



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΥ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΦΥΓΟΚΕΝΤΡΙΚΟΥ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ ΜΕ
ΕΡΓΑΖΟΜΕΝΟ ΜΕΣΟ R718**

ΠΑΤΡΑΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΧΡΗΣΤΟΣ ΤΖΙΒΑΝΙΔΗΣ (ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ)

Περιεχόμενα

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ	v
ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ	vii
ΣΥΝΟΨΗ.....	viii
ΚΑΦΑΛΑΙΟ 1^ο.....	1
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 <i>Εισαγωγικά γενικά στοιχεία.....</i>	<i>1</i>
1.2 <i>Το νερό ως ψυκτικό μέσο</i>	<i>2</i>
1.3 <i>Γενικά για τους συμπιεστές R718.....</i>	<i>4</i>
1.4 <i>Περιγραφή του Κυκλώματος Ψύξης.....</i>	<i>5</i>
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο	7
ΦΥΓΟΚΕΝΤΡΙΚΟΙ ΣΥΜΠΙΕΣΤΕΣ R718	7
2.1 <i>Κύρια μέρη του Φυγοκεντρικού συμπιεστή</i>	<i>7</i>
2.2 <i>Κύριες παράμετροι φυγοκεντρικού συμπιεστή.....</i>	<i>10</i>
2.3 <i>Σχεδιασμός για βέλτιστη γεωμετρία του συμπιεστή.....</i>	<i>13</i>
2.4 <i>Χαρακτηριστικά της ροής στους φυγοκεντρικούς συμπιεστές R718</i>	<i>18</i>
2.5 <i>Χαρακτηριστικά απόδοσης.....</i>	<i>20</i>
2.6 <i>Σύγκριση υπολοίπων ψυκτικών μέσων με το νερό σε συστήματα στροβιλοσυμπιεστών.....</i>	<i>23</i>
2.7 <i>Χαρακτηριστικά φυγοκεντρικών συμπιεστών R718</i>	<i>28</i>
2.8 <i>Συμπεράσματα</i>	<i>35</i>
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο	38
ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΤΟΥ ΦΥΓΟΚΕΝΤΡΙΚΟΥ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ R718.....	38
3.1 <i>Περιγραφή του παρόντος μοντέλου.....</i>	<i>38</i>
3.2 <i>Αρχικές συνθήκες του μοντέλου.....</i>	<i>38</i>
3.3 <i>Σχεδίαση της πτερωτής.....</i>	<i>40</i>
3.4 <i>Σχεδίαση του Διαχύτη.....</i>	<i>47</i>
3.5 <i>Σχεδίαση του Σωλήνα Εισόδου</i>	<i>49</i>
3.6 <i>Σχεδίαση του Κελύφους.....</i>	<i>50</i>
3.8 <i>Τελικό μοντέλο του φυγοκεντρικού συμπιεστή</i>	<i>54</i>

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4°	56
ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΦΥΓΟΚΕΝΤΡΙΚΟΥ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ R718	56
4.1 Περιγραφή της διαδικασίας	56
4.2 Ορισμός του πλέγματος.....	57
4.3 Δημιουργία πλέγματος της Πτερωτής.....	58
4.4 Δημιουργία πλέγματος του διαχύτη	63
4.5 Δημιουργία πλέγματος του σωλήνα εισόδου	65
4.6 Δημιουργία πλέγματος του κελύφους	67
4.7.1 Εισαγωγικά για ρευστοδυναμική ανάλυση (CFD) του φυγοκεντρικού συμπιεστή R718..	69
4.7.2 Γενικά στοιχεία του προγράμματος CFX	69
4.8 Μοντελοποίηση του προβλήματος.....	70
4.9 Αποτελέσματα από την εκτέλεση CFD του φυγοκεντρικού συμπιεστή R718	74
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5°	78
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ	78
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	79

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

Εικόνα 1. 1 Απεικόνιση του κυκλώματος ψύξης (20)	5
Εικόνα 1. 2 Απεικόνιση του παραπάνω κυκλώματος ψύξης μαζί με το κύκλωμα για τον Πύργο ψύξης με το κύκλωμα που πήγαινε στον καταναλωτή. (17).....	6

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

Εικόνα 2. 1 Απεικόνιση φυγοκεντρικού συμπιεστή σε μεσημβρινή και από πάνω όψη (34)	7
Εικόνα 2. 2 Φυγοκεντρικός συμπιεστής (30)	8
Εικόνα 2. 3 Συμπιεστής τύπου Roots (20).....	9
Εικόνα 2. 4 Συμπιεστής τύπου Screw (30)	9
Εικόνα 2. 5 Εξάρτηση του συντελεστή παροχής (Φ_{2d}) με την γωνία εξόδου (β_2) (19).....	14
Εικόνα 2. 6 Εξάρτηση του συντελεστή φόρτισης (Ψ), το παράγοντα ολίσθησης (μ_s) και τον αριθμό των πτερυγίων (Z_2) την γωνία εξόδου (β_2) (19)	15
Εικόνα 2. 7 Εξάρτηση του βαθμού απόδοσης (η_p) με την γωνία εξόδου (β_2) (19)	15
Εικόνα 2. 8 Απεικόνιση των τριγώνων ταχυτήτων στην είσοδο και στην έξοδο της φτερωτής (32)	16
Εικόνα 2. 9 Μεσημβρινή απεικόνιση του συμπιεστή (33)	17
Εικόνα 2. 10 Απεικόνιση των ζωνών jet – wake στην πτερωτή (28)	19
Εικόνα 2. 11 Λόγος πίεσης για διάφορα ψυκτικά μέσα (17).....	24
Εικόνα 2. 12 Αλληλεξάρτηση μεταξύ των l_e , M_u , Π , u_2 διάφορα ψυκτικά μέσα (17).....	25
Εικόνα 2. 13 Αλληλεξάρτηση μεταξύ Q_e , D_2 , e_c , η , b_2 και M_u για διάφορα ψυκτικά μέσα (17) ...	26
Εικόνα 2. 14 Χαρακτηριστικά απόδοσης συμπιεστή (17).....	28
Εικόνα 2. 15 Εξάρτηση μεταξύ M_u και u_2 (19)	29
Εικόνα 2. 16 Εξάρτηση μεταξύ Π ΔT και u_2 για διάφορες θερμοκρασίες ($\psi = 0,65$ και $\eta_p = 0,78$) (19).....	30
Εικόνα 2. 17 Επιρροή του η_p και Ψ στον λόγο πίεσης Π και στη ΔT ($T_0=10^\circ\text{C}$) (19)	31
Εικόνα 2. 18 Εξάρτηση της ογκομετρικής της ογκομετρικής παροχής V στην ικανότητα του ψυκτικού συστήματος (Q_e) για διάφορες θερμοκρασίες (19).....	32
Εικόνα 2. 19 Εξάρτηση της ογκομετρικής παροχής στην έξοδο της φτερωτής V_2 στην ογκομετρική παροχή V και στον περιφερειακό αριθμό Mach (19).....	32
Εικόνα 2. 20 Αλληλεξάρτηση μεταξύ D_2 , b_2 , η , V_2 και u_2 (19).....	33

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

Εικόνα 3. 1 Τιμές των αρχικών συνθηκών και οι ιδιότητες του ρευστού	39
Εικόνα 3. 2 Κύριες διαστάσεις πτερωτής	40
Εικόνα 3. 3 Μεσημβρινή όψη της πτερωτής	41
Εικόνα 3. 4 Δημιουργία 4 καμπυλών Bezier για τη δημιουργία του κύριου Πτερυγίου.....	42
Εικόνα 3. 7 Τρίγωνα ταχυτήτων στην είσοδο και στην έξοδο της φτερωτής.....	45

Εικόνα 3. 5 Πάχος τον πτερωτών	46
Εικόνα 3. 6 Τριδιάστατη όψη της φτερωτής μέσω του CFTurbo.....	47
Εικόνα 3. 8 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του διαχύτη	48
Εικόνα 3. 9 Όψη του σωλήνα εισόδου	49
Εικόνα 3. 10 Γεωμετρία αγωγού του σπειροειδούς κελύφους	50
Εικόνα 3. 11 Άνω όψη του κελύφους όπου διακρίνεται η γωνία 360°	51
Εικόνα 3. 12 Όψη του σπειροειδούς κελύφους μαζί με τον αυγό προέκτασης	52
Εικόνα 3. 13 Τελικό σχέδιο του κελύφους	52
Εικόνα 3. 14 Τελικό σχέδιο του συμπιεστή όψη 1	54
Εικόνα 3. 15 Τελικό σχέδιο του συμπιεστή όψη 2	54
Εικόνα 3. 16 Τελικό σχέδιο του συμπιεστή όψη 3	55

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

Εικόνα 4. 1 Μοντελοποίηση του συμπιεστή στο Ansys Workbench	57
Εικόνα 4. 2 Passage της πτερωτής.....	58
Εικόνα 4. 3 Αναλυτικά δεδομένα ίδια το Mesh.....	60
Εικόνα 4. 4 Τελικό πλέγμα για την φτερωτή όψη 1	61
Εικόνα 4. 5 Τελικό πλέγμα για την φτερωτή όψη 2	61
Εικόνα 4. 6 Τελικό πλέγμα για την φτερωτή όψη 3	62
Εικόνα 4. 7 Τελικό πλέγμα για την φτερωτή όψη στην έξοδο	62
Εικόνα 4. 8 Αναλυτικές τιμές για το πλέγμα του διαχύτη	63
Εικόνα 4. 9 Τελικό πλέγμα του διάχυτη	64
Εικόνα 4. 10 Κοντινότερη όψη του πλέγματος του διάχυτη	65
Εικόνα 4. 11 Τελικό πλέγμα του σωλήνα εισόδου	66
Εικόνα 4. 12 Κοντινότερη όψη του πλέγματος του σωλήνα εισόδου	67
Εικόνα 4. 13 Τελικό πλέγμα του κελύφους	68
Εικόνα 4. 14 Κοντινότερη όψη του πλέγματος του κελύφους (α).....	68
Εικόνα 4. 15 Κοντινότερη όψη του πλέγματος του κελύφους (β).....	69
Εικόνα 4. 16 Αρχικές βασικές ρυθμίσεις στο Turbo Mode	71
Εικόνα 4. 17 Ορισμός κάθε μεγέθους του συμπιεστή στο Turbo Mode	71
Εικόνα 4. 18 Εισαγωγή των αρχικών συνθηκών στο Turbo Mode	72
Εικόνα 4. 19 Εισαγωγή των δεδομένων του ρευστού (α).....	73
Εικόνα 4. 20 Εισαγωγή των δεδομένων του ρευστού (β).....	73
Εικόνα 4. 21 Περιβάλλον CFX.....	74
Εικόνα 4. 22 Κατανομή ολικής πίεσης στην κάτω επιφάνεια της φτερωτής	75
Εικόνα 4. 23 Κατανομή της ολικής πίεσης σε πλάγια όψη της φτερωτής.....	75
Εικόνα 4. 24 Κατανομή της στατικής πίεσης στην φτερωτή και στον διάχυτη σε μεσημβρινή όψη	76
Εικόνα 4. 25 Κατανομή της ταχύτητας στο κέλυφος	77

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

Πίνακας 2. 1 Πίνακας τιμών θερμοδυναμικών ιδιοτήτων για διάφορα ψεύτικα μέσα (17)	23
Πίνακας 2. 2 Δεδομένα μονοβάθμιου φυγοκεντρικού συμπιεστή για θερμοκρασία $T_e = 0\text{o C}$ και $T_c = 40\text{o C}$ (17).....	27

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

Πίνακας 3. 1 Στοιχεία για τις αρχικές συνθήκες και τις ιδιότητες του ρευστού.....	39
Πίνακας 3. 2 Τιμές γωνιών για τις καμπύλες (span) των κύριων και δευτερευουσών πτερυγίων	42
Πίνακας 3. 3 Αναλυτικά στοιχεία για τις ταχύτητες και για κάθε μία από τις καμπύλες (Span) των κύριων και δευτερευουσών πτερυγίων	44
Πίνακας 3. 4 Αναλυτικά στοιχεία για τα μήκη του κελύφους.....	53

ΣΥΝΟΨΗ

Τις τελευταίες δεκαετίες τα αυξανόμενα περιβαλλοντικά προβλήματα έχουν ωθήσει τους επιστήμονες στην εύρεση νέων τεχνολογιών με όσο δυνατόν ελάχιστες ή ακόμα και καθόλου ρυπαντές προς το περιβάλλον. Στον τομέα της ψύξης/θέρμανσης μία από αυτές τις τεχνολογίες αφορά συστήματα ψύξης τα οποία έχουν ως εργαζόμενο μέσο το νερό και για το κύκλωμά τους χρησιμοποιούν φυγοκεντρικούς συμπιεστές. Τα συστήματα, τα οποία ένα αντίθεση με τα κλασικά συστήματα ψύξης τα οποία χρησιμοποιούν ρυπογόνα ψυκτικά μέσα, έχουν μηδέν αντίκτυπο στο περιβάλλον, φαντάζουν ιδανικά για το μέλλον και η εξέλιξη τους κρίνεται έως και αναγκαία.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εκπονείται ο σχεδιασμός και η ανάλυση της ροής ενός φυγοκεντρικού συμπιεστή, ο οποίος θα χρησιμοποιηθεί ως εργαζόμενο μέσο το νερό (R718) για κύκλωμα ψύξης εσωτερικών χώρων μικρού μεγέθους και ισχύς 35KW. Η σχεδίαση απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή, τόσο λόγω των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων του νερού όσο και για το γεγονός ότι πρόκειται για πρόβλημα στροβιλομηχανών όπου γεωμετρία του συμπιεστή θα είναι πολύπλοκη αλλά και θα υπάρξουν μεγάλες θερμοδυναμικές αλλαγές στην ροή.

Η εργασία ξεκινάει με την ανάλυση όλων των παραμέτρων που αφορούν τη σχεδίαση του εν λόγω συμπιεστή αλλά γίνεται και ανάλυση της διαφορετικότητας με άλλους συμπιεστές που λειτουργούν με άλλα εργαζόμενα μέσα. Έπειτα έγινε προκαταρκτικός τρισδιάστατος σχεδιασμός μέσω υπολογιστικό προγράμματος για κάθε μέρος του συμπιεστή ξεχωριστά, για να φτάσουμε στο τελευταίο κομμάτι που αφορά την εκτέλεση υπολογιστικής ρευστοδυναμικής ανάλυσης (CFD) για την επικύρωση των παραμέτρων που υπολογίστηκαν σε προηγούμενο στάδιο αλλά και για τον απολογισμό νέων

ΚΑΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Εισαγωγικά γενικά στοιχεία

Με την ταχεία ανάπτυξη της παγκόσμιας οικονομίας και τη συνεχή αύξηση της ζήτησης υλικών, η κατανάλωση ενέργειας αυξάνεται ραγδαία και η ενεργειακή έλλειψη θα αποτελέσει μείζον πρόβλημα για την ανάπτυξη του κόσμου στο μέλλον. Ενώ η κατανάλωση ενέργειας είναι τεράστια, τα παγκόσμια περιβαλλοντικά ζητήματα, όπως η εξάντληση του όζοντος, η υπερθέρμανση του πλανήτη, το λιώσιμο των παγετώνων και η άνοδος της στάθμης της θάλασσας, κρούουν επίσης τον κώδωνα του κινδύνου. Μπροστά στην κρίση της ορυκτής ενέργειας και τα παγκόσμια περιβαλλοντικά προβλήματα, η αφιέρωση προσπαθειών στην ανάπτυξη και χρήση νέων μορφών ενέργειας και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως το σχιστολιθικό πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, η ηλιακή ενέργεια, η αιολική ενέργεια, η υδροηλεκτρική ενέργεια, η γεωθερμική ενέργεια, η ενέργεια από βιομάζα κ.ά., μπορεί να μειώσει αποτελεσματικά την εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα και να προστατεύσει το περιβάλλον. Ταυτόχρονα, η προώθηση της νέας πράσινης τεχνολογίας εξοικονόμησης ενέργειας και η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας στην παραγωγή και τη ζωή αποτελούν επίσης σημαντικά μέσα για την απαλλαγή από την ενεργειακή κρίση. Ως εκ τούτου, η πράσινη τεχνολογία εξοικονόμησης ενέργειας αποτελεί τον πυρήνα της έρευνας και την εστίαση του χρόνου σε διάφορους τομείς της κοινωνικής παραγωγής

Στον τομέα της ψύξης, η αναζήτηση αποδοτικών, πράσινων, φιλικών προς το περιβάλλον και εύκολα διαθέσιμων ψυκτικών μέσων έχει γίνει κοινός τόπος και η οικοδόμηση οικονομικών, εξοικονόμησης ενέργειας και αποδοτικών συστημάτων κυκλοφορίας δίνεται επίσης προσοχή στη βιομηχανία.

Η αναζήτηση νέων και φιλικών προς το περιβάλλον ψυκτικών μέσων έχει ανανεώσει το ενδιαφέρον για τεχνολογίες που χρησιμοποιούν φυσικά ψυκτικά μέσα, όπως το νερό. Ο κανονισμός για τα φθοριούχα αέρια, ο οποίος τέθηκε σε ισχύ την 1η Ιανουαρίου 2015, προβλέπει τη σταδιακή μείωση του ισοδύναμου CO₂ των υδροφθορανθράκων (HFC) σε ολόκληρη την ΕΕ κατά 79% έως το 2030 σε σύγκριση με μια τιμή αναφοράς που βασίζεται στον ετήσιο μέσο όρο των ποσοτήτων υδροφθορανθράκων που ένας παραγωγός ή εισαγωγέας ανέφερε ότι διέθεσε στην αγορά μεταξύ 2009 και 2012. Το επόμενο βήμα θα είναι η απαγόρευση της διάθεσης ψυκτικών συσκευών για εμπορική χρήση με HFC με GWP > 2500. Ως αποτέλεσμα, το ψυκτικό μείγμα R404A δεν μπορεί πλέον να χρησιμοποιείται σε νέα συστήματα από αυτό το χρονικό σημείο και μετά.

Μια τρέχουσα εναλλακτική λύση είναι η αντικατάσταση HFC ή HFO, αλλά στις περισσότερες περιπτώσεις, θεωρούνται μόνο ως προσωρινή λύση. Μια μακροπρόθεσμη εναλλακτική λύση είναι το φυσικό ψυκτικό μέσο. Το νερό ξεχωρίζει ως φυσικό ψυκτικό μέσο επειδή δεν έχει GWP ή ODP και δεν είναι ούτε εύφλεκτο ούτε τοξικό. Όταν χρησιμοποιείται σε ένα σύστημα ψύξης, εμφανίζεται σε υγρή και αέρια κατάσταση.

1.2 Το νερό ως ψυκτικό μέσο

Το νερό (R718) ως ψυκτικό μέσο είναι ένα από τα παλαιότερα ρευστά που χρησιμοποιούνται για ψυκτικές εφαρμογές μέχρι περίπου το σημείο πήξης. Το 1934, το νερό χρησιμοποιήθηκε ως ψυκτικό μέσο από την Belmont σε ένα σύστημα κλιματισμού και ήταν η πρώτη φορά που το νερό τεκμηριώθηκε στον τομέα της ψύξης ως ψυκτικό μέσο. Στη συνέχεια, με την ανακάλυψη και την εφαρμογή του ψυκτικού μέσου φρέον, ο όγκος και το βάρος του συμπιεστή μειώθηκαν σημαντικά και τα συστήματα συμπίεσης με νερό ως ψυκτικό μέσο ξεχάστηκαν σταδιακά. Τώρα, ενόψει της ενεργειακής κρίσης και των σοβαρών περιβαλλοντικών προβλημάτων και όσων αναφέρθηκαν παραπάνω, το νερό είναι ένα είδος πράσινου, φθηνού, ασφαλούς και σταθερού φυσικού ψυκτικού μέσου. Η χρήση του νερού ως ψυκτικού μέσου θα αποτελέσει μια σημαντική κατεύθυνση για τη μελλοντική έρευνα στον τομέα της εξοικονόμησης ενέργειας καθώς και στον τομέα της ψύξης, η οποία έχει προσελκύσει την προσοχή εγχώριων και ξένων μελετητών.

Όταν το νερό συνδυάζεται με προστατευτικά διαλύματα για την αποφυγή της κατάψυξης (π.χ. προπυλενογλυκόλη ή αιθυλενογλυκόλη), μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί πολύ κάτω από το κανονικό σημείο κατάψυξης του νερού σε εφαρμογές όπως οι πολτοί πάγου. Το νερό είναι εύκολα διαθέσιμο και έχει εξαιρετικές θερμοδυναμικές και χημικές ιδιότητες. Για θερμοκρασίες ατμοποίησης άνω των 20°C το R718 δίνει την υψηλότερη COP από όλα τα ψυκτικά μέσα υποθέτοντας ακριβώς τις ίδιες παραμέτρους του κύκλου.

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των φυσικών ψυκτικών μέσων που έχουν ήδη περιγράψει σε προηγούμενες μελέτες, το νερό μπορεί να θεωρηθεί ελκυστικό ψυκτικό μέσο λόγω των ακόλουθων πλεονεκτημάτων του.

- (1) Καμία ρύπανση του περιβάλλοντος. Ως ψυκτικό μέσο, το ODP του νερού είναι 0 και το $GWP < 1$, πράγμα που σημαίνει ότι το νερό δεν προκαλεί ζημιά στο στρώμα του όζοντος και οι επιπτώσεις του στην υπερθέρμανση του πλανήτη είναι μικρές. Το νερό είναι ένα φιλικό προς το περιβάλλον ψυκτικό μέσο και δεν υπάρχει κίνδυνος μελλοντικών περιορισμών.
- (2) Εύκολη πρόσβαση σε πρώτες ύλες και χαμηλό κόστος. Το νερό αφθονεί στη φύση και σε σύγκριση με οποιοδήποτε άλλο είδος ψυκτικών μέσων, το νερό είναι το πιο προσιτό και οικονομικό ψυκτικό μέσο. Το νερό της βρύσης, τα επεξεργασμένα λύματα ή το χονδροειδώς φιλτραρισμένο νερό του ποταμού μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα ως νερό αναπλήρωσης.

- (3) Καλή ασφάλεια. Το νερό δεν είναι τοξικό, εύφλεκτο, εκρηκτικό και δεν έχει άλλες επικίνδυνες ιδιότητες. Ανεξάρτητα από το αν συμβεί διαρροή υγρού ή αερίου, το νερό δεν προκαλεί προβλήματα ασφαλείας και είναι το ασφαλέστερο ψυκτικό μέσο. Αυτό υπόσχεται επίσης ότι το νερό δεν έχει πρόβλημα διάθεσης μετά τη χρήση.
- (4) Καλή σταθερότητα και ανθεκτικότητα. Η χημική φύση του νερού είναι πολύ σταθερή και δεν υπάρχει αποσύνθεση του νερού κατά τη μακροχρόνια χρήση.
- (5) Μεγάλη λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης. Σε σύγκριση με το προπάνιο, την αμμωνία και το διοξείδιο του άνθρακα, η λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης και η μονάδα μάζας ψυκτικής ικανότητας του νερού είναι μεγάλες.
- (6) Ασφάλεια λειτουργίας του συστήματος. Το νερό λειτουργεί με πολύ χαμηλές διαφορές πίεσης, μειώνοντας τις προφυλάξεις ασφαλείας.
- (7) Υψηλός θεωρητικός συντελεστής απόδοσης. Σε σύγκριση με τα CFC, το νερό έχει υψηλό θεωρητικό συντελεστή απόδοσης (COP).
- (8) Το σύστημα που λειτουργεί με νερό ως ψυκτικό μέσο μπορεί να χρησιμοποιήσει άμεσα εναλλάκτες θερμότητας για την ατμοποίηση και τη συμπύκνωση.

Παρά τα πλεονεκτήματά της, η χρήση του νερού ως ψυκτικού μέσου έχει τις δικές της προκλήσεις που πρέπει να ξεπεραστούν. Οι φυσικές ιδιότητες του νερού, όπως το χαμηλό μοριακό βάρος, ο μεγάλος ειδικός όγκος και ο υψηλός αδιαβατικός δείκτης, καθορίζουν τα συστήματα υδρατμών με:

- μεγάλο λόγο πίεσης
- μικρή ψυκτική ικανότητα ανά μονάδα όγκου
- μεγάλη ροή όγκου
- υψηλή θερμοκρασία ατμοποίησης

Λόγω του γεγονότος ότι η πίεση κορεσμού του νερού στους 100 °C είναι ίση με την ατμοσφαιρική πίεση, τα συστήματα υδρατμών βρίσκονται συχνά σε κατάσταση κενού. Γι' αυτό ο σημαντικότερος περιορισμός του νερού ως ψυκτικού μέσου σε μονάδες ψύξης για εφαρμογές κλιματισμού είναι το τριπλό σημείο του (0,00615 bar- 0,01°C). Οι συνθήκες λειτουργίας σε βαθύ κενό και η χαμηλή ειδική ογκομετρική ψυκτική ικανότητα του R718 είναι ιδιαιτερότητες που προκαλούν μεγάλες και εξαιρετικά μεγάλες ογκομετρικές παροχές για το θερμοκρασιακό εύρος των εφαρμογών ψύξης/κλιματισμού. Επιπλέον, ο απαιτούμενος λόγος πίεσης για δεδομένη ανύψωση θερμοκρασίας είναι υψηλός.

Ωστόσο, αυτές οι προκλήσεις μπορούν να ξεπεραστούν με το σχεδιασμό και την κατασκευή ειδικών συμπιεστών σε συστήματα υδρατμών.

1.3 Γενικά για τους συμπιεστές R718

Η ιδέα των συστημάτων ψύξης με τουρμποσυμπιεστή ξεκίνησε στα τέλη της δεκαετίας του 1980 και του 1990. Η εταιρεία IDE Technologies, στο Ισραήλ, υπήρξε πρωτοπόρος για τους φυγοκεντρικούς συμπιεστές υδρατμών ήδη από τις δεκαετίες του 1960, 1970 και 1980. Οι φυγοκεντρικοί συμπιεστές R718 έχουν εφαρμοστεί με επιτυχία σε θερμικούς συμπυκνωτές και εγκαταστάσεις αφαλάτωσης νερού. Μέχρι το τέλος της δεκαετίας του 1990, ο φυγοκεντρικός συμπιεστής υδρατμών R718 είχε ήδη αναπτυχθεί και κατασκευαστεί από το Institut für Luft and Kältetechnik της Δρέσδης, Γερμανία. Η εμπορική σκοπιμότητα της χρήσης του νερού ως βιώσιμη εναλλακτική λύση στα παραδοσιακά συνθετικά ψυκτικά μέσα αναλύεται από τους Lachner Jr. et al. (2007), όπου οι συγγραφείς δείχνουν ότι τα συστήματα ψύξης με συμπίεση ατμών με βάση το νερό δεν θα είναι οικονομικά ελκυστικά για μια ψυκτική μονάδα ονομαστικής ισχύος 3520 kW (σε σύγκριση με την τρέχουσα τεχνολογία αιχμής για μεγάλους ψύκτες που χρησιμοποιούν R134a) χωρίς ουσιαστικές και επιτυχείς προσπάθειες για την ανάπτυξη συμπιεστών χαμηλού κόστους και μεγάλης ισχύος. Η ονομαστική ισχύς των 3520 kW είναι πολύ μεγάλη για τις ψυκτικές μονάδες φυγοκεντρικού συμπιεστή R718.

Βάσει των πρόσφατων εξελίξεων και τεχνολογιών που εξετάζονται για τους φυγοκεντρικούς συμπιεστές ψύξης χωρίς πετρέλαιο με απευθείας κίνηση και μεταβλητές στροφές (τεχνολογία κινητήρων μόνιμων μαγνητών υψηλής ταχύτητας και τεχνολογία ενεργών μαγνητικών εδράνων), και ακολουθώντας την πρόοδο των επιστημών υλικών και αντοχής και τα επιτεύγματα στη δυναμική των ρευστών (CFD), οι φυγοκεντρικοί συμπιεστές νερού αποκτούν νέες προοπτικές και δυνατότητες για μελλοντική ανάπτυξη.

Τα τεχνικά και περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα του νερού ως ψυκτικού μέσου και οι θερμοδυναμικές του ιδιότητες είναι γνωστά. Για εφαρμογές αντλιών θερμότητας υψηλής θερμοκρασίας και θερμομετασχηματιστών σε μονάδες συμπύκνωσης και αφαλάτωσης, το νερό είναι ένα ιδανικό εργαζόμενο μέσο, κατάλληλο για την εφαρμογή φυγοκεντρικών συμπιεστών.

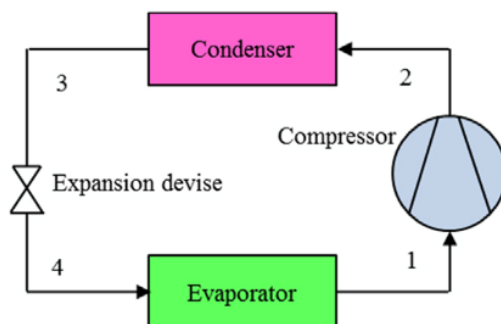
Η κύρια εφαρμογή των συμπιεστών υδρατμών μπορεί να χωριστεί σε τρία είδη: σύστημα MVR, σύστημα αντλίας θερμότητας υδρατμών και σύστημα ψύξης R718. Το σύστημα MVR είναι μια τεχνολογία υψηλής απόδοσης και εξοικονόμησης ενέργειας και το πλεονέκτημά του έγκειται στην απλή διαδικασία, το χαμηλό κόστος λειτουργίας, την ανακύκλωση της θερμότητας χωρίς το σύστημα ψύξης και τη μικρή καλυπτόμενη επιφάνεια. Τα συστήματα ψύξης υδρατμών και τα συστήματα αντλίας θερμότητας υδρατμών αντιμετωπίζουν αμφότερα την πρόκληση της ατμοποίησης σε κενό, του μεγάλου λόγου συμπίεσης, της μικρής ογκομετρικής ψυκτικής ικανότητας, της μεγάλης παροχής όγκου και της υψηλής θερμοκρασίας ατμοποίησης. Ωστόσο, ο COP τους είναι καλύτερος από τα παραδοσιακά συστήματα ψύξης και αντλίας θερμότητας υπό ορισμένες συνθήκες.

Προκειμένου να προωθηθεί η χρήση του ψυκτικού μέσου νερού στον τομέα της παραγωγής και των μέσων διαβίωσης, είναι επείγον να ερευνηθούν και να αναπτυχθούν πρακτικά εφαρμόσιμοι συμπιεστές για διαφορετικές περιπτώσεις χρήσης και απαιτήσεις ατμού. Η ανάπτυξη του συμπιεστή R718 περιορίζει την εφαρμογή του ψυκτικού μέσου (νερού) και την απόδοση του

συστήματος υδρατμών. Ο συμπιεστής υδρατμών με δύο κοιλίες με έγχυση νερού είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία που πρέπει να αναβιώσει στα συστήματα ψύξης υδρατμών και αντλιών θερμότητας και ο συνδυασμός του συμπιεστή υδρατμών με άλλο εξοπλισμό αποτελεί επίσης σημαντική ερευνητική κατεύθυνση. Εξάλλου, το σύστημα αντλίας θερμότητας συμπίεσης υδρατμών υψηλής θερμοκρασίας είναι πραγματικά μια τεχνολογία εξοικονόμησης ενέργειας με πράσινο ψυκτικό μέσο, η οποία μπορεί να έχει ευρείες βιομηχανικές εφαρμογές και θα πρέπει να επικεντρωθεί.

1.4 Περιγραφή του Κυκλώματος Ψύξης

Το ψυκτικό σύστημα ενός συμπιεστή R718 ενός σταδίου αποτελείται από τέσσερα βασικά μέρη: τον ψυκτικό συμπιεστή, τον συμπυκνωτή, τον ατμοποιητή και τη βάννα διαστολής. Το διάγραμμα ροής του συστήματος παρουσιάζεται στο σχήμα.

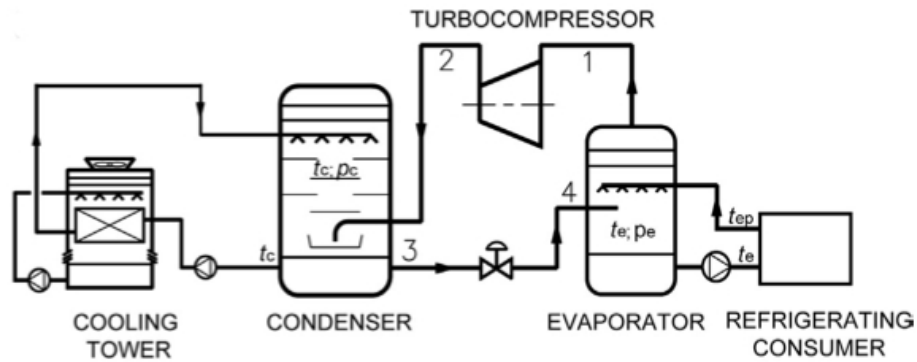


Εικόνα 1. 1 Απεικόνιση του κυκλώματος ψύξης (20)

Το νερό είναι το μέσο υλικό που χρησιμοποιείται για την απορρόφηση θερμότητας και την αποδέσμευση θερμότητας στο σύστημα ψύξης συμπίεσης υδρατμών. Στον ατμοποιητή, το υγρό νερό χαμηλής πίεσης απορροφά θερμότητα από το περιβάλλον και ατμοποιείται σε υδρατμούς χαμηλής πίεσης και χαμηλής θερμοκρασίας. Οι υδρατμοί εισέρχονται στον συμπιεστή και αφού συμπιεστούν σε υψηλή θερμοκρασία και υψηλή πίεση στον συμπιεστή, εκτονώνονται στον συμπυκνωτή. Οι υδρατμοί υψηλής θερμοκρασίας και υψηλής πίεσης συμπυκνώνονται σε υγρό νερό υψηλής πίεσης και απελευθερώνουν θερμότητα προς τα έξω στον συμπυκνωτή. Όταν το υγρό νερό υψηλής πίεσης ρέει στη βαλβίδα εκτόνωσης, διαστέλλεται σε υγρό νερό χαμηλής πίεσης. Μια τέτοια κυκλική διαδικασία είναι ο ψυκτικός κύκλος συμπίεσης υδρατμών ενός σταδίου.

