

ΓΡΑΜΜΑΤΕΙΑ ΜΗΧ/ΓΙΑΣ

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΡΕΥΣΤΩΝ



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΥΠΕΡΗΧΗΤΙΚΗΣ ΡΟΗΣ ΣΕ
ΑΚΡΟΦΥΣΙΟ ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΗΣ ΠΑΡΟΧΗΣ

(COMPUTATIONAL STUDY OF ULTRASONIC FLOW IN A FLOW-VARIANT NOZZLE)

ΑΡΓΥΡΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΓΛΥΝΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ



Επιβλέπων: ΝΙΚΑΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ - ΣΤΕΦΑΝΟΣ

Πειραιάς, 2013

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Κρίνεται σκόπιμο να εκφραστούν οι ειλικρινείς ευχαριστίες μας προς όσους βοήθησαν τοιούτοτρόπως στην εκπόνηση αυτής της εργασίας.

Αρχικά στον επιβλέποντα Καθηγητή Εφαρμογών στον Ενεργειακό Τομέα, του τμήματος Μηχανολογίας του Α.Τ.Ε.Ι. Πειραιά, κ. Κ-Σ. Νίκα, για την πολύτιμη καθοδήγηση του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Στους καθηγητές του τμήματος μας για τις γνώσεις που μας μετέδωσαν κατά τη διάρκεια των σπουδών μας.

Τέλος στις οικογένειές μας για τη διαρκή στήριξη τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μας και στη συνεχή βοήθεια που μας παρέχουν για την εκπλήρωση των στόχων μας.

Χωρίς τη βοήθεια όλων των παραπάνω η συγγραφή της παρούσας εργασίας θα ήταν αναμφίβολα δυσκολότερη.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	2
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	5
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 Βασικές έννοιες της Μηχανικής των Ρευστών	7
1.1 Βασικοί ορισμοί.....	7
1.1.1 Ορισμός του Ρευστού	7
1.1.2 Συνεκτικότητα ή ιξώδες.....	9
1.1.3 Συμπιεστότητα.....	9
1.1.4 Είδη Ροών	11
1.1.5 Σύστημα και Όγκος Ελέγχου	12
1.2 Ανάλυση σε Μικροσκοπικό επίπεδο ή Διαφορική Ανάλυση.....	12
1.2.1 Διαφορική Εξίσωση Συνέχειας Διατήρηση Μάζας.....	13
1.2.2 Διαφορική Εξίσωση Ορμής	14
1.3 Ροή ρευστού πάνω σε ακίνητη-σταθερή πλάκα	15
1.3.1 Οριακό στρώμα (Boundary layer).....	15
1.3.2 Είδη Οριακών Στρωμάτων.....	17
1.3.3 Εξισώσεις Οριακού Στρώματος	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 Εισαγωγή στη θεωρία του ακροφυσίου	24
2.1 Ορισμός Ακροφυσίου	24
2.2 Αριθμός Mach.....	26
2.3 Ανάλυση Μονοδιάστατης ροής Ρευστού δια μέσου Συγκλίνοντος – Αποκλίνοντος ακροφυσίου	26
2.4 Ροή σε ιδεατό υπερηχητικό ακροφύσιο με Κάθετο Κρουστικό Κύμα (ΚΚΚ) ακριβώς στην έξοδο	30
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Ο Ηλεκτρονικός Υπολογιστής και η Μηχανική των Ρευστών.....	33
3.1 Ο υπολογιστής και η μηχανική ρευστών.....	33
3.2 Αρχιτεκτονική του Υπολογιστή.....	35
3.3 Υπολογιστική Ρευστομηχανική.....	37

3.4	Πεδία εφαρμογής της Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής.....	38
3.5	Επίλυση Εξισώσεων κίνησης ρευστών με τη χρήση του εμπορικού πακέτου Fluent	43
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 Εισαγωγή στο σχεδιαστικό πακέτο Gambit		46
4.1	Η εννοιολόγηση του Gambit	46
4.2	Επιφάνεια εργασίας γραφικών.....	46
4.3	Σχεδιασμός του γεωμετρικού μοντέλου του ακροφυσίου.....	49
4.4	Δημιουργία υπολογιστικού πλέγματος στο γεωμετρικό μοντέλο	54
4.4.1	Δημιουργία υπολογιστικού πλέγματος σε ακμές	55
4.4.2	Δημιουργία υπολογιστικού πλέγματος σε πρόσωπο	55
4.5	Προσδιορισμός ζωνών και ορίων στο γεωμετρικό μοντέλο	56
4.5.1	Καθορισμός οριακών συνθηκών του μοντέλου μας.....	56
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 Εισαγωγή στο υπολογιστικό πακέτο Fluent		58
5.1	Η εννοιολόγηση του Fluent	58
5.2	Διαδικασία αντιμετώπισης και επίλυσης προβλημάτων στο Fluent.....	59
5.3	Διαδικασία επίλυσης του μοντέλου του ακροφυσίου στο Fluent.....	60
5.4	Αποτελέσματα & Σχολιασμός των προσομοιώσεων στο fluent.....	69
5.4.1	Βασική Γεωμετρία.....	69
5.4.2	Επίδραση διπλασιασμού συνολικής διαμέτρου	74
5.4.3	Επίδραση υποδιπλασιασμού συνολικής διαμέτρου.....	78
5.4.4	Επίδραση διπλασιασμού διαμέτρου εξόδου	82
5.4.5	Επίδραση διπλασιασμού διαμέτρου εισόδου	87
5.5	Συγκεντρωτικά αποτελέσματα & σύγκριση με το αρχικό πρόβλημα.....	91
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική εργασία		98
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ		100
ABSTRACT.....		101

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το αντικείμενο το οποίο πραγματεύεται η παρούσα εργασία είναι η μελέτη ενός συγκλίνοντος- αποκλίνοντος ακροφυσίου μέσω ενός υπολογιστικού κώδικα.

Στόχος της πτυχιακής εργασίας είναι ο υπολογισμός του αριθμού Mach, της πίεσης και η κατανομή θερμοκρασίας στο στόμιο του ακροφυσίου με εξαγωγή διαγραμμάτων από το εμπορικό πακέτο Fluent με παράλληλους σχολιασμούς σε αυτά. Στη συνέχεια θα γίνουν ορισμένες παραλλαγές στο σχεδιαστικό μέρος μέσω του GAMBIT και θα συγκρίνουμε τα αποτελέσματα με το αρχικό πρόβλημα που είχαμε να μελετήσουμε.

Μεθοδολογικά το προς μελέτη αντικείμενο ερευνάται μέσα από την επισκόπηση της ελληνικής αλλά και της ξενόγλωσσης βιβλιογραφίας, όπως και από την αναζήτηση συναφών με το θέμα στοιχείων μέσω της ηλεκτρονικής βιβλιογραφίας, ενώ θα επιχειρηθεί επίσης να διερευνηθούν μέσω του υπολογιστικού πακέτου FLUENT α) η ταχύτητα στην είσοδο, στο στόμιο και στην έξοδο (επί της κεντρικής γραμμής) του ακροφυσίου, β) ο αριθμός Mach ο οποίος μεταβάλλεται από υποηχητική σε ηχητική και στη συνέχεια σε υπερηχητική ροή, γ) η στατική πίεση και δ) η στατική θερμοκρασία. Κλείνοντας θα επιχειρηθούν διάφορες παραμετρικές αναλύσεις έχοντας ως στόχο να διαπιστώσουμε τις μεταβολές που παρατηρούνται στο ακροφύσιο σε σύγκριση με την αρχική κατάσταση του.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η συγκεκριμένη εργασία βασίζεται κυρίως στο σχεδιαστικό πακέτο GAMBIT και στο υπολογιστικό πρόγραμμα FLUENT. Μέσω του GAMBIT γίνεται η προσομοίωση του μοντέλου μας με τη μορφή πλέγματος και μέσω του FLUENT θα γίνει έλεγχος του υπολογιστικού πλέγματος που κατασκευάσαμε στο GAMBIT.

Στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας θα γίνει η εννοιολόγηση των βασικών εννοιών της μηχανικής των ρευστών βασισμένη στη διαθέσιμη βιβλιογραφία.

Στο δεύτερο κεφάλαιο θα γίνει εκτεταμένη αναφορά και περιγραφή της ροής των ρευστών δια μέσω ακροφυσίων.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στην επιστήμη της υπολογιστικής ρευστομηχανικής (CFD) και συσχέτιση με τη μηχανική των ρευστών.

Στο τέταρτο κεφάλαιο εξετάζονται οι βασικότερες λειτουργίες του σχεδιαστικού πακέτου GAMBIT, ενώ παράλληλα αναφέρονται τα βήματα κατασκευής της γεωμετρίας και του υπολογιστικού πλέγματος του ακροφυσίου.

Στο πέμπτο κεφάλαιο περιγράφεται ο τρόπος αντιμετώπισης του φυσικού προβλήματος του ακροφυσίου μέσω του υπολογιστικού πακέτου FLUENT. Επιπλέον, αναφέρονται αναλυτικά όλες οι διεργασίες που πραγματοποιήθηκαν για την προσομοίωση του φαινομένου και στη συνέχεια λαμβάνουμε τα αποτελέσματα από το fluent και κάνουμε τους απαραίτητους σχολιασμούς πάνω σε αυτά.

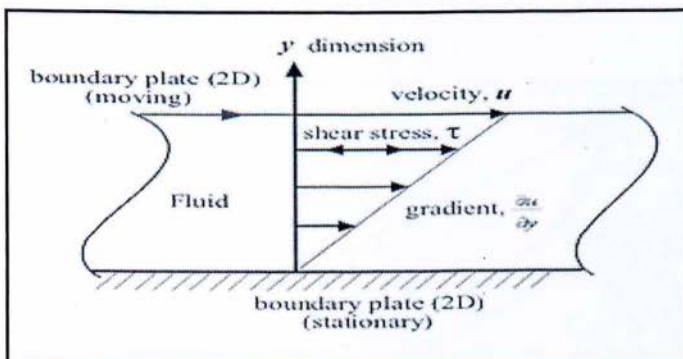
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 Βασικές έννοιες της Μηχανικής των Ρευστών

1.1 Βασικοί ορισμοί

1.1.1 Ορισμός του Ρευστού

Ρευστό (Fluid) είναι μια ουσία που παραμορφώνεται συνεχώς όταν υφίσταται μια Διατμητική Τάση (Shear Stress) όσο μικρή και αν είναι αυτή. Διατμητική Δύναμη (Shear Force) είναι η συνιστώσα δύναμη που δρα κατά την εφαπτομένη μιας επιφάνειας και η δύναμη αυτή όταν διαιρεθεί με το εμβαδό της επιφάνειας, μας δίνει τη Μέση Διατμητική Τάση (Average Shear Stress) της επιφάνειας. Διατμητική Τάση σε κάποιο σημείο είναι το όριο του λόγου της Διατμητικής Δύναμης προς το Εμβαδόν, όταν αυτό τείνει στο μηδέν γύρω από το υπόψη σημείο.

Θεωρούμε ότι έχουμε μια ουσία η οποία βρίσκεται μεταξύ δύο πλακών (Σχήμα 1.1), με μικρή απόσταση η μία από την άλλη και μεγάλες σε μήκος ώστε να αγνοηθούν οι συνθήκες που επικρατούν στα άκρα τους. Η κάτω πλάκα είναι σταθερή ενώ στην πάνω πλάκα εφαρμόζεται μια δύναμη F , η οποία, ασκεί μια Διατμητική Τάση (Shear Stress) F/A σε κάθε σημείο μεταξύ των πλακών, όπου A είναι το εμβαδόν την επάνω πλάκας. Όταν η δύναμη F προκαλέσει την κίνηση της επάνω πλάκας με σταθερή ταχύτητα, όσο μικρό και αν είναι το μέτρο της F , συμπεραίνουμε ότι η ουσία που βρίσκεται ανάμεσα στις δύο πλάκες είναι ρευστό (Fluid). Αυτό το είδος ροής, ονομάζεται ροή Couette.



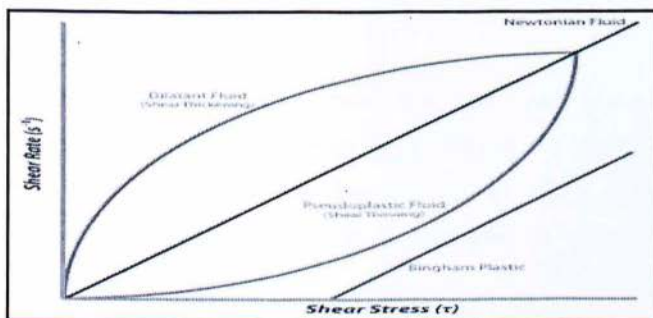
Σχήμα 1.1 Ροή Couette

Τα πειράματα έχουν δείξει ότι η F είναι ευθέως ανάλογη του A και αντιστρόφως ανάλογη του πάχους t όταν άλλα μεγέθη παραμένουν σταθερά. Αυτό εκφράζεται από την εξίσωση: $F = \mu \frac{AU}{t}$ όπου μ ο συντελεστής αναλογίας και περιλαμβάνει την επίδραση του εξεταζόμενου ρευστού.

Αν $\tau = F/A$ η διατμητική τάση, τότε από την παραπάνω εξίσωση προκύπτει: $\tau = \mu \frac{U}{t}$ και ο λόγος $\frac{U}{t}$ εκφράζει τη γωνιακή ταχύτητα (ή ρυθμό μεταβολής) της γωνιακής παραμόρφωσης του ρευστού. Η γωνιακή ταχύτητα μπορεί επίσης να γραφτεί ως du/dy , διότι το U/t αλλά και το du/dy εκφράζουν το λόγο της μεταβολής της ταχύτητας προς το μήκος στο οποίο έχουμε μεταβολή. Το κλάσμα du/dy εκφράζει το ρυθμό με τον οποίο ένα στρώμα (layer) κινείται σχετικά με ένα προσκείμενο σώμα. Οπότε η προηγούμενη εξίσωση γίνεται $\tau = \mu \frac{du}{dy}$ όπου το μ ονομάζεται ιξώδες (viscosity) του ρευστού (ή συνεκτικότητα) και εκφράζει τον Νόμο του ιξώδους του Νεύτωνα.

Διαφορετικά υλικά από τα ρευστά δεν μπορεί να ικανοποιούν τον ορισμό του ρευστού. Για παράδειγμα, μια πλαστική ουσία θα παραμορφώνεται κατά ορισμένο ποσοστό ανάλογα με τη δύναμη, όχι όμως συνεχώς, όταν η επιβαλλόμενη τάση βρίσκεται κάτω από τη διατμητική τάση διαρροής. Συνεπώς, τα πλαστικά (Plastics) και τα στερεά (Solids) σώματα αποκλείονται από τα ρευστά (Fluids).

Τα ρευστά διακρίνονται σε Νευτώνεια και μη Νευτώνια. Στα Νευτώνεια, η σχέση μεταξύ διατμητικής τάσης και ταχύτητας παραμόρφωσης είναι γραμμική, σε αντίθεση με τα μη Νευτώνια, όπου η σχέση μεταξύ του μέτρου της επιβεβλημένης διατμητικής τάσης και της ταχύτητας παραμόρφωσης δεν είναι γραμμική (Σχήμα 1.2).



Σχήμα 1.2 Σύγκριση της συμπεριφοράς των τεσσάρων τύπων υγρών με ρυθμό διάτμησης σε συνάρτηση της εφαρμοζόμενης τάσης διάτμησης

1.1.2 Συνεκτικότητα ή ιξώδες

Για τη μελέτη της ροής των ρευστών, στο ιξώδες (viscosity) χρειάζεται να εξεταστεί η φύση και τα χαρακτηριστικά του καθώς και οι συντελεστές μετατροπής του απολύτου και του κινηματικού ιξώδους. Το ιξώδες είναι η ιδιότητα εκείνη του ρευστού, που του δίνει τη δυνατότητα να ανθίσταται σε διάτμηση. Ο νόμος ιξώδους του Νεύτωνα ($\tau = \mu \frac{du}{dy}$) αναφέρει ότι για μια δοσμένη ταχύτητα γωνιακής παραμόρφωσης του ρευστού η διατμητική τάση είναι ανάλογη προς το ιξώδες. Επί παραδείγματι, το μέλι και η πίσσα είναι ρευστά με πολύ μεγάλο ιξώδες ενώ αντίθετα το νερό και ο αέρας έχουν πολύ μικρό ιξώδες.

Το ιξώδες των αερίων αυξάνεται ενώ το ιξώδες των υγρών μειώνεται όταν αυξάνεται η θερμοκρασία. Στα υγρά οι αποστάσεις μεταξύ των μορίων είναι πολύ μικρότερες από ότι στα αέρια και επομένως οι δυνάμεις συνοχής είναι πολύ μεγαλύτερες από ότι στα αέρια. Στα υγρά το ιξώδες οφείλεται κυρίως στις δυνάμεις συνοχής και αφού οι δυνάμεις μειώνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας, μειώνεται και το ιξώδες. Αντίθετα στα αέρια, οι δυνάμεις συνοχής είναι πολύ μικρές.

Η τιμή του ιξώδους προσδιορίζεται από την εξίσωση ιξώδους του Νεύτωνα λύνοντας ως προς μ : $\mu = \frac{\tau}{du/dy}$

Το ιξώδες μ αποκαλείται και απόλυτο ιξώδες (absolute viscosity) ή δυναμικό ιξώδες (dynamic viscosity) για να μην μπερδεύεται με το κινηματικό ιξώδες ν (kinematic viscosity), το οποίο είναι ο λόγος του ιξώδους προς την πυκνότητα της μάζας, δηλαδή: $\nu = \frac{\mu}{\rho}$.

1.1.3 Συμπιεστότητα

Άλλη μια ιδιότητα των ρευστών ιδιαίτερα σημασίας είναι η συμπιεστότητα. Συμπιεστότητα είναι η ιδιότητα των ρευστών να μεταβάλλουν την πυκνότητα τους με μεταβολή της ορθής εντατικής τους κατάστασης (πίεσης), είτε εν ηρεμία είτε εν κινήσει. Συγκεκριμένα, η αύξηση της πίεσης προκαλεί εν γένει αύξηση της πυκνότητας.

Για την περίπτωση των υγρών, λόγω της μεγάλης πυκνότητας των μορίων τους, επομένως και των μικρών τους αποστάσεων κάτω από μεγαλύτερες πιέσεις η

μεταβολή του όγκου τους είναι αμελητέα. Για τον προαναφερόμενο λόγο θεωρούνται πρακτικά ασυμπίεστα ($p = \text{const}$).

Αντιθέτως στα αέρια, η απόσταση μεταξύ των μορίων είναι πολύ μεγάλη σε σχέση με το μέγεθός τους, οπότε και η πυκνότητά τους είναι μικρή και δεν υφίστανται οι δυνάμεις συνοχής μεταξύ των μορίων. Άρα με την επενέργεια εξωτερικών δυνάμεων, που αυξάνουν την πίεση τους, μπορούν να μειώνουν τον όγκο τους και επομένως να αυξάνουν την πυκνότητά τους.

Η συμπιεστότητα ενός ρευστού εκφράζεται ως το αντίστροφο του μέτρου ελαστικότητας, που ορίζεται ως: $E = \frac{\Delta p}{\Delta p / p_0}$

Η συμπιεστότητα των αερίων είναι στενά συνυφασμένη με την εμφάνιση θερμικών φαινομένων στη μάζα τους. Η εσωτερική θερμική ενέργεια ενός αερίου χαρακτηρίζεται από τη θερμοκρασία του. Η σχέση που συνδέει την πίεση του αερίου, την θερμική του κατάσταση με την πυκνότητά του σε ηρεμία και σε κίνηση ονομάζεται καταστατική εξίσωση: $\frac{p}{\rho} = RT$.

Από το γενικό ορισμό του μέτρου ελαστικότητας μπορούμε να το υπολογίσουμε για τα τέλεια αέρια στην περίπτωση της ισοθερμοκρασιακής μεταβολής: $E = \frac{\Delta p}{\Delta p / p_0} = p_0$ διότι για $T = \text{const}$ έχουμε: $\frac{p}{\rho} = \frac{p_0}{\rho_0} = RT = RT_0 \Rightarrow \frac{\Delta p}{p_0} = \frac{p - p_0}{p_0} = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} = \frac{\Delta \rho}{\rho_0}$

Η συμπιεστότητα των αερίων και κατ' επέκταση των ατμών αποτέλεσε γεγονός εξαιρετικής σημασίας για τους Τεχνολογικούς κλάδους, διότι κατέστη δυνατή η μετατροπή θερμικής ενέργειας σε μηχανικό έργο κατά πρόσφορο τρόπο, όπως στις θερμικές μηχανές, μηχανές εσωτερικής καύσης, στρόβιλοι, jet, πύραυλοι.¹

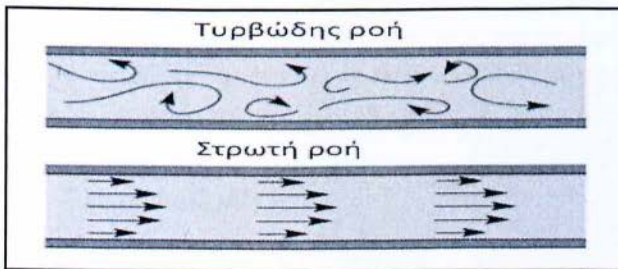
¹ Ανεπτύχθησαν έτσι κλάδοι της Μηχανικής των Ρευστών σε αυτοτελείς κλάδους της επιστήμης, όπως η Αεροδυναμική, ως κλάδος μελέτης του συμπίεστου ρευστού, και Τεχνολογικούς κλάδους που έντονα χρησιμοποιούν τη μελέτη του συμπίεστου ρευστού, αλλά πολλές φορές με άλλες επιδράσεις όπως φαινόμενα καύσης (μηχανές εσωτερικής καύσης, αεροστρόβιλοι).

1.1.4 Είδη Ροών

Οι ροές των ρευστών χωρίζονται σε διάφορες κατηγορίες, ανάλογα με το κριτήριο που χρησιμοποιούμε κάθε φορά. Τα βασικά κριτήρια αναφέρονται παρακάτω:

- 1) **Άτριβη – Ιξώδης** : επίδραση του ιξώδους.
- 2) **Στρωτή / τυρβώδης**: Επίδραση των αδρανειακών δυνάμεων προς των δυνάμεων τριβής.
- 3) **Ασυμπίεστη συμπίεστη**: Επίδραση της πίεσης στην πυκνότητα (πρακτικό νόημα στα αέρια μόνο).
- 4) **Μόνιμη / Μη μόνιμη**: Μεταβολή με το χρόνο.
- 5) **Ομοιόμορφη**: Το μέτρο και η διεύθυνση της ταχύτητας είναι σταθερά κατά μήκος οποιασδήποτε ροϊκής γραμμής του πεδίου ροής.
- 6) **Περιοδική ροή**: πλήρης επαναληψιμότητα στο χώρο ή στο χρόνο.
- 7) **Μονοδιάστατη (1D), δισδιάστατη (2D) ή τρισδιάστατη (3D)**: μεταβολή ως προς 1, 2 ή 3 διευθύνσεις.

Η συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία επικεντρώνεται κυρίως στη Στρωτή και Τυρβώδης ροή των ρευστών, καθώς στη μεν Στρωτή Ροή τα σωματίδια του ρευστού κινούνται ομαλά και παράλληλα μεταξύ τους σε στοιβάδες αφού υπάρχει μόνο μοριακή μεταφορά ορμής και θερμότητας μεταξύ των στρωμάτων, ενώ στη δε Τυρβώδη Ροή υπάρχουν ακανόνιστες, χαοτικές τροχιές των σωματιδίων, μακροσκοπική ανάμειξη, πάντοτε στρόβιλη πάντοτε μη –μόνιμη και μεταφορά μάζας και ενέργειας μεταξύ διαφορετικών περιοχών της ροής.



Σχήμα 1.3 Σχηματική αναπαράσταση στρωτής – τυρβώδους ροής μέσα σε αγωγή

1.1.5 Σύστημα και Όγκος Ελέγχου

Στις φυσικές και εφαρμοσμένες επιστήμες πολύ συχνά χρησιμοποιούνται οι έννοιες Σύστημα (Σ) και Όγκο Ελέγχου (ΟΕ) για τη μελέτη των διαφόρων φαινομένων.

Με τον όρο Σύστημα (Σ) εννοούμε μία διακεκρμένη ποσότητα ύλης, η μάζα της οποίας διατηρείται σταθερή με την πάροδο του χρόνου. Ότι δεν ανήκει στο σύστημα αποτελεί το περιβάλλον του συστήματος. Τα όρια του συστήματος σχηματίζουν μια (νοητή ή πραγματική) επιφάνεια, η οποία χωρίζει το σύστημα από το περιβάλλον του.

Οι Ιδιότητες του Συστήματος είναι οι εξής: α) Το σύστημα μπορεί να εναλλάσσει θερμότητα ή και έργο με το περιβάλλον, αλλά όχι μάζα. Εάν δεν εναλλάσσει ούτε θερμότητα ούτε έργο, λέγεται απομονωμένο, β) Το σύστημα ονομάζεται και κλειστό (λόγο της μη εναλλαγής μάζας) και χρησιμοποιείται συνήθως για τη μελέτη συστημάτων με στερεά σώματα.

Στη μηχανική των ρευστών, επειδή έχουμε ροή το σύστημα δεν είναι βολική έννοια. Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιείται ο όγκος ελέγχου (ΟΕ). Με τον όρο αυτό εννοούμε ένα συγκεκριμένο όγκο (χώρο) διαμέσου του οποίου γίνεται μεταφορά μάζας του ρευστού. Η γεωμετρική επιφάνεια που χωρίζει τον όγκο ελέγχου από το περιβάλλον ονομάζεται επιφάνεια ελέγχου. Ένα όγκος ελέγχου μπορεί να είναι ακίνητος, να κινείται με σταθερή ταχύτητα ή ακόμα να επιταχύνεται.

Οι Ιδιότητες του Όγκου Ελέγχου είναι οι εξής: α) Η εναλλαγή μάζας συνεπάγεται και εναλλαγή ορμής, β) Στην θερμοδυναμική, ο όγκος ελέγχου ονομάζεται ανοικτό σύστημα.

1.2 Ανάλυση σε Μικροσκοπικό επίπεδο ή Διαφορική Ανάλυση

Στη διαφορική ανάλυση απαιτείται επαναδιατύπωση των νόμων της φυσικής έτσι ώστε αυτοί να μπορούν να εφαρμοστούν σε διαφόρους όγκους ελέγχους. Αυτό επιτυγχάνεται με το Διαφορικό Θεώρημα Μεταφοράς το οποίο περιγράφεται παρακάτω:

$$\left(\frac{d\bar{n}}{dt}\right)_{\text{σύστημα}} = \frac{\partial}{\partial t} (n\rho) + \nabla \cdot (n\rho \vec{V}) \quad (1.1)$$

Όπου:

- $\left(\frac{d\bar{n}}{dt}\right)_{\text{σύστημα}}$ ολικός διαφορικός ρυθμός της ιδιότητας N του ρευστού ανά μονάδα όγκου.
- $\frac{\partial}{\partial t}(n\rho)$, διαφορικός ρυθμός μεταβολής της ιδιότητας N του ρευστού στον όγκο ελέγχου.
- $\nabla \cdot (n\rho \vec{V})$, διαφορικός ρυθμός καθαρής εκροής της ιδιότητας N του ρευστού διαμέσου της διαφορικής επιφάνειας.
- n, ποσότητα της ιδιότητας N ανά μονάδα μάζας ρευστού.
- \bar{n} , ποσότητα της ιδιότητας N ανά μονάδα όγκου.

1.2.1 Διαφορική Εξίσωση Συνέχειας Διατήρηση Μάζας

Εφαρμόζοντας το διαφορικό θεώρημα μεταφοράς που προαναφέραμε σε σχέση με την ιδιότητα της μάζας, προκύπτει:

$$n = \frac{m}{m} = 1 \quad (1.2)$$

$$\frac{d(\bar{n})}{dt} = \frac{d(\bar{m})}{dt} = 0 \quad (1.3)$$

Από τις παραπάνω παραδοχές (1.2.1) και (1.2.2) η εξίσωση (1.2) γίνεται:

$$\left(\frac{d\bar{n}}{dt}\right)_{\text{σύστημα}} = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad \text{Διαφορική εξίσωση Συνέχειας} \quad (1.4)$$

Όπου:

- $\frac{\partial \rho}{\partial t}$, ογκομετρικός διαφορικός ρυθμός συσσώρευσης μάζας
- $\nabla \cdot (\rho \vec{V})$, καθαρός ογκομετρικός διαφορικός ρυθμός εκροής μάζας.

Η διαφορική εξίσωση της συνέχειας (1.4) για όλα τα πεδία ροής γίνεται:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \Rightarrow \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} = 0 \quad [\text{Διαφορική Μορφή}]$$

$$\Leftrightarrow \frac{\partial \rho}{\partial t} + u_x \frac{\partial \rho}{\partial x} + \rho \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial \rho}{\partial y} + \rho \frac{\partial u_y}{\partial y} + u_z \frac{\partial \rho}{\partial z} + \rho \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0$$

$$\Leftrightarrow \frac{\partial \rho}{\partial t} + u_x \frac{\partial \rho}{\partial x} + u_y \frac{\partial \rho}{\partial y} + u_z \frac{\partial \rho}{\partial z} + \rho \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = 0$$

$$\Rightarrow \frac{\partial \rho}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \rho + \rho (\nabla \cdot \vec{V}) = 0$$

$$\Rightarrow \frac{1}{\rho} \frac{D\rho}{Dt} + (\nabla \cdot \vec{V}) = 0 \text{ [Διανυσματική Μορφή]}$$

Εξίσωση συνέχειας για ασυμπίεστο ρευστό, ($\frac{D\rho}{Dt}=0$):

$$(\nabla \cdot \vec{V}) = 0 \Rightarrow \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0$$

1.2.2 Διαφορική Εξίσωση Ορμής

Εφαρμόζοντας το διαφορικό θεώρημα μεταφοράς που αναφέραμε πιο πάνω σχέση (1.2) για την ιδιότητα της ορμής, προκύπτει:

$$n = \frac{\vec{I}}{m} = \frac{m \vec{V}}{m} = \vec{V}$$

$$\frac{d(\bar{n})}{dt} = \frac{d(\bar{I})}{dt} = \vec{f}$$

Από τις παραπάνω παραδοχές η σχέση (1.2) γίνεται:

$$\left(\frac{d\bar{I}}{dt}\right)_{\text{συστημα}} = \vec{f} = \frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{V}) + \nabla \cdot (\rho \vec{V}\vec{V})$$

Όπου:

- $\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{V})$, ογκομετρικός διαφορικός ρυθμός μεταβολής ορμής στον διαφορικό όγκο ελέγχου
- $\nabla \cdot (\rho \vec{V}\vec{V})$, καθαρός ογκομετρικός διαφορικός ρυθμός εκροής ορμής.

