



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Τομέας Ρευστών
Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών

Παραμετρική μελέτη βιομηχανικού φυγοκεντρικού φυσητήρα με
χρήση λογισμικού υπολογιστικής ρευστοδυναμικής

Διπλωματική Εργασία

Σοικιανίδης Κωνσταντίνος

Επιβλέπων Καθηγητής: Νικόλαος Αρετάκης

Αθήνα, Ιούλιος 2024



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Τομέας Ρευστών
Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών

Παραμετρική μελέτη βιομηχανικού φυγοκεντρικού φουσητήρα με χρήση λογισμικού υπολογιστικής ρευστοδυναμικής

Διπλωματική Εργασία

Σοικιανίδης Κωνσταντίνος

Επιβλέπων Καθηγητής: Νικόλαος Αρετάκης

Αθήνα, 2023

Περίληψη

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η μελέτη με στόχο τη βελτιστοποίηση ενός βιομηχανικού φυγοκεντρικού φουσητήρα. Ο εν λόγω φουσητήρας βρίσκεται στο Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών του ΕΜΠ και υπάρχουν τα κατασκευαστικά του σχέδια, καθώς και πειραματικά δεδομένα. Τα σχέδια αυτά αποτέλεσαν τη βάση για τον σχεδιασμό της μηχανής στο λογισμικό Solidworks. Στη συνέχεια, ύστερα από μελέτη για την επιλογή του πλέον κατάλληλου λογισμικού υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD) για την προσομοίωση της συμπεριφοράς της μηχανής επιλέχθηκε το Flow Simulations του Solidworks. Με τη χρήση του αρχικά επιβεβαιώθηκε η ακρίβεια της υπολογιστικής προσομοίωσης, συγκρίνοντάς την με τα πειραματικά δεδομένα και ύστερα ακολούθησαν παραμετρικές μελέτες για διάφορα σημεία λειτουργίας της μηχανής με διαφορετικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά της περωτής. Με τα αποτελέσματα των παραμετρικών αυτών μελετών διαπιστώνεται πως με χρήση κατάλληλου λογισμικού υπολογιστικής ρευστοδυναμικής, σχετικά χαμηλού υπολογιστικού κόστους, μπορεί να μελετηθεί η μηχανή και να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για τις επιδόσεις της και τη δυνατότητα βελτιστοποίησής της.

Ακρωνύμια

ΕΜΠ Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

ΕΘΣ Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών

CFD Computational Fluid Dynamics

CAD Computer-Aided Design

HVAC Heating, Ventilation and Air Conditioning

LTT Laboratory of Thermal Turbomachines

Κεφάλαιο 1

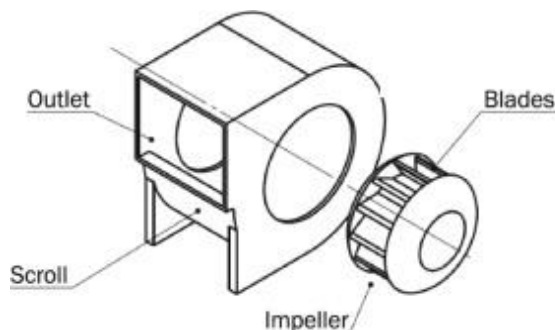
Εισαγωγή

1.1 Εισαγωγή στους φυγοκεντρικούς φυσητήρες

Οι φυγοκεντρικοί φυσητήρες, ή αλλιώς ακτινικοί φυσητήρες, αποτελούν στροβιλομηχανές απλής σχεδίασης. Χρησιμοποιούνται σε ένα ευρύ φάσμα βιομηχανικών εφαρμογών και σε συστήματα θέρμανσης για την δημιουργία ελεγχόμενης ροής αέρα ή άλλου αερίου. Σχεδιάζονται ειδικά για να χειρίζονται μεγάλους όγκους αέρα, καθιστώντας τους κατάλληλους για βιομηχανικά περιβάλλοντα.

Τα βασικότερα μέρη των ανεμιστήρων αυτών είναι η πτερωτή και το κέλυφος:

- Πτερωτή: είναι το κύριο εξάρτημα που είναι υπεύθυνο για τη δημιουργία ροής αέρα. Αποτελείται από μια σειρά από πτερόνια διατεταγμένα ακτινικά. Όταν η πτερωτή περιστρέφεται με τη βοήθεια του ηλεκτροκινητήρα, τραβάει αέρα από το κέντρο και τον εκτοξεύει προς τα έξω, αυξάνοντας την ταχύτητα και την πίεση της ροής του αέρα.
- Κέλυφος: είναι το σπειροειδές περίβλημα που περιβάλλει την πτερωτή. Είναι σχεδιασμένο να κατευθύνει και να ελέγχει τη ροή του αέρα. Οι βιομηχανικοί φυγοκεντρικοί φυσητήρες έχουν συχνά στιβαρά και βαρέως τύπου περιβλήματα για να αντέχουν σε σκληρές συνθήκες λειτουργίας.



Σχήμα 1.1: Δομή φυγοκεντρικού φυσητήρα.

Καθώς η περρωτή περιστρέφεται, δημιουργεί μια ζώνη χαμηλής πίεσης στο κέντρο, η οποία τραβάει αέρα στον ανεμιστήρα μέσω της εισόδου. Στη συνέχεια, ο αέρας επιταχύνεται και συμπιέζεται καθώς περνά μέσα από τα πτερύγια της περρωτής. Τέλος, ο πεπιεσμένος αέρας κατευθύνεται μέσω της εξόδου με υψηλή ταχύτητα, επιτρέποντας την αποτελεσματική κίνηση του αέρα μέσα στα βιομηχανικά συστήματα.

Οι βιομηχανικοί φυγοκεντρικοί φυσητήρες βρίσκουν εκτεταμένη χρήση σε διάφορες βιομηχανίες, όπως:

- **Συστήματα HVAC:** Χρησιμοποιούνται σε μεγάλης κλίμακας συστήματα θέρμανσης, εξαερισμού και κλιματισμού (HVAC) για εμπορικά κτίρια, εργοστάσια και αποθήκες, όπου απαιτούνται υψηλοί όγκοι ροής αέρα.
- **Βιομηχανικός αερισμός:** Αυτοί οι φυσητήρες χρησιμοποιούνται για εξαερισμό σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις, βοηθώντας στην απομάκρυνση των ρύπων, των αναθυμιάσεων και των αιωρούμενων σωματιδίων από το περιβάλλον εργασίας.
- **Απομάκρυνση υλικών:** Οι βιομηχανικοί φυγοκεντρικοί φυσητήρες χρησιμοποιούνται σε συστήματα απομάκρυνσης υλικών, όπως η πνευματική μεταφορά, όπου διευκολύνουν την κίνηση υλικών μέσω σωλήνων ή αγωγών.
- **Βιομηχανικές διεργασίες:** Είναι αναπόσπαστο μέρος σε διάφορες βιομηχανικές διεργασίες, συμπεριλαμβανομένης της ξήρανσης, της ψύξης, της παροχής αέρα καύσης και του φιλτραρίσματος αέρα.

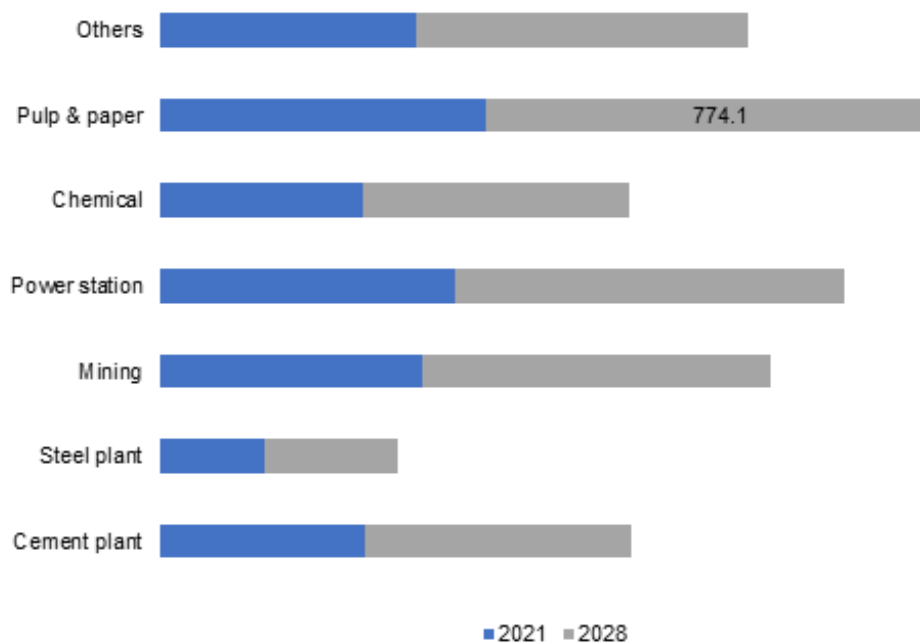
Οι βιομηχανικοί φυγοκεντρικοί φυσητήρες παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα, όπως:

- **Υψηλή ροή αέρα:** Μπορούν να χειριστούν μεγάλους όγκους αέρα, καθιστώντας τα κατάλληλα για εφαρμογές βιομηχανικής κλίμακας που απαιτούν σημαντική κίνηση αέρα.
- **Δυνατότητα αυξημένης πίεσης:** Οι φυγοκεντρικοί φυσητήρες έχουν σχεδιαστεί για να λειτουργούν σε υψηλότερες πιέσεις, επιτρέποντας την αποτελεσματική κατανομή του αέρα ακόμη και σε συστήματα με υψηλή αντίσταση ή μεγάλους αγωγούς.
- **Στιβαρή κατασκευή:** Αυτοί οι φυσητήρες είναι κατασκευασμένοι με υλικά βαρέως τύπου και ενισχυμένα περιβλήματα για να αντέχουν σε απαιτητικές βιομηχανικές συνθήκες, όπως υψηλές θερμοκρασίες, υγρασία και έκθεση σε διαβρωτικές ουσίες.

- **Επιλογές προσαρμογής:** Οι κατασκευαστές προσφέρουν ένα ευρύ φάσμα μεγεθών, διαμορφώσεων και υλικών για την κάλυψη συγκεκριμένων βιομηχανικών απαιτήσεων.
- **Ενεργειακή απόδοση:** Χρησιμοποιούνται προηγμένα σχέδια και τεχνολογίες για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης, μειώνοντας την κατανάλωση ενέργειας και το λειτουργικό κόστος.

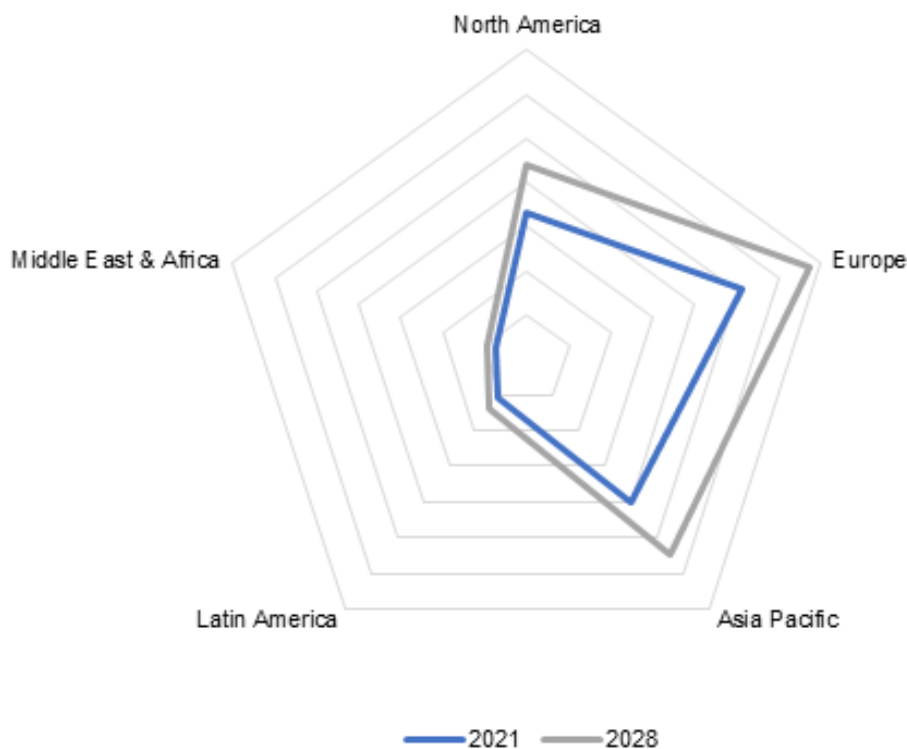
1.2 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας

Σύμφωνα με στατιστικά δεδομένα της Global Market Insights εν έτει 2023 η αγορά των φυγοκεντρικών φυσητήρων ανέρχεται στους 2.86 δις, ενώ προβλέπεται να αυξηθεί στους 3.5 δις έως το 2028. Η βιομηχανία χαρτιού είναι που χρησιμοποιεί σε μεγαλύτερο ποσοστό τις μηχανές αυτές, ενώ οι πωλήσεις είναι αυξημένες σε περιοχές της Ευρώπης και της Ασίας-Ειρηνικού.



Source: www.gminsights.com

Σχήμα 2.2: Έσοδα αγοράς φυγοκεντρικών φυσητήρων (σε εκατ. δολάρια) ανά βιομηχανία.



Source: www.gminsights.com

Σχήμα 3.2: Έσοδα αγοράς φυγοκεντρικών φυσητήρων ανά περιοχή.

Σε μια τέτοια οικονομία κλιμακίας υπάρχει η ανάγκη για αξιόπιστες αναλύσεις φυγοκεντρικών φυσητήρων με σκοπό την βελτιστοποίηση της λειτουργίας τους. Μια μικρή αύξηση στην απόδοση μιας τέτοιας μηχανής με τόσο ευρεία χρήση οδηγεί σε τεράστια εξοικονόμηση ενέργειας.

Είναι, λοιπόν, εξαιρετικά χρήσιμο να μοντελοποιηθούν αυτές οι μηχανές με τη βοήθεια της σύγχρονης τεχνολογίας με ένα λογισμικό CFD. Οι CFD προσομοιώσεις επιτρέπουν την ακριβή και λεπτομερή μελέτη της ροής του αέρα μέσα σε αυτές τις μηχανές, μειώνοντας σε μεγάλο βαθμό το κόστος παραγωγής τους. Και αυτό γιατί το CFD εξαλείφει την ανάγκη για δαπανηρά πρωτότυπα, επιτρέποντας γρήγορες επαναλήψεις στον σχεδιασμό των μηχανών και ταχύτερο χρόνο κυκλοφορίας στην αγορά.

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως σκοπό να δομηθεί ένα αξιόπιστο CFD μοντέλο ενός βιομηχανικού φυγοκεντρικού φυσητήρα του ΕΘΣ, επιτρέποντας στη συνέχεια την μελέτη και βελτιστοποίηση του χωρίς την ανάγκη δαπανηρών και χρονοβόρων πειραμάτων.

1.3 Δομή της διπλωματικής εργασίας

Η δομή της διπλωματικής παρουσιάζεται συνοπτικά παρακάτω:

- **Κεφάλαιο 2:** Κατηγοριοποίηση των φυσητήρων και μαθηματική περιγραφή των φυσικών μεγεθών που ορίζουν την λειτουργία της μηχανής
- **Κεφάλαιο 3:** Τα βήματα δημιουργίας του CAD σχεδίου με το λογισμικό Solidworks
- **Κεφάλαιο 4:** Τα βήματα κατασκευής του CFD μοντέλου της μηχανής με τη βοήθεια του εργαλείου Flow Simulation
- **Κεφάλαιο 5:** Παραμετρική ανάλυση της μηχανής για διαφορετικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά
- **Κεφάλαιο 6:** Ανακεφαλαίωση – Συμπεράσματα

Κεφάλαιο 2

Κατηγοριοποίηση και μαθηματική περιγραφή των φυγοκεντρικών φυσητήρων

2.1 Οι τύποι των φυγοκεντρικών φυσητήρων

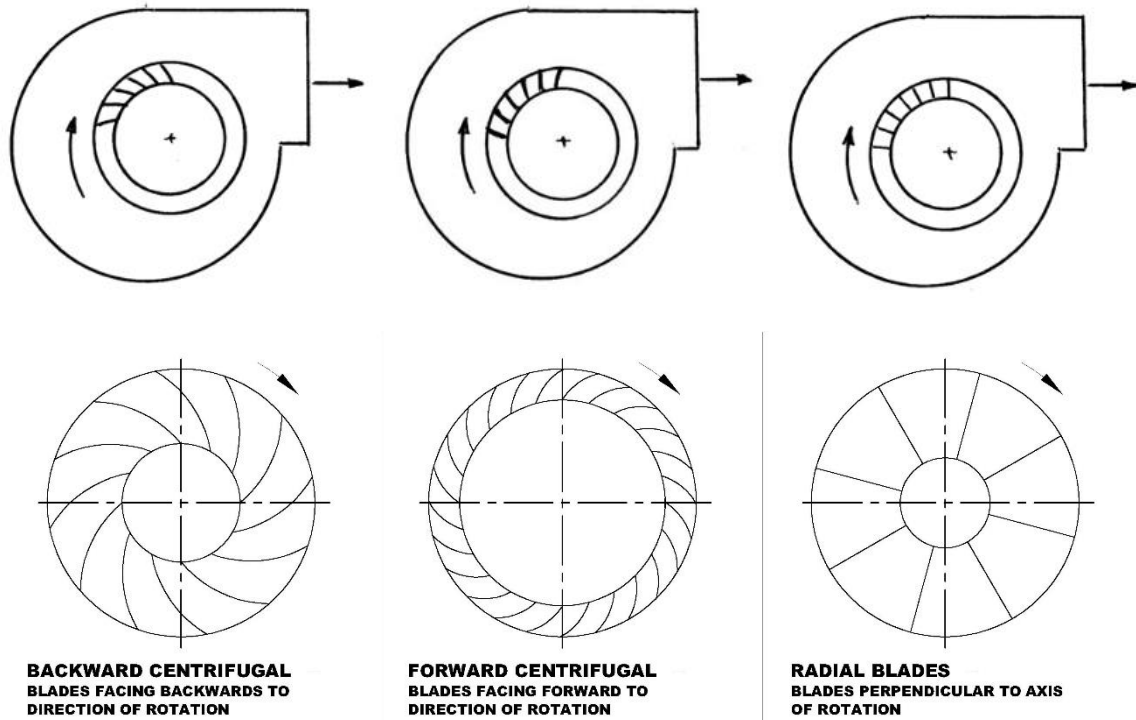
Οι φυγοκεντρικοί φυσητήρες διακρίνονται σε διάφορους τύπους που κάθε ένας χρησιμοποιείται σε ξεχωριστές εφαρμογές. Η ταξινόμησή τους σε κατηγορίες γίνεται με βάση των προσανατολισμό και σχεδίαση των πτερυγίων, την σχεδίαση της περωτής και τον τρόπο μετάδοσης της κίνησης.

2.1.1 Προσανατολισμός των πτερυγίων της περωτής

Με βάση τον προσανατολισμό των πτερυγίων οι φυγοκεντρικοί φυσητήρες χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

- **Εμπροσθοκλινή πτερύγια (Forward)** : Αυτός είναι ο πιο κοινός τύπος φυγοκεντρικού φυσητήρα και χρησιμοποιείται συχνά σε συστήματα HVAC. Διαθέτει πτερύγια που καμπυλώνουν προς τα εμπρός, δημιουργώντας σταδιακή αύξηση της ροής αέρα και της πίεσης. Οι φυσητήρες μπροστινής καμπύλης είναι σχετικά αθόρυβοι και παρέχουν μέτρια ροή αέρα σε χαμηλές έως μέτριες πιέσεις.
- **Οπισθοκλινή πτερύγια (Backward)** : Αντίθετα με τον παραπάνω τύπο, τα πτερύγια τώρα καμπυλώνουν προς τα πίσω. Προσφέρουν υψηλή απόδοση, χαμηλό θόρυβο και μπορούν να χειριστούν μέτριες έως υψηλές πιέσεις. Οι φυσητήρες αυτοί χρησιμοποιούνται συχνά σε εφαρμογές καθαρισμού του αέρα για τον έλεγχο της ατμόσφαιρας ενός χώρου.

- **Ακτινικά πτερύγια δίχως κλίση (Radial)** : Οι φυσητήρες ακτινικών πτερυγίων έχουν ευθεία πτερύγια που εκτείνονται από το κέντρο της πτερωτής. Είναι ικανά να παράγουν υψηλές πιέσεις και χρησιμοποιούνται συχνά σε βιομηχανικές εφαρμογές που περιλαμβάνουν απομάκρυνση υλικών όπως προιονίδι ή άλλες κοκκώδεις ουσίες.



Σχήμα 2.1: Κατηγοριοποίηση φυσητήρων ως προς τον προσανατολισμό των πτερυγίων τους.

Τα πτερύγια στην απλούστερη εκδοχή τους είναι σταθερού πάχους στην ακτινική διεύθυνση και χωρίς αλλαγή του προφίλ τους καθ' ύψος. Όμως χρησιμοποιούνται και πτερύγια μεταβλητού πάχους και με διαφορετικά προφίλ αεροτομών. Έτσι, με αυτή την πιο σύνθετη σχεδίαση πτερυγίων επιτυγχάνονται βέλτιστες ως προς τις επιδόσεις μηχανές, με αυξημένο όμως κόστος παραγωγής.



Σχήμα 2.2: Πτερύγια μεταβλητού πάχους με την μορφή αεροτομών.

Τα περὺγια μπορεί να είναι **σταθερού ύψους (drum type)** κατά την ακτινική διεύθυνση, αλλά και **μεταβλητού ύψους**, οπότε η περρωτή διαμορφώνεται αναλόγως.



Σχήμα 2.3: Περρωτή με περὺγια σταθερού ύψους (αριστερά) και περρωτή με περὺγια μεταβλητού ύψους.

2.1.2 Τρόπος μετάδοσης της κίνησης της περρωτής

Η περρωτή περιστρέφεται από ηλεκτροκινητήρα, ο οποίος μπορεί να δίνει την κίνηση με δύο τρόπους:

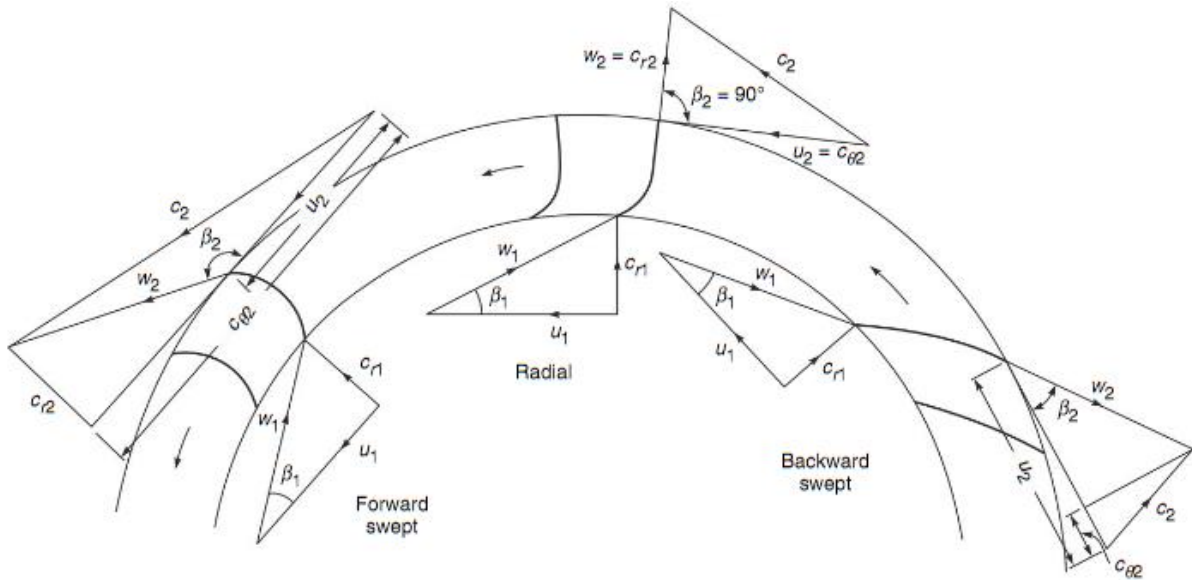
- **Άμεσης μετάδοσης (Direct drive)** : Αυτοί οι φυσητήρες έχουν την περρωτή απευθείας συνδεδεμένη με τον άξονα του κινητήρα, με αποτέλεσμα οικονομία χώρου και υψηλότερη απόδοση.
- **Με ιμάντα κίνησης (Belt drive)** : Οι φυσητήρες κίνησης με ιμάντα χρησιμοποιούν σύστημα ιμάντα-τροχαλίας για τη σύνδεση του κινητήρα με την περρωτή. Παρέχουν ευελιξία στη ρύθμιση της ταχύτητας και μπορεί να είναι χρήσιμοι όταν απαιτείται ακριβής έλεγχος ροής αέρα.



Σχήμα 2.4: Φυγοκεντρικός φυσητήρας με περρωτή με άμεση μετάδοση κίνησης (αριστερά) και με ιμάντα κίνησης.

2.2 Μαθηματική περιγραφή των φυσητήρων

Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιαστούν οι παράμετροι και οι σχέσεις που περιγράφουν την λειτουργία ενός φυγοκεντρικού φυσητήρα. Για τον σκοπό αυτόν, θα χρησιμοποιηθούν τα τρίγωνα ταχυτήτων του Σχήματος 2.5.



Σχήμα 2.5: Τρίγωνα ταχυτήτων σε περωτή φυγοκεντρικού φυσητήρα για τους διαφορετικούς προσανατολισμούς των περυγίων.

Η παροχή μάζας διαμέσου της περωτής δίνεται από τη σχέση

$$\dot{m} = \rho_1 Q_1 = \rho_2 Q_2 \quad (2.1)$$

Το εμβαδόν των διατομών κάθετα στις ακτινικές συνιστώσες των ταχυτήτων c_{r1} και c_{r2} είναι

$$A_1 = \pi d_1 b_1 \quad \text{και} \quad A_2 = \pi d_2 b_2$$

Άρα,

$$\dot{m} = \rho_1 c_{r1} (\pi d_1 b_1) = \rho_2 c_{r2} (\pi d_2 b_2) \quad (2.2)$$

Για μικρές αυξήσεις πιέσεις η αλλαγή στην πυκνότητα είναι αμελητέα άρα το ρευστό μπορεί να θεωρηθεί ασυμπίεστο. Για σταθερή ακτινική ταχύτητα έχουμε:

$$c_{r1} = c_{r2} = c_r \quad (2.3)$$

Τότε από τη σχέση (2.2) προκύπτει ότι

$$\dot{m} = \rho c_r (\pi d_1 b_1) = \rho c_r (\pi d_2 b_2)$$

$$b_1/b_2 = d_2/d_1 \quad (2.4)$$

2.2.1 Έργο βαθμίδας

Το έργο της βαθμίδας δίνεται από την εξίσωση του Euler

$$w_{st} = u_2 c_{\theta 2} - u_1 c_{\theta 1} \quad (2.5)$$

Στην περίπτωση που απουσιάζουν οδηγητικά περσόνια στην είσοδο, μπορεί να θεωρηθεί ότι η ροή εισέρχεται πλήρως αξονικά. Επομένως αυτή η συνθήκη δίνει

$$\alpha_1 = 90^\circ, c_{\theta 1} = 0 \quad \text{και} \quad u_1 c_{\theta 1} = 0$$

Επομένως για σταθερή ακτινική ταχύτητα

$$c_1 = c_{r1} = c_{r2} = u_1 \tan \beta_1 \quad (2.6)$$

Τότε η εξίσωση (2.5) γράφεται

$$w_{st} = u_2 c_{\theta 2} = u_2^2 \left(\frac{c_{\theta 2}}{u_2} \right) \quad (2.7)$$

Από το τρίγωνο ταχυτήτων στην έξοδο (Σχήμα 2.5),

$$u_2 - c_{\theta 2} = c_{r2} \cot \beta_2$$

$$\frac{c_{\theta 2}}{u_2} = 1 - \frac{c_{r2}}{u_2} \cot \beta_2 \quad (2.8)$$

Οι εξισώσεις (2.7) και (2.8) δίνουν

$$w_{st} = u_2^2 (1 - \Phi \cot \beta_2) \quad (2.9)$$

$$\frac{c_2}{\sin \beta_2} = \frac{u_2}{\sin(\alpha_2 + \beta_2)} \quad (2.10)$$

$$c_{\theta 2} = c_2 \cos \alpha_2 = \frac{u_2 \sin \beta_2 \cos \alpha_2}{\sin(\alpha_2 + \beta_2)}$$

$$\frac{c_{\theta 2}}{u_2} = \frac{\sin \beta_2 \cos \alpha_2}{\sin \alpha_2 \cos \beta_2 + \cos \alpha_2 \sin \beta_2} = \frac{\tan \beta_2}{\tan \alpha_2 + \tan \beta_2} \quad (2.11)$$

Αν αντικατασταθεί η σχέση (2.11) στην εξίσωση (2.7) το έργο της βαθμίδας δίνεται επίσης από την σχέση

$$w_{st} = u_2^2 \frac{\tan \beta_2}{\tan \alpha_2 + \tan \beta_2} \quad (2.12)$$

Υποθέτοντας πως η ροή υπακούει πλήρως στη γεωμετρία των περυγίων, το ειδικό έργο σε μια αδιαβατική μεταβολή δίνεται από τη σχέση

$$(\Delta h_o)_{st} = w_{st} = u_2 c_{\theta 2} = u_2^2 (1 - \Phi \cot \beta_2) \quad (2.13)$$

Η ισχύς που απαιτείται για την περιστροφή της περωτής είναι

$$P = \dot{m}(\Delta h_o)_{st} = \dot{m} C_p (\Delta T_o)_{st} = \dot{m} u_2 c_{\theta 2} \quad (2.14)$$

2.2.2 Αύξηση πίεσης βαθμίδας

Αν η διαδικασία συμπίεσης του ρευστού θεωρηθεί αντιστρέψιμη και αδιαβατική (ισεντροπική),

$$(\Delta h_o)_{st} = \frac{1}{\rho} (\Delta p_o)_{st}$$

Επομένως,

$$(\Delta p_o)_{st} = \rho u_2 c_{\theta 2} = \rho u_2^2 (1 - \Phi \cot \beta_2) \quad (2.15)$$

Η αύξηση της στατικής πίεσης διαμέσου της περρωτής οφείλεται στην αλλαγή της ενέργειας περιστροφής και στη διάχυση της σχετικής ροής. Άρα,

$$p_2 - p_1 = (\Delta p)_r = \frac{1}{2} \rho (u_2^2 - u_1^2) + \frac{1}{2} \rho (w_1^2 - w_2^2) \quad (2.16)$$

Η αύξηση της ολικής πίεσης διαμέσου της βαθμίδας μπορεί να περιγραφεί αιόμα από την εξίσωση του Euler για συμπιεστές ως εξής,

$$(\Delta p_o)_{st} = \frac{1}{2} \rho (u_2^2 - u_1^2) + \frac{1}{2} \rho (w_1^2 - w_2^2) + \frac{1}{2} \rho (c_2^2 - c_1^2) \quad (2.17)$$

Αντικαθιστώντας την σχέση (2.15),

$$(\Delta p_o)_{st} = (p_2 - p_1) + \frac{1}{2} \rho (c_2^2 - c_1^2) = p_{o2} - p_{o1}$$

$$(\Delta p_o)_{st} = (\Delta p)_r + \frac{1}{2} \rho (c_2^2 - c_1^2) \quad (2.18)$$

2.2.3 Συντελεστής πίεσης βαθμίδας

Ο συντελεστής πίεσης της βαθμίδας ορίζεται ως,

$$\Psi_{st} = (\Delta p_o)_{st} / \frac{1}{2} \rho u_2^2$$

Από την εξίσωση (2.15),

$$\Psi_{st} = 2 \frac{c_{\theta 2}}{u_2} = 2(1 - \Phi \cot \beta_2) \quad (2.19)$$

Αντικαθιστώντας την σχέση (2.11) στην εξίσωση (2.19) προκύπτει

$$\Psi_{st} = \frac{2 \tan \beta_2}{\tan \beta_2 + \tan \alpha_2} \quad (2.20)$$

Ο συντελεστής πίεσης ρότορα ή περωτής δίνεται από τη σχέση,

$$\Psi_r = (\Delta p)_r / \frac{1}{2} \rho u_2^2 \quad (2.21)$$

2.2.4 Βαθμός αντίδρασης βαθμίδας

Εξ' ορισμού ο βαθμός αντίδρασης της βαθμίδας της περωτής είναι

$$R = (\Delta p)_r / (\Delta p_0)_{st}$$

Ο βαθμός αντίδρασης μπορεί να γραφεί επίσης και με όρους συντελεστών πίεσης για τον ρότορα και τη βαθμίδα.

$$R = \Psi_r / \Psi_{st} \quad (2.22)$$

Από το τρίγωνο ταχυτήτων στην είσοδο

$$w_1^2 - u_1^2 = c_1^2$$

Αν αντικατασταθεί στην σχέση (2.16) προκύπτει ότι

$$(\Delta p)_r = \frac{1}{2} \rho (u_2^2 - w_2^2 + c_1^2) \quad (2.23)$$

Αν η σχέση (2.6) αντικατασταθεί στην εξίσωση (2.23) προκύπτει

$$(\Delta p)_r = \frac{1}{2} \rho (u_2^2 - w_2^2 + c_{r2}^2) \quad (2.23a)$$

Από το τρίγωνο ταχυτήτων εξόδου

$$\begin{aligned} w_2^2 - c_{r2}^2 &= (u_2 - c_{\theta 2})^2 \\ u_2^2 - w_2^2 + c_{r2}^2 &= u_2^2 - (u_2 - c_{\theta 2})^2 \\ u_2^2 - w_2^2 + c_{r2}^2 &= 2u_2 c_{\theta 2} - c_{\theta 2}^2 \end{aligned}$$

Αν η σχέση αυτή αντικατασταθεί στην εξίσωση (2.23a)

$$(\Delta p)_r = \frac{1}{2} \rho (2u_2 c_{\theta 2} - c_{\theta 2}^2) \quad (2.24)$$

Οι εξισώσεις (2.15) και (2.24) δίνουν τη σχέση του βαθμού αντίδρασης ως

$$R = 1 - \frac{1}{2} \frac{c_{\theta 2}}{u_2} \quad (2.25)$$

Η σχέση (2.25) δίνει τον βαθμό αντίδρασης των τριών τύπων περωτών που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Η περωτή με οπισθοκλινή περύγια έχει $\beta_2 < 90$, $c_{\theta 2}/u_2 < 1$ άρα $R < 1$. Η περωτή με ακτινικά περύγια έχει $\beta_2 = 90$, $c_{\theta 2} = u_2$ άρα $R = 1/2$. Η περωτή με εμπροσθοκλινή περύγια έχει $\beta_2 > 90$, $c_{\theta 2} > u_2$ άρα $R < 1/2$.

