



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΝΑΥΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ

ΠΑΛΛΟΜΕΝΟΣ ΕΥΚΑΜΠΤΟΣ ΕΛΛΕΙΠΤΙΚΟΣ ΔΑΚΤΥΛΙΟΣ

ΕΝΑ ΝΕΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΡΩΣΗΣ ΠΛΟΙΟΥ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΜΑΡΤΙΟΣ 2014

ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΠΟΛΙΤΗΣ ΓΕΡΑΣΙΜΟΣ

ΙΩΑΝΝΟΥ ΘΕΟΔΩΡΟΣ

**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΝΑΥΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ**  
**ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΙΤΛΟΣ:

ΠΑΛΛΟΜΕΝΟΣ ΕΥΚΑΜΠΤΟΣ ΕΛΛΕΙΠΤΙΚΟΣ ΔΑΚΤΥΛΙΟΣ

ΥΠΟΤΙΤΛΟΣ: ΕΝΑ ΝΕΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΡΟΩΣΗΣ ΠΛΟΙΟΥ

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

ΠΟΛΙΤΗΣ ΓΕΡΑΣΙΜΟΣ, ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ,  
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ

ΤΡΙΑΝΤΑΦΥΛΛΟΥ ΓΕΩΡΓΙΟΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ, ΜΕΛΟΣ  
ΜΠΕΛΙΜΠΑΣΑΚΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ, ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ  
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ, ΜΕΛΟΣ

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2014

ΙΩΑΝΝΟΥ ΘΕΟΔΩΡΟΣ

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Πολίτη Γεράσιμο, ο οποίος μέσω των αρκετά συχνών συζητήσεων που είχαμε με καθοδηγούσε πάντα στον επιστημονικά σωστό τρόπο αντιμετώπισης του προβλήματος αυτής της διπλωματικής εργασίας. Επίσης θα ήθελα να τον ευχαριστήσω που με εμπιστεύτηκε και μου ανέθεσε την παρουσίαση των αποτελεσμάτων αυτής της εργασίας στο τρίτο διεθνές συνέδριο ναυτικών προωστήριων μέσων (3rd International Symposium on Marine Propulsors) το οποίο διεξήχθη στην Τασμανία, της Αυστραλίας τον Μάιο του 2013. Η καθοδήγηση, οι συμβουλές αλλά κυρίως η υπομονή του ήταν καθοριστικοί παράγοντες για την διεκπεραίωση της εργασίας αυτής.

Επίσης να ευχαριστήσω τον κ. Phil Griffin ο οποίος βοήθησε στις φιλολογικές αλλά και γραμματικές διορθώσεις όλων των κειμένων που γράφτηκαν στην αγγλική ώστε να μπορέσει να γίνει η παρουσίαση στο διεθνές συνέδριο της Τασμανίας.

Τέλος να ευχαριστήσω την οικογένεια μου που πίστεψε σε αυτό που έκανα μέχρι τέλος και με στήριξε όπου χρειάστηκε με οποιονδήποτε τρόπο.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>1. Ιστορία και εξέλιξη των μέσων πρόωσης.....</b>	<b>6</b>
1.1 Ιστορική αναδρομή στα βιομηχανικά μέσα πρόωσης.....	7
1.2 Από την κίνηση της μέδουσας στο FEOD.....	10
1.3 Η Μέθοδος Συνοριακών Στοιχείων UBEM.....	14
<b>2. Εισαγωγή στην γένεση γεωμετρίας του FEOD.....</b>	<b>16</b>
2.1 Γεωμετρία και κίνηση υδροτομής.....	17
2.2 Ελλειπτική γεωμετρία και κίνηση του FEOD.....	20
2.3 Δημιουργία πλέγματος μέσω της Polar μεθόδου.....	24
2.4 Δημιουργία πλέγματος μέσω της Concentric μεθόδου.....	27
<b>3. Βασικές παράμετροι περιγραφής του προβλήματος του FEOD.....</b>	<b>31</b>
3.1 Κατηγορία A.....	32
3.2 Κατηγορία B.....	32
<b>4. Επίλυση του προβλήματος βέλτιστης σχεδίασης.....</b>	<b>33</b>
4.1 Επίλυση του προβλήματος του FEOD για το πρόβλημα σχεδίασης.....	34
4.2 Διαγράμματα FEOD σε ελεύθερη ροή.....	39
4.3 Τρόπος παραγωγής ώσης του FEOD από τον ομόρου του.....	43
4.4 Εφαρμογή του FEOD για την ώση πλοίου - Βέλτιστη σχεδίαση.....	47
<b>5. Κώδικας γένεσης της γεωμετρίας του πλέγματος.....</b>	<b>52</b>
5.1 Βασικά αρθρώματα του κώδικα.....	53
5.1.1 Άρθρωμα vector_algebra.....	53
5.2 Το κύριο πρόγραμμα.....	55
5.2.1 Η υπορουτίνα GMPP_jellyfish.....	55
5.2.2 Η υπορουτίνα read_parameters.....	55
5.2.3 Η υπορουτίνα manage_time.....	56
5.2.4 Η υπορουτίνα find_cdrag.....	57
5.2.5 Η υπορουτίνα wing_motion.....	57
5.2.6 Η υπορουτίνα create_c1_t.....	57
5.2.7 Η υπορουτίνα write_system_geometry_at_time_t.....	57
5.2.8 Η υπορουτίνα naca45.....	57
<b>6. Συμπεράσματα, συζήτηση και προτάσεις.....</b>	<b>58</b>
6.1 Εφικτότητα παραγωγής και κατασκευής του FEOD.....	59
6.2 Συμπεράσματα.....	61
<b>7. Βιβλιογραφία.....</b>	<b>62</b>

<b>Παράρτημα I :Ιδανική γωνία πρόσπτωσης και μηδενική γωνία άνωσης.....</b>	<b>64</b>
<b>Παράρτημα II: Αδιάστατες μεταβλητές .....</b>	<b>66</b>
<b>Παράρτημα III. Flexible Elliptic Oscillating Duct. Taking the FOD one step further. ....</b>	<b>68</b>

## 1. Ιστορία και εξέλιξη των μέσων πρόωσης

Ξεκινάμε με μια σύντομη εισαγωγή για την ιστορία των βιομηχανικών μέσων πρόωσης. Η ανάγκη που οδήγησε στην σύλληψη της ιδέας κατασκευής τους αλλά και η εξέλιξη τους μέσα στο πέρασμα των αιώνων συζητούνται. Εν συνεχεία γίνεται μια σύντομη περιγραφή του σκοπού της διπλωματικής αυτής εργασίας, ποιοι ήταν δηλαδή οι λόγοι που οδήγησαν στην δημιουργία ενός προωστήρα που να προσπαθεί να μιμηθεί την κίνηση μιας μέδουσας. Τέλος περιγράφονται οι βασικές αρχές του κώδικα UBEM ενός κώδικα που βασίζεται πάνω στην μέθοδο των συνοριακών στοιχείων και ο οποίος είναι αυτός που λύνει οποιοδήποτε μόνιμο ή μη μόνιμο πρόβλημα κίνησης σώματος που αναπτύσσει άνοση (lift) μέσα σε μη συνεκτικό ρευστό.

## 1.1 Ιστορική αναδρομή στα βιομιμητικά μέσα πρόωσης.

Από την αρχή της προσπάθειας του ανθρώπου να βελτιώσει τον τρόπο διαβίωσης του, είτε σε ενστικτώδες είτε σε συνειδητό επίπεδο, η προσοχή του στράφηκε στην ‘ευκολότερη’ λύση, να μιμηθεί την ίδια την φύση που είχε ήδη εξελίχθη για να αντιμετωπίσει όλα αυτά τα προβλήματα. Τα πιο άπλα παραδείγματα είναι από την κατασκευή εργαλείων όπως το τσεκούρι χειρός, Εικόνα 1, έως και προϊστορικών όπλων όπως το δόρυ, Εικόνα 2 όπου ο λόγος κατασκευής τους ήταν είτε για να διαμορφώσουν το έδαφος είτε για να κυνηγήσουν, ακόμα και να αμυνθούν από άγρια ζώα. Κάνοντας ένα άλμα κάποιων χιλιάδων χρόνων μέσα στην εξελικτική κλίμακα φτάνουμε σε μια περίοδο όπου ο άνθρωπος έχει εξασφαλίσει την τροφή του και μάλιστα έχει βελτιώσει κατά πολύ, σε σχέση με τα αρχικά στάδια, την τεχνική του. Πλέον στρέφεται σε άλλου είδους ανάγκες που είναι είτε να προστατέψει τον εαυτό του από άλλους ανθρώπους είτε να κατακτήσει άλλες περιοχές είτε για επεκτατικούς λόγους είτε απλά για λόγους εύρεσης τροφής σε άλλες περιοχές. Πλέον είναι ευνόητο ότι το ένστικτο δίνει τη θέση του στο συνειδητό και άρα στην αρχή εφαρμογής στρατηγικών για να μπορέσει με τον ευκολότερο δυνατό τρόπο να ανταπεξέλθει στις προκλήσεις. Αρχίζει λοιπόν να κατασκευάζει πιο πολύπλοκες κατασκευές μεταξύ των οποίων και μέσα τα οποία θα τον μεταφέρουν πιο γρήγορα και με ασφαλέστερο τρόπο σε μέρη που πριν ήταν απροσπέλαστα. Τα πρώτα πλοία φτιάχνονται τα οποία μεταφέρουν στρατό ή ακόμα και προσωπικό. Προσπαθώντας να μιμηθούν το εξωτερικό περίγραμμα των ψαριών οι γάστρες ομοιάζουν όσο το δυνατόν περισσότερο για την εποχή εκείνη σε ψάρια. Προχωρώντας και άλλα χρόνια προς την εποχή μας παρατηρούμε ότι πλέον ακόμα και το σχήμα αλλά και τα μέσα πρόωσης αρχίζουν και μεταβάλλονται μιας και πλέον ο παράγοντας ταχύτητα αρχίζει να γίνεται σημαντικός. Οι γάστρες βελτιώνονται σε σχήμα από υδροδυναμικής απόψεως, με βάση κυρίως την εμπειρία, αλλά και τα μέσα πρόωσης αλλάζουν, από το κατάρτι και το πανί περνάμε στην εμφάνιση της έλικας. Ταυτόχρονα αρχίζουμε να έχουμε δειλές προσπάθειες μίμησης του τρόπου πτήσης των πτηνών, βέβαια αυτό γίνεται σε μορφή είτε σχεδίων είτε μέσω μυθιστορημάτων. Για παράδειγμα ο Λεονάρντο Ντα Βίντσι μελέτησε την κίνηση των πτηνών και απλά σχεδίασε κάποιες μηχανές που θα μπορούσαν να μιμηθούν αυτή την κίνηση. Μπαίνοντας στον 20<sup>ο</sup> αιώνα έχουμε την κατασκευή των πρώτων αεροπλάνων που και πάλι βασίζονται στον τρόπο πτήσης των πουλιών. Τα άκαμπτα πτερύγια, λόγω έλλειψης τεχνογνωσίας, των αεροπλάνων προσομοιάζουν όσο το δυνατόν περισσότερο τα εύκαμπτα φτερά των πουλιών. Έχουμε επίσης στροφή και στο θαλάσσιο βασίλειο όπου αρχίζει η επιστημονική κοινότητα να μελετά την κίνηση ψαριών και θηλαστικών της θάλασσας. Ένα τυπικό παράδειγμα είναι το λεγόμενο ‘Παράδοξο του Gray’. Ο Sir James Gray ήταν ένας βρετανός ζωολόγος ο οποίος το 1936 με βάση τις μελέτες που είχε κάνει πάνω στα δελφίνια έκρινε ότι η μυϊκή τους μάζα δεν ήταν ικανή να τους προσδώσει τις ταχύτητες που

μετρούσαν πειραματικά στα δελφίνια. Με την σύγχρονη σχετική έρευνα γνωρίζουμε ότι οι ιδιαίτερες επιδόσεις των δελφινιών βασίζονται στην δυνατότητα των παλλομένων πτερυγίων να εκμεταλλεύονται το κυματικό δυναμικό της θάλασσας. Με την πάροδο του χρόνου και την πρόοδο των πειραματικών εξοπλισμών, της τεχνολογίας των υλικών αλλά και την αύξηση της δύναμης των υπολογιστών πλησιάζουμε περισσότερο στην κατανόηση τέτοιων προβλημάτων αλλά και στην υλοποίηση εύκαμπτων μερών προωστήριων μέσων που να μιμούνται ακριβώς την κίνηση είτε ψαριών είτε πτηνών. Έτσι, λοιπόν επανέρχεται στο προσκήνιο η ιδέα απαλλαγής άκαμπτων προωστήριων μέσων και η αντικατάστασή τους από εύκαμπτα πιο αποδοτικά μέσα είτε αυτά αφορούν εναέρια μέσα (πτερύγια) είτε αφορούν θαλάσσια μέσα (προπέλες). Πράγματι έχουν γίνει πολλές μελέτες και βήματα προς αυτή την κατεύθυνση, όπου τεχνητά υλικά τα οποία προσομοιάζουν τεχνητούς μύες είτε το εύκαμπτο κέλυφος ζώων, τροφοδοτούνται με ηλεκτρικούς παλμούς (ηλεκτρο- διεγερμένα πολυμερή) και μπορούν να εκτελέσουν μια πληθώρα κινήσεων[13]. Η κατασκευή ρομποτικών μηχανισμών που έχουν το εξωτερικό περίγραμμα ζώων και εκτελούν τις κινήσεις τους είναι επίσης πραγματικότητα[14] αλλά και η παραγωγή υπολογιστικών προγραμμάτων που εφαρμόζουν κώδικες παράγωγης γεωμετρίας, κίνησης αλλά και υδροδυναμικής συμπεριφοράς [6,11,8] έχουν οδηγήσει την επιστήμη μπροστά στο κατώφλι μιας νέας εποχής όπου η κατανόηση των σχετικών φαινομένων και η εκμετάλλευσή τους για την δημιουργία αποδοτικότερων συστημάτων πρόωσης γίνεται εφικτή.



Εικόνα 1. Τσεκούρι χειρός.





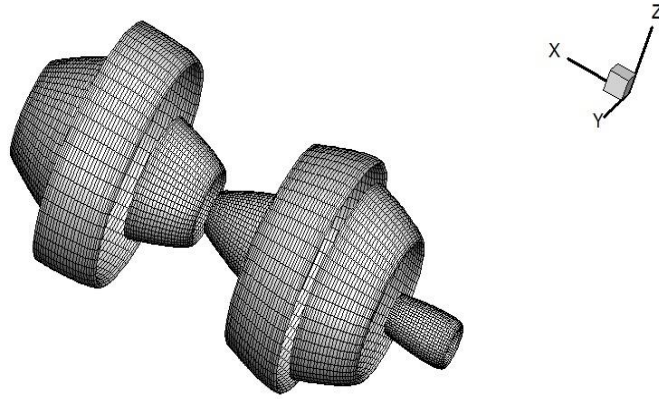
Εικόνα 2. Προϊστορικό δόρυ



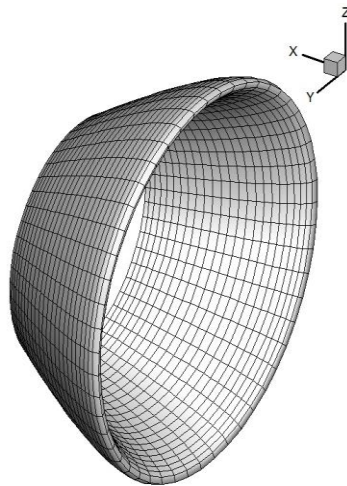
Εικόνα 3. Χρήση όπλων στην αρχαία Αίγυπτο.

## 1.2 Από την κίνηση της μέδουσας στο FEOD.

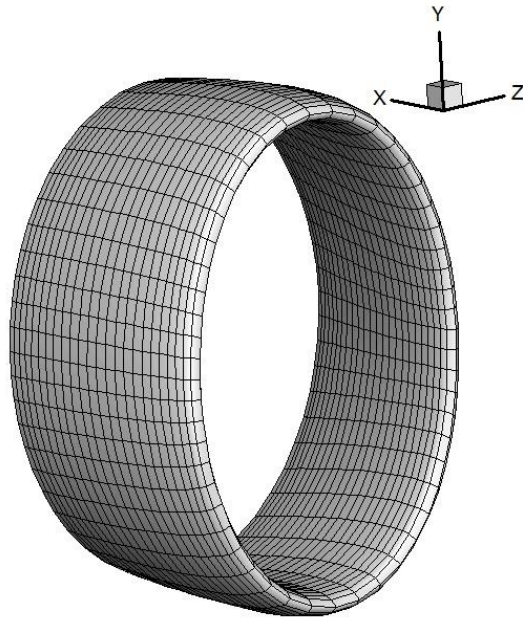
Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι να εξετάσει εναλλακτικούς τρόπους πρόωσης πλοίων, οι οποίοι θα είναι αποδοτικότεροι από μια συμβατική προπέλα. Η βασική ιδέα προέρχεται από την παρατήρηση και μελέτη της κίνησης της μέδουσας, Εικόνα 8 και Εικόνα 9, και μας οδήγησε στο να προσπαθήσουμε να προσομοιώσουμε στον Η/Υ ένα υδροδυναμικό σώμα το οποίο θα μιμείται όσο το δυνατόν περισσότερο την κίνηση της. Το φαινόμενο το οποίο παράγει την κίνηση μιας μέδουσας αλλά και τα κινηματικά χαρακτηριστικά αυτής έχουν μελετηθεί ήδη από τον Dabiri και τον Gharib [3,4] οι οποίοι ανέπτυξαν τεχνικές ώστε να κάνουν πειραματικές μετρήσεις αλλά και αριθμητικές προσομοιώσεις. Η αρχική προσέγγιση του προβλήματος μας είναι η σχεδίαση ενός δακτυλίου με υδροδυναμική διατομή, ο οποίος θα ταλαντεύεται γύρω από μια αρχική θέση, Εικόνα 4, Εικόνα 5. Ο δακτύλιος αυτός μπορεί να εκτελεί πολύπλοκες κινήσεις και ταυτόχρονα να είναι εύκαμπτος. Η ονομασία που δόθηκε σε αυτό το αρχικό μοντέλο του προωστήρα είναι FOD (Flexible Oscillating Duct) ή Εύκαμπτος Ταλαντευόμενος Δακτύλιος. Οι κινήσεις που εκτελεί το FOD είναι: (α) η ταχύτητα προχώρησης  $U$  (παράλληλη στον  $X$ -άξονα) και (β) κάθε υδροτομή του εκτελεί μια ταλάντωση κάθετη προς την  $U$  γύρω από μια αρχική θέση και πρόνευση γύρω από έναν άξονα κάθετο στο επίπεδο της υδροτομής. Ο κώδικας που αναπτύχθηκε για την παραγωγή της γεωμετρίας του FOD δίνει την δυνατότητα και άλλου είδους κινήσεων όπως για παράδειγμα την ελαστική παραμόρφωση της κάθε υδροτομής. Επειδή είμαστε σε ένα αρχικό όμως στάδιο μελέτης του προωστήρα περιοριζόμαστε στις τρεις παραπάνω κινήσεις. Ένα άλλο ζήτημα που τίθεται είναι ο τρόπος στήριξης του FOD πάνω στην γάστρα του πλοίου. Ο σχετικός προβληματισμός μας οδήγησε σε επέκταση της ιδέας του κυκλικού δακτυλίου σε αυτή του ελλειπτικού [8], αν και ο πρώτος πλησιάζει βαθμούς απόδοσης κοντά στο 85% [6]. Πιο συγκεκριμένα δεδομένου ότι κάθε υδροτομή του FOD ταλαντεύεται δεν υπάρχει κάποιο επίπεδο το οποίο να έχει μηδενική σχετική ταχύτητα με την γάστρα με αποτέλεσμα να μην υπάρχει σημείο στήριξης. Ο περιορισμός αυτός και μόνο οδήγησε αναγκαστικά σε έναν ταλαντευόμενο δακτύλιο στον οποίο θα πρέπει να υπάρχει ένα επίπεδο το οποίο θα έχει μηδενική σχετική ταχύτητα με την γάστρα και το υπόλοιπο μέρος του θα ταλαντεύεται. Καταλήξαμε λοιπόν στην περίπτωση όπου το κατακόρυφο επίπεδο του δακτυλίου ( $Y$ -άξονας), από όπου περνά ο κύριος άξονας του, θα παραμένει σταθερό έτσι ώστε ο νέος δακτύλιος να λαμβάνει ελλειπτικό σχήμα κατά τα στάδια της ταλάντωσης του, Εικόνα 6 και Εικόνα 7. Τον ελλειπτικό προωστήρα τον ονομάζουμε πλέον FEOD (Flexible Elliptic Oscillating Duct) ή Εύκαμπτος Ελλειπτικός Ταλαντευόμενος Δακτύλιος.



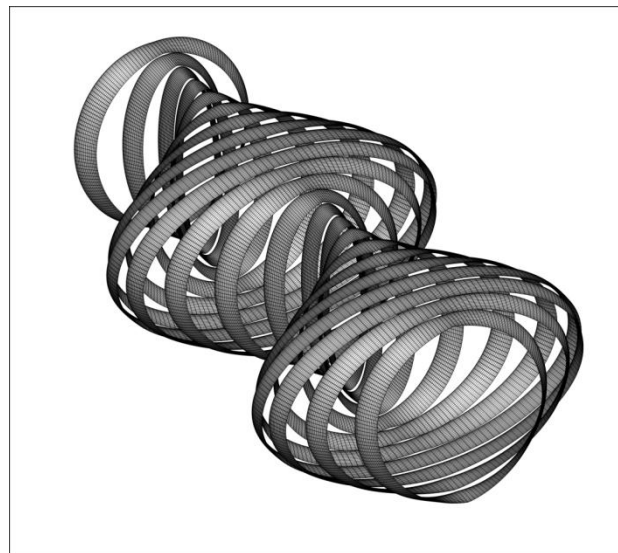
Εικόνα 4. Παραγωγή γεωμετρίας και κίνησης κυκλικού δακτυλίου με τη βοήθεια του κώδικα, σε επτά διαδοχικά χρονικά διαστήματα,  $Str=0.15$ ,  $R/c=3$ ,  $h_0/c=6$



Εικόνα 5. Γεωμετρία του FOD από τη χρήση του κώδικα,  $Str=0.15$ ,  $R/c=3$ ,  $h_0/c=6$



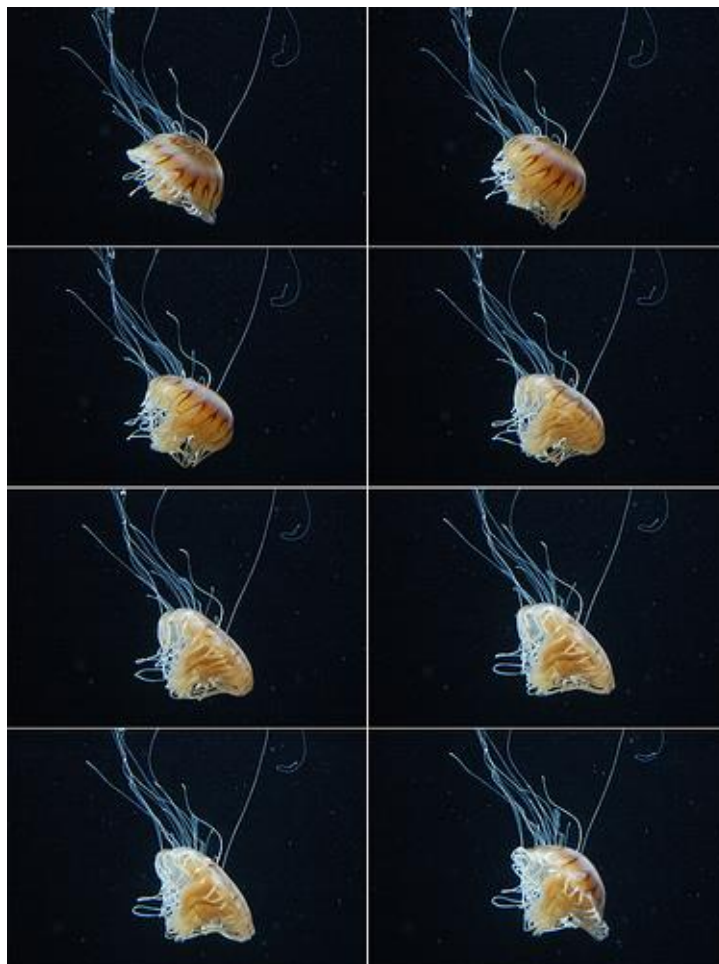
Εικόνα 6. Γεωμετρία του FEOD από τη χρήση του κώδικα,  $Str=0.15$ ,  $R/c=A_0/c=3$ ,  $h_0/c=6$



Εικόνα 7. Διαδοχικές θέσεις του FEOD σε διάστημα δύο περιόδων,  $R/c=A_0/c=4$ ,  $h_0/c=3$ ,  $Str=0.46$



Εικόνα 8. Σμήνος μεδουσών



Εικόνα 9. Κίνηση μέδουσας σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα

### 1.3 Η Μέθοδος Συνοριακών Στοιχείων UBEM

Η μέθοδος των συνοριακών στοιχείων B.E.M (Boundary Element Method) είναι μια μέθοδος επίλυσης προβλημάτων, ρευστομηχανικής και όχι μόνο, με υπολογιστικές μεθόδους. Η μέθοδος των συνοριακών στοιχείων βασίζεται πάνω στην διάσπαση του συνόρου ενός πεδίου ροής σε διακριτά πεπερασμένα  $N_p$  υποσύνολα, με άλλα λόγια δημιουργείται ένα ισοδύναμο διακριτό πλέγμα το οποίο περιγράφει ένα συνεχές σύνολο που είναι το σύνορο του πεδίου ροής. Καταλαβαίνει κανείς ότι όσο πιο μεγάλος είναι ο  $N_p$  τόσο πιο λεπτή είναι η διαμερίσει του αρχικού συνόλου και τόσο καλύτερη η περιγραφή του από το πλέγμα. Η διαφορά της μεθόδου συνοριακών στοιχείων με άλλες υπολογιστικές μεθόδους είναι ότι δεν κάνει διακριτοποίηση ολόκληρου του πεδίου ροής παρά μόνο του συνόρου του (ομόρους, περίγραμμα κινούμενου σώματος). Η δυνατότητα αυτή προκύπτει από την εκμετάλλευση του γεγονότος ότι μπορούμε να χωρίσουμε το πεδίο ροής σε δυο περιοχές, στην περιοχή με αστρόβιλη ροή εξωτερικά του σώματος και του ομόρου του και στην περιοχή με στροβιλισμό που αποτελείται από το οριακό στρώμα και την επιφάνεια του ομόρου όπου μόνο σε αυτά τα δυο υποθέτουμε ότι έχουμε στροβιλισμό. Η περιοχή χωρίς στροβιλισμό υπακούει στην εξίσωση Laplace. Συνεπώς μπορεί να χρησιμοποιηθούν τα γνωστά θεωρήματα αναπαράστασης του δυναμικού και της ταχύτητας για την αναγωγή του πεδίου προβλήματος Laplace σε επιφανειακό πρόβλημα ολοκληρωτικών εξισώσεων. Εφόσον δεν χρειάζεται να διακριτοποιηθεί ολόκληρο το πεδίο ροής αλλά μόνο το σύνορο του η μέθοδος των συνοριακών στοιχείων είναι πιο γρήγορη από άλλες μεθόδους. Μοναδικό μειονέκτημα είναι ο τρόπος εισαγωγής της επίδρασης της συνεκτικότητας ο οποίος είναι προσεγγιστικός και βασίζεται στην εισαγωγή ενός εμπειρικού συντελεστού επιφανειακής συνεκτικότητας. Οι 'κεντρική' εξίσωση πάνω στην οποία βασίζεται η μέθοδος των συνοριακών στοιχείων και ειδικά η διατύπωση MORINO που χρησιμοποιεί το δυναμικό των συνόρων σαν βασικό άγνωστο[7], είναι η παρακάτω.