Γενικά όλο το σύστημα ψύξης με τουρμποσυμπιεστή R718 παρουσιάζεται παρακάτω. Πέρα από το κύκλωμα (1 – 2 – 3 – 4) της εικόνας, όπου αναφέρθηκε προηγουμένως, με τη χρήση αντλίας κυκλοφορίας το νερό ψύξης (με θερμοκρασία μου ατμοποίησης T_e) τροφοδοτεί τους καταναλωτές ψύξης με κρύο και επιστρέφει στον ατμοποιητή σε υψηλότερη θερμοκρασία ($T_{ep} = T_e + \Delta T_{ew}$). Λόγω της χαμηλότερης πίεσης ατμοποίησης p_e (πίεση κορεσμού p_e για θερμοκρασία T_e), η οποία διατηρείται στον ατμοποιητή, πραγματοποιείται άμεση ατμοποίηση. Ο ατμός συμπιέζεται με τον

του ρημοσυμπεστή R718. Ο υηηλά υέρθερος αμός στην έξοδο του συμπεστή επανέρχεται στην κορεσμένη του κατάσταση και συμυκνώνεται στον συμυκνωτή άμεσης εκτόνωσης, χρησιμοποιώντας νερό ψύξης του συμυκνωτή. Το νερό συμύκνωσης σε θερμοκρασία συμύκνωσης T_c πηγαίνει στον πύργο ψύξης. Διαχέοντας τη θερμότητα στο περιβάλλον, το νερό συμύκνωσης ψύχεται ($T = T - \Delta T$) και επανακυκλοφορεί στον συμυκνωτή.



Εικόνα 1. 2 Απεικόνιση του παραπάνω κυκλώματος ψύξης μαζί με το κύκλωμα για τον Πύργο ψύξης με το κύκλωμα που πήγαινε στον καταναλωτή. (17)

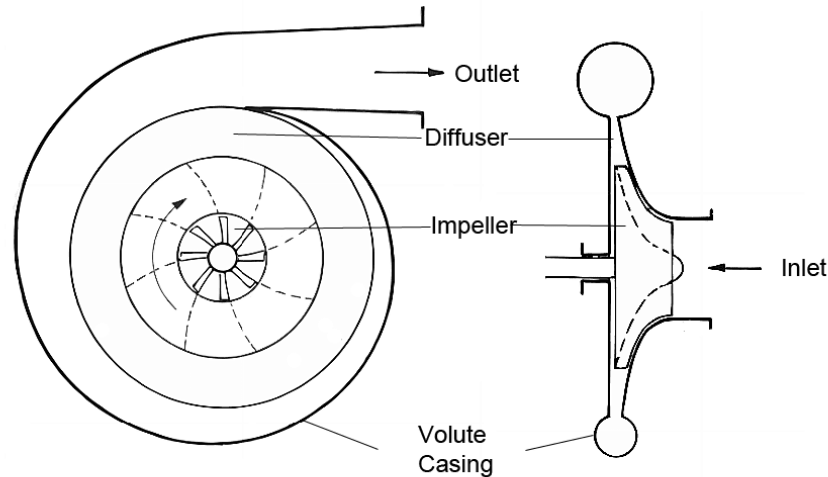
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

ΦΥΓΟΚΕΝΤΡΙΚΟΙ ΣΥΜΠΙΕΣΤΕΣ R718

2.1 Κύρια μέρη του Φυγοκεντρικού συμπιεστή

Σε έναν φυγοκεντρικό συμπιεστή (ακτινικό συμπιεστή), η ενέργεια μεταφέρεται από έναν περιστρεφόμενο τροχό - συμπιεστή σε ένα εργαζόμενο μέσο. Αυτό επιταχύνει το ρευστό και αυξάνει την κινητική του ενέργεια. Οι φυγοκεντρικοί συμπιεστές προσφέρουν το πλεονέκτημα του υψηλότερου λόγου πίεσης σε χαμηλότερες παροχές σε σύγκριση με τους αξονικούς συμπιεστές. Συνήθως χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία επεξεργασίας, στη βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου, στις βοηθητικές μονάδες ισχύος, στους υπερσυμπιεστές, και σε αεριοστρόβιλους. Ο συμπιεστής αποτελείται από τα ακόλουθα τέσσερα κύρια εξαρτήματα:

- την είσοδο,
- την πτερωτή,
- τον διαχύτη
- το κέλυφος



Centrifugal compressor schematic diagram

Εικόνα 2. 1Απεικόνιση φυγοκεντρικού συμπιεστή σε μεσημβρινή και από πάνω όψη (34)

Είσοδος

Η είσοδος ενός φυγοκεντρικού συμπιεστή είναι συνήθως ένας απλός σωλήνας. Ωστόσο, μπορεί να επίσης να ανοίξει θύρα επεκτείνοντας το εύρος λειτουργίας του συμπιεστή μετατοπίζοντας της γραμμής υπερπήδησης σε χαμηλότερους ρυθμούς ροής μάζας. Επιπλέον, τα πτερύγια οδήγησης εισόδου μπορούν να εγκατασταθούν για να στροβιλίζουν εκ των προτέρων την εισερχόμενη ροή.

Πτερωτή

Ένα περιστρεφόμενο σύνολο πτερυγίων μεταφέρει σταδιακά ενέργεια στο εργαζόμενο μέσο. Το αέριο εισέρχεται στον συμπιεστή με αξονική κατεύθυνση, επιταχύνεται και αποβάλλεται με ακτινική κατεύθυνση. Η ταχύτητα ροής εξόδου της πτερωτής μπορεί να φτάσει σε υπερηχητικές ταχύτητες. Ο τύπος του τροχού του συμπιεστή καθορίζεται από τη γωνία των πτερυγίων εξόδου.

Διαχύτης

Ο διαχύτης μετατρέπει την κινητική ενέργεια του εργαζόμενου μέσου σε δυναμική ενέργεια (πίεση). Αυτό επιτυγχάνεται με την αύξηση της διατομής επιφάνεια και μειώνοντας έτσι σταδιακά την ταχύτητα ροής. Οι διαχυτήρες μπορεί να είναι χωρίς πτερύγια ή με πτερύγια ανάλογα με την περίπτωση εφαρμογής.

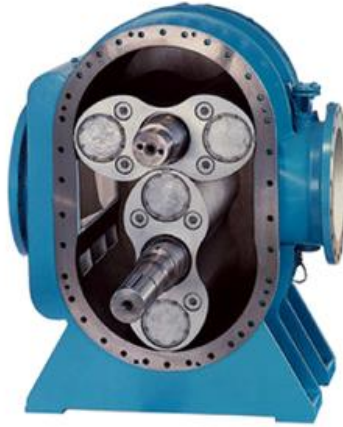
Κέλυφος

Το κέλυφος συλλέγει τη ροή ανακατευθύνοντάς την προς την περιφερειακή κατεύθυνση και την αποδίδει στον αγωγό εξόδου του συμπιεστή. Η ταχύτητα ροής μειώνεται περαιτέρω στο κανάλι ροής και αυξάνεται η στατική πίεση. Το κέλυφος μπορεί να λάβει πολλά διαφορετικά γεωμετρικά σχήματα.

Οι συμπιεστές R718 είναι κυρίως φυγοκεντρικοί αλλά υπάρχουν και οι τύπου Screw και Roots



Εικόνα 2. 2 Φυγοκεντρικός συμπιεστής (30)



Εικόνα 2. 3 Συμπιεστής τύπου Roots (20)



Εικόνα 2. 4 Συμπιεστής τύπου Screw (30)

Ο φυγοκεντρικός συμπιεστής R718 έχει το πλεονέκτημα του μεγαλύτερου ρυθμού ροής όγκου, αλλά έχει μικρότερο λόγο συμπίεσης ενός σταδίου, υψηλή θερμοκρασία εκτόνωσης και ευαισθησία σταγονιδίων. Ταυτόχρονα, το υλικό του πτερυγίου και του κελύφους του φυγοκεντρικού συμπιεστή υδρατμών είναι ακριβό. Ως εκ τούτου, ο φυγοκεντρικός συμπιεστής R718 είναι κατάλληλος για το σύστημα με τον μεγαλύτερο ρυθμό ροής όγκου και τον μικρότερο λόγο συμπίεσης. Ο συμπιεστής υδρατμών Roots έχει τα πλεονεκτήματα των λιγότερων εξαρτημάτων δόνησης και της απλής δομής, ωστόσο έχει επίσης μικρότερο λόγο συμπίεσης σε σύγκριση με τον Screw. Έτσι, χρησιμοποιείται συνήθως σε συστήματα με μικρό ρυθμό ροής όγκου, μεσαία θερμομαντική ικανότητα και άνοδο θερμοκρασίας. Ο Screw συμπιεστής υδρατμών έχει τα πλεονεκτήματα της καλής σταθερότητας, του μεγαλύτερου λόγου συμπίεσης και της υγρής συμπίεσης, ωστόσο η παροχή όγκου δεν είναι πολύ μεγάλη. Είναι πιο κατάλληλος για το σύστημα ψύξης με μεσαία και μικρότερη παροχή όγκου και μεγαλύτερο λόγο συμπίεσης

2.2 Κύριες παράμετροι φυγοκεντρικού συμπιεστή

Ο λόγος πίεσης του συμπιεστή (Π) εξαρτάται από την περιφερειακή ταχύτητα της πτερωτής (u_2), τις θερμοδυναμικές ιδιότητες του ρευστού (R, κ, ν), την γεωμετρία του πεδίου ροής του συμπιεστή αλλά και από τον βαθμό στον οποίο το πεδίο ροής έχει βέλτιστα σχεδιαστεί, όπως και τις συνθήκες λειτουργίας (αριθμός Mach, αριθμός Reynolds), όπου δίνουν τον συντελεστή φόρτισης (Ψ) και τον βαθμό απόδοσης του συμπιεστή (η). Ο περιφερειακός αριθμός Mach (M_u) προκύπτει από την περιφερειακή ταχύτητα της πτερωτής (u_2) και την τοπική ταχύτητα του ήχου (a_0):

$$\Pi = (1 + \psi(\kappa - 1)M_u^2/\eta_p)^\sigma \quad (2.1)$$

$$M_u = \frac{u_2}{a_0} \quad (2.2)$$

$$a_0 = (\kappa \xi_0 R T_0)^{1/2} \quad (2.3)$$

$$\xi_0 = \frac{p_0 \nu_0}{R T_0} \quad (2.4)$$

$$R = \frac{R_\mu}{\mu} \quad (2.5)$$

$$\sigma = \frac{\kappa}{\kappa - 1} \eta_p \quad (2.6)$$

Η τοπική ταχύτητα του ήχου (a_0) εξαρτάται από τις θερμοδυναμικές ιδιότητες του ρευστού (R , ατομική σταθερά αερίου (μ), μοριακή μάζα ψυκτικού μέσου (R_μ), παγκόσμια σταθερά αερίου (κ), θεωρητικό ισεντροπικό εκθέτη (ξ_0), συντελεστής συμπίεστικότητας), και τις θερμοδυναμικές συνθήκες εισόδου (p_0, ν_0, T_0).

Ο συντελεστής φόρτισης (Ψ) ενός φυγοκεντρικού συμπιεστή προκύπτει από την γεωμετρία της πτερωτής και την κινηματική της ροή (Ψ_t), και με την δυναμική (υδραυλική) αποδοτικότητα του ρευστού (η_h). Ο συντελεστής αυτός σχετίζεται άμεσα με το αποτελεσματικό έργο συμπίεσης (l_e και συντελεί στο λόγο πίεσης) του συμπιεστή.

$$\psi = \eta_h \psi_t \quad (2.7)$$

$$l_e = \psi u_2^2 \quad (2.8)$$

Ο θεωρητικός συντελεστής φόρτισης (Ψ_t) ενός φυγοκεντρικού συμπιεστή προκύπτει από το έργο συμπίεσης του Euler ($l = u_2 c_{2u}$) και μπορεί να παρθεί από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\psi_t = \frac{l}{u_2^2} \quad (2.9)$$

$$\psi_t = k_1 - k_2 \varphi_2 \text{ctg } \beta_2 \quad (2.10)$$

$$\psi_t = \mu_s \psi_\infty \quad (2.11)$$

$$\psi_\infty = 1 - \varphi_2 \text{ctg } \beta_2 \quad (2.12)$$

Ο συντελεστής ολίσθησης εξαρτάται από την γωνία του πτερυγίου της πτερωτής κατά την έξοδο (β_2), από τον αριθμό των πτερυγίων της πτερωτής (Z_2), όπως επίσης και από την γεωμετρία της πτερωτής αλλά και τις συνθήκες ροής του ρευστού (παροχή, αριθμό Reynolds, αριθμό Mach κλπ.)

Το πολυτροπικό έργο συμπίεσης (l_p), το οποίο είναι περίπου ίσο με το αποτελεσματικό έργο (l_e), εξαρτάται από το λόγο πίεση του συμπιεστή (Π). Ο πολυτροπικός βαθμός του συμπιεστή είναι περίπου ίσως με τον υδραυλικό βαθμό ($\eta_p \approx \eta_h$).

$$l_p = \sigma R \xi_0 T_0 [\Pi^{1/\sigma} - 1] \quad l_p \approx l_c \quad (2.13)$$

Ο συντελεστής παροχής του φυγοκεντρικού συμπιεστή (Φ_2) εξαρτάται από την παροχή του συμπιεστή (V).

$$\varphi_2 = \frac{V_2}{A_2 u_2} = \frac{V}{k_{v2} A_2 u_2} \quad (2.14)$$

$$k_{v2} = \frac{V}{V_2} = \frac{v_0}{v_2} \quad (2.15)$$

Οι σχέσεις μεταξύ της παροχής στην έξοδο της πτερωτής (V_2) και της παροχής όγκου στην είσοδο του συμπιεστή (V) προκύπτουν με τον λόγο πυκνότητας ή αλλιώς με τον ογκομετρικό λόγο (k_{v2})

$$k_{w2} = \left(1 + \frac{\psi r (k - 1) M_u^2}{\eta_p} \right)^{\sigma - 1} \quad (2.16)$$

$$r = 1 - \frac{\varphi_2^2 + \psi^2}{2\psi} \quad (2.17)$$

Ο συντελεστής αντίδρασης (r) της περωτής καθορίζει τον λόγο μεταξύ στατικού και ολικού έργου συμπίεσης Euler.

Η διάμετρος της περωτής (D_2) είναι η κυρία γεωμετρική παράμετρος η οποία καθορίζει τις διαστάσεις του συμπιεστή. Η διάμετρος της περωτής (D_2) εξαρτάται από την παροχή του συμπιεστή (V), την περιφερειακή η ταχύτητα της περωτής (u_2) (η οποία εξαρτάται άμεσα από τον λόγο πίεση του συμπιεστή), το λόγο πυκνότητας (όποιος εξαρτάται επίσης από τον λόγο πίεσης του συμπιεστή), και το σχετικό πλάτος της περωτής ($\bar{b}_2 = b_2 / D_2$). Η περιστροφική ταχύτητα (n) εξαρτάται από την περιφερειακή ταχύτητα (u_2) στην έξοδο και την διάμετρο της περωτής (D_2).

$$D_2 = \sqrt{\frac{V}{\pi \bar{b}_2 \tau_2 k_{v2} u_2 \varphi_2 d}} \quad (2.18)$$

$$n = \frac{u_2}{\pi D_2} \quad (2.19)$$

Για φυγοκεντρικούς συμπιεστές με υψηλό λόγο πίεσης (Π), η αύξηση της περιφερειακής ταχύτητας της περωτής (u_2) προκαλεί μείωση της διαμέτρου της περωτής (D_2) και μεγάλη αύξηση της περιστροφικής ταχύτητας της περωτής (n).

Η παροχή του συμπιεστή (V) εξαρτάται από την θερμοχωρητικότητα ψυκτικού (Q_e) και της ειδικής χωρητικότητας του συμπιεστή (e_c):

$$V = Q_e e_c \quad (2.20)$$

$$e_c = \frac{1}{q_v} \quad (2.21)$$

Η γωνία εξόδου του περυγίου της περωτής (β_2), το σχετικό πλάτος (\bar{b}_2), και ο συντελεστής παροχής στο σημείο σχεδίασης (Φ_{2d}) έχουν πολύ σημαντική επιρροή στο σχήμα της περωτής, τις διαστάσεις και τα χαρακτηριστικά απόδοσης του συμπιεστή.

Οι οριακές συνθήκες του συμπιεστή σχετίζονται με: περιορισμό της περιφερειακής ταχύτητας περίπου μέχρι 730 m/s λόγω των ορίων αντοχής της περωτής από κατασκευαστικό κομμάτι, όπου είναι σημαντικό για εργαζόμενα μέσα κυρίως με χαμηλή μοριακή μάζα, που έχουν κριτήριο τον περιορισμό του αριθμού Mach και της υπερηχητικής ροής, αλλά και για εργαζόμενα μέσα με μεγάλη μοριακή μάζα. Πολύ υψηλή θερμοκρασία στην έξοδο του συμπιεστή που προκαλείται από μεγάλο λόγο πίεσης και μεγάλη τιμή του ισεντροπικού εκθέτη του ατμού (κ), είναι μεγάλο

πρόβλημα στα συστήματα ψύξης με συμπιεστές R718 και γι' αυτό το λόγο προστίθεται σε ένα από τα κριτήρια περιορισμού.

Το νερό είναι ένα μέσο με μικρή μοριακή μάζα. Γι' αυτό τον λόγο οι φυγοκεντρικοί συμπιεστές R718 επιτυγχάνουν σχετικά χαμηλό λόγο πίεσης σε καταστάσεις 'συνηθισμένης' περιφερειακής ταχύτητας. Μεγάλο λόγο πίεσης μπορούν να επιτύχουν σε υψηλές περιφερειακές ταχύτητες $u_2 = 500 - 600$ (m/s). Επιπλέον, το νερό είναι ένα μέσο με χαμηλή ειδική ογκομετρική ψυκτική ικανότητα (q_v) ή με μεγάλη ειδική χωρητικότητα συμπιεστή (e_c), ειδικά για περιπτώσεις που αφορούν συστήματα κλιματισμού. Επομένως η ογκομετρική παροχή (V) είναι μεγάλη. Σε συνθήκες λειτουργίας όπου υπάρχει μεγάλο κενό και χαμηλή ειδική ογκομετρική ψυκτική ικανότητα του ψυκτικού μέσου (q_v) προκαλεί μεγάλη παροχή όγκου και μεγάλη διαστασιολόγηση του φυγοκεντρικού συμπιεστή R718.

2.3 Σχεδιασμός για βέλτιστη γεωμετρία του συμπιεστή

Η αλληλεξάρτηση μεταξύ του λόγου πίεσης (Π) του φυγοκεντρικού συμπιεστή, του έργου συμπίεσης (l_e), της περιφερειακής ταχύτητας (u_2), της μοριακής μάζας (μ), και του περιφερειακού αριθμού Mach (M_u) προκύπτει από τις παρακάτω σχέσεις (2.1) – (2.8) οι οποίες αναφέρθηκαν προηγουμένως.

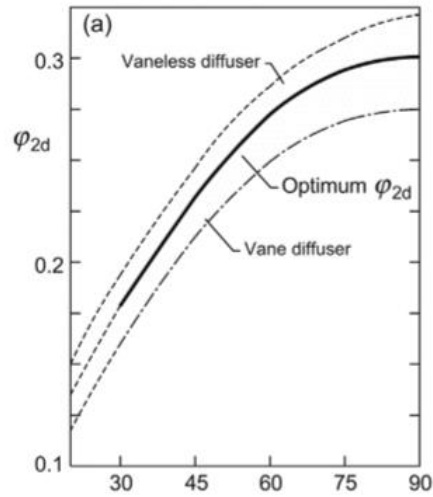
Ο συντελεστής φόρτισης (Ψ), ο συντελεστής παροχής (Φ_2), ο βαθμός απόδοσης του συμπιεστή ($\eta_p \approx \eta_h$) όπως και οι σχέσεις μεταξύ τους, προκύπτουν από το σχήμα του πεδίου ροής του συμπιεστή, από τις συνθήκες ροής του ρευστού αλλά κατά τις δυναμικές απώλειες του αερίου.

Για δοσμένες συνθήκες σχεδιασμού του συμπιεστή, η απόδοση εξαρτάται από το βαθμό με τον οποίο το πεδίο ροής του συμπιεστή έχει σχεδιαστεί βέλτιστα. Αν ο στόχος είναι να σχεδιαστεί ένα συμπιεστής με υψηλό βαθμό απόδοσης, τότε η επιρροή των συνθηκών λειτουργίας και των ιδιοτήτων του ψυκτικού μέσου στις δυναμικές απώλειες και στα χαρακτηριστικά απόδοσης του συμπιεστή θα πρέπει να ληφθούν κατά την διαδικασία βελτιστοποίησης στον σχεδιασμό του πεδίου ροής.

Αν ένας φυγοκεντρικός συμπιεστής δουλεύει σε μεταβλητές καταστάσεις λειτουργίας (μεταβλητή περιστροφική ταχύτητα, διαφορές θερμοκρασίας εισόδου στο συμπιεστή κλπ.) τότε διορθώσεις στην αποδοτικότητα (η) και στον συντελεστή φόρτισης (Ψ) πρέπει να ληφθούν υπόψιν.

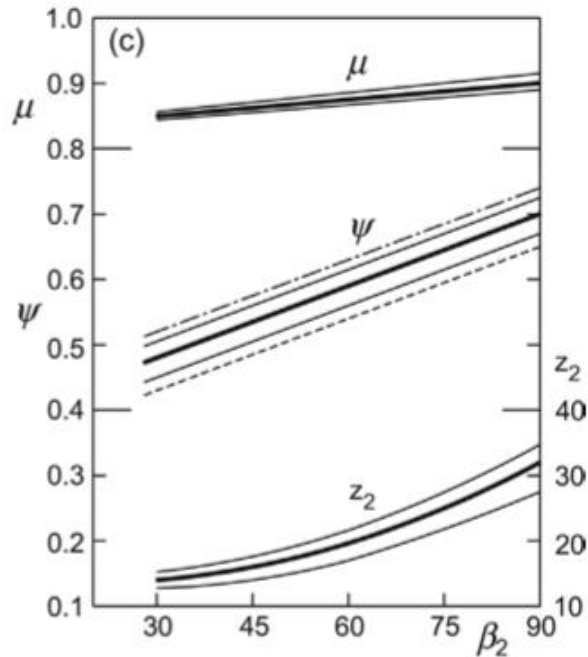
Η γωνία εξόδου του πτερυγίου της πτερωτής (β_2) είναι το πιο σημαντικό γεωμετρικό χαρακτηριστικό, το οποίο καθορίζει το σχήμα της πτερωτής, όπως επίσης τα χαρακτηριστικά της ροής, τον βαθμό απόδοσης, και την απόδοση του φυγοκεντρικού συμπιεστή. Η βέλτιστη σχεδίαση των άλλων γεωμετρικών παραμέτρων της πτερωτής εξαρτώνται από την τιμή της εξωτερικής γωνίας του πτερυγίου της πτερωτής (β_2).

Το εύρος τιμής του συντελεστή παροχής (Φ_{2d}) για το βέλτιστο σημείο σχεδίασης, για διάφορες γωνίες εξόδου των πτερυγίων της πτερωτής (β_2), δίνονται στο παρακάτω διάγραμμα.

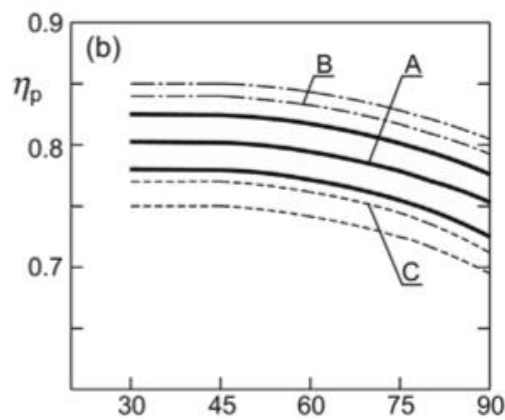


Εικόνα 2. 5 Εξάρτηση του συντελεστή παραχής (Φ_{2d}) με την γωνία εξόδου (β_2) (19)

Ο συντελεστής φόρτισης (Ψ) εξαρτάται από την παράγοντα ολίσθησης (μ_s) (ή από τους συντελεστές ολίσθησης κ_1 και κ_2), όπως επίσης και από την εξωτερική γωνία του περυγίου της περωτής (β_2) αλλά κι από την απόδοση του συμπιεστή (η_p). Ο παράγοντας ολίσθησης (μ_s) εξαρτάται κυρίως από τον αριθμό των περυγίων περωτής (Z_2) και την εξωτερική γωνία του περυγίου (β_2). Η αύξηση του αριθμού των περυγίων περωτής (Z_2) προκαλεί αύξηση του παράγοντα ολίσθησης (μ_s), και βελτίωση των συνθηκών ροής στην περωτή αλλά και στον διαχύτη. Όμως αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι απώλειες τριβής στην περωτή να αυξηθούν.



Εικόνα 2. 6 Εξάρτηση του συντελεστή φόρτισης (Ψ), το παράγοντα ολίσθησης (μ_s) και τον αριθμό των πτερυγίων (Z_2) την γωνία εξόδου (β_2) (19)



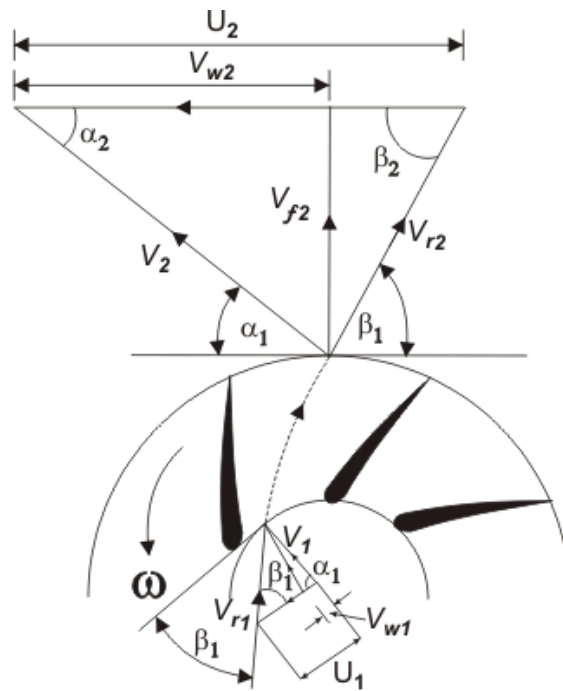
Εικόνα 2. 7 Εξάρτηση του βαθμού απόδοσης (η_p) με την γωνία εξόδου (β_2) (19)

Ο βαθμός απόδοσης του συμπιεστή είναι χαμηλότερος για μεγαλύτερες τιμές της εξωτερικής γωνίας του πτερυγίου (β_2), επειδή όσο μικρότερος ο βαθμός αντίδρασης της πτερωτής (r), τόσο μεγαλύτερες οι τιμές των δυναμικών απωλειών στον διαχύτη.

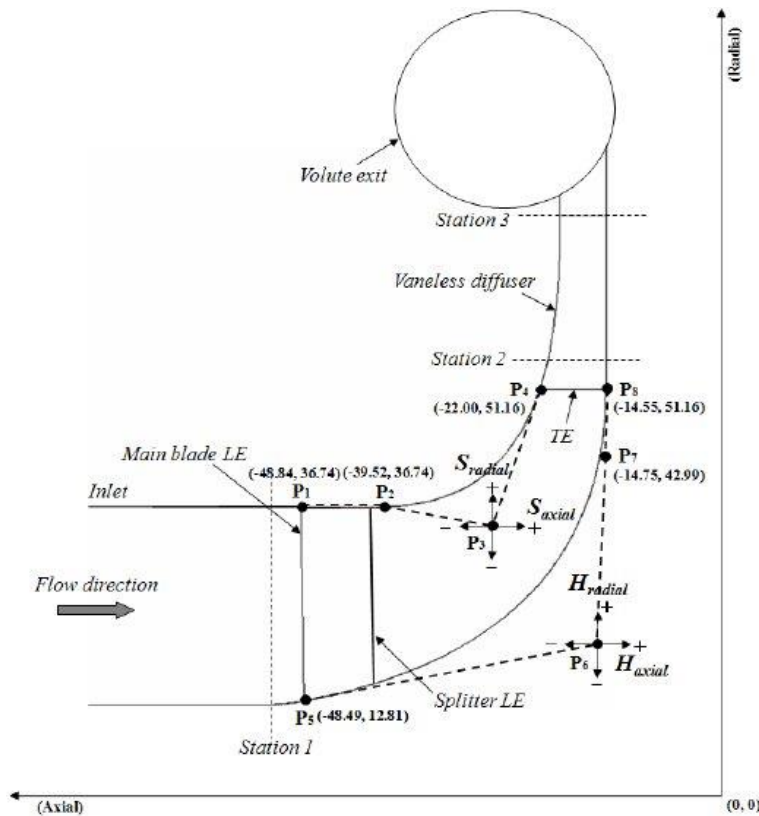
Μεγαλύτερος βαθμός απόδοσης παρατηρείται σε συμπιεστές οι οποίοι έχουν διάχυτες με πτερύγια, βέλτιστο σχετικό πλάτος, και επίσης σε συμπιεστές με μεγάλες διαστάσεις όπου επιρροή του αριθμού Reynolds δεν είναι τόσο σημαντική. Για μεγαλύτερο λόγο πίεσης σε φυγοκεντρικούς συμπιεστές με μικρές διαστάσεις η επιρροή του αριθμού Ρέινολντς και η επιρροή του αριθμού Mach προκαλούν μεγαλύτερες δυναμικές απώλειες και χαμηλότερη αποδοτικότητα στον

συμπιεστή. Ο χαμηλός αριθμός Reynolds κάτω από συνθήκες βαθιάς αναρρόφησης, είναι ένα επιπλέον πρόβλημα

Η βέλτιστη τιμή για το σχετικό πλάτος (\bar{b}_2) της περωτής εξαρτάται από τον τύπο της περωτής (γωνία β_2) και τις συνθήκες λειτουργίας του συμπιεστή (αριθμός Mach, αριθμός Reynolds, κλπ). Το εύρος τιμών του πλάτους της περωτής είναι $\bar{b}_2 = 0.02-0.06$. Μεγαλύτερο εύρος είναι το $\bar{b}_2 = 0.01-0.08$. Οι μεγαλύτερες τιμές στο πλάτος (\bar{b}_2) αντιστοιχούν σε μεγαλύτερη γωνία εξόδου (β_2) του περυγίου. Παρακάτω δίνεται προβολή των τριγώνων ταχυτήτων σε είσοδο και έξοδο σε μία περωτής όπως και η μεσημβρινή όψη.



Εικόνα 2. 8 Απεικόνιση των τριγώνων ταχυτήτων στην είσοδο και στην έξοδο της φτερωτής (32)



Εικόνα 2. 9 Μεσημβρινή απεικόνιση του συμπιεστή (33)

Όταν τίθεται όριο στον αριθμό Mach του πεδίου ροής (M_{w1}), οι φτερωτές με μικρότερο σχετικό πλάτος (\bar{b}_2) μπορούν να πετύχουν μεγαλύτερο περιφερειακό αριθμό Mach (M_u) και μεγαλύτερο λόγο πίεσης στον συμπιεστή (Π). Η επιρροή που έχει η τιμή του σχετικού πλάτους (\bar{b}_2) στη διάμετρο της περωτής (D_2), και της περιστροφικής της ταχύτητας (η) είναι σημαντική.

Η φτερωτές με μεγαλύτερη γωνία (β_2) έχουν μεγαλύτερη τιμή στο βαθμό φόρτισης (Ψ) και επομένως είναι περισσότερο κατάλληλες για μεγαλύτερο λόγο πίεσης στους φυγοκεντρικούς συμπιεστές R718. Η ανοιχτού τύπου ακτινικές φτερωτές με μεγαλύτερη γωνία εξόδου στα περύνια (β_2) από 75° έως 90° , έχουν μεγαλύτερη αντοχή και μπορούν να αντέξουν πολύ υψηλή περιφερειακή ταχύτητα u_2 από 500 m/s έως 600 m/s, το οποίο είναι ένα πολύ συχνό χαρακτηριστικό στους φυγοκεντρικούς συμπιεστές R718. Για φτερωτές με γωνία εξόδου στα περύνια (β_2) κοντά στις 90° , προκύπτει ένα επιπλέον πρόβλημα το οποίο είναι ότι το σημείο σχεδίασης πηγαίνει πολύ κοντά στο σημείο αναρρόφησης του συμπιεστή.

Σύμφωνα με το σενάριο της ελάχιστης σχετικής ταχύτητας (w_1) στην είσοδο της περωτής, προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν υδραυλικές απώλειες της περωτής, το τμήμα εισόδου της περωτής με διάμετρο ($\bar{D}_0 = D_0/D_2$) και γωνία εισόδου που αντιστοιχεί στο περύνιο της περωτής δίνεται από τους παρακάτω τύπους:

$$\bar{D}_{0w1min}^2 = \bar{d}^2 + \sqrt[3]{2} \left(\frac{4\tau_2 k_{v2} \bar{b}_2 \varphi_{2r} k'_c}{\tau_1 k_0 k_{v0}} \left(\frac{1 - M_0^2}{1 - 2M_0^2} \right)^{1/2} \right)^{2/3} \quad (2.22)$$

$$\text{tg } \beta_{1sl} = \frac{(\bar{D}_0^2 - \bar{d}^2)^{1/2}}{\bar{D}_0} \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{1 - 2M_0^2}{1 - M_0^2} \right)^{1/2} \quad (2.23)$$

Οι συντελεστές συστολής της περωτής κατά την είσοδο (τ_1) και την έξοδο (τ_2) εξαρτώνται από το πάχος δ_1 και δ_2 αντίστοιχα αλλά κι από την γεωμετρία.

$$\tau_1 = 1 - z_1 \delta_1 / (D_1 \pi \sin \beta_1) \quad (2.24)$$

$$\tau_2 = 1 - z_2 \delta_2 / (D_2 \pi \sin \beta_2) \quad (2.25)$$

Ο αριθμός Mach (M_0) στην είσοδο της περωτής $M_0 = c_0/a_0$ καθορίζει το συντελεστή $k_{v0} \cong 1 - M_0/2$. Οι τιμές των άλλων συντελεστών στην εξίσωση είναι μεταξύ $k_0 = 1.0 - 1.05$ και $k_c = 0.97 - 1.02$.

Οι βέλτιστες τιμές της διαμέτρου στην είσοδο της περωτής αλλά και της γωνίας εισόδου στην περωτής (β_1) είναι:

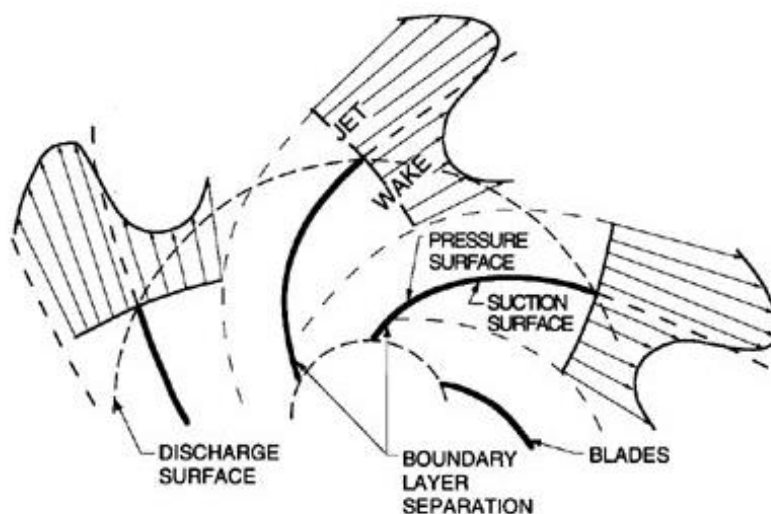
$$D_0 = (1.0 - 1.05) D_{0w1min} \quad (2.26)$$

$$\beta_1 = \beta_{1sl} + (0 - 10)^\circ \quad (2.27)$$

Αν $d \ll D_0$ και ο αριθμός Mach (M_0) είναι χαμηλός, τότε $\beta_{1sl} \cong 34^\circ$.

