



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών

Τομέας Ναυτικής και θαλάσσιας Υδροδυναμικής

Διπλωματική Εργασία

**Θέμα : Υπολογισμός υδροδυναμικών μεγεθών
στην γάστρα JBC με την χρήση του
λογισμικού STAR-CCM+**

Ρετζέπ Ιμάμ

Επιβλέπων : Γεώργιος Παπαδάκης

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Μάρτιος, 2019

Υπολογισμός υδροδυναμικών μεγεθών στην γάστρα JBC με την χρήση του λογισμικού STAR-CCM+

Διπλωματική Εργασία

Του

Ρετζέπ Ιμάμ

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή:

Γεώργιος Παπαδάκης

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π

Σχολή Ν.Μ.Μ

Γρηγόριος Γρηγορόπουλος

Καθηγητής Ε.Μ.Π

Σχολή Ν.Μ.Μ

Γεώργιος Τζαμπίρας

Καθηγητής Ε.Μ.Π

Σχολή Ν.Μ.Μ

Αθήνα, Μάρτιος, 2019

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία, με τίτλο « Υπολογισμός υδροδυναμικών μεγεθών στην γάστρα JBC με την χρήση του λογισμικού STAR-CCM+ » εκπονήθηκε στο κτήριο ANYM (Αεροδυναμικής, Ναυπηγικής & Υδροδυναμικών Μηχανών), του τμήματος Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής, της σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, στα πλαίσια του Προπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών.

Η ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας δεν θα ήταν εφικτή χωρίς την παρουσία του επιβλέποντος καθηγητή του τομέα Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής, κ. Γεώργιο Παπαδάκη, ο οποίος πάντοτε πρόθυμα άκουσε, συζήτησε και βοήθησε στην εύρεση λύσεων για τα προβλήματα που ανέκυπταν κατά την πρόδό της.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες, επίσης, θα ήθελα να δώσω και στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής που αποτελούνταν από τους κ. Γεώργιο Δ. Τζαμπίρα και κ. Γρηγόρη Ι. Γρηγορόπουλο, για την ουσιαστική βοήθεια και τις καίριες παρατηρήσεις τους καθ' όλη τη διάρκεια συγγραφής της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να αναφέρω ότι, η παρούσα διπλωματική εργασία δεν θα είχε επιτευχθεί εάν ο κ. Γρηγόρης Ι. Γρηγορόπουλος δεν είχε συνεισφέρει τους υπολογιστές που παρέχουν το λογισμικό STAR-CCM+.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την στήριξη και την υπομονή της όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία, έχει ως στόχο την μελέτη της συνολικής αντίστασης του μοντέλου JBC (JAPAN BULK CARRIER) σε ήρεμο νερό με την ταχύτητα υπηρεσίας του πλοίου. Το μοντέλο JBC προσομοιώθηκε σε κατάσταση πλεύσης straight ahead, static drift και pure sway. Για την μελέτη της αντίστασης σε κατάσταση πλεύσης static drift, το μοντέλο προσομοιώθηκε για γωνιά drift 0°, 5° και 10° όπου μελετήθηκε η συνολική αντίσταση και η πλευρική αντίσταση που αναπτύσσεται λόγω γωνίας πρόσκρουσης διάφορη του μηδενός. Για την περίπτωση του pure sway, η μέγιστη απόσταση που δόθηκε στο μοντέλο στον εγκάρσιο άξονα y είναι στα 0.875 m.

Η γάστρα που προσομοιώθηκε είναι αυτή του JBC (JAPAN BULK CARRIER) σε κλίμακα 1:40. Οι προσομοιώσεις αυτές επετεύχθησαν μέσω του λογισμικού STAR CCM+. Για την υλοποίηση των προσομοιώσεων, απαιτείται η δημιουργία εικονικών δεξαμενών, υπολογιστικό πλέγμα και ο ορισμός των αριθμητικών και φυσικών παραμέτρων που προαπαιτούνται για την ολοκλήρωση των προσομοιώσεων. Οι διαστάσεις της δεξαμενής, η γένεση του πλέγματος και ο ορισμός των φυσικών και αριθμητικών παραμέτρων, έγιναν αυστηρώς με τις υποδείξεις που παρέχονται από την ITTC (International Towing Tank Conference) για προσομοιώσεις CFD. Στην περίπτωση του straight ahead, η γάστρα προσομοιώθηκε μισή, αφού η κίνηση είναι συμμετρική ως προς το διάμηκες επίπεδο του πλοίου. Στην μελέτη του PMM (Planer Mechanism Motion) για static drift και pure sway το μοντέλο προσομοιώθηκε στο σύνολο του όγκου της γάστρας αφού οι κινήσεις που προσομοιώθηκαν δεν είναι συμμετρικές. Επιπλέον, και στις τρεις περιπτώσεις δεν επιβάλλεται κάποια κίνηση στο μοντέλο ως προς τον άξονα x, οι μελέτες πραγματοποιούνται δίνοντας κίνηση στο ρευστό, η ταχύτητα του ρευστού ταυτίζεται με την ταχύτητα υπηρεσίας του πλοίου.

Στην περίπτωση του straight ahead, τα αποτελέσματα που εξήχθησαν, συγκρίθηκαν με αποτελέσματα τα οποία πάρθηκαν από δημοσιεύσεις αντίστοιχων μελετών που βρέθηκαν στο διαδίκτυο και από δημοσιεύσεις από το συνέδριο TOKYO WORKSHOP 2015. Για την περίπτωση της στατικής μετατόπισης (static drift) και εγκάρσιας μετατόπισης (pure sway), δυστυχώς, δεν πραγματοποιήθηκε σύγκριση αποτελεσμάτων, ο λόγος είναι η μη ύπαρξη αντίστοιχων αποτελεσμάτων από παρόμοιες μελέτες για το συγκεκριμένο μοντέλο.

Τέλος, ακολουθεί ένα παράρτημα στο οποίο δίνονται λεπτομερείς οδηγίες για την εκπόνηση της προσομοίωσης στην περίπτωση του straight ahead. Στόχος του παραρτήματος αυτού είναι να βοηθήσει άλλους συναδέλφους και ερευνητές στην γρήγορη εκμάθηση του προγράμματος.

ABSTRACT

The objective of this master thesis is to calculate the total resistance coefficient of the model JBC (Japan Bulk Carrier) sailing in several conditions in calm water with the help of CFD program Star CCM+. The model JBC simulated in conditions of sailing in straight ahead, static drift and pure sway. In the case of static drift the model simulated in the drift angles of 0° , 5° and 10° where is calculated the total drag resistance and the lateral force. In case of pure sway, the sway rate used for this simulation was 0.875 m and corresponding sway amplitude used was $0.125 * L_{BP}$ and period was 27.5 sec.

The Japan Bulk Carrier (JBC) is a bulk carrier equipped with stern duck as an energy saving device. Contain a ship hull, a duck and a rudder. The shape of JBC is a traditional large merchant ship, has a bulbous bow and a single screw stern. In this CFD simulation, we simulate the condition without the ship appendix (Propeller, duct and rudder). Just calculate the influence by ship hull in model scale ship. Geometry of model scale ship is provided by « Tokyo 2015 – Workshop on CFD in ship Hydrodynamic ».

Master thesis mainly consists of four parts: background and methods, which is use to define the basic theoretical foundation of this thesis; Case study part introduced the model, mesh physical parameters setting process in the CFD computer program: Star-CCM+; Results part shows the result from simulation we get and Discussion part discuss the questions we encounter during the simulation. The entire simulation process in this thesis contains five phases: 1. Setup simulated model and meshes, 2. Setup physical parameters, 3. Verification of results; 4. Simulate all the test cases; 5. Analyze the results.

Πίνακας περιεχομένων

1. ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΠΛΟΙΟΥ.	1
1.1 Συνολική αντίσταση.....	1
1.1.1 Αντίσταση τριβής (<i>RF</i>).....	2
1.1.2 Υπόλοιπη αντίσταση.....	2
1.1.2.1 Αντίσταση πίεσης λόγω συνεκτικότητας (<i>RPV</i>).....	2
1.1.2.2 Αντίσταση λόγω κυματισμών (<i>RW</i>).	1
1.1.2.3 Μέθοδος υπολογισμού συνιστωσών κύματος και συνεκτικότητας.....	2
1.1.2.6 Αντίσταση λόγω αέρα (<i>RA</i>).	3
2.2 ΙΤΤC (International Towing Tank Conference).	4
2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	5
2.1 Υπολογιστική Ρευστομηχανική (CFD).....	5
2.1.2 Πειραματική ρευστομηχανική (EFD).	5
2.1.3 Σύγκριση CFD με EFD.	6
2.2 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΗΣ ΤΥΡΒΩΔΕΣ ΡΟΕΣ.....	7
2.2.1 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ REYNOLDS AVERAGED NAVIER – STOKES (RANS)...	9
2.3 ΜΟΝΤΕΛΑ ΤΥΡΒΗΣ.....	10
2.3.1 Η έννοια του τυρβώδους ιζώδους.....	10
2.3.2 Μοντέλο μήκους αναμίξεως.	12
2.3.3 Μοντέλα μιας εξίσωσης.....	13
2.3.4 Μοντέλα δυο εξισώσεων.	15
2.3.4.1. Μοντέλο $k - \epsilon$	15
2.3.5 Άλλα μοντέλα κλεισίματος τύρβης.....	18
2.4 ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΕΓΚΙΣΗΣ ΤΗΣ ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ.....	19
2.5 ΜΕΘΟΔΟΣ VOLUME OF FLUID (VOF).	20
2.6 ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΟΓΚΩΝ.....	21
2.6.1 Γενικά στοιχεία για την μέθοδο.	21
2.6.2 Διακριτοποίηση και επίλυση εξισώσεων μεταφοράς.	21
2.6.3 Διακριτοποίηση στον όγκο ρευστού.....	23
3. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....	24
3.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.	24

3.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΟΥ STRAIGHT AHEAD.....	26
3.2.1 Κύριοι τομείς	26
3.3 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΤΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ.	27
3.3.1 Εισαγωγή της γάστρας.	27
3.3.2 Δημιουργία του Towing Tank.	27
3.3.3 Διαχωρισμός των περιοχών του towing tank και δήλωση απαραίτητων στοιχείων.....	28
3.3.3 Επιλογή των κύριων χαρακτηριστικών του πλέγματος.	29
3.3.4 Καθορισμός των κύριων ρυθμίσεων του πλέγματος.	30
3.3.4.1 Αριθμός y^+	31
3.3.4.2 Prism Layer.....	32
3.3.4.3 Γενικές ρυθμίσεις πλέγματος.	32
3.3.6 Ορισμός των τύπων επιφανειών του towing tank	35
3.3.7 Δημιουργία του πλέγματος.	35
3.4 Εισαγωγή των αριθμητικών και φυσικών παραμέτρων.....	36
3.4.1 Επιλογή των φυσικών μοντέλων.....	36
3.4.1.1 Αλγόριθμος επίλυσης Pressure Based – Segregated.....	37
3.4.1.2 Μέθοδος Implicit Unsteady.	38
3.4.1.3 VOF (Volume of Fluid).	38
3.4.1.4 Μοντέλο τύρβης $k-\epsilon$	38
3.4.2 Ορισμός της μεθόδου Euler (δύο φάσεων νερό-αέρας).....	38
3.2.3 Ορισμός του VOF WAVES.....	39
3.2.4 Ορισμός των αρχικών συνθηκών.	39
3.2.5 Απόσβεση κυματισμών.....	40
3.2.6 Ορισμός συνοριακών συνθηκών.....	40
3.2.7 Ορισμός των παραμέτρων επίλυσης και τα κριτήρια τερματισμού.....	42
3.3 ΟΡΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΓΙΑ PMM.....	42
3.3.1 Διαστάσεις δεξαμενής (towing tank) για κίνηση PMM.	43
3.3.2 Πλέγμα Overset.....	43
3.3.2 Επίτευξη κίνησης μέσω πλέγματος overset.	44
3.3.2 Ορισμός των παραμέτρων επίλυσης και τα κριτήρια τερματισμού για PMM.	45
3.4 ΠΑΡΑΛΛΗΛΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ.	45
4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΙ.....	46

Εισαγωγή.	46
4.1. Straight ahead.....	47
4.1.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων της συνολικής δύναμης ανά περίπτωση.....	48
4.1.3 Συντελεστής αντίσταση straight ahead.	50
4.1.5 Κυματισμοί Kelvin σε Straight ahead.....	52
4.1.2 Γράφημα Residuals.	53
4.2 Κίνηση PMM (Planar Motion Mechanism).....	55
4.2.1 Static drift.....	56
4.2.2 PURE SWAY.....	64
4.2.2.1 Κυματισμοί Kelvin για Pure Sway.	66
5 ΣΥΝΟΨΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.	68
6 ΠΡΟΤΑΣΗ ΜΕΛΟΝΤΙΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.	70
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	71
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	72

Ορολογία

CFD : computational fluid dynamics

EFD : experimental fluid dynamics

JBC : JAPAN BULK CARRIER

NS : Navier-stokes

ΜΔΕ : μερική διαφορική εξίσωση

RANS : REYNOLDS AVERAGED NAVIER STOKES

TE : truncation error

STAR : STAR CCM +

VOF : volume of fluid

DNS : direct numerical solution

CAD : computer aided design

CAE : computer aided engineering

PMM : Planer Mechanism Motion

Συμβολισμοί

p : πίεση

ρ : η πυκνότητα του ρευστού σε kg/m^3

u_x, u_y, u_z : οι ταχύτητες του ρευστού στους άξονες x, y και z αντίστοιχα

Δp : διαφορά πίεσης

$\overline{v_{ar}}$: μέση τιμή ενός μεγέθους

ν : ιξώδες ρευστού

Rn : αριθμός Reynolds

Fn : αριθμός Froude

k : κινητική ενέργεια τύρβης

e : βαθμός καταστροφής τύρβης

ω : κυκλική συχνότητα τύρβης

$k-e$: μοντέλο τύρβης $k-e$

$k-\omega$: μοντέλο τύρβης $k-\omega$

μ : δυναμική συνεκτικότητα ρευστού

μ_T : δυναμική συνεκτικότητα τύρβης

λ : μήκος κύματος

ω_w : κυκλική συχνότητα κύματος

f_w : συχνότητα κύματος

R_d : δύναμη αντίστασης χωρίς κυματισμό

R_p : δύναμη αντίστασης πίεσης

R_s : δύναμη στρέψης

R_{aw} : πρόσθετη δύναμη αντίστασης λόγω κυματισμών

R_T : συνολική δύναμη αντίστασης σε κυματισμούς

C_D : συντελεστής οπισθέλκουσας

C_w : συντελεστής αντίστασης κυματισμών

k : κυματισμός

y^+ : αδιάστατη απόσταση από το wall

V_s : ταχύτητα υπηρεσίας πλοίου

i,j,k : μοναδιαία διανύσματα παράλληλα στους άξονες x, y, z αντίστοιχα

Ναυπηγικοί όροι

LOA : συνολικό μήκος πλοίου

LBP : μήκος μεταξύ προραίας και πρυμναίας καθέτου

B : πλάτος στο μέσο νομέα του πλοίου

D : κοίλο , απόσταση από τον πυθμένα μέχρι το κύριο κατάστρωμα του πλοίου

T : βύθισμα πλευσης , απόσταση από το πυθμένα μέχρι και την ίσαλο γραμμή στη μέση τομή

S_w : επιφάνεια βρεχόμενης επιφάνειας

L_{WL} : μήκος ισάλου

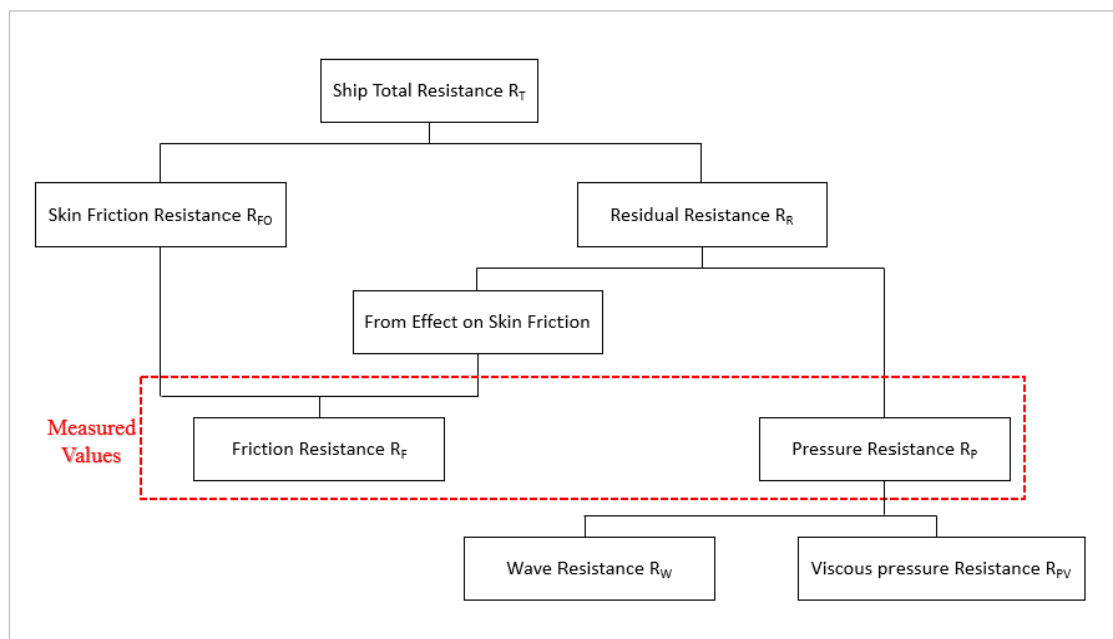
1. ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΠΛΟΙΟΥ.

1.1 Συνολική αντίσταση

Η αντίσταση του πλοίου είναι η δύναμη η οποία απαιτείτε για την ρυμούλκηση του πλοίου, όταν το πλοίο πλέει σε ήρεμο νερό με σταθερή ταχύτητα (θεωρώντας ότι δεν έχει πρόωση). Η αντίσταση του πλοίου εξαρτάται βασικά από την ταχύτητα, το εκτόπισμα του και την μορφή της γάστρας. Πιο συγκεκριμένα η αντίσταση του πλοίου οφείλετε σε απώλειες ενέργειας λόγω επαφής της επιφάνειας του με το περιβάλλον του ρευστού. Κατά την κίνηση του στο νερό, σε κάθε σημείο της βρεχόμενη επιφάνεια του αναπτύσσονται υδροδυναμικές πιέσεις και τάσεις. Οι πιέσεις και οι τάσεις αυτές μπορούν να αναλυθούν σε φαινομενικές τάσεις, δηλαδή εκείνες που δρουν εφαπτομενικά της βρεχόμενης επιφάνειας του σώματος και σε ορθές πιέσεις, οι οποίες αντίστοιχα δρουν κάθετα στην επιφάνεια του σώματος. Η ολοκλήρωση των φαινομενικών τάσεων γύρω απ την βρεχόμενη επιφάνεια οδηγεί σε μια οριζόντια συνιστώσα η οποία λέγεται αντίσταση τριβής R_F (Friction Resistance). Η ολοκλήρωση των ορθών πιέσεων οδηγεί σε μια οριζόντια συνιστώσα η οποία ονομάζεται υπόλοιπη αντίσταση R_R (Residual Resistance).

Το άθροισμα της αντίστασης τριβής και της υπόλοιπης αντίστασης ονομάζεται ολική αντίσταση. Πιο συγκεκριμένα η ολική αντίσταση του πλοίου συντίθεται από πολλές επιμέρους αντιστάσεις οι οποίες μπορούν να καταχωθούν σε τρεις κύριες ομάδες. Γενικά η συνολική αντίσταση αποτελείτε από δύο σημαντικά μέρη στην υπολογιστική ρευστομηχανική, εκ των οποίον το ένα μέρος είναι η αντίσταση τριβής και το δεύτερο η αντίσταση πίεσης.

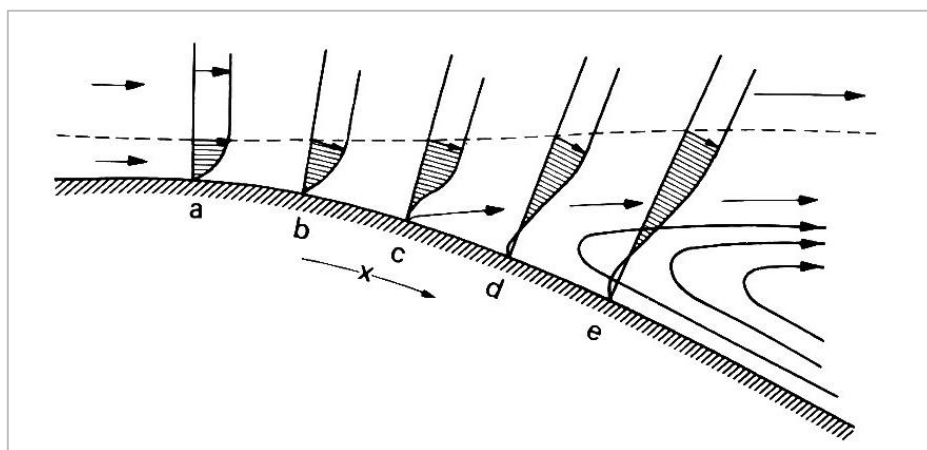
Η εικόνα παρακάτω δείχνει την σύνθεση της αντίστασης του πλοίου.



Εικόνα 1.1.1 : Κατανομή αντιστάσεων του πλοίου.

1.1.1 Αντίσταση τριβής (R_F).

Η αντίσταση τριβής R_F (Friction Resistance) η οποία προκαλείται από τις επαπτομενικές τάσεις οι οποίες δρουν επαπτομενικά επί της βρεχόμενης επιφάνειας όπου παρουσιάζονται μόνο σε πραγματικά υγρά με συνεκτικότητα και είναι συνδεδεμένες με τις διατρητικές τάσεις, που εξασκούνται μεταξύ σώματος και υγρού. Αυτή η αντίσταση σχετίζεται με τον αριθμό Reynolds. Γενικά κατά την κίνηση του σκάφους, τα υλικά σημεία του ρευστού τα οποία τα οποία έρχονται σε άμεση επαφή με την επιφάνεια του σώματος έχουν ίδια ταχύτητα με το κινούμενο σώμα, ενώ σε απόσταση μακριά από το σώμα είναι ανεπηρέαστα. Προκύπτει επομένως σημαντική πτώση της ταχύτητας του ρευστού προχωρώντας από το σώμα προς τα πλάγια. Οι πιο σημαντικές αλλαγές παρουσιάζονται κοντά στο σώμα, στο λεγόμενο οριακό στρώμα (boundary layer). Το οριακό στρώμα στην περιοχή της πλώρης είναι λεπτόγραμμο και γίνεται βαθμιαία παχύτερο καθώς κινείται προς την πρύμνη.



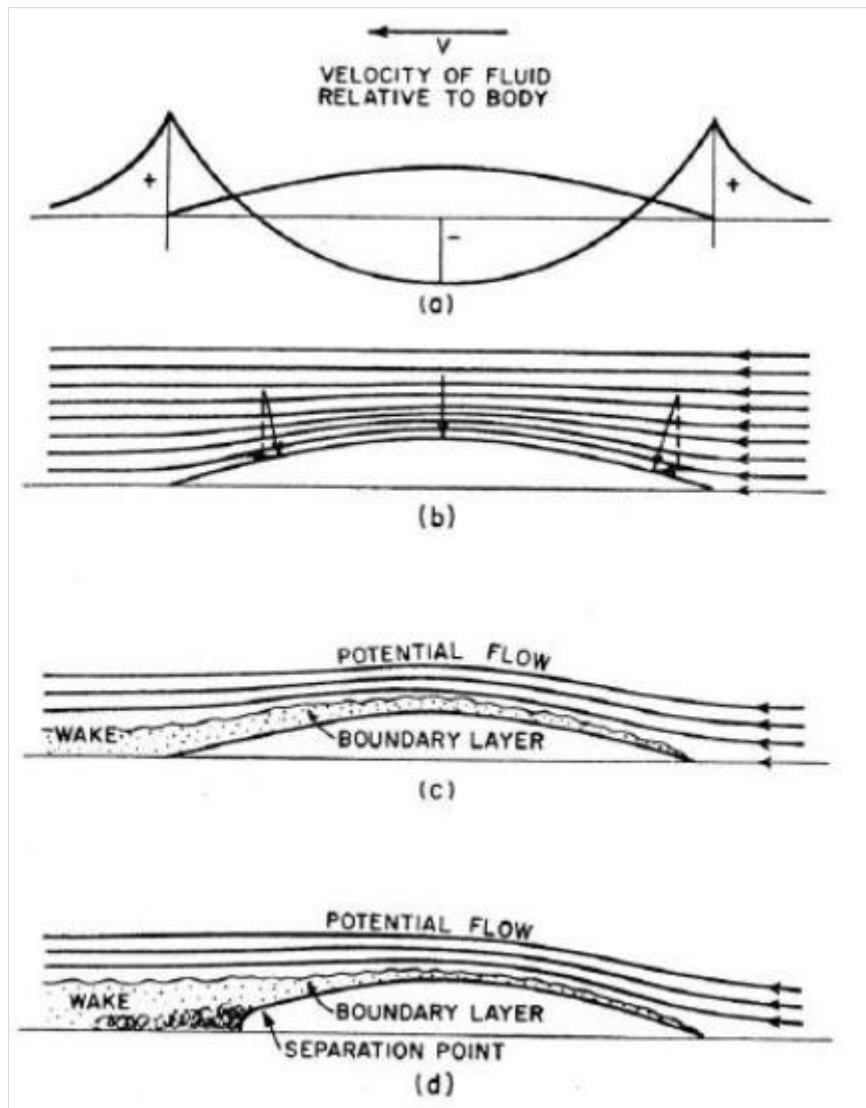
Εικόνα 1.1.1.1: Απεικόνιση ροής γύρω από την γάστρα, οριακό στρώμα, αποκόλληση ροής και αναστροφή ροής στην περιοχή της αποκόλλησης.

1.1.2 Υπόλοιπη αντίσταση.

Το άλλο μέρος απ το οποίο αποτελείται η συνολική αντίσταση είναι η υπόλοιπη αντίσταση R_R (Residual Resistance) η οποία προκαλείται από ορθές πιέσεις και δρουν κάθετα επί της βρεχόμενης επιφάνειας, παρουσιάζονται ανεξάρτητα από την ύπαρξη συνεκτικότητας και είναι ανάλογα με την κίνηση των μορίων του ρευστού. Αυτή η αντίσταση σχετίζεται με τον αριθμό Froude. Οι κύριες συνιστώσες της υπόλοιπης αντίστασης είναι η αντίσταση πίεσης λόγω συνεκτικότητας (R_{PV}) και η αντίσταση κυματισμών (R_W).

1.1.2.1 Αντίσταση πίεσης λόγω συνεκτικότητας (R_{PV}).

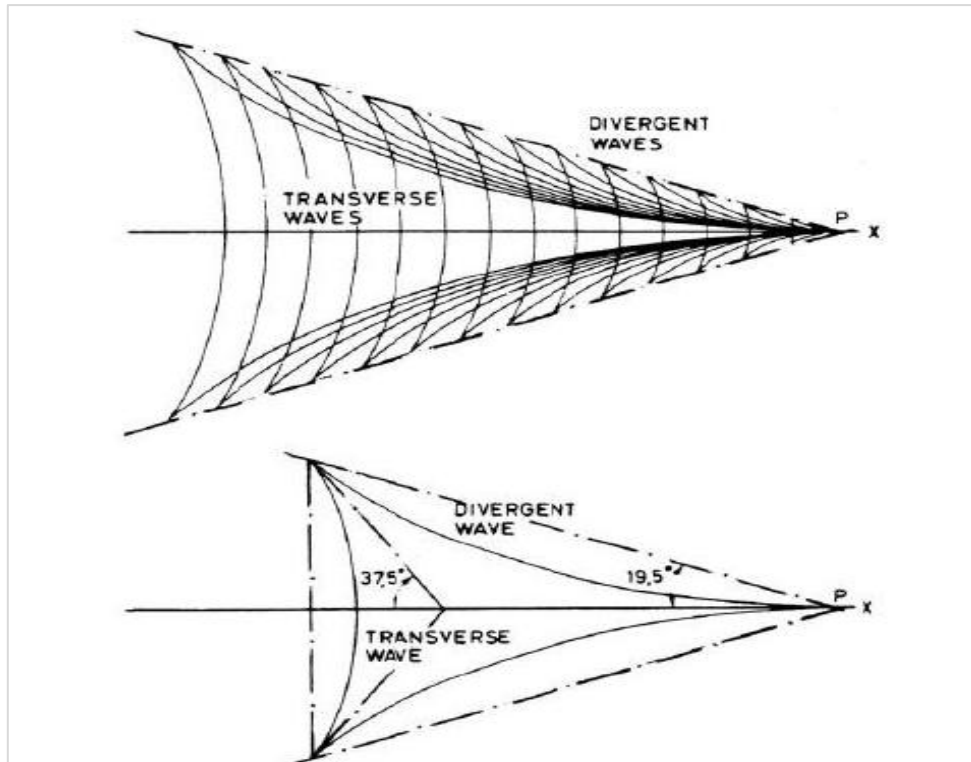
Η αντίσταση πίεσης λόγω συνεκτικότητας οφείλεται στην αλλαγή κατανομής της πίεσης στο βυθισμένο τμήμα της γάστρας λόγω της ύπαρξης συνεκτικότητας.



Εικόνα 1.1.2.1.1 : Ροή γύρω από ένα σώμα βυθισμένο σε άπειρο ρευστό.

1.1.2.2 Αντίσταση λόγω κυματισμών (R_W).

Ένα σώμα το οποίο κινείται στην ελεύθερη επιφάνεια ενός ρευστού προκαλεί διαταραχή στην επιφάνεια του, δημιουργώντας κύματα. Η αντίσταση κυματισμού μπορεί να θεωρηθεί ότι ισούται με την ενέργεια που απορροφούν τα δημιουργούμενα κύματα. Η πρώτη θεωρητική προσπάθεια μελέτης του φαινομένου έγινε από τον Lord Kelvin, οι κυματισμοί ενός πλοίου μπορούν να περιγραφούν θεωρώντας ότι ένα κινούμενο σώμα έχει ένα μοναδικό σημείο πίεσης που κινείται με ταχύτητα ίδια αυτή του πλοίου. Δημιουργείται έτσι ένα σύστημα εγκάρσιων κυματισμών (transverse) μαζί με μια σειρά αποκλινόντων κυματισμών (divergent) που απλώνονται πίσω από το σημείο πίεσης. Ο συνολικός σχηματισμός κυμάτων βρίσκεται ως επί το πλείστον μέσα σε δύο ευθείες γραμμές που ξεκινούν από το σημείο πίεσης και σχηματίζουν γωνίες περίπου 19.5 μοιρών ως προς τη διεύθυνση της κίνησης (σχήμα 3).



Εικόνα 1.1.2.2.1 : Παραγωγή κυματισμών Kelvin, από διαταραχή του ρευστού καθώς κινείται το βέλος P προς τον άξονα x.

Ο ακριβής υπολογισμός της αντίστασης κυματισμού δεν είναι εύκολος. Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει αξιόλογες προσπάθειες υπολογισμού της με την χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών και ειδικών προγραμμάτων. Τα αποτελέσματά τους, αν και μπορεί να διαφέρουν από τα πραγματικά μεγέθη, είναι πολύ χρήσιμα κατά την διαδικασία αρχικής σχεδίασης ενός πλοίου. Προσφέρουν στον μελετητή ένα μέτρο σύγκρισης της αντίστασης, δίνοντας του την δυνατότητα βελτιστοποίησης της μορφής τη γάστρας. Τέλος, αναφέρουμε ότι η χρήση πρωραίου βολβού επιδρά θετικά στην μείωση της αντίστασης.

1.1.2.3 Μέθοδος υπολογισμού συνιστωσών κύματος και συνεκτικότητας.

Η ακόλουθη μέθοδος υπολογισμού που παρουσιάζεται, είναι η μέθοδος υπολογισμού της συνιστώσας του κυματισμού και της συνεκτικότητας, μπορεί να βρεθεί στο [Molland et al 2011], και έχει σκοπό να παρέχει στον αναγνώστη την κατανόηση υπολογισμού των συνιστωσών της αντίστασης. Θεωρώντας ένα μοντέλο το οποίο είναι πακτωμένο και το νερό κινείται με μια σταθερή ταχύτητα, χωρίς κυματισμούς και ότι το σύστημα αξόνων είναι όπως στην εικόνα 2.6. Η ανύψωση κυματισμού που δημιουργείται από την γάστρα μπορεί να υπολογιστεί και η απώλεια ενέργειας που χάνεται από την αντίσταση των κυματισμών μπορεί να εκτιμηθεί. Η αντίσταση των κυματισμών μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση 2.1, και η συνολική συνεκτικότητα από την εξίσωση 2.2.

$$R_w = \frac{1}{2} \rho_w g \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \zeta^2 dy + \frac{1}{2} \rho_w \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \int_{-h}^{\zeta} (u_x^2 + u_y^2 + u_z^2) dz dy \quad (2.1)$$

$$R_V = \iint_{wake} \left[\Delta p + \frac{1}{2} \rho_w (u'^2 - u^2) \right] dydz \quad (2.2)$$

Όπου :

R_w : πρόσθετη δύναμη αντίστασης λόγω κυματισμών

R_V : δύναμη αντίστασης λόγω συνεκτικών δυνάμεων

ρ_w : πυκνότητα ρευστού

g : επιτάχυνση βαρύτητας

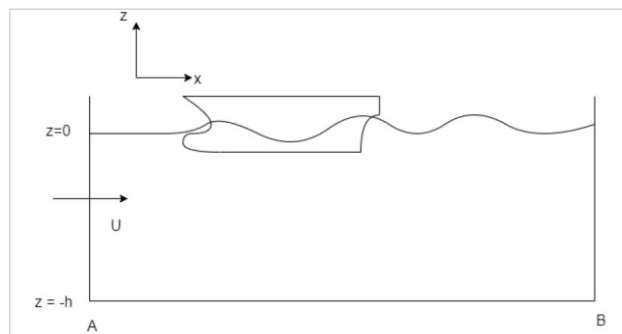
ζ : ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας

Δp : πτώση πίεσης ανάμεσα στο boundary layer

u' : η ταχύτητα που θα έπρεπε να έχει το ρευστό στο άξονα x αν δεν υπήρχε Δp

u : η πραγματική ταχύτητα του ρευστού στον άξονα x

u_x, u_y, u_z : οι συνιστώσες της ταχύτητας του κύματος στον άξονα x, y και z αντίστοιχα



Εικόνα 1.1.2.3.1 : Ογκομετρικός έλεγχος σε γάστρα με ταχύτητα ρευστού U.

1.1.2.6 Αντίσταση λόγω αέρα (R_A).

Η αντίσταση του αέρα είναι επίσης μια συνιστώσα της συνολικής αντίστασης του πλοίου. Στην προσομοίωση του CFD ο αέρας είναι μία κατάσταση η οποία εξετάζεται, αλλά όταν έρχεται σε σύγκριση με την αντίσταση του νερού, μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα, γιατί η τιμή της είναι αρκετά μικρή.

Το λογισμικό STAR-CCM+ εξάγει τα αποτελέσματα της ‘αντίστασης τριβής R_F ’ και της ‘αντίσταση πίεσης R_p ’ κατευθείαν. Για τον υπολογισμό του συντελεστή αντίστασης ακολουθείτε μια διαδικασία η όποια αναφέρεται παρακάτω.