Ο συνδυασμός των εξισώσεων (2.8) και (2.25) δίνει

$$R = \frac{1}{2} (1 + \Phi \cot \beta_2) \quad (2.26)$$

Μια χρήσιμη σχέση μεταξύ βαθμού αντίδρασης και συντελεστή πίεσης μπορεί να παραχθεί.

Από την εξίσωση (2.19),

$$\frac{c_{\theta 2}}{u_2} = \frac{1}{2} \Psi_{st}$$

Αντικαθιστώντας την παραπάνω σχέση στην (2.25),

$$R = 1 - \frac{1}{4} \Psi_{st} \quad (2.27)$$

$$\Psi_{st} = 4(1 - R) \quad (2.28)$$

Η σχέση αυτή υποδεικνύει πως ο συντελεστής πίεσης βαθμίδας μειώνεται με αύξηση του βαθμού αντίδρασης.

2.2.5 Βαθμός απόδοσης βαθμίδας

Το πραγματικό έργο που προσφέρεται στην βαθμίδα δίνεται από τη σχέση

$$w_{st} = u_2 c_{\theta 2}$$

Εδώ η τιμή της $c_{\theta 2}$ είναι η πραγματική τιμή σε πραγματική περρωτή, μικρότερη από την αντίστοιχη τιμή του Euler για μια ιδανική περρωτή. Εξαιτίας των απωλειών βαθμίδας το ισεντροπικό έργο $\frac{1}{\rho} (\Delta p_o)_{st} = v (\Delta p_o)_{st}$ είναι λιγότερο από το πραγματικό ($u_2 c_{\theta 2}$). Οπότε ο βαθμός απόδοσης της βαθμίδας ορίζεται ως

$$\eta_{st} = \frac{1}{\rho} (\Delta p_o)_{st} u_2 c_{\theta 2} \quad (2.29)$$

Σύμβολα Κεφαλαίου 2

A	Εμβαδόν διατομής
b	Ύψος περυγίου
c	Απόλυτη ταχύτητα ρευστού
d, D	Διάμετρος
g	Επιτάχυνση βαρύτητας
h	Ενθαλπία
Δh	Μεταβολή ενθαλπίας
\dot{m}	Παροχή μάζας
N	Ταχύτητα περιστροφής σε rpm
p	Πίεση
Δp	Διαφορά πίεσης
P	Ισχύς
Q	Παροχή όγκου
R	Βαθμός αντίδρασης
t	Πάχος περυγίου
T	Απόλυτη θερμοκρασία
u	Εφαπτομενική ταχύτητα
w	Σχετική ταχύτητα ή έργο

Ελληνικά Σύμβολα

α	Γωνία απόλυτης ταχύτητας
β	Γωνία σχετικής ταχύτητας

η	Βαθμός απόδοσης
ρ	Πυκνότητα ρευστού
Φ	Συντελεστής ροής
Ψ	Συντελεστής πίεσης

Δείκτες

1	Είσοδος περωτής
2	Έξοδος περωτής
o	Συνολικό
r	Ακτινική
st	Βαθμίδα
θ	Εφαπτομενική

Κεφάλαιο 3

CAD σχεδίαση του φυσητήρα με το λογισμικό Solidworks

3.1 Το CAD λογισμικό Solidworks

Το Solidworks είναι ένα ευέλικτο και φιλικό προς το χρήστη λογισμικό CAD που αναπτύχθηκε από την Dassault Systèmes. Προσφέρει μια σειρά προηγμένων χαρακτηριστικών που το καθιστούν ιδανική επιλογή για μηχανικούς και σχεδιαστές σε όλες τις βιομηχανίες. Η φιλική προς τον χρήστη διεπαφή και οι εύχρηστες ροές εργασίας του λογισμικού επιτρέπουν την αποτελεσματική δημιουργία, τροποποίηση και ανάλυση τρισδιάστατων μοντέλων. Οι παραμετρικές του δυνατότητες μοντελοποίησης επιτρέπουν γρήγορες επαναλήψεις σχεδιασμού και εξερεύνηση εναλλακτικών λύσεων.

Το Solidworks παρέχει επίσης ισχυρά εργαλεία προσομοίωσης για δομική ανάλυση, μελέτες κίνησης και προσομοιώσεις ροής ρευστού, βοηθώντας τους μηχανικούς να βελτιστοποιήσουν τα σχέδια για απόδοση και αποδοτικότητα. Οι δυνατότητες εύκολης κοινής χρήσης δεδομένων βοηθούν την ομαδική εργασία σε πραγματικό χρόνο.

Επιπλέον, το Solidworks προσφέρει μια εκτενή βιβλιοθήκη με προκατασκευασμένα εξαρτήματα, υλικά και υφές, εξοικονομώντας χρόνο και βελτιώνοντας την παραγωγικότητα.

Ανταγωνιστές του στα CAD λογισμικά είναι το Catia, AutoCad, Creo, Siemens NX και Fusion 360. Το Solidworks όμως είναι το πιο εύχρηστο λογισμικό για την σχεδίαση μηχανολογικών εξαρτημάτων και την δημιουργία απλών συναρμολογημένων τεμαχίων. Σε συνδυασμό με τις δυνατότητές του για εύκολες και αξιόπιστες παραμετρικές προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκε για τη σχεδίαση του φυσητήρα.

3.2 Σχεδίαση του φυγοκεντρικού φυσητήρα του ΕΘΣ

Ο φυσητήρας του ΕΘΣ είναι τύπου drum-type με εμπροσθοκλινή περὺγια, του οποίου η περὺγη περιστρέφεται άμεσα από τον ηλεκτροκινητήρα. Με βάση τις διαστάσεις που απεικονίζονται στα 2D κατασκευαστικά σχέδια του κελύφους και της περὺγης μπορεί να παραχθεί η 3D γεωμετρία στο Solidworks.

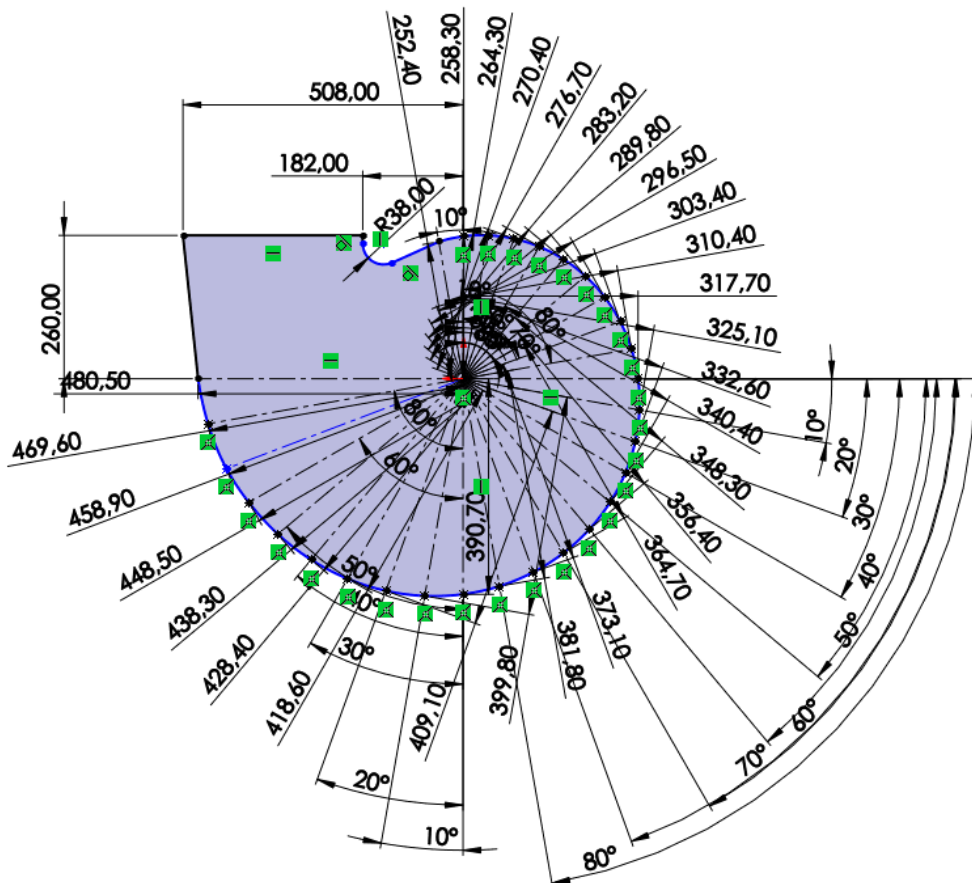


Σχήμα 3.1: Ο φυγοκεντρικός φυσητήρας του ΕΘΣ.

Πρώτα θα σχεδιαστεί το σπειροειδές κέλυφος, στη συνέχεια η περὺγη σε ξεχωριστά αρχεία (parts) και τελικά θα συναρμολογηθούν σε ένα τελικό CAD αρχείο (assembly).

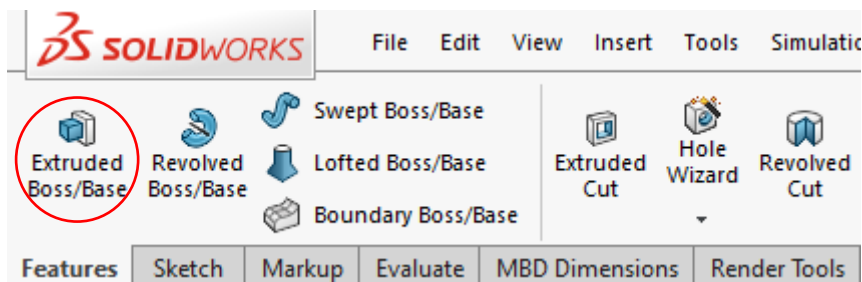
3.2.1 Σχεδίαση του σπειροειδούς κελύφους

Το πρώτο βήμα στην σχεδίαση του κελύφους είναι να δημιουργηθεί ένα sketch της πίσω όψης της μηχανής. Το σπειροειδές τμήμα του κελύφους σχεδιάζεται με μία απόσταση από το κέντρο της σπείρας ανα 10° , ενώ τοποθετούνται και άλλες διαστάσεις όπως ακτίνες καμπυλότητας και μήκη που αφορούν την έξοδο του φυσητήρα.



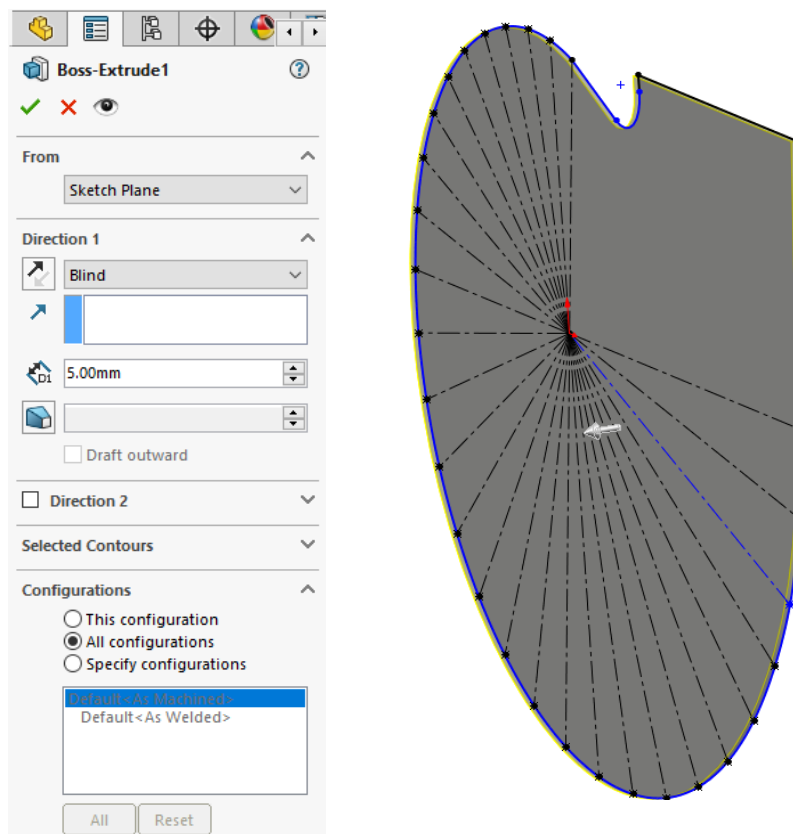
Σχήμα 3.2: Βήμα 1: Sketch της πίσω όψης του φυσητήρα.

Η πίσω όψη αποτελεί ένα τοίχωμα το οποίο φυσικά είναι 3D, άρα χρησιμοποιείται η εντολή Features→Boss-Extrude ώστε το sketch να πάρει τρισδιάστατη υπόσταση.



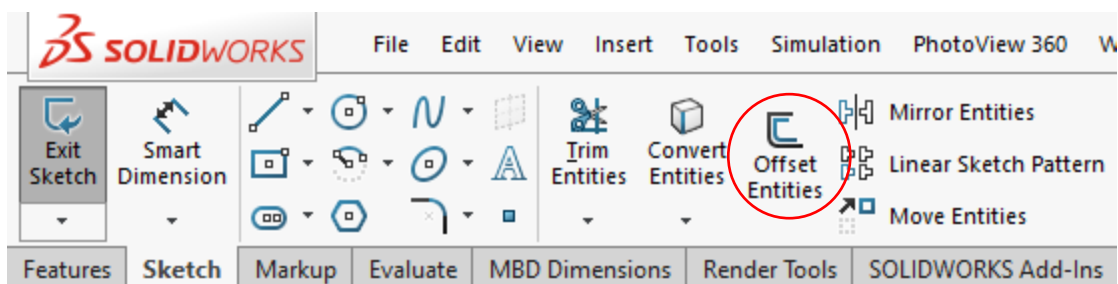
Σχήμα 3.3: Η εντολή Extruded Boss/Base.

Από το menu που θα ανοίξει επιλέγεται να αρχίσει το extrude από το επίπεδο του sketch προς μία κατεύθυνση και επιλέγεται το πάχος του τοιχώματος 5mm.



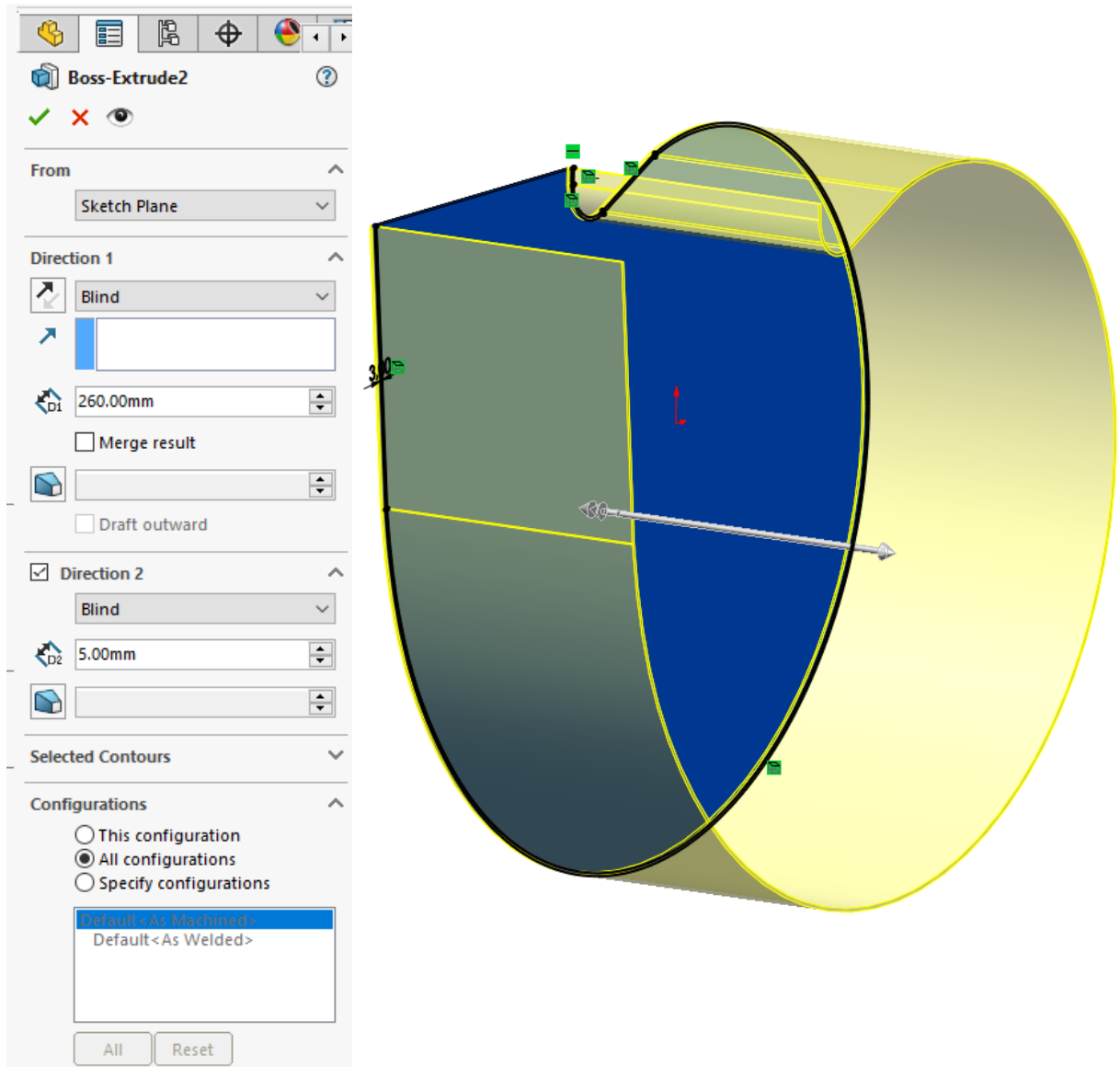
Σχήμα 3.4: Βήμα 2: Δημιουργία του πίσω τοιχώματος του κελύφους.

Στη συνέχεια, με την εντολή Sketch→Offset Entities προεκτείνεται το κέλυφος περιμετρικά κατά μήκος ίσο με το πάχος των πλαινών τοιχωμάτων.



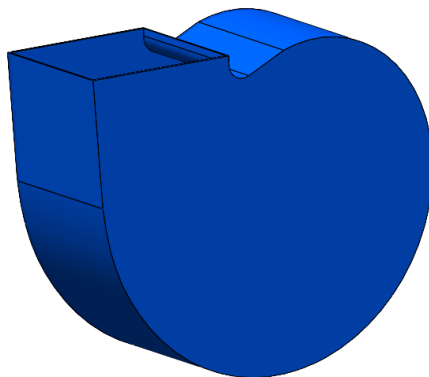
Σχήμα 3.5: Η εντολή Offset Entities.

Χρησιμοποιώντας ξανά την εντολή Extruded Boss/Base θα προεκταθούν τα πλαινά τοιχώματα.

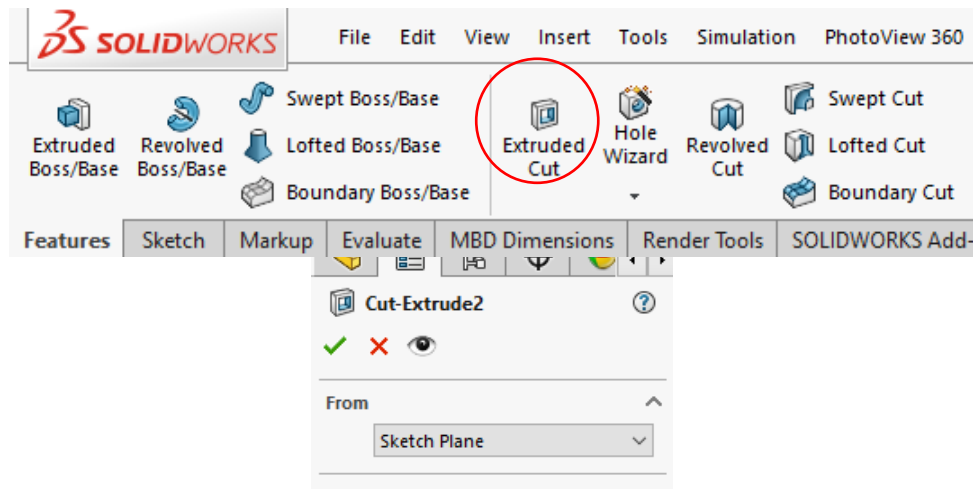


Σχήμα 3.6: Βήμα 3: Δημιουργία των πλαϊνών τοιχωμάτων.

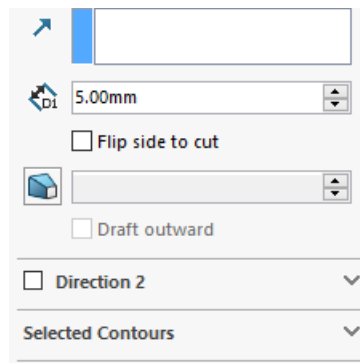
Στο επόμενο βήμα σχεδιάζεται το sketch του εμπρός τοιχώματος του κελύφους με τρόπο ίδιο με του πίσω και στη συνέχεια δίνεται το αντίστοιχο πάχος με την εντολή Extruded Boss/Base.



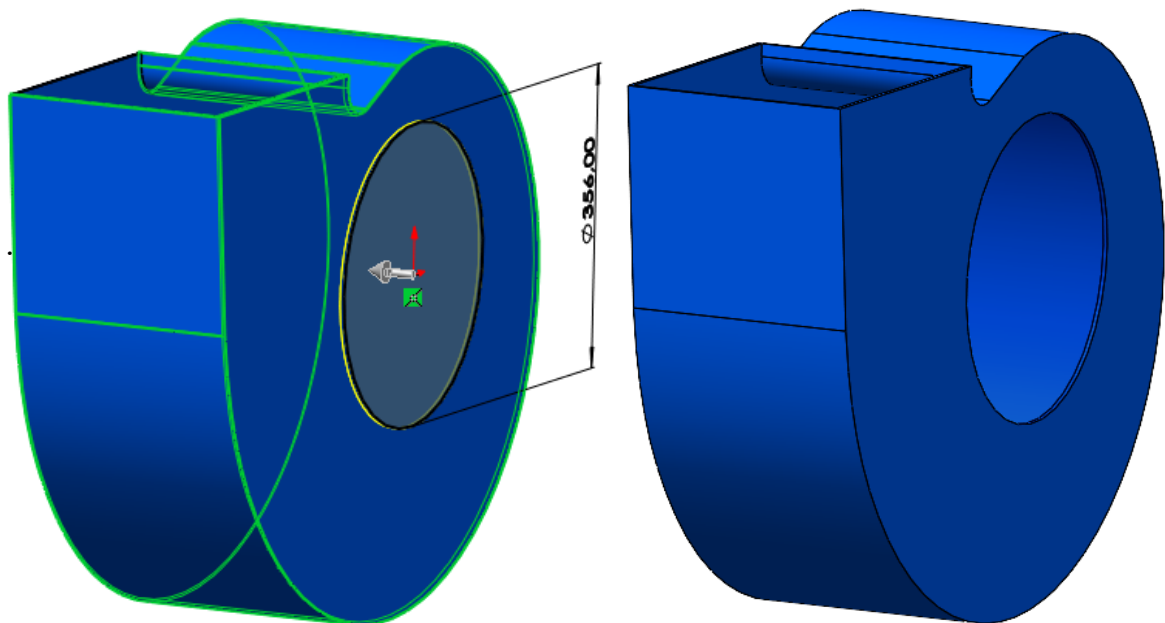
Έπειτα θα σχεδιαστεί στο επίπεδο του μπροστά τοιχώματος το sketch του δίσκου που πρόκειται να αφαιρεθεί με την εντολή Extruded Cut.



Σχήμα 3.7: Βήμα 4: Σχεδίαση του εμπρός τοιχώματος του κελύφους.

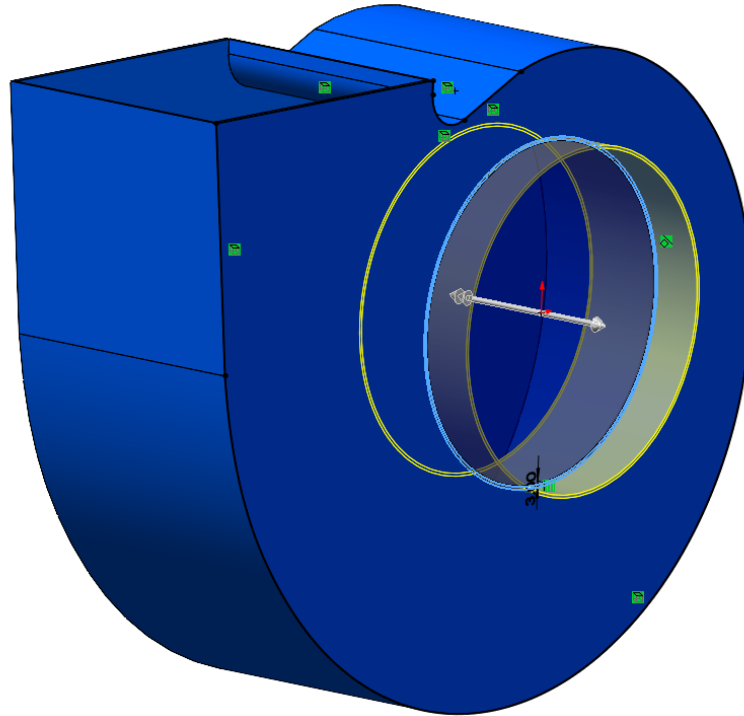


Σχήμα 3.8: Η εντολή Extruded Cut.



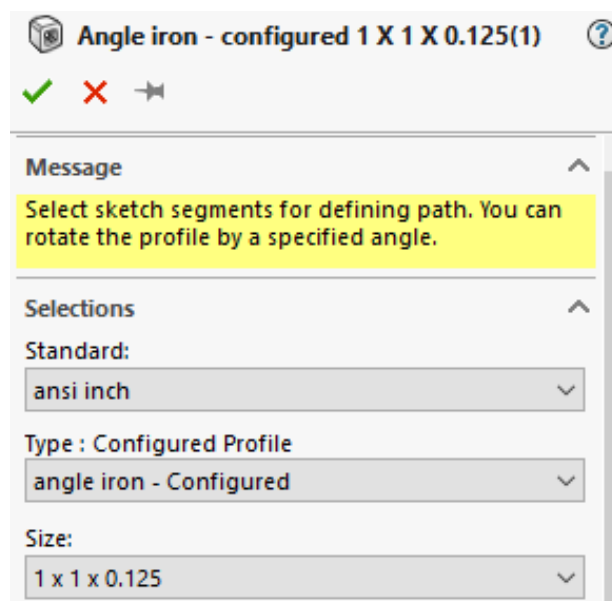
Σχήμα 3.9: Βήμα 5: Αφαίρεση του τμήματος του κελύφους από όπου θα εισέρχεται το ρουστό.

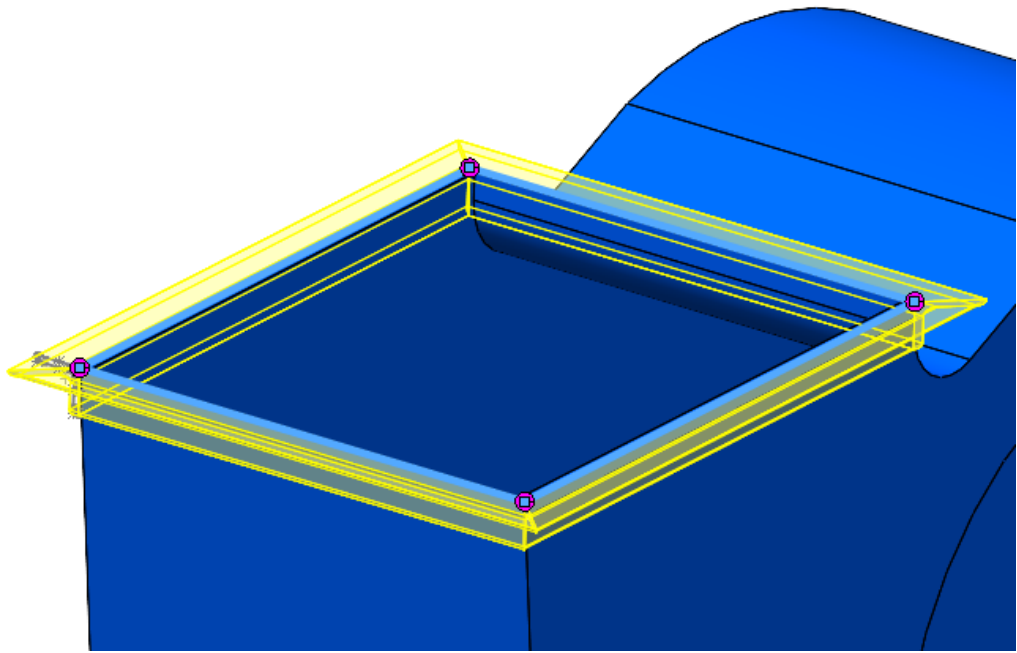
Για το τμήμα εισόδου θα δημιουργηθεί ένας αγωγός που θα εφάπτεται στην οπή που ανοίχτηκε στο Βήμα 5. Αυτό θα γίνει με ένα sketch δύο ομόκεντρων κύκλων και τη συνέχεια με την εντολή Extrude Boss/Base θα δημιουργηθεί η τρισδιάστατη προέκταση του.



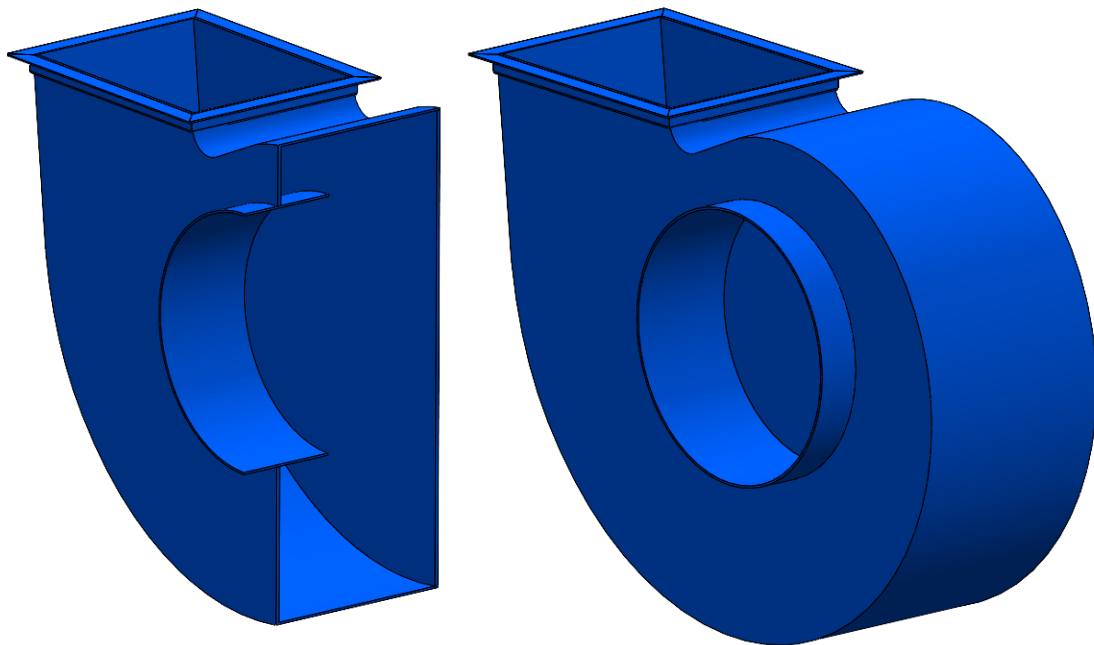
Σχήμα 3.10: Βήμα 6: Δημιουργία του αγωγού εισόδου.

Τέλος, θα δοθεί στην άκρη του αγωγού εξόδου του κελύφους η διαμόρφωση που έχει με την εντολή Insert→Weldments→Structural Member.





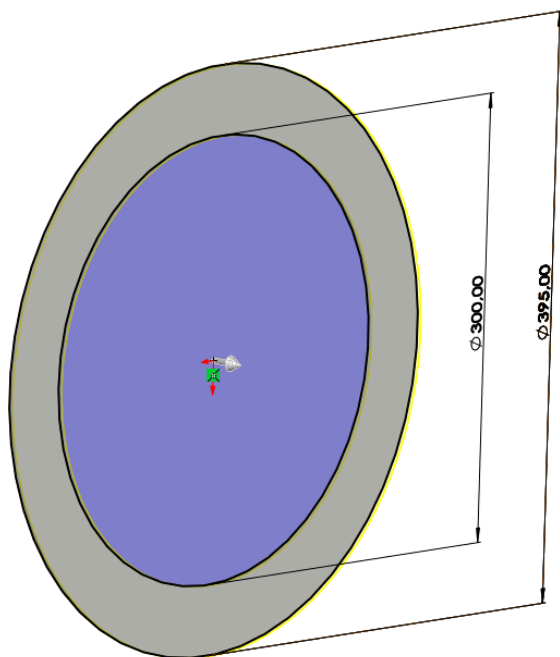
Έτσι λοιπόν ολοκληρώνεται η σχεδίαση CAD της γεωμετρίας του κελύφους του φυγοκεντρικού φυσητήρα.



Σχήμα 3.12: Τελικό CAD του κελύφους.

3.2.2 Σχεδίαση της περωτής

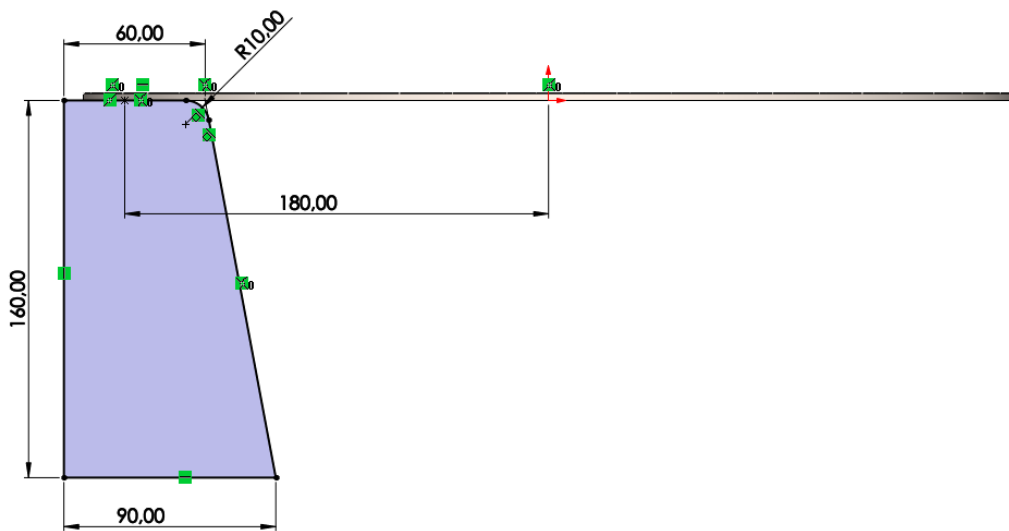
Η περωτή του φυσητήρα αποτελείται από δύο στεφάνια που αποτελούν το hub και το shroud, τα οποία στηρίζουν τα 16 περύγια. Αρχικά σχεδιάζεται εύκολα το shroud της περωτής με την εντολή Extruded Boss/Base στο αντίστοιχο sketch.



