



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**Σχεδιασμός & Ανάλυση Αξονικού Στροβίλου για Κύκλους
Παραγωγής Ισχύος Υπερκρίσιμου Διοξειδίου του Άνθρακα**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

Μεμούσαϊ Σάρα

Επιβλέπων:

Δρ. Ιωάννης Σαρρής

Επίκουρος Καθηγητής Πα.Δ.Α.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2024



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Σχεδιασμός & Ανάλυση Αξονικού Στροβίλου για Κύκλους Παραγωγής Ισχύος Υπερκρίσιμου Διοξειδίου του Άνθρακα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της
Μεμούσαϊ Σάρα

Επιβλέπων:
Δρ. Ιωάννης Σαρρής
Επίκουρος Καθηγητής Πα.Δ.Α.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική Επιτροπή στις

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....
Δρ Ιωάννης Σαρρής

ΔΕΠ

Πα.Δ.Α.

.....
Δρ Γεώργιος Σοφιάδης

ΕΕΠ

Πα.Δ.Α.

.....
Δρ Ευάγγελος Καρβέλας

ΕΕΠ

Πα.Δ.Α.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2024

Copyright © - Μεμούσαϊ Σάρα, 2024

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται στον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής.

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Μεμούσαϊ Σάρα του Σπαρτάκ, με αριθμό μητρώου 461272017034 φοιτήτρια του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, της Σχολής Μηχανικών, του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Η Δηλούσα



Μεμούσαϊ Σ. Σάρα

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω βαθύτατα τους επιβλέποντες καθηγητές μου, Γκούντα Απόστολο και Σαρρή Ιωάννη, που με την καθοδήγηση, τη βοήθεια και τη στήριξη τους μου έδωσαν τη δυνατότητα να ολοκληρώσω με επιτυχία τη διπλωματική μου εργασία καθώς ήταν πρόθυμοι να λύσουν τις απορίες που γεννήθηκαν κατά τη διάρκεια της έρευνάς μου.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να εκφράσω την εγκάρδια ευγνωμοσύνη μου στους αξιότιμους συναδέλφους μου στο CERN, με τους οποίους είχα το προνόμιο να συνεργαστώ τον περασμένο χρόνο για την ανάπτυξη του καινούργιου συστήματος ψύξης 2PACL για τους ανιχνευτές ATLAS και CMS. Το να εργάζομαι δίπλα σε τέτοια αφοσιωμένα και ταλαντούχα άτομα ήταν μια πολύτιμη εμπειρία και εκτιμώ βαθύτατα τη γνώση και την τεχνογνωσία που μοιράστηκαν σε όλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας. Οι γνώσεις και οι συνεισφορές τους έχουν βελτιώσει σημαντικά την κατανόηση και τις δεξιότητές μου, τις οποίες μπόρεσα να αξιοποιήσω στην παρούσα μελέτη.

Σαφώς, θα ήθελα μέσα από την καρδιά μου να ευχαριστώ την οικογένειά μου και τους φίλους μου που ήταν δίπλα μου καθ'όλη τη διάρκεια σπουδών μου και με στήριζαν ανιδιοτελώς και με κάθε δυνατό τρόπο.

Τέλος, θα ήθελα να πω ένα μικρό ευχαριστώ και στον εαυτό μου για τις αμέτρητες ώρες έρευνας και την αποφασιστικότητα μου να συνεχίσω, ακόμα και όταν αντιμετώπιζα αδιέξοδα. Οι σπουδές μου και η μελέτη αυτή ήταν ένα ταξίδι που μου δίδαξε πολλά τόσο για τον εαυτό μου όσο και τον κλάδο μου. Χάρη σε όλες τις προκλήσεις, μπορώ πλέον περήφανα να κατέχω τον τίτλο του «Μηχανολόγου Μηχανικού».

Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια υπάρχει η τάση και θέληση για μείωση της χρήσης των συμβατικών ορυκτών καυσίμων για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, με στόχο τη μείωση των ρυπογόνων εκπομπών στην ατμόσφαιρα. Αυτή η προσπάθεια έχει οδηγήσει σε σημαντική αύξηση της μελέτης τεχνολογιών που χρησιμοποιούν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ή πετυχαίνουν καλύτερες αποδόσεις σε σχέσεις με τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται ήδη. Ένα χαρακτηριστικό τέτοιο παράδειγμα, αποτελεί ο κλειστός κύκλος Brayton όπου ρέει υπερκρίσιμο διοξείδιο του άνθρακα ($s\text{CO}_2$). Ο κύκλος υπερκρίσιμου CO_2 μπορεί να βρει εφαρμογή σε πλήθος περιπτώσεων και αναγκών, κυρίως σε συστήματα υψηλών θερμοκρασιών, πετυχαίνει πολύ καλύτερες αποδόσεις από τους αντίστοιχους κύκλους Rankine, ενώ λόγω των ιδιοτήτων του CO_2 το μέγεθός της εγκατάστασής τους είναι σημαντικά μικρότερο, οδηγώντας σε σημαντική μείωση του κόστους κατασκευής και λειτουργίας τους.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται η ανάλυση και κατά συνέπεια ο σχεδιασμός της ροής ενός μονοβάθμιου αξονικού στροβίλου, ο οποίος θα χρησιμοποιεί ως εργαζόμενο ρευστό το υπερκρίσιμο διοξείδιο του άνθρακα. Ο σχεδιασμός ενός τέτοιου στροβίλου είναι αρκετά ιδιαίτερος, καθώς η ροή δεν πρέπει να εισέλθει στη διασκή περιοχή, προκαλώντας προβλήματα στη λειτουργία του στροβίλου. Στην διπλωματική εργασία αυτή, ερευνάται ο κύκλος Brayton επανασυμπίεσης και στη συνέχεια σχεδιάζεται ο στροβίλος του συστήματος.

Η μελέτη ξεκινά με έναν προκαταρκτικό σχεδιασμό, ο οποίος δίνει μία αρχική προσέγγιση της απόδοσης, της διαμέτρου και του αριθμού στροφών του στροβίλου. Ακολούθως, αναπτύσσεται ένα δισδιάστατο μοντέλο σχεδιασμού του στάτορα και του ρότορα του στροβίλου στο υπολογιστικό πρόγραμμα MATLAB, όπου ενσωματώνονται όλα τα διαθέσιμα μοντέλα θερμοδυναμικής και ρευστοδυναμικής από τη βιβλιογραφία.

Ακολουθεί ο τρισδιάστατος σχεδιασμός των πτερυγίων του στάτορα και του ρότορα στο λογισμικό περιβάλλον του CFTurbo, με βάση τα αποτελέσματα του δισδιάστατου μοντέλου που προέκυψαν από το προηγούμενο βήμα. Στη συνέχεια, δημιουργείται η γεωμετρία και το πλέγμα για τα δύο πτερύγια και αφού συνδεθούν κατάλληλα, πραγματοποιείται η επίλυση της ροής με τη χρήση του λογισμικού ANSYS, ώστε να μελετηθούν τα τρισδιάστατα φαινόμενα της ροής του διοξειδίου του άνθρακα.

Λέξεις κλειδιά: στροβιλομηχανές, αξονικός στροβίλος, οργανικός κύκλος Brayton, υπερκρίσιμος κύκλος διοξειδίου του άνθρακα, θερμο-ρευστοδυναμική έρευνα, προσομοίωση

Abstract

In recent years there has been the tendency and will to reduce the use of conventional fossil fuels for electricity production, with the aim of reducing polluting emissions into the atmosphere. This effort has led to a significant increase in the study of technologies that use renewable energy sources or achieve better efficiencies in relation to technologies already in use. A typical example of that, is the closed loop Brayton cycle that uses supercritical carbon dioxide (sCO₂). The supercritical CO₂ cycle can be applied in a multitude of cases and needs, mainly in high temperature systems, it achieves much better performance than the corresponding Rankine cycles, while due to the properties of CO₂ the size of their installation is significantly smaller, leading to a significant reduction of their construction and operation costs.

In this thesis, we will study the analysis and consequently the design of the flow of an axial turbine stage, which will use supercritical carbon dioxide as the working fluid. The design of such a turbine is quite special, as the flow must not enter the two-phase region, causing problems in the operation of the turbine. In this thesis, the recompression Brayton cycle is investigated and then the turbine of the system is designed.

The study starts with a preliminary design, which gives an initial approximation of the efficiency, diameter and speed of the turbine. Subsequently, a two-dimensional design model of the stator and rotor of the first stage of the turbine is developed in the MATLAB computational environment, where all available thermodynamic and fluid dynamics models from the literature are integrated.

Next is the 3D design of the stator and rotor blades in the CFturbo software environment, based on the results of the 2D model obtained from the previous step. Next, the geometry and mesh for the two blades are created and after they are properly connected, the flow is calculated using ANSYS software to study the 3D phenomena of carbon dioxide flow.

<p>Keywords: turbomachinery, axial turbine, organic Brayton cycle, supercritical carbon dioxide cycle, thermo-fluid dynamic research, simulation</p>

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1°	1
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 ΓΕΝΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	2
1.2 ΣΗΜΑΣΙΑ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΑΞΟΝΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΩΝ	3
1.3 ΣΤΟΧΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2°	5
ΚΥΚΛΟΣ BRAYTON sCO ₂	5
2.1 ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΥΠΑΡΧΟΥΣΑΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ	6
2.1.1 ΕΦΑΡΜΟΓΗ	6
2.1.2 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	7
2.1.3 ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΑΠΟΒΑΛΛΟΜΕΝΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ	9
2.1.4 ΘΑΛΑΣΣΙΕΣ ΚΑΙ ΑΕΡΟΔΙΑΣΤΗΜΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....	9
2.1.5 ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟ ΣΤΑΘΜΟΙ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ.....	10
2.1.6 ΧΗΜΙΚΕΣ ΚΑΙ ΠΕΤΡΟΧΗΜΙΚΕΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΕΣ.....	11
2.2 ΠΕΡΙΘΩΡΙΑ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΚΑΙ ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑΣ.....	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3°	15
ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΑΞΟΝΙΚΟΥ ΣΤΡΟΒΙΛΟΥ	15
3.1 ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ	16
3.2 ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ	27
3.3 ΤΡΙΓΩΝΑ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΥ	31
3.3.1 ΑΔΙΑΣΤΑΤΟΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ	35
3.3.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΑΕΡΑ	37
3.4 ΟΛΙΚΑ ΚΑΙ ΣΤΑΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ	46
3.5 ΑΠΟΔΟΣΗ	49
3.6 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΤΡΟΒΙΛΟΥ	50
3.7 ΑΠΩΛΕΙΕΣ	54
3.7.1 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΠΡΟΦΙΛ	54
3.7.2 ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΥΣΕΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ	57
3.7.3 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΔΙΑΚΕΝΟΥ	57
3.8 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ	58
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4°	60
ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΣΩ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΑΞΟΝΙΚΟΥ ΣΤΡΟΒΙΛΟΥ	60
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	61

4.2	ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ	61
4.2.1	CFturbo	61
4.2.2	Bladegen - Γεωμετρία.....	72
4.3	ΠΛΕΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ	73
4.3.1	TurboGrid - Πλεγματοποίηση	73
4.4	ΕΠΙΛΥΣΗ	79
4.4.1	CFX-Pre.....	79
4.4.2	CFX-Solver Manager.....	89
4.4.3	CFD-Post	91
4.5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	94
	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο	95
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	95

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 2.1.1.1: Απεικόνιση φάσεων του CO ₂ σε διάγραμμα Πίεσης-Θερμοκρασίας (Budisa & Schulze-Makuch, 2014).....	2
Εικόνα 2.1.1.1: Μορφολογία αξονικού στροβίλου (Gambini & Vellini, 2021).....	3
Εικόνα 2.1.1.1: Διάταξη κύκλου επανασυμπίεσης Brayton για χρήση sCO ₂ (Mohammadi et al., 2019).....	6
Εικόνα 2.1.1.2: Η πιθανή εφαρμογή του κύκλου sCO ₂ (Ahn et al., 2015).....	7
Εικόνα 2.1.2.1: Η σύγκριση συστημάτων μετατροπής ισχύος ατμού, αέρα και sCO ₂ (Kato and Nikitin, n.d.).....	7
Εικόνα 2.1.2.2: Μορφολογία συστήματος CSP (Mehos et al., 1980).	8
Εικόνα 2.1.3.1: Το δοκιμαστικό εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας της NET Power στο La Porte του Τέξας συλλαμβάνει το CO ₂ που παράγει πριν εισέλθει στην ατμόσφαιρα (Sonal Patel, 2022).....	9
Εικόνα 2.1.3.2: Ο κύκλος Allam-Fetvedt της NET Power είναι ουσιαστικά ένας εξειδικευμένος κύκλος Brayton (Sonal Patel, 2022).	9
Εικόνα 2.1.4.1: Προθερμασμένος και ανακτημένος αεριοστροβίλος sCO ₂ ως σύστημα WHR (Reale et al., 2023).	10
Εικόνα 2.1.5.1: (Αριστερά) Βασικός κύκλος NGP (Δεξιά) Διάγραμμα T-s του βασικού κύκλου NGP (Sudhoff et al., 2019).....	11
Εικόνα 2.1.6.1: Πειραματική συσκευή για πειράματα ανάκτησης διαλυτών (Im et al., 2018).	12
Εικόνα 2.1.6.1: Διάταξη αναγεννητικού κύκλου Brayton με sCO ₂ (Schmitt et al., 2015).....	16
Εικόνα 2.1.6.2: Διακύμανση της θερμικής απόδοσης καθώς αυξάνεται η αναλογία πίεσης του συμπιεστή (Gkoutas et al., 2017)	18
Εικόνα 2.1.6.3: Η αποτελεσματικότητα του ανακτητή ως συνάρτηση της θερμοκρασίας εισόδου του συμπιεστή (Gkoutas et al., 2017).	19
Εικόνα 2.1.6.4: Η αποτελεσματικότητα των ανακτητών υψηλής και χαμηλής θερμοκρασίας ως συνάρτηση της πίεσης εκκένωσης του συμπιεστή (Gkoutas et al., 2017).	19
Εικόνα 2.1.6.5: Διάγραμμα h-s της διεργασίας εκτόνωσης.....	22
Εικόνα 2.1.6.6: Μοντέλο εναλλαγής θερμότητας διακριτικού ελέγχου όγκου (Schmitt et al., 2015).....	23
Εικόνα 2.1.6.1: Διάγραμμα Baljé για στροβίλους (Heshmat et al., 2018).	28
Εικόνα 2.1.6.2: Απλοποιημένη έκδοση του διαγράμματος Balje για στροβίλους που εκφράζει τη δυνητική απόδοση ως συνάρτηση μόνο της ειδικής ταχύτητας (Japikse & Baines, 1994).	29
Εικόνα 2.1.6.1: Τρίγωνα ταχυτήτων για στροβίλο αξονικής ροής (R Gorla & Khan, 2003)..	32
Εικόνα 2.1.6.2: Ορισμός γωνιών πτερυγίου (Klimko et al., 2022).	34
Εικόνα 3.3.2.1: Αδιάστατα μεγέθη στο VTA.....	38
Εικόνα 3.3.2.2: Διάστατα μεγέθη στο VTA.	39
Εικόνα 3.3.2.3: Προφίλ ταχυτήτων στο VTAA.	40
Εικόνα 3.3.2.4: Ροή του ρευστού στην βάση των πτερυγίων του αξονικού στροβίλου.....	41
Εικόνα 3.3.2.5: Τιμές των ταχυτήτων και γωνιών εισόδου/εξόδου για την βάση του πτερυγίου.....	41
Εικόνα 3.3.2.6: Τρίγωνο ταχυτήτων για την βάση του πτερυγίου.	41
Εικόνα 3.3.2.7: Ροή του ρευστού στην μέση των πτερυγίων του αξονικού στροβίλου.	42

Εικόνα 3.3.2.8: Τιμές των ταχυτήτων και γωνιών εισόδου/εξόδου για την μέση του πτερυγίου.....	42
Εικόνα 3.3.2.9: Τρίγωνο ταχυτήτων για το μέσω του πτερυγίου.....	42
Εικόνα 3.3.2.10: Ροή του ρευστού στην ακμή των πτερυγίων του αξονικού στροβίλου.....	43
Εικόνα 3.3.2.11: Τιμές των ταχυτήτων και γωνιών εισόδου/εξόδου για την ακμή του πτερυγίου.....	43
Εικόνα 3.3.2.12: Τρίγωνο ταχυτήτων για το μέσω του πτερυγίου.....	43
Εικόνα 3.3.2.13: Ροή του ρευστού σε όλο το ύψος των πτερυγίων του αξονικού στροβίλου.	44
Εικόνα 3.3.2.14: Τρίγωνο ταχυτήτων καθ' όλο το ύψος του πτερυγίου.....	44
Εικόνα 3.3.2.15: Καμπή πτερυγίων στάτορα.....	45
Εικόνα 3.3.2.16: Καμπή πτερυγίων ρότορα.....	45
Εικόνα 3.3.2.1: Διαφορά μεταξύ στατικής πίεσης, δυναμικής πίεσης και ολικής πίεσης (Yunus A. Cengel and John M. Cimbala, 2014).....	46
Εικόνα 3.3.2.1: Εύρος επιλογής για τους εισαγωγικούς αδιάστατους συντελεστές που απαιτούνται στον ορισμό του πτερυγίου (Moroz et al., 2014).....	51
Εικόνα 3.3.2.2: Τυπικές αξονικές πτερωτές με αυξανόμενη αναλογία πλήμνης προς άκρη από αριστερά προς τα δεξιά (κλασικό σχήμα λεπίδας) (Carolus and Bamberger, 2023).....	51
Εικόνα 3.3.2.3: Μορφολογία πτερυγίων στάτορα και ρότορα αξονικού στροβίλου (Agromayor and Nord, 2019).....	53
Εικόνα 3.7.1.1: Συντελεστές απώλειας προφίλ για $i=0$, όταν (α) η σχετική γωνία εισόδου είναι μηδέν (β) οι σχετικές γωνίες εισόδου/εξόδου είναι ίσες.....	55
Εικόνα 3.7.1.2: (α) Διαφορά αδράνειας αξονικού στροβίλου και (β) Αδράνεια αξονικού στροβίλου για $s/c = 0,75$	56
Εικόνα 3.7.1.3: Αντιστοιχία απώλειας προφίλ συνάρτηση της γωνίας πρόσπτωσης.....	57
Εικόνα 3.7.3.1: Διάγραμμα διαδικασίας υπολογιστικής ρευστομηχανικής (Σαρρής Β. Αλέξανδρος, 2017).....	61
Εικόνα 4.2.1.1: Αρχική οθόνη κατά την εισαγωγή στο CFturbo.....	62
Εικόνα 4.2.1.2: Καθορισμός παγκόσμιων σταθερών.....	62
Εικόνα 4.2.1.3: Κύριες διαστάσεις στάτορα.....	63
Εικόνα 4.2.1.4: Μεσημβρινή όψη στάτορα.....	64
Εικόνα 4.2.1.5: Γωνίες εισόδου/εξόδου στάτορα.....	64
Εικόνα 4.2.1.6: Ιδιότητες πτερυγίων στάτορα.....	65
Εικόνα 4.2.1.7: Προφίλ πτερυγίων στάτορα.....	65
Εικόνα 4.2.1.8: Ρυθμίσεις διαστάσεων.....	66
Εικόνα 4.2.1.9: Παράμετροι διαστάσεων ρότορα.....	67
Εικόνα 4.2.1.10: Τελικές διαστάσεις στάτορα.....	67
Εικόνα 4.2.1.11: Μεσημβρινή όψη ρότορα.....	68
Εικόνα 4.2.1.12: Ροή του ρευστού στον ρότορα.....	68
Εικόνα 4.2.1.13: Σχετικές γωνίες εισόδου/εξόδου των πτερυγίων του ρότορα.....	69
Εικόνα 4.2.1.14: Ιδιότητες πτερυγίων ρότορα.....	69
Εικόνα 4.2.1.15: Προφίλ πτερυγίου ρότορα.....	70
Εικόνα 4.2.1.16: Μεσημβρινή όψη πτερυγίων.....	70
Εικόνα 4.2.1.17: Διάγραμμα πτερυγίων του στροβίλου.....	71
Εικόνα 4.2.1.18: Τρισδιάστατο μοντέλο του στροβίλου όπως προέκυψε στο πρόγραμμα CFturbo.....	71
Εικόνα 4.2.1.19: Εξαγωγή αρχείων για τον στάτορα και τον ρότορα.....	71
Εικόνα 4.2.2.1: Βήματα υπολογιστικής ρευστομηχανικής ανάλυσης στο πρόγραμμα ANSYS.....	72

Εικόνα 4.2.2.2: Μορφολογία πτερυγίου στάτορα όπως εμφανίζεται στο ANSYS Bladegen.	72
Εικόνα 4.2.2.3: Μορφολογία πτερυγίου ρότορα όπως εμφανίζεται στο ANSYS Bladegen...	73
Εικόνα 4.3.1.1: Απεικόνιση του όγκου ελέγχου ενός πτερυγίου ρότορα συμπίεστη στο πρόγραμμα ANSYS Turbogrid (ANSYS Inc., 2013).....	75
Εικόνα 4.3.1.2: Πλέγμα πτερυγίου στάτορα.	76
Εικόνα 4.3.1.3: Πλέγμα πτερυγίου ρότορα.	76
Εικόνα 4.3.1.4: Διαμοιρασμός στρωμάτων όπως φαίνονται στην μεσημβρινή όψη του στάτορα.	77
Εικόνα 4.3.1.5: Διαμοιρασμός στρωμάτων όπως φαίνονται στην μεσημβρινή όψη του ρότορα.	77
Εικόνα 4.3.1.6: Παράθυρο στο περιβάλλον του ANSYS-Turbogrid για τον ορισμό των κόμβων και στοιχείων του πλέγματος.	78
Εικόνα 4.3.1.7: Παράθυρο στο περιβάλλον του ANSYS-Turbogrid για τον ορισμό της μεθόδου πλεγματοποίησης.	78
Εικόνα 4.3.1.8: Μεγέθυνση πλέγματος πτερυγίου στάτορα.....	79
Εικόνα 4.4.1.1: Απεικόνιση ενός ζεύγους πτερυγίων του στροβίλου.	80
Εικόνα 4.4.1.2: Προσθήκη νέου υλικού στον κατάλογο του ANSYS.	80
Εικόνα 4.4.1.3: Το κύριο παράθυρο του υποπρογράμματος CFX-Pre.....	81
Εικόνα 4.4.1.4: Ορισμός είδους στροβιλομηχανής και τύπου ανάλυσης.....	81
Εικόνα 4.4.1.5: Προσδιορισμός πτερυγίου του στάτορα.	82
Εικόνα 4.4.1.6: Προσδιορισμός πτερυγίου του ρότορα.	82
Εικόνα 4.4.1.7: Ορισμός μοντέλου επίλυσης.	84
Εικόνα 4.4.1.8: Ορισμός διεπαφών των πτερυγίων του ρότορα	84
Εικόνα 4.4.1.9: Ορισμός διεπαφών των πτερυγίων του στάτορα.....	85
Εικόνα 4.4.1.10: Ορισμός του μεταβατικού πεδίου μεταξύ των πτερυγίων.	85
Εικόνα 4.4.1.11: Ορισμός των ιδιοτήτων του ρευστού κατά την είσοδο.	86
Εικόνα 4.4.1.12: Ορισμός των ιδιοτήτων του ρευστού κατά την είσοδο.	86
Εικόνα 4.4.1.13: Ορισμός των οριακών συνθηκών του πτερυγίου.	86
Εικόνα 4.4.1.14: Ορισμός των οριακών συνθηκών της πλήμνης.....	87
Εικόνα 4.4.1.15: Ορισμός έντασης τύρβης.	88
Εικόνα 4.4.1.16: Ορισμός σχεδίου έλξης.	88
Εικόνα 4.4.2.1: Παράθυρο εκκίνησης του επιλυτή.	90
Εικόνα 4.4.2.2: Απεικόνιση των RMS κατά την λειτουργία του Solver.....	90
Εικόνα 4.4.3.1: Κατανομή της πίεσης στο 10% του ύψους των πτερυγίων.....	92
Εικόνα 4.4.3.2: Κατανομή της πίεσης στο 50% του ύψους των πτερυγίων.....	92
Εικόνα 4.4.3.3: Κατανομή της πίεσης στο 90% του ύψους των πτερυγίων.....	93

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 3.1.1: Επιθυμητά χαρακτηριστικά στροβίλου.....	17
Πίνακας 3.1.2: Θερμοδυναμικά στοιχεία εισόδου κύκλου.....	20
Πίνακας 3.1.3: Ισεντροπικές ενθαλπίες.....	21
Πίνακας 3.1.4: Ροές μάζας συστήματος.....	23
Πίνακας 3.1.5: Αποτελεσματικότητα εναλλακτών.....	24
Πίνακας 3.1.6: Ολική και επιμέρους ισχύς/θερμότητα των στοιχείων του κύκλου επανασυμπίεσης.....	24
Πίνακας 3.1.7: Αποδόσεις κύκλου.....	26
Πίνακας 3.1.8: Συνολική ενέργεια και απόδοση κύκλου.....	27
Πίνακας 3.2.1: Αποτελέσματα προκαταρκτικού σχεδιασμού.....	30
Πίνακας 3.3.1: Τιμές τριγώνων ταχυτήτων.....	33
Πίνακας 3.3.1.2: Αδιάστατοι συντελεστές του στροβίλου.....	35
Πίνακας 3.4.1: Γνωστά ολικά μεγέθη στροβίλου.....	47
Πίνακας 3.4.2: Στατικές πιέσεις στροβίλου.....	47
Πίνακας 3.4.3: Σχετικές πιέσεις στροβίλου.....	47
Πίνακας 3.4.4: Θερμοχωρητικότητες στροβίλου.....	48
Πίνακας 3.4.5: Στατικές ενθαλπίες στροβίλου.....	48
Πίνακας 3.4.6: Rothalpy στροβίλου.....	48
Πίνακας 3.4.7: Στατικές και ολικές θερμοκρασίες στροβίλου.....	49
Πίνακας 3.5.1: Σχετικές πιέσεις στροβίλου.....	50
Κάποια γεωμετρικά χαρακτηριστικά όπως το χρήσιμο εμβαδόν και τις ακτίνες του στροβίλου τα έχουμε ήδη καταχωρήσει στον Πίνακα 3.6.1. Χρησιμοποιώντας αυτά τα δεδομένα, μπορούμε να καθορίσουμε πιο συγκεκριμένα την μορφολογία του στροβίλου.....	50
Πίνακας 3.6.2: Εισαγωγικές τιμές γεωμετρίας.....	51
Πίνακας 3.6.3: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά.....	52
Πίνακας 3.7.3.3: Απώλειες.....	58
Πίνακας 3.8.3: Συντελεστές απόδοσης.....	59
Πίνακας 4.4.1.1: Παράμετροι επίλυσης CFD.....	88

Ευρετήριο Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 2.1.6.1: Αναπαράσταση υπερκρίσιμου κύκλου CO ₂ στο διάγραμμα P-h.....	25
Διάγραμμα 2.1.6.2: Αναπαράσταση υπερκρίσιμου κύκλου CO ₂ στο διάγραμμα T-s.....	25
Διάγραμμα 2.1.6.3: Αναπαράσταση υπερκρίσιμου κύκλου CO ₂ στο διάγραμμα h-s.	26
Διάγραμμα 3.3.1.1: Τρίγωνα ταχυτήτων του αξονικού στροβίλου 1MW, στον X άξονα είναι η ακτινική ταχύτητα και στον Y άξονα είναι η αξονική ταχύτητα (για την πλήμνη).....	36
Διάγραμμα 3.3.1.2: Τρίγωνα ταχυτήτων του αξονικού στροβίλου 1MW, στον X άξονα είναι η ακτινική ταχύτητα και στον Y άξονα είναι η αξονική ταχύτητα (για το μέσο του πτερυγίων).	36
Διάγραμμα 3.3.1.3: Τρίγωνα ταχυτήτων του αξονικού στροβίλου 1MW, στον X άξονα είναι η ακτινική ταχύτητα και στον Y άξονα είναι η αξονική ταχύτητα (για την ακμή).	37
Διάγραμμα 3.3.2.1: Πτώση πίεσης όπως κατανέμεται στον στάτορα και στον ρότορα.....	54

Ευρετήριο Εξισώσεων

Εξίσωση 3.1.1: Έργο ισεντροπικής διεργασίας.....	21
Εξίσωση 3.1.2: Έργο πραγματικής διεργασίας	21
Εξίσωση 3.1.3: Ροή μάζας.....	22
Εξίσωση 3.1.4: Ισοζύγιο ενέργειας για τον LTR.....	22
Εξίσωση 3.1.5: Αποτελεσματικότητα HTR	24
Εξίσωση 3.1.6: Αποτελεσματικότητα LTR.....	24
Εξίσωση 3.1.7: Ηλεκτρική ισχύς.....	26
Εξίσωση 3.1.8: Πραγματικό παραγόμενο έργο	27
Εξίσωση 3.1.9: Συνολική καταναλισκόμενη ενέργεια	27
Εξίσωση 3.1.10: Θερμικός βαθμός απόδοσης.....	27
Εξίσωση 3.2.1: Ειδική ταχύτητα	28
Εξίσωση 3.2.2: Ειδική διάμετρος.....	28
Εξίσωση 3.2.3: Αναλογία βάσης-ακμής.....	29
Εξίσωση 3.2.4: Ακτίνα ακμής	29
Εξίσωση 3.2.5: Ακτίνα βάσης	29
Εξίσωση 3.2.6: Μέση ακτίνα	29
Εξίσωση 3.2.7: Διάμετρος ακμής και κορυφής.....	29
Εξίσωση 3.2.8: Εμβαδόν ακμής και κορυφής	30
Εξίσωση 3.2.9: Χρήσιμο εμβαδόν.....	30
Εξίσωση 3.3.1: Σχετική ταχύτητα	32
Εξίσωση 3.3.2: Αρχή διατήρησης της μάζας	33
Εξίσωση 3.3.3: Ταχύτητα πτερυγίου.....	33
Εξίσωση 3.3.4: Γωνία εναλλαγής.....	34
Εξίσωση 3.3.5: Γωνία καμπής.....	34
Εξίσωση 3.3.6: Συντελεστής ροής.....	35
Εξίσωση 3.3.7: Συντελεστής φόρτισης	35
Εξίσωση 3.3.8: Βαθμός αντίδρασης.....	35
Εξίσωση 3.4.1: Στατική πίεση.....	47
Εξίσωση 3.4.2: Αναλογία πιέσεων	47
Εξίσωση 3.4.3: Σχετική πίεση	47
Εξίσωση 3.4.4: Ολική ενθαλπία (Εκδοχή 1)	48
Εξίσωση 3.4.5: Rothalpy	48
Εξίσωση 3.4.6: Ολική ενθαλπία (Εκδοχή 2)	49
Εξίσωση 3.5.1: Συνολική-προς-συνολική απόδοση	49
Εξίσωση 3.5.2: Συνολική-προς-στατική απόδοση	49
Εξίσωση 3.6.1: Ύψος πτερυγίου	50
Εξίσωση 3.6.2: Μήκος χορδής.....	50
Εξίσωση 3.6.3: Αναλογία βήματος/χορδής	51
Εξίσωση 3.6.4: Πάχος πτερυγίου	52
Εξίσωση 3.6.5: Βήμα πτερυγίου.....	52
Εξίσωση 3.6.6: Αριθμός πτερυγίων	52
Εξίσωση 3.7.1: Πραγματικός συντελεστής απωλειών προφίλ	55
Εξίσωση 3.7.2: Δευτερεύουσες απώλειες.	57
Εξίσωση 3.7.3: Απώλειες διακένου.....	57
Εξίσωση 3.7.4: Συνολικές απώλειες.....	58

Εξίσωση 3.8.1: Συντελεστής απόδοσης στάτορα (μέσω ενθαλπίας)	58
Εξίσωση 3.8.2: Συντελεστής απόδοσης ρότορα (μέσω ενθαλπίας)	58
Εξίσωση 3.8.3: Συντελεστής απόδοσης στάτορα (μέσω πίεσης)	58
Εξίσωση 3.8.4: Συντελεστής απόδοσης ρότορα (μέσω πίεσης)	59
Εξίσωση 3.8.5: Ισεντροπική απόδοση.....	59
Εξίσωση 4.4.2.1: Εξίσωση συνέχειας	89
Εξίσωση 4.4.2.2: Εξίσωση ορμής	89
Εξίσωση 4.4.2.3: Τανυστής τάσης	89
Εξίσωση 4.4.2.4: Εξίσωση ενέργειας.....	89

Υπόμνημα

sCO ₂	Supercritical Carbon Dioxide	Υπερκρίσιμο Διοξείδιο του Άνθρακα
LTR	Low Temperature Recuperator	Ανακτητής Χαμηλής Θερμοκρασίας
HTR	High Temperature Recuperator	Ανακτητής Υψηλής Θερμοκρασίας
VTAA	Velocity Triangle Analysis App	Εφαρμογή Ανάλυσης Τριγώνων Ταχυτήτων
NGP	Next Level Geothermal Power Generation	Επόμενο Επίπεδο Γεωθερμικής Παραγωγής
LE	Leading Edge	Πρόσθιο Άκρο
TE	Trailing Edge	Οπίσθιο Άκρο
SST	Shear Stress Transport	Μεταφορά Διατμητικής Τάσης

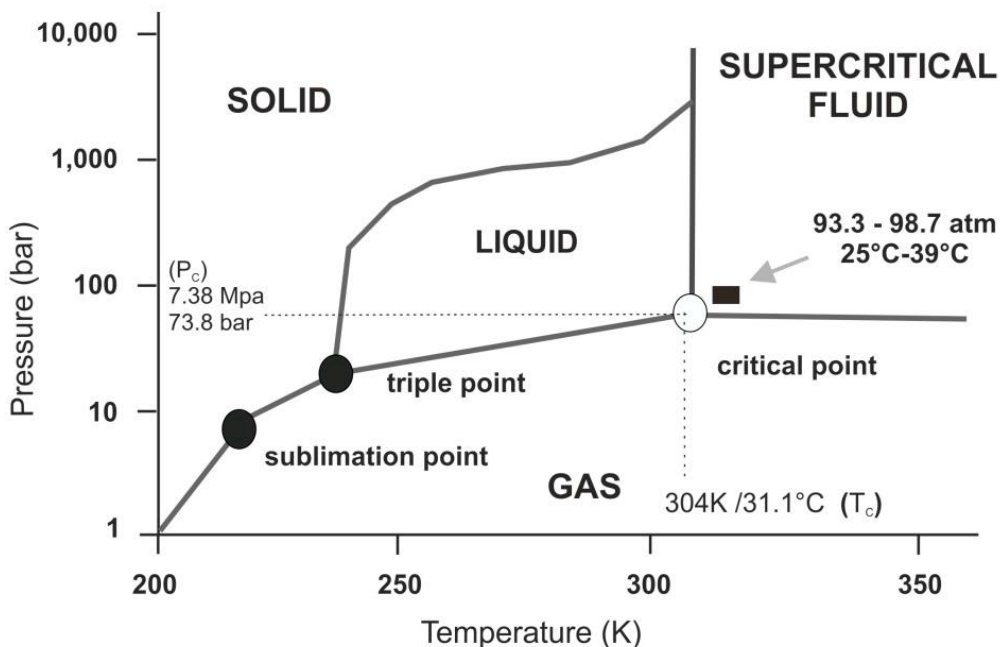
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΓΕΝΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Τα τελευταία χρόνια, η αυξανόμενη ζήτηση για ενεργειακή απόδοση και η επείγουσα ανάγκη μείωσης των εκπομπών άνθρακα έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη νέων τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας. Μεταξύ αυτών, ο κύκλος ισχύος υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα (sCO₂) έχει αναδειχθεί ως μια πολλά υποσχόμενη εναλλακτική λύση στους συμβατικούς κύκλους Rankine με ατμό, χάρη στην υψηλότερη απόδοση και τις χαμηλότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Ωστόσο, ο σχεδιασμός και η βελτιστοποίηση των κύκλων ισχύος Brayton sCO₂ υπόκειται ακόμη σε συνεχή έρευνα και μια κρίσιμη πτυχή είναι η ανάπτυξη αξονικών στροβίλων υψηλής απόδοσης.

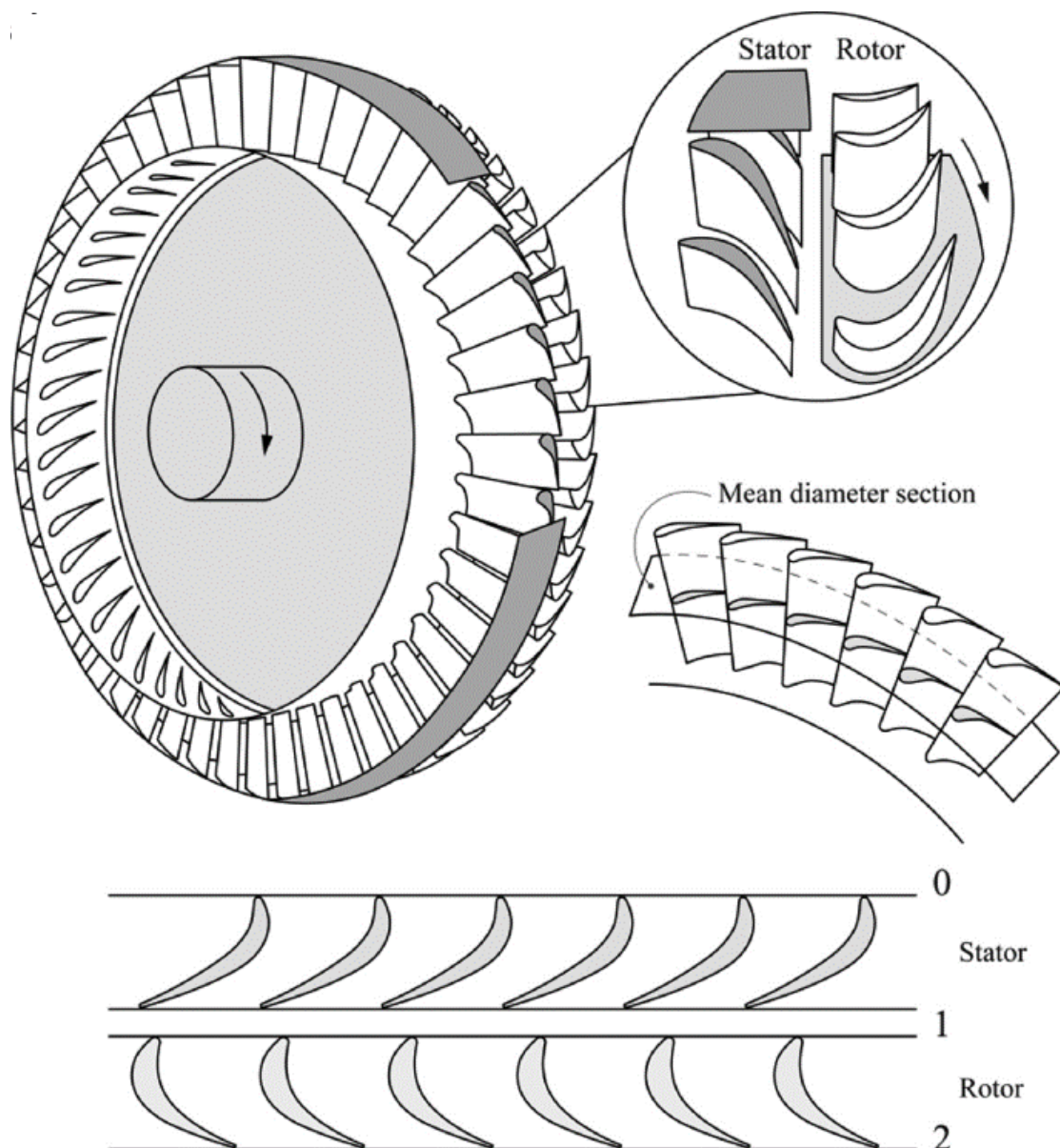
Το πλεονέκτημα της χρήσης υπερκρίσιμου CO₂ ως εργαζόμενου ρευστού ενός αεριοστροβίλου κλειστού κύκλου Brayton είναι πλέον ευρέως αναγνωρισμένο και η ανάπτυξη αυτής της τεχνολογίας επιδιώκεται πλέον ενεργά. Οι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής αεριοστροβίλων sCO₂ αποτελούν μια ελκυστική επιλογή για μετατροπή ηλιακής, γεωθερμικής και πυρηνικής ενέργειας (El Samad et al., 2020). Μεταξύ των προκλήσεων που πρέπει να ξεπεραστούν προκειμένου να κυκλοφορήσει με επιτυχία η τεχνολογία στην αγορά, η απόδοση του συμπιεστή και του στροβίλου που λειτουργούν με το υπερκρίσιμο ρευστό θα πρέπει να αυξηθεί όσο το δυνατόν περισσότερο. Η υψηλή απόδοση μπορεί να επιτευχθεί μέσω της εξελιγμένης αεροδυναμικής σχεδίασης, η οποία, σε σύγκριση με άλλες βελτιώσεις συνολικής απόδοσης, όπως η μέγιστη πίεση κύκλου και η αύξηση της θερμοκρασίας ή η αύξηση της αποτελεσματικότητας του ανακτητή, δεν απαιτεί αύξηση του κόστους εξοπλισμού, αλλά μόνο πρόσθετη προσπάθεια για έρευνα και ανάπτυξη (Pecnik et al., 2012).



Εικόνα 2.1.1.1: Απεικόνιση φάσεων του CO₂ σε διάγραμμα Πίεσης-Θερμοκρασίας (Budisa & Schulze-Makuch, 2014).

1.2 ΣΗΜΑΣΙΑ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΑΞΟΝΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΩΝ

Όπως προαναφέρθηκε, σημαντικό κομμάτι της έρευνας ανάπτυξης αυτών των συστημάτων είναι οι στρόβιλοι. Στη παρούσα μελέτη θα ασχοληθούμε εξολοκλήρου με τους αξονικούς στρόβιλους που παίζουν κρίσιμο ρόλο στους κύκλους ισχύος sCO₂, μετατρέποντας τη θερμική ενέργεια του ρευστού εργασίας σε μηχανική ενέργεια που οδηγεί μια γεννήτρια. Ο σχεδιασμός και η ανάλυση αξονικών στρόβιλων για κύκλους ισχύος sCO₂ θέτει πολλές προκλήσεις, όπως η υψηλή πυκνότητα του ρευστού, οι υψηλές θερμοκρασίες και οι περίπλοκοι θερμοδυναμικοί κύκλοι. Επιπλέον, η απόδοση των αξονικών στρόβιλων επηρεάζεται έντονα από τις παραμέτρους σχεδιασμού τους, όπως η γεωμετρία των πτερυγίων, η αλληλεπίδραση στάτορα-ρότορα και η διαμόρφωση της ροής (Sarkar, 2009).



Εικόνα 2.1.1.1: Μορφολογία αξονικού στρόβιλου (Gambini & Vellini, 2021).

1.3 ΣΤΟΧΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ως εκ τούτου, στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση του σχεδιασμού και της ανάλυσης αξονικών στροβίλων για κύκλους ισχύος sCO_2 , με έμφαση στη βελτιστοποίηση της απόδοσης. Η διατριβή θα καλύψει τις θεμελιώδεις αρχές των κύκλων ισχύος sCO_2 , το σχεδιασμό και την ανάλυση αξονικών στροβίλων και τις πειραματικές και αριθμητικές μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της απόδοσής τους.

Μέσω αυτής της εργασίας, στόχος είναι η συμβολή στην ανάπτυξη πιο αποτελεσματικών και αξιόπιστων κύκλων ενέργειας sCO_2 , οι οποίοι θα μπορούσαν να διαδραματίσουν κρίσιμο ρόλο στην κάλυψη της παγκόσμιας ενεργειακής ζήτησης με ταυτόχρονη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (Daabo et al., 2017).

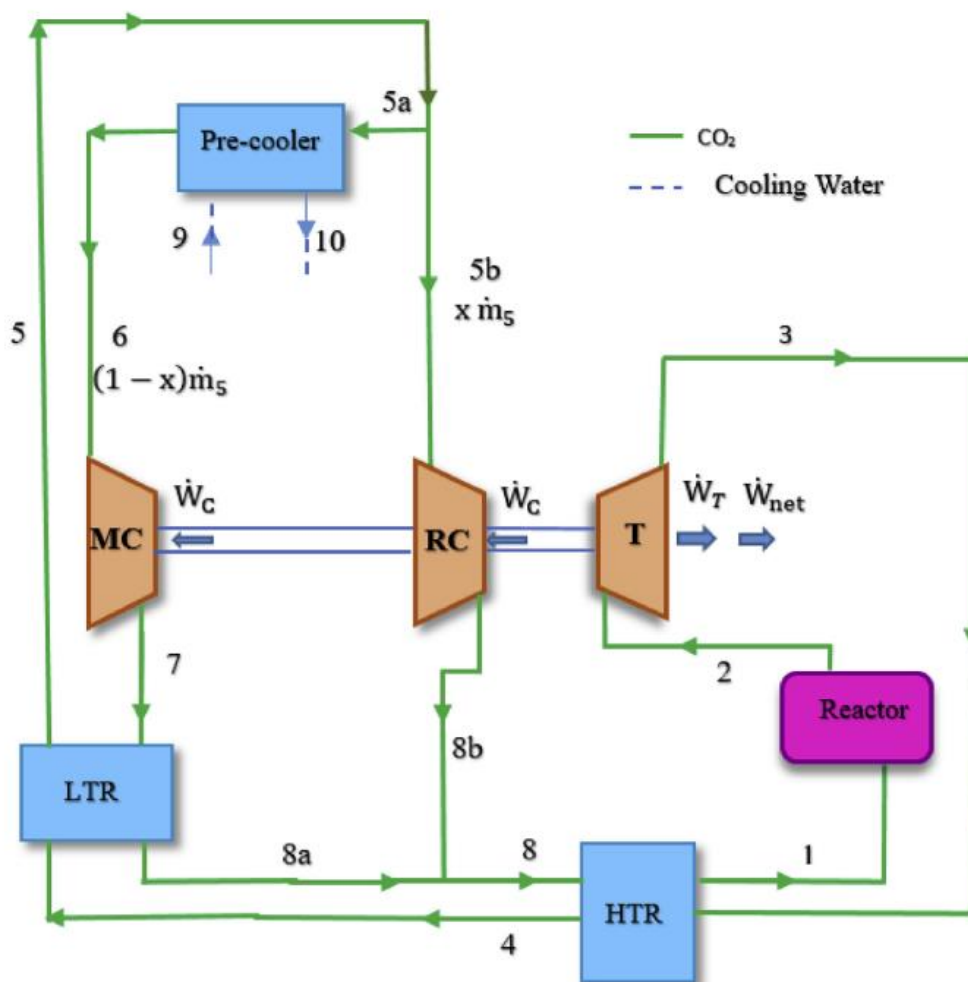
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

ΚΥΚΛΟΣ BRAYTON sCO₂

2.1 ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΥΠΑΡΧΟΥΣΑΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ

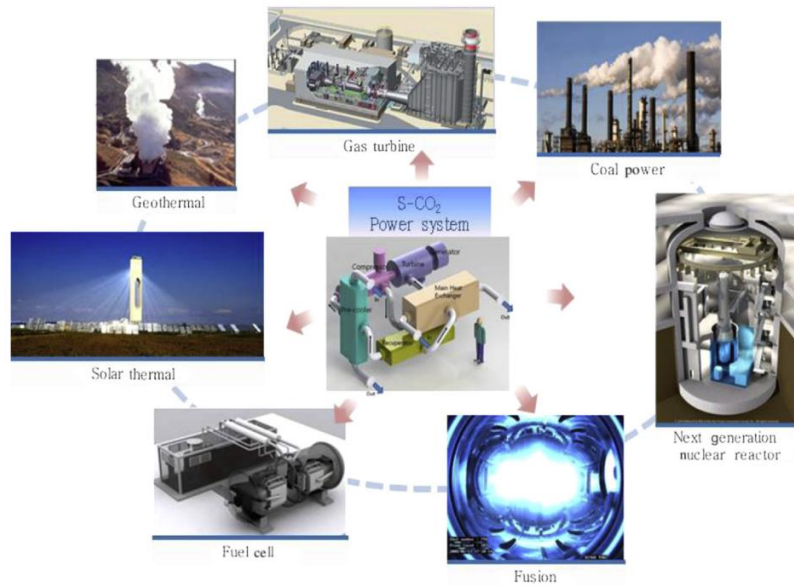
2.1.1 ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Πολυάριθμες είναι οι διατάξεις που έχουν μελετηθεί σε μια προσπάθεια να βρεθεί η βέλτιστη (E.G. Feher, 1968), αλλά σύμφωνα με τον Angelino (1968), ο κύκλος επανασυμπίεσης διαχωρισμένης ροής (Εικ. 2.11) μπορεί να θεωρηθεί ως ο πιο αποτελεσματικός, καθώς μειώνει τη διαφορά θερμοτήτων. Οι χωρητικότητες μεταξύ της θερμής και της ψυχρής πλευράς όπως και η συμπίεση λειτουργούν κοντά στο κρίσιμο σημείο. Επί του παρόντος δεν υπάρχουν επίσημοι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής που να λειτουργούν με κύκλους $s\text{CO}_2$, αλλά έχουν αναπτυχθεί μερικές εγκαταστάσεις δοκιμής μικρής κλίμακας για τη διερεύνηση της απόδοσης κρίσιμων στοιχείων για το σύστημα (Clementoni et al., 2015) και την εξέταση της τεχνολογίας λειτουργίας αυτών των συστημάτων (Conboy et al., 2012) στο Sandia National Lab (SNL, Νέο Μεξικό, Η.Π.Α.), Ινστιτούτο Εφαρμοσμένης Ενέργειας (IAE, Κιότο, Ιαπωνία) και στο Προηγμένο Ινστιτούτο Επιστήμης και Τεχνολογίας της Κορέας (KAIST, Daejeon, Νότια Κορέα).