2.2 ITTC (International Towing Tank Conference).

Ο International Towing Tank Conference είναι μια εθελοντική ένωση παγκόσμιων οργανισμών που έχουν την ευθύνη για την πρόβλεψη των υδροδυναμικών επιδόσεων των πλοίων και των θαλάσσιων εγκαταστάσεων, με βάση τα αποτελέσματα φυσικών και αριθμητικών πειραμάτων.

Το στήσιμο της προσομοίωσης έγινε αυστηρά με τις προδιαγραφές που υποδεικνύει η ITTC και τα αποτελέσματα της συνολικής αντίστασης στην περίπτωση του straight ahead, συγκρίθηκαν με αποτελέσματα που παρέχει η «Tokyo Workshop 2015» από το συνέδριο που πραγματοποιήθηκε.

2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.

2.1 Υπολογιστική Ρευστομηχανική (CFD).

Η Υπολογιστική Ρευστομηχανική είναι μια προσέγγιση για την μελέτη των ρευστών η οποία γίνεται ολοένα και πιο δημοφιλής. Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιεί μια αριθμητική προσέγγιση για την επίλυση των μαθηματικών εξισώσεων που εμπλέκονται στη ροή. Τις περισσότερες φορές αυτές οι εξισώσεις έχουν την μορφή μερικών διαφορικών εξισώσεων. Τέτοια προβλήματα μπορεί να εμπεριέχουν απλά χαρακτηριστικά ροής ή μερικές φορές περίπλοκους παράγοντες όπως είναι η τύρβη και η ροή θερμότητας.

Με την πρόοδο των αριθμητικών μεθόδων, πλέον οι εξισώσεις ρευστοδυναμικής μπορούν να επιλυθούν αριθμητικά και αυτή η εξέλιξη έχει γίνει ευρέως γνωστή και χρησιμοποιούμενη λόγω της προόδου που γνωρίζει η υπολογιστική δύναμη στις μέρες μας.

Οι εφαρμογές της Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής ξεκίνησαν από τις αρχές του 1940, αλλά περιορίζονταν λόγω της πολύ μικρής υπολογιστικής δύναμης. Με βάση τις αρχές της Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής, η ύπαρξη περισσότερων στοιχείων μπορεί να επιτρέψει μία περισσότερο ακριβή λύση αλλά αυτό επιτυγχάνεται με αύξηση του υπολογιστικού χρόνου. Επίσης με την ενσωμάτωση ακριβών εξισώσεων της τυρβώδους ροής ή άλλων παραγόντων, ενισχύεται η πολυπλοκότητα με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο υπολογιστικός χρόνος ή και η αποτελεσματικότητα του κώδικα. Αυτός είναι ο λόγος που η Υπολογιστική Ρευστοδυναμική έχει συσταθεί πρόσφατα ως εναλλακτική λύση στην πειραματική δοκιμή και χρησιμοποιείται επίσης και για καθαρά θεωρητικούς υπολογισμούς. Χάρη στην πρόοδο της τεχνολογίας, μέσω μεθόδων όπως η Παράλληλη επεξεργασία, μπορεί να μειωθεί αρκετά ο υπολογιστικός χρόνος.

2.1.2 Πειραματική ρευστομηχανική (EFD).

EFD (experimental fluid dynamic), είναι η φυσική πειραματική μέθοδος και διαδικασία με την οποία επιλύονται προβλήματα ρευστοδυναμικής. Ποιο συγκεκριμένα για την επίτευξη μιας μελέτης EFD πρέπει να υπάρχουν κατάλληλες εγκαταστάσεις και εξοπλισμός. Οι μελέτες EFD διεξάγονται σε εργαστήρια στα οποία εδράζονται κατάλληλες πειραματικές δεξαμενές που είναι εξοπλισμένες με φαριά, δυναμόμετρα και αισθητήρες και κυματιστήρες, όπου πραγματοποιούνται τα πειράματα. Για την επίτευξη ενός πειράματος πέραν από την δεξαμενή και τον εξοπλισμό, χρειάζεται το μοντέλο του αντιστοίχου πλοίου, υπό μια κλίμακα η οποία εξαρτάτε από το μέγεθος της πειραματικής δεξαμενής. Έτσι το μοντέλο ρυμουλκείται μέσα στην πειραματική δεξαμενή και όντας τον προαπαιτούμενο εξοπλισμό διεξάγονται αποτελέσματα και τιμές από διάφορες μελέτες που έχει ορίσει ο χρήστης.

2.1.3 Σύγκριση CFD με EFD.

Η μέθοδος της Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής CFD έχει αρκετά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με την Πειραματική Ρευστομηχανική EFD. Το πρώτο σημείο στο οποίο υπερτερεί το CFD σε σύγκριση με το EFD είναι όσον αφορά τη σκοπιμότητα του σχεδιασμού και της ανάπτυξης. Αυτό σημαίνει πως πολλές μελέτες που πειραματικά μπορεί να απαιτούν χρόνο όσον αφορά την συλλογή δεδομένων, πολύπλοκη δειγματοληψία, αλλαγή συνθηκών ώστε να ταιριάζουν με τις συνθήκες ενδιαφέροντος, προσαρμογές στις σχεδιαστικές παραμέτρους ώστε να μελετούνται διακυμάνσεις των τιμών που μετρούνται κτλ. Είναι πολύ πιο εύκολα να επιτευχθούν σε προσομοιώσεις CFD και τις περισσότερες φορές δεν απαιτείται διαδικασία επανεκκίνησης της λύσης. Παρόλα αυτά, πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχουν και κάποιοι περιορισμοί όσον αφορά το CFD. Για παράδειγμα η ανομοιομορφία και οι αιφνίδιες αλλαγές αστάθεια στις λύσεις με αποτέλεσμα την αργή ή την καθόλου σύγκληση τους. Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της προσομοίωσης CFD σε σύγκριση με EFD είναι η διάρκεια και τα στοιχεία που μπορεί να σου παρέχει μια απλή προσομοίωση. Ένα άλλο πλεονέκτημα της υπολογιστικής ρευστομηχανικής που δίνει ένα σημαντικό προβάδισμα είναι οι εκτεταμένες προσομοιώσεις, είναι αρκετά αποδοτικές σε σύγκριση με την πειραματική εναλλακτική λύση. Οι υπολογιστικοί κώδικες οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την επίλυση εξισώσεων ρευστοδυναμικής, είναι συνήθως διαθέσιμοι και ακόμα και υπολογιστές με χαμηλές υπολογιστικές προδιαγραφές είναι ικανοί να παρέχουν ακριβή αποτελέσματα για πολύπλοκες προσομοιώσεις. Επιπλέον το κόστος για την διεξαγωγή απλών πειραμάτων (EFD) είναι αρκετά αυξημένο. Αυτός είναι ο λόγος που το CFD είναι αρκετά οικονομικά αποδεκτό και συνεπώς έχει καθιερωθεί ως μια ευρέως χρησιμοποιημένη προσέγγιση για υπολογισμούς ρευστοδυναμικής.

Παρόλα τα πλεονεκτήματα του CFD, θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι πειραματικές μέθοδοι εξακολουθούν να διαδραματίζουν ζωτικό ρόλο στον τομέα της έρευνας. Σε μια τεχνική CFD θα υπάρξει κάποιος βαθμός ανακρίβειας λόγω της στρογγυλοποίησης των σφαλμάτων, τα οποία θα πρέπει να διατηρούνται σε εξαιρετικά μικρό βαθμό. Στις αριθμητικές υπολογιστικές μεθόδους η σύγκληση αποτελεί βασικό πρόβλημα. Εντούτοις είναι αδύνατο να επιτευχθεί ένας ικανοποιητικός βαθμός σύγκλησης χωρίς μεγάλη απαίτηση σε υπολογιστικές δυνάμεις (πολλές φορές χρειάζεται και πειραματική επιβεβαίωση ώστε να εξασφαλιστεί ότι χρησιμοποιήθηκαν οι σωστές ρυθμίσεις και ότι ο κώδικας προγραμματισμού λειτούργησε όπως είχε προγραμματιστεί). Σε γενικές γραμμές, τα πλεονεκτήματα που αναφέρθηκαν παραπάνω, έχουν κάνει τις CFD μεθόδους να διαδραματίζουν ολοένα και σημαντικότερο ρόλο στην διαδικασία της έρευνας και της ανάπτυξης, παρέχοντας μία οικονομική πρακτική επιλογή για την επέκταση των αποτελεσμάτων μακριά από τα όρια των πειραματικών μεθόδων.

2.2 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΗΣ ΤΥΡΒΩΔΕΣ ΡΟΕΣ.

Οι περισσότερες ροές που συναντώνται στην φύση, αλλά και σε καθημερινές πρακτικές εφαρμογές είναι τυρβώδεις, όπως για παράδειγμα ο άνεμος και η κίνηση του νερού στους ποταμούς. Τα παραδείγματα αυτά μας δίνουν μια διαισθητική κατανόηση του φαινομένου της τύρβης. Η τύρβη, λοιπόν, δημιουργείται μέσω της αστάθειας που παρουσιάζεται στις στρωτές ροές σε αγωγούς, ανοικτούς και μη, λόγω αύξησης της ταχύτητας της ροής. Η αστάθεια αυτή οδηγεί σε ενίσχυση των διαταράξεων του ρευστού και κατ' επέκταση στο φαινόμενο της τύρβης. Οι διαταράξεις αυτές υπεισέρχονται στην ροή από την είσοδο του αγωγού ή από πιθανές ανωμαλίες που παρουσιάζουν τα τοιχώματα του.

Το ιξώδες (ή συνεκτικότητα) του ρευστού έχει να την τάση να εξομαλύνει τις διαταράξεις αυτές, καθώς οι τελευταίες κινούνται τα κατάντη της ροής και μάλιστα σε περιπτώσεις στρωτών ροών οι διαταράξεις αυτές τελικά εξαλείφονται. Ωστόσο, όσο αυξάνεται η ταχύτητα της ροής, οι αδρανειακές δυνάμεις υπερισχύουν των δυνάμεων ιξώδους, με αποτέλεσμα οι διαταράξεις αυτές όχι μόνο να μην μπορούν πλέον να εξαλειφθούν, αλλά σε πολλές περιπτώσεις να μεγεθύνονται κιόλας, οδηγώντας κατ' αυτόν τον τρόπο στην δημιουργία του φαινομένου της τύρβης.

Στην κλασική περίπτωση ροής σε κλειστό αγωγό, η αστάθεια που εμφανίζεται οδηγεί σε «κατάρρευση» της ροής Poiseuille και σε δημιουργία τυρβώδους μη παράλληλης ροής, όπου η κατανομή της ταχύτητας δεν έχει πλέον την τυπική παραβολική μορφή. Η φάση κατά την οποία συντελείτε η μεταβολή από στρωτή σε τυρβώδες ροή καλείται και μεταβατική φυσική.

Ο αριθμός Reynolds, $Re = VL/v$ όπου V η κλίμακα ταχύτητας, L η κλίμακα μήκους των στροβίλων και v το ιξώδες, είναι η παράμετρος που σε συνδυασμό με το μέγεθος και τον τύπο των διαταράξεων καθορίζουν την έναρξη τυρβώδους φάσεως της ροής. Για υψηλούς αριθμούς Reynolds η αστάθεια που προκαλείται στη ροή δεν είναι δυνατόν να εξαλειφθεί από το ιξώδες του ρευστού. Λόγω αυτής της αστάθειας που προκαλείται στην ροή δεν είναι δυνατόν να εξαλειφθεί από το ιξώδες του ρευστού. Λόγω αυτής της αστάθειας παράγονται στρόβιλοι μεγάλης κλίμακας και δημιουργείται το φαινόμενο της τύρβης. Οι στρόβιλοι αυτοί, καθότι πάλι είναι ασταθείς, προκαλούν την δημιουργία μικρότερων στροβίλων και οι τελευταίοι με την σειρά τους ακόμα μικρότερων, με τη διαδικασία αυτή έως ότου το ιξώδες του ρευστού γίνει και πάλι σημαντικό για της μικρότερες κλίμακες και οδηγήσει στην εξάλειψή τους. Η διαδικασία αυτή καταπτώσεως κατά την οποία στρόβιλοι μεγάλης κλίμακας εκφυλίζονται σε όλο και μικρότερης κλίμακας στροβίλους, συνεχίζεται ακατάπαυστα μέσα σε μια ροή υψηλού αριθμού Reynolds, αφαιρώντας με τον τρόπο αυτόν ενέργεια από τις μεγάλες κλίμακες και μεταβιβάζοντας σε την στις μικρότερες, μέχρις ότου η ενέργεια αυτή αναλωθεί από τη δράση του ιξώδους. Έτσι, η διαδικασία καταπτώσεως συνδέεται με μια μέση ροή ενέργειας από τις μεγαλύτερες προς τις μικρότερες κλίμακες και καταλήγει στην ανάλωση μηχανικής ενέργειας από το ιξώδες στις μικρότερες κλίμακες (μετατροπή σε θερμότητα).

Η τύρβη είναι εγγενώς τρισδιάστατη και η τυρβώδης ροή εμφανίζεται με τυχαία κατανομή τόσο στον χώρο, όσο και στον χρόνο και ως εκ τούτου δεν μπορεί να αναπαραχθεί επακριβώς πειραματικά. Παρόλα η εμπειρία δείχνει ότι οι τυρβώδεις ροές μπορούν να περιγραφούν από τις ίδιες δυναμικές εξισώσεις που περιγράφονται και οι στρωτές ροές, με τις κατάλληλες, βέβαια, προσαρμογές.

Η ανάπτυξη που ακολουθεί αφορά ασυμπίεστα, Νευτώνεια ρευστά, όπου η ταχύτητα και η πίεση περιγράφονται από τις εξισώσεις Navier – Stokes, που αποτελούνται από τις εξισώσεις της συνέχειας. Οι εξισώσεις αυτές μπορούν να γραφούν μορφή (Bernal and Wallace, 2002):

Εξίσωση συνέχειας :

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

Εξίσωση Ορμής :

$$\rho \left(\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (2)$$

Όπου U_i στιγμιαίες ταχύτητες και g_i το διάνυσμα της επιτάχυνσης της βαρύτητας που έχει τη μορφή (0,0, -g), εφ' όσον οι άξονες επιλεγούν με τέτοιο τρόπο ώστε οι x_1, x_2 , να αντιπροσωπεύουν το οριζόντιο επίπεδο και ο x_3 το θετικό προς τον άνω άξονα.

Ακόμη, είναι ο τάνυσης των τάσεων, που για ένα ασυμπίεστο ρευστό εκφράζεται από την καταστατική σχέση :

$$\sigma_{ij} = -P\delta_{ij} + d_{ij} \quad (3)$$

Όπου P η δυναμική πίεση και δ_{ij} το δέλτα του Kronecker που ορίζεται ως :

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{για } i = j \\ 0 & \text{για } i \neq j \end{cases} \quad (4)$$

Με

$$d_{ij} = 2 \mu e_{ij} \quad (5)$$

να είναι το διατμητικό τμήμα του τανυστή των τάσεων και

$$e_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \text{ για } i \neq j \quad (6)$$

Με την βοήθεια των προηγούμενων σχέσεων, η εξίσωση (2) μπορεί να γραφεί τώρα στη μορφή :

$$p \left(\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) + p g_i \quad (7)$$

Στην παρουσίαση που προηγήθηκε, οι εξισώσεις περιγράφηκαν με την χρήση του τανυστικού συμβολισμού και της σύμβασης του Einstein. Για την των ανωτέρων εξισώσεων πρέπει να ορίζονται κάθε φορά οι κατάλληλες αρχικές και συνοριακές συνθήκες.

2.2.1 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ REYNOLDS AVERAGED NAVIER – STOKES (RANS).

Γενικά, υπάρχει αδυναμία επίλυσης των εξισώσεων Navier- Stokes για τυρβώδεις ροές, εκτός αριθμητικών λύσεων για μικρούς αριθμούς Reynolds με την μέθοδο Direct Numerical Simulation (DNS). Για τον λόγο αυτό είναι αναγκαίο η μετατροπή των εξισώσεων Navier – Stokes σε εξισώσεις που να περιγράφουν τις μέσες τιμές των ποσοτήτων που ενδιαφέρουν. Ακολουθώντας, λοιπόν, την πρακτική που εισήγαγε ο Reynolds και εφαρμόζοντας την διαδικασία του μέσου όρου, οι εξισώσεις (1) και (2) παίρνουν την μορφή :

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (8)$$

$$p \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} - \overline{p u'_i u'_j} \right) \quad (9)$$

Να σημειωθεί ότι στην εξίσωση (9) έχει αμεληθεί ο όρος της δυνάμεως πεδίου ($p g_i$), καθότι αυτός δεν επηρεάζεται από τη διαδικασία εξαγωγής του μέσου όρου. Ακόμη, ο όρος $-\overline{p u'_i u'_j}$ που εμφανίζεται στην εξίσωση (9) είναι προϊόν της διαδικασίας υπολογισμού του μέσου όρου για το μεταγωγικό όρο $p U_j (\partial U_i / \partial x_j)$ της εξίσωσης (7). Οι εξισώσεις (8) και (9) αποτελούν της Reynolds Averaged Navier – Stokes (RANS) εξισώσεις.

Από την μορφή της εξίσωσης (9) είναι προφανές ότι ο όρος $-\overline{p u'_i u'_j}$ συμπεριφέρεται ως μια επιπλέον τάση που δρα στο πεδίο ροής, εκτός από την μέση τάση $\bar{\sigma}_{ij}$. Ο όρος αυτός της επιπρόσθετης τάσης ονομάζεται τανυστής των τάσεων Reynolds (ή τανυστής των τυρβωδών τάσεων) και στην συνέχεια, όπου απαιτείται συμβολίζεται ως εξής :

$$\sigma_{ij}^t = -\overline{p u'_i u'_j} \quad (10)$$

Στην πραγματικότητα, οι εξισώσεις (8) και (9) περιγράφουν τη ροή ενός «φανταστικού» ασυμπίεστου ρευστού που κινείται με ταχύτητα $\bar{U}_I (I = 1, 2, 3)$. Με τον όρο «φανταστικό» ερμηνεύεται το γεγονός ότι δεν υπάρχει πραγματικό ρευστό που να κινείται με την μέση ταχύτητα \bar{U}_I . Η κατάστρωση μιας εξίσωσης ορμής για το «φανταστικό» αυτό ρευστό πρέπει να συμπεριλαμβάνει δυο εσωτερικές δυνάμεις: μια που να προέρχεται από το μέσο τανυστή των τάσεων $\bar{\sigma}_{IJ}$ και μια άλλη που να προέρχεται από τον τανυστή των τάσεων Reynolds. Ως αποτέλεσμα, προκύπτει η εξίσωση (9), σε αντίθεση με την ισορροπία δυνάμεων για πραγματικό ρευστό που δίνει την εξίσωση (2). Πρέπει πάντως να επισημανθεί ότι εξαιτίας της προέλευσης των όρων $-\overline{p'U'_I U'_J}$ από τους μεταγωγικούς όρους του αριστερού σκέλους της εξίσωσης (2), οι όροι αυτοί αντιπροσωπεύουν στην πραγματικότητα μεταφορά τυρβώδους x_i – ορμής στη διεύθυνση x_j (ή και το αντίστροφο).

Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό RANS, εξισώσεις (8) και (9), συγκριτικά με τις εξισώσεις Navier – Stokes, εξισώσεις (1) και (7), είναι ότι οι πρώτες δεν αποτελούν ένα κλειστό σύστημα εξισώσεων, καθότι δεν υπάρχει μια ευθεία σχέση που να συνδέει τον τανυστή των τυρβών τάσεων σ_{ij}^t με τις μέσες τιμές ταχύτητας και πίεσης \bar{U}_I και \bar{P} , αντίστοιχα. Η εύρεση ενός τέτοιου << κλεισίματος>> των εξισώσεων RANS, μέσω ενός καταστατικού νόμου για τανυστή των τυρβωδών τάσεων σ_{ij}^t , έχει αποτελέσει και εξακολουθεί να αποτελεί τον κύριο στόχο των μοντέλων τύρβης (Δημητρακόπουλος, 2006).

2.3 ΜΟΝΤΕΛΑ ΤΥΡΒΗΣ

2.3.1 Η έννοια του τυρβώδους ιξώδους.

Το κυρίαρχο πρόβλημα που ανακύπτει από τις εξισώσεις RANS, εξισώσεις (8) και (9), στην προσομοίωση ροών και την ανάλυση ενός σημείου (one point modeling) είναι οι τάσεις Reynolds. Σε μια πρώτη πρακτική προσέγγιση προσομοίωσης των τυρβωδών αυτών τάσεων χρησιμοποιείται, έως και σήμερα, το παλαιότερο μοντέλο προσομοίωσης, το οποίο βασίζεται στην υπόθεση ότι όπως οι διατμητικές τάσεις λόγω ιξώδους στη στρωτή ροή, έτσι και οι τυρβώδεις τάσεις, ή αλλιώς τάσεις Reynolds, στην τυρβώδη ροή είναι ανάλογες των βαθμίδων της μέσης ταχύτητας. Η ιδέα αυτή αποδίδεται στον Boussinesq (Rodi, 1980) και μαθηματικά εκφράζεται με την παρακάτω εξίσωση :

$$-\overline{p'u'_I u'_J} = \rho \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_I}{\partial x_J} + \frac{\partial \bar{u}_J}{\partial x_I} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{IJ} \quad (11)$$

Όπου ν_t το τυρβώδες ιξώδες που, σε αντίθεση με το κινηματικό ιξώδες της στρωτής ροής ν , δεν αποτελεί ιδιότητα του ρευστού, αλλά εξαρτάται από την κατάσταση της τύρβης. Ως αποτέλεσμα, το ν_t μπορεί να διαφέρει σημαντικά από σημείο σε σημείο

ενός ροϊκού πεδίου, καθώς και διαφορετικά ροϊκά πεδία. Με k συμβολίζεται η τυρβώδης κινητική ενέργεια ανά μονάδα μάζας.

Η εξίσωση (11), λόγω της συμπεριφοράς του v_t που αναφέρθηκε παραπάνω, δεν αποτελεί η ίδια μια καταστατική σχέση για το πρόβλημα κλεισίματος της τύρβης, αλλά δίνει το πλαίσιο προς αυτή την κατεύθυνση, μετατοπίζοντας το πρόβλημα πλέον στον καθορισμό της κατανομής που ακολουθεί το v_t .

Εάν αντικατασταθεί η εξίσωση (11) στην εξίσωση (9) λαμβάνεται μια έκφραση της μορφής :

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial X_j} = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\bar{P} + \frac{2}{3} k \right) + \nu \frac{\partial^2 \bar{U}_i}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[v_t \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} \right) \right] \quad (12)$$

όπου αξίζει να σημειωθεί ότι ο δεύτερος όρος του δεξιού σκέλους της εξίσωσης (11) ενσωματώνεται στον όρο της πίεσης, με αποτέλεσμα η επίδραση της στατικής πίεσης να αντικαθιστάται στις εξισώσεις ορμής από τη φαινόμενη πίεση $\left(\bar{P} + \frac{2}{3} pk \right)$. Ως εκ τούτου, η διαδικασία επίλυσης των RANS εξισώσεων μπορεί να προχωρήσει χωρίς να απαιτείται ο προσδιορισμός της k , δεδομένου ότι σε στερεά όρια ή ελεύθερες επιφάνειες ισχύει ότι $k = 0$ και επομένως στις περιοχές αυτές μπορούν να προσδιοριστούν οι τιμές της \bar{P} .

Ωστόσο, ο υπολογισμός της \bar{P} σε εσωτερικά σημεία του ροϊκού πεδίου απαιτεί μια ξεχωριστή διαδικασία προσδιορισμού της k .

Η υπόθεση ότι η μοριακή κίνηση που διέπεται από το νόμο ιξώδους του Νεύτωνα και η τυρβώδης κίνηση είναι μεταξύ τους ανάλογες, γέννησε την ιδέα του τυρβώδους ιξώδους. Οι στρόβιλοι της τύρβης θεωρείται πως κινούν «πακέτα» ρευστού που, όπως ακριβώς και τα μόρια, συγκρούονται και ανταλλάσσουν ορμή. Το μοριακό ιξώδες είναι ανάλογο προς την μέση ταχύτητα και το «μέσο ελεύθερο δρόμο» των μορίων. Αντίστοιχα, το τυρβώδες ιξώδες θεωρείται ανάλογο της χαρακτηριστικής κλίμακας ταχύτητας και της χαρακτηριστικής κλίμακας μήκους των μεγάλων στροβίλων. Βέβαια, η αναλογία μεταξύ μοριακής και τυρβώδους κινήσεως δεν μπορεί να είναι απολύτως ορθή (Rodi, 1980), δεδομένου ότι αφενός οι στρόβιλοι δεν είναι άκαμπτα σώματα ώστε να διατηρούν την ταυτότητα τους, αφετέρου διότι οι μεγάλοι στρόβιλοι, που είναι υπεύθυνοι για τη μεταφορά ορμής, έχουν «διαδρομές» που δεν είναι μικρές συγκριτικά με το μέγεθος του ροϊκού πεδίου, όπως απαιτείται η αντίστοιχη θεωρία στο μοριακό επίπεδο. Ωστόσο και παρ' όλες τις προαναφερθείσες «αντιρρήσεις», η ιδέα του τυρβώδους ιξώδους δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα σε πρακτικές εφαρμογές, καθότι το v_t , όπως αυτό ορίζεται στην εξίσωση (11), μπορεί να προσδιοριστεί με ικανοποιητική ακρίβεια σε πολλές ροές. Στο σημείο αυτό επισημαίνεται ότι το τυρβώδες ιξώδες είναι ανάλογο της κλίμακας ταχύτητας u_L και της κλίμακας μήκους L που χαρακτηρίζουν τους μεγάλους στροβίλους, δηλαδή :

$$V_t \propto U_L L \quad (13)$$

καθώς και ότι ακριβώς αυτή η κατανομή των κλιμάκων ταχύτητας και μήκους είναι που δύναται να προσεγγίσουν ικανοποιητικά σε πολλές ροές.

Η ιδέα του τυρβώδους ιξώδους βρίσκει εφαρμογή με μεγάλη επιτυχία στην πρόβλεψη δισδιάστατων ροών τύπου οριακού στρώματος. Στην περίπτωση αυτή, η διατρητική τυρβώδης τάση που ενδιαφέρει είναι η $\tau = -\overline{p u' v'}$ και με τη βοήθεια της εξίσωσης (11) προκύπτει ότι :

$$\tau = \rho v_t \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \quad (14)$$

όπου u , v οι διακυμάνσεις της ταχύτητας κατά τη διαμήκη (x) και εγκάρσια (y) διεύθυνση της ροής, αντίστοιχα.

Όμως, ακόμα και σε αυτή την κατηγορία, σχετικά απλών, ροών η ιδέα του τυρβώδους ιξώδους είναι δυνατόν να αστοχήσει. Για παράδειγμα, σε φλέβες προσκολλημένες σε τοίχωμα ή σε ασύμμετρα στρώματα τοιχώματος (όπως αυτά που συναντώνται για ροές σε ορθογωνική διατομή και διαφορετική τραχύτητα σε κάθε τοίχωμα) υπάρχουν περιοχές της ροής όπου η διατμητική τάση και η βαθμίδα της ταχύτητας $\frac{\partial \bar{u}}{\partial y}$ έχουν αντίθετα πρόσημα. Στην περίπτωση αυτή, βάση τη εξίσωσης (14), απαιτείται το τυρβώδες ιξώδες v_t να παίρνει αρνητικές τιμές στις συγκεκριμένες περιοχές, γεγονός όμως που δεν ερμηνεύεται φυσικά από τη στιγμή που οι κλίμακες ταχύτητας και μήκους των μεγάλων στροβίλων είναι πάντοτε θετικές ποσότητες. Επιπλέον, σε ακόμη πολύπλοκες ροές από τις ροές τύπου οριακού στρώματος, περισσότερες από μία τυρβώδεις τάσεις είναι σημαντικές. Στην εξίσωση (11) το v_t έχει εισαχθεί ως ένα βαθμωτό και ισότροπο μέγεθος, δηλαδή ένα μέγεθος με την ίδια τιμή για όλες τις συνιστώσες του τανυστή των τυρβωδών τάσεων. Η θεώρηση αυτή είναι περιοριστική σε πολύπλοκες ροές. Συνεπώς, διαφορετικά τυρβώδη ιξώδη είναι αναγκαίο να εισάγονται για την περιγραφή των τυρβωδών τάσεων σε διαφορετικές διευθύνσεις, όπως συμβαίνει σε μεγάλα υδάτινα σώματα, όπου το v_t καθορίζεται διαφορετικά για την μεταφορά ορμής στην οριζόντια και την κατακόρυφη διεύθυνση.

Ωστόσο, παρά τους περιορισμούς και τις αστοχίες του, η ιδέα του τυρβώδους ιξώδους χρησιμοποιείται ευρύτατα και παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα σε πολλές πρακτικές εφαρμογές.

2.3.2 Μοντέλο μήκους αναμίξεως.

Το πρώτο μοντέλο που περιγράφει την κατανομή του τυρβώδους ιξώδους, και κατ' επέκταση, το πρώτο μοντέλο «κλεισίματος» της τύρβης, παρουσιάστηκε από τον Prandtl. Ο Prandtl υπέθεσε ότι το τυρβώδες ιξώδες περιγράφεται από μια εξίσωση της μορφής :

$$v_t = \hat{v} * l_m \quad (15)$$

όπου $\hat{\nu}$ το μέτρο διακύμανσης της ταχύτητας λόγω τύρβης και l_m το μήκος αναμίξεως.

Η έννοια του μήκους αναμίξεως είναι η ακόλουθη: Σε ροές τύπου οριακού στρώματος, όταν ένα «πακέτο» ρευστού ταξιδεύει με τη μέση ταχύτητα της θέσεως του, την ίδια στιγμή μετατοπίζεται, λόγω τύρβης, στην εγκάρσια διεύθυνση από ένα επίπεδο y_1 σε ένα επίπεδο y_2 . Κατά τη διάρκεια της μετατόπισης αυτής, η ταχύτητα του μεταξύ της αρχικής και της νέας θέσης διαφέρει κατά $\Delta U \cong (\partial \bar{U} / \partial y)(y_2 - y_1)$. Ως μήκος αναμίξεως ορίζεται τότε η απόσταση $(y_2 - y_1)$ όπου η $\Delta \bar{U}$ ισούται με τη μέση τιμή των εγκάρσιων διακυμάνσεων, δηλαδή με $\hat{\nu}$.

Ο Prandtl θεώρησε ροές τύπου οριακού στρώματος με μόνη σημαντική τυρβώδη τάση την \overline{uv} και βαθμίδα ταχύτητας $(\partial \bar{U} / \partial y)$. Βασισμένος στον ορισμό του μήκους αναμίξεως που αναφέρθηκε προηγουμένως εξέφρασε το $\hat{\nu}$ ως :

$$\hat{\nu} = l_m \left| \frac{\partial \bar{U}}{\partial y} \right| \quad (16)$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (15) και (16) προκύπτει το μοντέλο μήκους αναμίξεως του Prandtl :

$$v_t = l_m^2 \left| \frac{\partial \bar{U}}{\partial y} \right| \quad (17)$$

Η εξίσωση (17) περιγράφει το τυρβώδεις ιξώδες v_t ως συνάρτηση της τοπικής βαθμίδας της μέσης ταχύτητας με μόνη άγνωστη παράμετρο το μήκος αναμίξεως l_m . Το μοντέλο αυτό έχει χρησιμοποιηθεί με μεγάλη επιτυχία σε σχετικά απλές ροές, διότι το μήκος αναμίξεως l_m μπορεί να περιγραφεί σε πολλές περιπτώσεις μέσω απλών εξμπειρικών σχέσεων.

Αξίζει να σημειωθεί ότι το μοντέλο του μήκους αναμίξεως δεν παρουσιάζει καθόλου ικανοποιητική συμπεριφορά σε περιπτώσεις όπου εμφανίζονται καμπυλότητα στη ροή, αποκόλληση, μεγάλες βαθμίδες πίεσης ή απότομες αλλαγές στη διάτμηση. Σε τέτοιες περιπτώσεις, απαιτείται η χρήση εναλλακτικού μοντέλου για το «κλείσιμο» της τύρβης.

2.3.3 Μοντέλα μιας εξίσωσης.

Προκρινόμενου να ξεπεραστούν οι περιορισμοί που προκύπτουν από το μοντέλο του μήκους αναμίξεως, αναπτύχθηκαν άλλα μοντέλα «κλεισίματος» της τύρβης που λαμβάνουν υπόψη τους τη μεταφορά ποσοτήτων τύρβης, επιλύοντας τις διαφορικές εξισώσεις μεταφοράς για αυτές τις ποσότητες. Ένα σημαντικό βήμα στην κατεύθυνση αυτή ήταν ότι εγκαταλείφθηκε το σκεπτικό του απευθείας συσχετισμού της κλίμακας των διακυμάνσεων της ταχύτητας με τη βαθμίδα της μέσης ταχύτητας και υιοθετήθηκε ο προσδιορισμός της κλίμακας αυτής μέσα από μια εξίσωση μεταφοράς.

Εάν οι διακυμάνσεις της ταχύτητας είναι αναγκαίο να χαρακτηριστούν από μια κλίμακα, η κλίμακα με το μεγαλύτερο φυσικό νόημα είναι η ποσότητα \sqrt{k} , όπου k η τυρβώδης κινητική ενέργεια. Η ποσότητα k αποτελεί το μέτρο της έντασης των

τυρβωδών διακυμάνσεων στις τρεις διεύθυνσης. Από τη στιγμή όμως, που η τυρβώδης κινητική ενέργεια k περιέχεται κυρίως στους στροβίλους μεγάλης κλίμακας, σημαίνει ότι η ποσότητα \sqrt{k} αποτελεί να κλίμακα ταχύτητας για τους στροβίλους αυτούς. Έτσι, σύμφωνα με την εξίσωση (13), το τυρβώδες ιζώδες μπορεί να εκφραστεί ως:

$$v_t = c_\mu' \sqrt{kL} \quad (18)$$

όπου c_μ' εμπειρική σταθερά.

Η εξίσωση (18) αποτελεί το μοντέλο Kolmogorov – Prandtl. Επίσης έχει προταθεί, ακόμη, η επίλυση των εξισώσεων μεταφοράς της ποσότητας k για τον προσδιορισμό της κατανομής της. Η εξίσωση της τυρβώδους κινητικής ενέργειας μπορεί να γραφεί στην ακόλουθη μορφή :

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \Pi - \varepsilon + \nu \frac{\partial^2 k}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{p \bar{u}'_i}{\rho} + u'_i \frac{\overline{u'_j u'_j}}{2} \right) \quad (19)$$

όπου ο πρώτος όρος του δεξιού σκέλους αποτελεί τον όρο παραγωγής της τυρβώδους κινητικής ενέργειας :

$$\Pi = \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \quad (20)$$

Εάν αντικατασταθεί η εξ. (11) στην εξ. (21), τότε η τελευταία παίρνει την παρακάτω μορφή :

$$\Pi = v_t \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \quad (21)$$

Οι εξ.(19) και (21), δεν ενδείκνυνται για την προσομοίωση της μεταφοράς της ποσότητας k , καθότι στην πρώτη εξακολουθούν να υπάρχουν άγνωστες συσχετίσεις τυρβωδών διακυμάνσεων. Προκειμένου να ληφθεί ένα κλειστό σύστημα εξισώσεων, πρέπει οι όροι

$$\varepsilon \text{ και } \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{p \bar{u}'_i}{\rho} + u'_i \frac{\overline{u'_j u'_j}}{2} \right) \quad (22)$$

να περιγραφούν και αυτοί από μοντέλα.

