ΑΝΩΤΑΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΑΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Πτυχιακή εργασία

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ

Θεολόγος-Ευάγγελος Μπουντουρέλης

Α.Μ. 5971

Επιβλέπων Καθηγητής
Δρ. Κωνσταντίντος Τζιράκης

Ηράκλειο, Μάρτιος 2017

Ευχαριστώ τον Δρ. Κωνσταντίνο Τζιράκη και τον κ. Γιώργο Στυλιανάκη για την πολύτιμη βοήθειά και καθοδήγησή τους στην εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία ασχολείται με την ανάλυση και το σχεδιασμό αεροστροβίλων. Πιο αναλυτικά, στο πρώτο κεφάλαιο θα γίνει μια σύντομη ιστορική αναδρομή στην εξέλιξη των αεροστροβίλων στο πέρασμα των αιώνων. Στη συνέχεια, στο δεύτερο κεφάλαιο, θα αναφερθούν και θα αναλυθούν τα διαφορετικά είδη των αεροστροβίλων με τις ανάλογες κατηγοριοποιήσεις τους. Έπειτα, θα παρουσιαστούν τα βασικά μέρη που αποτελούν τον κινητήρα.

Στο πέμπτο και έκτο κεφάλαιο της εργασίας, θα γίνει εκτενής αναφορά στους απλούς και συνδυαστικούς θερμοδυναμικούς κύκλους Brayton και ταυτόχρονα θα επισημανθούν οι αποδείξεις του καθενός ξεχωριστά. Στο έβδομο και τελευταίο κεφάλαιο, το οποίο ασχολείται με τους θερμοδυναμικούς κύκλους, τονίζεται ο πραγματικός κύκλος Brayton.

Στο όγδοο και ένατο κεφάλαιο, γίνεται αναλυτική περιγραφή των δυο πιο βασικών μερών του κινητήρα, δηλαδή του συμπιεστή και του στροβίλου. Συνεχίζοντας στο δέκατο κεφάλαιο ο αναγνώστης μπορεί να βρει τις καινοτόμες τεχνικές ψύξης ενός πτερυγίου στροβίλου, συνοδευόμενες από τις απαραίτητες κατατοπιστικές εικόνες.

Στα δύο τελευταία κεφάλαια, γίνεται μια πλήρης αναφορά στα υλικά κατασκευής κάθε μέρους του κινητήρα ξεχωριστά και μια ενδελεχής παρουσίαση του σχεδιαστικού μέρους της πτυχιακής εργασίας μαζί με τα αποτελέσματα της ανάλυσης.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ 11
2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ 13
3 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΑΕΡΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ 19
3.1 Ανάλογα με την επανακυκλοφορία ή μη του εργαζόμενου μέσου. 19
3.2 Ανάλογα με τον αριθμό αξόνων 19
3.3 Ανάλογα με την χρήση θερμικών εναλλακτών ή επιπλέον θάλαμο καύσης. 21
3.4 Ανάλογα με την εφαρμογή 21
3.4.1 Αεροπορικοί 21
3.4.2 Βιομηχανικοί. 25
4 ΒΑΣΙΚΑ ΜΕΡΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ 27
4.1 Εισαγωγή (inlet). 27
4.2 Συμπιεστής (compressor). 27
4.3 Θάλαμος καύσης (combustion chamber). 30
4.4 Τουρμπίνα (turbine). 32
5 ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ BRAYTON 34
5.1 Απλός ιδανικός κύκλος Brayton. 34
5.2 Κύκλος Brayton με εναλλάκτη θερμότητας. 35
5.3 Κύκλος Brayton με ενδιάμεση ψύξη. 37
5.4 Κύκλος Brayton με αναθέρμανση. 39
6 ΣΥΝΔΙΑΣΤΙΚΟΙ ΚΥΚΛΟΙ 42
6.1 Κυκλος Brayton με ενδιάμεση ψύξη και εναλλάκτη θερμότητας. 42
6.2 Κυκλος Brayton με εναλλάκτη θερμότητας και αναθερμαντήρα. 44
6.3 Κυκλος Brayton με ενδιάμεση ψύξη, εναλλάκτη θερμότητας και αναθερμαντήρα. 45
7 ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ BRYATON 48
7.1 Απόδοση ισεντροπικής συμπίεσης 48
7.2 Απόδοση ισεντροπικής εκτόνωσης. 49
7.3 Απόδοση καύσης. 50
7.4 Απώλειες πίιεσης. 50
7.5 Μηχανικές απώλειες. 50
8 ΣΥΜΠΙΕΣΤΗΣ 52
8.1 Χαρακτηριστικά αξονικού συμπιεστή. 52
8.2 Τρίγωνα ταχυτήτων συμπιεστή. 53
8.3 Παράγοντες που επηρεάζουν τον λόγο πίεσης βαθμίδας συμπιεστή 54
8.3.1 Ταχύτητα περιστροφής. 54
8.3.2 Αξονική ταχύτητα. 55
8.3.3 Στροφή ροής. 56
9 ΣΤΡΟΒΙΛΟΣ 57
9.1 Χαρακτηριστικά αξονικού στροβίλου. 57
9.2 Παράγοντες που επηρεάζουν τον λόγο πίεσης βαθμίδας στροβίλου. 57
9.3 Μέθοδοι υπολογισμού απόδοσης. 58
10 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΨΥΞΗΣ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΩΝ 59
10.1 Εσωτερική ψύξη. 60
10.1.1 Ψύξη με συναγωγή. 60
10.1.2 Ψύξη με πρόσκρουση. 60
10.2 Εξωτερική ψύξη. 61
10.2.1 Ψύξη με φιλμ. 61

10.2.2 Ψύξη με έκχυση. 61
10.2.3 Ψύξη με πτερύγια. 62
10.2.4 Ψύξη με διαπνοή. 62
11 ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ 63
11.1 Υλικά πτερυγιίων συμπιεστή. 63
11.2 Υλικά θαλάμου καύσης. 64
11.3 Υλικά δίσκων στροβίλων. 65
11.4 Υλικά πτερυγίων στροβίλων 66
12 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ 68
12.1 Είκονες για την αποτύπωση γεωμετρίας. 68
12.2 Εικόνες πλεγμάτων (meshing). 69
12.3 Ανάλυση τρισδιάστατων σχεδίων. 72
12.3.1 Ανάλυση συμπιεστή. 72
12.3.1.1 Διαγράμματα τάσεων και μετατοπίσεων συμπιεστή. 77
12.3.2 Ανάλυση στροβίλου. 79
12.3.2.1 Διαγράμματα τάσεων και μετατοπίσεων πτερυγίων. 82
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 85

ΚΑΤΑΛΑΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Εικόνα 2.1: Διάταξη του Ήρωνα 13
Εικόνα 2.2: Διάταξη του Gevanni Branca 13
Εικόνα 2.3: Ατμοκίνητο όχημα του Ισαάκ Νεύτων 14
Εικόνα 2.4: Σύστημα του John Barder 14
Εικόνα 2.5: Αεριοστρόβιλος του Frank Whittle 15
Εικόνα 2.6: Αεροσκάφος Gloster E28/39 15
Εικόνα 2.7: Αεροσκάφος Heinkel He-178 16
Εικόνα 2.8: Κινητήρας GE-IA 16
Εικόνα 2.9: Αεροσκάφος Bell XP-59 "Airacomet" 16
Εικόνα 2.10: Μαχητικό SR-71 Blackbird 17
Εικόνα 2.11: Αεροσκάφος Concorde 17
Εικόνα 2.12: Κινητήρας Olympus 543-B 17
Εικόνα 2.13: Βιομηχανικός αεριοστρόβιλος της Mitsubishi M501J ισχύος 327 MW, ο οποίος έχει την μεγαλύτερη απόδοση περίπου 61% (συνδυαστικό σύστημα) 18
Εικόνα 2.14: Βιομηχανικός αεριοστρόβιλος της Mitsubishi M701J ισχύος 680 MW, ο οποίος έχει την μεγαλύτερη απόδοση περίπου 61% (συνδυαστικό σύστημα) 18
Εικόνα 3.1: Διαγραμματική αναπαράσταση ανοικτού και κλειστού κύκλου 19
Εικόνα 3.2: Διαγραμματική αναπαράσταση κινητήρα μονού άξονα 19
Εικόνα 3.3: Διαγραμματική αναπαράσταση κινητήρα διπλού άξονα 20
Εικόνα 3.4: Αεροπορικός κινητήρας τριπλού άξονα 20
Εικόνα 3.5: Διαγραμματική αναπαράσταση ελεύθερου στροβίλου ισχύος. 20
Εικόνα 3.6: Διάγραμμα ροής στροβιλοαντιδραστήρα 21
Εικόνα 3.7: Διάγραμμα ροής στροβιλοανεμηστήρα (high bypass). 22
Εικόνα 3.8: Διάγραμμα ροής ελικοστρόβιλου. 22
Εικόνα 3.9: Βασικά μέρη αθόδυλου. 23
Εικόνα 3.10: Βασικά μέρη παλμικού αθόδυλου. 23
Εικόνα 3.11: Διάγραμμα ροής scramjet (βασικά μέρη). 24
Εικόνα 3.12: Κινητήρας propfan της General Electric. 24
Εικόνα 3.13: Διαγραμματική αναπαράσταση πυραύλου. 25
Εικόνα 3.14: Βασικά μέρη κινητήρα sabre. 25
Εικόνα 3.15: Αξονοστροβιλοκινητήρα SGT-750 (39.3 MW). 26
Εικόνα 4.1: Ασφάλεια στατικών πτερυγίων. 27
Εικόνα 4.2: Φυγοκεντρικός συμπιεστής. 28
Εικόνα 4.3: Διαχυτής (diffuser) 29
Εικόνα 5.1: Διαγράμματα P-V και T-S. 34
Εικόνα 5.2: Διάταξη κύκλου Brayton με εναλλάκτη θερμότητας. 36
Εικόνα 5.3: Διάγραμμα T-s με αναγέννηση. 36
Εικόνα 5.4: Διάταξη κύκλου Brayton με intercooler 38
Εικόνα 5.5: Διάγραμμα T-s με ενδιάμεση ψύξη. 38
Εικόνα 5.6: Διάγραμμα T-s με αναθέρμανση. 39
Εικόνα 5.7: Διάταξη κύκλου Brayton με αναθέρμανση. 40
Εικόνα 6.1: Διάγραμμα T-s με ενδιάμεση ψύξη και εναλλάκτη θερμότητας. 42
Εικόνα 6.2: Διάταξη κύκλου Brayton με ενδιάμεση ψύξη και εναλλάκτη θερμότητας. 43
Εικόνα 6.3: Διάγραμμα T-s με εναλλάκτη θερμότητας και αναθέρμανση 44

Εικόνα 6.4: Διάταξη κύκλου Brayton με εναλλάκτη θερμότητας και αναθέρμανση 44
Εικόνα 6.5: Διάγραμμα T-s κύκλου Brayton με ενδιάμεση ψύξη, εναλλάκτη θερμότητας και αναθερμαντήρα 46
Εικόνα 6.6: Διάταξη κύκλου Brayton με ενδιάμεση ψύξη, εναλλάκτη θερμότητας και αναθερμαντήρα 46
Εικόνα 7.1: Διάγραμμα T-s ιδανικού και πραγματικού κύκλου Brayton 48
Εικόνα 7.2: Διάγραμμα T-s ιδανικής και πραγματικής συμπίεσης 49
Εικόνα 7.3: Διάγραμμα T-s ιδανικής και πραγματικής εκτόνωσης 49
Εικόνα 8.1: VIGVs και VGVs 52
Εικόνα 8.2: Απεικονιση ταχυτήτων εισόδου και εξόδου 53
Εικόνα 9.1: Διάγραμμα Smith. 58
Εικόνα 10.1:Ιστορικά στοιχεία ανάπτυξης 59
Εικόνα 10.2: Ψύξη με συναγωγή 60
Εικόνα 10.3: Ψύξη με πρόσκρουση 61
Εικόνα 10.4: Ψύξη με φιλμ 61
Εικόνα 10.5: Ψύξη με έκχυση 62
Εικόνα 10.6: Ψύξη με πτερύγια 62
Εικόνα 11.1: Πίνακας υλικών 67
Εικόνα 12.1: Εικόνα πτερυγίιου στροβίλου (1) 68
Εικόνα 12.2: Εικόνα πτερυγίου στροβίλου (2) 68
Εικόνα 12.3: Εικόνα πτερυγίου συμπιεστή 68
Εικόνα 12.4: Πλέγμα πτερυγίου στροβίλου (1) 69
Εικόνα 12.5: Πλέγμα πτερυγίου στροβίλου (2) 70
Εικόνα 12.6: Σύστημα στροβίλου 70
Εικόνα 12.7: Πτερύγιο συμπιεστή 71
Εικόνα 12.8: Σύστημα συμπιεστή 71
Εικόνα 12.9: Ανάλυση τάσεων δίσκου (1) 72
Εικόνα 12.10: Ανάλυση τάσεων πτερυγίου (1) 72
Εικόνα 12.11: Ανάλυση τάσεων δίσκου (2) 73
Εικόνα 12.12: Ανάλυση μετατόπισης δίσκου 74
Εικόνα 12.13: Ανάλυση μετατόπισης πτερυγίου 74
Εικόνα 12.14: Ανάλυση καταπόνησης δίσκου (1) 75
Εικόνα 12.15: Ανάλυση καταπόνησης πτερυγίου 76
Εικόνα 12.16: Ανάλυση καταπόνησης δίσκου (2) 76
Εικόνα 12.17: Διάγραμμα τάσεων ακμής πτερυγίου στις 3344rpm (350r/s) 77
Εικόνα 12.18: Διάγραμμα τάσεων ακμής πτερυγίου στις 5255rpm (550r/s) 77
Εικόνα 12.19: Διάγραμμα τάσεων ακμής πτερυγίου στις 7166rpm (750r/s) 77
Εικόνα 12.20: Διάγραμμα μετόπισης ακμής πτερυγίου στις 3344rpm (350r/s) .. 78
Εικόνα 12.21: Διάγραμμα μετόπισης ακμής πτερυγίου στις 5255rpm (550r/s) .. 78
Εικόνα 12.22: Διάγραμμα μετόπισης ακμής πτερυγίου στις 7166rpm (750r/s) .. 78
Εικόνα 12.23: Πίνακας μέγιστων τιμών 79
Εικόνα 12.24: Ανάλυση τάσεων δίσκου 79
Εικόνα 12.25: Ανάλυση τάσεων πτερυγίου 80
Εικόνα 12.26: Ανάλυση μετατόπισης δίσκου 80
Εικόνα 12.27: Ανάλυση μετατόπισης πτερυγίου 81
Εικόνα 12.28: Ανάλυση καταπόνησης πτερυγίου 81
Εικόνα 12.29: Διάγραμμα τάσεων ακμής πτερυγίου στις 3344rpm (350r/s) 82
Εικόνα 12.30: Διάγραμμα τάσεων ακμής πτερυγίου στις 5255rpm (550r/s) 82
Εικόνα 12.31: Διάγραμμα τάσεων ακμής πτερυγίου στις 7166rpm (750r/s) 82

Εικόνα 12.32: Διάγραμμα μετόπισης ακμής πτερυγίου στις 3344rpm (350r/s) ..83
Εικόνα 12.33: Διάγραμμα μετόπισης ακμής πτερυγίου στις 5255rpm (550r/s) ..83
Εικόνα 12.34: Διάγραμμα μετόπισης ακμής πτερυγίου στις 7166rpm (750r/s) ..83
Εικόνα 12.35: Πίνακας μέγιστων τιμών 84
Εικόνα 12.36: Τελική συναρμολόγηση χωρίς ακμές.....83
Εικόνα 12.37: Τελική συναρμολόγηση με ακμές.....83

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι αεροστρόβιλοι ουσιαστικά είναι θερμικές μηχανές που χρησιμοποιούν τον αέρα ως εργαζόμενο μέσο για να παρέχει ώθηση στα αεροσκάφη και αντίστοιχα ηλεκτρική ενέργεια στα εργοστάσια. Για να επιτευχθεί αυτό, ο αέρας διερχόμενος από την μηχανή πρέπει να επιταχυνθεί, αυτό σημαίνει ότι η ταχύτητα ή κινητική ενέργεια του αέρα πρέπει να αυξηθεί. Για να αποκτηθεί το παραπάνω πρέπει αρχικά να αυξηθεί η πίεση, ακολουθούμενη από την προσθήκη θερμότητας πριν από την τελική μετατροπή σε κινητική ενέργεια υπό την μορφή υψηλής ταχύτητας καυσαερίων κατά την εκροή.

Ο κύκλος εργασίας ενός αεριοστροβίλου είναι αρκετά παρόμοιος μ' αυτόν ενός τετράχρονου κινητήρα. Παρ' όλα αυτά, σ' έναν αεριοστρόβιλο η καύση συμβαίνει υπό σταθερή πίεση ενώ σ' έναν τετράχρονο υπό σταθερο όγκο αέρα και οι δύο κύκλοι δείχνουν οτι υπάρχει κάθε στιγμή εισαγωγή, συμπίεση, καύση και εξαγωγη. Αυτές οι διεργασίες είναι διακοπτόμενες στην περίπτωση του τετράχρονου κινητήρα ενώ είναι συνεχής στους αεριοστροβίλους. Πιο αναλυτικά, σ' έναν τετράχρονο κινητήρα μόνο στον τρίτο χρόνο υπάρχει παραγωγή έργου οι υπόλοιποι χρόνοι βοηθούν στην εισαγωγή (πρώτος), στην συμπίεση (δεύτερος) και στην εξαγωγή (τέταρτος) των καυσαερίων.Σε αντίθεση, στους αεριοστρόβιλους υπάρχει συνεχής καύση και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την παραγωγή μεγαλύτερης ισχύος σε σχέση με το μέγεθος της μηχανής. Λόγω του οτι υπάρχει συνεχής καύση και οτι ο θάλαμος καύσης είναι ένας κλειστός χώρος η πίεση του αέρα δεν αυξάνεται όπως στις εμβολοφόρες λόγω καύσης, αλλά αυξάνεται ο όγκος. Αυτή η διεργασία είναι γνωστή ως θέρμανση σε σταθερή πίεση. Κάτω υπό αυτές τις συνθήκες δεν υπάρχουν διακυμάνσεις στην πίεση όπως στις εμβολοφόρες που η πίεση φτάνει έως τα 6,9 MPa.

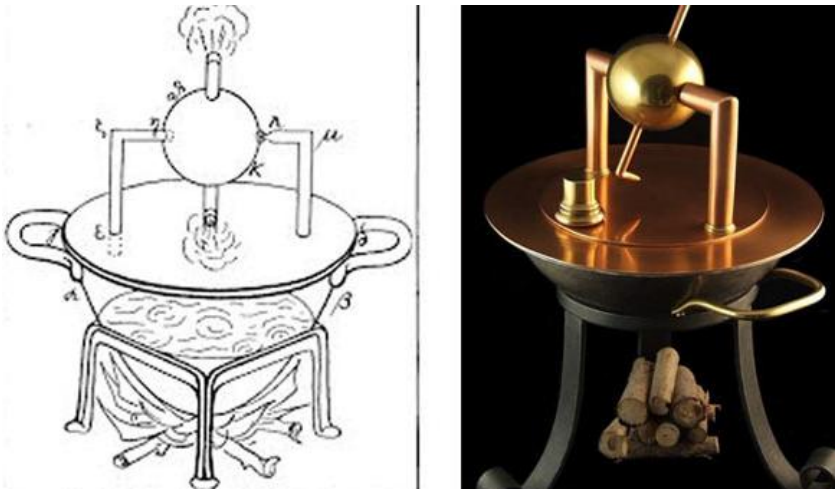
Έτσι από την προηγούμενη παράγραφο γίνεται να διεξαχθουν ορισμένα συμπεράσματα ως προς τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των αεριοστροβίλων. Όσον αφορά τα πλεονεκτήματα όπως αναφερθηκε και στην παραπάνω παράγραφο η συνεχόμενη ροή αέρα και η συνεχή καύση συνεπάγει μεγάλη παραγωγή ισχύος. Ταυτόχρονα η συνέχης ροή αέρα χαρακτηρίζετα από την απουσία παλιδρομικών κινήσεων που έχουν ως αποτέλεσμα την μειώμενη εμφάνιση δυνάμεων αδράνειας και μειωμένη κατανάλωση λιπαντικού (ελαχιστοποίηση τριβόμενων τμημάτων). Επιπρόσθετα, έχουν ικανοποιητικό

θερμικό βαθμό απόδοσης που κυμαίνεται μεταξύ 32% έως 45% για τον απλό θερμοδυναμίκο κύκλο, αλλά με την χρήση συνδυαστικών συστημάτων μπορεί να φτάσει σε πολύ υψηλές τιμές. Τέλος, υπάρχει η δυνατότητα να χρησιμοποιήθουν ποικίλα καύσιμα τα οποία μπορούν να είναι σε υγρή μορφή όπως κιροζίνη (αεροσκάφη) και βιοντίζελ είτε αέρια όπως φυσικό αέριο (natural gas), αεριοποιημένος άνθρακας (syngas) και biogas. Επίσης, με την εφαρμογή καινοτόμων σύγχρονων τεχνολογίων περιορίζονται σε μεγάλο βαθμό οι εκπομπές καυσαερίων στη ατμόσφαιρα.

Από την άλλη μεριά, βέβαια υπάρχουν και μειονεκτήματα. Αρχικά, επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από τις περιβαντολλογικές συνθήκες δηλαδή την θερμοκρασία, την πίεση, την υγρασία και την ταχύτητα εισόδου του αέρα τα οποία έχουν σαν αποτέλεσμα να μεταβάλλουν τον θερμικό βαθμό απόδοσης. Επιπλέον, σε συνθήκες μερικού φορτίου η απόδοση τους είναι αρκετά χαμηλή. Τέλος, έχουν μεγάλη ειδική κατανάλωση καυσίμου λόγω της μη διακοπτόμενης καύσης και αυξημένο κόστος και χρόνος για την ανάπτυξη-κατασκευή.

2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

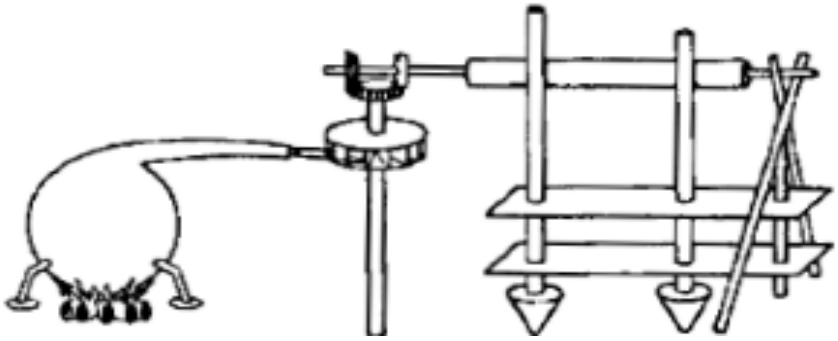
Η απαρχή της αεριοώθησης, ξεκίνησε από τα αρχαία χρόνια όταν ο Ήρωνας πραγματοποίησε την πρώτη εφαρμογή της αρχής της αεριοώθησης (Jet propulsion) περίπου τον 1^{ο} μ.Χ. αιώνα.



Εικόνα 2.1: Διάταξη του Ήρωνα

Η κατασκευή αυτή όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα (Εικόνα 1), περιελάμβανε ένα κλειστό δοχείο με νερό που θερμαινόταν, ώστε να παραχθεί ατμός. Ο ατμός που παραγόταν, μεταφερόταν μέσω δύο κάθετων σωλήνων σε μια σφαίρα, καθώς η σφαίρα γέμιζε με ατμό, περιστρεφόταν και ο ατμός έβρισκε οδό διαφυγής από τους ακτινικούς αυλούς.

Κατά το πέρασμα των αιώνων πολλοί χρησιμοποίησαν την αρχή της αεριοώθησης, όπως οι Κινέζοι τον 3^{ο} αιώνα μ.Χ. με τα βεγγαλικά και στην συνέχεια το 1232 με την κατασκευή ενός όπλου το «βέλος του ιπτάμενου πυρός» που προωθούνταν με την χρήση πυρίτιδας. Το 1629 μ.Χ. ο μηχανικός Gevanni Branca σχεδίασε τον πρώτο στρόβιλο.



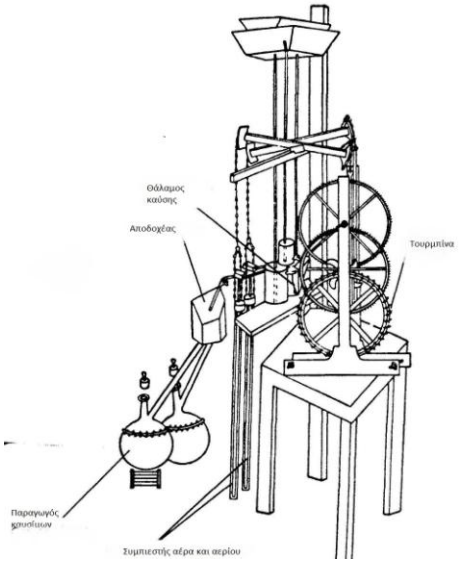
Εικόνα 2.2: Διάταξη του Gevanni Branca

Όπως φαίνεται από την διάταξη της κατασκευής (Εικόνα 2), ο ατμός που παράγεται από το θερμαινόμενο δοχείο, περιέστρεφε το δίσκο που έφερε κοιλότητες στην περιφέρειά του και η κίνηση του δίσκου μεταφερόταν μέσω συστήματος γραναζιών σε άλλον άξονα.

Το 1687 ο Ισαάκ Νεύτων, βασισμένος στον τρίτο Νόμο του, σχεδίασε ένα όχημα το οποίο κινούταν με ατμό. Βέβαια είχε ένα μεγάλο μειονέκτημα: την πολύ μικρή ισχύ του.

Εικόνα 2.3: Ατμοκίνητο όχημα του Ισαάκ Νεύτων

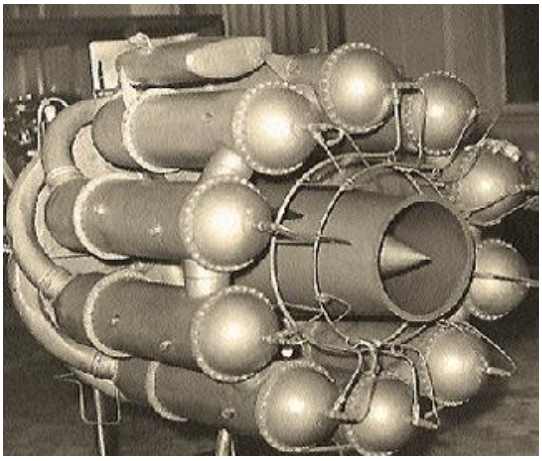
Μετά τον Νεύτωνα πολλοί μηχανικοί άρχισαν να κατασκευάζουν συστήματα προώθησης. Πιο συγκεκριμένα, ο John Barder το 1791 σχεδίασε ένα τέτοιο σύστημα που λειτουργούσε με το θερμοδυναμικό κύκλο του σύγχρονου αεριοστρόβιλου.



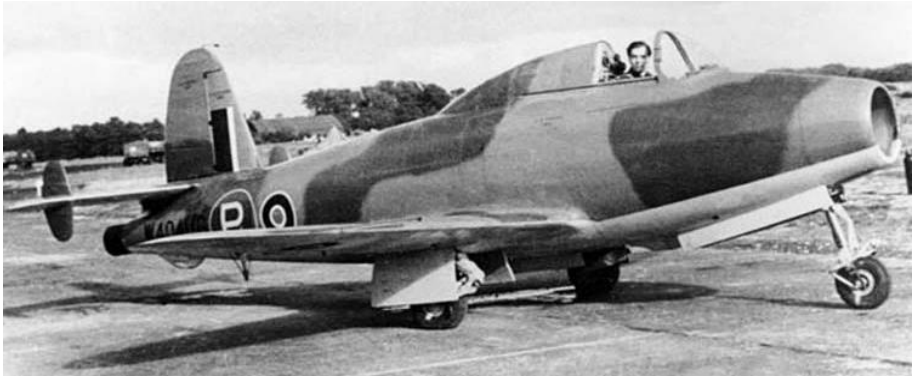
Εικόνα 2.4: Σύστημα του John Barder

Το 1808, ο John Bumbell, κατασκεύασε έναν αεριοστρόβιλο παρόμοιο με τους σημερινούς, αλλά χωρίς πτερύγια που να είναι σταθερά. Τις ίδιες ομοιότητες παρουσίασε και ο κινητήρας του Bresson το 1837. Το 1850 ο Fernouhough επινόησε τον πρώτο αεριοστρόβιλο κινητήρα που είχε την δυνατότητα να λειτουργεί με εργαζόμενα μέσα τον αέρα και τον ατμό. Ο πρώτος αεριοστρόβιλος που λειτούργησε με αέρα εξ' ολοκλήρου ξεφεύγοντας από τη χρήση του ατμού ανήκει στον F. Stoltz, το 1872.

Βέβαια οι αεριοστρόβιλοι άρχισαν να χρησιμοποιούνται μετά το 1937, όταν ο Άγγλος μηχανικός Frank Whittle έθεσε σε λειτουργία τον πρώτο αεριοστρόβιλο με ονομασία W1 που κινούσε το αεροσκάφος Gloster E28/39.