Εικόνα 2.1.1.1: Διατάξη κύκλου επανασυμπίεσης Brayton για χρήση $s\text{CO}_2$ (Mohammadi et al., 2019).

Υπάρχουν πολλοί τομείς εφαρμογής ενός τέτοιου κύκλου, οι πιο γνωστοί είναι οι παρακάτω.

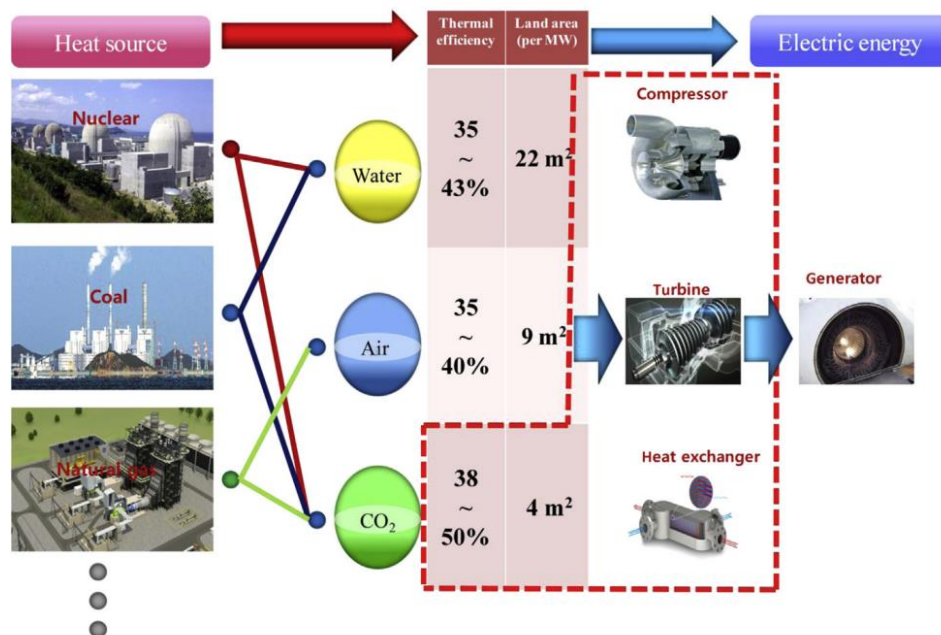


Εικόνα 2.1.1.2: Η πιθανή εφαρμογή του κύκλου sCO_2 (Ahn et al., 2015).

2.1.2 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

2.1.2.1 Πυρηνικοί Σταθμοί Ηλεκτροπαραγωγής

Ο κύκλος sCO_2 είναι ιδιαίτερα ωφέλιμος για προηγμένους πυρηνικούς αντιδραστήρες, όπως οι Γρήγοροι Αντιδραστήρες με Ψύξη Νατρίου (Sodium-cooled Fast Reactors - SFR) και οι Αντιδραστήρες Λιωμένου Άλατος (Molten Salt Reactors - MSRs), λόγω της υψηλής θερμικής απόδοσης και του συμπαγούς μεγέθους τους.



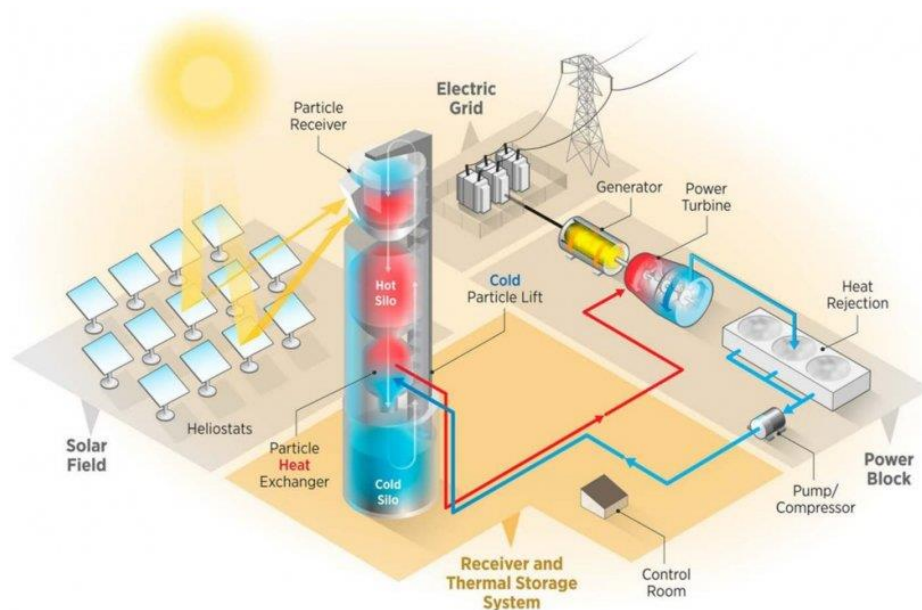
Εικόνα 2.1.2.1: Η σύγκριση συστημάτων μετατροπής ισχύος ατμού, αέρα και sCO_2 (Kato and Nikitin, n.d.).

2.1.2.2 Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια (CSP)

Το διοξείδιο του άνθρακα είναι ιδανικό για εφαρμογές CSP, επειδή μπορεί να λειτουργήσει αποτελεσματικά σε υψηλές θερμοκρασίες, ενισχύοντας τη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια.

Ακόμη και όταν συνδυάζονται με ξηρή ψύξη, οι τοπολογίες κύκλου, όπως ο κύκλος μερικής ψύξης και η επανασυμπύεση με κύρια ενδιάμεση ψύξη συμπίεσης, μαζί με την αναθέρμανση, φαίνεται ότι μπορούν να ανταποκριθούν στο όριο απόδοσης 50% που έχει ορίσει η SunShot. Κατά συνέπεια, ο κύκλος έχει επιλεγεί από την DOE ως η πιο πιθανή επιλογή για την επίτευξη του συνολικού στόχου SunShot. Απαιτούνται εξαιρετικά υψηλές θερμοκρασίες (πάνω από 700°C) για να επιτευχθεί αυτή η απόδοση. Άλλα HTF θα χρειαστούν στη θέση των τηγμένων νιτρικών αλάτων που χρησιμοποιούνται σήμερα, τα οποία μπορούν να αντέξουν μόνο σε θερμοκρασίες μικρότερες από 600°C. Αυτές οι υψηλές θερμοκρασίες μπορούν να παραδοθούν χρησιμοποιώντας HTF σωματιδίων, προηγμένου τετηγμένου αλάτος, αέριας φάσης και/ή σωματιδίων και σχετικούς δέκτες.

Άλλες κυβερνητικές και εμπορικές πρωτοβουλίες, όπως το σχέδιο της DOE, Supercritical Transformational Electric Power (STEP) για την κατασκευή μιας εγκατάστασης δοκιμής και επίδειξης 10 MWe, 700°C, προάγουν την ανάπτυξη του ίδιου του κύκλου ισχύος sCO₂.



Εικόνα 2.1.2.2: Μορφολογία συστήματος CSP (Mehos et al., 1980).

2.1.2.3 Ορυκτά Καύσιμα

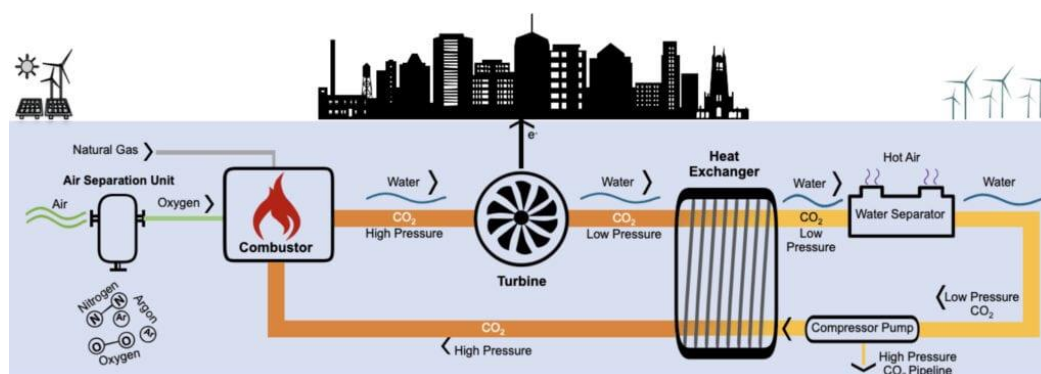
Ο κύκλος μπορεί να εφαρμοστεί σε μονάδες άνθρακα και φυσικού αερίου για τη βελτίωση της απόδοσης και τη διευκόλυνση των τεχνολογιών δέσμευσης άνθρακα (Dyreby et al., 2014; Su et al., 2022).

2.1.3 ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΑΠΟΒΑΛΛΟΜΕΝΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Ο κύκλος sCO_2 ανακτά αποτελεσματικά την απορριπτόμενη θερμότητα από βιομηχανικές διεργασίες και σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής. Μπορεί να μετατρέψει χαμηλής ποιότητας θερμική ενέργεια σε ηλεκτρική, βελτιώνοντας τη συνολική ενεργειακή απόδοση και μειώνοντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Αυτή η εφαρμογή είναι ιδιαίτερα σημαντική σε τομείς όπως η παραγωγή χάλυβα και η χημική επεξεργασία, όπου παράγονται σημαντικά ποσά μη εκμεταλλεύσιμης θερμότητας.



Εικόνα 2.1.3.1: Το δοκιμαστικό εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας της NET Power στο La Porte του Τέξας συλλαμβάνει το CO_2 που παράγει πριν εισέλθει στην ατμόσφαιρα (Sonal Patel, 2022).

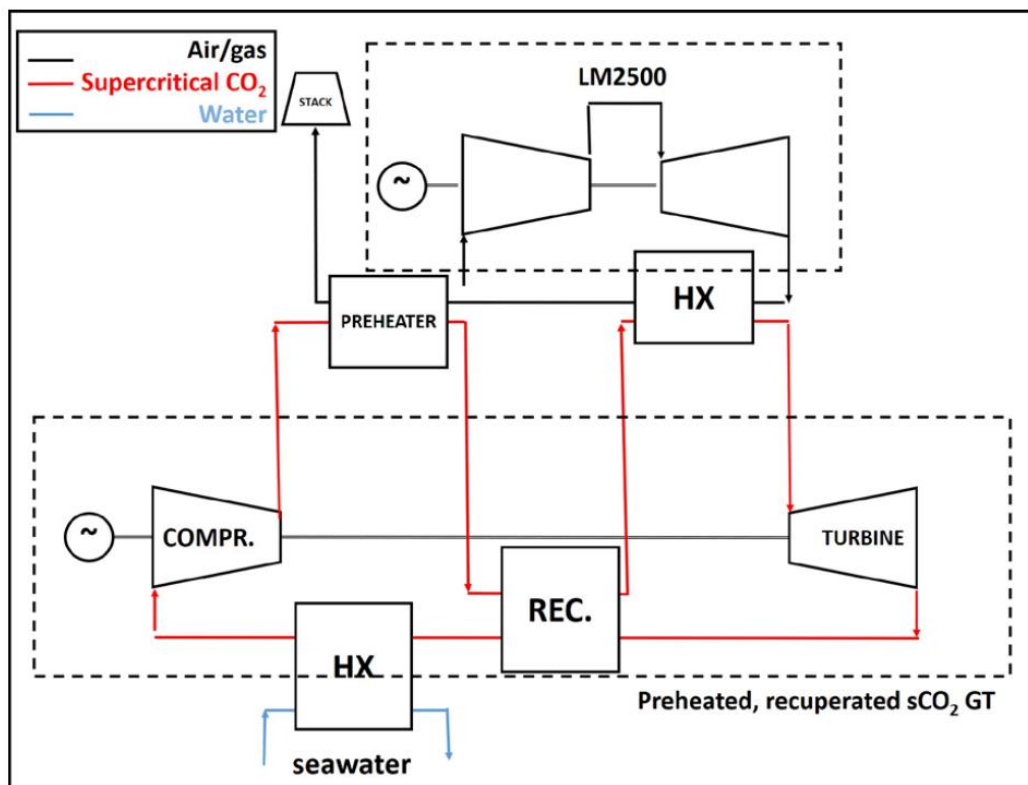


Εικόνα 2.1.3.2: Ο κύκλος Allam-Fetvedt της NET Power είναι ουσιαστικά ένας εξειδικευμένος κύκλος Brayton (Sonal Patel, 2022).

2.1.4 ΘΑΛΑΣΣΙΕΣ ΚΑΙ ΑΕΡΟΔΙΑΣΤΗΜΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Η υψηλή πυκνότητα ισχύος και το συμπαγές μέγεθος των συστημάτων sCO_2 τα καθιστούν κατάλληλα για εφαρμογές θαλάσσιας και αεροδιαστημικής πρόωσης, όπου το βάρος και ο

χώρος είναι κρίσιμοι παράγοντες. Η αποτελεσματικότητα του κύκλου σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας παρέχει επίσης ένα πλεονέκτημα σε αυτά τα περιβάλλοντα.



Εικόνα 2.1.4.1: Προθερμασμένος και ανακτημένος αεριοστρόβιλος sCO₂ ως σύστημα WHR (Reale et al., 2023).

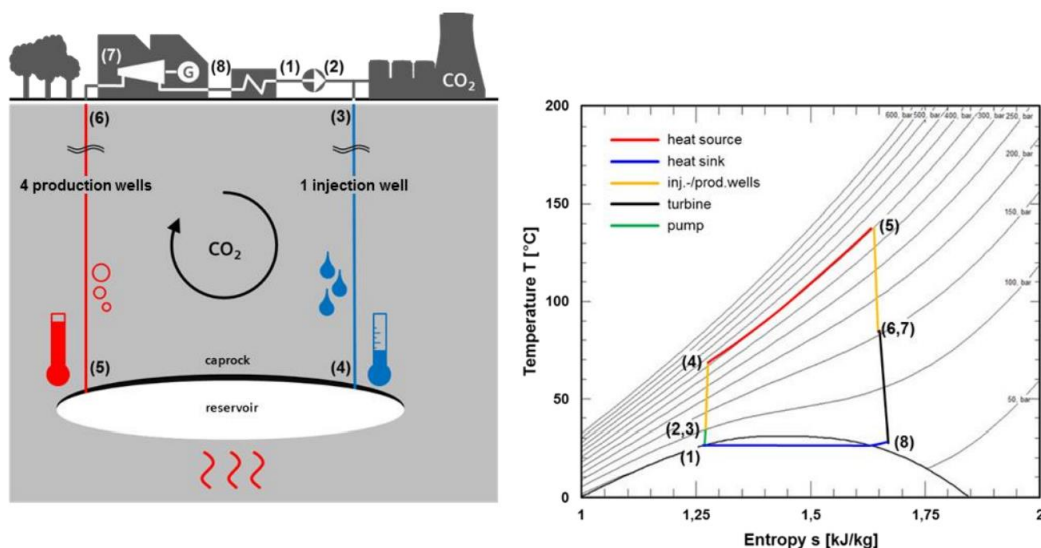
2.1.5 ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟ ΣΤΑΘΜΟΙ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Ο κύκλος sCO₂ είναι κατάλληλος για μετατροπή γεωθερμικής ενέργειας, ιδιαίτερα για γεωθερμικούς πόρους υψηλής θερμοκρασίας. Η ικανότητά του να λειτουργεί αποτελεσματικά σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών του επιτρέπει να αξιοποιεί τη γεωθερμική ενέργεια πιο αποτελεσματικά από τους παραδοσιακούς κύκλους Rankine.

Η ιδέα ενός συστήματος «Επόμενου Επιπέδου Παραγωγής Γεωθερμικής Ενέργειας» η αλλιώς NGP μπορεί να συνοψιστεί ως εξής: Με τη χρήση της τεχνολογίας Carbon-Capture (CC), μπορεί να δεσμευτεί CO₂ από έναν ή περισσότερους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής ορυκτών καυσίμων, καθώς και από άλλα συστήματα εκπομπής CO₂ όπως διυλιστήρια ή εργοστάσια τσιμέντου. Το CO₂ μπορεί στη συνέχεια να μεταφερθεί σε μία μονάδα NGP και να εγχυθεί σε μία «γεωλογική αποθήκη». Για να εκτελούνται κερδοφόρα οι δραστηριότητες NGP, η αποθήκη CO₂ πρέπει να έχει θερμοκρασία τουλάχιστον 100°C.

Αυτές οι ιζηματογενείς ή στρωματογραφικές λεκάνες πρέπει να έχουν επαρκή διαπερατότητα >10 mD (1 mD = 10⁻¹⁵ m²) και πρέπει να επικαλύπτονται από ένα καπάκι χαμηλής διαπερατότητας περίπου <0,01 mD ώστε να είναι δυνατή η αποτελεσματική έγχυση CO₂ στη δεξαμενή μέσω της έγχυσης στο φρεάτιο και για να αποτραπεί η ροή μέσω του καπακιού, έναντι του οποίου το CO₂ συγκεντρώνεται προς τα πάνω. Στη δεξαμενή, το CO₂ θερμαίνεται

γεωθερμικά και ένα τμήμα διοχετεύεται πίσω στην επιφανειακή μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, όπου εκτονώνεται σε έναν στρόβιλο, τροφοδοτώντας μια γεννήτρια και ως εκ τούτου παράγεται ηλεκτρική ενέργεια. Αφού εκτονωθεί ο στρόβιλος, το CO₂ συμπυκνώνεται/ψύχεται και εγχέεται εκ νέου στη δεξαμενή. Μια συμπληρωματική αντλία μπορεί να χρησιμοποιηθεί προαιρετικά για να αυξήσει ελαφρώς την καθαρή ισχύ εξόδου. (Adams et al., 2015).



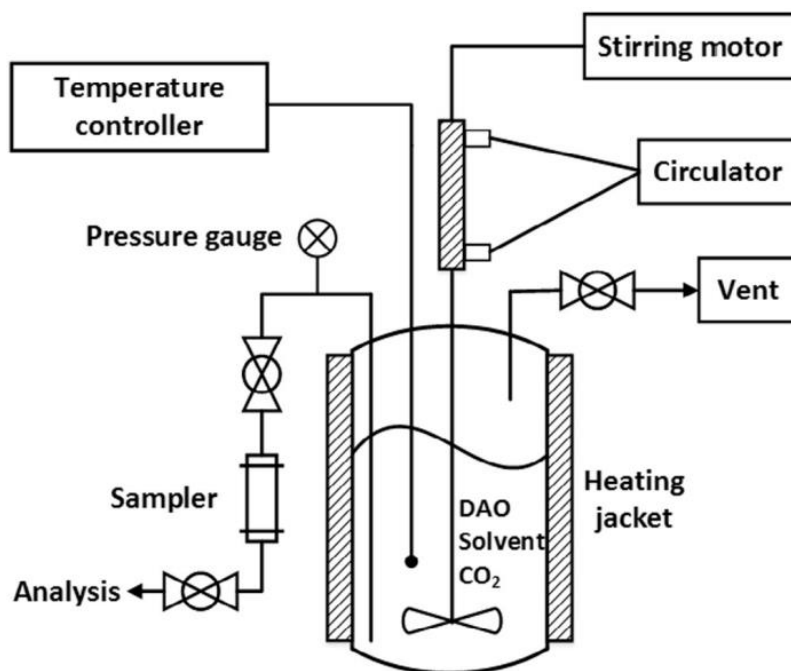
Εικόνα 2.1.5.1: (Αριστερά) Βασικός κύκλος NGP (Δεξιά) Διάγραμμα T-s του βασικού κύκλου NGP (Sudhoff et al., 2019).

2.1.6 ΧΗΜΙΚΕΣ ΚΑΙ ΠΕΤΡΟΧΗΜΙΚΕΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΕΣ

Στη χημική και πετροχημική βιομηχανία, ο κύκλος sCO₂ μπορεί να ενσωματωθεί με διαδικασίες που περιλαμβάνουν υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις. Προσφέρει οφέλη όσον αφορά την ενεργειακή απόδοση και τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας, οδηγώντας δυνητικά σε εξοικονόμηση κόστους και μειωμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Ένας μεγάλος αριθμός επιστημονικών άρθρων έχει αφιερωθεί στη μελέτη των δυνατοτήτων χρήσης sCO₂ στη χημική και πετροχημική βιομηχανία (Im et al., 2018). Δεδομένου ότι το sCO₂ χρησιμοποιείται συχνά σε τεχνολογίες διαχωρισμού, η ανάπτυξη και η βελτιστοποίηση των διαδικασιών εκχύλισης, κλασματοποίησης και καθαρισμού μέσω της χρήσης του απαιτεί γνώση της διαλυτότητας των στερεών στην παρουσία sCO₂ ή απουσία συνδιαλυτών. Οι (Bitencourt et al., 2019), προσδιόρισαν με ακρίβεια την διαλυτότητα των στερεών σε sCO₂ σε συστήματα τριών συστατικών και/ή τεσσάρων συστατικών.

Για να είμαστε δίκαιοι, σημειώνουμε ότι, όπως διαπιστώθηκε πριν από περισσότερα από είκοσι χρόνια, το sCO₂ έχει χαμηλότερη διαλυτική ισχύ σε σχέση με πολλά βαρέα συστατικά ελαίων, και επομένως είναι απαραίτητο να τροποποιηθεί με συνδιαλύτη, ενώ η χρήση του ως μέσο αντίδρασης συχνά περιορίζεται στις διεργασίες που πραγματοποιούνται σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες (Devetta et al., n.d.).



Εικόνα 2.1.6.1: Πειραματική συσκευή για πειράματα ανάκτησης διαλυτών (Im et al., 2018).

Οι ποικίλες εφαρμογές υπογραμμίζουν την ευελιξία και την αποτελεσματικότητα του κύκλου επανασυμπίεσης sCO₂ σε διάφορους τομείς της ενέργειας και της βιομηχανίας.

Συγκεκριμένα, λόγω της υψηλότερης πυκνότητας του ρευστού λειτουργίας από τα υπόλοιπα συμβατικά ρευστά εργασίας, πολλές μελέτες επικεντρώνονται στο σχεδιασμό πιο συμπαγούς και αποδοτικής στροβιλομηχανής για εφαρμογές sCO₂. Ωστόσο, λόγω της μεγάλης ποσότητας θερμότητας που ανακτάται στους ανακτητές και του τεράστιου μεγέθους των συμβατικών εναλλακτών θερμότητας κελύφους και σωλήνων, υπάρχει επίσης μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον για τη λειτουργία των εναλλάκτη θερμότητας, η οποία είναι ζωτικής σημασίας για την συνολική απόδοση του κύκλου (Gkoutas et al., 2017)

Υπάρχουν αδιαμφισβήτητα οφέλη σε αυτούς τους κύκλους, όπως ότι ο συντελεστής συμπίεστασης του CO₂ πέφτει στο 0,2-0,5 κοντά στο κρίσιμο σημείο, γεγονός που επιτρέπει σημαντική μείωση του έργου συμπίεσης (Turchi et al., 2012). Σε σύγκριση με άλλα συστήματα παραγωγής ενέργειας, το sCO₂ είναι ένα πιο επιθυμητό σύστημα λόγω της συμπαγούς γεωμετρίας, της απλότητας, της βελτιωμένης ασφάλειας και των οικονομικών χαρακτηριστικών του. Επιπλέον, έχει δηλωθεί ότι ο υπερκρίσιμος κύκλος του CO₂ μπορεί να διεξαχθεί με χρήση οποιουδήποτε τύπου πυρηνικού αντιδραστήρα (άμεσου ή έμμεσου) με θερμοκρασία εξόδου άνω των 500 °C (Dostal et al., 2006). Ο Feher κατέχει μία από τις πρώτες μελέτες σε αυτόν τον τομέα, παρουσιάζοντας χαρακτηριστικά όπως χαμηλότερο λόγο όγκου προς ισχύ, μη διάβρωση πτερυγίων στον στρόβιλο για τον κύκλο sCO₂ και υψηλότερη απόδοση θερμικού κύκλου για την ίδια θερμοκρασία εισόδου του στρόβιλου με αποτέλεσμα μειωμένης εργασίας του συμπίεστη γύρω από το κρίσιμο σημείο.

Πρόσθετα οφέλη ενός κύκλου Brayton με sCO₂ περιλαμβάνουν τον απλούστερο σχεδιασμό του, το χαμηλότερο κόστος σε σύγκριση με το ήλιο (He) και την υψηλότερη ικανότητα μεταφοράς θερμότητας, όπως υποδεικνύεται από την ειδική θερμότητα του ρευστού σε σταθερή πίεση και μοριακό βάρος. Οι συνθήκες για το CO₂ κοντά στο κρίσιμο σημείο είναι

73,77 bar και 30,98 °C. Η ελάχιστη πίεση του συστήματος (7380 kPa) είναι υψηλότερη από τον τρέχοντα κύκλο Rankine ατμού (10 kPa) ή τον κύκλο Brayton αερίου (100 kPa) όταν λειτουργεί πάνω από το κρίσιμο σημείο. Ως αποτέλεσμα, η πυκνότητα του ρευστού εργασίας παραμένει υψηλή σε ολόκληρο το σύστημα ισχύος, με αποτέλεσμα τη μείωση του ογκομετρικού ρυθμού ροής. Ως εκ τούτου, σε σύγκριση με τους κύκλους Rankine ατμού, το αναμενόμενο μέγεθος της στροβιλομηχανής σε κύκλους sCO₂ είναι περίπου δέκα φορές μικρότερο (Turchi et al., 2012)

Για πυρηνικούς αντιδραστήρες που αναμένεται να λειτουργούν στο μέλλον με θερμοκρασίες εξόδου αντιδραστήρα μεταξύ 550 και 750 °C, ο υπερκρίσιμος κύκλος CO₂ είναι γενικά μια χρήσιμη επιλογή μετατροπής ενέργειας (Sánchez et al., 2013). Είναι αυτονόητο ότι υπάρχουν αρκετά σημεία βελτίωσης στο σύστημα sCO₂, μερικές από τα οποία περιγράφονται σε αυτήν την ενότητα. Ο Sarkar (2009) ερευνήσε τη βελτιστοποίηση του κύκλου επανασυμπίεσης sCO₂ και την ανάλυση του δεύτερου νόμου. Εξέτασε τον τρόπο με τον οποίο διαφορετικές παράμετροι λειτουργίας επηρέασαν τις μη αντιστρεψιμότητες των εξαρτημάτων, την ενεργειακή και εξεργειακή απόδοση του κύκλου και την ιδανική αναλογία πίεσης. Επιπλέον, έχει ερευνήσει πώς η ιδανική αναλογία πίεσης και η απόδοση του δεύτερου νόμου επηρεάζονται από την ισεντροπική απόδοση, την αποτελεσματικότητα του εναλλάκτη θερμότητας και την πτώση πίεσης εξαρτημάτων.

Στη συνέχεια, ο κύκλος ισχύος επανασυμπίεσης sCO₂ με θέρμανση βελτιστοποιήθηκε από τους Sarkar και Bhattacharyya (2009). Διεξήγαγαν μια έρευνα σύγκρισης για τον κύκλο επανασυμπίεσης sCO₂ με και χωρίς θέρμανση και διαπίστωσαν ότι η προσθήκη θέρμανσης θα είχε ως αποτέλεσμα 3,5% αύξηση στην απόδοση του κύκλου. (Mohammadi et al., 2019)

Ένα από τα βασικά μέρη του κύκλου ισχύος είναι ο στρόβιλος. Γενικά, ο στρόβιλος ακτινικής εισροής χρησιμοποιείται για καταστάσεις μέτριας ροής όγκου. Ο στρόβιλος ακτινικής εισροής μπορεί να παράγει υψηλή απόδοση λειτουργίας σε μικρές ροές όγκου και είναι πιο προσιτός, πιο συμπαγής και έχει απλούστερη διαδικασία παραγωγής από έναν αξονικό στρόβιλο (Meshram et al., 2016; Zhou et al., 2018)

Η πλειονότητα της έρευνας για το σχεδιασμό στροβίλων CO₂ επικεντρώνεται στη συγκριτικά μέτρια ισχύ εξόδου, συχνά στην περιοχή από εκατοντάδες kW έως δεκάδες MW (Kulhánek and Václav Dostál, 2019). Η χρήση απορριπτόμενης θερμότητας ή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως η ηλιακή ενέργεια, είναι συχνά το επίκεντρο αυτών των εφαρμογών. Εξαιρέσεις περιλαμβάνουν τουρμπίνες με ισχύ εκατοντάδων MW όπως είναι οι δημοσίευση των Rogalev et al. (2019). Μια βελτιστοποίηση για έναν αξονικό στρόβιλο 950 MW για έναν κύκλο sCO₂ απευθείας καύσης με θερμοκρασίες εισόδου έως και 1200 °C δημοσιεύθηκε πριν κάποιο καιρό από τους Uysal et al. (2022). Οι ακτινικές στροβιλομηχανές έχουν μελετηθεί σε αρκετά εκτεταμένο βαθμό και έχει αποδειχθεί ότι μπορούν να παρέχουν έως και 300 MW ισχύος (Stepanek et al., 2022).

2.2 ΠΕΡΙΘΩΡΙΑ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΚΑΙ ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑΣ

Υπάρχουν δύο κύριοι τομείς έρευνας που χρειάζονται περισσότερη προσοχή στο πεδίο του σχεδιασμού αξονικών στροβίλων για υπερκρίσιμους κύκλους ισχύος διοξειδίου του άνθρακα: η ανάλυση του περίπλοκου προφίλ των πτερυγίων και η ανεπαρκής διερεύνηση της σχέσης

μεταξύ των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του sCO_2 και της αεροδυναμικής ιδιότητες των πτερυγίων του στροβίλου.

Αρχικά, προηγούμενες έρευνες επικεντρώθηκαν κυρίως στα χαρακτηριστικά σχεδιασμού σε μακρο-επίπεδο, όπως καταδεικνύεται από τις εργασίες των Smith et al. (2019) και Jones and Brown (2020). Αυτές οι μελέτες συχνά αγνοούν τα λεπτότερα σημεία των προφίλ πτερυγίων, όπως οι παραλλαγές στο μήκος της χορδής, η κύρτωση και η συστροφή, που είναι ζωτικοί παράγοντες για τον προσδιορισμό της αεροδυναμικής απόδοσης του αξονικού στροβίλου. Ως εκ τούτου, υπάρχει ένα κενό γνώσης σχετικά με τους τρόπους με τους οποίους αυτά τα μικρή κλίμακας σχεδιαστικά στοιχεία επηρεάζουν τη συνολική απόδοση των αξονικών στροβίλων που χρησιμοποιούνται σε κύκλους ισχύος sCO_2 .

Δεύτερον, υπάρχει έλλειψη βιβλιογραφίας που συζητά τις περίπλοκες αλληλεπιδράσεις μεταξύ των αεροδυναμικών ιδιοτήτων των πτερυγίων του στροβίλου και των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα. Παρόλο που έχει διεξαχθεί έρευνα σχετικά με τη θερμοδυναμική των κύκλων sCO_2 και την αεροδυναμική των στροβίλων σε διάφορες συνθήκες, δεν έχει υπάρξει αρκετή έρευνα για τον συνδυασμό αυτών των δύο περιοχών. Η βελτιστοποίηση της συνολικής απόδοσης των κύκλων ισχύος sCO_2 απαιτεί κατανόηση του τρόπου με τον οποίο τα ειδικά χαρακτηριστικά του sCO_2 , όπως η υψηλή πυκνότητα και το χαμηλό ιξώδες του στην υπερκρίσιμη κατάσταση, επηρεάζουν την αεροδυναμική συμπεριφορά των πτερυγίων του στροβίλου.

Σημαντικό να αναφερθεί είναι και το γεγονός ότι οι μέχρι τώρα έρευνες επικεντρώνονται στους ακτινικούς στροβίλους καλύπτοντας μια μεγάλη γκάμα κλίμακας του αποδιδόμενου έργου, αφήνοντας ένα μεγάλο ερωτηματικό στην ολοκληρωμένη και επαναλαμβανόμενη ανάλυση των αξονικών στροβίλων.

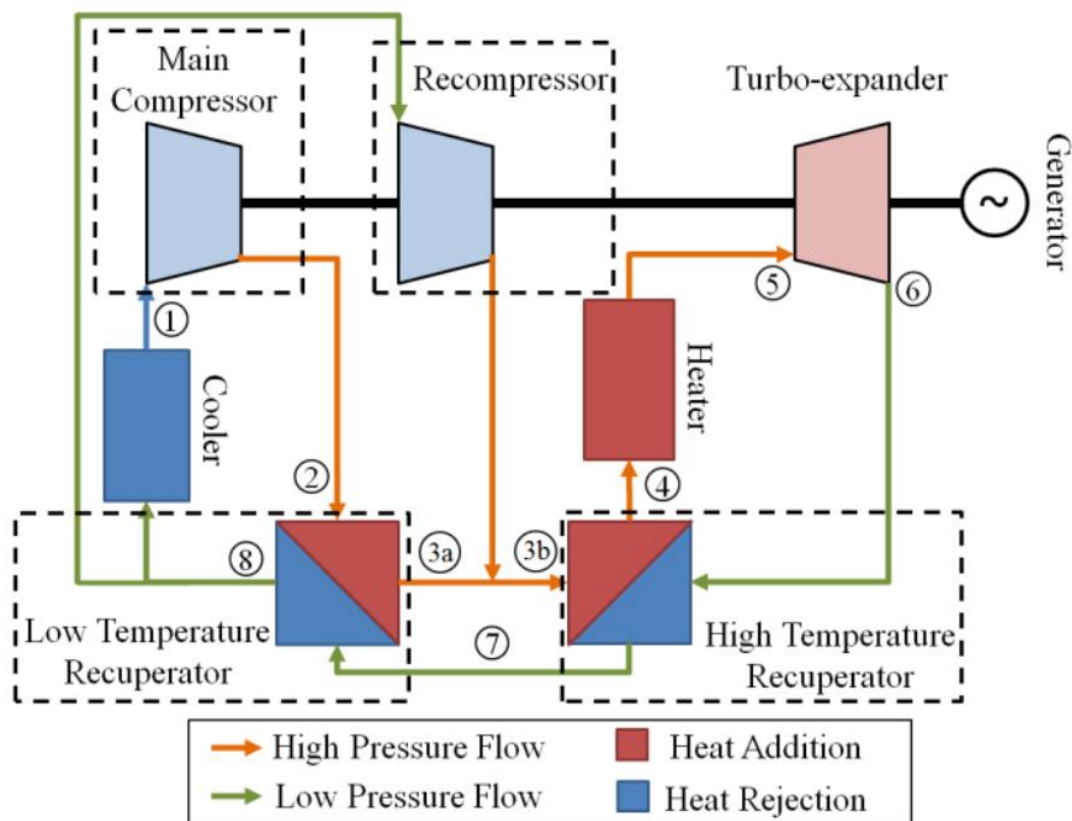
Η τρέχουσα μελέτη προσπαθεί να γεφυρώσει αυτά τα κενά προσφέροντας μια πιο εμπειριστατωμένη και σε βάθος κατανόηση των θεμάτων σχεδιασμού αξονικών στροβίλων για υπερκρίσιμους κύκλους ισχύος CO_2 , προωθώντας έτσι το θέμα. Με βάση την επακόλουθη ανάλυση, η μελέτη να καταφέρει να κλείσει αυτά τα κενά και να παρέχει κρίσιμες γνώσεις για τη δημιουργία πιο αποτελεσματικών και βελτιστοποιημένων αξονικών στροβίλων μέσω αυστηρής ανάλυσης και πειραματισμού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΑΞΟΝΙΚΟΥ ΣΤΡΟΒΙΛΟΥ

3.1 ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ

Η μελέτη ξεκινάει με την κατανόηση και “αποσύνθεση” του κύκλου παραγωγής έργου μέσω της θερμοδυναμικής ανάλυσης του κάθε στοιχείου που αποτελεί μέρος του κύκλου. Αν γίνει οπτικοποίηση του αναγεννητικού κύκλου sCO₂ προκύπτει η *Εικόνα 3.1.1*.



Εικόνα 2.1.6.1: Διάταξη αναγεννητικού κύκλου Brayton με sCO₂ (Schmitt et al., 2015).

Στον παραπάνω κύκλο επανασυμπίεσης ένα μέρος της ροής ανακατευθύνεται για να αποφευχθεί ο κύριος συμπίεστής και ο προ-ψύκτης. Συγκεκριμένα, υφίσταται επανασυμπίεση σε έναν βοηθητικό συμπίεστή πριν επανασυνδεθεί με το υπόλοιπο μέρος της ροής μεταξύ των δύο τμημάτων του διαχωρισμένου ανακτητή θερμότητας. Η διαφορά στις θερμοχωρητικότητες μεταξύ των δύο πλευρών του Ανακτητή Υψηλής Θερμοκρασίας (High Temperature Recuperator - HTR) είναι αμελητέες, καθώς η απόκλιση της ειδικής θερμοχωρητικότητας από αυτή του ιδανικού αερίου τείνει να εξαφανιστεί όταν η θερμοκρασία είναι υψηλή. Ως αποτέλεσμα, εάν οι ροές μάζας διατηρηθούν σταθερές και ίσες και στις δύο πλευρές του HTR, θα επιτευχθούν συγκρίσιμες θερμικές ικανότητες.

Παρόλα αυτά, η θερμή εκροή του Ανακτητή Χαμηλής Θερμοκρασίας (Low Temperature Recuperator - LTR) διαχωρίζεται, λόγω των μεγάλων διακυμάνσεων στην ειδική θερμοχωρητικότητα. Ένα μέρος της ροής αποστέλλεται στον συμπίεστή επανασυμπίεσης και το υπόλοιπο τμήμα αποστέλλεται στον προ-ψύκτη και μετά στον κύριο συμπίεστή, με αποτέλεσμα να προκύπτουν ροές με συγκρίσιμες θερμικές ικανότητες και στις δύο πλευρές του LTR (Gkountas et al., 2017).

Όσον αφορά το άμεσα υπολογιστικό κομμάτι και λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω θέτονται κάποιες αρχικές συνθήκες και επιθυμητοί στόχοι όπως φαίνονται στον Πίνακα 3.1.1. για την ομαλή λειτουργεία του κύκλου και των επιμέρους στοιχείων της.

Πίνακας 3.1.1: Επιθυμητά χαρακτηριστικά στροβίλου

Επιθυμητό αποδιδόμενο έργο κύκλου	W	1	MWe
Απόδοση συμπίεστή	η_c	0,88	-
Απόδοση στροβίλου	η_t	0,90	-
Θερμοκρασία εισόδου κύκλου	T_1	305	K
Πίεση εισόδου κύριου συμπίεστή	P_1	7,5	MPa
Πίεση εξόδου κύριου συμπίεστή	P_2	20	MPa
Λόγος πιέσεων	P_2/P_1	2,67	-

Για τον προσδιορισμό των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων, χρησιμοποιείται το πρόγραμμα NIST Refprop. Το NIST Refprop αποτελεί μία βάση δεδομένων θερμοδυναμικών ιδιοτήτων, το οποίο χρησιμοποιεί εξισώσεις για τις θερμοδυναμικές ιδιότητες (όπως η καταστατική εξίσωση των Span & Wagner (1996) η οποία θεωρείται η πιο ακριβής εξίσωση παγκοσμίως) και τις ιδιότητες μεταφοράς για να υπολογίσει την κατάσταση του ρευστού. Το πρόγραμμα αυτό επιλέγεται διότι τα αποτελέσματα που αποδίδει είναι αρκετά ακριβή για αυτό χρησιμοποιείται ευρέως και στην βιομηχανία.

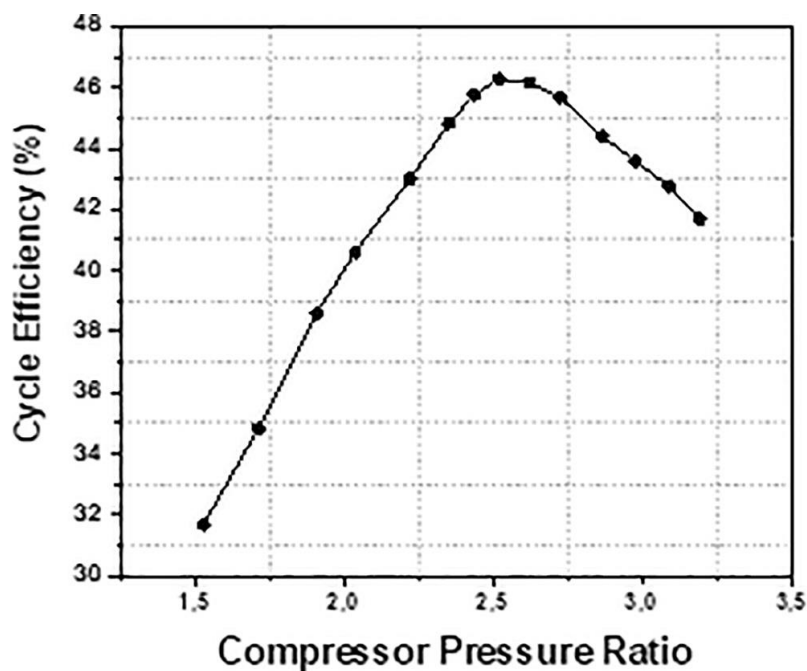
Για την υλοποίηση της υπολογιστικής διαδικασίας, επιλέγεται το προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB στο οποίο εισέρχονται όλα τα δεδομένα και αναπτύσσεται ένας αλγόριθμος υπολογισμού όλων των παραπάνω μοντέλων. Το MATLAB αποτελεί ένα πολύ έμπιστο εργαλείο για πολύπλοκες υπολογιστικές διαδικασίες, οπότε και γι' αυτό προτιμάται. (Σαρρής Β. Αλέξανδρος, 2017).

Η ουσία της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε περιστρέφεται γύρω από μια συστηματική προσέγγιση για την κατανόηση των θερμοδυναμικών στοιχείων του κύκλου παραγωγής ενέργειας επανασυμπίεσης sCO_2 (Daabo et al., 2017). Η κύρια εστίαση είναι αρχικά στον υπολογισμό των κρίσιμων θερμοδυναμικών παραμέτρων και στην επακόλουθη αξιολόγηση των ρυθμών ροής μάζας και της ισχύος εξόδου για κάθε στοιχείο του συστήματος και επακολούθως η εστίαση στον στρόβιλο μέσα από τα αποτελέσματα που θα προκύψουν.

Το αρχικό βήμα περιλαμβάνει έναν ολοκληρωμένο υπολογισμό των θερμοδυναμικών παραμέτρων σε βασικά σημεία του κύκλου. Η θερμοκρασία, η πίεση, η πυκνότητα, η ενθαλπία και η εντροπία εξετάζονται τόσο πριν όσο και μετά από κάθε κύριο εξάρτημα, συμπεριλαμβανομένων των συμπίεστών, των εναλλακτών θερμότητας και του στροβίλου. Αυτή η λεπτομερής αξιολόγηση παρέχει μια πλήρη κατανόηση της κατάστασης του εργαζόμενου ρευστού στα διάφορα στάδια του κύκλου.

Με βάση τα ευρήματα από την μελέτη των Gkountas et al. (2017), η πτώση πίεσης στους εναλλάκτες θερμότητας μπορεί να αγνοηθεί και το νερό θεωρείται το δευτερεύον ρευστό στον προ-ψύκτη. Αντίστοιχα, η επιλογή του λόγου πίεσης του συμπίεστή διεξήχθη με βάση την βελτιστοποίηση της απόδοσης του και την σταθερή γεωμετρία των ανακτητών και τα αποτελέσματα απεικονίζονται στην Εικόνα 3.1.2. Για τον υπερκρίσιμο κύκλο CO_2 , η θερμική απόδοση αρχικά αυξάνεται, φτάνοντας σε μέγιστη απόδοση 46% σε βέλτιστο λόγο πίεσης 2,55 αλλά στη συνέχεια μειώνεται λόγω των περιορισμών που επιβάλλονται από τους ανακτητές

σταθερού μεγέθους σε υψηλότερες πιέσεις εκκένωσης όπως φαίνονται και στο παρακάτω διάγραμμα.

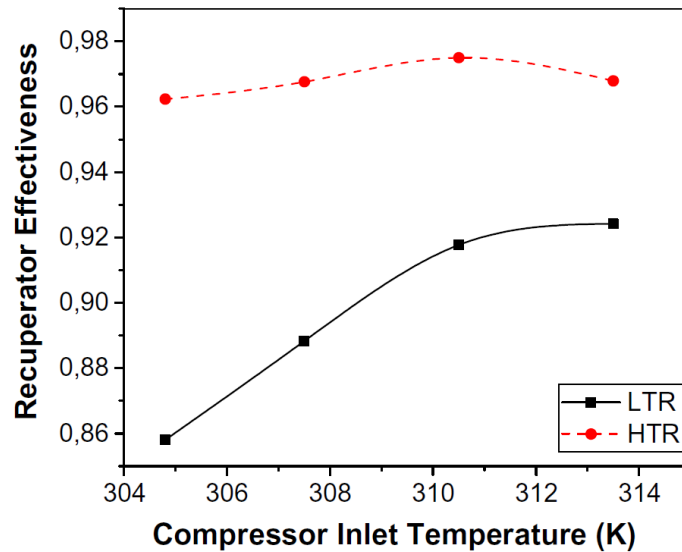


Εικόνα 2.1.6.2: Διακύμανση της θερμικής απόδοσης καθώς αυξάνεται η αναλογία πίεσης του συμπιεστή (Gkoutas et al., 2017).

Γνωρίζοντας πλέον τον λόγο πίεσης και την πίεση εισόδου που είναι αυτή του κρίσιμου σημείου καταλήγουμε στην πίεση εκτόνωσης και την πίεση συμπίεσης.

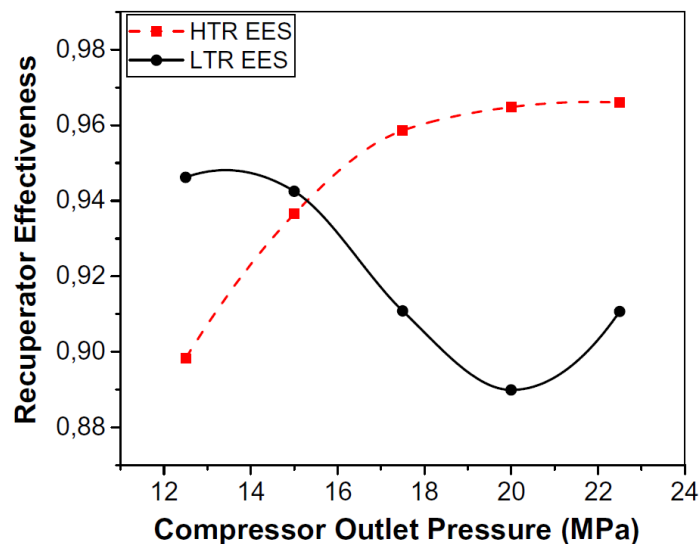
Μία επιπλέον σημαντική επίδραση στην απόδοση του κύκλου, είναι η θερμοκρασία εισόδου του συμπιεστή. Οι απότομες διακυμάνσεις των ιδιοτήτων σχετίζονται με χαμηλές θερμοκρασίες εισόδου, οι οποίες είναι πιο κοντά στο κρίσιμο σημείο. Ως αποτέλεσμα, οι διακυμάνσεις στη θερμοκρασία εισόδου του συμπιεστή μπορεί να έχουν σημαντικό αντίκτυπο στη διακύμανση της αποτελεσματικότητας του ανακτητή καθώς και στο να προκαλούν μια αξιοσημείωτη αλλαγή στην απόδοση της διαδικασίας συμπίεσης. Η απόδοση και των δύο ανακτητών HT και LT ποικίλλει ανάλογα με τη θερμοκρασία εισόδου του κύριου συμπιεστή.