2.4 Χαρακτηριστικά της ροής στους φυγοκεντρικούς συμπιεστές R718

Η φυγοκεντρικοί συμπιεστές R718 έχουν υψηλή περιφερειακή ταχύτητα, υψηλό αριθμό Mach και μεγάλο λόγο πίεσης. Θεωρητικές και πειραματικές έρευνες πάνω στους συμπιεστές αυτούς έχουν καταλήξει στο να ορίσουν τα παρακάτω κύρια χαρακτηριστικά της ροής στο πεδίο ροής τους: ξεχωριστή jet-wake ροή και διηχητικά φαινόμενα. Στο παρακάτω σκίτσο της περωτής διακρίνονται η wake και jet ζώνη αντίστοιχα.



Εικόνα 2. 10 Απεικόνιση των ζωνών jet – wake στην περρωτή (28)

Το φαινόμενο της jet-wake ροής στη περρωτή, παρατηρήθηκε έπειτα από πειραματικές έρευνες πάνω σε φυγοκεντρικούς συμπιεστές με μεγάλο λόγο πίεσης. Πιθανή ταξινόμηση της ροής, δηλαδή αν είναι πλήρως προσκολλημένη ή αν έχουμε jet – wake ροή, εξαρτάται από την περιφερειακή ταχύτητα (u_2) και από την γωνία εξόδου του πτερυγίου της περρωτής (β_2).

Μία αναλυτική πρόβλεψη της υπερηχητικής ροής σε στροβιλομηχανές είναι γενικά δύσκολο λόγω του υπερβολικού – ελλειπτικού χαρακτήρα του προβλήματος. Ένας τρόπος για να λυθούν διηγητικά προβλήματα είναι να χρησιμοποιηθούν χρονικά εξαρτώμενοι μέθοδοι και μέθοδοι πεπερασμένων στοιχείων. Αυτοί έχουν τη δυνατότητα να εισάγουν τις εξισώσεις των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων του εργαζόμενου μέσου στη διαδικασία υπολογισμού. Πολυάριθμες μέθοδοι CFD, μοντέλα τύρβης και λογισμικά εφαρμογής έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια για τρισδιάστατη ασταθή διηγητική ιξώδη ροή και έχουν εφαρμοστεί για την πρόβλεψη της ροής στους στροβιλοσυμπιεστές και για την πρόβλεψη των χαρακτηριστικών απόδοσης των στροβιλοσυμπιεστών.

Η υψηλή περιφερειακή ταχύτητα (u_2) προκαλεί υψηλό περιφερειακό αριθμό Mach (M_u) και μεγάλο λόγο πίεσης (Π). Αυτό προκαλεί μεγάλες βαθμίδες πίεσης και ταχύτητας μέσα στο κανάλι που βρίσκεται ανάμεσα σε πτερύγιο με πτερύγιο, όπως και υψηλό αριθμό Mach στο πεδίο ροής (M_w, M_c). Οι βαθμίδες με μεγάλη πίεση και ταχύτητα στην πλευρά πίεσης και αναρρόφησης προκαλούν αποκόλληση στην ροή πάνω στα τοιχώματα των πτερυγίων

Η αποκόλληση στην μεριά πίεσης του πτερυγίου, συμβαίνει πολύ κοντά στην ακμή προσβολής του πτερυγίου (leading edge). Ωστόσο, αυτό το φαινόμενο έχει αμελητέα επίπτωση στην κυρία ροή. Στην περρωτή, η αποκόλληση της ροής στην πλευρά αναρρόφησης συμβαίνει στο τελείωμα του πτερυγίου (trailing edge), και συγκεκριμένα στο δεύτερο μισό του. Το φαινόμενο αυτό μαζί με την περιστροφική κίνηση της περρωτής, προκαλεί ξεχωριστά jet και wake ζώνες ανάμεσα σε πτερύγιο - πτερύγιο.

Σύμφωνα με τις αναλύσεις των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από προσομοιώσεις CFD και από πειραματικές έρευνες της ροής σε φυγοκεντρικούς συμπιεστές υψηλού λόγου πίεσης, μπορούν να αναδειχθούν τα ακόλουθα κύρια χαρακτηριστικά:

- Ο διαχωρισμός του οριακού στρώματος στην πλευρά αναρρόφησης του πτερυγίου της πτερωτής προκαλεί jet - wake ροή. Αυτό είναι για πτερωτές με μεγάλη γωνία εξόδου πτερυγίου (β_2). Σε πτερωτές όπου έχουν ο οπισθοκλινή πτερούγια (μικρή γωνία β_2), αυτό το φαινόμενο δεν προκαλεί μεγάλη διαταραχή στην κυρία ροή.
- Οι διαφορές των παραμέτρων της ροής μεταξύ της πλευράς πίεσης και της πλευράς αναρρόφησης της πτερωτής αυξάνονται για μεγαλύτερο λόγο πίεσης. Μπορούν να επιτευχθούν μικρότερες διαφορές παραμέτρων ροής και να αποφευχθεί η εμφάνιση αντίστροφης δευτερεύουσας ροής στην πλευρά πίεσης του πτερυγίου με την αύξηση του αριθμού των πτερυγίων της πτερωτής (Z_2).
- Διηχητική ροή στην περιοχή εισόδου της πτερωτής. Τοπική υπερηχητική περιοχή, ενσωματωμένη σε υποηχητική ροή, υπήρχε πρώτα στην περιοχή της ακμής προσβολής (leading edge) στην πλευρά αναρρόφησης του πτερυγίου. Η εμφάνιση υπερηχητικής ροής σε ολόκληρη την περιοχή εισόδου προκαλεί ασφυκτική ροή και κρούση στο πεδίο ροής. Αυτά τα φαινόμενα, μαζί με βαθμίδες μεγάλης πίεσης, προκαλούν διαχωρισμό του οριακού στρώματος και διαταραχή της ροής στην πτερωτή.

Χρησιμοποιώντας μεθόδους CFD και εφαρμόζοντας για την πρόβλεψη της ροής στο πεδίο ροής του φυγοκεντρικού συμπιεστή, μπορούν να δημιουργηθούν τα μοντέλα προσομοίωσης. Με αριθμητικά πειράματα μπορούν να διερευνηθούν τα πολύπλοκα φαινόμενα της ασταθούς διηχητικής ροής εντός ολόκληρου του πεδίου ροής του φυγοκεντρικού συμπιεστή και να προβλεφθούν τα χαρακτηριστικά απόδοσης.

2.5 Χαρακτηριστικά απόδοσης

Τα αδιάστατα χαρακτηριστικά απόδοσης ενός φυγοκεντρικού συμπιεστή καθορίζονται από τις σχέσεις μεταξύ του συντελεστή έργου και του συντελεστή παροχής και μεταξύ του βαθμού απόδοσης του συμπιεστή και του συντελεστή παροχής:

$$\Psi = f(\varphi) \text{ και } \eta = f(\varphi)$$

Για μονοβάθμιο φυγοκεντρικό συμπιεστή οι σχέσεις μεταξύ Ψ και Φ είναι

$$\psi = (k_1 - k_2 \varphi_2 \text{ctg } \beta_2) \eta_h \quad (2.28)$$

Οι συντελεστές ολίσθησης k_1 και k_2 και η_h εξαρτώνται από τις διαστάσεις του πεδίου ροής του συμπιεστή όπως επίσης από το σχήμα και από τις συνθήκες ροής. Η επίδραση που έχουν οι

ιδιότητες του ψυκτικού μέσου στην αποδοτικότητα του συμπιεστή συμβιβάζεται με τον αριθμό Reynolds, τον αριθμό Mach και τον ισεντροπικό εκθέτη κ.

Τα χαρακτηριστικά του φυγοκεντρικού συμπιεστή $\Pi = f(V)$ όσον αφορά την απόδοση του προκύπτουν από τα αδιάστατα χαρακτηριστικά απόδοσης ($\Psi = f(\varphi)$ και $\eta = f(\varphi)$) αλλά κι από τις διαστάσεις του πεδίου ροής του συμπιεστή, το σχήμα, την περιφερειακή ταχύτητα και τις ιδιότητες του ψυκτικού μέσου

Ο βαθμός απόδοσης εξαρτάται από το βαθμό στον οποίο το πεδίο ροής του φυγοκεντρικού συμπιεστή έχει σχεδιαστεί βέλτιστα για τις συνθήκες σχεδιασμού.

Η αύξηση του περιφερειακού αριθμού Mach M_u προκαλεί μείωση του βαθμού απόδοσης του συμπιεστή λόγω:

- Μη ρυθμισμένες βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας της περωτής/του διαχύτη/του κελύφους
- Υπερηχητική συμπεριφορά της ροής και κρίσιμα φαινόμενα ροής στο πεδίο ροής

Η αύξηση του περιφερειακού αριθμού Mach M_u προκαλεί αύξηση του αριθμού Mach της ροής του ρευστού M_{w1} . Εάν ο M_{w1} είναι μεγαλύτερος από τον M_{w1cr} (κρίσιμος M_{w1}), τότε εμφανίζεται τοπική υπερηχητική ροή και η δυναμικές απώλειες αερίου στην περωτή αυξάνονται σημαντικά. Όταν ο M_{w1} φτάσει τον M_{w1max} εμφανίζεται “τσοκάρισμα” της ροής αλλά και Η ροή γίνεται κρίσιμη στη διατομή της εισόδου.

Η προσεγγιστική μέθοδος για την εκτίμηση των επιδόσεων του φυγοκεντρικού συμπιεστή που λειτουργεί σε διάφορα καθεστάτα λειτουργίας (μεταβλητή ταχύτητα περιστροφής και μεταβλητή θερμοκρασία εισόδου) βασίζεται στην απόδοση χωρίς διαστάσεις. Χρησιμοποιώντας τη θεωρία ομοιότητας στροβιλοσυμπιεστών, μπορούν να προκύψουν οι ακόλουθες σχέσεις:

- Κριτήρια ροής – ρυθμού:

$$\Phi_{2II} = \Phi_{2I} \quad (D_{II} = D_I, b_{2II} = b_{2I}, A_{2II} = A_{2I})$$

$$\varphi_{2II} = \left(\frac{V}{k_{v2} A_2 u_2} \right)_{II} = \left(\frac{V}{k_{v2} A_2 u_2} \right)_I = \varphi_{2I} \quad (2.29)$$

$$V_{II} = V_{I1} \frac{k_{v2II} u_{2II}}{k_{v2I} u_{2I}} \quad (2.30)$$

- Κριτήρια έργου:

$$\eta_{II} = \eta_I k_\eta, \quad \Psi_{II} = \Psi_I k_\psi, \quad \sigma_{II} = \sigma_I$$

$$l_{eII} = l_{eI} \frac{u_{21}^2}{u_{2I}^2} k_\psi \quad (2.31)$$

$$\Pi_{II} = \left[\left(\Pi_I^{1/\sigma_1} - 1 \right) \frac{M_{uII}^2}{M_{uI}^2} k_\psi + 1 \right]^{\sigma_u} \quad (2.32)$$

$$k_\eta = k_{\eta 1} k_{\eta 2} k_{\eta 3} k_{\eta 4} \quad (2.33)$$

$$k_\psi = k_\eta k_{\varphi_1} \quad (2.34)$$

Ο συντελεστής διόρθωσης απόδοσης (k_η) περιλαμβάνει:

- $k_{\eta 2}$ - Επίδραση του λόγου διάχυσης στις διαχωρισμένες απώλειες δευτερογενούς ροής.
- $k_{\eta 3}$ - Επίδραση της εισόδου κρούσης στις κρουστικές απώλειες.
- $k_{\eta 4}$ - Επίδραση του αριθμού Mach στις απώλειες της διηχητικής ροής
- k_ψ - Συντελεστής διόρθωσης αποτελεσματικού έργου, ο οποίος περιλαμβάνει τη διόρθωση αποτελεσματικότητας (k_η) και την επίδραση του αριθμού Mach στον θεωρητικό συντελεστή έργου ($k_{\varphi 1}$).

Εάν ο φυγοκεντρικός συμπίεστης είναι πολυβάθμιος, τότε η διαδικασία εκτίμησης θα πρέπει να πραγματοποιείται για κάθε βαθμίδα ξεχωριστά. Συνήθως ο λόγος πίεσης των βαθμίδων του συμπίεστη (Π_s) είναι περίπου ίσος για όλες τις βαθμίδες. Με αυτή την υπόθεση ο νέος λόγος πίεσης μπορεί να εκτιμηθεί ως εξής:

$$\Pi_{sI_1} = \Pi_{sI_2} = \dots = \Pi_{sN_t} = (\Pi_I)^{1/N} \quad (2.35)$$

$$\Pi_{II} = \Pi_{sI_1} \dots \Pi_{sN_u} = (\Pi_{sI_n})^N \quad (2.36)$$

$$\Pi_{II} = \left[\left(\Pi_I^{1/N\sigma_1} - 1 \right) \frac{M_{uII}^2}{M_{uI}^2} k_\psi + 1 \right]^{N\sigma_u} \quad (2.37)$$

Εάν ο συμπίεστης λειτουργεί σε συνθήκες εκτός σχεδιασμού, οι επιδόσεις του φυγοκεντρικού συμπίεστη μπορούν να εκτιμηθούν με τη χρήση αυτής της μεθόδου.

2.6 Σύγκριση υπολοίπων ψυκτικών μέσων με το νερό σε συστήματα στροβιλοσυμπιεστών

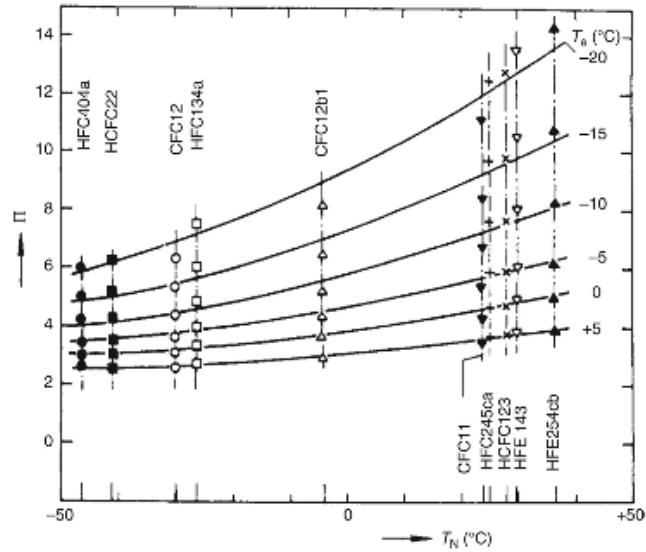
Η επίδραση των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων του ψυκτικού μέσου στα χαρακτηριστικά του φυγοκεντρικού συμπιεστή ψύξης αποτέλεσε ένα σημαντικό θέμα των δραστηριοτήτων έρευνας και ανάπτυξης στα τέλη του περασμένου αιώνα. Η αντικατάσταση των αρχικών ψυκτικών μέσων CFC και HCFC στις υπάρχουσες φυγοκεντρικές ψυκτικές μηχανές (οι συνολικές παγκόσμιες εγκαταστάσεις φυγοκεντρικών ψυκτικών μηχανημάτων για εφαρμογές κλιματισμού υπολογίστηκαν σε 125.000) και η ανάπτυξη νέων ψυκτικών μέσων (HFC, HFE, μείγματα ψυκτικών μέσων) σε φυγοκεντρικά ψυκτικά συστήματα, καθώς και η ανάπτυξη και το μέλλον των φυγοκεντρικών ψυκτικών συστημάτων με φυσικό ψυκτικό μέσο (νερό, αμμωνία, CO₂) αποτελούν τα κύρια θέματα αυτής της ενότητας.

Τα συγκριτικά δεδομένα ορισμένων ψυκτικών μέσων για τις ακόλουθες συνθήκες: θερμοκρασία ατμοποίησης $T_e = 0^\circ\text{C}$ - θερμοκρασία συμπύκνωσης $T_c = 40^\circ\text{C}$ - υπερθέρμανση ατμών αναρρόφησης $\Delta T_e = 0^\circ\text{C}$ - υπόψυξη υγρού $\Delta T_c = 0^\circ\text{C}$ δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 2. 1 Πίνακας τιμών θερμοδυναμικών ιδιοτήτων για διάφορα ψεύτικα μέσα (17)

Refrigerant	CFC11	HCFC123	HFC245ca	HFE143	HFE254cb	CFC12	HFC134a	HCFC22	HFC404a
μ (kg kmol ⁻¹)	137.4	152.9	134.0	100.0	132.0	120.92	102.03	88.01	97.60
T_{cr} (°C)	198.4	183.8	178.4	186.8	189.9	112.04	101.15	96.13	72.07
P_{cr} (bar)	44.1	36.76	38.85	41.41	35.6	41.2	40.64	59.86	37.32
T_b (°C)	23.8	27.9	25.0	30.06	36.44	-29.8	-26.5	40.84	-46.4
p_c (bar)	1.75	1.54	1.72	1.45	1.15	9.581	10.16	15.315	18.255
p_e (bar)	0.40	0.33	0.37	0.29	0.23	3.085	2.929	4.983	6.03
Π	4.33	4.66	4.677	4.972	5.072	3.106	3.469	3.073	3.02
e_c (m ³ MJ ⁻¹)	2.604	3.203	2.816	3.312	4.272	0.485	0.488	0.302	0.312
COP _t	6.06	5.993	5.861	6.023	5.873	5.3	5.3	5.8	4.2
ODP	1.0	0.02	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.053	0.0
GWP (100 years)	1.0	0.024	-	-	-	2.09	0.353	0.471	1.03

Ο λόγος πίεσης για διάφορα ψυκτικά μέσα, για θερμοκρασία συμπύκνωσης $T_c = 40^\circ\text{C}$ και για διάφορες θερμοκρασίες ατμοποίησης T_e δίνονται στον παρακάτω σχήμα:

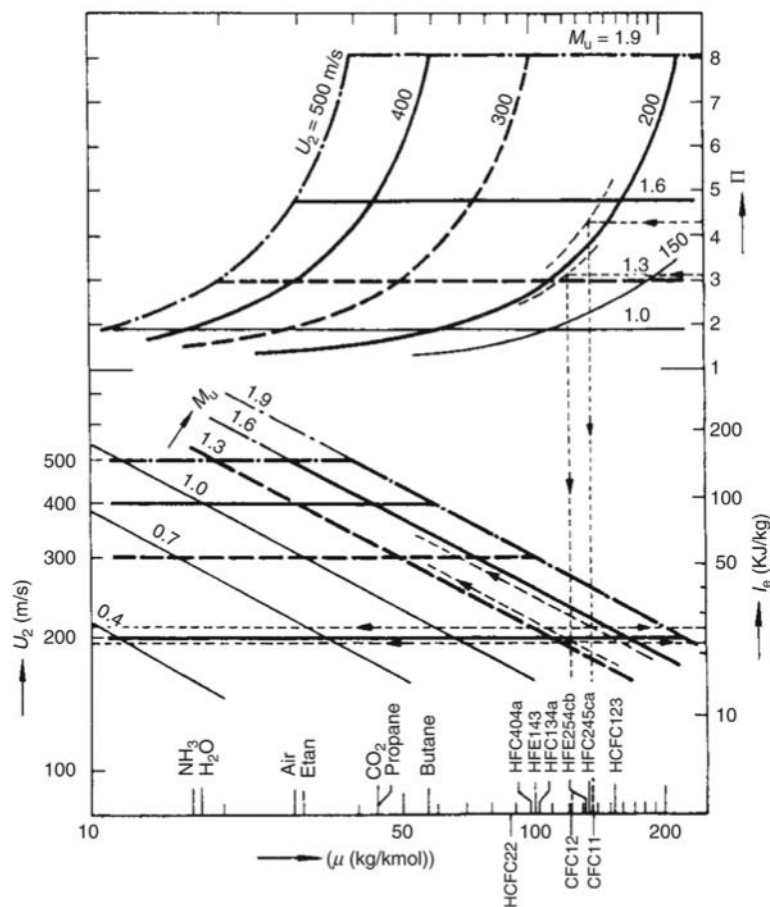


Εικόνα 2. 11 Λόγος πίεσης για διάφορα ψυκτικά μέσα (17)

Όπως φαίνεται παραπάνω, για δεδομένη θερμοκρασία ανύψωσης ($T_c - T_e$) τα ψυκτικά μέσα με χαμηλότερη κανονική θερμοκρασία βρασμού (T_N) απαιτούν μικρότερο λόγο πίεσης.

Το τριπλό σημείο λειτουργίας του R744 είναι υψηλότερο από την κανονική πίεση. Οι μικρές και εξαιρετικά μικρές διαστάσεις και η υψηλή πυκνότητα ισχύος αποτελούν ιδιαιτερότητες των φυγοκεντρικών συμπιεστών CO₂. Η κανονική θερμοκρασία βρασμού του νερού είναι 100°C. Ο υψηλός απαιτούμενος λόγος πίεσης είναι το πρώτο σημαντικό προβληματικό ζήτημα για τις φυγοκεντρικούς συμπιεστές R718.

Οι αλληλεξαρτήσεις μεταξύ του πραγματικού έργου συμπίεσης (l_e), του αριθμού Mach (M_u), του λόγου πίεσης της βαθμίδας του φυγοκεντρικού συμπιεστή (Π), της περιφερειακής ταχύτητας (u_2) και της μοριακής μάζας (μ) του ψυκτικού μέσου δίνονται στο παρακάτω σχήμα για $\psi = 0,6$, $\eta_p = 0,80$ και $T_e = 273$ (K).



Εικόνα 2. 12 Αλληλεξάρτηση μεταξύ των I_e , M_u , Π , u_2 διάφορα ψυκτικά μέσα (17)

Οι οριακές συνθήκες της βαθμίδας του φυγοκεντρικού συμπιεστή συνδέονται με το κριτήριο περιορισμού της περιφερειακής ταχύτητας μέσω των ιδιοτήτων αντοχής της περωτής, που είναι σημαντικές για τα ψυκτικά μέσα με μικρή μοριακή μάζα, και με το κριτήριο περιορισμού του δυναμικού αριθμού Mach του ρευστού, που είναι σημαντικό για τα ψυκτικά μέσα με μεγάλη μοριακή μάζα. Η βαθμίδα του φυγοκεντρικού συμπιεστή που λειτουργεί με ψυκτικά μέσα με μεγάλη μοριακή μάζα μπορεί να επιτύχει υψηλό λόγο πίεσης με σχετικά χαμηλή περιφερειακή ταχύτητα. Για οποιοδήποτε ψυκτικό μέσο με γνωστή μοριακή μάζα (μ), οι κύριες παράμετροι της βαθμίδας του φυγοκεντρικού συμπιεστή (I_e , M_u , Π , u_2) μπορούν να εκτιμηθούν κατά προσέγγιση και να πραγματοποιηθεί συγκριτική ανάλυση με άλλα ψυκτικά μέσα.

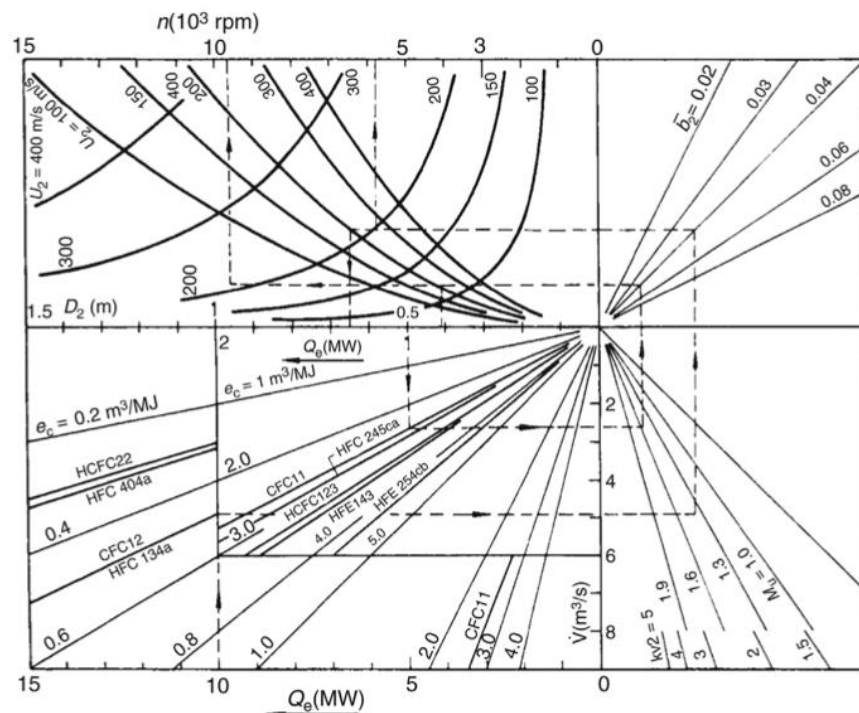
Σύμφωνα με τον απαιτούμενο λόγο πίεσης για δεδομένη θερμοκρασία συμπύκνωσης (T_c) και θερμοκρασία ατμοποίησης (T_e) και τον λόγο πίεσης των φυγοκεντρικών βαθμίδων (μπορεί να προκύψει ο αριθμός των βαθμίδων του συμπιεστή. Με τους μονοβάθμιους φυγοκεντρικούς συμπιεστές που λειτουργούν με διάφορα ψυκτικά μέσα CFC, HCFC, HFC και HFE, καλύπτεται ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών στην ψύξη και τον κλιματισμό.

Οι φυγοκεντρικοί συμπιεστές για ψυκτικά μέσα με μικρή μοριακή μάζα (R717- R718) είναι συνήθως πολυβάθμιοι. Η βαθμίδα του φυγοκεντρικού συμπιεστή που λειτουργεί με αυτά τα

ψυκτικά μέσα μπορεί να επιτύχει υψηλό λόγο πίεσης με υψηλή και εξαιρετικά υψηλή περιφερειακή ταχύτητα. Η υψηλή και εξαιρετικά υψηλή περιφερειακή ταχύτητα της περωτής είναι το δεύτερο σημαντικό προβληματικό ζήτημα για τις φυγοκεντρικές μονάδες R718.

Οι διαστάσεις των φυγοκεντρικών συμπιεστών εξαρτώνται κυρίως από την εκ νέου ψυκτική ικανότητα της μηχανής (Q_e) και την ειδική ογκομετρική ψυκτική ικανότητα του ψυκτικού μέσου (q_v).

Οι αλληλεξαρτήσεις μεταξύ της διαμέτρου της περωτής (D_2), της ταχύτητας περιστροφής (n), της ψυκτικής ικανότητας της μηχανής (Q_e), της ειδικής χωρητικότητας του ψυκτικού μέσου στον συμπιεστή (e_c), του σχετικού πλάτους της περωτής (\bar{b}_2) και του περιφερειακού αριθμού Mach (M_u) δίνονται στο σχήμα παρακάτω για διάφορα ψυκτικά μέσα και για συντελεστή ροής στο σημείο σχεδιασμού $\Phi_{2d} = 0,25$, συντελεστή έργου $\psi = 0,6$, θερμοκρασία ατμοποίησης $T_e = 0^\circ\text{C}$, θερμοκρασία συμπύκνωσης $T_c = 40^\circ\text{C}$. Μια συγκριτική ανάλυση μπορεί να πραγματοποιηθεί για την επίδραση των ιδιοτήτων των εναλλακτικών ψυκτικών μέσων στις διαστάσεις του συμπιεστή με τη χρήση του παρακάτω σχήματος.



Εικόνα 2. 13 Αλληλεξάρτηση μεταξύ Q_e , D_2 , e_c , n , \bar{b}_2 και M_u για διάφορα ψυκτικά μέσα (17)

Ορισμένα συγκριτικά δεδομένα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα για δεδομένες συνθήκες ατμοποίησης $T_e = 0^\circ\text{C}$ και συμπύκνωσης $T_c = 40^\circ\text{C}$

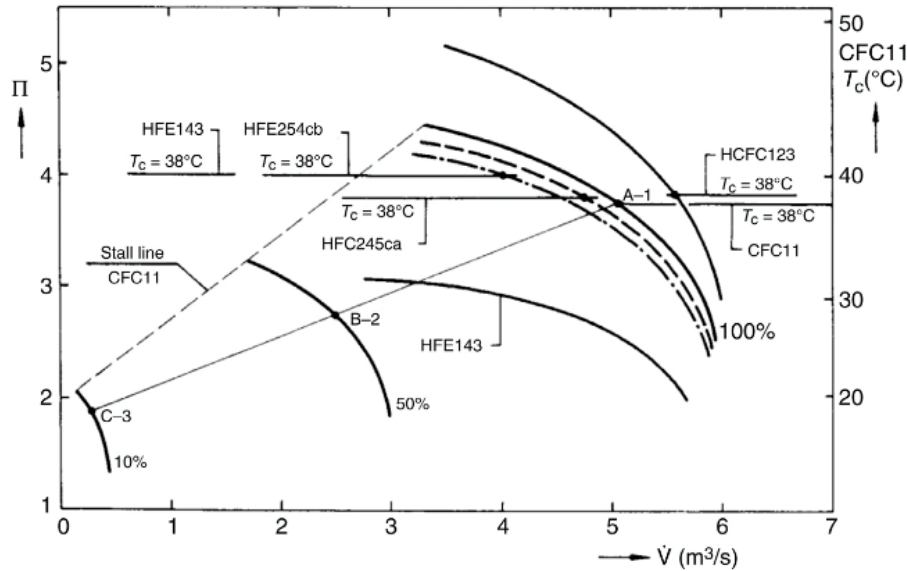
Πίνακας 2. 2 Δεδομένα μονοβάθμιου φυγοκεντρικού συμπιεστή για θερμοκρασία $T_e = 0\text{ }^\circ\text{C}$ και $T_c = 40\text{ }^\circ\text{C}$ (17)

Refrigerant	CFC11	HCFC123	HFC245ca	HFE143	HFE254cb	CFC12	HFC134a	HCFC22	HCF404a
Π	4.33	4.66	4.68	4.97	5.07	3.11	3.47	3.07	3.02
M_u	1.55	1.6	1.6	1.63	1.64	1.34	1.42	1.34	1.34
u_2 (ms^{-1})	212	206	221	261	228	196	224	228	217
Q_e (MW)	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	10.0	10.0	15.0	15.0
D_2 (mm)	590	645	585	575	695	655	595	560	615
b_2 (mm)	24.0	26.0	23.5	23.0	28.0	26.0	24.0	22.5	24.5
n (rpm)	6880	6100	7230	8700	6285	5705	7215	7405	6760

Μια βαθμίδα φυγοκεντρικού συμπιεστή που λειτουργεί με CFCs, HCFCs, HFCs ή HFEs μπορεί να επιτύχει υψηλό λόγο πίεσης με σχετικά χαμηλή περιφερειακή ταχύτητα. Ωστόσο, ο αριθμός Mach της ροής του ρευστού είναι υψηλός. Ο υψηλός λόγος πίεσης και ο υψηλός αριθμός Mach προκαλούν διαχωρισμένη ροή jet-wake στην πτερωτή και φαινόμενα διηχητικής ροής.

Οι δυνατότητες αντικατάστασης του ψυκτικού μέσου σε υπάρχοντα συστήματα ψύξης εξαρτώνται από τις θερμοδυναμικές ιδιότητες του ψυκτικών μέσων, κυρίως από τη μοριακή μάζα των νέων και των αρχικών ψυκτικών μέσων (μ_{II}, μ_I), τις κανονικές θερμοκρασίες βρασμού (T_{NI}, T_{NI}) και ειδική χωρητικότητα του συμπιεστή (e_{cII}, e_{cI}). Εάν η κανονική θερμοκρασία βρασμού $T_{NI} > T_{NI}$ τότε ο απαιτούμενος λόγος πίεσης του νέου ψυκτικού μέσου είναι συνήθως υψηλότερος από εκείνον του αρχικού ψυκτικού μέσου, για δεδομένη αύξηση της θερμοκρασίας ($T_c - T_e$). Σε αυτές τις περιπτώσεις ο συμπιεστής δεν μπορεί να επιτύχει την απαιτούμενη πίεση συμπίκνωσης ή θα λειτουργεί σε σημείο εκτός σχεδιασμού, κοντά στο σημείο αναρρόφησης, ανάλογα με τη χαρακτηριστική απόδοσης του φυγοκεντρικού συμπιεστή $\Pi = f(V)$. Εάν η μοριακή μάζα είναι $\mu_{II} > \mu_I$ τότε ο λόγος πίεσης της φυγοκεντρικής βαθμίδας $\Pi_{II} > \Pi_I$, αλλά και $M_{uII} > M_{uI}$. Σε αυτές τις περιπτώσεις είναι δυνατόν να εμφανιστούν φαινόμενα διηχητικής ροής με μείωση της απόδοσης του συμπιεστή, ανάλογα με τη σχέδιο του παιδιού ροής του ρευστού και τα χαρακτηριστικά ροής του. Η ψυκτική ικανότητα της μονάδας (Q_e) εξαρτάται έντονα από την ειδική χωρητικότητα του ψυκτικού μέσου στον συμπιεστή R718 (e_c).

Τα χαρακτηριστικά απόδοσης του φυγοκεντρικού συμπιεστή $\Pi = f(V)$ για διάφορα εναλλακτικά ψυκτικά μέσα δίνονται στο παρακάτω σχήμα για πλήρως ανοιγμένα οδηγία πτερύγια εισόδου. Στο σχήμα παρουσιάζονται επίσης τα χαρακτηριστικά απόδοσης του συμπιεστή που λειτουργεί με CFC11 για μερικώς ανοιγμένα οδηγία πτερύγια εισόδου (50% και 10%). Οι θερμοκρασίες ατμοποίησης και συμπίκνωσης είναι $T_e = 2^\circ\text{C}$ και $T_c = 38^\circ\text{C}$. Η ψυκτική ικανότητα του συστήματος ψύξης για το ψυκτικό μέσο CFC11 είναι $Q_e = 2350 \text{ kW}$.



