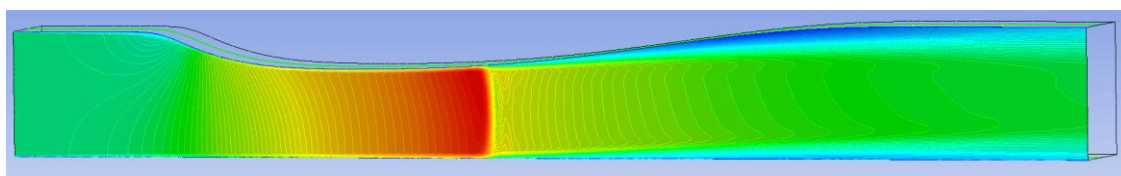




ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗΣ ΡΟΗΣ ΣΕ ΣΥΓΚΛΙΝΟΝ-ΑΠΟΚΛΙΝΟΝ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟ

ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΥ ΑΝΤΩΝΙΟΣ



Διπλωματική Εργασία

Επιβλέπων : Δρ. Ιωάννης Κ. Νικολός, Αναπληρωτής Καθηγητής

Χανιά, Σεπτέμβριος 2016

“Intentionally Left Blank”

© Copyright 2016, Αναστασίου Αντώνιος

Ευχαριστίες

Φτάνοντας στο τέλος αυτής της διπλωματικής εργασίας και κλείνοντας τον κύκλο των προπτυχιακών σπουδών, θα ήθελα μέσα από την καρδιά μου να ευχαριστήσω τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Ιωάννη Κ. Νικολό για την ευκαιρία που μου έδωσε και συνεργαστήκαμε, την εμπιστοσύνη, την καθοδήγηση, την στήριξη του, την επιμονή και υπομονή που μου έδειξε όλο το διάστημα που χρειάστηκε για την εκπόνηση της εργασίας αυτής. Όλα αυτά μαζί και πολλά ακόμα έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στην περάτωση της διπλωματικής εργασίας.

Όμως, ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω να πω και στην οικογένειά μου που με στήριξε και θα με στηρίζει πάντα στις επιλογές και τις προσπάθειές μου, καθώς και τους φίλους μου για την ενθάρρυνση τους όλο αυτό το διάστημα.

Χανιά, Σεπτέμβριος 2016

Αναστασίου Αντώνης

Πρόλογος

Η διπλωματική αυτή πραγματοποιήθηκε με σκοπό την αριθμητική προσομοίωση της συμπεριφοράς ροής στο εσωτερικό ενός συγκλίνοντος-αποκλίνοντος ακροφυσίου. Η γεωμετρική μοντελοποίηση του ακροφυσίου πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του εμπορικού λογισμικού CATIA ενώ η αριθμητική προσομοίωση της ροής έγινε με τη χρήση του εμπορικού λογισμικού ANSYS CFX. Επιπλέον, γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων που επιτεύχθηκαν από την εφαρμογή δύο διαφορετικών μεθόδων μοντελοποίησης της τύρβης, και συγκεκριμένα με το μοντέλο k -epsilon και το μοντέλο Shear Stress Transport (SST), με τα πειραματικά δεδομένα καθώς και με αριθμητικά αποτελέσματα που δίνονται στη βιβλιογραφία. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται αναλυτικά πως δημιουργήθηκε και αναλύθηκε το συγκεκριμένο μοντέλο, ενώ δίνεται και μια γενική εικόνα για το πώς χρησιμοποιούνται τα συγκεκριμένα λογισμικά.

Παρακάτω παρουσιάζεται περιληπτικά τι περιλαμβάνει το κάθε κεφάλαιο της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας:

Κεφάλαιο 1: Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη περιγραφή του αντικείμενου καθώς και του προβλήματος και των μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν.

Κεφάλαιο 2: Στο κεφάλαιο αυτό της διπλωματικής δίδεται αναλυτικά η διαδικασία η οποία ακολουθήθηκε με σκοπό τον σχεδιασμό της γεωμετρίας που αναλύθηκε.

Κεφάλαιο 3: Στη συνέχεια περιγράφεται με ποιο τρόπο το γεωμετρικό μοντέλο του αντικείμενου χρησιμοποιείται για την αριθμητική ανάλυση της ροής.

Κεφάλαιο 4: Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

Κεφάλαιο 5: Στο τελευταίο αυτό κεφάλαιο περιέχονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν.

Στο Παράρτημα τέλος δίδονται τα σημεία στον τρισδιάστατο χώρο που χρησιμοποιήθηκαν για τον σχεδιασμό της γεωμετρίας του ακροφυσίου.

“Intentionally Left Blank”

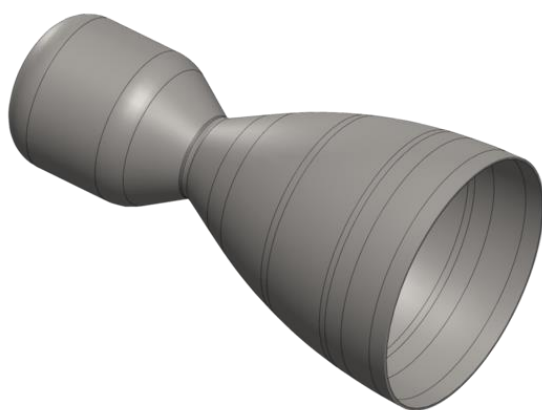
Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	7
1.1 Ιστορική αναδρομή.....	7
1.2 Εισαγωγικά στοιχεία.....	7
1.3 Είδη Ροής & Μοντέλα.....	8
1.4 Περιγραφή Αρχής Λειτουργίας Κώδικα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής.....	9
1.5 Μέθοδοι Προσομοίωσης Τυρβώδους Ροής.....	11
1.6 Το Λογισμικό ANSYS CFX.....	13
1.7 Πειραματικά Δεδομένα & Αποτελέσματα.....	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟΥ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ CATIA	16
2.1 Εισαγωγικά για το λογισμικό.....	16
2.2 Εισαγωγή στοιχείων στο χώρο.....	16
2.3 Ένωση σημείων με γραμμές και καμπύλες.....	20
2.4 Δημιουργία της επιφάνειας της γεωμετρίας.....	23
2.5 Εισαγωγή 3 ^{ης} διάστασης στο αντικείμενο.....	24
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΣΤΟ ANSYS CFX.....	26
3.1 Μορφοποίηση της γεωμετρίας του αντικειμένου.....	26
3.3 Δημιουργία πλέγματος στο αντικείμενο.....	32
3.4 Εισαγωγή ονόματος στις επιφάνειες.....	35
3.5 Τοπική Πύκνωση του Υπολογιστικού Πλέγματος.....	39
3.6 Έναρξη CFX Setup.....	44
3.7 Έναρξη CFX Solver Manager.....	51
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	54
4.1 Weak Shock Outflow.....	54
4.2 Strong Shock Outflow.....	60
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	70
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	71
1. Τα στοιχεία που εισήχθησαν για την σχεδίαση του ακροφυσίου.	71
1.1 Στοιχεία της άνω πλευράς.....	71
1.2 Τα στοιχεία της κάτω πλευράς.....	73
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	76

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

1.1 Ιστορική αναδρομή

Τα συγκλίνοντα-αποκλίνοντα ακροφύσια εφευρέθηκαν για πρώτη φορά από το Σουηδό μηχανικό Karl Gustaf Patrik de Laval το 1882 και αναπτύχθηκαν το 1890 με σκοπό την επίτευξη υπερηχητικής ροής ατμού στην είσοδο ατμοστροβίλου. Το ακροφύσιο de Laval, όπως λέγεται, ήταν ένας σωλήνας με στένωση στη μέση (λαιμός), που μετέτρεπε την θερμική ενέργεια σε κινητική και επιτυγχάνει υπερηχητική ροή στην έξοδο. Για τον λόγο αυτό μέχρι και σήμερα βρίσκει μεγάλες εφαρμογές, π.χ. σε ατμοστροβίλους και σε κινητήρες πυραύλων (Εικόνα 1.1).

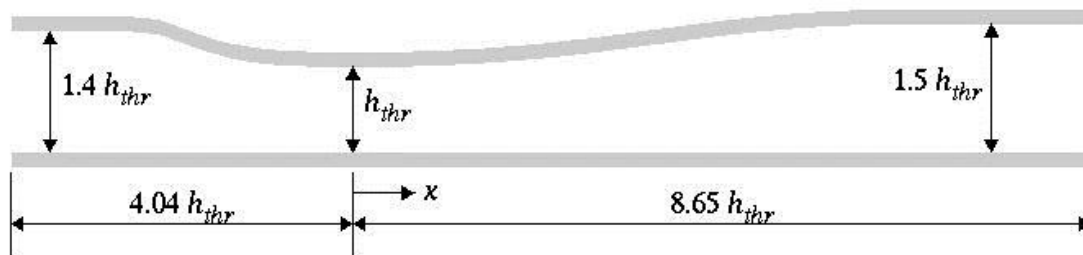


***Εικόνα 1.1:** Συγκλινον-αποκλίνον ακροφύσιο (αριστερά). Φωτογραφία του de Laval (δεξιά).*

1.2 Εισαγωγικά στοιχεία

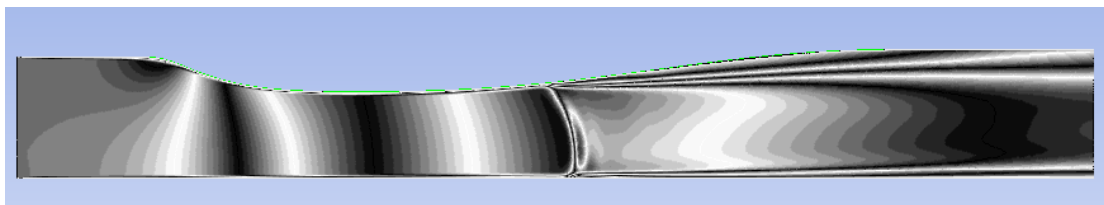
Τα ακροφύσια είναι μηχανολογικές διατάξεις επιτάχυνσης της ροής ρευστού και χρησιμοποιούνται ευρύτατα στους κινητήρες των αεριωθουμένων και των πυραύλων. Ένα ακροφύσιο είναι μια διάταξη που αυξάνει την ταχύτητα ενός ρευστού, σε βάρος της πίεσης. Το εμβαδόν διατομής ενός ακροφυσίου ελαττώνεται προς την κατεύθυνση της ροής για υποηχητικές ροές και αυξάνεται κατά την κατεύθυνση για υπερηχητικές ροές.

Στην παρούσα εργασία το ακροφύσιο που σχεδιάστηκε και αναλύθηκε αφορά σε συγκλίνον-αποκλίνον ακροφύσιο με γεωμετρία όπως αυτής της Εικόνας 1.2.1 [13].



Εικόνα 1.2.1: Η γεωμετρία του συγκλίνοντος-αποκλίνοντος ακροφυσίου που αναλύθηκε (Sajben transonic diffuser).

Τα ακροφύσια αυτά, όπως ήδη αναφέρθηκε, δημιουργήθηκαν για να επιτευχθεί υπερηχητική ταχύτητα (συμπεστού) ρευστού στην έξοδό τους και για τον λόγο αυτό προσαρτήθηκε έναν αποκλίνον τμήμα ροής μετά τον λαιμό του υποηχητικού ακροφυσίου. Με τον όρο λαιμό εννοείται το σημείο στένωσης του ακροφυσίου. Βέβαια ο εξαναγκασμός ενός ρευστού να διέλθει διαμέσου ενός συγκλίνοντος-αποκλίνοντος ακροφυσίου δεν εγγυάται ότι το ρευστό θα επιταχυνθεί σε υπερηχητικές ταχύτητες στην έξοδό του (κάτι που εξαρτάται από τις οριακές συνθήκες). Στην περίπτωση αυτή όμως το ρευστό έχει αποκτήσει ηχητική ταχύτητα στο λαιμό και συνεχίζει να επιταχύνει καθώς η πίεση μειώνεται. Για συγκεκριμένες οριακές συνθήκες, σαν αυτές που συναντώνται στην παρούσα εργασία, αναπτύσσεται ένα κρουστικό κύμα σε ένα σημείο μεταξύ λαιμού και εξόδου, το οποίο προκαλεί μία απότομη πτώση της ταχύτητας σε υποηχητικά επίπεδα και μια απότομη αύξηση της πίεσης όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.2.2.



Εικόνα 1.2.2: Απεικόνιση της ταχύτητας με σκοπό την επίδειξη του σχηματιζόμενου κρουστικού κύματος.

1.3 Είδη Ροής & Μοντέλα

Με τον όρο ροή εννοούμε την κίνηση ενός ρευστού σε μια ορισμένη περιοχή του χώρου, η οποία ονομάζεται πεδίο ροής. Μια δεδομένη ροή, μπορεί να ταξινομηθεί σε διάφορες κατηγορίες ή είδη ροής, ανάλογα με το κριτήριο που χρησιμοποιείται κάθε φορά για το χαρακτηρισμό της. Η ροή μπορεί να είναι ατριβής ή ιξώδης.

Ατριβής ροή ονομάζεται η ροή ιδεατών ρευστών με ιξώδες μηδέν. Τα ρευστά που έχουν την ιδιότητα αυτή ($\mu=0$) είναι γνωστά ως ιδανικά ρευστά. Ιξώδης ροή ονομάζεται η ροή των πραγματικών ρευστών. Τα πραγματικά ρευστά έχουν όλα ιξώδες, ανεξάρτητα αν αυτό είναι μικρό ή μεγάλο. Στα σημεία επαφής του ρευστού με ακίνητο στερεό τοίχωμα (για συνηθισμένες πιέσεις) η ταχύτητα είναι μηδέν (συνθήκη μη ολίσθησης). Αυτό σημαίνει ότι, στην ιξώδη ροή, το ρευστό δεν ολισθαίνει πάνω

στην επιφάνεια του στερεού αλλά μένει προσκολλημένο σε αυτήν. Όμως, καθώς απομακρυνόμαστε από την επιφάνεια του στερεού τοιχώματος, για εξωτερικές ροές η ταχύτητα του ρευστού αυξάνεται συνεχώς έως ότου αποκτήσει την οριακή τιμή u_∞ , όποτε και παραμένει σταθερή. Η περιοχή του ρευστού στην οποία συμβαίνει η παραπάνω μεταβολή της ταχύτητας ονομάζεται οριακό στρώμα.

Η ιξώδης ροή μπορεί να διακριθεί σε στρωτή ή τυρβώδη και σε ασυμπίεστη ή συμπίεστη ροή.

Στρωτή ροή ονομάζεται η ιξώδης ροή κατά την οποία τα στοιχεία του ρευστού κινούνται ομαλώς και κατά στρώματα (ή στιβάδες). Εμφανίζεται σε χαμηλές ταχύτητες και για μεγάλες τιμές του ιξώδους (συνεκτικότητας).

Τυρβώδης ροή ονομάζεται η ιξώδης ροή κατά την οποία τα στοιχεία του ρευστού κινούνται σε ακανόνιστες τροχιές προς όλες τις διευθύνσεις, σχηματίζοντας πολύπλοκες δίνες. Για την αριθμητική προσομοίωση της τυρβώδους ροής το εμπορικό λογισμικό ANSYS CFX δίνει την δυνατότητα επιλογής μεταξύ διαφορετικών τύπων μοντέλων τύρβης (π.χ. *k-epsilon*, *SST*).

Ασυμπίεστη ροή ονομάζεται η ροή ενός ρευστού (πραγματικού ή ιδανικού) κατά την οποία οι μεταβολές της πυκνότητας σε όλη την έκταση του πεδίου ροής είναι πρακτικά μηδενικές. Αντίθετα, συμπίεστη ροή ονομάζεται η ροή κατά την οποία οι μεταβολές της πυκνότητας είναι σημαντικές. Τα υγρά είναι πρακτικά ασυμπίεστα ρευστά. Για τα αέρια που είναι συμπίεστα, συνήθως για τον χαρακτηρισμό μιας ροής ως συμπίεστης ή ασυμπίεστης χρησιμοποιείται ο αδιάστατος αριθμός *Mach*, *M*, ο οποίος ορίζεται από την σχέση $M = \frac{v}{a}$ όπου *v* είναι η τοπική ταχύτητα του συμπίεστου ρευστού και *a* η αντίστοιχη ταχύτητα του ήχου. Στην πράξη, ως ασυμπίεστη ροή χαρακτηρίζεται κάθε ροή αερίου στην οποία ο αριθμός *Mach* είναι μικρότερος ή το πολύ ίσος με 0,3.

1.4 Περιγραφή Αρχής Λειτουργίας Κώδικα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής

Οι κώδικες CFD είναι δομημένοι πάνω σε αριθμητικούς αλγόριθμους που επιλύουν προβλήματα ροής ρευστών. Οι κώδικες αυτοί παρέχουν εύκολη πρόσβαση και λογική σχεδίασης, ώστε να μπορεί εύκολα κάποιος να ορίσει τις παραμέτρους του προβλήματος και να εξάγει τα αποτελέσματα. Για τον λόγο αυτόν, όλοι οι CFD κώδικες (προγράμματα), εστιάζοντας κυρίως στους εμπορικούς, αποτελούνται από τρία βασικά τμήματα.

- Προ-Επεξεργαστή (Pre-processor)
- Επιλύτη (Solver)
- Μετά- Επεξεργαστή (Post- processor)

Κατά την διαδικασία της προ-επεξεργασίας εισάγονται τα δεδομένα του προβλήματος ροής. Αυτό πραγματοποιείται συνήθως μέσω μια εύχρηστης

πλατφόρμας επικοινωνίας με τον χρήστη, που στην συνέχεια μετατρέπει τα δεδομένα σε μορφή κατάλληλη για την εισαγωγή στον επιλύτη. Τα δεδομένα εισαγωγής κατηγοριοποιούνται ως κάτωθι:

- Ορισμός της γεωμετρίας.
- Δημιουργία υπολογιστικού πλέγματος.
- Επιλογή φυσικών και χημικών φαινομένων που θα μοντελοποιηθούν.
- Ορισμός ιδιοτήτων ρευστού.
- Ορισμός οριακών συνθηκών.

Σημειώνεται ότι η λύση στο πρόβλημα ροής (ταχύτητα, πίεση, θερμοκρασία κ.α.) ορίζεται στους κόμβους σε κάθε κελί. Η ακρίβεια της λύσης εξαρτάται από τον αριθμό των κελιών και των κόμβων του πλέγματος. Γενικά, όσο πυκνότερο πλέγμα δημιουργηθεί τόσο μεγαλύτερη ακρίβεια της λύσης επιτυγχάνεται. Η δημιουργία βέλτιστου πλέγματος επιτυγχάνεται με την μεταβολή της πυκνότητας του ανάλογα με την κρισιμότητα κάθε περιοχής της γεωμετρίας και με σκοπό την μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια της λύσης σε συνδυασμό με το μικρότερο δυνατό υπολογιστικό κόστος.

Επιλύτης

Με την πάροδο των ετών αναπτύχθηκαν διάφορες μεθοδολογίες αριθμητικής επίλυσης, με πλήθος διαφορών μεταξύ τους, οι οποίες εστιάζονται κυρίως στον τομέα εφαρμογής τους. Π.χ. οι τρεις πιο δημοφιλείς και συνηθισμένες μέθοδοι διακριτοποίησης είναι:

- Μέθοδος διακριτοποίησης πεπερασμένων διαφορών.
- Μέθοδος διακριτοποίησης πεπερασμένων στοιχείων.
- Μέθοδος διακριτοποίησης πεπερασμένων όγκων.

Άλλες μέθοδοι είναι η μέθοδος των οριακών στοιχείων (boundary element methods), η υψηλής ανάλυσης (high- resolution methods) και αυτή άνευ πλέγματος όπως η φασματική μέθοδος.

Οι αριθμητικοί αλγόριθμοι περιγράφονται βασικά από τρία βήματα:

- Εισαγωγή και προσαρμογή των εξισώσεων ροής (μερικές διαφορικές εξισώσεις) πάνω σε όλους τους (πεπερασμένους) όγκους ελέγχου της γεωμετρίας.
- Διακριτοποίηση-Μετατροπή των ολοκληρωτικών εξισώσεων σε αλγεβρικές εξισώσεις.
- Επίλυση του αλγεβρικού συστήματος εξισώσεων με μία επαναληπτική μέθοδο.

Μετά- Επεξεργαστής

Κατά την μετέπειτα επεξεργασία πραγματοποιείται διαχείριση μεγάλου όγκου πληροφορίας μέσω κατάλληλου προγράμματος. Σε αυτό οφείλεται η δυνατότητα εύκολης και γρήγορης εξαγωγής συμπερασμάτων, μέσω της ευέλικτης επεξεργασίας

των αποτελεσμάτων και την δυνατότητα οπτικοποίησης αυτών. Έτσι μέσω του προγράμματος αυτού γίνεται εφικτή η υλοποίηση των παρακάτω:

- Εμφάνιση γεωμετρίας και πλέγματος.
- Δημιουργία γραφημάτων με βέλη, γραμμές, χρωματικούς διαχωρισμούς, 2D, 3D.
- Οπτικοποίηση ροής σωματιδίων.
- Διαχείριση προβολής αποτελεσμάτων (περιστροφή, εστίαση κ.α.).
- Έγχρωμη εξαγωγή αποτελεσμάτων.
- Animation.

1.5 Μέθοδοι Προσομοίωσης Τυρβώδους Ροής

Η τύρβη απαντάται στις περισσότερες περιπτώσεις ροής στην φύση και στις βιομηχανικές εφαρμογές. Φυσικές τυρβώδης ροές μπορούμε να συναντήσουμε σε ωκεανούς, ποταμούς και στην ατμόσφαιρα ενώ βιομηχανικές τυρβώδης ροές σε εναλλάκτες θερμότητας, χημικούς αντιδραστήρες κ.α. Το κύριο χαρακτηριστικό της τυρβώδους ροής (αντίθετης της στρωτής) είναι ότι τα στοιχεία του ρευστού κινούνται σε σύνθετες και ακανόνιστες τροχιές. Η έντονη αυτή κίνηση προκαλεί ανάμειξη πολλών στρωμάτων του ρευστού. Εξαιτίας της αύξησης της ορμής και της ενέργειας που ανταλλάσσεται μεταξύ μορίων και τοιχωμάτων στερεού, η τυρβώδης ροή εμφανίζει υψηλότερη επιφανειακή τριβή και μετάδοση θερμότητας σε σύγκριση με την στρωτή.

Η τυρβώδης ροή χαρακτηρίζεται από την εμφάνιση δινών στην ροή του ρευστού, με ευρύ φάσμα σε κλίμακα μεγέθους και χρόνου, που αλληλεπιδρούν δυναμικά με σύνθετο τρόπο. Δεδομένης της σημαντικότητας αποφυγής ή δημιουργίας στροβιλισμού σε εφαρμογές στην μηχανική, δεν είναι τυχαίο ότι πλήθος ερευνητών εστιάζουν στην ανάπτυξη αριθμητικών μεθόδων για την κατανόηση και εκμετάλλευση των βασικών επιπτώσεων από τους στροβιλισμούς. Η απευθείας προσομοίωση της τύρβης είναι δύσκολη και δυνητικά άγονη για τους ερευνητές CFD λόγω των υπολογιστικών δυσκολιών που εμφανίζει. Εξαιτίας του μεγάλου φάσματος εμφάνισης των στροβιλισμών (μέγεθος και χρόνο) καθίσταται πρακτικά αδύνατη η πλήρης επίλυση του φαινομένου. Το γεγονός αυτό οδήγησε τους ερευνητές να επιλέγουν μια σταθερή κλίμακα μεγέθους και χρόνου από το πεδίο τιμών και να το μοντελοποιούν. Οι μέθοδοι μοντελοποίησης της τυρβώδους ροής ομαδοποιούνται στις επόμενες τρεις βασικές κατηγορίες και επακόλουθα σε αρκετά μοντέλα τύρβης:

Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS).

Σε αυτήν την κατηγορία πραγματοποιείται πλήρης μοντελοποίηση της τύρβης, ανεξαρτήτως του μεγέθους των στροβιλισμών, ενώ αποτελεί την πλέον διαδεδομένη μεθοδολογία για την επίλυση πραγματικών προβλημάτων. Τα αντίστοιχα μοντέλα αλληλεπιδρούν με τις εξισώσεις ροής μέσω της τυρβώδους συνεκτικότητας (δυναμικής ή συνεκτικής), ενώ δύνανται να χρησιμοποιηθούν είτε σε μόνιμη είτε σε

μεταβαλλόμενη ροή, καθώς εκτελούν χρονική στάθμιση των τυρβώδων όρων. Ευρέως εφαρμοζόμενα μοντέλα αυτής της κατηγορίας είναι τα k-ε, k-ω, SST, Spalart-Almaras, κ.λπ.

Large Eddy Simulation (LES).

Σύμφωνα με αυτή τη μεθοδολογία οι μεγαλύτερες δίνες προσομοιώνονται απευθείας από τις εξισώσεις ροής, ενώ οι μικρότερες μοντελοποιούνται αντίστοιχα με την τεχνική RANS. Ως εκ τούτου, προβλέπουν την χωρική στάθμιση του υπολογιστικού χωρίου και δύνανται να εφαρμοσθούν μόνο σε χρονικά μεταβαλλόμενα προβλήματα. Παρά την αυξημένη ακρίβεια που προσφέρει η συγκεκριμένη μεθοδολογία, απαιτεί σχετικά αυξημένους υπολογιστικούς πόρους (λόγω πολύ μικρής χωρικής και χρονικής διακριτοποίησης) με συνέπεια τη μη χρήση της σε ιδιαίτερα πολύπλοκα προβλήματα ακόμα και σήμερα. Τα μοντέλα αυτής της κατηγορίας ωστόσο εμφανίζονται απλούστερα αυτών της προηγούμενης.

Direct Numerical Simulation (DNS).

Η προσέγγιση αυτή προβλέπει την επίλυση της ροής χωρίς βοηθητικά μοντέλα, παρά μόνο με τις εξισώσεις Navier-Stokes. Απαιτεί υπερβολικά μικρή χωρική και χρονική διακριτοποίηση και κατά συνέπεια υπερβολικά μεγάλους υπολογιστικούς πόρους. Ως εκ τούτου εφαρμόζεται μόνο σε πολύ απλά προβλήματα για ερευνητικούς σκοπούς, ενώ ακόμα και για αυτά οι αντίστοιχες προσομοιώσεις απαιτούν υπερβολικό χρόνο επεξεργασίας.

1.6 Το Λογισμικό ANSYS CFX

Το λογισμικό ANSYS [12] της ομώνυμης εταιρίας είναι ένα από πιο διαδεδομένα λογισμικά προσομοιώσεων. Η εταιρία ιδρύθηκε το 1970 και δραστηριοποιείται πάνω στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, στην υπολογιστική μηχανική ρευστών, στα ηλεκτρονικά, στους ημιαγωγούς και στην κατασκευή λογισμικών για τον σχεδιασμό, μελέτη, και βελτιστοποίηση αυτών.

Το ANSYS CFX είναι ένα λογισμικό υπολογιστικής ρευστομηχανικής γενικού σκοπού, που συνδυάζει ένα ανεπτυγμένο επιλύτη και τη δυνατότητα εύκολης προ- και μετά- επεξεργασίας των προβλημάτων ροής. Πιο συγκεκριμένα, το λογισμικό αυτό περιλαμβάνει:

- Έναν ισχυρό και αξιόπιστο επιλύτη.
- Πλήρη δυνατότητα ορισμού του προβλήματος ροής και ανάλυσης και παρουσίασης των αποτελεσμάτων αυτού.
- Χρήση μενού και γραφικών κατάλληλων για αυτόματη διόρθωση και αλληλεπίδραση με τον χρήστη κατά την διαδικασία ορισμού του προβλήματος.

Πιο αναλυτικά, ο επιλύτης του βασίζεται στην αριθμητική επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes με μεθοδολογία τύπου SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) επί διδιάστατων ή τριδιάστατων τετραεδρικών, εξαεδρικών ή υβριδικών μη-δομημένων υπολογιστικών πλεγμάτων, για την διακριτοποίηση των οποίων εφαρμόζεται η κεντροκομβική μέθοδος πεπερασμένων όγκων (FVM/Finite Volume Method). Για την προσομοίωση τυρβώδους ροής περιλαμβάνει διάφορες μεθόδους, όπως η μεθοδολογία RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) σε συνδυασμό με τα μοντέλα τύρβης k-ε, k-ω και SST (Shear Stress Transport), η μεθοδολογία LES (Large Eddy Simulation) με το μοντέλο του Smagorinsky, η μεθοδολογία DES (Detached Eddy Simulation), κ.λπ. Επιπρόσθετα, παρέχει τη δυνατότητα προσομοίωσης της μεταβατικής περιοχής της ροής, ήτοι από την τυρβώδη στην στρωτή περιοχή, ενώ η μοντελοποίηση κοντά στο τοίχωμα δύναται να υλοποιηθεί είτε με συναρτήσεις τοίχου είτε με την προσέγγιση του χαμηλού αριθμού Reynolds. Για την αύξηση της ακρίβειας των υπολογισμών εφαρμόζονται δεύτερης τάξης ακρίβειας σχήματα, που βασίζονται στην ανάπτυξη κατά Taylor των χρησιμοποιούμενων μεταβλητών, ενώ για τον υπολογισμό των απαραίτητων παραγώγων εφαρμόζονται συναρτήσεις σχήματος (shape functions). Η χρονική ολοκλήρωση και τελική ή μη κατάσταση της ροής στην περίπτωση σταθερού ή χρονικά μεταβαλλόμενου φαινομένου αντίστοιχα προσεγγίζεται επαναληπτικά με το Backward Euler σχήμα πρώτης ή δεύτερης τάξης χρονικής ακρίβειας. Για την επιτάχυνση της διαδικασίας επίλυσης εφαρμόζεται επιπρόσθετα μέθοδος παράλληλης επεξεργασίας, η οποία βασίζεται στην τεχνική διαμέρισης του υπολογιστικού πλέγματος σε μικρότερα υποχωρία (domain decomposition approach), ώστε να καταστεί δυνατή η ταυτόχρονη επίλυση των εξισώσεων σε

αυτά, καθώς και στις εντολές του πρωτόκολλου επικοινωνίας MPI (Message Passing Interface) για την επικοινωνία των εν λόγω γειτνιαζόντων υποχωρίων. Για περαιτέρω επιτάχυνση εφαρμόζεται μεθοδολογία αλγεβρικού πολυπλέγματος (Algebraic Multigrid). Τέλος, οι δυνατότητες του εν λόγω λογισμικού επεκτείνονται στην προσομοίωση ροών πολλαπλών στοιχείων και φάσεων, καθώς και ροών σε συνδυασμό με καύση και μετάδοση θερμότητας μέσω ακτινοβολίας. Για το τελευταίο φαινόμενο δύνανται να εφαρμοστούν διάφορες μέθοδοι, π.χ., Monte Carlo ή Discrete Transfer Method (DTM). Το ANSYS CFX είναι κατάλληλο για μοντελοποίηση:

- Σταθερής και μεταβαλλόμενης ροής.
- Στρωτής ή τυρβώδους ροής.
- Υποηχητικής, διηχητικής και υπερηχητικής ροής.
- Μεταφοράς θερμότητας μέσω αγωγής, συναγωγής και ακτινοβολίας.
- Πλευστότητας.
- Μη Νευτώνειου ρευστού.
- Πολυφασικής ροής.
- Καύσης.
- Ροής σε πολλαπλά συστήματα αναφοράς.
- Ροής σωματιδίων.