Σχήμα 3.13: Βήμα 1: Shroud της περωτής.

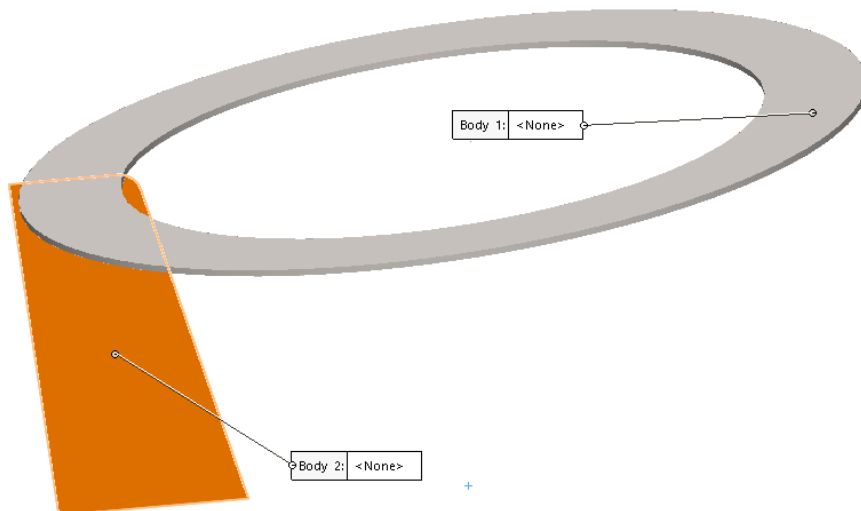
Ακολουθεί η σχεδίαση των περυγίων. Τα περύγια της συγκεκριμένης περωτής είναι σταθερού πάχους. Αρχικά κόβονται σε σχήμα τραπέζιου ως επίπεδες πλάκες και στη συνέχεια καμπυλώνονται από τον κατασκευαστή για να δοθεί το επιθυμητό σχήμα.

Αυτή ακριβώς η διαδικασία ακολουθήθηκε και για την CAD σχεδίασή τους, οπότε αρχικά σχεδιάστηκαν ως τραπέζια συγκεκριμένου πάχους που η μικρή τους πλευρά εφάπτεται στο shroud. Αξίζει να σημειωθεί ότι σχεδιάζεται μόνο ένα περύγιο και στη συνέχεια με κατάλληλη εντολή θα δημιουργηθούν πανομοιότυπα και τα υπόλοιπα.



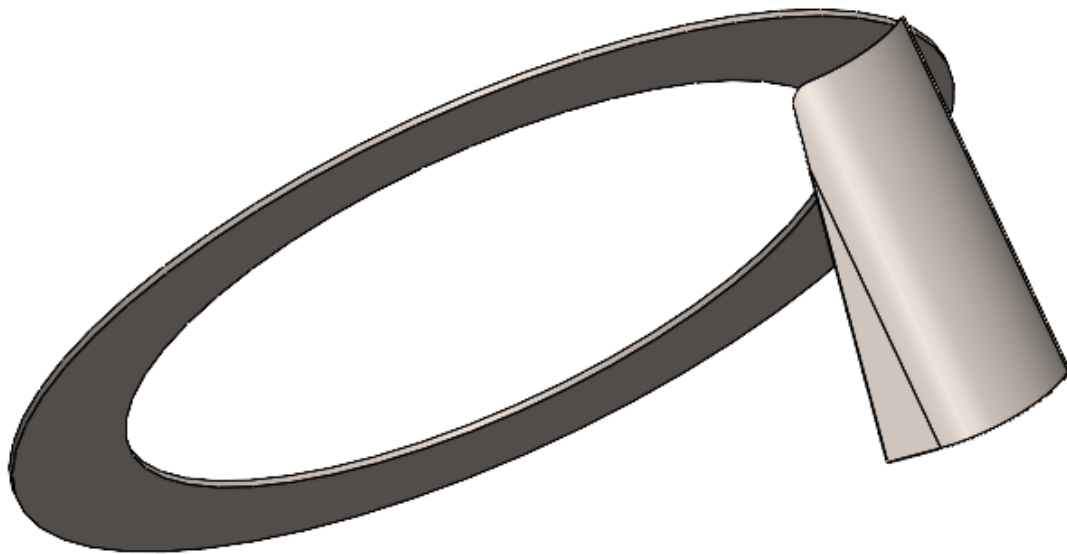
Σχήμα 3.14: Βήμα 2: Σχεδιασμός του τραπεζιου ως αρχική μορφή του περυγίου.

Με την εντολή Split διαχωρίζεται το περύγιο ως ξεχωριστό σώμα από εκείνο του shroud, ώστε να μπορεί να επεξεργαστεί ανεξάρτητα.



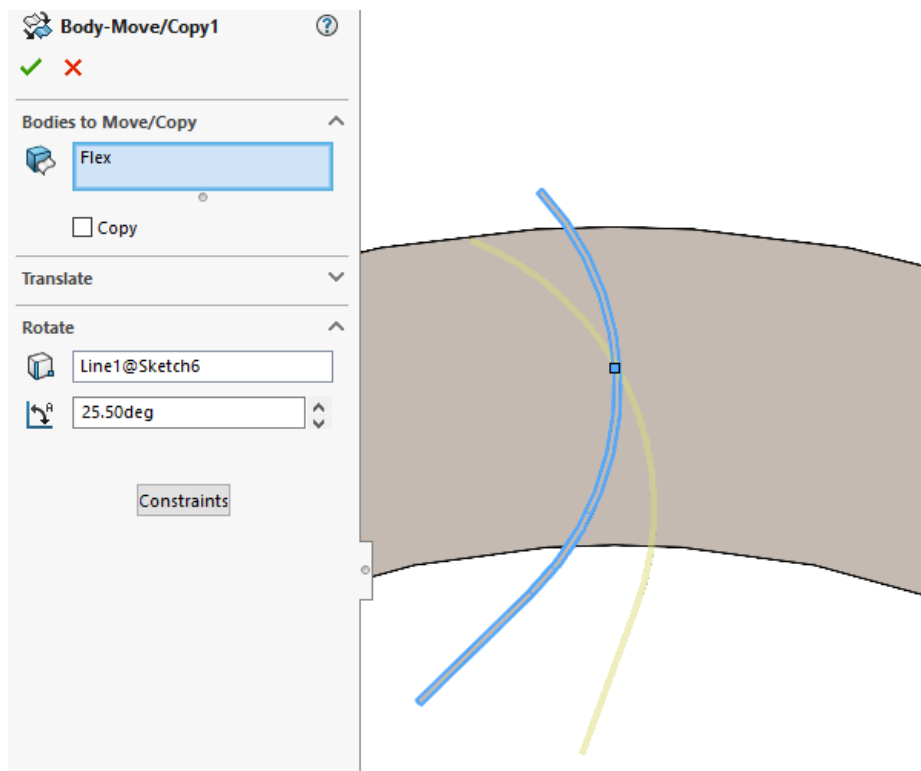
Σχήμα 3.15: Βήμα 3: Διαχωρισμός των bodies με την εντολή Split.

Με την εντολή Flex κάμπτεται το περύγιο με την επιθυμητή καμπυλότητα που επιβάλεται από τα κατασκευαστικά σχέδια.



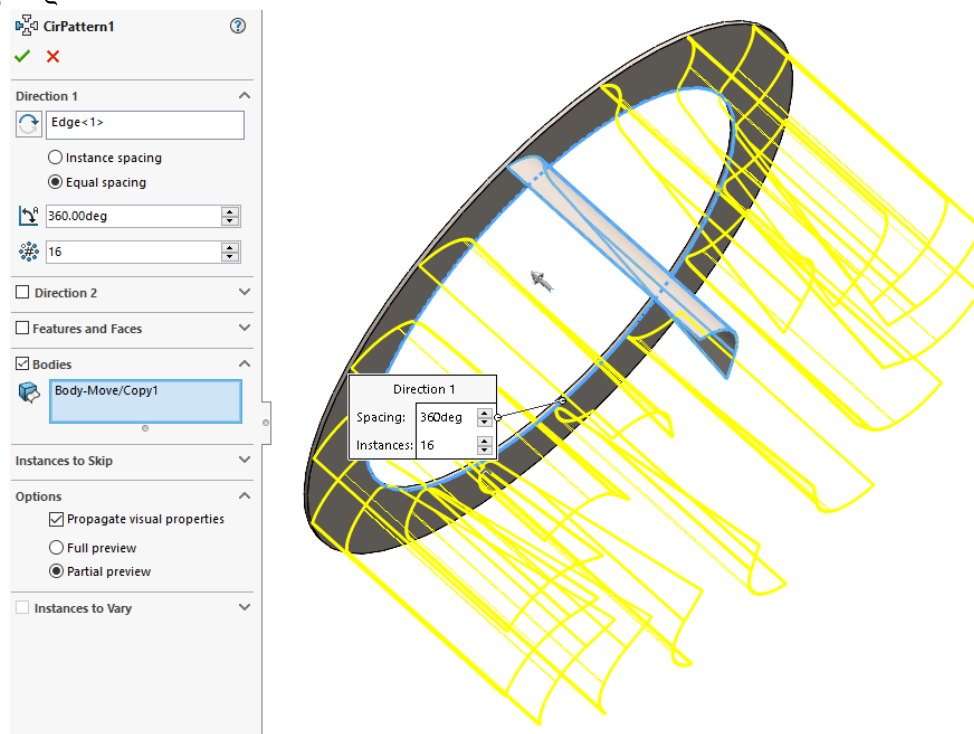
Σχήμα 3.16: Βήμα 4: Κάμψη του περυσίου με την εντολή Flex.

Με την εντολή Body-Move/Copy περιστρέφεται το περυσίο κατά την γωνία που ορίζει την κλίση του.



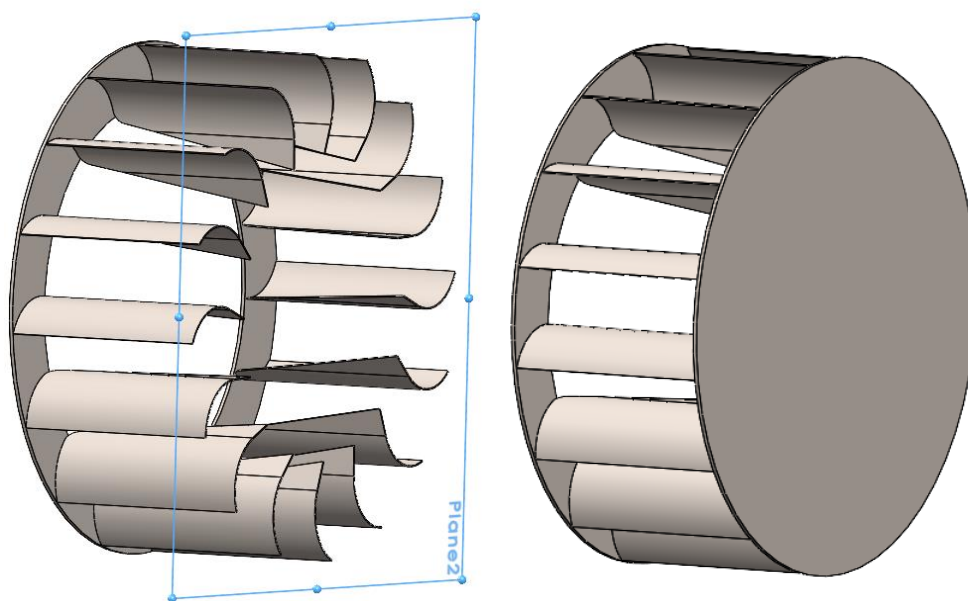
Σχήμα 3.17: Βήμα 5: Περιστροφή του περυσίου με την εντολή Body - Move/Copy.

Έχοντας ολοκληρώσει τη σχεδίαση του ενός περυγίου χρησιμοποιώντας την εντολή Circular Pattern αναπαράγεται κυκλικά η γεωμετρία του.



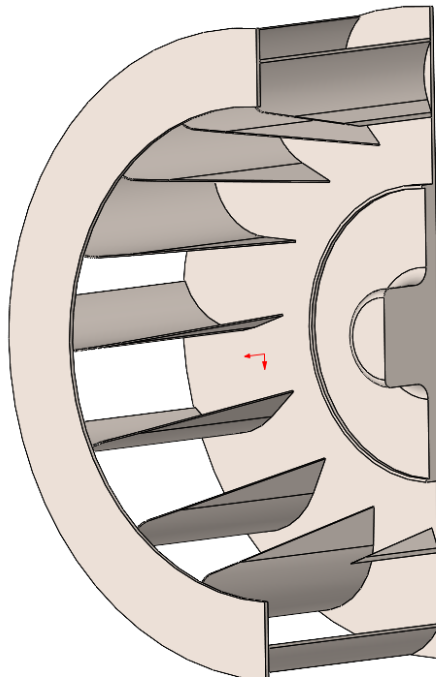
Σχήμα 3.18: Βήμα 6: Δημιουργία όλων των περυγίων με την εντολή Circular Pattern.

Αφού δημιουργηθεί ένα επίπεδο (Insert→Reference Geometry→Plane) στη βάση των περυγίων σχεδιάζεται το hub της περωτής με όμοιο τρόπο με το shroud στο επίπεδο αυτό.



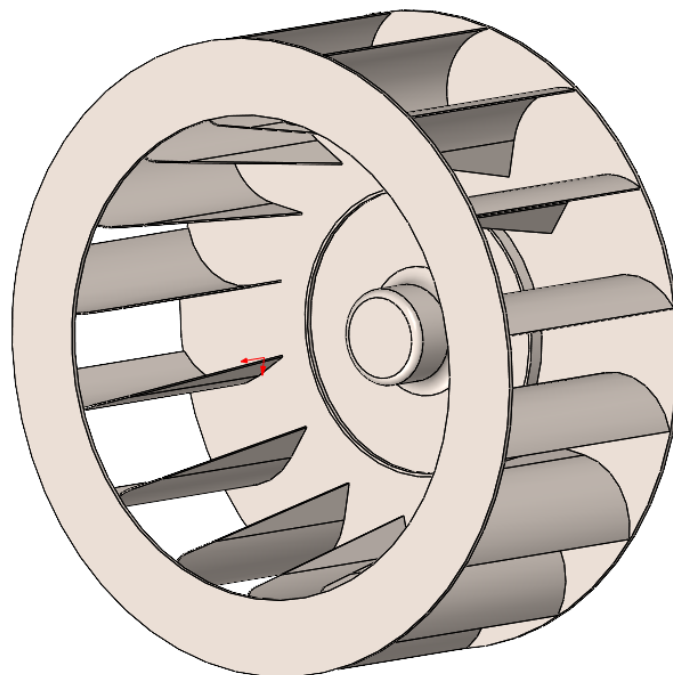
Σχήμα 3.19: Βήμα 7: Σχεδίαση του hub της περωτής.

Τέλος σχεδιάζεται η διαμόρφωση στο εσωτερικό της περωτής που αποτελεί το μέρος όπου βρίσκεται ο άξονας που την περιστρέφει.



Σχήμα 3.20: Βήμα 8: Διαμόρφωση του εσωτερικού της περωτής.

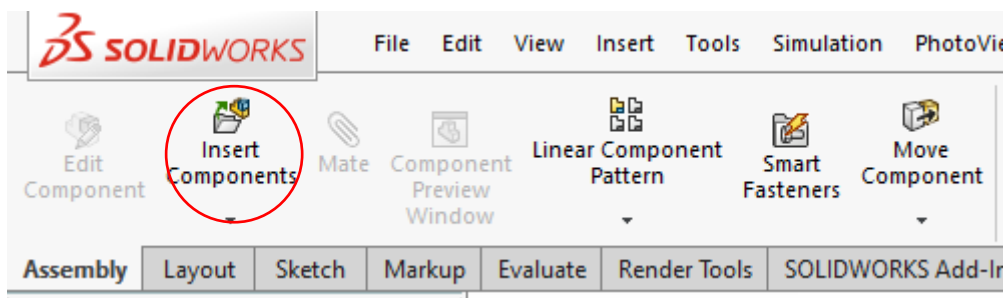
Ολοκληρώνεται έτσι και το CAD σχέδιο της περωτής και θα ακολουθήσει η συναρμολόγησή της με το κέλυφος.



Σχήμα 3.21: Τελικό CAD της περωτής.

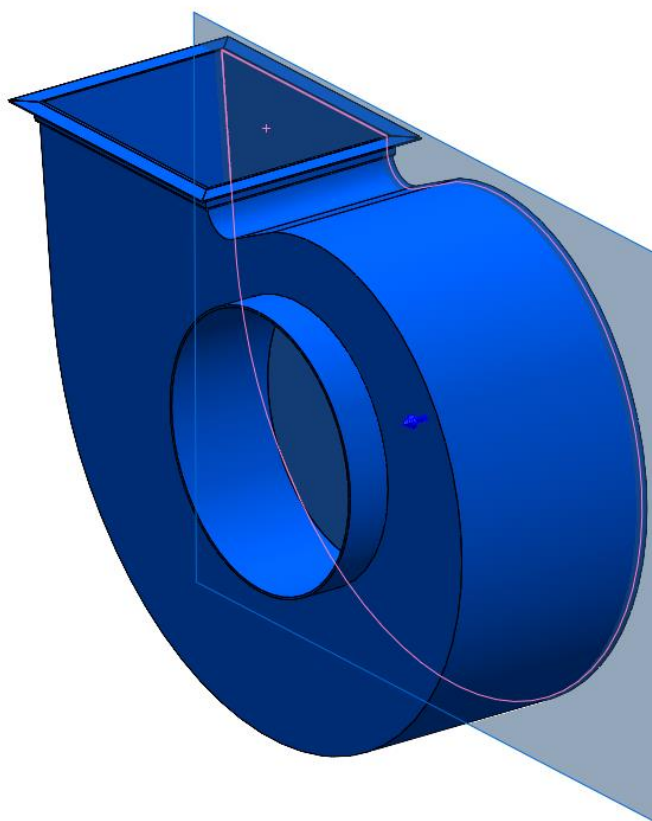
3.2.3 Συναρμολόγηση των τεμαχίων

Για την συναρμολόγηση των τεμαχίων δημιουργείται ένα νέο αρχείο στο Solidworks τύπου Assembly στο οποίο θα εισαχθούν τα αρχεία των parts του κελύφους και της περωτής με την εντολή Insert Components.



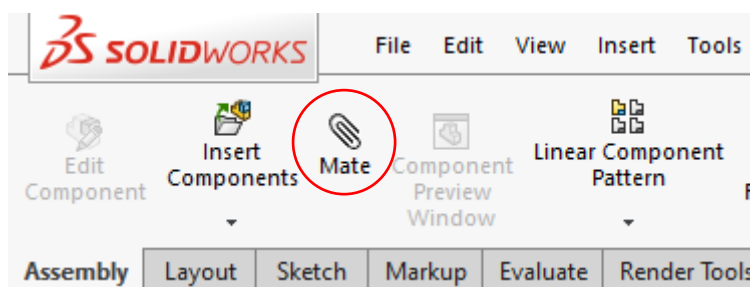
Σχήμα 3.22: Βήμα 1: Εισαγωγή των parts στο assembly με την εντολή Insert Components.

Δημιουργείται ένα επίπεδο (plane) που απέχει από το πίσω τοίχωμα του κελύφους όσο απέχει και το hub της περωτής.



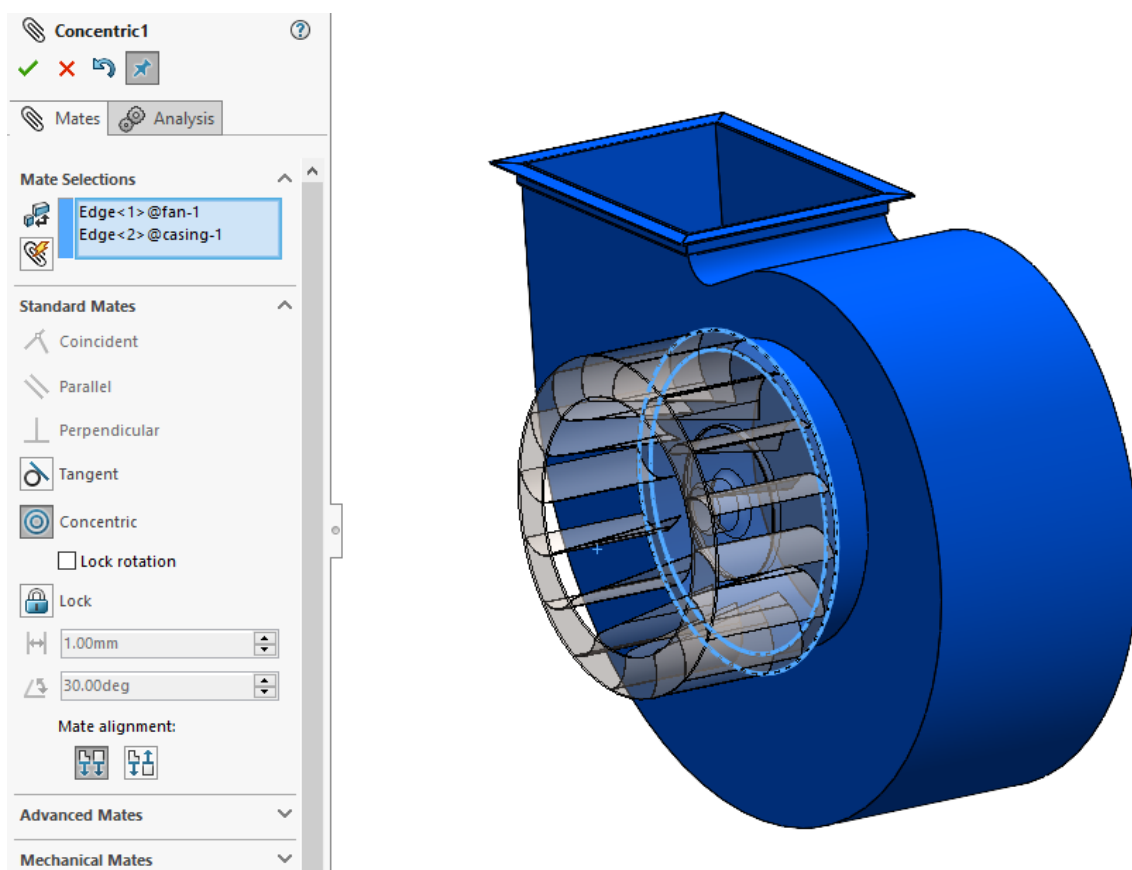
Σχήμα 3.23: Βήμα 2: Δημιουργία του επιπέδου του hub της περωτής.

Ακολουθεί η συναρμολόγηση των τεμαχίων η οποία θα γίνει μέσω της εργαλείου Mate.



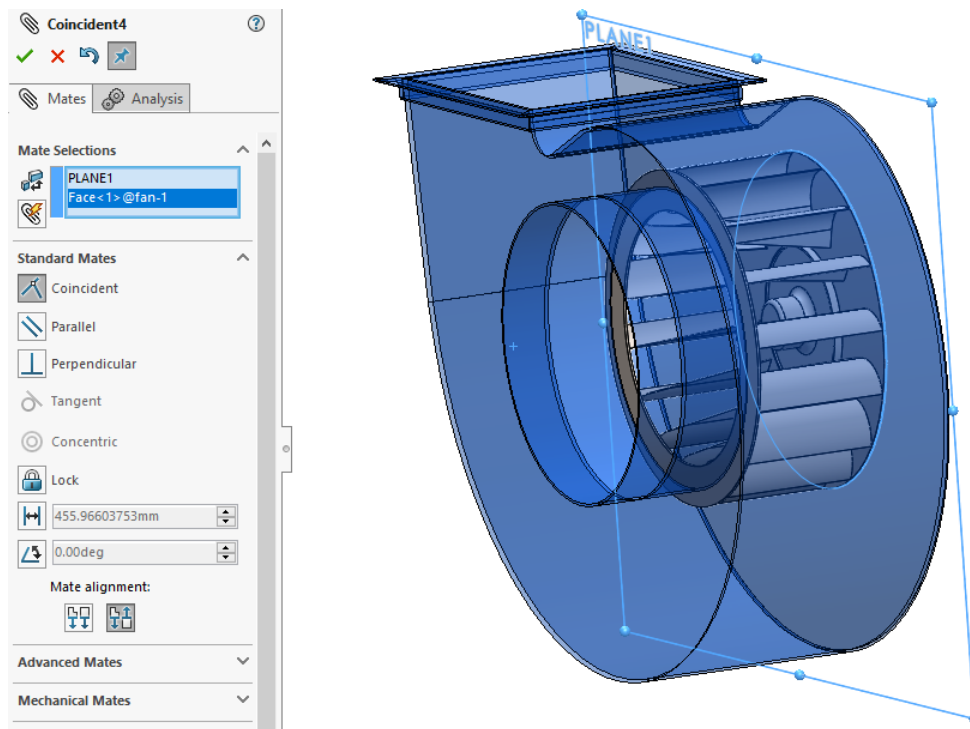
Σχήμα 3.24: Η εντολή Mate.

Το πρώτο mate θα φέρει τον άξονα συμμετρίας της περωτής ώστε να γίνει ομόκεντρος με τον άξονα που διέρχεται από το κέντρο του αγωγού εισόδου.



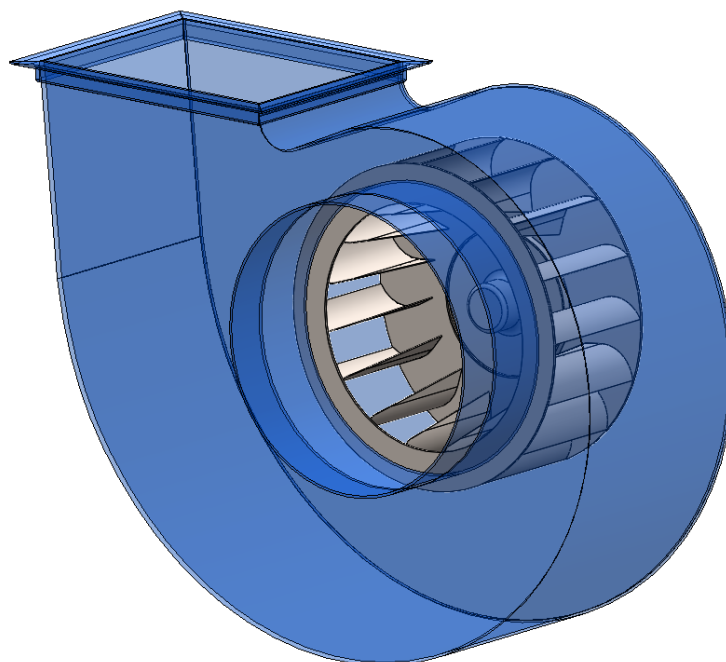
Σχήμα 3.25: Βήμα 3: Το πρώτο concentric mate που θα ευθυγραμμίσει τα parts.

Το δεύτερο mate θα δημιουργηθεί ώστε να εφάπτεται το πίσω μέρος του hub της περωτής στο επίπεδο που σχεδιάστηκε στο Βήμα 1.



Σχήμα 3.26: Βήμα 4: Το coincident mate που θα τοποθετήσει την περωτή στη σωστή θέση μέσα στο κέλυφος.

Ολοκληρώνεται λοιπόν και η συναρμολόγηση της μηχανής η οποία δίνει στην περωτή μοναδικό βαθμό ελευθερίας την περιστροφή της.



Σχήμα 3.27: Τελικό CAD του φυγοκεντρικού φυστήρα του ΕΘΣ.

Κεφάλαιο 4

CFD μοντελοποίηση του φυσητήρα με χρήση του Flow Simulation

4.1 Το εργαλείο Flow Simulation του Solidworks

Το πακέτο **Flow Simulation** του Solidworks είναι ένα λογισμικό υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD) που δίνει τη δυνατότητα στον σχεδιαστή να αναλύσει και να οπτικοποιήσει της συμπεριφορά του ρευστού στο τρισδιάστατο μοντέλο.

Αντίστοιχα CFD λογισμικά είναι το Ansys CFX/Fluent, το Star CCM+ και το ανοιχτό λογισμικό OpenFoam, που μαζί με μερικά ακόμα αποτελούν τους κύριους ανταγωνιστές του Flow Simulation στον τομέα των προσομοιώσεων ρευστών.

Η επιλογή του Flow Simulation έγινε με κριτήρια την οικονομία χρόνου και την ακρίβεια στις προσομοιώσεις. Το πακέτο επικοινωνεί αμεσάτα με την CAD γεωμετρία. Αυτό δίνει στον χρήστη τη δυνατότητα να εκτελεί εύκολα σε φιλικό περιβάλλον διαφορετικές παραμετρικές μελέτες σε λίγο χρόνο, σε αντίθεση με τα άλλα CFD λογισμικά όπου η γεωμετρία θα έπρεπε να αλλάζει εξωτερικά.

Ακόμα η απλή αλλά αποτελεσματική πλεγματοποίηση της τρισδιάστατης γεωμετρίας στο Flow Simulation παράγει γρήγορα και αξιόπιστα αποτελέσματα, σε αντίθεση με μια πιο σύνθετη πλεγματοποίηση που θα αύξανε σημαντικά το υπολογιστικό κόστος.

4.2 Κατασκευή του CFD μοντέλου

Το πρώτο βήμα για να δημιουργηθεί το μοντέλο προσομείωσης είναι να οριστεί ο τρισδιάστατος όγκος ρευστού (υπολογιστικό χωρίο) που βρίσκεται

εντός της μηχανής και ο οποίος θα πλεγματοποιηθεί. Ο τρόπος που θα οριστεί ο όγκος αυτός εξαρτάται από την προσέγγιση η οποία θα χρησιμοποιηθεί.

4.2.1 Η προσέγγιση που «συρόμενου πλέγματος»

Δύο προσεγγίσεις είναι οι κυρίαρχες στον χώρο της προσομοίωσης ρευστών, το μοντέλο ενός πλαισίου αναφοράς (Single Reference Frame model – SRF) και το μοντέλων πολλαπλών πλαισίων αναφοράς (Multiple Reference Frame model – MRF).

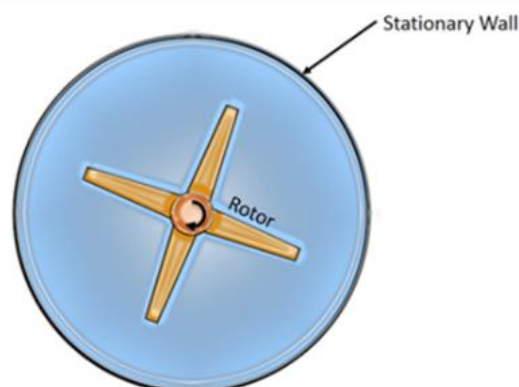
Στην προσέγγιση **SRF**, ολόκληρο το υπολογιστικό χωρίο, συμπεριλαμβανομένων τόσο των σταθερών όσο και των περιστρεφόμενων στοιχείων, αντιμετωπίζεται ως ένα ενιαίο πλαίσιο αναφοράς. Αυτό σημαίνει ότι οι εξισώσεις που διέπουν τη ροή του ρευστού επιλύονται σε αυτό το ενιαίο πλαίσιο αναφοράς. Χρησιμοποιείται συνήθως όταν η ταχύτητα περιστροφής είναι σχετικά χαμηλή και τα ασταθή φαινόμενα που εισάγονται από την περιστροφή έχουν ελάχιστο αντίκτυπο στη συνολική συμπεριφορά της ροής.

Πλεονεκτήματα SRF:

- Απλοποιημένη δημιουργία πλέγματος καθώς λαμβάνεται υπόψη μόνο ένα πλαίσιο αναφοράς,
- μειωμένο υπολογιστικό κόστος και
- κατάλληλο για προσομοιώσεις steady-state.

Μειονεκτήματα SRF:

- Μπορεί να μην αποτυπώνει με ακρίβεια την ασταθή συμπεριφορά ροής που εισάγεται από υψηλούς ρυθμούς περιστροφής,
- περιορισμένη δυνατότητα εφαρμογής σε περιπτώσεις με ισχυρές αλληλεπιδράσεις μεταξύ περιστρεφόμενων και στατικών τμημάτων.



Σχήμα 4.1: Η SRF προσέγγιση που λαμβάνει όλο το υπολογιστικό χωρίο ως ενιαίο πλαίσιο.

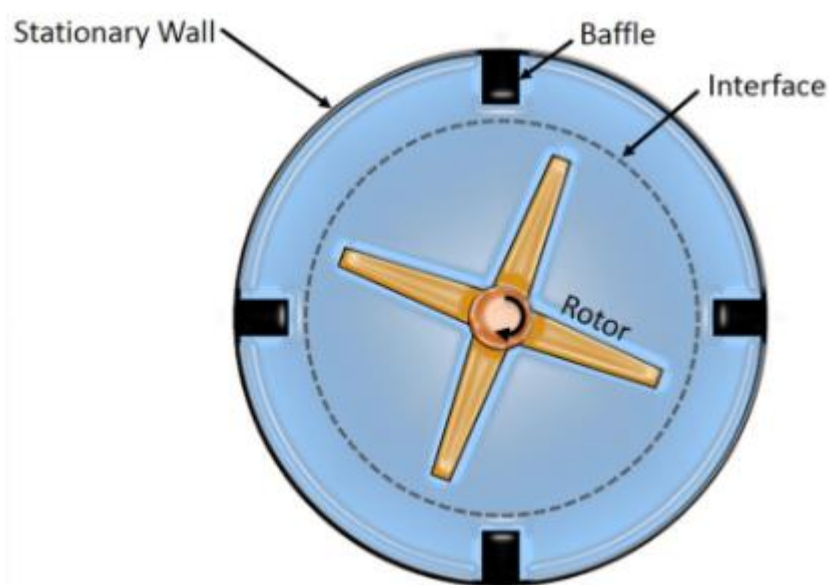
Η προσέγγιση **MRF** διαιρεί το υπολογιστικό χωρίο σε πολλαπλές ζώνες, καθμία με το δικό της πλαίσιο αναφοράς. Η σταθερή ζώνη αντιπροσωπεύει τα μη περιστρεφόμενα τμήματα, ενώ η περιστρεφόμενη ζώνη αντιπροσωπεύει τα περιστρεφόμενα τμήματα, όπως μια περρωτή ή ένα ρότορα. Οι εξισώσεις ροής επιλύονται ανεξάρτητα σε κάθε ζώνη και οι πληροφορίες ανταλλάσσονται μεταξύ των διεπαφών.

