



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧ/ΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΝΑΥΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ

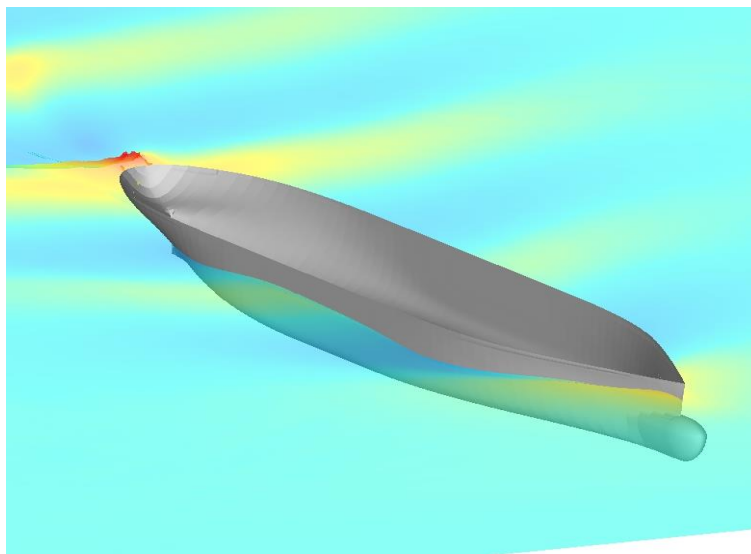
## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΘΕΜΑ:

*«ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥ ΣΕ ΠΛΟΙΑ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ*

*ΣΥΣΤΗΜΑΤΙΚΩΝ ΣΕΙΡΩΝ 60 ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ*

*ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΥΠΑΡΞΗΣ ΒΟΛΒΟΥ ΚΑΙ ΤΩΝ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΝ*

*ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΑΥΤΟΥ ΣΤΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥ»*



Τζάφος Παναγιώτης  
Αθήνα, Ιούλιος 2017

Επιβλέπων Καθηγητής  
Γεώργιος Τζαμπίρας

Τριμελής Επιτροπή  
Καθ. Γ. Τζαμπίρας, Καθ. Γρ. Γρηγορόπουλος, Αναπλ. Καθ. Κ. Μπελιμπασάκης

## 1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αρχικός στόχος αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η επέκταση του «αρχείου» για την πρόλεξη της αντίστασης κυματισμού, που εμφανίζουν μοντέλα της συστηματικής σειράς 60 όταν κινούνται σε αδιατάρακτη ελεύθερη επιφάνεια χωρίς αρχική διαγωγή. Για την επίτευξη αυτού του στόχου έγινε χρήση του προγράμματος *panelw.f*, το οποίο έχει αναπτυχθεί στο *Εργαστήριο Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ)* από τον Καθηγητή Γεώργιο Τζαμπίρα και ενσωματώνει τη θεωρία δυναμικού, η οποία δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα για την αντίσταση κυματισμού.

Η παραπάνω θεωρία βασίζεται σε ορισμένες παραδοχές. Το ρευστό θεωρείται μη - συνεκτικό και ασυμπίεστο και το πεδίο ροής αστρόβιλο, προκειμένου να γίνει δυνατή η επίλυση του συστήματος εξισώσεων *Navier – Stokes* που χαρακτηρίζει τη ροή γύρω από τη γάστρα του πλοίου. Η μέθοδος αυτή, όμως, προϋποθέτει την εξ'αρχής γνώση της μορφής της ελεύθερης επιφάνειας, κάτι που δεν ισχύει για τις περιπτώσεις που μελετούνται. Κάνοντας, όμως, χρήση μιας επαναληπτικής διαδικασίας γίνεται δυνατός ο υπολογισμός της ελεύθερης επιφάνειας με ικανοποιητική ακρίβεια, εκτός βέβαια από την περιοχή του ομόρρου για την οποία δεν ισχύουν οι παραδοχές που αναφέρθηκαν στην αρχή. Η ελεύθερη επιφάνεια, όπως και η βυθισμένη επιφάνεια της γάστρας αναπαριστώνται με τη βοήθεια κάποιων τετράπλευρων στοιχείων που καλούνται *panels*. Σε κάποιο ενδιάμεσο βήμα της διαδικασίας η ελεύθερη επιφάνεια θεωρείται γνωστή και επιβάλλεται η κινηματική οριακή συνθήκη θεωρώντας την ένταση της πηγής σε κάθε στοιχείο σταθερή και επιλύεται το ευθύ πρόβλημα της θεωρίας δυναμικού. Σε κάθε ενδιάμεσο βήμα η δυναμική οριακή συνθήκη δεν ικανοποιείται, δηλαδή η πίεση που υπολογίζεται δεν είναι ίση με την πραγματική (*στατική = 0 + υδροστατική = ρgz*). Η διαφορά τους εισάγεται σαν όρος πηγής στην ατριβή εξίσωση μεταφοράς για την κατακόρυφη συνιστώσα  $u_z^*$ . Με τη διορθωμένη κατακόρυφη συνιστώσα επαναπροσδιορίζεται η ελεύθερη επιφάνεια σε δύο βήματα. Για τη νέα ελεύθερη επιφάνεια επιλύεται ξανά το ευθύ πρόβλημα της θεωρίας δυναμικού. Η σύγκλιση της μεθόδου επιτυγχάνεται με την ταυτόχρονη ικανοποίηση της κινηματικής και της δυναμικής οριακής συνθήκης. Στη συνέχεια με ολοκλήρωση της πίεσης σε κάθε στοιχείο της γάστρας υπολογίζεται η αντίσταση πίεσης που θεωρείται εδώ ίση με την αντίσταση κυματισμού, λόγω των παραδοχών της θεωρίας δυναμικού για αστρόβιλο και ατριβές πεδίο. Για την παραγωγή των *panels* γίνεται υποδιαίρεση της γάστρας σε 5 περιοχές. Κάθε περιοχή αποτελείται από διδιάστατες εγκάρσιες τομές που περιγράφονται αναλυτικά από το σύμμορφο μετασχηματισμό.

Δεύτερος στόχος της εργασίας αυτής είναι να διαπιστώσει τα οφέλη που παρουσιάζει ο βολβός, όταν αυτός εισάγεται στα πλοία της γεωμετρίας της σειράς 60, συγκρίνοντας την αντίσταση που υπολογίζεται, με το αντίστοιχο μοντέλο χωρίς βολβό. Οι βολβοί επιλέχθηκαν με βάση τις σχεδιαστικές οδηγίες του *A.M. Kracht* ως οι βέλτιστοι. Για τον υπολογισμό της αντίστασης πλοίου με βολβό έγινε πάλι χρήση του υπολογιστικού προγράμματος *panelw.f* που αναφέρθηκε παραπάνω. Η γεωμετρία των πλοίων σειράς 60 τροποποιήθηκε έτσι ώστε να ενσωματωθεί ομαλά ο βολβός. Η τελευταία ενέργεια υλοποιείται από το πρόγραμμα *adbulb.exe*, που έχει αναπτυχθεί στο *Εργαστήριο Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής* και η λειτουργία του περιγράφεται παρακάτω. Στη συνέχεια τα τετράπλευρα στοιχεία κατασκευάστηκαν για τη νέα γεωμετρία της γάστρας όπως και για την ελεύθερη επιφάνεια, με χρήση του σύμμορφου μετασχηματισμού. Για όλες τις καταστάσεις που εξετάστηκαν, δηλαδή, για λεπτόγραμμα πλοία με μεγάλες ταχύτητες και για πιο «γεμάτες» γεωμετρίες με μικρές ταχύτητες διαπιστώθηκε μείωση της αντίστασης με τη χρήση βέλτιστου βολβού, κάτι που ήταν και αρχικά αναμενόμενο.

Ως τελικό στόχο η εργασία αυτή έχει την επαλήθευση ή απόρριψη των προβλέψεων του *A. M. Kracht* σχετικά με την επίδραση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του βολβού στην αντίσταση κυματισμού με χρήση της θεωρίας δυναμικού. Εξυπηρετώντας αυτό το σκοπό, 4 ακόμα βολβοί για κάθε γεωμετρία επιλέχθηκαν, δηλαδή 12 στο σύνολο, και αφού υπολογίστηκαν οι επί μέρους αντιστάσεις τους, έγινε σύγκριση με αυτές των βέλτιστων τους γεωμετριών. Παρατηρήθηκε απόκλιση των προβλέψεων του *Kracht*, από τα αποτελέσματα αυτής της εργασίας και η απόκλιση αυτή δικαιολογείται εν μέρει από την μη πληρότητα των διαγραμμάτων που χρησιμοποίησε ο *Kracht*.

## 2. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή Γεώργιο Τζαμπίρα που μου έδωσε τη δυνατότητα να ασχοληθώ με ένα ενδιαφέρον αντικείμενο στα πλαίσια της διπλωματικής μου εργασίας. Τον ευχαριστώ επίσης, για τη βοήθεια που μου παρείχε όποτε τη χρειάστηκα στην πορεία.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο Διδάκτορα Στυλιανό Πολύζο, η συμβολή του οποίου υπήρξε σημαντική για την υλοποίηση αυτής της εργασίας.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τους γονείς και τον αδερφό μου για τη στήριξη που μου παρείχαν καθ' όλη τη διάρκεια της προσπάθειάς μου αυτής.

### 3. ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	p. [2]
2. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	p. [3]
3. ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	p. [4]
4. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	p. [5]
5. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ.....	p. [7]
5.1 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ.....	p. [7]
5.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ.....	p. [10]
5.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ $C_w$ .....	p. [12]
5.4 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΓΑΣΤΡΑΣ.....	p. [14]
<i>ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ADBULB.EXE</i> .....	p. [15]
5.5 ΣΥΜΜΟΡΦΟΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ.....	p. [16]
5.6 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΩΣ ΤΗΝ ΕΞΑΓΩΓΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	p. [18]
<i>ΓΕΝΙΚΑ</i> .....	p. [18]
<i>ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΒΟΛΒΟΥΣ</i> .....	p. [18]
6. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	p. [20]
6.1 ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΑΡΙΘΜΟΣ PANELS.....	p. [20]
6.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	p. [23]
<i>[<math>C_B = 0.60</math> &amp; <math>F_N = 0.29</math>]</i> .....	p. [23]
<i>[<math>C_B = 0.70</math> &amp; <math>F_N = 0.260</math>]</i> .....	p. [43]
<i>[<math>C_B = 0.80</math> &amp; <math>F_N = 0.200</math>]</i> .....	p. [61]
7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	p. [81]
8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	p. [82]

#### 4. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το πεδίο ροής γύρω από πλοία περιγράφεται από τις εξισώσεις *Navier – Stokes* και την εξίσωση συνέχειας. Η επίλυση αυτών των μη – γραμμικών εξισώσεων καθίσταται αδύνατη χωρίς την εισαγωγή κάποιων παραδοχών. Σε αυτή την εργασία, το πεδίο ροής θεωρείται αστρόβιλο και το ρευστό μη – συνεκτικό και ασυμπίεστο. Έτσι οι μη – γραμμικές εξισώσεις *Navier – Stokes*, απλοποιούνται τώρα σε εξισώσεις τύπου *Euler* και το δυναμικό  $\varphi$  της ροής περιγράφεται τώρα από μια εξίσωση τύπου *Laplace*. Πλέον η επίλυση του συστήματος καθίσταται εύκολη με εφαρμογή της θεωρίας δυναμικού. Η τελευταία, όμως, προϋποθέτει την εξ' αρχής γνώση της μορφής της ελεύθερης επιφάνειας, κάτι που δεν ισχύει σε αυτή την εργασία. Το πρόβλημα αυτό επιλύεται με την εισαγωγή μιας επαναληπτικής διαδικασίας για τον υπολογισμό της ελεύθερης επιφάνειας, διαδικασία που έχει αναπτυχθεί στο *Εργαστήριο Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ)* από τον Καθηγητή *Γεώργιο Τζαμπίρα*. Η παραπάνω τεχνική ενσωματώνεται στο πρόγραμμα *panelw.f*, το οποίο μας δίνει τελικά τη δυνατότητα υπολογισμού της αντίστασης κυματισμού, που είναι και το μέγεθος που μας ενδιαφέρει σε αυτή την εργασία.

Συνοπτικά το πρόγραμμα λειτουργεί ως εξής. Η ελεύθερη επιφάνεια, όπως και η βυθισμένη επιφάνεια της γάστρας αναπαριστώνται με τη βοήθεια κάποιων τετράπλευρων στοιχείων που καλούνται *panels*. Για την παραγωγή των *panels* γίνεται υποδιαίρεση της γάστρας σε 5 περιοχές. Κάθε περιοχή αποτελείται από διδιάστατες εγκάρσιες τομές που περιγράφονται αναλυτικά από το σύμμορφο μετασχηματισμό.

Σε κάποιο ενδιάμεσο βήμα της επαναληπτικής διαδικασίας η ελεύθερη επιφάνεια θεωρείται γνωστή και επιβάλλεται η κινηματική οριακή συνθήκη θεωρώντας την ένταση της πηγής σε κάθε στοιχείο σταθερή και επιλύεται το ευθύ πρόβλημα της θεωρίας δυναμικού.

Η πίεση που προκύπτει στην επιφάνεια δεν ικανοποιεί την δυναμική οριακή συνθήκη και η διαφορά εισάγεται σαν όρος πηγής στην ατριβή εξίσωση μεταφοράς για την κατακόρυφη συνιστώσα  $u_z^*$ . Με τη διορθωμένη κατακόρυφη συνιστώσα επαναπροσδιορίζεται η ελεύθερη επιφάνεια σε δύο βήματα.

Για τη νέα ελεύθερη επιφάνεια επιλύεται ξανά το ευθύ πρόβλημα της θεωρίας δυναμικού. Η σύγκλιση της μεθόδου επιτυγχάνεται με την ταυτόχρονη ικανοποίηση της κινηματικής και της δυναμικής οριακής συνθήκης.

Στη συνέχεια με ολοκλήρωση της πίεσης σε κάθε στοιχείο της γάστρας υπολογίζεται η αντίσταση πίεσης. Στο παρόν, η αντίσταση πίεσης ισούται με την *αντίσταση κυματισμού  $C_w$* , καθώς λόγω των παραδοχών η αντίσταση πίεσης λόγω συνεκτικότητας και η αντίσταση τριβής θεωρούνται μηδενικές.

Χρησιμοποιώντας το παραπάνω πρόγραμμα έγινε υπολογισμός του  $C_w$  για 3 καταστάσεις γάστρας χωρίς βολβό και 15 όμοιες καταστάσεις ( $C_b, F_n$ ) γάστρας με βολβό. Τα αποτελέσματα συγκεντρώνονται και παρουσιάζονται στο κύριο σώμα της διπλωματικής και συγκεκριμένα στην ενότητα 6.2.

Τα πλοία της συστηματικής σειράς 60 παραδοσιακά δεν διαθέτουν βολβό. Για την εισαγωγή βολβοειδούς πλώρας στα πλοία της σειράς έγινε μελέτη του αντικειμένου του βολβού. Στη συνέχεια η επιλογή του εκάστοτε βολβού δεν έγινε αυθαίρετα, αλλά βασίστηκε σε προϋπάρχουσες σχεδιαστικές οδηγίες (Kracht, 1978) με στόχο την επιβεβαίωση ή την απόρριψή τους.

Η εφαρμογή του βολβού έχει επικρατήσει πλέον σε όλους τους τύπους πλοίων λόγω των καλών ιδιοτήτων που προσφέρει στην αντίσταση κυματισμού σε ήρεμο νερό. Η τελευταία παίρνει μεγάλες τιμές σε πλοία που έχουν υψηλές ταχύτητες σχεδίασης. Ακόμα όμως και σε βραδέα, ογκώδη σκάφη έχουν παρατηρηθεί υψηλές τιμές αντίστασης κυματισμού, λόγω των έντονων κλίσεων της γάστρας περί τις παρειές στην πλώρη (Παπανικολάου, 2009). Συνεπώς γίνεται αντιληπτή η μεγάλη βαρύτητα της αντίστασης κυματισμού επί της ολικής. Έτσι, το αντικείμενο της σχεδίασης της βολβοειδούς πλώρας καταστάται

ενδιαφέρον, αλλά δεν παύει να αποτελεί και δύσκολο εγχείρημα καθώς είναι τόσο χρονοβόρα, όσο και δαπανηρή η διεξαγωγή των κατάλληλων πειραμάτων σε δεξαμενή. Στο παρελθόν έχουν γίνει διάφορες προσπάθειες ώστε να καλύψουν το κενό των σχεδιαστικών δεδομένων των βολβών με σημαντικότερη την έρευνα του *A. M. Kracht* (Kracht, 1978).

Η παρούσα εργασία, στηρίζεται στα διαγράμματα που προέκυψαν από τη μελέτη του *Kracht*, τα οποία με τη σειρά τους είναι αποτέλεσμα στατιστικής ανάλυσης των πειραμάτων που διενεργήθηκαν στις *Δεξαμενές Προτύπων του Αμβούργου και του Βερολίνου*, *HSVA* και *VWS* αντίστοιχα. Τα παραπάνω εμπλουτίστηκαν με επί πλέον πειράματα για να καλυφθούν τα κενά.

Στόχος της εργασίας είναι η επιβεβαίωση ή η απόρριψη της κοινής παραδοχής της θετικής επίδρασης των βολβών στην αντίσταση κυματισμού, με τη χρήση της υπολογιστικής ρευστομηχανικής. Για τις τρεις γεωμετρίες που αναφέρθηκαν παραπάνω, κατασκευάστηκε και ενσωματώθηκε στην πλήρη βολβός, ο οποίος σύμφωνα με τον *Kracht* παρουσιάζει τη βέλτιστη συμπεριφορά όσον αφορά την αντίσταση κυματισμού. Αυτές οι ενέργειες υλοποιήθηκαν με χρήση του προγράμματος *adbulb.exe*, η δράση του οποίου περιγράφεται αναλυτικά στην ενότητα 5.4. Τα αρχεία εξόδου του *adbulb*, εισάγονται στο πρόγραμμα *condor.exe*. Στη συνέχεια ο κώδικας δυναμικής ροής έτρεξε εκ νέου και παρουσίασε αποτελέσματα για τον συντελεστή αντίστασης κυματισμού  $C_w$  του κάθε πλοίου. Η αντίσταση πλοίου με και χωρίς βολβό συγκρίνεται στην ενότητα 6.2 και γίνεται τελικά η επιβεβαίωση της θετικής επίδρασης του βολβού στην αντίσταση κυματισμού με χρήση υπολογιστικής ρευστομηχανικής.

Ο τελικός στόχος που τέθηκε και επιτεύχθηκε είναι η ποιοτική και η ποσοτική επίδραση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του βολβού στην αντίσταση κυματισμού. Οι βασικές παράμετροι του βολβού περιγράφονται στην ενότητα 5.6. Με παραλλαγή δύο κάθε φορά εξ αυτών, μετρήθηκε η νέα αντίσταση κυματισμού με την μέθοδο που έχουμε ήδη περιγράψει νωρίτερα. Συνολικά μελετήθηκαν 15 γάστρες με βολβό, ή πιο συγκεκριμένα 5 γεωμετρίες για κάθε έναν από τους 3 συντελεστές μορφής που αναφέρθηκαν παραπάνω. Για κάθε συντελεστή μορφής μελετήθηκε η περίπτωση γάστρας χωρίς βολβό, περίπτωση γάστρας με το βέλτιστο κατά τον *Kracht* βολβό και 4 περιπτώσεις γάστρας με παραλλαγή στις παραμέτρους του βέλτιστου βολβού. Αυτό που τελικά παρατηρήθηκε, είναι η σχετική απόκλιση των προβλέψεων του *Kracht* από τα αποτελέσματα αυτής της εργασίας.

## 5. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ

Για τον υπολογισμό της αντίστασης κυματισμού του πλοίου, ακολουθείται αριθμητική μέθοδος που βασίζεται στη θεωρία δυναμικού. Η επίλυση γίνεται με χρήση του προγράμματος *panel.w.f* που έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ) από τον Καθηγητή Γεώργιο Τζαμπίρα. Το πεδίο ροής θεωρείται ασυμπιεστο, ατριβές και αστρόβιλο. Ο τρόπος επίλυσης βασίζεται στη διατύπωση της θεωρίας δυναμικού των *Hess & Smith* (Hess & J.L.Smith, 1966)

### 5.1 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ

Για ένα ασυμπιεστο και ατριβές ρευστό όπως αυτό που έχει υποτεθεί για αυτή την έρευνα,  $\rho = \text{const.}$  και  $\mu = \nu = 0$ , συνεπώς οι γενικευμένες *Navier – Stokes* εξισώσεις (5.1.1) υποβιβάζονται στη μορφή της *Euler*-ιανής εξίσωσης της κίνησης (5.1.2):

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \rho u_x}{\partial t} + \text{div}(\rho u_x \mathbf{U}) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad} u_x) + S_{M_x} \\ \frac{\partial \rho u_y}{\partial t} + \text{div}(\rho u_y \mathbf{U}) &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad} u_y) + S_{M_y} \\ \frac{\partial \rho u_z}{\partial t} + \text{div}(\rho u_z \mathbf{U}) &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad} u_z) + S_{M_z} \end{aligned} \right\} \quad (5.1.1)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u_x}{\partial t} + \text{div}(u_x \mathbf{U}) &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \\ \frac{\partial u_y}{\partial t} + \text{div}(u_y \mathbf{U}) &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \\ \frac{\partial u_z}{\partial t} + \text{div}(u_z \mathbf{U}) &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \end{aligned} \right\} \quad (5.1.2a)$$

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + (\mathbf{U} \cdot \text{grad}) \mathbf{U} = -\frac{1}{\rho} \text{grad} p \quad (5.1.2b)$$

Και επίσης, η εξίσωση συνέχειας (5.1.3) απλοποιείται στην (5.1.4):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{U}) = 0 \quad (5.1.3)$$

$$\text{div}(\mathbf{U}) = 0 \quad (5.1.4)$$

Για την επίλυση των παραπάνω εξισώσεων, πρέπει να εισαχθούν ορισμένες οριακές συνθήκες. Η μέθοδος που ακολουθείται (Hess, 1966) μπορεί να λύσει το ευθύ πρόβλημα της ρευστομηχανικής, με την προϋπόθεση ότι οι οριακές συνθήκες είναι γνωστές, έστω συναρτήσεις του χρόνου και η ταχύτητα του ρευστού είναι επίσης γνωστή πάνω στα σύνορα. Στην περίπτωση που μελετάμε παρ' όλα αυτά, τα σύνορα δεν είναι γνωστά εξ' αρχής, καθώς δεν είναι γνωστή η μορφή της ελεύθερης επιφάνειας, όπως και η δυναμική συμπεριφορά του πλοίου. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα, υιοθετείται μια επαναληπτική διαδικασία όπου η μορφή της ελεύθερης επιφάνειας θεωρείται γνωστή εξ' αρχής, με το δυναμικό πεδίο ροής να υπολογίζεται στη συνέχεια και την ελεύθερη επιφάνεια να ανανεώνεται στο τέλος (βλ. και 5.2) (Tzabiras, 2008).

Στη συνέχεια η συνοριακή συνθήκη θα γράφεται για όλο το σύνορο  $S$  ως:

$$\mathbf{U} \cdot \mathbf{n}|_S = \mathbf{F} \quad (5.1.5)$$

Όπου  $n$  είναι το μοναδιαίο κάθετο διάνυσμα σε κάποιο σημείο του  $S$ , και  $F = F(x, t)$  είναι μια γνωστή συνάρτηση της θέσης πάνω στο  $S$  και του χρόνου. Στο πρόβλημά μας τα σύνορα θεωρούνται ακίνητα, συνεπώς:

$$\mathbf{U} \cdot \mathbf{n}|_S = 0 \quad (5.1.6)$$

Επίσης, χρειάζεται και η κατάλληλη συνθήκη στο άπειρο.

Οι παραπάνω εξισώσεις ορίζουν ένα ασυμπίεστο και μη συνεκτικό πεδίο, αλλά όχι και ένα πεδίο δυναμικής ροής. Για ένα πεδίο δυναμικής ροής ισχύει ότι το άνωσμα της ταχύτητας ισούται με την αρνητική κλίση μιας βαθμωτής συνάρτησης δυναμικού  $\varphi$ :

$$\mathbf{U} = -\nabla\varphi \quad (5.1.7)$$

Από τη διανυσματική ανάλυση είναι γνωστό ότι η στροβιλότητα ενός πεδίου δυναμικού είναι ίση με 0:

$$\nabla \times \nabla\varphi = 0 \quad (5.1.8)$$

Συνεπώς η στροβιλότητα ενός πεδίου δυναμικής ροής είναι μηδενική:

$$\nabla \times \mathbf{U} = 0 \quad (5.1.9)$$

Συνεπώς ένα πεδίο δυναμικού είναι ένα αστρόβιλο πεδίο.

Σύμφωνα με τη θεώρηση του *Hess* θεωρούμε ότι το άνωσμα της ταχύτητας  $U$  εκφράζεται ως το άθροισμα της επ' άπειρο ταχύτητας του πεδίου και της διαταραχής λόγω της παρουσίας του συνόρου:

$$\mathbf{U} = \mathbf{U}_\infty + \mathbf{u} \quad (5.1.10)$$

Θεωρούμε ότι η διαταραχή της ταχύτητας είναι ένα δυναμικό πεδίο:

$$\mathbf{u} = -\text{grad}\varphi \quad (5.1.11)$$

Οπότε η  $\mathbf{u}$  ικανοποιεί την εξίσωση (5.1.4):

$$\text{div}(\mathbf{u}) = 0 \quad (5.1.12)$$

Συνεπώς το δυναμικό  $\varphi$  της διαταραχής ικανοποιεί την εξίσωση *Laplace*:

$$\nabla^2\varphi = 0 \quad (5.1.13)$$

Οι οριακές συνθήκες για το  $\varphi$  γράφονται:

$$\text{grad}\varphi \cdot \mathbf{n}|_S = \left. \frac{\partial\varphi}{\partial\mathbf{n}} \right|_S = \mathbf{U}_\infty \cdot \mathbf{n}|_S \quad (5.1.14)$$



$$|\text{grad}\varphi| \rightarrow 0 \quad (5.1.15)$$

Οι εξισώσεις (5.1.13), (5.1.14) και (5.1.15) αποτελούν ένα καλώς τεθιμένο πρόβλημα για το δυναμικό  $\varphi$ , το οποίο και επιλύεται στη συνέχεια.

Το πλεονέκτημα που εμφανίζει η θεωρία δυναμικού είναι ο ανεξάρτητος υπολογισμός της ταχύτητας από την πίεση, καθώς δεν απαιτείται η επίλυση των εξισώσεων μεταφοράς για τον υπολογισμό της ταχύτητας.

Για τον υπολογισμό της πίεσης χρησιμοποιείται η (5.1.2) εξίσωση *Bernoulli*:

$$p - p_\infty = \frac{1}{2}\rho(|\mathbf{U}_\infty|^2 - |\mathbf{U}|^2) \quad (5.1.16)$$

Όπου  $p_\infty = 0$  η πίεση στο άπειρο.

Για τον υπολογισμό του συντελεστή  $C_p$ , η (5.1.16) επαναδιατυπώνεται ως εξής:

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2}\rho|\mathbf{U}|^2} = 1 - \frac{|\mathbf{U}|^2}{|\mathbf{U}_\infty|^2} \quad (5.1.17)$$

Η θεωρία δυναμικού μπορεί να περιγράψει με ικανοποιητικά αποτελέσματα ροές στις οποίες η συνεκτικότητα και η στροβιλότητα δεν είναι σημαντικές. Αποτυγχάνει, λοιπόν στις περιοχές του ομόρρου και των οριακών στρωμάτων. Στην έρευνα αυτή λοιπόν, στην οποία επιχειρείται να προσδιορισθεί αρχικά η ελεύθερη επιφάνεια, αναμένονται καλά αποτελέσματα για όλο το πλοίο εκτός από την περιοχή της πρύμνης.

Για την επίλυση των εξισώσεων (5.1.13), (5.1.14) και (5.1.15) εργαζόμαστε ως εξής. Θεωρούμε ότι η ελεύθερη επιφάνεια καθώς και το βρεχόμενο μέρος της γάστρας (δηλαδή το *σύνоро S*) χαρακτηρίζεται από μία κατανομή έντασης του δυναμικού  $\sigma(q)$ , όπου  $q$  κάποιο σημείο του συνόρου  $S$ . Τότε για να ικανοποιούνται οι οριακές συνθήκες θα πρέπει να ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$2p\sigma(p) - \oint_S \frac{\partial}{\partial n} \frac{1}{r(p,q)} \sigma(q) dS = \mathbf{n}(p) \cdot \mathbf{U}_\infty \quad (5.1.18)$$

Διακριτοποιώντας την (5.1.18) καταλήγουμε σε ένα σύστημα γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων. Θεωρούμε ότι η επιφάνεια του στερεού συνόρου  $S$ , καλύπτεται από  $N$  μικρά επίπεδα στοιχεία. Κάθε στοιχείο αντιπροσωπεύεται από ένα σημείο ελέγχου που βρίσκεται στο κέντρο του και θεωρούμε ότι η ένταση του δυναμικού είναι σταθερή σε όλη την επιφάνεια του στοιχείου. Με ολοκλήρωση της (5.1.18) σε κάθε στοιχείο προκύπτει ένα σύστημα  $N \times N$  εξισώσεων για την ένταση του δυναμικού σε κάθε στοιχείο. Επιλύοντας το σύστημα των εξισώσεων προκύπτουν οι συνιστώσες της ταχύτητας για κάθε στοιχείο και με χρήση της εξ. *Bernoulli* (5.1.16) παίρνουμε την πίεση.

Προκειμένου να είναι επιλύσιμη η (5.1.18) απαιτείται η εξ' αρχής γνώση του στερεού συνόρου  $S$ , κάτι που δε συμβαίνει στην περίπτωση που μελετάμε. Για να υπολογισθεί, λοιπόν, η μορφή της ελεύθερης επιφάνειας ακολουθείται η επαναληπτική διαδικασία η οποία περιγράφεται στη συνέχεια.

## 5.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ

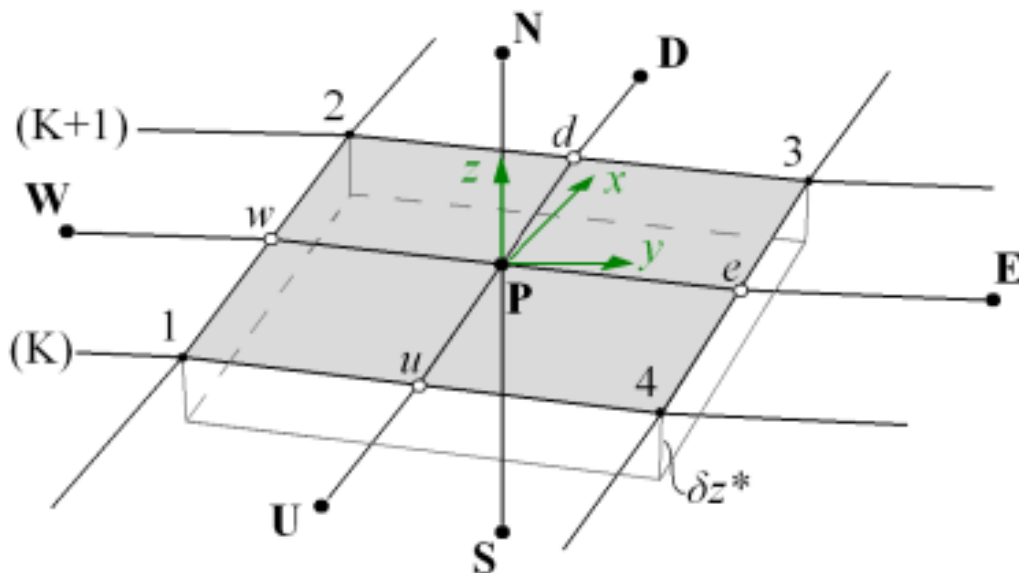
Σε κάποιο ενδιαμέσο βήμα θεωρούμε την ελεύθερη επιφάνεια γνωστή και λύνουμε το ευθύ πρόβλημα της θεωρίας δυναμικού (5.1). Κατασκευάζουμε τετράπλευρα στοιχεία που καλύπτουν την ελεύθερη επιφάνεια όπως και τη βυθισμένη επιφάνεια της γάστρας, θεωρώντας την ένταση του δυναμικού σταθερή στην επιφάνειά τους. Στη συνέχεια επιβάλλουμε την κινηματική οριακή συνθήκη σε κάθε στοιχείο, δηλαδή  $u_z^* = 0$  για τα panels της ελεύθερης επιφάνειας και  $u \cdot n = 0$ , όπου  $n$  συμβολίζει το κάθετο στη γάστρα κάθε φορά μοναδιαίο διάνυσμα. Στη συνέχεια επιλύεται η (5.1.18) και υπολογίζονται οι συνιστώσες της ταχύτητας  $u_x, u_y, u_z$  για κάθε στοιχείο. Τέλος, με χρήση της εξ. *Bernoulli* (5.1.16) υπολογίζεται η πίεση  $p^*$ .

Σαφώς η πίεση  $p^*$  που υπολογίστηκε δεν ισούται με την πραγματική, δηλαδή το άθροισμα της στατικής = 0 + υδροστατικής =  $\rho gh$ , εφόσον η ελεύθερη επιφάνεια έχει υποτεθεί τυχαία στην αρχή. Αυτή η διαφορά πίεσης εισάγεται σαν όρος πηγής στην ατριβή εξίσωση μεταφοράς για την εύρεση της κατακόρυφης συνιστώσας της ταχύτητας  $u_z^*$ :

$$\rho \left[ \frac{\partial u_x u_z^*}{\partial x} + \frac{\partial u_y u_z^*}{\partial y} + \frac{\partial u_z u_z^*}{\partial z} \right] = - \frac{\partial p^*}{\partial z} \quad (4.2.1)$$

Για τη λύση της παραπάνω εξίσωσης γίνεται εφαρμογή της μεθόδου των όγκων ελέγχου, σε όγκους που ορίζει η επιφάνεια κάθε στοιχείου και ένα ύψος  $\delta z^*$  (Σχήμα 5.1) το οποίο εισάγει ο χρήστης και επιδρά στη σύγκλιση της μεθόδου. Για τους όρους μεταφοράς εφαρμόζεται το πρωτοτάξιο άναντες σχήμα. Τελικά προκύπτει ένα σύστημα εξισώσεων το οποίο διατυπώνεται στη συνήθη μορφή:

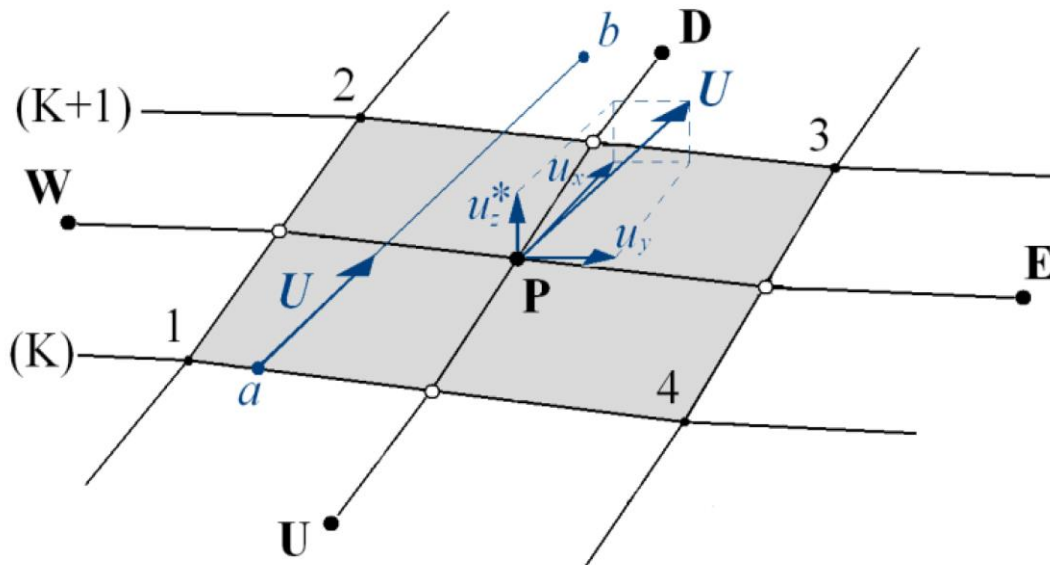
$$A_P u_{z,P}^* = A_E u_{z,E}^* + A_W u_{z,W}^* + A_U u_{z,U}^* + A_D u_{z,D}^* + (E_{1234})(p_P^* - \rho g z_P) \quad (4.2.2)$$



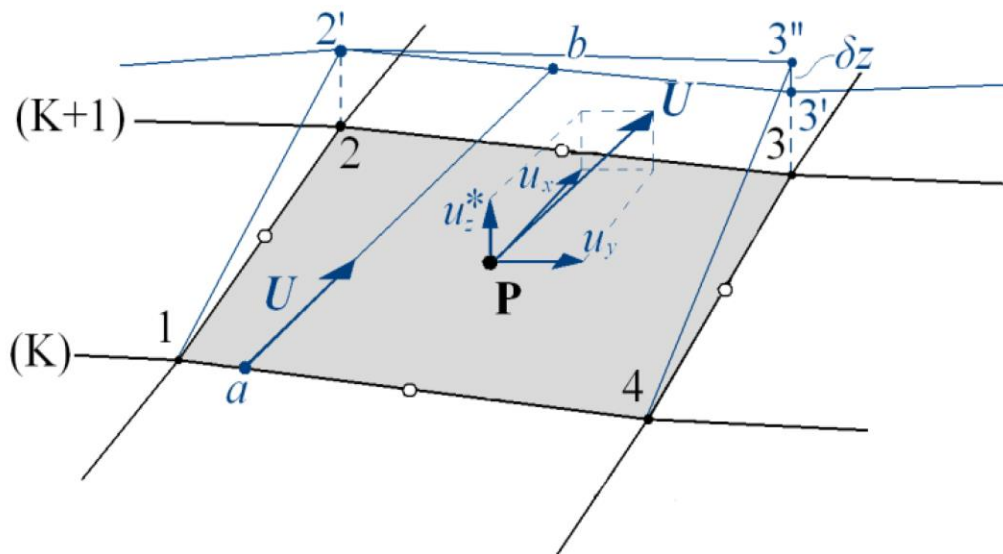
Σχήμα 5.1: Πεπερασμένος όγκος για την επίλυση της εξίσωσης μεταφοράς

Καθώς οι όροι μεταφοράς προσεγγίζονται από πρωτοτάξιο σχήμα, απαιτείται μεγάλος αριθμός στοιχείων για την ακριβή λύση του προβλήματος.

Στη συνέχεια επαναυπολογίζεται η ελεύθερη επιφάνεια σε δύο βήματα (Tzabiras, 2004) χρησιμοποιώντας τη διορθωμένη κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας. Αρχικά, προεκτείνοντας το νέο διάλυσμα ταχύτητας  $U$  τέμνονται σε 2 νέα σημεία οι γραμμές ροής  $K$  και  $K+1$  όπως φαίνεται στο σχήμα 5.2 και δημιουργείται μια νέα τομή. Έπειτα, η νέα τομή διορθώνεται κατά το ύψος  $\delta z$ , ώστε η παροχή από τη νέα επιφάνεια να μηδενίζεται, δηλαδή επιβάλλεται εκ νέου η κινηματική οριακή συνθήκη (Σχήμα 5.3). Η διαδικασία σταθεροποιείται με την εφαρμογή μιας εξωτερικής παραμέτρου που περιορίζει τη μεταβολή της επιφάνειας με συνέπεια και την επιβράδυνση της σύγκλισης.



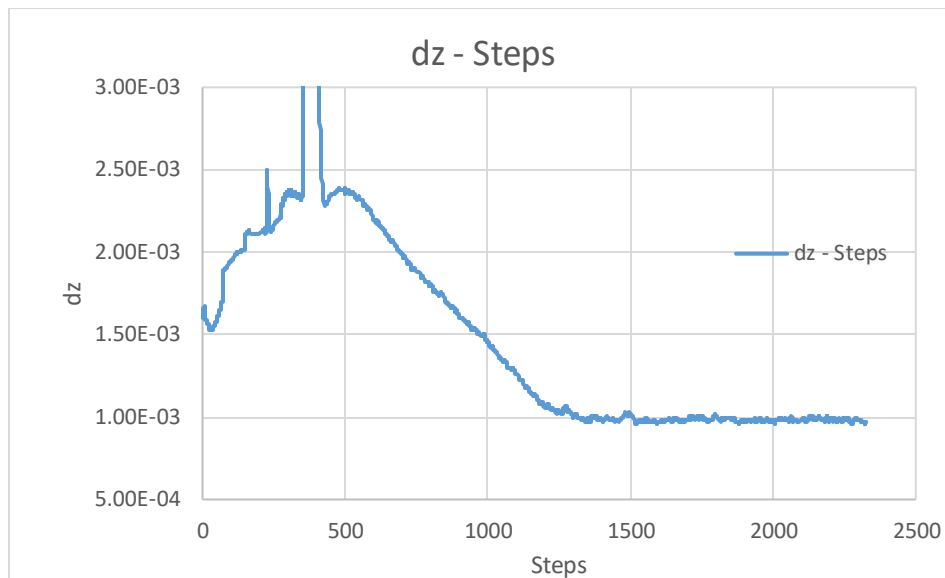
Σχήμα 5.2: Πρώτο βήμα διόρθωσης επιφάνειας



Σχήμα 5.3: Δεύτερο βήμα διόρθωσης επιφάνειας

Έχοντας την ανανεωμένη ελεύθερη επιφάνεια, το πρόβλημα της θεωρίας δυναμικού λύνεται εκ νέου και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να ικανοποιηθούν ταυτόχρονα και η κινηματική και η δυναμική οριακή συνθήκη. Η ικανοποίηση της τελευταίας ελέγχεται με χρήση της μεταβλητής  $dz$ , η οποία συμβολίζει την απόλυτη τιμή της διαφοράς της πραγματικής πίεσης από την υπολογιζόμενη στα σημεία ελέγχου των στοιχείων. Λόγω της φύσης της μεθόδου, υπάρχει ένα κατώτατο όριο στην τιμή που μπορεί να λάβει η μεταβλητή αυτή. Όσο μικρότερη πάντως είναι η τιμή της, τόσο πιο ακριβής είναι και η λύση - τόσο πιο ορθά αναπαρίσταται η ελεύθερη επιφάνεια.

Ένα παράδειγμα σύγκλισης ελεύθερης επιφάνειας δίνεται παρακάτω για πείραμα που έγινε στα πλαίσια αυτής της εργασίας:



Διάγραμμα 1: Χρονική ιστορία σύγκλισης ελεύθερης επιφάνειας πειράματος r60bc11m

Για το παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται μια απότομη κορυφή περί τα 400 βήματα που φαίνεται να βγαίνει έξω από το διάγραμμα. Το γεγονός αυτό δε λήφθηκε σοβαρά υπ' όψη γιατί από ότι φαίνεται το πρόγραμμα παρουσίασε σύγκλιση εν τέλει. Εκείνη έχει επιτευχθεί περί τα 1600 «βήματα», παρ' όλα αυτά κρίνεται ασφαλέστερο να τρέξει ως τα περίπου 2400.

### 5.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ $C_w$

Με την ελεύθερη επιφάνεια γνωστή, και τις τιμές της πίεσης και της ταχύτητας να έχουν συγκλίνει, είμαστε τώρα σε θέση να υπολογίσουμε το συντελεστή αντίστασης  $C_w$  μέσω της ολοκλήρωσης της πίεσης για κάθε στοιχείο πάνω στη βυθισμένη επιφάνεια της γάστρας. Στο παρόν η αντίσταση κυματισμού θεωρείται ίση με την αντίσταση πίεσης, καθώς η αριθμητική μέθοδος αδυνατεί να προβλέψει τις άλλες μορφές αντίστασης (αντίσταση πίεσης λόγω συνεκτικότητας και αντίσταση τριβής).

$$R_w = \iint_{WS} (p^* - \rho gh) \cdot (\mathbf{n} \cdot \mathbf{i}) ds \quad (4.3.1)$$

Όπου  $n$  είναι το κάθετο στην επιφάνεια της γάστρας μοναδιαίο διάνυσμα και  $i$  το μοναδιαίο διάνυσμα παράλληλο στον  $x$  – άξονα. Ο συντελεστής αντίστασης κυματισμού  $C_w$  ορίζεται ως:

$$C_w = -\frac{R_w}{\frac{1}{2}\rho \cdot WS \cdot V_s^2} \quad (4.3.2)$$

Όπου  $\rho$  η πυκνότητα του νερού,  $WS$  η βρεχόμενη επιφάνεια της γάστρας και  $V_s$  η ταχύτητα του πλοίου.

Ένα παράδειγμα υπολογισμού του  $C_w$  δίνεται παρακάτω μαζί με τη χρονική ιστορία της σύγκλισής του για ένα πείραμα που έγινε στα πλαίσια αυτής της εργασίας:



Διάγραμμα 2: χρονική ιστορία σύγκλισης  $C_w$  πειράματος p60bc11m

Αντίστοιχα για το διάγραμμα του  $C_w$  παρατηρείται σύγκλιση από τις 800 περίπου επαναλήψεις και μετά, αλλά αφήνεται ώστε να επιτευχθεί σταθερότητα ως τα περίπου 2400 βήματα.

## 5.4 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΓΑΣΤΡΑΣ

Τα στοιχεία στην επιφάνεια της γάστρας, χρησιμοποιούν για την κατασκευή τους τις διδιάστατες εγκάρσιες τομές που προκύπτουν αναλυτικά με τη χρήση του σύμμορφου μετασχηματισμού.

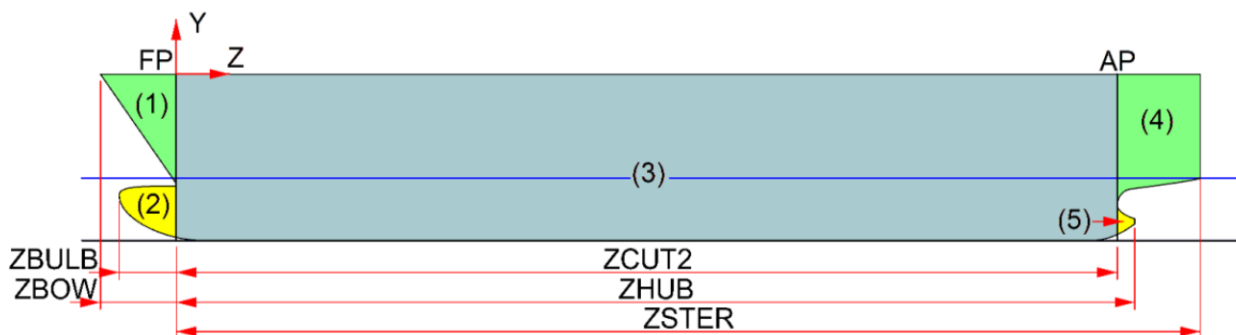
$$z = \sum_{n=1}^N a_n \zeta^{3-2n} \quad (5.4.1)$$

Συνήθως ο αριθμός των τομών που περιγράφουν τη γάστρα είναι μικρότερος από τον αριθμό των τομών που απαιτούνται για την κατασκευή των στοιχείων. Για το λόγο αυτό το πρόγραμμα ενσωματώνει διάφορες μεθόδους παρεμβολής (Tzabiras & Kontogiannis, 2009).

