλήματος. Συγκεκριμένα, σε περιοχές στις οποίες πρόκειται να παρατηρηθεί μεγάλη αυξομείωση των υπό μελέτη μεταβλητών, όπως κοντά στα τοιχώματα ενός στερεού που αλληλεπιδρά με το ρευστό, το πλέγμα προτιμάται να είναι πυκνό. Αντίθετα σε περιοχές όπου επικρατεί μία ομοιογένεια στις τιμές των μεταβλητών το πλέγμα προτιμάται να είναι αραιό.

Όσο πυκνότερο είναι ένα πλέγμα τόσο περισσότερα στοιχεία θα έχει, άρα και περισσότερες φορές θα χρειαστεί ο υπολογιστής να επιλύσει τις εξισώσεις διατήρησης και η επίλυση θα είναι χρονοβόρα. Για το λόγο αυτό προτιμάται η χρήση πυκνότερου πλέγματος μόνο σε σημεία στα οποία κρίνεται απαραίτητο.

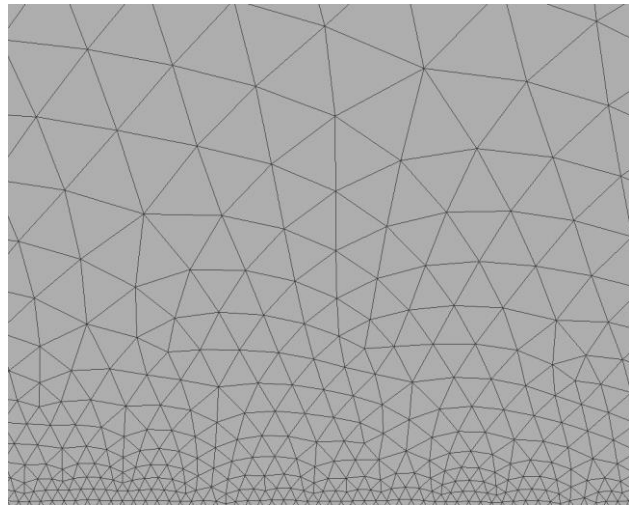
2.6.2 Ποιότητα πλέγματος

Η ποιότητα ενός πλέγματος είναι το βασικότερο χαρακτηριστικό του, καθώς επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων μίας ρευστοδυναμικής ανάλυσης. Συγκεκριμένα τα στοιχεία του πλέγματος πρέπει να χαρακτηρίζονται από τη χαμηλότερη δυνατή στρεβλότητα, καθώς το αντίθετο οδηγεί σε δυσκολία σύγκλισης των αποτελεσμάτων και στην απόκλισή τους από την πραγματικότητα. Επιπλέον, ο βαθμός ανάπτυξης (growth rate) των στοιχείων μεταξύ τους πρέπει να μην είναι μεγάλος, καθώς οι απότομες αλλαγές στο μέγεθος των στοιχείων μπορεί να οδηγήσουν σε επηρεάζουν τη σύγκλιση και τα αποτελέσματα της επίλυσης. Η προτεινόμενη και επί των πλείστων χρησιμοποιούμενη τιμή του βαθμού ανάπτυξης για ρευστοδυναμικές αναλύσεις είναι από 1,05 έως 1,4, δηλαδή ένα τυχαίο στοιχείο του πλέγματος θα είναι κατά 1,05 έως 1,4 μικρότερο ή μεγαλύτερο

του διπλανού του. Μία οπτικοποίηση της στρεβλότητας και του βαθμού ανάπτυξης φαίνεται στα σχήματα 2.16 και 2.17.



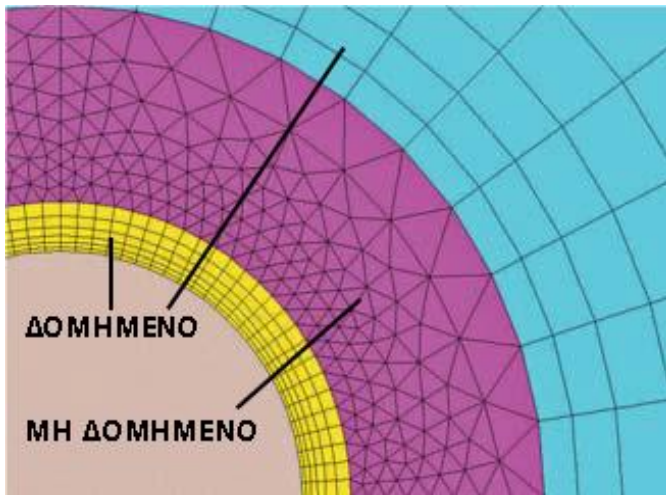
Σχήμα 2.16: Στοιχεία με μηδενική και με υψηλή στρεβλότητα [3]



Σχήμα 2.17: Βαθμός ανάπτυξης 1,2 σε μία επιφάνεια

2.6.3 Δομημένο, μη δομημένο, υβριδικό πλέγμα

Το δομημένο πλέγμα, αποτελούμενο κυρίως από τετράπλευρα ή εξάεδρα, επιτρέπει το πύκνωμα του πλέγματος σε περιοχές στις οποίες χρειάζεται, βοηθώντας στην ακριβέστερη προσέγγιση των μεταβλητών εκείνων των περιοχών, χωρίς την αύξηση της στρεβλότητας των στοιχείων του. Το μη δομημένο πλέγμα, αποτελούμενο κυρίως από τρίγωνα ή τετράεδρα, είναι λιγότερο πολύπλοκο και ευκολότερο στη δημιουργία του, καθώς μπορεί να προσαρμοστεί σε οποιαδήποτε γεωμετρία, απαιτώντας λιγότερη επέμβαση του χρήστη. Τέλος, το υβριδικό πλέγμα αποτελείται από χωρία δομημένου πλέγματος, εκεί που κρίνεται απαραίτητο, και από χωρία μη δομημένου πλέγματος εκεί που δε χρειάζεται υψηλή ακρίβεια. Για παράδειγμα στην παρούσα εργασία, στην οποία χρησιμοποιήθηκε υβριδικό πλέγμα κατά τη διακριτοποίηση, έγινε χρήση δομημένου πλέγματος στο οριακό στρώμα κοντά στα τοιχώματα της προπέλας και μη δομημένου μακριά από αυτά.



Σχήμα 2.18: Ένα υβριδικό πλέγμα, αποτελούμενο από δομημένο πλέγμα στα τοιχώματα και μη δομημένο ενδιάμεσα [3]

2.6.4 Οριακές Συνθήκες

Η χρήση κατάλληλων οριακών συνθηκών είναι βασική στην ακρίβεια μίας ρευστοδυναμικής επίλυσης. Οι οριακές συνθήκες προσδιορίζουν τον τύπο της ροής σε ένα πρόβλημα, σε αντίθεση με το πλέγμα, τις εξισώσεις κίνησης, τη γεωμετρία, τα οποία μπορεί να μην αλλάξουν για διαφορετική ρευστοδυναμική ανάλυση. Υπάρχουν διάφορα είδη οριακών συνθηκών, τα βασικότερα εκ των οποίων είναι οι οριακές συνθήκες τοιχώματος και οι οριακές συνθήκες εισροής και εκροής.

2.6.5 Μέγεθος περιβάλλοντος όγκου

Το μέγεθος του όγκου είναι σημαντικό για την ακρίβεια των αποτελεσμάτων, καθώς πρέπει οι μεταβλητές του ρευστού να έχουν σταθεροποιηθεί στα όριά του. Στην περίπτωση που υπάρχουν ακραίες μεταβολές των μεταβλητών στην περιοχή των ορίων σημαίνει το ρευστό δεν έχει φτάσει σε ισορροπία και ότι απαιτείται μεγαλύτερος όγκος για να επιτευχθεί σταθεροποίηση και ομοιομορφία και κατ' επέκταση σωστότερη επίλυση του προβλήματος.

2.6.6 Y^+ και Ιξώδες Τύρβης

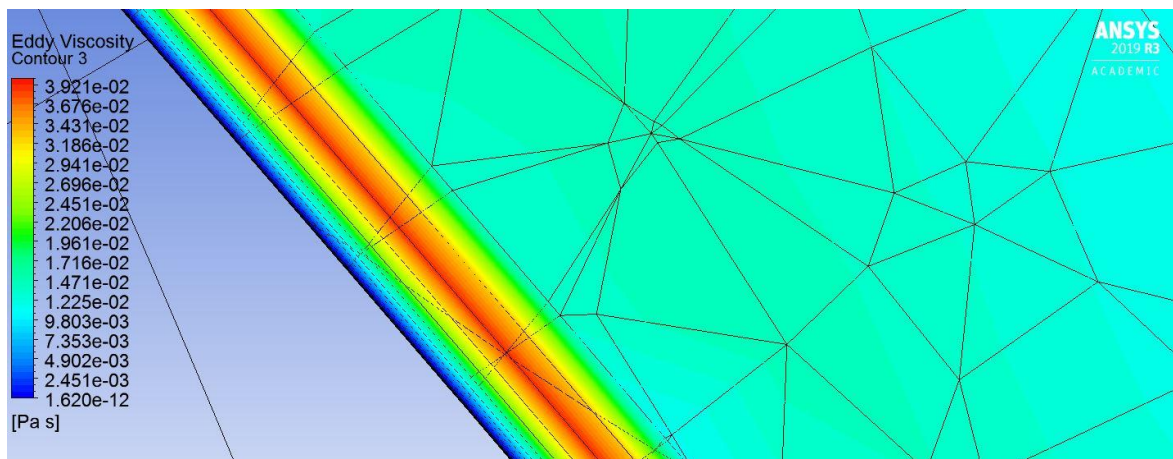
Σε κάθε περίπτωση πρέπει να υπάρχουν κάποιες παράμετροι, από τις οποίες ο χρήστης θα είναι ικανός να εξάγει κάποια συμπεράσματα σχετικά με την ποιότητα των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Σύμφωνα με τον οδηγό χρήσης του λογισμικού και με τις αναλύσεις που έγιναν, η περιοχή που επηρεάζει περισσότερο τα αποτελέσματα είναι εκεί που αλληλεπιδρά το ρευστό με το στερεό εμπόδιο στη ροή. Στην περίπτωση της εργασίας, αυτή η περιοχή βρίσκεται κοντά στα πτερύγια της προπέλας, συγκεκριμένα στο οριακό στρώμα.

Ένας τρόπος ποσοτικοποίησης της ποιότητας της διακριτοποίησης του οριακού στρώματος είναι το μέγεθος y^+ , το οποίο είναι η αδιάστατη κάθετη απόσταση του πρώτου κόμβου από τον τη στερεά επιφάνεια. Δίνεται από τη σχέση 2.22 και όσο πιο κοντά στο 1 είναι η τιμή του, τόσο καλύτερη είναι η διακριτοποίηση του οριακού στρώματος. Ακραία χαμηλές τιμές του y^+ , από την άλλη, δεν προτιμώνται και οι τιμές μεταξύ 1 και 5 θεωρούνται ικανοποιητικές για προβλήματα όπως αυτής της εργασίας.

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

,όπου y είναι η κάθετη απόσταση του πρώτου κόμβου από τη στερεά επιφάνεια, u_* είναι ταχύτητα τριβής και ν είναι το κινηματικό ιξώδες.

Επιπλέον, το ιξώδες τύρβης (Eddy Viscosity) παρουσιάζει στην οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων το μέγεθος της τύρβης σε κάθε στοιχείο και την επιρροή του στις εφαπτομενικές τάσεις. Εστιάζοντας στο οριακό στρώμα θα πρέπει η τιμή του να ξεκινάει από μηδέν επάνω στο τοίχωμα, σταδιακά να αυξάνεται μέχρι να φτάσει τη μέγιστη τιμή, όπου και θα αρχίσει να φθίνει προς το τέλος του οριακού στρώματος. Είναι ένας πολύ καλός τρόπος να φανεί αν η μοντελοποίηση στο οριακό στρώμα είναι ικανοποιητική.



Εικόνα 2.19: Κατανομή ιξώδους τύρβης στο οριακό στρώμα του πλέγματος

2.6.7 Μοντέλα τύρβης

Κατά τη χρήση ενός μοντέλου τύρβης τη θέση της εξίσωσης Navier-Stokes λαμβάνει η μέση κατά Reynolds εξίσωση Navier-Stokes (Reynolds Averaged Navier-Stokes ,RANS), η οποία για μόνιμη ασυμπίεστη τυρβώδη ροή είναι:

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \vec{\nabla}P + \nu \nabla^2 \vec{V} + \vec{\nabla} \cdot (\tau_{ij,turbulent}) \quad (2.23)$$

, όπου $\tau_{ij,turbulent}$ ο ειδικός τανυστής τάσεων Reynolds. Οι επιπλέον άγνωστοι του ειδικού τανυστή τάσεων μοντελοποιούνται με τη βοήθεια μοντέλων τύρβης.

Τα μοντέλα τύρβης χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη των επιδράσεων της τύρβης στη ροή του ρευστού, χωρίς να εξετάσει τις επιμέρους μικρότερες διακυμάνσεις της. Έχουν αναπτυχθεί διάφορα μοντέλα τύρβης δύο εξισώσεων βασισμένα στις εξισώσεις RANS, κάποια εκ των οποίων έχουν ευρεία εφαρμογή, σε αντίθεση με άλλα που εφαρμόζονται σε συγκεκριμένες περιπτώσεις. Αναφορικά, παρουσιάζονται μερικά από τα μοντέλα τύρβης παρακάτω.

2.6.7.1 Το *k-epsilon* μοντέλο ($k - \epsilon$)

Το $k - \epsilon$ είναι ένα από τα πιο γνωστά και εδραιωμένα μοντέλα. Χρησιμοποιεί την τυρβώδης κινητική ενέργεια k και το ρυθμό τυρβώδους καταστροφής 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.

2.6.7.2 Το *k-omega* μοντέλο ($k - \omega$)

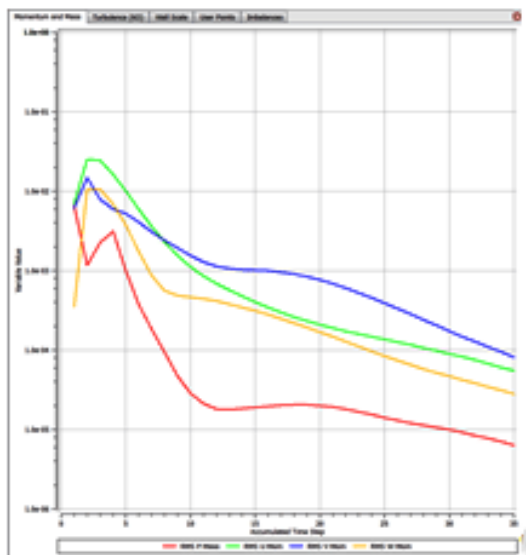
Ένα από τα επίσης δημοφιλέστερα μοντέλα τύρβης είναι το $k - \omega$, το οποίο δείχνει να λειτουργεί καλύτερα από το $k - \epsilon$ σε περιοχές οριακού στρώματος, καθώς η παράμετρος που χρησιμοποιεί είναι η συχνότητα τύρβης ω , αντί για το ρυθμό τυρβώδους καταστροφής ϵ . Αντίθετα, σε περιοχές εκτός του 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.

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

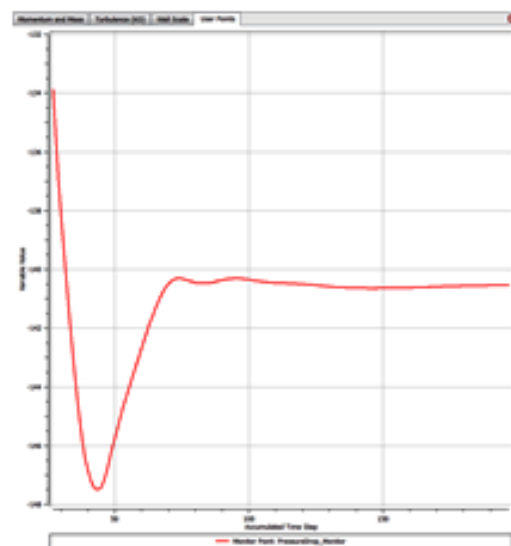
Το $k - \omega$ SST είναι ο συνδυασμός των δύο παραπάνω μοντέλων, εκμεταλλευόμενο το $k - \omega$ στη σωστότερη πρόβλεψη της συμπεριφοράς του ρευστού στο οριακό στρώμα και το $k - \varepsilon$ για την υπόλοιπη περιοχή του όγκου ελέγχου. Στις αναλύσεις της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε το $k - \omega$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

2.6.8 Επίλυση

Κατά την επίλυση μίας προσομοίωσης, είναι σημαντικός ο τρόπος σύγκλισης των αποτελεσμάτων. Τον κυριότερο ρόλο στη σύγκλιση παίζει το χρονικό βήμα (Timescale), δεδομένου ότι όλες οι υπόλοιπες παράμετροι όπως η διακριτοποίηση και οι οριακές συνθήκες είναι σωστά ορισμένες. Το λογισμικό της ANSYS χρησιμοποιεί μία ψευδο-μετάβαση κατά την επίλυση στατικών αναλύσεων. Ορίζεται ένα χρονικό βήμα, μετά από το οποίο επαναλαμβάνεται η επίλυση των διαφορικών εξισώσεων για ολόκληρο τον όγκο ελέγχου, μέχρι τα αποτελέσματα να μεταβούν από τις αρχικές συνθήκες σε μία σταθερή κατάσταση. Όταν το χρονικό βήμα είναι πολύ μικρό η σύγκλιση μπορεί να καθυστερήσει αρκετά, ενώ στην περίπτωση του πολύ μεγάλου χρονικού βήματος παρατηρούνται ακραίες διακυμάνσεις στην πορεία της σύγκλισης που μπορεί να οδηγήσουν και σε αποτυχία επίλυσης.



Σχήμα 2.20: Σύγκλιση μεταφοράς τάσεων Reynolds



Σχήμα 2.21: σύγκλιση συγκεκριμένης μεταβλητής

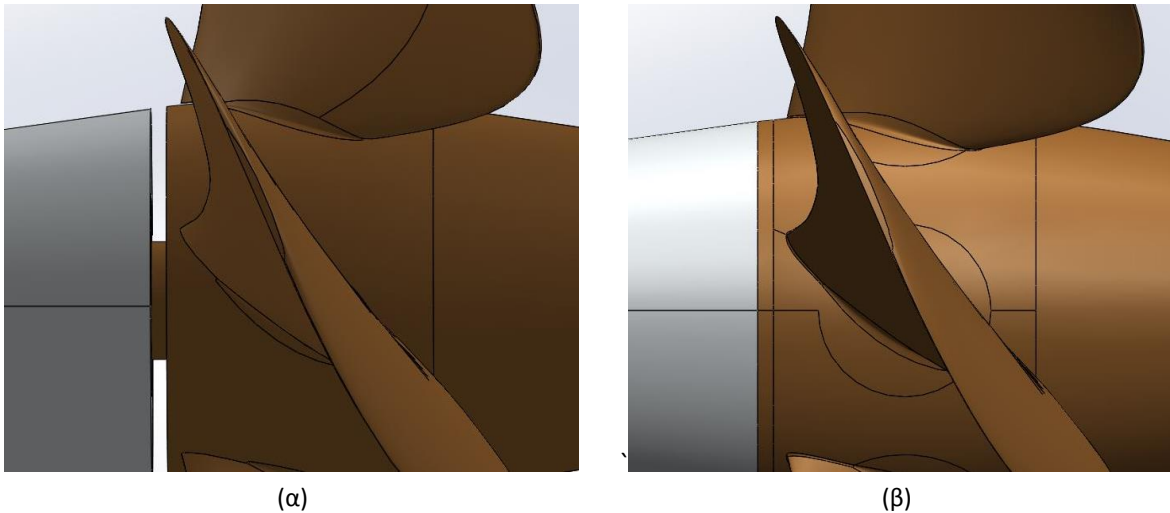
Πηγή: <https://www.computationalfluidynamics.com.au/convergence-and-mesh-independent-study/>

3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΟΠΕΛΑΣ

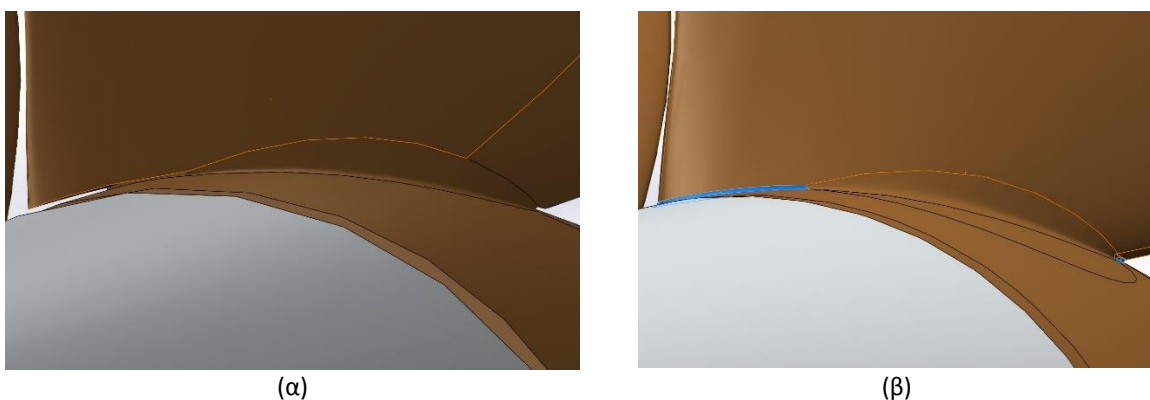
3.1 Γεωμετρία

3.1.1 Γεωμετρία προπέλας

Αρχικά, η γεωμετρία της προπέλας εισήχθη στο λογισμικό SolidWorks της Dassault Systems. Εκεί έγινε έλεγχος των σχεδιαστικών παραμέτρων της. Παρατηρήθηκε ότι, όντας προπέλα μεταβλητού βήματος, υπήρχε ένα κενό μεταξύ των πτερυγίων και του άξονα περιστροφής. Για την παρούσα εργασία και το συνέδριο SMP'11, το βήμα παραμένει σταθερό. Για το λόγο αυτό, ενώθηκαν τα πτερύγια με το φορέα τους, καθώς εκείνο το κενό θα μπορούσε να δημιουργήσει πρόβλημα στη διακριτοποίηση του όγκου ελέγχου σε εκείνη την περιοχή. Επιπλέον, έκλεισε το κενό μεταξύ του ακίνητου άξονα και του περιστρεφόμενου φορέα των πτερυγίων.



Σχήμα 3.1: Το κενό μεταξύ του άξονα περιστροφής και του φορέα πτερυγίων (α) και η κάλυψή του (β)



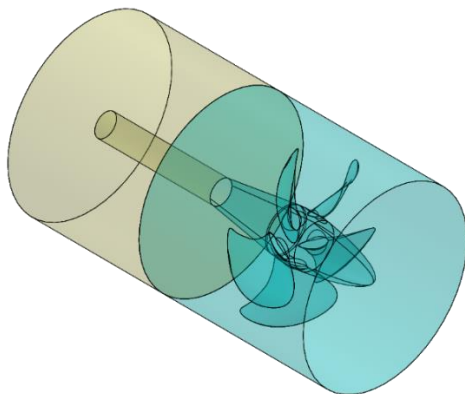
Σχήμα 3.2: Τα κενά μεταξύ των πτερυγίων και του φορέα πτερυγίων (α) και η κάλυψή τους (β)



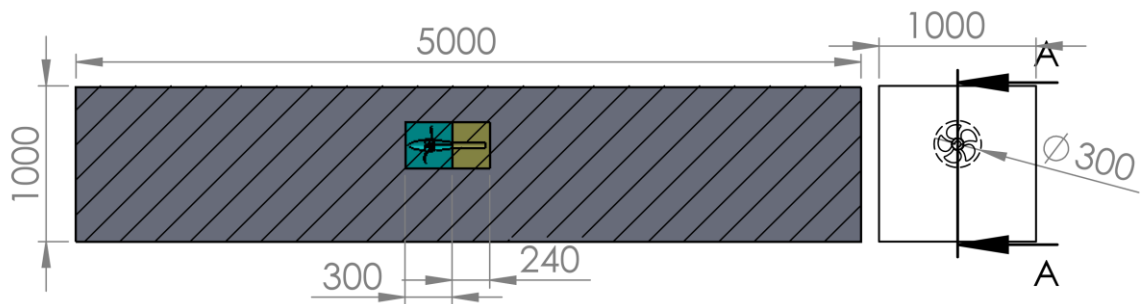
Σχήμα 3.3: Η τελική προπέλα. Το μπρονζέ κομμάτι περιστρέφεται και το ασημί μένει ακίνητο.

3.1.2 Σχεδίαση όγκων

Στο λογισμικό SolidWorks της Dassault Systems σχεδιάστηκαν τρεις όγκοι γύρω από την προπέλα. Ένας κύλινδρος στον οποίο βρίσκεται η προπέλα (μπλε – σχήμα 3.4), ένας κύλινδρος πίσω από την προπέλα (κίτρινος – σχήμα 3.4) και ένας παραλληλεπίπεδος (γκρι – σχήμα 3.5). Οι κύλινδροι δημιουργήθηκαν για το πύκνωμα των στοιχείων κοντά στην προπέλα και ο πρώτος αυτών για την περιστροφή του σχετικά με την ακίνητη προπέλα (frozen rotor – Ενότητα 3.3).