Για την ανάλυση της τυρβώδης κινητικής ενέργειας ε χρησιμοποιείται η βασική ιδέα του Richardson περί κατάπτωσης της τυρβώδους κινητικής ενέργειας k , καθώς και το γεγονός ότι ο ρυθμός ανάλωσης καθορίζεται από την ,μεταφορά ενέργειας που λαμβάνει χώρα από τους μεγαλύτερους προς τους μικρότερους στροβίλους. Ισχύει ότι: $\varepsilon \sim u_-(L^3)/L$. Βάση των ανωτέρω η ποσότητα ε προσομοιώνεται ως εξής:

$$\varepsilon = c_D \frac{k^{3/2}}{L} \quad (23)$$

όπου c_D εμπειρικός συντελεστής.

Τέλος, ο τελευταίος όρος του δεξιού σκέλους της εξ.(19) και λόγω μια πιο φορμαλιστικής διαδικασίας προσομοίωσής του, μοντελοποιείται ως εξής :

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\overline{p u'_i}}{\rho} + \overline{u'_i \frac{u'_j u'_j}{2}} \right) = - \frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \quad (24)$$

όπου ο συντελεστής σ_k μπορεί να θεωρηθεί ως ένας τυρβώδης αριθμός Prandtl της ποσότητας k . Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (21), (23) και (24) στην εξίσωση (19), η τελευταία λαμβάνει την ακόλουθη μορφή :

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \overline{U_j} \frac{\partial k}{\partial x_j} = \Pi - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\nu \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] \quad (25)$$

Η εξίσωση (25) σε συνδυασμό με τις εξισώσεις (21), (23) και (24) αποτελούν τις σχέσεις που χρησιμοποιούν τα μοντέλα μιας εξίσωσης για την προσομοίωση της μεταφοράς της τυρβώδους κινητικής ενέργειας. Για τις σταθερές που περιέχονται στις παραπάνω εξισώσεις, λογικές προσεγγίσεις αποτελούν οι τιμές (Rodi, 1980):

$$c'_{\mu} = 1, c_D = 0.08 \text{ και } \sigma_k = 1$$

Προκειμένου το μοντέλο μιας εξίσωσης να είναι πλήρες, πρέπει να καθοριστεί η κλίμακα μήκους L των μεγάλων στροβίλων. Ακριβώς αυτός ο καθορισμός είναι που διακρίνει τα διάφορα μοντέλα μιας εξίσωσης μεταξύ τους. Στην πλειοψηφία αυτών, το μήκος L καθορίζει από απλές εμπειρικές εξισώσεις, όπως γινόταν και στο μοντέλο μήκους αναμίξεως. Ωστόσο, το μεγαλύτερο μειονέκτημα του συγκεκριμένου μοντέλου είναι η δυσκολία καθορισμού της κλίμακας L , ιδιαίτερα σε πολύπλοκες ροές. Αντιθέτως, σε απλές ροές τύπου οριακού στρώματος, διαπιστώνεται ότι τα μοντέλα μήκους αναμίξεως και μιας εξίσωσης αποδίδουν εξίσου καλά καθιστώντας έτσι τη χρήση του τελευταίου εξαιρετικά περιορισμένη.

2.3.4 Μοντέλα δυο εξισώσεων.

Η δυσκολία καθορισμού της κλίμακας μήκους L των μεγάλων στροβίλων, όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, οδήγησε κάποιους ερευνητές στην ανάπτυξη εναλλακτικών μοντέλων «κλεισίματος» της τύρβης. Τα αφενός υιοθετούν την ιδέα του τυρβώδους ιξώδους, αφετέρου είναι αυτόνομα ως προς την απαίτηση εξωτερικού προσδιορισμού της κλίμακας L , έχοντας μάλιστα την ικανότητα αυτόματης επιλογής της συγκεκριμένης κλίμακας.

2.3.4.1. Μοντέλο $k - \varepsilon$

Το μοντέλο $k - \varepsilon$ αποτελεί το δημοφιλέστερο μοντέλο της συγκεκριμένης κατηγορίας και βασίζεται στον συνδυασμό των εξισώσεων (9) και (23) για την απαλοιφή της

κλίμακας L. Ο συνδυασμός ατών εξισώσεων αυτών δίνει την παρακάτω σχέση για το τυρβώδες ιξώδες:

$$\nu_t = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (27)$$

Όπου $c_\mu = c'_\mu c_D$ εμπειρική σταθερά.

Εφ' όσον, η εξίσωση (26) αποτελεί τη βάση για το τυρβώδες ιξώδες, προκύπτει άμεσα η ανάγκη προσομοίωσης της μεταφοράς των ποσοτήτων k και ε. Για μια προσομοίωση της τυρβώδους κινητικής ενέργειας k χρησιμοποιείται η εξίσωση μεταφοράς που δόθηκε στην προηγούμενη ενότητα δηλαδή:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \overline{U}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \Pi - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\nu \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] \quad (25)$$

όπου

$$\Pi = \nu_t \frac{\partial \overline{U}_j}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \overline{U}_j}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{U}_j}{\partial x_i} \right) \quad (21)$$

Να σημειωθεί ότι η προσομοίωση της μεταφοράς του όρου ανάλωσης της τυρβώδους κινητικής ενέργειας ε, που περιέχεται στην εξίσωση (25), δεν περιγράφεται πλέον από μια αλγεβρική σχέση, καθότι αποτελεί τώρα μέρος του μοντέλου. Η διαδικασία μοντελοποίησης για την ποσότητα ε (Bernard and Wallace, 2002) απαιτεί περισσότερες παραδοχές συγκριτικά με την αντίστοιχη διαδικασία για την εξίσωση της k. Για τις ανάγκες της παρούσας ανάλυσης, παρουσιάζεται μόνο το τελικό αποτέλεσμα που προκύπτει από τη συγκεκριμένη διαδικασία. Έτσι, η εξίσωση μοντελοποιεί την ποσότητα ε είναι :

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \overline{U}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = c_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \Pi - c_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] \quad (27)$$

Συνοψίζοντας, το μοντέλο δύο εξισώσεων k- ε, χρησιμοποιώντας για το τυρβώδες ιξώδες την εξίσωση (26) και για τις ποσότητες k και ε τις εξισώσεις (21), (25) και (27), συμπληρώνει τις εξισώσεις RANS, εξισώσεις (8) και (9). Οι τιμές των εμπειρικών συντελεστών που καθορίζουν την κανονική (standard) μορφή του μοντέλου υπολογίστηκαν από τους Launder and Spalding (1972) και δίνονται στον πίνακα 1.

c_μ	$c_{\varepsilon 1}$	$c_{\varepsilon 2}$	σ_k	σ_ε
0.09	1.44	1.92	1.0	1.3

Πίνακας 1: Τιμές εμπειρικών συντελεστών στην κανονική μορφή του μοντέλου $k - \varepsilon$.

Οι τιμές των συντελεστών αυτών έχουν προκύψει είτε μέσω βελτιστοποίησης των αποτελεσμάτων του μοντέλου ύστερα από συγκρίσει από πειραματικές μετρήσεις, είτε λόγω απαίτησης συμφωνίας με πειραματικά αποτελέσματα από απλές περιπτώσεις ροών. Για την τιμή του συντελεστή c_μ λαμβάνεται υπόψη η συμπεριφορά διατμητικών ροών, όπου η τύρβη βρίσκεται σε κατάσταση τοπικής ισορροπίας. Τότε από την εξίσωση (25) προκύπτει ότι :

$$\Pi = \varepsilon \quad (28)$$

Για ροές τύπου οριακού στρώματος η εξίσωση (28) σε συνδυασμό με την εξίσωση (21) δίνουν :

$$v_t \left(\frac{\partial \bar{U}}{\partial Y} \right)^2 = \varepsilon \quad (29)$$

Όμως, αν η εξίσωση (29) συνδυαστεί με την εξίσωση (11) και (26), προκύπτει τελικά ότι:

$$c_\mu = \left(\frac{\overline{uv}}{k} \right)^2 \quad (30)$$

Σε τέτοιου τύπου ροές, πειραματικές μετρήσεις πλησίον του τοιχώματος έχουν δώσει τιμές $\overline{uv}/k \cong 0.3$, οπότε ο συντελεστής c_μ βάση της εξίσωσης (30) προκύπτει τελικά ίσος με $c_\mu = 0.09$.

Η τιμή του συντελεστή $c_{\varepsilon 2}$ βασίζεται σε πειραματικά δεδομένα για την αποδόμηση τύρβης πλέγματος, από τα οποία οι τιμές που προκύπτουν βρίσκονται στο διάστημα 1.8 έως 2.0.

Τέλος για ροές τοιχώματος και πλησίον αυτού ισχύουν τα εξής : (α) η διαμήκης ταχύτητα κατά την εγκάρσια διεύθυνση περιγράφεται από το λογαριθμικό νόμο και η διατμητική τάση είναι περίπου σταθερή, (β) η παραγωγή τυρβώδους κινητικής ενέργειας βρίσκεται σε ισορροπία με την ανάλωση, δηλαδή δεν υπάρχει μεταγωγική ούτε διαχυτική μεταφορά της ποσότητας k και (γ) δεν υπάρχει μεταγωγική μεταφορά της ανάλωσης, αλλά μόνο διαχυτική μεταφορά αυτής στην εγκάρσια διεύθυνση του τοιχώματος. Έτσι, για την τιμή του συντελεστή $c_{\varepsilon 1}$ και βάση της εξίσωσης (27) προκύπτει τελικά ότι :

$$c_{\varepsilon 1} = c_{\varepsilon 2} - \frac{k^2}{\sigma_\varepsilon \sqrt{c_\mu}} \quad (31)$$

Επομένως, η τιμή του $c_{\varepsilon 1}$ υπολογίζεται αφού προηγουμένως έχουν προσδιοριστεί οι τιμές των συντελεστών $c_{\varepsilon 2}$, σ_{ε} θεωρήθηκαν αρχικά ίσοι με την μονάδα και στην συνέχεια τόσο αυτοί, όσο και ο συντελεστής $c_{\varepsilon 2}$, βελτιστοποιήθηκαν μέσω συγκρίσεως με διάφορα πειραματικά δεδομένα για ελεύθερες διατμητικές ροές. Έχουν χρησιμοποιηθεί, ωστόσο, με ακόμα μεγαλύτερη επιτυχία και σε ροές τοιχώματος. Ανάλυση ευαισθησίας έχει δείξει ότι τα αποτελέσματα του μοντέλου $k - \varepsilon$ είναι περισσότερο ευαίσθητα στις τιμές των $c_{\varepsilon 1}$ και $c_{\varepsilon 2}$.

Αξίζει, ακόμη να σημειωθεί 'ότι οι τιμές του κανονικού (standard) μοντέλων δυο εξισώσεων $k - \varepsilon$ αποτελούν έναν συμβιβασμό. Για κάθε ειδικό πρόβλημα πιθανών η ακρίβεια να μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω μέσω αναπαραγωγής των τιμών των συντελεστών (Rodi, 1993 και Pope 2000). Έχει ωστόσο διαπιστωθεί ότι όταν $k - \varepsilon$ μοντέλα με αναπροσαρμοσμένους συντελεστές εφαρμόζονται σε ένα ευρύ φάσμα προβλημάτων, τότε τα αποτελέσματα τους είναι κατώτερα των αποτελεσμάτων του κανονικού μοντέλου.

2.3.5 Άλλα μοντέλα κλεισίματος τύρβης.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η ιδέα του τυρβώδους ιξώδους αστοχεί σε πολλές περιπτώσεις τυρβωδών ροών, αστοχία που δεν οφείλεται αποκλειστικά σε κακή επιλογή της τιμής του ν_t , αλλά στην εν γένει ακαταλληλότητα της ιδέας για τα συγκεκριμένα προβλήματα. Το γεγονός αυτό οδήγησε διάφορους ερευνητές στην προσπάθεια ανάπτυξης μοντέλων «κλεισίματος» της τύρβης που δεν στηρίζονται στην εξίσωση (11). Υπάρχουν τρεις για την βελτίωση της ικανότητας πρόβλεψης των τυρβωδών τάσεων.

Ο πρώτος αφορά την αναζήτηση εναλλακτικών σχέσεων, αντί των εξισώσεων (11), που να προσομοιώνουν καλύτερα την πραγματική μηχανική συμπεριφορά της τυρβώδους μεταφοράς. Στην περίπτωση αυτή, ιδιαίτερα προσοχή δίνεται στην κατανόηση των φυσικών μηχανισμών που διέπουν την τυρβώδη μεταφορά και την επινόηση καταστατικών σχέσεων που να την περιγράφουν κατάλληλα. Ως εκ τούτου, τα μοντέλα που προκύπτουν προσπαθούν να γενικεύσουν την γραμμική σχέση μεταξύ τάσεων και ρυθμού παραμορφώσεων και να συμπεριλαμβάνουν μη γραμμικά φαινόμενα. Τα μοντέλα αυτά είναι γνωστά ως μοντέλα μη γραμμικού τυρβώδους ιξώδους (non - linear eddy viscosity models).

Ο δεύτερος άξονας αφορά τον προσδιορισμό των τυρβωδών τάσεων (τάσεις Reynolds) μέσα από την επίλυση των διαφορικών εξισώσεων που τις διέπουν. Για τον σκοπό αυτό, απαιτείται η προσομοίωση των φυσικών μηχανισμών που καθορίζουν τη διατήρηση των τυρβωδών αυτών τάσεων.

Στενά με τις δύο προηγούμενες προσεγγίσεις είναι η Τρίτη, στην οποία οι όροι βαθμίδων στις διαφορικές εξισώσεις των τυρβωδών τάσεων απαλείφονται από προσεγγίσεις (αλγεβρικά μοντέλα) που μετατρέπουν τις διαφορικές αυτές εξισώσεις σε αλγεβρικές εκφράσεις. Τα μοντέλα που προκύπτουν με τον παραπάνω τρόπο ονομάζονται και μοντέλα αλγεβρικών τάσεων Reynolds.

Όλα τα παραπάνω πιθανά εναλλακτικά μοντέλα «κλεισίματος» της τύρβης δεν θα αναπτυχθούν περαιτέρω στην παρούσα εργασία. Διεξοδική ανάλυση τους μπορεί να αναζητηθεί σε συγγραφείς όπως οι Launder & Spalding (1997), Rodi (1993), Pope (2000), Matthew & Scott (2000), καθώς και σε άλλες κλασικές εργασίες που σχετίζονται με το φαινόμενο της τύρβης.

2.4 ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΕΓΚΙΣΗΣ ΤΗΣ ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ.

Η ανάλυση ροών με ελεύθερη επιφάνεια μέσω των τρισδιάστατων εξισώσεων RANS εξισώσεις (8) και (9), βρίσκει ιδιαίτερη εφαρμογή τα τελευταία χρόνια, ύστερα και από την ανάπτυξη των σύγχρονων ισχυρών υπολογιστών. Ωστόσο, όλα τα μοντέλα επίλυσης που χρησιμοποιούν τις εξισώσεις RANS αντιμετωπίζουν το πρόβλημα προσεγγίσεις της ελεύθερης επιφάνειας, η οποία αποτελεί ένα δευτερεύοντα άγνωστο στις εξισώσεις επίλυσης του προβλήματος. Για το λόγο αυτό, έχουν αναπτυχθεί αρκετές μέθοδοι αντιμετώπισης του προβλήματος της ελεύθερης επιφάνειας, οι οποίες σε συνδυασμό με τις εξισώσεις RANS, καταφέρνουν να δώσουν ολοκληρωμένες απαντήσεις στο πρόβλημα ροών του συγκεκριμένου τύπου.

Η αποτελεσματικότερη, πιθανόν, μέθοδος για την προσομοίωση προβλημάτων ελεύθερης επιφάνειας είναι η μέθοδος Volume of Fluid (VOF) των Hirt and Nicholls. Για της μεθόδου είναι απαραίτητα τρία πράγματα: (α) μια μεθοδολογία που να καθορίζει τη θέση της ελεύθερης επιφάνειας, (β) ένας αλγόριθμος που να παρακολουθεί την τελευταία ως μια κινούμενη διεπιφάνεια εντός του υπολογιστικού χώρου και (γ) ένα μέσο που να καθορίζει τις οριακές συνθήκες που επικρατούν σε αυτήν.

Η χρήση, ωστόσο, της μεθόδου VOF συνεπάγεται κάποιους περιορισμούς. Το υπολογιστικό πεδίο, το οποίο αποτελείται από διάφορες φάσεις (για παράδειγμα, αέρα – νερού), πρέπει να περιέχει πεπερασμένους όγκους που να είναι γεμάτοι με κάποια από τις δύο φάσεις ή με ένα συνδυασμό τους. Στη μέθοδο VOF δεν επιτρέπεται η ύπαρξη κενών περιοχών στο υπολογιστικό πεδίο, όπου καμία από τις δύο φάσεις ή ο συνδυασμός τους δεν θα είναι παρούσες. Ακόμη, η συγκεκριμένη μέθοδος απαιτεί η ροή να είναι ασυμπίεστη, ενώ δεν υπάρχει δυνατότητα μοντελοποίησης φαινομένων μεταφοράς θερμότητας.

Η μέθοδος VOF εφαρμόζεται για την προσομοίωση ροής σε ανοιχτό κανάλι, με τον ορισμό μίας ζώνης αέρα που τοποθετείται υπεράνω της αντίστοιχης ζώνης νερού. Στην είσοδο του καναλιού θεωρείται ξεχωριστή εισαγωγή αέρα και νερού, οι οποίες ως τόσο επιλύονται ταυτόχρονα, προκειμένου να γίνει πρόβλεψη της ελεύθερης επιφάνειας. Η συγκεκριμένη μέθοδος εφαρμόζεται και στο παρόν πρόβλημα ροής και αναλύεται πιο διεξοδικά στην παράγραφο που ακολουθεί.

2.5 ΜΕΘΟΔΟΣ VOLUME OF FLUID (VOF).

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην υπόθεση ότι δύο ή περισσότερα ρευστά δεν αναμιγνύονται μεταξύ τους. Για κάθε επιπλέον ρευστό εισάγεται μια νέα μεταβλητή που αντιπροσωπεύει το ποσοστό όγκου του σε κάθε στοιχειώδη όγκο του ροϊκού πεδίου. Ακόμη, σε κάθε στοιχειώδη όγκο του ροϊκού πεδίου, το άθροισμα των ποσοστών όγκου όλων των ρευστών ισούται με τη μονάδα. Όλες οι μεταβλητές και οι ιδιότητες σε κάθε στοιχειώδη όγκο αντιπροσωπεύουν μέσες τιμές, σύμφωνα με το ποσοστό όγκου κάθε ρευστού. Έτσι, εάν θεωρήσουμε ως α_q το ποσοστό όγκου ρευστού q που περιέχει στον στοιχειώδη όγκο, τότε αν $\alpha_q = 0$ ο στοιχειώδης όγκος είναι άδειος από το ρευστό q , αν $\alpha_q = 1$ είναι γεμάτος, ενώ αν $0 < \alpha_q < 1$ είναι μερικώς κατειλημμένος από το ρευστό q . Στην περίπτωση αυτή, η εξίσωση ορμής επιλύεται σε όλο το ροϊκό πεδίο και το πεδίο ταχυτήτων που προκύπτει διαμοιράζεται στις υπάρχουσες φάσεις. Η εξισώσεις ορμής εξαρτάται από τα ποσοστά όγκου των διαφόρων φάσεων, μέσω των ιδιοτήτων της πυκνότητας ρ και του ιξώδους μ των ρευστών.

Για το διαφασικό σύστημα (αέρα- νερό) που εξετάζεται και στο οποίο η φάση του αέρα θεωρείται κύρια και του νερού δευτερεύουσα, η πυκνότητα και το ιξώδες σε κάθε υπολογιστικό κελί δίνονται από τις εξισώσεις:

$$\rho = a_{water} * \rho_{water} + (1 - a_{water}) * \rho_{air} \quad (32)$$

$$\mu = a_{water} * \mu_{water} + (1 - a_{water}) * \mu_{air} \quad (33)$$

Με τον τρόπο αυτό, οι φυσικές ιδιότητες ρ και μ των ρευστών που περιέχονται στις εξισώσεις RANS αντικαθίστανται από τις εξισώσεις (32) και (33), οι οποίες αποτελούν ένα είδος μέσων τιμών των συγκεκριμένων ιδιοτήτων για το νερό και τον αέρα. Οι εξισώσεις RANS εν συνέχεια επιλύονται σε ολόκληρο το υπολογιστικό πεδίο.

Για τον προσδιορισμό της ελεύθερης επιφάνειας χρησιμοποιείται μια εξίσωση μεταφοράς του ποσοστού όγκου των ρευστών. Στην γενική περίπτωση ενός ρευστού q , η εξίσωση αυτή έχει την ακόλουθη μορφή :

$$\frac{\partial a_q}{\partial t} + \bar{U}_I \frac{\partial a_q}{\partial x_i} = 0 \quad (34)$$

Η εξίσωση (34) επιλύεται για κάθε ρευστό, εκτός εκείνου που ορίζεται ως κύριο. Για το κύριο ρευστό το ποσοστό όγκου υπολογίζεται με βάση τον ακόλουθο περιορισμό :

$$\sum_{q=1}^N a_q = 1 \quad (35)$$

2.6 ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΟΓΚΩΝ.

2.6.1 Γενικά στοιχεία για την μέθοδο.

Η μέθοδος διακριτοποίησης των πεπερασμένων όγκων αποτελεί την κύρια μέθοδο διακριτοποίησης για την επίλυση προβλημάτων υπολογιστικής ρευστομηχανικής. Κύριο πλεονέκτημα της εν λόγω μεθόδου, αποτελεί η δυνατότητα της για εφαρμογή σε κάθε τύπο πλέγματος, αλλά και σε πολύπλοκες γεωμετρίες. Εξ' ορισμού η μέθοδος αυτή είναι συντηρητική, εφ' όσον τα επιφανειακά ολοκληρώματα τα ίδια στις δύο πλευρές μιας διεπιφάνειας. Επιπρόσθετα, όλες οι μεταβλητές που υπολογίζονται έχουν φυσική σημασία, κάτι που συμβάλλει στην ευρεία χρήση της μεθόδου. Αντίθετα, κύριο μειονέκτημα της μεθόδου αποτελεί η δυσκολία στην ανάπτυξη σχημάτων μεγαλύτερης ακρίβειας από την μέθοδο διακριτοποίησης των πεπερασμένων στοιχείων για τρισδιάστατα μη-δομημένα πλέγματα. Παρόλα αυτά η μέθοδος διακριτοποίησης των πεπερασμένων όγκων αποτελεί μια ευρέως διαδεδομένη μέθοδο χωρικής διακριτοποίησης, η οποία ουσιαστικά μετατρέπει το πολύπλοκο σύστημα των διαφορικών εξισώσεων σε ένα επιλύσιμο σύστημα γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων.

Καταρχήν, σύμφωνα με αυτήν την μέθοδο. Ο χώρος ροής του ρευστού υποδιαιρείται σε ένα σύνολο όγκων, που καλούνται όγκοι αναφοράς ή όγκοι ελέγχου ή κυψέλες ελέγχου (Control Volumes, CV). Η διακριτοποίηση των μερικών διαφορικών εξισώσεων, που περιγράφουν τη ροή του ρευστού, πραγματοποιείται ολοκληρώνοντας τις εξισώσεις σε όγκους ελέγχου. Οι όγκοι ελέγχου περιέχουν τα διακριτά σημεία του πεδίου, στα οποία θα υπολογιστούν οι μεταβλητές επίλυσης, τα οποία καλούνται και υπολογιστικοί κόμβοι, δηλαδή το κέντρο κάθε όγκου αναφοράς αποτελεί και ένα διακριτό σημείο του πεδίου, στο οποίο θα υπολογιστούν οι τιμές των μεταβλητών του προβλήματος, όπως η πίεση, η ταχύτητα, η πυκνότητα, η θερμοκρασία κ.α.

2.6.2 Διακριτοποίηση και επίλυση εξισώσεων μεταφοράς.

Το πρόγραμμα STAR-CCM+ μετατρέπει μια βαθμωτή εξίσωση μεταφοράς σε αλγεβρική, που μπορεί να λυθεί αριθμητικά, χρησιμοποιώντας μια τεχνική βασισμένη στους όγκους ελέγχου. Η τεχνική αυτή συνιστάτε στην ολοκλήρωση της εξίσωσης μεταφοράς σε κάθε όγκο ελέγχου, αποδίδοντας με τον τρόπο αυτό μια διακριτή εξίσωση που εκφράζει το νόμο διατήρησης στη βάση ενός όγκου ελέγχου.

Η διακριτοποίηση των εξισώσεων του προβλήματος μπορεί να παρουσιαστεί ευκολότερα θεωρώντας την μη μόνιμη εξίσωση διατήρησης μεταφοράς ενός βαθμωτού μεγέθους Φ . Αυτό διακρίνεται στην επόμενη εξίσωση που είναι γραμμένη σε ολοκληρωτική μορφή για έναν όγκο V :

$$\int_V \frac{\partial \rho \Phi}{\partial t} dV + \oint \rho \Phi \vec{v} \cdot d\vec{A} = \oint \Gamma_\Phi \nabla \Phi \cdot d\vec{A} + \int_V S_\Phi dV \quad (36)$$

Όπου :

ρ : πυκνότητα.

\vec{v} : διάνυσμα ταχύτητας

\vec{A} : διάνυσμα επιφάνειας

Γ_Φ : συντελεστής διάχυσης μεγέθους Φ

$\nabla\Phi$: παράγωγος κατά κατεύθυνση ή βαθμίδα ή κλίση μεγέθους Φ

S_Φ : πηγή μεγέθους Φ ανά μονάδα όγκου

Η εξίσωση (36) εφαρμόζεται σε κάθε όγκο ελέγχου του υπολογιστικού πεδίου.

Ένα παράδειγμα εφαρμογής για έναν όγκο ελέγχου στις δύο διαστάσεις φαίνεται στο σχήμα 3.6.2.1, όπου απεικονίζεται ένα τριγωνομετρικό κελί. Η διακριτοποίηση της εξίσωσης (36) σε ένα τέτοιο κελί δίνει :

$$\frac{\partial \rho \Phi}{\partial t} V + \sum_f^{N_{\text{faces}}} \rho_f \vec{v}_f \Phi_f * \vec{A}_f = \sum_f^{N_{\text{faces}}} \Gamma_f \nabla \Phi_f * \vec{A}_f + S_\Phi V$$

(37)

όπου :

N_{faces} : αριθμός πλευρών στις (δύο διαστάσεις) ή εδρών στις (3 διαστάσεις) που περικλείουν το κελί

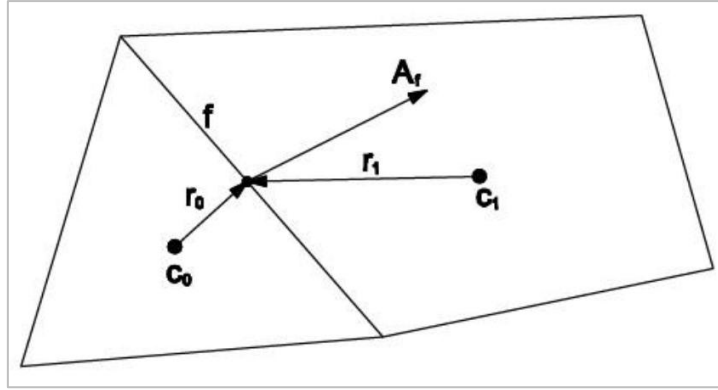
Φ_f : ποσότητα μεγέθους Φ που περνάει μέσα από την πλευρά

$\rho_f \vec{v}_f * \vec{A}_f$: ροή μάζας στη πλευρά

\vec{A}_f : επιφάνεια πλευράς

$\nabla \Phi_f$: παράγωγος κατά διεύθυνση μεγέθους Φ στη πλευρά

V : όγκος κελιού



Εικόνα 3.6.2.1 : Δύο γειτονικά κελιά σε ένα δισδιάστατο υπολογιστικό πεδίο και τα κέντρα τους c_0 και c_1 .

Στην συνέχεια το λογισμικό STAR-CCM+ επιλύει την διακριτοποιημένη εξίσωση μεταφοράς, εξίσωση (37), που περιέχει το άγνωστο βαθμωτό μέγεθος Φ στο κέντρο του κελιού, καθώς και τις άγνωστες τιμές του στα γειτονικά κελιά. Γενικά, η εξίσωση αυτή είναι μη - γραμμική ως προς της ανωτέρω μεταβλητές. Μια γραμμική μορφή της εξίσωσης (37) είναι η ακόλουθη :

$$a_p \Phi = \sum_{nb} a_{nb} \Phi_{nb} + b \quad (38)$$

Όπου a_p, a_{nb} είναι οι γραμμικοποιημένοι συντελεστές των μεγεθών Φ και Φ_{nb} , αντίστοιχα και η υπόστιξη nb αναφέρεται στα γειτονικά κελιά.

2.6.3 Διακριτοποίηση στον όγκο ρευστού.

Οι τιμές του βαθμωτού μεγέθους Φ που υπολογίζονται με την παραπάνω διαδικασία αποθηκεύονται εξ' ορισμού από το STAR-CCM+ στο κέντρο του κάθε κελιού. Ως τόσο, για τους όρους μεταφοράς, που στην εξίσωση (37) είναι οι όροι $\sum_f^{N_{faces}} \rho_f \vec{v}_f \Phi_f * \vec{A}_f$, πρέπει η τιμή του μεγέθους αυτού να είναι γνωστή στις πλευρές ή τις έδρες κάθε κελιού. Για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο, χρησιμοποιείται η μέθοδος της παρεμβολής, δηλαδή εφαρμόζεται ένα σχήμα όπου οι τιμές του μεγέθους Φ_f στις πλευρές προέρχονται από τις τιμές αυτού στο κέντρο των κελιών που βρίσκονται προς τα πάνω σχετικά με την διεύθυνση της ταχύτητας.

3. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται το μοντέλο το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση, το περιβάλλον του λογισμικού και οι διάφοροι παράμετροι που επιλέχθηκαν για την ολοκλήρωση της προσομοίωσης.

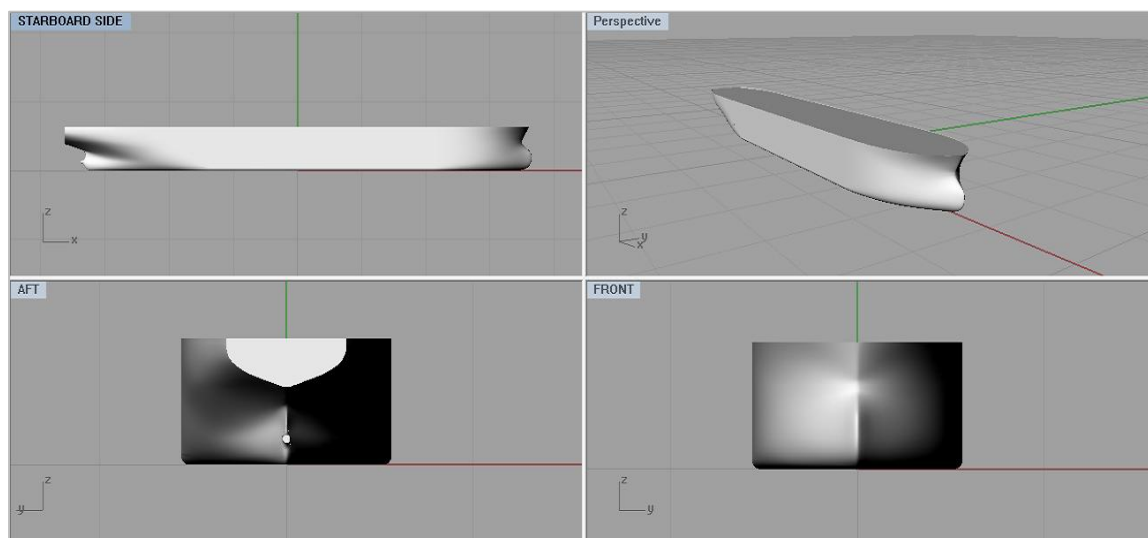
3.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.

Japan Bulk Carrier (JBC)

Το Japan Bulk Carrier είναι ένα φορτηγό πλοίο, τύπου χύδην φορτίου και είναι εξοπλισμένο με δακτύλιο προπέλας. Το Εθνικό Ινστιτούτο Θαλάσσιας Έρευνας (NMRI), Το εθνικό πανεπιστήμιο της YOKOHOMA και το ερευνητικό κέντρο κατασκευών πλοίων της Ιαπωνίας ασχολήθηκαν επί κοινού για την σχεδίαση της γάστρας του πηδαλίου και τον δακτύλιο της έλικας. Τα χαρακτηριστικά του σχήματος της γάστρας του JBC είναι τύπου παραδοσιακό εμπορικό πλοίο με βολβοειδή πλώρη και εξοπλισμένο με μονή έλικα.

Τα πειράματα ρυμούλκησης γίνονται στα πανεπιστήμια NMRI, SCR και OSACA τα οποία αποτελούνται από πειράματα πρόωσης, αντίστασης και μετρήσεων πρυμναίων πεδίων ροής (PIV). Ο σχεδιασμός της γάστρας και οι μετρήσεις διεξάχθηκαν με την στήριξη της κλάσης NK, για την στήριξη της κοινής έρευνας και ανάπτυξης. Ωστόσο μέχρι στιγμής δεν υπάρχει πλήρες σκάφος.

Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται το μοντέλο JBC σε τέσσερις διαφορετικές όψεις.



Εικόνα 3.1.1 : Μοντέλο JBC.

Στην τρέχων CFD προσομοίωση, προσομοιώθηκε το μοντέλο JBC (Japan Bulk Carrier) με γυμνή γάστρα, δηλαδή χωρίς τα παρελκόμενα της γάστρας (πηδάλιο, προπέλα, δακτύλιο προπέλας). Οι γραμμές της γάστρας προσφέρονται από το “ Tokyo 2015 – A Workshop on CFD in Ship Hydrodynamics”. Τα αρχεία είναι της μορφής .IGS υπό κλίμακα 1:40.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα κύρια χαρακτηριστικά του πλοίου.

Πίνακας 3.1.1 : Χαρακτηριστικά μοντέλου.

Japan Bulk Carrier		Full Scale	Model Scale 1:40	
Length Between Perpendiculars	LBP	280	7	m
Length of Waterline	LWL	285	7.125	m
Beam	B	45	1.125	m
Depth	D	25	0.625	m
Draft	T	16.5	0.4125	m
Displacement Volume		178370	2.78703	(m ³)
Midship section coefficient	(CM)	0.9981	0.9981	
Froude number	Fn	0.142	0.142	
Design Speed	V _{design}	14.5	2.29	(knots)
Design Speed	V _{design}	7.4588	1.17943	(m/s)

3.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΟΥ STRAIGHT AHEAD.

Αρχικά, πριν την εκτέλεση της προσομοίωσης πρέπει να γίνει μια προκαταρκτική εισαγωγή των παραμέτρων στο περιβάλλον του λογισμικού. Παρακάτω αναφέρεται η σειρά της δομής του περιβάλλοντος και εν συνεχεία οι παράμετροι, οι κύριες ρυθμίσεις και ο αναλυτικός τρόπος με τον οποίο στήθηκε η συγκεκριμένη προσομοίωση.