Η αποτελεσματικότητα του ανακτητή υψηλής θερμοκρασίας παραμένει υψηλή και οριακά αυξάνεται στο μέγιστο όσο απομακρυνόμαστε από το κρίσιμο σημείο. Η αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου του συμπιεστή εντός του εύρους που φαίνεται στην *Εικόνα 3.1.3* βελτιώνει σημαντικά την αποτελεσματικότητα του ανακτητή χαμηλής θερμοκρασίας, η οποία παραμένει σε χαμηλότερο επίπεδο (Baik et al., 2017).



Εικόνα 2.1.6.3: Η αποτελεσματικότητα του ανακτητή ως συνάρτηση της θερμοκρασίας εισόδου του συμπιεστή (Gkountas et al., 2017).

Είναι σαφές ότι η διαδικασία συμπίεσης επηρεάζει την απόδοση του ανακτητή και, τελικά, την απόδοση του κύκλου. Η διερεύνηση των συνθηκών λειτουργίας του κύκλου και των επιπτώσεών τους στην απόδοση του είναι ζωτικής σημασίας. Η απόδοση των ανακτητών υψηλής και χαμηλής θερμοκρασίας φαίνεται στο *Εικόνα 3.1.4*. Είναι προφανές ότι η πίεση εξόδου του συμπιεστή έχει σημαντικό αντίκτυπο στην αποτελεσματικότητα, ιδιαίτερα του HTR. Πάνω από 20 MPa στην πίεση εξόδου, φαίνεται ότι δεν μπορούν να επιτευχθούν άλλες αυξήσεις στη αποτελεσματικότητα του ανακτητή. Αντίθετα, αναμένεται ότι η απόδοση του LTR θα μειωθεί έως ότου η πίεση φτάσει τα 20 MPa, μετά την οποία θα αυξηθεί.



Εικόνα 2.1.6.4: Η αποτελεσματικότητα των ανακτητών υψηλής και χαμηλής θερμοκρασίας ως συνάρτηση της πίεσης εκκένωσης του συμπιεστή (Gkountas et al., 2017).

Αυτή η συμπεριφορά προκαλείται από το επανασυμπιεσμένο κλάσμα μάζας, το οποίο πέφτει κάτω από τα 20 MPa και μεταβάλλει τη θερμοκρασία στην πλευρά του θερμού εναλλάκτη θερμότητας.

Έχοντας τις παραπάνω πληροφορίες, επιλέγονται και υπολογίζονται οι τιμές εισόδου και εξόδου των βασικών ιδιοτήτων του κάθε στοιχείου του κύκλου λειτουργείας, όπως φαίνονται στον Πίνακα 3.1.2.

Πίνακας 3.1.2: Θερμοδυναμικά στοιχεία εισόδου κύκλου.

1 ^{ος} Συμπιεστής	Πίεση	P_1	7,5	MPa
	Θερμοκρασία	T_1	305	K
	Πυκνότητα	ρ_1	389,85	kg/m ³
	Ενθαλπία	h_1	354,80	kJ/kg
	Εντροπία	s_1	1,51	kJ/kgK
LTR	Πίεση	P_2	20	MPa
	Θερμοκρασία	T_2	351,72	K
	Πυκνότητα	ρ_2	603,08	kg/m ³
	Ενθαλπία	h_2	372,49	kJ/kg
	Εντροπία	s_2	1,49	kJ/kgK
HTR	Πίεση	P_3	20	MPa
	Θερμοκρασία	T_3	670,03	K
	Πυκνότητα	ρ_3	157,21	kg/m ³
	Ενθαλπία	h_3	846,72	kJ/kg
	Εντροπία	s_3	2,49	kJ/kgK
Θερμαντήρας	Πίεση	P_4	20	MPa
	Θερμοκρασία	T_4	828,10	K
	Πυκνότητα	ρ_4	123,59	kg/m ³
	Ενθαλπία	h_4	1041,30	kJ/kg
	Εντροπία	s_4	2,75	kJ/kgK
Στρόβιλος	Πίεση	P_5	20	MPa
	Θερμοκρασία	T_5	823,15	K
	Πυκνότητα	ρ_5	124,39	kg/m ³
	Ενθαλπία	h_5	1035,10	kJ/kg
	Εντροπία	s_5	2,74	kJ/kgK
HTR	Πίεση	P_6	7,5	MPa
	Θερμοκρασία	T_6	713,82	K
	Πυκνότητα	ρ_6	55,51	kg/m ³
	Ενθαλπία	h_6	915,42	kJ/kg
	Εντροπία	s_6	2,77	kJ/kgK
LTR	Πίεση	P_7	7,5	MPa
	Θερμοκρασία	T_7	341,10	K
	Πυκνότητα	ρ_7	160,75	kg/m ³
	Ενθαλπία	h_7	478,34	kJ/kg

	Εντροπία	s_7	1,89	kJ/kgK
Προϊόνκτης	Πίεση	P_8	7,5	MPa
	Θερμοκρασία	T_8	305	K
	Πυκνότητα	ρ_8	389,85	kg/m^3
	Ενθαλπία	h_8	354,80	kJ/kg
	Εντροπία	s_8	1506,70	kJ/kgK

Μια αναπόσπαστη πτυχή της ανάλυσης είναι ο υπολογισμός των μη ισεντροπικών ενθαλπιών. Υπολογίζοντας την διαφορά ενθαλπίας από την αρχική θερμοδυναμική ανάλυση του πρώτου βήματος και συνυπολογίζοντας την επιθυμητή απόδοση του στροβίλου, υπολογίζονται οι μη ισεντροπικές ενθαλπίες. Σε αυτό το βήμα παρουσιάζονται οι ρεαλιστικές τιμές ενθαλπίας, όπου θέτοντας την αναμενόμενη απόδοση των συμπιεστών και του στροβίλου παρουσιάζεται μια διαφοροποιημένη προοπτική σχετικά με την απόδοση και την αποτελεσματικότητα των κύριων μελών του υπερκρίσιμου κύκλου.

Η διεργασίες 1→2 και 5→6 θεωρούνται αρχικά ισεντροπικές οπότε ισχύει ότι $s_{2s} = s_1$, από εκεί εξάγουμε την ενθαλπία για την ισεντροπική διεργασία (h_{2s}), από το Refprop. Για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας εξόδου, ο υπολογισμός είναι ο ακόλουθος

Εξίσωση 3.1.1: Έργο ισεντροπικής διεργασίας

$$\dot{w}_s = h_{2s} - h_1$$

Εξίσωση 3.1.2: Έργο πραγματικής διεργασίας

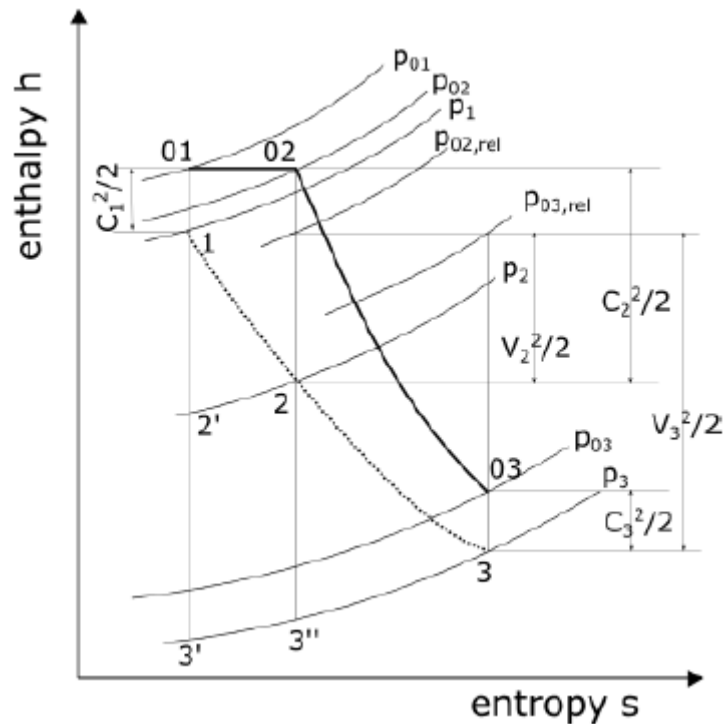
$$\dot{w} = \dot{w}_s * \eta_c \Rightarrow h_2 = \dot{w} + h_1$$

Πίνακας 3.1.3: Ισεντροπικές ενθαλπίες.

1 ^{ος} Συμπιεστής	h_{2s}	388,05	
2 ^{ος} Συμπιεστής	h_{3s}	1279,60	kJ/kg
Στρόβιλος	h_{6s}	902,12	

Έχοντας υπολογίσει τις πραγματικές ενθαλπίες εξόδου και για γνωστή πίεση αποσπώνται μέσω του REFPROP οι πραγματικές θερμοκρασίες εξόδου των συμπιεστών και του στροβίλου. Ακριβώς με τον ίδιο τρόπο λειτουργούμε και για την διεργασία 5→6.

Αν απεικονίζαμε τις πραγματικές και τις ισεντροπικές ενθαλπίες σε ένα διάγραμμα ενθαλπίας ως προς την εντροπία θα προέκυπτε η παρακάτω γραφική παράσταση. Τα σημεία 1, 2', 3' αντιπροσωπεύουν τις ισεντροπικές διεργασίες.



Εικόνα 2.1.6.5: Διάγραμμα h-s της διεργασίας εκτόνωσης.

Στη συνέχεια, πραγματοποιείται μια ανάλυση των ρυθμών ροής μάζας. Καθορίζεται ο συνολικός ρυθμός ροής μάζας, καθώς και η κατανομή των ρυθμών ροής μάζας σε κάθε κλάδο του κύκλου. Αυτό το βήμα θέτει τα θεμέλια για μετέπειτα υπολογισμούς ισχύος εφόσον εξετάζουμε ένα κλειστό σύστημα και προσφέρονται πληροφορίες για την κυκλοφορία και τη χρήση του εργαζόμενου ρευστού.

Από την παραπάνω ανάλυση του κύκλου έχουμε την διαφορά ενθαλπίας εισόδου-εξόδου του στρόβιλου όπως και την επιθυμητή ισχύ που θέλουμε να εισπράξουμε από τον στρόβιλο. Έτσι προκύπτει παρακάτω ο υπολογισμός μάζας.

Εξίσωση 3.1.3: Ροή μάζας

$$\dot{m} = \frac{W}{h_6 - h_5}$$

Εκτός της συνολικής ροής μάζας, εκκρεμεί ο υπολογισμός του ποσοστού της μάζας «y» που διαχωρίζεται από την κύρια πορεία ροής ώστε να τροφοδοτήσει τον δεύτερο συμπιεστή. Έτσι υπολογίζουμε το ισοζύγιο ενέργειας για τον LTR.

Εξίσωση 3.1.4: Ισοζύγιο ενέργειας για τον LTR

$$(1 - y) * m(h_2 - h_3) = m(h_8 - h_7)$$

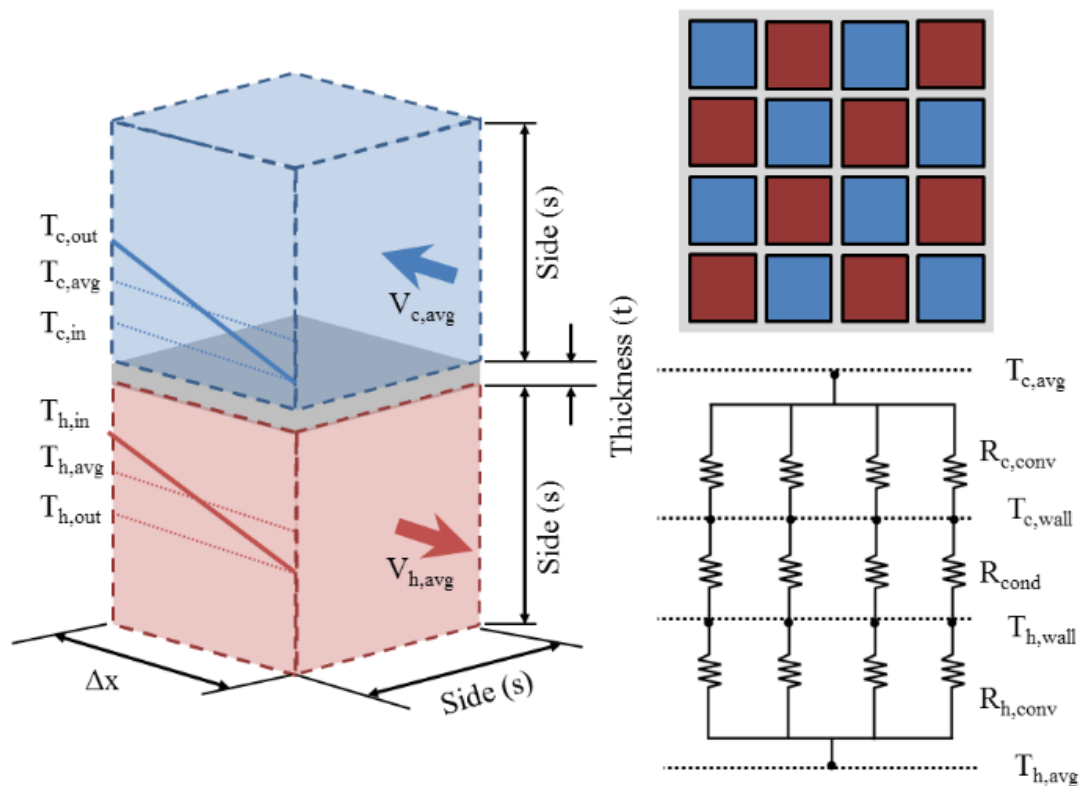
Πίνακας 3.1.4: Ροές μάζας συστήματος.

Συνολική ροή μάζας	\dot{m}	8,58	
Ροή μάζας στον κλάδο του πρώτου στροβίλου	\dot{m}_1	5,88	kg/s
Ροή μάζας στον κλάδο του δευτέρου στροβίλου	\dot{m}_2	2,71	
Ποσοστό ροής μάζας που διακλαδώνεται	y	32	%

Όσον αφορά τους δύο εναλλάκτες θερμότητας, οι εναλλάκτες μικρο-καναλιών μπορεί να είναι πιο επιθυμητοί για το sCO₂ από τους τυπικούς εναλλάκτες θερμότητας κελύφους και σωλήνων που χρησιμοποιούνται συμβατικά.

Τα τετράγωνα κανάλια επιλέγονται επειδή η διάταξή τους μπορεί να περιβάλλει αποτελεσματικά ένα κανάλι σε κάθε τοίχο με ένα κανάλι που περιέχει ένα ρευστό που κινείται προς την αντίθετη κατεύθυνση, όπως φαίνεται στην *Εικόνα 3.1.6*. Η αρχή των κυκλωμάτων θερμικής αντίστασης διέπει τη μοντελοποίηση της ανταλλαγής θερμότητας μεταξύ ζεστού και κρύου ρευστού.

Για την εύρεση των χαρακτηριστικών ενός εναλλάκτη θερμότητας αντίθετης ροής μικρο-καναλιών, όπως περιγράφεται από τους Dostal και Carman (Carman et al., 2002; Dostal et al., 2004), χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες σχέσεις: μεταβίβαση θερμότητας μέσω τυρβώδους ροής, που διέπεται από την εξίσωση Dittus-Boelter. Αγωγή μεταφορά θερμότητας, υπολογισμένη με το νόμο του Fourier. Πτώση πίεσης, μοντελοποιημένη από την εξίσωση Darcy-Weisbach. Όλοι αυτοί οι παράγοντες πρέπει να ισορροπούν στη βελτιστοποίηση και να εμπίπτουν στα όρια σχεδιασμού.



Εικόνα 2.1.6.6: Μοντέλο εναλλαγής θερμότητας διακριτικού ελέγχου όγκου (Schmitt et al., 2015).

Στην δικιά μας περίπτωση, δεν θα εμβαθύνουμε τόσο πολύ στην ανάλυση των εναλλακτών HTR & LTR. Παρόλα αυτά, με βάση τα στοιχεία των Πινάκων 3.1.2 και 3.1.4 μπορούμε να βρούμε αυτό που ονομάζουμε ως «αποτελεσματικότητα» των εναλλακτών. Η αποτελεσματικότητα (ϵ) ενός εναλλάκτη είναι το μέτρο της ικανότητάς του να μεταφέρει τη μέγιστη δυνατή ποσότητα θερμότητας από το ζεστό ρευστό στο κρύο ρευστό. Ορίζεται ως ο λόγος της πραγματικής μεταφοράς θερμότητας προς τη μέγιστη δυνατή μεταφορά θερμότητας.

Οι τύποι είναι οι παρακάτω.

Εξίσωση 3.1.5: Αποτελεσματικότητα HTR

$$\epsilon_{HTR} = \frac{h_4 - h_3}{h_6 - h_3}$$

Εξίσωση 3.1.6: Αποτελεσματικότητα LTR

$$\epsilon_{LTR} = \frac{\dot{m}_1 * (h_3 - h_2)}{\dot{m} * (h_7 - h_2)}$$

Πίνακας 3.1.5: Αποτελεσματικότητα εναλλακτών.

HTR	ϵ_{HTR}	74,7	%
LTR	ϵ_{LTR}	48,2	

Η «καρδιά» της μεθοδολογίας βρίσκεται στον υπολογισμό ισχύος του κύκλου. Αξιοποιώντας τις ροές μάζας και τιμές ενθαλπίας, η ισχύς που παράγεται ή καταναλώνεται από τους συμπιεστές, τους εναλλάκτες θερμότητας και τον στρόβιλο υπολογίζεται αναλυτικά. Αυτό το βήμα διευκολύνει την πλήρη κατανόηση του ενεργειακού ισοζυγίου εντός του συστήματος, αποκαλύπτοντας την δυναμική της παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας.

Εξίσωση 3.1.1: Ισχύς

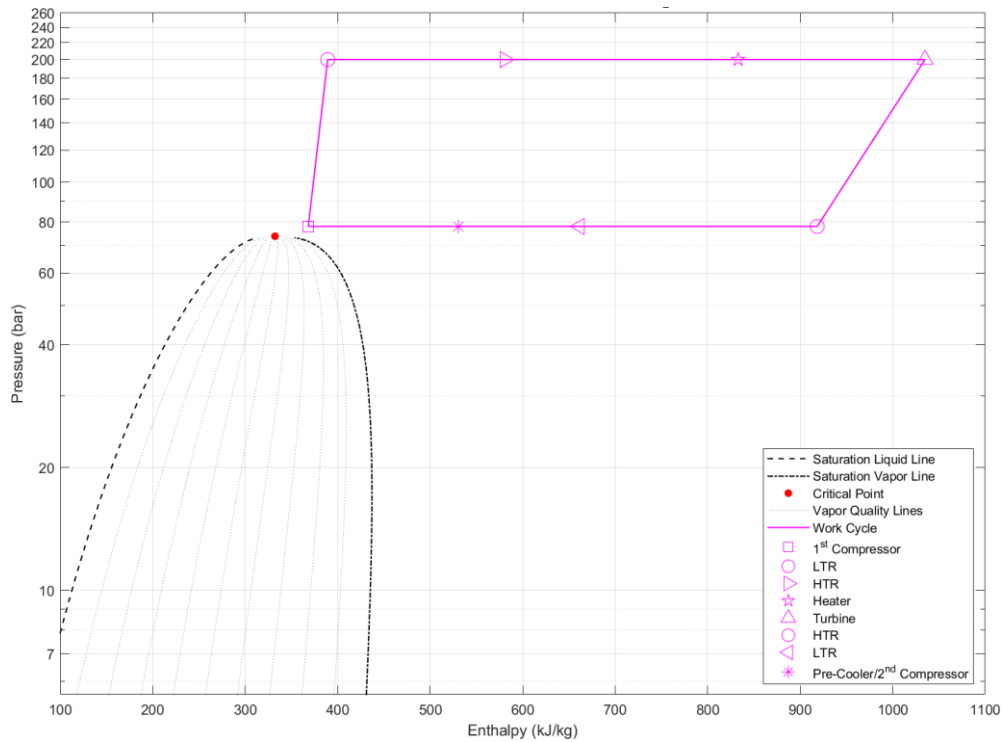
$$W = \dot{m}\Delta h$$

Εφαρμόζοντας τον τύπο της ισχύς, με βάση τον Πίνακα 3.1.4, προκύπτει ο παρακάτω πίνακας.

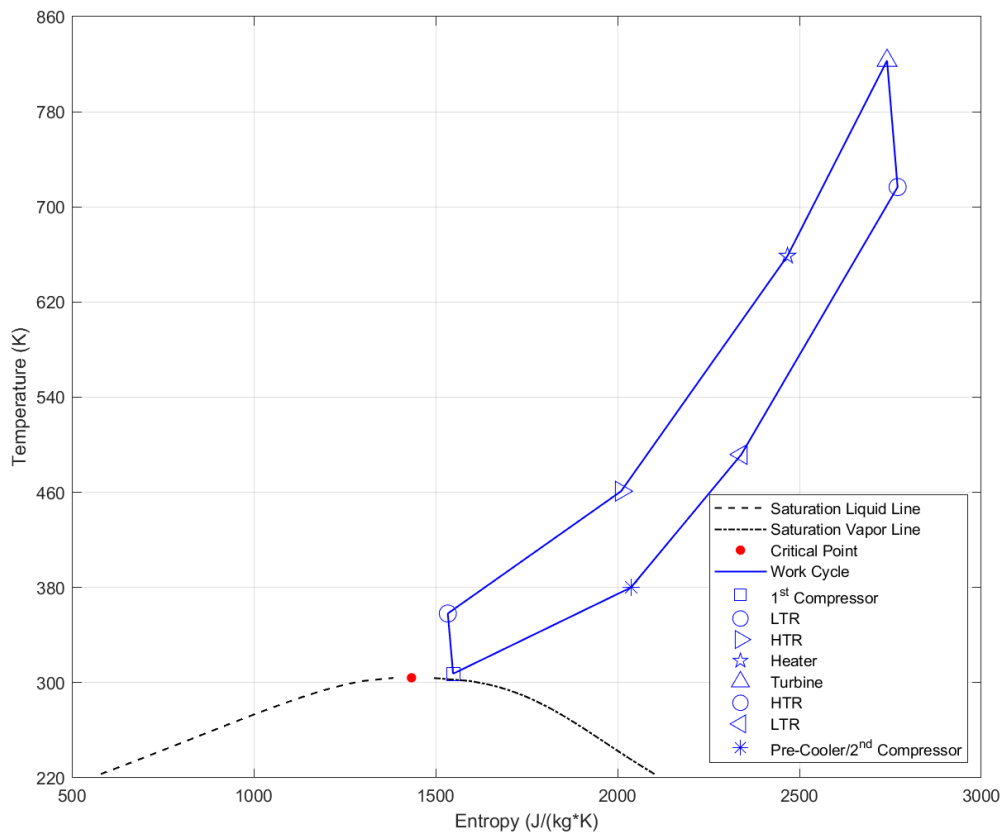
Πίνακας 3.1.6: Ολική και επιμέρους ισχύς/θερμότητα των στοιχείων του κύκλου επανασυμπίεσης.

Ισχύς πρώτου συμπιεστή	W_{C1}	123,1	kW
Ισχύς δεύτερου συμπιεστή	W_{C2}	135,9	
Θερμότητα LTR	Q_{LTR}	2252,4	
Θερμότητα HTR	Q_{HTR}	4370,7	
Θερμότητα θερμαντήρα	Q_{heater}	1733,7	
Θερμότητα προψύκτη	Q_{cooler}	-953,3	
Ισχύς στρόβιλου	W_t	-1000,0	

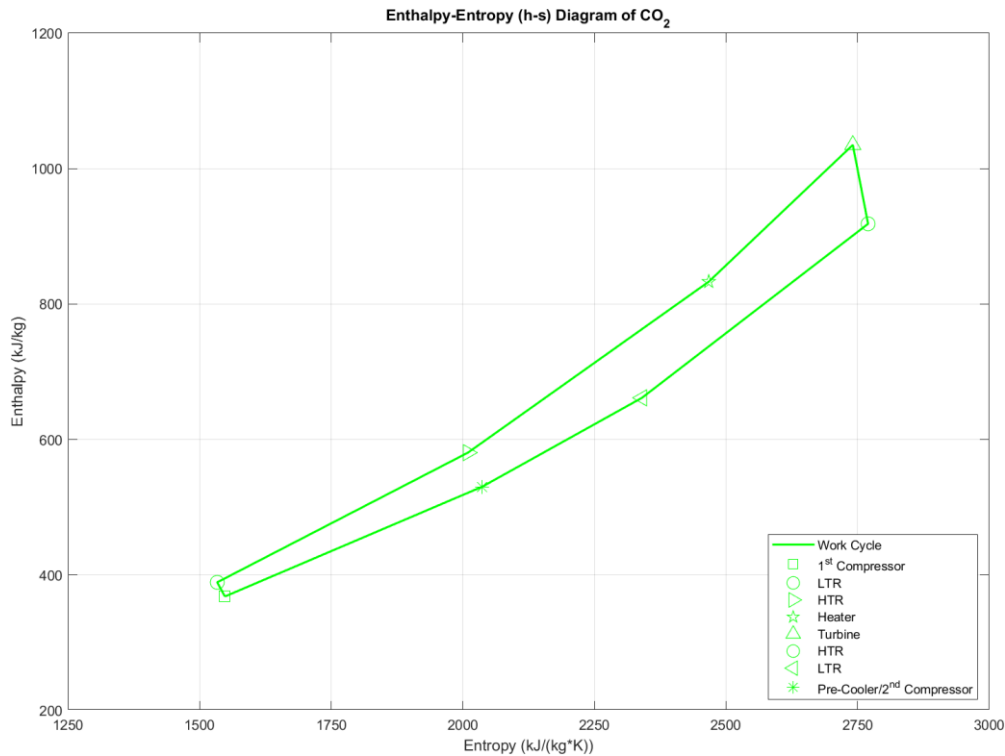
Εν τέλει προκύπτει ο υπερκρίσιμος κύκλος λειτουργίας όπως φαίνεται στο παρακάτω P-h διάγραμμα (Διάγραμμα 3.1.1). Αντίστοιχα, τα Διαγράμματα 3.1.2 και 3.1.3 απεικονίζουν τον κύκλο σε συνάρτηση με την θερμοκρασία-εντροπία και την ενθαλπία-εντροπία, αντίστοιχα.



Διάγραμμα 2.1.6.1: Αναπαράσταση υπερκρίσιμου κύκλου CO₂ στο διάγραμμα P-h.



Διάγραμμα 2.1.6.2: Αναπαράσταση υπερκρίσιμου κύκλου CO₂ στο διάγραμμα T-s.



Διάγραμμα 2.1.6.3: Αναπαράσταση υπερκρίσιμου κύκλου CO₂ στο διάγραμμα h-s.

Η λεπτομερής και συστηματική μεθοδολογία που χρησιμοποιείται σε αυτή τη θερμοδυναμική ανάλυση χρησιμεύει ως η ραχοκοκαλιά της πολυπλοκότητας του κύκλου παραγωγής ενέργειας επανασυμπιέσης sCO₂. Οι υπολογιζόμενες θερμοδυναμικές παράμετροι, οι ροές μάζας, οι ισχύς εξόδου και οι μη ισεντροπικές ενθαλπίες συμβάλλουν συλλογικά σε μια ολοκληρωμένη κατανόηση της απόδοσης του κύκλου υπό συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας. Μέσω των προαναφερθέντων υπολογισμών θέτονται οι βάσεις για τον σχεδιασμό και την βελτιστοποίηση μελλοντικών υπερκρίσιμων συστημάτων ισχύος με βάση το CO₂.

Αν θέλουμε να προχωρήσουμε την ανάλυση μας ένα βήμα παραπέρα μπορούμε να υπολογίσουμε και την συνολική απόδοση του κύκλου και την πραγματική ενέργεια που εν τέλει εκμεταλλευόμαστε μέσω της γεννήτριας.

Αρχικά, ορίζουμε τις μηχανικές απώλειες της ατράκτου, που συνδέει τους συμπιεστές με τον στρόβιλο και μετά με την γεννήτρια και την απόδοση της ηλεκτρικής γεννήτριας. Με βάση τον Kapil (2011) οι μέσες αναμενόμενες αποδόσεις ατράκτου και γεννήτριας είναι οι παρακάτω.

Πίνακας 3.1.7: Αποδόσεις κύκλου.

Μηχανική απόδοση	η_{mech}	90	%
Ηλεκτρική απόδοση	η_{gen}	95	

Για τον υπολογισμό της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύς, χρησιμοποιούμε τον παρακάτω τύπο.

Εξίσωση 3.1.7: Ηλεκτρική ισχύς

$$P_{gen} = \eta_{gen} * W_{NET}$$

Όπου το W_{NET} εκφράζει το συνολικό πραγματικό παραγόμενο έργο από τον στρόβιλο αφού αφαιρέσουμε το καταναλισκόμενο έργο από τους συμπιεστές, το οποίο με βάση τον Πίνακα 3.1.4, υπολογίζεται όπως ακολούθως.

Εξίσωση 3.1.8: Πραγματικό παραγόμενο έργο

$$W_{NET} = \eta_{mech} * W_{tur} - \frac{W_{com_1} + W_{com_2}}{\eta_{mech}}$$

Ζωτικής σημασίας είναι και η συνολική θερμική ενέργεια του συστήματος. Αυτό συμπεριλαμβάνει την θερμότητα που παρέχουμε (στην συγκεκριμένη περίπτωση από τον πυρηνικό αντιδραστήρα), την θερμότητα που αποβάλλουμε (προ-ψύκτης) και τους εναλλάκτες.

Εξίσωση 3.1.9: Συνολική καταναλισκόμενη ενέργεια

$$Q_{TOTAL} = Q_{LTR} + Q_{HTR} + Q_{heater} + Q_{cooler}$$

Γνωρίζοντας πλέον την δυνατή εκμεταλλεύσιμη ηλεκτρική ισχύς από το σύστημα, μας ενδιαφέρει να δούμε και πόσο αποδοτικό είναι εν τέλει το σύστημα σε σύγκριση με την αρχική ενέργεια που εναποθέτουμε στον κύκλο. Έτσι, καταλήγουμε στον θερμικό βαθμό απόδοσης του κύκλου.

Εξίσωση 3.1.10: Θερμικός βαθμός απόδοσης

$$\eta_{th} = \frac{W_{NET}}{Q_{heater}}$$

Συγκεντρώνοντας τις παραπάνω πληροφορίες προκύπτει ο παρακάτω πίνακας.

Πίνακας 3.1.8: Συνολική ενέργεια και απόδοση κύκλου.

Ηλεκτρική ισχύς	P_{gen}	581,6	
Πραγματικό παραγόμενο έργο	W_{NET}	612,2	kW
Συνολική καταναλισκόμενη ενέργεια	Q_{TOTAL}	2689,1	
Θερμικός βαθμός απόδοσης	η_{th}	35,3	%

Έχοντας πλέον όλα τα χρήσιμα θερμοδυναμικά στοιχεία του κύκλου, οι υπολογιστικές διαδικασίες μπορούν να προχωρήσουν και να επικεντρωθούν εξολοκλήρου στον στρόβιλο.

3.2 ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ

Ο προκαταρκτικός σχεδιασμός βασίζεται στο διάγραμμα Baljé, ειδικά προσαρμοσμένο για στρόβιλους, ενσωματώνοντας δύο βασικές αδιάστατες παραμέτρους, την ειδική ταχύτητα (N_s) και ειδική διάμετρο (D_s). Η σύνθεση, όπως εκφράζεται στις επόμενες εξισώσεις, απαιτεί προσεκτική εξέταση των συνθηκών ροής μάζας. Οι Fuller και Balje (1962) τονίζουν την χρήση

της ροής των καυσαερίων στους υπολογισμούς, επιβεβαιώνοντας την επιρροή της στους μηχανισμούς που αποτελούν τη βάση για τους ορισμούς των τριγώνων ταχύτητας στην έξοδο του ρότορα.

Εξίσωση 3.2.1: Ειδική ταχύτητα

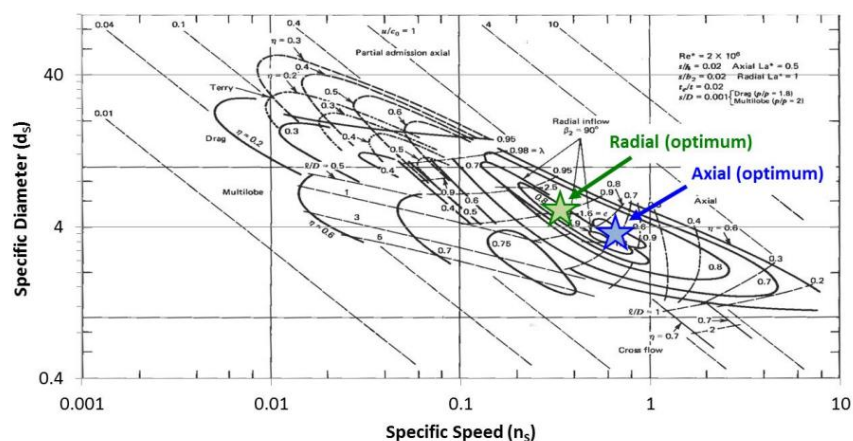
$$N_s = \frac{\left(\frac{m}{\rho}\right)^{0.5} \Omega}{\Delta h_s^{0.75}}$$

Εξίσωση 3.2.2: Ειδική διάμετρος

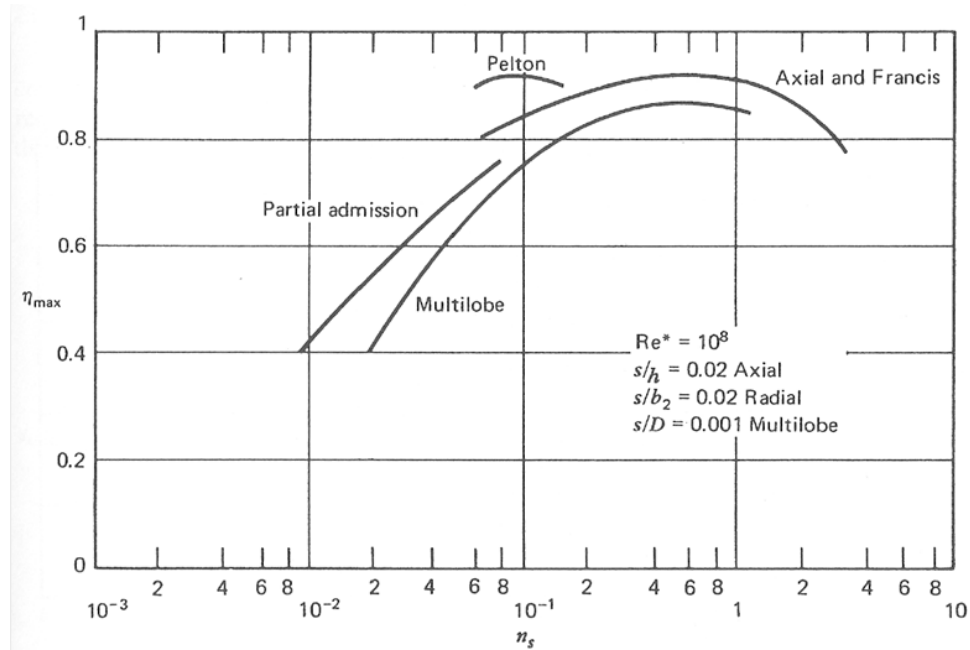
$$D_s = \frac{dt(\Delta h_s)^{0.25}}{\left(\frac{m}{\rho}\right)^{0.5}}$$

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι ο σχεδιασμός με βάση τον Baljé σχεδιάστηκε αρχικά για έναν στρόβιλο ενός σταδίου, ιδανικής ροής. Αν και η ιδεατότητα της ροής θεωρείται εύλογα για τον στρόβιλο sCO₂ που βρίσκεται αρκετά πάνω από το κρίσιμο σημείο του, η πιθανότητα πολλαπλών σταδίων απαιτεί μια ελάχιστα διαφοροποιημένη προσέγγιση. Η χρήση της πυκνότητας εξόδου για τον υπολογισμό των αδιάστατων παραμέτρων N_s και D_s θα έδινε τιμές αντιπροσωπευτικές κυρίως των τελευταίων σταδίων, χωρίς να συμπεριλαμβάνονται τα χαρακτηριστικά των αρχικών σταδίων. Κατά συνέπεια, οι συνθήκες μέσης ροής χρησιμοποιούνται στις προαναφερθείσες εξισώσεις, με τις ιδιότητες κατάστασης εξόδου να επηρεάζουν τον ορισμό της ειδικής ταχύτητας και διαμέτρου για κάθε στάδιο.

Το συνοδευτικό διάγραμμα Baljé, που παρουσιάζεται στις Μονάδες SI, οριοθετεί γραμμές ίσης απόδοσης για ακτινωτούς και αξονικούς στρόβιλους. Σε αυτό το πλαίσιο, η επιλογή ακτινωτής τουρμπίνας απορρίπτεται με βάση τις εκτιμήσεις που διευκρινίστηκαν από τον Noall (Dixon & Hall, 2014). Το διάγραμμα Baljé επικυρώνει την περιορισμένη αποτελεσματική εφαρμογή των ακτινικών στρόβιλων, με εκτιμώμενες αποδόσεις που ξεπερνούν το 90% μόνο εντός του στενού εύρους των 0,5 < N_s < 0,6. Αντίθετα, οι αξονικοί στρόβιλοι εμφανίζουν αποδόσεις που ξεπερνούν το 90% για ένα ευρύτερο εύρος 0,5 < N_s < 0,9, εξασφαλίζοντας λειτουργία άνω του 80% σε ένα ποικίλο φάσμα συνθηκών λειτουργίας. Ο Fuller υποστηρίζει ότι το βέλτιστο εύρος είναι 0,4 < N_s < 0,7.



Εικόνα 2.1.6.1: Διάγραμμα Baljé για στρόβιλους (Heshmat et al., 2018).



Εικόνα 2.1.6.2: Απλοποιημένη έκδοση του διαγράμματος Balje για στροβίλους που εκφράζει τη δυναμική απόδοση ως συνάρτηση μόνο της ειδικής ταχύτητας (Japikse & Baines, 1994).

Η αξιολόγηση του προκαταρκτικού σχεδιασμού χρησιμοποιώντας μέσες ποσότητες για την εκτίμηση του αριθμού των σταδίων παρέχει μια ολοκληρωμένη επισκόπηση της συνολικής προς την στατική απόδοση και της διαμέτρου ακμής για τον στρόβιλο. Τα αποτελέσματα της προκαταρκτικής μελέτης περιλαμβάνουν την περιστροφική ταχύτητα του στροβίλου, τον προσδιορισμό του αριθμού των σταδίων που ευνοούν την επίτευξη της υψηλότερης συνολικής προς στατική απόδοση, της ακτίνας ακμής για κάθε στάδιο και την συνολική προς στατική απόδοση για κάθε στάδιο. Γνωρίζοντας πλέον την διάμετρο ακμής μπορούμε να εξάγουμε και τα υπόλοιπα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του στροβίλου, ορίζοντας εξαρχής (με βάση τους Ainley & Mathieson, 1957) την αναλογία βάσης-ακμής ως 0,8.

Εξίσωση 3.2.3: Αναλογία βάσης-ακμής.

$$R_{ht} = \frac{r_h}{r_t}$$

Εξίσωση 3.2.4: Ακτίνα ακμής

$$r_t = \frac{D_t}{2}$$

Εξίσωση 3.2.5: Ακτίνα βάσης

$$r_h = R_{ht} * r_t$$

Εξίσωση 3.2.6: Μέση ακτίνα

$$r_m = \frac{r_t + r_h}{2}$$

Εξίσωση 3.2.7: Διάμετρος ακμής και κορυφής

$$D_t = 2 * r_t$$

$$D_h = 2 * r_h$$

Εξίσωση 3.2.8: Εμβαδόν ακμής και κορυφής

$$A_t = \pi * r_t^2$$

$$A_h = \pi * r_h^2$$

Εξίσωση 3.2.9: Χρήσιμο εμβαδόν

$$A = A_t - A_h$$

Αυτές οι παράμετροι, με τη σειρά τους, χρησιμεύουν ως είσοδοι για τον επόμενο υπολογιστικό κώδικα που αναπτύχθηκε για να διευκολύνει έναν πιο περίπλοκο και λεπτομερή σχεδιασμό του αξονικού στροβίλου.

Τα αποτελέσματα του προκαταρκτικού σχεδιασμού φαίνονται στο παρακάτω πίνακα, όπου βλέπουμε τις παραμέτρους εισόδου και τις υπολογιζόμενες τιμές με βάση τις Εξισώσεις 3.2.1 & 3.2.2.

Πίνακας 3.2.1: Αποτελέσματα προκαταρκτικού σχεδιασμού

Δεδομένα	Ειδική ταχύτητα	N_s	0,40	
	Ειδική διάμετρος	D_s	4,65	-
	Αναλογία βάσης-ακμής	R_{ht}	0,80	
	Μέση πυκνότητα ρευστού στον στρόβιλο	$\rho_{avg.}$	90,94	kg/m^3
	Περιστροφική ταχύτητα στροβίλου	Ω_{rad}	8211	rad/s
	Περιστροφική ταχύτητα στροβίλου	Ω	78407	RPM
Αποτελέσματα	Διάμετρος πτερυγίου	D_t	77,23	
	Ακτίνα ακμής	r_t	38,66	
	Ακτίνα βάσης	r_h	30,92	
	Μέση ακτίνα	r_m	34,80	
	Διάμετρος βάσης	D_h	61,86	mm
	Εμβαδόν ακμής	A_t	4695,70	
	Εμβαδόν βάσης	A_h	3005,20	
	Χρήσιμο εμβαδόν	A	1690,40	
	Στάδια	n	1	-

3.3 ΤΡΙΓΩΝΑ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΥ

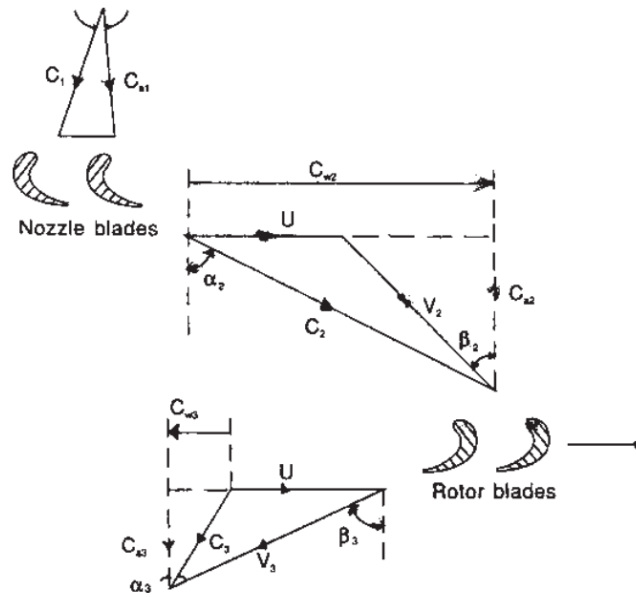
Ο υπολογισμός των τριγώνων ταχύτητας είναι ένα βασικό βήμα στη μεθοδολογία της ανάλυσης του αξονικού στροβίλου, παρέχοντας μια λεπτομερή εικόνα της δυναμικής ροής του ρευστού μέσω των πτερυγίων του στροβίλου. Τα τρίγωνα ταχύτητας είναι γραφικές αναπαραστάσεις που διευκρινίζουν την απόλυτη και σχετική κίνηση του ρευστού καθώς κυλάει στα πτερύγια του στροβίλου, τόσο τον στάτορα που προηγείται όσο και στον ρότορα. Σε αυτή την ενότητα, αναλύουμε τη μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των τριγώνων ταχύτητας σε αξονικούς στροβίλους.

Οι κύριες παράμετροι που εξετάζονται περιλαμβάνουν την απόλυτη αξονική ταχύτητα (c_x), την απόλυτη γωνία ροής εισόδου (α_1) και την σχετική γωνία ροής εξόδου (β_3). Επιπλέον, οι παράμετροι που χαρακτηρίζουν την κίνηση της λεπίδας, όπως η ταχύτητα λεπίδας (U), αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της ανάλυσης των τριγώνων ταχύτητας.

Όσον αφορά τον στάτορα, οι σχέσεις που διέπουν τα τρίγωνα ταχύτητας συσχετίζονται. Για τις συνθήκες εισόδου, η απόλυτη αξονική ταχύτητα εισόδου (c_x) σχετίζεται με την γωνιακή συνιστώσα (c_1) και την εφαπτομενική συνιστώσα ($c_{\theta 1}$) της ταχύτητας του ρευστού. Η απόλυτη γωνία ροής εισόδου (α_1) συνδέεται άμεσα με αυτά τα στοιχεία μέσω τριγωνομετρικών σχέσεων.

Ομοίως, για τις συνθήκες εξόδου, η απόλυτη αξονική ταχύτητα εξόδου (c_x) εκφράζεται ως προς την γωνιακή συνιστώσα (c_2) και την εφαπτομενική συνιστώσα ($c_{\theta 2}$) της ταχύτητας του ρευστού, μαζί με τη σχετική γωνία ροής εξόδου (β_2). Οι τριγωνομετρικές σχέσεις που διέπουν αυτές τις παραμέτρους είναι καθοριστικές για την κατανόηση της συμπεριφοράς του ρευστού καθώς αυτό εξέρχεται από τον στροβίλο.

Ένα σημαντικό κομμάτι της ανάλυσης περιλαμβάνει τον προσδιορισμό της σχετικής ταχύτητας (w), η οποία αντιπροσωπεύει την ταχύτητα του ρευστού σε σχέση με την κινούμενη λεπίδα. Η σχετική γωνία εισόδου (β_2), που σχηματίζεται μεταξύ του διανύσματος της σχετικής ταχύτητας και της εφαπτομενικής διεύθυνσης της ταχύτητας στην είσοδο, είναι θεμελιώδης σε αυτόν τον υπολογισμό και αργότερα στον υπολογισμό του rothalpy (I).



Εικόνα 2.1.6.1: Τρίγωνα ταχυτήτων για στρόβιλο αξονικής ροής (R Gorla & Khan, 2003).

Η διαδικασία υπολογισμού περιλαμβάνει μια προσέγγιση βήμα προς βήμα, ξεκινώντας με τον προσδιορισμό των συνθηκών εισόδου, προχωρώντας στο μεταβατικό στάδιο από τον στάτορα στον ρότορα, στην συνέχεια με τον καθορισμό των συνθηκών εξόδου και ολοκληρώνοντας με τον υπολογισμό των συντελεστών κίνησης του στροβίλου. Οι σχέσεις μεταξύ αυτών των παραμέτρων εφαρμόζονται για να διασφαλίσουν μια ολοκληρωμένη αναπαράσταση των τριγώνων ταχύτητας.

Στους παρακάτω υπολογισμούς, για την αξονική σχεδίαση οι δείκτες 1, 2, 3 θα υποδεικνύουν την είσοδο του στάτορα (ή αλλιώς ακροφυσίου), την έξοδο του ακροφυσίου και την έξοδο του ρότορα άρα και του στροβίλου.

Εάν το ρευστό έχει απόλυτη ταχύτητα \vec{c} και οι λεπίδες περιστρέφονται με περιστροφική ταχύτητα \vec{U} , η σχετική ταχύτητα \vec{w} ορίζεται ως:

Εξίσωση 3.3.1: Σχετική ταχύτητα

$$\vec{w} = \vec{c} - \vec{U}$$

Σε έναν στρόβιλο, το ρευστό εισέρχεται πρώτα στα πτερύγια του ακροφυσίου (στάτορα), όπου η συνολική ενθαλπία διατηρείται σταθερή, αλλά το ρευστό επιταχύνεται από την ταχύτητα c_1 στην c_2 ενώ η στατική πίεση και η στατική ενθαλπία μειώνονται. Στη συνέχεια, η ροή κατευθύνεται στον ρότορα για να ολοκληρωθεί η διαστολή στην πίεση εξόδου P_3 . Το πρώτο στάδιο μπορεί να προηγηθεί από πτερύγια εισαγωγής που οδηγούν στο να κατευθύνουν τη ροή προς το ακροφύσιο με σωστή γωνία.

Ξεκινάμε την επίλυση υπολογίζοντας την απόλυτη αξονική ταχύτητα η οποία παραμένει σταθερή από την είσοδο του στροβίλου μέχρι την έξοδο του εφόσον εξετάζουμε αξονικό στρόβιλο. Για την εύρεση του χρησιμοποιούμε την αρχή διατήρησης της μάζας αφού ο κύκλος είναι κλειστός.

Εξίσωση 3.3.2: Αρχή διατήρησης της μάζας.

$$\dot{m} = c_x * \rho_5 * A$$

Εξίσωση 3.3.3: Ταχύτητα πτερυγίου.

$$U = \Omega * r_m$$

Πίνακας 3.3.1: Τιμές τριγώνων ταχυτήτων.