Πλεονεκτήματα MRF:

- Κατάλληλο για προσομοιώσεις που περιλαμβάνουν περιστρεφόμενα τμήματα, όπου η σχετική κίνηση μεταξύ των περιστρεφόμενων και των στατικών στοιχείων είναι απαραίτητη,
- μπορεί να διαχειριστεί πολύπλοκες αλληλεπιδράσεις μεταξύ περιστρεφόμενων και στατικών τμημάτων όπου η SRF αποτυγχάνει και
- είναι κατάλληλο και για προσομοιώσεις σταθερής και ασταθούς κατάστασης, ανάλογα με τις απαιτήσεις του προβλήματος.

Μειονεκτήματα MRF:

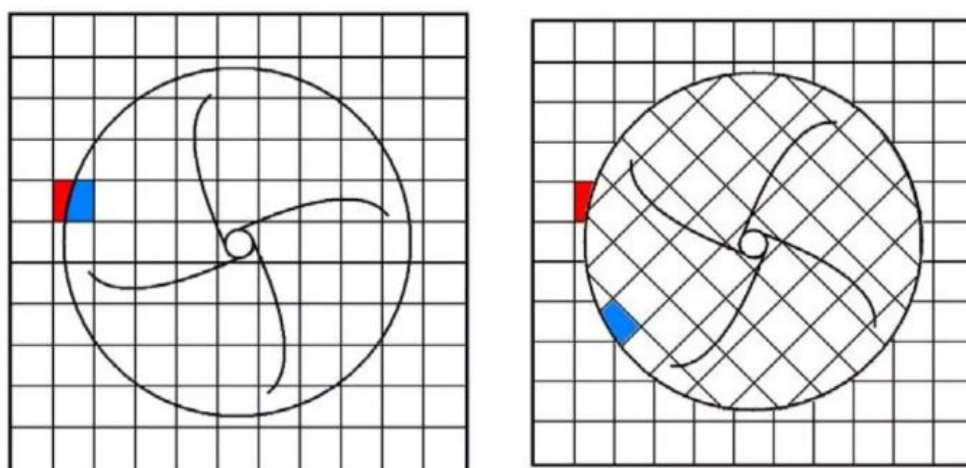
- Πιο πολύπλοκη δημιουργία πλέγματος, ιδιαίτερα γύρω από τις διεπαφές μεταξύ των ζωνών,
- εισάγει σφάλματα παρεμβολής στις συρόμενες διεπαφές, τα οποία μπορεί να επηρεάσουν την ακρίβεια της λύσης,
- μπορεί να είναι υπολογιστικά πιο απαιτητική από την προσέγγιση SRF, ειδικά σε περιπτώσεις με υψηλές ταχύτητες περιστροφής.



Σχήμα 4.2: Η MRF προσέγγιση με τις διαφορετικές ζώνες που χωρίζονται στις διεπιφάνειες.

Για την CFD μοντελοποίηση του φυσητήρα χρησιμοποιήθηκε μια παραλλαγή της MRF προσέγγισης, αυτή του «**συρόμενου πλέγματος**» (Sliding Mesh Method).

Στη μέθοδο αυτή, οι ζώνες της κινούμενης (ρότορα) και ακίνητης (στάτορα) περιοχής συνδέονται μέσω μιας συρόμενης διεπαφής. Κατά τη διάρκεια του υπολογισμού, οι ζώνες που συνδέονται μέσω της ολισθαίνουσας διεπαφής παραμένουν σε επαφή μεταξύ τους (δηλαδή, τα κελία του ρότορα ολισθαίνουν σε σχέση με τα κελία του στάτορα κατά μήκος του οριζίου της διεπαφής σε διακριτά βήματα όπως φαίνεται παρακάτω).



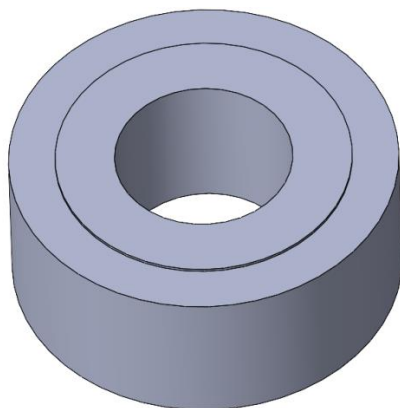
Σχήμα 4.3: Η μέθοδος Sliding Mesh που επιλέχθηκε.

Το πλεονέκτημα της μεθόδου Sliding Mesh είναι ότι το πλέγμα εντός της περιστρεφόμενης περιοχής ενημερώνεται καθ' όλη τη διάρκεια του υπολογισμού για να συμμορφώνεται με τη θέση του περιστρεφόμενου στοιχείου. Αυτό εξασφαλίζει μια πιο ακριβή λύση. Το μειονέκτημα είναι ότι αυτή η μέθοδος είναι πιο απαιτητική υπολογιστικά, κάτι που όμως με κατάλληλο σχεδιασμό του πλέγματος μπορεί να ρυθμιστεί.

Η τεχνική αυτή επιτρέπει τόσο την προσομοίωση ροών σταθερής κατάστασης όσο και μεταβατικής κατάστασης που περιλαμβάνουν περιστρεφόμενα εξαρτήματα. Είναι κατάλληλη για την προσομοίωση στροβιλομηχανών, όπως φυγοκεντρικοί συμπιεστές, αντλίες και ανεμιστήρες, όπου η σχετική κίνηση μεταξύ περιστρεφόμενων και ακίνητων μερών επηρεάζει σημαντικά τη συμπεριφορά ροής, γι' αυτό και επιλέγεται για την προσομοίωση του φυσητήρα.

4.2.2 Όγκος ρευστού στην περιστρεφόμενη περιοχή

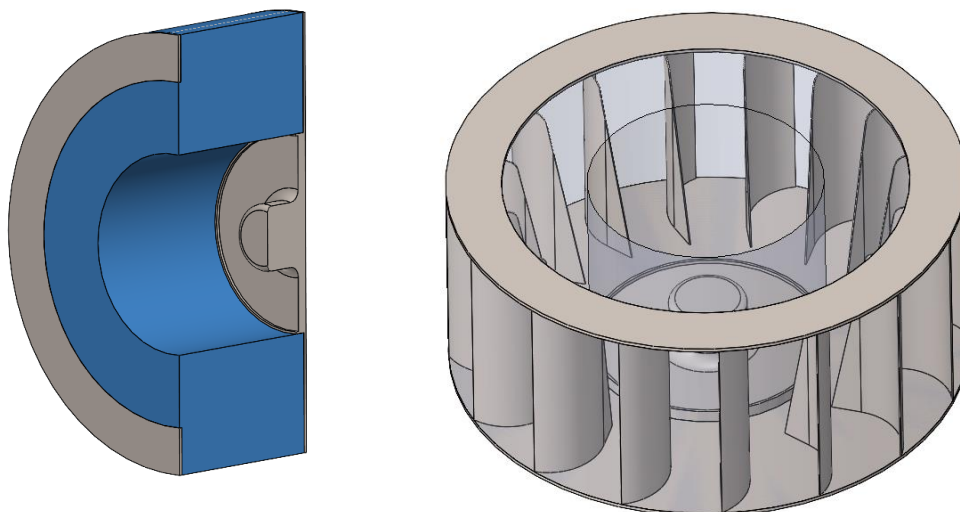
Σχεδιάζεται ένα part επιπλέον στο solidworks το οποίο θα αποτελεί τον όγκο ρευστού εντός της περωτής που περιστρέφεται.



Σχήμα 4.4: Βήμα 1: Δημιουργία του part του περιστρεφόμενου όγκου ρευστού.

Στη συνέχεια, το part αυτό θα εισαχθεί μαζί με τα άλλα δύο (κέλυφος και περωτή) στο assembly που είχε δημιουργηθεί με την γνωστή εντολή Insert Components.

Θα χρησιμοποιηθούν δύο mates, ένα concentric και ένα coincident, ώστε να ευθυγραμμιστεί με τον άξονα της περωτής και να εφάπτεται σε αυτή αντίστοιχα.

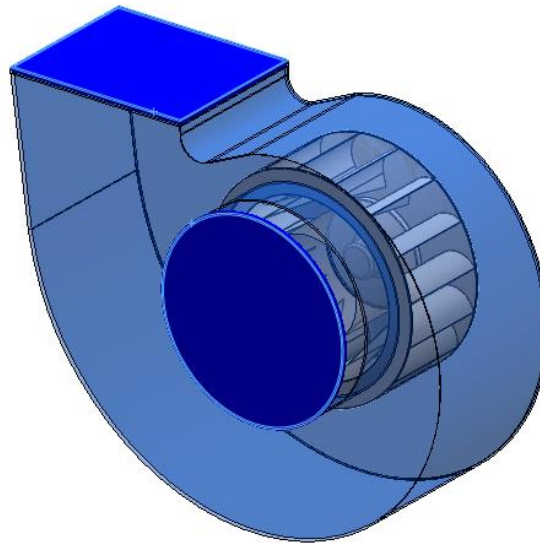


Σχήμα 4.5: Βήμα 2: Εισαγωγή της γεωμετρίας αυτής στο assembly.

4.2.3 Όγκος ρευστού εντός του κελύφους

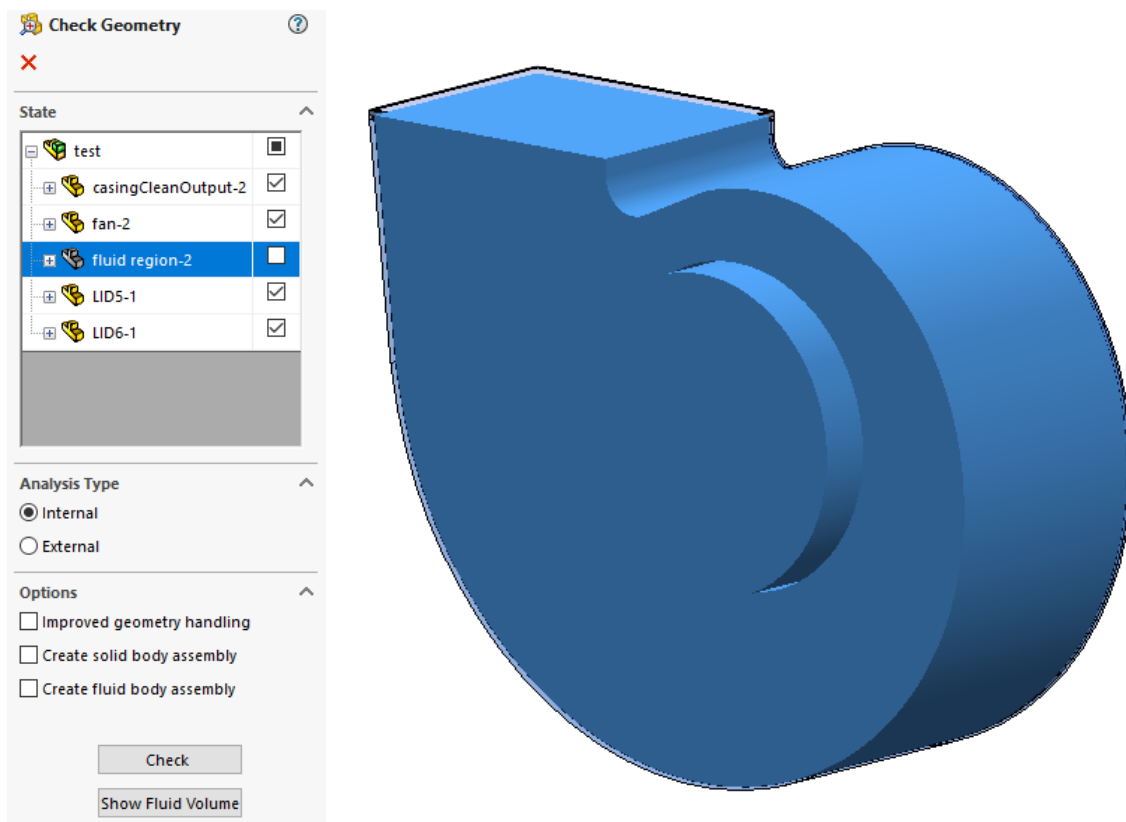
Για να σχεδιαστεί ο υπόλοιπος όγκος του ρευστού εντός της μηχανής, που δεν περιστρέφεται, αρχικά δημιουργούνται δύο «καπάκια» (lids) στην εί-

σοδο και έξοδο του φουσητήρα. Αυτό θα γίνει με την εντολή Create Lids στην γραμμή εντολών της καρτέλας του Flow Simulation.



Σχήμα 4.6: Βήμα 1: Δημιουργία των lids στην είσοδο και έξοδο.

Στην συνέχεια με την εντολή Check Geometry επιλέγεται να μη συμπεριλάβει τον περιστρεφόμενο όγκο ρευστού για τη δημιουργία της γεωμετρίας και τον τύπο ανάλυσης σε «εσωτερικό». Πατώντας Check ελέγχεται η γεωμετρία που σχηματίστηκε και αφού είναι επιτυχής τότε με το Show Fluid Volume οπτικοποιείται η εν λόγω γεωμετρία.

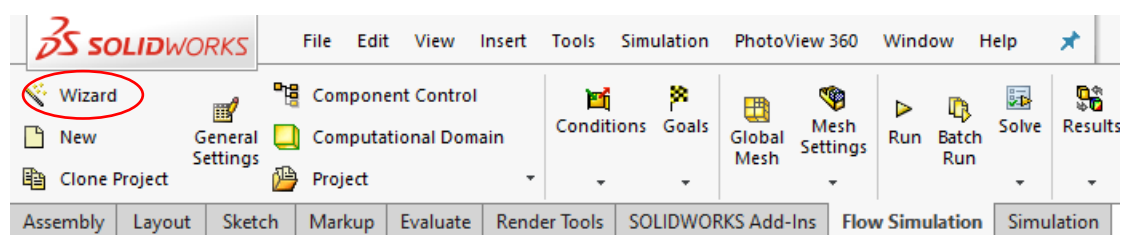


Σχήμα 4.7: Βήμα 2: Δημιουργία του όγκου εντός του κελύφους.

Παρατηρείται λοιπόν ο όγκος ρευστού εντός του φυσητήρα ο οποίος δεν θα περιστρέφεται. Έτσι, ολοκληρώθηκε η εξαγωγή της γεωμετρίας προς πλεγματοποίηση και στις δύο περιοχές όπου θα λυθούν οι εξισώσεις.

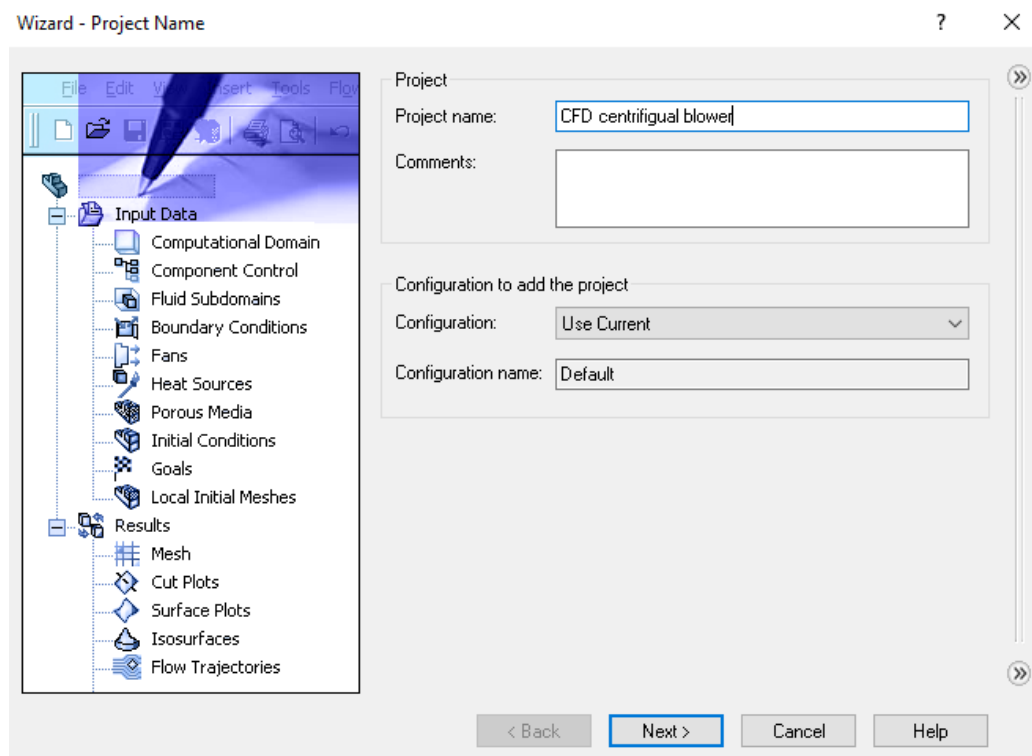
4.2.3 Δημιουργία Project στο Flow Simulation

Αφού έχουν καθοριστεί οι απαραίτητες γεωμετρίες έχει έρθει η ώρα για να στηθεί το CFD μοντέλο. Στη γραμμή εντολών του Flow Simulation επιλέγεται η εντολή Wizard.

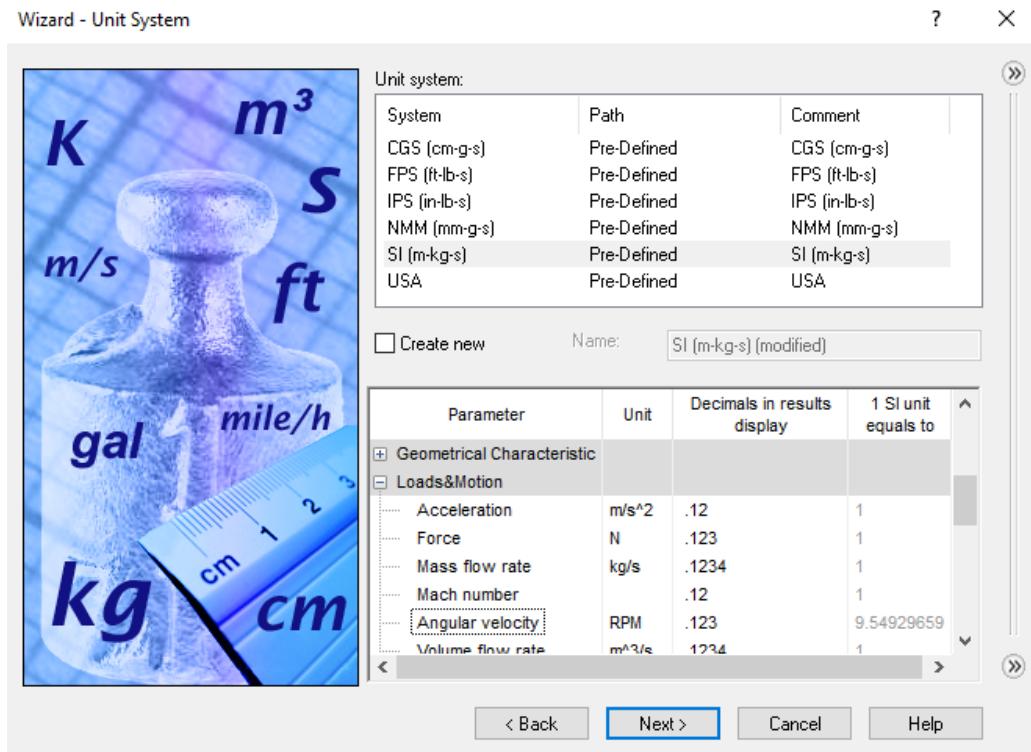


Σχήμα 4.8: Βήμα 1: Άνοιγμα ενός νέου project με την εντολή Wizard.

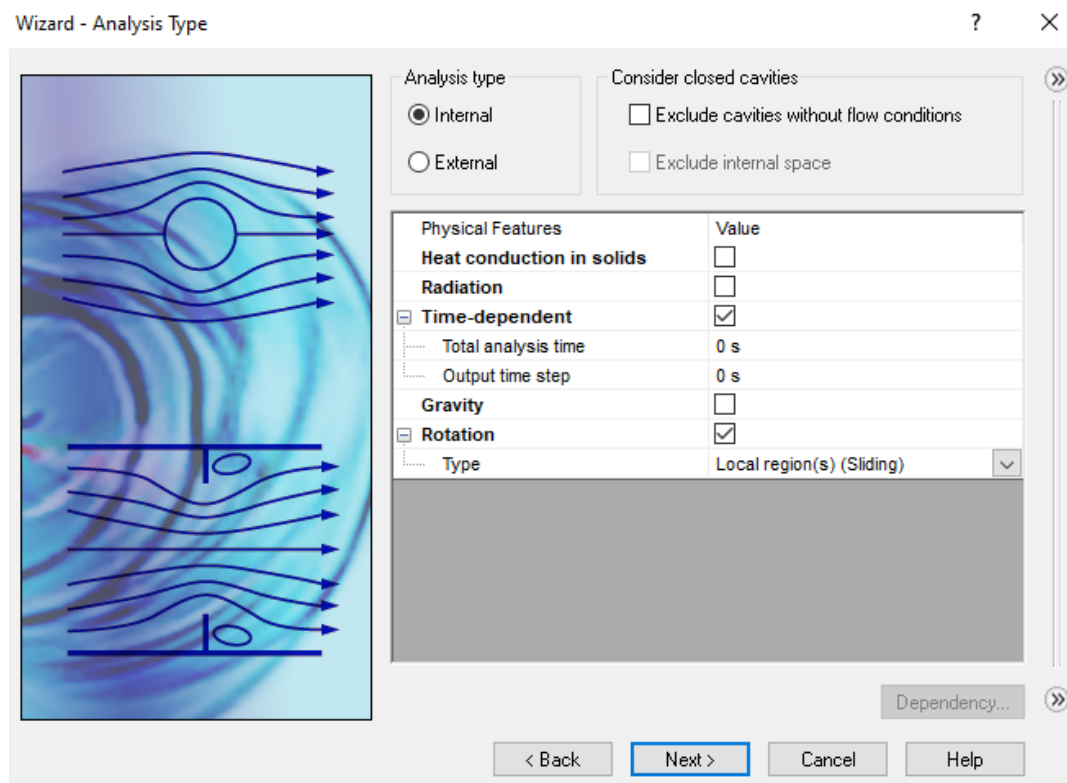
Το παράθυρο που θα ανοίξει κατευθύνει τον χρήστη ώστε να ορίσει τις βασικές παραμέτρους του μοντέλου. Με τη σειρά ο χρήστης επιλέγει:



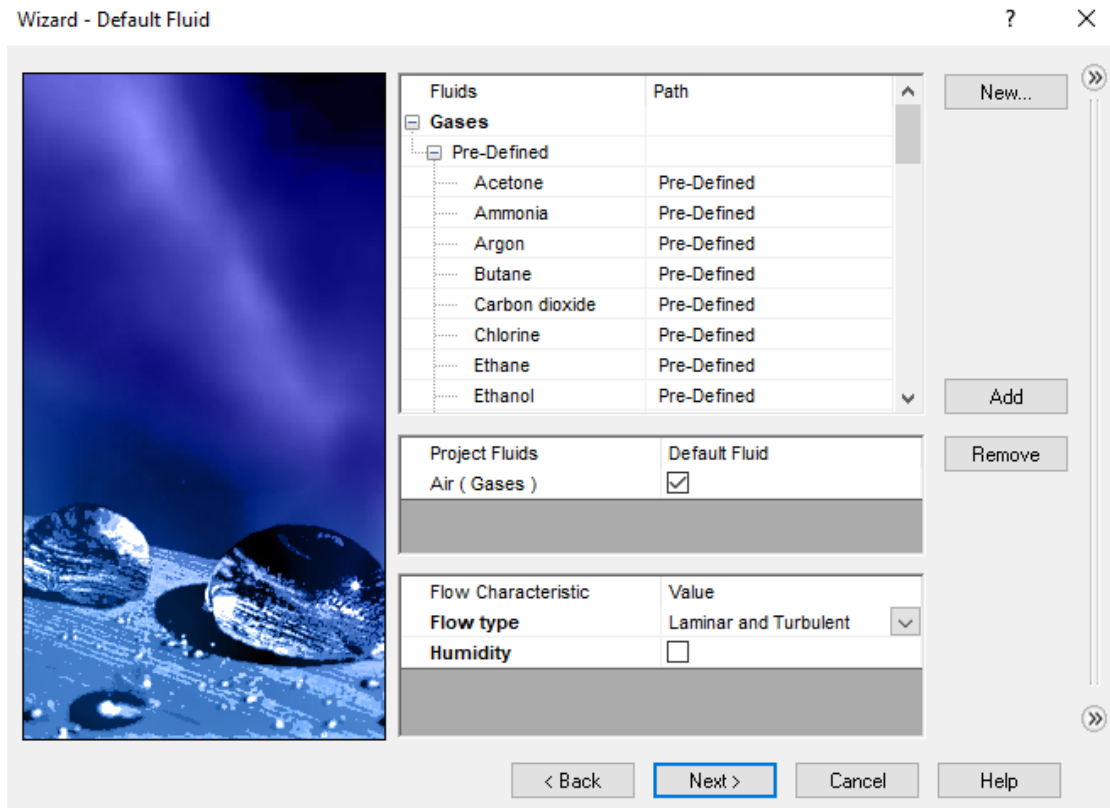
Σχήμα 4.9: Όνομα στο Project.



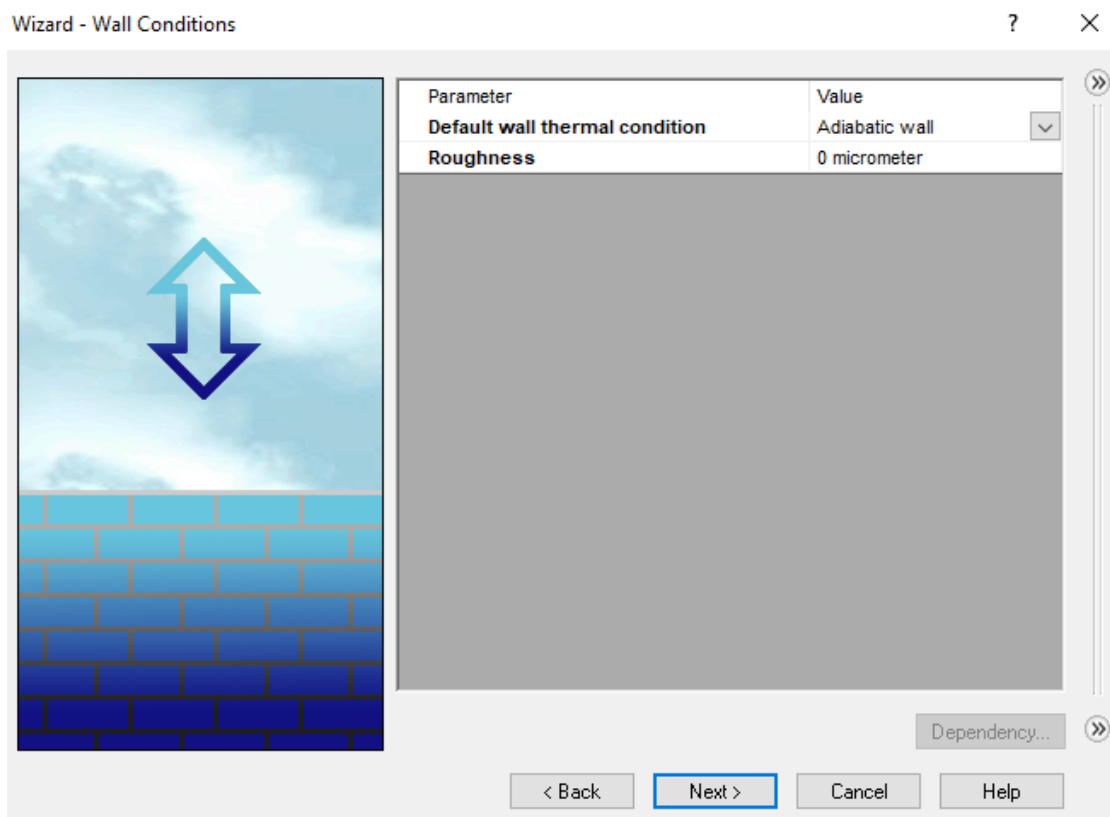
Σχήμα 4.10: Μετρικό σύστημα (αλλαγή της μονάδας μέτρησης της ταχύτητας περιστροφής σε rpm).



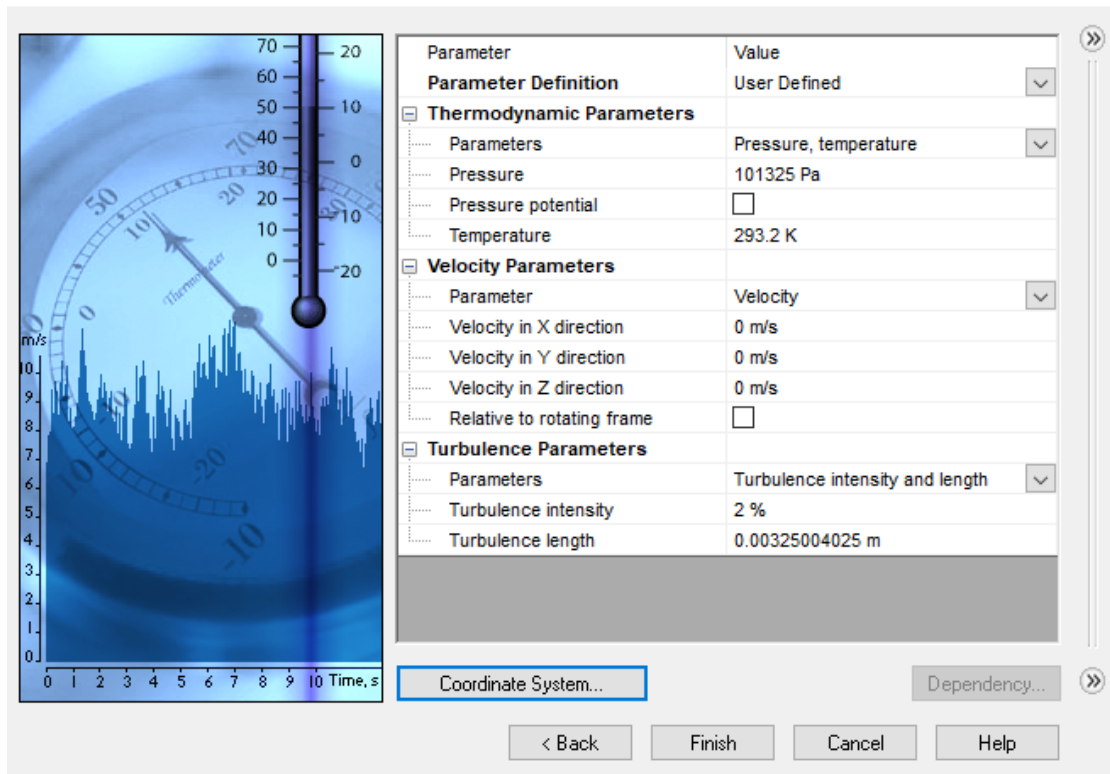
Σχήμα 4.11: Τύπος ανάλυσης.



Σχήμα 4.12: Είδος ρευστού.

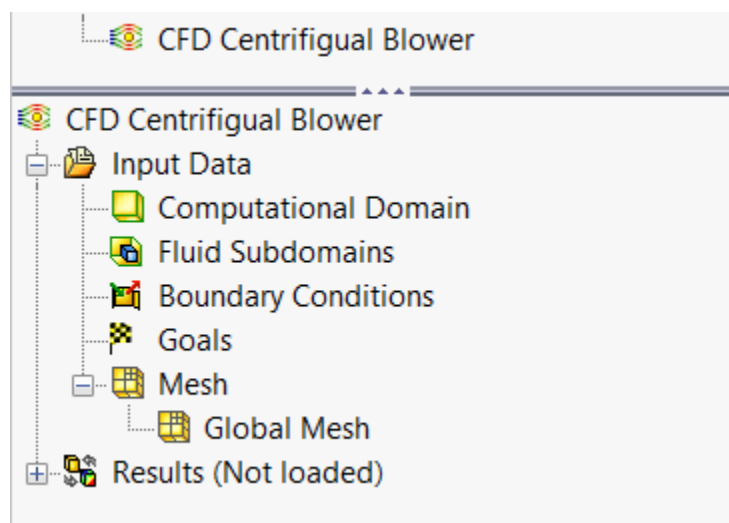


Σχήμα 4.13: Συνθήκες στα τοιχώματα.



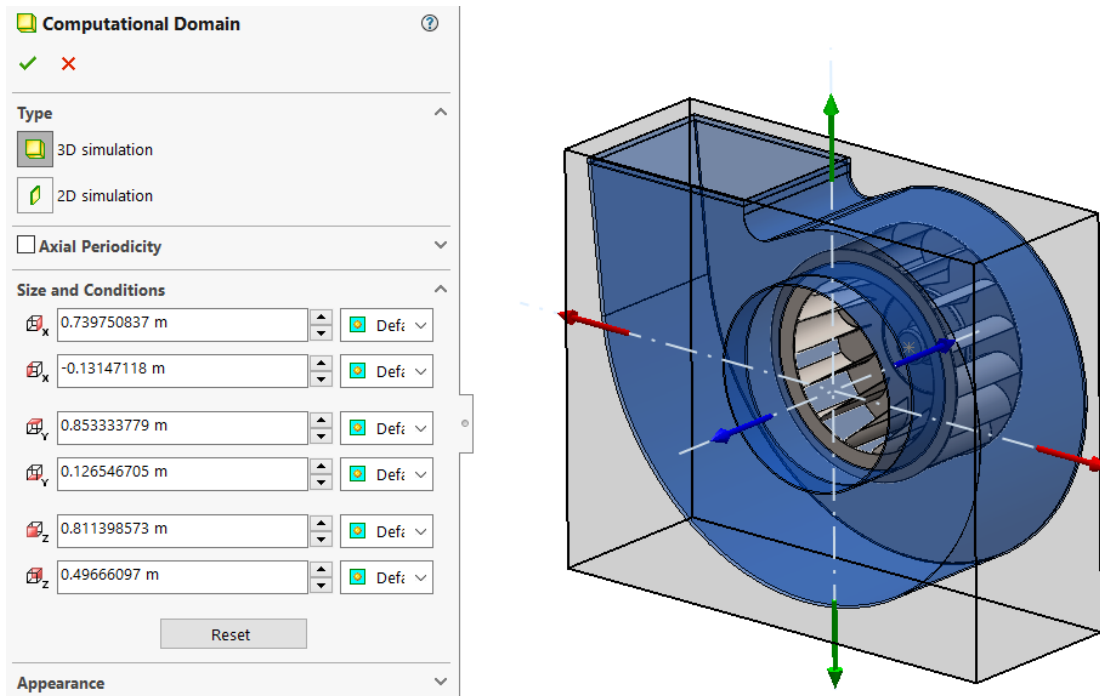
Σχήμα 4.14: Αρχικές συνθήκες (θα τροποποιηθούν όταν γίνουν οι παραμετρικές μελέτες).