Εικόνα 2. 14 Χαρακτηριστικά απόδοσης συμπιεστή (17)

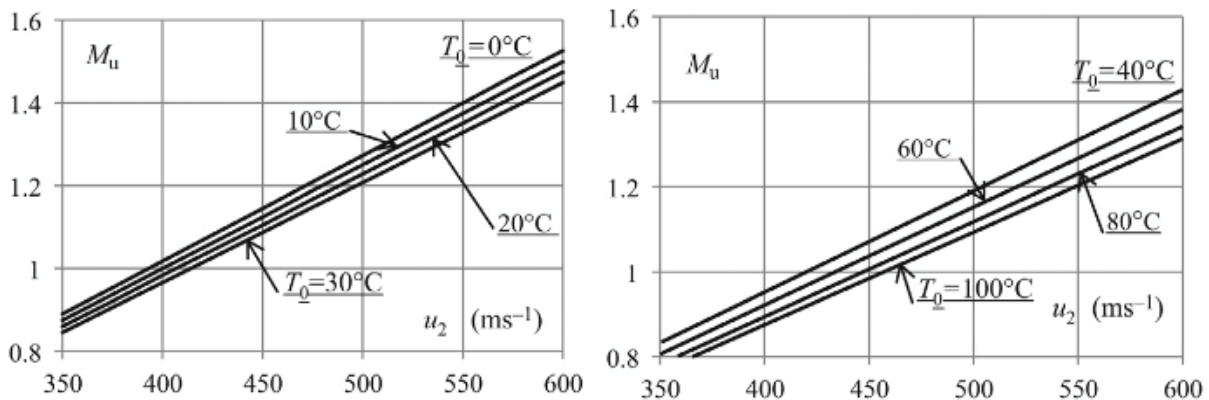
2. 7 Χαρακτηριστικά φυγοκεντρικών συμπιεστών R718

Τα τρία κύρια προβλήματα που προκύπτουν για το συνδυασμό των φυγοκεντρικών συμπιεστών R718 είναι τα εξής:

- Υψηλή κανονική θερμοκρασία βρασμού, η οποία προκαλεί υψηλό απαιτούμενο λόγο πίεσης για την επίτευξη δεδομένης διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ συμπύκνωσης και θερμοκρασιών ατμοποίησης ($T_c - T_e$),
- Χαμηλή μοριακή μάζα που προκαλεί υψηλή και εξαιρετικά υψηλή περιφερειακή ταχύτητα πτερωτής για την επίτευξη του κατάλληλου λόγου υψηλής πίεσης μιας βαθμίδας φυγοκεντρικού συμπιεστή,
- Η μεγάλη ειδική χωρητικότητα του ψυκτικού μέσου στον συμπιεστή R718 (e_c) ιδιαίτερα κοντά στο τριπλό σημείο του νερού, η οποία προκαλεί μεγάλες διαστάσεις της φυγοκεντρικής μονάδας.

Επιπλέον, η υψηλή τιμή του κινηματικού ιξώδους του νερού κοντά στην επίσης υψηλή τιμή του ισοεντροπικού εκθέτη του νερού, προκαλεί υψηλή υπερθέρμανση κατά την έξοδο από τον συμπιεστή.

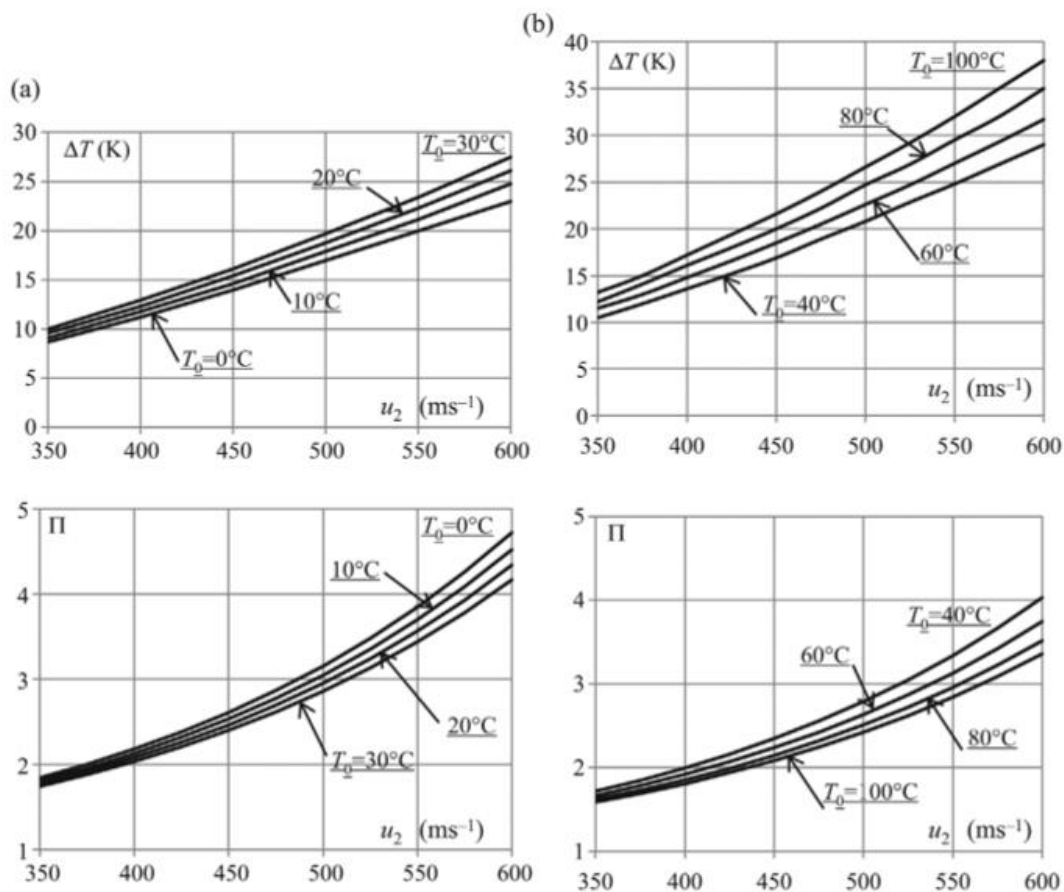
Οι οριακές συνθήκες μίας βαθμίδας ενός φυγοκεντρικού συμπιεστή R718 συνδέονται με τα κριτήρια περιορισμού της περιφερειακής ταχύτητας μέσω των ιδιοτήτων αντοχής της πτερωτής. Έρευνες έχουν δείξει πως το όριο αντοχής, από κατασκευαστικής άποψης φτάνει μέχρι τα ~730 (m/s). Η υψηλή ταχύτητα και ο υψηλός λόγος πίεσης προκαλούν υψηλό περιφερειακό αριθμό Mach όπως φαίνεται στα παρακάτω διαγράμματα για διάφορες τιμές του της περιφερειακής ταχύτητας συνάρτηση της θερμοκρασίας του συμπιεστή.



Εικόνα 2. 15 Εξάρτηση μεταξύ M_u και u_2 (19)

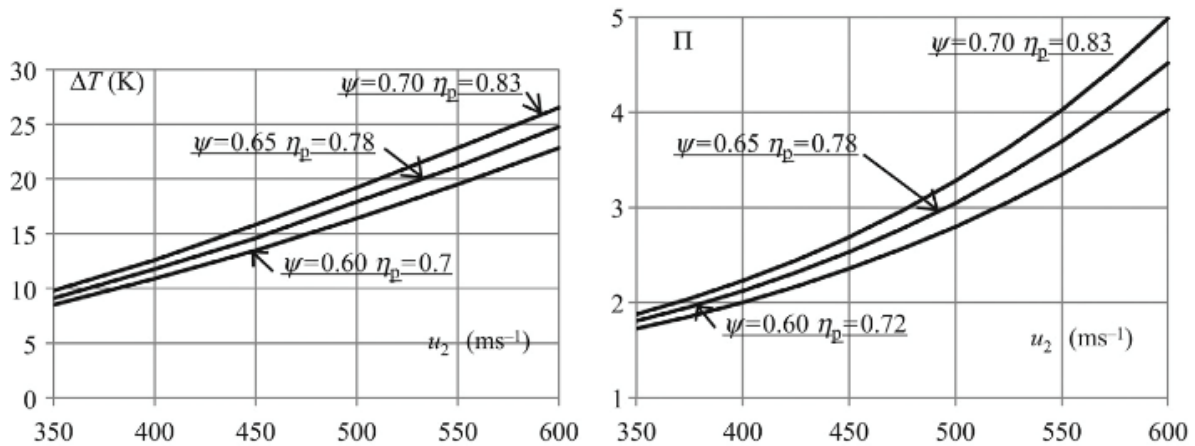
Η υψηλή υπερθέρμανση στην έξοδο του συμπιεστή που προκαλείται από τον υψηλό λόγο πίεσης και την υψηλή τιμή του ισεντροπικού εκθέτη των υδρατμών είναι ένα τεράστιο πρόβλημα στα φυγοκεντρικού συμπιεστές R718 και αποτελεί ένα πρόσθετο κριτήριο περιορισμού.

Η βαθμίδα του φυγοκεντρικού συμπιεστή μπορεί να επιτύχει σχετικά χαμηλό λόγο πίεσης σε συνθήκες συνήθους περιφερειακής ταχύτητας $u = 350-400$ (m/s). Αντίστοιχα υψηλός λόγος πίεσης μπορεί να επιτευχθεί σε συνθήκες υψηλής και εξαιρετικά υψηλής περιφερειακής ταχύτητας της περωτής $u = 500 - 600$ (m/s). Η εξάρτηση μεταξύ του λόγου πίεσης του φυγοκεντρικού συμπιεστή R718 (Π), της αντίστοιχης θερμοκρασιακής ανύψωσης (ΔT) και της περιφερειακής ταχύτητας (u_2) για διάφορες θερμοκρασίες εισόδου του συμπιεστή (T_0) δίνεται στα παρακάτω σχήματα, για $\psi = 0,65$ και $\eta_p = 0,78$.



Εικόνα 2. 16 Εξάρτηση μεταξύ Π , ΔT και u_2 για διάφορες θερμοκρασίες ($\psi = 0,65$ και $\eta_p = 0,78$) (19)

Η επίδραση του βαθμού απόδοσης του συμπιεστή ($\eta_p = 0,72 - 0,78 - 0,83$) και του αντίστοιχου συντελεστή έργου ($\psi = 0,60 - 0,65 - 0,70$) επί του λόγου πίεσης βαθμίδας του φυγοκεντρικού συμπιεστή (Π) και της αντίστοιχης θερμοκρασιακής ανύψωσης (ΔT) για $T_0 = 10$ (°C) δίδεται στα παρακάτω σχήματα.



Εικόνα 2. 17 Επιρροή του η_r και Ψ στον λόγο πίεσης Π και στη ΔT ($T_0=10^\circ C$) (19)

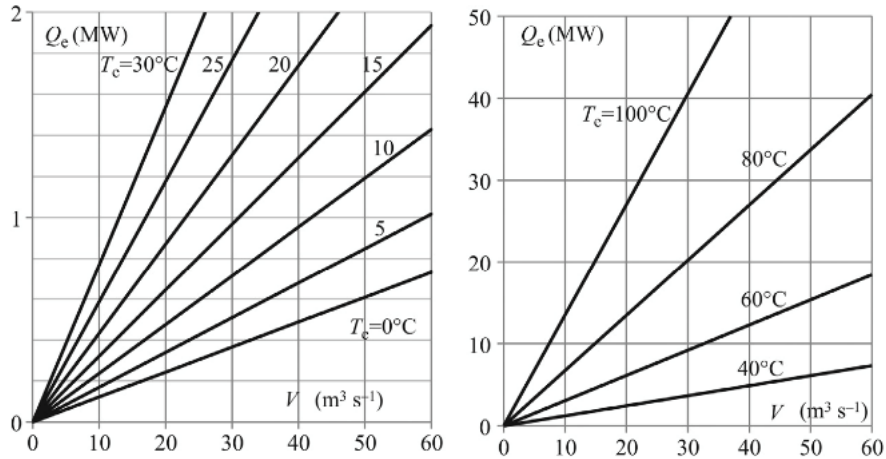
Οι φυγοκεντρικοί συμπιεστές R718 χαρακτηρίζονται από υψηλή περιφερειακή ταχύτητα πτερωτής, υψηλό αριθμό Mach και υψηλό λόγο πίεσης. Επιπλέον, ο αριθμός Reynolds της ροής υπό συνθήκες βαθύ κενού είναι χαμηλός. Η υψηλή υπερθέρμανση στην έξοδο του συμπιεστή είναι ένα άλλο πρόβλημα στους φυγοκεντρικούς ψυκτικούς συμπιεστές R718.

Εάν ο σκοπός είναι η επίτευξη μίας βαθμίδας ενός συμπιεστή με υψηλό λόγο πίεσης και υψηλή απόδοση, τότε οι ιδιότητες των υδρατμών και οι συνθήκες λειτουργίας σχεδιασμού θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στη διαδικασία βελτιστοποίησης του πεδίου ροής του συμπιεστή. Με σκοπό την αποφυγή ισχυρών φαινομένων διηχητικής ροής στο πεδίο ροής του συμπιεστή και αρνητικών επιδράσεων στον βαθμό απόδοσης και στα χαρακτηριστικά απόδοσης του συμπιεστή, καθώς και την αποφυγή πολύ υψηλής υπερθέρμανσης στην έξοδο του συμπιεστή, ο περιορισμός της περιφερειακής ταχύτητας της πτερωτής συνιστάται να είναι $u = 600$ (m/s).

Ο βαθμός απόδοσης εκτιμάται ότι είναι $\eta_r = 0,72-0,83$. Οι χαμηλότερες τιμές αντιστοιχούν σε μικρούς συμπιεστές, όπου η επίδραση του υψηλού αριθμού Mach και του χαμηλού αριθμού Reynolds είναι έντονη.

Οι διαστάσεις του φυγοκεντρικού συμπιεστή εξαρτώνται κυρίως από την ικανότητα του ψυκτικού συστήματος (Q_e), την ειδική ογκομετρική ψυκτική ικανότητα (q_v) ή την ειδική χωρητικότητα του συμπιεστή (ec) και τον απαιτούμενο λόγο πίεσης (Π).

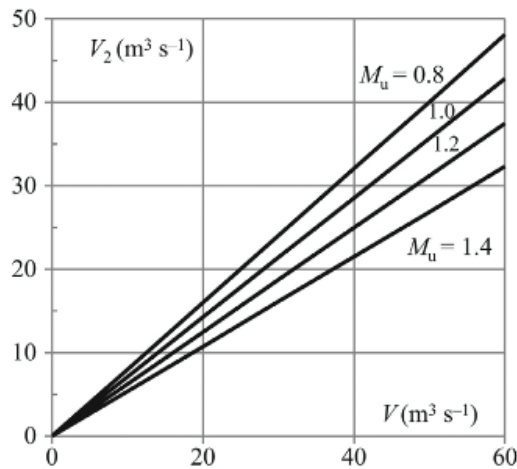
Το νερό είναι ψυκτικό μέσο με μικρή ειδική ογκομετρική ψυκτική ικανότητα (q_v) ή με μεγάλη ειδική χωρητικότητα συμπιεστή (ec), ειδικά στον τομέα των εφαρμογών κλιματισμού. Η εξάρτηση της ογκομετρικής παροχής του συμπιεστή για διάφορες θερμοκρασίες ατμοποίησης (T_e) δίνεται τα παρακάτω σχήματα.



Εικόνα 2. 18 Εξάρτηση της ογκομετρικής της ογκομετρικής παροχής V στην ικανότητα του ψυκτικού συστήματος (Q_e) για διάφορες θερμοκρασίες (T_c)

Οι συνθήκες λειτουργίας σε βαθύ κενό και η χαμηλή ειδική ογκομετρική ψυκτική ικανότητα (q_v) (υψηλή ec) του R718 προκαλούν μεγάλη ογκομετρική παροχή και μεγάλες διαστάσεις των φυγοκεντρικών συμπιεστών R718

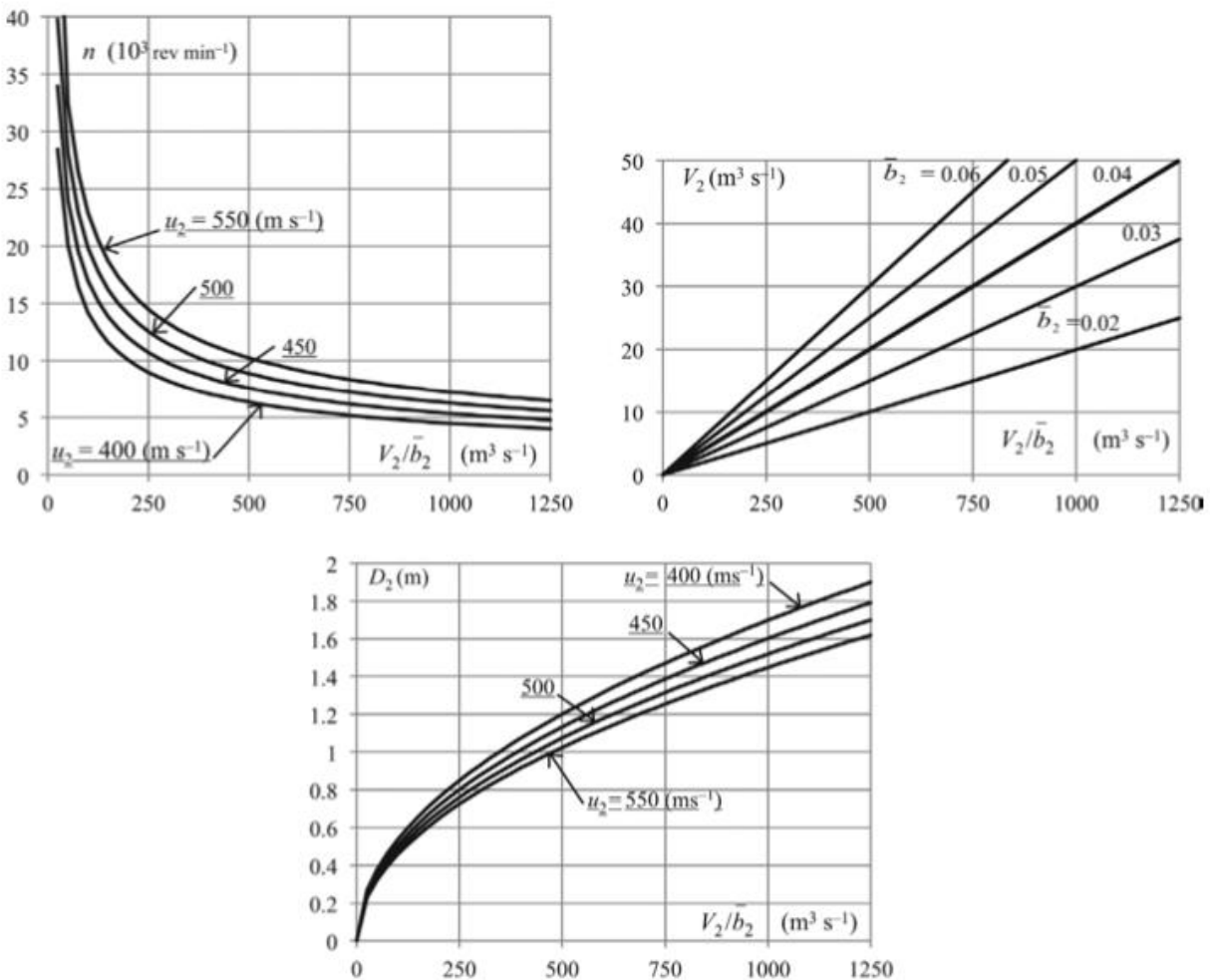
Η εξάρτηση της ογκομετρικής παροχής στην είσοδο του συμπιεστή (V) και της ογκομετρικής παροχής στην έξοδο της περωτής (V_2) από το λόγο πίεσης του συμπιεστή $\Pi = f(Mu)$ ή από τον περιφερειακό αριθμό Mach Mu δίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 2. 19 Εξάρτηση της ογκομετρικής παροχής στην έξοδο της περωτής V_2 στην ογκομετρική παροχή V και στον περιφερειακό αριθμό Mach (Mu)

Το σχετικό πλάτος της περωτής ($\bar{b}_2 = b_2 / D_2$) είναι μία από τις σημαντικότερες γεωμετρικές παραμέτρους με ισχυρή επιρροή στο σχεδιασμό και τα χαρακτηριστικά απόδοσης. Η αλληλεξάρτηση μεταξύ της διαμέτρου του άκρου της περωτής (D_2), του σχετικού πλάτους της

περωτής ($\bar{b}_2 = b_2 / D_2$), της ταχύτητας περιστροφής της περωτής (n), της ογκομετρικής παροχής του συμπιεστή (V_2) και της περιφερειακής ταχύτητας της περωτής (u_2), η οποία προσδιορίζεται με έναν αναγκαίο λόγο πίεσης ($u_2 = f(\Pi)$), για συντελεστή παροχής στο σημείο σχεδίασης $\Phi_{2d} = 0,3$, συντελεστή φόρτισης $\psi = 0,65$ και πολυτροπικό βαθμό απόδοσης $\eta_p = 0,78$, δίνεται στα παρακάτω σχήματα.



Εικόνα 2. 20 Αλληλεξάρτηση μεταξύ D_2 , \bar{b}_2 , n , V_2 και u_2 (19)

Ο περιορισμός του λόγου πίεσης φυγοκεντρικού συμπιεστή R718 στο πεδίο των εφαρμογών κλιματισμού είναι περίπου $\Pi \approx (3,2-4,0)$ έως $(4,0-5,0)$, για περιορισμό του $u \approx 550 - 600$ (m/s), και ο περιορισμός της αντίστοιχης ανύψωσης της θερμοκρασίας είναι περίπου $\Delta T \approx (20-22)$ έως $(23-27)$ (K). Οι φυγοκεντρικοί συμπιεστές δύο σταδίων αποτελούν βέλτιστη λύση για τα συστήματα ψύξης/αντλίας θερμότητας R718 για εφαρμογές κλιματισμού ($T_e = 0 - 10^\circ\text{C}$ και $T_c = 35 - 50^\circ\text{C}$).

Ο περιορισμός του λόγου πίεσης φυγοκεντρικού συμπιεστή R718 στον τομέα των βιομηχανικών αντλιών θερμότητας υψηλής θερμοκρασίας και των εφαρμογών συμπυκνωτών είναι περίπου $\Pi \approx (2,7-4,0)$ έως $(3,4-4,7)$, για τον περιορισμό του $u \approx 550-600$ (m/s), ανάλογα με τη θερμοκρασία εισόδου $T = 30 - 100^\circ\text{C}$ και ο περιορισμός της αντίστοιχης ανύψωσης θερμοκρασίας είναι περίπου $\Delta T \approx (20-28)$ έως $(29-40)$ K. Ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών στον τομέα των αντλιών θερμότητας υψηλών θερμοκρασιών και των συστημάτων συμπύκνωσης καλύπτεται με μονοβάθμιους φυγοκεντρικούς συμπιεστές.

Για μεγαλύτερες διαμέτρους πτερωτής (π.χ: $D_2 \approx 1700$ mm, $(\bar{b}_2 = 0,06)$), και για θερμοκρασία ατμοποίησης $T_e = 10^\circ\text{C}$, η μεγαλύτερη ισχύς της φυγοκεντρικής ψυκτικής μονάδας R718 μπορεί να επιτευχθεί $Q_e \approx 2000$ kW. Για διαμέτρους πτερωτής $D_2 = 500 - 1000$ mm, το εκτιμώμενο εύρος ισχύος των φυγοκεντρικών συμπιεστών Q_e είναι $100 - 700$ kW. Οι συμπιεστές R718 μπορούν να εφαρμοστούν για συστήματα ψύξης με χαμηλή ισχύ $Q_e = 10-50$ kW ($D_2 = 170-300$ mm). Η υψηλή και εξαιρετικά υψηλή ταχύτητα περιστροφής της πτερωτής είναι χαρακτηριστικό των φυγοκεντρικών ψυκτικών μονάδων χαμηλής ισχύος.

Σύμφωνα με την ανάλυση και τις εκτιμήσεις που δόθηκαν προηγουμένως, προκύπτουν οι ακόλουθες γενικές παρατηρήσεις και συστάσεις σχετικά με τη βελτιστοποίηση του πεδίου ροής των φυγοκεντρικών συμπιεστών R718:

1. Η γωνία εξόδου της πτερωτής πρέπει να είναι $\beta_2 = 75^\circ-90^\circ$. Αυτές οι πτερωτές έχουν χαρακτηριστικά υψηλής αντοχής και μπορούν να αντέξουν υψηλές και εξαιρετικά υψηλή περιφερειακή ταχύτητα $u = 500-550-600$ (m/s), υψηλό συντελεστή έργου, ελαφρώς χαμηλότερη απόδοση του συμπιεστή, και ύπαρξη ροής jet - wake στις πτερωτές. Για περιφερειακή ταχύτητα περίπου $u \approx 400$ m/s) μπορούν να εφαρμοστούν πτερωτές με χαμηλότερη γωνία εξόδου πτερυγίων ($\beta_2 = 65^\circ-75^\circ$).
2. Ο αριθμός των πτερυγίων της πτερωτής πρέπει να είναι σχετικά υψηλός. Αυτές οι πτερωτές έχουν υψηλό συντελεστή ολίσθησης, βελτιωμένες συνθήκες ροής μέσα στην πτερωτή, μικρότερες διαφορές παραμέτρων ροής μεταξύ του σημείου πίεσης και του σημείου αναρρόφησης του πτερυγίου και η πτερωτή παρέχει πιο ομοιόμορφη ροή στον διαχύτη. Για πτερωτές με μικρές διαστάσεις, ο αριθμός μεταξύ των δύο σειρών πρέπει να είναι ($z_2 = 2z_1$).
3. Το σχετικό πλάτος της πτερωτής $\bar{b}_2 = 0,02-0,04$ ($-0,06$). Οι πτερωτές με μικρότερο \bar{b}_2 μπορούν να επιτύχουν υψηλότερο περιφερειακό αριθμό Mach M_u και αντίστοιχα υψηλότερο λόγο πίεσης (Π) για δεδομένο περιορισμό του αριθμού Mach M_{w1} της ροής του ρευστού. Για δεδομένη ισχύ του συμπιεστή και περιφερειακή ταχύτητα της πτερωτής, η χαμηλότερη τιμή του σχετικού πλάτους \bar{b}_2 της πτερωτής προκαλεί αύξηση της διαμέτρου D_2 της πτερωτής και μείωση της ταχύτητας περιστροφής n της πτερωτής. Οι βέλτιστες τιμές των \bar{b}_2 και z_2 εξαρτώνται επίσης από την τιμή της αριθμού Reynolds, ο οποίος καθορίζει τις απώλειες τριβής της ροής του ρευστού.
4. Η είσοδος της πτερωτής θα πρέπει να είναι βέλτιστα σχεδιασμένη ώστε να παρέχει ελάχιστη σχετική ταχύτητα εισόδου w_1 και πτερυγία πτερωτής με μεταβλητή γωνία

είσοδου $\beta 1$. Ο περιορισμός του αριθμού Mach της ροής στην είσοδο της περωτής είναι $Mw_1 = 0,85-0,95$. Μια τοπική υπερηχητική περιοχή υπάρχει πρώτα στην περιοχή στην ακμή προσβολής στην πλευρά αναρρόφησης του περυγίου και οι δυναμικές απώλειες ρευστού αυξάνονται σημαντικά εάν εμφανιστούν φαινόμενα υπερηχητικής ροής. Η εμφάνιση υπερηχητικής ροής σε ολόκληρη την περιοχή εισόδου του καταρράκτη προκαλεί ‘‘τσοκάρισμα’’ και κρουστικό κύμα στο πεδίο ροής.

5. Ο διαχύτης πρέπει να είναι βέλτιστα σχεδιασμένος ώστε να παρέχει υψηλό βαθμό απόδοσης των συμπιεστή. Ο συντελεστής ροής στο σημείο σχεδιασμού ϕ_{2d} πρέπει να παρέχει βέλτιστες συνθήκες ροής στην είσοδο του διαχύτη, χωρίς φαινόμενα διηχητικής ροής. Τα πτερύγια του διάχυτη έχουν χαμηλότερο Φ_{2d} , υψηλότερη απόδοση (η) και υψηλότερο συντελεστή έργου ψ , σε σύγκριση με τους διαχύτες χωρίς πτερύγια, αλλά τα έξοδα και το κόστος του συμπιεστή είναι υψηλότερα. Ο διαχύτης με πτερύγια τα οποία είναι ρυθμιζόμενα μπορεί να παρέχει υψηλό βαθμό απόδοσης σε καθεστώτα μεταβλητής παροχής. Οι διαχύτες χωρίς πτερύγια με προφίλ μεσημβρινής διατομής μπορούν να βελτιώσουν την απόδοση του διαχύτη.

Η εκτίμηση των κύριων παραμέτρων των μονοβάθμιων φυγοκεντρικών συμπιεστών υδρατμών για βιομηχανικές αντλίες θερμότητας υψηλών θερμοκρασιών και για εγκαταστάσεις συμπύκνωσης με διάφορες δυναμικότητες και για διάφορες θερμοκρασιακές συνθήκες μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη χρήση της διαδικασίας υπολογισμού που δόθηκε προηγουμένως και των αποτελεσμάτων που παρουσιάστηκαν. Η ανύψωση της θερμοκρασίας που μπορεί να επιτευχθεί με μονοβάθμιο φυγοκεντρικό συμπιεστή R718 είναι 20-28 (°C), για θερμοκρασίες ατμοποίησης περίπου 30°C, και 29-40 (°C), για θερμοκρασία ατμοποίησης περίπου 100°C. Το εύρος της δυναμικότητας της αντλίας θερμότητας εξαρτάται από τις συνθήκες λειτουργίας. Για θερμοκρασίες ατμοποίησης περίπου 30°C, το εύρος της ισχύος της αντλίας θερμότητας είναι (0,1-5,0) MW. Το εύρος είναι (1,0-50) MW για θερμοκρασία ατμοποίησης περίπου 100°C.

2.8 Συμπεράσματα

Οι θερμοδυναμικές ιδιότητες του ψυκτικού μέσου και οι συνθήκες λειτουργίας του συστήματος ψύξης/θέρμανσης καθορίζουν τις ιδιαιτερότητες των φυγοκεντρικών συμπιεστών R718. Τα χαρακτηριστικά των φυγοκεντρικών συμπιεστών R718 εξαρτώνται κυρίως από την κανονική θερμοκρασία βρασμού του ψυκτικού μέσου, τη μοριακή μάζα και την ειδική ψυκτική ικανότητα (ειδική μετατόπιση του συμπιεστή). Τα CFC, HCFC, HFC και HFE είναι ενώσεις με μεγάλη μοριακή μάζα. Μια βαθμίδα ενός φυγοκεντρικού συμπιεστή που λειτουργεί με αυτά τα ψυκτικά μέσα επιτυγχάνει υψηλό λόγο πίεσης με σχετικά χαμηλή περιφερειακή ταχύτητα. Ο απαιτούμενος λόγος πίεσης για δεδομένη ανύψωση θερμοκρασίας είναι μικρότερος για ψυκτικά μέσα με χαμηλότερη κανονική θερμοκρασία βρασμού. Οι δυνατότητες αντικατάστασης του ψυκτικού μέσου σε ένα υπάρχον ψυκτικό σύστημα, καθώς και το εύρος της κατάλληλης και επιτυχημένης εφαρμογής διαφόρων ψυκτικών μέσων σε φυγοκεντρικές ψυκτικές μονάδες, εξαρτώνται κυρίως

από τη μοριακή μάζα του ψυκτικού μέσου, την κανονική θερμοκρασία βρασμού και την ειδική ψυκτική ικανότητα του ψυκτικού μέσου.

Η μικρή μοριακή μάζα, η υψηλή κανονική θερμοκρασία βρασμού, η χαμηλή ειδική ψυκτική ικανότητα του νερού, και επιπλέον η υψηλή τιμή του κινηματικού ιξώδους του νερού κοντά στο τριπλό σημείο και η υψηλή τιμή του ισεντροπικού εκθέτη του νερού καθορίζουν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά και ιδιαιτερότητες της βαθμίδας φυγοκεντρικού συμπιεστή R718:

- υψηλή περιφερειακή ταχύτητα
- υψηλός λόγος πίεσης
- υψηλός αριθμός Mach
- χαμηλός αριθμός Reynolds
- υψηλή υπερθέρμανση στην έξοδο του συμπιεστή
- περιορισμός της παροχής

Αλληλεξάρτηση μεταξύ του λόγου πίεσης της βαθμίδας του φυγοκεντρικού συμπιεστή, της αντίστοιχης ανύψωσης θερμοκρασίας, του περιφερειακού αριθμού Mach και της περιφερειακής ταχύτητας της περωτής, καθώς και η επίδραση της ψυκτικής ισχύος στις διαστάσεις των φυγοκεντρικών συμπιεστών, εκτιμώνται. Ο φυγοκεντρικός συμπιεστής μπορεί να επιτύχει σχετικά χαμηλό λόγο πίεσης σε συνθήκες συνήθους περιφερειακής ταχύτητας $u = 350-400$ (m/s). Η περωτή πρέπει να λειτουργεί με υψηλή και εξαιρετικά υψηλή περιφερειακή ταχύτητα $u = 500-550-600$ (m/s). Ο περιορισμός του λόγου πίεσης της βαθμίδας του φυγοκεντρικού συμπιεστή R718 στον τομέα των εφαρμογών κλιματισμού είναι περίπου $\Pi \approx (3,2-4,0)$ έως $(4,0-5,0)$, για περιορισμό $u \approx 550-600$ (m/s) και ο περιορισμός της αντίστοιχης ανύψωσης της θερμοκρασίας είναι περίπου $\Delta T \approx (20-22)$ έως $(23-27)$ (K). Οι φυγοκεντρικοί συμπιεστές δύο σταδίων αποτελούν βέλτιστη λύση για συστήματα ψύξης/αντλίας θερμότητας R718 για εφαρμογές κλιματισμού ($T_e = (0-10)^\circ\text{C}$ - $T_c = (35-50)^\circ\text{C}$). Ο περιορισμός του λόγου πίεσης των φυγοκεντρικών συμπιεστών R718 στον τομέα των βιομηχανικών αντλιών θερμότητας υψηλής θερμοκρασίας και των εφαρμογών συμπυκνωτών είναι περίπου $\Pi \approx (2,7-4,0)$ έως $(3,4-4,7)$, για περιορισμό $u \approx 550-600$ (m/s), ανάλογα με τη θερμοκρασία εισόδου $T_0 = 30 - 100$ °C και ο περιορισμός της αντίστοιχης ανύψωσης της θερμοκρασίας είναι περίπου $\Delta T \approx (20-28)$ έως $(29-40)$ (K). Με τους μονοβάθμιους φυγοκεντρικούς συμπιεστές καλύπτεται ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών στον τομέα των αντλιών θερμότητας υψηλής θερμοκρασίας και των συστημάτων συμπύκνωσης. Το νερό είναι ιδανικό ψυκτικό μέσο για βιομηχανικές αντλίες θερμότητας υψηλής θερμοκρασίας.