Ανάλυση Διαφορικής Εξίσωσης Ορμής:

$$\vec{f} = \frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{V}) + \nabla \cdot (\rho \vec{V}\vec{V}) \Rightarrow$$

$$\vec{f} = \rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla (\rho \vec{V}) + \rho \underline{\vec{V} \cdot \nabla} \vec{V} \Rightarrow$$

$$\vec{f} = \rho \left(\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} \right) + \vec{V} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) \quad (i)$$

Από εξίσωση συνέχειας ισχύει ότι $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0$ (ii)

Άρα, από (i) και (ii) έχουμε την διαφορική εξίσωση ορμής:

$$\vec{f} = \rho \left(\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} \right) \quad (1.3)$$

Ανάλυση Διαφορικής Εξίσωσης Ορμής Στο Καρτεσιανό Σύστημα Συντεταγμένων (x, y, z):

Η σχέση (1.3) αναλύεται σε τρεις συνιστώσες στο σύστημα καρτεσιανών συντεταγμένων

$$f_x = \rho \left(\frac{du_x}{dt} + u_x \frac{du_x}{dx} + u_y \frac{du_x}{dy} + u_z \frac{du_x}{dz} \right) \quad (\text{Στον άξονα } x)$$

$$f_y = \rho \left(\frac{du_y}{dt} + u_x \frac{du_y}{dx} + u_y \frac{du_y}{dy} + u_z \frac{du_y}{dz} \right) \quad (\text{Στον άξονα } y)$$

$$f_z = \rho \left(\frac{du_z}{dt} + u_x \frac{du_z}{dx} + u_y \frac{du_z}{dy} + u_z \frac{du_z}{dz} \right) \quad (\text{Στον άξονα } z)$$

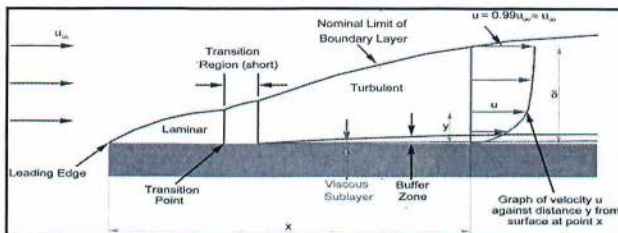
1.3 Ροή ρευστού πάνω σε ακίνητη-σταθερή πλάκα

1.3.1 Οριακό στρώμα (Boundary layer)

Η θεωρία του οριακού στρώματος θεμελιώθηκε από τον Prandtl το 1905, επιτυγχάνοντας να συνδέσει την ιδανική με την ιξώδη ροή. Με βάση την θεωρία του, η επίδραση του ιξώδους γίνεται ιδιαίτερα αισθητή σε ένα πολύ λεπτό στρώμα ρευστού, που ονομάζεται οριακό στρώμα, πλησίον της επιφάνειας του στερεού τοιχώματος.

Το πεδίο ροής από την κίνηση ενός ρευστού πάνω από ένα στερεό μπορεί να χωριστεί δύο περιοχές: το οριακό στρώμα και η περιοχή εκτός αυτού.

Στην περιοχή εκτός του οριακού στρώματος, η ροή διέπεται μόνο από τις δυνάμεις αδράνειας και πίεσης και μπορεί να θεωρηθεί έπειτα από πολύ καλή προσέγγιση άτριβη. Αντίθετα, στην περιοχή του οριακού στρώματος η ροή εκτός από τις προηγούμενες δυνάμεις διέπεται σε σημαντικό βαθμό από τις ιξώδεις δυνάμεις, οι οποίες είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με τις αδρανειακές.



Σχήμα 1.4 Ανάπτυξη οριακού στρώματος πάνω από ακίνητη επίπεδη πλάκα

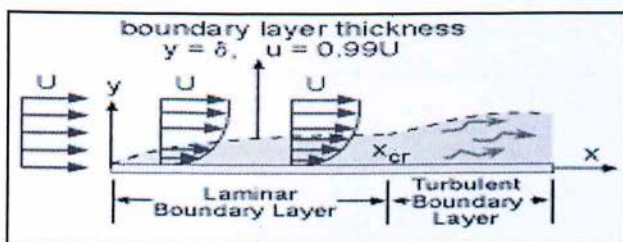
Θεωρούμε ομοιόμορφη, μόνιμη ροή πάνω από μια λεπτή επίπεδη πλάκα η οποία είναι τοποθετημένη παράλληλα προς την διεύθυνση της ροής (σχήμα 1.4).

Πριν φτάσει το ρευστό στην αρχική ακμή της πλάκας έχει μια ομοιόμορφη ταχύτητα u_∞ . Η παρουσία της πλάκας έχει ως αποτέλεσμα το ρευστό πάνω σε αυτή να έχει ίση ταχύτητα με αυτή της πλάκας, λόγω της ιξώδους φύσης του ρευστού.

Από την αρχική ακμή της πλάκας αναπτύσσεται μια διατμητική τάση με αποτέλεσμα να προκαλείται επιβράδυνση της ροής. Έτσι σε διάφορα σημεία της πλάκας αναπτύσσεται κατανομή της ταχύτητας, όπως αυτή που φαίνεται στο (σχήμα 1.4).

Για τη μελέτη ροών γύρω από στερεά σώματα σημαντικό ρόλο παίζουν τα τρία ακόλουθα χαρακτηριστικά μεγέθη του οριακού στρώματος:

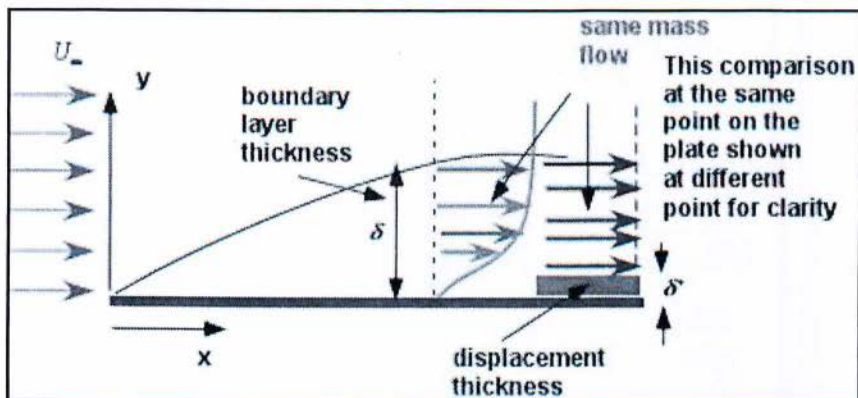
Πάχος οριακού στρώματος (boundary layer thickness), (δ): το πάχος, δ , περιγράφει τη γειτονική περιοχή ως προς την πλάκα σε κάθετη διεύθυνση στην οποία παρατηρείται μεταβολή της ταχύτητας του ρευστού δεν είναι σταθερό κατά την αξονική ως προς την πλάκα διεύθυνση, αλλά γενικά αυξάνεται καθώς μεγάλες ποσότητες ρευστού επιβραδύνονται υπό την επίδραση διατμητικών τάσεων εντός του οριακού στρώματος.



Σχήμα 1.5 Πάχος οριακού στρώματος (δ)

Πάχος μετατόπισης (displacement thickness), δ_1 : ως πάχος μετατόπισης, δ_1 , ορίζεται το πάχος ενός ιδεατού στρώματος ρευστού, ταχύτητας ίσης με την αντίστοιχη της ελεύθερης ροής, μέσα στο οποίο η παροχή του ρευστού είναι ίση με τη μείωση της παροχής μέσα στο οριακό στρώμα, λόγω επιβράδυνσης της ροής. $\delta_1 =$

$$\int_h^{h+\delta} (1 - u/U) dy$$



Σχήμα 1.6 Πάχος μετατόπισης (δ_1)

Πάχος ορμής (momentum thickness), δ_2 : ως πάχος ορμής, δ_2 , ορίζεται το πάχος ενός ιδεατού στρώματος ρευστού, ταχύτητας ίσης με του ελεύθερου ρεύματος, για το οποίο η εισροή ορμής είναι ίση με την αντίστοιχη μείωση αυτής δια μέσου του οριακού στρώματος, λόγω επιβράδυνσης της ροής. $\delta_2 = \int_h^{h+\delta} u/U (1 - \frac{u}{U}) dy$

1.3.2 Είδη Οριακών Στρωμάτων

- **Στρωτό οριακό στρώμα (Laminar Boundary Layer)**

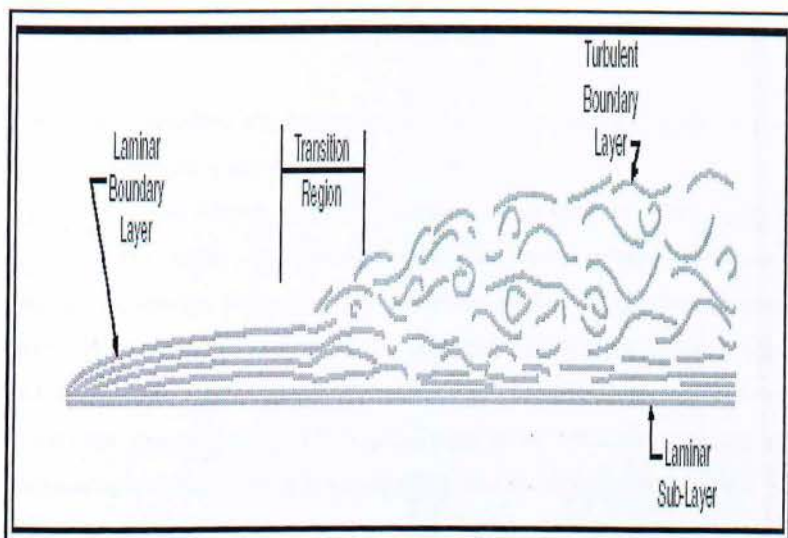
Η Περιοχή μέσα στην οποία για μια μικρή απόσταση από την αρχική ακμή της πλάκας όλα τα στοιχεία του ρευστού κινούνται παράλληλα προς την επιφάνεια και μεταξύ τους.

- **Μεταβατική Περιοχή (Transition Region)**

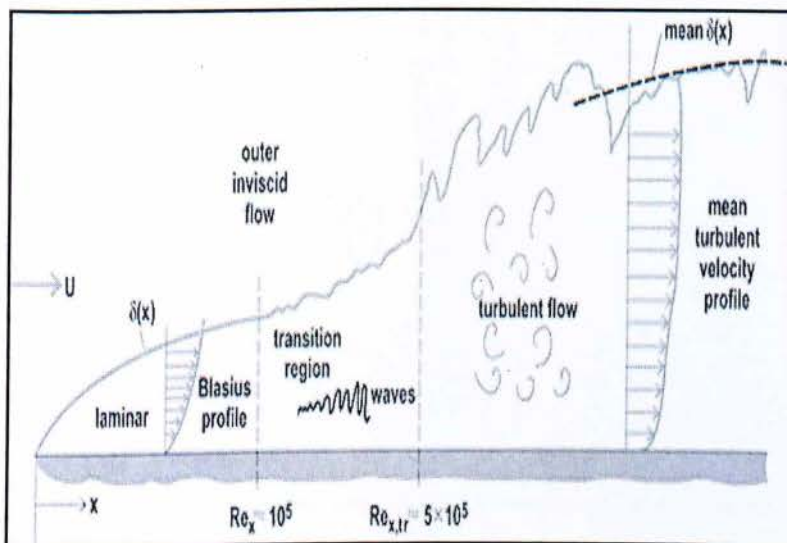
Είναι η περιοχή όπου η ροή παρουσιάζει κάποια σημάδια αστάθειας με την άτακτη και ακανόνιστη γένεση δινών με αύξουσα συχνότητα.

- **Τυρβώδες οριακό στρώμα (Turbulent Boundary Layer)**

Στο τυρβώδες οριακό στρώμα όλη η περιοχή χαρακτηρίζεται από υψηλά επίπεδα τύρβης εκτός μιας πολύ λεπτής ζώνης γνωστής ως στρωτό υπόστρωμα, η οποία βρίσκεται πολύ κοντά και σε επαφή με το στερεό τοίχωμα.



Σχήμα 1.7 Αναπαράσταση ειδών οριακών στρωμάτων



Σχήμα 1.8 Κρίσιμος αριθμός Reynolds στις μεταβατικές περιοχές του οριακού στρώματος

Στην περίπτωση ροής πάνω από πλάκα η κρίσιμη τιμή Re για τη μετάβαση από τη στρωτή στη μεταβατική περιοχή είναι 2×10^5 , ενώ για τη μετάβαση από τη μεταβατική στην πλήρως τυρβώδη είναι 5×10^5 .

1.3.3 Εξισώσεις Οριακού Στρώματος

Η εύρεση των εξισώσεων του οριακού στρώματος ήταν μια από τις πιο σημαντικές προόδους στην δυναμική των ρευστών.

Χρησιμοποιώντας μια διάταξη ανάλυσης μεγέθους, η γνώση που διέπει τις εξισώσεις Navier-Stokes σαν ιξώδη ροή ρευστού μπορούν να απλοποιηθούν σημαντικά εντός του οριακού στρώματος. Συγκεκριμένα, το χαρακτηριστικό των μερικών διαφορικών εξισώσεων γίνεται παραβολική, παρά την ελλειπτική μορφή της πλήρους εξίσωσης Navier-Stokes. Αυτό απλοποιεί σημαντικά τη λύση των εξισώσεων. Κάνοντας την προσέγγιση του οριακού στρώματος, η ροή διαιρείται σε ένα ιξώδες τμήμα (το οποίο είναι εύκολο να λυθεί από έναν αριθμό μεθόδων) και του οριακού στρώματος.

Οι εξισώσεις συνέχειας και Navier-Stokes σε ένα δισδιάστατο σύστημα (x,y) και θεωρώντας ότι η ροή είναι ασυμπίεστη έχουμε:

Εξίσωση συνέχειας σε διαφορική μορφή:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

Εξισώσεις κίνησης Navier-Stokes:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right)$$

Όπου u και v οι συνιστώσες της ταχύτητας, ρ η πυκνότητα, p η πίεση και ν το κινηματικό ιξώδες του υγρού σε ένα σημείο.

Με την προϋπόθεση ότι η ροή είναι ασυμπίεστη και μεγάλου αριθμού Reynolds, οι παραπάνω εξισώσεις **Navier-Stokes** για την διεύθυνση x καταλήγουν στην παρακάτω εξίσωση:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$

Και αν το ρευστό είναι ασυμπίεστο (όπως τα υγρά υπό κανονικές συνθήκες):

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = 0$$

Στην συνέχεια εξετάζεται η περίπτωση της παράλληλης ροής πάνω σε επίπεδη πλάκα στην οποία η στατική πίεση (εξωτερική) είναι σταθερή, δηλαδή

$$\frac{\partial p}{\partial x} = 0$$

Οι διαφορικές εξισώσεις του συστήματος είναι:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$

Με οριακές συνθήκες : $u(y=0)=v(y=0)=0$ και $u(y=\infty)=u_\infty$

Αριθμός Reynolds- Κίνηση αντικειμένων σε ρευστά

Το κριτήριο για το εάν ένα ρευστό κατά τη ροή του συμπεριφέρεται στρωτά η τυρβώδη προκύπτει από τον υπολογισμό ενός αδιάστατου μεγέθους, του αριθμού Reynolds. Ο αριθμός Reynolds είναι ένα ημι – εμπειρικό μέγεθος, εκφράζει τον λόγο του διαλασιασμού της κινητικής ενέργειας ενός στοιχειώδους όγκου του ρευστού δια των απωλειών του σε τριβή:

$$Re = \frac{2 E_{κιν}}{W_{τριβή}}$$

Όσο αυξάνεται η κινητική ενέργεια του ρευστού τόσο ασταθής γίνεται η ροή, ενώ η τριβή του, επιδρά ισορροπητικά στην ροή του ρευστού.

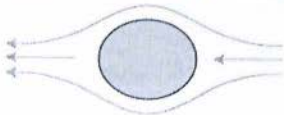
- Για μικρές τιμές του αριθμού Reynolds, δηλαδή για $E_{κιν} \ll W_{τριβή}$ η ροή είναι στρωτή.
- Για $E_{κιν} \gg W_{τριβή}$ εμφανίζονται στροβιλισμοί στη ροή του ρευστού με αποτέλεσμα να γίνεται τυρβώδης.

Για τον υπολογισμό των συνθηκών που εκφράζουν τη ροή του ρευστού εισάγεται ένα χαρακτηριστικό μήκος L, το οποίο περιγράφει τη γεωμετρία του πεδίου ροής.

Ο αριθμός Reynolds ορίζεται πλέον ως :

$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot L}{\eta}$, όπου V η μέση ταχύτητα ροής, ρ η πυκνότητα και ο συντελεστής τριβής (ιξώδες).

Μετάβαση στρωτής σε τυρβώδη ροή στην κίνηση σφαίρας μέσα σε ρευστό:

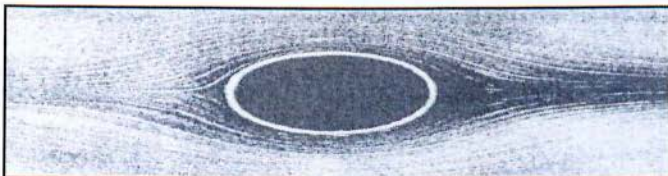


Για κίνηση σφαίρας μέσα σε ρευστό, το L περιγράφει την διάμετρο της σφαίρας, δηλαδή,

$$L = 2 \cdot r \Rightarrow Re = \frac{\rho \cdot V \cdot L}{\eta} = \frac{\rho \cdot V \cdot 2 \cdot r}{\eta}$$

Έχει αποδειχθεί ότι η μετάβαση από στρωτή σε τυρβώδη ροή πραγματοποιείται σε πολύ μικρές τιμές του αριθμού Reynolds. Πειραματικά, έχει δείχθει ότι η κρίσιμη του είναι περίπου η μονάδα : $Re_{κρίσιμη} \approx 1$

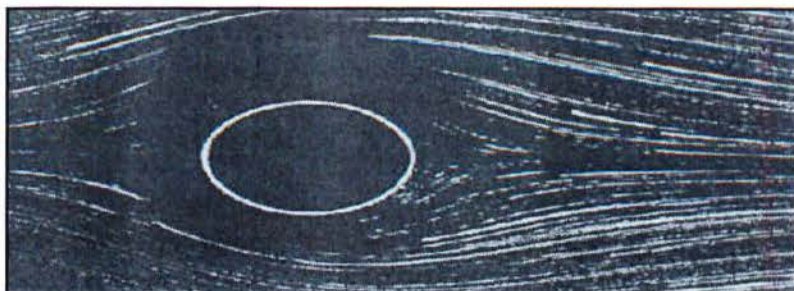
- **Re << 1:**



(Re = 0,16)

Η ροή είναι ιξώδης και σχεδόν συμμετρική ανάντη και κατάντη της σφαίρας

- $Re \approx 1$:



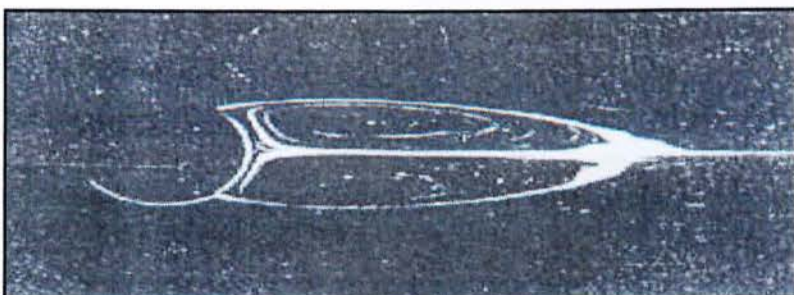
($Re = 1,54$)

Ελαφρά αναπτυσσόμενη ασυμμετρία

- $10 \leq Re \leq 41$:



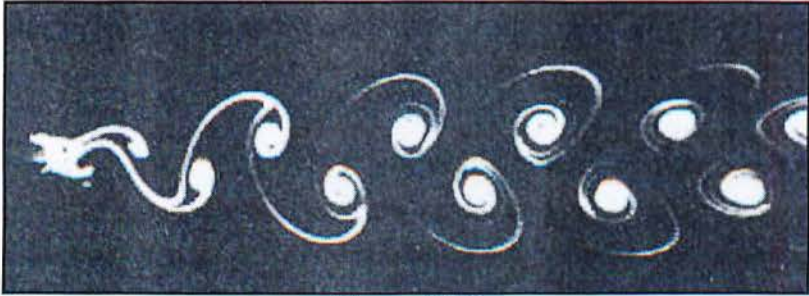
($Re = 26$)



($Re = 41$)

Ο χωρισμός εμφανίζεται, με συνέπεια δύο αντίθετες περιστρεφόμενες δύνες στα ίχνη του κυλίνδρου. Η ροή ακόμα σταθερή και στρωτή.

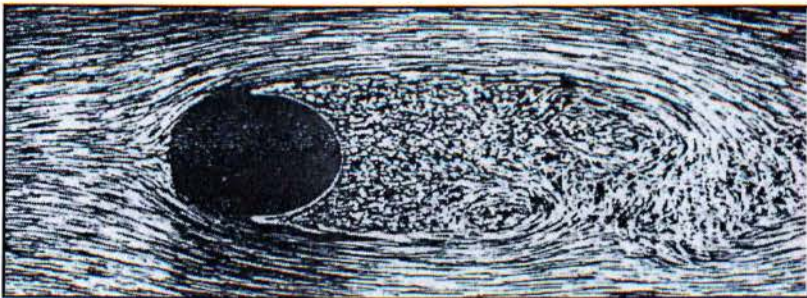
- $41 \leq Re \leq 10^3$:



($Re = 105$)

Ασταθής στρωτή ροή με αντιθέτως περιστρεφόμενες δίνες. Η ροή ακόμα είναι προβλέψιμη.

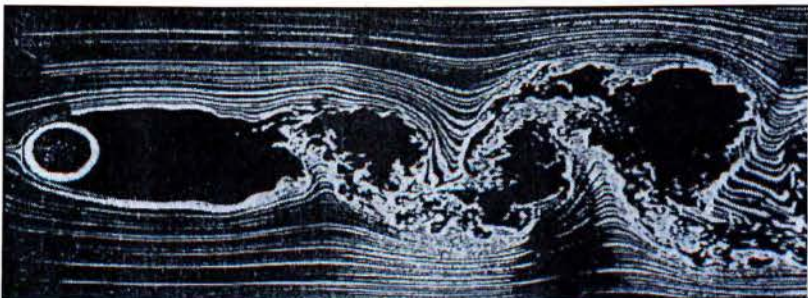
- $Re > 10^3$:



($Re = 2000$)

Οι δίνες είναι ακόμα ασταθείς και η ροή μεταπίπτει σε τυρβώδη

- $Re \approx 10^4$:



($Re = 10000$)

Πλήρως τυρβώδης ροή

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 Εισαγωγή στη θεωρία του ακροφυσίου

2.1 Ορισμός Ακροφυσίου

Ακροφύσιο θεωρείται ένα ανοικτό Θερμοδυναμικό Σύστημα, μέσω του οποίου η ροή θεωρείται, Μονο-Διάστατη, Ασυμπίεστη, Αδιαβατική (Ισοεντροπική- Αντιστρεπτή) και Σταθερής Ροής, με σκοπό την μετατροπή των Ενεργειών, Δυναμική (λόγω πίεσης) και τη Θερμική (λόγω θερμοκρασίας, δηλαδή ενθαλπίας) σε Κινητική Ενέργεια, δηλαδή απόκτησης υψηλής ταχύτητας στην έξοδο.

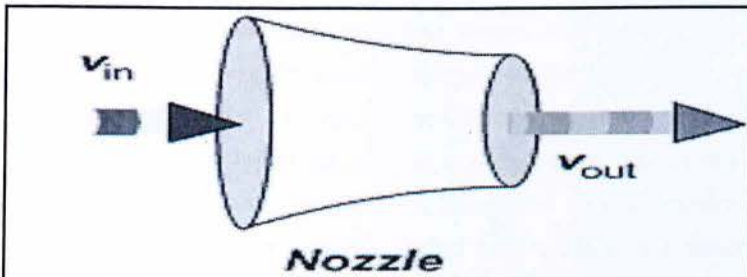
Απλούστερα, ακροφύσιο ονομάζεται το διαμορφωμένο άκρο του αγωγού, στο οποίο η πίεση, η δυναμική ενέργεια ή θερμική ενέργεια του ρέοντος ρευστού μετατρέπονται σε κινητική ενέργεια.

Ένα ακροφύσιο διακρίνεται σε:

A) Συγκλίνον Ακροφύσιο (Convergent Nozzle):

Σε ένα συγκλίνον ακροφύσιο η ροή του ρευστού επιταχύνεται, με την πίεση να μειώνεται με κύριο σκοπό να έχουμε υποηχητική ροή.

Το συγκλίνον ακροφύσιο χρησιμοποιείται στις υδροδυναμικές μηχανές στους υδροστροβίλους δράσης (Pelton) για τη μετατροπή του δυναμικού βαρύτητας σε κινητική ενέργεια πριν από την είσοδο της περωτής (σκαφίδια Pelton). Επίσης στην τεχνολογία των καυστήρων (εξαεριωτής) και τεχνολογία ψεκασμού (sprays) χρησιμοποιείται το ακροφύσιο για την απόσπαση σταγονιδίων από υγρή μάζα.

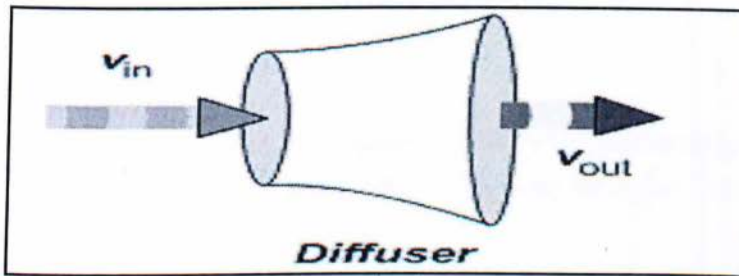


Σχήμα 2.1: Συγκλίνον ακροφύσιο

Β) Αποκλίνον Ακροφύσιο (Divergent Nozzle – Diffuser):

Σε αντίθεση με το συγκλίνον ακροφύσιο, στο αποκλίνον ακροφύσιο ή αλλιώς διαχύτης (diffuser) έχουμε επιβράδυνση της ροής του ρευστού, με την πίεση να αυξάνεται.

Το αποκλίνον ακροφύσιο χρησιμοποιείται στην έξοδο των υδροστροβίλων τύπου Francis ως διαχύτης για την ανάκτηση της πίεσης και βελτίωση του βαθμού απόδοσής τους.



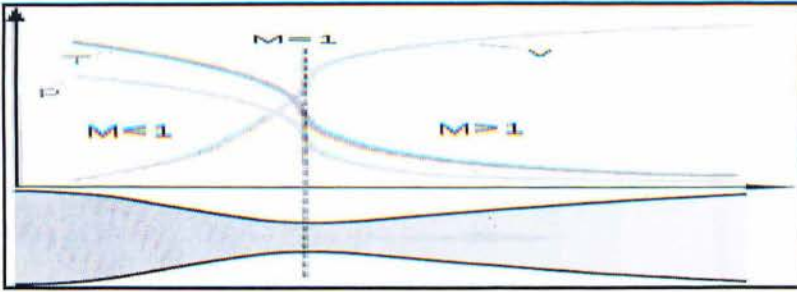
Σχήμα 2.2: Αποκλίνον ακροφύσιο

Γ) Συγκλίνον – Αποκλίνον Ακροφύσιο (de Laval):

Το συγκλίνον – αποκλίνον ακροφύσιο ονομάζεται και ακροφύσιο – Laval, διότι **επινοήθηκε και χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά από το Σουηδό μηχανικό G.P. de Laval (1883), για την επιτάχυνση της ροής του ατμού στους αεροστροβίλους.**

Ο σκοπός του συγκλίνοντος ακροφυσίου είναι η **επίτευξη υπερηχητικής ροής.** Αυτό πραγματοποιείται με το συνδυασμό ενός συγκλίνοντος ακροφυσίου (Convergent Nozzle) και ενός αποκλίνοντος ακροφυσίου (Divergent Nozzle- Diffuser).

Όπως αναφέραμε πιο πάνω ο σκοπός του συγκλίνοντος ακροφυσίου είναι να είναι η ροή πάντοτε υποηχητική ($M < 1$), μπορεί όμως στην περιοχή του λαιμού να γίνεται ηχητική ($M = 1$). Ο σκοπός του αποκλίνοντος ακροφυσίου είναι αν είμαστε στην περίπτωση υποηχητικής ροής η ανάκτηση πίεσης, όπως συμβαίνει για ασυμπίεστο ρευστό, ενώ αν είμαστε στην περίπτωση υπερηχητικής ροής ($M > 1$) είναι η επίτευξη υψηλών τιμών του αριθμού Mach για χρήση στις αεροδυναμικές σύραγγες.