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}\phi(P) - \frac{1}{4\pi} \int_{SB(t)} \phi \frac{\vec{n} \cdot \vec{r}}{r^3} dS - \frac{1}{4\pi} \int_{SK(t)} \mu \frac{\vec{n} \cdot \vec{r}}{r^3} dS = -\frac{1}{4\pi} \int_{SB(t)} \frac{\vec{n} \cdot \vec{v}_A}{r} dS + \\ \frac{1}{4\pi} \int_{SF(t)} \mu \frac{\vec{n} \cdot \vec{r}}{r^3} dS, P \in SB(t) \end{aligned} \quad (1.1)$$

Όπου:

SB: το σύνορο του στερεού σώματος,

SK: η λωρίδα Kutta [7],

SF: η επιφάνεια του ακολουθούστος φύλλου στροβιλότητας που προκύπτει από την λύση του προβλήματος (θεωρήματα Helmholtz),

$\varphi$  το ίχνος του δυναμικού στο σύνορο και

$\mu(Q) = \varphi^+(Q) - \varphi^-(Q)$  η επιφανειακή ένταση διπόλων στην ακολουθούσα επιφάνεια στροβιλότητας SF

Έχοντας επιλύσει την εξίσωση (1.1) μπορούμε να υπολογίσουμε και την κατανομή πίεσης πάνω στο σώμα αλλά και τις δυνάμεις και ροπές που ασκούνται σε αυτό ως εξής:

$$\frac{p-p_\infty}{\rho} = -\frac{\partial\varphi}{\partial t} - \frac{1}{2}(\nabla\varphi)^2 - \nabla\varphi \cdot \mathbf{V}_\infty \quad (1.2)$$

Τέλος οι δυνάμεις και ροπές πάνω στο σώμα μπορούν να υπολογιστούν από τις εξής εξισώσεις:

$$\begin{aligned} \vec{F} &= \int_B \mathbf{p} \cdot \vec{n} dS \\ \vec{M} &= \int_B \mathbf{r}_i \times \mathbf{p} \cdot \vec{n} dS \end{aligned} \quad (1.3)$$

Η υλοποίηση της επίλυσης της εξίσωσης 1.1 συμπεριλαμβανομένης και της δυναμικής των ελευθέρων φύλλων στροβιλότητας γίνεται στον κώδικα H/Y UBEM (Unsteady Boundary Element Modeling) που έχει αναπτυχθεί από τον επιβλέποντα της παρούσας διπλωματικής. Η συμβολή του γράφοντος είναι στην ανάπτυξη της μεθοδολογίας και του κώδικα γένεσης του μη-μόνιμου γεωμετρικού πλέγματος που απαιτεί σαν δεδομένο ο κώδικας UBEM προκειμένου να φέρει εις πέρας τους σχετικούς υδροδυναμικούς υπολογισμούς. Το σχετικό θέμα αναπτύσσεται στις επόμενες παραγράφους.

---

<sup>1</sup> Η συνάρτηση  $\frac{\partial\varphi}{\partial t}$  υπολογίζεται ως προς σύστημα συντεταγμένων σταθερό στο χώρο.



## 2. Εισαγωγή στην γένεση γεωμετρίας του FEOD

Στο κεφάλαιο αυτό αρχικά γίνεται μια εισαγωγή στην κίνηση της υδροτομής στο χώρο, αναλύονται κάποιες βασικές παράμετροι οι οποίες πρέπει να είναι γνωστές για την κατανόηση της κίνησης μιας υδροτομής και επίσης αποδεικνύουμε εξισώσεις οι οποίες συνδέουν την ιδανική γωνία πρόσπτωσης με την κατανομή της κυρτότητας της υδροτομής. Εν συνεχεία γίνεται μια εισαγωγή στην γεωμετρία της έλλειψης και ποιές μέθοδοι μπορούν να περιγράψουν την γεωμετρία της, φτάνουμε στο σημείο της δημιουργίας ολοκλήρου του προωστήρα ο οποίος έχει το σχήμα έλλειψης και κινείται στον χώρο. Τέλος περιγράφουμε τις δυο μεθόδους με τις οποίες δημιουργήσαμε το πλέγμα της γεωμετρίας του FEOD και γίνεται μια συζήτηση για το ποια από τις δυο θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια.



## 2.1 Γεωμετρία και κίνηση υδροτομής

Το πρωταρχικό σημείο από το οποίο πρέπει να ξεκινήσουμε για την χρήση του κώδικα UBEM σε ένα εύκαμπτο σώμα είναι η διακριτοποίηση της γεωμετρίας του από ένα χρονικά εξαρτώμενο πλέγμα. Και στην περίπτωση του FOD αλλά και του FEOD ( με ελάχιστες εξαιρέσεις που τονίζονται όπου χρειάζεται) η χρονικά εξαρτώμενη γεωμετρία δημιουργείται ως εξής: ξεκινάμε από μια τυπική δισδιάστατη υδροτομή η οποία κινείται παράλληλα στον X-άξονα με ταχύτητα  $U$ , ταυτόχρονα εκτελεί μια παλινδρομική ανύψωση ( κατά τον Y-άξονα - heaving) με μέγιστο πλάτος  $h_0$  και μια πρόνευση (pitching) με μέγιστο πλάτος  $\theta_0$  ( σε σχέση με τον X-άξονα) η οποία έχει διαφορά φάσης  $\psi$  σε σχέση με την εγκάρσια κίνηση. Ο προνευστασμός εκτελείται γύρω από έναν προκαθορισμένο άξονα και σε απόσταση  $b$  από το χείλος πρόσπτωσης της υδροτομής. Και στην περίπτωση της εγκάρσιας κίνησης και του προνευστασμού υπάρχει κοινή γωνιακή ταχύτητα με την οποία εκτελούνται και οι δυο κινήσεις  $\omega=2\pi n$ , όπου  $n$  είναι η αντίστοιχη συχνότητα. Επίσης, μπορούμε να επιλέξουμε την κυρτότητα μιας δισδιάστατης υδροτομής να εκτελεί μια μη μόνιμη κίνηση με κατανομή  $y(\{\tau;\phi\}, u, t)$  (το  $\{\tau;\phi\}$  ισχύει μόνο στην περίπτωση του FEOD και έχει να κάνει με ποιον τρόπο έχουμε παράγει την γεωμετρία του, κάτι το οποίο θα εξηγήσουμε παρακάτω, το  $u$  συμβολίζει την ποσοστιαία θέση του σημείου  $y$  πάνω στη χορδή μετρούμενη από το χείλος πρόσπτωσης και το  $t$  συμβολίζει τον χρόνο). Την αναλυτική μορφή της κατανομής της κυρτότητας μπορούμε να την λάβουμε από τυποποιημένες σειρές υδροτομών όπως για παράδειγμα, υδροτομή της σειράς NACA τεσσάρων ή πέντε ψηφίων. Υποθέτουμε επίσης ότι τα σημεία  $y(\{\tau;\phi\}, u, t)$  της κυρτότητας μπορούν να ταλαντεύονται γύρω από μια τυποποιημένη μέση θέση που είναι μονοσήμαντη συνάρτηση της μέγιστης κυρτότητας την συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Την στιγμιαία μέγιστη τιμή της κυρτότητας την συμβολίζουμε με  $m_c(\{\tau;\phi\}, t)$ . Φτάνουμε λοιπόν στις εξής δυο λογικά αναδυόμενες περιπτώσεις για το  $m_c(\{\tau;\phi\}, t)$ : α) διαλέγουμε το  $m_c(\{\tau;\phi\}, t)$  έτσι ώστε η στιγμιαία ολική γωνία πρόσπτωσης ( η οποία ορίζεται σε σχέση με την επάπειρο ταχύτητα) της υδροτομής να είναι σταθερό ποσοστό της στιγμιαίας ιδανικής γωνίας πρόσπτωσης της υδροτομής, β) διαλέγουμε το  $m_c(\{\tau;\phi\}, t)$  να ταλαντώνεται αρμονικά με την ίδια συχνότητα και φάση με τον προνευστασμό και με μέγιστο προκαθορισμένο πλάτος ταλάντωσης (από τον ερευνητή)  $m_0$ . Πρέπει να τονίσουμε ότι και στις δυο περιπτώσεις η μη μόνιμη κίνηση της επιφάνειας που αποτελείται από όλες τις κατανομές των καμπυλών κυρτότητας της κάθε υδροτομής έχει την ίδια συχνότητα και την ίδια διαφορά φάσης με τον προνευστασμό. Βέβαια μόνο η περίπτωση β) μας οδηγεί σε μια αρμονική κίνηση της καμπύλης κυρτότητας.

Αναλύοντας λίγο περισσότερο την περίπτωση α) καταλήγουμε σε τυποποιημένες εξισώσεις για τον υπολογισμό του  $m_c(\{\tau; \phi\}, t)$ . Στην περίπτωση αυτή μπορούμε να βρούμε [1] μια ρητή σχέση που συνδέει την κατανομή της κυρτότητας  $y(\{\tau; \phi\}, u, t)$  με την ιδανική γωνία πρόσπτωσης  $\alpha_i(\{\tau; \phi\}, t)$ :

$$\alpha_i(\{\tau; \phi\}, t) = \frac{1}{\pi \cdot c} \int_0^\pi \frac{\partial y(\{\tau; \phi\}, u, t)}{\partial u} d\theta \quad (2.1)$$

όπου  $\alpha_i(\{\tau; \phi\}, t)$  είναι η ιδανική γωνία πρόσπτωσης

$y(\{\tau; \phi\}, x, t)$  είναι η τεταγμένη της καμπύλης κυρτότητας

Χρησιμοποιώντας την παραπάνω εξίσωση για την περίπτωση (α) απαιτούμε σε κάθε χρονική στιγμή η κατανομή της κυρτότητας κάθε υδροτομής να είναι τέτοια ώστε να έχουμε πάντα ιδανική γωνία πρόσπτωσης (ή ποσοστό της). Στην περίπτωση των υδροτομών σειράς NACA τεσσάρων ψηφίων που εξετάζουμε, το μέγιστο πάχος και η θέση του είναι καθορισμένα από τον τύπο της υδροτομής. Έχοντας την εξίσωση για την κατανομή της κυρτότητας [1]:

$$y_c(\{\tau; \phi\}, t) = m_c(\{\tau; \phi\}, t) \frac{c \cdot u}{p^2} (2p - u) \quad \text{για } 0 \leq u \leq p \quad (2.2)$$

$$y_c(\{\tau; \phi\}, t) = m_c(\{\tau; \phi\}, t) \left( \frac{c \cdot (1 - u)}{(1 - p)^2} \right) \cdot (1 + u - 2 \cdot p) \quad \text{για } p \leq u \leq 1 \quad (2.3)$$

Όπου  $c$  είναι το μήκος της χορδής

$u$  είναι η ποσοστιαία θέση πάνω στην χορδή

$m_c(\{\tau; \phi\}, t)$  είναι η μέγιστη κυρτότητα σαν ποσοστό της χορδής

$p$  είναι η θέση του σημείου της μέγιστης κυρτότητας σαν ποσοστό της χορδής

Μετά από τις απαραίτητες πράξεις (Παράρτημα Ι) καταλήγουμε στην ακόλουθη εξίσωση όπου μας δίνεται η μέγιστη κυρτότητα σαν συνάρτηση της ιδανικής γωνίας πρόσπτωσης:

$$m_c(\{\tau; \phi\}, t) = \frac{\lambda \cdot a_i(\{\tau; \phi\}, t) \cdot p^2 \cdot (1-p)^2 \cdot \pi}{2 \cdot (p-0.5) \cdot (p^2 \cdot \pi - 2p\theta + \theta - \sin(\theta))}$$

$$\theta = \cos^{-1}(1-2p)$$

$$\lambda \in [0,1]$$
(2.4)

Ένα άλλο σημαντικό μέγεθος το οποίο πρέπει να ξέρει ένας ερευνητής είναι η γωνία μηδενικής άνωσης το οποίο δίνεται από την σχέση [1]:

$$a_{i=0}(\{\tau; \phi\}, t) = \frac{-1}{\pi c} \int_0^\pi \frac{\partial y(\{\tau; \phi\}, u, t)}{\partial u} \cdot (1 - \cos(\theta)) d\theta$$
(2.5)

Όπου  $a_{i=0}(\{\tau; \phi\}, t)$  είναι η γωνία μηδενικής άνωσης. Εργαζόμενοι όπως πριν φτάνουμε στην ακόλουθη σχέση (Παράρτημα D):

$$a_{i=0}(\{\tau; \phi\}, t) = \frac{\left(2(p+0.25 \cdot \cos(\theta)-1)(p-0.5) \cdot \sin(\theta) + \left(p-\frac{3}{4}\right) \cdot (p^2 \cdot \pi - 2p\theta + \theta)\right) \cdot \alpha_i(\{\tau; \phi\}, t) \cdot \pi}{\pi(p-0.5) \cdot (p^2 \cdot \pi - 2p\theta + \theta - \sin(\theta))}$$
(2.6)

Πρέπει να τονιστεί ότι οι παραπάνω εξισώσεις του Abbott και Von Doenhoff αφορούν το δισδιάστατο γραμμικοποιημένο πρόβλημα. Οι εξισώσεις αυτές μπορεί να χρησιμοποιηθούν σαν μια αρχική προσέγγιση για το τρισδιάστατο πρόβλημα το οποίο εξετάζουμε.

## 2.2 Ελλειπτική γεωμετρία και κίνηση του FEOD.

Μέχρι στιγμής ό,τι έχουμε αναφέρει είναι κοινό για το FOD και το FEOD. Λόγω όμως της πιο γενικευμένης γεωμετρίας του FEOD πρέπει να κάνουμε μια πιο λεπτομερή αναφορά στην ελλειπτική γεωμετρία. Έστω ότι έχουμε το καρτεσιανό ορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων, Σχήμα 1. Υπάρχουν τρεις βασικοί τρόποι ορισμού της ελλειπτικής γεωμετρίας με ημι-μέγιστο και ημι-ελάχιστο κύριο άξονα A,B:

1<sup>ος</sup> ορισμός:

$$\frac{z^2}{A^2} + \frac{y^2}{B^2} = 1 \quad (2.7)$$

2<sup>ος</sup> ορισμός

$$z = A \cdot \cos(\tau) \quad (2.8)$$

$$y = B \cdot \sin(\tau) \quad (2.9)$$

3<sup>ος</sup> ορισμός

$$z = r \cdot \cos(\varphi) \quad (2.10)$$

$$y = r \cdot \sin(\varphi) \quad (2.11)$$

όπου  $r, \varphi, \tau$  σχετίζονται μέσω των παρακάτω εξισώσεων:

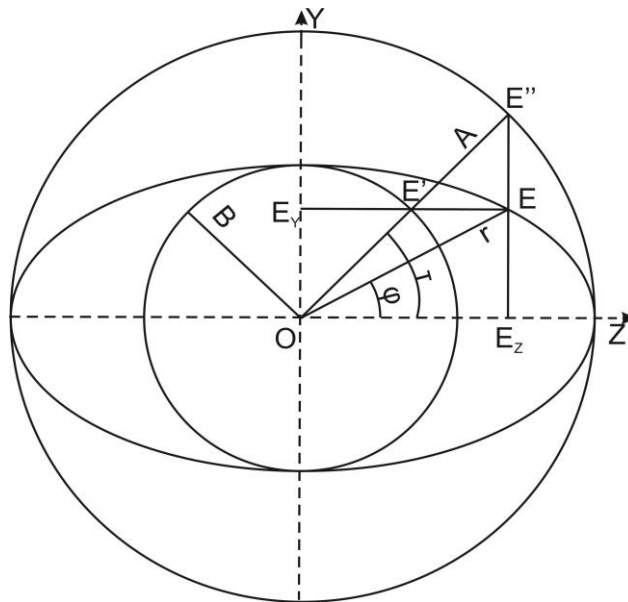
$$r = \frac{1}{\sqrt{\frac{\cos^2 \varphi}{A^2} + \frac{\sin^2 \varphi}{B^2}}} \quad (2.12)$$

$$\tan \varphi = \frac{B}{A} \tan \tau \quad (2.13)$$

Η εξίσωση (2.7) είναι γνωστή και ως ‘συνηθισμένη μορφή’ έλλειψης, ενώ οι εξισώσεις (2.8),(2.9) και (2.10),(2.11) είναι παραμετρικές μορφές με αντίστοιχες παραμέτρους  $\tau \in (0, 2\pi)$  και  $\varphi \in (0, 2\pi)$ . Οι εξισώσεις (2.8),(2.9) θα καλούνται στο εξής ‘concentric’ περιγραφή ενώ οι εξισώσεις (2.10),(2.11) θα καλούνται ‘polar’ περιγραφή. Η παράμετρος  $\varphi$  στην polar περιγραφή έχει απλή γεωμετρική ερμηνεία. Είναι η γωνία του ευθύγραμμου τμήματος  $\overline{OE}$  το οποίο ξεκινά από το κέντρο της έλλειψης και καταλήγει στο σημείο E που ανήκει στην έλλειψη, Σχήμα 1. Στο ίδιο σχήμα βλέπουμε και την γεωμετρική ερμηνεία της παραμέτρου  $\tau$ . Το ZY σύστημα συντεταγμένων στο Σχήμα 1, μπορεί να μετασχηματιστεί σε ένα δεξιόστροφο τρισδιάστατο ορθογώνιο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων, προσθέτοντας τον X-άξονα κάθετα στο ZY επίπεδο βλέποντας προς την μέσα μεριά του χαρτιού. Η έλλειψη στο Σχήμα 1 όπως και ο αντίστοιχος κύκλος για το FOD εκλέγονται να αποτελούν έναν συγκεκριμένο γεωμετρικό τόπο. Για να κατανοήσουμε τον γεωμετρικό τόπο αυτό ας φανταστούμε κάθε υδροτομή χωριστά. Σε κάθε υδροτομή όπως προείπαμε έχουμε ένα σημείο στο επίπεδο της από το οποίο περνά ο άξονας γύρω από τον οποίο πραγματοποιείται ο προνευστασμός της υδροτομής. Το σημείο αυτό το ονομάζουμε σημείο προνευστασμού και τον άξονα τον ονομάζουμε άξονα προνευστασμού. Το σύνολο όλων των σημείων προνευστασμού για όλες τις υδροτομές είναι ο γεωμετρικός τόπος που ψάχνουμε. Με άλλα λόγια σε κάθε σημείο της αρχικής έλλειψης τοποθετούμε μια υδροτομή της οποίας ο άξονας προνευστασμού θα διέρχεται από το σημείο αυτό. Για να ολοκληρώσουμε την γεωμετρία του FEOD, πρέπει να ορίσουμε την θέση της κάθε υδροτομής στον χώρο. Το Σχήμα 1, δείχνει ότι δυο τέτοιοι εναλλακτικοί τρόποι υπάρχουν:

α) ‘polar’ περίπτωση: τοποθετούμε την υδροτομή στο επίπεδο που ορίζεται από τον X-άξονα και το ευθύγραμμο τμήμα  $\overline{OE}$  (γωνία  $\varphi$  σε σχέση με τον Z-άξονα), ή

β) ‘concentric’ περίπτωση: τοποθετούμε την υδροτομή σε ένα επίπεδο που διέρχεται από το E με διεύθυνση παράλληλη στο επίπεδο που ορίζεται από τον X-άξονα και το ευθύγραμμο τμήμα  $\overline{OE''}$  (γωνία  $\tau$  σε σχέση με τον Z-άξονα) .



Σχήμα 1. Εγγεγραμμένος και περιγεγραμμένος κύκλος της έλλειψης. Τα σημεία  $E, E', E_y$  ορίζουν μια παράλληλη ευθεία στον  $Z$ -άξονα, ενώ τα σημεία  $E'', E, E_z$  ορίζουν μια παράλληλη ευθεία στον  $Y$ -άξονα.

Προσανατολίζουμε την υδροτομή, σε οποιοδήποτε από τα δυο επίπεδα, ώστε να σχηματιστεί γωνία  $\theta$  σε σχέση με τον  $X$ -άξονα. Εν γένει και με βάση όσα ειπώθηκαν σε προηγούμενη παράγραφο η γωνία  $\theta$  μπορεί να είναι συνάρτηση των παραμέτρων  $\varphi$  ή  $\tau$  με άλλα λόγια  $\theta(\{\tau; \varphi\})$ . Υποθέτοντας επιπλέον ότι οι παρακάτω μεταβλητές σε κάθε χρονική στιγμή είναι γνωστές συναρτήσεις: (α) η κατανομή μέγιστης κυρτότητας  $f(\{\tau; \varphi\})$ , (β) η κατανομή της χορδής  $c(\{\tau; \varphi\})$ , (γ) η κατανομή του μέγιστου πάχους  $T(\{\tau; \varphi\})$ , (δ) η μορφή του πάχους και της κυρτότητας, και (ε) η ποσοστιαία θέση  $b$  των αξόνων προνευστασμού σε σχέση με το χείλος πρόσπτωσης για κάθε υδροτομή, έχουμε γνωστή την γεωμετρία του FEOD σε κάθε χρονική στιγμή. Μπορούμε πλέον να προσθέσουμε και την εγκάρσια παραμόρφωση στην αρχική έλλειψη που φαίνεται στο Σχήμα 1, με βάση την παρακάτω διεργασία:

$$A = A_0 + A_1 \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi_A) \quad (2.14)$$

$$B = B_0 + B_1 \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi_B) \quad (2.15)$$

Όπου,  $A_0, B_0$  συμβολίζουν το μέσο (ή αρχικό) ημι-μέγιστο και ημι-ελάχιστο άξονα αντίστοιχα και  $A_1, B_1$  είναι τα αντίστοιχα πλάτη της ταλάντωσης,  $\omega$  συμβολίζει την γωνιακή ταχύτητα της ταλάντωσης που είναι κοινή και για τους δυο άξονες ( $\omega = 2\pi n$  όπου  $n$  είναι η συχνότητα της ταλάντωσης) και  $\psi_A, \psi_B$  είναι οι φάσεις της ταλάντωσης του κάθε άξονα. Με βάση τα προηγούμενα τα σημεία της έλλειψης μπορούν να ταυτοποιηθούν (παραμετροποιηθούν) σε κάθε χρονική στιγμή μέσω της παραμέτρου  $\varphi$  (polar περιγραφή/πλέγμα) ή της  $\tau$  (concentric περιγραφή/πλέγμα), με άλλα λόγια υπάρχει μια ένα προς ένα και επί αντιστοιχία μεταξύ των παραμέτρων  $\varphi, \tau$  και της κάθε υδροτομής. Έχοντας την παραγόμενη κίνηση στο σημείο E από τις εξισώσεις (2.14), (2.15) παρατηρούμε ότι αυτή εξαρτάται από την μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε για το σημείο E για την αναπαράστασή του, πράγμα που σημαίνει ότι είναι διαφορετική για την κάθε περίπτωση πλέγματος. Επίσης να τονιστεί ότι με βάση τις παραπάνω εξισώσεις μπορούμε να παράγουμε οποιαδήποτε μορφή έλλειψης θέλουμε να μελετήσουμε η οποία μπορεί να είναι κύκλος καθ' όλη την διάρκεια κίνησης (FOD) ή ακόμα και στην ακραία και μη ρεαλιστική περίπτωση κύκλος ο οποίος παραμορφώνεται σε μια ευθεία και πάλι σε κύκλο. Με βάση λοιπόν τις δυνατότητες του κώδικα που έχει αναπτυχτεί αναφέρουμε ότι στην παρούσα διπλωματική εργασία όλες οι προσομοιώσεις του κώδικα για την περίπτωση του FEOD ξεκινούν με αρχική μορφή έναν κυκλικό δακτύλιο ο οποίος ταλαντεύεται και παραμορφώνεται σε έλλειψη. Η μόνη διαφορά του από το FOD είναι ότι οι υδροτομές των οποίων το επίπεδο τους περνά από τον κατακόρυφο άξονα του FEOD, έχουν ταχύτητες ίσες με την ταχύτητα προχώρησης και δεν εκτελούν ούτε εγκάρσια κίνηση ούτε προνευστασμό. Οι λόγοι που επιλέξαμε να κρατάμε σταθερό ένα από τους δύο άξονες σχετίζονται με την εξασφάλιση ενός τουλάχιστον σταθερού σημείου στηρίζεως ώστε να εδράσουμε τον προωστήρα επάνω στην γάστρα του πλοίου.

