



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ

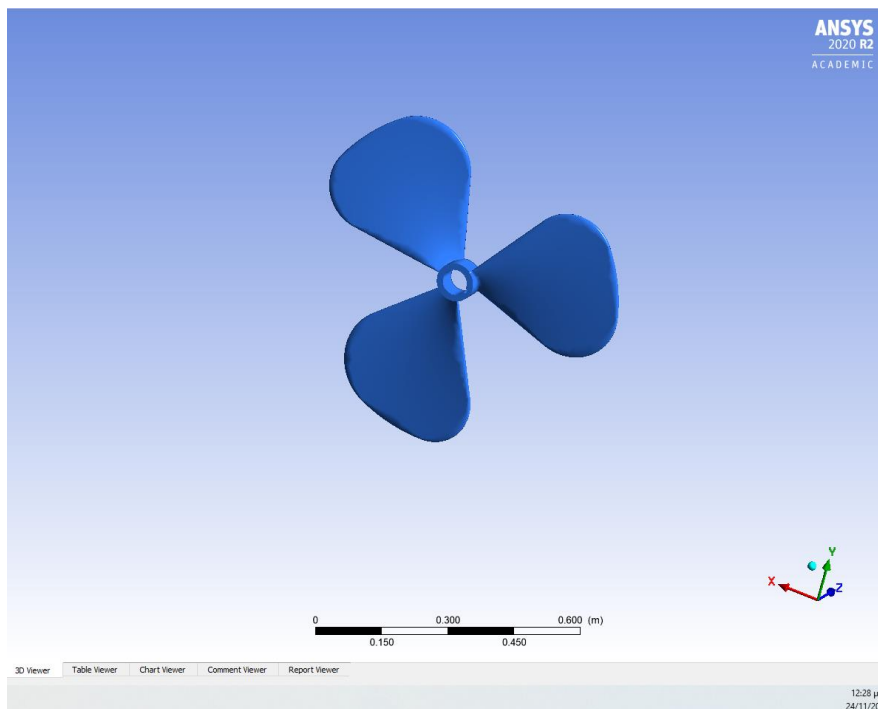
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΗΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΠΡΟΠΕΛΑ ΠΛΟΙΟΥ ΜΕ ΜΕΘΟΔΟΥΣ

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ



ΟΝΟΜΑ: ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΕΠΩΝΥΜΟ: ΠΑΛΛΗΣ

ΑΜ:6193

Επιβλέπων καθηγητής: ΕΥΓΕΝΙΟΣ ΣΚΟΥΡΑΣ

Πάτρα 2021



## Ευχαριστίες

Θα ήθελα αρχικά να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, Ευγένιο Σκούρα, με την καθοδήγηση και τις υποδείξεις του οποίου εκπονήθηκε η συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένειά μου για όλη τη στήριξη που έχω λάβει κατά τα φοιτητικά μου χρόνια αλλά και όλους όσους στάθηκαν στο πλευρό μου κατά τα φοιτητικά μου χρόνια, φίλους και συμφοιτητές. Η συνεισφορά τους ήταν πολύτιμη.

## Περίληψη

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται την προσομοίωση προπέλας πλοίου με πεπερασμένα στοιχεία με την βοήθεια του λογισμικού ANSYSWORKBENCH 2020 R2(FLUIDFLUENT).

Πιο αναλυτικά στη συγκεκριμένη εργασία αναπτύχθηκαν τα εξής θέματα:

Στο κεφάλαιο ένα γίνεται με συνεκτική αναφορά στις βασικές έννοιες όπως πρόωση ,ναυσιπλοΐα αλλά αναφέρονται επίσης και η ιστορία των πλοίων και πως αυτά αναπτύχθηκαν και εξελιχθήκαν μέσα στο χρόνο.

Στο κεφάλαιο δύο αναφέρονται αναλυτικά οι περισσότεροι και πιο σημαντικοί τύποι μηχανών εσωτερικής καύσης που συναντάμε σήμερα στα σύγχρονα πλοία αλλά και ο τρόπος ο οποίος αυτές δουλεύουν.

Στο κεφάλαιο τρία γίνεται λεπτομερείς αναφορά στο θέμα της εργασίας που είναι η προπέλα του πλοίου. Παρουσιάζονται κατασκευαστικά κριτήρια για το πώς επιλέγεται μια προπέλα πλοίου αλλά και πως υπολογίζονται διάφορα μεγέθη όπως απόδοση και ισχύς.

Στο κεφάλαιο τέσσερα παρουσιάζονται κάποιες από τις βασικές μεθόδους των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιούνται στις αναλύσεις για προσομοίωση ρευστών σε κίνηση.

Στο κεφάλαιο πέντε παρουσιάζεται το μοντέλο όπως αυτό σχεδιάστηκε στο πρόγραμμα SOLIDWORKS.

Στο κεφάλαιο έξι παρουσιάζονται όλα τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση που έγινε.

Και τέλος στο τελευταίο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας αποτελεί ουσιαστικά μια σύνοψη όλων όσων έγιναν γνωστά στην παρούσα εργασία, με συμπυκνωμένο τρόπο, ενώ δίνονται και κάποιες προτάσεις, ώστε μελλοντικές εργασίες να εστιάσουν σε σχετικά με το παρόν θέμα.



## Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	i
Περίληψη.....	ii
Περιεχόμενα.....	iv
Κατάλογος Εικόνων .....	vi
Εισαγωγή .....	1
Κεφάλαιο 1 <sup>ο</sup> : Ιστορική αναδρομή στη ναυσιπλοΐα .....	4
1.1 Η έννοια της πρόωσης.....	4
1.2 Κωπήλατα πλοία .....	4
1.3 Ιστιοφόρα .....	5
1.3 Ατμόπλοια .....	8
1.4 Εμβολοφόροι κινητήρες diesel .....	9
1.6 Αερόστρωμνα (hovercraft).....	10
1.7 Κινητήρες LNG.....	12
1.8 Αεριοστρόβιλοι.....	13
1.9 Πυρηνοκίνητα πλοία .....	15
Κεφάλαιο 2 <sup>ο</sup> : Περιγραφή των εμβολοφόρων ΜΕΚ.....	18
2.1 Κατάταξη των ΜΕΚ .....	23
2.2 Χρήση των πετρελαιομηχανών .....	24
2.3 Ναυτικές μηχανές.....	26
Κεφάλαιο 3 <sup>ο</sup> : Προπέλα Πλοίου .....	29
3.1 Ορισμοί παραμέτρων .....	29
.....	30
3.1.1 Συντελεστής περιοχής δίσκου .....	31
3.1.2 Αριθμός λεπίδων .....	31
3.2 Τύποι και γεωμετρία έλικα .....	32
3.2 Συνθήκες ροής.....	34
3.3 Συντελεστής ώσης, $t$ .....	36
3.3.1 Συντελεστές έλικα .....	37
3.3.2 Αποτελεσματικότητα και παράμετροι που επηρεάζουν .....	39
.....	40
3.3.3 Απόδοση άξονα .....	40

Κεφάλαιο 4 Πεπερασμένα στοιχεία για Ρευστά.....	42
4.1 Μέθοδοι πεπερασμένων διαφορών .....	42
4.2 Μέθοδοι πεπερασμένου όγκου .....	43
4.3 Φασματική μέθοδος.....	44
.....	46
4.4 Υβριδική μέθοδος.....	47
4.5 Εξισώσεις Poisson: Πίεση σε Navier – Stoke .....	48
4.6 Εξισώσεις Poisson.....	48
4.7 Οριακές συνθήκες για αδύναμες εξισώσεις .....	48
4.8 Φυσικές οριακές Συνθήκες .....	49
4.9 Βασικές εξισώσεις πεπερασμένων στοιχείων.....	49
4.10 Προσέγγιση Galerkin .....	50
4.11 Από τοπικό σε ολικό ( GlobaltoLocal) .....	50
4.12 Πρόβλημα πεπερασμένης διαφοράς PoissonMatrix .....	51
4.13 Πρόβλημα PoissonMatrix Πεπερασμένου Όγκου.....	51
Κεφάλαιο 5 Παρουσίαση μοντέλου .....	52
.....	54
Κεφάλαιο 6 Παρουσίαση αποτελεσμάτων Προσομοιώσεις.....	55
6.1 Εισαγωγή μοντέλου στο ANSYS.....	55
.....	58
6.2 Αποτελέσματα.....	61
Συμπεράσματα .....	70
Βιβλιογραφία .....	71

## Κατάλογος Εικόνων

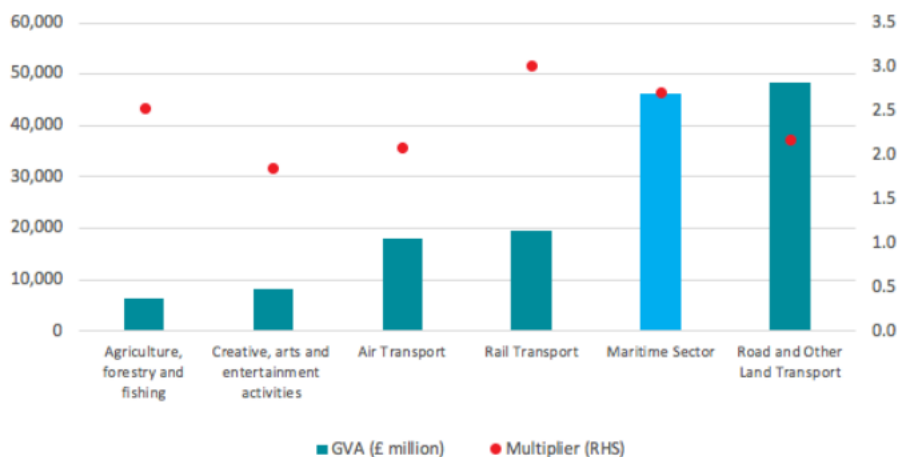
Εικόνα 1: Ο αντίκτυπος της θαλάσσιας οικονομίας στην οικονομία του Ηνωμένου Βασιλείου του 2019 σε σχέση με άλλους κλάδους (πηγή: ADS, ONS, Cebranalysis).....	2
Εικόνα 2: Τυπικό παράδειγμα σύγχρονου ιστιοφόρου αναψυχής (πηγή: Σαρακατσιάνος, 2018).....	7
Εικόνα 3: Τυπικό παράδειγμα επιβατικού hovercraft στη Ρωσία (πηγή: Διαδίκτυο).....	11
Εικόνα 4: Το NB 1376 της VikingLines (πηγή: διαδίκτυο).....	13
Εικόνα 5: Αεριοστρόβιλοι πολεμικού πλοίου του ιταλικού ναυτικού (πηγή: διαδίκτυο).....	14
Εικόνα 6: Αναπαράσταση του πυρηνικού αντιδραστήρα στο εσωτερικό του Savannah (πηγή: διαδίκτυο).....	16
Εικόνα 7: Σύγχρονος κινητήρας οχημάτων εσωτερικής καύσης τη δεκαετία του 1990 (πηγή: διαδίκτυο).....	20
Εικόνα 8: Ο ένας από τους δύο τετράχρονους κινητήρες στο Selandia (πηγή: διαδίκτυο) ...	21
Εικόνα 9: Δεκαεξακύλινδρη μεσόστροφη τετράχρονη πετρελαιομηχανή, ισχύος 11.520 kW (πηγή: διαδίκτυο).....	26
Εικόνα 10: Κλίση και ολίσθηση έλικα.....	29
Εικόνα 11: Απόδοση έλικα και αριθμός λεπίδας. Σημειώστε ότι οι σ.α.λ. είναι σταθερές και συνεπώς η διάμετρος πρέπει να αυξηθεί για να επιτευχθεί η βέλτιστη.....	30
Εικόνα 12: Τύποι προπελών.....	33
Εικόνα 13: Rake and skew.....	34
Εικόνα 14: Προπέλα Kappel.....	36
Εικόνα 15: Advance number.....	37
Εικόνα 16: Απώλειες έλικας. Σημειώστε ότι αυτό είναι μόνο ένα παράδειγμα, υπάρχουν διάφοροι συνδυασμοί ταχύτητας και βήματος σε διαφορετικές σειρές έλικα. ....	40
Εικόνα 17: Συλλογή εξισώσεων σχετικών με την προώθηση και την αποτελεσματικότητα του πλοίου.....	41
Εικόνα 18: Φασματική μέθοδος.....	45
Εικόνα 19: Φασματική μέθοδος.....	45
Εικόνα 20: Φασματική μέθοδος.....	46
Εικόνα 21: Φασματική μέθοδος.....	47
Εικόνα 22: MatrixPoisson.....	51
Εικόνα 23: PoissonMatrix Πεπερασμένου Όγκου.....	51
Εικόνα 24: Μοντέλο υπό μελέτη.....	52
Εικόνα 25: Μοντέλο υπό μελέτη.....	53
Εικόνα 26: Μοντέλο υπό μελέτη.....	54
Εικόνα 27: Μοντέλο υπό μελέτη.....	54
Εικόνα 28: Ιδιότητες ρευστού.....	55
Εικόνα 29: Ταχύτητα περιστροφής προπέλας.....	56
Εικόνα 30: Εισαγωγή ταχύτητας ροής νερού.....	56
Εικόνα 31: Εισαγωγή μοντέλου στο Ansys.....	57
Εικόνα 32: Viscous model.....	58
Εικόνα 33: Inlet Συνοριακές συνθήκες.....	59
Εικόνα 34: Διακριτοποίηση Μοντέλου.....	59
Εικόνα 35: Τομή μέσα στο Mesh.....	60



Εικόνα 36: Δύναμη στην προπέλα .....	61
Εικόνα 37: Μέση δύναμη στην είσοδο του μοντέλου .....	62
Εικόνα 38: Παροχή μάζας στο μοντέλο.....	63
Εικόνα 39: Συνολική δύναμη που ασκείται στην προπέλα.....	64
Εικόνα 44: Κατανομή πίεσης πάνω στην προπέλα .....	65
Εικόνα 45: Κατανομή πυκνότητας νερού πάνω στην προπέλα .....	66
Εικόνα 46: Turbulence Eddy Didipation .....	67
Εικόνα 47: Wall shear stress.....	68
Εικόνα 48: Τυρβώδεις κινητική ενέργεια.....	68
Εικόνα 49: Κατανομή ταχύτητας και ροή νερού γύρω από αυτήν .....	69
Εικόνα 50: Κατανομή ταχύτητας και ροή νερού γύρω από αυτήν .....	69

## Εισαγωγή

Η θαλάσσια οικονομία είναι ένα τεράστιο κεφάλαιο της παγκόσμιας οικονομίας. Ως θαλάσσια οικονομία μπορεί να οριστεί οποιαδήποτε δραστηριότητα λαμβάνει χώρα στη θάλασσα. Αυτό σημαίνει πως σε αυτό τον τομέα περιλαμβάνονται οι θαλάσσιες μεταφορές αγαθών, φορτίων, υδρογονανθράκων, αλλά και η μεταφορά ανθρώπων, τόσο για εμπορικούς σκοπούς όσο και για αναψυχή. Στα παραπάνω μπορούν να προστεθούν και ορισμένοι τομείς λίγο πιο αφανείς, ωστόσο εξίσου κερδοφόροι για τη ναυτική οικονομία. Αυτοί οι τομείς είναι ο επιστημονικός και κατασκευαστικός κλάδος της ναυτιλίας, δηλαδή οι ναυπηγήσεις των πλοίων, η συνεχής έρευνα που γίνεται πάνω στην εξέλιξη των πλοίων, οι κινητήρες και όλα τα συστήματα που κατασκευάζονται και συνεχώς βελτιώνονται, καθώς και οι υπηρεσίες που υπάρχουν στο ναυτιλιακό περιβάλλον, όπως τα logistics, οι λιμένες κ.λπ. Ενδεικτικό της αξίας που έχει η ναυτιλία στον οικονομικό κλάδο, είναι και το αποτέλεσμα έρευνας που έγινε το 2019 από την MaritimeUK, μαζί με το Κέντρο για την Οικονομία και την Επιχειρησιακή Έρευνα (CEBR). Η εν λόγω αναφορά επιβεβαίωσε πως ο θαλάσσιος τομέας έχει συνεισφορά στην οικονομία του Ηνωμένου Βασιλείου κατά 46,1 δις στερλίνες μέσα στο 2019, αντικατοπτρίζοντας αύξηση σε αυτό το νούμερο κατά 8,3 δις από το 2010. Για να είναι πιο κατανοητή η σημασία αυτού του ποσού, στην παρακάτω εικόνα γίνεται σύγκριση με άλλους οικονομικούς κλάδους εντός ΗΒ, με τη θαλάσσια οικονομία να υστερεί ελάχιστα μόνο από τις οδικές και χερσαίες μεταφορές.



Εικόνα 1: Ο αντίκτυπος της θαλάσσιας οικονομίας στην οικονομία του Ηνωμένου Βασιλείου του 2019 σε σχέση με άλλους κλάδους (πηγή: ADS, ONS, Cebranalysis)

Τα συγκεκριμένα νούμερα μεταφράζονται σε 220.100 απασχολούμενου από τη θαλάσσια οικονομία στο ΗΒ, ήτοι αύξηση κατά 24000 θέσεις από το 2010.

Στο πνεύμα των παραπάνω έχει γίνει και η παρούσα εργασία. Η σημασία του ναυτιλιακού και θαλάσσιου τομέα είναι τεράστια για τον άνθρωπο. Και αυτό είναι κάτι που δύναται να ισχυριστεί κάποιος όχι μόνο από οικονομική σκοπιά, αλλά και από κοινωνική, πολιτισμική και περιβαλλοντική. Αυτή η αξία του θαλάσσιου τομέα θα μελετηθεί και στην παρούσα εργασία, ωστόσο από μια πιο τεχνική σκοπιά.

Η καρδιά των πλοίων, τα οποία είναι σε θέση να κάνουν την παγκόσμια οικονομία να γυρίζει είναι οι κινητήρες τους. Πρόκειται για τεράστια και πολύπλοκα συμπλέγματα εξαρτημάτων, τα οποία καλούνται να δουλέψουν σε αρμονία ώστε το πλοίο να είναι αξιόπιστο και οικονομικά ωφέλιμο. Επιπλέον, θα πρέπει να είναι σε θέση να έχει ένα καλό περιβαλλοντικό πρόσωπο καθώς στη σύγχρονη εποχή δεν υπάρχει ανοχή σε ρυπογόνες λύσεις οι οποίες στέκονται μονάχα στο βραχυπρόθεσμο όφελος.

Έτσι, στη συγκεκριμένη εργασία η ανάλυση θα εστιάσει στους κινητήρες των πλοίων, και συγκεκριμένα σε αυτούς των μεγάλων μεταφορικών πλοίων. Ειδικότερα, αυτοί που θα μελετηθούν είναι οι μεσόστροφοι και οι αργόστροφοι

κινητήρες πλοίων, οι οποίοι αποτελούν εντυπωσιακά δείγματα μηχανικής και εντυπωσιάζουν με τις επιδόσεις τους και το μέγεθός τους.

## Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>: Ιστορική αναδρομή στη ναυσιπλοΐα

### 1.1 Η έννοια της πρόωσης

Γενικά, ο όρος πρόωση πλοίου σημαίνει κίνηση του πλοίου. Επικράτησε όμως να αναφέρεται μόνο για τα μηχανοκίνητα πλοία, καθώς εκεί είναι πιο ελεγχόμενη σε σχέση με ιστιοφόρα και κωπήλατα πλοία.

Η πρόωση των μηχανοκίνητων πλοίων ξεκίνησε αρχικά με τους πλευρικούς ή πρυμναίο τροχό, και τα πλοία ονομάζονταν τροχήλατα. Με την επικράτηση όμως της έλικας, η πρόωση του πλοίου ονομάστηκε η κίνηση που επιτυγχάνεται με μία ή περισσότερες έλικες οι οποίες και φέρονται επί αξόνων. Οι άξονες περιστροφής των ελίκων συνδέονται με τις κύριες μηχανές που χρησιμοποιούν ατμό που παρέχεται από τους ατμολέβητες οι οποίοι λειτουργούν είτε με καύση κάρβουνου αρχικά είτε με καύση πετρελαίου αργότερα, στα λεγόμενα ατμόπλοια. Στη σύγχρονη εποχή, οι έλικες έχουν φτάσει να περιστρέφονται ακόμα και από πυρηνική ενέργεια, στα πυρηνοκίνητα πλοία.

### 1.2 Κωπήλατα πλοία

Η ιστορία της πρόωσης των πλοίων είναι πολύ παλιά και δεν μπορεί με ακρίβεια να προσδιοριστεί ο χρόνος κατασκευής των πρώτων πλοίων. Οι αρχαιότερες παραστάσεις πλοίων που βρέθηκαν, χρονολογούνται από το 3000 π.Χ. και είναι κρητικές και αιγυπτιακές. Είχαν ως βασικό μέσο κίνησης τα κουπιά και ως βοηθητικό ένα διπλό ιδιότυπο ιστό. Τα ελληνικά πλοία των ομηρικών εποχών, σύμφωνα με τα στοιχεία που μπορούν να αντληθούν από την Οδύσσεια και την Ηλιάδα ήταν γρήγορα, κομψά και «άφρακτα» (δηλ. χωρίς κατάστρωμα). Το πλήρωμα αποτελούνταν από 50 έως και 120 άντρες που ήταν παράλληλα και κωπηλάτες. Το μήκος τους κυμαινόταν από 15-30 m και ήταν μονήρεις νήες, είχαν δηλαδή μια σειρά κουπιά. Αργότερα, εμφανίστηκαν οι διήρεις και οι τριήρεις. Τα

αρχαία πλοία γνώρισαν μεγάλη εξέλιξη και τελειοποιήθηκαν από τους Φοίνικες, την τεχνική των οποίων αξιοποίησαν και οι Έλληνες αλλά και οι Ρωμαίοι. Πολλά στοιχεία για την τεχνική τους δίνονται σε διάφορες ασσυριακές παραστάσεις.

Τα συγκεκριμένα πλοία τελειοποιήθηκαν περίπου τον 8<sup>ο</sup> και τον 7<sup>ο</sup> π.Χ. αιώνα, με τη συμβολή των Φοινικέων και των Ελλήνων, ενώ η αξία τους αναγνωρίστηκε και από τους Ρωμαίους, τόσο για εμπορικούς όσο και για πολεμικούς σκοπούς. Τα συγκεκριμένα πλοία παρέμειναν अपαράλλαχτα μέχρι και τα πρώτα Βυζαντινά χρόνια, όπου οι επαφές Βυζαντινών και Αράβων τον 7<sup>ο</sup> μ.Χ. αιώνα επηρέασε τη μορφή των πλοίων. Τότε, υιοθετήθηκε το τριγωνικό πανί και παράλληλα κατασκευάστηκαν πιο ελαφριά και γρήγορα πλοία. Την ίδια εποχή, αλλά σε άλλη περιοχή, οι Βίκινγκς χρησιμοποιούσαν πλοία πιο εξελιγμένα. Τα πλοία με κουπιά έφτασαν στο απόγειό τους τον 13<sup>ο</sup> αιώνα από τους Βενετούς και τους Γενουάτες. Η αντικατάστασή τους από την κίνηση μέσω του αέρα επήλθε σταδιακά μέχρι τον 16<sup>ο</sup> αιώνα, όπου κυριάρχησε το πανί στα πλοία.

### 1.3 Ιστιοφόρα

Ως ιστιοφόρο θεωρείται οποιοδήποτε σκάφος, το οποίο έχει ως αποκλειστικό μέσο πρόωσής του την αιολική ενέργεια επί των ιστίων του, δηλαδή των πανιών του, εξ' ου και η ονομασία του. Αποτελεί τη 2<sup>η</sup> εξελικτικά βασική κατηγορία πλοίων, μετά τα κωπήλατα και πριν τα μηχανοκίνητα (ατμόπλοιο).

Τα ιστιοφόρα, σε αντίθεση με τα ατμόπλοια, χρειάστηκαν πολλούς αιώνες για να εξελιχθούν, να καθιερωθούν και να φτάσουν στο απόγειο της βελτιστοποίησής τους. Όταν διαπιστώθηκε η δύναμη που δίνει ο ατμός στα πλοία, ωστόσο, τα ιστιοφόρα άρχισαν άμεσα να χάνουν έδαφος στην προτίμησή του κόσμου.

Από την αρχαιότητα μέχρι και τα μέσα του μεσαίωνα, τα ιστιοφόρα εξελίσσονταν, αν και με πολύ αργούς ρυθμούς, καθώς το κουπί εξακολουθούσε να αποτελεί το βασικό μέσο πρόωσης. Τότε, το πανί που έφερε συνήθως μια σταυρωτή κεραία (οριζόντια δοκός) από τον ιστό (κατάρτι), αποτελούσε βοηθητικό μέσο πρόωσης,

αφενός για τη μερική ανάπαυση των πληρωμάτων, αλλά αφετέρου κατά τη λεγόμενη «ουριοδρομία» (με τον άνεμο από πρύμνη δηλαδή).

Με βάση της πληροφορίες του Ομήρου, η ώρα του απόπλου ήταν αμέσως μετά τη θερινή δύση του Ηλίου όπου, αφού κόπαζε η θαλάσσια αύρα, η «πελάγια αύρα» κατά τους αρχαίους, άρχιζε να πνέει η «απόγεια αύρα», δηλαδή με βάση τους σύγχρονους ναυτικούς, όταν «αρχίζουν να βγάζουν οι στεριές».

Λειτουργικά, τα ιστιοφόρα άρχισαν να καθιερώνονται από τον 14<sup>ο</sup> και 15<sup>ο</sup> αιώνα, καθώς τότε μπόρεσαν να καταφέρουν να πλέουν και με αντίθετο άνεμο. Τότε, άρχισαν να εμφανίζονται τα λατίνια, τα αργοκίνητα ιστιοφόρα πλοία όπως το γαλιόνι, οι καράκες και οι караβέλες. Τέτοια πλοία αξιοποιήθηκαν για τις πρώτες εξερευνήσεις στη Γη από ανθρώπους όπως ο Χριστόφορος Κολόμβος, ο Βάσκο ντα Γκάμα, ο Μαγγελάνος κ.α.

Αναμφίβολα, σταθμός στην εξέλιξη των ιστιοφόρων υπήρξε η επιπλέον σπουδαία για τη ναυπηγική, ναυτική τέχνη και ναυτική τακτική, ναυμαχία της Ναυπάκτου, μια ναυμαχία που καθιέρωσε το ιστιοφόρο ως πολεμικό πλοίο γραμμής.