Η δομή του ANSYS CFX αποτελείται από τέσσερα επιμέρους λογισμικά, τα οποία παίρνουν την γεωμετρία και το πλέγμα που έχει δημιουργηθεί και με κατάλληλη ροή πληροφορίας και δεδομένων πραγματοποιείται τμηματικά η ανάλυση.

1.7 Πειραματικά Δεδομένα & Αποτελέσματα

Η εξεταζόμενη γεωμετρία περιγράφεται από σημεία στο χώρο (που δίδονται στη βιβλιογραφία) με την μόνη προϋπόθεση ότι πρέπει να μετατραπούν οι συντεταγμένες τους από ίντσες σε εκατοστά. Επιπλέον, για την ανάλυση της ροής δίνονται τα δεδομένα των οριακών συνθηκών, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.7.1.

Total Pressure (psia)	19.58
Total Temperature (R)	500.0
Angle-of-Attack (deg)	0.0
Angle-of-Sideslip (deg)	0.0
Weak Shock Outflow Static Pressure	16.05
Strong Shock Outflow Static Pressure	14.10

Εικόνα 1.7.1: Δεδομένα πειράματος.

Όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.7.1 δίνεται η πίεση εισόδου, η ολική θερμοκρασία, καθώς και οι πιέσεις εξόδου ανάλογα με το είδος του κρουστικού κύματος που επιθυμείται να εξεταστεί. Επιπλέον, στην ιστοσελίδα (<http://www.grc.nasa.gov/WWW/wind/valid/transdif/transdif.html>) [13] που αναφέρονται τα δεδομένα της περίπτωσης που εξετάστηκε υπάρχουν και αποτελέσματα από άλλες αριθμητικές επιλύσεις, στις οποίες περιέχονται τα δεδομένα που χρησιμοποίησαν, καθώς και τα αποτελέσματα τους, τα οποία συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής. Δίδονται επίσης και αναφορές σε διάφορα συγγράμματα, τα οποία βοήθησαν στο στήσιμο της προσομοίωσης.

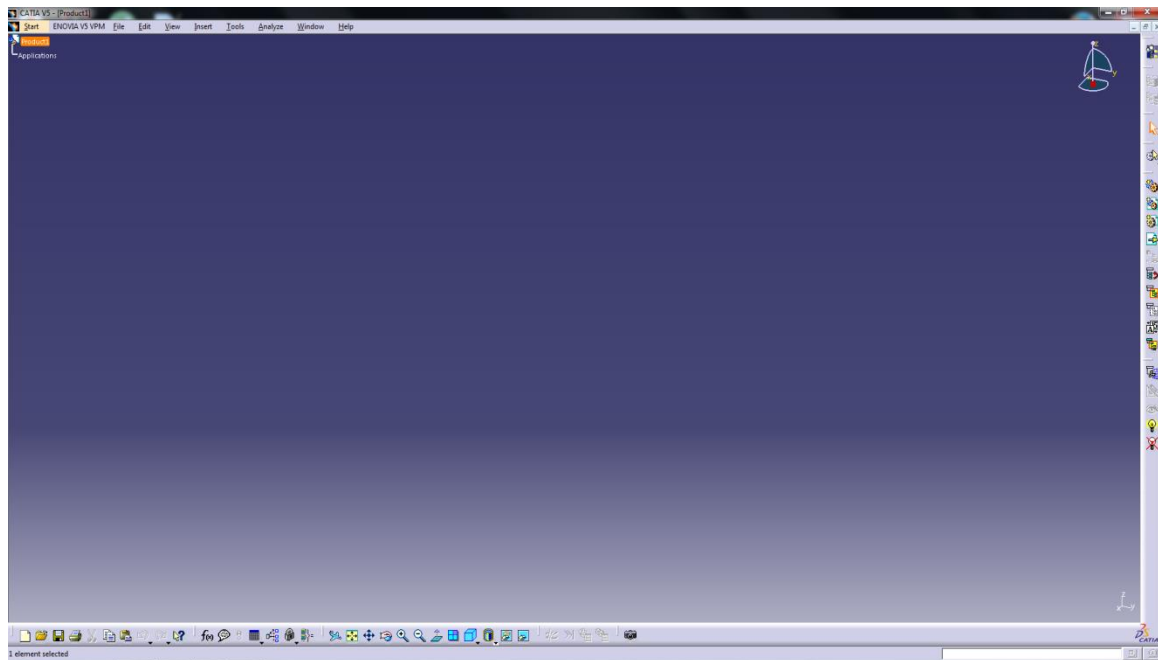
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟΥ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ CATIA

2.1 Εισαγωγικά για το λογισμικό

Το εμπορικό λογισμικό *Catia* είναι ένα λογισμικό τριδιάστατης σχεδίασης ευρέως διαδεδομένο στην βιομηχανία, το οποίο διαθέτει πάρα πολλές δυνατότητες. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε ένα μέρος αυτού, που ονομάζεται *Catia design* όπου τα προϊόντα και οι λύσεις του καλύπτουν ολόκληρο το κομμάτι του *shape design* και του *styling*, δίνοντας την δυνατότητα να σχεδιαστεί οποιοδήποτε πολύπλοκο σχέδιο.

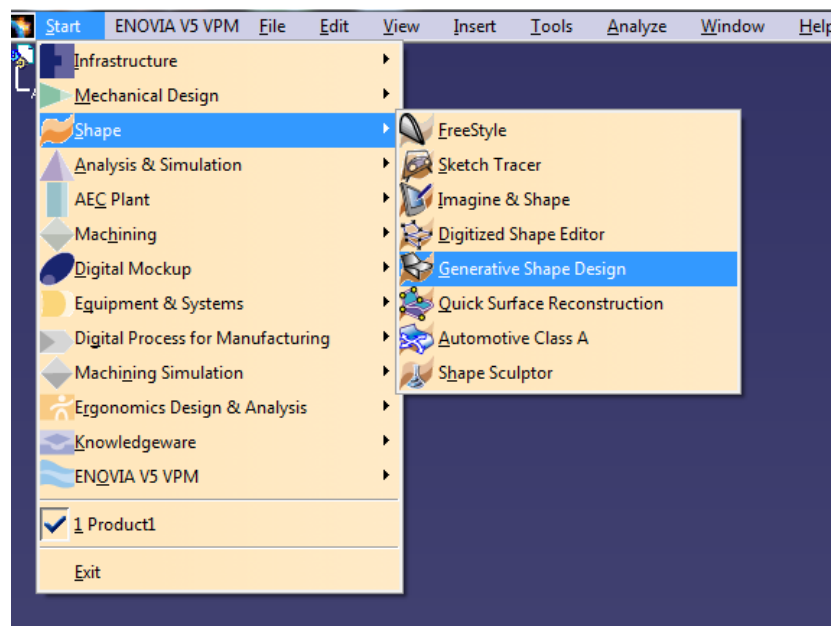
2.2 Εισαγωγή στοιχείων στο χώρο

Χρησιμοποιούνται οι παρεχόμενες συντεταγμένες των σημείων στον χώρο έτσι ώστε να μπορέσει κάποιος να σχεδιάσει το παρόν πείραμα. Η μονάδα μέτρησης όμως της απόστασης των σημείων από την αρχή των αξόνων είναι σε ίντσες και για τον λόγο αυτό μετατράπηκαν σε *meters*, όπου $1 \text{ inch} = 0.0254 \text{ m}$. Τα σημεία που περιγράφουν το προφίλ του ακροφυσίου ήταν εκφρασμένα σε δύο διαστάσεις στον χώρο και για τον λόγο αυτό η τρίτη διάσταση ορίστηκε αυθαίρετα ίση με $0,058 \text{ m}$. Αυτό έγινε για να γίνει δυνατή η προσομοίωση μιας διδιάστατης ροής με τη χρήση τριδιάστατου μοντέλου προσομοίωσης. Η έκδοση του λογισμικού *Catia* που χρησιμοποιήθηκε ήταν η *V5R19*. Ανοίγοντας το *Catia* το *interface* το οποίο συναντάται είναι όπως αυτό που φαίνεται στην εικόνα 2.2.1. Εκεί φαίνονται οι αρχικές επιλογές του λογισμικού.



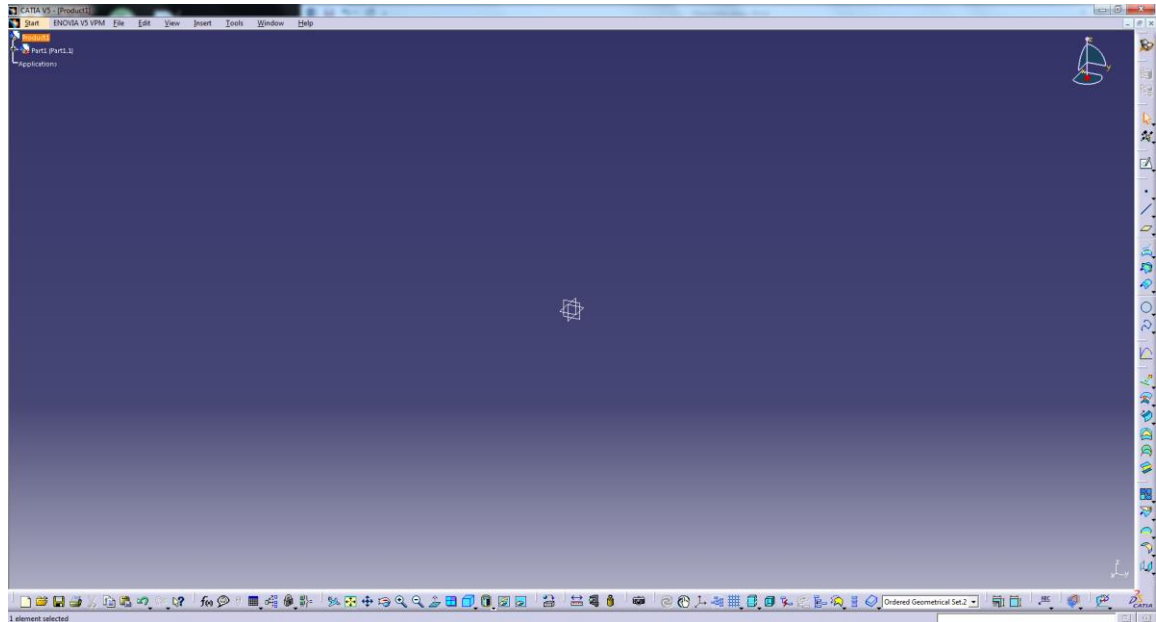
Εικόνα 2.2.1: Αρχικό «interface» σχεδιαστικού προγράμματος «Catia».

Με την επιλογή *start* εμφανίζονται οι υπόλοιπες γενικές επιλογές εργαλείων του λογισμικού, όπου από εκεί επιλέγεται το *shape* και στη συνέχεια το *generative shape design*, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.2.2.



Εικόνα 3.2.2: Μετάβαση στο «Generative Shape Design».

Μόλις γίνει η επιλογή του *generative shape design* εμφανίζεται νέο περιβάλλον εργασίας, όπου υπάρχουν τα επίπεδα αναφοράς στο κέντρο της οθόνης. Επίσης το *menu* εργαλείων άλλαξε και έχει διαμορφωθεί σύμφωνα με την επιλογή που επιλέχθηκε. Αυτό φαίνεται χαρακτηριστικά στην Εικόνα 2.2.3.



Εικόνα 2.2.3: Αρχική οθόνη εργασίας του «*Generative Shape Design*».

Στη συνέχεια, τα σημεία που περιγράφουν τη γεωμετρία του ακροφυσίου εισάγονται είτε το καθένα χωριστά είτε δημιουργώντας ένα αρχείο *Excel* κατάλληλο ώστε να μπορεί το πρόγραμμα να εισάγει αυτοματοποιημένα όλα τα σημεία μαζί. Προφανώς επιλέχθηκε ο δεύτερος τρόπος γιατί πέρα από την ευκολία που δίνεται κατά την εισαγωγή είναι και πολύ πιο εύκολο να γίνουν με ακρίβεια οι αλλαγές στις μονάδες, από *inches* σε *meters*, καθώς και να καθίσταται δυνατό να αλλάζει πολύ πιο γρήγορα το αρχείο σε περίπτωση λάθους. Αρκεί λοιπόν να ξεκινάει με την φράση *start loft* στο πρώτο κελί και στο δεύτερο *startcurve* το *excel sheet*.

	A	B	C	D	E
1	StartLoft				
2	StartCurve				

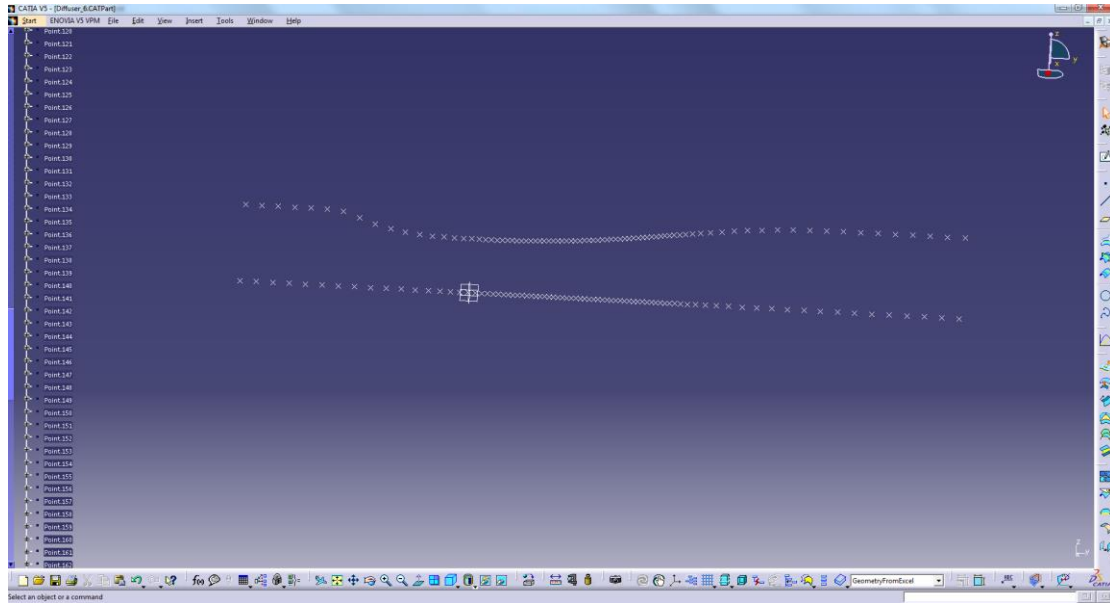
Εικόνα 2.2.4: Αρχικοποίηση των πρώτων δύο κελίων στο αρχείο δεδομένων «Excel».

Αφού έχουν εισαχθεί όλα τα σημεία (τα οποία τα χρειάζονται για να απεικονιστεί η γεωμετρία του ακροφυσίου στο *Catia*) στη συνέχεια στα τελευταία κελιά του εν λόγω αρχείου εισάγονται οι εντολές *endcurve* και *endloft* και *end*, όπως φαίνονται και στην Εικόνα 2.2.5.

165	EndCurve				
166	EndLoft				
167	End				

Εικόνα 2.2.5: Ολοκλήρωση των κελίων του «Excel».

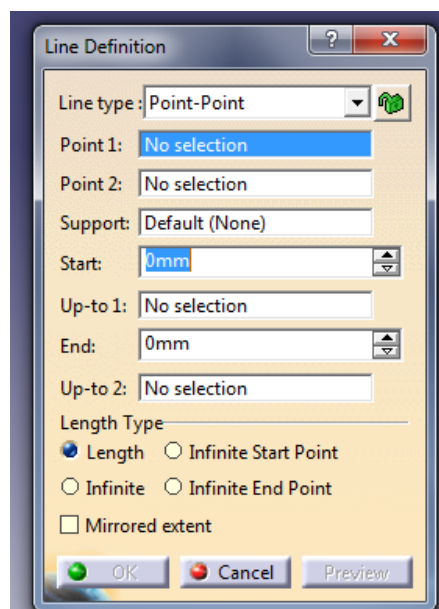
Τα σημεία που χρησιμοποιήθηκαν για την εισαγωγή και ορισμό της γεωμετρίας του ακροφυσίου παρουσιάζονται στο Παράρτημα. Στη συνέχεια, πατώντας στο πρόγραμμα του *Excel alt* και *f8* (χωρίς όμως να έχει κλείσει το *Catia*) εμφανίζεται ένα παράθυρο στο *excel* το οποίο δίνει 3 επιλογές. Με την επιλογή 1 εισάγονται μόνο τα σημεία, με την επιλογή 2 τα σημεία καθώς και μια *spline* καμπύλη που θα τα ενώνει και τέλος στην επιλογή 3 ότι και στις προηγούμενες 2 αλλά σχεδιάζεται ακόμα και η επιφάνεια. Από τις τρεις επιλέχθηκε η 1 για να αποφευχθεί οποιοδήποτε λάθος, μιας και τα εισαγόμενα σημεία αφορούσαν και την πάνω επιφάνεια του αντικειμένου και την κάτω και η καμπύλη που θα δημιουργείτο θα ένωνε και τις δύο. Το αποτέλεσμα από το *Excel* στο *Catia* φαίνεται στην Εικόνα 2.2.6.



Εικόνα 2.2.6: Μετάβαση σημείων γεωμετρίας από «Excel» σε «Catia».

2.3 Ένωση σημείων με γραμμές και καμπύλες

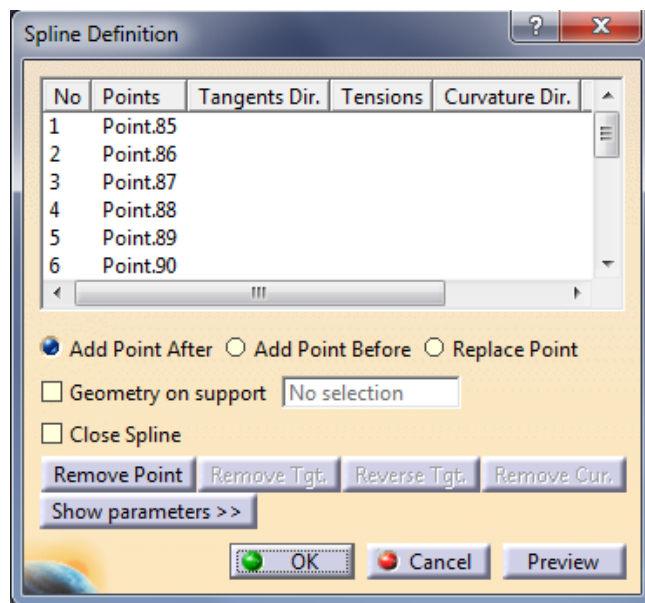
Στο στάδιο αυτό ενώνονται τα σημεία μεταξύ τους με *lines*, ένα προς ένα, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.3.1 και εμφανίζεται το αποτέλεσμα που βλέπουμε στη συνέχεια.



Εικόνα 2.3.1: Δημιουργία γραμμών από σημείο σε σημείο.

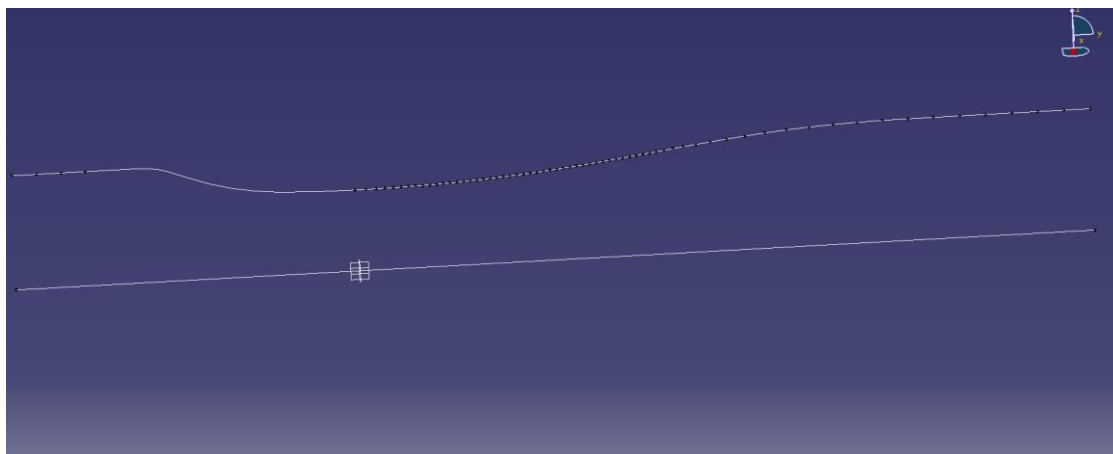
Είναι εμφανές από την εικόνα 2.3.3 ότι ανά δυο σημεία είναι ενωμένα σχεδόν όλα με ευθύγραμμα τμήματα εκτός από το κομμάτι με την έντονα αραιή καμπύλη όπου τα σημεία θα ενωθούν με *spline* όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα

2.3.2. Επιλέγονται όλα τα σημεία που απέμειναν με την επιλογή add point after και τέλος *ok*.



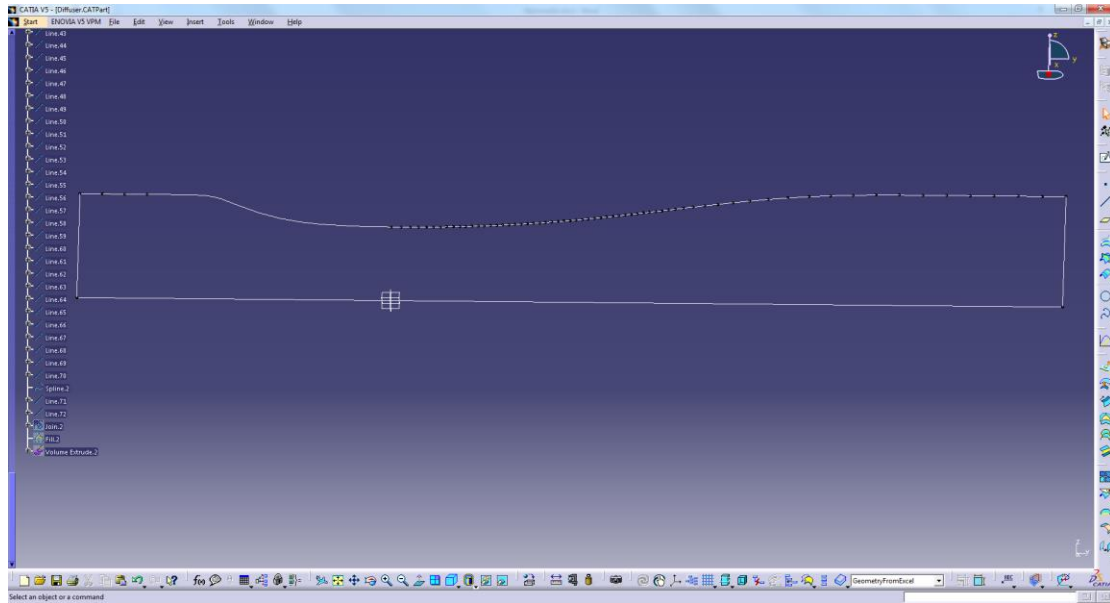
Εικόνα 2.3.2: Δημιουργία καμπύλης *spline* με πρόσθεση σημείων το ένα μετά το άλλο.

Έτσι η ένωση όλων των σημείων δίνει το αποτέλεσμα που της Εικόνας 2.3.3.



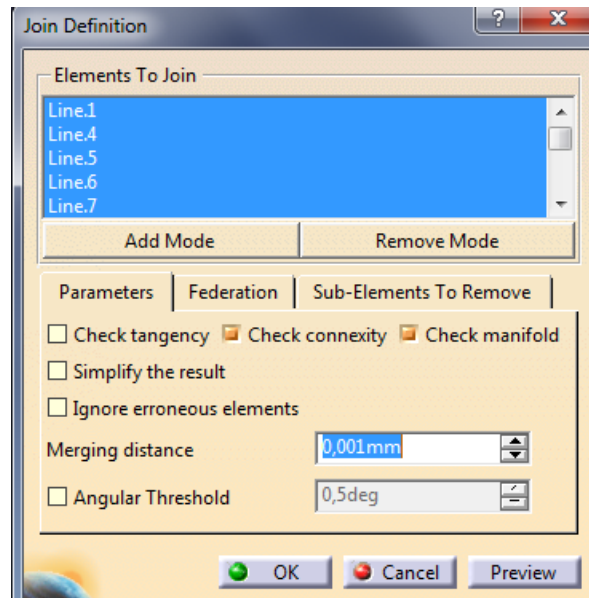
Εικόνα 2.3.3: Αποτέλεσμα από τις ενώσεις των γραμμών και καμπυλών.

Εν συνεχεία ενώνονται οι καμπύλες των πάνω και κάτω ορίων με δύο ευθύγραμμο τμήματα, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.3.4. Το πρώτο ευθύγραμμο τμήμα από τα αριστερά ενώνει το πρώτο σημείο της πάνω με το αντίστοιχο σημείο της κάτω πλευράς και όμοια το δεύτερο ευθύγραμμο τμήμα από τα δεξιά ενώνει το τελευταίο σημείο της μίας με το αντίστοιχο της άλλης, με σκοπό να δημιουργηθεί το επιθυμητό σχήμα που παριστάνεται στην Εικόνα 2.3.4.



Εικόνα 2.3.4: Ένωση μεταξύ των πλευρών με ευθύγραμμα τμήματα.

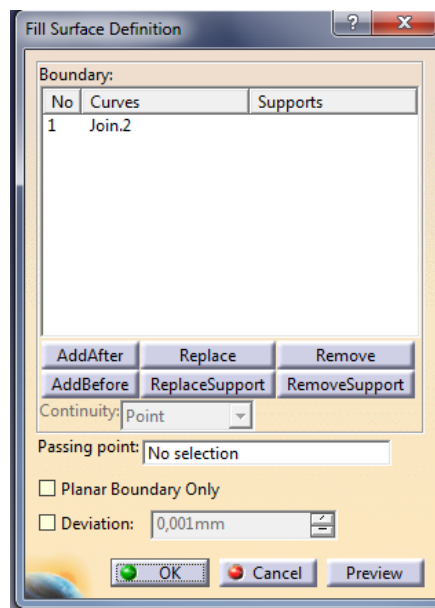
Για να μπορέσει να ολοκληρωθεί το σχήμα αρκεί να ομαδοποιηθούν όλες οι γραμμές και η καμπύλη του προφίλ. Για να πραγματοποιηθεί αυτό χρειάζεται η εντολή *join*, η οποία βρίσκεται στην γραμμή εργαλείων (όπως επίσης και στη γραμμή εντολών ακολουθώντας με σειρά τα βήματα *insert -> operation -> join*). Πατώντας *join* εμφανίζεται ένα παράθυρο στο οποίο ζητείται να εισαχθούν τα στοιχεία που επιθυμούνται. Εκεί προστίθενται η καμπύλη και όλα τα σχετικά ευθύγραμμα τμήματα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.3.5.



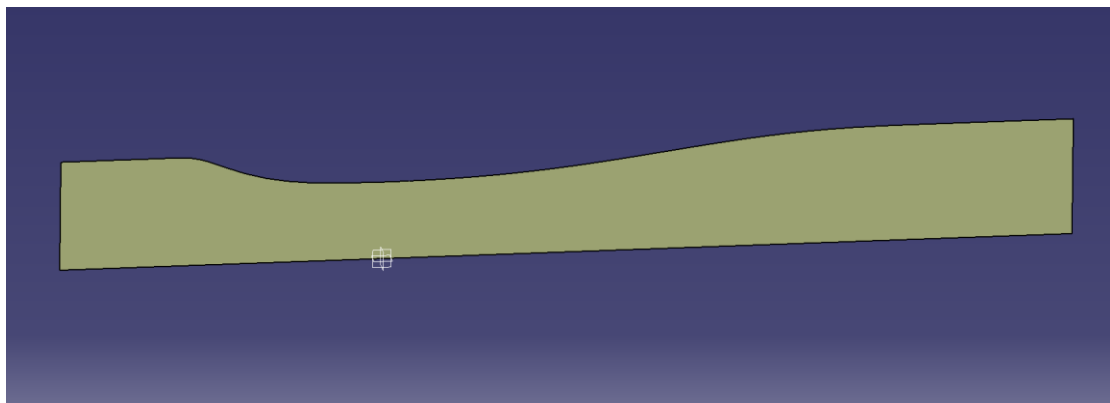
Εικόνα 2.3.5: Ενοποίηση όλων των γραμμών και της καμπύλης με την εντολή «join».

2.4 Δημιουργία της επιφάνειας της γεωμετρίας

Το επόμενο στάδιο είναι να δημιουργηθεί η επιφάνεια της γεωμετρίας. Αυτό είναι δυνατό με την χρήση της εντολής *fill* η οποία βρίσκεται στην γραμμή εργαλείων (ή διαφορετικά στην γραμμή εντολών ακολουθώντας την σειρά *insert -> surface -> fill*). Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.4.1, αρκεί να επιλεγεί το αντικείμενο *join.2* που κατασκευάστηκε προηγουμένως και *ok* στο παράθυρο που ανοίγεται και δημιουργείται η επιφάνεια (Εικόνα 2.4.2).



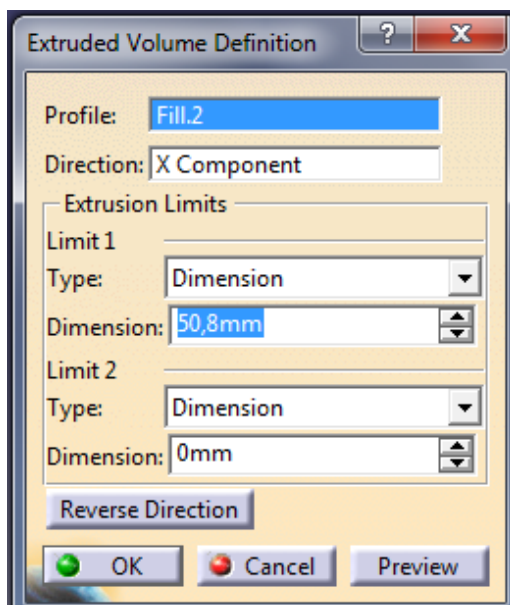
Εικόνα 2.4.1: Παράθυρο εντολής «fill» αξιοποιώντας το προηγούμενο αντικείμενο «join.2».



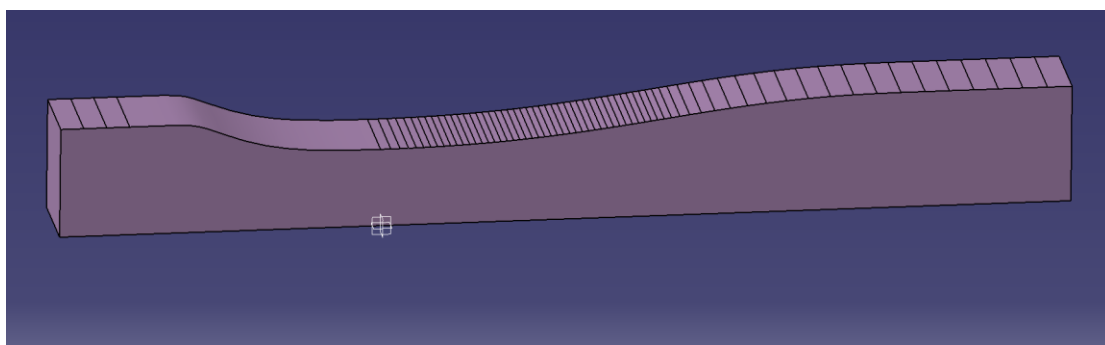
Εικόνα 2.4.2: Επιφάνεια που δημιουργήθηκε από την εντολή «fill».