3.2.1 Κύριοι τομείς

1. Δημιουργία πλέγματος.
 - 1.1. Εισαγωγή της γεωμετρίας.
 - 1.2. Δημιουργία του towing tank
 - 1.3. Διαχωρισμός των περιοχών του towing tank και δήλωση απαραίτητων στοιχείων.
 - 1.4. Επιλογή των κύριων χαρακτηριστικών του πλέγματος.
 - 1.5. Καθορισμός των κύριων ρυθμίσεων του πλέγματος.
 - 1.6. Δημιουργία τοπικού ογκομετρικού πλέγματος, σε κρίσιμα σημεία εστίασης.
 - 1.7. Ορισμός των τύπων επιφανειών του towing tank .
 - 1.8. Δημιουργία του πλέγματος.

2. Εισαγωγή των αριθμητικών και των φυσικών παραμέτρων.
 - 2.1. Επιλογή των φυσικών μοντέλων.
 - 2.2. Ορισμός της μεθόδου Euler (δύο φάσεων νερό-αέρα).
 - 2.3. Δήλωση της ταχύτητας νερού, αέρα και το επίπεδο του ρευστού (βύθισμα).
 - 2.4. Ρύθμιση των αρχικών συνθηκών.
 - 2.5. Καθορισμός της απόστασης για την απόσβεση των κυμάτων.
 - 2.6. Δήλωση οριακών συνθηκών.
 - 2.7. Ορισμός παραμέτρων επίλυσης.

3. Απεικόνιση και ανάλυση δεδομένων
 - 3.1. Απεικόνιση ελεύθερης επιφάνειας.
 - 3.2. Απεικόνιση του μοτίβου κύματος (Kelvin).
 - 3.3. Διάγραμμα σύγκλισης των αντιστάσεων.
 - 3.4. Διάγραμμα συγκλήσεις σε συνάρτηση του χρόνου.

3.3 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΤΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ.

3.3.1 Εισαγωγή της γάστρας.

Το πρώτο βήμα για την εκκίνηση της διαδικασίας είναι η εισαγωγή της γεωμετρίας. Εφόσον εισαχθεί η γεωμετρία στην προαπαιτούμενη διάσταση, πρέπει να γίνουν κάποιοι έλεγχοι σχετικά με την ποιότητα της γεωμετρίας. Το λογισμικό star-csm+ παρέχει την λειτουργία αυτήν και είναι αναγκαίως ο έλεγχος για την πρόληψη και αποφυγή προβλημάτων. Εάν η γεωμετρία κριθεί ακατάλληλη από το πρόγραμμα, το πρόγραμμα εντοπίζει και εμφανίζει τις ατέλειες. Επίσης, το λογισμικό παρέχει την δυνατότητα επισκευής, αλλά δεν συνιστάται εάν οι ατέλειες είναι μεγάλου βαθμού, τύπου κενά και τρύπες. Συνήθως τα μοντέλα είναι παραμετρικής σχεδίασης και κατά την εκτέλεση της εντολής ‘επισκευή’ η γεωμετρία παραμορφώνεται. Στην παρούσα μελέτη για την συνολική αντίσταση προσομοιώθηκε η μισή γάστρα, αφού η κίνηση του straight ahead είναι συμμετρική ως προς τους άξονες.

3.3.2 Δημιουργία του Towing Tank.

Towing Tank, είναι μια εικονική δεξαμενή η οποία λειτουργεί ως το χωρίον του περιβάλλοντος και δημιουργείται για την επίλυση της προσομοίωσης. Αρχικά, πρέπει να γίνει μια προμελέτη της κατασκευής του towing tank σχετικά με τις διαστάσεις. Τα τοιχώματα πρέπει να εδράζονται σε συγκεκριμένη απόσταση από την γεωμετρία της γάστρας με την προϋπόθεση να μην υπάρχουν τυχόν παρενέργειες στα αποτελέσματα. Πιο συγκεκριμένα, τα όρια οριοθέτησης των τοιχωμάτων πρέπει να τοποθετηθούν σε μεγάλη απόσταση από την γάστρα για την ελαχιστοποίηση παρουσιάσεις τυχόν προβλημάτων, αλλά και για την επίτευξη της καλής απεικόνισης των κυματισμών. Ωστόσο η απόσταση πρέπει να είναι εντός λογικής γιατί η δημιουργία ενός μεγάλου towing tank συνεπάγεται με σημαντική αύξηση κελιών όπου αυτό οδηγεί σε πολλαπλούς υπολογισμούς όπου προαπαιτείται η ύπαρξη αρκετού υπολογιστικού χώρου και χρόνος.

Η επιλογή των αποστάσεων στο συγκεκριμένο Towing tank έγιναν μέσα από έναν οδηγό ο οποίος παρέχει σημαντικές πληροφορίες για CFD πλοίων και παρέχεται από τον οργανισμό ITTC (International Towing Tank Conference).

Στη συνέχεια πρέπει να γίνει ο διαχωρισμός σε κάθε επιφάνεια για να οριστούν οι συνοριακές συνθήκες.

Patch	Part Surface Name
726	Symmetry
727	Outlet
728	Side
729	Bottom

Εικόνα 3.3.2.1 : Διαχωρισμός επιφανειών Towing Tank.

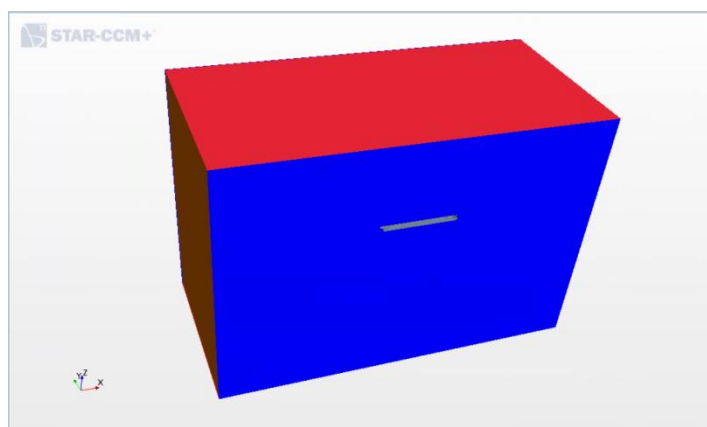
Παρακάτω φαίνεται ένας πίνακας ο οποίος περιέχει τις ακριβείς διαστάσεις του Towing Tank σε Model scale 1:40.

Πίνακας 3.3.2.1 : Διαστάσεις Towing Tank.

Towing Tank- boundaries	JBC	
	Model Scale 1/40	
Front (front of ship)	18.00	m
After (After shhip)	-18.00	m
Side (Port side)	18.00	m
side (Starboart side)	0.00	m
Top (After deck)	9.00	m
Bottom(from ship bottom)	-18.00	m

3.3.3 Διαχωρισμός των περιοχών του towing tank και δήλωση απαραίτητων στοιχείων.

Πριν την παραγωγή του πλέγματος μέσα στο towing tank πρόχει ο διαχωρισμός των επιφανειών του. Αρχικά επιλέγουμε την επιλογή δημιουργία περιοχής για κάθε τμήμα, στη συνέχεια δημιουργία ορίων για κάθε μια επιφάνεια και τέλος την επιλογή μη δημιουργίας διεπαφών μεταξύ των επιφανειών. Είναι σημαντικό τα τμήματα της δεξαμενής να μην διεπαφούν γιατί το καθένα λειτουργεί ως μια διακριτή οντότητα που μπορεί να επιτελέσει ένα σύνολο λειτουργιών.



Εικόνα 3.3.3.1: Virtual Towing Tank.

Όπως φαίνεται και στην εικόνα έχει δημιουργηθεί το Towing Tank, οι επιφάνειες του ξεχωρίζουν (έχουν διαφορετικό χρώμα) και η γεωμετρία έχει κοπεί στην μέση κατά το διάμηκες όπως επιθυμείται, αφού θα τρέξει η μισή γάστρα. Επίσης, ότι είναι εκτός του Towing Tang δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα.

3.3.3 Επιλογή των κύριων χαρακτηριστικών του πλέγματος.

Το πλέγμα υπολογισμού είναι μια διακριτή γεωμετρική αναπαράσταση που επιλύει προβλήματα ροής ρευστών, μεταφοράς μάζας και θερμότητας, χημικές αντιδράσεις και άλλα σχετικά φαινόμενα, μέσω της επίλυσης του συστήματος εξισώσεων που τα διέπει. Το πρόγραμμα STAR-CCM+ χρησιμοποιεί την μέθοδο πεπερασμένων όγκων για την επίλυση των εξισώσεων που διέπουν ένα πρόβλημα. Με την μέθοδο αυτή το υπολογιστικό πεδίο, που στην περίπτωση μας αποτελείται από δύο ρευστά (νερό και αέρα) και από το σώμα της γάστρας, διακριτοποιείται σε ένα σύνολο από πεπερασμένους όγκους ελέγχου στους οποίους επιλύονται οι εξισώσεις που περιγράφουν το πρόβλημα. Το σύνολο αυτών των πεπερασμένων όγκων που έχει δημιουργηθεί για την διακριτοποίηση της γεωμετρίας του προβλήματος ονομάζεται πλέγμα (mesh ή grid) και πρέπει να είναι κατάλληλο ώστε με το πέρας της προσομοίωσης να προκύπτουν σωστά αποτελέσματα.

Η αύξηση του αριθμού των κελιών του πλέγματος βελτιώνει την ακρίβεια της μεθόδου, αλλά ταυτόχρονα αυξάνει και τον απαιτούμενο υπολογιστικό χρόνο, γεγονός ανεπιθύμητο. Για τον λόγο αυτό επιλέγεται η πυκνωση του πλέγματος σε συγκεκριμένες περιοχές της γεωμετρίας, όπου εμφανίζονται μεγάλες μεταβολές της ταχύτητας, της πίεσης της θερμοκρασίας ή άλλων παραμέτρων που χαρακτηρίζουν ένα πρόβλημα. Επίσης, τα κελία του πλέγματος θα πρέπει να πληρούν κάποια κριτήρια σχεδίασης για να εξασφαλίσουν την ποιότητα. Υπάρχουν διάφοροι τύποι κελιών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν όπως τα : τετράπλευρα, εξάεδρα, πυραμίδας και πρισματικά. Τα πιο σύνηθες είναι τα κελιά τύπου εξάεδρα το οποίο απεικονίζεται παρακάτω :



Εικόνα 3.3.3.1 : εξάεδρο κελί πλέγματος.

Η τεχνική που επιλέχθηκε σε αυτήν την προσομοίωση για την δομή των κελιών του πλέγματος ονομάζεται Automated Mesh και χαρακτηρίζεται από την χρησιμοποίηση πυκνού πλέγματος κοντά στα τοιχώματα της γεωμετρίας και πιο αραιά μακριά από αυτά. Επιπροσθέτως, παρέχει την πιο βέλτιστη διαδρομή για τον σχηματισμό του πλέγματος σε περίπλοκες γεωμετρίες, δημιουργεί είτε πολυεδρικά είτε εξάεδρα κελιά με το πάτημα μια εντολής που προσφέρει ένα συνδυασμό ταχύτητας, ελέγχου και ακρίβειας.

Πριν την παραγωγή του πλέγματος λοιπόν, πρέπει να καθοριστούν τα προαπαιτούμενα χαρακτηριστικά του πλέγματος που θα χρησιμοποιηθούν για την επίλυση της συγκεκριμένη προσομοίωση και τον χώρο στον οποίο θα δημιουργηθεί το πλέγμα, όπου στην προκειμένη περίπτωση είναι το towing tank.

Group	Mesher
<i>Surface Meshers</i>	Surface Remesher
<i>Optional Surface Meshers</i>	Automatic Surface Repair
<i>Core Volume Meshers</i>	Trimmed Cell Mesher
<i>Optional Boundary Layer Meshers</i>	Prism Layer Mesher

Εικόνα 3.3.3.2 : Χαρακτηριστικά του πλέγματος.

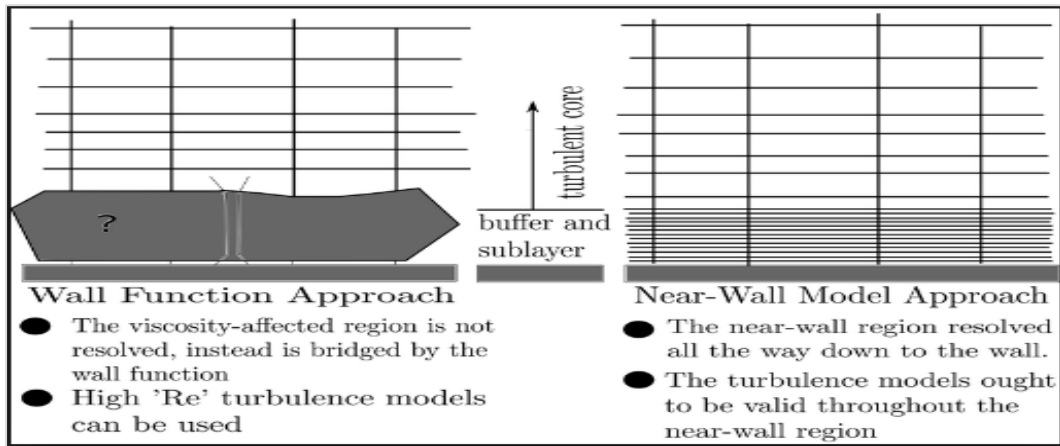
3.3.4 Καθορισμός των κύριων ρυθμίσεων του πλέγματος.

Εφόσον έχει επιλεγθεί ο τύπος του πλέγματος, μετέπειτα ακολουθείται η διαδικασία οριστικοποίησης των παραμέτρων του πλέγματος. Συνήθως οι αναλύσεις της αντίστασης εκτελούνται με την χρήση των μοντέλων trimmed volume mesh και prism layer. Η χρήση trimmed cells σημαίνει ότι το πλέγμα είναι ευθυγραμμισμένο με την ελεύθερη επιφάνεια. Ενώ το πλέγμα prism layer έχει την δυνατότητα να προσομοιώνει με ακρίβεια την δύνη και την μεταφορά θερμότητας.

Ένα σημαντικό μέρος της δημιουργίας πλέγματος για ακριβή προσομοίωση CFD είναι η περιοχή κοντά στο τοίχωμα ή η επίστρωση εξώθησης. Το STAR-CMM+ παράγει αυτόματα ένα στρώμα πλέγματος εξώθησης υψηλής ποιότητας σε όλους τους τοίχους που έχουν δηλωθεί, στην προκειμένη περίπτωση στο JBC _ geometry. Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα έλεγχου της θέσης, του μεγέθους, της ταχύτητας ανάπτυξης και του αριθμού των επιπέδων επίστρωσης.

Γνωρίζουμε ότι μια ροή παράλληλα προς ένα τοίχωμα χαρακτηρίζεται από ένα λεπτό οριακό στρώμα παράλληλα στο τοίχωμα. Μέσα στο οριακό στρώμα η ταχύτητα του ρευστού που ρέει παράλληλα προς το τοίχωμα μεταβάλλεται από την τιμή της ταχύτητας του ρευστού που είναι έξω από το οριακό στρώμα στην τιμή μηδέν που επιβάλλει η φυσική οριακή συνθήκη πάνω στο τοίχωμα. Το ρευστό που βρίσκεται μέσα στο οριακό στρώμα κινείται βραδύτερα από ότι το ρευστό εκτός οριακού στρώματος. Κατά συνέπεια το οριακό στρώμα χαρακτηρίζεται από ελαττωμένη ροή μάζας και ελαττωμένη ροή ορμής. Αυτό σημαίνει ότι όσο η ροή του ρευστού πλησιάζει το τοίχωμα (την επιφάνεια της γάστρας) ο Reynolds θα είναι πολύ χαμηλός και θα υπάρξει στρωτή ροή. Στο κελί της προσομοίωσης όμως, υποθέτουμε ότι η ροή είναι 100% τυρβώδης.

Η μέθοδος της πυκνώσης κοντά στην επιφάνεια είναι μια μέθοδος τροποποίησης των μοντέλων τύρβης που επιτρέπει την ύπαρξη του ιξώδους σε όλη την περιοχή και επιλύεται μέσω του πλέγματος. Αυτή η προσέγγιση είναι ικανή να επιλύσει την ροή με μεγάλη ακρίβεια, χωρίς την χρήση εμπειρικών μοντέλων. Το μόνο μειονέκτημα είναι ότι αυξάνεται ο αριθμός των κελιών και ο χρόνος υπολογισμού. Τα μοντέλα τύρβης θα πρέπει να ισχύουν σε όλη την επιφάνεια του τοιχώματος όπως απεικονίζονται στην εικόνα παρακάτω.



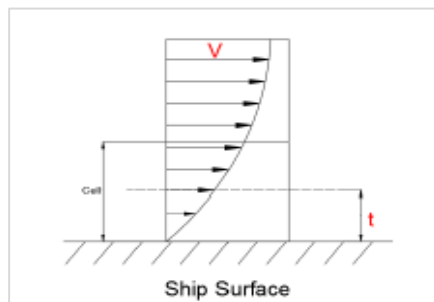
Εικόνα 3.3.4.1 : Απεικόνιση υψηλής πυκνώσης περιμετρικά της επιφάνειας.

3.3.4.1 Αριθμός y^+

Μετά την μέθοδο near wall treatment, είναι απαραίτητη η κατανόηση του Y^+ . Το Y^+ είναι ειδική τιμή που μας παρέχει την αξιοπιστία ότι το πλέγμα περιμετρικά της γάστρας θα μας παρέχει ακριβή αποτελέσματα. Ο αριθμός Y^+ ορίζεται ως ο αριθμός Reynolds, η εξίσωση είναι :

$$Y^+ = \frac{vt}{\gamma} \quad (39)$$

Όπου v είναι η ταχύτητα του τοπικού κελιού και t η απόσταση από το κέντρο του κελιού έως την επιφάνεια της γάστρας. Η εικόνα 4.3.4.1.1 βοηθάει στην κατανόηση του αριθμού Y^+ .



Εικόνα 3.3.4.1.1 : Y^+ .

Γενικά, ο αριθμός Y^+ πρέπει να διατηρείται στην τιμή από 30 έως 500 για την επίτευξη της υψηλής ακρίβειας των αποτελεσμάτων.

3.3.4.2 Prism Layer.

Prism Layer, είναι ο τρόπος με τον οποίο μειώνεται ο αριθμός Y^+ , περιμετρικά της γάστρας. Είναι επίπεδα υψηλού πάχους του πλέγματος. Η εξίσωση του ολικού πάχους είναι :

$$h_w = 2y = \frac{y^+}{LRe \sqrt{\frac{Cf}{2}}} \quad (40)$$

Επίσης αξίζει να σημειωθεί ότι, σε κανονική κλίμακα ο αριθμός Re μικραίνει και η ταχύτητα του ρευστού κοντά στην γάστρα αυξάνεται δραματικά, για την εξαγωγή ακριβών αποτελεσμάτων απαιτείται αύξηση των κελιών στην κοντινή περιοχή της γάστρας.

Ρύθμιση της προσαρμογής του Prism Layer mesher :

Node	Property	Setting
Prism Layer Mesher	Minimum Thickness Percentage	1.0
	Boundary March Angle	75.0

Εικόνα 3.3.4.2.1 : Ρυθμίσεις Prism layer.

3.3.4.3 Γενικές ρυθμίσεις πλέγματος.

Προσδιορισμός της γενικής μορφής του πλέγματος :

Node	Property	Setting
Base Size	Value	0.1125 m
Target Surface Size > Relative Size	Percentage of Base	50
Minimum Surface Size > Relative Size	Percentage of Base	6.25
Surface Curvature > Basic Curvature	# Pts./circle	36
Auto-Repair Minimum Proximity >	Minimum Proximity	0.001
Number of Prism Layers	Number of Prism Layers	6
Prism Layer Total Thickness	Size Type	Absolute
└ Absolute Size	Value	0.02 m
Volume Growth Rate	Default Growth Rate	Slow
	Surface Growth Rate	Slow
Maximum Cell Size > Relative Size	Percentage of Base	1600

Εικόνα 3.3.4.3.1 : Γενικές ρυθμίσεις του πλέγματος.

Επιπροσθέτως, πρέπει να οριστούν οι παράμετροι των πλεγμάτων που θα χρησιμοποιηθούν για την πύκνωση των κρίσιμων σημείων.

Για τον προσδιορισμό του τοπικού πλέγματος :

Node	Property	Setting
Hull	Part Surfaces	[Virtual Towing Tank.KCS_Geometry.Hull]
└ Controls		
└ Prism Layers	Prism Layers	Use Parent Values
└ Values		
└ Target Surface Size > Relative Size	Percentage of Base	25
└ Minimum Surface Size > Relative Size	Percentage of Base	25

Εικόνα 3.3.4.3.2 : Ρυθμίσεις τοπικού πλέγματος Deck.

Node	Property	Setting
Deck	Part Surfaces	[Virtual Towing Tank.KCS_Geometry.Deck]
└ Controls		
└ Target Surface Size	Target Surface Size	Specify Custom Value
└ Minimum Surface Size	Minimum Surface Size	Specify Custom Value
└ Prism Layers	Prism Layers	Disable
└ Values		
└ Target Surface Size > Relative Size	Percentage of Base	200
└ Minimum Surface Size > Relative Size	Percentage of Base	100

Εικόνα 3.3.4.3.3: Ρυθμίσεις τοπικού πλέγματος Hull.

Node	Property	Setting
Tank	Part Surfaces	[Virtual Towing Tank.Tank.Bottom,Virtual Towing Tank.Tank.Inlet,Virtual Towing Tank.Tank.Outlet,Virtual Towing Tank.Tank.Side,Virtual Towing Tank.Tank.Symmetry,Virtual Towing Tank.Tank.Top]
└ Controls		
└ Target Surface Size	Target Surface Size	Specify Custom Value
└ Minimum Surface Size	Minimum Surface Size	Specify Custom Value
└ Values		
└ Target Surface Size > Relative Size	Percentage of Base	1600
└ Minimum Surface Size > Relative Size	Percentage of Base	1600

Εικόνα 3.3.4.3.4 : Ρύθμιση πλέγματος σε όλο το Towing Tank.

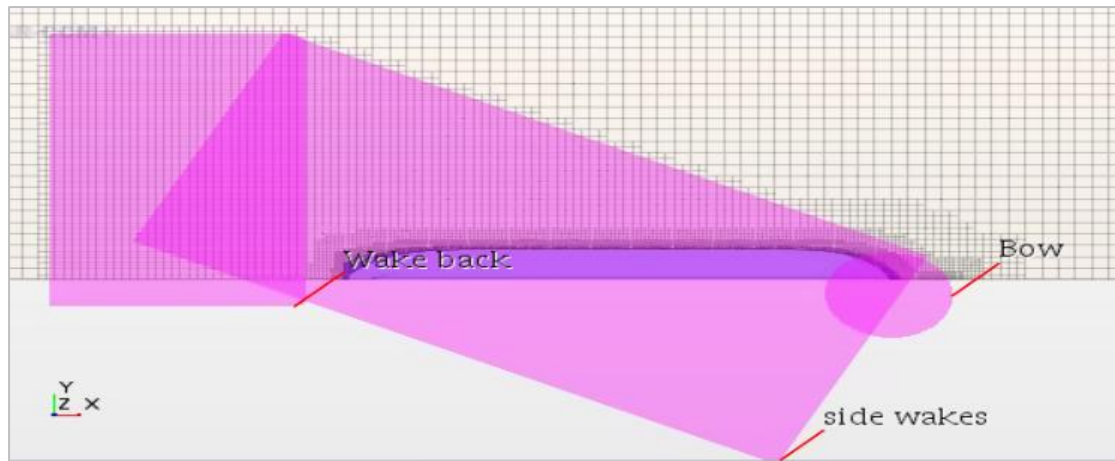
3.3.5 Δημιουργία τοπικού ογκομετρικού πλέγματος, σε κρίσιμα σημεία εστίασης.

Οι περιοχές που χρίζουν από συμπαγής πυκνωση λόγω του φαινομένου τύρβης, όπως είναι η περιοχή περιμετρικά της γάστρας και η ελεύθερη επιφάνεια, εξοπλίζονται με ογκομετρικό πλέγμα, όπου απαρτίζεται από κελία μικρού μεγέθους για την καλύτερη δυνατή προσέγγιση της ακρίβειας.

Γενικά, η χρήση του ογκομετρικού πλέγματος εξυπηρετεί στην βελτίωση του πλέγματος σε σημεία που δημιουργούνται γωνίες καθώς το πλέγμα εφαρμόζεται στην γεωμετρία. Για παράδειγμα στον βολβό, στην ανάλυση των χαρακτηριστικών της ροής όταν η ροή διαχωρίζεται καθώς και στο φαινόμενο Kelvin. Η εφαρμογή αυτή είναι σημαντικά χρήσιμη για την απεικόνιση και επίλυση της ελεύθερης επιφάνειας, δηλαδή για την περιοχή όπου έχουμε διαχωρισμό του αέρα και των υδάτων.

Μέσω της χρήσης του μοντέλου trimmed mesh, μπορεί κάποιος να ευνοηθεί κατά την εφαρμογή του ογκομετρικού πλέγματος αφού παρέχεται η δυνατότητα εφαρμογής ανισότροπη κατεύθυνση, δίνοντας έτσι μεγαλύτερη έμφαση στον ενδιαφερόμενο άξονα. Στην περίπτωση της ελεύθερης επιφάνειας ο ενδιαφερόμενος άξονας είναι η κατεύθυνση z.

Στη παρούσα μελέτη τα σημεία τα οποία έχρηζαν εφαρμογή ογκομετρικού πλέγματος ήταν ο βολβός, η ελεύθερη επιφάνεια και η περιοχή περιμετρικά της γάστρας όπου δημιουργούνται οι κυματισμοί Kelvin και η τιμή της τύρβης είναι υψηλή. Ακολουθεί εικόνα για την καλύτερη κατανόηση.



Εικόνα 3.3.5.1: Τοπικό ογκομετρικό πλέγμα.

3.3.6 Ορισμός των τύπων επιφανειών του towing tank .

Προτού δημιουργηθεί το πλέγμα προέχει ο ορισμός των τύπων στα όρια του towing tank. Από προεπιλογή, δεν δημιουργούνται στρώματα πρίσματος για όρια εισροής, εκροής και συμμετρίας.

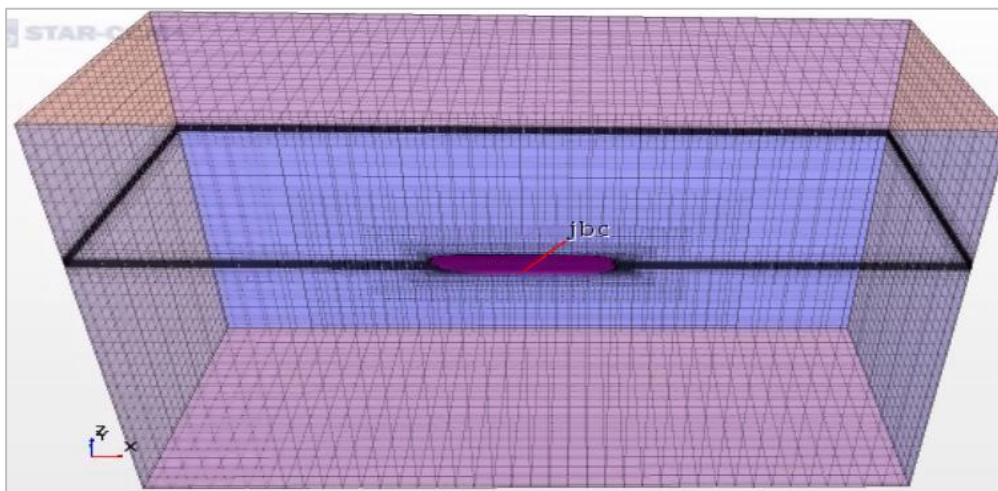
Boundary Name	Boundary Type
Tank.Inlet	Velocity Inlet
Tank.Outlet	Pressure Outlet
Tank.Side	Symmetry Plane
Tank.Symmetry	Symmetry Plane
Tank.Top	Velocity Inlet

Εικόνα 3.3.6.1 : Ορισμός επιφανειών Towing Tank.

3.3.7 Δημιουργία του πλέγματος.

Εφόσον έχει προηγηθεί η παραπάνω διαδικασία ακολουθείται η μετάβαση στην παραγωγή του πλέγματος.

Παρακάτω απεικονίζεται η διακριτοποίηση των κελιών του πλέγματος στο εσωτερικό του Towing Tank σύμφωνα με τις ρυθμίσεις που έχουν προεπιλεγθεί. Στο κάθετο πλαίσιο, είναι προφανής η συμπαγής πυκνωση, η οποία έχει δημιουργηθεί για την ελεύθερη επιφάνεια, ενώ στο οριζόντιο πλαίσιο, απεικονίζεται η συμπαγής πυκνωση της γεωμετρίας όπως και των ογκομετρικών πλεγμάτων αντίστοιχα, που έχουν δημιουργηθεί για την απεικόνιση των κυματισμών Kelvin.



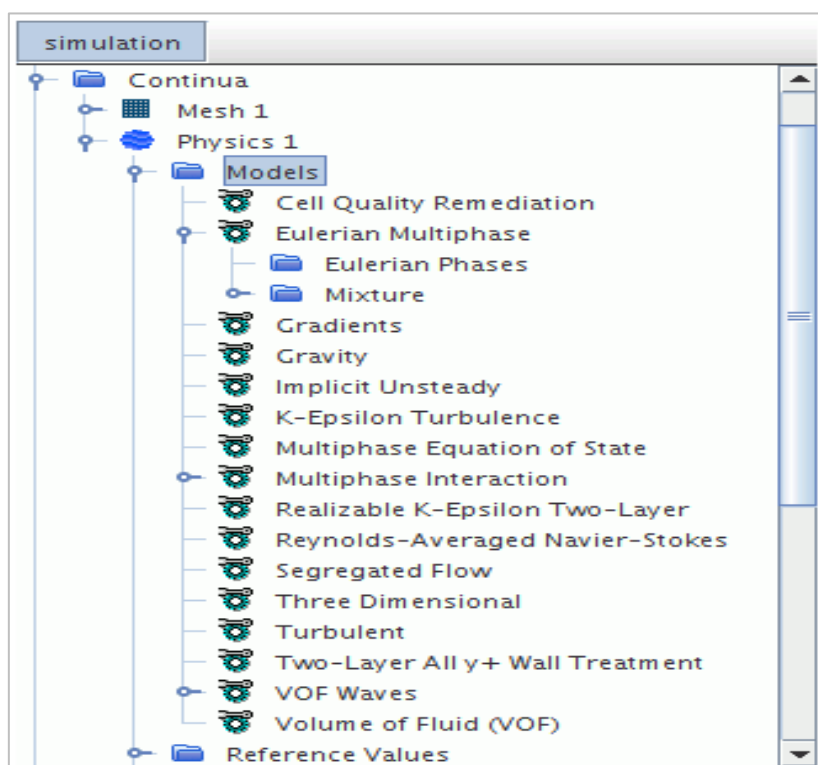
Εικόνα 3.3.7.1 : Πλέγμα επίλυσης.

3.4 Εισαγωγή των αριθμητικών και φυσικών παραμέτρων.

Η προσομοίωση της αντίστασης είναι ένα περίπλοκο πολυφασικό πρόβλημα. Αφού οριστούν οι παράμετροι της γεωμετρίας και του πλέγματος, πρέπει να οριστούν οι αριθμητικοί και φυσικοί παράμετροι του προβλήματος που θα συντελέσουν στην επίλυση της αντίστασης.

3.4.1 Επιλογή των φυσικών μοντέλων.

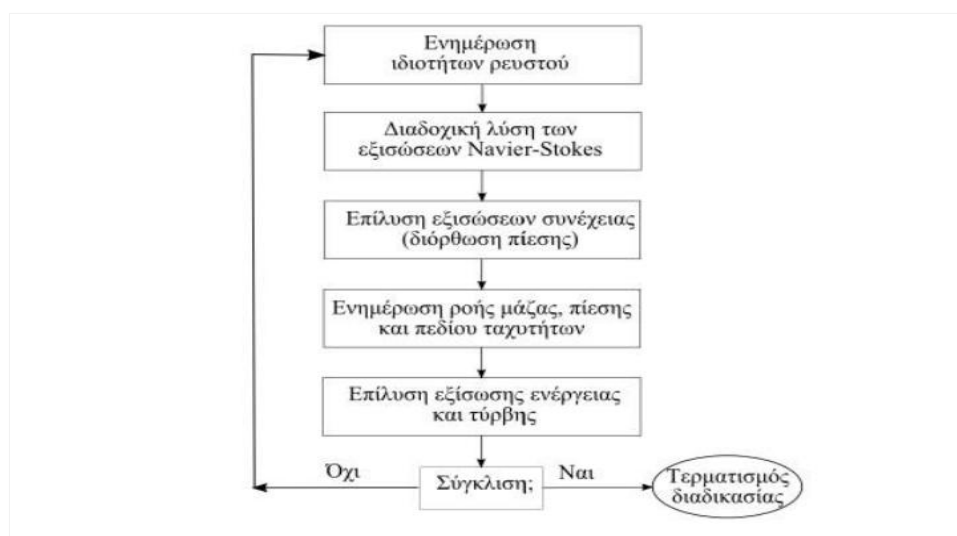
Παρακάτω απεικονίζονται τα φυσικά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση της παρούσας προσομοίωσης.



Εικόνα 3.4.1.1 : Φυσικά μοντέλα.

3.4.1.1 Αλγόριθμος επίλυσης Pressure Based – Segregated.

Ο αλγόριθμος Pressure Based – Segregated είναι αλγόριθμος που επιλύει με βάση την πίεση, εφαρμόζεται για ένα μεγάλο εύρος ροών, που κυμαίνεται από ασυμπίεστες ροές χαμηλών ταχυτήτων έως συμπιεστές ροές υψηλών ταχυτήτων. Ο αλγόριθμος αυτός είναι ευέλικτος και απαιτεί μικρή υπολογιστική μνήμη, καθότι οι εξισώσεις που έχουν διακριτοποιηθεί αποθηκεύονται μια μόνο φορά. Επίσης στον διαχωριστικό αλγόριθμο οι εξισώσεις επιλύονται διαδοχικά και οι λύσεις της προηγούμενης εξίσωσης μεταβιβάζονται στην επόμενη. Στην παρακάτω εικόνα που ακολουθεί απεικονίζεται τα βήματα του συγκεκριμένου αλγορίθμου επίλυσης.



Εικόνα 3.4.1.1.1 : Αλγόριθμος επίλυσης Pressure Based – Segregated.

1. Ειδικότερα, ο αλγόριθμος επίλυσης Pressure Based – Segregated λειτουργεί ως εξής : 1. Ενημερώνει τις ιδιότητες του ρευστού, όπως είναι η πυκνότητα, το ιξώδες και το τυρβώδες ιξώδες, βάση της υπάρχουσας λύσης.
2. Επιλύει διαδοχικά τις εξισώσεις ορμής χρησιμοποιώντας τις πρόσφατα ενημερωμένες τιμές για την πίεση και την ροή μάζας στις επιφάνειες.
3. Διορθώνει τις τιμές πίεσης χρησιμοποιώντας τα πρόσφατα ενημερωμένα πεδία ταχυτήτων και ροής μάζας ανά επιφάνεια.
4. Διορθώνει τις τιμές της ροής μάζας ανά επιφάνεια και του πεδίου ταχυτήτων χρησιμοποιώντας τις διορθωμένες τιμές πίεσης του προηγούμενου βήματος.
5. Επιλύει τις εξισώσεις για τα πρόσθετα βαθμωτά μεγέθη, όπως είναι οι τυρβώδεις ποσότητες και η ενέργεια, χρησιμοποιώντας τις τρέχουσες τιμές των μεταβλητών που επιλύονται.
6. Ελέγχει την σύγκλιση των εξισώσεων.