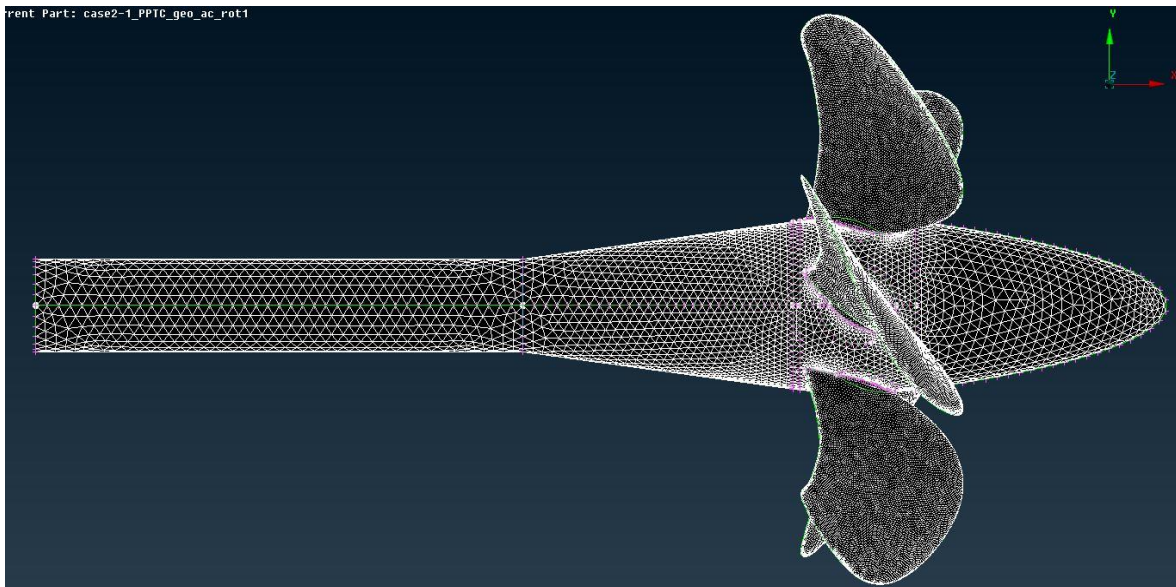
Σχήμα 3.4: Οι δύο κυλινδρικοί όγκοι γύρω από την προπέλα. Ο μπλε, περιστρεφόμενος θεωρώντας ακίνητη προπέλα με την εντολή Frozen Rotor, και ο κίτρινος για την πύκνωση των στοιχείων πίσω από την προπέλα.



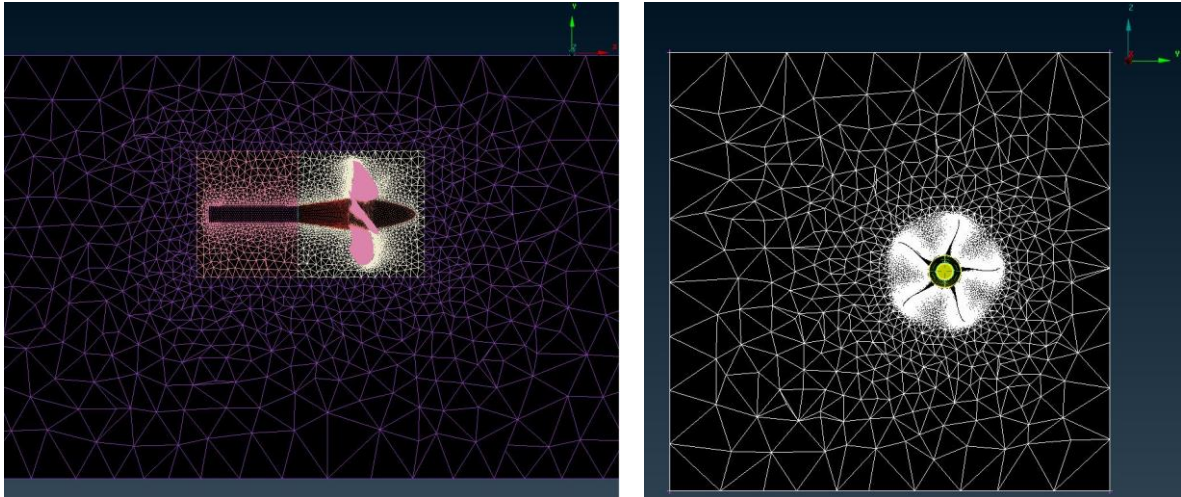
Σχήμα 3.5: Οι διαστάσεις και οι θέσεις των όγκων που περιβάλλουν την προπέλα

3.2 Διακριτοποίηση

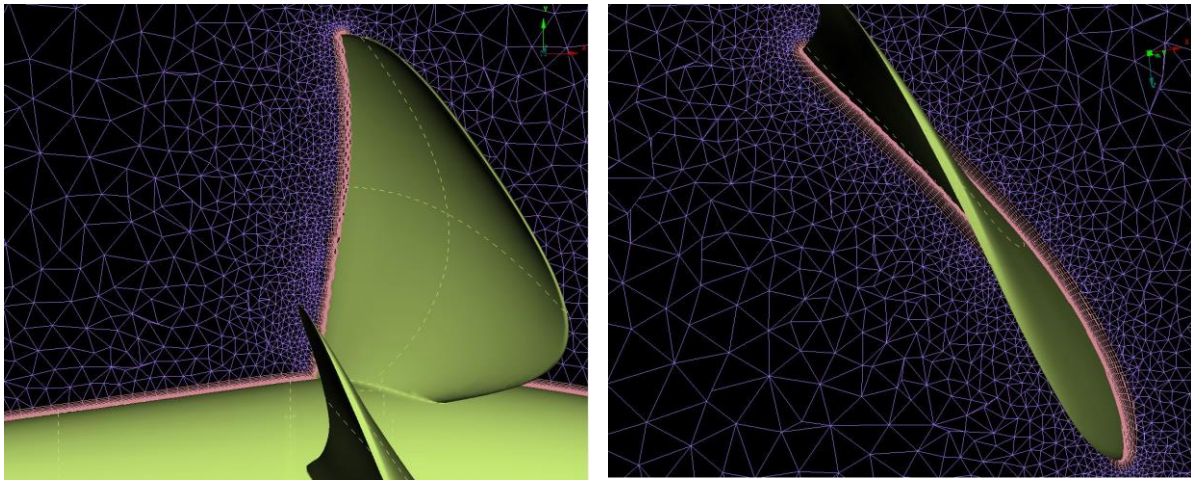
Για τη διακριτοποίηση των σχεδιασμένων χωρίων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ANSA της Beta CAE Systems. Αφού ελέγχθηκε η γεωμετρία και έγιναν οι κατάλληλες ενέργειες για την τοπολογική ορθότητά της, δημιουργήθηκε το πλέγμα των επιφανειών και κατ' επέκταση το πλέγμα των όγκων. Η πυκνότητα του πλέγματος έγινε μεγαλύτερη στις επιφάνειες των πτερυγίων, καθώς εκείνη είναι η περιοχή ενδιαφέροντος. Για τον ίδιο λόγο το πλέγμα είναι πυκνότερο κοντά στην προπέλα και αραιώνει όσο απομακρύνεται από αυτήν. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε υβριδικό πλέγμα κατά την τρισδιάστατη διακριτοποίηση, με στοιχεία πρίσματος στο οριακό στρώμα και τετράεδρα για τον υπόλοιπο όγκο. Στα σχήματα 3.6 με 3.8 φαίνεται η κατανομή των στοιχείων του πλέγματος



Σχήμα 3.6: Κατανομή των επιφανειακών στοιχείων επάνω στην προπέλα. Στα πτερύγια της προπέλας τα στοιχεία είναι περισσότερα, διότι εκείνη είναι η περιοχή ενδιαφέροντος



Σχήμα 3.7: Κατανομή των στοιχείων στους περιβάλλοντες όγκους της προπέλας. Όσο πιο κοντά είναι ένα στοιχείο στα πτερύγια της προπέλας, τόσο μικρότερο μέγεθος έχει.



Σχήμα 3.8: Διακριτοποίηση οριακού στρώματος γύρω από την προπέλα

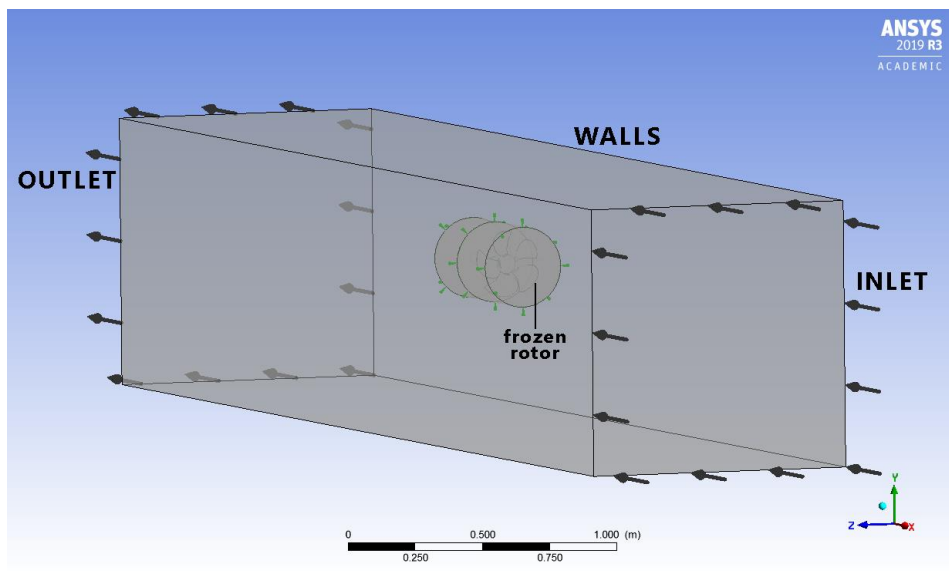
Να σημειωθεί ότι οι ακριβείς τιμές του μεγέθους και γενικά των ιδιοτήτων του πλέγματος θα αναφερθούν στην τέταρτο κεφάλαιο, όπου τα αποτελέσματά τους συγκρίνονται με τα πειραματικά δεδομένα.

3.3 Οριακές συνθήκες

Για τον προσδιορισμό των οριακών συνθηκών και την ανάλυση του προβλήματος, χρησιμοποιήθηκε το CFX του λογισμικού ANSYS. Αρχικά προσδιορίστηκαν τα χωρία, με τον κύλινδρο που περιλαμβάνει την προπέλα να θεωρείται περιστρεφόμενος και την προπέλα ακίνητη, με την εντολή Frozen Rotor (σχήμα 3.9). Με τη συγκεκριμένη εντολή γίνεται καλύτερη οπτικοποίηση της ροής του ρευστού στην προπέλα, καθώς ρευστό είναι αυτό που περιστρέφεται με τη σχετική περιστροφική ταχύτητα ως προς την ακίνητη προπέλα.

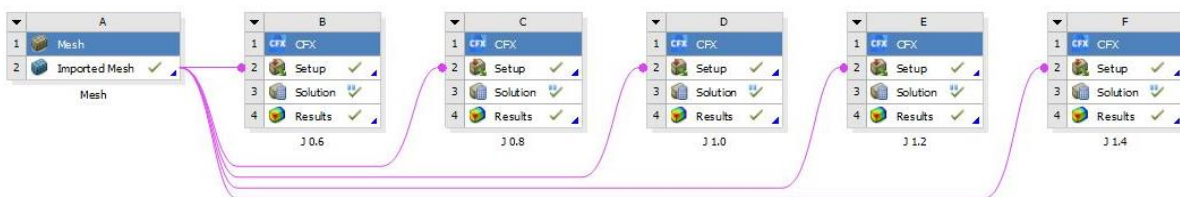
Οι ιδιότητες του ρευστού καθορίστηκαν με βάση τα στοιχεία που δόθηκαν από το ίδρυμα SVA. Συγκεκριμένα, η θερμοκρασία ορίστηκε σταθερή $T = 17.5^{\circ}\text{C}$, η ολική πίεση του ρευστού στις αρχικές συνθήκες $P_{tot} = 1 \text{ atm}$ και η πλευστότητα δε λήφθηκε υπόψη, καθώς αυτό θα απαιτούσε μη στατική ανάλυση συναρτήσει του χρόνου.

Τα πλαϊνά τοιχώματα του παραλληλεπίπεδου και τα επάνω και κάτω τοιχώματα θεωρήθηκαν τοίχοι (WALLS) με μηδενική τριβή, για να μην επηρεάζεται η ροή κοντά σε αυτά. Στην εισαγωγή του ρευστού ορίστηκε εισροή (INLET) με σταθερή ταχύτητα, από $V_A = 2,25 \text{ m/s}$ για συντελεστή πρόωσης $J = 0,6$, έως $V_A = 5,25 \text{ m/s}$ για $J = 1,4$ και ένταση τύρβης 1%. Στην έξοδο του ρευστού ορίστηκε εκροή (OUTLET) με σταθερή σχετική πίεση $P_{out} = 0 \text{ atm}$ κατά μέσο όρο σε όλη την επιφάνεια εκροής. Η συγκεκριμένη επιβολή οριακών συνθηκών προτείνεται στον οδηγό χρήσης του λογισμικού για γρηγορότερη και σωστότερη σύγκλιση των αποτελεσμάτων και εφαρμόστηκε σε όλες τις αναλύσεις.



Σχήμα 3.9: Οι οριακές συνθήκες που ανατέθηκαν στο CFX_PRE του λογισμικού ANSYS.

Τέλος, σε κάθε περίπτωση ανάλυσης έγινε προσομοίωση για τους συντελεστές πρόωσης $J = 0,6, 0,8, 1,0, 1,2$ και $1,4$, παρέχοντας αποτελέσματα για ολόκληρο το επιθυμητό εύρος λειτουργίας της προπέλας.

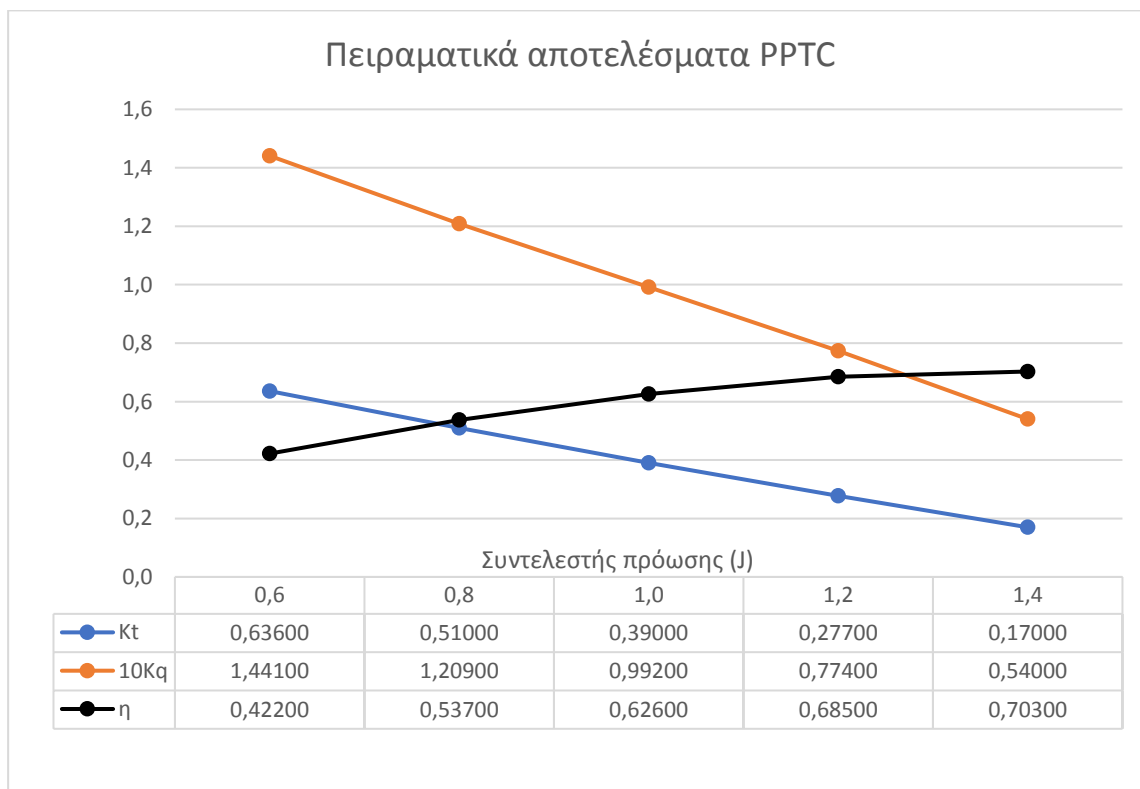


Σχήμα 3.10: Οι πέντε αναλύσεις για κάθε σενάριο, από $J=0,6$ έως $J=1,4$

4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

4.1 Αποτελέσματα πειραματικών δεδομένων PPTC

Τα πειραματικά αποτελέσματα των συντελεστών ώσης και ροπής (K_T και $10K_Q$ αντίστοιχα), καθώς και του βαθμού απόδοσης σε ελεύθερη ροή (η_0) για τους συντελεστές πρόωσης $J = 0,6, 0,8, 1,0, 1,2$ και $1,4$, του ιδρύματος SVA, όπως παρουσιάστηκαν και στην ενότητα 1.2, φαίνονται στο σχήμα 4.1.



Σχήμα 4.1: Πειραματικά δεδομένα PPTC [9]

Οι προσομοιώσεις έγιναν σε στατική ανάλυση (steady-state), για κάθε συντελεστή πρόωσης ξεχωριστά. Μεγάλη σημασία δόθηκε στον τρόπο κατάστρωσης όλων των παραμέτρων που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα και την ακρίβεια των δεδομένων που εξάγονται. Συγκεκριμένα προσδιορίστηκαν οι οριακές συνθήκες, όπως αναλύονται στην ενότητα 3.3, και στήθηκαν διαφορετικές εκδοχές του πλέγματος, του πάχους και αριθμού στρωμάτων του οριακού στρώματος, καθώς και του μεγέθους του όγκου ελέγχου της γεωμετρίας. Ακολούθησε η σύγκριση των περιπτώσεων ανά κατηγορία, συναρτήσε των πειραματικών δεδομένων του SVA και της

συμπεριφοράς του ρευστού γύρω από την προπέλα, ώστε να γίνει η επιλογή των παραμέτρων που οδηγούν στα πιο αντιπροσωπευτικά με την πραγματικότητα αποτελέσματα.

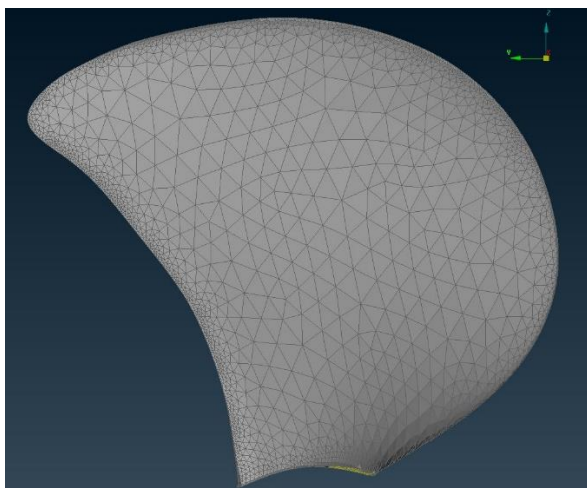
4.2 Πυκνότητα πλέγματος στα πτερύγια της προπέλας

Κατά την προσπάθεια βελτίωσης του πλέγματος, έγινε μία πυκνωση των στοιχείων επάνω στην επιφάνεια των πτερυγίων της προπέλας. Συγκεκριμένα, από 1 χιλιοστό στις άκρες του πτερυγίου και 5 χιλιοστά προς το εσωτερικό τους, έγινε 0,5 χιλιοστό και 1 χιλιοστό αντίστοιχα, όπως φαίνεται στον πίνακα 4.1 και στα σχήματα 4.2 και 4.3. Όλα τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του πλέγματος και των οριακών συνθηκών παρέμειναν ίδια.

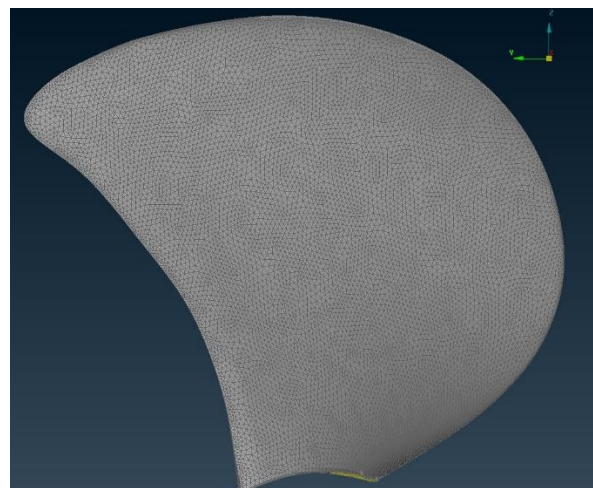
4.2.1 A – B

Πίνακας 4.1: Στοιχεία πλέγματος για τις περιπτώσεις A και B

Περίπτωση	Περιβάλλον όγκος		Κύλινδροι	Μήκος στοιχείων (mm)		Οριακό στρώμα				Συνολικά στοιχεία	
	Διαστάσεις (m)	Μήκος στοιχείων εξωτερικά (mm)	Μήκος στοιχείων (mm)	Πτερύγια	άξονας	Αριθμός στρωμάτων	Πάχος πρώτου στρώματος (mm)	Βαθμός ανάπτυξης	Συνολικό πάχος οριακού στρώματος (mm)	Επιφανειακά	Όγκου
A	1x1x5	150	20	1 - 5	3 - 5	13	0,001	1.1 - 2	0,59	103360	2963737
B	1x1x5	150	20	0,5 - 1	3 - 5	13	0,001	1.1 - 2	0,59	236156	5836277

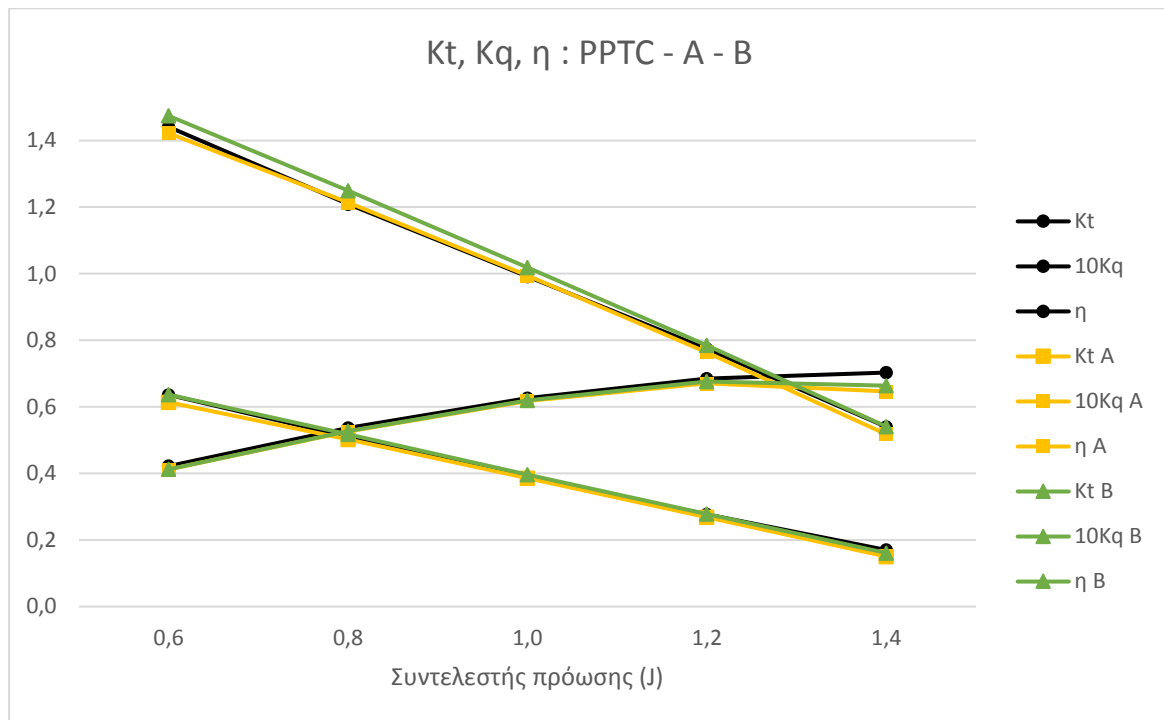


Σχήμα 4.2: Κατανομή στοιχείων στην επιφάνεια των πτερυγίων (περίπτωση A)

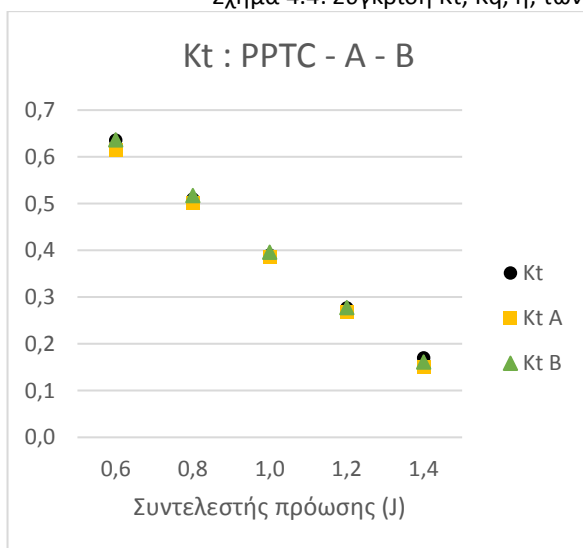


Σχήμα 4.3: Κατανομή στοιχείων στην επιφάνεια των πτερυγίων (περίπτωση B)

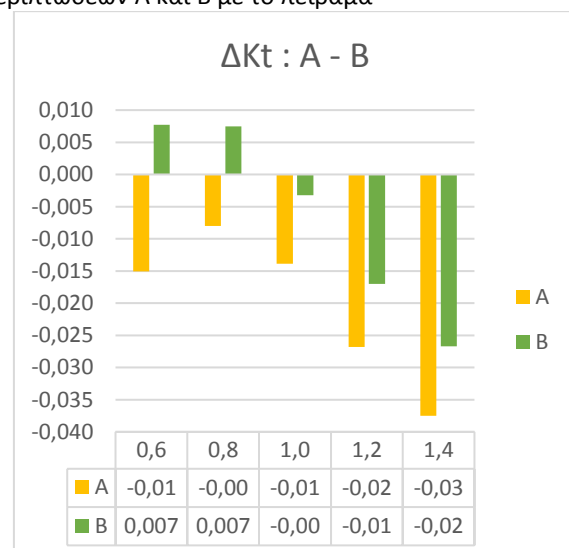
Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η πύκνωση του πλέγματος επάνω στα πτερύγια της προπέλας βοήθησε αισθητά στη μείωση του σφάλματος των αποτελεσμάτων, όπως ήταν αναμενόμενο. Για το λόγο αυτό, η περίπτωση B είναι προτιμότερη από την A.