Μετά απ' αυτά ακολούθησαν παράλληλα και εφευρέσεις και ανακαλύψεις, όπως π.χ. το πηδάλιο, η άγκυρα, η πυξίδα, η αλυσιδωτή θωράκιση κ.τ.λ., που πέτυχαν την περαιτέρω εξέλιξη του ιστιοφόρου πλοίου.

Την εποχή των ιστιοφόρων υπήρχαν τρεις βασικές κατηγορίες αυτού του πλοίου: α) τα πολεμικά ιστιοφόρα, β) τα εμπορικά ιστιοφόρα και γ) τα ανένταχτα ή κοινώς λεγόμενα ως «πειρατικά». Τα εμπορικά μετέφεραν προϊόντα, επιβάτες, ζώα χωρίς κάποια ιδιαίτερη διάκριση ανάμεσα σε αυτές τις κατηγορίες. Ο πλοίαρχος τέτοιων σκαφών εκτελούσε επίσης και χρέη ναυτικού πράκτορα, τροφοδότη και όλες εκείνες τις επιμέρους βοηθητικές ειδικότητες που απαντώνται σήμερα στον ναυτιλιακό κόσμο.

Επίσης, η σπουδαιότερη διάκριση που γινόταν τότε στα ιστιοφόρα ήταν ανάλογα με τον αριθμό των όρθιων ιστών τους, δηλαδή το πόσα κατάρτια διέθετε αυτό. Με βάση αυτόν τον παράγοντα, τα ιστιοφόρα διακρίνονταν σε:

- **Μονόστηλα**, με ένα κατάρτι

- **Δίστηλα**, με δύο κατάρτια
- **Τρίστηλα**, με τρία κατάρτια
- **Πολυκάταρτα**, όσα έφεραν από τέσσερα και πάνω κατάρτια και εκτελούσαν υπερπόντια ναυσιπλοΐα.

Στη σύγχρονη εποχή, τα ιστιοφόρα εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται, για ψυχαγωγικούς και αθλητικούς κυρίως σκοπούς. Αποτελούνται συνήθως από ένα μόνο κατάρτι, εφοδιασμένο με δύο τριγωνικά πανιά, το φλόκο και το κύριο ιστίο. Όταν ο καιρός το επιτρέπει, χρησιμοποιείται και ένα τρίτο πανί, το σπινακερ. Είναι πανί σχήματος μπαλονιού που φουσκώνει μπροστά από το φλοκό σε περιπτώσεις ούριου ανέμου. Εκτός από τα μονοκάταρτα ιστιοπλοϊκά σκάφη, υπάρχουν και τρεις τύποι δικάταρτων ιστιοπλοϊκών, το γιοι, η γολέτα και η σκούνα. Ο πρώτος τύπος είναι ο πιο αποδοτικός για ιστιοπλοϊκά, ο δεύτερος κυρίως αξιοποιείται στην αναψυχή και ο τρίτος απαντάται σε μεγάλα ιστιοφόρα, κυρίως στις ανατολικές ακτές των ΗΠΑ.



*Εικόνα 2: Τυπικό παράδειγμα σύγχρονου ιστιοφόρου αναψυχής (πηγή: Σαρακατσιάνος, 2018)*



### 1.3 Ατμόπλοια

Το πρώτο ατμόπλοιο που θεωρείται πως κατασκευάστηκε, ήταν από τον Jonathan Hull, ο οποίος το 1736 κατασκεύασε μια ατμοκίνητη μαούνα. Τα μόνα στοιχεία που υπάρχουν για το συγκεκριμένο πλοίο είναι τα σχέδιά του, ενώ δεν έχει εξακριβωθεί ποτέ εάν όντως κατασκευάστηκε και λειτούργησε αποτελεσματικά. Ωστόσο, ο Hull είχε πάρει δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για αυτή του την ανακάλυψη.

Το 1783, ο Jouffroyd' Abbens, κατασκεύασε ένα ατμόπλοιο με το όνομα Pyroscaphe (Πυροσκάφος). Ήταν ένα ποταμόπλοιο, με κινητήρια ατμομηχανή. Το δοκιμαστικό του ταξίδι κράτησε μονάχα 15 λεπτά, καθώς η ατμομηχανή άρχισε να έχει έντονους κραδασμούς, έτσι το σκάφος υπέστη ρωγμές και βυθίστηκε.

Όλα τα ατμόπλοια αρχικά αποτελούνταν από δύο τροχούς, έναν πλευρικό και έναν οπίσθιο, με την έλικα να τους αντικαθιστά σταδιακά από το 1840 κι έπειτα. Τότε ξεκινά και η κατασκευή πολεμικών πλοίων με έλικα, ενώ μέχρι το 1860 μόνο τα ποταμόπλοια είχαν τροχό, με τα υπερωκεάνια πλοία να διαθέτουν μονάχα έλικα.

Η ελληνική ναυσιπλοΐα εισήλθε καθυστερημένα στα ατμόπλοια, καθώς λόγω έλλειψης κεφαλαίων, αλλά και επαφής με τον τεχνολογικό έξω κόσμο (ελέω του απελευθερωτικού αγώνα του 1821 και της ένδειας στην οποία βρισκόταν το νεοσύστατο κράτος) δεν υπήρχαν ούτε οι πόροι, ούτε και η τεχνογνωσία για να αγοραστούν/κατασκευαστούν και να λειτουργήσουν τέτοια πλοία στην επικράτεια. Οι πρώτες, ωστόσο, νηολογήσεις ατμόπλοιων με ελληνική σημαία έγιναν το 1856, με τα πρώτα αυτά πλοία να είναι τα «Ύδρα», «Καρτερία», «Βασιλεύς Όθων» και «Βασίλισσα της Ελλάδος», κυρίως μεταφορικού και συγκοινωνιακού χαρακτήρα, μεταφέροντας στα νησιά επιβάτες, εμπορεύματα, γράμματα. Μέχρι τα τέλη του 19<sup>ου</sup> αιώνα, 84 ελληνικά ατμόπλοια κυκλοφορούσαν στις θάλασσες. Ο αριθμός αυτός εκτινάχθηκε στα 475 μέχρι το 1915. Σημαντικό όμως ήταν το πρόβλημα της δυσκολίας προσαρμογής στη νέα αυτή τεχνολογία ναυσιπλοΐας. Χαρακτηριστικό ήταν το παράδειγμα ναυτικών από το Καστελόριζο, οι οποίοι έφυγαν στο Περθ της Αυστραλίας και ίδρυσαν εκεί το 1912 την πρώτη οργανωμένη ελληνική ναυτική κοινότητα, την «Καστελοριζιακή Αδελφότητα».

#### 1.4 Εμβολοφόροι κινητήρες diesel

Τα περισσότερα σύγχρονα πλοία χρησιμοποιούν μια παλινδρομική μηχανή diesel ως κινητήρια δύναμη, λόγω της λειτουργίας και της απλότητας, της αντοχής και της οικονομίας καυσίμου σε σύγκριση με τους περισσότερους κύριους μηχανισμούς κίνησης. Ο περιστρεφόμενος στροφαλοφόρος μπορεί να συζευχθεί απευθείας με την έλικα με αργή ταχύτητα κινήσεως, μέσω ενός κιβωτίου ταχυτήτων μείωσης για μέση και υψηλή ταχύτητα μηχανής ή μέσω ενός εναλλάκτη και ηλεκτρικού κινητήρα. Η περιστροφή του στροφαλοφόρου άξονα συνδέεται με τον εκκεντροφόρο άξονα. Η παλινδρομική μηχανή diesel στα πλοία χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά το 1903 με το ποταμόπλοιο δεξαμενόπλοιο Vandal. Ο κινητήρας diesel πρόσφερε σύντομα μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα από την τουρμπίνα ατμού αλλά για πολλά χρόνια ο βαθμός απόδοσής του ήταν μικρότερος. Η εξέλιξη του υπερσυμπιεστή οδήγησε όμως προς την τελική προτίμησή τους, επιτρέποντας μεγαλύτερες παροχές.

Σήμερα, οι κινητήρες diesel κατατάσσονται σε διάφορες κατηγορίες, ανάλογα με:

- Τον κύκλο λειτουργίας τους (δίχρονοι ή τετράχρονοι)
- Ανάλογα με την κατασκευή τους (σταυρό, κορμό ή αντίθετων εμβόλων)
- Με την ταχύτητά τους (αργόστροφες, μεσόστροφες, ταχύστροφες).

Η τελευταία κατηγορία είναι και αυτή στην οποία εστιάζει κατά κύριο λόγο η παρούσα εργασία, οπότε ας δοθούν λίγες περισσότερες λεπτομέρειες στο συγκεκριμένο κομμάτι.

Ως **αργόστροφες**, θεωρούνται οι μηχανές με ταχύτητα λειτουργίας μέχρι 300rpm. Κατά βάση, οι περισσότερες αργόστροφες μηχανές λειτουργούν κάτω από τις 120

rpm. Οι πιο ισχυροί κινητήρες πλοίων στον κόσμο είναι συνήθως αργής ταχύτητας, δίχρονοι και σταυρωτής κεφαλής.

Ως **μεσόστροφες**, θεωρούνται οι μηχανές με ταχύτητα στην περιοχή από 300 έως και 900 rpm. Πολλοί σύγχρονοι τετράχρονοι κινητήρες diesel με μεσαία ταχύτητα λειτουργούν στην περιοχή των 500 rpm.

Ως **ταχύστροφες** μηχανές θεωρούνται όσες λειτουργούν με ταχύτητες άνω των 900 rpm.

Οι περισσότερες σύγχρονες μηχανές στα μεγάλα εμπορικά πλοία είναι συνήθως αργόστροφες, δίχρονες με σταυρωτή κεφαλή ή εναλλακτικά μεσόστροφες, τετράχρονες. Κάποια μικρότερα σκάφη χρησιμοποιούν και κινητήρες diesel υψηλής ταχύτητας. Καθοριστικός παράγοντας για την επιλογή του κινητήρα σε ένα νέο πλοίο είναι και το μέγεθός του. Γενικά, οι δίχρονοι κινητήρες έχουν μεγαλύτερο ύψος σε σχέση με αντίστοιχους τετράχρονους. Επίσης, προτιμάται τις περισσότερες φορές η τοποθέτηση πολλαπλών κινητήρων ώστε να υπάρχει πλεονασμός στην περίπτωση βλάβης ενός ή περισσότερων κινητήρων, καθώς και η δυνατότητα για απόδοση σε μια ευρύτερη κλίμακα συνθηκών λειτουργίας εάν αυτό κριθεί απαραίτητο. Τα σύγχρονα πλοία με προπέλες έχουν μεγάλη απόδοση και δουλεύουν συνήθως σε χαμηλές στροφές, χωρίς ωστόσο να απαιτείται κιβώτιο ταχυτήτων. Το κιβώτιο μπορεί να χρησιμοποιείται σε πλοία με υψηλή ή μέση ταχύτητα, όπου η ύπαρξη ενός συμπλέκτη (clutch) δίνει τη δυνατότητα να δουλεύει η μία μηχανή όταν η άλλη υφίσταται κάποιες εργασίες συντήρησης, μακριά από το λιμάνι.

## 1.6 Αερόστρωμνα (hovercraft)

Πρόκειται για σκάφος που γλιστρά σε λεία επιφάνεια (συνήθως στη θάλασσα), πάνω σε ένα στρώμα πεπιεσμένου αέρα και χρησιμοποιείται για τη μεταφορά επιβατών και οχημάτων. Τα συγκεκριμένα σκάφη προωθούνται από έλικες ή ναυτικούς έλικες ή εκτοξευτήρες νερού. Η λειτουργία του βασίζεται στη δημιουργία

του «στρωματουπτάμενου συστήματος», το σκάφος δηλ. κινείται πάνω σε ένα συμπαγές στρώμα αέρα που δημιουργείται από το σύστημα ανύψωσης του σκάφους (ανάλογα το μοντέλο είτε με έναν επιπλέον έλικα τοποθετημένο στο μπροστινό μέρος, είτε με εκμετάλλευση της πρόωσης του αέρα) και ανανεώνεται συνεχώς. Αποτέλεσμα είναι το σκάφος να έχει τη δυνατότητα να κινηθεί με πολύ μεγαλύτερη ευελιξία από τα συμβατικά πλοία, ακόμα και σε νερά με πολύ μικρό βάθος, ενώ μπορεί να αναπτύξει ταχύτητες μέχρι και 30-40 κόμβους. Το hovercraft εφευρέθηκε από τον Βρετανό Sir Christopher Cockerell.



Εικόνα 3: Τυπικό παράδειγμα επιβατικού hovercraft στη Ρωσία (πηγή: Διαδίκτυο)

Τα συγκεκριμένα σκάφη είναι συνήθως μικρής χωρητικότητας, 250 τόνων περίπου, ικανά να μεταφέρουν περισσότερους από 300 επιβάτες και γύρω στα 25 επιβατηγά οχήματα. Η κίνησή τους γίνεται πάνω σε στρώμα αέρος που επιτυγχάνεται με ειδικούς επιπρυμναίους αεροστροβίλους (ανεμιστήρες), πίσω από τους οποίους φέρονται τα πηδάλια. Η φορτοεκφόρτωσή τους γίνεται από την πλώρη όπου και φέρουν πρωαίο υδραυλικό καταπέλτη. Τα σκάφη αυτά θεωρητικά δεν παρουσιάζουν «εν κινήσει» εκτόπιση, όπως επίσης και τα υδροπτέρυγα.

Πολλές χώρες έχουν επιλέξει να διαθέτουν τέτοιου τύπου σκάφη για τις ναυτικές τους δυνάμεις, μεταξύ αυτών και η Ελλάδα. Είναι ιδανικά για αμφίβιες επιχειρήσεις και ναρκοπολέμους. Η πρώτη ιστορικά εμπορική αξιοποίηση αυτών των σκαφών έγινε στην πορθμειακή γραμμή Αγγλίας-Γαλλίας.

### 1.7 Κινητήρες LNG

Οι μηχανές διπλού καυσίμου τροφοδοτούνται από diesel πλοίων, μαζούτ ή υγροποιημένο φυσικό αέριο (Liquified Natural Gas, LNG). Έχοντας πολλαπλές επιλογές καυσίμων, επιτρέπουν στα πλοία να διέρχονται από χώρες και λιμάνια χωρία να στηρίζονται μονάχα σε έναν τύπο καυσίμου. Οι μελέτες δείχνουν ότι το LNG είναι το πιο αποτελεσματικό καύσιμο, αν και υπάρχει περιορισμένη πρόσβαση σε σταθμούς ανεφοδιασμού η οποία περιορίζει την υιοθέτηση του συγκεκριμένου καυσίμου από τα πλοία. Στα σκάφη στα οποία έχουν τοποθετηθεί δύο κινητήρες καυσίμων, έχει αποδειχτεί πως είναι εξαιρετικά αποτελεσματικοί. Οφέλη του διπλού καυσίμου είναι η ευελιξία, η υψηλή απόδοση, οι χαμηλές συνολικά εκπομπές ρύπων, ενώ υπάρχουν και αξιοσημείωτα πλεονεκτήματα κόστους. Οι μηχανές που λειτουργούν με υγροποιημένο φυσικό αέριο είναι φιλικές προς το περιβάλλον. Το 2010, στη Φινλανδία, η Viking Lines υπέγραψε συμφωνία για να αρχίσει την κατασκευή του μεγαλύτερου πλοίου κρουαζιέρας που θα λειτουργεί με τέτοιο κινητήρα. Η κατασκευή του συγκεκριμένου πλοίου, του NB 1376 ολοκληρώθηκε το 2013. Η μείωση των εκπομπών σε σχέση με αντίστοιχου μεγέθους πλοία που χρησιμοποιούν κινητήρες diesel φτάνει στο 90% σχεδόν. Οι εκπομπές διοξειδίων του αζώτου είναι σχεδόν μηδενικές, ενώ αυτές του θείου και των οξειδίων του είναι κατά 80% μικρότερες σε σχέση με το ανώτατο όριο που έχει τεθεί από τον IMO. Η αύξηση των αερίων του θερμοκηπίου που συνδέεται με την υπερθέρμανση του πλανήτη αποτελεί σήμερα ένα θέμα παγκόσμιου ενδιαφέροντος.



Εικόνα 4: Το NB 1376 της VikingLines(πηγή: διαδίκτυο)

Φιλικά προς το περιβάλλον, και καινοτόμα, τα πλοία που χρησιμοποιούν ως καύσιμο το LNG είναι ένα βήμα προόδου προς την επίτευξη ενός υγιέστερου πλανήτη. Τα κέρδη των εταιρειών από τις φορολογικές περικοπές και τα λειτουργικά πλεονεκτήματα κόστους έχουν οδηγήσει στη σταδιακή αύξηση της χρήσης κινητήρων με καύσιμο το LNG.

### 1.8 Αεριοστρόβιλοι

Πολλά πολεμικά πλοία, ιδιαίτερα όσα ναυπηγήθηκαν κατά τη δεκαετία του 1960, αξιοποιούν αεριοστρόβιλους για την πρόωσή τους, ενώ υπάρχουν και ορισμένα επιβατηγά πλοία που χρησιμοποιούν τη συγκεκριμένη τεχνολογία. Οι

αεριοστρόβιλοι χρησιμοποιούνται κατά βάση επικουρικά με άλλους κινητήρες. Για παράδειγμα, το QueenMary 2 έχει αεριοστρόβιλους οι οποίοι συλλειτουργούν μαζί με κινητήρες diesel. Λόγω της κακής θερμικής απόδοσής τους σε χαμηλή ισχύ της παραγωγής, είναι κοινό για τα πλοία να χρησιμοποιούν κατά βάση τους κινητήρες diesel, αξιοποιώντας τους αεριοστρόβιλους όταν απαιτείται υψηλές ταχύτητες. Στην περίπτωση των επιβατηγών πλοίων, ο βασικός σκοπός της τοποθέτησης αεριοστρόβιλων είναι η μείωση των εκπομπών αερίων ρύπων σε ευαίσθητες περιβαλλοντικά περιοχές ή σε λιμάνια με συγκεκριμένη νομοθεσία περί ρύπων. Ορισμένα πολεμικά πλοία, καθώς και μερικά σύγχρονα κρουαζιερόπλοια, έχουν χρησιμοποιήσει τουρμπίνες ατμού για τη βελτίωση της αποδοτικότητας των αεριοστρόβιλων τους σε συνδυασμένο κύκλο, όπου η απορριπτόμενη θερμότητα από την εξάτμιση στον αεριοστρόβιλο χρησιμοποιείται για να βράσει το νερό και να δημιουργηθεί ο ατμός που θα διοχετευθεί στην τουρμπίνα. Σε αυτούς τους συνδυασμένους κύκλους, η θερμική απόδοση μπορεί να είναι η ίδια ή ελαφρώς μεγαλύτερη από εκείνη των κινητήρων diesel. Ωστόσο, η ποιότητα του καυσίμου που απαιτείται για τις τουρμπίνες αερίου είναι πολύ πιο δαπανηρή από αυτή που χρειάζεται για τους κινητήρες diesel, άρα τα έξοδα λειτουργίας είναι αυξημένα.



Εικόνα 5: Αεριοστρόβιλοι πολεμικού πλοίου του ιταλικού ναυτικού (πηγή: διαδίκτυο)

## 1.9 Πυρηνοκίνητα πλοία

Ως πυρηνοκίνητο (nuclearship), χαρακτηρίζεται το πλοίο εκείνο που χρησιμοποιεί ως πρωτεύον μέσο πρόωσης πυρηνική ενέργεια. Αποτελεί την τελευταία εξέλιξη μέσου πρόωσης των μηχανοκίνητων πλοίων.

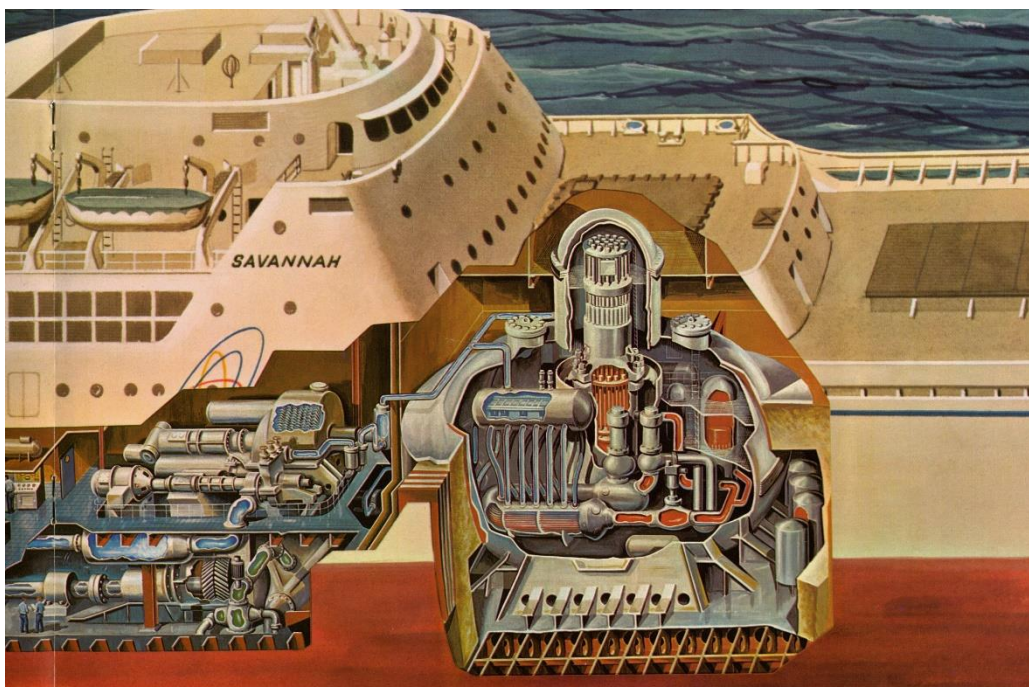
Τα πλοία αυτά διαθέτουν σε ξεχωριστό διαμέρισμα πυρηνικό αντιδραστήρα τύπου PWR, ο οποίος θέτει σε κίνηση τις ηλεκτρομηχανές (τουρμπίνες). Σχετικές μελέτες εφαρμογής επέκτασης της πυρηνικής ενέργειας ως μέσον πρόωσης εμπορικών πλοίων έχουν ξεκινήσει πολλές χώρες. Οι πρώτες πετυχημένες προσπάθειες έγιναν από τους Γερμανούς με το επιβατηγό OttoHahn, τους Κινέζους με το επιβατηγό ZanThan, τους Ρώσους με το παγοθραυστικό Lenin και τους Αμερικάνους με το φορτηγό πλοίο γραμμής Savannah, το οποίο ναυπηγήθηκε το 1962. Η πειραματική αυτή χρήση στα εμπορικά πλοία δεν δικαιολογήθηκε εν τέλει οικονομικά, καθώς τα πλοία αποδείχτηκαν ασύμφορα.

Στα πολεμικά πλοία, ωστόσο, η χρήση της πυρηνικής ενέργειας αποδείχτηκε αρκετά επιτυχής πλην ελάχιστων ατυχημάτων. Ειδικά στα αεροπλανοφόρα και τα υποβρύχια, η αξιοποίηση της πυρηνικής ενέργειας τα έχει καταστήσει ενεργειακά αυτόνομα, με την ακτίνα δράσης τους να είναι κυριολεκτικά απροσδιόριστη.

Η καρδιά των συγκεκριμένων πλοίων είναι ο πυρηνικός αντιδραστήρας, η διάταξη εκείνη η οποία παράγει εντός της την ενέργεια που χρειάζεται με ελεγχόμενη αντίδραση σχάσης. Ο πυρηνικός αντιδραστήρας θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως μια μεγάλη δεξαμενή όπου το πυρηνικό καύσιμο υφίσταται πυρηνική σχάση απελευθερώνοντας ενέργεια. Η συγκεκριμένη ενέργεια μετατρέπεται νερό σε ατμό, ο οποίος έχοντας μεγάλη ενέργεια κινεί έναν στρόβιλο ο οποίος με τη σειρά του περιστρέφει μια ηλεκτρογεννήτρια. Το καύσιμο που χρησιμοποιούν αυτοί οι αντιδραστήρες είναι είτε φυσικό είτε εμπλουτισμένο Ουράνιο. Βέβαια, υπάρχουν



και αντιδραστήρες σχάσης με καύσιμο το Πλουτώνιο αλλά και το ισότοπο του Ουρανίου, το  $U_{233}$ . Το καύσιμο βρίσκεται σε ειδικούς φορείς (containers) με μορφή ράβδων καυσίμου. Αυτές, τοποθετούνται με καθορισμένη διάταξη μέσα στον επιβραδυντή, ο οποίος είτε έχει γραφίτη είτε νερό και σκοπός του είναι να επιβραδύνει τα νετρόνια που παράγονται από τις σχάσεις. Οι ρυθμιστικές ράβδοι, που χρησιμεύουν για τη διατήρηση ενός σταθερού ρυθμού σχάσης, εισέρχονται στον πυρήνα του επιβραδυντή και η θέση τους μεταβάλλεται ώστε να επιτευχθεί ο επιθυμητός ρυθμός σχάσης. Όταν οι ράβδοι είναι βαθύτερα μέσα στον πυρήνα, επιβραδύνουν περισσότερα νετρόνια και έτσι μειώνεται ο ρυθμός των σχάσεων. Το αντίθετο συμβαίνει όταν οι ράβδοι αυτοί αποσύρονται.



Εικόνα 6: Αναπαράσταση του πυρηνικού αντιδραστήρα στο εσωτερικό του Savannah (πηγή: διαδίκτυο)

Ένα ψυκτικό υλικό κυκλοφορεί υπό πίεση μέσα στα λεγόμενα κανάλια του επιβραδυντή. Σκοπός της κυκλοφορίας του ψυκτικού είναι η απαγωγή θερμικής ενέργειας και η μεταφορά της σε εναλλάκτη θερμότητας. Ο επιβραδυντής βρίσκεται στο εσωτερικό χαλύβδινου προστατευτικού περιβλήματος, κατασκευασμένο έτσι ώστε να αντέχει στις υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες στο εσωτερικό του αντιδραστήρα. Γύρω από το χαλύβδινο περίβλημα, υπάρχει θωράκιση από σκυρόδεμα, η οποία εμποδίζει τη ραδιενέργεια να φτάσει στους χειριστές του

αντιδραστήρα και στο περιβάλλον, τόσο σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας, όσο και στην περίπτωση ατυχήματος.

## Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>: Περιγραφή των εμβολοφόρων ΜΕΚ

Η παραγωγή έργου με τη χρήση μιας θερμικής μηχανής βασίζεται στην πρόσδοση θερμότητας στο εργαζόμενο μέσο, με αποτέλεσμα τη μεταβολή της ενεργειακής του κατάστασης. Ένα τμήμα αυτής της ενέργειας μπορεί να αποδοθεί ως μηχανικό έργο, ενώ το υπόλοιπο αποβάλλεται ξανά ως θερμότητα στο περιβάλλον.

Η πρόσδοση της θερμότητας μπορεί να γίνεται είτε εντός του κύριου τμήματος της μηχανής είτε σε ένα ανεξάρτητο τμήμα της. Οι μηχανές εσωτερικής καύσης διακρίνονται από τις αντίστοιχες εξωτερικής καύσης από αυτό ακριβώς το χαρακτηριστικό, ότι δηλαδή η καύση για την παραγωγή της αναγκαίας θερμότητας πραγματοποιείται εντός της μηχανής ενώ το εργαζόμενο μέσο που εκτονώνεται εντός κυλίνδρου για την παραγωγή του έργου είναι το καυσαέριο.

Αντίθετα, στις μηχανές εξωτερικής καύσης, η θερμότητα προσδίδεται στο εργαζόμενο μέσο σε ανεξάρτητη συσκευή της μηχανής, ενώ τα καυσαέρια δεν έρχονται σε επαφή με το εργαζόμενο μέσο. Ως παράδειγμα μηχανής εξωτερικής καύσης μπορεί να αναφερθεί η ατμομηχανή, όπου η παραγόμενη από την καύση θερμότητα εντός του λέβητα μετατρέπει το νερό (εργαζόμενο ρευστό) σε ατμό, ο οποίος με τη σειρά του οδηγείται σε κύλινδρο. Η μετακίνηση του εμβόλου κατά την εκτόνωση του ατμού εντός του κυλίνδρου παράγει το ωφέλιμο έργο της μηχανής.

Στα τέλη του 19<sup>ου</sup> αιώνα, όταν οι ατμομηχανές είχαν ουσιαστικά εξαντλήσει τη δυναμική τους, η πιεστική ανάγκη για συνεχώς ισχυρότερους, απλούστερους, μικρότερους και αποδοτικότερους κινητήρες, οδήγησε την έρευνα προς την ανάπτυξη εμβολοφόρων μηχανών εσωτερικής καύσης. Είχε προηγηθεί η πρόταση του Robert Street το 1794 για χρησιμοποίηση της πίεσης των καυσαερίων από την καύση υγρών καυσίμων στη μετακίνηση του εμβόλου και την παραγωγή έργου. Το 1833 ο W.L. Wright κατασκεύασε την πρώτη δίχρονη μηχανή εσωτερικής καύσης, ενώ το 1860 ο J.J. Etienne Lenoir από το Λουξεμβούργο συναρμολόγησε την πρώτη μηχανή εσωτερικής καύσης βιομηχανικής παραγωγής, χρησιμοποιώντας για καύσιμο το φωταέριο. Ο Γερμανός Otto, πειραματίστηκε με τη μηχανή του Lenoir και κατασκεύασε τον πρώτο βενζινοκινητήρα το 1876. Οι αρχές λειτουργίας του

κινητήρα του Otto αποτέλεσαν τη βάση πάνω στην οποία λειτουργούν μέχρι και σήμερα οι βενζινοκινητήρες.

Με την καθιέρωση του κύκλου καύσης του Otto, οι έρευνες στράφηκαν προς την ανεύρεση αποτελεσματικών μεθόδων ανάφλεξης του μίγματος καυσίμου-αέρα. Μια από τις μεθόδους που δοκιμάστηκαν, ήταν η εφαρμογή μεγάλης συμπίεσης του αέρα μέσα στον κύλινδρο, προκειμένου να επιτευχθεί πολύ υψηλή θερμοκρασία. Το καύσιμο στη συνέχεια ψεκάζεται μέσα στον κύλινδρο, όπου, λόγω της υψηλής θερμοκρασίας του αέρα ξεκινούσε αυτοδύναμα η καύση. Η εκτόνωση των αερίων μπορούσε να απελευθερώσει πολύ μεγάλη ποσότητα ενέργειας. Ο τύπος αυτός των κινητήρων χαρακτηρίζεται ως κινητήρας συμπίεσης-ανάφλεξης.

Οι υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες που αναπτύσσονταν κατά τη λειτουργία των μηχανών αυτών, είχαν ως αποτέλεσμα την εμφάνιση σοβαρών προβλημάτων όσον αφορά στην αντοχή των υλικών κατασκευής τους. Ένα άλλο σοβαρό πρόβλημα των παραπάνω κινητήρων συνδεόταν με τη δυσκολία ψεκασμού του καυσίμου στον κύλινδρο όπου επικρατούσε υψηλή πίεση λόγω της μεγάλης συμπίεσης του αέρα.

Μεγάλη αύξηση της αξιοπιστίας των κινητήρων συμπίεσης-ανάφλεξης πέτυχε ο Γερμανός Rudolph Diesel. Αρχικά, προσπάθησε να λειτουργήσει τους παραπάνω κινητήρες χρησιμοποιώντας κονιορτοποιημένο γαιάνθρακα ως καύσιμο, οι κινητήρες ωστόσο καταστρέφονταν με έκρηξη.

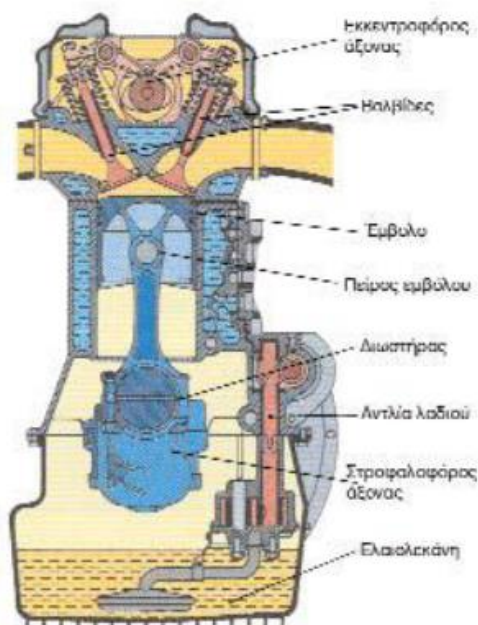
Το 1894 πέτυχε τη λειτουργία τους χρησιμοποιώντας υγρό καύσιμο (πετρέλαιο). Με αυτό τον τρόπο κατέστησε τον κινητήρα πιο οικονομικό και περισσότερο αποδοτικό σε σχέση με τους υπόλοιπους κινητήρες εκείνης της εποχής. Το 1895 ο Diesel μάλιστα, κατοχύρωσε την ευρεσιτεχνία του στις ΗΠΑ.

Μέχρι το 1900 οι πετρελαιοκινητήρες είχαν διαδοθεί ευρύτατα στην Ευρώπη. Ογκώδεις και με μεγάλο βάρος, οι κινητήρες εκείνης της εποχής είχαν εφαρμογή μόνο ως κινητήρες σταθερής βάσης. Ο πρώτος πετρελαιοκινητήρας που τοποθετήθηκε σε πλοίο ήταν το 1903 στο Ρωσικό Wandal, με τα λεωφορεία να παίρνουν σειρά το 1925. Το 1929 κυκλοφόρησε και το πρώτο φορτηγό-αυτοκίνητο. Οι κινητήρες αυτοί ήταν πολύ μεγάλοι σε μέγεθος και πολύ βαριοί για μικρά επιβατικά.

Το 1927, η Bosch άρχισε να κατασκευάζει εξαρτήματα και μηχανισμούς ψεκασμού για πετρελαιοκινητήρες. Η Bosch μπορούσε να παράγει μαζικά εξοπλισμό συστημάτων ψεκασμού και μάλιστα για μεγάλη ποικιλία εφαρμογών. Επιπλέον, η εταιρεία αυτή απέκτησε την άδεια κατασκευής εξαρτημάτων πετρελαιοκινητήρων σε άλλες χώρες, με αποτέλεσμα οι κινητήρες αυτοί να καταστούν πολύ δημοφιλείς και να επικρατήσουν διεθνώς.

Ο πρώτος πετρελαιοκινητήρας, κατάλληλος για ένα επιβατικό όχημα, κατασκευάστηκε το 1936 από τη Mercedes-Benz. Μετά και τον 2<sup>ο</sup> Παγκόσμιο Πόλεμο, η υψηλή τιμή της βενζίνης κατέστησε ειδικά στην Ευρώπη και την Ιαπωνία επιτακτική την ανάγκη για μικρά πετρελαιοκίνητα οχήματα και ελαφρά φορτηγά.

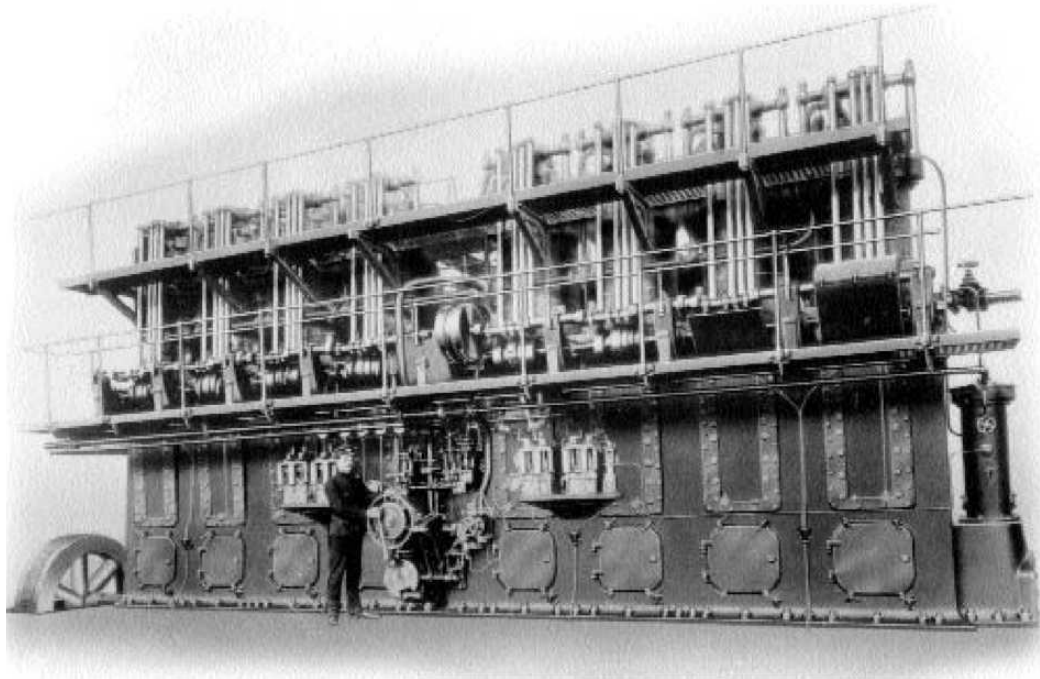
Από το 1980 και ύστερα, η πτώση της τιμής της βενζίνης είχε οδηγήσει σε περιορισμό των αυτοκινήτων με κινητήρες diesel. Το οικονομικότερο καύσιμο, σε συνδυασμό με τους πιο ογκώδεις, βαριούς και ακριβούς πετρελαιοκινητήρες, έστρεψε το κοινό στην αγορά βενζινοκινητήρων, με τις μηχανές diesel να αξιοποιούνται κυρίως σε μεσαίας κατηγορίας και βαρέα οχήματα, καθώς και σε γεωργικά και χωματουργικά μηχανήματα.



Εικόνα 7: Σύγχρονος κινητήρας οχημάτων εσωτερικής καύσης τη δεκαετία του 1990 (πηγή: διαδίκτυο)

Η ανακάλυψη του κινητήρα diesel ήταν καθοριστική για την ανάπτυξη της ναυτιλίας. Το πρώτο μεγάλο πλοίο με εγκατάσταση κινητήρα diesel ήταν το Romagna, 678 τόνων, που ναυπηγήθηκε το 1910, με δύο τετρακύλινδρους κινητήρες Sultzer, 280 kW έκαστος, και ταχύτητα περιστροφής 250 RPM.

Η πρώτη εγκατάσταση πετρελαιοκινητήρα σε ωκεανοπόρο εμπορικό πλοίο πραγματοποιήθηκε το 1912, στο πλοίο Selandia που πραγματοποιούσε ταξίδι 20.000 ναυτικών μιλίων, από την Κοπεγχάγη στην Ιαπωνία. Όπως μπορεί να φανεί και στην παρακάτω εικόνα, οι διαστάσεις της μηχανής ήταν μεγάλες. Οι νέοι κινητήρες diesel είχαν τόσο μεγάλη επιτυχία, ώστε μέχρι το 1920 είχαν ναυπηγηθεί 16 παρόμοια πλοία μόνο από το ίδιο ναυπηγείο που είχε φτιάξει στο Selandia.



*Εικόνα 8: Ο ένας από τους δύο τετράχρονους κινητήρες στο Selandia (πηγή: διαδίκτυο)*

Το 1924, υπήρχαν 2000 πλοία συνολικού τονάζ 2 εκατ. τόνους. Μέχρι το 1940 αυξήθηκαν σε 4000 πλοία, 18 εκ. τόνων. Μεταξύ δύο παγκόσμιων πολέμων, το ποσοστό των ντιζελοκίνητων πλοίων αυξήθηκε από 1,3% στο 25% του συνολικού παγκόσμιου τονάζ.

Στα επιβατηγά πλοία, το πρώτο που λειτούργησε με κινητήρα diesel ήταν στη γραμμή του Ατλαντικού, το Gripsholm, κατασκευασμένο το 1925. Δύο εξακύλινδροι τετράχρονοι κινητήρες της B&W παρείχαν συνολική ισχύ 9930 kW στο πλοίο.

Η υπερπλήρωση στους κινητήρες diesel οδήγησε σε ακόμα μεγαλύτερη αύξηση της χρήσης τους. Στις τετράχρονες μηχανές, η υπερπλήρωση ξεκίνησε από τη δεκαετία του '20, με χρήση μηχανικών συμπιεστών. Η πρώτη ευρεσιτεχνία για στροβιλοϋπερπληρωτή κατατέθηκε από τον Buchito 1905, αλλά απαιτήθηκαν 50 χρόνια για να μπορέσει το σύστημα αυτό να βρει πλήρη εφαρμογή σε μεγάλες δίχρονες ναυτικές μηχανές. Η πρώτη ναυτική μηχανή με στροβιλοϋπερπληρωτή κατασκευάστηκε το 1927 από τη MAN.

Ένα από τα πιο κοινά προβλήματα των πετρελαιομηχανών είναι οι ταλαντώσεις, ένα πρόβλημα που οι ειδικοί προσπάθησαν κατά καιρούς να παρακάμψουν με τη σχεδίαση περιστροφικών και όχι παλινδρομικών μηχανών. Το πιο πετυχημένο σχέδιο περιστροφικού εμβολοφόρου κινητήρα παρουσιάστηκε το 1954 από τον FelixWankel. Στον ομώνυμο κινητήρα το έμβολο έχει μορφή καμπυλωμένου τριγωνικού πρίσματος, το οποίο φέρει εσωτερικά οδόντωση που συμπλέκεται έκκεντρα με αντίστοιχο μικρότερο οδοντωτό τροχό, προσαρμοσμένο σταθερά στο σώμα του κινητήρα. Το έμβολο περιστρέφεται εντός ελλειψοειδούς θαλάμου, μεταξύ του οποίου και του εμβόλου πραγματοποιούνται οι διαδοχικές φάσεις λειτουργίας των ΜΕΚ. Έτσι, στο συγκεκριμένο έργο εκτελούνται ταυτόχρονα (σε διαφορετική φάση) τρεις ανεξάρτητοι κύκλοι λειτουργίας, με αποτέλεσμα την πολύ συμπαγή κατασκευή των κινητήρων (μικρός κυβισμός και όγκος με μεγάλη παραγόμενη ισχύ).

Επειδή δεν υπάρχουν παλινδρομούσες μάζες, απουσιάζουν και τα προβλήματα ταλαντώσεων. Οι κινητήρες αυτοί ωστόσο δεν έχουν συναντήσει μεγάλη εφαρμογή λόγω ανυπέβλητων προβλημάτων στεγανοποίησης των θαλάμων, μη βέλτιστου σχήματος του θαλάμου καύσεως, υψηλών ρύπων, υψηλής κατανάλωσης και υψηλού κόστους κατασκευής και συντήρησης. Οι κινητήρες Wankel δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την καύση πετρελαίου εξαιτίας του μικρού βαθμού

συμπύεσης που μπορούν να πετύχουν. Βρίσκουν εφαρμογή σε λίγους τύπους ειδικών αυτοκινήτων και στην πρόωση μικρών ελικοφόρων αεροσκαφών.

## 2.1 Κατάταξη των ΜΕΚ

Γενικά, οι μηχανές εσωτερικής καύσεων (ΜΕΚ) διακρίνονται σε τρεις κύριες κατηγορίες:

1. Στις εμβολοφόρες παλινδρομικές
2. Στις περιστροφικές
3. Στους αεριοστροβίλους

Οι εμβολοφόρες παλινδρομικές ΜΕΚ κατατάσσονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

- Με βάση τον τρόπο έναυσης του καυσίμου διακρίνονται σε **μηχανές εναύσεως με σπινθήρα** (βενζινομηχανές), σε **μηχανές εναύσεως με συμπίεση** (πετρελαιομηχανές) και σε **μηχανές semi-diesel**.
- Με βάση τον αριθμό των διαδρομών του εμβόλου για την ολοκλήρωση του κύκλου λειτουργίας, διακρίνονται σε **τετράχρονες**, και σε **δίχρονες**.
- Ανάλογα με το είδος του καυσίμου κατατάσσονται σε **μηχανές βαρέως πετρελαίου** (μαζούτ), σε **μηχανές ελαφρών καυσίμων** (πετρέλαιο diesel, βενζίνη) και σε **μηχανές αερίων καυσίμων**.
- Ανάλογα με τη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του στροφαλοφόρου άξονα διακρίνονται σε μηχανές **αργόστροφες** (ταχύτητα περιστροφής έως 350 rpm), **μεσόστροφες** (με ταχύτητα περιστροφής έως 1500 περίπου rpm), **πολύστροφες** (με ταχύτητα περιστροφής μέχρι 5000 rpm) και **ταχύστροφες** (ταχύτητα περιστροφής άνω των 5000 rpm).
- Ανάλογα των αριθμό των κυλίνδρων διακρίνονται σε **μονοκύλινδρες** και σε **πολυκύλινδρες** μηχανές
- Ανάλογα με τη διάταξη των κυλίνδρων, κατατάσσονται σε **κατακόρυφες ή εν σειρά, τύπου (V), (W), (Δ), (H), (X), αντιτιθέμενων κυλίνδρων (οριζόντιες-boxer), σταυροειδείς, αστεροειδείς, πολυγωνικές, διπλών εμβόλων κ.λπ.**



- Ανάλογα με τον τρόπο ψύξης των κυλίνδρων κατατάσσονται σε **υδρόψυκτες** και σε **αερόψυκτες μηχανές**.
- Ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσης του εμβόλου και του διωστήρα κατατάσσονται σε **μηχανές με ή χωρίς βάκτρο και ζύγωμα**.
- Ανάλογα με τον τρόπο, την πίεση αλλά και την ποσότητα του αέρα που εισάγεται στον κύλινδρο, κατατάσσονται σε **υπερπληρούμενες** και **ατμοσφαιρικές μηχανές**.
- Ανάλογα με τον τρόπο εγκατάστασης διακρίνονται σε μηχανές **σταθερής ή μόνιμης** βάσης και σε **μηχανές κινούμενου φορέα**.
- Ανάλογα με τη χρήση τους κατατάσσονται σε **μηχανές οχημάτων, ναυτικές μηχανές, βιομηχανικές, μηχανές αεροσκαφών** κ.λπ.
- Ανάλογα με τη φορά περιστροφής του στροφαλοφόρου άξονα κατατάσσονται σε μηχανές **ορισμένης φοράς περιστροφής** και σε **αναστρέψιμες μηχανές**.
- Ανάλογα με την παραγόμενη ισχύ ανά κύλινδρο στις κανονικές στροφές λειτουργίας κατατάσσονται σε μηχανές **μικρής ισχύος** (μέχρι 20 Ps), **μέσης ισχύος** (μέχρι 200 Ps) και **μεγάλης ισχύος** (άνω των 200 Ps).
- Ανάλογα με τον τρόπο απόδοσης της ισχύος, κατατάσσονται σε μηχανές **σταθερών στροφών** (και μεταβλητού φορτίου) και σε μηχανές **μεταβλητών στροφών**.
- Ανάλογα με το είδος του θαλάμου καύσεως διακρίνονται σε μηχανές με **ενιαίο** και σε μηχανές με **διαιρούμενο** θάλαμο καύσης.

## 2.2 Χρήση των πετρελαιομηχανών

Οι πετρελαιομηχανές, ανάλογα με τη χρήση τους, κατατάσσονται στις παρακάτω κατηγορίες:

### 1) Μηχανές αυτοκινήτων

Οι πετρελαιομηχανές έχουν επικρατήσει στα φορτηγά αυτοκίνητα και στα λεωφορεία, ενώ στα μικρά επιβατικά αυτοκίνητα η χρήση τους είναι πιο περιορισμένη. Τα κύρια χαρακτηριστικά των πετρελαιομηχανών, εν συγκρίσει με τις πετρελαιομηχανές που χρησιμοποιούνται σε άλλους τομείς, είναι το μικρό βάρος ανά παραγόμενο ίππο, ο μεγάλος αριθμός στροφών ανά λεπτό (2000-5000 rpm), η λειτουργία τους χωρίς κραδασμούς, το γρήγορο ξεκίνημα στο κρύο περιβάλλον, η χρήση ειδικής ποιότητας καυσίμου και η σχεδίαση για όσο το δυνατόν μικρότερη εκπομπή ρύπων. Οι μηχανές αυτές, σε συντριπτικό ποσοστό, είναι υπερπληρούμενες.

## **2) Μηχανές βαρέων οχημάτων**

Χρησιμοποιούνται σε όλα τα χωματουργικά και γεωργικά μηχανήματα. Είναι μεγάλης ισχύος, συνήθως υπερπληρούμενες, βαρύτερες, μεγαλύτερες, ιδιαίτερα στιβαρούς κατασκευής και πιο αργόστροφες από αυτές των αυτοκινήτων.

## **3) Μηχανές τρένων**

Είναι μεσόστροφες, σταθερού αριθμού στροφών και φοράς περιστροφής. Δεν κινούν απ' ευθείας τους τροχούς αλλά περιστρέφουν γεννήτρια, η οποία παράγει ηλεκτρικό ρεύμα. Η γεννήτρια κάθε μηχανής δίνει ρεύμα σε ηλεκτροκινητήρες, οι οποίοι με τη σειρά τους κινούν τους κινητήριους τροχούς. Ο τρόπος αυτός μετάδοσης της ισχύος στους τροχούς έχει πολλά πλεονεκτήματα. Δεν χρησιμοποιείται μηχανικό κιβώτιο ταχυτήτων, αυξομειώνονται εύκολα οι στροφές, ενώ επιτυγχάνεται μεγάλη ροπή και ισχύς έλξης στο ξεκίνημα του συρμού.

## **4) Ναυτικές μηχανές**

Χρησιμοποιούνται σε όλα τα θαλάσσια μέσα, από τα μικρά σκάφη μέχρι τα πολύ μεγάλης χωρητικότητας εμπορικά πλοία, στα πολεμικά πλοία και τα συμβατικά υποβρύχια. Μπορεί να είναι δίχρονες ή τετράχρονες διαφόρων τύπων, σχημάτων, μεγεθών και ισχύος. Σχεδόν στο σύνολό τους, οι μηχανές αυτές είναι υπερπληρούμενες.



Εικόνα 9: Δεκαεξακύλινδρη μεσόστροφη τετράχρονη πετρελαιομηχανή, ισχύος 11.520 kW (πηγή: διαδίκτυο)

## 5) Πετρελαιομηχανές ηλεκτρογεννητριών

Τα κύρια χαρακτηριστικά τους είναι η υψηλή ισχύς, ο μεγάλος βαθμός αξιοπιστίας στη λειτουργία τους, οι σταθερές στροφές λειτουργίας (υποχρεωτική προϋπόθεση επίτευξης σταθερής συχνότητας ρεύματος) και η σχετικά οικονομική λειτουργία τους. Χρησιμοποιούνται κυρίως από τη ΔΕΗ στην ηλεκτροδότηση των νησιών, στα νοσοκομεία για την ηλεκτροδότηση έκτακτης ανάγκης, σε βιομηχανίες και σε στρατιωτικές εγκαταστάσεις. Οι κινητήριες μηχανές που χρησιμοποιούνται στα ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη των πλοίων πρέπει επιπλέον να συγκεντρώνουν υψηλό βαθμό ηλεκτρονικού ελέγχου.

### 2.3 Ναυτικές μηχανές

Καθώς το αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η ανάλυση των αργόστροφων και μεσόστροφων μηχανών στα πλοία, μετά την αρχική εισαγωγή γενικά στις πετρελαιομηχανές, οι οποίες είναι ο τύπος μηχανής που υπάρχει κατά κόρον στα

πλοία. Έτσι, σε αυτή την παράγραφο γίνεται μια πιο βασική ανάλυση στις πετρελαιομηχανές των πλοίων, τις οποίες θα δούμε και αναλυτικότερα στα επόμενα κεφάλαια όπου αναλύονται ενδελεχώς.

Στα μεγάλα πλοία, οι δίχρονες αργόστροφες πετρελαιομηχανές είναι αυτές που κυριαρχούν, σε πλοία όπως πετρελαιοφόρα, μεταφοράς χύδην φορτίου και μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων. Όλοι οι σύγχρονοι δίχρονοι αργόστροφοι κινητήρες έχουν κοινά χαρακτηριστικά, όπως ύπαρξη σταυρού, ευθύγραμμη σάρωση με βαλβίδα εξαγωγής, σύστημα καυσαερίων σταθερής πίεσης και μεγάλους λόγους διαδρομής προς διάμετρο εμβόλου, που φθάνουν ακόμα και στο 4.2:1. Το χαμηλότερο όριο της ταχύτητας περιστροφής τους έχει κατέλθει πλέον στις 55 rpm, επιτρέποντας την περιστροφή μεγάλων ελίκων με πολύ καλή απόδοσης πρόωσης.