Η υψηλή περιφερειακή ταχύτητα, ο υψηλός αριθμός Mach και ο υψηλός λόγος πίεσης προκαλούν διαχωρισμένα φαινόμενα ροής, ροή jet-wake, και διηχητικής ροής στο πεδίο ροής του συμπιεστή. Οι περωτές με γωνία εξόδου περυγίων $\beta_2 = 75^\circ-90^\circ$ έχουν χαρακτηριστικά υψηλής αντοχής και μπορούν να αντέξουν την υψηλή και εξαιρετικά υψηλή περιφερειακή ταχύτητα. Αν και υπάρχει δομή ροής jet-wake στα περυγία, αυτές οι περωτές είναι κατάλληλες για φυγοκεντρικούς συμπιεστές με υψηλή περιφερειακή ταχύτητα και υψηλό λόγο πίεσης. ο αριθμός

των πτερυγίων της πτερωτής πρέπει να είναι υψηλός. Ο συντελεστής ολίσθησης αυτών των πτερυγίων είναι υψηλός, οι συνθήκες ροής στην πτερωτή βελτιώνονται και η ροή του ρευστού στην πτερωτή και στην είσοδο του διαχύτη είναι πιο ομοιόμορφη. Οι πτερωτές με χαμηλότερες ($b_2 = 0,02 - 0,04$) μπορούν να επιτύχουν υψηλότερο περιφερειακό αριθμό Mach M_u και αντίστοιχα υψηλότερο λόγο πίεσης φυγοκεντρικής βαθμίδας (Π), για δεδομένο περιορισμό του αριθμού Mach της ροής του ρευστού M_{w1} . Η είσοδος της πτερωτής θα πρέπει να σχεδιαστεί βέλτιστα ώστε να παρέχει ελάχιστη σχετική ταχύτητα εισόδου w_1 (ελάχιστο M_{w1}). Ο συντελεστής παροχής στο σημείο σχεδιασμού Φ_{2d} θα πρέπει να παρέχει βέλτιστες συνθήκες ροής στην είσοδο του διαχύτη, χωρίς φαινόμενα διηχητικής ροής. Ο διαχύτης πρέπει να είναι βέλτιστα σχεδιασμένος για να παρέχει υψηλή απόδοση του συμπιεστή. Οι βέλτιστες τιμές των b_2 και z_2 εξαρτώνται επίσης από τις τιμές του αριθμού Reynolds, ο οποίος καθορίζει τις απώλειες τριβής της ροής του ρευστού. Χαμηλός αριθμός Reynolds των υδρατμών προκαλεί μείωση της απόδοσης του συμπιεστή.

Μείωση του βαθμού απόδοσης εμφανίζεται όταν ο συμπιεστής λειτουργεί σε συνθήκες εκτός σχεδιασμού, λόγω μη ρυθμισμένων βέλτιστων συνθηκών λειτουργίας της πτερωτής/διαχύτη/κελύφους, καθώς και λόγω φαινομένων διηχητικής ροής και ‘‘τσοκαρίσματος’’, που μπορεί να εμφανιστούν όταν αυξάνεται η περιφερειακή ταχύτητα και/ή μειώνεται η θερμοκρασία εισόδου. Οι δυναμικές απώλειες του ρευστού αυξάνονται σημαντικά εάν εμφανιστούν φαινόμενα διηχητικής ροής. Η εμφάνιση της υπερηχητικής ροής σε ολόκληρη την περιοχή εισόδου προκαλεί ‘‘τσοκάρισμα’’ και κρουστικά κύματα στο πεδίο ροής του συμπιεστή.

Το εύρος των πιθανών εφαρμογών των μονάδων ψύξης/θέρμανσης με φυγοκεντρικό συμπιεστή R718 εκτιμάται ότι είναι πολύ μεγάλο, από δεκάδες KW έως 1 έως 2 MW. Το εκτιμώμενο ευνοϊκό εύρος είναι 100 - 1200 KW.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΤΟΥ ΦΥΓΟΚΕΝΤΡΙΚΟΥ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ R718

3.1 Περιγραφή του παρόντος μοντέλου

Το μοντέλο που παρουσιάζεται στην παρούσα διπλωματική εργασία αφορά φυγοκεντρικό συμπιεστή R718, για κύκλωμα ψύξης με ισχύ έως 35KW. Πρόκειται δηλαδή για συμπιεστή ο οποίος ανήκει στην κατηγορία των συμπιεστών μικρών διαστάσεων. Χρησιμοποιείτε δηλαδή σε ψύκτες που προβλέπονται για κλιματισμό/θέρμανση εσωτερικών χώρων περίπου 220 - 250 m². Πολλές φορές γίνεται η τοποθέτηση πολλών τέτοιων μονάδων ώστε να καλυφθεί η ανάγκη για μεγαλύτερη επιφάνεια. Ένα χαρακτηριστικό αυτών των ψυκτών είναι το μικρό τους μέγεθος, που συνήθως προβάλλεται και ως επιχείρημα για την αγορά τους. Αυτό σημαίνει πως η χωροταξία σε όλο τον ψύκτη παίζει βασικό ρόλο σε αντίθεση με τους ψύκτες μεγάλων διαστάσεων όπου δεν αποτελεί πρόβλημα.

Για την σχεδίαση του φυγοκεντρικού συμπιεστή R718 επιλέχθηκε το λογισμικό CFTurbo. Όσα αναφέρθηκαν στις προηγούμενες ενότητες θα εφαρμοστούν μέσω του συγκεκριμένου λογισμικού ώστε να βγουν οι τελικές τιμές των διαφόρων παραμέτρων αλλά και γεωμετρικών χαρακτηριστικών των εξαρτημάτων από τα οποία αποτελείται ο συμπιεστής. Στη συγκεκριμένη περίπτωση θα αποτελείται από τα εξής μέρη:

- (1) Σωλήνας εισόδου
- (2) Πτερωτή
- (3) Διάχυτης
- (4) Κέλυφος

Η σειρά γι' τη σχεδίαση των παραπάνω θα είναι πρώτα της πτερωτής, αφού αυτή αποτελεί το κύριο μέρος το συμπιεστή και όλα τα υπόλοιπα εξαρτώνται από αυτό. Στη συνέχεια θα γίνει σχεδίαση του διαχύτη, μετά του σωλήνα εισόδου και τέλος του κελύφους του συμπιεστή.

3.2 Αρχικές συνθήκες του μοντέλου

Στον παρόν κύκλωμα ψύξης χρησιμοποιείται ατμοποιητής όπου για παροχή 2 kg/s σε αυτόν περίπου 1% ατμοποιείται και πηγαίνει στον συμπιεστή. Επομένως έχουμε παροχή συμπιεστή 0.02 kg/s. Θερμοκρασία εισόδου είναι 10° C όπου η αντίστοιχη πίεση ατμοποίησης είναι 0.0123 bar. Ο λόγος πίεσης (Π) να είναι στο 3. Με αρχικό κριτήριο το όριο της περιφερειακή ταχύτητα u_2 αλλά και όσον αναφέρθηκαν προηγουμένως οι διαστάσεις της διαμέτρου και της ταχύτητας

περιστροφής της περωτής επιλέχθηκαν 280mm και 40.000 rpm αντίστοιχα. Όλα αυτά όμως ισχύουν για το εργαζόμενο μέσο που θέλουμε δηλαδή για ατμό νερού σε 10° C οπότε εισάγονται και θερμοδυναμικές ιδιότητες του. Με αυτές ως αρχικές συνθήκες, μπορούμε να ξεκινήσουμε να τις εισάγουμε στο πρόγραμμα για τον υπολογισμό όλων των υπολοίπων παραμέτρων.

The image shows two panels of input fields. The left panel is titled 'Design point' and includes:

- Mass flow: 0.02 kg/s
- Total pressure ratio: 3
- Revolutions: 40000 /min
- Gas Name: H2O - Steam
- Model: Perfect
- Inlet conditions: Pressure (total) pt = 0.012 bar, Temperature (total) Tt = 10.0 °C

 The right panel lists various gas properties:

- General: Gas constant R = 461.5 J/(kg-K), Molar weight M = 0.018016 kg/mol
- Perfect Gas: Compressibility factor Z = 1, Heat capacity cp = 1849.4 J/(kg-K)
- Real Gas: Critical pressure pc = 220 bar, Critical temperature Tc = 374.0 °C, Critical density ρc = 322 kg/m³, Acentric factor ω = 0.344, Heat capacity coefficients cp0 = 1050 J/(kg-K), cp1 = 0.01 J/(kg-K²), cp2 = 0.0005 J/(kg-K³), cp3 = 0 J/(kg-K⁴)
- Transport Properties: Kinematic viscosity ν = 0 m²/s, Thermal conductivity λ = 0.0262 W/(m-K)

Εικόνα 3. 1 Τιμές των αρχικών συνθηκών και οι ιδιότητες του ρευστού

Αναλυτικά οι Αρχικές συνθήκες

Πίνακας 3. 1 Στοιχεία για τις αρχικές συνθήκες και τις ιδιότητες του ρευστού

Gas model			Perfect
Design Point			
Mass flow	m	[kg/s]	0.02
Revolutions	n	[/min]	40000
Add'l. Total-to-total efficiency	ηtt+	[%]	100
Rotation direction			Right (clockwise)
Swirl number hub	δrh	[-]	1
Swirl number shroud	δrs	[-]	1
Pressure ratio (total)	πtt	[-]	3
Fluid			

Name			H2O - Steam
Description			
Symbol			
Compressibility factor	Z	[-]	1
Gas constant	R	[J/(kg·K)]	461.5
Critical pressure	p _c	[bar]	220
Kinematic viscosity	ν	[m ² /s]	0
Thermal conductivity	λ	[W/(m·K)]	0.0262
Molar weight	M	[kg/mol]	0.018016
Inlet conditions			
Pressure (total)	p _t	[bar]	0.012
Temperature (total)	T _t	[°C]	10.0

3.3 Σχεδίαση της περωτής

Στην παρούσα περωτή επιλέχθηκε περωτή με δευτερεύουσα περύγια “Splitter Blades”. Ο συνολικός αριθμός των περυγίων είναι 18, 9 κύρια περύγια και 9 δευτερεύουσα. Γι’ τη διάμετρο εισόδου επιλέχθηκε $D_s = 180$, $D_1 = 280$ και διάμετρο δρομέα στην είσοδο $D_H = 15$.

Main dimensions

Hub diameter dH mm

 Automatic

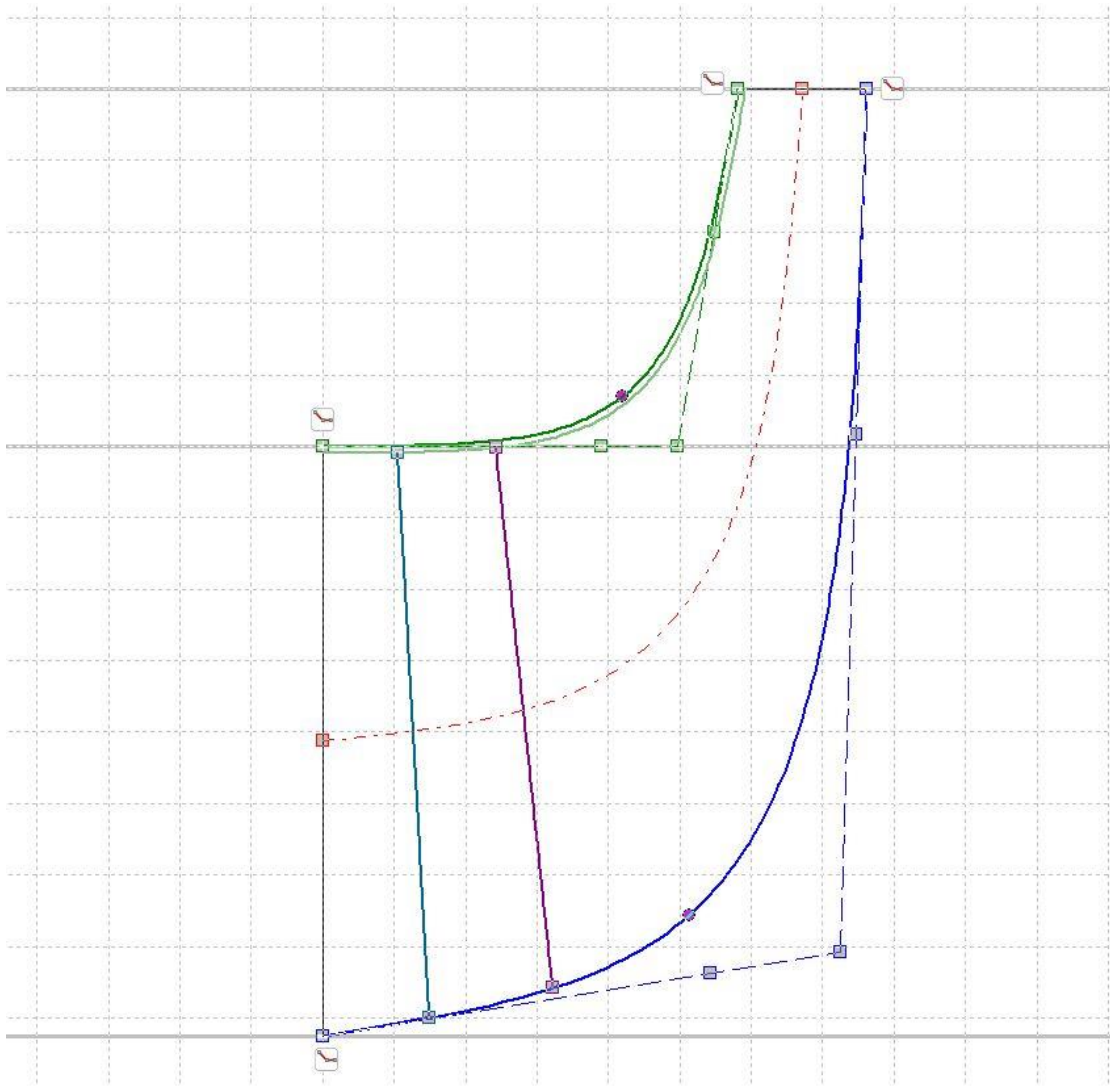
Suction diameter dS mm

Impeller diameter d2 mm

Outlet width b2 mm

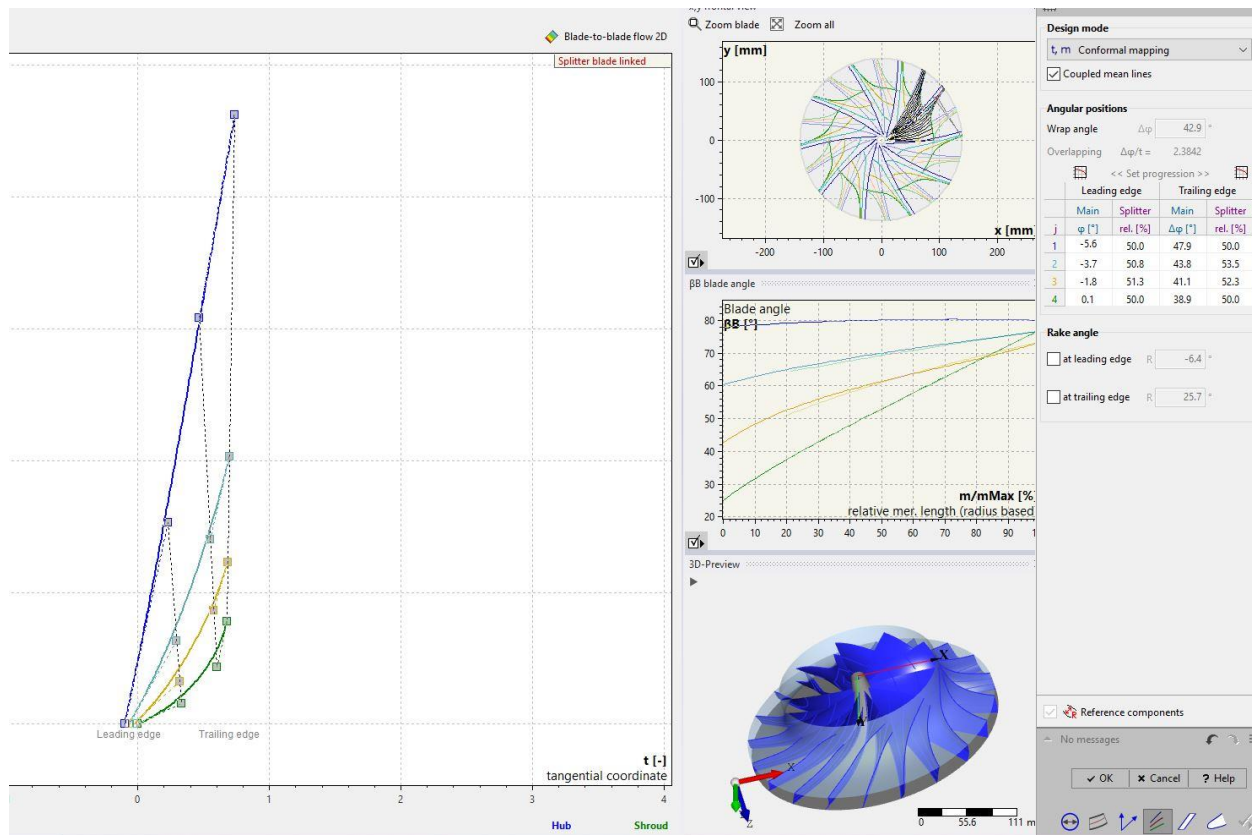
Εικόνα 3. 2 Κύριες διαστάσεις περωτής

Η πτερωτή σε μεσημβρινή όψη προκύπτει ως εξής:



Εικόνα 3. 3 Μεσημβρινή όψη της πτερωτής

Πέρα από τα μήκη των παραμέτρων της φτερωτής που αναφέρθηκαν πιο πριν, η γεωμετρία αποτελεί ένα ξεχωριστό κομμάτι. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η γεωμετρία των πτερυγίων έγινε με την χρήση 4 καμπυλών Bezier, όπου ορίζουν όλο το πτερύγιο. Ο τρόπος με τον οποίον έγινε αυτό ήταν με τον ορισμό της γωνίας στην αρχή και στο πέρας της φτερωτής (trailing edge και leading edge αντίστοιχα) για κάθε καμπύλη (span). Για τα δευτερεύουσα πτερύγια (splitter blades) επιλέχθηκε η εντολή της αυτόματης σύνδεσης με τα κύρια πτερύγια



Εικόνα 3. 4 Δημιουργία 4 καμπυλών Bezier για τη δημιουργία του κύριου Πτερυγίου

Η παραπάνω καμπύλες έχουν αρχή την ακμή προσβολής (leading edge) και τέλος τελείωμα του πτερυγίου (trailing edge), και με την προσθήκη ή την αλλαγή σημείων πάνω στην καμπύλη τροποποιείται η γεωμετρία του πτερυγίου. Οι τιμές για τις παραπάνω καμπύλες φαίνεται στο παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 3. 2 Τιμές γωνιών για τις καμπύλες (span) των κύριων και δευτερευουσών πτερυγίων

Main blade			
Coupled mean lines			-
Overlapping	$\Delta\phi/t$	[-]	2.4128
Meanline 1 (Hub)			
Leading edge position	ϕ_{LE}	[°]	-5.6
Trailing edge position	ϕ_{TE}	[°]	42.3
Wrap angle	$\Delta\phi$	[°]	47.9
Blade angle leading edge	$\beta B1$	[°]	78.0
Blade angle trailing edge	$\beta B2$	[°]	80.0
Meanline 2			
Leading edge position	ϕ_{LE}	[°]	-3.7
Trailing edge position	ϕ_{TE}	[°]	41.3

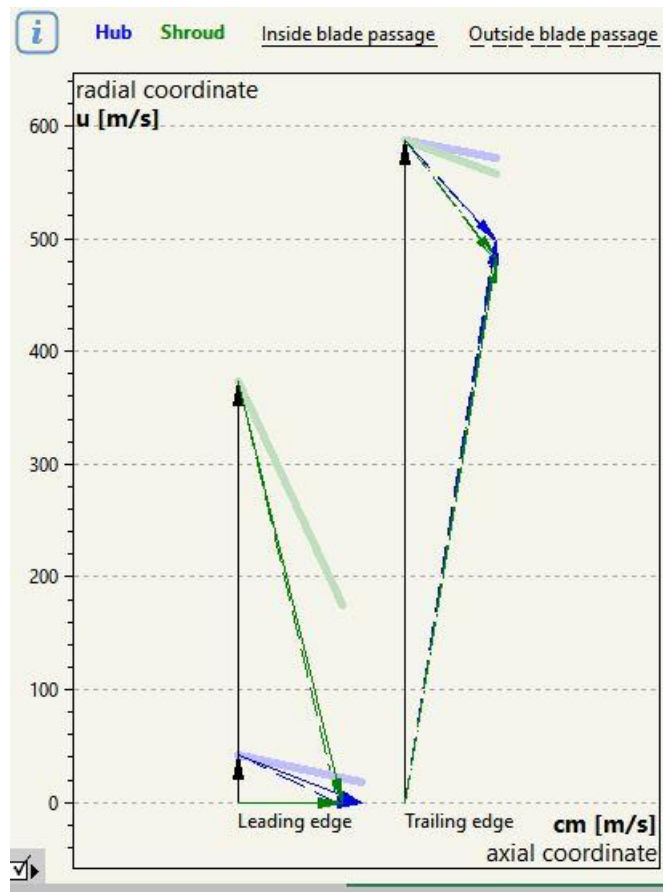
Wrap angle	$\Delta\phi$	[°]	45.0
Blade angle leading edge	$\beta B1$	[°]	60.3
Blade angle trailing edge	$\beta B2$	[°]	76.7
Meanline 3			
Leading edge position	ϕLE	[°]	-1.8
Trailing edge position	ϕTE	[°]	40.1
Wrap angle	$\Delta\phi$	[°]	42.0
Blade angle leading edge	$\beta B1$	[°]	42.7
Blade angle trailing edge	$\beta B2$	[°]	73.3
Meanline 4 (Shroud)			
Leading edge position	ϕLE	[°]	0.1
Trailing edge position	ϕTE	[°]	38.9
Wrap angle	$\Delta\phi$	[°]	38.9
Blade angle leading edge	$\beta B1$	[°]	25.0
Blade angle trailing edge	$\beta B2$	[°]	70.0
Splitter blade			
Splitter position		[%]	50
Overlapping	$\Delta\phi/t$	[-]	1.623
Meanline 1 (Hub)			
Leading edge position	ϕLE	[°]	29.3
Trailing edge position	ϕTE	[°]	60.3
Wrap angle	$\Delta\phi$	[°]	30.9
Blade angle leading edge	$\beta B1$	[°]	79.6
Blade angle trailing edge	$\beta B2$	[°]	80.0
Meanline 2			
Leading edge position	ϕLE	[°]	27.3
Trailing edge position	ϕTE	[°]	59.3
Wrap angle	$\Delta\phi$	[°]	32.0
Blade angle leading edge	$\beta B1$	[°]	64.4
Blade angle trailing edge	$\beta B2$	[°]	76.6
Meanline 3			
Leading edge position	ϕLE	[°]	28.9
Trailing edge position	ϕTE	[°]	58.1
Wrap angle	$\Delta\phi$	[°]	29.2
Blade angle leading edge	$\beta B1$	[°]	50.7
Blade angle trailing edge	$\beta B2$	[°]	73.3
Meanline 4 (Shroud)			
Leading edge position	ϕLE	[°]	32.2
Trailing edge position	ϕTE	[°]	56.9
Wrap angle	$\Delta\phi$	[°]	24.7
Blade angle leading edge	$\beta B1$	[°]	39.0
Blade angle trailing edge	$\beta B2$	[°]	69.9

Πίνακας 3. 3 Αναλυτικά στοιχεία για τις ταχύτητες και για κάθε μία από τις καμπύλες (Span) των κύριων και δευτερευουσών πτερυγίων

Slip			
Slip model			Aungier/Wiesner
Slip coefficient	γ	[-]	0.56
Suction side			
Circumferential velocity	uS	[m/s]	[31.416, 376.99]
Circumferential component of relative velocity	wuS	[m/s]	[-31.416, -376.99]
Relative velocity	wS	[m/s]	[93.653, 387.18]
Meridional component of absolute velocity	cmS	[m/s]	[88.227, 88.227]
Radial component of absolute velocity	crS	[m/s]	[13.996, 0.0069656]
Axial component of absolute velocity	caxS	[m/s]	[87.109, 88.227]
Circumferential component of absolute velocity	cuS	[m/s]	[0, 0]
Absolute velocity	cS	[m/s]	[88.227, 88.227]
Leading edge (outside blade passage)			
Circumferential component of relative velocity	wu0	[m/s]	[-41.937, -373.2]
Relative velocity	w0	[m/s]	[97.998, 383.57]
Meridional component of absolute velocity	cm0	[m/s]	[88.571, 88.571]
Radial component of absolute velocity	cr0	[m/s]	[16.58, 1.4128]
Axial component of absolute velocity	cax0	[m/s]	[87.006, 88.56]
Circumferential component of absolute velocity	cu0	[m/s]	[0, 0]
Absolute velocity	c0	[m/s]	[88.571, 88.571]
Leading edge (inside blade passage)			
Circumferential velocity	u1	[m/s]	[41.937, 373.2]
Circumferential component of relative velocity	wu1	[m/s]	[-41.937, -373.2]
Relative velocity	w1	[m/s]	[117.75, 384.49]
Meridional component of absolute velocity	cm1	[m/s]	[110.03, 92.48]
Radial component of absolute velocity	cr1	[m/s]	[20.597, 1.4752]
Axial component of absolute velocity	cax1	[m/s]	[108.08, 92.469]
Circumferential component of absolute velocity	cu1	[m/s]	[0, 0]
Absolute velocity	c1	[m/s]	[110.03, 92.48]
Trailing edge (inside blade passage)			
Circumferential velocity	u2	[m/s]	[586.43, 586.43]
Circumferential component of relative velocity	wu2	[m/s]	[-88.632, -103.59]
Relative velocity	w2	[m/s]	[119.94, 131.21]
Meridional component of absolute velocity	cm2	[m/s]	[80.81, 80.519]
Radial component of absolute velocity	cr2	[m/s]	[80.77, 79.349]
Axial component of absolute velocity	cax2	[m/s]	[2.5194, 13.675]
Circumferential component of absolute velocity	cu2	[m/s]	[497.8, 482.84]
Absolute velocity	c2	[m/s]	[504.31, 489.5]
Trailing edge (outside blade passage)			
Circumferential component of relative velocity	wu3	[m/s]	[-88.632, -103.59]

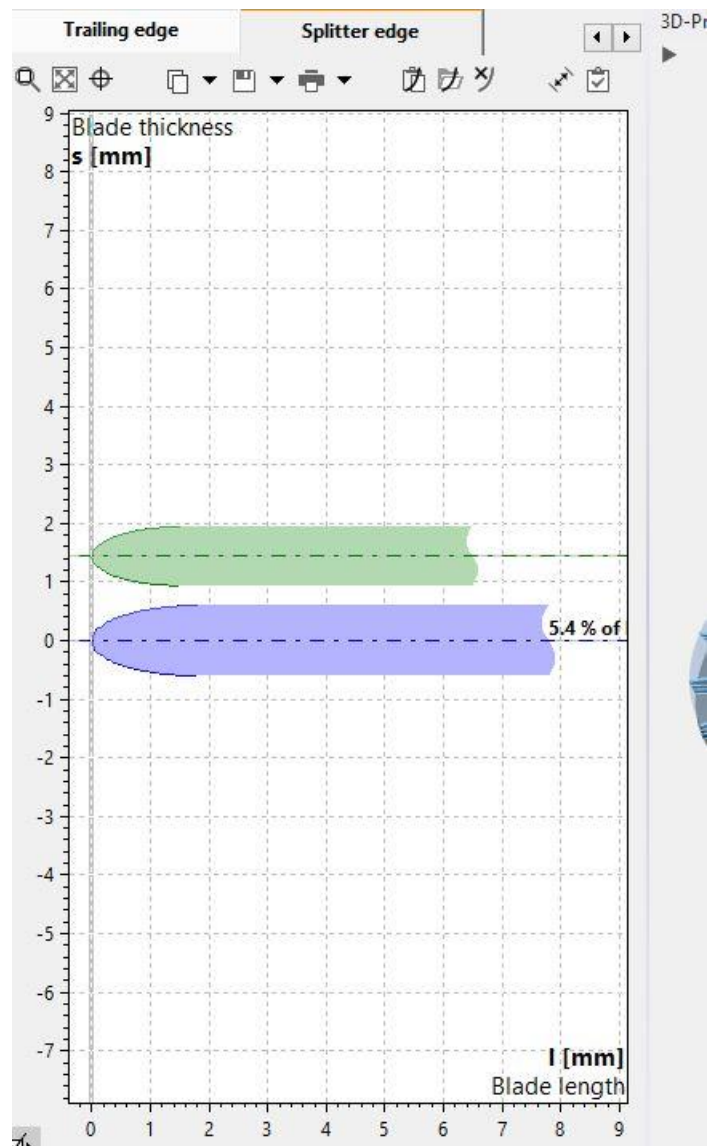
Relative velocity	w3	[m/s]	[118.44, 130.02]
Meridional component of absolute velocity	cm3	[m/s]	[78.571, 78.571]
Radial component of absolute velocity	cr3	[m/s]	[78.533, 77.429]
Axial component of absolute velocity	cax3	[m/s]	[2.4496, 13.344]
Circumferential component of absolute velocity	cu3	[m/s]	[497.8, 482.84]
Absolute velocity	c3	[m/s]	[503.96, 489.19]

Σημείωση: Όπου υπάρχουν δύο τιμές η πρώτη αναφέρεται στην ακμή προβολής πτερυγίου (*leading edge*) και η δεύτερη στο τελείωμα του πτερυγίου (*trailing edge*)



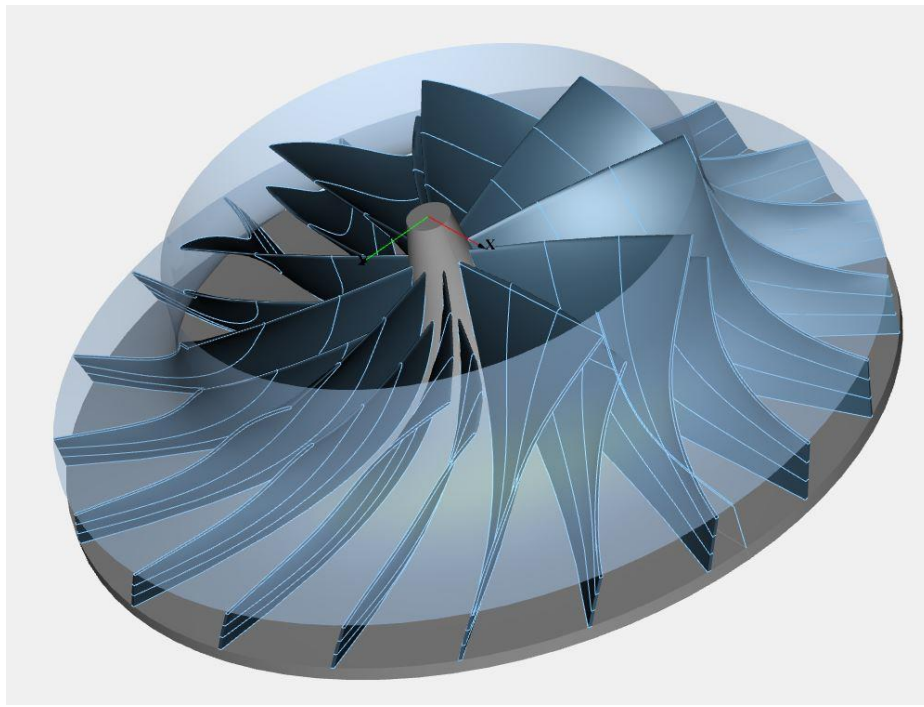
Εικόνα 3. 5 Τρίγωνα ταχυτήτων στην είσοδο και στην έξοδο της φτερωτής

Τέλος για τα πάχη των πτερυγίων έγινε επιλογή 1.2 mm με το παρακάτω προφίλ.



Εικόνα 3. 6 Πάχος των πτερωτών

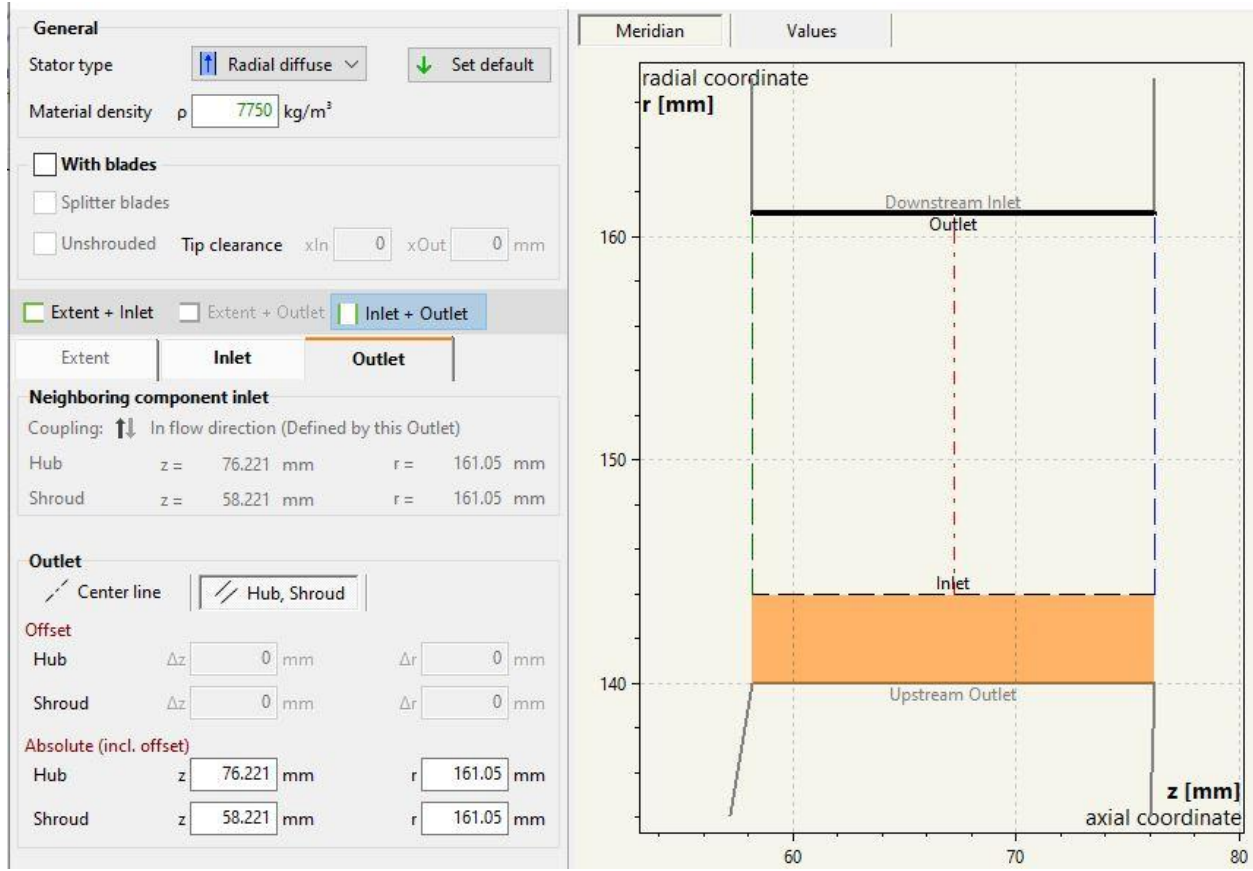
Το τελικό μοντέλο όσον αναφορά την πτερωτή προκύπτει ως εξής:



Εικόνα 3. 7 Τρισδιάστατη όψη της φτερωτής μέσω του CFTurbo

3. 4 Σχεδίαση του Διαχύτη

Ο διαχύτης, ο οποίος αποτελεί τη συνέχεια της πτερωτής και ουσιαστικά προέκταση της, στη περίπτωση μας επιλέχθηκε 21.05mm μήκος από την φτερωτή, δηλαδή διάμετρο 321mm, και πλάτος όσο το πλάτος της πτερωτής b_2 , δηλαδή 18mm.