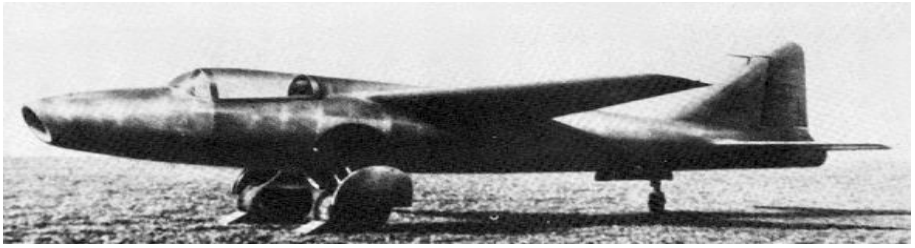


Εικόνα 2.5: Αεριοστρόβιλος του Frank Whittle



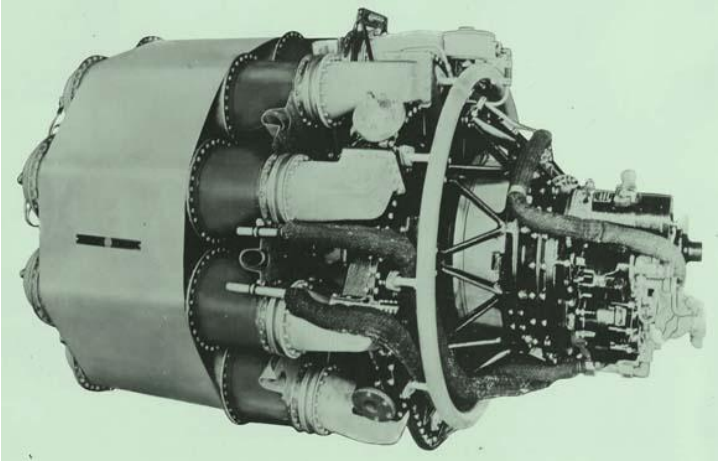
Εικόνα 2.6: Αεροσκάφος Gloster E28/39

Παράλληλα , ο Γερμανός μηχανικός Hans Von Ohain δοκίμασε το δικό του κατασκευής αεριοστρόβιλο στο αεροσκάφος Heinkel He-178. Και ο Whittle και ο Ohain χρησιμοποίησαν μονοβάθμιο φυγόκεντρο συμπιεστή και στρόβιλο.



Εικόνα 2.7: Αεροσκάφος Heinkel He-178

Τον Οκτώβριο του 1942, η General Electric βασιζόμενη στα σχέδια του Frank Whittle κατασκεύασε τον GE-IA που χρησιμοποιήθηκε στο αεροσκάφος Bell XP-59 “Airacomet”.



Εικόνα 2.8: Κινητήρας GE-IA

Εικόνα 2.9: Αεροσκάφος Bell XP-59 “Airacomet”

Στις σημερινές μέρες τα επιβατικά, εμπορικά και στρατιωτικά αεροσκάφη χρησιμοποιούν σε τεράστιο βαθμό κινητήρες αεριοώθησης. Με τα τεράστια άλματα που κάνει η τεχνολογία έγινε εφικτή η ανάπτυξη και η κατασκευή κινητήρων που έχουν τη δυνατότητα να κινούν υπερηχητικά τα

αεροσκάφη, όπως το μαχητικό SR-71 Blackbird που έχει πέντε φορές την ταχύτητα του ήχου.

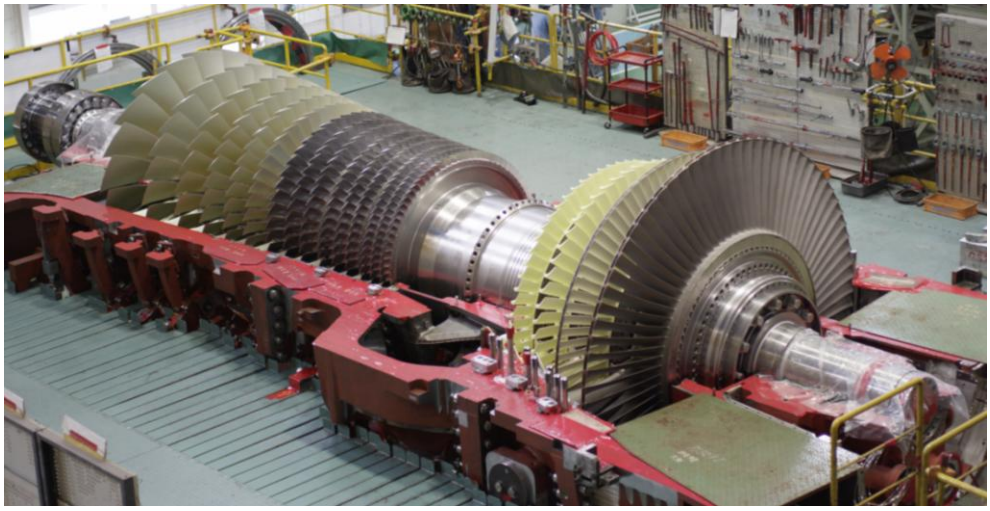
Εικόνα 2.10: Μαχητικό SR-71 Blackbird

Επιπρόσθετα, στα μέσα του 1975, η συνεργασία δύο χωρών (Αγγλίας-Γαλλίας) θα έχει ως αποτέλεσμα την κατασκευή ενός υπερηχητικού επιβατικού αεροσκάφους με την ονομασία Concorde το οποίο είχε εφοδιαστεί με κινητήρες Olympus 543-B το οποίο πετούσε με 2,2 φορές την ταχύτητα του ήχου.

Εικόνα 2.11: Αεροσκάφος Concorde

Εικόνα 2.12: Κινητήρας Olympus 543-B

Βέβαια, από το 1940 και μετά οι αεριοστρόβιλοι χρησιμοποιούνται και ως μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Σήμερα κατασκευάζονται κινητήρες που ξεπερνούν σε ισχύ τα 300 MW και παρουσιάζουν αποδόσεις που ξεπερνούν το 36% βάσει του απλού κύκλου Brayton.



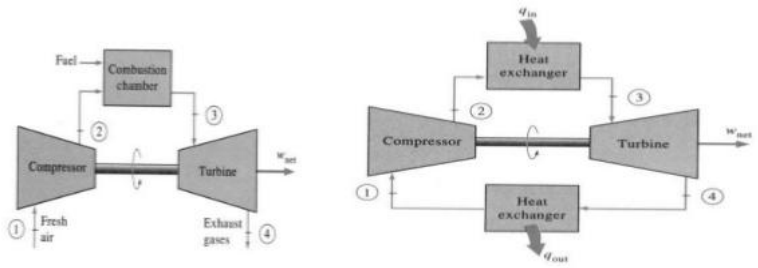
Εικόνα 2.13: Βιομηχανικός αεριοστρόβιλος της Mitsubishi M501J ισχύος 327 MW, ο οποίος έχει την μεγαλύτερη απόδοση περίπου 61% (συνδυαστικό σύστημα)

Εικόνα 2.14: Βιομηχανικός αεριοστρόβιλος της Mitsubishi M701J ισχύος 680 MW, ο οποίος έχει την μεγαλύτερη απόδοση περίπου 61% (συνδυαστικό σύστημα)

3 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΑΕΡΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ

3.1 Ανάλογα με την επανακυκλοφορία ή μη του εργαζόμενου μέσου.

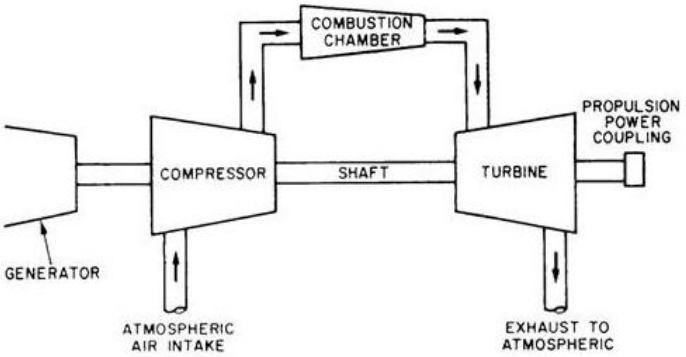
- **Ανοικτού κύκλου:** με συνεχή αναρρόφηση ατμοσφαιρικού αέρα από την εισαγωγή και την εκτόνωσή του από την εξαγωγή προς το περιβάλλον
- **Κλειστού κύκλου:** η ίδια ποσότητα αερίου παραμένει πάντα μέσα στον κινητήρα, ανακυκλοφορεί και επαναλαμβάνει τον θερμικό κύκλο (ο θάλαμος καύσης αντικαθίσταται από θερμικό εναλλάκτη).



Εικόνα 3.1: Διαγραμματική αναπαράσταση ανοικτού και κλειστού κύκλου

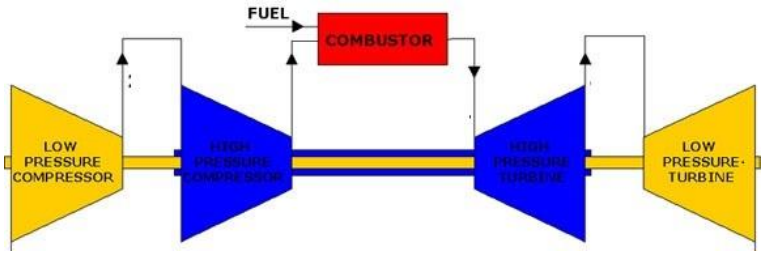
3.2 Ανάλογα με τον αριθμό αξόνων

- **Μονού άξονα:** ο συμπιεστής και ο στρόβιλος είναι μηχανικά συνδεδεμένοι πάνω στον έναν και μοναδικό άξονα, ο στρόβιλος παρέχει την απαραίτητη ενέργεια για να λειτουργήσει ο συμπιεστής. Όταν πρόκειται για αεροπορικό αεριοστρόβιλο η περισευούμενη ενέργεια μετατρέπεται σε κινητική, ενώ στην περίπτωση βιομηχανικού αεριοστρόβιλου μετατρέπεται σε ωφέλιμο έργο.



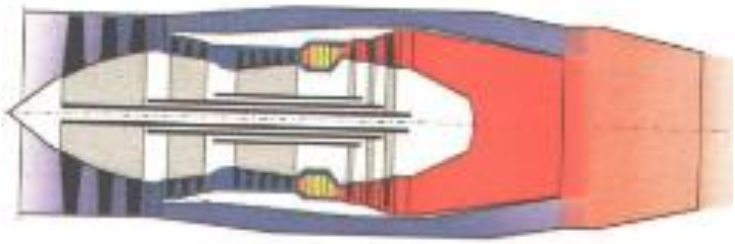
Εικόνα 3.2: Διαγραμματική αναπαράσταση κινητήρα μονού άξονα

- **Διπλού άξονα:** σ' αυτήν την περίπτωση, μέσω του πρώτου άξονα, ο στρόβιλος χαμηλής πίεσης οδηγεί τον συμπιεστή χαμηλής πίεσης, ενώ μέσω του δεύτερου άξονα ο στρόβιλος υψηλής πίεσης, οδηγεί τον συμπιεστή υψηλής πίεσης.



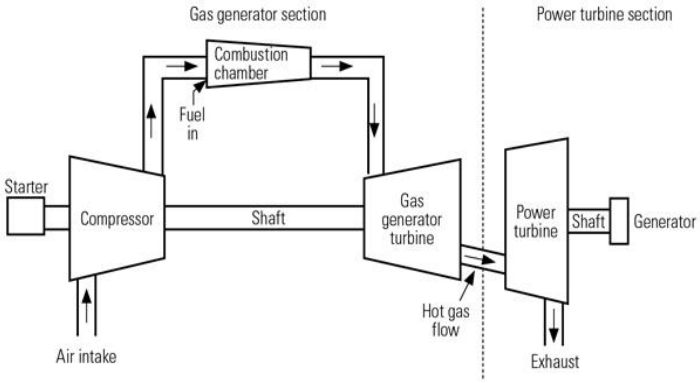
Εικόνα 3.3: Διαγραμματική αναπαράσταση κινητήρα διπλού άξονα

- **Τριπλού άξονα:** η περίπτωση αυτή είναι παρόμοια με αυτή του διπλού άξονα, μόνο που υπάρχει και ένας τρίτος άξονας που συνδέει ένα επιπλέον ζευγάρι συμπιεστή στροβίλου.



Εικόνα 3.4: Αεροπορικός κινητήρας τριπλού άξονα

- **Ελεύθερου στροβίλου ισχύος:** σ' αυτόν τον κινητήρα, η επιπλέον ενέργεια των καυσαερίων που φεύγουν από τον τελευταίο στρόβιλο του συμπιεστή, δεσμεύονται από έναν επιπλέον άξονα.



Εικόνα 3.5: Διαγραμματική αναπαράσταση ελεύθερου στροβίλου ισχύος.

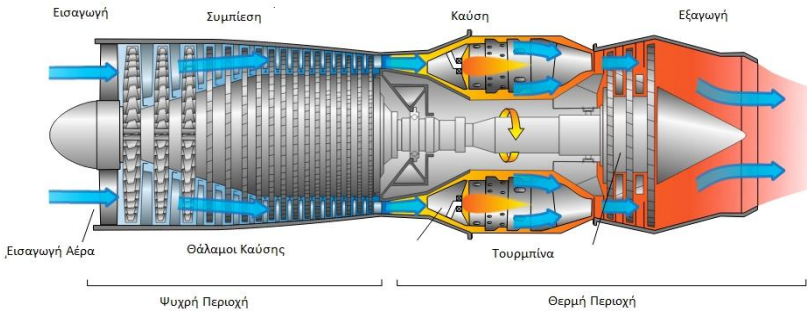
3.3 Ανάλογα με την χρήση θερμικών εναλλακτών ή επιπλέον θάλαμο καύσης.

- **Με προθέρμανση:** ένας εναλλάκτης τύπου αέρα-αέρα τοποθετημένος ανάμεσα στον συμπιεστή και στο θάλαμο καύσης, χρησιμοποιείται για να προθερμαίνει τον συμπιεσμένο αέρα που εισέρχεται στο θάλαμο καύσης.
- **Ενδιάμεσης ψύξης:** ένας εναλλάκτης συνήθως αέρα-νερό τοποθετημένος ανάμεσα σε δυο συμπιεστές χρησιμοποιείται για να ψύξει τον συμπιεσμένο αέρα προτού αυτός ξανά συμπιεστεί.
- **Με αναθέρμανση:** στους βιομηχανικούς κινητήρες υπάρχει πριν τον τελευταίο στρόβιλο ένας επιπλέον θάλαμος καύσης που ανεβάζει τη θερμοκρασία.

3.4 Ανάλογα με την εφαρμογή

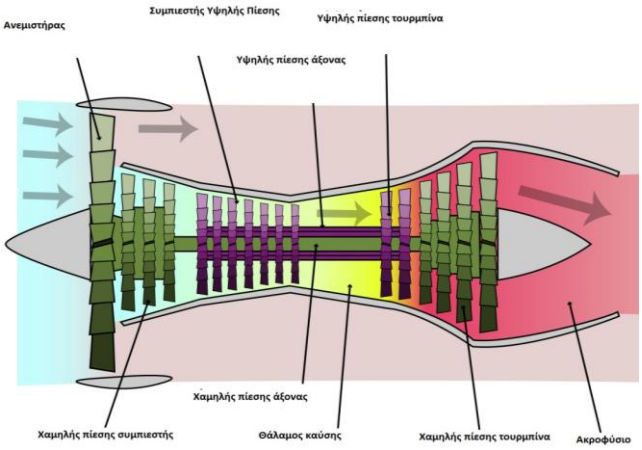
3.4.1 Αεροπορικοί

- **Στροβιλοαντιδραστήρες (Turbojet):** χρησιμοποιούνται σε μαχητικά αεροσκάφη υπερηχητικών ταχυτήτων (πρώτης και δεύτερης γενιάς). Οι κινητήρες αυτοί έχουν την δυνατότητα να επιταχύνουν μικρές ποσότητες αέρα και για να επιταχύνουν τα καυσαέρια χρησιμοποιούν μετακαυστήρες. Τα σημαντικότερα μειονεκτήματα τους είναι η χαμηλή απόδοση που έχουν σε μίκρες ταχύτητες λόγω του οτι χρειάζονται υψηλή πίεση στον συμπιεστή για να λειτουργήσουν για αυτόν τον λόγο περιορίζεται σε μεγάλο βαθμό η χρήση τους. Τέλος, έχουν αυξημέμη κατανάλωση καυσιμο η οποία γίνεται ακόμη μεγαλύτερη εξαιτίας της μετάκαυσης και εχουν υψηλά επίπεδα θορύβου.



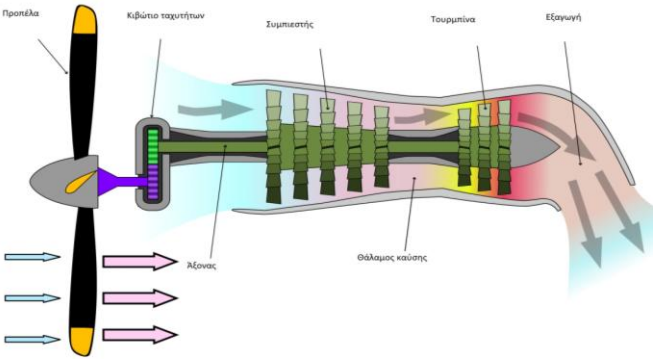
Εικόνα 3.6: Διάγραμμα ροής στροβιλοαντιδραστήρα

- **Στροβιλοανεμηστήρες (Turbofan):** Το χαρακτηριστικό στοιχείο που έχουν αυτοί οι κινητήρες είναι οτι ο αέρας χωρίζεται σε δύο ρεύματα. Το πρώτο ρεύμα παρακάμπτει τον αντιδραστήρα και εκτονώνεται στην ατμόσφαιρα (bypass). Ενώ, το κύριο ρεύμα (δεύτερο) εισέρχεται κανονίκα στον συμπιεστή και στην συνέχεια στον θάλαμο καύσης. Οι κινητήρες αυτοί χρησιμοποιούνται στα σύγχρονα αεροπλάνα υψηλών υποηχητικών ταχυτήτων γιατι έχουν αυξημένη παραγωγή ισχύος ανά μονάδα βάρους, ικανοποιητική ειδική κατανάλωση καυσίμου και ταυτόχρονα χαμηλό θόρυβο κατά την απογείωση και την προσγείωση.



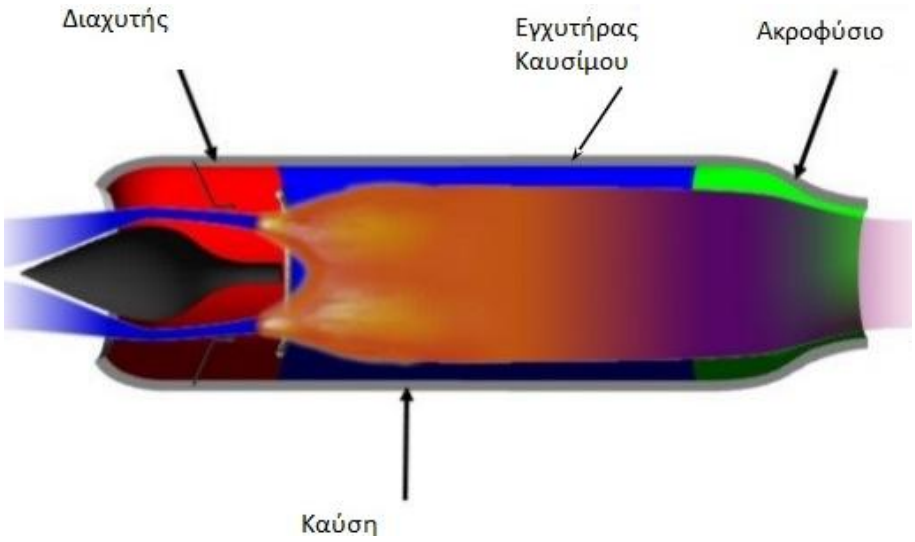
Εικόνα 3.7: Διάγραμμα ροής στροβιλοανεμηστήρα (high bypass).

- **Ελικοστρόβιλοι (Turboprop):** ο κινητήρας αυτός παράγει ελάχιστη ώση από τα καυσαέρια που δημιουργεί, η κύρια ώση προέρχεται από μια εξωτερική έλικα. Στην περίπτωση αυτού του κινητήρα είναι απαραίτητη η χρήση κιβωτιόυ ταχυτήτων για τη σωστή μεταφορά της ισχύς. Άρα, το σύστημα αυτό έχει αυξημένο βάρος και όγκο λόγο του μειωτήρα. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε πολιτικά αεροσκάφοι μικρών αποστάσεων και έχουν χαμηλή κατανάλωση καυσίμο σε υψόμετρο μέχρι 7 χιλιόμετρα.



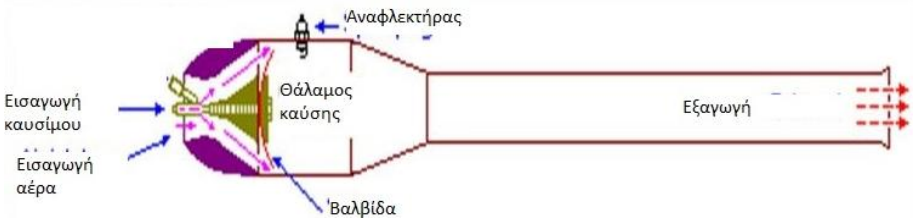
Εικόνα 3.8: Διάγραμμα ροής ελικοστρόβιλου.

- **Αθόδυλος (ramjet):** είναι ο πιο απλός κινητήρας γιατί δεν έχει κινητά μέρη, ενώ ενδύκνειται μόνο για πολύ μεγάλες ταχύτητες πτήσης (3000 Km/h). Αποτελείται από ψεκαστήρες καυσίμου και συγκρατητές φλόγας. Ο κινητήρας αυτός, παρά την απλή κατασκευή του δεν χρησιμοποιείται σε εμπορική κλίμακα. Διότι ένα αεροσκάφος δεν θα μπορούσε να είναι αυτόνομο κατά την εκκίνηση του λόγω του φαινομένου της ανακοπής (ram) δηλαδή είναι απαραίτητη η χρήση ενός δευτερεύων κινητήρα (π.χ στροβιλοαντιδραστήρα) ώστε να τον επιταχύνει σε ταχύτητες πτήσεις (2,5 M).



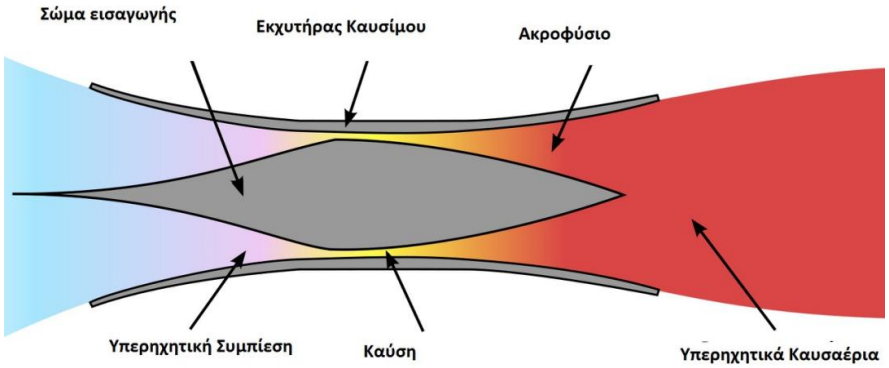
Εικόνα 3.9: Βασικά μέρη αθόδυλου.

- **Παλμικός αθόδυλος (Pulsejet):** είναι ένας κινητήρας του οποίου η καύση πραγματοποιείται με παλμούς. Ο κινητήρας αυτός μπορεί να κατασκευαστεί με λίγα ή με καθόλου κινούμενα μέρη και είναι ικανός να λειτουργεί στατικός. Οι παλμικοί κινητήρες είναι ελαφριάς κατασκευής αλλά έχουν χαμήλο βαθμό συμπίεσης και αυτό έχει ως συνέπεια την χαμηλή ειδική ώθηση.



Εικόνα 3.10: Βασικά μέρη παλμικού αθόδυλου.

- **Scramjet:** είναι ένας κινητήρας ramjet του οποίου διαρρέει αέρας με υπερηχητικές ταχύτητες. Ουσιαστικά, είναι κινητήρες ramjet που έχουν μετασχηματιστεί ώστε να αντέχουν ταχύτητες έως και 8 M.

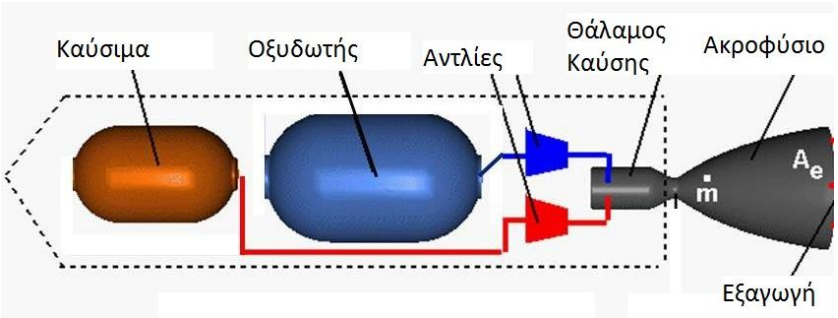


Εικόνα 3.11: Διάγραμμα ροής scramjet (βασικά μέρη).

- **Propfan:** οι κινητήρες αυτοί είναι συνδυασμός από δύο τύπους τον στροβιλοανεμηστήρα (turbofan) και τον ελικοστρόβιλο (turboprop). Διαθέτουν δυο προπέλες μικρής σχετικά διαμέτρου που περιστρέφονται αντίρροπα έξω απο το κέλυφος του κινητήρα. Οι προπέλες αυτές κινούνται μέσω στροβίλων και ειναι συνδεδεμένες με κιβώτιο ταχυτήτων. Σχεδιάστηκε με σκοπό να προσφέρει την ίδια ταχυτητα και απόδοση με τον στροβιλοανεμηστήρα αλλά και συνάμα την μειωμένη κατανάλωση καυσίμου ένος ελικοστρόβιλου.

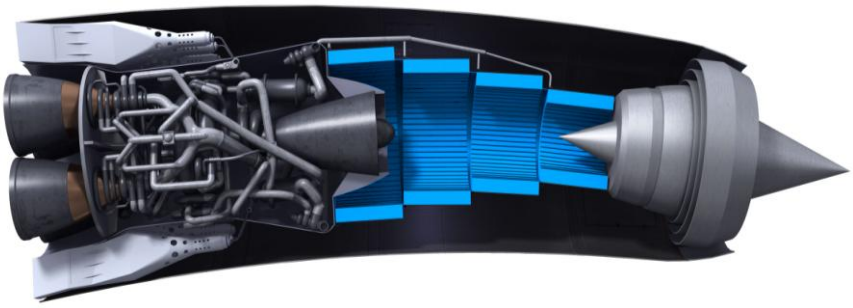
Εικόνα 3.12: Κινητήρας propfan της General Electric.

- **Πύραυλος (Rochet):** είναι ένας από τους λίγους κινητήρες που δεν απαιτούν εισαγωγή αέρα. Πιο αναλυτικά, ένα στερεό ή υγρό καύσιμο και ένα οξειδωτικό μέσο αντιδρούν στο θάλαμο καύσης και τα καυσαέρια της εκτόνωσης αποβάλλονται από το ακροφύσιο.



Εικόνα 3.13: Διαγραμματική αναπαράσταση πυραύλου.

- **Sabre:** ο κινητήρας αυτός είναι ακόμη σε πρώιμο στάδιο, έχει κατεσκευαστεί ύπο κλίμακα. Για την λειτουργία χρησιμοποιεί ατμοσφαιρικό αέρα ο οποίος καίγεται στον θάλαμο καύσης και στην συνέχεια προσδίδει θερμότητα για να υπερτροφοδοτήσει την μηχανή. Επίσης, η ίδια η μηχανή θα έχει την δυνατότητα να δημιουργεί υγρό οξυγόνο ψύχοντας τον αέρα από τους 1500 C στους -150 C σε εκατοστά του δευτερολέπτου, χωρίς να δημιουργεί πάγο.

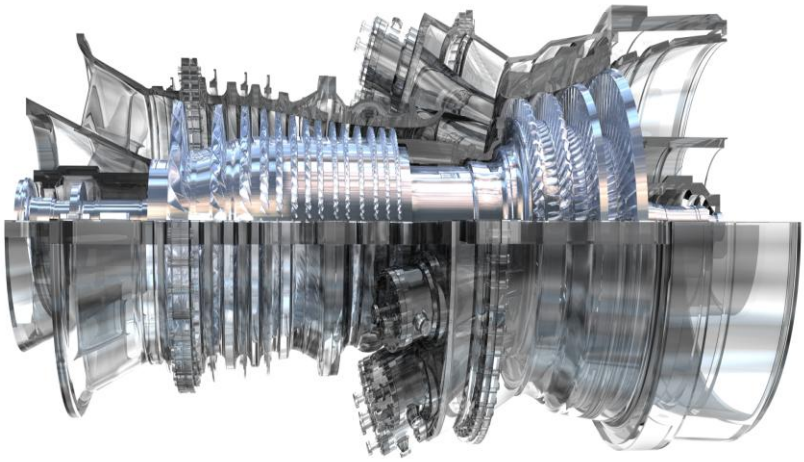


Εικόνα 3.14: Βασικά μέρη κινητήρα sabre.

3.4.2 Βιομηχανικοί.

