

**ΑΚΑΔΗΜΙΑ ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ  
ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΘΕΜΑ : Χρήση Της Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής Στην Ναυτική  
Τεχνολογία**

**ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ : Θεοχάρης Γεώργιος**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ  
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : κ. Διβινής Νικόλαος**

**ΝΕΑ ΜΗΧΑΝΙΩΝΑ  
2013**

**ΑΚΑΔΗΜΙΑ ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ  
ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΘΕΜΑ : Χρήση Της Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής Στην Ναυτική  
Τεχνολογία**

**ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ : Θεοχάρης Γεώργιος  
ΑΜ : 4388**

**ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΠΑΡΑΔΟΣΗΣ :**

Βεβαιώνεται η ολοκλήρωση της παραπάνω πτυχιακής εργασίας

Ο καθηγητής

## Περίληψη

Ένας κλάδος της μηχανικής είναι η υπολογιστική ρευστομηχανική, η οποία εξετάζει τη ροή αερίων και υγρών, την αλληλεπίδραση μηχανισμών μεταφοράς και χημείας, τους μηχανισμούς παραγωγής ατμοσφαιρικών ρύπων, την κατασκευή απλοποιημένων χημικών κινητικών μηχανισμών για σύνθετα καύσιμα και τα προχωρημένα μοντέλα τύρβης. Μια από τις εφαρμογές της υπολογιστικής ρευστομηχανικής είναι η ναυτιλία και πιο συγκεκριμένα η ναυπηγική και η ναυπηγοεπισκευαστική βιομηχανία. Προβλήματα δηλαδή που αφορούν στην πλεύση, στον υπολογισμό ροής στους σωλήνες, στους έλικες των πλοίων, στη γάστρα, στην πρόωση και στη σπηλαίωση αντιμετωπίζονται πλέον με τη βοήθεια της υπολογιστικής ρευστομηχανικής. Σκοπός επομένως της παρούσας εργασίας είναι η παρουσίαση της χρήσης της υπολογιστικής ρευστομηχανικής στη ναυτιλία για την επίλυση προβλημάτων. Η μέθοδος που ακολουθήθηκε ήταν αυτή της βιβλιογραφικής επισκόπησης, ώστε να υπάρχει μια ολοκληρωμένη και πλήρης εικόνα για τη χρήση της υπολογιστικής ρευστομηχανικής στη ναυτιλία. Από τη μελέτη προέκυψε ότι η CFD είναι ένα συνεχώς εξελισσόμενο εργαλείο, που βοηθά στην αντιμετώπιση προβλημάτων στη ναυτιλία που έχει ως αποτέλεσμα να υπάρχει μία ασφαλέστερη και ομαλότερη λειτουργία των πλοίων και των συστημάτων που υπάρχουν μέσα σε αυτά. Παρ' όλα αυτά το λογισμικό υπολογισμού και επίλυσης των προβλημάτων που αφορούν στα πλοία δεν είναι ακόμη στο επίπεδο που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί τυφλά από τους σχεδιαστές χρειάζονται νέα μαθηματικά μοντέλα και επιβεβαίωση από πειράματα.

## Abstract

A branch of engineering is Computational Fluid Mechanics, which inspects the flow of reactive gases (liquids, gases, and plasmas) the interaction of mechanisms of transport and chemistry, their mechanisms of production of atmospheric pollutants, the manufacture of simplified chemical kinetic mechanisms for complex fuels and the advanced models of friction... One of the applications of Computational Fluid Mechanics is the shipping and more concretely the naval and naval constructive factory industry. Problems related to sailing route, in the calculation of flow in the pipes, in the helixes of boats, in hull, in the propulsion and in the cavitation are faced henceforth with the help of Computational Fluid Mechanics. So the purpose of this essay is the presentation of use of Computational Fluid Mechanics in the shipping for the resolution of problems. The method that was followed was the bibliographic review, so that there will be a complete and full picture for the use of Computational Fluid Mechanics in shipping. The study showed that the CFD is a constantly evolving tool that helps the confrontation of problems in shipping and by extension in the safety and smooth operation of boats and the involving systems within. Nevertheless the software of calculation and resolution of problems that concerns the boats it is not still up to the level that could be used blindly from the designers and the engineers, that is why new mathematic models and verification by experiments are needed.

# Πρόλογος

Το κεφάλαιο αυτό αποτελεί την εισαγωγή της εργασίας. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η παρουσίαση της προβληματικής του θέματος, ο σκοπός της εργασίας και η περιγραφή της δομής της εργασίας.

## Τοποθέτηση του προβλήματος

Η αρχή της ιστορίας της Μηχανικής χάνεται στα βάθη του χρόνου όταν οι άνθρωποι έστρεψαν το βλέμμα τους στον ουρανό και αναρωτήθηκαν για τους νόμους που διέπουν την κίνηση των ουρανίων σωμάτων. Ένα βασικό στάδιο εξέλιξης της συμβαίνει στην εποχή των Γαλιλαίου-Νεύτωνα. Τότε υπήρχε η μηχανιστική εικόνα που εξηγούσε τα φαινόμενα με μια τάση απολυτοποίησης. Έτερο κρίσιμο στάδιο της εξέλιξης της Μηχανικής λαμβάνει χώρα στα μέσα του 19<sup>ου</sup> και αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα, όταν η μηχανιστική εικόνα του κόσμου επεκτάθηκε με μια σειρά νέων εννοιών (ενέργεια, εντροπία, μοριακή κίνηση κ.λπ.) που παρέκαμψε και σε πολλά σημεία ανέτρεψε την απόλυτη μηχανιστική ερμηνεία των φαινομένων. Το στάδιο αυτό της Μηχανικής αρχίζει από τη στιγμή που τα μικροσκοπικά φαινόμενα ήταν αδύνατο να εξηγηθούν με απλή μηχανιστική ερμηνεία και χρειάστηκε η ανάπτυξη νέων κατευθύνσεων όπως είναι η ηλεκτροδυναμική και η κβαντική φυσική. Στην φάση αυτή εντάσσεται και η συνεισφορά του Henri Poincaré η οποία είναι η βάση της θεωρίας των δυναμικών συστημάτων και της χαοτικής δυναμικής. Πρέπει να τονίσουμε όμως ότι υπάρχουν προβλήματα της Μηχανικής που είναι και θα παραμείνουν άλυτα από πλευράς αναλυτικής αντιμετώπισης. Όχι λόγω της έλλειψης των απαραίτητων μαθηματικών εργαλείων αλλά λόγω της ίδιας της φύσης και φυσικής πολυπλοκότητας των προβλημάτων.

Η Μηχανική δεν είχε την αίγλη που απέκτησε αργότερα. Η Μηχανική στην σύγχρονη εποχή κατευθύνεται κατά κύριο λόγο στην ανάπτυξη μεθόδων και τεχνικών για την εξήγηση των φαινομένων που χαρακτηρίζουν πολύπλοκα προβλήματα. Προβλημάτων δηλαδή όπου η συμπεριφορά του συνόλου δεν μπορεί να προβλεφθεί απλά μελετώντας του νόμους που διέπουν τα υποσυστήματα που το απαρτίζουν. Σημαντικό ρόλο για την ανάπτυξη θεωριών προς αυτή την κατεύθυνση θα πρέπει να αποδοθεί στον Pyla Prigogine για την συμβολή του στην ανάπτυξη θεωριών στη φυσική και μηχανική της μη-ισορροπίας.

Στον 21<sup>ο</sup> αιώνα μπορούμε να ισχυριστούμε με απόλυτη βεβαιότητα ότι καμία πρόοδος σε κανένα κλάδο της τεχνολογίας δεν μπορεί να φτάσει τον στόχο της αν δεν ληφθούν υπ' όψη βασικές και σύγχρονες θεωρίες της Μηχανικής. Η γνώση της Μηχανικής είναι απαραίτητη σε μια πολύ ευρεία κλίμακα ερευνητικών περιοχών με πρακτικές εφαρμογές που εκτείνονται από την κατασκευή κτιριακών συγκροτημάτων, υδροηλεκτρικών σταθμών και φραγμάτων, γεφυρών και δρόμων, πλοίων

και αεροπλάνων, μέχρι τον σχεδιασμό έμβιο-μηχανικών και βίο-ρομποτικών συστημάτων, στην κατανόηση βίο-δυναμικών, επιδημιολογικών, οικολογικών φαινομένων, το σχεδιασμό υλικών στο μικρο-νάνο επίπεδο. Οι νόμοι της Μηχανικής άλλωστε διέπουν διαφορετικές λειτουργίες και εφαρμόζονται στην αιχμή της έρευνας στην Μηχανική όπως έχει διαμορφωθεί στον 21<sup>ο</sup> αιώνα και περιλαμβάνει την μελέτη φαινομένων και συστημάτων όπως είναι η μετακίνηση των οργανισμών στην ξηρά, η αυτό-οργάνωση που εμφανίζεται στην πτήση σμήνους πτηνών και εντόμων, η πλεύση ψαριών, η κυκλοφορία του αίματος στον ζωντανό οργανισμό την διαίρεση του κυττάρου, η λειτουργία του νευρικού συστήματος, η δημιουργία μικρο-διατάξεων και μικρο-καψουλών για την στοχευμένη αντιμετώπιση ασθενειών όπως είναι ο καρκίνος, η συστηματική μελέτη και μοντελοποίηση σεισμικών φαινομένων.

Εδώ μπαίνει το ερώτημα: Πώς η Μηχανική, οι νόμοι της οποίας αναδείχθηκαν εδώ και αιώνες δεν έχει εξαντλήσει τον εαυτό της και δεν έχει αναχθεί σε ένα σύνολο προκαθορισμένων κανόνων και περιοχών μελέτης; Πού «κρύβεται» η σύνδεση της Μηχανικής με άλλες επιστήμες και ποιος είναι ο συνδετικός κρίκος; Πρώτα από όλα κανένα σύνολο νόμων της επιστήμης δεν μπορεί να εξαντλήσει το περιεχόμενο της. Θα ήταν σα να ζητάμε π.χ. από όλους, να γίνουν ποιητές και μουσικοσυνθέτες επειδή υπάρχουν κανόνες γραφής των ποιημάτων και μουσικής. Επίσης στην εξέλιξη της Μηχανικής σημαντικό ρόλο παίζουν τα Μαθηματικά τα οποία είναι αναπόσπαστο μέρος της Μηχανικής, χάρις στα οποία η μελέτη των προβλημάτων γίνεται με συστηματικό και αξιωματικό τρόπο. Ακόμα τα Μαθηματικά πολλές φορές συμβάλλουν στην εξέλιξη της Μηχανικής προς κατευθύνσεις που αρχικά δεν διαφαίνονται. Επίσης πολλές φορές συμβαίνει και το αντίστροφο, όταν προβλήματα της Μηχανικής δίνουν το ερέθισμα και την δυνατότητα ερμηνείας πολλών Μαθηματικών περιοχών που δεν θα είχαν αναπτυχθεί αλλιώς.

Ένας κλάδος της μηχανικής είναι η υπολογιστική ρευστομηχανική, η οποία εξετάζει τη ροή Αντιδρώντων Αερίων, την αλληλεπίδραση μηχανισμών μεταφοράς και χημείας, τους μηχανισμούς παραγωγής ατμοσφαιρικών ρύπων, την κατασκευή απλοποιημένων χημικών κινητικών μηχανισμών για σύνθετα καύσιμα και τα προχωρημένα μοντέλα τύρβης.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί ότι μια από τις εφαρμογές της υπολογιστικής ρευστομηχανικής είναι η ναυτιλία και πιο συγκεκριμένα η ναυπηγική και η ναυπηγοεπισκευαστική βιομηχανία. Τα τελευταία χρόνια οι επενδύσεις των ασιατικών χωρών, δημιούργησαν πλεονάζουσα παραγωγική ικανότητα με άμεσο αντίκτυπο την πτώση των προσφερόμενων τιμών των ναυπηγείων, σε επισκευές και κατασκευές σκαφών σε σύγκριση με τα ελληνικά και διεθνή δεδομένα. Τα ναυπηγεία της ανατολής σήμερα έχουν ήδη εξασφαλίσει εργασίες για τη διάρκεια της επόμενης δεκαετίας. Έτσι και λόγω του γεγονότος ότι στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης λειτουργούν κανόνες ελεύθερης αγοράς με μη απαγόρευση ή περιορισμό των επιδοτήσεων και ενισχύσεων, δημιουργήθηκε μια ανισορροπία στην παγκόσμια αγορά προς όφελος των υπό ανάπτυξη ασιατικών

χωρών. Παρατηρήθηκε μια εντυπωσιακή αύξηση του μεριδίου αγοράς των ασιατικών χωρών και μια ταυτόχρονη πτώση των ναυπηγείων των χωρών της Ευρώπης. Για να αντιμετωπιστεί η κατάσταση, απαιτούνται κυρίως τα ακόλουθα: Δραστική μείωση του κόστους και του χρόνου παραγωγής, διατήρηση της ποιότητας σε υψηλά επίπεδα και φυσικά όλα αυτά με προϋπόθεση η οποιαδήποτε δράση να είναι φιλική προς το περιβάλλον. Κατ' επέκταση, προς επίτευξη όλων των παραπάνω στόχων απαιτούνται δραστικές αλλαγές σχεδόν σε κάθε φάση σχεδιασμού, κατασκευής και συντήρησης των πλοίων που επισκέπτονται τα ναυπηγεία της χώρας.