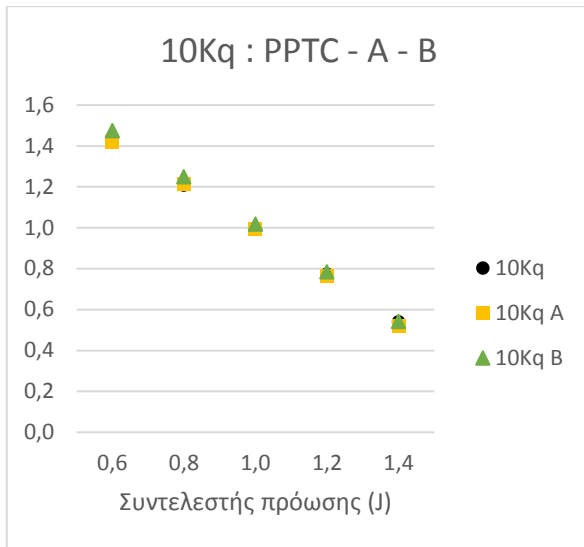
Σχήμα 4.4: Σύγκριση Kt, Kq, η, των περιπτώσεων A και B με το πείραμα



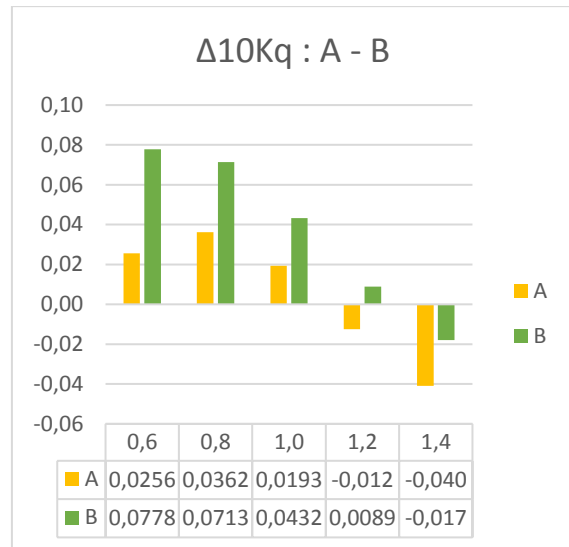
Σχήμα 4.5: Συντελεστής ώσης, περιπτώσεις A και B



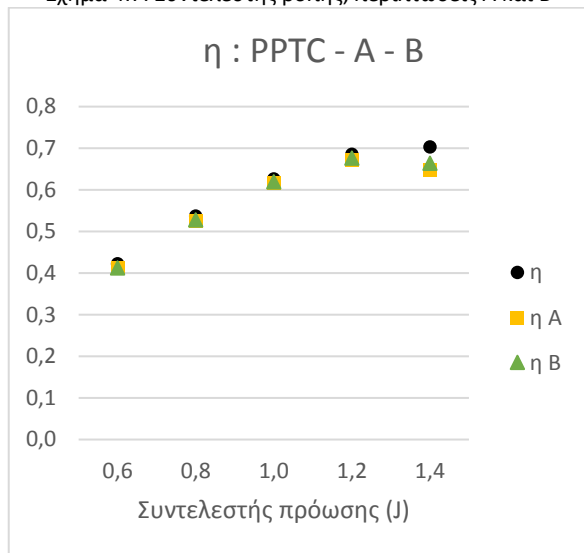
Σχήμα 4.6: Απόκλιση Kt των A και B από το πείραμα



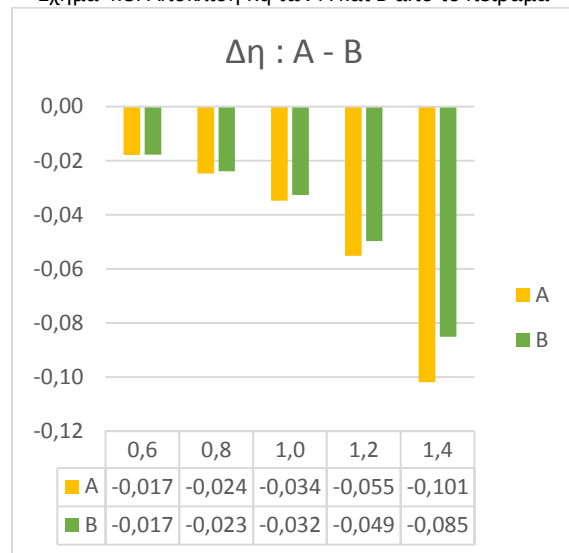
Σχήμα 4.7: Συντελεστής ροπής, περιπτώσεις A και B



Σχήμα 4.8: Απόκλιση Kq των A και B από το πείραμα



Σχήμα 4.9: Βαθμός απόδοσης, περιπτώσεις A και B



Σχήμα 4.10: Απόκλιση η των A και B από το πείραμα

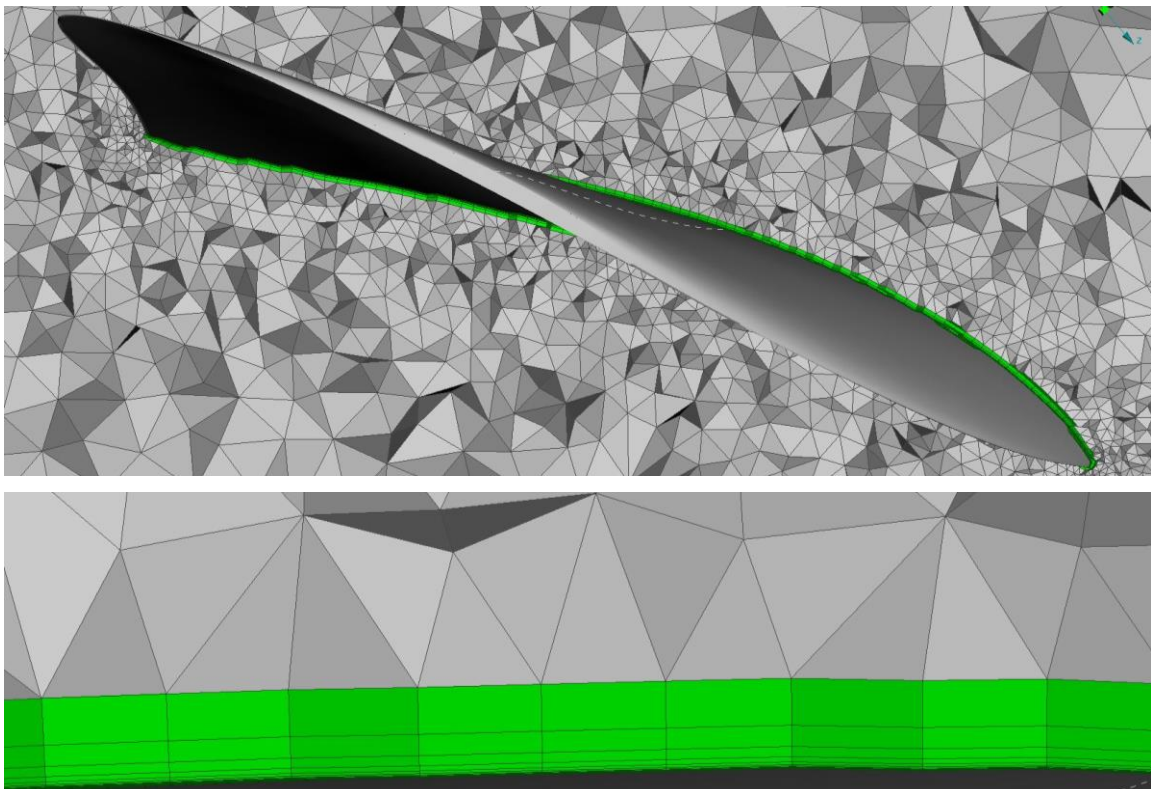
4.3 Πάχος, βαθμός ανάπτυξης και αριθμός στρωμάτων οριακού στρώματος

Ακολούθησε μία πύκνωση των στρωμάτων του οριακού στρώματος, με βαθμό ανάπτυξης 1,2 σταθερά, διατηρώντας το συνολικό πάχος λίγο πάνω από 0,5 χιλιοστά. Διαμορφώθηκε η περίπτωση Γ, όπως περιγράφεται στον πίνακα 4.2, και συγκρίθηκε με την Β.

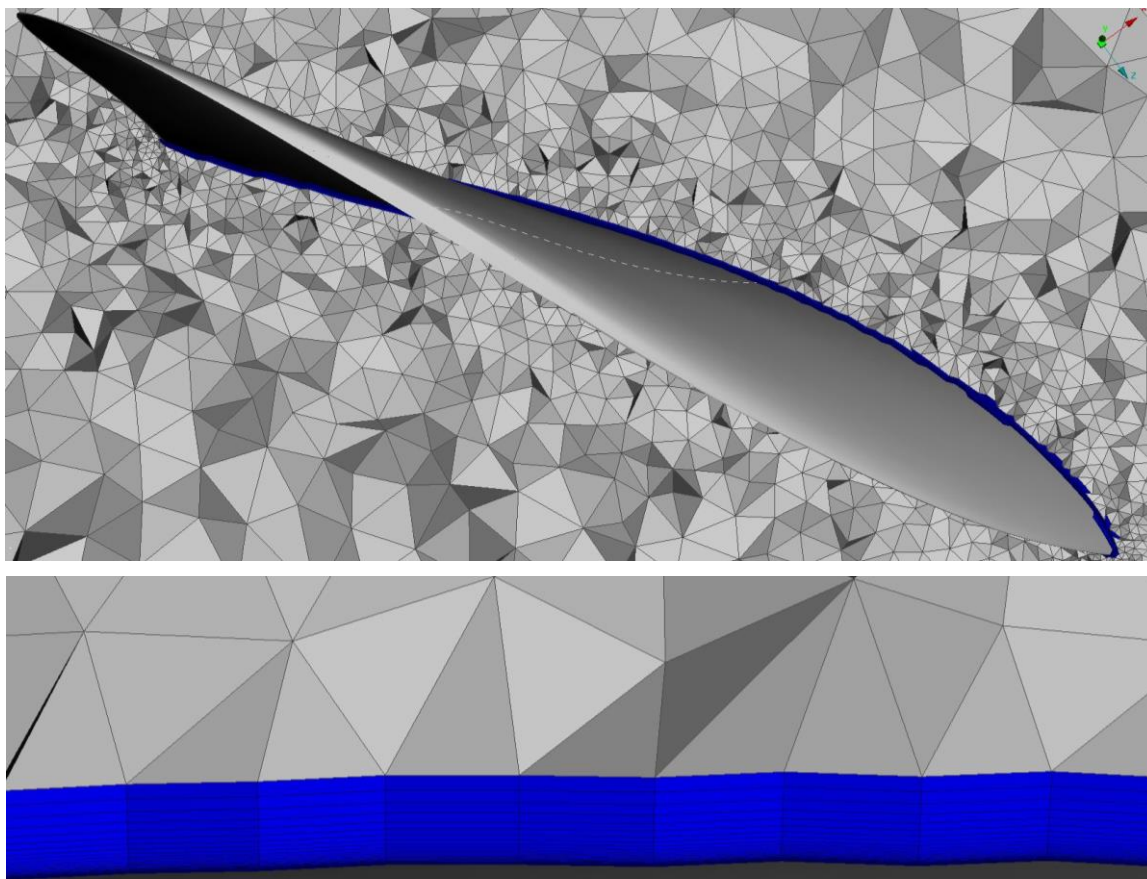
4.3.1 Β – Γ

Πίνακας 4.2: Στοιχεία πλέγματος για τις περιπτώσεις Β και Γ

Περίπτωση	Περιβάλλον όγκος		Κύλινδροι	Μήκος στοιχείων (mm)		Οριακό στρώμα				Συνολικά στοιχεία	
	Διαστάσεις (m)	Μήκος στοιχείων εξωτερικά (mm)	Μήκος στοιχείων (mm)	Πτερύγια	άξονας	Αριθμός στρωμάτων	Πάχος πρώτου στρώματος (mm)	Βαθμός ανάπτυξης	Συνολικό πάχος οριακού στρώματος (mm)	Επιφανειακά	Όγκου
Β	1x1x5	150	20	0,5 - 1	3 - 5	13	0,001	1.1 - 2	0,59	236156	5836277
Γ	1x1x5	150	20	0,5 - 1	3 - 5	26	0,001	1,2	0,567	236832	9407081

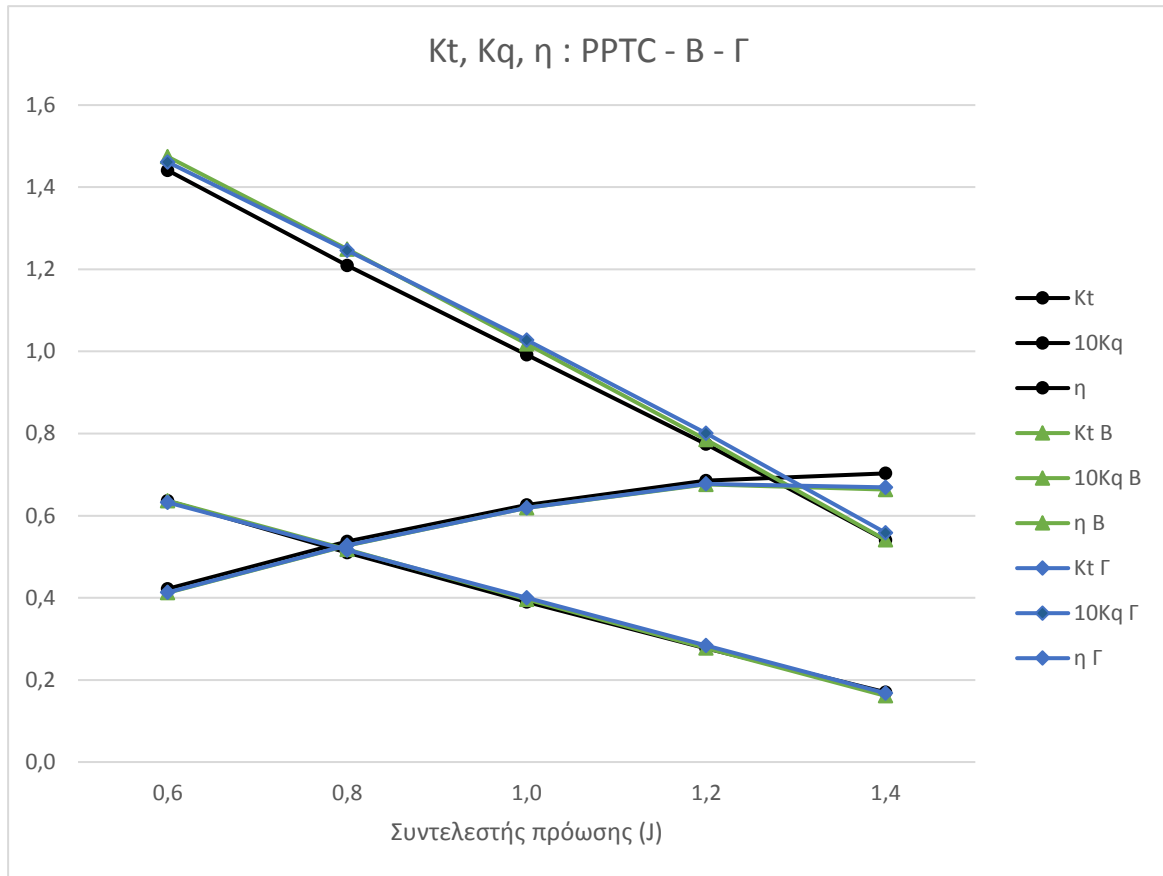


Σχήμα 4.11: Διακριτοποίηση οριακού στρώματος (περίπτωση Β)

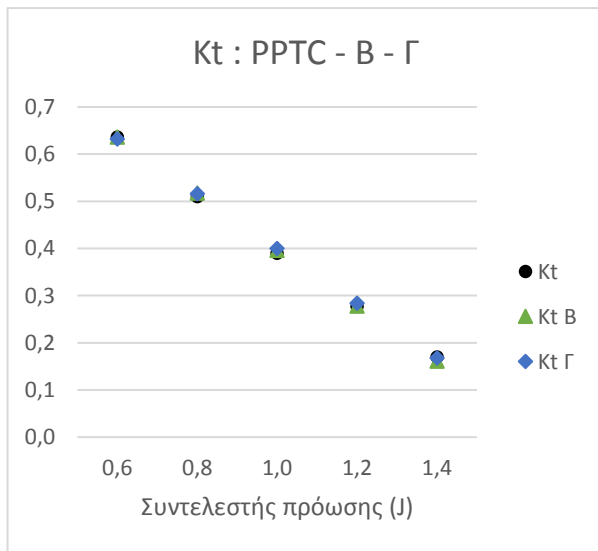


Σχήμα 4.12: Διακριτοποίηση οριακού στρώματος (περίπτωση Γ)

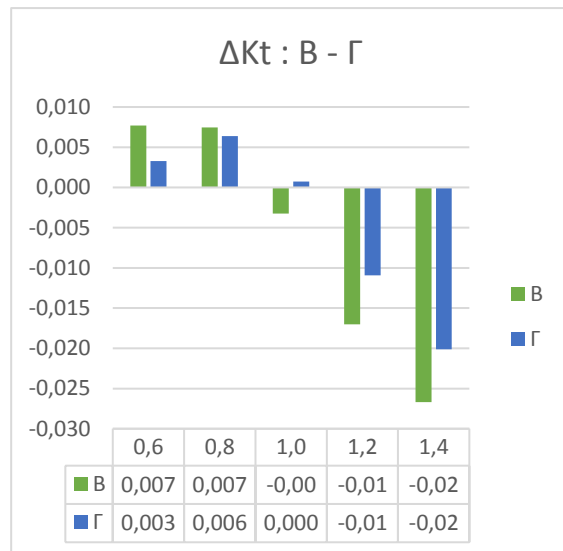
Ενώ υπάρχουν παρόμοιες αποκλίσεις των δύο περιπτώσεων από τα πειραματικά δεδομένα, η απόκλιση του βαθμού απόδοσης μειώθηκε αισθητά στην περίπτωση Γ, σε σύγκριση με τη Β. Αυτό μπορεί να οφείλεται στην πυκνότητα και τον αριθμό των στρωμάτων του οριακού στρώματος, δίνοντας πιο λεπτομερή αποτελέσματα των τάσεων στην επιφάνεια της προπέλας. Επίσης ο βαθμός ανάπτυξης 1,2 της περίπτωσης Γ είναι σαφώς προτιμότερος, καθώς βρίσκεται μέσα στο επιτρεπτό όριο των προτάσεων της βιβλιογραφίας και πιθανόν να βοηθάει το λύτη να εκτιμήσει καλύτερα τη ροή στο οριακό στρώμα. Ο βαθμός ανάπτυξης της περίπτωσης Β, ξεπερνώντας την τιμή 1,4, είναι επισφαλής σε ακραίες διακυμάνσεις των παραμέτρων της ροής μέσα στο οριακό στρώμα, οδηγώντας σε αποτελέσματα που δεν αντιπροσωπεύουν την πραγματικότητα.



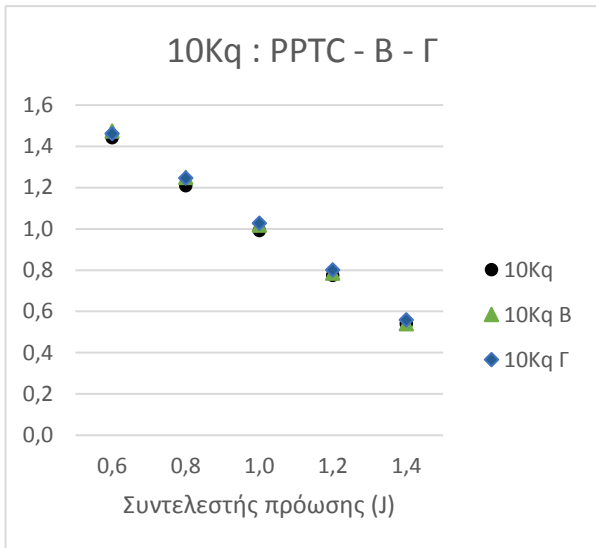
Σχήμα 4.13: Σύγκριση Kt, Kq, η, των περιπτώσεων Β και Γ με το πείραμα



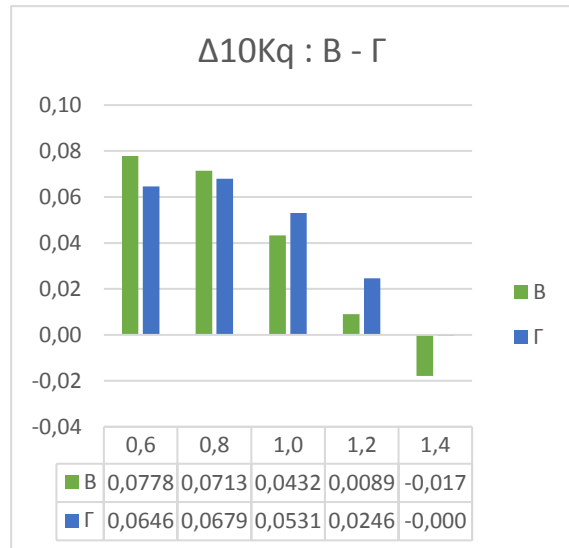
Σχήμα 4.14: Συντελεστής ώσης, περιπτώσεις Β και Γ



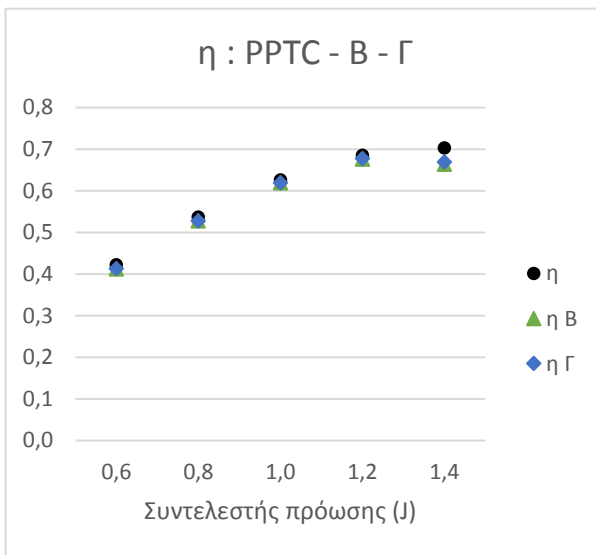
Σχήμα 4.15: Απόκλιση Kt των Β και Γ από το πείραμα



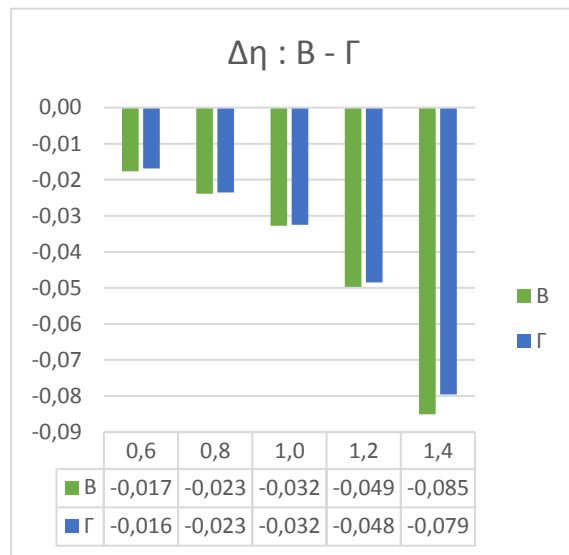
Σχήμα 4.16: Συντελεστής ροπής, περιπτώσεις Β και Γ



Σχήμα 4.17: Απόκλιση Kq των Β και Γ από το πείραμα



Σχήμα 4.18: Βαθμός απόδοσης, περιπτώσεις Β και Γ



Σχήμα 4.19: Απόκλιση η των Β και Γ από το πείραμα

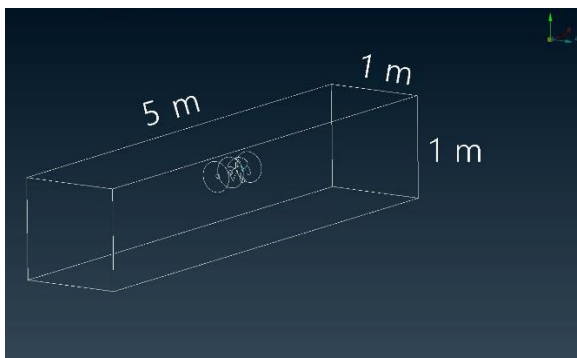
4.4 Περιβάλλον όγκος και διακριτοποίηση

Σε αυτό το σημείο έγινε μία απόπειρα αύξησης του περιβάλλοντος όγκου, πύκνωσης των στοιχείων του κοντά στην προπέλα και αραίωσης μακριά από αυτήν, με καμία ουσιώδη διαφορά στα αποτελέσματα, καθώς φάνηκε ότι ο περιβάλλον όγκος της περίπτωσης Γ είχε ήδη ικανοποιητικό μέγεθος για τη διατήρηση των μεταβλητών στα άκρα του.