Για την αναπαράσταση γεωμετρίας της γάστρας ο κώδικας υποδιαιρεί την τελευταία σε 5 περιοχές. Η διαμήκης θέση της πρωραίας καθέτου ορίζεται στο σημείο που η εφαπτομένη του διαμήκους περιγράμματος της πλώρης είναι κάθετη (Σχήμα 5.4).

Η περιοχή 1 αναφέρεται στο μέρος του πλοίου που βρίσκεται πρώραθεν της πρωραίας καθέτου (F.P.) και άνωθεν του βολβού, ενώ η περιοχή 2 αναφέρεται στο βολβό που βρίσκεται πρώραθεν της πρωραίας καθέτου (F.P.). Ως περιοχή 3 ορίζεται η περιοχή ανάμεσα στην πρωραία (F.P.) και την πρυμναία (A.P.) κάθετο. Οι περιοχές 4 και 5 αναφέρονται στις περιοχές που βρίσκονται πρύμνηθεν της πρυμναίας καθέτου (A.P.).

Κατ' αντιστοιχία ορίζουμε τη διαμήκη θέση της πρυμναίας καθέτου, στο σημείο όπου η εφαπτομένη του διαμήκους περιγράμματος της πρύμνης είναι κάθετη.



Σχήμα 5.4: Ορισμός των περιοχών της γάστρας και του συστήματος συντεταγμένων

Κάθε περιοχή περιγράφεται από ένα πλήθος νομέων ανάλογα με το μήκος και την πολυπλοκότητά της. Οι νομείς αποτελούνται από πλήθος σημείων το οποίο είναι εξίσου ανάλογο με την πολυπλοκότητα και τη θέση του κάθε νομέα.

Λόγω της πιο απαιτητικής γεωμετρίας στις περιοχές 1, 2, 4 και 5 επιλέγονται περισσότεροι αναλογικά ως προς το μήκος νομείς. Λόγω του μήκους όμως της περιοχής 3, εκεί εμφανίζεται και το μεγαλύτερο πλήθος νομέων. Για την περιγραφή της περιοχής 1 χρησιμοποιήθηκαν από το πρόγραμμα 4 νομείς, για την περιοχή 3 επιλέχθηκαν 61 νομείς, οι 3 πυκνότερα τοποθετημένοι κοντά στη διεπιφάνεια περιοχής 1,3 και οι υπόλοιποι 58 κατά το μήκος της περιοχής 3. Για την περιοχή του βολβού χρησιμοποιήθηκαν 22 νομείς, ενώ για την περιοχή 4 επιλέχθηκαν 9 νομείς. Τα πλοία που μελετήθηκαν δεν είχαν πλήμνη οπότε η περιοχή 5 αγνοήθηκε.

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο τρόπος εισαγωγής των νομέων στο πρόγραμμα γίνεται μέσω αρχείων κειμένου (χαρακτήρων ASCII). Χρησιμοποιείται ένα αρχείο για τη γεωμετρία όλης της γάστρας πλην της περιοχής 2 και ένα ξεχωριστό αρχείο για τη γεωμετρία του βολβού. Για τον κάθε νομέα εισάγεται πρώτα η διαμήκης θέσης του, ύστερα ο αριθμός των σημείων που τον περιγράφουν και τέλος οι συντεταγμένες  $y, z$  του κάθε σημείου διαχωρισμένα με κενό χαρακτήρα. Για τους νομείς που συμπίπτουν με την τομή δύο περιοχών, ο νομέας εισάγεται εις διπλούν, μία φορά για κάθε περιοχή.

Το αρχείο που περιέχει τη γεωμετρία της γάστρας πλοίου της συστηματικής σειράς 60 λέγεται *dcondor2.txt* και εξάγεται απευθείας από τη «βιβλιοθήκη» του *Εργαστηρίου Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής* για τα πλοία των σειρών 60 μέσω του προγράμματος *Rhinoceros.exe*. Το *dcondor1.txt*, περιέχει πληροφορίες όπως ο αριθμός των νομέων κάθε περιοχής και εξάγεται και αυτό απευθείας από το πρόγραμμα *Rhinoceros.exe*.

Το αρχείο που περιέχει τη γεωμετρία του βολβού λέγεται *dcondor3* και παράγεται από την εκτέλεση του προγράμματος *adbulb.exe*, προγράμματος που είναι επίσης σχεδιασμένο από το *Εργαστήριο Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής*.

### Το πρόγραμμα adbulb.exe

Το *adbulb.exe* χρειάζεται το αρχείο *dad* ως δεδομένο το οποίο συμπληρώνεται από το χρήστη, με τον τελευταίο να εισάγει με απλό τρόπο τα βασικά μεγέθη της γεωμετρίας της γάστρας, αλλά και του βολβού που πρόκειται να σχεδιαστεί. Στο πρόγραμμα εισάγονται επίσης και τα *dcondor1.txt* και *dcondor2.txt*.

Με την εκτέλεση του *adbulb.exe*, το πρόγραμμα κατασκευάζει το βολβό με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που ζητήθηκαν και τον τοποθετεί στη διαμήκη θέση της πρωραίας καθέτου του πλοίου. Η πρωραία κάθετος ορίζεται συμβατικά ως η κάθετη στο σημείο που η ίσαλος τέμνει το προφίλ της πλώρης. Στη συνέχεια, προεκτείνει από την πρωραία κάθετο παράλληλα με τον άξονα  $Z$  (εδώ, *διαμήκης άξονας*) όπως φαίνεται στο σχήμα 5.6 ώσπου να συναντήσει το περίγραμμα της κεντρικής διαμήκους τομής του πλοίου.

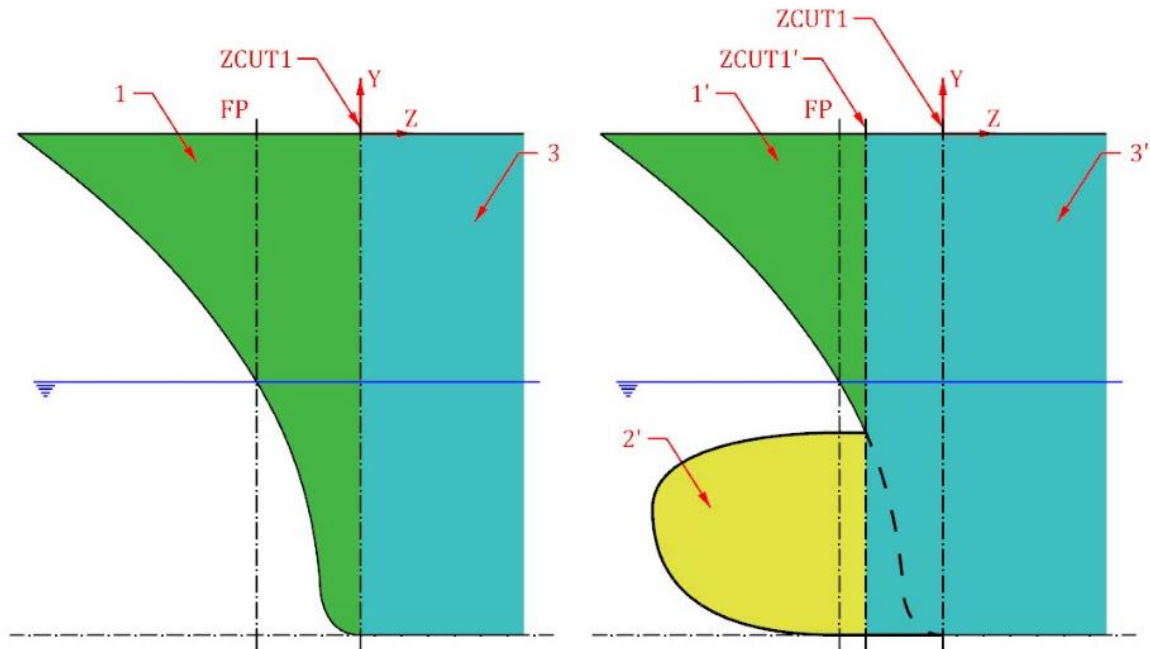
Κατά συνέπεια, οι περιοχές 1 και 3 για τις οποίες έγινε λόγος νωρίτερα έχουν τώρα αλλάξει δυναμικά, με την 1 να έχει υποχωρήσει και την 3 να έχει επεκταθεί (Σχήμα 5.6). Λόγω της ύπαρξης του βολβού, η γεωμετρία στη νέα περιοχή 3 και ειδικά κοντά στην baseline είναι πιο πολύπλοκη. Γι' αυτό το λόγο, επιλέξαμε νωρίτερα να έχουμε 3 πιο πυκνά τοποθετημένους νομείς στην αρχή της περιοχής 3.

Το πρόγραμμα, επίσης, δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να μεταφέρει την αρχή των αξόνων απ' τη θέση *Zcut1* στη θέση *Zcut1'* (Σχήμα 5.6), με συμπλήρωση της μεταβλητής *ZFP* στο αρχείο input *dad*.

Στο τέλος, το πρόγραμμα εξάγει το *dcondor3* με τη γεωμετρία του βολβού, όπως και τα *dcondor1*, *dcondor2*, με την ανανεωμένη επιφάνεια της γάστρας μαζί με το βολβό.

Το τελευταίο βήμα της γεωμετρικής αναπαράστασης της γάστρας, γίνεται με την «είσοδο» των 3 παραπάνω αρχείων κειμένου στο πρόγραμμα *condor.exe*, το οποίο κατασκευάζει και τοποθετεί τα panels πάνω στην επιφάνεια της γάστρας με χρήση του σύμμορφου μετασχηματισμού.

Συμπερασματικά, τονίζεται σε αυτό το σημείο, ότι η αξία του προγράμματος *adbulb.exe* είναι ότι δημιουργεί και προσθέτει βολβό στη γάστρα του πλοίου με τέτοιο τρόπο, ώστε σε συνεργασία με το πρόγραμμα *condor.exe* να παραχθεί η τελική γεωμετρία του πλοίου με βολβό *παρακάμπτοντας* τη διαδικασία εξομάλυνσης των γραμμών του πλοίου στα ύφαλα της πλώρης με κάποιο πρόγραμμα εξομάλυνσης (π.χ. AVEVA Marine ή Rhinoceros).



Σχήμα 5.5: Ενέργειες του προγράμματος adbulb.exe

## 5.5 ΣΥΜΜΟΡΦΟΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ

Η πληροφορία προκειμένου να δημιουργηθούν τα panels αποκτάται από τις διδιάστατες εγκάρσιες τομές στις οποίες υποδιαιρείται η γάστρα. Συγκεκριμένα κάθε νομέας αναπαριστάται αναλυτικά με εφαρμογή της σύμμορφης απεικόνισης. Αυτή η μέθοδος έχει αναπτυχθεί από τον καθηγητή Γ. Τζαμπίρα (Tzabiras, 2009).

Συνήθως ο αριθμός των νομέων που έχουμε στη διάθεσή μας είναι μικρός σε σχέση με τον αριθμό των νομέων που χρειάζονται για να δημιουργηθούν τα τετράπλευρα στοιχεία. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές παρεμβολής νομέων.

Ο σύμμορφος μετασχηματισμός ενός διδιάστατου εγκάρσιου νομέα που περιγράφει ένα πλοίο δίνεται από τον (Kerczek, 1969) ως:

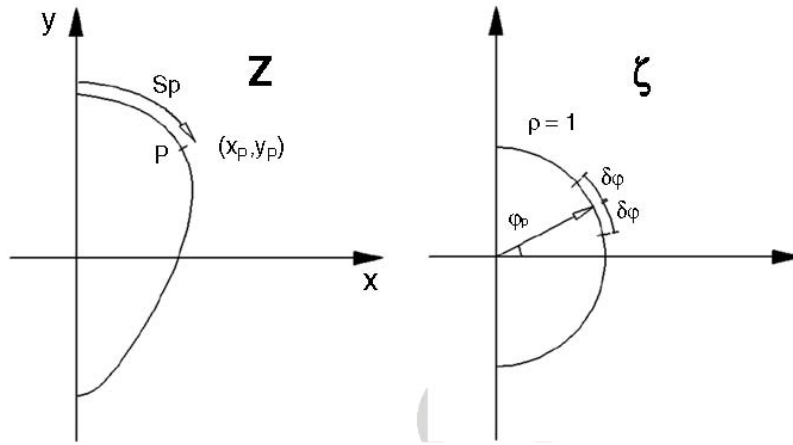
$$z = c_0 + c_{-1}\zeta + \sum_{n=1}^N c_n \zeta^{-n} \quad (5.5.1)$$

Όπου  $\zeta$ : συμβολίζει το μιγαδικό επίπεδο του μοναδιαίου κύκλου και  $z$ : το επίπεδο του νομέα. Αν ο νομέας είναι συμμετρικός ως προς τον  $y$  - άξονα, οι συντελεστές  $C_n$  ανάγονται σε πραγματικούς  $\alpha_n$  και το πραγματικό και μιγαδικό μέρος του  $z$  (5.5.1) γράφονται αντίστοιχα:

$$x = \alpha_{-1} \cos \varphi + \sum_{n=1}^N \alpha_n \cos(-n\varphi)$$

$$y = \alpha_0 + \alpha_{-1} \sin \varphi + \sum_{n=1}^N \alpha_n \sin(-n\varphi) \quad (5.5.2)$$





Σχήμα 5.6: Περιγραφή ενός νομέα του πλοίου στον μιγαδικό μοναδιαίο κύκλο.

Στην εξίσωση (5,5.2),  $\varphi = \arg(x,y)$  στο μοναδιαίο κύκλο, ενώ οι συντελεστές  $a_n$  υπολογίζονται αργότερα (Tzabiras, Dimas, & Loukakis, 1986), είτε απ παρακάτω ολοκληρώματα:

$$a_0^{(1)} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} x(\varphi) d\varphi$$

$$a_{-1}^{(1)} + a_1^{(1)} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} x(\varphi) \cos(\varphi) d\varphi \quad (5.5.3a),$$

$$a_n^{(1)} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} x(\varphi) \cos(\varphi) d\varphi, n > 2$$

είτε από τα ολοκληρώματα:

$$a_0^{(2)} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} y(\varphi) d\varphi$$

$$a_{-1}^{(2)} + a_1^{(2)} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} y(\varphi) \sin(\varphi) d\varphi \quad (5.5.3b)$$

$$a_n^{(2)} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} y(\varphi) \sin(\varphi) d\varphi, n > 2$$

Τα αποτελέσματα  $a_n$  για τις δύο μεθόδους θα ήταν ίδια εάν αφήναμε το  $N \rightarrow \infty$ . Σε πραγματικές, όμως, εφαρμογές το  $N$  είναι πεπερασμένος αριθμός και άρα οι τιμές για τα  $a_n^{(1)}$  και  $a_n^{(2)}$  διαφέρουν. Για να καταλήξουμε σε μια τιμή, ισχυριζόμαστε ότι η σχέση των δύο προσεγγίσεων είναι γραμμική:

$$a_n = r a_n^{(1)} + (1 - r) a_n^{(2)}, n = -1, \dots, N \quad (5.5.4)$$

Με το συντελεστή βαρύτητας  $r$  να προσδιορίζεται ελαχιστοποιώντας το ολικό σφάλμα:

$$E_t = \sum_P [(x_P - x_{aP})^2 + (y_P - y_{aP})^2] \quad (5.5.5)$$

Όπου  $P$  είναι ο αριθμός των σημείων  $(x_p, y_p)$  που περιγράφουν το νομέα.

Τότε το  $r$  υπολογίζεται λύνοντας τη γραμμική σχέση: 
$$\frac{\partial E_t}{\partial r} = 0 \quad (5.5.6)$$

## 5.6 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΩΣ ΤΗΝ ΕΞΑΓΩΓΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

### Γενικά

Αρχικά έγιναν τα αριθμητικά πειράματα για 3 διαφορετικές καταστάσεις. Μελετήθηκαν οι περιπτώσεις  $C_b = 0.6$  και  $F_N = 0.290$ ,  $C_b = 0.7$  και  $F_N = 0.260$  και  $C_b = 0.8$  και  $F_N = 0.200$  χωρίς βολβό. Στη συνέχεια προστέθηκε ο βέλτιστος βολβός κατά τον A. M. Kracht (Kracht, 1978) για την κάθε περίπτωση. Τέλος, με αλλαγή σε ένα ζευγάρι παραμέτρων που αφορούν τη γεωμετρία του βολβού κάθε φορά έγιναν 4 ακόμα πειράματα για τον κάθε συντελεστή μορφής, σύνολο δηλαδή άλλα 12 πειράματα. Συνολικά ο κώδικας έτρεξε 21 φορές εκ των οποίων οι 3 αφορούσαν τον προσδιορισμό του αριθμού των στοιχείων, 3 χωρίς βολβό, 3 με το βέλτιστο και 12 παραλλαγές του βέλτιστου βολβού.

Ο κώδικας χρειάζεται τα αρχεία *dpanelw* και *filecond* για να λειτουργήσει, με τα οποία ο χρήστης έχει τη δυνατότητα περισσότερο ή λιγότερο, να αλληλεπιδράσει με το πρόγραμμα *panelw.f*.

Το *dpanelw.txt* περιέχει βασικές πληροφορίες όπως τον αριθμό των panels, τον αριθμό των επαναλήψεων, την ταχύτητα και τη γεωμετρία της γάστρας, την ύπαρξη ή όχι βολβού στην πλήρη, αρχική διαγωγή, όπως και άλλες μεταβλητές που επιδρούν στην ταχύτητα της σύγκλισης. Για κάθε διαφορετικό run, υπάρχει λοιπόν και ένα ξεχωριστό *dpanelw.txt*.

Το αρχείο *filecond* περιέχει τη γεωμετρία της γάστρας, όπως έχει παραχθεί μετά την εφαρμογή του σύμμορφου μετασχηματισμού.

Ο σύμμορφος εκτελείται από το πρόγραμμα *condor.exe*, το οποίο απαιτεί κάποια input αρχεία για να λειτουργήσει σωστά. Αυτά είναι τα αρχεία *dcondor1*, *dcondor2* και *dcondor3* και περιέχουν τη γεωμετρία των διδιάστατων εγκάρσιων τομών της γάστρας σε μορφή Y-Z συντεταγμένων. Το *dcondor1* παρέχει τις πληροφορίες όπως τον αριθμό των τομών για κάθε υποδιαιρεμένη περιοχή της γάστρας (βλ. 5.4), ενώ το *dcondor2* περιέχει την πληροφορία για τη γεωμετρία της γάστρας αυτής καθ' εαυτής. Τέλος, το *dcondor3* περιέχει τη γεωμετρία του βολβού. Μετά την εκτέλεση του σύμμορφου μετασχηματισμού, το αρχείο *filecond* περιέχει την απαραίτητη πληροφορία που χρειάζεται το *panelw.f* για να ξεκινήσει τις επαναλήψεις για τον προσδιορισμό της ελεύθερης επιφάνειας και την επίλυση της θεωρίας δυναμικού.

### Για τους βολβούς

Για την περιγραφή της μορφής του βολβού έξι παράμετροι κρίθηκαν αναγκαίες. Από αυτές οι τρεις είναι γραμμικές και οι τρεις μη γραμμικές (Σπύρου, 1984). Οι γραμμικές είναι:

1. Η παράμετρος πλάτους, δηλαδή το μέγιστο πλάτος του βολβού  $B_b$  προς το πλάτος του πλοίου στο μέσον  $B_m$

$$C_{BB} = \frac{B_b}{B_m}$$

2. Η παράμετρος μήκους, δηλαδή το προεξέχον τμήμα του βολβού  $LBULB$  δια του μήκους  $L_{pp}$  του πλοίου

$$C_{LPR} = \frac{LBULB}{L_{pp}}$$

3. Η παράμετρος βυθίσματος, δηλαδή το ύψος  $ZB$  του πιο ακραίου κατά μήκος σημείου του βολβού διαιρεμένο με το βύθισμα  $TFP$  του πλοίου στην πρωραία κάθετο

$$C_{ZB} = \frac{ZB}{TFP}$$

και οι μη – γραμμικές:

4. Η παράμετρος εγκάρσιας επιφάνειας (*cross section parameter*), δηλαδή η εγκάρσια επιφάνεια ABT της βολβοειδούς πλώρης στην πρωραία κάθετο, διαιρεμένη με την επιφάνεια AMS στο μέσο του πλοίου

$$C_{ABT} = \frac{ABT}{AMS}$$

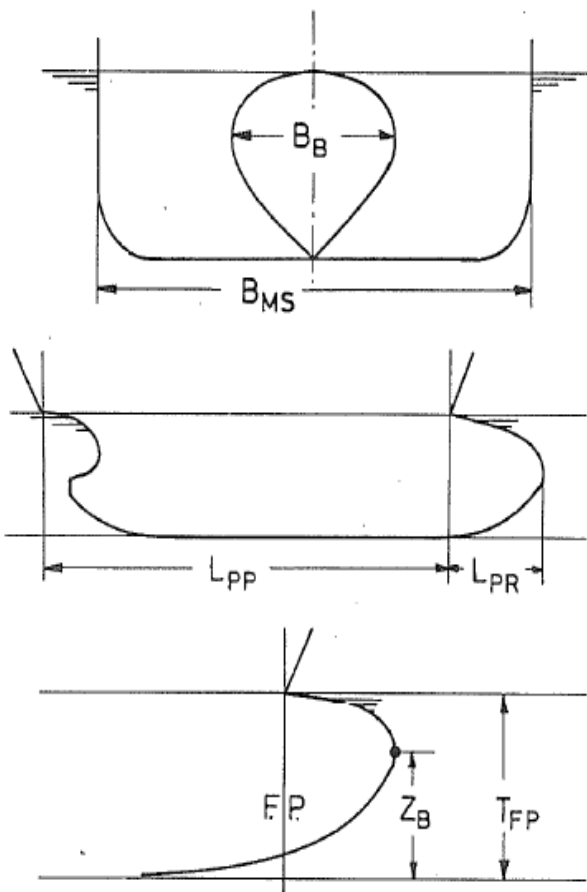
5. Η πλάγια παράμετρος (*lateral parameter*), δηλαδή η επιφάνεια της τομής του βολβού με το κεντρικό διάμηκες επίπεδο, διαιρεμένη με AMS

$$C_{ABL} = \frac{ABL}{AMS}$$

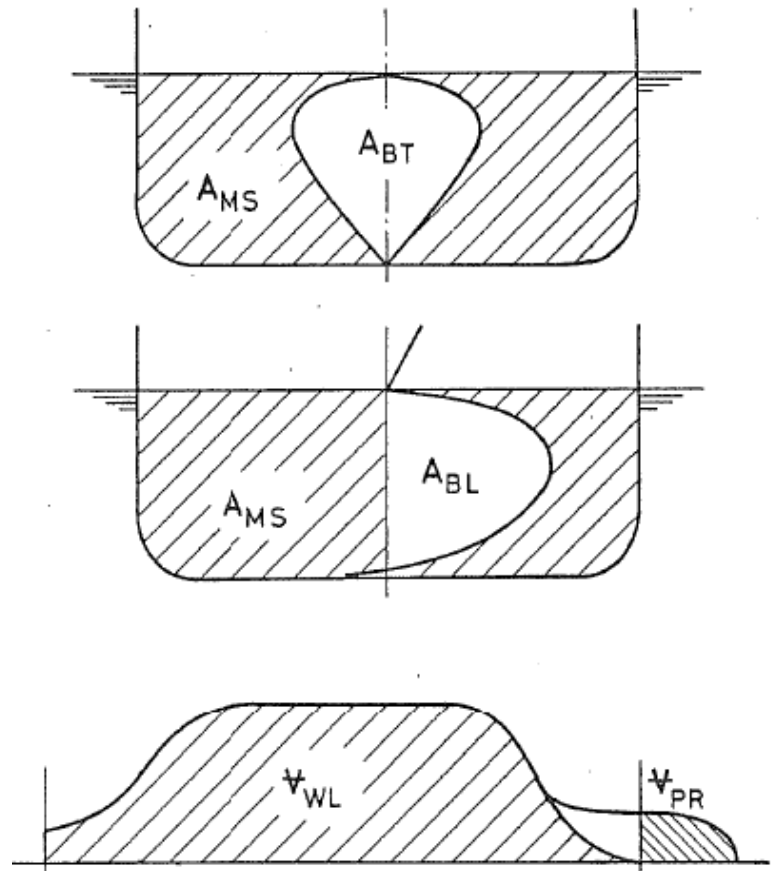
6. Η ογκομετρική παράμετρος, δηλαδή ο όγκος VPR του προεξέχοντος μέρος του βολβού προς τον όγκο εκτοπίσματος του πλοίου

$$C_{VPR} = \frac{VPR}{VWL}$$

Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται αναλυτικά οι διαστάσεις του βολβού και του πλοίου.

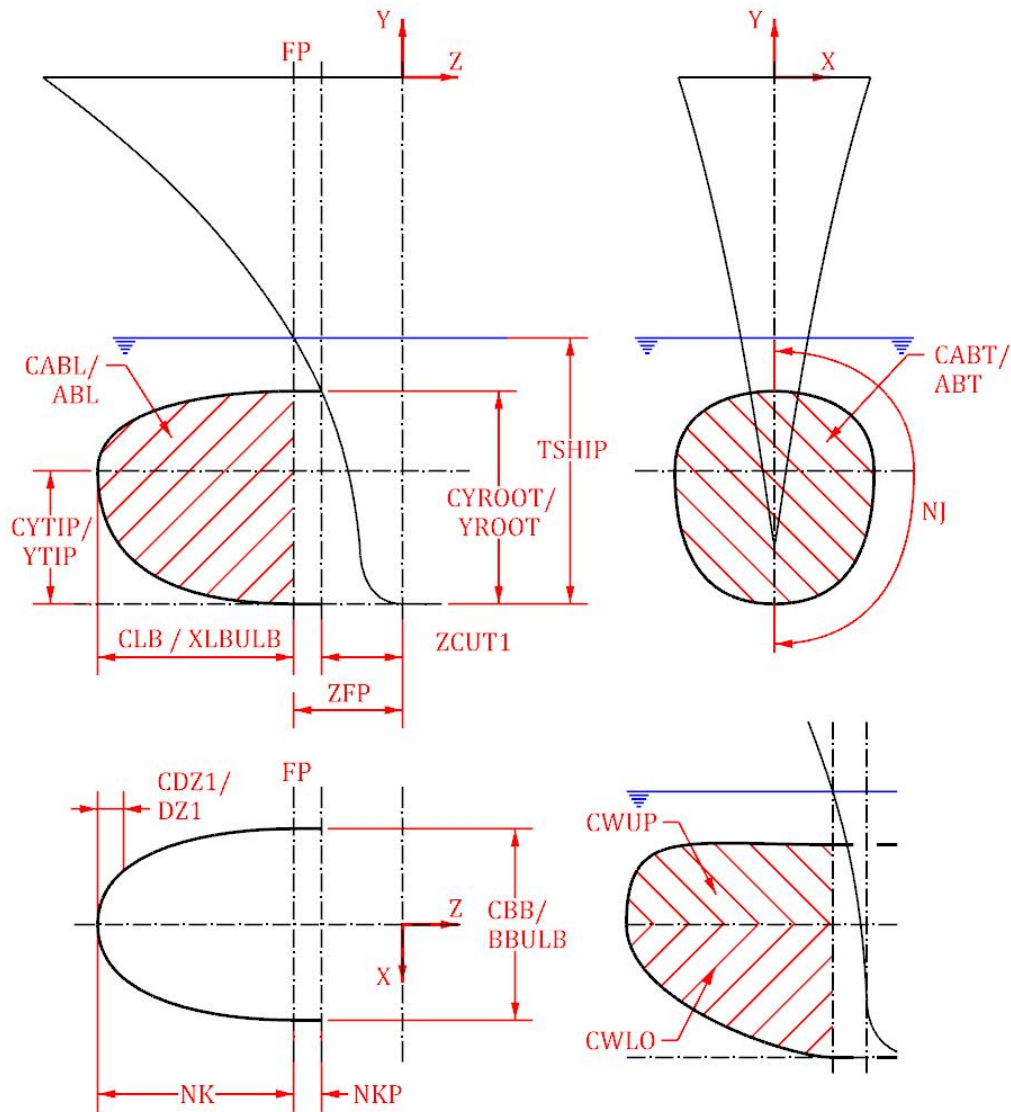


Σχήμα 5.7: Απεικόνιση των γραμμικών παραμέτρων βολβού.



Σχήμα 5.8: Απεικόνιση μη – γραμμικών παραμέτρων βολβού.

Η επιλογή των βέλτιστων βολβών έγινε σύμφωνα με τις οδηγίες του *A. M. Kracht* στη δημοσίευσή του «Design of Bulbous Bows» (Kracht, 1978). Η εργασία αυτή προσφέρει διαγράμματα που δείχνουν πώς επιδρά ποιοτικά το κάθε γεωμετρικό χαρακτηριστικό του βολβού χωριστά, στη μείωση της υπόλοιπης αντίστασης και καλύπτει όλες τις περιπτώσεις που μελετάμε. Στο παρόν η αντίσταση κυματισμού θεωρείται ίση με την υπόλοιπη αντίσταση καθώς η αντίσταση λόγω συνεκτικότητας και η αντίσταση μορφής θεωρούνται μηδενικές. Επιλέχθηκε αυθαίρετα ως κύρια σχεδιαστική παράμετρος η  $CLB$ , η οποία δίνει τη μικρότερη αντίσταση για την κάθε περίπτωση. Χρησιμοποιώντας αυτή την τιμή της αντίστασης είναι δυνατό τώρα να προσδιοριστούν οι υπόλοιποι 5 παράμετροι από τα άλλα διαγράμματα. Ο συνδυασμός των παραμέτρων οδηγεί στη σχεδίαση ενός μοναδικού κάθε φορά βολβού ο οποίος ενσωματώθηκε στη γάστρα και το πρόγραμμα υπολόγισε εκ νέου τη συνολική αντίσταση του σκάφους.



Σχήμα 5.9: Απεικόνιση των παραμέτρων του βολβού σύμφωνα με την ονομασία τους στο αρχείο input *dad*.

## 6. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

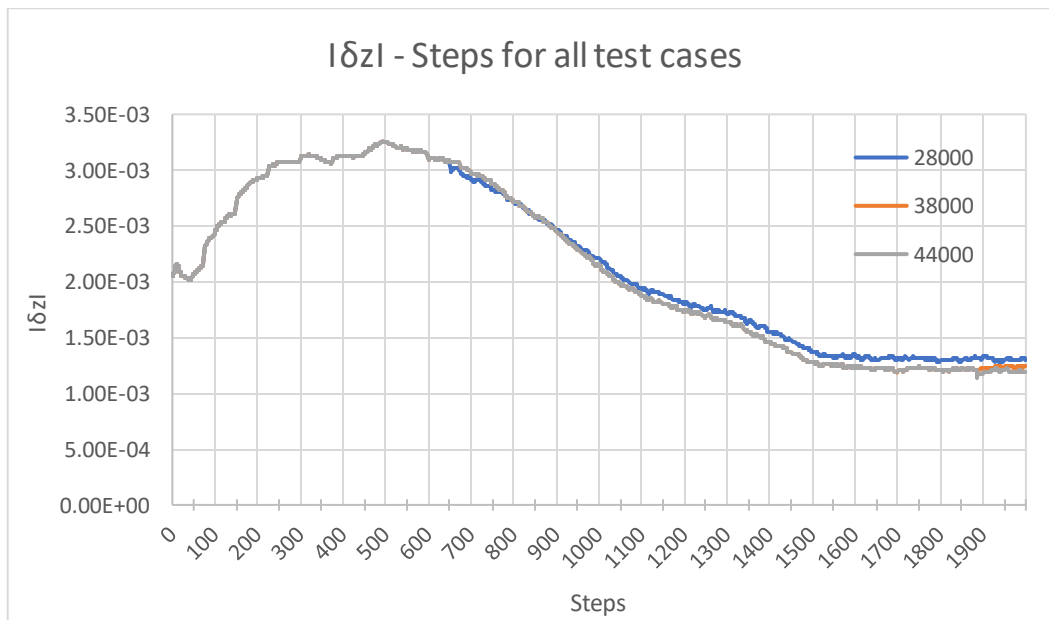
### 6.1 Βέλτιστος αριθμός panels

Το πρώτο βήμα της εργασίας ήταν η επιλογή του αριθμού των τετράπλευρων κατασκευαστικών στοιχείων που απαρτίζουν τη βυθισμένη επιφάνεια της γάστρας και την ελεύθερη επιφάνεια. Η επιλογή αυτή βασίστηκε σε δύο αντίρροπους παράγοντες. Από τη μία, μεγάλος αριθμός panels εμφανίζει μεγαλύτερη ακρίβεια αποτελεσμάτων, αλλά από την άλλη, και μεγαλύτερο υπολογιστικό χρόνο. Η επιθυμητή – βέλτιστη λύση βρέθηκε με τη διεξαγωγή 3 αριθμητικών πειραμάτων και την επικράτηση του πειράματος που έδινε μικρότερη τιμή της μεταβλητής  $I\delta zI$ .

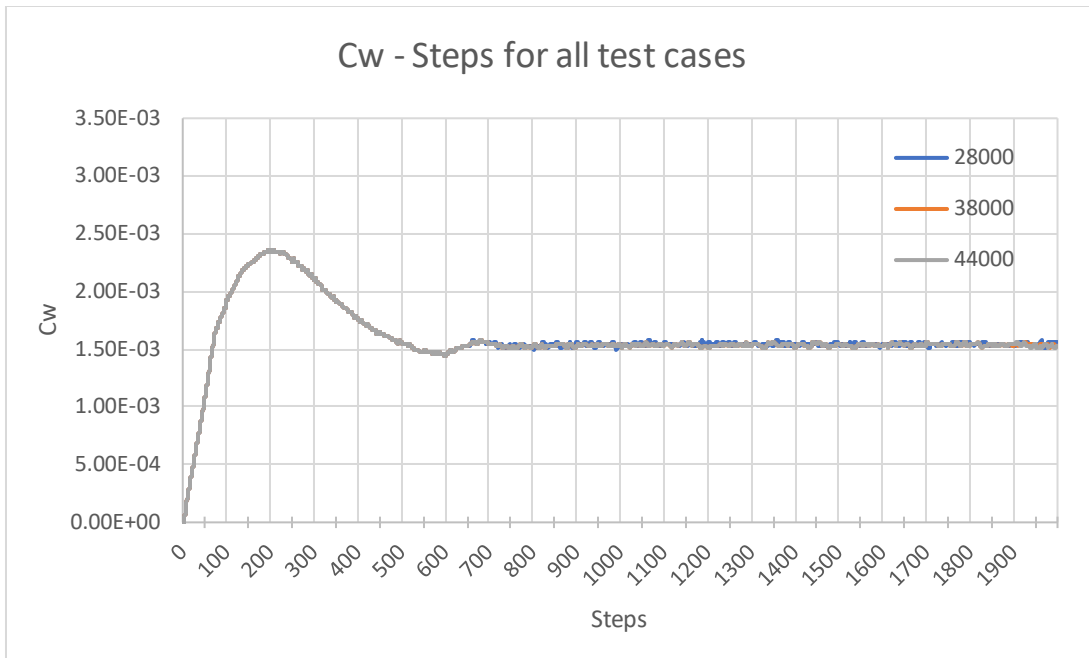
Από παλαιότερες εργασίες είχε διαπιστωθεί ότι ικανοποιητική ακρίβεια παρατηρείται για τον αριθμό των περίπου 21000 panels (Fragkoulis, 2015). Για αυτή την εργασία προτιμήθηκε μεγαλύτερη ακρίβεια σε βάρος του υπολογιστικού χρόνου και έτσι έγιναν δοκιμές για 38000 panels, όπως επίσης και για 28000 και για 44000. Για τις δοκιμές χρησιμοποιήθηκε μοντέλο γεωμετρίας συστηματικής σειράς 60 με συντελεστή μορφής  $C_b = 0.60$  και αριθμό Froude  $F_n = 0.316$ . Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι η βέλτιστη λύση για την ελεύθερη επιφάνεια δίνεται για τον αριθμό των 38000 στοιχείων. Η ποιότητα της σύγκλισης ελέγχεται με τη μεταβλητή  $I\delta zI$ , που ισούται με το μέσο όρο των απολύτων τιμών των διαφορών της υπολογιζόμενης πίεσης από την πραγματική για κάθε στοιχείο. Συνεπώς μικρότερη τιμή  $I\delta zI$  σημαίνει και ακριβέστερη λύση. Όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα με περαιτέρω αύξηση των στοιχείων δεν παρατηρείται μείωση στην τιμή του  $I\delta zI$ , ενώ η αύξηση από τα 28000 στα 38000 panels προσφέρει σχετική βελτίωση στην ακρίβεια της λύσης.

$C_b = 0.60$ & $F_n = 0.316$	$C_w$	$dz$
# panels		
28000	1.55E-03	1.31E-03
38000	<b>1.53E-03</b>	<b>1.21E-03</b>
44000	1.53E-03	1.21E-03

Πίνακας 1: Συντελεστής αντίστασης κυματισμού  $C_w$  και υπόλοιπη πίεσης  $I\delta zI$  διαφορετικό αριθμό panels

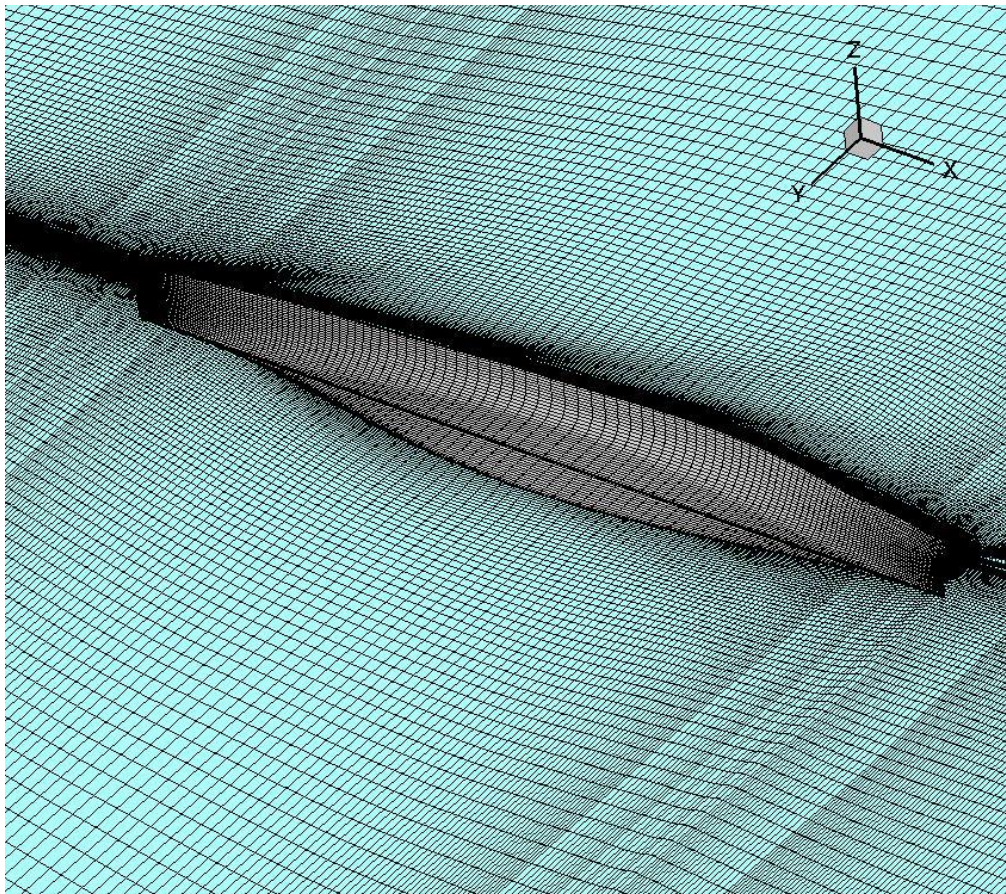


Διάγραμμα 3: Σύγκλιση της ελεύθερης επιφάνειας για κάθε αριθμό panels



Διάγραμμα 4: Τιμές του  $C_w$  για τον κάθε αριθμό panels

Από τα διαγράμματα γίνεται σαφές ότι η καλύτερη λύση είναι αυτή των 38000 panels γιατί προσφέρει μικρότερη τιμή  $|\delta z|$  και άρα μεγαλύτερη ακρίβεια (Διάγραμμα 3) για το ίδιο περίπου αποτέλεσμα του συντελεστή  $C_w$  (Διάγραμμα 4).



Σχήμα 6.1: Τελική αναπαράσταση γάστρας και ελεύθερης επιφάνειας με 38000 panels

## 6.2 Παρουσίαση αριθμητικών αποτελεσμάτων

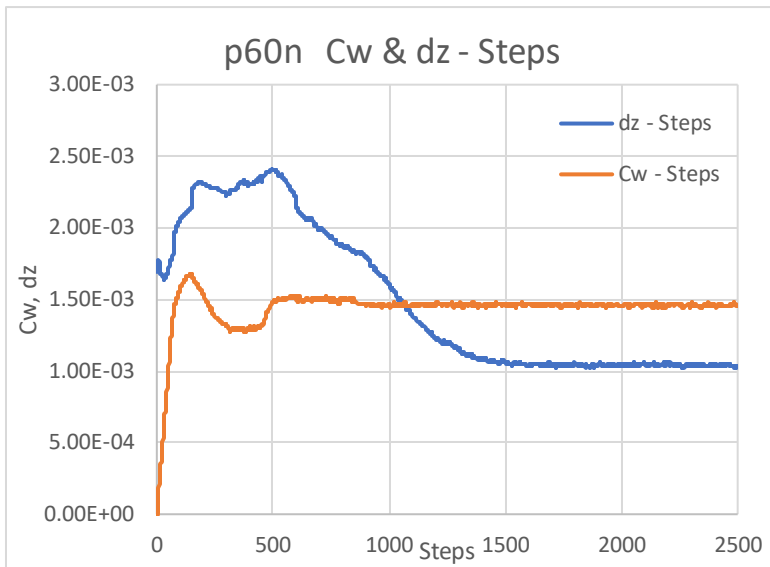
[ $C_B = 0.60$  &  $F_N = 0.290$ ]

Η πρώτη περίπτωση που εξετάστηκε αφορά πλοίο γεωμετρίας συστηματικής σειράς 60 με συντελεστή μορφής  $C_B = 0.60$  και αριθμό Froude = 0.290. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη του μοντέλου.

MAIN PARTICULARS ( $C_B = 0.60$ )			
Overall Length	Loa	3.158	[m]
Length Bet. Perp.	Lbp	3.048	[m]
Waterline Length	Lwl	3.099	[m]
Beam	B	0.406	[m]
Draft	T	0.163	[m]
Depth	D	0.245	[m]
Bilge radius	r	0.064	[m]
Displacement Volume	V	0.121	[m <sup>3</sup> ]
Wetted Surface	WS	1.524	[m <sup>2</sup> ]
Block Coeff.	$C_B$	0.599	[-]
Prismatic Coeff.	$C_p$	0.617	[-]
Entr. Prismatic Coeff.	$C_{pe}$	0.606	[-]
Run Prismatic Coeff.	$C_{pr}$	0.536	[-]
Midship Coeff.	$C_x$	0.973	[-]
Center of Boyancy (+fwd)	LCB	-1.271	[%]
Entrance Length	Le	49.97	[%]
Midship Length	Lx	10	[%]
Run Length	Lr	40.03	[%]
*****	*****	*****	*****
Z-Bow	ZBOW	-0.022	[m]
Z-Bulb	ZBULB	No Bulb	[m]
Z-mid	ZMID	1.495	[m]
Z-cut	ZCUT2	2.99	[m]
Z-stern	ZSTER	3.136	[m]
Z-hub	ZHUB	No Hub	[m]

Πίνακας 1: Γεωμετρία πλοίου  $C_B = 0.60$

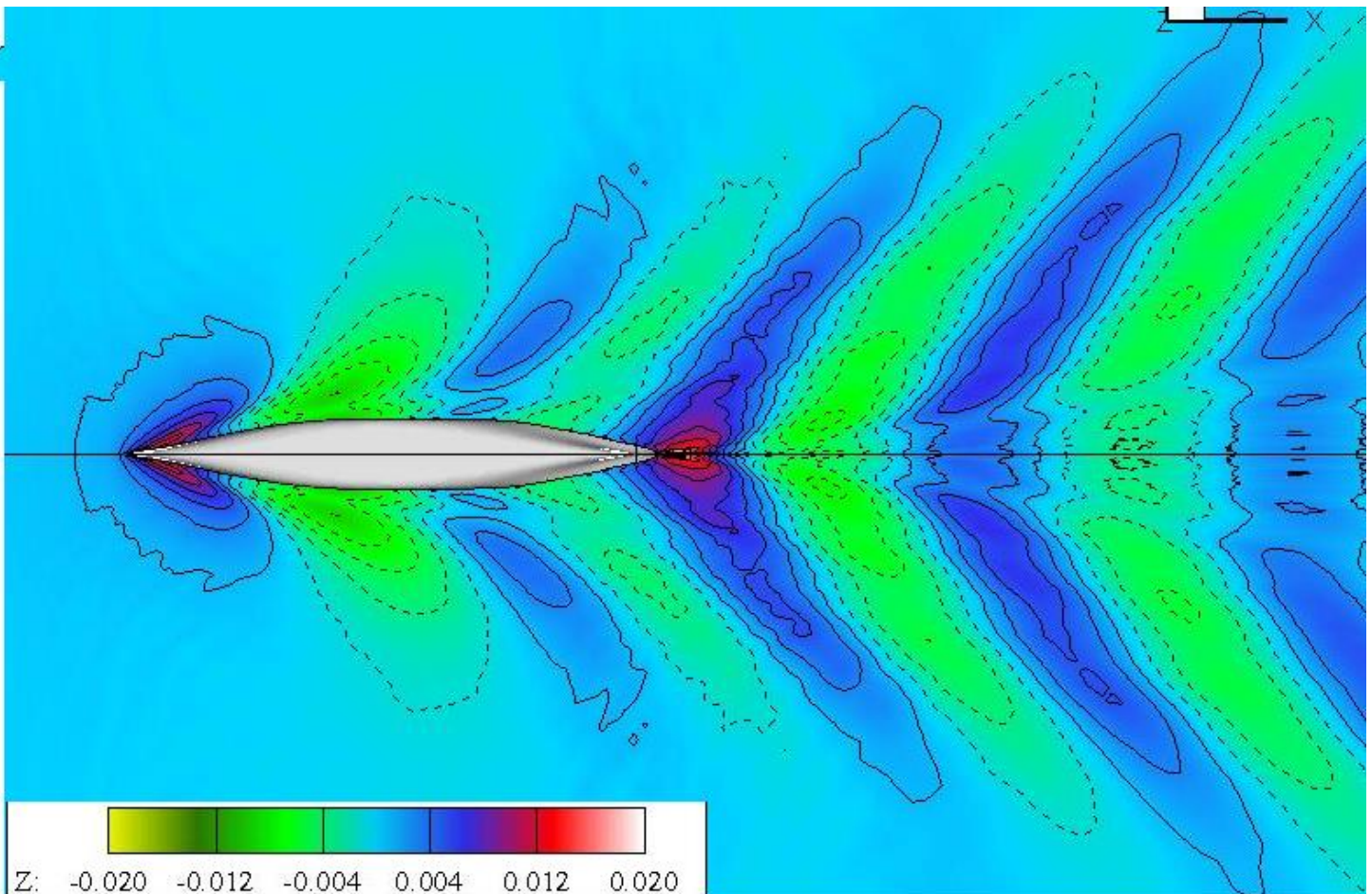
Μετά την εκτέλεση του κώδικα λήφθηκαν τα παρακάτω αποτελέσματα για το συντελεστή αντίστασης  $C_w$  και τον όρο υπόλοιπης πίεσης  $|δz|$ , όπου παρουσιάζονται μαζί με την ιστορία σύγκλισής τους στο διάγραμμα 1. Στον πίνακα 2 φαίνονται οι τελικές τιμές που προέκυψαν μετά τη σύγκλιση της αριθμητικής μεθόδου.