3.4.1.2 Μέθοδος Implicit Unsteady.

Η μέθοδος Implicit Unsteady είναι μια μέθοδος η οποία χρησιμοποιείται για την διαχείριση του χρόνου κατά την επίλυση των μαθηματικών εξισώσεων. Κατά την μέθοδο αυτήν κάθε φυσικό χρονικό βήμα περιλαμβάνει κάποιο αριθμό εσωτερικών επαναλήψεων για να συγκλίνει η λύση για εκείνη την δεδομένη χρονική στιγμή.

3.4.1.3 VOF (Volume of Fluid).

Το μοντέλο VOF βασίζεται στην υπόθεση ότι οι φάσεις μιας πολυφασικής ροής δεν αναμιγνύονται. Η μέθοδος VOF είναι μια τεχνική μοντελοποίηση της ελεύθερης επιφάνειας, δηλαδή μια αριθμητική τεχνική για την παρακολούθηση και τον εντοπισμό της ελεύθερης επιφάνειας (ή της διεπαφής ρευστών). Ανήκει στην τάξη των μεθόδων που έχουν χαρακτηριστεί από ένα πλέγμα που είναι είτε ακίνητο είτε κινείται με έναν συγκεκριμένο τρόπο για να προσαρμόζεται στο εξελισσόμενο σχήμα της διασύνδεσης. Με την επίλυση των εξισώσεων Navier – Stokes ξεχωριστά, που περιγράφουν την κίνηση της ροής, κάθε κελί μπορεί να καθορίσει την θέση της ελεύθερης επιφάνειας. Ο αλγόριθμος VOF μας επιτρέπει να εξοικονομήσουμε υπολογιστικό χρόνο αλλά δεν είναι πολύ ακριβής. Για αυτό το λόγο επιλέγουμε να πυκνώσουμε με ογκομετρικό πλέγμα στην ελεύθερη επιφάνεια και ορίζουμε τα κελία όσο το δυνατόν μικρότερα, ειδικά στην κατεύθυνση z.

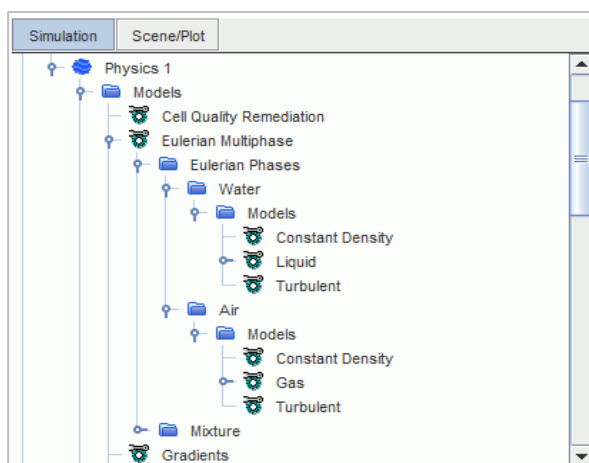
3.4.1.4 Μοντέλο τύρβης k-ε.

Για την προσομοίωση της τύρβης, υπάρχουν διάφοροι μέθοδοι και μοντέλα. Σε αυτήν την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο τύρβης k-ε.

Το μοντέλο k-ε είναι η πιο συχνή μέθοδος τύρβης. Πρόκειται για ένα μοντέλο δύο εξισώσεων που δίνει μια γενική περιγραφή του στροβιλισμού μέσω δυο εξισώσεων μεταφοράς. Η πρώτη εξίσωση μεταφοράς έχει να κάνει με την κινητική ενέργεια του στροβιλισμού (k). Η δεύτερη εξίσωση μεταφοράς έχει να κάνει με τον ρυθμό απόσπασης της ενέργειας στροβιλισμού (ε).

3.4.2 Ορισμός της μεθόδου Euler (δύο φάσεων νερό-αέρα).

Εφόσον έχει επιλεγεί το μοντέλο VOF απαιτείται η δημιουργία της μεθόδου Euler δύο φάσεων, νερού και αέρα. Στο περιβάλλον της προσομοίωσης θεωρείται μια κατάσταση ήρεμου νερού και αέρα, χωρίς κύματα ή ρεύματα. Στο STAR-CCM+, οι παράμετροι του περιβάλλοντος ορίζονται ως πολυφασικές ροές.



Εικόνα 3.4.2.1 : Φάση του Euler.

3.2.3 Ορισμός του VOF WAVES.

Κατά την διάρκεια της προσομοίωσης με την πάροδο του χρόνου η ελεύθερη επιφάνεια αλλάζει. Το λογισμικό STAR – CCM + παρέχει το μοντέλο vof waves που επιτρέπει τον καθορισμό των αρχικών και οριακών συνθηκών κύματος. Επομένως ορίζεται ένα επίπεδο κύμα vof.

Στην συγκεκριμένη μελέτη το πλοίο δεν ρυμουλκείται αλλά παραμένει σταθερό, θεωρείται πακτωμένο. Έτσι δίνεται κίνηση στο νερό και στον αέρα για την επίτευξη της προσομοίωσης και καθορίζεται αντίστοιχα το ύψος της ελεύθερης επιφάνειας όπως φαίνεται παρακάτω.

Πίνακας 3.2.3.1 : Τιμές ορισμού του VOF Waves.

Direction	x	y	z	
Point On Water Level	0.00	0.00	0.41	m
Vertical Direction	0.00	0.00	1.00	
Current	-1.17934	0.00	0.00	m/s
Wind	-1.17934	0.00	0.00	m/s
Light Fluid Density	1.18415			kg/m ³
Heavy Fluid Density	997.561			kg/m ³

3.2.4 Ορισμός των αρχικών συνθηκών.

Ορισμός των αρχικών συνθηκών πίεσης, ταχύτητας, και του διαχωρισμού όγκου. Οι αρχικές συνθήκες είναι οι συνθήκες που πρέπει να οριστούν για το κάθε κελί του πλέγματος. Προηγουμένως επιλέχθηκε η μέθοδος του Euler δυο φάσεων νερού και αέρα, και αντίστοιχα επιλέχθηκε η μέθοδος VOF waves για τον ορισμό της ταχύτητας του ρευστού και της ελεύθερης επιφάνειας. Οπότε για τον εντοπισμό τους σε κάθε κελί, δηλώνουμε την μέθοδο field function. Η μέθοδος field function επιτρέπει την δημιουργία δεδομένων, τα οποία μπορεί να απεικονιστούν είτε κλιμακωτά είτε διανυσματικά είτε σαν κορυφές μέσα στα κελία όπου απαρτίζονται από δύο ρευστά.

Node	Property	Setting
Pressure	Method	Field Function
	Scalar Function	Hydrostatic Pressure of FlatVofWave 1
Velocity	Method	Field Function
	Vector Function	Velocity of FlatVofWave 1
Volume Fraction	Method	Composite
└ Composite > Water	Method	Field Function
	Scalar Function	Volume Fraction of Heavy Fluid of FlatVofWave 1
└ Composite > Air	Method	Field Function
	Scalar Function	Volume Fraction of Light Fluid of FlatVofWave 1

Εικόνα : Εικόνα 3.2.4.1 Αρχικές συνθήκες πίεσης, ταχύτητας και διαχωρισμού όγκου.

3.2.5 Απόσβεση κυματισμών.

Κατά το πέρας της προσομοίωσης δημιουργούνται κύματα, τα οποία πρέπει να αποσβεστούν. Εάν δεν εφαρμοστούν τα κατάλληλα μέτρα απόσβεσης κυμάτων, κατά την διάρκεια της προσομοίωσης μπορεί να εμφανιστούν αντανάκλασεις κυμάτων, τα οποία θα επηρεάσουν την ακρίβεια των τελικών αποτελεσμάτων. Υπάρχουν δύο πιθανά ενδεχόμενα αναπαραγωγής κυμάτων αντανάκλασής. Ο κυματισμός αντανάκλασης από τα όρια του Towing Tank και ο κυματισμός αντανάκλασης λόγω της απότομης μετάβασης των κελιών. Το πρώτο ενδεχόμενο επιλύεται κατά την ενεργοποίηση της μεθόδου wave damping option, το οποίο παρέχεται από το πρόγραμμα. Εδώ πρέπει να επισημανθεί ότι, η απόσταση που θα οριστεί η λειτουργία της μεθόδου αυτής, πρέπει να είναι αρκετά μακριά από την γάστρα, για να υπάρξει ομαλή απόσβεση και να βρίσκεται σε σημείο το οποίο δεν επηρεάζει διάφορα φαινόμενα που δημιουργούνται, όπως είναι το φαινόμενο Kelvin και το φαινόμενο αποκόλλησης ροής. Σε αυτήν την προσομοίωση επιλέχθηκε η απόσταση των εννέα μέτρων. Το δεύτερο ενδεχόμενο επιλύθηκε κατά την οριστικοποίηση της επιλογής του Growth Rate από fast σε slow.

3.2.6 Ορισμός συνοριακών συνθηκών.

Σε αυτό το σημείο της προσομοίωσης πρέπει να προσδιοριστούν κάποιες ιδιότητες στα όρια του Towing Tank και στην γεωμετρία σχετικά με την λειτουργία τους μέσα στην προσομοίωση. Πιο συγκεκριμένα, οι ιδιότητες αυτές διακρίνονται σε δύο είδη, η

πρώτη είναι η κινηματική συνοριακή συνθήκη που ασχολείται με την ταχύτητα και η δεύτερη είναι η κινηματική συνοριακή συνθήκη που ασχολείται με την πίεση.

Σε αυτήν την μελέτη μας ενδιαφέρουν οι τύποι συνοριακών συνθηκών wall, inlet boundaries, outlet boundaries και symmetry plane. Όπου ο κάθε τύπος ορίου έχει διαφορετική χρήση. Ο τύπος wall αντιπροσωπεύει μια αδιαπέραστη επιφάνεια από το υγρό ή τον αέρα αντίστοιχα, ο τύπος velocity inlet χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της ταχύτητας εισόδου και ροής στα κελία, ενώ στην περιοχή του boundary outlet χρησιμοποιούμε pressure outlet όπου ορίζει την στατική τιμή της πίεσης που εξάγεται. Στην τρέχων μελέτη επειδή προσομοιώνεται η μισή γάστρα για την εξοικονόμηση υπολογιστικού χρόνου και χώρου, χρησιμοποιείται άλλος ένας τύπος ορίου που ονομάζεται symmetry plane. Ο τύπος αυτός έχει ως ιδιότητα να λειτουργεί συμμετρικά και να αποτυπώνει το άλλο μισό της προσομοίωσης το οποίο δεν διαφέρει σε καμία περίπτωση εάν προσομοιωθεί ολόκληρο. Τέλος οι συνοριακές συνθήκες των ορίων του JBC_ geometry παραμένουν ως wall.

Node	Property	Setting
Physics Conditions		
└ VofWaveDampingBoundaryOption	Method	Yes
Physics Values		
└ Pressure	Method	Field Function
	Scalar Function	Hydrostatic Pressure of FlatVofWave 1
└ Volume Fraction	Method	Composite
└ Composite > Water	Method	Field Function
	Scalar Function	Volume Fraction of Heavy Fluid of FlatVofWave 1
└ Composite > Air	Method	Field Function
	Scalar Function	Volume Fraction of Light Fluid of FlatVofWave 1

Εικόνα 3.2.6.1 : Συνοριακές συνθήκες του Tank Inlet.

Node	Property	Setting
Physics Conditions		
└ Velocity Specification	Method	Components
└ VofWaveDampingBoundaryOption	Method	No
Physics Values		
└ Velocity	Method	Field Function
	Vector Function	Velocity of FlatVofWave 1
└ Volume Fraction	Method	Composite
└ Composite > Water	Method	Field Function
	Scalar Function	Volume Fraction of Heavy Fluid of FlatVofWave 1
└ Composite > Air	Method	Field Function
	Scalar Function	Volume Fraction of Light Fluid of FlatVofWave 1

Εικόνα 3.2.6.2 : Συνοριακές συνθήκες του Tank Bottom και του Tank Top.

Node	Property	Setting
Physics Conditions		
└ Velocity Specification	Method	Components
└ VofWaveDampingBoundaryOption	Method	Yes
Physics Values		
└ Velocity	Method	Field Function
	Vector Function	Velocity of FlatVofWave 1
└ Volume Fraction	Method	Composite
└ Composite > Water	Method	Field Function
	Scalar Function	Volume Fraction of Heavy Fluid of FlatVofWave 1
└ Composite > Air	Method	Field Function
	Scalar Function	Volume Fraction of Light Fluid of FlatVofWave 1

Εικόνα 3.2.6.3 : Συνοριακές συνθήκες του Tank Outlet.

3.2.7 Ορισμός των παραμέτρων επίλυσης και τα κριτήρια τερματισμού.

Η επίλυση της αντίστασης γίνεται μέσω μιας παροδικής προσομοίωσης, για την οποία πρέπει να καθοριστεί το χρονικό βήμα ο αριθμός των εσωτερικών επαναλήψεων ανά βήμα χρόνου και ο φυσικός χρόνος. Επιπλέον μπορούν να οριστούν αριθμητικοί παράμετροι όπως ο παράγοντας 'υπό- χαλάρωσης', για τη αύξηση της σύγκλισης ανά χρονικό βήμα.

Το χρονικό βήμα ορίζει τον χρόνο στον οποίο θα επιλύονται οι εξισώσεις ενώ ο αριθμός των εσωτερικών επαναλήψεων ορίζει τον αριθμό επαναλήψεων που θα γίνονται ανά πάγωμα χρόνου. Στην συγκεκριμένη μελέτη το χρονικό βήμα ορίστηκε 0.04 sec.

Εφόσον έχει γίνει η προ-αναφέρουσα διαδικασία, έχει δημιουργηθεί το Towing tank, το πλέγμα επίλυσης και έχουν οριστεί οι φυσικοί και αριθμητικοί παράγοντες, η προσομοίωση είναι έτοιμη για τρέξιμο.

3.3 ΟΡΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΓΙΑ PMM.

Οι προσομοιώσεις για τις κινήσεις PMM (Planer Mechanism Motion), στη παρούσα διπλωματική εργασία γίνονται για την μελέτη της συνολικής αντίστασης σε κίνηση static drift και pure sway σε ήρεμο νερό. Ωστόσο χρησιμοποιούνται ίδιοι παράμετροι με την προσομοίωση του straight ahead που αναφέρθηκαν παραπάνω. Η μόνη διαφορά τους είναι, η χρήση πλέγματος overset, το οποίο είναι απαραίτητο για την επίτευξη της στρέψης στην περίπτωση του static drift και της κίνησης στην περίπτωση του pure sway αντίστοιχα. Επίσης, είναι αναγκαίο να γίνει η προσομοίωση

ολόκληρης της γάστρας, για τον λόγο ότι, οι κινήσεις αυτές δεν είναι συμμετρικές προς του άξονες. Η διαδικασία αυτή έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των κελίων του υπολογιστικού πλέγματος.

3.3.1 Διαστάσεις δεξαμενής (towing tank) για κίνηση PMM.

Εφόσον οι κινήσεις PMM δεν είναι συμμετρικές προς τους άξονες, το μοντέλο έπρεπε να προσομοιωθεί ολόκληρο. Παρακάτω ακολουθεί ένας πίνακας με της αναλυτικές διαστάσεις της εικονικής δεξαμενής.

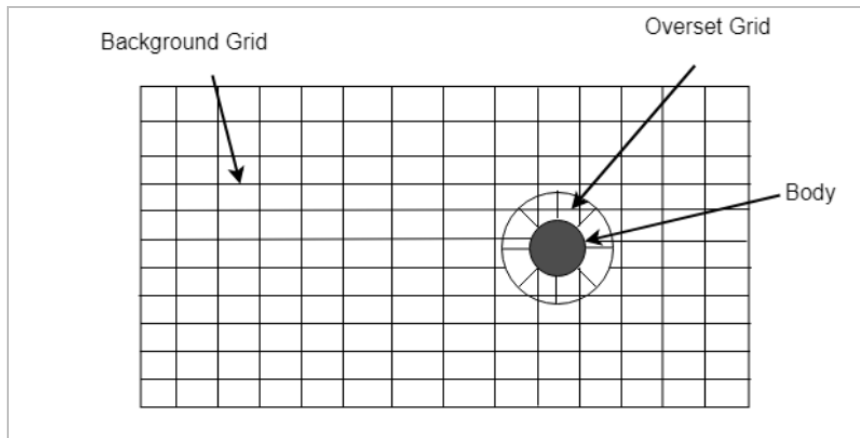
Πίνακας 3.3.1.1 : Διαστάσεις δεξαμενής για τις κινήσεις PMM.

Towing Tank- boundaries	JBC	
	Model Scale 1/40	
Front (front of ship)	18.00	m
After (After shhip)	-18.00	m
Side (Port side)	18.00	m
side (Starboard side)	-18.00	m
Top (After deck)	9.00	m
Bottom(from ship bottom)	-18.00	m

3.3.2 Πλέγμα Overset.

Το πλέγμα overset, είναι ένας τύπος πλέγματος το οποίο παρέχει ποικίλες δυνατότητες σε προσομοιώσεις CFD. Μια από αυτές τις δυνατότητες, είναι η κίνηση, το πλέγμα overset έχει την ικανότητα να μετατοπίζει πράγματα μέσα στο υπόλοιπο πλέγμα και να λύνει τις εξισώσεις RANS παράλληλα. Τα αποτελέσματα που εξάγει είναι αξιόπιστα ακόμα και για πολύπλοκες κινήσεις και υψηλές απαιτήσεις προσομοιώσεων.

Αυτό το είδος πλέγματος χρησιμοποιείται για προσομοιώσεις που οι απαιτήσεις τους είναι, να ταιριάξουν πολλά πλέγματα μαζί, να παρέχουν ακριβή αποτελέσματα για περιοχές που βρίσκονται η μία μέσα στην άλλη, να διατηρείται η μάζα σε όλο το χώρο της εικονικής δεξαμενής, για πολύπλοκα πολυεδρικά πλέγματα και τέλος για σώματα που επιθυμείται η κίνηση τους με αυθόρμητο τρόπο το ένα σε σχέση με το άλλο.



Εικόνα 3.3.2.1 : Απεικόνιση πλέγματος overset μέσα στην δεξαμενή.

Έτσι λοιπόν, όπως απεικονίζεται στην εικόνα 3.3.2.1 για την δημιουργία του πλέγματος overset απαιτούνται δύο δεξαμενές, η μία είναι η κύρια δεξαμενή η οποία είναι ακίνητη και καλείται background, ενώ η δεύτερη είναι η δεξαμενή στην οποία εδράζεται το πλέγμα overset το οποίο απομονώνει την γεωμετρία. Κατά την χρήση overset αναπτύσσεται αλληλεπίδραση μεταξύ των πλεγμάτων, για την επίτευξη της αλληλεπίδρασης και την επίλυση των εξισώσεων.

Για την επίτευξη της ορθής αλληλεπίδρασης και επίλυση των εξισώσεων, πρέπει να γίνει η διαδικασία hole cutting, η οποία αξιολογεί τα κελιά που βρίσκονται στην εκάστοτε δεξαμενή και η διαδικασία της ταυτοποίησης των interpolation stencils που επιτρέπει την σωστή αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο πλεγμάτων.

3.3.2 Επίτευξη κίνησης μέσω πλέγματος overset.

Η στρέψη του μοντέλου στην περίπτωση της στατικής μετατόπισης (static drift) και η επίτευξη της κίνησης στον εγκάρσιο άξονα y (pure sway), επιτυγχάνεται μέσω του πλέγματος overset.

Εφόσον έχει δημιουργηθεί το πλέγμα overset, υπάρχει η δυνατότητα της στρέψης του από το υπόλοιπο πλέγμα της δεξαμενής. Η στρέψη επιτυγχάνεται από την εντολή rotate.

Για την επίτευξη της κίνησης, αρχικά πρέπει να δηλωθεί η εξίσωση της. Το λογισμικό star ccm+ παρέχει την ευχέρεια της δήλωσης των κινήσεων. Δηλώνοντας μια νέα κίνηση στο λογισμικό, το πλέγμα overset μπορεί να ανακαλεί και να πραγματοποιεί την κίνηση αυτή. Στην προκειμένη περίπτωση δόθηκε η εξίσωση της κίνησης για pure sway.

3.3.2 Ορισμός των παραμέτρων επίλυσης και τα κριτήρια τερματισμού για PMM.

Εφόσον για την συγκεκριμένη διαδικασία ήταν αναγκαία η προσομοίωση ολόκληρης της γάστρας, αλλά και η χρήση του πλέγματος overset για την επίτευξη της κίνησης, ο αριθμός των κελιών αυξήθηκε δραματικά. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση του χρόνου επίλυσης. Η επίλυση των προσομοιώσεων για static drift και pure sway επιλύθηκαν με χρονικό βήμα 0.01 sec.

3.4 ΠΑΡΑΛΛΗΛΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ.

Το πρόγραμμα STAR – CCM+ έχει την δυνατότητα να «τρέξει» παράλληλα σε πολλούς επεξεργαστές, γεγονός που επιτυγχάνει τη διαδικασία της προσομοίωσης. Οι σύγχρονοι υπολογιστές διαθέτουν πολλούς επεξεργαστές ή έναν επεξεργαστή με πολλούς πυρήνες. Έτσι, καθένας από αυτούς μπορεί να αποτελεί ένα κόμβο υπολογισμού για το πρόγραμμα STAR – CCM+. Σε αυτή την περίπτωση, το υπολογιστικό πλέγμα χωρίζεται αυτόματα σε τμήματα και κάθε υπολογιστικός κόμβος ασχολείται με ένα συγκεκριμένο τμήμα. Κάθε επεξεργαστής επιλύει το πρόβλημα χωριστά από τους υπόλοιπους και επικοινωνεί μαζί τους σε περιπτώσεις που απαιτείται λήψη δεδομένων, πράγμα που συμβαίνει συνήθως στα όρια των τιμών. Ακόμη, στο τέλος κάθε επαναληπτικού βήματος ελέγχεται ο καταμερισμός του φόρτου επεξεργασίας, ώστε αν υπάρχουν σημαντικές διαφορές ο τελευταίος να τροποποιείται κατάλληλα.

4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΙ.

Εισαγωγή.

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την αριθμητική επίλυση του προβλήματος, που αφορούσε την συνολική αντίσταση του μοντέλου JBC σε κίνηση straight ahead, και την εξέταση στον μηχανισμό κίνησης επιπέδου PMM (Planar motion mechanism) για static drift και pure sway.

Το μοντέλο που προσομοιώθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία ονομάζεται Japan Bulk Carrier (JBC). Το μοντέλο JBC είναι ένα φορτηγό πλοίο, τύπου χύδην φορτίου και είναι εξοπλισμένο με πηδάλιο, προπέλα και δακτύλιο προπέλας. Στην τρέχων προσομοίωση η μελέτη έγινε για γυμνή γάστρα δηλαδή, χωρίς πηδάλιο, προπέλα και δακτύλιο προπέλας. Το μοντέλο προσομοιώθηκε υπό κλίμακα 1:40.

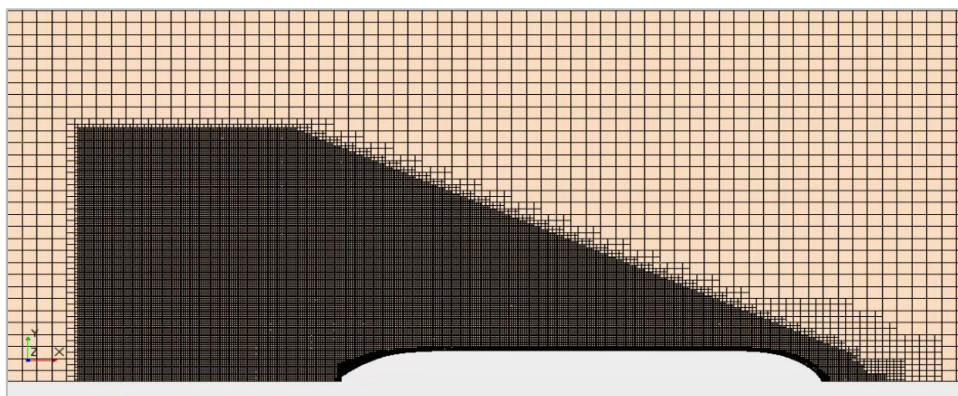
Για την διεξαγωγή των αποτελεσμάτων της συνολικής αντίστασης του πλοίου σε κατάσταση straight ahead, προσομοιώθηκε το μοντέλο JBC σε ήρεμο νερό, με σταθερή ταχύτητα (ταχύτητα υπηρεσίας). Στο μοντέλο δεν δόθηκε κίνηση παρέμεινε σταθερό «πακτωμένο». Έτσι λοιπόν, για την επίτευξη της προσομοίωσης και την διεξαγωγή των αποτελεσμάτων για την μελέτη που πραγματοποιήθηκε, δόθηκε κίνηση στο νερό και στον αέρα. Η ταχύτητα της κίνηση αυτής ταυτίζεται με την ταχύτητα υπηρεσίας του πλοίου.

Στο δεύτερο σκέλος της διπλωματικής, γίνεται μια μελέτη στον μηχανισμό κίνησης επιπέδου PMM (Planer Motion Mechanism), για δύο κινήσεις του πλοίου. Η πρώτη μελέτη γίνεται για την κίνηση Static drift, όπου το πλοίο παραμένει ακίνητο και στρέφεται υπό γωνία drift. Ενώ η δεύτερη μελέτη σχετίζεται με την κίνηση pure sway, σε αυτήν την περίπτωση το πλοίο δεν παραμένει σταθερό αλλά κινείται εγκάρσια στον άξονα y υπό περιοδική κίνηση.

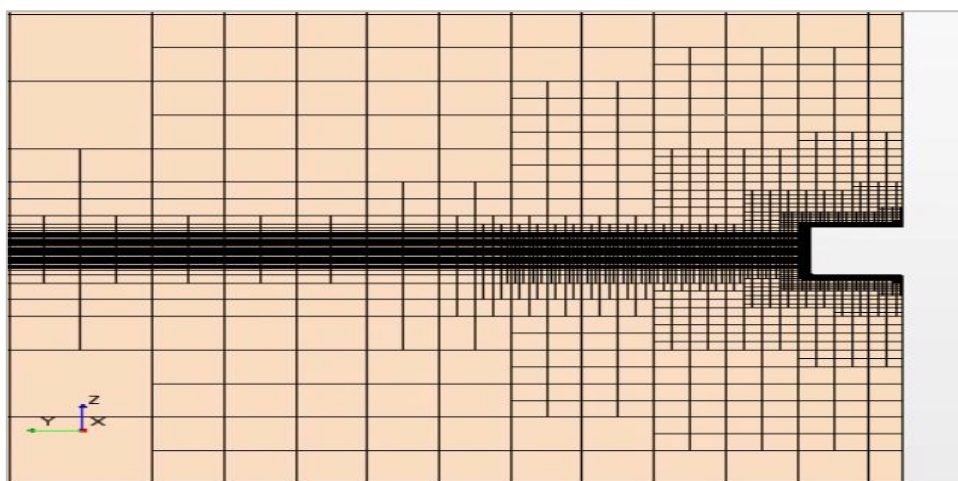
Στο παρόν κεφάλαιο λοιπόν, γίνεται η συλλογή και η ανάλυση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τα πειράματα τα οποία διεξήχθησαν με την βοήθεια των μοντέλων προσομοίωσης. Η ανάλυση γίνεται είτε για να συνδράμει στην λήψη αποφάσεων είτε για την επαλήθευση και την εγκαθίδρυση της αξιοπιστίας του δείγματος. Μέσω του ορισμού αλλά και των παραδειγμάτων, πρέπει να είναι πλέον φανερό στον αναγνώστη ότι η προσομοίωση είναι μια τεχνική κατά την οποία πραγματοποιείται η εκτέλεση ενός πειράματος, το οποίο διεξάγεται για να βοηθήσει στην επίλυση πραγματικών προβλημάτων που προκύπτουν. Τα λεπτομερή αποτελέσματα παρατίθενται μέσω κειμένου, αλλά και με την μορφή πινάκων και γραφημάτων.

4.1. Straight ahead.

Για την επίτευξη της εξαγωγής των αποτελεσμάτων της συνολικής αντίστασης σε κατάσταση πλεύσης straight ahead προσομοιώθηκε το μοντέλο JBC σε ήρεμο νερό, υπό τις συνθήκες που έχουν προαναφερθεί. Η πλεύση straight ahead είναι κίνηση αξονικά συμμετρική. Έτσι κατά την προσομοίωση του συγκεκριμένου προβλήματος υπήρχε η δυνατότητα να προσομοιωθεί η μισή γάστρα του μοντέλου, που είχε ως αποτέλεσμα την εξοικονόμηση μεγάλου αριθμού κελιών. Ακολουθεί η εικόνα 4.1.1 και 4.1.2 για την παρουσίαση της δομής του πλέγματος που απαιτείται για την σωστή υλοποίηση του εν λόγω πειράματος.



Εικόνα 4.1.1: Κάτοψη υπολογιστικού πλέγματος για το πείραμα straight ahead.



Εικόνα 4.1.2 : Αριστερή πλάγια όψη υπολογιστικού πλέγματος για το πείραμα straight ahead.

Στην εικόνα 4.1.1 παρουσιάζεται η κάτοψη της προσομοίωσης όπου αναδεικνύεται η διακριτοποίηση των κελιών περιμετρικά της γάστρας, κατ' επέκταση συνεχίζεται η διακριτοποίηση παριστάνοντας την υποθετική σχηματική δομή των Kelvin, για την επίτευξη της απεικόνισής τους. Η εικόνα 4.1.2 παρουσιάζει την διακριτοποίηση των κελιών στην ελεύθερη επιφάνεια. Είναι πολύ σημαντικό να δοθεί μεγάλη έμφαση στην συμπαγή πύκνωση της ελεύθερης επιφάνειας.

Για την εξακρίβωση της σωστής λειτουργίας της προσομοίωσης και των αποτελεσμάτων, η προσομοίωση έτρεξε τέσσερις φορές. Μετέπειτα, ακολούθησε σύγκριση των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν από τις τέσσερις αυτές προσομοιώσεις, για την καταγραφή των αποκλίσεων και την καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας του πλέγματος. Τέλος, έγινε υπολογισμός της απόκλισης των αποτελεσμάτων, από ήδη υπάρχοντα πειραματικά αποτελέσματα EFD (experimental fluid dynamic), τα οποία βρέθηκαν στο διαδίκτυο από την ιστοσελίδα «Tokyo 2015 Workshop».

Ακολουθεί ο πίνακας 4.1.1 όπου δείχνει τις τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις που έτρεξε το μοντέλο για την εξαγωγή της συνολικής αντίστασης. Η ταχύτητα και η βρεχόμενη επιφάνεια παρέμειναν ίδιες και για τις τέσσερις περιπτώσεις. Επίσης, στις περιπτώσεις αυτές, χρησιμοποιήθηκε το ίδιο μοντέλο τύρβης, η ίδια τιμή του φυσικού χρόνου και ίδιο χρονικό βήμα. Αυτό που αλλάζει είναι ο αριθμός των κελιών. Η αλλαγή αυτή έγινε με σκοπό την προσέγγιση του επιθυμητού αριθμού της συνολικής δύναμης και την σωστή απεικόνιση των κυματισμών. Η αύξηση των κελιών του πλέγματος, έγινε είτε αλλάζοντας το base size όλου του πλέγματος, είτε αυξάνοντας τον αριθμό των κελιών στα ενδιαφερόμενα σημεία, από την ρύθμιση percentage of base του κάθε ογκομετρικού ελέγχου που φτιάχτηκε ξεχωριστά.

Πίνακας 4.1.1 : Παρουσίαση του αριθμητικού μεγέθους των κελιών ανά προσομοίωση.

<i>model scale</i>								
cases	ship	Vdesign (m/s)	sw (m ²)	turbulence model	physical Time (sec)	Time step (sec)	Base size (m)	Number of cells
1	half	1.17934	12.2225625	k-ε	50	0.04	0.1125	263.611
2	half	1.17934	12.2225625	k-ε	50	0.04	0.055	1.177.739
3	half	1.17934	12.2225625	k-ε	50	0.04	0.055	1.914.536
4	half	1.17934	12.2225625	k-ε	50	0.04	0.055	2.805.376

4.1.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων της συνολικής δύναμης ανά περίπτωση.

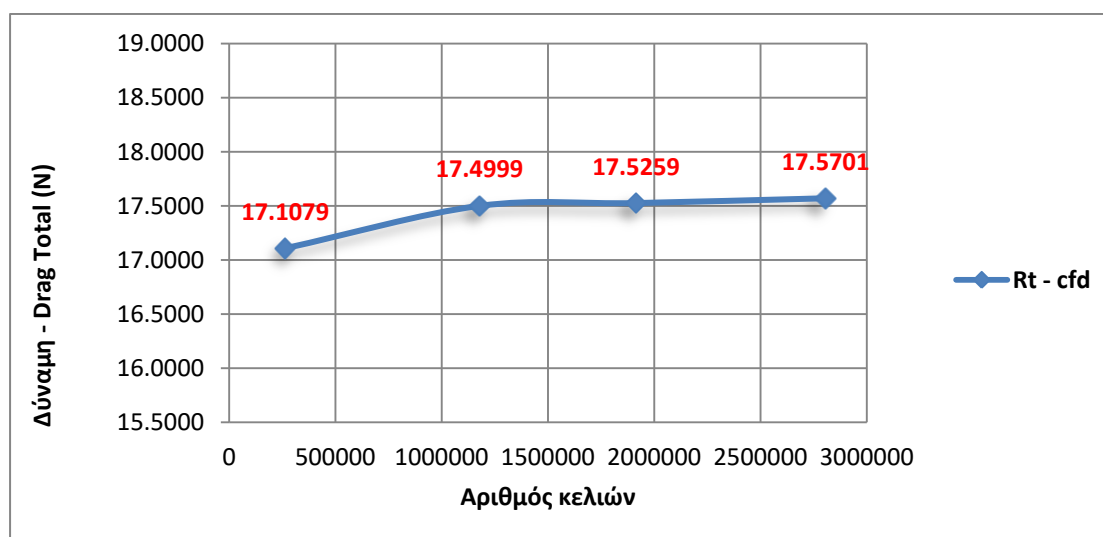
Εφόσον η προσομοίωση έτρεξε τέσσερις φορές για την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων, εκλάβαμε την τιμή της συνολικής δύναμης που ασκείται σε κάθε προσομοίωση αντίστοιχα. Οι τιμές των δυνάμεων διαφέρουν μεταξύ τους αφού όπως προαναφέρθηκε, ο αριθμός των κελιών αλλάζει σε κάθε πείραμα ξεχωριστά. Η αλλαγή αυτή γίνεται με σκοπό την παρακολούθηση της συμπεριφοράς των τιμών της συνολική δύναμη που ασκείται στο μοντέλο και την εύρεση της αριθμητικής τιμής της αντίστασης που συγκλίνει με την τιμή της πειραματικής μελέτης EFD.