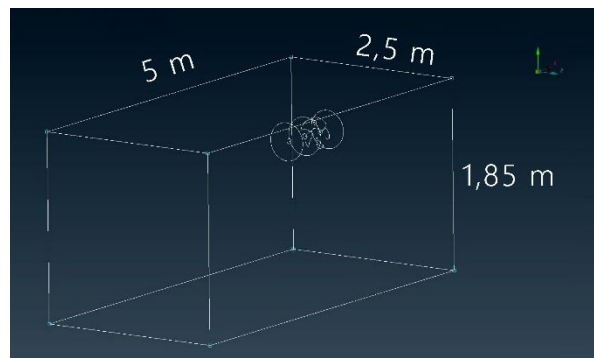
4.4.1 Γ – Δ

Πίνακας 4.3: Στοιχεία πλέγματος για τις περιπτώσεις Γ και Δ

Περίπτωση	Περιβάλλον όγκος		Κύλινδροι	Μήκος στοιχείων (mm)		Οριακό στρώμα				Συνολικά στοιχεία	
	Διαστάσεις (m)	Μήκος στοιχείων εξωτερικά (mm)	Μήκος στοιχείων (mm)	Πτερύγια	άξονας	Αριθμός στρωμάτων	Πάχος πρώτου στρώματος (mm)	Βαθμός ανάπτυξης	Συνολικό πάχος οριακού στρώματος (mm)	Επιφανειακά	Όγκου
Γ	1x1x5	150	20	0,5 - 1	3 - 5	26	0,001	1,2	0,567	236832	9407081
Δ	2,5x1,85x5	50 - 200	20	0,5 - 1	3 - 5	26	0,001	1,2	0,567	240756	8903621

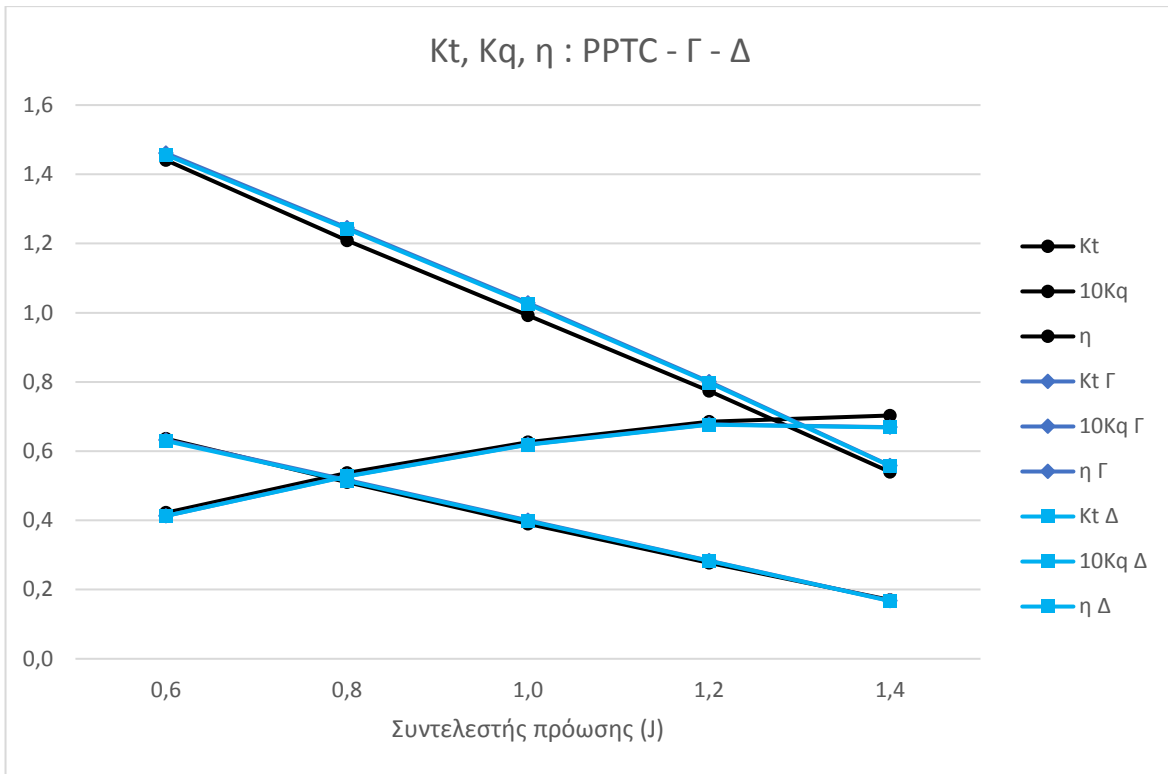


Σχήμα 4.20: Διαστάσεις περιβάλλοντα όγκου (περίπτωση Γ)

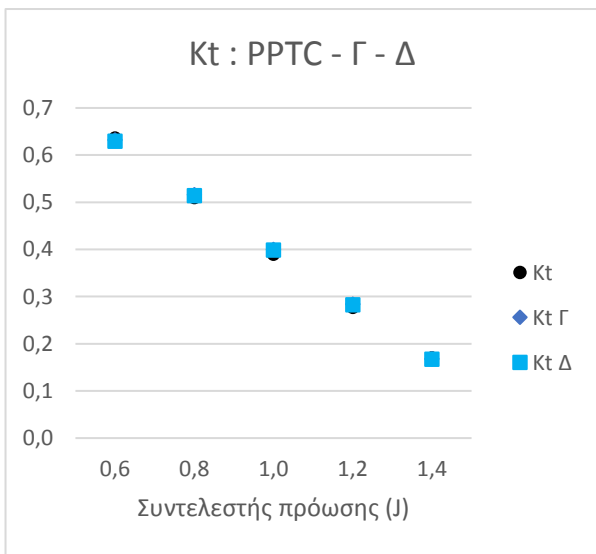


Σχήμα 4.21: Διαστάσεις περιβάλλοντα όγκου (περίπτωση Δ)

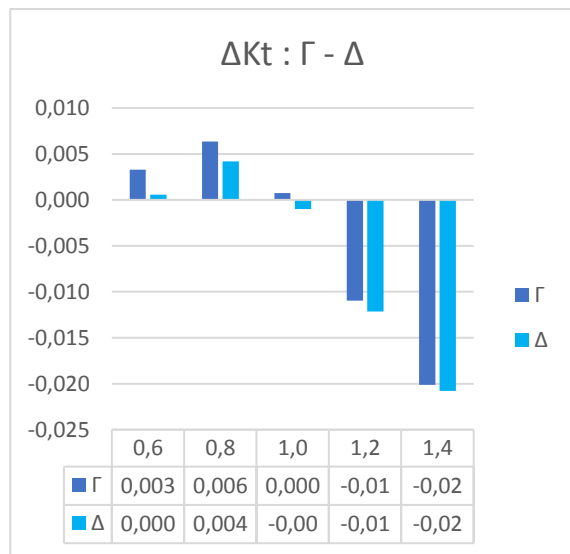
Η αλλαγή στον περιβάλλοντα όγκο φαίνεται να μην προκάλεσε καμία αισθητή διαφορά στα αποτελέσματα. Αυτό σημαίνει ότι και στις δύο περιπτώσεις η διακριτοποίηση και το μέγεθος του παραλληλεπίπεδου είναι ικανοποιητικά και δε μπορεί να θεωρηθεί κάποια περίπτωση προτιμότερη από την άλλη.



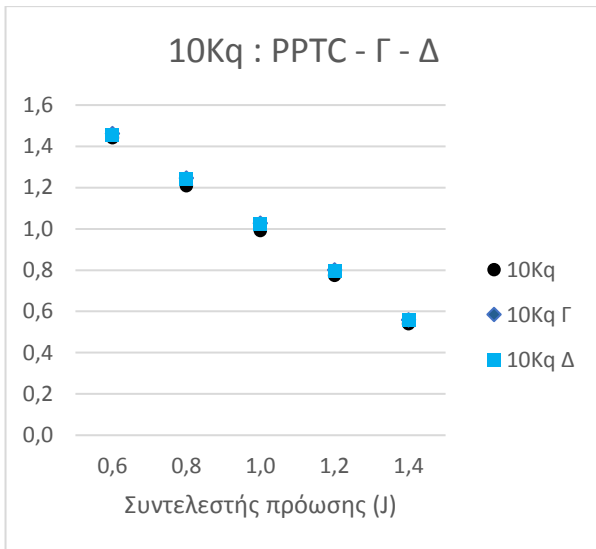
Σχήμα 4.22: Σύγκριση Kt, Kq, η, των περιπτώσεων Γ και Δ με το πείραμα



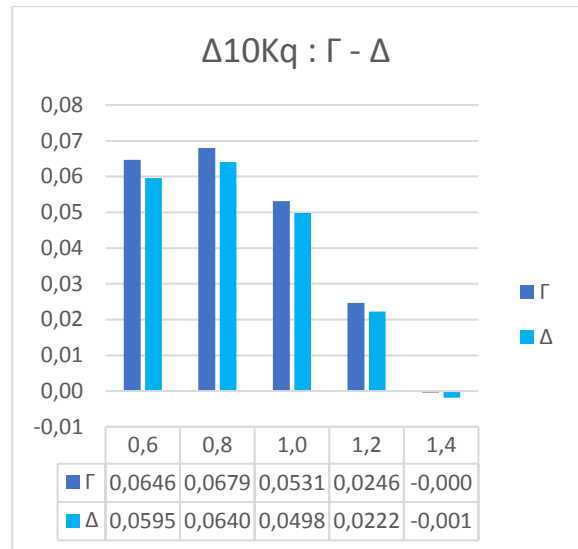
Σχήμα 4.23: Συντελεστής ώσης, περιπτώσεις Γ και Δ



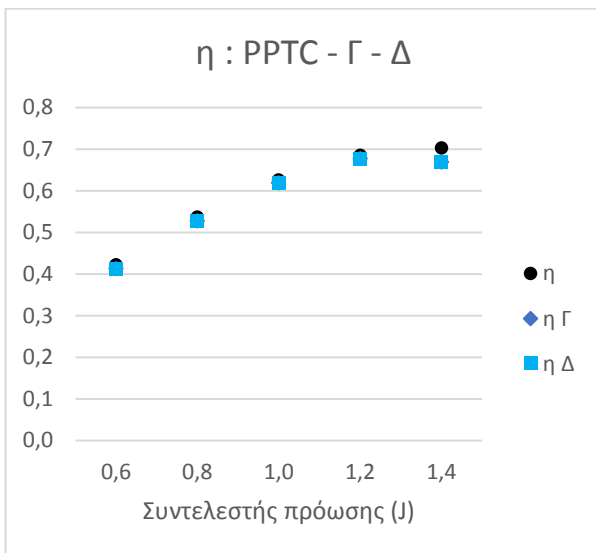
Σχήμα 4.24: Απόκλιση Kt των Γ και Δ από το πείραμα



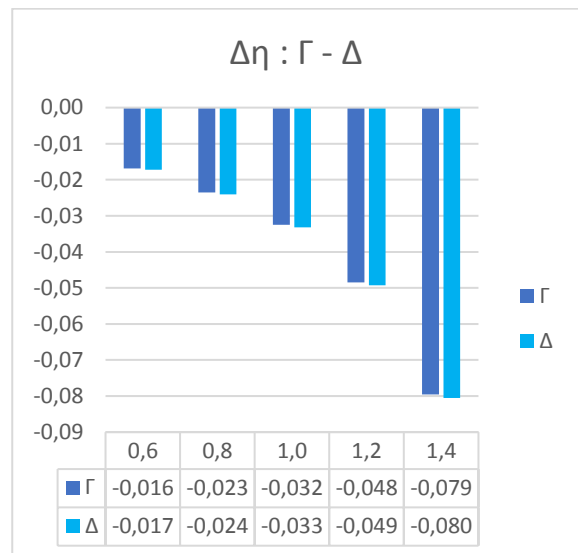
Σχήμα 4.25: Συντελεστής ροπής, περιπτώσεις Γ και Δ



Σχήμα 4.26: Απόκλιση Kq των Γ και Δ από το πείραμα



Σχήμα 4.27: Βαθμός απόδοσης, περιπτώσεις Γ και Δ



Σχήμα 4.28: Απόκλιση η των Γ και Δ από το πείραμα

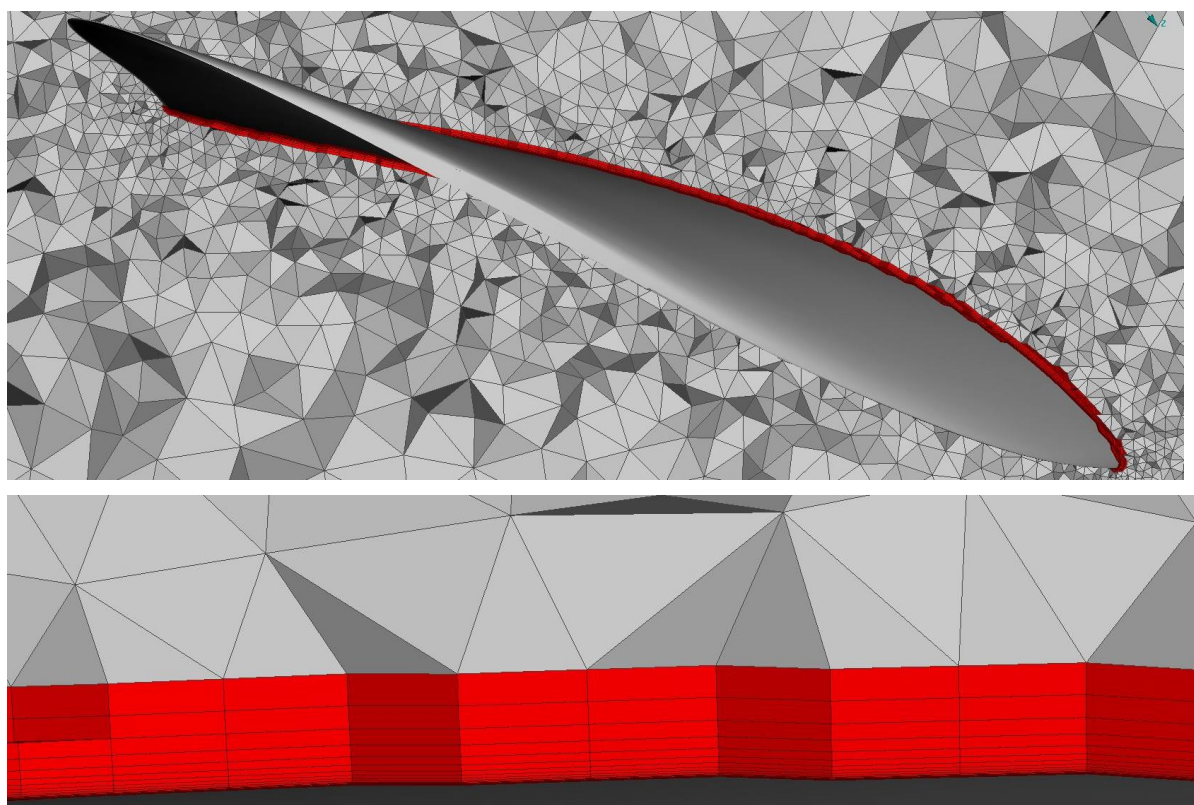
4.5 Υ+

Σύμφωνα με τη θεωρία το Υ+, ιδανικά, πρέπει να βρίσκεται κοντά στην τιμή 1. Στην περίπτωση Γ, λόγω του πολύ μικρού πάχους του πρώτου στρώματος του πλέγματος, το Υ+ παίρνει τιμές πολύ μικρότερες του 1 στην επιφάνεια των πτερυγίων, όπως φαίνεται στα σχήματα 4.30 και 4.32. Έτσι, διατηρώντας ένα οριακό στρώμα με συνολικό πάχος μεγαλύτερο των 0,5 χιλιοστών, διαμορφώθηκε μία καινούρια στρωματοποίηση του πλέγματος για την περίπτωση Ε, όπου το πάχος του πρώτου στρώματος διπλασιάστηκε. Παράλληλα, ο αριθμός των στρωμάτων μειώθηκε, ελαττώνοντας το συνολικό αριθμό των στοιχείων όγκου του πλέγματος στα 2/3.

4.5.1 Γ – Ε

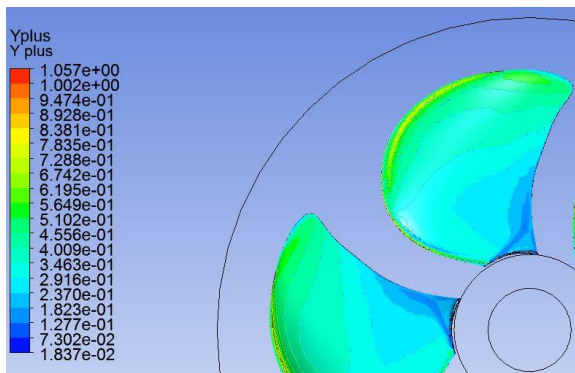
Πίνακας 4.4: Στοιχεία πλέγματος για τις περιπτώσεις Γ και Ε

Περίπτωση	Περιβάλλον όγκος		Κύλινδροι	Μήκος στοιχείων (mm)		Οριακό στρώμα				Συνολικά στοιχεία	
	Διαστάσεις (m)	Μήκος στοιχείων εξωτερικά (mm)	Μήκος στοιχείων (mm)	Πτερύγια	άξονας	Αριθμός στρωμάτων	Πάχος πρώτου στρώματος (mm)	Βαθμός ανάπτυξης	Συνολικό πάχος οριακού στρώματος (mm)	Επιφανειακά	Όγκου
Γ	1x1x5	150	20	0,5 - 1	3 - 5	26	0,001	1,2	0,567	236832	9407081
Ε	1x1x5	150	20	0,5 - 1	3 - 5	15	0,002	1,4	0,773	235786	6269296

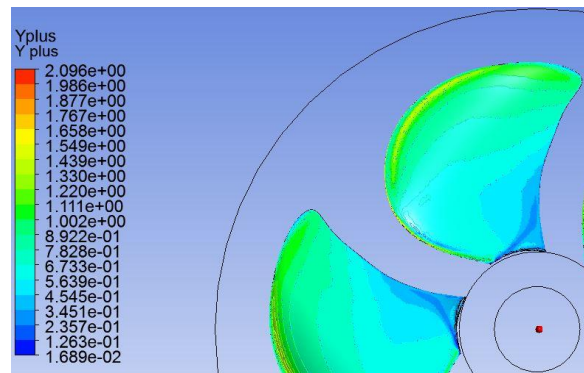


Σχήμα 4.29: Διακριτοποίηση οριακού στρώματος (περίπτωση Ε)

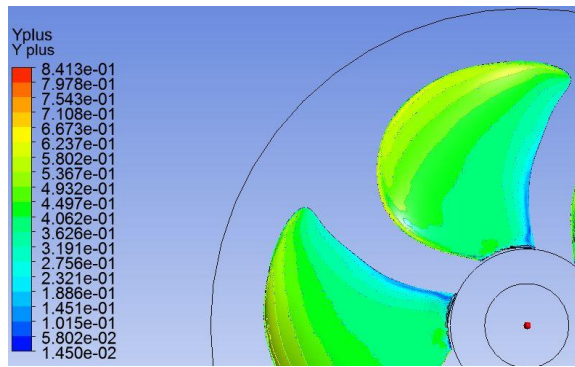
Τα αποτελέσματα των δύο περιπτώσεων είναι παραπλήσια. Η απόκλιση τους από τα πειραματικά δεδομένα διαφέρουν ελάχιστα και δε λαμβάνεται προτιμότερη περίπτωση με βάση τα διαγράμματα. Από την άλλη, στα σχήματα 4.31 και 4.33 φαίνεται ότι η τιμή του Y^+ στην περίπτωση E είναι πιο κοντά στα προτεινόμενα από το λογισμικό νούμερα, καθώς στο μεγαλύτερο εύρος των πτερυγίων το Y^+ βρίσκεται μεταξύ 0,8 και 2,1 για συντελεστή πρόωσης 0,6 και μεταξύ 0,8 και 1,6 για συντελεστή πρόωσης 1,4. Τέλος, η περίπτωση E, αποτελούμενη από λιγότερα συνολικά στοιχεία, απαιτεί λιγότερη υπολογιστική ισχύ, γεγονός πολύ σημαντικό για το χρόνο επίλυσης των προσομοιώσεων.