Διάγραμμα 1: Ιστορία σύγκλισης ποσοτήτων  $C_w$  και  $I\delta z_l$  για  $C_B = 0.60$  και  $F_N = 0.290$ .

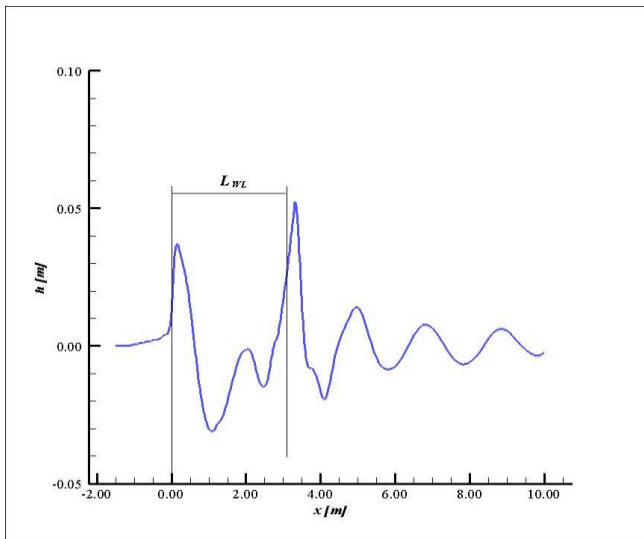
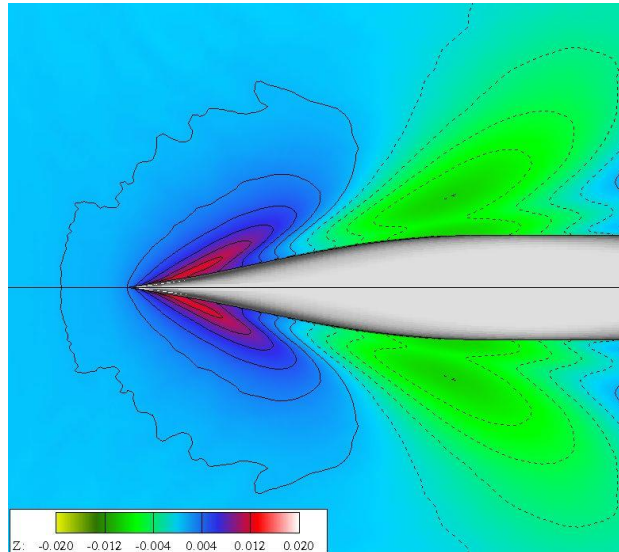
<b><math>C_B = 0.60</math> &amp; <math>F_N = 0.290</math></b>		
	values	units
<b><math>C_w</math></b>	1.458E-03	-
<b><math>I\delta z_l</math></b>	1.040E-03	-
TOTAL RES. (ITTC)	9.7608	Nt
TOTAL RES. (ATTC)	9.5535	Nt
BUOYANCY	1185.2	Nt
LCB	1.55E+00	m
KB	-7.58E-02	m

Πίνακας 2: Τιμές αποτελεσμάτων σύγκλισης

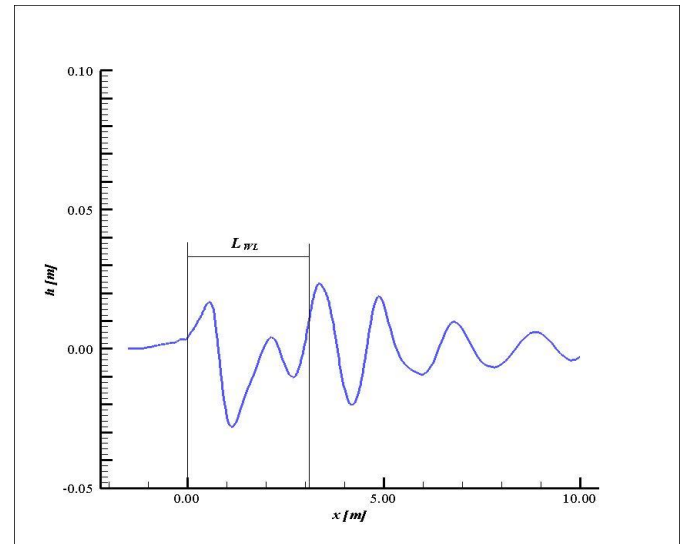


Σχήμα 1: Αναπαράσταση των Ισοψών τομών της ελεύθερης επιφάνειας και μεγέθυνση στην πλώρη (κάτω) για  $C_B = 0.60$  και  $F_N = 0.290$  χωρίς βολβό.





Wave on hull

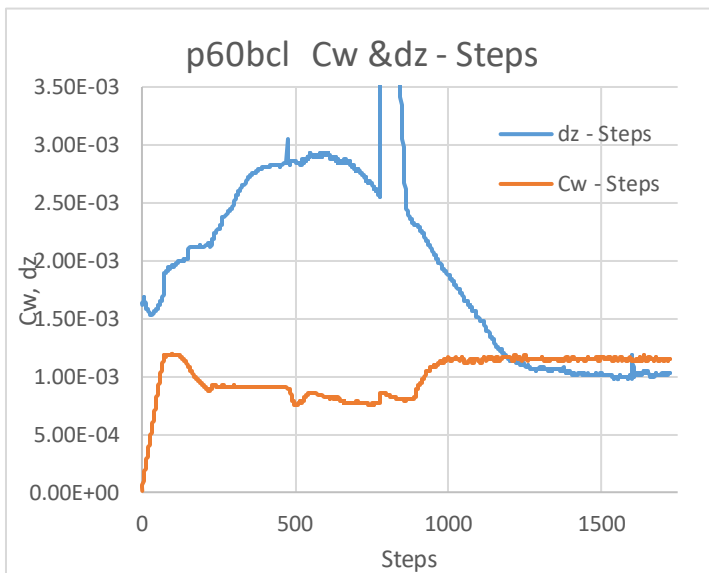


Wavecut at Bms + 10 cm

Στη συνέχεια προστέθηκε βολβός στην πλώρη του μοντέλου, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του οποίου επιλέχθηκαν με βάση τις οδηγίες του A. M. Kracht (Kracht, 1978) και καταγράφονται στον παρακάτω πίνακα. Οι παράμετροι του βολβού αναλύονται στην ενότητα 5.6. Το πρόγραμμα έτρεξε για τη νέα γεωμετρία και τα αποτελέσματα φαίνονται στο διάγραμμα 2. Στον πίνακα 4 φαίνονται μεταξύ άλλων οι τελικές τιμές για τα  $C_w$  και  $|δz|$  μετά τη σύγκλιση της μεθόδου. Η παράμετρος  $Cz_{BROOT}$  ισούται με το ύψος του βολβού προς το βύθισμα του πλοίου στην πρωραία κάθετο και η εισαγωγή της κρίθηκε αναγκαία για την κατασκευή του βολβού. Η τιμή του ύψους του βολβού λαμβάνεται μικρότερη πάντα από την τιμή του βυθίσματος μείων το πλάτος του βολβού (Παπανικολάου, 2009).

1 <sup>st</sup> CASE: OPTIMAL BULB	
CB	0.60
FN	0.29
CVPR	0.00355
CLPR	0.03360
CBB	0.15500
CZB	0.60000
CZBROOT	0.80000
CABL	0.16000
CABT	0.10000

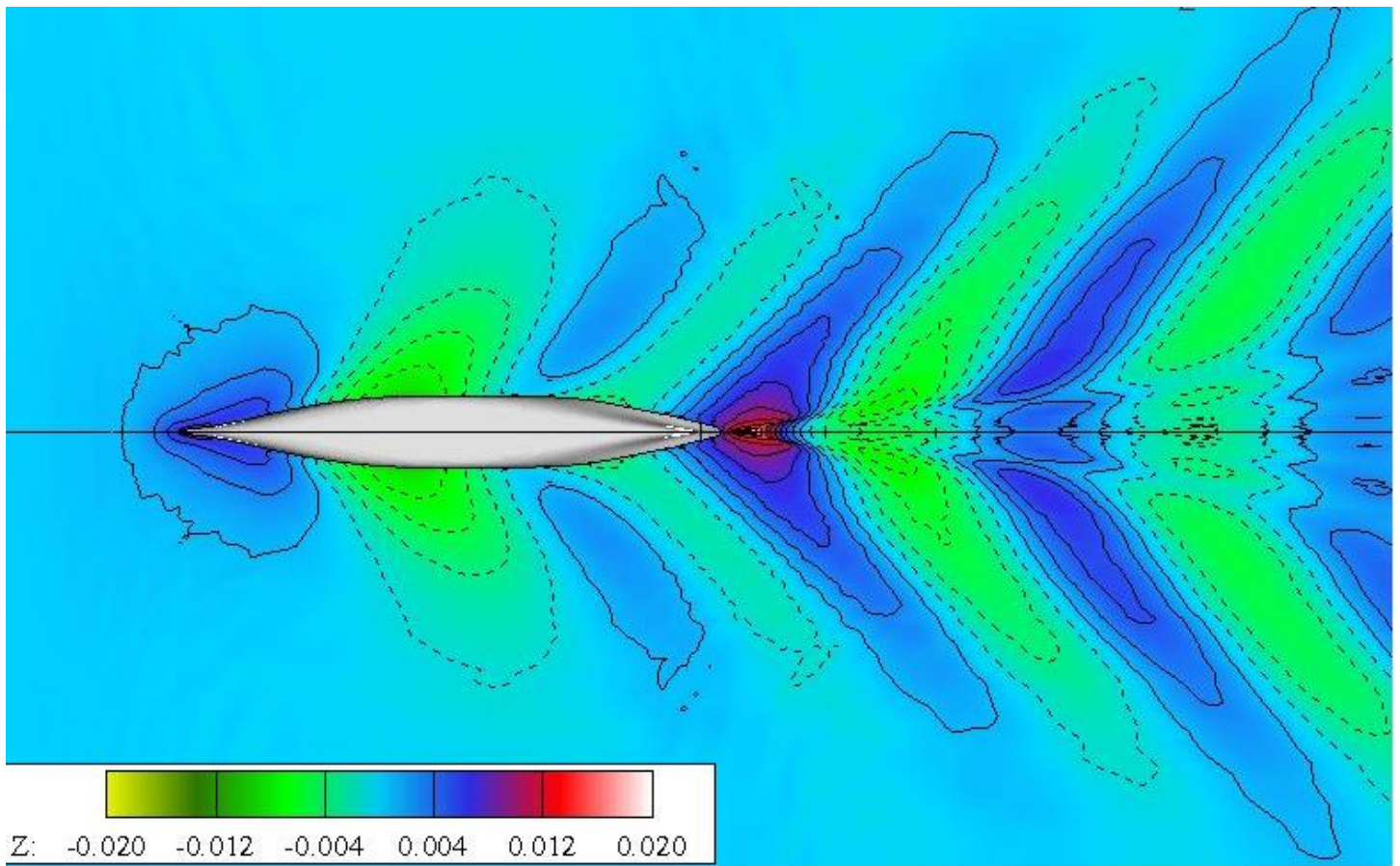
Πίνακας 3: Γεωμετρία βέλτιστου βολβού για  $C_B = 0.60$



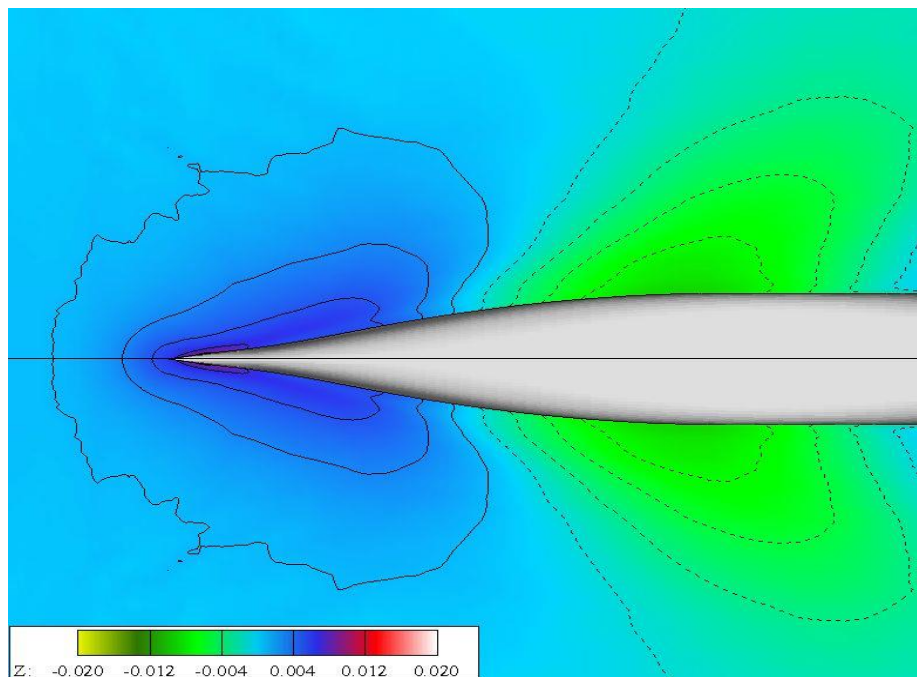
Διάγραμμα 2: Ιστορία σύγκλισης ποσοτήτων  $C_w$  και  $I\delta z_l$  για  $C_B = 0.60$ ,  $F_N = 0.290$  και βέλτιστο βολβό.

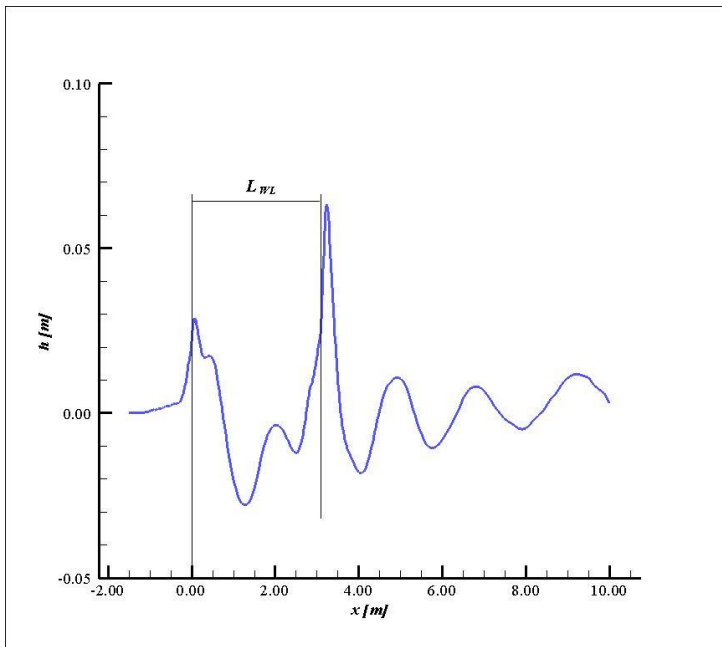
$C_B = 0.60$	Optimal bulb	
	values	units
<b><math>C_w</math></b>	1.150E-03	-
<b><math>I\delta z_l</math></b>	1.013E-03	-
TOTAL RES. (ITTC)	9.3517	Nt
TOTAL RES. (ATTC)	9.1433	Nt
BUOYANCY	1197.9	Nt
LCB	1.54E+00	m
KB	-7.59E-02	m

Πίνακας 4: αποτελέσματα σύγκλισης για βέλτιστο βολβό.

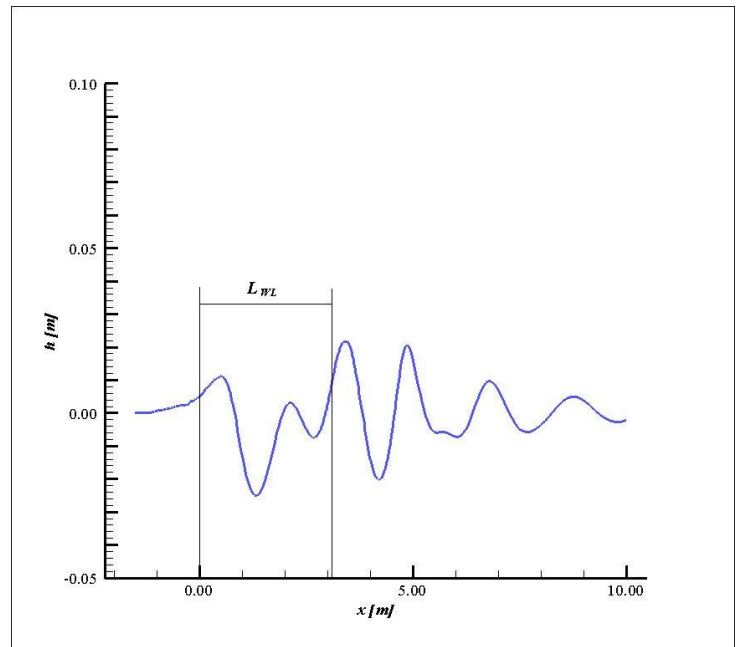


Σχήμα 2: Αναπαράσταση των Ισοϋψών τομών της ελεύθερης επιφάνειας και μεγέθυνση στην πλώρη (κάτω) για case 1:  $C_b = 0.60$  optimal bulb.





Wave on hull



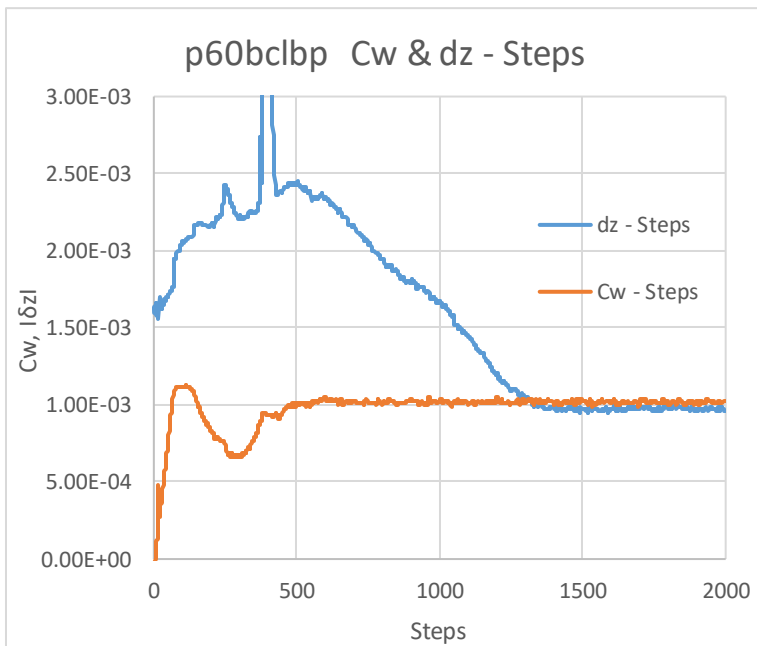
Wavecut at Bms + 10 cm

Έπειτα, δοκιμάστηκαν παραλλαγές του βέλτιστου βολβού για  $C_B = 0.60$  και  $F_N = 0.290$ . Επιχειρείται κάθε φορά, αλλαγή σε ένα ζευγάρι παραμέτρων μήκους ή πλάτους. Από τον ορισμό των παραμέτρων φαίνεται να υπάρχει σύνδεση μεταξύ της παραμέτρου μήκους του βολβού ( $CLPR$ ) και της πλάγιας παραμέτρου ( $CABL$ ), όπως και της παραμέτρου πλάτους ( $CBB$ ) με την παράμετρο εγκάρσιας επιφάνειας ( $CABT$ ). Επιλέχθηκε έτσι να γίνει μελέτη των περιπτώσεων μεταβολής των παραμέτρων μήκους κατά  $\pm 10\%$  και των παραμέτρων πλάτους  $\pm 10\%$ . Προέκυψαν έτσι 4 νέοι βολβοί, οι οποίοι δοκιμάστηκαν με την αριθμητική μέθοδο και τα αποτελέσματα των δοκιμών φαίνονται παρακάτω.

➤ Περίπτωση βολβού με +10% των βέλτιστων τιμών στις παραμέτρους  $C_{BB}$  και  $C_{ABT}$

Case +10% $C_{BB}$ , $C_{ABT}$ BULB	
$C_B$	0.60
$F_N$	0.29
$C_{VPR}$	0.00355
$C_{LPR}$	0.03360
<b><math>C_{BB}</math></b>	<b>0.17050</b>
$C_{ZB}$	0.60000
$C_{ZBROOT}$	0.80000
$C_{ABL}$	0.16000
<b><math>C_{ABT}</math></b>	<b>0.11000</b>

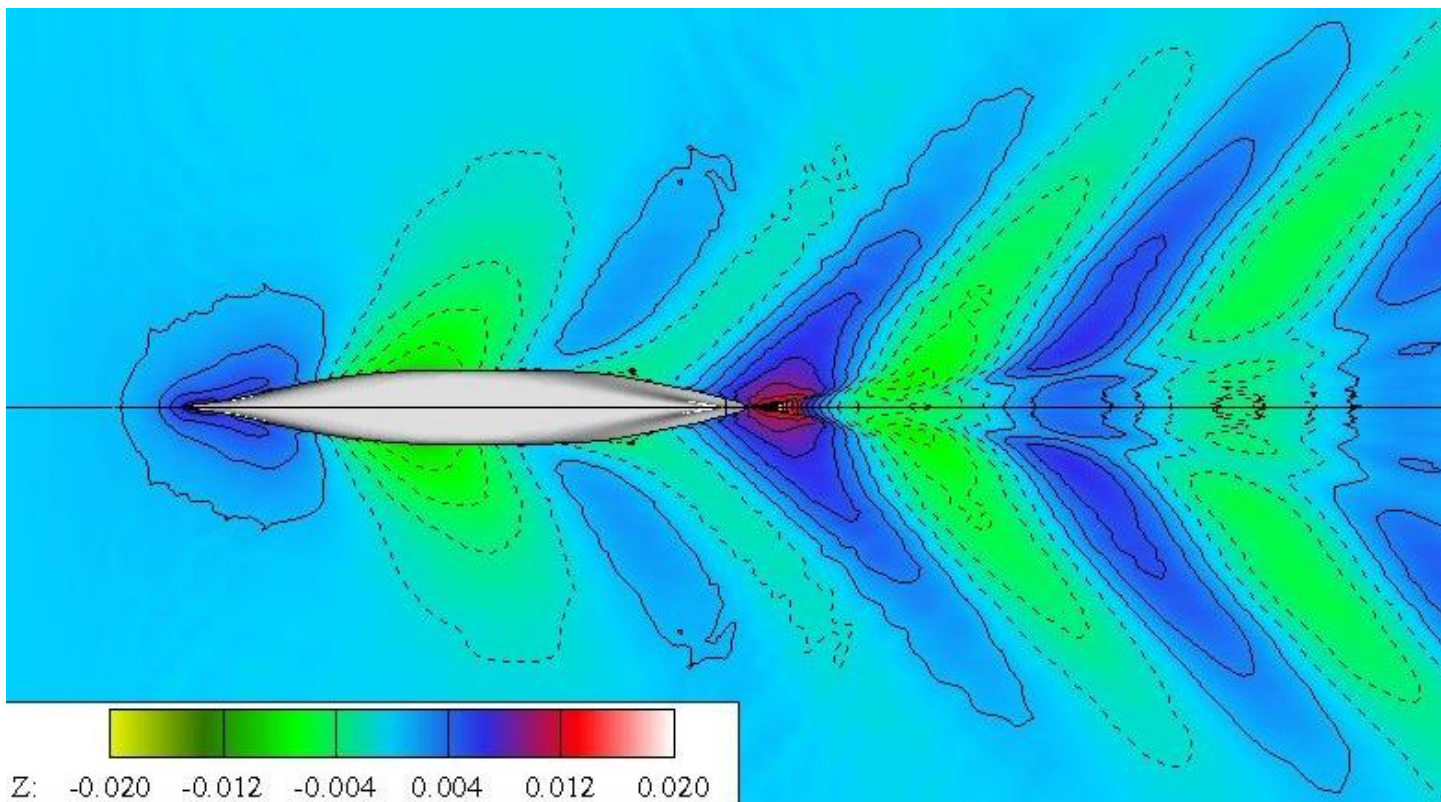
Πίνακας 5: Γεωμετρία του βολβού



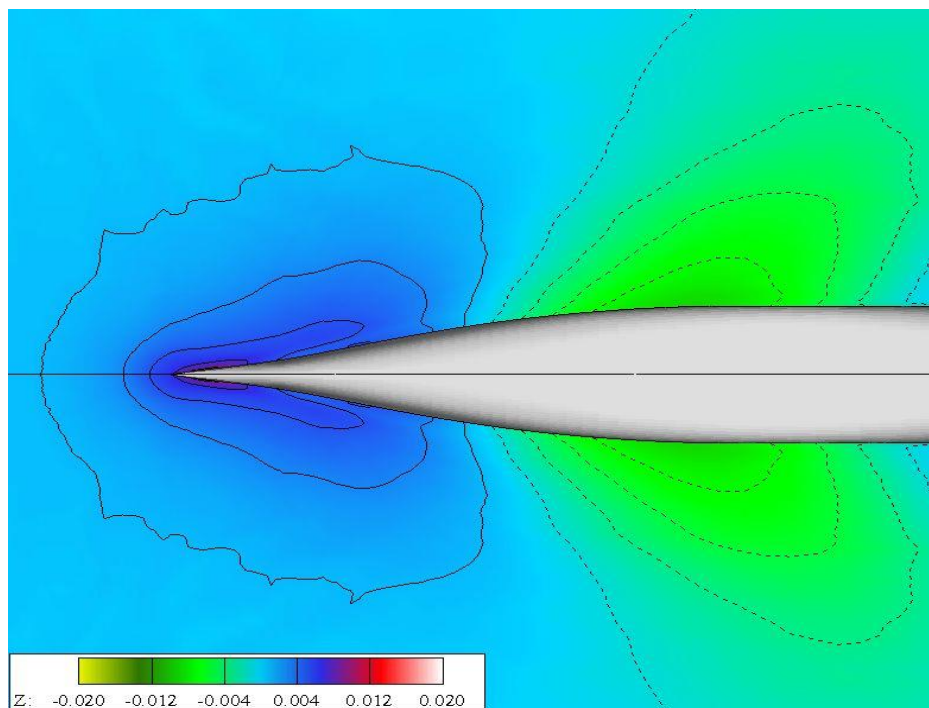
Διάγραμμα 3: Ιστορία σύγκλισης ποσοτήτων  $C_w$  και  $I_{dzl}$  για  $C_B = 0.6$ ,  $F_N = 0.290$  και +10% B βολβό.

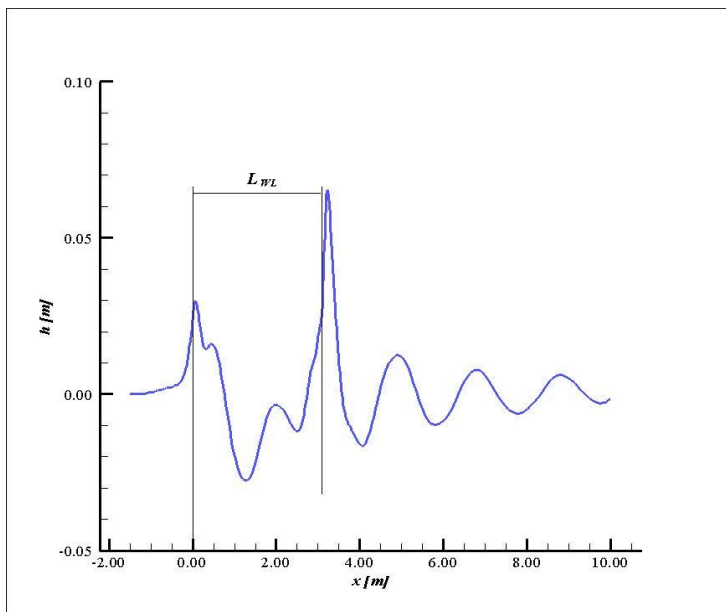
$C_B = 0.60$	<b>+10% <math>C_{BB}</math>, <math>C_{ABT}</math> bulb</b>	
	values	units
<b><math>C_w</math></b>	1.016E-03	-
<b><math>I_{dzl}</math></b>	-9.749E-04	-
TOTAL RES. (ITTC)	9.0768	Nt
TOTAL RES. (ATTC)	8.8679	Nt
BUOYANCY	1200	Nt
LCB	1.53E+00	m
KB	-7.59E-02	m

Πίνακας 6: αποτελέσματα σύγκλισης για +10% B βολβό.

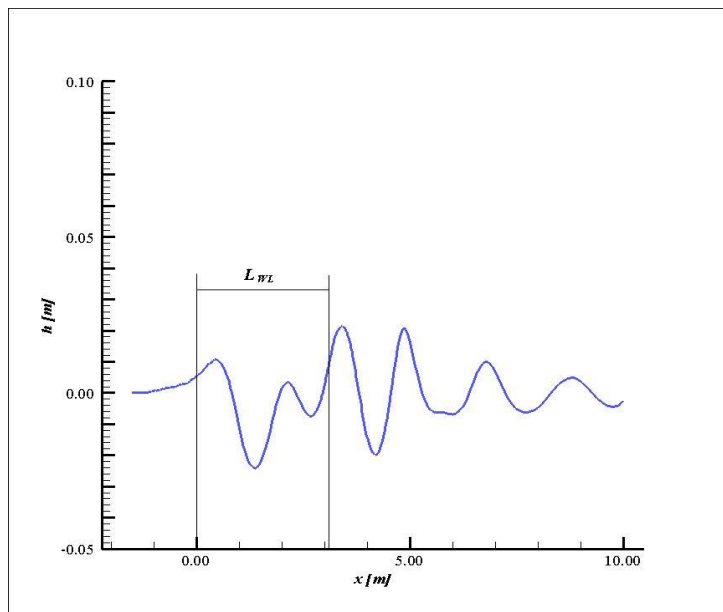


Σχήμα 3: Αναπαράσταση των Ισοψών τομών της ελεύθερης επιφάνειας και μεγέθυνση στην πλώρη (κάτω) για case 2:  $C_B = 0.60$  bclbr.





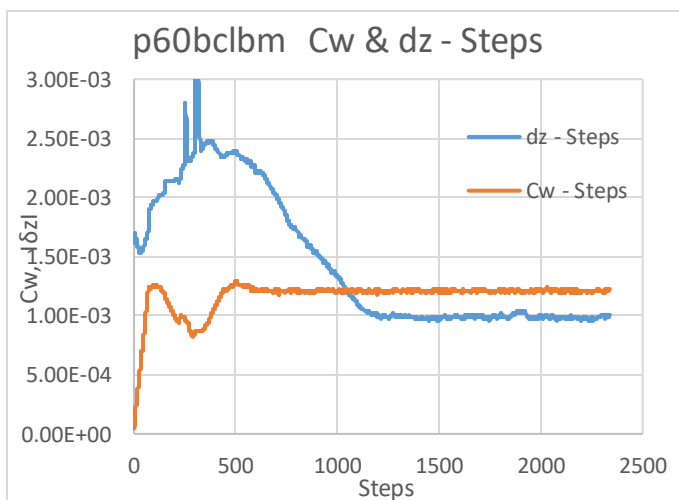
Wave on hull



Wavecut at Bms + 10 cm

➤ Περίπτωση βολβού με -10% των βέλτιστων τιμών στις παραμέτρους  $C_{BB}$  και  $C_{ABT}$

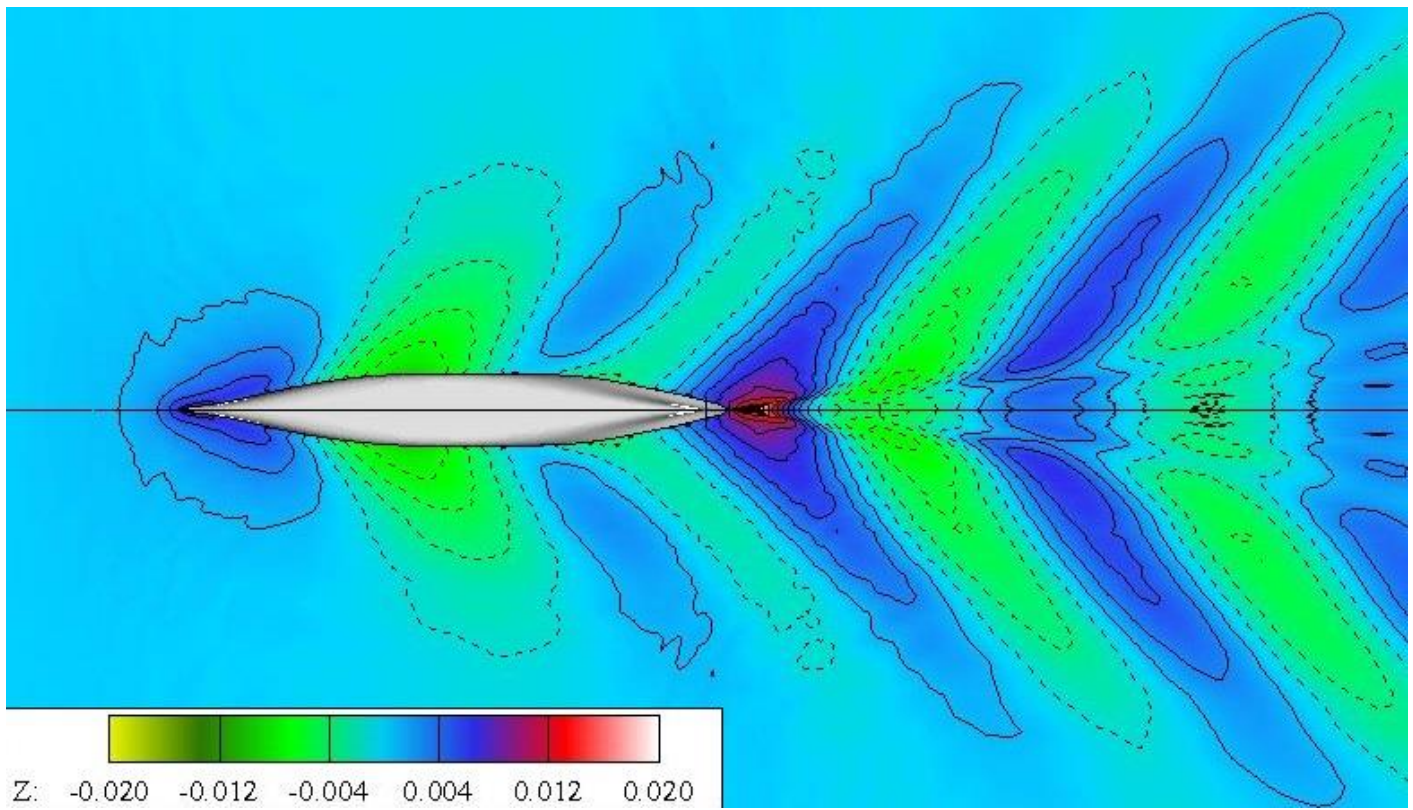
CASE -10% $C_{BB}$ , $C_{ABT}$ BULB	
CB	0.60
FN	0.29
CVPR	0.00355
CLPR	0.03360
<b><math>C_{BB}</math></b>	<b>0.13950</b>
CZB	0.60000
CZBROOT	0.80000
CABL	0.16000
<b><math>C_{ABT}</math></b>	<b>0.09000</b>



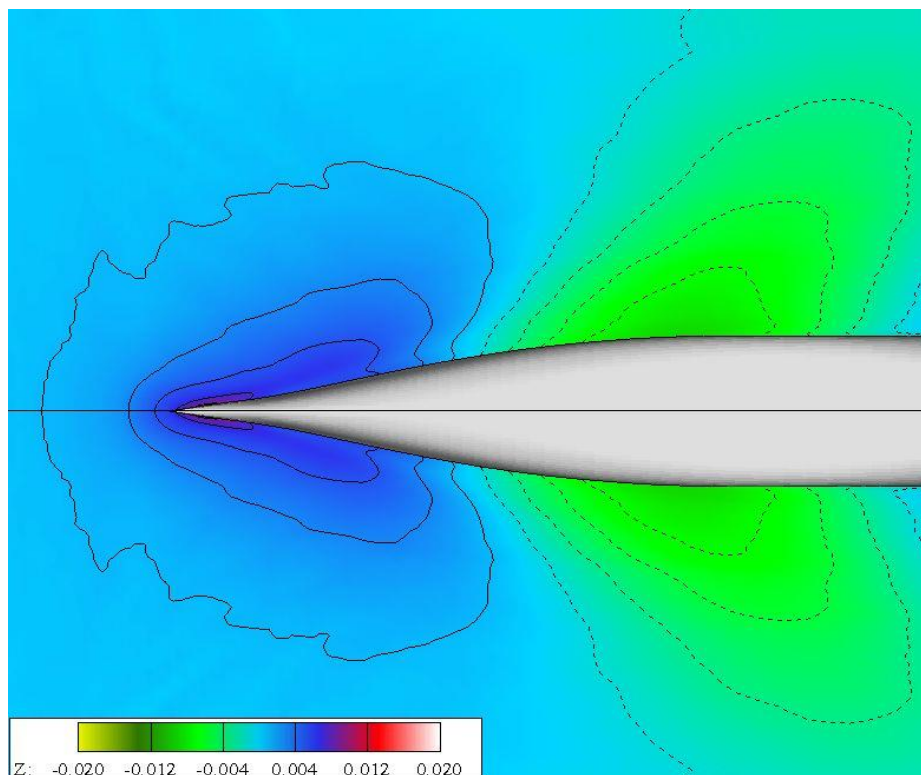
CB = 0.60	p60bclbm	
	values	units
<b>Cw</b>	1.208E-03	-
<b><math>I_{\delta z}</math></b>	9.830E-04	-
TOTAL RES. (ITTC)	9.4922	Nt
TOTAL RES. (ATTC)	9.2841	Nt
BUOYANCY	1196.1	Nt
LCB	1.54E+00	m
KB	-7.58E-02	m

Διάγραμμα 4: Ιστορία σύγκλισης ποσοτήτων  $C_w$  και  $I_{\delta z}$  για  $C_B = 0.6$ ,  $F_N = 0.290$  και -10% B βολβό.

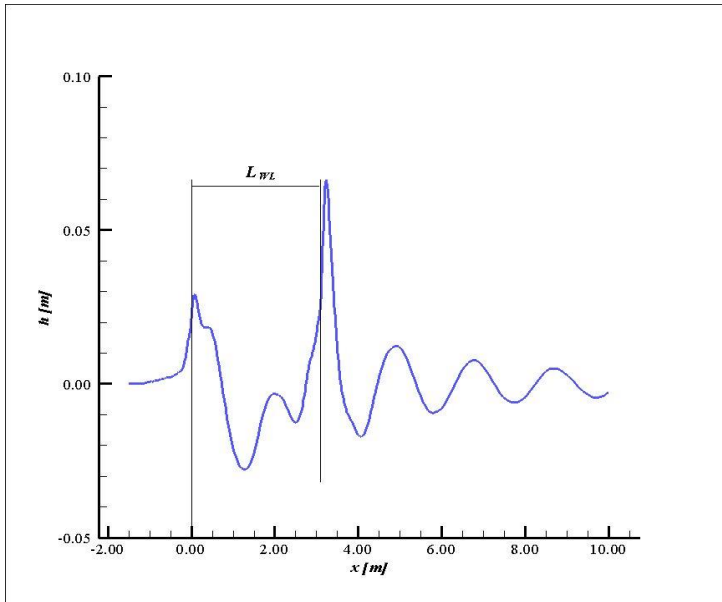
Πίνακας 7: αποτελέσματα σύγκλισης για -10% B βολβό.



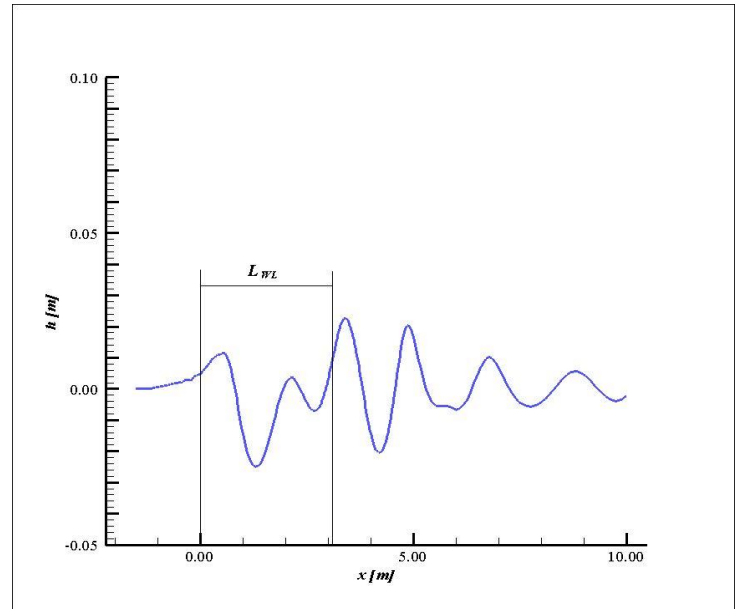
Σχήμα 4: Αναπαράσταση των Ισοϋψών τομών της ελεύθερης επιφάνειας και μεγέθυνση στην πλώρη (κάτω) για case 3:  $C_b = 0.60$  bclbm.







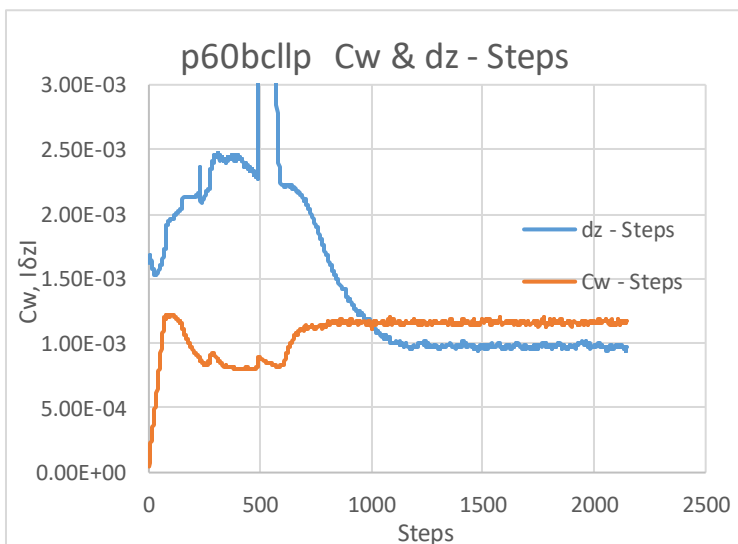
Wave on hull



Wavecut at Bms + 10 cm

➤ Περίπτωση βολβού με +10% των βέλτιστων τιμών στις παραμέτρους CLPR και CABL

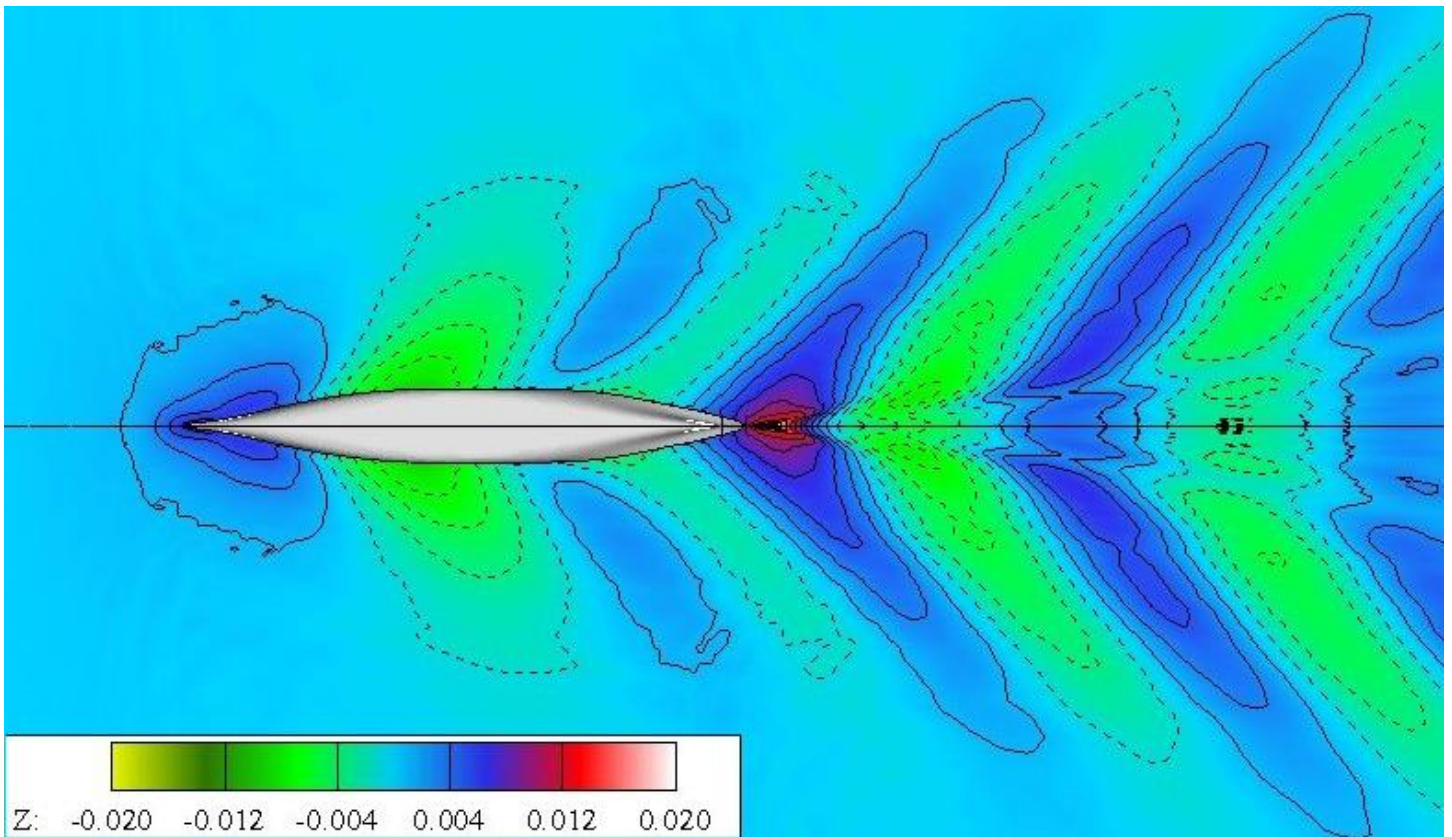
CASE +10% CLPR, CABL BULB	
CB	0.60
FN	0.29
CVPR	0.00355
<b>CLPR</b>	<b>0.03696</b>
CBB	0.15500
CZB	0.60000
CZBROOT	0.80000
<b>CABL</b>	<b>0.17600</b>
CABT	0.10000



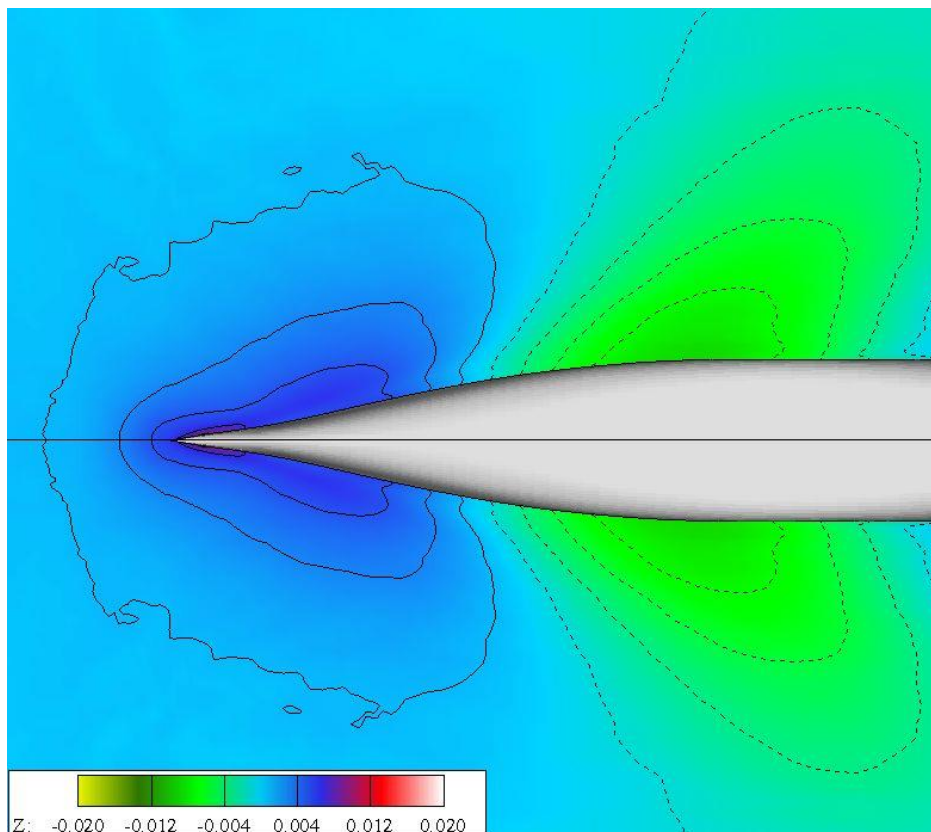
Διάγραμμα 5: Ιστορία σύγκλισης ποσοτήτων  $C_w$  και  $I_{\delta zI}$  για  $C_B = 0.6$ ,  $F_N = 0.290$  και +10% L βολβό.