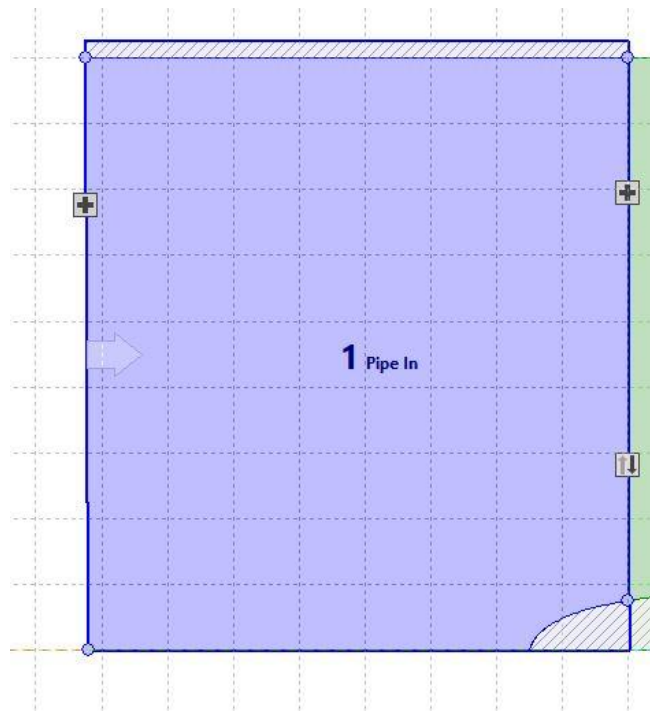
Εικόνα 3. 8 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του διαχύτη

Πίνακας 3. 4 Αναλυτικά στοιχεία για το πλάτος και τη διάμετρο του διαβήτη

Setup			
Consider upstream swirl			✓
Stator type			Radial diffuser
With blades			-
Inlet			
Diameter	d	[mm]	288
Width	b	[mm]	18
Outlet			
Diameter	d	[mm]	322.11
Width	b	[mm]	18

3.5 Σχεδίαση του Σωλήνα Εισόδου

Αυτός ποικίλει όσον αναφορά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ανάλογα την περίπτωση του ατμοποιητή όπου βρίσκεται πριν το συμπιεστή όπως και όταν τίθενται χωροταξικοί περιορισμοί όλου του συστήματος ψύξης. Στην περίπτωση μας πρόκειται για έναν ευθύγραμμο σωλήνα ο οποίος οδηγεί στην είσοδο της πτερωτής χωρίς οδηγία πτερύγια. Το μήκος του είναι τέτοιο ώστε χρησιμοποιηθεί και να δώσει τις πληροφορίες που χρειαζόμαστε κατά την εκτέλεση CFD σε επόμενο στάδιο. Έχει μήκος 82 mm και διάμετρο ίδια με αυτή της φτερωτής στην είσοδο, δηλαδή 180 mm.

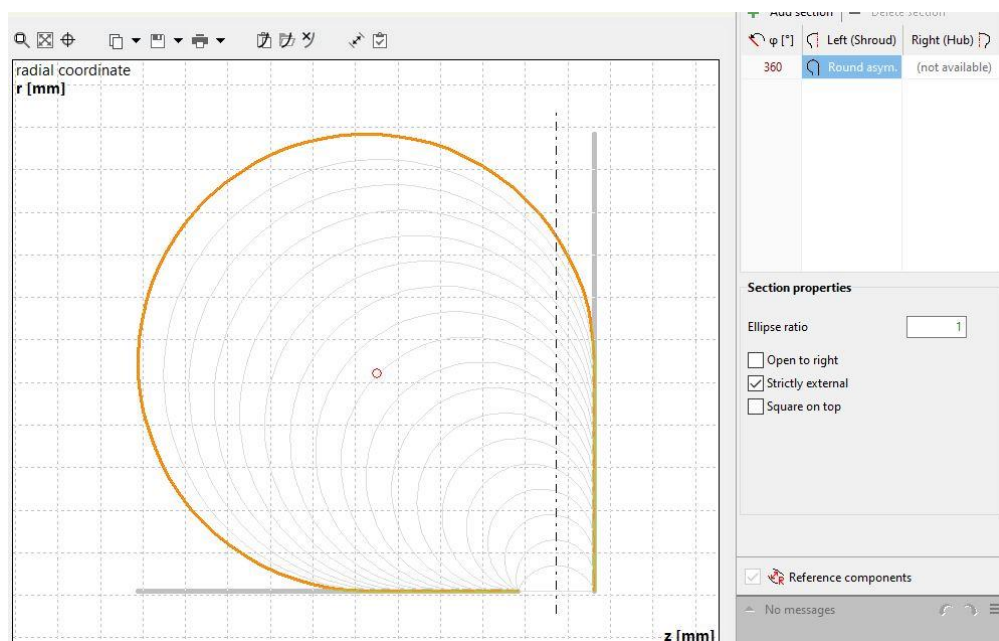


Εικόνα 3. 9 Όψη του σωλήνα εισόδου

3.6 Σχεδίαση του Κελύφους

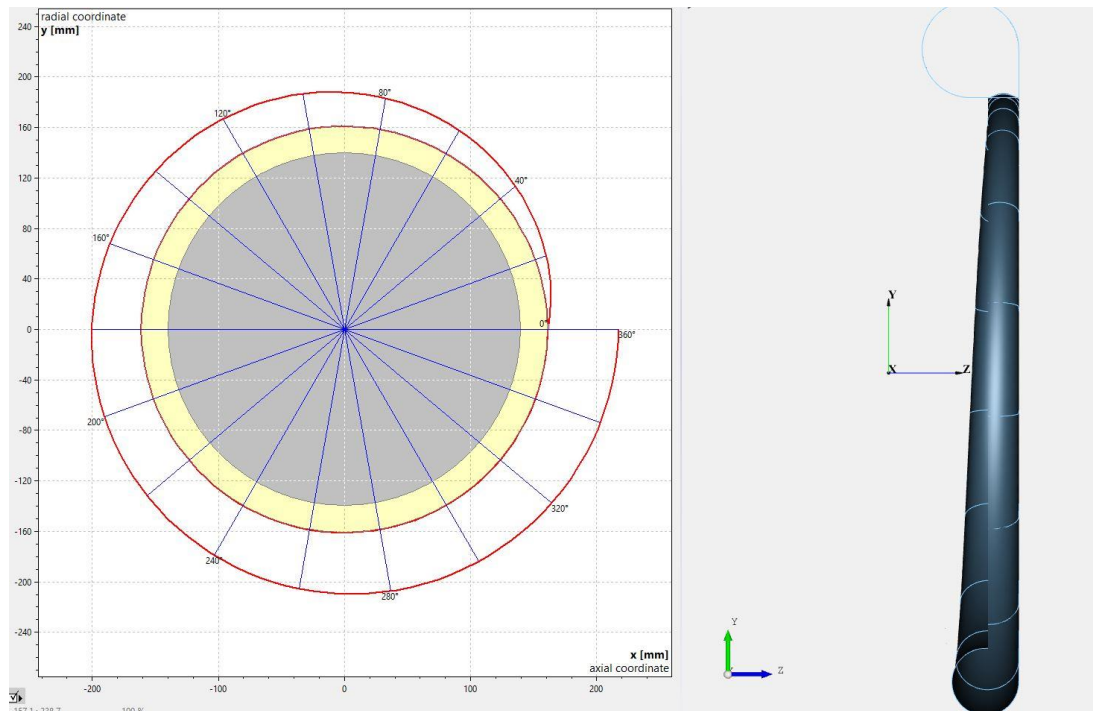
Γενικά όπως αναφέρθηκε και στην αρχή, ο στόχος του κελύφους είναι να συλλέγει τη ροή, να μειώνει την ταχύτητα ροής και να μετατρέπει την κινητική ενέργεια σε δυναμική ενέργεια/στατική πίεση. Η αύξηση της πίεσης στο κέλυφος είναι στις περισσότερες περιπτώσεις ίση με την αύξηση της πίεσης στην πτερωτή. Το ίδιο το κέλυφος δεν συμμετέχει στη διαδικασία μεταφοράς ενέργειας στο ρευστό. Ως εκ τούτου, όλες οι σχεδιαστικές εκτιμήσεις του κελύφους προσπαθούν να μειώσουν τις απώλειες. Αξίζει να σημειωθεί, από την βιβλιογραφία αναφέρεται ότι το κέλυφος καθορίζει το σημείο της καλύτερης απόδοσης των αντλιών και των συμπιεστών και όχι ο τροχός του συμπιεστή. Αυτό δείχνει τη σημασία του προσεκτικού σχεδιασμού αυτού του εξαρτήματος ενός στροβιλοκινητήρα και τις δυνατότητες βελτίωσης αυτού του τμήματος του συμπιεστή.

Μέσω του λογισμικού CFTurbo για τις αρχικές συνθήκες του μοντέλου αλλά και έπειτα από τον σχεδιασμό της πτερωτής και του διαχύτη, επιλέχτηκε για το κέλυφος διάμετρος η οποία αυξάνεται γραμμικά. Στις 0° έχει διάμετρο 322.05 mm και στις 360° 378.684 mm. Το πλάτος εισόδου είναι 18 mm όσο δηλαδή και το πλάτος του διαχύτη και η διάμετρος εξόδου 56.684 mm. Όσον αφορά τη γεωμετρία της σπειροειδούς διατομής επιλέχθηκε κυκλική ασύμμετρη. Ο κύριος λόγος της επιλογής αυτής, ήταν ότι η κίνηση της φτερωτής δίνεται από ηλεκτροκινητήρα ο οποίος τοποθετείται πίσω ακριβώς από αυτήν και η προέκταση του κελύφους και στις δύο μεριές ίσως να προκαλούσε χωροταξικά προβλήματα. Το συγκεκριμένο σχέδιο είναι επίσης ευνοϊκό για τη συγκεκριμένη περίπτωση αφού πρόκειται για συμπιεστή οποίος προορίζεται για ψύκτες μικρού μεγέθους οι οποίοι μπορεί να τοποθετηθούν άνετα σε εσωτερικούς χώρους μικρών διαστάσεων.



Εικόνα 3. 10 Γεωμετρία αγωγού του σπειροειδούς κελύφους

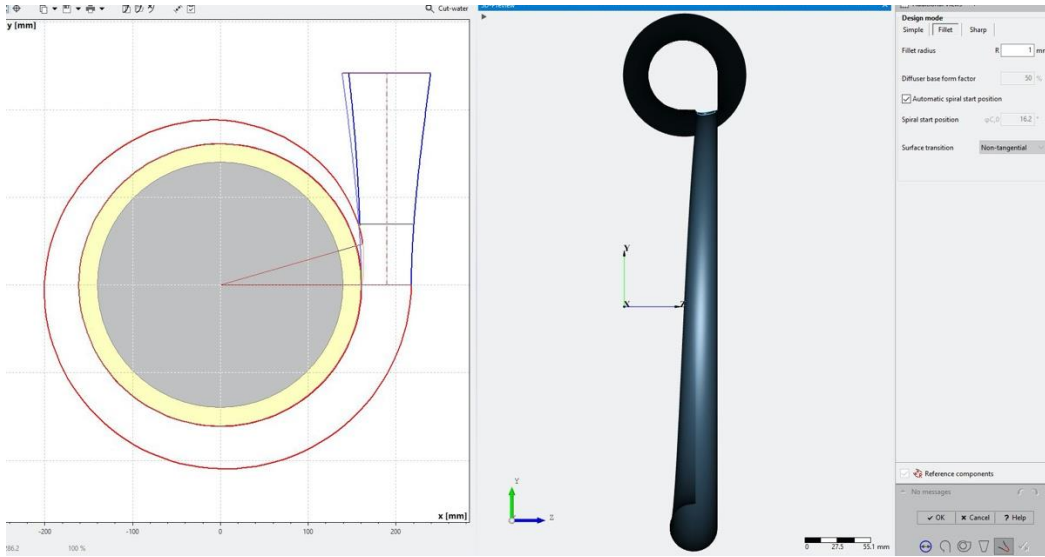
Η γωνία που δημιουργεί το κέλυφος πρόκειται για γωνία 360°



Εικόνα 3. 11 Άνω όψη του κελύφους όπου διακρίνεται η γωνία 360°

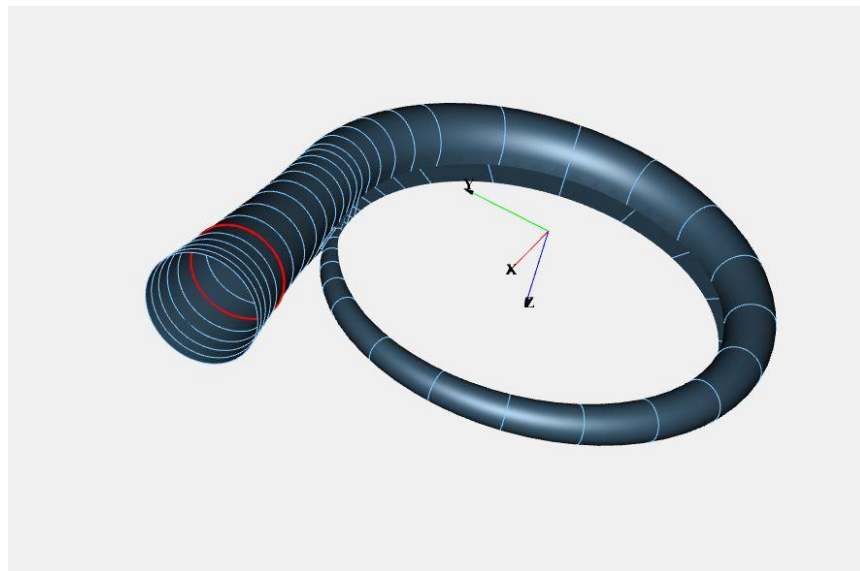
Ως προέκταση σπειροειδές μέρος του κελύφους επιλέχθηκε κυκλικός αγωγός μήκους 241.5 mm και τελικής διαμέτρου 103.14 mm.

Τελικό στάδιο για τη δημιουργία του κελύφους προκύπτει η ένωση μεταξύ του αγωγού προέκτασης και του σπειροειδούς μέρος του. Στη συγκεκριμένη περίπτωση έγινε με τον τρόπο fillet με ράδιο 1mm.



Εικόνα 3. 12 Όψη του σπειροειδές κελύφους μαζί με τον αγωγό προέκτασης

Το τελικό μοντέλο όσον αναφορά το σπειροειδές κελύφος προκύπτει ως εξής:



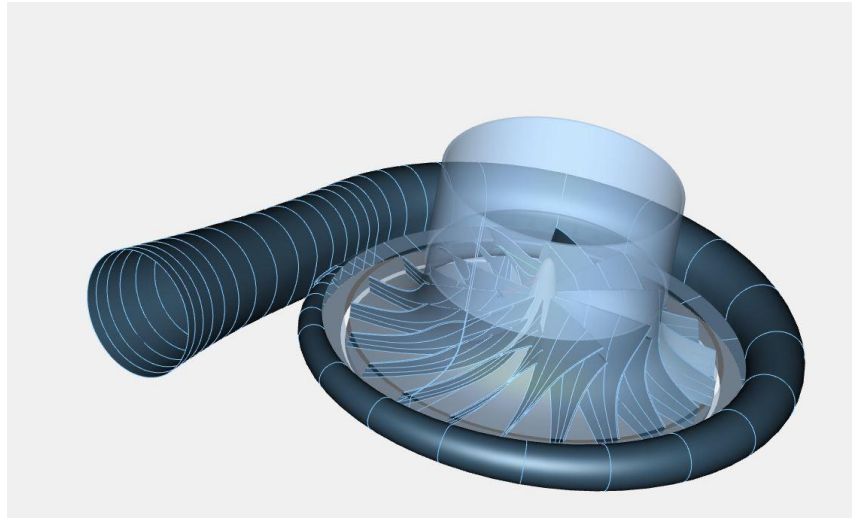
Εικόνα 3. 13 Τελικό σχέδιο του κελύφους

Αναλυτικά οι ιδιότητες του κελύφους

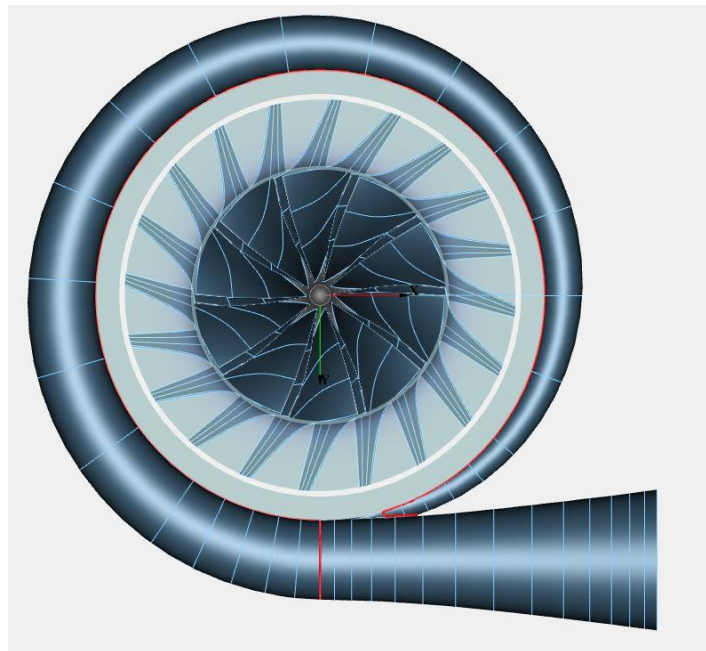
Πίνακας 3. 5 Αναλυτικά στοιχεία για τα μήκη του κελύφους

Inlet			
Diameter	d	[mm]	18
Width	b	[mm]	322.11
Spiral areas			
Inner radius	r'	[mm]	161.05
Last cross section			
Equivalent diameter	D	[mm]	58.453
Min. axial coordinate	z	[mm]	19.637
Height	H	[mm]	56.569
Width	B	[mm]	56.584
Discharge area	A	[mm ²]	2683.5
Diffuser			
Direction			Tangential
Eccentricity mode			Centric
Height	H	[mm]	241.5
Center distance	C	[mm]	189.34
Equiv. diameter	D6	[mm]	103.14
End cross section			
Type			Circle
Diameter	D	[mm]	103.14
Cutwater			
Mode			Fillet
Automatic spiral start position			✓
Equivalent diameter	D	[mm]	64.565
Throat area	A	[mm ²]	3274
Fillet radius	R	[mm]	1
Cutwater diameter			
Inner	dInn	[mm]	343.28
Outer	dOut	[mm]	347.12
Average	dAvg	[mm]	344.76
Minimal	dMin	[mm]	343.26

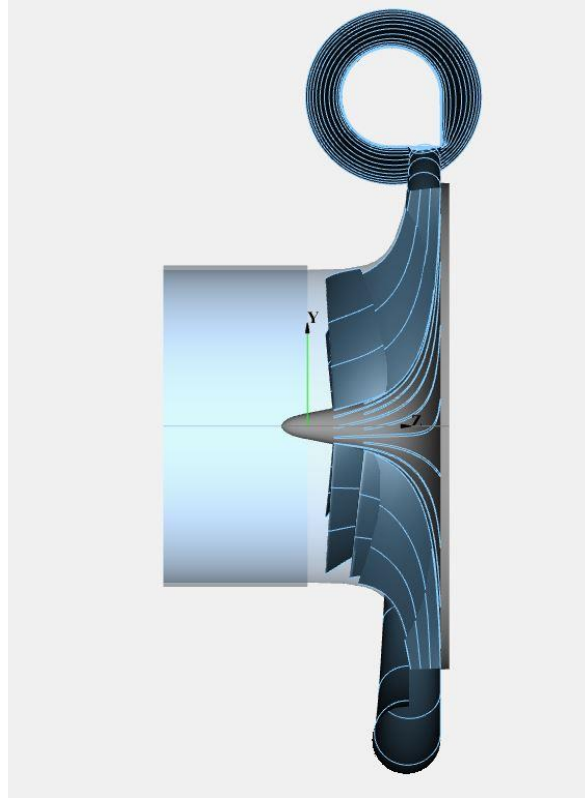
3.8 Τελικό μοντέλο του φυγοκεντρικού συμπιεστή



Εικόνα 3. 14 Τελικό σχέδιο του συμπιεστή όψη 1



Εικόνα 3. 15 Τελικό σχέδιο του συμπιεστή όψη 2



Εικόνα 3. 16 Τελικό σχέδιο του συμπιεστή όψη 3

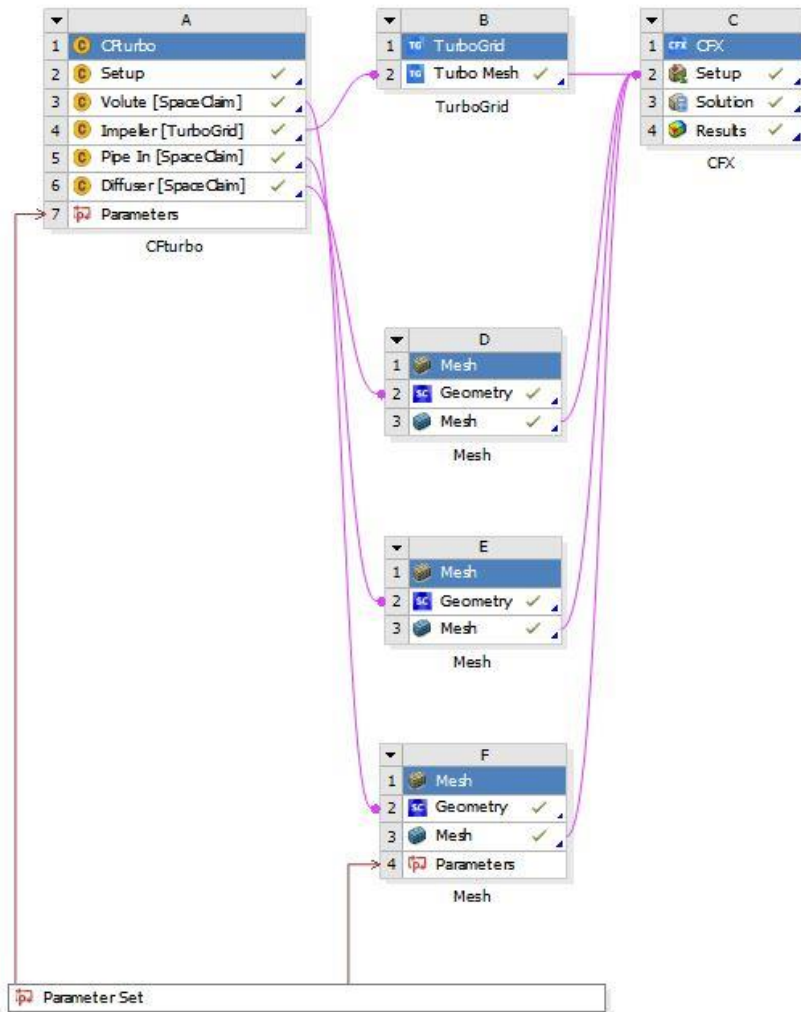
Έτσι ολοκληρώνεται ο πρωταρχικός σχεδιασμός του φυγοκεντρικού συμπιεστή R718 και προκύπτει το παρακάτω μοντέλο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΦΥΓΟΚΕΝΤΡΙΚΟΥ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ R718

4.1 Περιγραφή της διαδικασίας

Μετά την ολοκλήρωση του προκαταρκτικού σχεδιασμού μέσω του λογισμικού CFTurbo σειρά έχει η μελέτη των τρισδιάστατων ρευστοδυναμικών φαινομένων εσωτερικά του συμπιεστή. Η μελέτη αυτή πραγματοποιήθηκε μέσω του λογισμικού ANSYS. Ουσιαστικά το συγκεκριμένο λογισμικό παρέχει ένα περιβάλλον, το ANSYS Workbench, μέσα στα οποία τρέχουν άλλα υποπρογράμματα τα οποία θα χρησιμοποιήσουμε όπως το Mesh και το Turbogrid τα οποία θα εκτελεστούν για την πραγματοποίηση του πλέγματος για κάθε ένα από τα μέρη από τα οποία αποτελείται ο συμπιεστής. Έπειτα το CFX με το οποίο θα εκτελεστεί υπολογιστική Ρευστοδυναμική (CFD) μέσα στο συμπιεστή για τις αρχικές συνθήκες που έχουμε ορίσει στην προηγούμενη ενότητα. Αυτό κρίζεται αναγκαίο καθώς μας δίνει όλα τα θερμοδυναμικά δεδομένα που χρειαζόμαστε σε κάθε σημείο του συμπιεστή αλλά και ταυτόχρονα επαληθεύει αρχικές υποθέσεις που τέθηκαν στον αρχικό σχεδιασμό. Αξίζει να σημειωθεί ότι σημαντικό ρόλο έπαιξε το γεγονός ότι το ANSYS Workbench περιλαμβάνει ως υποπρόγραμμα το λογισμικό CFTurbo ώστε να εισαχθεί η γεωμετρία από όλα τα μέρη του συμπιεστή που υπολογίστηκαν με αυτό. Η απεικόνιση του εν λόγω περιβάλλοντος φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 4. 1 Μοντελοποίηση του συμπιεστή στο Ansys Workbench

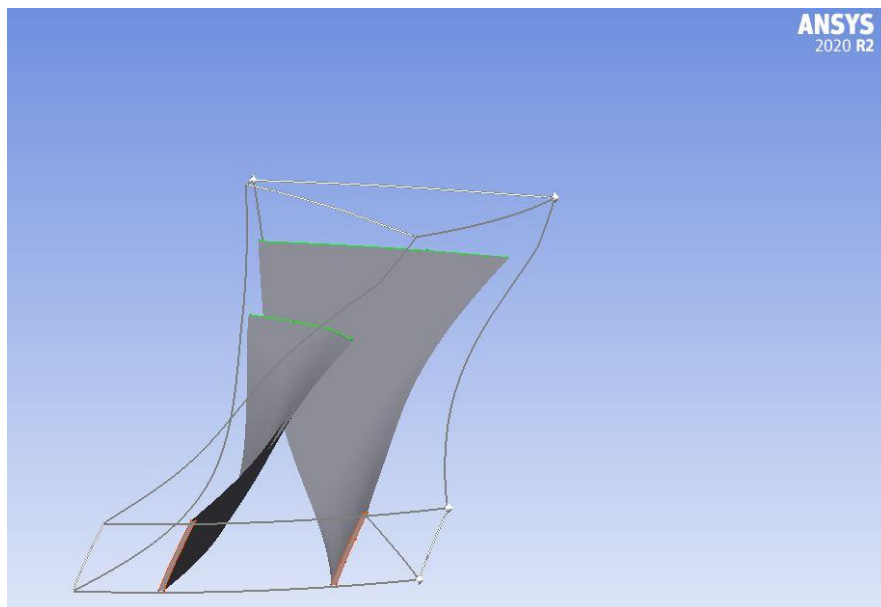
4.2 Ορισμός του πλέγματος

Το πλέγμα είναι η διαδικασία κατά την οποία ο συνεχής γεωμετρικός χώρος ενός αντικειμένου αναλύεται σε χιλιάδες ή περισσότερα σχήματα για να καθοριστεί σωστά το φυσικό σχήμα του αντικειμένου. Όσο πιο λεπτομερές είναι ένα πλέγμα, τόσο πιο ακριβές θα είναι το τρισδιάστατο μοντέλο CAD, επιτρέποντας προσομοιώσεις υψηλής πιστότητας. Η δημιουργία πλέγματος, είναι η διαδικασία δημιουργίας ενός δισδιάστατου και τρισδιάστατου πλέγματος. Πρόκειται για τη διαίρεση πολύπλοκων γεωμετριών σε στοιχεία που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διακριτοποίηση ενός τομέα. Δεδομένου ότι η δημιουργία πλέγματος καταναλώνει συνήθως σημαντικό μέρος του χρόνου για την απόκτηση αποτελεσμάτων προσομοίωσης, τα προηγμένα αυτοματοποιημένα εργαλεία δημιουργίας πλέγματος μπορούν να παρέχουν ταχύτερες και ακριβέστερες λύσεις.

4.3 Δημιουργία πλέγματος της Πτερωτής

Η πτερωτή αποτελεί το μέρος του συμπιεστή με την πολυπλοκότερη γεωμετρία. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο η δημιουργία πλέγματος αποτελεί μία δύσκολη διαδικασία συγκριτικά με άλλες πιο απλές γεωμετρίες. Ιδανική λύση σ' αυτό το πρόβλημα δίνει το πρόγραμμα TurboGrid.

Το TurboGrid παρέχει τη δυνατότητα δημιουργίας πλεγμάτων ειδικά προσαρμοσμένων στις ανάγκες των γεωμετριών των πτερυγίων. Δημιουργεί εξαεδρικά πλέγματα υψηλής ποιότητας που είναι προσαρμοσμένα στις απαιτήσεις της ανάλυσης ρευστοδυναμικής σε στροβιλομηχανές. Ταυτόχρονα συνεργάζεται με λογισμικό CFTurbo, δηλαδή η πτερωτή που σχεδιάστηκε προηγουμένως τοποθετείται απευθείας στο TurboGrid, για την δημιουργία του πλέγματος σε κάθε σημείο της αλλά και στο πεδίο ροής της. Αφού τα πτερύγια είναι ίδια μεταξύ τους (9 κυρία πτερύγια και 9 δευτερεύον) η δημιουργία του πλέγματος θα γίνει σε ένα μόνο πέρασμα (passage) της πτερωτής (1 κύριο και 1 δευτερεύον πτερύγιο).



Εικόνα 4. 2 Passage της πτερωτής

Όπως αναφέρθηκε λόγω των ιδιοτήτων του ρευστού αλλά και για τον λόγο ότι στο σύστημα του συμπιεστή εμφανίζονται οι ψηλές ταχύτητες, ψηλός αριθμός Mach και Reynolds κλπ. ιδιαίτερη έμφαση πρέπει να δοθεί στο οριακό στρώμα, δηλαδή σε όλη την επιφάνεια του πτερυγίου, στην ακμή προσβολής αλλά και στο πέρασ του πτερυγίου. Έτσι αναγκαίο κρίνεται η δημιουργία πυκνότερου πλέγματος στα σημεία αυτά.

Αρχικά το πρώτο βήμα για να ορίσουμε στο πλέγμα μας είναι η επιλογή του μεγέθους του. Αυτό γίνεται με την επιλογή τιμής στον Global Size Factor. Για να αυξήσουμε την ανάλυση του πλέγματος, αυξάνουμε τον παράγοντα μεγέθους χρησιμοποιώντας τη ρύθμιση Size Factor. Η μεταβολή του συνολικού μεγέθους του πλέγματος δεν είναι γραμμική. Σε αυτή τη λειτουργία, αν αλλάξουμε το μέγεθος του πλέγματος κατά μήκος της έκτασης του οριακού στρώματος ή αν κάνουμε οποιοσδήποτε τοπικές βελτιώσεις ακμών στο πλέγμα, ο Global Size Factor θα παραμείνει σταθερός και το συνολικό μέγεθος του πλέγματος μπορεί να αλλάξει. Ναι μεν όσο αυξάνουμε το μέγεθος του πλέγματος δημιουργούμε ένα αναλυτικότερο περιβάλλον μέσα στο οποίο θα τρέξει η ροή μας αλλά ταυτόχρονα δημιουργείται ένα πολύπλοκότερο σύστημα το οποίο θα καθυστερήσει την επίλυση του συστήματος με CFD. Επειδή πρόκειται για μοντέλο στροβιλομηχανών όπου επικρατεί πολύπλοκη γεωμετρία, και στην περίπτωση μας δε μας ενδιαφέρει μόνο το ένα πέρασμα στο συμπιεστή, δηλαδή το πεδίο ροής μεταξύ κύριου και δευτερεύων πτερυγίου αλλά ολόκληρου του συμπιεστή, η εκτέλεση του CFD είναι ήδη από την αρχή μια χρονοβόρα διαδικασία και η επιπλέον άσκοπη καθυστέρηση αποτελεί ένα από τα κριτήρια περιορισμού.

Για τον έλεγχο του οριακού στρώματος επιλέχθηκε η μέθοδος Proportional to Mesh Size. Αυτή η επιλογή ελέγχει τον αριθμό των στοιχείων σε όλη την περιοχή του οριακού στρώματος ανάλογα με τις τιμές που καθορίζονται για τις τιμές Factor Base και Factor Ratio. Αυτή η μέθοδος διατηρεί παρόμοια ποσοστά διαστολής όταν αλλάζει ο παράγοντας Global Size Factor. Εάν το πτερύγιο έχει αποκομμένη ακμή, η επιλογή Factor Ratio ελέγχει επίσης τον αριθμό των στοιχείων κατά μήκος της αποκομμένης ακμής.