2.5 Εισαγωγή 3^{ης} διάστασης στο αντικείμενο

Σαν τελικό στάδιο το μόνο που απομένει για το σχεδιασμό είναι να δημιουργήσουμε την τρίτη διάσταση στο εν λόγω αντικείμενο. Για να γίνει αυτό χρησιμοποιείται η εντολή *extrude*, σύμφωνα με την οποία χρειάζεται να γνωρίζουμε το βάθος του σχήματος αλλά και την κατεύθυνση που θα εξωθεί. Στην Εικόνα 2.5.1 φαίνεται το επιθυμητό αποτέλεσμα καθώς και το παράθυρο στο οποίο πρέπει να δοθούν τα στοιχεία τα οποία εδώ ορισθήκαν ως 0.0508m ενώ η κατεύθυνση είναι στο άξονα x.

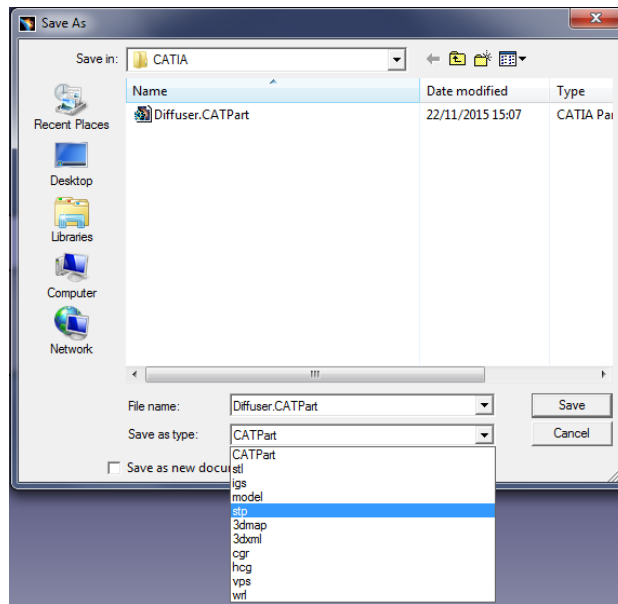


Εικόνα 2.5.1: Παράθυρο εντολής «*extrude*» για επιλογή κατεύθυνσης και βάθους.



Εικόνα 2.5.2: Τελικό αντικείμενο του ακροφυσίου από τον σχεδιασμό στο «*Catia*».

Έχοντας έτοιμο το σχέδιο για να μπορέσει να χρησιμοποιηθεί στο λογισμικό ANSYS CFX, θα πρέπει να αλλάξει μορφή το αρχείο και από την προεπιλεγμένη *Catpart* μορφή να μετατραπεί σε *stp* αρχείο. Για να γίνει αυτό αρκεί να ακολουθηθούν τα βήματα *file-> save as* και επιλέγεται ο τύπος του αρχείου *stp* όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.5.3.



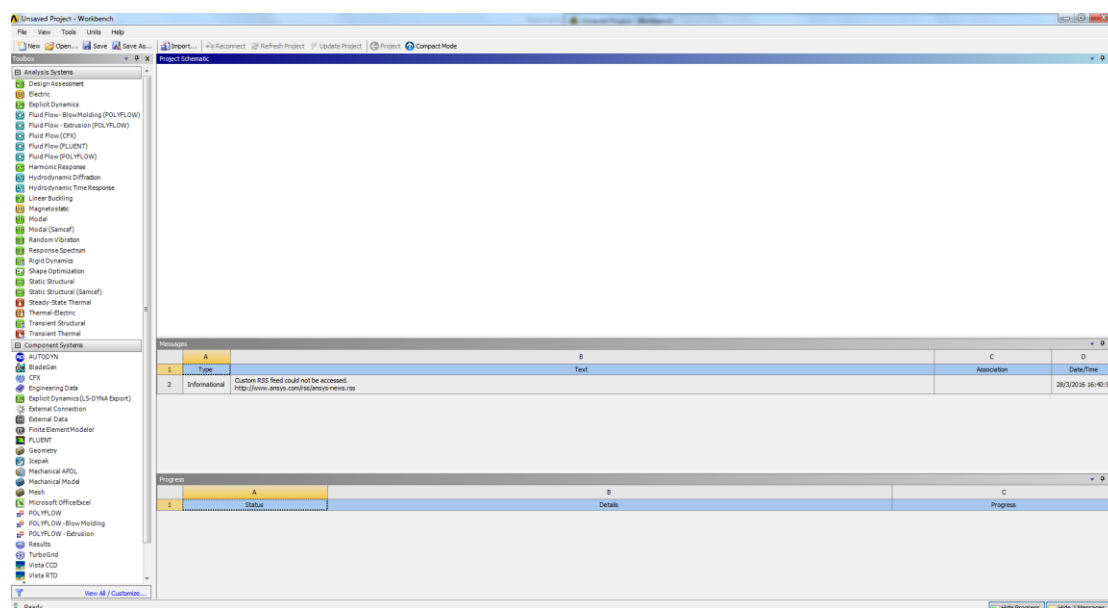
Εικόνα 2.5.3: Αποθήκευση του σχεδίου σε προσπελάσιμη μορφή «stp».

Έτσι ολοκληρώνεται η χρήση του σχεδιαστικού προγράμματος *Catia* και είναι η στιγμή που το αποτέλεσμα της γεωμετρικής μοντελοποίησης θα αξιοποιηθεί με το λογισμικό *CFX*.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΣΤΟ ANSYS CFX

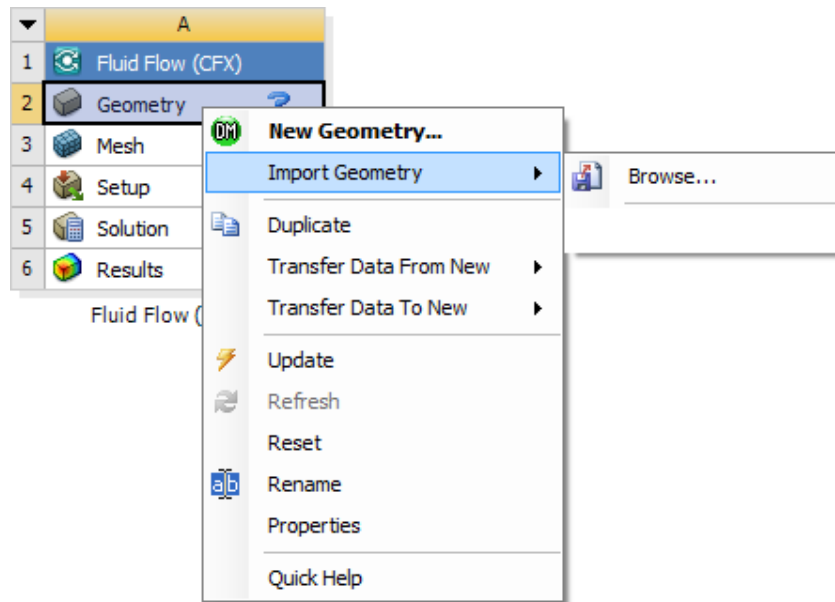
3.1 Μορφοποίηση της γεωμετρίας του αντικειμένου

Για την ανάπτυξη της προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκε η 13^η έκδοση του λογισμικού αυτού. Έχοντας έτοιμο το αρχείο από το *Catia*, σε μορφή *stp* file, ανοίγεται το λογισμικό ANSYS και εμφανίζεται ένα παράθυρο όπως στην Εικόνα 3.2.1 παρακάτω.



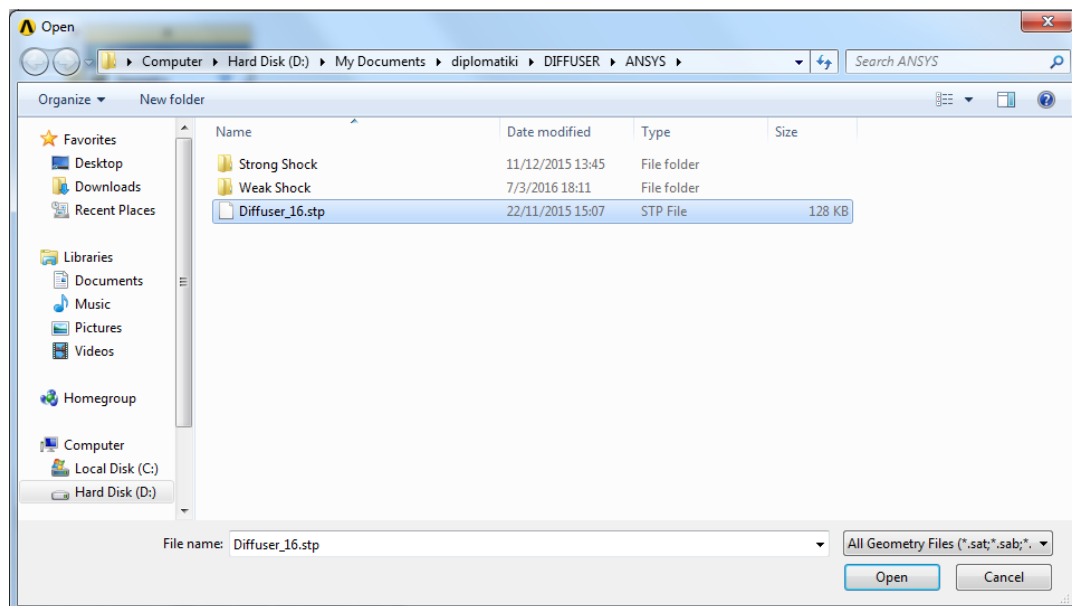
Εικόνα 3.2.1: Αρχική σελίδα του «Ansys».

Στη συνέχεια επιλέγεται από το αριστερό *menu*, *Fluid Flow(CFX)* με διπλό *click* και ανοίγει ένα νέο παράθυρο στο οποίο ζητείται αρχικά η γεωμετρία του αντικειμένου που θα χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση. Είναι εφικτό επίσης να σχεδιαστεί η γεωμετρία και σε αυτό το πρόγραμμα, όμως στην περίπτωσή μας θα εισαχθεί από το σχεδιαστικό λογισμικό CATIA, που χρησιμοποιήθηκε προηγουμένως. Έτσι εκεί που αναφέρει την λέξη *geometry* με δεξιά *click* ανοίγονται νέες επιλογές που λένε νέα γεωμετρία (*new geometry*), εισαγωγή γεωμετρίας (*import geometry*), ανανέωση (*update*) και άλλες όπου και επιλέγεται *import geometry* και στην συνέχεια περιήγηση (*browse*) όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.2.2 στη συνέχεια.



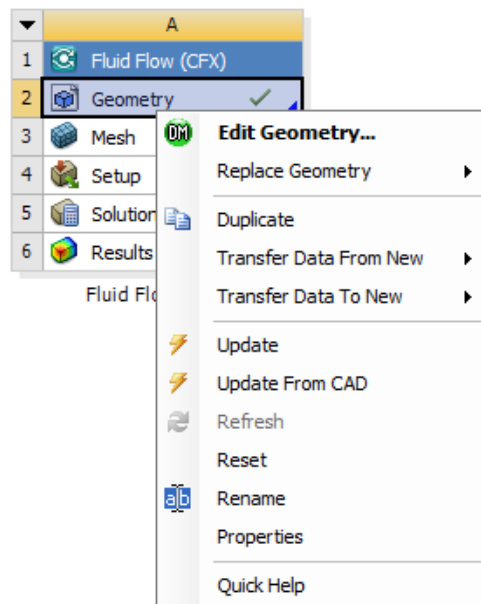
Εικόνα 3.2.2: Εισαγωγή γεωμετρίας.

Στη συνέχεια επιλέγεται το *stp file* που δημιουργήθηκε προηγουμένως και *open* όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.2.3.



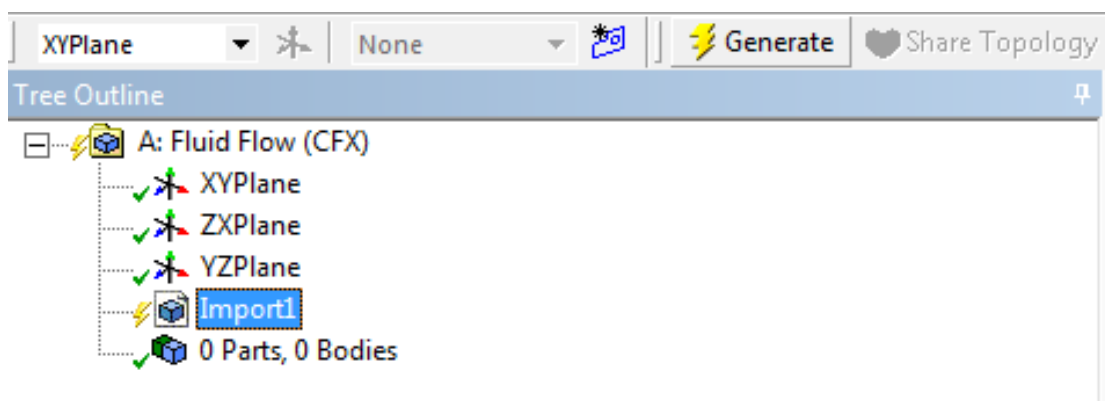
Εικόνα 3.2.3: Επιλογή αρχείου «stp».

Αφού λοιπόν έχει γίνει σωστά η εισαγωγή του αρχείου εμφανίζεται ένα πράσινο σημάκι δεξιά της λέξης *geometry*. Στο στάδιο αυτό μπορούν να γίνουν και αλλαγές στη γεωμετρία του ή διαφορετικά αν το σχήμα είναι εντάξει να συνεχιστεί η διαδικασία. Σε αυτή την περίπτωση θα προστεθούν κάποια χαρακτηριστικά στην γεωμετρία, όπως θα δειχθεί στην συνέχεια, και γι' αυτό επιλέγεται *edit geometry* όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.2.4.



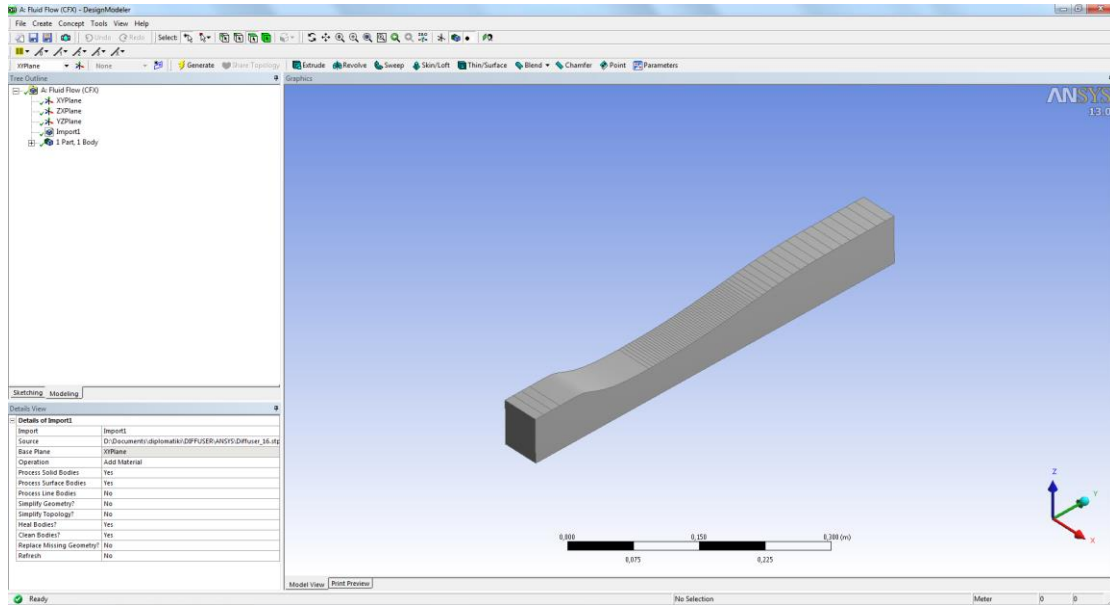
Εικόνα 3.2.4: Τροποποίηση γεωμετρίας με «Edit Geometry».

Έχοντας πατήσει *edit geometry* ανοίγει ένα νέο παράθυρο το οποίο λέγεται *Design Modeler* που κατά το άνοιγμα ζητάει την μονάδα στη οποία θα είναι εκφρασμένες οι διαστάσεις του σχήματος και στις τρεις κατευθύνσεις. Επιλέγεται *millimeters* και *ok*. Τέλος, για να εμφανιστεί το σχήμα στην οθόνη αρκεί να πατηθεί *Generate* όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.2.5.



Εικόνα 3.2.5: Εμφάνιση του αντικειμένου στο «Design Modeler».

Το αντικείμενο εμφανίζεται με την παρακάτω μορφή της Εικόνας 3.2.6.

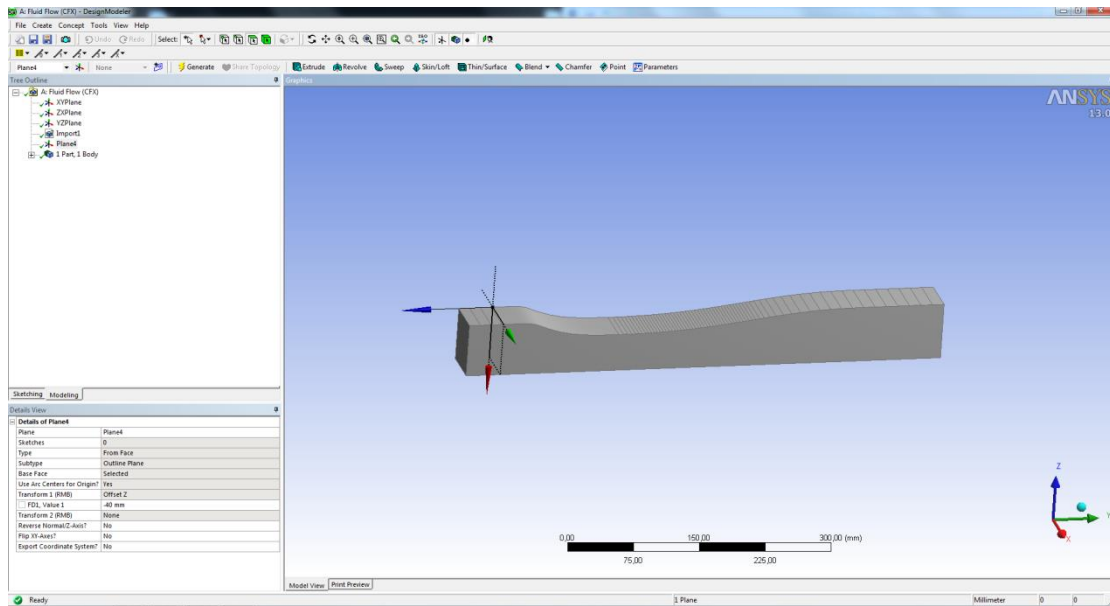


Εικόνα 7.6: Η γεωμετρία όπως έχει εισαχθεί στο λογισμικό ANSYS.

Παρότι η γεωμετρία είναι η επιθυμητή, επιλέχθηκε να γίνει επεξεργασία της έτσι ώστε να δημιουργηθεί ένα νέο αντικείμενο όπου στον όγκο του θα μπορέσει να εφαρμοστεί επιπλέον πύκνωση του πλέγματος. Για να γίνει αυτό πρέπει να ακολουθήσουν ορισμένα βήματα. Αρχικά δημιουργείται ένας νέος άξονας είτε από την γραμμή εργαλείων είτε από το *create->new plane*, όπου εκεί ζητείται στο αριστερό παράθυρο ο τύπος-*type* δηλαδή που επιθυμείται να δημιουργηθεί ο άξονας. Επιλέγεται *from face*-από επιφάνεια, ύστερα *base face* κάνοντας *click* μία από τις πλευρές με την μικρότερη επιφάνεια και τέλος *transform 1 (RMB)*, όπου και επιλέγεται σε ποιο καρτεσιανό άξονα θα γίνει η μετατόπιση του νέου άξονα, εδώ *Offset Z*. Έπειτα, στο *value* η τιμή δίδεται ίση με *-40mm* και επιλέγεται *generate*, ώστε να μεταφερθεί εκεί απ' όπου είναι επιθυμητό να ξεκινήσει η πύκνωση, όπως φαίνεται στις Εικόνες 3.2.7 και 3.2.8.

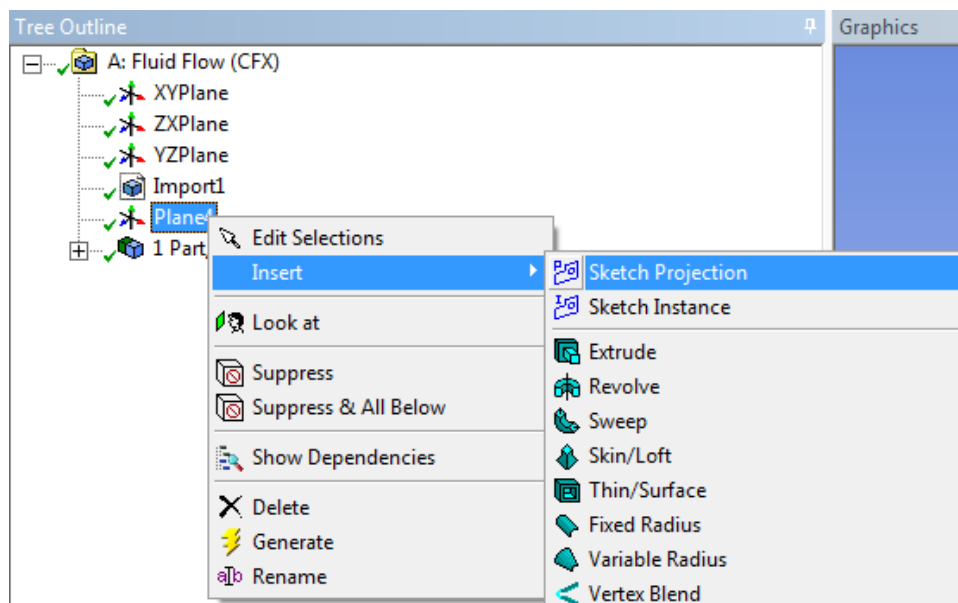
Details View	
Details of Plane4	
Plane	Plane4
Sketches	0
Type	From Face
Subtype	Outline Plane
Base Face	Selected
Use Arc Centers for Origin?	Yes
Transform 1 (RMB)	Offset Z
<input type="checkbox"/> FD1, Value 1	-40 mm
Transform 2 (RMB)	None
Reverse Normal/Z-Axis?	No
Flip XY-Axes?	No
Export Coordinate System?	No

Εικόνα 3.2.7: Επιλογή ιδιοτήτων για την δημιουργία του νέου άξονα.

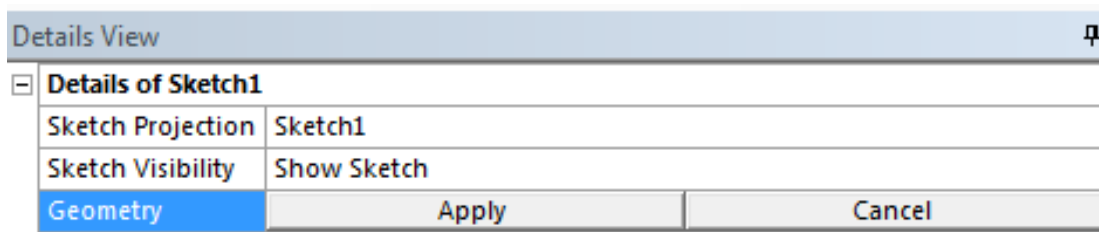


Εικόνα 3.2.8: Παρουσίαση νέου άξονα συμμετρίας στο αντικείμενο.

Για να γίνει όμοιο ορθογωνικό προφίλ στον άξονα που δημιουργήθηκε, αρκεί να γίνει δεξί *click* στο *plane 4* και μετά *insert->sketch projection*, όπως στην Εικόνα 3.2.9. Έχοντας κάνει *click* εμφανίζεται ένα νέο παράθυρο, όπου ζητείται η γεωμετρία *geometry* και επιλέγεται η πίσω επιφάνεια πατώντας *apply* όπως στην Εικόνα 3.2.10.

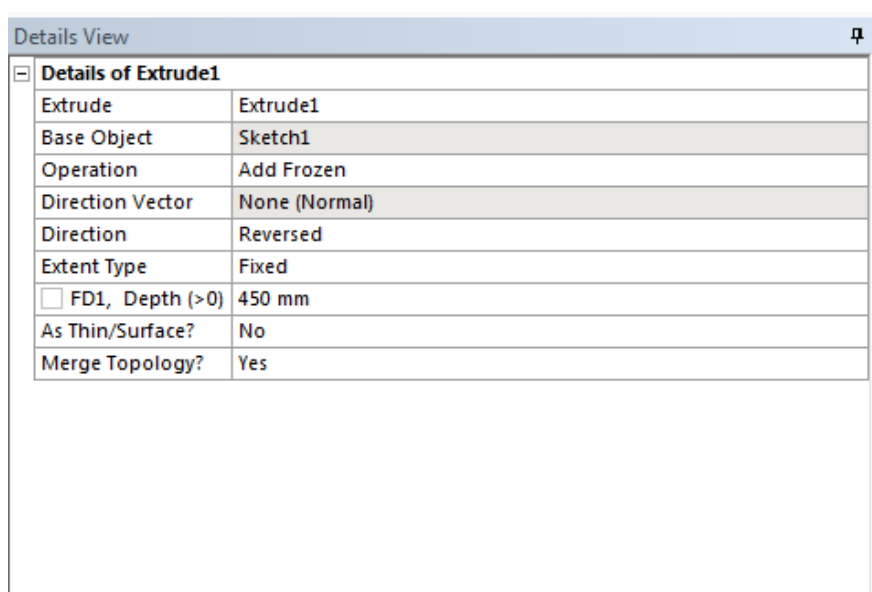


Εικόνα 3.2.9: Εισαγωγή σχεδίου πάνω στον άξονα συμμετρίας.



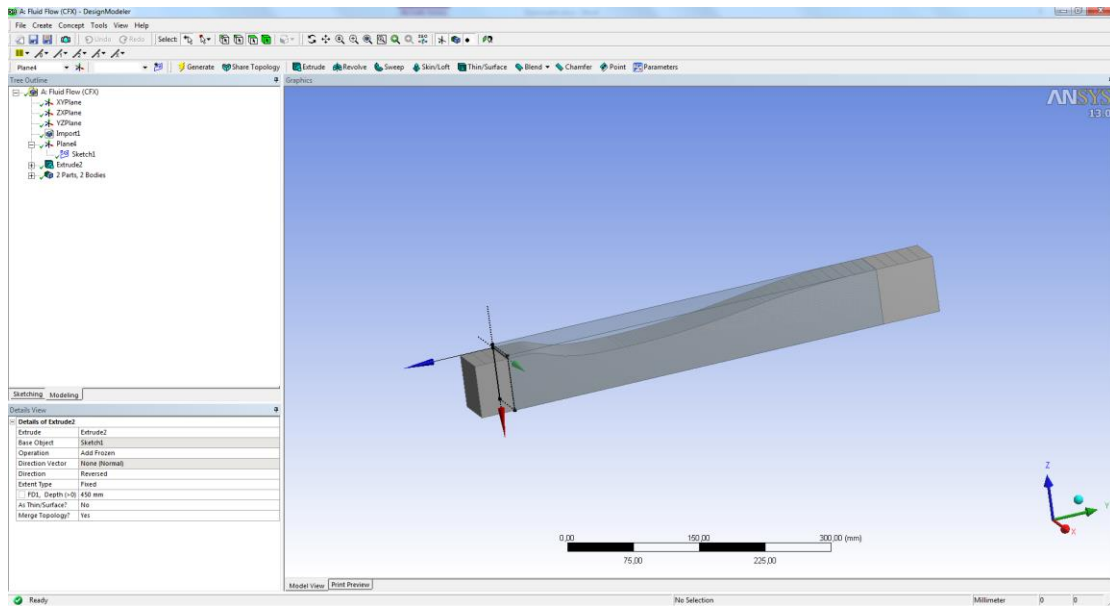
Εικόνα 3.2.10: Επιλογή γεωμετρίας στον άξονα.

Στην συνέχεια, για να γίνει επέκταση του *sketch*, του προφίλ δηλαδή, γίνεται επιλογή του *sketch* και στην συνέχεια *extrude* είτε από την γραμμή εργαλείων είτε από το *menu* (δηλαδή *Create ->Extrude*) και εμφανίζεται ένα παράθυρο όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.2.11.



Εικόνα 3.2.11: Ιδιότητες για την δημιουργία «frozen body».

Εκεί στην επιλογή *operation* επιλέγεται *add frozen* γιατί αυτό που θα προστεθεί θα είναι στην ουσία κάτι νοητό και όχι κάτι απτό και σχετικό με το σχήμα μας. Στο *direction* επιλέγεται *reversed* έτσι ώστε να είναι ομόρροπο με την φορά που εκτείνεται το αντικείμενο και στο *depth* επιλέγεται το βάθος *450mm* και *generate* για την ολοκλήρωση, ενώ το τελικό αποτέλεσμα θα είναι όπως στην Εικόνα 3.2.12.

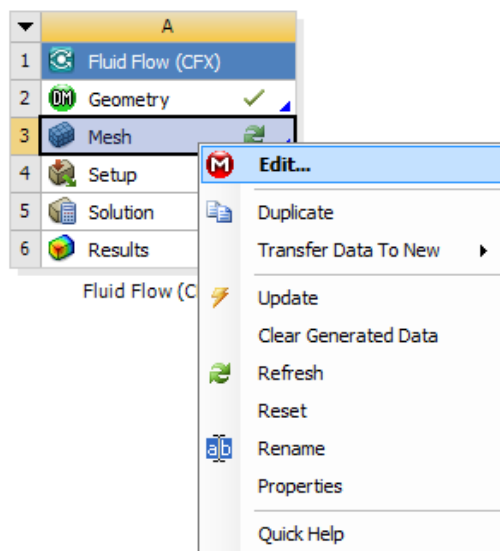


Εικόνα 3.2.12: Ολοκληρωμένη γεωμετρία αντικείμενου για εφαρμογή τοπικής πύκνωσης του πλέγματος.

Έχοντας έτοιμη πια την γεωμετρία και κλείνοντας το *design modeler*, η διαδικασία συνεχίζεται με τη δημιουργία του υπολογιστικού πλέγματος.