## Σκοπός της εργασίας

Η συγκεκριμένη εργασία έχει ως σκοπό να παρουσιάσει την υπολογιστική ρευστομηχανική στη ναυτιλία. Ποιο συγκεκριμένα η εργασία αυτή θα ασχοληθεί με τα εξής:

- ✓ Τί είναι CFD (Computational Fluid Dynamics) (Υπολογιστική Ρευστομηχανική)
- ✓ Πού χρησιμοποιείται
- ✓ Πώς γίνεται η λύση των εξισώσεων
- ✓ Ποιά η φιλοσοφία του
- ✓ Ποιές εταιρίες υπάρχουν (π.χ. \* Ansys - Fluent, \* CFX κ.ά.)
- ✓ Γενικές εφαρμογές:
  - Αεροναυτιλία
    - Κατασκευή Αεροπλάνων
  - Ναυπηγεία
    - Κατασκευή Πλοίων
  - Ιατρική
    - Κατασκευή συστημάτων αιμοκάθαρσης για νεφροπαθείς
  - Σχεδιασμός αντλιών
    - Έλεγχος ροής του υγρού για αποφυγή σπηλαιώσης
  - Μηχανολογία
    - Έλεγχος μηχανημάτων και εξαρτημάτων για αντοχή σε βάθος χρόνου και σε διάφορες συνθήκες χρήσης
- ✓ Ειδικές εφαρμογές
- ✓ Ναυπηγεία (Χρησιμότητα, Εφαρμογές, Λύσεις κ.ά.)
- ✓ Σχεδιασμός αντλιών (Σπηλαιώση κ.ά.)
- ✓ Σχεδιασμός δικτύων (Εφαρμογές, Λύσεις κ.ά.)
- ✓ Σχεδιασμός ελίκων (Εφαρμογές, Λύσεις κ.ά.)
- ✓ Ροή γύρω από έλικα πλοίου κ.ά.

Η εργασία αυτή θα πραγματοποιηθεί με τη μέθοδο της βιβλιογραφικής επισκόπησης, ώστε να έχουμε μια ολοκληρωμένη και πλήρη εικόνα για την υπολογιστική ρευστομηχανική στη ναυτιλία.

## **Δομή της εργασίας**

Η παρούσα εργασία αποτελείται από τρία κεφάλαια. Το πρώτο κεφάλαιο αφορά στην υπολογιστική ρευστομηχανική και αναλύει το τί είναι η υπολογιστική ρευστομηχανική και που χρησιμοποιείται. Το δεύτερο κεφάλαιο αφορά στην υπολογιστική διαδικασία που ακολουθείται για την επίλυση ενός προβλήματος με τη βοήθεια της υπολογιστικής ρευστομηχανικής. Γίνεται αναφορά στο υπολογιστικό πλέγμα, στα βήματα για την ανάπτυξη αριθμητικού αλγορίθμου, για τις εξισώσεις ροής. Περιγράφεται η γεωμετρία του πεδίου ροής και το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με τη διακριτοποίηση του πεδίου ροής με χρήση των πεπραγμένων στοιχείων. Το τρίτο κεφάλαιο αφορά στην υπολογιστική ρευστομηχανική και τη ναυτιλία και αναφέρει ενδεικτικές εφαρμογές. Πιο συγκεκριμένα γίνεται λόγος για την εφαρμογή της στην ναυπηγική αρχιτεκτονική, στους ναυτικούς κινητήρες, για την επίλυση του φαινομένου της σπηλαίωσης αλλά για τους έλικες ενός πλοίου. Η εργασία ολοκληρώνεται με τα συμπεράσματα.



# Κεφάλαιο 1: Υπολογιστική Ρευστομηχανική / Computational Fluid Dynamics

Το κεφάλαιο αυτό αφορά στην Υπολογιστική Ρευστομηχανική /Computational Fluid Dynamics. Για το λόγο αυτό θα εξηγήσουμε τι είναι το CFD, που χρησιμοποιείται, πώς χρησιμοποιείται, ποιος είναι ο ρόλος του στη σύγχρονη Υπολογιστική Ρευστομηχανική και θα ολοκληρώσουμε το κεφάλαιο με το τι δεν μπορεί να κάνει το CFD.

## 1.1 Τι είναι η Υπολογιστική Ρευστομηχανική

Τα φυσικά χαρακτηριστικά μίας οποιασδήποτε ροής ρευστού υπόκεινται στις ακόλουθες τρεις θεμελιώδεις αρχές: α) διατήρηση της μάζας, β)  $F = m \cdot a$  (ο δεύτερος Νόμος του Νεύτωνα) και γ) η διατήρηση της ενέργειας (Φάτσης, 2012).

Αυτές οι θεμελιώδεις αρχές μπορούν να εκφραστούν υπό τη μορφή εξισώσεων που στην πιο γενική τους μορφή είναι συνήθως μερικές διαφορικές εξισώσεις.

Η Υπολογιστική Ρευστομηχανική (Computational Fluid Dynamics ή CFD στο εξής) είναι εν μέρει η τέχνη της αντικατάστασης των μερικών αυτών διαφορικών εξισώσεων με αριθμούς και η ολοκλήρωση αυτών στο χώρο και στο χρόνο για την απόκτηση μίας τελικής μαθηματικής περιγραφής του πλήρους πεδίου ροής που ενδιαφέρει να μελετηθεί. Αντιλαμβάνεται κανείς ότι CFD σημαίνει μελέτη της φυσικής ροής των υγρών και της μεταφοράς θερμότητας με τη χρήση υπολογιστικών μεθόδων (Φάτσης, 2012).

Το παραπάνω δεν είναι μία πλήρης ερμηνεία του CFD διότι υπάρχουν κάποια προβλήματα που επιτρέπουν την άμεση λύση του πεδίου ροής χωρίς την ολοκλήρωση του στο χώρο και χρόνο ενώ υπάρχουν και περιπτώσεις που εμπεριέχουν ολοκληρωμένες διαφορικές εξισώσεις αντί για μερικές.

Παρ' όλα αυτά όλα τα περισσότερα προβλήματα βιομηχανικών εφαρμογών της υπολογιστικής ρευστομηχανικής απαιτούν τον χειρισμό και τη λύση αριθμών. Το τελικό προϊόν του CFD είναι μία συλλογή αριθμών σε αντίθεση με μία κλειστού τύπου αναλυτική λύση που και αυτή εμφανίζει μία ποσοτική περιγραφή του προβλήματος (Φάτσης, 2012).

Βέβαια το μέσο το οποίο επέτρεψε την ανάπτυξη του CFD είναι ο υπολογιστής. Οι λύσεις του CFD απαιτούν τον επαναληπτικό προσδιορισμό χιλιάδων ή και εκατομμυρίων αριθμών έργο αδύνατο για τον άνθρωπο χωρίς τον υπολογιστή.

Έτσι η ανάπτυξη του CFD και των εφαρμογών του σε προβλήματα ιδιαίτερα πολύπλοκα ή λεπτομερή είναι απόλυτα συνδεδεμένα με την ανάπτυξη του hardware των υπολογιστών ιδιαίτερα

στο πεδίο της μνήμης και της ταχύτητας. Για το λόγο αυτό η ανάγκη του CFD λειτούργησε σαν κινητήρια δύναμη για την ανάπτυξη των υπολογιστών (Φάτσης, 2012).

## 1.2 Πού χρησιμοποιείται το CFD

Η Μηχανική των ρευστών αποτελεί μια βασική επιστήμη στην οποία θεμελιώνονται εφαρμοσμένες επιστήμες και τεχνικές για την μελέτη του φυσικού περιβάλλοντος και τον σχεδιασμό πλήθους έργων, προϊόντων, συστημάτων και διαδικασιών του ανθρωπογενούς περιβάλλοντος.

Αναφέρουμε ενδεικτικά μερικές από τις πιο σημαντικές εφαρμογές της υπολογιστικής ρευστομηχανικής στο σχεδιασμό και την μελέτη έργων και συστημάτων που ενδιαφέρουν τους μηχανικούς:

1. Σχεδιασμός δικτύων ύδρευσης οικισμών.
2. Σχεδιασμός δικτύων άρδευσης.
3. Σχεδιασμός αποσταγιστικών δικτύων.
4. Μελέτη της μεταφοράς ρυπαντών σε φυσικούς ή τεχνητούς αποδέκτες ( ποτάμια, λίμνες, ταμιευτήρες, θάλασσες, ατμόσφαιρα, έδαφος) και σχεδιασμός συστημάτων διάχυσης και διασποράς ώστε να επιτευχθεί η απαιτούμενη αραίωση.
5. Σχεδιασμός: α) πτερύγων αεροπλάνων υψηλής ανωστικής δύναμης (lift) και χαμηλής αντίστασης β) πλοίων και οχημάτων χαμηλής αντίστασης και υψηλής ευστάθειας γ) ψηλών κτιρίων, ελαφρών μεταλλικών κατασκευών και γεφυρών όπου οι ανεμοπιέσεις αποτελούν ιδιαίτερα επικίνδυνα φορτία.
6. Μελέτη της διάδοσης κυμάτων στην επιφάνεια της θάλασσας και σχεδιασμός λιμενικών έργων καθώς και έργων προστασίας των ακτών από διάβρωση.
7. Σχεδιασμός βιομηχανικών διεργασιών όταν τα υλικά βρίσκονται σε υγρή ή αέρια κατάσταση.
8. Σχεδιασμός δικτύων αποχέτευσης.
9. Σχεδιασμός μονάδων καθαρισμού αστικών λυμάτων και βιομηχανικών αποβλήτων.
10. Σχεδιασμός στροβιλομηχανών. ( <http://www.cd-adapco.com/>).

Θα πρέπει να προστεθεί ότι πέρα από την οικονομική πλευρά το CFD προσφέρει τη δυνατότητα συλλογής πληροφοριών του πεδίου ροής, που είναι σε μερικές περιπτώσεις δύσκολο να μετρηθεί. Βέβαια εννοείται τα αποτελέσματα του CFD είναι ακριβή και οικονομικά. Τα αποτελέσματα του CFD είναι αξιόπιστα στο βαθμό που το φυσικό μοντέλο ερμηνεύεται από τις διαφορετικές εξισώσεις και τις οριακές συνθήκες και άρα μπορεί να εμπεριέχεται σφάλμα ιδιαίτερα στις τυρβώδεις ροές (Φάτσης, 2012).

Επομένως μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την διενέργεια μαθηματικών και υπολογιστικών πειραμάτων για να βοηθηθεί η μελέτη των βασικών χαρακτηριστικών της ροής. Τα υπολογιστικά πειράματα είναι ευθέως ανάλογα με τα πραγματικά πειράματα (Φάτσης, 2012).

Το ερώτημα επομένως που δημιουργείται είναι τι τύπους ροής μπορεί να χειριστεί με επάρκεια το CFD; Το CFD μπορεί να χειριστεί:

- ✓ Ροϊκά πεδία γύρω από δορυφόρους.
- ✓ Ροές πάνω από ακτινική πτέρυγα.
- ✓ Μη σταθερές, παλινδρομικές ροές υπερηχητικών ροών στην είσοδο μηχανών.
- ✓ Ροϊκό πεδίο αυτοκινήτου που μεταφέρει trailer.
- ✓ Υπερηχητικές ροές καύσης σε αεριοστρόβιλους (Φάτσης, 2012).

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονίσουμε ότι υπάρχουν εταιρίες που χρησιμοποιούν την υπολογιστική ρευστομηχανική στην κατασκευή αντλιών, σωλήνων και δικτύων όπως είναι Ansys - Fluent, CFX, Plant management, κ.ά..

## Κεφάλαιο 2: Υπολογιστική διαδικασία

Το κεφάλαιο αυτό αφορά στη λύση των εξισώσεων στη υπολογιστική ρευστομηχανική. Συγκεκριμένα αναλύονται τα υπολογιστικά δίκτυα, τα βήματα για την ανάπτυξη αριθμητικού αλγορίθμου και περιγράφεται η γεωμετρία του πεδίου ροής.

### 2.1 Υπολογιστικό πλέγμα

Η αριθμητική επίλυση οπουδήποτε προβλήματος υπολογιστικής ρευστομηχανικής απαιτεί καταρχάς την περιγραφή της γεωμετρίας του προβλήματος και στη συνέχεια την κατασκευή του υπολογιστικού πεδίου το οποίο συντίθεται από πεπερασμένα στοιχεία ή όγκους. Η κατασκευή τέτοιων πλεγμάτων είναι σημαντική εργασία, που πρέπει να εκτελεστεί πριν την επίλυση του προβλήματος. Ο τρόπος με τον οποίο θα αναγνωσθούν από το πρόγραμμα τα πεπερασμένα στοιχεία ή οι όγκοι είναι θέμα υπολογιστικής αναλύσεως. Υπάρχουν κατά βάση δυο τεχνικές δημιουργίας υπολογιστικών δικτύων, τα δομημένα και τα μη-δομημένα.

Τα δομημένα βασίζονται σε καμπυλωμένες συντεταγμένες οι οποίες προσδιορίζονται επί των ορίων του προβλήματος. Τα δίκτυα αυτά είναι δυνατόν να αποτελέσουν από μη ορθογωνικές υπολογιστικές γραμμές και χώρος ροής να αποτελείται από πολλαπλούς χώρους. Οι κορυφές του πλέγματος μπορούν να κατανεμηθούν επιλεκτικά κατά μήκος ακμών με στόχο ή την καλύτερη προσέγγιση σε έντονα μεταβαλλόμενες γεωμετρίες ή τη μείωση του συνολικού αριθμού των υπολογιστικών στοιχείων. Το πρόβλημα που παρουσιάζει το δομημένο πλέγμα εντοπίζεται στη δυσκολία καθορισμού των συνδέσμων ανάμεσα στα γειτονικά στοιχεία όταν πρόκειται για σύνθετες γεωμετρίες και μεταβλητά σημεία πλέγματος. Το δομημένο πλέγμα όμως πλεονεκτεί, γιατί εύκολα αποθηκεύονται τα στοιχεία του στον υπολογιστή και με την ίδια ευκολία γίνονται οι υπολογισμοί.

Τα μη δομημένα κατασκευάζονται με την τοποθέτηση κόμβων σε όλα τα εσωτερικά και εξωτερικά όρια της γεωμετρίας του προβλήματος. Η κατασκευή των πεπερασμένων υπολογιστικών στοιχείων ή όγκων γίνεται με τη χρήση της τεχνικής τριγωνοποίησης Delaunay. Το κύριο πλεονέκτημα της ανάπτυξεως και χρήσεως μη-δομημένων τεχνικών είναι η πιθανή αυτοματοποίηση στη διαδικασία διακριτοποίησης σύνθετων γεωμετρικών προβλημάτων ροής και ως εκ τούτου η πυκνωση ή η αραιωση του δικτύου στην περιοχή που επιθυμούμε κατά τη διαδικασία της επίλυσεως (Μπαιρακτάρης, 2006).