- **Αξονοστροβιλοκινητήρες (industrial):** οι βιομηχανικού τύπου αεριοστρόβιλοι διαφέρουν στον σχεδιασμό από τους αεροπορικούς δηλαδή το πλαίσιο, τα ρουλεμάν και τα πτερύγια έχουν βαρύτερη κατασκευή. Τα μεγέθη τους κυμαίνονται απο μικρές ή μεγάλες φορητές μονάδες μέχρι και πολύπλακα συστήματα τα οποία μπορούν να ζυγίζουν εκατοντάδες τόνους. Όταν ένας αεριοστρόβιλος χρησιμοποείται αποκλειστικά και μόνο για να περιστρέψει έναν άξονα η θερμική απόδοση δεν ξεπερνάει το 30%. Για αυτόν τον λόγο πολλοί κινητήρες χρησιμοποιούν συνδυαστικούς κύκλους όπου η απορριπτόμενη

θερμότητα ανακτάται άπο μία γεννήτρια ατμού (boiler) η οποία τροφοδοτεί ένα συμβατικό στρόβιλο ατμού. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε ηλεκτροπαραγωγικές μονάδες, αντλητικά συστήματα, πλοία και τρένα.



Εικόνα 3.15: Αξονοστροβιλοκινητήρα SGT-750 (39.3 MW).

4 ΒΑΣΙΚΑ ΜΕΡΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

4.1 Εισαγωγή (inlet).

Ο αγωγός εισαγωγής του ατμοσφαιρικού αέρα πρέπει να παρέχει στον κινητήρα καθαρή και απεριόριστη ροή αέρα. Για να παραταθεί η ζωή του κινητήρα πρέπει να προβλεφθεί η είσοδος ξένων αντικειμένων κατά την εισαγωγή του αέρα και η διάβρωση.

4.2 Συμπιεστής (compressor).

Ο συμπιεστής είναι υπεύθυνος να παρέχει στον κινητήρα όσο αέρα χρειάζεται ώστε να λειτουργεί όσο πιο αποδοτικά γίνεται.

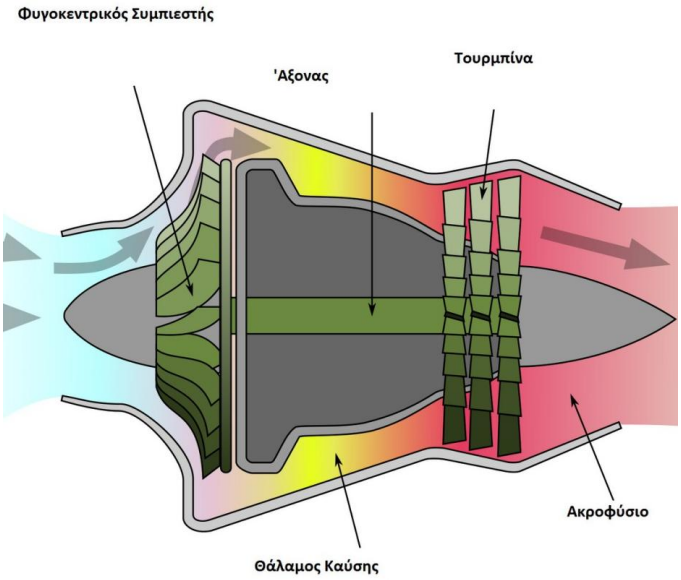
Καθοριστικό παράγοντα έχει ο σχεδιασμός του συμπιεστή γιατί έχει ουσιαστικό ρόλο στην ομαλή ροή του αέρα. Στην περίπτωση αστοχίας του σχεδιασμού θα υπάρξει αύξηση απωλειών ροής του αέρα λόγω τριβής και στροβιλισμών. Ένα ακόμα σημαντικό πρόβλημα είναι ότι η φυσική τάση του αέρα είναι να ρέει προς τη ζώνη χαμηλής πίεσης (π.χ από την βαθμίδα 3 προς τη βαθμίδα 2). Αν συνέβαινε αυτό, το αποτέλεσμα θα ήταν η δραματική πτώση της αποδοτικότητας του συμπιεστή, γιατί ενέργεια που προσδίδεται στον αέρα για να αυξηθεί η πίεσή του, θα χανόταν. Έτσι, για να αποφευχθεί αυτό το σοβαρό ζήτημα, τοποθετούνται ασφάλειες στη βάση από κάθε σειρά στατικών πτερυγίων για να μην υπάρξει διαρροή του αέρα.

Εικόνα 4.1: Ασφάλεια στατικών πτερυγίων.

Οι τύποι συμπιεστών που χρησιμοποιούνται στους αεριοστροβίλους είναι οι εξής:

- Φυγόκεντρης ροής
- Αξονικής ροής
- Συνδυασμός αυτών των δύο

Ο φυγοκεντρικός συμπιεστής ονομάζεται έτσι λόγω της διεύθυνσης που δίνει στον αέρα κατά την έξοδό του από τον συμπιεστή. Αποτελείται από μια ή δύο βαθμίδες και έχει φάσμα στροφών 20.000-40.000 rpm. Τα πλεονεκτήματά του είναι ότι αναπτύσσεται και κατασκευάζεται με σχετική ευκολία, είναι ανθεκτικός, ελαφρύς και φτηνός. Βέβαια, έχει ένα πολύ σημαντικό μειονέκτημα ότι δε μπορεί να επιτύχει μεγάλο βαθμό συμπίεσης.



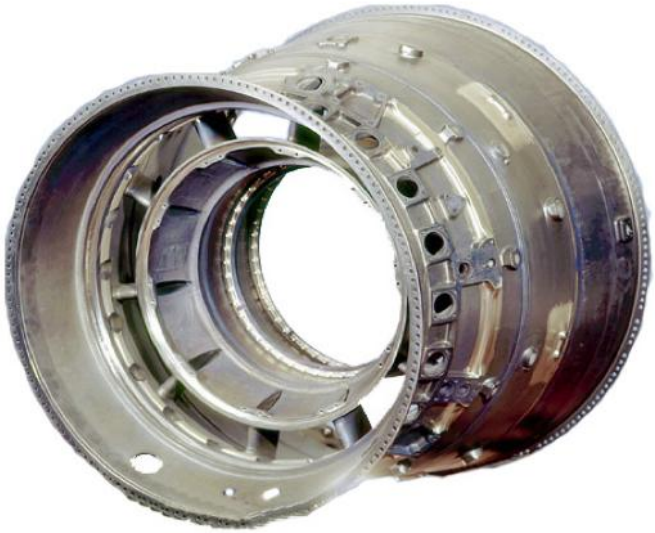
Εικόνα 4.2: Φυγοκεντρικός συμπιεστής.

Οι αξονικοί συμπιεστές είναι πολλαπλών επιπέδων και χρησιμοποιούν εναλλασσόμενες σειρές από περιστρεφόμενους ρότορες-λεπίδες και στατικά πτερύγια (vanes) για να επιταχύνουν τον αέρα μέχρι να αναπτυχθεί η κατάλληλη πίεση. Στους σύγχρονους αξονικούς συμπιεστές η κάθε βαθμίδα αυξάνει την πίεση του αέρα 30% και την θερμοκρασία περίπου κατά 30 ^{0}C. Επίσης, ο συμπιεστής μπορεί να χωρίζεται σε ομάδες βαθμίδων (spools) που να περιστρέφονται με την ίδια ταχύτητα. Το φάσμα των στροφών του κυμαίνονται από 10.000-30.000 rpm. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα που έχει είναι ότι παρ'

όλο τη μικρή μετωπική επιφάνεια συμπιέζει τεράστιες ποσότητες αέρα (μεγάλο βαθμό απόδοσης). Από την άλλη μεριά, έχει αρκετά μειονεκτήματα ως προς την πολυπλοκότητα της ανάπτυξης και της κατασκευής του (μεγάλο κόστος), επιρρεπής σε αστάθειες ροής και σε βλάβες.

4.3 Διαχυτής (diffuser)

Ο αέρας που εξέρχεται από τον συμπιεστή οδηγείται στα πτερύγια εξόδου τα οποία μετατρέπουν την ακτινική ροή του αέρα σε ευθεία γραμμή. Στην συνέχεια, ο αέρας εισέρχεται στον διαχύτη ο οποίος είναι ένας αποκλίνων αγωγός. Η κύρια λειτουργία του είναι να μετατρέπει το μεγαλύτερο μέρος της ταχύτητας του αέρα σε στατική πίεση και αυτό έχει ως αποτέλεσμα η χαμηλότερη ταχύτητα και η υψηλότερη στατική πίεση σε όλο τον κινητήρα να βρίσκεται κατά την έξοδο του διαχύτη και κατά την είσοδο του θαλάμου καύσης.



Εικόνα 4.3: Διαχυτής (diffuser)

Ο διαχύτης εκτός από την αεροδυναμική χρήση, παρέχει επιπλέον στον κινητήρα τα εξής:

- στήριξη του κινητήρα με την άτρακτο
- υποστήριξη για τα πίσω έδρανα κύλισης (ρουλεμάν) του συμπιεστή και τις φλάντζες
- πηγές συμπιεσμένου αέρα (bleed valves) οι οποίες χρησιμεύουν στον κλιματισμό και στο αντι-ψυκτικό σύστημα (χρήση σε αεροπορικούς κινητήρες)

- παρέχει την απαραίτητη πίεση λαδιού στα πίσω έδρανα κύλισης του συμπιεστή και στα μπροστά του στροβίλου
- τοποθέτηση ακροφυσίων καυσίμου

4.4 Θάλαμος καύσης (combustion chamber).

Ο θάλαμος καύσης εκτελεί το δύσκολο έργο της καύσης μεγάλων ποσοτήτων καυσίμου μαζί με μεγάλο όγκο αέρα που τροφοδοτείται από τον συμπιεστή. Βέβαια, πρέπει να κάνει την καύση με τέτοιο τρόπο ώστε η θερμότητα που θα ελευθερωθεί, να έχει ως αποτέλεσμα την διαστολή του αέρα και την επιτάχυνσή του για να δώσει μια ομαλή ροή από καυσαέρια στην τουρμπίνα.

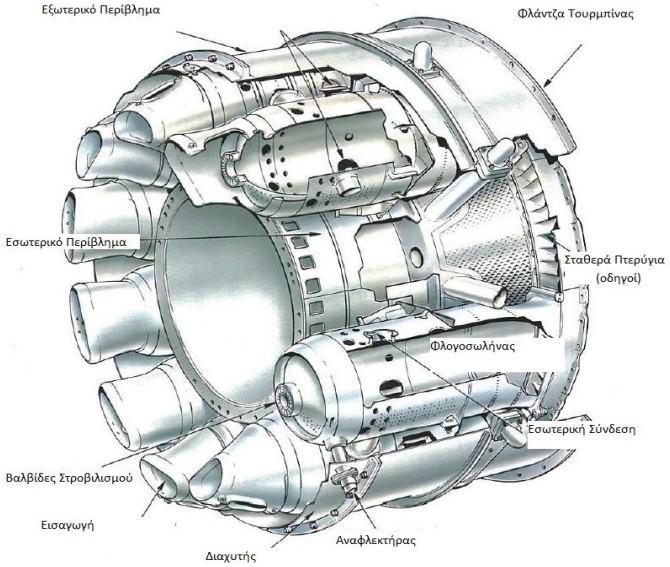
Ο θάλαμος καύσης στους αεριοστροβίλους λειτουργεί υπό συνθήκες πολύ φτωχού μίγματος, δηλαδή υπάρχει περισσότερη ποσότητα αέρα από την απαιτούμενη. Έτσι, για να πραγματοποιηθεί και να διατηρηθεί η ανάφλεξη θα πρέπει ο λόγος αέρα/καυσίμου να κυμαίνεται από 8:1 έως 30:1 (τοπικά). Επίσης, δεν γίνεται να επιτευχθεί καύση όταν η ταχύτητα με την οποία εισέρχεται ο αέρας στον θάλαμο καύσης απ΄΄ο τον συμπιεστή κυμαίννεται στα 150-200 m/s. Άρα, είναν απαραίτητο να μειωθεί η ταχύτητα του αέρα στις τάξεις των 25 m/s γιατί στην περίπτωση που γινόταν καύση με μεγαλύτερη ταχύτητα θα υπήρχαν τεράστιες απώλειες πίεσης στον θάλαμο καύσης.

Υπάρχουν τρεις τύποι θαλάμων καύσης:

- Πολλαπλός σωληνωτός (can type).
- Δακτυλιοειδής (annular type).
- Σωληνο-Δακτυλιοειδής (can annular).

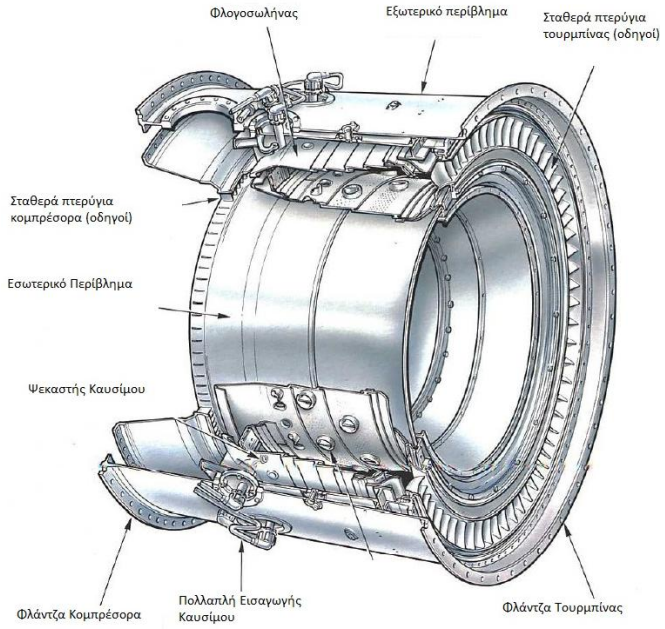
Χρησιμοποιείται κυρίως μαζί με φυγοκεντρικούς συμπιεστές ή με παλαιότερους αξονικούς. Το κύριο πλεονέκτημα τους, είναι η ευκολότερη συντήρηση και επιθεώρηση. Βέβαια, έχουν και κάποια βασικά μειονεκτήματα όπως ότι είναι μεγαλύτεροι σε διάμετρο από τους επόμενους με αποτέλεσμα να είναι βαρύτεροι και σε περίπτωση μη ορθής λειτουργίας ενός φλογοσωλήνα

υπάρχει περίπτωση υπερθέρμανσης και ανομοιόμορφης ροής καυσαέριων προς στον στρόβιλο.



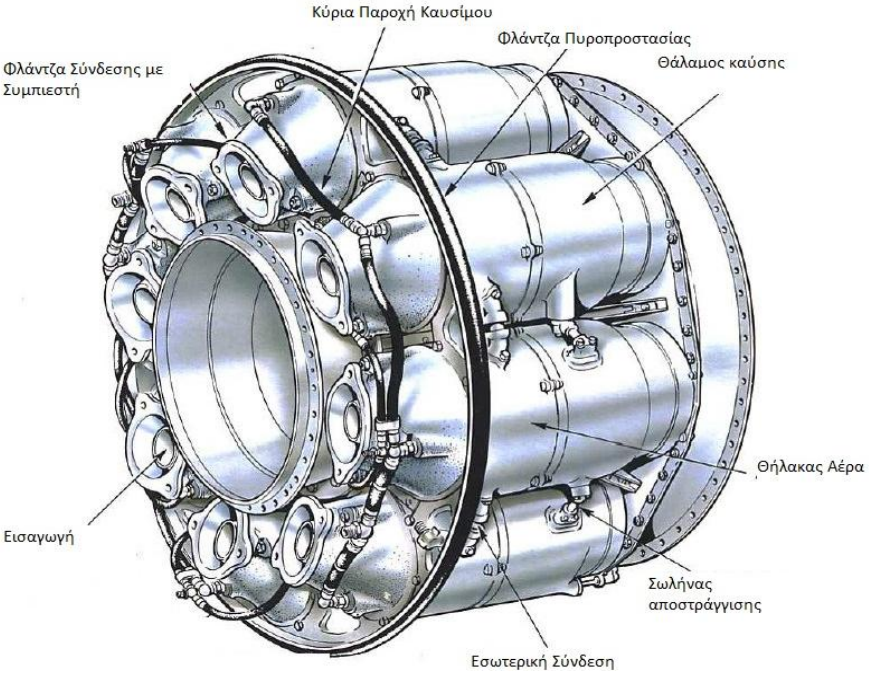
Εικόνα 4.4: Τα βασικά μέρη του πολλαπλού σωληνωτού.

Ο τύπος αυτός χρησιμοποιείται από τους σύγχρονους αεροπορικούς κινητήρες. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα του είναι η μικρότερη πτώση πίεσης λόγω του σχεδιασμού του, το μειωμένο βάρος έως και 25% και καλύτερη κατανομή της πίεσης και ταχύτερη μετάδοση της φλόγας. Από την αλλή μεριά, υπάρχουν και μειονεκτήματα όπως δυσκολότερη και πιο δαπανηρή ανάπτυξη, περισσότερα μηχανικά προβλήματα και δυσκολότερη διατήρηση σταθερής θερμοκρασίας στην έξοδο του θαλάμου καύσης .



Εικόνα 4.5: Τα βασικά μέρη του δακτυλιοειδούς

Ο τύπος αυτός χρησιμοποιείται σε κινητήρες με μεγάλη ισχύ και μετριούς λόγους πίεσης. Είναι συνδυασμός του πολλαπλού και του δακτυλιοειδούς θαλάμου καύσης. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα του είναι οτι υπάρχει βέλτιστη εκμετάλευση του χώρου, καλύτερος έλεγχος της φλόγας και πιο στιβαρή κατασκευή. Τα μειονεκτήματα του είναι το αυξημένο βάρος και η μη ορθή διάδοση της φλόγας.



Εικόνα 4.6: Τα βασικά μέρη του σωληνο-δακτυλιοειδούς

Οι μέγιστες θερμοκρασίες είναι ανάμεσα στους 850° C με 1700° C άρα τα υλικά που πρέπει να χρησιμοποιηθούνε πρέπει να παρουσιάζουν υψηλή αντοχή σε θερμικές καταπονήσεις, στην διάβρωση που δημιουργείται λόγω των προιόντων της καύσης και στους κραδασμούς. Στις περισσότερες περιπτώσεις για την κατασκευή του θαλάμου καύσης χρησιμοποιούνται κράματα χάλυβα με νικέλιο και χρώμιο, ενώ το περίβλήμα κατασκευάζεται από ελαφρύ χάλυβα.

4.5 Τουρμπίνα (turbine).

Η τουρμπίνα έχει ως κύριο έργο να παρέχει τη δύναμη ώστε να οδηγήσει τον συμπιεστή, μετατρέποντας την ενέργεια των καυσαερίων σε μηχανική ισχύ. Κάθε τουρμπίνα αποτελείται πρώτα από στατικά πτερύγια και μετά ακολουθούν τα περιστρεφόμενα (αντίστροφα από τον συμπιεστή). Αυτό συμβαίνει διότι στον

συμπιεστή η ενέργεια προσδίδεται στον αέρα από τα περιστρεφόμενα πτερύγια, ενώ στην τουρμπίνα τα στατικά πτερύγια αυξάνουν την ταχύτητα και τα περιστρεφόμενα εξάγουν την ενέργεια.

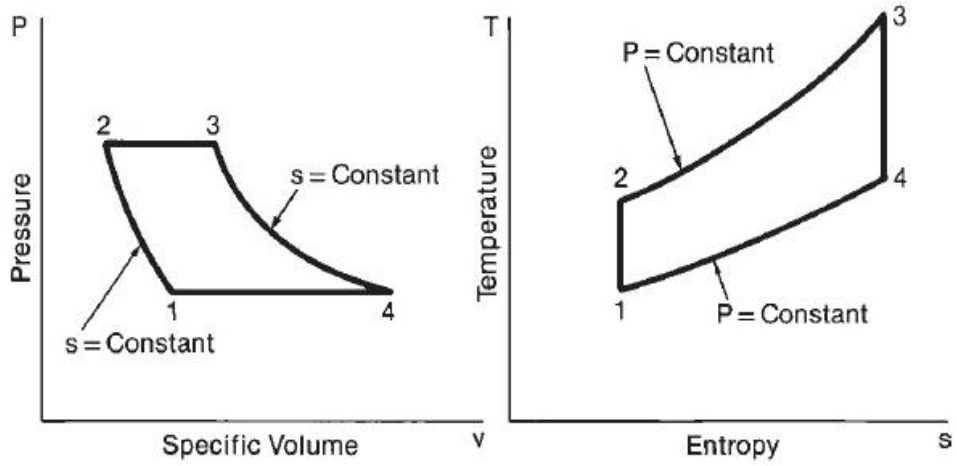
Πιο αναλυτικά, ένα μόνο πτερύγιο του στροβίλου έχει παραγόμενη ισχύ μέχρι και 300 hp. Ακόμη, σε κάθε πτερύγιο στη βάση του και στην κορυφή του υπάρχει επιπλέον υλικό το οποίο σχηματίζει ένα δακτύλιο σταθεροποίησης (shrounds). Τέλος, τα πτερύγια του στροβίλου έχουν μεγαλύτερη κυρτότητα και πάχος από τα αντίστοιχα του συμπιεστή, αλλά και αρκετά μικρότερο μήκος.

5 ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ BRAYTON

5.1 Απλός ιδανικός κύκλος Brayton.

Ο κύκλος Brayton δημιουργήθηκε από τον George Brayton το 1870 για να εφαρμόστει σε έναν πετρελαιοκινητάρα δικίας του κατασκευής. Πλέον ο κύκλος αυτός χρησιμοποιείται σε περιστροφικές μηχανές (αεριοστρόβιλους) όπου οι διεργασίες είναι συμπίεση και εκτόνωση.

Στην πιο απλή του μορφή ο κύκλος παίρνει την μορφή που φαίνεται στα παρακάτω διαγράμματα.



Εικόνα 5.1: Διαγράμματα P-V και T-S.

Ο κύκλος αποτελείται από τέσσερις αντιστρεπτές διεργασίες:

1) Ισεντροπική συμπίεση (1-2)
2) Ισοβαρής προσθήκη θερμότητας (2-3)
3) Ισεντροπική εκτόνωση (3-4)
4) Ισοβαρής απόρριψη θερμότητας (4-1)

<u>Η απόδοση του απλού κύκλου θα είναι:</u>

Έργο συμπιεστή:

$Wc_{12} = h_1 - h_2 = C_p\ (T_1 - T_2)$

Προσδιδόμενη θερμότητα:

$Q_{in23} = h_3 - h_2 = C_p\ (T_3 - T_2)$

Έργο εκτόνωσης:

$W_{E34} = h_3 - h4 = C_p\ (T_3 - T_4)$

Απορριπτόμενη θερμότητα:

$Q_{out41} = h_4 - h_1 = C_p\ (T_4 - T_1)$

<u>ΑΡΑ</u>

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q_{in}} \Rightarrow \eta_{th} = 1 - \frac{Q_{out}}{Q_{in}} \Rightarrow$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{C_p(T_4 - T_1)}{C_p(T_3 - T_2)} \Rightarrow => \eta_{th} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} \qquad (1)$$

Επειδή οι διεργασίες 1-2 και 3-4 είναι ισεντροπικές τοτε $P_2 = P_3$ και $P_1 = P_4$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

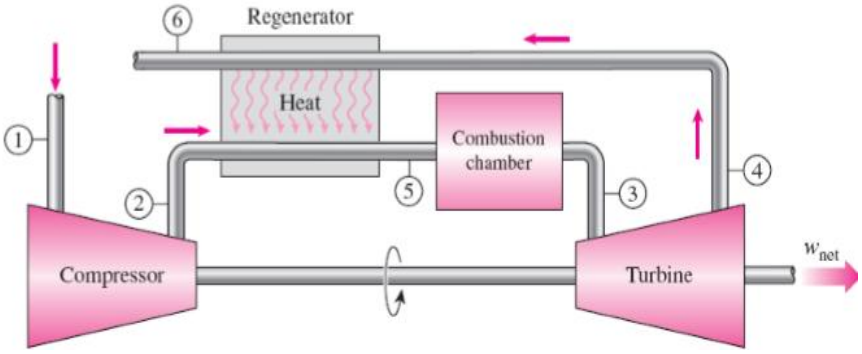
$$(1) \Rightarrow \eta_{th} = 1 - \frac{T_1\left(\frac{T_4}{T_1} - 1\right)}{T_2\left(\frac{T_3}{T_2} - 1\right)} \Rightarrow \eta_t = 1 - \left(1 - \frac{T_1}{T_2}\right) \Rightarrow \boldsymbol{\eta_{th} = 1 - \frac{1}{\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}}$$

Η τελική σχέση δείχνει ότι η θερμική απόδοση του ιδανικού κύκλου Brayton εξαρτάται μόνο από το λόγο πιέσων και από τον λόγο των ειδικών θερμοτήτων (ισχύει και στους πραγματικούς αεριοστρόβιλους).

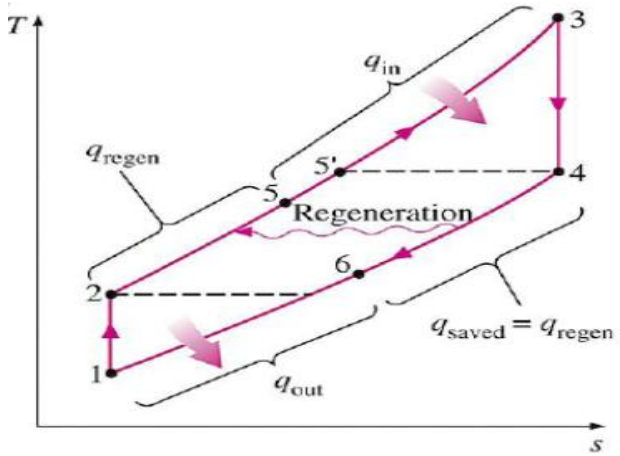
5.2 Κύκλος Brayton με εναλλάκτη θερμότητας.

Ο πιο εύκολος τρόπος να αυξηθεί η θερμική απόδοση του απλού κύκλου Brayton είναι με την χρήση εναλλάκτη θερμότητας. Πιο αναλυτίκα, με την τοποθετήση ενός αναγεννητής (εναλλάκτης θερμότητας αντιρροής) μετά τον συμπιεστή, εκμεταλευόμενος την θερμότητα των καυσαερίων θερμαίνει περαιτέρω το εργαζόμενο μέσω (αέρας) πριν εισέλθει στον θάλαμο καύσης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αυξήθει περίπου κατα 10% τη θερμική απόδοση

διότι η ενέργεια των καυσαερίων που θα απορριπτόταν στο περιβάλλον θερμαίνει μέσω του εναλλάκτη τον αέρα πριν τον θάλαμο καύσης. Άρα, με την μέθοδο αυτη μειώνται αισθητά οι απαιτήσεις καυσίμου για το ίδιο έργο εξόδου. Το μόνο μειονέκτημα της μεθόδου αυτης, είναι οτι δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε αεριοστροβίλους με υψηλό λόγο συμπίεσης γιατί η θερμοκρασία εξόδου από τους στροβίλους είναι μικρότερη από εκείνη πριν το εργαζόμενο μέσω εισέλθει στον θάλαμο καύσης.



Εικόνα 5.2: Διάταξη κύκλου Brayton με εναλλάκτη θερμότητας.



Εικόνα 5.3: Διάγραμμα T-s με αναγέννηση.

<u>Η απόδοση του κύκλου θα είναι:</u>

Έργο συμπιεστή:

$$Wc_{12} = h_1 - h_2 = C_p\ (T_1 - T_2) = -\ C_p\, T_2\, (1 - \frac{T_1}{T_2})$$

Προσδιδόμενη θερμότητα:

$$Q_{in53} = h_3 - h_5 = C_p\,(T_3 - T_5') = C_p\,(T_3 - T_4) = C_p\, T_3 \left(\frac{P_4}{P_3}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} =$$

$= C_p T_3 \left(1 - \frac{T_1}{T_2}\right)$

(Επειδή $T_5' = T_4$ και $\frac{T_1}{T_2} = \frac{T_4}{T_3}$)

Έργο εκτόνωσης:

$W_{E34} = h_3 - h_4 = C_p (T_3 - T_4) = C_p T_3 (1 - \frac{T_4}{T_3})$

Γνωρίζοντας από τις εξισώσεις των ιδανικών αερίων οτι ισχύει:

$$\left(\frac{P_4}{P_3}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \frac{T_4}{T_3} \Rightarrow \frac{T_1}{T_2} = \frac{T_4}{T_3}$$

<u>ΑΡΑ</u>

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q_{in}} \Rightarrow \eta_{th} = \frac{C_p T_3\left(1 - \frac{T_4}{T_3}\right) - C_p T_2\left(1 - \frac{T_1}{T_2}\right)}{C_p T_3\left(1 - \frac{T_1}{T_2}\right)} \Rightarrow$$

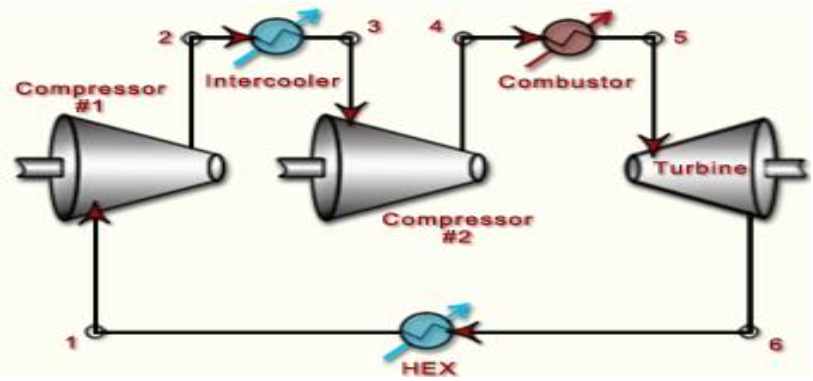
$$\eta_{th} = \frac{C_p\left(1 - \frac{T_1}{T_2}\right)(T_3 - T_2)}{C_p T_3\left(1 - \frac{T_1}{T_2}\right)} \Rightarrow \eta_{th} = \frac{T_3 - T_2}{T_3} \Rightarrow \eta_{th} = 1 - \frac{T_2}{T_3} \Rightarrow$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{\frac{T_2}{T_1}}{\frac{T_3}{T_1}} \Rightarrow \boldsymbol{\eta_{th} = 1 - \frac{\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}{\frac{T_3}{T_1}}}$$

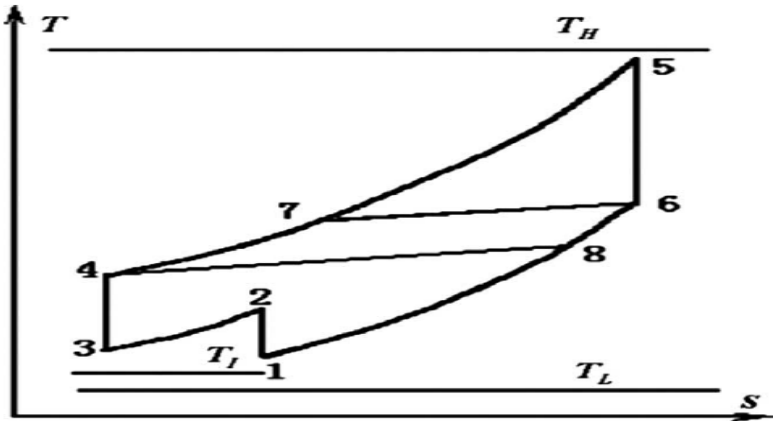
5.3 Κύκλος Brayton με ενδιάμεση ψύξη.