Στο παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τις δύναμης που εξήχθησαν για την κάθε προσομοίωση ξεχωριστά, για τις τέσσερις διαφορετικές καταστάσεις του πλέγματος. Επίσης πρέπει να επισημανθεί ότι η τιμή τις συνολικής δύναμης αναφέρεται στη μισή γάστρα, αφού προσομοιώνεται η μισή γάστρα για εξοικονόμηση χρόνου και υπολογιστικού χώρου.

Πίνακας 4.1.2.1 : Αποτελέσματα της συνολικής δύναμης για κάθε μια περίπτωση ξεχωριστά.

cases	1	2	3	4
ship	half	half	half	half
V_{design} (m/s)	1.17934	1.17934	1.17934	1.17934
sw (m ²)	12.2225625	12.2225625	12.2225625	12.2225625
Turbulence model	k-ε	k-ε	k-ε	k-ε
Physical Time (sec)	200	200	200	200
Time step (sec)	0.04	0.04	0.04	0.04
Base size (m)	0.1125	0.055	0.055	0.055
Number of cells	263611	1177739	1914536	2805376
Rt (N)	17.1079	17.4999	17.5259	17.5701

Ακολουθεί, μια γραφική παράσταση με την ένδειξη του εύρους των τιμών της συνολικής δύναμης των τεσσάρων περιπτώσεων.



Γράφημα 4.1.2.1 : Εύρος τιμών της δύναμης ανά περίπτωση.

Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα είναι ξεκάθαρο ότι, οι τιμές της συνολικής δύναμης που εξήχθησαν για κάθε πείραμα δεν αποκλίνουν σε σημαντικό βαθμό μεταξύ τους. Πιο συγκεκριμένα, η μέγιστη τιμή της συνολικής δύναμης είναι της

τάξης μεγέθους 17.6001 N και η μικρότερη είναι της τάξης μεγέθους 17.1079 N. Λαμβάνοντας υπόψη τη γραφική παράσταση συμπεραίνεται ότι, πρώτον ο αριθμός των κελιών είναι ικανοποιητικός, εφόσον δεν υπάρχει κάποια σημαντική απόκλιση των τιμών από το γενικό σύνολο και δεύτερον ότι η τιμή της συνολικής δύναμης κυμαίνεται στο εύρος που απεικονίζεται στο διάγραμμα.. Βεβαία, η χρήση των κελιών θα πρέπει να είναι άνω του ενός εκατομμυρίου για καλύτερη σύγκλιση.

4.1.3 Συντελεστής αντίστασης straight ahead.

Σε αυτό το σημείο, γίνεται μια σύγκριση των αποτελεσμάτων της αντίστασης στο τρέχων μοντέλο. Τα αποτελέσματα εξήχθησαν από την προσομοίωση που αναγράφεται, μέσω του λογισμικού star - csm+ και η σύγκριση θα γίνει μεταξύ αυτών και των αποτελεσμάτων πειραματικής μελέτης EFD. Στη παρούσα διπλωματική εργασία δεν πραγματοποιήθηκε κάποιο πείραμα για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων σε EFD. Οι τιμές των αποτελεσμάτων από την πειραματική μέθοδο EFD παρέχονται από την ιστοσελίδα “ Tokyo 2015 Workshop ”. Η σύγκριση γίνεται για το μοντέλο JBC (Japan Bulk Carrier), σε κατάσταση πλεύσης ήρεμου νερού με σταθερή ταχύτητα 14,5 knots, όπου ο αριθμός Froude είναι $Fr= 0.1423$.

Επίσης, το λογισμικό star – csm+ εξάγει τα αποτελέσματα τις συνολικής δύναμης και όχι της αντίστασης. Για την διεξαγωγή της αντίστασης μέσω της δύναμης γίνεται χρήση του εμπειρικού τύπου :

$$C_R = \frac{2 * R_t}{\rho * S_W * v^2} \quad (41)$$

Όπου, ρ η πυκνότητα του νερού, S_W η βρεχόμενη επιφάνεια της γάστρας, V ταχύτητα σχεδίασης και R_t η συνολική δύναμη. Στη τρέχουσα διπλωματική η συνολική δύναμη πολλαπλασιάζεται επί δύο επειδή το μοντέλο προσομοιώνεται με μισή γάστρα.

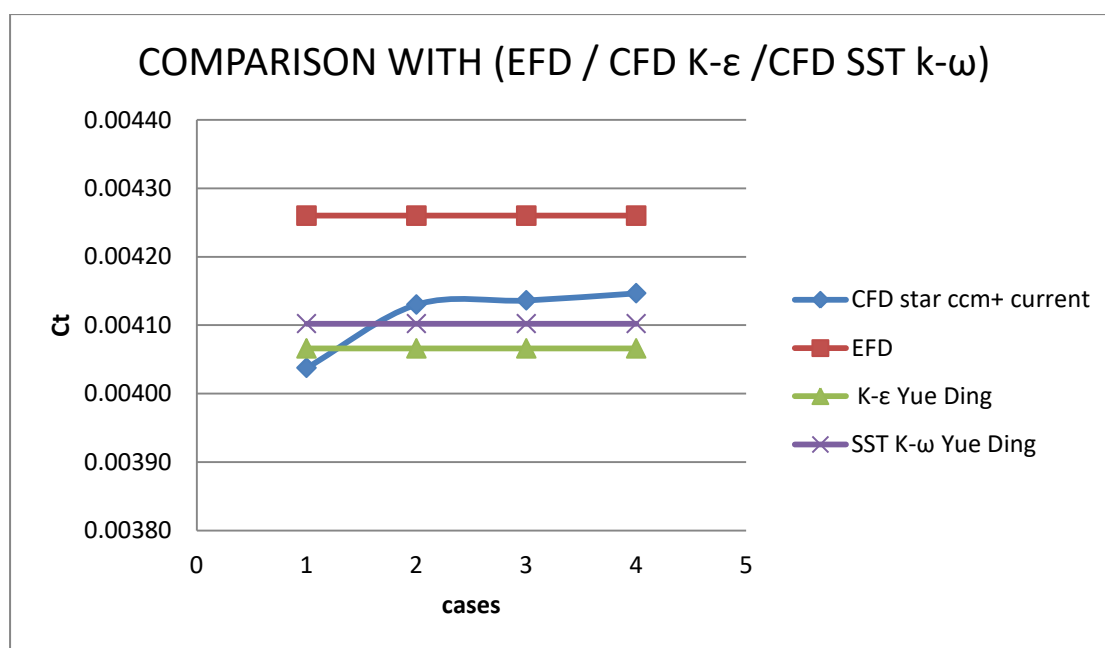
Στο παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τέσσερις συντελεστές αντίστασης, που προέκυψαν σύμφωνα με τον προαναφερθέντα τύπο όπου και γίνεται σύγκριση μεταξύ αυτών και της αντίστασης από πειραματικά αποτελέσματα EFD. Στην τελευταία στήλη του πίνακα αναγράφεται η διαφορά τους .

Πίνακας 4.1.3.1 : Διαφορά CFD-EFD

Μοντέλο JBC				
Πείραμα	Rt	CFD: Ct	EFD: Ct	Διαφορά CFD-EFD
1	17.1079	0.00404	0.00426	5.51%
2	17.4999	0.00413	0.00426	3.15%
3	17.5259	0.00414	0.00426	2.99%
4	17.5701	0.00415	0.00426	2.73%
Τιμή EFD : Ct= 0.00426 (γυμνής γάστρας)				

Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα της παραπάνω σύγκρισης, είναι ξεκάθαρο πλέον ότι τα αποτελέσματα που διεξήχθησαν από την τρέχων προσομοίωση συγκλίνουν ως προς τα αποτελέσματα της πειραματικής μεθόδου. Πιο συγκεκριμένα, βάση των αποτελεσμάτων της σύγκρισης, συμπεραίνεται ότι η προσομοίωση λειτούργησε σωστά και ότι τα αποτελέσματα της μεθόδου CFD είναι ισάξια με τα αποτελέσματα της μεθόδου EFD.

Ακολουθεί ένα διάγραμμα στο οποίο γίνεται μια σύγκριση των αποτελεσμάτων των τεσσάρων αυτών προσομοιώσεων που έτρεξαν, με τα αποτελέσματα από τη μέθοδο EFD, καθώς επίσης και με αποτελέσματα που προέκυψαν από προσομοιώσεις με το ίδιο λογισμικό (STAR-CCM+) για το ίδιο μοντέλο γάστρας με μοντέλα τύρβης k-ε και SST k-ω αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα των δυο μοντέλων τύρβης βρέθηκαν στο διαδίκτυο από μια πηγή (Yue Ding, MSc thesis, discipline oriented), όπου προσομοιώνει το ίδιο ακριβώς πρόβλημα και τα αποτελέσματα EFD από την ιστοσελίδα 'Tokyo 2015 Workshop'.



Γράφημα 4.3.1.1 : Σύγκριση με EFD / K-ε / SST k- ω.

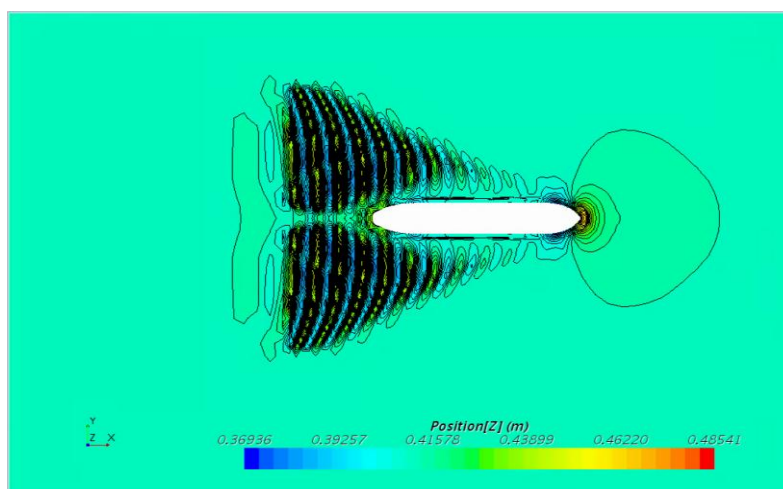
Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα, είναι πλέον αντιληπτό ότι και τα τέσσερα πειράματα προσεγγίζουν αρκετά τα αποτελέσματα της πειραματικής μέθοδο EFD, αλλά και τα αποτελέσματα από άλλες παρόμοιες μελέτες που έχουν επετεύχθη με διαφορετικό μοντέλο τύρβης. Έτσι λοιπόν, είναι πλέον ξεκάθαρο ότι ο συντελεστής αντίστασης της παρούσας μελέτης είναι αρκετά αξιόπιστος.

Επίσης, η απόκλιση των αποτελεσμάτων συγκριτικά με την μέθοδο EFD ενδέχεται να οφείλεται στο γεγονός ότι, στο πείραμα του CFD η γάστρα θεωρείται πακτωμένη, σε αντίθεση με τη μέθοδο EFD όπου πολύ πιθανόν το πλοίο να έχει ελευθερία κίνησης σε pitch και heave.

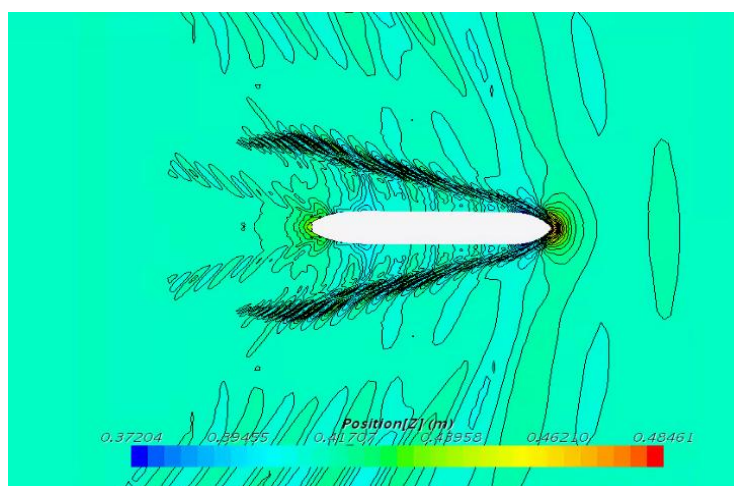
4.1.5 Κυματισμοί Kelvin σε Straight ahead.

Οι κυματισμοί Kelvin, είναι άλλο ένα φαινόμενο το οποίο είναι αναγκαίο να σχολιαστεί. Έχοντας ζητήσει από το πρόγραμμα την απεικόνιση των κυματισμών που δημιουργούνται κατά την πλεύση του πλοίου, παρατηρήθηκε ότι, στο κάθε πείραμα η αποτύπωση των κυματισμών διέφερε μεταξύ τους. Έτσι δημιουργήθηκε η ανάγκη για την εξέταση τους.

Στην εικόνα 4.1.5.1 απεικονίζονται οι κυματισμοί του πειράματος με αριθμό κελιών 1.177.739 ενώ στην εικόνα 4.1.5.2 απεικονίζονται οι κυματισμοί του τελευταίου πειράματος με αριθμό κελιών 2.805.376



Εικόνα 4.1.5.1 : Κυματισμός Kelvin με αριθμό κελιών 1.177.739 .



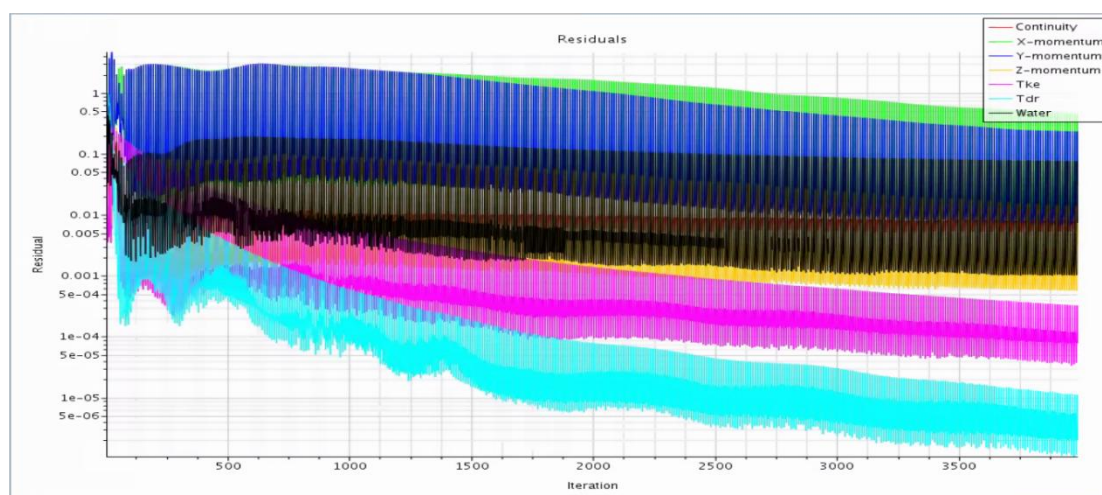
Εικόνα 4.1.5.2 : Κυματισμός Kelvin με αριθμό κελιών 2.805.376.

Σύμφωνα με τις φωτογραφίες είναι ξεκάθαρο ότι στο πρώτο πείραμα έχει επιτύχει η απεικόνιση των κυματισμών ενώ στο δεύτερο πείραμα όχι. Αυτό οφείλεται είτε στην κακή κατανομή των κελιών του πλέγματος είτε στο χρονικό βήμα. Εάν τα κελία του πλέγματος δεν είναι διακριτοποιημένα σωστά για την εμφάνιση των κυματισμών, η απεικόνιση τους δεν θα επιτευχτεί. Επίσης αν ο αριθμός των κελιών είναι υψηλός το χρονικό βήμα ίσως δεν επαρκεί για την επίλυση των εξισώσεων ώστε να αποτυπωθούν σωστά οι κυματισμοί που δημιουργούνται κατά την πλεύση. Στην παρούσα φάση χρησιμοποιήθηκε χρονικό βήμα 0.04 (time step). Έτσι λοιπόν, μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι το χρονικό βήμα που χρησιμοποιήθηκε δεν ήταν αρκετό για την επίλυση των εξισώσεων ώστε να αποτυπωθούν σωστά οι κυματισμοί Kelvin.

4.1.2 Γράφημα Residuals.

Η γραφική παράσταση residuals δείχνει την μεταβολή της τρέχουσας τιμής από την προηγούμενη, όπως και την ανισορροπία των αποτελεσμάτων μέχρι τα αποτελέσματα να σταθεροποιηθούν ώστε να αρχίσουν να συγκλίνουν και να διατηρείται η ισορροπία της μάζας και της ορμής κατά το πέρας της προσομοίωσης. Τα αποτελέσματα που παρέχει το γράφημα έχουν να κάνουν με τις λύσεις των εξισώσεων και των μοντέλων τύρβης.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιείται το μοντέλο τύρβης k-ε για την επίλυση. Σε αυτήν την περίπτωση, τα residuals απαρτίζονται από επτά τιμές : μια εξίσωση συνέχειας, τρεις εξισώσεις ορμής των κατευθύνσεων x, y, z, μια τιμή της εξίσωσης T_{ke} , μια T_{dr} και μία τιμή της εξίσωσης του νερού που προέρχεται από το VOF waves. Η παρακάτω εικόνα απεικονίζει το γράφημα των residuals της προσομοίωσης.

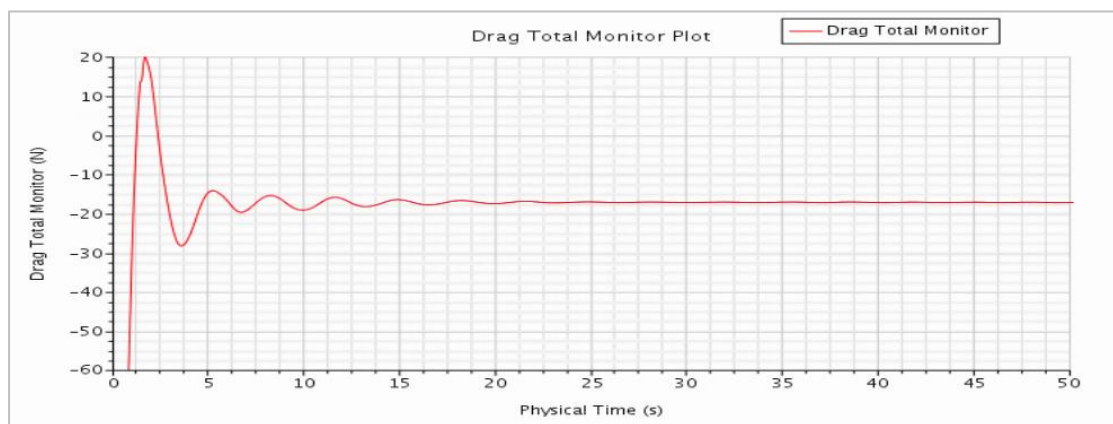


Εικόνα 4.1.2.1 : Γράφημα residuals.

Η κατάσταση των γραφημάτων στα residual υποδεικνύουν την σύγκλιση των αποτελεσμάτων. Εάν όλα τα residuals υποδείξουν μια σταδιακή πτώση σημαίνει πως τα αποτελέσματα θα συγκλίνουν. Επίσης πολλές φορές, κατά την εκκίνηση της προσομοίωσης παρατηρήθηκε ότι, οι τιμές των residuals είναι αρκετά υψηλές και

υστέρα ξεκινάει η πτώση τους σταδιακά. Αυτό συμβαίνει είτε όταν το time step είναι μεγάλο είτε όταν το πλέγμα επίλυσης απαρτίζεται από μεγάλο αριθμό κελιών. Γενικά, κατά το πέρας της προσομοίωσης είναι πιθανόν να εμφανιστούν μη αναμενόμενες τιμές, αλλά αυτό δεν χρειάζεται να δημιουργεί ανησυχία εφόσον έχουν οριστεί όλοι οι παράμετροι σωστά. Το πρόγραμμα θα πραγματοποιήσει την διαδικασία υπολογισμού και με το πέρας του χρόνου θα προσπαθήσει να προσεγγίσει τα σωστά αποτελέσματα.

Τέλος, ακολουθεί μια εικόνα στην οποία απεικονίζεται η σύγκλιση της δύναμης σε φυσικό χρόνο.



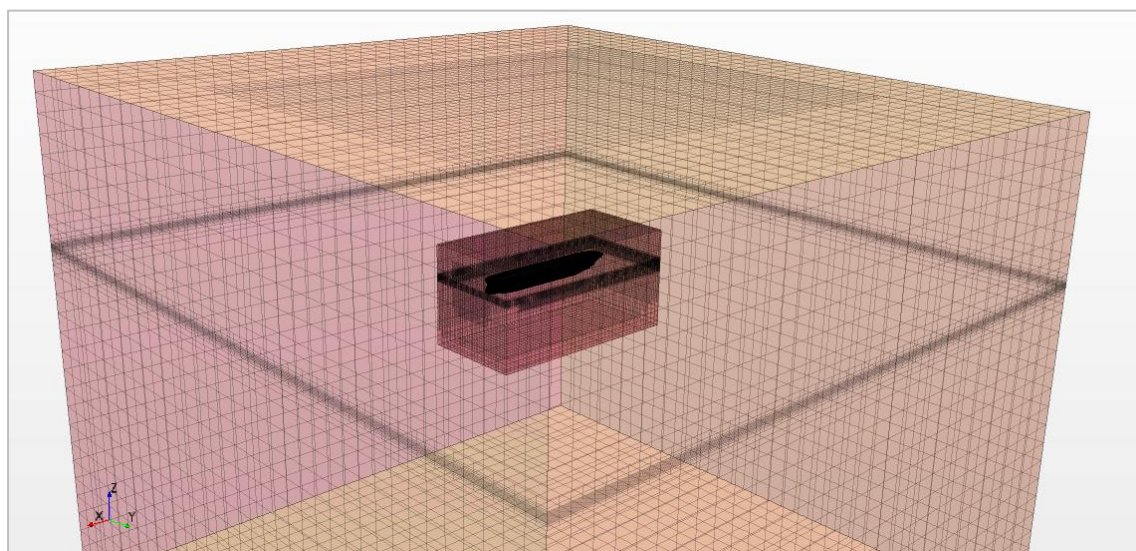
Εικόνα 4.1.2.2 : Σύγκλιση δύναμης στο πεδίο του χρόνου.

4.2 Κίνηση PMM (Planar Motion Mechanism).

Η κίνηση PMM είναι μια δοκιμή επιβαλλόμενης κίνησης στο πλοίο. Η δοκιμή PMM συνιστάται για στατική μετατόπιση (static drift), pure sway και pure yaw. Οι κινήσεις αυτές εφαρμόζονται στο πλοίο και μέσω του λογισμικού είναι εφικτή η μέτρηση των υδροστατικών δυνάμεων. Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε εφαρμογή των κινήσεων static drift και pure sway, σε ήρεμο νερό με σταθερή ταχύτητα. Οι κινήσεις αυτές δεν είναι συμμετρικές ως προς τον άξονα και για αυτόν τον λόγο χρειάστηκε να προσομοιωθεί ολόκληρη η γάστρα. Επίσης χρειάστηκε να γίνει χρήση ενός νέου τύπου πλέγματος που ονομάζεται overset για την επίτευξη της στρέψης στο πείραμα του static drift αλλά και για την επίτευξη της εγκάρσιας μετατόπισης της γάστρας στο πείραμα του pure sway. Με την χρήση αυτού του πλέγματος ο αριθμός των κελιών αυξήθηκε δραματικά όπως και ο χρόνος επίλυσης.

Πίνακας 4.2.1 : Κατάσταση προσομοίωσης για την μελέτη PMM.

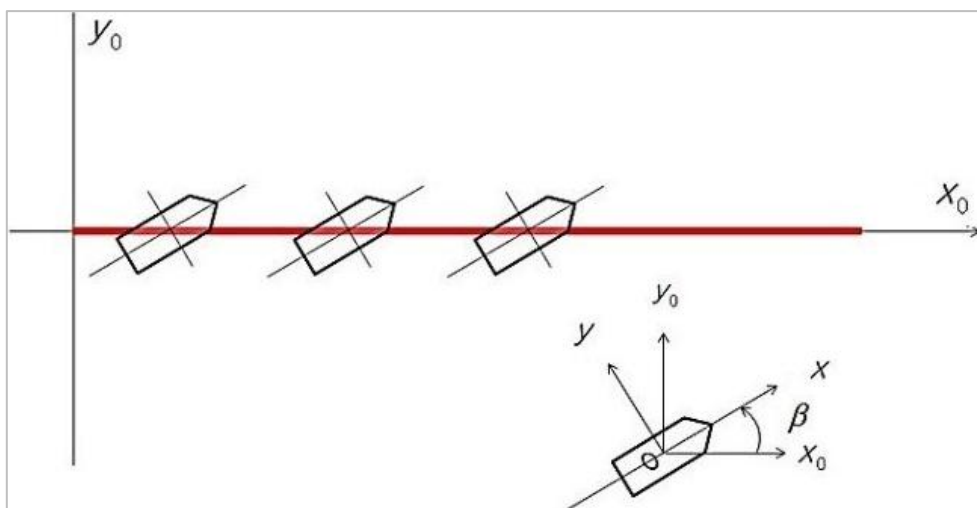
PPM experimental	
Model	JBC
Condition	calm water
water / air velocity	1.17934 m/s
Mesh	overset
Number of cells	4573198
Motion 1	static drift
Motion 2	pure sway



Εικόνα 4.2.1 : Πλέγμα Overset.

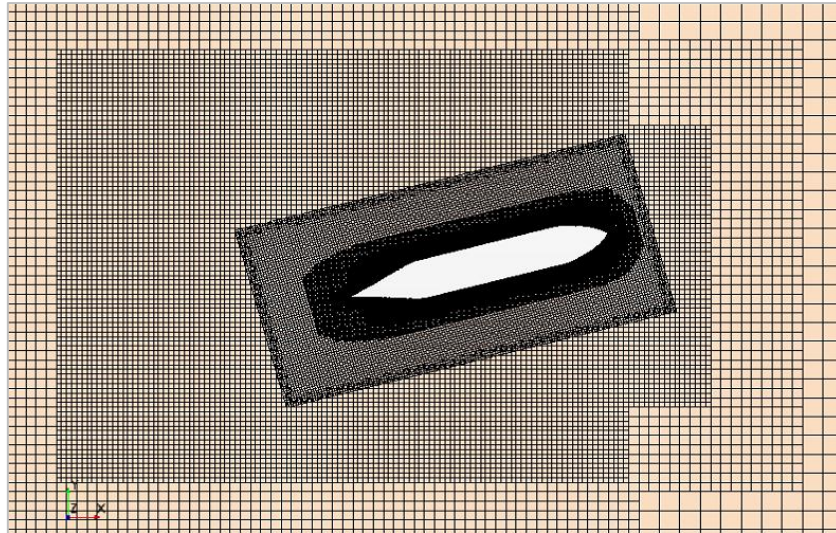
4.2.1 Static drift

Στο ακόλουθο πείραμα του static drift προσομοιώθηκε το μοντέλο για διάφορες γωνίες με σκοπό την ανάπτυξη της πλευρικής δύναμης και τον υπολογισμό των αντίστοιχων συντελεστών αντίστασης. Κατά την διάρκεια των πειραμάτων το πλοίο ήταν σταθερό (πακτωμένο) σε ήρεμο νερό, υπό την εξεταζόμενη γωνία και χωρίς κάποια ελευθερία κινήσεων, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 4.2.1.1, όπου το β αντιπροσωπεύει την γωνία drift.



Εικόνα 4.2.1.1 : Σχηματική αναπαράσταση της κίνησης static drift.

Για την επίτευξη της στρέψης του μοντέλου στην επιθυμητή γωνία, χρειάστηκε να γίνει χρήση ενός νέου τύπου πλέγματος το οποίο ονομάζεται overset. Το overset έχει την ιδιότητα να δημιουργεί ένα δεύτερο πλέγμα μέσα στο ήδη υπάρχον, όπως και την ιδιότητα απομόνωσης της γεωμετρίας, καταφέροντας με αυτόν το τρόπο να ανεξαρτητοποιεί την γεωμετρία από το κύριο πλέγμα. Η κύρια λειτουργία του overset είναι η ελευθερία κινήσεων που έχει μέσα στο υπόλοιπο πλέγμα. Στην παρούσα μελέτη το overset δεν έχει κάποια ελευθερία κίνησης αλλά παραμένει σταθερό υπό γωνία drift. Τα αποτελέσματα δεν επηρεάζονται κατά την χρήση του overset, επειδή τα κελία των δυο πλεγμάτων αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Μια από τις δυνατότητες των κινήσεων του πλέγματος overset, είναι της στρέψης. Έτσι λοιπόν, χρησιμοποιώντας το πλέγμα overset επιτεύχθηκε η στρέψη της γάστρας για τις επιθυμητές γωνίες. Παρακάτω ακολουθεί η εικόνα 4.2.1.2 για την καλύτερη κατανόηση της χρήσης του πλέγματος over set και την απεικόνιση του φαινομένου static drift υπό γωνία 10° .



Εικόνα 4.2.1.2 : Παρουσίαση του πλέγματος overset και της γωνίας του static drift των 10° .

Για το πείραμα του static drift, η προσομοίωση εκτελέστηκε για τρεις διαφορετικές γωνίες 0° , 5° και 10° . Τα αποτελέσματα των συντελεστών αντίστασης για κάθε γωνία φαίνονται στον πίνακα 4.2.1.2.1. Δυστυχώς, σύγκριση με EFD αποτελέσματα δεν πραγματοποιήθηκε, λόγω της μη ύπαρξης αποτελεσμάτων από πειραματικές μεθόδους σε καταστάσεις static drift.

4.2.1.1 Σύγκριση straight ahead με static drift 0° .

Εφόσον δεν υπήρξε σύγκριση με αποτελέσματα EFD και δεν βρέθηκε κάποια πηγή στο διαδίκτυο για να υπάρξει σύγκριση αποτελεσμάτων για της επιθυμητές γωνίες static drift, δημιουργήθηκε η ανάγκη για την επαλήθευση της ορθής λειτουργίας του overset. Για την εξέταση της ορθής λειτουργίας και της ακρίβειας των αποτελεσμάτων, προγραμματίστηκε μια προσομοίωση, παρόμοιας κατάστασης με την προηγούμενη μελέτη του straight ahead, με την μόνη διάφορα την χρήση του πλέγματος overset (σε κατάσταση static drift 0°) και το time step, με την προϋπόθεση να υπάρξει σύγκριση μεταξύ τους. Έτσι λοιπόν, εφόσον υλοποιήθηκε η προσομοίωση, ακολούθησε σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ του static drift υπό γωνία 0° (με πλέγμα overset) και του straight ahead. Το αποτέλεσμα της σύγκρισης ήταν θετικό, διότι τα αποτελέσματα συγκλίνουν μεταξύ τους. Έτσι λοιπόν αποφασίστηκε να συνεχιστεί η μελέτη για τις ενδιαφερόμενες γωνίες και η στρέψη να πραγματοποιηθεί με χρήση πλέγματος overset, χωρίς να υπάρχουν μεγάλοι ενδοιασμοί, για την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Παρακάτω ακολουθεί ένας πίνακας για την παρουσίαση του ποσοστού απόκλισης μεταξύ των αποτελεσμάτων από straight ahead και από static drift υπό γωνία 0° .

Πίνακας 4.2.1 : Σύγκριση συντελεστή αντίστασης C_t μεταξύ straight ahead και static drift υπό γωνία 0° .

Model JBC	C_t	Difference
Straight ahead	0.00415	3.37%
Static drift ($\beta=0^\circ$)	0.00429	

Σύμφωνα με τον πίνακα 4.2.1 η απόκλιση των τιμών μεταξύ των δυο συντελεστών αντίστασης είναι στο 3.37 % που σημαίνει ότι οι τιμές είναι αρκετά κοντά, επομένως αποδεικνύεται ότι το πλέγμα overset δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα.

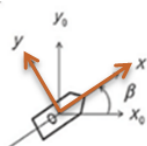
4.2.1.2 Συντελεστής αντίστασης.

Η μελέτη του static drift έγινε υπό τις συνθήκες που προαναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 4.1 για το εύρος γωνιών 0° , 5° και 10° . Ο στόχος της μελέτης αυτής ήταν η εξαγωγή των αποτελεσμάτων του συντελεστή αντίστασης και της αναπτυσσόμενης πλευρικής αντίστασης λόγω γωνίας πρόσπτωσης διάφορο του μηδενός. Στον πίνακα 4.2.1.2.1 ακολουθεί η παρουσίαση των αποτελεσμάτων των συντελεστών αντίστασης στους άξονες του πλοίου από το static drift υπό τις εξεταζόμενες γωνίες και τις πλευρικής δύναμης.

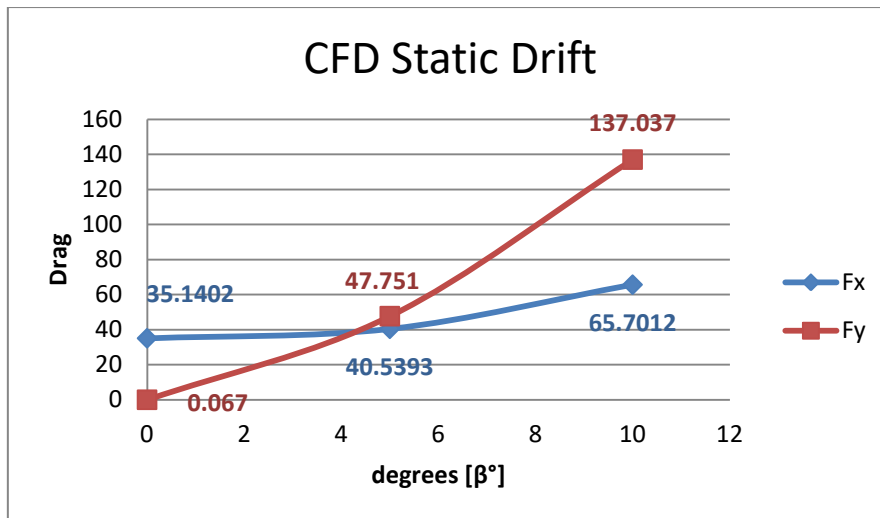
Πίνακας 4.2.1.2.1 : Παρουσίαση αποτελεσμάτων.

static drift				
cases	β°	F_y (N)	F_x (N)	C_t^*
1	0	0.067	35.140	0.00429
2	5	47.751	40.539	0.00435
3	10	137.037	65.701	0.00489

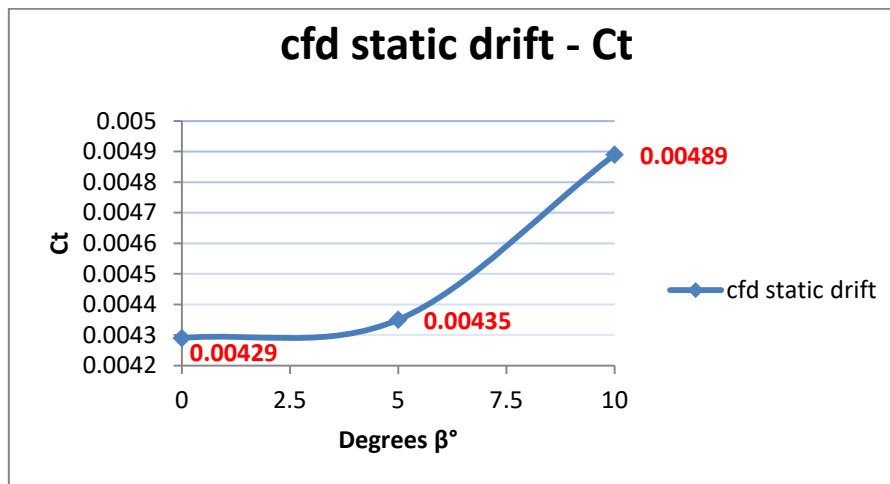
* C_t = για τους άξονες του πλοίου :



Στο διάγραμμα 4.2.1.2.1 απεικονίζεται η γραφική παράσταση τις πλευρικής δύναμης που αναπτύσσεται στο άξονα y σε σύγκριση με την δύναμη στον άξονα x καθώς το πλοίο πλέει υπό γωνία static drift.