### 2.3 Δημιουργία πλέγματος μέσω της ‘polar’ μεθόδου.

Θα προσπαθήσουμε να αναλύσουμε περαιτέρω την κίνηση της κάθε υδροτομής είτε παράγεται με την ‘polar’ είτε με την ‘concentric’ μέθοδο. Ξεκινώντας με την ‘polar’ μέθοδο και διαιρώντας κατά μέλη τις εξισώσεις (2.10) και (2.11) οδηγούμαστε στο εξής:

$$\frac{y}{z} = \tan \varphi \quad (2.16)$$

Η παραπάνω εξίσωση μας πληροφορεί ότι στην περίπτωση της ‘polar’ μεθόδου το σημείο  $E(\varphi)$  της αρχικής έλλειψης κινείται πάνω στο ευθύγραμμο τμήμα  $\overline{OE}$ , δηλαδή η υδροτομή κινείται καθ’ όλη τη διάρκεια της ταλάντωσης πάνω στην ίδια ευθεία που περνά από το κέντρο των αξόνων της αρχικής έλλειψης. Αν ορίσουμε με  $dr(\varphi, t)/dt$  την ταχύτητα που παράγεται από την μεταβολή της θέσης της υδροτομής, τότε η επάπειρο ταχύτητα της δίνεται από τον τύπο:

$$V^* = \sqrt{U^2 + (dr(\varphi, t)/dt)^2} \quad (2.17)$$

Η δε γωνία που σχηματίζεται μεταξύ των  $U$  και  $V^*$  δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\phi(\varphi, t) = \tan^{-1}\left(\frac{dr(\varphi, t)/dt}{U}\right) \quad (2.18)$$

Μπορούμε πλέον την γωνία πρόνευσης  $\theta(\varphi, t)$  της κάθε υδροτομής να την υπολογίσουμε από τον εξής τύπο:

$$\theta(\varphi, t) = w \cdot \phi(\varphi, t) = w \cdot \tan^{-1}\left(\frac{dr(\varphi, t)/dt|_{t=t_c}}{U}\right) \quad (2.19)$$

Οπού  $w$  είναι μια παράμετρος, ανεξάρτητη χρόνου, με τιμές στο διάστημα:  $0 < w < 1$ . Ονομάζουμε την παράμετρο αυτή ως ‘the pitch control parameter’ χρησιμοποιώντας την ορολογία σύμφωνα με την εργασία: Politis G. & Politis K. [19]. Μπορούμε πλέον να εκτιμήσουμε την γωνία πρόσπτωσης, Σχήμα 2, της κάθε υδροτομής σε σχέση με την  $V^*$  ως εξής:

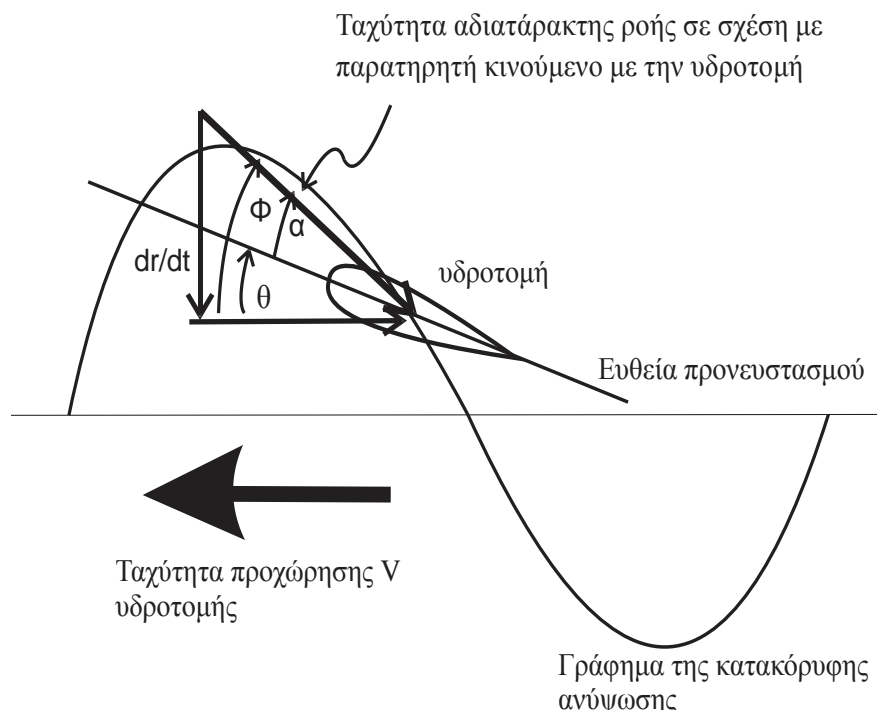


$$\alpha(\varphi, t) = \phi(\varphi, t) - \theta(\varphi, t) = (1 - w) \cdot \tan^{-1}\left(\frac{dr(\varphi, t) / dt}{U}\right) \quad (2.20)$$

Παρατηρούμε από την (2.20) ότι η γωνία πρόσπτωσης εξαρτάται άμεσα από την παράμετρο  $w$  που ορίσαμε προηγουμένως. Πιο συγκεκριμένα βλέπουμε ότι στην περίπτωση όπου  $w=1$  τότε καθ' όλη τη διάρκεια της κίνησης του FEOD η στιγμιαία γωνία πρόσπτωσης είναι πάντοτε μηδενική ενώ στην περίπτωση όπου  $w=0$  είναι πάντοτε ίση με τη γωνία που σχηματίζεται μεταξύ των  $U$  και  $V^*$ . Επίσης παρατηρούμε ότι καθώς αυξάνουμε το  $w$  η γωνία πρόσπτωσης μικραίνει και άρα η φόρτιση της υδροτομής είναι μικρότερη ενώ καθώς μικραίνουμε το  $w$  η φόρτιση της υδροτομής αυξάνει διότι αυξάνει η γωνία πρόσπτωσης, άμεσος κίνδυνος αυτού είναι η πιθανότητα αποκόλλησης της ροής. Βλέπουμε επίσης ότι για  $0 \leq w \leq 1$  η απόλυτη τιμή της γωνίας πρόσπτωσης βρίσκεται εντός του διαστήματος:

$$|\alpha(\varphi, t)| \in \left[ 0, \left| \tan^{-1}\left(\frac{dr(\varphi, t) / dt}{U}\right) \right| \right] \quad (2.21)$$

Ο υπολογισμός της γωνίας πρόσπτωσης στη σχέση (2.20) παραλείπει τις ταχύτητες διαταραχής. Η παράλειψη αυτή είναι αποδεχτεί για σχετικά μικρούς αριθμούς Strouhal ενώ μεγαλύτερες διαφορές αναμένονται καθώς ο Strouhal μεγαλώνει. Συνεπώς για μικρότερους αριθμούς Strouhal στους οποίους πρακτικά εμφανίζεται ο μέγιστος υδροδυναμικός βαθμός απόδοσης η επιλογή του  $w$  στην περιοχή 0 έως 1 οδηγεί σε κινήσεις που παράγουν ώση.



Σχήμα 2. Ορισμός γωνιών και ταχύτητας αδιατάρακτης ροής υδροτομής [19].

## 2.4 Δημιουργία πλέγματος μέσω της ‘concentric’ μεθόδου.

Εφαρμόζοντας την ίδια συλλογιστική πορεία και για την περίπτωση ‘concentric’ αλλά χρησιμοποιώντας αυτή την φορά τις (2.8),(2.9),(2.14) και (2.15) θα δούμε ότι πλέον δεν καταλήγουμε σε μια απλή εξίσωση όπως η (2.16) αλλά σε μια πιο πολύπλοκη. Αν υποθέσουμε ότι και οι δυο κύριοι άξονες ταλαντώνονται, δηλαδή  $A_1, B_1 \neq 0$  τότε λόγω του ότι  $A_0 = B_0 \equiv R$ ,  $\psi_A = \psi_B = 0$  οι (2.8) και (2.9) γίνονται αντίστοιχα:

$$z = R \cdot \cos(\tau) + A_1 \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \cos(\tau) \quad (2.22)$$

$$y = R \cdot \sin(\tau) + B_1 \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \sin(\tau) \quad (2.23)$$

Αυτό που παρατηρούμε είναι ότι αν απαλείψουμε τους ημιτονικούς παράγοντες ( $\sin(\omega \cdot t)$ ) από τις δυο προκύπτουσες εξισώσεις, πράγμα που μπορεί να γίνει μόνο αν  $A_1, B_1 \neq 0$ , τότε φτάνουμε στην εξής μορφή:

$$y(t, \tau) = z(t, \tau) \cdot \tan(\tau) \cdot \frac{B_1}{A_1} + R \cdot \left(1 - \frac{B_1}{A_1}\right) \cdot \sin(\tau) \quad (2.24)$$

Η (2.24) μας πληροφορεί ότι και στην περίπτωση αυτή κάθε σημείο της αρχικής έλλειψης κινείται πάνω σε μια ευθεία η οποία όμως δεν περνά από το κέντρο των αξόνων όπως στην προηγούμενη περίπτωση. Και στην περίπτωση αυτή ορίζουμε την ταχύτητα της εγκάρσιας κίνησης αλλά με διαφορετικό τρόπο από πριν. Στην περίπτωση όπου είτε και οι δυο άξονες βρίσκονται σε κίνηση, ισχύει δηλαδή η (2.24) είτε ο οριζόντιος μόνο κινείται, τότε ορίζουμε την ταχύτητα της υδροτομής σαν την συνιστάμενη των ταχυτήτων που επάγονται από την κίνηση των αξόνων ή του άξονα αντίστοιχα στην θέση  $\tau$ :

$$\begin{aligned}\dot{h}(\tau, t) &= \sqrt{\left[ (\omega \cdot A_1 \cdot \cos(\omega \cdot t) \cdot \cos(\tau))^2 + (\omega \cdot B_1 \cdot \cos(\omega \cdot t) \cdot \sin(\tau))^2 \right]} = \\ &= \omega \cdot \sqrt{\left[ (A_1 \cdot \cos(\tau))^2 + (B_1 \cdot \sin(\tau))^2 \right]} \cdot \cos(\omega \cdot t)\end{aligned}\quad (2.25)$$

Έτσι ορίζεται και πάλι η επέπειρο ταχύτητα που δίνεται από τον τύπο:

$$V^* = \sqrt{U^2 + \left( \dot{h}(\tau, t) \right)^2} \quad (2.26)$$

Η δε γωνία που σχηματίζεται μεταξύ των  $U$  και  $V^*$  δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\phi(\tau, t) = \tan^{-1} \left( \frac{\dot{h}(\tau, t)}{U} \right) \quad (2.27)$$

Ορίζουμε εκ νέου την γωνία προνευστασμού  $\theta(\tau, t)$  της κάθε υδροτομής από τύπο:

$$\theta(\tau, t) = w \cdot \phi(\tau, t) = w \cdot \tan^{-1} \left( \frac{\dot{h}(\tau, t) \Big|_{t=t_c}}{U} \right) \quad (2.28)$$

Η αντίστοιχη γωνία πρόσπτωσης της κάθε υδροτομής σε σχέση με την  $V^*$  ως εξής:

$$\alpha(\tau, t) = \phi(\tau, t) - \theta(\tau, t) = (1 - w) \cdot \tan^{-1} \left( \frac{\dot{h}(\tau, t)}{U} \right) \quad (2.29)$$

Στην διπλωματική αυτή εργασία αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί η ‘polar’ μέθοδος κυρίως για το γεγονός ότι καθ’ όλη τη διάρκεια της κίνησης του FEOD κάθε επίπεδο υδροτομής διέρχεται πάντοτε από το κέντρο της αρχικής έλλειψης πράγμα που καθιστά την μελέτη του προβλήματος πιο εύκολη στην κατανόηση.

Έχοντας επιλέξει την μέθοδο παραγωγής του πλέγματος για το FEOD πρέπει αρχίσουμε να ορίζουμε κάποια χαρακτηριστικά μεγέθη. Ορίζουμε λοιπόν ένα γεωμετρικό μέγεθος αναφοράς με βάση το οποίο θα υπολογίζονται και όλα τα άλλα γεωμετρικά μεγέθη του FEOD. Έτσι λοιπόν πρέπει να θεωρήσουμε μια αρχική μέση ακτίνα, αυτή θα είναι και το αρχικό μήκος του οριζόντιου άξονα, δηλαδή  $B_0$ . Θέτοντας στην εξίσωση (2.12)  $\varphi = \pi/2$  οδηγούμαστε στην παρακάτω εξίσωση:

$$r(\pi/2, t) = B = B_0 + B_1 \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi_B) \quad (2.30)$$

Θεωρώντας τις παρακάτω αντικαταστάσεις:

$B_0 = R, B_1 = h_0, \psi_B = \psi_A = \psi$  και  $h(t) = h_0 \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi)$  οδηγούμαστε στην παρακάτω μορφή:

$$r(\pi/2, t) = R + h(t) = R + h_0 \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi) \quad (2.31)$$

Παίρνοντας την χρονική παράγωγο της (2.31) έχουμε:

$$dr(\pi/2, t) / dt = dh(t) / dt = h_0 \omega \cos(\omega t + \psi) \quad (2.32)$$

Ενώ η σχέση (2.20) για  $\varphi = \pi/2$  γίνεται:

$$a(\pi/2, t) = (1 - w) \tan^{-1}(\pi \cdot Str \cdot \cos(\omega \cdot t + \psi)) \quad (2.33)$$

Όπου Str δηλώνει τον αριθμό Strouhal:

$$Str = \frac{n \cdot h}{U}, h = 2h_0 \quad (2.34)$$

Υποθέτοντας ότι έχουμε γνωστές τις μεταβλητές  $w, A_0, R, h_0, U, \omega, \psi$  η κίνηση του FEOD καθορίζεται πλήρως, ενώ οι εξισώσεις (2.10), (2.11) και (2.12) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό της γεωμετρίας και του αντίστοιχου πλέγματος για το FEOD σε κάθε χρονική

στιγμή. Έχοντας πλέον ορίσει την αναλυτική περιγραφή της γεωμετρίας και της κίνησης του FEOD μπορούμε να προχωρήσουμε ένα βήμα παρακάτω και να δημιουργήσουμε μια επιφάνεια πλεγμάτων σε διαδοχικά χρονικά διαστήματα τα οποία θα περιγράφουν την κίνηση του FEOD στον χρόνο και στον χώρο. Η Εικόνα 7 δείχνει μια διακριτοποίηση του πλέγματος για ένα συγκεκριμένο αριθμό χρονικών στιγμών τα οποία αντιστοιχούν στην ελάχιστη, μέγιστη και αρχική κατάσταση του FEOD σε μια περίοδο. Έχοντας λοιπόν όλη την χρονική εξέλιξη του FEOD μπορούμε πλέον να χρησιμοποιήσουμε τον κώδικα UBEM για να υπολογίσουμε τις μη μόνιμες δυνάμεις, τις ενεργειακές ανάγκες αλλά και την χρονική εξέλιξη της γεωμετρίας του ομόρου του FEOD.

### 3. Βασικές παράμετροι περιγραφής του προβλήματος του FEOD

Πριν προχωρήσουμε στην ανάλυση των αποτελεσμάτων από την χρήση του κώδικα UBEM θα πρέπει πρώτα να αναλύσουμε ένα πολύ σημαντικό σκέλος του υπό μελέτη προβλήματος για να κατανοήσουμε αργότερα τα αποτελέσματα. Σε κάθε τομέα της μηχανικής το πρόβλημα σχεδιασμού έχει έναν απώτερο σκοπό, την βελτιστοποίηση. Έτσι λοιπόν το πρόβλημα σχεδιασμού ενός προωστήρα οδηγεί στην προσπάθεια εύρεσης των φυσικών αλλά και κινηματικών χαρακτηριστικών τα οποία θα ελαχιστοποιήσουν την απαιτούμενη ισχύ για μια δεδομένη ταχύτητα ενός συγκεκριμένου πλοίου. Η πειραματική έρευνα αλλά και η αποδειχθείσα θεωρία έχουν οδηγήσει στην εύρεση φυσικών νόμων οι οποίοι περιγράφουν το υπό μελέτη πρόβλημα. Αυτοί οι νόμοι δεν είναι τίποτε άλλο παρά συναρτησιακές σχέσεις μεταξύ των διαστατικών εξαρτημένων μεταβλητών και των αδιάστατων ανεξάρτητων μεταβλητών. Οι ανεξάρτητες μεταβλητές είναι αυτές που χαρακτηρίζουν διάφορες καταστάσεις του φαινομένου. Δεδομένου λοιπόν όλων των παραπάνω καταλαβαίνει κανείς ότι είναι απαραίτητη η περιγραφή αυτών των μεταβλητών. Οι ανεξάρτητες αυτές μεταβλητές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δυο κατηγορίες: η κατηγορία A περιέχει τις γεωμετρικές μεταβλητές; ενώ η κατηγορία B περιέχει τις μεταβλητές κίνησης [9].

### 3.1 Κατηγορία A

Η γεωμετρία του FEOD περιγράφεται από το περίγραμμα του (την χορδή και την μέση ακτίνα του), την κατανομή της κυρτότητας και του πάχους. Έχοντας υπόψη ότι η μέγιστη κυρτότητα, το πάχος και η θέση του άξονα προνευστασμού είναι μεταβλητές οι οποίες μπορούν να μεταβληθούν σε κάθε διαφορετική κατάσταση πειραμάτων μπορούμε να τα συμπεριλάβουμε μέσα στην κατηγορία αυτή. Επίσης, πρέπει να τονίσουμε ότι η μέγιστη κυρτότητα αλλά και η θέση του μπορούν να μεταβάλλονται στον χρόνο αν υποθέσουμε ότι υπάρχει ελαστικότητα της κάθε υδροτομής. Συγκεντρωτικά λοιπόν οι παράμετροι που βρίσκονται στην κατηγορία αυτή είναι: η χορδή  $c$ ; οι χαρακτηριστικές ακτίνες  $A_0, B_0$ ; το μέγιστο πάχος  $m_i(t)$ ; η μέγιστη κυρτότητα  $m_c(\{\phi; \tau\}, t)$ ; και η θέση του άξονα προνευστασμού  $b$ .

### 3.2 Κατηγορία B

Σε αυτήν την περίπτωση πρέπει να τονίσουμε ότι ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της κίνησης που θα επιβάλει ο ερευνητής στο μοντέλο θα οδηγηθούμε και σε διαφορετικές χαρακτηριστικές παραμέτρους που θα υπάγονται σε αυτήν την περίπτωση. Γενικά όμως οι παράμετροι αυτές δεν θα διαφέρουν τόσο στην ουσία τους όσο στον τρόπο ορισμού τους. Στην δική μας περίπτωση έχουμε επιλέξει ημιτονική εξίσωση για την εγκάρσια κίνηση ενώ για τον προνευστασμό επιλέγεται μέσω της επιλογής του  $w$  όπως εξηγήσαμε προηγουμένως. Έτσι λοιπόν οι παράμετροι αυτής της κατηγορίας είναι: το πλάτος  $h_0$  της εγκάρσιας κίνησης; το πλάτος  $\theta_0$  του προνευστασμού (μέσω της επιλογής του  $w$ ); η συχνότητα  $n$  (κοινή και για την κατακόρυφη ανύψωση και για τον προνευστασμό); και η διαφορά φάσης  $\psi$  των δυο αυτών κινήσεων.



## 4. Επίλυση του προβλήματος βέλτιστης σχεδίασης

Στο κεφάλαιο αυτό οδηγούμαστε στο τελικό στάδιο της μελέτης της παρούσας διπλωματικής όπου πλέον γίνεται σύζευξη του FEOD με τη γάστρα ενός πλοίου ώστε να εξάγουμε τα επιθυμητά αποτελέσματα. Αρχικά ορίζουμε το πρόβλημα σχεδίασης του προωστήρα ώστε να μπορέσουμε να παραγάγουμε τα διαγράμματα ώσης και ισχύος. Εν συνεχεία συζητείται η παραγωγή των διαγραμμάτων σε ελεύθερη ροή και το πώς αυτά χρησιμοποιούνται για την σχεδίαση ενός προωστήρα. Η συμμετοχή του ομόρου στην παραγωγή ώσης είναι κάτι το οποίο είναι πολύ σημαντικό για την κατανόηση του προβλήματος για τον λόγο αυτό γίνεται αναφορά στους μηχανισμούς παραγωγής ώσης από τον ομόρου. Τέλος παρέχονται συγκριτικά αποτελέσματα μεταξύ τριών διαφορετικών προωστήρων: μιας τυπικής προπέλας B-screw, του FOD και του FEOD.

#### 4.1 Επίλυση του προβλήματος του FEOD για το πρόβλημα σχεδίασης.

Ξεκινώντας πλέον την προσπάθεια επίλυσης του προβλήματος πρέπει να αποφασίσουμε ποιες ανεξάρτητες παράμετροι είναι αυτές που ελέγχουν την ώση αλλά και την κατανάλωση ενέργειας μιας και αυτά τα δυο μεγέθη είναι αυτά που απασχολούν έναν σχεδιαστή. Έχουμε ήδη κάνει σαφές ότι η γεωμετρία του FEOD ελέγχεται από δυο βασικές κατηγορίες αδιάστατων μεταβλητών. Έχοντας εξάγει λοιπόν τις αδιάστατες παραμέτρους (Παράρτημα II), έχουμε τις παρακάτω μεταβλητές που ελέγχουν την γεωμετρία και την κίνηση του FEOD, υποθέτοντας ότι  $\psi=0$ :

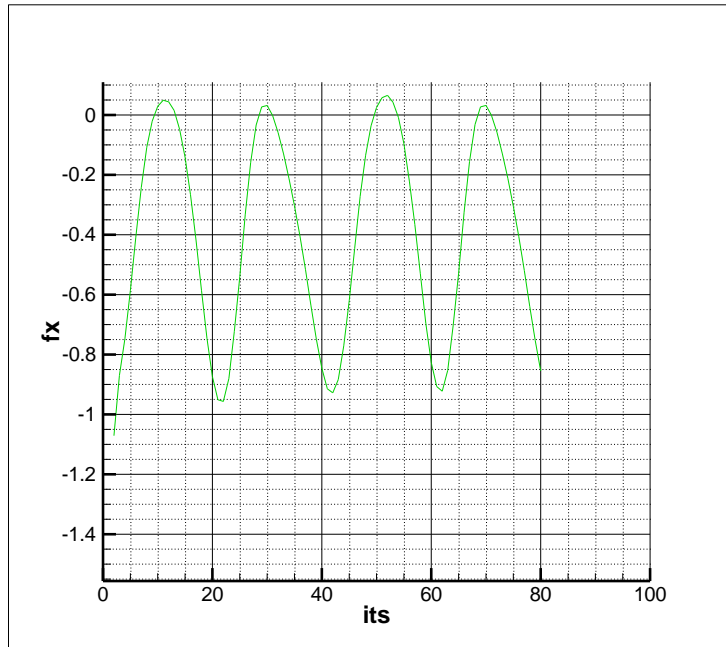
$$\begin{aligned} &w, Str, h_0/c, b/c, A_0/c, R/c, \\ &\text{κατανομή κυρτότητας \& πάχους.} \end{aligned} \tag{4.1}$$

Προσπαθώντας να ορίσουμε το πρόβλημα ενός προωστήρα καταλήγουμε στην εξής συλλογιστική: υπολογίζω την στιγμιαία απόδοση, ώση και ισχύ του προωστήρα σε ελεύθερη ροή χρησιμοποιώντας τον UBEM για ένα εύρος των παραμέτρων ( $w, Str$ ) υποθέτοντας ότι οι παράμετροι  $h_0/c, b/c, A_0/c, R/c$  είναι δεδομένες μαζί με τις κατανομές της κυρτότητας και του πάχους, Διάγραμμα 1, Διάγραμμα 2, Διάγραμμα 3. Οι περιπτώσεις που παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα έχουν δημιουργηθεί με την ‘polar’ περιγραφή και έχουν χορδή  $c=0.15$  m και τον άξονα προνευστασμού στον  $b/c=0.33\%$  του μήκους της χορδής. Στο Διάγραμμα 1 παρατηρούμε ότι η τιμές της δύναμης που παράγεται κατά τον άξονα-X είναι ως επί το πλείστον αρνητικές, το αρνητικό πρόσημο δηλώνει ότι η δύναμη που παράγεται είναι ομόρροπη της ταχύτητας προχώρησης. Το ίδιο ισχύει και για το Διάγραμμα 2 και το Διάγραμμα 3 όπου το αρνητικό πρόσημο δηλώνει ότι ενέργεια από το ρευστό ή τον κινητήρα αντίστοιχα παρέχεται στο FEOD, επίσης στα διαγράμματα αυτά τα μεγέθη του ο κατακόρυφου άξονα είναι  $f_x=F_x/\rho$ ,  $net\_pow=Net\_Power/\rho$  και  $dhp\_general=DHP\_GENERAL/\rho$ , όπου  $\rho$  είναι η πυκνότητα του υγρού, και  $[\rho]=\text{kg}\cdot\text{sec}^2/\text{m}^4$ . Για κάθε χρονική στιγμή μπορούμε να ορίσουμε τις τρεις παραπάνω εξαρτημένες, λόγω όμως της περιοδικότητας της κίνησης μπορούμε να υποθέσουμε ότι υπάρχει ένα είδος μονιμότητας σε κάθε περίοδο, πράγμα που σημαίνει ότι κάθε περίοδος μπορεί να αντιπροσωπευτεί από τιμές εξαρτημένων μεταβλητών ικανές να εκπροσωπήσουν την κάθε περίοδο της κίνησης. Αυτές οι παράμετροι δεν είναι άλλες από τις μέσες τιμές της απόδοσης, της ώσης και της ισχύος του προωστήρα. Έτσι υπολογίζουμε την μέση τιμή για την ώση και την αποδιδόμενη ισχύ στο FEOD για μια περίοδο τις οποίες συμβολίζω με:  $T$  και  $DHP$  αντίστοιχα. Η απόδοση του προωστήρα μπορεί να εκφραστεί από τους ακόλουθους αδιάστατους συντελεστές ώσης και ισχύος:

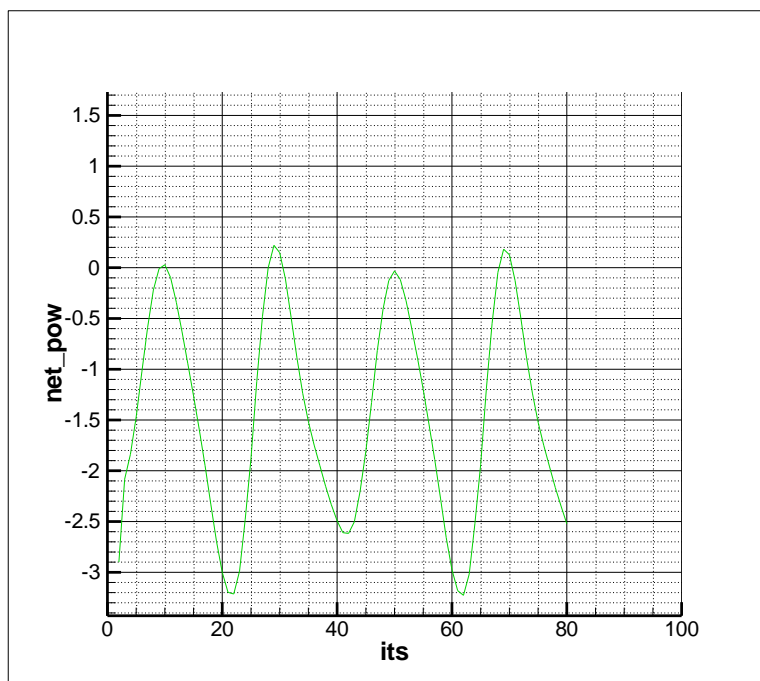
$$C_T = \frac{T}{0.5\rho U^2 S} = C_T(w, Str, h_0/c, b/c, A_0/c, R/c) \quad (4.2)$$

$$C_p = \frac{DHP}{0.5\rho U^3 S} = C_p(w, Str, h_0/c, b/c, A_0/c, R/c) \quad (4.3)$$

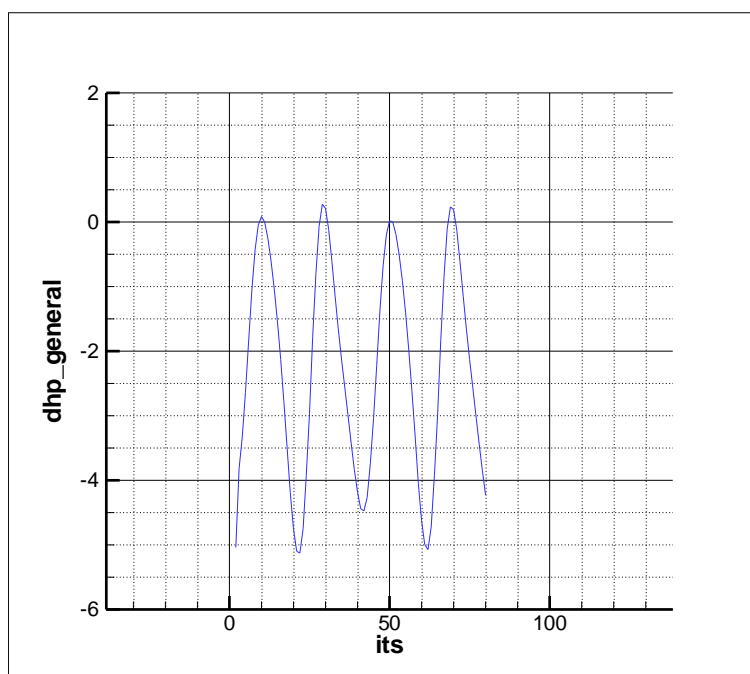
Όπου S συμβολίζει την μέση επιφάνεια δίσκου του FEOD ( $= \pi \cdot A_0 \cdot B_0$ ).