Μία ακόμη τροποποίηση που μπορεί να δεχθεί ο απλός κύκλος Brayton είναι η χρήση intercooler. Δηλαδή, ψύξη του αέρα ανάμεσα σε δύο στάδια συμπίεσης εκμεταλεύοντας την ιδιότητα ιδανίκων αερίων να συμπιέζονται πιο εύκολα όταν έχουν χαμηλότερη θερμοκρασία (μείωση εσωτερικής ενέργειας).

Με την τροποποίηση αυτή δεν επιτυγχάνουμε αύξηση της θερμικής απόδοσης αλλά μείωση. Η ουσιαστική εισφορά του intercooler είναι να μείωσει το έργο συμπίεσης περίπου κατά 15% για έναν ιδανίκο intercooler και να αυξήση το ειδικό έργο, κρατώντας σταθερό το έργο που παράγει η τουρμπίνα σε σχέση πάντα με τον απλό κύκλο. Αυτό συμβαίνει διότι η ενδιάμεση ψύξη μειώνει την μέση θερμοκρασία στην οποία γίνεται προσθήκη θερμότητας.



Εικόνα 5.4: Διάταξη κύκλου Brayton με intercooler



Εικόνα 5.5: Διάγραμμα T-s με ενδιάμεση ψύξη.

<u>Η απόδοση του κύκλου θα είναι:</u>

Έργο συμπιεστή:

$Wc_{12} = h_1 - h_2 = C_p\ (T_1 - T_2)$

$Wc_{34} = h_3 - h_4 = C_p\ (T_3 - T_4)$

Προσδιδόμενη θερμότητα:

$Q_{in45} = h_5 - h_4 = C_p\ (T_5 - T_4)$

Έργο εκτόνωσης:

$W_{E56} = h_5 - h_6 = C_p\ (T_5 - T_6)$

ΑΡΑ

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q_{in}} \Rightarrow \eta_{th} = \frac{Wc_{12} + Wc_{34} + W_{E56}}{Q_{in45}} \Rightarrow$$

$$\eta_{th} = \frac{C_p\left(T_1 - T_2\right) + C_p\left(T_3 - T_4\right) + C_p\left(T_5 - T_6\right)}{C_p\left(T_5 - T_4\right)} \Rightarrow$$

$$\eta_{th} = \frac{C_p\left(T_1 - T_2 + T_3 - T_4 + T_5 - T_6\right)}{C_p\left(T_5 - T_4\right)} \Rightarrow$$

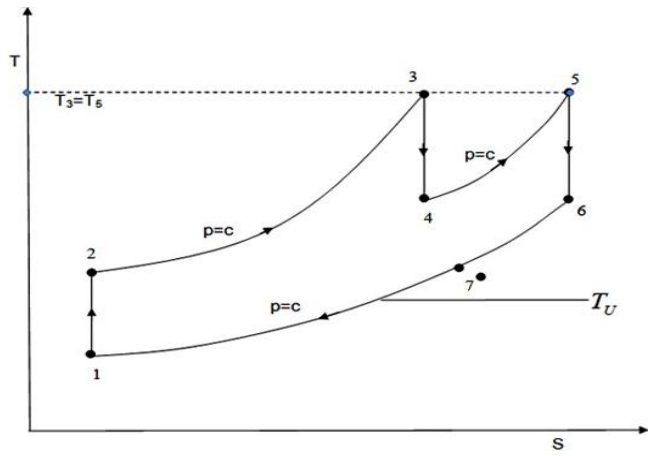
$$\boldsymbol{\eta_{th}} = \frac{\left(\mathbf{T_1} - \mathbf{T_2} + \mathbf{T_3} - \mathbf{T_4} + \mathbf{T_5} - \mathbf{T_6}\right)}{\left(\mathbf{T_5} - \mathbf{T_4}\right)}$$

Αντίστοιχα με την χρήση των ενθαλπίων γίνεται:

$$\boldsymbol{\eta_{th}} = \frac{\left(\mathbf{h_1} - \mathbf{h_2} + \mathbf{h_3} - \mathbf{h_4} + \mathbf{h_5} - \mathbf{h_6}\right)}{\left(\mathbf{h_5} - \mathbf{h_4}\right)}$$

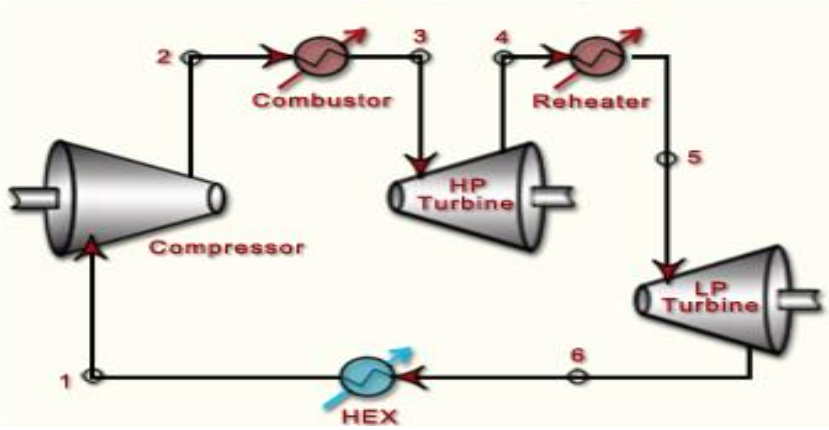
5.4 Κύκλος Brayton με αναθέρμανση.

Μία ακόμη τροποποίηση που μπορεί να λάβει μέρος σε έναν απλό κύκλο Brayton είναι η διεργασία της αναθέρμανσης. Η αναθέρμανση πραγματοποιείται ανάμεσα σε δυο στρόβιλους όσον αφορά τους βιομηχανικούς ή μετά τους στροβίλους δηλαδή στον αγωγό εξαγωγής των καυσαερίων, για τους αεροπορικούς.



Εικόνα 5.6: Διάγραμμα T-s με αναθέρμανση.

Από το διάγραμμα T-s διαπιστώνεται ότι η διαδικασία της εκτόνωσης χωρίζεται σε δύο μέρη στο 3-4 και στο 5-6. Έτσι αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αυξάνεται το έργο εκτόνωσης (W_E) σε σχέση με τον απλό κύκλο Brayton. Επιπρόσθετα, παρατηρείται αύξηση της θερμότητας στο τμήμα 4-5 αλλά όχι αύξηση του θερμίκου συντελεστή. Αυτό συμβαίνει, επειδή η προσθήκη του τμήματος 4-5 σύνεπαγει στην αύξηση της απορριπτόμενης θερμότητας η οποία δημιουργεί πτώση του θερμικού συντελέστη της τάξης του 8%, με άλλα λόγια αυξάνει την μέση θερμοκρασία που γίνεται απόρριψη θερμότητας.



Εικόνα 5.7: Διάταξη κύκλου Brayton με αναθέρμανση.

<u>Η απόδοση του κύκλου θα είναι:</u>

Έργο συμπιεστή:

$Wc_{12} = h_1 - h_2 = C_p\ (T_1 - T_2)$

Προσδιδόμενη θερμότητα:

$Q_{in} = h_3 - h_2 + h_5 - h_4 = C_p\ (T_3 - T_2) + C_p\ (T_5 - T_4) = C_p\,(T_3 - T_2 + T_5 - T_4)$

Έργο εκτόνωσης:

$W_E = h_3 - h_4 + h_5 - h_6 = C_p\ (T_3 - T_4) + C_p\ (T_5 - T_6) = C_p\,(T_3 - T_4 + T_5 - T_6)$

<u>ΑΡΑ</u>

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q_{in}} \Rightarrow \eta_{th} = \frac{C_p(T_1 - T_2) + C_p(T_3 - T_4 + T_5 - T_6)}{C_p\ (T_3 - T_2 + T_5 - T_4)} \Rightarrow$$

$$\eta_{th} = \frac{C_p(T_1 - T_2 + T_3 - T_4 + T_5 - T_6)}{C_p(T_3 - T_2 + T_5 - T_4)} \Rightarrow$$

$$\boldsymbol{\eta_{th} = \frac{(T_1 - T_2 + T_3 - T_4 + T_5 - T_6)}{(T_3 - T_2 + T_5 - T_4)}}$$

Αντίστοιχα με την χρήση των ενθαλπίων γίνεται:

$$\boldsymbol{\eta_{th}} = \frac{\left(\mathbf{h_1} - \mathbf{h_2} + \mathbf{h_3} - \mathbf{h_4} + \mathbf{h_5} - \mathbf{h_6}\right)}{\left(\mathbf{h_3} - \mathbf{h_2} + \mathbf{h_5} - \mathbf{h_4}\right)}$$

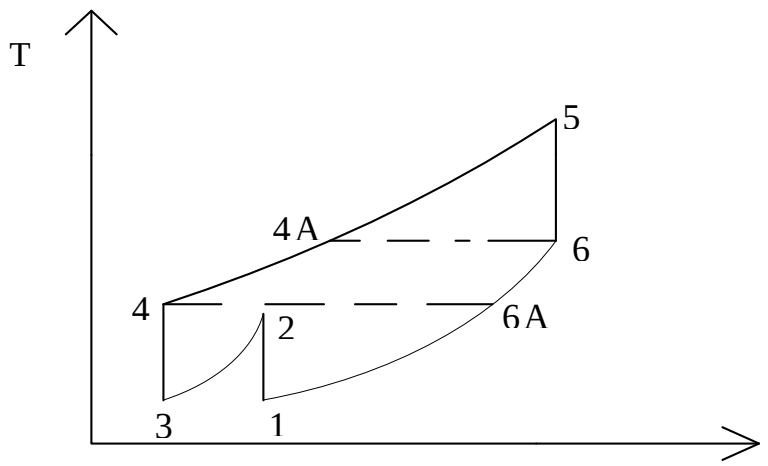
6 ΣΥΝΔΙΑΣΤΙΚΟΙ ΚΥΚΛΟΙ

6.1 Κυκλος Brayton με ενδιάμεση ψύξη και εναλλάκτη θερμότητας.

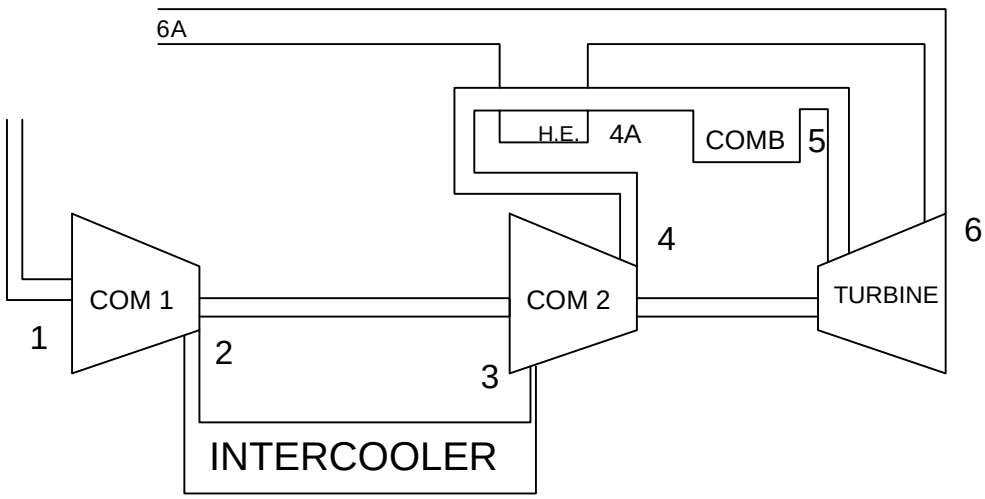
Ο συνδυασμός ενδιάμεσης ψύξης (intercooler) και εναλλάκτη θερμότητας (regenerative) σ΄ έναν απλό κύκλο Brayton έχει ως αποτέλεσμα την εκμετέλευση των πλεοκτενημάτων των δύο αυτών κύκλων και ταυτόχρονα να αντισταθμίζει τα μειονεκτήματα του καθενός ξεχωριστά. Πιο αναλυτικά, επιτυγχάνεται αύξηση του θερμικού συντελεστή λόγο της μείωσης της απαιτούμενης θερμότητας και του έργου συμπίεσης.

Το βασικό μειονέκτημα αυτού του συνδυαστικού κύκλου είναι η πολυπλοκότητα της κατασκευής λόγο της τοποθέτησης δύο εναλλακτών θερμότητας, έναν με νερό/αέρα (intercooler) και έναν με αέρα/αέρα (heat exchanger), τα οποία αναιβάζουν το κόστος κατασκευής και αυξάνουν τον όγκο του αεριοστροβίλου.

Ο κύκλος αυτός χρησιμοποιείται στην πρόωση πλοίων και σε εργαστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος, δεν εφαρμόζεται στην πρόωση αεροσκαφών παρ΄ ολου που τα τελευταία χρόνια γίνεται προσπάθεια να γίνει χρήση σε αεριοσκάφη με την τοποθέτηση υψηλής τεχνολογίας εναλλακτών θερμότητας.



Εικόνα 6.1: Διάγραμμα T-s με ενδιάμεση ψύξη και εναλλάκτη θερμότητας.



Εικόνα 6.2: Διάταξη κύκλου Brayton με ενδιάμεση ψύξη και εναλλάκτη θερμότητας.

<u>Η απόδοση του κύκλου θα είναι:</u> επειδή υποθέτουμε οτι είναι ιδανικός ο προθερμαντήρας ισχύει,

$T_{4A} = T_6$ και $T_4 = T_{6A}$ και $T_1 = T_3$

Έργο συμπιεστή:

$Wc_{12} = h_1 - h_2 = C_p\ (T_1 - T_2)$

$Wc_{34} = h_3 - h_4 = C_p\ (T_3 - T_4)$

Προσδιδόμενη θερμότητα:

$Q_{in4A5} = h_5 - h_{4A} = C_p\,(T_5 - T_{4A}) = C_p\,(T_5 - T_6)$

Έργο εκτόνωσης:

$W_{E56} = h_5 - h_6 = C_p\ (T_5 - T_6)$

<u>ΑΡΑ</u>

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q_{in}} \Rightarrow \eta_{th} = \frac{Wc_{12} + Wc_{34} + W_{E56}}{Q_{in4A5}} \Rightarrow$$

$$\eta_{th} = \frac{C_p(T_1 - T_2)\ + C_p(T_3 - T_4)\ + C_p\,(T_5 - T_6)}{C_p(T_5 - T_6)} \Rightarrow$$

$$\eta_{th} = \frac{C_p(T_1 - T_2 + T_3 - T_4 + T_5 - T_6)}{C_p(T_5 - T_6)} \Rightarrow \eta_{th} = \frac{T_1 - T_2 + T_3 - T_4 + T_5 - T_6}{T_5 - T_6} \Rightarrow$$

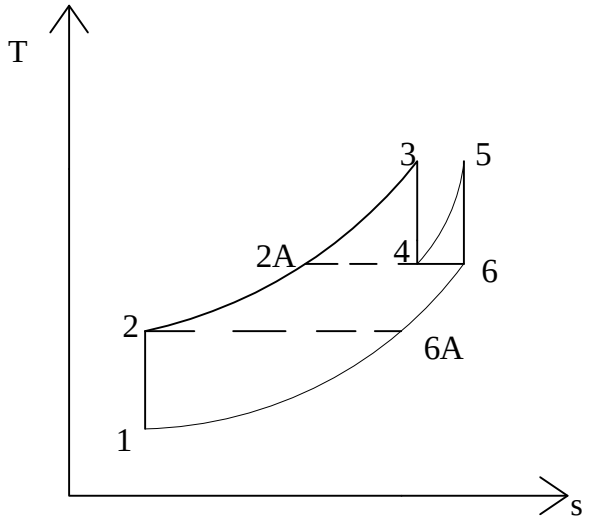
$$\boldsymbol{\eta_{th} = \frac{(2T_1 - T_2 - T_4 + T_5 - T_6)}{(T_5 - T_6)}}$$

Αντίστοιχα με την χρήση των ενθαλπίων γίνεται:

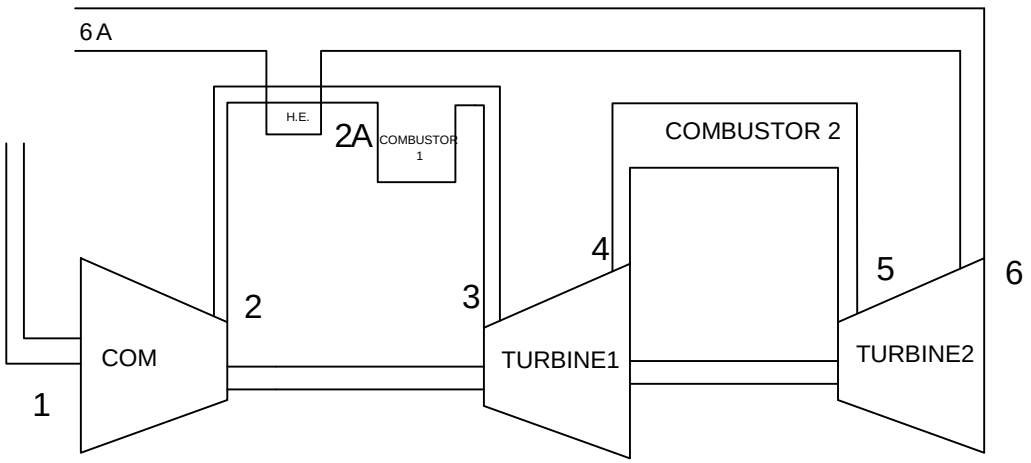
$$\boldsymbol{\eta_{th} = \frac{(2h_1 - h_2 - h_4 + h_5 - h_6)}{(h_5 - h_6)}}$$

6.2 Κυκλος Brayton με εναλλάκτη θερμότητας και αναθερμαντήρα.

Όπως διαπιστώθηκε σε προηγούμενη παράγραφο με την χρήση αναθερμαντήρα προκαλείται μείωση του θερμικού συντελεστή για αυτόν τον λόγο είναι απαραίτητη η χρήση εναλλάκτη θερμότητας για να αντισταθμίζει την μείωση αυτήν.



Εικόνα 6.3: Διάγραμμα T-s με εναλλάκτη θερμότητας και αναθέρμανση



Εικόνα 6.4: Διάταξη κύκλου Brayton με εναλλάκτη θερμότητας και αναθέρμανση

<u>Η απόδοση του κύκλου θα είναι:</u>

Έργο συμπιεστή:

$Wc_{12} = h_1 - h_2 = C_p\ (T_1 - T_2)$

Προσδιδόμενη θερμότητα:

$Q_{\text{ινολ}} = h_3 - h_{2A} + h_5 - h_4 = C_p\ (T_3 - T_{2A}) + C_p\ (T_5 - T_4) =$

$C_p\ (T_3 - T_6) + C_p\ (T_5 - T_4)$ (Επειδή $T_{2A} = T_6$)

Έργο εκτόνωσης:

$W_{Εολ} = h_3 - h_4 + h_5 - h_6 = C_p\ (T_3 - T_4) + C_p\ (T_5 - T_6) = C_p\,(T_3 - T_4 + T_5 - T_6)$

ΑΡΑ

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q_{in}} \Rightarrow \eta_{th} = \frac{Wc_{12} + W_{Eολ}}{Q_{in2A3}} \Rightarrow$$

$$\eta_{th} = \frac{C_p(T_1 - T_2)\ + C_p(T_3 - T_4 + T_5 - T_6)}{C_p\,(T_3 - T_6)\ + C_p\,(T_5 - T_4)} \Rightarrow \eta_{th} = \frac{C_p\ \ (T_1 - T_2 + T_3 - T_4 + T_5 - T_6)}{C_p\ \ (T_3 - T_6 + T_5 - T_4)} \Rightarrow$$

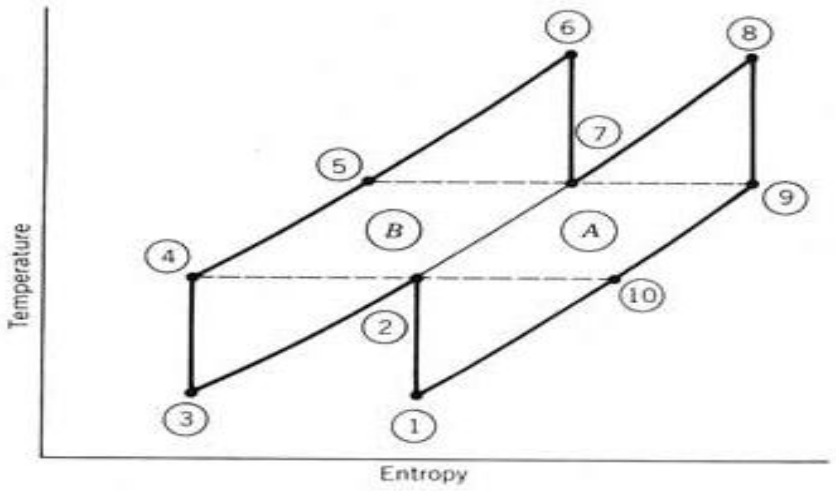
$$\boldsymbol{\eta_{th}} = \frac{\left(\mathbf{T_1 - T_2 + T_3 - T_4 + T_5 - T_6}\right)}{\left(\mathbf{T_3 - T_6 + T_5 - T_4}\right)}$$

Αντίστοιχα με την χρήση των ενθαλπίων γίνεται:

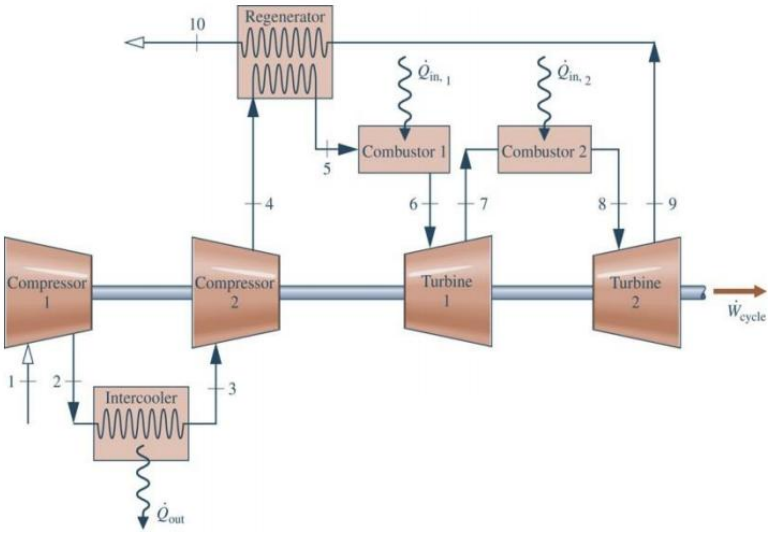
$$\boldsymbol{\eta_{th}} = \frac{\left(\mathbf{h_1 - h_2 + h_3 - h_4 + h_5 - h_6}\right)}{\left(\mathbf{h_3 - h_6 + h_5 - h_4}\right)}$$

6.3 Κυκλος Brayton με ενδιάμεση ψύξη, εναλλάκτη θερμότητας και αναθερμαντήρα.

Με την χρήση ενδιάμεσης ψύξης (intercooler) και αναθέρμανσης (reheat) ο αέρας εξέρχεται από τον συμπιεστή με χαμηλότερη θερμοκρασία και τα καυσαέρια με χαμηλότερη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της αποτελεσματικότητας της αναγέννησης λόγο της μεγαλύτερης θερμοκρασιακής διαφοράς. Όπως διαπιστώθηκε και στις προηγούμενες παραγράφους η χρήση ενδιάμεσης ψύξης (intercooler) και αναθέρμανσης (reheat) έχει ως συνέπεια να αυξάνεται το ωφέλιμο έργο του αεριοστροβίλου αλλά να μειώνεται δραματικά η θεμική απόδοση. Για αυτο τον λόγο, η χρήση προθερμαντήρα είναι απαραίτη σε συστήματα με ενδιάμεση ψύξη και αναθέρμανση.



Εικόνα 6.5: Διάγραμμα T-s κύκλου Brayton με ενδιάμεση ψύξη, εναλλάκτη θερμότητας και αναθερμαντήρα



Εικόνα 6.6: Διάταξη κύκλου Brayton με ενδιάμεση ψύξη, εναλλάκτη θερμότητας και αναθερμαντήρα

<u>Η απόδοση του κύκλου θα είναι:</u>

Επειδή υποθέτουμε οτι είναι ιδανικός ο intercooler, εναλλάκτη και αναθερμαντήρα ισχύει οτι

($T_1 = T_3$ και $T_2 = T_4$) , ($T_5 = T_7$) , ($T_6 = T_8$ και $T_7 = T_9$)

Έργο συμπιεστή:

$Wc_{12} = h_1 - h_2 = C_p\ (T_1 - T_2)$

$Wc_{34} = h_3 - h_4 = C_p\ (T_3 - T_4)$

$Wc_{o\lambda} = 2C_p\ (T_1 - T_2)$

Προσδιδόμενη θερμότητα:

$Q_{ino\lambda} = h_6 - h_5 + h_8 - h_7 = C_p\ (T_6 - T_5) + C_p\ (T_8 - T_7) = C_p\ (T_6 - 2T_5 + T_8)$

Έργο εκτόνωσης:

$W_{E o\lambda} = h_6 - h_7 + h_8 - h_9 = C_p\ (T_6 - T_7) + C_p\ (T_8 - T_9) = C_p\,(T_6 - T_7 + T_8 - T_9)$

$= 2C_p\,(T_6 - T_7)$

<u>ΑΡΑ</u>

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q_{in}} \Rightarrow \eta_{th} = \frac{Wc_{12} + Wc34 + W_{E o\lambda}}{Q_{ino\lambda}} \Rightarrow$$

$$\eta_{th} = \frac{2C_p\ (T_1 - T_2)\ +\ 2C_p(T_6 - T_7)}{C_p\,(T_6 -\ 2T_5 + T_8)} \Rightarrow \eta_{th} = \frac{2C_p\ \ (T_1 - T_2 + T_6 - T_7)}{C_p\,(T_6 -\ 2T_5 + T_8)} \Rightarrow$$

$$\boldsymbol{\eta_{th} = \frac{2\left(T_1 -\ T_2 +\ T_6 - T_7\right)}{\left(T_6 -\ 2T_5 +\ T_8\right)}}$$

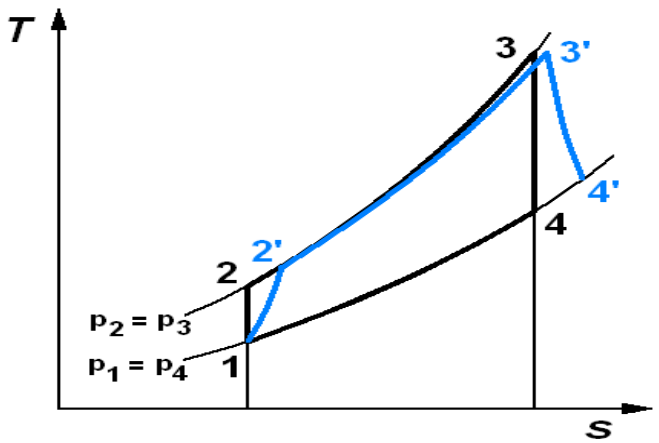
Αντίστοιχα με την χρήση των ενθαλπίων γίνεται:

$$\boldsymbol{\eta_{th} = \frac{2\left(h_1 - h_2 +\ h_6 -\ h_7\right)}{\left(h_6 + 2h_5 -\ h_8\right)}}$$

7 ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ BRYATON

Ο πραγματικός κύκλος λειτουργίας ενός αεριοστροβίλου διαφέρει από τον ιδανικό κύκλο Brayton σε αρκετά σημεία. Πιο αναλυτικά, η πτώση πίεσης κατά την διάρκεια των διεργασίων προσθήκης και απόρριψης θερμότητας είναι ένα φαινόμενο το οποίο δεν λαμβάνεται υπόψιν στον ιδανικό κύκλο. Επίσης, το πραγματικό έργο εισόδου του συμπιεστή είναι μεγαλύτερο, ενώ το πραγματικό έργο εξόδου του στροβίλου είναι μικρότερο. Επιπρόσθετα, τα φαινόμενα τριβής οδηγούν σε απώλειες πίεσης στους θαλάμους καύσης από τους οποίους εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό η απόδοση του αεριοστροβίλου.