Σχήμα 2.3 P, T, M σε διαφορετικά σημεία σε όλο το μήκος του ακροφυσίου

2.2 Αριθμός Mach

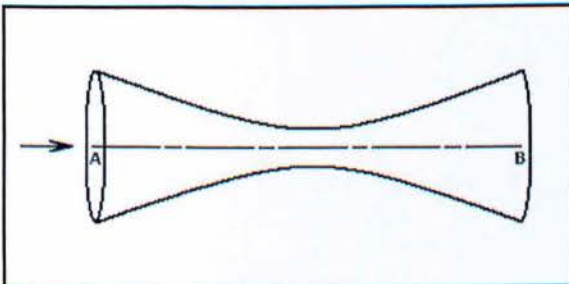
Για το χαρακτηρισμό μιας ροής ως συμπιεστή ή ασυμπιεστή, χρησιμοποιείται σαν κριτήριο ο αριθμός Mach M, δηλαδή ο λόγος της ταχύτητας του ρευστού (u) προς της ταχύτητας του ήχου (c).

Ο αριθμός Mach δίνεται από την ακόλουθη την σχέση: $M = \frac{u}{c}$

Για τις περιπτώσεις όπου:

- $M < 1$, η ροή χαρακτηρίζεται Υποηχητική (subsonic)
- $M < 1$, η ροή χαρακτηρίζεται Ακουστική (sonic)
- $M > 1$, η ροή χαρακτηρίζεται Υπερηχητική (supersonic)

2.3 Ανάλυση Μονοδιάστατης ροής Ρευστού δια μέσου Συγκλίνοντος – Αποκλίνοντος ακροφυσίου



Σχήμα 2.4 Σχηματική αναπαράσταση συγκλίνοντος-αποκλίνοντος ακροφυσίου

Υποθέτοντας ότι:

- Έχουμε σταθερή ροή
- Μη ιξώδεις ροή - inviscid
- Δεν υπάρχει καμία επίδραση δυνάμεων πάνω στο ακροφύσιο

Διατήρηση της μάζας

$$\iiint_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \iint_S \rho \vec{U} \cdot \vec{n} dS = 0 \quad (2.1)$$

Διατήρηση της ορμής

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho \vec{U} dV + \iint_S \rho (\vec{U} \cdot \vec{n}) \vec{U} dS = - \iint_S p dS + \iiint_V \rho \vec{f} dV + F_{\text{viscous}} \quad (2.2)$$

Διατήρηση της Ενέργειας

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho \left(e + \frac{U^2}{2} \right) dV + \iint_S \rho \left(e + \frac{U^2}{2} \right) \vec{U} \cdot \vec{n} dS = - \iint_S p \vec{U} \cdot \vec{n} dS + \iiint_V \rho \frac{\partial q}{\partial t} dV + \iiint_V \rho (\vec{f} \cdot \vec{U}) dV \quad (2.3)$$

Η εξίσωση (2.1) γίνεται:

$$\iiint_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \iint_S \rho \vec{U} \cdot \vec{n} dS = 0$$

$$-\rho u A + (u + du)(\rho + d\rho)(A + dA) = 0$$

$$-\rho u A + \rho u A + \rho u dA + d\rho u A + \dots = 0$$

$$\rho A u = \text{Const.}$$

$$\frac{dA}{A} + \frac{d\rho}{\rho} + \frac{du}{u} = 0$$

Αντίστοιχα η εξίσωση (2.2) γίνεται:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho \vec{U} dV + \iint_S \rho (\vec{U} \cdot \vec{n}) \vec{U} dS = - \iint_S p dS + \iiint_V \rho \vec{f} dV + F_{\text{viscous}}$$

$$-\rho u^2 A + (\rho + d\rho)(u + du)(u + du)(A + dA) = PA - (P + dP)(A + dA) + 2 \left(\frac{P dA}{2} \right)$$

$$-\rho u^2 A + \rho u^2 A + \rho u^2 dA + u^2 A d\rho + \rho u A du + \rho u A du = P A - P A - P dA - A dP + P dA$$

$$u(\rho u dA + u A d\rho + \rho A du) + \rho u A du = A dP$$

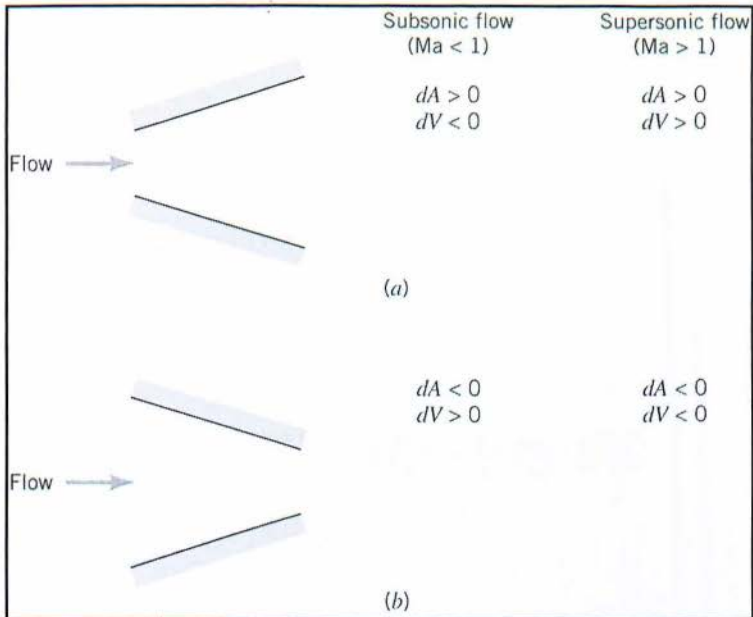
$$dP = -\rho u du \Rightarrow \frac{dP}{\rho} = \frac{dP}{d\rho} \frac{d\rho}{\rho} = -u du \left(\alpha^2 = \frac{dP}{d\rho} \right) \Rightarrow \frac{d\rho}{\rho} = -\frac{u}{\alpha^2} du$$

$$\text{Από: } \frac{dA}{A} + \frac{d\rho}{\rho} + \frac{du}{u} = 0 \Rightarrow \frac{dA}{A} + \frac{du}{u} - \frac{u}{\alpha^2} du = 0$$

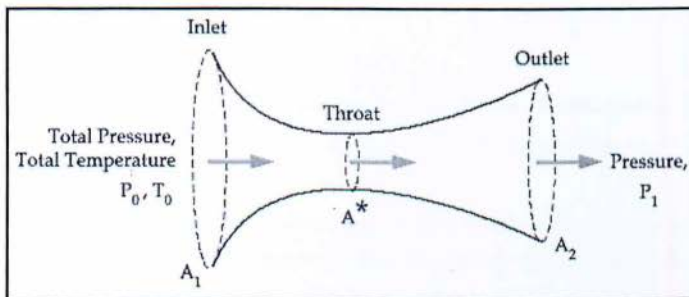
$$\frac{dA}{A} + \frac{du}{u} \left(1 - \frac{u^2}{\alpha^2} \right) = \frac{dA}{A} + \frac{du}{u} (1 - M^2) = 0$$

$$\frac{dA}{A} = (M^2 - 1) \frac{du}{u} \quad (2.4)$$

Η σχέση (2.4) μας λέει ορισμένα "παράδοξα" πράγματα. Μας λέει π.χ. αν $M < 1$ τότε αύξηση του εμβαδού της διατομής προξενεί ελάττωση της ταχύτητας, που βλέπουμε "λογικό", αν όμως $M > 1$ τότε το αντίθετο συμβαίνει, δηλαδή αύξηση του εμβαδού προκαλεί αύξηση της ταχύτητας, το "παράδοξο". Μας λέει επίσης όταν η ταχύτητα είναι σταθερή και $M=1$, τότε θα πρέπει $dA=0$, δηλαδή $M=1$ επιτυγχάνεται, είτε από τον αυχένα ή κατά την έξοδο από το ακροφύσιο όταν $dA=0$.



Σχήμα 2.5 Διαχωρισμός συγκλίνοντος-αποκλίνοντος ακροφύσιου σε ακροφύσιο-διαχύτη



Σχήμα 2.6 Συγκλίνον-αποκλίνον ακροφύσιο

Ισεντροπική σχέση:

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^\gamma = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

Εξίσωση της ενέργειας:

$$c_p T_0 = c_p T + \frac{V^2}{2} \Rightarrow \frac{T_0}{T} = 1 + \frac{V^2}{2c_p T} = 1 + \frac{\gamma-1}{2} \frac{V^2}{\gamma R T}$$

$$\frac{T_0}{T} = 1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \quad (2.5)$$

$$\frac{P_0}{P} = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (2.6)$$

$$\frac{\rho_0}{\rho} = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2\right)^{\frac{1}{\gamma-1}} \quad (2.7)$$

Στο στόμιο του ακροφυσίου, ισχύει: $A^*, P^*, T^*, \rho^*, M^*=1$

$$\rho^* u^* A^* = \rho u A$$

$$M^* = \frac{u^*}{\alpha^*} = 1 \Rightarrow u^* = \alpha^*$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{T_0}{T} = 1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \\ \frac{P_0}{P} = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \\ \frac{\rho_0}{\rho} = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2\right)^{\frac{1}{\gamma-1}} \end{array} \right. \Rightarrow \left(\frac{A}{A^*}\right)^2 = \left(\frac{\rho^*}{\rho}\right)^2 \left(\frac{\alpha^*}{u}\right)^2 = \left(\frac{\rho^*}{\rho_0}\right)^2 \left(\frac{\rho_0}{\rho}\right)^2 \left(\frac{\alpha^*}{u}\right)^2 \left(\frac{\alpha^*}{\alpha^*}\right)^2$$

$$= \frac{1}{M^2} \left[\frac{2}{\gamma-1} \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2\right) \right]^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}$$

2.4 Ροή σε ιδεατό υπερηχητικό ακροφύσιο με Κάθετο Κρουστικό Κύμα (ΚΚΚ) ακριβώς στην έξοδο

Ο σχηματισμός κρουστικών κυμάτων είναι σχεδόν πάντοτε αναπόφευκτος. Στην παράγραφο αυτή θα θεωρήσουμε, ότι ένα ΚΚΚ σχηματίζεται ακριβώς στην έξοδο του ακροφυσίου.

Από τις παραπάνω σχέσεις του προηγούμενου κεφαλαίου, γίνεται αντιληπτό, ότι σε κάθε περίπτωση διαμόρφωσης συγκεκριμένης ροής τέλει αερίου υπάρχει μία και μόνη τιμή του λόγου των πιέσεων εσωτερικά και εξωτερικά του ακροφυσίου, για την οποία σχηματίζεται ΚΚΚ ακριβώς στην έξοδο.

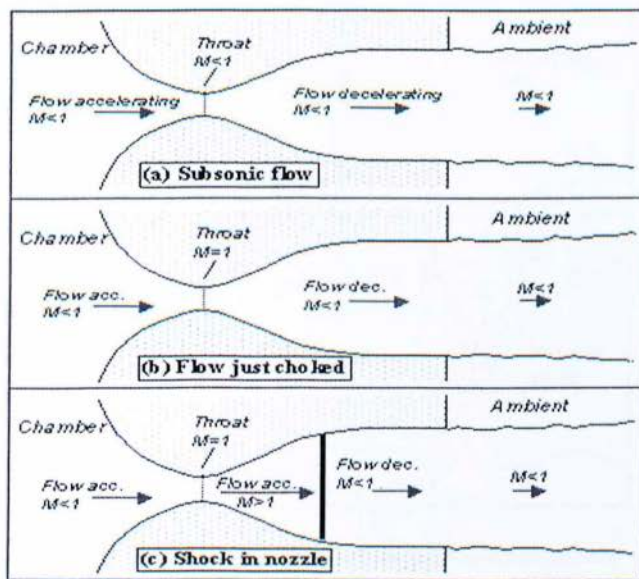
Ο προσδιορισμός όμως του λόγου αυτών των πιέσεων έτσι ώστε να σχηματίζεται ακριβώς στην έξοδο του ακροφυσίου προϋποθέτει, ότι η ροή είναι, τουλάχιστον στο επίπεδο της εξόδου μονοδιάστατη. Αυτή η θεώρηση όμως δεν επαληθεύεται στην πράξη.

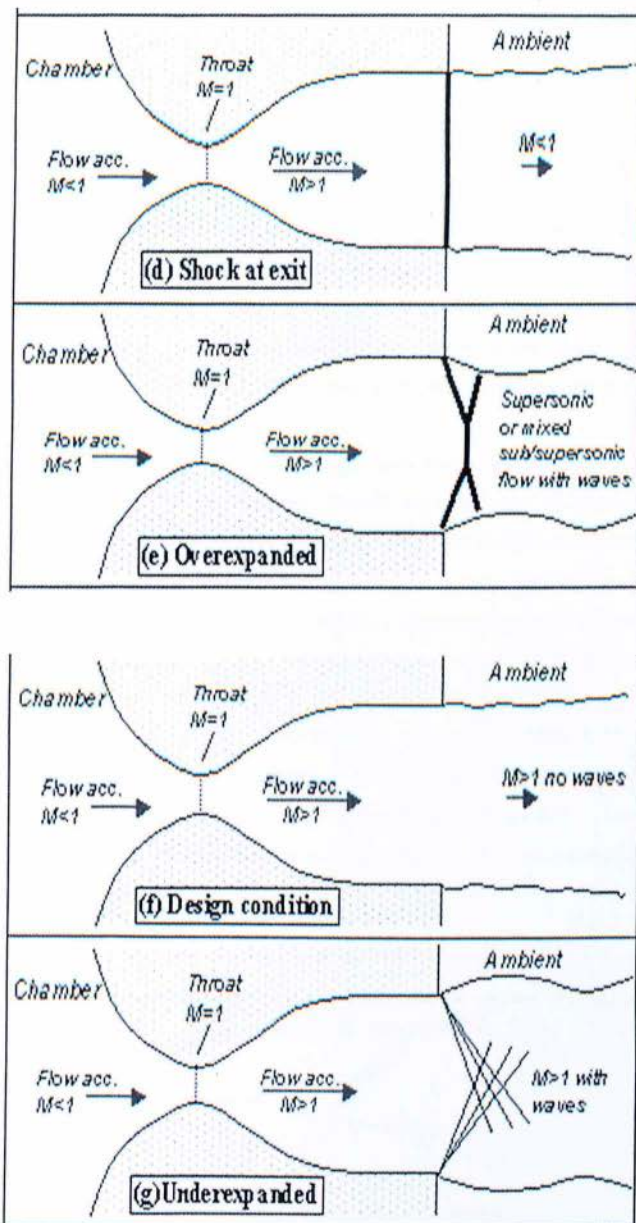
Στην πράξη, συμπιεστή ροή μέσα στο ακροφύσιο δεν είναι ούτε μονοδιάστατη αλλά ούτε ισεντροπική. Η γεωμετρία, η τραχύτητα και το σχήμα των τοιχωμάτων επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την εξέλιξη της ροής.

Έτσι, στο **συγκλίνον τμήμα του ακροφυσίου** που η ροή είναι υποηχητική $M < 1$ και η μεταβολή της πίεσης κατά μήκος της ροής είναι πάντοτε $\frac{\partial p}{\partial x} < 0$, δεν υπάρχει φόβος σχηματισμού ΚΚΚ, ούτε και αποκόλλησης της ροής από τα τοιχώματα. Επομένως, οποιοδήποτε σχήμα με ομαλές και καμπύλες επιφάνειες είναι κατάλληλο για το συγκλίνον τμήμα του ακροφυσίου.

Το ίδιο όμως δεν γίνεται στην περίπτωση υπερηχητικής ροής. Ως γνωστόν, μια ροή μπορεί να εξελιχθεί υπερηχητικά όταν στην στένωση έχει αποκτήσει $M=1$ μόνο στο **αποκλίνον τμήμα του ακροφυσίου**. Εκεί, μία λανθασμένη επιλογή σχετικά με το σχήμα και την τραχύτητα των τοιχωμάτων, έχει σαν πιθανό αποτέλεσμα τη δημιουργία κρουστικών κυμάτων, που υποβαθμίζουν τη ροή και αποτελούν μειονέκτημα, λόγω κακού σχεδιασμού.

Το **αποκλίνον τμήμα** ενός υπερηχητικού ακροφυσίου σχεδιάζεται με πολύ λείες επιφάνειες, με μικρή γωνία κορυφής που επιτρέπουν στη ροή να εξελιχθεί σε υπερηχητική χωρίς την δημιουργία ενδιάμεσων κρουστικών κυμάτων.





Σχήμα 2.7 Σχηματική αναπαράσταση δημιουργίας κροστικού κύματος

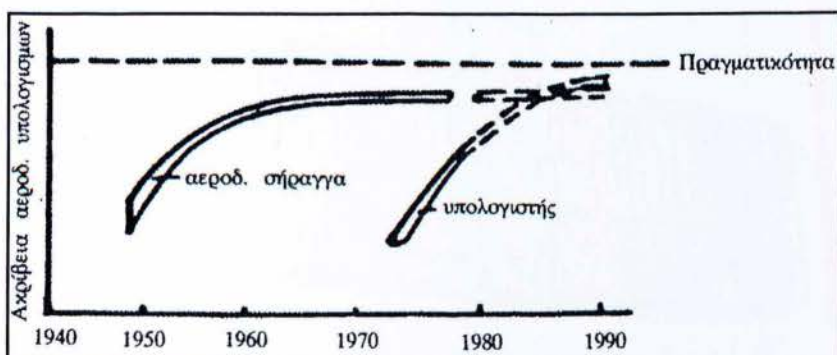
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Ο Ηλεκτρονικός Υπολογιστής και η Μηχανική των Ρευστών

3.1 Ο υπολογιστής και η μηχανική ρευστών

Η επίδραση των υπολογιστών στον τομέα της Μηχανικής των Ρευστών και ιδιαίτερα στο τομέα της Αεροδυναμικής υπήρξε σημαντική. Μέχρι το τέλος της δεκαετίας του 1960 οι λύσεις των προβλημάτων της αεροδυναμικής προέρχονταν είτε από πειραματική προσομοίωση των προβλημάτων σε αεροδυναμική σήραγγα είτε από αναλυτικές λύσεις απλοποιημένων εξισώσεων με παραδοχές των οποίων η αξιοπιστία ήταν αμφισβητήσιμη.

Η αεροδυναμική σήραγγα η οποία έχει τόσο ευρεία χρήση στη μελέτη των αεροδυναμικών φαινομένων μπορεί να θεωρηθεί ως μηχανισμός ολοκλήρωσης των διαφορικών εξισώσεων που εκφράζουν το πεδίο ροής. Συνήθως τα αποτελέσματα που παίρνουμε από την αεροδυναμική σήραγγα αναφέρονται σε ολοκληρωτικά μεγέθη του πεδίου ροής, όπως συντελεστές άνωσης και αντίστασης του αεροσκάφους C_L και C_D , σπανιότερα δε σε σημειακά μεγέθη του πεδίου ροής, όπως ταχύτητες και πιέσεις σε διάφορες θέσεις.

Σήμερα η συμμετοχή του ηλεκτρονικού υπολογιστή στην επίλυση των προβλημάτων της Μηχανικής των Ρευστών είναι σχεδόν πρωταρχική, σε ορισμένες δε περιπτώσεις οι λύσεις που παρέχει ο ηλεκτρονικός υπολογιστής είναι αρκετά αξιόπιστες και δεν κρίνεται αναγκαίος η σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων με εργαστηριακές μετρήσεις.

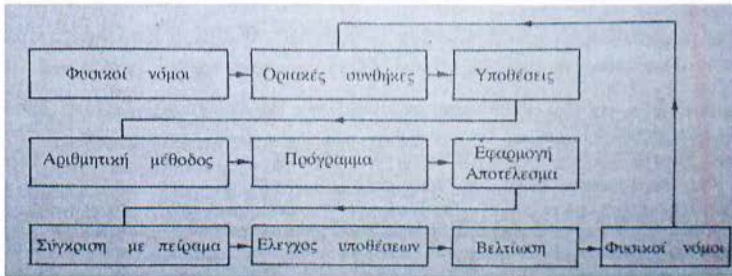


Σχήμα 3.1 Σύγκριση αξιοπιστίας Η/Υ και Αεροδυναμικής Σήραγγας

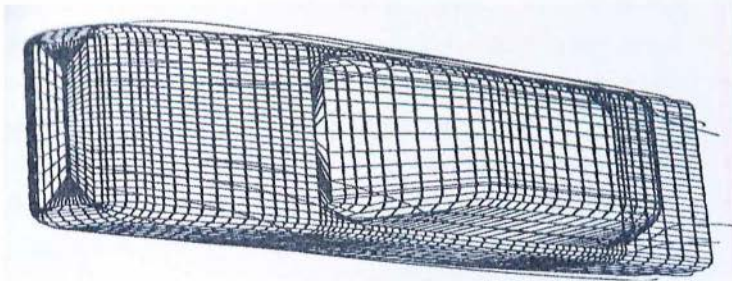
Ο ηλεκτρονικός υπολογιστής όταν μπορεί αξιόπιστα να επιλύσει ένα πεδίο ροής έχει πολύ μεγάλες δυνατότητες και σε ορισμένες περιπτώσεις ακόμα και μεγαλύτερες από την εναλλακτική λύση της φυσικής προσομοίωσης καθώς η πειραματική προσομοίωση ενδεχομένως να μην είναι πλήρης λόγω των αλληλεπιδράσεων των υλικών της πειραματικής διάταξης και της αδυναμίας προσομοίωσης ορισμένων συνθηκών π.χ. αριθμός Reynolds και Mach. Οι υπολογιστές δεν έχουν τόσο πρόβλημα σε αυτούς τους περιορισμούς όσο σε προβλήματα ταχύτητας εκτέλεσης πράξεων, χωρητικότητας μνήμης σε συνδυασμό με την πλήρη μαθηματική περιγραφή των παραμέτρων που αλληλεπιδρούν στο εκάστοτε φαινόμενο.

Προς το παρόν τόσο τα υπολογιστικά μοντέλα όσο και τα πειραματικά αλληλοσυμπληρώνονται, ο υπολογιστής όμως έχει πολύ μεγαλύτερο ρυθμό εξέλιξης αλλά και μείωση κόστους εκτέλεσης των αριθμητικών πράξεων.

Τέλος ο H/Y εκτός από τη δυνατότητα της επίλυσης προβλημάτων πρακτικού ενδιαφέροντος συμβάλλει σημαντικά στον έλεγχο της ορθότητας των φυσικών υποθέσεων που υπάρχουν στις βασικές ρευστομηχανικές εξισώσεις.



Σχήμα 3.2 Διαδικασία υπολογιστικού ελέγχου φυσικών υποθέσεων



Σχήμα 3.3 Δυναμική Ροή γύρω από αυτοκίνητο- Γραμμές ροής

3.2 Αρχιτεκτονική του Υπολογιστή

Ο Υπολογιστής αποτελείται από το υλικό μέρος hardware όπως ο δίσκος, η οθόνη, μηχανικά μέρη κ.λπ και από τα προγράμματα ελέγχου λειτουργίας το γνωστό software όπως το λειτουργικό σύστημα, γλώσσα προγραμματισμού κ.λπ.

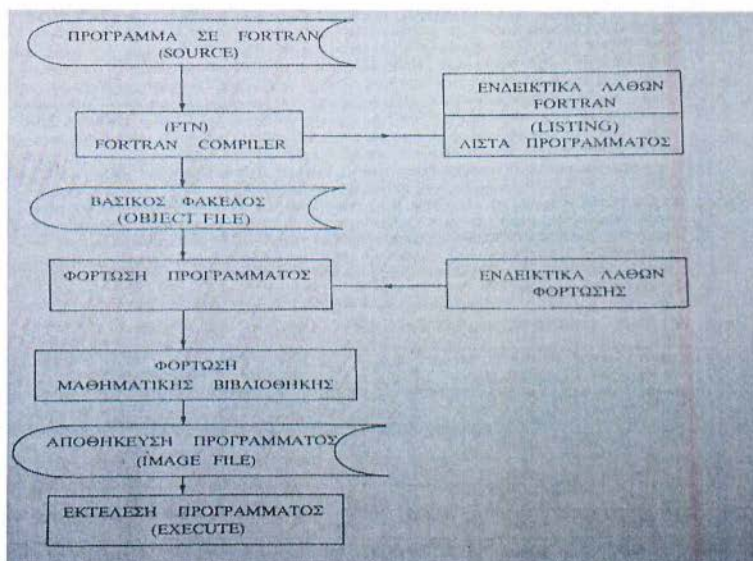
Μονάδα εισόδου: Η μονάδα αυτή αποτελεί την δίοδο επικοινωνίας του χρήστη με την μηχανή. Αυτού του είδους οι μονάδες διαβάζουν μαγνητικές ταινίες ή δίσκους που φέρουν αποτυπωμένες ψηφιακές πληροφορίες.

Μονάδα μνήμης: Στη μνήμη του υπολογιστή αποθηκεύονται όλες οι πληροφορίες που δίνονται από τη μονάδα εισόδου είτε ως πρόγραμμα είτε ως δεδομένα. Επιπλέον αποθηκεύονται όλες οι πληροφορίες που ο ίδιος ο υπολογιστής δημιουργεί κατά τη διάρκεια επίλυσης του προβλήματος και όλες οι εντολές και τα προγράμματα που χρειάζονται για τη λειτουργία του και που αναφέρονται στον τρόπο εκτέλεσης των βασικών αριθμητικών πράξεων, αποθήκευσης των αποτελεσμάτων και επικοινωνίας του με άλλες μονάδες του συστήματος.

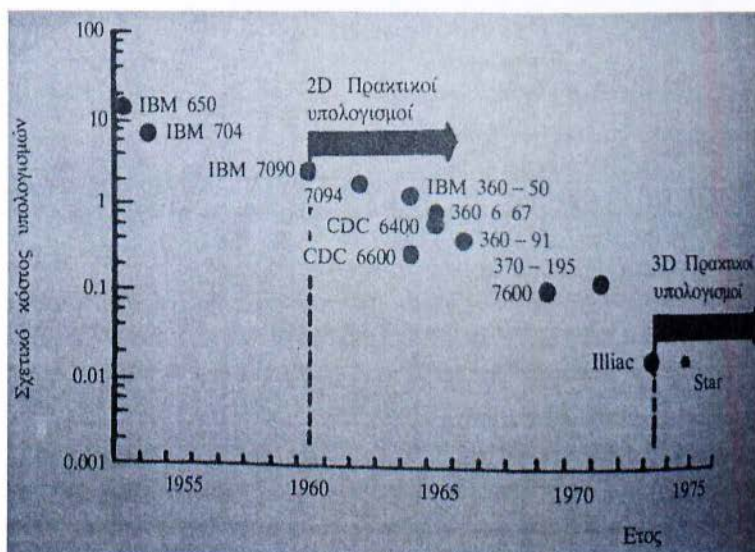
Κεντρική υπολογιστική μονάδα: Η κεντρική υπολογιστική μονάδα αποτελεί το σημαντικότερο μέρος του υπολογιστή και κύριος σκοπός της είναι η εκτέλεση των αριθμητικών πράξεων και διαφόρων συμβολικών διεργασιών. Η μονάδα επικοινωνεί με τη μνήμη του υπολογιστή και η μνήμη με τις μονάδες εισόδου και εξόδου. Κύριο χαρακτηριστικό του υπολογιστή είναι η ταχύτητα επικοινωνίας της μονάδας αυτής με τη μνήμη.

Μονάδα εξόδου: Με τη μονάδα αυτή ο υπολογιστής έχει τη δυνατότητα να επικοινωνεί με άλλες εξωτερικές μονάδες. Οι μονάδες αυτές μπορεί να είναι ένας εκτυπωτής, μια μαγνητική ταινία, δίσκος, κ.λπ.

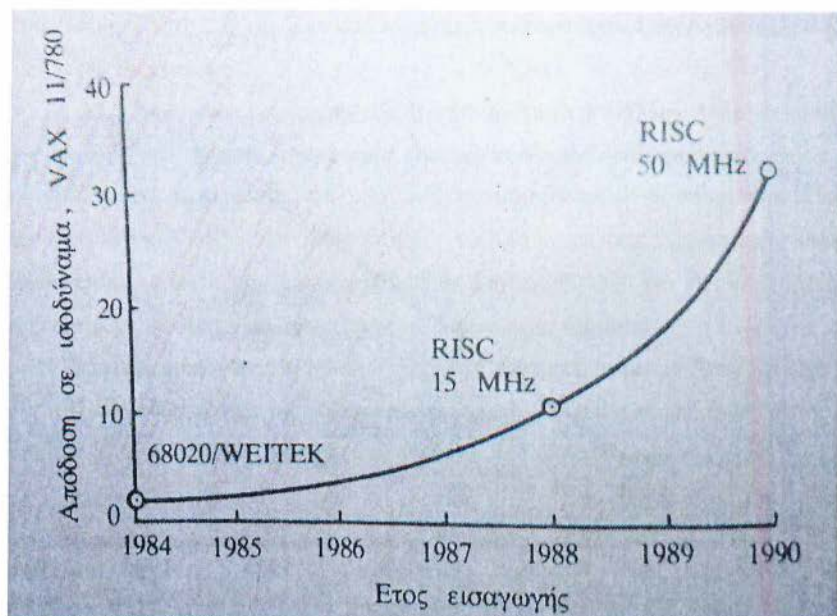
Μεταγλωττιστής: Ο μεταγλωττιστής είναι ένα πρόγραμμα που μετατρέπει/μεταφράζει κείμενο γραμμμένο σε μια γλώσσα προγραμματισμού σε μια άλλη. Το κείμενο της εισόδου ονομάζεται πηγαίος κώδικας (source code) και η έξοδος του προγράμματος αντικειμενικός κώδικας (object code). Ο όρος μεταγλωττιστής χρησιμοποιείται κυρίως για προγράμματα που μεταφράζουν μια γλώσσα προγραμματισμού υψηλού επιπέδου σε μία γλώσσα χαμηλού επιπέδου (όπως η συμβολική γλώσσα ή η γλώσσα μηχανής).