Διάγραμμα 1. Στιγμαία δύναμη κατά τον X-άξονα ( $[fx]=m^4/s^2$ ) προς τα χρονικά βήματα της προσομοίωσης για FEOD με  $Str=.5$ ,  $h_0/c = 0.5$ ,  $R/c = 3$ ,  $\theta_0 = 23.54^\circ$



Διάγραμμα 2. Στιγμιαία ωφέλιμη ισχύς ( $[net\_pow]=m^5/s^3$ ) προς τα χρονικά βήματα της προσομοίωσης για FEOD με  $Str=.5$ ,  $h_0/c=0.5$ ,  $R/c=3$ ,  $\theta_0 = 23.54^\circ$



Διάγραμμα 3. Στιγμιαία αποδιδόμενη ισχύς ( $[dhp\_general]=m^5/s^3)^2$  προς τα χρονικά βήματα της προσομοίωσης για FEOD με  $Str=.5$ ,  $h_0/c=0.5$ ,  $R/c=3$ ,  $\theta_0 = 23.54^\circ$

<sup>2</sup> Ο συμβολισμός  $dhp\_general$  έχει να κάνει καθαρά με τον κώδικα UBEM ο οποίος έχει τη δυνατότητα να υπολογίσει αποδιδόμενη ισχύ για προπέλα  $dhp\_propel1$ , για φτερό  $dhp\_wing$ , και για γενικού σχήματος σώμα  $dhp\_general$ . Έτσι ανάλογα με το είδος του σώματος που έχουμε ο κώδικας υπολογίζει και την αντίστοιχη ισχύ.

Σε κατάσταση αυτοπρόωσης ορίζουμε το ποσοστό ομόρου  $W$  ως:

$$U = V(1 - W) \quad (4.4)$$

Όπου  $V$  είναι η ταχύτητα του πλοίου. Ορίζουμε επίσης τον βαθμό απόδοσης σχετικής περιστροφής  $\eta_R$  ως:

$$\eta_R = \frac{DHP}{DHP_B} \quad (4.5)$$

Όπου  $DHP_B$  είναι η μέση αποδιδόμενη ισχύς στο FEOD για μια περίοδο σε κατάσταση αυτοπρόωσης. Βέβαια η ορολογία για την ονομασία του  $\eta_R$  που χρησιμοποιήθηκε είναι καθαρά για λόγους συνοχής με την διεθνή βιβλιογραφία και για λόγους συμβατότητας μιας και στην περίπτωση μας δεν υπάρχει περιστροφή του FEOD όπως σε μια έλικα. Υποθέτοντας επίσης ότι έχουμε χρησιμοποιήσει την μέθοδο εξίσωσης της ώσης για τον προσδιορισμό των συντελεστών αλληλεπίδρασης FEOD-γάστρας  $W, t, \eta_R$  (όπου  $t$  είναι το ποσοστό μείωσης της ώσης), η ώση και η αποδιδόμενη ισχύς για τον προωστήρα μας για την πρώτη παραμετρική περίπτωση σε κατάσταση αυτοπρόωσης δίνεται από:

$$T_B = T = 0.5\rho(V(1 - W))^2 S \cdot C_T(w, \frac{n \cdot 2h_0}{V(1 - W)}, h_0/c, b/c, A_0/c, R/c) \quad (4.6)$$

$$DHP_B \eta_R = 0.5\rho(V(1 - W))^3 S \cdot C_P(w, \frac{n \cdot 2h_0}{V(1 - W)}, h_0/c, b/c, A_0/c, R/c) \quad (4.7)$$

Για ένα αυτοπροωθούμενο πλοίο κινούμενο με ταχύτητα  $V$ , το περιβάλλον ρευστό αλληλεπιδρά με την γάστρα και δημιουργεί αντίσταση ίση με:  $R_0(V)/(1 - t)$ , όπου  $R_0(V)$  είναι η αντίσταση ρυμουλκούμενου πλοίου εξοπλισμένο με όλα τα παρελκόμενα πλην της έλικας και η οποία εξαρτάται από την γεωμετρία του πλοίου και την ταχύτητα του. Για λόγους πληρότητας πρέπει να

συμπεριλάβουμε και την περίπτωση όπου ένα πλοίο έλκει ένα αντικείμενο με δύναμη  $F$  (περίπτωση αλιευτικού ή ρυμουλκού). Σε αυτήν την περίπτωση λοιπόν η ώση που αναπτύσσεται δίνεται από :

$$T_B = \frac{R_0(V)}{1-t} + F \quad (4.8)$$

Έχοντας γνωστά τα  $V, w, c, A_0, R, h_0, b, W, t, \eta_R$  οι εξισώσεις (4.6), (4.7) και (4.8) ορίζουν ένα μη γραμμικό σύστημα τριών εξισώσεων με τρεις αγνώστους  $(T, DHP_B, n)$ . Μπορούμε λοιπόν να λύσουμε το παραπάνω σύστημα για ένα εύρος ταχυτήτων πλοίου  $V \in (V_1, V_2)$  και  $w \in [0, 1]$ . Έτσι αποκτούμε την ολότητα των λύσεων που αφορούν την σχεδίαση για ένα συγκεκριμένο πλοίο:

$$DHP_B, n \leftarrow V, w \Big|_{\text{δεδομένο πλοίο, } c, A_0, R, h_0, b, W, t, \eta_R} \quad (4.9)$$

Οι πληροφορίες που δίνονται από την (4.9) μπορούν να παρουσιαστούν σε ένα 2-D  $DHP-n$  διάγραμμα στην μορφή παραμετρικών καμπύλων σταθερού  $V$  και  $w$ . Παρατηρούμε ότι ο τρόπος που θέσαμε και τελικά λύσαμε το πρόβλημα οδήγησε στην εξίσωση (4.9) η οποία είναι παρόμοια με αυτή μιας συμβατικής προπέλας με τη διαφορά ότι ο λόγος βήματος αντικαθιστά το  $w$ . Για να μπορούμε όμως να φτάσουμε στα παραπάνω αποτελέσματα πρέπει να έχουμε γνώση των διαγραμμάτων ελεύθερης ροής του προωστήρα ώστε να γνωρίζουμε τους συντελεστές ώσης και ισχύς, κάτι το οποίο εξετάζεται στην επόμενη παράγραφο.

## 4.2 Διαγράμματα FEOD σε ελεύθερη ροή.

Για να μπορέσουμε να παράγουμε μια πειραματική σειρά δεδομένων για την σχεδίαση του FEOD, πρέπει να προαποφασίσουμε κάποιες χαρακτηριστικές τιμές για τις γεωμετρικές και κινηματικές μεταβλητές. Στην περίπτωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας εξετάζουμε και παρουσιάζουμε την περίπτωση συστήματος πρόωσης που αποτελείται από ένα μόνο FEOD με τις παρακάτω χαρακτηριστικές μεταβλητές  $R/c = A_0/c = 4$ ,  $h_0/c = 3.0$  και  $b/c = 0.33$ , ο αριθμός Strouhal κυμαίνεται μεταξύ  $Str = 0.1 \div 0.7$ . Η επιλογή του αριθμού Strouhal γίνεται καθαρά με βάση την εμπειρία μας δεδομένου ότι μέσα σε αυτήν την περιοχή θα βρίσκεται η μέγιστη υδροδυναμική απόδοση του προωστήρα. Τέλος η μεταβλητή  $w$  έχει επιλεχθεί να κυμαίνεται μεταξύ 0 και 1 το οποίο σημαίνει ότι οι αντίστοιχες γωνίες προνευστασμού  $\theta(\varphi, t)$  περιλαμβάνουν εξολοκλήρου την περιοχή των κινήσεων που παράγουν ώση για κάθε αριθμό Strouhal. Έχοντας λοιπόν αποφασίσει για τις αδιάστατες μεταβλητές προχωρήσαμε σε συστηματικά τρεξίματα του κώδικα UBEM, σε όλες τις περιπτώσεις η χορδή επιλέχθηκε  $c = 1.0m$ . Μεταβάλλοντας τον αριθμό Strouhal και ταυτόχρονα κρατώντας σταθερή την ταχύτητα προχώρησης  $V = 2.3m/s$  έχουμε σαν αποτέλεσμα την μεταβολή της συχνότητας ταλάντωσης. Αποτέλεσμα αυτού είναι να έχουμε συνεχώς σταθερό αριθμό Reynolds ίσο με  $0.202 \cdot 10^7$ , στην συγκεκριμένη περίπτωση ο αριθμός Reynolds ( $Re = V \cdot c / \nu$ ) αναφέρεται σε ολόκληρο τον προωστήρα και παράγεται αν διαλέξουμε την ταχύτητα προχώρησης σαν μια από τις ανεξάρτητες μεταβλητές, με άλλα λόγια θα μπορούσαμε να πούμε ότι αναφέρεται στην ολόκληρη του προωστήρα και δεν αποτελεί τοπικό αριθμό Reynolds όπως θα μπορούσαμε να παράγουμε για κάθε υδροτομή ξεχωριστά μιας και η κάθε μια λειτουργεί σε διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης. Αν διαλέξουμε σαν ανεξάρτητη μεταβλητή όχι πλέον την ταχύτητα προχώρησης αλλά την μέγιστη ταχύτητα αδιατάρακτης ροής τότε άμεσα στον τύπο του αριθμού Reynolds υπεισέρχεται και ο αριθμός Strouhal και επομένως έχουμε την εξής σχέση:  $Re_{Str} = \frac{V \cdot c}{\nu} \sqrt{1 + (\pi \cdot Str)^2}$ . Με βάση την προηγούμενη σχέση ο αριθμός Reynolds κυμαίνεται από  $Re_{Str} = 0.22 \cdot 10^7$  για  $Str = 0.10$  και  $Re_{Str} = 0.51 \cdot 10^7$  για  $Str = 0.7$  (κινηματική συνεκτικότητα:  $\nu = 1.139 \cdot 10^{-6} m^2/s$ ). Γνωρίζοντας λοιπόν όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά του προωστήρα μας υπολογίσαμε την μέση ώση και ισχύ χρησιμοποιώντας τον UBEM κώδικα για ένα διάστημα δυο περιόδων.

Παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα σε διαγράμματα της μορφής  $C_T - \theta_0$ , Διάγραμμα 4, (όπου  $\theta_0 \rightarrow \theta$  στα διαγράμματα) και  $C_p - \theta_0$ , Διάγραμμα 5. Στα διαγράμματα το  $\theta_0$  δηλώνει το πλάτος της γωνίας προνευστασμού της υδροτομής στον ελάχιστο κύριο άξονα της έλλειψης ((2.19)

με  $\varphi = \pi/2$ ). Τα  $C_T - \theta_0$  διαγράμματα περιέχουν επίσης σε παραμετρική μορφή την απόδοση σε ελεύθερη ροή  $\eta$  του συστήματος (λεπτές γραμμές):

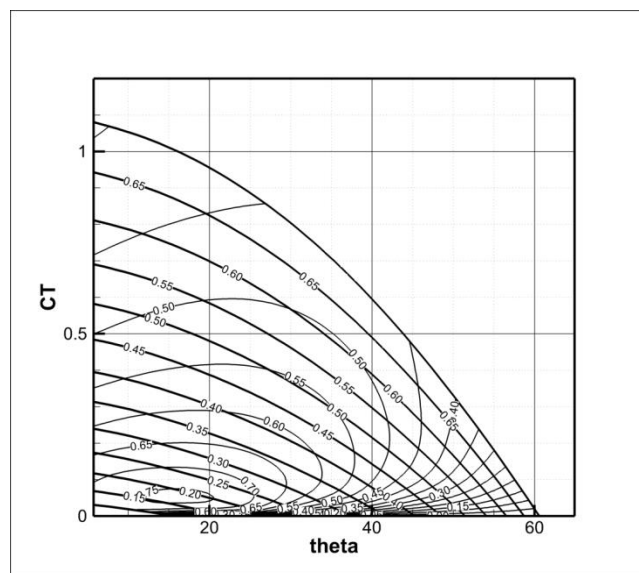
$$\eta = \frac{T \cdot U}{DHP} = \frac{C_T}{C_P} \quad (4.10)$$

Επίσης, τα  $C_P - \theta_0$  διαγράμματα περιέχουν σε παραμετρική μορφή την μέγιστη γωνία πρόσπτωσης  $\alpha_{\max}$ , η οποία ορίζεται ως η μέγιστη τιμή της  $a(t)$  εξίσωση (2.20) για  $\varphi = \pi/2$ . Η γνώση της μέγιστης γωνίας πρόσπτωσης είναι πολύ σημαντική για τον σχεδιαστή μιας και με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να αποφύγουμε αποκόλληση ροής πάνω στον προωστήρα μας, ένα φαινόμενο το οποίο δεν μοντελοποιείται με τον κώδικα UBEM. Για λόγους σύγκρισης το Διάγραμμα 6 και Διάγραμμα 7 παρέχουν ακριβώς τα ίδια αποτελέσματα αλλά για ένα FOD με:  $R/c=4$ ,  $h_0/c=2$  έτσι ώστε να γίνονται εύκολες συγκρίσεις. Παρατηρούμε ότι ο λόγος  $h_0/c$  δεν είναι ίδιος με αυτήν του FEOD, αυτό γίνεται για καθαρά λόγους σύγκρισης μιας και ο ένας άξονας του FEOD είναι σταθερός στον χώρο χρειάζεται ο  $h_0/c$  να είναι μεγαλύτερος από αυτόν του FOD έτσι ώστε να πλησιάζει η μέγιστη επιφάνεια του FEOD αυτή του FOD, με άλλα λόγια θέλουμε οι επιφάνειες  $S$  των εξισώσεων (4.2) και (4.3) να είναι συγκρίσιμες μεταξύ των προωστήρων. Θα μπορούσε βέβαια να είχε επιλεγθεί και μεγαλύτερος λόγος για το FEOD ή ακόμα και ο ίδιος με αυτόν του FOD. Η επιλογή του λόγου αυτού εξαρτάται καθαρά από τον σχεδιαστή και το τι θέλει να συγκρίνει μεταξύ των δυο προωστήρων.

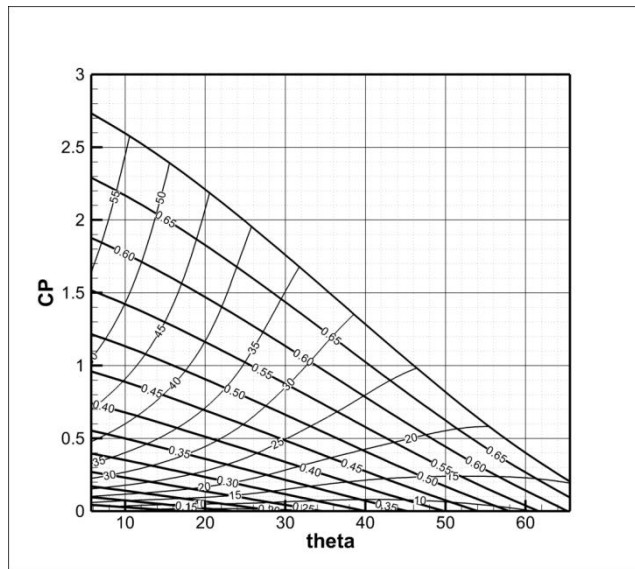
Έχοντας λοιπόν τα διαγράμματα αυτά μπορούμε να βγάλουμε χρήσιμα συμπεράσματα: α) η περιοχή της μέγιστης υδροδυναμικής απόδοσης βρίσκεται σε περιοχές όπου η μέγιστη γωνία πρόσπτωσης που λαμβάνει κάθε υδροτομή είναι μικρότερη των 15 μοιρών, με άλλα λόγια σε περιοχές χωρίς αποκόλληση ροής κάτι το οποίο αναμέναμε, β) η απόδοση του FEOD είναι αρκετά μικρότερη αυτής του FOD μιας και ο κατακόρυφος άξονας δεν συμμετέχει καθόλου στην παραγωγή ώσης, όμως μια τέτοια μείωση στην απόδοση μπορεί να εξισορροπείται από μια οικονομικότερη κατασκευή και ευκολότερη τοποθέτηση του προωστήρα πίσω από την γάστρα. Πρέπει εδώ να συμπληρώσουμε ότι σε ενδελεχή έλεγχο που έγινε στις μεταβολές των πιέσεων δεν παρουσιάστηκε κάποιο αποτέλεσμα που να οδηγεί σε πιέσεις χαμηλότερες αυτών της πίεσης ατμοποίησης, πράγμα που σημαίνει ότι δεν υπάρχει κίνδυνος σπηλαιώσης. Παρατηρούμε επίσης ότι με τα παρακάτω διαγράμματα μπορούμε να επιλέξουμε το βέλτιστο FEOD για δεδομένο πλοίο [11]. Ο τρόπος χρήσης των  $C_P - \theta_0$  και  $C_T - \theta_0$  διαγραμμάτων γίνεται ως εξής: έχοντας γνωστά την ταχύτητα αλλά και την καμπύλη αντίστασης του πλοίου, μπορώ να βρω άμεσα μέσω των συντελεστών αλληλεπίδρασης προωστήρα-γάστρας την ταχύτητα ελεύθερης ροής του FEOD αλλά



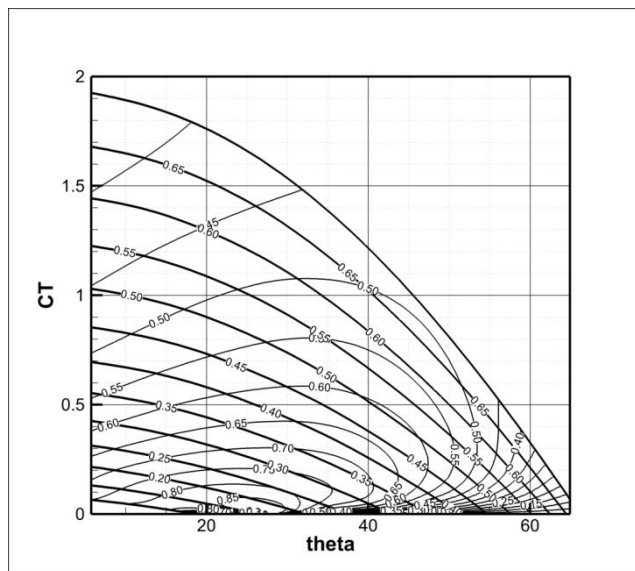
και την ώση που χρειαζόμαστε, έτσι υπολογίζω τον συντελεστή ώσης  $C_T$ . Για την τιμή αυτή στο Διάγραμμα 4 φέρω παράλληλη γραμμή στον οριζόντιο άξονα, η γραμμή αυτή προφανώς θα τέμνει το διάγραμμα σε παραπάνω από μια καμπύλες γραμμές που αντιστοιχούν σε αριθμούς Strouhal και υδροδυναμικής απόδοσης, ο τρόπος λοιπόν που επιλεγούμε μια από αυτές τις λύσεις είναι εκείνη η λύση που φαίνεται οπτικά να δίνει την μεγαλύτερη απόδοση. Στο σημείο λοιπόν τομής της οριζόντιας γραμμής και της γραμμής απόδοσης αντιστοιχεί ένας αριθμός Strouhal ο οποίος είναι και ο αριθμός που θα αντιστοιχεί στον προωστήρα. Στο σημείο εκείνο λοιπόν φέρουμε παράλληλη στον κατακόρυφο άξονα μέχρι να τμήσει τον οριζόντιο από όπου διαβάζουμε την τιμή του  $\theta$ . Πηγαίνουμε στο Διάγραμμα 5 και για την τιμή  $\theta$  και strouhal που έχουμε βρίσκουμε τη μέγιστη γωνία πρόσπτωσης αλλά και τον συντελεστή  $C_p$  από όπου υπολογίζουμε την ισχύ.



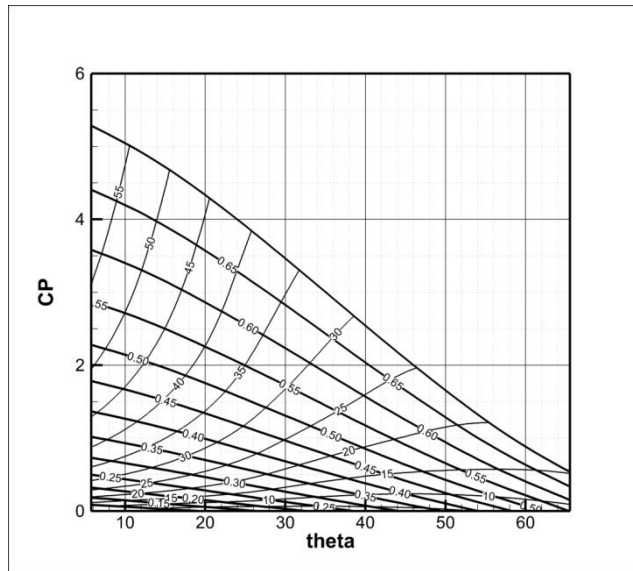
Διάγραμμα 4.  $C_T - \theta_0$  διάγραμμα για FEOD. Παχιές γραμμές δείχνουν τον αριθμό  $Str$  και οι λεπτές την απόδοση.



Διάγραμμα 5.  $C_p - \theta_0$  διάγραμμα για FEOD. Παχιές γραμμές δείχνουν τον αριθμό  $Str$  οι λεπτές την  $\alpha_{max}$



Διάγραμμα 6.  $C_T - \theta_0$  διάγραμμα για FOD  $R/c=4$   $h_0/c=2.0$ . Παχιές γραμμές δείχνουν τον αριθμό  $Str$  και οι λεπτές την απόδοση.