Ακόμη, στην περίπτωση συνδυαστικού κύκλου Brayton οι εναλλάκτες θερμότητας (heat exchangers) και τα ψυγεία (intercoolers) δεν έχουν βαθμό απόδοσης 100% όπως συνέβαινε στους ιδανίκους κύκλους. Τέλος, οι ταχύτητες ροής είναι αρκετά υψηλές με αποτέλεσμα η μεταβολή της κινητικής ενέργειας μεταξύ εισόδου και εξόδου από κάθε τμήμα να μην είναι αμελητέα.

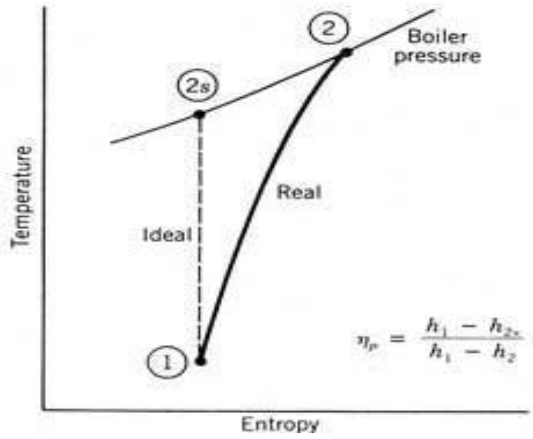


Εικόνα 7.1: Διάγραμμα T-s ιδανικού και πραγματικού κύκλου Brayton

7.1 Απόδοση ισεντροπικής συμπίεσης .

Στον ιδανικό κύκλο Brayton θεωρούταν ότι η συμπίεση και η εκτόνωση πραγματοποιόντουσαν ισεντροπικά δηλαδή χωρίς απώλειες. Βέβαια, στην πραγματικότητα υπάρχουν απώλειες που οφείλονται σε φαινόμενα τριβής και για αυτόν τον λόγο πρέπει να καταναλώνεται περισσότερο έργο συμπίεσης.

Έτσι, ορίζεται ο συντελεστής απόδοσης ισεντροπίκης συμπίεσης που είναι ο λόγος του ιδανικού προς το πραγματικό έργο συμπίεσης.

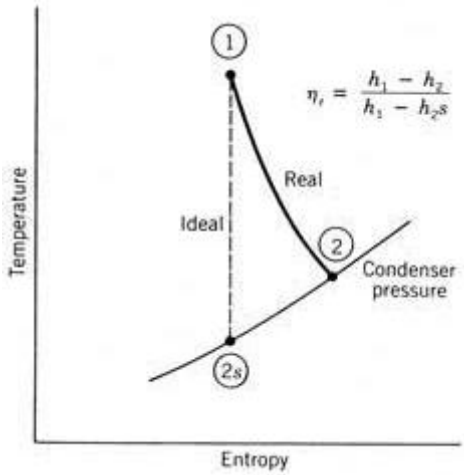


Εικόνα 7.2: Διάγραμμα T-s ιδανικής και πραγματικής συμπίεσης

$$\eta_{isc} = \frac{\iota\delta\alpha\nu\iota\kappa\acute{o}\, W_c}{\pi\rho\alpha\gamma\mu\alpha\tau\iota\kappa\acute{o}\, W_c} = \frac{h_{o1} - h_{o2s}}{h_{o1} - h_{o2}} = \frac{C_p\left(T_{o1} - T_{o2s}\right)}{C_p\left(T_{o1} - T_{o2}\right)} \frac{\left(T_{o1} - T_{o2s}\right)}{\left(T_{o1} - T_{o2}\right)}$$

$$\Rightarrow \boldsymbol{\eta_{isc}} = \frac{\left(\frac{\mathbf{P_{02}}}{\mathbf{P_{01}}}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - \mathbf{1}}{\frac{\mathbf{h_{o2s}}}{\mathbf{h_{o1}}} - \mathbf{1}}$$

7.2 Απόδοση ισεντροπικής εκτόνωσης.



Εικόνα 7.3: Διάγραμμα T-s ιδανικής και πραγματικής εκτόνωσης

$$\eta_{isc} = \frac{\pi\rho\alpha\gamma\mu\alpha\tau\iota\kappa\acute{o}\ W_E}{\iota\delta\alpha\nu\iota\kappa\acute{o}\ W_E} = \frac{-(h_{o1}-h_{o2})}{-(h_{o1}-h_{o2s})} = \frac{C_p(T_{o1}-T_{o2s})}{C_p(T_{o1}-T_{o2})} - \frac{(T_{o1}-T_{o2s})}{(T_{o1}-T_{o2})}$$

$$\Rightarrow \boldsymbol{\eta_{isc}} = \frac{\mathbf{1} - \frac{\mathbf{T_{o2s}}}{\mathbf{T_{o1}}}}{\mathbf{1} - \left(\frac{\mathbf{P_{02s}}}{\mathbf{P_{01}}}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}$$

7.3 Απόδοση καύσης.

Η καύση στην πραγματικότητα δεν είναι ποτέ πλήρης ούτε και τέλεια. Στα καυσαέρια (προιόντα της καυσης) υπάρχει πάντα άκαυστο καύσιμο και αυτό έχει ως συνέπεια η αύξηση της θερμοκρασίας να είναι μικρότερη από αυτήν που θα αναπτυσόταν αν καιγόταν πλήρως το καύσιμο. Η μέγιστη απόδοση καύσης που μπορεί να επιτευχθεί είναι 99%.

7.4 Απώλειες πίιεσης.

Σε όλα τα τμήματα του στροβιλοκινητήρα υπάρχουν απώλειες ροής αλλά τις σωληνώσεις και τις συνδέσεις είναι ελάχιστες. Πιο συγκεκριμένα στην εισαγωγή και στην εξαγωγή τις περίπου 10mbar. Επίσης, κατά την διαδικασία της αναρρόφησης από τον συμπιεστή δημιουργείται στραγγαλισμός που έχει ως συνέπεια πτώση πίεσης περίπου 0,01 bar, ενώ η αντίστοιχη πτώση πίεσης στον στρόβιλο είναι ακόμη μικρότερη. Στον θάλαμο καύσης η πτώση πίεσης είναι λίγο μεγαλύτερη της τάξης των 0,02 bar. Όσον αφορά τις πτώσεις πίεσης του ψύκτη και του εναλλάκτη θερμότητας είναι 0,01 bar και 0,02 bar αντίστοιχα.

7.5 Μηχανικές απώλειες.

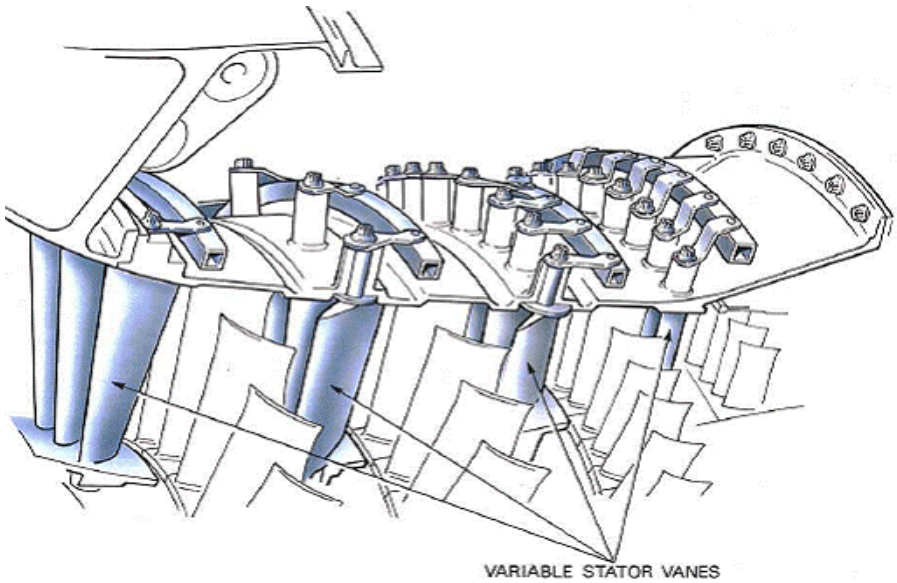
Κάθε αεριοστρόβιλος χρησιμοποιεί βοηθητίκα εξαρτήματα όπως αντλίες καυσίμου και λιπαντικού τα οποία παίρνουν ισχύ από τον στρόβιλο. Η ισχύς αυτή αφαιρείται από την ωφέλιμη παραγόμενη ισχύ του κινητήρα. Επίσης, στους βιομηχανικούς αεριοστροβίλους η ισχύς χάνεται με την μορφή θερμότητας κατά

την μετάδοση της κίνησης από τον στρόβιλο στο φορτίο μέσω του συστήματος μετάδοσης. Σε περίπτωση που υπάρχει στρόβιλος ισχύος, η ισχύς για τα βοηθητικά εξαρτήματα θα παραλαμβάνεται από τον στρόβιλο που είναι μηχανικά συνδεδεμένος με τον συμπιεστή.

8 ΣΥΜΠΙΕΣΤΗΣ

8.1 Χαρακτηριστικά αξονικού συμπιεστή.

Όπως έχει γίνει ήδη αναφορά, ένας αξονικός συμπιεστής αποτελείται από διαδοχικές βαθμίδες περιστρεφόμενων πτερυγίων και ανάμεσα τους υπάρχουν σειρές από σταθερά πτερύγια (vanes) τα οποία είναι συνήθως τοποθετημένα στην βάση και στο περίβλημα του κινητήρα. Συνήθως, στους αεριοστροβίλους μπροστά από την πρώτη βαθμίδα συμπίεσης υπάρχουν τα IGVs (inlet guide vanes) τα οποία μαζί με τα GVs (guide vanes-σταθερά πτερύγια) χρησιμεύουν ώστε να αλλάζουν την γωνία με την οποία εισέρχεται ο αέρας στις πρώτες βαθμίδες. Αυτό επιτυγχάνεται όταν τα πτερύγια αυτά μπορούν να αλλάξουν την κλίση τους, σ' αυτήν την περίπτωση ονομάζονται VIGVs (variable inlet guide vanes) και VGVs (variable guide vanes).



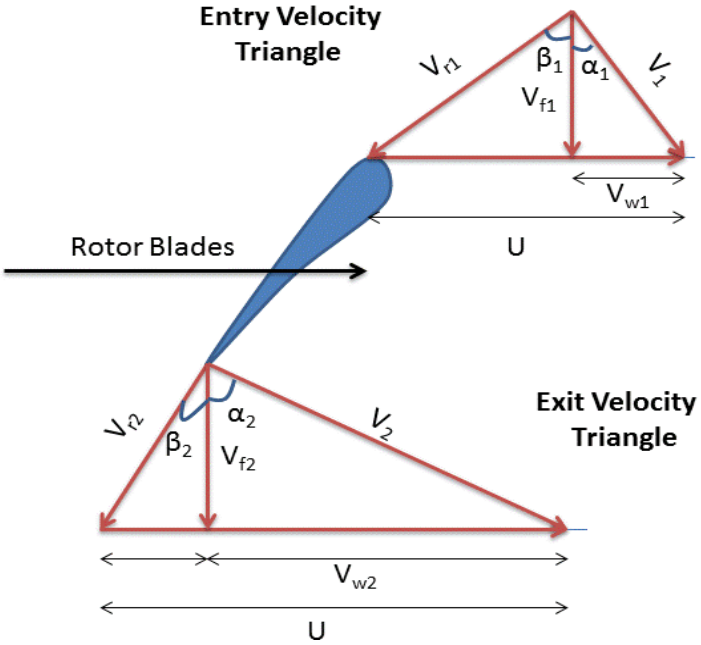
Εικόνα 8.1: VIGVs και VGVs

Πιο αναλυτικά, όταν τα VIGVs και VGVs τείνουν προς τον άξονα τους αυξάνουν την ταχύτητα με την οποία εισέρχεται ο αέρας στις βαθμίδες του συμπιεστή, άρα ο συμπιεστής έχει περισσότερο έργο να εκτελέσει. Όσο αφορά το κατεσκευαστικό μέρος η απόσταση των περιστρεφόμενων πτερυγίων μιας βαθμίδας συμπιεστή πρέπει να είναι περίπου το 70% του μήκους της χορδής του πτερυγίου. Στην περίπτωση που η απόσταση είναι μεγαλύτερη θα έχει ως αποτέλεσμα, ο αέρας να περνάει χωρίς να συμπιέζεται ενώ στην περίπτωση που

η απόσταση είναι μικρότερη ο αέρας δεν θα μπορεί να περάσει. Ο ίδιος περιορισμός απόστασης ισχύει και για τα σταθερά πτερύγια GVs.

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των αξονικών συμπιεστών είναι οτι παρουσιάζουν επιβραδυνόμενη ροή και στις κινητές αλλά και στις σταθερές σειρές πτερυγίων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να υποβάλλει κάποιους περιορισμούς ως προς μέγιστο λόγο πίεσης που μπορεί να επιτύχει μια βαθμίδα μόνη της (1:6). Επίσης, οποιαδήποτε ανωμαλία στην ομοιόμορφη ροή του αέρα μέσα στον συμπιεστή μπορεί να έχει δραματικά αποτελέσματα στην απόδοση του. Ένα άλλο χαρακτηριστικό των συμπιεστών αυτών είναι η μείωση της διατομής εξόδου σε σχέση με αυτήν της εισόδου. Αυτό συμβαίνει διότι το εργαζόμενο μέσο (αέρας) κατά την διάρκεια της διαδικασίας της συμπίεσης αυξάνεται η πυκνότητα του λόγω της αύξησης της πίεσης κρατώντας όμως την ταχύτητα του σταθερή.

8.2 Τρίγωνα ταχυτήτων συμπιεστή.



Εικόνα 8.2: Απεικονιση ταχυτήτων εισόδου και εξόδου

Η συγκεκριμένη βαθμίδα συμπιεστή αποκλίνει από τον άξονα άρα η ταχύτητα περιστροφής εισόδου είναι μικρότερη αό αυτήν της εξόδου γιατί $\omega R_1 < \omega R_2$ $(U_1 < U_2)$.

Στο παραπάνω σχήμα διακρίνεται η ταχύτητα V_{r1} όπου είναι σχετίκη ταχύτητα και η V_1 που είναι η απόλυτη ταχύτητα με την οποία εισέρχεται αέρας

από την προηγούμενη βαθμίδα. Στην συνέχεια, η ταχύτητα V_2 είναι η απόλυτη από την οποία εξέρχεται ο αέρας από την περιστρεφόμενη σείρα πτερυγίων και εισέρχεται στν σταθέρη σειρά. Σημαντικό είναι να τονιστεί για τις ταχύτητες V_2 και V_1 θα ισχύει οτι $V_2>V_1$ λόγο του οτι προσδίδεται ενέργεια εξαιτίας της περιστροφης των πτερυγίων. Επιπρόσθετα, οι γωνίες α_1 και α_2 που βρίσκονται μεταξύ των απόλυτων ταχυτήτων V_2 ,V_1 και της αξονικής διεύθυνσης ονομάζονται απόλυτες, ενώ οι γωνίες β_1 και β_2 οι οποίες βρίσκονται μεταξύ των σχετικών ταχυτήτων και της αξονικής διεύθυνσης ονομάζονται σχετικές.

Σχεδιασμός για την μέγιστη V_{r1}: για να επιτευχθεί αύξηση της V_{r1} δηλαδή της ταχύτητας εισόδου στα πτερύγια, αρκεί να μειωθεί η επιτάχυνση του αέρα πριν εισέλθει στα περιστρεφόμενα πτερύγια. Αυτό βέβαια μπορεί να έχει καταστροφικές συνέπειες στην μηχανική αντοχή των πτερυγίων λόγω των μεγάλων τάσεων που αναπτύσονται. Έτσι, κατά την σχεδίαση ενός συμπιεστή αυτό που προσπαθείται να επιτευχθεί είναι η μέγιστη στατική πίεση σε μία βαθμίδα θυσιάζοντας όμως την ταυτόχρονη άυξηση των απώλειων ολικής πίεσης και την μείωση της απόδοσης.

Σχεδιασμός για την μέγιστη V_{r2}: αντίθετα με την V_{r1} που σχεδιάζεται ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή τιμής της, η V_{r2} σχεδιάζεται ώστε να επιτευχθεί η ελάχιστη δυνατή τιμής της. Αυτό οφείλεται στο οτι με την αύξηση της τιμής V_{r2} αυξάνεται ταυτόχρονα η πίεση στον λαιμό του πτερυγίου. Για να αποφεχθεί αυτό πρέπει να μειωθεί στο ελάχιστο η ταχύτητα V_{r2} δηλαδή η διατομή εξόδου A_2 να αυξάνεται σχέσημε την A_1.

8.3 Παράγοντες που επηρεάζουν τον λόγο πίεσης βαθμίδας συμπιεστή

8.3.1 Ταχύτητα περιστροφής.

Η ταχύτητα περιστροφής έχει σημαντικό ρόλο ως προς τον λόγο πίεσης βαθμίδας του συμπιεστή, αλλά έχει ακόμη μεγαλύτερο αντίκτυπο στις τάσεις που αναπτύσονται στα πτερύγια και στους δίσκους που τα συγκρατούν λόγω της φυγόκεντρου δύναμης που ασκείται. Για αυτόν τον λόγο δεν είναι εφικτό να αυξάνεται απεριόριστα η ταχύτητα περιστροφής διότι θα ξεπεραστούν τα όρια αντοχής των υλικών των συμπιεστών που είναι συνήθως από τιτάνιο.

Σύμφωνα με μελέτες το σημείο που δέχεται την μεγαλύτερη φόρτιση είναι το πόδι του πτερυγίου, στο οποίο εμφανίζεται η μεγαλύτερη εφελκυστική τάση λόγω φυγόκεντρης δύναμης. Αυτή η μέγιστη εφελκυστική τάση μπορεί εύκολα να υπολογιστεί από τον τύπο (σταθερή διατομή πτερυγίου):

$$\sigma_{\max} = \frac{(2\pi N)^2}{60}\rho_b \frac{\left(r_T{}^2 - r_B{}^2\right)}{2} = \frac{(2\pi N)^2}{60}\rho_b \frac{A}{2}$$

$$\sigma_{\max} = \frac{\rho_b U_T{}^2}{2}\left[1 - \left(\frac{r_H{}^2}{r_B{}^2}\right)\right]$$

- ρ_b είναι η πυκνότητα του υλικού του πτερυγίου
- R είναι η ακτίνα του πτερυγίου
- A η διατομή του πτερυγιού
- H και T είναι οι δείκτες για το πόδι και την κεφαλή αντίστοιχα
- U_T είναι η ταχύτητα κέφαλης

Από τον προηγούμενο τύπο συμπεραίνεται ότι για μια συγκεκριμένη διατομή ενός συμπιεστή θα υπάρχει πάντα περιορισμός ως προς την ταχύτητα περιστροφής N (rpm). Επίσης παρατηρείται οτι για μια ορισμέμη ταχύτητα U_T, οι τάσεις θα αυξάνονται όταν ο λόγος r_H/r_T μειώνεται με αλλά λόγια όσο μεγαλώνει το μήκος των πτερυγίων τόσο θα αυξάνονται και οι τιμές των τάσεων.

8.3.2 Αξονική ταχύτητα.

Με την αύξηση της αξονικής ταχύτητας επιτυγχάνεται αύξηση της παροχής μάζας και ταυτόχρονη αύξηση του λόγου πίεσης, αλλά προφανώς υπάρχουν αεροδυναμική περιορισμοί όπως οτι ο αριθμοός Mach δεν πρέπει να ξεπερνάει κάποιες τιμές (>1). Αν συμβεί κάτι τέτοιο τότε θα υπάρχουυν τεράστιες απώλειες πίεσης και τυτόχρονη πτώση του λόγου απόδοσης. Βέβαια, με την πάραδο των χρόνων και με την αλματώδης ανάπτυξη της τεχνολογίας έχει επιτευχθεί κατασκευή βαθμίδων (περιστρεφόμενες) που οι τιμές του αριθμού Mach φτάνει το 1,6.

8.3.3 Στροφή ροής.

Ο τελευταίος παράγοντας που επηρεάζει το λόγο πίεσης βαθμίδας είναι η αύξηση της στροφής ροής η οποία έχει και αυτή αεροδυναμικούς περιορισμούς. Ουσιαστικά για να επιτευχθεί αύξηση της στροφής ροής χρειάζεται να αυξηθεί η διαφορά των γωνιών β_2-β_1 (εικόνα 50), βέβαια όσο αυξάνεται η στροφή ροής τόσο αυξάνεται η επιβράδυνση του αέρα.Για αυτόν λόγο υπάροχυν κάποιες οριακές τιμές που μπορεί να πάρει η επιβράδυνση έτσι ώστε να μην δημιουργούνται προβλήματα στην λειτουργια του κινητήρα όπως αισθητή μείωση του βαθμού απόδοσης,φαινόμενα ασταθούς λειτουργίας και αποκόλληση των οριακών στρωμάτων. Το κριτήριο το οποίο τηρείται ώστε να λειτουργεί χώρις προβλήματα μια σειρά από πτερύγια είναι το “κριτίριο de Heller” όπου τονίζει οτι η επιβράδυνση σε μια βαθμίδα αξονικού συμπιεστή δεν πρέπει να οδηγεί σε ταχύτητα εξόδου μικρότερη του 70% της ταχύτητας εισόδου.

Συμπερασματικά, ο τελικός στόχος κάθε σχεδιαστή είναι η αύξηση της πίεσης κατά μήκος της κάθε βαθμίδας πτερυγίων με απώτερο σκοπό την μείωση του αριθμού των βαθμίδων ώστε να μειωθεί το κόστος κατασκευής και ταυτόχρονα το συνολικό βάρος και όγκο του συμπιεστή και κατά συνέπεια ολόκληρου του αεριοστροβίλου.

9 ΣΤΡΟΒΙΛΟΣ

9.1 Χαρακτηριστικά αξονικού στροβίλου.

Η λειτουργία του στροβίλου σ' έναν κινητήρα είναι να μετατρέπει την ενέργεια με σκοπό να περιστρέψει τον συμπιεστή.

Πιο αναλυτικά, ο συμπιεστής και ο στρόβιλος παρά τις αρκετές ομοιότητες που φέρουν μεταξύ τους έχουν δύο σημαντικές διαφορές. Η πρώτη και η σημαντικότερη είναι οτι αναπτύσονται αρκετά μεγαλύτερες θερμοκρασίες σε σχέση μ' αυτές στον συμπιεστή με αποτέλεσμα να τίθεται το θέμα της επιλογής κατάλληλων υλικών σε θερμική αντοχή. Επίσης οι υψηλές θερμοκρασίες που δημιουργούνται στον στρόβιλο έχουν σαν αποτέλεσμα να μειώνει αισθητά τον αριθμό Mach σε σχέση πάντα με τον συμπιεστή. Έτσι, με την συμβολή αυτού του φαινομένου μειώνονται ταυτόχρονα και τα προβλήματα που δημιουργόντουσαν λόγο αεροδυναμικής. Τέλος, η δεύτερη διαφορά είναι οτι σε αντίθεση με τον συμπιεστή που η πίεση αυξάνεται στον στρόβιλο μειώνεται προκαλώντας ελαχιστοποίηση της αποκόλλησης. Γι' αυτόν τον λόγο τα πτερύγια του στροβίλου έχουν μεγαλύτερη καμπυλότητα από αυτά του συμπιεστή, έτσι ώστε να μπορεί να κινήσει έως και εφτά βαθμίδες συμπιεστή.

Ο σχεδιασμός στροβίλων γίνεται με μια σύνθετη διαδικασία ανάπτυξης για τον λόγο οτι συνδυάζει την αεροδυναμική, την θερμοδυναμική,την μηχανική και την τεχνολογία των υλικών θέτοντας αυτούς τους τέσσερις τομείς στα όρια τους. Ένας στρόβιλος που χρησιμοποιείται σε ακραίες περιβαντολλογικές συνθήκες όπως οι αεροπορικοί θα πρέπει να συνδυάζουν χαμηλό βάρος, υψηλή ισχύ,αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες και εκταταμένη διάρκεια ζώης. Ένας σημαντικός περιορισμός των στροβίλων είναι οι υψηλές θερμοκρασίες που δημιουργούνται ώστε να αυξηθεί όσο το δυνατότερο ο θερμικός βαθμός απόδοσης για αυτόν τον λόγο αναπτύχθηκε ένας τρόπος ψύξης με αέρα των πτερυγίων. Ακόμη, ένας περιορισμός είναι οι φορτίσεις που δέχονται οι δίσκοι που τοποθετούνατι τα πτερύγια.

9.2 Παράγοντες που επηρεάζουν τον λόγο πίεσης βαθμίδας στροβίλου.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τον λόγο πίεσης είναι οι εξής:

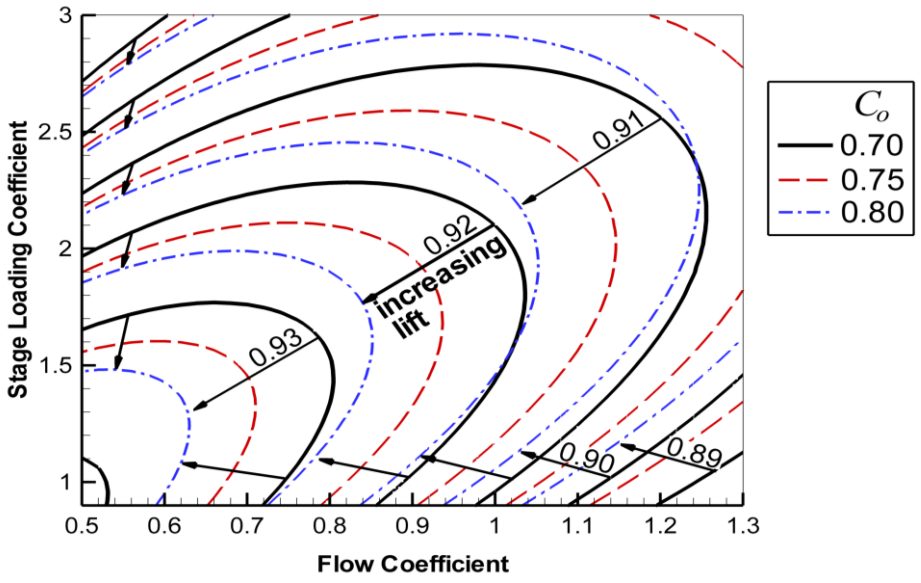
- Απώλειες επιφανειακών τριβών.

- Απώλειες περιφερειακών τοιχωμάτων.
- Απώλειες κρουστίκων κυμάτων στις περιοχές που η ταχύτητα ροής ξεπερνάει αυτή του ήχου.
- Απώλειες ρόης λόγω αέρα ψύξης .
- Απώλειες λόγω των διάκενών μεταξύ των πτερυγίων.

9.3 Μέθοδοι υπολογισμού απόδοσης.

Η πρώτη μέθοδος για τον υπολογισμό της απόδοσης τους στροβίλου βασίζεται σε σειριακά δεδομένα, δηλαδή υπολογίζονται οι απώλειες που αναφέρθηκαν παραπάνω ξεχωριστά και στην συνέχεια βρίσκεται το άθροισμα τους. Αυτή η μέθοδος δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα για στροβίλους με μικρές αποοδόσης αλλά ενδέχεται να έχει λανθασμένα αποτελέσματα σε βαθμίδες υψηλών αποδόσεων.

Η δεύτερη μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι και η πιο αξιόπιστη. Πιο αναλυτικα βασίζεται σε πειραματικά δεδομένα και ονομάζεται σχέση απόδοσης του Smith. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, η μέθοδος αυτή βασίζεται σ' ένα διάγραμμα το οποίο έχει για άξονες τους συντελεστές Φ και Ψ, γνωρίζοντας τους δύο αυτους συντελέστες υπάρχει η δυνατότητα εύρεσης της απόδοσης με απόκλιση έως και 0,5%.



Εικόνα 9.1: Διάγραμμα Smith.

