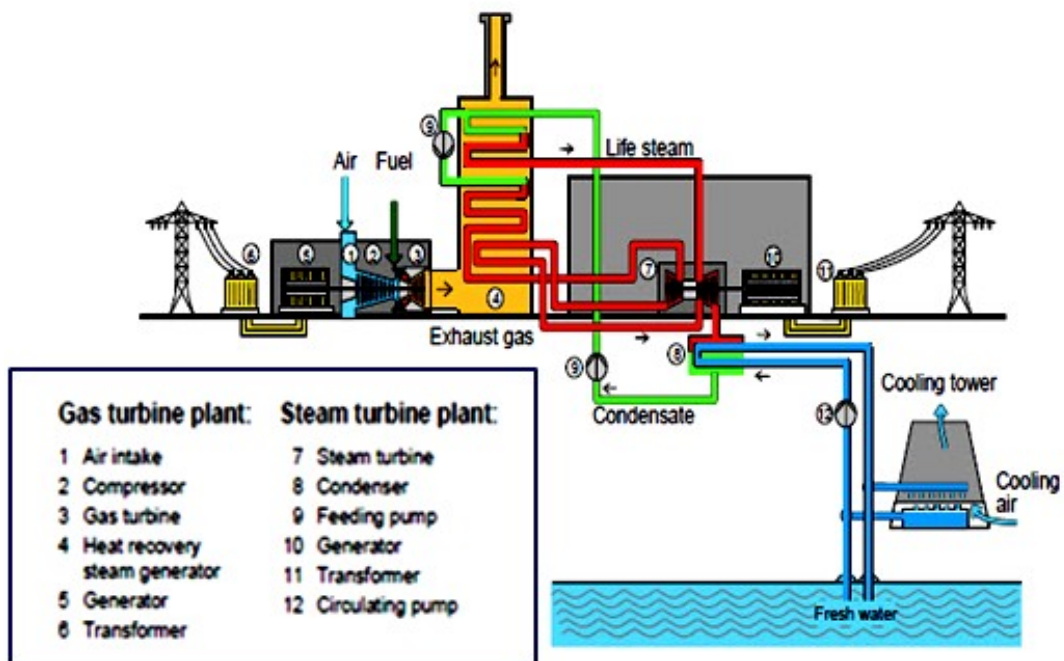


ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΒΑΘΜΟΥ
ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΣΤΑΘΜΟΥ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΟΥ ΚΥΚΛΟΥ
ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΜΟΝΗΣ ΠΙΕΣΗΣ



ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΖΟΓΚΑΣ (Α.Μ 6633)

ΘΕΟΔΩΡΟΣ ΠΑΠΑΝΙΚΟΛΑΟΥ (Α.Μ 6684)

ΕΠΟΠΤΕΥΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Δρ. ΠΟΛΥΖΑΚΗΣ ΑΠΟΣΤΟΛΟΣ

ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2020
ΠΑΤΡΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η Πτυχιακή Εργασία που εκπονήθηκε με στόχο την ολοκλήρωση των σπουδών μας στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών (πρώην Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε) του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου (πρώην Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Δυτικής Ελλάδας (Πάτρα)) και μελετά εργοστάσιο παραγωγής συνδυασμένου κύκλου μόνης πίεσης.

Η επιλογή του παρόντος θέματος έγινε με γνώμονα την εξέλιξη της τεχνολογίας σε ότι αφορά τους αεριοστρόβιλους και τους ατμοστρόβιλους. Επιπλέον, η διαδικασία υπολογισμών βασικών δεδομένων για την λειτουργία των ατμοστρόβιλων θεωρούνται από τις βασικές και απαραίτητες γνώσεις για έναν Μηχανολόγο Μηχανικό ο οποίος θέλει να ασχοληθεί με την βιομηχανία και την μαζική παραγωγή.

Από τη θέση αυτή θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά τον Δρ. Πολυζάκη Απόστολό, επιβλέπων της παρούσας πτυχιακής εργασίας, όπου μας εμπιστευτικέ για την εκπόνηση της. Επίσης, η βοήθεια και η καθοδήγηση του ήταν πολύτιμη καθώς προσπάθησε να μας μεταδώσει τις γνώσεις του πάνω στο συγκεκριμένο αντικείμενο.

Τέλος, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τις οικογένειες μας που στάθηκαν δίπλα μας σε όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μας στηρίζοντας μας όχι μόνο οικονομικά αλλά και ψυχολογικά καθώς επίσης και τους φίλους μας που ήταν εκεί σε ότι και αν χρειαστήκαμε δείχνοντας την αμέριστη συμπαράσταση τους.

Υπεύθυνη Δήλωση Σπουδαστών: Οι κάτωθι υπογεγραμμένοι σπουδαστές έχουμε επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνουμε υπεύθυνα ότι είμαστε συγγραφείς αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, αναλαμβάνοντας την ευθύνη επί ολοκλήρου του κειμένου εξ ίσου, έχουμε δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μας όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποιήσαμε και λάβαμε ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνουμε επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχουμε ενσωματώσει στην εργασία μας προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχουμε πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχουμε αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Οι σπουδαστές

Δημήτριος Ζόγκας

.....

(Υπογραφή)

Θεόδωρος Παπανικολάου

.....

(Υπογραφή)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία στοχεύει στην υλοποίηση μελέτης εργοστασίου παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος συνδυασμένου κύκλου μέσω μιας γενικής μεθόδου υπολογισμού του βαθμού απόδοσης και μιας αναλυτικής δίνοντας τα πραγματικά αποτελέσματα λειτουργίας.

Αρχικά αναλύονται οι αεριοστροβίλοι. Περιγράφεται η αρχή λειτουργίας τους και δίνονται οι πιο διαδεδομένοι τύποι αεροστροβίλων που είναι ο στροβιλοαντιδραστήρας, ελικοστροβίλος, αξονοστροβίλος, στροβιλοανεμιστήρας και ο στροβίλος αθόδουλος. Στη συνέχεια αναλύονται οι ατμοστροβίλοι, όπου περιγράφεται το κύκλωμα και ο τρόπος λειτουργίας τους, τα κύρια μέρη τους που είναι το στροφέιο και το κέλυφος, τα ακροφύσια και τα πτερύγια. Ακολουθεί η κατάταξη τους και οι τύποι των ατμοστροβίλων.

Ακολουθεί το θεωρητικό υπόβαθρό του εργοστασίου παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος συνδυασμένου κύκλου. Δίνονται οι αρχές των συνδυασμένων κύκλων, οι διαμορφώσεις του εργοστασίου συνδυασμένου κύκλου καθώς και τα κύρια εξαρτήματα. Έπειτα ακολουθεί η διαδικασία υπολογισμών στο σημείο σχεδιασμού του εργοστασίου παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος CCPP μονής πίεσης μέσα από μια γενική και αναλυτική μέθοδο. Στην συνέχεια γίνεται εφαρμογή της διαδικασίας μέσω συγκεκριμένων δεδομένων με στόχο την διεξαγωγή αποτελεσμάτων.

Τέλος, δίνονται τα συμπεράσματα της παρούσας πτυχιακής εργασίας, δίνοντας έμφαση στα αποτελέσματα και κυρίως στον βαθμό απόδοσης του εργοστασίου παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος συνδυασμένου κύκλου μονής πίεσης.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	i
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	ii
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1. ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟΙ.....	4
1.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΥΣ ΑΕΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥΣ.....	4
1.2. ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΑΕΡΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ.....	7
1.2.1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΑΕΡΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ.....	8
1.3. ΤΥΠΟΙ ΑΕΡΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ.....	9
1.3.1. ΣΤΡΟΒΙΛΟΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑΣ (TURBOJET ENGINE).....	11
1.3.2. ΕΛΙΚΟΣΤΡΟΒΙΛΟΣ (TURBOPROP ENGINE).....	12
1.3.3. ΑΞΟΝΟΣΤΡΟΒΙΛΟΣ (TURBOSHAFT ENGINE).....	14
1.3.4. ΣΤΡΟΒΙΛΟΑΝΕΜΙΣΤΗΡΑΣ (TURBOFAN ENGINE).....	14
1.3.5. ΣΤΡΟΒΙΛΟ-ΑΘΟΔΥΛΟΣ (TURBORAMJET).....	16
2. ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΑΤΜΟΣΤΡΟΒΙΛΟΙ.....	17
2.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΥΣ ΑΤΜΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥΣ.....	17
2.1.1. ΕΞΕΛΙΞΗ ΑΤΜΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ.....	18
2.2. ΚΥΚΛΩΜΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΑΤΜΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ.....	19
2.3. ΤΡΟΠΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΑΤΜΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ.....	21
2.4. ΤΑ ΚΥΡΙΑ ΜΕΡΗ ΤΟΥ ΑΤΜΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ.....	22
2.4.1. ΣΤΡΟΦΕΙΟ ΚΑΙ ΚΕΛΥΦΟΣ.....	23
2.4.2. ΑΚΡΟΦΥΣΙΑ ΚΑΙ ΡΟΗ ΑΤΜΟΥ ΜΕΣΑ ΑΠΟ ΑΥΤΑ.....	24
2.4.3. ΠΤΕΡΥΓΙΑ ΑΤΜΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ.....	24
2.5. ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΤΩΝ ΑΤΜΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ.....	25
3. ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΕΡΓΟΣΤΑΣΙΟ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΙΚΗΣΙΣΧΥΟΣ ΣΥΝΔΙΑΣΜΕΝΟΥ ΚΥΚΛΟΥ.....	27

3.1.	ΑΡΧΕΣ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΩΝ ΚΥΚΛΩΝ.....	27
3.2.	ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΕΡΓΟΣΤΑΣΙΩΝ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΟΥ ΚΥΚΛΟΥ.....	30
3.3.	ΚΥΡΙΑ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ ΤΟΥ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΟΥ ΚΥΚΛΟΥ.....	32
3.4.	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΣΤΟ ΣΗΜΕΙΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ CCPP ΜΟΝΗΣ ΠΙΕΣΗΣ.....	38
4.	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΣΤΟ ΣΗΜΕΙΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ CCPP ΜΟΝΗΣ ΠΙΕΣΗΣ.	51
4.1.	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΓΕΝΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ.....	51
4.2.	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ.....	54
	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	64
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	66
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΠΙΝΑΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ.....	68
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: EXCEL ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ.....	77

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Αεροστρόβιλο τύπου J85-GE-17A της εταιρίας General Electric (1970)	4
Εικόνα 2: Η σφαίρα του Ήρωνα	18
Εικόνα 3: Κατασκευή του GiovanniDiBranca.....	19
Εικόνα 4: Απεικόνιση κάτω ημικελύφους και σταθερών πτερυγίων ατμοστροβίλου υψηλής πίεσεως.....	23

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1: Αεριοστρόβιλος ανοικτού τύπου λειτουργίας [3].....	5
Σχήμα 2: Αεριοστρόβιλος κλειστού τύπου λειτουργίας [3].....	6
Σχήμα 3: Βασικά μέρη αεριοστρόβιλου [4].....	7
Σχήμα 4: Θεωρητικός κύκλος του Brayton [5].....	9
Σχήμα 5: Βασικοί τύπου αεριοστρόβιλων [6].....	10
Σχήμα 6: Στροβιλοαντιδραστήρα [8].....	12
Σχήμα 7: Ελικοστρόβιλος [8].....	12
Σχήμα 8: Ελικοστρόβιλος κινητήρας T-53 [6].....	13
Σχήμα 9: Ελικοστρόβιλος κινητήρας T-56 [6].....	13
Σχήμα 10: Στροβιλοανεμιστήρα [11].....	14
Σχήμα 11: Στροβιλο – αθόδουλο [5].....	16
Σχήμα 12: Τροχοί με πτερύγια.....	17
Σχήμα 13: Διάγραμμα λειτουργίας εγκατάστασης ατμοστρόβιλου [15].....	20
Σχήμα 14: Διάταξη στροβιλοεγκατάστασης [15].....	20
Σχήμα 15: Καταστατική μεταβολή κατά την εκτόνωση ατμού στο στρόβιλο [15].....	22
Σχήμα 16: Τυπικές μορφές ακροφυσίων ατμοστρόβιλου [15].....	24
Σχήμα 17: Πτερύγια ατμοστροβίλων.....	24
Σχήμα 18: Απεικόνιση ατμοστροβίλου υψηλής, μέσης, χαμηλής πίεσεως [15].....	26
Σχήμα 19: Στρόβιλος αντιδράσεως ακτινικής ροής [15].....	26
Σχήμα 20: Block – διάγραμμα συνδυασμένου κύκλου [18].....	28
Σχήμα 21: T-s διάγραμμα πραγματικού συνδυασμένου κύκλου [19].....	28
Σχήμα 22: Τυπικό διάγραμμα έργου κατασκευής CCPP [1].....	30
Σχήμα 23: Διαμόρφωση (α) Multi-shaft CCPP και(β) Single-shaft CCPP [21].....	31
Σχήμα 24: Σχηματικό διάγραμμα της HRSG μονής πίεσης [20].....	33
Σχήμα 25: Διάγραμμα μεταφοράς θερμότητας σε HRSG μονής πίεσης [20].....	34
Σχήμα 26:Τυπική διαμόρφωση αεριοστρόβιλου.....	35
Σχήμα 27: Παράμετροι σχεδιασμού συμπυκνωτή [1].....	36
Σχήμα 28: α)Σύστημα άμεσης ψύξης με νερό ποταμού ή θαλασσινό νερό ,β) Πύργος ψύξης, γ) Αεροσυμπυκνωτής, δ)Υβριδικές λύσεις.....	38
Σχήμα 29: Διάγραμμα λειτουργίας εργοστασίου συνδυασμένου κύκλου μονής πίεσης.....	39
Σχήμα 30: Γενικό διάγραμμα ενεργειακής ροής ισχύος γενικής μεθόδου.....	40
Σχήμα 31:Κύκλος ατμού (απλός).....	41
Σχήμα 32: T-s διάγραμμα μεταφορά θερμότητας CCPP εργοστασίου μονής πίεσης.....	46
Σχήμα 33: Διάγραμμα λειτουργίας εργοστασίου συνδυασμένου κύκλου μονής πίεσης.....	51
Σχήμα 34: Γενικό διάγραμμα ενεργειακής ροής ισχύος γενικής μεθόδου.....	53
Σχήμα 35: T-s διάγραμμα μεταφορά θερμότητας CCPP εργοστασίου μονής πίεσης (Περίπτωση μελέτης).....	63

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα αεριοστρόβιλων ανοικτού τύπου [3].....	5
Πίνακας 2: Βασικές κατηγορίες αεριοστρόβιλων [7].....	11
Πίνακας 3: Πλεονεκτήματα στροβιλοανεμιστήρων υψηλού και χαμηλού λόγου παράκαμψης [1].....	15
Πίνακας 4: Δεδομένα υπολογισμού ολικής απόδοσης συνδυασμένου κύκλου.....	52
Πίνακας 5: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων του υπολογισμού της ολικής απόδοσης συνδυασμένου κύκλου μονής πίεσης.....	53
Πίνακας 6: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων μίγμα νερού / ατμού και τροφοδοτικής αντλίας.....	54
Πίνακας 7: Στοιχεία σημείου F, θερμοκρασία κορεσμού του υγρού, ενθαλπία κορεσμού του υγρού και την εντροπία κορεσμού του υγρού.....	55
Πίνακας 8: Σημεία μετάβασης από F σε E και σημείο E.....	55
Πίνακας 9: Σημείο A, σημεία μετάβασης από E σε A και σημεία μετάβασης από A σε G.....	57
Πίνακας 10: Σημεία μετάβασης από C σε B, σημείο C και σημείο B.....	58
Πίνακας 11: Δεδομένα για αναλυτική μέθοδο υπολογισμού του σημείο σχεδιασμό CCPP μονής πίεσης.....	58
Πίνακας 12: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων μετάβασης σημείων από 1 έως 3 και από 3 έως 4.....	61
Πίνακας 12: Συγκεντρωτικός Πίνακας Αποτελεσμάτων μετάβασης από το σημείο A στο G..	62