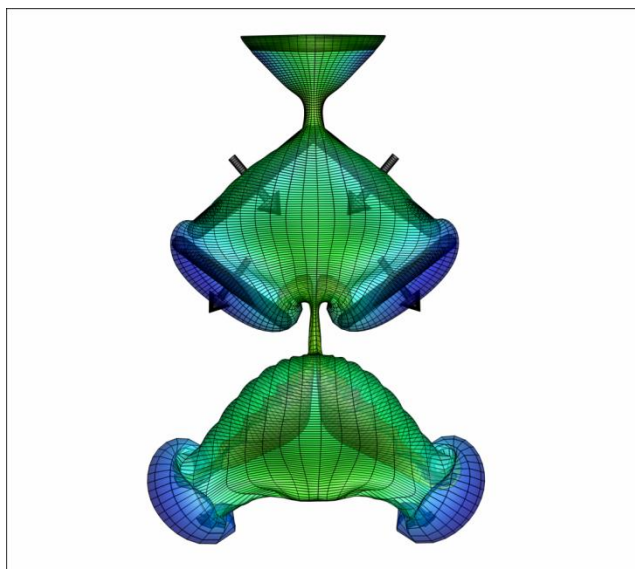


Διάγραμμα 7.  $C_p - \theta_0$  διάγραμμα για FOD  $R/c=4$   $h_0/c=2.0$ . Παχιές γραμμές δείχνουν τον αριθμό  $Str$  οι λεπτές την  $a_{max}$

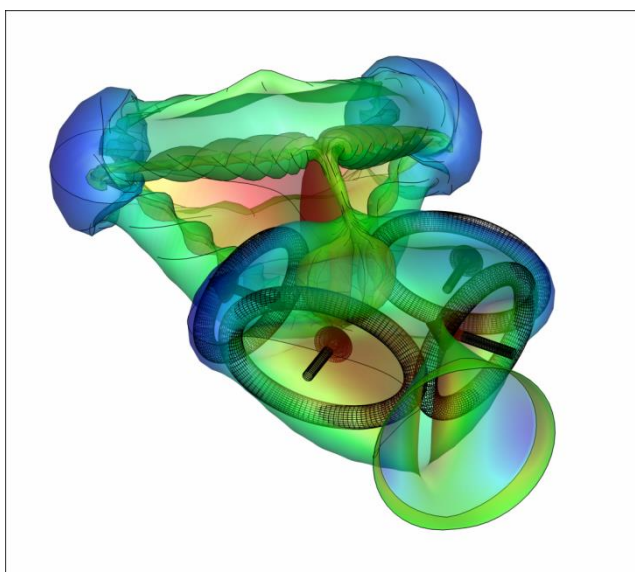
### 4.3 Τρόπος παραγωγής ώσης του FEOD από τον ομόρου του.

Για να μπορέσουμε να κατανοήσουμε πως συμμετέχει ο ομόρους στην παραγωγή ώσης του προωστήρα πρέπει να κατανοήσουμε την γεωμετρία του. Αρχικά πρέπει να επισημάνουμε για άλλη μια φορά όπως και σε προηγούμενη παράγραφο ότι τόσο η επιφάνεια του FEOD όσο και ο ομόρους αντιμετωπίζονται ως επιφάνειες ασυνέχειας. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι αν θεωρήσουμε τον ομόρου σαν μια επιφάνεια  $S$  τότε διαχωρίζουμε την επιφάνεια αυτή σε δυο μέρη, το άνω  $S^+$  και το κάτω  $S^-$ . Τα δυο αυτά μέρη δεν είναι τίποτε άλλο παρά μόνο η ίδια επιφάνεια  $S$ , ο διαχωρισμός όμως αυτός γίνεται για να κατανοήσουμε ότι καθώς πλησιάζουμε οριακά τις τιμές ενός μεγέθους (π.χ. την ταχύτητα διαταραχής  $\nabla\Phi$ ) από την  $S^+$  και καθώς πλησιάζουμε από την  $S^-$  επιφάνεια το μέγεθος αυτό λαμβάνει τις τιμές  $\nabla\Phi^+$  και  $\nabla\Phi^-$  αντίστοιχα, άρα το μέγεθος είναι ασυνεχές. Καταλαβαίνουμε λοιπόν ότι αυτός είναι και ο λόγος που ονομάζονται το σώμα και ο ομόρους επιφάνειες ασυνέχειας. Ο τρόπος ορισμού ενός μεγέθους για το αν είναι ασυνεχής συνάρτηση ή όχι εξαρτάται από το πρόβλημα και από τις φυσικές και οριακές συνθήκες που πρέπει να επιβάλλουμε ώστε να είναι όσο το δυνατόν περισσότερο αντιπροσωπευτικό της πραγματικότητας. Έτσι για παράδειγμα το πεδίο ταχυτήτων είναι ασυνεχές πάνω στην επιφάνεια του ομόρου, διότι ενώ η κάθετη προβολή της ταχύτητας διαταραχής πρέπει να είναι ίδια και στην  $S^+$  και στην  $S^-$ , δηλαδή  $\vec{n} \cdot \nabla\Phi^+ = \vec{n} \cdot \nabla\Phi^-$ , οι εφαπτομενικές συνιστώσες του ίδιου μεγέθους δεν χρειάζεται να έχουν τις ίδιες τιμές μιας και για να έχουμε στροβιλότητα πρέπει να υπάρχει μια σχετική ολίσθηση της  $S^+$  πάνω στην  $S^-$  πράγμα που σημαίνει ότι ο ομόρους είναι επιφάνεια ασυνέχειας της εφαπτομενικής συνιστώσας της ταχύτητας του ρευστού. Για να μπορέσουν να

μοντελοποιηθούν μαθηματικά ώστε να καταλήξουμε στον κώδικα UBEM καταλήγουμε στην παραγωγή αυτών των επιφανειών από κατανομές διπόλων[7]. Γνωρίζουμε ότι  $\nabla\mu = \vec{\gamma} \times \vec{n}$  όπου  $\mu = \phi^+ - \phi^-$  η επιφανειακή ένταση διπόλων. Από την στιγμή που το  $\nabla\mu$  κατευθύνεται προς τη διεύθυνση μέγιστης αύξησης του  $\mu$  πάνω στην επιφάνεια ορισμού του, αυτό σημαίνει ότι το  $\vec{\gamma}$  κατευθύνεται σε διεύθυνση όπου το  $\mu$  είναι σταθερό. Αν λοιπόν χρωματίσουμε την επιφάνεια του FEOD και τον ομόρου, Σχήμα 3, ανάλογα με την κατανομή διπόλων που περιγράφει τις δυο αυτές επιφάνειες τότε παρατηρούμε ότι οι γραμμές σταθερής κατανομής διπόλων συμπίπτουν με τις επιφανειακές γραμμές στροβιλότητας και άρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την οπτικοποίηση-της. Με βάση λοιπόν τα παραπάνω οδηγούμαστε στο εξής συμπέρασμα: όπου βλέπουμε επιφανειακή γραμμή με αλλαγή χρωματικής απόχρωσης, σημαίνει ότι στην περιοχή εκείνη το διάνυσμα της στροβιλότητας εφάπτεται. Συνεπώς μια κλειστή τέτοια γραμμή αναπαριστά μια δακτυλιοειδή δίνη. Αυτό φαίνεται καθαρά από το παρακάτω σχήμα όπου παρατηρούμε την παραγωγή δινών (και των αντίστοιχων jet) οι οποίες είναι υπεύθυνες για την παραγωγή ώσης που προέρχεται από την διατήρηση της ορμής στο FEOD. Πιο συγκεκριμένα τα βέλη στο Σχήμα 3 δείχνουν την διεύθυνση των επαγόμενων ταχυτήτων που παράγονται από τις δακτυλιοειδείς δίνες. Επίσης η μορφή των δακτυλιοειδών δινών παρατηρούμε ότι ομοιάζει περισσότερο σε σύστημα διπλών πτερυγίων, Σχήμα 4, παρά σε αυτό του FOD, με άλλα λόγια ομόκεντροι δακτύλιοι αντικαθίστανται από ζεύγη δακτυλίων. Το σχήμα των δακτυλίων προσομοιάζει επίσης τους δακτυλίους που παράγονται από πτερύγια με μικρό λόγο επιμήκους AR σε μικρούς αριθμούς Strouhal (οι δακτύλιοι είναι πεπλατυσμένοι στον άξονα παράλληλα της κίνησης προχώρησης ενώ σε μεγαλύτερους AR, είναι πεπλατυσμένοι κατά την διεύθυνση του πλάτους).

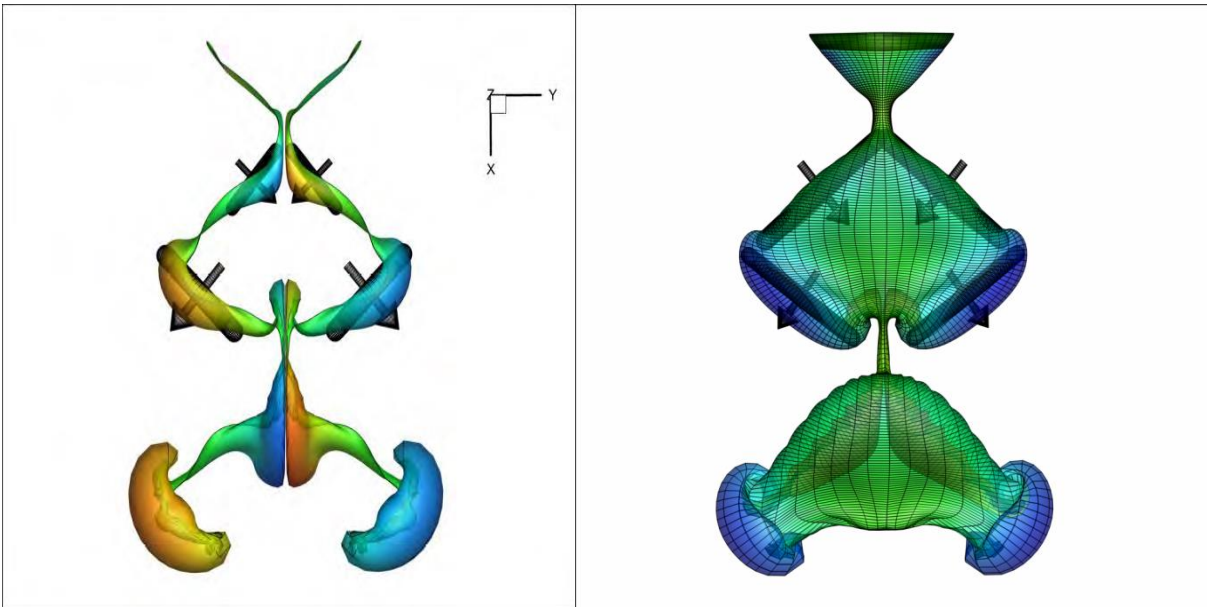


(α)



(β)

Σχήμα 3 α,β. Ομόρους του FEOD,  $Str=0.46$ ,  $\theta_0=34.4$ . Ο χρωματισμός έχει γίνει με βάση την κατανομή διπόλων. Παρατηρούμε τις δακτυλιοειδείς δίνες και τα αντίστοιχα jets με τα οποία το FEOD παράγει ώση.

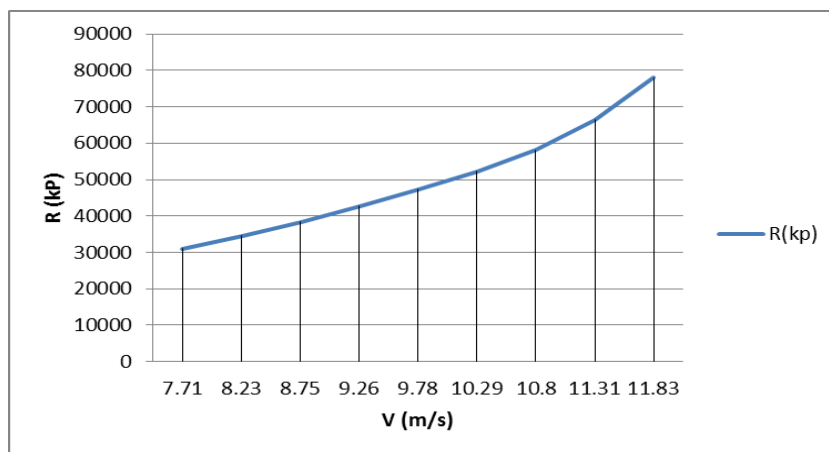


Σχήμα 4. Αντιπαραβολή δημιουργίας δινών στον ομόρου ενός συστήματος διπλών ορθογωνικών συζευγμένων περυγίων ( $AR=2$ ,  $Str=.4$ ,  $A=15$ ) [10] με τις αντίστοιχες ενός FEOD.

#### 4.4 Εφαρμογή του FEOD για την ώση πλοίου - Βέλτιστη σχεδίαση.

Έχοντας αναλύσει την γεωμετρία, την κίνηση, τις παραμέτρους που περιγράφουν το πρόβλημα μας αλλά και τον τρόπο παραγωγής ώσης από τον ομόρου μπορούμε πλέον να δούμε και ‘πειραματικά’ την συμπεριφορά του FEOD με το οποίο θα εξοπλίσουμε ένα πλοίο. Έτσι ελέγχοντας όλες τις μεταβλητές που επηρεάζουν το πρόβλημα μας, σε αρχικό πάντα στάδιο, εξετάζουμε την βέλτιστη σχεδίαση ενός προωστήρα. Στην παρούσα παράγραφο θα γίνουν συγκρίσεις μεταξύ των FEOD, FOD και της προπέλας. Με άλλα λόγια θα εξοπλίσουμε ένα passenger ferry με τους τρεις παραπάνω προωστήρες και θα αφήσουμε τον κώδικα UBEM να υπολογίσει όλα τα μεγέθη που μας ενδιαφέρουν. Το μοντέλο πλοίου που χρησιμοποιούμε είναι ένα διπλέλικο πλοίο με εκτόπισμα 8917.66 τόνους και μέγιστη επιτρεπόμενη διάμετρο έλικας 4.1 μέτρα. Η καμπύλη αντίστασης γυμνής γάστρας του μοντέλου μας δόθηκε από την βάση δεδομένων της δεξαμενής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, και δίνεται στον Πίνακας 1. Η γραφική μορφή της καμπύλης φαίνεται στο Σχήμα 5. Με την καμπύλη αντίστασης γυμνής γάστρας δεδομένη, το σύστημα των αλγεβρικών εξισώσεων (4.6),(4.7),(4.8) μπορεί να λυθεί για ένα εύρος ταχυτήτων  $V$  και  $\theta_0$  η ολότητα των λύσεων μπορεί να παρουσιαστεί σε ένα διάγραμμα όπως μας υποδεικνύει η εξίσωση (4.9). Για χάρη ευκολίας συγκρίσεων υποθέτουμε ότι σε όλες τις περιπτώσεις:  $W = 0.0, t = 0.0, \eta_R = 1.0$ . Όσον αφορά την κάθε περίπτωση χωριστά η παραπάνω υπόθεση είναι λογική αφού ένα διπλέλικο πλοίο έχει μικρές αλληλεπιδράσεις προωστήρα-γάστρας. Όσον αφορά τον λόγο που και οι τρεις περιπτώσεις έχουν τους ίδιους συντελεστές είναι και πάλι μια λογική επιλογή μιας και (για την ίδια γεωμετρία πλοίου) οι συντελεστές αλληλεπίδρασης είναι συναρτήσεις της διαμέτρου του προωστήρα και της παραγόμενης ώσης [12]. Δεν έγινε διόρθωση για κεκλιμένο άξονα για την περίπτωση της προπέλας, επίσης δεν έγινε διόρθωση για παρελκόμενα. Ο βαθμός απόδοσης έλικας-πλοίου θεωρήθηκε ίσος με 1 στους υπολογισμούς μας. Τέλος δεν έγιναν διορθώσεις στον τον αριθμό Reynolds για την κλίμακα του πλοίου.

Το σύνολο των λύσεων σχεδίασης παρέχονται σε μορφή  $V=\text{σταθ.}$  και  $\theta_0=\text{σταθ.}$  για το FEOD, FOD και  $V=\text{σταθ}$  και  $P/D=\text{σταθ}$  για την προπέλα και παρουσιάζονται στο Σχήμα 6, Σχήμα 7, Σχήμα 8 αντίστοιχα. Η σύγκριση των βέλτιστων FEOD, FOD και B-screw για ταχύτητα πλοίου 23 κόμβων παρουσιάζεται συγκεντρωτικά στον Πίνακας 2. Σε κάθε περίπτωση το πλοίο είναι εξοπλισμένο με δυο προωστήρες.



Σχήμα 5. Γράφημα αντίστασης προς την ταχύτητα για το πλοίο υπό μελέτη.

V(m/s)	R(kp)
7.71	31056
8.23	34528
8.75	38374
9.26	42755
9.78	47292
10.29	52301
10.80	58153
11.31	66426
11.83	8009

Πίνακας 1. Καμπύλη αντίστασης μοντέλου.

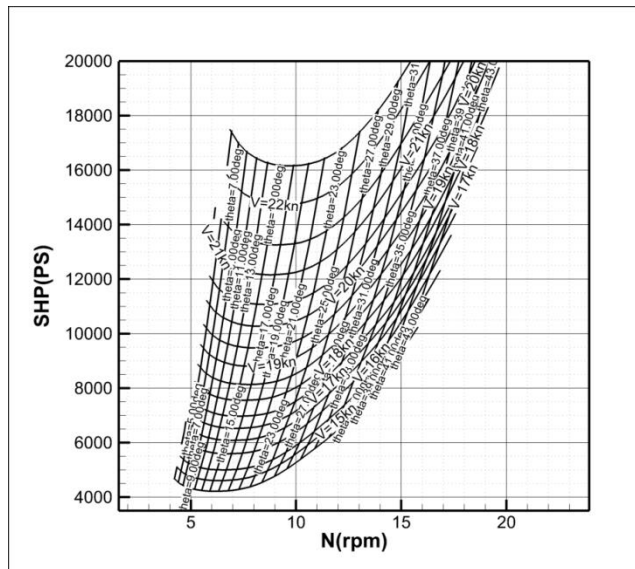


Προωστήρας	Στροφές (rpm)	Ισχύς (PS)	Απόδοση (%)	Κέρδος σε ισχύ (%)
FEOD	9.81	16211.83	75.90	5.21
FOD	29.55	14961.13	82.24	12.52
B-screw	168.30	17103.40	71.97	

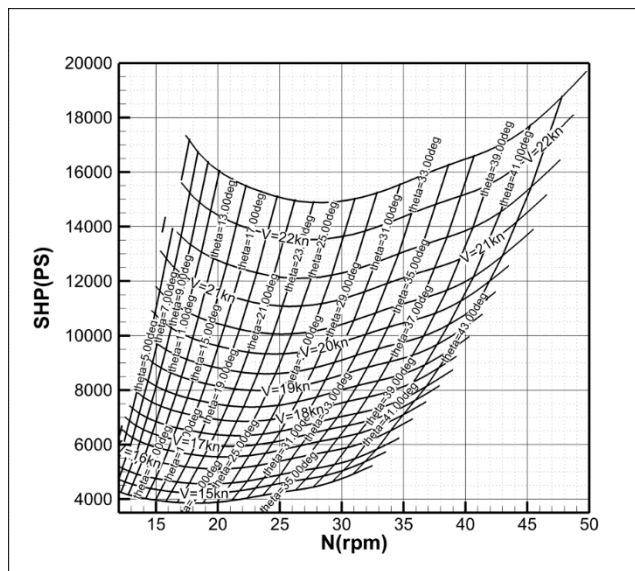
Πίνακας 2. Σύγκριση προωστήρων

Πρέπει στο σημείο αυτό να τονίσουμε ότι η προπέλα καθώς και το FOD χρησιμοποιούν τη μέγιστη δυνατή διάμετρο η οποία υπαγορεύεται από τις ανοχές. Με άλλα λόγια η προπέλα έχει διάμετρο  $D$  και το FOD έχει αρχική διάμετρο  $D$  και τελική  $D=2R+2h_0$ . Το FEOD όμως έχοντας τον κατακόρυφο άξονα σταθερό έχει σαν αρχική διάμετρο την μέγιστη του FOD δηλαδή  $D=2R+2h_0$ . Από το γεγονός αυτό οδηγούμαστε κατευθείαν στο συμπέρασμα ότι ο συντελεστής ώσης θα είναι μειωμένος και άρα η απόδοση του FEOD θα είναι επίσης μειωμένη.

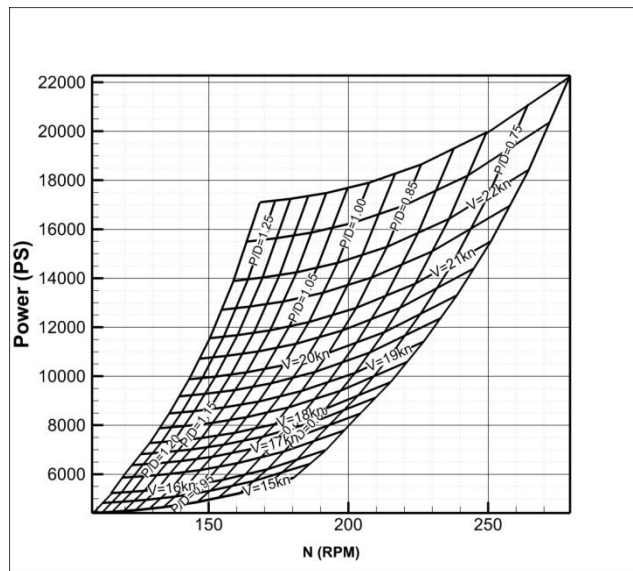
Παρατηρούμε λοιπόν από τον Πίνακα 2 ότι έχουμε ένα ποσοστό κέρδους στην απόδοση κατά 5.21% στην περίπτωση του FEOD σε σχέση με την προπέλα. Το αντίστοιχο κέρδος για το FOD είναι 12.25% πολύ μεγαλύτερο από του FEOD, θυμίζουμε στο σημείο αυτό ότι ο λόγος διαφοράς στην απόδοση είναι ότι στην περίπτωση του FEOD η κατακόρυφη υδροτομή δεν προσφέρει καθόλου στην κίνηση του προωστήρα μιας και είναι σταθερή, επίσης όπως εξηγήθηκε παραπάνω η επιφάνεια αδιαστατοποίησης για τον συντελεστή ώσης είναι διαφορετικός για το FOD και το FEOD πράγμα που οδηγεί σε περαιτέρω μείωση.



Σχήμα 6.Passenger Ferry-FEOD: Ολότητα λύσεων σε μορφή ισο-V, ισο- $\theta_0$  πλέγμα.



Σχήμα 7.Passenger Ferry-FOD: Ολότητα λύσεων σε μορφή ισο-V, ισο- $\theta_0$  πλέγμα.



Σχήμα 8.. Passenger Ferry- B4.75 προπέλα: Ολόκληρα λύσεων σε μορφή ισο-V, ισο-P/D πλέγμα.

## 5. Κώδικας γένεσης της γεωμετρίας του πλέγματος

Όπως είπαμε στην αρχή της διατριβής αυτής για να υλοποιήσουμε όλα όσα συζητήθηκαν παραπάνω χρησιμοποιήσαμε δυο είδη προγραμμάτων το UBEM και το πρόγραμμα παραγωγής της γεωμετρίας και κίνησης του FEOD. Το πρόγραμμα δημιουργίας της κίνησης αλλά και γεωμετρίας του προωστήρα είναι αυτό που υλοποιήθηκε από τον γράφοντα της παρούσας διπλωματικής και που θα συζητηθεί σε αυτό το κεφάλαιο. Το υπό συζήτηση πρόγραμμα έχει υλοποιηθεί σε γλώσσα Fortran 95/03 και αποτελείται από το κυρίως πρόγραμμα (main) και τα αρθρώματα του (modules). Θα περιγράψουμε στη συνέχεια πρώτα τα αρθρώματα και στη συνέχεια τον κύριο κώδικα.

## 5.1 Βασικά αρθρώματα του κώδικα.

### 5.1.1 Άρθρωμα `vector_algebra`

Στο άρθρωμα αυτό ορίζονται νέα αντικείμενα τα οποία θα διευκολύνουν τις πράξεις στο κυρίως πρόγραμμα. Στο πρόγραμμα αυτό ορίζονται διανύσματα, τελεστές (πρόσθεση, αφαίρεση, πολλαπλασιασμός, διαίρεση) λόγω του ότι ο κύριος κώδικας πραγματεύεται τέτοιου είδους οντότητες κατά τη διάρκεια της δημιουργίας του προωστήρα.

#### 1. Ορισμός Αντικειμένων :

- a. **Τύπος διάνυσμα:** Στο πρόγραμμα καλείται ως `vector` και αποτελείται από τρεις πραγματικούς αριθμούς:  $x, y, z$ .
- b. **Τύπος βάση διανύσματος:** στο πρόγραμμα καλείται ως `base_vectors` και αποτελείται από τρία αντικείμενα τύπου `vector`  $e_1, e_2, e_3$ . Σκοπός του είναι να έχει σαν στοιχειά του τις ορθογώνιες βάσεις του τρισδιάστατου χώρου.
- c. **Τύπος σύστημα συντεταγμένων:** στο πρόγραμμα καλείται ως `coordinate_system` και αποτελείται από τέσσερα αντικείμενα τύπου `vector`  $o, e_1, e_2, e_3$ . Το αντικείμενο αυτό ουσιαστικά είναι το καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων μαζί με την αρχή των αξόνων.

Συνεχίζουμε με τον ορισμό των τελεστών οι οποίοι είναι απαραίτητοι ώστε το άρθρωμα και ο κύριος κώδικας να γνωρίζουν πως ορίζονται οι πράξεις μεταξύ των παραπάνω αντικειμένων. Ο μαθηματικός ορισμός ενός τελεστή (διμερής πράξη) είναι σαν μια συνηθισμένη συνάρτηση μιας, δυο ή τριών μεταβλητών, έτσι για παράδειγμα αν είχα μια συνάρτηση  $f$  δυο μεταβλητών  $x, y$  με αποτέλεσμα πραγματικό αριθμό  $z$  τότε ο αυστηρός μαθηματικός ορισμός της συνάρτησης αυτής είναι:  $f: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$  με τύπο  $f(x,y) = z$ . Έτσι ακριβώς ορίζουμε και τους τελεστές πράξεων μόνο που αντί για  $f$  το όνομα του τελεστή είναι για παράδειγμα  $(+)$ . Ο αντίστοιχος μαθηματικός ορισμός του είναι:  $+: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$  με τύπο  $+(x,y) = z$ . Στους τελεστές πράξεων συνηθίζεται ο συμβολισμός τους, αντί να μπαίνει στην αρχή όπως στις συνηθείς συναρτήσεις, να μπαίνει ανάμεσα στις δυο μεταβλητές του έτσι γραφούμε:  $x+y = z$ . Έτσι κάθε φορά που ο κώδικας θα βλέπει το σύμβολο κάποιου τελεστή ανάμεσα σε δυο αντικείμενα θα ξέρει αυτόματα τι διαδικασίες πρέπει να καλέσει για να εκτέλεση την εντολή. Ο τρόπος ορισμού των τελεστών γίνεται ως εξής: ορίζουμε το σύμβολο που θα αντιστοιχεί στον τελεστή σαν μια εξωτερική διαδικασία του αρθρώματος με την εντολή `interface procedure` και στη συνέχεια ορίζουμε τη διαδικασία του αρθρώματος που θα καλείται κάθε φορά που θα συναντάται ο τελεστής αυτός.