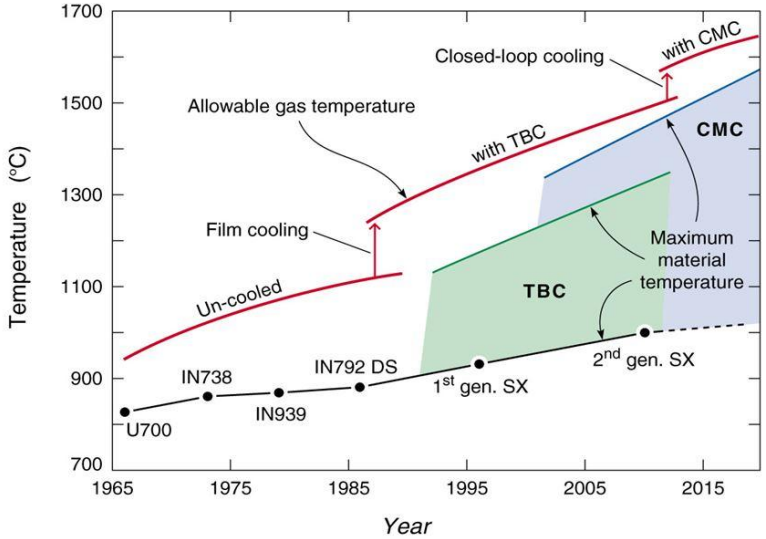
10 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΨΥΞΗΣ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΩΝ

Οι αεριοστρόβιλοι, έχουν γίνει η βασική επιλογή για την παραγωγή ενέργειας διότι προσφέρουν αποδοτική μετατροπή καυσίμων σε ενέργεια έτσι ώστε να μειώσουν την τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να γίνονται διαρκώς προσπάθειες για την ανάπτυξη νέων αεριοστρόβιλων με υψηλότερες θερμοκρασίες καύσης και λόγους πίεσης. Για να επιτευχθούν τα προαναφερόμενα δυο χαρακτηριστικά, θα πρέπει να αναπτυχθούν νέα υλικά και νέοι τρόποι ψύξης.

Η ψύξη των πτερυγίων μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση αέρα ή ψυκτικού υγρού. Η χρήση του ψυκτικού υγρού θεωρείται πιο αποτελεσματική λόγω της υψηλής θερμικής χωρητικότητας αλλά με δεδομένη την πιθανότητα ύπαρξης διαρροής και διάβρωσης.

Από την άλλη μεριά, η ψύξη με αέρα επιτρέπει την απόρριψη του αέρα στην κύρια ροή χωρίς κανένα πρόβλημα. Η ποσότητα του αέρα που χρησιμοποιείται για αυτό το σκοπό είναι περίπου 1 έως 3% από την κύρια παροχή. Οι θερμοκρασίες των πτερυγίων μειώνονται κατά 200-300 ^{o}C.

Υπάρχουν πολλά είδη ψύξης που χρησιμοποιούνται για τα πτερύγια του στροβίλου, οι οποίες χωρίζονται σε δυο μεγάλες κατηγορίες: στην εσωτερική και εξωτερική ψύξη, με κοινό παρονομαστή την χρήση του αέρα ως το κύριο ψυκτικό μέσο.

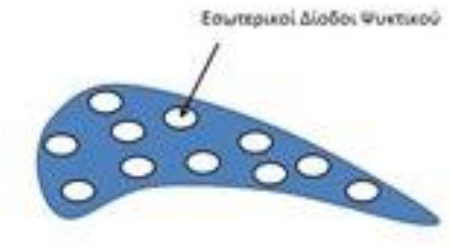


Εικόνα 10.1:Ιστορικά στοιχεία ανάπτυξης

10.1 Εσωτερική ψύξη.

10.1.1 Ψύξη με συναγωγή.

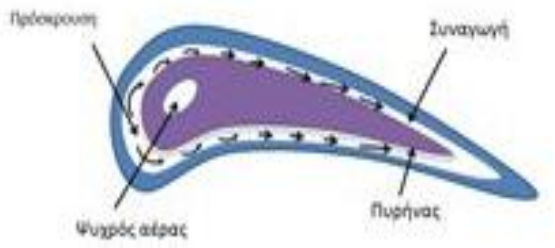
Το συγκεκριμένο είδος εσωτερικής ψύξης λειτουργεί διοχετεύοντας ψυχρό αέρα διαμέσου διόδων στο εσωτερικό των πτερυγίων. Η θερμότητα μεταφέρεται με βάση το φαινόμενο της συναγωγής μέσω του πτερυγίου και στη συνέχεια πάλι με συναγωγή μεταφέρεται θερμότητα στον αέρα που ρέει. Για αυτή τη μέθοδο, θα ήταν επιθυμητό, να υπάρχει μια μεγάλη εσωτερική επιφάνεια, ώστε οι διαδρομές ψύξης να γίνονται σταδιακά ελικοειδείς και γεμάτες από μικρά πτερύγια. Οι εσωτερικές διαδρομές μέσα στο πτερύγιο μπορεί να έχουν κυκλικό ή ελλειπτικό σχήμα. Η ψύξη μπορεί να επιτευχθεί με την εισροή αέρα μέσω αυτών των διαδρομών. Η ψύξη επιτυγχάνεται με την εισροή του αέρα σε αυτά τα περάσματα, ο οποίος προέρχεται από τον συμπιεστή, ξεκινώντας από τον κόμβο και καταλήγοντας στις άκρες του πτερυγίου.



Εικόνα 10.2: Ψύξη με συναγωγή

10.1.2 Ψύξη με πρόσκρουση.

Μια παραλλαγή της ψύξης με συναγωγή, είναι η ψύξη με πρόσκρουση. Σε αυτό το είδος ψύξης, ο αέρας προσκρούει στην εσωτερική επιφάνεια του πτερυγίου με υψηλή ταχύτητα. Αυτό επιτρέπει να μεταφερθεί περισσότερη θερμότητα μέσω της συναγωγής σε σύγκριση με την απλή μορφή συναγωγής, που αναλύθηκε παραπάνω. Η ψύξη με πρόσκρουση χρησιμοποιείται σε περιοχές οι οποίες υποβάλλονται σε υψηλά θερμικά φορτία. Στην περίπτωση των πτερυγίων του στροβίλου, η άκρη του πτερυγίου έχει την υψηλότερη θερμοκρασία και επομένως το υψηλότερο θερμικό φορτίο.

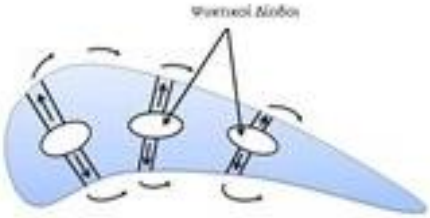


Εικόνα 10.3: Ψύξη με πρόσκρουση

10.2 Εξωτερική ψύξη.

10.2.1 Ψύξη με φιλμ.

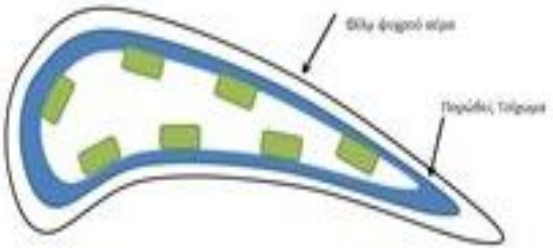
Η ψύξη με φίλμ χρησιμοποιείται ευρέως γιατί επιτρέπει υψηλότερους ρυθμούς μεταφοράς θερμότητας από τις προηγούμενες μεθόδους που έχουν αναφερθεί. Αυτή η τεχνική, απαιτεί τη συνεχή άντληση ψυχρού αέρα έξω από το πτερύγιο μέσω πολλαπλών οπών στην κατασκευή. Έτσι, με αυτόν τον τρόπο, δημιουργείται ένα λεπτό στρώμα (φιλμ) ψυχρού αέρα στην εξωτερική επιφάνεια του πτερυγίου, μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο την μεταφορά θερμότητας από την κύρια ροή (1026 – 1526 ^{o}C), της οποίας οι θερμοκρασίες μπορεί να υπερβούν το σημείο τήξης του υλικού των πτερυγίων. Οι οπές μπορεί να έχουν πολλές διαφορετικές θέσεις αλλά οι πιο συνήθεις είναι κατά μήκος της άκρης του πτερυγίου.



Εικόνα 10.4: Ψύξη με φιλμ

10.2.2 Ψύξη με έκχυση.

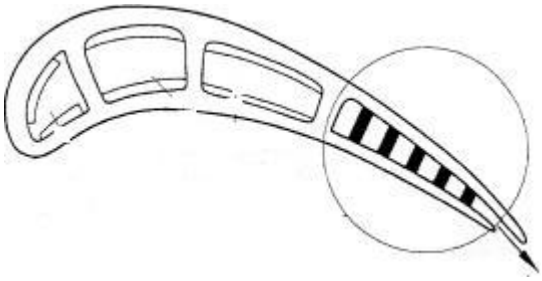
Η επιφάνεια του πτερυγίου είναι φτιαγμένη από πορώδες υλικό και αυτό σημαίνει ότι έχει μεγάλο αριθμό μικρών στομίων, πάνω στην επιφάνεια του. Ο ψυχρός αέρας εξαναγκάζεται να εισέλθει στα στόμια, τα οποία σχηματίζουν ένα στρώμα (φιλμ).



Εικόνα 10.5: Ψύξη με έκχυση

10.2.3 Ψύξη με πτερύγια.

Στην ουρά του πτερυγίου όπου χρησιμοποιείται ψύξη με φιλμ, υπάρχει μια διάταξη από μικρά πτερύγια, τα οποία ενισχύουν την μεταφορά θερμότητας από το κύριο πτερύγιο. Η μεταφορά θερμότητας λαμβάνει μέρος από τη διάταξη αυτή και δια μέσου των πλευρικών τοιχωμάτων, ενώ το ψυκτικό ρέει κατά μήκος των πτερυγίων με υψηλή ταχύτητα.



Εικόνα 10.6: Ψύξη με πτερύγια

10.2.4 Ψύξη με διαπνοή.

Η τεχνική αυτή, είναι παρόμοια με αυτήν της ψύξης με φιλμ γιατί δημιουργεί και αυτή ένα λεπτό στρώμα (φιλμ) ψυχρού αέρα πάνω στο πτερύγιο, με τη διαφορά ότι ο αέρας αυτός διαρρέει μέσω ενός διάτρητου κελύφους αντί να διοχετεύεται μέσω οπών. Αυτή η μέθοδος, είναι αποτελεσματική σε υψηλές θερμοκρασίες διότι καλύπτει ανομοιόμορφα ολόκληρο το σώμα του πτερυγίου με ψυχρό αέρα. Τα πτερύγια τα οποία χρησιμοποιούν αυτή τη μορφή ψύξης αποτελούνται στην πλειοψηφία τους από μια άκαμπτη δοκό με πορώδες κέλυφος.

11 ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Η ραγδαία ανάπτυξη των υλικών κατασκευής αεριοστροβίλων είχε ως αποτέλεσμα να δημιοθργηθούν μηχανές με πολύ υψηλή ισχύ και ικανοποιητικό βαθμό θερμικής απόδοσης. Για να επιτευχθεί αυτό έπρεπε να αυξηθούν οι θερμοκρασίες λειτουργιας των κινητήρων ώστε να υπάρχει και ανάλογη αύξηση στην ισχύ και στην απόδοση. Έτσι, τα παραδοσιακά υλικά που κατασκευάζονταν οι κινητήρες δεν μπορούν να ανταπεξέλθουν στις υψηλές θερμοκρασίες και την θέση τους παίρνουν ειδικοί χάλυβες, κράματα τιτανίου και υπερκράματα. Επιπλέον, η χρήση επιστρώσεων (coating technology) είναι ζωτικής σημασίας για την κατασκευή αεριοστροβίλων διότι είναι ο μόνος τρόπος να συνδυαστούν οι υψηλές μηχανικές ιδιότητες και οι άριστες αντιδιαβρωτικές ιδιότητες.

Τα υλικά που κατασκευάζονταν αρχικά είχαν ως κύριο χαρακτηριστικό την υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό. Βέβαια, με το πέρασμα των χρόνων και με τις απαιτήσεις να αλλάζουν δραστικά και τις θερμοκρασίες να αυξάνονται συνεχώς οι κύριες απαιτήσεις έγιναν διαφορετικές, δηλαδή αντοχή σε ερπυσμό και μεγαλύτερο κύκλο ζωής.

11.1 Υλικά πτερυγίων συμπιεστή.

Τα πτερύγια του συμπιεστή ποικίλουν ανάλογα τον τρόπο κατασκευής από σφυρήλατα εξωθούμενα και κατεργασμένα. Όλες τα πτερύγια παραγωγής μέχρι και πρόσφατα έχουν κατασκευαστεί από AISI-403 ή AISI-403 + Cb. Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1980, ένα νέο υλικό το GTD-450 (μαρτενσιτικός ανοξείδωτος χάλυβας) χρησιμοποιείται για την κατασκευή πτερυγίων το οποίο έχει υποστεί καθύζιση για να σκληρύνει.

Το υλικό αυτό παρέχει υψηλή αντοχή σε εφελκισμό χωρίς να θυσιάζει την αντοχή του στη διάβρωση. Αυτό επιτυγχάνεται λόγω της συγκέντρωσης χρωμίου (Cr) και μολυβδαινίου (Mo) στα πτερύγια του συμπιεστή. Η διάβρωση στο συμπιεστή συνήθως προκαλείται από την υγρασία η οποία συναντάται μεταξύ των βαθμίδων πέντε και οκτώ όπου ο αέρας γίνεται αρκετά θερμός ώστε

να αποτρέψει την συμπίκνωση, γι' αυτό το λόγο οι επιστρώσεις συνιστούνται ανεπιφύλακτα.

Για μικρούς και μεσαίους συμπιεστές αεριοστροβίλων, οι θερμοκρασίες που βιώνουν τα πτερύγια κυμαίνονται από 50° C έως 500° C. Βραχυπρόθεσμα και μεσοπρόθεσμα η χρήση φεριτικού ανοξείδωτου χάλυβα θα είναι ανεπαρκής, γιατί με το πέρασμα των χρόνων θα απαιτείται αύξηση στη θερμική απόδοση και αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα να αυξηθεί ο λόγος πίεσης και οι γωνιακές ταχύτητες και ταυτόχρονα οι θερμοκρασίες. Σ' αυτή την περίπτωση είναι δεδομένο ότι θα χρησιμοποιηθούν υλικά όπως κράματα τιτανίου, κράματα νικελίου και σύνθετα υλικά για να ανταπεξέλθουν σε τέτοια περιβάλλοντα. Βέβαια με την είσοδο αυτών των υλικών θα παρουσιαστεί σημαντικότατη αύξηση του κόστους λόγω της πολυπλοκότητας της ανάπτυξης και της κατασκευής τέτοιων κραμάτων. Επίσης, έχει εξεταστεί η χρήση ελαφρών μετάλλων, όπως κράματα αλουμινίου, σύνθετα πολυμερή για τα κινητά και ακίνητα πτερύγια τα οποία μειώνουν τη μάζα του συμπιεστή και γενικά τη μάζα ολόκληρου του κινητήρα με αποτέλεσμα να μειώνονται οι φορτίσεις και να αυξάνεται η περιστροφική ταχύτητα.

11.2 Υλικά θαλάμου καύσης.

Ο θάλαμος καύσης βιώνει τις υψηλότερες θερμοκρασίες σε έναν αεριοστρόβιλο και υπόκειται σε ένα συνδυασμό από ερπυσμό, υψηλή πίεση και συνεχή θερμική καταπόνηση. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι σφυρήλατα και υπερκράματα βασισμένα σε νικέλιο (Ni). Αυτά παρέχουν αντοχή στη θερμομηχανική κόπωση, αντίσταση στον ερπυσμό και στην οξείδωση σε στατικά μέρη η οποία δημιουργείται εύκολα σε πολύπλοκα σχήματα όπως στους καυστήρες και στους αγωγούς μετάβασης. Εξίσου σημαντική είναι η συγκόλλησή τους, γιατί επιτρέπουν ευελιξία σε περίπτωση μελλοντικής επισκευής μειώνοντας έτσι το κόστος του κύκλου ζωής.

Οι συνεχείς θερμικές καταπονήσεις που υφίσταται ο θάλαμος καύσης σημαίνει ότι επιβάλλεται η χρήση κάποιας επίστρωσης (coating). Η συγκεκριμένη τεχνολογία επίστρωσης βασίζεται σε ένα πολυεπίπεδο σύστημα που αποτελείται από κοβάλτιο – χρώμιο – αλουμίνιο – ύττριο και κεραμική

επίστρωση χρησιμοποιώντας ψεκαστήρες πλάσματος. Η εφαρμογή της παρούσας τεχνολογίας έχει ως στόχο τον περιορισμό της μέγιστης θερμοκρασίας του μετάλλου στους 900° έως 950° C.

Οι μελλοντικές εξελίξεις αποσκοπούν στην εφαρμογή παχύτερων επιστρώσεων οι οποίες θα επιτρέψουν υψηλότερες θερμοκρασίες μέσα στο φλογοσωλήνα και ταυτόχρονη μείωση των θερμοκρασιών των μετάλλων.

11.3 Υλικά δίσκων στροβίλων.

Η κύρια λειτουργία των δίσκων είναι να ασφαλίζουν τα πτερύγια πάνω τους και να μεταφέρουν τη μηχανική ενέργεια στον άξονα κίνησης. Για να αποφευχθεί η υπερβολική φθορά, οι δονήσεις και η πτώση απόδοσης πρέπει να κατασκευάζονται με εξαιρετική ακρίβεια με σκοπό να ανταπεξέλθουν οι δίσκοι στα θερμικά φορτία, στις φυγόκεντρες τάσεις και στα αξονικά φορτία που προκύπτουν από τα πτερύγια που υφίστανται κατά τη λειτουργία. Ο ερπισμός και η χαμηλή αντοχή σε κόπωση είναι οι κύριες ιδιότητες που μειώνουν τον κύκλο ζωής ενός δίσκου στροβίλου. Οι απαραίτητες ιδιότητες ενός δίσκου πρέπει να είναι:

- Υψηλή ακαμψία και αντοχή σε εφελκυσμό για να εξασφαλίζεται η ακριβής τοποθέτηση των πτερυγίων λόγω των υψηλών περιστροφικών ταχυτήτων
- Υψηλή αντοχή σε κόπωση και αντίσταση στη διάδοση των ρωγμών για να αποτραπεί η έναρξη ρωγμών κατά την διάρκεια του κύκλου λειτουργίας του κινητήρα
- Αυξημένη αντοχή σε ερπυσμό για να αποφευχθεί η παραμόρφωση σε περιοχές με υψηλή θερμοκρασία
- Αντοχή στην οξείδωση υψηλής θερμοκρασίας και διάβρωση λόγω της θερμότητας.

Για την κατασκευή των δίσκων χρησιμοποιούνται διαφόρων ειδών κράματα:

- 718 – νικέλιο (Ni): αυτό το κράμα βασισμένο σε νικέλιο έχει υποστεί κατακρήμνηση για να αυξηθεί η σκληρότητά του. Το κράμα 718 περιέχει στοιχεία κράματος και επομένως είναι δύσκολο να παραχθεί σε

πολύ μεγάλα πλινθώματα που απαιτούνται για τους μεγάλους στροβίλους.

- 706 – νικέλιο (Ni): αυτό το κράμα σε νικέλιο έχει υποστεί και αυτό κατακρήμνηση για να αυξηθεί η σκληρότητά του. Χρησιμοποιείται συνήθως σε μεγάλου μεγέθους σκελετούς. Προσφέρει μια σημαντική αύξηση στην αντοχή και στο όριο διαρροής σε σχέση με άλλα κράματα. Τα κράμα 706 είναι πανομοιότυπο με το 718 με τη μόνη διαφορά ότι περιέχει λιγότερα στοιχεία κράματος με αποτέλεσμα να μπορεί να παραχθεί σε μεγάλα πλινθώματα.
- Χρώμιο – Μολυβδαίνιο – βανάδιο (Cr – Mo –V): οι δίσκοι του στροβίλου φτιάχνονται από 1% Cr, 1,25% Mo και 0,25% V. Αυτό το κράμα βάφεται και επαναφέρεται στην αρχική του κατάσταση για να ενισχυθεί η σκληρότητά του.
- 12% Cr (χρώμιο): αυτή η οικογένεια κραμάτων έχει ένα συνδυασμό από ιδιότητες που την καθιστούν ιδιαίτερα χρήσιμη στους δίσκους του στροβίλου. Αυτές οι ιδιότητες περιλαμβάνουν καλή ολκιμότητα και αξιοσημείωτη αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες (482° C).
- A 286 κράμα: το A286 είναι ένα κράμα με βάση τον ωστενίτη σιδήρου, το οποίο χρησιμοποιείται εδώ και χρόνια σε εφαρμογές κινητήρων αεροσκαφών. Άρχισε να χρησιμοποιείται το 1965 σε επίγειες εφαρμογές αεριοστροβίλων, όταν έγινε εφικτή η παραγωγή πλινθωμάτων που ήταν επαρκής σε μέγεθος.

11.4 Υλικά πτερυγίων στροβίλων

Τα πτερύγια που χρησιμοποιούνται στον στρόβιλο υποβάλλονται σε υψηλές περιστροφικές ταχύτητες και υψηλές πιέσεις σε συνδυασμό με τις ακραίες θερμοκρασίες. Το πιο δύσκολο σημείο βρίσκεται στα πτερύγια του στροβίλου που είναι τοποθετημένα αμέσως μετά το θάλαμο καύσης όπου οι θερμοκρασίες πλησιάζουν τους 1400-1500° C, η πίεση είναι μεγαλύτερη όπως και οι περιστροφικές ταχύτητες.

Για να ξεπεραστούν αυτά τα εμπόδια τα πτερύγια αυτά φτιάχνονται από προηγμένα υλικά τα οποία μπορεί να αποτελούνται από 10 διαφορετικά

στοιχεία. Το κύριο υλικό που χρησιμοποιείται είναι το νικέλιο (Ni) στο οποίο τοποθετούνται σε υψηλά επίπεδα, το βολφράμιο (W) και ρήνιο (Re) τα οποία αυξάνουν την αντοχή του. Στη συνέχεια, βέβαια προστέθηκαν και άλλα στοιχεία όπως το αλουμίνιο (Al), το τιτάνιο (Ti), το ταντάλιο (Ta) και το χρώμιο (Cr) για να αυξηθούν παραπάνω οι μηχανικές ιδιότητες των πτερυγίων. Βέβαια, έπρεπε να μειωθεί η ολκιμότητά τους και ταυτόχρονα να μειωθεί αισθητά η τάση για διάβρωση.

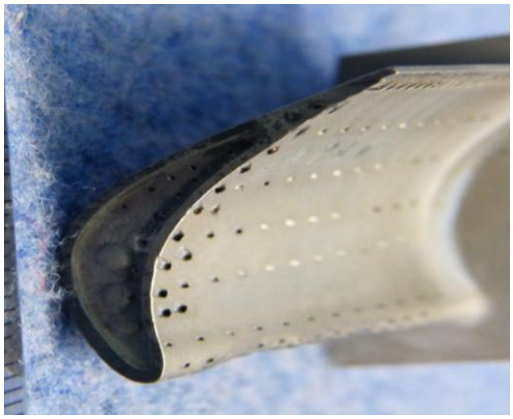
Component	***Cr***	***Ni***	***Co***	***Fe***	***W***	***Mo***	***Ti***	***Al***	***Cb***	***V***	***C***	***B***	***Ta***
Turbine blade													
U500	18,5	BAL	18,5	-	-	4	3	3	-	-	0,07	0,006	-
RENE 77 (U700)	15	BAL	17	-	-	5,3	3,35	4,25	-	-	0,07	0,02	-
IN738	16	BAL	8,3	0,2	2,6	1,75	3,4	3,4	0,9	-	0,1	0,001	1,75
GTD111	14	BAL	9,5	-	3,8	1,5	4,9	3	-	-	0,1	0,01	2,8
Turbine nozzles													
X40	25	10	BAL	1	8	-	-	-	-	-	0,5	0,01	-
X45	25	10	BAL	1	8	-	-	-	-	-	0,25	0,01	-
FSX414	28	10	BAL	1	7	-	-	-	-	-	0,25	0,01	-
N155	21	20	20	BAL	2,5	3	-	-	-	-	0,2	-	-
GTD222	22,5	BAL	19	-	2	2,3	1,2	0,8	-	0,1	0,008	1	-
Combustors													
SS309	23	13	-	BAL	-	-	-	-	-	-	0,1	-	-
HAST X	22	BAL	1,5	1,9	0,7	9	-	-	-	-	0,07	0,005-	-
N-263	20	BAL	20	0,4	-	6	2,1	0,4	-	-	0,06	-	-
HA-188	22	22	BAL	1,5	14	-	-	-	-	-	0,05	0,01	-
Turbine Wheels													
Alloy 718	19	BAL	-	18,5	-	3	0,9	0,5	5,1	-	0,03	-	-
Alloy 706	16	BAL	-	37	-	-	1,8	-	2,9	-	0,03	-	-
Cr-Mo-V	1	0,5	-	BAL	-	1,25	-	-	-	-	0,3	-	-
A286	15	25	-	BAL	-	1,2	2	3	-	-	0,08	0,006	-
M125	12	2,5	-	BAL	-	1,7	-	-	-	-	0,12	-	-
Compressor Blades													
AISI 403	12	-	-	BAL	-	-	-	-	-	-	0,11	-	-
AISI 403 + Cb	12	-	-	BAL	-	-	-	-	0,2	-	0,15	-	-
GTD-450	15,5	6,3	-	BAL	-	0,8	-	-	-	-	0,03	-	-

Εικόνα 11.1: Πίνακας υλικών

12 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ

12.1 Είκονες για την αποτύπωση γεωμετρίας.

Εικόνα 12.1: Εικόνα πτερυγίου στροβίλου (1)



Εικόνα 12.2: Εικόνα πτερυγίου στροβίλου (2)

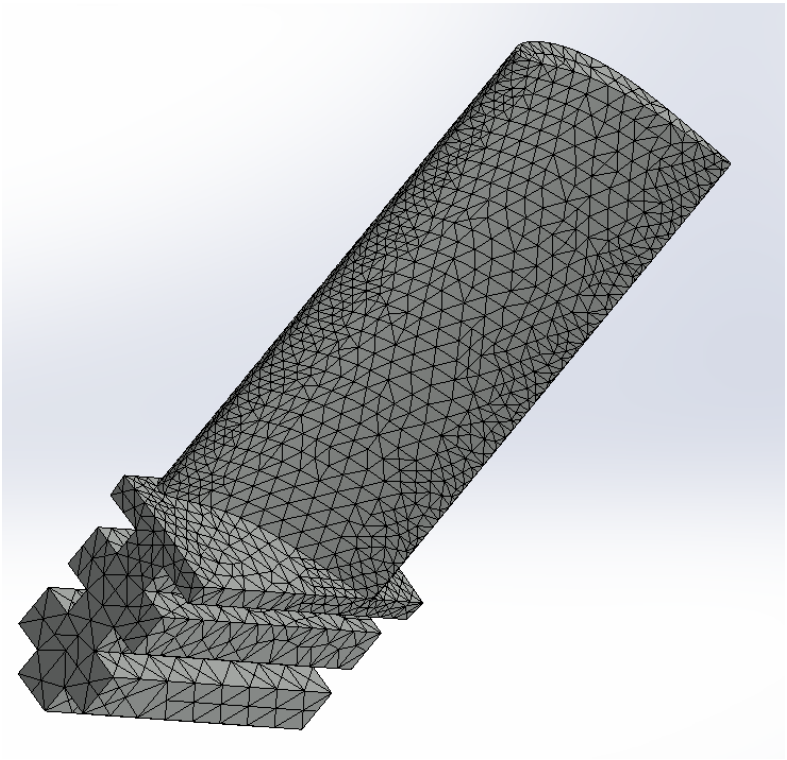
Εικόνα 12.3: Εικόνα πτερυγίου συμπιεστή

12.2 Εικόνες πλεγμάτων (meshing).

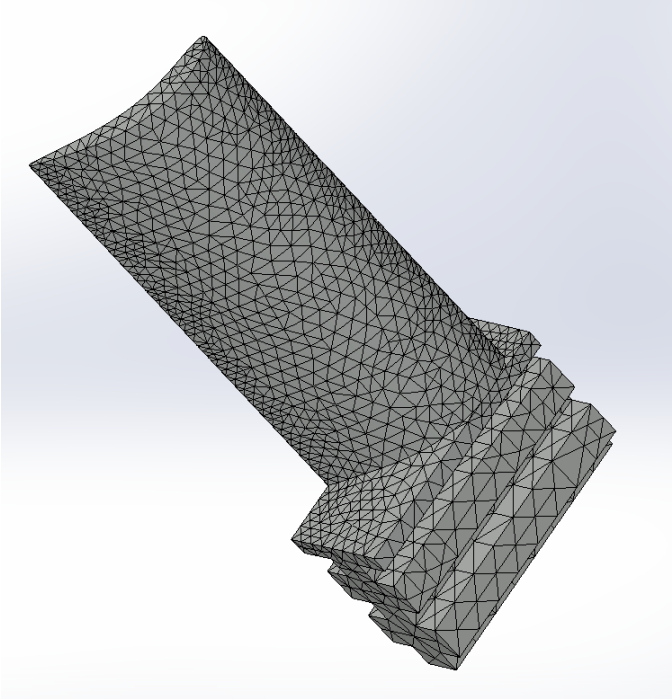
Η δημιουργία πλέγματος (meshing) χρησιμεύει στην κατασκευή ενός πολυγωνικού ή πολυεδρικού πλέγματος για την προσέγγιση ενός πολύπλοκου γεωμετρικού σχήματος. Τυπικές χρήσεις της λειτουργίας αυτής είναι για την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων ή υπολογιστικής ρευστομηχανικής. Το μοντέλου εισόδου μπορεί να έχει διάφορες μορφές που ποικίλουν, όπως CAD, NURBS και STL.

Σε περίπτωση τρισδιάστατου μοντέλου που δημιουργήθηκε για την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων το πλέγμα πρέπει να αποτελείται από τετράεδρα, πυραμίδες, πρίσματα και εξάεδρα. Η καλύτερη ποιότητα πλέγματος παρέχει πιο ακριβή λύση, για παράδειγμα υπάρχει η δυνατότητα να βελτιωθεί το πλέγμα σε ορισμένες περιοχές της γεωμετρίας, όπου οι κλίσεις είναι υψηλές (πολυπλοκή γεωμετρία), αυξάνοντας έτσι την πιστότητα των λύσεων στην συγκεκριμένη περιοχή.