Γράφημα 4.2.1.1 : Δυνάμεις αντίστασης κατά τον άξονα x και y σε κατάσταση static drift.



Γράφημα 4.2.1.2 : Συντελεστής αντίστασης σε κατάσταση static drift.

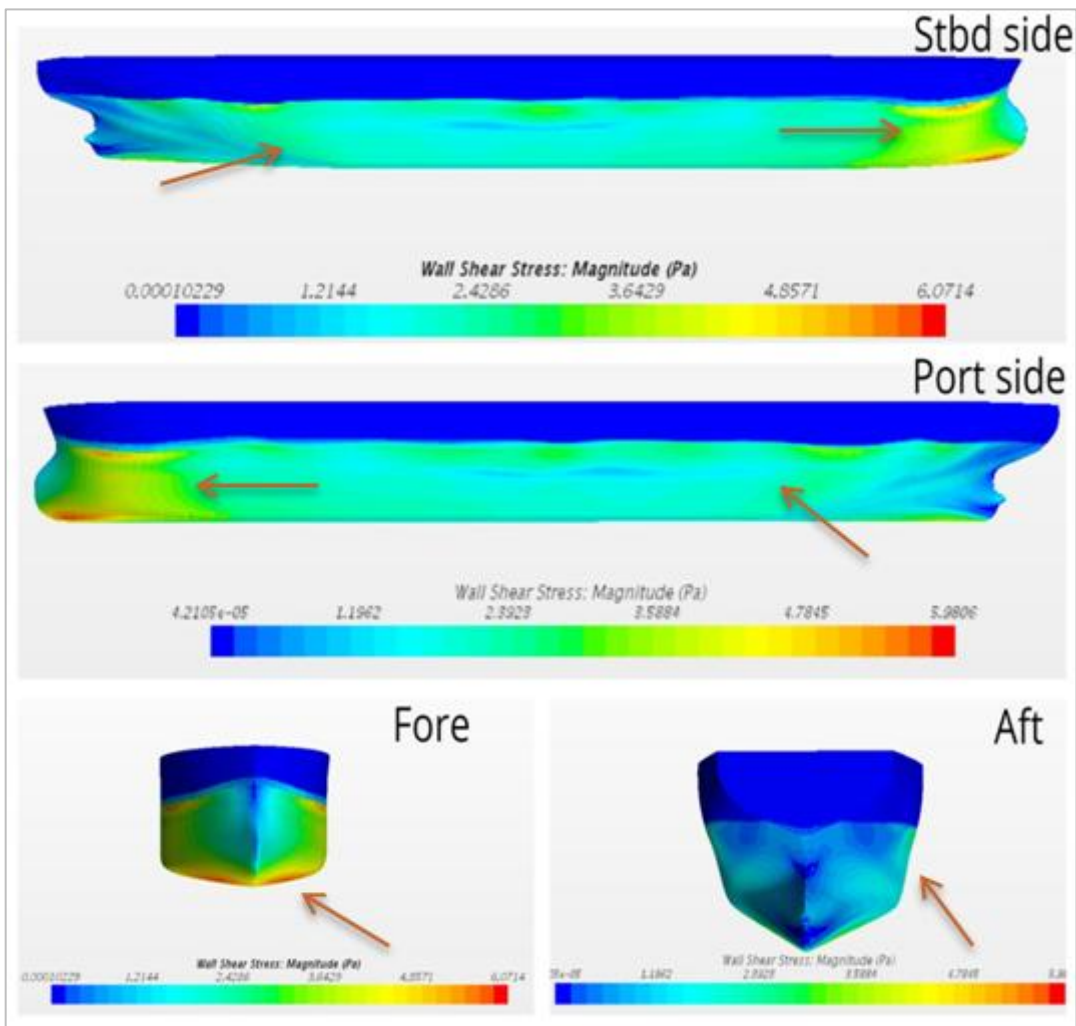
Από τα αποτελέσματα που αναδεικνύονται στον πίνακα 4.2.1.2.1 και τα παραπάνω διαγράμματα, συμπεραίνεται ότι, όσο έχουμε αύξηση της γωνίας drift αυξάνεται η πλευρική αντίσταση. Έτσι λοιπόν, από εκεί που η δύναμη Fx είναι η κύρια συνιστώσα της αντίστασης σε κατάσταση πλεύσης straight ahead, και με τα αποτελέσματα που εξήχθησαν σε κατάσταση πλεύσης static drift, η κύρια συνιστώσα γίνεται η πλευρική δύναμη Fy. Συνοψίζοντας, όσο αυξάνεται η γωνία drift συνεπάγεται αύξηση της πλευρικής δύναμης αλλά και του συνολικού συντελεστή αντίστασης αντίστοιχα.

Σύμφωνα με την λογική, η πλευρική δύναμη Fy θα μεγιστοποιηθεί όταν η γωνία drift είναι 90°. Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, κρίθηκε σκόπιμο η προσομοίωση του static drift για δύο μόνο γωνίες, λόγω περιορισμένης υπολογιστικής ισχύς. Παρόλα αυτά, οι γωνίες αυτές επαρκούν, αφού μπορούν να παρέχουν μια πλήρη εικόνα για την συμπεριφορά της πλευρικής δύναμης Fy κατά την αύξηση της γωνίας drift.

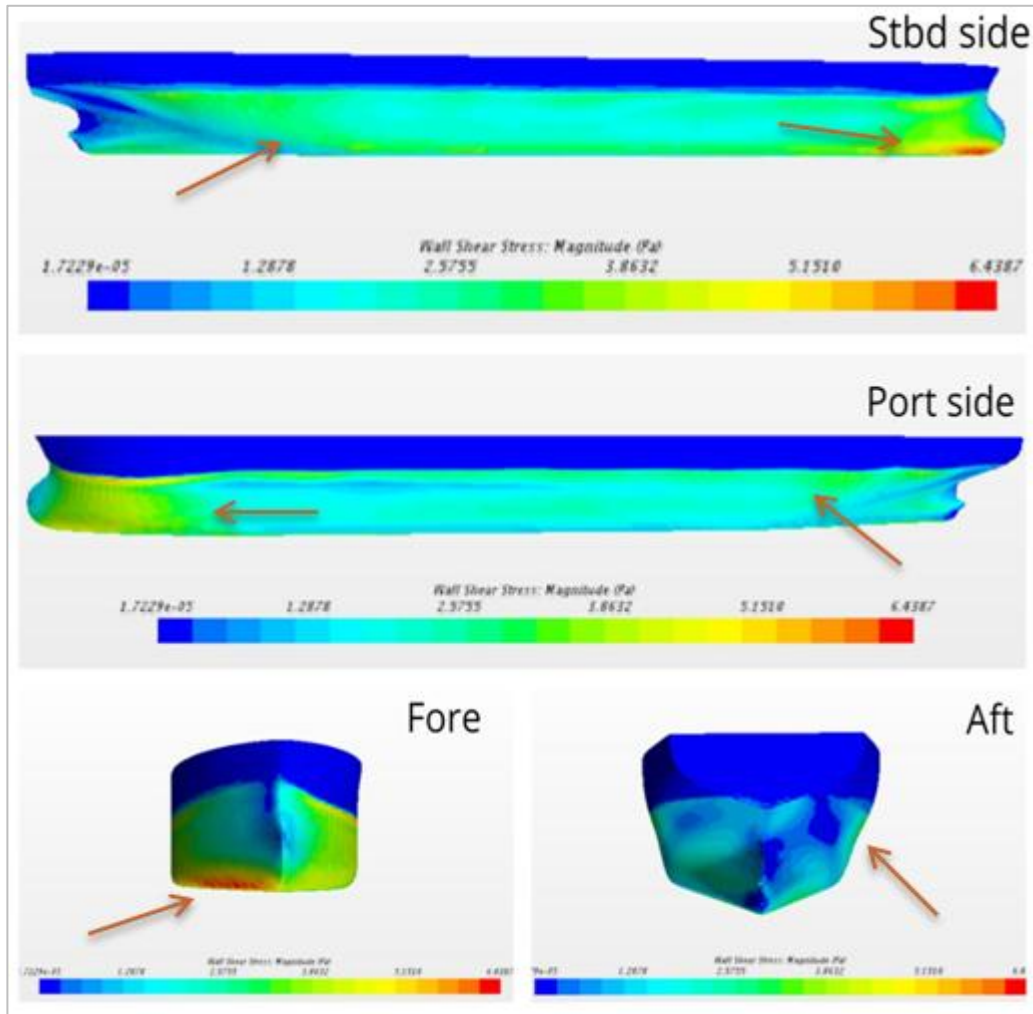
4.2.1.3 Κατανομή πίεσης σε static drift.

Ένα από τα πλεονεκτήματα των προσομοιώσεων CFD είναι η ικανότητα παροχής οπτικού υλικού, πιο συγκεκριμένα υπάρχει η δυνατότητα απεικόνισης των αποτελεσμάτων όπου αυτό είναι αρκετά χρήσιμο. Το λογισμικό star ccm+ παρέχει την δυνατότητα απεικόνισης της πίεσης και της ταχύτητας σε κάθε σημείο της γάστρας, πράγμα που μπορεί να φανεί αρκετά χρήσιμο σε μελέτες υδροδυναμικής σχεδίασης γαστρών.

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μια παρουσίαση της κατανομής των υδροδυναμικών πιέσεων στην γάστρα, για γωνία drift 10° και 0° (straight ahead). Εφόσον το πλοίο πλέει σε διαφορετικές γωνίες drift και η ταχύτητα του νερού κατανέμεται υπό γωνία πρόσπτωσης διάφορο του μηδενός, είναι αναμενόμενη η διαφορετική κατανομή της πίεσης στην επιφάνεια της γάστρας. Η εικόνα 4.2.1.3.1 απεικονίζει την κατανομή τις πίεσης σε κατάσταση πλεύσης straight ahead (static drift 0°) και η εικόνα 4.2.1.3.2 απεικονίζει την κατανομή της πίεσης για static drift $\beta=10^\circ$.



Εικόνα 4.2.1.3.1 : Κατανομή πίεσης για κατάσταση πλεύσης straight ahead.

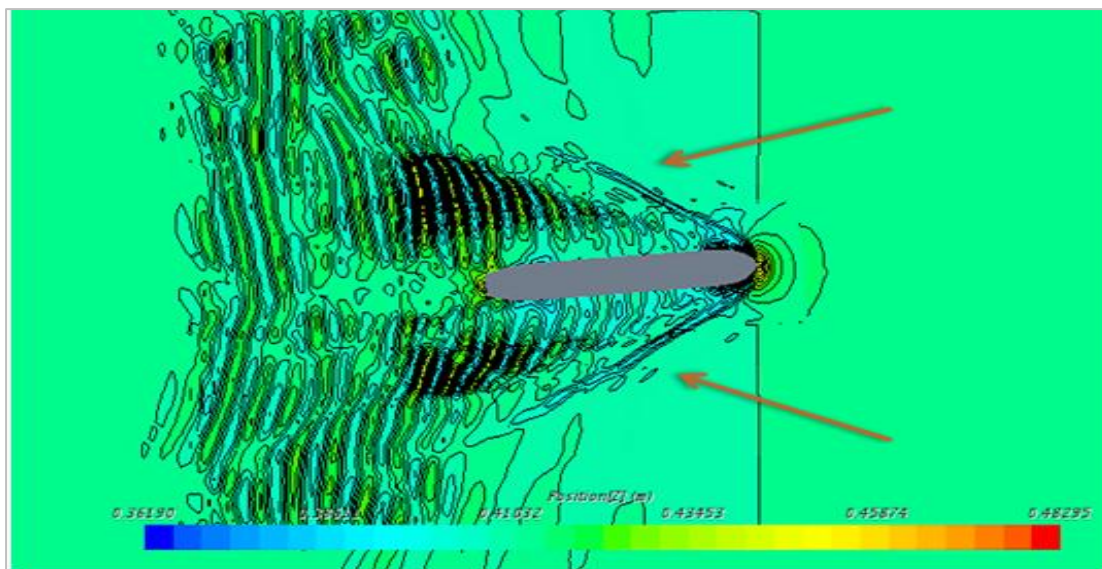


Εικόνα 4.2.1.3.1 : Κατανομή πίεσης σε κατάσταση πλεύσης static drift $\beta=10^\circ$

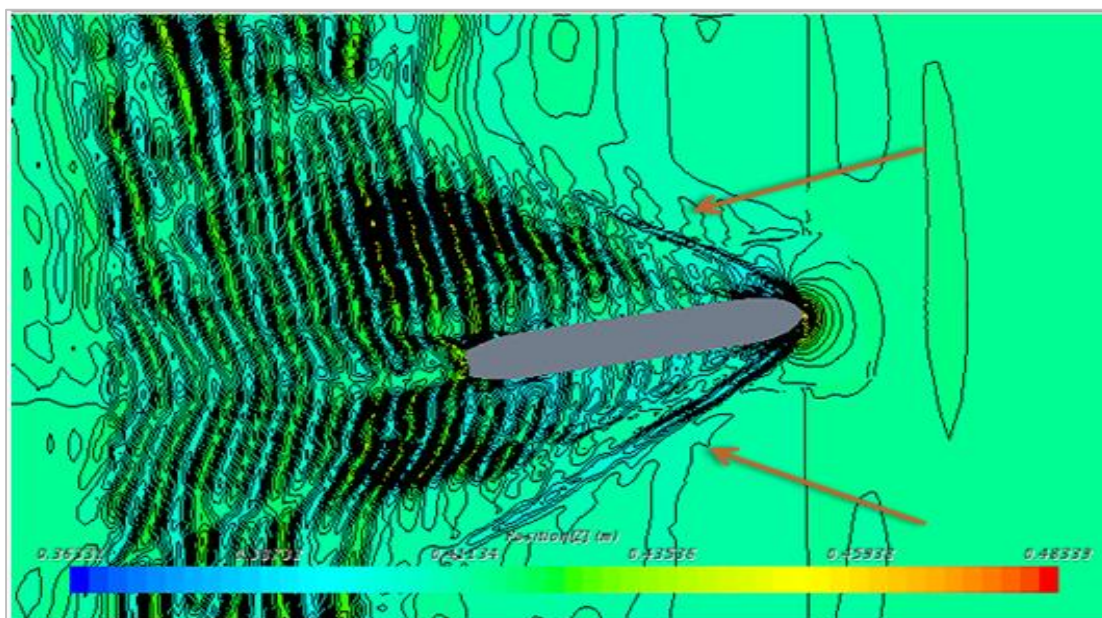
Στην περίπτωση του static drift, καθώς το πλοίο πλέει σε ήρεμο νερό με γωνία drift η πλευρά της γάστρας που είναι σε κατάσταση drift δέχεται μεγαλύτερη αντίσταση σε σχέση με την άλλη πλευρά. Επιπροσθέτως, η ελεύθερη επιφάνεια ανεβαίνει και η κατανομή της πίεσης διαμορφώνεται αναλόγως. Η κατάσταση αυτή γίνεται καλύτερα αντιληπτή κοιτάζοντας την εικόνα 4.2.1.3.1 όπου φαίνεται ξεκάθαρα η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας και η αυξημένη πίεση στην αριστερή μεριά της γάστρας (Port Side) σε σύγκριση με την δεξιά πλευρά (Starboard Side). Επιπλέον, κάνοντας μια σύγκριση μεταξύ της εικόνας 4.2.1.3.1 που βρίσκεται σε κατάσταση πλεύσης straight ahead και στην εικόνα 4.2.1.3.2 που βρίσκεται σε κατάσταση πλεύσης static drift γωνίας 10° μπορεί κάποιος να διακρίνει εύκολα την διάφορα στην κατανομή πίεσης, αλλά και την διαφορά της επιπρόσθετης αντίστασης. Η κατανομή τις πίεσης στην κατάσταση straight ahead κατανέμεται ομοιόμορφα, ενώ υπό γωνία drift 10° κατανέμεται ανομοιόμορφα. Ο λόγος είναι προφανές στην μια κατάσταση έχει γωνία πρόσκρουσης μηδέν και επωφελείται από την υδροδυναμική σχεδίαση της γάστρας ενώ η δεύτερη δεν έχει, επομένως δεν επωφελείται από την υδροδυναμική σχεδίαση της γάστρας.

4.2.1.4 Κυματισμοί Kelvin σε Static drift.

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα γίνει μια απεικόνιση των κυματισμών του μοντέλου JBC σε ήρεμο νερό με σταθερή ταχύτητα πλεύσης, για δυο διαφορετικές γωνίες static drift. Πιο συγκεκριμένα η εικόνα 4.2.1.4.1 απεικονίζει τους κυματισμούς που αναπτύσσονται κατά την πλεύση του μοντέλου JBC με γωνία drift 5° ενώ η εικόνα 4.2.1.4.2 απεικονίζει τους κυματισμούς που αναπτύσσονται κατά την πλεύση του μοντέλου JBC με γωνία drift 10°.



Εικόνα 4.2.1.4.1 : Απεικόνιση κυματισμών για γωνία drift 5°.



Εικόνα 4.2.1.4.2 : Απεικόνιση κυματισμών για γωνία drift 10°.

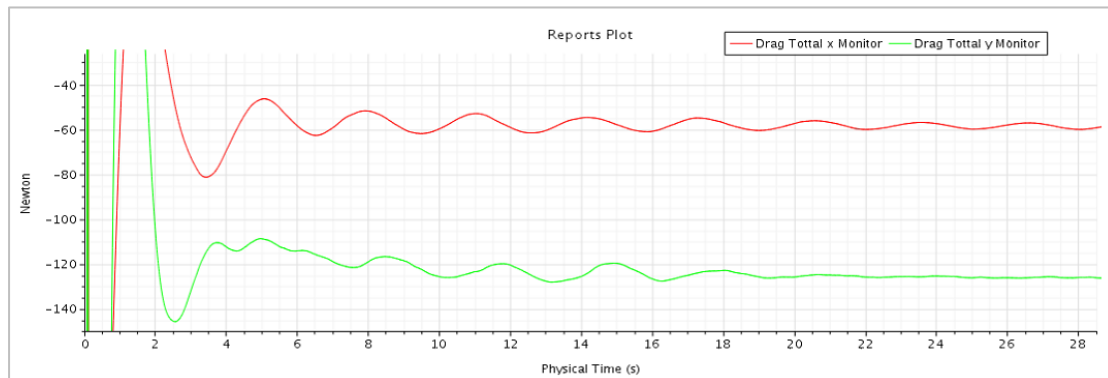
Σύμφωνα με την εικόνα 4.2.1.4.1 και την εικόνα 4.2.1.4.2 που απεικονίζουν τους κυματισμούς Kelvin που δημιουργούνται κατά το πέρας της προσομοίωσης καθώς το πλοίο πλέει με σταθερή ταχύτητα για γωνίες drift 5° και 10°, μπορεί κανείς να διακρίνει την μη γραμμική σχεδίαση των Kelvin κατά την μεταβολή της γωνίας drift.

4.2.1.5 Γραφήματα σύγκλισης στο πεδίο του χρόνου.

Στα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζεται η δύναμη του F_x και F_y για τις γωνίες drift 0° και 10° .



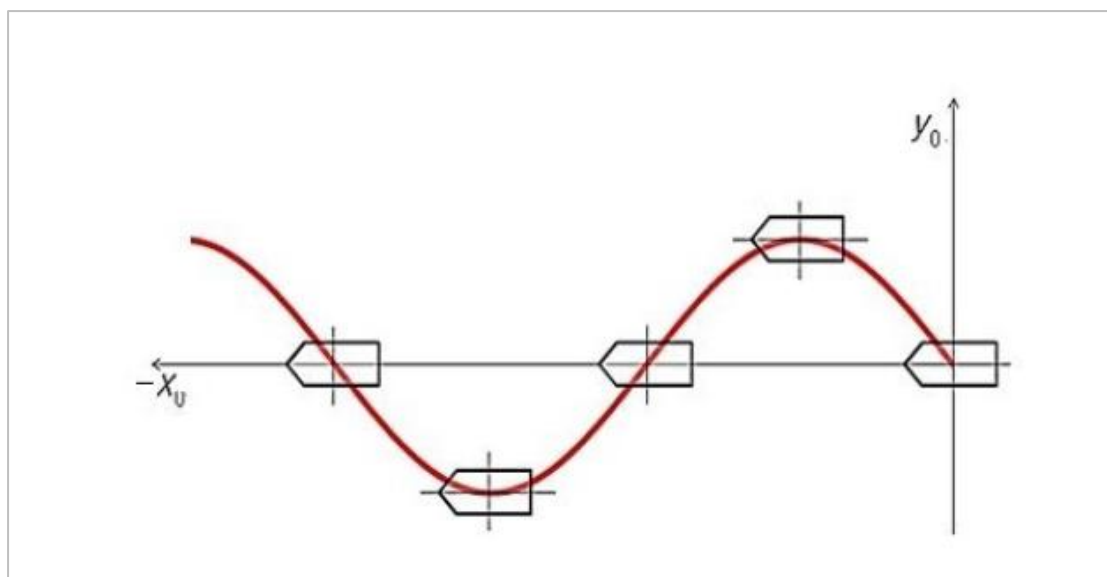
Εικόνα 4.2.1.5 : Σύγκλιση δύναμης F_x και F_y στο πεδίο του χρόνου γωνία drift 5° .



Εικόνα 4.2.1.6 Σύγκλιση δύναμης F_x και F_y στο πεδίο του χρόνου σε static drift 10° .

4.2.2 PURE SWAY

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο γίνεται μια μελέτη του μοντέλου JBC σε κίνησης Pure sway. Στην προσομοίωση της κίνησης αυτής, το πλοίο κινείται εγκάρσια στον άξονα y , χωρίς να έχει κάποια ελευθερία κινήσεων προς τους άλλους άξονες. Όπως απεικονίζεται στην εικόνα 4.2.2.1. Το μοντέλο στην προκείμενη μελέτη παραμένει σταθερό κατά τον άξονα x , ενώ ταχύτητα δίνεται στο νερό και στον αέρα όπως έχει προαναφερθεί παραπάνω με την μέθοδο VOF WAVES (Flat Wave). Το πλέγμα υπολογισμού είναι ίδιο με το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση στο static drift. Για την επίτευξη της κίνησης στο άξονα y , έγινε χρήση του πλέγματος overset.



Εικόνα 4.2.2.1 : Σχηματική αναπαράσταση της κίνησης pure sway.

Η κίνηση επετεύχθη μέσω της εξίσωσης :

$$U = Y * w * \cos(wt) \quad (42)$$

Όπου U είναι η ταχύτητα του μοντέλου στον άξονα y , και Y η μέγιστη απόσταση που θα διανύσει το μοντέλο στον άξονα y .

Όπου :

$Y = 0.125 * L_{BP}$ και είναι η συνιστώσα κάθετη στην V_s .

w : η γωνιακή συχνότητα.

t : ο χρόνος.

Μπορούμε να ισχυριστούμε ότι :

$$F_y = \frac{1}{2} * \rho * SW * C_y * U^2. \quad (43)$$

Όπου :

F_y : η πλευρική δύναμη.

ρ : η πυκνότητα του νερού.

SW : η βρεχόμενη επιφάνεια.

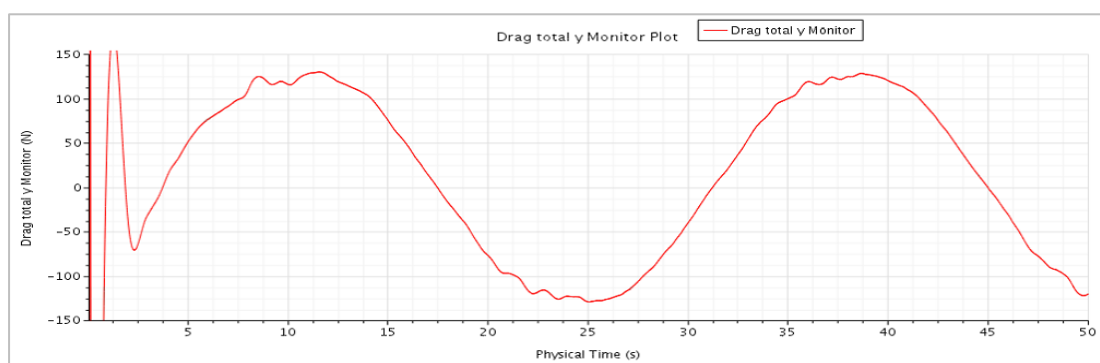
C_y : ο συντελεστής αντίστασης.

U : η ταχύτητα του μοντέλου στον άξονα y .

Η δύναμη που καταγράφηκε στον άξονα x είναι $f_x = 38.37$ N με συνολικό συντελεστή αντίστασης $C_x = 0.00452$.

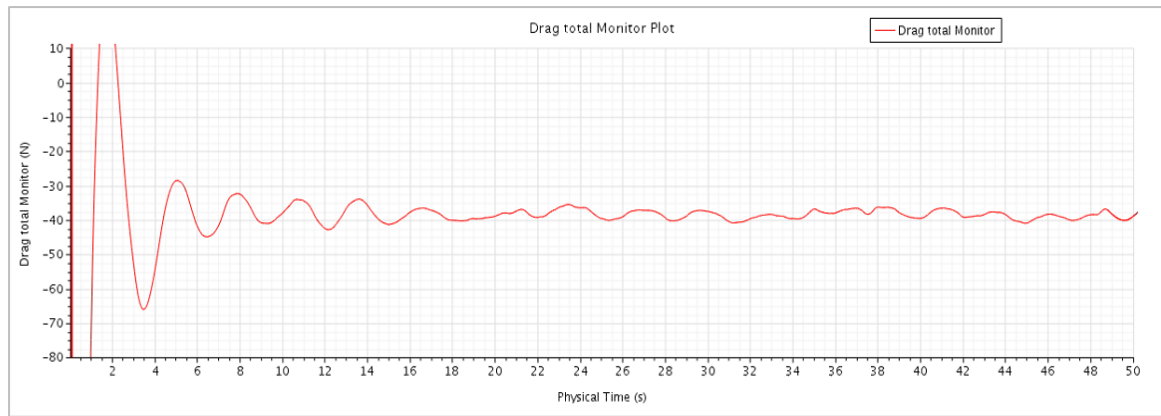
Η μέγιστη πλευρική δύναμη που καταγράφηκε στον άξονα y είναι $f_{y_{max}} = 129.15$ N με συνολικό συντελεστή αντίστασης $C_{y_{max}} = 0.01523$.

Ακολουθεί ένα διάγραμμα στο οποίο απεικονίζονται τα αποτελέσματα της πλευρικής δύναμης που αναπτύσσεται στον άξονα y κατά το πέρασ της προσομοίωσης για pure sway.



Εικόνα 4.2.2.2 : Απεικόνιση της πλευρικής δύναμης y κατά τον εγκάρσιο άξονα.

Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα, παρατηρείται ότι η δύναμη F_y στα ακρότατα είναι ίση κατά μέτρο και αντίθετη σε πρόσημο, αυτό είναι λογικό αφού η κίνηση είναι συμμετρική.



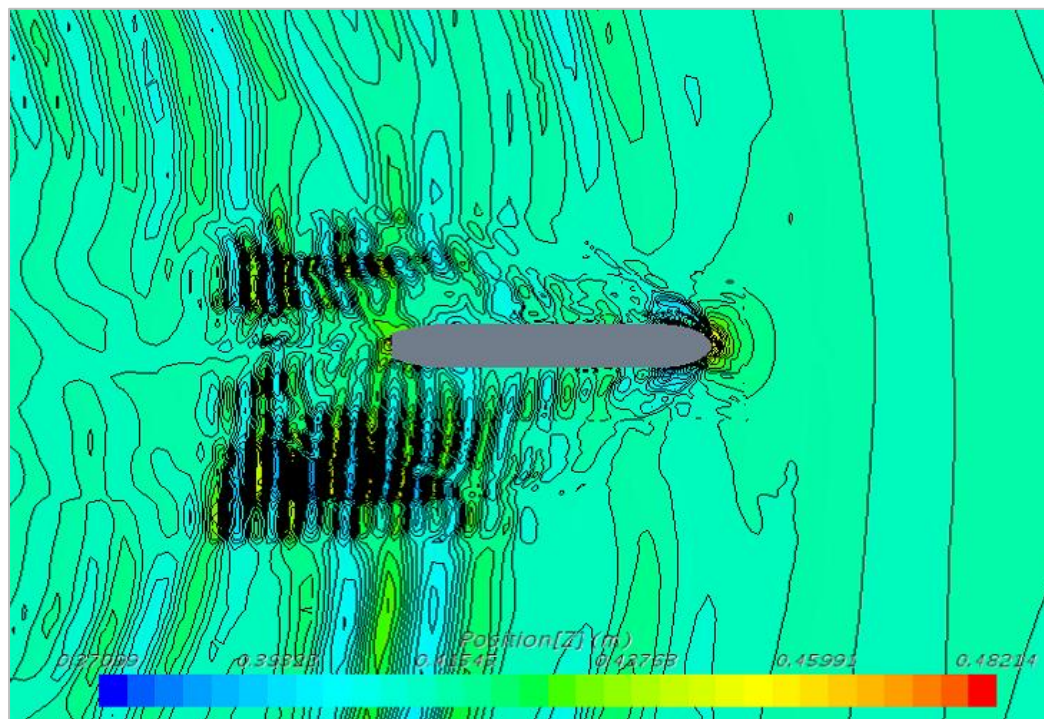
Εικόνα 4.2.2.3 : Απεικόνιση της δύναμης F_x .

Με βάση το παραπάνω διάγραμμα, όπου αφορά την δύναμη F_x , αποτυπώνεται η σύγκλιση της δύναμης στο πεδίο του χρόνου.

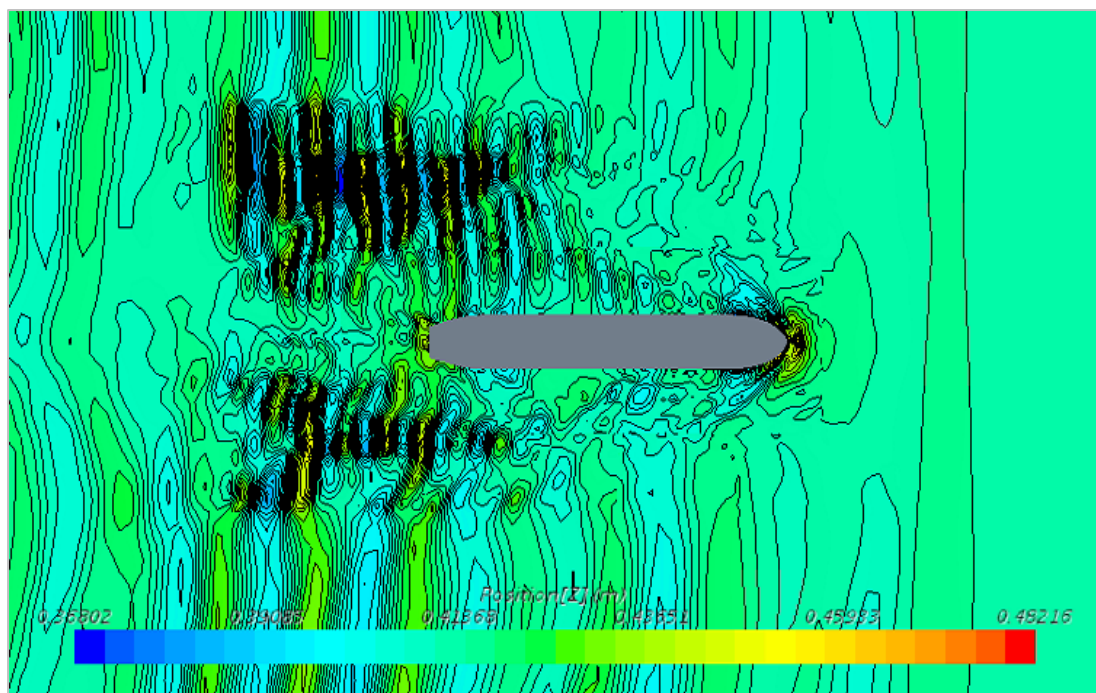
Για να έχουμε μια σωστή εικόνα απ' όλο το φαινόμενο, η προσομοίωση θα πρέπει να τρέξει τουλάχιστον 30 δευτερόλεπτα, όσο είναι και η περίοδος μιας ταλάντωσης.

4.2.2.1 Κυματισμοί Kelvin για Pure Sway.

Στη παράγραφο αυτή παρουσιάζονται οι κυματισμοί Kelvin που δημιουργούνται από την κίνηση pure sway.



Εικόνα 4.2.2.1.1 : Κυματισμοί Kelvin από pure sway για πλεύση στις αρνητική πλευρά του άξονα y .



Εικόνα 4.2.2.1.2 : Κυματισμοί Kelvin από pure sway για πλεύση στις αρνητική πλευρά του άξονα y.

Αρχικά στην εικόνα 4.2.2.1.1 απεικονίζονται οι κυματισμοί Kelvin που δημιουργούνται κατά την πλεύση του μοντέλου στην αρνητική περιοχή του εγκάρσιου άξονα y, ενώ στην εικόνα 4.2.2.1.2 απεικονίζονται οι κυματισμοί Kelvin που δημιουργούνται κατά την πλεύση του μοντέλου στην θετική περιοχή του εγκάρσιου άξονα y.

Σύμφωνα με την παραπάνω εικόνα, διακρίνεται ότι οι κυματισμοί Kelvin που δημιουργούνται από την κίνηση pure sway δεν έχουν αποτυπωθεί σωστά. Αυτό οφείλεται στον περιορισμένο φυσικό χρόνο που υποβλήθηκε η μελέτη pure sway.

5 ΣΥΝΟΨΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνήθηκε η συνολική αντίσταση του μοντέλου JBC υπό κλίμακα 1:40, για διάφορες καταστάσεις πλεύσης. Αυτό επιτεύχθηκε με την βοήθεια του λογισμικού STAR- CCM+.

Η μελέτη του συγκεκριμένου προβλήματος απαιτούσε αφενός την δημιουργία ενός κατάλληλου, ως προς τις διαστάσεις, μοντέλου προσομοίωσης με την χρήση υπολογιστικού πλέγματος και αφετέρου την διαδικασία αριθμητικής επίλυσης του. Το μοντέλο προσομοίωσης παρέχεται από την ‘Tokyo workshop’ υπό κλίμακα 1:40 σε μορφή .igs, η γάστρα παρέχεται σε συμμετρική μορφή και ανοιχτή κατά το main deck. Για τις μελέτες που προαναφέρθηκαν χρειάστηκε να γίνει επεξεργασία της γάστρας, ώστε να είναι στο σύνολο του όγκου της, όπως και κλειστή κατά το main deck, η επεξεργασία αυτή επιτεύχθηκε μέσω του λογισμικού CASES, και το αρχείο μετατράπηκε σε αρχείο .stl. Οι περιπτώσεις που επιλύθηκαν αφορούσαν την διερεύνηση της συνολικής αντίστασης σε κατάσταση πλεύσης straight ahead, static drift για γωνίες drift 0°, 5° και 10° μοίρες και pure sway, με σταθερή ταχύτητα $V_{design} = 1,17943$ m/s σε ήρεμο νερό. Για κάθε μια από τις παραπάνω περιπτώσεις, προέκυψαν αποτελέσματα που αποτυπώνουν τον συντελεστή αντίστασης και τις πλευρικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στην περίπτωση του static drift και pure sway. Εξήχθησαν, επίσης, αποτελέσματα υπό την μορφή εικόνας, για την απεικόνιση των κυματισμών Kelvin, και την κατανομή της πίεσης για κάθε μια περίπτωση ξεχωριστά.