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ολοένα αυξημένη ζήτηση για ενέργεια οδήγησε μετά το 1970 την δημιουργία σταθμών συνδυασμένου κύκλου. Οι σταθμοί συνδυασμένου κύκλου (CCPP) εξυπηρετούν την αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας από τη δεκαετία του 1970. Τα τελευταία 40 χρόνια, οι ανάγκες μετατοπίστηκαν από ταχεία και χαμηλού κόστους παροχές ηλεκτρικού ρεύματος προς μια βιώσιμη και ευέλικτη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η ανάπτυξη αυτού του είδους εγκαταστάσεων ξεκίνησε τη δεκαετία του 1980 όταν το φυσικό αέριο ήταν ευρέως διαθέσιμο ως εγχώριο καύσιμο στην Ευρώπη και την Ασία και τα εργοστάσια είχαν χαμηλό κόστος κεφαλαίου, μπορούσαν να κατασκευαστούν γρήγορα και είχαν χαμηλό κόστος συντήρησης. Χρησιμοποιούνταν όλο και περισσότερο για την εξυπηρέτηση της αυξανόμενης αγοράς IPP (Ανεξάρτητη Παραγωγός Ισχύος), αλλά και για την κάλυψη των επεκτατικών αναγκών χρησιμότητας. Αργότερα στη δεκαετία του 1990, αυτή η ιδέα του εργοστασίου απέκτησε επιπλέον αξία ως η χαμηλότερη γεννήτρια εκπομπών εκτός από την πυρηνική ενέργεια. Αρχίζοντας γύρω στο 2000, η ευελιξία άρχισε να αποκτά μεγαλύτερη σημασία ως τρόπος αντιστάθμισης του αυξανόμενου μεριδίου της διακύμανσης της παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές στο σύστημα. Με τα χρόνια, οι μονάδες συνδυασμένου κύκλου έχουν βελτιστοποιηθεί με περαιτέρω καινοτομίες στον τομέα των αεριοστροβίλων, των ατμοστροβίλων και των τεχνολογιών γεννήτριας, καθώς και στον κύκλο ατμού / νερού, προκειμένου να ανταποκριθούν στην αυξανόμενη τάση προς βιώσιμες τεχνολογίες, να μειώσουν την κατανάλωση πόρων και να ελαχιστοποιήσουν τα ορυκτά εκπομπών. Οι εγκαταστάσεις συνδυασμένου κύκλου χρησιμοποιούνται σήμερα, ακόμη και αν ο άνθρακας είναι άφθονος, ως μέσο διαφοροποίησης της πρωτογενούς ενέργειας και της πολύτιμης δυναμικότητας εφεδρείας. να μειωθεί η κατανάλωση πόρων και να ελαχιστοποιηθούν οι εκπομπές ορυκτών καυσίμων. Οι εγκαταστάσεις συνδυασμένου κύκλου χρησιμοποιούνται σήμερα, ακόμη και αν ο άνθρακας είναι άφθονος, ως μέσο διαφοροποίησης της πρωτογενούς ενέργειας και της πολύτιμης δυναμικότητας εφεδρείας.

Οι μονάδες παραγωγής ενέργειας με φυσικό αέριο με υπερσύγχρονους αεριοστροβίλους είναι εξαιρετικά εξελιγμένες έννοιες εργοστασίων και τεχνολογιών που προσφέρουν άριστη λειτουργικότητα, αξιοπιστία και φιλικότητα προς το περιβάλλον. Η βιομηχανία ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στην επίτευξη μακροπρόθεσμης βιωσιμότητας της παραγωγής ορυκτών ηλεκτρικής ενέργειας με εξαιρετικά μεγάλη εξοικονόμηση πόρων και χαμηλότερες εκπομπές CO₂ μόνο με τόσο υψηλή ισχύ καινοτομίας. Συγκρίνοντας την απόδοση και τα επίπεδα εκπομπών CO₂ όλων των τύπων μονάδων παραγωγής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα, αυτές οι μονάδες συνδυασμένου κύκλου βασισμένες σε αεριοστροβίλους είναι η πιο βιώσιμη, προβλέψιμη και αξιόπιστη τεχνολογία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που είναι διαθέσιμη προς το παρόν. CO₂ οι εκπομπές από τις σύγχρονες μονάδες συνδυασμένου κύκλου με καύση φυσικού αερίου είναι περίπου 57% χαμηλότερες από τις εκπομπές από υπερσύγχρονα εργοστάσια με καύση άνθρακα.

Η προηγμένη τεχνολογία συνδυασμένου κύκλου βασίζεται στις τελευταίες εξελίξεις στην τεχνολογία αεριοστροβίλων που επιτρέπουν την υψηλότερη ροή μάζας, χαμηλότερες απώλειες στους συμπιεστές, θερμοκρασία εισόδου στροβίλου άνω των 1.500 ° C και βελτιστοποιημένες αναλογίες πίεσης για να ικανοποιούν και τις απαιτήσεις ενός ατμού υψηλής θερμοκρασίας. Αυτές οι εξελίξεις υποστηρίζονται από τη χρήση βελτιωμένων και ακόμη και νέων υλικών σε όλο τον περιστρεφόμενο εξοπλισμό, κεραμικά στα τμήματα καύσης και στροβίλων και σύγχρονα εργαλεία σχεδιασμού και υπολογισμού και καινοτομίες σε άλλες περιοχές.

Οι πλήρως ανεπτυγμένες στο νερό γεννήτριες και οι ατμοστρόβιλοι υψηλής θερμοκρασίας συμβάλλουν επίσης στις χαμηλότερες εκπομπές CO₂, NO_x και SO₂ καθώς και στην υψηλότερη απόδοση για όλες τις μονάδες παραγωγής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα. Στον αντίστοιχο κύκλο ατμού / νερού, η χρήση νέων υλικών καθώς και πρωτοποριακών ατμογεννητριών βοήθησε στην αύξηση της απόδοσης κατά τα τελευταία 15 χρόνια από περίπου 50% σε αποδεδειγμένο ρεκόρ 60,75% (LHV) που μετρήθηκε στη UlrichHartmann (Irsching 4) στα μέσα του 2011. Το εργοστάσιο έχει από τότε συγκεντρώσει πάνω από 15.000 ώρες εμπορικής λειτουργίας.

Τα εργοστάσια CCPP στο Andong και DaeguCity της Νότιας Κορέας αποτελούν εξαιρετικά παραδείγματα της επιτυχίας αυτής της προηγμένης τεχνολογίας σε αγορές όπως η Ασία, οι οποίες έχουν υψηλές τιμές αερίου μέσω προμηθειών ΥΦΑ (Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο). Από το 2015, οι δύο αυτές εγκαταστάσεις - με δυναμικότητα από 400 έως 420 MW και απόδοση 61% καθαρά - θα παράσχουν ηλεκτρική ενέργεια σε περίπου 200.000 αστικά νοικοκυριά και θα εξοικονομήσουν φυσικό αέριο και περίπου 3,5 εκατομμύρια τόνους CO₂ ετησίως σε σύγκριση με τα υπάρχοντα σταθμών ηλεκτροπαραγωγής στην περιοχή.

Σε χώρες όπως η Γερμανία, η τεχνολογία αυτή υποστηρίζει επίσης την τρέχουσα μετάβαση στην ενέργεια προς ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, δεδομένου ότι η ιδέα της εγκατάστασης επιτρέπει εξαιρετικά ευέλικτη λειτουργία για τη στήριξη ισχύος για διακυμάνσεις των αιολικών και ηλιακών πηγών και εξασφαλίζει την αξιοπιστία και τη σταθερότητα του δικτύου. Ο όρος «συνδυασμένος κύκλος» περιγράφει τον συνδυασμό δύο θερμοδυναμικών κύκλων, όπου ο αεριοστρόβιλος (κύκλος Brayton) καίει φυσικό ή συνθετικό αέριο από άνθρακα / υπολείμματα / πετρέλαιο και τα καυτά του καυσαέρια που τροφοδοτούν ένα μικρό σταθμό ατμού (κύκλος Rankine). Οι μονάδες παραγωγής ενέργειας συνδυασμένου κύκλου (CCPP) μπορούν σήμερα να επιτυγχάνουν θερμική απόδοση άνω του 60%, σε σύγκριση με μονάδες παραγωγής αερίου ενός κύκλου που περιορίζονται σε απόδοση περίπου 35 έως 42%.

Η αποδοτικότητα, η οποία ορίζεται ως η χρησιμοποιούμενη ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από το εργοστάσιο διαιρούμενη με ενέργεια καυσίμου, καθορίζεται από τους ακόλουθους παράγοντες:

- Αποδοτικότητα του αεριοστρόβιλου και του άλλου περιστρεφόμενου εξοπλισμού μέσω του αεροδυναμικού σχεδιασμού, της τεχνολογίας ψύξης και της ανώτερης θερμοκρασίας της διαδικασίας Brayton (θερμοκρασία εισόδου στροβίλου),
- Σχεδιασμός αποτελεσματικότητας του κύκλου Rankine μέσω της θερμοκρασίας και της πίεσης του ατμού που παράγεται από μία μόνο πίεση σε ένα κύκλο τριπλής επαναθέρμανσης με την πίεση συμπυκνωτή ως χαμηλότερη θερμοκρασία επεξεργασίας,
- Τεχνολογία ψύξης που χρησιμοποιείται ως άμεσο νερό- προς έμμεσο αέρα- και για την κατευθυνόμενη ψύξη του αέρα.

Τα CCPP σήμερα επιτυγχάνουν απόδοση που κυμαίνεται από 52 έως 61%, ανάλογα με τους παραπάνω παράγοντες και τις περιβαλλοντικές συνθήκες όπως η θερμοκρασία εισόδου αέρα και η θερμοκρασία ψύξης.

Η αυξανόμενη απόδοση που επιτεύχθηκε με την πάροδο των ετών καταδεικνύει το τεράστιο δυναμικό καινοτομίας και την πρόοδο της ανάπτυξης που υποστηρίζει αυτή την τεχνολογία των εγκαταστάσεων.

Τεχνολογίες

Αυτές οι βελτιώσεις είναι αξιοσημείωτες και οδήγησαν σε διάφορες καινοτομίες και εξελίξεις στους ακόλουθους τομείς:

- αεριοστρόβιλοι με αυξημένες θερμοκρασίες πυροδότησης,
- προηγμένα βασικά υλικά και κεραμικά, ιδιαίτερα στη διαδρομή θερμού αερίου του αεριοστρόβιλου,
- προηγμένες τεχνολογίες ψύξης όπως η ψύξη των ταινιών στις πρώτες σειρές λεπίδων και πτερυγίων,

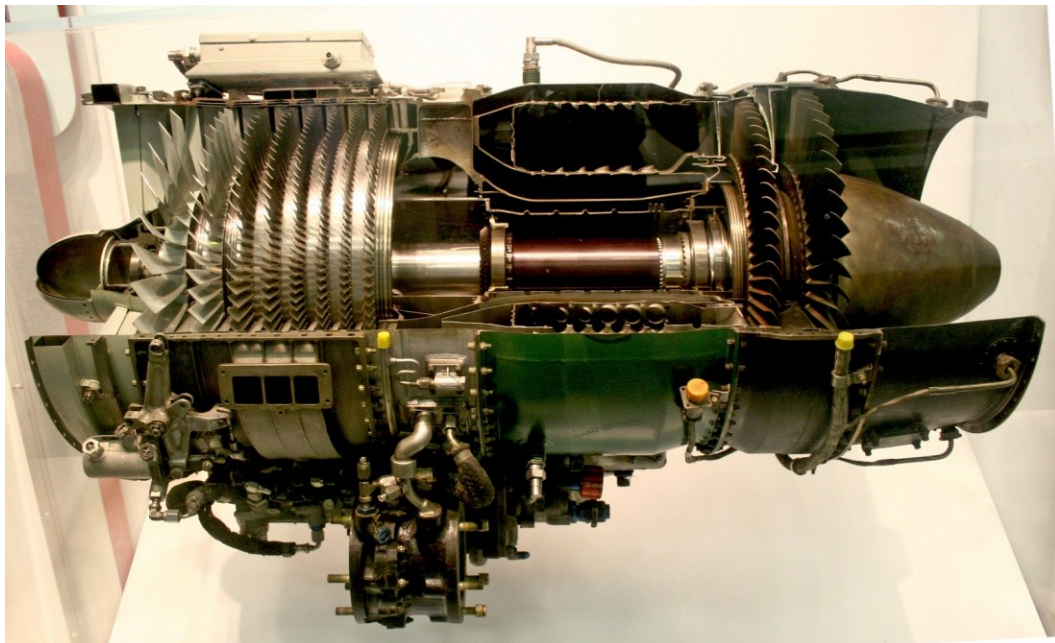
- μειωμένες απώλειες στον περιστρεφόμενο εξοπλισμό μέσω εκλεπτυσμένων σχεδίων και σφραγίδων,
- προηγμένα υλικά και σχεδιασμός διεργασιών για τον εναλλάκτη θερμότητας εξαγωγής HRSG,
- σχεδιασμό HRSG μία φορά (Benson) για τη μείωση των απωλειών,
- τεχνολογία ατμοστρόβιλων υψηλής θερμοκρασίας που παράγεται από μονάδες παραγωγής ατμού,
- άλλες τεχνικές για τη βελτίωση της βιωσιμότητας των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής και της οικολογικής φιλικότητας μπορούν να εφαρμοστούν κατά περίπτωση ανάλογα με τις απαιτήσεις των πελατών,
- τεχνολογία καύσης με χαμηλή περιεκτικότητα σε NO_x για τη μείωση των εκπομπών σε λιγότερο από 25 (προς ένα μόνο ψηφίο) ppm,
- επιλεκτική καταλυτική αναγωγή (SCR) για NO_x: εφαρμογή ενός καταλυτικού μετατροπέα διοξειδίου του τιτανίου με βάση το με NH₃ (αμμωνία ή ουρία) για τη μείωση των NO_x εκπομπών από περαιτέρω 70 έως 90%.
- καταλύτη οξειδωσης CO για να οξειδώσει το άκαυστο CO σε CO₂ και να επιτρέψει ευρύτερο εύρος λειτουργίας,
- Έννοια της εγκατάστασης Flex ή FACY (FACY) για τη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και των εκπομπών CO₂ κατά την εκκίνηση μέσω της ολοκληρωμένης και καινοτόμου τεχνολογίας υλικού και λογισμικού,
- WETEX: συνδυασμένες τεχνολογίες για τη μείωση της κατανάλωσης νερού στο μηδέν,
- CCS (Συλλογή και αποθήκευση άνθρακα) υπό ανάπτυξη για εγκαταστάσεις άνθρακα και φυσικού αερίου.

1. ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟΙ

1.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΥΣ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥΣ

Η χρήση των αεριοστρόβιλων σε αεροσκάφη οδήγησε στην ολοένα και πιο βελτιωμένη τεχνολογία τους. Με μία γρήγορη ιστορική αναδρομή αναφέρουμε ότι το 1921 δόθηκε ο πρώτο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για την χρήση αεριοστρόβιλου σε αεροσκάφος. Έπειτα, το 1939 ακολούθησε η πρώτη κατασκευή αεροσκάφους που ως μέσο κίνησης είχε έναν αεριοστρόβιλο. Είναι γεγονός όμως ότι οι βαθμοί απόδοσης ήταν ιδιαίτερα χαμηλοί, κατά συνέπεια οι κατασκευαστικές εταιρείες άρχισαν να πραγματοποιούν διαρκής προσπάθειες για να βελτιώσουν τόσο τον βαθμό απόδοσης όσο και γενικά χαρακτηριστικά των αεριοστρόβιλων με βασικό χαρακτηριστικό την ταχύτητα.

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να αναφέρουμε την εταιρεία General Electric, η οποία είναι μία από τις πρώτες εταιρείες η οποία κατασκεύασε το 1970 τον αεριοστρόβιλο τύπου J85-GE-17A. Ο αεριοστρόβιλος αυτού του τύπου παρουσίασε σημαντική βελτίωση του βαθμού απόδοσης, της ταχύτητας και παράλληλα τα υλικά από τα οποία κατασκευάστηκε ήταν βασισμένα στις απαιτήσεις της εποχής.



Εικόνα 1: Αεριοστρόβιλο τύπου J85-GE-17A της εταιρίας General Electric (1970) [2]

Συνοπτικά περιγράφοντας έναν αεριοστρόβιλο θα πρέπει αρχικά να αναφέρουμε ότι είναι μία μηχανή εσωτερικής καύσης (Μ.Ε.Κ.) συνεχούς ροής. Συγκρίνοντας το βάρος και το μέγεθος ενός αεριοστρόβιλου με την παραγόμενη ισχύ θα μπορούσαμε να πούμε ότι παράγει αρκετά μεγάλη ισχύ για τα χαρακτηριστικά της. Χαρακτηριστικό παράδειγμα του

προαναφερθέντος είναι η σύγκριση του λόγου παραγωγής ώσης ανά μονάδα βάρους των αεροπορικών κινητήρων και των εμβολοφόρων κινητήρων ίδιου βάρους, όπου στους πρώτους ο λόγος παραγωγής ώσης ανά μονάδα βάρους είναι από 5 έως 9 φορές μεγαλύτερος από αυτόν των δεύτερων.

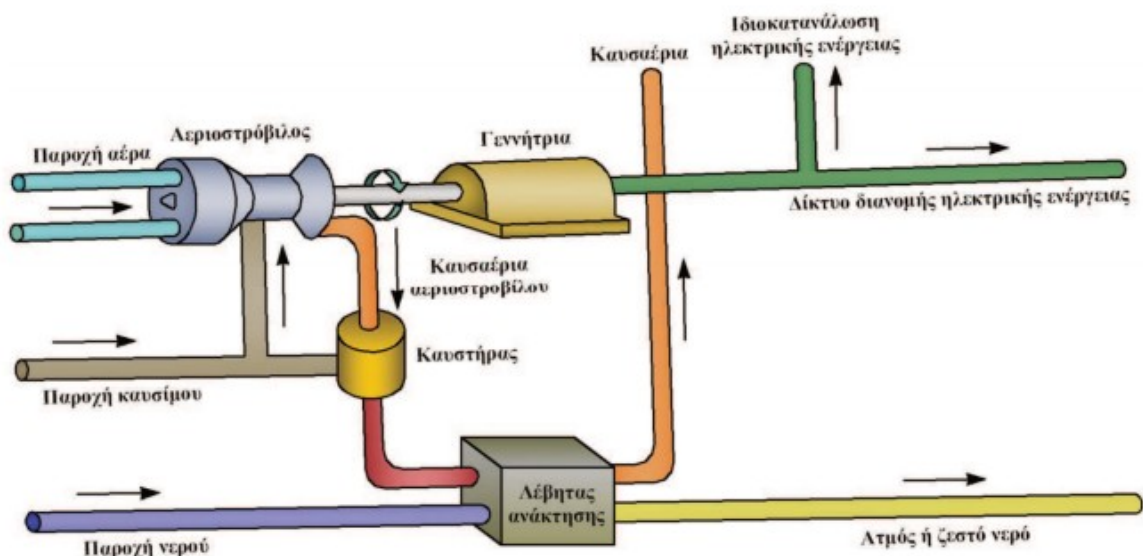
Βασικό κριτήριο διαχωρισμού των αεριοστρόβιλων σε κατηγορίες είναι η δυνατότητα ή μη ανακύκλωσης του θερμοδυναμικού μέσου. Έτσι οι αεριοστρόβιλοι κατηγοριοποιούνται ως εξής:

- Αεριοστρόβιλοι ανοικτού τύπου
- Αεριοστρόβιλοι κλειστού τύπου

Βασικό χαρακτηριστικό των αεριοστρόβιλων ανοικτού τύπου είναι ότι ο ατμοσφαιρικός αέρας εισρέει διαρκώς μέσα από τον συμπιεστή, ενώ παράλληλα η ενέργεια προστίθεται με την καύση του καυσίμου με τον αέρα στο θάλαμο καύσης. Εκτόνωση των καυσαερίων πραγματοποιείται στον στρόβιλο και στο τελικό ακροφύσιο εξαγωγής από το οποίο οδηγούνται στην ατμόσφαιρα. Οι ανοικτού τύπου αεριοστρόβιλοι είναι και οι επικρατέστεροι στη αγορά μέχρι και σήμερα.

ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟΙ ΑΝΟΙΚΤΟΥ ΤΥΠΟΥ	
ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Παρουσιάζουν σχετική απλότητα στην εγκατάσταση και λειτουργία τους ▪ Άριστη λειτουργία σε σταθερό αριθμό στροφών υπό σταθερό φορτίο ▪ Υψηλή αδράνεια, η οποία οφείλεται στην αντίσταση του συμπιεστή επειδή ελαττώνει τον κίνδυνο υπερβολικής ταχύτητας στην ξαφνική απώλεια φορτίου 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Η μεταβολή ισχύος επιτυγχάνεται με την μεταβολή της ροής καυσίμου με συνέπεια την μείωση της πίεσης του κύκλου καθώς και της μέγιστης θερμοκρασίας με συνέπεια την πτώση της θερμικής απόδοσης.

Πίνακας 1: Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα αεριοστρόβιλων ανοικτού τύπου [3]

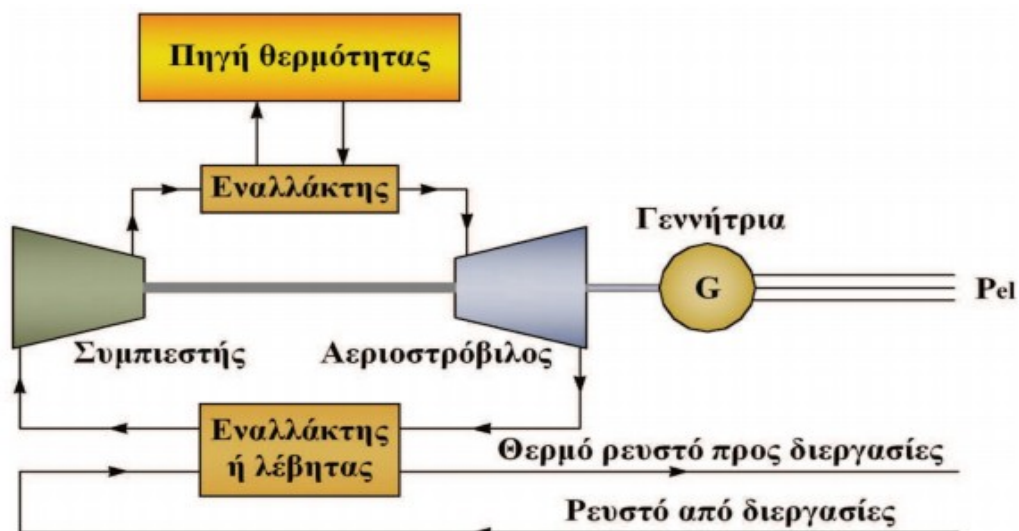


Σχήμα 1: Αεριοστρόβιλος ανοικτού τύπου λειτουργίας [3]

Όσον αφορά τους κλειστού τύπου αεριοστρόβιλους, ο εξαγόμενος από αυτούς αέρας οδηγείται ξανά στην είσοδο του κινητήρα με αποτέλεσμα την ανακύκλωσή του. Θα πρέπει ωστόσο να σημειωθεί ότι ο αέρας που επιστρέφει είναι «καθαρός». Επιπροσθέτως, η διαδικασία της καύσης δεν κάνει χρήση του αέρα του κυκλώματος λόγω του ότι θα εξατμούνταν ταχύτατα το υπάρχον στο κλειστό κύκλωμα οξυγόνο. Για τους λόγους που προαναφέραμε γίνεται αντιληπτή η απαίτηση είτε χρήσης θερμαντήρα είτε εναλλάκτη θερμότητας με σκοπό την παραγωγή θερμικής ενέργειας. Επιπλέον, η διαδικασία της καύσης θα πρέπει να λαμβάνει χώρο σε απομονωμένο εξωτερικό καυστήρα.

Συνεπώς το αέριο του οποίου γίνεται χρήση εντός του αεριοστρόβιλου θα μπορούσε εκτός από τον αέρα να είναι οποιοδήποτε αέριο παρουσιάζει βέλτιστες θερμοδυναμικές ιδιότητες. Όπως συμβαίνει στους αεριοστρόβιλους ανοικτού τύπου, έτσι και στους αεριοστρόβιλους κλειστού τύπου παρουσιάζονται κάποια πλεονεκτήματα και κάποια μειονεκτήματα τα οποία αναφέρονται επιγραμματικά στην συνέχεια του εδαφίου.

ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΤΥΠΟΥ	
ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Υψηλή πίεση αερίου εντός του κλειστού κυκλώματος ▪ Δυνατότητα αυξομείωσης της πίεσης μπορεί να επηρεάσει την παραγόμενη ισχύ χωρίς την μεταβολή παροχής καυσίμου ▪ Χρήση διάφορων αερίων με στόχο την εκμετάλλευση των θερμικών τους ιδιοτήτων ▪ Η μεταφορά θερμότητας στον εναλλάκτη βελτιώνεται λόγω της υψηλής πυκνότητας αερίου ▪ Μείωση των διαβρώσεων και των φθορών των πτερυγίων του στρόβιλου που δημιουργούνται από τα προϊόντα καύσης ▪ Με απαίτηση φιλτραρίσματος του εισερχόμενου αέρα στον κύκλο του αεριοστρόβιλου 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Υποχρεωτικό εξωτερικό σύστημα θέρμανσης, στο οποίο περιλαμβάνεται ο εξωτερικός θάλαμος καύσεως ▪ Ύπαρξη διαφόρων προβλημάτων που οφείλονται στις υψηλές πιέσεις (π.χ. διαρροές)



Σχήμα 2: Αεριοστρόβιλος κλειστού τύπου λειτουργίας [3]

Σήμερα, οι κλειστού κύκλου αεριοστρόβιλοι έχουν ισχύ από 2 έως 30 MW και ως μέσο για την λειτουργία τους χρησιμοποιούν τον ατμοσφαιρικό αέρα. Σαν καύσιμο κάνουν χρήση πετρελαίου, άνθρακα και φυσικού αερίου.

Γενικά, οι αεριοστρόβιλοι συγκρινόμενοι με άλλα συστήματα όπως είναι οι Μηχανές Εσωτερικής Καύσεως (ΜΕΚ) τείνουν να είναι αποδοτικότεροι. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζουν καλύτερο βαθμό απόδοσης αλλά και ταχύτητας. Αυτό οφείλεται στα στοιχεία απλότητας που παρουσιάζουν και συγκεκριμένα στα ακόλουθα εξής στοιχεία τους:

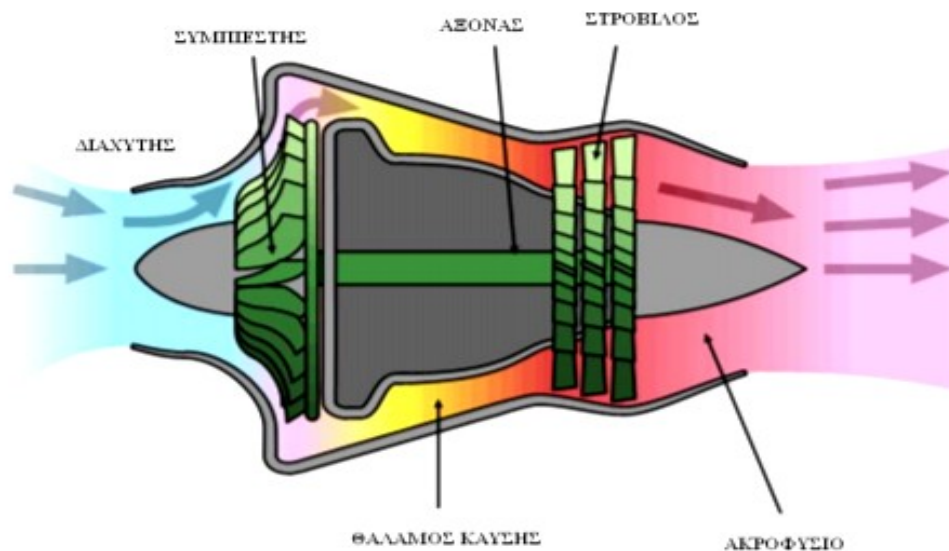
- Μεγάλη ομοιομορφία στρεπτικής ροπής και ταχύτητας περιστροφής,
- Απλούστευση των προβλημάτων στεγανότητας.
- Απλούστευση των προβλημάτων λίπανσης.
- Μείωση των μηχανικών απωλειών.
- Υψηλή τιμή του άνω ορίου για την ταχύτητα περιστροφής.
- Γρήγορη εκκίνηση από κρύα κατάσταση.
- Μη αναγκαιότητα ψυκτικού ύδατος.

1.2. ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΑΕΡΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ

Είναι γεγονός ότι οι αεριοστρόβιλοι αποτελούν έναν ευρέως διαδεδομένο και αποτελεσματικό κινητήρα αεριώθησης. Τον «σκελετό» των αεριοστρόβιλων αποτελούν τα ακόλουθα τμήματα:

- Εισαγωγή (intake)
- Συμπιεστής (compressor)
- Θάλαμος καύσης (combustion chamber)
- Στρόβιλος (compressor turbine)
- Ακροφύσιοεξαγωγής (propelling exhaust nozzle)

Στην συνέχεια του εδαφίου ακολουθεί σχηματική απεικόνιση του «σκελετού» ενός αεριοστρόβιλου (Σχήμα 3).