Ενώ παλαιότερα οι κατασκευαστές αργόστροφων δίχρονων πετρελαιομηχανών ξεπερνούσαν τους δεκαπέντε, τη σήμερα ημέρα έχουν επιβιώσει επί της ουσίας τρεις, η MANB&W, η Wartsila και η Mitsuhihi. Οι παραπάνω κατασκευαστές προσφέρουν διαφορετικές οικογένειες δίχρονων αργόστροφων πετρελαιομηχανών, με διαμέτρους κυλίνδρων από 260 έως 980 mm, αριθμό κυλίνδρων έως δώδεκα και ταχύτητα περιστροφής από 55 ως 250 rpm.

Οι μεσόστροφες τετράχρονες πετρελαιομηχανές χρησιμοποιούνται κυρίως για την κίνηση μικρότερων πλοίων ή για την κίνηση ειδικών τύπων μεγάλων πλοίων, όπως τα πλοία αναψυχής (κρουαζιερόπλοια) και τα οχηματαγωγά, αν και οι μεγαλύτερες μηχανές της κατηγορίας στοχεύουν πλέον και στην περιοχή που επικρατούν οι δίχρονες αργόστροφες πετρελαιομηχανές. Κατασκευάζονται σε διάταξη εν σειρά ή σε διάταξη V και είναι όλες υπερπληρούμενες. Το σύστημα προσαγωγής των καυσαερίων στο στρόβιλο είναι συνήθως σύστημα παλμών, αλλά χρησιμοποιούνται και συστήματα σταθερής πίεσης ή/και υβριδικά συστήματα.

Στην κατηγορία των μεσόστροφων τετράχρονων μηχανών έχουν επιβιώσει πολλοί περισσότεροι κατασκευαστές. Πέρα από τις προαναφερθείσες τρεις, υπάρχουν και η Yanmar, η MTU, η Caterpillar, η Daihatsu η Rustonκ.α.

Εκτός των μεσόστροφων τετράχρονων πετρελαιομηχανών, υπάρχουν και αργόστροφες τετράχρονες πετρελαιομηχανές. Η κατασκευή και η χρήση τους περιορίζεται στην αγορά της Ιαπωνίας και της Άπω Ανατολής γενικά. Με ταχύτητες περιστροφής κάτω από 200 rpm, επιτρέπουν την απευθείας σύνδεση της έλικας στη μηχανή. Σε σχέση με τις μεσόστροφες τετράχρονες πετρελαιομηχανές έχουν μεγαλύτερο βάρος και όγκο ενώ λόγω της απουσίας μειωτήρα, η ταχύτητα περιστροφής της προπέλας είναι δεδομένη.

Κατασκευαστές τέτοιων κινητήρων είναι οι HanshinDiesel, AkasakaDiesels, Makita, MatsuiIronWorks και NiigataEngineering.

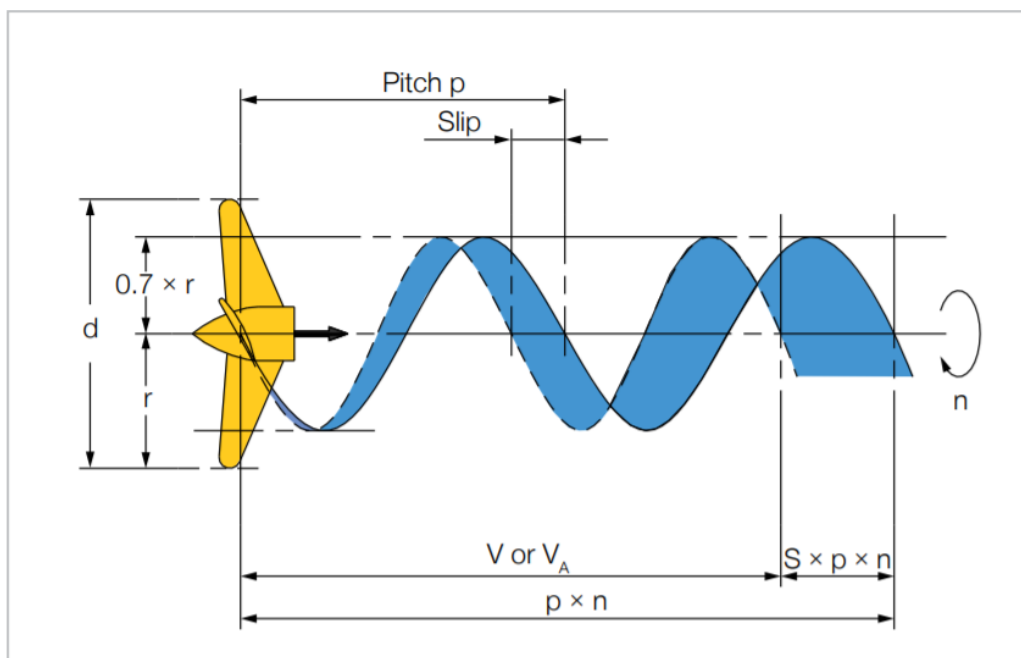
Οι ταχύστροφες πετρελαιομηχανές είναι τετράχρονες και χρησιμοποιούνται για την πρόωση μικρών πλοίων, αλλά και ως ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη σε όλες τις κατηγορίες των πλοίων. Δεν υπάρχει σαφής διαχωρισμός μεταξύ μεσόστροφων και ταχύστροφων πετρελαιομηχανών, αν και συνήθως λαμβάνεται ως τυπικό όριο οι 1000-1200 rpm. Οι κυριότεροι κατασκευαστές ταχύστροφων πετρελαιομηχανών είναι οι Caterpillar, Cummins, Wartsila, MANB&W, Mitsubishi, MTU, Paxman, SEMTPielstick, VolvoPenta.

## Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>: Προπέλα Πλοίου

### 3.1 Ορισμοί παραμέτρων

Η διάμετρος κατασκευάζεται με σκοπό την επίτευξη της υψηλότερης απόδοσης και της χαμηλότερης κατανάλωσης καυσίμου. Γενικά, η έλικα δεν επιτρέπεται να επεκταθεί κάτω από την αρχική γραμμή στα εμπορικά πλοία, και συνήθως περιλαμβάνεται ένα μικρό περιθώριο για να διασφαλιστεί αυτό η έλικα δεν έχει υποστεί ζημιά σε περίπτωση γείωσης, κατά τη διάρκεια στεγνής σύνδεσης ή κάτι ανάλογο. Η παρεμβολή μεταξύ της έλικας και του βυθού, μπορεί να προκαλέσει ζημιά όχι μόνο στην έλικα, αλλά και στον άξονα της έλικας, στο κιβώτιο ταχυτήτων (εάν είναι εγκατεστημένο) και στον ίδιο τον κύριο κινητήρα.

Επιπλέον, το μέγεθος της έλικας περιορίζεται από την απόσταση μεταξύ του άκρου της έλικας και του κάτω μέρους του πλοίου, καθώς η έλικα που είναι πολύ κοντά στο κύτος μπορεί να οδηγήσει σε υψηλές δονήσεις και θόρυβο.



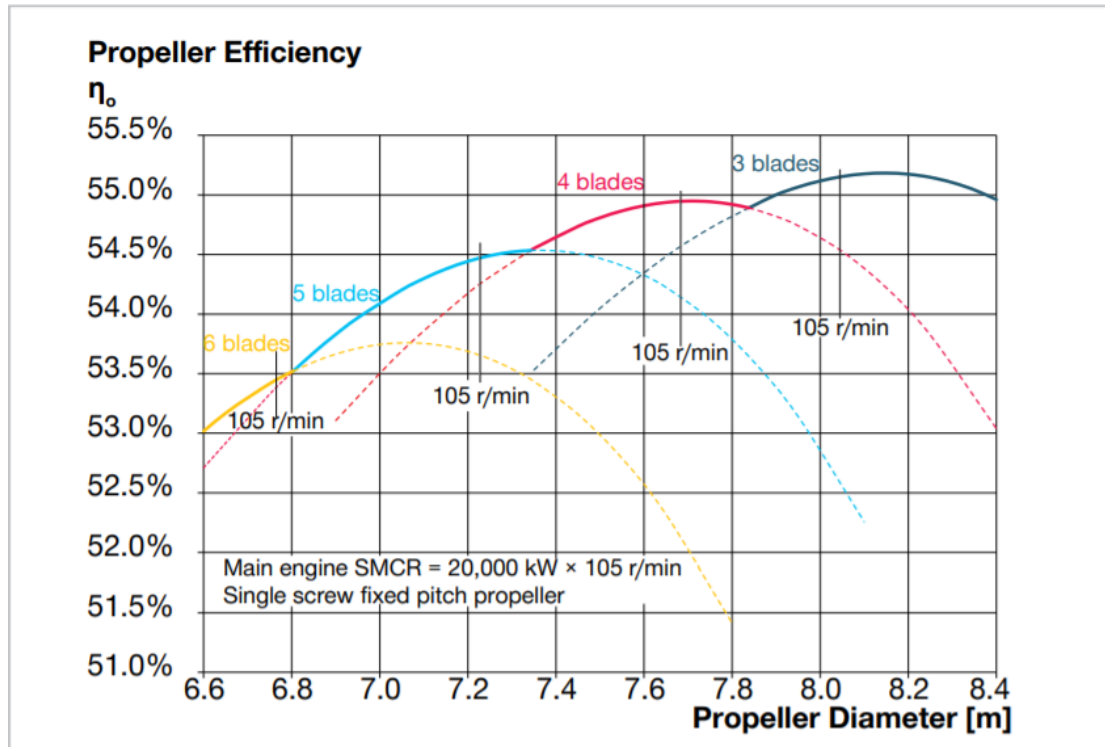
Εικόνα 10: Κλίση και ολίσθηση έλικα

Πηγή: <https://marine.man-es.com/>

Πίνακας 1: Κατά προσέγγιση ανώτερο όριο αναλογίας μεταξύ διαμέτρου έλικα και βυθίσματος

<b>Bulkers and tankers</b>	$d/T_d \approx 0.65$
<b>Container ships</b>	$d/T_d \approx 0.75$
<b>Volume ships, high speed (i.e. ro-pax)</b>	$d/T_d \approx 0.85$

Πηγή: <https://marine.man-es.com/>



Εικόνα 11: Απόδοση έλικα και αριθμός λεπίδας. Σημειώστε ότι οι σ.α.λ. είναι σταθερές και συνεπώς η διάμετρος πρέπει να αυξηθεί για να επιτευχθεί η βέλτιστη

Πηγή: <https://marine.man-es.com/>

Καθώς το βήμα μεταβάλλεται κατά μήκος της ακτίνας της λεπίδας, η αναλογία υπολογίζεται κανονικά για το βήμα στα  $0,7 \times r$ , όπου  $r = d / 2$  είναι η ακτίνα της έλικα. Το βέλτιστο βήμα εξαρτάται από το ρυθμό περιστροφής και διάμετρος έλικα.

### 3.1.1 Συντελεστής περιοχής δίσκου

Ο συντελεστής περιοχής δίσκου (μερικές φορές αναφέρεται ως αναλογία εκτεταμένης περιοχής λεπίδας) καθορίζει το ανεπτυγμένο εμβαδόν επιφάνειας της έλικα σε σχέση με την περιοχή δίσκου. Αυτή η περιοχή πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη για να αποφευχθεί η επιβλαβής σπηλαιώση που μπορεί να οδηγήσει σε διάβρωση, αλλά όχι πολύ μεγάλη, καθώς αυτό θα αυξήσει την τριβή της έλικας. Μια αναλογία 0,40 έως 0,60 είναι τυπική για κανονικά φορτωμένες έλικες 4 λεπίδων. Τα πλοία με ένα βιδωτό δοχείο με υψηλό φορτίο μπορούν να δουν τιμές έως 1,0. Για να αντιμετωπιστεί αυτό, ο αριθμός λεπίδων πρέπει να αυξηθεί.

### 3.1.2 Αριθμός λεπίδων

Οι έλικες μπορούν να κατασκευαστούν με 2, 3, 4, 5, 6 ή 7 λεπίδες. Γενικά, όσο λιγότερος είναι ο αριθμός των λεπίδων, τόσο υψηλότερη θα είναι η απόδοση της προπέλας. Ωστόσο, για λόγους αντοχής και δονήσεων, οι έλικες 4, 5 και 6 λεπίδων χρησιμοποιούνται συνήθως σε εμπορικά πλοία, με 4 λεπίδες είναι τα πιο συνηθισμένα.

Το κατώτερο όριο του αριθμού λεπίδας ορίζεται συνήθως από τα ποικίλα μεγέθη των δυνάμεων που βιώνουν οι λεπίδες όταν αυτό κινείται ή όταν βρίσκεται στην κορυφή και στη λιγότερο περιορισμένη ροή στο κάτω μέρος.

Πλοία με σχετικά μεγάλη απαίτηση ισχύος και πολύ φορτωμένες έλικες, π.χ. Γρήγορα πλοία εμπορευματοκιβωτίων, μπορεί να χρειαστούν έλικες 5 ή 6 λεπίδων για να έχουν επαρκή επιφάνεια για τη μεταφορά του φορτίου χωρίς σπηλαιώση. Η βέλτιστη ταχύτητα έλικα εξαρτάται από τον αριθμό των λεπίδων. Έτσι, για την ίδια διάμετρο έλικα, μια προπέλα με 6 έλικες έχει περίπου 10% χαμηλότερη βέλτιστη ταχύτητα έλικα από μια με 5. Για λόγους δόνησης, οι έλικες με ορισμένο αριθμό λεπίδων μπορούν να αποφεύγονται σε μεμονωμένες περιπτώσεις, ώστε να μην προκαλείται διέγερση φυσικών συχνοτήτων στο κύτος του πλοίου ή στην υπερκατασκευή.



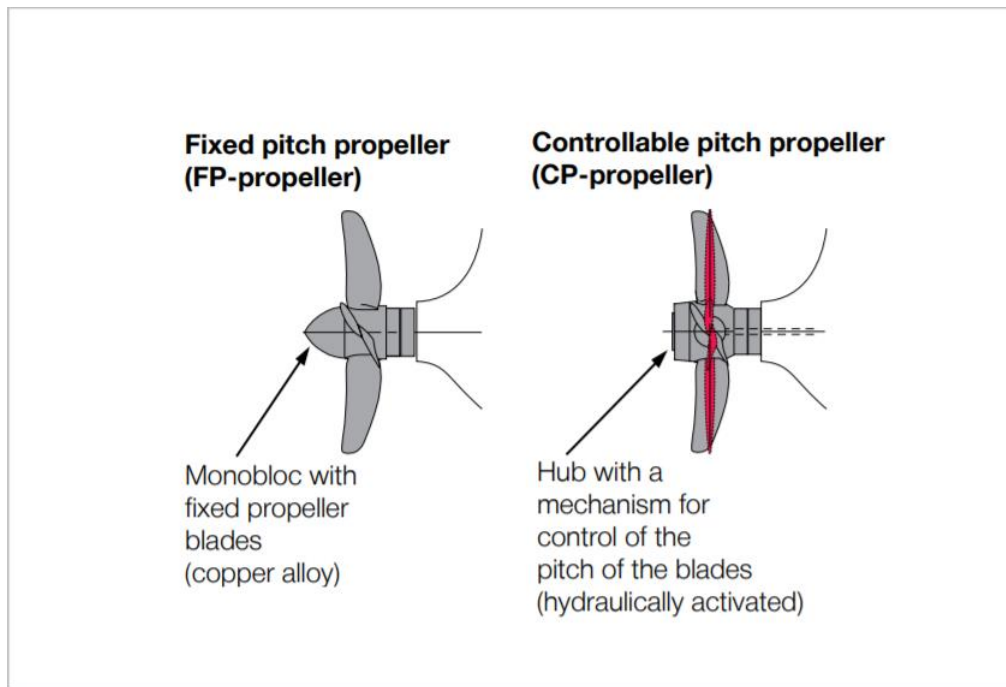
### 3.2 Τύποι και γεωμετρία έλικα

Έλικες σταθερού βήματος τύπου (FP) ρίχνονται σε ένα τεμάχιο και συνήθως κατασκευάζονται από κράμα χαλκού.

Οι λεπίδες είναι για πάντα σταθερές, με δεδομένο βήμα. Αυτό σημαίνει ότι όταν λειτουργεί, για παράδειγμα, σε καιρικές συνθήκες, οι καμπύλες απόδοσης της έλικας, δηλαδή ο συνδυασμός σημείων ισχύος και ταχύτητας (σ.α.λ.), θα αλλάξουν ανάλογα με τις εξωτερικές συνθήκες.

Οι προπέλες FP είναι απλές και επιτρέπουν τον υψηλότερο αριθμό λεπίδων. Ωστόσο, το μειονέκτημα είναι ότι ο κινητήρας πρέπει να σταματήσει και να αντιστραφεί εάν απαιτείται αντιστροφή της έλικα για την αποσυγκέντρωση του πλοίου ή για να πάει προς τα εμπρός. Σημειώστε ότι ο ηλεκτρονικά ελεγχόμενος δίχρονος κινητήρας αντικατοπτρίζει το χρονισμό της βαλβίδας του κινητήρα στο εσωτερικό, και επομένως είναι εξίσου ικανός να τρέχει πιο μπροστά.

Τα περισσότερα πλοία που δεν χρειάζονται ιδιαίτερα καλή ευελιξία, όπως πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, δεξαμενόπλοια και μεταφορείς χύδην εξοπλισμένα με έλικα FP, καθώς προσφέρουν την υψηλότερη απόδοση. Αυτό οφείλεται σε μια μικρή αναλογία πλήμνης / διαμέτρου 0,15-0,20. Βλέπε Εικ. 12 για τις εννοιολογικές διαφορές με μια προπέλα CP.



Εικόνα 12: Τύποι προπελών

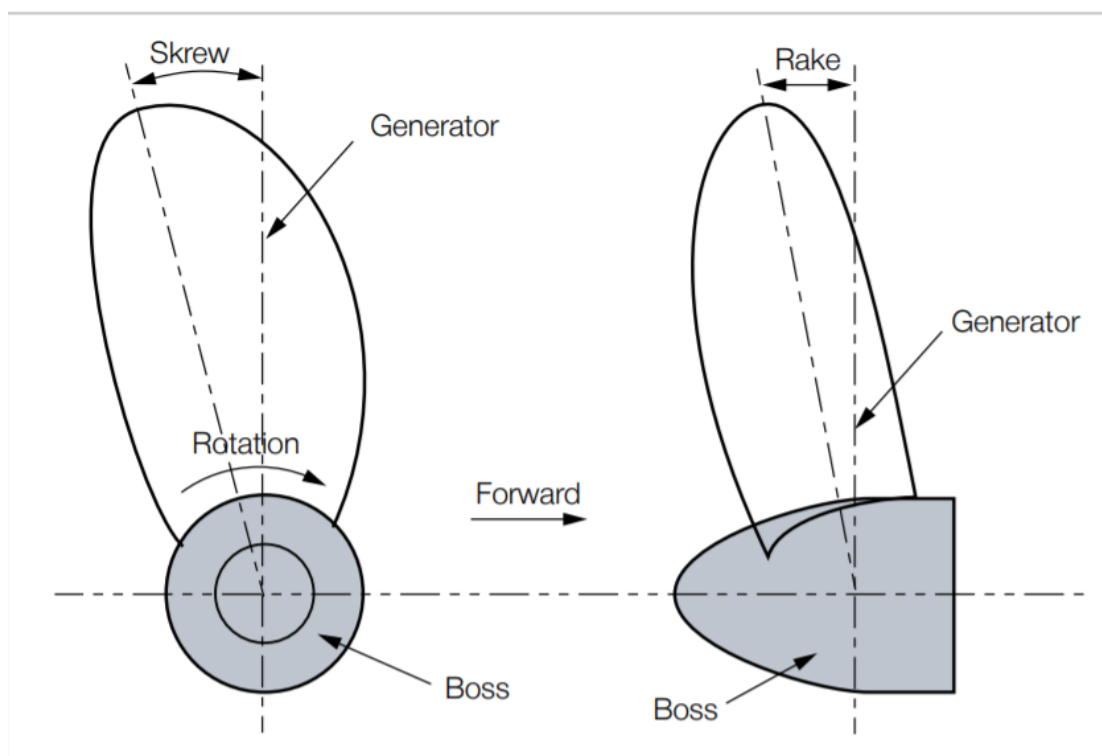
Πηγή: <https://marine.man-es.com/>

Έλικες ελεγχόμενου βήματος (CP) έχουν σχετικά μεγαλύτερη πλήμνη σε σύγκριση με τους FP επειδή ο διανομέας πρέπει να φιλοξενήσει τον υδραυλικά ενεργοποιημένο μηχανισμό για τον έλεγχο του βήματος. Επομένως, CP είναι ακριβότερος από έναν αντίστοιχο έλικα FP.

Το μεγάλο πλεονέκτημα της έλικας CP είναι ότι επιτρέπει τη λειτουργία του κινητήρα σε οποιαδήποτε περιστροφή ή επιθυμητό φορτίο, ανάλογα με τις δυνατότητες του συστήματος ελέγχου της έλικας. Αποσυνδέει επίσης την κατεύθυνση ώθησης από την κατεύθυνση περιστροφής του κινητήρα, έτσι επιτρέποντας γρήγορους ελιγμούς λόγω του σχετικά μεγαλύτερου κόμβου, περίπου λόγος πλήμνης - διαμέτρου 0,22-0,30, η απόδοση της προπέλας είναι ελαφρώς χαμηλότερη, συνήθως 1-2%. Η ανεπάρκεια της έλικας CP μπορεί, στις περισσότερες περιπτώσεις, να ανακτηθεί, καθώς είναι πιο προσαρμόσιμη σε διαφορετικές συνθήκες.

## Rake and skew

Η εικόνα 13 απεικονίζει την έννοια skew και της στρέβλωσης. Για τα κανονικά εμπορικά πλοία οι λεπίδες τυλίγονται συνήθως πίσω για να αυξήσουν την απόσταση μεταξύ του πλοίου και της έλικας. Το Skew εισάγεται ώστε να βελτιώσει τα χαρακτηριστικά δόνησης, καθώς τα πτερύγια θα ανταποκρίνονται σταδιακά σε τυχόν αλλαγές στο πεδίο αφύπνισης.



Εικόνα13: Rake and skew

Πηγή:<https://marine.man-es.com/>

### 3.2 Συνθήκες ροής

#### Οριακό στρώμα και αφύπνιση

Όταν το πλοίο κινείται, η τριβή του πλοίου θα δημιουργήσει ένα λεγόμενο οριακό στρώμα γύρω από το πλοίο. Σε αυτό το οριακό στρώμα, η ταχύτητα του νερού στην επιφάνεια του πλοίου είναι ίση με εκείνη του σε άλλα σημεία του πλοίου και μειώνεται με την απόσταση από την επιφάνεια του.

### Συντελεστής κλάσματος, $w$

Κυρίως λόγω του οριακού στρώματος, το νερό που ρέει προς την έλικα θα έχει αποτελεσματική ταχύτητα αφύπνισης  $VW$  που έχει την ίδια κατεύθυνση με την ταχύτητα  $V$  του πλοίου, βλέπε Εικ. 14. Αυτό σημαίνει ότι η ταχύτητα του νερού που φθάνει  $V_A$  στην έλικα (που δίνεται ως η μέση ταχύτητα πάνω από την περιοχή του δίσκου της έλικας και ισούται με την ταχύτητα προώθησης της προπέλας), είναι  $VW$  χαμηλότερη από την ταχύτητα  $V$  του πλοίου.

Η πραγματική ταχύτητα αφύπνισης στην προπέλα είναι συνεπώς ίση με  $VW = V - V_A$  και μπορεί να εκφραστεί σε μορφή χωρίς διάσταση μέσω του συντελεστή κλάσματος αφύπνισης  $w$ , από τον Taylor που ορίζεται ως:

$$W = \frac{V_W}{V} = \frac{V - V_A}{V} = 1 - \frac{V_A}{V}$$

Η τιμή του wakefractioncoefficient εξαρτάται από το σχήμα (που σχετίζεται με τα τρισδιάστατα εφέ της αντίστασης τριβής του) και μπορεί να επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό τις συνθήκες εργασίας και, επομένως, την απόδοση της έλικας. Όσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής τριβής, τόσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής κλασμάτων αφύπνισης.



Εικόνα 14: Προπέλα Kappel

Πηγή: <https://marine.man-es.com/>

### 3.3 Συντελεστής ώσης, $t$

Η δράση της έλικας αναγκάζει το νερό που βρίσκεται μπροστά του να «απορροφάτε» προς την έλικα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα επιπλέον αντίσταση στο πλοίο που συνήθως ονομάζεται «αύξηση αντίστασης» ή, εάν σχετίζεται με τη συνολική απαιτούμενη δύναμη ώθησης  $T$  στην έλικα, «κλάσμα αφαίρεσης ώσης»  $F$ . Αυτό σημαίνει ότι η δύναμη ώθησης  $T$  στην προπέλα έχει να ξεπεραστεί τόσο η αντίσταση ρυμούλκησης του πλοίου όσο και η επιπλέον αντίσταση στο πλοίο λόγω της απορροφητικής δράσης της έλικα.

Το κλάσμα αφαίρεσης ώσης  $F$  μπορεί να εκφραστεί σε μορφή χωρίς διάσταση μέσω του συντελεστή αφαίρεσης ώσης  $t$ :

$$t = \frac{F}{T} = \frac{T - R_{\tau}}{T} = 1 - \frac{R_{\tau}}{T}$$

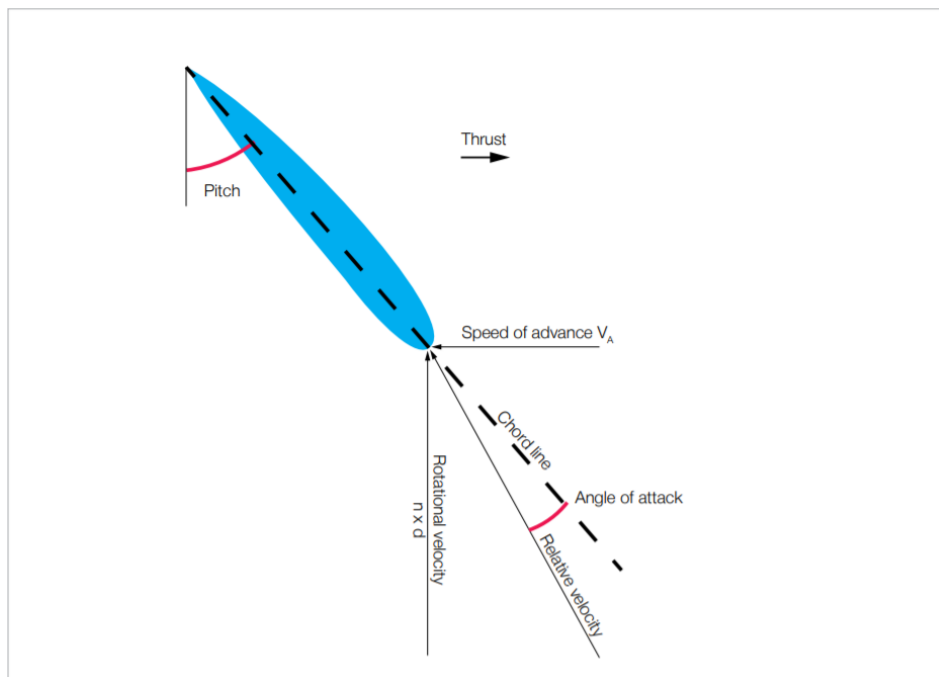
### 3.3.1 Συντελεστές έλικα

Η απόδοση της προπέλας περιγράφεται σε συστηματικές δοκιμές μοντέλου, αλλά για να διευκολυνθεί η πρακτική χρήση αυτών των δοκιμών, ορισμένοι συντελεστές έλικας χωρίς διάσταση έχουν εισαχθεί σε σχέση με τη διάμετρο  $d$ , τον ρυθμό περιστροφής  $n$  και την πυκνότητα μάζας νερού  $\rho$ .