Παρακάτω ακολουθούν εικόνες πλεγμάτων από μέρη ενός αεριοστροβίλου (πτερύγιο συμπιεστή και στροβίλου αλλα και ολόκληρα συστήματα):

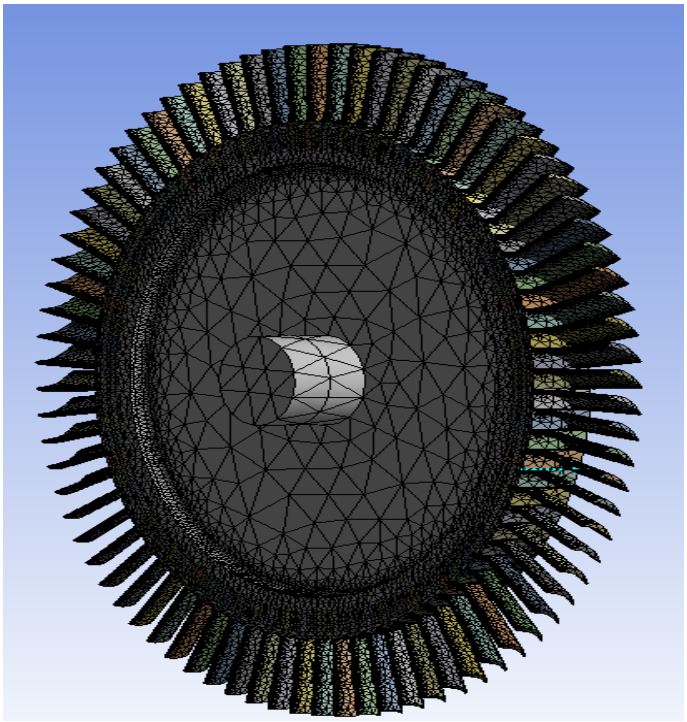


Εικόνα 12.4: Πλέγμα πτερυγίου στροβίλου (1)

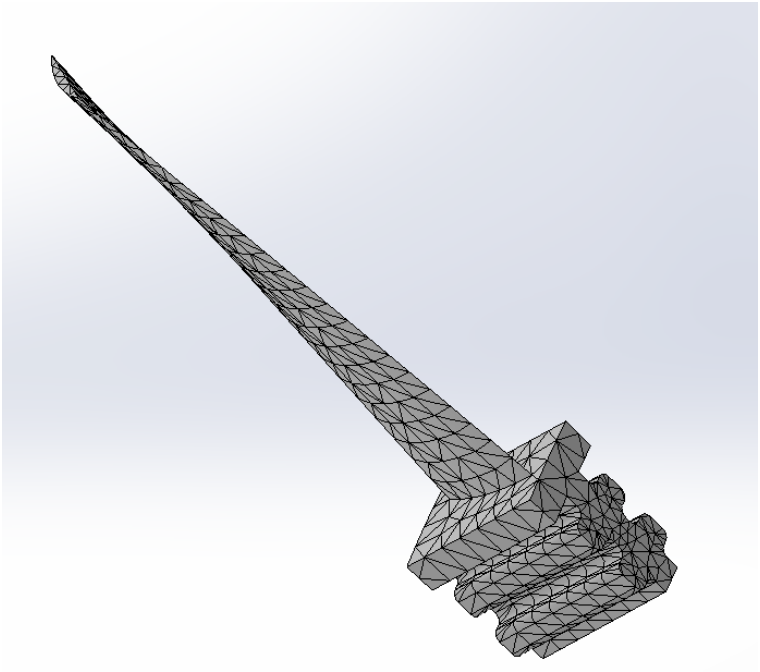


Εικόνα 12.5: Πλέγμα πτερυγίου στροβίλου (2)

Για το πλέγμα του πτερυγίου του στροβίλου χρησιμοποιήθηκε η παράμετρος curvature-based mesh η οποία αυξάνει την πυκνότητα του πλέγματος σε περιοχές με καμπυλότητα, τα τρίγωνα που χρησιμοποιήθηκαν έχουν μέγεθος 4,441-0,882mm και είναι συνολικά 17489 στοιχεία.

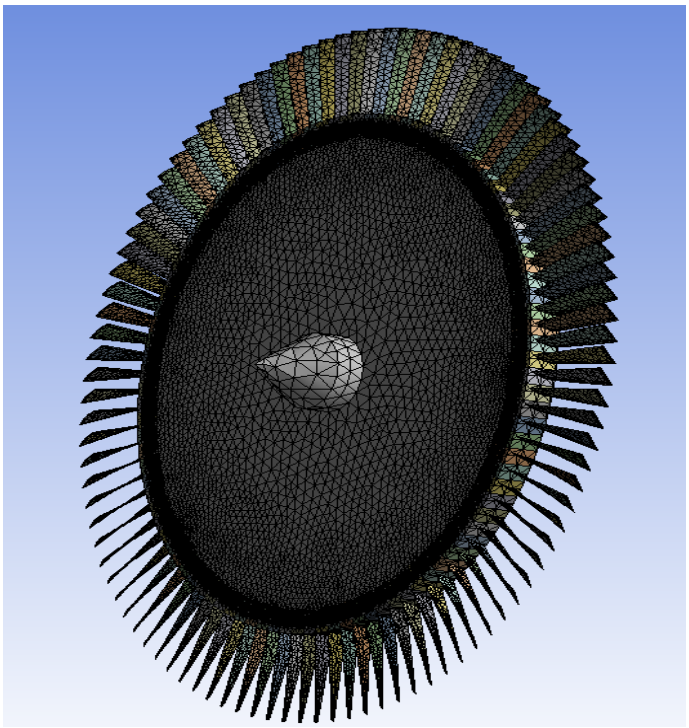


Εικόνα 12.6: Σύστημα στροβίλου



Εικόνα 12.7: Πτερύγιο συμπιεστή

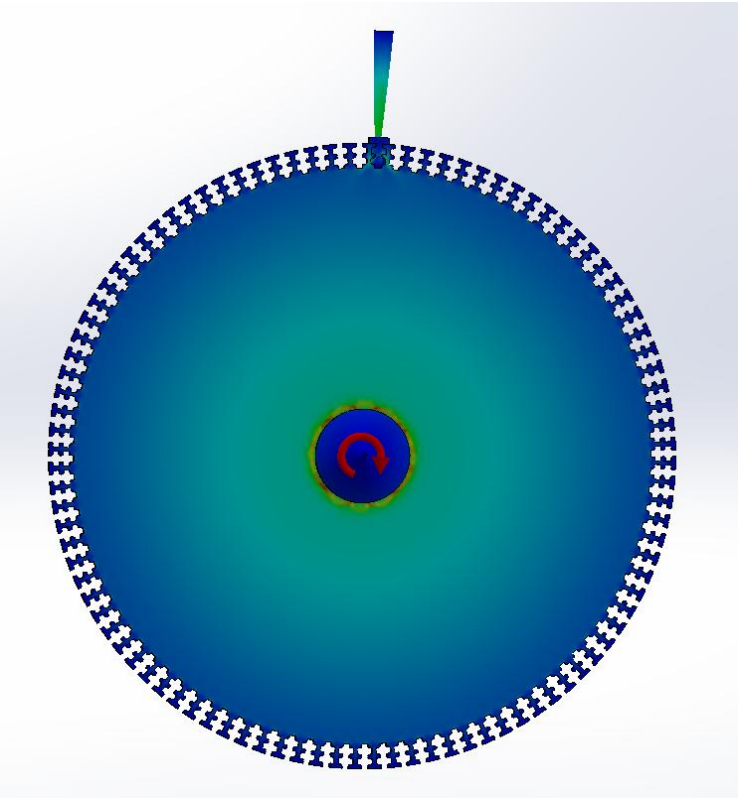
Για το πλέγμα του πτερυγίου του συμπιεστή χρησιμοποιήθηκε απλό mesh control, τα τρίγωνα που χρησιμοποιήθηκαν έχουν μέγεθος 6.752 mm και είναι συνολικά 3951 στοιχεία.



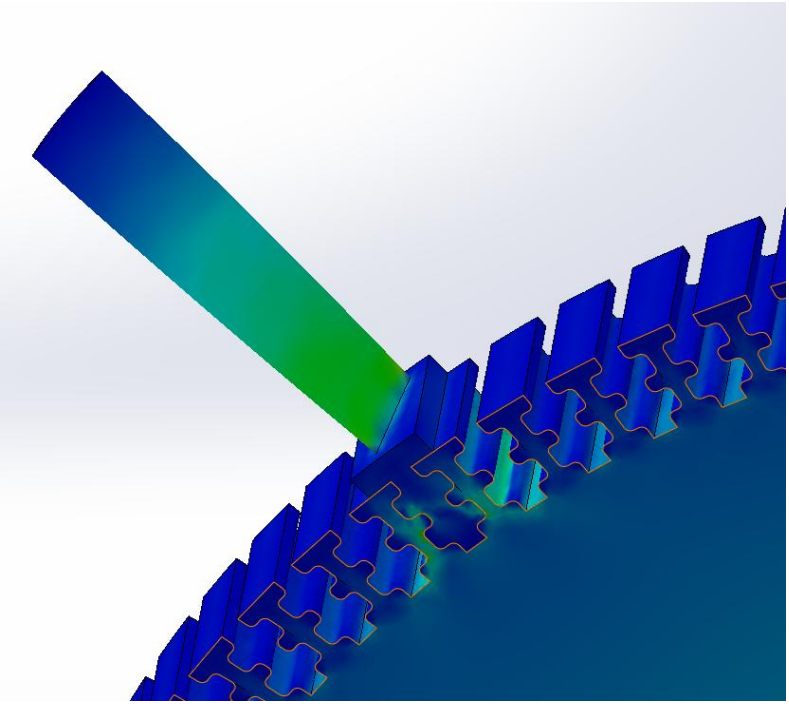
Εικόνα 12.8: Σύστημα συμπιεστή

12.3 Ανάλυση τρισδιάστατων σχεδίων.

12.3.1 Ανάλυση συμπιεστή.

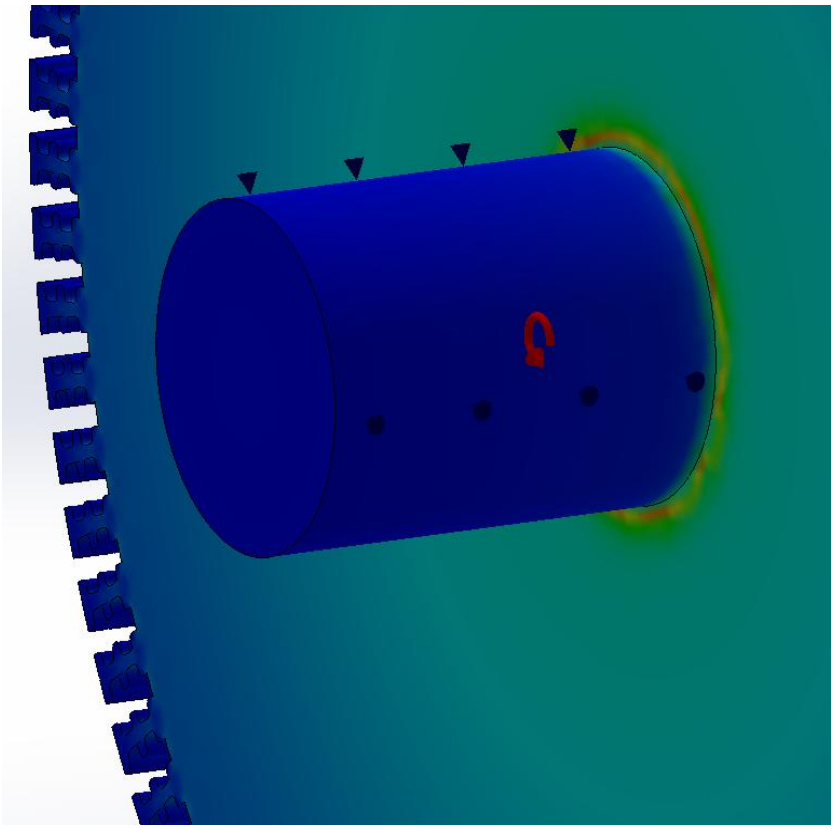


Εικόνα 12.9: Ανάλυση τάσεων δίσκου (1)

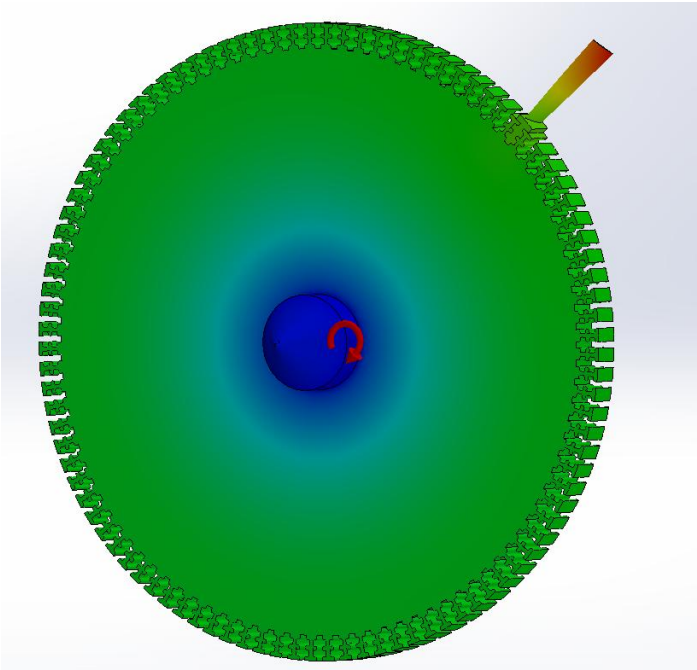


Εικόνα 12.10: Ανάλυση τάσεων πτερυγίου (1)

Στην ανάλυση τάσεων του δίσκου οι υψηλότερες τάσεις εμφανίζονται στην κυκλική περιοχή της ένωσης του άξονα με τον δίσκο όπως φαίνεται στην εικόνα 12.11. Όσον αφορά μεμονωμένα το πτερύγιο του συμπιεστή οι μέγιστες τάσεις παρουσιάζονται κυρίως στο πόδι του πτερυγίου και όπως είναι φυσικό στην βάση τοποθέτησης (εικόνα 12.10). Οι υπόλοιπες περιεχές όπως ο άξονας και το μεγαλύτερο μέρος του δίσκου (μπλε και ανοικτό πράσινο) εκτός από την προαναφερθείσα βάση παρουσιάζουν αμελητέες τάσεις. Σ' όλες τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν με τις διαφορετικές στροφές (3343,9 [rpm], 5254,8 [rpm], 7165,6 [rpm]) δεν υπήρξε υπέρβαση των ορίων διαρροής (yield strength) που είχαν τεθεί από τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν. Πιο αναλυτικά, το πτερύγιο του συμπιεστή με υλικό AISI 403 έχει όριο ασφαλείας 580 [Mpa] και ο δίσκος με υλικό κατασκευής Ti-6Al-2Sn-2Zr-2Mo-2Cr-0.25Si έχει όριο ασφαλείας 1070 [Mpa].

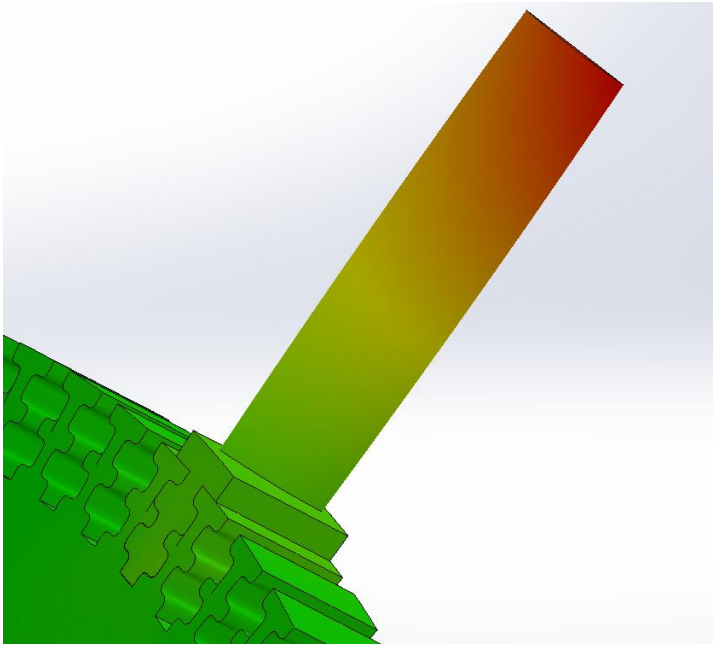


Εικόνα 12.11: Ανάλυση τάσεων δίσκου (2)

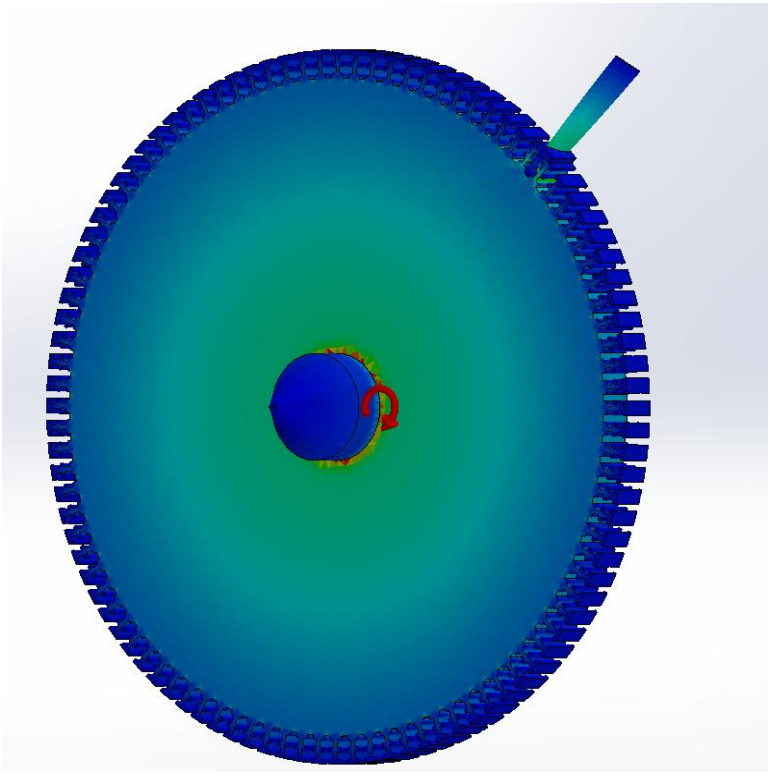


Εικόνα 12.12: Ανάλυση μετατόπισης δίσκου

Στην επόμενη ανάλυση που είναι η μετατόπιση η μοναδική περιοχή ολόκληρου του συστήματος δίσκου-πτερυγίου που εμφανίζει έντονη δραστηριότητα είναι στην κεφαλή του πτερυγίου (εικόνα 12.13). Άρα από τις εικόνες 12.12 και 12.13 συμπεραίνεται ότι όσο αυξάνεται η απόσταση από τον αξονική τόσο περισσότερο αυξάνεται και η μετατόπιση για αυτόν τον λόγο η μέγιστη τιμή παρουσιάζεται στην ακμή του πτερυγίου.

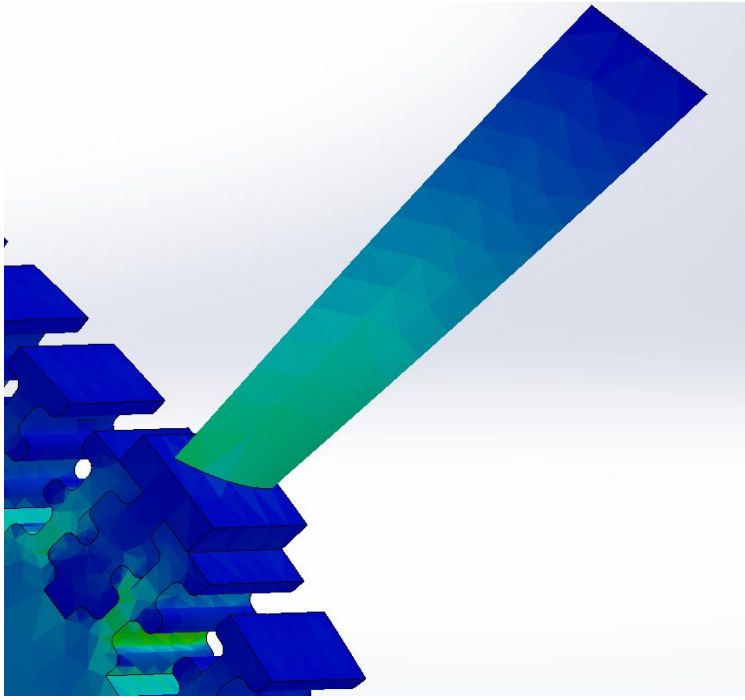


Εικόνα 12.13: Ανάλυση μετατόπισης πτερυγίου

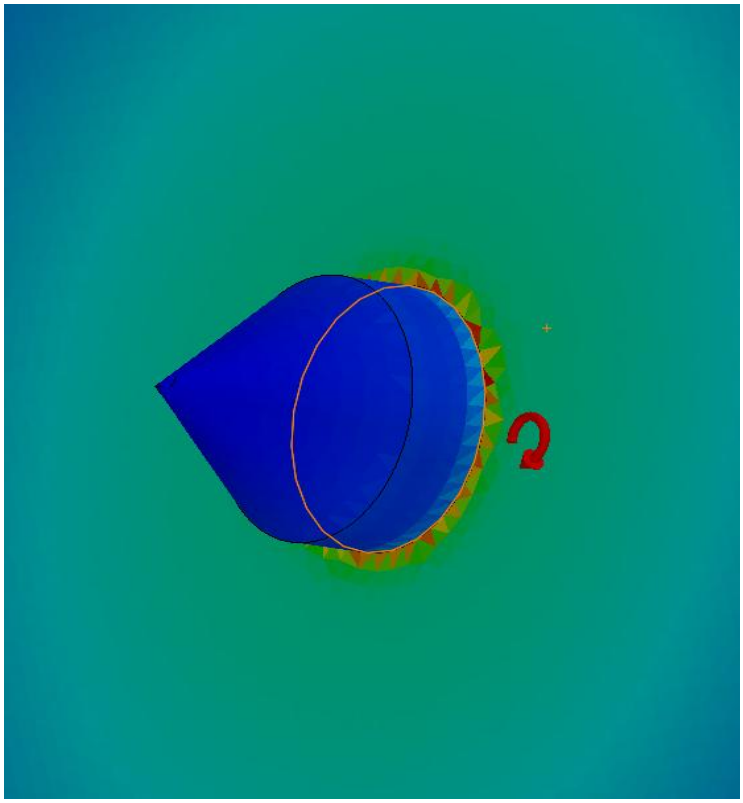


Εικόνα 12.14: Ανάλυση καταπόνησης δίσκου (1)

Στην τελευταία ανάλυση, που είναι η καταπόνηση παρατηρείται οτι οι μέγιστες καταπόνησεις (εικόνα 12.14, 12.15 και 12.16) βρίσκονται ακριβώς στην ίδια περιοχή που λαμβάνουν χώρα και οι υψηλότερες τάσεις. Αυτό εξηγείται, διότι η καταπόνηση είναι στην ουσία το μέτρο της γεωμετρικής απόκρισης και η αλλαγή στο σχήμα λόγω των εφαρμοζόμενων δυνάμεων που ασκούνται σε κάθε περιοχή. Με άλλα λόγια η καταπόνηση είναι ο λόγος, της μετατόπισης (Δλ) του δοκιμίου ως προς το αρχικό του μήκος (λ).

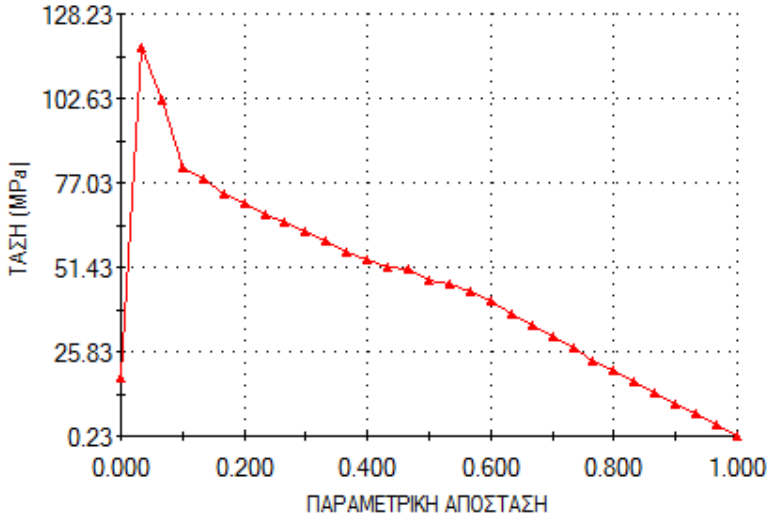


Εικόνα 12.15: Ανάλυση καταπόνησης πτερυγίου

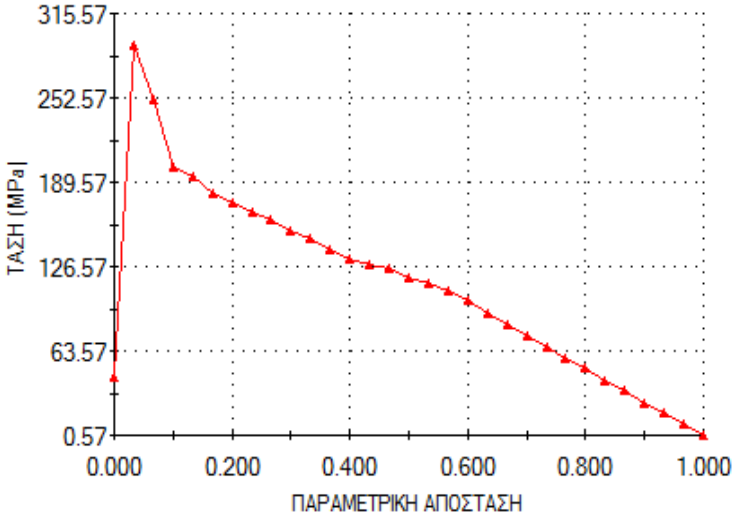


Εικόνα 12.16: Ανάλυση καταπόνησης δίσκου (2)

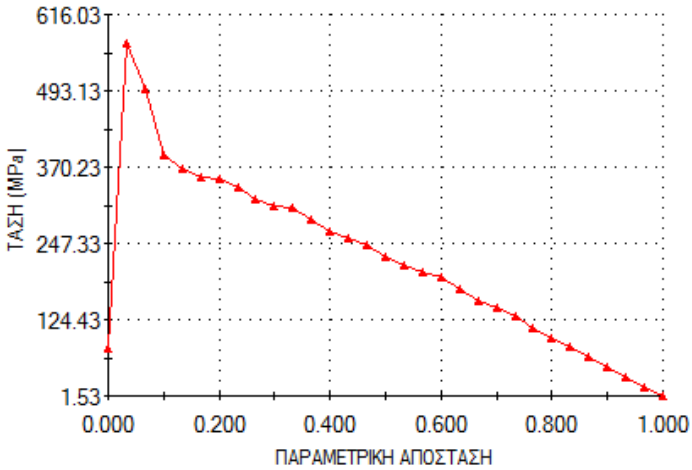
12.3.1.1 Διαγράμματα τάσεων και μετατοπίσεων συμπιεστή.