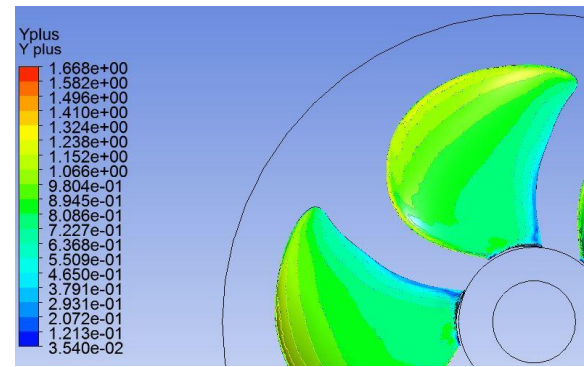
Σχήμα 4.30: Y^+ , περίπτωση Γ | J 0,6



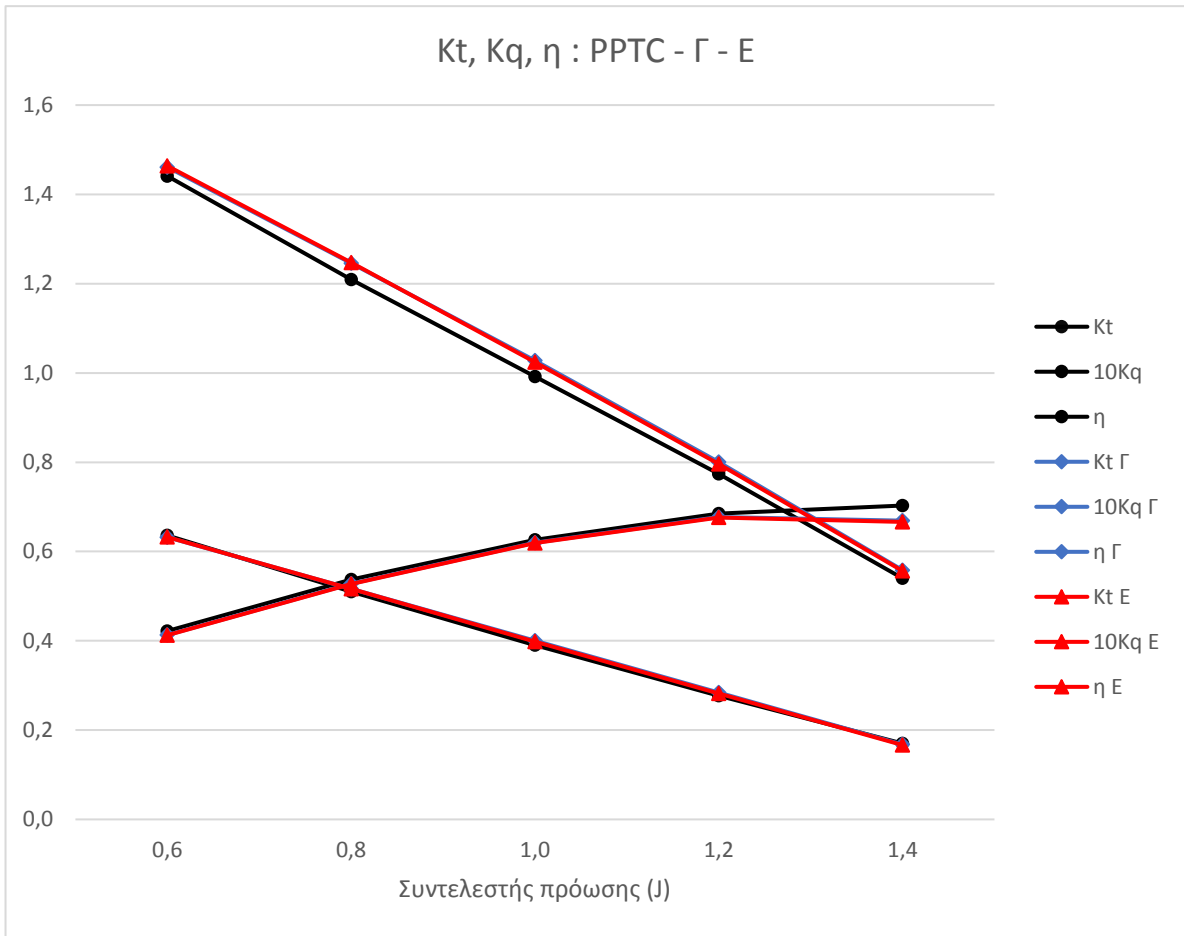
Σχήμα 4.31: Y^+ , περίπτωση E | J 0,6



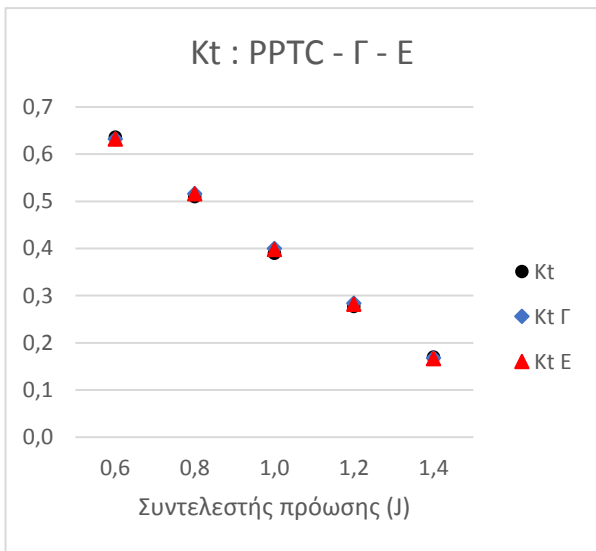
Σχήμα 4.32: Y^+ , περίπτωση Γ | J 1,4



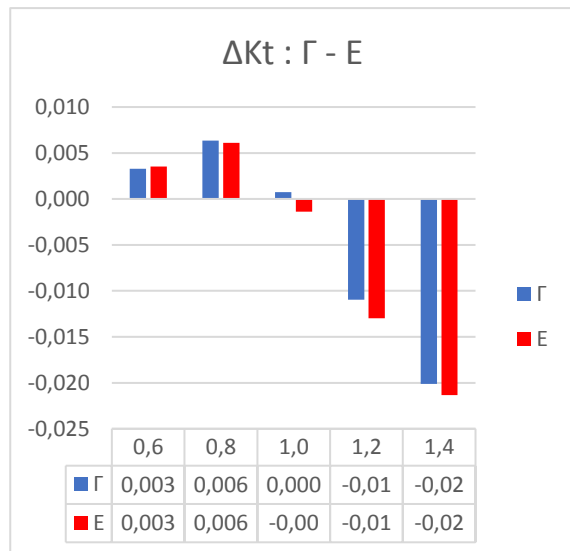
Σχήμα 4.33: Y^+ , περίπτωση E | J 1,4



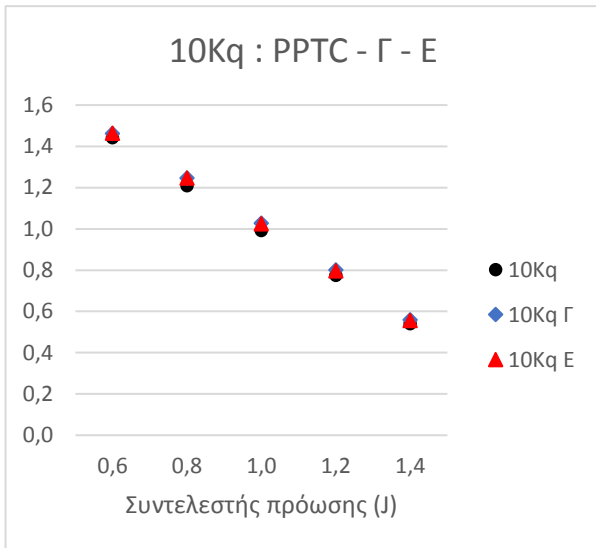
Σχήμα 4.44: Σύγκριση Kt, Kq, η, των περιπτώσεων Γ και Ε με το πείραμα



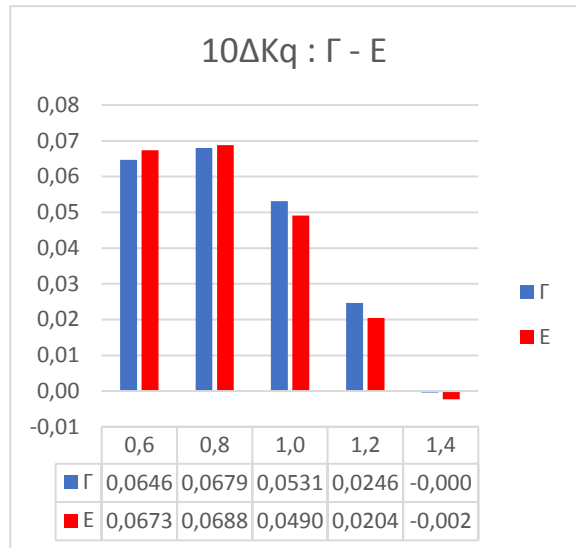
Σχήμα 4.45: Συντελεστής ώσης, περιπτώσεις Γ και Ε



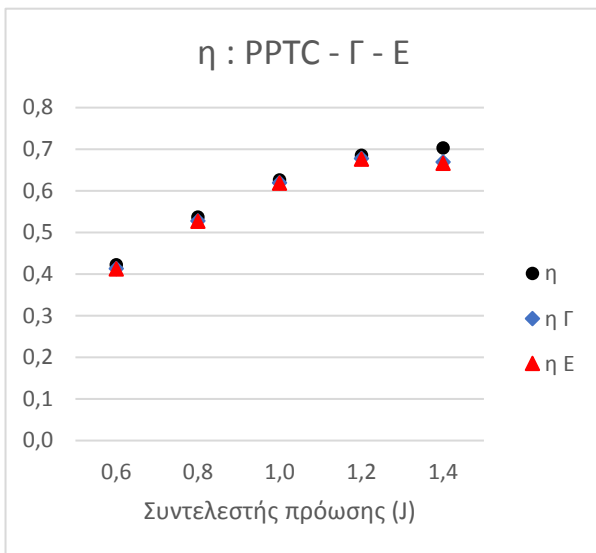
Σχήμα 4.46: Απόκλιση Kt των Γ και Ε από το πείραμα



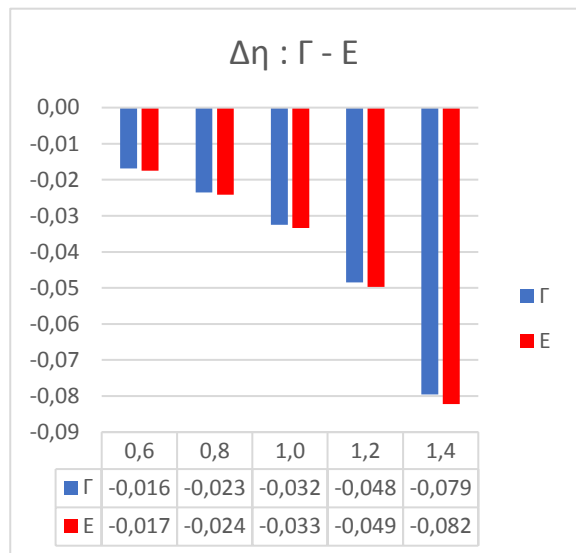
Σχήμα 4.47: Συντελεστής ροπής, περιπτώσεις Γ και E



Σχήμα 4.48: Απόκλιση Κq των Γ και E από το πείραμα



Σχήμα 4.49: Βαθμός απόδοσης, περιπτώσεις Γ και E



Σχήμα 4.50: Απόκλιση η των Γ και E από το πείραμα

4.6 Πάχος οριακού στρώματος

4.6.1 Εκτίμηση πάχους οριακού στρώματος

Για την εκτίμηση του πάχους του οριακού στρώματος συντάχθηκε ένας κώδικας MATLAB. Επιλέχθηκαν επτά ακτίνες καθ' ύψος των πτερυγίων της προπέλας και με τη χρήση του SOLIDWORKS υπολογίστηκαν οι χορδές των τομών του πτερυγίου σε κάθε ακτίνα. Έπειτα υπολογίστηκε η γραμμική ταχύτητα αυτών των τομών λόγω της περιστροφής τους και υπολογίστηκε η σχετική ταχύτητα του ρευστού ως προς την κάθε τομή. Τέλος, για κάθε τομή και για κάθε συντελεστή πρόωσης, έγινε υπολογισμός του αριθμού Reynolds ώστε να προσδιοριστεί το είδος της ροής σε κάθε περίπτωση και να υπολογιστεί το μέγιστο πάχος του οριακού στρώματος σε χιλιοστά.

Πίνακας 4.5: Μέγιστος αριθμός Reynolds και πάχος οριακού στρώματος στο συνολικό μήκος χορδών (αποτελέσματα του κώδικα MATLAB, κεφάλαιο 8)

Cengel - Cimbala [3]	Μέγιστος αριθμός Reynolds						Μέγιστο πάχος οριακού στρώματος (mm)				
	Συντελεστής πρόωσης (J)						Συντελεστής πρόωσης (J)				
	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	
Τομές πτερυγίου (r/R)	0,4	3,3E+05	3,6E+05	3,8E+05	4,2E+05	4,5E+05	0,58026	0,56102	0,54032	0,51946	0,49923
	0,5	4,9E+05	5,1E+05	5,4E+05	5,8E+05	6,1E+05	0,58362	2,28015	2,25529	2,22851	2,20084
	0,6	6,6E+05	6,9E+05	7,2E+05	7,5E+05	7,9E+05	2,48909	2,47195	2,45167	2,42916	2,40521
	0,7	8,4E+05	8,6E+05	8,9E+05	9,2E+05	9,6E+05	2,61116	2,59749	2,581	2,56231	2,54199
	0,8	9,8E+05	1,0E+06	1,0E+06	1,1E+06	1,1E+06	2,59771	2,58706	2,57404	2,55905	2,5425
	0,9	1,1E+06	1,1E+06	1,1E+06	1,1E+06	1,2E+06	2,4802	2,47204	2,46196	2,45023	2,43712
	0,95	1,0E+06	1,0E+06	1,0E+06	1,1E+06	1,1E+06	2,26283	2,2561	2,24777	2,23802	2,22707
White [2]	Μέγιστος αριθμός Reynolds						Μέγιστο πάχος οριακού στρώματος (mm)				
	Συντελεστής πρόωσης (J)						Συντελεστής πρόωσης (J)				
	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	
Τομές πτερυγίου (r/R)	0,4	3,3E+05	3,6E+05	3,8E+05	4,2E+05	4,5E+05	0,59089	0,5713	0,55023	0,52898	0,50838
	0,5	4,9E+05	5,1E+05	5,4E+05	5,8E+05	6,1E+05	0,59432	0,58045	0,56476	0,54814	0,53128
	0,6	6,6E+05	6,9E+05	7,2E+05	7,5E+05	7,9E+05	0,58721	0,57715	0,56539	0,5525	0,53898
	0,7	8,4E+05	8,6E+05	8,9E+05	9,2E+05	9,6E+05	0,57371	0,56623	0,55729	0,54726	0,53647
	0,8	9,8E+05	1,0E+06	1,0E+06	1,1E+06	1,1E+06	0,5456	0,54003	2,38976	2,37981	2,36881
	0,9	1,1E+06	1,1E+06	1,1E+06	1,1E+06	1,2E+06	2,30745	2,30202	2,29531	2,28749	2,27874
	0,95	1,0E+06	1,0E+06	1,0E+06	1,1E+06	1,1E+06	2,09922	2,09476	2,08923	2,08276	2,07548

Πίνακας 4.6: Μέγιστος αριθμός Reynolds και πάχος οριακού στρώματος στα 4/5 του μήκους χορδών (αποτελέσματα του κώδικα MATLAB, κεφάλαιο 8)

Cengel - Cimbala [3]		Μέγιστος αριθμός Reynolds					Μέγιστο πάχος οριακού στρώματος (mm)				
		Συντελεστής πρόωσης (J)					Συντελεστής πρόωσης (J)				
		0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4
Τομές πτερυγίου (r/R)	0,4	2,7E+05	2,8E+05	3,1E+05	3,3E+05	3,6E+05	0,519	0,50179	0,48328	0,46462	0,44652
	0,5	3,9E+05	4,1E+05	4,3E+05	4,6E+05	4,9E+05	0,522	0,50983	0,49604	0,48145	0,46664
	0,6	5,3E+05	5,5E+05	5,7E+05	6,0E+05	6,3E+05	2,08216	2,06782	2,05085	2,03202	2,01199
	0,7	6,7E+05	6,9E+05	7,1E+05	7,4E+05	7,7E+05	2,18426	2,17283	2,15904	2,1434	2,12641
	0,8	7,8E+05	8,0E+05	8,2E+05	8,4E+05	8,7E+05	2,17301	2,16411	2,15321	2,14068	2,12683
	0,9	8,5E+05	8,6E+05	8,8E+05	9,0E+05	9,3E+05	2,07472	2,06789	2,05946	2,04965	2,03868
	0,95	8,1E+05	8,2E+05	8,3E+05	8,5E+05	8,7E+05	1,89288	1,88725	1,88028	1,87213	1,86297
White [2]		Μέγιστος αριθμός Reynolds					Μέγιστο πάχος οριακού στρώματος (mm)				
		Συντελεστής πρόωσης (J)					Συντελεστής πρόωσης (J)				
		0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4
Τομές πτερυγίου (r/R)	0,4	2,7E+05	2,8E+05	3,1E+05	3,3E+05	3,6E+05	0,52851	0,51099	0,49214	0,47314	0,45471
	0,5	3,9E+05	4,1E+05	4,3E+05	4,6E+05	4,9E+05	0,53157	0,51917	0,50514	0,49027	0,4752
	0,6	5,3E+05	5,5E+05	5,7E+05	6,0E+05	6,3E+05	0,52521	0,51622	0,5057	0,49417	0,48208
	0,7	6,7E+05	6,9E+05	7,1E+05	7,4E+05	7,7E+05	0,51314	0,50645	0,49846	0,48948	0,47984
	0,8	7,8E+05	8,0E+05	8,2E+05	8,4E+05	8,7E+05	0,488	0,48302	0,47696	0,47005	0,46249
	0,9	8,5E+05	8,6E+05	8,8E+05	9,0E+05	9,3E+05	0,45457	0,45084	0,44626	0,44096	0,43509
	0,95	8,1E+05	8,2E+05	8,3E+05	8,5E+05	8,7E+05	0,42098	0,41786	0,41401	0,40954	0,40455

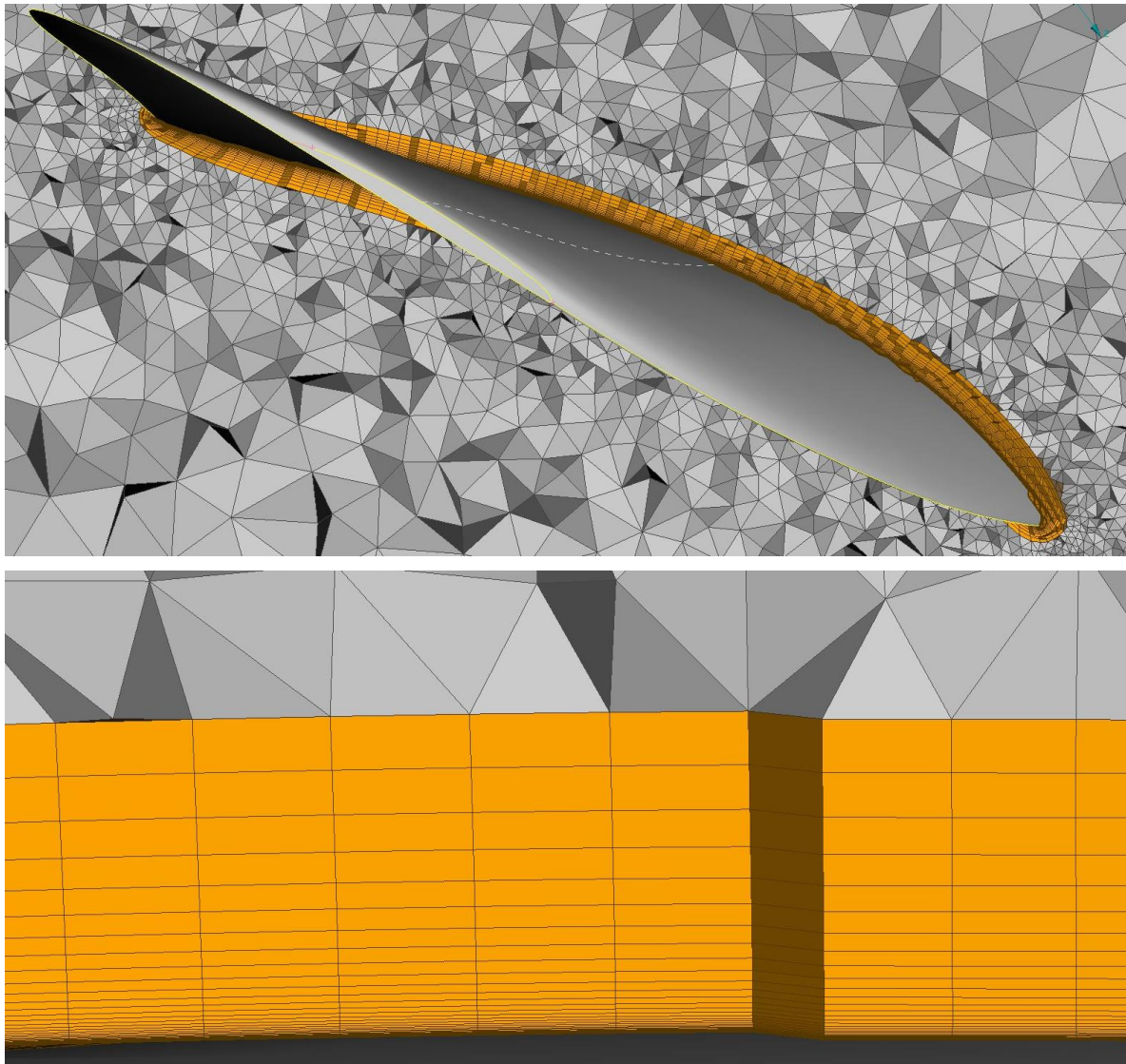
Στους πίνακες 4.5 και 4.6 τα αποτελέσματα του κώδικα έχουν χωριστεί, ανάλογα με το είδος της ροής, σύμφωνα με τον μηχανοτεχνικό κρίσιμο αριθμό Reynolds ($Re_{x,cr} = 5 \times 10^5$) βασισμένο στο σύγγραμμα των Cengel-Cimbala [3] και τον κρίσιμο αριθμό Reynolds ($Re_{x,cr} = 1 \times 10^6$) βασισμένο στο σύγγραμμα του White [2]. Στα κελιά με πράσινο χρώμα η ροή θεωρείται στρωτή, ενώ στην περίπτωση των πορτοκαλί κελιών τυρβώδης. Αυτό επηρεάζει το μέγιστο πάχος που αναμένεται να έχει το οριακό στρώμα στο τέλος της πορείας του ρευστού από τα πτερύγια της προπέλας. Συγκεκριμένα, μόνο σε πολύ μικρές ακτίνες, κοντά στον άξονα περιστροφής, η ροή αναμένεται να είναι σε όλο το μήκος στρωτή, αφού εκεί το μήκος της χορδής των τομών του πτερυγίου και η ταχύτητα πρόσπτωσης του ρευστού έχουν χαμηλότερη τιμή σε σχέση με τις τομές σε μεγαλύτερη ακτίνα. Από την άλλη, υπολογίζοντας το πάχος του οριακού στρώματος κατά White, μέχρι και στα 4/5 της πορείας του ρευστού επάνω στην προπέλα, η ροή αναμένεται να είναι στρωτή έχοντας στη μεγαλύτερη επιφάνεια των πτερυγίων οριακό στρώμα όχι μεγαλύτερο των 0,53 χιλιοστών (πίνακας 4.6).

Για το λόγο αυτό δημιουργήθηκε ένα ακόμα πλέγμα (περίπτωση ΣΤ), το οποίου το οριακό στρώμα έγινε παχύτερο, για ενδεχόμενη κάλυψη της τύρβης σε όλη την πορεία του ρευστού κοντά στην προπέλα. Τα στοιχεία του πλέγματος φαίνονται στον πίνακα 4.7.

4.6.2 Γ – ΣΤ

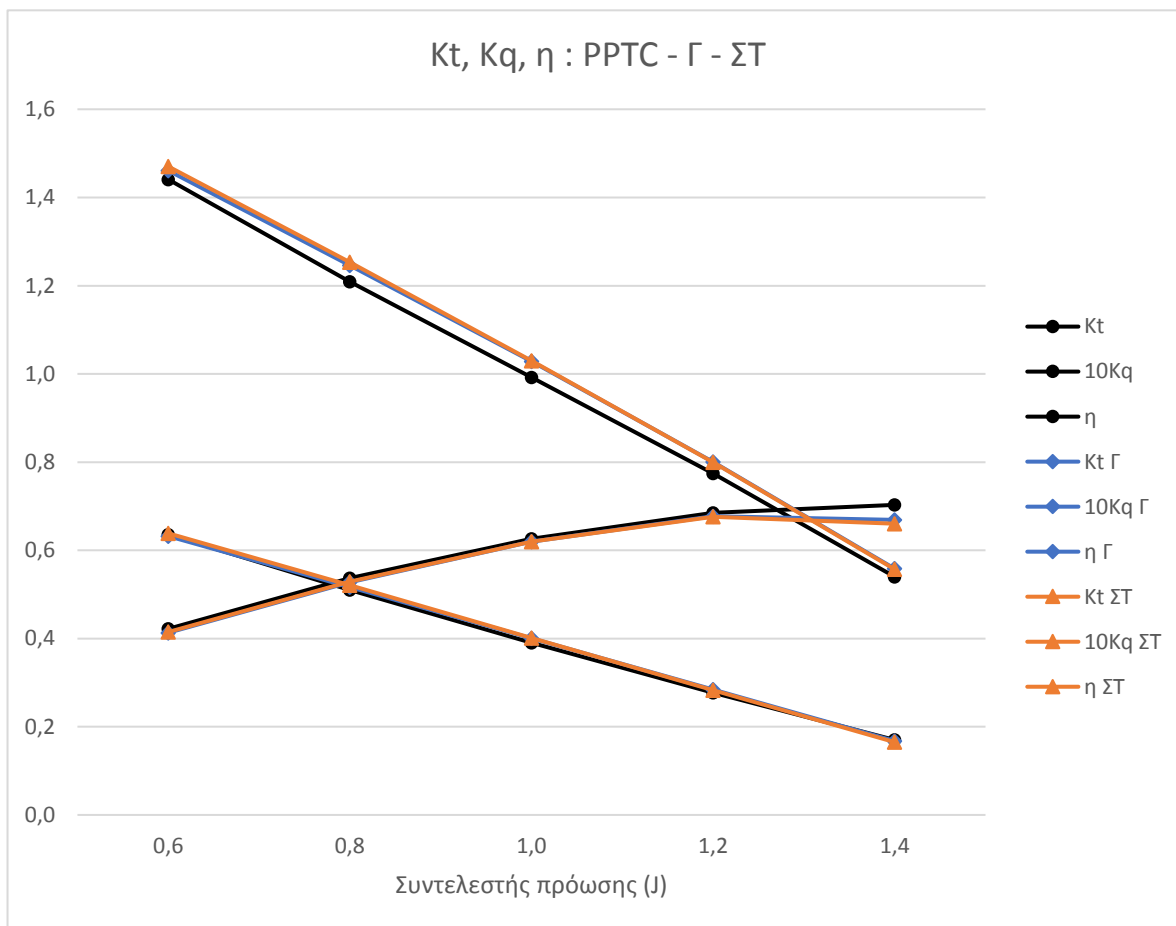
Πίνακας 4.7: Στοιχεία πλέγματος για τις περιπτώσεις Γ και ΣΤ

Περίπτωση	Περιβάλλον όγκος		Κύλινδροι	Μήκος στοιχείων (mm)		Οριακό στρώμα				Συνολικά στοιχεία	
	Διαστάσεις (m)	Μήκος στοιχείων εξωτερικά (mm)		Μήκος στοιχείων (mm)	Πτερύγια	άξονας	Αριθμός στρωμάτων	Πάχος πρώτου στρώματος (mm)	Βαθμός ανάπτυξης	Συνολικό πάχος οριακού στρώματος (mm)	Επιφανειακά
Γ	1x1x5	150	20	0,5 - 1	3 - 5	26	0,001	1,2	0,567	236832	9407081
ΣΤ	1x1x5	150	20	0,5 - 1	3 - 5	34	0,001	1,2	2,45	234600	10144922

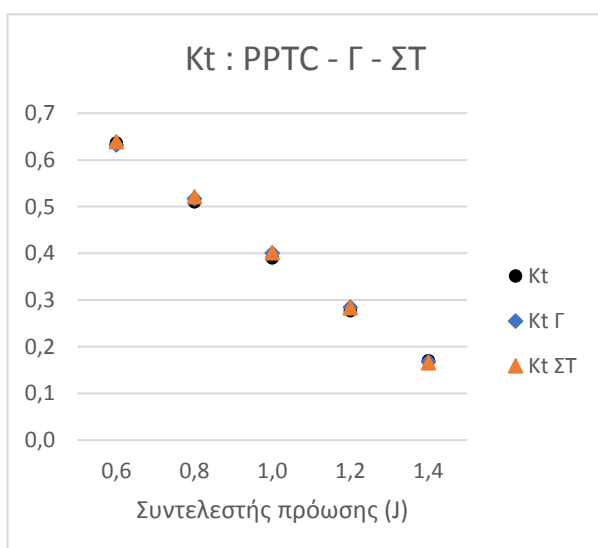


Σχήμα 4.51: Διακριτοποίηση οριακού στρώματος (περίπτωση ΣΤ)

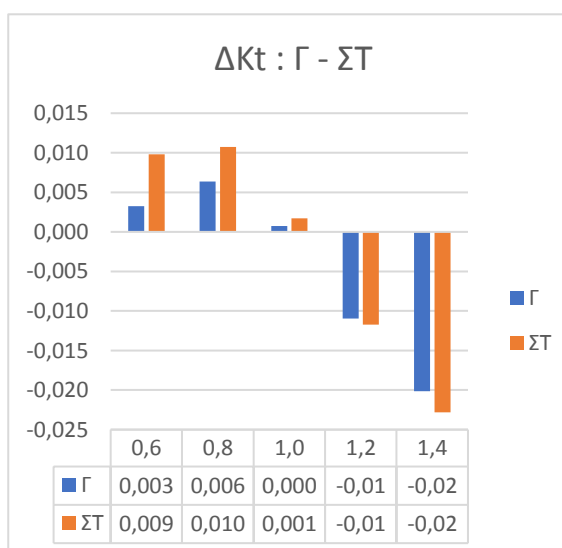
Στην περίπτωση ΣΤ τα αποτελέσματα αποκλίνουν περισσότερο, ειδικά ως προς το βαθμό απόδοσης, άρα δεν προτιμάται σε σύγκριση με την Γ.