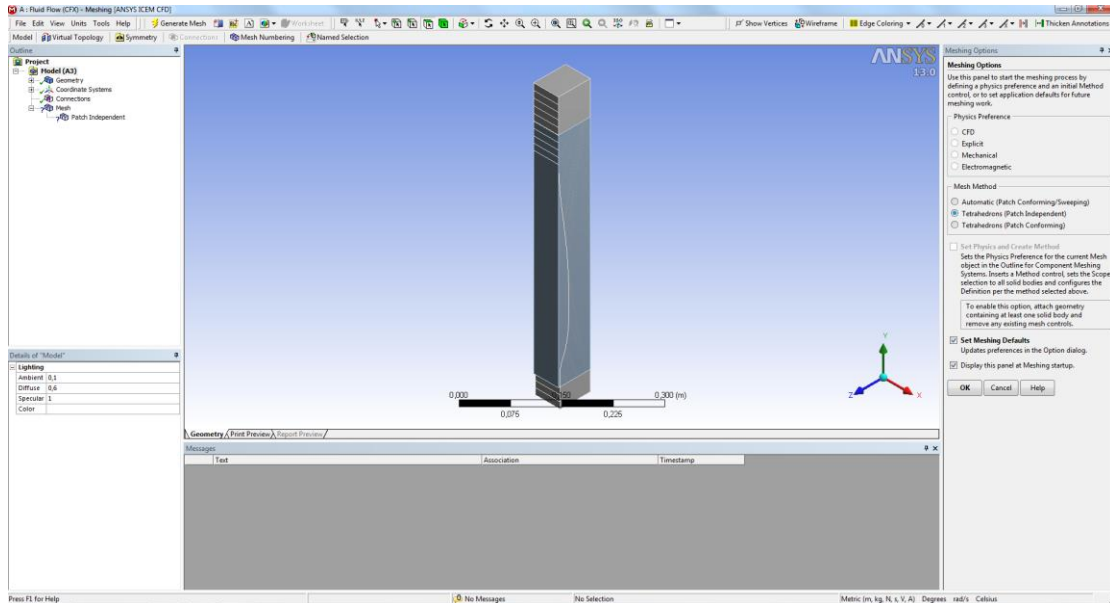
3.3 Δημιουργία πλέγματος στο αντικείμενο

Το υπολογιστικό πλέγμα (*mesh*) παράγεται επιλέγοντας δεξί *click* και στην συνέχεια *edit* όπως φαίνεται στη Εικόνα 3.3.1 στη συνέχεια.



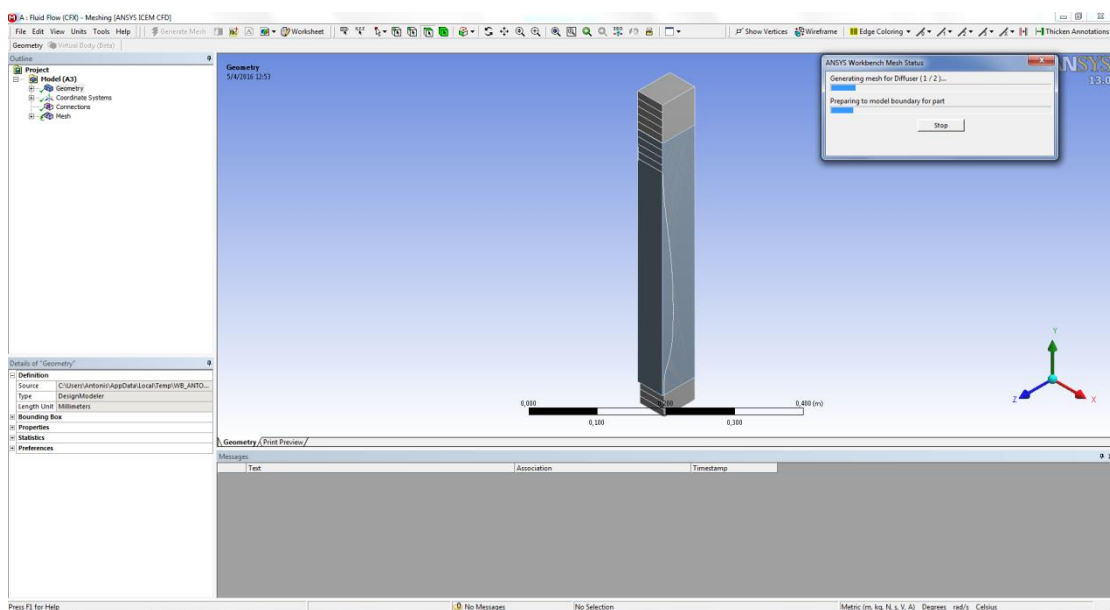
Εικόνα 3.3.1: Άνοιγμα επιλογής «mesh» για τη δημιουργία του πλέγματος.

Ύστερα, ανοίγει ένα νέο πρόγραμμα το *meshing* όπου κατά το άνοιγμα εμφανίζεται ένα παράθυρο στο οποίο ζητείται να επιλεχθεί τι *mesh method* - μέθοδος δημιουργία πλέγματος θα χρησιμοποιηθεί. Η προεπιλεγμένη επιλογή από το πρόγραμμα είναι τετραεδρική και χωρίς να επιλεχθεί *physics preferences*- φυσικές προτιμήσεις όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.3.2 πατιέται *ok*.



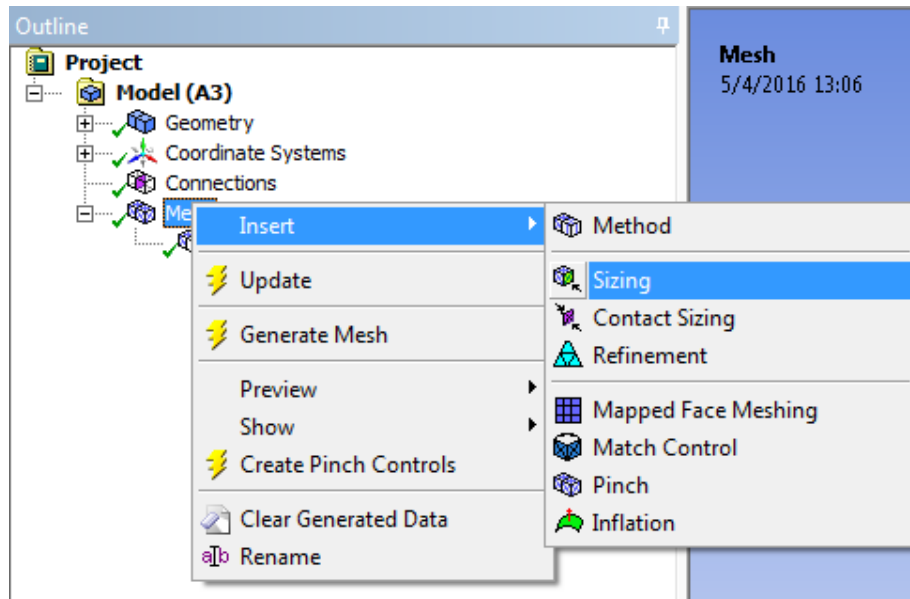
Εικόνα 3.3.2: Επιλογή μεθόδου «mesh».

Για να μπορέσει να εμφανιστεί το πλέγμα αρκεί να πατηθεί *generate mesh* και θα εμφανιστεί ένα παράθυρο το οποίο θα δείχνει την πρόοδο μέχρι την ολοκλήρωση της δημιουργίας του. Έτσι σε κάθε αλλαγή θα εμφανίζεται αυτή η μπάρα προόδου της εργασίας, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.3.3.



Εικόνα 3.3.3: Πρόοδος «meshing».

Σε πρώτη φάση θα πρέπει να εισαχθεί το σώμα που προστέθηκε, ως η περιοχή που επιλέχθηκε να γίνει αραίωση ή πύκνωση του πλέγματος, στην προκειμένη περίπτωση δημιουργήθηκε για πύκνωση. Για να γίνει λοιπόν αυτό αρκεί να γίνει δεξιά *click* στην λέξη *mesh* και στην συνέχεια *sizing* όπως στην Εικόνα 3.3.4.



Εικόνα 3.3.4: Εισαγωγή «Sizing» στην περιοχή της πύκνωσης.

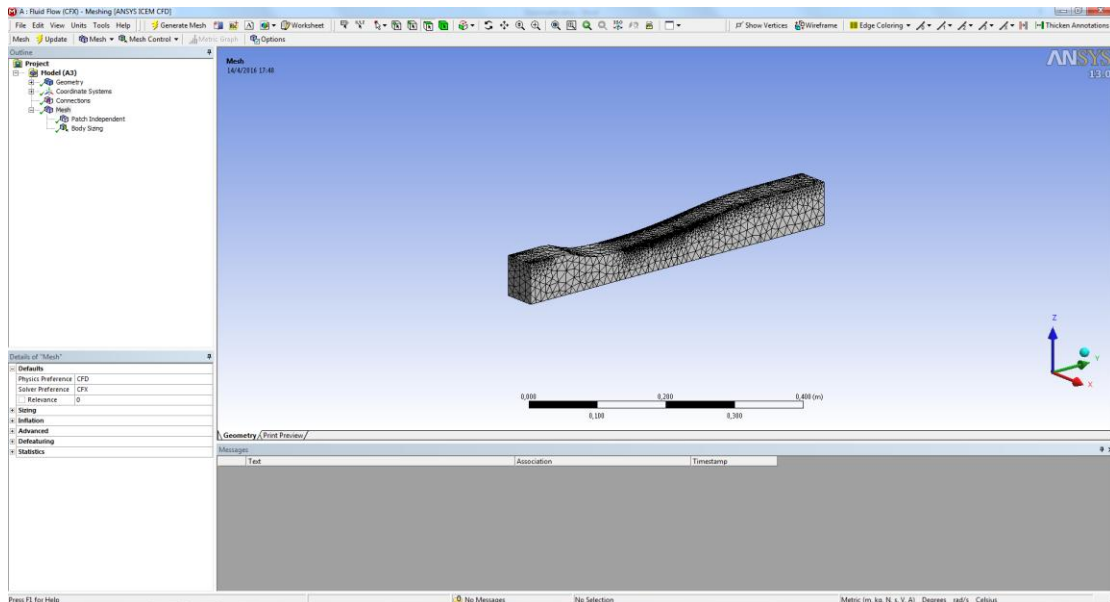
Στην συνέχεια, στο παράθυρο αριστερά ζητείται να ορισθεί το αρχικό σώμα για να γίνει το πλέγμα και αφού επιλεγθεί στο *geometry* ύστερα επιλέγεται στο τύπο-*type->body of influence* και το δεύτερο σώμα σαν *bodies of influence* που προστέθηκε στην προηγούμενη ενότητα και με αυτόν τον τρόπο θα γίνει ένα με το αντικείμενο που είχε σχεδιαστεί. Στις Εικόνες 3.3.5 και 3.3.6 φαίνονται οι επιλογές, ενώ στην Εικόνα 3.3.7 το αποτέλεσμα αρκεί να πατηθεί το *generate mesh*.

Details of "Body Sizing" - Sizing	
[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
[-] Definition	
Suppressed	No
Type	Element Size
<input type="checkbox"/> Element Size	Default
Behavior	Soft
<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	Default
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default

Εικόνα 3.3.5: Επιλογή κύριου σώματος «body».

Details of "Body Sizing" - Sizing	
[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
[-] Definition	
Suppressed	No
Type	Body of Influence
Bodies of Influence	1 Body
<input type="checkbox"/> Element Size	Default
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default

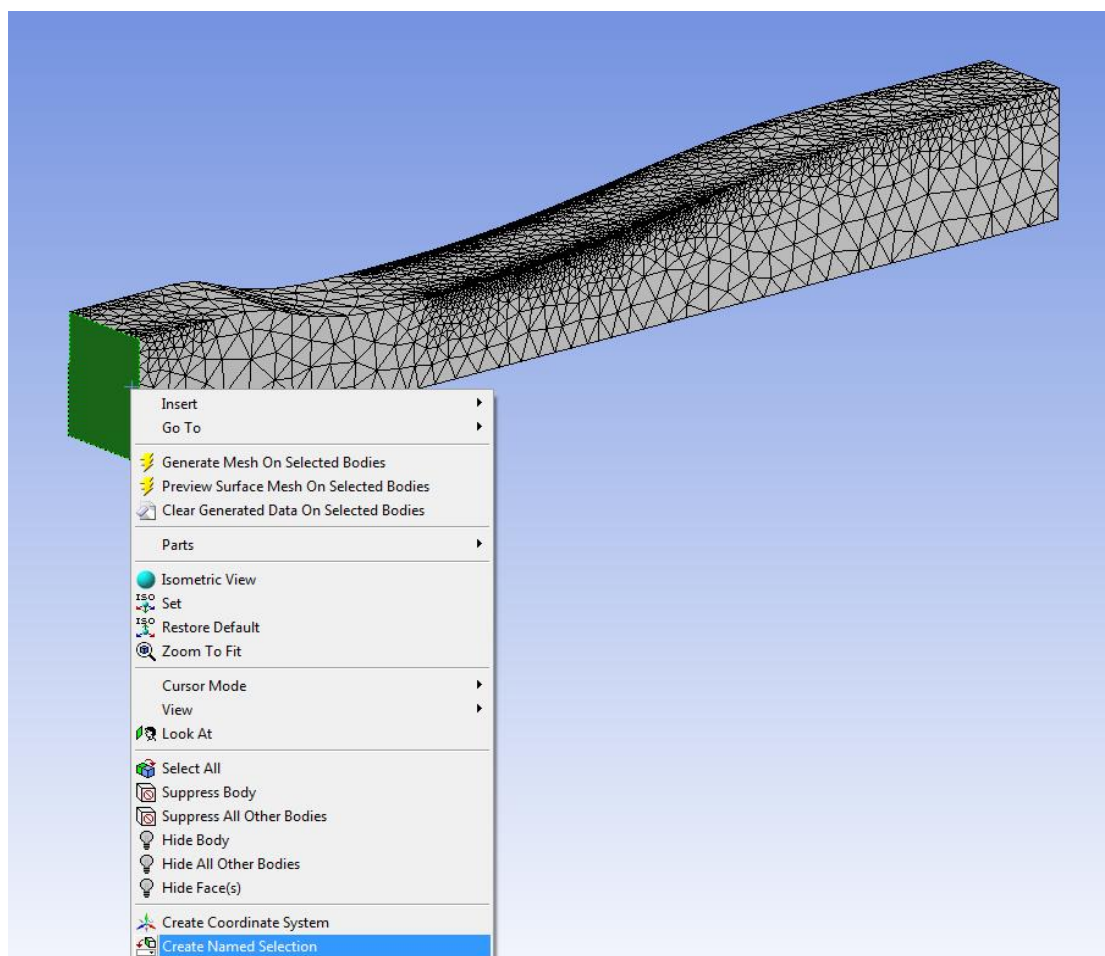
Εικόνα 3.3.6: Εισαγωγή «Body of Influence».



Εικόνα 3.3.7: Συνένωση σωμάτων και τελικό αποτέλεσμα.

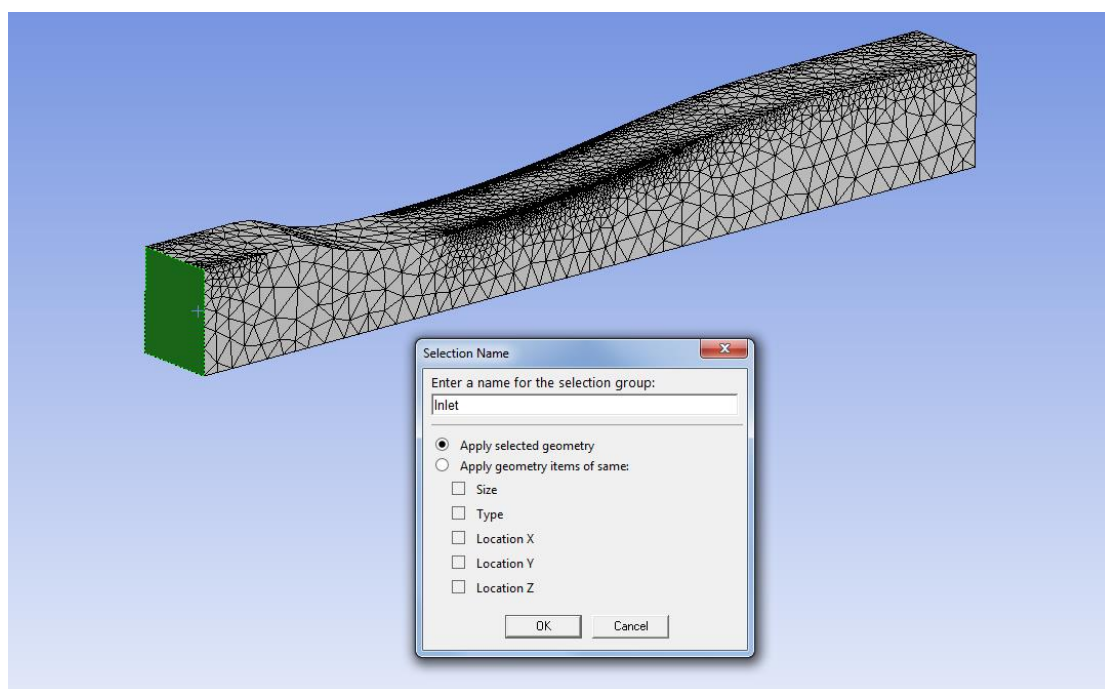
3.4 Εισαγωγή ονόματος στις επιφάνειες

Είναι σημαντικό να ορισθούν ονόματα στις πλευρές του αντικειμένου κάτι το οποίο θα είναι χρήσιμο στο επόμενο στάδιο εισαγωγής οριακών συνθηκών, αλλά και για να γίνεται ευκολότερα η αναφορά στις επιφάνειες οι οποίες θα χρησιμεύσουν στον ορισμό των χαρακτηριστικών του πλέγματος. Για να γίνει αυτό αρκεί να επιλεγθεί η επιφάνεια που επιθυμείται και πατώντας αριστερό *click-> create named selection*.

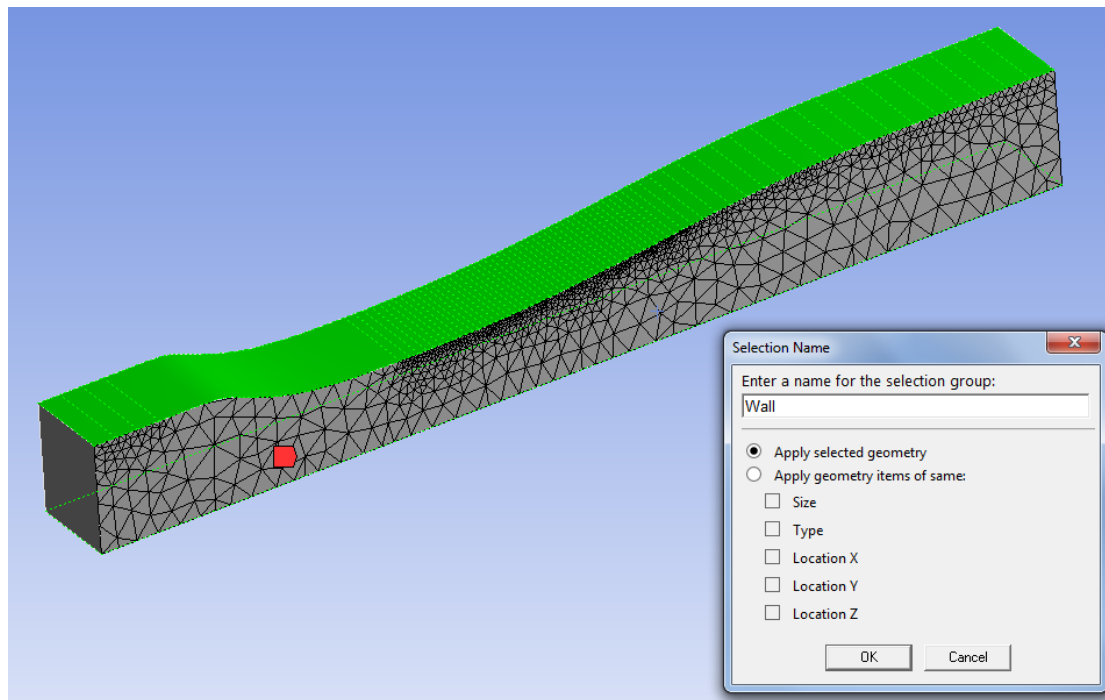


Εικόνα 3.4.1: Τρόπος εισαγωγής ονόματος στις επιφάνειες.

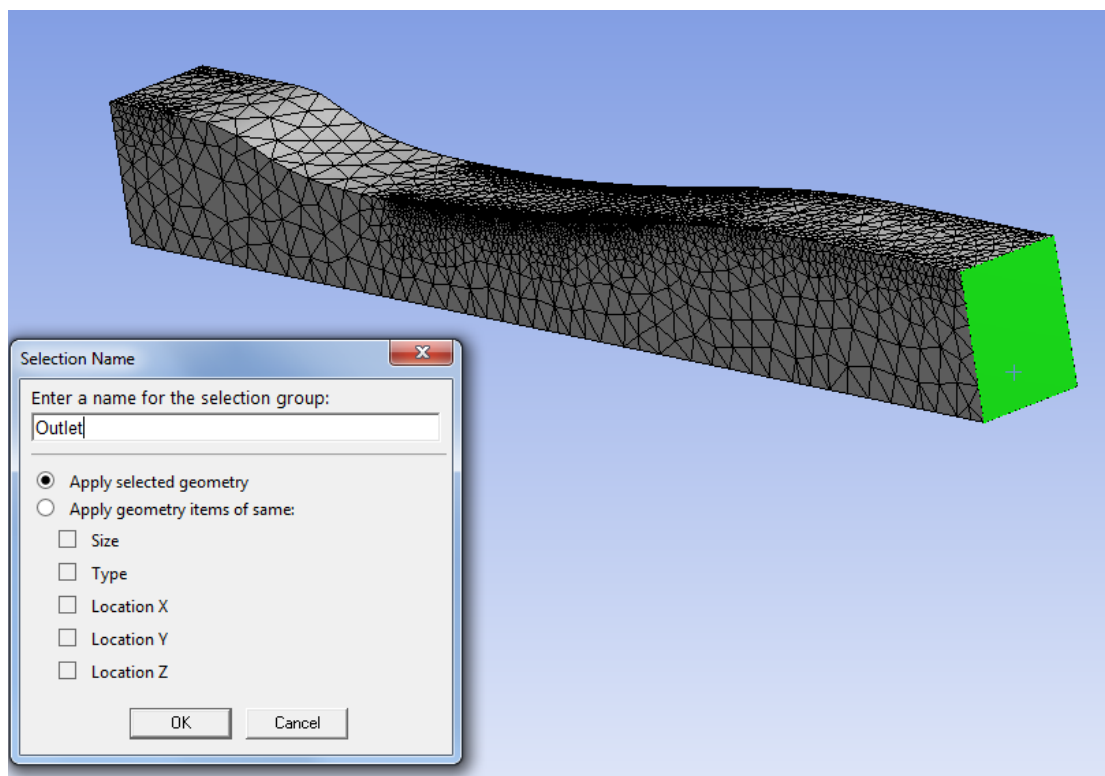
Στην συνέχεια ορίζεται το όνομα της επιφάνειας και επιλέγεται *ok*.



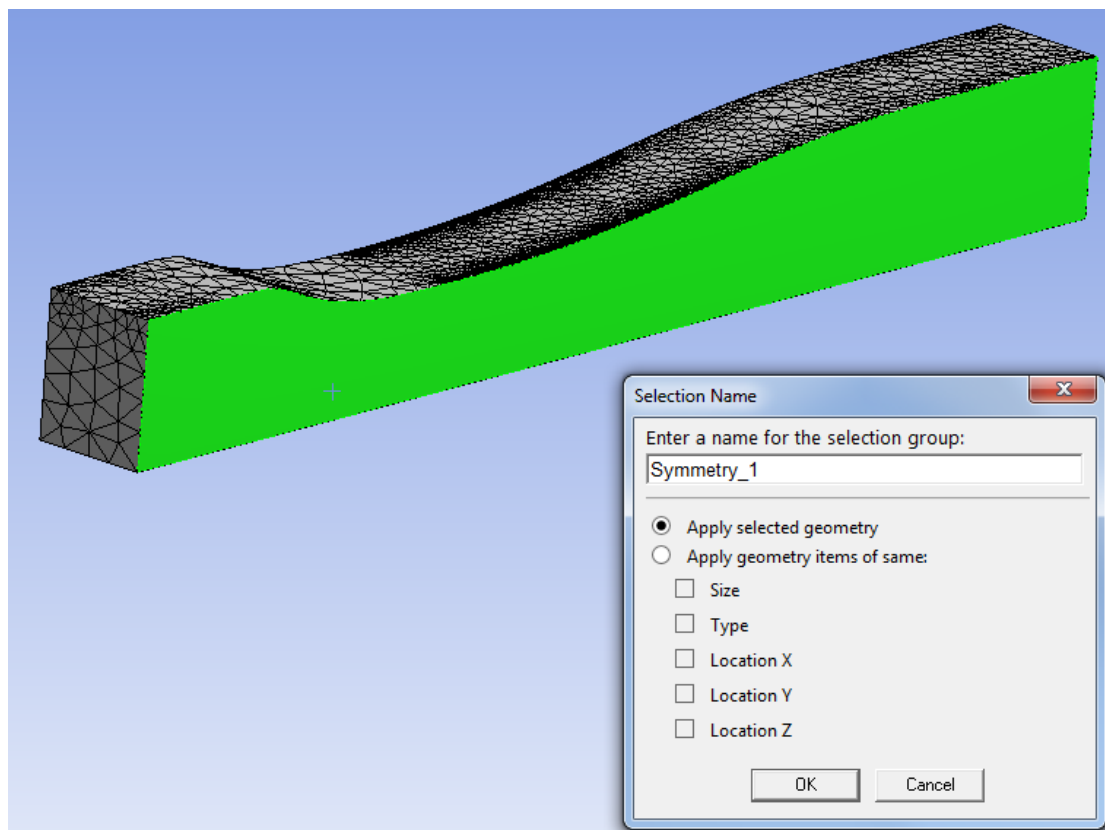
Εικόνα 3.4.2: Εισαγωγής ονόματος στην επιφάνεια εισόδου «Inlet».



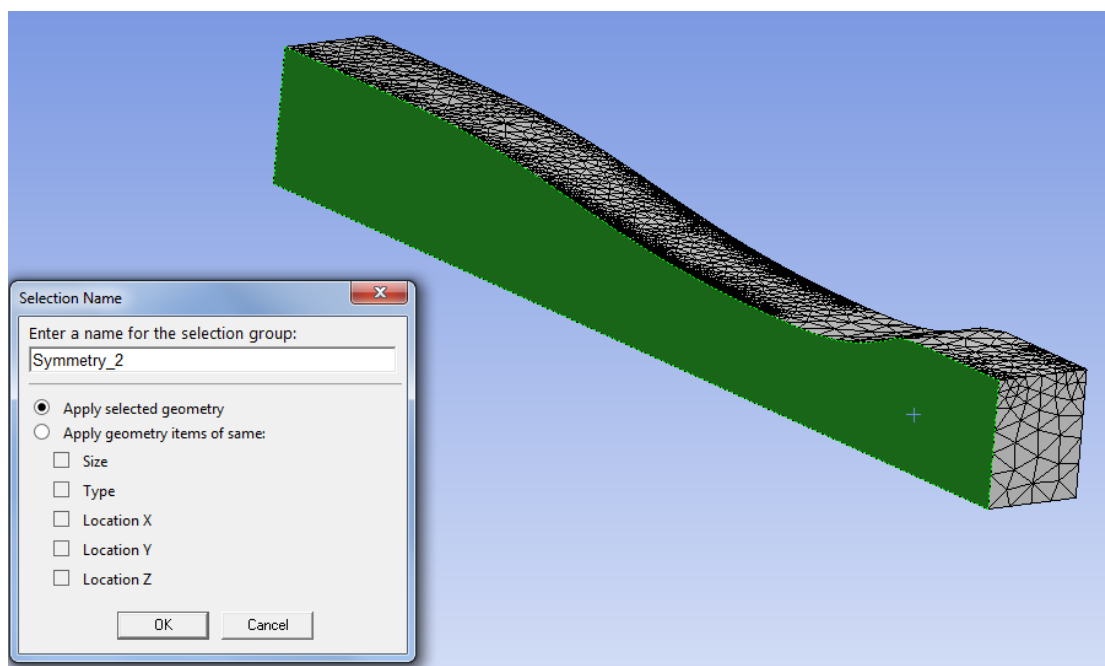
Εικόνα 3.4.3: Εισαγωγή ονόματος των επιφανειών «wall».



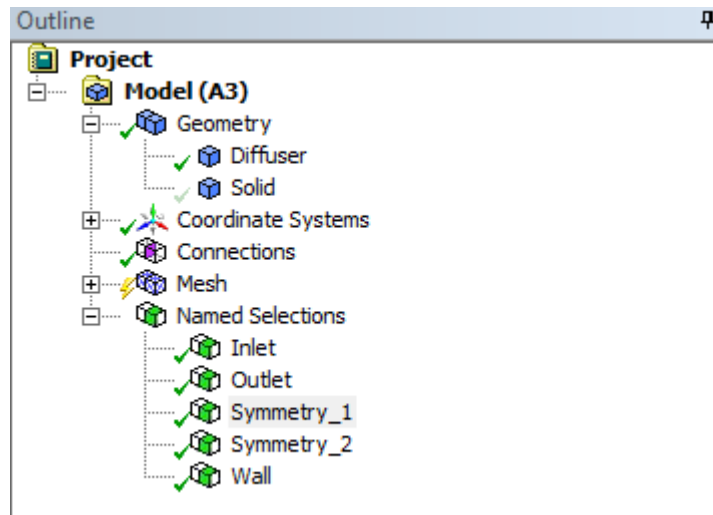
Εικόνα 3.4.4: Εισαγωγή ονόματος στην επιφάνεια εξόδου «outlet».



Εικόνα 3.4.5: Εισαγωγή ονόματος στη συμμετρική επιφάνεια 1.



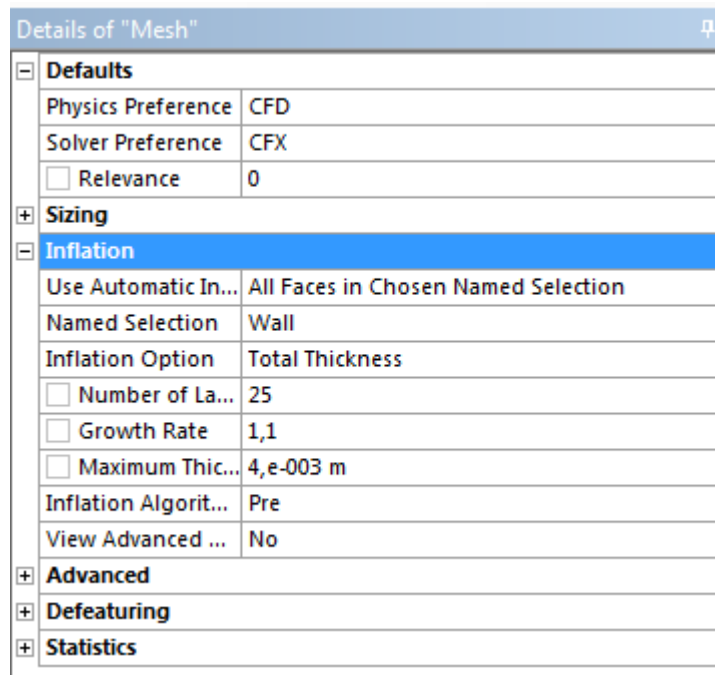
Εικόνα 3.4.6: Εισαγωγή ονόματος στη συμμετρική επιφάνεια 2.