### 2.2 Βήματα για την ανάπτυξη αριθμητικού αλγόριθμου

Τα απαιτούμενα βήματα για την ανάπτυξη και εφαρμογή αριθμητικής προσομοίωσης προβλημάτων Μηχανικής Ρευστών είναι η αναγνώριση του προβλήματος, η προσομοίωση του προβλήματος και η επίλυσή του.

Πρώτα από όλα αναγνωρίζεται το πρόβλημα και κατανοείται το μελετητικό ή ερευνητικό πρόγραμμα. Στη συνέχεια καθορίζονται οι επί μέρους αντικειμενικοί σκοποί και τα αναμενόμενα αποτελέσματα. Υστέρα σημειώνονται τα πλεονεκτήματα και η οικονομική θεώρηση αναπτύξεως και χρήσεως αριθμητικών προσομοιώσεων. Συλλαμβάνονται και σχεδιάζονται τα όρια της προσομοιώσεως και ελέγχεται η αξιοπιστία του αριθμητικού προσομοιωτή (Μπαιρακτάρης, 2006).

Στη συνέχεια προχωρούμε στην προσομοίωση του προβλήματος. Αρχικά επιλέγονται οι ανεξάρτητες και εξαρτημένες μεταβλητές του προβλήματος. Στη συνέχεια επιλέγεται το είδος της προσομοιώσεως και των σχετικών αριθμητικών προσεγγίσεων και καθορίζονται οι βασικές εξισώσεις, οι αρχικές συνθήκες ροής και οι οριακές συνθήκες του προβλήματος. Τέλος γίνονται παραδοχές και αναπτύσσονται τα επί μέρους προγράμματα για την ολοκλήρωση του προβλήματος.

Τέλος προχωρούμε στην επίλυση του προβλήματος. Πρώτα από όλα, στο στάδιο αυτό, επιλέγεται η κατάλληλη τεχνική επίλυσεως ή το κατάλληλο έτοιμο διαθέσιμο λογισμικό. Στη συνέχεια χρησιμοποιούνται τα κατάλληλα υπολογιστικά συστήματα και επαληθεύονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών με ακριβείς αναλυτικές λύσεις εφόσον αυτές υπάρχουν ή άλλες αριθμητικές τεχνικές ή πειραματικά αποτελέσματα ή οπτικά αποτελέσματα. Τέλος παρουσιάζονται τα υπολογιστικά αποτελέσματα, εξάγονται συμπεράσματα και σημειώνονται για περαιτέρω μελέτη (Μπαιρακτάρης, 2006).

## 2.3 Εξισώσεις ροής

Για να λυθούν τα προβλήματα ρευστομηχανικής χρησιμοποιούνται τρεις νόμοι της Δυναμικής των Ρευστών. Οι τρεις νόμοι είναι, η διατήρηση της συνέχειας της μάζας, η διατήρηση της ορμής και η διατήρηση της ενέργειας.

$$\text{Διατήρηση της μάζας:} \quad m_1 + m_2 = M$$

$$\text{Διατήρηση της ορμής:} \quad m_1 u_1 + m_2 u_2 = MV$$

$$\text{Διατήρηση της ενέργειας:} \quad U_1 + K_1 = U_2 + K_2$$

όπου  $U_1$ η συνολική δυναμική ενέργεια όλων των σωμάτων τη στιγμή 1,  $U_2$ η συνολική δυναμική ενέργεια όλων των σωμάτων τη στιγμή 2,  $K_1$ η συνολική κινητική ενέργεια όλων των σωμάτων τη στιγμή 1 και  $K_2$ η συνολική κινητική ενέργεια όλων των σωμάτων τη στιγμή 2

Στην ρευστομηχανική, δεν είναι εφικτό να ακολουθήθει η κίνηση των μεμονωμένων ατόμων ή μορίων. Αντ' αυτού, πρέπει να μελετήσουμε ένα σωματίδιο όπου σε κάθε σημείο του έχει εκχωρηθεί ο μέσος όρος των ατόμων που το αποτελούν. Συγκεκριμένα, έχει μια πυκνότητα  $\rho$  και  $V$  ταχύτητος που εξαρτώνται από τη χρονική στιγμή  $t$  και  $r$  θέσης. Η ορμή ανά μονάδα όγκου είναι  $\rho v$ .

$$-\nabla p + \rho \mathbf{g} = 0.$$

Στην περίπτωση αυτή η επιτάχυνση δεν είναι δεν δίνεται από τη σχέση  $\partial v / \partial t$ , επειδή το υγρό δέχεται τις μεταβολές του όγκου σε σχέση με το χρόνο. Έτσι δίνεται με το εξής:

$$\frac{D}{Dt} \equiv \frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla .$$

Η εξίσωση αυτή μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε υλικό. Πρέπει να τονιστεί ότι ανά μονάδα όγκου, ο ρυθμός μεταβολής της ορμής είναι ίσος με  $\rho Dv / dt$ . Αυτό είναι ίση με την καθαρή δύναμη του ρευστού.

Οι δυνάμεις που μπορούν να αλλάξουν τη δυναμική ενός ρευστού περιλαμβάνουν την κλίση της πίεσης και της βαρύτητας, όπως παραπάνω. Στην απλούστερη περίπτωση, μια τάση διάτμησης  $\tau$ , που ασκείται από μια δύναμη παράλληλη προς την επιφάνεια του ρευστού, είναι ανάλογη με το ποσοστό της παραμόρφωσης ή ποσοστό παραμόρφωσης. Μια τέτοια τάση διατμήσεως παρουσιάζεται όταν το ρευστό έχει μια κλίση ταχύτητας, επειδή το υγρό κινείται ταχύτερα στη μία πλευρά από ό, τι άλλο. Εάν η ταχύτητα κατά τη διεύθυνση  $x$  αλλάζει ανάλογα με το  $Z$ , τότε η εφαπτόμενη δύναμη μεταβάλλεται κατά τη διεύθυνση  $X$  ανά μονάδα επιφάνειας κάθετα προς την κατεύθυνση  $z$ . Αυτό δίνεται από την εξίσωση:

$$\sigma_{zx} = -\mu \frac{\partial v_x}{\partial z} ,$$

όπου  $\mu$  είναι το ιξώδες. Αυτό είναι επίσης μια ροή, ή της ροής ανά μονάδα επιφάνειας, διαμέσου της επιφάνειας.

Συμπεριλαμβανομένης της επίδρασης ιξώδους, οι εξισώσεις ισορροπίας εξελίσσονται σε

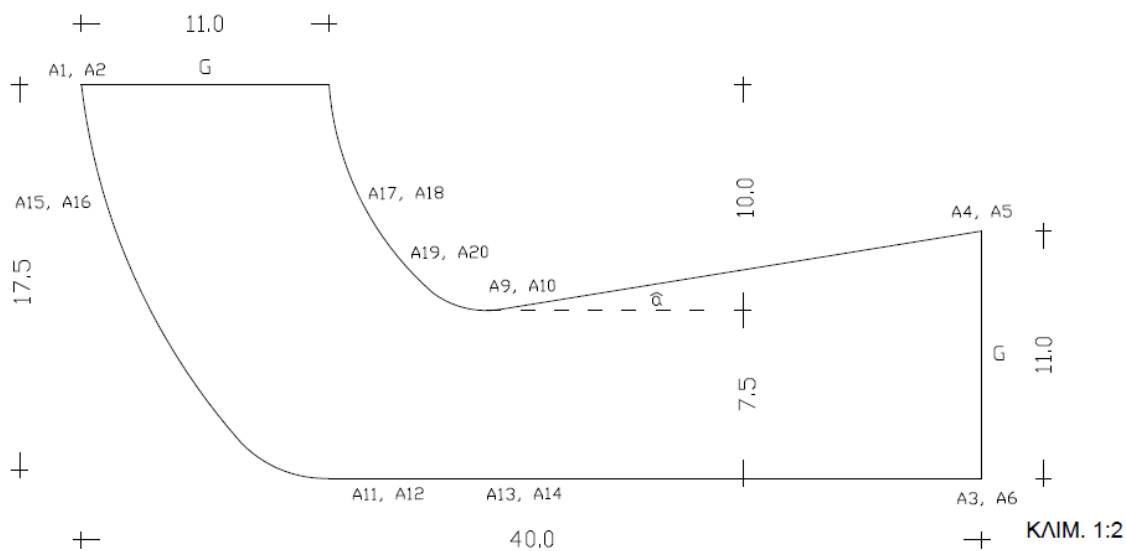
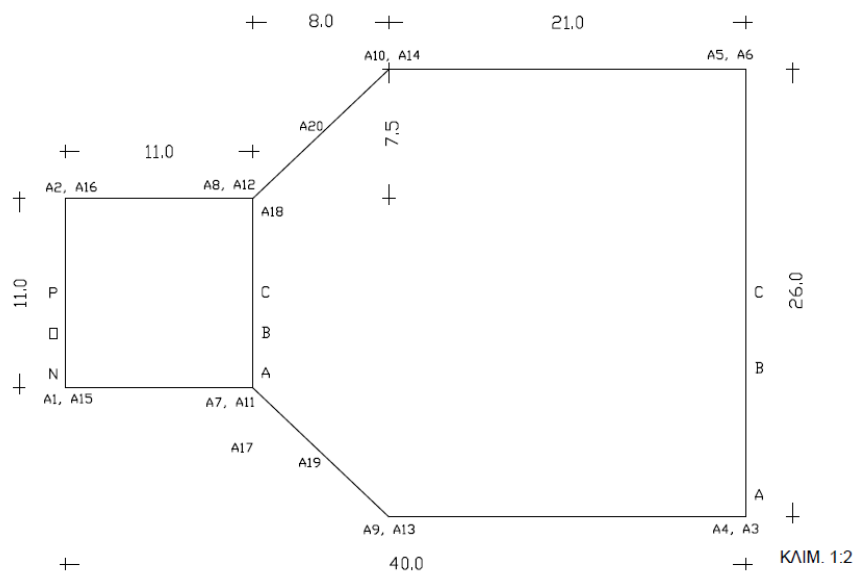
$$\rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \rho \mathbf{g} .$$

Για κάθε επιφάνεια με κανονική κατεύθυνση  $\mathbf{I}$  και δύναμη στην κατεύθυνση  $\mathbf{j}$ , υπάρχει ένα συστατικό  $\sigma_{ij}$ . Οι παραπάνω συνιστώσες συνθέτουν το τανυστή των τάσεων Cauchy  $\sigma$ , η οποία περιλαμβάνει τόσο την πίεση και διάτμηση. Η τοπική διατήρησης της ορμής εκφράζεται από την εξίσωση ορμής Cauchy:

$$\rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = \nabla \cdot \sigma + \mathbf{f} ,$$

## 2.4 Περιγραφή της γεωμετρίας του Πεδίου Ροής

Για την περιγραφή της γεωμετρίας του πεδίου ροής σε έναν αγωγό πλοίου για παράδειγμα χρησιμοποιούμε το λογισμικό Gambit. Το πεδίο ροής που εξετάζεται είναι ένας αγωγός φυγής, οι διαστάσεις του οποίου αναπτύσσονται παρακάτω



**Εικόνα 1** Διαστάσεις αγωγού

Στη συνέχεια παρατίθεται ο Πίνακας, όπου φαίνονται αναλυτικά οι συντεταγμένες των σημείων που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του αγωγού.

A/A	x	y	z
A1	0	0	0.175
A2	0	0.11	0.175
A3	0.4	-0.075	0
A4	0.4	-0.075	0.11
A5	0.4	0.185	0
A6	0.4	0.185	0.11
A7	0.11	0	0.175
A8	0.11	0.11	0.175
A9	0.19	-0.075	0.075
A10	0.19	0.185	0.075
A11	0.11	0	0
A12	0.11	0.11	0
A13	0.19	-0.075	0
A14	0.19	0.185	0
A15	0	0	0.11
A16	0	0.11	0.11
A17	0.11	0	0.11
A18	0.11	0.11	0.11
A19	0.15	-0.0375	0.08
A20	0.15	0.1475	0.08

**Πίνακας 1** Συντεταγμένες αγωγού

Αφού ορίσθηκαν οι συντεταγμένες, στη συνέχεια με τα σημεία αυτά σχηματίστηκαν γραμμές, οι οποίες φαίνονται στον Πίνακα 2 . Να σημειωθεί ότι οι L5, L6,L11, L16 και L17είναι καμπύλες γραμμές.