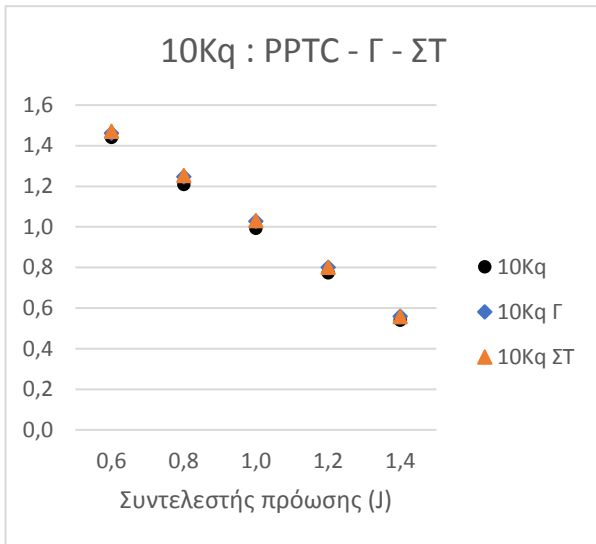
Σχήμα 4.52: Σύγκριση Kt, Kq, η, των περιπτώσεων Γ και ΣΤ με το πείραμα



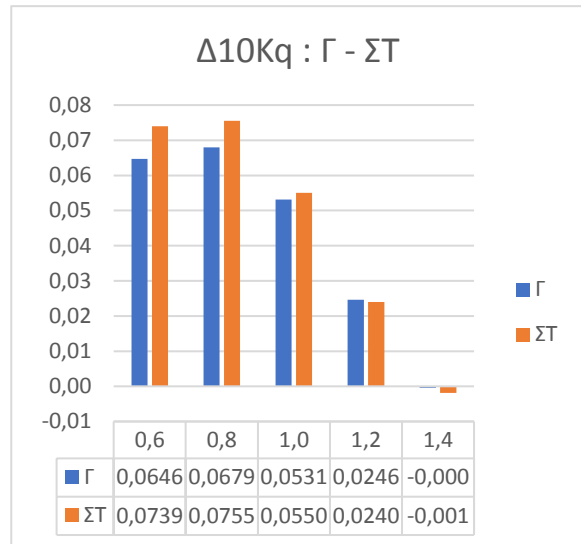
Σχήμα 4.53: Συντελεστής ώσης, περιπτώσεις Γ και ΣΤ



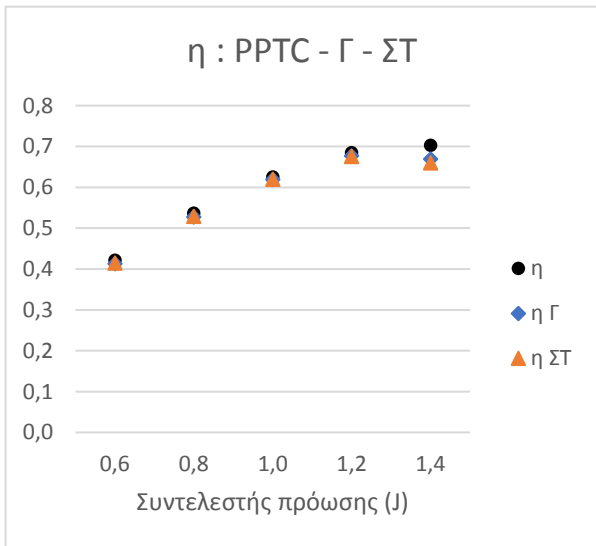
Σχήμα 4.54: Απόκλιση Kt των Γ και ΣΤ από το πείραμα



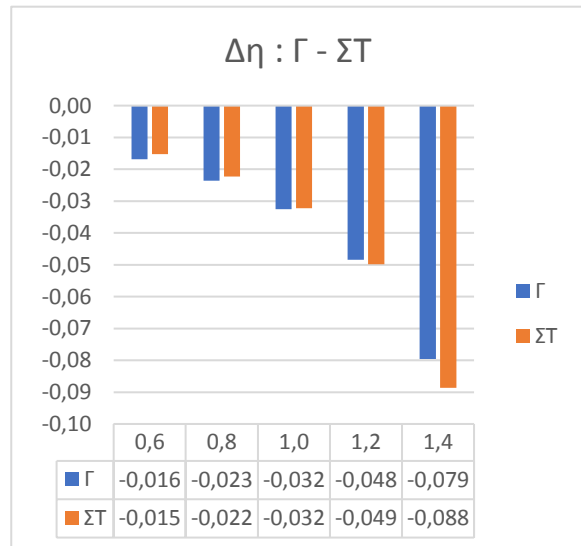
Σχήμα 4.55: Συντελεστής ροπής, περιπτώσεις Γ και ΣΤ



Σχήμα 4.56: Απόκλιση Κq των Γ και ΣΤ από το πείραμα



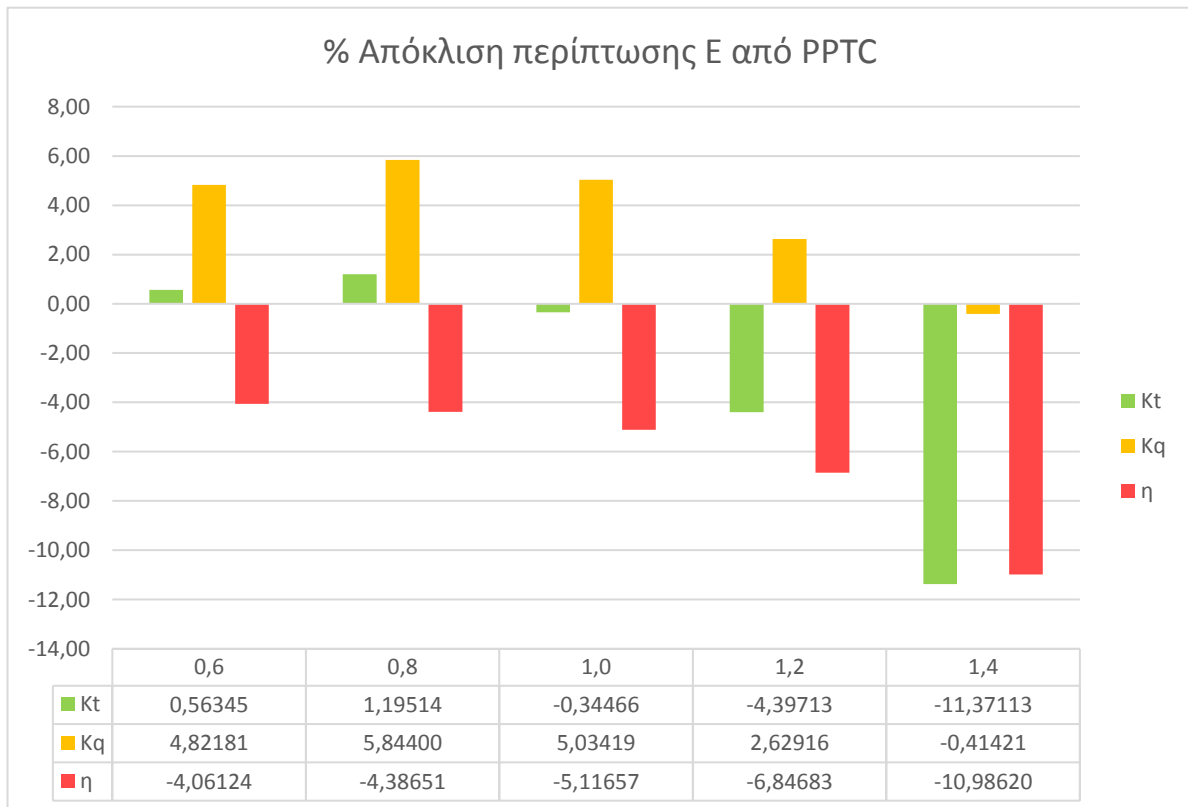
Σχήμα 4.57: Βαθμός απόδοσης, περιπτώσεις Γ και ΣΤ



Σχήμα 4.58: Απόκλιση η των Γ και ΣΤ από το πείραμα

4.7 Συμπεράσματα αναλύσεων

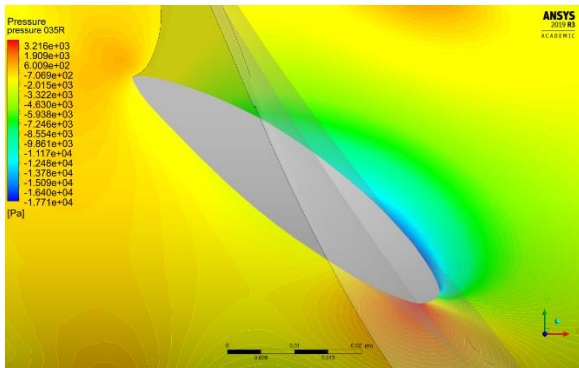
Παρατηρώντας τα διαγράμματα των παραπάνω περιπτώσεων, διακρίνεται μία υπερεκτίμηση του συντελεστή ροής, ο οποίος προκαλεί τη μείωση του βαθμού απόδοσης σε σύγκριση με τα πειραματικά δεδομένα. Για συντελεστή πρόωσης 1,4 και συνδιάζοντας την υποτίμηση του συντελεστή ώσης, δημιουργείται μία αισθητή απόκλιση του βαθμού απόδοσης από τα πειραματικά δεδομένα. Με βάση τα παραπάνω και λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα, κυρίως του βαθμού απόδοσης που μας ενδιαφέρει για την επόμενη ενότητα, επιλέγεται η περίπτωση E ως η προτιμότερη. Η απόκλισή της από τα πειραματικά δεδομένα είναι σχεδόν η μικρότερη και με βάση τη βιβλιογραφία η διακριτοποίησή της θεωρείται ορθή, ως προς την πρόβλεψη των χαρακτηριστικών της ροής. Εν τέλει, για την περίπτωση του βαθμού απόδοσης, ο οποίος μας ενδιαφέρει περισσότερο στην παρούσα εργασία, το σφάλμα είναι περίπου 4% για $J = 0,6$, σταδιακά αυξάνεται με αύξηση του συντελεστή πρόωσης, καταλήγοντας να είναι λίγο λιγότερο από 11% για $J = 1,4$.



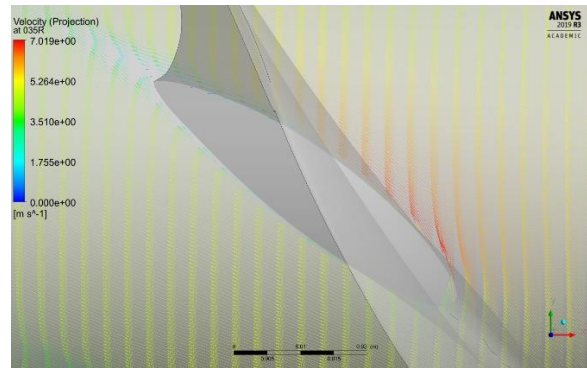
Σχήμα 4.59: Η % απόκλιση της περίπτωσης E από τα πειραματικά δεδομένα

Παρακάτω παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά της ροής γύρω από τα πτερύγια της προπέλας με εικόνες κατανομής πίεσης και διανυσμάτων ταχύτητας, για τρεις διαφορετικές ακτίνες (0,35 R, 0,65 R, 0,95 R) και τρεις διαφορετικούς συντελεστές πρόωσης ($J = 0,6$, 1,0 και 1,4).

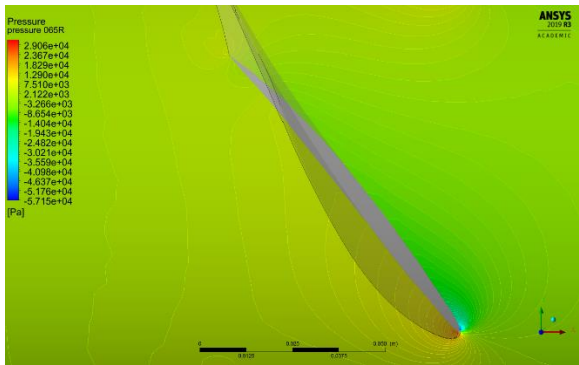
$$J = 0,6$$



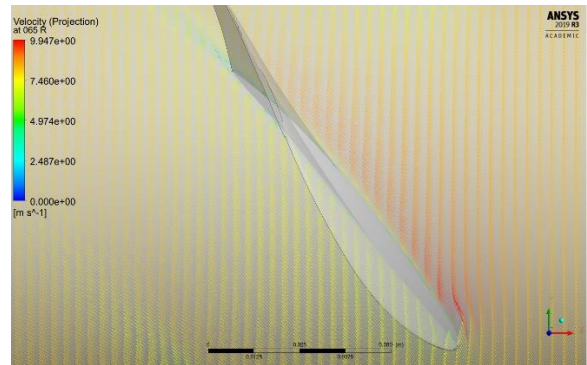
Σχήμα 4.60: Κατανομή πίεσης (0,35 R)



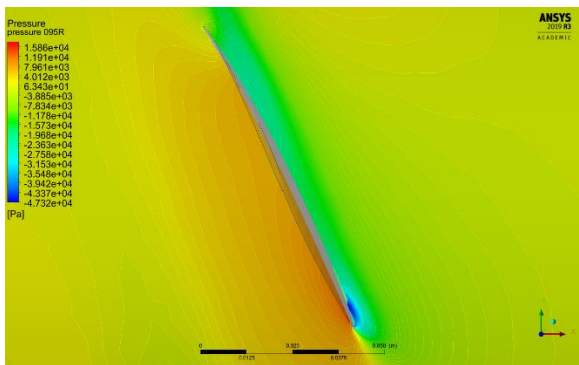
Σχήμα 4.61: Διανύσματα ταχύτητας (0,35 R)



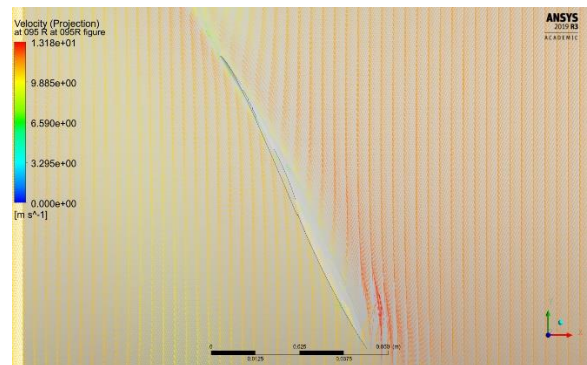
Σχήμα 4.62: Κατανομή πίεσης (0,65 R)



Σχήμα 4.63: Διανύσματα ταχύτητας (0,65 R)



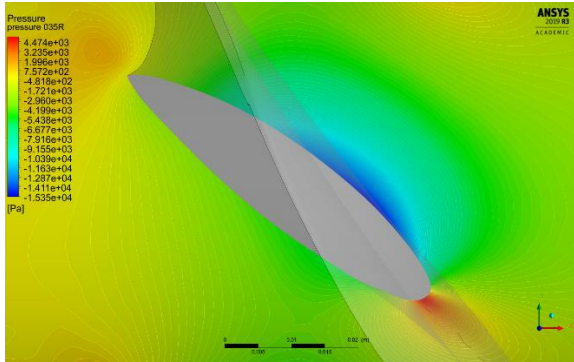
Σχήμα 4.64: Κατανομή πίεσης (0,95 R)



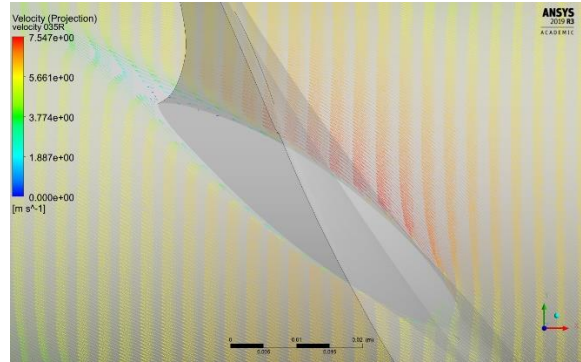
Σχήμα 4.65: Διανύσματα ταχύτητας (0,95 R)

Για συντελεστή πρόωσης 0,6 φαίνεται στις εικόνες κατανομής πίεσης ότι η γωνία πρόσπτωσης είναι μεγάλη, δημιουργώντας μεγάλη διαφορά πίεσης μεταξύ των δύο πλευρών των πτερυγίων. Επίσης, στα διανύσματα ταχύτητας παρατηρείται αύξηση εκεί που υπάρχει και μείωση της πίεσης, όπως είναι αναμενόμενο. Στο πίσω μέρος των πτερυγίων, σε ύψος 0,35 R, παρατηρείται μεγάλη μείωση της ταχύτητας του ρευστού, προκαλώντας αποκόλληση της ροής.

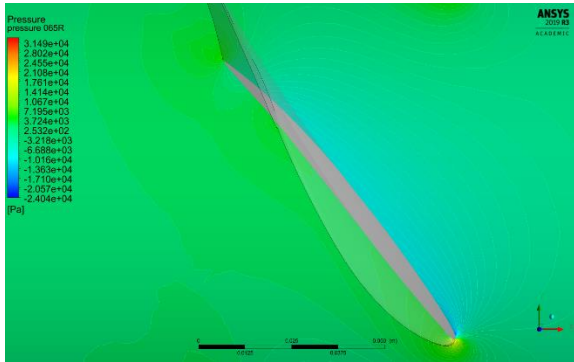
$$J = 1,0$$



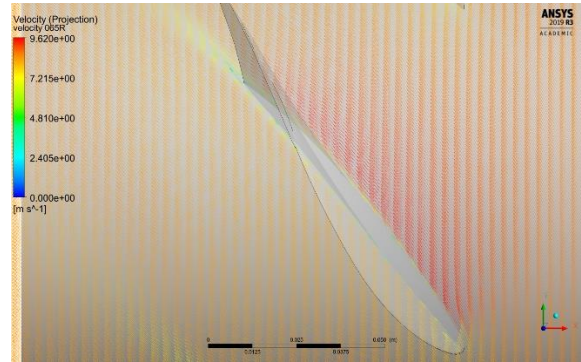
Σχήμα 4.66: Κατανομή πίεσης (0,35 R)



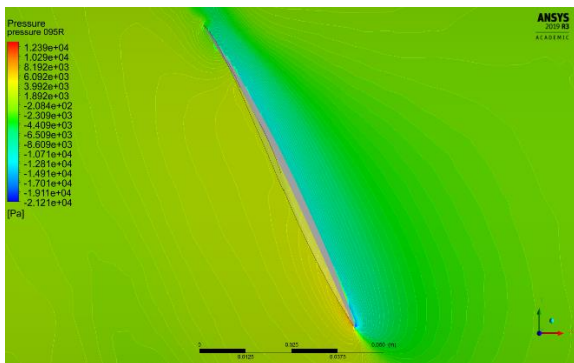
Σχήμα 4.67: Διανύσματα ταχύτητας (0,35 R)



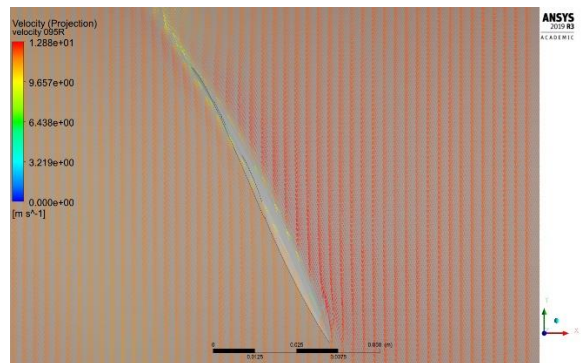
Σχήμα 4.68: Κατανομή πίεσης (0,65 R)



Σχήμα 4.69: Διανύσματα ταχύτητας (0,65 R)



Σχήμα 4.70: Κατανομή πίεσης (0,95 R)

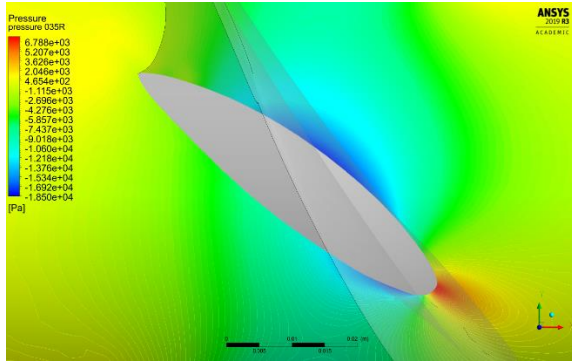


Σχήμα 4.71: Διανύσματα ταχύτητας (0,95 R)

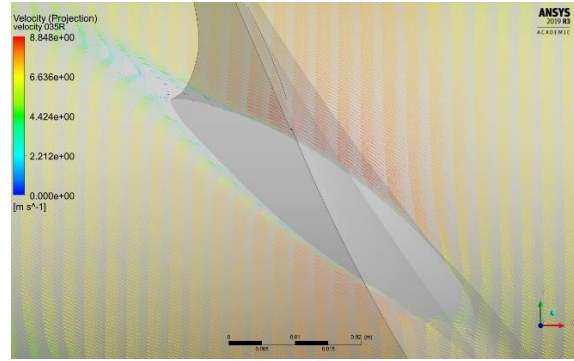
Η γωνία προσβολής, στην περίπτωση του συντελεστή πρόωσης 1,0, έχει μειωθεί αρκετά. Αυτό δικαιολογεί τη φθίνουσα πορεία των συντελεστών ώσης και ροπής στα αντίστοιχα διαγράμματα, καθώς η μικρότερη γωνία προσβολής οδηγεί σε μικρότερες δυνάμεις οπισθέλκουσας και άνωσης. Το ίδιο ισχύει και στην περίπτωση του συντελεστή πρόωσης 1,4.

Τέλος, με αύξηση του συντελεστή πρόωσης, παρατηρείται να συνεχίζει η ροή να αποκολλάται στο πίσω μέρος της επιφάνειας υποπίεσης, χαμηλά του περυγίου, σε ακτίνα 0,35 της συνολικής ακτίνας της προπέλας. Η μείωση της γωνίας πρόσπτωσης θα μπορούσε να έχει επανακολλήσει τη ροή στο περύγιο, αλλά η αύξηση της ταχύτητας της ροής ευνοεί το φαινόμενο.