Αφού ο χρήστης επιλέξει τις επιθυμητές παραμέτρους πατώντας finish δημιουργείται το νέο CFD Project, του οποίου το μενού παρουσιάζεται στα αριστερά της οθόνης.



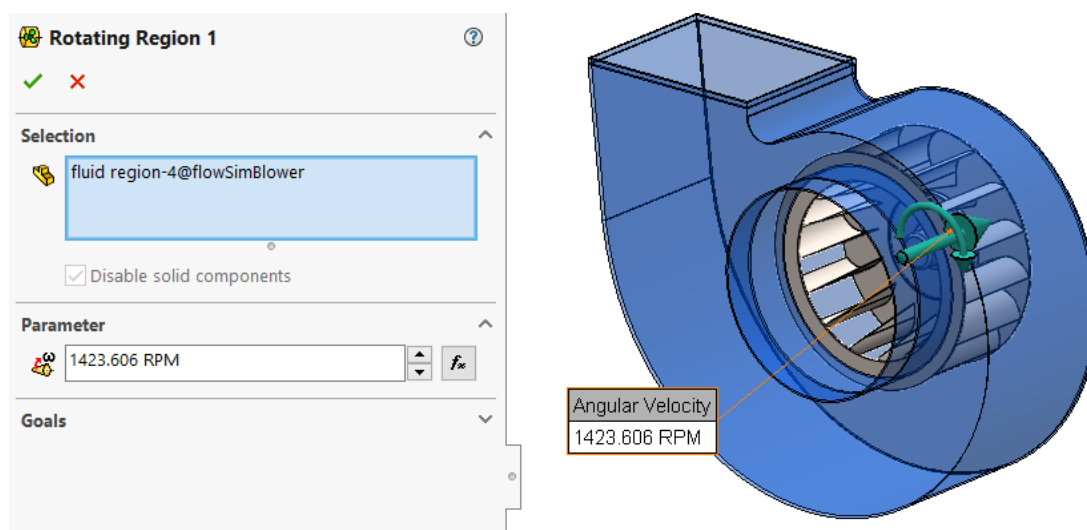
Σχήμα 4.15: Το μενού του νέου Flow Simulation Project.

Στην επιλογή του Computational Domain καθορίζεται η τρισδιάστατη γεωμετρία του υπολογιστικού χωρίου ως ένα ορθογώνιο εντός του οποίου βρίσκεται ο φυσητήρας



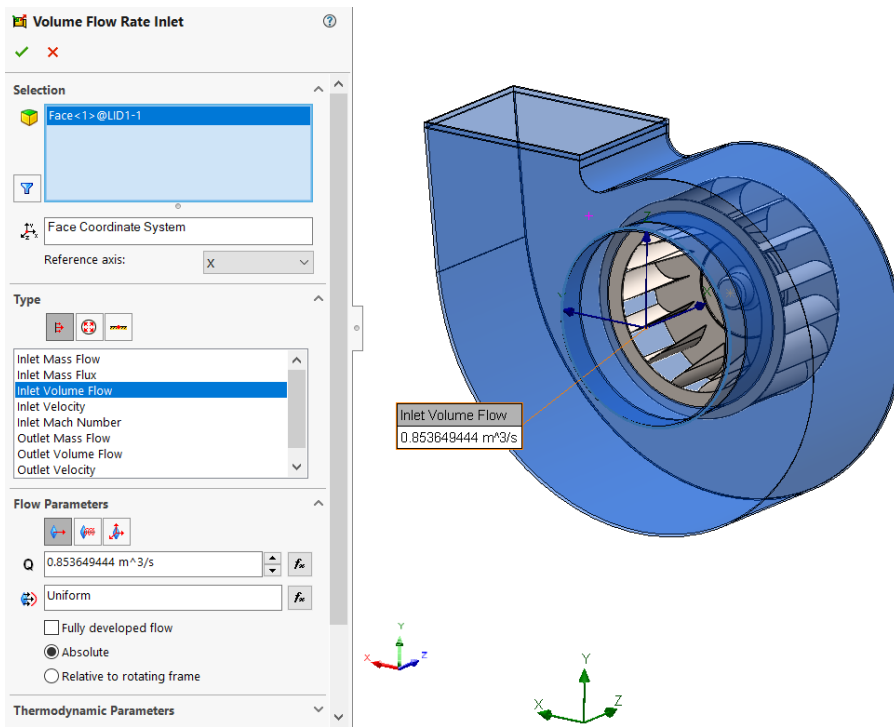
Σχήμα 4.16: Βήμα 2: Το υπολογιστικό χωρίο της προσομοίωσης.

Στη συνέχεια με την δεξιά κλικ στην επιλογή Rotating Regions και Insert Rotating Region θα καθοριστεί η περιοχή του ρευστού που περιστρέφεται (μέτρο και φορά της ταχύτητας περιστροφής), η οποία προφανώς είναι ο όγκος ρευστού εντός της περωτής.

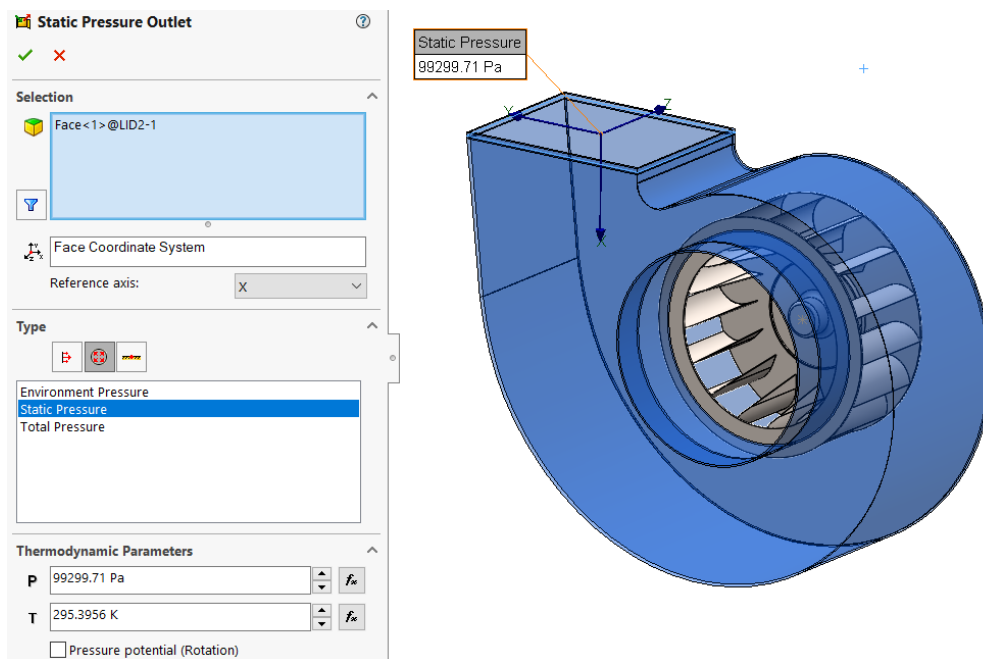


Σχήμα 4.17: Βήμα 3: Καθορισμός της περιοχής του ρευστού που θα περιστρέφεται.

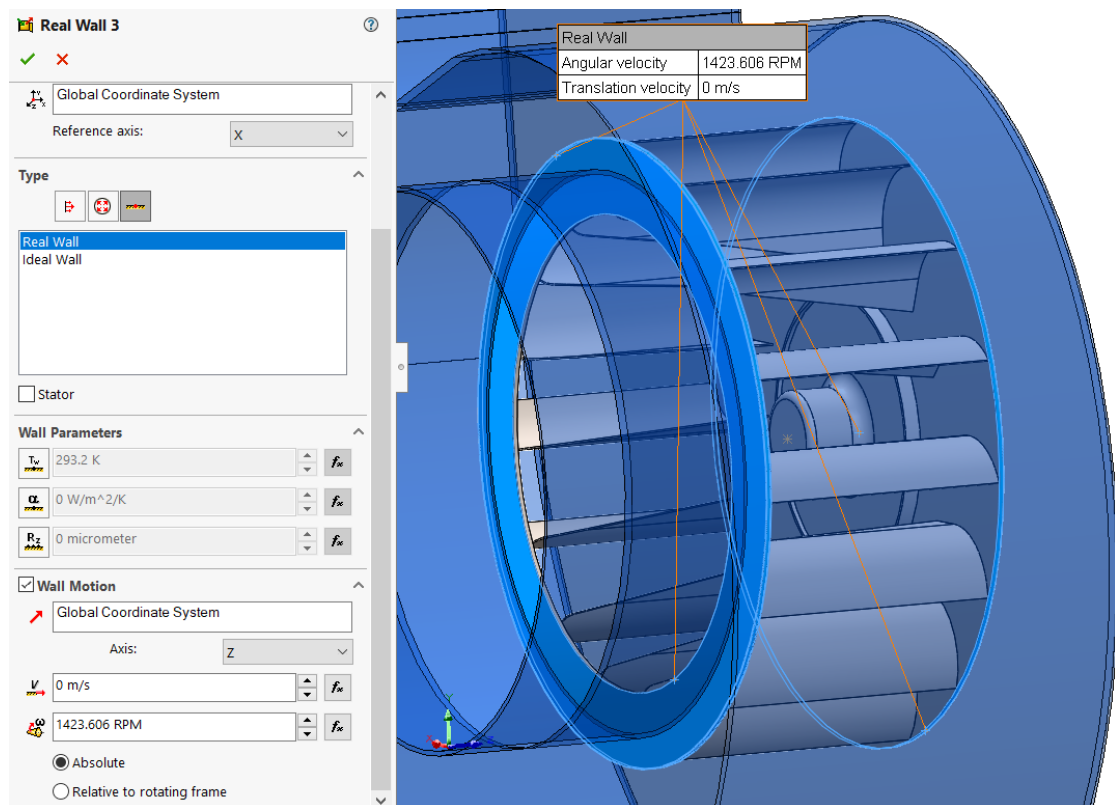
Ομοίως με δεξί κλικ στην επιλογή Boundary Conditions και Insert Boundary Conditions δημιουργούνται τρεις οριακές συνθήκες. Η πρώτη αφορά τον καθορισμό της παροχής όγκου στην είσοδο, η δεύτερη την στατική πίεση στην έξοδο και η τρίτη τις συνθήκες τοίχου στην περωτή.



Σχήμα 4.18: Βήμα 4: Οριακή συνθήκη στην είσοδο.



Σχήμα 4.19: Βήμα 5: Οριακή συνθήκη στην έξοδο.



Σχήμα 4.20: Βήμα 6: Οριακή συνθήκη τοίχου στην περωτή.

Τα τοιχώματα της περωτής τα οποία λαμβάνουν συνθήκη τοίχου είναι εκείνα τα οποία δεν έρχονται σε επαφή με την περιοχή του ρευστού εντός της περωτής που περιστρέφεται, άρα πρόκειται για το εμπρός και περιφερειακό τμήμα του shroud και το πίσω και περιφερειακό τμήμα του hub.

Επιπλέον, δίνεται κίνηση σε αυτά τα τοιχώματα καθώς περιστρέφονται μαζί με την περωτή και την περιοχή ρευστού εντός της.

Αξίζει να τονιστεί ότι η παροχή στην είσοδο, η πίεση στην έξοδο, η θερμοκρασία και η ταχύτητα περιστροφής θα επιλεγθούν κατάλληλα όταν δημιουργηθούν οι παραμετρικές μελέτες.

Επόμενο βήμα είναι να οριστούν τα φυσικά μεγέθη-στόχοι που θα υπολογίζονται κατά την προσομοίωση και ποια από αυτά θα χρησιμοποιηθούν ως κριτήρια σύγκλισης για την επαναληπτική διαδικασία της επίλυσης της ροής. Αυτό θα γίνει με την επιλογή Goals. Με δεξί κλικ δίνεται η επιλογή στον χρήστη να δημιουργήσει Global, Point, Surface, Volume και Equation Goals.

Για την προσομοίωση του φυσητήρα ο μηχανικός θέλει να γνωρίζει όλα τα μεγέθη που περιγράφουν την λειτουργία του. Θα δημιουργηθούν λοιπόν τα εξής Goals:

- Παροχή όγκου στην είσοδο (surface goal)

- Ολική πίεση στην είσοδο (surface goal)
- Παροχή όγκου στην έξοδο (surface goal)
- Στατική πίεση στην έξοδο (surface goal)
- Ολική πίεση στην έξοδο (surface goal)
- Ροπή στην περρωτή (surface goal)
- Διαφορά ολικών πιέσεων εισόδου-εξόδου (equation goal)
- Διαφορά ολικής-στατικής πίεσης εισόδου-εξόδου (equation goal)
- Συντελεστής απόδοσης ολική προς ολική (equation goal)
- Συντελεστής απόδοσης ολική προς στατική (equation goal)

The screenshot shows the 'Surface Goals' configuration window. It includes a 'Selection' area with a blue box, a 'Parameters' table, and an 'Equation Goal 1' configuration section.

Parameter	Min	Av	Max	Bulk Av	Use for Conv.
Static Pressure	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Total Pressure	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Dynamic Pressure	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Temperature (Fluid)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Total Temperature	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Mean Radiant Temperature	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Operative Temperature	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Draught Rate	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Density (Fluid)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Mass Flow Rate			<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>
Volume Flow Rate			<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>
CAD Area			<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>
Area (Fluid)			<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>
Velocity	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Velocity (X)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Velocity (Y)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Velocity (Z)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Circumferential Velocity	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Uniformity Index			<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>

Equation Goal 1: No unit

Expression: Please specify an expression. To add area or volume please create an appropriate goal.

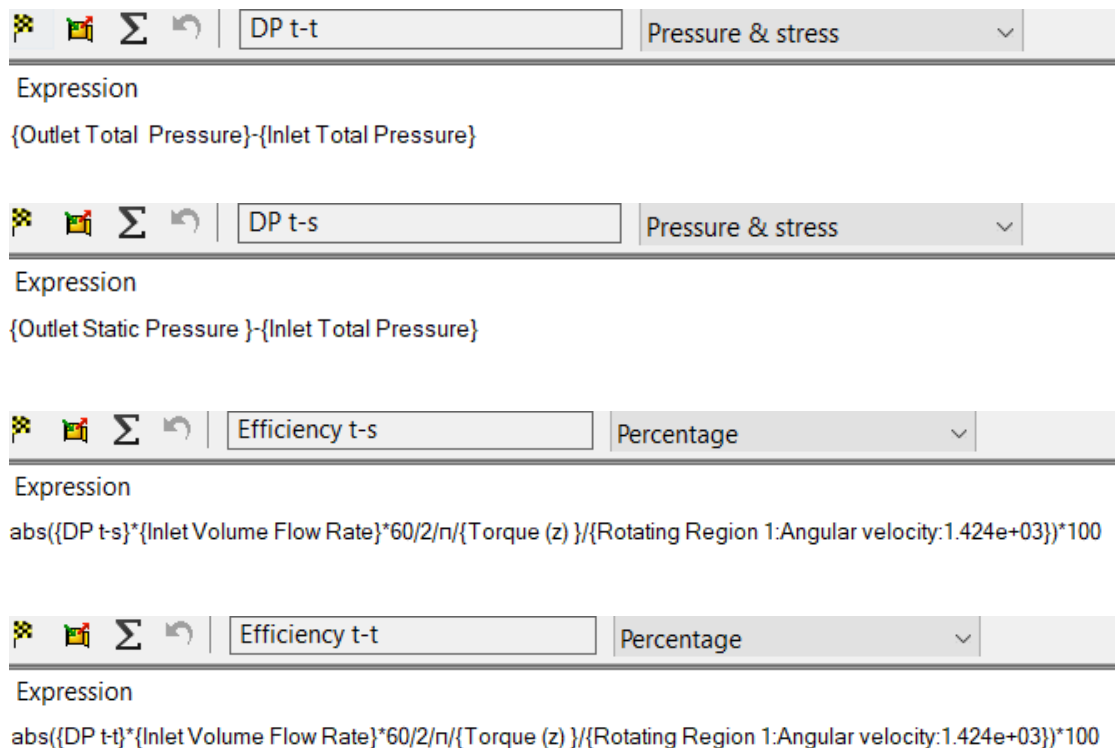
Calculator interface with buttons for numbers (0-9), operators (+, -, *, /, ^, √), functions (sin, cos, tan, lg, exp, ln, abs), and constants (π, g, R, σ, min, max, average, t).

Use for convergence control

Σχήμα 4.21: Βήμα 7: Δημιουργία Surface και Equation Goals.

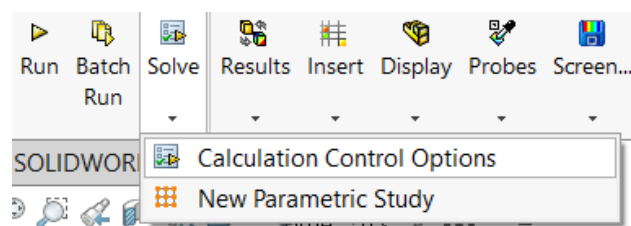
Για την δημιουργία Surface Goal αρχικά πρέπει να επιλέξει ο χρήστης την επιφάνεια στην οποία θα γίνει ο υπολογισμός. Στη συνέχεια το λογισμικό όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.20 παρέχει μια πληθώρα από φυσικά μεγέθη. Επιλέγεται το κατάλληλο με κλικ στο μεσαίο κουτάκι που αντιστοιχεί στη μέση τιμή του φυσικού μεγέθους της επιφάνειας που επιλέχθηκε.

Στα Equation Goals ο χρήστης θα πληκτρολογήσει τη μαθηματική έκφραση που θα δώσει το ζητούμενο μέγεθος, καθώς και την κατάλληλη μονάδα μέτρησης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.21.

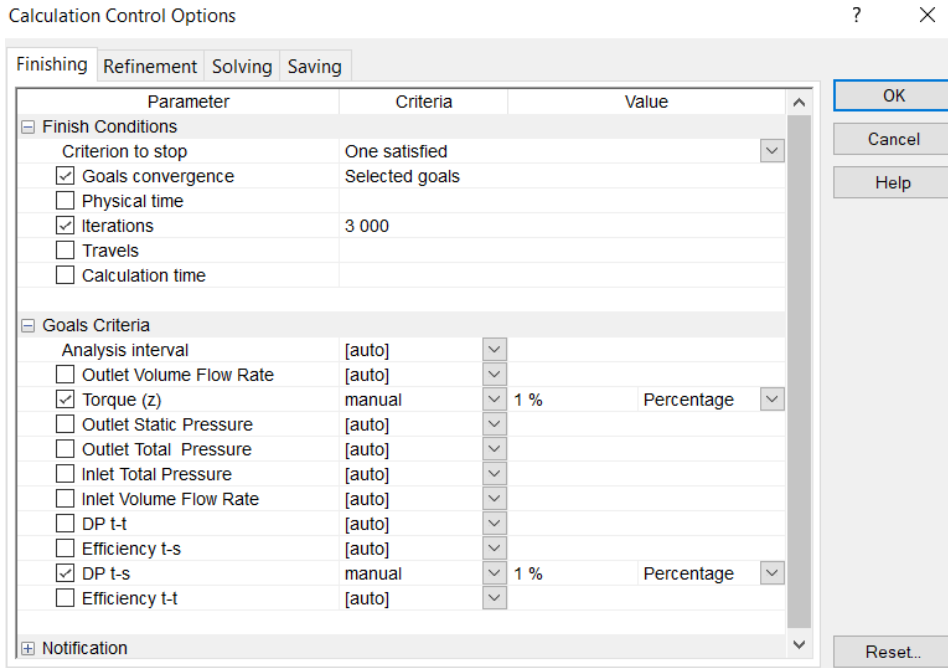


Σχήμα 4.22: Οι μαθηματικές εκφράσεις των Equation Goals που δημιουργήθηκαν.

Φυσικά με την επιλογή Use for convergence control το Goal που δημιουργήθηκε αυτόματα θα χρησιμοποιηθεί ως κριτήριο σύγκλισης. Τα κριτήρια σύγκλισης καθώς και οι μέγιστες επιτρεπόμενες επαναλήψεις του κώδικα καθορίζονται επίσης και από το menu των Calculation Control Options.



Σχήμα 4.23: Η επιλογή Calculation Control Options.

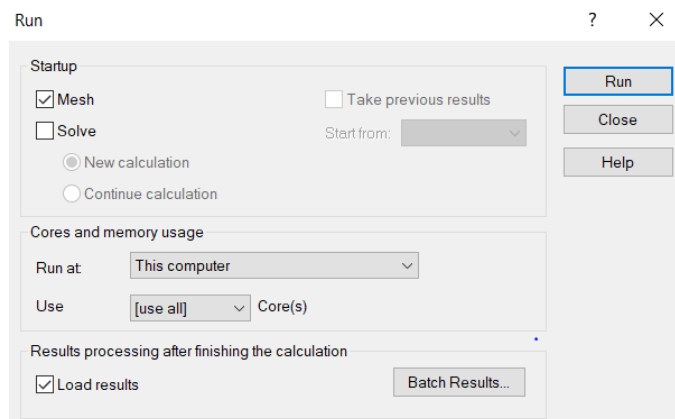


Σχήμα 4.24: Οι επιλογές που δίνει στον χρήστη η καρτέλα του Calculation Control Options.

Επιλέγονται ως κριτήρια σύγκλισης η ροπή και η διαφορά ολικής μεστατική πίεση μεταξύ εισόδου-εξόδου. Ο κώδικας θα θεωρείται ότι έχει συγκλίνει όταν τα δύο αυτά μεγέθη δεν αλλάζουν περισσότερο από 1% στις τελευταίες επαναλήψεις. Η επιλογή αυτών των μεγεθών γίνεται διότι με βάση αυτά υπολογίζονται και οι βαθμοί απόδοσης.

Τέλος, για τη δημιουργία του πλέγματος με δεξί κλικ στην επιλογή Mesh πρώτα δημιουργείται ένα Global Mesh και στη συνέχεια ένα Local Mesh. Το πρώτο πλέγμα είναι γενικότερο, όμοιο για όλο το υπολογιστικό χωρίο, ενώ το δεύτερο επικεντρώνεται στην πιο περίπλοκη γεωμετρία εντός της περωτής, πυκνώνοντας κοντά στα περύγια όπου τα ρευστοδυναμικά φαινόμενα παρουσιάζουν μεγαλύτερο ενδιαφέρον.

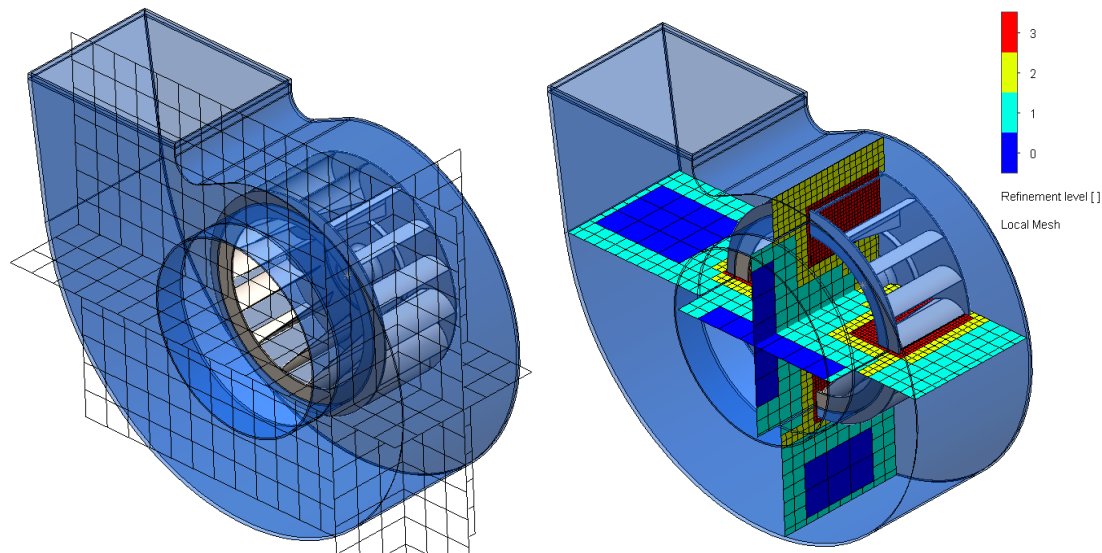
Δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να οπτικοποιήσει το πλέγμα μέσω της εντολής Run.



Σχήμα 4.25: Επιλέγοντας μόνο το Mesh ο χρήστης μπορεί να τρέξει μόνο το πλέγμα.

Έπειτα από το μενού στα αριστερά της οθόνης, αφού έχει τρέξει το πλέγμα, στην επιλογή Results→Mesh μπορεί να ρυθμιστεί το επίπεδο στο οποίο θα οπτικοποιηθεί το πλέγμα.

Στο Κεφάλαιο 5 θα γίνει παραμετρική ανάλυση σχετικά με την πυκνότητα του πλέγματος όπου και θα επεξηγηθούν επακριβώς τα εργαλεία του Flow Simulation για την κατασκευή του.

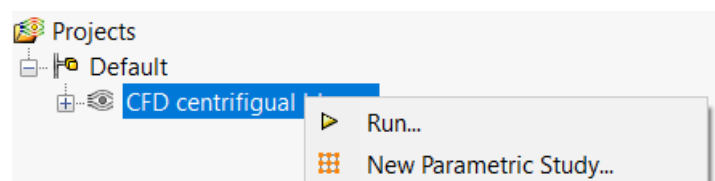


Σχήμα 4.26: Βήμα 8: Δημιουργία Global Mesh (αριστερά) και Local Mesh (δεξιά).

4.2.4 Δημιουργία παραμετρικής μελέτης

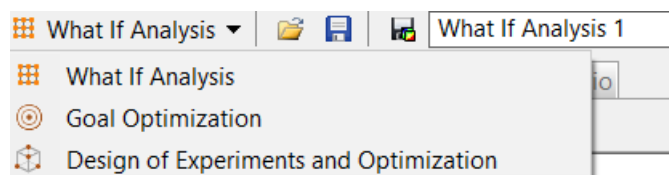
Το περιβάλλον του Flow Simulation δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να μελετήσει παραμετρικά τη μηχανή. Με την μεθοδολογία που θα υποδειχθεί παρακάτω μπορεί να εξεταστεί η συμπεριφορά της μηχανής για διαφορετικές συνθήκες περιβάλλοντος, για άλλες οριακές συνθήκες και για διαφορετικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά.

Πρώτο βήμα είναι να δημιουργηθεί η παραμετρική μελέτη με δεξί κλικ στο όνομα του Project και στη συνέχεια New Parametric Study.



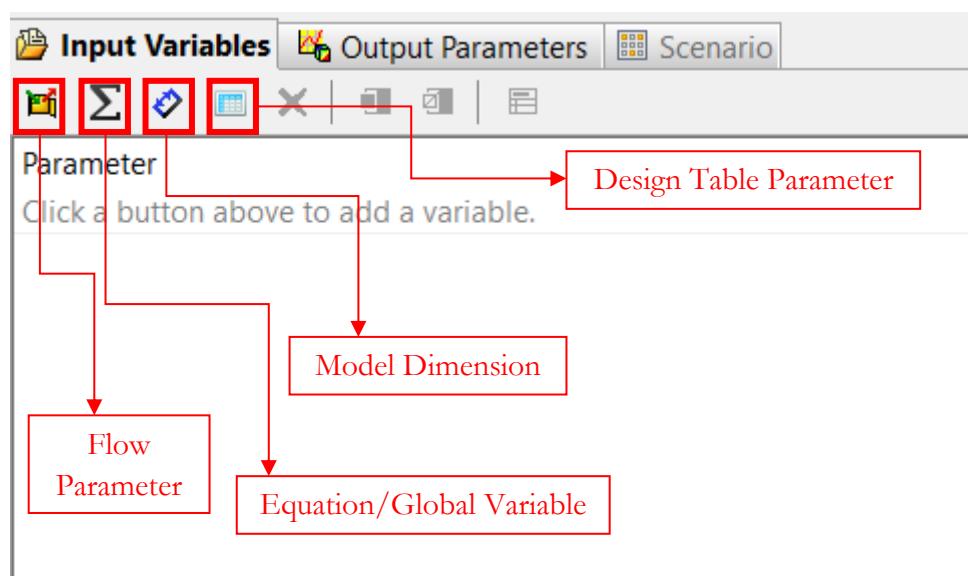
Σχήμα 4.27: Βήμα 1: Δημιουργία νέας παραμετρικής μελέτης.

Στο κάτω μέρος της οθόνης ανοίγει η καρτέλα της παραμετρικής ανάλυσης, όπου ο χρήστης θα καθορίσει πλήρως την μελέτη που θέλει να εκτελέσει. Από τις επιλογές του είδους της παραμετρικής για τις μελέτες του φυσητήρα που θα γίνουν επιλέγεται ο τύπος What If Analysis.



Σχήμα 4.28: Βήμα 2: Επιλογή του τύπου της παραμετρικής ανάλυσης.

Στο επόμενο βήμα απαιτείται ο καθορισμός των μεταβλητών οι οποίες θα είναι οι παράμετροι στην καρτέλα Input Variables. Αυτές οι μεταβλητές μπορεί να είναι παράμετροι της ροής, μεταβλητές εξισώσεων, γεωμετρικές διαστάσεις είτε παράμετροι από πίνακα. Στις μελέτες που θα εκτελεστούν θα χρησιμοποιηθούν παράμετροι της ροής και γεωμετρικές διαστάσεις ως μεταβλητές σχεδιασμού.



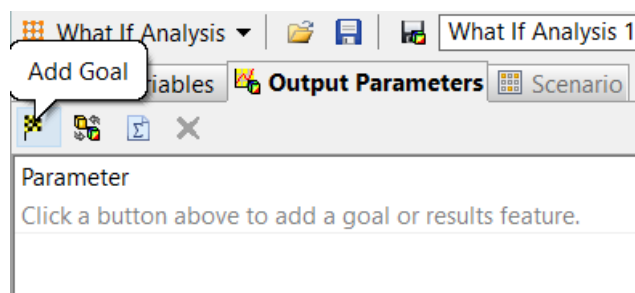
Σχήμα 4.29: Βήμα 3: Επιλογή των παραμέτρων της μελέτης.

Στις παραμέτρους της ροής συμπεριλαμβάνονται οι οριακές συνθήκες και το πλέγμα ενώ στις γεωμετρικές παραμέτρους όλες οι διαστάσεις με τις οποίες σχεδιάστηκε το CAD μοντέλο.

Στη φάση αυτή καθορίζεται το εύρος και το πλήθος των τιμών το οποίο θα λάβει η κάθε παράμετρος κατά τη μελέτη με τις επιλογές που δίνονται από το λογισμικό. Οι τιμές που μπορούν να πάρουν είναι διακριτές και είτε δίνονται

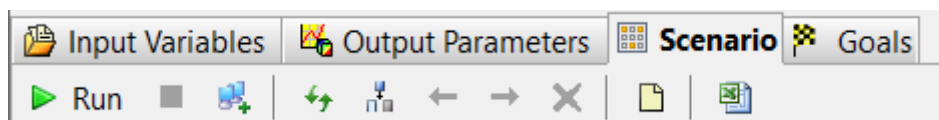
από τον χρήστη, είτε λαμβάνονται από ένα άλλο αρχείο, είτε ακολουθούν μια κατανομή μεταξύ μιας μέγιστης και μιας ελάχιστης τιμής.

Στην επόμενη καρτέλα Output Parameters με την επιλογή Add Goal καθορίζονται τα μεγέθη που ενδιαφέρουν τον χρήστη, θα παρακολουθούνται από την μελέτη και θα είναι το αποτέλεσμα της.



Σχήμα 4.30: Βήμα 4: Επιλογή των μεταβλητών που θα αποτελέσουν την έξοδο της παραμετρικής.

Τέλος, στην καρτέλα Scenario παρουσιάζεται μια σύνοψη της παραμετρικής μελέτης, όπου ο χρήστης μπορεί να επεξεργαστεί τα σημεία σχεδιασμού που έχουν δημιουργηθεί και φυσικά να αρχίσει την παραμετρική μελέτη με την επιλογή Run.



Σχήμα 4.31: Βήμα 5: Σύνοψη όλων των σημείων σχεδιασμού που θα μελετηθούν και εκτέλεση της παραμετρικής.

Κεφάλαιο 5

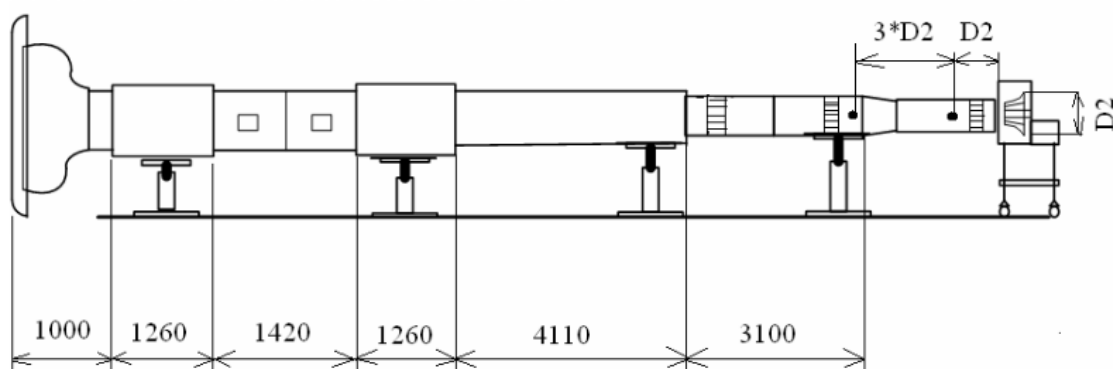
Παραμετρική ανάλυση

5.1 Επικύρωση του CFD μοντέλου

Για να θεωρηθεί ακριβής και αποδεκτή μία υπολογιστική προσομοίωση θα πρέπει τα αποτελέσματα που θα δώσει να επικυρωθούν ώστε να διαπιστωθεί η αξιοπιστία του μοντέλου. Στο ΕΘΣ είχαν μελετήσει πειραματικά την συγκεκριμένη μηχανή, οπότε τα πειραματικά δεδομένα θα χρησιμοποιηθούν ως αναφορά για να επικυρωθεί το CFD μοντέλο.