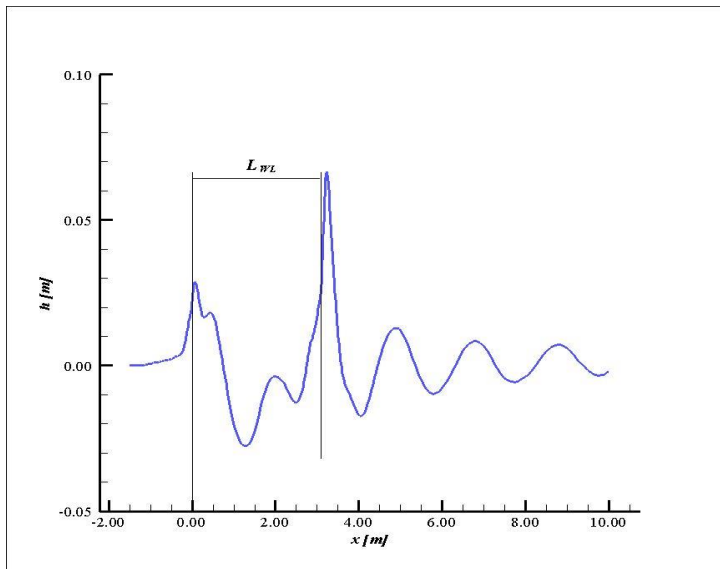
$C_B = 0.60$	p60bc1lp	
	values	units
<b><math>C_w</math></b>	1.162E-03	-
<b><math>I_{\delta zI}</math></b>	9.796E-04	-
TOTAL RES. (ITTC)	9.407	Nt
TOTAL RES. (ATTC)	9.1987	Nt
BUOYANCY	1198.3	Nt
LCB	1.54E+00	m
KB	-7.59E-02	m

Πίνακας 8: αποτελέσματα σύγκλισης για +10% L βολβό.

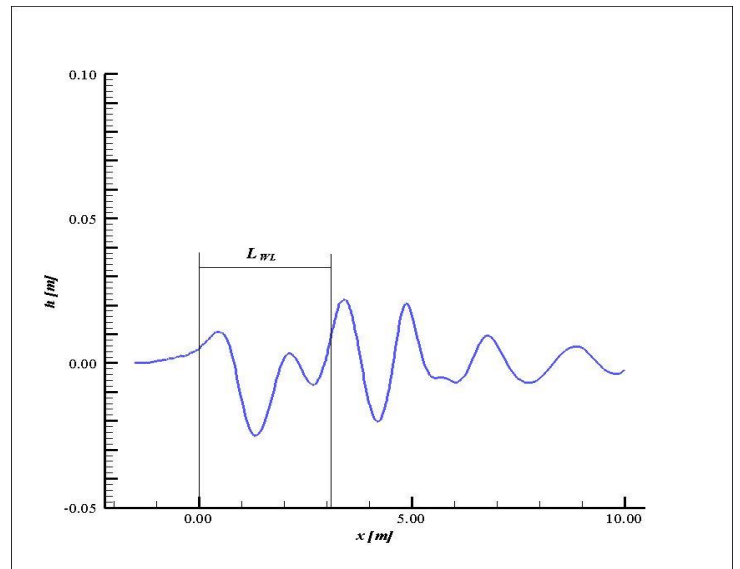


Σχήμα 5: Αναπαράσταση των Ισοϋψών τομών της ελεύθερης επιφάνειας και μεγέθυνση στην πλώρη (κάτω) για case 4:  $C_B = 0.60$  bcllp.





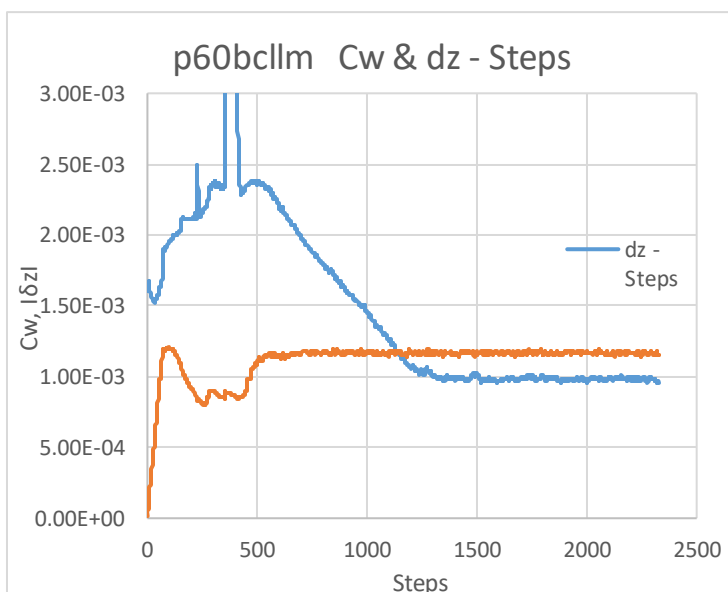
Wave on hull



Wavecut at Bms + 10 cm

➤ Περίπτωση βολβού με -10% των βέλτιστων τιμών στις παραμέτρους CLPR και CABL

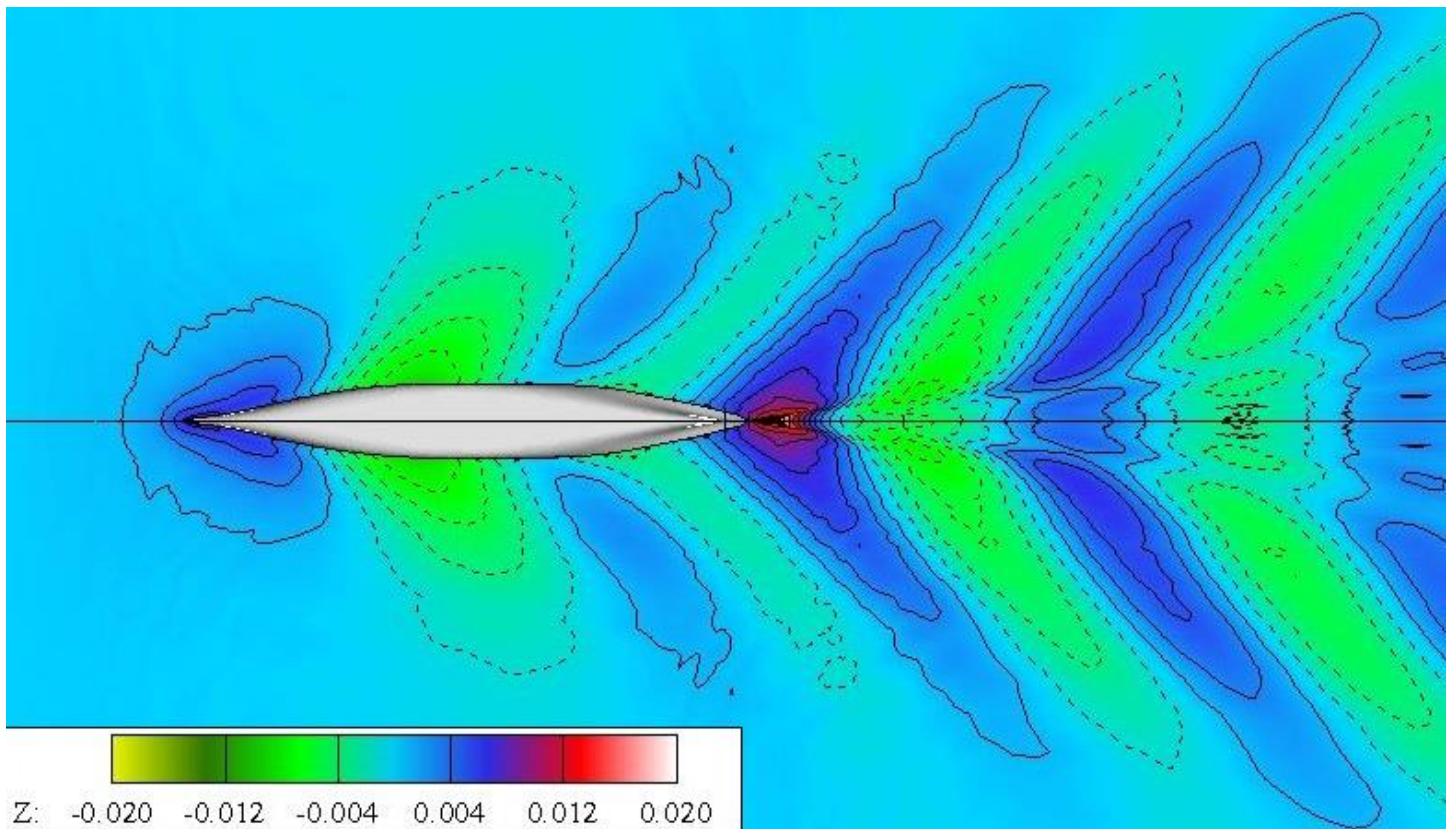
CASE -10% CLPR, CABL BULB	
CB	0.60
FN	0.29
CVPR	0.00355
<b>CLPR</b>	<b>0.03024</b>
CBB	0.15500
CZB	0.60000
CZBROOT	0.80000
<b>CABL</b>	<b>0.14400</b>
CABT	0.10000



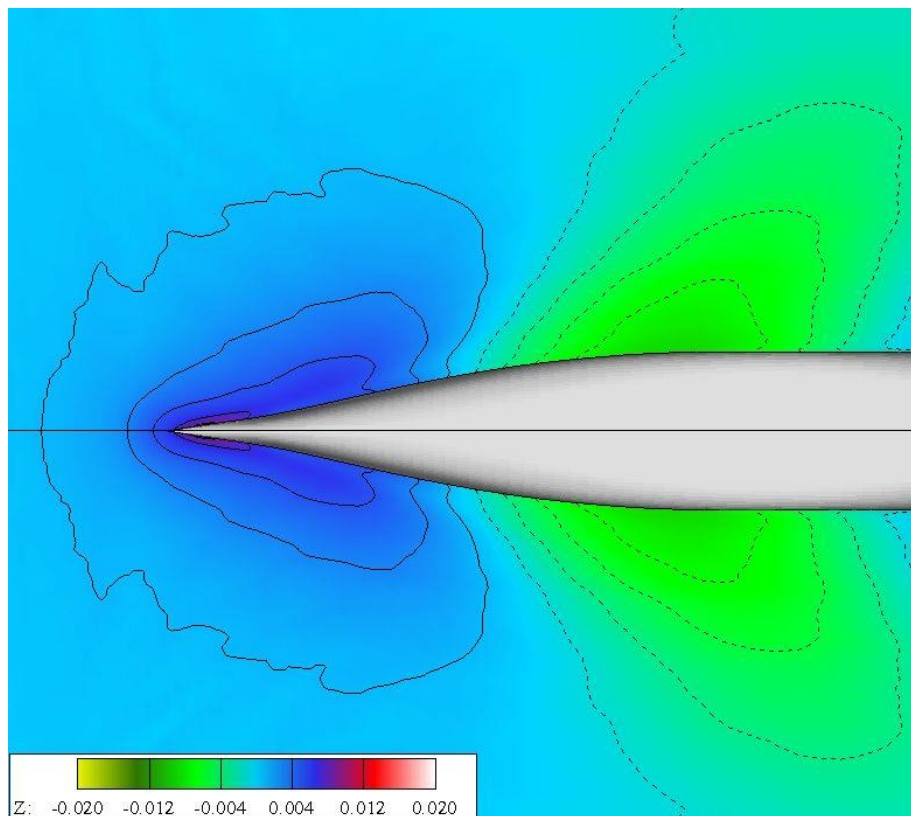
Διάγραμμα 6: Ιστορία σύγκλισης ποσοτήτων  $C_w$  και  $I_{\delta zI}$  για  $C_B = 0.6$ ,  $F_N = 0.290$  και +10% Β βολβό.

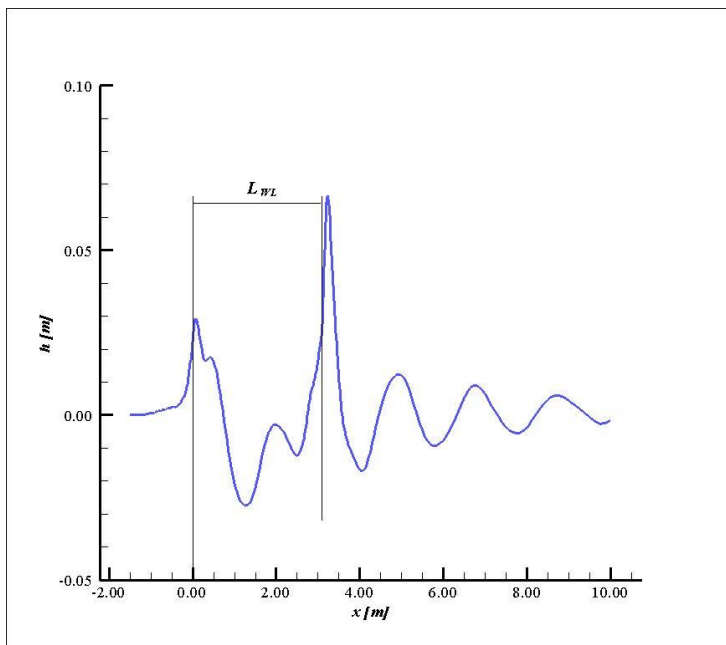
$C_B = 0.60$	p60bc11m	
	values	units
<b><math>C_w</math></b>	1.164E-03	-
<b><math>I_{\delta zI}</math></b>	9.832E-04	-
TOTAL RES. (ITTC)	9.3523	Nt
TOTAL RES. (ATTC)	9.1437	Nt
BUOYANCY	1197.5	Nt
LCB	1.54E+00	m
KB	-7.59E-02	m

Πίνακας 9: αποτελέσματα σύγκλισης για +10% Β βολβό.

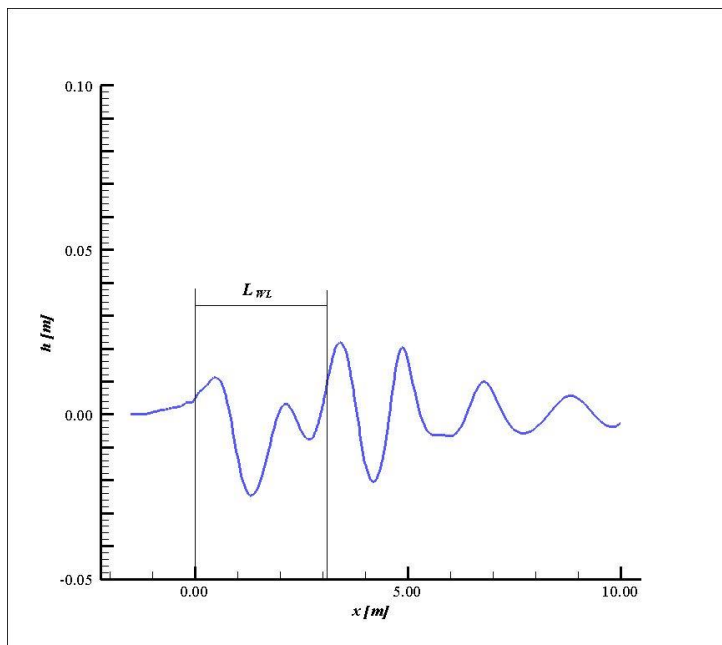


Σχήμα 6: Αναπαράσταση των Ισοψών τομών της ελεύθερης επιφάνειας και μεγέθυνση στην πλώρη (κάτω) για case 5:  $C_B = 0.60$  bcllm.





Wave on hull

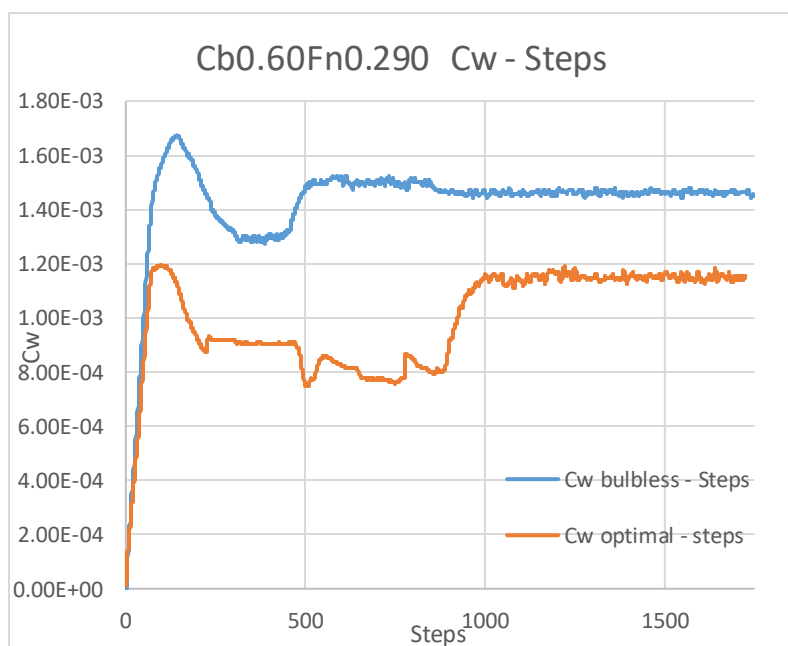


Wavecut at Bms + 10 cm

### Σύγκριση αριθμητικών αποτελεσμάτων συντελεστή μορφής $C_b = 0.60$

Σε αυτή την ενότητα γίνεται η σύγκριση των τιμών της αντίστασης κυματισμού για τα πλοία με συντελεστή  $C_b = 0.60$ . Αρχικά, συγκρίνεται η περίπτωση του βέλτιστου βολβού και του πλοίου χωρίς βολβό για τα αποτελέσματα που έδωσε η θεωρία δυναμικού και στη συνέχεια συγκρίνεται ο βέλτιστος βολβός σε σχέση με τις υπόλοιπες 4 παραλλαγές του και αξιολογείται το αν και κατά πόσο είναι εύστοχες οι προβλέψεις του *A.M. Kracht*. Τα αποτελέσματα παραθέτονται παρακάτω.

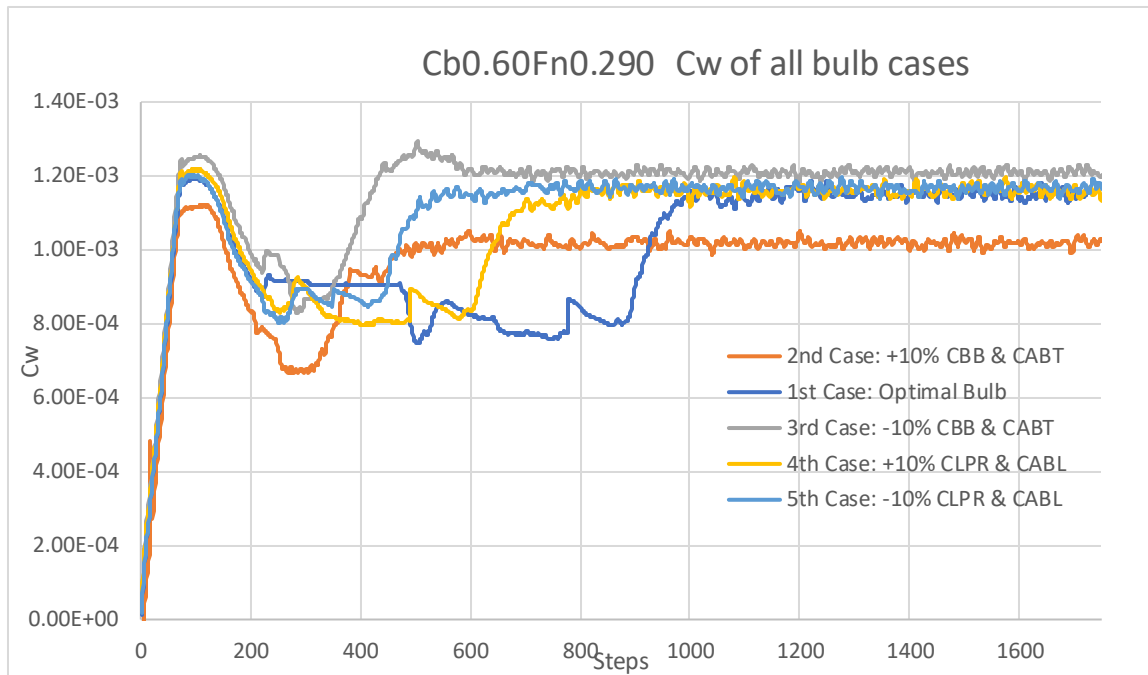
#### Αντίσταση κυματισμού πλοίου χωρίς βολβό vs. πλοίο με τον βέλτιστο βολβό



C <sub>B</sub> = 0.60 & F <sub>N</sub> = 0.290			
	Normal run	Optimal bow run	ΔC <sub>w</sub>
C <sub>w</sub>	1.458E-03	1.150E-03	-21.12%

Από το διάγραμμα και τον πίνακα, φαίνεται καθαρά η υπεροχή του πλοίου με βολβό, όσον αφορά την αντίσταση κυματισμού. Η τελευταία παρουσιάζεται μειωμένη κατά περίπου 20% παρουσία του βέλτιστου βολβού. Μια τέτοια πτώση της τιμής της αντίστασης ήταν αναμενόμενη καθώς είναι γνωστή η χρησιμότητα του βολβού σε λεπτόγραμμα και γρήγορα πλοία όπως αυτό της σειράς 60 με  $C_b = 0.60$  και  $F_N = 0.290$ .

Αντίσταση κυματισμού πλοίου με βέλτιστο βολβό vs. πλοίο με βολβό με παραλλαγές



Test cases for $C_B = 0.60$ & $F_N = 0.290$			
	Cw	$\Delta C_w$ after potential run	$\Delta C_w$ Kracht's prediction
1 <sup>st</sup> Case: Optimal bulb	1.15E-03	-	-
2 <sup>nd</sup> Case: +10% CBB, CABT bulb	1.02E-03	-13.13%	-0.4%
3 <sup>rd</sup> Case: -10% CBB, CABT bulb	1.21E-03	4.84%	3.50%
4 <sup>th</sup> Case: +10% CLPR, CABL bulb	1.16E-03	1.07%	7.35%
5 <sup>th</sup> Case: -10% CLPR, CABL bulb	1.16E-03	1.27%	-5.85%

Από το παραπάνω διάγραμμα και τον πίνακα φαίνεται ότι η αντίσταση κυματισμού αυξάνεται με την παραλλαγή του βέλτιστου βολβού εκτός από την περίπτωση που αυξάνουμε το πλάτος και την εγκάρσια επιφάνεια του βολβού κατά 10%. Αποδεικνύεται ότι ένας πιο «γεμάτος» βολβός προσδίδει καλύτερες ιδιότητες όσον αφορά την αντίσταση σε ένα σχετικά γρήγορο και λεπτόγραμμο πλοίο.

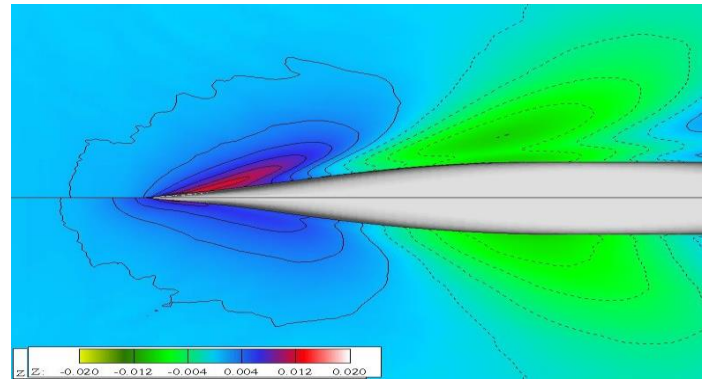
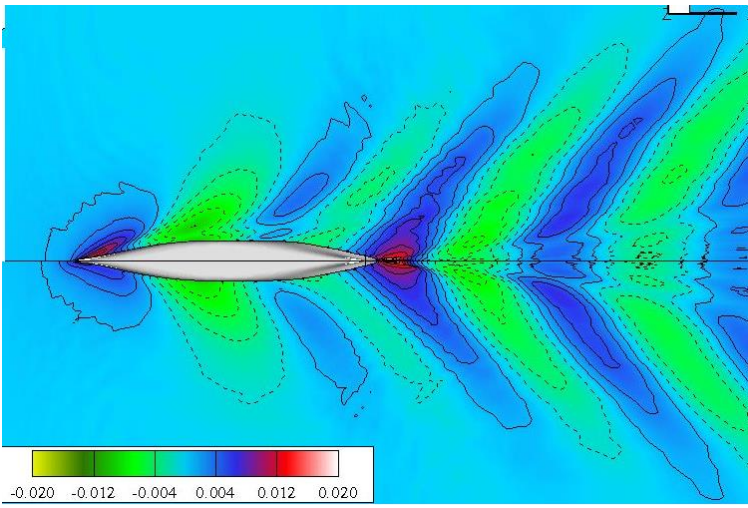
Στην τελευταία στήλη του πίνακα φαίνονται οι προβλέψεις που είχε κάνει ο *Kracht* για την διαφορά στην αντίσταση που αναμένεται να έχει η κάθε μεταβολή στις παραμέτρους σχεδίασης του βέλτιστου βολβού. Παρατηρείται ότι σε γενικές γραμμές οι προβλέψεις του δεν είναι εύστοχες, καθώς και φαίνεται πως δεν δικαιολογείται ο τίτλος του «βέλτιστου» για τον βολβό που έχει επιλέξει.

Είναι λογικό να μην είναι εντελώς εύστοχες οι παρατηρήσεις του *Kracht*, καθώς για την εξαγωγή των διαγραμμάτων από τα οποία εκλέχθηκαν οι παράμετροι για αυτή την εργασία, έχει βασιστεί κατά ένα μέρος σε πειράματα σε δεξαμενή και κατά ένα μέρος στη γραμμική θεωρία της αντίστασης κυματισμού, (Inui, Takahei, & Kumano, 1961; Weinblum, 1935; Wigley, 1935), δηλαδή, όχι εξ ολοκλήρου σε πειράματα. Δεν είναι δηλαδή δεδομένο ότι οι παραλλαγές των βολβών που επιλέχθηκαν αντιστοιχούν και σε βολβούς που υπάρχουν στην πραγματικότητα. Πιθανές αστοχίες μπορεί επίσης να οφείλονται στις διαφορετικές διαστάσεις για τη γάστρα που χρησιμοποιούμε, με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή των διαγραμμάτων.

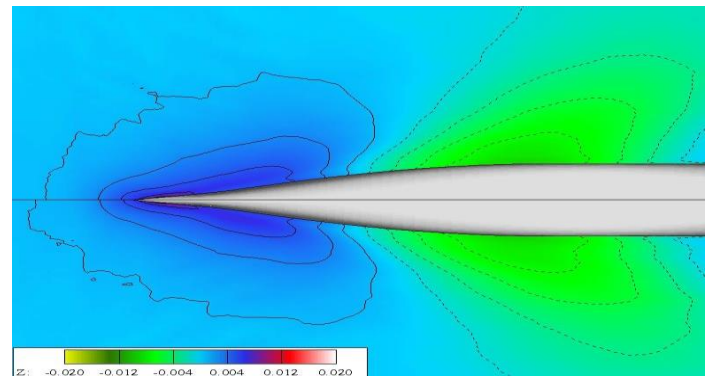
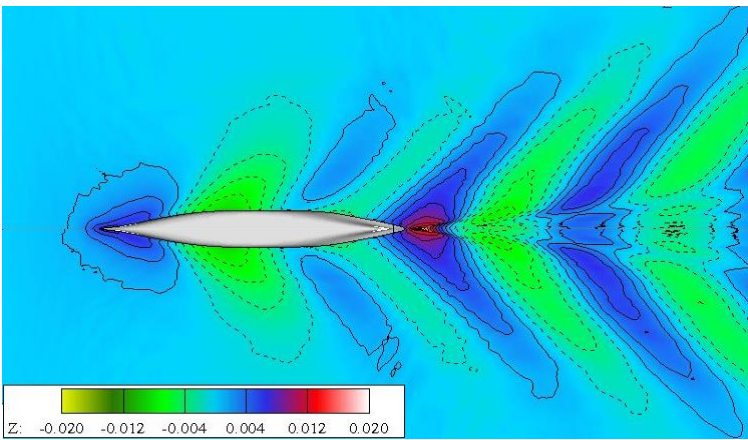
Σύγκριση ισοϋψών τομών και υπέρθεση των wavecuts για  $C_B = 0.60$

**NORMAL VIEW**

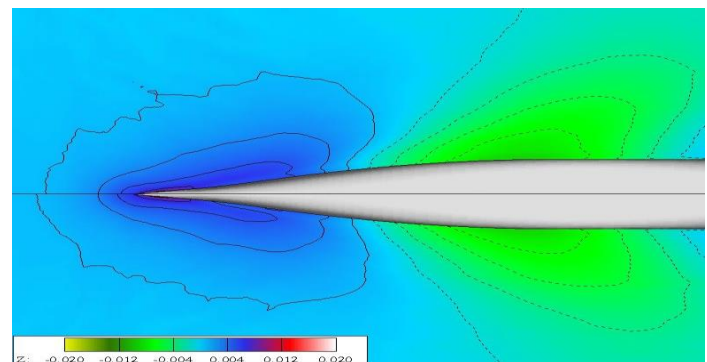
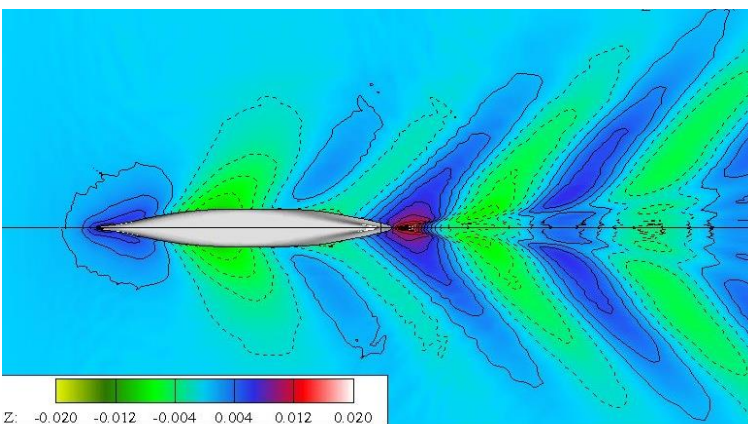
**ZOOMED - IN**



Σχήμα 7: case 1: Optimal bulb (πάνω) **VS.** bulbless ship (κάτω)



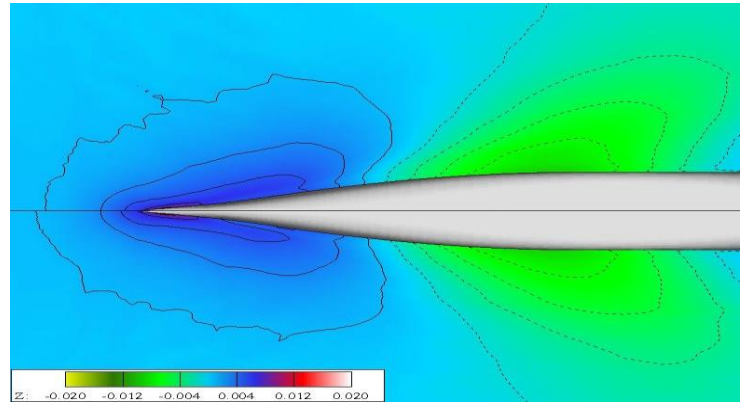
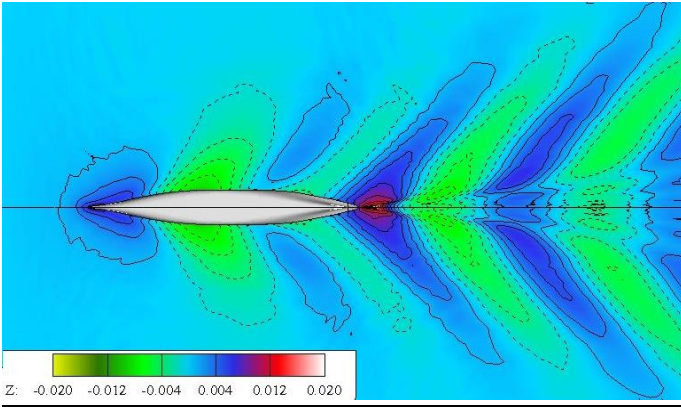
Σχήμα 8: case 1: Optimal bulb (πάνω) **VS.** case 3: bclbm (κάτω)



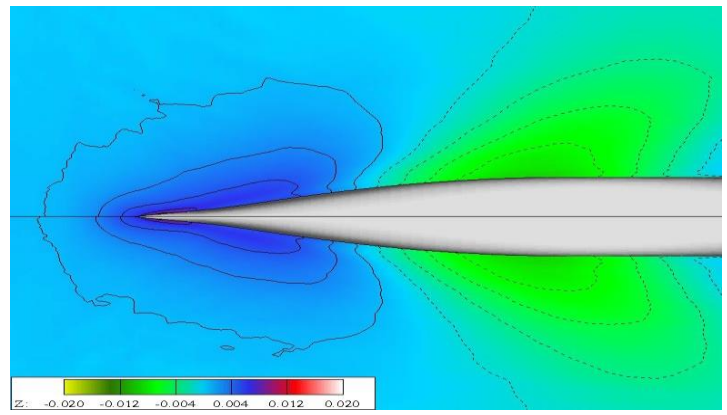
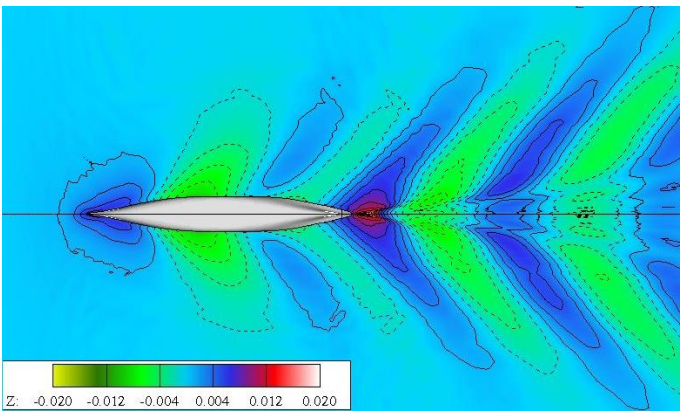
Σχήμα 9: case 1: Optimal bulb (πάνω) **VS.** case 2: bclbp (κάτω)

**NORMAL VIEW**

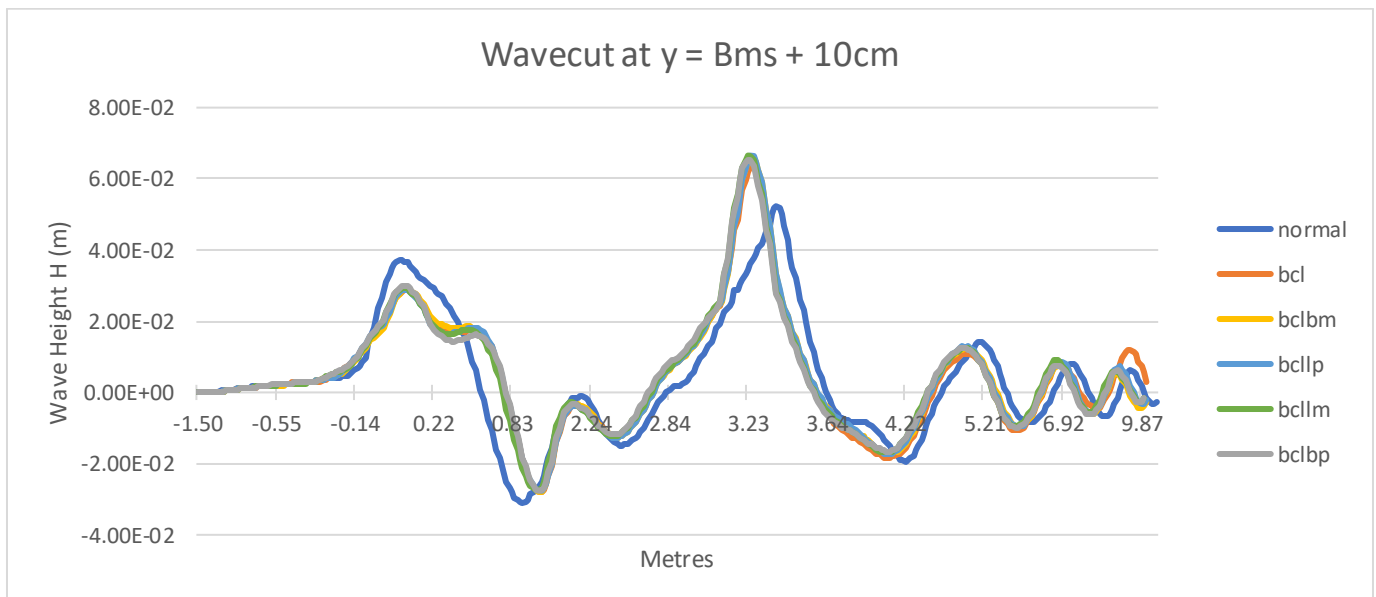
**ZOOMED – IN**



Σχήμα 10: case 1: Optimal bulb (πάνω) **VS.** case 5: bclIm (κάτω)

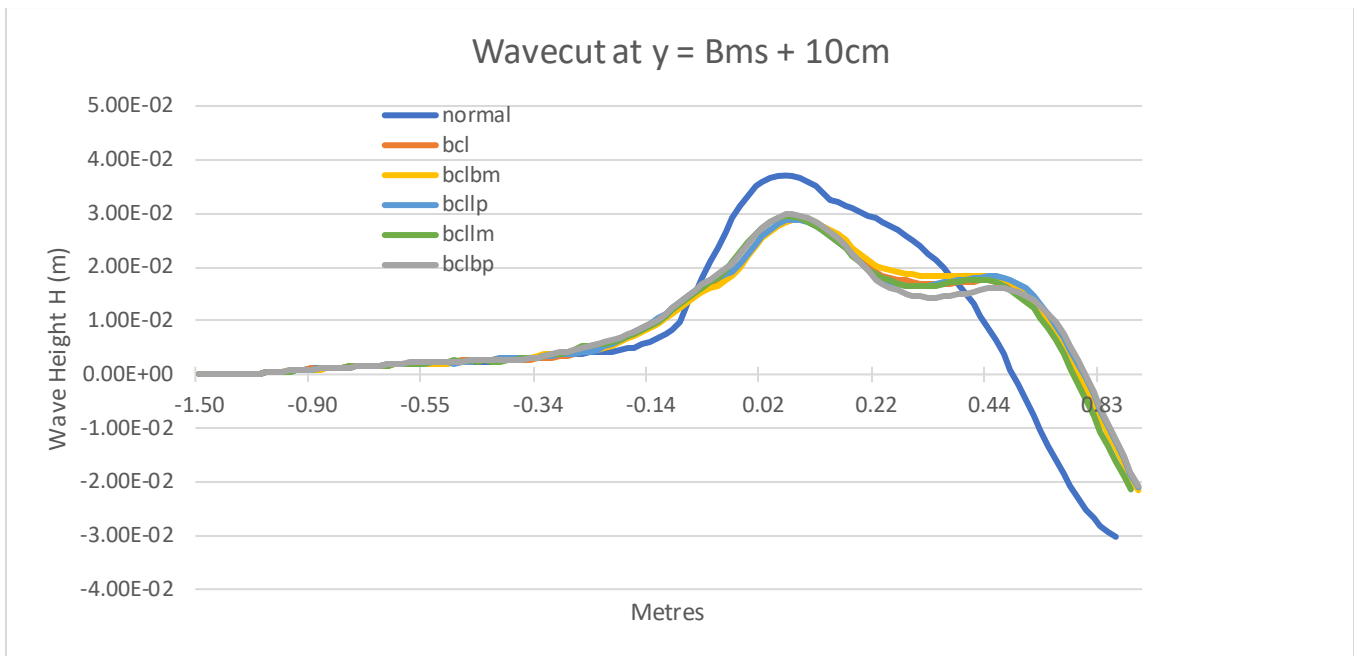


Σχήμα 11: case 1: Optimal bulb (πάνω) **VS.** case 4: bclIp (κάτω)



Διάγραμμα 7: Σύγκριση των wavecuts σε απόσταση 10cm από το Bms για  $C_B = 0.60$ .

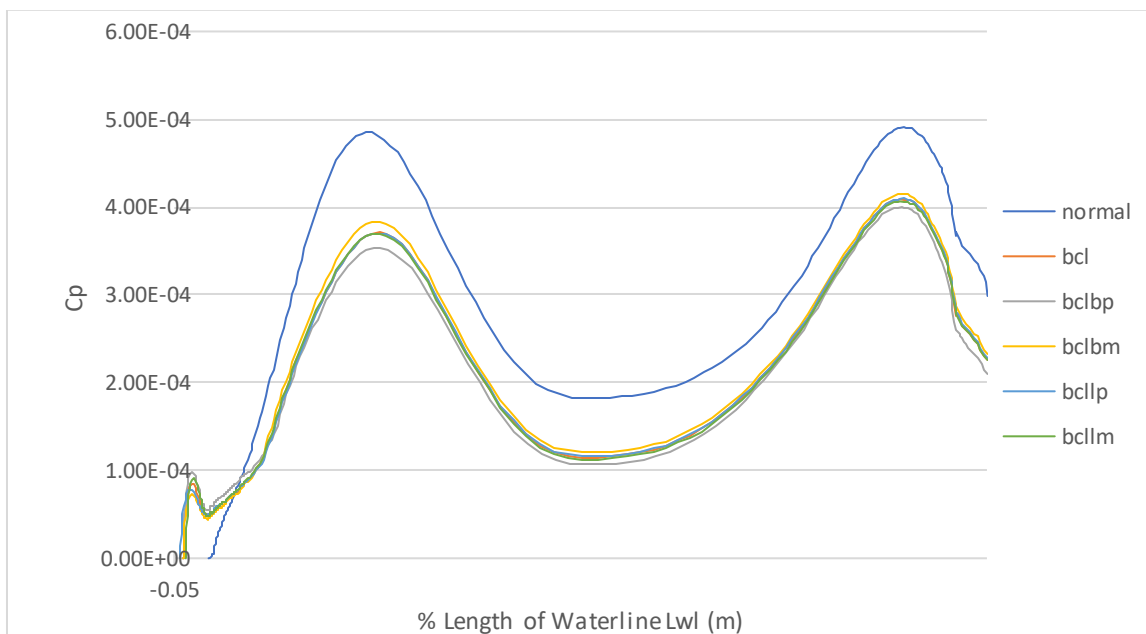




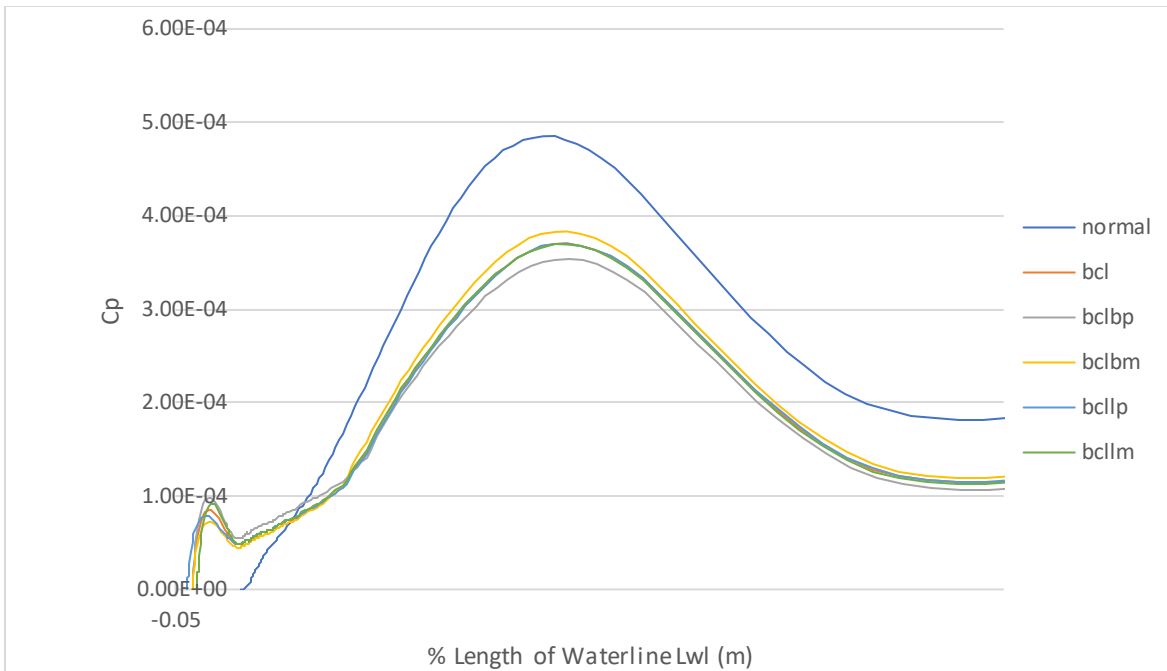
Διάγραμμα 8: Το ύψος του κύματος στη θέση της πλώρης σε απόσταση  $B_{ms} + 10cm$  για  $C_B = 0.60$ .