Σχήμα 3.4 Διαδικασία μετατροπής προγράμματος χρήστη σε γλώσσα μηχανής



Σχήμα 3.5 Εξέλιξη της πτώσης του υπολογιστικού κόστους την περίοδο 1950-1975



Σχήμα 3.6 Εξέλιξη υπολογιστικής ισχύος σταθμών εργασίας την περίοδο 1984-1990

3.3 Υπολογιστική Ρευστομηχανική

Σκοπός της Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής (Computational Fluid Dynamics), είναι να επιλύσει αριθμητικά με τη βοήθεια του ηλεκτρονικού υπολογιστή, τις διαφορικές εξισώσεις που εκφράζουν μαθηματικά τα πεδία ροής. Με την επίλυση αυτών των εξισώσεων σχεδιάζονται και βελτιώνονται οι μηχανολογικές κατασκευές, ειδικά των αεροπορικών κατασκευών.

Ο Richardson (1910) ήταν από τους πρώτους που εφάρμοσε τεχνικές χαλάρωσης (επαναληπτικές μέθοδοι) για να υπολογίσει τη διανομή των τάσεων σε ένα φράγμα, και από τους πρώτους που διαχώρισε τα προβλήματα που μπορούν να επιλυθούν με μεθόδους χαλάρωσης από τα προβλήματα προέλασης. Λίγα χρόνια αργότερα οι Courant, Friedrichs και Levy (1928) δημοσίευσαν το κριτήριο CFL που ορίζει την ευστάθεια των αριθμητικών υπολογισμών επίλυσης υπερβολικού τόξου εξισώσεων καθώς και τη διερεύνηση τους για την ύπαρξη και μοναδικότητα λύσης των μερικών διαφορικών εξισώσεων. Αργότερα ο J. V. Neumann δημοσίευσε αντίστοιχη μέθοδο για τον έλεγχο ευστάθειας λύσης παραβολικού τύπου διαφορικών εξισώσεων. Τέλος, σημαντικές πρόοδοι στην αριθμητική επίλυση υπερηχητικών ροών έγιναν τη δεκαετία

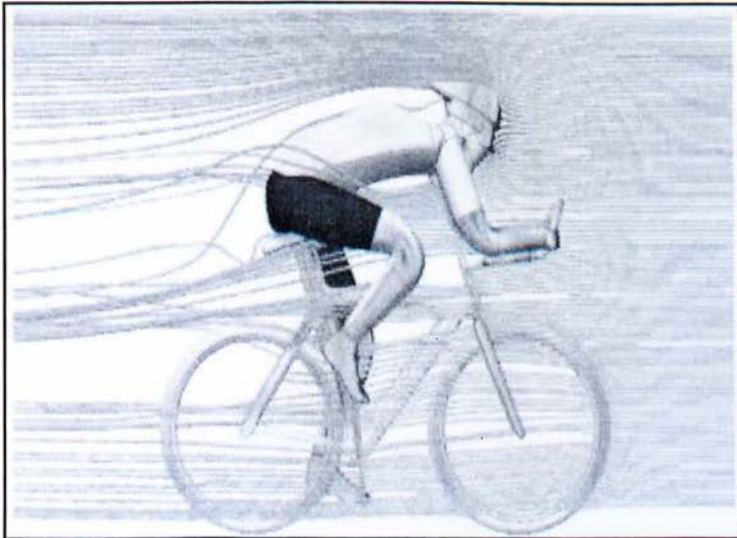
του 1960 από τους Lax και Wendroff αναπτύσσοντας αριθμητικά σχήματα σύλληψης των κυμάτων κρούσης.

Τα τελευταία χρόνια έμφαση έχει δοθεί στην αριθμητικής επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes σε σύνθετες τοπογραφίες και στην αριθμητική επίλυση των εξισώσεων σε γενικευμένα καμπυλόγραμμα συστήματα συντεταγμένων πάνω σε μη δομημένα αριθμητικά πλέγματα. Οι δυνατότητες της υπολογιστικής ρευστομηχανικής καθορίζονται από τη σημερινή διαθέσιμη υπολογιστική ισχύ και την αριθμητική συμπεριφορά των αλγορίθμων επίλυσης των διαφορικών εξισώσεων.

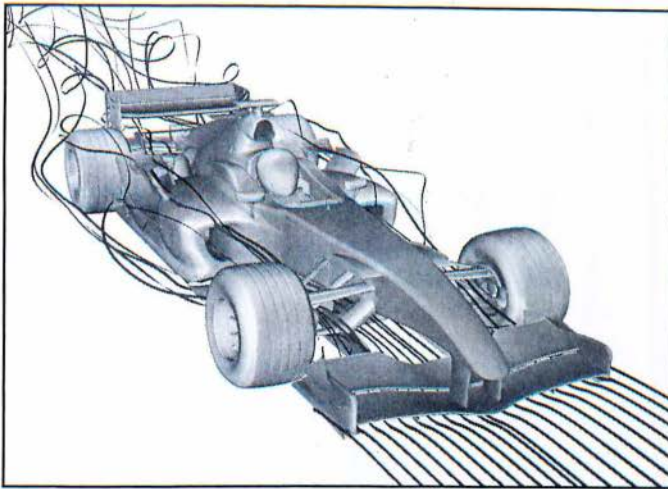
Η Υπολογιστική Ρευστομηχανική είναι ένα δυναμικά αναπτυσσόμενος τομέας έρευνας με ενδιαφέροντα αποτελέσματα και προοπτικές εξέλιξης που όμως απαιτεί γνώσεις ρευστομηχανικής, αριθμητικής ανάλυσης και προγραμματισμού.

3.4 Πεδία εφαρμογής της Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής

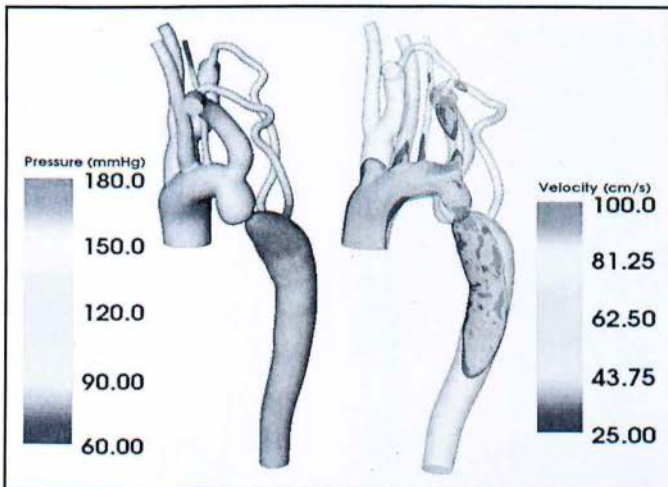
Τα πεδία εφαρμογής της υπολογιστικής ρευστομηχανικής είναι άπειρα, ενδεικτικά, αναφέρονται τα παρακάτω:



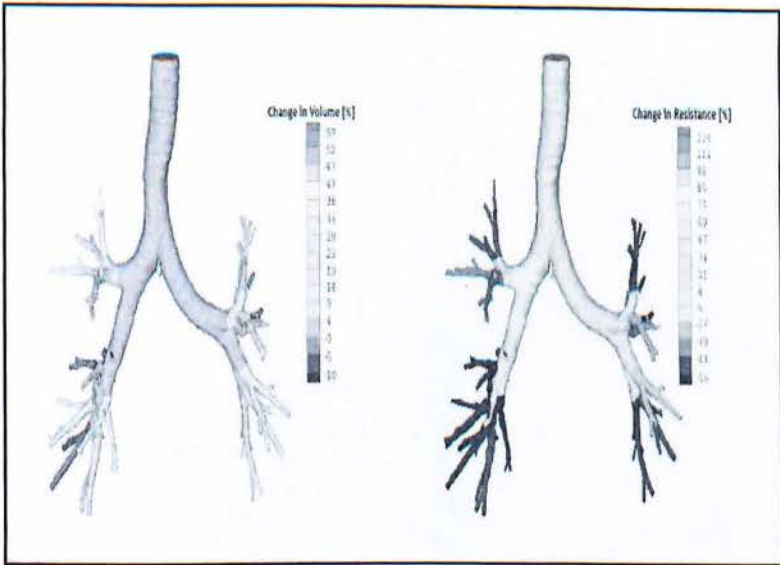
Σχήμα 3.7α Αεροδυναμική προσομοίωση ποδηλάτη



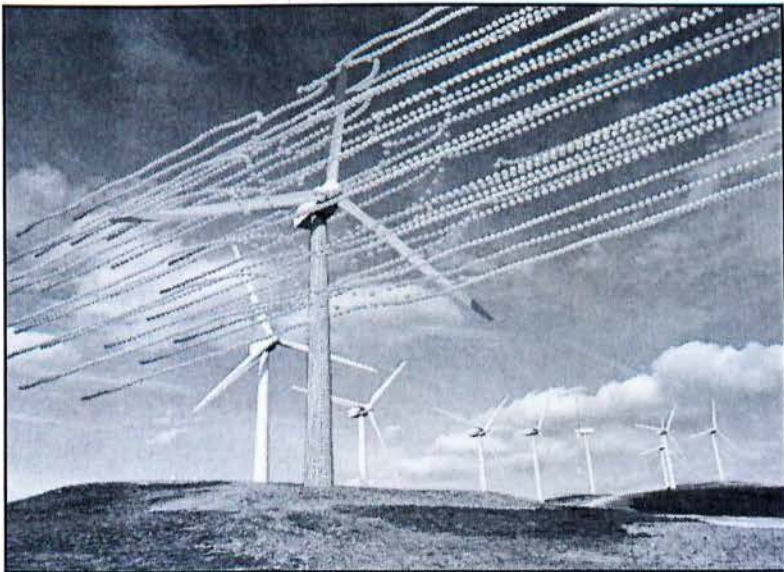
Σχήμα 3.7β Αεροδυναμική αγωνιστικών οχημάτων



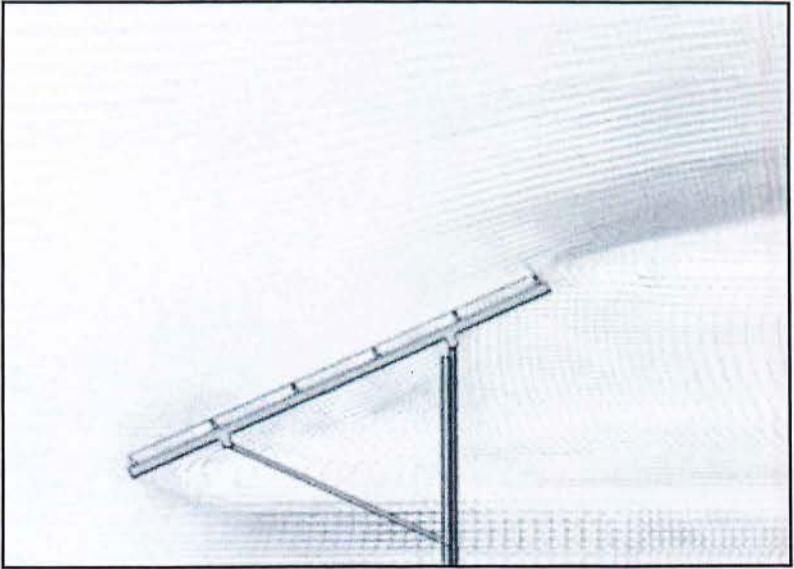
Σχήμα 3.7γ Πίεση και ταχύτητα αίματος στα αιμοφόρα αγγεία



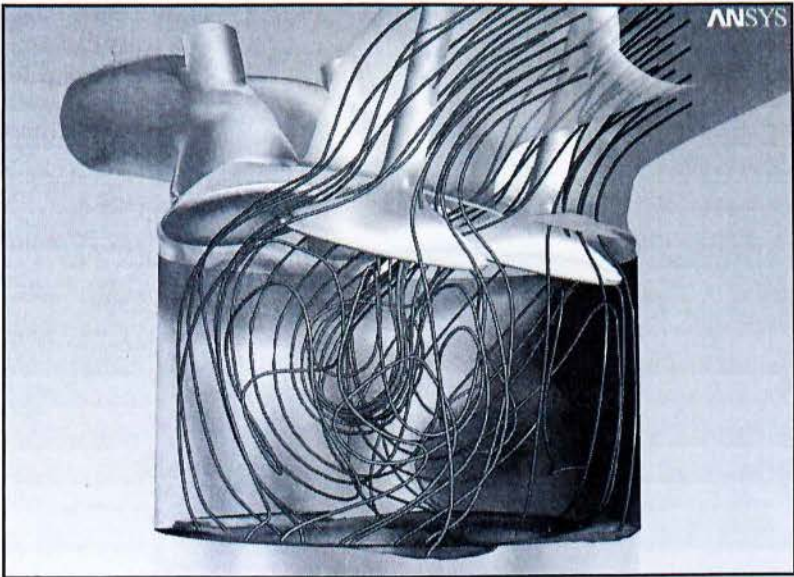
Σχήμα 3.7δ Μεταβολή στην αλλαγή όγκου και αντίστασης ροής



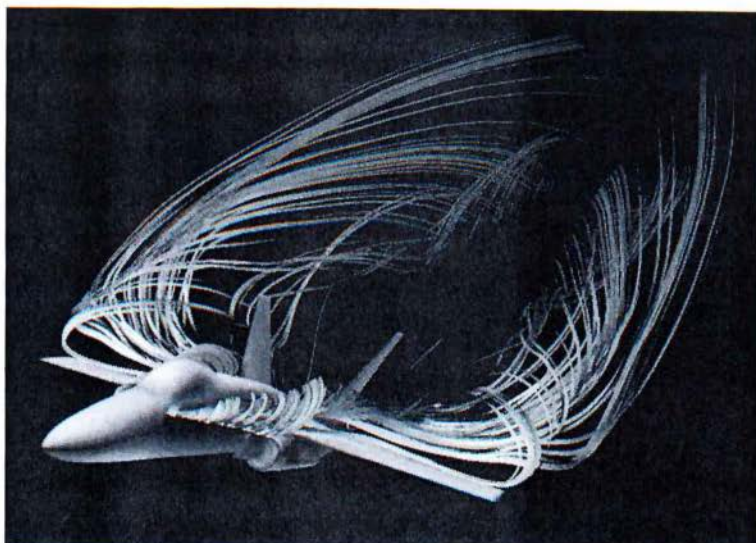
Σχήμα 3.7ε Ροή αέρα πρόσκρουσης στην πτερωτή ανεμογεννήτριας



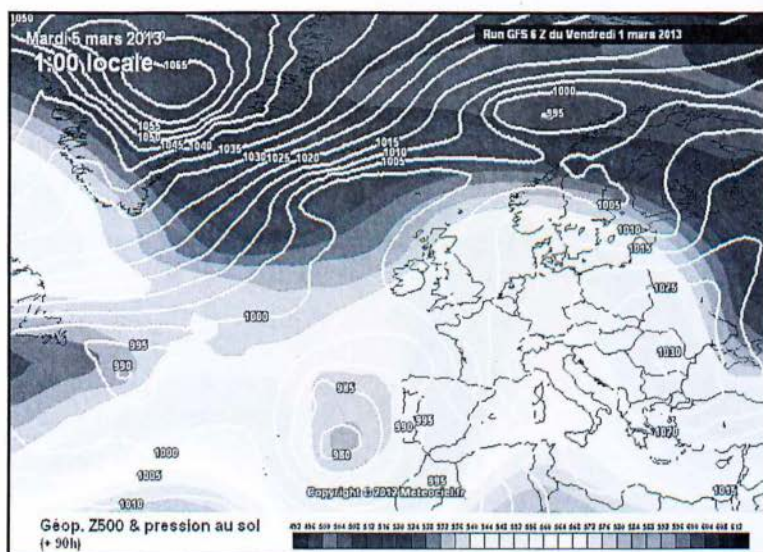
Σχήμα 3.7στ Φορτία ανέμου σε συστήματα αποθήκευσης ηλιακής ενέργειας (φωτοβολταικά)



Σχήμα 3.7ζ Εισαγωγή μείγματος αέρα-καυσίμου στον κύλινδρο κινητήρα



Σχήμα 3.7η Ροή αέρα γύρω από αεροσκάφη



Σχήμα 3.7ο Ανάλυση μετεωρολογικών φαινομένων – Ένδειξη Ατμοσφαιρικής Πίεσης

3.5 Επίλυση Εξισώσεων κίνησης ρευστών με τη χρήση του εμπορικού πακέτου Fluent

Οι εξισώσεις που αφορούν την κίνηση του ρευστού σε σχέση με τη γεωμετρία και περιγράφουν το πεδίο είναι η εξίσωση της συνέχειας, της ορμής και αναλόγως μοντέλου της ενέργειας.

Η εξίσωση ενέργειας για ασυμπύεστο ρευστό είναι:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

Οι εξισώσεις ορμής ή εξισώσεις Navier – Stokes είναι:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \rho g_x$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \rho g_y$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \rho g_z$$

Η εξίσωση ενέργειας

$$\rho \cdot C_p \cdot \frac{DT}{Dt} = \frac{\partial}{\partial X_i} \left(k \frac{\partial T}{\partial X_i} \right) + \frac{DP}{Dt} + Q + \Phi$$

u, v, w : εκφράσεις ταχύτητας στους άξονες x, y, z αντίστοιχα

ρ : πυκνότητα

μ : ιξώδες

P : πίεση

C_p : ειδική θερμοχωρητικότητα

X_i : ταυσιτής

T : Θερμοκρασία

K: συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας

Q : πηγή θερμότητας

Φ : Συνάρτηση απορρόφησης

Η επίλυση του συστήματος διαφορικών εξισώσεων που προκύπτει είναι εξαιρετικά δύσκολο πρόβλημα. Για αυτόν τον λόγο έχουν αναπτυχθεί πολλοί μέθοδοι

υπολογιστικής προσέγγισης των λύσεων με όριο σύγκλισης να τίθεται αναλόγως των αναγκών της εκάστοτε μελέτης.

Για την πραγματοποίηση του εγχειρήματος αυτού απαιτείται η διακριτοποίηση του συνεχούς χώρου σε μικρά κελιά σχηματίζοντας έτσι ένα πεπερασμένο πλέγμα και η εφαρμογή του κατάλληλου αλγορίθμου για την επίλυση των εξισώσεων. Προτείνεται η επίλυση με διαφορικά πλέγματα με σκοπό να εξασφαλισθεί ανεξαρτησία του πλέγματος.

Μέθοδοι:

- **Μέθοδος πεπερασμένων όγκων** η οποία χρησιμοποιείται σε ερευνητικούς κώδικες και εμπορικά προγράμματα. Οι εξισώσεις λύνονται σε διακριτοποιημένους όγκους ελέγχου.

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint Q \, dV + \iint F \, dA = 0,$$

Όπου Q είναι το διάνυσμα των μεταβλητών διατήρησης, V ο όγκος του κελιού και A η επιφάνεια του κελιού.

- **Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων** η οποία χρησιμοποιείται για δομική ανάλυση των στερεών και επίσης εφαρμόσιμη στα ρευστά.

$$R_i = \iiint W_i \cdot Q \cdot dV^e$$

Όπου R_i είναι το υπόλοιπο σε ένα i άξονα του στοιχείου, Q είναι η εξίσωση διατήρησης εκφρασμένη σε στοιχείο, W είναι ο συντελεστής βαρύτητας και V ο όγκος του στοιχείου.

- **Μέθοδος πεπερασμένων διαφορών** η οποία είναι πολύ παλιά αλλά σχετικά πιο εύκολη στο προγραμματισμό.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} + \frac{\partial H}{\partial z} = 0,$$

Όπου Q είναι το διάνυσμα των μεταβλητών συνέχειας F , G και H οι δυνάμεις στις κατευθύνσεις x , y , z αντίστοιχα.

Στο συγκεκριμένο θέμα της πτυχιακής εργασίας οι εξισώσεις Navier –Stokes επιλύθηκαν με τη χρήση του υπολογιστικού προγράμματος Fluent βασισμένο στη προαναφερθείσα μέθοδο πεπερασμένων όγκων. Για την επίλυση του πεδίου,

χρησιμοποιήθηκε φορητός υπολογιστής με επεξεργαστή Intel® Core™ i5 – 2430M CPU @ 2.40GHz 2.40 GHz με λειτουργικό σύστημα 64-bit και εγκατεστημένη μνήμη (RAM) 6,00 GB.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 Εισαγωγή στο σχεδιαστικό πακέτο Gambit

4.1 Η εννοιολόγηση του Gambit

Το σχεδιαστικό πακέτο GAMBIT (Geometry And Mesh Building Intelligent Toolkit), είναι ένα λογισμικό, στο οποίο ο σχεδιαστής όπου θέλει να προσομοιώσει ένα μοντέλο για ένα φαινόμενο, μπορεί να σχεδιάσει το μοντέλο, να κατασκευάσει το πλέγμα και να περάσει τις οριακές συνθήκες έτσι ώστε στη συνέχεια να μπορεί να επλύσει φαινόμενα ροής ρευστών, μεταφοράς θερμότητας και άλλων πολλών επιστημονικών εφαρμογών.

Το αντικείμενο κατασκευής της πτυχιακής εργασίας είναι ένα συγκλίνον – αποκλίνον ακροφύσιο, στο οποίο ρέει αέρας και στη συνέχεια θα ακολουθήσει η δημιουργία του πλέγματος.

Στη συνέχεια, περιγράφονται αναλυτικά τα βήματα που πραγματοποιήθηκαν για την κατασκευή του ακροφυσίου και αναλύονται οι βασικές λειτουργίες (operations) του προγράμματος οι οποίες είναι: α) Εντολές που αφορούν την γεωμετρία (Geometry command button), β) Εντολές που αφορούν το πλέγμα (Mesh command button), γ) Εντολές που αφορούν τις οριακές συνθήκες (Zone command button).

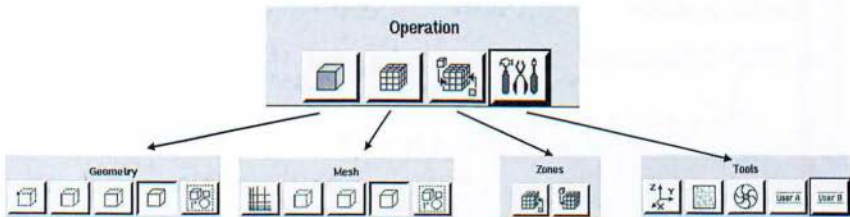
4.2 Επιφάνεια εργασίας γραφικών

Η αρχική εικόνα που εμφανίζεται κατά την έναρξη του προγράμματος είναι η επιφάνεια εργασίας γραφικών (**graphic user interface**). Πάνω σε αυτήν την επιφάνεια θα σχεδιάσουμε το ακροφύσιο.



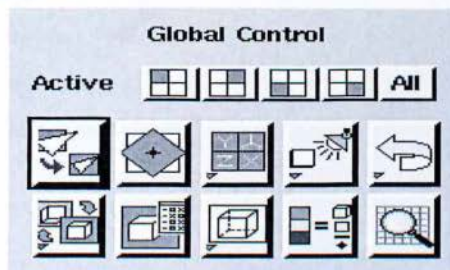
Σχήμα 4.1 Επιφάνεια εργασίας Gambit

Στην επιφάνεια εργασίας του Gambit πάνω δεξιά βλέπουμε την γραμμή εργαλείων και λειτουργιών (**operation tool pad**) η οποία αποτελείται από τέσσερα επιμέρους τμήματα :



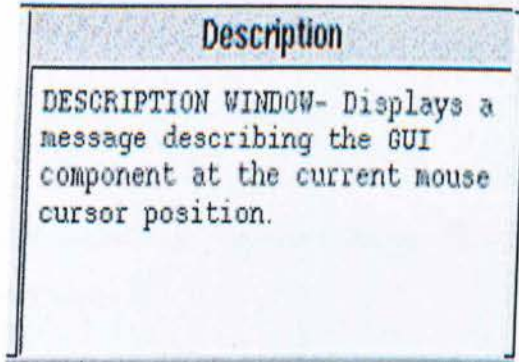
- 1) Geometry (Γεωμετρία): Με το πλήκτρο αυτό, ενεργοποιούνται τα εργαλεία με τα οποία κατασκευάζουμε ένα γεωμετρικό σχήμα.
- 2) Mesh (Πλέγμα): Με το πλήκτρο αυτό, ενεργοποιούνται τα εργαλεία με τα οποία κατασκευάζουμε το πλέγμα πάνω στην γεωμετρία που είχαμε κατασκευάσει στο προηγούμενο βήμα.
- 3) Zones (Ζώνες): Με το πλήκτρο αυτό, ενεργοποιούνται τα εργαλεία με τα οποία ορίζουμε τις οριακές συνθήκες του γεωμετρικού μοντέλου που θέλουμε να κατασκευάσουμε.
- 4) Tools (Εργαλεία): Με το πλήκτρο αυτό, ενεργοποιείται η γραμμή εργαλείων από την οποία είναι δυνατό να δημιουργήσουμε ή να μετατρέψουμε συστήματα συντεταγμένων καθώς και πλέγματα.

Επίσης, στην αρχική επιφάνεια εργασίας του Gambit, κάτω δεξιά βλέπουμε τη γραμμή εργαλείων κεντρικού ελέγχου (**global control toolbar**) η οποία αποτελείται από 11 επιμέρους τμήματα:

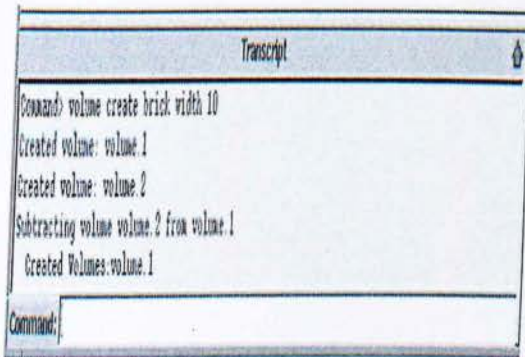


- 1) Fit to window (Προσαρμογή στο παράθυρο): Προσαρμόζει το μοντέλο που έχουμε ώστε να καταλαμβάνει όλη την επιφάνεια εργασίας γραφικών.
- 2) Select pivot (Επιλογή άξονα): Καθορίζει ένα σημείο, γύρω από το οποίο έχουμε την δυνατότητα να περιστρέψουμε το μοντέλο.
- 3) Select preset configuration (Επιλογή προκαθορισμένης ρύθμισης): Χωρίζει τη επιφάνεια μας σε τέσσερα ίσα μέρη στα οποία το μοντέλο έχει διαφορετικό προσανατολισμό.
- 4) Modify lights (Τροποποίηση Φωτισμού): Ρυθμίζει την ένταση του φωτισμού στο γεωμετρικό μοντέλο.
- 5) Annotate (Υποσημείωση): Δίνεται η δυνατότητα τοποθέτησης σχολίων στο μοντέλο με τη χρήση γραμμών και βελών.
- 6) Undo-Redo (Αναίρεση- Επανάληψη): Αναίρεση της τελευταίας εντολής- Επανάληψη της τελευταίας εντολής.
- 7) Orient model (Προσανατολισμός μοντέλου): Προσανατολίζει τη γεωμετρία σύμφωνα με το σύστημα συντεταγμένων που έχουμε ορίσει.
- 8) Specify color mode (Καθορισμός χρώματος): Μας επιτρέπει να ορίσουμε ποια χαρακτηριστικά της γεωμετρίας θα παρουσιάζονται στην οθόνη γραφικών, όπως κόμβοι, ακμές, επιφάνειες.
- 9) Render model (Ορισμός μοντέλου): Ορίζει αν στο μοντέλο θα φαίνετε το πλέγμα ή όχι, αν θα είναι σκιασμένο ή αν θα φαίνονται ακμές.
- 10) Specify color model (Προσδιορισμός μοντέλου χρώματος): Καθορίζει το χρωματισμό των διαφόρων συνιστωσών της γεωμετρικής κατασκευής.
- 11) Examine mesh (Εξέταση πλέγματος): Γίνεται ο έλεγχος του πλέγματος στο σχήμα.

Στην αρχική επιφάνεια εργασίας του Gambit έχουμε, κάτω δεξιά το παράθυρο περιγραφής (**Description**) σκοπός του οποίου είναι η εμφάνιση μηνυμάτων περιγράφοντας τα διάφορα συστατικά του GUI (Graphical Users Interface), όπως πεδία, παράθυρα και κουμπιά εντολών.



Τέλος, στην αρχική επιφάνεια εργασίας του Gambit έχουμε, κάτω αριστερά το παράθυρο καταγραφής και εισαγωγής εντολών (**Transcript**) με σκοπό να εμφανίζει και να καταγράφει ένα ιστορικό εντολών που έχουν πραγματοποιηθεί και η εμφάνιση μηνυμάτων του Gambit κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού.