Σταθ. Τιμές	Περιφερειακή ταχύτητα	U	285,7	m/s
	Απόλυτη αξονική ταχύτητα	C_x	40,8	
Είσοδος Στάτορα	Απόλυτη γωνιακή ταχύτητα	C_1	42,2	m/s
	Απόλυτη γωνία	α_1	15,0	$^\circ$
Έξοδος Στάτορα/ Είσοδος Ρότορα	Απόλυτη γωνιακή ταχύτητα	C_2	398,9	m/s
	Απόλυτη εφαπτόμενη ταχύτητα	$C_{\theta 2}$	396,8	
	Σχετική γωνιακή ταχύτητα	W_2	118,4	
	Σχετική εφαπτομένη ταχύτητα	$W_{\theta 2}$	111,2	
	Απόλυτη γωνία	α_2	84,1	$^\circ$
	Σχετική γωνία	β_2	12,7	
Έξοδος Ρότορα	Απόλυτη γωνιακή ταχύτητα	C_3	99,7	m/s
	Απόλυτη εφαπτομένη ταχύτητα	$C_{\theta 3}$	91,1	
	Σχετική γωνιακή ταχύτητα	W_3	378,9	
	Σχετική εφαπτομένη ταχύτητα	$W_{\theta 3}$	376,7	
	Απόλυτη γωνία	α_3	-65,8	$^\circ$
	Σχετική γωνία	β_3	78,2	

Έχοντας υπολογίσει τα τρίγωνα ταχυτήτων και τις γωνίες εισόδου και εξόδου, μπορούμε τώρα να υπολογίσουμε τις υπόλοιπες παραμέτρους που καθορίζουν την γεωμετρία του πτερυγίου – την γωνία εναλλαγής (ζ), γωνία απόκλισης (δ), γωνία καμπής (θ) και γωνία πρόσπτωσης (i) – που επηρεάζονται άμεσα από τα παραπάνω τρίγωνα. Αυτές οι γωνίες είναι καθοριστικές για την διευκρίνιση της μορφολογίας του πτερυγίου και της αλληλεπίδρασής της με τη ροή του ρευστού και υπολογίζονται δύο φορές, μία για τον στάτορα και μία για τον ρότορα.

Η γωνία εναλλαγής (stagger angle) παρέχει τον προσανατολισμό του πτερυγίου σε σχέση με την αξονική διεύθυνση.

$$\zeta = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}$$

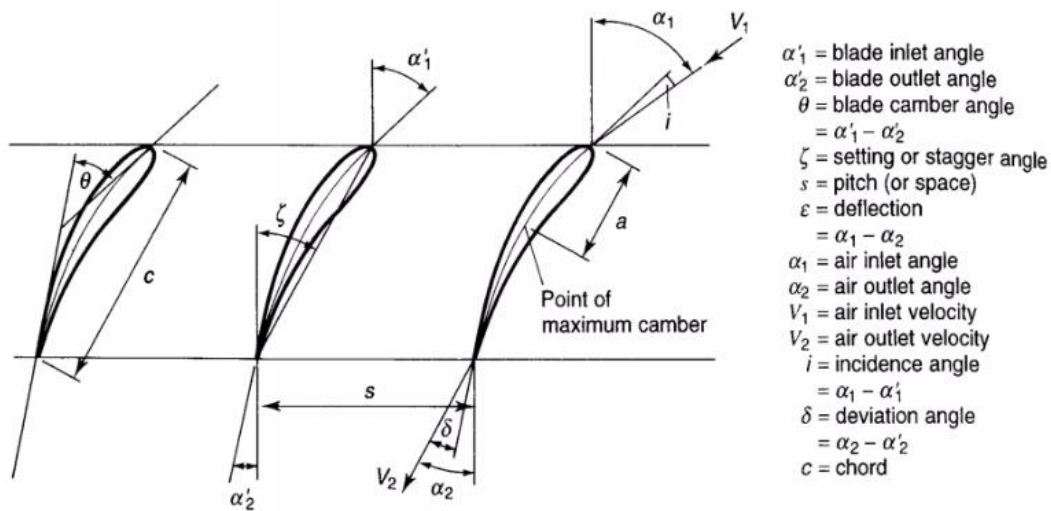
Η γωνία απόκλισης (deviation angle) υπολογίζει τη διαφορά μεταξύ της γωνίας ροής εξόδου και της γωνίας του περυγίου. Η γωνία απόκλισης για έναν αξονικό στρόβιλο τυπικά κυμαίνεται από -1° έως 3° (Agromayor and Nord, 2019). Αυτό το εύρος ποικίλλει ανάλογα με το σχεδιασμό και τις συνθήκες λειτουργίας του στρόβιλου, όπως ο συντελεστής ροής και η φόρτιση στα περύγια. Οι γωνίες απόκλισης είναι κρίσιμες για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του στρόβιλου, καθώς επηρεάζουν τη ροή που περιστρέφεται στο άκρο του περυγίου, επηρεάζοντας τη συνολική απόδοση.

Η γωνία καμψής (camber angle) αντιπροσωπεύει την καμπυλότητα της λεπίδας.

$$\theta = \alpha_1 - \alpha_2$$

Η γωνία πρόσπτωσης (incidence angle) μας δίνει πληροφορίες για την αρχική γωνία προσβολής της ροής σε σχέση με το «πρόσωπο» του περυγίου. Το εύρος για έναν αξονικό στρόβιλο τυπικά ποικίλλει ανάλογα με το σχεδιασμό και τις συνθήκες λειτουργίας. Πρακτικά, η γωνία πρόσπτωσης μπορεί να κυμαίνεται από ελαφρώς αρνητικές τιμές (περίπου -10°) έως θετικές τιμές (έως $+20^\circ$) (Klimko et al., 2022). Για την διευκόλυνση του υπολογισμού των απωλειών, όπως θα δούμε παρακάτω, επιλέγουμε να θέσουμε την γωνία πρόσπτωσης στις 0° .

Αυτοί οι υπολογισμοί διασφαλίζουν ότι ο σχεδιασμός της λεπίδας θα επιτύχει την επιθυμητή αεροδυναμική απόδοση και απόδοση εντός των επιθυμητών συνθηκών της ροής (Ma et al., 2022).



Εικόνα 2.1.6.2: Ορισμός γωνιών περυγίου (Klimko et al., 2022).

3.3.1 ΑΔΙΑΣΤΑΤΟΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ

Έχοντας πλέον όλα τα θερμοδυναμικά και ρευστοδυναμικά στοιχεία του κύκλου μπορούμε να προχωρήσουμε στο τελευταίο υπολογιστικό κομμάτι που είναι ο υπολογισμός των αδιάστατων συντελεστών του πτερυγίου.

Ο συντελεστής ροής «φ», σύμφωνα με τους Dixon & Hall, 2014, ορίζεται ως ο λόγος της απόλυτης αξονικής ταχύτητας προς την περιφερειακή ταχύτητα ενώ για ένα στάδιο καθορίζει τις σχετικές γωνίες ροής.

Ένα στάδιο με χαμηλή τιμή «φ» συνεπάγεται κλιμακωτές λεπίδες και σχετικές γωνίες ροής κοντά στην εφαπτομενική. Οι υψηλές τιμές συνεπάγονται χαμηλή κλιμάκωση και γωνίες ροής πιο κοντά στην αξονική. Για σταθερή γεωμετρία και σταθερή ταχύτητα περιστροφής, η ροή μάζας μέσω του στροβίλου αυξάνεται με την αύξηση του φ.

Εξίσωση 3.3.6: Συντελεστής ροής

$$\varphi = \frac{C_x}{U}$$

Ο συντελεστής φόρτισης «ψ» ορίζεται ως ο λόγος της διαφοράς της απόλυτης εφαπτομένης ταχύτητας που αλλάζει μέσα σε μια βαθμίδα προς το τετράγωνο της περιστροφικής ταχύτητας.

Εξίσωση 3.3.7: Συντελεστής φόρτισης

$$\psi = \frac{\Delta C_\theta}{U}$$

Έτσι, ο υψηλός συντελεστής φόρτισης βαθμίδας συνεπάγεται μεγάλη ροή και οδηγεί σε τρίγωνα υψηλής «κλοξής» ταχύτητας για να επιτευχθούν οι στροφές. Δεδομένου ότι η φόρτωση βαθμίδας είναι ένα αδιάστατο μέτρο του έργου που παράγεται ανά στάδιο, είναι επιθυμητή μια υψηλή φόρτιση σταδίου επειδή απαιτούνται λιγότερα στάδια για να παραχθεί η απαιτούμενη απόδοση έργου.

Τέλος, έχουμε τον συντελεστή αντίδρασης «R» που ορίζεται ως ο λόγος της πτώσης της στατικής ενθαλπίας στα πτερύγια του ρότορα σε σχέση με την ολική πτώση της στατικής ενθαλπίας στην βαθμίδα.

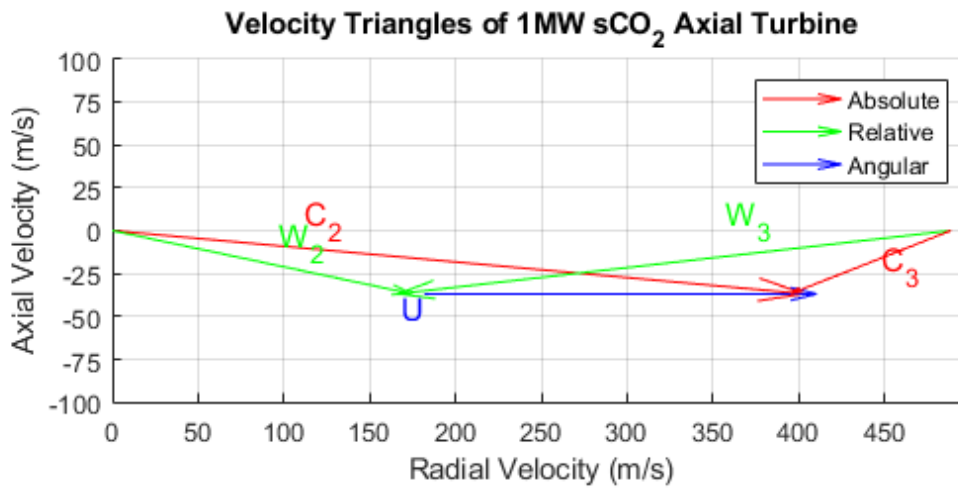
Εξίσωση 3.3.8: Βαθμός αντίδρασης.

$$R = \frac{h_2 - h_3}{h_1 - h_3}$$

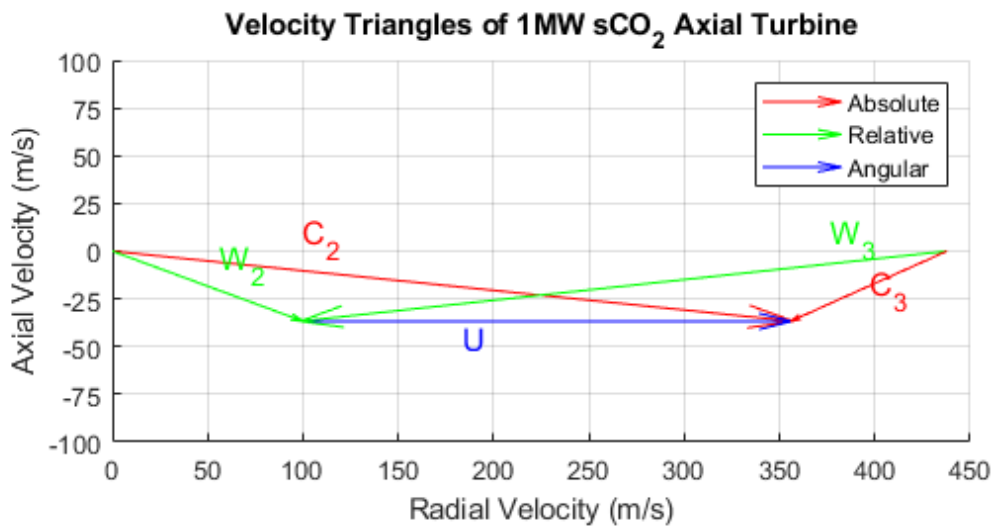
Πίνακας 3.3.1.2: Αδιάστατοι συντελεστές του στροβίλου.

Συντελεστής ροής	φ	0,14	
Πραγματική ενθαλπία δεύτερου συμπίεστη	ψ	1,43	-
Πραγματική ενθαλπία στροβίλου	R	0,32	

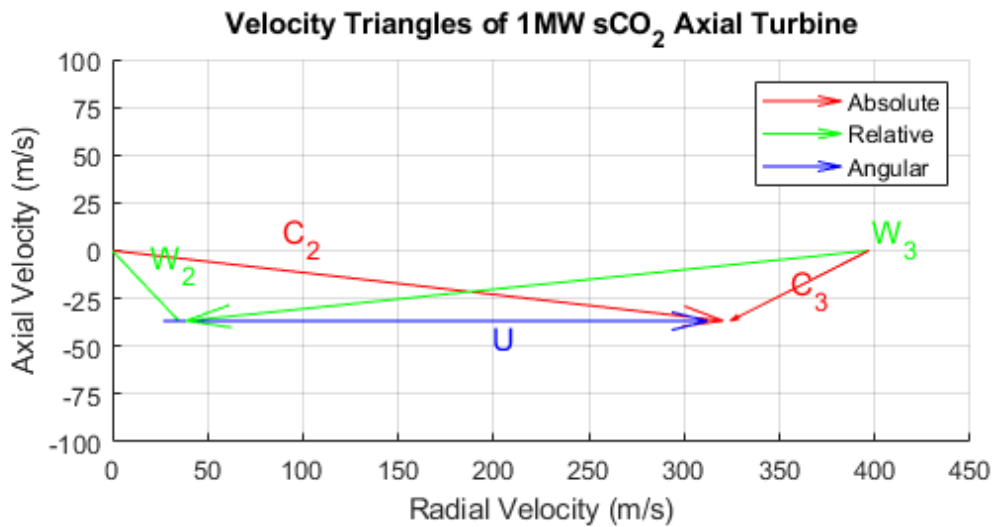
Παρακάτω απεικονίζονται τα τρίγωνα ταχυτήτων όπως προέκυψαν από την προηγούμενη ανάλυση μέσω του κώδικα MATLAB.



Διάγραμμα 3.3.1.1: Τρίγωνα ταχυτήτων του αξονικού στροβίλου 1MW, στον X άξονα είναι η ακτινική ταχύτητα και στον Y άξονα είναι η αξονική ταχύτητα (για την πλήμνη).



Διάγραμμα 3.3.1.2: Τρίγωνα ταχυτήτων του αξονικού στροβίλου 1MW, στον X άξονα είναι η ακτινική ταχύτητα και στον Y άξονα είναι η αξονική ταχύτητα (για το μέσο του πτερυγίων).



Διάγραμμα 3.3.1.3: Τρίγωνα ταχυτήτων του αξονικού στροβίλου 1MW, στον X άξονα είναι η ακτινική ταχύτητα και στον Y άξονα είναι η αξονική ταχύτητα (για την ακμή).

3.3.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΑΕΡΑ

Αξίζει να γίνει σύγκριση των παραπάνω υπολογισμών για την περίπτωση χρήσης αέρα ως εργαζόμενο μέσου αντί για sCO₂. Σε αυτή την περίπτωση συμβουλευόμαστε την εφαρμογή «Velocity Triangle Analysis» (VTA) που δημιουργήθηκε από το Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης με σκοπό τον υπολογισμό των τριγώνων ταχυτήτων.

Ξεκινάμε με την εισαγωγή των δεδομένων στην εφαρμογή. Συγκεκριμένα, με την εισαγωγή των τριών αδιάστατων μεγεθών, του συντελεστή φορτίου «φ», του συντελεστή φόρτισης «ψ» και του βαθμού αντίδρασης «R_n». Επιλέγουμε στρόβιλο με μη επαναλαμβανόμενη βαθμίδα αφού εξετάζουμε μονοβάθμιο στρόβιλο.



Εικόνα 3.3.2.1: Αδιάστατα μεγέθη στο VTA.

Στην συνέχεια, γίνεται εισαγωγή των διάστατων μεγεθών, συγκεκριμένα η διάμετρος μέχρι την άκρη του περυγίου και η αναλογία πλήμνης-ακμής που έχουν επίσης οριστεί στους προηγούμενους υπολογισμούς.

Dimensional Analysis

Constant Vx Profile (Stage 1-3)
Custom annulus geometry

Tip Diameter at Stage 1 [m]

Tip Diameter at Stage 2 [m]

Tip Diameter at Stage 3 [m]

Hub2Tip ratio at Stage 1 [-]

Hub2Tip ratio at Stage 2 [-]

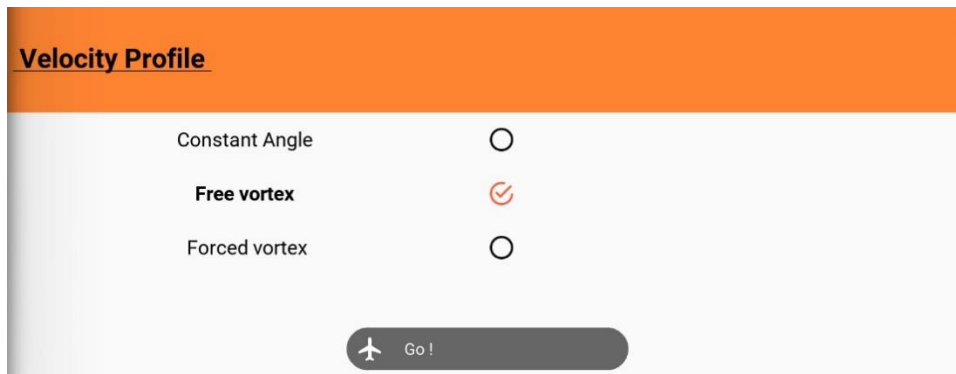
Hub2Tip ratio at Stage 3 [-]

Rotational Speed [rpm]

Εικόνα 3.3.2.2: Διάστατα μεγέθη στο VTA.

Τέλος, επιλέγουμε το προφίλ των ταχυτήτων/ροής. Με βάση τον Seppo A. Korpela (2011), το πιο αντιπροσωπευτικό προφίλ είναι αυτό της ελεύθερης δίνης. Σε ένα προφίλ ελεύθερης δίνης, η γωνιακή ορμή (rV_{θ}) είναι σταθερή σε όλη τη ροή. Αυτό το προφίλ προέρχεται από την υπόθεση ότι καμία εξωτερική δύναμη, εκτός από φυγοκεντρικές δυνάμεις, δεν δρουν στο ρευστό. Η εφαπτομενική ταχύτητα μειώνεται όσο αυξάνεται η ακτίνα ($V_{\theta} \propto 1/r$).

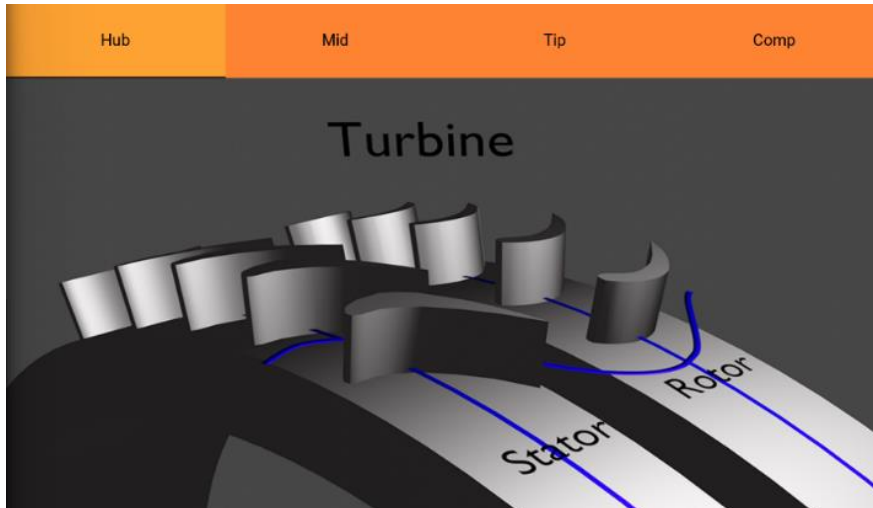
Το προφίλ ελεύθερης δίνης είναι γενικά η καταλληλότερη επιλογή για αξονικούς στρόβιλους, ιδιαίτερα όταν η απόδοση είναι προτεραιότητα. Αυτό το προφίλ ευθυγραμμίζεται με τις φυσικές αρχές της διατήρησης της γωνιακής ορμής, οδηγώντας σε μια πιο αποτελεσματική μεταφορά ενέργειας και μια πιο ομοιόμορφη κατανομή του έργου κατά μήκος των πτερυγίων του στροβίλου. Έχει ως αποτέλεσμα μικρότερες απώλειες λόγω διαχωρισμού ροής και ανομοιόμορφης κατανομής έργου, οι οποίες είναι πιο πιθανές σε σταθερή γωνία ή προφίλ εξαναγκασμένης δίνης.



Εικόνα 3.3.2.3: Προφίλ ταχυτήτων στο VTAA.

Ακολουθώντας την μεθοδολογία και το τυπολόγιο που χρησιμοποιήθηκε παραπάνω, η εφαρμογή καταλήγει στα παρακάτω αποτελέσματα σε σύγκριση με τα υπολογιζόμενα και το πιο σημαντικό, αποδίδει γεωμετρικά τα τρίγωνα ταχυτήτων για την βάση, το μέσο και την ακμή του πτερυγίου.

Στην επόμενη σελίδα φαίνονται αναλυτικά όλα τα χαρακτηριστικά της ροής για τα τρία μέρη των πτερυγίων του στροβίλου.

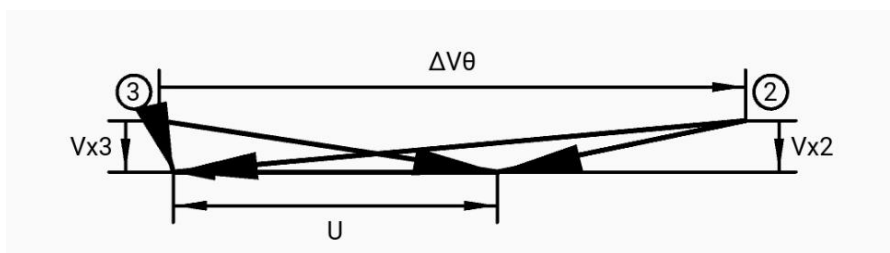


Εικόνα 3.3.2.4: Ροή του ρευστού στην βάση των περηνών του αξονικού στροβίλου.

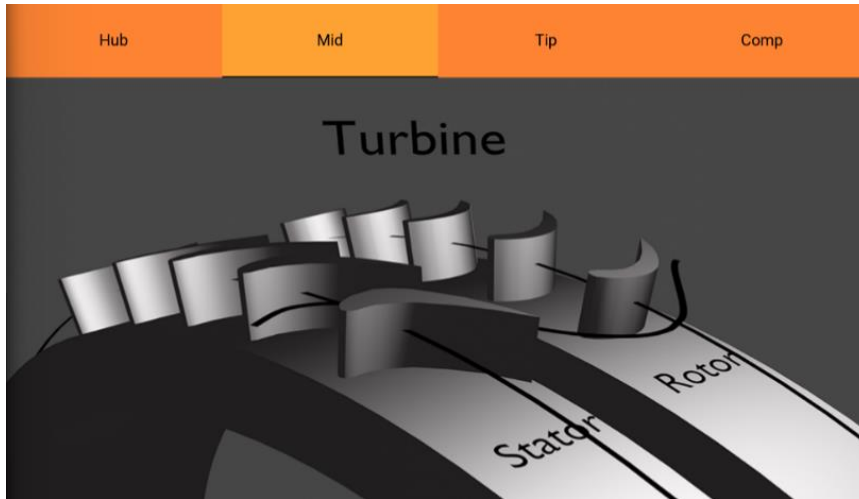
Hub Velocity Triangles

Coefficients and Angles			Dimensional Velocities		
Loading Coefficient ψ :	1.81	[-]	Hub rotational speed U_h	410.667	[m/s]
Flow Coefficient φ_3 :	0.158	[-]	Axial Velocity at stage 3 V_{x3}	64.68	[m/s]
Flow Coefficient φ_2 :	0.158	[-]	Axial Velocity at stage 2 V_{x2}	64.68	[m/s]
Reaction Coefficient R_n :	0.139	[-]	Exit relative velocity V_3	67.187	[m/s]
Inlet absolute angle α_1 :	---	[°]	Exit absolute velocity V_2	727.921	[m/s]
Exit absolute angle α_2 :	84.902	[°]	Exit relative velocity W_3	433.699	[m/s]
Inlet absolute angle α_3 :	-15.701	[°]	Exit relative velocity W_2	320.96	[m/s]
Inlet relative angle β_1 :	---	[°]	Absolute rotary velocity $V_{\theta 3}$	-18.182	[m/s]
Exit relative angle β_2 :	78.374	[°]	Absolute rotary velocity $V_{\theta 2}$	725.042	[m/s]
Inlet relative angle β_3 :	-81.423	[°]	Relative rotary velocity $W_{\theta 3}$	-428.848	[m/s]
			Absolute rotary velocity $W_{\theta 2}$	314.375	[m/s]
			Difference of rotary velocity DV_{θ}	743.223	[m/s]

Εικόνα 3.3.2.5: Τιμές των ταχυτήτων και γωνιών εισόδου/εξόδου για την βάση του περηνίου.



Εικόνα 3.3.2.6: Τρίγωνο ταχυτήτων για την βάση του περηνίου.

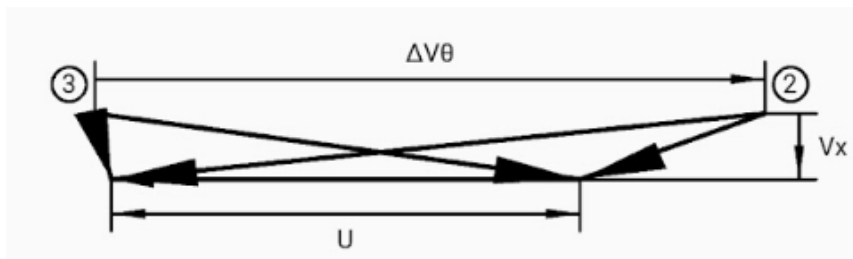


Εικόνα 3.3.2.7: Ροή του ρευστού στην μέση των περυγίων του αξονικού στροβίλου.

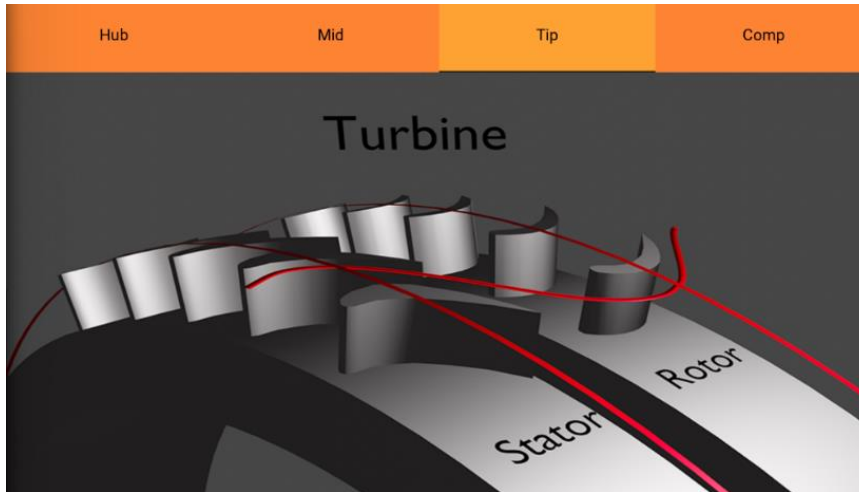
Middle Velocity Triangles

Coefficients and Angles			Dimensional Velocities		
Loading Coefficient ψ :	1.43	[-]	Middle rotational speed U_m	462.0	[m/s]
Flow Coefficient ϕ :	0.14	[-]	Axial Velocity V_x	64.68	[m/s]
Reaction Coefficient R_n :	0.32	[-]	Exit relative velocity V_3	66.671	[m/s]
Inlet absolute angle α_1 :	---	[°]	Exit absolute velocity V_2	647.719	[m/s]
Exit absolute angle α_2 :	84.269	[°]	Exit relative velocity W_3	482.549	[m/s]
Inlet absolute angle α_3 :	-14.036	[°]	Exit relative velocity W_2	193.612	[m/s]
Inlet relative angle β_1 :	---	[°]	Absolute rotary velocity $V_{\theta 3}$	-16.17	[m/s]
Exit relative angle β_2 :	70.484	[°]	Absolute rotary velocity $V_{\theta 2}$	644.482	[m/s]
Inlet relative angle β_3 :	-82.297	[°]	Relative rotary velocity $W_{\theta 3}$	-478.195	[m/s]
			Absolute rotary velocity $W_{\theta 2}$	182.489	[m/s]
			Difference of rotary velocity DV_{θ}	660.66	[m/s]

Εικόνα 3.3.2.8: Τιμές των ταχυτήτων και γωνιών εισόδου/εξόδου για την μέση του περυγίου.



Εικόνα 3.3.2.9: Τρίγωνο ταχυτήτων για το μέσω του περυγίου.

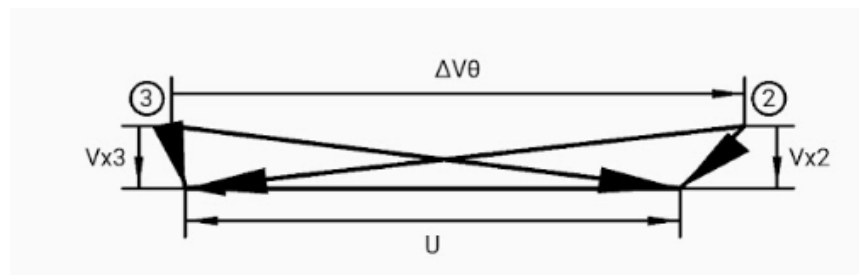


Εικόνα 3.3.2.10: Ροή του ρευστού στην ακμή των περυγίων του αξονικού στροβίλου.

Tip Velocity Triangles

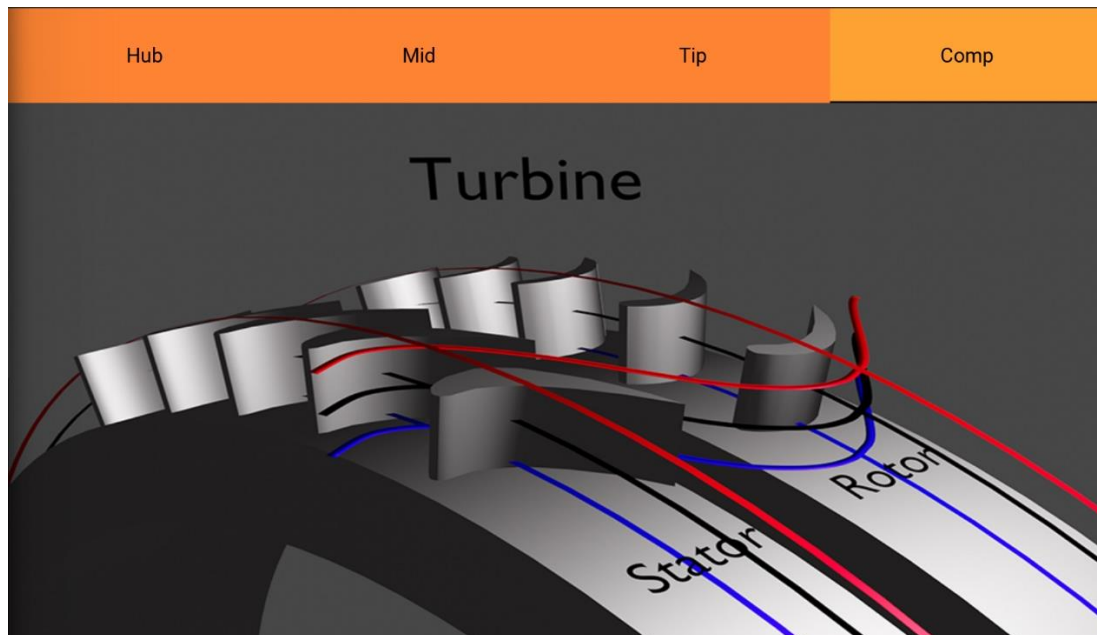
Coefficients and Angles			Dimensional Velocities		
Loading Coefficient ψ :	1.158	[-]	Tip rotational speed U_t	513.333	[m/s]
Flow Coefficient φ_3 :	0.126	[-]	Axial Velocity at stage 3 V_{x3}	64.68	[m/s]
Flow Coefficient φ_2 :	0.126	[-]	Axial Velocity at stage 2 V_{x2}	64.68	[m/s]
Reaction Coefficient R_n :	0.449	[-]	Exit relative velocity V_3	66.295	[m/s]
Inlet absolute angle α_1 :	---	[°]	Exit absolute velocity V_2	583.628	[m/s]
Exit absolute angle α_2 :	83.637	[°]	Exit relative velocity W_3	531.827	[m/s]
Inlet absolute angle α_3 :	-12.674	[°]	Exit relative velocity W_2	92.911	[m/s]
Inlet relative angle β_1 :	---	[°]	Absolute rotary velocity $V_{\theta 3}$	-14.545	[m/s]
Exit relative angle β_2 :	45.881	[°]	Absolute rotary velocity $V_{\theta 2}$	580.033	[m/s]
Inlet relative angle β_3 :	-83.014	[°]	Relative rotary velocity $W_{\theta 3}$	-527.879	[m/s]
			Absolute rotary velocity $W_{\theta 2}$	66.7	[m/s]
			Difference of rotary velocity DV_{θ}	594.579	[m/s]

Εικόνα 3.3.2.11: Τιμές των ταχυτήτων και γωνιών εισόδου/εξόδου για την ακμή του περυγίου.

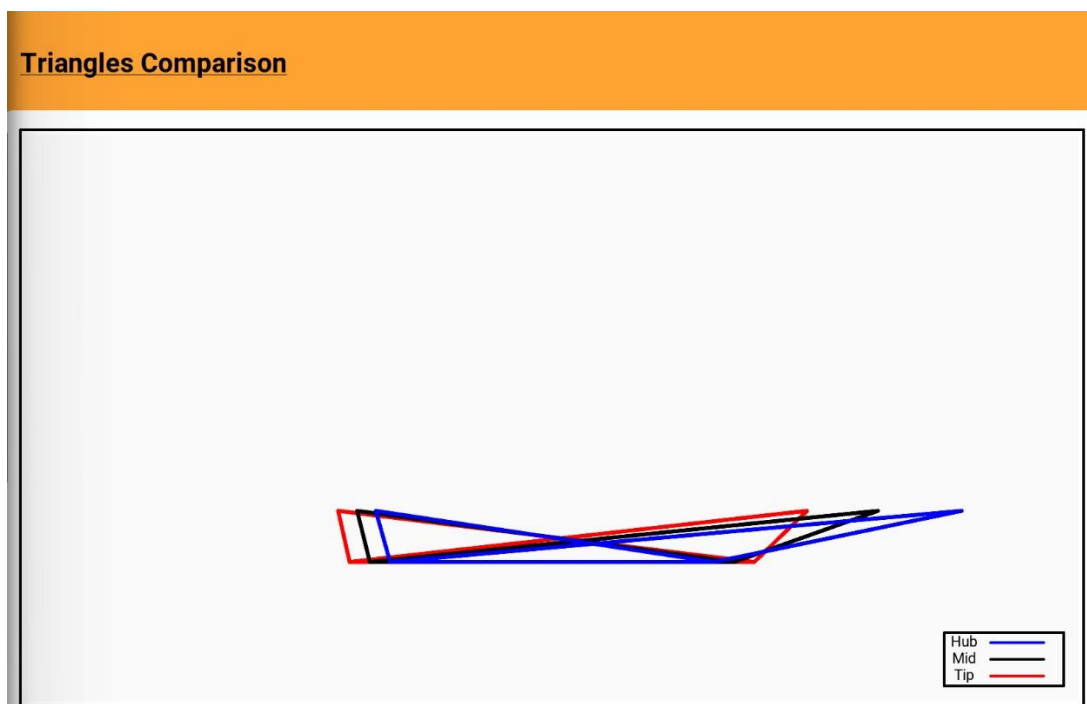


Εικόνα 3.3.2.12: Τρίγωνο ταχυτήτων για το μέσο του περυγίου.

Όλα τα παραπάνω γραφήματα μπορούν να «στοιβαχθούν» ώστε να έχουμε πλήρη εικόνα της μετάβασης των τριγώνων ταχυτήτων και της μορφολογίας των πτερυγίων καθ' όλο το ύψος τους.

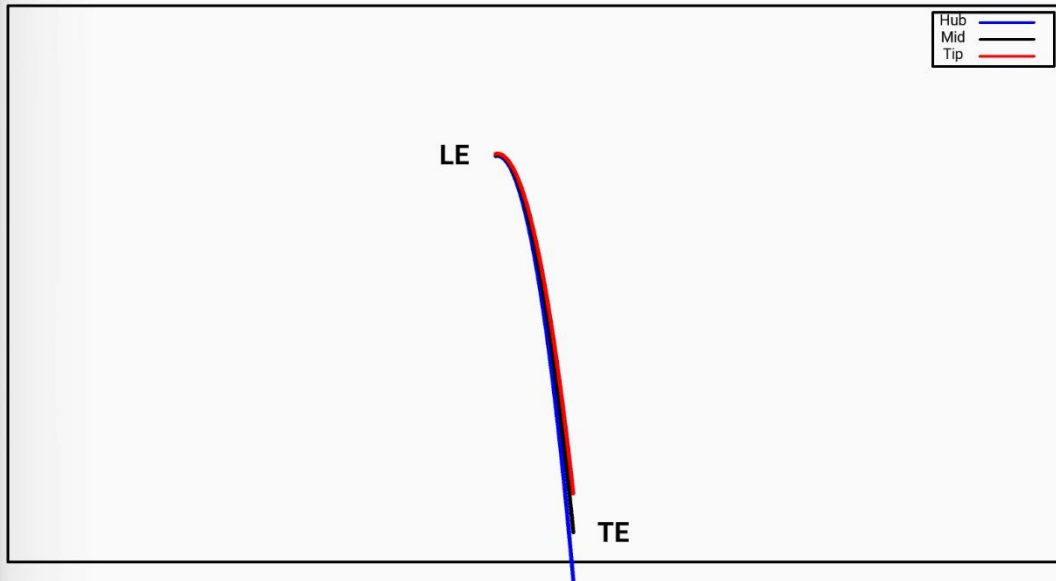


Εικόνα 3.3.2.13: Ροή του ρευστού σε όλο το ύψος των πτερυγίων του αξονικού στροβίλου.



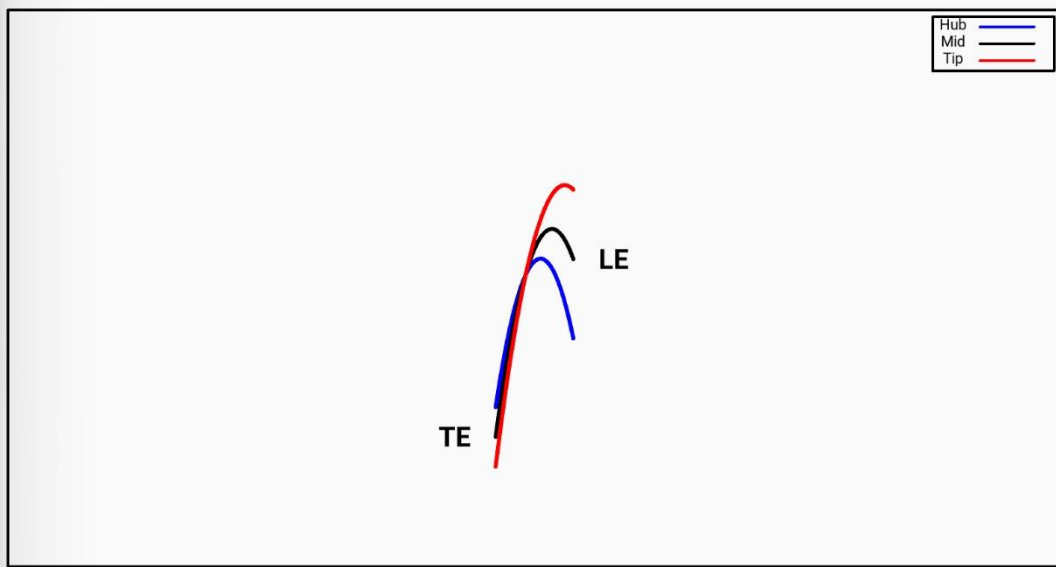
Εικόνα 3.3.2.14: Τρίγωνα ταχυτήτων καθ' όλο το ύψος του πτερυγίου.

Stator mean camber lines



Εικόνα 3.3.2.15: Καμπή πτερυγίων στάτορα.

Rotor mean camber lines



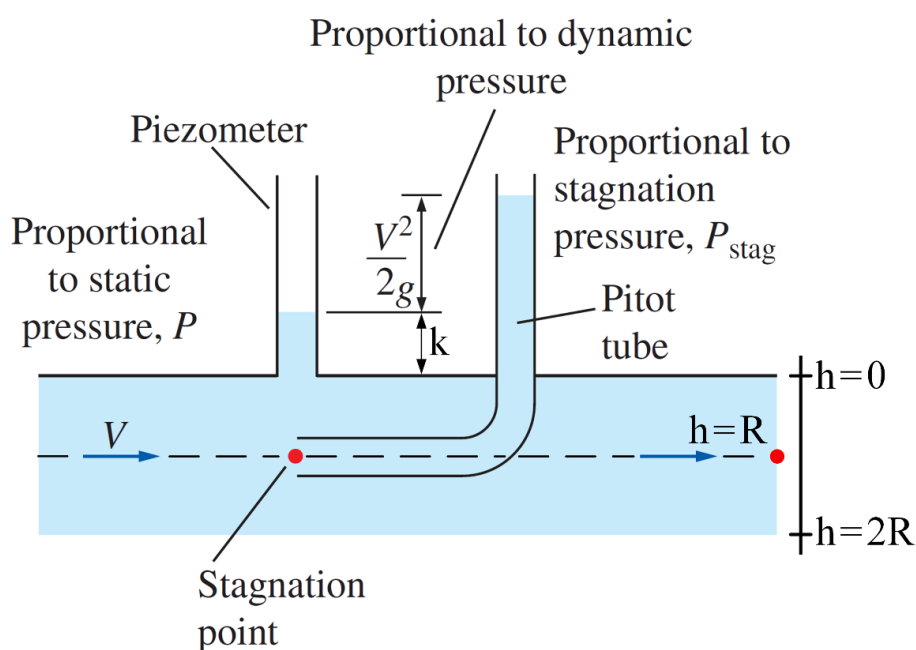
Εικόνα 3.3.2.16: Καμπή πτερυγίων ρότορα.

Στις παραπάνω εικόνες φαίνεται και η «ραχοκοκαλιά» των πτερυγίων. Έτσι, αντιλαμβανόμαστε πλήρως την κλίση καμψής των πτερυγίων του στάτορα και του ρότορα.

3.4 ΟΛΙΚΑ ΚΑΙ ΣΤΑΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ

Τα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά της ροής στον στρόβιλο μπορούν να χωριστούν σε τρεις κύριες κατηγορίες, σε στατικά, ολικά και σχετικά.

- Οι **στατικές ιδιότητες** αναφέρονται στη θερμοδυναμική κατάσταση ενός ρευστού σε ένα δεδομένο σημείο του χώρου, υποθέτοντας ότι το ρευστό βρίσκεται σε ηρεμία σε σχέση με αυτό το σημείο.
Για παράδειγμα, η θερμοκρασία του ρευστού όπως μετριέται από ένα θερμόμετρο που κινείται μαζί με το ρευστό (δηλαδή βρίσκεται σε ηρεμία σε σχέση με το ρευστό και επομένως δεν επηρεάζεται από την κίνηση του ρευστού).
- Οι **ολικές ιδιότητες** αναφέρονται στην κατάσταση του ρευστού όταν αυτό τίθεται σε ηρεμία αδιαβατικά (χωρίς ανταλλαγή θερμότητας) από μια κινούμενη κατάσταση. Αυτές οι ιδιότητες περιλαμβάνουν τόσο την εσωτερική ενέργεια όσο και την κινητική ενέργεια του ρευστού.
Για παράδειγμα, η θερμοκρασία που θα είχε το ρευστό εάν σταματούσε πλήρως ισημερινά. Υπολογίζει τόσο τη στατική θερμοκρασία όσο και την κινητική ενέργεια του ρευστού λόγω της ταχύτητάς του.
- Οι **σχετικές ιδιότητες** χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τη θερμοδυναμική κατάσταση ενός ρευστού από ένα πλαίσιο αναφοράς που κινείται σε σχέση με το ρευστό. Αυτές οι ιδιότητες είναι ιδιαίτερα σημαντικές σε περιστρεφόμενα μηχανήματα, όπως στρόβιλους, συμπιεστές και αντλίες, όπου η ροή του ρευστού πρέπει να αναλυθεί τόσο στο ακίνητο πλαίσιο (συνήθως ονομάζεται απόλυτο πλαίσιο) όσο και στο περιστρεφόμενο πλαίσιο (που ονομάζεται σχετικό πλαίσιο).



Εικόνα 3.3.2.1: Διαφορά μεταξύ στατικής πίεσης, δυναμικής πίεσης και ολικής πίεσης (Yunus A. Çengel and John M. Cimbala, 2014).

Από την θερμοδυναμική ανάλυση ολόκληρου του κύκλου γνωρίζουμε ήδη τα ολικά μεγέθη εισόδου και εξόδου του στροβίλου, όπως φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 3.4.1: Γνωστά ολικά μεγέθη στροβίλου.

Ολική ενθαλπία εισόδου στάτορα	$h_{t01} = h_5$	1035	kJ/kg
Ολική ενθαλπία εξόδου στάτορα	h_{t02}	1035	
Ολική ενθαλπία εξόδου ρότορα	$h_{t03} = h_6$	919	
Ολική πίεση εισόδου στάτορα	$P_{t01} = P_5$	20	MPa
Ολική πίεση εξόδου στάτορα	P_{t02}	16,1	
Ολική πίεση εξόδου ρότορα	$P_{t03} = P_6$	7,8	

Η ολική ενθαλπία εξόδου του στάτορα είναι η ίδια με αυτή της εισόδου γιατί στον στάτορα δεν παράγεται έργο, ενώ για την ολική πίεση εξόδου στάτορα υπολογίστηκαν πρώτα οι στατικές πιέσεις εισόδου/εξόδου και στην συνέχεια χρησιμοποιήθηκε η τροποποιημένη έκδοση της εξίσωσης του βαθμού αντίδρασης.

Εξίσωση 3.4.1: Στατική πίεση

$$P_{t1} = P_{t01} - \rho_5 * \frac{c_1^2}{2}$$

Αντίστοιχα, υπολογίζεται η στατική πίεση και για την έξοδο του ρότορα, ενώ για το μεταβατικό στάδιο από τον στάτορα στον ρότορα, με βάση τον Dixon (2014), χρησιμοποιούμε τον βαθμό αντίδρασης.

Εξίσωση 3.4.2: Αναλογία πιέσεων

$$R \approx \frac{P_{t2} - P_{t3}}{P_{t1} - P_{t3}}$$

Έτσι, προκύπτει ο πίνακας με τις στατικές πιέσεις.

Πίνακας 3.4.2: Στατικές πιέσεις στροβίλου.

Στατική πίεση εισόδου στάτορα	P_{t1}	19,8	MPa
Στατική πίεση εξόδου στάτορα	P_{t2}	11,5	
Στατική πίεση εξόδου ρότορα	P_{t3}	7,5	

Βασίζόμενοι στις στατικές πιέσεις μπορούμε να εξάγουμε και τις σχετικές πιέσεις, με την χρήση του παρακάτω τύπου.

Εξίσωση 3.4.3: Σχετική πίεση

$$P_{t02,rel} = P_{t2} + \rho_{avg} * \frac{w_2^2}{2}$$

Έτσι, προκύπτει ο πίνακας με τις σχετικές πιέσεις.

Πίνακας 3.4.3: Σχετικές πιέσεις στροβίλου.

Σχετική πίεση εξόδου στάτορα	$P_{t02,rel}$	12,2	MPa
Σχετική πίεση εξόδου ρότορα	$P_{t03,rel}$	11,6	

Επόμενο βήμα αποτελεί ο υπολογισμός των ολικών, στατικών και σχετικών θερμοκρασιών και ενθαλιών. Για να γίνει αυτό θα χρειαστούμε την θερμοχωρητικότητα στην είσοδο/έξοδο του στάτορα και ρότορα το οποίο γίνεται με την βοήθεια του Refprop, έχοντας ως σημεία προσδιορισμού τις ολικές ενθαλπίες και τις ολικές πιέσεις.

Πίνακας 3.4.4: Θερμοχωρητικότητες στροβίλου.