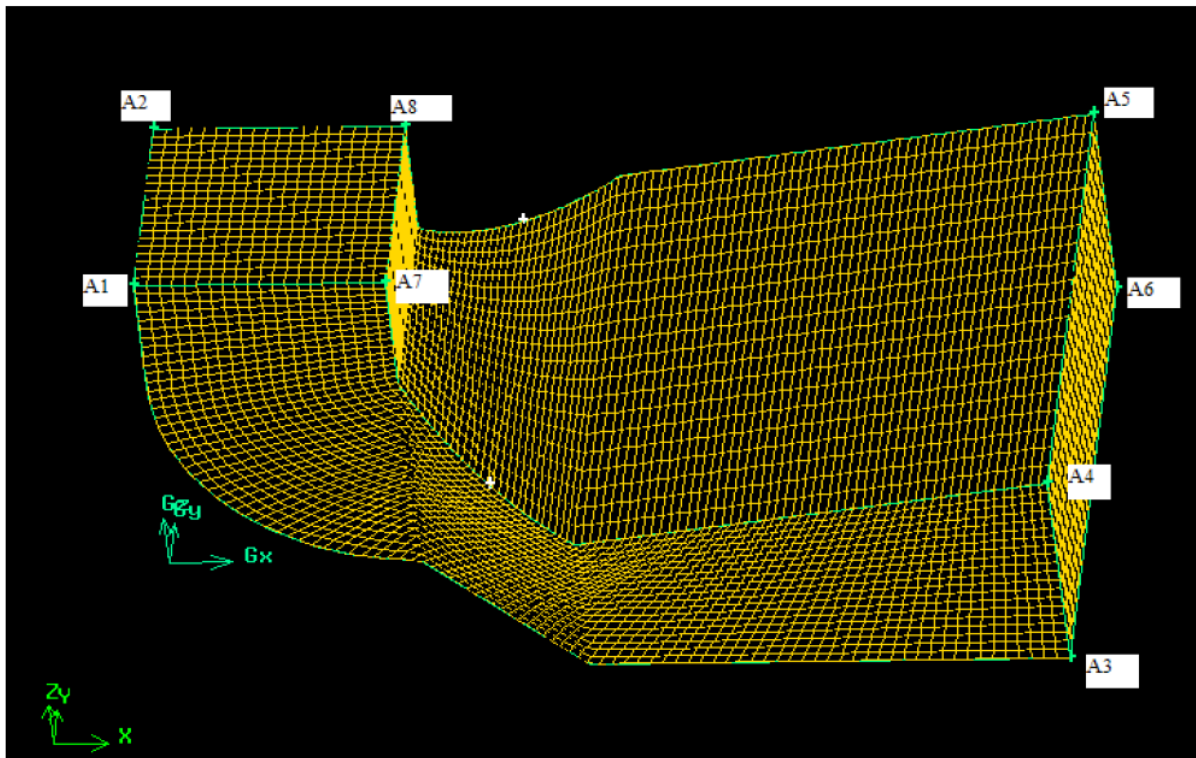


Α/Α ΓΡΑΜΜΩΝ	ΣΗΜΕΙΑ	Α/Α ΓΡΑΜΜΩΝ	ΣΗΜΕΙΑ
L1	A1A2	L17	A20A10
L2	A2A8	L18	A14A6
L3	A8A7	L19	A13A3
L4	A1A7	L20	A6A3
L5	A17A19	L21	A1A15
L6	A18A20	L22	A2A16
L7	A10A5	L23	A17A7
L8	A5A4	L24	A8A18
L9	A9A4	L25	A17A11
L10	A16A15	L26	A18A12
L11	A11A15	L27	A9A13
L12	A11A12	L28	A10A14
L13	A16A12	L29	A4A3
L14	A14A12	L30	A5A6
L15	A11A13	L31	A9A10
L16	A19A9	L32	A13A14

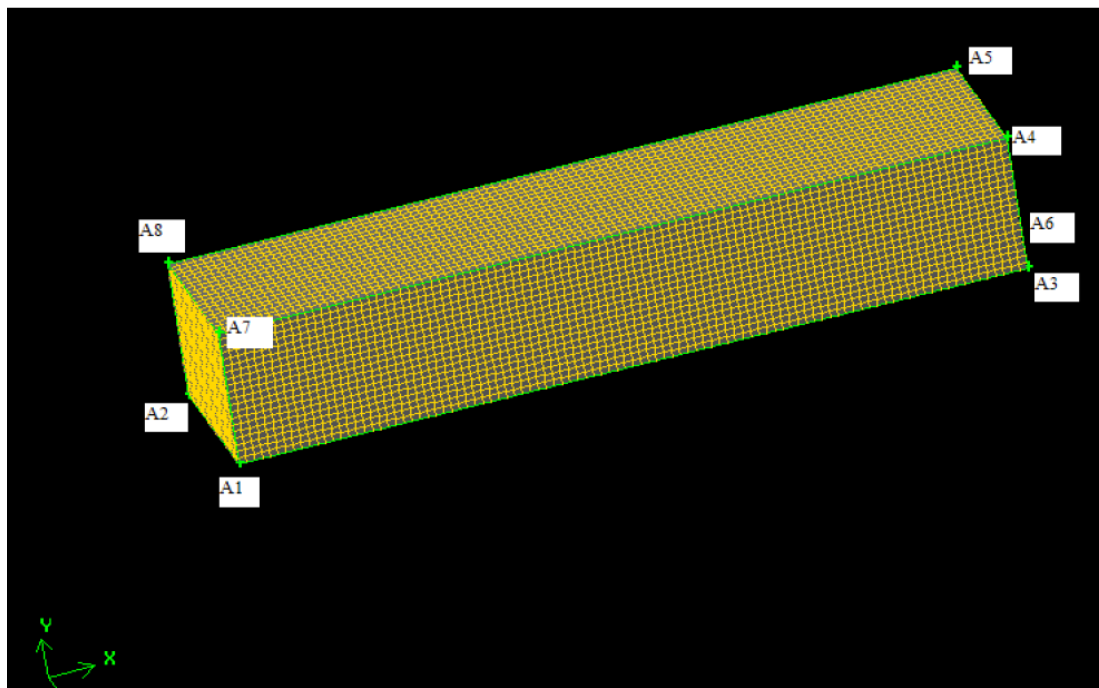
**Πίνακας 2** Γραμμές που προκύπτουν από την ένωση των σημείων

Ενώνοντας τις γραμμές του παραπάνω πίνακα σχηματίστηκαν οι επιφάνειες που έχουν ως εξής, οι δύο πλάγιες όψεις αποτελούνται από τέσσερις επιφάνειες, η πάνω πλευρά του αγωγού αποτελείται από τρεις επιφάνειες και η κάτω πλευρά από τέσσερις. Κατόπιν ενώθηκαν οι επιμέρους επιφάνειες σχηματίζοντας έξι συνολικά επιφάνειες. Τις δυο πλάγιες όψεις του αγωγού τις πάνω και κάτω πλευρές του αγωγού και τέλος δυο επιφάνειες: η είσοδος και η έξοδος του αγωγού. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι κάποιες επιφάνειες έχουν καμπύλη μορφή.

Από τις έξι επιφάνειες αυτές, δημιουργείται ο συνολικός όγκος του αγωγού και το υπολογιστικό δίκτυο φαίνεται στο Σχ. 1. Η τελική γεωμετρία τοπολογικά ισοδυναμεί με ένα ορθογώνιο αγωγό, Δηλαδή μπορεί να μετασχηματιστεί σε ορθογώνιο αγωγό (σχ. 2)



Σχήμα 1 Κασκευασθέν υπολογιστικό δίκτυο

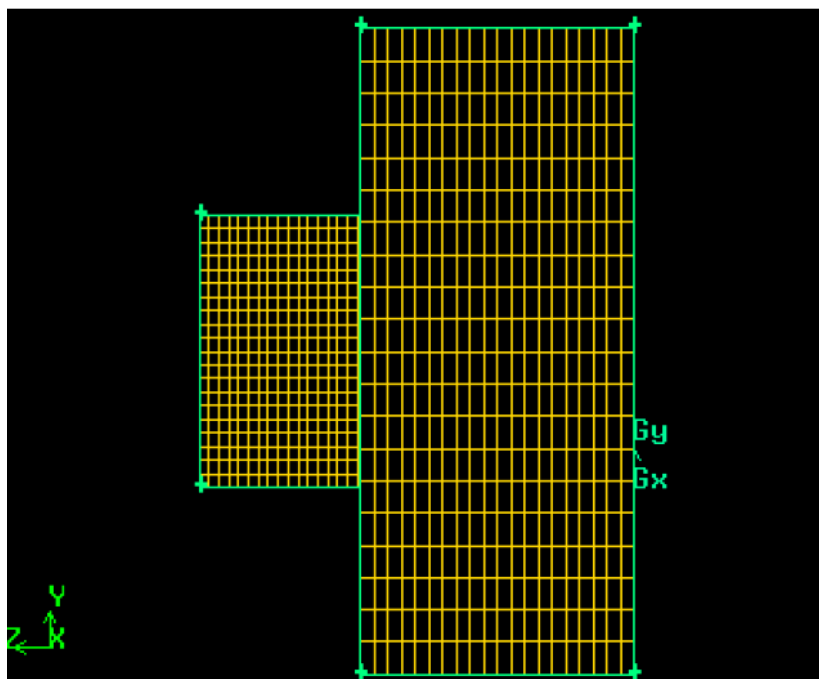


Σχήμα 2 Ορθογώνιος αγωγός με τον οποίο ισοδυναμεί η τελική γεωμετρία του αγωγού

## 2.5 Διακριτοποίηση του πεδίου ροής με χρήση των πεπερασμένων στοιχείων

Με χρήση του λογισμικού Gambit διακριτοποιείται το πεδίο ροής κάνοντας χρήση των πεπερασμένων στοιχείων. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του υπολογιστικού δικτύου είναι η Hex/Cooper, ενώ η διακριτοποίηση του πεδίου ροής έγινε με τη χρήση δομημένου

δικτύου και τα πεπερασμένα στοιχεία είναι εξάεδρα. Στη συνέχεια στη διατομή εισόδου έγινε διακριτοποίηση με 20x20 πεπερασμένα στοιχεία και 21x21 κόμβους. Η ίδια διακριτοποίηση έγινε και στη διατομή εξόδου, ενώ κατά μήκος του αγωγού έγινε διακριτοποίηση με τη χρήση 101 υπολογιστικών κόμβων. Οπότε το τελικό πλέγμα αποτελείται από  $20 \times 20 \times 100 = 40000$  πεπερασμένα στοιχεία και  $21 \times 21 \times 21 = 44541$  υπολογιστικούς κόμβους. Το πλέγμα που δημιουργείται από τη διακριτοποίηση αυτή, σε μια του λεπτομέρεια φαίνεται στο Σχήμα 3.



**Σχήμα 3** Λεπτομέρεια του πλέγματος, στη διατομή εξόδου του αγωγού, από τη διακριτοποίηση του πεδίου ροής

Γίνεται επομένως κατανοητό ότι για να επιλύσουμε ένα πρόβλημα στην ναυτιλία με τη βοήθεια της υπολογιστικής ρευστομηχανικής ακολουθούμε τα παρακάτω βήματα (ANSYS):

1. Περιγραφή Προβλήματος [Στο οποίο γίνεται το Σκαρίφημα, Δεδομένα, Εξισώσεις, κλπ.]
2. Γεωμετρία [Στην οποία γίνεται ο σχεδιασμός του προβλήματος, κλπ.]
3. Δημιουργία Υπολογιστικού Πλέγματος
4. Εισαγωγή Φυσικών Παραμέτρων, Επιλογή Εξισώσεων Επίλυσης, Οριακές Συνθήκες, Συνθήκες Ροής.
5. Επίλυση Προβλήματος [Ανάλυση Δεδομένων]
6. Αποτελέσματα [Αξιολόγηση και Παρουσίασή τους]
7. Επαλήθευση – Επικύρωση Αποτελεσμάτων

## Κεφάλαιο 3: Υπολογιστική ρευστομηχανική και Ναυτιλία (ενδεικτικές εφαρμογές)

Η σημασία των ρευστών για τον τομέα της ναυτιλίας είναι τεράστια. Εκτός από τα ζητήματα που σχετίζονται με την άνοση, την πλεύση και την κίνηση του πλοίου στη θάλασσα, το ίδιο το πλοίο αποτελεί μία σχετικά αυτόνομη παραγωγική μονάδα, στην οποία συναντάμε πολλά είδη ρευστών (νερό διαφόρων χρήσεων, καύσιμα, λάδια, ατμό, αέρα κ.λπ.). Οι σωληνώσεις και τα μηχανήματα διακινήσεως αυτών των ρευστών δεν περιορίζονται μόνο στο μηχανοστάσιο, αλλά εκτείνονται σε όλο το πλοίο. Η μελέτη και η κατανόηση επομένως της συμπεριφοράς των ρευστών είναι εξαιρετικά σημαντική για το Μηχανικό.

Μία αποτελεσματική προσέγγιση που έχει αναπτυχθεί για τον υπολογισμό της ολικής αντίστασης των πλοίων βασίζεται στην αποσύζευξη του προβλήματος. Η ελεύθερη επιφάνεια υπολογίζεται από έναν κώδικα δυναμικής ροής, και στη συνέχεια οι εξισώσεις του συνεκτικού ρευστού επιλύονται κάτω απ' αυτήν.

Αυτή η υβριδική διαδικασία είναι σημαντικά ταχύτερη από την επίλυση του πλήρους προβλήματος με τις έως τώρα γνωστές μεθόδους (surface tracking & surface capturing).

Υπάρχουν πολλές μέθοδοι που υιοθετούν αυτήν τη λογική οι οποίες διαφέρουν στον τρόπο επίλυσης τόσο του δυναμικού όσο και του συνεκτικού προβλήματος. Σε κάθε περίπτωση η ελεύθερη επιφάνεια που προκύπτει από τη δυναμική λύση αγνοεί τις επιδράσεις της συνεκτικότητας στις περιοχές της πρύμνης και του ομόρου.

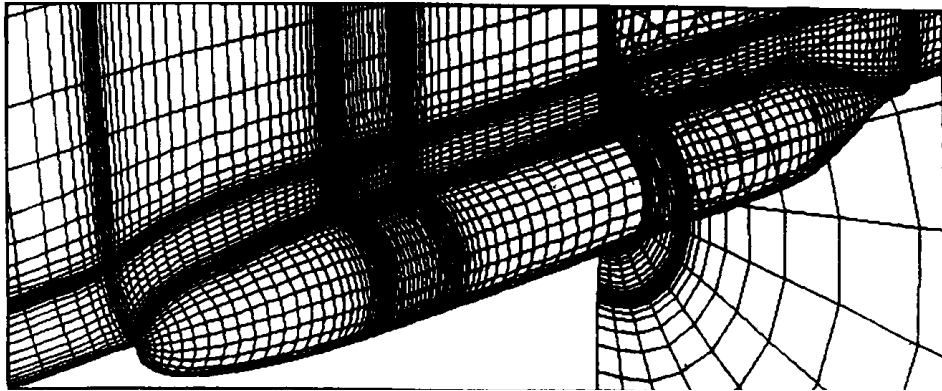
Εξάλλου είναι αδύνατο, μέχρι σήμερα, να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της θραύσης των κυματισμών που εμφανίζεται γύρω από την πλώρη σε υψηλούς αριθμούς Froude. Συνεπώς η εφαρμοσιμότητα της μεθόδου εξαρτάται άμεσα από αυτές τις επιδράσεις. Τα πλοία συχνά δοκιμάζονται στην δεξαμενή του ΕΜΠ και η συνήθης απαίτηση είναι η βελτίωση των γραμμών στην πλώρη ή την πρύμνη, έτσι ώστε να επιτύχουν υψηλότερη ταχύτητα.