Ο αριθμός προόδου είναι μια αδιάστατη έκφραση της ταχύτητας προόδου της έλικας,  $V_A$ :

$$J = \frac{V_A}{nxd}$$

Για ένα δεδομένο βήμα προπέλας, ο αριθμός προώθησης εκφράζει τη γωνία της ροής εισερχόμενου νερού σε σχέση με τις λεπίδες έλικα, βλέπε Εικ.15. Για μια δεδομένη έλικα και βήμα, η γνώση του αριθμού προόδου είναι επαρκής για τον προσδιορισμό ώσης, ροπής και αποτελεσματικότητας της έλικα.



Εικόνα15: Advance number

Πηγή: <https://marine.man-es.com/>

### Συντελεστής ροπής

Η ροπή έλικα  $Q = PD / (2\pi n)$  εκφράζεται χωρίς διάσταση με τη βοήθεια του συντελεστή ροπής  $K_Q$ :

$$K_Q = \frac{Q}{\rho x n^2 x d^5}$$

### Συντελεστής ώσης φορτίου

Ο συντελεστής ώσης φόρτωσης περιγράφει το βαθμό φόρτωσης της έλικας, καθώς η πίεση της έλικα σχετίζεται με την δυναμική της προπέλας στη δυναμική πίεση της εισερχόμενης ροής νερού προς την έλικα, δηλ. η ώθηση διαιρείται με την ταχύτητα προώθησης και την τετραγωνική διάμετρο:

$$C_{th} = \frac{P_{propeller}}{P_{dynamic}} = \frac{\frac{T}{\frac{\pi}{4}d^2}}{\frac{1}{2}\rho V_A^2} = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho V_A^2 \frac{\pi}{4}d^2} = \frac{8K}{\pi J^2}$$

### 3.3.2 Αποτελεσματικότητα και παράμετροι που επηρεάζουν

#### Απόδοση ανοιχτού νερού

Η απόδοση της έλικας  $\eta_0$  σχετίζεται με την πρόωσή σε ανοιχτά νερά, δηλαδή η έλικα λειτουργεί σε ένα ομοιογενές πεδίο. Η απόδοση της έλικας εξαρτάται, ιδίως, από την ταχύτητα της προώθησης  $V_A$ , τη δύναμη ώθησης  $T$ , τη διάμετρο  $d$  και από το σχεδιασμό της έλικας, όπως ο αριθμός των λεπίδων, ο λόγος περιοχής δίσκου και ο λόγος βήματος / διαμέτρου.

Η ιδανική και μη προσβάσιμη απόδοση, δίνεται από τον συντελεστή φόρτωσης ώσης:

$$\eta_{0,ideal} = \frac{2}{1 + \sqrt{1 + C_{th}}}$$
$$C_{th} = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho V_A^2 \frac{\pi}{4} d^2}$$

Όπως φαίνεται, όσο ελαφρύτερη η έλικα (χαμηλό  $C_{th}$ ), τόσο υψηλότερη θα είναι η θεωρητική απόδοση. Στην πράξη υπάρχει ένα χαμηλότερο όριο φορτίου, κάτω από το οποίο η απόδοση θα μειωθεί ξανά. Αυτό το όριο συνήθως δεν πληρούνται για πρακτικές εφαρμογές.

Τα δύο κύρια μέσα για την ελαχιστοποίηση του φορτίου περιλαμβάνουν είτε την αύξηση της διαμέτρου εντός των ορίων που αναφέρθηκαν προηγουμένως είτε την αύξηση της ταχύτητας προώθησης.

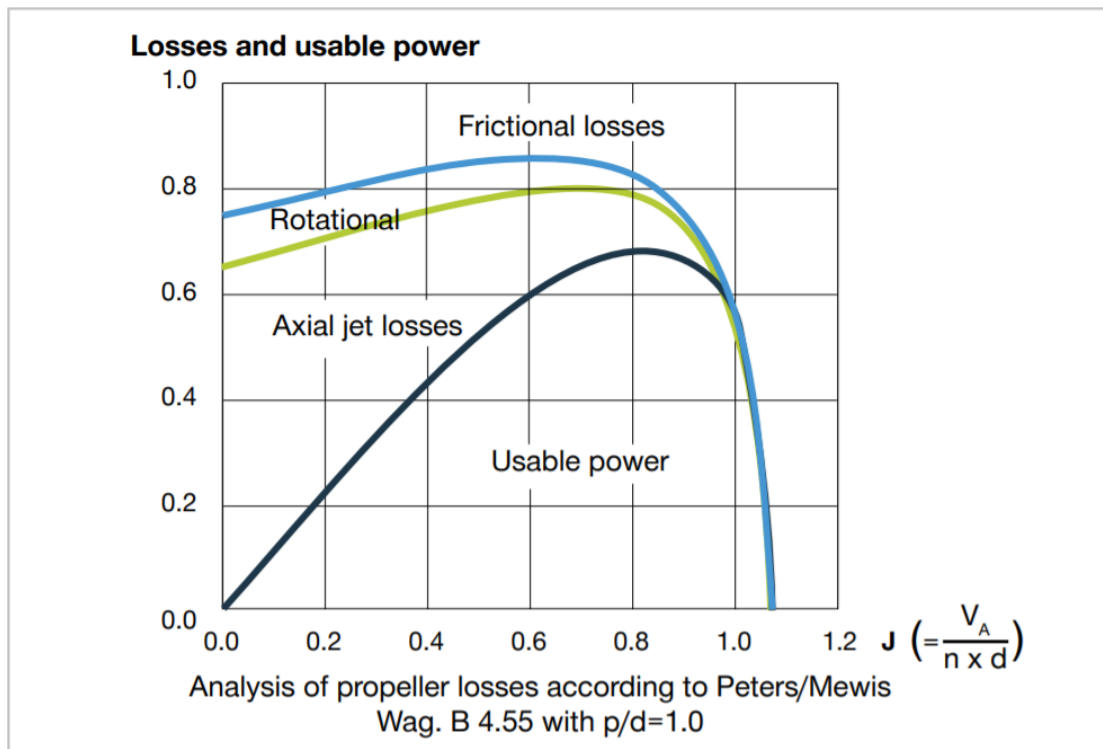
Για έναν φορέα ευρείας δέσμης, με χαμηλό  $V_A$  και σχετικά μικρή έλικα, το φορτίο που εκφράζεται από τον  $C_{th}$  θα είναι υψηλό. Από την άλλη πλευρά, ένας φορέας διπλού κοχλία δοχείου θα έχει ελαφρά φορτωμένες έλικες.

Η προσέγγιση που βασίζεται στο  $C_{th}$  στην απόδοση της προπέλας που δίνεται παραπάνω δεν λαμβάνει υπόψη τις στροφές έλικα. Επομένως, είναι συχνά πιο βολικό να εκφράζεται η απόδοση της έλικας ως συνάρτηση του αριθμού προώθησης  $J$  καθώς και της μη διαστατικής ώσης και ροπής ο συντελεστής εξηγήθηκε προηγουμένως.



$$\eta_o = \frac{P_T}{P_D} = \frac{T \times V_A}{Q \times 2\pi \times n} = \frac{K_T}{K_Q} \times \frac{J}{2\pi}$$

Ανάλογα με τη φόρτωση και το σχεδιασμό της έλικας, συνήθως επιτυγχάνεται απόδοση  $\eta_o = 0,55 - 0,70$ .



Εικόνα 16: Απώλειες έλικας. Σημειώστε ότι αυτό είναι μόνο ένα παράδειγμα, υπάρχουν διάφοροι συνδυασμοί ταχύτητας και βήματος σε διαφορετικές σειρές έλικα.

Πηγή: HSVA

### 3.3.3 Απόδοση άξονα

Η απόδοση άξονα  $\eta_s$  εξαρτάται, μεταξύ άλλων παραγόντων, από την ευθυγράμμιση και λίπανση των εδράνων του άξονα και από τον μειωτήρα, εάν είναι εγκατεστημένο. Ορίζεται ως ο λόγος μεταξύ της ισχύος που παρέχεται στην προπέλα  $P_D$  και της ισχύος πέδησης του κύριου κινητήρα  $P_B$ :

$$\eta_o = \frac{P_D}{P_B}$$

Για δίχρονους κινητήρες που συνδέονται άμεσα με άξονα  $\eta_S \approx 0,99$ , για άξονες  $\eta_S \approx 0,98$  και εάν έχει εγκατασταθεί μειωτήρας,  $\eta_S \approx 0,95$  έως  $0,96$ .

<b>Velocities</b>	<b>Efficiencies</b>
Ship's speed ..... : $V$	Hull efficiency ..... : $\eta_H = \frac{1-t}{1-w}$
Arriving water velocity to propeller..... : $V_A$ (Speed of advance of propeller)	Propeller efficiency - open water ..... : $\eta_O$
Effective wake velocity ..... : $V_W = V - V_A$	Relative rotative efficiency ..... : $\eta_R$
Wake fraction coefficient..... : $w = \frac{V - V_A}{V}$	Shaft efficiency ..... : $\eta_S$
<b>Forces</b>	Engine efficiency ..... : $\eta_E$
Towing resistance ..... : $R_T$	Propeller efficiency - behind hull ..... : $\eta_B = \eta_O \times \eta_R$
Thrust force ..... : $T$	Propulsive efficiency ..... : $\eta_D = \eta_H \times \eta_B$
Thrust deduction fraction ..... : $F = \frac{T - R_T}{T}$	Total propulsive efficiency ..... : $\eta_{prop}$
Thrust deduction coefficient ..... : $t = \frac{T - R_T}{T}$	$\eta_{prop} = \frac{P_E}{P_B} = \frac{P_E}{P_T} \times \frac{P_T}{P_D} \times \frac{P_D}{P_B} = \eta_H \times \eta_B \times \eta_S = \eta_H \times \eta_O \times \eta_R \times \eta_S$
<b>Power</b>	Total efficiency ..... : $\eta_{tot}$
Effective (Towing) power ..... : $P_E = R_T \times V$	$\eta_{tot} = \eta_{prop} \times \eta_E = \eta_H \times \eta_O \times \eta_R \times \eta_S \times \eta_E$
Thrust power delivered by the propeller to water ..... : $P_T = P_E / \eta_H$	
Power delivered to propeller ..... : $P_D = P_T / \eta_B$	
Brake power of main engine ..... : $P_B = P_D / \eta_S$	

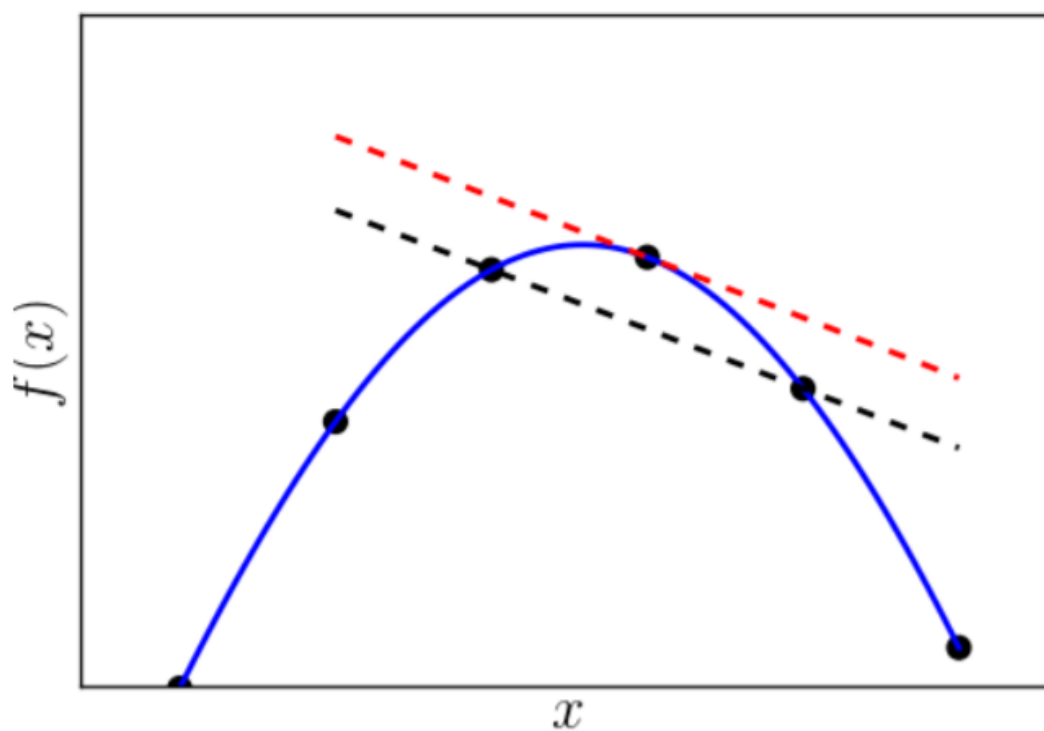
Εικόνα 17: Συλλογή εξισώσεων σχετικών με την προώθηση και την αποτελεσματικότητα του πλοίου

Πηγή: <https://marine.man-es.com/>

## Κεφάλαιο 4 Πεπερασμένα στοιχεία για Ρευστά

### 4.1 Μέθοδοι πεπερασμένων διαφορών

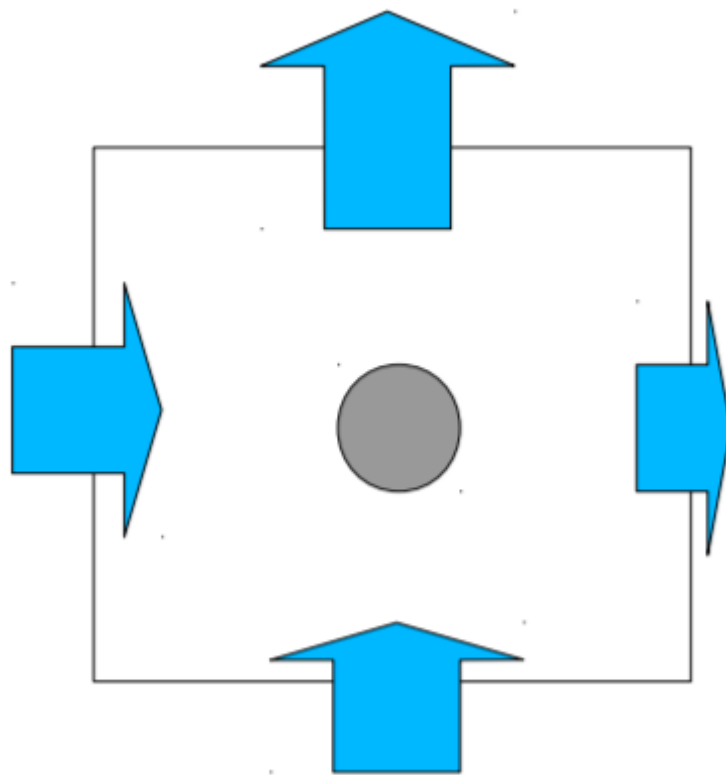
- ✓ Μειώνει τον προβληματικό τομέα σε πεπερασμένο σύνολο σημείων
- ✓ Αντικαθιστά τα ακριβή παράγωγα με εξισώσεις διαφοράς κατά προσέγγιση



$$\frac{df}{dx} \approx \frac{\Delta f}{\Delta x} = \frac{f(x_i + 1) - f(x_i - 1)}{(x_i + 1) - (x_i - 1)}$$

## 4.2 Μέθοδοι πεπερασμένου όγκου

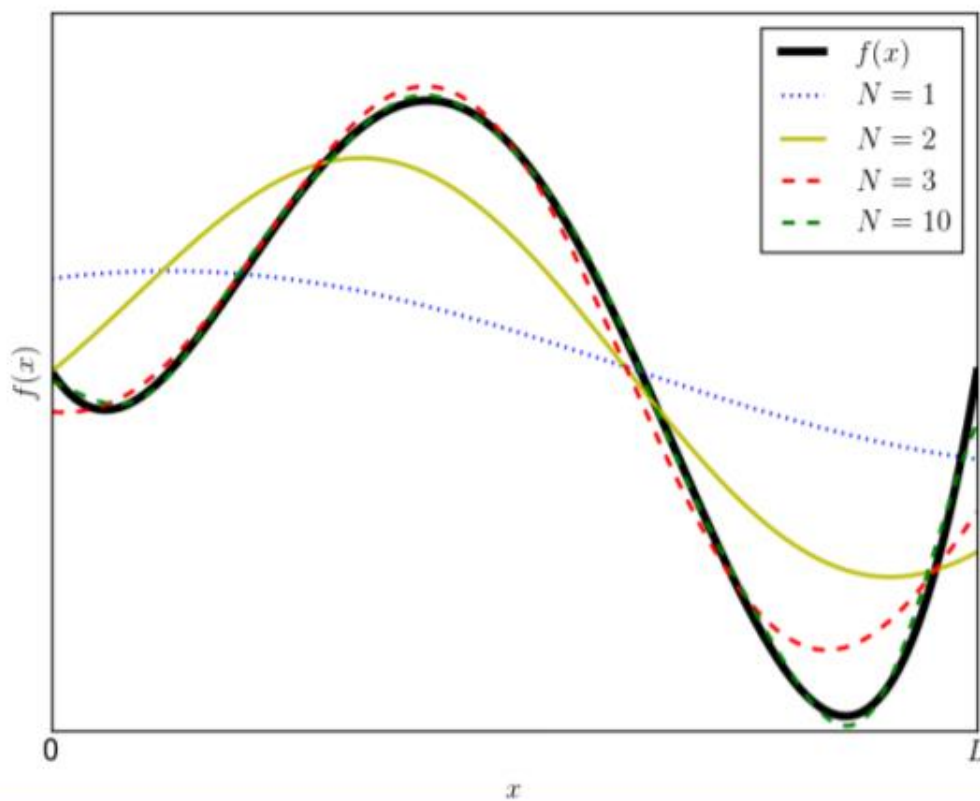
- Διαχωρίζει τον προβληματικό τομέα σε ένα πεπερασμένο σύνολο δευτερευόντων {τομών}.
- Λύνει για ολοκλήρωση όγκου ποσοτήτων στο εσωτερικό. Συνήθως μειώνει πρόβλημα στον υπολογισμό ροής σε όλες τις όψεις του τόμου
- Εάν οι ροές εξαρτώνται από παράγωγα, τότε άλλη μέθοδος (π.χ. πεπερασμένες διαφορές) πρέπει να χρησιμοποιηθεί για να τις βρείτε



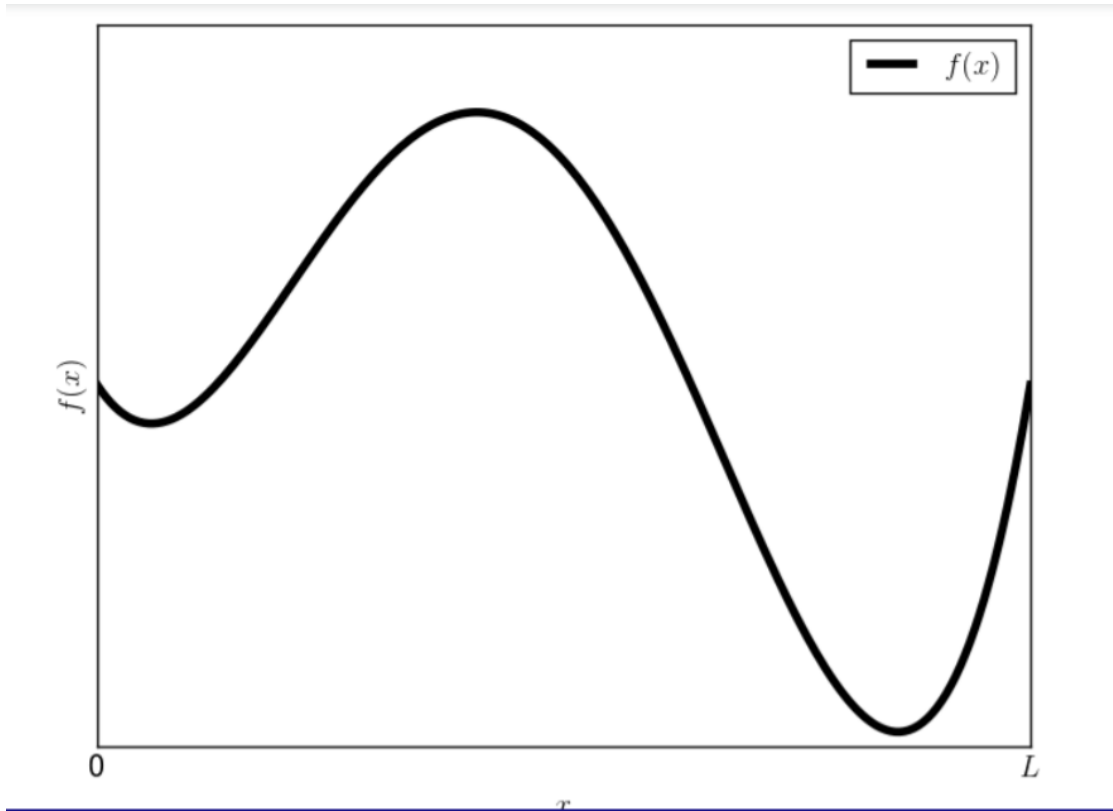
$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega_i} \rho dV = \sum_{Faces} \int_{\delta\Omega_i^j} \rho u \cdot n ds$$

### 4.3 Φασματική μέθοδος

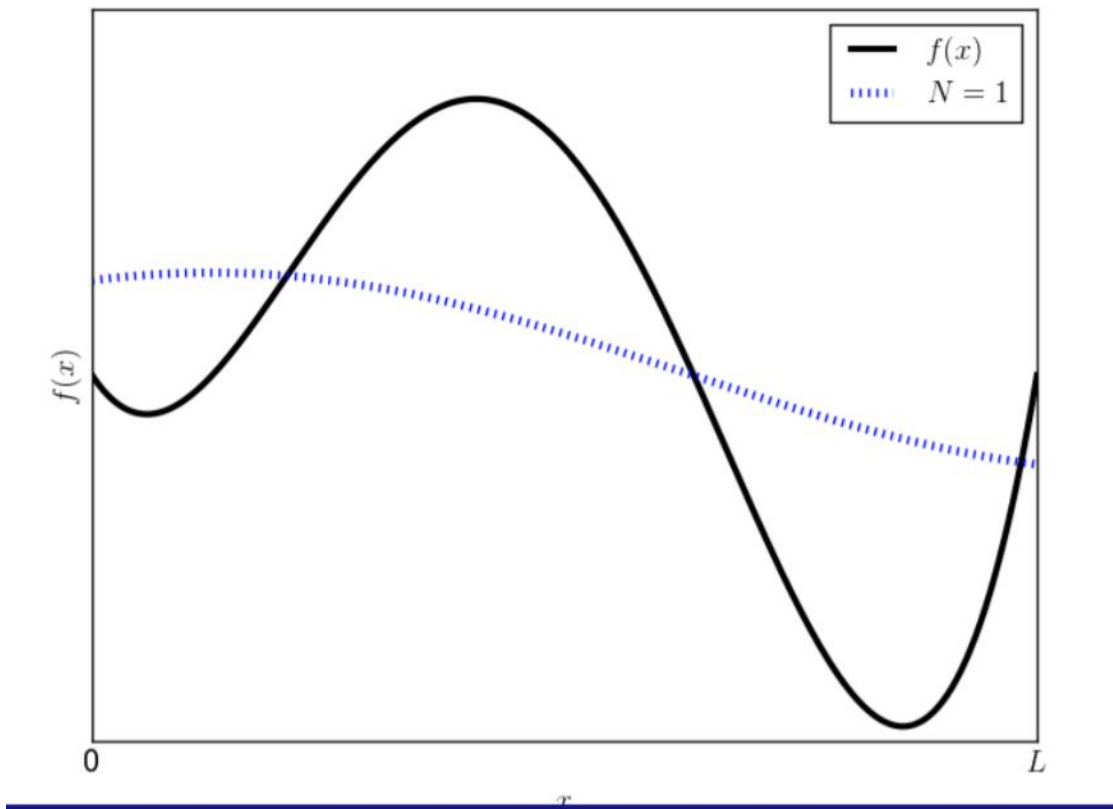
- Αντιπροσωπεύω τις μεταβλητές ως (όριο) συνόλων ορθογώνιων συναρτήσεων βάσης
- Οι λειτουργίες globalbasis διαφέρουν σε ολόκληρο τον τομέα
- Περιορίζει τις άπειρες σειρές και υπολογίζει τη συμπεριφορά των πεπερασμένων συντελεστών