Θερμοχωρητικότητα εισόδου στάτορα	Cp_1	1,24	kJ/kgK
Θερμοχωρητικότητα εξόδου στάτορα	Cp_2	1,22	
Θερμοχωρητικότητα εξόδου ρότορα	Cp_3	1,17	

Για τον προσδιορισμό των στατικών ενθαλιών χρησιμοποιούμε τον τύπο που αντιπροσωπεύει την ολική ενθαλία.

Εξίσωση 3.4.4: Ολική ενθαλία (Εκδοχή 1)

$$h_{t01} = h_{t1} + \frac{c_1^2}{2}$$

Έτσι, προκύπτει ο πίνακας με τις στατικές ενθαλπίες.

Πίνακας 3.4.5: Στατικές ενθαλπίες στροβίλου.

Στατική ενθαλία εισόδου στάτορα	h_{t1}	1034	kJ/kg
Στατική ενθαλία εξόδου στάτορα	h_{t2}	955	
Στατική ενθαλία εξόδου ρότορα	h_{t3}	913	
Στατική ισεντροπική ενθαλία εξόδου ρότορα	h_{t3s}	893	

Μέσα από τον Πίνακα 3.1.2 & 3.4.5 απομονώνουμε τα στοιχεία της στατικής ενθαλπίας, της σχετικής και περιστροφικής ταχύτητας ώστε να υπολογίσουμε την «Rothalpy» (I). Η «Rothalpy», δηλαδή η περιστροφική ενθαλία, είναι μια μηχανική ιδιότητα σημαντική στη μελέτη της ροής εντός του στροβίλου. Αυτή η ιδιότητα είναι ιδιαίτερα χρήσιμη κατά την ανάλυση της ροής του ρότορα, επειδή παραμένει σταθερή κατά μήκος της γραμμής ροής στα περιστρεφόμενα περύγια (Agromayor and Nord, 2019).

Εξίσωση 3.4.5: Rothalpy

$$I = h_{t0,rel} - \frac{u^2}{2} = h_t + \frac{w^2}{2} - \frac{u^2}{2}$$

Έτσι προκύπτει η Rothalpy η οποία έχει την ίδια τιμή για την είσοδο και έξοδο του ρότορα για έναν αξονικό στρόβιλο, διότι κάτω από σταθερές, αδιάκριτες και αδιαβατικές συνθήκες, καμία εξωτερική εργασία ή μεταφορά θερμότητας δεν αλλάζει αυτή τη συνολική ενέργεια.

Πίνακας 3.4.6: Rothalpy στροβίλου.

Rothalpy	$I_2 = I_3$	921,6	kJ/kg
----------	-------------	-------	-------

Τέλος, μία άλλη εκδοχή της Εξίσωσης 3.4.1 είναι αυτή που περιλαμβάνει την θερμοχωρητικότητα και την θερμοκρασία, απ' όπου μπορούμε να εξάγουμε τις ολικές και στατικές θερμοκρασίες.

Εξίσωση 3.4.6: Ολική ενθαλπία (Εκδοχή 2)

$$h_{t01} = Cp_1 * T_{t01}$$

Έτσι, προκύπτει ο πίνακας με τις ολικές και στατικές θερμοκρασίες.

Πίνακας 3.4.7: Στατικές και ολικές θερμοκρασίες στροβίλου.

Ολική ενθαλπία εισόδου στάτορα	T_{t01}	834,1	
Ολική ενθαλπία εξόδου στάτορα	T_{t02}	842,1	
Ολική ενθαλπία εξόδου ρότορα	T_{t03}	783,8	
Ολική ισεντροπική ενθαλπία εξόδου ρότορα	T_{t03s}	699,2	
Στατική ενθαλπία εισόδου στάτορα	T_{t1}	833,7	
Στατική ενθαλπία εξόδου στάτορα	T_{t2}	797,7	K
Στατική ισεντροπική ενθαλπία εξόδου στάτορα	T_{t2s}	734,3	
Στατική ενθαλπία εξόδου ρότορα	T_{t3}	781,5	
Στατική ισεντροπική ενθαλπία εξόδου ρότορα	T_{t3s}	694,5	
Στατική διπλά ισεντροπική ενθαλπία εξόδου ρότορα (προερχόμενη από την T_{t2s})	T_{t3ss}	739,8	

3.5 ΑΠΟΔΟΣΗ

Στο πλαίσιο ενός αξονικού στροβίλου, η συνολική προς την συνολική (Total-to-Total) απόδοση και η συνολική προς την στατική (Total-to-Static) απόδοση είναι δύο βασικά μέτρα απόδοσης που περιγράφουν πόσο αποτελεσματικά ο στρόβιλος μετατρέπει την ενέργεια της εισερχόμενης ροής σε χρήσιμο έργο (H.I.H. Saravanamuttoo et al., 2016).

Η συνολική-προς-συνολική απόδοση (η_{tt}) μετρά πόσο καλά ο στρόβιλος μετατρέπει τη συνολική ενέργεια (τόσο την κινητική όσο και τη θερμική) στο εισερχόμενο ρευστό στη συνολική ενέργεια στο εξερχόμενο ρευστό. Συγκρίνει τη συνολική μεταβολή ενθαλπίας (μεταξύ εισόδου και εξόδου) με την ισεντροπική αλλαγή ενθαλπίας που θα συνέβαινε σε έναν ιδανικό στρόβιλο χωρίς απώλειες.

Εξίσωση 3.5.1: Συνολική-προς-συνολική απόδοση

$$\eta_{tt} = \frac{h_{t01} - h_{t03}}{h_{t01} - h_{t03s}}$$

Η συνολική-προς-στατική απόδοση (η_{ts}) μετρά πόσο αποτελεσματικά ο στρόβιλος μετατρέπει τη συνολική ενέργεια στο εισερχόμενο ρευστό στη στατική ενέργεια στο εξερχόμενο ρευστό. Συγκρίνει τη συνολική μεταβολή της ενθαλπίας με την ισεντροπική μεταβολή στη στατική ενθαλπία. Εδώ, η εστίαση είναι στις στατικές συνθήκες στην έξοδο, οι οποίες είναι κρίσιμες όταν η κινητική ενέργεια της ροής εξόδου δεν χρησιμοποιείται ή θεωρείται απώλεια (π.χ. για σκοπούς παραγωγής ενέργειας όπου η ταχύτητα εξόδου ελαχιστοποιείται ιδανικά).

Εξίσωση 3.5.2: Συνολική-προς-στατική απόδοση

$$\eta_{ts} = \frac{h_{t01} - h_{t03}}{h_{t01} - h_{t3}}$$

Χρησιμοποιώντας τους παραπάνω τύπους και αντικαθιστώντας με τις αντίστοιχες ενθαλπίες, διαμορφώνουμε τον παρακάτω πίνακα

Πίνακας 3.5.1: Σχετικές πιέσεις στροβίλου.

Συνολική-προς-συνολική απόδοση	η_u	85,0	%
Συνολική-προς-στατική απόδοση	η_{ts}	95,9	

3.6 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΤΡΟΒΙΛΟΥ

Το τελικό στάδιο στην ανάλυση και τον σχεδιασμό ενός στροβίλου είναι το να καταλήξουμε στις διαστάσεις του. Όλες οι προηγούμενες θερμοδυναμικές ιδιότητες που υπολογίσαμε μπορούμε να τις «μεταφράσουμε» σε γεωμετρικά χαρακτηριστικά του στροβίλου που θα μας επιτρέψουν να φέρουμε τον σχεδιασμό μας στην πραγματικότητα.

Κάποια γεωμετρικά χαρακτηριστικά όπως το χρήσιμο εμβαδόν και τις ακτίνες του στροβίλου τα έχουμε ήδη καταχωρήσει στον Πίνακα 3.6.1. Χρησιμοποιώντας αυτά τα δεδομένα, μπορούμε να καθορίσουμε πιο συγκεκριμένα την μορφολογία του στροβίλου.

Οι λόγοι h_b / w και h_b / c χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του πλάτους του πτερυγίου και της χορδής για τον στάτορα και για τον ρότορα. Ξεκινώντας από το ύψος του πτερυγίου, έχουμε:

Εξίσωση 3.6.1: Ύψος πτερυγίου

$$h_b = r_t - r_h$$

Ο σχεδιασμός του πτερυγίου για τον στάτορα και τον ρότορα απαιτεί τις γεωμετρικές εισόδους που αναφέρονται στην Εικόνα 3.6.1, με το σχετικό εύρος τιμών τους. Αξίζει να αναφερθεί ότι για τους συμβατικούς αεριοστρόβιλους, ο λόγος διαστάσεων (aspect ratio) είναι συνήθως μεταξύ 3 και 4. Ωστόσο, οι αεριοστρόβιλοι sCO₂ είναι εξαιρετικά μικροί που συνεπάγεται σε τιμές κάτω από 1, γεγονός που μερικές φορές προκαλεί πτώση της απόδοσης. Η απόδοση του στροβίλου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την επιλογή όλων των παραμέτρων που αναφέρονται, επομένως πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα στην επιλογή τους. Επιπλέον, οι εισόδοι επιλέγονται ως σταθερές και ίδιες για κάθε στάδιο (Dostal et al., 2006).

Εξίσωση 3.6.2: Μήκος χορδής

$$c = h_b / AR$$

Μεταξύ των παραμέτρων που επηρεάζουν την απόδοση του στροβίλου, ο λόγος βήματος-χορδής s/c είναι αναμφίβολα σημαντικός: εάν τα πτερύγια έχουν μικρή απόσταση μεταξύ τους, το ρευστό οδηγείται στην πορεία του αλλά οι απώλειες τριβής είναι υψηλές. Αντίθετα, εάν η απόσταση είναι μεγάλη, τότε οι απώλειες τριβής είναι χαμηλές αλλά η ροή δεν καθοδηγείται καλά, με αποτέλεσμα τον διαχωρισμό. Για την εκτίμηση του λόγου βήματος/χορδής, χρησιμοποιείται το κριτήριο του Zweifel (Scaccabarozzi et al., 2022), το οποίο βασίζεται στις γωνίες ροής εισόδου και εξόδου για την εκτίμηση μιας βέλτιστης τιμής με βάση πειραματικά

δεδομένα. Η συσχέτιση αναφέρεται εδώ για τον ρότορα αλλά μπορεί να διαμορφωθεί ανάλογα και για τον στάτορα.

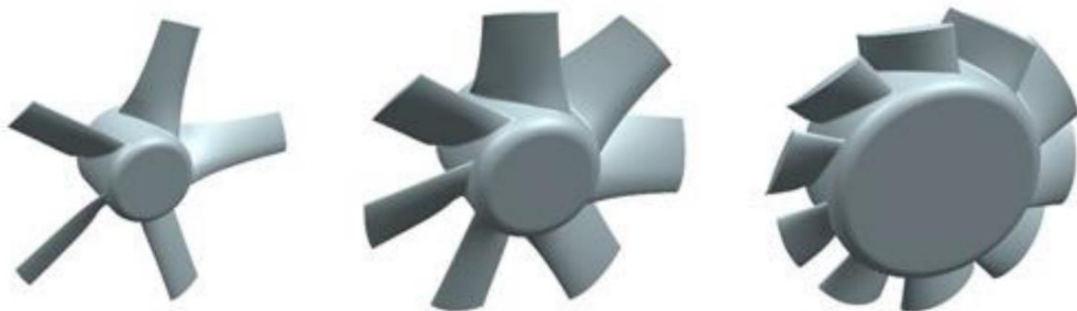
Εξίσωση 3.6.3: Αναλογία βήματος/χορδής

$$\frac{s}{c} = \frac{0,8}{2\cos\alpha_2(\tan\alpha_1 + \tan\alpha_2)}$$

Παρακάτω φαίνονται όλοι οι αδιάστατοι γεωμετρικοί συντελεστές που χρειάζονται ως αρχικές τιμές για τον υπολογισμό των υπόλοιπων γεωμετρικών χαρακτηριστικών.

Geometry inputs		
Aspect ratio	$\frac{h_b}{c}$	<1
Height/width ratio	$\frac{h_b}{w}$	2-3
Thickness/chord ratio	$\frac{t_b}{c}$	0.15 - 0.25
Tip clearance	cl	0 - 0.0025 m

Εικόνα 3.3.2.1: Εύρος επιλογής για τους εισαγωγικούς αδιάστατους συντελεστές που απαιτούνται στον ορισμό του περυγίου (Moroz et al., 2014).



Εικόνα 3.3.2.2: Τυπικές αξονικές περωτές με αυξανόμενη αναλογία πλήμνης προς άκρη από αριστερά προς τα δεξιά (κλασικό σχήμα λεπίδας) (Carolus and Bamberger, 2023).

Με βάση τον Moroz (2014) επιλέγουμε την τιμή των αρχικών μεγεθών, που είναι οι αδιάστατοι συντελεστές, όπως φαίνονται στον πίνακα παρακάτω.

Πίνακας 3.6.2: Εισαγωγικές τιμές γεωμετρίας.

Λόγος διαστάσεων	$h_b/c = AR$	0,7
Λόγος ύψους/πάχους	h_b/w	2
Λόγος πάχους/χορδής	t_b/c	0,2
Λόγος βήματος/χορδής	s/c	0,39
Διάκενο ακμής	cl	0,1 mm

Το διάκενο ακμής αντιπροσωπεύει το κενό μεταξύ την ακμή του περυγίου του κινούμενου μέλους (ρότορα) και του προστατευτικού κελύφους του στροβίλου.

Το τυπολόγιο που ακολουθεί μας οδηγεί στην εύρεση όλων των γεωμετρικών χαρακτηριστικών που απαιτούνται για τον καθορισμό της μορφολογίας του περυγίου.

Εξίσωση 3.6.4: Πάχος περυγίου

$$t_b = c * \frac{tb}{c}$$

Εξίσωση 3.6.5: Βήμα περυγίου

$$s = \frac{0,8}{2\cos\alpha_2(\tan\alpha_1 + \tan\alpha_2)} * c$$

Η συνήθης πρακτική είναι να υπάρχει ένας ζυγός αριθμός περυγίων του στάτορα και ένας πρώτος αριθμός για τα περύγια του ρότορα προκειμένου να αποφευχθούν οι συχνότητες συντονισμού.

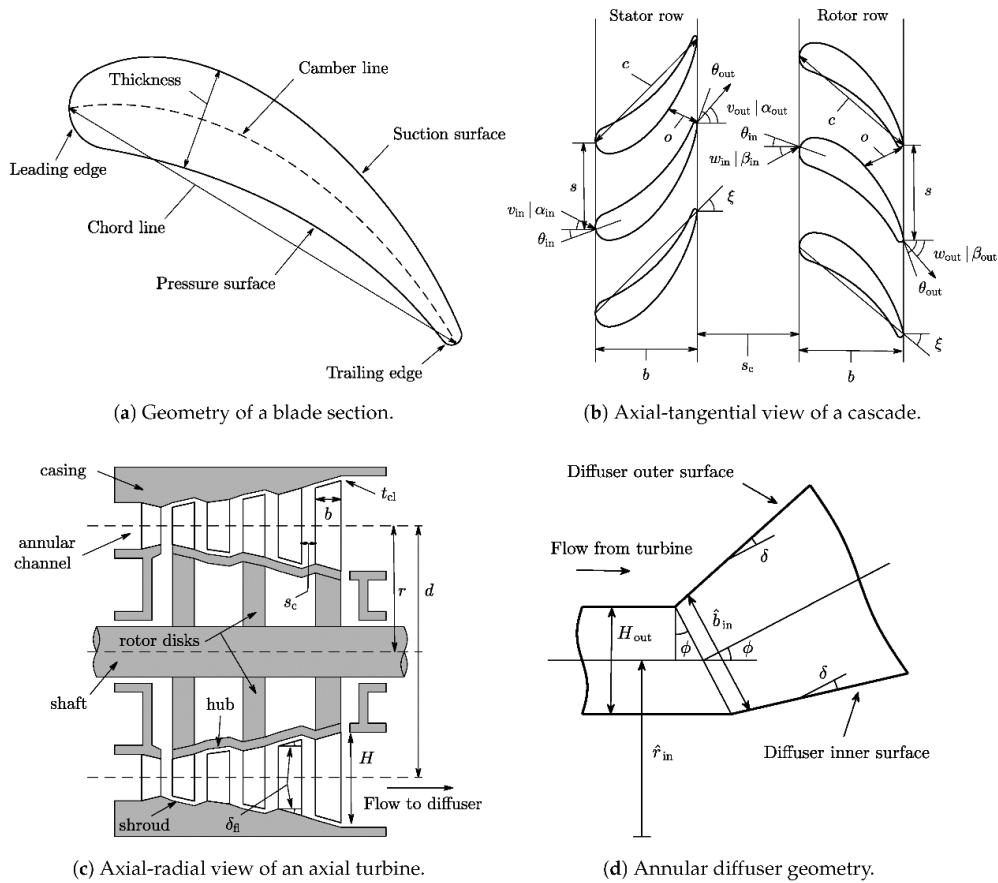
Εξίσωση 3.6.6: Αριθμός περυγίων

$$N_b = \frac{2\pi r_m}{s}$$

Συγκεντρώνοντας, όλες τις παραπάνω τιμές προκύπτει ο ακόλουθος πίνακας.

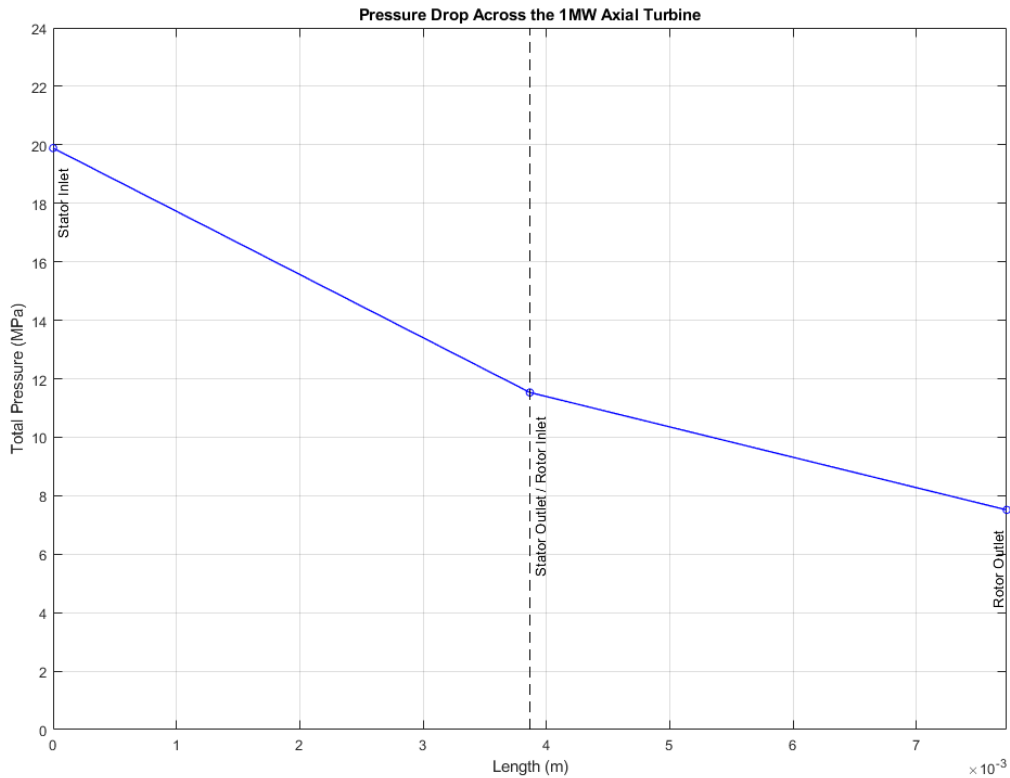
Πίνακας 3.6.3: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά

Λόγος διαστάσεων	$h_b/c = AR$	0,7	
Λόγος ύψους/πάχους	h_b/w	2	
Λόγος πάχους/χορδής	t_b/c	0,2	
Λόγος βήματος/χορδής	s/c	0,39	
Διάκενο ακμής	cl	0,1	mm



Εικόνα 3.3.2.3: Μορφολογία περυγίων στάτορα και ρότορα αξονικού στροβίλου (Agromayor and Nord, 2019).

Γνωρίζοντας, πλέον όλα τα θερμοδυναμικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά του στροβίλου αξίζει να εμφανίζουμε, μέσω του αλγόριθμου, την κατανομή πτώσης πίεσης κατά πλάτος των περυγίων του στάτορα και του ρότορα.



Διάγραμμα 3.3.2.1: Πτώση πίεσης όπως κατανέμεται στον στάτορα και στον ρότορα.

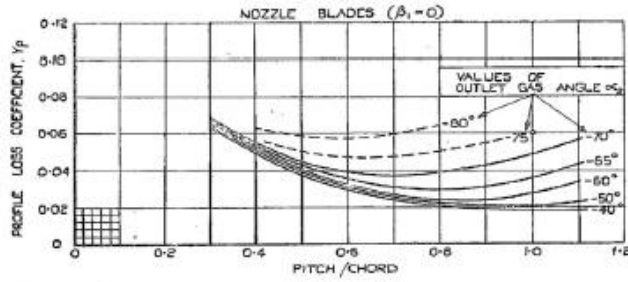
3.7 ΑΠΩΛΕΙΕΣ

Η μέθοδος που χρησιμοποιείται στην μελέτη αυτή για την εκτίμηση των απωλειών αναπτύχθηκε από τους Ainley και Mathieson (1957) για την εκτίμηση της απόδοσης του αξονικού στροβίλου με βάση τις μέσες τιμές γραμμής.

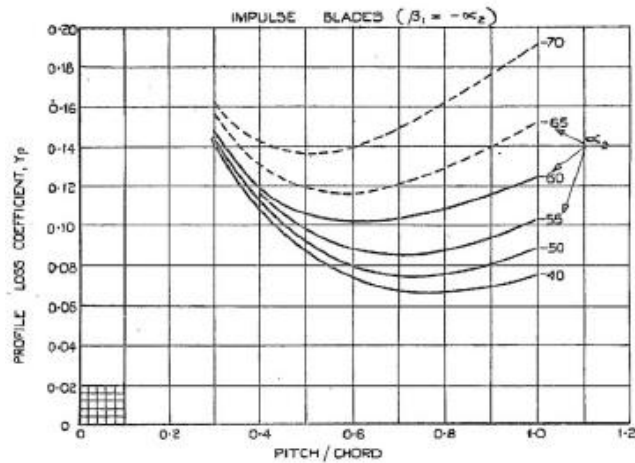
Στόχος της μεθοδολογίας αυτής είναι να υπολογίσουμε τις συνολικές απώλειες ροής του περυγίου, οι οποίες εμπεριέχουν κατά κύριο λόγο τις απώλειες προφίλ, τις δευτερεύουσες απώλειες και τις απώλειες διακένου.

3.7.1 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΠΡΟΦΙΛ

Βασιζόμενοι στην *Εικόνα 3.7.1* εξάγουμε τον συντελεστή απωλειών προφίλ, θεωρώντας αρχικά την σχετική γωνία εισόδου μηδέν και στην συνέχεια θεωρώντας τις σχετικές γωνίες εισόδου/εξόδου ίσες. Έτσι, θα προκύψουν συντελεστές απωλειών προφίλ για τις δύο περιπτώσεις που θα χρησιμεύσουν ως δείκτες στον υπολογισμό του πραγματικού συντελεστή απωλειών προφίλ.



(a) Nozzle blades: $\beta_2 = 0$



(b) Impulse blades: $\beta_2 = \beta_3$

Εικόνα 3.7.1.1: Συντελεστές απώλειες προφίλ για $i=0$, όταν (α) η σχετική γωνία εισόδου είναι μηδέν (β) οι σχετικές γωνίες εισόδου/εξόδου είναι ίσες.

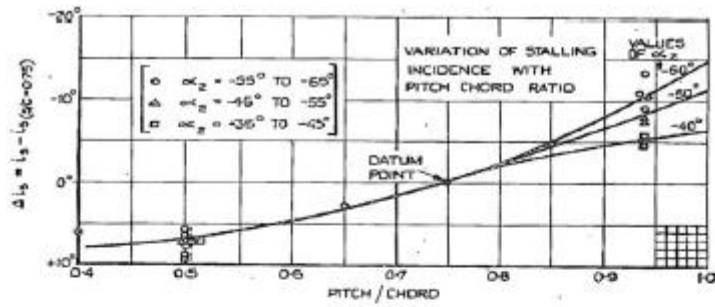
Χρησιμοποιούμε τους συντελεστές από το προηγούμενο βήμα στον παρακάτω τύπο. Η σχέση αυτή είναι για τον ρότορα αλλά αν αντικαταστήσουμε το β_2 με α_1 και β_3 με α_2 θα πάρουμε τις απώλειες προφίλ του στάτορα.

Εξίσωση 3.7.1: Πραγματικός συντελεστής απωλειών προφίλ.

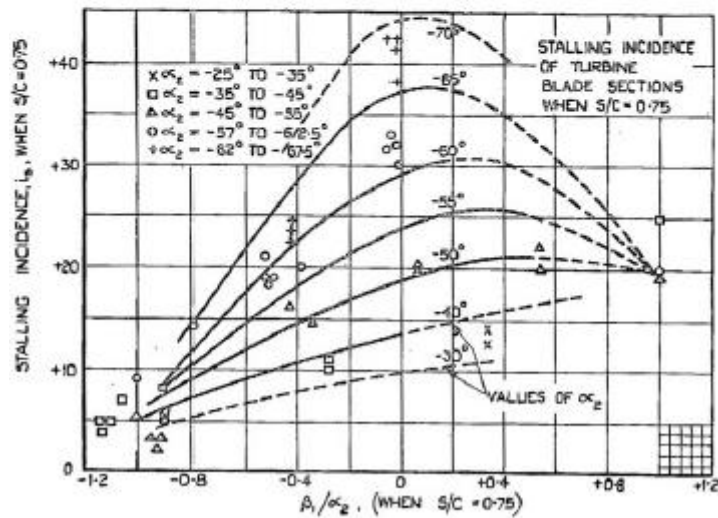
$$Y_{p,(i=0)} = \left\{ Y_{p,(\beta_2=0)} + \left(\frac{\beta_2}{\beta_3} \right)^2 * [Y_{p,(\beta_2=\beta_3)} - Y_{p,(\beta_2=0)}] \right\} \left(\frac{t}{0,2c} \right)^{\frac{\beta_2}{\beta_3}}$$

Επειδή για τον στάτορα θεωρούμε ότι έχουμε γωνία πρόσπτωσης $i = 0$, οι απώλειες προφίλ βγαίνουν για τον προαναφερθέντα τύπο. Στην περίπτωση του ρότορα όμως, η γωνία πρόσπτωσης συνήθως σχεδιάζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες σύμφωνα με την ακόλουθη διαδικασία.

Μια γωνία πρόσπτωσης $i_{(s,0,75)}$ υπολογίζεται αρχικά για την αναλογία βήματος/χορδής $s/c=0,75$ με βάση την Εικόνα 3.7.1.1(β).



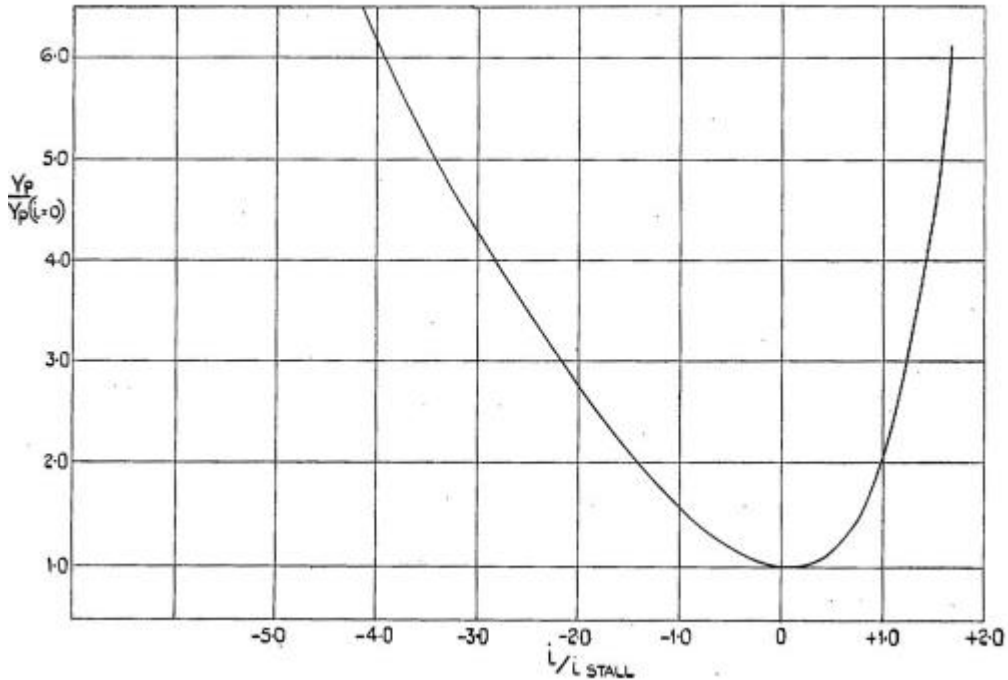
(a) Stalling incidence difference



(b) Stalling incidence for $\frac{s}{c} = 0.75$

Εικόνα 3.7.1.2: (α) Διαφορά αδράνειας αζονικού στροβίλου και (β) Αδράνεια αζονικού στροβίλου για $s/c = 0,75$.

Στη συνέχεια, η πραγματική αναλογία βήματος/χορδής χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της διαφοράς μεταξύ της πραγματικής γωνία πρόσπτωσης i_s και $i_{(s,0.75)}$ από την Εικόνα 3.7.1.2(α). Η πραγματική γωνία πρόσπτωσης του ρότορα υπολογίζεται με βάση την τιμή του i που αντιστοιχεί στον λόγο i/i_s που ελαχιστοποιεί την αναλογία μεταξύ των απωλειών προφίλ $Y_P/Y_{P,(i=0)}$, σύμφωνα με τη σχέση που προτείνεται στην Εξίσωση 3.7.1.1.



Εικόνα 3.7.1.3: Αντιστοιχία απώλειας προφίλ συνάρτηση της γωνίας πρόσπτωσης.

Τέλος, έχοντας το $Y_{P,(i=0)}$ του ρότορα, μπορεί να υπολογιστεί ο συντελεστής απώλειας προφίλ για τον ρότορα $Y_{P,r}$.

3.7.2 ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΥΣΕΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ

Στη συνέχεια, αξιολογούνται οι δευτερεύουσες απώλειες που οφείλονται στα οριακά στρώματα του τελικού τοιχώματος που προκαλούν περίπλοκες διατάξεις ροής. Ο τύπος που χρησιμοποιείται είναι ο παρακάτω

Εξίσωση 3.7.2: Δευτερεύουσες απώλειες.

$$Y_s = 0,0334N_b \left(\frac{c}{h_b} \right) \left(\frac{\cos\beta_3}{\cos\beta'_2} \right)$$

3.7.3 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΔΙΑΚΕΝΟΥ

Στη συνέχεια, υπολογίζονται οι απώλειες διακένου που αφορούν μόνο τον ρότορα γιατί εμφανίζονται το κενό μεταξύ της ακμής του πτερυγίου και το κέλυφος του στροβίλου.

Εξίσωση 3.7.3: Απώλειες διακένου.

$$Y_k = 0,25N_b \left(\frac{c}{h_b} \right) \left(\frac{cl}{c} \right)^{0,78}$$

Ο συντελεστής συνολικής απώλειας Y , όπως ορίζεται σε αυτό το υποκεφάλαιο, για το ακροφύσιο και για τον ρότορα, υπολογίζεται αθροίζοντας τις τιμές των απωλειών προφίλ, δευτερογενών και απωλειών διάκενου.

Εξίσωση 3.7.4: Συνολικές απώλειες.

$$Y_{\{\sigma\acute{\alpha}\tau\omicron\rho\alpha\}} = Y_{p_{\{i=0\}\{\sigma\acute{\alpha}\tau\omicron\rho\alpha\}}} + Y_{s_{\{\sigma\acute{\alpha}\tau\omicron\rho\alpha\}}}$$

$$Y_{\{\rho\acute{o}\tau\omicron\rho\alpha\}} = Y_{p_{\{i=0\}\{\rho\acute{o}\tau\omicron\rho\alpha\}}} + Y_{s_{\{\rho\acute{o}\tau\omicron\rho\alpha\}}} + Y_{k_{\{\rho\acute{o}\tau\omicron\rho\alpha\}}}$$

Συγκεντρώνοντας όλες τις τιμές έχουμε τον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 3.7.3.1: Απώλειες.

Συντελεστής απωλειών προφίλ για $\beta_2 = 0$	$Y_{\beta_2=0}$	0,05
Συντελεστής απωλειών προφίλ για $\beta_2 = \beta_3$	$Y_{\beta_2=\beta_3}$	0,14
Πραγματικός συντελεστής απωλειών προφίλ για στάτορα	$Y_{P,(i=0),s}$	0,0375
Συντελεστής απωλειών προφίλ για ρότορα	$Y_{P,(i=0),r}$	0,0381
Πραγματικός συντελεστής απωλειών προφίλ για ρότορα	$Y_{P,r}$	0,0951
Συντελεστής δευτερευόντων απωλειών για στάτορα	$Y_{S,s}$	0,26
Συντελεστής δευτερευόντων απωλειών για ρότορα	$Y_{S,r}$	0,52
Συντελεστής απωλειών διακένου για ρότορα	$Y_{k,r}$	0,47
Συντελεστής συνολικών απωλειών στάτορα	Y_s	0,29
Συντελεστής συνολικών απωλειών ρότορα	Y_r	1,07

3.8 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

Ένας επιπλέον τρόπος για την εκτίμηση των απωλειών του στροβίλου είναι να υπολογίσουμε τους συντελεστές απόδοσης για τον στάτορα και για τον ρότορα. Ορίζονται είτε ως $\lambda_{(N,R)}$, εάν είναι συναρτήσεις της ενθαλπίας και της ταχύτητας του ρευστού ή ως $Y_{(N,R)}$, εάν υπολογίζονται από τις τιμές της πίεσης. Και τα δύο χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της ποσότητας ενέργειας που χάνεται λόγω τριβής διέλευσης του ρευστού. Οι δείκτες N και R χρησιμοποιούνται για να υποδεικνύεται εάν ο συντελεστής αναφέρεται στον στάτορα (nozzle) ή στο ρότορα (rotor).

Εξίσωση 3.8.1: Συντελεστής απόδοσης στάτορα (μέσω ενθαλπίας)

$$\lambda_N = \frac{T_2 - T_{2s}}{\frac{c_2^2}{2 * Cp_2 * 1e3}}$$

Εξίσωση 3.8.2: Συντελεστής απόδοσης ρότορα (μέσω ενθαλπίας)

$$\lambda_R = \frac{T_3 - T_{3ss}}{\frac{c_3^2}{2 * Cp_3 * 1e3}}$$

Εξίσωση 3.8.3: Συντελεστής απόδοσης στάτορα (μέσω πίεσης)

$$Y_N = \frac{P_{01} - P_{02}}{P_{02} - P_2} \approx \lambda_N \frac{T_{02}}{T_2}$$

Εξίσωση 3.8.4: Συντελεστής απόδοσης ρότορα (μέσω πίεσης)

$$Y_R = \frac{P_{02,rel} - P_{03,rel}}{P_{03,rel} - P_3} \approx \lambda_r \frac{T_{03,rel}}{T_3}$$

Έχοντας πλέον τους συντελεστές απόδοσης μπορούμε να τους εισάγουμε στον εναλλακτικό τύπο της ισεντροπικής απόδοσης.

Εξίσωση 3.8.5: Ισεντροπική απόδοση

$$\eta_s = \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \frac{C_{ax}}{U} \left[\frac{\lambda_R \sec^2 \beta_3 + \left(\frac{T_3}{T_2}\right) \lambda_N \sec^2 \alpha_2}{\tan \beta_3 + \tan \alpha_2 - \left(\frac{U}{C_{ax}}\right)} \right]}$$

που συγκρίνεται με τον θερμοδυναμικό ορισμό της απόδοσης που υπολογίστηκε προωύτερα.

Πίνακας 3.8.1: Συντελεστές απόδοσης.

Συντελεστής απόδοσης στάτορα (μέσω ενθαλπίας)	λ_N	0,9528
Συντελεστής απόδοσης ρότορα (μέσω ενθαλπίας)	λ_R	0,6788
Συντελεστής απόδοσης στάτορα (μέσω πίεσης)	Y_N	0,8518
Συντελεστής απόδοσης ρότορα (μέσω πίεσης)	Y_R	0,1282
Ισεντροπική απόδοση	η_s	0,75

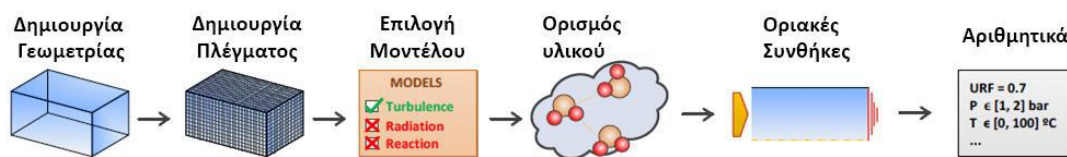
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΣΩ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ
ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΑΞΟΝΙΚΟΥ
ΣΤΡΟΒΙΛΟΥ**

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ως επόμενο βήμα της υπολογιστικής μεθόδου ανάλυσης και σχεδίασης του αξονικού στροβίλου που λειτουργεί με υπερκρίσιμο διοξείδιο του άνθρακα sCO_2 , ακολουθεί η μελέτη της βαθμίδας του αξονικού στροβίλου μέσω της χρήσης της υπολογιστικής ρευστομηχανικής (CFD). Το πρόγραμμα σχεδίασης και επίλυσης που χρησιμοποιείται είναι το γνωστό λογισμικό ANSYS, περιλαμβάνοντας τα επιμέρους υποπρογράμματα που είναι το ANSYS Bladegen σε συνεργασία με το CFturbo, όπου γίνεται η είσοδος των τιμών της γεωμετρίας που υπολογίστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο για την 2D απεικόνιση των πτερυγίων του στάτορα και του ρότορα, το ANSYS TurboGrid στο οποίο αναπαράγεται η 3D απεικόνιση των πτερυγίων από τα 2D μοντέλα, και στην συνέχεια παράγονται τα πλέγματα υψηλής ποιότητας και τέλος, το ANSYS CFX, το οποίο ως τελευταίο στην σειρά αποτελεί τον επιλυτή της μεθόδου.

Σημαντικό είναι να αναφερθεί σε αυτό το σημείο ότι παρόλο που η σχεδίαση του στάτορα και του ρότορα αποτελούν δύο ξεχωριστές αλλά παρόμοιες διαδικασίες, στο τέλος κατά την χρήση του επιλυτή αυτές οι δύο διαδικασίες συναντώνται καθώς οι υπολογιστικοί ρευστομηχανικοί μέθοδοι πρέπει να εφαρμοστούν σε ολόκληρη τη βαθμίδα. Στα επόμενα υποκεφάλαια, θα δοθεί ιδιαίτερη προσοχή και θα αναλυθεί λεπτομερειακά η λειτουργία κάθε εντολής και υποπρογράμματος ξεχωριστά, όπως και η διαδικασίες εισαγωγής και εξαγωγής των δεδομένων τους. Όπως φαίνεται και παρακάτω, η αρχική εικόνα της όλης διαδικασίας που θα ακολουθηθεί μέσω της σύνδεσης και συνεργασίας των παραπάνω υποπρογραμμάτων που αναφέρθηκαν είναι αλυσιδωτή.



Εικόνα 3.7.3.1: Διάγραμμα διαδικασίας υπολογιστικής ρευστομηχανικής (Σαρρής Β. Αλέξανδρος, 2017).

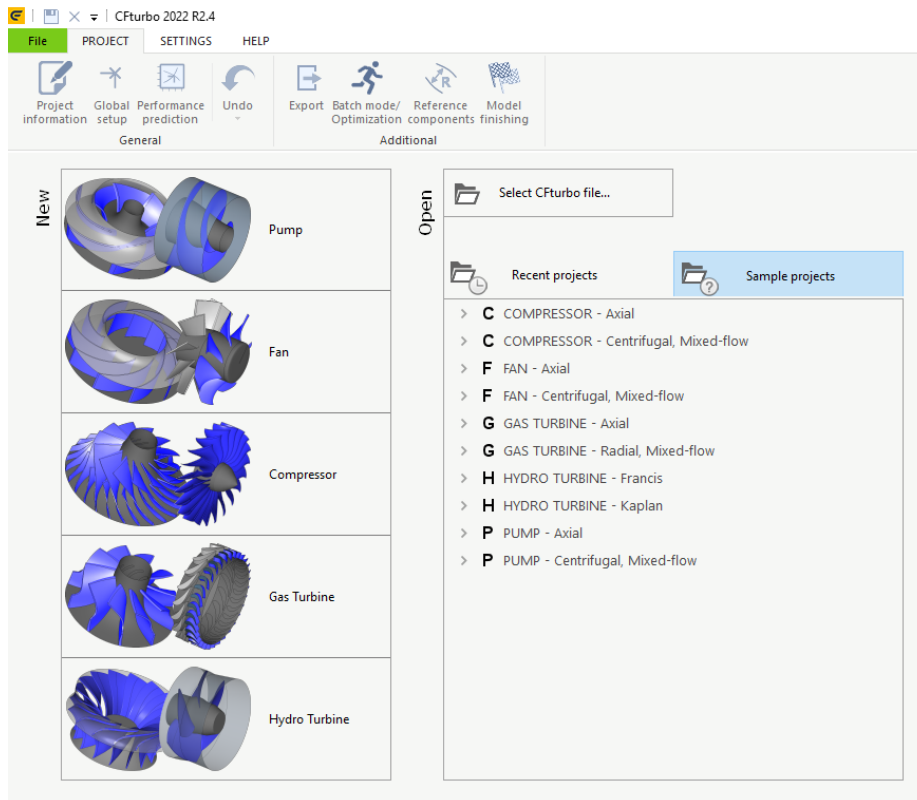
Τα βήματα που ακολουθήθηκαν όπως και η αναλυτική περιγραφή τους αναφέρεται στα επόμενα υποκεφάλαια.

4.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ

Κατά την αρχική σχεδίαση, υπάρχει η δυνατότητα μοντελοποίησης ενός πτερυγίου είτε σχεδιάζοντας το από την αρχή, είτε εισάγοντας το στο πρόγραμμα σε περίπτωση που τα σχέδια ήδη υπάρχουν. Στη μελέτη αυτή, η σχεδίαση των πτερυγίων του στροβίλου έγιναν στο 3^ο κεφάλαιο, οπότε η σχεδίαση θα ξεκινήσει με την εισαγωγή των προηγούμενων αριθμητικών δεδομένων και παραμέτρων στο υποπρόγραμμα μοντελοποίησης CFturbo και ANSYS Bladegen, το οποίο θα προσφέρει μία ταχύτερη και ακριβέστερη σχεδίαση.

4.2.1 CFturbo

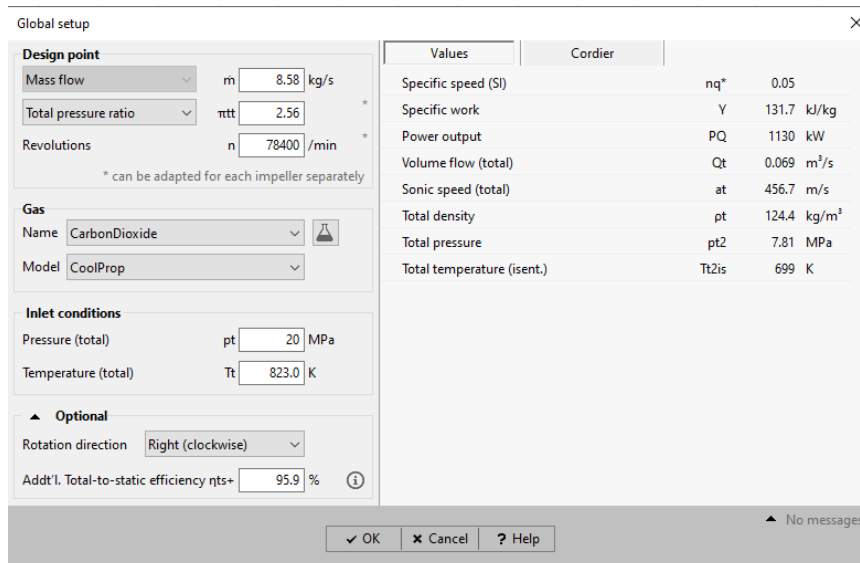
Το CFturbo είναι ένα εξειδικευμένο λογισμικό που χρησιμοποιείται για τον εννοιολογικό σχεδιασμό στροβιλομηχανών, το οποίο περιλαμβάνει εξαρτήματα όπως αντλίες, ανεμιστήρες, συμπιεστές και στροβίλους. Το πρόγραμμα είναι ιδιαίτερα χρήσιμο στη δημιουργία και τη βελτιστοποίηση αυτών των στοιχείων που επιτρέπει τόσο τη 2D όσο και 3D μοντελοποίηση.



Εικόνα 4.2.1.1: Αρχική οθόνη κατά την εισαγωγή στο CFturbo.

4.2.1.1 Αρχικές συνθήκες συστήματος

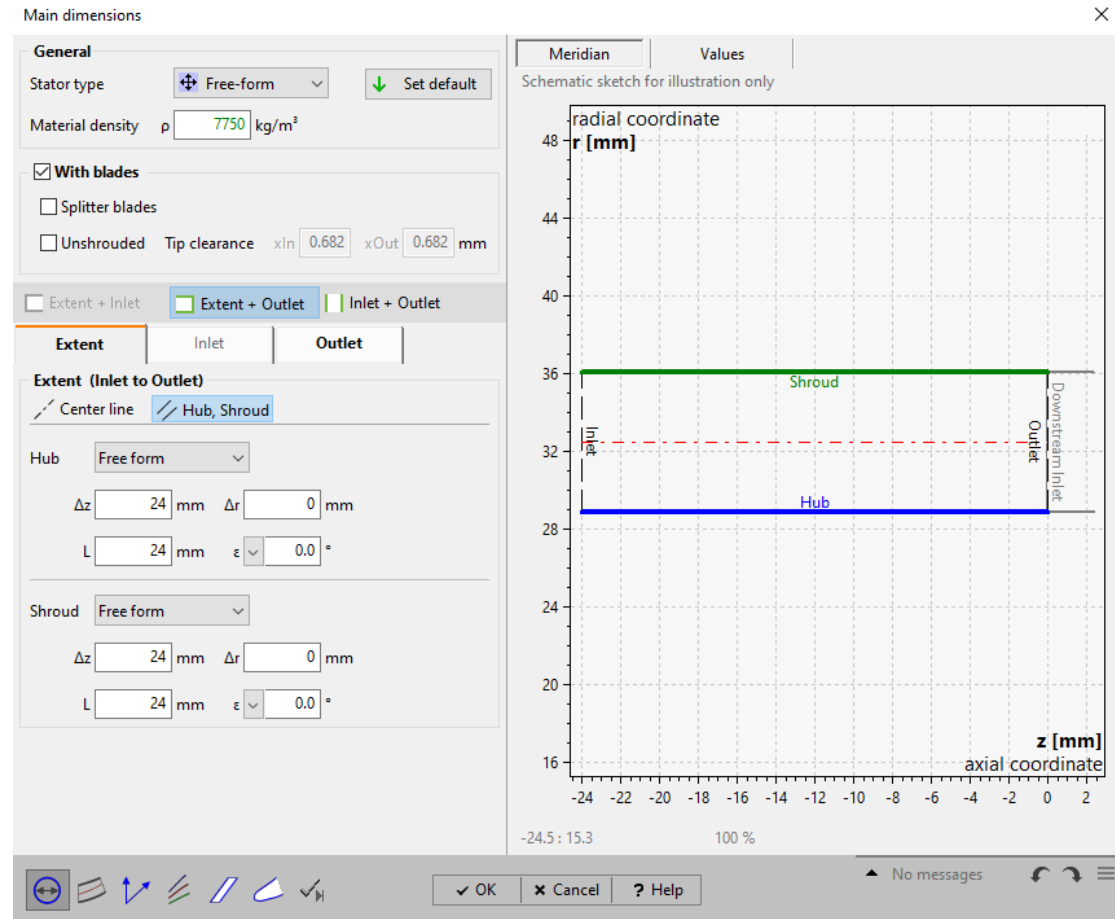
Αρχικά, γίνεται η εισαγωγή των παγκόσμιων σταθερών όπως της ροή μάζας, τον λόγο πιέσεων, τις στροφές και την θερμοκρασία και πίεση εισόδου του στροβίλου. Με την εισαγωγή το προαναφερθέντων ιδιοτήτων εμφανίζονται στο δεξιό μέρος του παραθύρου τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του στροβίλου που συμπίπτουν με τις τιμές που υπολογίστηκαν στο 2^ο Κεφάλαιο.



Εικόνα 4.2.1.2: Καθορισμός παγκόσμιων σταθερών.