Τα παραπάνω διαγράμματα (7 & 8) δείχνουν το ύψος του κύματος στην περιοχή της πλώρης. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, το ύψος κύματος στην πλώρη για πλοίο χωρίς βολβό είναι μεγαλύτερο κατά 20% περίπου. Είναι ασφαλές να βγάλουμε το συμπέρασμα ότι μεγαλύτερος συντελεστής αντίστασης κυματισμού  $C_w$  αντιπροσωπεύει μεγαλύτερο κύμα στην πλώρη. Στην περιοχή της πλώρης μπορεί να παρατηρηθεί επίσης η επαλληλία των κυμάτων λόγω της ύπαρξης του βολβού ο οποίος προκαλεί θραύση του κύματος.

Σύγκριση του συντελεστή αντίστασης πίεσης  $C_p$  όλων των cases



Διάγραμμα 9: Ο συντελεστής  $C_p$  κατά μήκος της γάστρας.



Διάγραμμα 10: Ο συντελεστής  $C_p$  κατά μήκος της γάστρας σε μεγέθυνση στην πλώρη.

Στα παραπάνω διαγράμματα (9 & 10) παριστάται ο συντελεστής αντίστασης πίεσης  $C_p$  κατά μήκος της γάστρας του πλοίου για όλες τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν. Για την παρούσα έρευνα η αντίσταση πίεσης είναι ίση με την αντίσταση κυματισμού, άρα το  $C_p$  είναι ουσιαστικά το  $C_w$ . Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι ενώ ο βολβός αυξάνει αρχικά την αντίσταση στην πλώρη, στη συνέχεια φαίνεται να μειώνει τις πιέσεις όσο πηγαίνουμε προς την πρύμνη, επειδή επιδρά στο σύστημα των κυματισμών. Η συνολική επίδραση του βολβού φαίνεται ότι είναι ευεργετική, καθώς κρατάει αυτό το πλεονέκτημα πτώσης πίεσης μέχρι την πρύμνη, με μόνη αύξηση αυτή που συμβαίνει στην πλώρη.

[ $C_B = 0.70$  &  $FN = 0.260$ ]

Στη συνέχεια εξετάστηκε πλοίο γεωμετρίας συστηματικής σειράς 60 με συντελεστή μορφής  $C_B = 0.70$  και αριθμό Froude = 0.260. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη του μοντέλου.

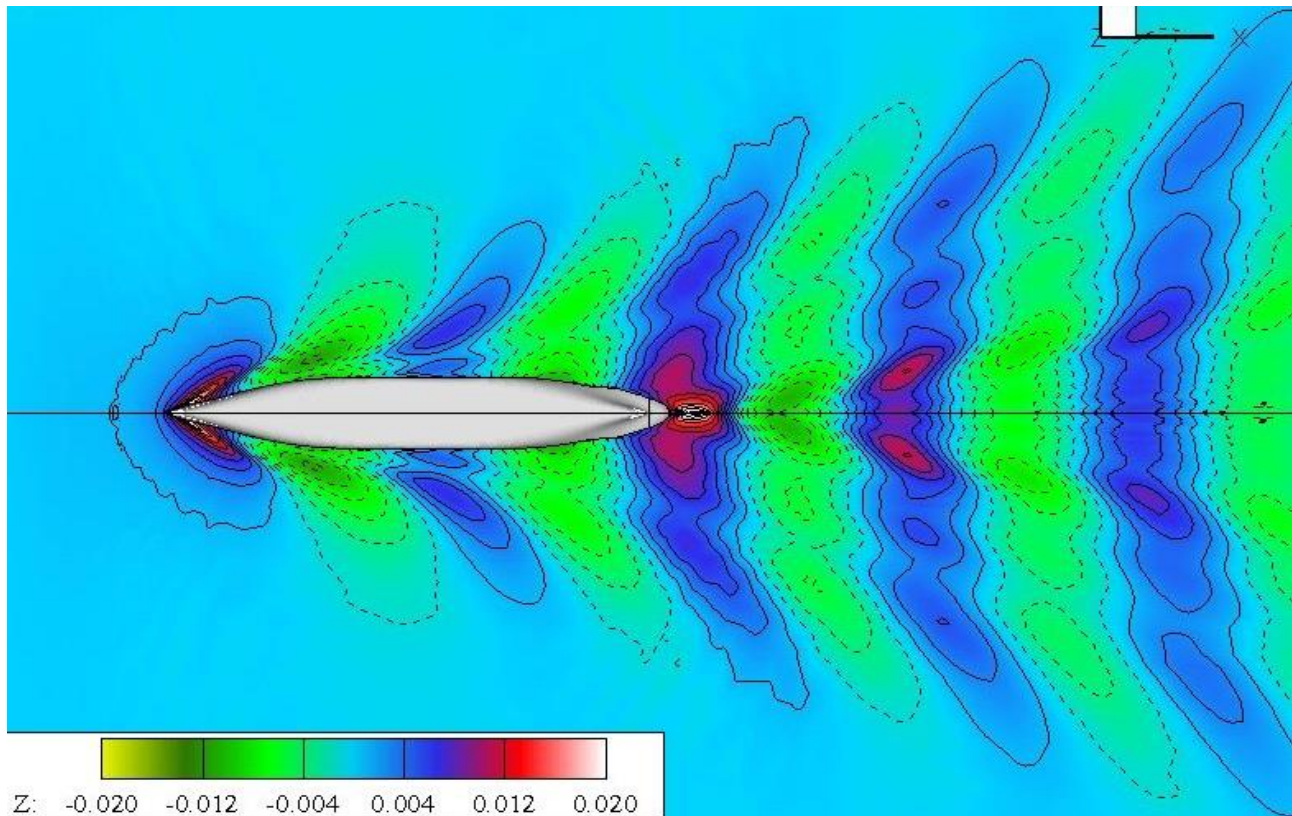
<b>MAIN PARTICULARS (<math>C_B = 0.70</math>)</b>			
Overall Length	Loa	3.15800	[m]
Length Bet. Perp.	Lbp	3.04800	[m]
Waterline Length	Lwl	3.09900	[m]
Beam	B	0.469	[m]
Draft	T	0.163	[m]
Depth	D	0.245	[m]
Bilge radius	r	0.051	[m]
Displacement Volume	V	0.163	[m <sup>3</sup> ]
Wetted Surface	WS	1.783	[m <sup>2</sup> ]
Block Coeff.	$C_B$	0.70	[-]
Prismatic Coeff.	$C_p$	0.71	[-]
Entr. Prismatic Coeff.	$C_{pe}$	0.642	[-]
Run Prismatic Coeff.	$C_{pr}$	0.69900	[-]
Midship Coeff.	$C_x$	0.98500	[-]
Center of Boyancy (+fwd)	LCB	-1.53100	[%]
Entrance Length	Le	41.92600	[%]
Midship Length	Lx	11.86100	[%]
Run Length	Lr	46.21300	[%]
*****			
Z-Bow	ZBOW	-0.022	[m]
Z-Bulb	ZBULB	No Bulb	[m]
Z-mid	ZMID	1.495	[m]
Z-cut	ZCUT2	2.99	[m]
Z-stern	ZSTER	3.136	[m]
Z-hub	ZHUB	No Hub	[m]

Πίνακας 1: Γεωμετρία πλοίου  $C_B = 0.70$

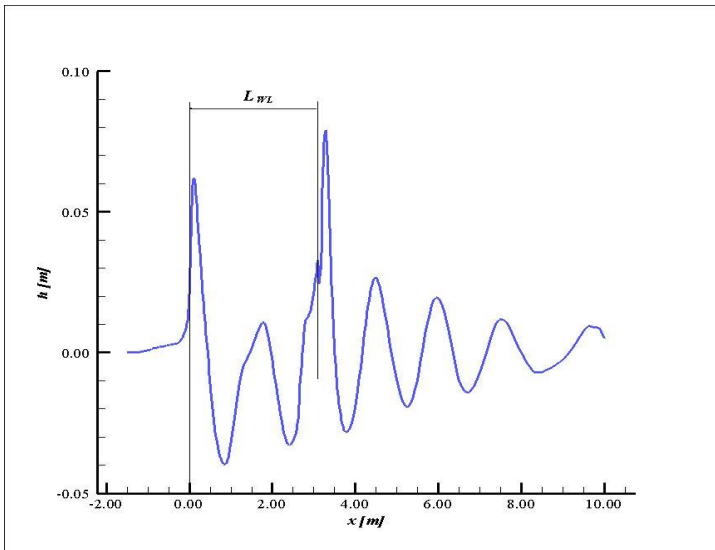
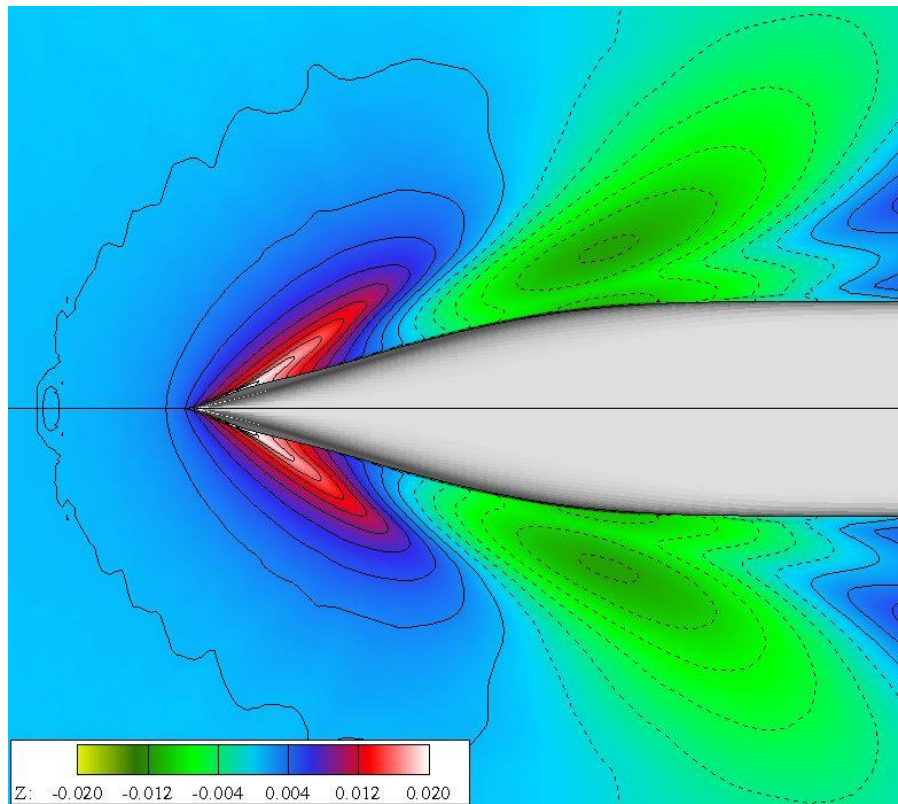
Μετά την εκτέλεση του κώδικα λήφθηκαν τα παρακάτω αποτελέσματα για το συντελεστή αντίστασης  $C_w$  και τον όρο υπόλοιπης πίεσης  $|δz|$ . Στον πίνακα 2 φαίνονται οι τελικές τιμές που προέκυψαν μετά τη σύγκλιση της αριθμητικής μεθόδου.

C <sub>B</sub> = 0.70 & F <sub>N</sub> = 0.260		
	values	units
<b>C<sub>w</sub></b>	2.171E-03	-
<b>IδzI</b>	1.369E-03	-
TOTAL RES. (ITTC)	10.74	Nt
TOTAL RES. (ATTC)	10.531	Nt
BUOYANCY	1594.6	Nt
LCB	1.55E+00	m
KB	-7.76E-02	m

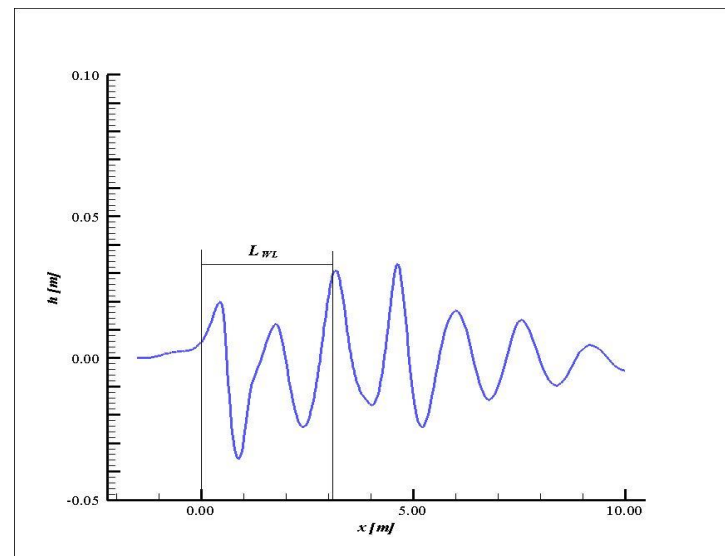
Πίνακας 2: Τιμές αποτελεσμάτων σύγκλισης



Σχήμα 1: Αναπαράσταση των Ισοψών τομών της ελεύθερης επιφάνειας και μεγέθυνση στην πλώρη (ακολουθεί) για normal: C<sub>B</sub> = 0.70 και F<sub>N</sub> = 0.260.



Wave on hull



Wavecut at Bms + 10 cm

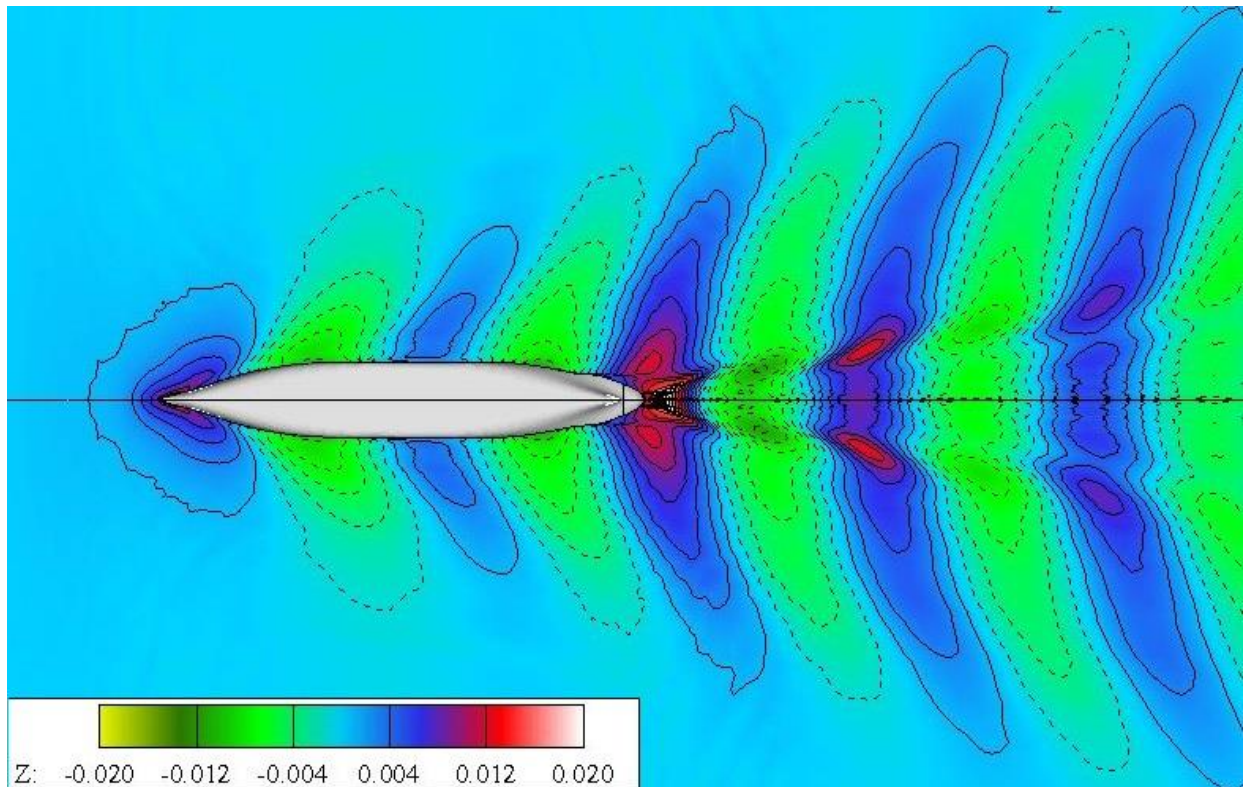
Στη συνέχεια προστέθηκε βολβός στην πλώρη του μοντέλου, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του οποίου επιλέχθηκαν με βάση τις οδηγίες του *A. M. Kracht* (Kracht, 1978) και καταγράφονται στον παρακάτω πίνακα. Οι παράμετροι του βολβού αναλύονται στην ενότητα 5.6. Το πρόγραμμα έτρεξε για τη νέα γεωμετρία και στον πίνακα 4 φαίνονται μεταξύ άλλων οι τελικές τιμές για τα  $C_w$  και  $|dz|$  μετά τη σύγκλιση της μεθόδου. Η παράμετρος  $CZBROOT$  ισούται με το ύψος του βολβού προς το βύθισμα του πλοίου στην πρωραία κάθετο και η εισαγωγή της κρίθηκε αναγκαία για την κατασκευή του βολβού. Η τιμή του ύψους του βολβού λαμβάνεται μικρότερη από την τιμή του βυθίσματος μείων το πλάτος του βολβού (Παπανικολάου, 2009).

1 <sup>st</sup> CASE OPTIMAL BULB	
CB	0.70
FN	0.26
CVPR	0.00585
CLPR	0.03695
CBB	0.19000
CZTIP	0.57500
CZBROOT	0.85000
CABL	0.16150
CABT	0.12250

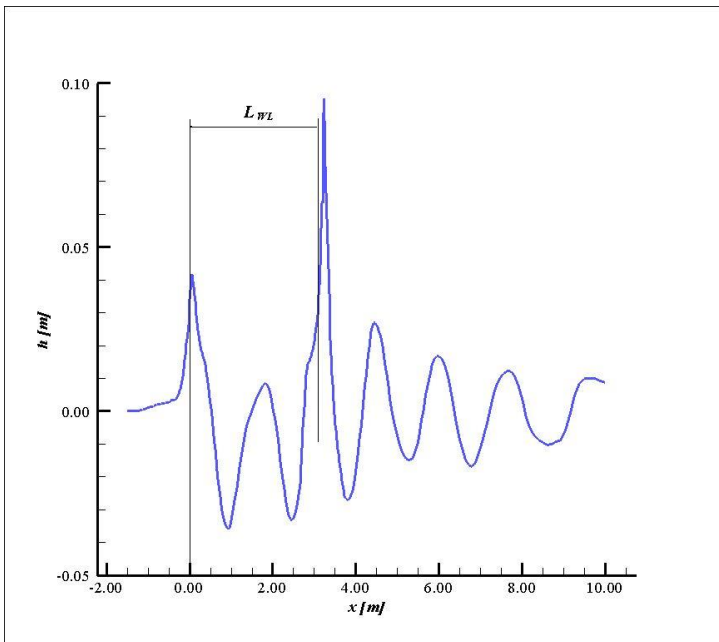
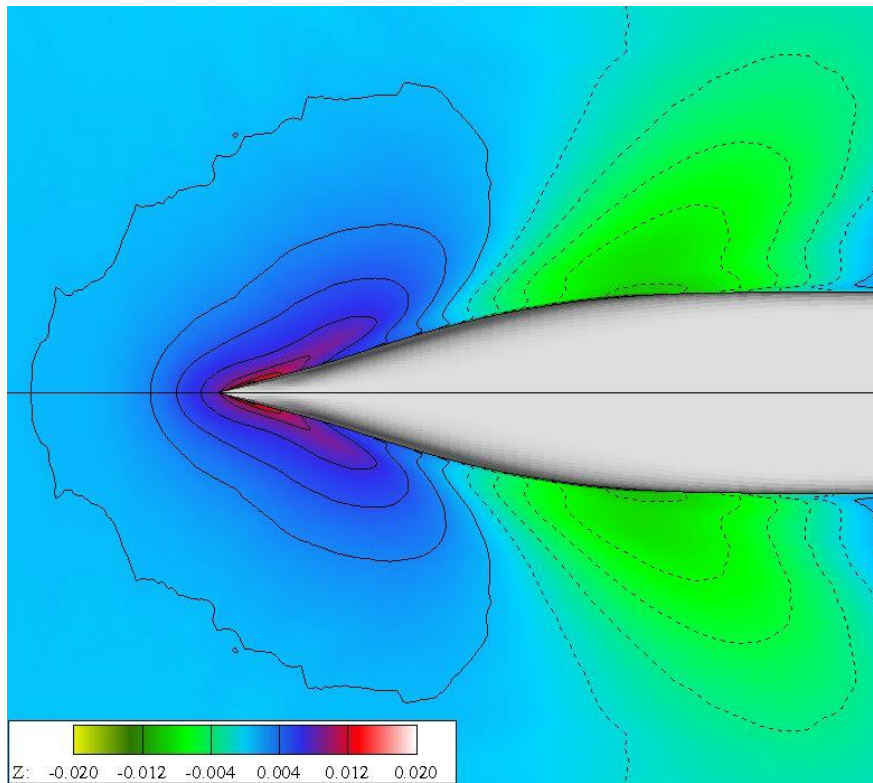
Πίνακας 3: Γεωμετρία βέλτιστου βολβού για  $C_B = 0.70$ .

$C_B = 0.70$	p70bcl	
	values	units
<b>Cw</b>	1.964E-03	-
<b>IδzI</b>	1.302E-03	-
TOTAL RES. (ITTC)	1.05E+01	Nt
TOTAL RES. (ATTC)	10.245	Nt
BUOYANCY	1610.7	Nt
LCB	1.54E+00	m
KB	-7.76E-02	m

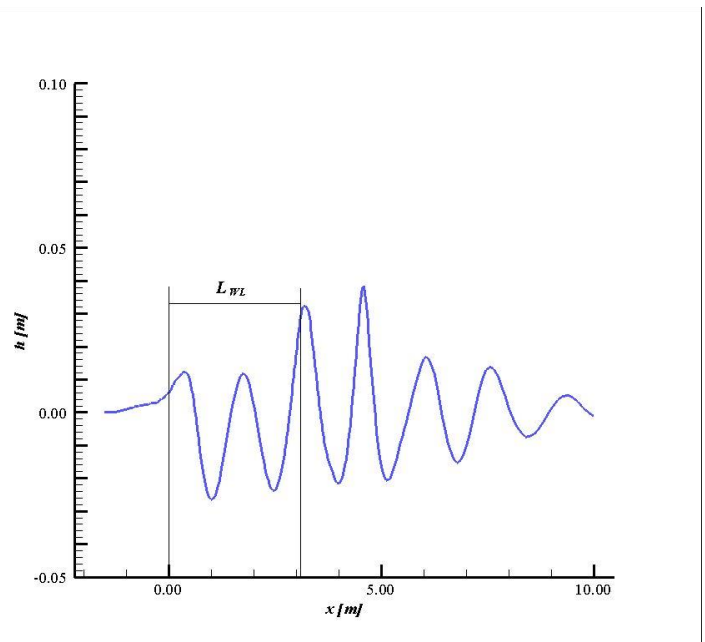
Πίνακας 4: αποτελέσματα σύγκλισης για βέλτιστο βολβό



Σχήμα 2: Αναπαράσταση των Ισοψών τομών της ελεύθερης επιφάνειας και μεγέθυνση στην πλώρη (ακολουθεί) για case 1:  $C_B = 0.70$  optimal bulb.



Wave on hull



Wavecut at Bms + 10 cm

Έπειτα, δοκιμάστηκαν παραλλαγές του βέλτιστου βολβού για  $C_b = 0.70$  και  $Fn = 0.260$ . Επιχειρείται κάθε φορά, αλλαγή σε ένα ζευγάρι παραμέτρων μήκους ή πλάτους. Από τον ορισμό των παραμέτρων φαίνεται να υπάρχει σύνδεση μεταξύ της παραμέτρου μήκους του βολβού ( $CLPR$ ) και της πλάγιας παραμέτρου ( $CABL$ ), όπως και της παραμέτρου πλάτους ( $CBB$ ) με την παράμετρο εγκάρσιας επιφάνειας ( $CABT$ ). Επιλέχθηκε έτσι να γίνει μελέτη των περιπτώσεων μεταβολής των παραμέτρων μήκους κατά  $\pm 10\%$  και των παραμέτρων πλάτους  $\pm 10\%$ . Προέκυψαν έτσι 4 νέοι βολβοί, οι οποίοι δοκιμάστηκαν με την αριθμητική μέθοδο και τα αποτελέσματα των δοκιμών φαίνονται παρακάτω.

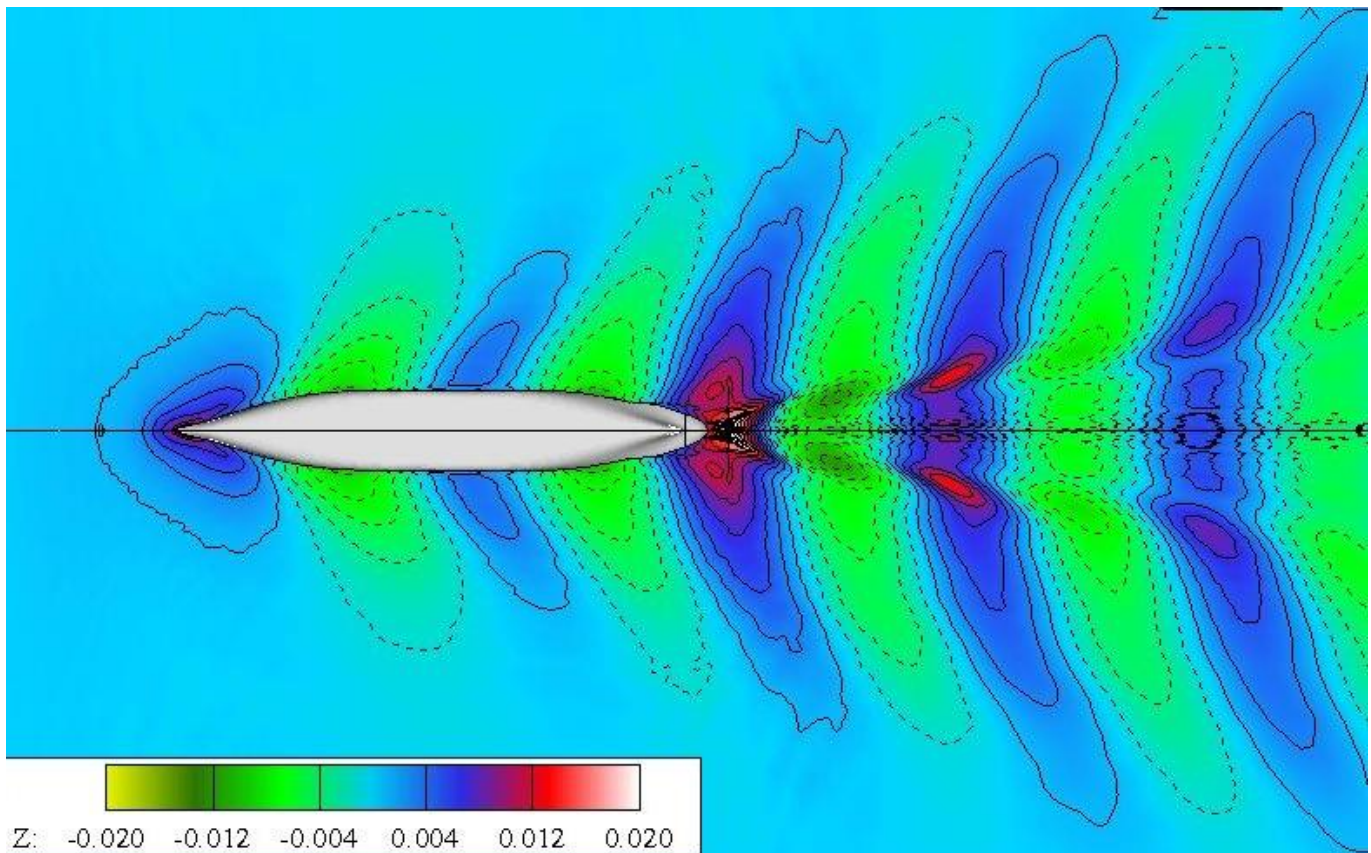
- 2<sup>η</sup> περίπτωση βολβού με +10% των βέλτιστων τιμών στις παραμέτρους  $C_{BB}$  και  $C_{ABT}$

2 <sup>nd</sup> CASE +10% $C_{BB}$ & $C_{ABT}$	
$C_B$	0.70
$F_N$	0.26
$C_{VPR}$	0.00585
$C_{LPR}$	0.03695
<b><math>C_{BB}</math></b>	<b>0.20900</b>
$C_{ZTIP}$	0.57500
$C_{ZBROOT}$	0.85000
$C_{ABL}$	0.16150
<b><math>C_{ABT}</math></b>	<b>0.13475</b>

Πίνακας 5: Γεωμετρία του βολβού

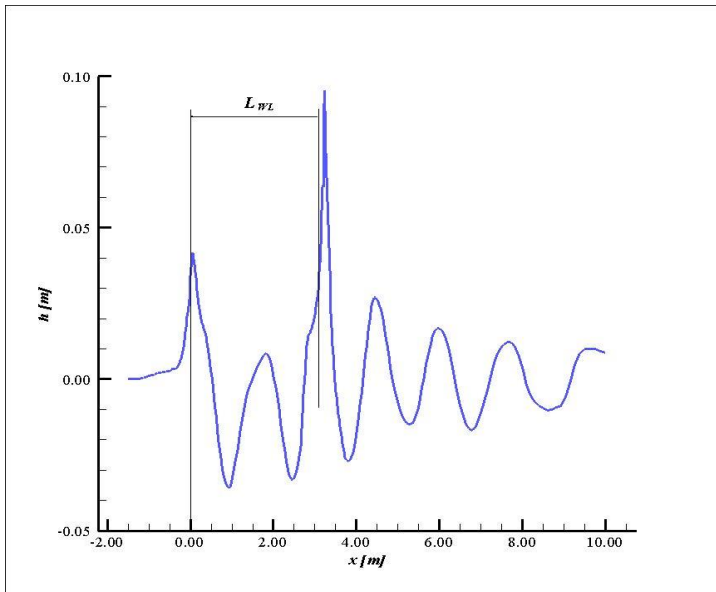
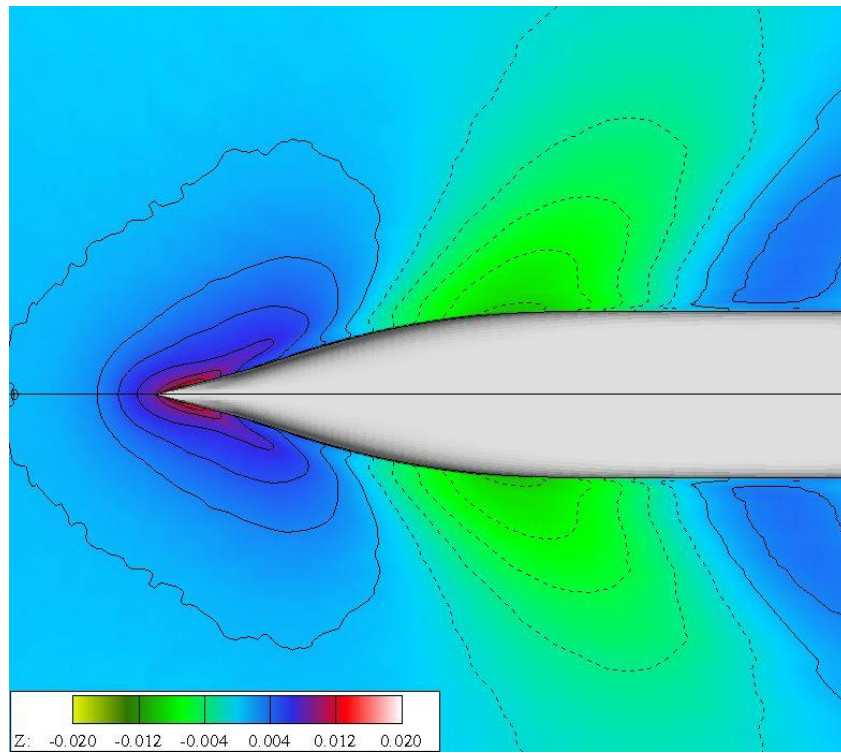
$C_B = 0.70$	p70bclbp	
	values	units
<b><math>C_w</math></b>	1.917E-03	-
<b><math>I_{\delta zI}</math></b>	1.309E-03	-
TOTAL RES. (ITTC)	10.43	Nt
TOTAL RES. (ATTC)	10.22	Nt
BUOYANCY	1613.2	Nt
LCB	1.53E+00	m
KB	-7.76E-02	m

Πίνακας 6: αποτελέσματα σύγκλισης για +10% B βολβό.

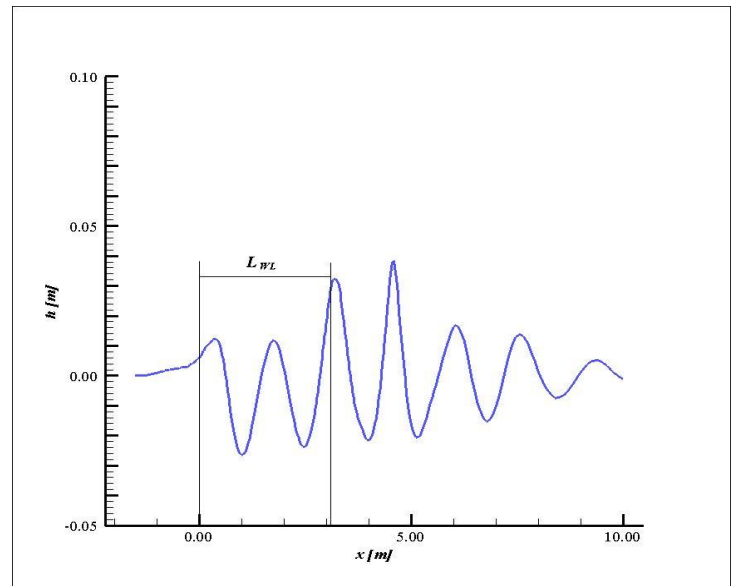


Σχήμα 3: Αναπαράσταση των Ισοψών τομών της ελεύθερης επιφάνειας και μεγέθυνση στην πλώρη (ακολουθεί) για case 2:  $C_B = 0.70$  bclbp.





Wave on hull

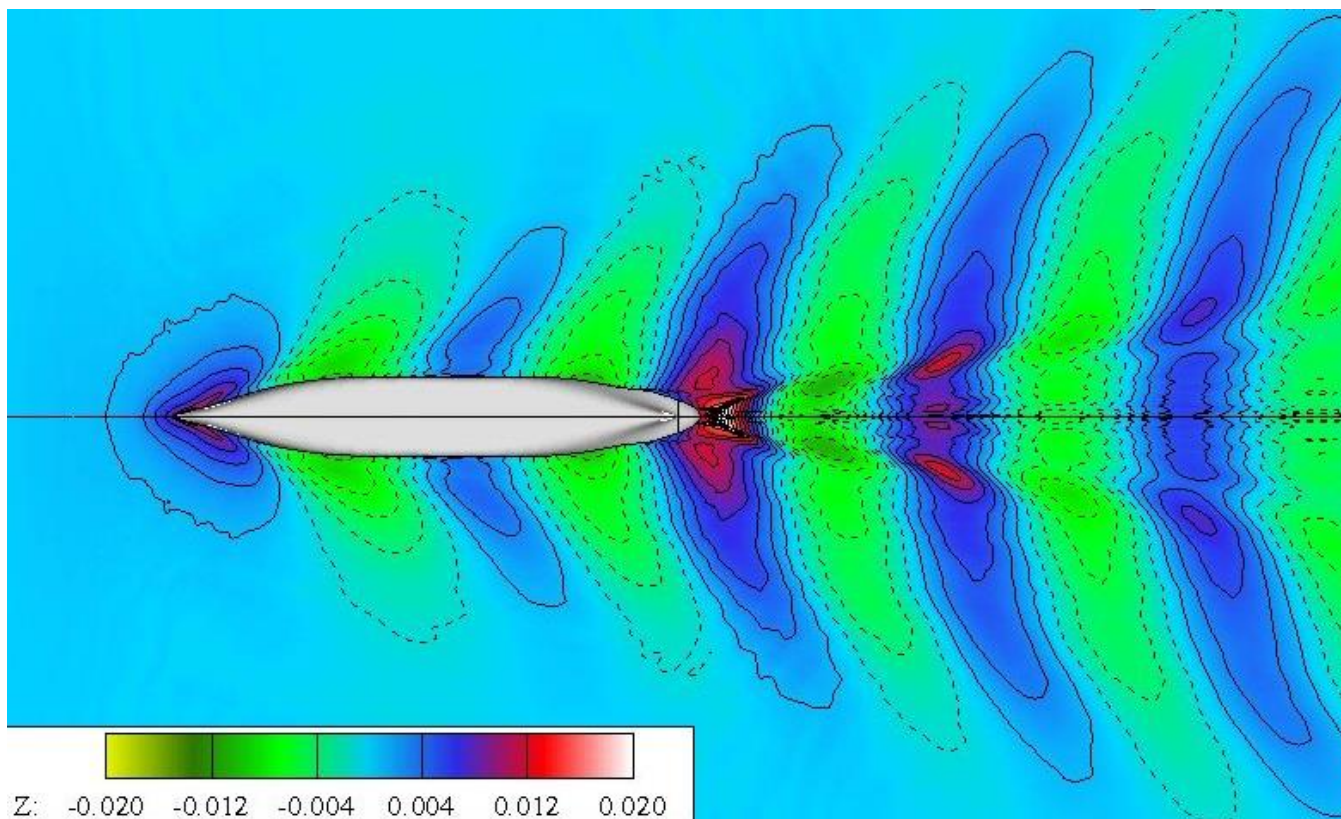


Wavecut at Bms + 10 cm

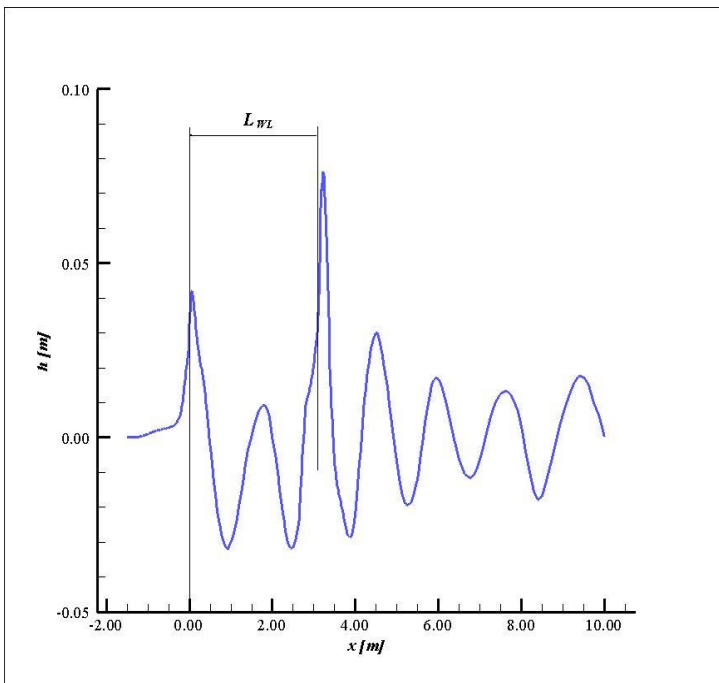
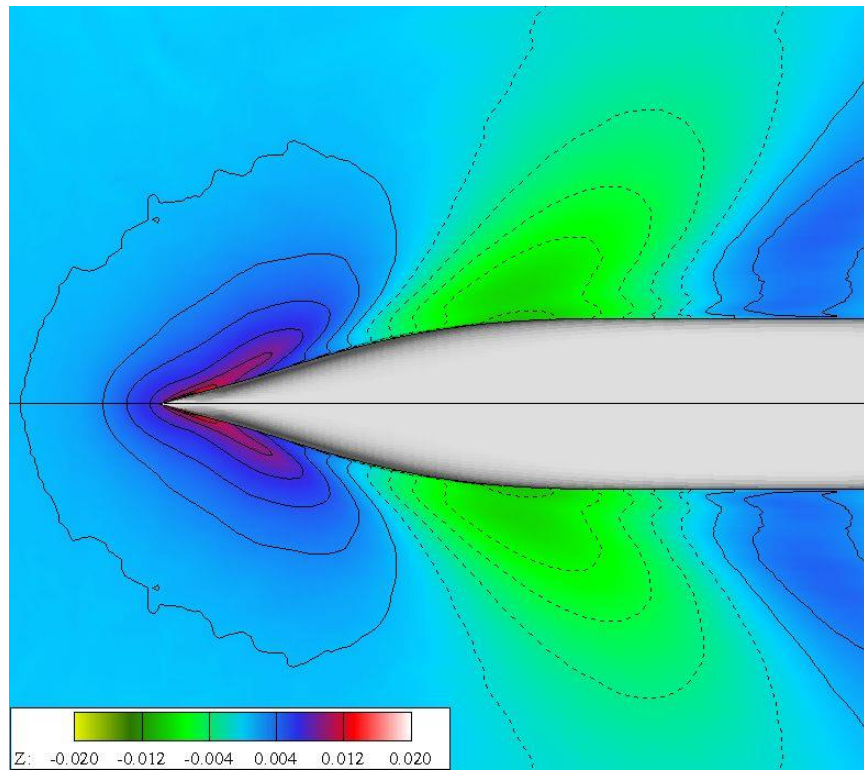
➤ 3<sup>η</sup> περίπτωση βολβού με -10% των βέλτιστων τιμών στις παραμέτρους  $C_{BB}$  και  $C_{ABT}$

3 <sup>rd</sup> CASE -10% $C_{BB}$ & $C_{ABT}$	
$C_B$	0.70
$F_N$	0.26
$C_{VPR}$	0.00585
$C_{LPR}$	0.03695
<b><math>C_{BB}</math></b>	<b>0.17100</b>
$C_{ZTIP}$	0.57500
$C_{ZBROOT}$	0.85000
$C_{ABL}$	0.16150
<b><math>C_{ABT}</math></b>	<b>0.11025</b>

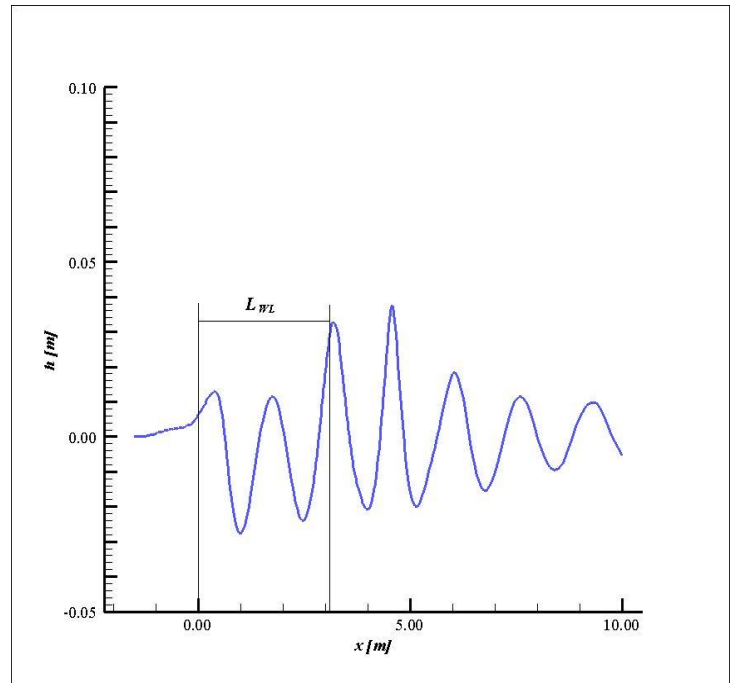
$C_B = 0.70$	p70bclbm	
	values	units
<b><math>C_w</math></b>	1.987E-03	-
<b><math> \delta z </math></b>	1.295E-03	-
TOTAL RES. (ITTC)	10.567	Nt
TOTAL RES. (ATTC)	10.358	Nt
BUOYANCY	1608.5	Nt
LCB	1.54E+00	m
KB	-7.76E-02	m



Σχήμα 4: Αναπαράσταση των Ισοψών τομών της ελεύθερης επιφάνειας και μεγέθυνση στην πλώρη (ακολουθεί) για case 3:  $C_B = 0.70$  bclbm.