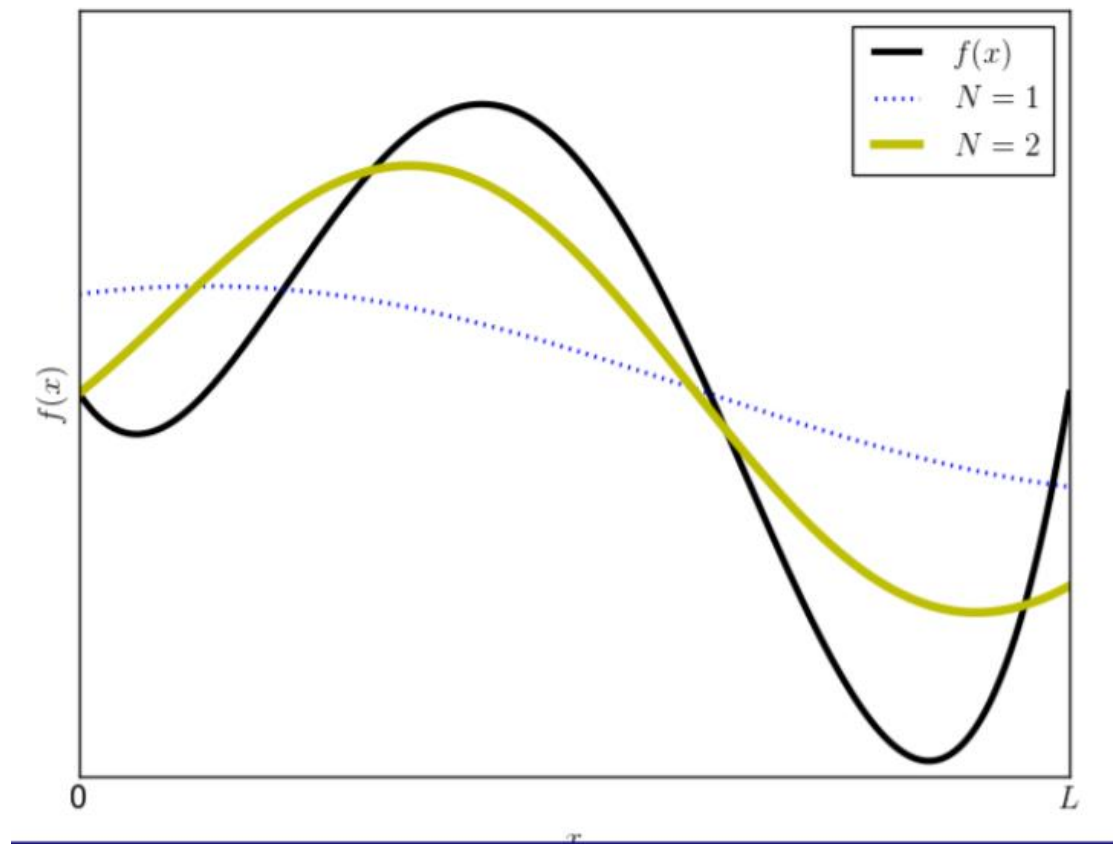
$$f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \alpha_n \cos\left(n \frac{\pi x}{L}\right) + b_n \sin\left(n \frac{\pi x}{L}\right) \approx \sum_{n=1}^N \alpha_n \cos\left(n \frac{\pi x}{L}\right) + b_n \sin\left(n \frac{\pi x}{L}\right)$$



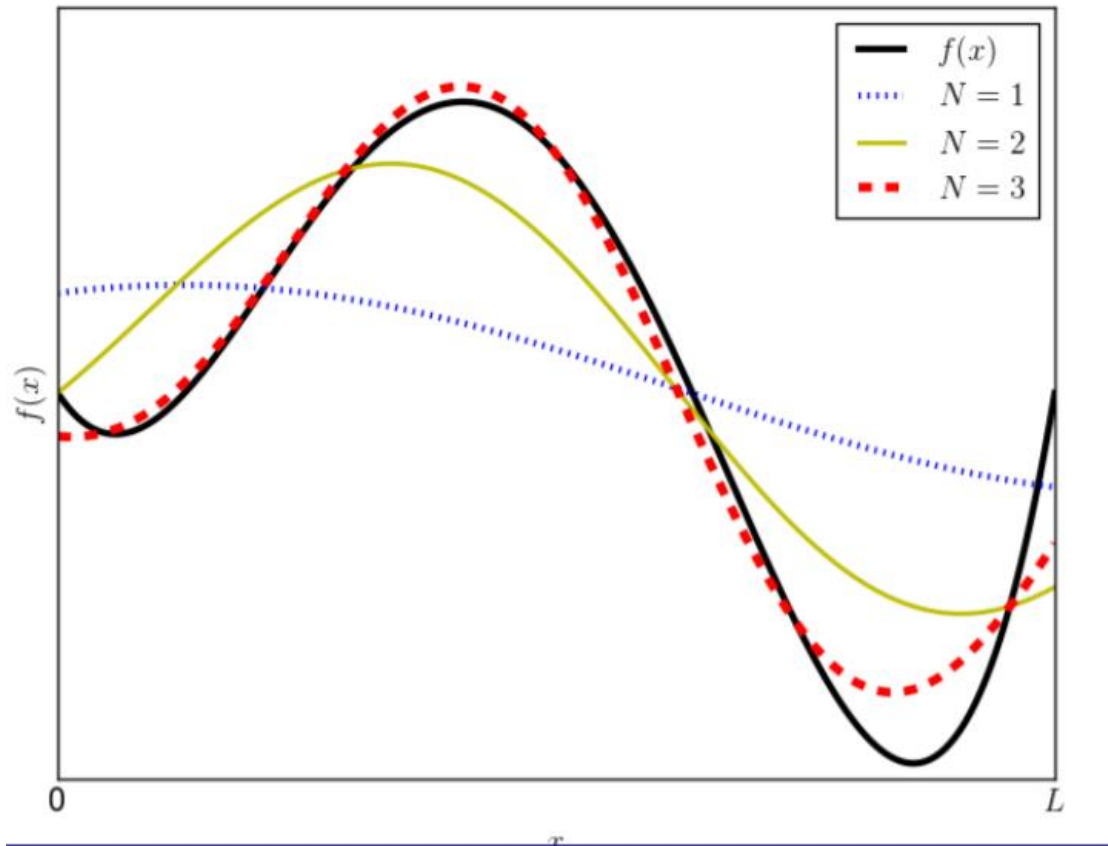
Εικόνα 18:Φασματική μέθοδος



Εικόνα 19:Φασματική μέθοδος



Εικόνα 20:Φασματική μέθοδος



Εικόνα 21: Φασματική μέθοδος

#### 4.4 Υβριδική μέθοδος

- ✚ Μέθοδος πεπερασμένου όγκου για global διατηρημένη ποσότητα - μέθοδος πεπερασμένων διαφορών για τον υπολογισμό των ροών
- ✚ Επίλυση ταχύτητας ρευστότητας: Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων, για πεπερασμένη διαφορά στο χρόνο



#### 4.5 Εξισώσεις Poisson: Πίεση σε Navier–Stoke

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u = \nabla p + \nabla^2 u, \text{ (ορμή)}$$

$$\nabla \cdot u = 0 \text{ (συνέχεια)}$$

Λαμβάνοντας την απόκλιση

$$\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \cdot u) + \nabla \cdot (\nabla \cdot u) = -\nabla^2 p + u \cdot \nabla^2 \cdot \nabla \cdot u$$

#### 4.6 Εξισώσεις Poisson

Η γενική μορφή της εξίσωσης είναι:

$$\nabla^2 \psi + f(x) = 0 \quad \forall x \in (0,1)$$

Αυτή είναι η δυνατή μορφή της εξίσωσης Poisson.

#### 4.7 Οριακές συνθήκες για αδύναμες εξισώσεις

Δύο πιθανές μορφές οριακής συνθήκης για μια καλή λύση στην εξίσωση Poisson είναι:

1. Dirichlet:  $\Psi(x) = A(x)$  για  $x \in A \subset \delta\Omega$
2. Neumann:  $\frac{\partial \Psi}{\partial x} = B(x)$  για  $x \in A \subset \delta\Omega$

Στην εξίσωση Galerkin, οι συνθήκες ορίου Dirichlet συνήθως απαιτούν ρητή τροποποίηση της δομής του προβλήματος για να λυθεί, ενώ οι συνθήκες Neumann αντιμετωπίζονται φυσικά ως μέρος της διατύπωσης.

## 4.8 Φυσικές οριακές Συνθήκες

Η μορφή της εξίσωσης είναι:

$$\int_0^1 \Phi \left( \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} \right) dx = 0$$

Ολοκληρώνοντας έχω:

$$\int_0^1 \Phi \frac{\partial \Phi}{\partial X} \frac{\partial \Psi}{\partial X} dx - \int_0^1 \Phi f dx = - \left[ \Phi \frac{\partial \Psi}{\partial x} \right]$$

Επιλέγω  $\phi$  για να απαλείψω στο Dirichlet συνθήκες (και έχω  $\Psi = a(0)$ ), και χρησιμοποιώ

ότι  $\frac{\partial \Psi}{\partial x}$  στις Neumann συνθήκες κα έχω:

$$\int_0^1 \phi \frac{\partial \phi}{\partial x} \frac{\partial \Psi}{\partial x} dx - \int_0^1 \phi f dx - \phi(1)b(1)$$

## 4.9 Βασικές εξισώσεις πεπερασμένων στοιχείων

Χρειάζεστε διακριτή πεπερασμένη διαστατική αναπαράσταση του προβλήματος που πρέπει να κάνετε αριθμητικό υπολογισμό σε υπολογιστή.

$$\Psi^\delta(x) = \sum_{i=1}^N \hat{\Psi}_i N_i(x)$$

Όπου  $\hat{\Psi}_i$  ανήκει στους πραγματικούς αριθμούς και  $N_i: \Omega \rightarrow \mathbb{R}$  είναι μια σταθερή εξίσωση που καθορίζει τη χωρική εξάρτηση.

#### 4.10 Προσέγγιση Galerkin

Για να αποκτήσουμε την προσέγγιση Galerkin της εξίσωσης Poisson, βρίσκουμε τη (μοναδική) λύση της εξίσωσης αδύναμης μορφής όταν είναι τα  $\gamma$  και  $f$  προσεγγίζονται από τις επεκτάσεις πεπερασμένων στοιχείων μας,

$$\psi^\delta = \sum_{i=1}^n \widehat{\Psi}_i N_i$$

$$\phi^\delta = \sum_{j=0}^n \widehat{\Phi}_j N_j$$

Οι  $\Psi^\delta$  ονομάζονται δοκιμαστικές συναρτήσεις και ο χώρος λειτουργίας που προέρχονται από αυτές είναι ο δοκιμαστικός χώρος. Το  $\Phi^\delta$  ονομάζεται λειτουργίες δοκιμής και βρίσκεται στο δοκιμαστικό χώρο. Ο υπολογισμός περιλαμβάνει τη λήψη του πεπερασμένου αριθμού  $\widehat{\Psi}_i$ .

Αντικαθιστώντας τις πεπερασμένες παραστάσεις σε (\*) έχουμε:

$$\int \sum_{j=0}^n \widehat{\Phi}_j \frac{\partial N_j}{\partial x} \sum_{i=1}^n \widehat{\Psi}_i \frac{\partial N_i}{\partial x} dV + u_N^\delta b(x_N) = \int \sum_{j=0}^n \widehat{\Phi}_j N_j f dV$$

$$\widehat{\Phi}_j \left\{ \left[ \int \frac{\partial N_j}{\partial x} \frac{\partial N_i}{\partial x} dV \right] \widehat{\Phi}_i - \int f N_j dV + \begin{cases} 0 & j = 1, \dots, n-1 \\ b(x_n) & j = n \end{cases} \right\}$$

#### 4.11 Από τοπικό σε ολικό (Global to Local)

$$D_{ij} = \int_{\Omega} \frac{\partial N_j}{\partial x} \frac{\partial N_i}{\partial x} dV$$

$$= \sum_K \int_{\Omega^K} \frac{\partial N_j}{\partial x} \frac{\partial N_i}{\partial x} dV$$

Όπου το  $\Omega^K = [x_i x_{i+1}]$  συνεισφέρει μόνο εάν:

$$\frac{\partial N_i}{\partial x} \neq 0, \frac{\partial N_j}{\partial x} \neq 0$$

#### 4.12 Πρόβλημα πεπερασμένης διαφοράς PoissonMatrix

$\frac{-2}{h^2}$	$\frac{1}{h^2}$	0	0	0	0	$\psi_1$	=	$\hat{f}_2 - \frac{a(0)}{h^2}$
$\frac{1}{h^2}$	$\frac{-2}{h^2}$	$\frac{1}{h^2}$	0	0	0	$\psi_2$		$\hat{f}_3$
0	$\frac{1}{h^2}$	$\frac{-2}{h^2}$	$\frac{1}{h^2}$	0	0	$\psi_3$		$\hat{f}_4$
0	0	$\frac{1}{h^2}$	$\frac{-2}{h^2}$	$\frac{1}{h^2}$	0	$\psi_4$		$\hat{f}_5$
0	0	0	$\frac{1}{h^2}$	$\frac{-2}{h^2}$	$\frac{1}{h^2}$	$\psi_5$		$\hat{f}_6$
0	0	0	0	$\frac{1}{h^2}$	$\frac{-1}{h^2}$	$\psi_6$		$\frac{1}{2}\hat{f}_6 - b(1)$

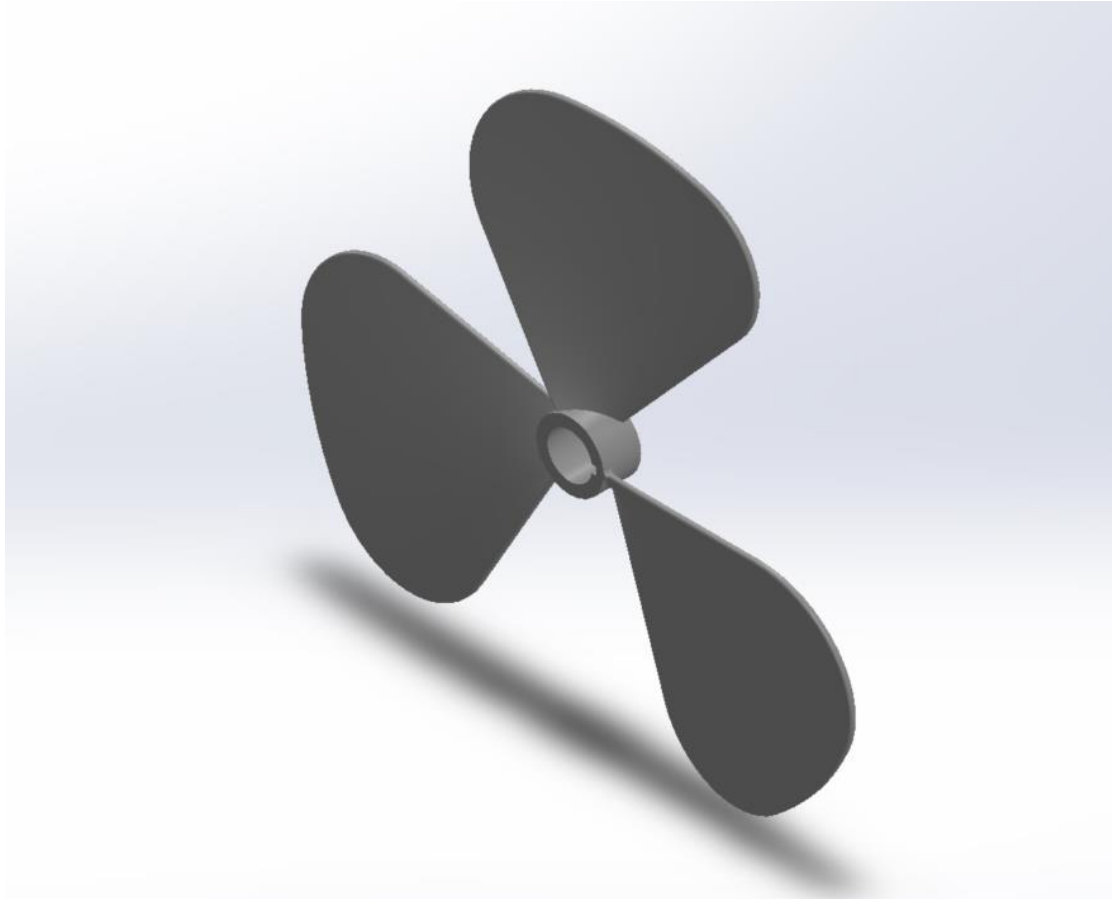
Εικόνα 22: MatrixPoisson

#### 4.13 Πρόβλημα PoissonMatrix Πεπερασμένου Όγκου

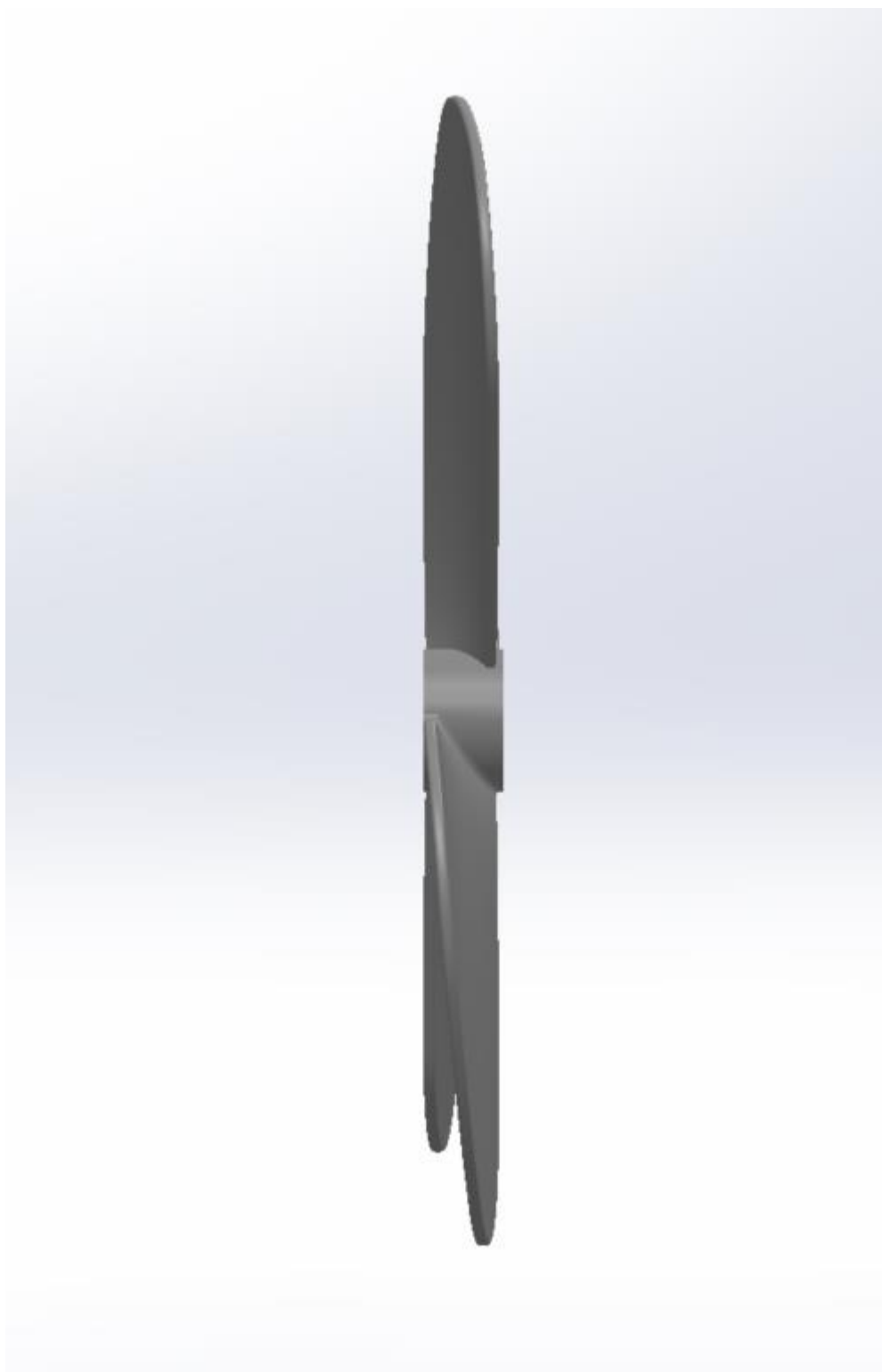
$\frac{-3}{h}$	$\frac{1}{h}$	0	0	0	0	$\psi_{\frac{1}{2}}$	=	$h\hat{f}_{1/2} - 2\frac{a(0)}{h}$
$\frac{1}{h}$	$\frac{-2}{h}$	$\frac{1}{h}$	0	0	0	$\psi_{\frac{3}{2}}$		$h\hat{f}_{3/2}$
0	$\frac{1}{h}$	$\frac{-2}{h}$	$\frac{1}{h}$	0	0	$\psi_{\frac{5}{2}}$		$h\hat{f}_{5/2}$
0	0	$\frac{1}{h}$	$\frac{-2}{h}$	$\frac{1}{h}$	0	$\psi_{\frac{7}{2}}$		$h\hat{f}_{7/2}$
0	0	0	$\frac{1}{h}$	$\frac{-2}{h}$	$\frac{1}{h}$	$\psi_{\frac{9}{2}}$		$h\hat{f}_{9/2}$
0	0	0	0	$\frac{1}{h}$	$\frac{-1}{h}$	$\psi_{\frac{11}{2}}$		$h\hat{f}_{11/2} - b(1)$

Εικόνα 23: PoissonMatrix Πεπερασμένου Όγκου

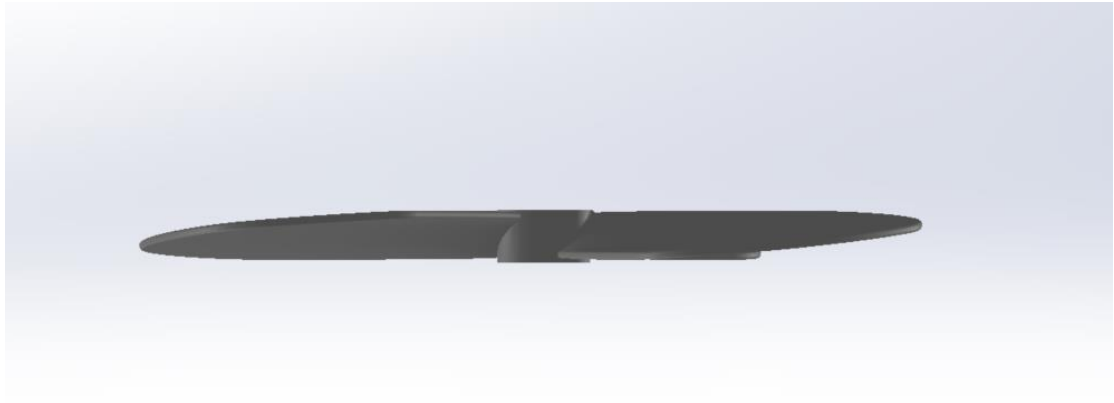
## Κεφάλαιο 5 Παρουσίαση μοντέλου



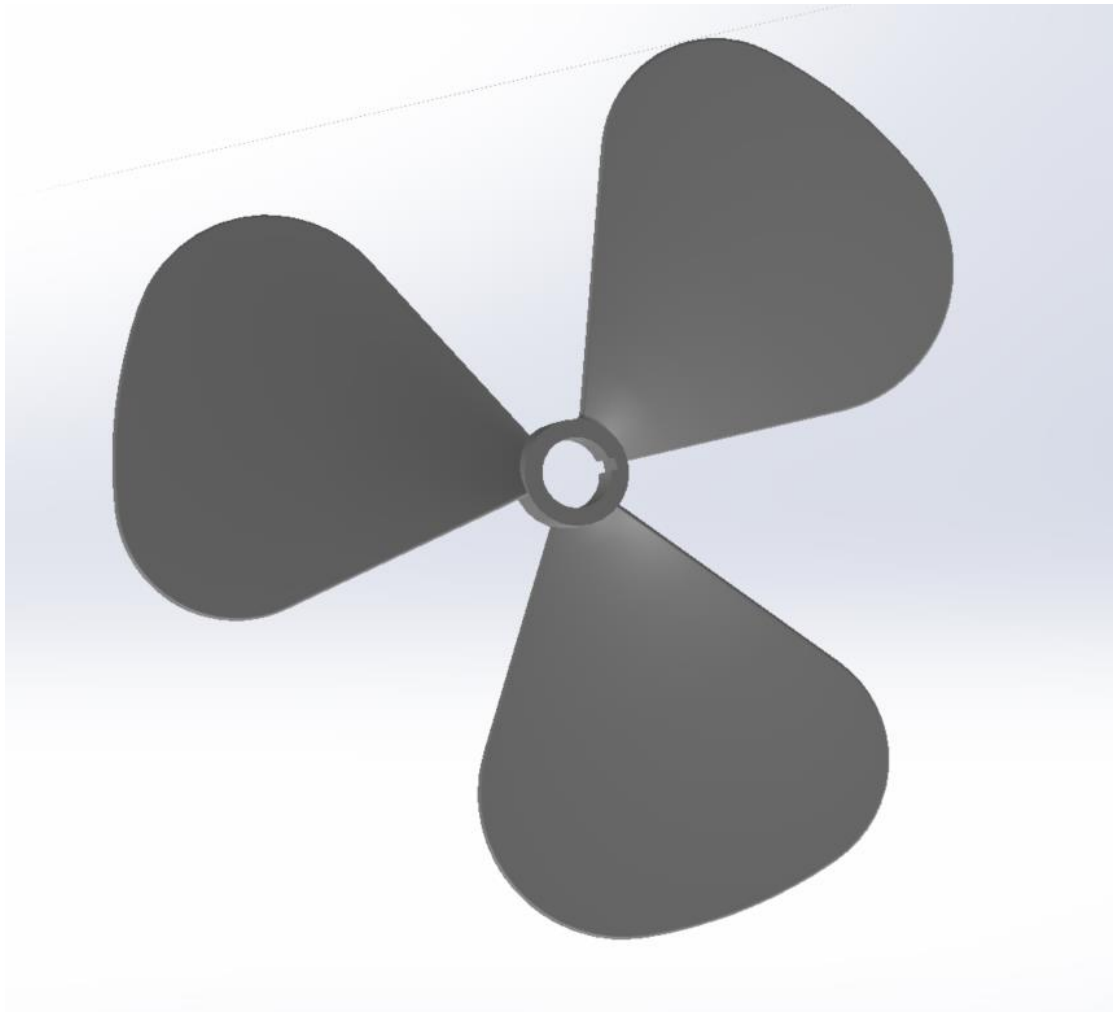
*Εικόνα 24: Μοντέλο υπό μελέτη*



*Εικόνα 25: Μοντέλο υπό μελέτη*



*Εικόνα 26: Μοντέλο υπό μελέτη*



*Εικόνα 27: Μοντέλο υπό μελέτη*

## Κεφάλαιο 6 Παρουσίαση αποτελεσμάτων Προσομοιώσεις

### 6.1 Εισαγωγή μοντέλου στο ANSYS

Στο κεφάλαιο αυτό και με την βοήθεια του προγράμματος ANSYS θα γίνει η προσομοίωση του μοντέλου μας. Το υγρό που ρέει γύρω από την προπέλα είναι νερό με πυκνότητα  $998.2 \frac{kg}{m^3}$  και ιξώδες  $0.001003 \frac{kg}{ms}$  όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.