2. Πράξεις διανύσματος με διάνυσμα :
  - a. **Πρόσθεση** : Τελεστής (+), καλεί την συνάρτηση `v_plus_v` και έχει αποτέλεσμα διάνυσμα.
  - b. **Αφαίρεση**: Τελεστής (-), καλεί την συνάρτηση `v_minus_v` και έχει αποτέλεσμα διάνυσμα.
  - c. **Εσωτερικός πολλαπλασιασμός**: Τελεστής (\*), καλεί την συνάρτηση `dotproduct` και έχει αποτέλεσμα πραγματικό αριθμό.
  - d. **Εξωτερικός πολλαπλασιασμός**: Τελεστής (.x.), καλεί την συνάρτηση `crossproduct` και έχει αποτέλεσμα διάνυσμα.
  
3. Πράξεις διανύσματος με πραγματικό ή ακέραιο αριθμό:
  - a. **Πολλαπλασιασμός**: Τελεστής (\*) καλεί τις συναρτήσεις `v_x_real`, `v_x_integ` και `real_x_v`, `integ_x_v` και έχει αποτέλεσμα διάνυσμα.
  - b. **Διαίρεση**: Τελεστής (/), καλεί τις συναρτήσεις `v_div_real` , `v_div_integ` και έχει αποτέλεσμα διάνυσμα.
  
4. Συνάρτηση διανύσματος με αποτέλεσμα πραγματικό αριθμό : Υπολογίζει το μέτρο διανύσματος, καλεί την συνάρτηση `norm`.
5. Συνάρτηση διανυσμάτων με αποτέλεσμα πραγματικό αριθμό : Υπολογίζει τη γωνία διανυσμάτων σε rad, καλεί την συνάρτηση `vector angle`.
6. Συνάρτηση με όρισμα και αποτέλεσμα τύπου `base_vectors`: Υπολογίζει την αντίστροφη βάση διανυσμάτων, καλεί την συνάρτηση `reciprocal_base`.
7. Συνάρτηση με όρισμα τρία διανύσματα αποτέλεσμα δυο διανύσματα: Υπολογίζει τα μοναδιαία διανύσματα πάνω σε δεδομένη ευθεία, καλεί την συνάρτηση `point_to_line_unit_vectors` .
8. Συνάρτηση με όρισμα τρία διανύσματα αποτέλεσμα πραγματικό αριθμό: Υπολογίζει την απόσταση σημείου από ευθεία καλεί την συνάρτηση `point_to_line_distance`.
9. Συνάρτηση τύπου `subroutine` με αποτελέσματα πραγματικό αριθμό και διάνυσμα: Απόσταση σημείου από ευθεία και μοναδιαίο διάνυσμα κάθετο στην ευθεία η διεύθυνση του οποίου διέρχεται από το σημείο, καλεί την συνάρτηση `point_to_line_distance_and_et`.
10. Συνάρτηση με όρισμα πραγματικό αριθμό και τρία διανύσματα και αποτέλεσμα διάνυσμα: Στρέφει κατά τη γωνία που θα του δώσουμε αρχικό διάνυσμα γύρω από συγκεκριμένη διεύθυνση, καλεί την συνάρτηση `rotate1`.

## 5.2 Το κύριο πρόγραμμα

Έχοντας ορίσει τις συναρτήσεις του αρθρώματος πλέον προχωράμε στην περιγραφή του κυρίως προγράμματος. Αρχικά δίνεται η εντολή να συμπεριληφθεί στο κύριο πρόγραμμα το άρθρωμα με την εντολή `INCLUDE "mod_vector_algebra.f95"` έπειτα δίνεται η εντολή να γίνει χρήση του ως `USE vector_algebra`. Στη συνέχεια καλούνται κάποιες υπορουτίνες οι οποίες και εξηγούνται παρακάτω.

### 5.2.1 Η υπορουτίνα `GMPP_jellyfish`

Σκοπός αυτής της υπορουτίνας είναι να υπολογιστούν ο αριθμός Strouhal και το πλάτος της γωνιάς προνευστασμού του οριζόντιου άξονα του FEOD ώστε αυτά τα αποτελέσματα να χρησιμοποιηθούν αργότερα στο κώδικα UBEM.

### 5.2.2 Η υπορουτίνα `read_parameters`

Η υπορουτίνα διαβάζει από εξωτερικό αρχείο όλα τα δεδομένα που έχουμε ορίσει για τη συγκεκριμένη προσομοίωση. Περιλαμβάνει τον αριθμό των προωστήρων, επιλογή για το αν θέλουμε η γωνία πρόσπτωσης να είναι αρμονική ή όχι, πόσες περιόδους θέλουμε να κινηθεί ο προωστήρας, αλλά και το πόσο θα προχωρήσει μέσα σε αυτό τον αριθμό περιόδων, επίσης περιλαμβάνει την ταχύτητα προχώρησης, την κινηματική συνεκτικότητα και τον συντελεστή αντίστασης. Στη συνέχεια ορίζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του προωστήρα, δηλαδή ο τύπος της υδροτομής NACA (πενταψήφιος ή τετραψήφιος), αρχική θέση του κάθε προωστήρα σε σχέση με την αρχή των αξόνων, επιλογή για το αν η μέθοδος θα είναι η polar ή η concentric, αν θα έχουμε ελλειπτικό ή κυκλικό δακτύλιο (FEOD ή FOD), ο λόγος του ημι-μέγιστου άξονα προς την χορδή, η χορδή, η θέση του άξονα προνευστασμού, ο αριθμός των υδροτομών και ο αριθμός των κόμβων σε κάθε υδροτομή, ώστε να μπορέσει να γίνει διακριτοποίηση της γεωμετρίας και παραγωγή του πλέγματος. Έπειτα δίνονται τα χαρακτηριστικά της κίνησης: ο αριθμός Strouhal, οι λόγοι πλάτους της κατακόρυφης ανύψωσης προς τους αντίστοιχους κύριους ημι-άξονες, και η διαφορά φάσης των δυο ταλαντώσεων, η διαφορά φάσης μεταξύ της κατακόρυφης ανύψωσης και του προνευστασμού και το πλάτος της κίνησης προνευστασμού.

### 5.2.3 Η υπορουτίνα `manage_time`

Η υπορουτίνα υπολογίζει, ανάλογα με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά αλλά και τα χαρακτηριστικά της κίνησης του προωστήρα, ποια θα είναι η διακριτοποίηση του χρονικού διαστήματος κίνησης του FEOD έτσι ώστε στη συνέχεια ο κώδικας UBEM να μπορέσει να τρέξει σε ένα χρονικό περιθώριο ικανοποιητικό ώστε να βγουν χρήσιμα συμπεράσματα. Πιο συγκεκριμένα, μέσω της υπορουτίνας αυτής υπολογίζεται ο αριθμός των χρονικών στιγμών (nts) καθώς και η διαφορά δυο διαδοχικών στιγμών (dt) που ουσιαστικά είναι δυο όψης του ίδιου νομίσματος. Η λογική πίσω από τον ορισμό αυτών των μεταβλητών είναι η εξής: καταρχάς υπολογίζουμε μια προσέγγιση του μέτρου της ταχύτητας του σώματος `velo` μέσω της υπορουτίνας `velocity_estimation` και εν συνεχεία υπολογίζουμε πόσο χρόνο χρειάζεται μια υδροτομή να ταξιδέψει το μήκος της χορδής της, `c`, και άρα έχουμε:  $\Delta t = c / \text{velo}$ . Προφανώς δεν γίνεται να έχουμε σαν διαφορά δυο χρονικών στιγμών το μέγεθος  $\Delta t$ , διότι μεταξύ  $t_1$  και  $t_2$  όπου  $t_2 = t_1 + \Delta t$  έχουμε χάσει σημαντικές πληροφορίες όσον αφορά την κίνηση του σώματος, μιας και η απόσταση που διάνυσε είναι ίδιας τάξης μεγέθους με το μήκος του. Θέλουμε να έχουμε τουλάχιστον μια διαφορά τάξεως ένα μεταξύ της διανυθείσας απόστασης και του μήκους του σώματος. Για τον λόγο αυτό διαιρούμε την χορδή με τον όρο `nts_per_chord = 10k` όπου το `k` είναι φυσικός αριθμός. Έτσι έχουμε το μέγεθος  $\text{delta\_t} = c / (\text{nts\_per\_chord} \cdot \text{velo})$  το οποίο είναι ένα πιο ικανοποιητικό χρονικό διάστημα, όσον αφορά όμως την μη περιοδική κίνηση του σώματος. Πρέπει λοιπόν να δούμε αυτό το χρονικό διάστημα τι διαφορά τάξης έχει και με την περίοδο της παλλόμενης κίνησης, έτσι ορίζουμε τη μεταβλητή  $\text{nts\_per\_period} = \frac{T}{\text{delta\_t}} = \frac{1}{n \cdot \text{delta\_t}}$ . Για να ελέγξουμε αν αυτό το μέγεθος είναι ικανοποιητικό έχουμε φράξει την μεταβλητή `nts_per_period` μεταξύ μιας ελάχιστης τιμής `nts_per_period_min` και μιας μέγιστης τιμής `nts_per_period_max`. Αν η τιμή της βρίσκεται μέσα σε αυτό το διάστημα τότε  $\text{dt} = \text{delta\_t}$  αλλιώς αν βρίσκεται εκτός αντικαθιστούμε την τιμή του `nts_per_period` είτε με το άνω είτε με το κάτω φράγμα του ανάλογα σε ποιο είναι πιο κοντά. Το νέο dt είναι  $\text{dt} = \frac{1}{n \cdot \text{nts\_per\_period}}$ , ο αριθμός των χρονικών βημάτων (nts) υπολογίζεται ανάλογα με το πόσες περιόδους θέλουμε να έχουμε και με τα χρονικά βήματα μέσα σε μια περίοδο `nts_per_period`.



### **5.2.4 Η υπορουτίνα `find_cdrag`**

Υπολογίζει την αντίσταση λόγω συνεκτικότητας μέσω του αριθμού Reynolds στον οποίο θα βρίσκεται ο προωστήρας μας.

### **5.2.5 Η υπορουτίνα `wing_motion`**

Η συγκεκριμένη υπορουτίνα είναι αυτή που δημιουργεί σε κάθε χρονική στιγμή την παραμορφωμένη γεωμετρία του προωστήρα λόγω της κίνησης του. Ο τρόπος δημιουργίας της γεωμετρίας είναι όπως τον περιγράψαμε σε προηγούμενη παράγραφο.

### **5.2.6 Η υπορουτίνα `create_c1_t`**

Η υπορουτίνα αυτή διευθετεί σε συγκεκριμένη σειρά τους κόμβους της κάθε υδροτομής στην μπροστά και πίσω όψη έτσι ώστε να είναι συμβατό το αρχείο εξόδου με τον κώδικα UBEM.

### **5.2.7 Η υπορουτίνα `write_system_geometry_at_time_t`**

Η υπορουτίνα αυτή δημιουργεί το αρχείο εξόδου ώστε να είναι έτοιμο για χρήση από τον κώδικα UBEM. Περιλαμβάνει πληροφορίες και μορφές που πρέπει να υπάρχουν ώστε να αποτελεί ένα συμβατό αρχείο εισόδου για τον κώδικα UBEM.

### **5.2.8 Η υπορουτίνα `naca45`**

Το υποπρόγραμμα αυτό δημιουργεί όλα τα δεδομένα και χαρακτηριστικά που πρέπει να έχει η υδροτομή NACA που ορίσαμε στην αρχή, δηλαδή πάχος, κυρτότητα, θέση μεγίστου πάχους και κυρτότητας και γενικά την γεωμετρία της. Επίσης στο υποπρόγραμμα αυτό υπάρχει η δυνατότητα να δοθεί και ελαστικότητα στην υδροτομή αν αυτό απαιτηθεί.

## 6. Συμπεράσματα, συζήτηση και προτάσεις

Όπως είδαμε από τον Πίνακα 2 το FEOD δεν είναι τόσο αποδοτικό όσο το FOD όμως είναι αποδοτικότερο από μια συμβατική προπέλα. Το κέρδος σε ισχύ που αποκομίζουμε από το FEOD είναι ικανό να κάνει έναν ερευνητή να μελετήσει περαιτέρω τα χαρακτηριστικά ενός τέτοιου προωστήρα. Εκτός όμως από το κέρδος σε ισχύ θα πρέπει να εξετάσουμε αν γενικά είναι εφικτή η παραγωγή ενός τέτοιου προωστήρα. Οι σημαντικότερες κατηγορίες στις οποίες πρέπει να επικεντρωθούμε είναι: ο τρόπος κατασκευής ενός τέτοιου σώματος, η μείωση θορύβου και ταλαντώσεων στη γάστρα και η προστασία της βιοποικιλότητας.

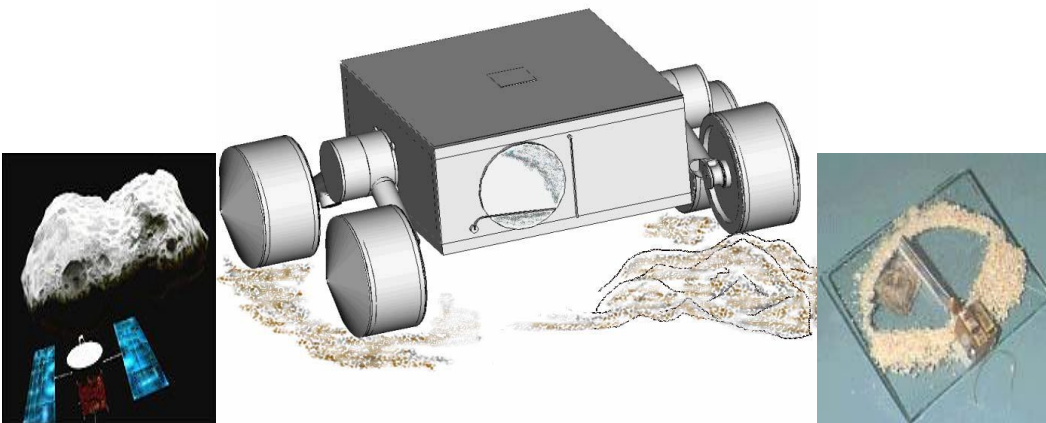
## 6.1 Εφικτότητα παραγωγής και κατασκευής του FEOD

Τα Electroactive polymers (EAP), ή ηλεκτρό-διεγερμένα πολυμερή, είναι η τεχνολογία παραγωγής μηχανισμών οι οποίοι υπό τη διέγερση ηλεκτρικού πεδίου, χημικού περιβάλλοντος, φωτός, πίεσης, μαγνητικού πεδίου κ.α. παραμορφώνουν είτε προσωρινά είτε μόνιμα το σχήμα τους και το μέγεθος τους. Μια σημαντική ιδιότητα των EAP είναι ότι μπορούν να παραμορφωθούν, έως και 380% του φυσικού τους σχήματος σε κάποιες περιπτώσεις, ενώ υποβάλλονται σε εξαιρετικές καταπονήσεις. Η προσπάθεια παραγωγής EAP δεν είναι κάτι το καινούργιο, η πρώτη προσπάθεια έγινε το 1880 από τον Wilhelm Rontgen, βέβαια η πάροδος των χρόνων βελτίωσε τις όποιες προσπάθειες και έχουμε φτάσει σήμερα σε ένα πολύ καλό επίπεδο δημιουργίας μηχανισμών από EAP, τα οποία μπορούν να ανταποκριθούν σε αρκετές απαιτήσεις της επιστημονικής κοινότητας. Κάποιες από τις χρήσεις των EAP είναι η παραγωγή τεχνητών μυών όπου έχει προσελκύσει αρκετά το επιστημονικό ενδιαφέρον, Εικόνα 10, η παραγωγή βιομιμητικών συσκευών, παραγωγή συσκευών διεπαφής ανθρώπου – μηχανής όπως για παράδειγμα δημιουργία ‘έξυπνης’ στολής κατάδυσης ή πτήσης, αλλά και στον τομέα της κοσμολογίας με τη δημιουργία αισθητήρων καθαρισμού ατράκτων που βρίσκονται ήδη στο διάστημα, Εικόνα 11. Τα είδη που χρησιμοποιούνται κατά κόρων είναι τα λεγόμενα διηλεκτρικά και ιοντικά EAP [2]. Τα διηλεκτρικά EAP έχουν την δυνατότητα να διατηρούν την παραμόρφωση που έχουν υποστεί όταν διαπερνώνται από συνεχές ρεύμα κάτι το οποίο τα καθιστά κατάλληλα για τη χρήση τους σε ρομποτικές εφαρμογές, έχουν επίσης υψηλή μηχανική αντοχή πράγμα που σημαίνει ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ξηρό περιβάλλον. Παρ όλα αυτά όμως έχουν υψηλές απαιτήσεις σε ενεργεία ώστε να εκκινήσουν την λειτουργία τους. Τα ιοντικά EAP από την άλλη έχουν πολύ χαμηλές απαιτήσεις τάσης της τάξεως 1-2 V και μπορούν να υποστούν μεγάλα βέλη κάμψης, χρειάζονται όμως να βρίσκονται σε υγρό περιβάλλον πράγμα που τα καθιστά ιδανικά για την εφαρμογή που μελετάμε. Η κατασκευή ενός μηχανισμού από EAP έχει επίσης το πλεονέκτημα ότι η παραγωγή θορύβου και άρα ταλαντώσεων στη γάστρα είναι ουσιαστικά αμελητέα, σε αντίθεση με μια συμβατική προπέλα, και έχουν υψηλή ευκινησία και ελκτικήότητα. Επίσης λόγω της μη ύπαρξης στρέψης του προωστήρα όπως στην περίπτωση της προπέλας καθίσταται πιο φιλικό προς το θαλάσσιο περιβάλλον και στην θαλάσσια ζωή. Τέλος να τονίσουμε ότι οι περιπτώσεις που εξετάσαμε είναι αυτές όπου ο προωστήρας λειτουργεί σε γωνίες πρόσπτωσης στις οποίες παράγεται ώση, όπως όμως καταλαβαίνει κανείς υπάρχουν και οι περιπτώσεις όπου δεν παράγεται ώση αλλά καταναλώνεται ενέργεια από το περιβάλλον ρευστό. Οι περιπτώσεις αυτές μπορούν επίσης να καταστούν εκμεταλλεύσιμες διότι εκτός από έναν προωστήρα ο οποίος κινεί το πλοίο μπορούν να τοποθετηθούν σε διάφορες θέσης του πλοίου, όπως στην πλώρη, μικρότερα FEOD τα οποία θα καταναλώνουν ενέργεια από το κινούμενο ρευστό, θα την αποθηκεύουν και θα μπορούν να την χρησιμοποιούν είτε για την φόρτιση γεννητριών είτε για

την μετατροπή άλλου είδους ενέργειας. Με άλλα λόγια θα μπορεί το ίδιο το πλοίο να φέρει πάνω του πολλαπλούς ‘μικρό – υδροηλεκτρικούς’ σταθμούς.



Εικόνα 10. Ανδρειδές το οποίο να μιμείται μυϊκές κινήσεις του πρόσωπου [2].



Εικόνα 11. Αισθητήρας καθαρισμού φακού ατράκτου που βρίσκεται σε αποστολή στο διάστημα [2].

## 6.2 Συμπεράσματα

Όπως καταλαβαίνει κανείς ο προωστήρας που αναλύσαμε έχει όλες τις προδιαγραφές για να είναι υποψήφιος αντικαταστάτης μιας συμβατικής προπέλας ως προωστήριο μέσω αλλά και ως μονάδα αποθήκευσης ενέργειας. Είδαμε ότι μπορούμε να έχουμε κέρδος μέχρι και 5.21% σε σχέση με μια συμβατική προπέλα, βεβαία το FOD όπως είδαμε έχει πολύ καλύτερη απόδοση από το FEOD αλλά υπάρχει μεγάλη δυσκολία στην στήριξη του πάνω στην γάστρα. Βέβαια το FEOD έχει καλύτερη προσαρμογή στην πρύμνη και αυτό γιατί μπορούμε να αναπτύξουμε τον οριζόντιο άξονα του όσο θέλουμε, μέσα σε επιτρεπτά όρια, ώστε η επιφάνεια του να είναι όσο το δυνατό μεγαλύτερη γίνεται. Είναι προφανές, ότι μια ακόμα πιο συστηματική μελέτη περισσότερων περιπτώσεων είναι αναγκαία ώστε να μπορέσουμε να αποφανθούμε αν η χρήση του FEOD είναι κατάλληλη και για άλλες εφαρμογές οι οποίες δεν είναι προφανείς ακόμα. Επίσης είδαμε ότι μηχανισμοί οι οποίοι είναι εύκαμπτοι δεν είναι πια μόνο θεωρητικά μοντέλα, έχουν αναπτυχτεί πλέον ειδικά υλικά τα οποία μπορούν να μιμηθούν οποιαδήποτε κίνηση χωρίς να χρειάζονται να καταναλώσουν μεγάλα ποσά ενέργειας, πράγμα το οποίο καθιστά πλέον την δυνατότητα παραγωγής του FEOD πραγματικότητα. Η κατασκευή ενός τέτοιου μηχανισμού είναι μια πρόκληση τόσο θεωρητική όσο και πρακτική και θα αποτελούσε ένα σημαντικό μέρος ως συνέχεια της παρούσας διπλωματικής εργασίας αλλά σε πιο εκτεταμένη μορφή. Ως μελλοντικό πλάνο θα μπορούσε να πει κάποιος ότι αυτό που μένει είναι η κατανομή της κυρτότητας της κάθε υδροτομής να μεταβάλλεται με το χρόνο αλλά και να μεταβάλουμε τη διαφορά φάσης, μεταξύ των δυο κινήσεων, ώστε να μπορέσουμε να αποκτήσουμε μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα για τα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά ενός τέτοιου προωστήρα. Πλέον και η υδροτομή θα είναι εύκαμπτη και θα μπορεί να εκτελεί κινήσεις που ορίζουμε εμείς οι οποίες σε αρχικό στάδιο θα είναι ημιτονικού χαρακτήρα με κάποια διαφορά φάσης από τις υπόλοιπες κινήσεις.

## 7. Βιβλιογραφία

- [1] Abbott I, Doenhoff H. Theory of wing sections. Dover; 1959.
- [2] Cohen YB, editor. Electroactive polymer (EAP) actuators as artificial muscles – reality potential, and challenges. SPIE Press; 2004.
- [3] Dabiri JO, Gharib M. Sensitivity analysis of kinematic approximations in dynamic medusan swimming models. *Journal of Experimental Biology* 2003;206(20):3675–80.
- [4] Dabiri JO, Gharib M. Starting flow through nozzles with temporally variable exit diameter. *Journal of Fluid Mechanics* 2005;538:111–36.
- [5] E.L. Houghton and P.W. Carpenter, *Aerodynamics for Engineering Students*, Fifth Edition
- [6] Gerasimos Politis & Vasileios Tsarsitalidis, *Flexible Oscillating Duct: An approach to a novel propulsor*.
- [7] Gerasimos Politis, *The Boundary Element Method for 3-D Fluid Flow Problems*
- [8] Gerasimos Politis, Theodoros Ioannou, Vasileios Tsarsitalidis, *Flexible Elliptic Oscillating Duct. Taking the FOD one step further*.
- [9] Gerasimos Politis, Vasileios Tsarsitalidis, *Biomimetic Propulsion - Opening the way for more efficient systems*
- [10] Gerasimos Politis, Vasileios Tsarsitalidis, *Biomimetic Propulsion using twin oscillating wings*
- [11] Gerasimos Politis, Vasileios Tsarsitalidis, *Exploring the Potential of an Oscillating Duct as a Marine Propulsor*
- [12] Harvald SA. *Resistance and propulsion of ships*. Wiley-Interscience, John Wiley and Sons; 1983
- [13] Janna C Nawroth et al., *A tissue-engineered jellyfish with biomimetic propulsion*
- [14] Junzhi Yu, *Development of a biomimetic robotic fish and its control algorithm*
- [15] Katz & Plotkin, *Low speed aerodynamics*
- [16] Maxime Bôcher, *Plane analytic geometry, with introductory chapters on the differential calculus*
- [17] Moran, *An Introduction to Theoretical and Computational Aerodynamics*
- [18] N. M. Gunter, *Potential Theory and Its Applications to Basic Problems of Mathematical Physics*

[19] Politis, G., Politis, K., Biomimetic propulsion under random heaving conditions, using active pitch control. *Journal of Fluids and Structures*(2012)

[20] Sedov, *Similarity and Dimensional Methods in Mechanics*

[21] Γ.Κ. Πολίτη, *Η ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΤΗΣ ΕΛΙΚΑΣ*

## Παράρτημα I :Ιδανική γωνία πρόσπτωσης και μηδενική γωνία άνωσης

Σε αυτό το παράρτημα θα αποδείξουμε τις σχέσεις (2.4),(2.6). Αν παραγωγίσουμε την σχέση (2.2) ως προς  $u$  θα έχουμε:

$$\frac{((2 \cdot p - u) \cdot m_c(\{\tau; \phi\}, t)) \cdot c}{p^2} - \frac{u \cdot m_c(\{\tau; \phi\}, t) \cdot c}{p^2} \text{ για } 0 \leq u \leq p$$

Θέτοντας  $u = \frac{1 - \cos \theta}{2}$  τότε αντικαθιστώντας στην παραπάνω σχέση έχουμε:

$$\frac{(2p - 0.5 + \cos(\theta)/2) \cdot m_c(\{\tau; \phi\}, t) \cdot c}{p^2} - \frac{(0.5 - \cos(\theta)/2) \cdot m_c(\{\tau; \phi\}, t) \cdot c}{p^2}$$

Παραγωγίζουμε την (2.3) ως προς  $u$  οπότε έχουμε:

$$\frac{(1 - u) \cdot c \cdot m_c(\{\tau; \phi\}, t)}{(1 - p)^2} - \frac{(1 + u - 2p) \cdot m_c(\{\tau; \phi\}, t) \cdot c}{(1 - p)^2} \text{ για } p \leq u \leq 1$$

Θέτοντας  $u = \frac{1 - \cos \theta}{2}$  τότε αντικαθιστώντας στην παραπάνω σχέση έχουμε:

$$\frac{(0.5 + (0.5) \cdot \cos(\theta)) \cdot m_c(\{\tau; \phi\}, t) \cdot c}{(1 - p)^2} - \frac{(1.5 - 0.5 \cdot \cos(\theta) - 2 \cdot p) \cdot m_c(\{\tau; \phi\}, t) \cdot c}{(1 - p)^2}$$

Θα υπολογίσουμε τώρα το ολοκλήρωμα της εξίσωσης (2.1) :

$$\frac{\lambda}{\pi} \int_0^\pi \frac{\partial \left( \frac{y}{c} \right)}{\partial u} d\theta = \frac{1}{\pi} \int_0^t \frac{\partial \left( \frac{y}{c} \right)}{\partial u} d\theta + \frac{1}{\pi} \int_t^\pi \frac{\partial \left( \frac{y}{c} \right)}{\partial u} d\theta \text{ όπου } t = \cos^{-1}(1 - 2p)$$

Μετά από την ολοκλήρωση των παραπάνω σχέσεων οδηγούμαστε στο επόμενο:

$$\frac{\lambda}{\pi} \int_0^\pi \frac{\partial \left( \frac{y}{c} \right)}{\partial u} d\theta = \frac{(2 \cdot p - 1) \cdot m_c(\{\tau; \phi\}, t) \cdot (p^2 \cdot \pi - 2 \cdot p \cdot t + t - \sin(t))}{p^2(p-1)^2 \pi}$$

Όμως η παραπάνω σχέση είναι ποσοστό της ιδανικής γωνίας πρόσπτωσης έτσι λύνοντας για  $m_c(\{\tau; \phi\}, t)$  έχουμε:

$$m_c(\{\tau; \phi\}, t) = \frac{\lambda \cdot a_i(\{\tau; \phi\}, t) \cdot p^2 \cdot (1 - p)^2 \cdot \pi}{2 \cdot (p - 0.5) \cdot (p^2 \cdot \pi - 2pt + t - \sin(t))}$$

$$t = \cos^{-1}(1 - 2p)$$

$$\lambda \in [0, 1]$$



Ο τρόπος παραγωγής της (2.6) είναι ακριβώς ο ίδιος με την (2.4) ότι η μορφή των ολοκληρωμάτων αλλάζει. Έτσι με όλα τα παραπάνω ίδια μένει να υπολογίσουμε την σχέση (2.5)

$$\frac{-1}{\pi} \int_0^{\pi} \frac{\partial \left( \frac{y}{c} \right)}{\partial u} (1 - \cos(\theta)) d\theta = \frac{-1}{\pi} \int_0^t \frac{\partial \left( \frac{y}{c} \right)}{\partial u} (1 - \cos(\theta)) d\theta - \frac{1}{\pi} \int_t^{\pi} \frac{\partial \left( \frac{y}{c} \right)}{\partial u} (1 - \cos(\theta)) d\theta$$

όπου  $t = \cos^{-1}(1 - 2p)$ .