Wave on hull

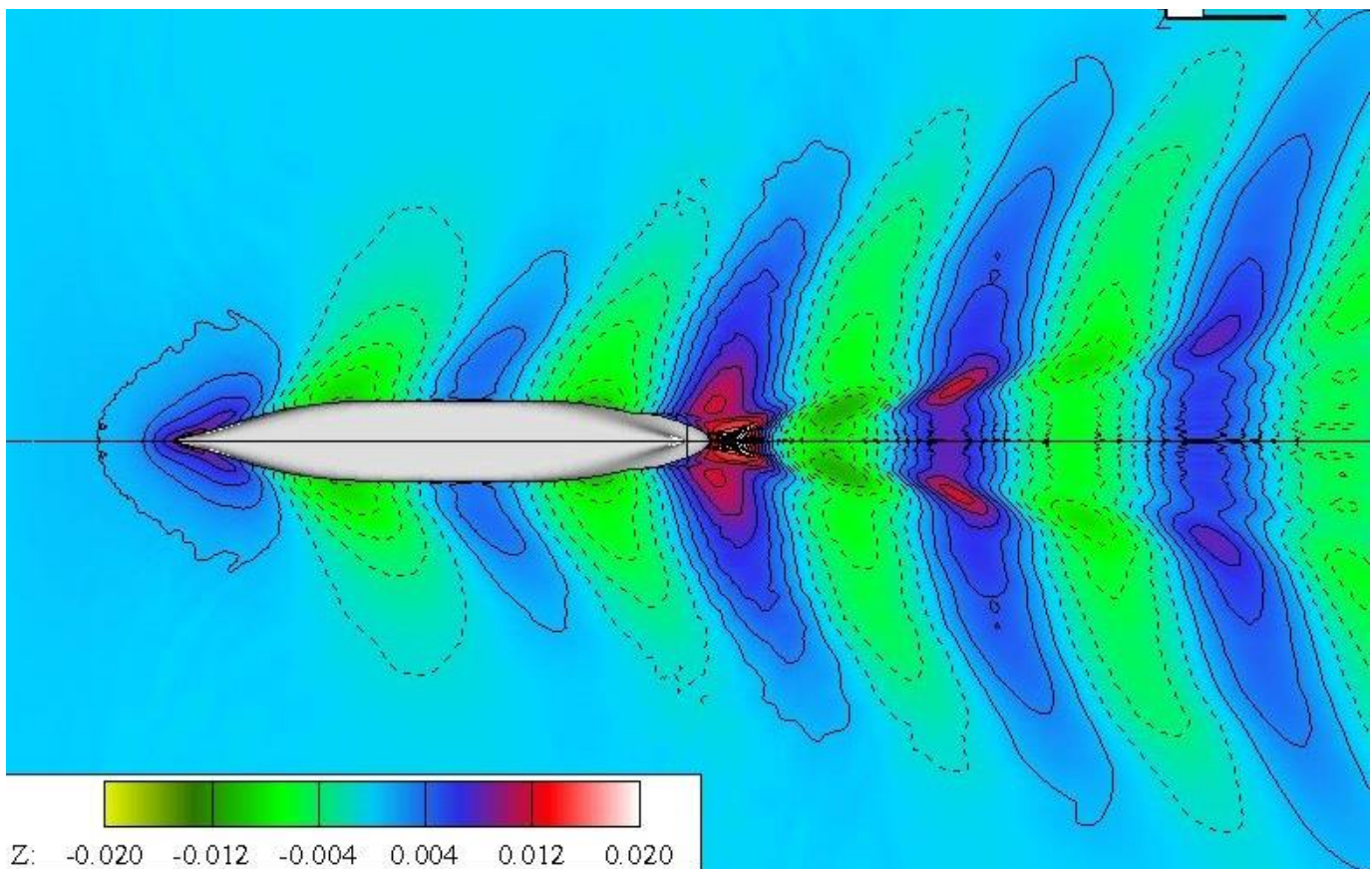


Wavecut at Bms + 10 cm

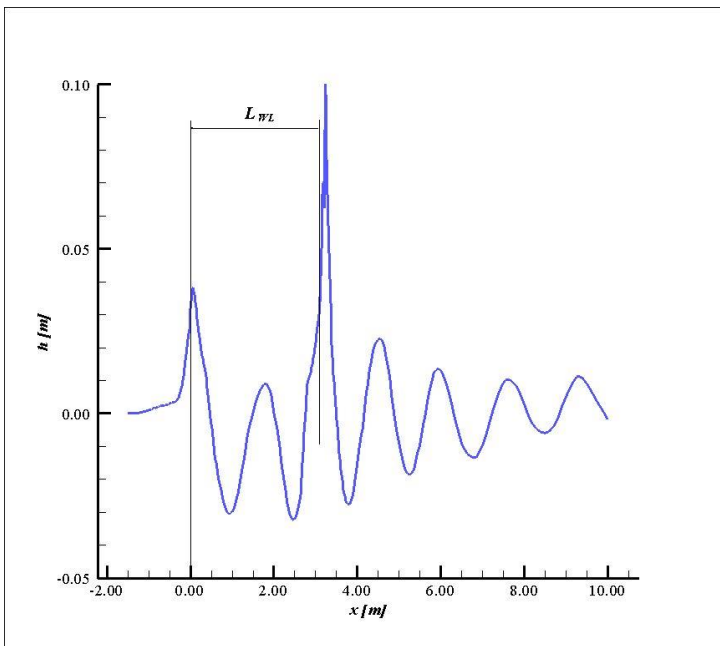
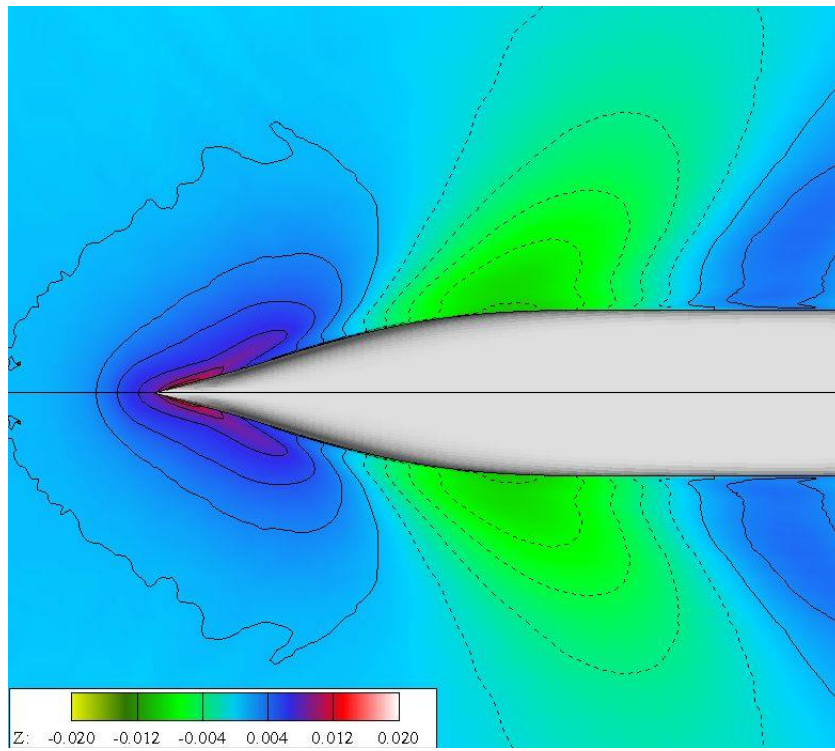
➤ 4<sup>η</sup> περίπτωση βολβού με +10% των βέλτιστων τιμών στις παραμέτρους  $C_{LPR}$  και  $C_{ABL}$

4 <sup>th</sup> CASE +10% $C_{LPR}$ , $C_{ABL}$	
$C_B$	0.70
$F_N$	0.26
$C_{VPR}$	0.00585
<b><math>C_{LPR}</math></b>	<b>0.04065</b>
$C_{BB}$	0.19000
$C_{ZTIP}$	0.57500
$C_{ZBROOT}$	0.85000
<b><math>C_{ABL}</math></b>	<b>0.17765</b>
$C_{ABT}$	0.12250

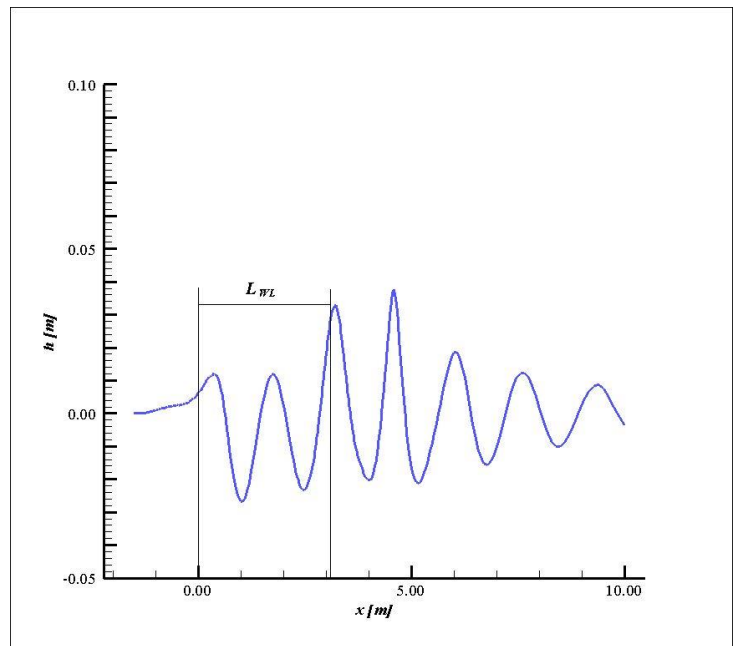
$C_B = 0.70$	p70bc1lp	
	values	units
<b><math>C_w</math></b>	1.973E-03	-
<b><math>I\delta_{zi}</math></b>	1.280E-03	-
TOTAL RES. (ITTC)	10.608	Nt
TOTAL RES. (ATTC)	10.399	Nt
BUOYANCY	1611.6	Nt
LCB	1.54E+00	m
KB	-7.76E-02	m



Σχήμα 5: Αναπαράσταση των Ισοψών τομών της ελεύθερης επιφάνειας και μεγέθυνση στην πλώρη (ακολουθεί) για case 4:  $C_B = 0.70$  bc1lp.



Wave on hull

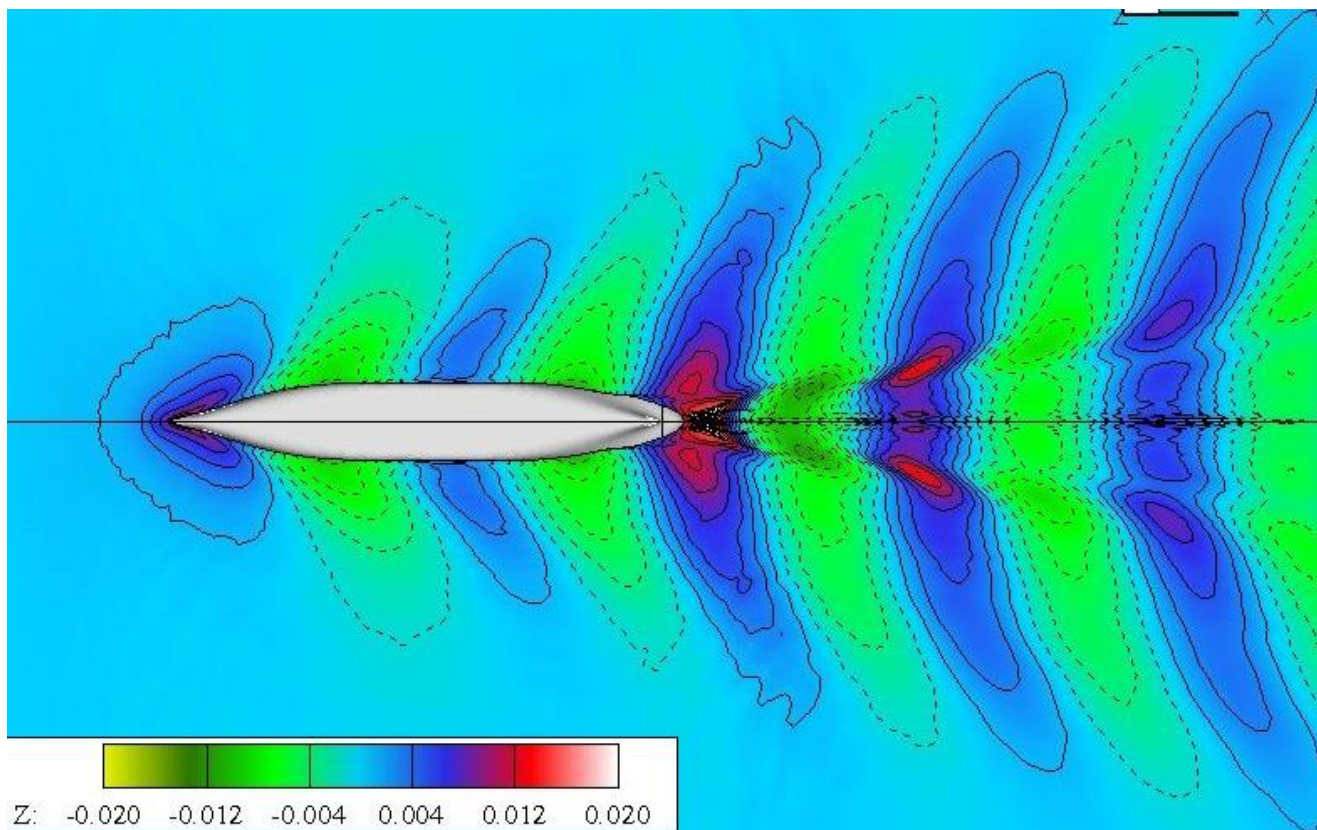


Wavecut at Bms + 10 cm

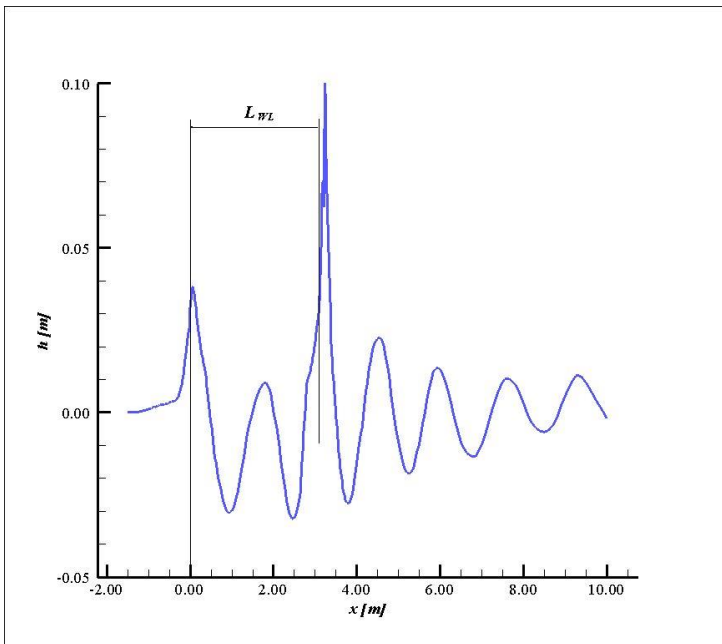
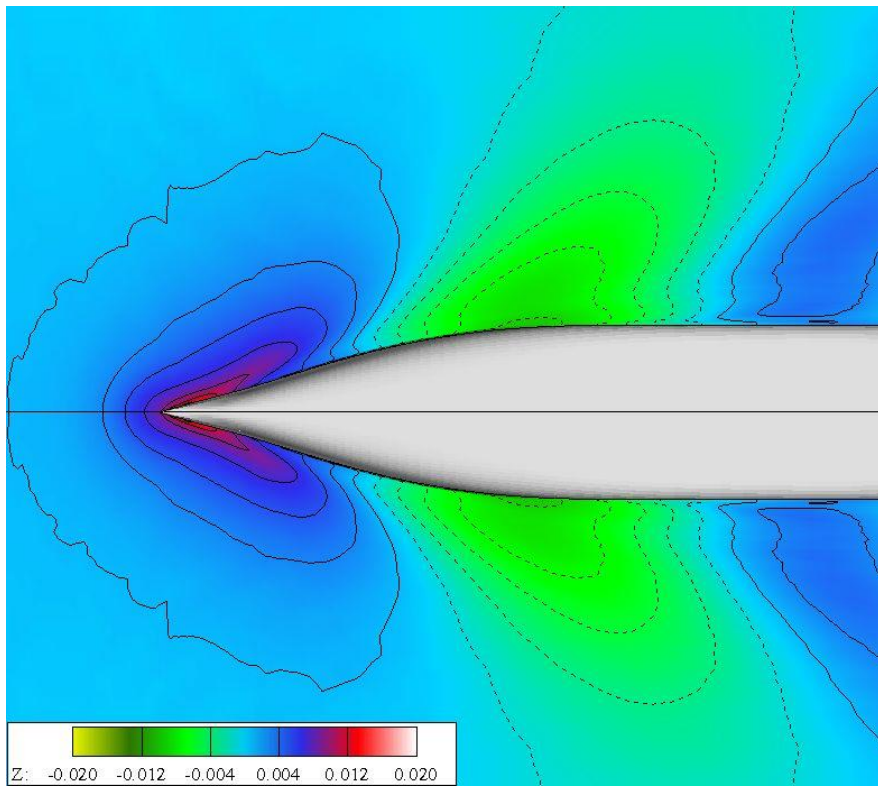
➤ 5<sup>η</sup> περίπτωση βολβού με -10% των βέλτιστων τιμών στις παραμέτρους  $C_{LPR}$  και  $C_{ABL}$

5 <sup>th</sup> CASE -10% $C_{LPR}$ , $C_{ABL}$	
$C_B$	0.70
$FN$	0.26
$C_{VPR}$	0.00585
<b><math>C_{LPR}</math></b>	<b>0.03326</b>
$C_{BB}$	0.19000
$C_{ZTIP}$	0.57500
$C_{ZBROOT}$	0.85000
<b><math>C_{ABL}</math></b>	<b>0.14535</b>
$C_{ABT}$	0.12250

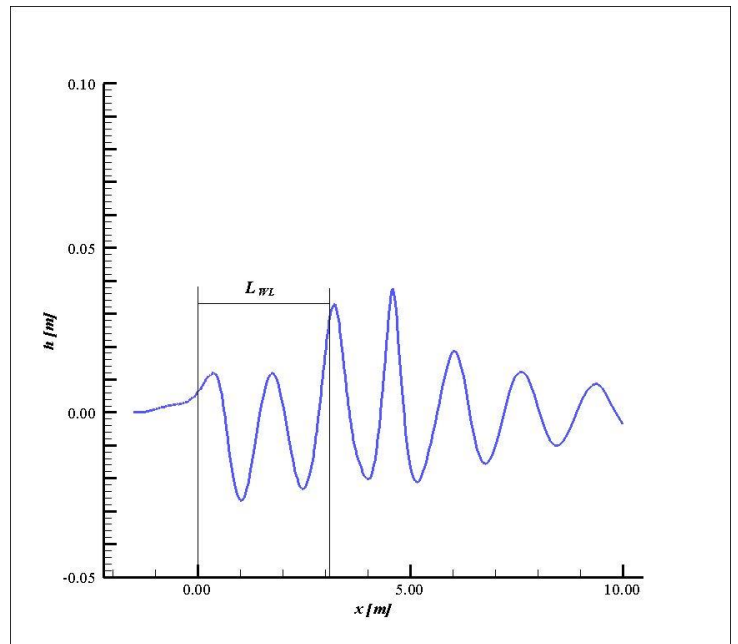
$C_B = 0.70$	$\rho 70bc11m$	
	values	units
<b><math>C_w</math></b>	1.936E-03	-
<b><math>I\delta z_l</math></b>	1.309E-03	-
TOTAL RES. (ITTC)	10.357	Nt
TOTAL RES. (ATTC)	10.147	Nt
BUOYANCY	1610.1	Nt
LCB	1.54E+00	m
KB	-7.76E-02	m



Σχήμα 6: Αναπαράσταση των Ισοϋψών τομών της ελεύθερης επιφάνειας και μεγέθυνση στην πλώρη (ακολουθεί) για case 5:  $C_B = 0.70$   $bc11m$ .



Wave on hull

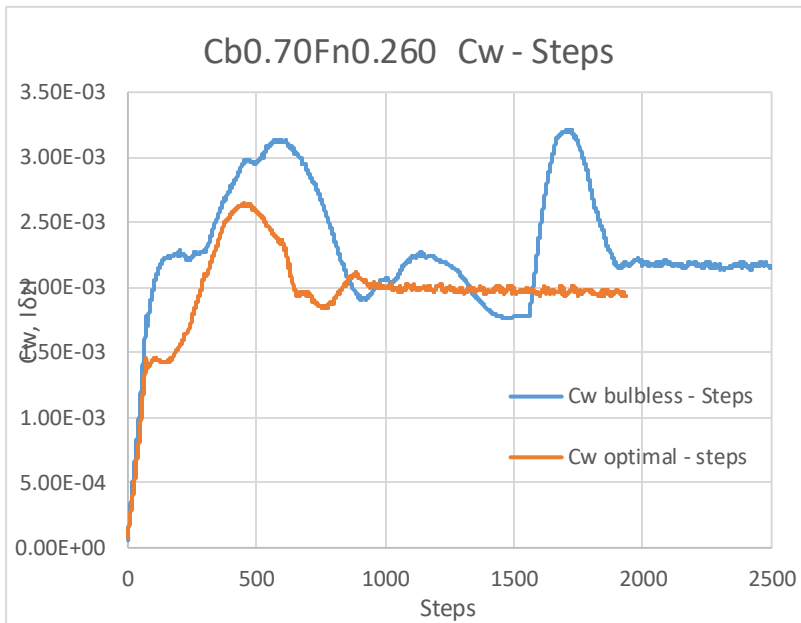


Wavecut at Bms + 10 cm

## Σύγκριση αριθμητικών αποτελεσμάτων συντελεστή μορφής $C_B = 0.70$

Σε αυτή την ενότητα γίνεται η σύγκριση των τιμών της αντίστασης κυματισμού για τα πλοία με συντελεστή  $C_B = 0.70$ . Αρχικά, συγκρίνεται η περίπτωση του βέλτιστου βολβού και του πλοίου χωρίς βολβό για τα αποτελέσματα που έδωσε η θεωρία δυναμικού και στη συνέχεια συγκρίνεται ο βέλτιστος βολβός σε σχέση με τις υπόλοιπες 4 παραλλαγές του και αξιολογείται το αν και κατά πόσο είναι εύστοχες οι προβλέψεις του *A.M. Kracht*. Τα αποτελέσματα παραθέτονται παρακάτω.

### Αντίσταση κυματισμού πλοίου χωρίς βολβό vs. πλοίο με τον βέλτιστο βολβό

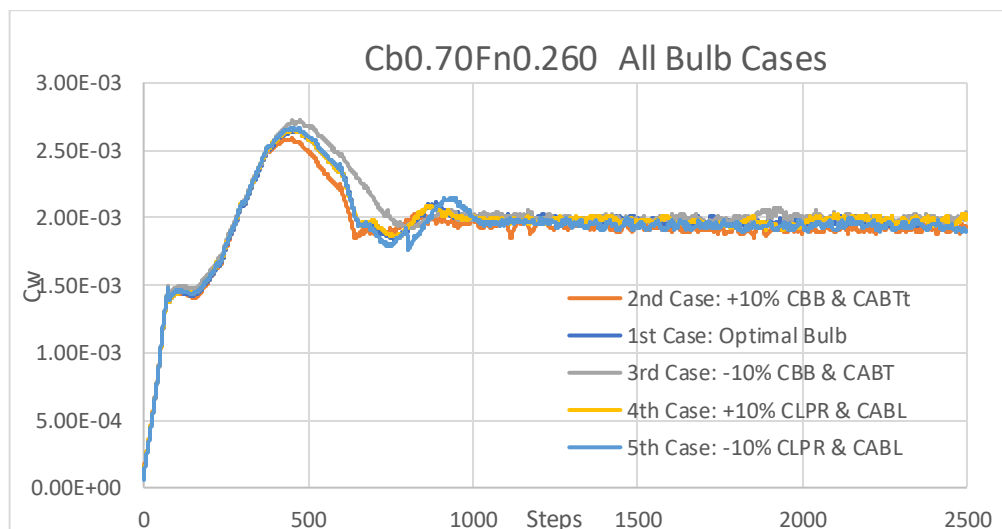


$C_B = 0.70$ $F_N = 0.260$			
	Normal run	1 <sup>st</sup> Case: Optimal bow run	$\delta C_w$
$C_w$	2.171E-03	1.964E-03	-10.55%

Από το διάγραμμα και τον πίνακα, φαίνεται καθαρά η υπεροχή του πλοίου με βολβό, όσον αφορά την αντίσταση κυματισμού. Η τελευταία παρουσιάζεται μειωμένη κατά περίπου 10% παρουσία του βέλτιστου βολβού. Γίνεται επομένως αντιληπτή και η θετική επίδραση του βολβού σε περιπτώσεις και πέραν της λεπτόγραμμης γάστρας και των

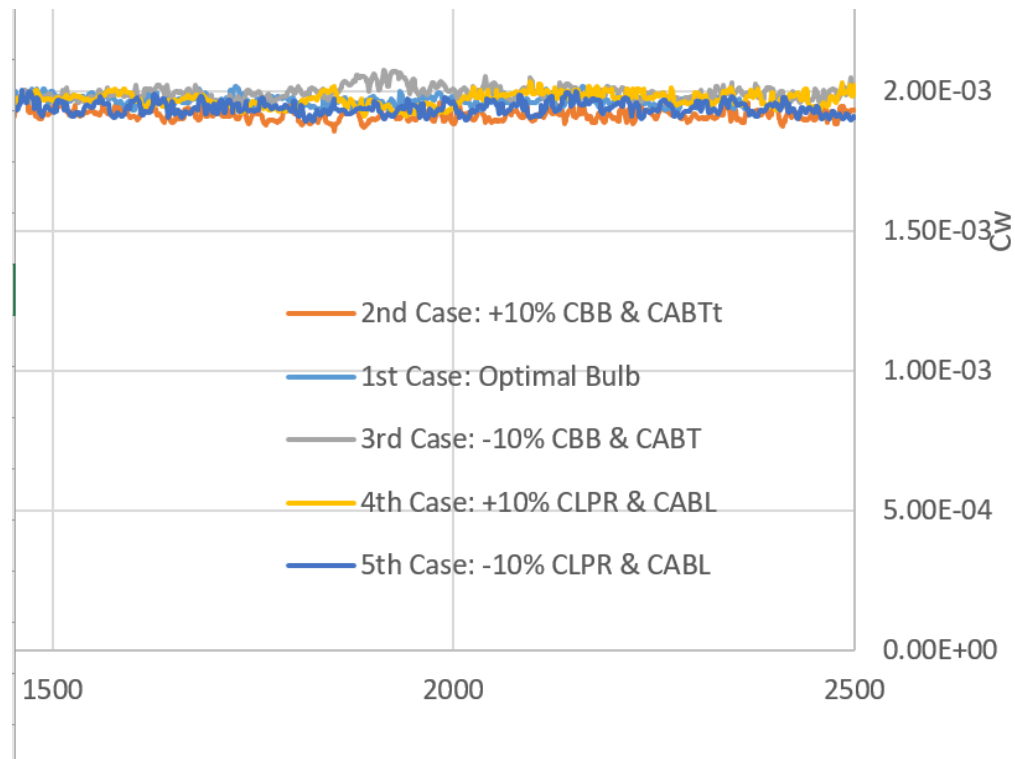
υψηλών ταχυτήτων. Η μείωση είναι μικρότερη από ότι στην περίπτωση της πιο λεπτόγραμμης γάστρας ( $C_B = 0.60$ ) αλλά εξακολουθεί να είναι σημαντική.

### Αντίσταση κυματισμού πλοίου με βέλτιστο βολβό vs. πλοίο με βολβό με παραλλαγές



Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται καλύτερα οι τελικές τιμές της χρονικής ιστορίας του  $C_w$ .





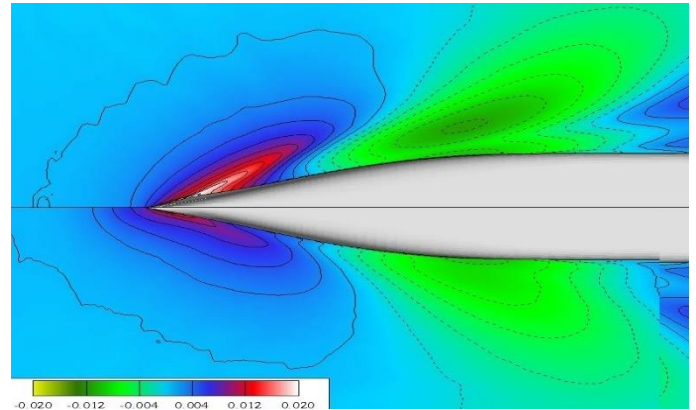
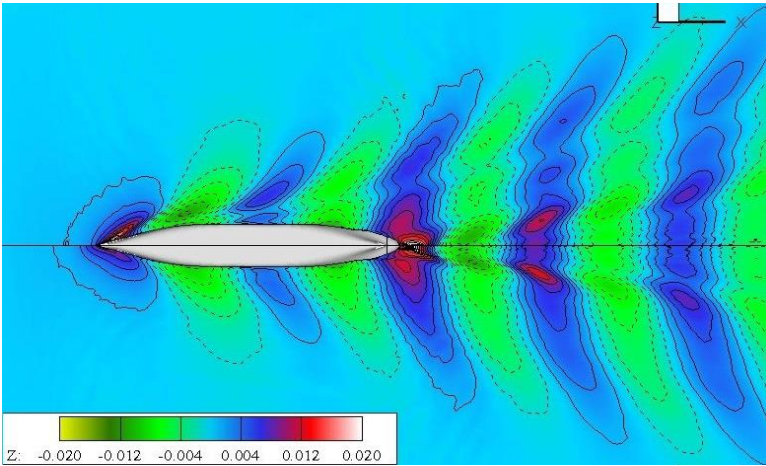
Test cases for $C_B = 0.70$ & $F_N = 0.260$			
	$C_w$	$\Delta C_w$ after potential run	$\Delta C_w$ Kracht's prediction
1 <sup>st</sup> Case: Optimal bulb	0.001964	-	-
2 <sup>nd</sup> Case: +10% CBB, CABT bulb	0.001917	-2.43%	2.9%
3 <sup>rd</sup> Case: -10% CBB, CABT bulb	0.001987	1.17%	27.6%
4 <sup>th</sup> Case: +10% CLPR, CABL bulb	0.001973	0.46%	32.1%
5 <sup>th</sup> Case: -10% CLPR, CABL bulb	0.001936	-1.44%	15.5%

Από το παραπάνω διάγραμμα και τον πίνακα φαίνεται ότι η αντίσταση κυματισμού είναι περίπου ίδια με μικρές αυξομειώσεις για τις παραλλαγές του βολβού. Ο *Kracht* φαίνεται να αστοχεί τελείως στις προβλέψεις του τόσο ποσοτικά, όσο και ποιοτικά. Οι λόγοι της αστοχίας των προβλέψεών του είναι ίδιοι με αυτούς που αναλύθηκαν για τον συντελεστή  $C_B = 0.60$ .

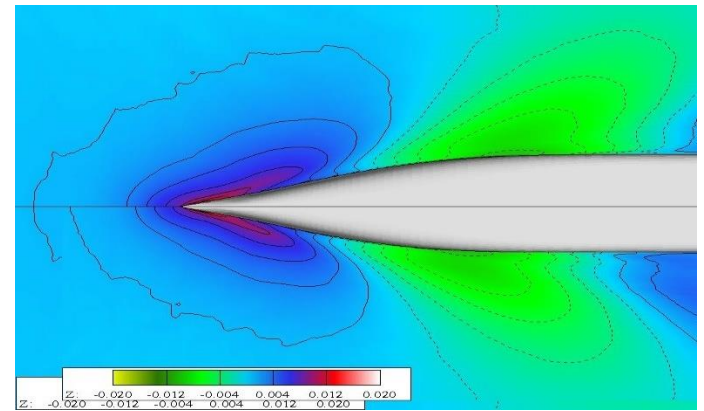
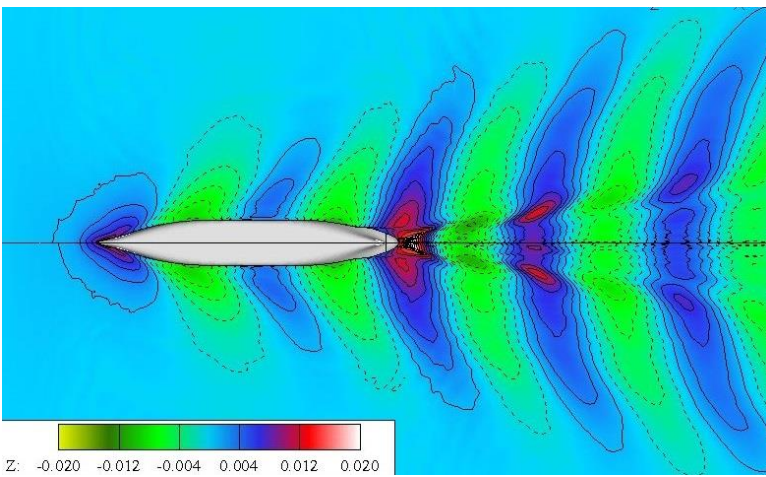
Σύγκριση ισοϋψών τομών και υπέρθεση των wavecuts για  $C_B = 0.70$

**NORMAL VIEW**

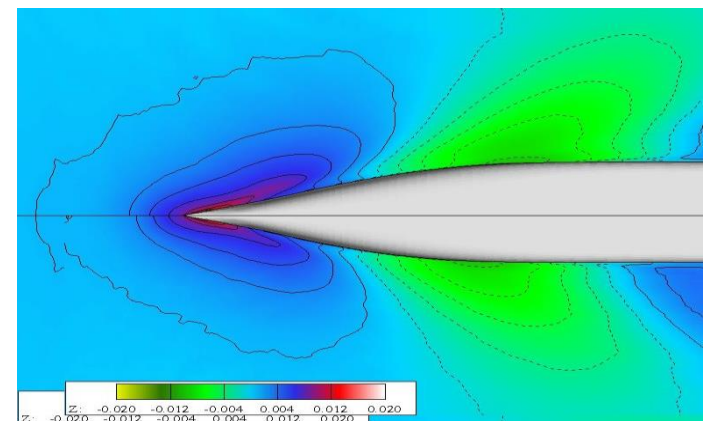
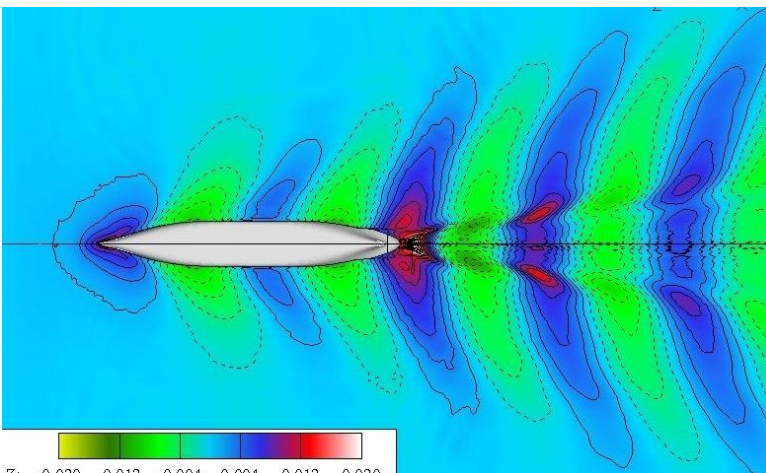
**ZOOMED - IN**



Σχήμα 7: normal (πάνω) VS. case 1: optimal bulb (κάτω)



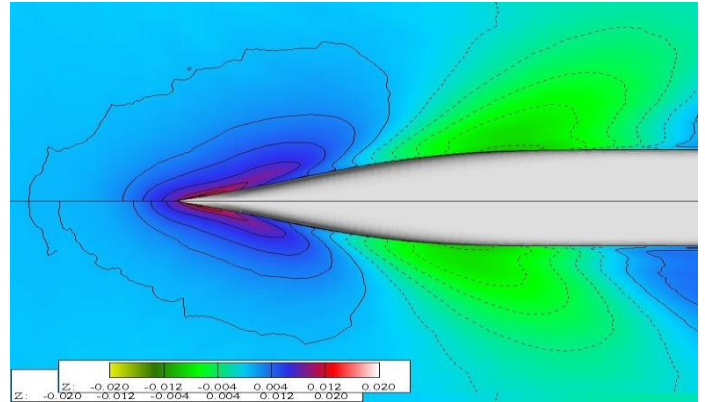
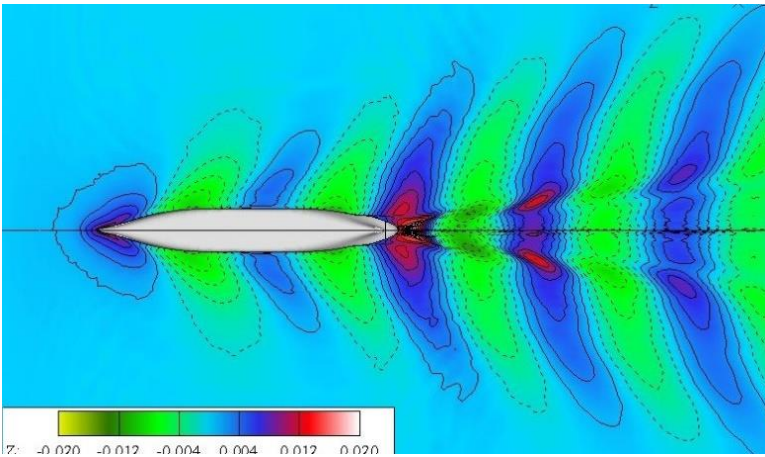
Σχήμα 8: case 1: Optimal bulb (πάνω) VS. case 3: bclbm (κάτω)



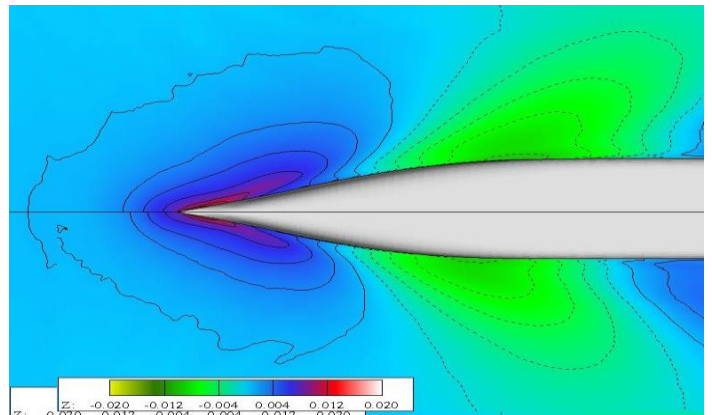
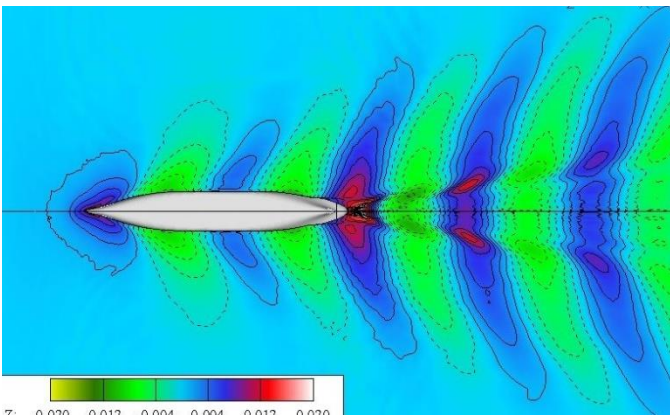
Σχήμα 9: case 1: Optimal bulb (πάνω) VS. case 2: bclbp (κάτω)

**NORMAL VIEW**

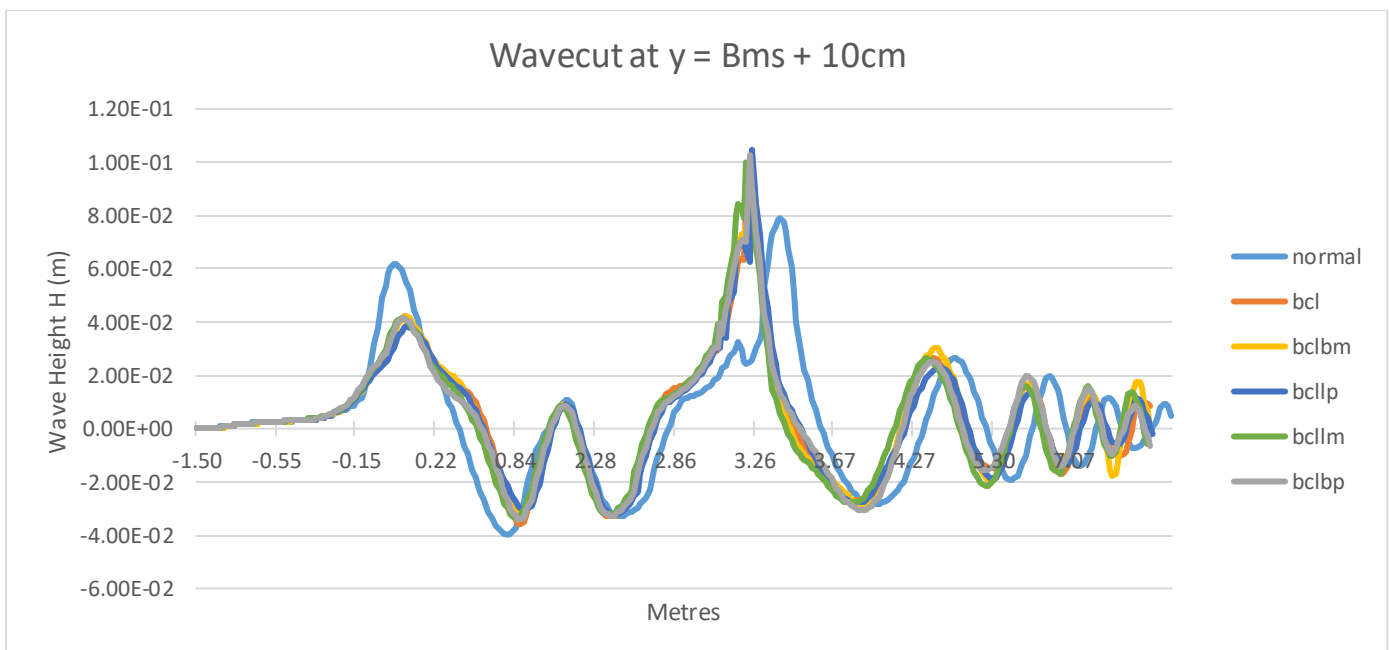
**ZOOMED - IN**



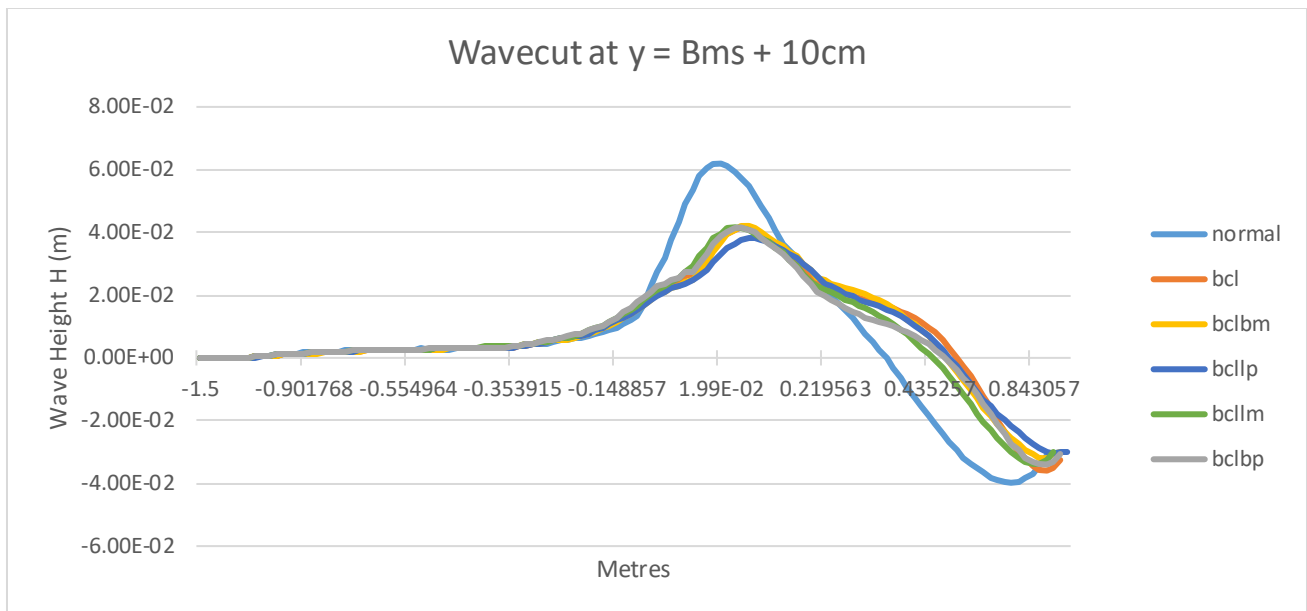
Σχήμα 10: case 1: Optimal bulb (πάνω) **VS.** case 5: bclIm (κάτω)



Σχήμα 11: case 1: Optimal bulb (πάνω) **VS.** case 4: bclIp (κάτω)



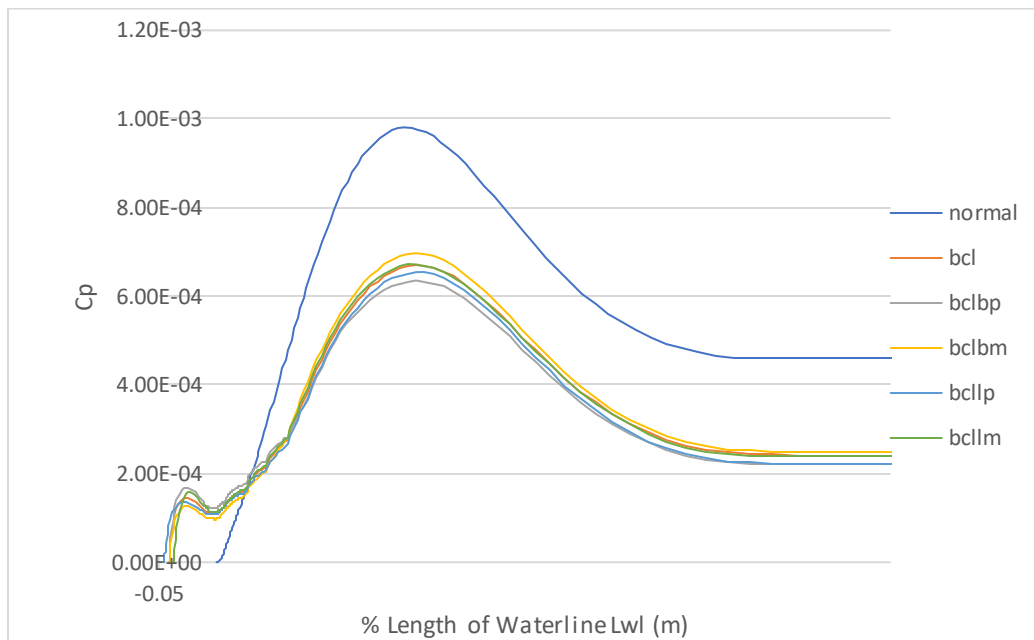
Διάγραμμα 1: Σύγκριση των wavecuts σε απόσταση 10cm από το Bms για  $C_B = 0.70$ .