4.3 Σχεδιασμός του γεωμετρικού μοντέλου του ακροφυσίου

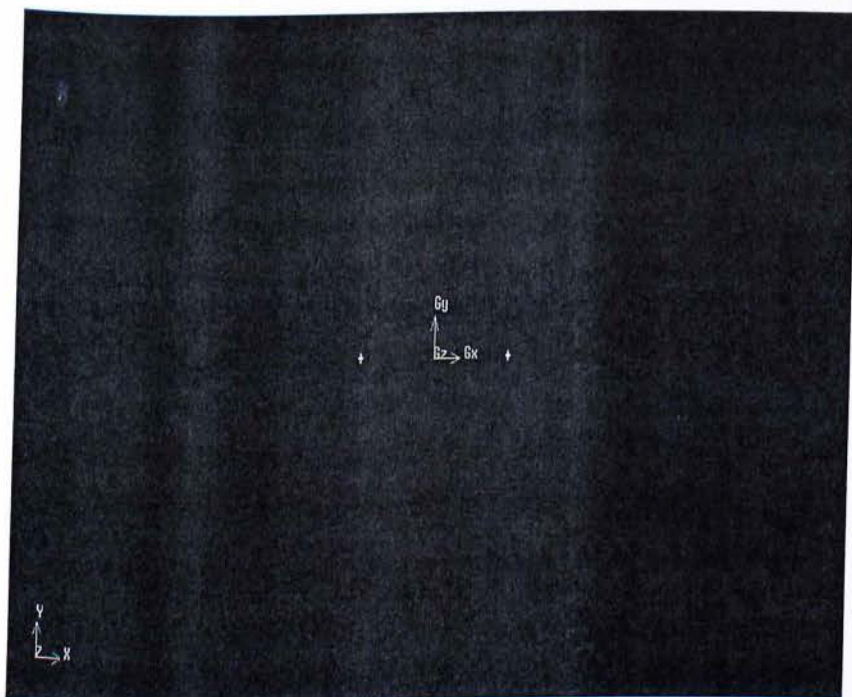
Σε αυτήν την παράγραφο παρατίθενται τα βήματα τα οποία πραγματοποιήθηκαν προκειμένου να σχεδιαστεί το ακροφύσιο, για την προσομοίωση του φαινομένου που μελετάμε. Το ακροφύσιο έχει κυκλική μια κυκλική διατομή A , η οποία ποικίλλει ανάλογα με την αξονική απόσταση από το λαιμό, X , σύμφωνα με τον τύπο $A=0,1+X^2$ και $-0,5 < X < 0,5$.

- Δημιουργούμε τις δύο κορυφές A και B οι οποίες ακολουθούν την ανίσωση $-0,5 < X < 0,5$

Κορυφή A: $(-0.5,0,0)$

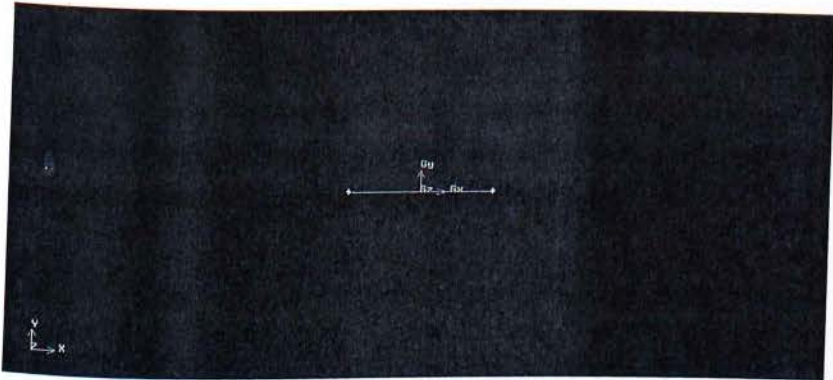
Κορυφή B: $(0.5,0,0)$

Operation Toolpad \rightarrow Geometry Command Button  \rightarrow Vertex Command Button  \rightarrow Create Vertex 



- Ενόνομε τις δύο κορυφές A και B και σχηματίζουμε την ευθεία AB

Operation Toolpad → Geometry Command Button  → Edge Command Button  → Create Edge 

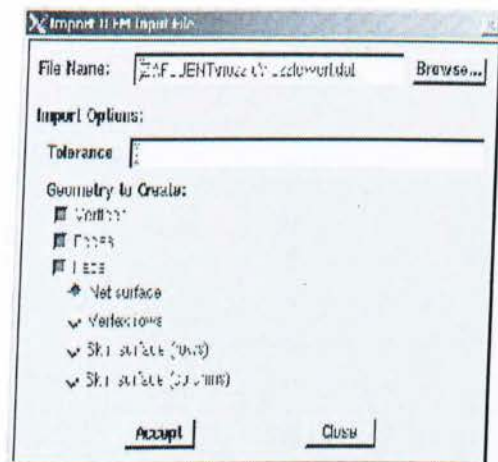


- Στη συνέχεια θα κατασκευάσουμε την καμπύλη η οποία περιγράφεται από την σχέση $A = 0,1 + X^2 \Rightarrow r = [(0,1 + X^2)/\Pi]^{0,5}$ και $0,5 < X < 0,5$

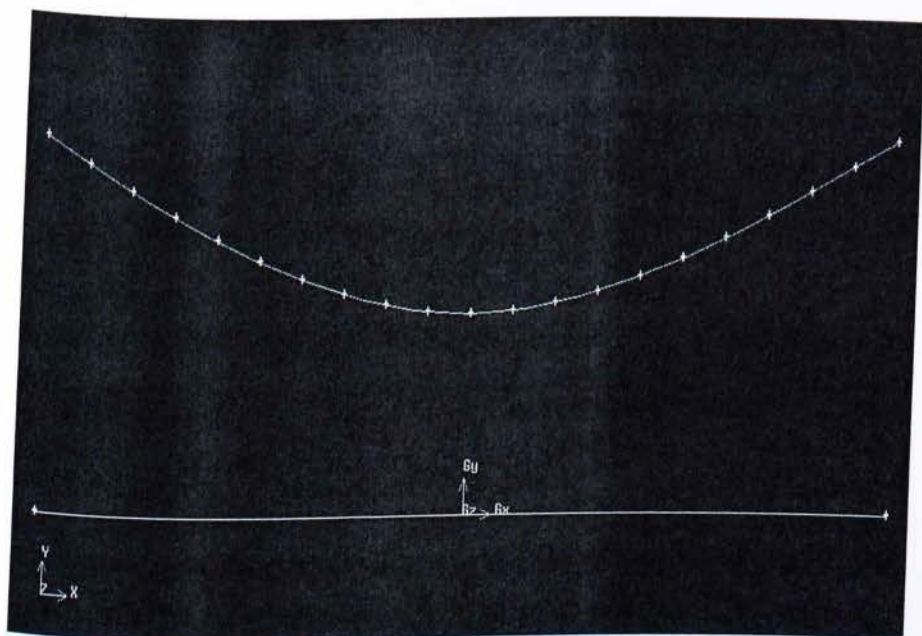
Τα παρακάτω σημεία διαγράφουν την καμπύλη που θέλουμε να σχεδιάσουμε:

21 1
-0.500 0.33377906 0
-0.450 0.31030427 0
-0.400 0.28768137 0
-0.350 0.26612769 0
-0.300 0.24592454 0
-0.250 0.22743209 0
-0.200 0.21110041 0
-0.150 0.19746635 0
-0.100 0.18712052 0
-0.050 0.18062880 0
0.000 0.17841241 0
0.050 0.18062880 0
0.100 0.18712052 0
0.150 0.19746635 0
0.200 0.21110041 0
0.250 0.22743209 0
0.300 0.24592454 0
0.350 0.26612769 0
0.400 0.28768137 0
0.450 0.31030427 0
0.500 0.33377906 0

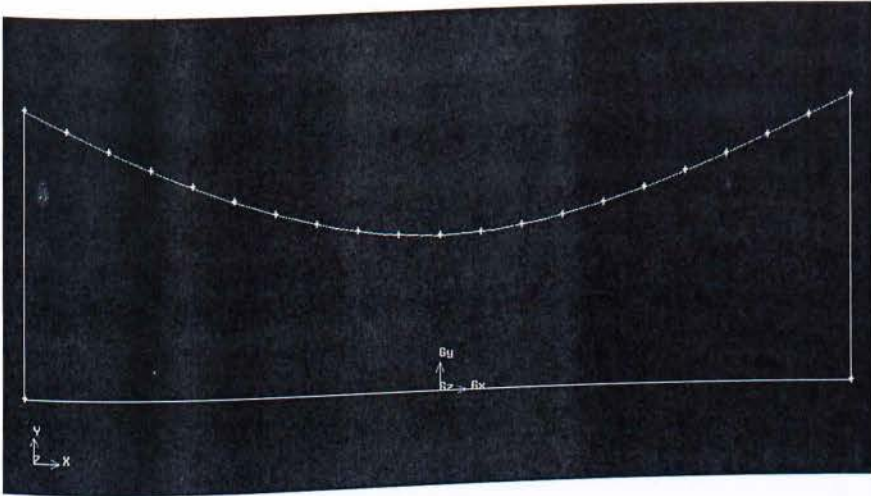
Main Menu → File → Import → ICEM Input







Και στην συνέχεια περνάμε το αρχείο μορφής dat με τις παραπάνω συντεταγμένες και δημιουργούμε την παρακάτω καμπύλη μορφής παραβολή.

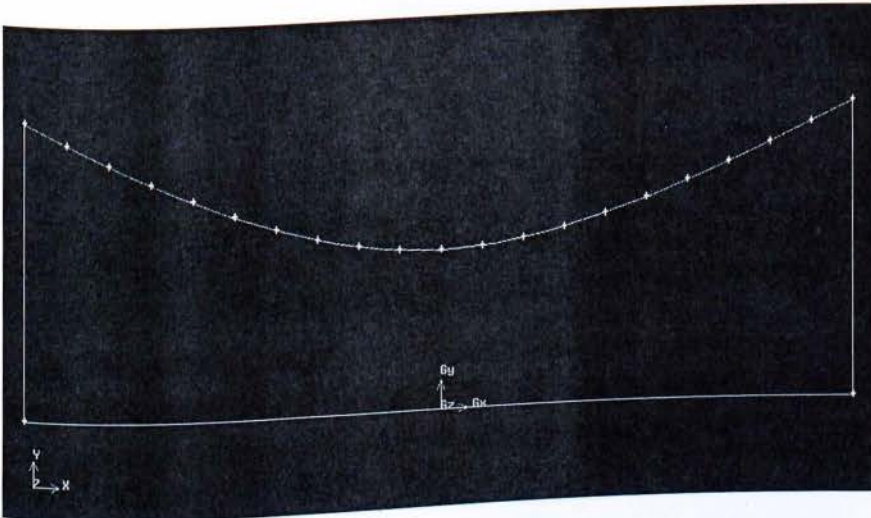


- Μετά ενώνουμε τα σημεία A και B με τα επάνω άκρα της καμπύλης







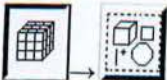
- Τέλος θα δημιουργήσουμε το πρόσωπο (face) από τα σημεία αυτά

Operation Toolpad → Geometry Command Button  → Face Command Button 
 → Form Face 






4.4 Δημιουργία υπολογιστικού πλέγματος στο γεωμετρικό μοντέλο

Για την κατασκευή του υπολογιστικού πλέγματος στη γεωμετρία που έχουμε κατασκευάσει δίνονται οι εξής δυνατότητες από το πρόγραμμα:

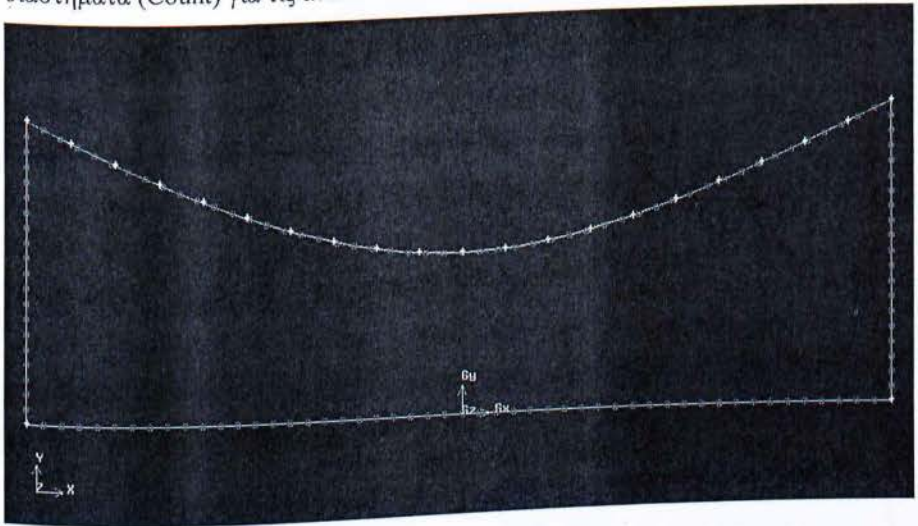
- Δημιουργία υπολογιστικού πλέγματος σε οριακό στρώμα 
- Δημιουργία υπολογιστικού πλέγματος σε ακμή 
- Δημιουργία υπολογιστικού πλέγματος σε επιφάνεια 
- Δημιουργία υπολογιστικού πλέγματος σε όγκο 
- Δημιουργία υπολογιστικού πλέγματος σε ομάδα ακμών, επιφανειών και όγκων 

Για τις ανάγκες κατασκευής του υπολογιστικού πλέγματος της γεωμετρίας του σχήματος μας θα χρησιμοποιήσουμε δημιουργία πλέγματος σε ακμή και στην συνέχεια σε επιφάνεια.




4.4.1 Δημιουργία υπολογιστικού πλέγματος σε ακμές

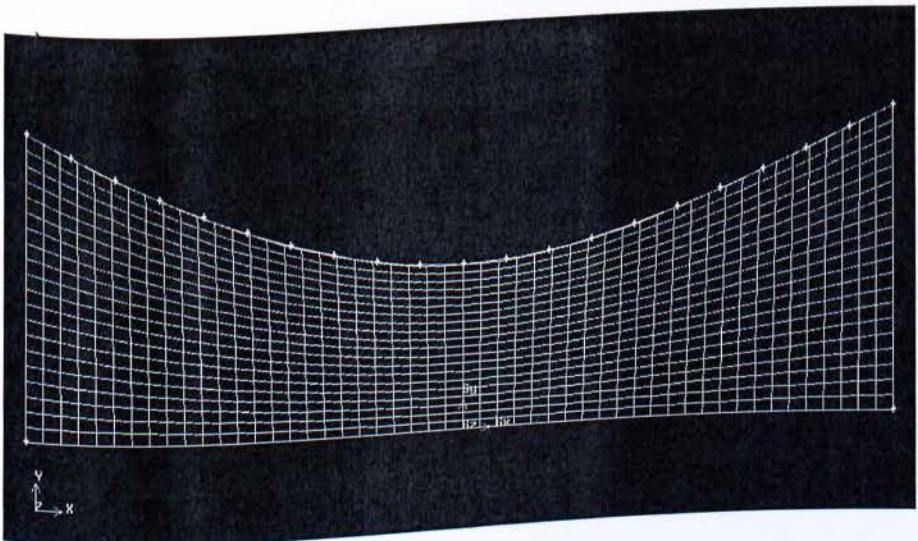
Operation Toolpad → Mesh Command Button  → Edge Command Button  → Mesh Edges 

Θα χρησιμοποιήσουμε 20 διαστήματα (Count) για τις πλευρικές ακμές και 50 διαστήματα (Count) για τις άνω και κάτω ακμές.



4.4.2 Δημιουργία υπολογιστικού πλέγματος σε πρόσωπο


Operation Toolpad → Mesh Command Button  → Face Command Button  → Mesh Faces 



4.5 Προσδιορισμός ζωνών και ορίων στο γεωμετρικό μοντέλο

Ο προσδιορισμός των ζωνών και των ορίων είναι απαραίτητος διότι ουσιαστικά οριοθετεί το γεωμετρικό μοντέλο που έχουμε κατασκευάσει, το Gambit δίνει τις ακόλουθες δύο δυνατότητες:



1) Οριακές ζώνες (Specify boundary types): καθορίζονται οι οριακές συνθήκες του

μοντέλου και το είδος των ορίων 

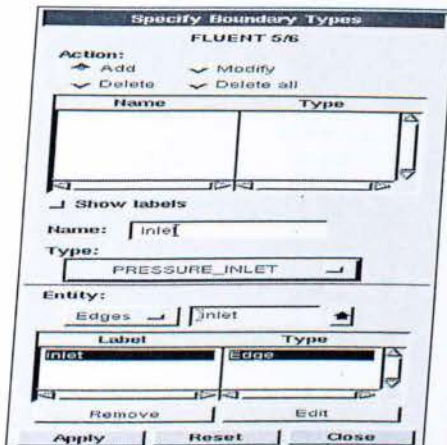
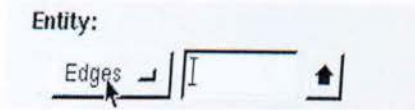
2) Οι ζώνες συνεχούς μέσου (specify continuum types): καθορίζονται τα χαρακτηριστικά των ορίων και το είδος του διακινούμενου μέσου στη γεωμετρία



4.5.1 Καθορισμός οριακών συνθηκών του μοντέλου μας

Operation Toolpad > Zones Command Button  Specify Boundary Types Command Button 

Ορίζουμε την αριστερή πλευρά ως είσοδο :



Επαναλαμβάνουμε για έξοδο (outlet) , κεντρική γραμμή (centerline) και ακμές τοιχώματος (wall)

Name	Type
inlet	PRESSURE_INL
outlet	PRESSURE_OUT
wall	WALL
centerline	AXIS

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 Εισαγωγή στο υπολογιστικό πακέτο Fluent

5.1 Η εννοιολόγηση του Fluent

Το FLUENT είναι ένα υπολογιστικό πρόγραμμα για την μοντελοποίηση της ροής ρευστού και της μεταφοράς θερμότητας σε απλές έως πολύ δύσκολες γεωμετρικές. Το FLUENT παρέχει δυνατότητα δημιουργίας πλέγματος με διδιάστατα τριγωνικά/τετραγωνικά κελιά. Το πακέτο FLUENT που χρησιμοποιείται περιλαμβάνει τα παρακάτω δύο βασικά τμήματα:

- GAMBIT, ο προ-επεξεργαστής για μοντελοποίηση γεωμετρίας και δημιουργία πλέγματος.
- FLUENT, ο επίλυτής των εξισώσεων.

Το υπολογιστικό πακέτο FLUENT, μπορεί να επιλύσει φαινόμενα τα οποία εξελίσσονται σε 2 ή 3 διαστάσεις. Το αντικείμενο της πτυχιακής εργασίας είναι η προσομοίωση ενός συγκλίνοντος-αποκλίνοντος ακροφυσίου σε δισδιάστατη μορφή (2-D). Αρχικός στόχος της χρησιμοποίησης του Fluent είναι να ελέγξουμε αρχικά το υπολογιστικό πλέγμα που κατασκευάσαμε στο Gambit, για πιθανές ατέλειες και στην συνέχεια να κάνουμε την προσομοίωση του φυσικού προβλήματος του ακροφυσίου. Στις επόμενες παραγράφους δίνεται μια εποπτική άποψη για τη χρήση του προγράμματος και περιγράφονται αναλυτικά

Οι βασικές λειτουργίες (operations) του προγράμματος οι οποίες θα αναλυθούν είναι οι εξής:

- Εντολές που αφορούν την εισαγωγή του αρχείου από το σχεδιαστικό στο υπολογιστικό πακέτο.
- Εντολές που αφορούν το υπολογιστικό πλέγμα το οποίο κατασκευάστηκε στο σχεδιαστικό πακέτο και πλέον χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό χαρακτηριστικών μεγεθών, π.χ.: αριθμό Mach στο στόμιο του ακροφυσίου.
- Εντολές που αφορούν τις οριακές συνθήκες, π.χ.: θερμοκρασία εισόδου.
- Εντολές που αφορούν την αριθμητική επίλυση του προβλήματος και επίσης γίνεται ο προσδιορισμός του χρονικού και χωρικού βήματος κάτω από το οποίο θα πραγματοποιηθεί η επαναληπτική διαδικασία για τη σύγκλιση της λύσης.
- Εντολές που αφορούν την απεικόνιση των αποτελεσμάτων σε περιβάλλον με γραφικά καθώς και επίσης απεικόνιση των αποτελεσμάτων σε γραφικές παραστάσεις.

5.2 Διαδικασία αντιμετώπισης και επίλυσης προβλημάτων στο Fluent

Στην παράγραφο αυτή αναφέρονται τα βασικά βήματα τα οποία θα μας οδηγήσουν στην επίλυση του προβλήματος που επιθυμούμε. Η αναλυτική προσέγγιση για τον τρόπο εισαγωγής και επεξεργασίας γίνεται στις επόμενες παραγράφους, ο αλγόριθμος που ακολουθείται είναι ο ακόλουθος:

1) Σχεδιασμός του γεωμετρικού μοντέλου και του υπολογιστικού πλέγματος σε οποιοδήποτε σχεδιαστικό πακέτο που είναι συμβατό με το Fluent, στην παρούσα πτυχιακή εργασία χρησιμοποιήσαμε το **Gambit**.

2) Κατά την έναρξη του Fluent, μας ζητείται να επιλέξουμε σε πόσες διαστάσεις εξελίσσεται το φαινόμενο μας (**2-D, 3-D**).

3) Κατά την εισαγωγή του γεωμετρικού μοντέλου και του υπολογιστικού πλέγματος στο Fluent, το αρχείο το οποίο αναγνωρίζει το Fluent έχει την κατάληξη .msh. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής :

File → **Read** → **Case.../Data.../Case & Data...**

4) Επιθυμητό θα ήταν να γίνει έλεγχος του πλέγματος που κατασκευάστηκε στο Gambit, προκειμένου να αποφευχθούν πιθανά σφάλματα. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής:

Grid → **Check...**

5) Γίνεται η επιλογή της αριθμητική μεθόδου επίλυσης του φαινομένου και ορισμός αν το φαινόμενο είναι μόνιμο ή μη. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής:

Define → **Models** → **Solidification & Melting...**

6) Πραγματοποιείται ο προσδιορισμός του μέσου ή του υλικού που επεξεργαζόμαστε στο πείραμα μας. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής:

Define → **Materials...**

7) Γίνεται ο ορισμός των οριακών συνθηκών του προβλήματος. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής:

Define → **Boundary Conditions...**

8) Έναρξη της διαδικασίας επίλυσης του προβλήματος, επιλέγοντας κατάλληλους συντελεστές υποχαλάρωσης. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής:

Solve → **Controls** → **Solution...**

9) Ακολουθεί ο ορισμός μιας αρχικής τιμής για την έναρξη των επαναλήψεων, με σκοπό τη σύγκλιση της επαναληπτικής μεθόδου. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής:

Solve → Initialize...

10) Στη συνέχεια επιλέγουμε κατάλληλα κριτήρια σύγκλισης για τις εξαρτημένες μεταβλητές των διαφορικών εξισώσεων. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής:

Solve → Monitors → Residuals...

11) Έχοντας δώσει αρχικές τιμές γίνεται εκκίνηση της επίλυσης με ορισμό των παραμέτρων για χρονικό βήμα μεταξύ των επαναλήψεων. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής:

Solve → Iterate...

12) Πραγματοποιείται γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων σε γραφήματα ή σε περιβάλλον γραφικών. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής:

Plot → xy plot...

13) Αν τα αποτελέσματα που εξήχθησαν κρίθηκαν αποδεκτά προχωράμε σε αποθήκευση των δεδομένων και των αποτελεσμάτων που λάβαμε. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής:

File → Write → Case.../ Data.../ Case & Data...

5.3 Διαδικασία επίλυσης του μοντέλου του ακροφυσίου στο Fluent

Σε αυτήν την παράγραφο παρατίθενται τα βήματα τα οποία πραγματοποιήθηκαν προκειμένου να προσομοιώσουμε το μοντέλο μας στο υπολογιστικό πρόγραμμα Fluent.

- Εισάγουμε το αρχείο κατάληξης msh,(nozzle.msh)

Main Menu → File → Read → Case...

```

> Reading "Z:\Academic Technology Center\Confluence Project\Nozzle Tutorial\nozzle.msh"...
1071 nodes.
  50 mixed wall faces, zone 3.
  50 mixed wall faces, zone 4.
  20 mixed wall faces, zone 5.
  20 mixed wall faces, zone 6.
  1930 mixed interior faces, zone 8.
  1000 quadrilateral cells, zone 2.

Building...
  mesh
  materials,
  interface,
  domains,
  zones,
    default-interior
    inlet
    outlet
    centerline
    wall
    fluid
  shell conduction zones,
Done.

Preparing mesh for display...
Done.

```

- Στην συνέχεια ελέγχουμε το πλέγμα που έχουμε κατασκευάσει στο σχεδιαστικό πρόγραμμα Gambit για να βεβαιωθούμε ότι δεν υπάρχουν σφάλματα.

Under Problem Setup → General → Mesh → Check

Mesh Check

Domain Extents:

x-coordinate: min (m) = -5.000000e-01, max (m) = 5.000000e-01

y-coordinate: min (m) = 0.000000e+00, max (m) = 3.337791e-01

Volume statistics:

minimum volume (m3): 1.788585e-04

maximum volume (m3): 3.288900e-04

total volume (m3): 2.368239e-01

Face area statistics:

minimum face area (m2): 8.920610e-03

maximum face area (m2): 2.111261e-02

Checking mesh.....

Done.

- Ελέγχουμε πόσους κόμβους έχει το πλέγμα μας. Το πλέγμα έχει 50 κόμβους κατά την αξονική διεύθυνση και 20 κόμβους κατά την ακτινική διεύθυνση. Ο συνολικός αριθμός των κόμβων είναι $50 \times 20 = 1000$. Επειδή υποθέτουμε πως έχουμε

μη ιξώδης ροή (Inviscid), δεν θέλουμε την επίλυση του ιξώδους στο οριακό στρώμα που πρόσκειται στο τοίχωμα.

Η επίδραση του οριακού στρώματος είναι μικρό στην περίπτωση μας και μπορεί να αγνοηθεί. Έτσι το πλέγμα έχει ομοιόμορφη απόσταση κατά την ακτινική διεύθυνση και κατά την αξονική διεύθυνση.

Mesh Size				
Level	Cells	Faces	Nodes	Partitions
0	1000	2070	1071	1
1 cell zone, 5 face zones.				

▪ Ορισμός ιδιοτήτων για επίλυση (solve)

Ιστορικά, η επιλογή **“Pressure-Based”** αναπτύχθηκε για χαμηλές ταχύτητες ροής (ασυμπιέστη), ενώ η επιλογή **“Density-Based”** χρησιμοποιήθηκε κυρίως για υψηλές ταχύτητες ροής (συμπιεστή). Ωστόσο, πρόσφατα οι δύο μέθοδοι ροής έχουν επεκταθεί και αναδιατυπωθεί για να λύσουν, λειτουργήσουν σε ένα ευρύ φάσμα συνθηκών ροής.

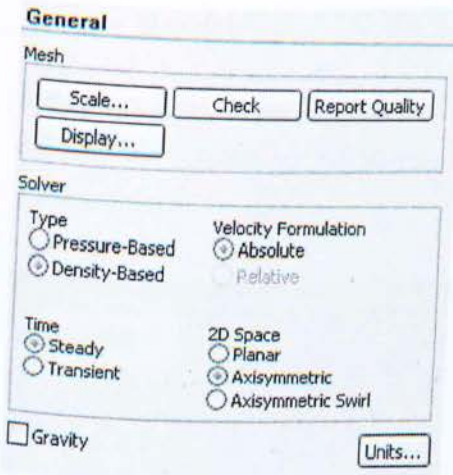
Στις περισσότερες μεθόδους το πεδίο ταχύτητας λαμβάνεται από τις εξισώσεις ορμής. Στη μέθοδο επίλυσης **“Density-Based”** η εξίσωση της συνέχειας χρησιμοποιείται για να ληφθεί το πεδίο πυκνότητας, ενώ το πεδίο λύσης προσδιορίζεται από την καταστατική εξίσωση.

Από την άλλη πλευρά, στη μέθοδο επίλυσης **“Pressure-Based”** το πεδίο πίεσης εξάγεται με την επίλυση μιας εξίσωσης διόρθωσης πίεσης όπου η πίεση λαμβάνεται από τις εξισώσεις συνέχειας και ορμής.

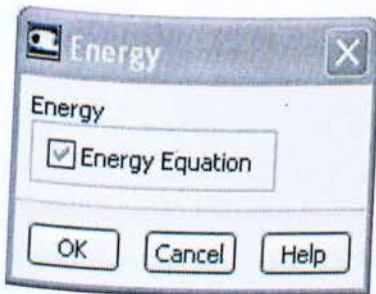
Για το ακροφύσιο της παρούσας πτυχιακής εργασίας θα επιλέξουμε την μέθοδο επίλυσης **“Density-Based”**.

Define → Models → Solver... → Density-Based

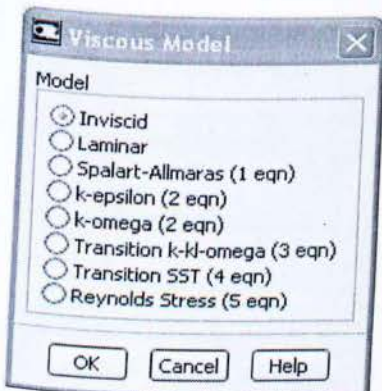
Επίσης, η εξίσωση που επιλέξαμε θα επιλυθεί αξονοσυμμετρικά (Axisymmetric).



- Στην συνέχεια ρυθμίζουμε τα μοντέλα για το πρόβλημα
 Η εξίσωση ενέργειας πρέπει να ενεργοποιηθεί δεδομένου ότι έχουμε ροή συμπιεστή όπου έχουμε την εξίσωση ενέργειας σε συνδυασμό με την εξίσωση της συνέχειας.



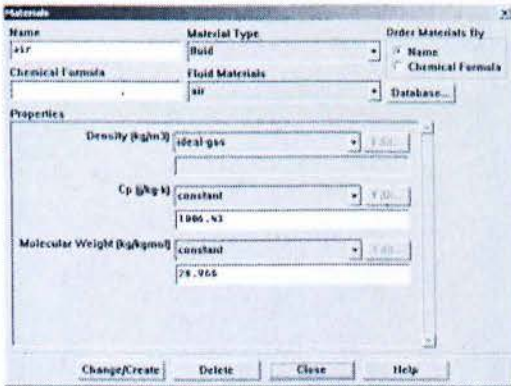
Define → Models → Viscous - Laminar → Edit



Αυτό σημαίνει ότι ο λύτης θα παραμελεί τους παχύρευστους όρους στις εξισώσεις.