Μετά από την ολοκλήρωση των παραπάνω σχέσεων οδηγούμαστε στο ζητούμενο:

$$a_{i=0}(\{\tau; \phi\}, t) = \frac{((2p-1) \cdot (p+0.25 \cdot \cos(t)-1) \cdot \sin(t) + (p-0.75) \cdot (p^2 \cdot \pi - 2 \cdot p \cdot t + t)) \cdot a_i(\{\tau; \phi\}, t) \cdot \pi}{\pi \cdot (p-0.5) \cdot (p^2 \cdot \pi - 2 \cdot p \cdot t + t - \sin(t))}$$

## Παράρτημα II: Αδιάστατες μεταβλητές

Στο παρών παράρτημα παραθέτουμε τις αδιάστατες μεταβλητές του προβλήματος που αναλύθηκε στο κεφάλαιο 4. Στους παρακάτω πίνακες έχουμε τα ζεύγη ανεξάρτητων μεταβλητών με τα οποία γίνονται οι αδιαστατοποιήσεις και τις αντίστοιχες παραγόμενες αδιάστατες μεταβλητές. Να τονίσουμε εδώ ότι ανάλογα με το πρόβλημα που εξετάζουμε μπορεί ο ερευνητής να επιλέξει και διαφορετικά ζεύγη ανεξάρτητων μεταβλητών.

Αδιάστατη μεταβλητή	Ζεύγος ανεξάρτητων μεταβλητών					
	$\{m_t, n\}$	$\{m_t, U_\infty\}$	$\{m_c, n\}$	$\{m_c, U_\infty\}$	$\{b, n\}$	$\{b, U_\infty\}$
$\Pi_{m_t}$	1	1	$\frac{m_t}{m_c}$	$\frac{m_t}{m_c}$	$\frac{m_t}{b}$	$\frac{m_t}{b}$
$\Pi_{m_c}$	$\frac{m_c}{m_t}$	$\frac{m_c}{m_t}$	1	1	$\frac{m_c}{b}$	$\frac{m_c}{b}$
$\Pi_b$	$\frac{b}{m_t}$	$\frac{b}{m_t}$	$\frac{b}{m_c}$	$\frac{b}{m_c}$	1	1
$\Pi_{h_0}$	$\frac{h_0}{m_t}$	$\frac{h_0}{m_t}$	$\frac{h_0}{m_c}$	$\frac{h_0}{m_c}$	$\frac{h_0}{b}$	$\frac{h_0}{b}$
$\Pi_{U_\infty}$	$\frac{U_\infty}{m_t \cdot n}$	1	$\frac{U_\infty}{m_c \cdot n}$	1	$\frac{U_\infty}{b \cdot n}$	1
$\Pi_{\theta_0}$	$\theta_0$	$\theta_0$	$\theta_0$	$\theta_0$	$\theta_0$	$\theta_0$
$\Pi_n$	1	$\frac{m_t \cdot n}{U_\infty}$	1	$\frac{m_c \cdot n}{U_\infty}$	1	$\frac{b \cdot n}{U_\infty}$
$\Pi_\psi$	$\psi$	$\psi$	$\psi$	$\psi$	$\psi$	$\psi$
$\Pi_R$	$\frac{R}{m_t}$	$\frac{R}{m_t}$	$\frac{R}{m_c}$	$\frac{R}{m_c}$	$\frac{R}{b}$	$\frac{R}{b}$
$\Pi_c$	$\frac{c}{m_t}$	$\frac{c}{m_t}$	$\frac{c}{m_c}$	$\frac{c}{m_c}$	$\frac{c}{b}$	$\frac{c}{b}$

Πίνακας 3. Αδιάστατες μεταβλητές με τις αντίστοιχες ανεξάρτητες μεταβλητές αδιαστατοποίησης.

Αδιάστατη μεταβλητή	Ζεύγος ανεξάρτητων μεταβλητών						
	{h <sub>0</sub> ,n}	{h <sub>0</sub> , U <sub>∞</sub> }	{R,n}	{R, U <sub>∞</sub> }	{c,n}	{c, U <sub>∞</sub> }	{ U <sub>∞</sub> ,n}
Π <sub>m<sub>t</sub></sub>	$\frac{m_t}{h_0}$	$\frac{m_t}{h_0}$	$\frac{m_t}{R}$	$\frac{m_t}{R}$	$\frac{m_t}{c}$	$\frac{m_t}{c}$	$\frac{m_t \cdot n}{U_\infty}$
Π <sub>m<sub>c</sub></sub>	$\frac{m_c}{h_0}$	$\frac{m_c}{h_0}$	$\frac{m_c}{R}$	$\frac{m_c}{R}$	$\frac{m_c}{c}$	$\frac{m_c}{c}$	$\frac{m_c \cdot n}{U_\infty}$
Π <sub>b</sub>	$\frac{b}{h_0}$	$\frac{b}{h_0}$	$\frac{b}{R}$	$\frac{b}{R}$	$\frac{b}{c}$	$\frac{b}{c}$	$\frac{b \cdot n}{U_\infty}$
Π <sub>h<sub>0</sub></sub>	1	1	$\frac{h_0}{R}$	$\frac{h_0}{R}$	$\frac{h_0}{c}$	$\frac{h_0}{c}$	$\frac{h_0 \cdot n}{U_\infty}$
Π <sub>U<sub>∞</sub></sub>	$\frac{U_\infty}{h_0 \cdot n}$	1	$\frac{U_\infty}{R \cdot n}$	1	$\frac{U_\infty}{c \cdot n}$	1	1
Π <sub>θ<sub>0</sub></sub>	θ <sub>0</sub>	θ <sub>0</sub>	θ <sub>0</sub>	θ <sub>0</sub>	θ <sub>0</sub>	θ <sub>0</sub>	θ <sub>0</sub>
Π <sub>n</sub>	1	$\frac{h_0 \cdot n}{U_\infty}$	1	$\frac{R_0 \cdot n}{U_\infty}$	1	$\frac{c \cdot n}{U_\infty}$	1
Π <sub>ψ</sub>	ψ	ψ	ψ	ψ	ψ	ψ	ψ
Π <sub>R</sub>	$\frac{R}{h_0}$	$\frac{R}{h_0}$	1	1	$\frac{R}{c}$	$\frac{R}{c}$	$\frac{R \cdot n}{U_\infty}$
Π <sub>c</sub>	$\frac{c}{h_0}$	$\frac{c}{h_0}$	$\frac{c}{R}$	$\frac{c}{R}$	1	1	$\frac{c \cdot n}{U_\infty}$

Πίνακας 4. Αδιάστατες μεταβλητές με τις αντίστοιχες ανεξάρτητες μεταβλητές αδιαστατοποίησης.

## Παράρτημα III. Flexible Elliptic Oscillating Duct. Taking the FOD one step further.

Third International Symposium on Marine Propulsors  
smp'13, Launceston, Tasmania, Australia, May 2013

### Flexible Elliptic Oscillating Duct. Taking the FOD one step further.

Gerasimos Politis<sup>1</sup>,Theodoros Ioannou<sup>2</sup>, Vasileios Tsarsitalidis<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Associate professor, NTUA, Athens Greece, [polit@central.ntua.gr](mailto:polit@central.ntua.gr)

<sup>3</sup>Naval Architect and Marine Engineer Senior Student, NTUA Athens, Greece

<sup>3</sup>Naval Architect and Marine Engineer, Ph.D. candidate, NTUA Athens, Greece,  
[vtsars@central.ntua.gr](mailto:vtsars@central.ntua.gr)

#### ABSTRACT

Inspired by the paradigm of a jellyfish or a torpedo fish, we have extended the FOD (Flexible Oscillating Duct) concept to the new FEOD (Flexible Elliptic Oscillating Duct) concept. The FEOD is a generalization of the FOD since it can have an elliptic shape when at rest and can oscillate differently along the two axis of the ellipse. By leaving the major axis of the ellipse constant in time, the FEOD can be supported to the ship's hull, a problem which

was very difficult to be solved for a FOD. In this case the oscillation of the FEOD is limited to the minor axis of the ellipse. Apart from the obvious advantage of having two points of support, the FEOD is also capable of better adaptation to the existing area behind the ship, allowing thus lower thrust coefficients, and higher efficiencies. To understand the flow physics of the FEOD system, the problem of flow around an actively (i.e. controlled by the user) deforming FEOD, performing unsteady

motion, while travelling with a given velocity in an infinitely extended fluid, has been simulated using the Unsteady Boundary Element Modeling code UBEM. For the needs of the simulation, a special data generation algorithm has been developed, capable of producing a number of unsteady motions for the FEOD, including chord-wise flexibility. Using this data-generation code, we feed UBEM with systematic motion data by varying the pitch angle of the FEOD sections, as well as the Strouhal number. Systematic results for the open water thrust, power and efficiency are calculated and presented. The problem of designing such a system for a real ship is also presented. Comparisons with a conventional propeller and a similar FOD prove that the FEOD is a promising system, more feasible than the FOD, with propulsive efficiencies comparable to that of a conventional propeller.

### **Keywords**

Biomimetic Propulsion; Jellyfish Propulsion; Flexible oscillating Duct; Unsteady wake rollup.

## **INTRODUCTION**

In Politis and Tsarsitalidis (2012) the concept of a FOD (Flexible Oscilating Duct) has been introduced as a new propulsor. In the same paper the design methodology of the FOD has been presented and comparisons with a conventional propeller, for three different ship types has been given. The main conclusion from

this work was that the FOD is a promising propulsor with hydrodynamic efficiencies well over that of a convensional propeller. The main disadvantage of the FOD has to do with his support to the hull stern. More specifically it became obvious from the beginning that the completely circular geometry of the FOD makes difficult its support onto the ship, since every single point of the FOD would be in a constant motion. Towards resolution of this problem we decided to expand/generalize the geometry of our propulsor allowing elliptical shapes. We thus arrive to the concept of a ‘Flexible Elliptic Oscillating Duct’ or simply, FEOD. An important difference between the FOD and the FEOD is that the latter can oscillate in both axis of the ellipse in a manner determined by the designer. This allows the designer to select one of the axis of the ellipse (for example the major axis) to be constant and the other to be oscillating. With this selection the major axis can be used for supporting the FEOD to the hull. Hence both ducts (FOD & FEOD) oscillate, but since the FEOD has two degrees of oscillation freedom (the two axis of the ellipse), deforms as an ellipse rather than as a circle in the general case.

In this paper the FEOD is introduced and systematically examined. Hydrodynamic performance simulations are then undertaken using UBEM, Politis (2004,2011), in a pilot, limited in extent, systematic series for the FEOD and the calculated mean thrust and power are plotted in diagrams, appropriate for the

FEOD design. Systematic runs include variation of Strouhal number and pitch angle amplitude for a pre-selected FEOD geometry. A design method, that employs the produced charts, is presented and used to calculate the powering performance of a passenger/car ferry equipped with the FEOD propulsor. Powering performance calculations have also been made for the same ship equipped with either a FOD or a conventional propeller. The comparison shows that the FEOD can produce high efficiencies, although not as high as the FOD, but good enough to give a serious reason for further investigating such a propulsor and overcoming the technical difficulties connected with its construction.

## 1 FEOD geometry and motion – panel generation.

The starting point for an unsteady BEM simulation of a flexible body is the generation of the time dependent paneling describing the geometry of the system, Politis (2011). Thus we start from a discussion of the shape of the FEOD with a special consideration on the definition of the ‘FEOD sections’ and their ‘pitch’.

Consider a plane Cartesian orthogonal coordinate system  $YZ$ , figure 1. There are three common descriptions for an elliptic shape with major and minor axis  $A, B$  as follows:

$$\frac{z^2}{A^2} + \frac{y^2}{B^2} = 1 \quad (1)$$

$$z = A \cdot \cos(\tau) \quad (2)$$

$$y = B \cdot \sin(\tau) \quad (3)$$

$$z = r \cdot \cos(\varphi) \quad (4)$$

$$y = r \cdot \sin(\varphi) \quad (5)$$

where  $r, \varphi, \tau$  are related by the equations:

$$r = \frac{1}{\sqrt{\frac{\cos^2 \varphi}{A^2} + \frac{\sin^2 \varphi}{B^2}}} \quad (6)$$

$$\tan \varphi = \frac{B}{A} \tan \tau \quad (7)$$

Equation (1) is the standard form, while equations (2),(3) and equations (4),(5) are parametric forms, with  $\tau \in (0, 2\pi)$  and  $\varphi \in (0, 2\pi)$  respectively. Form (2),(3) is termed ‘concentric’ in the sequel while form (4),(5) is termed ‘polar’. The parameter  $\varphi$  in the description of the polar form has a very simple physical meaning. It denotes the angle of the line segment  $\overline{OE}$  starting at the center of the ellipse  $O$  and ending at the point  $E$  belonging

to the ellipse, figure 1. In the same figure the physical meaning of the parameter  $\tau$  is shown.

The YZ system of figure 1, can now be completed to a right handed 3D Cartesian-orthogonal coordinate system, by adding the X-axis normal to YZ showing inside paper. We can now proceed to the description of FEOD by ‘building’ the FEOD hydrodynamic sections around this ellipse. More specifically the ellipse of figure 1 is selected to be the locus of the pitch axis points of the FEOD sections. To complete the FEOD geometry, the position of the FEOD sections in space has to be defined. Figure 1 dictates two alternatives for this:

- (a) *polar case*: put the section in the plane defined by the X-axis and the line  $\overline{OE}$  (angle  $\varphi$  from Z-axis), or
- (b) *concentric case*: put the sections in a plane through  $E$  with orientation parallel to the plane defined by the X-axis and the line  $\overline{OE''}$  (angle  $\tau$  from Z-axis) .

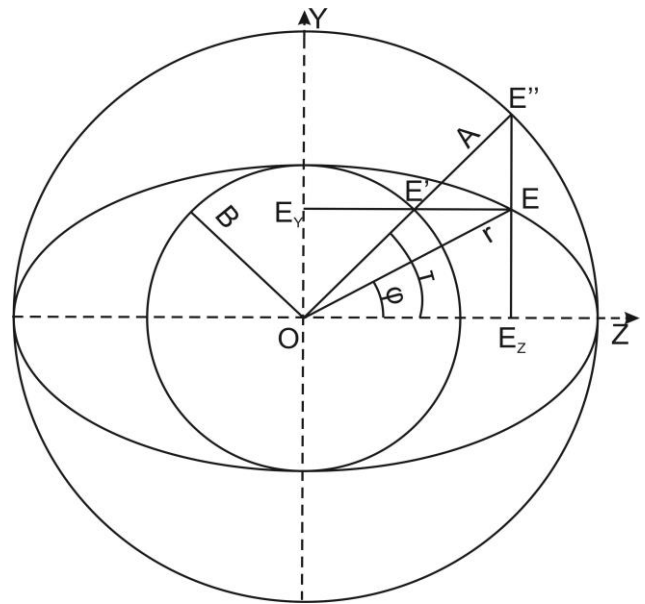


Figure 1. Inscribed and outscribed circles of an ellipse. Points  $E, E', E_y$  define a line parallel to Z-axis, while points  $E'', E, E_z$  define a line parallel to Y-axis

Orientate then the FEOD section, at either plane, to make an angle  $\theta$  with the X-axis. In general  $\theta$  can be a function of  $\varphi$  or  $\tau$  i.e.  $\theta(\varphi)$  or  $\theta(\tau)$ . Assuming further that the following variables are known functions: (i) the FEOD chord distribution  $c(\varphi)$  ( $c(\tau)$ ), (ii) the maximum camber distribution  $f(\varphi)$  ( $f(\tau)$ ), (iii) the maximum thickness distribution  $T(\varphi)$  ( $T(\tau)$ ), (iv) the thickness and camber forms, and (v) the chordwise position  $b$  for the sectional pitch axis from leading edge, the geometry of the FEOD is fully defined.

The two alternatives (a) and (b) lead to two different space grids which shall be termed as the ‘polar grid’ and the ‘concentric grid’ respectively, in accordance with the previous

definitions regarding the parametric description of an ellipse.

We can now add a heaving motion to the pitch loci ellipse of figure 1, as follows. Assume:

$$A = A_0 + A_1 \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi_A) \quad (8)$$

$$B = B_0 + B_1 \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi_B) \quad (9)$$

where  $A_0, B_0$  denote the mean major and minor axis positions and  $A_1, B_1$  the corresponding oscillation amplitudes,  $\omega$  denotes the angular velocity of oscillation which is common for both axis ( $\omega = 2\pi n$  where  $n$  the frequency of oscillation) and  $\psi_A, \psi_B$  the phase angles.

With the previous considerations in mind, the points on the ellipse are identifiable through a certain value of the parameter  $\varphi$  (polar description/grid) or the parameter  $\tau$  (concentric description/grid). Considering now the motion induced by relations (8),(9) to point  $E$ , we observe that this depends on the parametric identification used for  $E$  i.e. it is different for the concentric and polar descriptions. Dividing the two sides of the polar equations (4),(5) we get:

$$\frac{y}{z} = \tan \varphi \quad (10)$$

Relation (10) indicates that if we use the polar description to parameterize the points of the ellipse, then the  $E(\varphi)$  moves along  $\overline{OE}$  i.e. in-plane with the FEOD section. Denote by  $dr(\varphi, t)/dt$  the ‘heaving velocity’ on the polar plane ( $r$  according to equation (6)). The total sectional undisturbed velocity due to the combined polar plane heaving and parallel translation  $V$  can then be calculated:

$V^* = \sqrt{V^2 + (dr(\varphi, t)/dt)^2}$  and the angle  $\phi(\varphi, t)$  between velocities  $V$  and  $V^*$  is given by the relation:

$$\phi(\varphi, t) = \tan^{-1}\left(\frac{dr(\varphi, t)/dt}{V}\right), \quad (11)$$

The sectional pitch angle  $\theta(\varphi, t)$  can then be selected according to the formula:

$$\theta(\varphi, t) = w \cdot \phi(\varphi, t) = w \cdot \tan^{-1}\left(\frac{dr(\varphi, t)/dt|_{t=\tau_c}}{V}\right) \quad (12)$$

where  $w$  denotes a weighting factor, independent of time, with values in the range:  $0 < w < 1$ . We name  $w$  ‘the pitch control parameter’ after Politis & Politis (2012). An estimation of the angle of attack of the wing with respect to  $V^*$  is given by the following relation:

$$\alpha(\varphi, t) = \phi(\varphi, t) - \theta(\varphi, t) = (1-w) \cdot \tan^{-1}\left(\frac{dr(\varphi, t)/dt}{V}\right) \quad (13)$$

In this paper we decide to use the polar description/grid for the FEOD discretization. In addition the major axis of the pitch loci ellipse



is held constant in time i.e.  $A_1 = 0$ . Equation (6) applied for the minor axis (i.e.  $\varphi = \pi/2$ ) becomes:

$$r(\pi/2, t) = B = B_0 + B_1 \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi_B) \quad (14)$$

or introducing the substitutions:

$$B_0 = R, B_1 = h_0, \psi_B = \psi \text{ and } h(t) = h_0 \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi):$$

$$r(\pi/2, t) = R + h(t) = R + h_0 \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi) \quad (15)$$

Getting the time derivative of (15) we get:

$$dr(\pi/2, t) / dt = dh(t) / dt = h_0 \omega \cos(\omega t + \psi) \quad (16)$$

and relation (13) for  $\varphi = \pi/2$  becomes:

$$a(\pi/2, t) = (1-w) \tan^{-1}(\pi \cdot Str \cdot \cos(\omega \cdot t + \psi)) \quad (17)$$

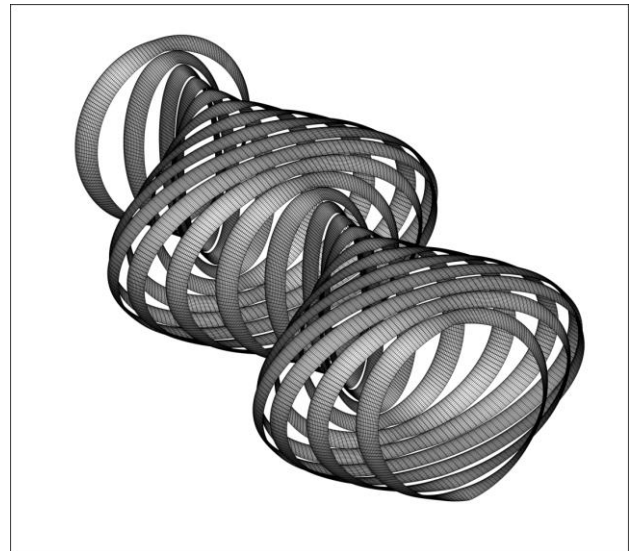
where  $Str$  denotes the Strouhal number defined by:

$$Str = \frac{n \cdot h}{V}, h = 2h_0$$

Assuming given values for  $w, A_0, R, h_0, V, \omega, \psi$  the motion of the FEOD is fully determined and equations (4),(5) and (6) can be used for the determination of the time dependent geometry and corresponding grid for the FEOD. In case of chord-wise flexibility the FEOD deforms in a

similar manner to that discussed in Politis & Tsarsitalidis (2012).

Having introduced the analytical description of both geometry and motion of our FEOD, we can now proceed to the creation of a surface panel distribution at consecutive time steps describing the FEOD geometric evolution. Figure 2 shows the panel discretization of the FEOD at a number of time instances, corresponding to the maximum, minimum and inflection point positions of a FEOD section in one period. With the FEOD paneling in time known, the code UBEM can be applied to calculate the FEOD unsteady forces, energy requirements and free shear layer evolution.



(18) Figure 2. Successive positions of the FEOD in two periods,  $R/c = A_0/c = 4$ ,  $h_0/c = 3$ ,  $Str = 0.46$ .

## 2 Calculation of forces, moments, power and efficiency.

In the case of an arbitrary body (rigid or flexible), energy is transferred through flexibility in a point-wise manner. UBEM code uses a specialized procedure for the calculation of the power provided to the tandem wing configuration, termed DHP (Delivered Horse Power) and the useful power developed by the system to propel the ship, termed EHP (Effective Horse Power). The corresponding methodology has already been presented in Politis & Tsarsitalidis (2012).

## 3 Formulation and solution of the FEOD propulsor design problem.

FEOD Propulsor design problem consists in finding the propulsor geometric and motion characteristics by which it can propel a given ship with a given speed. Although the optimum propulsor problem is a problem of mutual propulsor/stern optimization, in most cases we optimize the propulsor assuming that the hull/stern geometry is given.