Σχήμα 3: Βασικά μέρη αεριοστρόβιλου [4]

Κάθε στρόβιλος ξεκινά την λειτουργία του όταν η παροχή μάζας από το τμήμα εισαγωγής μεταφέρεται στον συμπίεστή. Στο τμήμα του συμπίεστή πραγματοποιείται η συμπίεσή της και έπειτα η μεταφορά της στον θάλαμο καύσης. Κατά την διεργασία της συμπίεσης παρατηρείται διατήρηση της θερμοκρασίας στα ίδια επίπεδα με την θερμοκρασία εισαγωγής, ενώ παράλληλα παρατηρείται αύξηση της πίεσης. Ωστόσο, στον θάλαμο καύσης η θερμοκρασία του αέρα αυξάνει με την καύση του καυσίμου διατηρώντας την πίεση σταθερή. Στη συνέχεια αναμειγνύεται με το εκχυόμενο καύσιμο για να πραγματοποιηθεί η διεργασία της καύσης, κατά την οποία γίνεται παραγωγή θερμών καυσαερίων τα οποία εκτονώνονται και μεταφέρονται στην εξαγωγή του αεριοστρόβιλου. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να σημειωθεί ότι η μεταφορά αυτήν των καυσαερίων προκαλεί την περιστροφή του στρόβιλου. Ο στρόβιλος και ο συμπίεστής είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους με έναν κοινό άξονα, ενώ στο τμήμα του αεριοστρόβιλου παρατηρείται μείωση της θερμοκρασίας και της πίεσης.

Έπειτα, συνεχίζεται η εκτόνωση των καυσαερίων τα οποία περνούν στο ακροφύσιο εξόδου. Κατά την εξαγωγή τους από τον κινητήρα παρατηρείται ότι έχουν πολύ μεγαλύτερη ταχύτητα συγκριτικά με εκείνη της εισερχόμενης μάζας του αέρα. Αυτή η έντονη λοιπόν διαφορά των ταχυτήτων εισαγωγής και εξαγωγής οδηγεί στην παραγωγή ώσης, το μέγεθος της οποίας εξαρτάται άμεσα από τον τύπο του αεριοστρόβιλου. Θα ήταν ιδιαίτερα σημαντικό να αναφέρουμε ότι υπάρχει δυνατότητα χρήσης περισσότερων από έναν στρόβιλων ή συμπίεστή οι οποίοι θα είναι βασισμένοι σε ξεχωριστό άξονα αλλά θα έχουν το ίδιο κέντρο.

Γενικά, ένας αεριοστρόβιλος αποτελείται από δύο βασικά τμήματα. Το ψυχρό τμήμα το οποίο περιλαμβάνει τον συμπίεστή και το θερμό τμήμα, το οποίο περιλαμβάνει τον θάλαμο καύσης και τον στρόβιλο – τουρμπίνα.

1.2.1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΑΕΡΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ

Η λειτουργία των αεριοστρόβιλων βασίζονται στον θεωρητικό κύκλο του Brayton. Τον κορμό του κύκλου Brayton αποτελούν οι ακόλουθες διεργασίες:

- Δύο διαφορετικές διεργασίες υπό σταθερή πίεση, κατά τις οποίες γίνεται προσθαφαίρεση θερμότητας.
- Δύο ισεντροπικές διεργασίες (συμπίεση – εκτόνωση) στις οποίες πραγματοποιείται παραγωγή έργου.

Όπως διακρίνεται στη συνέχεια Σχήμα 4, ο θεωρητικός κύκλος Brayton ως γραφική παράσταση δύναται να απεικονιστεί σε συντεταγμένες Πίεσεως-Όγκου (P-V) και σε συντεταγμένες Θερμοκρασίας-Εντροπίας (T-S).

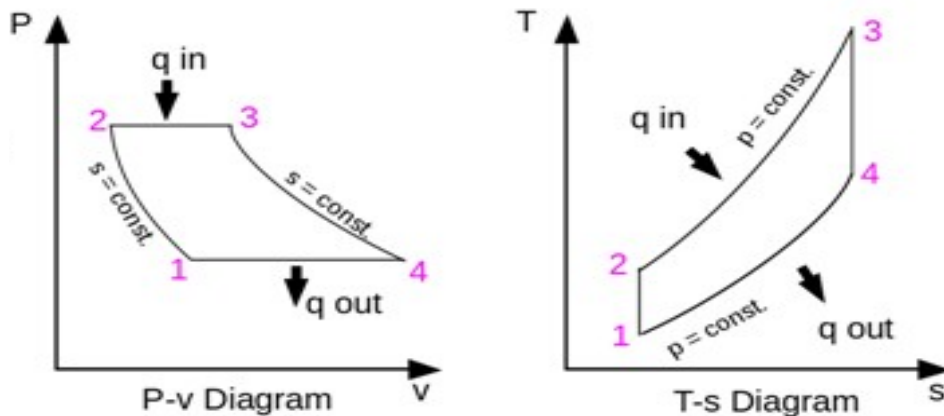
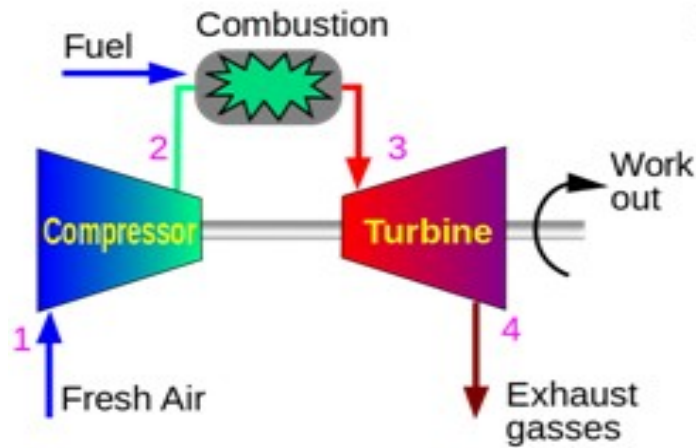
Αναλύοντας το διάγραμμα με συντεταγμένες Πίεσης-Όγκου (P-V), οι εκτελούμενες διεργασίες είναι οι εξής:

1. Συμπίεση
2. Προσθήκη Θερμότητας
3. Παραγωγή Έργου
4. Αποβολή Θερμότητας

Ωστόσο, αναλύοντας το διάγραμμα Θερμοκρασίας-Εντροπίας (T-S), οι εκτελούμενες διεργασίες είναι οι ακόλουθες:

1. Αντιστρεπτή Αδιαβατική (ισεντροπική) Συμπίεση (1-2)
2. Προσθήκη θερμότητας υπό σταθερή πίεση (2-3)

3. Αντιστρεπτή Αδιαβατική Εκτόνωση (3-4)
4. Αποβολή θερμότητας υπό σταθερή πίεση μέχρι την αρχική κατάσταση (4-1)



Σχήμα 4: Θεωρητικός κύκλος του Brayton[5]

Γενικά, οι θερμικοί κύκλοι είναι εφαρμογές του πρώτου και του δεύτερου θερμοδυναμικού νόμου. Πιο συγκεκριμένα, σε έναν θερμικό κύκλο σκοπός του εργαζόμενου μέσου είναι η μετατροπή της Θερμικής Ενέργειας σε Μηχανική, πράγμα το οποίο επιτυγχάνεται έπειτα από μία σειρά διεργασιών.

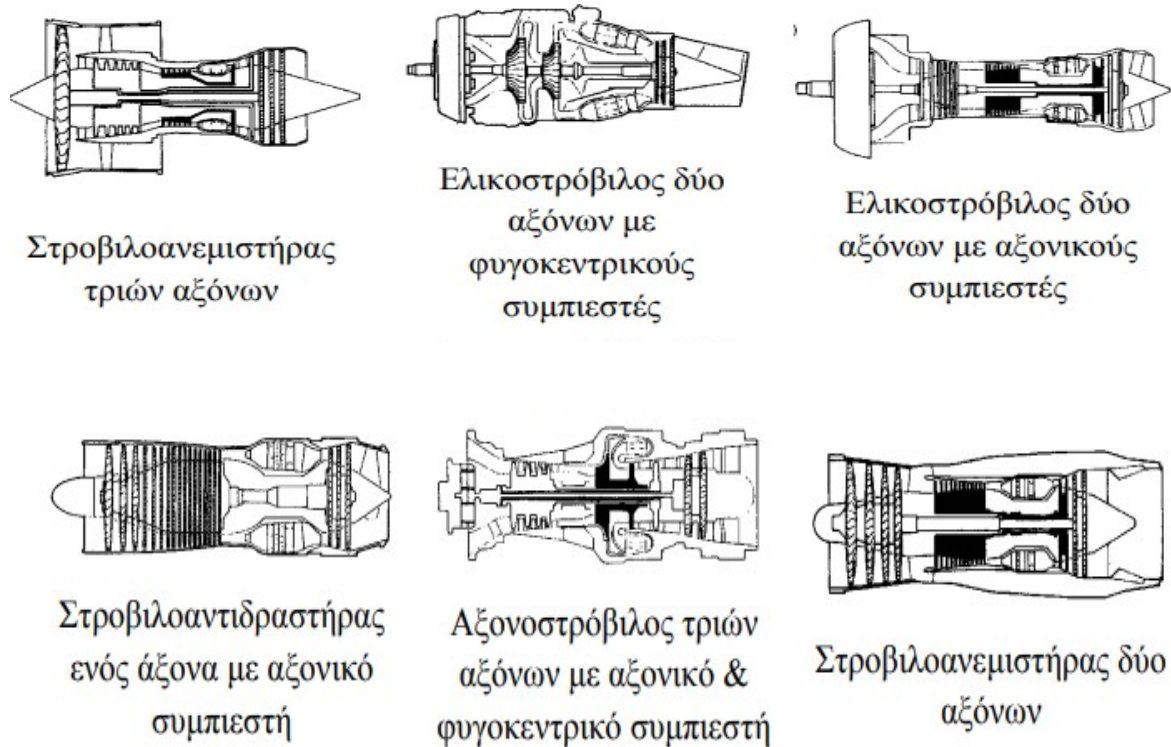
Στην περίπτωση των αεριοστρόβιλων, ως εργαζόμενο μέσο είναι ο αέρας αλλά και τα καυσαέρια. Όταν ολοκληρωθεί μία σειρά φάσεων (διεργασίες), τότε ο αέρας επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση. Θα πρέπει ωστόσο να αναφέρουμε πως για τον υπολογισμό του βαθμού θερμικής απόδοσης του κύκλου θα πρέπει αρχικά να υπολογιστούν η θερμότητα που προσδίδουμε στο σύστημα καθώς και το έργο που παράγεται. Έχοντας υπολογίσει τα προαναφερόμενα, δύναται να γίνει και υπολογισμός της ποσότητας του εργαζόμενου μέσου που απαιτείται για να παραχθεί ισχύς.

1.3. ΤΥΠΟΙ ΑΕΡΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ

Η κατηγοριοποίηση των αεριοστρόβιλων πραγματοποιείται με γνώμονα τα χαρακτηριστικά τους. Ένας πρώτος διαχωρισμός των σε κατηγορίες είναι με βάση τον αριθμό των αξόνων τους. Έτσι προκύπτουν οι ακόλουθοι τύποι αεριοστρόβιλων:

- Απλοί αεριοστρόβιλοι
- Αεριοστρόβιλοι διπλού άξονα
- Αεριοστρόβιλοι τριπλού άξονα
- Αεριοστρόβιλοι τυμπάνου

Στην συνέχεια ακολουθεί το Σχήμα 5 με διαφόρους τύπους αεροστροβίλων



Σχήμα 5: Βασικοί τύπου αεριοστρόβιλων [6]

Ανεξάρτητα από τον τύπο του αεριοστρόβιλου, το μέγεθος της ισχύος είναι πάντοτε ανάλογο του ποσού της θερμότητας που εκλύεται κατά την διαδικασία της καύσης. Ωστόσο, λόγω του ότι η θερμότητα δεν είναι δυνατόν να μετρηθεί γίνεται χρήση κάποιων παραμέτρων με σκοπό την προσέγγιση του υπολογισμού της. Οι παράμετροι αυτοί είναι αναφορικά οι εξής:

- Η θερμοκρασία
- Η μάζα-το βάρος
- Η ειδική θερμότητα

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να αναφέρουμε πως η λειτουργία ενός αεριοστρόβιλου εξαρτάται τόσο από τον παράγοντα θερμοκρασία, όσο και από τον παράγοντα θερμότητα. Βέβαια, οι δύο αυτοί παράγοντες επηρεάζουν διαφορετικά την λειτουργία ενός αεριοστρόβιλου. Έστω για παράδειγμα ότι υπάρχουν δύο αεριοστρόβιλοι από τους οποίους ο ένας καταναλώνει το δεκαπλάσιο καύσιμο από τον άλλον, ενώ η θερμοκρασία εισόδου στην οποία λειτουργούν είναι η ίδια. Αυτό που είναι εύκολα διακριτό στο παράδειγμα αυτό,

είναι ότι ο στρόβιλος με την μεγαλύτερη κατανάλωση ποσότητας καυσίμου, αποδίδει δεκαπλάσια ισχύ. Επιπροσθέτως, η αύξηση της θερμοκρασίας καύσης έχει συνέπεια την μεγαλύτερη εκτόνωση των καυσαερίων με συνέπεια την παραγωγή μεγαλύτερης ώσης.

Βασικό ρόλο όσον αφορά την λειτουργία ενός αεριοστρόβιλο παίζει το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένος ο θάλαμος καύσης του στρόβιλου. Γενικότερα, εκτός από τις κατηγορίες αεριοστρόβιλων που έχουμε ήδη αναφέρει στην παρούσα πτυχιακή εργασία, υπάρχουν και άλλες κατηγορίες οι οποίες βασίζονται στα ακόλουθα:

- Στον κύκλο
- Στον άξονα
- Στους θερμικούς εναλλάκτες
- Στην εφαρμογή

Ακολουθεί Πίνακας 2 στον οποίο αναφέρουμε τους τύπους αεριοστρόβιλων που προκύπτουν από τα προαναφερθέντα κριτήρια.

ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ	ΤΥΠΟΙ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ
Κατά τον κύκλο	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ανοικτού κύκλου (open cycle) με αναρρόφηση και επαναφορά στην ατμόσφαιρα ▪ Κλειστού τύπου (closed cycle), όπου το ρευστό παραμένει πάντα στη μηχανή και τα ποσά θερμότητας εισέρχονται και εξέρχονται από τη μηχανή μέσω θερμικών εναλλακτών
Κατά τον άξονα	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Μονό – αξονικοί (single shaft) ▪ Δι-αξονικοί (two shaft) ▪ Τρι-αξονικοί (triple shaft) ▪ Ελεύθεροι στρόβιλοι ισχύος, όπου η εκτόνωση γίνεται εν μέρει στο στρόβιλο που κινεί το συμπιεστή και η υπόλοιπη στο στρόβιλο ισχύος
Κατά τους θερμικούς εναλλάκτες	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Αναγεννητικός (Regenerative) ▪ Με ενδιάμεση ψύξη (Intercooled) ▪ Με αναθέρμανση (Reheated)
Κατά την εφαρμογή	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Αεροπορικοί ▪ Ηλεκτροπαραγωγικοί ▪ Βιομηχανικοί ▪ Ναυτικοί

Πίνακας 2: Βασικές κατηγορίες αεριοστρόβιλων [7]

Στην συνέχεια της παρούσας πτυχιακής εργασίας, θα περιγράψουμε τους ευρύτερα διαδεδομένους αεριοστρόβιλους με λεπτομέρεια και ιδιαίτερη έμφαση στα χαρακτηριστικά που παρουσιάζει ο κάθε ένας κατά την διάρκεια της λειτουργίας του.