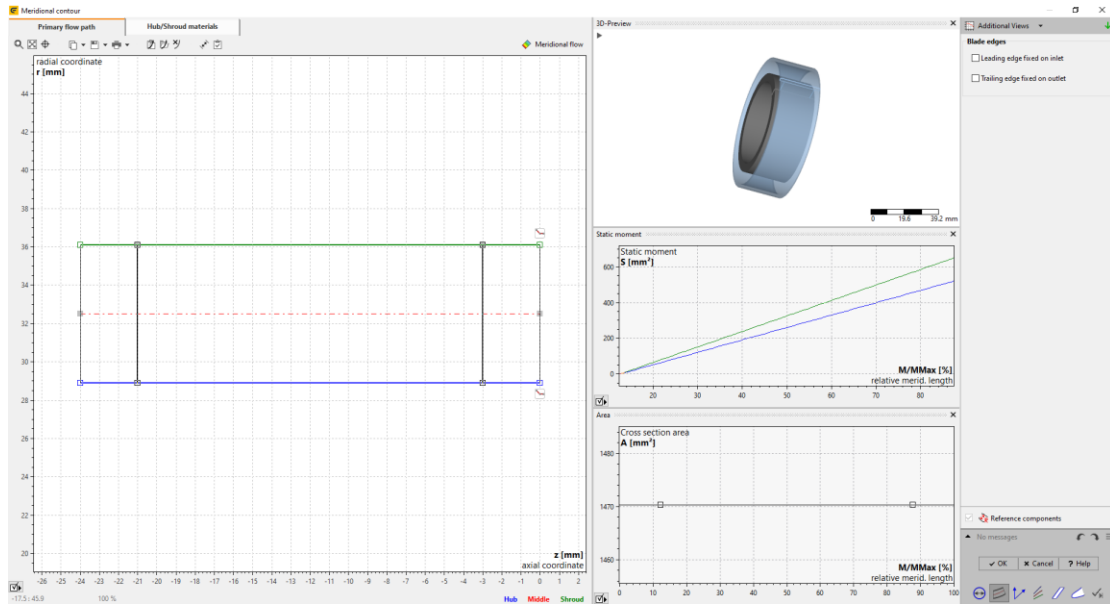
4.2.1.2 Στάτορας

Στον καθορισμό του στάτορα ξεκινάμε με τον καθορισμό των κύριων διαστάσεων του. Ο ορισμός της πυκνότητας του υλικού έχει να κάνει με υλικό κατασκευής του στροβίλου, που στην συγκεκριμένη περίπτωση θεωρούμε ότι κατασκευάζεται από ανοξείδωτο ατσάλι.



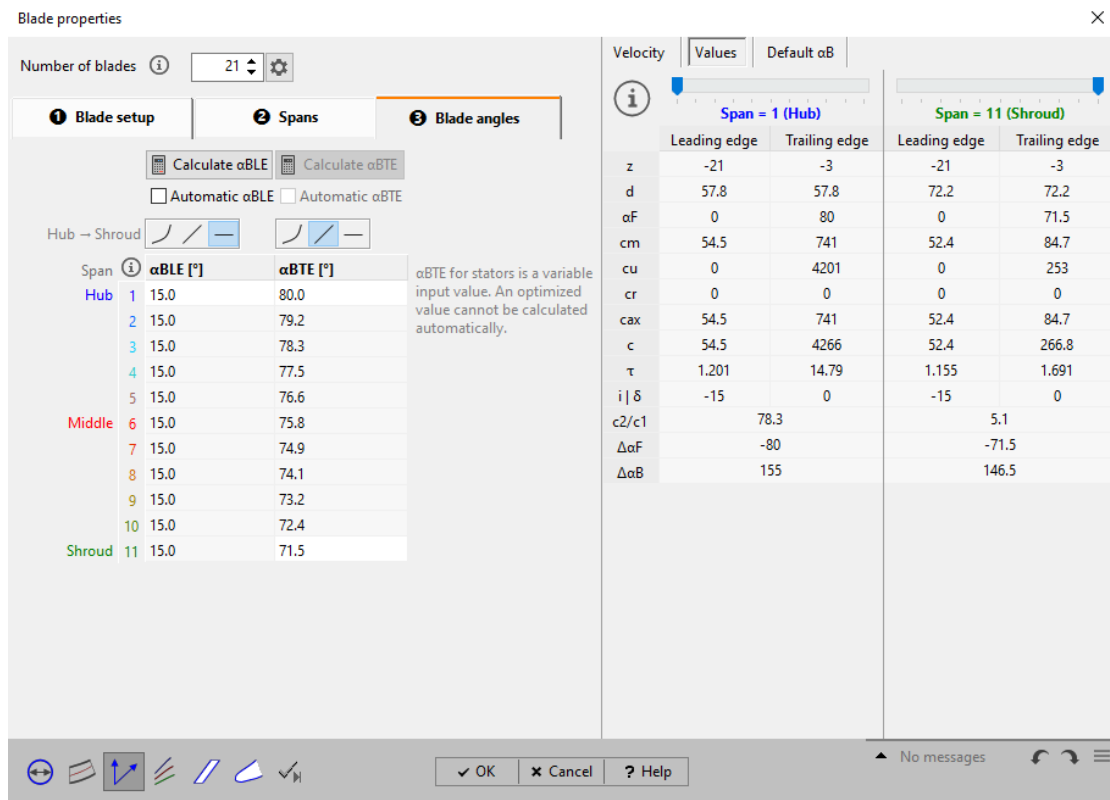
Εικόνα 4.2.1.3: Κύριες διαστάσεις στάτορα.

Στην συνέχεια, περνάμε στον ορισμό της μεσημβρινής όψης, όπου το πρόγραμμα ήδη έχει μία προτεινόμενη μορφολογία σύμφωνα με τις παγκόσμιες σταθερές που εισάχθηκαν προωτέρα.



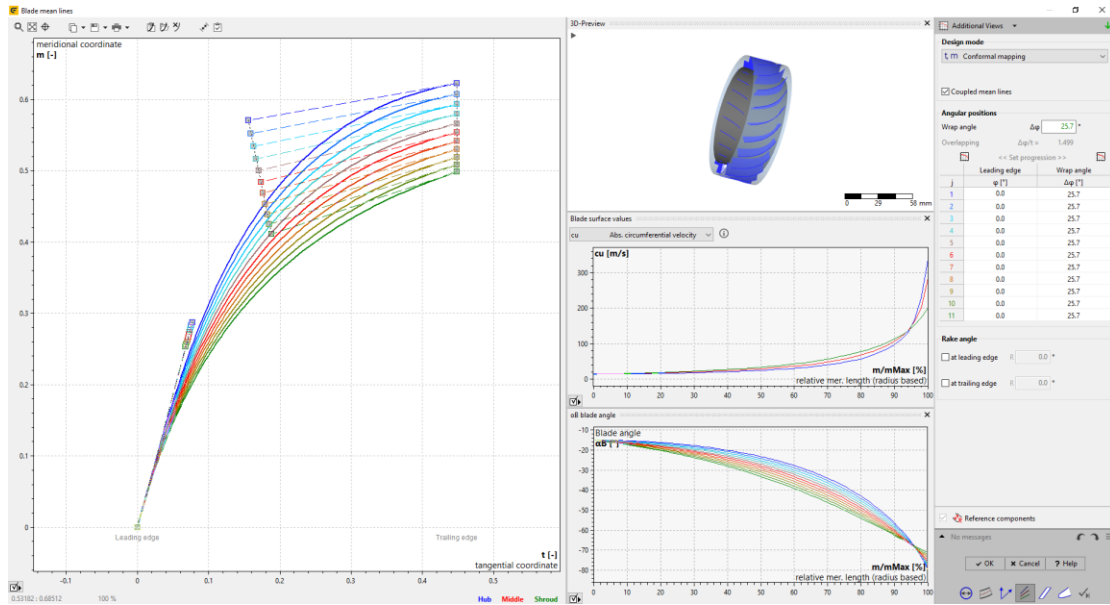
Εικόνα 4.2.1.4: Μεσημβρινή όψη στάτορα.

Ορίζονται οι γωνίες εισόδου και εξόδου.



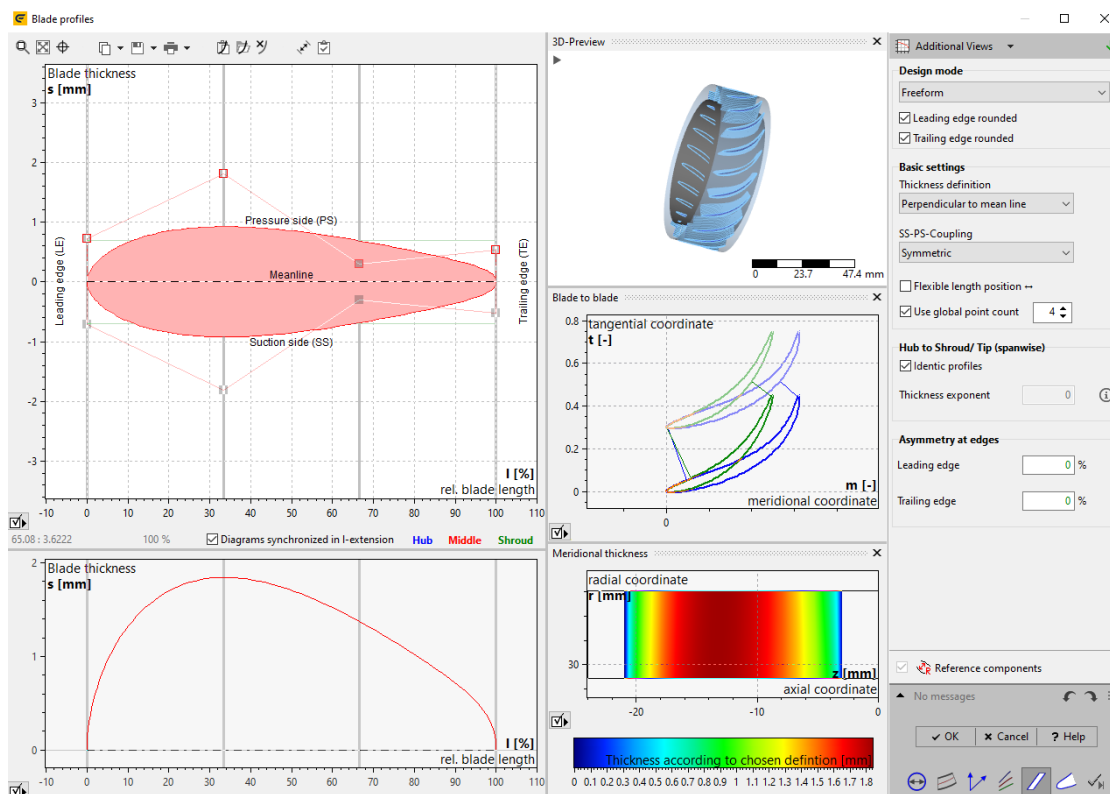
Εικόνα 4.2.1.5: Γωνίες εισόδου/εξόδου στάτορα

Ακολουθεί, ένα από τα κύρια βήματα το οποίο είναι ο ορισμός των ιδιοτήτων του περυγίου του στάτορα μέσω των γραμμών καμπυλότητας, όπου ελέγχουμε την κλίση του περυγίου.



Εικόνα 4.2.1.6: Ιδιότητες περυγίων στάτορα.

Τέλος, έχουμε την δυνατότητα να διαμορφώσουμε το προφίλ του περυγίου. Συγκεκριμένα, το πάχος του και την καμυλότητα του μπροστινού άκρου και του πίσω άκρου.



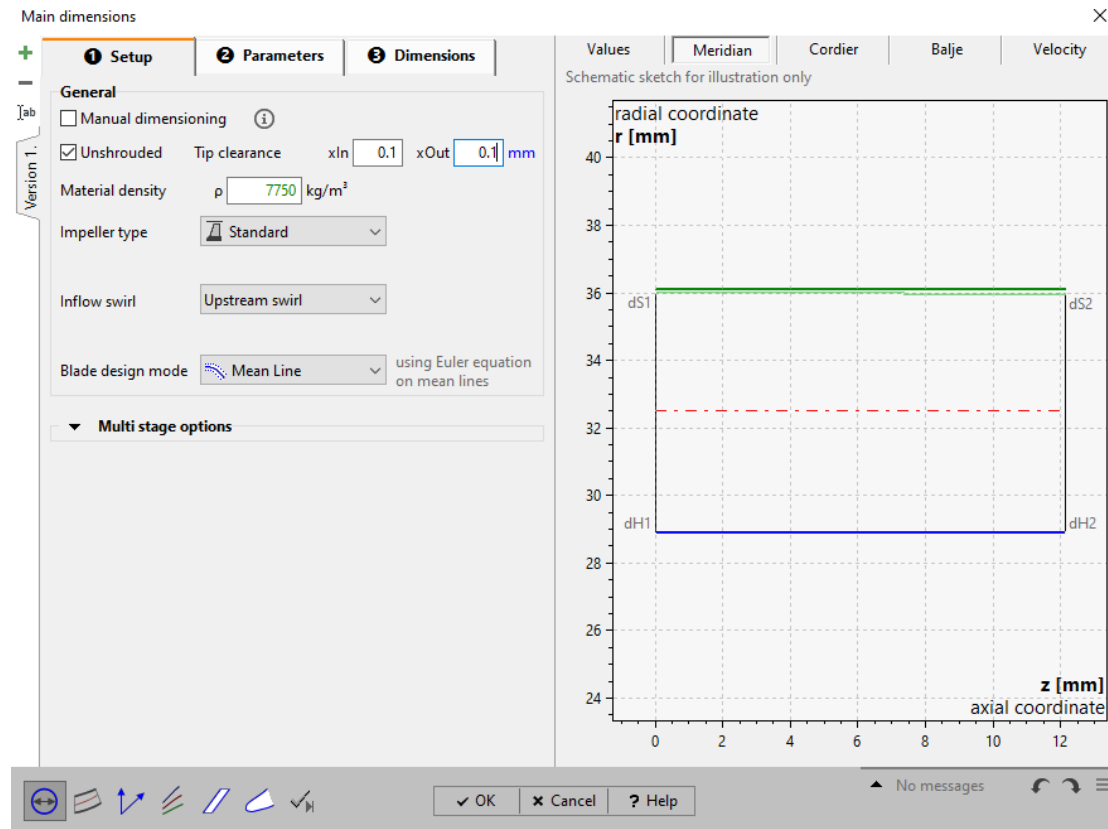
Εικόνα 4.2.1.7: Προφίλ περυγίων στάτορα.

4.2.1.3 Ρότορας

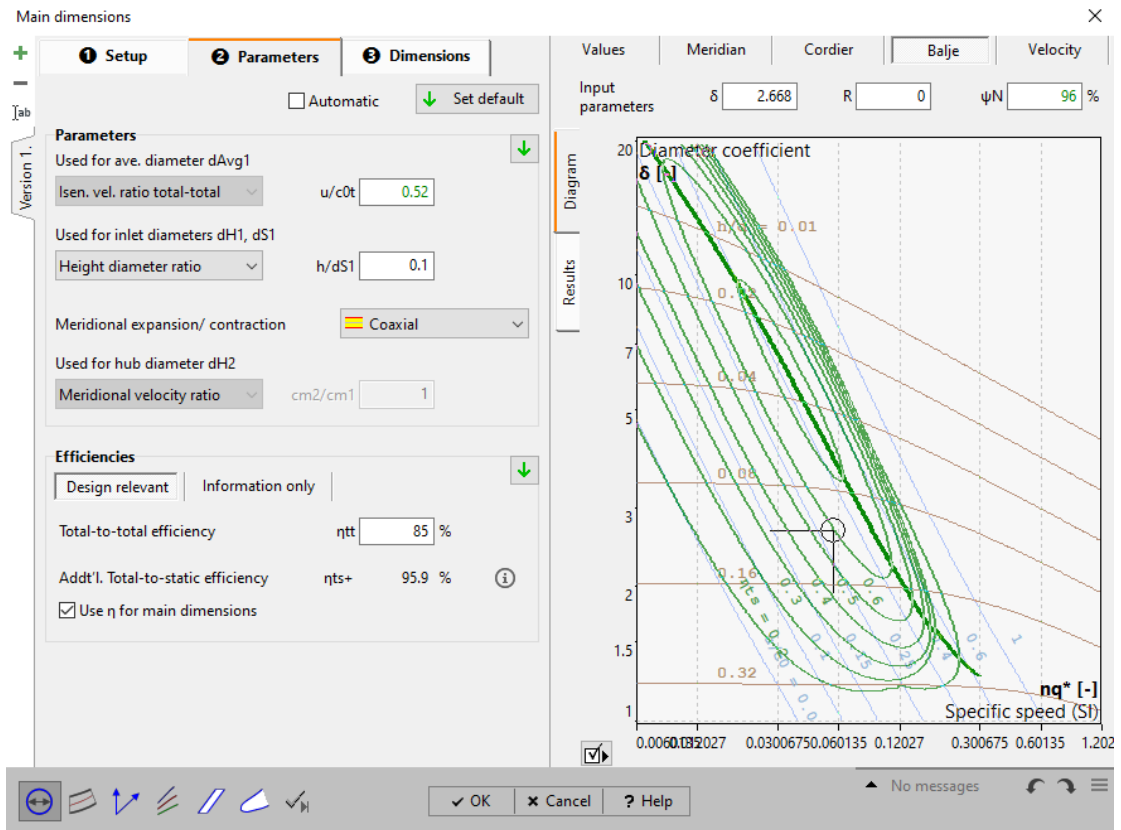
Στην περίπτωση του ρότορα, όπως και πριν ξεκινάμε με τον καθορισμό των κύριων διαστάσεων του. Το στάδιο αυτό είναι πιο λεπτομερές σε σχέση με τον στάτορα διότι ο ρότορας

αποτελεί κινούμενο μέλος και χρειάζεται περισσότερες παραμέτρους για τον προσδιορισμό του.

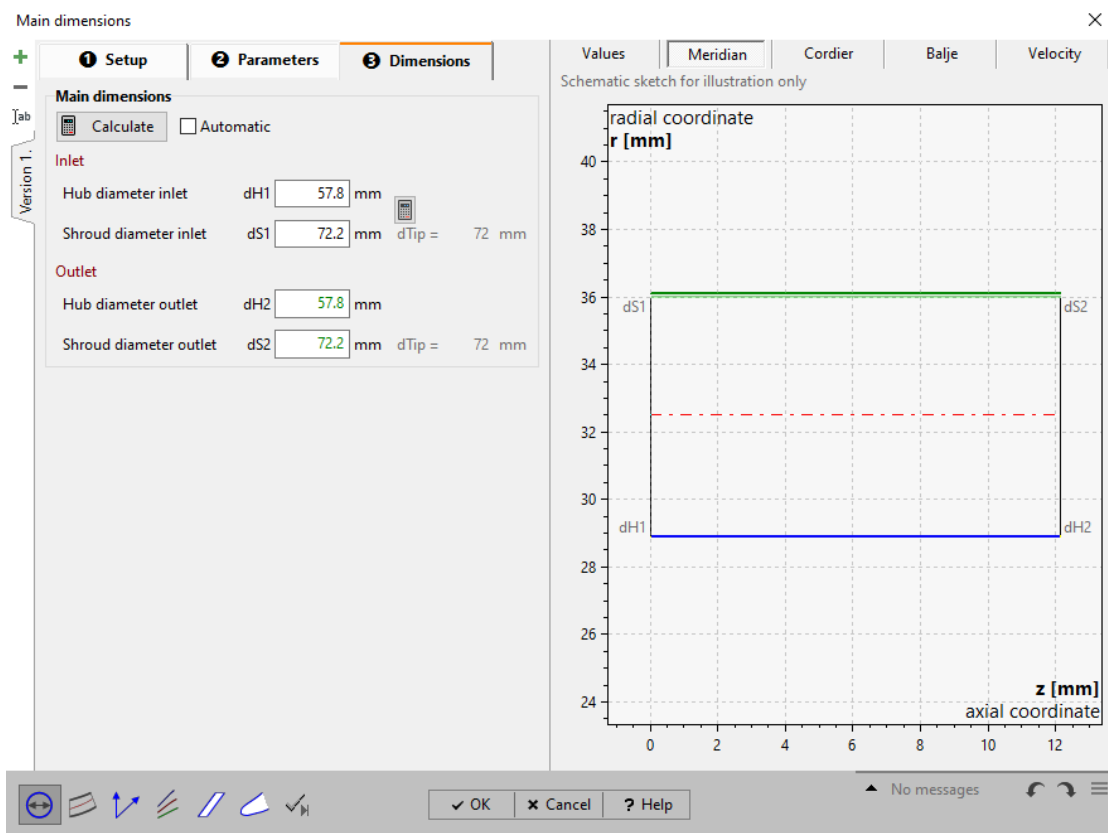
Συγκεκριμένα, στην καρτέλα «Παράμετροι» εισάγουμε την αναλογία ύψους/διαμέτρου του πτερυγίου όπως και τις αποδόσεις του στροβίλου. Στην καρτέλα «Διαστάσεις» πατώντας το κουμπί «Υπολόγισε» προκύπτουν οι απαιτούμενες διαστάσεις του ρότορα. Αν συγκρίνουμε τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το λογισμικό με τους υπολογισμούς του Πίνακα 3.2.1 θα συμπεράνουμε ότι οι τιμές έχουν μικρή απόκλιση.



Εικόνα 4.2.1.8: Ρυθμίσεις διαστάσεων.

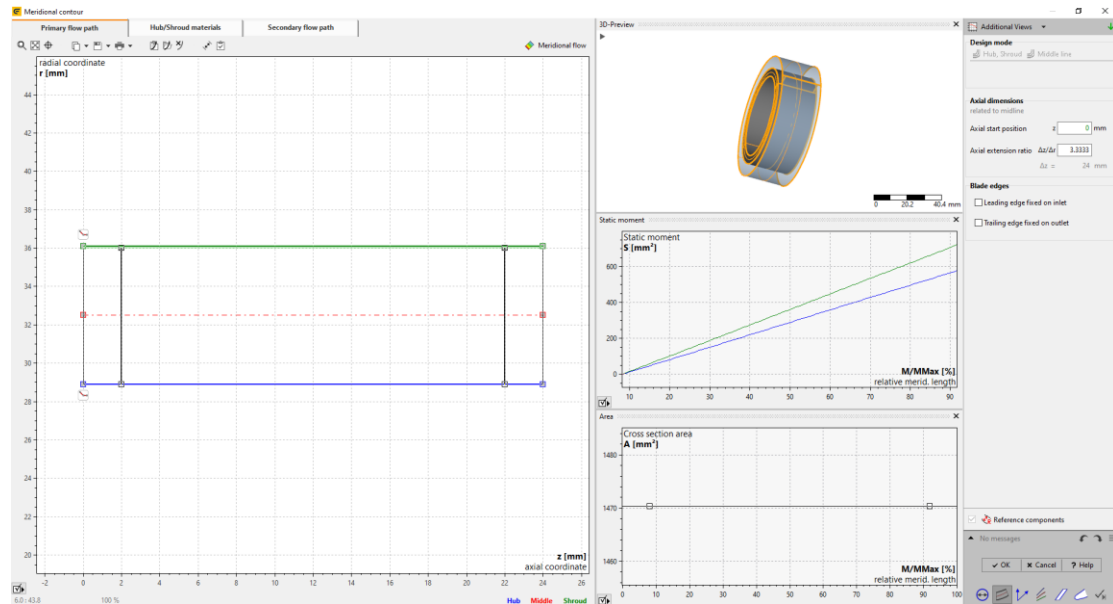


Εικόνα 4.2.1.9: Παράμετροι διαστάσεων ρότορα.



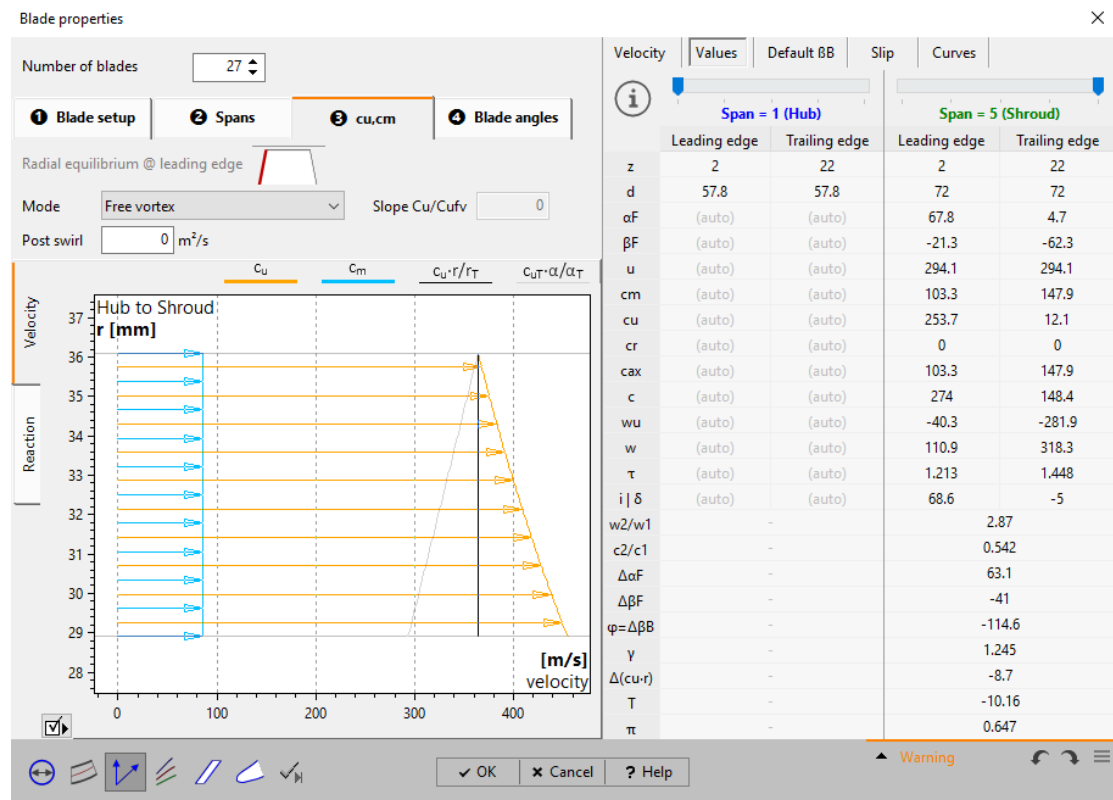
Εικόνα 4.2.1.10: Τελικές διαστάσεις στάτορα.

Στην συνέχεια, περνάμε στον ορισμό της μεσημβρινής όψης, όπου το πρόγραμμα ήδη έχει μία προτεινόμενη μορφολογία σύμφωνα με τις παγκόσμιες σταθερές που εισάχθηκαν προωτέρα.



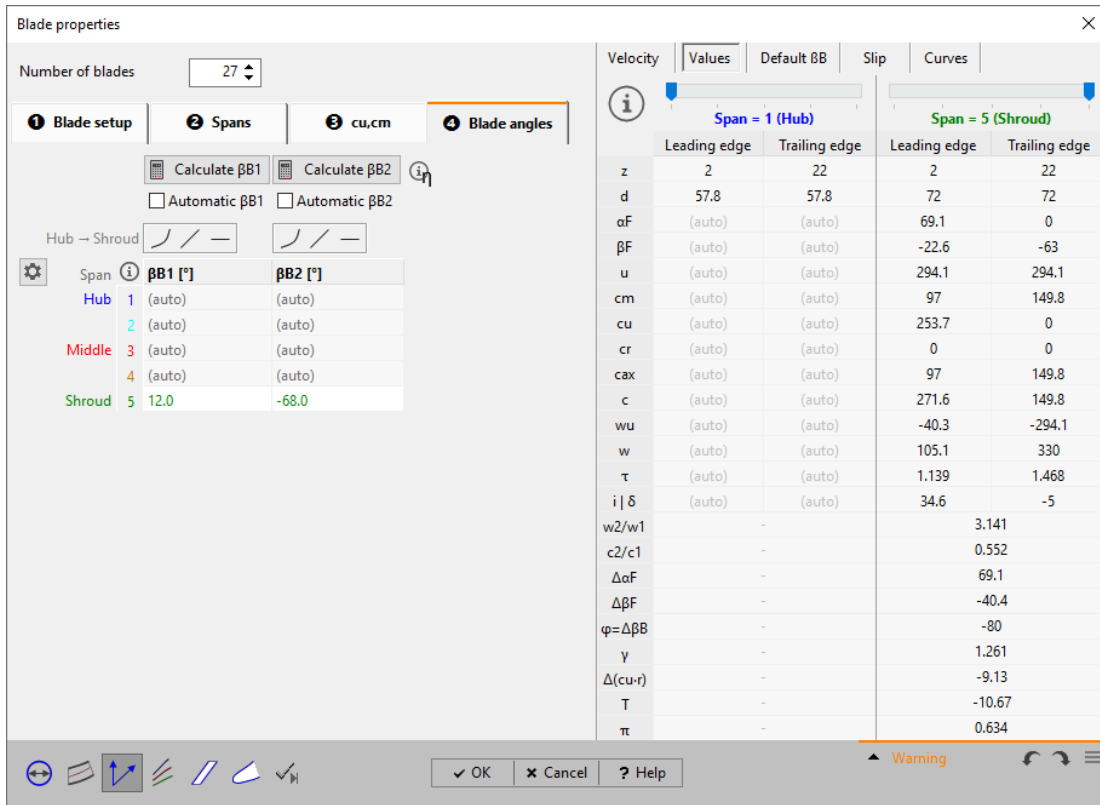
Εικόνα 4.2.1.11: Μεσημβρινή όψη ρότορα.

Ακολούθως, πρέπει να ορίσουμε τις ιδιότητες του περυσίου. Ξεκινώντας από το είδος της ροής, επιλέγουμε την ελεύθερη δύνη, για τους λόγους που αναφέραμε στο προηγούμενο κεφάλαιο.



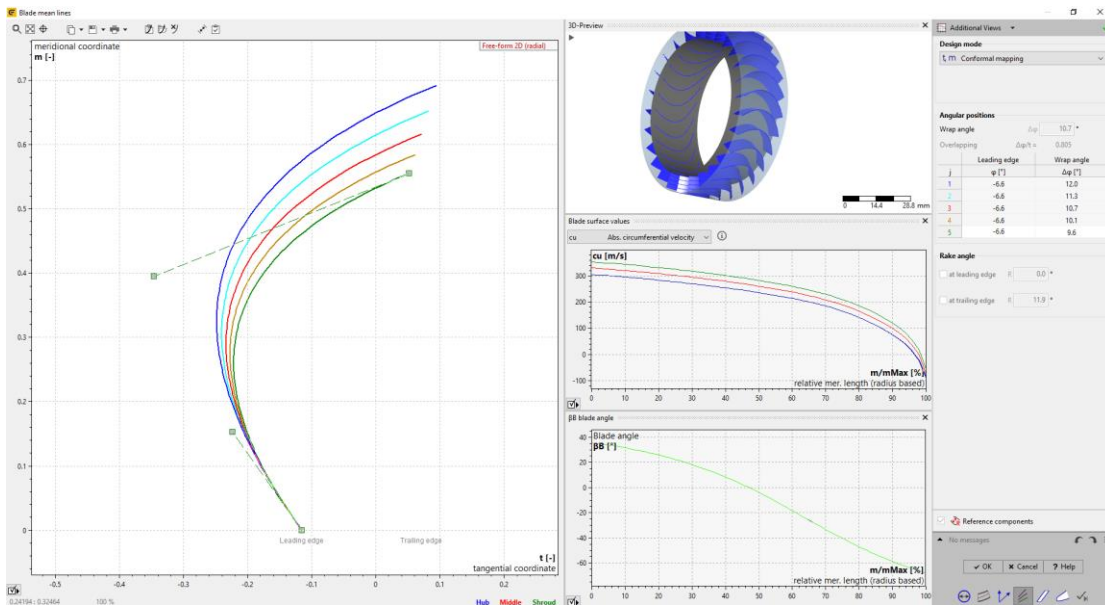
Εικόνα 4.2.1.12: Ροή του ρευστού στον ρότορα.

Έτσι, προκύπτουν οι σχετικές γωνίες εισόδου και εξόδου των πτερυγίων του ρότορα έτσι όπως διαμορφώνονται από την πλήμνη στην κορυφή.



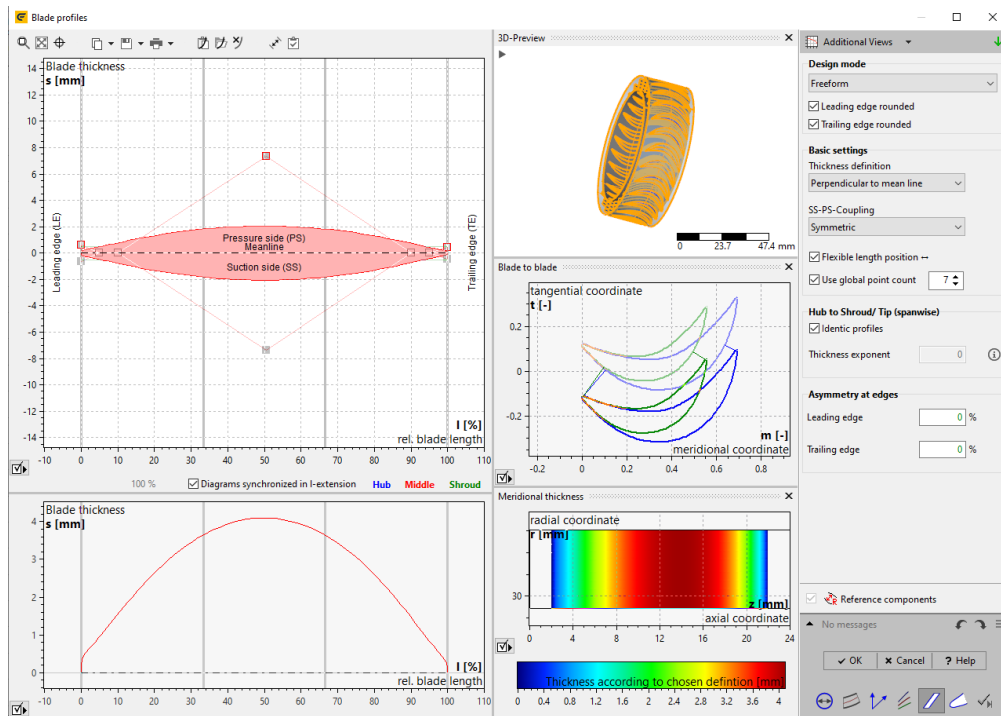
Εικόνα 4.2.1.13: Σχετικές γωνίες εισόδου/εξόδου των πτερυγίων του ρότορα.

Προχωράμε στην διαμόρφωση των γραμμών καμπυλότητας, οι οποίες προκύπτουν σχεδόν εξ' ολοκλήρου από τις σχετικές γωνίες εισόδου εξόδου, οπότε χρειάζονται ελάχιστες έως και καθόλου αλλαγές.



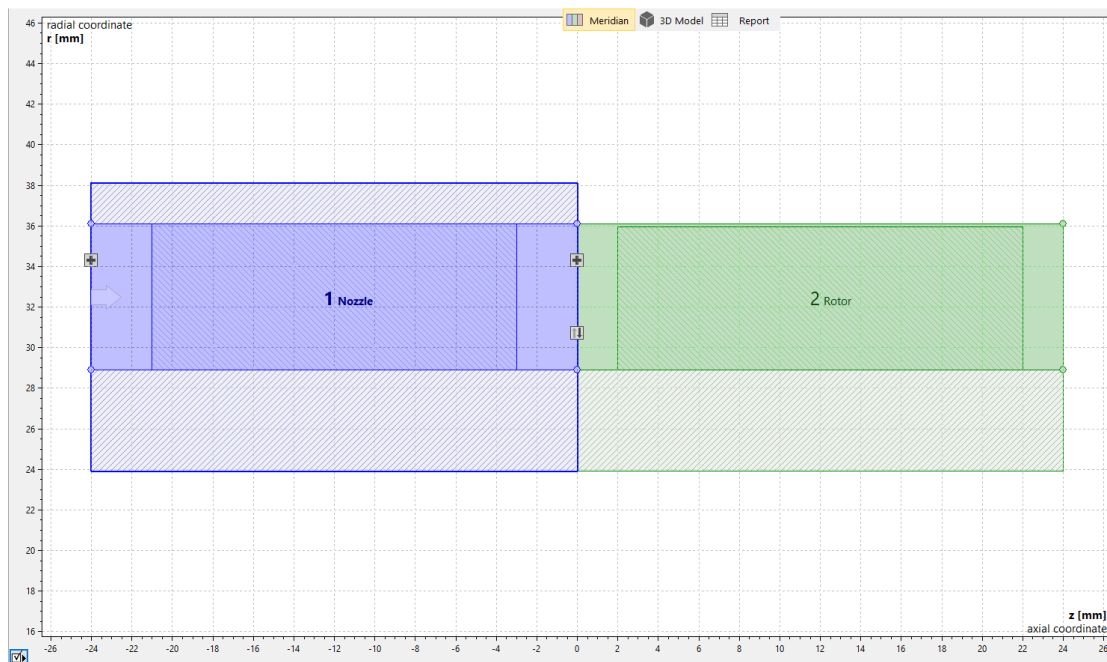
Εικόνα 4.2.1.14: Ιδιότητες πτερυγίων ρότορα.

Τέλος, μένει να διαμορφώσουμε το προφίλ του πτερυγίου. Συγκεκριμένα, το πάχος του και την καμπυλότητα του μπροστινού άκρου και του πίσω άκρου.

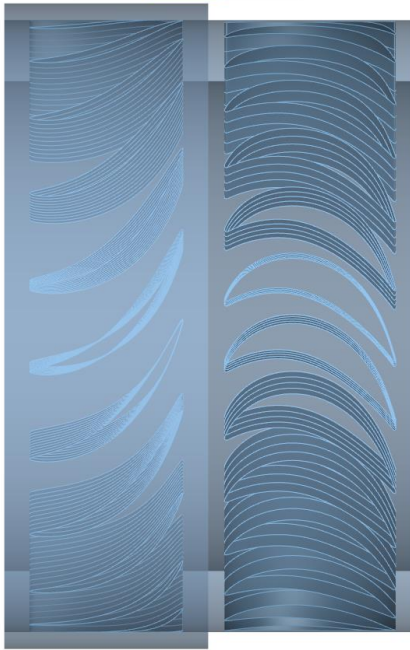


Εικόνα 4.2.1.15: Προφίλ πτερυγίου ρότορα.

Αφού ολοκληρώσουμε τα παραπάνω βήματα για τον στάτορα και τον ρότορα μπορούμε να εμφανίσουμε την μεσημβρινή όψη των δύο πτερυγίων όπως και το ολοκληρωμένο τρισδιάστατο μοντέλο του στροβίλου.



Εικόνα 4.2.1.16: Μεσημβρινή όψη πτερυγίων.

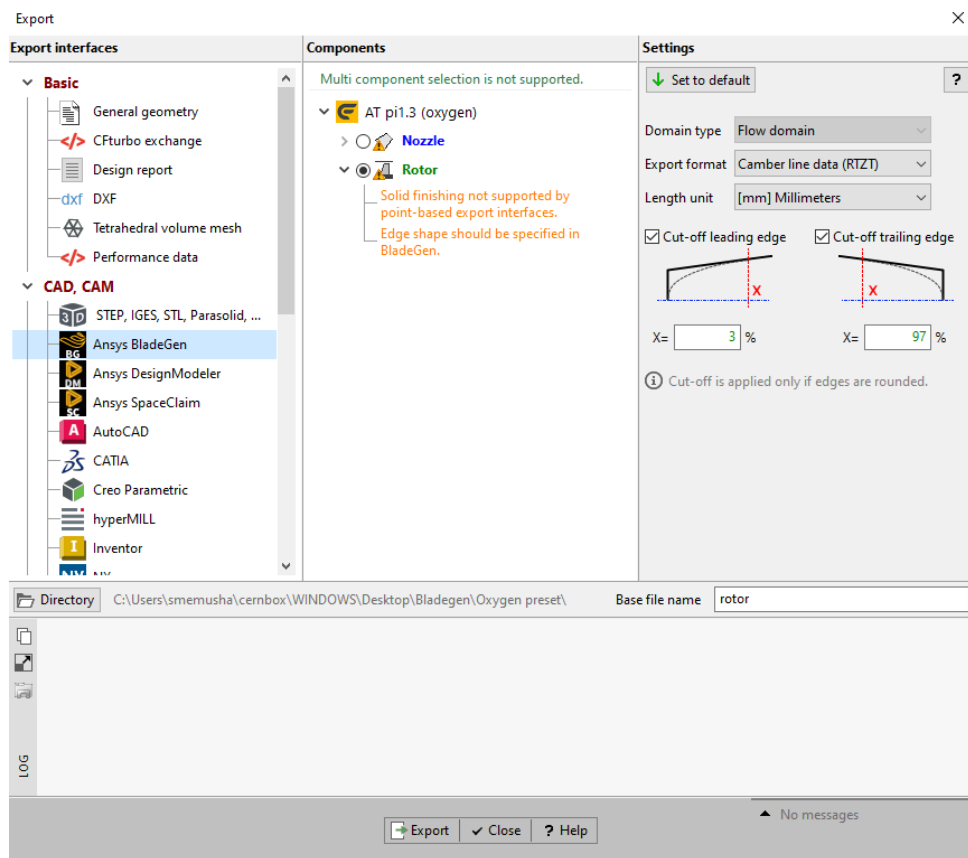


Εικόνα 4.2.1.17: Διάγραμμα πτερυγίων του στροβίλου.



Εικόνα 4.2.1.18: Τρισδιάστατο μοντέλο του στροβίλου όπως προέκυψε στο πρόγραμμα CFturbo.

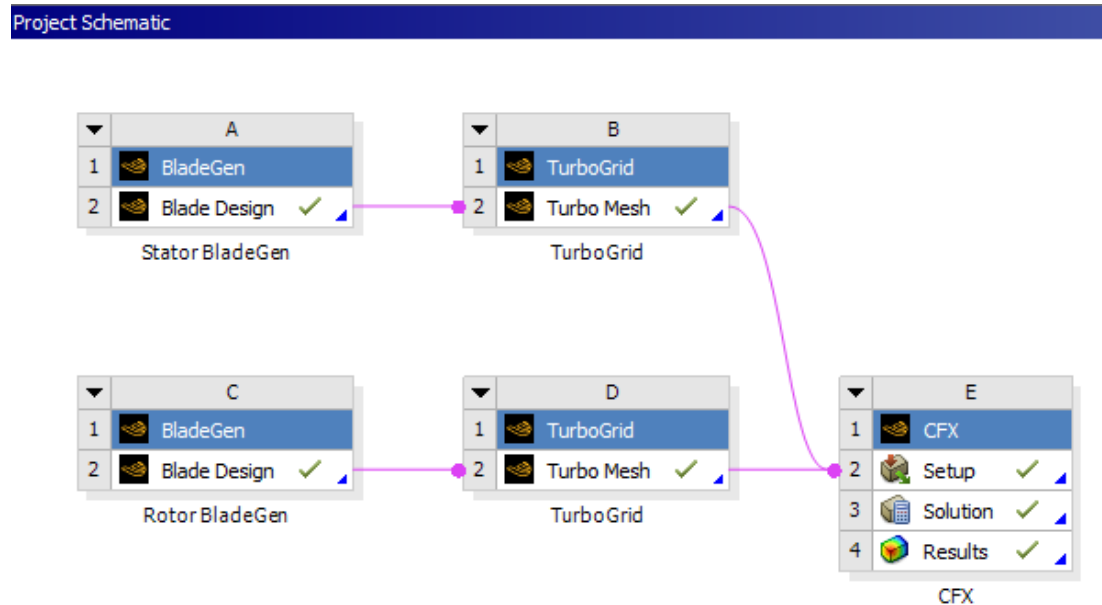
Τελευταίο βήμα αποτελεί η εξαγωγή των μοντέλων των πτερυγίων στάτορα/ρότορα από το CFturbo για την μετέπειτα εισαγωγή τους στο ANSYS Bladegen.



Εικόνα 4.2.1.19: Εξαγωγή αρχείων για τον στάτορα και τον ρότορα.

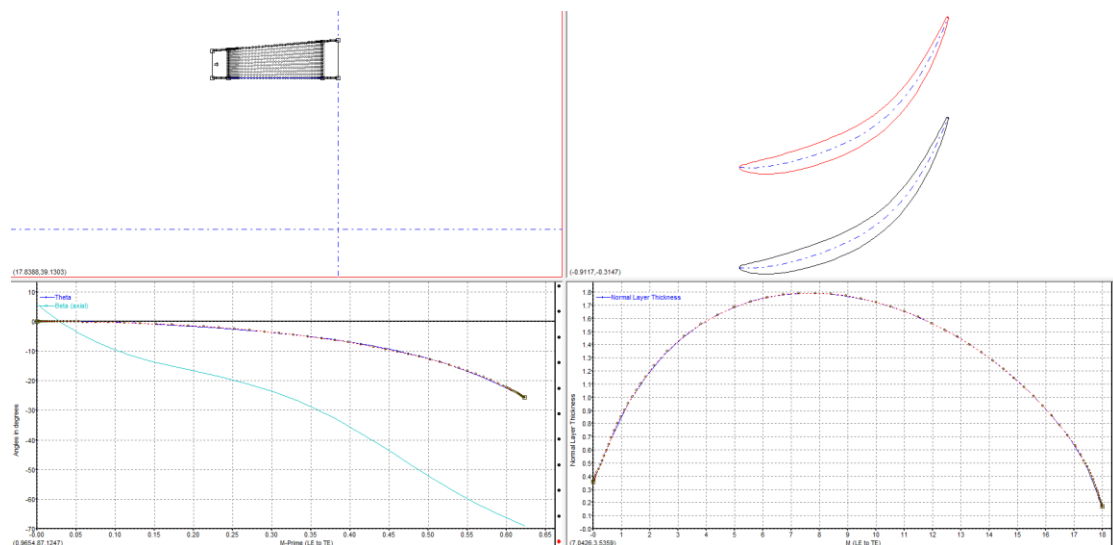
4.2.2 Bladegen - Γεωμετρία

Το BladeGen είναι ένα στοιχείο του ANSYS BladeModeler. Το λογισμικό BladeModeler είναι ένα εργαλείο για τον τρισδιάστατο σχεδιασμό εξαρτημάτων περιστρεφόμενων μηχανημάτων. Παρέχει τη βασική σύνδεση μεταξύ του σχεδιασμού του περυγίου και της ρευστοδυναμικής προσομοίωσης. Η συνολική ανάλυση που γίνεται στο ANSYS εμφανίζεται παρακάτω.

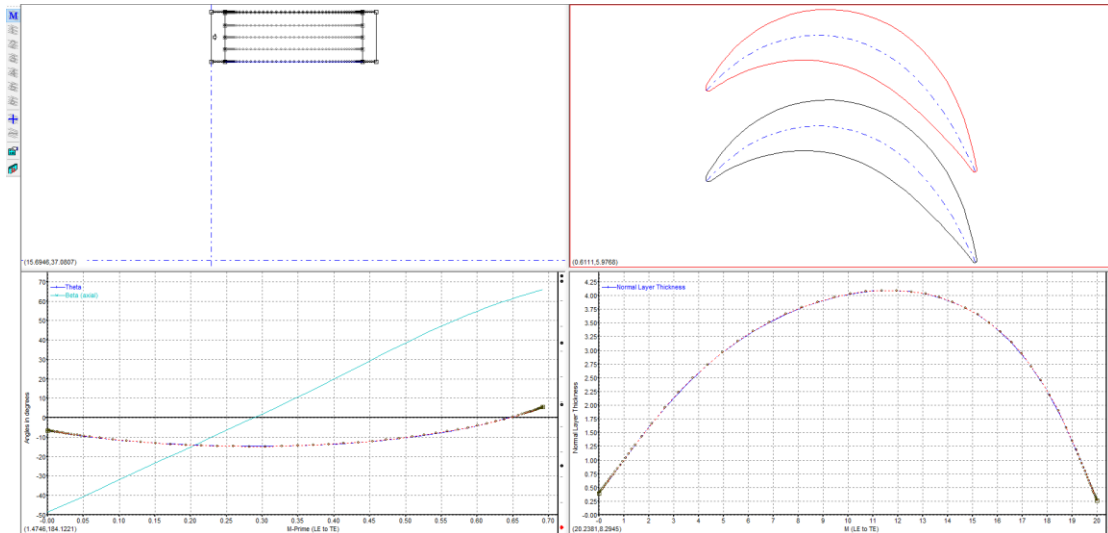


Εικόνα 4.2.2.1: Βήματα υπολογιστικής ρευστομηχανικής ανάλυσης στο πρόγραμμα ANSYS.

Μεταβαίνοντας στο ANSYS Bladegen και ακολουθώντας την ίδια διαδικασία για τον στάτορα και τον ρότορα, μπορούμε να διακρίνουμε ότι το υποπρόγραμμα απαιτεί από τον χρήστη να εισάγει κάποιες γεωμετρικές παραμέτρους, τις οποίες εμείς κατέχουμε από το CFturbo. Εισάγοντας τα αρχεία προκύπτει το παρακάτω παράθυρο.