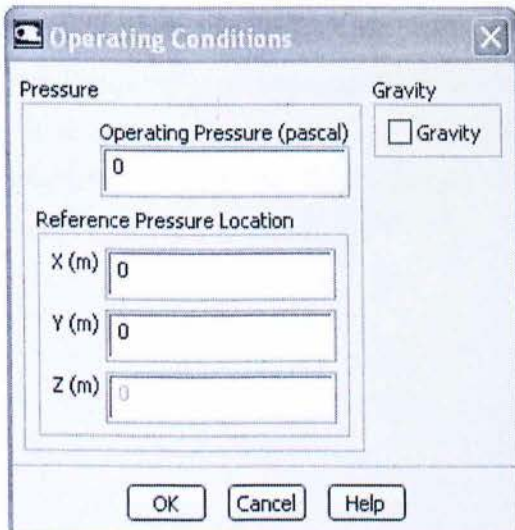
Define → Materials

Επιλέγουμε αέρα. Αυτό σημαίνει ότι το Fluent χρησιμοποιεί την καταστατική εξίσωση των αερίων να σχετίζονται με την πυκνότητα, στατική πίεση και θερμοκρασία.



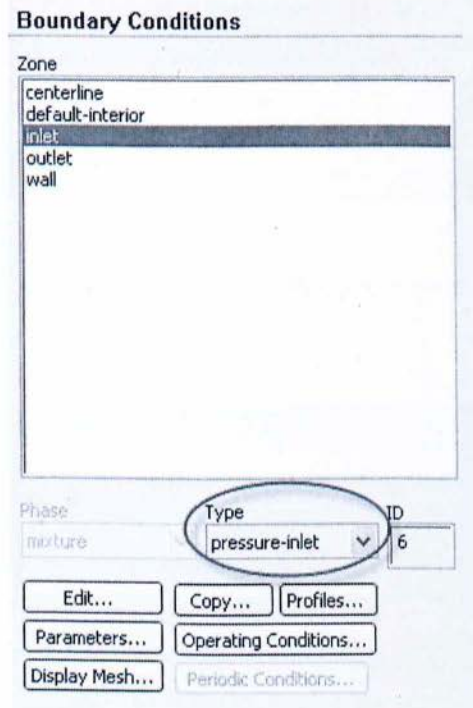
Define → Operating Conditions

Ορίζουμε την απόλυτη πίεση λειτουργίας ως μηδέν. Είναι σημαντικό να ρυθμίσουμε σωστά την πίεση λειτουργίας στους υπολογισμούς της συμπιεστής ροής από το Fluent μέσω του οποίου υπολογίζεται μέσω της καταστατικής εξίσωσης των ιδανικών αερίων.

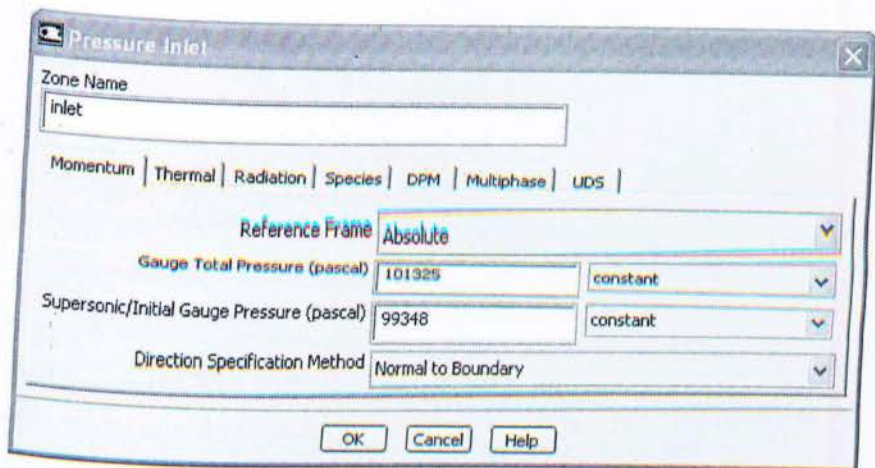


Define → Boundary Conditions

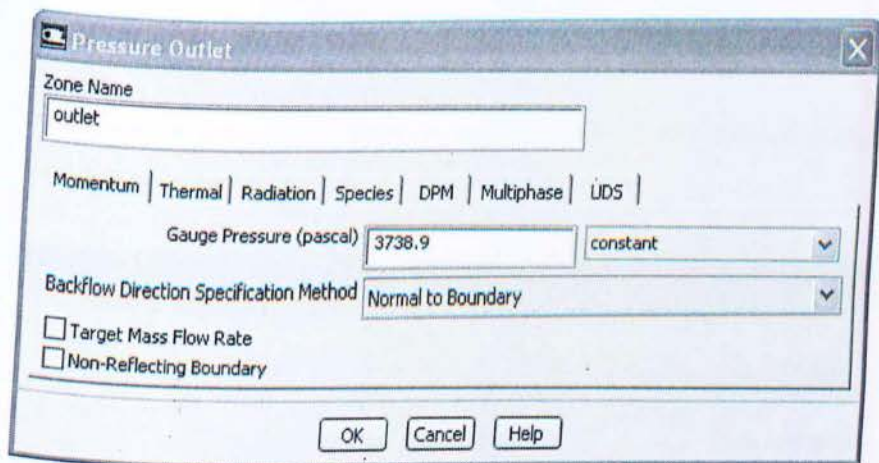
Ορίζουμε τις οριακές συνθήκες για τις ακόλουθες επιφάνειες : είσοδος, έξοδος, κεντρική γραμμή, τοίχο.



Ρυθμίζουμε την ολική πίεση εισόδου (Gauge Total Pressure) η οποία είναι 101325 Pa , όπως ορίζεται στην δήλωση του προβλήματος και για υποχητική πίεση εισόδου, υπερχητική 99348 Pa. Στην συνέχεια δηλώνουμε την συνολική θερμοκρασία εισόδου η οποία είναι 300 K.



Χρησιμοποιώντας τα ίδια βήματα από πάνω ρυθμίζουμε την πίεση εξόδου, η οποία είναι 3738,9 Pa.



▪ Τώρα θα θέσουμε τις ρυθμίσεις για να λύσει το πρόβλημα και στη συνέχεια να λύσει χρησιμοποιώντας μια επαναληπτική διαδικασία προσέγγισης.

Under Solution > Solution Methods

Main Menu → Solve → Initialization

Θα ορίσουμε τιμές στην είσοδο (Inlet)

Solution Initialization

Compute from

Reference Frame
 Relative to Cell Zone
 Absolute

Initial Values

Gauge Pressure (pascal)

Axial Velocity (m/s)

Radial Velocity (m/s)

Temperature (k)

Main Menu → Solve → Monitors or Under Solution → Monitors select Residual → Edit

Αλλάζουμε το υπόλοιπο με κριτήριο σύγκλισης για τη συνέχεια, x-ταχύτητα, y-ταχύτητα και ενέργεια για $1e-6$.

Residual Monitors

Options

Print to Console
 Plot

Window

Iterations to Plot

Iterations to Store

Equations

Residual	Monitor	Check Convergence	Absolute Criteria
continuity	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="text" value="1e-6"/>
x-velocity	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="text" value="1e-6"/>
y-velocity	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="text" value="1e-6"/>
energy	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="text" value="1e-6"/>

Residual Values

Normalize
Iterations
 Scale

Convergence Criterion
absolute

- Επανάληψη έως τη σύγκλιση (converged)

Στο παράθυρο που εμφανίζεται βάζουμε αριθμό επαναλήψεων (number of iterations) 150. Η σύγκλιση πραγματοποιείται στις 144 επαναλήψεις.

Main Menu → Solve → Run calculation or Under Solution → Run Calculation

Run Calculation

Check Case... Preview Mesh Motion...

Number of Iterations Reporting Interval

150 1

Profile Update Interval

1

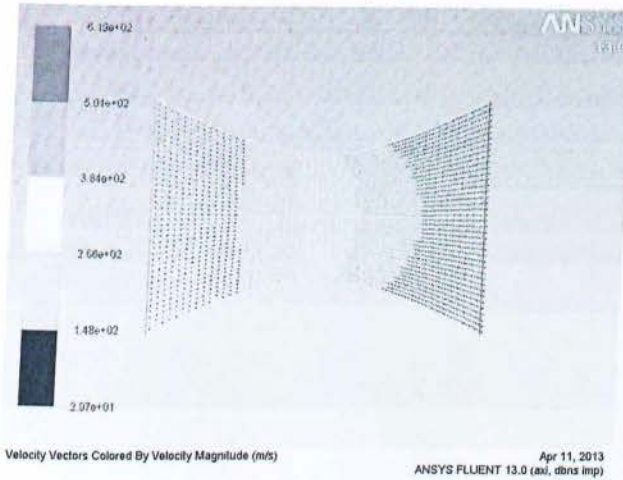
Data File Quantities... Acoustic Signals...

Calculate

Help

5.4 Αποτελέσματα & Σχολιασμός των προσομοιώσεων στο fluent

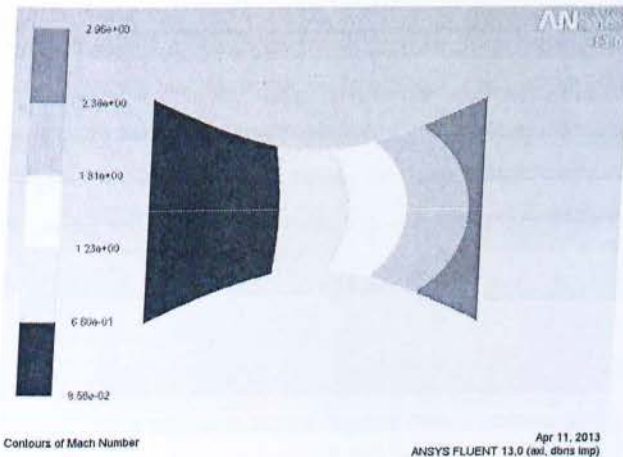
5.4.1 Βασική Γεωμετρία



Σχήμα 5.1 Διάνυσμα Ταχύτητας

Από το σχήμα 5.1 παρατηρούμε ότι η ροή είναι ομαλά επιταχυνόμενη, από την είσοδο έως την έξοδο. Χαρακτηριστικά βλέπουμε ότι:

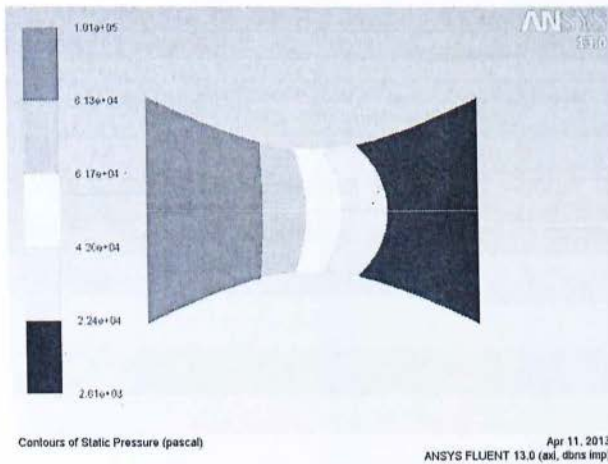
- ⇒ Η ταχύτητα στην είσοδο είναι **29.7 m/sec**.
- ⇒ Η ταχύτητα στη στένωση είναι περίπου **280 m/sec**.
- ⇒ Η ταχύτητα στην έξοδο είναι **619 m/sec**.



Σχήμα 5.2 Αριθμός Mach

Από το σχήμα 5.2 συμπεραίνουμε ότι ο αριθμός Mach αυξάνεται από την είσοδο έως την έξοδο και η ροή μεταβάλλεται από υποηχητική σε ηχητική και στη συνέχεια σε υπερηχητική. Χαρακτηριστικά βλέπουμε ότι:

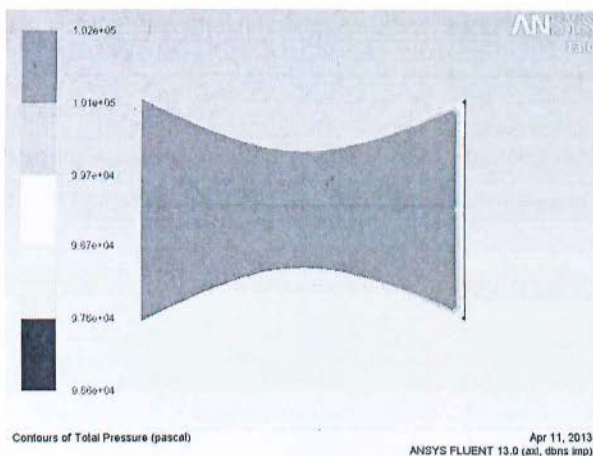
- ⇒ Ο αριθμός Mach στην είσοδο είναι ο ελάχιστος **0.0856**.
- ⇒ Σύμφωνα με τη θεωρία όταν στην έξοδο του ακροφυσίου έχουμε υπερηχητική ροή, τότε στη στένωση έχουμε ηχητική ροή, το οποίο σύμφωνα με τα αποτελέσματα ισχύει.
- ⇒ Πηγαίνοντας προς την έξοδο ο αριθμός Mach αυξάνεται περισσότερο. Χαρακτηριστικά ο αριθμός Mach γίνεται περίπου **2.96**.



Σχήμα 5.3 *Περίγραμμα Στατικής Πίεσης*

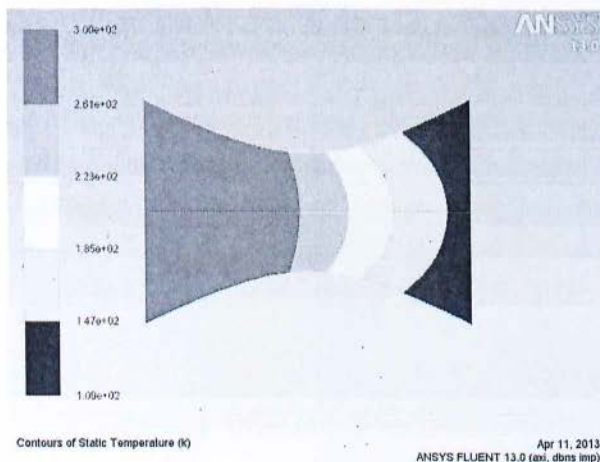
Σύμφωνα με το σχήμα 5.3 παρατηρούμε πως η στατική πίεση μειώνεται καθώς ο αέρας ρέει προς την έξοδο του ακροφυσίου. Χαρακτηριστικά:

- ⇒ Στις δύο άκρες της εισόδου έχουμε τη μέγιστη στατική πίεση **101000 Pascal**.
- Πλησιάζοντας προς το κέντρο του ακροφυσίου η στατική πίεση μειώνεται.
- ⇒ Στη στένωση του ακροφυσίου η πίεση μειώνεται **55100 Pascal**.
- ⇒ Πλησιάζοντας προς την έξοδο έχουμε την ελάχιστη πίεση **2810 Pascal**.



Σχήμα 5.4 Περίγραμμα Συνολικής Πίεσης

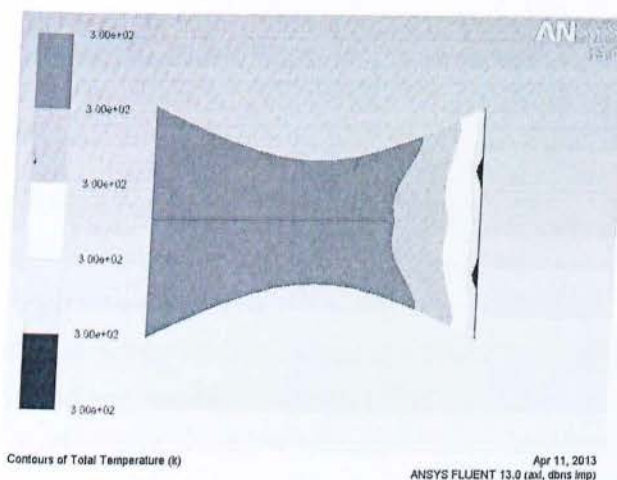
Στο σχήμα 5.4 παρατηρούμε ότι η συνολική πίεση είναι σταθερή **101000 Pascal**, όμως γύρω από την έξοδο του ακροφυσίου υπάρχει απώλεια πίεσης εξαιτίας της αριθμητικής διάχυσης.



Σχήμα 5.5 Περίγραμμα Στατικής Θερμοκρασίας

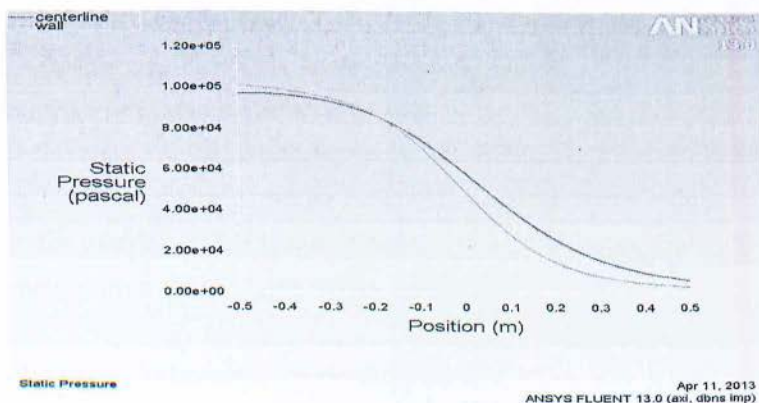
Στο σχήμα 5.5 διακρίνουμε πως η θερμοκρασία μειώνεται από την είσοδο προς την έξοδο του ακροφυσίου υποδεικνύοντας μια μεταφορά της εσωτερικής ενέργειας σε κινητική ενέργεια, με αποτέλεσμα την εν λόγω μείωση της θερμοκρασίας.
Αναλυτικότερα:

- ⇒ Στην είσοδο του ακροφυσίου έχουμε τη μέγιστη στατική θερμοκρασία **300 Kelvin**. Στη συνέχεια παρατηρείτε μείωση της στατικής θερμοκρασίας σε όλο το μήκος του ακροφυσίου.
- ⇒ Στη στένωση έχουμε ελάττωση της θερμοκρασίας περίπου **246 Kelvin**.
- ⇒ Στην έξοδο έχουμε την ελάχιστη τιμή θερμοκρασίας **109 Kelvin**.



Σχήμα 5.6 Περίγραμμα Συνολικής Θερμοκρασίας

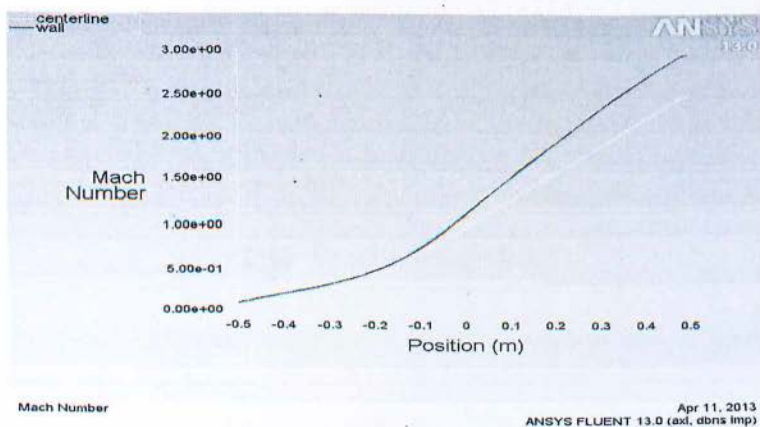
Στο περίγραμμα συνολικής θερμοκρασίας όπως βλέπουμε από το σχήμα, η κατανομή της θερμοκρασίας παραμένει σταθερή σε όλο το μήκος του ακροφυσίου **300 Kelvin**. Με αυτό γίνεται επιβεβαίωση της θεωρίας, γιατί θεωρούμε ότι αυτή η ροή είναι ισεντροπική και έτσι την επιλύουμε, θεωρώντας δηλαδή ότι η ολική θερμοκρασία, όπως και η πίεση παραμένει κανονικά σε σταθερές τιμές.



Σχήμα 5.7 Στατική Πίεση κατά μήκος της κεντρικής γραμμής (centerline) και του τοίχου (wall)

Με βάση το σχήμα 5.7 φαίνεται ότι:

- ⇒ Η στατική πίεση στην είσοδο του ακροφυσίου $X=-0,5$ m είναι μεγαλύτερη στο τοίχωμα (wall) παρά στην κεντρική γραμμή (centerline).
- ⇒ Περίπου στο σημείο $X \approx 0,2$ m η στατική πίεση στην κεντρική γραμμή (centerline) είναι ίδια με αυτή στο τοίχωμα (wall).
- ⇒ Στο διάστημα $-0,2 \leq X \leq 0,5$ η πίεση στην κεντρική γραμμή (centerline) είναι μεγαλύτερη από αυτή στο τοίχωμα (wall).



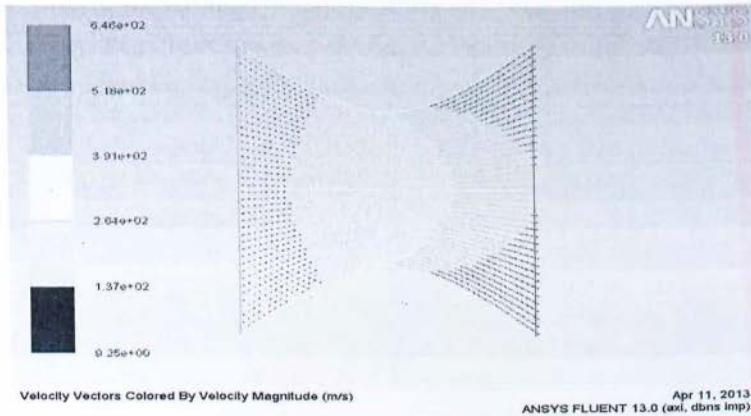
Σχήμα 5.8 Διακύμανση αριθμού Mach κατά την αξονική διεύθυνση στον άξονα (centerline) και του τοιχώματος (wall)

Στο σχήμα 5.8 παρατηρούμε ότι:

- ⇒ Στο διάστημα $-0,5 \leq X < 0$ ο αριθμός Mach είναι μικρότερος από ένα ($M < 1$), που δηλώνει ότι η ροή είναι υποηχητική (subsonic).
- ⇒ Στο σημείο $X=0$ ο αριθμός Mach στην κεντρική γραμμή (centerline) είναι ίσος με ένα ($M=1$), που σημαίνει ότι η ροή στο σημείο αυτό είναι ηχητική (sonic).
- ⇒ Στο διάστημα $0 < X \leq +0,5$ ο αριθμός Mach είναι μεγαλύτερος του ένα ($M > 1$), που σημαίνει ότι η ροή από ηχητική γίνεται υπερηχητική (supersonic).

5.4.2 Επίδραση διπλασιασμού συνολικής διαμέτρου

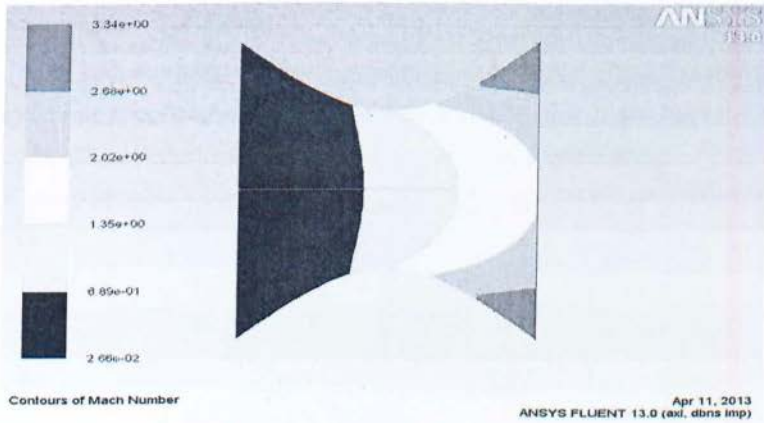
Για τον διπλασιασμό της συνολικής διαμέτρου του ακροφυσίου διπλασιάσαμε την ακτίνα r της κυκλικής διατομής ($A = \pi \times r^2$) σύμφωνα με τα παρακάτω: $A = \pi \times r^2$ και $A = 0,1 + X^2$ με $-0,5 < X < 0,5$. Όμως ($A = A$), οπότε $\pi \times r^2 = 0,1 + X^2 \Rightarrow r = [(0,1 + X^2) / \pi]^{1/2}$, άρα $r_{\text{new}} = 2 \times r$. Τέλος, πήραμε το αρχείο vert.dat (συντεταγμένες κατά μήκος της καμπύλης) και αντικαταστήσαμε την νέα ακτίνα (r_{new}) στο σχεδιαστικό πρόγραμμα Gambit.



Σχήμα 5.9 Διάγραμμα Ταχύτητας

Από το σχήμα 5.9 βλέπουμε ότι η ροή είναι ομαλά επιταχυνόμενη από την είσοδο έως την έξοδο. Χαρακτηριστικά:

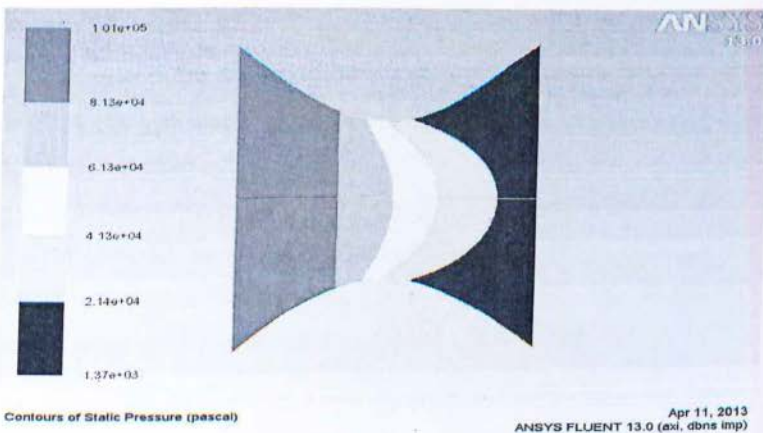
- ⇒ Η ταχύτητα στην είσοδο είναι **9.25 m/sec**.
- ⇒ Η ταχύτητα στη στένωση είναι περίπου **232 m/sec**.
- ⇒ Στην έξοδο έχουμε τη μέγιστη ταχύτητα **646 m/sec**.



Σχήμα 5.10 Αριθμός Mach

Σύμφωνα με το σχήμα 5.10 ο αριθμός Mach αυξάνεται από την είσοδο έως την έξοδο και η ροή μεταβάλλεται από υποηχητική σε ηχητική και στη συνέχεια σε υπερηχητική. Κυρίως παρατηρούμε:

- ⇒ Ο αριθμός Mach στην είσοδο είναι ο ελάχιστος **0.0266**.
- ⇒ Σύμφωνα με τη θεωρία όταν στην έξοδο του ακροφυσίου έχουμε υπερηχητική ροή, τότε στη στένωση έχουμε ηχητική ροή, το οποίο σύμφωνα με τα αποτελέσματα ισχύει.
- ⇒ Πηγαίνοντας προς την έξοδο ο αριθμός Mach αυξάνεται περισσότερο και έχουμε το μέγιστο αριθμό **3.34**.



Σχήμα 5.11 Περίγραμμα Στατικής Πίεσης

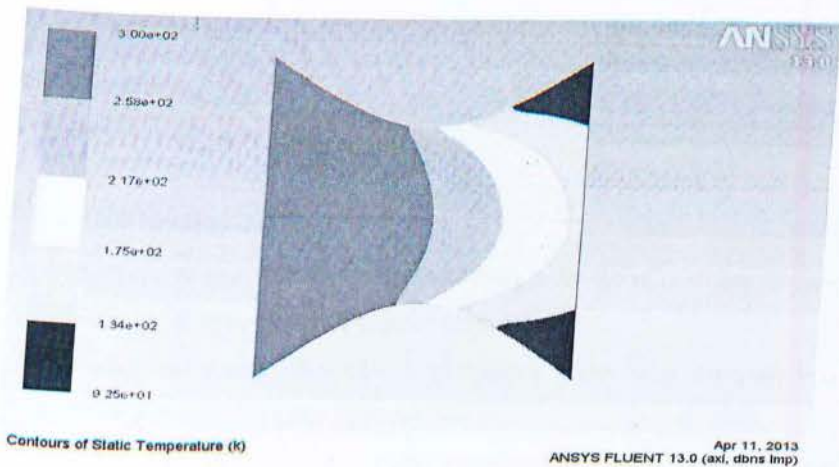
Στο σχήμα 5.11 φαίνεται πως η στατική πίεση μειώνεται καθώς ο αέρας ρέει προς την έξοδο του ακροφυσίου. Ειδικά:

⇒ Στις δύο άκρες της εισόδου έχουμε τη μέγιστη στατική πίεση **101000 Pascal**.

Πλησιάζοντας προς το κέντρο του ακροφυσίου η στατική πίεση μειώνεται.

⇒ Στη στένωση του ακροφυσίου η πίεση μειώνεται **64700 Pascal**.

⇒ Πλησιάζοντας προς την έξοδο έχουμε την ελάχιστη πίεση στα **1370 Pascal**.



Σχήμα 5.12 Περίγραμμα Στατικής Θερμοκρασίας

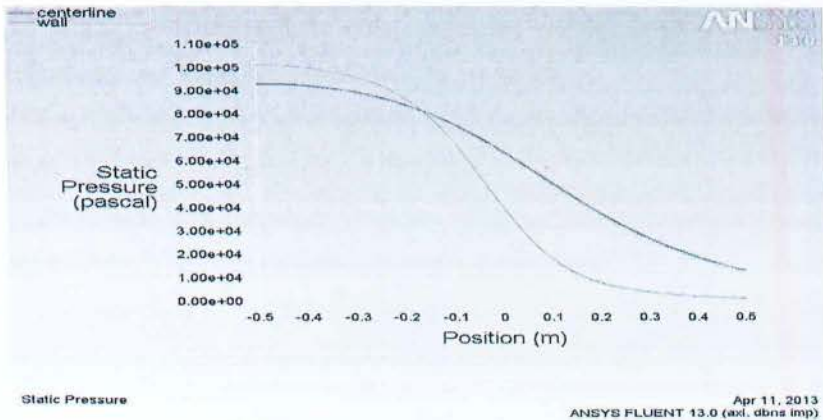
Στο σχήμα 5.12 διακρίνουμε πως η θερμοκρασία μειώνεται από την είσοδο προς την έξοδο του ακροφυσίου, υποδεικνύοντας μια μεταφορά της εσωτερικής ενέργειας σε κινητική ενέργεια, με αποτέλεσμα την εν λόγω μείωση της θερμοκρασίας.