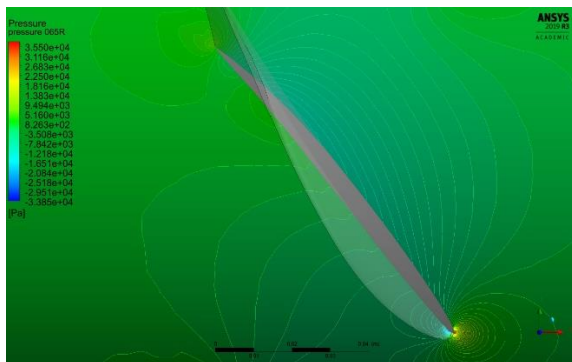
$$J = 1,4$$



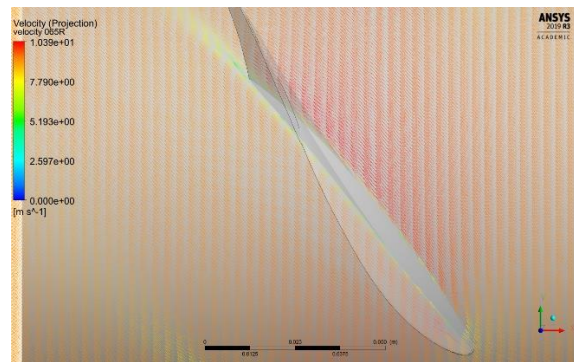
Σχήμα 4.72: Κατανομή πίεσης (0,35 R)



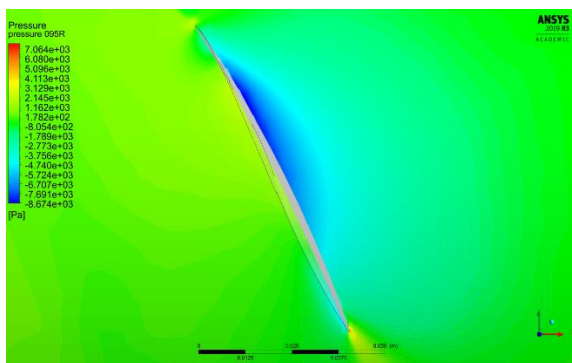
Σχήμα 4.73: Διανύσματα ταχύτητας (0,35 R)



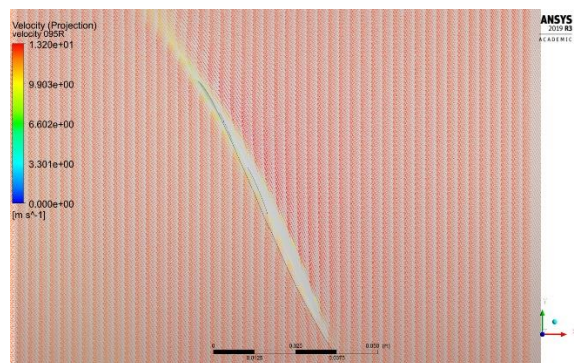
Σχήμα 4.74: Κατανομή πίεσης (0,65 R)



Σχήμα 4.75: Διανύσματα ταχύτητας (0,65 R)



Σχήμα 4.76: Κατανομή πίεσης (0,95 R)

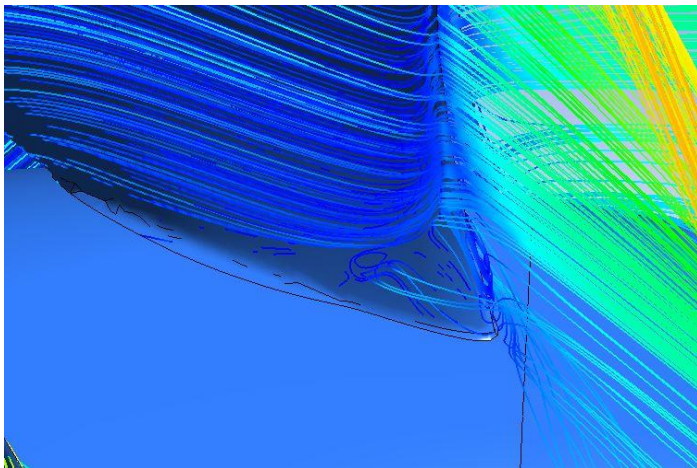


Σχήμα 4.77: Διανύσματα ταχύτητας (0,95 R)

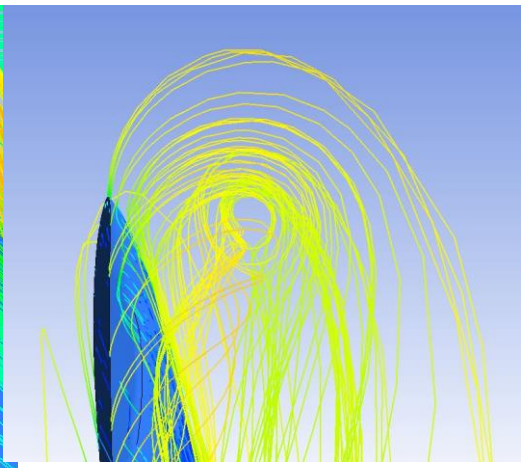
5 ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ

5.1 Αξιολόγηση VP1304

Κατά την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης της VP1304 προπέλας παρατηρήθηκαν δύο φαινόμενα, τα οποία θεωρητικά επιδρούν αρνητικά την απόδοση της προπέλας. Αξίζει να σημειωθεί ότι αυτά τα φαινόμενα φαίνεται να παρουσιάζονται στην πλειοψηφία των ναυτικών προπελών. Αρχικά, παρατηρείται μία αποκόλληση της ροής στην επιφάνεια υποπίεσης κοντά στον άξονα περιστροφής της προπέλας (σχήμα 5.1). Επιπλέον, δημιουργείται μία δίνη στο άκρο των πτερυγίων, καθώς το ρευστό έχει την τάση να μεταβεί από την περιοχή υψηλότερης στην περιοχή χαμηλότερης πίεσης, όπως ακριβώς συμβαίνει και στο άκρο του πτερυγίου ενός αεροπλάνου (σχήμα 5.2). Παρακάτω παρουσιάζονται η σχεδίαση και ανάλυση γεννητριών στροβίλων και φράκτη ακροπτερυγίου αντίστοιχα, στην απόπειρα μείωσης των φαινομένων αυτών, με σκοπό τη βελτίωση του βαθμού απόδοσης της προπέλας στις ήδη υπάρχουσες συνθήκες.



Σχήμα 5.1: Αποκόλληση της ροής κοντά στον άξονα περιστροφής της προπέλας



Σχήμα 5.2: Δημιουργία δίνης στο άκρο των πτερυγίων

5.2 Γεννήτριες στροβίλων

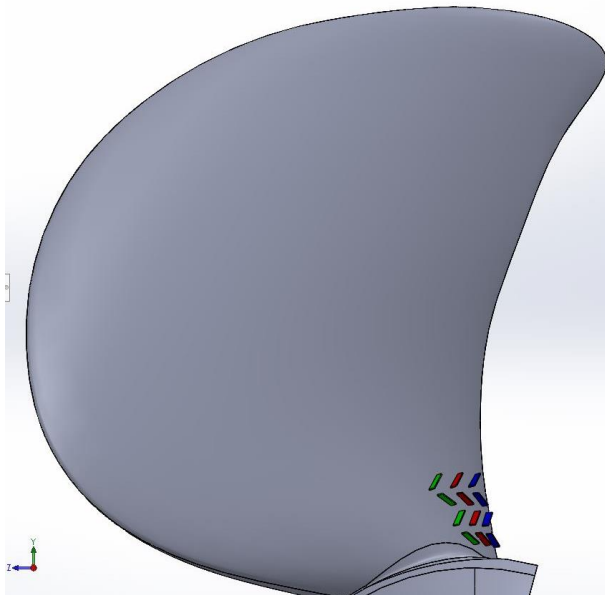
5.2.1 Δημιουργία

Η ροή αποκολλάται πολύ χαμηλά στα πτερύγια της προπέλας και γίνεται αισθητή στο πίσω τμήμα των πτερυγίων. Όπως είναι λογικό, σε μικρότερο συντελεστή πρόωσης η αποκόλληση συμβαίνει σε μεγαλύτερο εύρος των πτερυγίων της προπέλας, και αντίστροφα. Με τη χρήση του λογισμικού Solidworks σχεδιάστηκαν γεννήτριες στροβίλων επάνω στην επιφάνεια υποπίεσης των πτερυγίων σε

τρεις διαφορετικές αποστάσεις (x/c) από το σημείο προσβολής. Οι διαστάσεις και οι θέσεις των γεννητριών στροβίλων παρουσιάζονται στον πίνακα 5.1.

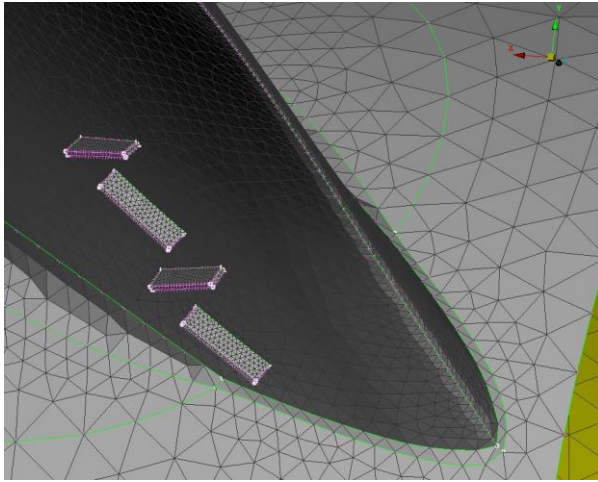
Πίνακας 5.1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά γεννητριών στροβίλων

	αριθμός γεννητριών	x/c	r/R min	r/R max	μήκος (mm)	πλάτος (mm)	πάχος (mm)	γωνίες τοποθέτησης (°)
A	4	0,7	0,325	0,45	4	1	0,2	30 - 150
B	4	0,8	0,325	0,45	4	1	0,2	30 - 150
Γ	4	0,9	0,325	0,45	4	1	0,2	30 - 150



Σχήμα 5.3: Οι θέσεις των γεννητριών δίνης επάνω στο πτερύγιο της προπέλας, σχεδιασμένες στο λογισμικό Solidworks. Η Α περίπτωση απεικονίζεται με πράσινο, η Β με κόκκινο και η Γ με μπλε.

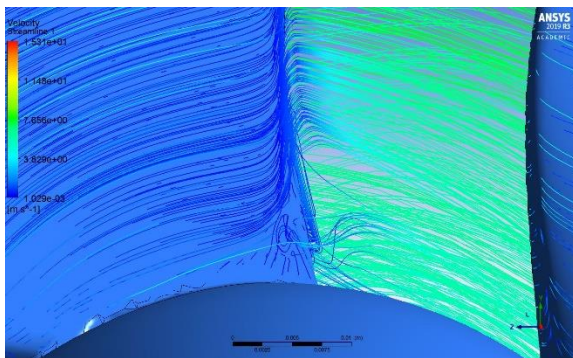
Η δημιουργία του πλέγματος έγινε με τον ίδιο τρόπο που περιγράφηκε παραπάνω, με το μήκος των στοιχείων στις γεννήτριες να είναι 0,2 χιλιοστά, καθώς είναι πολύ λεπτές για να εφαρμοστεί το μήκος των 0,5 χιλιοστών, που ισχύει στις άκρες των πτερυγίων. Όλα τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του πλέγματος και των οριακών συνθηκών είναι ίδια με την περίπτωση E, με την οποία συγκρίνονται τα οι τρεις περιπτώσεις ξεχωριστά.



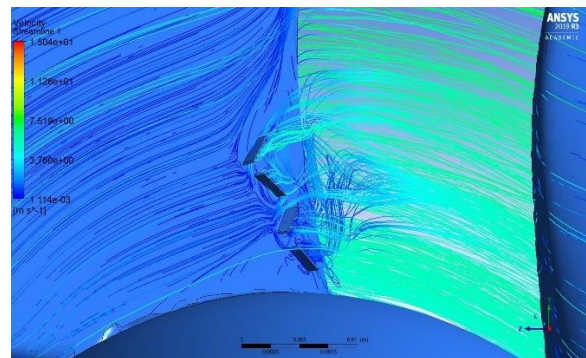
Σχήμα 5.4: Διακριτοποίηση επιφάνειας φράκτη ακροπτερυγίου

5.2.2 Αποτελέσματα

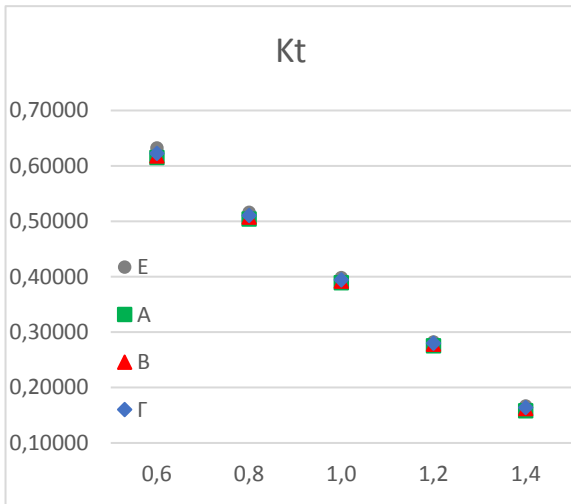
Η επίδραση των γεννητριών στροβίλων, με το συγκεκριμένο τρόπο τοποθέτησης, φαίνεται να είναι αρνητική, καθώς μειώνονται η ώση και η απαιτούμενη ροπή της προπέλας, δίνοντας έναν χαμηλότερο βαθμό απόδοσης. Επιπλέον παρατηρείται ότι όσο πιο πίσω είναι τοποθετημένες οι γεννήτριες τόσο μικρότερη είναι η επίδρασή τους στα αποτελέσματα, όπως δείχνουν τα σχήματα 5.1 έως 5.6. Παράλληλα, στα σχήματα 5.5 και 5.6 είναι ευδιάκριτη η δημιουργία δινών από τις γεννήτριες, αλλά δεν επαρκεί για την εξάλειψη, ή έστω τη μείωση του φαινομένου της αποκόλλησης.



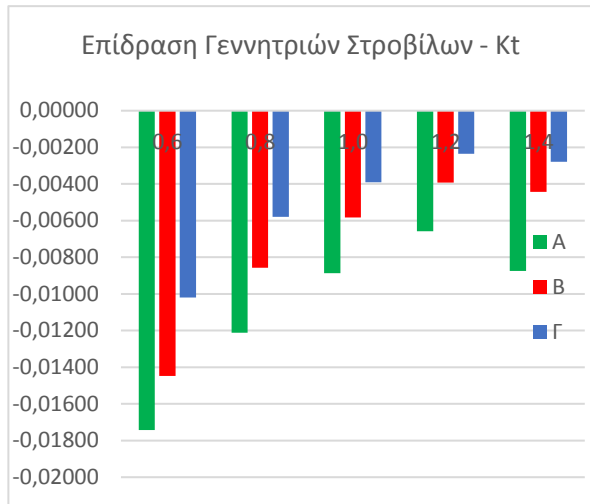
Σχήμα 5.5: Αποκόλληση χωρίς γεννήτριες στροβίλων | J 1,4



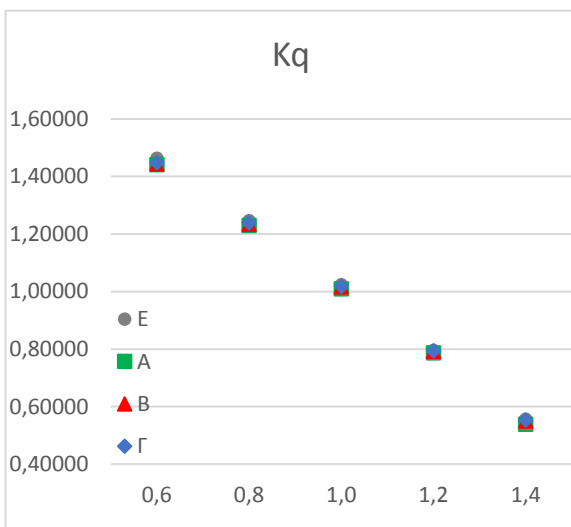
Σχήμα 5.6: Αποκόλληση με γεννήτριες στροβίλων | J 1,4 (περίπτωση Β)



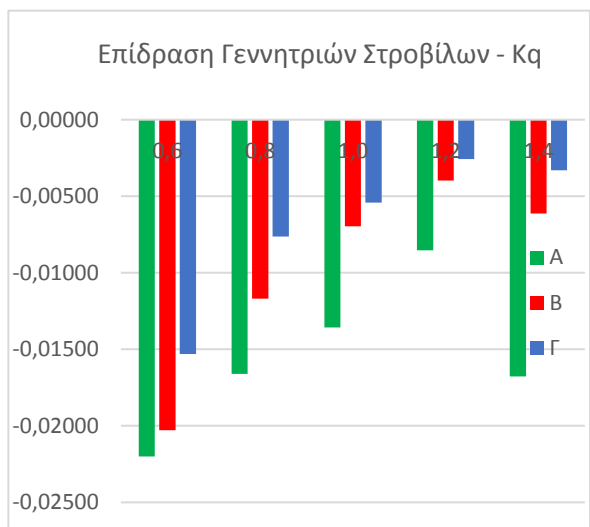
Σχήμα 5.7: Kt, χωρίς και με γεννήτριες στροβίλων



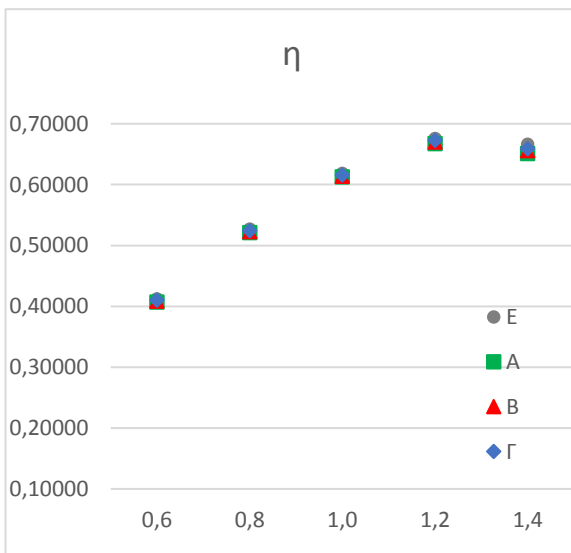
Σχήμα 5.8: Επίδραση γεννητριών στροβίλων στο Kt



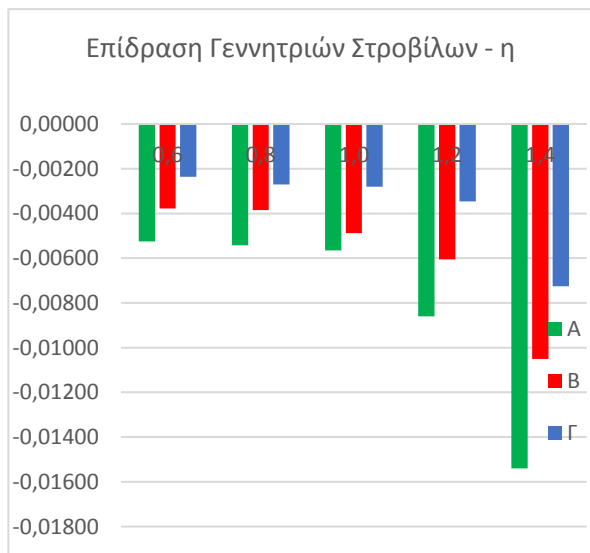
Σχήμα 5.9: Kq, χωρίς και με γεννήτριες στροβίλων



Σχήμα 5.10: Επίδραση γεννητριών στροβίλων στο Kq



Σχήμα 5.11: Απόδοση, χωρίς και με γεννήτριες στροβίλων

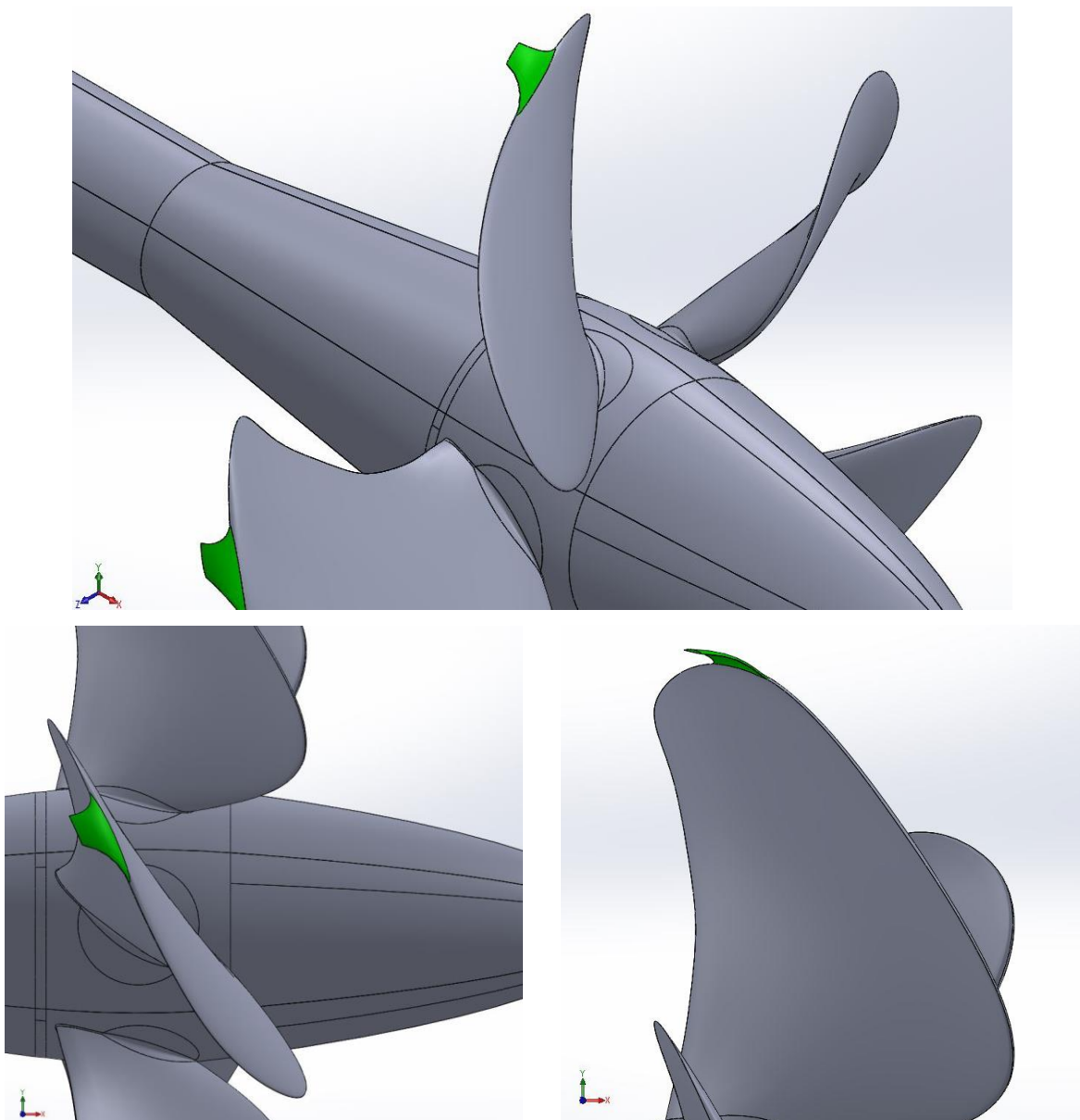


Σχήμα 5.12: Επίδραση γεννητριών στροβίλων στην απόδοση

5.3 Φράκτης ακροπτερυγίων

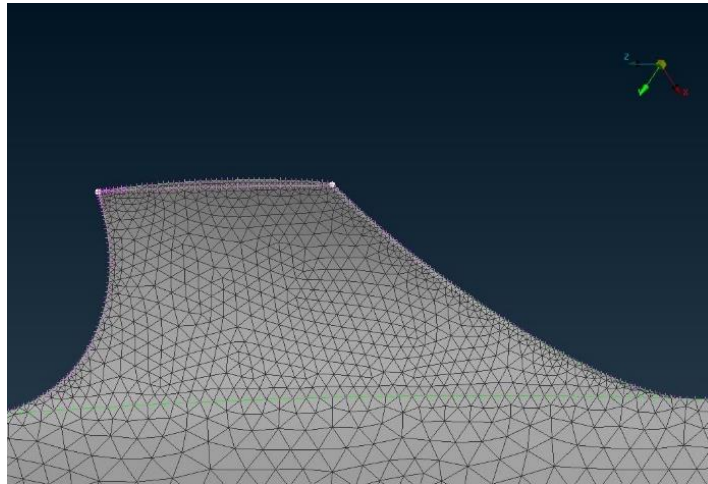
5.3.1 Δημιουργία

Η παραγόμενη δίνη φαίνεται να ξεκινάει από πολύ μπροστά και χαμηλά στις μικρές τιμές του συντελεστή πρόωσης, καθώς η γωνία πρόσπτωσης είναι μεγαλύτερη σε μικρότερες ταχύτητες πρόωσης, για σταθερή περιστροφική ταχύτητα. Στις μεγάλες τιμές του συντελεστή πρόωσης η δίνη είναι μικρότερη και εμφανίζεται μόνο στο άκρο των πτερυγίων. Με τη χρήση του λογισμικού Solidworks σχεδιάστηκε ο φράκτης ακροπτερυγίων, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.13. Σκοπός είναι η μείωση του μεγέθους της δίνης που παράγεται κατά τη λειτουργία της προπέλας και αναμένεται η επίδραση του φράκτη να αυξάνεται με αύξηση του συντελεστή πρόωσης.



Σχήμα 5.13: Ο φράκτης ακροπτερυγίων σχεδιασμένος στο λογισμικό Solidworks

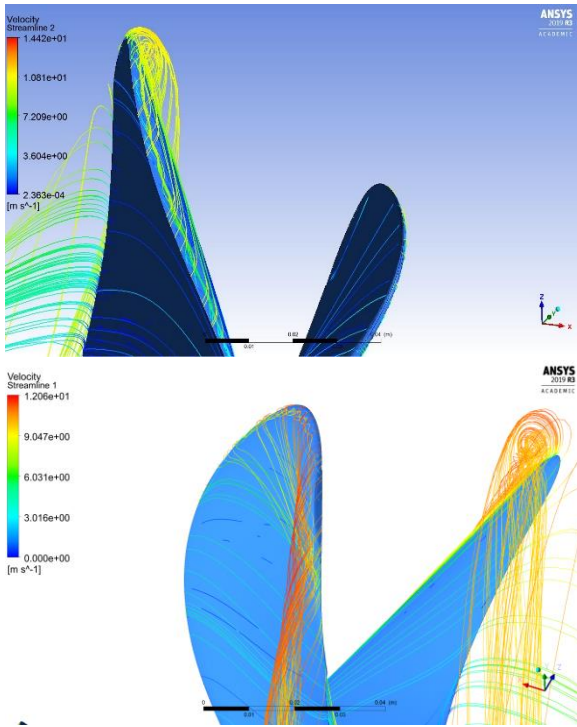
Η δημιουργία του πλέγματος έγινε με τον ίδιο τρόπο που περιγράφηκε παραπάνω, με το μήκος των στοιχείων στις άκρες του φράκτη να είναι 0,2 χιλιοστά, καθώς είναι πολύ λεπτός (0,6 χιλιοστά) για να εφαρμοστεί το μήκος των 0,5 χιλιοστών, που ισχύει στις άκρες του υπόλοιπου πτερυγίου. Όλα τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του πλέγματος και των οριακών συνθηκών είναι ίδια με την περίπτωση E, με την οποία συγκρίνεται το μοντέλο.