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

Εικόνα 28: Ιδιότητες ρευστού

Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση είναι το k-epsilon. Τέλος η ταχύτητα περιστροφής της προπέλας θεωρήθηκε 1300 rpm όπως φαίνεται στην εικόνα 29.



Fluid

Zone Name: rotating

Material Name: water-liquid

Frame Motion
  3D Fan Zone
  Source Terms  
 Mesh Motion
  Laminar Zone
  Fixed Values  
 Porous Zone
  LES Zone

Reference Frame | **Mesh Motion** | Porous Zone | 3D Fan Zone | Embedded LES | Reaction | Source Terms | Fixed Values | Multiphase

**Relative Specification** UDF  
 Relative To Cell Zone: absolute | Zone Motion Function: none

**Rotation-Axis Origin**  
 X (m): 0  
 Y (m): 0  
 Z (m): 0

**Rotation-Axis Direction**  
 X: 0  
 Y: 0  
 Z: 1

**Rotational Velocity**  
 Speed (rpm): 1300

**Translational Velocity**  
 X (m/s): 0  
 Y (m/s): 0  
 Z (m/s): 0

Εικόνα 29: Ταχύτητα περιστροφής προπέλας

Velocity Inlet

Zone Name: inlet

Momentum | Thermal | Radiation | Species | DPM | Multiphase | Potential | UDS

Velocity Specification Method: Magnitude, Normal to Boundary

Reference Frame: Absolute

Velocity Magnitude (m/s): 14

Supersonic/Initial Gauge Pressure (pascal): 0

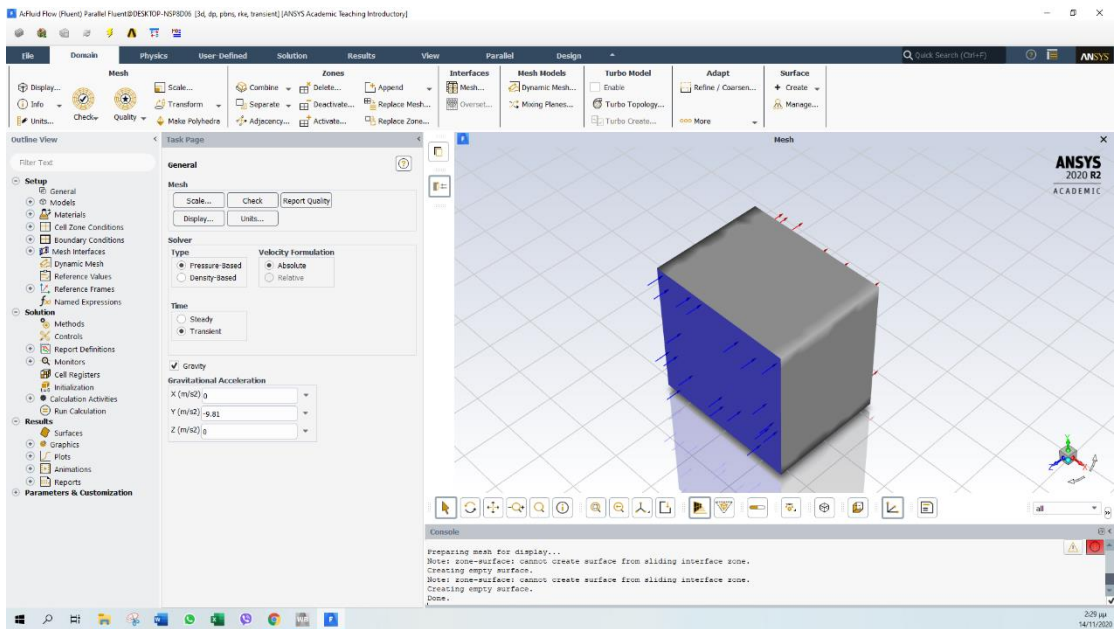
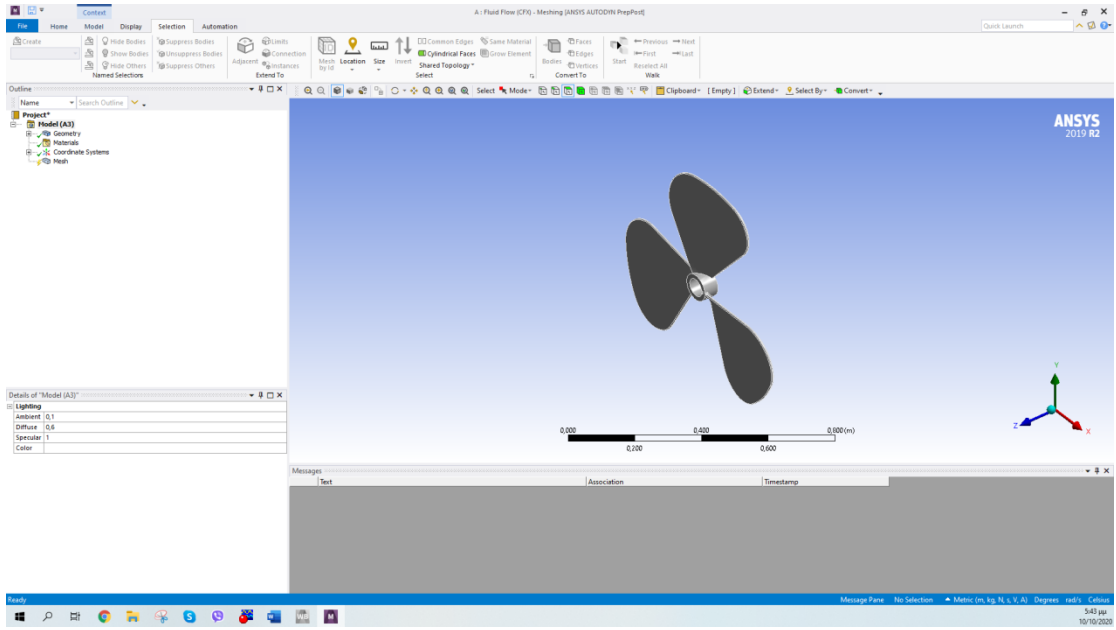
**Turbulence**

Specification Method: Intensity and Viscosity Ratio

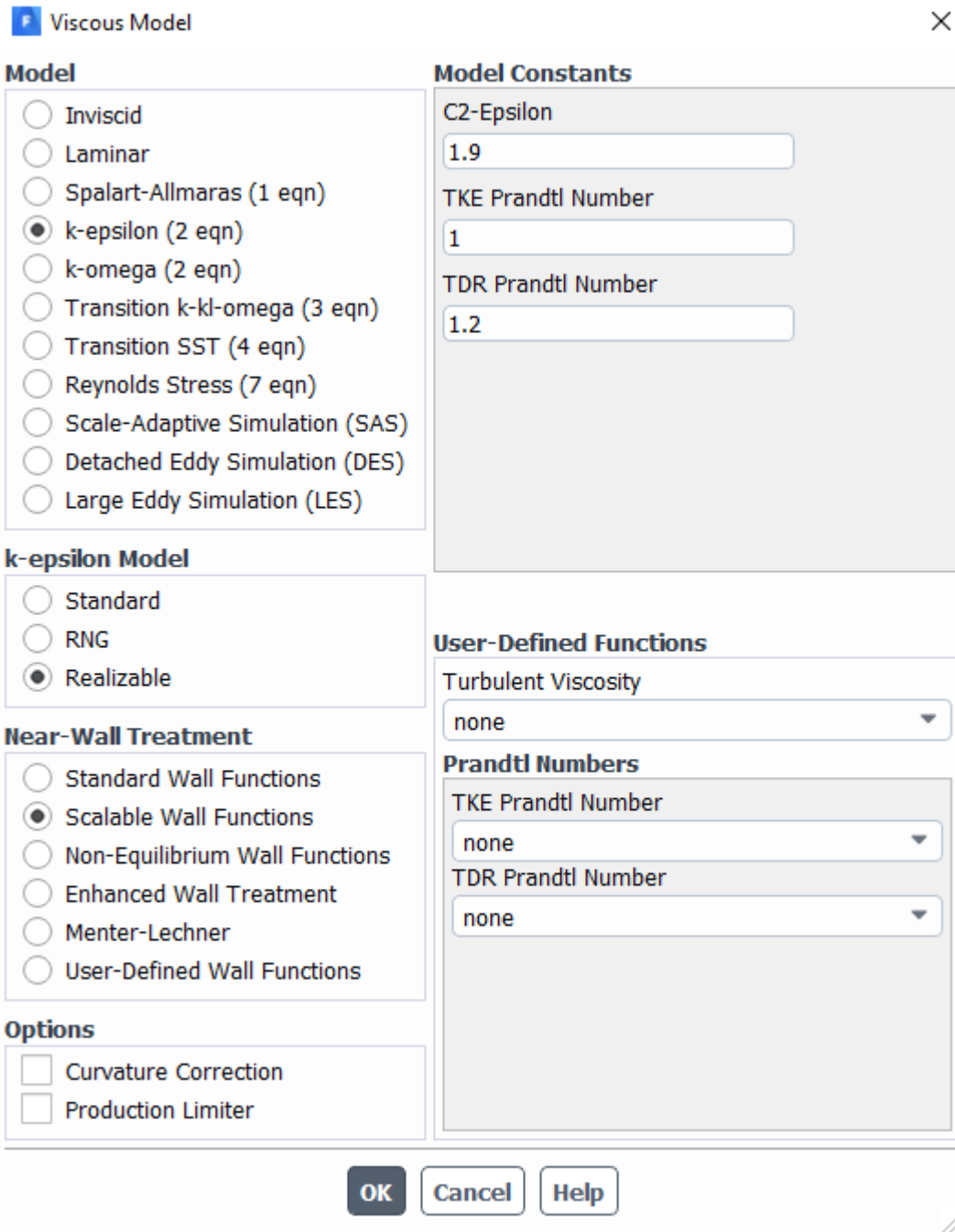
Turbulent Intensity (%): 5

Turbulent Viscosity Ratio: 10

Εικόνα 30: Εισαγωγή ταχύτητας ροής νερού



Εικόνα 31: Εισαγωγή μοντέλου στο Ansys



Εικόνα 32: Viscous model

Velocity Inlet
✕

Zone Name  
inlet

Momentum
Thermal
Radiation
Species
DPM
Multiphase
Potential
UDS

Velocity Specification Method Magnitude, Normal to Boundary

Reference Frame Absolute

Velocity Magnitude (m/s) 14

Supersonic/Initial Gauge Pressure (pascal) 0

**Turbulence**

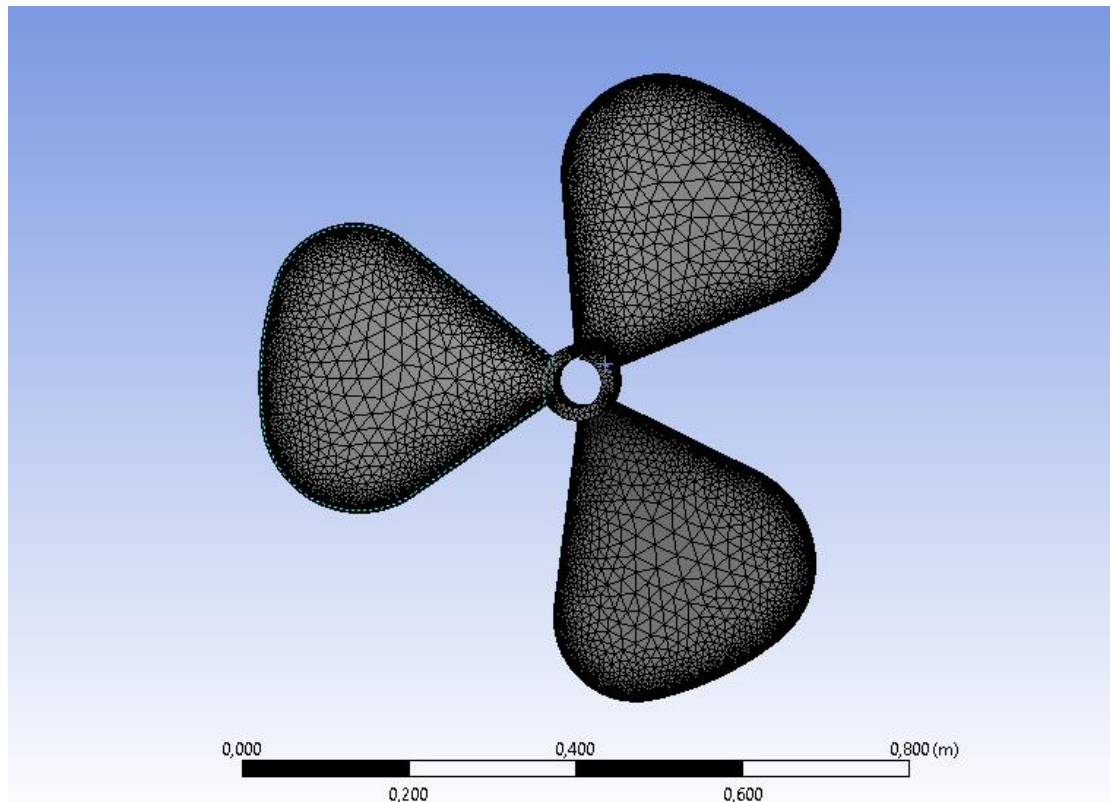
Specification Method Intensity and Viscosity Ratio

Turbulent Intensity (%) 5

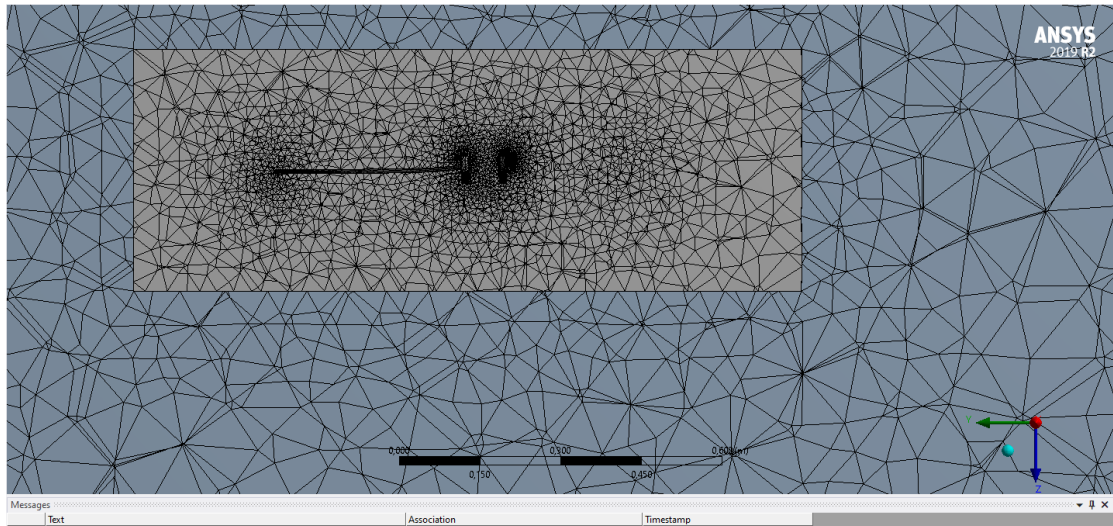
Turbulent Viscosity Ratio 10

Apply
Close
Help

Εικόνα 33: Inlet Συνοριακές συνθήκες



Εικόνα 34: Διακριτοποίηση Μοντέλου



Εικόνα 35: Τομή μέσα στο Mesh

## 6.2 Αποτελέσματα

The screenshot displays the 'Function Calculator' window. At the top, there are three icons: 'Macro Calculator', 'Mesh Calculator', and 'Function Calculator'. The 'Function Calculator' section is active and contains the following settings:

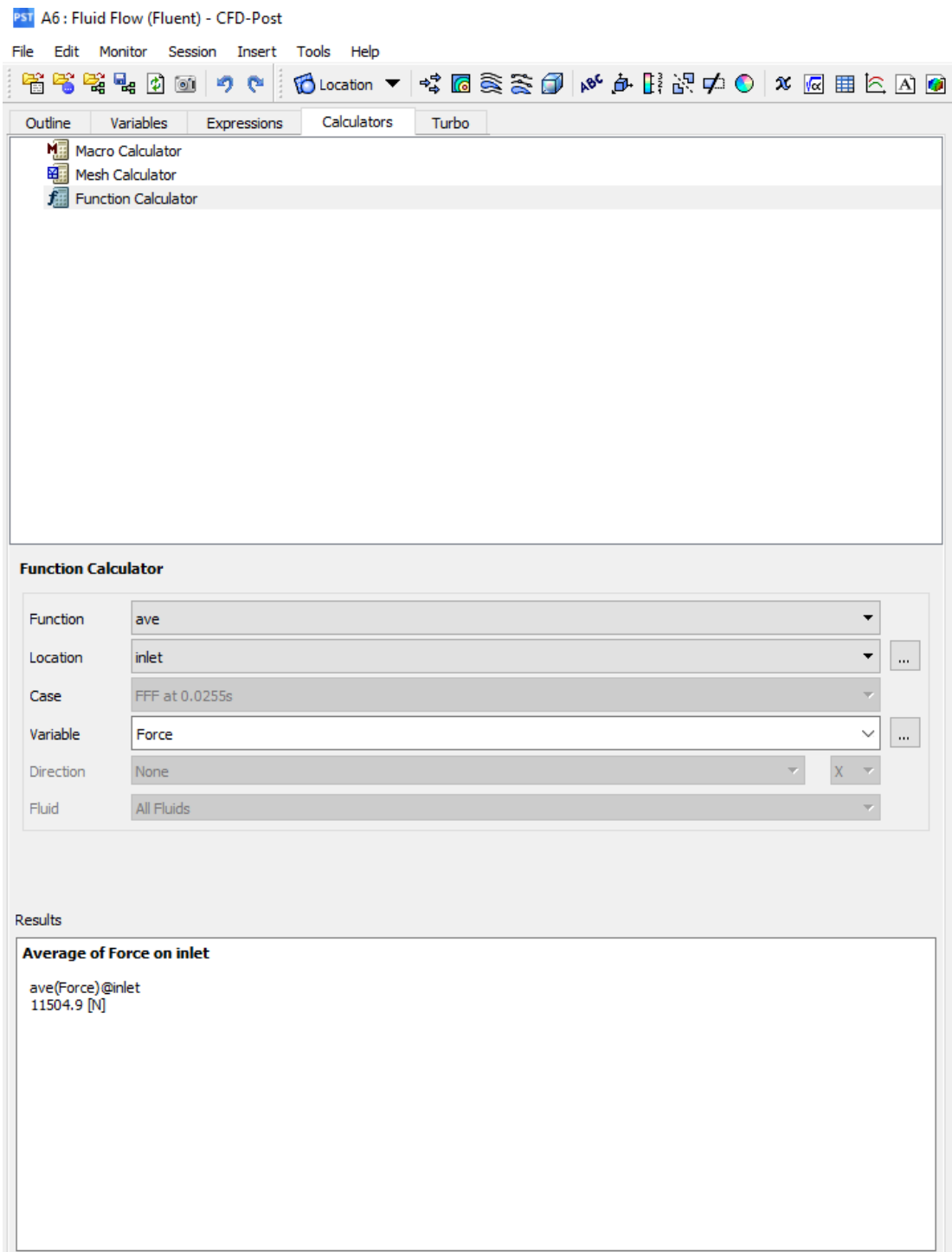
- Function: force
- Location: propeller
- Case: FFF at 0.0255s
- Variable: Force
- Direction: Global (with an 'X' dropdown)
- Fluid: All Fluids

Below the settings, the 'Results' section shows the following output:

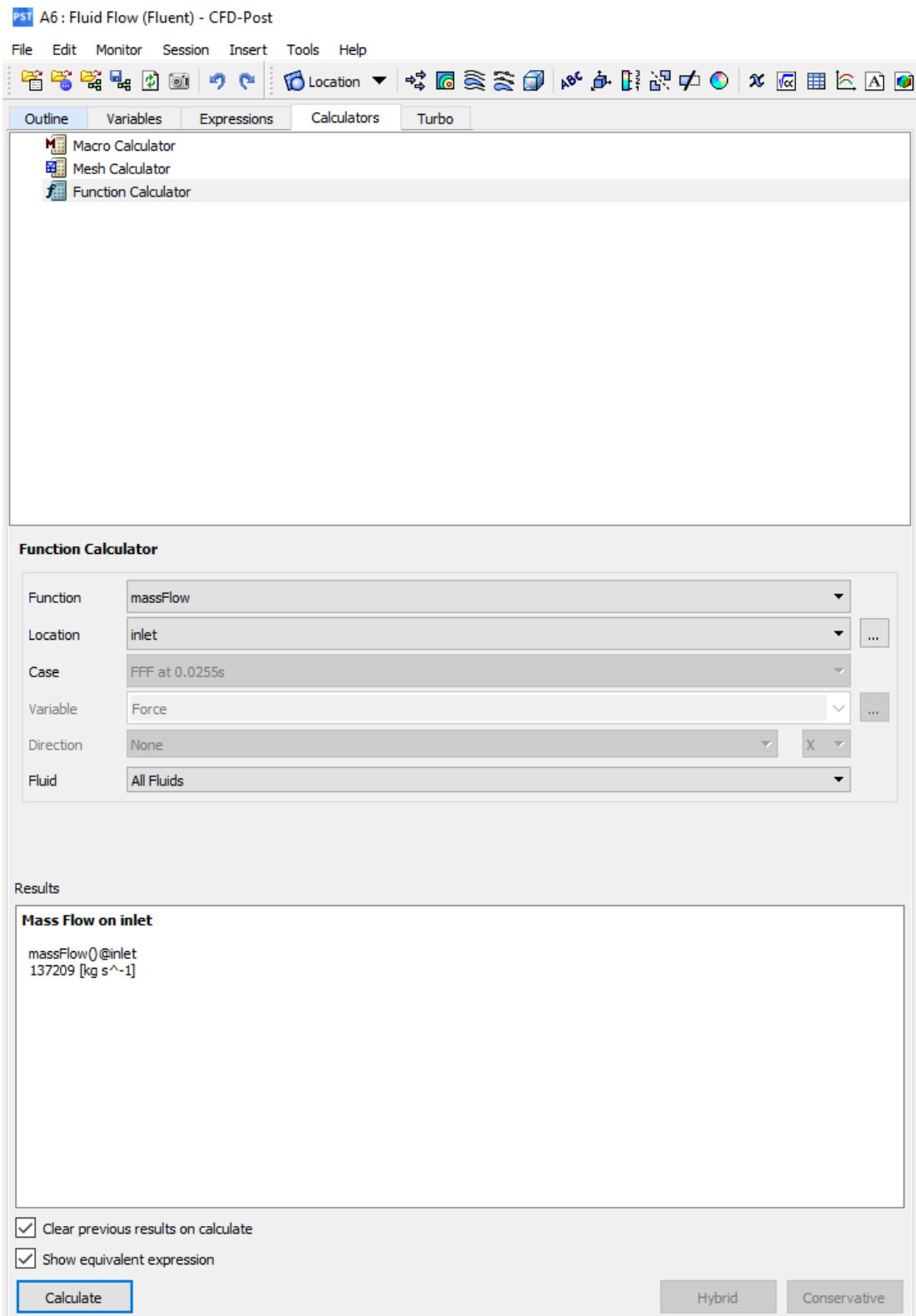
```
Force on propeller  
force_x()@propeller  
1631.06 [N]
```

At the bottom, there are two checked checkboxes: 'Clear previous results on calculate' and 'Show equivalent expression'. A 'Calculate' button is highlighted in blue. To the right, there are 'Hybrid' and 'Conservative' buttons.