5.1.1 Η πειραματική διάταξη και οι μετρήσεις

Τα πειράματα που είχαν πραγματοποιηθεί στο ΕΘΣ για την μελέτη του φυσητήρα έκαναν χρήση της εγκατάστασης δοκιμών που απεικονίζεται στα Σχήματα 5.1. και 5.2. Σημειώνεται πως η διάταξη αυτή συγκροτήθηκε σύμφωνα με το πρότυπο DIN 24163.



Σχήμα 5.1: Υπό κλίμακα σκάρφιγμα της πειραματικής εγκατάστασης.



Σχήμα 5.2: Φωτογραφίες της πλήρους πειραματικής διάταξης.

Από τις μετρήσεις που είχαν γίνει στον φυσητήρα με γεωμετρία όπως σχεδιάστηκε στο Κεφάλαιο 3 θα χρησιμοποιηθούν 9 πειραματικά σημεία. Τα σημεία αυτά σχηματίζουν τη γραμμή λειτουργίας της μηχανής και βοήθησαν τόσο στη σωστή ρύθμιση όλων των παραμέτρων του μοντέλου προσομοίωσης, όσο και στην επικύρωσή του.

Τα φυσικά μεγέθη που απαιτούνται για την επικύρωση του μοντέλου, υπολογίστηκαν είτε άμεσα είτε έμμεσα με κάποιον επιπλέον υπολογισμό από τις πειραματικές μετρήσεις. Συγκεκριμένα τα μεγέθη αυτά είναι:

- Ταχύτητα περιστροφής της περωτής N
- Παροχή όγκου στην είσοδο Q
- Ολική θερμοκρασία στην έξοδο T_{t2}
- Στατική πίεση στην έξοδο P_{s2}
- Διαφορά ολικής πίεσης στην είσοδο με στατικής στην έξοδο ΔP_{t-s}
- Βαθμός απόδοσης φυσητήρα ολικών προς στατικές συνθήκες η_{t-s}

5.1.2 Παραμετρική ανάλυση με το Flow Simulation και σύγκρισή των αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα πειραματικά

Στο σημείο αυτό θα δημιουργηθεί με τη διαδικασία που υποδείχτηκε στο Κεφάλαιο 4 η πρώτη παραμετρική ανάλυση για τα 9 σημεία σχεδιασμού. Ως μεταβλητές εισόδου στο λογισμικό θα δοθούν για κάθε ένα από τα σημεία αυτά τα παρακάτω:

- Ταχύτητα περιστροφής της περωτής N
- Παροχή όγκου στην είσοδο Q
- Ολική θερμοκρασία στην έξοδο T_{t2}

- Στατική πίεση στην έξοδο P_{s2}

Τα μεγέθη αυτά είναι τα δεδομένα της προσομοίωσης που ρυθμίζονται από τον μηχανικό (στροφές και παροχή) και το περιβάλλον (πίεση και θερμοκρασία στην έξοδο).

Τα αποτελέσματα τα οποία θα λάβουμε από το λογισμικό θα είναι:

- Ροπή που ασκείται στην περωτή T
- Διαφορά ολικής πίεσης στην είσοδο με στατική στην έξοδο ΔP_{t-s}
- Βαθμός απόδοσης ολικών προς στατικές συνθήκες για την περωτή $\eta_{imp,t-s}$

Για να υπολογιστεί όμως ο συνολικός βαθμός απόδοσης της μηχανής θα πρέπει να γίνει χρήση του βαθμού απόδοσης η_{motor} του ηλεκτροκινητήρα ο οποίος περιστρέφει την περωτή. Έτσι, υπολογίζεται εύκολα ο συνολικός βαθμός απόδοσης από την σχέση (5.1).

$$\eta_{t-s} = \eta_{motor} \cdot \eta_{imp,t-s} \quad (5.1)$$

Για τον βαθμό απόδοσης του ηλεκτροκινητήρα θα χρησιμοποιηθεί η σχέση (5.2) η οποία υπολογίζει την απόδοση ως καθαρό αριθμό (όχι ποσοστό %) με βάση την ισχύ P μετρούμενη σε Watt.

$$\eta_{motor} = -0.0037 \cdot \ln\left(\frac{P}{1000 \cdot \eta_{motor}}\right)^3 - 0.0457 \cdot \ln\left(\frac{P}{1000 \cdot \eta_{motor}}\right)^2 + \\ + 0.0433 \cdot \ln\left(\frac{P}{1000 \cdot \eta_{motor}}\right) + 0.7934 \quad (5.2)$$

Όπου η ισχύς σε Watt δίνεται από την σχέση (5.3) όπου η ταχύτητα μετράται σε rpm και η ροπή σε Nm.

$$P = \pi NT / 30 \quad (5.3)$$

Ξεκινώντας λοιπόν αντίστροφα από τα δεδομένα που είναι γνωστά υπολογίζεται η ισχύς και στη συνέχεια με μια επαναληπτική διαδικασία λύνεται η μη-γραμμική εξίσωση (5.2) με άγνωστο τον βαθμό απόδοσης του ηλεκτροκινητήρα. Τέλος, με την σχέση (5.1) υπολογίζεται ο βαθμός απόδοσης του φυσητήρα.

Η γραμμή φορτίου (system operating curve) για το οποίο θα δουλεύει η μηχανή περιγράφεται από την παρακάτω παραβολική σχέση.

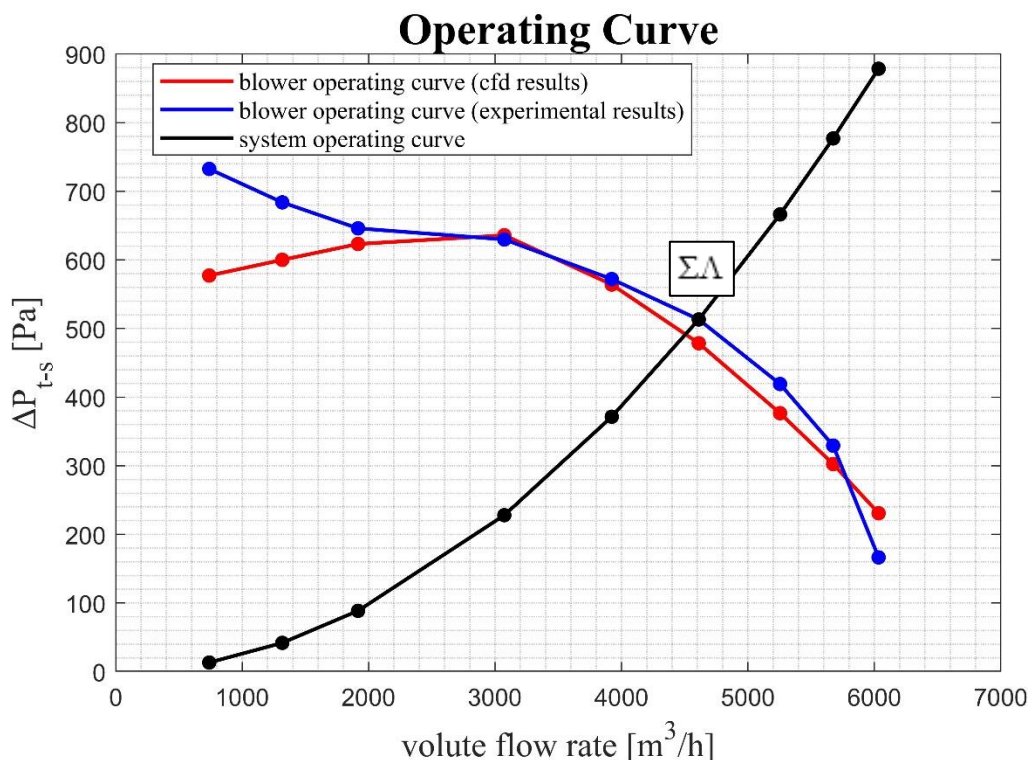
$$\Delta P = k \cdot Q^2 \quad (5.4)$$

Όπου k είναι συντελεστής, ο οποίος για να βρεθεί χρειάζεται να είναι γνωστό το σημείο λειτουργίας της μηχανής που ικανοποιεί τις απαιτήσεις του φορτίου. Για την συγκεκριμένη περίπτωση θεωρούμε σαν σημείο που ικανοποιεί τις απαιτήσεις του φορτίου το εξής:

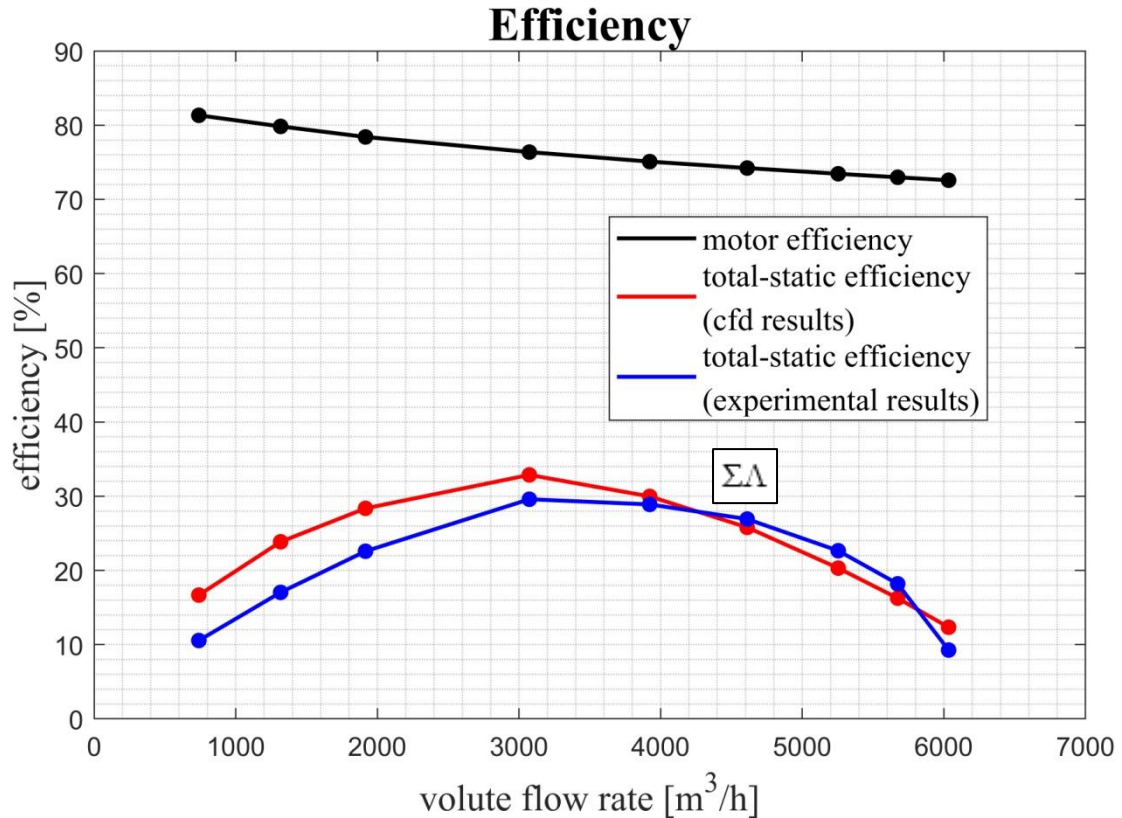
$$(Q, \Delta P) = \left(4611.035 \text{ m}^3/\text{h}, 513.166 \text{ Pa} \right)$$

Θέλοντας να σχεδιαστεί η χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας του φυσητήρα θα πρέπει κανείς να δημιουργήσει ένα διάγραμμα με την παροχή στον οριζόντιο άξονα και την διαφορά πίεσης στον κατακόρυφο άξονα. Ομοίως για την δημιουργία της καμπύλης της απόδοσης της μηχανής θα πρέπει στον οριζόντιο άξονα να τοποθετηθεί η παροχή και στον κατακόρυφο ο βαθμός απόδοσης ολικών προς στατικές συνθήκες.

Έτσι, σχεδιάζονται τα παρακάτω διαγράμματα των καμπύλων επίδοσης της μηχανής όπου συγκρίνονται τα πειραματικά αποτελέσματα με αυτά που λήφθηκαν από το CFD μοντέλο που δημιουργήθηκε.



Σχήμα 5.3: Η χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας της μηχανής όπως προκύπτει από τα πειραματικά αποτελέσματα (μπλε) σε σύγκριση με τα αποτελέσματα του μοντέλου στο Flow Simulation (κόκκινο).



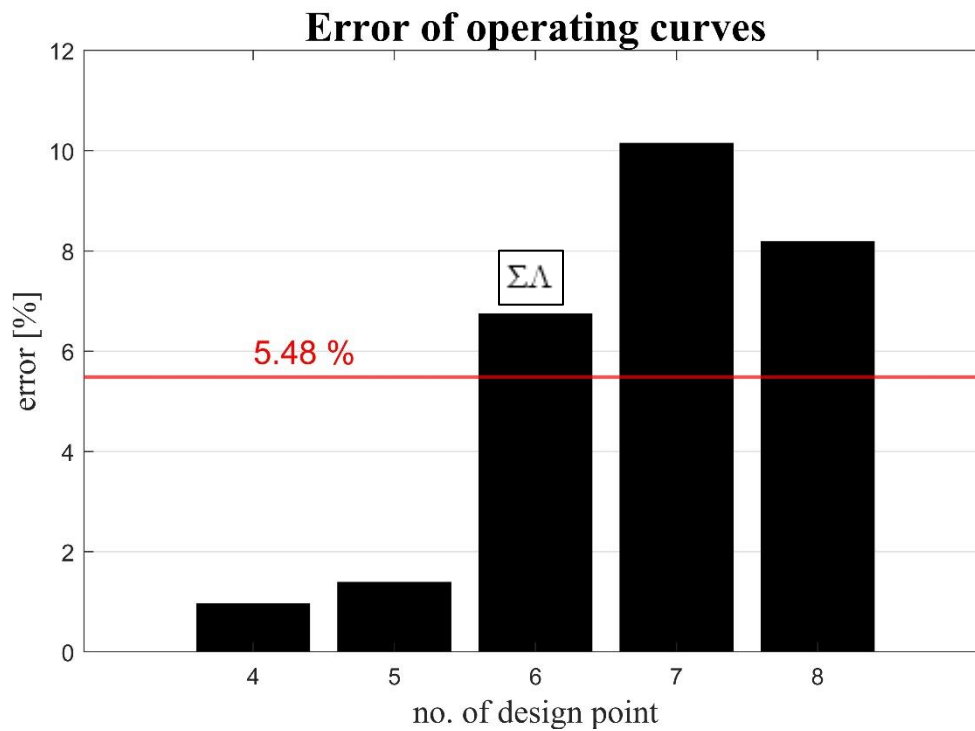
Σχήμα 5.4: Η καμπύλη του βαθμού απόδοσης ολικών προς στατικές συνθήκες του φυσητήρα όπως προκύπτει από τα πειραματικά αποτελέσματα (μπλε) και από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης (κόκκινο), καθώς και η καμπύλη της απόδοσης του ηλεκτροκινητήρα (μαύρο).

Παρατηρείται ότι οι καμπύλες που δημιουργήθηκαν από το CFD μοντέλο του Flow Simulation προσεγγίζουν σε ικανοποιητικό βαθμό τα πειραματικά αποτελέσματα. Αξίζει να σημειωθεί ότι η μεγαλύτερη απόκλιση υπάρχει στα δύο άκρα των καμπύλων όπου είτε η διαφορά πίεσης είτε η παροχή αυξάνονται περισσότερο. Στα σημεία όμως γύρω από το σημείο λειτουργίας, για τα οποία σχεδιάζεται να λειτουργεί η μηχανή, οι καμπύλες φαίνεται σχεδόν να ταυτίζονται.

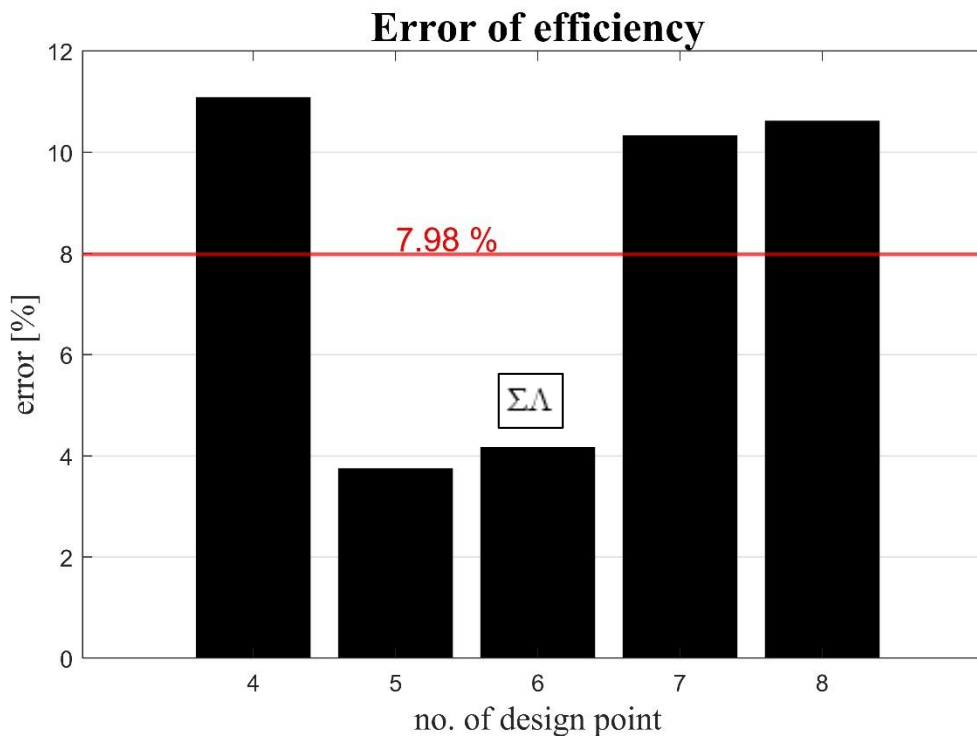
Προκειμένου να φανεί καλύτερα η απόκλιση από τα πειραματικά αποτελέσματα ορίζεται ένα σφάλμα επί τοις εκατό των CFD αποτελεσμάτων για το σημείο λειτουργίας και τα 2 γειτονικά του εκατέρωθεν σημεία ως εξής:

$$error = \frac{|CFD\ results - Experimental\ results|}{Experimental\ results} \cdot 100\% \quad (5.4)$$

Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζεται το σφάλμα κάθε σημείου λειτουργίας που προσομοιώθηκε με το Flow Simulation σε σχέση με την πειραματική τιμή καθώς και η μέση τιμή αυτών.



Σχήμα 5.5: Σφάλμα των σημείων της χαρακτηριστικής καμπύλης.



Σχήμα 5.6: Σφάλμα της καμπύλης του βαθμού απόδοσης.

Διαπιστώνεται ότι το σφάλμα της προσομοίωσης από τα πειραματικά για την περιοχή που θα λειτουργεί η μηχανή είναι της τάξης του 5-8% .

Παρατηρώντας τα διαγράμματα είναι ξεκάθαρο ότι το μοντέλο που έχει δημιουργηθεί είναι ικανό να προσομοιώσει επαρκώς την συμπεριφορά του φυσητήρα. Πετυχαίνει τόσο ακρίβεια στα αποτελέσματα στα σημεία που ενδιαφέρουν για την λειτουργία της μηχανής, αλλά και προσομοιώνει σωστά την τάση μεταβολής των μεγεθών όσο αυξάνει η παροχή.

Επομένως, θεωρείται ένα αξιόπιστο μοντέλο για την μελέτη του φυγοκεντρικού φυσητήρα. Σε συνδυασμό με το μικρό υπολογιστικό του κόστος, καθώς χρειάζονται μόλις 30 λεπτά (σε έναν μέτριο σύγχρονο υπολογιστή, INTEL Core i-5 10400@2.9GHz, 6 cores, 16GB RAM) για την προσομοίωση ενός σημείου λειτουργίας, μπορεί να αποτελέσει ένα καλό εργαλείο για την βελτιστοποίηση της μηχανής και τη διεξαγωγή επιπλέον παραμετρικών μελετών.

5.2 Μελέτη ανεξαρτησίας πλέγματος

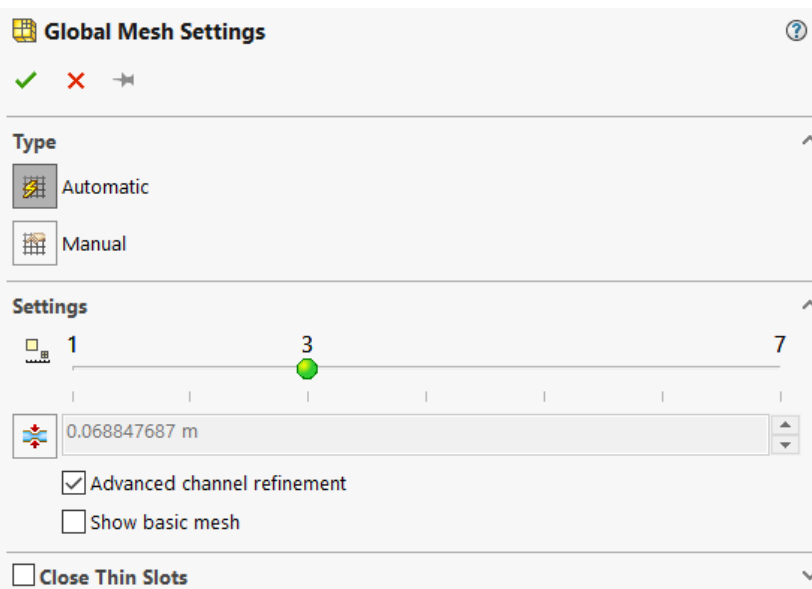
Πριν ξεκινήσει η παραμετρική μελέτη του φυσητήρα ως προς τα γεωμετρικά του χαρακτηριστικά θα πρέπει να μελετηθεί το μοντέλο ως προς την πυκνότητα του πλέγματος. Έτσι, θα βρεθεί η κατάλληλη πυκνότητα όπου τόσο τα αποτελέσματα θα είναι ακριβή αλλά χωρίς να γίνεται σπατάλη στους υπολογιστικούς πόρους.

Για να επιτευχθεί αυτό θα δημιουργηθεί μια παραμετρική μελέτη στο Flow Simulation ως προς τα χαρακτηριστικά του πλέγματος. Στόχος θα είναι η συνεχής αύξηση της πυκνότητάς του, ώσπου να βρεθεί μια πυκνότητα από την οποία και ύστερα οι λύσεις δεν μεταβάλλονται σημαντικά.

Το πλέγμα το οποίο δημιουργείται από το λογισμικό είναι ένα απλό πλέγμα τρισδιάστατων πεπερασμένων όγκων που αποτελείται από ορθογωνικά στοιχεία. Τα στοιχεία αυτά είναι μικρότερα σε περιοχές που παρουσιάζονται έντονα φαινόμενα, όπως στην περωτή, άρα το πλέγμα εκεί θα είναι πυκνότερο. Επομένως, θα πρέπει να ρυθμιστούν σωστά οι επιλογές του λογισμικού για να πετυχαίνει το πλέγμα αυτόν τον στόχο.

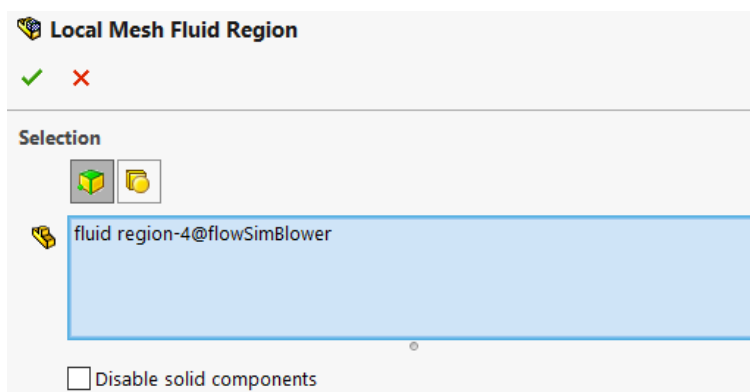
Συγκεκριμένα, οι επιλογές που θα εξεταστούν βρίσκονται στην καρτέλα Input Data στα αριστερά της οθόνης στο Mesh. Αρχικά, στο Global Mesh μπορεί να ρυθμιστεί μια συνολική αρχική πυκνότητα του πλέγματος. Όσο πιο

μεγάλο το επίπεδο του αρχικού πλέγματος τόσο πιο πυκνό και αργό να κατασκευαστεί και να επιλυθεί.



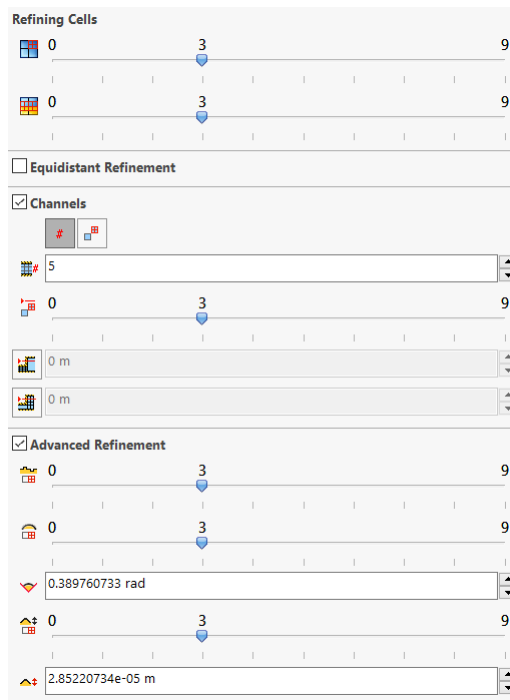
Σχήμα 5.7: Επιλογή της αρχικής πυκνότητας του πλέγματος.

Στη συνέχεια στο Local Mesh επιλέγεται η περιοχή ρευστού όπου ενδιαφέρει να πυκνώσει το πλέγμα. Άρα, επιλέγεται η γεωμετρία του όγκου ρευστού εντός της περρωτής.



Σχήμα 5.8: Επιλογή της περιοχής πυκνώσεως του πλέγματος.

Αφού επιλεγθεί η περιοχή αυτή το λογισμικό δίνει τη δυνατότητα να ρυθμιστεί ο τρόπος που θα πυκνώσει το πλέγμα. Μπορεί να ρυθμιστεί η πυκνότητα των περιοχών εντός του ρευστού, των περιοχών στο σύνορό του με στερεό τοίχωμα, καθώς δίνονται και άλλες επιλογές που αφορούν την καμπυλότητα, την ανοχή, τη γεωμετρία γύρω από μικρά στερεά αντικείμενα και την πυκνότητα εντός κενών στη γεωμετρία.



Σχήμα 5.9: Επιλογές στις ρυθμίσεις του Local Mesh.

Όπως και στο Global Mesh, έτσι και στο Local, όσο πιο κοντά στο μέγιστο είναι το επίπεδο Refinement τόσο πιο πυκνό το πλέγμα. Όλες αυτές οι επιλογές μπορούν να παραμετροποιηθούν στην καρτέλα Input Variables μιας παραμετρικής μελέτης επιλέγοντας Add Simulation Parameter και στην συνέχεια την εκάστοτε παράμετρο. Παρακάτω φαίνεται στην καρτέλα Scenario της παραμετρικής για την μελέτη ανεξαρτησίας πλέγματος οι επιλογές εκείνες που μελετήθηκαν.

Summary	Design Point 1	Design Point 2	Design Point 3	Design Point 4
Level of Initial Mesh (Automatic Mesh) []	3	3	4	3
Small Solid Feature Refinement Level (Local Mesh Fluid Region) []	2	3	3	4
Level of Refining Fluid Cells (Local Mesh Fluid Region) []	2	3	3	4
Maximum Channel Refinement Level (Local Mesh Fluid Region) []	2	3	3	4
Level of Refining Cells at Fluid/Solid Boundary (Local Mesh Fluid Region) []	2	3	3	4
Tolerance Level (Local Mesh Fluid Region) []	2	3	3	4
Curvature Level (Local Mesh Fluid Region) []	2	3	3	4

Σχήμα 5.10: Παράμετροι του πλέγματος που μελετήθηκαν.

Άρα λοιπόν μελετήθηκαν 4 πλέγματα που αντιστοιχούν στα Design Points του Σχήματος 5.10, αυξανόμενης πυκνότητας.

Αριθμός Πλέγματος	Σύνολο Στοιχείων
1	26967
2	105195
3	340883
4	617322

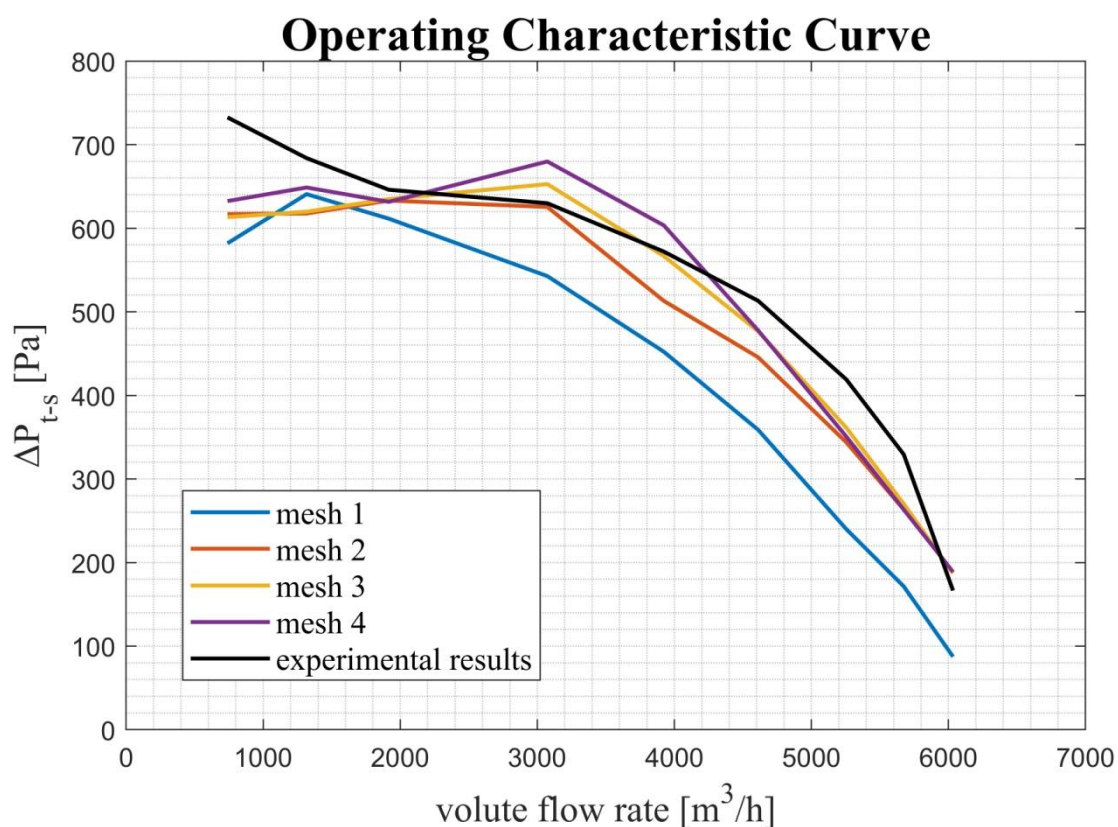
Πίνακας 5.1: Αριθμός πεπερασμένων στοιχείων από τα οποία αποτελείται το κάθε πλέγμα.

Με σκοπό να μελετηθεί ο τρόπος με τον οποίον μεταβάλλεται η λύση για διαφορετικό πλέγμα θα οριστεί ένα μέσο σφάλμα από τα 5 σημεία σχεδιασμού κάθε καμπύλης ως εξής.

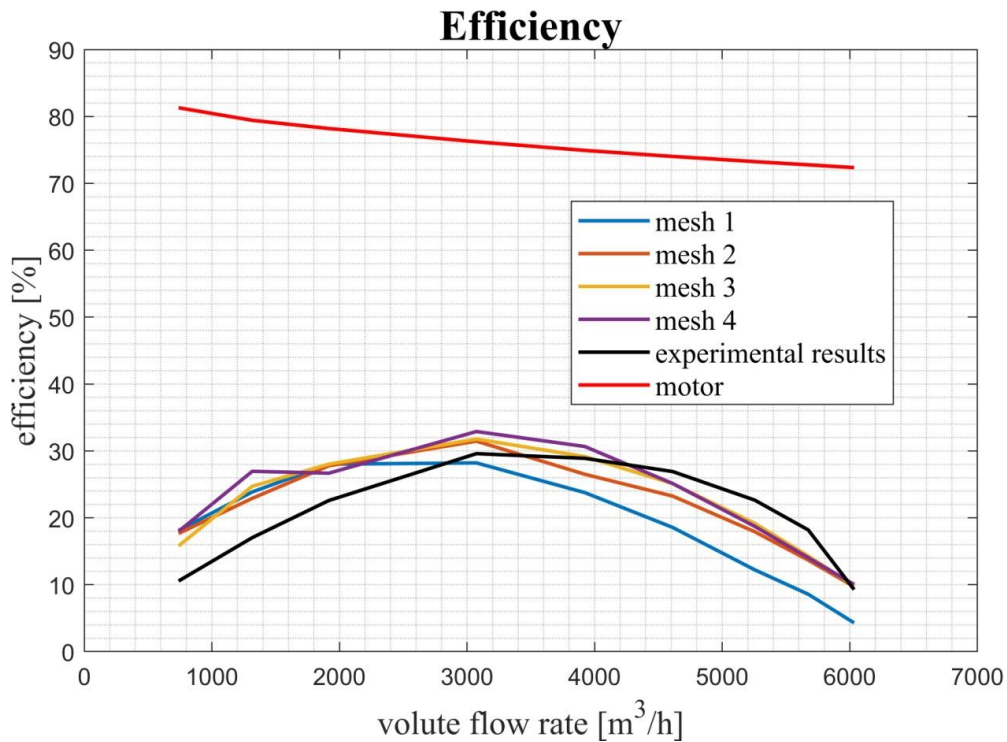
$$mean\ error = \frac{\sum_1^5 \frac{|CFD\ results - Experimental\ results|}{Experimental\ results} \cdot 100\%}{5} \quad (5.2)$$

Με τον τρόπο αυτόν δημιουργείται ένα μέγεθος ενδεικτικό της ακρίβειας του πλέγματος σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα. Έτσι, δύο πλέγματα με παρόμοιο μέσο σφάλμα μπορεί να θεωρηθούν και παρόμοιας ποιότητας.

Στα Σχήματα 5.10 και 5.11 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες του φυσητήρα για διαφορετικά πλέγματα.