Εικόνα 4.2.2.2: Μορφολογία περυγίου στάτορα όπως εμφανίζεται στο ANSYS Bladegen.



Εικόνα 4.2.2.3: Μορφολογία πτερυγίου ρότορα όπως εμφανίζεται στο ANSYS Bladegen.

Οι δύο άνω προβολές αντιπροσωπεύουν την μεσημβρινή (αριστερά) και την κάτω όψη (δεξιά) του πτερυγίου, ενώ οι δύο κάτω προβολές εμπεριέχουν την κατανομή των γωνιών (αριστερά) και την κατανομή του πάχους του πτερυγίου. Οι όψεις αυτές ορίζουν το πτερύγιο σε διακριτές γραμμές ροής (στρώσεις). Τα δεδομένα των στρωμάτων πρέπει να συνδυαστούν για να δημιουργηθεί το τελικό σχήμα του πτερυγίου.

4.3 ΠΛΕΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ

4.3.1 TurboGrid - Πλεγματοποίηση

Στο επόμενο βήμα της ανάλυσης πραγματοποιείται η διαδικασία της πλεγματοποίησης των μοντέλων του στάτορα και του ρότορα. Με βάση το προηγούμενο βήμα μοντελοποίησης συνεχίζουμε στο πρόγραμμα ANSYS και συγκεκριμένα χρησιμοποιούμε το υποπρόγραμμα TurboGrid. Το υποπρόγραμμα αυτό σε αντίθεση με τα υπόλοιπα υποπρογράμματα πλεγματοποίησης της ANSYS όπως το ICEM και το Mesh, είναι προσαρμοσμένο και συμβατό με τον τομέα των στροβιλομηχανών και έχει την δυνατότητα σύνδεσης του με το «κουτί» του Bladegen.

Ξεκινάμε με την διαδικασία εισόδου του μοντέλου στο TurboGrid. Ακολουθεί ο καθορισμός των παραμέτρων και του τρόπου πλεγματοποίησης. Χρησιμοποιείται η ίδια διαδικασία δημιουργίας πλέγματος για τον στάτορα και τον ρότορα, λαμβάνοντας όπως διαφορετικά αποτελέσματα όπως θα δούμε παρακάτω.

Για να μπορέσει το ANSYS TurboGrid να δημιουργήσει ένα πλέγμα, πρέπει να του παρέχουμε πολλές πληροφορίες. Τέτοιες πληροφορίες περιλαμβάνουν τη θέση των αρχείων γεωμετρίας (hub, shroud και blades), το είδος της τοπολογίας του πλέγματος και την κατανομή των κόμβων στο πλέγμα. Όλα τα δεδομένα που εισάγονται αποθηκεύονται σε «κουτάκια» δεδομένων γνωστά ως αντικείμενα CCL. Αφού καθοριστούν κατάλληλα τα αντικείμενα CCL, μπορεί να δοθεί εντολή στο ANSYS TurboGrid να δημιουργήσει το πλέγμα.

Η διεπαφή χρήστη του ANSYS TurboGrid οργανώνει τα αντικείμενα CCL σε μια προβολή δέντρου, γνωστή ως επιλογέας αντικειμένων. Ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει τον επιλογέα αντικειμένων για να επιλέξει και να επεξεργαστεί τα αντικείμενα CCL. τα αντικείμενα αυτά παρατίθενται από πάνω προς τα κάτω με μια τυποποιημένη σειρά για τη δημιουργία ενός πλέγματος. Η διεπαφή χρήστη διαθέτει επίσης μια γραμμή εργαλείων για την επιλογή και την επεξεργασία των αντικειμένων CCL.

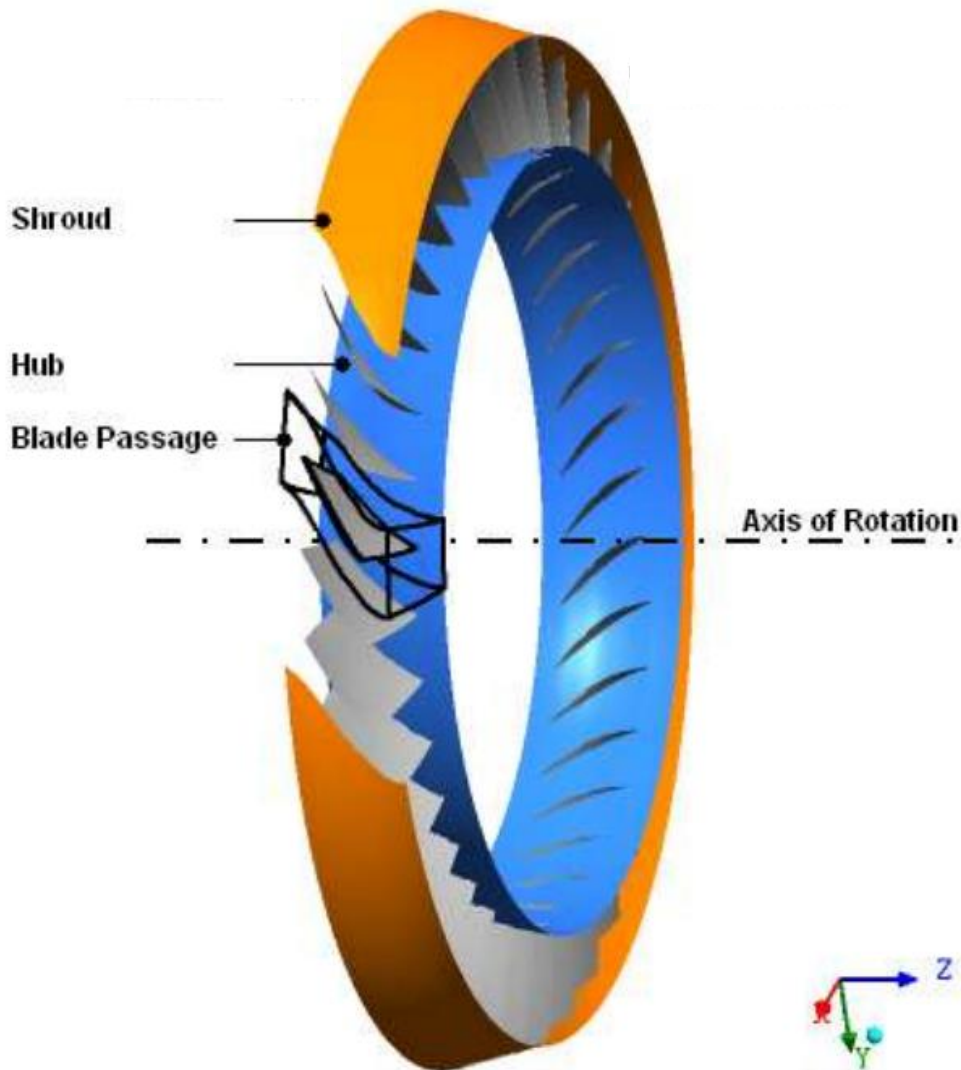
Κατά κανόνα τα βήματα που πρέπει να ακολουθούνται όταν δημιουργείται ένα πλέγμα είναι τα ακόλουθα (ANSYS Inc., 2013):

- Βήμα 1 Καθορίζεται η γεωμετρία φορτώνοντας τα αρχεία των μοντέλων των πτερυγίων του στάτορα και του ρότορα όπου ολοκληρώσαμε κατά την μοντελοποίηση στο BladeGen.
- Βήμα 2 Ορίζεται η τοπολογία επιλέγοντας έναν τύπο τοπολογίας.
- Βήμα 3 Τροποποιούνται προαιρετικά οι ρυθμίσεις Mesh Data που διέπουν τον αριθμό και την κατανομή των κόμβων σε διάφορα μέρη του πλέγματος. Εάν ο σκοπός είναι ένα λεπτό πλέγμα (υψηλής ανάλυσης), πρέπει να ρυθμιστεί η πυκνότητα πλέγματος σε μεταγενέστερο χρόνο προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί ο χρόνος επεξεργασίας κατά τη δημιουργία της τοπολογίας. Σημαντικό είναι να ληφθεί υπόψη ότι η αλλαγή της πυκνότητας των κόμβων μπορεί να επηρεάσει την ποιότητα του πλέγματος.
- Βήμα 4 Βελτιώνεται η τοπολογία στα στρώματα της πλήμνης και της ακμής όπως απαιτείται.
- Βήμα 5 Προστίθεται ενδιάμεσα στρώματα 2D που καθοδηγούν την τρισδιάστατη τοπολογία και το πλέγμα. Εάν δεν προστεθούν στρώματα σε αυτό το σημείο, θα προστεθούν όπως απαιτείται όταν δημιουργήσετε το πλέγμα. Η έγκαιρη προσθήκη τους σας δίνει την ευκαιρία να ελέγξετε και να προσαρμόσετε την ποιότητα του πλέγματος 2D στα ενδιάμεσα στρώματα πριν δημιουργήσετε το πλήρες 3D πλέγμα.
- Βήμα 6 Εκτέλεση της εντολής για τη δημιουργία πλέγματος.
- Βήμα 7 Έλεγχος της ποιότητας του πλέγματος. Όπως απαιτείται, προσαρμόζεται ο τύπος και η κατανομή τοπολογίας στις ρυθμίσεις Mesh Data. Εάν γίνουν αλλαγές, επιστρέφουμε στο προηγούμενο βήμα.
- Βήμα 8 Αποθήκευση του πλέγματος σε ένα αρχείο.

4.3.1.1 Πλέγμα

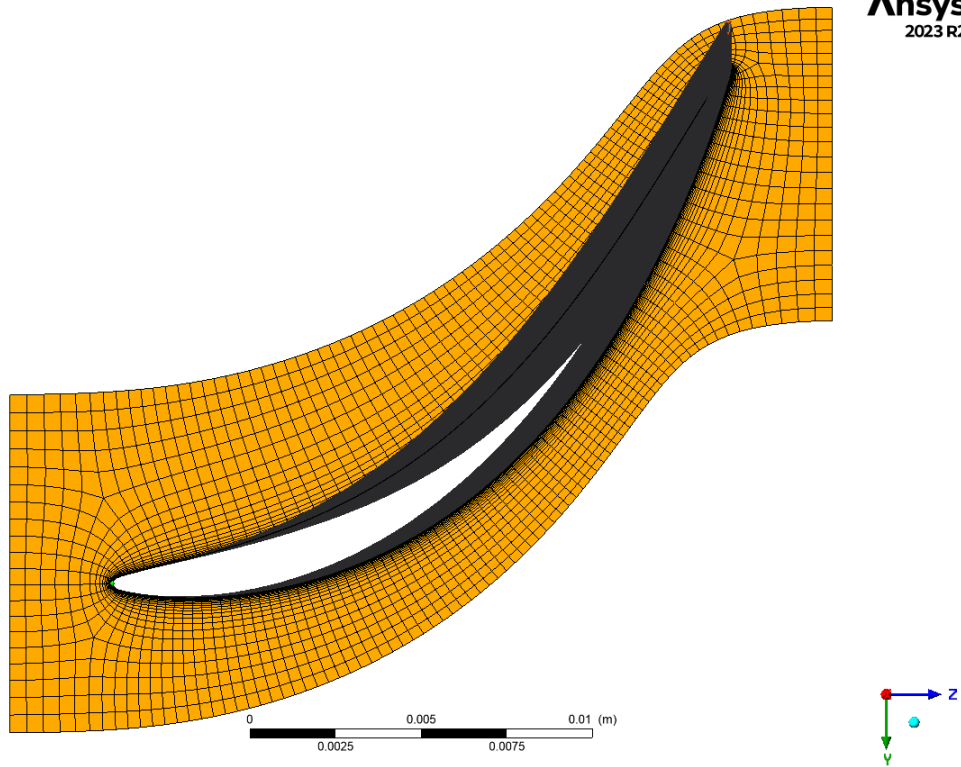
Κατά την δημιουργία του πλέγματος είναι σημαντική και η απόσταση μεταξύ του όγκου ελέγχου εισόδου της ροής και της ακμής πρόσπτωσης του πτερυγίου, όπως και η απόσταση μεταξύ του όγκου ελέγχου εξόδου της ροής και της ακμής φυγής του. Στόχος είναι να έρθουν οι όγκοι ελέγχου, των οποίων οι διαστάσεις έχουν ήδη καθοριστεί από το Bladegen, όσο πιο κοντά γίνεται στις ακμές του πτερυγίου.

Μεταποιώντας αυτές τις ρυθμίσεις προκύπτει η αύξηση μεταξύ των αποστάσεων τους που στην ουσία μειώνει τους όγκους ελέγχου εισόδου και εξόδου αντίστοιχα. Το αποτέλεσμα είναι να εμφανίζονται περιστασιακά κάποια φαινόμενα ροής τα οποία δεν εξαλείφονται στην είσοδο και στην έξοδο. Επίσης, όσο μειώνονται αυτοί οι όγκοι ελέγχου, αυξάνεται ο όγκος ελέγχου του περυγίου, με αποτέλεσμα να προκύπτει ένας αραιωμένος όγκος ελέγχου περυγίου, αντί για έναν πυκνωμένο τον οποίο χρειαζόμαστε στις περιοχές κοντά στο περύγιο, ώστε να ληφθούν υπόψη τα τριγύρω φαινόμενα ροής.

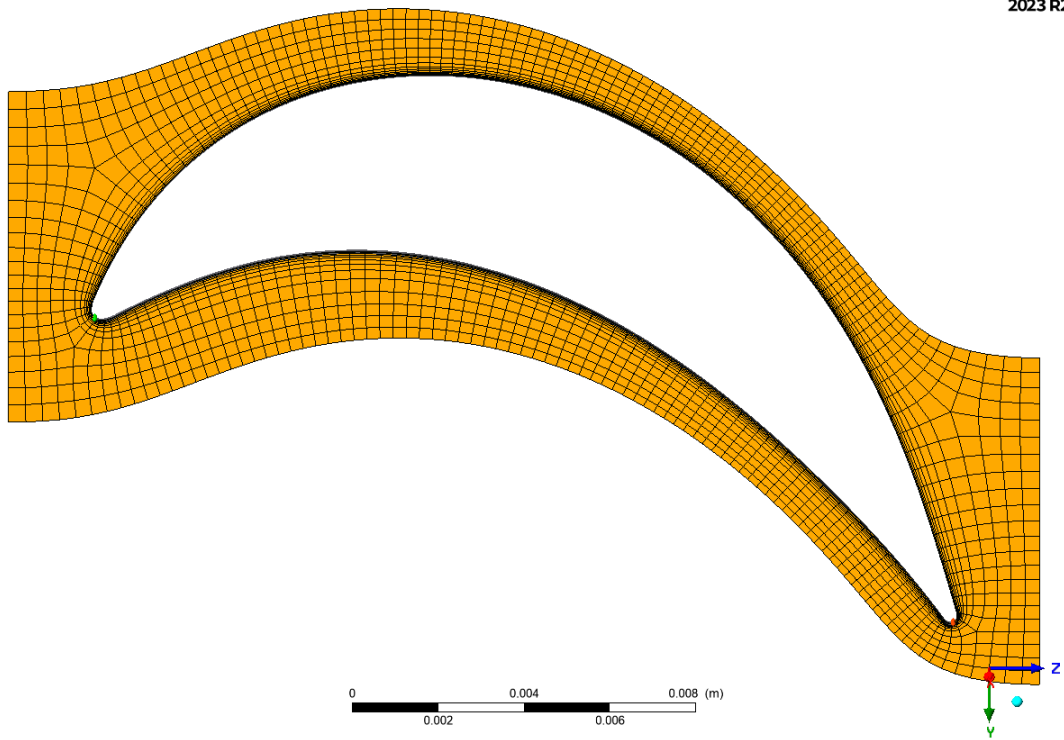


Εικόνα 4.3.1.1: Απεικόνιση του όγκου ελέγχου ενός περυγίου ρότορα συμπεσιτή στο πρόγραμμα ANSYS Turbogrid (ANSYS Inc., 2013).

Συγκεκριμένα, για τα περύγια του στροβίλου μας η ανάπτυξη του πλέγματος είναι η παρακάτω.



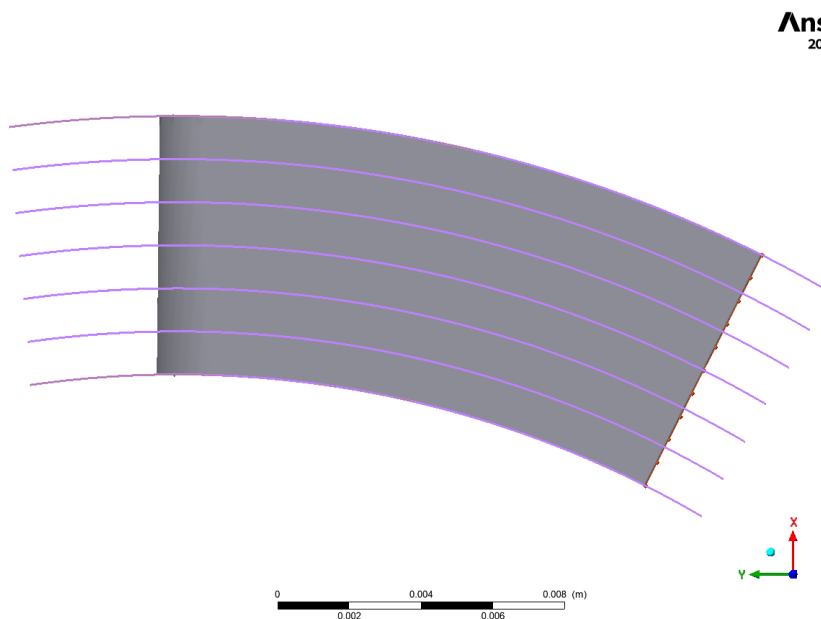
Εικόνα 4.3.1.2: Πλέγμα περυσίου στάτορα.



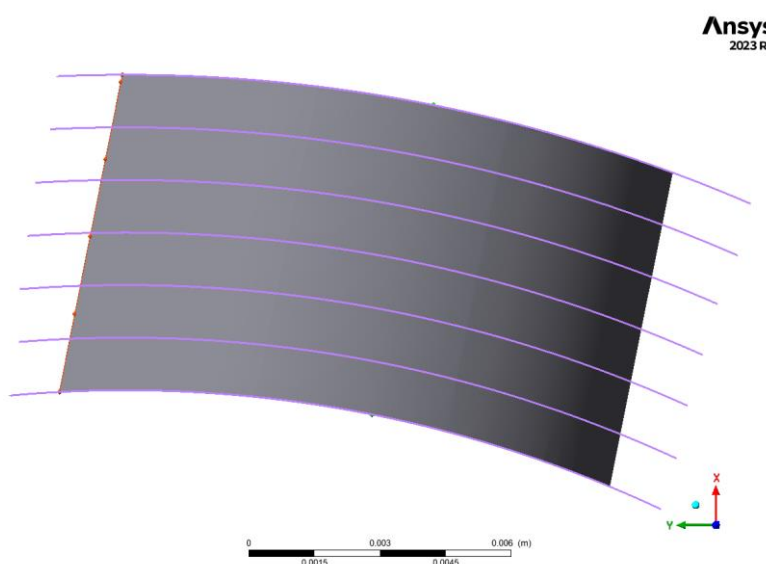
Εικόνα 4.3.1.3: Πλέγμα περυσίου ρότορα.

4.3.1.2 Αριθμός Στρωμάτων

Κατά τον ορισμό των διάφορων παραμέτρων πλεγματοποίησης, σημαντικός είναι και ο αριθμός των στρωμάτων. Αρχικά το υποπρόγραμμα δημιουργεί το 2D πλέγμα σε κάθε στρώμα, και μετά ενώνει τους κόμβους τους για να δημιουργηθεί το τρισδιάστατο πλέγμα. Όσα περισσότερα τα στρώματα τόσο πιο λεπτομερής θα είναι η τρισδιάστατη πλεγματοποίηση και η αποτύπωση του περυγίου. Με βάση αυτά τα κριτήρια λοιπόν, επιλέγεται η δημιουργία 5 πλεγματοποιημένων στρωμάτων. Στα πέντε στρώματα δεν συμπεριλαμβάνονται τα οριακά στρώματα της πλήμνης και της κορυφής.



Εικόνα 4.3.1.4: Διαμοιρασμός στρωμάτων όπως φαίνονται στην μεσημβρινή όψη του στάτορα.



Εικόνα 4.3.1.5: Διαμοιρασμός στρωμάτων όπως φαίνονται στην μεσημβρινή όψη του ρότορα.

4.3.1.3 Μέγεθος Πλέγματος

Η τελευταία κατά σειρά, αλλά σημαντικότερη παράμετρος που πρέπει να οριστεί για να παραχθεί ένα πλέγμα, είναι το μέγεθός του. Το μέγεθος του πλέγματος πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να διασφαλίζεται η υψηλή ποιότητα του πλέγματος η οποία θα οδηγήσει σε μία ακριβή λύση. Οι κύριοι περιορισμοί που έχουμε είναι η υπολογιστική ισχύς την οποία έχει ο χρήστης στην κατοχή του και ο διαθέσιμος χρόνος για κάθε προσομοίωση. Στην παρούσα μελέτη ορίζεται ο αριθμός των κόμβων στις 88.000.

Details of MESH GENERATOR

3D Mesh

Node Counts

All domains: 88418

Passage: 88418

Inlet: 0

Outlet: 0

Element Counts

All domains: 80745

Passage: 80745

Inlet: 0

Outlet: 0

When the Generate button is enabled, the mesh can be created by clicking on the Generate button.

Generate

Total Nodes = 88418 Total Elements = 80745

Εικόνα 4.3.1.6: Παράθυρο στο περιβάλλον του ANSYS-Turbogrid για τον ορισμό των κόμβων και στοιχείων του πλέγματος.

Όσον αφορά την μέθοδο πλεγματοποίησης κοντά στα τοιχώματα, επιλέγεται η *Απόλυτη* (Absolute) μέθοδος ενώ κοντά στο οριακό στρώμα του περυγίου επιλέγεται ως μέθοδος η *Αναλογική Μεγένθυση του Πλέγματος* (Proportional to Mesh Size), με συντελεστή βάσης 3 και λόγο συντελεστών 0, καθώς και μέγιστο ρυθμό επέκτασης ίσο με 1.3, όπως φαίνεται παρακάτω.

Details of Mesh Data

Mesh Size Passage Hub Tip Shroud Tip Inlet Outlet

Lock mesh size

Method: Global Size Factor

Size Factor: 1.0

Boundary Layer Refinement Control

Boundary Layer Refinement Control

Method: Proportional to Mesh Size

Parameters

Factor Base: 3.0

Factor Ratio: 0.0

Constant First Element Offset

Target Maximum Expansion Rate

Rate: 1.3

Near Wall Element Size Specification

Near Wall Element Size Specification

Method: Absolute

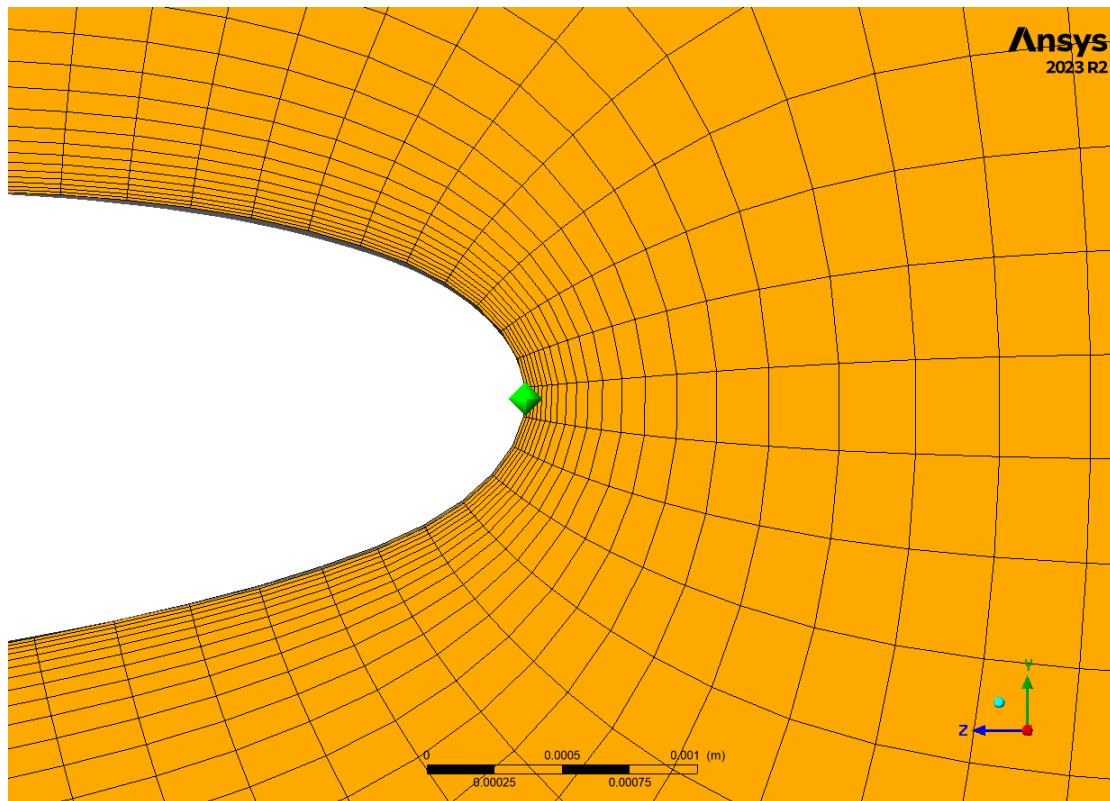
Five-Edge Vertex Mesh Size Reduction

Inlet Domain

Outlet Domain

Apply Reset

Εικόνα 4.3.1.7: Παράθυρο στο περιβάλλον του ANSYS-Turbogrid για τον ορισμό της μεθόδου πλεγματοποίησης.



Εικόνα 4.3.1.8: Μεγέθυνση πλέγματος περυγίου στάτορα.

Αξίζει να αναφέρουμε ότι το μέγεθος του πλέγματος διαφέρει ανάλογα με τη ζώνη του περυγίου, για παράδειγμα, το μέγεθος του πλέγματος βελτιώθηκε στις περιοχές κοντά στην επιφάνεια του περυγίου και στα τοιχώματα του για να διατηρηθεί ένας αποδεκτός συμβιβασμός μεταξύ του υπολογιστικού κόστους και της ακρίβειας της λύσης.

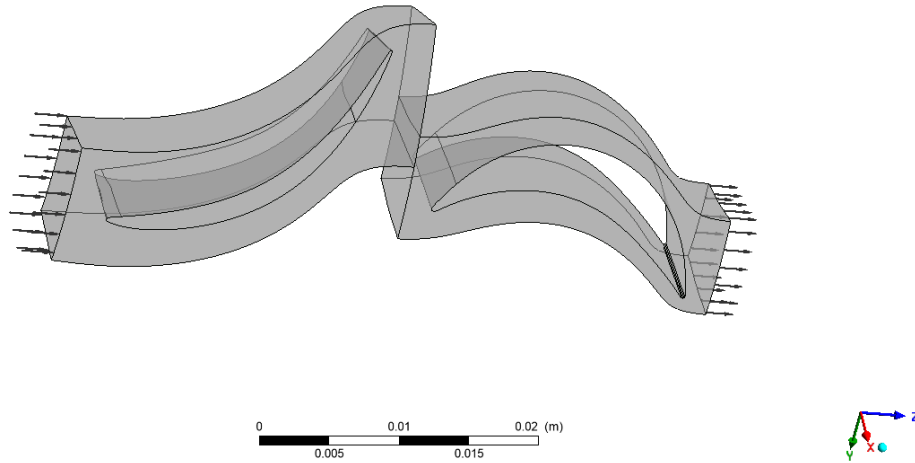
4.4 ΕΠΙΛΥΣΗ

Στο υποκεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται το τελευταίο βήμα στην διαδικασία της μοντελοποίησης, η οποία είναι η επίλυση της βαθμίδας του αξονικού στροβίλου. Με τη βοήθεια του υποπρογράμματος CFX του ANSYS, πραγματοποιείται η εισαγωγή του μοντέλου σε αυτό και η επίλυση του προβλήματος. Το υποπρόγραμμα Ansys CFX χωρίζεται σε τρία (3) κύρια μέρη:

4.4.1 CFX-Pre

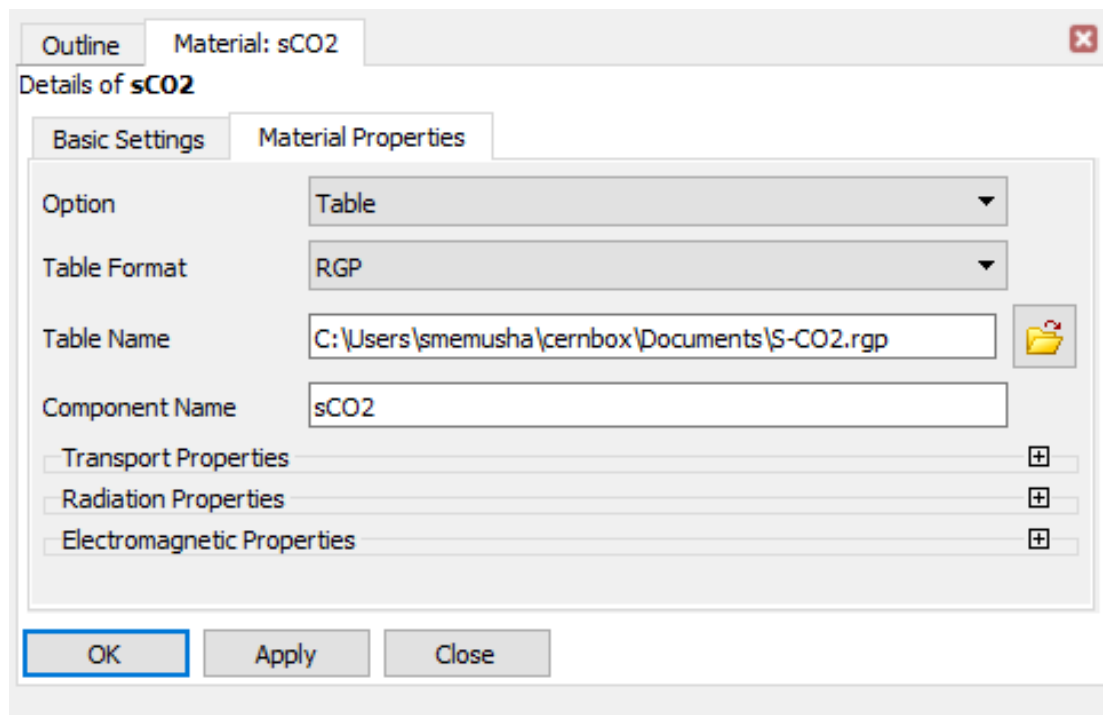
Το CFX-Pre, είναι ο προ-επεξεργαστής ορισμού των φυσικών φαινομένων για το Ansys CFX. Σε αυτό το σημείο εισάγονται τα πλέγματα που δημιουργήθηκαν στο TurboGrid και επιλέγεται το φυσικό μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί στην προσομοίωση CFD. Τα αρχεία που παράγονται από το CFX-Pre αποστέλλονται στο CFX Solver (ANSYS Inc., 2021a).

Ξεκινάμε με την εισαγωγή του πλέγματος (mesh) μέσα στο CFX-Pre, που δημιουργήθηκε στο TurboGrid.



Εικόνα 4.4.1.1: Απεικόνιση ενός ζεύγους πτερυγίων του στροβίλου.

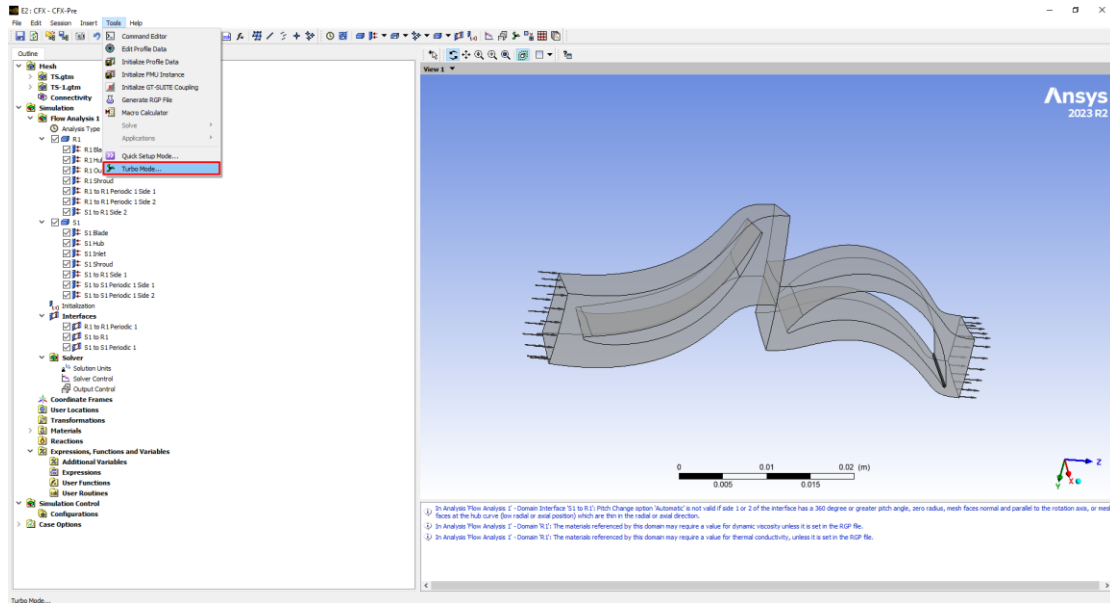
Στην συνέχεια, επιλέγουμε το εργαζόμενο ρευστό. Στην περίπτωση αυτής της μελέτης, δεν μπορούμε να επιλέξουμε το ρευστό από την βιβλιοθήκη του Ansys CFX διότι δεν διαθέτει το διοξείδιο του άνθρακα σε υπερκρίσιμη κατάσταση. Αντί αυτού εξάγουμε τις θερμοδυναμικές ιδιότητες του ρευστού σε ένα αρχείο .rgp, τις οποίες πήραμε μέσω κώδικα στο Matlab χρησιμοποιώντας το Refprop, για το εύρος πίεσης και θερμοκρασιών του κύκλου. Το αρχείο αυτό το εισάγουμε στο παράθυρο «Material» του υποπρογράμματος ως νέο ρευστό.



Εικόνα 4.4.1.2: Προσθήκη νέου υλικού στον κατάλογο του ANSYS.

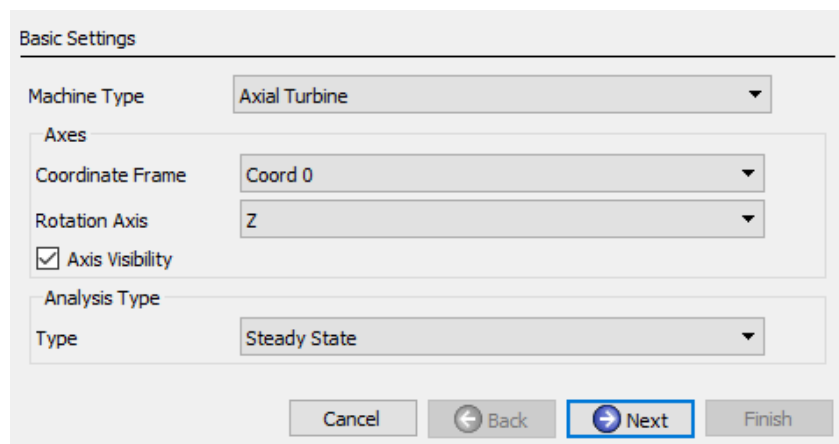
Στους πίνακες αυτούς περιλαμβάνονται ιδιότητες όπως η πυκνότητα, το ιξώδες, η θερμική αγωγιμότητα και η ειδική θερμοχωρητικότητα για ένα ζεύγος τιμών πίεσης-ενθαλπίας.

Επόμενο βήμα αποτελεί ο καθορισμός των βασικών στοιχείων και συνθηκών της προσομοίωσης, οπότε μέσω της εργαλειοθήκης του υποπρογράμματος επιλέγουμε την λειτουργία «*Turbo*» για την γρήγορη και αξιόπιστη επίλυση του προβλήματος.



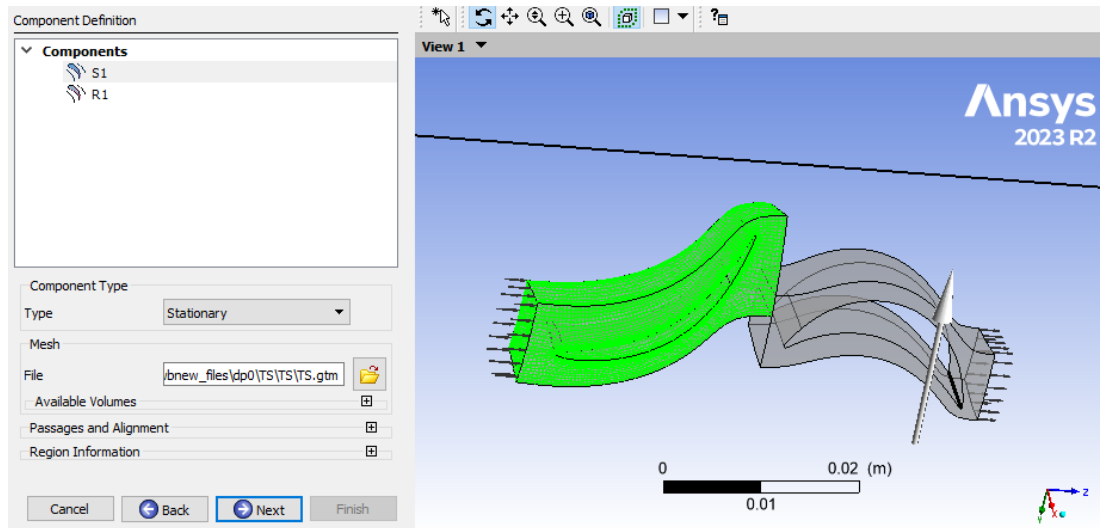
Εικόνα 4.4.1.3: Το κύριο παράθυρο του υποπρογράμματος CFX-Pre.

Αρχικά, ορίζουμε το είδος της μηχανής που μελετάμε, όπως και το είδος της ανάλυσης. Στην περίπτωση του αξονικού στροβίλου που μελετάμε επιλέγουμε την «Σταθερή Κατάσταση» ως μέθοδο ανάλυσης. Οι κύριοι λόγοι για την επιλογή αυτή είναι επειδή η συμπεριφορά του συστήματος μας δεν αλλάζει με την πάροδο του χρόνου και η προσομοίωση γίνεται ταχύτερα. Δεδομένου ότι σας ενδιαφέρει μόνο η τελική κατάσταση ισορροπίας, δεν χρειάζεται να προσομοιώνετε κάθε χρονικό βήμα από την αρχή μέχρι το τέλος, κάνοντας την ανάλυση ταχύτερη και λιγότερο εντατική σε πόρους (John Anderson, 2017).

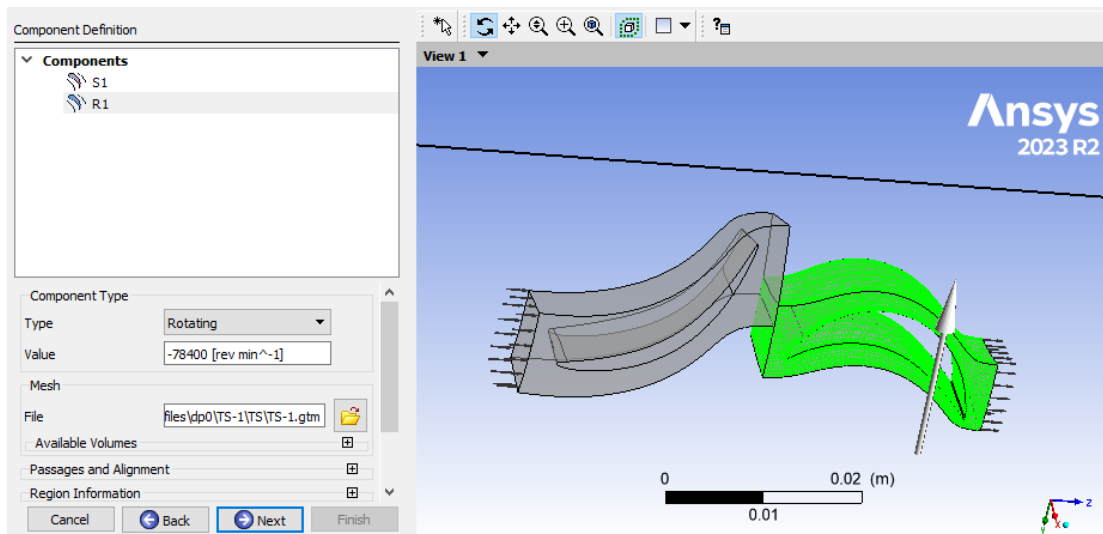


Εικόνα 4.4.1.4: Ορισμός είδους στροβιλομηχανής και τύπου ανάλυσης.

Από εκεί προχωράμε στον ακριβή προσδιορισμό του πτερυγίου του στάτορα και του ρότορα. Προσδιορίζουμε την ακινησία και τον όγκο ελέγχου των πτερυγίων του στάτορα, ενώ για τον ρότορα τις στροφές ανά λεπτό όπως και τον όγκο ελέγχου των πτερυγίων. Προσοχή πρέπει να δοθεί στο πρόσημο των στροφών διότι προσδιορίζει την φορά περιστροφής.



Εικόνα 4.4.1.5: Προσδιορισμός πτερυγίου του στάτορα.



Εικόνα 4.4.1.6: Προσδιορισμός πτερυγίου του ρότορα.

Επόμενο βήμα αποτελεί ο ορισμός του προτύπου που θα ακολουθήσουμε για την επίτευξη της προσομοίωσης. Σε αυτό το σημείο επιλέγουμε το ως ρευστό το sCO_2 , όπως το εισαγάγαμε πιο πριν στα υλικά μας, όπως και τις συνθήκες εισόδου και επιθυμητές συνθήκες εξόδου του στροβίλου.

Όσον αφορά τα μοντέλα τύρβης, υπάρχουν διάφορες επιλογές:

- **Μοντέλο k-ε:** Πρόκειται για ένα από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα μοντέλα τύρβης για προσομοιώσεις γενικής χρήσης, ιδιαίτερα σε βιομηχανικές εφαρμογές. Είναι ένα μοντέλο δύο εξισώσεων που λύνει δύο ξεχωριστές εξισώσεις μεταφοράς:
 - «k»: Η τυρβώδης κινητική ενέργεια, η οποία περιγράφει την ένταση του στροβιλισμού.

- «ε»: Ο ρυθμός διασποράς της τυρβώδους κινητικής ενέργειας, που ελέγχει το μέγεθος των δινών.

Χρησιμοποιείται κυρίως για πλήρως ανεπτυγμένη τύρβη σε ροές υψηλού αριθμού Reynolds. Ωστόσο, δεν είναι πολύ ακριβές σε ροές με ισχυρές διακυμάνσεις πίεσης, διαχωρισμούς ή περιοχές κοντά σε τοιχώματα (Costa et al., 2022).

- Μοντέλο k- ω : Είναι επίσης ένα μοντέλο δύο εξισώσεων, παρόμοιο με το μοντέλο k- ϵ , αλλά λύνει για:

- «k»: Η τυρβώδης κινητική ενέργεια.
- « ω »: Ο ειδικός ρυθμός διασποράς, ο οποίος είναι ο λόγος του «ε» προς το «k», και δίνει την κλίμακα της τύρβης.

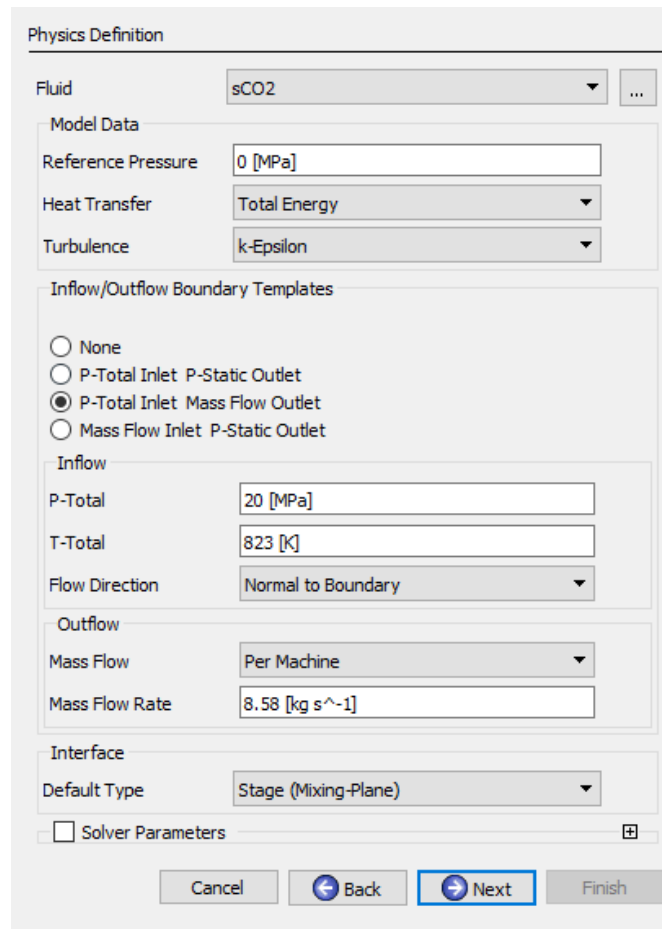
Αποδίδει καλά σε περιοχές κοντά σε τοίχους χωρίς να χρησιμοποιεί πολύπλοκες λειτουργίες και θεωρείται πιο ακριβές από το «k- ϵ » στις ροές οριακών στρωμάτων, στις ροές με διαχωρισμό, σε ισχυρές διακυμάνσεις πίεσης και ζώνες ανακυκλοφορίας. Παρόλα αυτά μπορεί να είναι υπερβολικά ευαίσθητο στις οριακές συνθήκες ελεύθερης ροής μακριά από τοίχους και όχι τόσο στιβαρό όσο το «k- ϵ » για ελεύθερες ροές διάτμησης. Το μοντέλο k- ω προτιμάται συχνά για την προσομοίωση ροών όπου η ακριβής πρόβλεψη της συμπεριφοράς του οριακού στρώματος είναι κρίσιμη (Versteeg και Malalasekera, 2007).

- Μοντέλο Shear Stress Transport (SST): Συνδυάζει τις δυνάμεις τόσο του μοντέλου «k- ϵ » όσο και του μοντέλου «k- ω », που αναπτύχθηκαν για τη βελτίωση της πρόβλεψης του διαχωρισμού της ροής και την καλύτερη καταγραφή της συμπεριφοράς αναταράξεων κοντά σε τοιχώματα. Συνδυάζει:

- Τους τύπους από το μοντέλο «k- ω » για ροές κοντά σε τοίχους (για καλύτερη ακρίβεια στα οριακά στρώματα).
- Τους τύπους από το μοντέλο «k- ϵ » για μακρινά πεδία (για καλύτερη ευρωστία σε ροές ελεύθερης ροής).

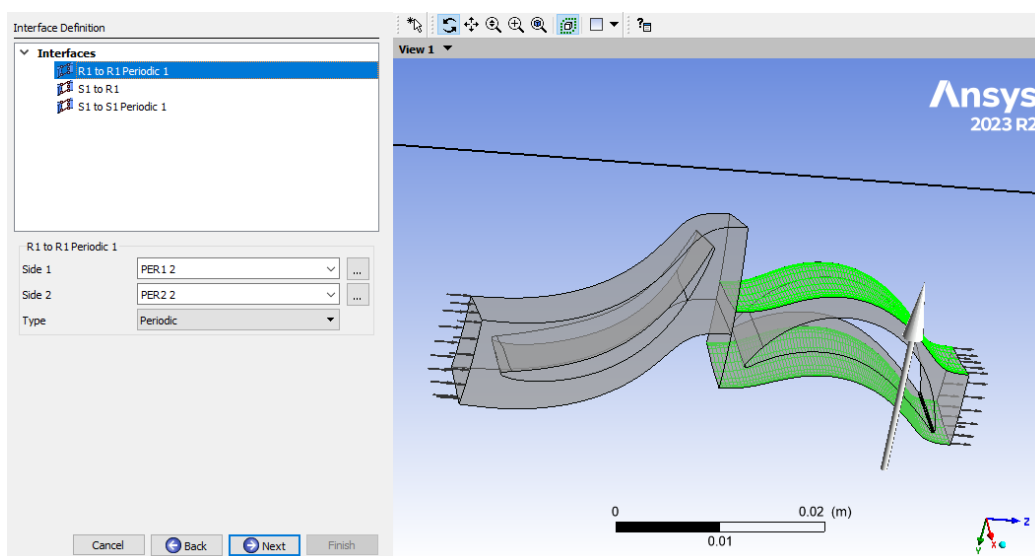
Αποτελεί βέλτιστη μέθοδος στην πρόβλεψη διαχωρισμού ροής και ισχυρών διακυμάνσεων πίεσης. Λιγότερο ευαίσθητο σε οριακές συνθήκες ελεύθερης ροής σε σύγκριση με το μοντέλο «k- ω », ενώ μπορεί να χειριστεί πολύπλοκες ροές με διαχωρισμό, στροβιλισμό ή περιστροφή. Ωστόσο περισσότερο απαιτητικό υπολογιστικά σε σύγκριση με τις δύο άλλες μεθόδους (Könözy, 2019).