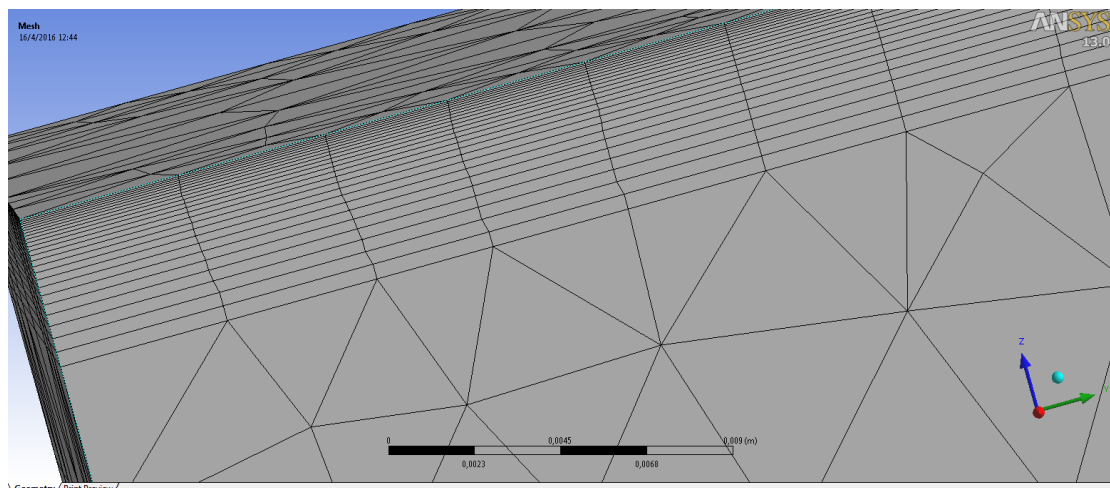
Εικόνα 3.4.7: «Named Selections» στο «Outline Tree».

3.5 Τοπική Πύκνωση του Υπολογιστικού Πλέγματος

Σε πρώτη φάση θα ήτανε καλό να δημιουργηθεί στις επιφάνειες *wall* διαφορετική πύκνωση απ' ότι στο υπόλοιπο πλέγμα για να μπορέσει να γίνει με μεγαλύτερη ακρίβεια ο υπολογισμός του οριακού στρώματος και της αποκόλλησης του ρευστού. Για να γίνει αυτό αρκεί να πατηθεί στο *outline tree* πρώτα *mesh* και έπειτα *inflation*. Εκεί θα ζητηθούν να ορισθούν οι επιφάνειες που επιθυμούνται (δηλαδή *wall*) και σε συνέχεια θα επιλεγθεί *total thickness* στο *inflation option*. Αμέσως ζητείται *maximum thickness* όπου ορίσθηκε 4×10^{-3} και έπειτα επιλέγεται ο αριθμός των *layers* καθώς και ο ρυθμός αύξησης, όπως φαίνεται και παρακάτω όπου για να εφαρμοστούν όπως και για κάθε αλλαγή αρκεί η επιλογή *generate mesh*.

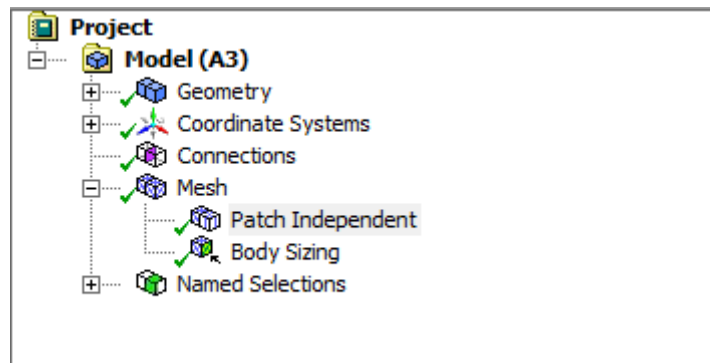


Εικόνα 3.5.1: Εισαγωγή «inflation» στην επιφάνεια «wall» του «mesh».



Εικόνα 3.5.2: Παρουσίαση της πύκνωσης (Inflation) του πλέγματος στο στερεό τοίχωμα.

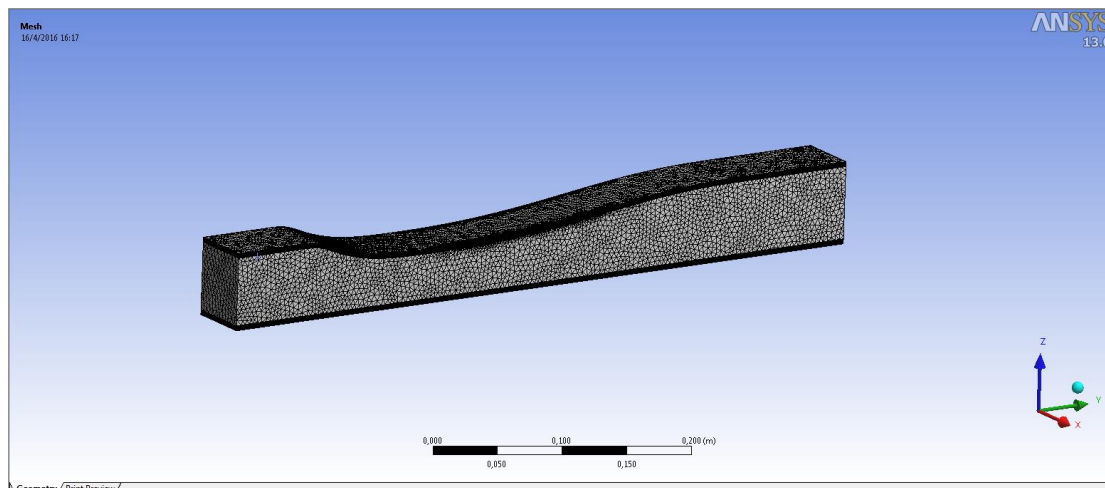
Πέρα όμως από το *inflation* είναι απαραίτητο να οριστεί και η πύκνωση στο αντικείμενο. Αρχικά επιλέγεται στο *outline tree* → *patch independent* και έπειτα στο *Details of "Patch Independent"* → *Advanced*. Στο σημείο αυτό αλλάζεται ο αριθμός από προεπιλεγμένος – *Default* στο κελί *Max Element Size* και δίνεται ο αριθμός 4×10^{-3} . Έτσι πατώντας *update* ή *generate mesh* το πλέγμα παίρνει την μορφή που επιθυμείται.



Εικόνα 3.5.3: «Outline Tree» -> «Mesh» -> «Patch Independent».

Details of "Patch Independent" - Method	
Scope	
Definition	
Advanced	
Defined By	Max Element Size
<input type="checkbox"/> Max Element Size	4,e-003 m
<input type="checkbox"/> Feature Angle	30,0 °
Mesh Based Defeaturing	Off
Curvature and Proximity Refinement	Yes
<input type="checkbox"/> Min Size Limit	Default
<input type="checkbox"/> Num Cells Across Gap	Default
<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	Default
Smooth Transition	Off
Growth Rate	Default
Minimum Edge Length	3,4607 e-003 m
Write ICFM CFD Files	No

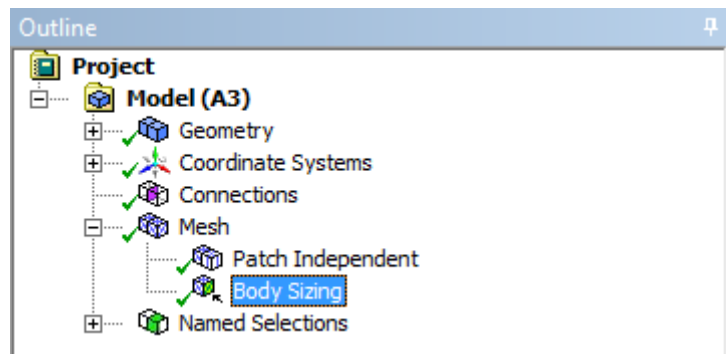
Εικόνα 3.5.4: Αλλαγή «Max Element Size» στο «Patch Independent».



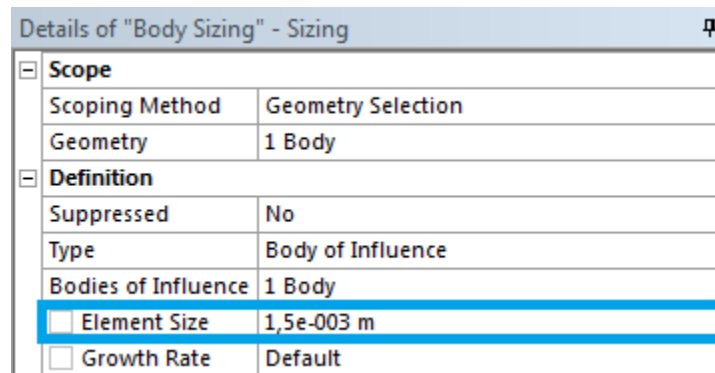
Εικόνα 3.5.5: Αποτέλεσμα πλέγματος με αλλαγή στο «Max Element Size».

Για την ολοκλήρωση του πλέγματος απομένει να γίνει η τοπική πύκνωση στο εσωτερικό του αντικειμένου, σύμφωνα με το *body 2* που δημιουργήθηκε προηγουμένως. Αυτό γίνεται με τις επιλογές: *outline tree->body sizing* και στην

συνέχεια το *element size* γίνεται $1,5 \times 10^{-3}$ όπως φαίνονται στις Εικόνες 3.5.5 και 3.5.6.

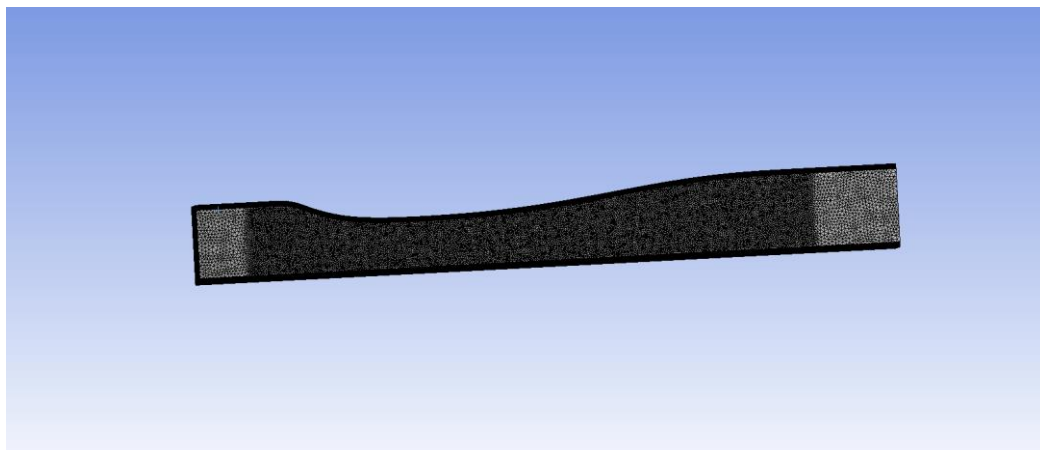


Εικόνα 3.5.6: «Outline Tree» -> «Mesh» -> «Body Sizing».




Εικόνα 3.5.7: Αλλαγή «Element Size» στο «Body Sizing».

Το πλέγμα που δημιουργήθηκε μέσω της διαδικασίας «mesh», όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.5.7, παρουσιάζει διαφορετική πυκνωση στην περιοχή που δημιουργήθηκε το «frozen body». Η πυκνωση αυτή εξυπηρετεί στο γεγονός ότι θα μπορέσουν να υπολογισθούν με μεγαλύτερη ακρίβεια τα αποτελέσματα στο επόμενο στάδιο. Συνολικά το πλέγμα αποτελείται από 1.456.143 κόμβους και 5.963.291 στοιχεία.



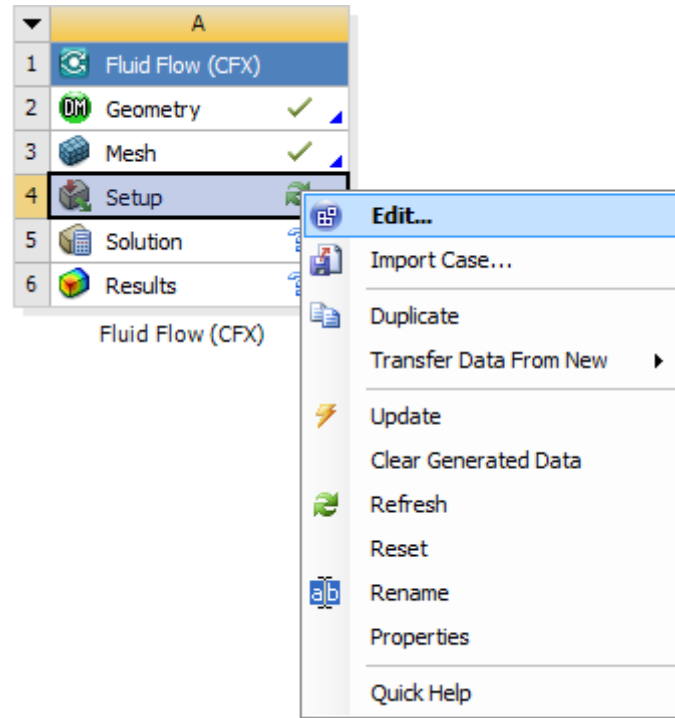
Εικόνα 3.5.8: Τελική μορφή πυκνωσης του πλέγματος.

 Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	1456143
<input type="checkbox"/> Elements	5963291
Mesh Metric	None

Εικόνα 3.5.9: Στατιστικά στοιχεία πλέγματος.

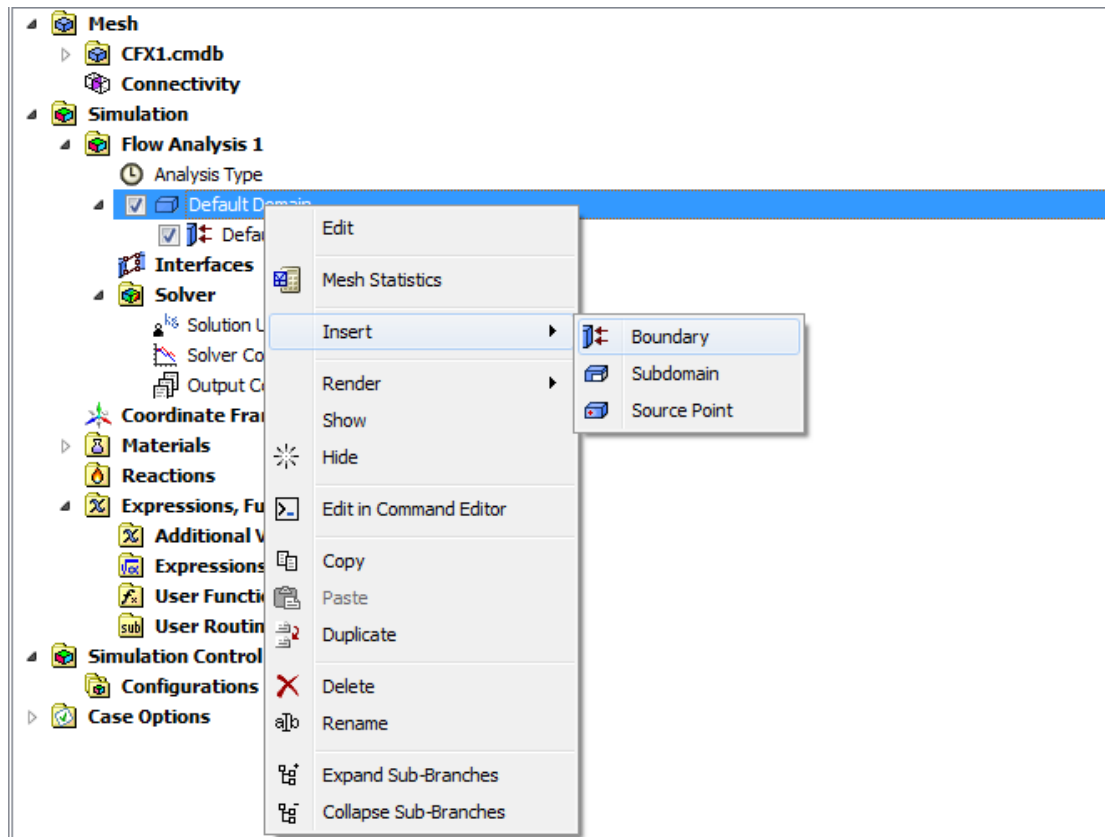
3.6 Έναρξη CFX Setup

Έχοντας ολοκληρώσει το υπολογιστικό πλέγμα στη συνέχεια σειρά έχει η εφαρμογή *Setup* του *CFX* δηλαδή *Setup*-> *Edit*, για τον ορισμό των κύριων χαρακτηριστικών της προσομοίωσης.



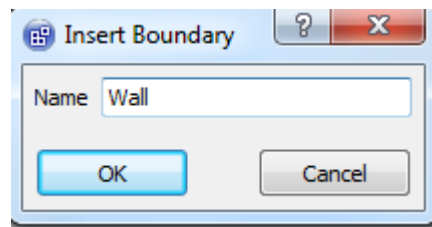
Εικόνα 3.6.1: Άνοιγμα επιλογής «Setup».

Ως πρώτο στάδιο είναι χρήσιμο να ορισθούν οι επιφάνειες που εισήχθησαν προηγουμένως ως *boundaries*, όπου με τον τρόπο αυτό θα γίνει και η εισαγωγή των δεδομένων της προσομοίωσης. Για να πραγματοποιηθεί αυτό αρκεί να γίνει δεξί *click* στο *Default domain* -> *Insert* -> *Boundary*, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.6.2.

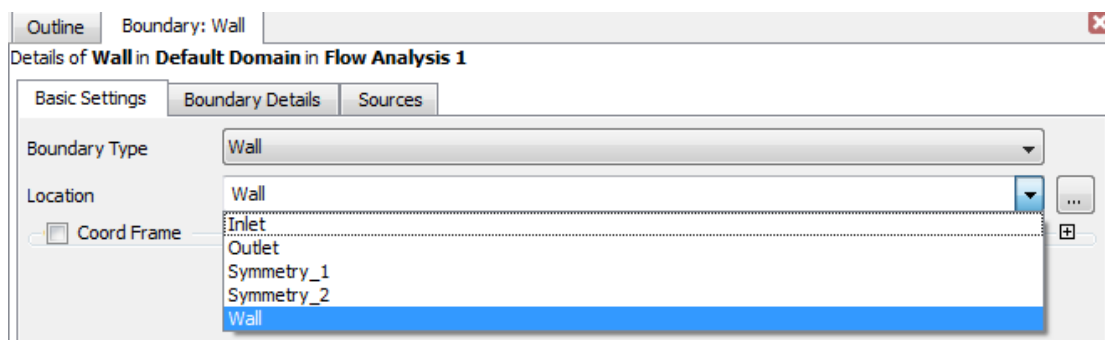


Εικόνα 3.6.2: Εισαγωγή Boundaries στο Setup.

Η σειρά με την οποία ορίσθηκαν είναι τυχαία και δεν έχει καμία σημασία. Αρχικά ορίσθηκε το *wall* όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.6.3 και έπειτα το *location* του όπως την Εικόνα 3.6.4.

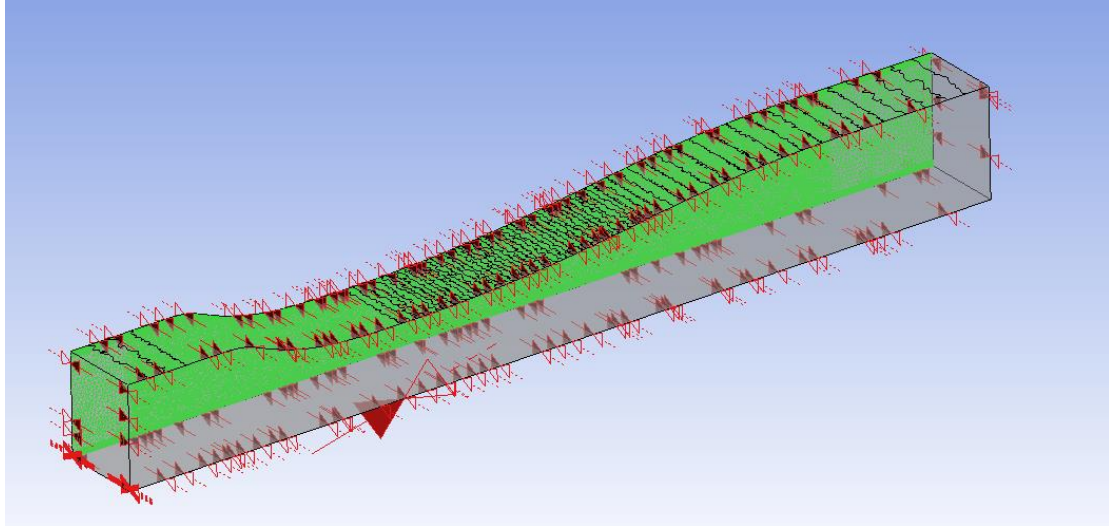


Εικόνα 3.6.3: Insert Boundary Wall.



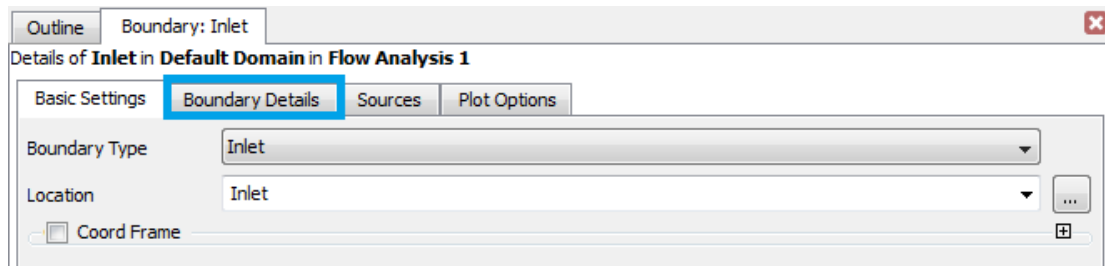
Εικόνα 3.6.4: Επιλογή location.

Ομοίως και για *Symmetry_1* και *Symmetry_2*, οπότε το σώμα απεικονίζεται όπως στην Εικόνα 3.6.5.



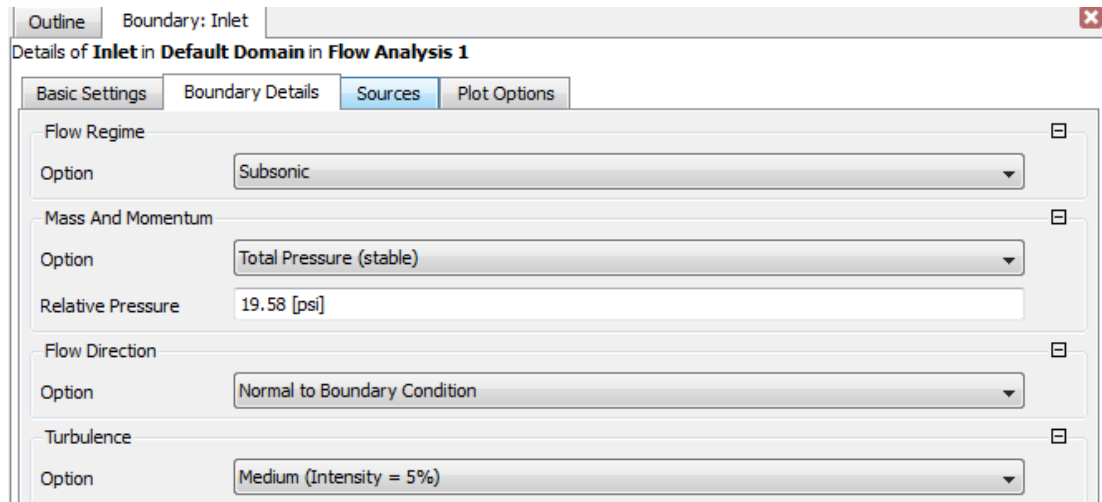
Εικόνα 3.6.5: Απεικόνιση σώματος μετά από την εισαγωγή των τριών ορίων.

Εκτός αυτών θα πρέπει να εισαχθούν και το όριο εισόδου *inlet* και το όριο εξόδου *outlet*. Αρχικά, για την είσοδο όπως προηγουμένως έγινε και στα προηγούμενα *insert -> boundary* και μετά ονοματίζεται *inlet*, ενώ στη συνέχεια εισάγεται η καρτέλα *boundary details* όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 3.6.6.



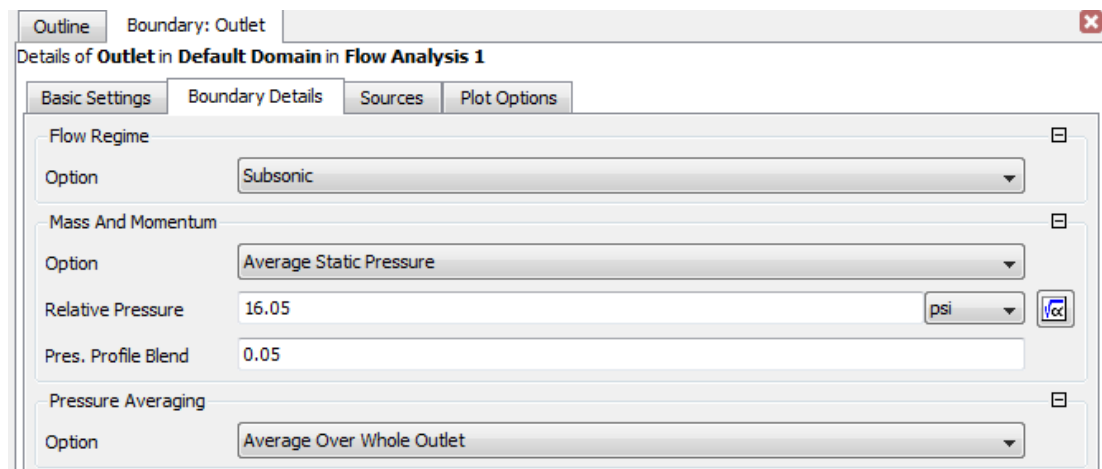
Εικόνα 3.6.6: Διαμόρφωση ορίου *inlet*.

Εκεί επιλέγεται το είδος της ροής και εισάγεται η ολική πίεση στην επιφάνεια εισόδου βάσει βέβαια των δεδομένων που έχουν δοθεί από την περιγραφή του πειράματος. Έτσι, στην περιοχή *mass and momentum* επιλέγεται *option -> total pressure(stable)* και ως σχετική πίεση *relative pressure 19.58psi* στις υπόλοιπες επιλογές ως έχουν και *ok*.

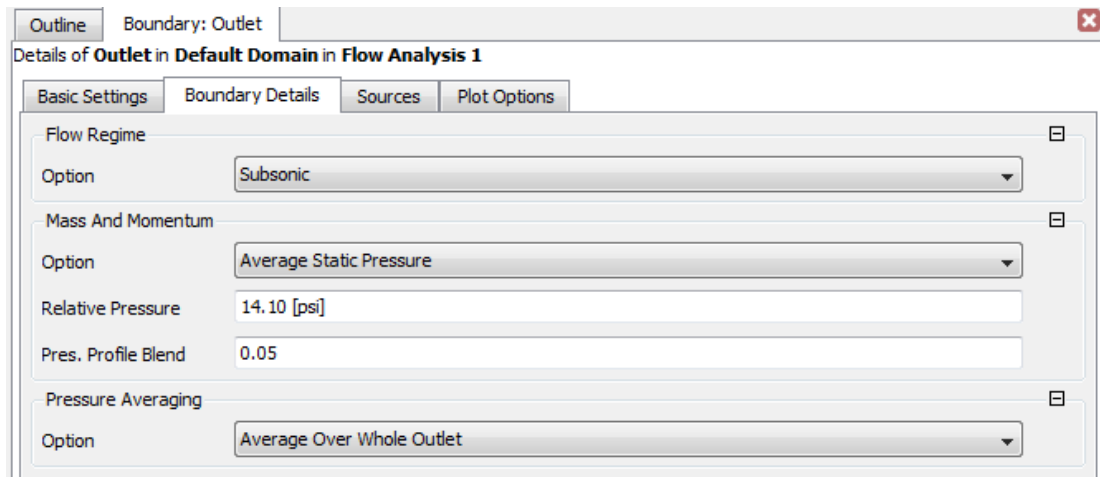


Εικόνα 3.6.7: Εισαγωγή δεδομένων εισόδου inlet.

Στην έξοδο θα εισαχθούν δύο διαφορετικές τιμές πίεσεως και με τον τρόπο αυτό θα γίνει και η διαφοροποίηση του πειράματος από *weak shock outflow* σε *strong shock outflow*. Όπως και προηγουμένως *insert -> boundary* και παίρνει το όνομα *outlet* στη συνέχεια *boundary detail*. Στην Εικόνα 3.6.8 παρουσιάζονται τα στοιχεία εξόδου για την περίπτωση *weak shock outflow* ενώ στην Εικόνα 3.6.9 για την περίπτωση *strong shock outflow*. Η πίεση εξόδου στην πρώτη περίπτωση είναι 16.05psi ενώ στην δεύτερη 14.10psi όπως φαίνεται και παρακάτω.

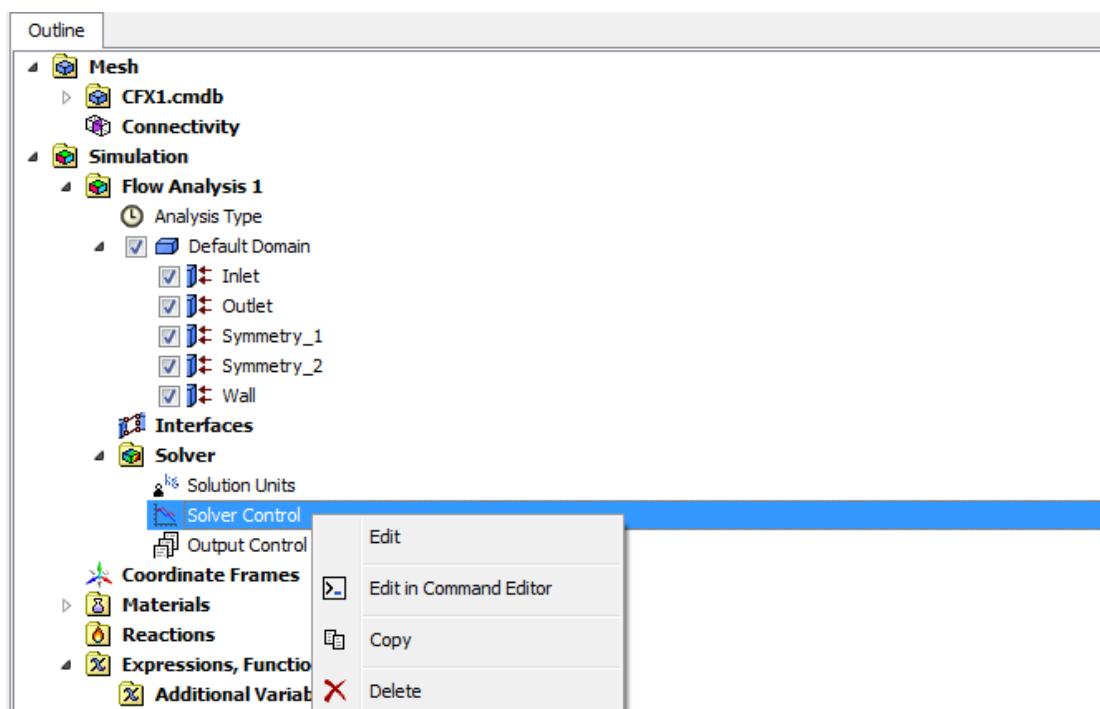


Εικόνα 3.6.8: Στοιχεία εξόδου στην περίπτωση *weak shock outflow*.