Από τα αποτελέσματα του straight ahead δεν καταγράφηκε κάποια σημαντική απόκλιση στον συντελεστή αντίστασης, σε σύγκριση με αποτελέσματα πειραματικής μεθόδου EFD, τα οποία τα παρέχει η ITTC από το συνέδριο «Tokyo 2015 Workshop», αλλά και σε σύγκριση με αποτελέσματα τα όποια βρέθηκαν στο διαδίκτυο από μια πηγή «Yue Ding, MSc thesis» για μοντέλο τύρβης k-ε και SST k-ω. Μια σημαντική λεπτομέρεια η οποία πρέπει να αναφερθεί, είναι η κακή απεικόνιση των κυματισμών Kelvin που σημειώθηκαν στην προσομοίωση με αριθμό κελιών του υπολογιστικού πλέγματος άνω των δυο εκατομμυρίων με χρονικό βήμα επίλυσης 0.04 sec (time step). Αυτό οφείλεται στο μικρό χρονικό βήμα, για προσομοιώσεις με υπολογιστικό πλέγμα άνω του ενός εκατομμυρίου κελιών. Το χρονικό βήμα επίλυσης πρέπει να είναι από 0.01 sec και κάτω, όπως άλλωστε αναγράφεται και στις υποδείξεις της ITTC.

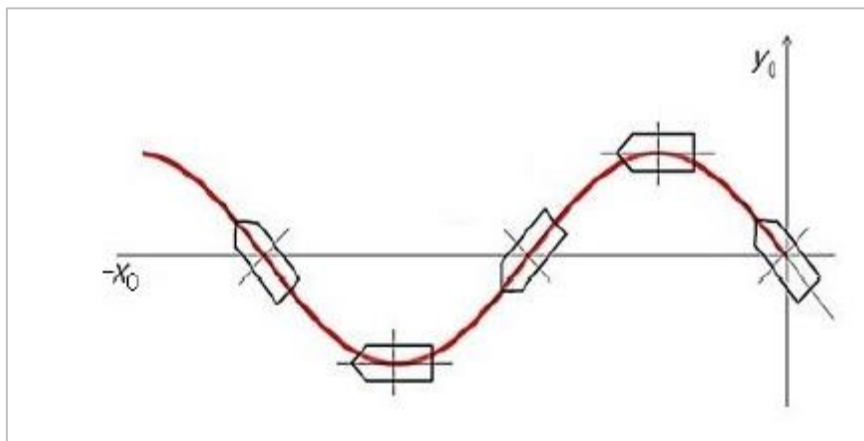
Για την εκπόνηση της προσομοίωσης του static drift έγινε χρήση του πλέγματος overset, με σκοπό να επιτευχθεί η στρέψη. Τα κελία του πλέγματος αυξήθηκαν δραματικά και η προσομοίωση έτρεξε για χρονικό βήμα 0.01 sec (time step). Για την εξέταση της αξιοπιστίας του πλέγματος, πραγματοποιήθηκε σύγκριση του συντελεστή αντίστασης από την προσομοίωση του straight ahead που υλοποιήθηκε χωρίς πλέγμα overset και την προσομοίωση του static drift για γωνία drift 0° η οποία υλοποιήθηκε με χρήση πλέγματος overset. Η απόκλιση ήταν πολύ μικρή

επομένως η αξιοπιστία του πλέγματος αποδείχτηκε. Στην προσομοίωση static drift, δεν επιτεύχθηκε σύγκριση με αποτελέσματα πειραματικής μεθόδου EFD και ο λόγος είναι η μη ύπαρξη διαθέσιμων αποτελεσμάτων στο διαδίκτυο. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για γωνία drift 5° και 10° μοίρες, υπέδειξαν αύξηση της συνολικής αντίστασης, αφού κατά την αύξηση της γωνίας drift αναπτύσσεται η πλευρική δύναμη F_y . Αυτό οφείλεται στην γωνία πρόσπτωσης η οποία είναι διάφορο του μηδενός για γωνίες drift 5° και 10° μοίρες. Τέλος, ακλούθησαν αποτελέσματα σε μορφή εικόνας όπου αναδεικνύεται η κατανομή πίεσης υπό γωνία drift όπως και η ένδειξη της μορφολογίας των κυματισμών Kelvin.

Στην περίπτωση του pure sway η προσομοίωση έτρεξε για πενήντα δευτερόλεπτα σε φυσικό χρόνο. Στα τριάντα δευτερόλεπτα ολοκληρώνεται μια περίοδος ταλάντωσης. Η δύναμη F_x που διεξήχθη από την περίπτωση του pure sway είναι στα 38.37 N, η οποία έχει 9.19 % απόκλιση από την δύναμη F_x της περίπτωσης του straight ahead. Επίσης εξάχθηκε η πλευρική δύναμη που αναπτύσσεται στον άξονα y κατά την κίνηση pure sway, η οποία στην ακραία θέση του Y η δύναμη καταγράφηκε 0 N, ενώ στο επίπεδο συμμετρίας $y=0$ καταγράφηκε η μέγιστη δύναμη των 129.15 N. Δυστυχώς, λόγω περιορισμένης υπολογιστικής ισχύος η προσομοίωση περιορίστηκε στο φυσικό χρόνο των πενήντα δευτερολέπτων, ο φυσικός χρόνος για αυτήν την περίπτωση δεν επαρκεί για την εξαγωγή μιας ολοκληρωμένης εικόνας και την πλήρη αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Παρόλα αυτά, μπορεί να παρέχει μια πρώτη εκτίμηση, που στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι επαρκής.

6 ΠΡΟΤΑΣΗ ΜΕΛΟΝΤΙΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.

Έχοντας φτάσει σε αυτό το σημείο της έρευνας, μια πρόταση για μελλοντική μελέτη θα ήταν προσομοίωση του μοντέλου JBC σε συνδυασμό κινήσεων pure sway και yaw.



Εικόνα 6.1 : Ταυτόχρονη κίνηση pure sway και yaw.

Στη παρούσα διπλωματική εργασία δεν μελετήθηκε η συγκεκριμένη κίνηση λόγω της περιορισμένης υπολογιστικής ισχύς. Η επίτευξη της προσομοίωσης αυτής προαπαιτεί μεγάλο αριθμό κελιών όπου συνεπάγεται μεγάλη υπολογιστική ισχύς.

Σύμφωνα με τις μελέτες που έχουν προηγηθεί και την αναλυτική περιγραφή τους, με τον κατάλληλο υπολογιστικό εξοπλισμό μπορεί κάποιος να φέρει εις πέρας πολύ εύκολα την προσομοίωση της ταυτόχρονης κίνησης pure sway και yaw. Επίσης ακολουθεί ένα παράρτημα στο οποίο αναγράφεται αναλυτικά η διαδικασία του straight ahead όπου ο σκοπός του παραρτήματος αυτού είναι η γρήγορη εκμάθηση του προγράμματος για κάποιον συνάδερφο ή μελετητή που θα τον ενδιέφερε να συνεχίσει την μελέτη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΕΛΛΗΝΙΚΗ

1. Γ.Κ Πολίτης «Αντίσταση και Πρόωση Πλοίου» , Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
2. Γ. Δ Τζαμπίρας «Υπολογιστική Ρευστομηχανική», Εκδόσεις Συμεών.
3. Γ.Κ. Πολίτης – Γ. Τζαμπίρας, « Πρόωση Πλοίου, Αναλυτική σχεδίαση ελίκων – Εφαρμογές CFD στην Αντίσταση και Πρόωση Πλοίου», Αθήνα, Ιούνιος 2016.
4. Δημητρακόπουλος Κ.. Α (2005) «Ειδικά θέματα υδραυλικής μηχανικής (τυρβώδες ροές)» Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα.
5. Βασίλειος Λουκόπουλος, «Υπολογιστική Ρευστομηχανική (Περιγραφή Αριθμητικών Μεθόδων) » Πανεπιστήμιο Πατρών.
6. Κωνσταντίνου Σπύρου « Δυναμική Ευστάθεια Πλοίου » Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
7. Μακρυγιάννης Κ. Γ « Τρισδιάστατη αριθμητική προσομοίωση υδροδυναμικής συμπεριφοράς πλωτής ανεμογεννήτριας τύπου Spar- Boy σε θαλάσσιους κυματισμούς » Πάτρα 2015.

ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ

8. ITTC – Recommended Procedures and Guidelines, Testing and Extrapolation Methods, General Guidelines for Uncertainty Analysis in Resistance Towing Tank Tests, Effective date: 2008
9. Tokyo 2015 A Workshop on CFD in Ship Hydrodynamics <http://www.t2015.nmri.go.jp/>
10. FIRST INTRODUCTION INTO COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS FOR MARINE APPLICATION, Vladimir I. Krasilnikov.
11. CD-Adapco (2011). USER GUIDE. : <file:///C:/Program%20Files/CD-adapco/STARCCM+11.02.010R8/doc/en/online/index.html#page/STARCCM%20P%20FGUID-BF2627F0-C612-4D89-8DFC-61B71271E321%3Den%3D.html%23>
12. Yue Ding «Scale effect on the wake field of a single Screw ship» NTNY (Norwegian University of Science and Technology), 2015.
13. Joakim Tveiten Vigsnes «Seakeeping Analysis Comparison «Between Viscous And Inviscid CFD » NTNY (Norwegian University of Science and Technology), 2018.
14. Hafizul Islam, Carlos Guedes Soares « A CFD study of a ship moving with constant drift angle in calm water and waves » Chapter- April 2018.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ.

Παρακάτω αναγράφεται η διαδικασία εισαγωγής της γεωμετρίας.

1. Εκκίνηση του λογισμικού **STAR-CCM** και στη συνέχεια δημιουργία προσομοίωσης κάνοντας κλικ στην εντολή **File > New Simulation**.
2. Έπειτα επιλέγεται η εντολή **File > Import > Import Surface Mesh** για την εισαγωγή της γεωμετρίας.
3. Ύστερα άνοιγμα **Parts > JBC_ geometry > Surfaces** για τον έλεγχο της εισαχθέντας γεωμετρίας.
4. Τέλος επιλογή της εντολής **File > Save As** αποθήκευση της προσομοίωσης ως αρχείο **.sim**

2. ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ.

2.1 Δημιουργία του towing tank.

Δημιουργία του block για τον σχηματισμό του Towing tank :

1. Δεξί κλικ **Geometry > Parts >** άνοιγμα κόμβου και επιλογή **New Shape Part > Block**.
2. Στην πλατφόρμα του δημιουργημένου block, εισάγονται τα μέγιστα και τα ελάχιστα όρια του block.
 - a. Όρισε Corner 1 [18.00, 18.00, 9.00].
 - b. Όρισε Corner 2 [-18.00, 0.00, -18.00].
3. Επιλογή **Create** και μετά **Close**.
4. Μετονομασία του καινούργιου block **Geometry > Parts > Block** σε Tank.

Στη συνέχεια πρέπει να γίνει ο διαχωρισμός σε κάθε επιφάνεια και να οριστούν οι οριακές συνθήκες.

5. Δεξί κλικ **Geometry > Parts > Tank > Surface > block surface** άνοιγμα και επιλογή **Split by Patch**.
6. Μέσα στο Split Part Surface by Path dialog, επιλέγουμε 725 στο Part Surface Patches group box.

Η αντίστοιχη επιφάνεια εμφανίζεται στο παράθυρο

7. Στο Part surface name text box , γράφουμε Top.
8. Επιλογή **create**.
9. Συνέχεια έχει ο διαχωρισμός και η μετονομασία των υπόλοιπων block σύμφωνα με την διαδικασία που προαναφέρθηκε, με τα patch και τα ονόματα που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα

Patch	Part Surface Name
726	Symmetry
727	Outlet
728	Side
729	Bottom

Εικόνα 2.1.1 : Διαχωρισμός επιφανειών Towing Tank

Μετονομασία και του τελευταίου patch απ το δέντρο τις προσομοίωσης.

10. Δεξί κλικ **Geometry > Parts > Tank > Surface > block surface** επιλογή και μετονομασία ως **Inlet**.

Για την δημιουργία του Towing Tank, εκτελείτε η λειτουργία Boolean αφαίρεσης πλέγματος :

11. Ταυτόχρονη επιλογή του Tank και JBC_ geometry:
12. Δεξί κλικ σε ένα απ τα δύο και επιλέγεται **Create Mesh Operation > Boolean > Subtract Parts**.
13. Επιλογή **οκ**.

Ο κόμβος **Operations > Subtract** δημιουργήθηκε.

14. Επιλογή του κόμβου **Operations > Subtract** ορισμός **Target Part** σε **Tank**.
15. Δεξί κλικ στον κόμβο **Operations > Subtract** επιλογή **Execute**.
16. Μετονομασία του **Parts > Subtract** part σε Virtual Towing Tank.

Για την αστικοποίηση του Virtual Towing Tank

17. Δεξί κλικ στο κενό χώρο του παραθύρου και επιλογή **Hide All Parts**.

18. Επιλογή του κόμβου **Geometry > Parts > Virtual Towing Tank** επιλογή και μετακίνηση στο παράθυρο γραφημάτων.
19. Στο μενού που θα εμφανιστεί, επιλογή **Part Displayers > Add to Geometry 1**.
20. Χρωματισμός τω επιφανειών.
 - a. Επιλογή **Scenes > Geometry Scene 1 > Displayers > Geometry 1**
 - b. Στο παράθυρο των ιδιοτήτων, ορισμός **Color Mode** σε **Distinguish Inputs**.

Η δημιουργία του Towing Tank επετεύχθη.

Παρακάτω φαίνεται ένας πίνακας ο οποίος περιέχει τις ακριβές διαστάσεις του Towing Tank σε κλίμακα Full scale και Model scale.

Πίνακας 2.1.1 : Όρια του Towing Tank

Towing Tank- boundaries	JBC	
	Model Scale	
Front (front of ship)	18.00	m
After (After shhip)	-18.00	m
Side (Port side)	18.00	m
side (Starboart side)	0.00	m
Top (After deck)	9.00	m
Bottom(from ship bottom)	-18.00	m

2.2 Διαχωρισμός των περιοχών του towing tank και δήλωση απαραίτητων στοιχείων.

Για την δήλωση των περιοχών του Towing Tank :

1. Δεξί κλικ στο **Geometry > Parts > Virtual Towing Tank** επιλογή **Assign Parts to Regions**.
2. Αντιστοιχίσει μερών στις περιοχές :
 - a. Επιλογή **Create a Region for Each Part**.
 - b. Επιλογή **Create a Boundary for Each Part Surface**.
 - c. Επιλογή **Do Not Create Interfaces From Contacts**.
 - d. Κλικ **Apply** και μετά **Close**.
3. Επέκταση του κόμβου **Regions**.

Για τον έλεγχο της δημιουργίας του καινούργιου **Virtual Towing Tank**.

4. Επέκταση του κόμβου **Virtual Towing Tank > Boundaries**

Για την πιστοποίηση των μεταφερθέντων περιοχών ξεχωριστά.

2.3 Επιλογή των κύριων χαρακτηριστικών του πλέγματος.

Πριν την παραγωγή του πλέγματος λοιπόν, πρέπει να καθοριστούν τα προαπαιτούμενα χαρακτηριστικά του πλέγματος που θα χρησιμοποιηθούν για την επίλυση της συγκεκριμένη προσομοίωση και τον χώρο στον οποίο θα δημιουργηθεί το πλέγμα, όπου στην προκειμένη περίπτωση είναι το towing tank.

Για την επιλογή των προαπαιτούμενων μοντέλων :

1. Δεξί κλικ **Geometry > Operations** επιλογή **New > Automated Mesh**.
2. Στο παράθυρο επιλογών :
 - a. Επιλογή **Virtual Towing Tank** από το **Part list**.
 - b. Επιλογή των ακόλουθων μοντέλων :

Group	Mesher
<i>Surface Meshers</i>	Surface Remesher
<i>Optional Surface Meshers</i>	Automatic Surface Repair
<i>Core Volume Meshers</i>	Trimmed Cell Mesher
<i>Optional Boundary Layer Meshers</i>	Prism Layer Mesher

Εικόνα 2.3.1 : Χαρακτηριστικά του πλέγματος.

2.4 Καθορισμός των κύριων ρυθμίσεων του πλέγματος.

Για την ρύθμιση της προσαρμογής του Prism Layer mesher :

1. Επεξεργασία **Operations > Automated Mesh > Meshers** επιλογή και ορισμός των ακόλουθων ρυθμίσεων :

Node	Property	Setting
Prism Layer Mesher	Minimum Thickness Percentage	1.0
	Boundary March Angle	75.0

Εικόνα 2.4.1 : Ρυθμίσεις Prism layer.

Για τον προσδιορισμό της γενικής μορφής του πλέγματος :

1. Επεξεργασία **Automated Mesh > Default Controls** επιλογή και ορισμός των ακόλουθων ρυθμίσεων :

Node	Property	Setting
Base Size	Value	0.1125 m
Target Surface Size > Relative Size	Percentage of Base	50
Minimum Surface Size > Relative Size	Percentage of Base	6.25
Surface Curvature > Basic Curvature	# Pts./circle	36
Auto-Repair Minimum Proximity >	Minimum Proximity	0.001
Number of Prism Layers	Number of Prism Layers	6
Prism Layer Total Thickness	Size Type	Absolute
└ Absolute Size	Value	0.02 m
Volume Growth Rate	Default Growth Rate	Slow
	Surface Growth Rate	Slow
Maximum Cell Size > Relative Size	Percentage of Base	1600

Εικόνα 2.4.2 : Γενικές ρυθμίσεις του πλέγματος.

Επιπροσθέτως, πρέπει να οριστούν οι παράμετροι των πλεγμάτων που θα χρησιμοποιηθούν για την πύκνωση των κρίσιμων σημείων.

Για τον προσδιορισμό του τοπικού πλέγματος :

2. Δεξί κλικ **Automated Mesh** > **Custom Controls** επιλογή και δημιουργία καινούργιου **Surface Control**.
3. Μετονομασία του **Surface Control** σε Deck.
4. Επεξεργασία του Deck και ορισμός των ακόλουθων ρυθμίσεων :

Node	Property	Setting
Deck	Part Surfaces	[Virtual Towing Tank.KCS_Geometry.Deck]
└ Controls		
└ Target Surface Size	Target Surface Size	Specify Custom Value
└ Minimum Surface Size	Minimum Surface Size	Specify Custom Value
└ Prism Layers	Prism Layers	Disable
└ Values		
└ Target Surface Size > Relative Size	Percentage of Base	200
└ Minimum Surface Size > Relative Size	Percentage of Base	100

Εικόνα 2.4.3 : Ρυθμίσεις τοπικού πλέγματος Deck.

5. Αντιγραφή και επικόλληση του **Deck** πάνω στο **Custom Controls** επιλογή και μετονομασία σε Hull.
6. Επεξεργασία του Hull και ορισμός των ακόλουθων ρυθμίσεων :

8. Δημιουργία καινούργιου surface control και μετονομασία σε Tank.

9. Επεξεργασία του Tank και ορισμός των ακόλουθων ρυθμίσεων :

Node	Property	Setting
Hull	Part Surfaces	[Virtual Towing Tank.KCS_Geometry.Hull]
└ Controls		
└ Prism Layers	Prism Layers	Use Parent Values
└ Values		
└ Target Surface Size > Relative Size	Percentage of Base	25
└ Minimum Surface Size > Relative Size	Percentage of Base	25

Εικόνα 2.4.4 : Ρυθμίσεις τοπικού πλέγματος Hull.

Node	Property	Setting
Tank	Part Surfaces	[Virtual Towing Tank.Tank.Bottom,Virtual Towing Tank.Tank.Inlet,Virtual Towing Tank.Tank.Outlet,Virtual Towing Tank.Tank.Side,Virtual Towing Tank.Tank.Symmetry,Virtual Towing Tank.Tank.Top]
└ Controls		
└ Target Surface Size	Target Surface Size	Specify Custom Value
└ Minimum Surface Size	Minimum Surface Size	Specify Custom Value
└ Values		
└ Target Surface Size > Relative Size	Percentage of Base	1600
└ Minimum Surface Size > Relative Size	Percentage of Base	1600

Εικόνα 2.4.5 : Ρυθμίσεις πλέγματος σε όλο το Towing Tank.

2.5 Δημιουργία τοπικού ογκομετρικού πλέγματος, σε κρίσιμα σημεία εστίασης.

1. Δημιουργία block για την ελεύθερη επιφάνεια :

a. Δεξί κλικ **Geometry** > **Parts** επιλογή **New Shape Part** > **Block**.

b. Για την δημιουργία του block, εισάγονται οι ακόλουθες τιμές :

➤ Ορισμός corner 1 [-18 m, 0 m, 0.20 m]

➤ Ορισμός corner 2 [18 m, 18 m, 0.55 m]

c. Επιλογή **create** και **close**.

d. Μετονομασία του **block** ως **free surface**.

2. Δημιουργία block για απόνερα πλαγίως :

a. Δεξί κλικ **Geometry** > **Parts** επιλογή **New Shape Part** > **Block**.

b. Για την δημιουργία του block, εισάγονται οι ακόλουθες τιμές :

➤ Ορισμός corner 1 [0.7 m , -0.4 m , 0.0 m]

➤ Ορισμός corner 2 [-3.7 m , 9.0 m , 0.515 m]

c. Επιλογή **create** και **close**.

d. Μετονομασία του **block** ως **side wakes**.

3. Δημιουργία block για απόνερα πρίμα:

a. Δεξί κλικ **Geometry** > **Parts** επιλογή **New Shape Part** > **Block**.

b. Για την δημιουργία του block, εισάγονται οι ακόλουθες τιμές :

➤ Ορισμός corner 1 [-6.5 m, -0.5 m , 0.0 m]

➤ Ορισμός corner 2 [-4.5 m, 4.65 m, 0.525 m]

- c. Επιλογή **create** και **close**.
- d. Μετονομασία του **block** ως **back wakes**.

4. Δημιουργία block για απόνερα πρίμα:

a. Δεξί κλικ **Geometry** > **Parts** επιλογή **New Shape Part** > **cylinder**.

b. Για την δημιουργία του block, εισάγονται οι ακόλουθες τιμές :

- Ορισμός corner 1 [3.6 m, -0.48 m , 0.525 m]
- Ορισμός corner 2 [3.6 m, -0.48 m, 0.0 m]
- Ακτίνα κύκλου [1 m]

c. Επιλογή **create** και **close**.

d. Μετονομασία του **block** ως **Bow**.

e.

2.6 Ορισμός των τύπων επιφανειών του towing tank .

Για τον ορισμό των τύπων ορίων :

1. Επιλογή **Regions** > **Virtual Towing Tank** > **Boundaries** > **Tank** > **Bottom** ορισμός του **Type** σε **Velocity Inlet**.
2. Παρομοίως, ακολουθείτε η ίδια διαδικασία για τον ορισμό και τον επόμενων ορίων όπως φαίνονται παρακάτω :

Boundary Name	Boundary Type
Tank.Inlet	Velocity Inlet
Tank.Outlet	Pressure Outlet
Tank.Side	Symmetry Plane
Tank.Symmetry	Symmetry Plane
Tank.Top	Velocity Inlet

Εικόνα 2.6.1 : Ορισμός των επιφανειών του Towing Tank

Όλα τα όρια του JBC_ geometry παραμένουν ως **Wall**.

2.7 Δημιουργία του πλέγματος

Εφόσον έχει προηγηθεί η προαναφέρσου διαδικασία ακολουθείτε η μετάβαση στην παραγωγή του πλέγματος.

Για την παραγωγή του πλέγματος :

1. Επιλογή **Mesh > Generate Volume Mesh.**

Η διαδικασία παραγωγής του πλέγματος έχει ξεκινήσει. Στο παράθυρο του output απεικονίζεται η τρέχων διαδικασία.

Για την απεικόνιση του πλέγματος :

2. Δημιουργία δύο επίπεδων τμημάτων :

a. Δεξί κλικ **Derived Parts** επιλογή **New Part > Section > Plane...**

b. Στο τμήμα που δημιουργείτε :

- Στο part group box, επιλογή της εντολής **select** και ύστερα επιλογή **Regions > Virtual Towing Tank .**
- Κλικ **OK.**

c. Στο πλαίσιο των παραμέτρων εισάγονται :

- Ορισμός **origin** [0.0 m, 0.0 m, -0.118 m].
- Ορισμός **normal** [0.0 m, 0.0 m, 1.0 m].
- Κλικ **create.**

d. Για το δεύτερο επίπεδο τμήμα εισάγονται οι παράμετροι :

- Ορισμός **origin** [0.5 m, 0.0 m, -0.0 m].
- Ορισμός **normal** [1.0 m, 0.0 m, 0.0 m].
- Κλικ **create.**

Δυο νέα **Derived Parts** έχουν δημιουργηθεί :

- **Plane section** και **Plane Section 2 .**

3. Κλικ Scene/ Plot.

4. Επιλογή **Displayers** > **Outline 1** > **Parts** στο παράθυρο των ρυθμίσεων , κλικ (**Custom Editor**) δίπλα απ το **Parts**.
5. Στο *Parts - Parts dialog*, απορρίπτονται όλες οι επιλογές.
6. Επιλογή **Displayers** > **Outline 1** > **Parts** στο παράθυρο των ρυθμίσεων , κλικ (**Custom Editor**) δίπλα απ το **Parts**.
7. Στο *Parts - Parts dialog*, επιλογή **Regions** > **Virtual Towing Tank** και κλικ **OK**.
8. Ταυτόχρονη επιλογή του **Section Geometry 1** και **Section Geometry 2** και ορισμός του **Mesh** σε **Activated**.
9. Δεξί κλικ στο κενό χώρο του παραθύρου των γραφημάτων και επιλογή **Apply Representation** > **Volume Mesh**.

3. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ.

3.1 Επιλογή των φυσικών μοντέλων.

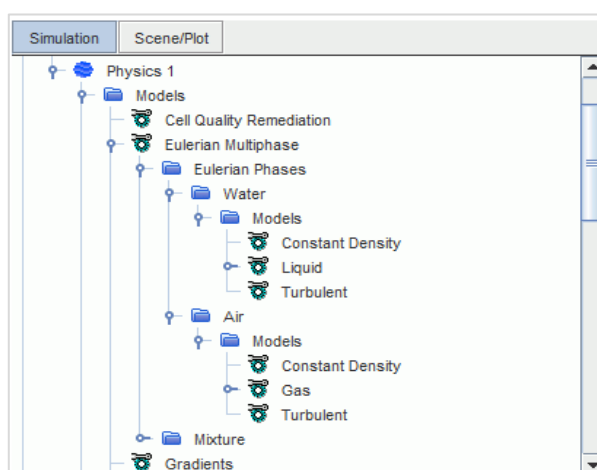
Επιλογή των προαπαιτούμενων φυσικών μοντέλων για την προσομοίωση.

1. Επιστροφή στην προσομοίωση.
2. Δεξί κλικ **Continua** > **Physics 1** > **Models** και επιλογή **Select Models...**
3. Στο παράθυρο του **Physic 1** επιλέγονται τα μοντέλα :
 - a) Επιλογή **Implicit Unsteady** από το **Time group box**.
 - b) Επιλογή **Eulerian Multiphase** από το **e Material group box**.
 - c) Επιλογή **Volume of Fluid (VOF)** από το **Multiphase Model group box**.
 - d) Επιλογή **Turbulent** από το **Viscous Regime group box**.
 - e) Επιλογή **K-Epsilon Turbulence** από το **Reynolds-Averaged Turbulence group box**.
 - f) Από το **Optional Models group box**, επιλογή **Gravity, Cell Quality Remediation**, και **VOF Waves**
 - g) Κλικ **close**.

3.2 Ορισμός της μεθόδου Euler (δύο φάσεων νερό-αέρας).

Για τον ορισμό της Eulerιανής φάσης ακολουθείτε η εξής διαδικασία :

1. Δεξί κλικ **Continua** > **Physics 1** > **Models** > **Eulerian Multiphase** > **Eulerian Phases** και επιλογή **New**.
2. Μετονομασία του **Phase 1** ως **Water**.
3. Δεξί κλικ **Eulerian Phases** > **Water** > **Models** και επιλογή **Select Models...**
4. Στο παράθυρο του **Water Model** επιλέγονται τα ακόλουθα:
 - a) Επιλογή **Liquid** από το **Material group box**.
 - b) Επιλογή **Constant Density** από το **Equation of State group box**.
 - c) Κλικ **Close**.
5. Δεξί κλικ στο **Continua** > **Physics 1** > **Models** > **Eulerian Multiphase** > **Eulerian Phases** επιλογή **New**.
6. Μετονομασία του **Phase 1** ως **Air**.
7. Δεξί κλικ **Eulerian Phases** > **Air** > **Models** επιλογή της εντολής **Select Models...**
8. Στο παράθυρο του **Air Model** επιλέγονται τα ακόλουθα:
 - a) Επιλογή **Gas** από το **Material group box**.
 - b) Επιλογή **Constant Density** από το **Equation of State group box**.
9. Κλικ **Close**.



Εικόνα 3.2.1 : Φάση του Euler.

3.3 Ορισμός του VOF WAVES.

Για τον ορισμό του επίπεδου κύματος vof ακολουθείται η εξής διαδικασία :

1. Δεξί κλικ **Continua > Physics 1 > Models > VOF Waves > Waves** επιλογή **New > Flat.**
2. Επιλογή της εντολής **Flat Vof Wave 1.**
3. Στο παράθυρο των ρυθμίσεων του Flat Vof Wave 1 επιλέγονται τα εξής :

Πίνακας 3.3.1 : Τιμές ορισμού VOF WAVES.

Direction	x	y	z	
Point On Water Level	0.00	0.00	0.41	m
Vertical Direction	0.00	0.00	1.00	
Current	-1.17934	0.00	0.00	m/s
Wind	-1.17934	0.00	0.00	m/s
Light Fluid Density	1.18415			kg/m ³
Heavy Fluid Density	997.561			kg/m ³

3.4 Ορισμός των αρχικών συνθηκών.

Για τον ορισμό των αρχικών συνθηκών ακολουθείται η εξής διαδικασία :

1. Επιλογή **Continua > Physics 1 > Initial Conditions** επιλογή και ορισμός των ακόλουθων ρυθμίσεων :

Node	Property	Setting
Pressure	Method	Field Function
	Scalar Function	Hydrostatic Pressure of FlatVofWave 1
Velocity	Method	Field Function
	Vector Function	Velocity of FlatVofWave 1
Volume Fraction	Method	Composite
└ Composite > Water	Method	Field Function
	Scalar Function	Volume Fraction of Heavy Fluid of FlatVofWave 1
└ Composite > Air	Method	Field Function
	Scalar Function	Volume Fraction of Light Fluid of FlatVofWave 1

Εικόνα 3.4.1 : Αρχικές συνθήκες πίεσης ταχύτητας και διαχωρισμού όγκου.

3.5 Απόσβεση κυματισμών.

Για την αντιμετώπιση των κυμάτων αντανάκλασης από τα όρια, παρέχεται από το λογισμικό STAR-CCM+ η λειτουργία απόσβεσης κυμάτων vof.

Για την ενεργοποίηση της λειτουργίας απόσβεσης vof από τα όρια ακολουθείται η εξής διαδικασία :

1. Επιλογή **Regions > Virtual Towing Tank > Physics Conditions > Vof Wave Damping Option** ενεργοποίηση **Damping**.
2. Επιλογή **Regions > Virtual Towing Tank > Physics Values > Vof Wave Damping Length** ορισμός του **Value** σε 9.0 m.

3.6 Ορισμός συνοριακών συνθηκών.

Για τον ορισμό των συνοριακών συνθηκών ακολουθείται η εξής διαδικασία :

1. Άνοιγμα **Regions > Virtual Towing Tank > Boundaries > Tank. Inlet** και επιλογή των ακόλουθων ρυθμίσεων :

Node	Property	Setting
Physics Conditions		
└ Velocity Specification	Method	Components
└ VofWaveDampingBoundaryOption	Method	Yes
Physics Values		
└ Velocity	Method	Field Function
	Vector Function	Velocity of FlatVofWave 1
└ Volume Fraction	Method	Composite
└ Composite > Water	Method	Field Function
	Scalar Function	Volume Fraction of Heavy Fluid of FlatVofWave 1
└ Composite > Air	Method	Field Function
	Scalar Function	Volume Fraction of Light Fluid of FlatVofWave 1

Εικόνα 3.6.1 : Συνοριακές συνθήκες.

2. Ταυτόχρονη επιλογή του **Tank. Bottom** και του **Tank. Top** και ορισμός των ακόλουθων ρυθμίσεων :

Node	Property	Setting
Physics Conditions		
└ VofWaveDampingBoundaryOption	Method	Yes
Physics Values		
└ Pressure	Method	Field Function
	Scalar Function	Hydrostatic Pressure of FlatVofWave 1
└ Volume Fraction	Method	Composite
└ Composite > Water	Method	Field Function
	Scalar Function	Volume Fraction of Heavy Fluid of FlatVofWave 1
└ Composite > Air	Method	Field Function
	Scalar Function	Volume Fraction of Light Fluid of FlatVofWave 1

Εικόνα 3.6.2 : Συνοριακές συνθήκες του Tank Bottom και του Tank Top.

Επιλογή του **Tank. Outlet** και ορισμός των ακόλουθων ρυθμίσεων :

Node	Property	Setting
Physics Conditions		
└ Velocity Specification	Method	Components
└ VofWaveDampingBoundaryOption	Method	No
Physics Values		
└ Velocity	Method	Field Function
	Vector Function	Velocity of FlatVofWave 1
└ Volume Fraction	Method	Composite
└ Composite > Water	Method	Field Function
	Scalar Function	Volume Fraction of Heavy Fluid of FlatVofWave 1
└ Composite > Air	Method	Field Function
	Scalar Function	Volume Fraction of Light Fluid of FlatVofWave 1

Εικόνα 3.6.3 : Συνοριακές συνθήκες του Tank Outlet.

1. Επιλογή **Tank. Side > Physics Conditions > Vof Wave Damping Boundary Option** ορισμός του **Method** ως **Yes**.
2. Αποθήκευση της προσομοίωσης.

3.7 Ορισμός των παραμέτρων επίλυσης και τα κριτήρια τερματισμού.

Για τον ορισμό των παραμέτρων επίλυσης έχουμε :

1. Επιλογή **Solvers > Implicit Unsteady** ορισμός **Time Step** σε 0.04 s.
2. Επιλογή **Solvers > Segregated Flow > Velocity** ορισμός **Under-Relaxation Factor** σε 0.7.
3. Επιλογή **Solvers > Segregated Flow > Pressure** ορισμός **Under-Relaxation Factor** σε 0.4.
4. Επιλογή **Solvers > Segregated VOF** ορισμός **Under-Relaxation Factor** σε 0.8.

Για τον ορισμό των κριτηρίων τερματισμού έχουμε :

1. Επιλογή **Stopping Criteria > Maximum Inner Iterations** ορισμός **Maximum Inner Iteration** σε 10.
2. Επιλογή **Stopping Criteria > Maximum Physical Time** ορισμός **Maximum Physical Time** σε 200.0 s.
3. Επιλογή **Stopping Criteria > Maximum Steps** ορισμός ως **Enabled**.
4. Αποθήκευση της προσομοίωσης.