Συγκεκριμένα βλέπουμε ότι:

⇒ Στην είσοδο του ακροφυσίου έχουμε τη μέγιστη στατική θερμοκρασία **300 Kelvin**. Στη συνέχεια παρατηρείτε μείωση της στατικής θερμοκρασίας σε όλο το μήκος του ακροφυσίου.

⇒ Στη στένωση έχουμε ελάττωση της θερμοκρασίας περίπου **265 Kelvin**.

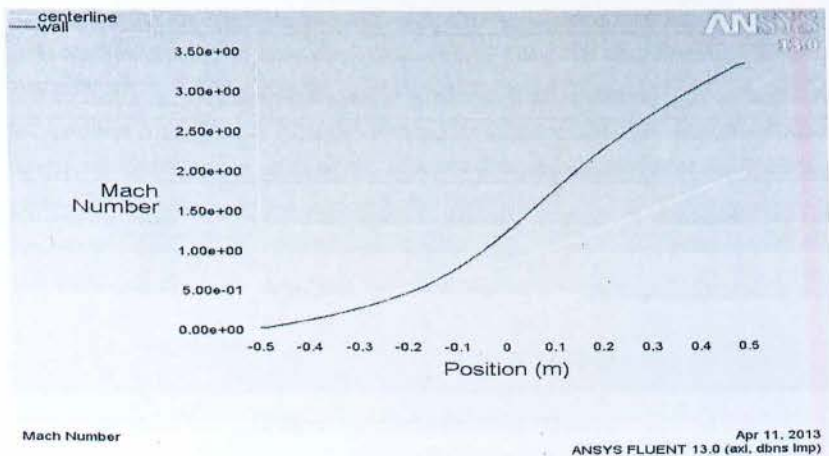
⇒ Στην έξοδο και κατά μήκος της κεντρικής γραμμής (centerline) έχουμε ακόμα μεγαλύτερη μείωση της θερμοκρασίας η οποία περίπου είναι **162 Kelvin**, ενώ στις δύο άκρες έχουμε την ελάχιστη τιμή θερμοκρασίας **92.5 Kelvin**.



Σχήμα 5.13 Στατική Πίεση κατά μήκος της κεντρικής γραμμής (centerline) και του τοίχου (wall)

Στο σχήμα 5.13 παρατηρούμε ότι:

- ⇒ Η στατική πίεση στην είσοδο του ακροφυσίου $X=-0,5$ m είναι μεγαλύτερη στο τοίχωμα (wall) παρά στην κεντρική γραμμή (centerline).
- ⇒ Περίπου στο σημείο $X \approx -0,25$ m η στατική πίεση στην κεντρική γραμμή (centerline) είναι ίδια με αυτή στο τοίχωμα (wall).
- ⇒ Στο διάστημα $-0,2 \leq X \leq +0,5$ η πίεση στην κεντρική γραμμή (centerline) είναι μεγαλύτερη από αυτή στο τοίχωμα (wall).



Σχήμα 5.14 Διακύμανση αριθμού Mach κατά την αξονική διεύθυνση στον άξονα (centerline) και του τοιχώματος (wall)

Από τη διακύμανση του αριθμού Mach κατά την αξονική διεύθυνση στον άξονα (centerline) και του τοιχώματος (wall) υποδεικνύεται ότι:

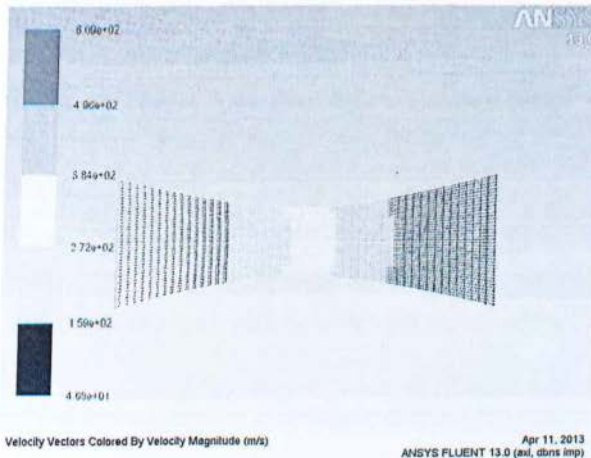
⇒ Στο διάστημα $-0,5 \leq X < 0$ ο αριθμός Mach είναι μικρότερος από ένα $M < 1$, που σημαίνει ότι η ροή είναι υποηχητική (subsonic).

⇒ Στο σημείο $X=0$ ο αριθμός Mach στο τοίχωμα (wall) είναι ίσος με ένα, $M=1$, που σημαίνει ότι η ροή στο σημείο αυτό είναι ηχητική (sonic).

⇒ Στο διάστημα $0 < X \leq +0,5$ ο αριθμός Mach είναι μεγαλύτερος του ένα, $M > 1$, που σημαίνει ότι η ροή από ηχητική γίνεται υπερηχητική (supersonic).

5.4.3 Επίδραση υποδιπλασιασμού συνολικής διαμέτρου

Για τον υποδιπλασιασμό της συνολικής διαμέτρου του ακροφυσίου υποδιπλασιάσαμε την ακτίνα r της κυκλικής διατομής ($A = \pi \times r^2$) σύμφωνα με τα παρακάτω: $A = \pi \times r^2$ και $A = 0,1 + X^2$ με $-0,5 < X < 0,5$. Όμως ($A = A$), οπότε $\pi \times r^2 = 0,1 + X^2 \Rightarrow r = [(0,1 + X^2) / \pi]^{1/2}$, άρα $r_{\text{new}} = r/2$. Τέλος, πήραμε το αρχείο vert.dat (συντεταγμένες κατά μήκος της καμπύλης) και αντικαταστήσαμε την νέα ακτίνα (r_{new}) στο σχεδιαστικό πρόγραμμα Gambit.



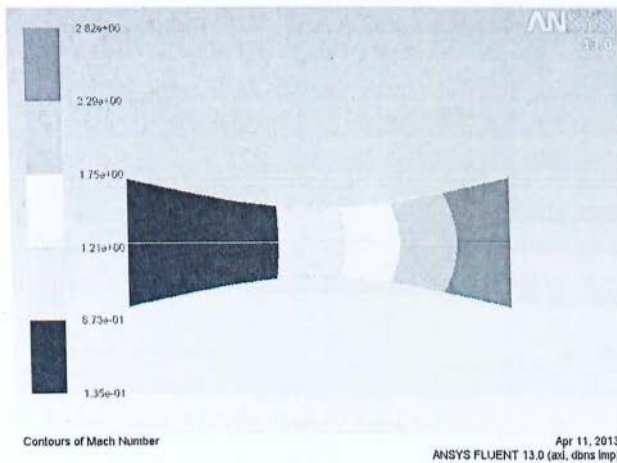
Σχήμα 5.15 Διάνυσμα Ταχύτητας

Από το σχήμα 5.15 συμπεραίνουμε ότι η ροή είναι ομαλά επιταχυνόμενη από την είσοδο έως την έξοδο. Πιο συγκεκριμένα:

⇒ Η ταχύτητα στην είσοδο είναι **46.8 m/sec**.

⇒ Η ταχύτητα στη στένωση είναι περίπου **314 m/sec**.

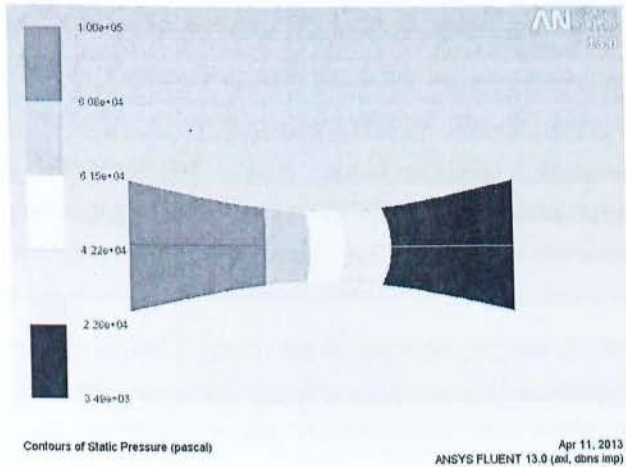
⇒ Η ταχύτητα στην έξοδο είναι ομοιόμορφη και είναι **609 m/sec**.



Σχήμα 5.16 Αριθμός Mach

Από το σχήμα 5.16 παρατηρούμε ότι ο αριθμός Mach αυξάνεται από την είσοδο έως την έξοδο και η ροή μεταβάλλεται από υποηχητική σε ηχητική και στη συνέχεια σε υπερηχητική. Χαρακτηριστικά βλέπουμε ότι:

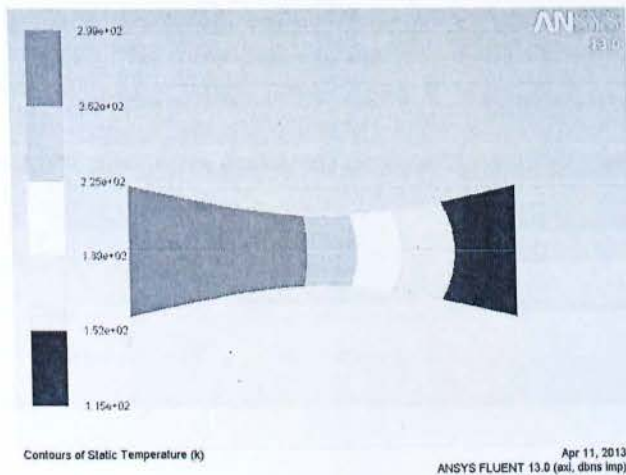
- ⇒ Ο αριθμός Mach στην είσοδο είναι **0.135**.
- ⇒ Σύμφωνα με τη θεωρία όταν στην έξοδο του ακροφυσίου όταν έχουμε υπερηχητική ροή, τότε στη στένωση έχουμε ηχητική ροή, το οποίο σύμφωνα με τα αποτελέσματα ισχύει.
- ⇒ Πηγαίνοντας προς την έξοδο ο αριθμός Mach αυξάνεται περισσότερο. Επί της κεντρικής γραμμής (centerline), ο αριθμός Mach γίνεται περίπου **2.70** ενώ πλησιάζοντας προς τις δυο άκρες της εξόδου έχουμε τον μέγιστο αριθμό **2.82**.



Σχήμα 5.17 Περίγραμμα Στατικής Πίεσης

Στο σχήμα 5.17 βλέπουμε πως η στατική πίεση μειώνεται καθώς ο αέρας ρέει προς την έξοδο του ακροφυσίου. Αναλυτικότερα:

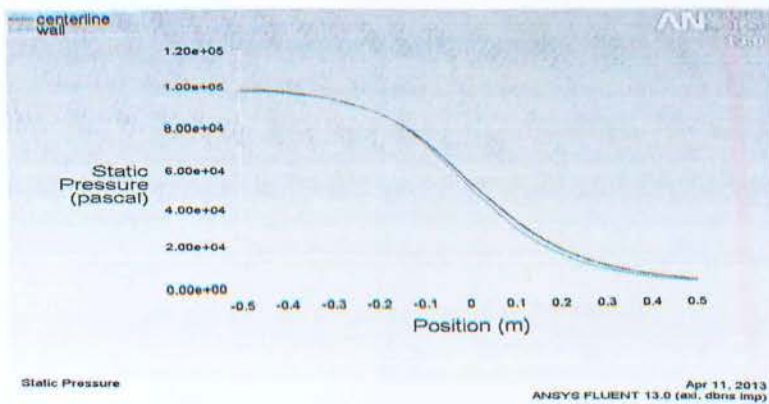
- ⇒ Η πίεση στην είσοδο είναι ομοιόμορφη και είναι **100000 Pascal**.
- ⇒ Στη στένωση του ακροφυσίου η πίεση μειώνεται **50000 Pascal**.
- ⇒ Πλησιάζοντας προς την έξοδο η πίεση όλο και περισσότερο μειώνεται. Έχουμε ομοιόμορφη μορφή και η τιμή της είναι **3490 Pascal**.



Σχήμα 5.18 Περίγραμμα Στατικής Θερμοκρασίας

Από το σχήμα 5.18 μπορούμε να δούμε πως η θερμοκρασία μειώνεται από την είσοδο προς την έξοδο του ακροφυσίου, υποδεικνύοντας μια μεταφορά της εσωτερικής ενέργειας σε κινητική ενέργεια με αποτέλεσμα την εν λόγω μείωση της θερμοκρασίας. Χαρακτηριστικά:

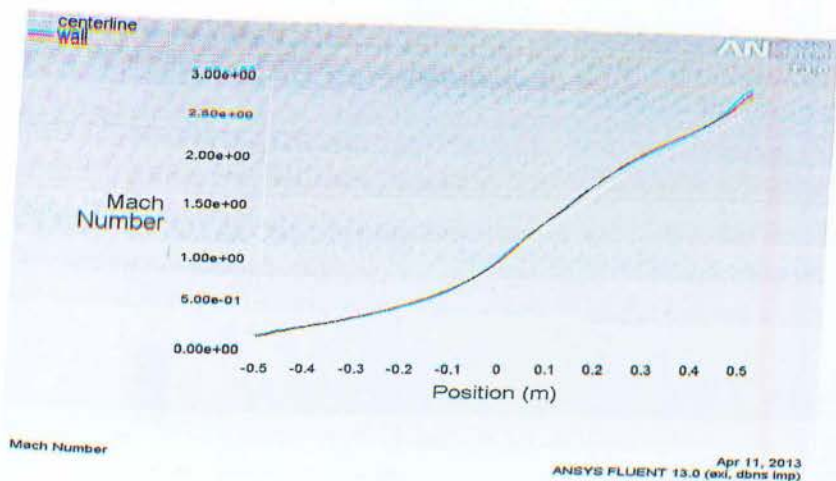
- ⇒ Στην είσοδο του ακροφυσίου έχουμε τη μέγιστη στατική θερμοκρασία **300 Kelvin**. Στη συνέχεια παρατηρείτε μείωση της στατικής θερμοκρασίας σε όλο το μήκος του ακροφυσίου.
- ⇒ Στη στένωση έχουμε ελάττωση της θερμοκρασίας περίπου **245 Kelvin**.
- ⇒ Στην έξοδο και κατά μήκος της κεντρικής γραμμής (centerline) έχουμε ακόμα **μεγαλύτερη μείωση της θερμοκρασίας** η οποία περίπου είναι **121 Kelvin**, ενώ στις δύο άκρες έχουμε την ελάχιστη τιμή θερμοκρασίας **115 Kelvin**.



Σχήμα 5.19 Στατική Πίεση κατά μήκος της κεντρικής γραμμής (centerline) και του τοίχου (wall)

Στο σχήμα παρατηρούμε ότι:

- ⇒ Η στατική πίεση στην είσοδο του ακροφυσίου $X=-0,5$ m είναι ελάχιστα μεγαλύτερη στο τοίχωμα (wall) παρά στην κεντρική γραμμή (centerline).
- ⇒ Περίπου στο σημείο $X\approx-0,25$ m η στατική πίεση στην κεντρική γραμμή (centerline) είναι ίδια με αυτή στο τοίχωμα (wall).
- ⇒ Στο διάστημα $-0,25\leq X\leq+0,5$ η πίεση στην κεντρική γραμμή (centerline) είναι ελάχιστα μεγαλύτερη από αυτή στο τοίχωμα (wall).
- ⇒ Στο σημείο $X=0,5$ η πίεση στο τοίχωμα και στην κεντρική γραμμή γίνονται ίσες.



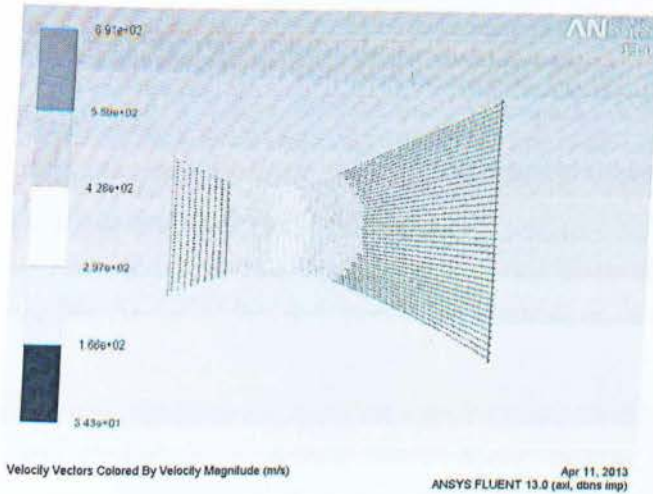
Σχήμα 5.20 Διακύμανση αριθμού Mach κατά την αξονική διεύθυνση στον άξονα (centerline) και του τοιχώματος (wall)

Στο σχήμα παρατηρούμε ότι:

- ⇒ Στο διάστημα $-0,5 \leq X < 0$ ο αριθμός Mach είναι μικρότερος από ένα $M < 1$, που σημαίνει ότι η ροή είναι υποηχητική (subsonic).
- ⇒ Στο σημείο $X=0$ ο αριθμός Mach στο τοίχωμα (wall) και στην κεντρική γραμμή (centerline) είναι ίσος με ένα $M=1$, που σημαίνει ότι η ροή στο σημείο αυτό είναι ηχητική (sonic).
- ⇒ Στο διάστημα $0 < X \leq +0,5$ ο αριθμός Mach είναι μεγαλύτερος του ένα $M > 1$, που σημαίνει ότι η ροή από ηχητική γίνεται υπερηχητική (supersonic).

5.4.4 Επίδραση διπλασιασμού διαμέτρου εξόδου

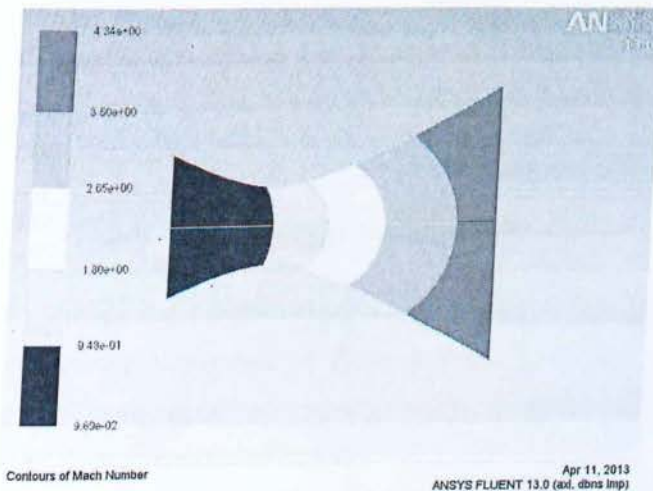
Για τον διπλασιασμό της διαμέτρου εξόδου του ακροφυσίου διπλασιάσαμε μόνο την ακτίνα r της κυκλικής διατομής ($A = \pi \times r^2$) της εξόδου με παράλληλη αύξηση του μήκους (διπλασιασμό) από την στένωση μέχρι την έξοδο, με σκοπό να ακολουθούμε την εξίσωση της παραβολής σύμφωνα με τα παρακάτω: $A = \pi \times r^2$ και $A = 0,1 + X^2$ με $-0,5 < X < 1,1$. Όμως ($A = A$), οπότε $\pi \times r^2 = 0,1 + X^2 \Rightarrow r = [(0,1 + X^2) / \pi]^{1/2}$, άρα $r_{\text{new}} = r/2$. Τέλος, πήραμε το αρχείο vert.dat (συντεταγμένες κατά μήκος της καμπύλης) και αντικαταστήσαμε την νέα ακτίνα (r_{new}) στο σχεδιαστικό πρόγραμμα Gambit.



Σχήμα 5.21 Διάγραμμα Ταχύτητας

Από το σχήμα 5.21 βλέπουμε ότι η ροή είναι ομαλά επιταχυνόμενη από την είσοδο έως την έξοδο. Κυρίως βλέπουμε ότι:

- ⇒ Η ταχύτητα στην είσοδο είναι **34.3 m/sec**.
- ⇒ Η ταχύτητα στη στένωση είναι περίπου **340 m/sec**.
- ⇒ Η ταχύτητα στην έξοδο είναι ομοιόμορφη και είναι **691 m/sec**.



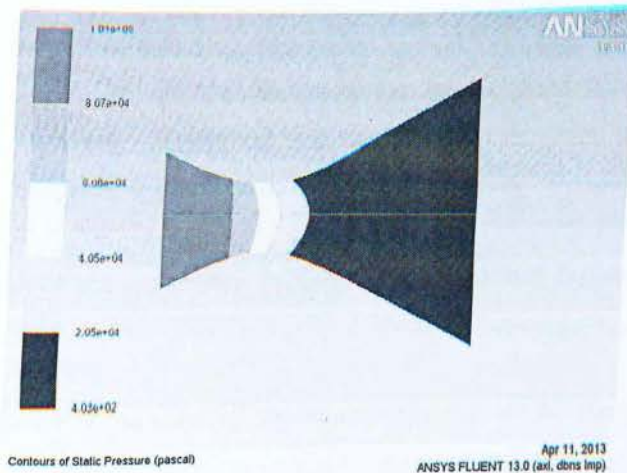
Σχήμα 5.22 Αριθμός Mach

Από το σχήμα 5.22 βλέπουμε ότι ο αριθμός Mach αυξάνεται από την είσοδο έως την έξοδο και η ροή μεταβάλλεται από υποηχητική σε ηχητική και στη συνέχεια σε υπερηχητική. Συγκεκριμένα:

⇒ Ο αριθμός Mach στην είσοδο επί της κεντρικής γραμμής (centerline) είναι **0.24** ενώ στις δύο άκρες είναι ο ελάχιστος **0.0989**.

⇒ Σύμφωνα με τη θεωρία όταν στην έξοδο του ακροφυσίου έχουμε υπερηχητική ροή, τότε στη στένωση έχουμε ηχητική ροή, το οποίο σύμφωνα με τα αποτελέσματα ισχύει.

⇒ Πηγαίνοντας προς την έξοδο ο αριθμός Mach αυξάνεται περισσότερο. Επί της κεντρικής γραμμής (centerline), ο αριθμός Mach γίνεται περίπου **3.80** ενώ πλησιάζοντας προς τις δυο άκρες της εξόδου έχουμε τον μέγιστο αριθμό **4.34**.



Σχήμα 5.23 Περίγραμμα Στατικής Πίεσης

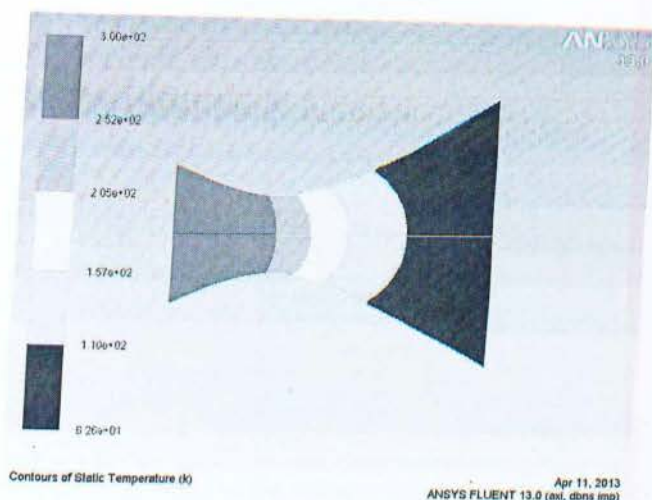
Στο σχήμα 5.23 βλέπουμε πως η στατική πίεση μειώνεται καθώς ο αέρας ρέει προς την έξοδο του ακροφυσίου. Χαρακτηριστικά βλέπουμε ότι:

⇒ Η πίεση στην είσοδο και επί της κεντρικής γραμμής (centerline) είναι **95000 Pascal** ενώ στις δυο άκρες είναι **101000 Pascal**.

⇒ Στη στένωση του ακροφυσίου η πίεση μειώνεται **48000 Pascal**.

⇒ Πλησιάζοντας προς την έξοδο η πίεση όλο και περισσότερο μειώνεται.

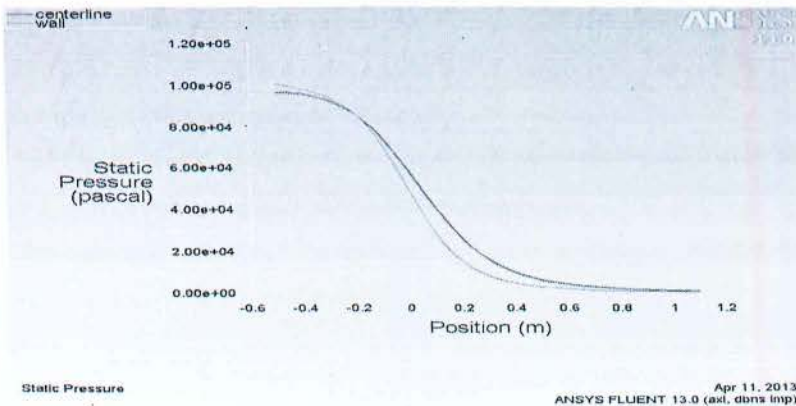
Έχουμε ομοιόμορφη μορφή και η τιμή της είναι **403 Pascal**.



Σχήμα 5.24 Περίγραμμα Στατικής Θερμοκρασίας

Στο σχήμα 5.24 όπως μπορούμε να δούμε, η θερμοκρασία μειώνεται από την είσοδο προς την έξοδο του ακροφυσίου υποδεικνύοντας μια μεταφορά της εσωτερικής ενέργειας σε κινητική ενέργεια με αποτέλεσμα την εν λόγω μείωση της θερμοκρασίας. Χαρακτηριστικά βλέπουμε ότι:

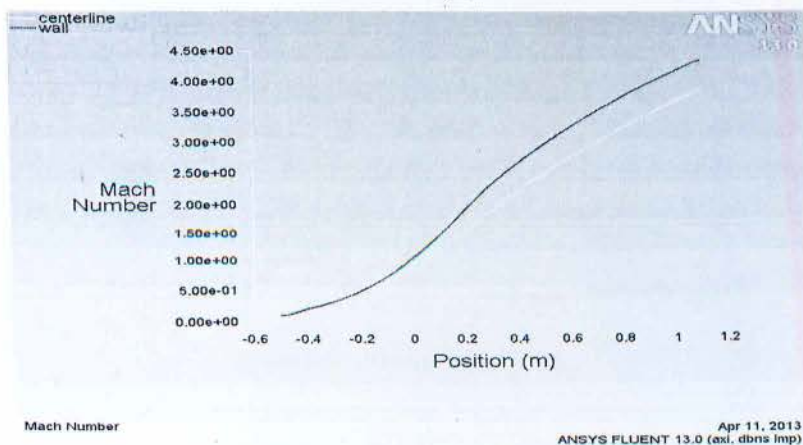
- ⇒ Στην είσοδο του ακροφυσίου έχουμε τη μέγιστη στατική θερμοκρασία **300 Kelvin**. Στη συνέχεια παρατηρείτε μείωση της στατικής θερμοκρασίας σε όλο το μήκος του ακροφυσίου.
- ⇒ Στη στένωση έχουμε ελάττωση της θερμοκρασίας περίπου **230 Kelvin**.
- ⇒ Στην έξοδο και κατά μήκος της κεντρικής γραμμής (centerline) έχουμε ακόμα περισσότερο μείωση της θερμοκρασίας η οποία περίπου είναι **70.5 Kelvin**, ενώ στις δύο άκρες έχουμε την ελάχιστη τιμή θερμοκρασίας **62.5 Kelvin**.



Σχήμα 5.25 Στατική Πίεση κατά μήκος της κεντρικής γραμμής (*centerline*) και του τοίχου (*wall*)

Στο σχήμα 5.25 παρατηρούμε ότι:

- ⇒ Η στατική πίεση στην είσοδο του ακροφυσίου ($X=-0,5$ m) είναι ελάχιστη μεγαλύτερη στο τοίχωμα (*wall*) παρά στην κεντρική γραμμή (*centerline*).
- ⇒ Περίπου στο σημείο $X \approx -0,2$ m η στατική πίεση στην κεντρική γραμμή (*centerline*) είναι ίδια με αυτήν στο τοίχωμα (*wall*).
- ⇒ Στο διάστημα $-0,2 \leq X \leq 0,7$ η πίεση στην κεντρική γραμμή (*centerline*) είναι ελάχιστη μεγαλύτερη από αυτή στο τοίχωμα (*wall*).
- ⇒ Στο σημείο $X=1,1$ η πίεση στο τοίχωμα και στην κεντρική γραμμή είναι όμοια.



Σχήμα 5.26 Διακύμανση αριθμού Mach κατά την αξονική διεύθυνση στον άξονα (*centerline*) και του τοιχώματος (*wall*)

Από το σχήμα 5.26 γίνεται αντιληπτό ότι:

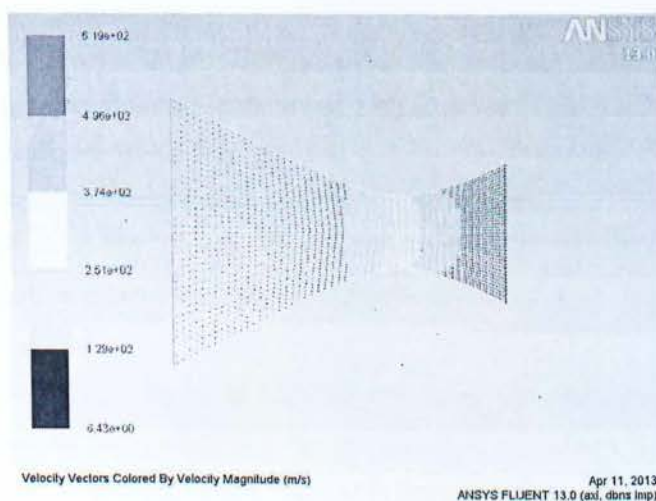
⇒ Στο διάστημα $-0,5 \leq X < 0$ ο αριθμός Mach είναι μικρότερος από ένα $M < 1$, που σημαίνει ότι η ροή είναι υποηχητική (subsonic).