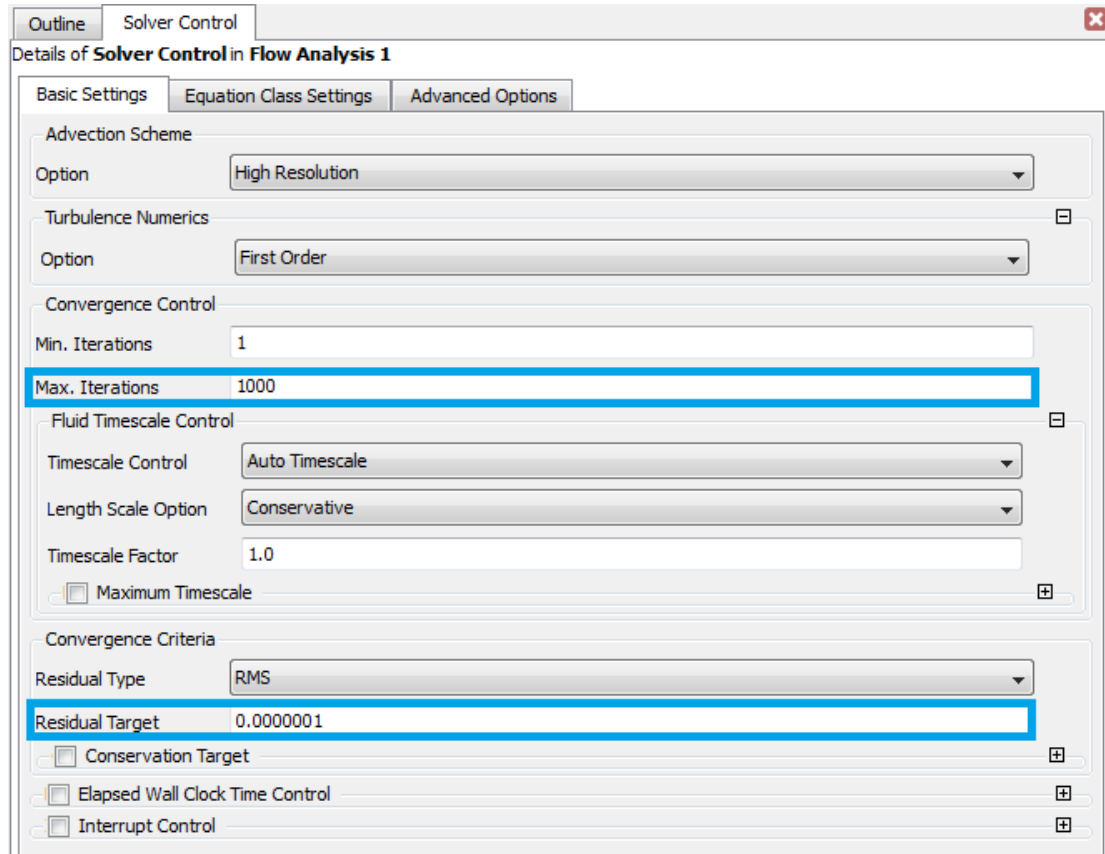


Εικόνα 3.6.9: Στοιχεία εξόδου στην περίπτωση *strong shock outflow*.

Έχοντας ορίσει την τιμή της πίεσης στην έξοδο, ανάλογα με ποια περίπτωση είναι η επιθυμητή, στη συνέχεια ορίζεται ο αριθμός των επαναλήψεων που θα εκτελεσθούν στον επιλύτη, καθώς και η ακρίβεια που επιθυμείται για το αποτέλεσμα. Για να γίνει αυτό επιλέγεται στο *outline tree* στην καρτέλα *solver* με δεξιά *click* στο *Solver Control* -> *Edit*. Εκεί ανοίγει ένα νέο παράθυρο στο οποίο δίνεται ο αριθμός 1000 στο κελί *Max. Iterations* για τις επαναλήψεις και 0.0000001 στο κελί *Residual Target* για την ακρίβεια. Η διαδικασία φαίνεται στις Εικόνες 3.6.10 και 3.6.11.

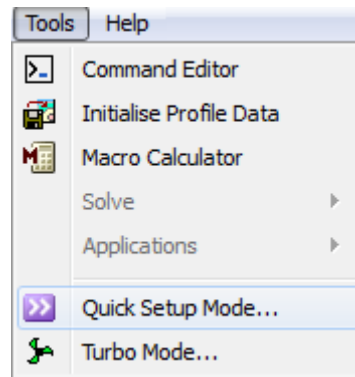


Εικόνα 3.6.10: Άνοιγμα «*Solver Control*».

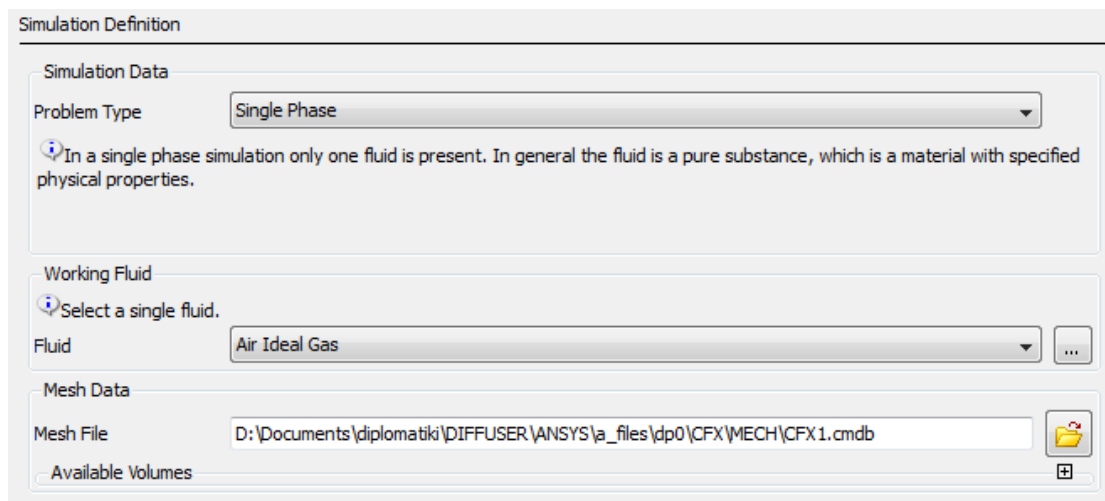


Εικόνα 3.6.11: Επιλογή αριθμού επαναλήψεων καθώς και επιθυμητής ακρίβειας.

Τέλος, για την ολοκλήρωση του *Setup* το μόνο που απέμεινε είναι να γίνει ένα *quick setup mode* όπου και θα ορισθεί ο τύπος του προβλήματος *single phase* καθώς και ο τύπος του ρευστού στην περίπτωση αυτή *Air Ideal Gas* και *Next*. Στην συνέχεια θα ορισθεί η τιμή της πίεσης αναφοράς ίσης με *0psi*. Στην επιλογή *Turbulence* επιλέχθηκε εναλλακτικά *SST method* και *k-epsilon method*. Οι παραπάνω επιλογές έγιναν με τους εξής συνδυασμούς: δηλαδή *weak shock outflow* και *strong shock outflow* με την μέθοδο *SST* και ομοίως *weak shock outflow* και *strong shock outflow* με την μέθοδο *k-epsilon*. Συνολικά δηλαδή πραγματοποιήθηκαν τέσσερα διαφορετικά τρεξίματα. Μιας και δεν έχει ορισθεί η θερμοκρασία εισόδου επιλέγεται *Inlet* και στο *Total Temperature 500R* μετά *Next* και τέλος *Finish*. Ολόκληρη η αντίστοιχη διαδικασία παρουσιάζεται στις Εικόνες 3.6.12 έως 3.6.16.



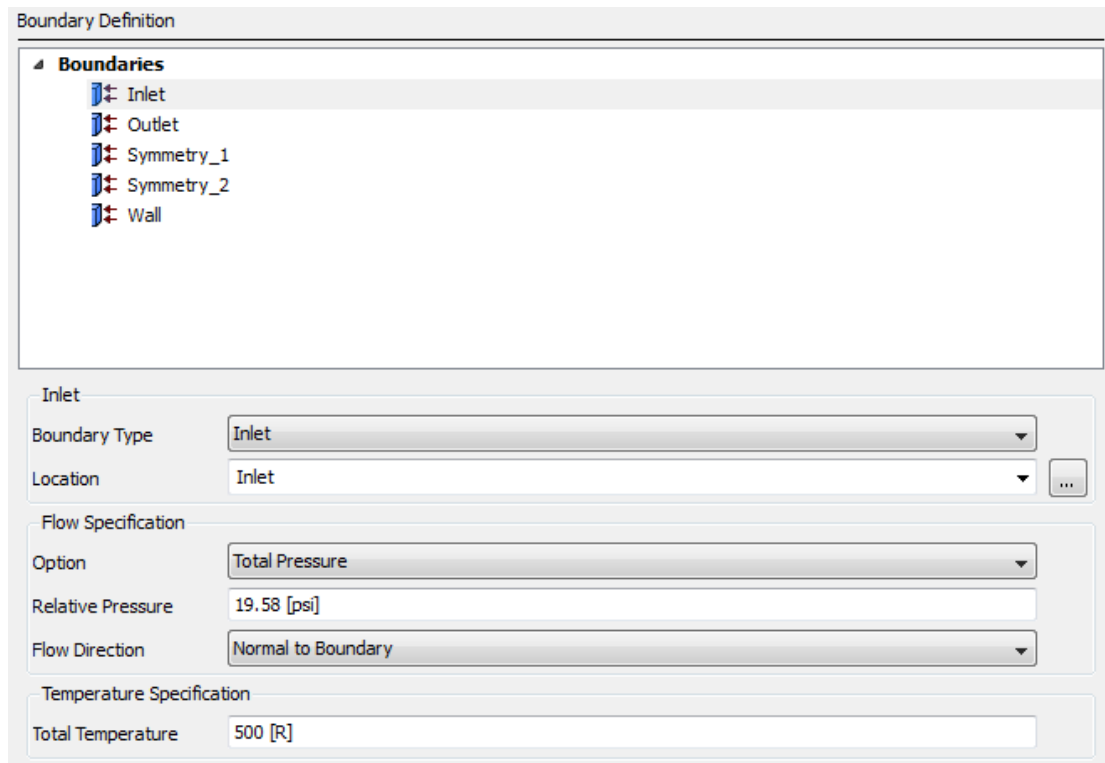
Εικόνα 3.6.12: Άνοιγμα «Quick Setup Mode».



Εικόνα 3.6.13: Επιλογή Problem Type και Working Fluid.



Εικόνα 3.6.14: Εισαγωγή πίεσεως αναφοράς και επιλογή μοντέλου τύρβης.



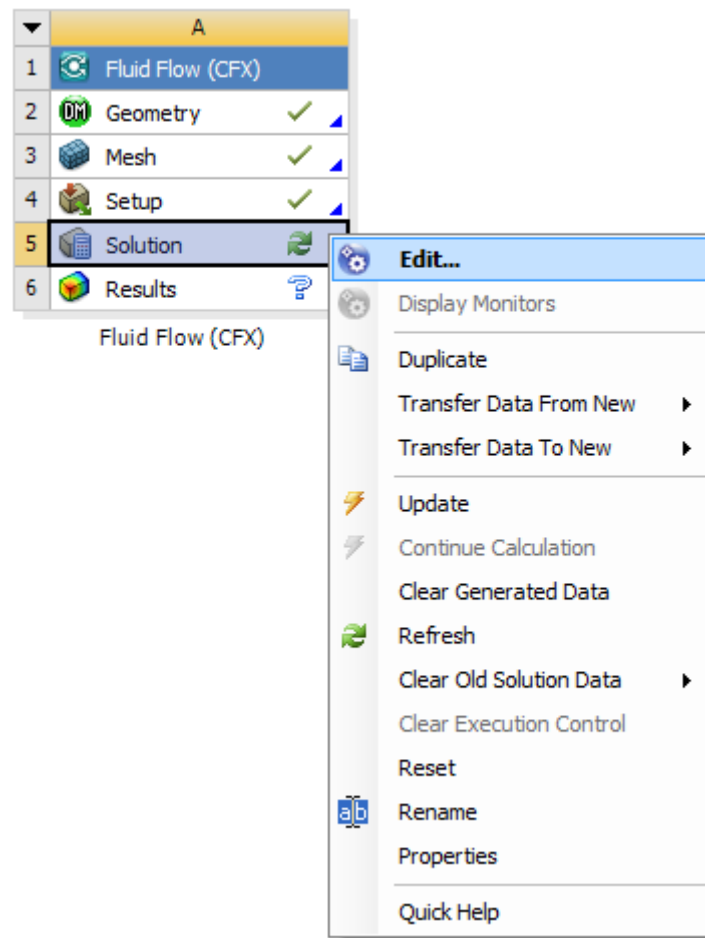
Εικόνα 3.6.15: Εισαγωγή *Total Temperature* στο *Boundary Inlet*.



Εικόνα 3.6.16: *Finish*.

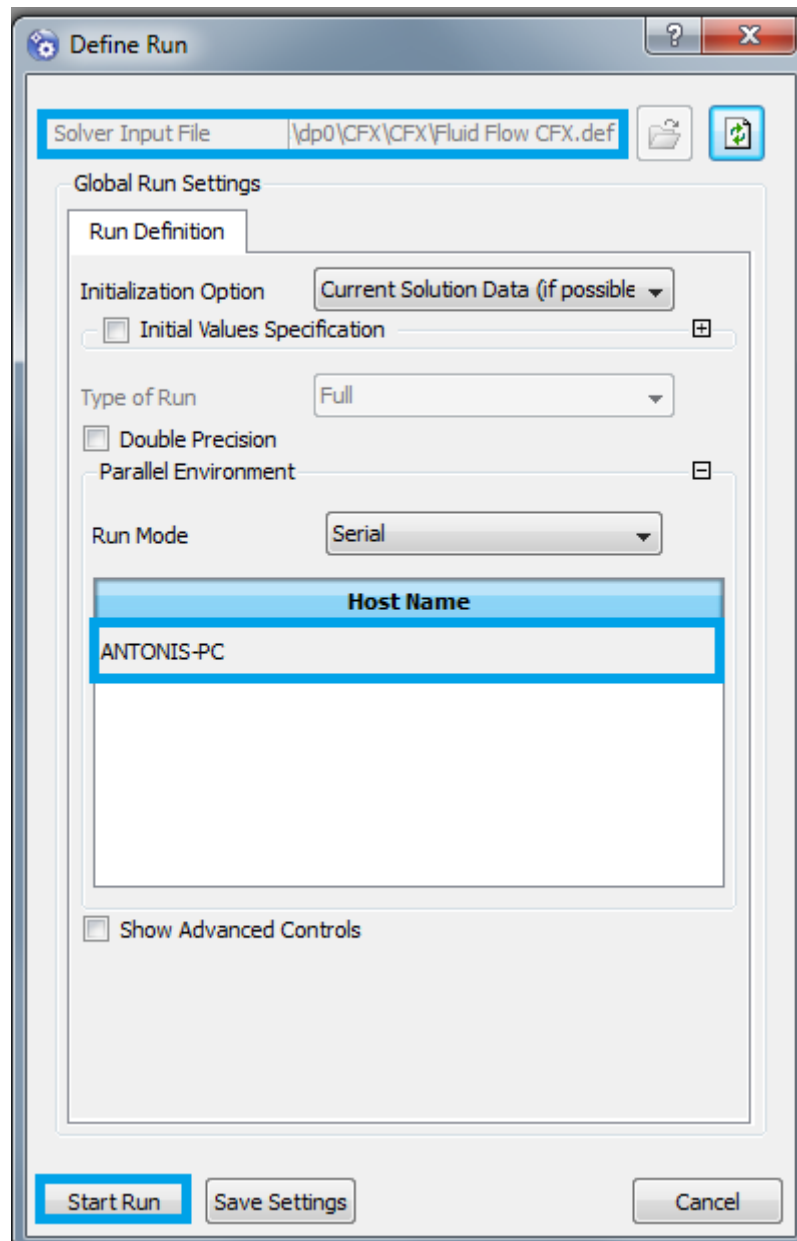
3.7 Έναρξη CFX Solver Manager

Έχοντας ολοκληρώσει όλες τις προηγούμενες διαδικασίες ήρθε η στιγμή να γίνει η επίλυση του προβλήματος μέσω του υπολογιστικού λογισμικού *Ansys CFX*. Για να γίνει αυτό πρέπει να κλείσει το *CFX Setup* και να ανοίξει το *Cfx Solver* όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.7.1.



Εικόνα 3.7.1: Άνοιγμα «Cfx Solver».

Αφού ανοίξει ο επιλύτης CFX, ανοίγει ένα παράθυρο στο οποίο ζητείται να γίνει επιλογή αποθήκευσης του *input file* του *solver* να επιλεγεί το όνομα του υπολογιστή στον οποίο θα τρέξει ο *solver* και τέλος *start run* για να ξεκινήσει η προσομοίωση, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.7.2. Ο χρόνος που απαιτείται για την περάτωση του εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον αριθμό των κόμβων που υπάρχουν στο πλέγμα, καθώς βέβαια και από τον αριθμό των επαναλήψεων που ορίστηκαν, τις δυνατότητες του υπολογιστή και άλλα χαρακτηριστικά, όπως της έκδοσης του λογισμικού που χρησιμοποιείται.



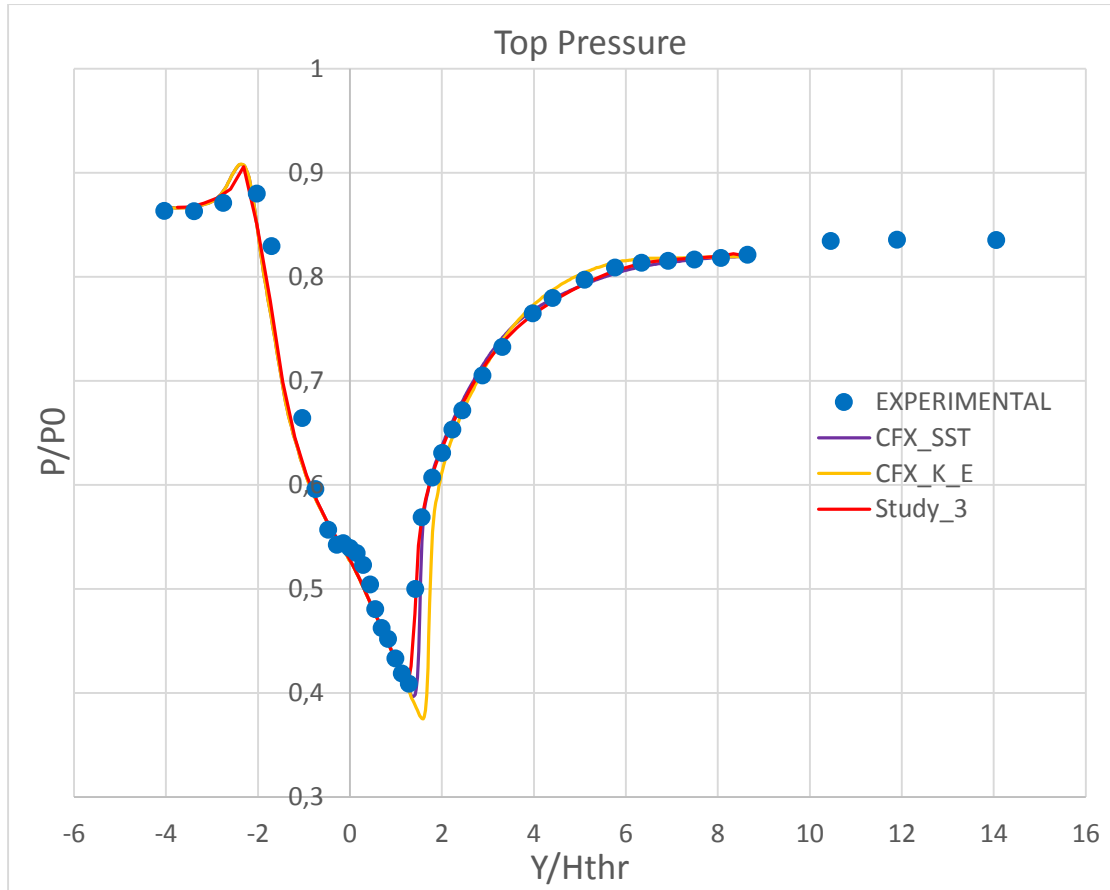
Εικόνα 3.8.2: Εκκίνηση «Solver».

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα θα χωρισθούν σε δύο κατηγορίες, η πρώτη αναφέρεται για πίεση στην επιφάνεια εξόδου τέτοια ώστε να δημιουργήσει *weak shock* και η δεύτερη για πίεση τέτοια στην έξοδο που θα δημιουργήσει *strong shock*.

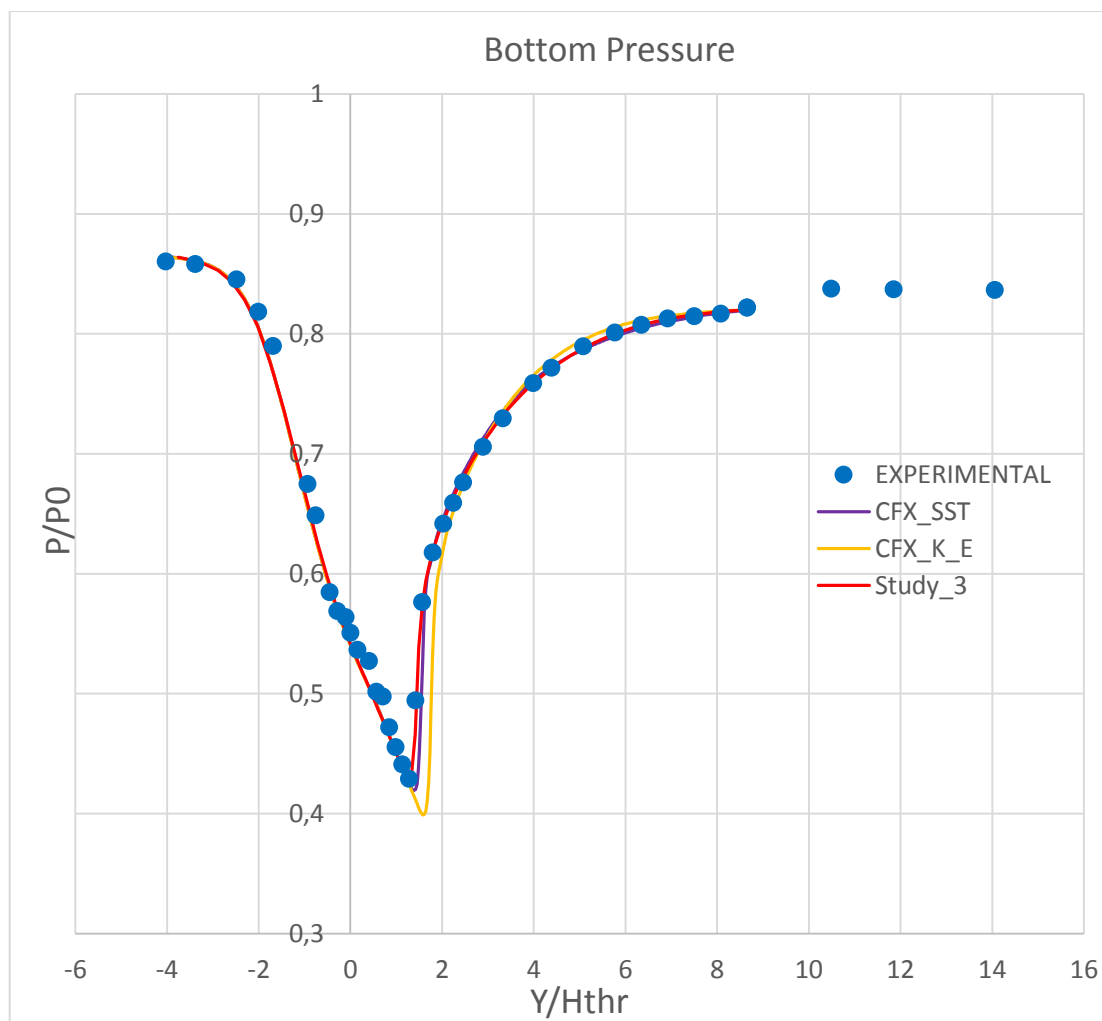
4.1 Weak Shock Outflow

Το παρακάτω διάγραμμα στην Εικόνα 4.1.1 αναφέρεται στην πίεση που υπολογίστηκε στην πάνω επιφάνεια του σχήματος αδιαστατοποιημένη με την εισερχόμενη ολική πίεση του πειράματος, καθώς και το πηλίκο όλων των σημείων της επιφάνειας σε σχέση με το ελάχιστο ύψος, H_{thr} , από την κάτω επιφάνεια (στον λαιμό). Παρουσιάζεται σύγκριση των δικών μας αποτελεσμάτων με τις γραμμές σε χρώμα μοβ και κίτρινο, που περιγράφουν τα αποτελέσματα με χρήση μοντέλων τύρβης *SST* και *K-epsilon* αντίστοιχα, σε σχέση με τα πειραματικά (*experimental*), που όπως φαίνεται απεικονίζονται με μπλε κουκίδες, καθώς και με τα αποτελέσματα της *study_3* [13] που φέρουν το διακριτικό κόκκινο χρώμα.



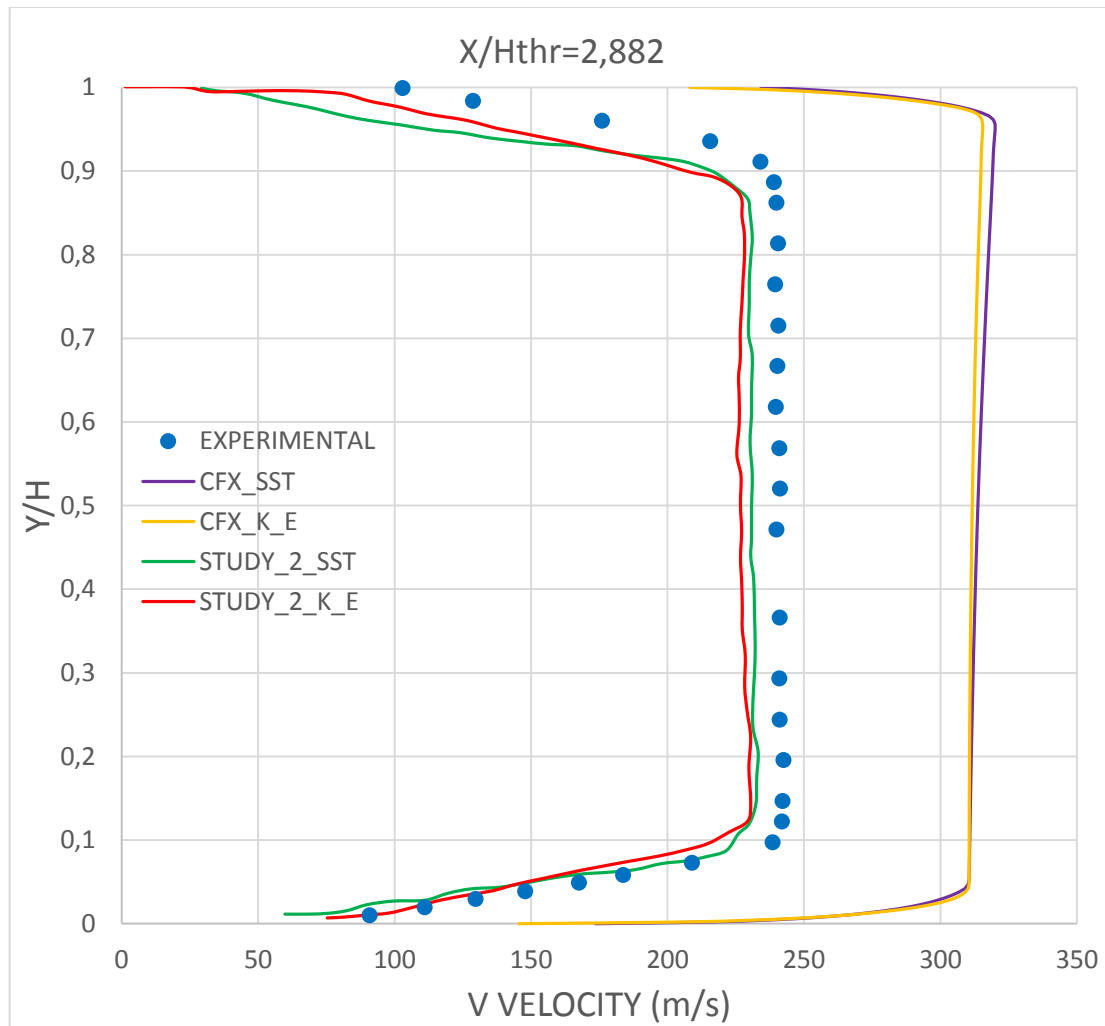
Εικόνα 4.1.1: Διάγραμμα μεταβολής της στατικής πίεσης για την επάνω επιφάνεια του ακροφυσίου.

Αντίστοιχα, βλέπουμε παρακάτω στην Εικόνα 4.1.2 το διάγραμμα της μεταβολής της στατικής πίεσης στην κάτω επιφάνεια. Με όμοιο τρόπο όπως παραπάνω, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της κάτω πλευράς.