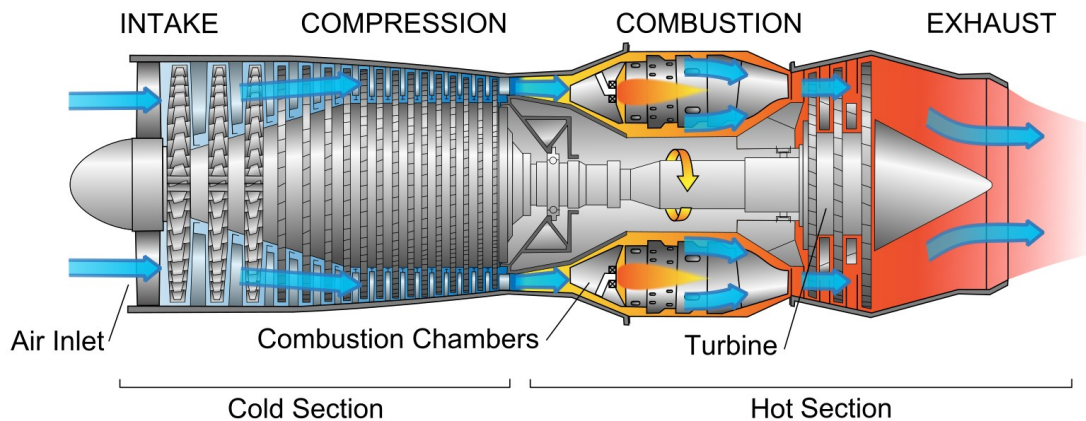
1.3.1. ΣΤΡΟΒΙΛΟΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑΣ (TURBOJET ENGINE)

Μία από τις απλούστερες μορφές αεριοστρόβιλου (ίσως και η απλούστερη), είναι ο στροβιλοαντιδραστήρας (turbojet engine). Η αρχή λειτουργίας του μοιάζει πολύ με αυτήν ενός απλού αεριοστρόβιλου. Η επιτάχυνση μάζας αέρα σε υψηλές ταχύτητες, δημιουργεί ροή καυσαερίων στο ακροφύσιο εξαγωγής την οποία ο στροβιλοαντιδραστήρας εκμεταλλεύεται

σαν μοναδικό μέσο παραγωγής ώσης. Ο EPR (engine pressure ratio), δηλαδή ο λόγος πίεσης ή ο λόγος συμπίεσης αποτελεί χαρακτηριστική παράμετρο για κάθε στροβιλοαντιδραστήρα. Ουσιαστικά, ο EPR είναι το μέγεθος έκφρασης της πίεσης εξαγωγής των καυσαερίων από τον στρόβιλο προς την πίεση του αέρα που εισέρχεται. Για μία συγκεκριμένη παροχή ισχύος, η τιμή του EPR αποτελεί ένδειξη της ώσης που παράγεται.

Ο EPR αποτελεί μέτρο αξιολόγησης της πίεσης εισαγωγής αέρα στο συμπιεστή (εάν είναι ικανοποιητική ή μη). Γενικότερα, είναι ιδιαίτερα σημαντικό να δίνεται ο απαιτούμενος χρόνος για να αυξηθεί η πίεση και να φτάσει στα απαραίτητα επίπεδα για να παραχθεί η απαιτούμενη ώση. Τα βασικότερα μειονεκτήματα ενός στροβιλοαντιδραστήρα είναι τα ακόλουθα:

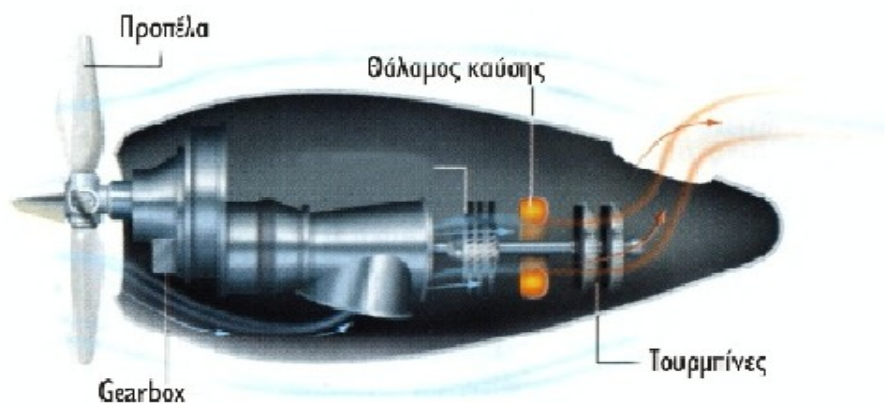
- Χαμηλές ταχύτητες (μικρότερη παραγόμενη ώση)
- Υψηλή κατανάλωση καυσίμου



Σχήμα 6: Στροβιλοαντιδραστήρα [8]

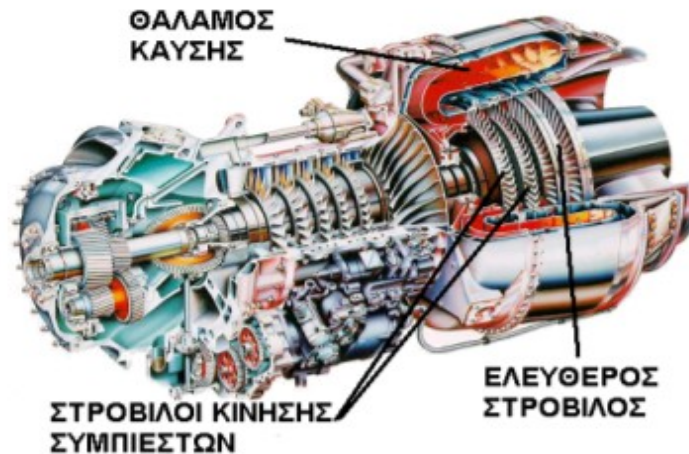
1.3.2. ΕΛΙΚΟΣΤΡΟΒΙΛΟΣ (TURBOPROP ENGINE)

Γενικά, η χρήση του ελικοστρόβιλου (turbo-prop engine) μπορεί να γίνει σε πολλές εφαρμογές. Παρόλο που θεωρείται τυπικά σχεδόν όμοιος με τον στροβιλοαντιδραστήρα, διαφέρει στο γεγονός ότι χρησιμοποιεί ένα σύστημα γραναζιών ως μειωτήρα, με σκοπό την μείωση στροφών στην μετάδοση κίνησης. Επιπλέον, θα πρέπει να αναφέρουμε ότι στην περίπτωση του ελικοστρόβιλου γίνεται χρήση μεγάλου ποσοστού καυσαερίων για να κινηθεί ο έλικας. Κατά συνέπεια, η ώση που προσφέρουν τα καυσαέρια παραμένει σε ιδιαίτερα χαμηλά επίπεδα. Πιο συγκεκριμένα, η ενέργεια των καυσαερίων ενός ελικοστρόβιλου αποδίδει το 90% ισχύ στον άξονα ο οποίος κινεί τον έλικα και το 10% υπό μορφή ώσης.



Σχήμα 7: Ελικοστρόβιλος [8]

Υπάρχουν αρκετοί τύποι ελικοστρόβιλων σε κάποιους από τους οποίους είναι δυνατή η χρήση ενός επιπλέον στρόβιλου με σκοπό την βελτιστοποίηση της κίνησης του έλικα.



Σχήμα 8: Ελικοστρόβιλος κινητήρας T-53 [6]

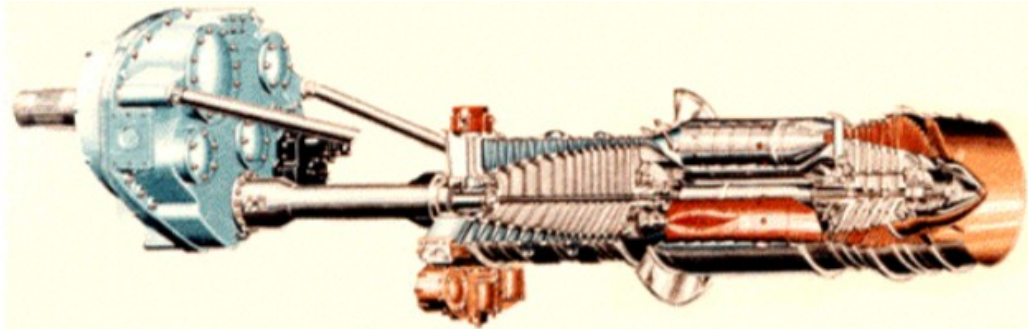
Πιο συγκεκριμένα, στον ελεύθερο στρόβιλο (freeturbine ή powerturbine) έχουμε περίπτωση σύνδεσης στρόβιλου με έναν διαφορετικό άξονα, με έναν μειωτήρα στροφών. Ωστόσο, τα λοιπά μέρη του κινητήρα (συμπιεστής, θάλαμος καύσης, στρόβιλος καυσαερίων) βασίζουν τη λειτουργία τους στην παροχή καυσαερίων υψηλής ενέργειας. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η περιστροφή του ελεύθερου στρόβιλου. Σε περιπτώσεις ελικοστρόβιλων στις οποίες δεν υπάρχει ξεχωριστός ελεύθερος στρόβιλος, για την κίνηση του έλικα γίνεται εκμετάλλευση τμήματος της ενέργειας των καυσαερίων τα οποία εκτονώνονται σε στρόβιλο που κινεί και τον συμπιεστή.

Τα πλεονεκτήματα χρήσης ελικοστρόβιλων σε εφαρμογές είναι τα ακόλουθα:

- Πολύ καλή ειδική κατανάλωση καυσίμου
- Επιτάχυνση μεγάλων μαζών αέρα σε μικρές ταχύτητες
- Μεγάλη παραγόμενη ώση

Εκτός από τα πλεονεκτήματα ωστόσο παρουσιάζει και κάποια μειονεκτήματα. Αναφορικά αυτά είναι τα εξής:

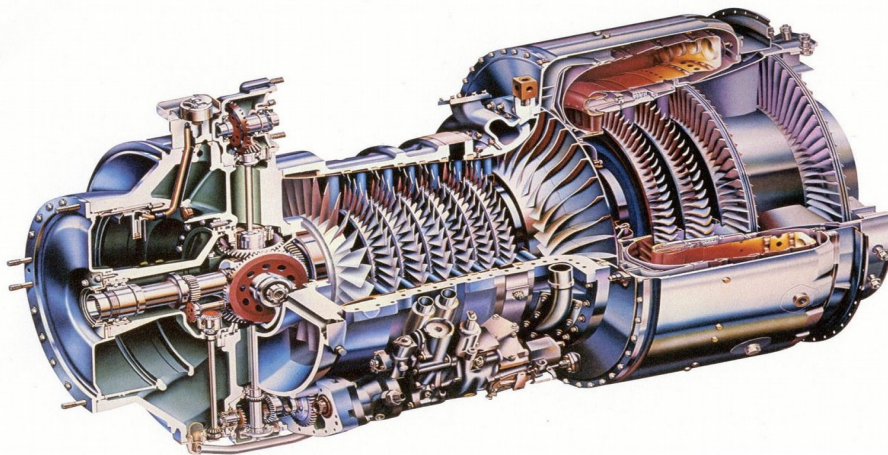
- Πολυπλοκότητα κατασκευής
- Προβλήματα συντήρησης λόγω της πολυπλοκότητάς τους
- Ιδιαίτερα βαριά κατασκευή συγκρινόμενα με κατασκευές παραγωγής ανάλογης ώσης



Σχήμα 9: Ελικοστρόβιλος κινητήρας T-56 [6]

1.3.3. ΑΞΟΝΟΣΤΡΟΒΙΛΟΣ (TURBOSHAFT ENGINE)

Βασικό χαρακτηριστικό ενός αξονοστρόβιλου (turboshaftengine) είναι η παροχή ισχύος σχεδόν με αποκλειστικότητα στον άξονά του. Θα πρέπει ωστόσο να αναφέρουμε πως ένα ελάχιστη είναι η παροχή ώσης σε αυτών των τύπο αεριοστρόβιλου. Είναι γεγονός ότι ο αξονοστρόβιλος έχει μεγάλη ομοιότητα με τον ελικοστρόβιλο, ειδικά στην περίπτωση κατά την οποία δεν υπάρχει σύνδεση του ελεύθερου στρόβιλου με τον έλικα αλλά με τον άξονα του στροφείου (αξονοστρόβιλος).



Εικόνα :Αξονοστρόβιλος [9]

Επιπροσθέτως, η χρήση του αξονοστρόβιλου πραγματοποιείται και ως εναλλακτικό μέσο παροχής ισχύος. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να επισημάνουμε ότι η χρήση των αξονοστρόβιλων δεν περιορίζεται σε αεροπορικές εφαρμογές, καθώς ένας ελεύθερος στρόβιλος δύναται να συνδεθεί και με τον άξονα στροφείου οχήματος, πλοίου και άλλων.

1.3.4. ΣΤΡΟΒΙΛΟΑΝΕΜΙΣΤΗΡΑΣ (TURBOFAN ENGINE)

Μία από τις πλέον σπουδαίες τεχνικές εξελίξεις τις τεχνολογίας των αεριοστρόβιλων είναι ο στρόβιλοανεμιστήρας (turbofanengine). Τυπικά αποτελεί μία παραλλαγή του στρόβιλοαντιδραστήρα, ενώ στην πραγματικότητα είναι καθαρός συνδυασμός των χαρακτηριστικών του στρόβιλοαντιδραστήρα και του ελικοστρόβιλου.



Σχήμα 10:Στροβιλοανεμιστήρα [11]

Τα βασικότερα πλεονεκτήματα ενός στροβιλοαντιδραστήρα είναι τα ακόλουθα:

- Αυξημένη παροχή ισχύος ανά μονάδα βάρους
- Καλή ειδική κατανάλωση καυσίμου
- Μειωμένος θόρυβος κατά την λειτουργία

Ουσιαστικά, ο στροβιλοανεμιστήρας δεν είναι κάτι διαφορετικό από έναν ελικοστρόβιλο που εντός του κινητήρα του έχει έναν έλικα (ανεμιστήρα/fan). Ο ανεμιστήρας δύναται να είναι τοποθετημένος είτε στο εμπροσθεν είτε στο όπισθεν μέρος του αεριοστρόβιλου. Ωστόσο, η αρχή λειτουργίας του διαφέρει από αυτήν των κοινών αεριοστρόβιλων λόγω της διάσπασης της ροής του αέρα σε δύο ρεύματα (θερμό ρεύμα και ψυχρό ρεύμα). Η διέλευση του θερμού ρεύματος γίνεται μέσα από τον κινητήρα και η συνεισφορά του όσον αφορά την παραγωγή ώσης αγγίζει το 80%. Το δε ψυχρό ρεύμα, διέρχεται περιφερειακά του σώματος του κινητήρα με όμοια αξονική διεύθυνση (ροή παράκαμψης – bypass).

Ο ανεμιστήρας του συστήματος βοηθά στην επιπλέον παραγωγή ώσης. Αυτό συμβαίνει καθώς ο ανεμιστήρας επιταχύνει ψυχρό αέρα προς το όπισθεν μέρος του κινητήρα, χωρίς ωστόσο να πραγματοποιείται καύση. Η παραγόμενη από τον ανεμιστήρα ώση προστίθεται στον συνολική ώση του κινητήρα.