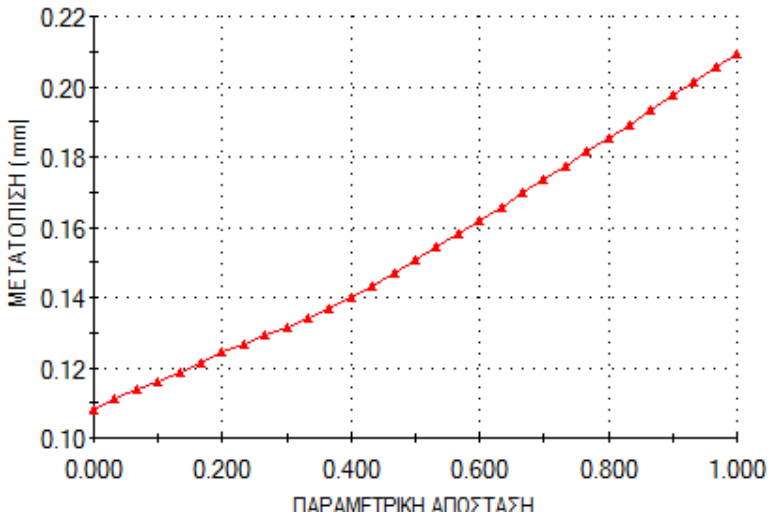
Εικόνα 12.17: Διάγραμμα τάσεων ακμής πτερυγίου στις 3344rpm (350r/s)



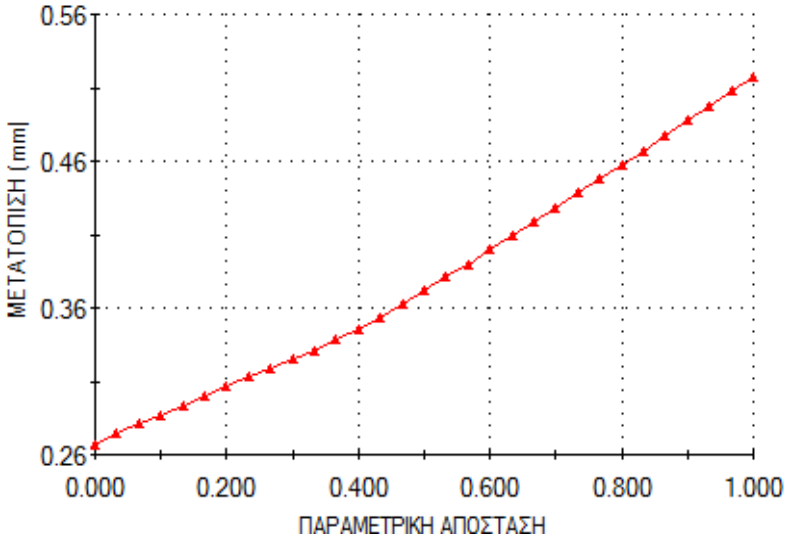
Εικόνα 12.18: Διάγραμμα τάσεων ακμής πτερυγίου στις 5255rpm (550r/s)



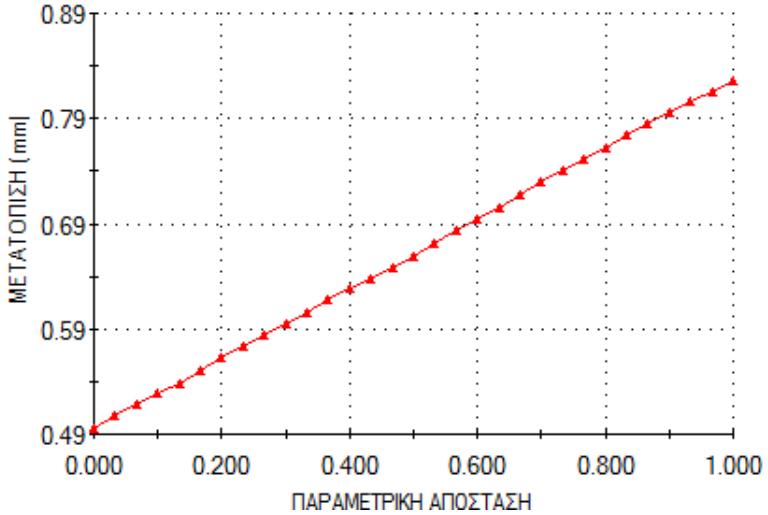
Εικόνα 12.19: Διάγραμμα τάσεων ακμής πτερυγίου στις 7166rpm (750r/s)



Εικόνα 12.20: Διάγραμμα μετόπισης ακμής πτερυγίου στις 3344rpm (350r/s)



Εικόνα 12.21: Διάγραμμα μετόπισης ακμής πτερυγίου στις 5255rpm (550r/s)



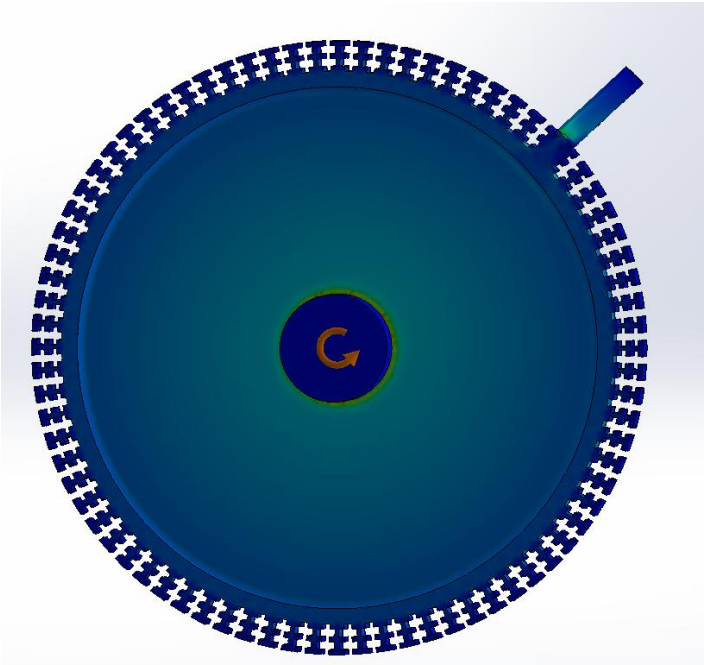
Εικόνα 12.22: Διάγραμμα μετόπισης ακμής πτερυγίου στις 7166rpm (750r/s)

ω(r/s)	n(rpm)	τάση(MPa)	μετατόπιση(mm)	καταπόνηση(Δl/l)
350	3343,9	1,86E+02	2,095E-01	1,15E-03
550	5254,8	4,58E+02	5,173E-01	2,83E-03
750	7165,6	9,74E+02	8,258E-01	5,48E-03

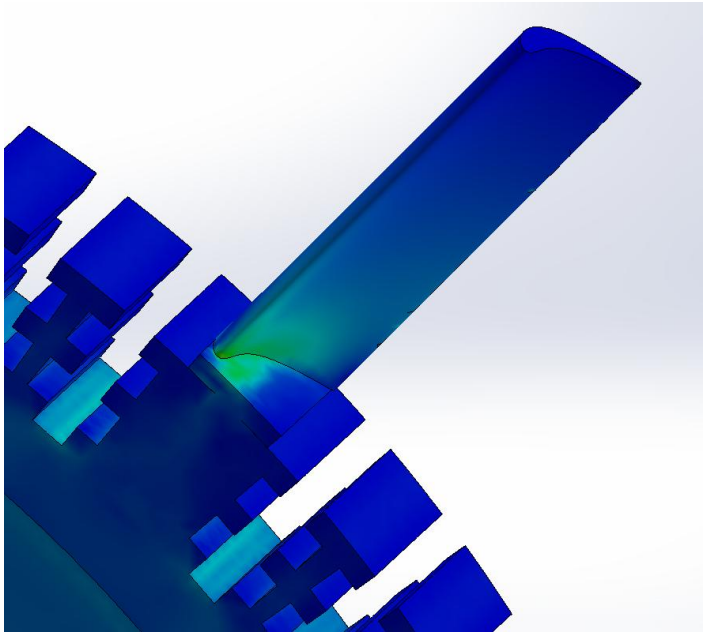
Εικόνα 12.23: Πίνακας μέγιστων τιμών

12.3.2 Ανάλυση στροβίλου.

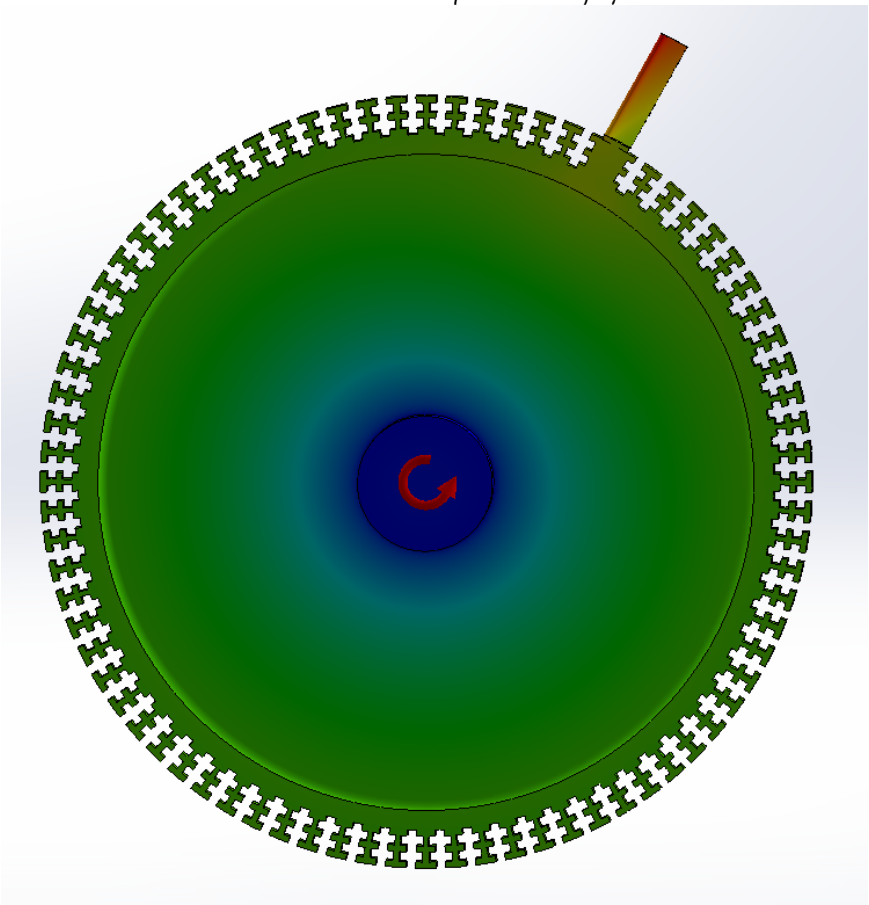
Η ανάλυση του στροβίλου δεν έχει καμία διαφορά ως προς τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανάλυση του συμπιεστή. Οι μόνες διαφορές που παρατηρούνται είναι οι αλλαγές στις τιμές των αποτελεσμάτων, κάτι το οποίο οφείλεται στα διαφορετικά υλικά του δίσκου και του πτερυγίου του στροβίλου που συνεπάγει άλλη συμπεριφορά (ιδιότητες υλικών). Πιο αναλυτικά, για τον δίσκο χρησιμοποιήθηκε το nickel-718 με όριο διαρροής 1340 [Mpa] και για το πτερύγιο το rene-77 με όριο διαρροής 760 [Mpa]. Επιπρόσθετα, μία ακόμη διαφορά που πρέπει να σημείωθεί είναι η μεγαλύτερη καμπυλότητα που παρουσιάζουν τα πτερύγια του στροβίλου σε σχέση με αυτά του συμπιεστή το οποίο συμβάλει στην ανομοιομορφία των περιοχών που σχηματίζονται οι τάσεις, οι μετατοπίσεις και η καταπόνηση πάνω στο πτερύγιο.



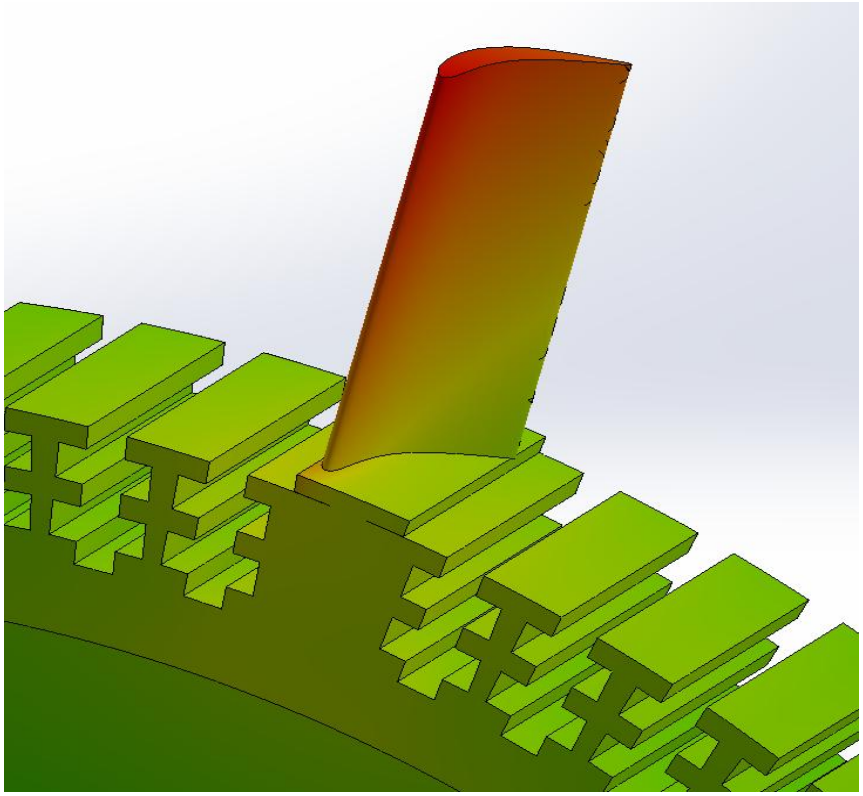
Εικόνα 12.24: Ανάλυση τάσεων δίσκου



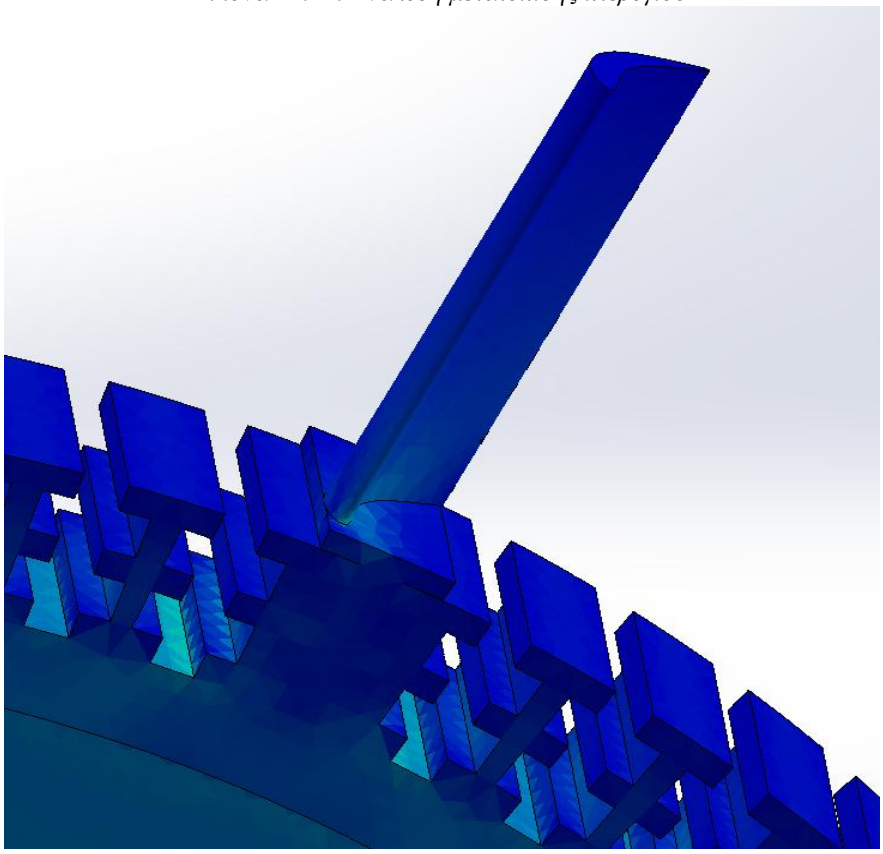
Εικόνα 12.25: Ανάλυση τάσεων πτερυγίου



Εικόνα 12.26: Ανάλυση μετατόπισης δίσκου

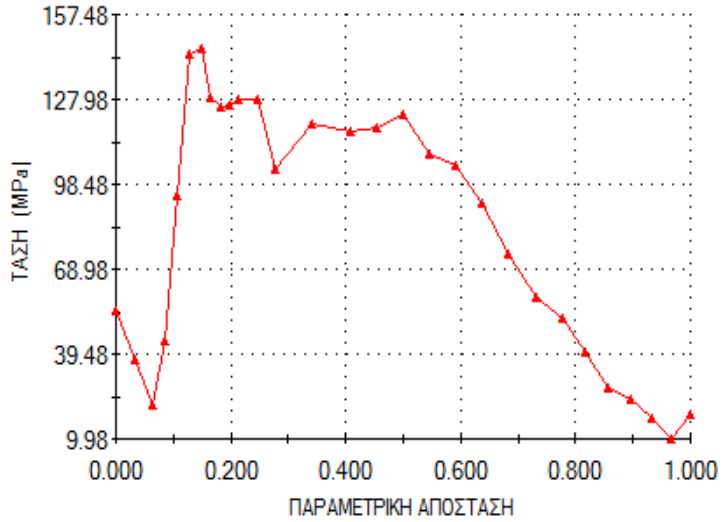


Εικόνα 12.27: Ανάλυση μετατόπισης πτερυγίου

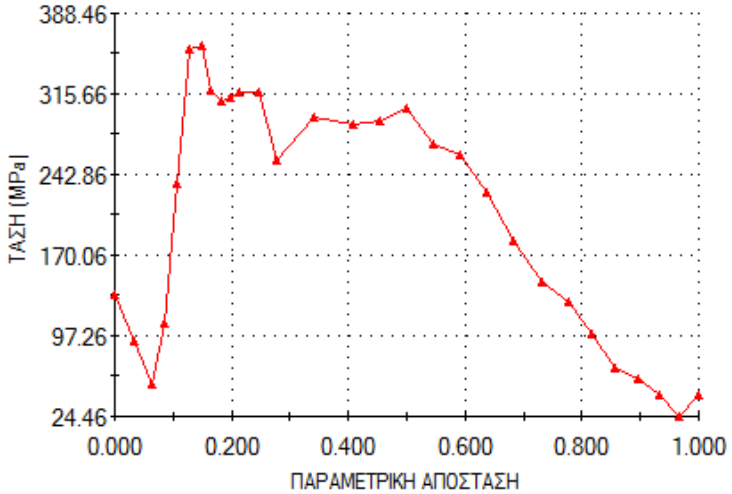


Εικόνα 12.28: Ανάλυση καταπόνησης πτερυγίου

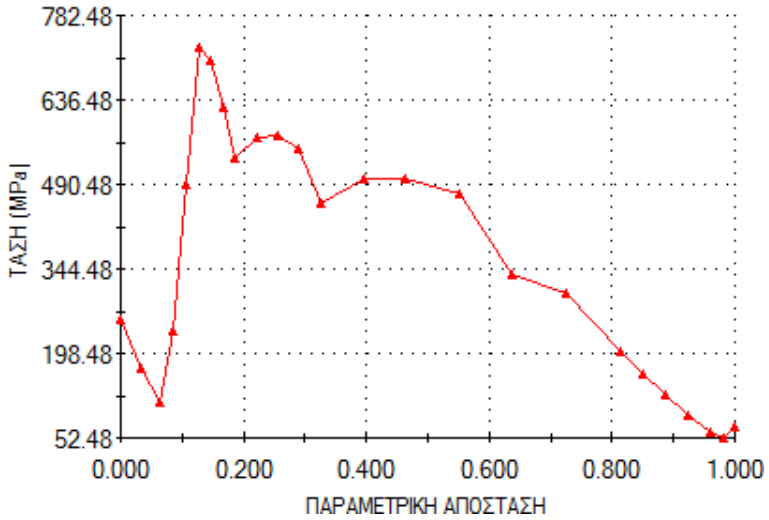
12.3.2.1 Διαγράμματα τάσεων και μετατοπίσεων πτερυγίων.



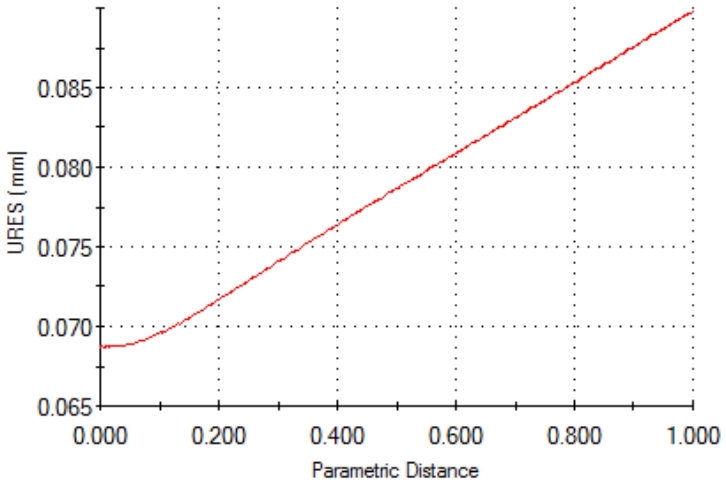
Εικόνα 12.29: Διάγραμμα τάσεων ακμής πτερυγίου στις 3344rpm (350r/s)



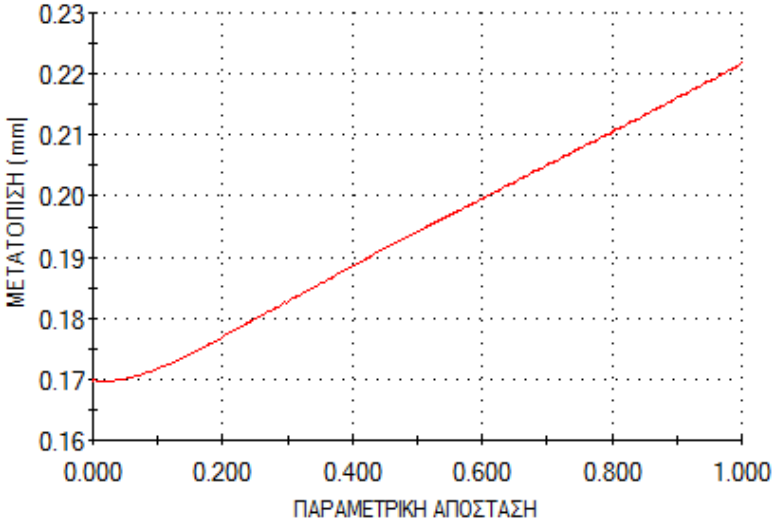
Εικόνα 12.30: Διάγραμμα τάσεων ακμής πτερυγίου στις 5255rpm (550r/s)



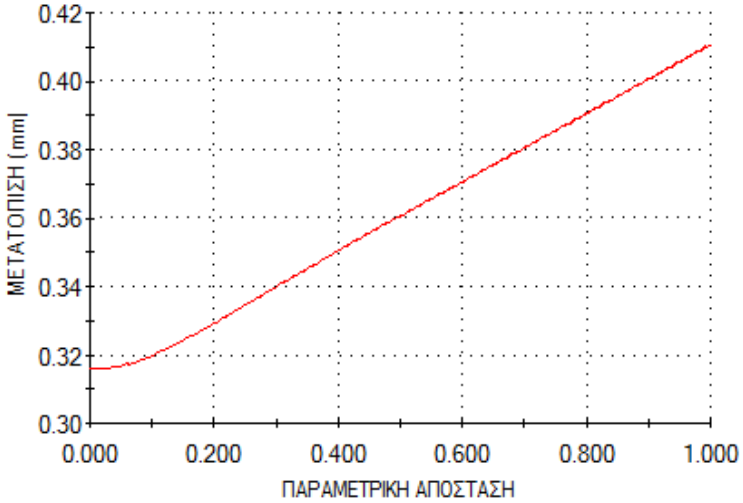
Εικόνα 12.31: Διάγραμμα τάσεων ακμής πτερυγίου στις 7166rpm (750r/s)



Εικόνα 12.32: Διάγραμμα μετόπισης ακμής πτερυγίου στις 3344rpm (350r/s)



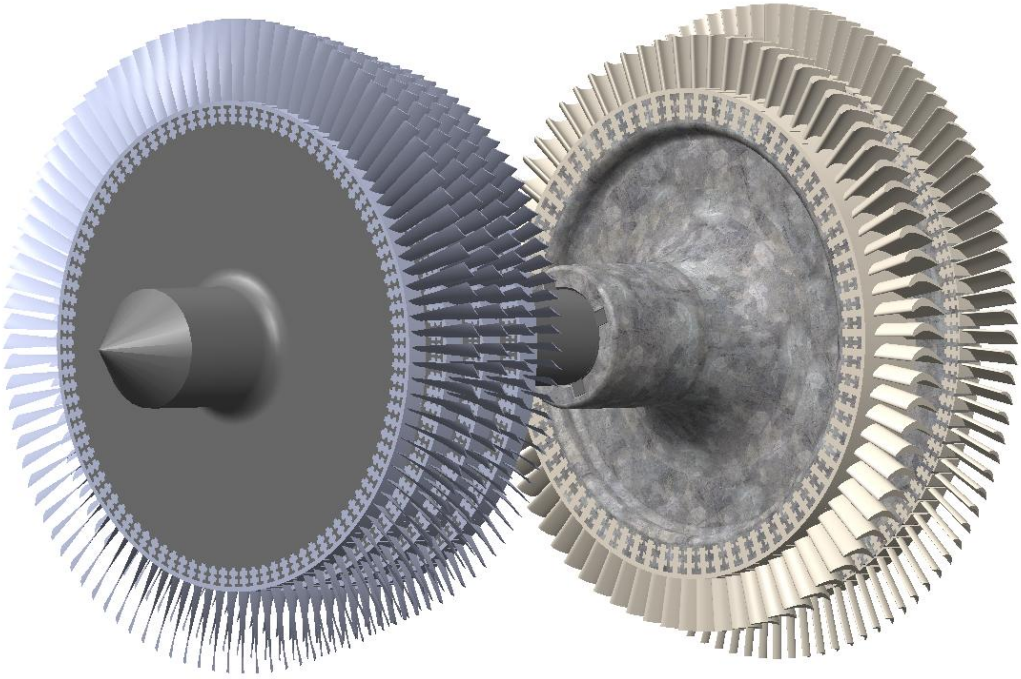
Εικόνα 12.33: Διάγραμμα μετόπισης ακμής πτερυγίου στις 5255rpm (550r/s)



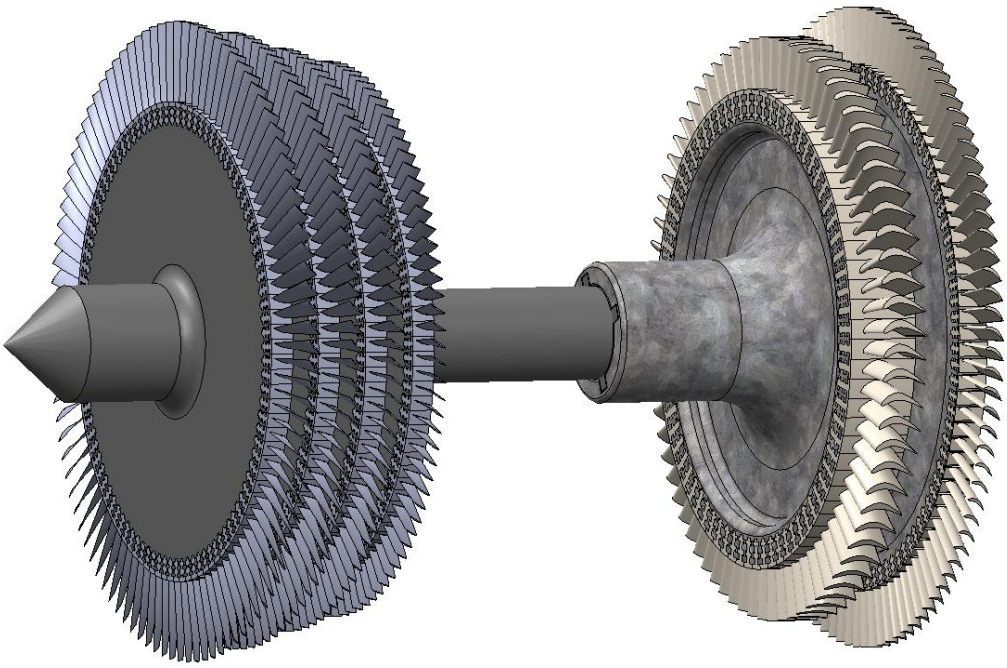
Εικόνα 12.34: Διάγραμμα μετόπισης ακμής πτερυγίου στις 7166rpm (750r/s)

ω(r/s)	n(rpm)	τάση(MPa)	μετατόπιση(mm)	καταπόνηση(Δl/l)
350	3343,9	3,16E+02	1,016E-01	1,23E-03
550	5254,8	8,50E+02	2,508E-01	2,94E-03
750	7165,6	1,29E+03	4,632E-01	4,11E-03

Εικόνα 12.35: Πίνακας μέγιστων τιμών



Εικόνα 12.36:Τελική συναρμολόγηση χωρίς ακμές



Εικόνα 12.37:Τελική συναρμολόγηση με ακμές

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Boles, M., A., & Cengel, Y., A. (2016). Η θερμοδυναμική για μηχανικούς (8η έκδοση), Τζιόλα, Θεσσαλονίκη.
2. Πολυζάκης, Α., (2012). Λειτουργία αεριοστροβίλων και παραγωγή ενέργειας- *Προώθηση Θεωρία, Ιδιωτική*, Πτολεμαίδα.
3. Συλλογικό έργο, *The jet engine, by Rolls Roys*, 5th Edition.
4. https://en.wikipedia.org/wiki/Gas_turbine
5. https://en.wikipedia.org/wiki/Turbine_blade
6. http://www.ijesmr.com/doc/Archive-2014/July-2014/02_A01_01.pdf
7. http://www.ijme.us/cd_08/PDF/120,_ENG_108.pdf
8. http://www.gruppofrattura.it/ocs/index.php/ICF/ICF10/paper/viewFile/4972/6979
9. http://www.dieselduck.info/machine/01%20prime%20movers/2015%20Advance%20materials%20for%20GT.pdf
10. https://powergen.gepower.com/content/dam/gepower-pgdp/global/en_US/documents/technical/ger/ger-3569g-advanced-gas-turbine-materials-coatings.pdf
11. http://cdn.intechweb.org/pdfs/22905.pdf
12. http://www.hightempmetals.com/techdata/hitempInconel718data.php
13. http://www.makeitfrom.com/material-properties/AISI-403-S40300-Stainless-Steel
14. http://www.makeitfrom.com/material-properties/Nickel-Alloy-718-2.4668-N07718-NA51