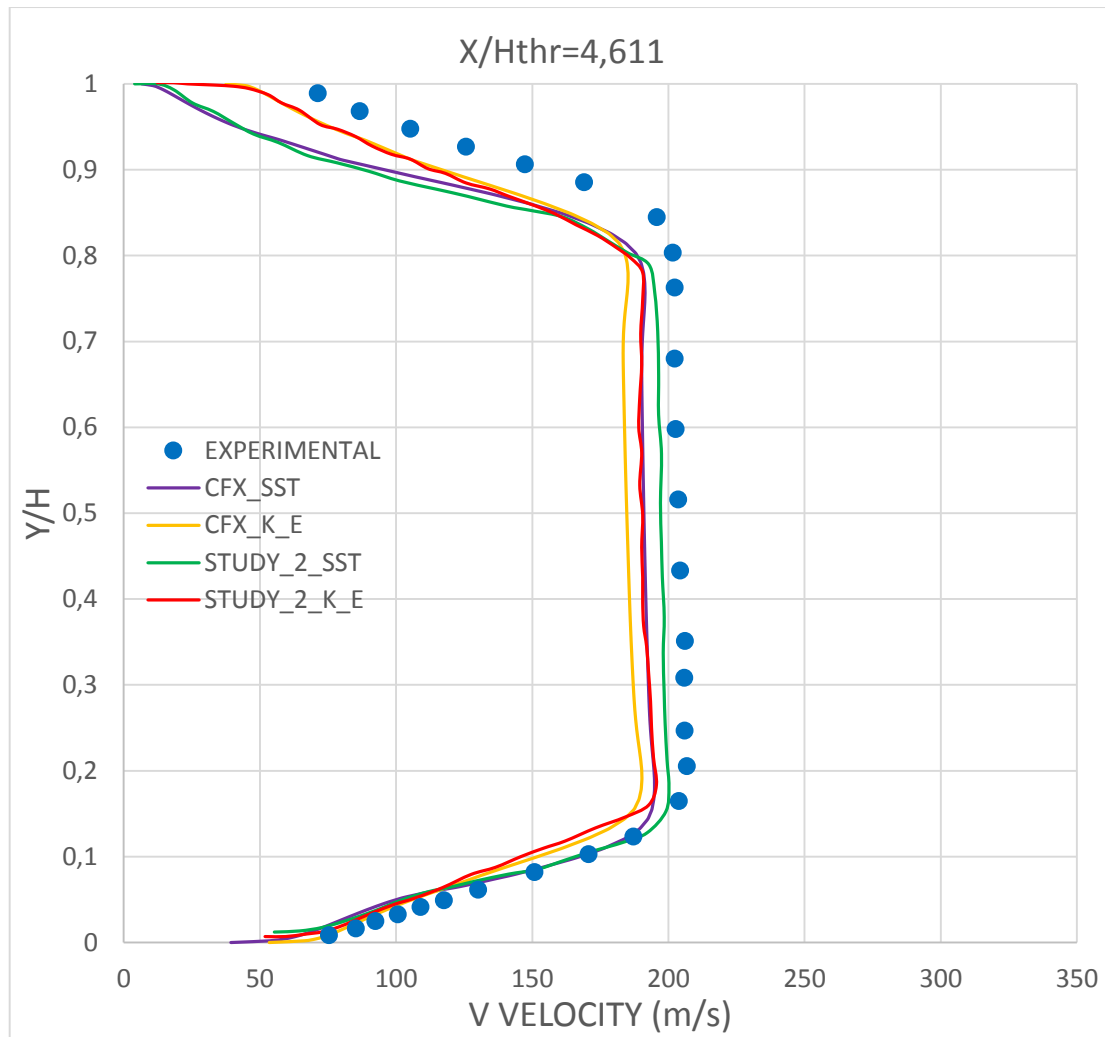
Εικόνα 4.1.2: Διάγραμμα μεταβολής της στατικής πίεσης για την κάτω επιφάνεια του ακροφυσίου.

Για να μπορούμε να έχουμε όμως μια καλύτερη άποψη για τα αποτελέσματα μας, συγκρίναμε και την αξονική ταχύτητα σε διάφορες θέσεις κατά μήκος του άξονα του ακροφυσίου. Με όμοιο τρόπο, παρουσιάζουμε τα πειραματικά αποτελέσματα με κουκκίδες [13], τα δικά μας με μοβ και κίτρινο χρώμα και της *study_2* [13] αυτή την φορά με κόκκινο και πράσινο χρώμα αντίστοιχα. Ο λόγος χρησιμοποίησης διαφορετικών εργασιών για σύγκριση είναι η διαθεσιμότητα των αποτελεσμάτων τους. Βλέπουμε πως υπάρχει διαφορά στην ταχύτητα μας κατά το ύψος στο σημείο της Εικόνας 4.1.3, κάτι το οποίο σημαίνει πως οι συνθήκες της προσομοίωσης δεν είναι ακριβώς οι ίδιες με αυτές του πειράματος. Βέβαια, τα υπολογιστικά αποτελέσματα άλλων ερευνητών που παρατίθενται στην Εικόνα 4.1.3 προέκυψαν με αλλαγές στις συνθήκες εισόδου ή εξόδου για να μπορούν να βρίσκονται κοντά στα πειραματικά αποτελέσματα. Οι συνθήκες αυτές όπως είδαμε μπορεί να είναι η πίεση και η θερμοκρασία. Κάτι τέτοιο δεν έγινε στην δική μας προσομοίωση.



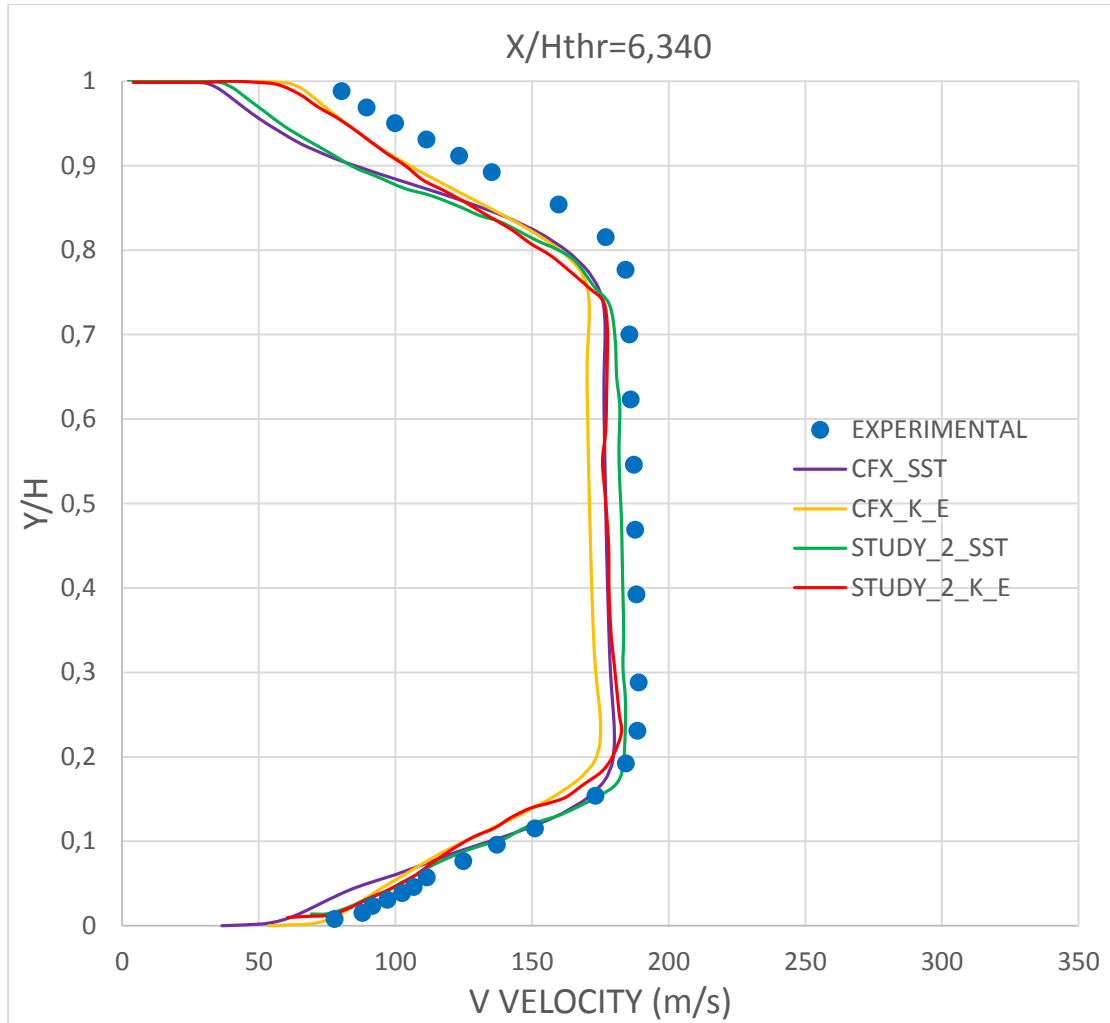
Εικόνα 4.1.3: Διάγραμμα ταχύτητας – ύψους κατά μήκος του ακροφυσίου στην θέση $X/H_{thr}=2.882$.

Η επόμενη θέση κατά μήκος είναι η $X/H_{thr}=4.611$ στην οποία παριστάνονται τα αποτελέσματα με τον ίδιο τρόπο, σχήμα και χρώμα, όπως και προηγουμένως. Παρατηρούμε λοιπόν ότι στην θέση αυτή είναι βελτιωμένα τα αποτελέσματα ως προς την ακρίβεια συγκρίνοντας με τα πειραματικά. Συγκρίνοντας τις δύο μεθόδους μοντελοποίησης της τύρβης, δηλαδή *SST* και *K-epsilon*, παρατηρείται πως στην συγκεκριμένη θέση η *SST* δίνει καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με την άλλη, με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα.

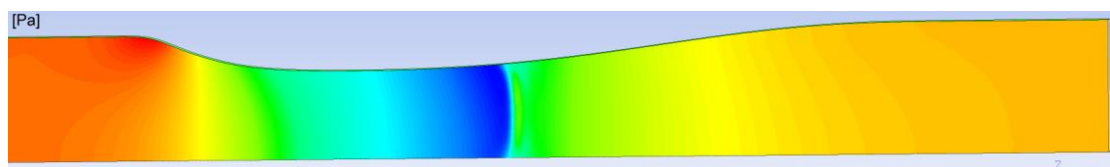


Εικόνα 4.1.4: Διάγραμμα ταχύτητας – ύψους κατά μήκος του ακροφυσίου στην θέση $X/H_{thr}=4.611$.

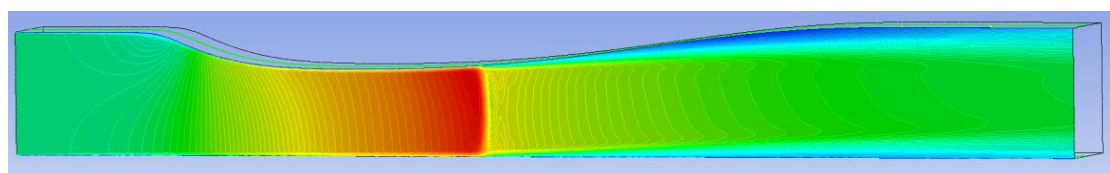
Τέλος η τελευταία Εικόνα 4.1.5 αναφέρεται στην θέση $X/H_{thr}=6.340$ όπου η σχηματική απεικόνιση είναι όμοια. Τα αποτελέσματα δείχνουν πως όπως και με τις συγκρίσεις που γίνονται με την *study_2* έτσι και της διπλωματικής δίνουν πολύ κοντινά αποτελέσματα σε σχέση με τα πειραματικά, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.1.5. Στην Εικόνα 4.1.6 παρουσιάζεται γραφικά η διανομή της στατικής πίεσης σε όλο το μήκος της γεωμετρίας, ενώ στην Εικόνα 4.1.7 η διανομή της ταχύτητας, με μορφή ισογραμμών, όπου είναι χαρακτηριστική η θέση του κύματος κρούσης.



Εικόνα 4.1.5: Διάγραμμα ταχύτητας – ύψους κατά μήκος του ακροφυσίου στην θέση $X/H_{thr}=6.340$.



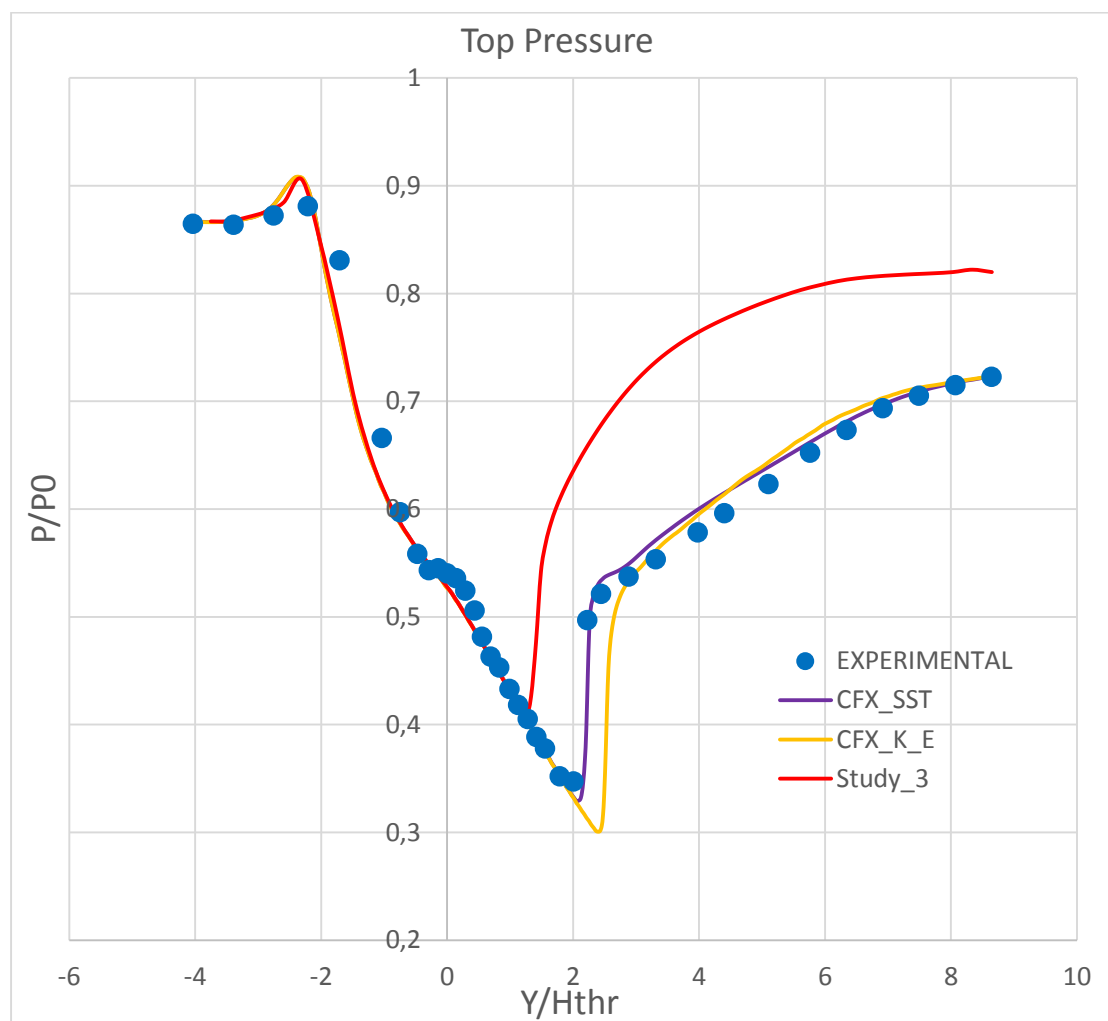
Εικόνα 4.1.6: Γραφική αναπαράσταση της μεταβολής της στατικής πίεσης στο επίπεδο συμμετρίας.



Εικόνα 4.1.7: Γραφική αναπαράσταση της μεταβολής ταχύτητας στο επίπεδο συμμετρίας.

4.2 Strong Shock Outflow

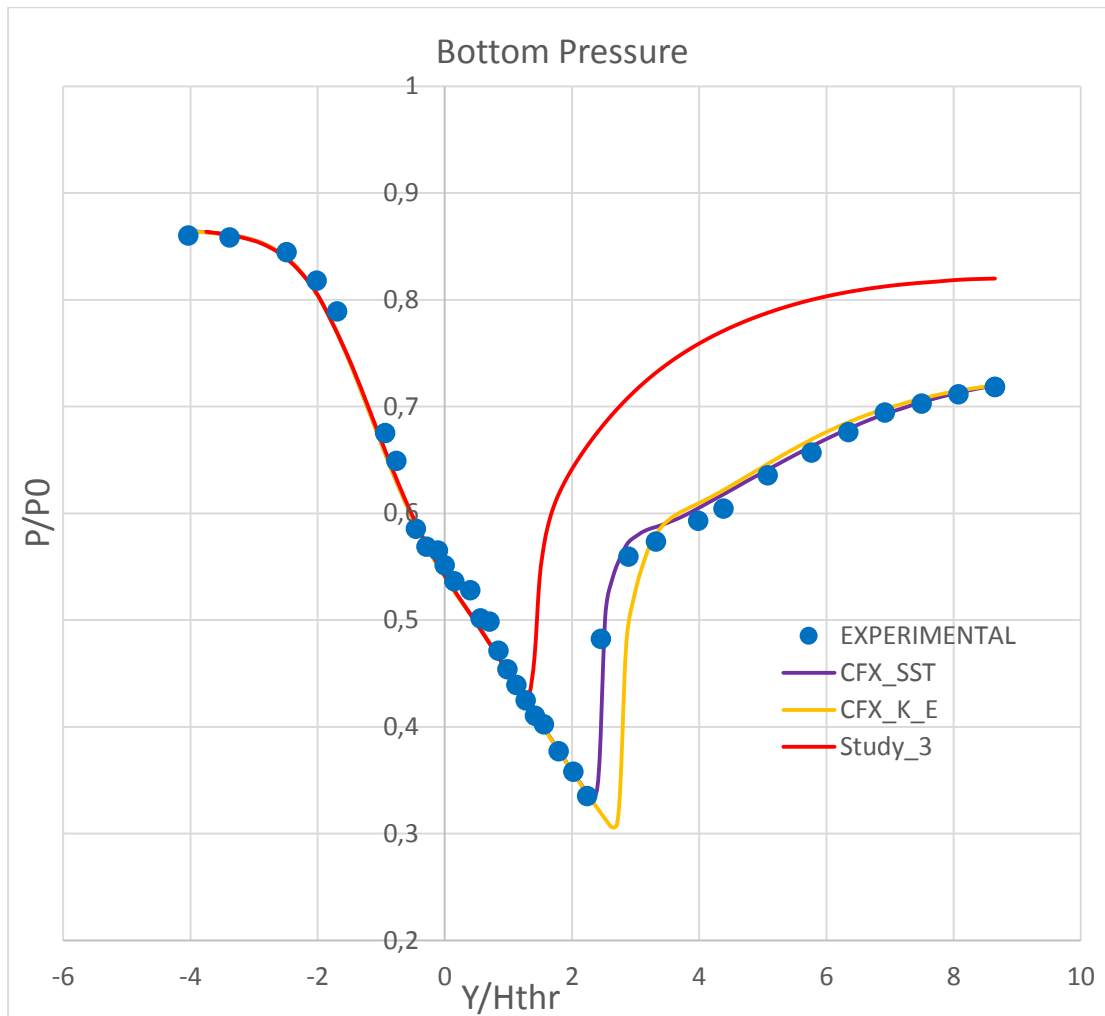
Το παρακάτω διάγραμμα στην Εικόνα 4.2,1 αναφέρεται στη διανομή της στατικής πίεσης στην πάνω επιφάνεια του ακροφυσίου, αδιαστατοποιημένη με την εισερχόμενη ολική πίεση. Η αξονική θέση είναι αδιαστατοποιημένη με το ύψος του λαιμού. Παρουσιάζεται σύγκριση των αποτελεσμάτων του *CFX* με τις γραμμές σε χρώμα μοβ και κίτρινο, που περιγράφουν τις μεθόδους μοντελοποίησης της τύρβης *SST* και *K-epsilon* αντίστοιχα, σε σχέση με τα πειραματικά (*experimental*) αποτελέσματα, που όπως φαίνεται απεικονίζονται με μπλε κουκίδες, καθώς και με τα αποτελέσματα της *study_3* [13] που φέρουν το διακριτικό κόκκινο χρώμα.



Εικόνα 4.2.1: Διάγραμμα μεταβολής της στατικής πίεσης για την επάνω επιφάνεια του ακροφυσίου.

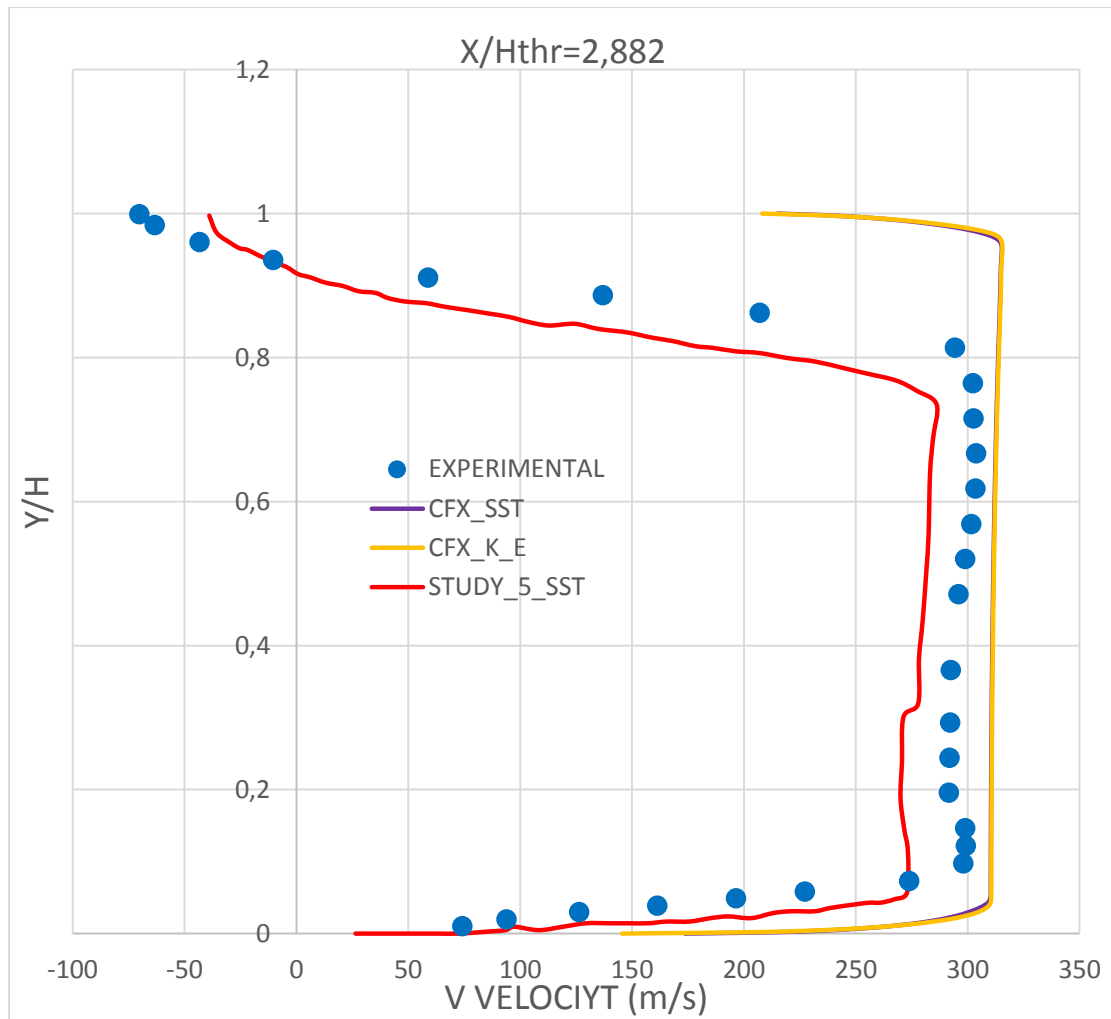
Αντίστοιχα, βλέπουμε στη συνέχεια στην Εικόνα 4.2.2 το διάγραμμα της κάτω επιφάνειας εκφραζόμενη ακριβώς με τα ίδια στοιχεία. Φαίνεται ότι το μοντέλο

τύρβης SST οδηγεί σε καλύτερη πρόβλεψη τη διανομή της στατικής πίεσης στις δύο επιφάνειες.



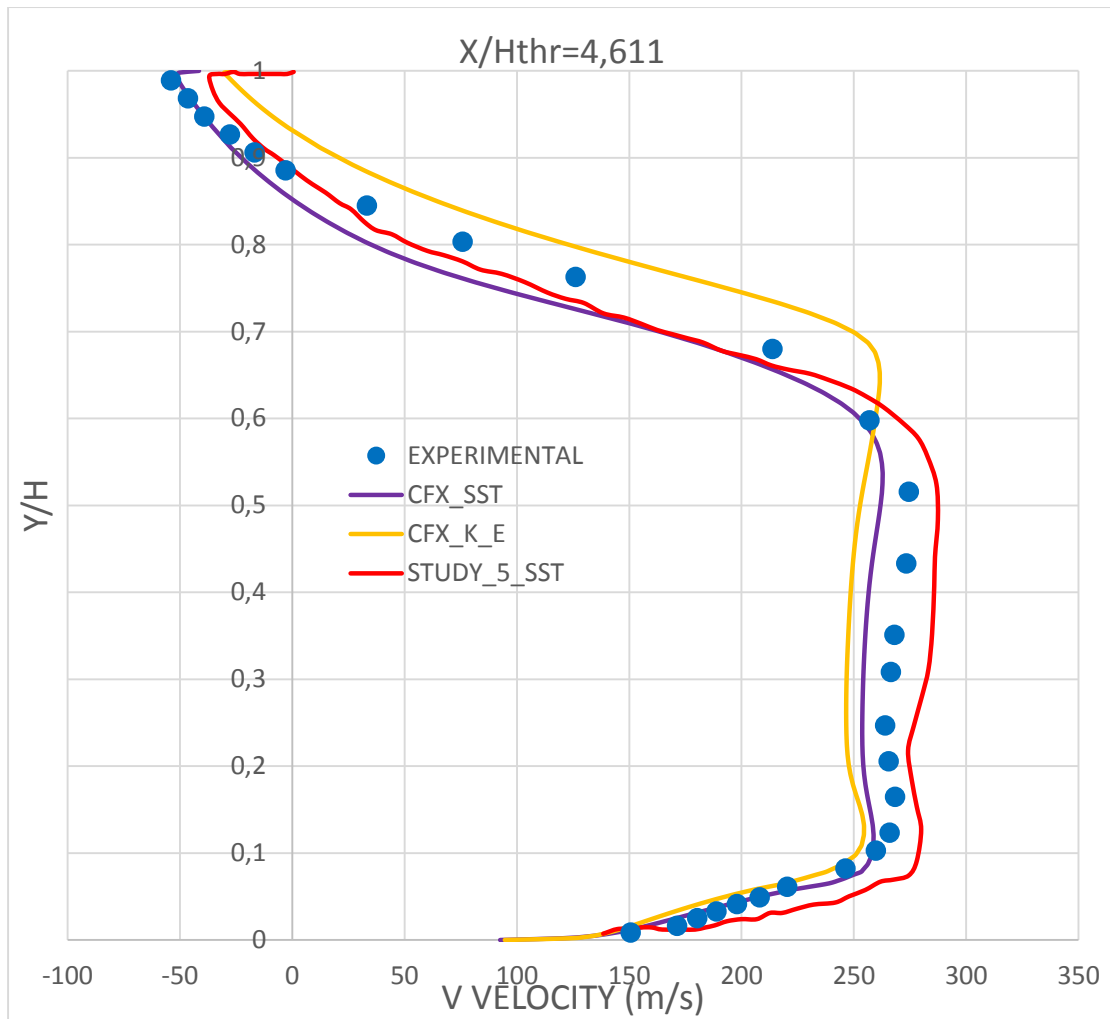
Εικόνα 4.2.2: Διάγραμμα διανομής της στατικής πίεσης για την κάτω επιφάνεια του ακροφυσίου.

Όπως και προηγουμένως, συγκρίνουμε επίσης τα προφίλ της αξονικής ταχύτητας σε διάφορες αξονικές θέσεις κατά μήκος του ακροφυσίου. Στην πρώτη περίπτωση έχουμε τη θέση $X/H_{thr} = 2.882$. Παρατηρούμε πως υπάρχει διαφορά στην ταχύτητα μας κατά ύψος στο σημείο αυτό. Υπενθυμίζεται πως οι ερευνητές των οποίων τους υπολογισμούς παραθέτουμε για σύγκριση, αλλάζανε τις συνθήκες εισόδου ή εξόδου (σε σχέση με τις πειραματικές) για να μπορούν να βρίσκονται κοντά στα πειραματικά αποτελέσματα. Αυτό δεν έγινε στην παρούσα εργασία.



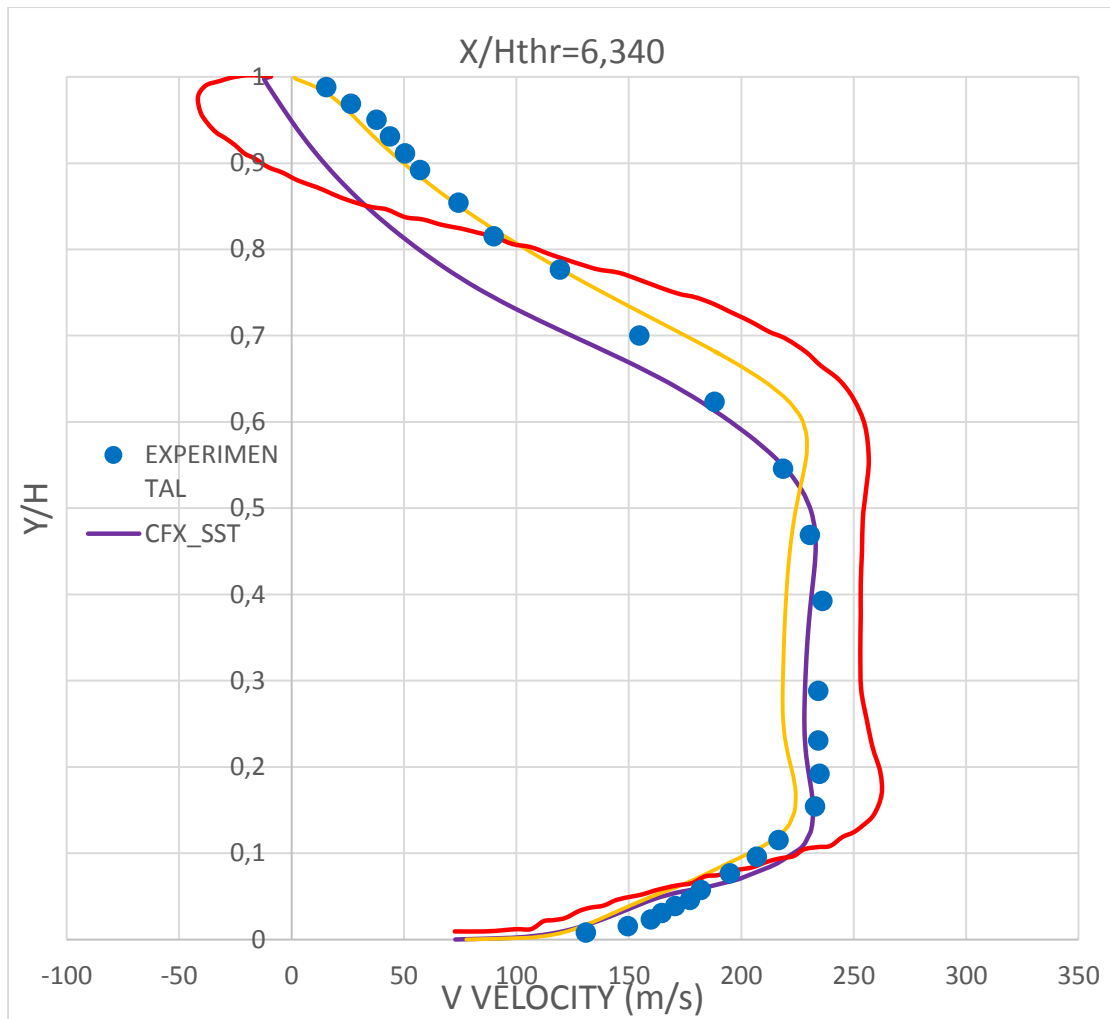
Εικόνα 4.2.3: Διάγραμμα ταχύτητας – ύψους κατά μήκος του ακροφυσίου στη θέση $X/H_{thr}=2.882$.