Έχουν συνήθως μικρό συντελεστή γάστρας το οποίο ισοδυναμεί με ομαλές γραμμές στην περιοχή της πρύμνης το οποίο με την σειρά του επιτρέπει την εφαρμογή του κλασικού μοντέλου τύρβης με αξιοπιστία.

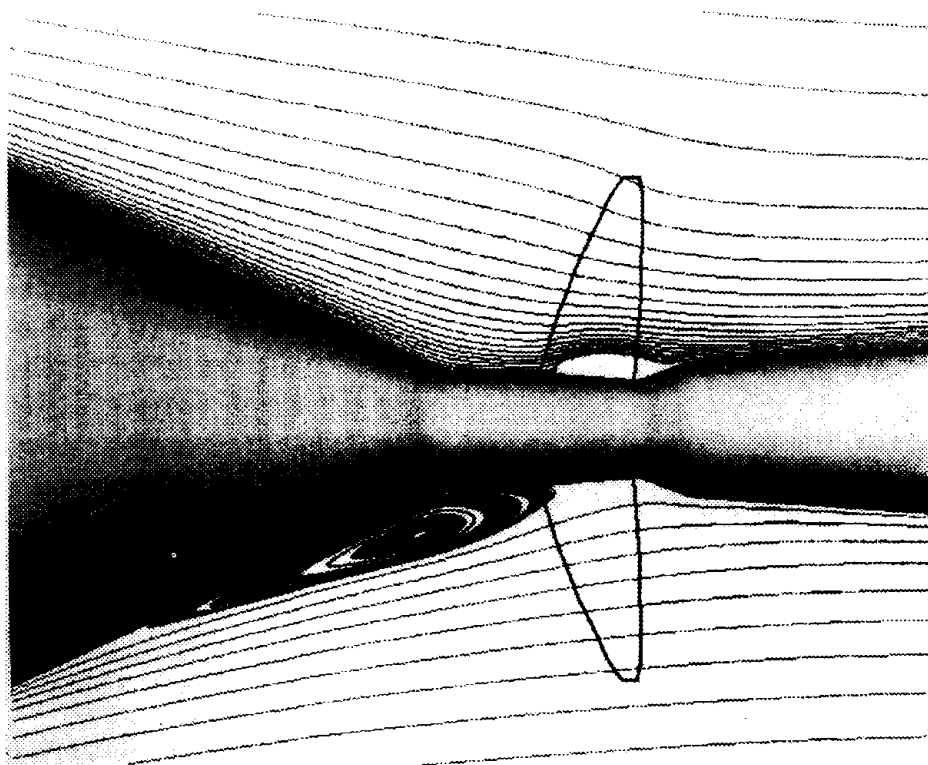
### 3.1 Εφαρμογές στην ναυπηγική αρχιτεκτονική, το παράδειγμα ενός υποβρυχίου

Ένα παράδειγμα μιας εφαρμογής CFD για υποβρύχια απεικονίζεται στο εικόνα 4 και 5. Η εικόνα 4 παρουσιάζει το πολυζωνικό πλέγμα που χρησιμοποιείται για τους υπολογισμούς της ροής πάνω από το κύτος ενός υποβρυχίου. Για να λυθεί το πρόβλημα της ροής των υγρών, συμπεριλαμβανομένης και της τύρβης χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις Navier. Στην εικόνα 5 παρουσιάζονται ορισμένα

αποτελέσματα. Στην ουσία αυτό που παρουσιάζουν οι εικόνες είναι ένα παράδειγμα ενός αριθμητικού πειράματος που ακολουθεί τη φιλοσοφία της επίλυσης προβλήματος με τη βοήθεια της υπολογιστικής ρευστομηχανικής (Anderson, 1995).



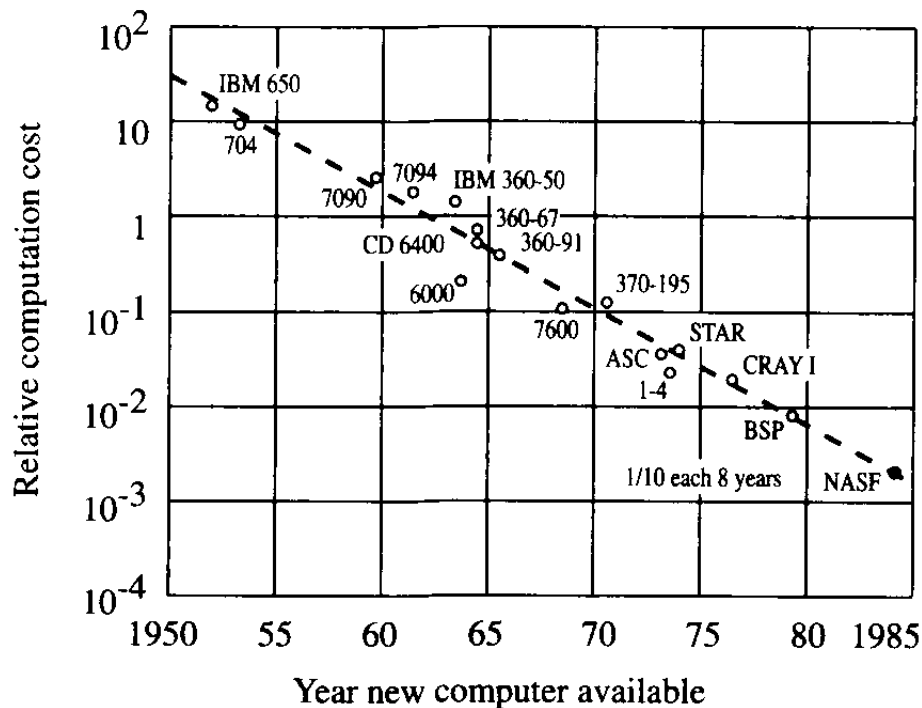
**Εικόνα 4** Δίκτυο για τον υπολογισμό της ροής του νερού στο κύτος του υποβρυχίου



**Εικόνα 5** Σχέδιο προσομοίωσης στην πρύμνη του υποβρυχίου. Το πάνω μέρος του σχήματος απεικονίζει το σχέδιο με μια προπέλα, το κάτω μέρος χωρίς έλικα.

Φυσικά το μέσο το οποίο μας επιτρέπει να εφαρμόζουμε πρακτικά την υπολογιστική ρευστομηχανική για επιλύσουμε τα προβλήματα που προκύπτουν είναι ένας υπολογιστής με γρήγορο επεξεργαστή και υψηλής τεχνολογίας. Η επίλυση ενός προβλήματος υπολογιστικής ρευστομηχανικής απαιτεί τον ορθό χειρισμό εκατοντάδων για να μην πούμε χιλιάδων αριθμών, ενός

πλήθους από δεδομένα που ο ανθρώπινος νους είναι δύσκολο να συγκρατήσει. Για το λόγο αυτό απαιτείται η χρήση αλγορίθμων και ενός λογισμικού προγράμματος που θα βοηθήσει στην επίλυση. Βάζουμε τα δεδομένα μας στον υπολογιστή και με αυτό τον τρόπο έχουμε το παρακάτω γράφημα (Anderson, 1995).



### 3.2 Εφαρμογή της υπολογιστικής ρευστομηχανικής σε Ναυτικούς κινητήρες, το παράδειγμα ενός δίχρονου κινητήρα Diesel

Με τη χρήση του κώδικα KIVA -3, έγινε στο παρακάτω παράδειγμα η αριθμητική προσομοίωση της ροής και καύσης στον κύλινδρο δίχρονου βραδύστροφου υπερπληρούμενου κινητήρα Diesel της κατασκευάστριας εταιρίας Wartsila Switzerland. Τα χαρακτηριστικά και τα δεδομένα λειτουργίας του κινητήρα σε πλήρες φορτίο λειτουργίας παρατίθενται στον Πίνακα 3 (Παναγάκης, 2011).

ΤΥΠΟΣ	RT-flex58T-B
ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΕΜΒΟΛΟΥ	580 mm
ΔΙΑΔΡΟΜΗ ΕΜΒΟΛΟΥ	2416 mm
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ	105 RPM
ΜΕΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΕΜΒΟΛΟΥ	8.46 m/s
ΕΝΑΡΞΗ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ (Από ΑΝΣ)	-96°
ΠΕΡΑΣ ΕΚΤΟΝΩΣΗΣ (Από ΑΝΣ)	120°
ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΓΧΥΣΗΣ	Common Rail System-CRS
ΑΡΙΘΜΟΣ ΕΓΧΥΤΗΡΩΝ	3
ΕΝΑΡΞΗ ΕΓΧΥΣΗΣ	2°
ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΕΓΧΥΣΗΣ	15.2°
ΜΕΣΗ ΕΝΔΕΙΚΝΥΜΕΝΗ ΠΙΕΣΗ	19 bar
ΜΕΓΙΣΤΗ ΙΣΧΥΣ ΠΕΔΗΣ / ΚΥΛΙΝΔΡΟ	2125 KW

Πίνακας 3 Χαρακτηριστικά του κινητήρα

Η ένταση του εγκάρσιου στροβιλισμού ορίζεται ως ο λόγος της γωνιακής ταχύτητας στροβιλισμού του αέρα προς τη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της μηχανής (Πανανάκης, 2011).

$$SN = \frac{\omega_{swirl}}{\omega_{engine}}$$

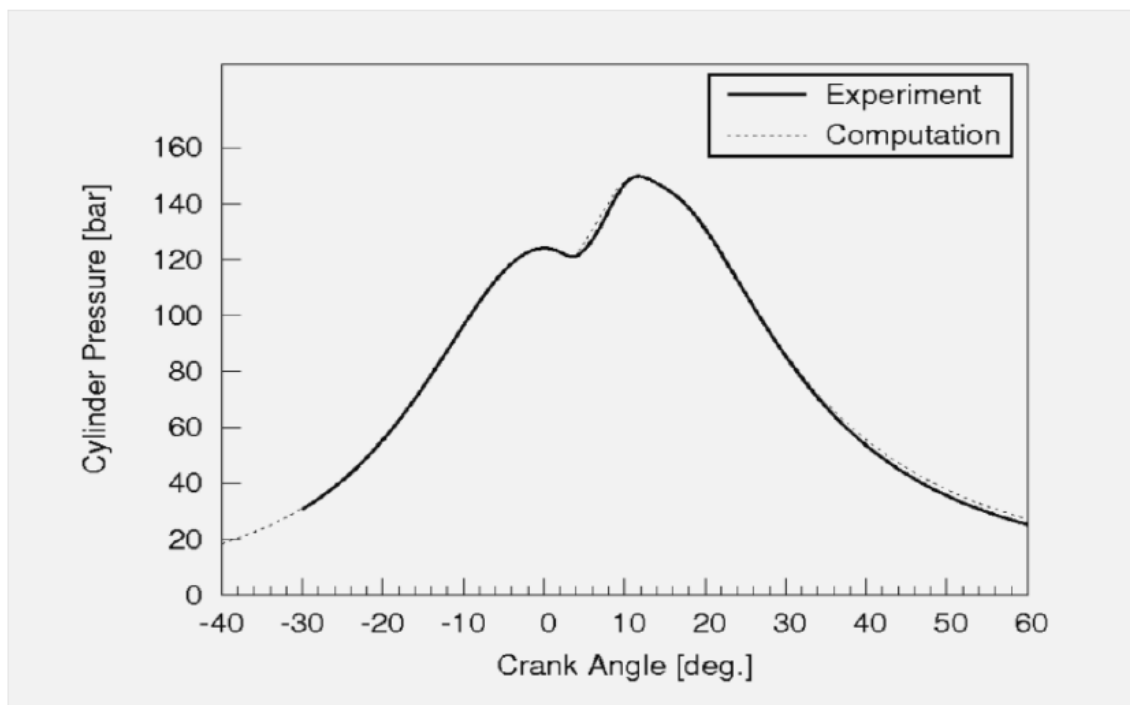
όπου

$\omega_{swirl}$ , η γωνιακή ταχύτητα στροβιλισμού του αέρα [Hz]

$\omega_{engine} = \frac{2 \cdot \pi \cdot N}{60}$ , η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της μηχανής [Hz]

N, ταχύτητα περιστροφής της μηχανής [RPM]

Η εισαγωγή αέρα από τις θυρίδες δημιουργεί μια δομή εγκάρσιου στροβιλισμού εντός του κυλίνδρου, λόγω της ισχυρής επαπτόμενης συνιστώσας της ταχύτητας. Η παρουσία εγκάρσιου στροβιλισμού ή συστροφής συμβάλλει στην καλύτερη απόπλυση του κυλίνδρου από τα καυσαέρια καθώς και την καλύτερη ανάμιξη καυσίμου - αέρα. Οι συνιστώσες της ταχύτητας που αντιστοιχούν στην εγκάρσια συστροφή ορίζονται στην αρχή της συμπίεσης με τη βοήθεια μιας συνάρτησης Bessel. Το παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζει την καμπύλη πίεσης, συγκρινόμενη με τα πειραματικά δεδομένα. Τα πειραματικά δεδομένα αντιστοιχούν στο κινητήρα RT-flex58T-B, ο οποίος χρησιμοποιεί ως καύσιμο diesel και βρίσκεται στις εγκαταστάσεις της Wartsila Switzerland (Πανανάκης, 2011).