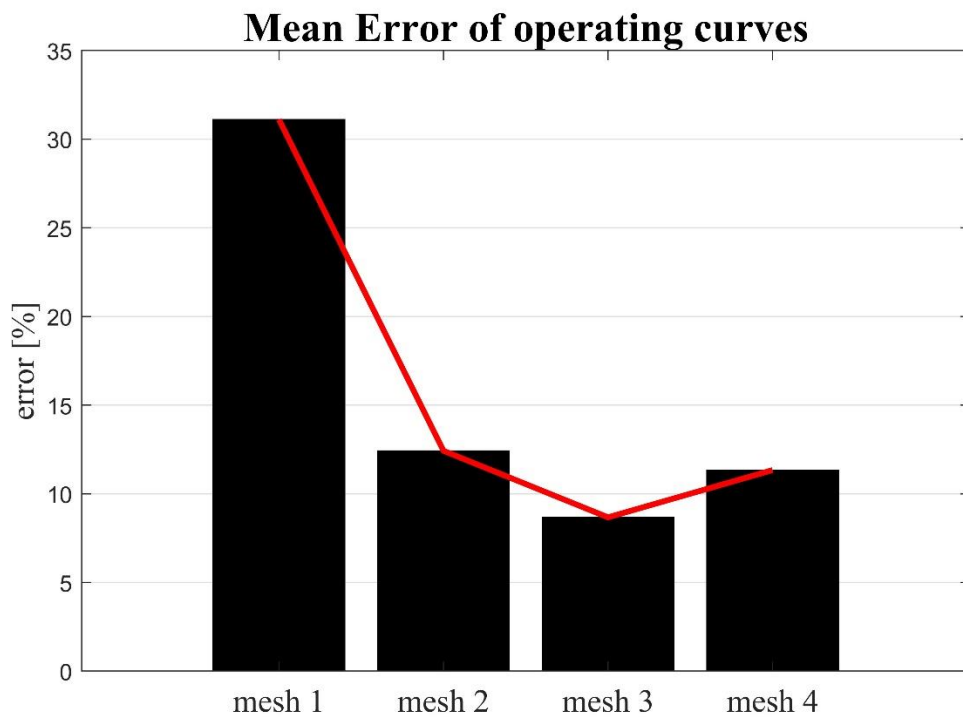


Σχήμα 5.10: Χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας για διαφορετικά πλέγματα.

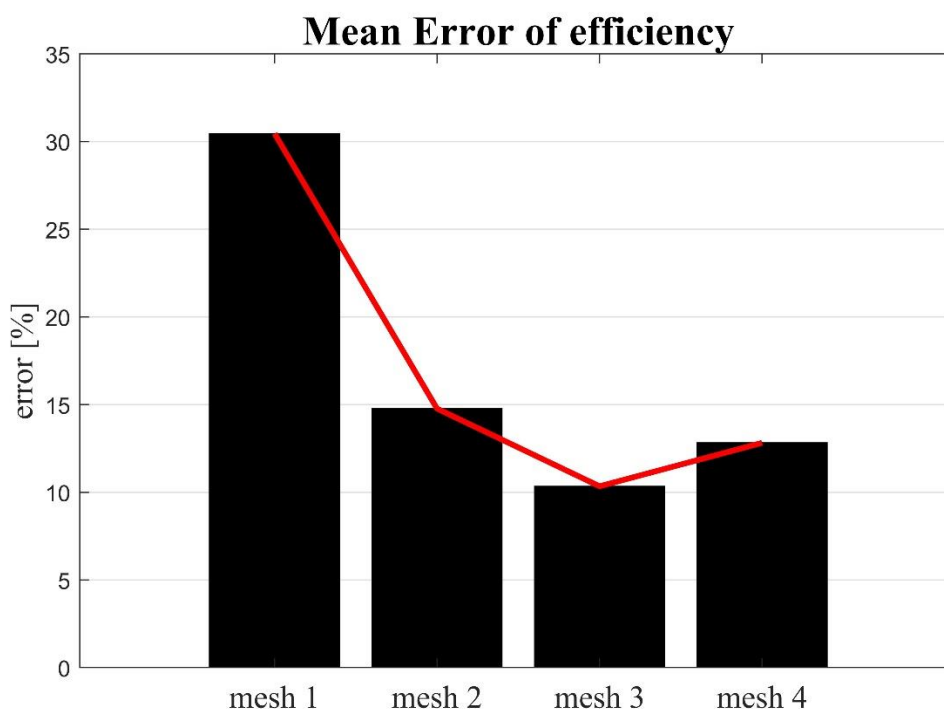


Σχήμα 5.11: Καμπύλη απόδοσης του φυσητήρα για διαφορετικά πλέγματα.

Το μέσο σφάλμα για τα διάφορα πλέγματα παρουσιάζεται στο σχήμα 5.12 και 5.13.



Σχήμα 5.12: Μέσο σφάλμα των σημείων της χαρακτηριστικής καμπύλης για τα διάφορα πλέγματα.



Σχήμα 5.13: Μέσο σφάλμα των σημείων της καμπύλης απόδοσης για τα διάφορα πλέγματα.

Παρατηρείται ότι το πλέγμα 1 με τα λιγότερα στοιχεία δεν δίνει ακριβή αποτελέσματα, κι έτσι απορρίπτεται. Όμως από το πλέγμα 2 και μετά φαίνεται πως η ακρίβεια της λύσης και στις δύο καμπύλες δεν αλλάζει σημαντικά (έχει «φλατάρει»). Επομένως, το πλέγμα 2 θα προτιμηθεί για τις μετέπειτα παραμετρικές μελέτες καθώς πετυχαίνει την αποδεκτή ακρίβεια και συγχρόνως η επίλυσή του έχει σχετικά μικρό υπολογιστικό κόστος.

5.3 Από τα πραγματικά δεδομένα στα ανοιγμένα ως προς τις στροφές

Για την επικύρωση του μοντέλου και την μελέτη ανεξαρτησίας πλέγματος τα αριθμητικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν ως είσοδος στο λογισμικό λήφθηκαν αυτούσια από τα πειραματικά δεδομένα. Στις επόμενες παραμετρικές για να είναι ευκολότερη η σύγκριση των αποτελεσμάτων τα δεδομένα των 9 σημείων σχεδιασμού που προσομοιώνονται θα ανοιχθούν ισοδύναμα ως προς τις στροφές.

Συγκεκριμένα, τα σημεία αυτά, ενώ αντιστοιχούν σε διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής, θα ανοιχθούν ως προς σταθερή ταχύτητα περιστροφής

1450 rpm, ολική θερμοκρασία εξόδου 288.15 K και στατική πίεση εξόδου 101325 Pa. Έτσι, η παροχή εισόδου θα είναι η μόνη μεταβλητή οριακή συνθήκη που διαφοροποιεί τα σημεία σχεδιασμού και θα μετασχηματιστεί σύμφωνα με τον παρακάτω νόμο ομοιότητας της παροχής Q συναρτήσει των στροφών N και της διαμέτρου D (η διάμετρος D στην περίπτωση αυτή δεν μεταβάλλεται):

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right) \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^3 \quad (5.3)$$

Σημείο	Παροχή πειραματικών δεδομένων	Ισοδύναμη παροχή στα 1450 rpm	Ισοδύναμη παροχή στα 970 rpm
1	6033.408	6417.503	4293.088
2	5673.898	6011.876	4021.737
3	5254.123	5535.345	3702.955
4	4611.035	4812.708	3219.536
5	3922.961	4043.569	2705.008
6	3073.138	3130.116	2093.939
7	1916.174	1931.352	1292.008
8	1316.975	1324.365	885.955
9	739.398	742.444	496.670

Πίνακας 5.2: Παροχή εισόδου σε m³/h όπως προκύπτει από τον ισοδύναμο μετασχηματισμό για σταθερές στροφές.

5.4 Έλεγχος των νόμων ομοιότητας της περωτής με το CFD μοντέλο

Αφού επιλέχθηκε το πλέγμα με το οποίο θα διεξαχθούν οι προσομοιώσεις στο επόμενο βήμα θα ελεγχθεί κατά πόσο το CFD μοντέλο που δημιουργήθηκε καταφέρνει να δώσει αποτελέσματα που συμβαδίζουν με τους θεωρητικούς νόμους ομοιότητας της περωτής (fan laws). Συγκεκριμένα ο νόμος που θα εξεταστεί περιγράφει την διαφορά πίεσης που δημιουργείται από την περωτή για διαφορετική πυκνότητα ρ , διαφορετική ταχύτητα περιστροφής N, και διαφορετική διάμετρο περωτής D, σύμφωνα με την παρακάτω σχέση.

$$\frac{\Delta P_1}{\Delta P_2} = \left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right) \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2 \quad (5.4)$$

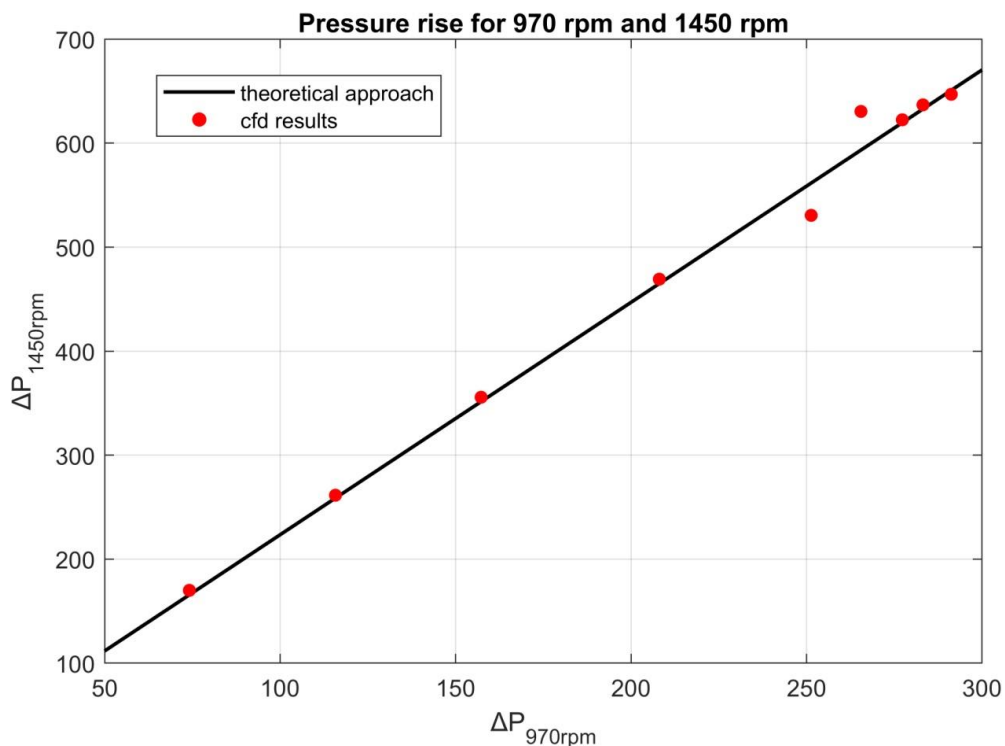
Και αν οι συνθήκες περιβάλλοντος είναι ίδιες και πρόκειται για την ίδια πτερωτή η πυκνότητα ρ και η διάμετρος D παραμένουν σταθερές άρα η σχέση (5.4) μπορεί να γραφεί απλούστερα.

$$\frac{\Delta P_1}{\Delta P_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \quad (5.5)$$

Θα μελετηθούν τα 9 σημεία με τις διαφορετικές παροχές και ίδιες συνθήκες περιβάλλοντος (στατική πίεση 101325 Pa και ολική θερμοκρασία 288.15 K) για δύο διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής 1450 rpm και 970 rpm. Τότε η θεωρητική σχέση (5.5) αν αντικατασταθούν οι τιμές των ταχυτήτων και λυθεί ως προς ΔP_1 θα γραφεί ως εξής:

$$\Delta P_1 = \Delta P_2 \left(\frac{1450}{970}\right)^2 \quad (5.6)$$

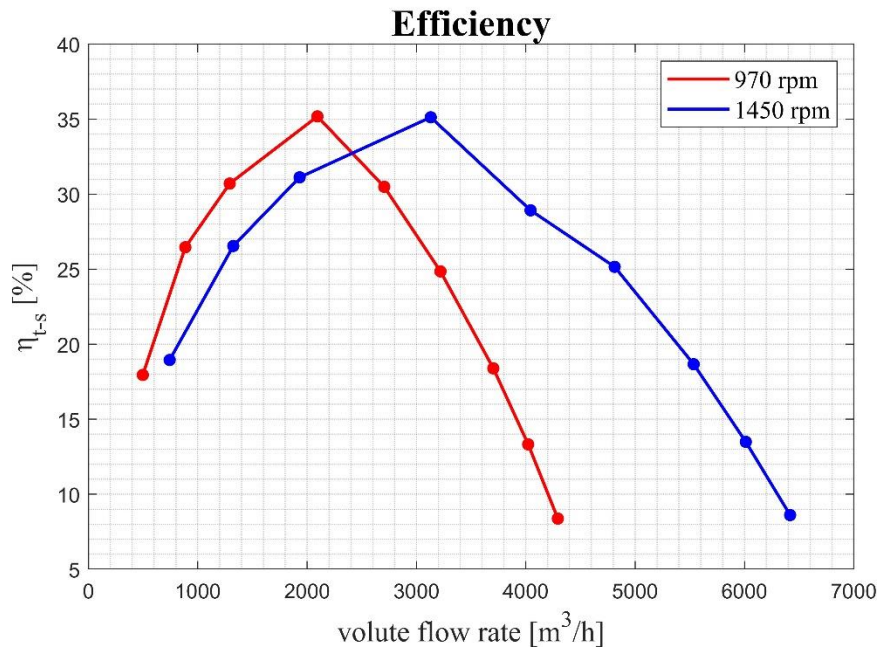
Άρα δίνοντας τιμές στην διαφορά πίεσης ΔP_2 (που αντιστοιχεί στα 970 rpm) με την σχέση (5.6) εκτιμάται η διαφορά πίεσης ΔP_1 , και άρα μπορεί να σχεδιαστεί η καμπύλη που περιγράφει αυτή τη σχέση. Στο ίδιο διάγραμμα θα τοποθετηθούν και τα σημεία που λήφθηκαν από τα αποτελέσματα της CFD προσομοίωσης στα 1450 rpm και στα 970 rpm. Οι τιμές της παροχής εισόδου για τα 9 σημεία για κάθε ταχύτητα είναι αυτές που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.2.



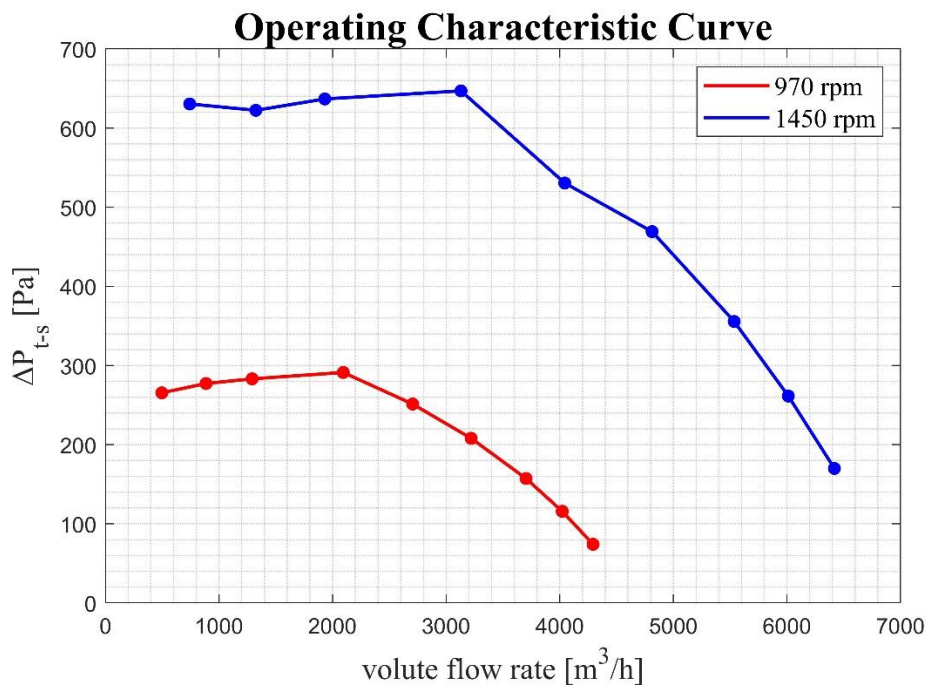
Σχήμα 5.14: Προσέγγιση των νόμων ομοιότητας της πτερωτής με το CFD μοντέλο.

Από το Σχήμα 5.14 φαίνεται πως το μοντέλο CFD που δημιουργήθηκε συμβαδίζει με τον θεωρητικό νόμο ομοιότητας για την περωτή για διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής. Αυτό δείχνει ότι είναι ικανό να μοντελοποιήσει σωστά τη φυσική του φυσητήρα και ενισχύεται η αξιοπιστία του για τα αποτελέσματα των παραμετρικών μελετών που θα ακολουθήσουν.

Στα σχήματα 5.15 και 5.16 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες της μηχανής για την baseline γεωμετρία για τις διαφορετικές στροφές.



Σχήμα 5.15: Καμπύλη βαθμού απόδοσης για διαφορετικές στροφές.

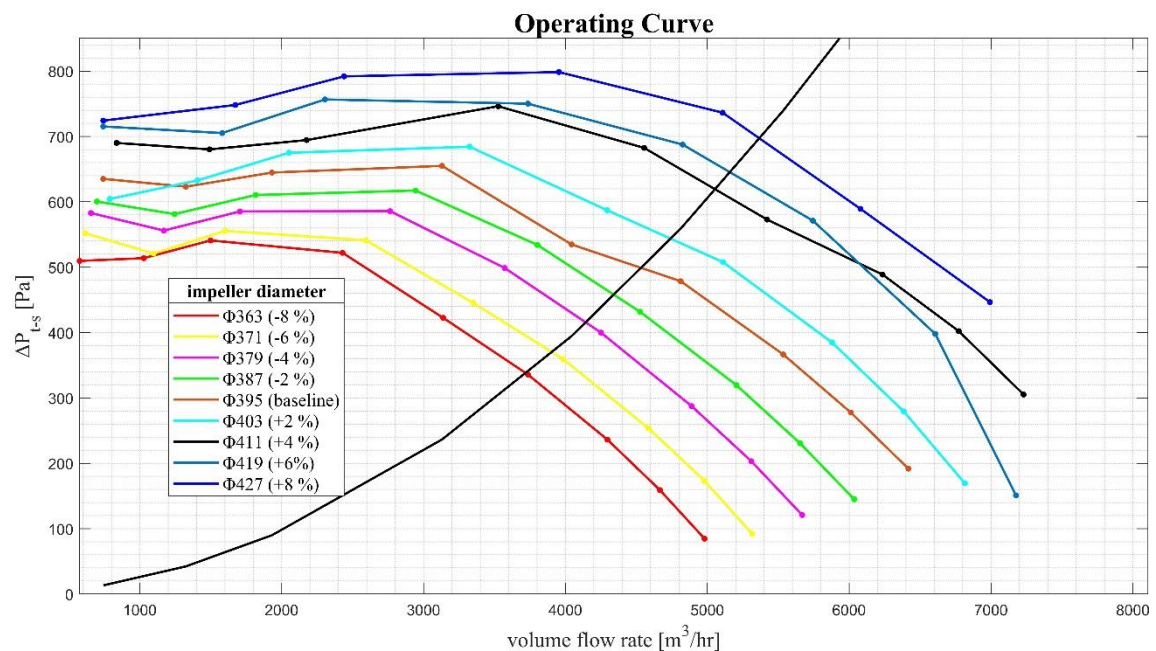


Σχήμα 5.16: Χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας για διαφορετικές στροφές.

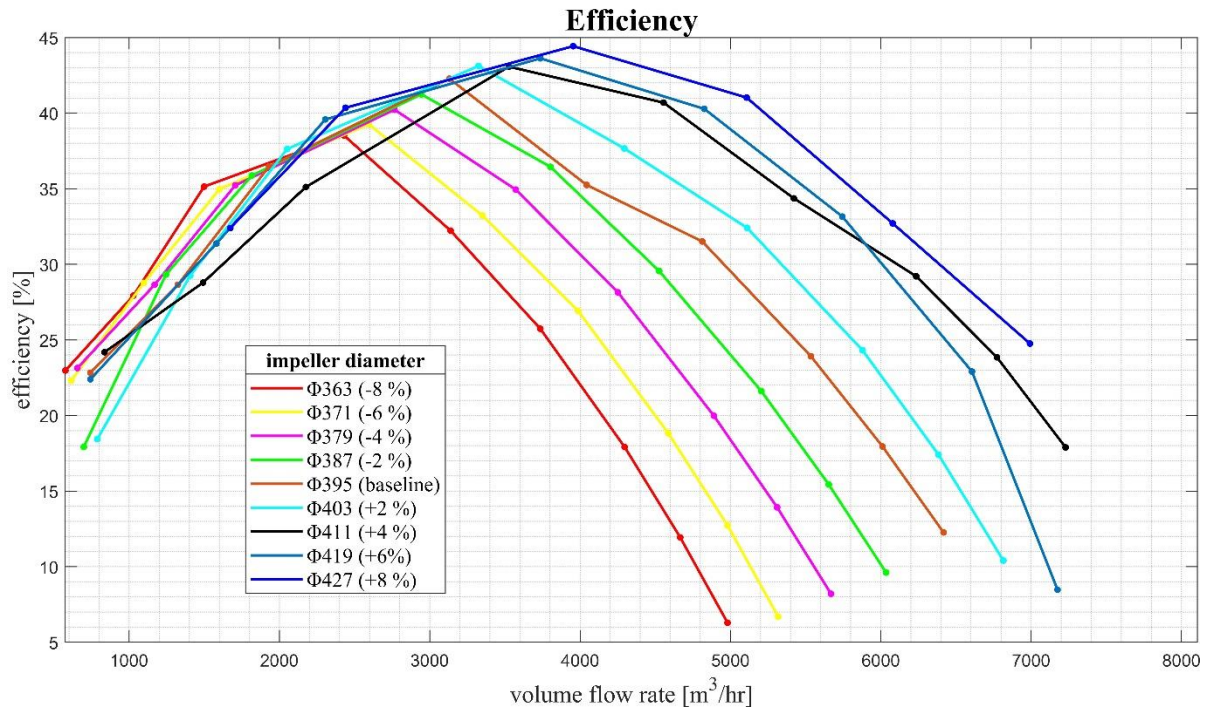
Παρατηρείται ότι ο βαθμός απόδοσης για τις διαφορετικές στροφές είναι σταθερός κάτι το οποίο αναμένεται θεωρητικά.

5.5 Μελέτη της συμπεριφοράς του φουσητήρα για διαφορετικές διαμέτρους περωτής

Η πιο καθοριστική συνιστώσα στην λειτουργία ενός φουσητήρα είναι η περωτή του, και σε αυτή θα επικεντρωθεί η παρούσα διπλωματική. Αρχικά θα μελετηθεί η συμπεριφορά της μηχανής αν μεταβληθεί η διάμετρος της περωτής, διατηρώντας όλα τα υπόλοιπα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της σταθερά. Προσομοιώνοντας τα γνωστά 9 σημεία στην ταχύτητα των 1450 rpm λαμβάνονται οι παρακάτω καμπύλες επίδοσης του φουσητήρα. Η διάμετρος μεταβάλλεται κατά $\pm 8\%$ από την αρχική (baseline). Οι παροχές των προσομοιώσεων για κάθε διάμετρο υπολογίστηκαν με βάση τη σχέση (5.3) για σταθερές στροφές.



Σχήμα 5.17: Χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας του φουσητήρα για διαφορετικές διαμέτρους περωτής.



Σχήμα 5.18: Καμπύλη απόδοσης του φυσητήρα για διαφορετικές διαμέτρους περρωτής.

Να σημειωθεί ότι στα παραπάνω διαγράμματα για τις δύο μεγαλύτερες διαμέτρους κάποια σημεία λειτουργίας οδηγούν σε αρνητικές διαφορές πίεσης για αυξημένες παροχές εισόδου. Οπότε αυτά τα σημεία εξαιρέθηκαν από τα διαγράμματα.

Παρατηρείται πως με αύξηση της διαμέτρου της περρωτής υπάρχει μετατόπιση της καμπύλης λειτουργίας προς υψηλότερες διαφορές πίεσης και υψηλότερους βαθμούς απόδοσης για την ίδια παροχή, όπως αναμένεται.

5.6 Μελέτη της συμπεριφοράς του φυσητήρα για διαφορετικά ύψη περρωγίων

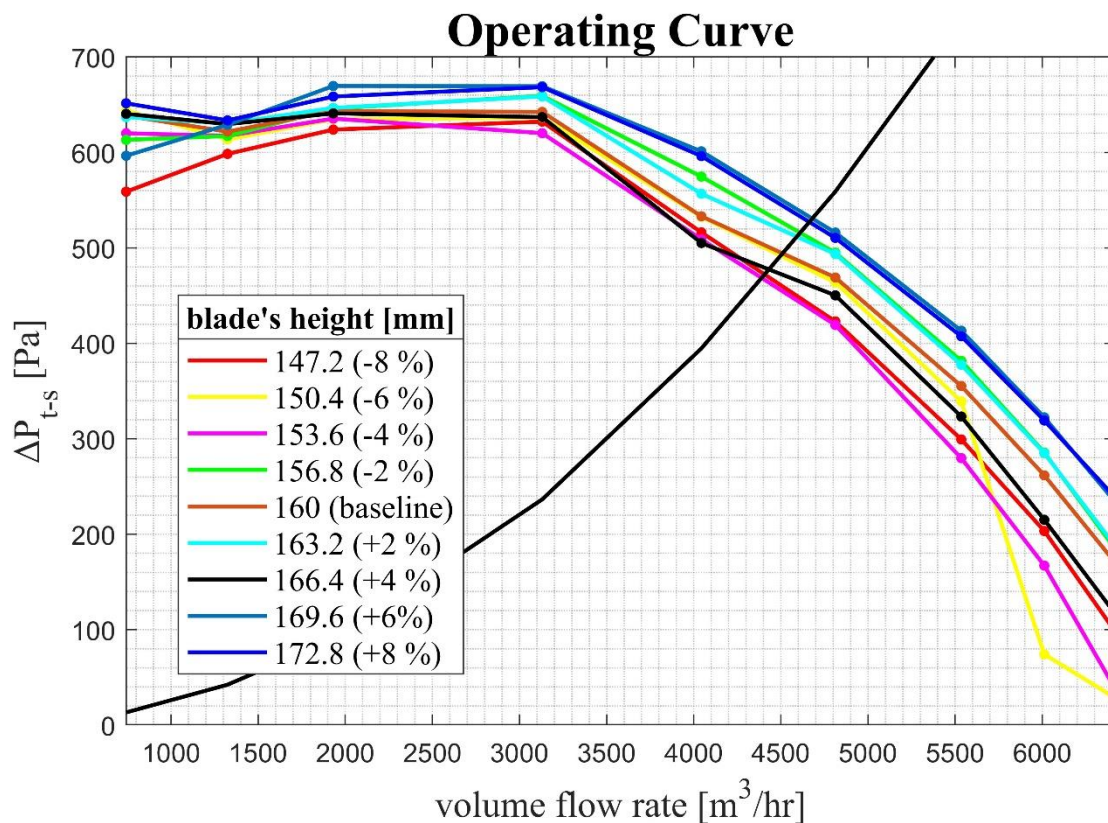
Σε αυτή την υποενότητα θα προσομοιωθεί η λειτουργία της μηχανής για διαφορετικά ύψη περρωγίων, διατηρώντας σε αυτή την περίπτωση σταθερό τον αριθμό τους και τη διάμετρο της περρωτής όπως είχαν οριστεί αρχικά (baseline). Το ύψος των περρωγίων θα μελετηθεί για τιμές $\pm 8\%$ από την αρχική. Να σημειωθεί ότι όταν το ύψος αυξάνεται θα πρέπει το μήκος του αγωγού εισόδου

του φυσητήρα να μειώνεται ώστε το μεταξύ τους διάκενο να μείνει σταθερό στα 4mm, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.19.

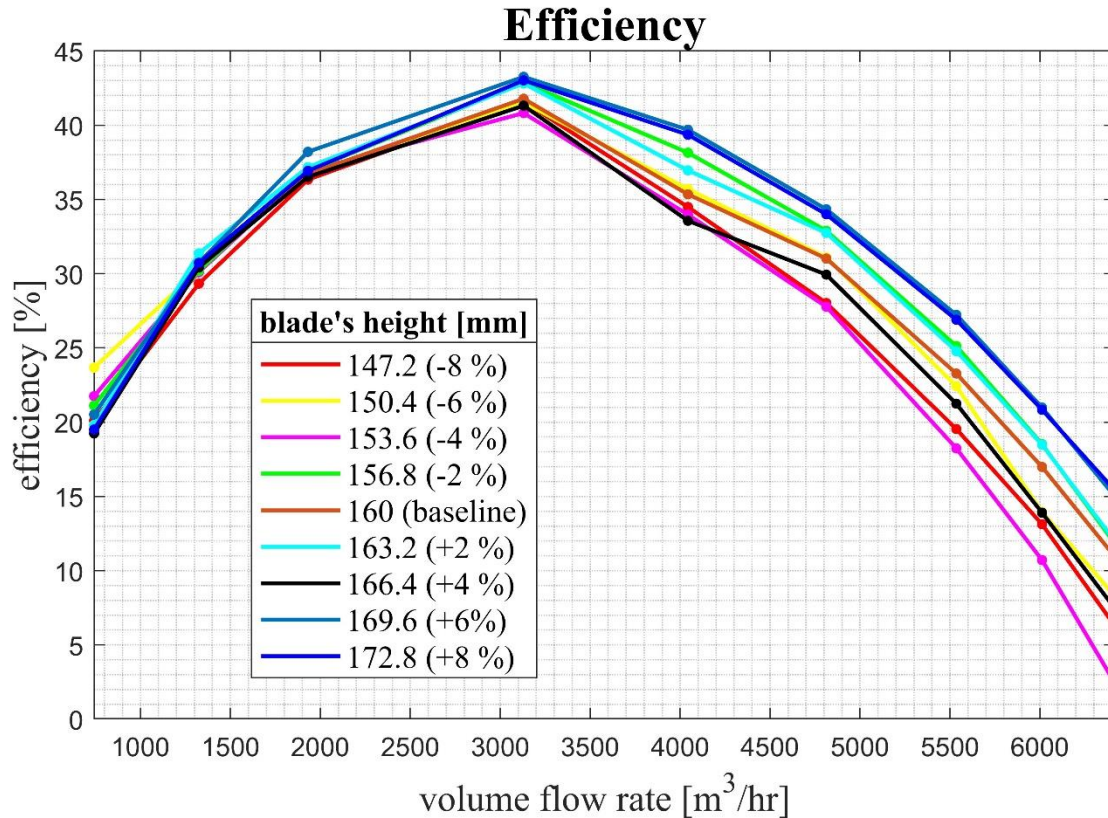


Σχήμα 5.19: Μείωση του αρχικού μήκους του αγωγού εισόδου με την αύξηση του ύψους των πτερυγίων της περωτής.

Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνονται οι καμπύλες επίδοσης της μηχανής για τις διαφορετικές τιμές του ύψους των πτερυγίων.



Σχήμα 5.20: Χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας του φυσητήρα για διαφορετικά ύψη πτερυγίων.

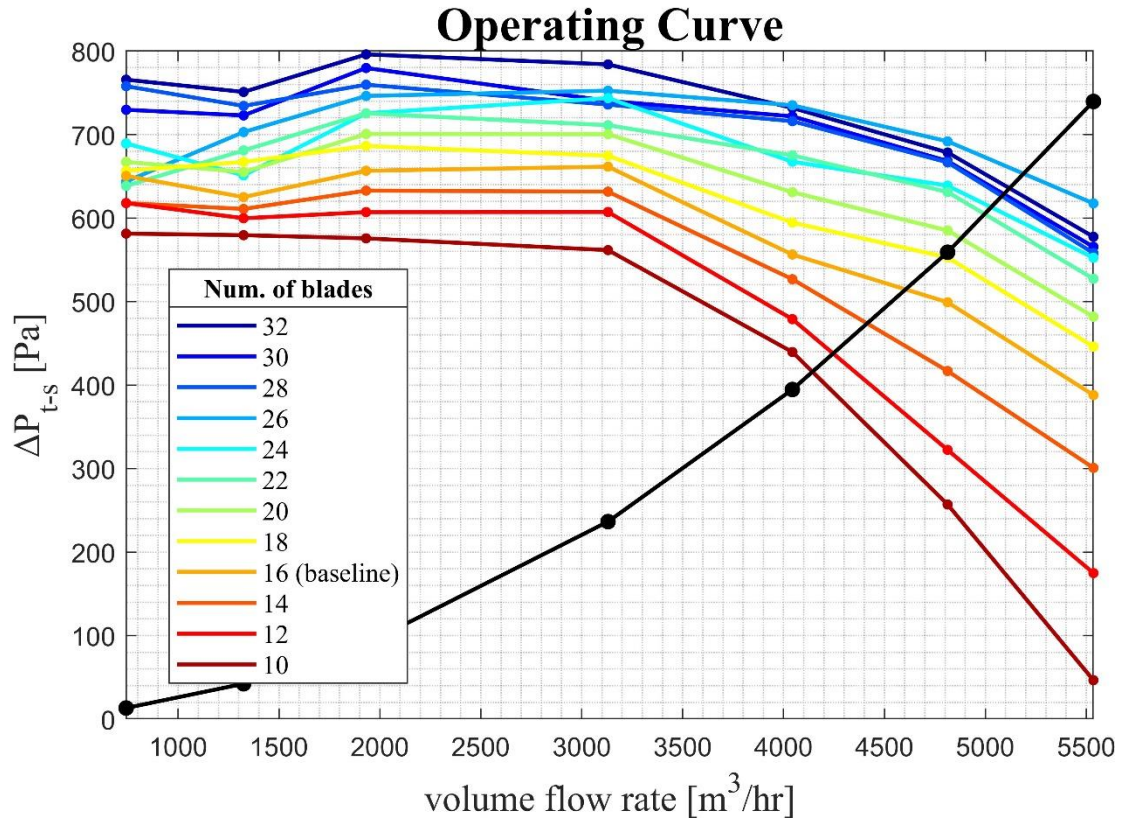


Σχήμα 5.21: Καμπύλη απόδοσης του φυσητήρα για διαφορετικά ύψη πτερυγίων.