Ένα από τα βασικότερα χαρακτηριστικά του στροβιλοανεμιστήρα είναι ο λόγος παράκαμψης γνωστός ως bypassratio. Με τον όρο λόγο παράκαμψης αναφερόμαστε στον λόγο του ψυχρού ρεύματος προς το θερμό ρεύμα αέρα. Οι τιμές του λόγου παράκαμψης μας βοηθούν να χαρακτηρίσουμε περαιτέρω έναν στροβιλοανεμιστήρα ως χαμηλού ή υψηλού λόγου παράκαμψης. Οι τιμές στις οποίες κυμαίνεται ο λόγος παράκαμψης είναι από 2:1 έως 10:12. Για την εξαγωγή του αέρα παράκαμψης υπάρχει ένας ειδικός αγωγός (duct), ο οποίος είναι τοποθετημένος περιφερειακά του κύριου σώματος του κινητήρα. Στους πιο πολλούς τύπους στροβιλοανεμιστήρα χρησιμοποιούνται περισσότεροι από έναν στρόβιλοι με σκοπό την κίνηση του ανεμιστήρα.

Στον Πίνακα 3, γίνεται αναφορά τόσο στα πλεονεκτήματα όσο και στα μειονεκτήματα των στροβιλοανεμιστήρων υψηλού (highbypassratio) και χαμηλού λόγου παράκαμψης (lowbypassratio).

ΣΤΡΟΒΙΛΟΑΝΕΜΙΣΤΗΡΕΣ ΥΨΗΛΟΥ ΛΟΓΟΥ ΠΑΡΑΚΑΜΨΗΣ	ΣΤΡΟΒΙΛΟΑΝΕΜΙΣΤΗΡΕΣ ΧΑΜΗΛΟΥ ΛΟΓΟΥ ΠΑΡΑΚΑΜΨΗΣ
ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Βελτίωση της ικανότητας αναστροφής ώσης ✓ Βελτίωση της sfc ✓ Αύξηση του βάρους ανά μονάδα 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Παραγωγή υψηλών ποσών ώσης ✓ Ιδιαίτερα υψηλός λόγος ισχύος / βάρους ✓ Ιδιαίτερα υψηλός λόγος ισχύος / όγκου ✓ Ικανοποιητική κατανάλωση καυσίμου

<p>ώσης</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Αύξηση της μετωπικής επιφάνειας ανά μονάδα ώσης ✓ Σημαντική αύξηση του αριθμού των βαθμίδων του LP στροβίλου ✓ Αύξηση του κόστους κτήσης ανά μονάδα ώσης 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Δυνατότητα μετάκαυσης
--	---

Πίνακας 3: Πλεονεκτήματα στροβιλοανεμιστήρων υψηλού και χαμηλού λόγου παράκαμψης [1]

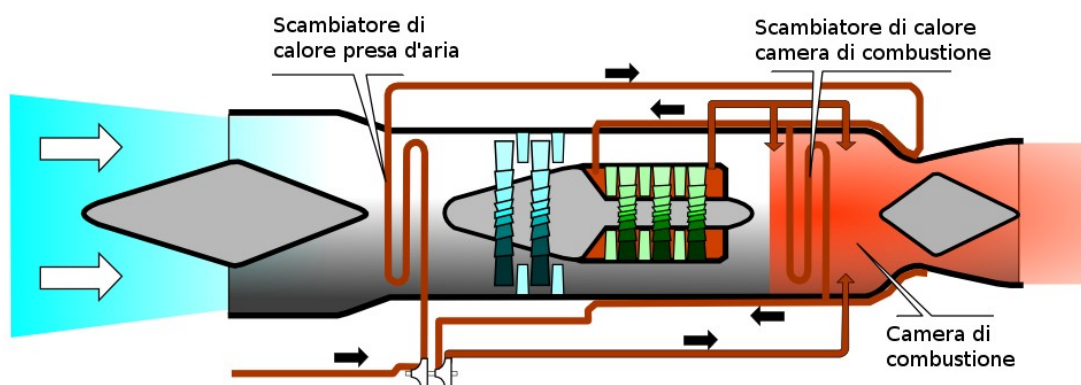
Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να αναφέρουμε ότι η χρήση στροβιλοαντιδραστήρων υψηλού λόγου παράκαμψης ενδείκνυται σε κινητήρες αεροσκαφών των οποίων η ταχύτητα είναι στην περιοχή των 0.8M. Έως σήμερα, ο μέγιστος λόγος παράκαμψης που έχει σημειωθεί είναι ο 9:1.

Όσον αφορά τους στροβιλοαντιδραστήρες χαμηλού λόγου παράκαμψης μειονεκτούν στο γεγονός ότι παρουσιάζουν αυξημένο κόστος κτήσης και ανάπτυξης. Παρά το μειονέκτημα αυτό, αυτού του τύπου οι κινητήρες αποτελούν το προωθητικό σύστημα των περισσότερων αεροσκαφών υψηλών επιδόσεων της 2^{ης} και έπειτα γενιάς.

Συνοψίζοντας, γενικά οι στροβιλοαντιδραστήρες, όποιου τύπου και αν είναι, στις μέρες αποτελούν τους πιο αξιόλογους τύπους αερίωσης μεγάλων αεροσκαφών.

1.3.5. ΣΤΡΟΒΙΛΟ-ΑΘΟΔΥΛΟΣ (TURBORAMJET)

Με τον όρο στροβιλο-αθόδουλος (turboramjet) αναφερόμαστε σε έναν συνδυασμό στροβιλοαντιδραστήρα και ενός αθόδουλου. Η διάταξη αυτού του τύπου κινητήρα περιλαμβάνει, εκτός από την τυπική διάταξη ενός στροβιλοαντιδραστήρα, μετακαυστήρα αλλά και ένα ακροφύσιο μεταβλητής διατομής.



Σχήμα 11: Στροβιλο – αθόδουλος [5]

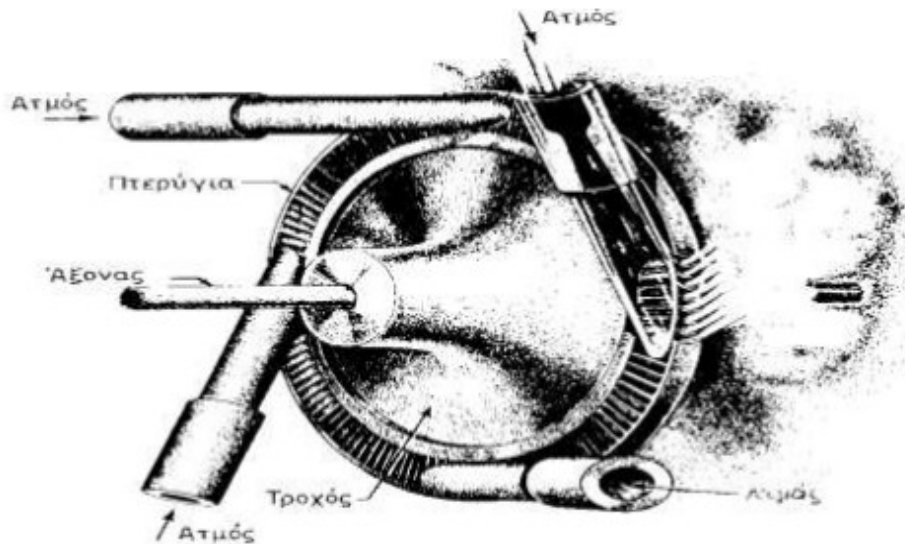
Ουσιαστικά, ένας τυπικός στροβιλο – αθόδουλος μπορεί να λειτουργήσει χωρίς την υποβοήθηση του μετακαυστήρα σε ταχύτητες έως και 3 Mach. Ωστόσο, μετά την υπέρβαση αυτής της τιμής παύει η λειτουργία του στροβιλοαντιδραστήρα και η ροή του αέρα κινείται προς τον μετακαυστήρα και η λειτουργία του κινητήρα είναι αυτή του αθόδουλου.

2. ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΑΤΜΟΣΤΡΟΒΙΛΟΙ

2.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΥΣ ΑΤΜΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥΣ

Οι συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις σε ισχύ ήταν το έναυσμα για την ανάπτυξη των ατμοστροβίλων, καθώς οι εμβολοφόρες μηχανές δεν ήταν πλέον ικανές να καλύψουν αυτές τις απαιτήσεις. Ένας ατμοστρόβιλος ή αλλιώς τουρμπίνα είναι μία θερμική μηχανή εξωτερικής καύσης με δυνατότητα μετατροπής της ενέργειας του ατμού σε ωφέλιμο μηχανικό έργο.

Στην απλούστερη μορφή του έναν ατμοστρόβιλο των αποτελούν ένας οι περισσότεροι τροχοί, με πτερύγια περιφερειακά τους, προσαρμοσμένοι πάνω σε έναν άξονα ο οποίος αποτελεί και την βάση του ατμοστρόβιλου. Μία επιπλέον μορφή ατμοστροβίλου είναι αυτή που πάνω στον άξονά του, αντί των τροχών, προσαρμόζεται ένα τύμπανο. Υπάρχει ωστόσο και η μορφή κατά την οποία το τύμπανο είναι κατασκευασμένο μαζί με τον άξονα και επάνω στο τύμπανο βρίσκονται πτερύγια περιφερειακά διατεταγμένα στο τύμπανο.



Σχήμα 12: Τροχοί με πτερύγια

Η επαφή του ατμού με τα πτερύγια του στροβίλου προκαλεί την κίνηση του άξονα. Αυτό συμβαίνει λόγω της ταχύτητας που έχει ο ατμός ή λόγω της εκτονωτικής του δύναμης. Η κίνηση του ατμοστρόβιλου διαφέρει παντελώς από την κίνηση των μερών της παλινδρομικής ατμομηχανής, καθώς είναι πάντοτε περιστροφική.

Σε μία παλινδρομική μηχανή, η χρήση ατμού πραγματοποιείται για την εκμετάλλευση της δυναμικής και της θερμικής του ενέργειας (εκμετάλλευση πίεσεως). Σε έναν ατμοστρόβιλο η εκμετάλλευση του ατμού αφορά την θερμική και κινητική του ενέργεια (εκμετάλλευση ταχύτητας).

Η παλινδρομική μηχανή έχει εκτοπιστεί πλήρως τα τελευταία χρόνια λόγω της συνεχούς χρήσης ατμοστροβίλων. Αυτό συμβαίνει λόγω των πολλών πλεονεκτημάτων της χρήσης ατμοστροβίλων ιδιαίτερα σε περιπτώσεις που απαιτούν μεγάλη παραγωγή έργου.

2.1.1. ΕΞΕΛΙΞΗ ΑΤΜΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ

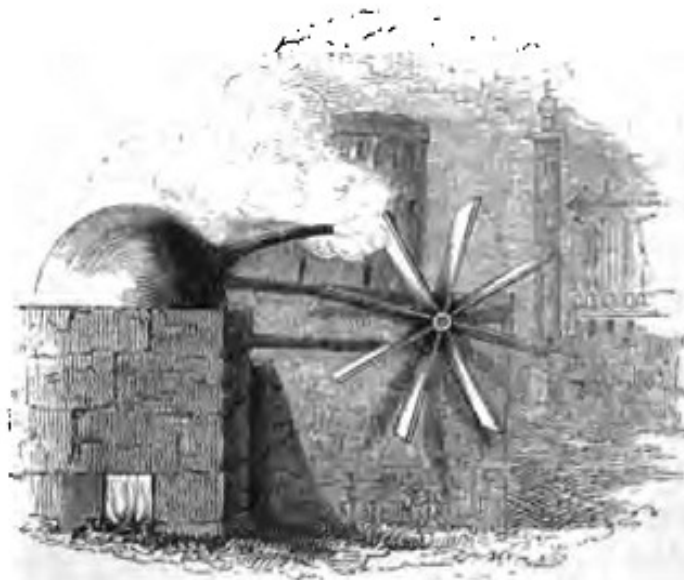
Ο φυσικομαθηματικός Ήρωνας με καταγωγή από την Αλεξάνδρεια είναι ο πρώτος άνθρωπος που προσπάθησε να εκμεταλλευτεί την ενέργεια που προκύπτει από την αντίδραση της ροής του ατμού, κατασκευάζοντας μία συσκευή την λεγόμενη σφαίρα του Ήρωνα. Αυτή η ενέργεια αποτέλεσε κίνητρο για πολλούς μηχανικούς οι οποίοι για αιώνες ολόκληρους επινοώντας διάφορες συσκευές προσπάθησαν να ελέγξουν την ενέργεια του ατμού με στόχο την παραγωγή ωφέλιμου έργου.



Εικόνα 2: Η σφαίρα του Ήρωνα [13]

Μία προσπάθεια η οποία είναι άξια αναφοράς είναι η κατασκευή του γνωστού Ιταλού Leonardo da Vinci. Ο γνωστός καλλιτέχνης αλλά και μηχανικός κατασκεύασε μία χάλκινη συσκευή της οποίας το σχήμα θύμιζε κάννη πολυβόλου. Η συσκευή αυτή είχε την δυνατότητα να ρίχνει βλήματα σφαιρικού σχήματος με βάρος έως 30kg κάνοντας χρήση της ενέργειας του ατμού.

Εφαρμόζοντας την αρχή της σφαίρας του Ήρωνα ο Ιταλικής καταγωγής Giovanni Battista Della Porta, έκανε χρήση του παραγόμενου ατμού για να ανυψώσει και να καταθλίψει νερό σε ένα ορισμένο ύψος. Παρόμοιες με την προσπάθεια του Giovanni Battista Della Porta ήταν και οι προσπάθειες των γαλλικής καταγωγής Florence Raivault (1605) και Solomon De Caus (1615). Αξιόλογη προσπάθεια ήταν του Ιταλού Giovanni Di Branca (1629), ο οποίος κατασκευάζοντας μία συσκευή κατάφερε να κινήσει έναν τροχό με πτερύγια περιφερειακά του με την χρήση ατμού. Τέλος, ο πασίγνωστος αγγλικής καταγωγής φυσικός Isaac Newton κατάφερε να κινήσει μία άμαξα εκτοξεύοντας ατμού από την άμαξα και προς τα πίσω.