Η αύξηση της τιμής του Factor Base ή του Factor Ratio αυξάνει τον αριθμό των στοιχείων σε όλο το οριακό στρώμα και κατά μήκος της ακμής αποκοπής (εάν ισχύει). Αντίθετα, η μείωση της τιμής του Factor Base ή του Factor Ratio μειώνει τον αριθμό των στοιχείων. Ο αριθμός των στοιχείων κατά μήκος του οριακού στρώματος υπολογίζεται ως εξής:

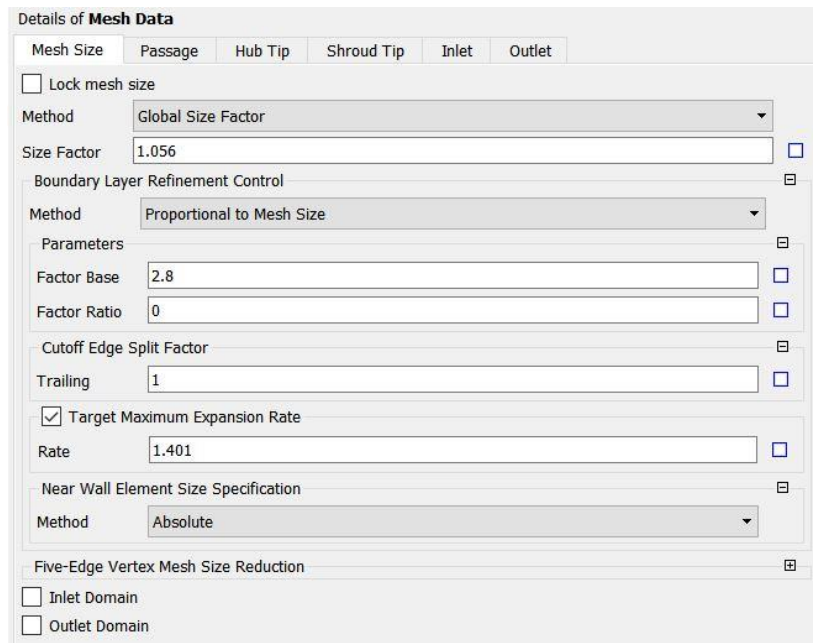
$$\text{Base Count} * \text{Global Size Factor} * (\text{Factor Base} + \text{Factor Ratio} * \text{Global Size Factor})$$

Έπειτα έγινε η επιλογή του Cutoff Edge Split Factor. Πρόκειται για έναν παράγοντα για κάθε κομμένο άκρο για να ελέγξουμε τον αριθμό των στοιχείων κατά μήκος αυτού.

Ακόμα μία παράμετρος που εισάγεται για τη δημιουργία πλέγματος είναι η Target Maximum Expansion Rate. Η επιλογή Target Maximum Expansion Rate (Μέγιστος ρυθμός επέκτασης) επιτρέπει τον προσδιορισμό ενός μέγιστου ρυθμού επέκτασης γύρω από το οριακό στρώμα.

Τέλος βρίσκεται η παράμετρος Near Wall Element Size Specification. Η ρύθμιση Near Wall Element Size Specification ελέγχει τη μέθοδο με την οποία καθορίζεται η απόσταση των κόμβων κοντινού τοιχώματος στις καρτέλες Passage και Hub/Shroud Tip. Η απόσταση των κόμβων κοντά στο τοίχωμα είναι η απόσταση μεταξύ ενός και του πρώτου στρώματος κόμβων από το τοίχωμα. Στην περίπτωση μας επιλέχθηκε η μέθοδος Absolute όπου επιτρέπει να ορίσουμε απευθείας την απόσταση μεταξύ των κοντινών τοίχων.

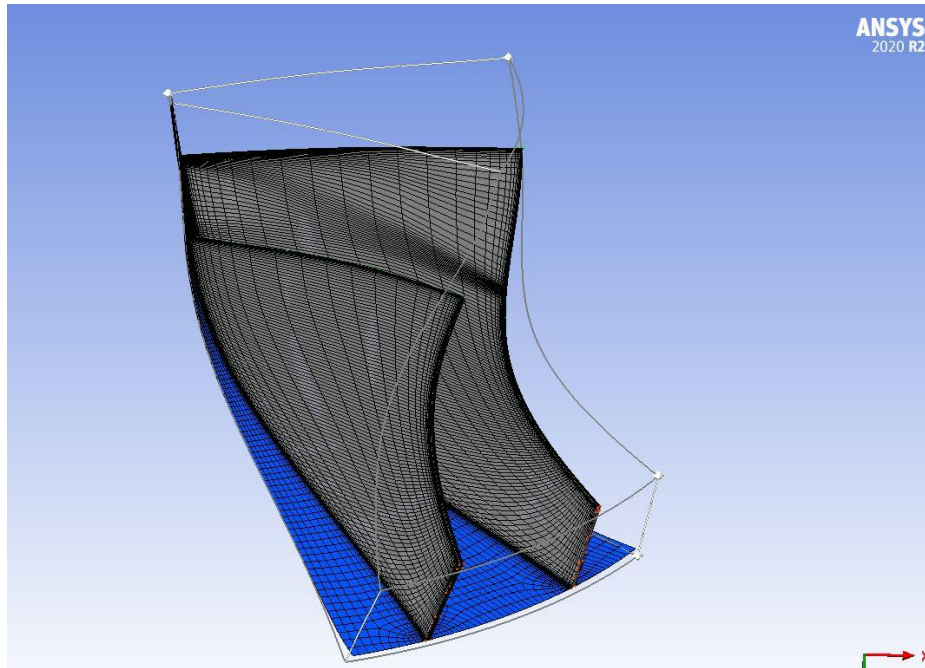
Όλες οι παραπάνω παράμετροι οποία αναφέρθηκαν οι αντίστοιχες τιμές τους φαίνονται παρακάτω.



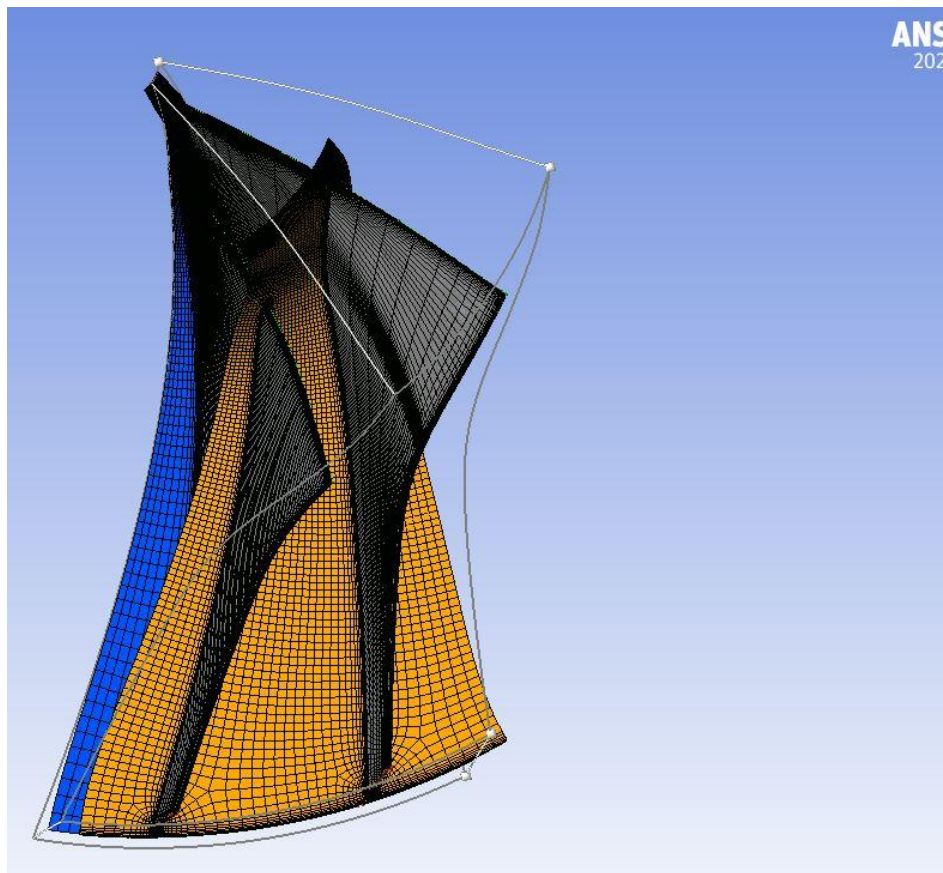
Εικόνα 4. 3 Αναλυτικά δεδομένα ίδια το Mesh

Γενικά για όλο τον προσδιορισμό του πλέγματος λήφθηκαν υπόψη κι άλλες παράμετροι. Στην παρούσα διπλωματική δε χρειάζεται να εμβαθύνουμε κι άλλο στο κομμάτι αυτό αφού δεν είναι το θέμα στο οποίο επικεντρώνεται.

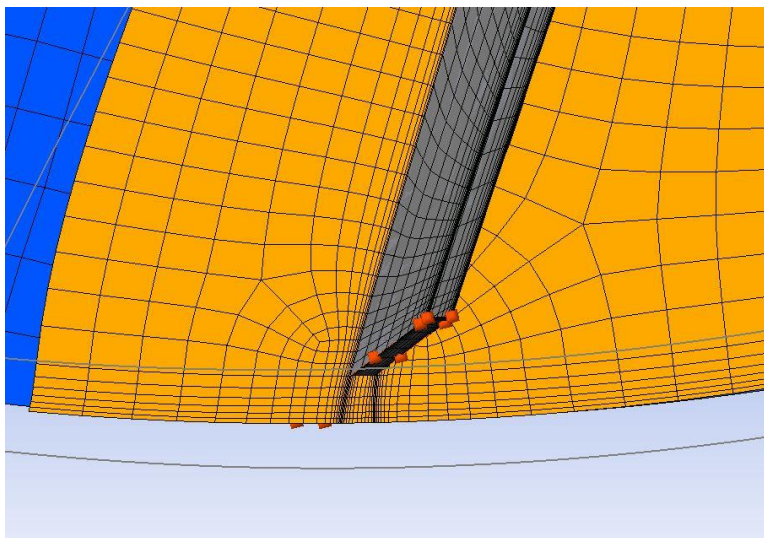
Έτσι προκύπτει το τελικό πλέγμα για το πέρασμα της φτερωτής (passage).



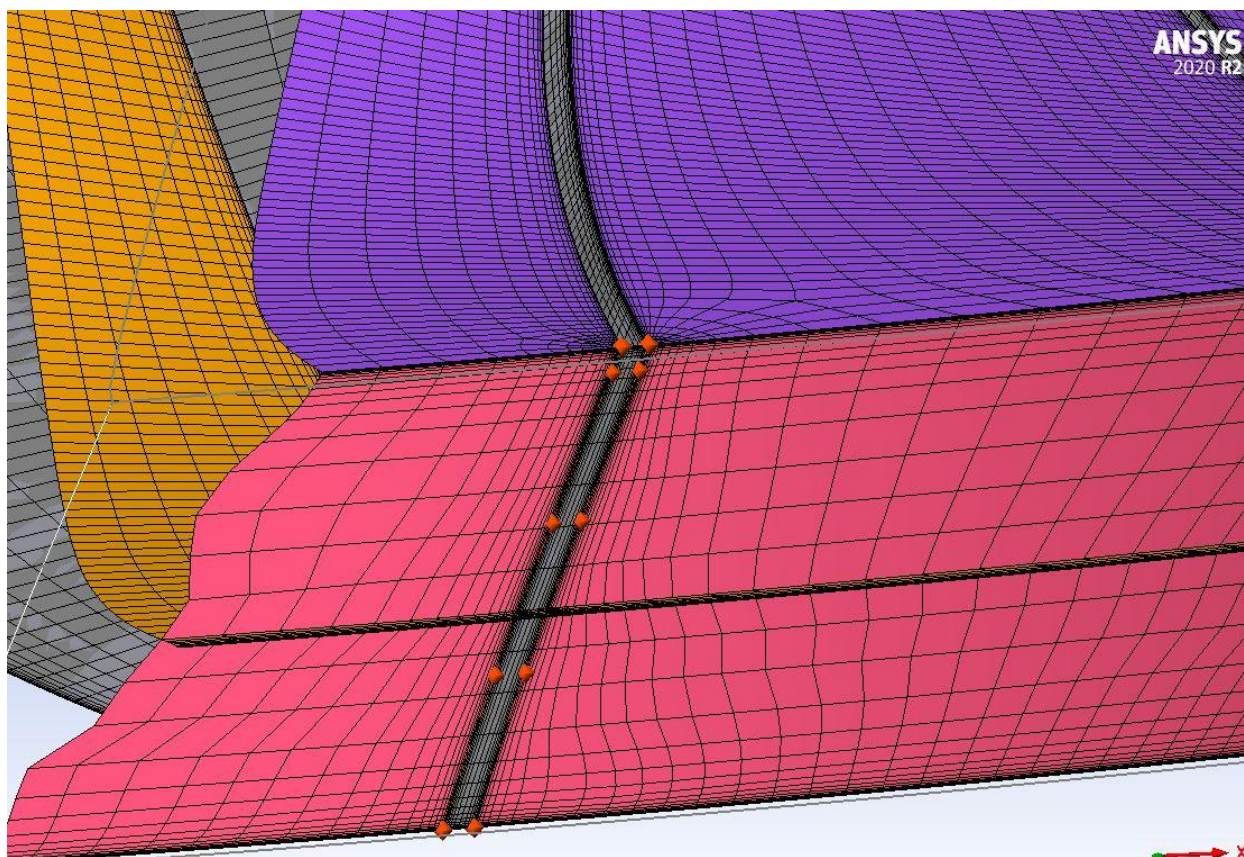
Εικόνα 4. 4 Τελικό πλέγμα για την φτερωτή όψη 1



Εικόνα 4. 5 Τελικό πλέγμα για την φτερωτή όψη 2



Εικόνα 4. 6 Τελικό πλέγμα για την φτερωτή όψη 3



Εικόνα 4. 7 Τελικό πλέγμα για την φτερωτή όψη στην έξοδο

4.4 Δημιουργία πλέγματος του διαχύτη

Για την δημιουργία του πλέγματος του διάχυτη επιλέχθηκε το υποπρόγραμμα Mesh. Ο λόγος για την επιλογή του συγκεκριμένου υποπρογράμματος έγινε για το γεγονός ότι σε αντίθεση με τη φτερωτή ο διάχυτης έχει πολύ πιο απλή γεωμετρία. Μπορεί αυτό να φαίνεται ιδανικό αλλά ο διάχυτης απαιτεί σημαντική προσοχή καθώς αποτελεί την έξοδο από την φτερωτή όπου εξακολουθούμε να έχουμε πολύ υψηλές τιμές όσον αφορά την ταχύτητα, την πίεση κλπ. Η κυρία προσοχή που δίνεται εδώ πέρα, όπως σε κάθε μοντέλο CFD, αφορά το οριακό στρώμα.

Για να ορίσουμε το πλέγμα του διάχυτη, επιλέχθηκε αρχικά η μέθοδος Patch Performing και συγκεκριμένα η μέθοδος Tetrahedrons. Πρόκειται δηλαδή για μία μέθοδο που δημιουργεί ένα τετραεδρικό πλέγμα το μέγεθος το οποίο ορίζεται με βάση το μέγεθος του κάθε στοιχείου που έχουμε ορίσει αρχικά στο Mesh. Στην περίπτωση μας έχουμε επιλέξει μέγεθος στοιχείο 1.5 mm. Η δημιουργία του απαιτεί επίσης την τοποθέτηση διαφόρων τιμών σε διάφορες παραμέτρους, πράγμα το οποίο δεν θα αναφερθεί στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Όπως είδαμε και παραπάνω το πιο σημαντικό κομμάτι είναι το οριακό στρώμα, και η πύκνωση του πλέγματος στα σημεία αυτά έγινε με τη χρήση του Inflation. Το πόσο πυκνό θέλουμε να είναι ορίζεται από τις παρακάτω παραμέτρους οι τιμές των οποίων φαίνεται στον πίνακα.

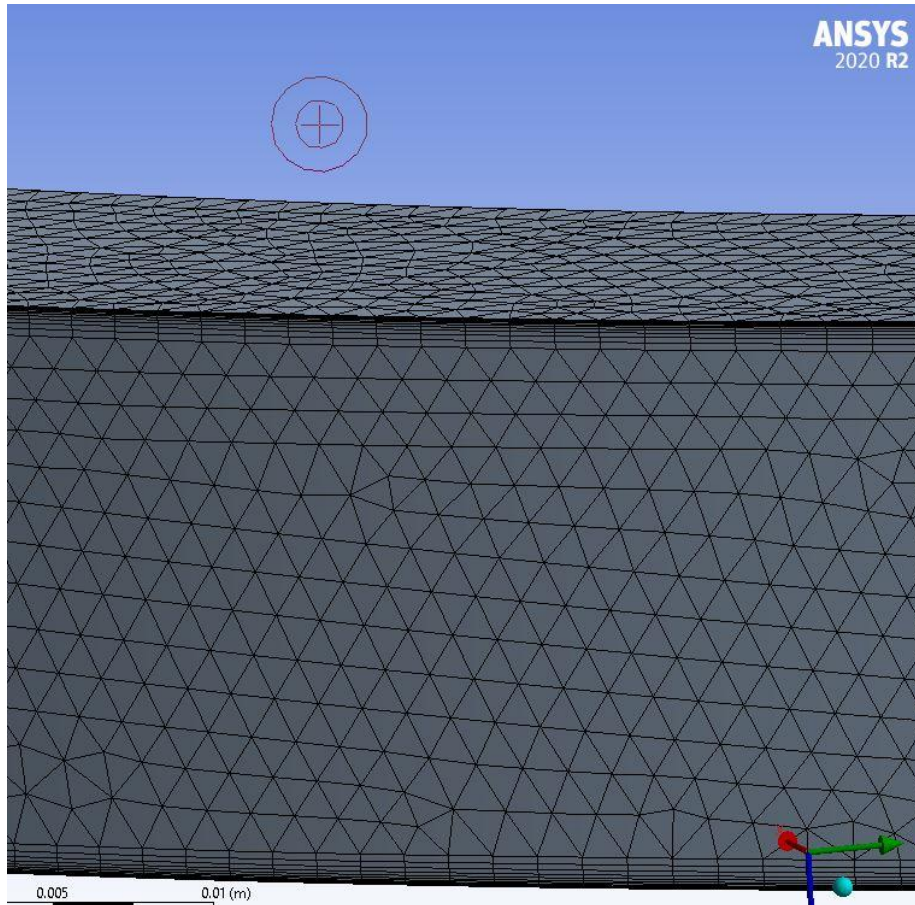
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
Definition	
Suppressed	No
Boundary Scoping Method	Geometry Selection
Boundary	5 Faces
Inflation Option	Smooth Transition
<input type="checkbox"/> Transition Ratio	0.15
<input type="checkbox"/> Maximum Layers	11
<input type="checkbox"/> Growth Rate	1.3
Inflation Algorithm	Pre

Εικόνα 4. 8 Αναλυτικές τιμές για το πλέγμα του διαχύτη

Έτσι προκύπτει το παρακάτω πλέγμα.



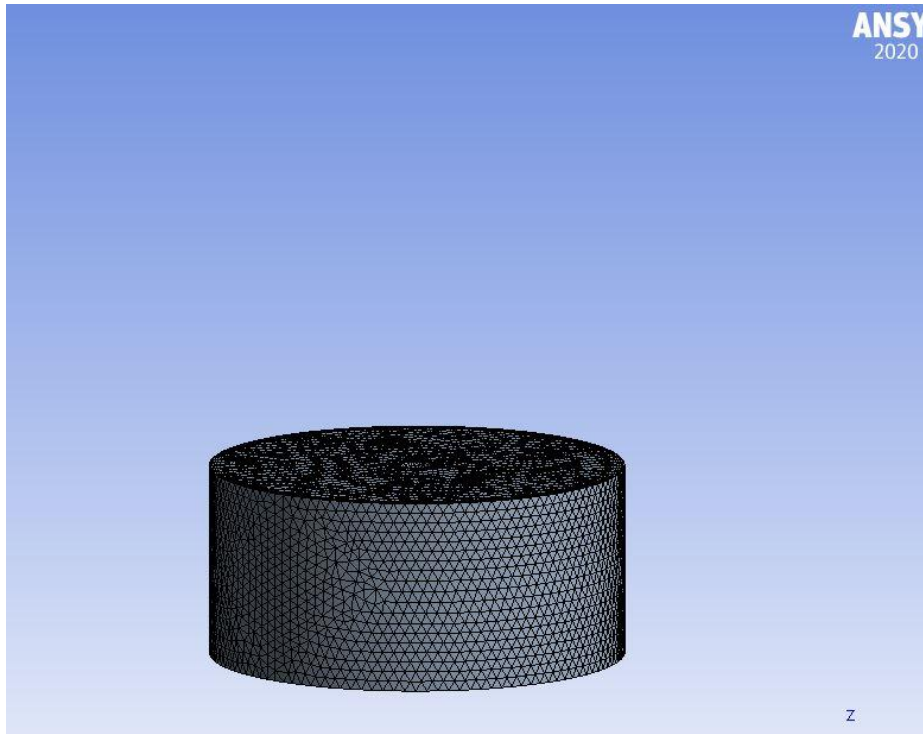
Εικόνα 4. 9 Τελικό πλέγμα του διάχυτη



Εικόνα 4. 10 Κοντινότερη όψη του πλέγματος του διάχυτη

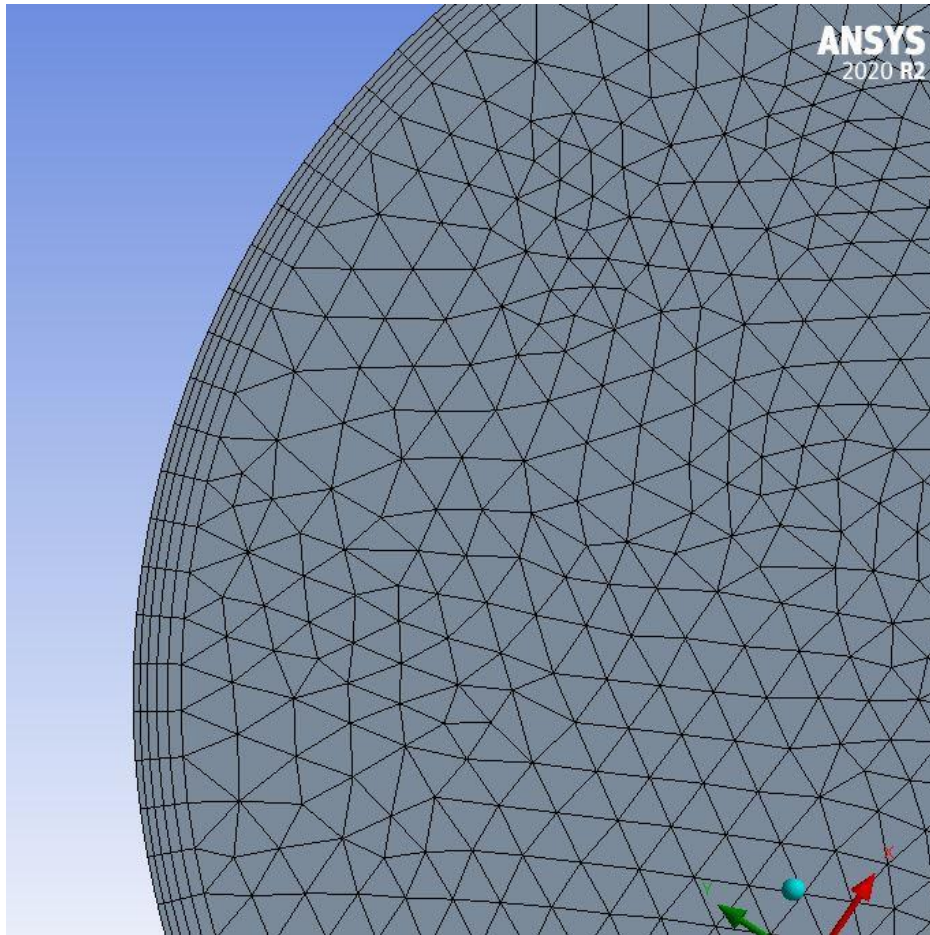
4.5 Δημιουργία πλέγματος του σωλήνα εισόδου

Όπως και στο διάχυτη έτσι και στη σωλήνα εισόδου της φτερωτής το πλέγμα θα δημιουργηθεί με το υποπρόγραμμα το πλέγμα θα δημιουργηθεί με το υποπρόγραμμα Mesh. Η διαφορά που προκύπτει με την δημιουργία πλέγματος του διαχύτη είναι ότι αντί για τη μέθοδο Patch Performing επιλεγεί η μέθοδος Body Sizing. Ουσιαστικά πρόκειται για μία παρόμοια δημιουργία πλέγματος στην οποία επιλέγετε το μέγεθος του στοιχείου. Στη συγκεκριμένη περίπτωση επιλέχθηκε 4.8 mm. Αντίστοιχα για τη δημιουργία του χρειάζονται καλές παράμετροι οι οποίες δεν θα αναφερθούν.



Εικόνα 4. 11 Τελικό πλέγμα του σωλήνα εισόδου

Αντίστοιχα για τον ίδιο λόγο που χρησιμοποιήσαμε την μέθοδο Inflation στον διαχύτη, θα χρησιμοποιήσουμε και στο σωλήνα εισόδου. Το αποτέλεσμα φαίνεται παρακάτω.

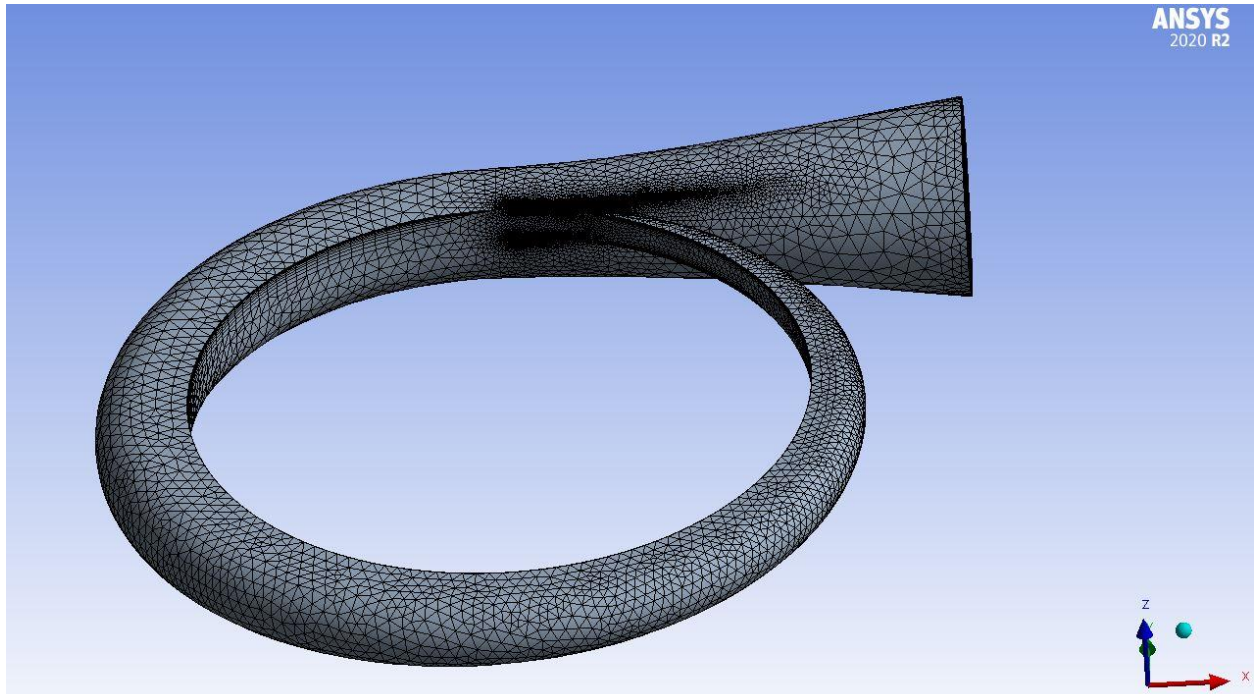


Εικόνα 4. 12 Κοντινότερη όψη του πλέγματος του σωλήνα εισόδου

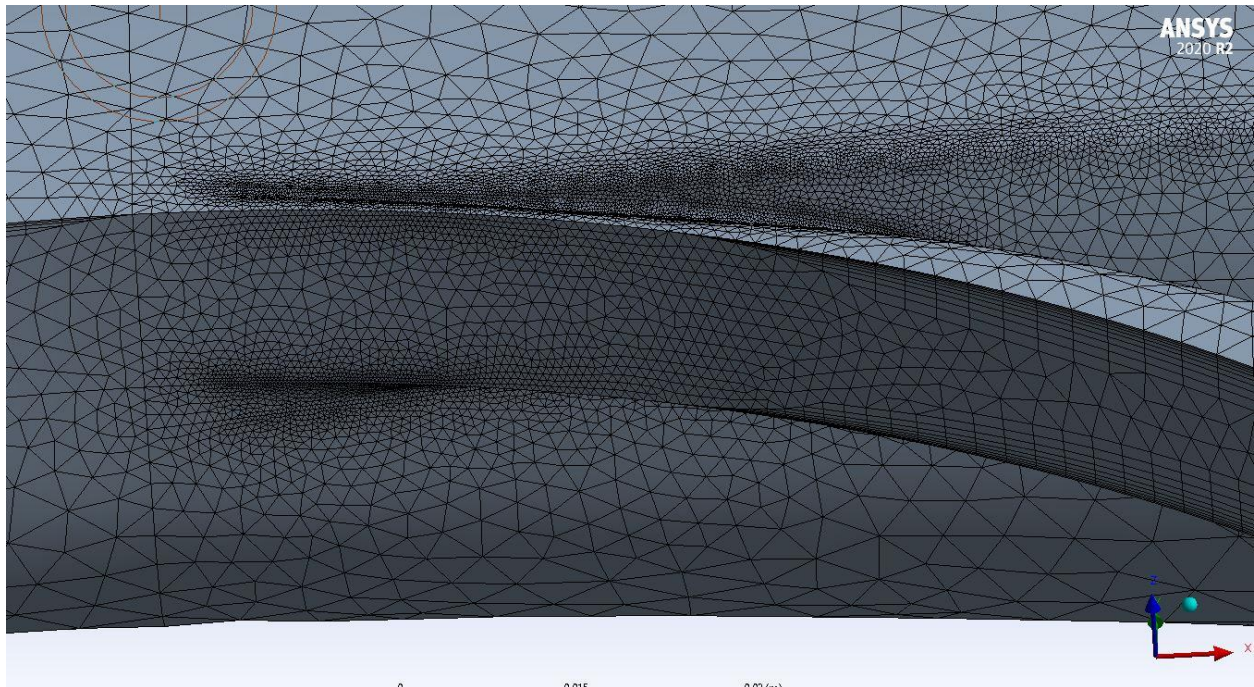
4.6 Δημιουργία πλέγματος του κελύφους

Αν και το κέλυφος έχει πιο περίπλοκη γεωμετρία συγκριτικά με τον διαχύτη, και τον σωλήνα εισόδου, εξακολουθεί να έχει μία πιο απλή από την γεωμετρία της περωτής. Για το λόγο αυτό θα χρησιμοποιήσουμε ξανά το υποπρόγραμμα Mesh.

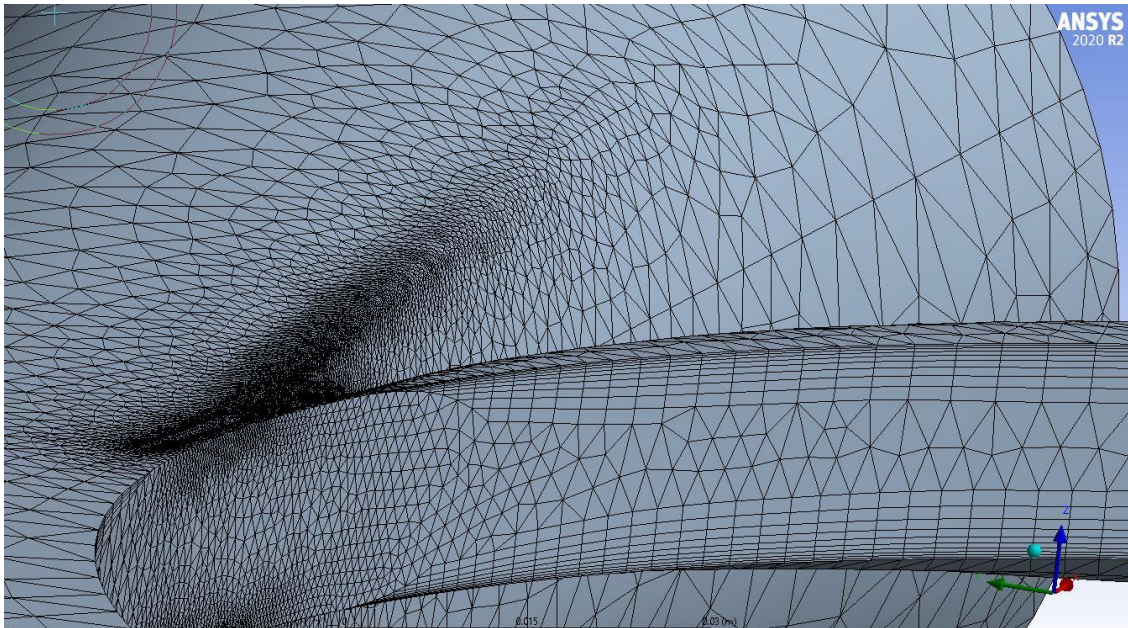
Η διαδικασία που θα ακολουθήσουμε είναι ανάλογη των προηγούμενων μερών του συμπεστή. Θα χρησιμοποιήσουμε ξανά τη μέθοδο Patch Performing και συγκεκριμένα τη μέθοδο Tetrahedrons όπως επίσης και την μέθοδο Inflation. Ένα ακόμα θα προσθέσουμε στο συγκεκριμένο κομμάτι του συμπεστή είναι να αυξήσουμε την πυκνότητα του πλέγματος στην έξοδο του συμπεστή με τη μέθοδο Face Sizing. Γενικά τα κριτήρια για την πύκνωση του πλέγματος εξακολουθούν να είναι τα ίδια που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Έτσι προκύπτει το παρακάτω πλέγμα.



Εικόνα 4. 13 Τελικό πλέγμα του κελύφους



Εικόνα 4. 14 Κοντινότερη όψη του πλέγματος του κελύφους (α)



Εικόνα 4. 15 Κοντινότερη όψη του πλέγματος του κελύφους (β)

4.7.1 Εισαγωγικά για ρευστοδυναμική ανάλυση (CFD) του φυγοκεντρικού συμπιεστή R718

Μετά την προκαταρκτική σχεδίαση του φυγοκεντρικού συμπιεστή R718 αναγκαία κρίνεται η εκτέλεση ρευστοδυναμικών προσομοιώσεων με πεπερασμένα στοιχεία (CFD) για εξακρίβωση όλων των τιμών των παραμέτρων του συμπιεστή που υπολογίστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, αλλά και για τον υπολογισμό άλλων θερμοδυναμικών παραμέτρων που μπορούν να φανούν χρήσιμα σε διάφορους τομείς είτε πρόκειται για την βελτιστοποίηση του συμπιεστή ή ακόμα και για την ασφάλεια όλου του συστήματος ψύξης.

4.7.2 Γενικά στοιχεία του προγράμματος CFX

Για την κάλυψη των αναγκών της εν λόγω διπλωματικής εργασίας, το πρόγραμμα που επιλέχθηκε, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, είναι το CFX. Οι εξισώσεις που επιλύονται από το Ansys CFX είναι οι Reynolds Averaged Navier-Stokes equations (RANS). Για το λόγο αυτό αξίζει να αναφερθούν οι εξισώσεις συνέχειας, ορμής, ενέργειας όπως και οι καταστατικές εξισώσεις, οι οποίες χρησιμοποιούνται και την επίλυση και του συγκεκριμένου μοντέλου.