Καταλήγουμε ότι το μοντέλο SST είναι εξαιρετικά ευέλικτο και είναι η προτιμώμενη επιλογή για προσομοιώσεις που περιλαμβάνουν διαχωρισμό, όπως στην μελέτη αεροδυναμικών φαινομένων και στροβιλομηχανών.

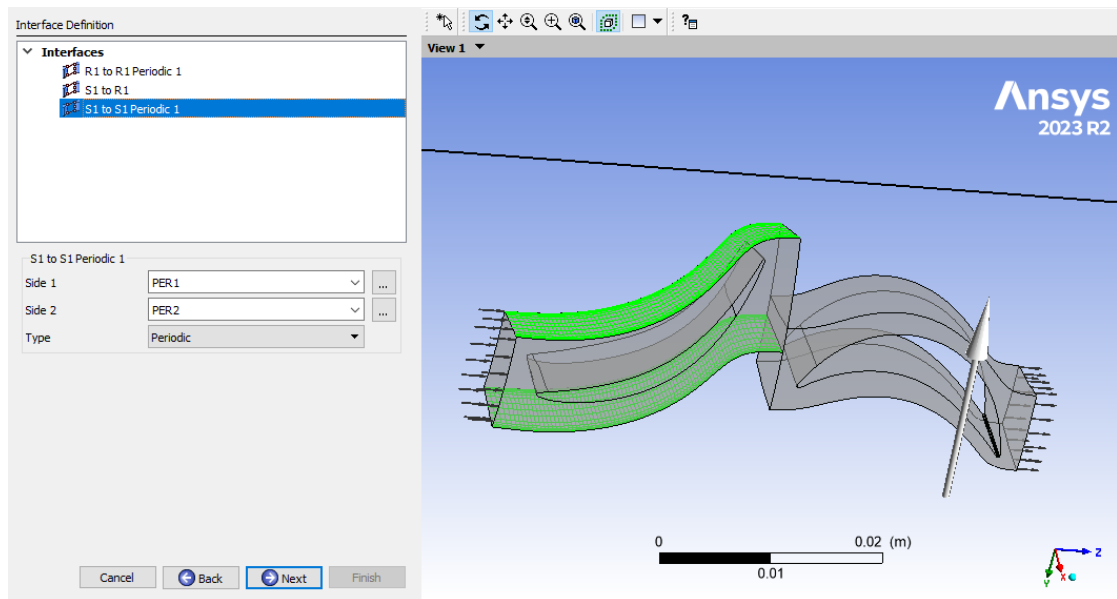


Εικόνα 4.4.1.7: Ορισμός μοντέλου επίλυσης.

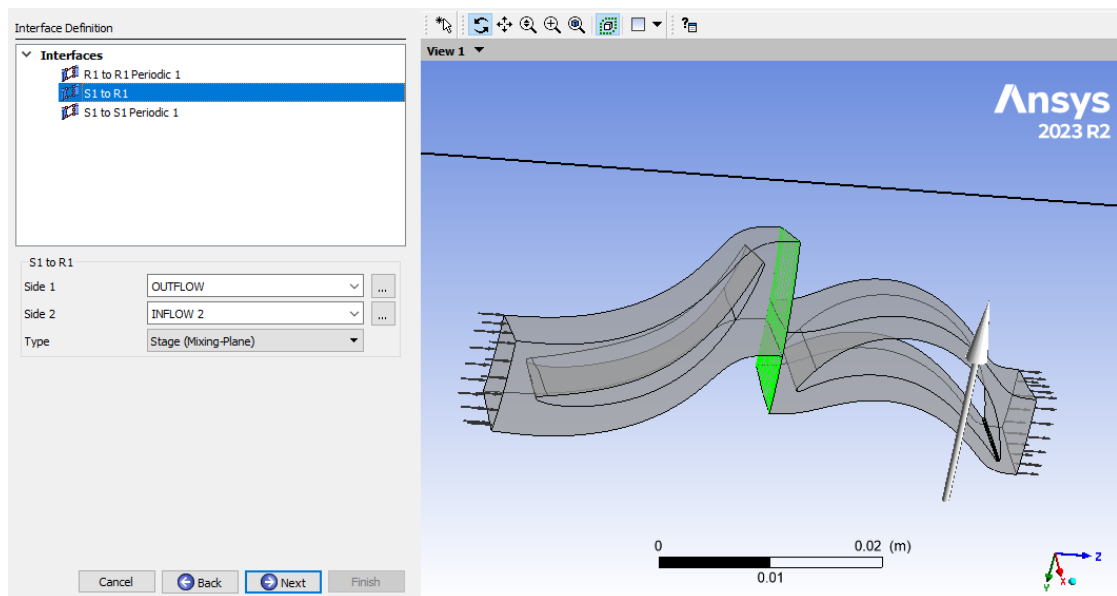
Προχωράμε στον ορισμό των διεπαφών μεταξύ των όγκων ελέγχου των πτερυγίων και των οριακών συνθηκών. Όσον αφορά τους όγκους ελέγχου των πτερυγίων έχουμε την επιφάνεια «μείξης» που αποτελεί το μεταβατικό πεδίο μεταξύ του στάτορα και του ρότορα, ενώ οι πάνω και κάτω επιφάνειες των όγκων ελέγχου θεωρούνται μεταβαλλόμενες.



Εικόνα 4.4.1.8: Ορισμός διεπαφών των πτερυγίων του ρότορα

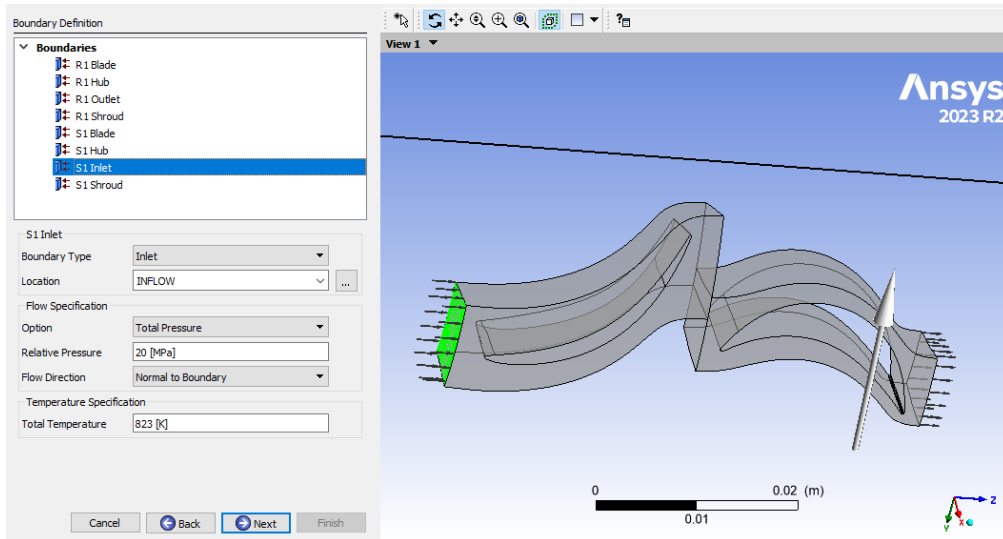


Εικόνα 4.4.1.9: Ορισμός διεπαφών των περηνγίων του στάτορα

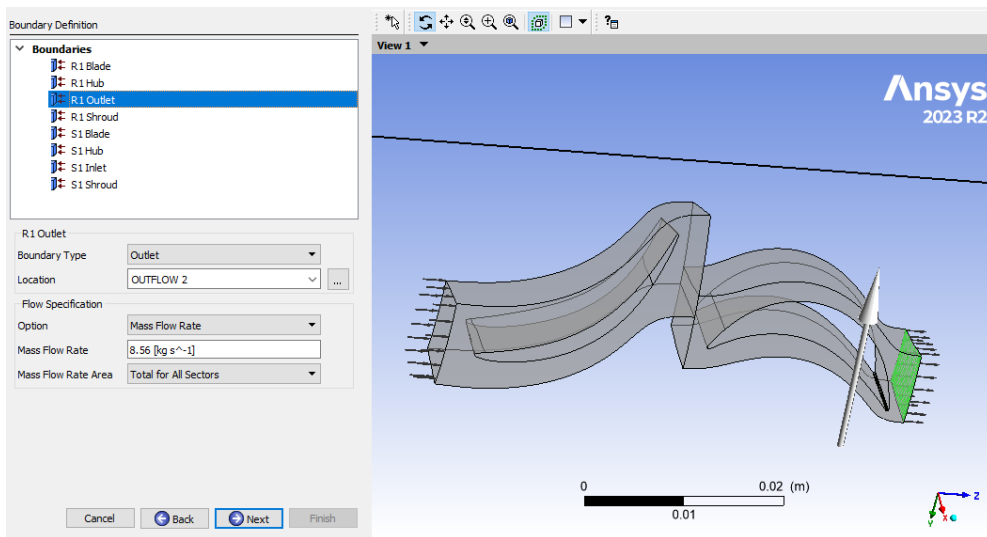


Εικόνα 4.4.1.10: Ορισμός του μεταβατικού πεδίου μεταξύ των περηνγίων.

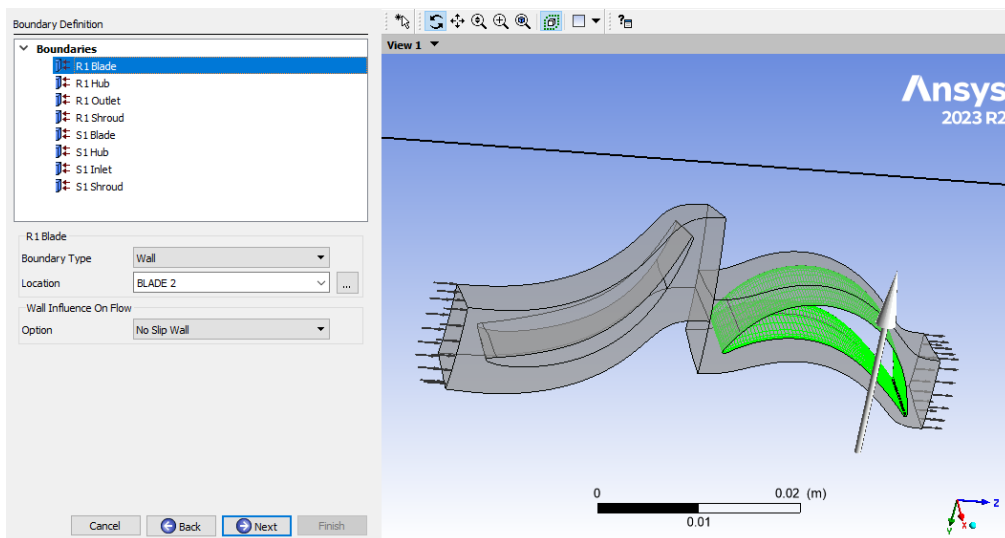
Αντίστοιχα, μένει να ορίσουμε τις οριακές συνθήκες της προσημείωσης. Αυτό περιλαμβάνει τον καθορισμό της συνολικής πίεσης και θερμοκρασίας κατά την είσοδο και την ροή μάζας κατά την έξοδο, ενώ ορίζουμε την πλήρη, ακμή και τα περύγια ως «τοίχους χωρίς ολίσθηση».



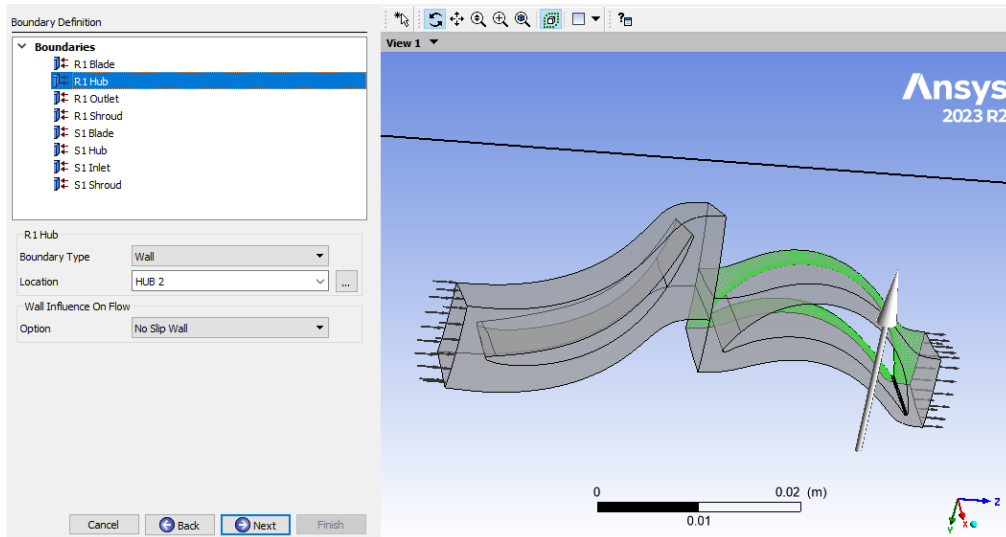
Εικόνα 4.4.1.11: Ορισμός των ιδιοτήτων του ρευστού κατά την είσοδο.



Εικόνα 4.4.1.12: Ορισμός των ιδιοτήτων του ρευστού κατά την είσοδο.

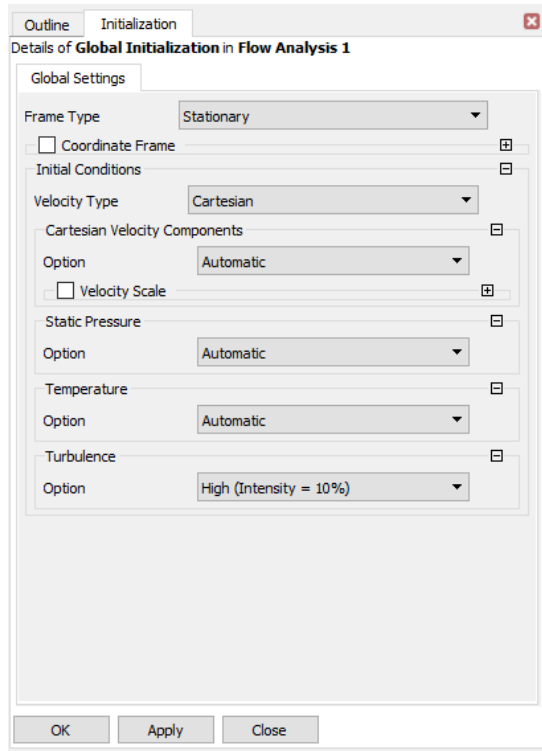


Εικόνα 4.4.1.13: Ορισμός των οριακών συνθηκών του πτερυγίου.

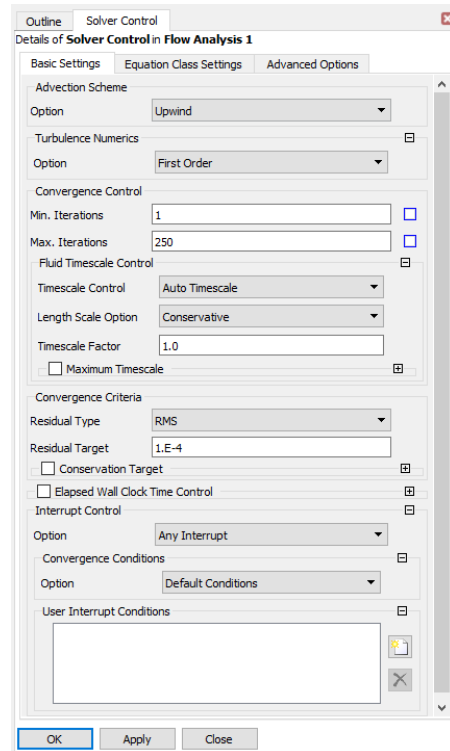


Εικόνα 4.4.1.14: Ορισμός των οριακών συνθηκών της πλήμνης.

Τέλος, μένει να καθορίσουμε τις παραμέτρους επίλυσης. Μία από αυτές είναι η ένταση της τύρβης, η οποία επιλέγεται ως υψηλή όπως συνηθίζεται στους αξονικούς στροβίλους λόγω των υψηλών αριθμών Reynolds και των πολύπλοκων μοτίβων ροής. Η άλλη είναι το σχέδιο έλξης που επιλέγεται να είναι αντίθετα από την ροή (upwind), λόγω της υψηλής ταχύτητας ροής. Προσφέρει καλύτερη αριθμητική σταθερότητα διασφαλίζοντας ότι οι πληροφορίες διαδίδονται στη σωστή κατεύθυνση (με τη ροή) (Abdeldayem et al., 2021).



Εικόνα 4.4.1.15: Ορισμός έντασης τύρβης.



Εικόνα 4.4.1.16: Ορισμός σχεδίου έλξης.

Μπορούμε να διαμορφώσουμε τις ρυθμίσεις επίλυσης και περαιτέρω, όπως τα κριτήρια σύγκλισης και το μέγεθος χρονικού βήματος (για μεταβατικές προσομοιώσεις). Αυτές οι ρυθμίσεις επηρεάζουν την ακρίβεια και την αποτελεσματικότητα της προσομοίωσης και επιλέγονται έτσι ώστε να επιτευχθεί μια ισορροπία μεταξύ ακρίβειας και υπολογιστικού κόστους.

Συμπύσσοντας όλες τις παραπάνω ρυθμίσεις, προκύπτει ο παρακάτω πίνακας.

Πίνακας 4.4.1.1: Παράμετροι επίλυσης CFD.

	Τύπος Παραμέτρου	Ρύθμιση
Τύπος Ανάλυσης	Steady-state	-
Δεδομένα μοντέλου	Reference pressure	0 kPa
	Heat transfer	Total energy
	Turbulence	SST
Οριακές συνθήκες	T_0 (K)	823
	P_0 (MPa)	20
	N (kRPM)	80
	P_1 (MPa)	7.8
	Shroud	Counterrotating wall
	Blade/hubs	No slip wall
Διεπαφή	Stator to rotor	Stage (mixing plane)
Έλεγχος επιλυτή	Advection scheme	Upwind
	Turbulence numeric	High resolution
Χρονικός βηματισμός	Physical timescale(s)	10^{-4}
Κριτήρια σύγκλισης	RMS	10^{-5}

4.4.2 CFX-Solver Manager

Το CFX-Solver Manager, είναι κυριολεκτικά ο επιλυτής του προβλήματος μας. Είναι στη ουσία μια γραφική διεπαφή χρήστη που δίνει τη δυνατότητα να οριστούν τα χαρακτηριστικά για τον υπολογισμό του CFD, να ελεγχθεί το CFX-Solver διαδραστικά και να προβληθούν πληροφορίες σχετικά με την αναδυόμενη λύση (ANSYS Inc., 2021b).

Όπως έχει προαναφερθεί, ο στάτορας ρυθμίζει την κατεύθυνση και την ταχύτητα του ρευστού εργασίας έτσι ώστε να ρέει στον ρότορα με τη σχεδιασμένη γωνία και ταχύτητα. Σε αυτό το σημείο, ένα μοντέλο CFD χρησιμοποιείται για να απεικονίζει το τρισδιάστατο πεδίο ροής. Ένα μοντέλο CFD συμβάλλει επίσης στην πρόβλεψη της απόδοσης του στροβίλου και στην διαλεύκανση της θέσης των απωλειών. Για να διεκπεραιώσει το πρόγραμμα τους παραπάνω υπολογισμούς χρησιμοποιεί ένα μοντέλο που αποτελείται από πακέτο εξισώσεων που περιγράφουν την ροή. Οι κύριες από αυτές είναι οι παρακάτω.

Εξίσωση 4.4.2.1: Εξίσωση συνέχειας

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0$$

Εξίσωση 4.4.2.2: Εξίσωση ορμής

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \times U) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + S_M$$

Όπου το «τ» αντιπροσωπεύει τον τανυστή τάσης, ο οποίος μπορεί να υπολογιστεί ξεχωριστά.

Εξίσωση 4.4.2.3: Τανυστής τάσης

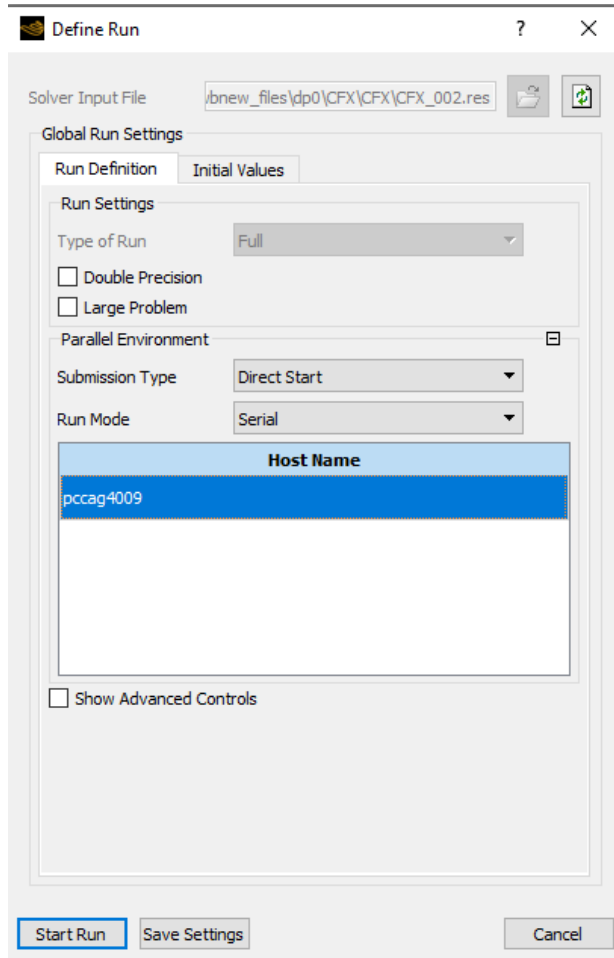
$$\tau = \mu \left(\nabla U + (\nabla U)^T - \frac{2}{3} \delta \nabla \cdot U \right)$$

Εξίσωση 4.4.2.4: Εξίσωση ενέργειας

$$\frac{\partial(\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U h_{tot}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (U \cdot \tau) + U \cdot S_M + S_E$$

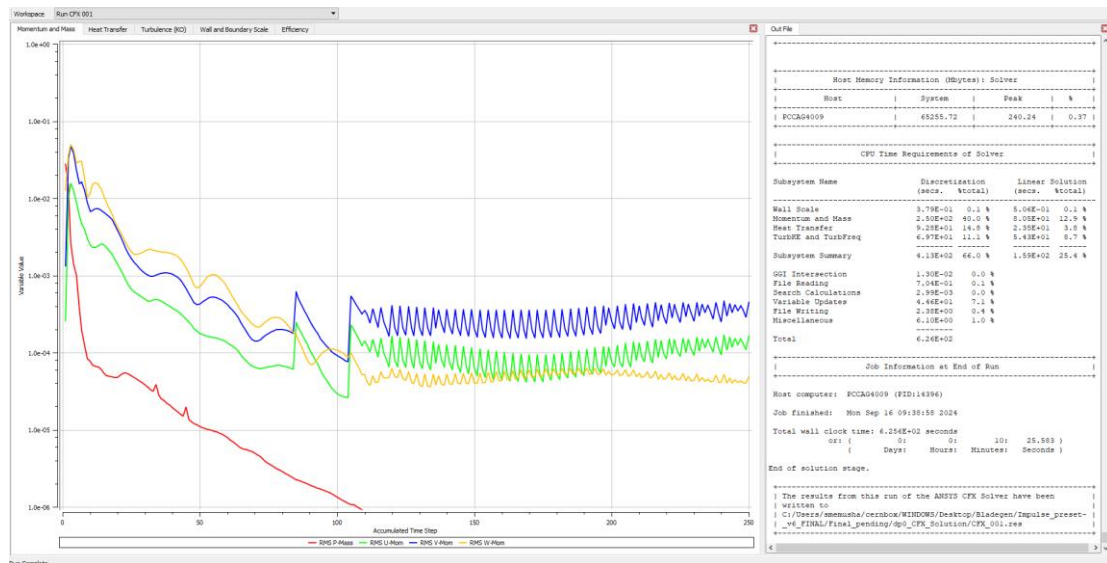
Ο όρος $\nabla \cdot (U \cdot \tau)$ ορίζει το έργο λόγω των ιξωδών τάσεων (viscous stresses) και αποκαλείται όρος ιξώδους έργου (viscous work term), ο οποίος περιγράφει την παραγωγή θερμότητας στο ρευστό λόγω των ιξωδών δυνάμεων και στις περισσότερες περιπτώσεις είναι αμελητέος.

Ο όρος $U \cdot S_M$ υποδηλώνει το έργο λόγω ορμής εξωτερικών παραγόντων.



Εικόνα 4.4.2.1: Παράθυρο εκκίνησης του επιλυτή.

Όταν εκκινούμε το πρόγραμμα εμφανίζεται το παρακάτω δυναμικό διάγραμμα, μεταβαλλόμενο στον χρόνο.



Εικόνα 4.4.2.2: Απεικόνιση των RMS κατά την λειτουργία του Solver.

Η εικόνα είναι ένα διάγραμμα σύγκλισης από το ANSYS CFX που προκύπτει από τον επιλυτή. Χρησιμοποιείται για να αξιολογήσει πόσο καλά συγκλίνει η λύση με την πάροδο του χρόνου κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Συγκεκριμένα, ο άξονας Y (Τιμή μεταβλητής) αντιπροσωπεύει τα «υπολείμματα» ρίζας του μέσου τετραγώνου (RMS) διαφόρων μεταβλητών. Το «υπόλειμμα» είναι ένα μέτρο του πόσο η τρέχουσα λύση αποκλίνει από την ικανοποίηση των εξισώσεων που διέπουν την ροή του ρευστού.

Αντίστοιχα, ο άξονας X (Συσσωρευμένο βήμα χρόνου) δείχνει τον αριθμό των χρονικών βημάτων που συσσωρεύτηκαν κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Κάθε χρονικό βήμα αντιπροσωπεύει μια πρόοδο της λύσης προς την τελική σταθερή ή παροδική συμπεριφορά.

Η κάθε έγχρωμη γραμμή αντιπροσωπεύει το υπόλειμμα RMS για μια συγκεκριμένη μεταβλητή:

- Κόκκινο (RMS P-Mass): Υπόλειμμα για διατήρηση μάζας (επίλυση εξίσωσης συνέχειας).
- Πράσινο (RMS U-Mom): Υπόλειμμα για την x-συνιστώσα της ορμής (U-Momentum).
- Μπλε (RMS V-Mom): Υπόλειμμα για την y-συνιστώσα της ορμής (V-ορμή).
- Πορτοκαλί (RMS W-Mom): Υπόλειμμα για τη συνιστώσα z της ορμής (W-ορμή).

Τα υπολείμματα κατά κανόνα μειώνονται με την πάροδο του χρόνου, πράγμα που δείχνει ότι η λύση συγκλίνει (οι εξισώσεις ικανοποιούνται με μεγαλύτερη ακρίβεια).

Υπάρχουν περιοδικές αιχμές στα υπολείμματα, που υποδηλώνουν μη γραμμικότητες στη διαδικασία επίλυσης ή περιοχές της ροής όπου παροδικά φαινόμενα ή αλλαγές στις οριακές συνθήκες μπορεί να επηρεάζουν τη σύγκλιση. Η μείωση των υπολειμματικών τιμών είναι επιθυμητή γιατί σημαίνει ότι η προσομοίωση προχωρά προς μια πιο σταθερή και ακριβέστερη λύση. Ο στόχος είναι συνήθως τα υπολείμματα να πέφτουν κάτω από ένα ορισμένο όριο (συνήθως κάτω από 10^{-4}) για να θεωρηθεί ότι η λύση συγκλίνει πλήρως (Franke et al., 2007).

4.4.3 CFD-Post

Το CFD-Post, είναι ένας ευέλικτος μεταεπεξεργαστής. Έχει σχεδιαστεί για να επιτρέπει την εύκολη οπτικοποίηση και την ποσοτική ανάλυση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων CFD (ANSYS Inc., 2021c).

Μέσα από το υποπρόγραμμα μας ενδιαφέρει να δούμε την κατανομή της πίεσης στα διάφορα ύψη (spans) του πτερυγίου, που αποτελεί το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό του στροβίλου αφού ορίζει την ιδιότητα του.



Εικόνα 4.4.3.1: Κατανομή της πίεσης στο 10% του ύψους των περυγίων.



Εικόνα 4.4.3.2: Κατανομή της πίεσης στο 50% του ύψους των περυγίων.



Εικόνα 4.4.3.3: Κατανομή της πίεσης στο 90% του ύψους των πτερυγίων.

Η αναλλαγή χρώματος από κόκκινο/κίτρινο σε πράσινο/μπλε αντανακλά την πτώση πίεσης στο πέρασμα του πτερυγίου. Αυτή η πτώση πίεσης είναι κρίσιμη για την παραγωγή ισχύος στην έξοδο του στροβίλου. Η ταχεία μεταβολή της πίεσης σημαίνει την εκτόνωση του υπερκρίσιμου CO₂ καθώς διαπερνά τα πτερύγια. Το CO₂ υφίσταται μια σχετικά αποτελεσματική διαδικασία εκτόνωσης, μεταφέροντας ενέργεια στα πτερύγια του στροβίλου και προκαλώντας μείωση της πίεσης.

Αξίζει να σταθούμε στην τοπικά υψηλή πίεση (πορτοκαλί/κόκκινη περιοχή) η οποία εμφανίζεται κυρίως όσο πλησιάζουμε την ακμή του πτερυγίου του ρότορα. Η συγκεντρωμένη περιοχή υψηλής πίεσης μπορεί να υποδηλώνει υψηλό φορτίο, διαχωρισμό ροής, ανακυκλοφορία ή στασιμότητα ροής, τα οποία επηρεάζουν σημαντικά στην μείωση της απόδοσης του στροβίλου. Επιπλέον, τα σημεία αυτά είναι πιθανά σημεία μηχανικής καταπόνησης, διότι τα υπερκρίσιμα ρευστά, λόγω της υψηλής ενεργειακής τους πυκνότητας, μπορούν να επιβάλλουν σημαντικά μηχανικά φορτία στα εξαρτήματα του στροβίλου. Έτσι, απαιτείται αρκετή προσοχή για τη διασφάλιση της δομικής ακεραιότητας των πτερυγίων του στροβίλου.

4.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτή την μελέτη, γίνεται ανάλυση ενός αξονικού στροβίλου κλίμακας 10 kW, ο οποίος εξετάστηκε για τις ανάγκες ενός κύκλου ισχύος sCO₂ για την ανάκτηση της απορριπτόμενης θερμότητας από πυρηνικό εργοστάσιο.

Ολοκληρώθηκαν αριθμητικές προσομοιώσεις, με τον στρόβιλο να έχει σχεδιαστεί για να παράγει ισχύ εξόδου 1 MW στις 78.000 RPM με αναλογία πίεσης 2,56. Όπως είναι εμφανές, η υψηλή πυκνότητα ισχύος του sCO₂ έχει ως αποτέλεσμα υψηλές ταχύτητες περιστροφής για τέτοιες στροβιλομηχανές μικρής κλίμακας. Στην κλίμακα αυτή, ο ρυθμός ροής μάζας σχεδιασμού των στροβίλων είναι χαμηλότερος σε σύγκριση με τους σχεδιασμούς στροβίλων υψηλής ισχύος, στην μελέτη αυτή με βάση την αρχή διατήρησης της μάζας, προέκυψε ως 8,56 kg/s. Η απόδοση της εξόδου του στροβίλου βασίζεται στον λόγο πίεσης και στην ταχύτητα περιστροφής.

Για το πτερύγιο του στάτορα και του ρότορα, οι κατανομές στατικής πίεσης σε διαφορετικά ύψη (spans) είναι σχετικά συνεπείς. Ο στάτορας εμφανίζει σταθερά χαρακτηριστικά φόρτισης που ανακουφίζουν το φαινόμενο διαχωρισμού, ενώ ο ρότορας έχει προφανή χαρακτηριστικά διαχωρισμού και καταπόνησης, συμβάλλοντας έτσι μερικώς στην πτώση πίεσης. Όσον αφορά συνολικά τον στρόβιλο, τα φαινόμενα διαχωρισμού και στροβιλισμού που εμφανίζονται αποδίδονται κυρίως στην ακανόνιστη κατανομή πίεσης του ρότορα, η οποία είχε ως αποτέλεσμα την απώλεια ροής.

Σε μελλοντικές έρευνες, προτείνεται να διερευνηθεί μια συνολική επίδραση της κλίμακας ισχύος και του εύρους ταχυτήτων σε στροβίλους sCO₂. Όπως και το να γίνει μία εκτενής γεωμετρική και δομική ανάλυση πτερυγίων για τέτοιου είδους εφαρμογές. Επιπλέον, είναι σημαντικό να αναπτυχθούν μοντέλα απώλειας στροβίλων ως κατευθυντήριες γραμμές σχεδιασμού με στόχο την βελτίωση των στροβίλων sCO₂ για εκτεταμένη εφαρμογή και σε άλλες πηγές θερμότητας μέσης θερμοκρασίας, συμπεριλαμβανομένης της ηλιακής, της βιομηχανικά αποβαλλόμενης θερμότητας και της γεωθερμίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Abdeldayem, A., White, M.T., Sayma, A.I., 2021. Comparison of CFD predictions of supercritical carbon dioxide axial flow turbines using a number of turbulence models.
2. Adams, B.M., Kuehn, T.H., Bielicki, J.M., Randolph, J.B., Saar, M.O., 2015. A comparison of electric power output of CO ₂ Plume Geothermal (CPG) and brine geothermal systems for varying reservoir conditions. <i>Appl Energy</i> 140, 365–377. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.11.043
3. Agromayor, R., Nord, L.O., 2019. Preliminary design and optimization of axial turbines accounting for diffuser performance. <i>International Journal of Turbomachinery, Propulsion and Power</i> 4. https://doi.org/10.3390/ijtp4030032
4. Ahn, Y., Bae, S.J., Kim, M., Cho, S.K., Baik, S., Lee, J.I., Cha, J.E., 2015. Review of supercritical CO ₂ power cycle technology and current status of research and development. <i>Nuclear Engineering and Technology</i> . https://doi.org/10.1016/j.net.2015.06.009
5. Ainley, D.G., Mathieson, G.C., 1957. A Method of Performance Estimation for Axial-Flow Turbines.
6. Angelino, G., 1968. Carbon Dioxide Condensation Cycles For Power Production. <i>Journal of Engineering for Power</i> 90, 287–295. https://doi.org/10.1115/1.3609190
7. ANSYS Inc., 2021a. CFX-Pre User’s Guide.
8. ANSYS Inc., 2021b. CFX-Solver Manager User’s Guide.
9. ANSYS Inc., 2021c. CFD-Post User’s Guide.
10. ANSYS Inc., 2013. ANSYS TurboGrid Tutorials Third-Party Software.
11. Baik, S., Kim, S.G., Lee, J., Lee, J.I., 2017. Study on CO ₂ – water printed circuit heat exchanger performance operating under various CO ₂ phases for S-CO ₂ power cycle application. <i>Appl Therm Eng</i> 113, 1536–1546. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.11.132
12. Balje´, O.E., 1962. A Study on Design Criteria and Matching of Turbomachines: Part A—Similarity Relations and Design Criteria of Turbines. <i>Journal of Engineering for Power</i> 84, 83–102. https://doi.org/10.1115/1.3673386
13. Bitencourt, R.G., Palma, A.M., Coutinho, J.A.P., Cabral, F.A., Meirelles, A.J.A., 2019. Prediction of solid solute solubility in supercritical CO ₂ with cosolvents using the CPA EoS. <i>Fluid Phase Equilib</i> 482, 1–10. https://doi.org/10.1016/j.fluid.2018.10.020
14. Budisa, N., Schulze-Makuch, D., 2014. Supercritical carbon dioxide and its potential as a life-sustaining solvent in a planetary environment. <i>Life</i> 4, 331–340. https://doi.org/10.3390/life4030331
15. Carman, B.G., Kapat, J.S., Chow, L.C., An, L., 2002. IMPACT OF A CERAMIC MICROCHANNEL HEAT EXCHANGER ON A MICRO TURBINE.

16. Carolus, T., Bamberger, K., 2023. Axial Impeller-Only Fans with Optimal Hub-to-Tip Ratio and Blades Adapted for Minimum Exit Loss. <i>International Journal of Turbomachinery, Propulsion and Power</i> 8. https://doi.org/10.3390/ijtpp8010007
17. Clementoni, E.M., Cox, T.L., King, M.A., 2015. Off-Nominal Component Performance in a Supercritical Carbon Dioxide Brayton Cycle. <i>J Eng Gas Turbine Power</i> 138. https://doi.org/10.1115/1.4031182
18. Conboy, T., Wright, S., Pasch, J., Fleming, D., Rochau, G., Fuller, R., 2012. Performance Characteristics of an Operating Supercritical CO ₂ Brayton Cycle. <i>J Eng Gas Turbine Power</i> 134. https://doi.org/10.1115/1.4007199
19. Costa, L.M.F., Montiel, J.E.S., Corrêa, L., Lofrano, F.C., Nakao, O.S., Kurokawa, F.A., 2022. Influence of standard $k-\epsilon$, SST $\kappa-\omega$ and LES turbulence models on the numerical assessment of a suspension bridge deck aerodynamic behavior. <i>Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering</i> 44. https://doi.org/10.1007/s40430-022-03653-1
20. Daabo, A.M., Mahmoud, S., Al-Dadah, R.K., Al Jubori, A.M., Bhar Ennil, A., 2017. Numerical analysis of small scale axial and radial turbines for solar powered Brayton cycle application. <i>Appl Therm Eng</i> 120, 672–693. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.03.125
21. Devetta, L., Giovanzana, A., Canu, P., Bertucco, A., Minder, B.J., n.d. Kinetic experiments and modeling of a three-phase catalytic hydrogenation reaction in supercritical CO ₂ .
22. Dixon, S.L., Hall, C.A., 2014a. Fluid mechanics and thermodynamics of turbomachinery. Butterworth-Heinemann.
23. Dixon, S.L., Hall, C.A., 2014b. Fluid mechanics and thermodynamics of turbomachinery. Butterworth-Heinemann.
24. Dostal, V., Driscoll, M.J., Hejzlar, P., 2004. Advanced Nuclear Power Technology Program.
25. Dostal, V., Hejzlar, P., Driscoll, M.J., 2006. High-performance supercritical carbon dioxide cycle for next-generation nuclear reactors. <i>Nucl Technol</i> 154, 265–282. https://doi.org/10.13182/NT154-265
26. Dyreby, J., Klein, S., Nellis, G., Reindl, D., 2014. Design Considerations for Supercritical Carbon Dioxide Brayton Cycles With Recompression. <i>J Eng Gas Turbine Power</i> 136. https://doi.org/10.1115/1.4027936
27. E.G. Feher, 1968. The Supercritical Thermodynamic Power Cycle, Energy Conversion. Pergamon Press.
28. El Samad, T., Teixeira, J.A., Oakey, J., 2020. Investigation of a radial turbine design for a utility-scale supercritical CO ₂ power cycle. <i>Applied Sciences (Switzerland)</i> 10, 1–26. https://doi.org/10.3390/APP10124168
29. Franke, J., Hellsten, A., Schlünzen, H., Carissimo, B., 2007. Best Practice Guideline For The Cfd Simulation Of Flows In The Urban Environment.

30. Gambini, M., Vellini, M., 2021. Preliminary Design of Axial Flow Turbines, in: Gambini, M., Vellini, M. (Eds.), Turbomachinery: Fundamentals, Selection and Preliminary Design. Springer International Publishing, Cham, pp. 109–153. https://doi.org/10.1007/978-3-030-51299-6_3
31. Gkoutas, A.A., Stamatelos, A.M., Kalfas, A.I., 2017. Recuperators investigation for high temperature supercritical carbon dioxide power generation cycles. Appl Therm Eng 125, 1094–1102. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.07.092
32. Heshmat, H., Ii, J.F.W., Córdova, J.L., 2018. The 6 th International Supercritical CO2 Power Cycles Symposium Technology Readiness of 5 th and 6 th Generation Compliant Foil Bearing for 10 MWE S-CO2 Turbomachinery Systems.
33. H.I.H. Saravanamuttoo, G.F.C. Rogers, H. Cohen, 2016. Gas Turbine Theory.
34. Im, S.I., Shin, S., Park, J.W., Yoon, H.J., Go, K.S., Nho, N.S., Lee, K.B., 2018. Selective separation of solvent from deasphalted oil using CO2 for heavy oil upgrading process based on solvent deasphalting. Chemical Engineering Journal 331, 389–394. https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.08.094
35. Japikse, D., Baines, N.C., 1994. Introduction to Turbomachinery.
36. John Anderson, 2017. Fundamentals of Aerodynamics.
37. Kapil, S., 2011. Aerodynamic Design and Performance of an Axial Flow Turbine for a Small Turbofan Engine application.
38. Kato, Y., Nikitin, K., n.d. ADVANCED ENERGY SYSTEM WITH NUCLEAR REACTORS AS AN ENERGY SOURCE.
39. Klimko, M., Žitek, P., Duda, D., Rudas, B., 2022. Estimation of the Induced Incidence of a High Reaction Axial Turbine Bucket. Energies (Basel) 15. https://doi.org/10.3390/en15176440
40. Könözsy, L., 2019. The $k-\omega$ and Shear-Stress Transport (SST) Turbulence Model, in: Könözsy, L. (Ed.), A New Hypothesis on the Anisotropic Reynolds Stress Tensor for Turbulent Flows: Volume I: Theoretical Background and Development of an Anisotropic Hybrid k -Omega Shear-Stress Transport/Stochastic Turbulence Model. Springer International Publishing, Cham, pp. 57–66. https://doi.org/10.1007/978-3-030-13543-0_3
41. Kulhánek, I.M., Václav Dostál, I., 2019. SUPERCRITICAL CARBON DIOXIDE CYCLES THERMODYNAMIC ANALYSIS AND COMPARISON.
42. Ma, S., Hu, J., Wang, X., Ji, J., 2022. Effect of Non-Uniformity of Rotor Stagger Angle on the Stability of a Low-Speed Axial Compressor. Energies (Basel) 15. https://doi.org/10.3390/en15082714
43. Mehos, M., Turchi, C., Vidal, J., Wagner, M., Ma, Z., Ho, C., Kolb, W., Andraka, C., Kruizenga, A., 1980. Concentrating Solar Power Gen3 Demonstration Roadmap.

44. Meshram, A., Jaiswal, A.K., Khivsara, S.D., Ortega, J.D., Ho, C., Bapat, R., Dutta, P., 2016. Modeling and analysis of a printed circuit heat exchanger for supercritical CO ₂ power cycle applications. <i>Appl Therm Eng</i> 109, 861–870. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.05.033
45. Mohammadi, Z., Fallah, M., Mahmoudi, S.M.S., 2019. Advanced exergy analysis of recompression supercritical CO ₂ cycle. <i>Energy</i> 178, 631–643. https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.134
46. Moroz, L., Frolov, B., Burlaka, M., Guriev, O., 2014. Turbomachinery flowpath design and performance analysis for supercritical CO ₂ , in: <i>Proceedings of the ASME Turbo Expo. American Society of Mechanical Engineers (ASME)</i> . https://doi.org/10.1115/GT2014-25385
47. Pecnik, R., Rinaldi, E., Colonna, P., 2012. COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS OF A RADIAL COMPRESSOR OPERATING WITH SUPERCRITICAL CO ₂ .
48. R Gorla, R.S., Khan, A.A., 2003. <i>Axial Flow and Radial Flow Gas Turbines</i> .
49. Reale, F., Calabria, R., Massoli, P., 2023. Performance Analysis of WHR Systems for Marine Applications Based on sCO ₂ Gas Turbine and ORC. <i>Energies (Basel)</i> 16. https://doi.org/10.3390/en16114320
50. Rogalev, A., Grigoriev, E., Osipov, S., Rogalev, N., 2019. The design approach for supercritical CO ₂ gas turbine, <i>AIP Conference Proceedings</i> . https://doi.org/10.1063/1.5138630
51. Sánchez, D., Brenes, B.M., Muñoz de Escalona, J.M., Chacartegui, R., 2013. Non-conventional combined cycle for intermediate temperature systems. <i>Int J Energy Res</i> 37, 403–411. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/er.2945
52. Sarkar, J., 2009. Second law analysis of supercritical CO ₂ recompression Brayton cycle. <i>Energy</i> 34, 1172–1178. https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.04.030
53. Sarkar, J., Bhattacharyya, S., 2009. Optimization of recompression S-CO ₂ power cycle with reheating. <i>Energy Conversion and Management - ENERGMANAGE</i> 50, 1939–1945. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.04.015
54. Scaccabarozzi, R., Martelli, E., Pini, M., De Servi, C.M., Chiesa, P., Gatti, M., 2022. A Code for the Preliminary Design of Cooled Supercritical CO ₂ Turbines and Application to the Allam Cycle. <i>J Eng Gas Turbine Power</i> 144. https://doi.org/10.1115/1.4052146
55. Schmitt, J., Amos, D., Kapat, J., 2015. DESIGN AND REAL FLUID MODELLING OF MICRO-CHANNEL RECUPERATORS FOR A NOMINAL 100MW CLASS RECUPERATED RECOMPRESSION BRAYTON CYCLE USING SUPERCRITICAL CARBON DIOXIDE.
56. Seppo A. Korpela, 2011. <i>Principles of Turbomachinery</i> .
57. Sonal Patel, 2022. NET Power’s First Allam Cycle 300-MW Gas-Fired Project Will Be Built in Texas.

58. Span, R., Wagner, W., 1996. A New Equation of State for Carbon Dioxide Covering the Fluid Region from the Triple-Point Temperature to 1100 K at Pressures up to 800 MPa. <i>J Phys Chem Ref Data</i> 25, 1509–1596. https://doi.org/10.1063/1.555991
59. Stepanek, J., Syblik, J., Entler, S., 2022. Axial sCO ₂ high-performance turbines parametric design. <i>Energy Convers Manag</i> 274. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116418
60. Su, R., Yu, Z., Wang, D., Sun, B., Sun, J., 2022. Performance Analysis of an Integrated Supercritical CO ₂ Recompression/Absorption Refrigeration/Kalina Cycle Driven by Medium-Temperature Waste Heat. <i>Journal of Thermal Science</i> 31, 2051–2067. https://doi.org/10.1007/s11630-022-1677-7
61. Sudhoff, R., Glos, S., Siemens, M.W., Saar, M.O., Zurich, E., Sudhoff, R., Glos, S., Wechsung, M., Adams, B., Wechsung, M., Adams, B.M., 2019. Next Level Geothermal Power Generation (NGP)-A new sCO ₂ -based geothermal concept Next Level Geothermal Power Generation (NGP)-A new sCO ₂ -based geothermal concept Conference Paper Next Level Geothermal Power Generation (NGP)-A new sCO ₂ -based geothermal concept. https://doi.org/10.3929/ethz-b-000449693
62. Turchi, C., Ma, Z., Neises, T., Wagner, M., 2012. Thermodynamic Study of Advanced Supercritical Carbon Dioxide Power Cycles for High Performance Concentrating Solar Power Systems, <i>Journal of Solar Energy Engineering</i> . https://doi.org/10.1115/ES2012-91179
63. Uysal, S.C., White, C.W., Weiland, N., Liese, E.A., 2022. Cooling analysis of an axial turbine for a direct fired sCO ₂ cycle and impacts of turbine cooling on cycle performance. <i>Energy Convers Manag</i> 263. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115701
64. Versteeg, H.K., Malalasekera, W., 2007. <i>An Introduction to Computational Fluid Dynamics Second Edition</i> .
65. Yunus A. Çengel, John M. Cimbala, 2014. <i>Fluid Mechanics</i> .
66. Zhou, A., Song, J., Li, X., Ren, X., Gu, C., 2018. Aerodynamic design and numerical analysis of a radial inflow turbine for the supercritical carbon dioxide Brayton cycle. <i>Appl Therm Eng</i> 132, 245–255. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.12.106
67. Σαρρής Β. Αλέξανδρος, 2017α. Σχεδιασμός και Ανάλυση Βαθμίδας Αξονικού Συμπιεστή για Εφαρμογές Υπερκρίσιμου Διοξειδίου του Άνθρακα.