⇒ Στο σημείο $X=0$ ο αριθμός Mach στο τοίχωμα (wall) είναι ίσος με ένα, $M=1$, που σημαίνει ότι η ροή στο σημείο αυτό είναι ηχητική (sonic).

⇒ Στο διάστημα $-0,2 < X \leq +1,1$ ο αριθμός Mach είναι μεγαλύτερος του ένα, $M > 1$, που σημαίνει ότι η ροή από ηχητική γίνεται υπερηχητική (supersonic).

5.4.5 Επίδραση διπλασιασμού διαμέτρου εισόδου

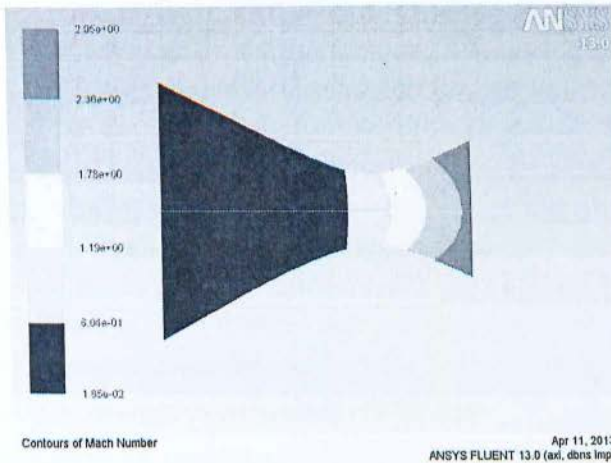
Για τον διπλασιασμό της διαμέτρου εισόδου του ακροφυσίου διπλασιάσαμε μόνο την ακτίνα r της κυκλικής διατομής ($A = \pi \times r^2$) της εισόδου με παράλληλη αύξηση του μήκους (διπλασιασμό) από την είσοδο μέχρι την στένωση, με σκοπό να ακολουθούμε την εξίσωση της παραβολής σύμφωνα με τα παρακάτω: $A = 0,1 + X^2$ με $-1,1 < X < 0,5$. Όμως ($A = A$), οπότε $\pi \times r^2 = 0,1 + X^2 \Rightarrow r = [(0,1 + X^2) / \pi]^{1/2}$, άρα $r_{\text{new}} = 2 \times r$. Τέλος, πήραμε το αρχείο vert.dat (συντεταγμένες κατά μήκος της καμπύλης) και αντικαταστήσαμε την νέα ακτίνα (r_{new}) στο σχεδιαστικό πρόγραμμα Gambit.



Σχήμα 5.27 Διάγραμμα Ταχύτητας

Από το σχήμα 5.27 βλέπουμε ότι η ροή είναι ομαλά επιταχυνόμενη από την είσοδο έως την έξοδο. Συγκεκριμένα:

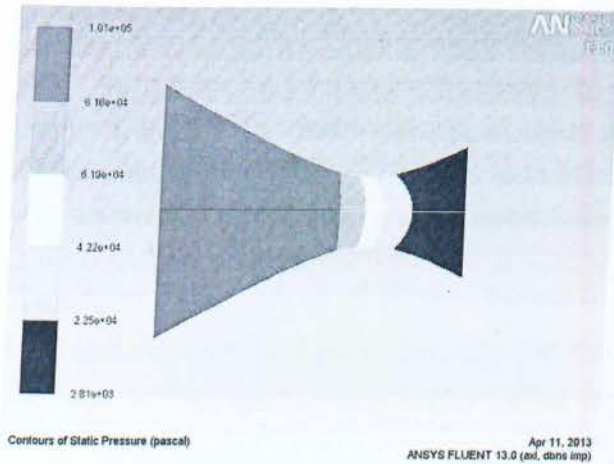
- ⇒ Η ταχύτητα στην είσοδο είναι **6.43 m/sec**.
- ⇒ Η ταχύτητα στη στένωση είναι περίπου **250 m/sec**.
- ⇒ Η ταχύτητα στην έξοδο είναι ομοιόμορφη και είναι **619 m/sec**.



Σχήμα 5.28 Αριθμός Mach

Από το σχήμα 5.28 βλέπουμε ότι ο αριθμός Mach αυξάνεται από την είσοδο έως την έξοδο και η ροή μεταβάλλεται από υποηχητική σε ηχητική και στη συνέχεια σε υπερηχητική. Χαρακτηριστικά βλέπουμε ότι:

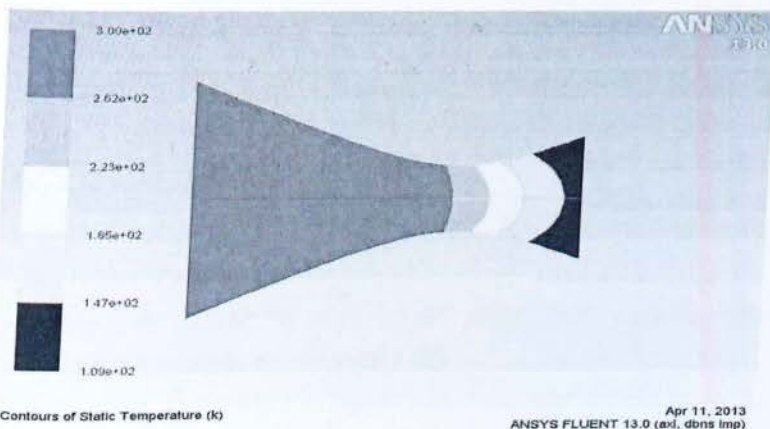
- ⇒ Ο αριθμός Mach στην είσοδο είναι ομοιόμορφος **0.0185**.
- ⇒ Σύμφωνα με τη θεωρία όταν στην έξοδο του ακροφυσίου έχουμε υπερηχητική ροή, τότε στην στένωση έχουμε ηχητική ροή, το οποίο σύμφωνα με τα αποτελέσματα ισχύει.
- ⇒ Πηγαίνοντας προς την έξοδο ο αριθμός Mach αυξάνεται περισσότερο. Χαρακτηριστικά επί της κεντρικής γραμμής (centerline), ο αριθμός Mach γίνεται περίπου **2.40** ενώ πλησιάζοντας προς τις δυο άκρες της εξόδου έχουμε τον μέγιστο αριθμό **2.95**.



Σχήμα 5.30 Περιγραφή Στατικής Πίεσης

Στο σχήμα 5.30 βλέπουμε πως η στατική πίεση μειώνεται καθώς ο αέρας ρέει προς την έξοδο του ακροφυσίου. Αναλυτικά φαίνεται ότι:

- ⇒ Η πίεση στην είσοδο είναι ομοιόμορφη **101000 Pascal**.
- ⇒ Στη στένωση του ακροφυσίου η πίεση μειώνεται **68000 Pascal**.
- ⇒ Πλησιάζοντας προς την έξοδο η πίεση όλο και περισσότερο μειώνεται. Επί της κεντρικής γραμμής η πίεση είναι **7000 Pascal** ενώ στις δύο άκρες είναι **2810 Pascal**.



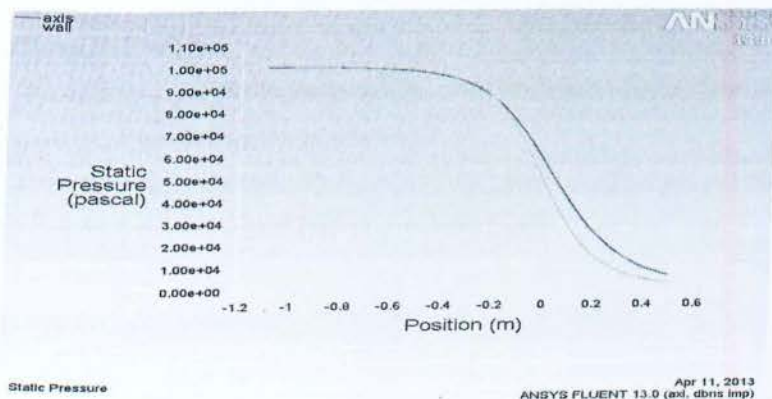
Σχήμα 5.31 Περιγραφή Στατικής Θερμοκρασίας

Στο σχήμα 5.31 όπως μπορούμε να δούμε, η θερμοκρασία μειώνεται από την είσοδο προς την έξοδο του ακροφυσίου, υποδεικνύοντας μια μεταφορά της εσωτερικής ενέργειας σε κινητική ενέργεια με αποτέλεσμα την εν λόγω μείωση της θερμοκρασίας. Χαρακτηριστικά βλέπουμε ότι:

⇒ Στην είσοδο του ακροφυσίου έχουμε την μέγιστη στατική θερμοκρασία **300 Kelvin**. Στην συνέχεια παρατηρείτε μείωση της στατικής θερμοκρασίας σε όλο το μήκος του ακροφυσίου.

⇒ Στη στένωση έχουμε ελάττωση της θερμοκρασίας περίπου **260 Kelvin**.

⇒ Στην έξοδο και κατά μήκος της κεντρικής γραμμής (centerline) έχουμε ακόμα περισσότερο μείωση της θερμοκρασίας η οποία περίπου είναι **135 Kelvin**, ενώ στις δύο άκρες έχουμε την ελάχιστη τιμή θερμοκρασίας **109 Kelvin**.



Σχήμα 5.32 Στατική Πίεση κατά μήκος της κεντρικής γραμμής (centerline) και του τοίχου (wall)

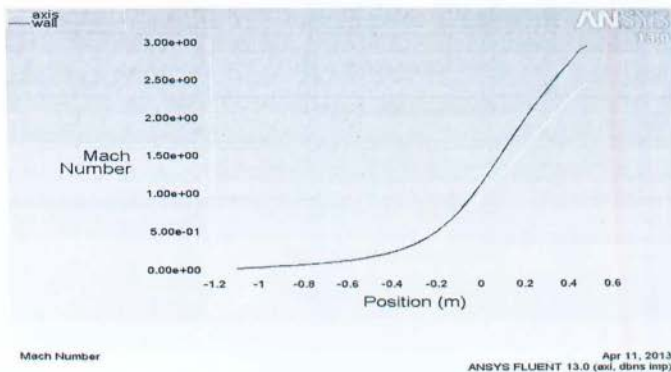
Στο σχήμα 5.32 παρατηρούμε ότι:

⇒ Η στατική πίεση στην είσοδο του ακροφυσίου ($X=-0,5$ m) στο τοίχωμα (wall) είναι ίδια με της κεντρικής (centerline).

⇒ Στο διάστημα $-1,1 \leq X \leq -0,4$ m η στατική πίεση στην κεντρική γραμμή (centerline) είναι ίδια με αυτήν στο τοίχωμα (wall).

⇒ Στο διάστημα $-0,2 \leq X \leq +0,5$ η πίεση στην κεντρική γραμμή (axis) είναι ελάχιστη μεγαλύτερη από αυτή στο τοίχωμα (wall).

⇒ Στο σημείο $X=0,5$ η πίεση στο τοίχωμα και στην κεντρική γραμμή είναι όμοια.



Σχήμα 5.33 Διακύμανση αριθμού Mach κατά την αξονική διεύθυνση στον άξονα (centerline) και του τοιχώματος (wall)

Στο σχήμα παρατηρούμε ότι:

- ⇒ Στο διάστημα $-1,1 \leq X < 0$ ο αριθμός Mach είναι μικρότερος από ένα $M < 1$, που σημαίνει ότι η ροή είναι υποηχητική (subsonic).
- ⇒ Στο σημείο $X=0$ ο αριθμός Mach στο τοίχωμα (wall) είναι ίσος με ένα, $M=1$, που σημαίνει ότι η ροή στο σημείο αυτό είναι ηχητική (sonic).
- ⇒ Στο διάστημα $-0 < X \leq +0,5$ ο αριθμός Mach είναι μεγαλύτερος του ένα, $M > 1$, που σημαίνει ότι η ροή από ηχητική γίνεται υπερηχητική (supersonic).

5.5 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα & σύγκριση με το αρχικό πρόβλημα

Διάλυσμα ταχύτητας

Διάμετρος D	Ταχύτητα εισόδου (m/sec)	29.7
	Ταχύτητα στένωσης (m/sec)	280
	Ταχύτητα εξόδου (m/sec)	619

Διάμετρος 2D	Ταχύτητα εισόδου (m/sec)	9.25
	Ταχύτητα στένωσης (m/sec)	232
	Ταχύτητα εξόδου (m/sec)	646

Διάμετρος D/2	Ταχύτητα εισόδου (m/sec)	46.8
	Ταχύτητα στένωσης (m/sec)	314
	Ταχύτητα εξόδου (m/sec)	609

Διάμετρος D - 2D	Ταχύτητα εισόδου (m/sec)	34.3
	Ταχύτητα στένωσης (m/sec)	340
	Ταχύτητα εξόδου (m/sec)	691

Διάμετρος 2D - D	Ταχύτητα εισόδου (m/sec)	6.43
	Ταχύτητα στένωσης (m/sec)	250
	Ταχύτητα εξόδου (m/sec)	619

Από τα παραπάνω συγκεντρωτικά αποτελέσματα βλέπουμε ότι:

Αν διπλασιάσουμε τη διάμετρο:

- 1) Η ταχύτητα εισόδου μειώνεται αρκετά
- 2) Η ταχύτητα στη στένωση ομοίως μειώνεται
- 3) Η ταχύτητα εξόδου σε σχέση με την είσοδο, έξοδο παρουσιάζει αύξηση

Αν υποδιπλασιάσουμε τη διάμετρο:

- 1) Η ταχύτητα εισόδου αυξάνεται
- 2) Η ταχύτητα στη στένωση αυξάνεται
- 3) Η ταχύτητα στην έξοδο παρουσιάζει μια μικρή αύξηση

Αν διπλασιάσουμε τη διάμετρο της εξόδου:

- 1) Η ταχύτητα εισόδου παρουσιάζει μικρή αύξηση
- 2) Η ταχύτητα στη στένωση αυξάνεται σημαντικά
- 3) Η ταχύτητα στην έξοδο επίσης αυξάνεται σε σημαντικό βαθμό

Αν διπλασιάσουμε τη διάμετρο της εισόδου:

- 1) Η ταχύτητα στην είσοδο μειώνεται αρκετά
- 2) Η ταχύτητα στη στένωση μειώνεται
- 3) Η ταχύτητα στην έξοδο παραμένει σταθερή

Αριθμός Mach

Διάμετρος D	Mach εισόδου	0.0856
	Mach στένωσης	1.04
	Mach εξόδου	2.96

Διάμετρος 2D	Mach εισόδου	0.0266
	Mach στένωσης	1.02
	Mach εξόδου	3.34

Διάμετρος D/2	Mach εισόδου	0.135
	Mach στένωσης	1.03
	Mach εξόδου	2.82

Διάμετρος D - 2D	Mach εισόδου	0.0989
	Mach στένωσης	1.09
	Mach εξόδου	4.34

Διάμετρος 2D - D	Mach εισόδου	0.0185
	Mach στένωσης	1.09
	Mach εξόδου	2.95

Από τα παραπάνω συγκεντρωτικά αποτελέσματα βλέπουμε ότι:

Αν διπλασιάσουμε τη διάμετρο:

- 1) Ο αριθμός Mach στην είσοδο μειώνεται
- 2) Ο αριθμός Mach στη στένωση ομοίως μειώνεται
- 3) Ο αριθμός Mach στην έξοδο παρουσιάζει μικρή αύξηση

Αν υποδιπλασιάσουμε τη διάμετρο:

- 1) Ο αριθμός Mach στην είσοδο αυξάνεται
- 2) Ο αριθμός Mach στη στένωση παραμένει σχεδόν ίδιος

- 3) Ο αριθμός Mach στην έξοδο παρουσιάζει μια μικρή μείωση

Αν διπλασιάσουμε τη διάμετρο της εξόδου:

- 1) Ο αριθμός Mach παρουσιάζει μικρή αύξηση
- 2) Ο αριθμός Mach στη στένωση παραμένει σχεδόν ίδιος
- 3) Ο αριθμός Mach στην έξοδο παρουσιάζει σημαντική αύξηση

Αν διπλασιάσουμε τη διάμετρο της εισόδου:

- 1) Ο αριθμός Mach στην είσοδο μειώνεται αρκετά
- 2) Ο αριθμός Mach στη στένωση παραμένει σχεδόν ίδιος
- 3) Ο αριθμός Mach στην έξοδο παραμένει σχεδόν ίδιος

Στατική πίεση

Διάμετρος D	Στατική πίεση εισόδου (Pascal)	101000
	Στατική πίεση στένωσης (Pascal)	55100
	Στατική πίεση εξόδου (Pascal)	2810

Διάμετρος 2D	Στατική πίεση εισόδου (Pascal)	101000
	Στατική πίεση στένωσης (Pascal)	64700
	Στατική πίεση εξόδου (Pascal)	1370

Διάμετρος D/2	Στατική πίεση εισόδου (Pascal)	10000
	Στατική πίεση στένωσης (Pascal)	50000
	Στατική πίεση εξόδου (Pascal)	3490

Διάμετρος D - 2D	Στατική πίεση εισόδου (Pascal)	10100
	Στατική πίεση στένωσης (Pascal)	48000
	Στατική πίεση εξόδου (Pascal)	403

Διάμετρος 2D - D	Στατική πίεση εισόδου (Pascal)	101000
	Στατική πίεση στένωσης (Pascal)	68000
	Στατική πίεση εξόδου (Pascal)	2810

Από τα παραπάνω συγκεντρωτικά αποτελέσματα βλέπουμε ότι:

Αν διπλασιάσουμε την διάμετρο:

- 1) Η στατική πίεση στην είσοδο είναι σταθερή
- 2) Η στατική πίεση στη στένωση αυξάνεται
- 3) Η στατική πίεση στην έξοδο μειώνεται σημαντικά

Αν υποδιπλασιάσουμε την διάμετρο:

- 1) Η στατική πίεση στην είσοδο είναι σταθερή
- 2) Η στατική πίεση στη στένωση μειώνεται
- 3) Η στατική πίεση στην έξοδο αυξάνεται

Αν διπλασιάσουμε την διάμετρο της εξόδου:

- 1) Η στατική πίεση στην είσοδο παρουσιάζει μικρή αύξηση
- 2) Η στατική πίεση στη στένωση μειώνεται
- 3) Η στατική πίεση στην έξοδο μειώνεται αρκετά

Αν διπλασιάσουμε την διάμετρο της εισόδου:

- 1) Η στατική πίεση στην είσοδο παρουσιάζει μικρή αύξηση
- 2) Η στατική πίεση στη στένωση αυξάνεται
- 3) Η στατική πίεση στην έξοδο παραμένει σταθερή

Στατική θερμοκρασία

Διάμετρος D	Στατική θερμοκρασία εισόδου (Kelvin)	300
	Στατική θερμοκρασία στένωσης (Kelvin)	246
	Στατική θερμοκρασία εξόδου (Kelvin)	109

Διάμετρος 2D	Στατική θερμοκρασία εισόδου (Kelvin)	300
	Στατική θερμοκρασία στένωσης (Kelvin)	265
	Στατική θερμοκρασία εξόδου (Kelvin)	92.5

Διάμετρος D/2	Στατική θερμοκρασία εισόδου (Kelvin)	300
	Στατική θερμοκρασία στένωσης (Kelvin)	245
	Στατική θερμοκρασία εξόδου (Kelvin)	115

D - 2D	Στατική θερμοκρασία εισόδου (Kelvin)	300
	Στατική θερμοκρασία στένωσης (Kelvin)	230
	Στατική θερμοκρασία εξόδου (Kelvin)	62.5

2D - D	Στατική θερμοκρασία εισόδου (Kelvin)	300
	Στατική θερμοκρασία στένωσης (Kelvin)	260
	Στατική θερμοκρασία εξόδου (Kelvin)	109

Από τα παραπάνω συγκεντρωτικά αποτελέσματα βλέπουμε ότι:

Αν διπλασιάσουμε τη διάμετρο:

- 1) Η στατική θερμοκρασία στην είσοδο είναι σταθερή
- 2) Η στατική θερμοκρασία στη στένωση παρουσιάζει μικρή αύξηση
- 3) Η στατική θερμοκρασία στην έξοδο μειώνεται ελάχιστα

Αν υποδιπλασιάσουμε τη διάμετρο:

- 1) Η στατική θερμοκρασία στην είσοδο είναι σταθερή
- 2) Η στατική θερμοκρασία στη στένωση παραμένει σταθερή
- 3) Η στατική θερμοκρασία στην έξοδο αυξάνεται ελάχιστα

Αν διπλασιάσουμε τη διάμετρο της εξόδου:

- 1) Η στατική θερμοκρασία στην είσοδο είναι σταθερή
- 2) Η στατική θερμοκρασία στη στένωση μειώνεται ελάχιστα
- 3) Η στατική θερμοκρασία στην έξοδο μειώνεται αρκετά

Αν διπλασιάσουμε τη διάμετρο της εισόδου:

- 1) Η στατική θερμοκρασία στην είσοδο είναι σταθερή

- 2) Η στατική θερμοκρασία στη στένωση παρουσιάζει μικρή αύξηση
- 3) Η στατική θερμοκρασία στην έξοδο παραμένει σταθερή

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική εργασία

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία μελετάμε τη ροή του αέρα σε συγκλίνον-αποκλίνον ακροφύσιο με σκοπό τον υπολογισμό του αριθμού Mach, της ταχύτητας, της στατικής πίεσης και θερμοκρασίας. Με βάση τα αποτελέσματα παρατηρήσαμε ότι το Fluent προλέγει σωστά τη ροή από υποηχητική στην είσοδο, ηχητική στη στένωση και υπερηχητική στην έξοδο. Επιπρόσθετα όπως παρατηρούμε η συνολική θερμοκρασία και πίεση παραμένει σε σταθερές τιμές σε όλο το μήκος του ακροφυσίου. Με αυτό γίνεται επιβεβαίωση της θεωρίας, γιατί θεωρούμε ότι αυτή η ροή είναι ισεντροπική και έτσι την επιλύουμε, θεωρώντας δηλαδή ότι η ολική θερμοκρασία, όπως και η πίεση παραμένει κανονικά σε σταθερές τιμές.

Συνοψίζοντας καταλήγουμε στα εξής:

- Όταν διπλασιάσουμε τη συνολική διάμετρο του ακροφυσίου παρατηρούμε πως στην είσοδο έχουμε μείωση της ταχύτητας και του αριθμού Mach ενώ η στατική πίεση και θερμοκρασία παραμένει σταθερή. Στη στένωση, ο αριθμός Mach και η ταχύτητα μειώνεται. Η στατική πίεση αυξάνεται, ενώ η στατική θερμοκρασία παρουσιάζει μια μικρή αύξηση. Στην έξοδο, η ταχύτητα και ο αριθμός Mach παρουσιάζει ελάχιστη αύξηση, η στατική πίεση μειώνεται σημαντικά και η στατική θερμοκρασία παρουσιάζει ελάχιστη μείωση.
- Όταν υποδιπλασιάσουμε τη συνολική διάμετρο του ακροφυσίου παρατηρούμε πως στην είσοδο έχουμε σημαντική αύξηση της ταχύτητας, μείωση του αριθμού Mach και η στατική πίεση, θερμοκρασία παραμένουν αμετάβλητες. Στη στένωση, η ταχύτητα και ο αριθμός Mach αυξάνεται, ενώ η στατική πίεση μειώνεται και η στατική θερμοκρασία παραμένει σταθερή. Στην έξοδο, η ταχύτητα παρουσιάζει μικρή αύξηση ενώ ο αριθμός Mach μικρή μείωση. Η στατική πίεση και θερμοκρασία αυξάνονται.
- Όταν υποδιπλασιάσουμε τη διάμετρο εξόδου του ακροφυσίου παρατηρούμε πως στην είσοδο η ταχύτητα παρουσιάζει μικρή αύξηση, ο αριθμός Mach και στατική θερμοκρασία παραμένουν στο ίδιο επίπεδο ενώ η στατική πίεση παρουσιάζει ελάχιστη αύξηση. Στη στένωση, η ταχύτητα αυξάνεται αρκετά, ο

αριθμός Mach παραμένει ίδιος, η στατική πίεση μειώνεται και η στατική θερμοκρασία παρουσιάζει μικρή αύξηση. Στην έξοδο, η ταχύτητα και ο αριθμός Mach αυξάνονται πολύ, η στατική πίεση μειώνεται αρκετά ενώ η στατική θερμοκρασία παραμένει αμετάβλητη.

- Όταν υποδιπλασιάζουμε τη διάμετρο εισόδου του ακροφυσίου παρατηρούμε πως στην είσοδο η ταχύτητα και ο αριθμός Mach μειώνονται αρκετά ενώ η στατική πίεση αυξάνεται ελάχιστα και η στατική θερμοκρασία παραμένει σταθερή. Στη στένωση, η ταχύτητα μειώνεται, ο αριθμός Mach παραμένει σταθερός ενώ η στατική πίεση αυξάνεται και η στατική θερμοκρασία εμφανίζει μικρή αύξηση. Στην έξοδο, η ταχύτητα, ο αριθμός Mach και η στατική πίεση και θερμοκρασία παραμένουν σε σταθερές τιμές.

ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Για περαιτέρω διερεύνηση του φαινομένου θα μπορούσε να προταθούν οι ακόλουθες εργασίες-μελέτες:

- Ίδιες γεωμετρίες με διαφορετικό πλέγμα
- Διαφορετικές γεωμετρίες με διαφορετικό πλέγμα
- Ίδιες γεωμετρίες με διαφορετικές οριακές συνθήκες
- Διαφορετικές γεωμετρίες με ίδιες οριακές συνθήκες
- Ανάλυση δεδομένων με περισσότερα πρότυπα μοντέλα προσομοίωσης

Τέλος, θα μπορούσε επιπλέον να μελετηθεί και η προσομοίωση της παρούσας γεωμετρίας σε τρισδιάστατο περιβάλλον (3-D) με τη χρησιμοποίηση ενός καλύτερου πλέγματος το οποίο θα ήταν ικανό να μας φέρει καλύτερα αποτελέσματα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Επιλεγμένη ελληνική βιβλιογραφία :

- Γεώργιος Μπεργελές, << Υπολογιστική Ρευστομηχανική>>, Εκδόσεις ΣΥΜΕΩΝ, Αθήνα 2006
- Περικλής Κορωνάκης, <<Μηχανική Ρευστών>>, Τρίτη Έκδοση, Εκδόσεις ΙΩΝ
- Περικλής Κορωνάκης, <<Εφαρμοσμένη Ρευστομηχανική>>, Δεύτερη Έκδοση, Εκδόσεις ΙΩΝ
- Streeter/Wylie/Bedford, <<Μηχανική Ρευστών>>, ΦΟΥΝΤΑΣ, 6^η Έκδοση (1975)
- Σωκράτης Τσαγγάρης, << Μηχανική των Ρευστών>>, Εκδόσεις ΣΥΜΕΩΝ, Αθήνα 2005
- Π. Κ. ΝΙΚΑ, <<Εφαρμοσμένη Θερμοδυναμική>>, Τόμος 1-Έκδοση 6^η (2008), Εκδόσεις LEEDER ENTERPRISES LTD
- Νικολόπουλος Νικόλαος, Νίκας Κων/νος-Στέφανος, Μουστρής Κωνσταντίνος, <<Εφαρμοσμένη Ρευστομηχανική>> Αθήνα 2011

Εγχειρίδια Προγραμμάτων :

- Introductory GAMBIT Training GAMBIT 2.2 February 2005
- Introductory FLUENT Notes FLUENT v6.2 Mar 2005
- GAMBIT Tutorial Guide May 2000
- GAMBIT Tutorial Guide May 2007
- GAMBIT 2.4 Tutorial Guide

Διαδικτυακοί Τόποι :

- <http://fm1.fluidmech.gr/refsta/book/chapter21n.pdf>
- <https://confluence.cornell.edu/display/SIMULATION/FLUENT+-+Compressible+Flow+in+a+Nozzle+-+Problem+Specification>
- http://en.wikipedia.org/wiki/Boundary_layer
- <http://www.atm.ox.ac.uk/user/marshall/ffc/lecture3.pdf>
- [http://www.public.iastate.edu/~huhui/teaching/2013S/class-notes/AerE344-Lecture-12-ShockWaves-and-De-Laval-Nozzle-Schlieren-Shadowgraph-Plume-Lab-final%20\[Compatibility%20Mode\].pdf](http://www.public.iastate.edu/~huhui/teaching/2013S/class-notes/AerE344-Lecture-12-ShockWaves-and-De-Laval-Nozzle-Schlieren-Shadowgraph-Plume-Lab-final%20[Compatibility%20Mode].pdf)

A Computational Study on the supersonic flow in a variable flow rate nozzle

Argyris Nikolaos, Glynos George

ABSTRACT

The subject dealt with in this Thesis is the design study of a converging-diverging nozzle through a computer code.

Consequently, the aim of this project is to calculate the Mach number, the pressure and the temperature distribution at the nozzle orifice to export charts from the commercial package Fluent with parallel annotations to them. Then we will make some variations in the designing part using GAMBIT and we will compare the results with the original problem that we consider.

Methodologically the subject for perusal is searched through the review of the Greek but also foreign language bibliography, as well as the retrieval of relevant to the subject information through the electronic bibliography. Additionally we will attempt to calculate via computer package FLUENT a) the speed at the orifice entrance and the outlet (on the center line) of the nozzle, b) the Mach number which varies from subsonic flow to transonic flow and then to supersonic flow, c) the static pressure and d) the static temperature. Finally various parametric analyzes will be attempted in order to understand the changes taking part in the nozzle compared to its initial state.