- Εξίσωση συνέχειας:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0 \quad (4.1)$$

- Εξίσωση ορμής:

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \times \mathbf{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \mathbf{S}_M \quad (4.2)$$

$$\boldsymbol{\tau} = \mu \left(\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T - \frac{2}{3} \delta \nabla \cdot \mathbf{U} \right) \quad (4.3)$$

Όπου (τ) ο τανυστής τάσης

- Εξίσωση ενέργειας:

$$\frac{\partial(\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} h_{tot}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (\mathbf{U} \cdot \boldsymbol{\tau}) + \mathbf{U} \cdot \mathbf{S}_M + \mathbf{S}_E \quad (4.4)$$

$$h_{tot} = h + \frac{1}{2} \mathbf{U}^2 \quad (4.5)$$

Ο όρος $\nabla \cdot (\mathbf{U} \cdot \boldsymbol{\tau})$ παριστάνει το έργο λόγω των ιξωδών τάσεων (viscous stresses) και αποκαλείται όρος ιξώδους έργου (viscous work term). Αυτός περιγράφει την παραγωγή θερμότητας στο ρευστό λόγω των ιξωδών δυνάμεων και στις περισσότερες περιπτώσεις είναι αμελητέος. Ο όρος $\mathbf{U} \cdot \mathbf{S}_M$ παριστάνει το έργο λόγω ορμής εξωτερικών παραγόντων.

- Καταστατικές εξισώσεις

$$\rho = \rho(p, T) \quad (4.6)$$

$$dh = \left. \frac{\partial h}{\partial T} \right|_p dT + \left. \frac{\partial h}{\partial p} \right|_T dp = c_p dT + \left. \frac{\partial h}{\partial p} \right|_T dp \quad (4.7)$$

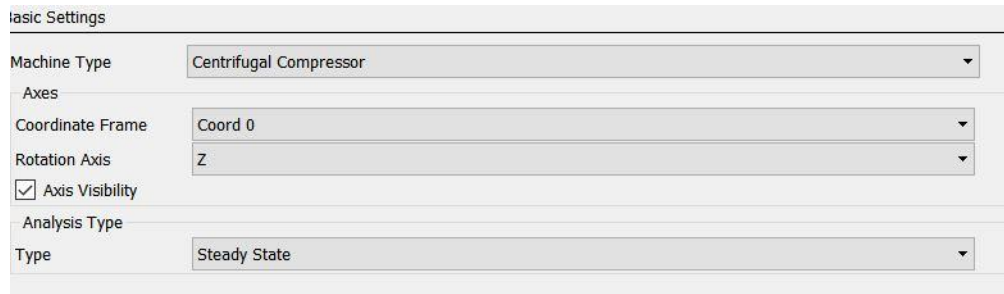
$$c_p = c_p(p, T) \quad (4.8)$$

4.8 Μοντελοποίηση του προβλήματος

Ένας λόγος που το CFX αποτελεί ιδανική επιλογή για την επίλυση προβλημάτων στροβιλομηχανών είναι ότι περιέχει το Turbo Mode. Πρόκειται για ένα εργαλείο το οποίο βήμα βήμα καταλήγει στη δημιουργία του επιθυμητού μοντέλου, ξεκινώντας από το είδος της

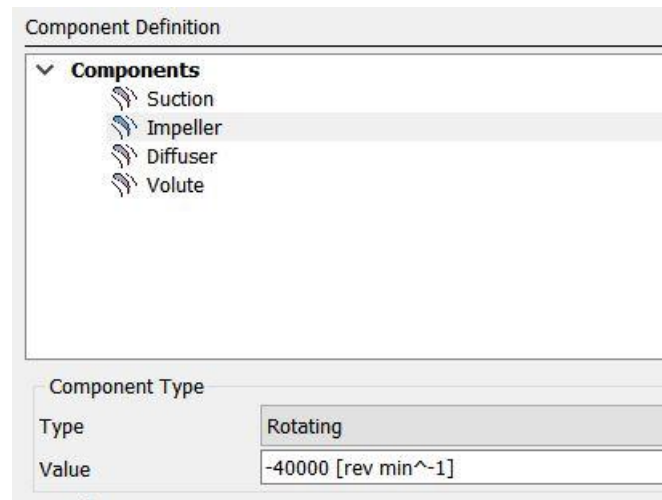
στροβιλομηχανής, στα μέρη από τα οποία αποτελείται, στις οριακές συνθήκες του κάθε μέρους ξεχωριστά και στις σχέσεις μεταξύ τους.

Η διαδικασία ξεκινάει με τη χρήση του CFX – Pre το οποίο περιέχει το εργαλείο Turbo Mode. Όπως αναφέρθηκε αρχικά εισάγουμε τον τύπο της στροβιλομηχανής.



Εικόνα 4. 16 Αρχικές βασικές ρυθμίσεις στο Turbo Mode

Έπειτα εισάγονται τα μέρη από τα οποία αποτελείται ο συμπιεστής. Για κάθε ένα επιλέγεται και το είδος της κατάστασης στην οποία θα βρίσκεται, δηλαδή αν είναι ακίνητο ή περιστρεφόμενο. Όλα εκτός, της περωτής η οποία περιστρέφεται με 40.000 RPM, είναι ακίνητα.



Εικόνα 4. 17 Ορισμός κάθε μεγέθους του συμπιεστή στο Turbo Mode

Επόμενο βήμα αποτελεί εισαγωγή συνθηκών λειτουργίας, τις ίδιες που τοποθετήσαμε και στο λογισμικό CFTurbo. Για το μοντέλο τύρβης επιλέχθηκε η μέθοδος SST(Shear Stress Transport). Το μοντέλο SST, βασισμένο στη νοοτροπία του μοντέλου k- ω , λαμβάνει υπόψη του τη μεταφορά των διατμητικών τάσεων της τύρβης και δίνει εξαιρετικά ακριβή αποτελέσματα γύρω από την αποκόλληση της ροής κάτω από δυσμενείς κλίσεις πίεσης. Γενικά, το μοντέλο SST,

εκμεταλλεύεται τα θετικά στοιχεία των δύο προηγούμενων μοντέλων (k-ε, k-ω), ελέγχοντας πάντα την απόσταση από το τοίχωμα (k-ω: κοντά στο τοίχωμα, k-ε: μακριά από το τοίχωμα). Επίσης το μοντέλο SST αποτρέπει την υπερεκτίμηση του ιξώδους των δινών. Για τους δύο παραπάνω λόγους επιλέγεται το συγκεκριμένο μοντέλο τύρβης ως το κατάλληλο για την παρούσα ρευστομηχανική ανάλυση.

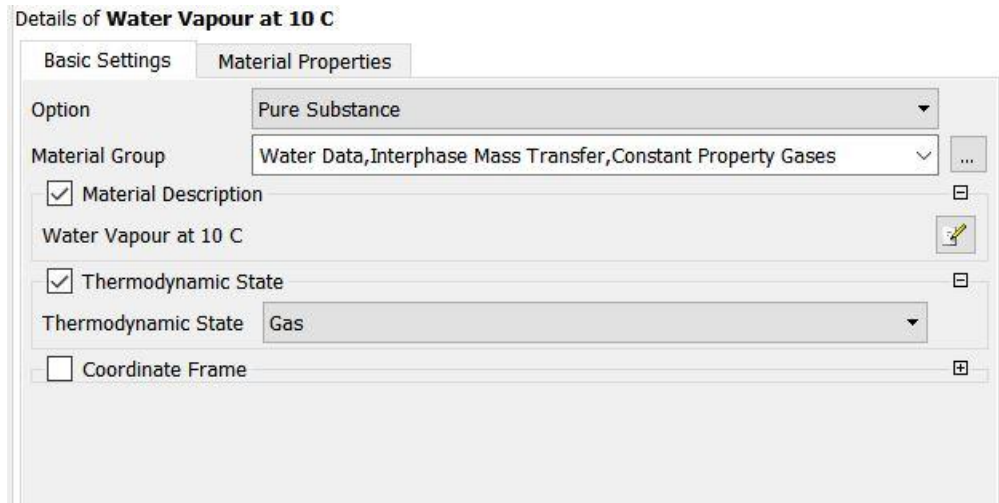
Για την περιστρεφόμενη ανάλυση του συμπιεστή επιλέχθηκε η μέθοδος Frozen Rotor. Σε αντίθεση με μια παραδοσιακή περιστρεφόμενη ανάλυση, η περιστρεφόμενη περιοχή δεν περιστρέφεται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Ωστόσο, η περιστροφή και οι σχετικοί όροι ορμής μεταδίδονται στη ροή. Η μέθοδος Frozen Rotor είναι χρήσιμη για τη γρήγορη προσομοίωση περιστρεφόμενων στοιχείων χωρίς την πολυπλοκότητα της αριθμητικής περιστροφής του φυσικού ρότορα.

The image shows a 'Physics Definition' dialog box with the following settings:

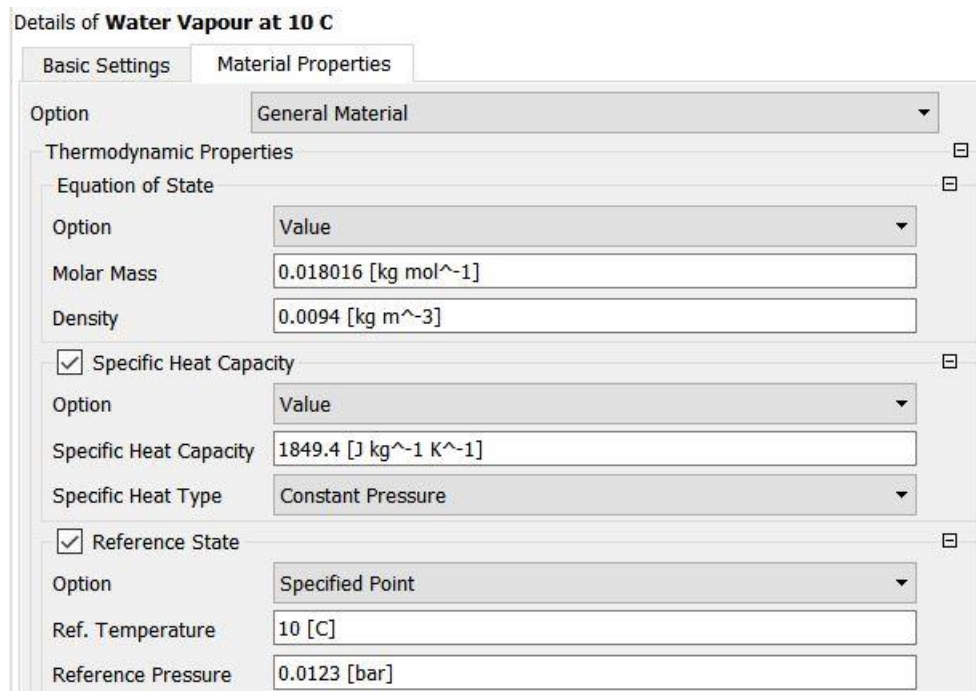
- Fluid:** Water Vapour at 10 C
- Model Data:**
 - Reference Pressure: 0 [atm]
 - Heat Transfer: Total Energy
 - Turbulence: Shear Stress Transport
- Inflow/Outflow Boundary Templates:**
 - None
 - P-Total Inlet P-Static Outlet
 - P-Total Inlet Mass Flow Outlet
 - Mass Flow Inlet P-Static Outlet
- Inflow:**
 - P-Total: 0.0123 [bar]
 - T-Total: 10 [C]
 - Flow Direction: Normal to Boundary
- Outflow:**
 - Mass Flow: Per Component
 - Mass Flow Rate: 0.02 [kg s⁻¹]
- Interface:**
 - Default Type: Frozen Rotor
- Solver Parameters

Εικόνα 4. 18 Εισαγωγή των αρχικών συνθηκών στο Turbo Mode

Όπως φαίνεται παραπάνω έγινε εισαγωγή όλο των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων του ρευστού, δηλαδή τον αριθμό νερό στους 10°C



Εικόνα 4. 19 Εισαγωγή των δεδομένων του ρευστού (α)



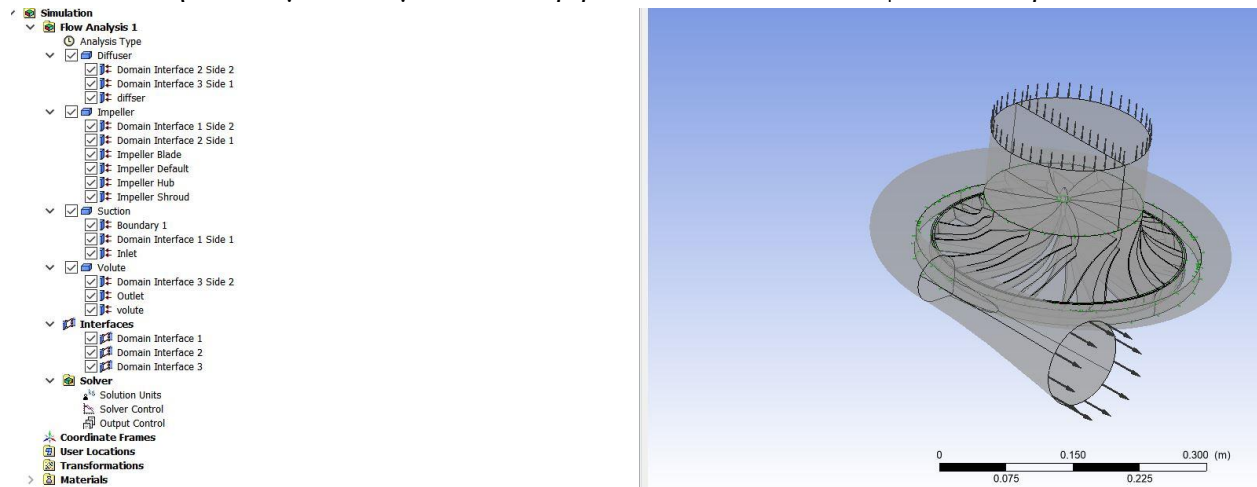
Εικόνα 4. 20 Εισαγωγή των δεδομένων του ρευστού (β)

Στη συνέχεια ορίστηκαν οι συνοριακές συνθήκες. Εκτός του μέρος της φτερωτής όλα τα υπόλοιπα είναι ακίνητα και έτσι δηλώθηκαν ως τοιχώματα και ισχύει η συνθήκη μη ολίσθησης. Η φτερωτή αν και έχει περιστρεφόμενα μέρη, ο στάτορας (hub) και το shroud είναι ακίνητα. Έτσι ορίστηκαν στο πρόγραμμα ως Counter Rotating Wall. Υπόλοιπες συνοριακές συνθήκες είναι η είσοδος, (αρχή του σωλήνα εισόδου) στην οποία επικρατεί ολική πίεση 0.0123 bar και η έξοδος (έξοδος από το κέλυφος) όπου έχουμε παροχή 0.02 kg/s.

Τελικό κομμάτι αποτελεί η σύνδεση μεταξύ των μερών από τα οποία αποτελείται ο συμπιεστής. Αυτά τα τρία είναι:

1. Η σύνδεση του σωλήνα εισόδου με την φτερωτή
2. Η σύνδεση της φτερωτής με τον διάχυτη
3. Η σύνδεση του διάχυτη με το σπειροειδές κέλυφος

Η απεικόνιση όλο το μοντέλο μέσα στο περιβάλλον του CFX – Pre φαίνεται παρακάτω



Εικόνα 4. 21 Περιβάλλον CFX

4.9 Αποτελέσματα από την εκτέλεση CFD του φυγοκεντρικού συμπιεστή R718

Το πιο σημαντικό που αξίζει να αναφερθεί από τα αποτελέσματα είναι ότι ο λόγος ολικής πίεσης επαληθεύτηκε και μάλιστα με πολύ μικρή απόκλιση. Ο υπολογισμός της ολικής πίεσης στην έξοδο της φτερωτής έγινε με την εντολή

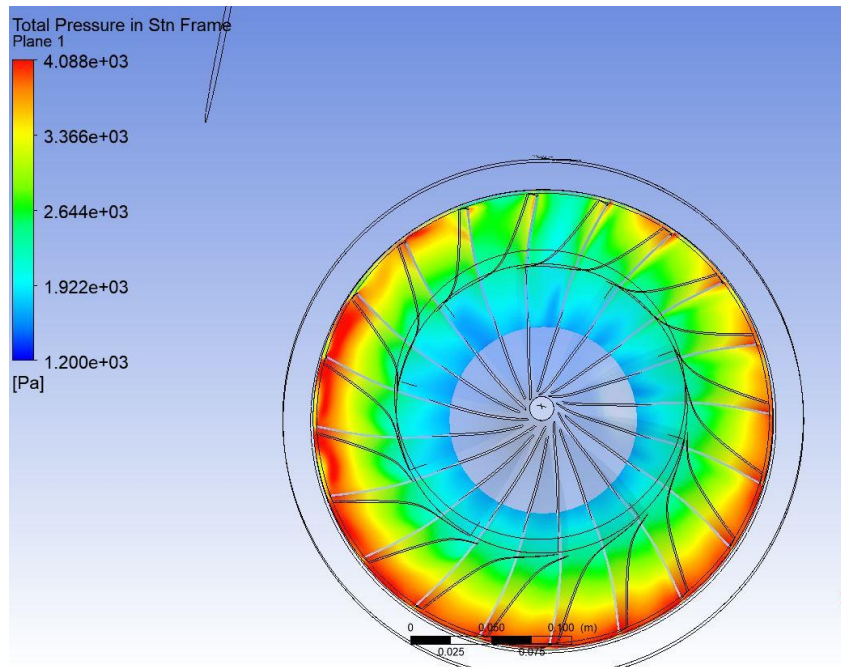
`massFlowAve(Total Pressure in Stn Frame)@Entire OUTFLOW`

Αντίστοιχα για την είσοδο:

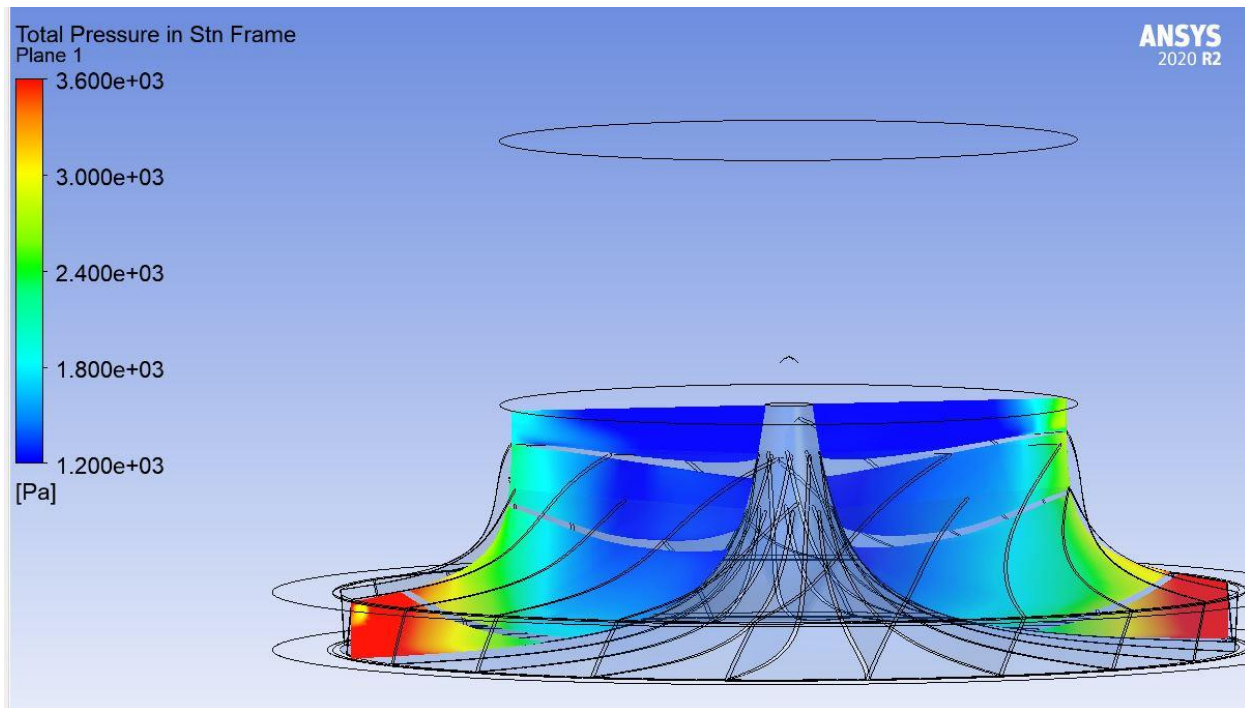
`massFlowAve(Total Pressure in Stn Frame)@Entire INFLOW`

Με τιμές εισόδου και εξόδου 1145 Pa και 3523 Pa αντίστοιχα λόγος πίεσης (Π) ισούται με 3.076. Παρακάτω δίνονται εικόνες που δείχνει κατανομή πίεσης σε διάφορα μέρη του συμπιεστή.

Οι εικόνες που παρουσιάζεται παρακάτω, αποτυπώνουν την κατανομή της ολικής πίεσης στη βάση της φτερωτής αλλά κι από την είσοδο έως την έξοδο της. Βλέπουμε ότι η ολική πίεση αυξάνεται σταδιακά με κορύφωση την ακμή πτερυγίου

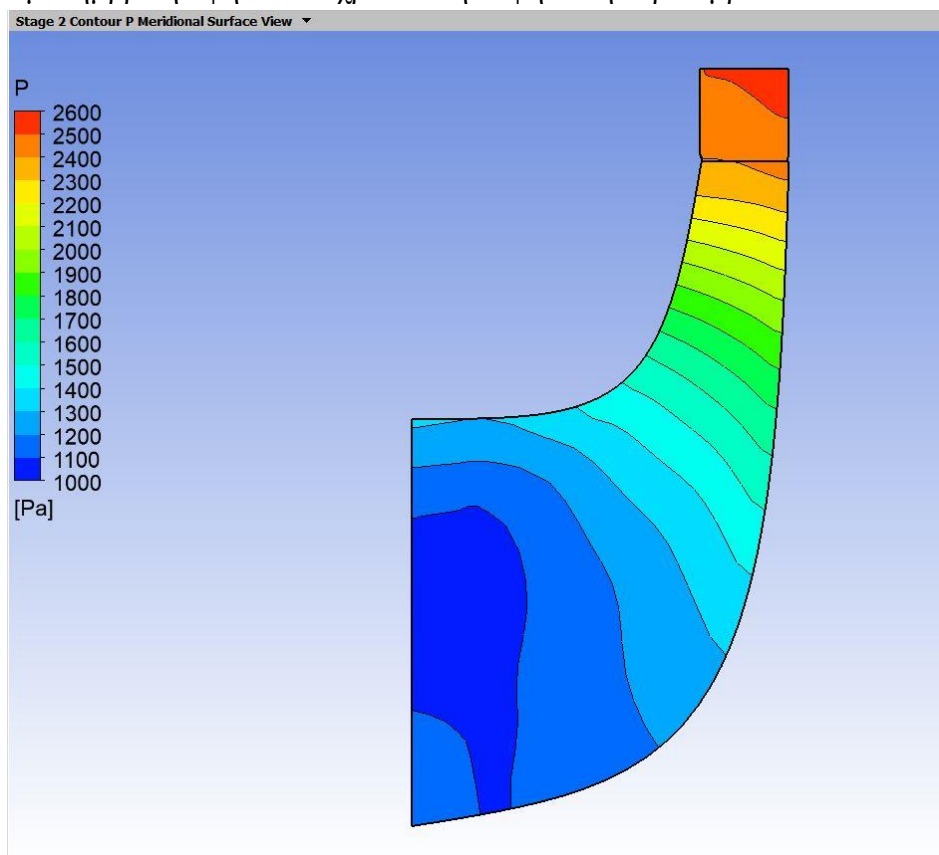


Εικόνα 4. 22 Κατανομή ολικής πίεσης στην κάτω επιφάνεια της φτερωτής



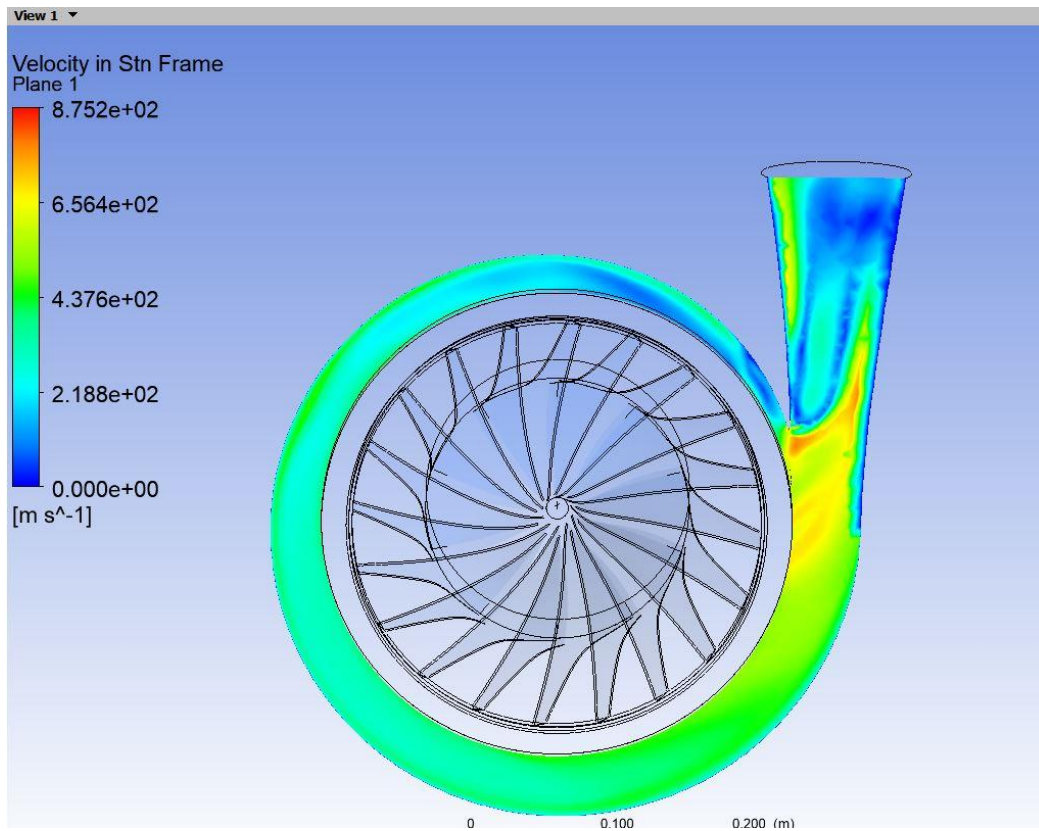
Εικόνα 4. 23 Κατανομή της ολικής πίεσης σε πλάγια όψη της φτερωτής

Η παρακάτω εικόνα αποτελεί αποτύπωση της στατικής πίεσης από την είσοδο έως την έξοδο της φτερωτής σε μεσημβρινή όψη. Ταυτόχρονα στην όψη αυτή περιλαμβάνεται και ο διάχυτης.



Εικόνα 4. 24 Κατανομή της στατικής πίεσης στην περαιοτή και στον διάχυτη σε μεσημβρινή όψη

Όσον αφορά την ταχύτητα βλέπουμε ότι βρίσκεται σε διηχητική ροή δηλαδή βρίσκεται γύρω από 1 Mach κάτι που περιμέναμε λόγω της υψηλής περιφερειακής ταχύτητας και των ιδιοτήτων του ρευστού.



Εικόνα 4. 25 Κατανομή της ταχύτητας στο κέλυφος

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας υλοποιήθηκε ο σχεδιασμός ενός φυγοκεντρικού συμπιεστή με εργαζόμενο μέσο νερό (R718) για ψύκτες μικρών διαστάσεων οι οποίοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για κλιματισμό / θέρμανση εσωτερικών χώρων.

Η διαδικασία για τον σχεδιασμό του εν λόγω φυγοκεντρικού συμπιεστή ξεκίνησε με τον προκαταρκτικό σχεδιασμό κάθε τμήματος του συμπιεστή ξεχωριστά μέσω του λογισμικού CFTurbo. Μέσω αυτού έγινε υπολογισμός των τιμών των παραμέτρων του συμπιεστή αλλά κι αποτέλεσε το μοντέλο για την εκτέλεση ρευστοδυναμικής ανάλυσης μέσω πεπερασμένων στοιχείων με το λογισμικό Ansys CFX. Για να εκτελεστεί η διαδικασία που αναφέρθηκε πραγματοποιήθηκε πλεγματοποίηση για κάθε μέρος του συμπιεστή μέσω του προγράμματος Mesh και Turbogrid. Το τελικό κομμάτι αποτέλεσε την επικύρωση των τιμών των παραμέτρων που τέθηκαν στο προκαταρκτικό σχεδιασμό του συμπιεστή αλλά και τον υπολογισμό άλλων, μέσω της εκτέλεσης (CFD).

Μελλοντικά βήματα που μπορούν να γίνουν:

- Αφού έχει διερευνηθεί πλήρως η λειτουργία του συμπιεστή με υπολογιστικό τρόπο, επόμενο στάδιο θα αποτελούσε η βελτιστοποίησή του.
- Υπολογισμός δυνάμεων και εκτάσεων αλλά και ορίων αντοχής του συμπιεστή R718
- Διερεύνηση μεταβατικής λειτουργίας (transient) του συμπιεστή για να μελετηθεί η συμπεριφορά του σε χρονομεταβαλλόμενο πρόβλημα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1) The Effect of Wet Compression on a Centrifugal Compressor for a Compressed Air Energy Storage System. Jianting Sun 1,2, Xin Zhou 1, Qi Liang 1,2, Zhitao Zuo 1, Haisheng Chen 1, Published: 8 March 2019
- 2) Water as a Refrigerant in Centrifugal Compressor Cooling Systems for Industrial Applications, Florian Hanslik and Juergen Suess.
- 3) Technical data eChiller, efficient Energy
- 4) Turbo-compressors: Prototype tests of mechanical vapour recompression for steam driers. Michael Bantlea, 12th IEA Heat Pump Conference 2017
- 5) Energy efficient vacuum freezing ice slurry generation using a R718 compressor.
- 6) The Use of Water as a Refrigerant: Impact of Cycle Modifications on Commercial Feasibility Brandon F. Lachner, Jr . May 2004
- 7) Eckert, Thomas; Dostal, Leo; Helm, Martin; and Schweigler, Christian, "3D-CFD Design Study And Optimization Of A Centrifugal Turbo Compressor For The Operation In A Hybrid Sorption/Compression Heat Pump Cycle" (2016). International Compressor Engineering Conference. Paper 2431
- 8) ANSYS, Inc., ANSYS CFX-Solver Manager Users Guide, July 2020
- 9) ANSYS, Inc., ANSYS TurboGrid User's Guide, July 2020
- 10) ANSYS, Inc., ANSYS CFX-Solver Theory Guide, July 2020
- 11) Εισαγωγή στις Θερμικές Στροβιλομηχανές, Κ.Δ Παπαήλιου, Κ.Μ. Μαθιουδάκης, Κ.Χ. Γιαννάκογλου, Αθήνα 2000
- 12) Design and optimization of a centrifugal compressor stage for water as a refrigerant (R718), Marcus Honke (ILK Dresden) Marius Korfanty (CFturbo), June 2017
- 13) "Σημειώσεις από τις παραδόσεις του μαθήματος Αεριοστρόβιλοι και ατμοστρόβιλοι" Διδακτικές Σημειώσεις, Αθήνα 2018
- 14) Centrifugal turbo chiller using water as refrigerant and lubricant, Tadayoshi Shoyama¹, Bunki Kawano¹, Takeshi Ogata¹, Masaru Matsui¹, Masato Furukawa² and Saeid Dousti³, Special Issue: The 11th International Conference on Compressors and Their Systems Date received: 27 September 2019; accepted: 5 June 2020
- 15) COPs OF R718 IN COMPARISON WITH OTHER MODERN REFRIGERANTS, A. Kilicarslan¹ and N. Müller², Proceedings of the First Cappadocia International Mechanical Engineering Symposium 14-16 July 2004, Cappadocia, Turkey
- 16) Wobst, Eberhard; Kalitzin, Nikolai; and Apley, Rainer, "Turbo Water Chiller with Water as Refrigerant" (2004). International Compressor Engineering Conference. Paper 1625.
- 17) Water (R718) Turbo Compressor and Ejector Refrigeration / Heat Pump Technology Milan N, Sarevski and Vasko N. Šarevski (2016)
- 18) Research Paper, Thermal characteristics of high-temperature R718 heat pumps with turbo compressor thermal vapor recompression, Milan N. Šarevski [†], Vasko N. Šarevski, Received 21 September 2016 Revised 17 October 2016 Accepted 8 February 2017 Available online 12 February 2017

- 19) Preliminary study of a novel R718 refrigeration cycle with single stage centrifugal compressor and two-phase ejector, Milan N. Sarevski*, Vasko N. Sarevski, Received 14 October 2013, Received in revised form 8 December 2013, Accepted 10 December 2013, Available online 19 December 2013
- 20) Water vapor compression and its various applications, Bin Hu, Di Wu, R.Z. Wang*
- 21) Modeling and simulation on a water vapor high temperature heat pump system, Di Wu, Hongzhi Yan, Bin Hu*, R.Z. Wang** Received 15 July 2018 Received in revised form, 29 October 2018, Accepted 25 November 2018 ,Available online 26 November 2018
- 22) Water (R718) The Safe & Natural Refrigerant, Brochure eChiller, Efficient Energy
- 23) Product Description eChiller, Efficient Energy
- 24) Design of compressor Impellers for a water as a refrigerant, Norbert Muller
- 25) Implementation of 3Port Condensing Wave Rotors in R718 Cycles, Amir A. Kharazi, Pezhman Akbari, Norbert Müller, December 2006 Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME 128(4)
- 26) Kawasaki Water-Refrigerant Centrifugal Chiller, Brochure
- 27) Genetic Optimization of Turbomachinery Components using the Volute of a Transonic Centrifugal Compressor as a Case Study, Martin Heinrich, November 22, 2016
- 28) Jet-wake flow pattern in impeller image, <https://link.springer.com/article/10.1007/s13202-015-0173-y/figures/3>
- 29) Mesh Information, simutech group
- 30) Water Chiller Information, icooler-r718, Hamburg Vacuum <https://www.icooler-r718.de/technical-info.html>
- 31) 3D-CFD Design Study And Optimization Of A Centrifugal Turbo Compressor For The Operation In A Hybrid Sorption/ Compression Heat Pump Cycle, C. Schweigler, 2
- 32) Impeller top view, https://nptel.ac.in/content/storage2/courses/112104117/chapter_8/8_3.html
- 33) Surrogate Modeling for Optimization of a Centrifugal Compressor Impeller, Jin-Hyuk KIM, Kwang-Yong Kim, Jae-Ho Choi, March 2010
- 34) https://www.researchgate.net/publication/337644278_CFD_Based_Design_of_an_Impeller_for_a_Novel_Integrated_Motor-Compressor_System/figures?lo=1