Εικόνα 36: Δύναμη στην προπέλα

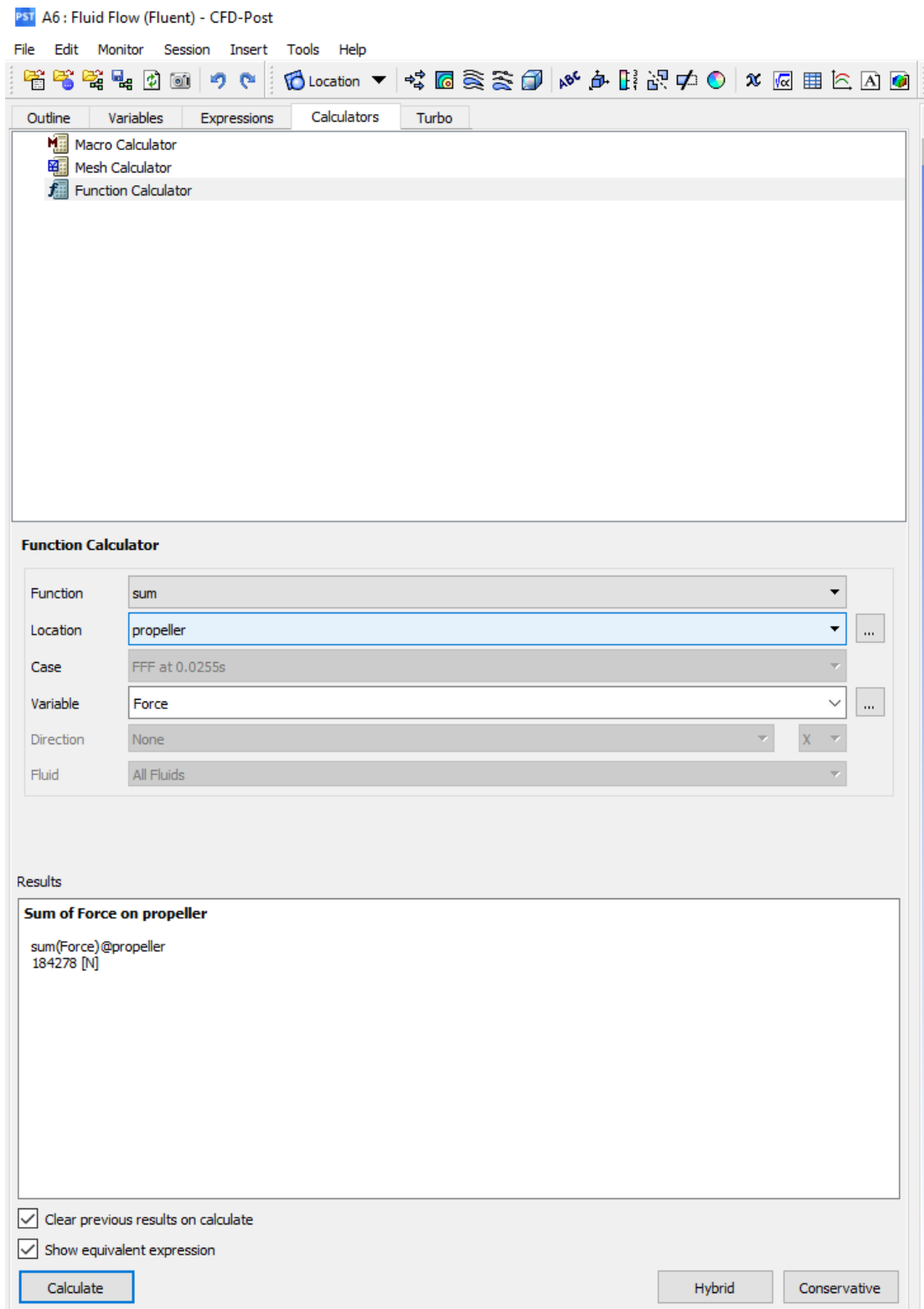


Εικόνα 37: Μέση δύναμη στην είσοδο του μοντέλου

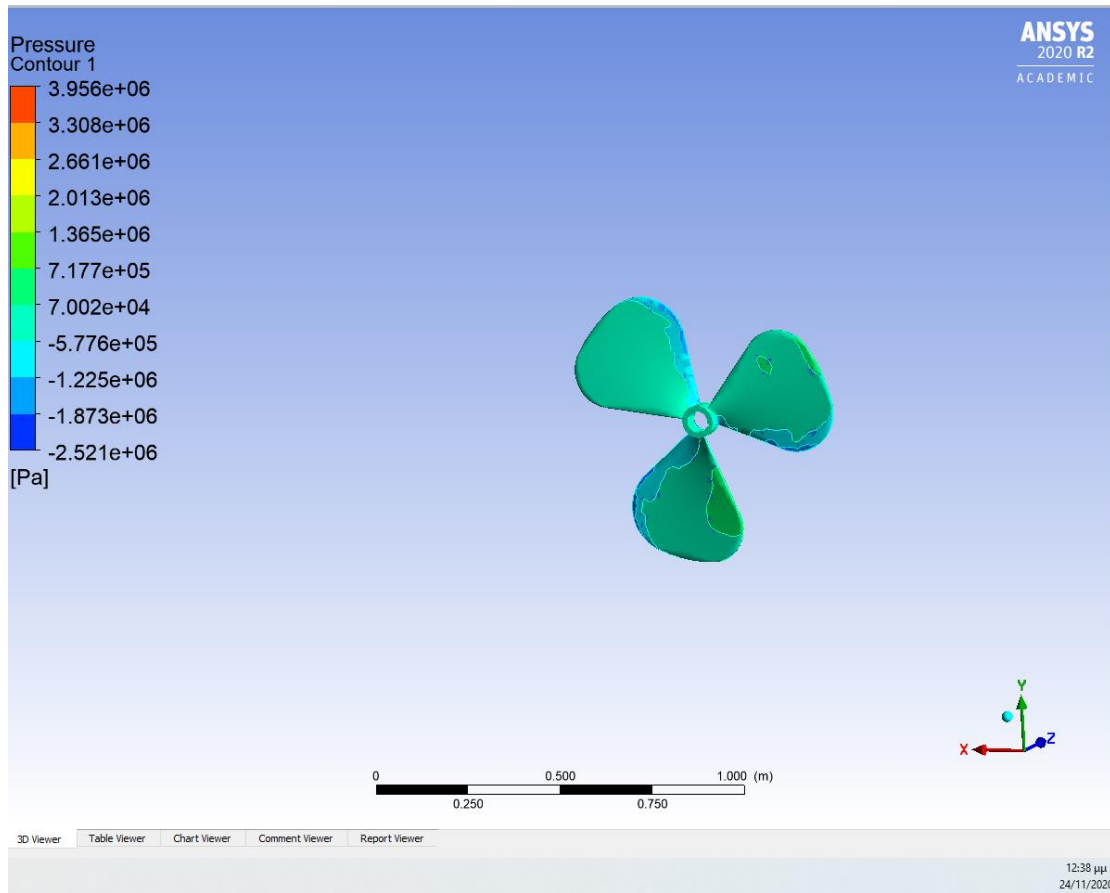


Εικόνα 38: Παροχή μάζας στο μοντέλο

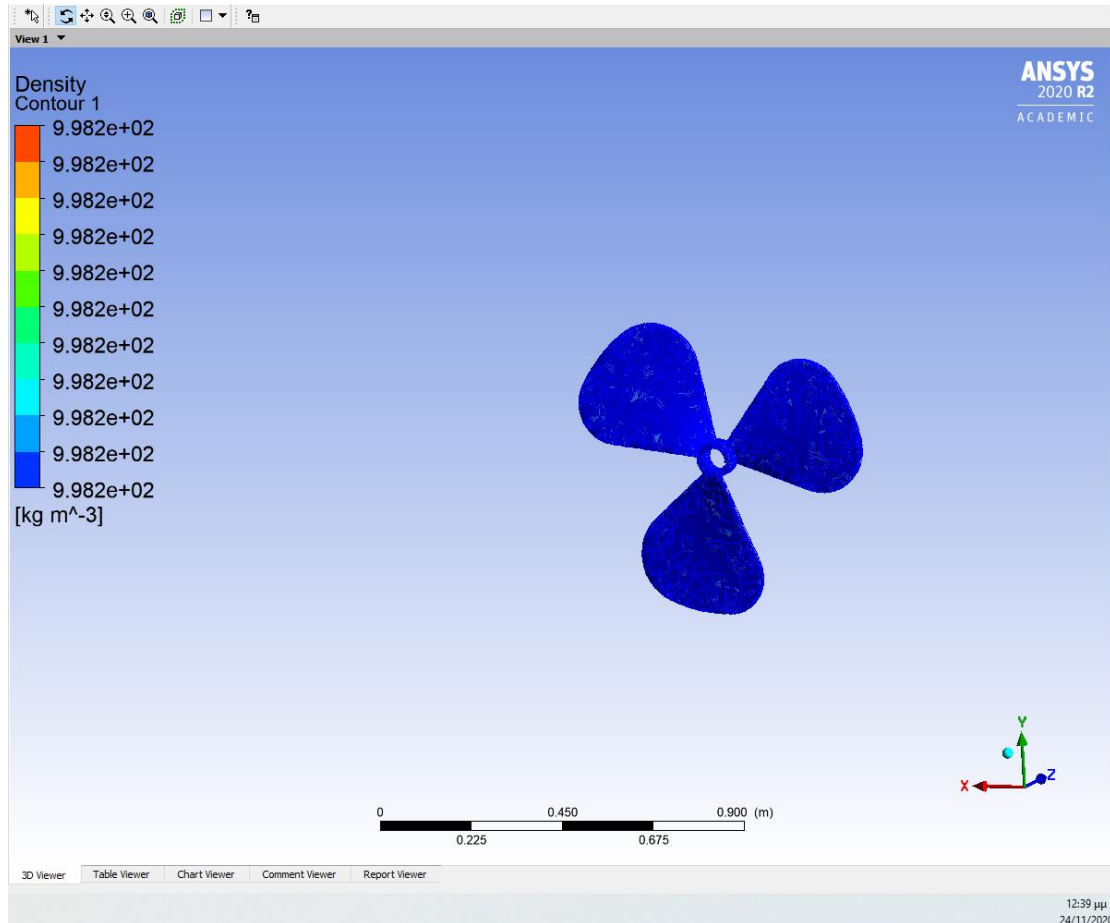




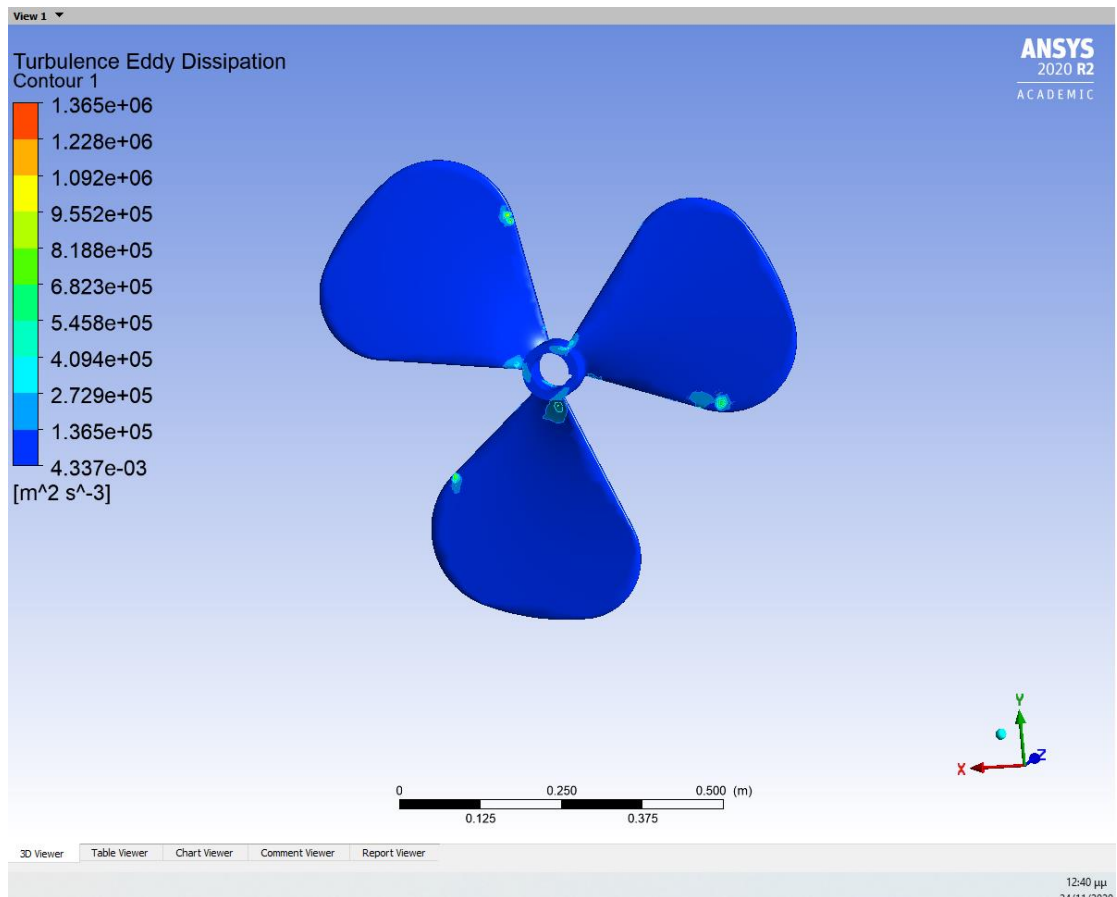
Εικόνα 39:Συνολική δύναμη που ασκείται στην προπέλα



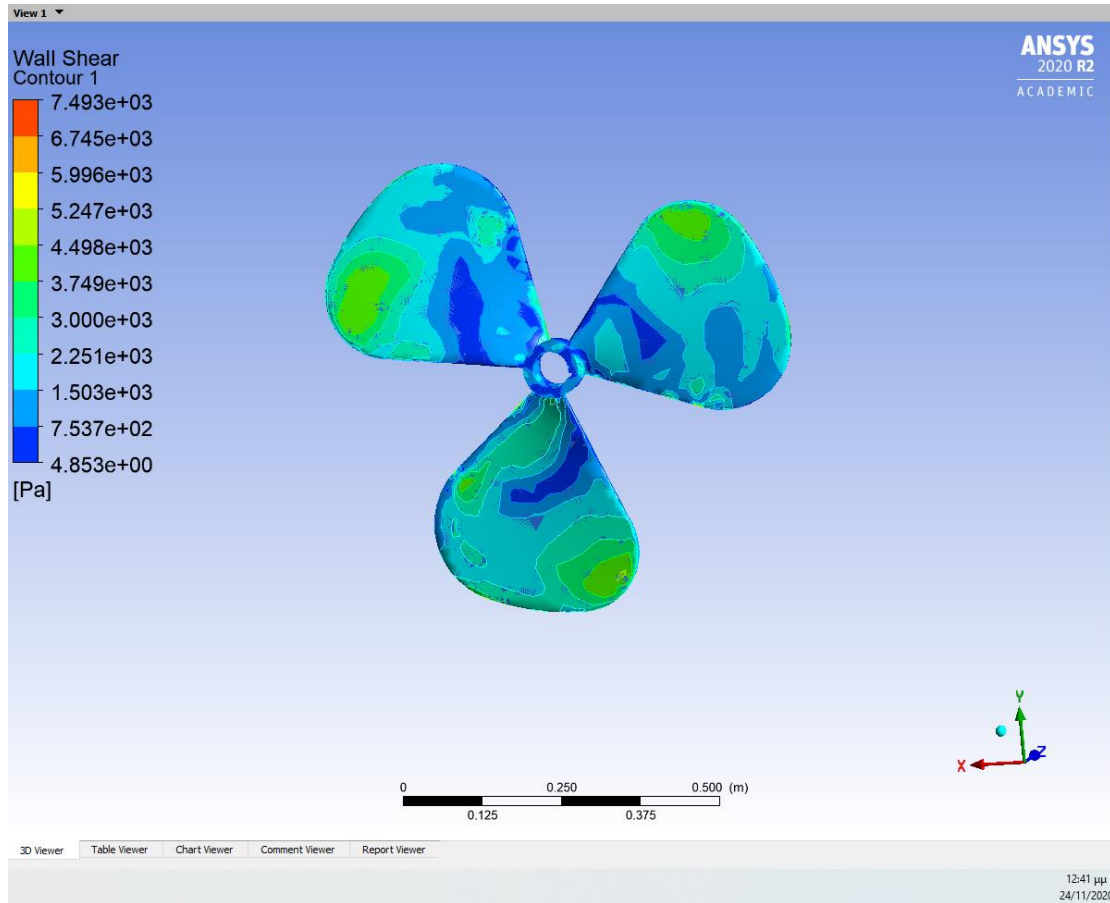
Εικόνα 40: Κατανομή πίεσης πάνω στην προπέλα



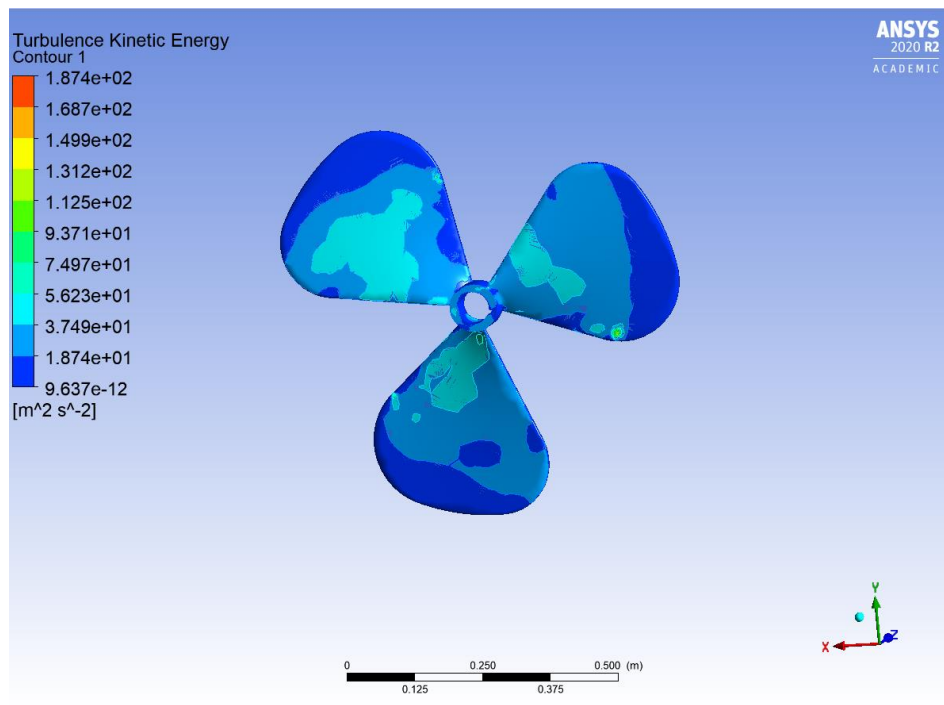
Εικόνα 41: Κατανομή πυκνότητας νερού πάνω στην προπέλα



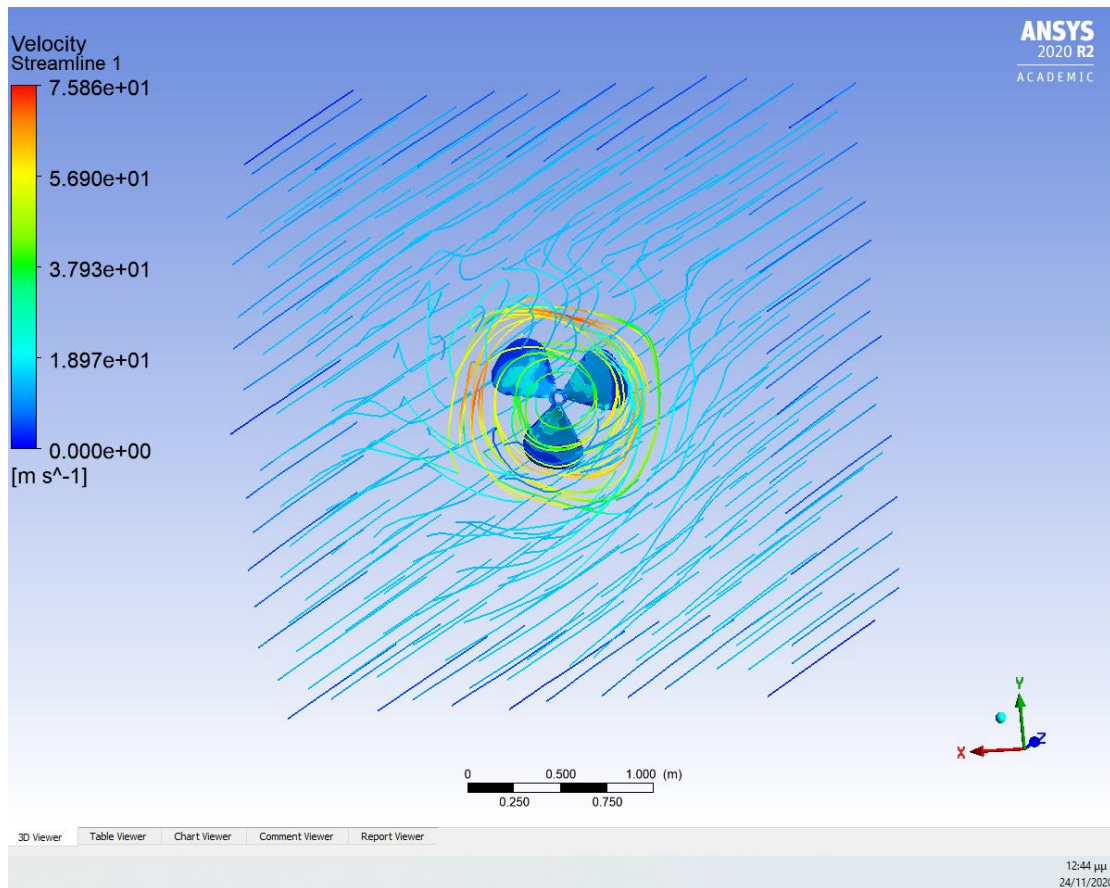
Εικόνα 42: Turbulence Eddy Dissipation



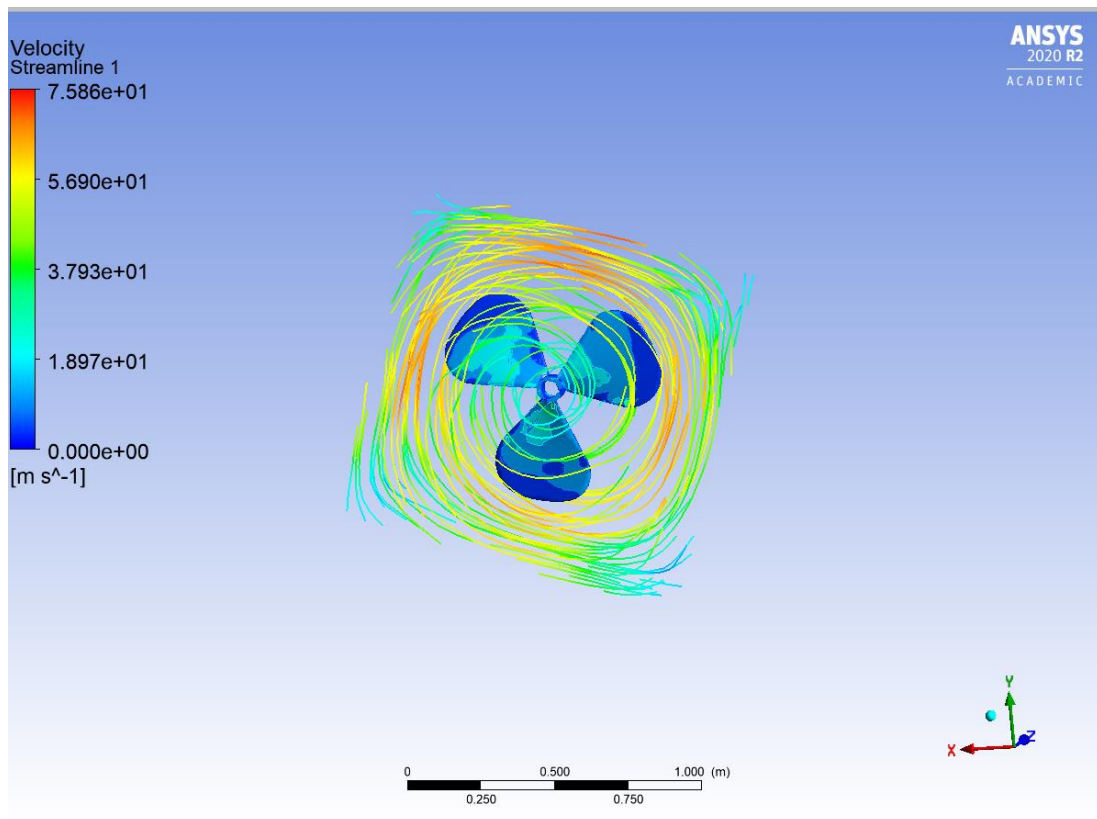
Εικόνα 43: Wall shear stress



Εικόνα 44: Τυρβώδεις κινητική ενέργεια



Εικόνα 45:Κατανομή ταχύτητας και ροή νερού γύρω από αυτήν



Εικόνα 46:Κατανομή ταχύτητας και ροή νερού γύρω από αυτήν

## Συμπεράσματα

Τα πεπερασμένα στοιχεία είναι ένας από του σημαντικότερους τρόπους υπολογισμών στην σύγχρονη μηχανική, η εκμάθησή τους προσφέρει στον μελλοντικό μηχανικό ένα σπουδαίο εργαλείο στον να μπορεί να κατανοεί και στην συνέχεια να λύνει σύγχρονα προβλήματα στον τομέα της μηχανικής αλλά και να προσφέρει βέλτιστες λύσεις.

Στην εργασία αυτή ο φοιτητής ήρθε αντιμέτωπος με πολλά και διαφορετικά προβλήματα τα οποία έπρεπε να κατανοήσει πρώτα καλά και στην συνέχεια να μπορέσει να τα εισάγει στο πρόγραμμα με τα πεπερασμένα στοιχεία για την προσομοίωση τους. Μερικά από τα πιο σημαντικά συμπεράσματα που προέκυψαν από την εργασία είναι:

- ✓ Η μέγιστη τυρβώδεις κινητική ενέργεια είναι  $187 \frac{m^2}{s^2}$
- ✓ Η μέγιστη πίεση που αναπτύσσεται είναι 3,95 MPa
- ✓ Η μέγιστη ταχύτητα που αναπτύσσεται είναι  $7.586 \frac{m}{s}$
- ✓ Η συνολική δύναμη που ασκείται στην προπέλα είναι 184KN
- ✓ Η παροχή μάζας του μοντέλου είναι  $137209 \frac{kg}{s}$

Τέλος η εργασία αυτή αποτελεί μια καλή βάση για μελλοντική ανάπτυξη και περαιτέρω μελέτη του θέματος από άλλους συναδέλφους.

## Βιβλιογραφία

1. [www.ansys.com](http://www.ansys.com)
2. [www.google.com](http://www.google.com)
3. O. Axelson, V. Barker: Finite element solution of boundary value problems. Academic Press 1984.
4. K. Baba, M. Tabata: On a conservative upwind finite element scheme for convection diffusion equations. RAIRO numer Anal . 15 ,1, 3-25, 1981.
5. I Babuska, W. Rheinboldt: Error estimates for adaptive finite element computations. SIAM J. Numer Comp . 15. 1978.
6. I. Babuska: the p and h – p version of the finite element method: the state of the art. in in Finite element, theory and application . D. Dwoyer, M Hussaini, R. Voigt eds. Springer ICASE/NASA LaRC series. 199-239 1988.
7. G.K. Batchelor: An Introduction to Fluid Dynamics. Cambridge University Press, 1970 .
8. A. Baker: Finite element computational fluid mechanics . McGraw-Hill, 1985.
9. R. Bank: PTLMG User's guide. Dept of Math. UCSD tech. report. Jan 1988. REFERENCES 185
10. R. Bank, T. Dupont, H. Yserentant: The Hierarchical basis multigrid method. Konrad ZuseZentrum Preprint SC-87-1. 1987.
11. R. Bank, L.R. Scott: On the conditioning of Finite Element equations with highly refined meshes. Math Dept. PennState research report 87013. 1987.
12. R. Bank, T. Dupont, H. Yserentant : The Hierarchical multigrid method. UCLA math preprint SC87-2, 1987.
13. C. Bardos: On the two dimensional Euler equations for incompressible fluids. J. Math. Anal. Appl ., 40 , 769-790, 1972.
14. T.J. Beale, A. Majda: Rate of convergence for viscous splitting of the Navier-Stokes equations. Math. Comp . 37 243-260, 1981.
15. C. Begue, C. Conca, F. Murat, O. Pironneau: A nouveau sur les ´equations de Navier-Stokes avec conditions aux limites sur la pression. Note CRAS t 304 Serie I 1 .,23-28 , 1987



16. C. Begue, C. Conca, F. Murat, O. Pironneau: Equations de Navier-Stokes avec conditions aux limites sur la pression. Nonlinear Partial Differential equations and their applications. Collège de France Seminar 9 , (H. Brezis and J.L. Lions ed) Pitman 1988.