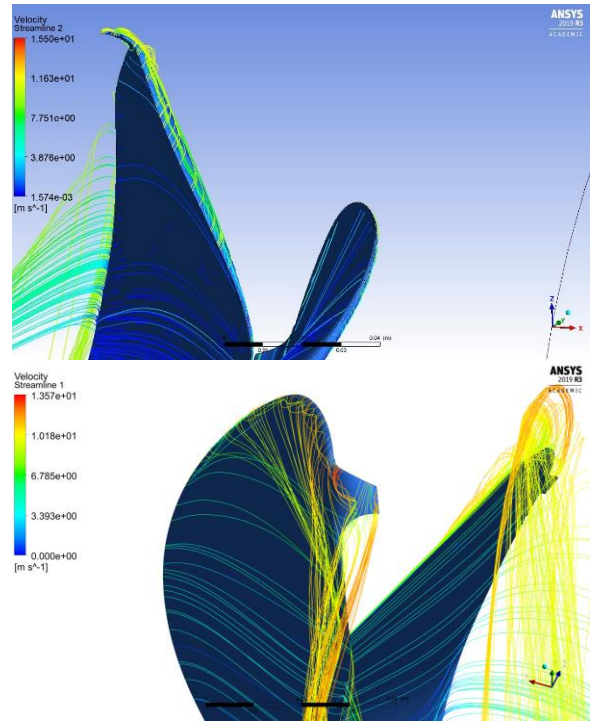
Σχήμα 5.14: Διακριτοποίηση επιφάνειας φράκτη ακροπτερυγίου

5.3.2 Αποτελέσματα

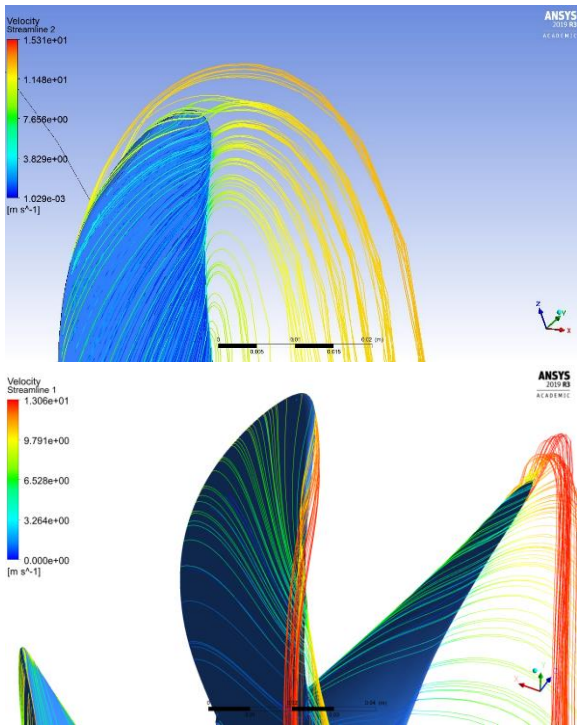
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για την περίπτωση του φράκτη ακροπτερυγίων, δείχνουν ότι η τοποθέτησή του προκαλεί μεγαλύτερη ώθηση της προπέλας στο ρευστό, απαιτώντας περισσότερη ροπή για την περιστροφή της. Εν τέλει ο βαθμός απόδοσης της προπέλας με την προσθήκη του φράκτη ακροπτερυγίων είναι μεγαλύτερος σε σχέση με την προπέλα χωρίς αυτόν, και στην περίπτωση του $J=1,4$ κατά 1,46%. Επιπλέον, όπως φαίνονται στα σχήματα 5.16 και 5.18, η δημιουργία της δίνης στο άκρο των πτερυγίων ελαττώνεται. Για $J=0.6$, όπου η δίνη προκαλείται σε μεγαλύτερο εύρος της προπέλας, η επίδραση του φράκτη είναι μικρή. Στην περίπτωση του $J=1,4$ η επίδραση του φράκτη μεγιστοποιείται, καθώς η δίνη σχεδόν εξαλείφεται.



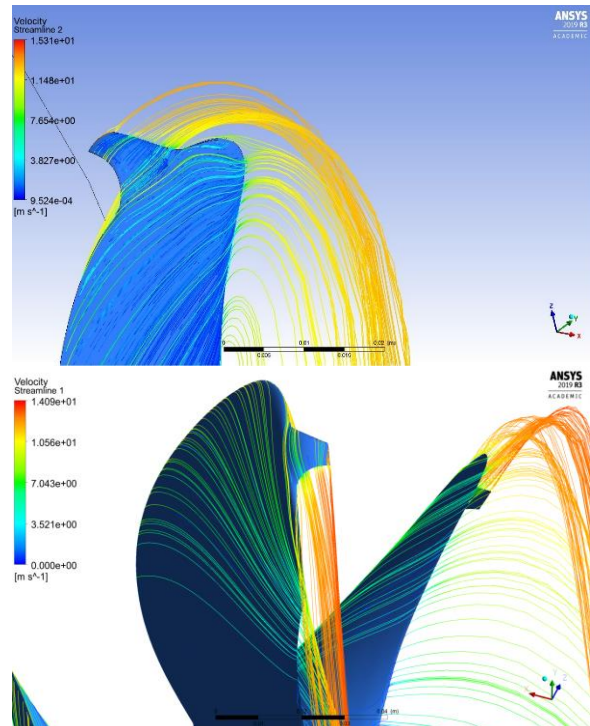
Σχήμα 5.15: Δίνη χωρίς φράκτη ακροπτερυγίου (J 0,6)



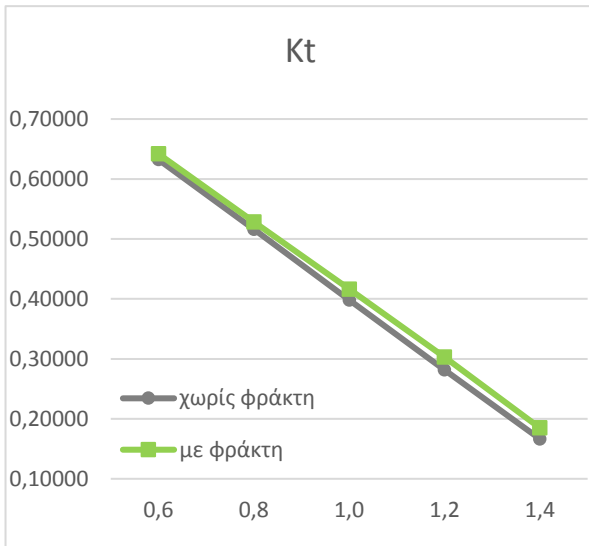
Σχήμα 5.16: Δίνη με φράκτη ακροπτερυγίου (J 0,6)



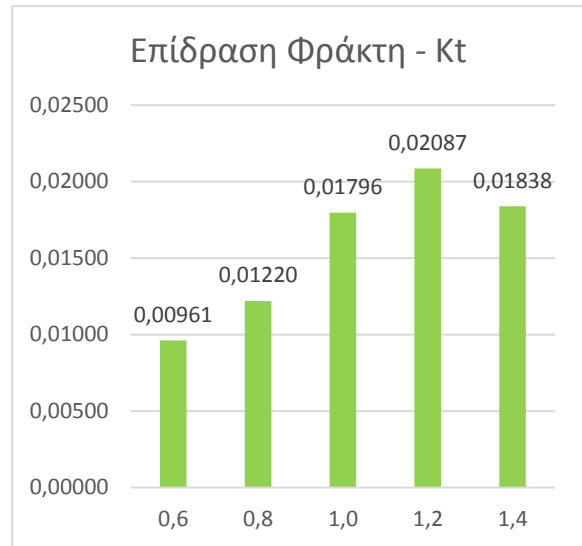
Σχήμα 5.17: Δίνη χωρίς φράκτη ακροπτερυγίου (J 1,4)



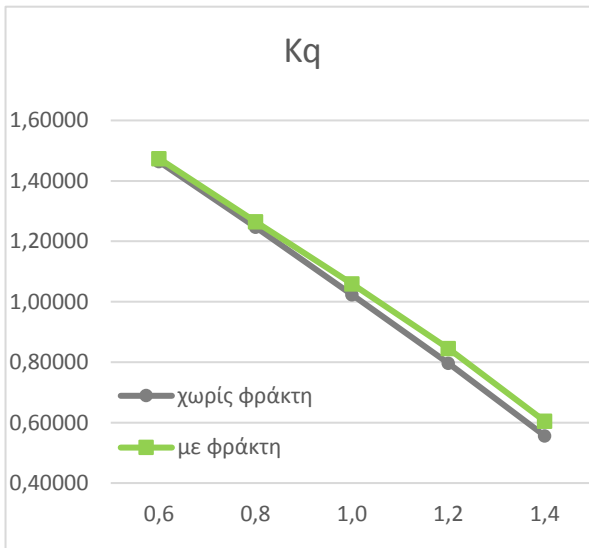
Σχήμα 5.18: Δίνη με φράκτη ακροπτερυγίου (J 1,4)



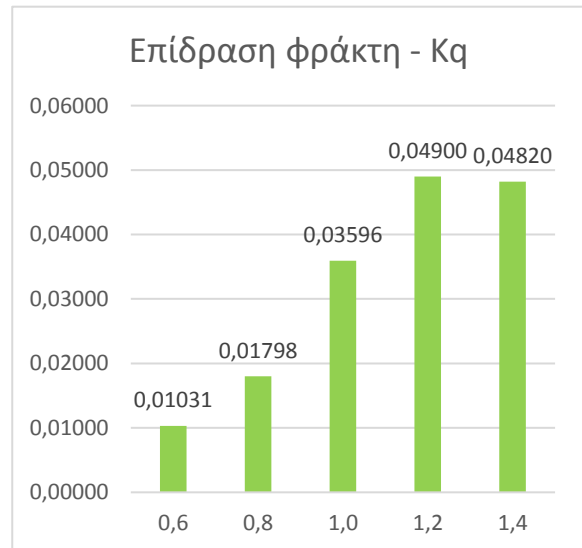
Σχήμα 5.19: Συντελεστής ώσης, χωρίς και με φράκτη



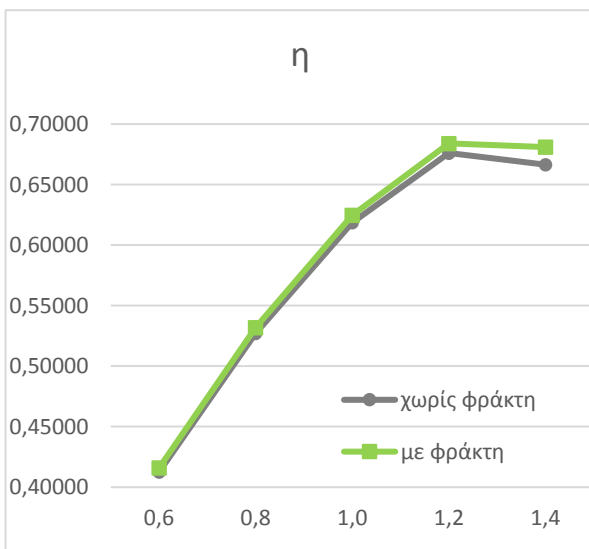
Σχήμα 5.20: Επίδραση φράκτη στο συντελεστή ώσης



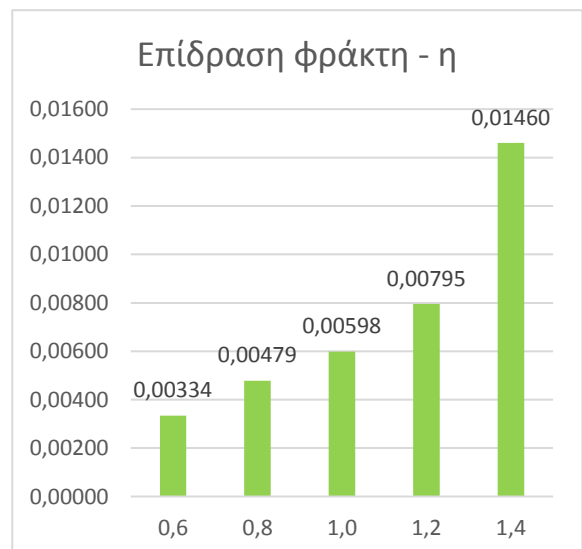
Σχήμα 5.21: Συντελεστής ροπής, χωρίς και με φράκτη



Σχήμα 5.22: Επίδραση φράκτη στο συντελεστή ροπής



Σχήμα 5.23: Βαθμός απόδοσης, χωρίς και με φράκτη



Σχήμα 5.24: Επίδραση φράκτη στο βαθμό απόδοσης

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 3.1, η εκμετάλλευση των διαθέσιμων πειραματικών δεδομένων, από το ίδρυμα SVA, βοήθησε απόλυτα στην εκτίμηση του σφάλματος των προσομοιώσεων. Στην περίπτωση της παρούσας εργασίας το μέγιστο σφάλμα βρίσκεται κοντά στο 11%, γεγονός το οποίο πρέπει να ληφθεί υπόψη στην εγκυρότητα των προσομοιώσεων του πέμπτου κεφαλαίου.

Στην προσπάθεια ανάλυσης του παραπάνω σφάλματος, παρατηρείται ότι με αύξηση του συντελεστή πρόωσης (J) επέρχεται και αύξηση της απόκλισης του βαθμού απόδοσης από τα πειραματικά δεδομένα. Αυτό δείχνει ότι η ταχύτητα επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τα αποτελέσματα των αναλύσεων, για το συγκεκριμένο πλέγμα. Προφανώς μπορούν να γίνουν πολλές βελτιώσεις όσον αφορά τη διακριτοποίηση του όγκου ελέγχου. Αρχικά, η συμμετρία της προπέλας μπορεί να αξιοποιηθεί, μοντελοποιώντας μόνο το ένα πέμπτο της, δηλαδή ένα κομμάτι 72 μοιρών από τις 360, μειώνοντας στο ένα πέμπτο και τον αριθμό των στοιχείων όγκου του πλέγματος. Τοιουτοτρόπως, η πυκνότερη διακριτοποίηση γίνεται εφικτή, κυρίως σε πολύ λεπτά σημεία όπως οι άκρες των πτερυγίων, χωρίς να αυξάνονται τα στοιχεία του πλέγματος τόσο ώστε να απαιτούν παράλογα πολλή υπολογιστική ισχύ. Επιπλέον, με την ανάλυση περισσότερων περιπτώσεων της διακριτοποίησης του οριακού στρώματος, αποκτάται πιο ολοκληρωμένη εικόνα του συγκεκριμένου θέματος, οδηγώντας ίσως σε προσομοίωση που αντιπροσωπεύει την πραγματικότητα καλύτερα. Τα παραπάνω μπορούν να συμβάλλουν στη μείωση της απόκλισης των αποτελεσμάτων των αναλύσεων, βοηθώντας να εξάγουμε συμπεράσματα με μεγαλύτερη βεβαιότητα για το πέμπτο κεφάλαιο.

Όσον αφορά το πέμπτο κεφάλαιο, έγινε προσπάθεια εξάλειψης δύο φαινομένων στην απόπειρα βελτίωσης του βαθμού απόδοσης, της αποκόλλησης της ροής στο χαμηλό τμήμα των πτερυγίων και της δημιουργίας δινών στο άκρο τους.

Για την αποκόλληση της ροής, οι τρεις περιπτώσεις γεννητριών στροβίλων δε βοήθησαν, αντίθετα οδήγησαν σε μικρότερο βαθμό απόδοσης. Η δημιουργία παραπάνω περιπτώσεων, λαμβάνοντας υπόψη τη γωνία τοποθέτησης, το πάχος και το ύψος των γεννητριών, σε συνδιασμό με την απόσταση x/c , θα μπορούσε να δώσει λύση στο πρόβλημα της αποκόλλησης της ροής.

Από την άλλη, ο φράκτης ακροπτερυγίων έδειξε να μειώνει σε μεγάλο βαθμό το πρόβλημα της δημιουργίας δινών στο άκρο των πτερυγίων, με επερχόμενη αύξηση του βαθμού απόδοσης. Μία τέτοια βελτίωση έχει σημαντικά θετική επίδραση στη ναυσιπλοΐα. Αρχικά, η αύξηση του βαθμού απόδοσης οδηγεί σε μείωση της κατανάλωσης του καυσίμου, η οποία με τη σειρά της συμβάλλει στη μείωση του κόστους χρήσης των πλοίων και της παραγωγής καυσαερίων. Επιπλέον, για την

περίπτωση των ηλεκτρικών σκαφών, συμβάλλει στην αυτονομία τους, θέμα καίριο στην εποχή εξέλιξης της ηλεκτροκίνησης.

Είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψη το σφάλμα των προσομοιώσεων και να γίνει αντιληπτό ότι τα θετικά αποτελέσματα της προσθήκης φράκτη ακροπτερυγίων πιθανόν να είναι παραπλανητικά. Για το λόγο αυτό, προτείνεται η αξιολόγησή τους σε πειραματική διάταξη, η οποία θα εξαλείψει οποιονδήποτε ενδοιασμό υπάρχει για τη συμβολή τους στην απόδοση της προπέλας.

Επιπλέον, η παρουσία του φράκτη ακροπτερυγίων μπορεί να συμβάλλει στη μείωση του φαινομένου της σπηλαίωσης λόγω δινών ακροπτερυγίου και κατ' επέκταση του παραγώμενου θορύβου. Προτείνεται η ανάλυση του φαινομένου και η εκτίμηση της συμβολής του φράκτη ακροπτερυγίων στην εξάλειψη του φαινομένου.

Τέλος, κρίνεται σημαντική η δομική ανάλυση της προπέλας με φράκτη ακροπτερυγίων για την εκτίμηση των ταλαντώσεων και των τάσεων που δέχεται από το ρευστό. Συγκεκριμένα, ο φράκτης ακροπτερυγίων είναι πολύ λεπτός, με πάχος περίπου 0,5 χιλιοστό στη άκρη του και το σημείο ένωσής του με την υπόλοιπη προπέλα μπορεί να απαιτεί ενίσχυση.

7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Carlton J., 2012. Marine Propellers and Propulsion. 3rd ed. Oxford: Elsevier
- [2] White F., 2011. Fluid Mechanics. 7th ed. New York: McGraw-Hill
- [3] Cengel Y. and Cimbala J., Μηχανική Ρευστών Θεωρία και Εφαρμογές. Μεταφράστηκε από Αγγλικά από Ι. Κόλιας, Ν. Λαγανοπούλου και Μ. Γρηγορίου Φούντα. Αθήνα: FountasBooks
- [4] Λουκάκης Θ., Δόδουλας Α. και Κουρεμένος Κ., 2016. Πρόωση Πλοίου. Α΄ Έκδοση. Αθήνα: ΣΕΑΒ
- [5] ANSYS CFX-Pre User's Guide. Release 14.0. 2011. Canonsburg: ANSYS
- [6] ANSYS CFX-Solver Theory Guide. Release 14.0. 2011. Canonsburg: ANSYS
- [7] ANSYS CFX-Solver Modelling Guide. Release 14.0. 2011. Canonsburg: ANSYS
- [8] ANSYS CFX-Post User's Guide. Release 18.0. 2017. Canonsburg: ANSYS
- [9] SVA smp'11 workshop - <https://www.sva-potsdam.de/en/pptc-smp11-workshop/>
- [10] Bosschers J., 2018. Propeller Tip-Vortex Cavitation and its Broadband Noise. The Netherlands: Print Service Ede BV
- [11] <https://blog.greencarrier.com/the-importance-of-shipping-in-the-transportation-industry/>
- [12] Δαμκαλή Ρ., 2019. Υπολογιστική διερεύνηση μικρού ελικοειδούς υδροστροβίλου για αξονικά ρεύματα. Κοζάνη: Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας
- [13] Παναγιώτου Ι., 2019. Υπολογιστική μελέτη του φαινομένου της δίνης στο ακροπτερύγιο αεροσκάφους πολιτικής αεροπορίας. Κοζάνη: Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας

8 ΚΩΔΙΚΑΣ MATLAB

```
clc
clear all
%-----ΔΕΔΟΜΕΝΑ-----
n = 15; %γωνιακή ταχύτητα προπέλας [rev/s]
J = [0.6 0.8 1.0 1.2 1.4]; %συντελεστής πρόωσης
D = 0.25; %διάμετρος προπέλας [m]
Va = n*D*J; %ταχύτητα ρευστού [m/s]
visc = 0.00000107; %κινηματικό ιξώδες [m^2/s]

%-----ΑΠΟ SOLIDWORKS-----
d_D = [0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 0.95]; %r/R τομές
sections = d_D*D; %διάμετρος r/R τομών [m]
Vr = n*pi*sections; %γραμμική ταχύτητα προπέλας σε κάθε τομή[m/s]
L = [68.16 83.26 95.62 105.18 107.83 104.66 94.54]; %μήκος τομών πτερυγίου [mm]
L1 = L/1000; %μήκος τομών πτερυγίου [m]
L2 = 4*L/5000; %μήκος τομών πτερυγίου [m]

%-----ΥΠΟΛΟΓΟΣΜΟΙ κατά Cengel-----
V1 = zeros(length(d_D),length(J));
th1 = zeros(length(d_D),length(J));
Re1 = zeros(length(d_D),length(J));
delta1 = zeros(length(d_D),length(J));
tirvi1 = zeros(length(d_D),length(J));
for j=1:length(J)
    for i=1:length(d_D)
        th1(i,j) = atan(Vr(i)/Va(j)); %γωνία τριγώνου ταχυτήτων
        V1(i,j) = Vr(i)/sin(th1(i,j)); %ταχύτητα πρόσπτωσης [m/s]
        Re1(i,j) = V1(i,j)*L1(i)/visc;
        if Re1(i,j)<=500000
            delta1(i,j) = 1000*4.91*L1(i)/sqrt(Re1(i,j));
        else
            delta1(i,j) = 1000*0.38*L1(i)/(Re1(i,j)^(1/5));
            tirvi1(i,j) = 1;
        end
    end
end

%-----ΥΠΟΛΟΓΟΣΜΟΙ κατά White-----
V2 = zeros(length(d_D),length(J));
th2 = zeros(length(d_D),length(J));
Re2 = zeros(length(d_D),length(J));
delta2 = zeros(length(d_D),length(J));
tirvi2 = zeros(length(d_D),length(J));
for j=1:length(J)
    for i=1:length(d_D)
        th2(i,j) = atan(Vr(i)/Va(j)); %γωνία τριγώνου ταχυτήτων
        V2(i,j) = Vr(i)/sin(th2(i,j)); %ταχύτητα πρόσπτωσης [m/s]
        Re2(i,j) = V2(i,j)*L1(i)/visc;
        if Re2(i,j)<=1000000
            delta2(i,j) = 1000*5*L1(i)/sqrt(Re2(i,j));
        else
            delta2(i,j) = 1000*0.16*L1(i)/(Re2(i,j)^(1/7));
            tirvi2(i,j) = 1;
        end
    end
end
```

```

%-----4/5 L-----
%-----ΥΠΟΛΟΓΟΣΜΟΙ κατά Cengel-----
V3 = zeros(length(d_D),length(J));
th3 = zeros(length(d_D),length(J));
Re3 = zeros(length(d_D),length(J));
delta3 = zeros(length(d_D),length(J));
tirvi3 = zeros(length(d_D),length(J));
for j=1:length(J)
    for i=1:length(d_D)
        th3(i,j) = atan(Vr(i)/Va(j)); %γωνία τριγώνου ταχυτήτων
        V3(i,j) = Vr(i)/sin(th3(i,j)); %ταχύτητα πρόσπτωσης [m/s]
        Re3(i,j) = V3(i,j)*L2(i)/visc;
        if Re3(i,j)<=500000
            delta3(i,j) = 1000*4.91*L2(i)/sqrt(Re3(i,j));
        else
            delta3(i,j) = 1000*0.38*L2(i)/(Re3(i,j)^(1/5));
            tirvi3(i,j) = 1;
        end
    end
end

%-----ΥΠΟΛΟΓΟΣΜΟΙ κατά White-----
V4 = zeros(length(d_D),length(J));
th4 = zeros(length(d_D),length(J));
Re4 = zeros(length(d_D),length(J));
delta4 = zeros(length(d_D),length(J));
tirvi4 = zeros(length(d_D),length(J));
for j=1:length(J)
    for i=1:length(d_D)
        th4(i,j) = atan(Vr(i)/Va(j)); %γωνία τριγώνου ταχυτήτων
        V4(i,j) = Vr(i)/sin(th4(i,j)); %ταχύτητα πρόσπτωσης [m/s]
        Re4(i,j) = V4(i,j)*L2(i)/visc;
        if Re4(i,j)<=1000000
            delta4(i,j) = 1000*5*L2(i)/sqrt(Re4(i,j));
        else
            delta4(i,j) = 1000*0.16*L2(i)/(Re4(i,j)^(1/7));
            tirvi4(i,j) = 1;
        end
    end
end
end

```