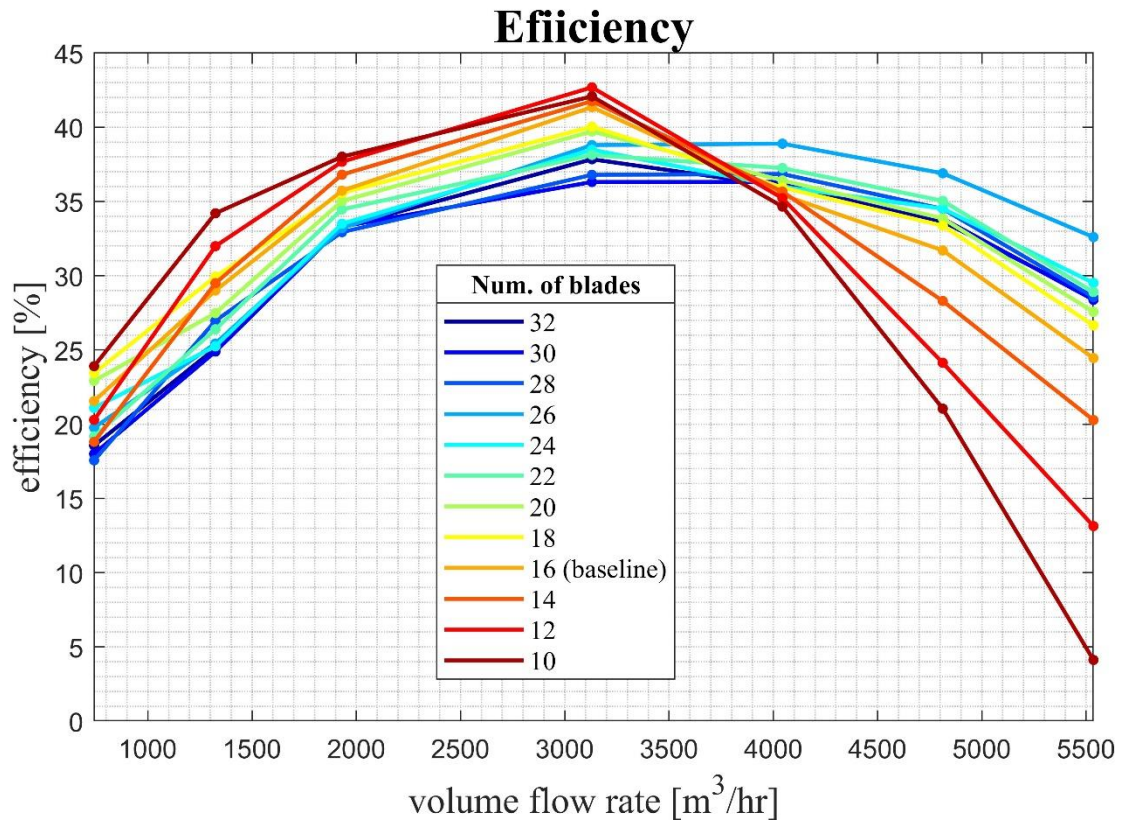
Παρατηρείται ότι με αύξηση του ύψους των πτερυγίων πάλι η καμπύλη λειτουργίας μετατοπίζεται προς μεγαλύτερες διαφορές πίεσης και μεγαλύτερους βαθμούς απόδοσης, όχι τόσο έντονα όμως όσο με την αύξηση της διαμέτρου όπως αναμένεται.

5.7 Μελέτη της συμπεριφοράς του φυσητήρα για διαφορετικό αριθμό πτερυγίων

Μια άλλη σημαντική παράμετρος της λειτουργίας της πτερωτής και κατ' επέκταση όλου του φυσητήρα είναι ο αριθμός των πτερυγίων. Επομένως, στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των παραμετρικών για αριθμούς πτερυγίων από 10 έως 32, ανά 2 με σταθερά όλα τα υπόλοιπα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της μηχανής όπως αρχικά σχεδιάστηκαν. Έτσι, από τα δεδομένα που λήφθηκαν από το CFD μοντέλο σχεδιάστηκαν τα παρακάτω διαγράμματα.



Σχήμα 5.22: Χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας του φουσητήρα για διαφορετικό αριθμό πτερυγίων.

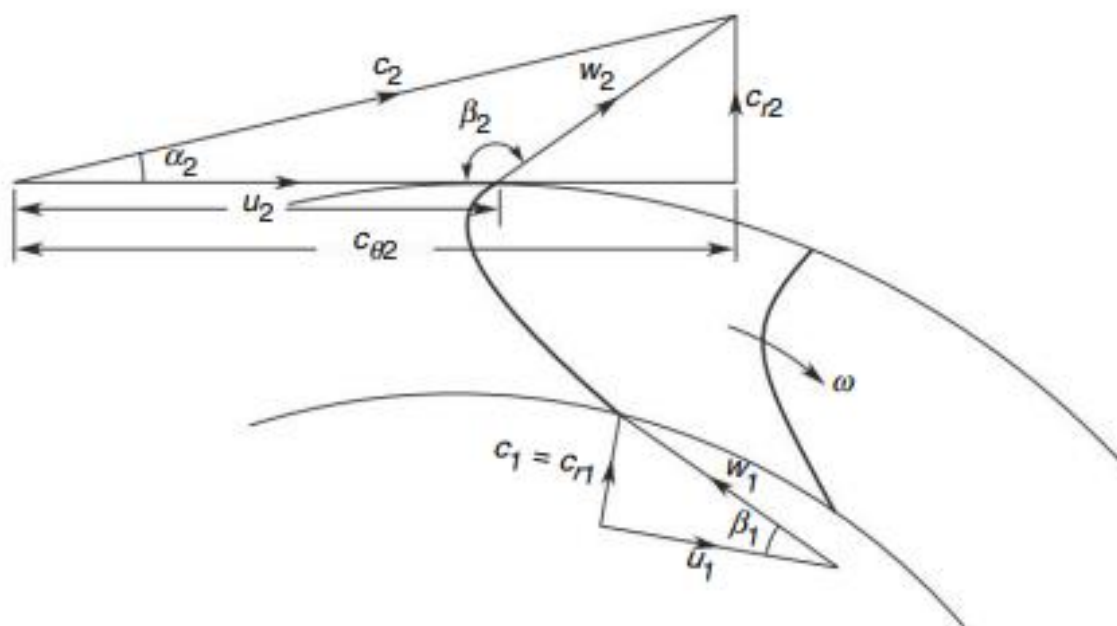


Σχήμα 5.23: Καμπύλη απόδοσης του φουσητήρα για διαφορετικό αριθμό πτερυγίων.

Από τα σχήματα 5.22 και 5.23 παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται ο αριθμός των πτερυγίων τόσο η χαρακτηριστική καμπύλη βελτιώνεται, κινούμενη δεξιότερα, καθώς η ροή κατευθύνεται καλύτερα εντός του κελύφους. Όμως, ο μέγιστος βαθμός απόδοσης της μηχανής με αύξηση των πτερυγίων φαίνεται να μειώνεται ελαφρώς, εξαιτίας των περισσότερων απωλειών που εισάγουν τα περισσότερα πτερύγια. Παράλληλα όμως επιτυγχάνεται μεγαλύτερος βαθμός απόδοσης σε μεγαλύτερο εύρος παροχών.

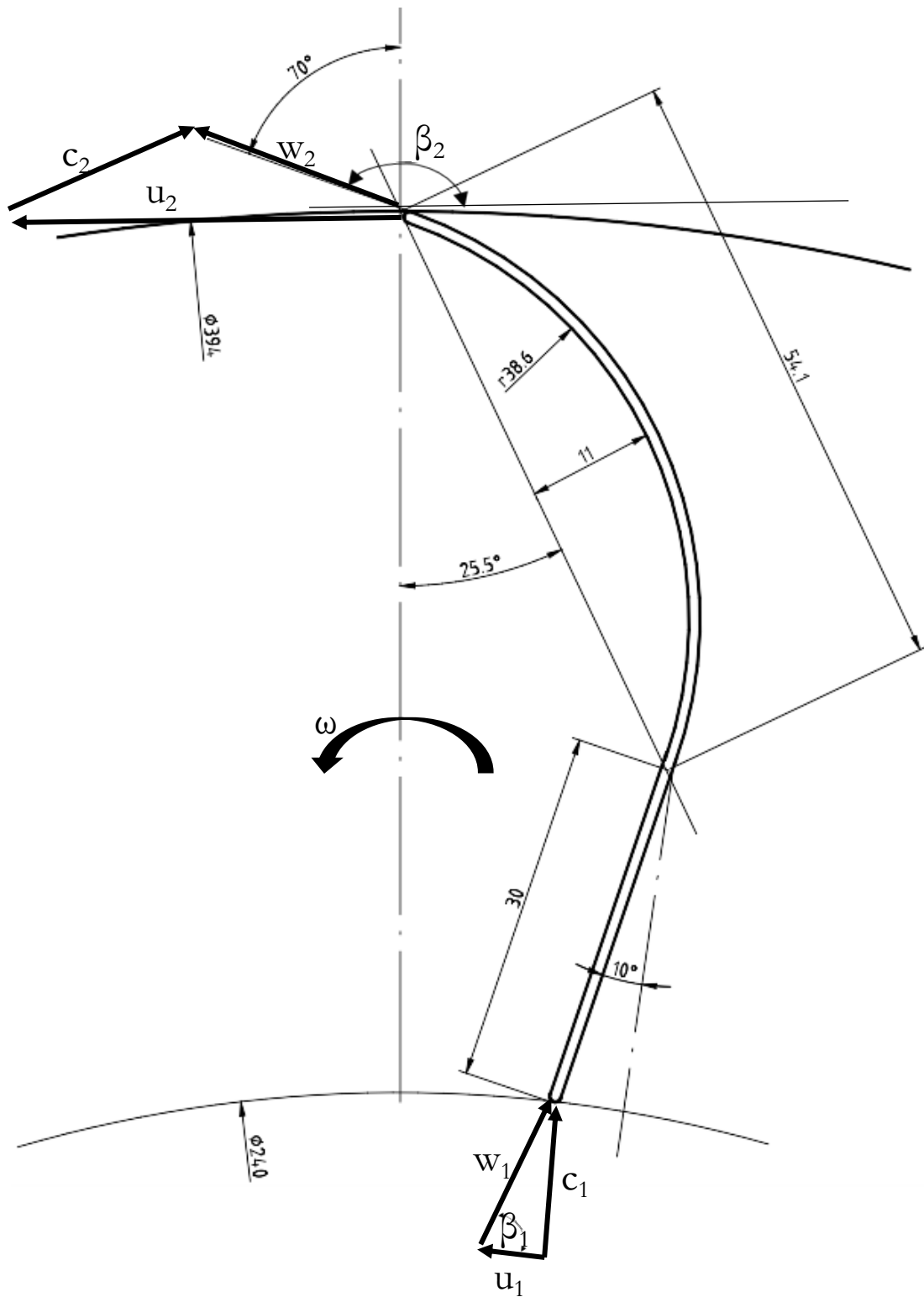
5.8 Μελέτη της συμπεριφοράς του φουσητήρα για διαφορετικές γωνίες πτερυγίων

Τέλος, θα μελετηθεί ο φουσητήρας για διαφορετικές γωνίες των πτερυγίων στην πτερωτή του. Συγκεκριμένα, θα μεταβάλλεται μόνο η βασική γωνία που ορίζει την περιστροφή του πτερυγίου από την ακτινική θέση. Αυτή η γωνία όμως επηρεάζει άμεσα τις γωνίες στην είσοδο και την έξοδο του πτερυγίου.



Σχήμα 5.24: Τρίγωνα ταχυτήτων σε πτερωτή με εμπροσθοκλινή πτερύγια.

Για να κατανοηθεί καλύτερα ο τρόπος με τον οποίο παραμετροποιήθηκαν οι γωνίες του πτερυγίου με μόνο μία γωνία μπορεί κανείς να παρατηρήσει το Σχήμα 5.25.



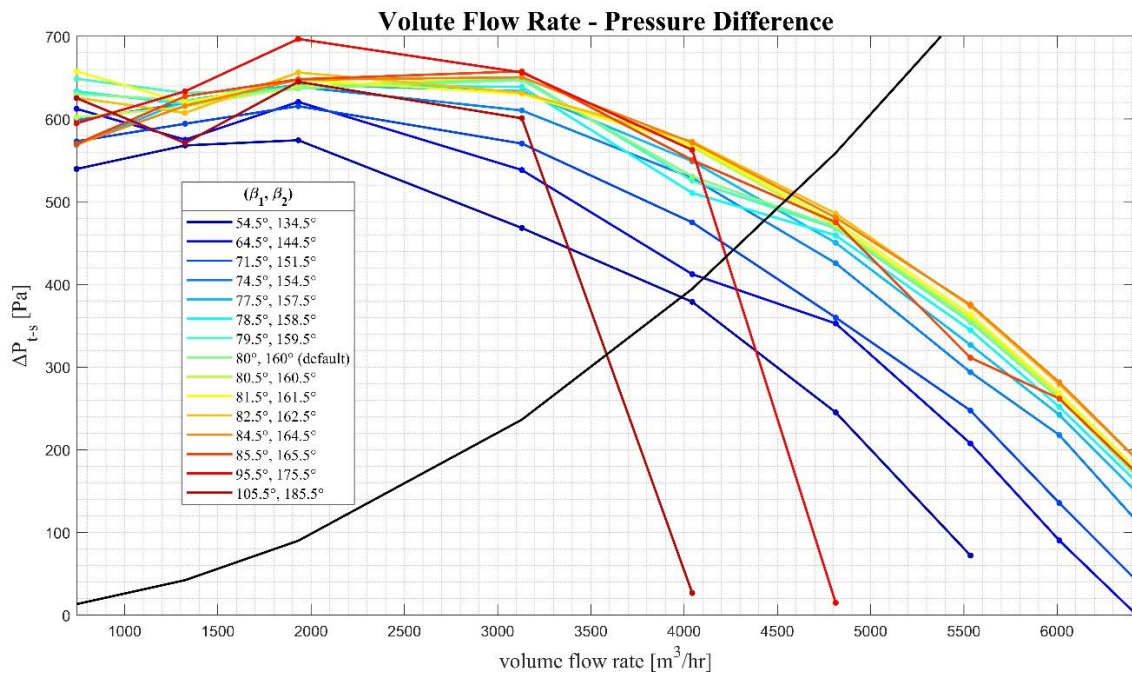
Σχήμα 5.25: Τρίγωνα ταχυτήτων εισόδου και εξόδου στην baseline περρωτή.

Καθώς μεταβάλλεται κατά x μοίρες η γωνία των 25.5° , τότε σύμφωνα με την γεωμετρία του σχήματος την ίδια μεταβολή x παίρνουν και οι γωνίες β_1 και β_2 του περρωγίου σε σχέση με την περιφερειακή κατεύθυνση στην είσοδο και έξοδο αντίστοιχα.



Σχήμα 5.26: Σχεδίαση των περυγίων με γωνίες 0° (αριστερά), 25.5° (κέντρο) και 50° (δεξιά) με την ακτινική διεύθυνση.

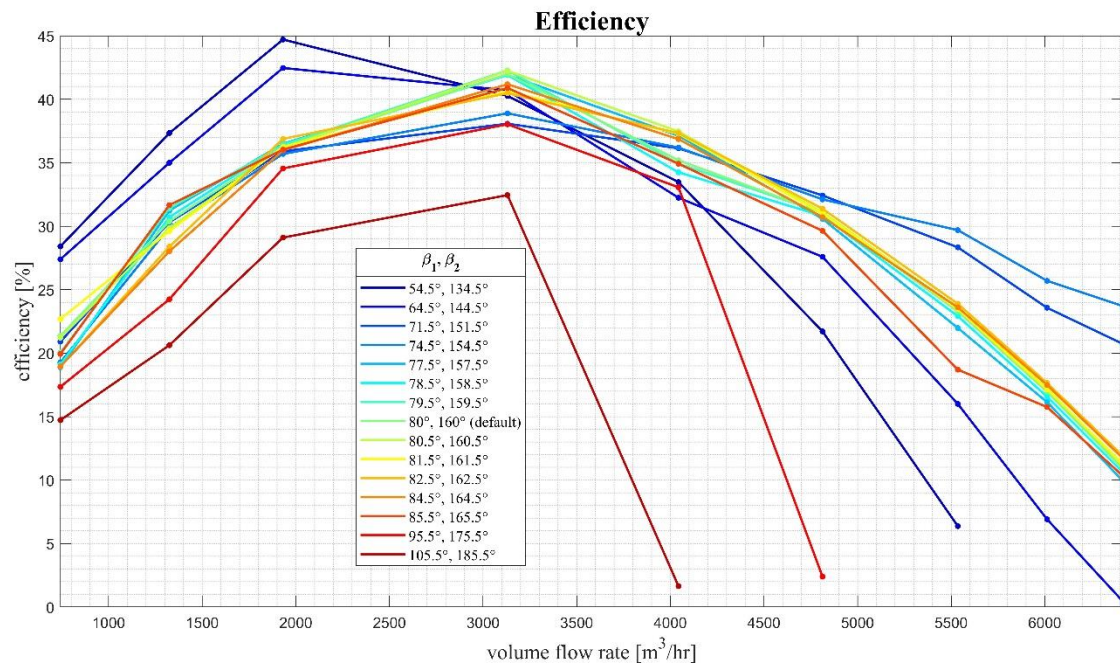
Προσομοιώνοντας μεταβολές $\pm 9^\circ$ στις γωνίες από την αρχική (baseline) των 25.5° , καθώς και διαμορφώνοντας την γωνία στις ακραίες θέσεις 0° , 10° , 40° και 50° (βλ. Σχήμα 5.26) και διατηρώντας σταθερό αριθμό και ύψος περυγίων και διάμετρο περωτής λαμβάνονται τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα.



Σχήμα 5.27: Χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας του φυσητήρα για διαφορετικές γωνίες περυγίων.

Παρατηρώντας τις χαρακτηριστικές καμπύλες του Σχήματος 5.27 διαπιστώνεται ότι για γωνίες εισόδου και εξόδου μικρότερες από την αρχική για την οποία σχεδιάστηκε ο φυσητήρας η καμπύλη μετατοπίζεται πιο αριστερά, κάτι που δεν είναι επιθυμητό. Όμως για γωνίες λίγο μεγαλύτερες της αρχικής

(μέχρι 4 μοίρες) επιτυγχάνεται μετατόπιση της καμπύλης δεξιότερα. Άρα, έτσι οδηγείται κανείς σε μια καλύτερη μηχανή.



Σχήμα 5.28: Καμπύλη απόδοσης του φυσητήρα για διαφορετικές γωνίες περουργιών.

Από το Σχήμα 5.28 φαίνεται ότι για σημαντική αύξηση των γωνιών εισόδου και εξόδου η απόδοση της μηχανής ελαττώνεται. Για μικρή μείωση στις γωνίες ο μέγιστος βαθμός απόδοσης μειώνεται ελαφρώς αλλά επιτυγχάνεται μεγαλύτερος βαθμός απόδοσης σε μεγαλύτερο εύρος παροχών. Για μικρή αύξηση στις γωνίες δεν παρατηρείται σημαντική μεταβολή στον βαθμό απόδοσης.

Κεφάλαιο 6

Ανακεφαλαίωση - Συμπεράσματα

6.1 Ανακεφαλαίωση - Συμπεράσματα

Στη διπλωματική αυτή μελετήθηκε η σχεδίαση και προσομοίωση ενός φυγοκεντρικού φυσητήρα με τη χρήση λογισμικού υπολογιστικής ρευστοδυναμικής. Συγκεκριμένα

- Ξεκινώντας από τα κατασκευαστικά σχέδια ενός φυσητήρα σχεδιάστηκε στο λογισμικό Solidworks η γεωμετρία της περωτής και του κελύφους του φυσητήρα
- Συναρμολογήθηκε η περωτή με το κέλυφος και στη συνέχεια μοντελοποιήθηκε το ρευστό εντός της μηχανής, το οποίο και πλεγματοποιήθηκε με το εργαλείο Flow Simulation του Solidworks
- Στη συνέχεια ορίστηκαν οι οριακές συνθήκες του προβλήματος ολοκληρώνοντας το μοντέλο υπολογιστικής προσομοίωσης της συμπεριφοράς του φυσητήρα
- Η επαλήθευση της αξιοπιστίας και ακρίβειας του μοντέλου έγινε συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με αντίστοιχα πειραματικά που υπήρχαν για την συγκεκριμένη μηχανή
- Έχοντας ένα αξιόπιστο μοντέλο, πλέον, έγιναν αλλαγές στην γεωμετρία της περωτής και μελετήθηκαν οι επιδόσεις της μηχανής (καμπύλη λειτουργίας και βαθμός απόδοσης) για τις νέες σχεδιάσεις
- Πιο συγκεκριμένα μελετήθηκε η επίδραση της διαμέτρου της περωτής, του ύψους των περυγίων, ο αριθμός και η γωνία των περυγίων

Από τις παραμετρικές μελέτες που πραγματοποιήθηκαν προκύπτουν τα εξής γενικά συμπεράσματα:

- Με αύξηση της διαμέτρου της περωτής υπάρχει μετατόπιση της καμπύλης λειτουργίας προς υψηλότερες διαφορές πίεσης και υψηλότερους βαθμούς απόδοσης για την ίδια παροχή.
- Με αύξηση του ύψους των περυγίων η καμπύλη λειτουργίας μετατοπίζεται επίσης προς μεγαλύτερες διαφορές πίεσης και μεγαλύτερους βαθ-

μούς απόδοσης, όχι τόσο έντονα όμως όσο με την αύξηση της διαμέτρου.

- Με αύξηση του αριθμού των πτερυγίων η χαρακτηριστική καμπύλη βελτιώνεται, κινούμενη δεξιότερα, καθώς η ροή κατευθύνεται καλύτερα εντός του κελύφους. Όμως, ο μέγιστος βαθμός απόδοσης της μηχανής με αύξηση των πτερυγίων φαίνεται να μειώνεται, εξαιτίας των περισσότερων απωλειών που εισάγουν τα περισσότερα πτερύγια. Παράλληλα όμως επιτυγχάνεται μεγαλύτερος βαθμός απόδοσης σε μεγαλύτερο εύρος παροχών.
- Μικρές αλλαγές στην περωτή μπορούν να οδηγήσουν σε έναν νέο αποδοτικό φυσητήρα για να καλύψει διαφορετικές ανάγκες από τον αρχικό χωρίς να χρειάζεται να αλλάξει και το κέλυφος.

Όσον αφορά την βελτίωση των επιδόσεων του συγκεκριμένου φυσητήρα προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

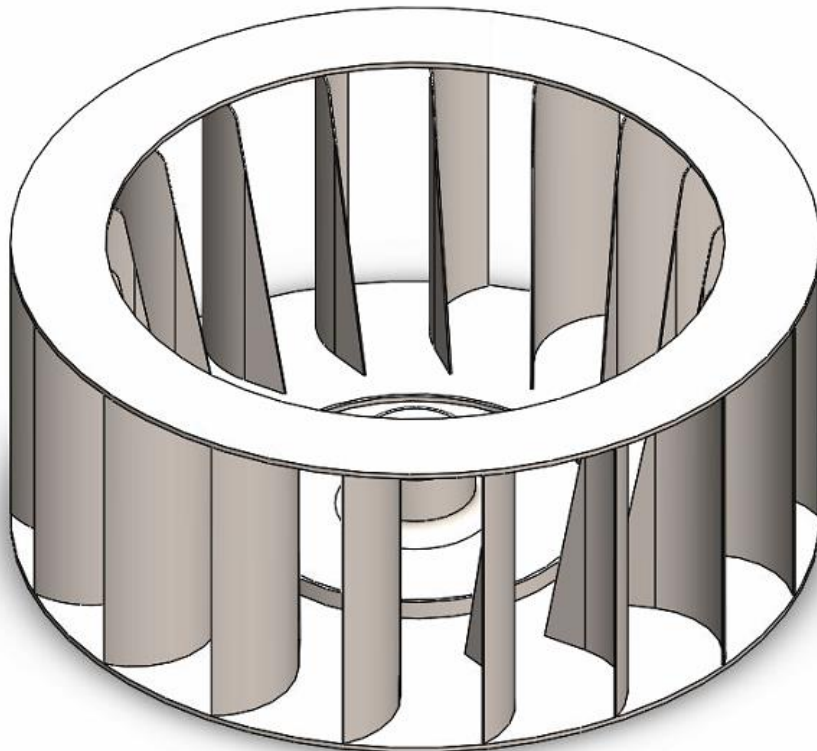
- Με μικρή αύξηση της διαμέτρου της περωτής και του ύψους των πτερυγίων, της τάξης των 5mm-10mm βελτιώνεται η συμπεριφορά της μηχανής χωρίς να μεταβληθεί σημαντικά το σημείο λειτουργίας
- Με αύξηση του αριθμού των πτερυγίων σε 18 (από τα 16 της αρχικής γεωμετρίας) παρατηρείται ομοίως βελτιωμένη η απόδοση της μηχανής γύρω από το ίδιο σημείο λειτουργίας
- Με μικρή μείωση της γωνίας των πτερυγίων, της τάξης των 3°-5° παρατηρείται ότι ο βαθμός απόδοσης βελτιώνεται, καθώς η καμπύλη του παρουσιάζει αύξηση σε ευρύτερο φάσμα γύρω από το σημείο λειτουργίας

Σε κάθε περίπτωση η αξιολόγηση της συμπεριφοράς της μηχανής πρέπει να γίνεται συναρτήσει της ανάγκης που υπάρχει για να διακινεί ορισμένη παροχή. Αν μετακινηθεί το σημείο λειτουργίας η αύξηση της ισχύος που οφείλεται στην αυξημένη παροχή και πίεση πρέπει να είναι μικρότερη κατά απόλυτη τιμή από την μείωση της απαιτούμενης ισχύος λόγω της αύξησης του βαθμού απόδοσης για να θεωρείται βελτιωμένη η σχεδίαση του φυσητήρα.

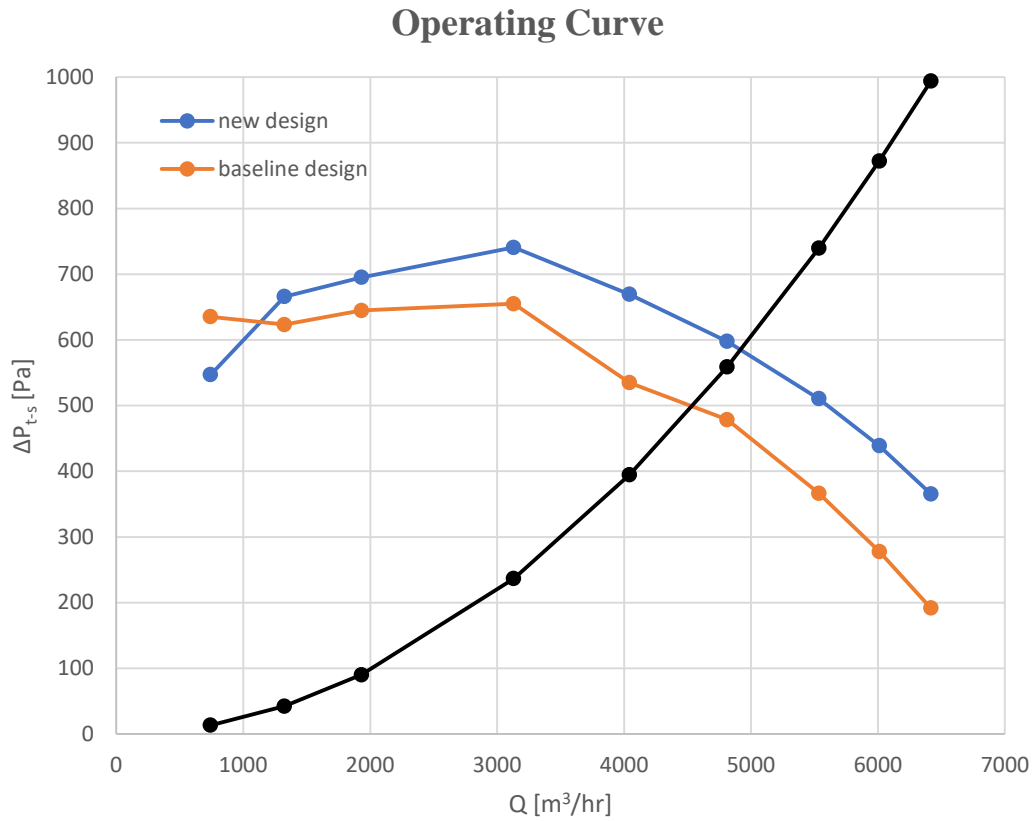
Συνδυάζοντας μικρές μεταβολές στην γεωμετρία της περωτής, όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.1 και στο Σχήμα 6.1, οδηγείται κανείς σε μία νέα σχεδίαση, της οποίας η λειτουργία αποτυπώνεται στα σχήματα 6.2 και 6.3.

	Αρχική γεωμετρία (baseline design)	Νέα γεωμετρία (new design)
Πλάτος περρωτής	<i>395mm</i>	<i>403mm</i>
Ύψος περρωγίων	<i>160mm</i>	<i>164mm</i>
Αριθμός περρωγίων	<i>16</i>	<i>18</i>
Γωνία περρωγίων	<i>25.5°</i>	<i>22°</i>

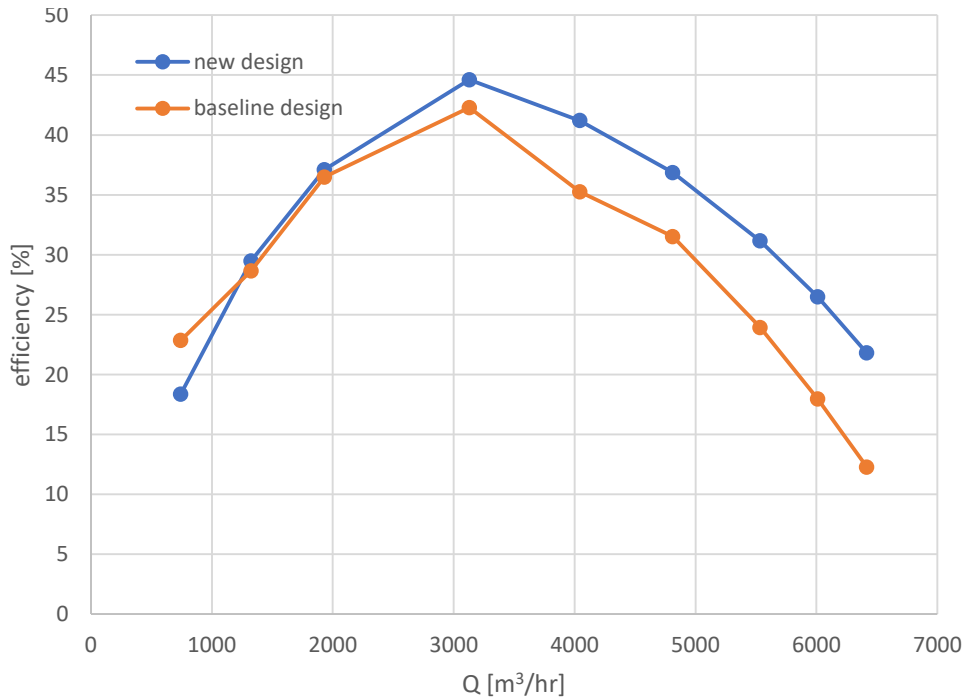
Πίνακας 6.1: Οι διαστάσεις της νέας σχεδίασης της περρωτής συγκριτικά με την αρχική γεωμετρία της.



Σχήμα 6.1: Η περρωτή όπως προκύπτει μετά από τις συνδυασμένες αλλαγές στις γεωμετρικές της παραμέτρους.



Σχήμα 6.2: Χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας του φυσητήρα με την αρχική και την νέα σχεδίαση.



Σχήμα 6.3: Καμπύλη βαθμού απόδοσης του φυσητήρα με την αρχική και την νέα σχεδίαση.

Από τα σχήματα παρατηρούμε πως ενώ το σημείο λειτουργίας δεν μετακινείται σημαντικά, ο βαθμός απόδοσης παρουσιάζει αύξηση της τάξης του 3% οδηγώντας έτσι σε μια οικονομικότερη στην χρήση μηχανή εφόσον η αύξηση της παροχής δικαιολογείται από την συγκεκριμένη εφαρμογή.

6.2 Προτάσεις για μελλοντικές εργασίες

Με βάση την διπλωματική αυτή προτείνεται στο μέλλον να μελετηθεί:

- η επίδραση της γεωμετρίας του κελύφους στις επιδόσεις της μηχανής
- η παραμετρική βελτιστοποίηση της φτερωτής και του κελύφους για εγκατάσταση συγκεκριμένων προδιαγραφών
- η πειραματική επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων για διαφορετικές γεωμετρίες

Βιβλιογραφία

[1] O.P. Singh, Rakesh Khilwani, T. Streenivasulu, M. Kannan: *Parametric study of centrifugal fan performance: Experiments and numerical simulation*, TVS Motor Company, R&D Department, Department of mechanical engineering, Indian Institute of Technology, 2011

[2] Nitin N. Vibhakar, Dr. S. A. Channiwala: *Studies on radial tipped centrifugal fan*, Veer Narmad South Gujarat University, Surat, 2012

[3] Beena D. Baloni, Yogesh Pathak, S.A. Channiwala: *Centrifugal blower volute optimization based on Taguchi method*, Department of Mechanical Engineering, S.V.N.I.T., Surat, 2013

[4] Frank P. Bleier: *Fan handbook: Selection, application and design*, 1998

[5] I. Howitt: *Centrifugal and axial flow fan applications and design criteria*, Air & Gas Products Howden Parsons Limited, Scarborough, Ontario, Canada

[6] Malcolm J McPherson: *Subsurface Ventilation Engineering*, Virginia Polytechnic Institute and State University, Chapter 10, 1993

[7] K. C. Giannakoglou: *Viscous flows in Turbomachines*, NTUA, 2004

[8] G. Mpergeles: *Computational fluid dynamics*, 2nd Edition, Simeon Publishing House, 2012

[9] S. Tsaggaris: *Fluid Dynamics*, 2nd Edition, Tsotras Publishing House, 2016

- [10] K. D. Papailiou, K. M. Mathioudakis, K. C. Giannakoglou: *Introduction to thermal turbomachines*, LTT, NTUA, 2000
- [11] S. M. Yahya: *Turbines, Compressors and Fans*, 4th Edition, Tata McGraw Hill Education Private Limited, Indian Institute of Technology, Delhi, Chapter 15, 2011
- [12] Kiran Pulidindi, Akshay Prakash: *Centrifugal Blower Market Size – By Pressure (High, Medium, Low), By End-user (Cement Plant, Steel Plant, Mining, Power Station, Chemical, Pulp & Paper), COVID-19 Impact Analysis and Forecast, 2022-228*, Global Market Insights, Summary, 2022
- [13] G. Xristou, K. Mathioudakis: *Study of the flow field and behavior of a centrifugal blower by changing its operational parameters*, LTT, NTUA, 2006
- [14] A. Vlachakis, N. Aretakis: *Construction and certification of experimental facility for measuring the performance of centrifugal blowers*, LTT, NTUA, 2018