**Διάγραμμα 1** Πειραματική και υπολογισθείσα καμπύλη πίεσης σε συνάρτηση με τη γωνία στροφάλου, για την περίπτωση αναφοράς.

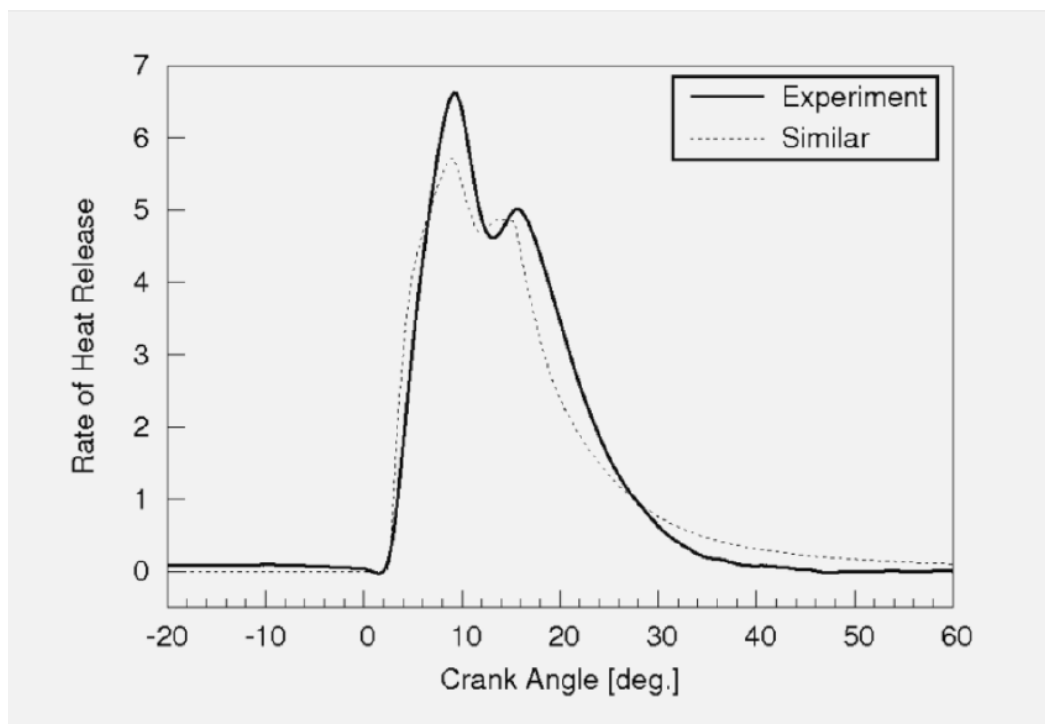
Στο διάγραμμα 2 παρουσιάζονται οι καμπύλες ρυθμού έκλυσης θερμότητας και συνολικής έκλυσης θερμότητας και συγκρίνονται με τα πειραματικά δεδομένα. Η πειραματική καμπύλη του ρυθμού έκλυσης θερμότητας βασίζεται στη μετρηθείσα πίεση η οποία δίνεται ως δεδομένο σε θερμοδυναμικό κώδικα προσομοίωσης της διεργασίας. Ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας έχει αδιαστατοποιηθεί με τον εξής τρόπο

$$ROHR = \frac{d(Q_{chem})}{d(CA)} \cdot \frac{100}{Q_{chem,tot}}$$

Όπου,

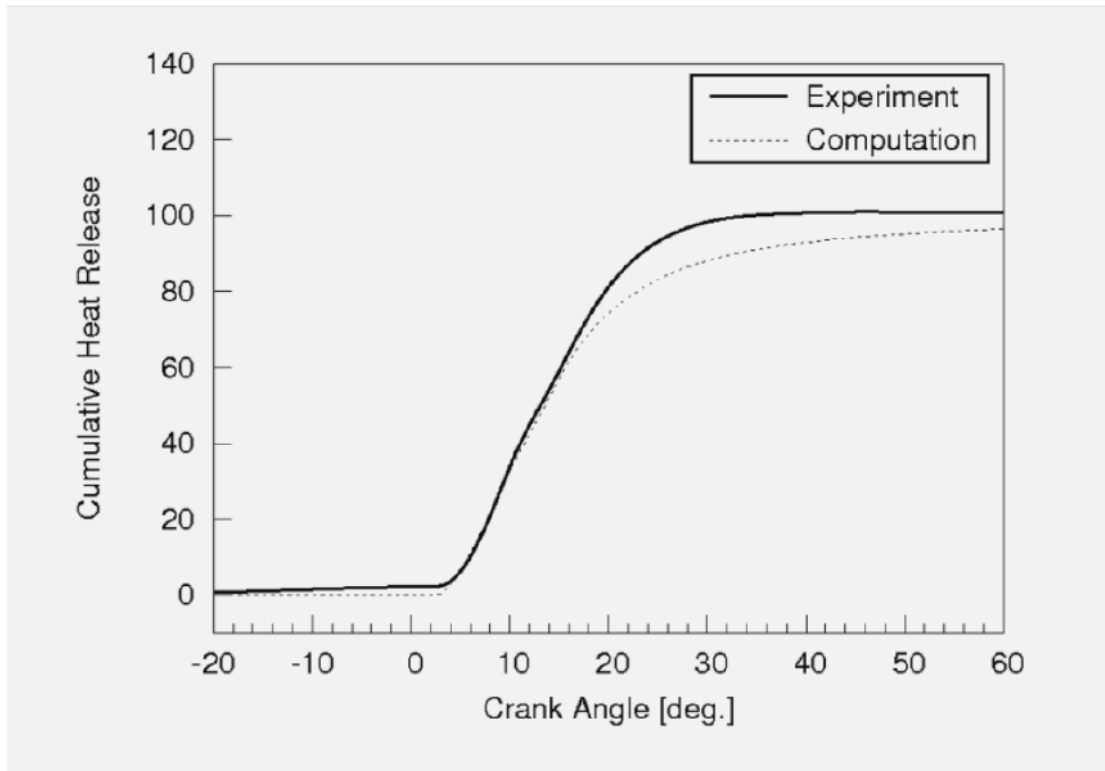
$Q_{chem}$ , η εκλυόμενη θερμότητα της καύσης [Joule]

$Q_{chem,tot}$ , η συνολική εκλυόμενη θερμότητα της καύσης [Joule]



**Διάγραμμα 2** Πειραματική και υπολογισθείσα καμπύλη ρυθμού έκλυσης θερμότητας σε συνθήκες αναφοράς, σε συνάρτηση με τη γωνία στροφάλου.





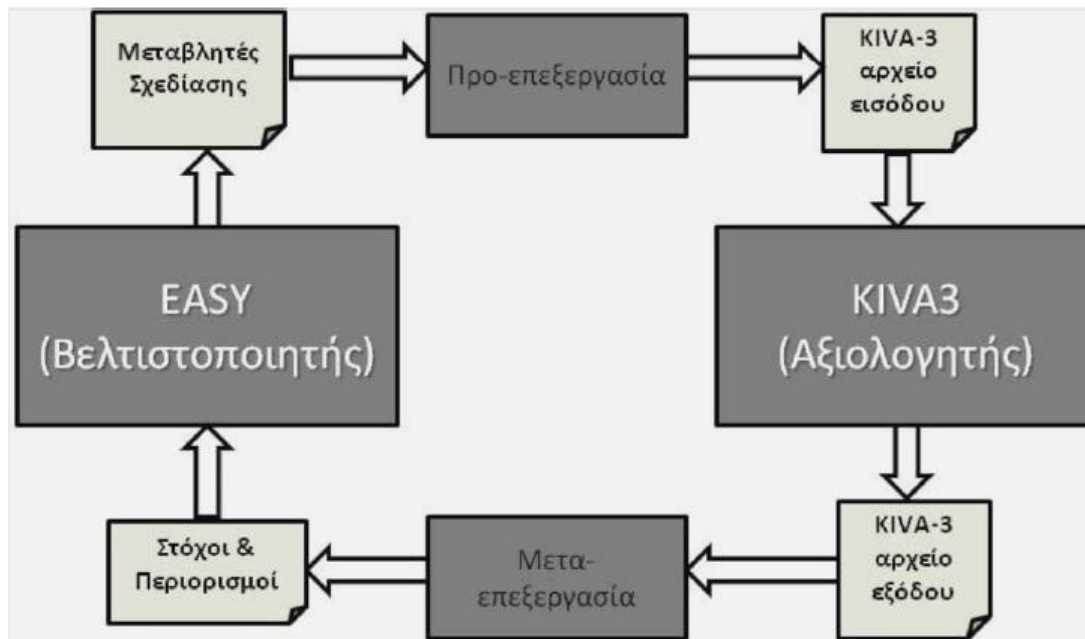
**Διάγραμμα 3** Πειραματική και υπολογισθείσα καμπύλη της συνολικής έκλυσης θερμότητας σε συνθήκες αναφοράς σε συνάρτηση με τη γωνία του στροφάλου.

Στα διαγράμματα 1, 2 και 3 παρατηρούνται τα εξής (Πανανάκης, 2011):

- Στο διάγραμμα της πίεσης, η συγκρότηση πειράματος και προσομοίωσης είναι ικανοποιητική.
- Στα διαγράμματα έκλυσης θερμότητας, η καύση στην προσομοίωση εξελίσσεται, στα τελευταία της στάδια, με αργό ρυθμό σε σύγκριση με το πείραμα. Η συμπεριφορά αυτή έχει ως αποτέλεσμα τη συγκριτικά μεγαλύτερη διάρκεια της όλης διεργασίας της καύσης κατά την προσομοίωση.

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι γίνεται χρήση εξελεγκτικών αλγορίθμων με στόχο τη βελτιστοποίηση του προφίλ της έγχυσης καυσίμου σε δίχρονο ναυτικό κινητήρα. Για την επίτευξη του στόχου αυτού, έγινε σύζευξη του κώδικα υπολογιστικής ρευστομηχανικής KIVA-3 με το λογισμικό βελτιστοποίησης EASY. Συγκεκριμένα, το λογισμικό EASY είναι λογισμικό εξελεγκτικών αλγορίθμων κι λειτουργεί ως βελτιστοποιητής, ενώ ο κώδικας KIVA -3 ως αξιολογητής (Πανανάκης, 2011).

Η συνολική υπολογιστική διαδικασία, δηλαδή το διάγραμμα ροής της, παρουσιάζεται στην εικόνα.. Οι ρουτίνες που αναπτύχθηκαν αποτελούνται από κατάλληλες ρουτίνες προ επεξεργασίας και μετά επεξεργασίας. (Πανανάκης, 2011).



Εικόνα 6 Διάγραμμα ροής της υπολογιστικής διαδικασίας

### 3.3 Εφαρμογή της υπολογιστικής ρευστομηχανικής για την επίλυση του φαινομένου της σπηλαιώσης. Το παράδειγμα μιας φυγόκεντρης αντλίας.

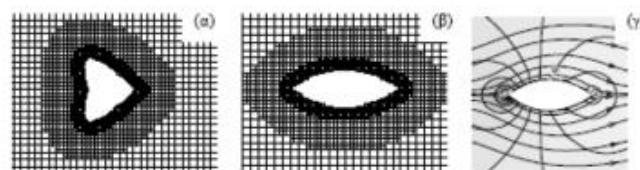
Όταν η στατική πίεση του υγρού μέσα σε μια αντλία ή σε έναν υδροστρόβιλο γίνει τοπικά μικρότερη από την πίεση ατμοποίησης (τάση ατμών), τότε εμφανίζεται το φαινόμενο της σπηλαιώσης, δηλαδή συμβαίνει τοπική εξάτμιση του υγρού. Η σπηλαιώση αποτελεί μια σημαντική παράμετρο τόσο στον σχεδιασμό όσο και στη λειτουργία των υδροδυναμικών μηχανών, καθώς μπορεί να προκαλέσει σημαντική διάβρωση, αλλά και θόρυβο, ταλαντώσεις και πτώση της απόδοσης. Για την αριθμητική προσομοίωση αυτού του φυσικού μηχανισμού αναπτύχθηκε ένα μοντέλο διφασικής ροής (υγρού-ατμού), με το οποίο επιλύεται μαζί με τις ομογενείς εξισώσεις Navier-Stokes και μια εξίσωση διατήρησης για το ποσοστό όγκου του υγρού στο διφασικό μίγμα (volume fraction). Στην εξίσωση αυτή εισάγονται κατάλληλοι όροι πηγής για τη συναλλαγή μάζας μεταξύ των δύο φάσεων (εξάτμιση – επαναυγροποίηση), που είναι συνάρτηση των τοπικών συγκεντρώσεων και πιέσεων.

Η ενδεχόμενη επίδραση φαινομένων συμπίεστος, λόγω μειωμένης ταχύτητας του ήχου σε ομογενή μίγματα, έχει βρεθεί ότι δεν επηρεάζει σημαντικά τα δυναμικά χαρακτηριστικά της ροής, έτσι δεν μοντελοποιείται, και η πυκνότητα κάθε φάσης λαμβάνεται σταθερή (Σεμψής, 2007).