Διάγραμμα 2: Το ύψος του κύματος στη θέση της πλώρης σε απόσταση  $B_{ms} + 10cm$  για  $C_B = 0.70$ .

Παρατηρείται μείωση του ύψους του κύματος κοντά στην περιοχή της πλώρης κατά παραπάνω από 30% με τη χρήση του βολβού. Παρατηρείται επίσης αύξηση του ύψους του κύματος σε σχέση με αυτό της περίπτωσης  $C_B = 0.60$  που αντιπροσωπεύει μια πιο λεπτόγραμμη γεωμετρία.

Σύγκριση του συντελεστή αντίστασης πίεσης  $C_p$  όλων των Cases



Στο παραπάνω διάγραμμα παριστάται ο συντελεστής αντίστασης πίεσης  $C_p$  κατά μήκος της γάστρας του πλοίου για όλες τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν, σε μεγέθυνση στην πλώρη. Τα συμπεράσματα είναι ίδια με το  $C_B = 0.60$ . Για την παρούσα έρευνα η αντίσταση πίεσης είναι ίση με την αντίσταση κυματισμού, άρα το  $C_p$  είναι ουσιαστικά το  $C_w$ . Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι ενώ ο βολβός αυξάνει αρχικά την αντίσταση στην πλώρη, στη συνέχεια φαίνεται να μειώνει τις πιέσεις όσο πηγαίνουμε προς την πρύμνη, επειδή επιδρά στο σύστημα των κυματισμών. Η συνολική επίδραση του βολβού φαίνεται ότι είναι ευεργετική, καθώς κρατάει αυτό το πλεονέκτημα πτώσης πίεσης μέχρι την πρύμνη, με μόνη αύξηση αυτή που συμβαίνει στην πλώρη.

[ $C_B = 0.80$  &  $FN = 0.200$ ]

Στη συνέχεια εξετάζεται πλοίο γεωμετρίας συστηματικής σειράς 60 με συντελεστή μορφής  $C_B = 0.80$  και αριθμό Froude = 0.200. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη του μοντέλου.

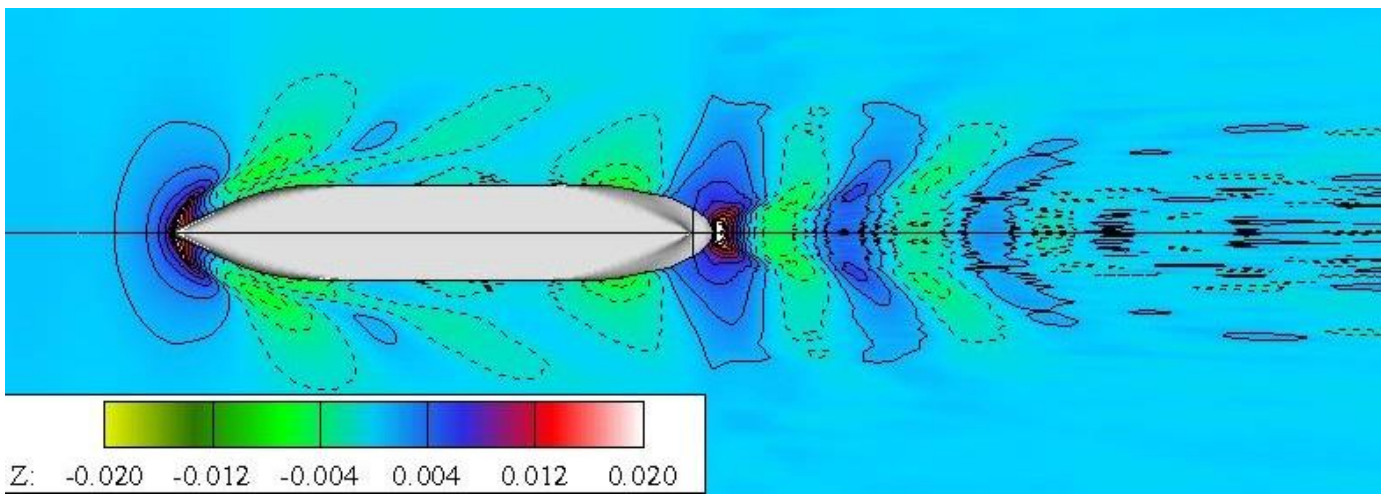
<b>MAIN PARTICULARS (<math>C_B = 0.80</math>)</b>			
Overall Length	Loa	3.15800	[m]
Length Bet. Perp.	Lbp	3.04800	[m]
Waterline Length	Lwl	3.09900	[m]
Beam	B	0.55500	[m]
Draft	T	0.16300	[m]
Depth	D	0.24500	[m]
Bilge radius	r	0.01500	[m]
Displacement Volume	V	0.221	[m <sup>3</sup> ]
Wetted Surface	WS	2.157	[m <sup>2</sup> ]
Block Coeff.	$C_B$	0.8	[-]
Prismatic Coeff.	$C_p$	0.805	[-]
Entr. Prismatic Coeff.	$C_p$	0.697	[-]
Run Prismatic Coeff.	$C_{pr}$	0.738	[-]
Midship Coeff.	$C_x$	0.999	[-]
Center of Boyancy (+fwd)	LCB	-0.04	[%]
Entrance Length	Le	30.705	[%]
Midship Length	Lx	30.222	[%]
Run Length	Lr	39.072	[%]
*****			
Z-Bow	ZBOW	-0.022	[m]
Z-Bulb	ZBULB	No Bulb	[m]
Z-mid	ZMID	1.495	[m]
Z-cut	ZCUT2	2.99	[m]
Z-stern	ZSTER	3.136	[m]
Z-hub	ZHUB	No Hub	[m]

Πίνακας 1: Γεωμετρία πλοίου  $C_B = 0.80$

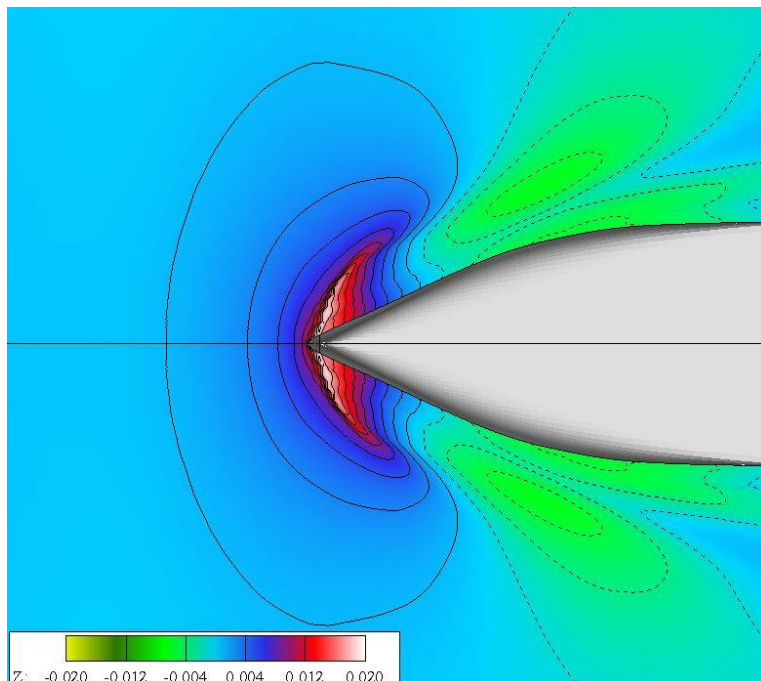
Μετά την εκτέλεση του κώδικα λήφθηκαν τα παρακάτω αποτελέσματα για το συντελεστή αντίστασης  $C_w$  και τον όρο υπόλοιπης πίεσης  $Idzl$ . Στον πίνακα 2 φαίνονται οι τελικές τιμές που προέκυψαν μετά τη σύγκλιση της αριθμητικής μεθόδου.

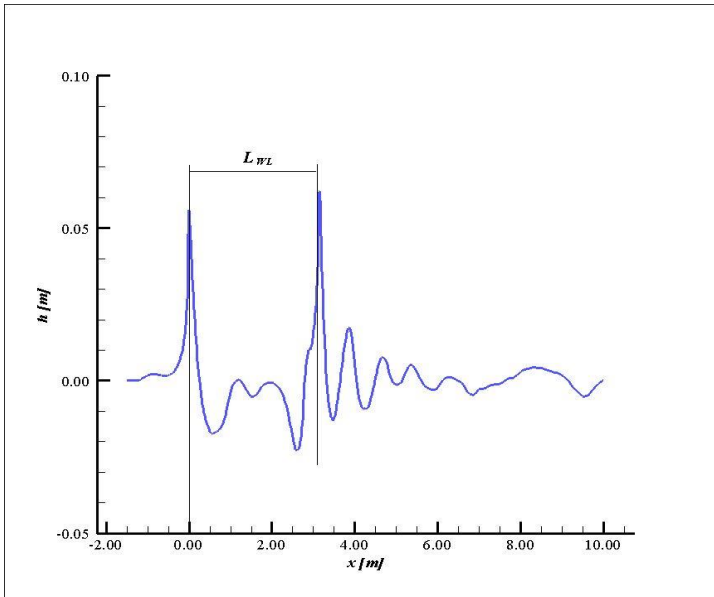
C <sub>B</sub> =0.80 & F <sub>N</sub> = 0.200		
	values	units
<b>C<sub>w</sub></b>	5.384E-04	-
<b>IδzI</b>	7.549E-04	-
TOTAL RES. (ITTC)	50.149	Nt
TOTAL RES. (ATTC)	209.45	Nt
BUOYANCY	2237.2	Nt
LCB	1.52E+00	m
KB	-8.24E-02	m

Πίνακας 2: Τιμές αποτελεσμάτων σύγκλισης

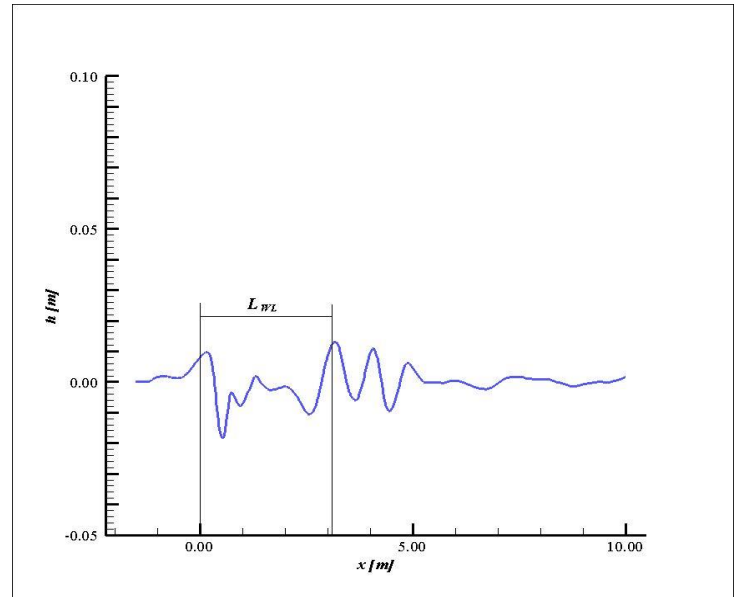


Σχήμα 1: Αναπαράσταση των Ισοψών τομών της ελεύθερης επιφάνειας και μεγέθυνση στην πλώρη (κάτω) για normal: C<sub>B</sub> = 0.80 και F<sub>N</sub> = 0.200.





Wave on hull



Wavecut at Bms + 10 cm

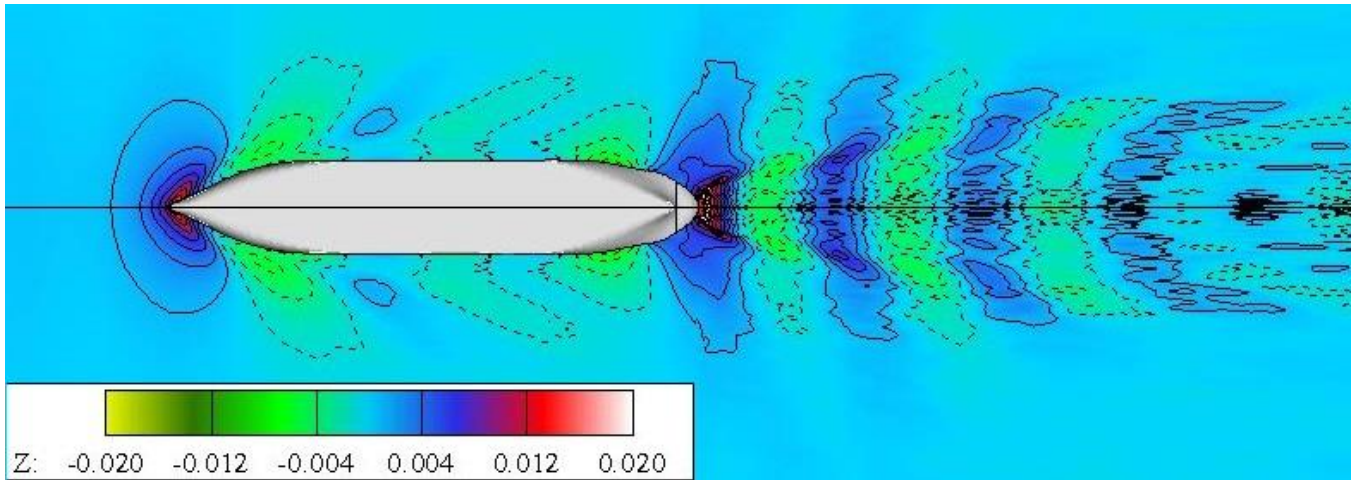
Στη συνέχεια προστέθηκε βολβός στην πλήρη του μοντέλου, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του οποίου επιλέχθηκαν με βάση τις οδηγίες του *A. M. Kracht* (Kracht, 1978) και καταγράφονται στον παρακάτω πίνακα. Οι παράμετροι του βολβού αναλύονται στην ενότητα 5.6. Το πρόγραμμα έτρεξε για τη νέα γεωμετρία και στον πίνακα 4 φαίνονται μεταξύ άλλων οι τελικές τιμές για τα  $C_w$  και  $|\delta z|$  μετά τη σύγκλιση της μεθόδου. Η παράμετρος  $C_{ZBROOT}$  ισούται με το ύψος του βολβού προς το βύθισμα του πλοίου στην πρωραία κάθετο και η εισαγωγή της κρίθηκε αναγκαία για την κατασκευή του βολβού. Η τιμή του ύψους του βολβού λαμβάνεται μικρότερη πάντα από την τιμή του βυθίσματος μείων το πλάτος του βολβού (Παπανικολάου, 2009).

1 <sup>st</sup> CASE: OPTIMAL BULB	
$C_B$	0.80
$F_N$	0.20
$C_{VPR}$	0.00117
$C_{LPR}$	0.02070
$C_{BB}$	0.13700
$C_{ZTIP}$	0.40000
$C_{ZBROOT}$	0.80000
$C_{ABL}$	0.08100
$C_{ABT}$	0.08650

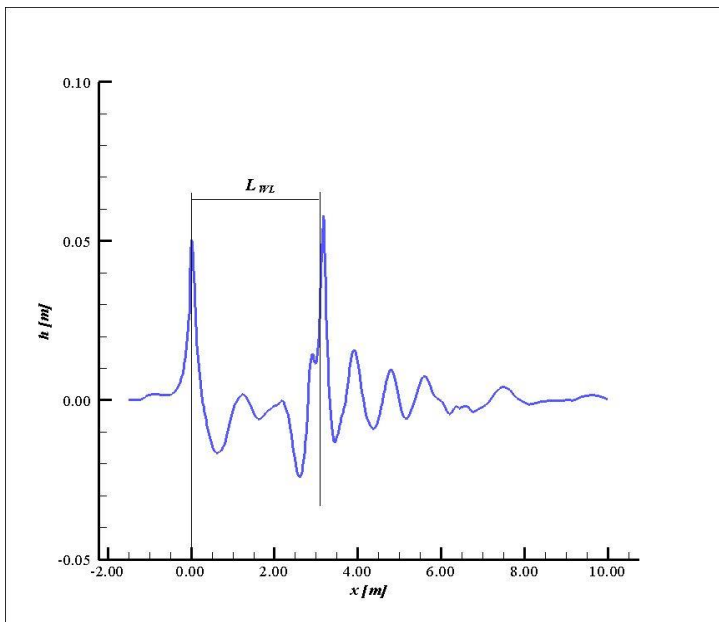
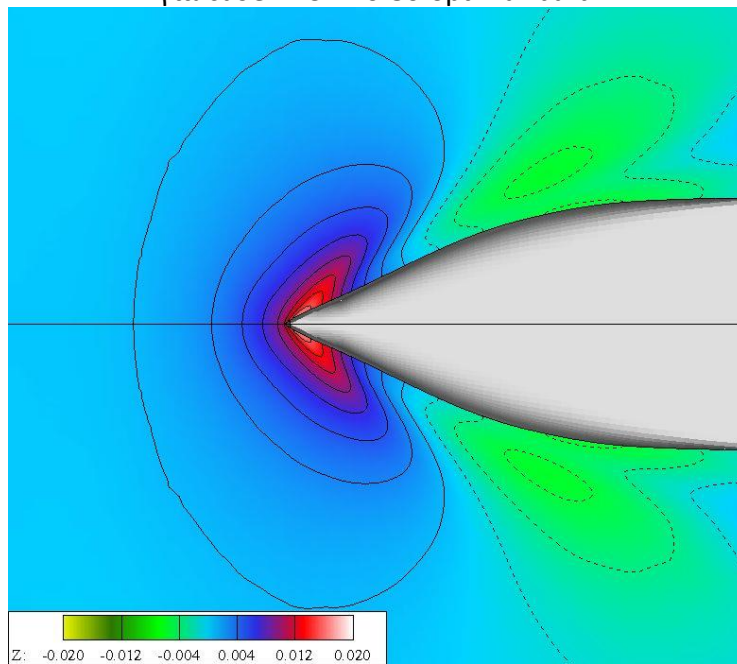
Πίνακας 3: Γεωμετρία βέλτιστου Βολβού για  $C_B = 0.80$ .

$C_B = 0.80$	p80bcl	
	values	units
$C_w$	3.766E-04	-
$ \delta z $	7.441E-04	-
TOTAL RES. (ITTC)	5.5999	Nt
TOTAL RES. (ATTC)	5.4201	Nt
BUOYANCY	2168	Nt
LCB	1.55E+00	m
KB	-7.94E-02	m

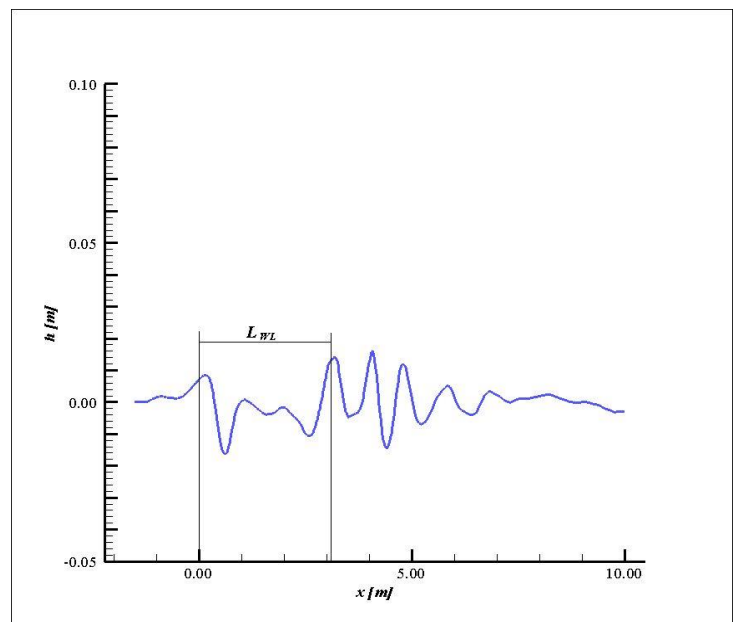
Πίνακας 4: αποτελέσματα σύγκλισης για βέλτιστο βολβό.



Σχήμα 2: Αναπαράσταση των Ισοψών τομών της ελεύθερης επιφάνειας και μεγέθυνση στην πλώρη (κάτω) για case 1:  $C_b = 0.80$  optimal bulb.



Wave on hull



Wavecut at Bms + 10 cm



Έπειτα, δοκιμάστηκαν παραλλαγές του βέλτιστου βολβού για  $C_B = 0.80$  και  $F_N = 0.200$ . Επιχειρείται κάθε φορά, αλλαγή σε ένα ζευγάρι παραμέτρων μήκους ή πλάτους. Από τον ορισμό των παραμέτρων φαίνεται να υπάρχει σύνδεση μεταξύ της παραμέτρου μήκους του βολβού ( $C_{LPR}$ ) και της πλάγιας παραμέτρου ( $C_{ABL}$ ), όπως και της παραμέτρου πλάτους ( $C_{BB}$ ) με την παράμετρο εγκάρσιας επιφάνειας ( $C_{ABT}$ ). Επιλέχθηκε έτσι να γίνει μελέτη των περιπτώσεων μεταβολής των παραμέτρων μήκους κατά  $\pm 10\%$  και των παραμέτρων πλάτους  $\pm 10\%$ . Προέκυψαν έτσι 4 νέοι βολβοί, οι οποίοι δοκιμάστηκαν με την αριθμητική μέθοδο και τα αποτελέσματα των δοκιμών φαίνονται παρακάτω.

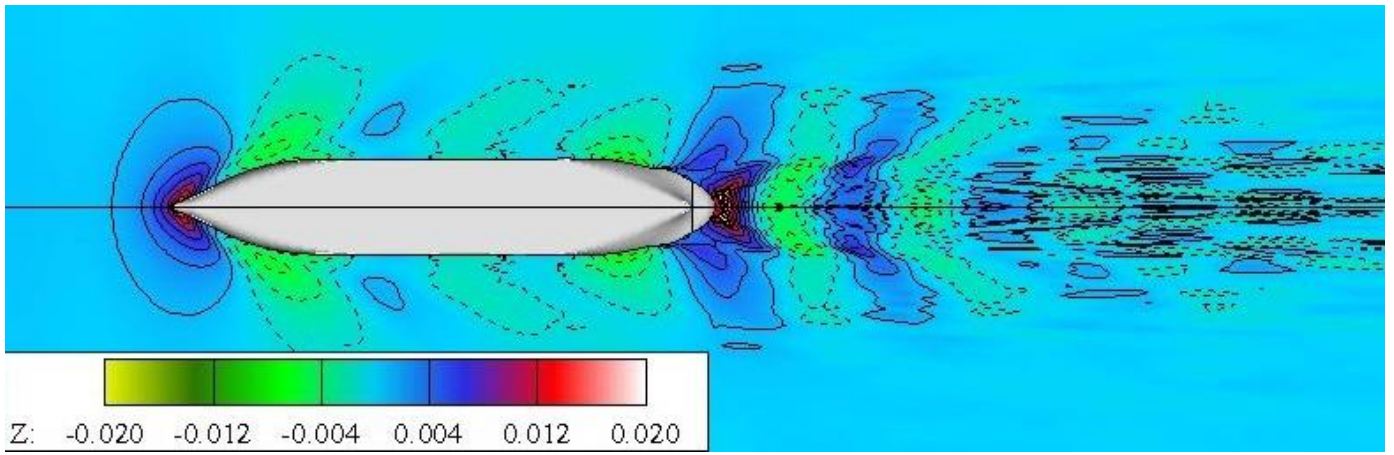
➤ 2<sup>η</sup> περίπτωση βολβού με +10% των βέλτιστων τιμών στις παραμέτρους  $C_{BB}$  και  $C_{ABT}$

2 <sup>nd</sup> CASE: +10% $C_{BB}$ & $C_{ABT}$	
$C_B$	0.80
$F_N$	0.20
$C_{VPR}$	0.00117
$C_{LPR}$	0.02070
<b><math>C_{BB}</math></b>	<b>0.15070</b>
$C_{ZTIP}$	0.40000
$C_{ZBROOT}$	0.80000
$C_{ABL}$	0.08100
<b><math>C_{ABT}</math></b>	<b>0.09515</b>

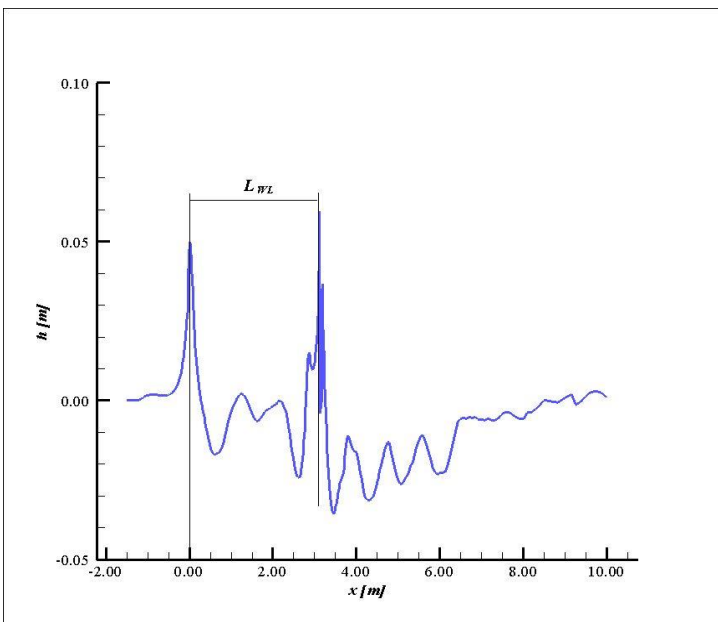
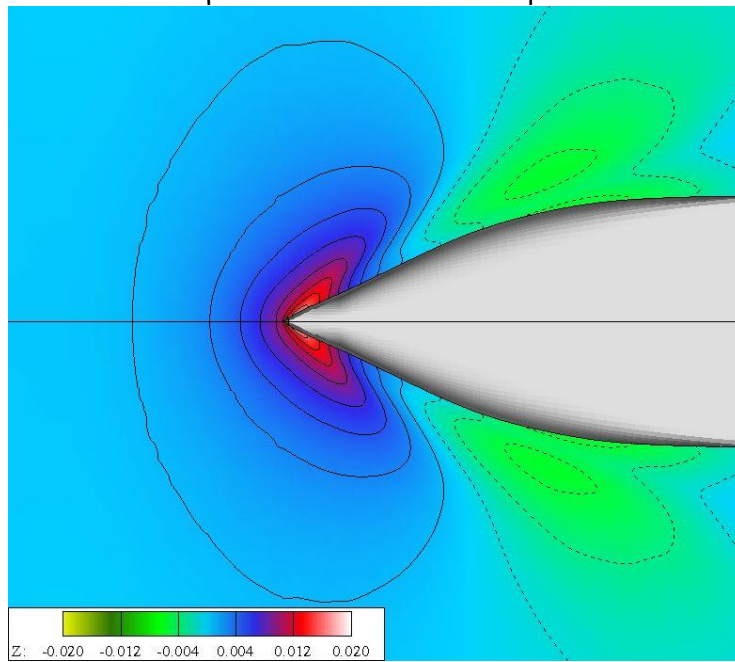
Πίνακας 5: Γεωμετρία του βολβού με +10% παραμέτρους πλάτους.

$C_B = 0.80$	p80bclbp	
	values	units
<b><math>C_w</math></b>	3.628E-04	-
<b><math>I\delta z_I</math></b>	8.414E-04	-
TOTAL RES. (ITTC)	5.5582	Nt
TOTAL RES. (ATTC)	5.3783	Nt
BUOYANCY	2169.2	Nt
LCB	1.55E+00	m
KB	-7.94E-02	m

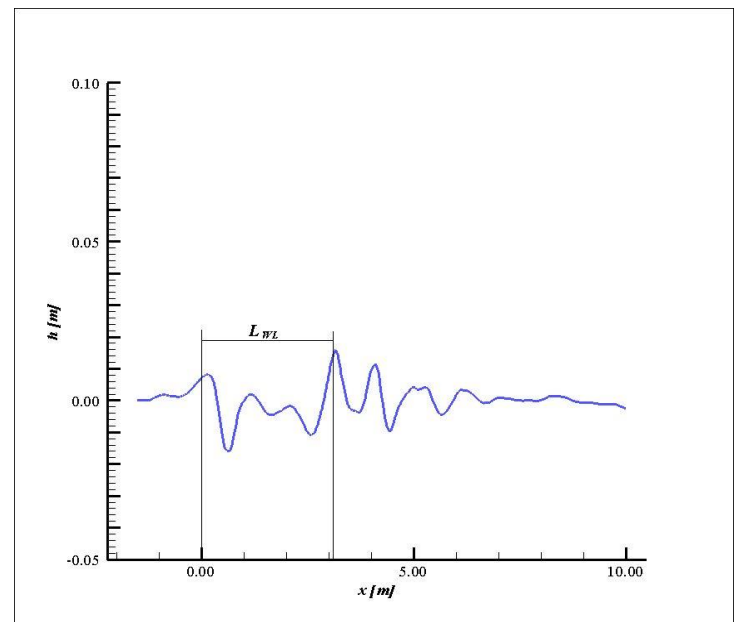
Πίνακας 6: αποτελέσματα σύγκλισης για +10% Β βολβό.



Σχήμα 3: Αναπαράσταση των Ισοψών τομών της ελεύθερης επιφάνειας και μεγέθυνση στην πλώρη (κάτω) για case 2:  $C_B = 0.80$  bclbp.



Wave on hull



Wavecut at Bms + 10 cm

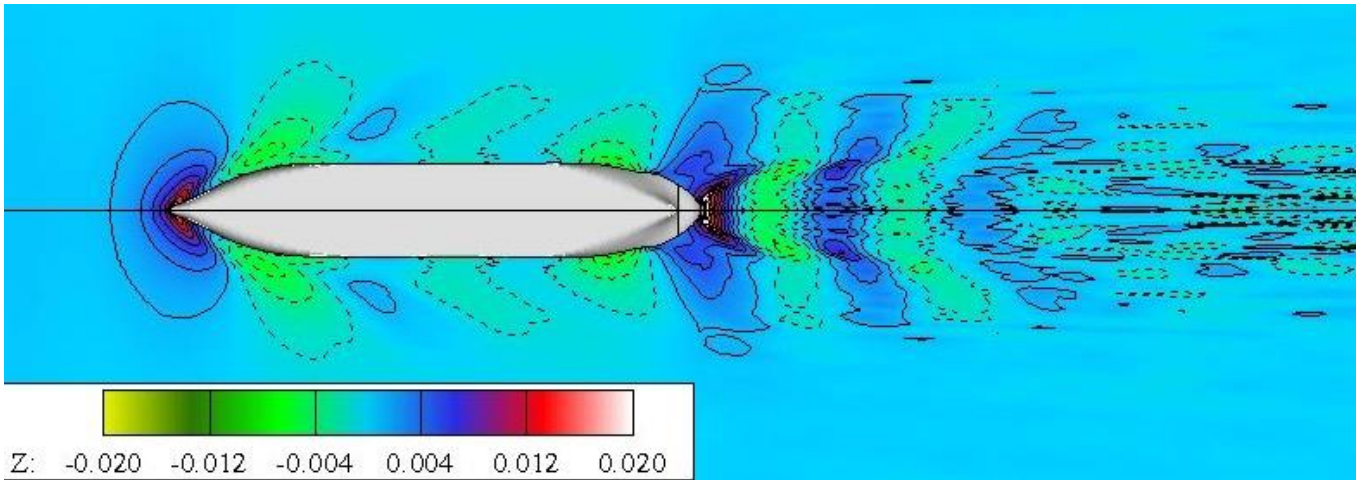
- 3<sup>η</sup> περίπτωση βολβού με -10% των βέλτιστων τιμών στις παραμέτρους  $C_{BB}$  και  $C_{ABT}$

<b>3<sup>rd</sup> CASE -10% <math>C_{BB}</math> &amp; <math>C_{ABT}</math></b>	
$C_B$	0.80
$F_N$	0.20
$C_{VPR}$	0.00117
$C_{LPR}$	0.02070
<b><math>C_{BB}</math></b>	<b>0.12330</b>
$C_{ZTIP}$	0.40000
$C_{ZBROOT}$	0.80000
$C_{ABL}$	0.08100
<b><math>C_{ABT}</math></b>	<b>0.07785</b>

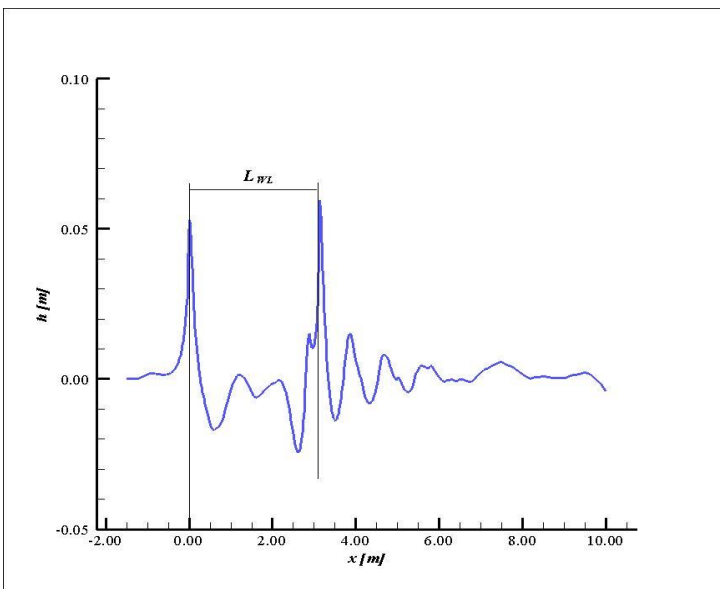
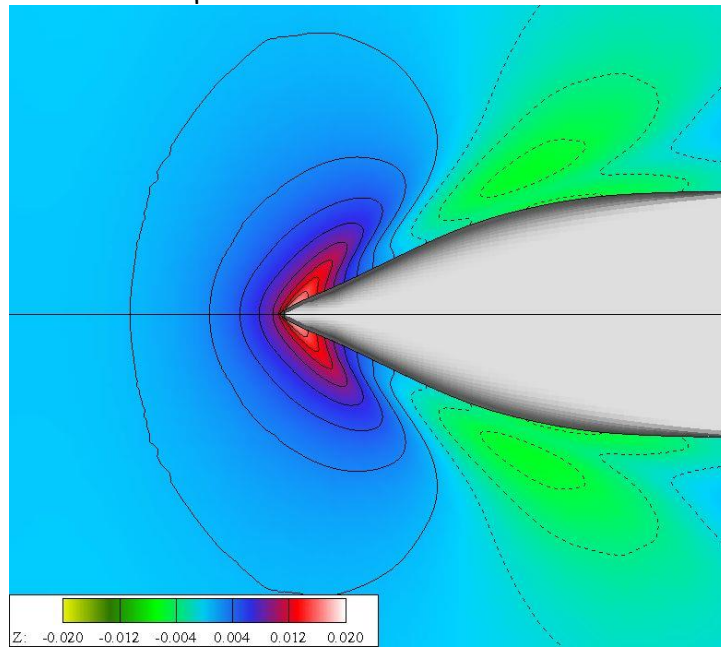
Πίνακας 7: Γεωμετρία του βολβού με -10% παραμέτρους πλάτους.

$C_B = 0.80$	p80bclbm	
	values	units
<b><math>C_w</math></b>	4.515E-04	-
<b><math>I\delta z_I</math></b>	8.010E-04	-
TOTAL RES. (ITTC)	5.7273	Nt
TOTAL RES. (ATTC)	5.5478	Nt
BUOYANCY	2167	Nt
LCB	1.55E+00	m
KB	-7.94E-02	m

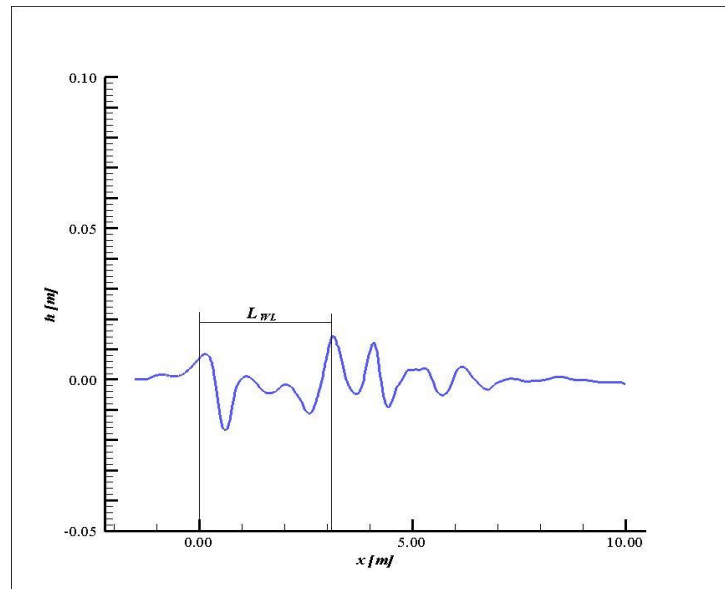
Πίνακας 8: αποτελέσματα σύγκλισης για -10% Β Βολβό.



Σχήμα 4: Αναπαράσταση των Ισοψών τομών της ελεύθερης επιφάνειας και μεγέθυνση στην πλώρη (κάτω) για case 3:  $CB = 0.80$  bclbm.



Wave on hull



Wavecut at Bms + 10 cm

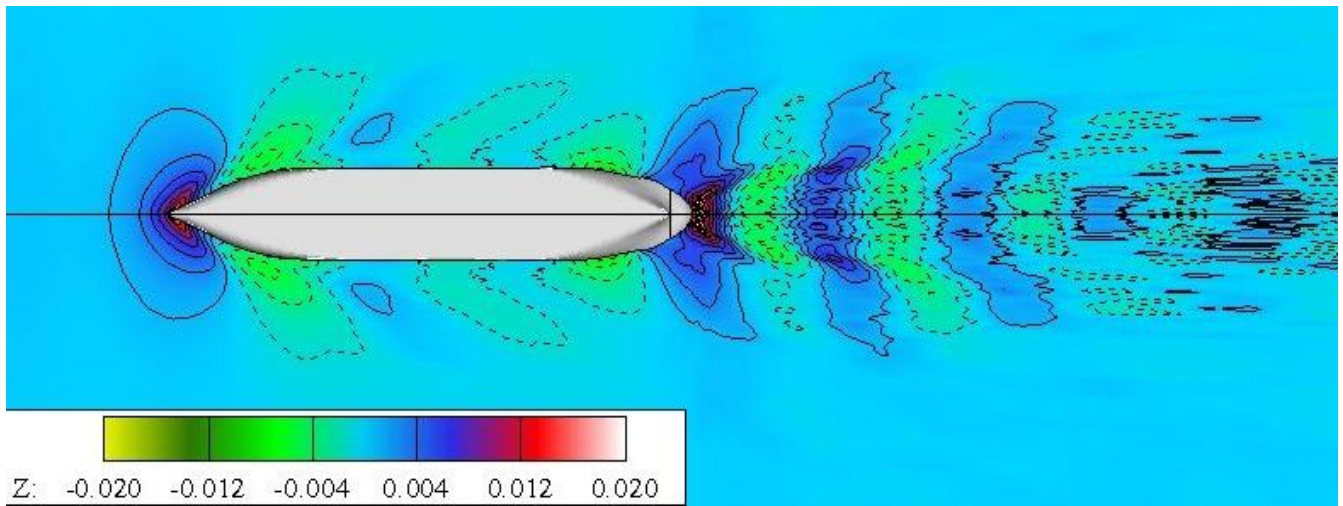
- 4<sup>η</sup> περίπτωση βολβού με +10% των βέλτιστων τιμών στις παραμέτρους CLPR και CABL

4 <sup>th</sup> CASE +10% CLPR & CABL	
CB	0.80
FN	0.20
CVPR	0.00117
<b>CLPR</b>	<b>0.02277</b>
CBB	0.13700
CZTIP	0.40000
CZBROOT	0.80000
<b>CABL</b>	<b>0.08910</b>
CABT	0.08650

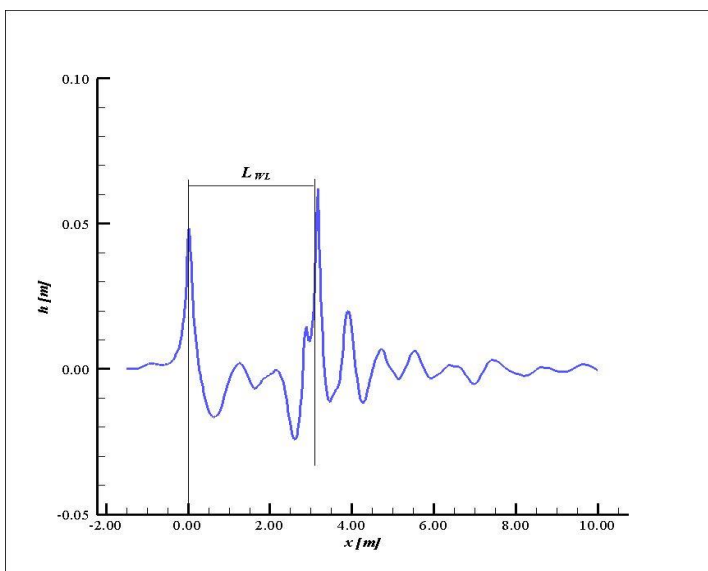
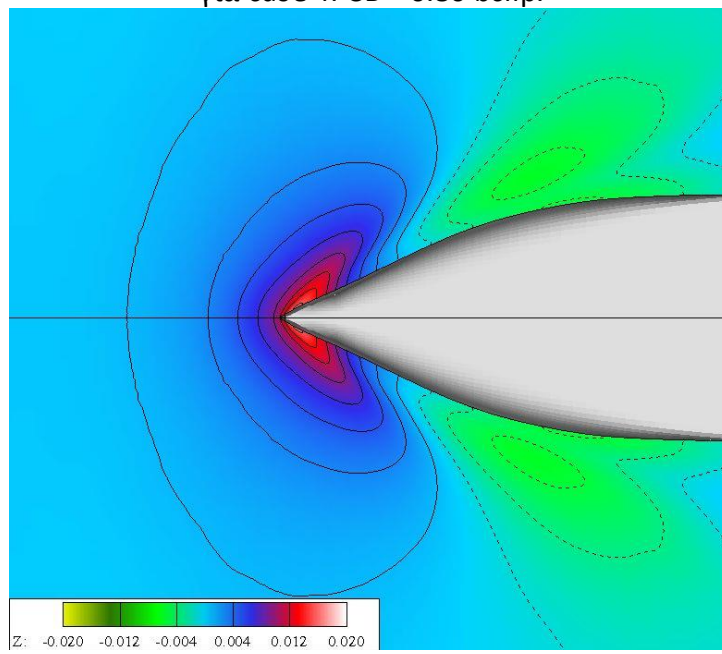
Πίνακας 9: Γεωμετρία του βολβού με +10% Παραμέτρους μήκους.

CB = 0.80	p80bc1lp	
	values	units
<b>Cw</b>	3.514E-04	-
<b>Ιδζl</b>	7.586E-04	-
TOTAL RES. (ITTC)	5.5862	Nt
TOTAL RES. (ATTC)	5.4065	Nt
BUOYANCY	2168.4	Nt
LCB	1.55E+00	m
KB	-7.94E-02	m

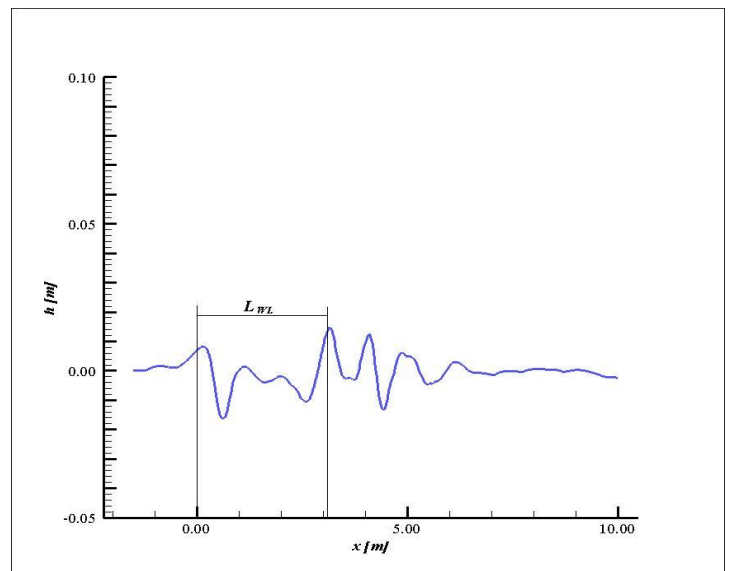
Πίνακας 10: αποτελέσματα σύγκλισης για +10% L βολβό.



Σχήμα 5: Αναπαράσταση των Ισοψών τομών της ελεύθερης επιφάνειας και μεγέθυνση στην πλώρη (κάτω) για case 4:  $CB = 0.80$  bcllp.