Εικόνα 3: Κατασκευή του GiovanniDiBranca [5]

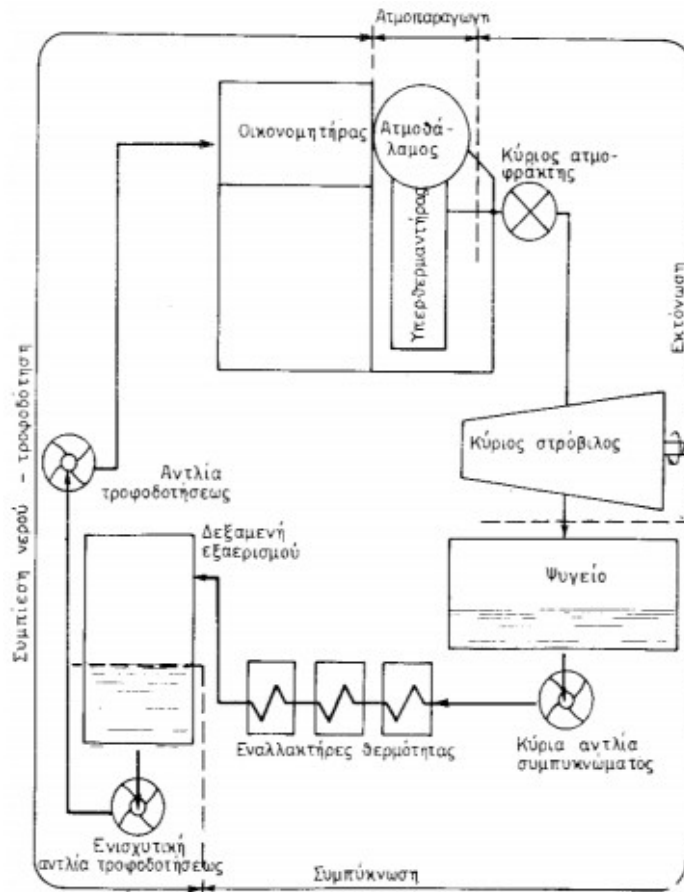
Λόγω μη ύπαρξης τεχνικών μέσων εκείνα τα χρόνια, όλες οι προσπάθειες στην ανωτέρω παράγραφο δεν μπορούσαν να εφαρμοστούν πρακτικά. Αυτό άλλαξε το 1883, όταν ο σουηδικής καταγωγής μηχανικός Laval κατασκεύασε τον πρώτο ατμοστρόβιλο χρησιμοποιώντας έναν τροχό με πτερύγια με ταχύτητα περιστροφής του τροχού 25.000 στροφές ανά λεπτό (rpm), τον οποίο κατάφερε να τελειοποιήσει αργότερα ο αμερικανικής καταγωγής μηχανικός CharlesGordonCurtis κατασκευάζοντας τον στρόβιλο Curtis (στρόβιλος δράσεως). Μετά από έναν χρόνο, το 1884, ο μηχανικός αγγλικής καταγωγής Parson κατασκεύασε στρόβιλο ο οποίος κάνοντας χρήση της αρχής της αντιδράσεως κατάφερε να παράγει έργο με την χρήση του ατμού. Με την πάροδο των χρόνων και αφού υπέστη αρκετές τροποποιήσεις και βελτιώσεις, ο στρόβιλος πλέον κατέχει αξιόλογη θέση σε πολλές εφαρμογές.

2.2. ΚΥΚΛΩΜΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΑΤΜΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ

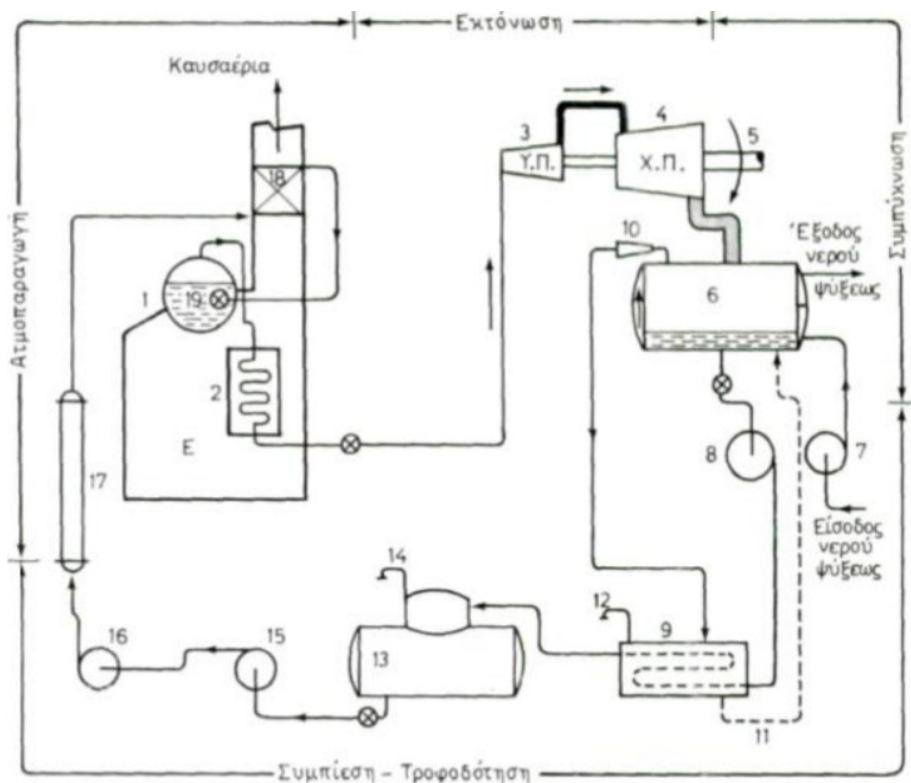
Σε όλες τις εγκαταστάσεις ατμοστρόβιλων ως εργαζόμενο μέσο χρησιμοποιείται το νερό. Το νερό λοιπόν υπόκειται σε φυσικές αλλαγές (νερό – ατμός ή ατμός – νερό) με απώτερο σκοπό την παραγωγή ωφέλιμου έργου. Σύμφωνα με τον Μερετάκη Α. (2008), οι βασικές διαδοχικές φάσεις λειτουργίας του κυκλώματος του σχήματος είναι οι ακόλουθες:

- Η συμπίεση του νερού μέχρι να φτάσει σε πίεση υψηλότερη από αυτήν που επικρατεί μέσα στο λέβητα και η τροφοδότηση του τελευταίου, δηλαδή του λέβητα.
- Η παραγωγή ατμού με θέρμανση του νερού στο λέβητα.
- Η εκτόνωση του ατμού μέσα στο στρόβιλο και η παραγωγή έργου.
- Η συμπύκνωση του ατμού σε νερό μέσα στο ψυγείο.

Στο Σχήμα 15 απεικονίζει μέσω διαγράμματος την λειτουργία μίας σύγχρονης εγκατάστασης ατμοστρόβιλου και στο Σχήμα 16 μια διάταξη στροβιλοεγκατάστασης.



Σχήμα 13: Διάγραμμα λειτουργίας εγκατάστασης ατμοστρόβιλου [15]



Σχήμα 14: Διάταξη στροβιλοεγκατάστασης [15]

Η όλη λειτουργία της εγκατάστασης σύμφωνα με τον Μερετάκη Α. (2008) έχει ως εξής: η ενισχυτική αντλία τροφοδοτήσεως αναρροφεί το νερό από την δεξαμενή εξαερισμού, καλούμενη και ως θερμοδοχείο, και το καταθλίβει στην αναρρόφηση της αντλίας τροφοδοτήσεως του λέβητα. Αυτή το συμπιέζει σε πίεση μεγαλύτερη από την πίεση του λέβητα και το καταθλίβει πρώτα στον οικονομητήρα και από εκεί στο λέβητα. Εντός του λέβητα το νερό μετατρέπεται σε ατμό και έπειτα οδηγείται στον υπερθερμαντήρα. Από τον υπερθερμαντήρα εξέρχεται ως υπέρθερμος και μεταφέρεται στον κύριο στρόβιλο στον οποίο με την εκτόνωση παράγει έργο. Από τον στρόβιλο ο ατμός εισέρχεται με μορφή εξατμίσεων στο ψυγείο, στο οποίο με την διεργασία της συμπύκνωσης μετατρέπεται σε νερό. Από εκεί ακολουθεί η αναρρόφησή του από την κύρια αντλία συμπυκνώματος και έπειτα η κατάθλιψή του προς τους εναλλακτήρες θερμότητας. Στους εναλλακτήρες θερμότητας προθερμαίνεται με ατμό ο οποίος έχει ληφθεί από το στρόβιλο και έπειτα οδηγείται προς το θερμοδοχείο, όπου εξαερώνεται. Ακολουθεί συγκέντρωση του εξαεριωμένου πλέον νερού στον πυθμένα της εξαερωτικής δεξαμενής, από την οποία αναρροφάται πάλι από την ενισχυτική τροφοδοτήσεως και αρχίζει η πραγματοποίηση των ίδιων φάσεων του κυκλώματος.

2.3. ΤΡΟΠΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΑΤΜΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ

Το θεώρημα μεταβολής της ορμής αποτελεί την βάση της θεωρίας που αφορά την κατασκευή των ατμοστροβίλων. Πιο αναλυτικά, το θεώρημα αναφέρει πως η δύναμη F_u που δημιουργείται περιφερειακά των πτερυγίων του στροβίλου, είναι ίση με τη χρονική μεταβολή της ορμής (μάζα – ταχύτητα κατά μέγεθος και διεύθυνση). Από αυτό συμπεραίνουμε ότι για σταθερή ποσότητα ατμού, η δύναμη F_u περιφερειακά των πτερυγίων του τροχού του στροβίλου που κινείται δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$F_u = m_s (W_{1u} - W_{2u}) \quad [2.1]$$

Όπου:

m_s = ρέουσα μάζα ανά μονάδα χρόνου σε kg/s

W_{1u} = περιφερειακή συνιστώσα της ταχύτητας του εισερχόμενου στα κινητά πτερύγια ατμού (m/s)

W_{2u} = περιφερειακή συνιστώσα της ταχύτητας του εξερχόμενου ατμού από τα κινητά πτερύγια (m/s)

Ως θερμική πτώση ενός ατμοστροβίλου ορίζεται το ποσό θερμότητας που εμπεριέχεται στον επεξεργασμένο ατμό σε kJ/kg, όπως αυτό προκύπτει από την κατάσταση του ατμού που εισέρχεται και του ατμού που εξέρχεται.

Οι δύο παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η ισχύς ενός ατμοστροβίλου είναι οι εξής:

- Η μάζα ή η ποσότητα ατμού (kg/s)
- Η θερμική πτώση ((kJ/kg)

Η ισχύς του ατμοστροβίλου δίνεται από την εξής σχέση:

$$P_T = Y_T \cdot m_s \cdot n_e \quad [2.2]$$

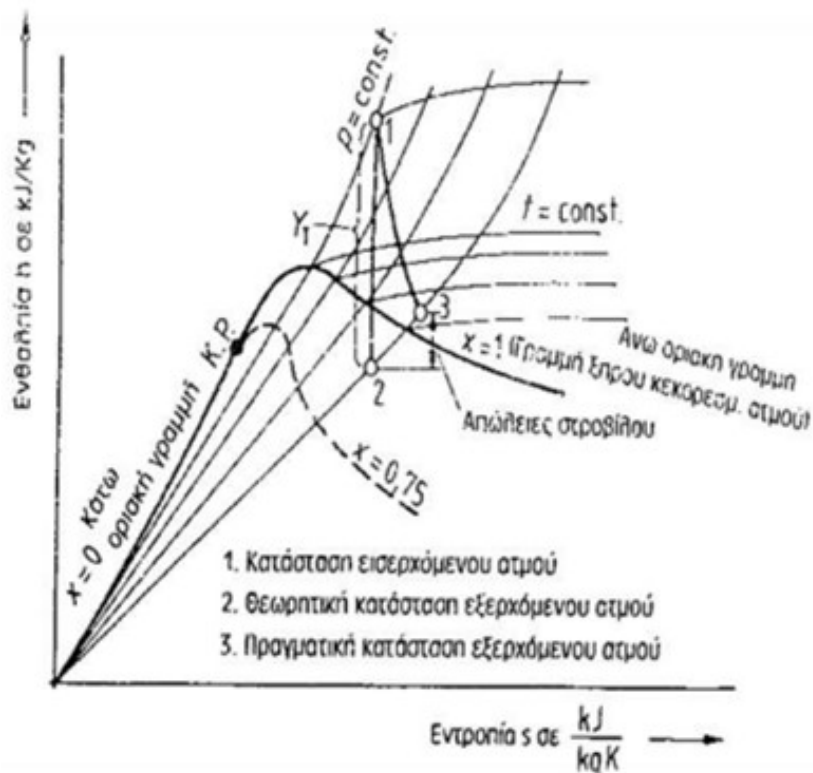
Όπου:

m_s = ρέουσα μάζα ανά μονάδα χρόνου (kg/s)

Y_T = διαβατική θερμική πτώση στο στρόβιλο (kJ/kg)

N_e = πραγματικός βαθμός απόδοσης του στροβίλου

Στο Σχήμα 15 που ακολουθεί απεικονίζεται η καταστατική μεταβολή κατά την εκτόνωση ατμού στο στρόβιλο.



Σχήμα 15: Καταστατική μεταβολή κατά την εκτόνωση ατμού στο στρόβιλο [15]

Αναλύοντας το σχήμα παρατηρούμε ότι από αυτό δίνεται η διαβατική θερμική πτώση Y_T . Ως Κ.Ρ. στο διάγραμμα συμβολίζεται το κρίσιμο σημείο το οποίο αποτελεί ένωση της κάτω οριακής γραμμής ($x=0$) και της άνω οριακής γραμμής ($x=1$). Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να αναφέρουμε ότι η κάτω οριακή γραμμή αποτελεί οριοθέτηση στο διάγραμμα της περιοχής υγρού ατμού προς την περιοχή μόνο υγρού, σε αντίθεση με την άνω οριακή γραμμή η οποία αποτελεί οριοθέτηση της περιοχής υγρού ατμού από την περιοχή του υπέρθερμου ατμού.

2.4. ΤΑ ΚΥΡΙΑ ΜΕΡΗ ΤΟΥ ΑΤΜΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ

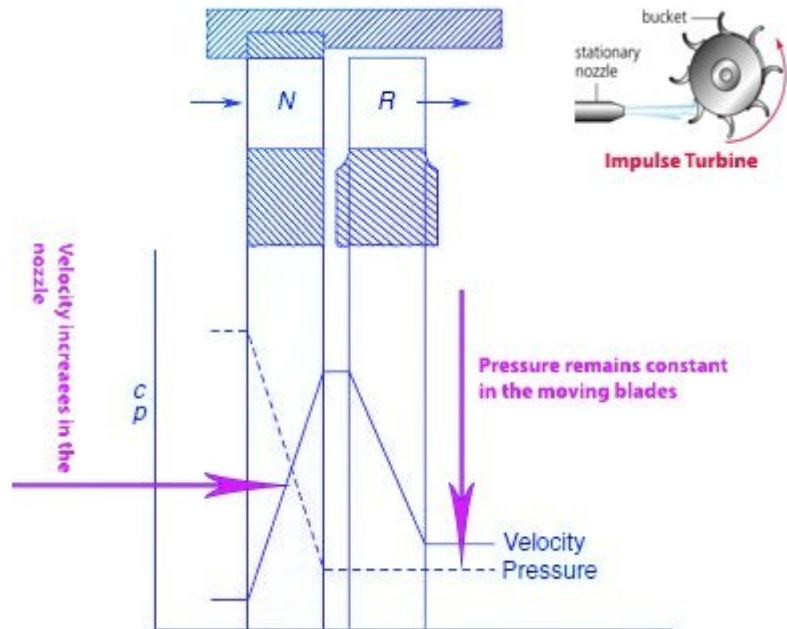
Τα κύρια μέρη από τα οποία αποτελείται ένας ατμοστρόβιλος είναι τα ακόλουθα:

- Στροφείο και κέλυφος
- Τα ακροφύσια και η ροή ατμού μέσα από αυτά
- Τα πτερύγια των ατμοστρόβιλων

Στην συνέχεια του εδαφίου ακολουθεί συνοπτική ανάλυση των κύριων αυτών μερών του ατμοστρόβιλου.