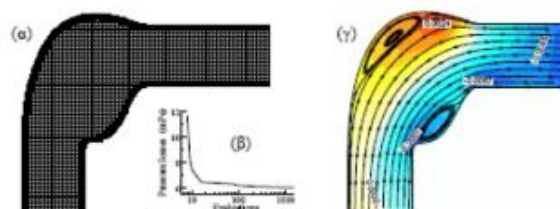
Η υλοποίηση της διαδικασίας αντίστροφης σχεδίασης ενός στοιχείου ή τμήματος μιας υδροδυναμικής μηχανής ή μιας σωλήνωσης προϋποθέτει τη συνεργασία ενός ισχυρού υπολογιστικού κώδικα επίλυσης της ροής και ενός αλγορίθμου αριθμητικής βελτιστοποίησης υψηλού ρυθμού σύγκλισης. Επειδή για την εύρεση του βέλτιστου σχεδιασμού απαιτείται σημαντικός αριθμός

διαδοχικών επιλύσεων του πεδίου ροής, εκτός από την ταχύτητα, ο κώδικας επίλυσης πρέπει να εξασφαλίζει την αυτόματη κατασκευή πλέγματος σε κάθε νέα τροποποίηση της γεωμετρίας που δοκιμάζεται, χωρίς την παρέμβαση του χρήστη. Η χρήση μη-δομημένων Καρτεσιανών πλεγμάτων, μαζί με μια τεχνική επίλυσης πολύπλοκης γεωμετρίας, όπως αυτή που παρουσιάστηκε προηγουμένως, ικανοποιεί αυτές τις απαιτήσεις. Επιπλέον, η εφαρμογή της τεχνικής ρυθμιζόμενης πύκνωσης του πλέγματος επιλεκτικά και μόνο σε περιοχές που αυτό είναι απαραίτητο (π.χ. κοντά σε στερεά όρια) μπορεί να εξοικονομήσει σημαντικό υπολογιστικό χρόνο ανά επίλυση, για δεδομένη ακρίβεια αποτελεσμάτων (Σεμψής, 2007).

Οι εξελιγμένες αυτές αριθμητικές τεχνικές, συνδυάστηκαν με σχήματα διακριτοποίησης δεύτερης τάξης (Central Differences και BSOU) και με έναν επιλύτη συζυγών κλίσεων (preconditioned Bi-CG) για την ανάπτυξη ενός νέου, ισχυρού υπολογιστικού κώδικα. Για την περιγραφή και παραμετροποίηση της γεωμετρίας του υπολογιστικού χώρου ενσωματώθηκε η δυνατότητα χρήσης πολυωνύμων Bezier, αρχικά για 2διάστατα πεδία (Σεμψής, 2007), ενώ μπορεί να εφαρμοστεί και νέος αλγόριθμος αριθμητικής βελτιστοποίησης, που χρησιμοποιεί στοχαστικές τεχνικές και εξελικτικούς (γενετικούς) αλγορίθμους, ο οποίος αναπτύχθηκε στο Εργ. Θερμικών Στροβιλομηχανών του ΕΜΠ (Giannakoglou, 2002).



Σχήμα 3.5.1 Ελαχιστοποίηση υδροδυναμικής αντίστασης σώματος ορισμένου όγκου: α) πλέγμα σε μη-βέλτιστη γεωμετρία, β) πλέγμα τελικής γεωμετρίας και γ) τελικό πεδίο ροής και πιέσεων.



Σχήμα 3.5.2 Ελαχιστοποίηση απωλειών πίεσης σε γωνία  $90^\circ$ : α) βέλτιστη γεωμετρία και πλέγμα, β) ρυθμός σύγκλισης του αλγορίθμου βελτιστοποίησης και γ) πεδίο ροής και πιέσεων.

Πιο συγκεκριμένα θα δούμε το παράδειγμα μιας φυγόκεντρης αντλίας πλοίου που παρουσίασε το φαινόμενο της σπηλαίωσης. Η αριθμητική προσομοίωση γίνεται με το λογισμικό ANSYS CFX 12

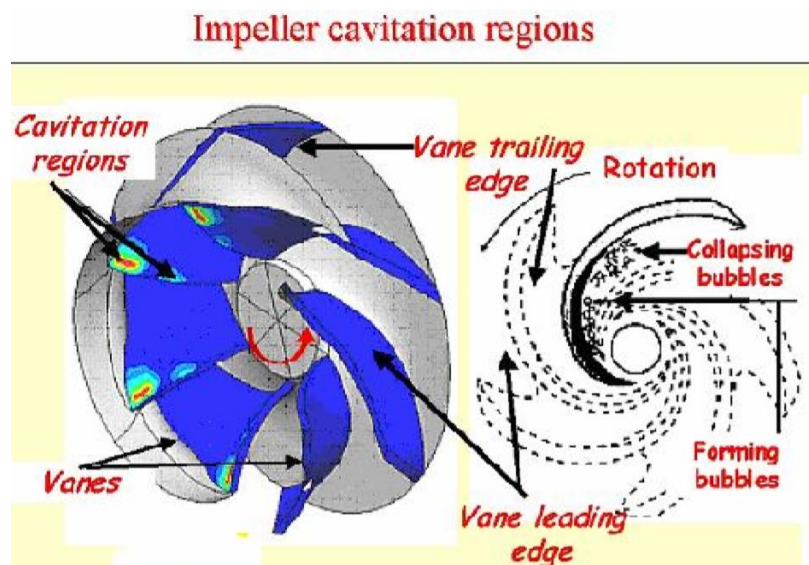
και υπολογίζονται βάση αυτού τα δεδομένα. Με αυτό τον τρόπο αποδεικνύεται ότι ο σχηματισμός φυσαλίδων στην περιοχή της αντλίας προκαλείται από την υψηλή ταχύτητα του ρευστού (Khudhair Abbas, 2010).

Οι γεωμετρικές παράμετροι για το στροφέιο φαίνεται στον πίνακα (4).

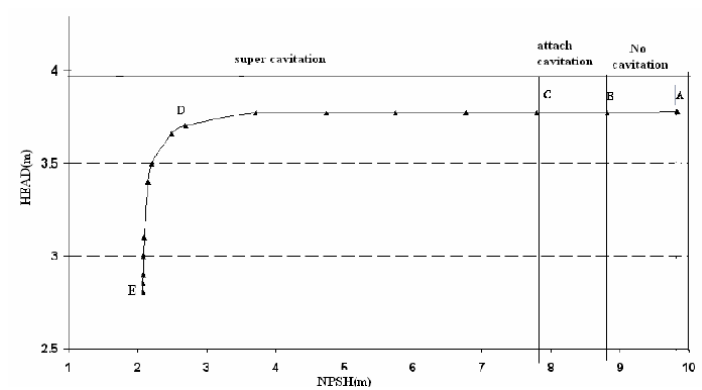
Impeller dimension	
Inlet diameter at hub $D_{1h}$ (mm)	36
Inlet diameter at tip $D_{1t}$ (mm)	80
Outlet width $b_2$ (mm)	4.4
Blade inlet angle at hub $\beta_{1h}$ ( $^\circ$ )	21.5
Blade inlet angle at tip $\beta_{1t}$ ( $^\circ$ )	31.1
Blade outlet angle $\beta_2$ ( $^\circ$ )	22.5
Blade number $z$	6

**Πίνακας 4** Οι γεωμετρικές παράμετροι

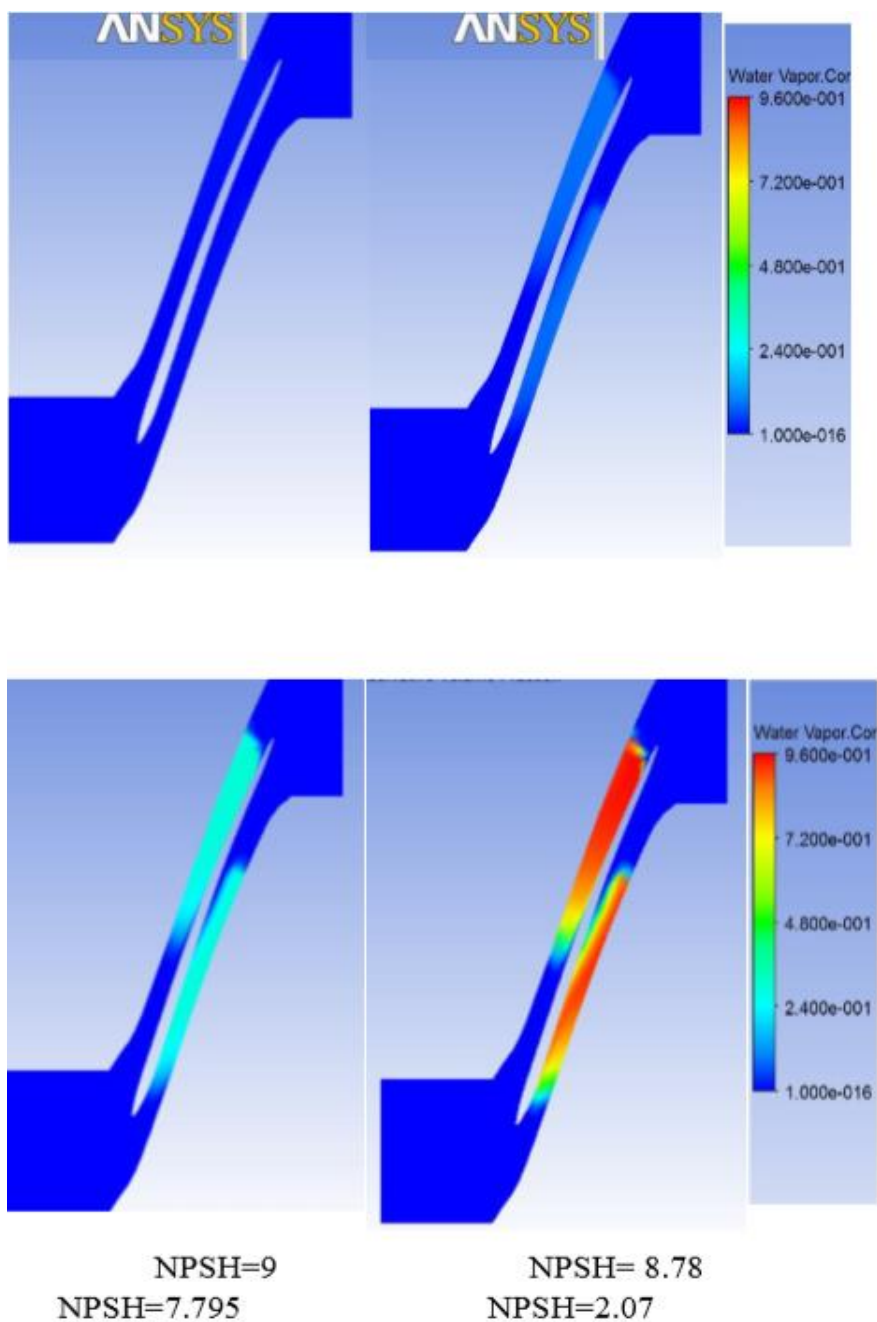
Το υπολογιστικό πλέγμα αποτελείται συνολικά από 25368 κόμβους. Η προσομοίωση της ροής εκτελείται στην εναλλαγή του πλαίσιο αναφοράς. Οι αρχικές υποθέσεις του πεδίου ροής υπολογίζονται από μονοδιάστατη ανάλυση. Στατική πίεση και ταχύτητα ροής πεδίου καθορίζονται ως αρχική υπόθεση. Για να υπολογίσουμε την καμπύλη πτώσης, η απόλυτη ολική πίεση στο όριο εισροής μειώνεται από 100000 Pa για την αντιμετώπιση της εμφάνισης της σπηλαιώσης (εικόνα 8). Όταν αυτό συμβεί, η προσομοίωση εκτελείται μέχρις ότου η συνολική πίεση εισόδου μειώνεται σε 30.000 Pa (Khudhair Abbas, 2010).



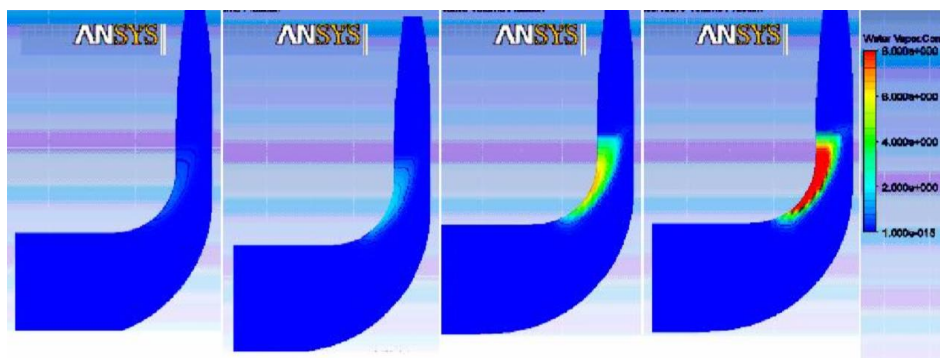
**Εικόνα 7** Περιοχές σπηλαιώσης σε στροφέιο αντλίας



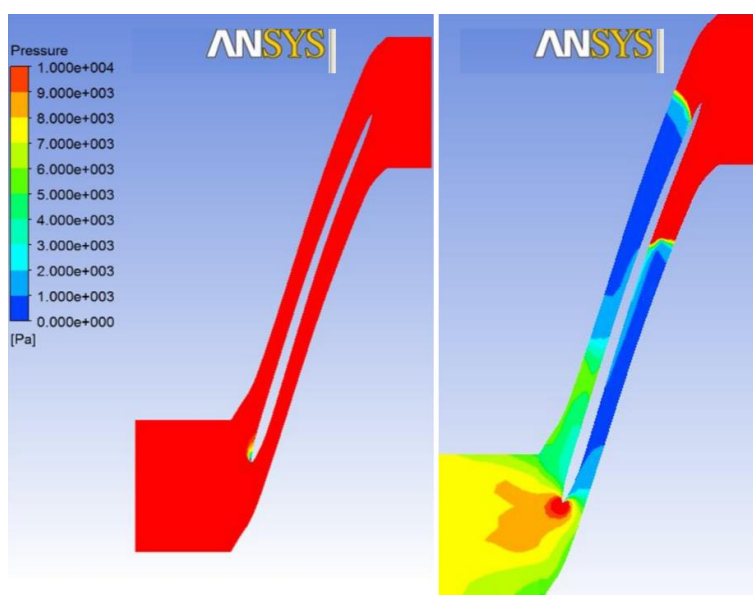
Εικόνα 8 Υπολογισμός της καμπύλης



Εικόνα 9 Αποψη περιθωρίου υδρατμών από λεπίδα σε λεπίδα σε έκταση 99%.