Development of a design theory for a new propulsor, requires decisions regarding the independent geometric/motion variables controlling the thrust production and the energy absorption. The proposed FEOD propulsor is a generalization of the FOD which has been discussed in detail in Politis & Tsarsitalidis (2012). From paragraph 2 (above), it became obvious that, the FEOD geometry is controlled

by two ‘length’ variables i.e. the sizes of the major and the minor axis, while only the FOD radius characterizes the FOD. Working on the same lines as in Politis & Tsarsitalidis (2012), the non-dimensional variables controlling the FEOD geometry and motion are the following (assuming  $\psi = 0$ ):

$$w, Str, h_0/c, b/c, A_0/c, R/c, \text{camber \& thickness distributions.} \quad (19)$$

A well-posed propulsion problem for a FEOD can be set as follows:

Calculate the instantaneous open water FEOD performance using UBEM for a range of the parameters  $(w, Str)$  assuming given  $h_0/c, b/c, A_0/c, R/c$  and camber & thickness distributions. Calculate then the period-mean values for thrust and delivered power and denote them by:  $T$  and  $DHP$  respectively. FEOD performance can then be expressed by the following non-dimensional thrust and (delivered) power coefficients:

$$C_T = \frac{T}{0.5\rho U^2 S} = C_T(w, Str, h_0/c, b/c, A_0/c, R/c) \quad (20)$$

$$C_P = \frac{DHP}{0.5\rho U^3 S} = C_P(w, Str, h_0/c, b/c, A_0/c, R/c) \quad (21)$$

where  $S$  denotes the mean FEOD disc surface area ( $= \pi \cdot A_0 \cdot B_0$ ). In self-propulsion conditions,

we assume that a Taylor wake fraction  $W$  is defined by:

$$U = V(1-W) \quad (22)$$

where  $V$  is the ship speed. Furthermore a relative rotative efficiency  $\eta_R$  is defined by:

$$\eta_R = \frac{DHP}{DHP_B} \quad (23)$$

where  $DHP_B$  denotes the (period-mean) power delivered to the FEOD in self-propulsion conditions. Assuming further that a ‘thrust equalization method’ has been used for the estimation of FEOD-hull interaction coefficients  $W, t, \eta_R$  (where  $t$  denotes the thrust deduction factor), the FEOD thrust and power for the first parametric case, in the self-propulsion conditions becomes:

$$T_B = T = 0.5\rho(V(1-W))^2 S \cdot C_T(w, \frac{n \cdot 2h_0}{V(1-W)}, h_0/c, b/c, A_0/c, R/c) \quad (24)$$

$$DHP_B \eta_R = 0.5\rho(V(1-w))^3 S \cdot C_P(w, \frac{n \cdot 2h_0}{V(1-W)}, h_0/c, b/c, A_0/c, R/c) \quad (25)$$

For a self-propelled hull, moving with velocity  $V$ , the surrounding fluid interacts with the hull developing a resistance force:  $R_0(V)/(1-t)$ , where  $R_0(V)$  denotes the hull towing resistance. A hull can also pull an object with a force  $F$  (case of a tug-boat or a trawler).

Then the FEOD thrust, under self-propulsion conditions, is given by:

$$T_B = \frac{R_0(V)}{1-t} + F \quad (26)$$

Assuming that  $V, w, c, A_0, R, h_0, b, W, t, \eta_R$  are known parameters, Equations (24),(25),(26) become a non-linear system of three equations with three unknowns:  $(T, DHP_B, n)$ . This system can be solved for a range of ship speeds:  $V \in (V_1, V_2)$  and  $w \in [0, 1]$ . We thus obtain the totality of design solutions for the given ship:

$$DHP_B, n \leftarrow V, w \Big|_{\text{given: ship, } c, A_0, R, h_0, b, W, t, \eta_R} \quad (27)$$

The content of Equation (27) can be represented in a 2-D  $DHP-n$  diagram in the form of parametric curves of constant  $V$  and constant  $w$ . Notice that this presentation is similar to that used in conventional propellers, where the propeller pitch ratio  $P/D$  is taking the place of  $w$ . Using this representation, we can finally extract the required optimum FEOD by selecting the characteristics (geometric and motion) which require the minimum DHP for the given ship speed  $V$ .

#### 4 Decisions regarding Geometric and Flow/motion variables for the proposed twin wing series.

To proceed to a series based design process for a FEOD, decisions have to be taken, on the corresponding geometric and flow related

parameters. For the needs of the current pilot paper on the subject, the series is limited in extent and consist of only one FEOD system, with  $R/c = A_0/c = 4$ ,  $h_0/c = 3.0$  and  $b/c = 0.33$ . The Strouhal number has been selected in the range:  $Str = 0.1 \div 0.7$ . Using our previous experience, this selection is expected to contain the region of maximum hydrodynamic efficiency. Finally the range of the pitch control parameter  $w$  has been selected between 0 and 1 which means a corresponding pitch angle  $\theta(\varphi, t)$  which includes the full range of thrust producing motions for the various Strouhal numbers.

## 5 Transient FEOD performance and selection of simulation period.

The main difference between a traditional propeller and a biomimetic propulsor is that the latter produces a period mean thrust as a result of a highly unsteady instantaneous thrust. The simulation method in hand can predict this time dependent thrust but, since it is a time stepping method, initial conditions on motion have to be imposed. A burst starting FEOD is used as the starting condition. In this case a transient phenomenon occurs. Thus the mean period values for thrust or power have to be calculated after the passage of this initial transient phenomenon. To take care for this, time domain simulations have been performed for three periods and for several cases. Indicatively, Figures 3, 4 present the unsteady thrust for two

cases.

From these figures it can be concluded that, for the representative selected parameters, the transient phenomenon is limited to the few initial time steps after the burst start. Thus it is safe to use the 2<sup>nd</sup> period of simulation, to calculate the mean thrust and power to be used in the design charts.

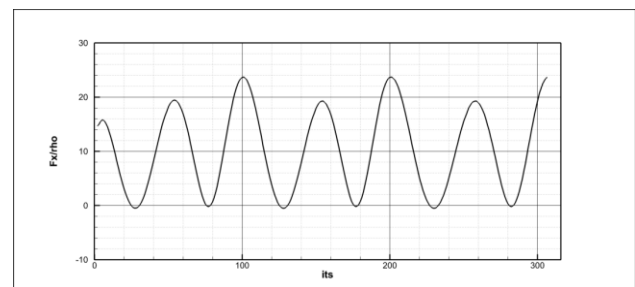


Figure 3. Time evolution of thrust for ( $R/c=A_0/c=4$ ,  $h_0/c=3$ ,  $Str=0.22$ ,  $\Theta=13.3$ )

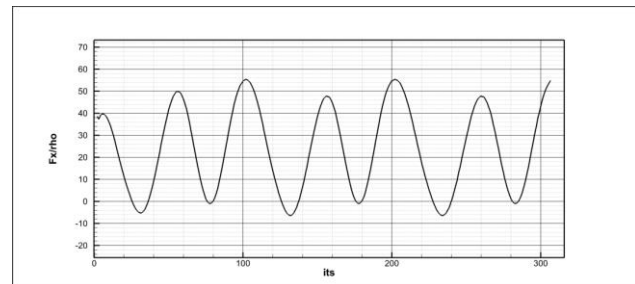


Figure 4. Time evolution of thrust for ( $R/c=A_0/c=4$ ,  $h_0/c=3$ ,  $Str=0.46$ ,  $\Theta=34.4$ )

## 6 Open water performance diagrams and comparison with single wing systems.

Systematic simulations using UBEM have been performed with the selected FEOD series described in section 5. In all simulations a chord

of  $c = 1.0m$  has been selected. Furthermore in all simulations we have used a FEOD system with:  $R/c=A_0/c=4, h_0/c=3, b/c=0.33$ .

Variation of Strouhal number has been achieved by changing the frequency of oscillation while the corresponding translational velocity has been held constant and equal to  $V = 2.3m/s$ . This results to a constant Reynolds number equal to  $0.202 \cdot 10^7$ , based on translational velocity ( $Re = V \cdot c / \nu$ ). Corresponding Reynolds numbers based on the maximum undisturbed flow velocity are Strouhal dependent, according to the relation:

$$Re_{Str} = \frac{V \cdot c}{\nu} \sqrt{1 + (\pi \cdot Str)^2}. \text{Thu } Re_{Str} = 0.22 \cdot 10^7$$

at  $Str = 0.10$  and  $Re_{Str} = 0.51 \cdot 10^7$  at  $Str = 0.7$

(kinematic viscosity:  $\nu = 1.139 \cdot 10^{-6} m^2/s$ ).

Mean thrust and power have then been calculated by running the UBEM code for two time periods and calculating the mean values of the unsteady forces over the second period. The results are presented in the form of  $C_T - \theta_0$  diagrams, figure 5, (where  $\theta_0 \rightarrow \theta$  in diagrams) and  $C_p - \theta_0$  diagrams, figure 6. Notice that the used  $\theta_0$  denotes the sectional pitch angle amplitude along the minor axis of the ellipse (equation (12) with  $\varphi = \pi/2$ ). Notice also that for the FEOD the pitch angle is  $\varphi$  dependent.

$C_T - \theta_0$  diagrams contain additionally in parametric form the open water efficiency  $\eta$  of the system (thin lines):

$$\eta = \frac{T \cdot U}{DHP} = \frac{C_T}{C_p} \quad (28)$$

Also,  $C_p - \theta_0$  diagrams contain additionally in parametric form the  $a_{\max}$  angle (thin lines) defined as the maximum value of  $a(t)$ , relation (17) with  $\varphi = \pi/2$ , over one period. This last information is very useful for the designer in order to avoid maximum angles with a potential danger for separating flow (e.g. greater than 20deg), phenomenon which is not modeled by the used version of UBEM. For illustrative reasons, diagrams 7 and 8 contain similar results for a FOD with :  $R/c=4, h_0/c=2$ , so that comparisons are made easy. Note that the  $h_0/c$  ratio is not the same for the two cases, as the  $h_0/c$  ratio for the FEOD, refers to the maximum heave at the minor ellipse axis.

Interesting conclusions drawn from those figures are the following: (a) The region of maximum hydrodynamic efficiency is achieved at a maximum angle of attack less than 15degrees i.e. at the region of flow without expected separation, (b) The performance of the FEOD is diminished compared to that of the FOD, but it remains to be seen if such a compromise is acceptable for the sake of easier construction and proper fixing of the mechanism behind the boat. It should be also noted that systematic inspections of the calculated pressure distributions gave no indication of local pressure less than the corresponding vapor pressure in the region

around optimum performance. As a result no cavitation is expected at that region. Finally notice that these charts can be used to select an optimum FEOD configuration for a given ship very easily as discussed in Politis & Tsarsitalidis (2012).

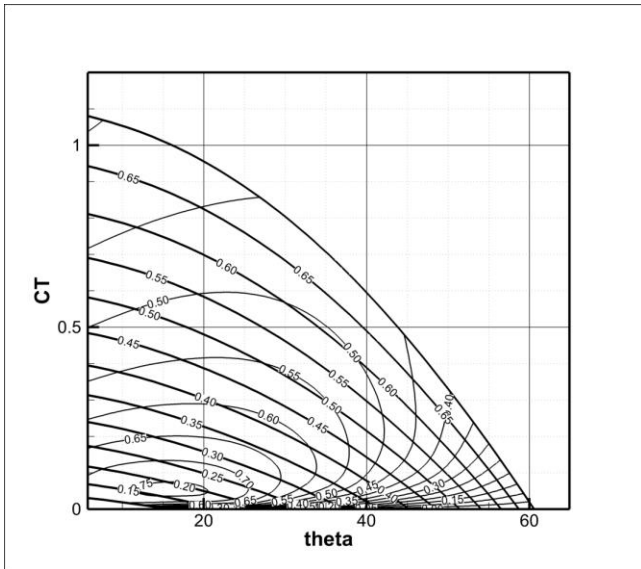


Figure 5.  $C_T - \theta_0$  chart for FEOD. Thick lines stand for  $Str$  and thin lines for Efficiency.

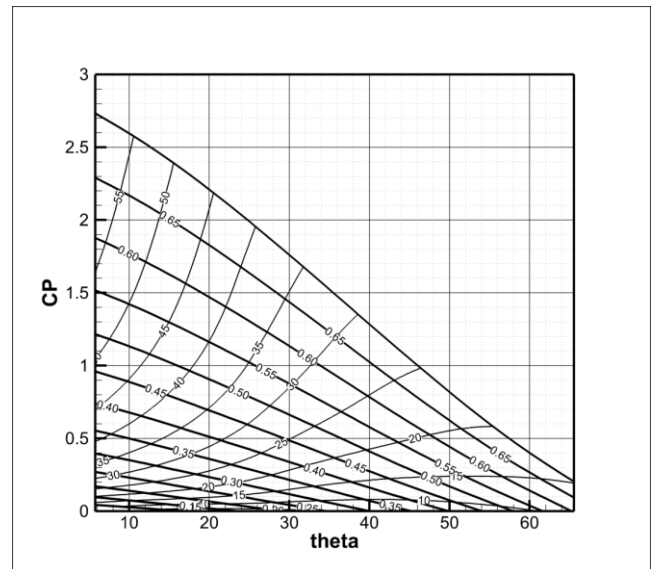


Figure 6  $C_P - \theta_0$  chart for FEOD. Thick lines stand for  $Str$  and thin for  $a_{max}$

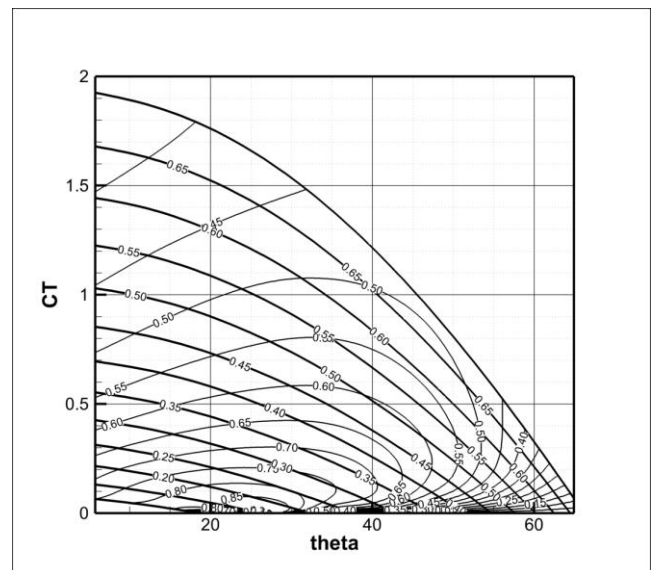


Figure 7  $C_T - \theta_0$  chart for FOD  $R/c=4$   $h_0/c=2.0$ . Thick lines stand for  $Str$  and thin lines for Efficiency.

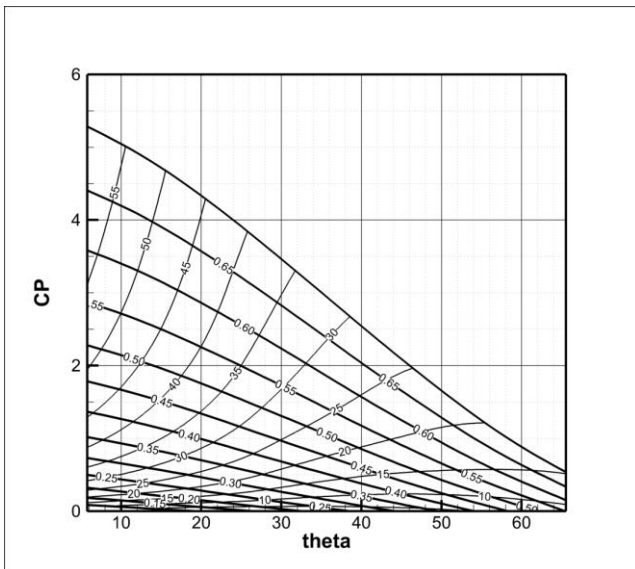


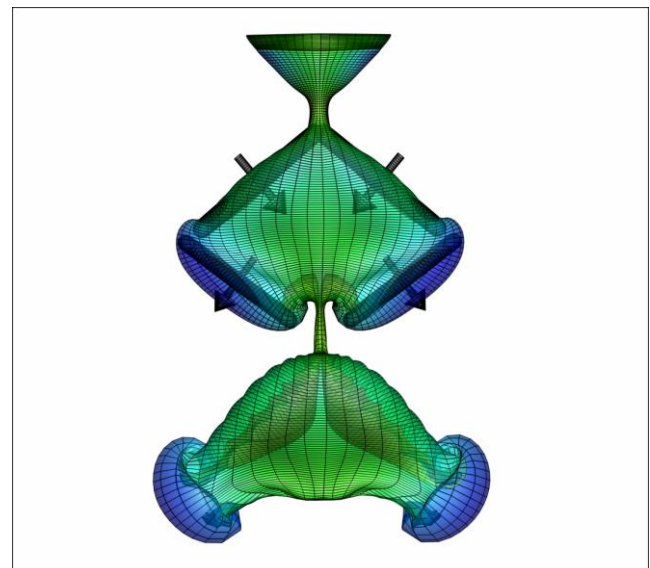
Figure 8  $C_p - \theta_0$  chart for FOD  $R/c=4$   $h_0/c=2.0$ .

Thick lines stand for  $Str$  and thin for  $\alpha_{max}$

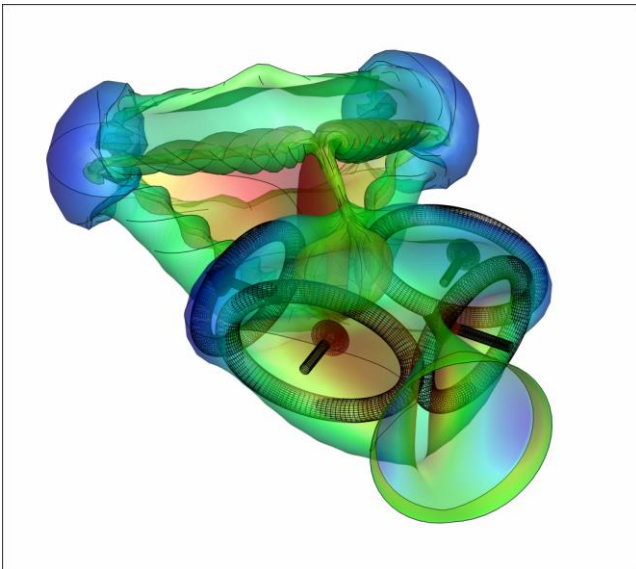
## 7 Wake visualizations – Understanding how the FEOD produces thrust.

For a better understanding of the underlying physical mechanisms of thrust production, the free shear layer produced by the FEOD system is plotted, figures 9a,b. The FEOD surface and the free vortex sheet surface on those figures have been colored according to their surface dipole distribution intensity. Notice that constant dipole lines coincide with surface vortex lines. By using either the last property or the deformation patterns of the free vortex sheets, a number of strong ring vortices in the wake of the FEOD are made recognizable. Those ring vortices produce series of oblique jet flows by which the flapping wing produces thrust. Figure 9 also contains artistic add-ons, showing the train of ring vortices (toroidal

meshes) and corresponding jets (straight arrows) by which the flapping wing feeds with momentum the wake and produces thrust. More specifically the straight arrows are the results of the induced velocities produced by the ring vortices. What is important, is that the wake resembles more that of a twin wing system than that of the FOD (i.e. the homocentric rings have been replaced with couples of rings). From the shape of the rings, it is also noticeable that they resemble the rings produced by wings of small Aspect Ratio operating at lower Strouhal numbers (the rings are elongated in the axis of parallel translation, while in higher AR, they are elongated in the spanwise direction) This fact points to where further investigation is to be made (i.e. higher  $B_0/c$  ratios).



(a)



(b)

Figure 9. Wake of a FEOD,  $Str=0.46$ ,  $\theta_0=34.4$ . Colors are for dipole potential. Artistic add-ons showing the train of ring vortices and corresponding jets by which the FEOD produces thrust.

## 8 Application of a FEOD for the propulsion of a ship – Optimum design example.

A passenger ferry is used in a feasibility study for the application of the FEOD, the FOD and a traditional propeller as alternative propulsors. The passenger ferry is a twin screw vessel with displacement of 8917.66 tns and a maximum allowed propeller diameter of 4.1 meters. The bare hull resistance curve of the ship, taken from the database of the NTUA towing tank, is given in table 1.

With the bare hull resistance given, the system of algebraic equations (24),(25),(26) can be solved for a range of ship speeds  $V$  and  $\theta_0$ , and the totality of design solutions can be presented

in a diagram as dictated by Equation (27). For the need of the comparison, it has been assumed that in all cases:  $W=0.0, t=0.0, \eta_R=1.0$ . This is a reasonable assumption for a twin screw vessel which has small propulsor-hull interactions. The use of the same hull-interaction coefficients for the FEOD/FOD systems and the propeller can be considered reasonable, since interaction coefficients are (for the same stern geometry) mainly functions of propulsor diameter and the developed thrust, Harvald (1983). No inclined axis corrections were made for the conventional propellers. No correction of the bare hull resistance for appendages has been made. A shaft efficiency equal to 1 has been used in the calculations. No corrections for full scale Reynolds number have been introduced for the propulsors.

Totality of design solutions in the form of Constant-V, constant- $\theta_0$  grids for FEOD, FOD and Constant-V, constant-P/D grids for propellers are illustrated for comparison in figures 10,11 and 12. The comparison of the optimum FEOD and FOD vs the optimum B-screw, for a ship speed equal to 23knots can be summarized in table 2. In all cases, the ship is equipped with two propulsors.



Table 1. Resistance curve.

V (m/s)	R(kp)
7.71	31056
8.23	34528
8.75	38374
9.26	42755
9.78	47292
10.29	52301
10.80	58153
11.31	66426
11.83	78009

Table 2. Comparison of propulsors.

Case	Revolutions (rpm)	Power (PS)	Propulsive Efficiency (%)	Power Gain (%)
FEO D	9.81	16211.83	75.90	5.21
FOD	29.55	14961.13	82.24	12.52
B-screw	168.30	17103.40	71.97	

Note, that while the propeller and the FOD, use the maximum allowed (by tolerances) diameter, the FEOD, as it does not move at the upper and lower point, it uses a larger diameter, which in this case, is the maximum diameter the FOD will take (i.e.  $D+2h_0$ ), thus the required Thrust coefficient is lower and the diminished performance of the FEOD is compensated.

It is observed that a gain in propulsive efficiency of 5.21% is obtained for the case of a FEOD in comparison to a conventional propeller. The corresponding gain for a FOD is 12.52%. It is also noticeable, that the optimum flapping wing revolutions are always lower compared to that of corresponding conventional optimum propeller. It should be stretched that the absolute values of power and overall efficiency, contained in table 2, are approximate to the extent of our uncertainty regarding values of propulsor-hull interaction factors.

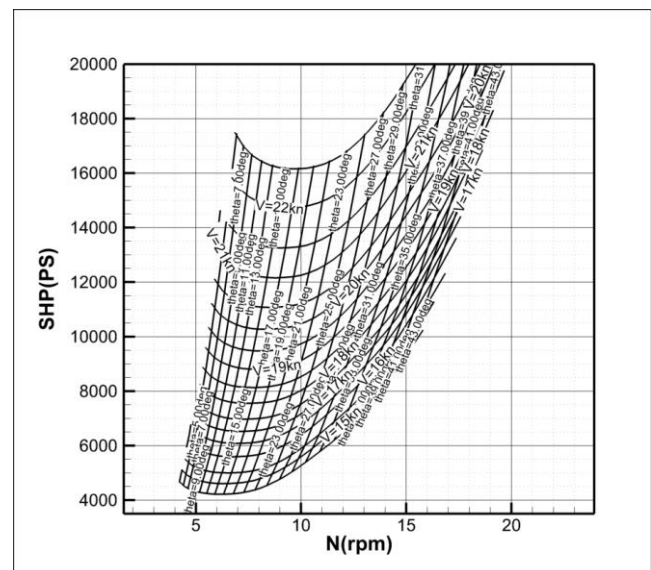


Figure 10. Passenger Ferry-FEOD: Totality of design solutions in the form of Constant-V, constant- $\theta_0$  grid.

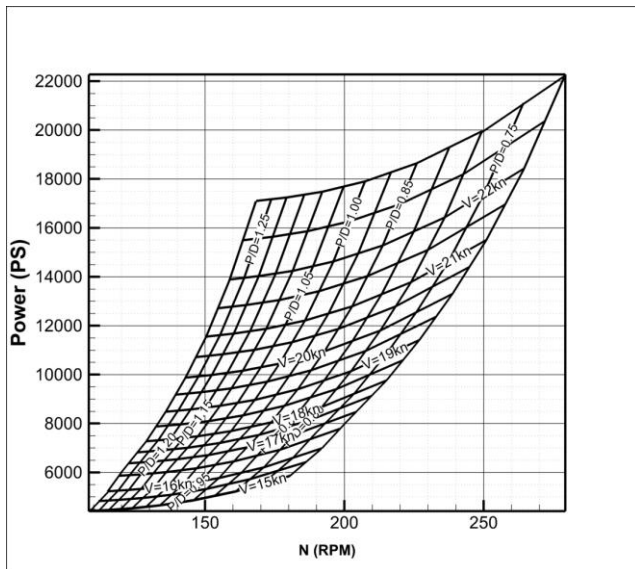


Figure 12. Passenger Ferry- B4.75 screw:  
 Totality of design solutions in the form of  
 Constant-V, constant-P/D grid.

## 9 Closing remarks, Challenges and further Development

The unsteady boundary element modeling code UBEM has been applied to investigate the open water performance of a FEOD propulsor. Systematic calculations were made and design charts were produced, along with a design methodology, which has been explained thoroughly. Propulsive coefficients of the order of 0.75 have been calculated, which are higher than that observed in conventional propellers. After applying the design method to an actual ship, the FEOD system proves to be better than conventional propellers with respectable efficiency gains of practical interest. The oval shaped swept area and the two fixed points, allow taking advantage of larger stern area, compared to a propeller, and make it easier to construct and operate, compared to the FOD, which seems feasible only by employing

specialized materials. This initial study shows that the loss due to breaking the circular symmetry of the FOD is not big enough to make the system unworthy of further exploration.

Expansion of the presented series of the FEOD, is planned in the near future, a fact which will allow us to examine in more detail the effect of the kinematic and geometric parameters of the propulsor to its hydrodynamic performance.

## 10 Acknowledgements:

**This research has been co-financed by the European Union (European Social Fund – ESF) and Greek national funds through the Operational Program "Education and Lifelong Learning" of the National Strategic Reference Framework (NSRF) - Research Funding Program: Heracleitus II. Investing in knowledge society through the European Social Fund.**



## REFERENCES

- Politis, G. K. (2004). "Simulation of unsteady motion of a propeller in a fluid including free wake modeling." *Engineering Analysis with Boundary Elements* 28(6): 633-653.
- Politis, G., Politis, K., 'Biomimetic propulsion under random heaving conditions, using active pitch control', *Journal of fluids and structures*, 2012.
- Politis, G. and V. Tsarsitalidis (2012). "Flexible Oscillating Duct: An approach to a novel propulsor." *Applied Ocean Research* 36: 36-50.
- Politis, G. K. (2011). "Application of a BEM time stepping algorithm in understanding complex unsteady propulsion hydrodynamic phenomena." *Ocean Engineering* 38(4): 699-711.