Wave on hull



Wavecut at Bms + 10 cm

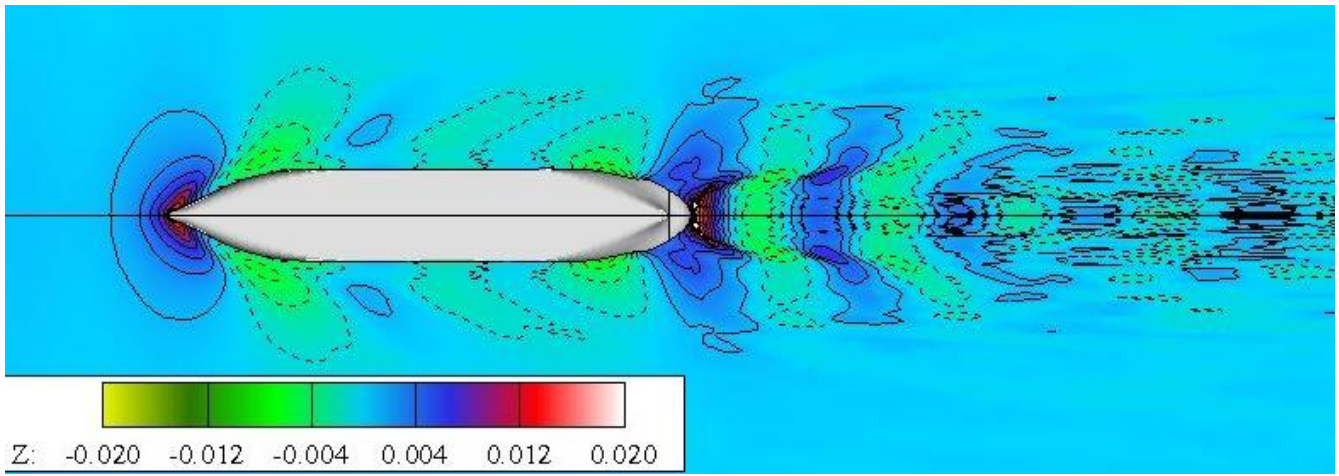
- 5<sup>η</sup> περίπτωση βολβού με -10% των βέλτιστων τιμών στις παραμέτρους CLPR και CABL

5 <sup>th</sup> CASE -10% CLPR & CABL	
CB	0.80
FN	0.20
CVPR	0.00117
<b>CLPR</b>	<b>0.01863</b>
CBB	0.13700
CZTIP	0.40000
CZBROOT	0.80000
<b>CABL</b>	<b>0.07290</b>
CABT	0.08650

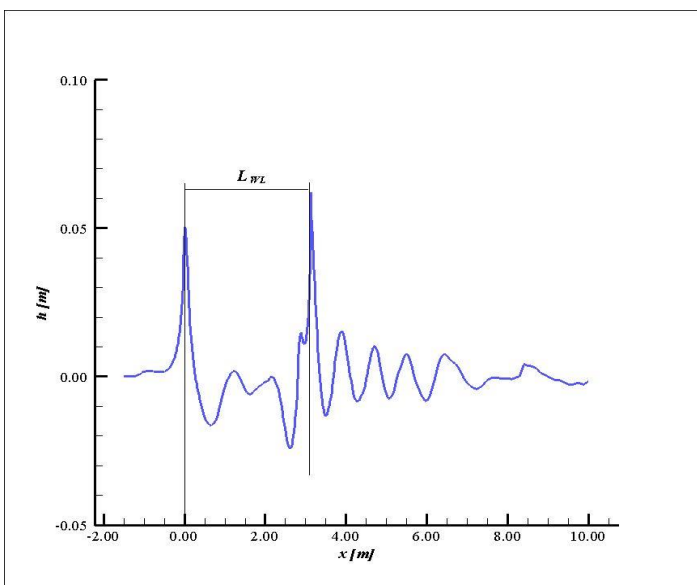
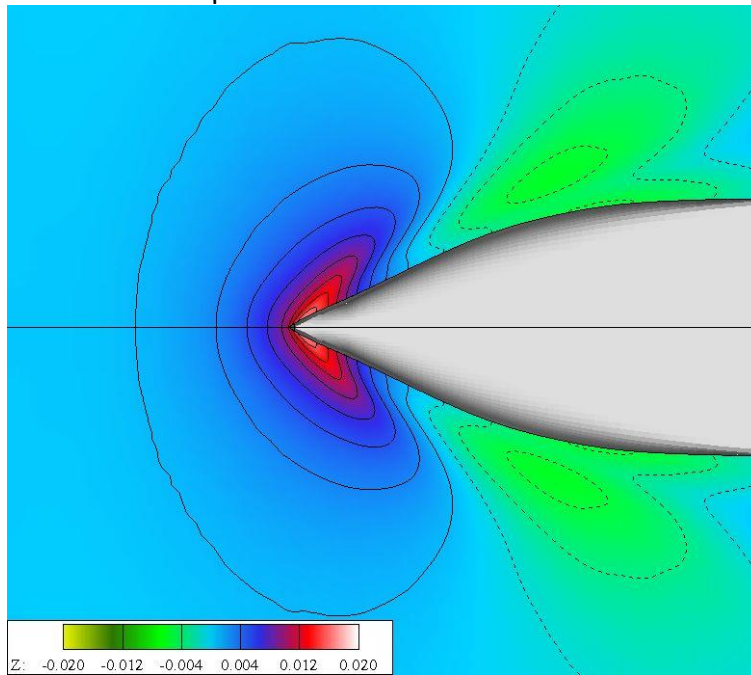
Πίνακας 11: Γεωμετρία του βολβού με -10% παραμέτρους μήκους.

CB = 0.80	p80bc11m	
	values	units
<b>Cw</b>	4.602E-04	-
<b>IδzI</b>	7.805E-04	-
TOTAL RES. (ITTC)	5.7143	Nt
TOTAL RES. (ATTC)	5.5346	Nt
BUOYANCY	2.17E+03	Nt
LCB	1.55E+00	m
KB	-7.94E-02	m

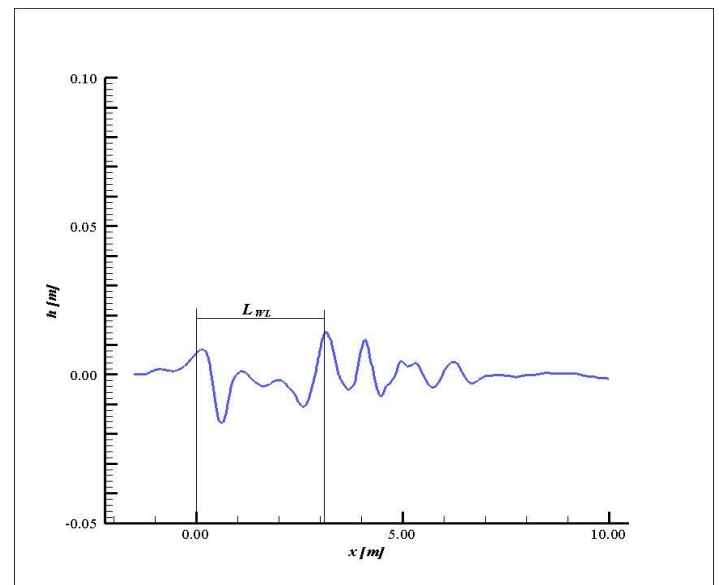
Πίνακας 12: αποτελέσματα σύγκλισης για -10% L βολβό.



Σχήμα 6: Αναπαράσταση των Ισοψών τομών της ελεύθερης επιφάνειας και μεγέθυνση στην πλώρη (κάτω) για case 5: CB = 0.80 bcllm.



Wave on hull



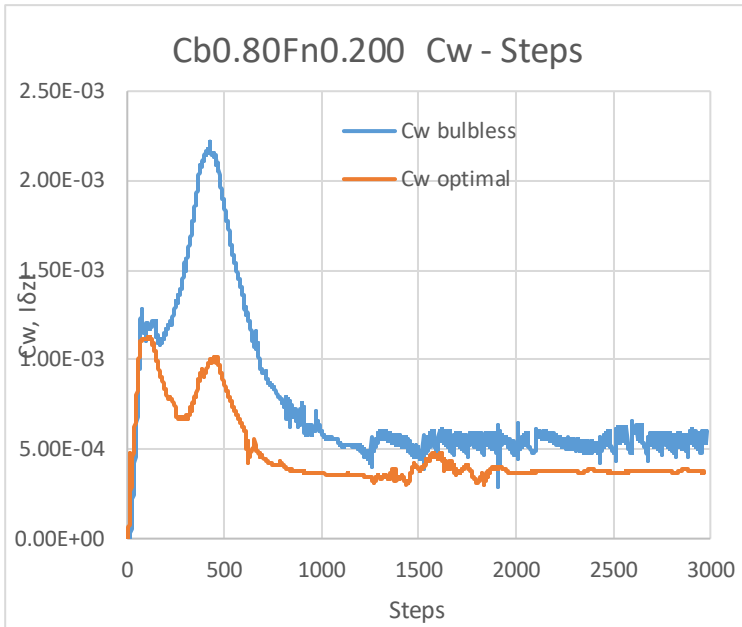
Wavecut at Bms + 10 cm



## Σύγκριση αριθμητικών αποτελεσμάτων

Σε αυτή την ενότητα γίνεται η σύγκριση των τιμών της αντίστασης κυματισμού για τα πλοία με συντελεστή  $C_b = 0.80$ . Αρχικά, συγκρίνεται η περίπτωση του βέλτιστου βολβού και του πλοίου χωρίς βολβό για τα αποτελέσματα που έδωσε η θεωρία δυναμικού και στη συνέχεια συγκρίνεται ο βέλτιστος βολβός σε σχέση με τις υπόλοιπες 4 παραλλαγές του και αξιολογείται το αν και κατά πόσο είναι εύστοχες οι προβλέψεις του *A.M. Kracht*. Τα αποτελέσματα παραθέτονται παρακάτω.

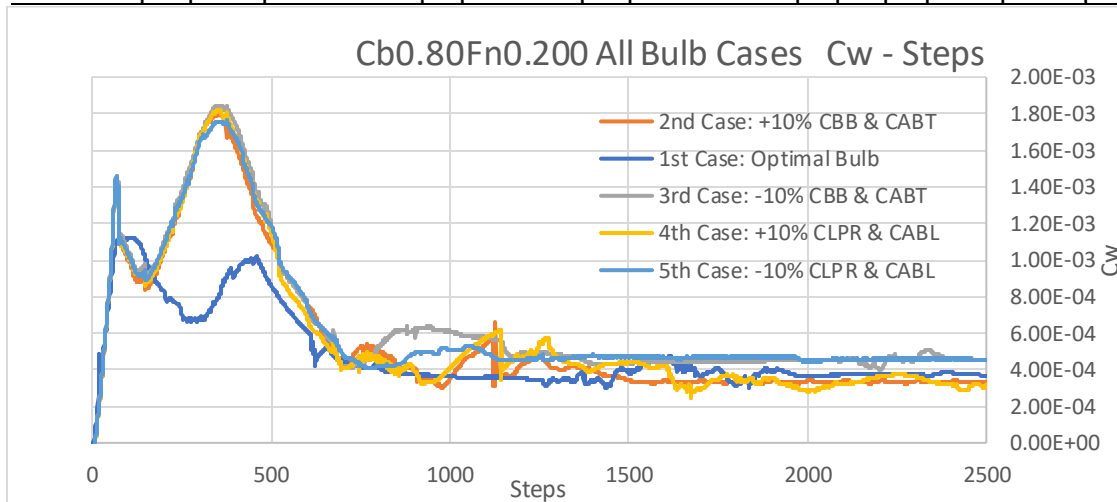
### Αντίσταση κυματισμού πλοίου χωρίς βολβό vs. πλοίο με τον βέλτιστο βολβό



C <sub>B</sub> = 0.80 & F <sub>N</sub> = 0.200			
	Normal run	1 <sup>st</sup> Case: Optimal bow run	ΔC <sub>w</sub>
C <sub>w</sub>	5.384E-04	3.766E-04	-42.97%

Από το διάγραμμα και τον πίνακα, φαίνεται καθαρά η υπεροχή του πλοίου με βολβό, όσον αφορά την αντίσταση κυματισμού. Η τελευταία παρουσιάζεται μειωμένη κατά παραπάνω από 40% παρουσία του βέλτιστου βολβού. Γίνεται επομένως αντιληπτή και η θετική επίδραση του βολβού σε πλοία με πιο «γεμάτες» γάστρες που πλέον σε πιο αργές ταχύτητες. Η μείωση είναι η σημαντικότερη που έχει παρατηρηθεί μέχρι τώρα.

### Αντίσταση κυματισμού πλοίου με βέλτιστο βολβό vs. πλοίο με βολβό με παραλλαγές



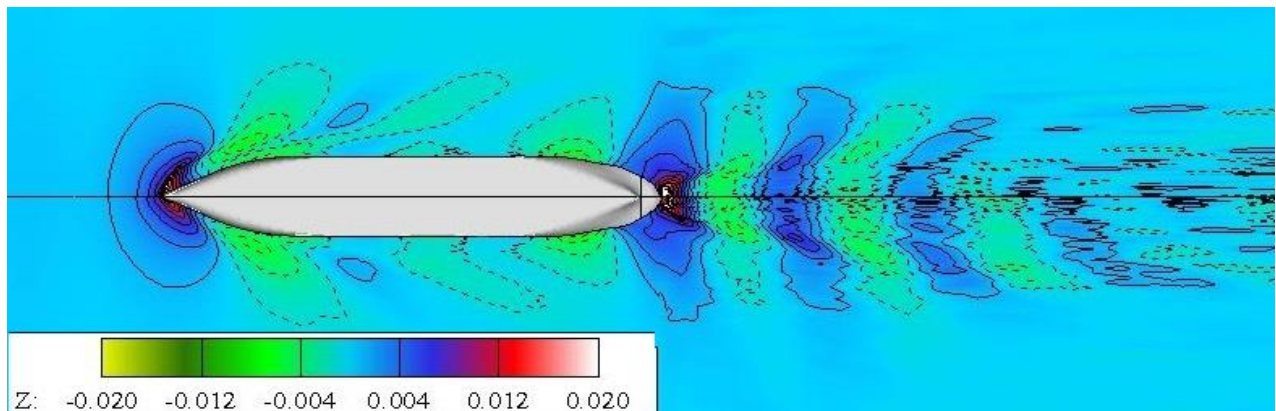
Test cases for C <sub>B</sub> = 0.80 & F <sub>N</sub> = 0.200			
	C <sub>w</sub>	ΔC <sub>w</sub> after potential run	ΔC <sub>w</sub> Kracht's prediction
1 <sup>st</sup> Case: Optimal bulb	0.000377	-	-
2 <sup>nd</sup> Case: +10% C <sub>BB</sub> , C <sub>ABT</sub> bulb	0.000363	-3.80%	7.50%
3 <sup>rd</sup> Case: -10% C <sub>BB</sub> , C <sub>ABT</sub> bulb	0.000452	16.60%	13.5%
4 <sup>th</sup> Case: +10% C <sub>LPR</sub> , C <sub>ABL</sub> bulb	0.000351	-7.15%	3.70%
5 <sup>th</sup> Case: -10% C <sub>LPR</sub> , C <sub>ABL</sub> bulb	0.000460	18.18%	8.20%

Από το παραπάνω διάγραμμα και τον πίνακα φαίνεται ότι η αντίσταση κυματισμού μειώνεται για βολβό με αυξημένες κατά 10% τις παραμέτρους πλάτους αλλά και μήκους, ενώ αντίθετα αυξάνεται για τις υπόλοιπες δύο περιπτώσεις. Αποδεικνύεται πως και για τους 3 συντελεστές μορφής, οι περιπτώσεις με αυξημένες παραμέτρους πλάτους βολβού δίνουν καλύτερα αποτελέσματα από τα βέλτιστα κατά τον *Kracht*.

Όσον αφορά τις ποιοτικές προβλέψεις του *Kracht* βλέπουμε ότι εξακολουθεί να μην είναι εύστοχος και οι λόγοι της αστοχίας των προβλέψεών του είναι ίδιοι με αυτούς που αναλύθηκαν για τον συντελεστή  $C_B = 0.60$ .

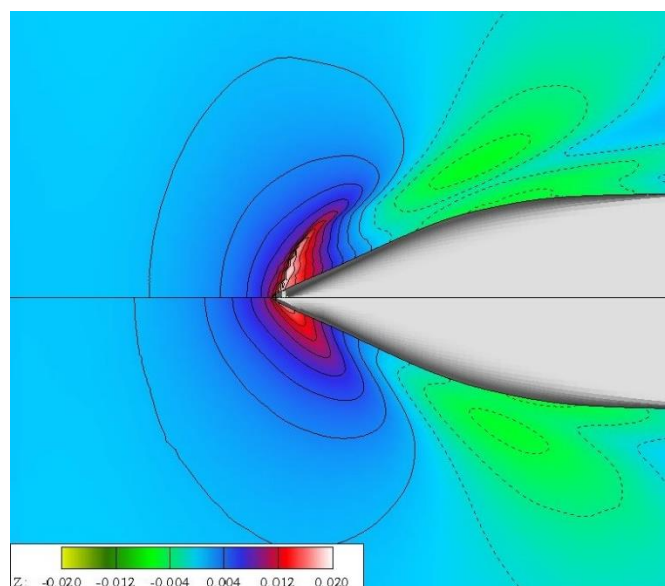
### Σύγκριση ισοϋψών τομών και υπέρθεση των wavecuts για $C_B = 0.80$

#### NORMAL VIEW

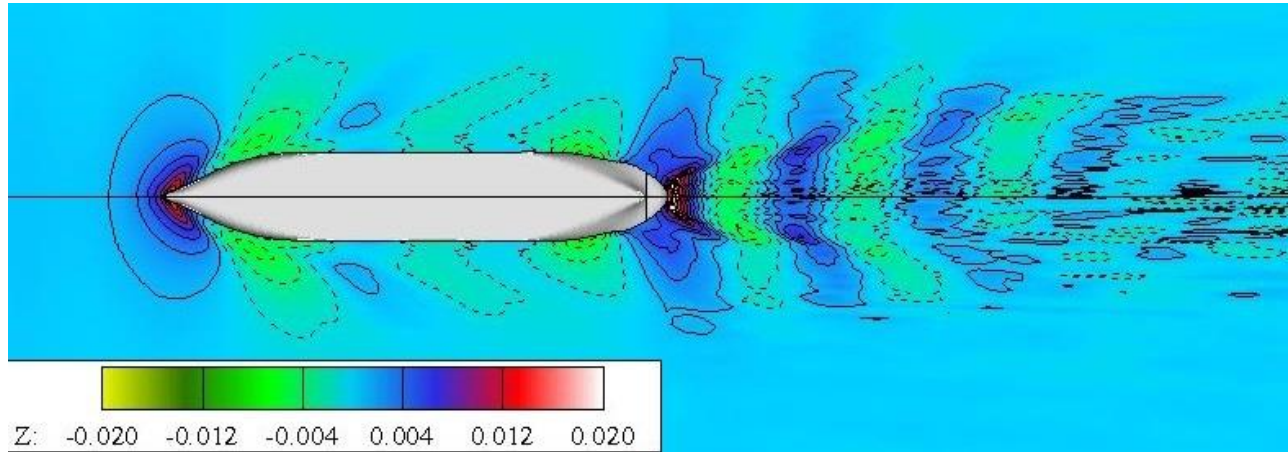


Σχήμα 7: normal (πάνω) VS. case 1: optimal bulb (κάτω)

#### ZOOMED – IN

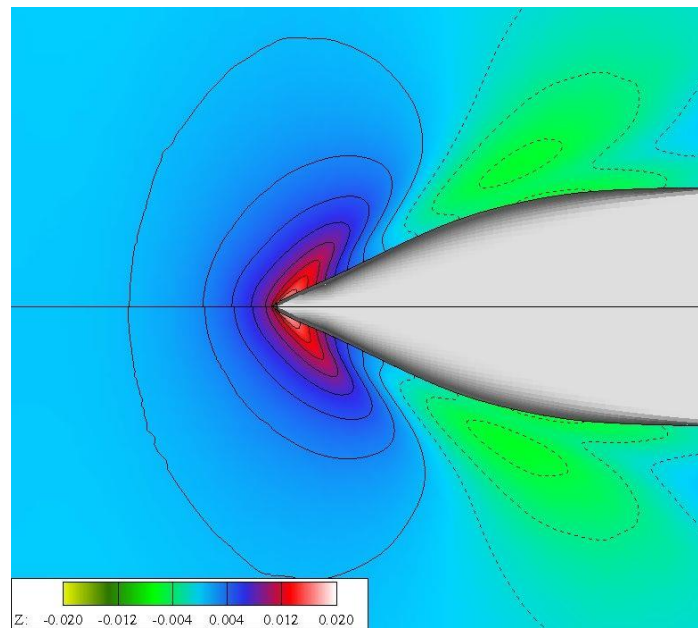


**NORMAL VIEW**

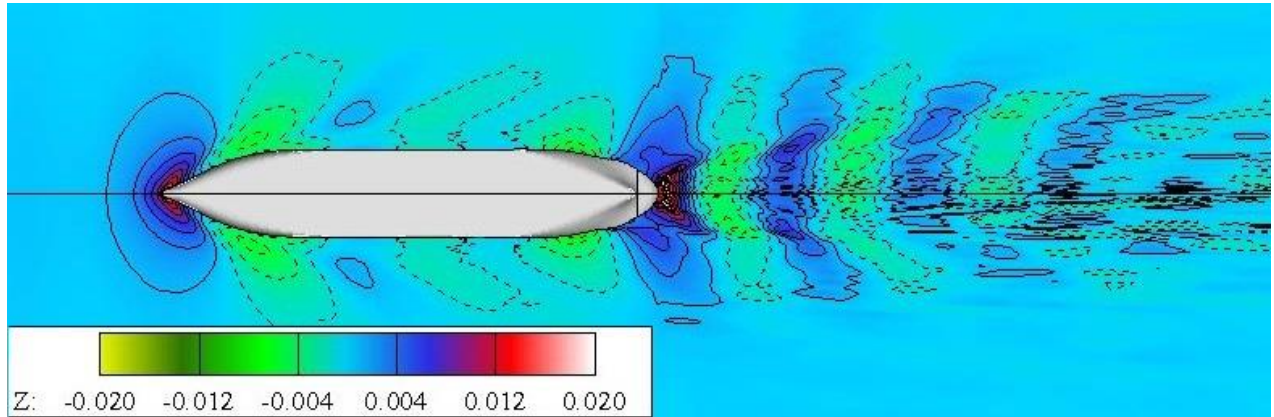


Σχήμα 8: case 1: Optimal bulb (πάνω) **VS.** case 3: bclbm (κάτω)

**ZOOMED – IN**

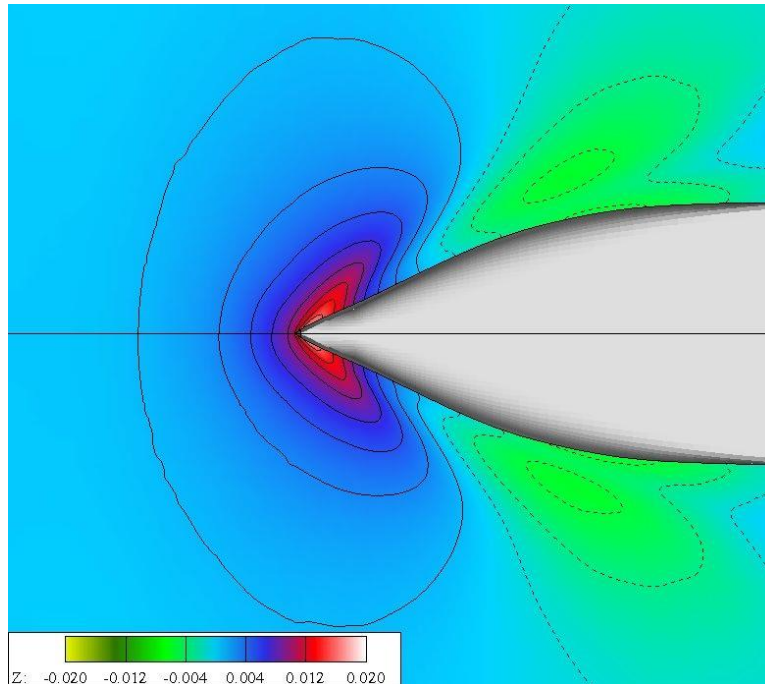


**NORMAL VIEW**

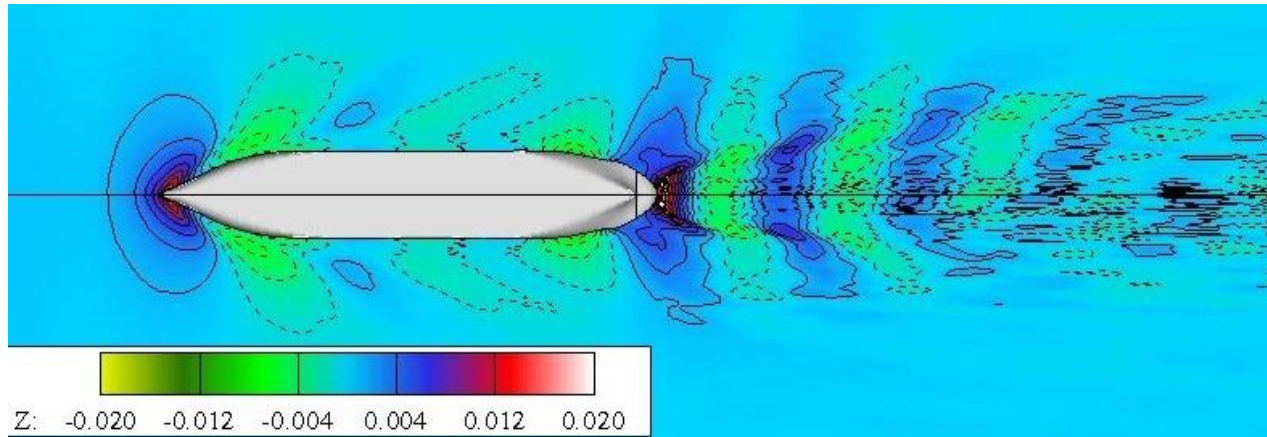


Σχήμα 9: case 1: Optimal bulb (πάνω) VS. case 2: bclbp (κάτω)

**ZOOMED - IN**

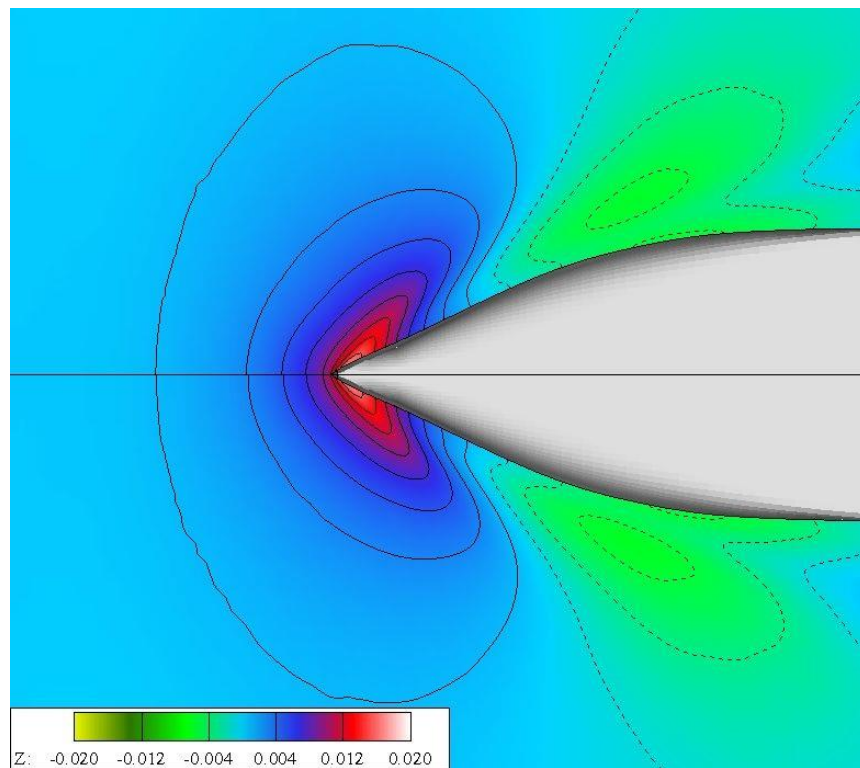


**NORMAL VIEW**

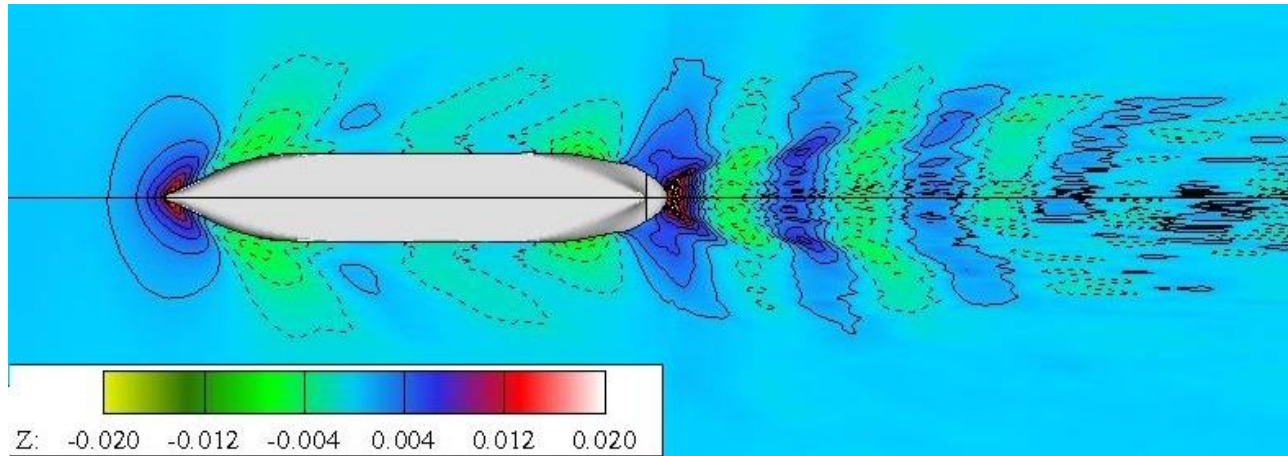


Σχήμα 10: case 1: Optimal bulb (πάνω) **VS.** case 5: bcllm (κάτω)

**ZOOMED - IN**

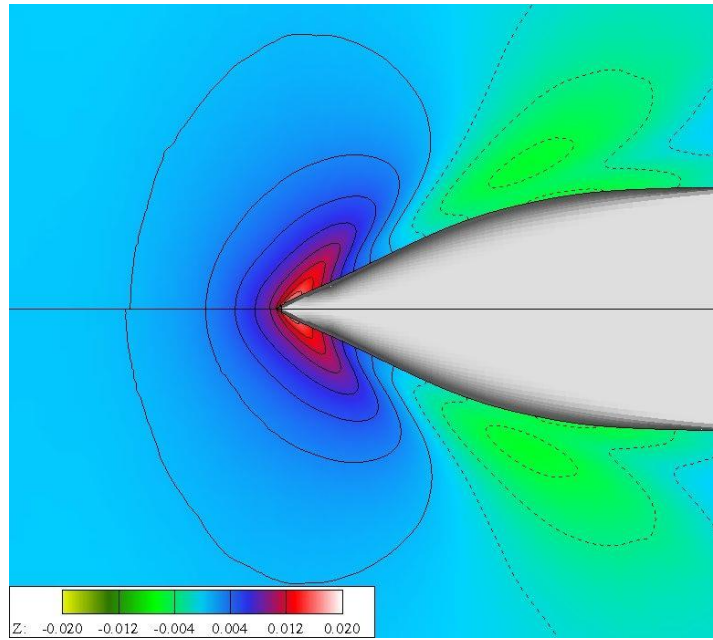


**NORMAL VIEW**

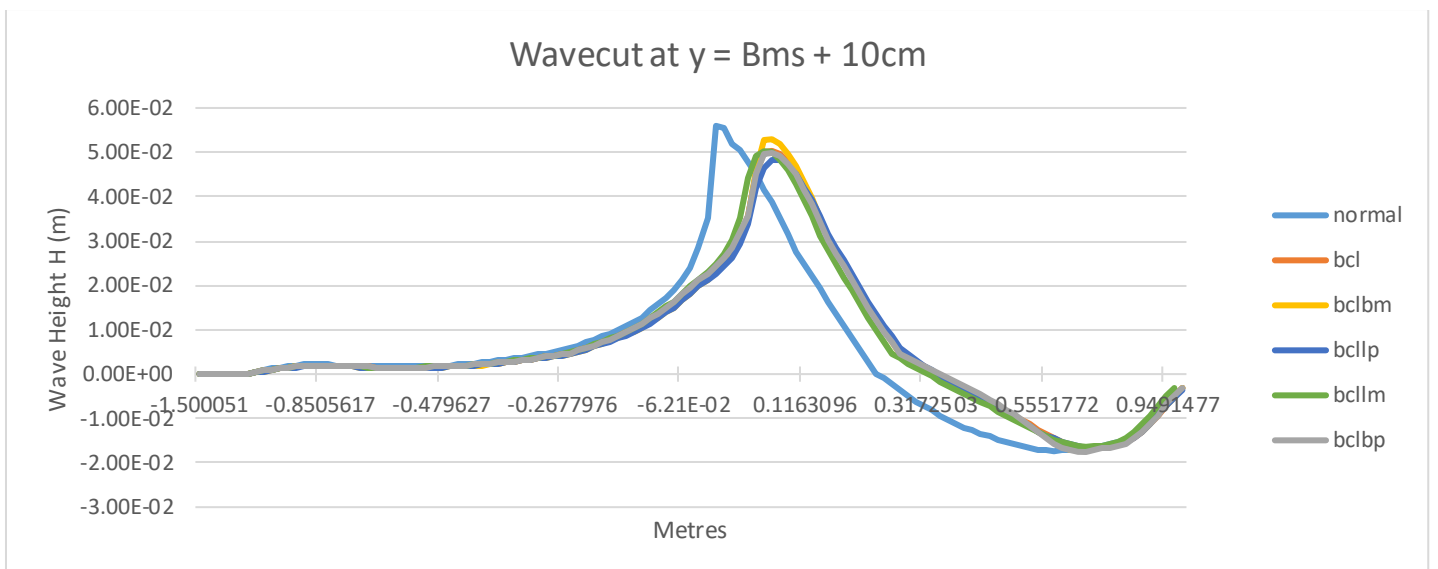
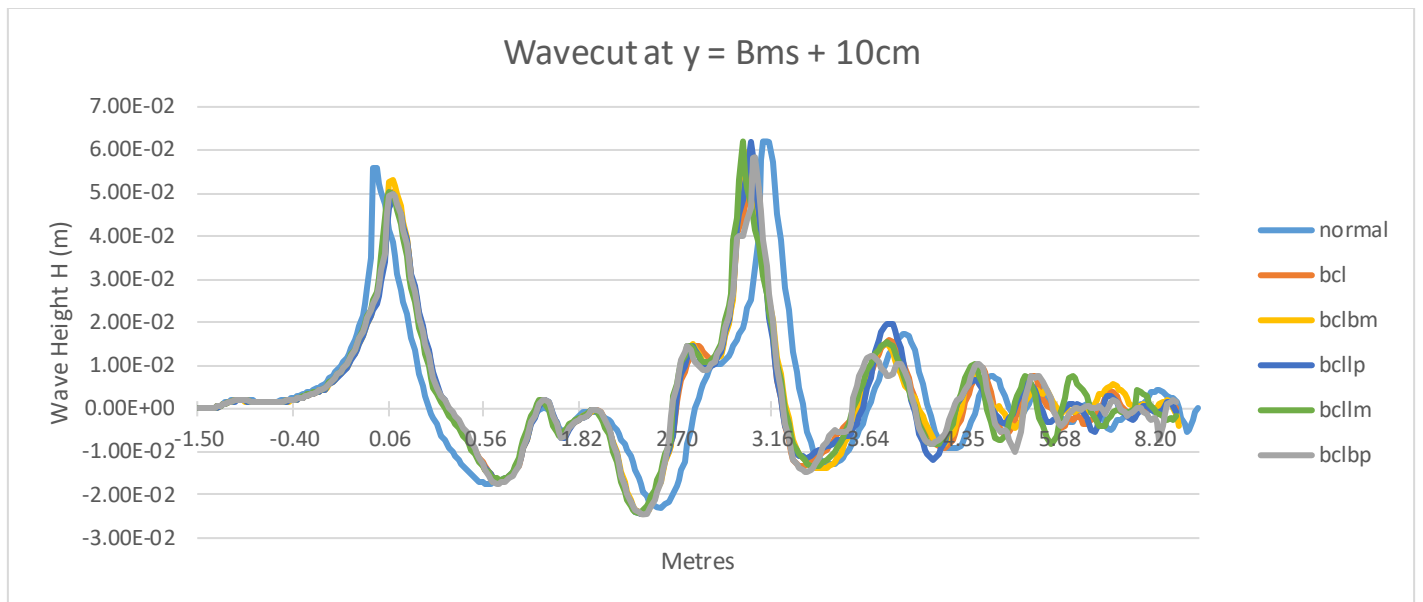


Σχήμα 11: case 1: Optimal bulb (πάνω) **VS.** case 3: bclbm (κάτω)

**ZOOMED - IN**

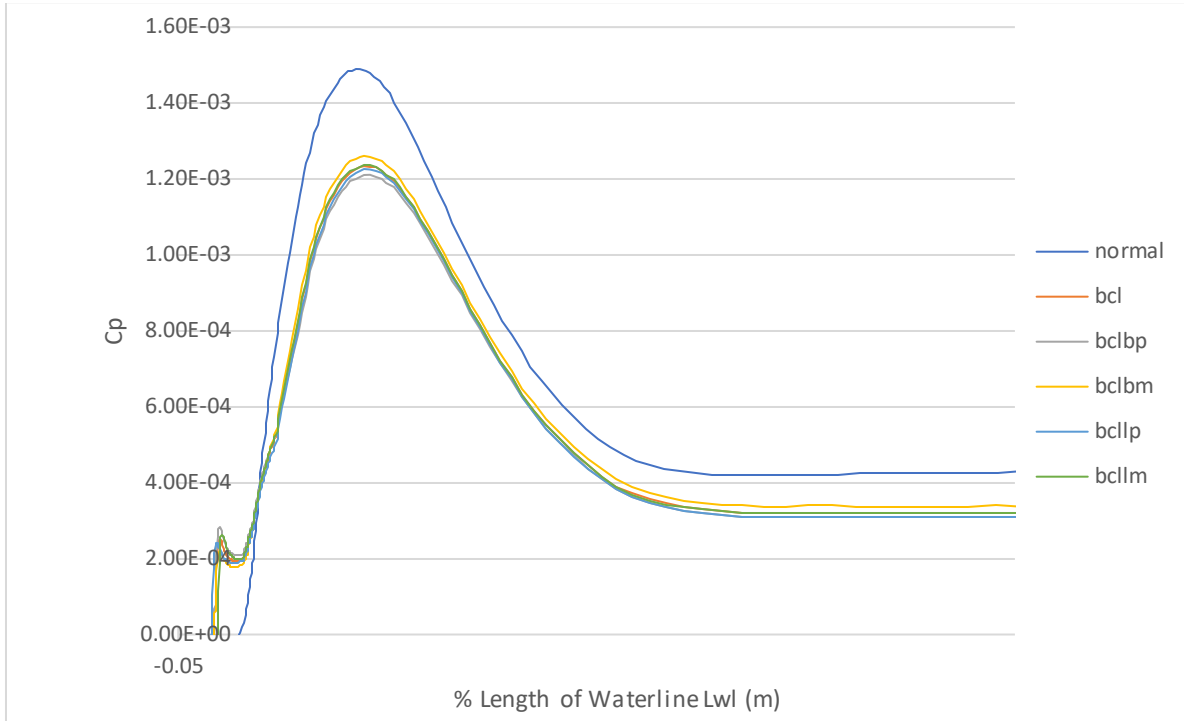


bcl (πάνω) vs bcllp (κάτω)



Στα παραπάνω διαγράμματα φαίνεται ξανά η θετική επίδραση της ύπαρξης βολβού στη μείωση του ύψους του κύματος κοντά στην πλώρη. Αξίζει να τονιστεί ότι ενώ η μείωση της αντίστασης κυματισμού με την ύπαρξη βολβού ανέρχεται στο ύψος του 40%, η αντίστοιχη μείωση του ύψους του κύματος είναι πολύ μικρότερη – μόλις 10%. Γίνεται λοιπόν αντιληπτό, ότι η σχέση του συντελεστή αντίστασης κυματισμού  $C_w$  και του ύψους του κύματος δεν είναι γραμμική.

### Σύγκριση του συντελεστή αντίστασης πίεσης $C_p$ όλων των Cases



Στο παραπάνω διάγραμμα παριστάται ο συντελεστής αντίστασης πίεσης  $C_p$  κατά μήκος της γάστρας του πλοίου για όλες τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν, σε μεγέθυνση στην πλώρη. Τα συμπεράσματα είναι ίδια με  $C_B = 0.6$  και  $C_B = 0.70$ . Για την παρούσα έρευνα η αντίσταση πίεσης είναι ίση με την αντίσταση κυματισμού, άρα το  $C_p$  είναι ουσιαστικά το  $C_w$ . Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι ενώ ο βολβός αυξάνει αρχικά την αντίσταση στην πλώρη, στη συνέχεια φαίνεται να μειώνει τις πιέσεις όσο πλησιάζουμε προς την πρύμνη, επειδή επιδρά στο σύστημα των κυματισμών. Η συνολική επίδραση του βολβού φαίνεται ότι είναι ευεργετική, καθώς κρατάει αυτό το πλεονέκτημα πτώσης πίεσης μέχρι την πρύμνη, με μόνη αύξηση αυτή που συμβαίνει στην πλώρη.



## 7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Η μεγαλύτερη αντίσταση κυματισμού παρουσιάζεται για πλοίο με  $C_B = 0.70$  και  $F_N = 0.26$ , με το πλοίο με  $C_B = 0.60$  και  $F_N = 0.29$  να ακολουθεί και τελευταίο αυτό με  $C_B = 0.80$  και  $F_N = 0.20$ .
- Η ύπαρξη βολβού στην πλώρη φαίνεται να μειώνει αισθητά την αντίσταση κυματισμού και στις τρεις παραπάνω περιπτώσεις. Μεγαλύτερη μείωση παρατηρείται για  $C_B = 0.80$  και  $F_N = 0.20$  (40%), μετά ακολουθεί το  $C_B = 0.60$  και  $F_N = 0.290$  (20%) και τελευταίο έρχεται το  $C_B = 0.70$  και  $F_N = 0.260$  (10%).
- Το μικρότερο ύψος κύματος κοντά στην πλώρη για πλοία χωρίς βολβό το παρουσίασε το πλοίο με  $C_B = 0.60$ , μετά το  $C_B = 0.80$  και τελευταίο το  $C_B = 0.70$ .
- Για όλους τους συντελεστές μορφής, η παρουσία του βολβού στην πλώρη μετατοπίζει την κορυφή του κύματος κατά τον άξονα  $-X$  και προς την πρύμνη του πλοίου.
- Η γεωμετρία της γάστρας και της ελεύθερης επιφάνειας καλύπτεται από 38000 panels. Τα 38000 δίνουν μεγαλύτερη ακρίβεια από τα 28000 στοιχεία και περίπου ίδια με τα 44000, ενώ δίνουν τον ίδιο συντελεστή αντίστασης κυματισμού  $C_w$ , για τη γάστρα που δοκιμάστηκε.
- Οι προβλέψεις που έγιναν βάσει των διαγραμμάτων της έρευνας του A.M.Kracht το 1978 δεν συμβαδίζουν με τη λύση του potential προγράμματος. Βάσει του τελευταίου, υπάρχει καλύτερη γεωμετρία βολβού η οποία δίνει τα βέλτιστα αποτελέσματα για τον  $C_w$ . Επίσης, οι ποιοτικές προβλέψεις του Kracht, που επέρχονται με την αλλαγή των παραμέτρων του βολβού δεν συμβαδίζουν με τα αποτελέσματα αυτής της εργασίας. Αυτό οφείλεται σε δύο παράγοντες. Ο Kracht δε συνιστά το να κρατήσουμε όλες τις παραμέτρους και να αλλάξουμε αυθαίρετα 2 από αυτές, όπως κάναμε, γιατί ο βολβός που προκύπτει μπορεί να μην αντιστοιχεί σε έναν βολβό που να «υπάρχει» και να έχει δοκιμαστεί στην πραγματικότητα. Ένας δεύτερος λόγος είναι διότι η γεωμετρία της γάστρας στην οποία προσαρμόστηκε κάθε φορά βολβός είναι διαφορετική από αυτή που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή των διαγραμμάτων στα οποία βασίστηκε αυτή η εργασία.
- Με αύξηση 10% των παραμέτρων πλάτους ( $C_{BB}$ ,  $C_{ABT}$ ) του βολβού, παρατηρείται περαιτέρω μείωση της αντίστασης κυματισμού για  $C_B = 0.60$  (13% του «βέλτιστου» βολβού).
- Με αύξηση 10% των παραμέτρων πλάτους ( $C_{BB}$ ,  $C_{ABT}$ ) του βολβού, παρατηρείται περαιτέρω μείωση της αντίστασης κυματισμού για  $C_B = 0.70$  (2.4% του «βέλτιστου» βολβού).
- Με αύξηση 10% των παραμέτρων πλάτους ( $C_{BB}$ ,  $C_{ABT}$ ) του βολβού, παρατηρείται περαιτέρω μείωση της αντίστασης κυματισμού για  $C_B = 0.80$  (3.8% του «βέλτιστου» βολβού) αλλά ο πιο αποδοτικός βολβός είναι ο αρχικός με 10% αύξηση παραμέτρων μήκους (7.15% του «βέλτιστου» βολβού).
- Η επίδραση του βολβού στο συντελεστή αντίστασης πίεσης  $C_p$  είναι για όλα τα  $C_B$  αρχικά αρνητική λόγω της παρουσίας του βολβού, αλλά όσο προχωράμε προς την πρύμνη οι πιέσεις στη γάστρα ελαττώνονται λόγω της τροποποίησης του συστήματος κυματισμών και το ισοζύγιο γίνεται θετικό.
- Ως μελλοντική δουλειά προκύπτει ότι αξίζει να μελετηθούν: η επίδραση της διαγωγής, η επίδραση βυθίσματος και η επίδραση του  $F_N$  στο συντελεστή αντίστασης κυματισμού. Επίσης, η επίδραση του συντελεστή μορφής  $C_B$  στο  $C_w$  (με σταθερό *Froude Number*). Τέλος, ενδιαφέρον θα παρουσίαζε και η μελέτη του ανασηκωμένου βολβού στη συμπεριφορά των κυματισμών και του  $C_w$ .

## 8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Fragkoulis, G. (2015). *Αριθμητική Διερεύνηση της Αντίστασης Κυματισμού στη Συστηματική Σειρά 60*.
2. Hess, & J.L.Smith. (1966). Calculations of potential flow about arbitrary bodies, 1–136.
3. Inui, T., Takahei, T., & Kumano, M. (1961). Wave Profile Measurements on the Wave-making Characteristics of the Bulbous-Bow. *Journal of the British Ship Research Association*, 16.
4. Kerczek, V. (1969). The Representation of ship hulls by conformal mapping functions. *Journal of Ship Research*, (284–298).
5. Kracht, A. (1978). Design of Bulbous Bows. *SNAME Transactions*, 86, 197–217.
6. Tzabiras, G. D. (2004). Resistance and self-propulsion simulations for a Series-60,  $C_B = 0.6$  hull at model and full scale. *Ship Technology Research*, 21–34.
7. Tzabiras, G. D. (2008). A method for predicting the influence of an additive bulb on ship resistance. *Proc. 8th International Conference of Hydrodynamics*, 53–60.
8. Tzabiras, G. D., Dimas, A., & Loukakis, T. A. (1986). A numerical method for the calculation of incompressible, steady, separated flows around aerofoils. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 789–809.
9. Tzabiras, G. D., & Kontogiannis, K. (2009). An integrated method for predicting the hydrodynamic resistance of low-  $C_B$  ships. *JCAD*, 1–16.
10. Weinblum, G. (1935). *Theorie der Wulstschiffe*.
11. Wigley, W. C. S. (n.d.). The Theory of the Bulbous Bow and its Practical Application. *Trans. North-East Coast Institution of Engineers and Shipbuilders*, 52.
12. Παπανικολάου, Α. (2009). *Μελέτη Πλοίου Τεύχος 2*.
13. Σπύρου, Κ. (1984). Το πρόβλημα του βολβού, βολβοί και αντίσταση.