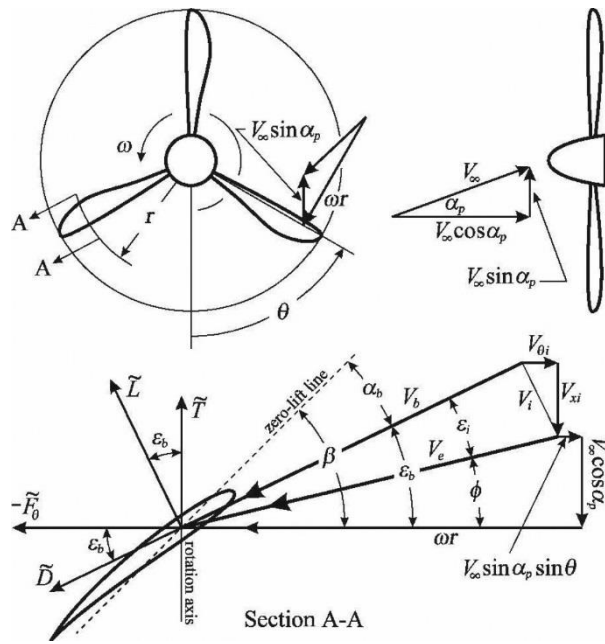
Εικόνα 10 Μερική άποψη περιθωρίου υδρατμών σε έκταση 99%.



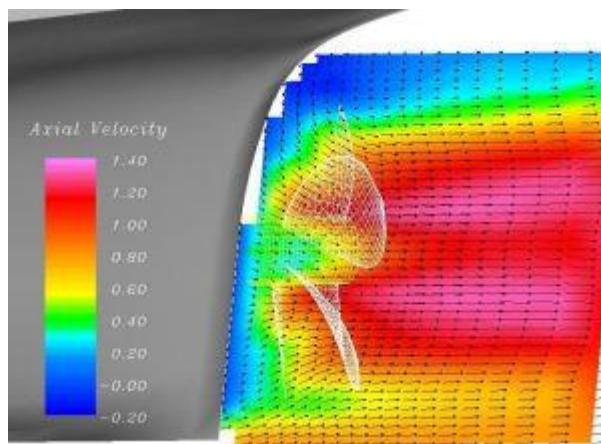
Εικόνα 11 Άποψη περιθωρίου διανομής πίεσης από λεπίδα σε λεπίδα σε έκταση 99% στην πρώτη σταγόνα.

### 3.4 Εφαρμογή της υπολογιστικής ρευστομηχανικής στους έλικες ενός πλοίου. Το παράδειγμα εξοικονόμησης ενέργειας.

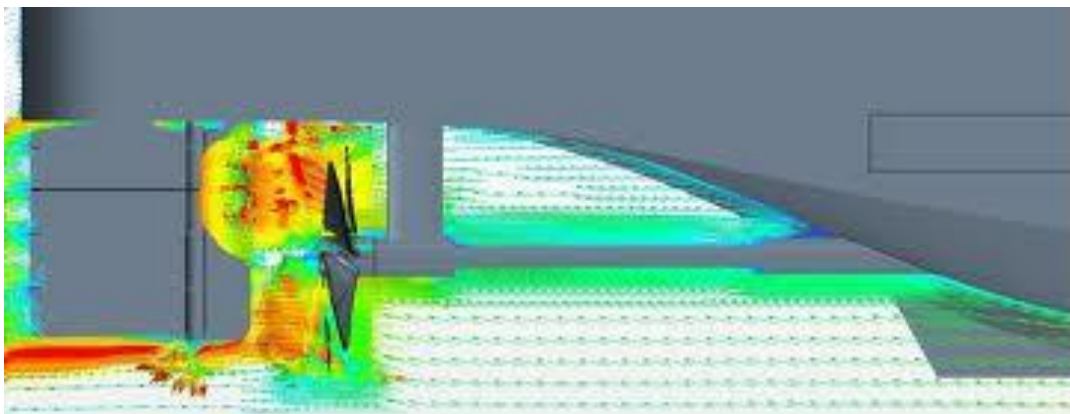
Η σημασία της μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας των πλοίων είναι μια πρόκληση για την εποχή μας τόσο εξαιτίας της αύξησης στην τιμή του πετρελαίου, όσο και στους συνεχούς ελέγχους των εκπομπών CO<sub>2</sub> και την μόλυνση των θαλασσών. Για το λόγο αυτό προβλέπεται η χρήση της CFD και των ανάλογων εργαλείων που θα επιτρέψουν την επίλυση αυτού του προβλήματος. Αν για παράδειγμα ένα πλοίο παρουσίαση σπηλαίωση στους έλικες του τότε με την τεχνολογία και το κατάλληλο λογισμικό που προβλέπει η υπολογιστική ρευστομηχανική θα αποτυπωθούν γεωμετρικά τα προβλήματα και με το υπολογιστικό πλέγμα (εικ. 12, 13, 14) θα μπορέσουμε να αντιμετωπίσουμε το πρόβλημα, τοποθετώντας μια συσκευή εξοικονόμησης ενέργειας (Kawakita, Takashima, 2012).



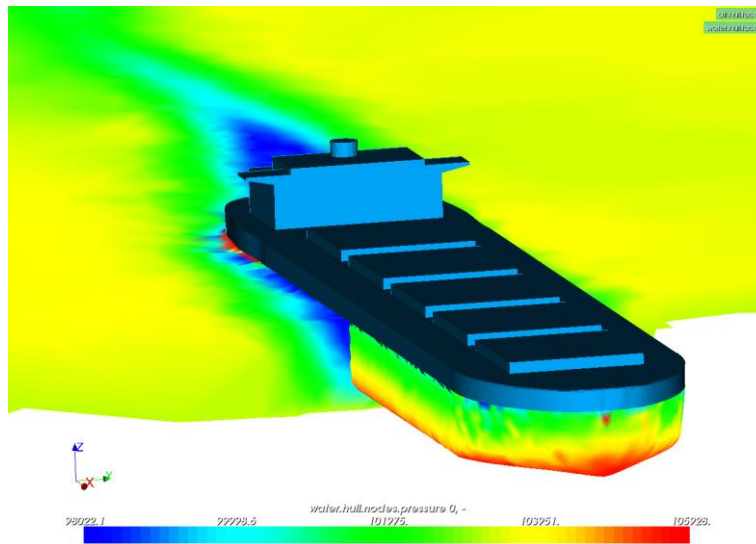
**Εικόνα 122** Γεωμετρική αναπαράσταση της έλικας



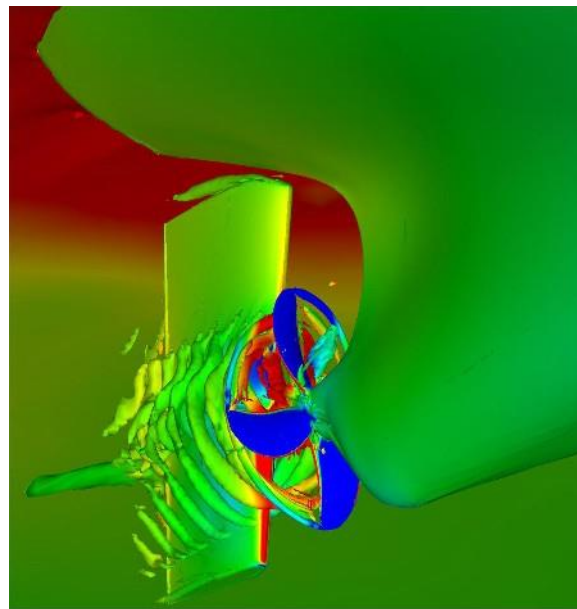
**Εικόνα 13** Περιοχή τιμών της αξονικής ταχύτητας



**Εικόνα 144** Αναπαράσταση ροής του νερού κατά τη περιστροφή της έλικας σε σχέση με το πηδάλιο



**Εικόνα 15** Περιοχή τιμών για τις καταπονήσεις της πλώρης



**Εικόνα 16** Αναπαράσταση της ροής του νερού κατά την περιστροφή της έλικας



## Συμπεράσματα

Έχοντας ολοκληρώσει την παρούσα εργασία μπορεί κανείς εύκολα να συμπεράνει ότι προβλήματα που αφορούν στον σχεδιασμό ενός πλοίου, στον υπολογισμό ροής στους σωλήνες, στους έλικες των πλοίων, στη γάστρα και στη σπηλαιώση αντιμετωπίζονται πλέον με τη βοήθεια της υπολογιστικής ρευστομηχανικής. Κάποιοι από τους συγκεκριμένους κώδικες έχουν τη δυνατότητα υπολογισμού της συμπεριφοράς του πλοίου τόσο σε ήρεμο νερό, όσο και σε κυματισμούς. Κάθε πρόγραμμα υπολογιστικής ρευστομηχανικής (CFD software package) έχει σαν στόχο να προβλέπει τον τρόπο που ρέει ένα ρευστό σε μια δεδομένη κατάσταση. Για να το επιτύχει αυτό πρέπει να παράγει αριθμητικές λύσεις στις εξισώσεις που καθορίζουν την κίνηση του ρευστού (κυβερνώσες εξισώσεις – governing equations). Σε ότι αφορά τον αναλυτή που διαχειρίζεται το «υπολογιστικό πρόγραμμα», απαιτείται να έχει γνώση τόσο των ιδιοτήτων του ρευστού οι οποίες θα πρέπει να μοντελοποιηθούν ανάλογα, όσο και των εξισώσεων που καθορίζουν την κίνηση. Αυτές οι εξισώσεις παράγονται ξεκινώντας με δεδομένη την αρχή διατήρησης της μάζας και της ορμής. Ωστόσο η αριθμητική επίλυση των προβλημάτων μέσα από την υπολογιστική ρευστομηχανική βοηθά στο να αναλυθούν παράξενα αποτελέσματα που αναζητούν προσομοίωση και να εντοπιστεί η πηγή των προβλημάτων.

Τα βήματα που απαιτούνται για την επίλυση ενός προβλήματος με τη χρήση CFD είναι τα ακόλουθα:

- ✓ Περιγραφή Προβλήματος [Στο οποίο γίνεται το Σκαρίφημα, Δεδομένα, Εξισώσεις, κλπ.]
- ✓ Γεωμετρία [Στην οποία γίνεται ο σχεδιασμός του προβλήματος, κλπ.]
- ✓ Δημιουργία Υπολογιστικού Πλέγματος
- ✓ Εισαγωγή Φυσικών Παραμέτρων, Επιλογή Εξισώσεων Επίλυσης, Οριακές Συνθήκες, Συνθήκες Ροής.
- ✓ Επίλυση Προβλήματος [Ανάλυση Δεδομένων]
- ✓ Αποτελέσματα [Αξιολόγηση και Παρουσίασή τους]
- ✓ Επαλήθευση – Επικύρωση Αποτελεσμάτων

Γίνεται όμως σαφές ότι σήμερα η CFD και το λογισμικό υπολογισμού και επίλυσης των προβλημάτων που αφορούν τα πλοία δεν είναι ακόμη στο επίπεδο που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί τυφλά από τους σχεδιαστές και τους μηχανικούς. Τα νέα μαθηματικά μοντέλα (π.χ., εξισώσεις ισορροπίας του πληθυσμού για διάφορα συστήματα) χρειάζονται τόσο τροποποίηση των υφιστάμενων εργαλείων CFD όσο και ανάπτυξη νέων.

## Βιβλιογραφία

1. Anderson J., (1995). Computational Fluid Dynamics, The basics with applications, Schaum Division, New York
2. Γκοβάτσος Π., (1997). 'Ανάπτυξη αριθμητικής μεθοδολογίας για τον υπολογισμό μόνιμης ροής σε υδροδυναμικές μηχανές.', Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π.
3. Giannakoglou, κ.Κ., (2002). Acceleration of Genetic Algorithms Using Artificial Neural Networks – Theoretical Background, von Karman Institute Lectures Series on Genetic Algorithms for Optimization in Aeronautics and Turbomachinery, May 15-19.
4. Khudhair Abbas, (2010). Cavitation in Centrifugal Pumps, Diyala Journal Of Engineering Sciences, December, Iraq, p.p. 170-180.
5. Kawakita C., Takashima R., (2012). CFD on Cavitation around Marine Propellers with Energy-Saving Devices. Mitsubishi Heavy Industries Technical Review Vol. 49 No. 1 (March 2012) .
6. Μπαιρακτάρης Δ., (2006). Σπηλαίωση εντός αγωγών με ύπαρξη εμπορίου, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, ΔΠΘ, Ξάνθη.
7. Πανακάης Ε., (2011). " Διερεύνηση Στρατηγικών Έγχυσης Καυσίμου για Κάυση Μερικώς Ομογενοποιημένου Μίγματος σε Δίχρονους Ναυτικούς
8. Σεμνής Λ., (2007). Μελέτη του φαινομένου της σπηλαίωση σε φυγοκεντρική αντλία "Cavitation". Μεταπτυχιακή εργασία του διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών "Ναυτική και θαλάσσια τεχνολογία και επιστήμη" Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο στο [http://dspace.lib.ntua.gr/bitstream/123456789/486/4/sempsisl\\_cavitation.pdf](http://dspace.lib.ntua.gr/bitstream/123456789/486/4/sempsisl_cavitation.pdf) (18/4/2013).
9. Φατσής Α., (2012). Στοιχεία Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής - Αεροδυναμικής στο <http://www.teihal.gr/mec/lesson12.asp> (3/2/2013).

# Περιεχόμενα

Περίληψη.....	3
Abstract .....	4
Πρόλογος.....	5
Κεφάλαιο 1: Υπολογιστική Ρευστομηχανική / Computational Fluid Dynamics .....	9
Κεφάλαιο 2: Υπολογιστική διαδικασία.....	12
Κεφάλαιο 3: Υπολογιστική ρευστομηχανική και Ναυτιλία (ενδεικτικές εφαρμογές) .....	20
Συμπεράσματα.....	33
Βιβλιογραφία.....	34
Περιεχόμενα .....	35