Η επόμενη θέση κατά μήκος είναι η $X/H_{thr}=4.611$ στην οποία παριστάνονται τα αποτελέσματα με τον ίδιο τρόπο, σχήμα και χρώμα, όπως και προηγουμένως στην Εικόνα 4.2.4. Παρατηρούμε ότι στην θέση αυτή είναι βελτιωμένα τα αποτελέσματα ως προς την ακρίβεια συγκρίνοντας με τα πειραματικά. Συγκρίνοντας τις δύο μεθόδους, δηλαδή *SST* και *K-epsilon*, παρατηρείται πως στην συγκεκριμένη θέση η *SST* δίνει καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με την άλλη, σε σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα.

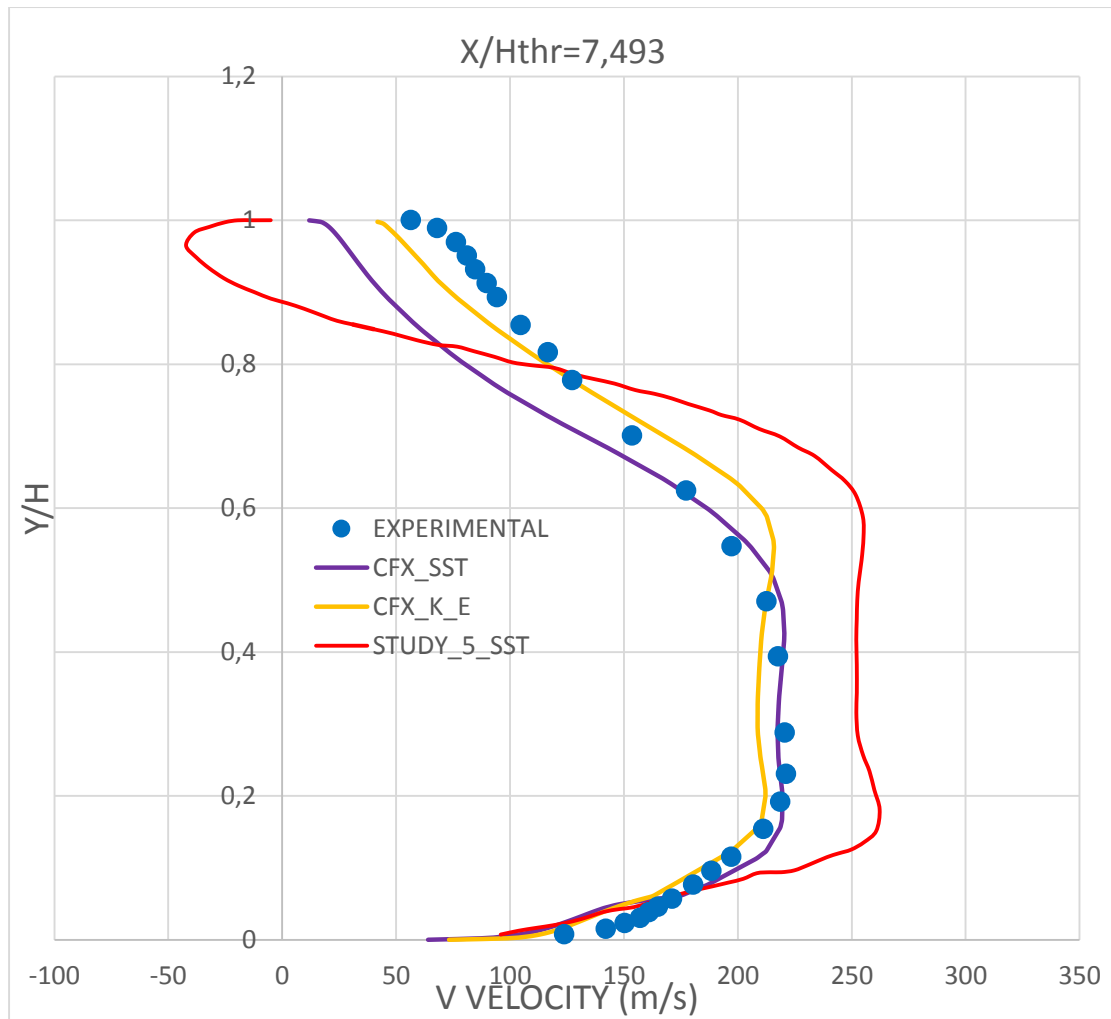


Εικόνα 4.2.4: Διάγραμμα ταχύτητας - ύψους κατά μήκος του ακροφυσίου στην θέση $X/H_{thr}=4.611$.

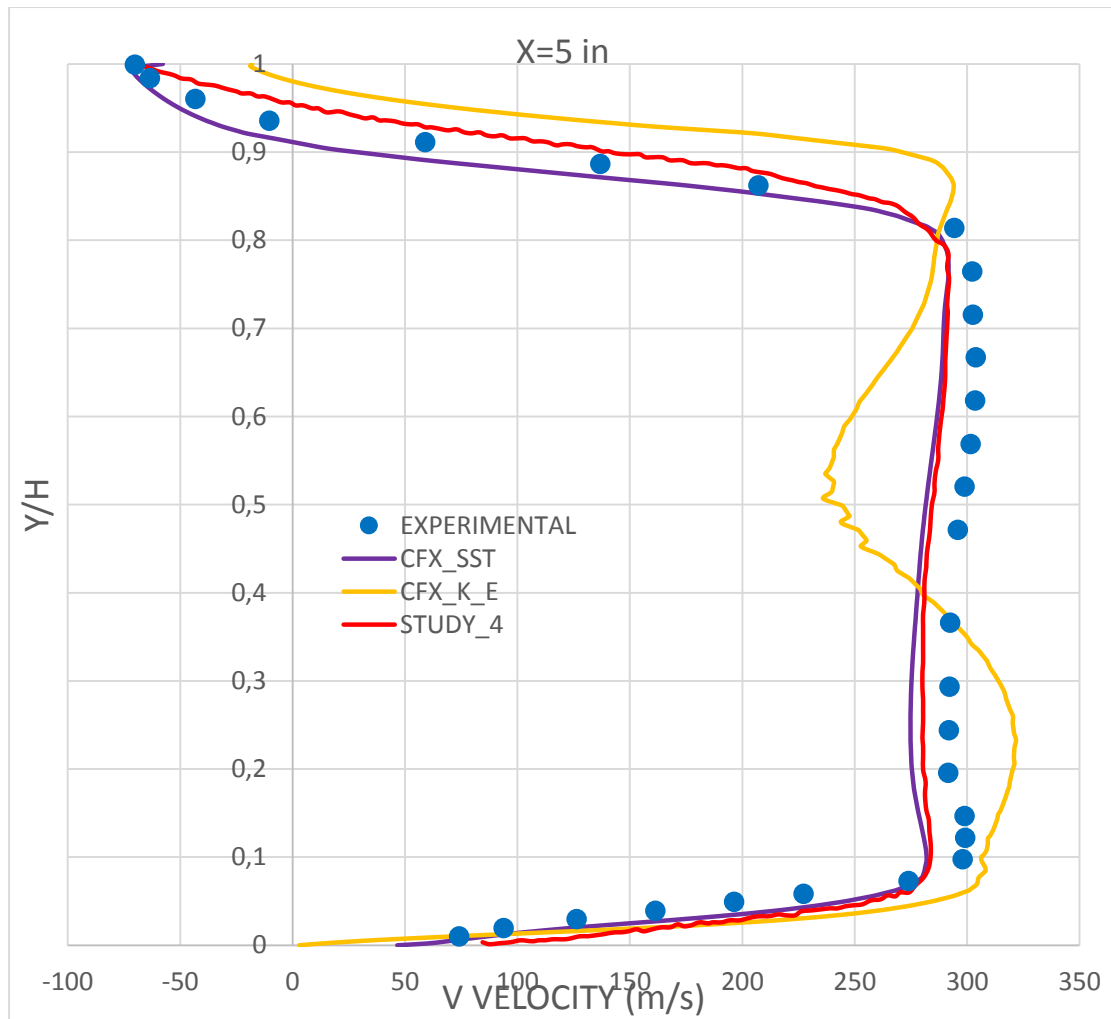
Τέλος η Εικόνα 4.2.5 αναφέρεται στην θέση κατά μήκος $X/H_{thr}=6.340$ όπου η σχηματική απεικόνιση είναι όμοια, όπως προηγουμένως. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται μόνο με τα πειραματικά μιας και δεν υπήρχαν αποτελέσματα από άλλες προσομοιώσεις σε αυτή τη θέση. Με τον ίδιο τρόπο ακριβώς παρουσιάζονται στη συνέχεια οι συγκρίσεις των αποτελεσμάτων στις θέσεις $X/H_{thr}=7.493$, $X=5in$, $X=8in$, $X=11in$, $X=13in$. Στην εικόνα 4.2.11 έχουμε γραφική αναπαράσταση της διανομής της στατικής πίεσης κατά μήκος της γεωμετρίας του ακροφυσίου, όπως και της ταχύτητας στην Εικόνα 4.3.12.



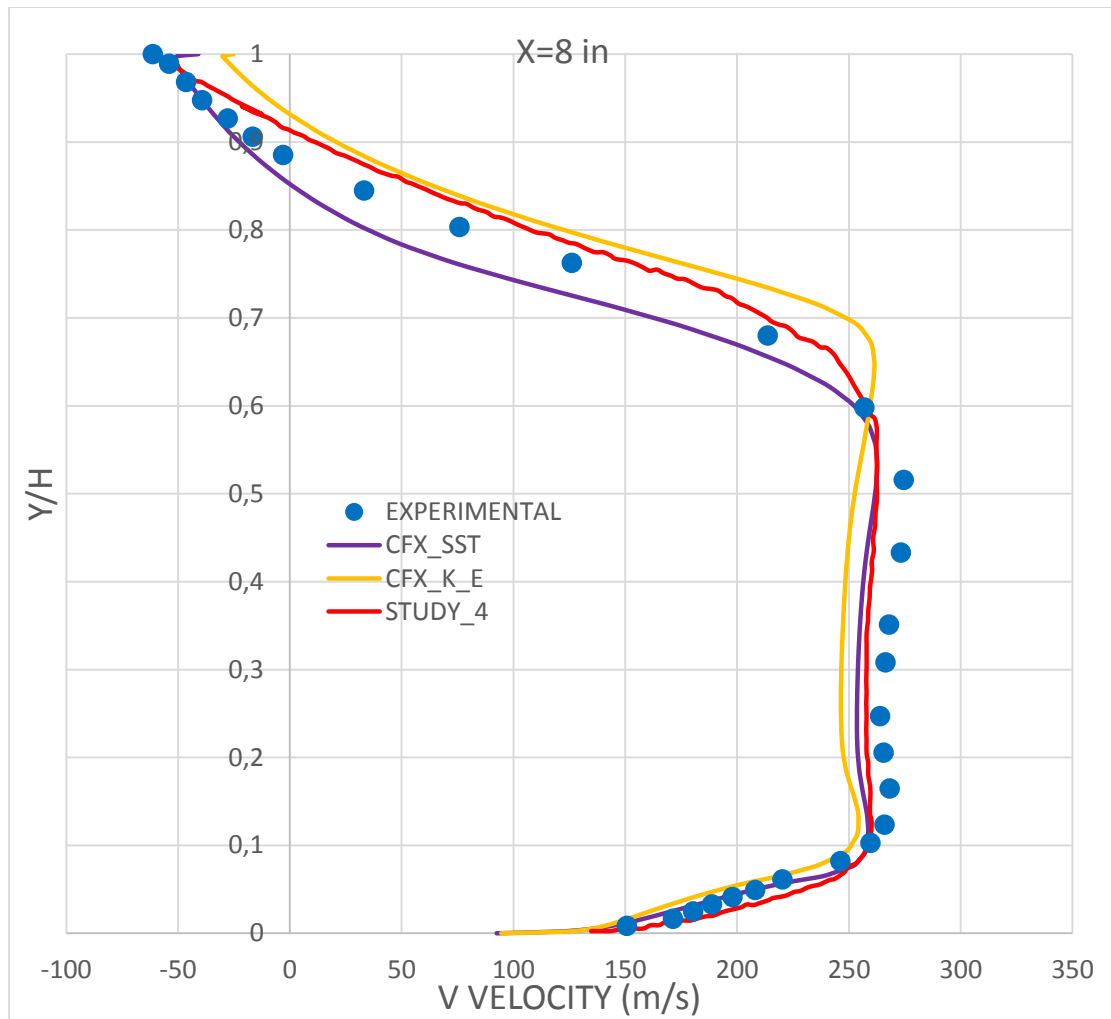
Εικόνα 4.2.5: Διάγραμμα ταχύτητας - ύψους κατά μήκος του ακροφυσίου στην θέση $X/H_{thr}=6.340$.



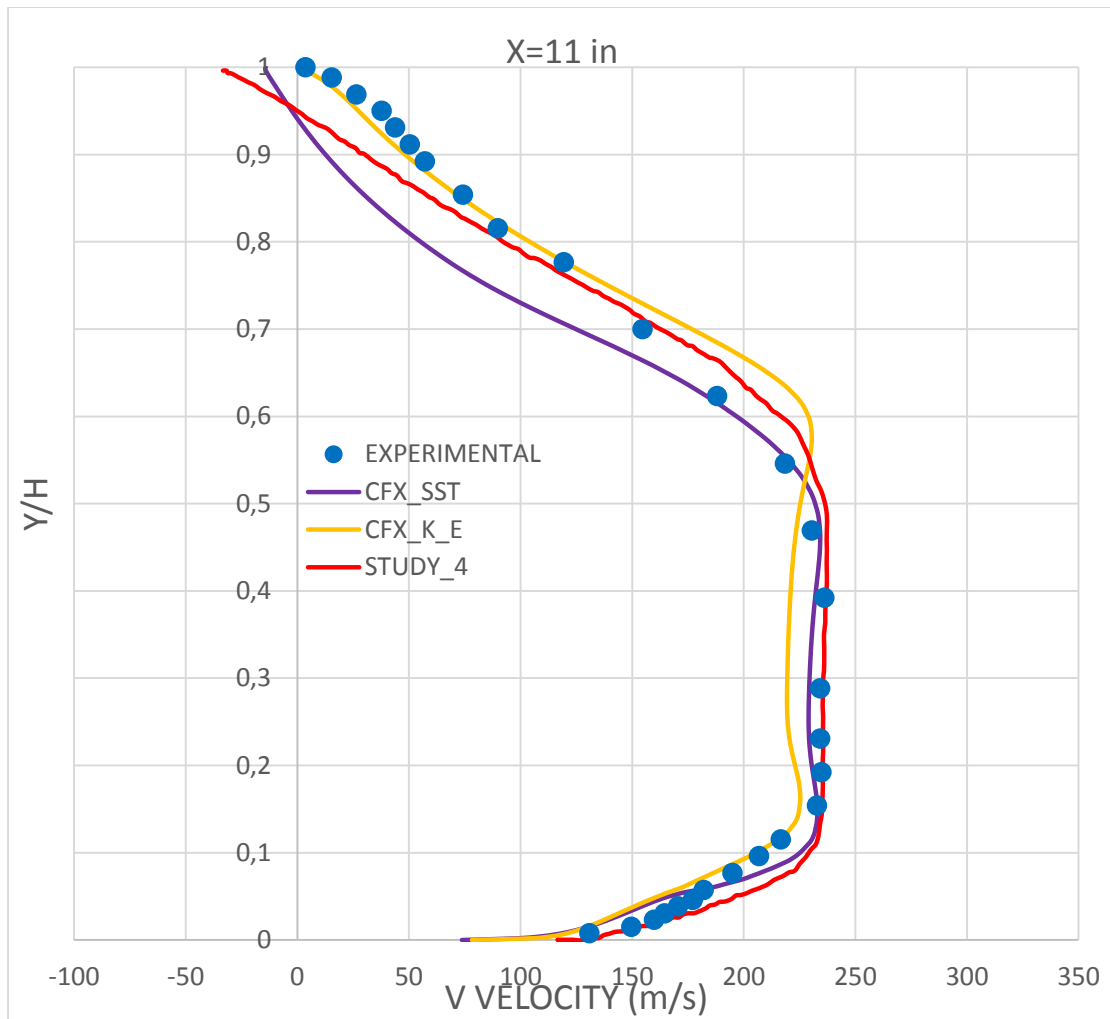
Εικόνα 4.2.6: Διάγραμμα ταχύτητας - ύψους κατά μήκος του ακροφυσίου στην θέση $X/H_{thr}=7.493$.



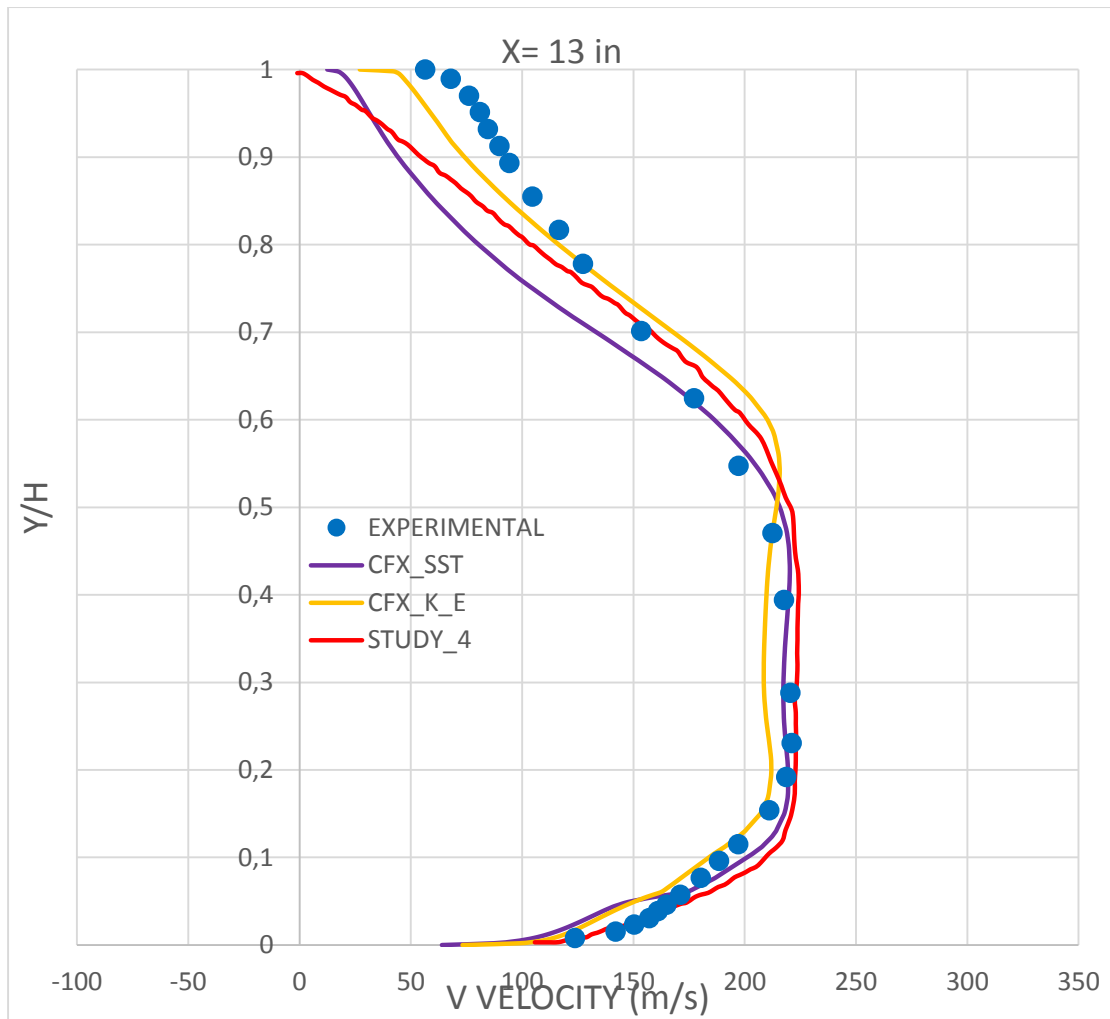
Εικόνα 4.2.7: Διάγραμμα ταχύτητας - ύψους κατά μήκος του ακροφυσίου στην θέση $X=5in$.



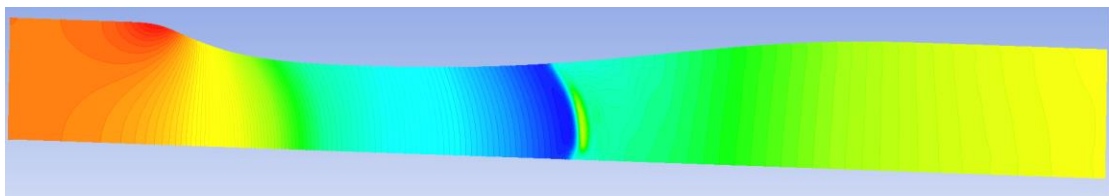
Εικόνα 4.2.8: Διάγραμμα ταχύτητας - ύψους κατά μήκος του ακροφυσίου στην θέση $X=8in$.



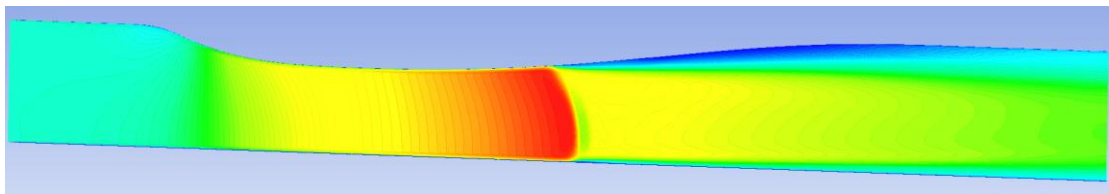
Εικόνα 4.2.9: Διάγραμμα ταχύτητας - ύψους κατά μήκος του ακροφυσίου στην θέση $X=11in$.



Εικόνα 4.2.10: Διάγραμμα ταχύτητας – ύψους κατά μήκος του ακροφυσίου στην θέση $X=13\text{in}$.



Εικόνα 4.3.11: Γραφική αναπαράσταση της στατικής πίεσης στο επίπεδο συμμετρίας.



Εικόνα 4.3.12: Γραφική αναπαράσταση της ταχύτητας στο επίπεδο συμμετρίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε η χρήση δύο διαφορετικών λογισμικών, του σχεδιαστικού λογισμικού *Catia* και του λογισμικού Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής *Ansys CFX*, με σκοπό την προσομοίωση της συμπιεστής ροής στο εσωτερικό ενός συγκλίνοντος-αποκλίνοντος ακροφυσίου, στο οποίο σχηματίζεται κύμα κρούσης.

Σε ότι αφορά το σχεδιαστικό πρόγραμμα *Catia* οι εντυπώσεις είναι θετικές, μιας και το συγκεκριμένο λογισμικό δίνει μια πολύ μεγάλη γκάμα εργαλείων, ενώ οι δυνατότητές του το καθιστούν από τα πιο χρήσιμα και διαδεδομένα προγράμματα στο χώρο του CAD (Computer Aided Design). Η ευκολία στην χρήση καθώς και τα αναρίθμητα *videos* που είναι διαθέσιμα στο διαδίκτυο δημιούργησαν μια εμπειρία θετική για την εκμάθηση και τη χρήση του. Η απλότητα στην εισαγωγή δεδομένων με ένα *excel* φύλλο καθώς και τα διαθέσιμα *menu* εργαλείων (που είναι εύκολα στη χρήση) δημιούργησαν ένα αποτέλεσμα με πολύ μικρή πιθανότητα λάθους.

Επιπλέον, το λογισμικό *Ansys CFX* αποτέλεσε μια καλή αφορμή για την κατανόηση βασικών χαρακτηριστικών της προσομοίωσης της ροής με τη χρήση εργαλείων Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής. Επίσης, η συγκεκριμένη προσομοίωση ήταν μία πρώτης τάξεως ευκαιρία για μια εισαγωγή στα φαινόμενα της συμπιεστής ροής αερίου και ειδικά στη δημιουργία κυμάτων κρούσης. Έγινε αντιληπτό πως η θέση καθώς και η ένταση του κύματος επηρεάζεται από την πίεση εξόδου του ακροφυσίου.

Η εργασία αποδείχθηκε ιδιαίτερα χρήσιμη εμπειρία για τη εισαγωγή επίσης στη διαδικασία δημιουργίας υβριδικού υπολογιστικού πλέγματος, για το πως πρέπει να μεταβάλλεται η πυκνωση του ανάλογα με την ακρίβεια που επιθυμείται (σε αντιδιαστολή όμως με το υπολογιστικό κόστος, που συνεπάγεται η μεγάλη πυκνωσή του).

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν στις 4 περιπτώσεις που εξετάστηκαν έδειξαν πως ήταν πολύ κοντά με τα πειραματικά, κάτι που επιβεβαίωσε την ορθότητα του στησίματος της προσομοίωσης. Πρέπει να σημειωθεί ότι η χρήση του μοντέλου τύρβης SST έδωσε γενικά καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με το k-ε, κάτι που ήταν αναμενόμενο με βάση το γεγονός ότι το πρώτο είναι πιο εξελιγμένο και σύγχρονο. Για την προσομοίωση δεν έγινε έλεγχος ανεξαρτησίας πλέγματος, μιας και το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν ιδιαίτερα πυκνό.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

1. Τα στοιχεία που εισήχθησαν για την σχεδίαση του ακροφυσίου.

1.1 Στοιχεία της άνω πλευράς

X	Y	Z
0	-0,17775	0,062099
0	-0,16505	0,062099
0	-0,15236	0,062099
0	-0,13966	0,062099
0	-0,12697	0,062099
0	-0,11427	0,062099
0	-0,10157	0,06085
0	-0,08891	0,056349
0	-0,0764	0,051798
0	-0,06421	0,048501
0	-0,05256	0,046435
0	-0,04165	0,045241
0	-0,03164	0,04459
0	-0,0226	0,044252
0	-0,01453	0,044088
0	-0,00736	0,044018
0	-0,001	0,043998
0	0,004672	0,044006
0	0,009784	0,044034
0	0,014451	0,044079
0	0,018777	0,044137
0	0,022846	0,044207
0	0,026728	0,044287
0	0,030474	0,044379
0	0,034125	0,044481
0	0,03771	0,044595
0	0,041249	0,04472
0	0,044758	0,044857
0	0,048246	0,045007
0	0,051721	0,045169
0	0,055187	0,045344
0	0,058648	0,045532
0	0,062105	0,045733
0	0,065559	0,045948
0	0,069013	0,046176
0	0,072465	0,046418

0	0,075917	0,046674
0	0,079368	0,046943
0	0,082819	0,047226
0	0,08627	0,047522
0	0,089721	0,047831
0	0,093172	0,048154
0	0,096623	0,048489
0	0,100073	0,048837
0	0,103524	0,049197
0	0,106975	0,049568
0	0,110426	0,049951
0	0,113877	0,050345
0	0,117328	0,050741
0	0,120779	0,051162
0	0,124229	0,051584
0	0,12768	0,052014
0	0,131131	0,052452
0	0,134581	0,052897
0	0,138032	0,053347
0	0,141483	0,053803
0	0,144934	0,054262
0	0,148385	0,054725
0	0,151875	0,055195
0	0,155525	0,055688
0	0,159533	0,05623
0	0,164138	0,05685
0	0,169564	0,057575
0	0,175975	0,058419
0	0,183453	0,059377
0	0,191998	0,060424
0	0,201544	0,061515
0	0,211978	0,062595
0	0,223169	0,063598
0	0,234978	0,064463
0	0,247277	0,065142
0	0,259952	0,06561
0	0,27291	0,065874
0	0,286075	0,065977
0	0,299388	0,065996
0	0,312807	0,065997
0	0,326298	0,065997
0	0,339839	0,065997
0	0,35341	0,065997
0	0,366995	0,065997

0	0,380582	0,065997
---	----------	----------

1.2 Τα στοιχεία της κάτω πλευράς

X	Y	Z
0	-0,17775	0
0	-0,16505	0
0	-0,15236	0
0	-0,13966	0
0	-0,12697	0
0	-0,11427	0
0	-0,10157	0
0	-0,08891	0
0	-0,0764	0
0	-0,06421	0
0	-0,05256	0
0	-0,04165	0
0	-0,03164	0
0	-0,0226	0
0	-0,01453	0
0	-0,00736	0
0	-0,001	0
0	0,004672	0
0	0,009784	0
0	0,014451	0
0	0,018777	0
0	0,022846	0
0	0,026728	0
0	0,030474	0
0	0,034125	0
0	0,03771	0
0	0,041249	0
0	0,044758	0
0	0,048246	0
0	0,051721	0
0	0,055187	0
0	0,058648	0
0	0,062105	0
0	0,065559	0
0	0,069013	0
0	0,072465	0
0	0,075917	0
0	0,079368	0

0	0,082819	0
0	0,08627	0
0	0,089721	0
0	0,093172	0
0	0,096623	0
0	0,100073	0
0	0,103524	0
0	0,106975	0
0	0,110426	0
0	0,113877	0
0	0,117328	0
0	0,120779	0
0	0,124229	0
0	0,12768	0
0	0,131131	0
0	0,134581	0
0	0,138032	0
0	0,141483	0
0	0,144934	0
0	0,148385	0
0	0,151875	0
0	0,155525	0
0	0,159533	0
0	0,164138	0
0	0,169564	0
0	0,175975	0
0	0,183453	0
0	0,191998	0
0	0,201544	0
0	0,211978	0
0	0,223169	0
0	0,234978	0
0	0,247277	0
0	0,259952	0
0	0,27291	0
0	0,286075	0
0	0,299388	0
0	0,312807	0
0	0,326298	0
0	0,339839	0
0	0,35341	0
0	0,366995	0
0	0,380582	0

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Αδαμούδης Λάζαρος (2005), Επίλυση των εξισώσεων Euler σε τρεις διαστάσεις με χρήση μη δομημένου πλέγματος και εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων όγκων, Διπλωματική Εργασία. Χανιά.
- [2] Λυγιδάκης Γεώργιος (2009), Ανάπτυξη μεθοδολογίας αυτόματης πύκνωσης μη δομημένου πλέγματος κατά την αριθμητική επίλυση εξισώσεων Euler στις τρεις διαστάσεις, Διπλωματική Εργασία. Χανιά.
- [3] Μπιλάλης Ν., & Μαραβελάκης Ε. (2009), Συστήματα CAD/CAM και τρισδιάστατη μοντελοποίηση, Εκδόσεις Κριτική.
- [4] Νικολός Ιωάννης (2007), Σημειώσεις Μαθήματος Μετάδοσης Θερμότητας, Χανιά.
- [5] Νικολός Ιωάννης (2007), Σημειώσεις Ρευστομηχανικής, Χανιά, 2007.
- [6] Παπαϊωάννου Άγγελος, Μηχανική Των Ρευστών, Β' Έκδοση Τόμος 1.
- [7] Cengel, Y.A., Boles, M.A., Θερμοδυναμική Για Μηχανικούς, 7^η Έκδοση.
- [8] Dassault Systemes, & IBM, CATIA V5 User Manual.
- [9] Lygidakis, G. N. (2015), On the Numerical Solution of Compressible Fluid Flow and Radiative Heat Transfer Problems. PhD Thesis. Chania.
- [10] Malalasekera W., & Versteeg H. (2007), An introduction to computational fluid dynamics, Pearson Ed.
- [11] (<http://www.3ds.com/products-services/catia/capabilities/design/>)
- [12] (<http://www.ansys.com/About-ANSYS>)
- [13] (<http://www.grc.nasa.gov/WWW/wind/valid/transdif/transdif.html>)