2.4.1. ΣΤΡΟΦΕΙΟ ΚΑΙ ΚΕΛΥΦΟΣ

Το στροφείο, αποτελεί το κινητό μέρος ενός ατμοστρόβιλου το οποίο περιβάλλεται από το κέλυφος. Βασικό στοιχείο από το οποίο αποτελείται το στροφείο είναι ένας άξονας επάνω στον οποίο δύναται να προσαρμοστούν είτε τροχοί με κινητά πτερυγία (στρόβιλοι δράσεως), είτε τύμπανο με σειρές κινητών πτερυγίων (στρόβιλοι αντιδράσεως). Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να αναφέρουμε ότι ο συνδυασμός τροχών – τυμπάνου έχει ως αποτέλεσμα έναν μεικτό στρόβιλο δράσεως – αντιδράσεως.



Διάγραμμα (πίεσης-ταχύτητας) στροβίλου δράσεως - αντιδράσεως [17]

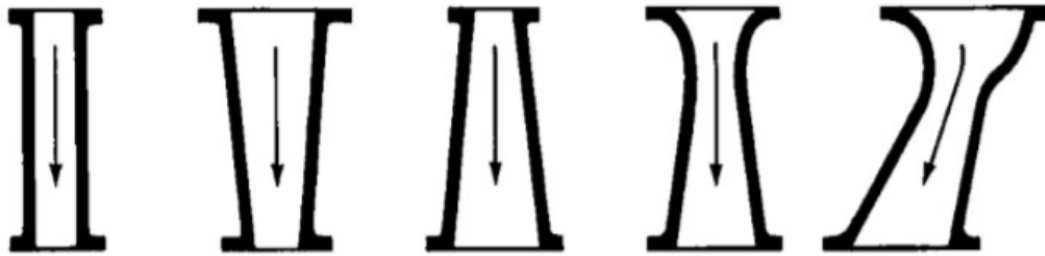
Το κέλυφος, αποτελεί το σταθερό μέρος ενός ατμοστροβίλου και περιβάλλει το στροφείο. Το κέλυφος το αποτελούν δύο ημικελύφη, το πάνω και το κάτω. Αυτά καταλήγουν σε περιαιχένια (δηλαδή φλάντζες). Η σύνδεση μεταξύ του άνω και κάτω κελύφους γίνεται με κοχλίες πολύ ισχυρούς. Το κενό μεταξύ των δύο ημικελύφων είναι η κοιλότητα μέσα στην οποία τοποθετείται το στροφείο.



Εικόνα 4: Απεικόνιση κάτω ημικελύφους και σταθερών πτερυγίων ατμοστροβίλου υψηλής πίεσεως

2.4.2. ΑΚΡΟΦΥΣΙΑ ΚΑΙ ΡΟΗ ΑΤΜΟΥ ΜΕΣΑ ΑΠΟ ΑΥΤΑ

Τα ακροφύσια αποτελούν και αυτά με την σειρά τους βασικό μέρος των αεροστροβίλων καθώς είναι τα όργανα που παράγουν την ταχύτητα του ατμού. Η δημιουργία της ταχύτητας ατμού οφείλεται στο γεγονός ότι ο ατμός μεταφέρεται από έναν χώρο μεγάλης πίεσεως και εισέρχεται μέσω των ακροφυσίων σε έναν χώρο μικρότερης πίεσεως. Σε κάποιες ιδιαίτερες περιπτώσεις αντί ακροφυσίων μπορεί να γίνει χρήση σταθερών πτερυγίων. Παρά την ποικιλία σχημάτων των ακροφυσίων, μπορούμε να πούμε πως η επίδρασή τους στον ατμό είναι η ίδια ανεξαρτήτου σχήματος. Ένα ακροφύσιο ανάλογα με την μορφή του μπορεί να χαρακτηριστεί συγκλίνον ή αποκλίνον ακροφύσιο.



Σχήμα 16: Τυπικές μορφές ακροφυσίων αεροστροβίλου [15]

2.4.3. ΠΤΕΡΥΓΙΑ ΑΤΜΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ

Αποτελούμενα από μικρές μεταλλικές καμπυλόγραμμες ράβδους ιδιόμορφης διατομής, τα πτερύγια τοποθετούνται πάνω στο τύμπανο ή στους τροχούς. Η απόσταση μεταξύ των πτερυγίων είναι σχετικά μικρή. Έτσι δημιουργείται σχηματισμός αυλακίου συγκεκριμένου σχήματος μεταξύ δύο διαδοχικών πτερυγίων. Ο διερχόμενος από τα αυλάκια αέρας επιδρά πάνω τους.

Τα πτερύγια ανάλογα με την διατομή, το σημείο τοποθέτησής τους και τον τρόπο με τον οποίο δρουν στο σύστημα διακρίνονται σε:

- Πτερύγια σταθερά δράσεως ή οδηγητικά
- Πτερύγια κινητά δράσεως
- Πτερύγια σταθερά αντιδράσεως
- Πτερύγια κινητά αντιδράσεως



Σχήμα 17: Πτερύγια αεροστροβίλων

Τα βασικότερα στοιχεία από τα οποία προσδιορίζεται ένα πτερύγιο είναι τα ακόλουθα:

- Το ύψος του (από την βάση του μέχρι την κορυφή)
- Το πλάτος του (η απόσταση από τη μία μέχρι την άλλη κόψη του κατά την έννοια του άξονα του στροβίλου)

2.5. ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΤΩΝ ΑΤΜΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ

Η πληθώρα και η διαφορετικότητα των απαιτήσεων που με την πάροδο τον χρόνο και την εξέλιξη της τεχνολογίας ολοένα και αυξάνονται, οδήγησε στην διαμόρφωση πολλών ειδών ατμοστροβίλων. Ανάλογα λοιπόν με την απαίτηση της εκάστοτε εφαρμογής οι ατμοστρόβιλοι κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τις διαφορές των χαρακτηριστικών τους. Σύμφωνα με τον Πυλαρινό Π. (2017), οι κατηγορίες στις οποίες κατατάσσονται έχουν ως εξής:

1. Με βάση την αρχή λειτουργίας τους διακρίνονται σε στροβίλους:

- Δράσεως
- Αντιδράσεως
- Μικτούς

Οι στρόβιλοι δράσεως υποκατηγοριοποιούνται σε : στρόβιλοι δράσεως με διαβάθμιση της ταχύτητας, στρόβιλοι δράσεως με διαβάθμιση της πίεσης, σύνθετοι με διαβάθμιση της πίεσης και της ταχύτητας.

2. Με βάση την θέση του άξονά τους διακρίνονται σε:

- Οριζόντιους
- Κατακόρυφους

3. Με βάση τη διεύθυνση κατά την οποία ρέει ο ατμός στο εσωτερικό τους:

- Στρόβιλοι με αξονική ροή, όπου η ροή του ατμού κατά την είσοδό του στον στρόβιλο έως και την έξοδό του πραγματοποιείται παράλληλα στον άξονα του στροβίλου. Οι στρόβιλοι αξονικής ροής κατηγοριοποιούνται ως απλής ροής, δηλαδή ροή προς μία μόνο διεύθυνση, ως διπλής ροής, δηλαδή δύο διευθύνσεις αντίθετες μεταξύ τους (ο ατμός εισέρχεται μέχρι το μέσο του άξονα του στροβίλου και εξέρχεται προς τα δύο άκρα αντιστρόφως).
- Στρόβιλοι με ακτινική ροή, όπου ο ατμός ρέει ακτινικά, δηλαδή σε διεύθυνση κάθετη προς τον άξονα του στροβίλου από το κέντρο προς την περιμέτρο του ή και αντιστρόφως.
- Στρόβιλοι περιφερειακής ή εφαπτόμενης ροής, όπου η ροή του ατμού ακολουθεί την διεύθυνση της εφαπτομένης της περιμέτρου του τροχού.

4. Με βάση την πίεση του ατμού κατηγοριοποιούνται ως:

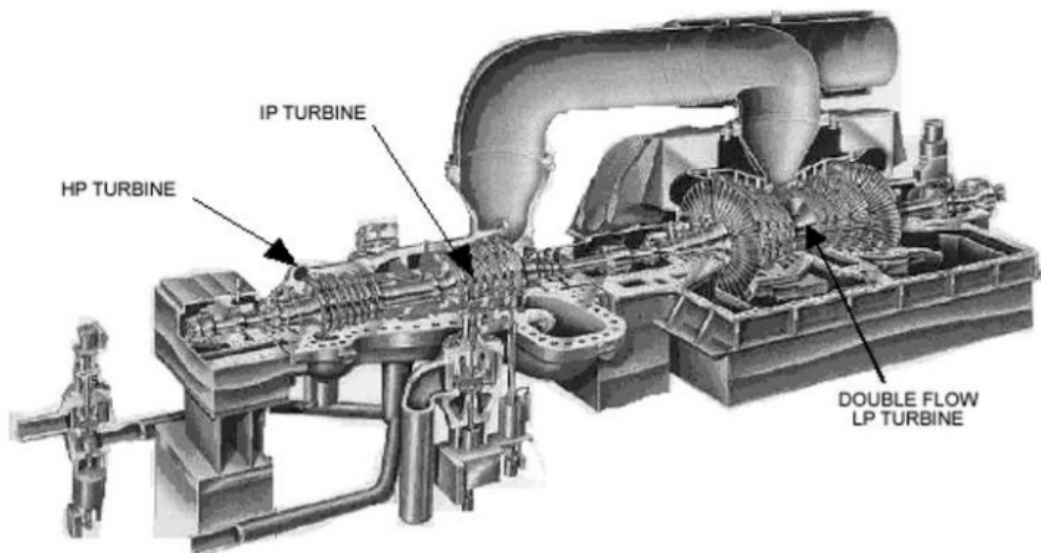
- Υψηλής πίεσης (απευθείας τροφοδοσία ατμού από τον λέβητα)
- Μέσης πίεσης (τροφοδοσία με τον ατμό που εξέρχεται από τον στρόβιλο υψηλής πίεσης)
- Χαμηλής πίεσης (τροφοδοσία με τον ατμό που εξέρχεται από τον στρόβιλο μέσης πίεσεως και στην συνέχεια κατευθύνεται στον συμπυκνωτή).

5. Με βάση την πίεση του ατμού κατά την έξοδο από τον στρόβιλο κατηγοριοποιούνται ως εξής:

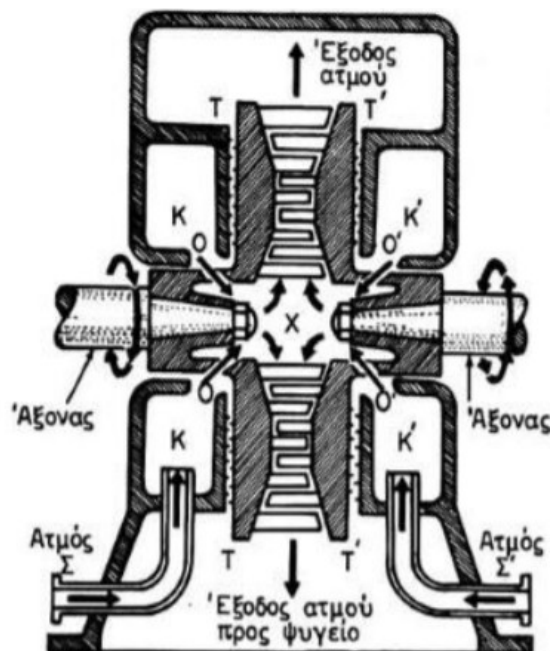
- Στρόβιλοι ελεύθερης εξάτμισης (ο ατμός εξάγεται στην ατμόσφαιρα)
- Στρόβιλοι αντίθλιψης (ο ατμός εξάγεται σε δίκτυο για την κάλυψη διαφόρων αναγκών)
- Στρόβιλοι κενού (ο ατμός εξάγεται στον συμπυκνωτή)

6. Με βάση την λειτουργία του όταν αφορά την εγκατάστασή τους σε πλοίο διακρίνονται σε:

- Προωστικούς ή κύριους (για την πρόωση του πλοίου)
- Βοηθητικούς (κάλυψη αναγκών κίνησης μηχανημάτων)



Σχήμα 18: Απεικόνιση ατμοστρόβιλου υψηλής, μέσης, χαμηλής πίεσεως [15]



Σχήμα 19: Στρόβιλος αντιδράσεως ακτινικής ροής [15]

3. ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΕΡΓΟΣΤΑΣΙΟ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΣΥΝΔΙΑΣΜΕΝΟΥ ΚΥΚΛΟΥ

3.1. ΑΡΧΕΣ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΩΝ ΚΥΚΛΩΝ

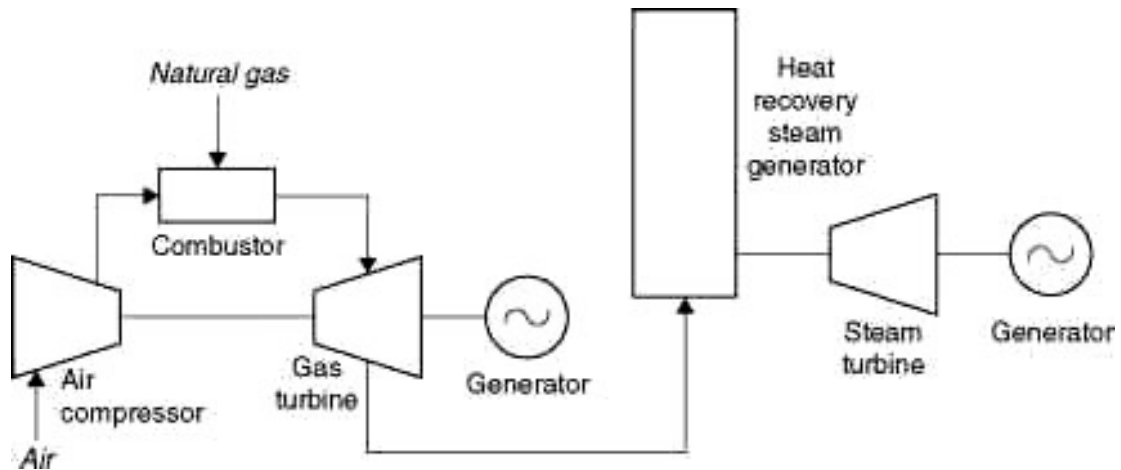
Στη διεθνή βιβλιογραφία τα Εργοστάσια Παραγωγής Ηλεκτρικής Ισχύος ονομάζονται CombinedCyclePowerPlants (CCPP) ή GasTurbineCombinedCycle (GTCC) ή SteamAndGasTurbine (STAG). Όπως υποδηλώνει ο όρος, συνδυασμένος κύκλος (CombinedCycle) είναι ο συνδυασμός των δύο κύκλων ισχύος, ενός κύκλου αερίου (κύκλος Brayton ή GasCycle, GC) και ενός κύκλου ατμού (κύκλος Rankine ή SteamCycle, SC). Φυσικά αυτοί οι δύο κύκλοι ισχύος μπορούν να λειτουργήσουν κι ανεξάρτητα. Οι δύο κύκλοι έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά:

- Ο κύκλος αερίου είναι ένας κύκλος υψηλής θερμοκρασίας (με μέγιστη την $TET=1.200$ με 1.600 °C για βιομηχανικούς αεριοστρόβιλους) παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος, ενώ στο τέλος του απορρίπτεται θερμότητα μέσω των καυσαερίων σε θερμοκρασίες της τάξης των 500 με 700 °C.
- Ο κύκλος ατμού είναι ένας κύκλος χαμηλής θερμοκρασίας (με μέγιστη θερμοκρασία περίπου 550 °C) παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος, ενώ στο τέλος του απορρίπτεται θερμότητα σε θερμοκρασίες περίπου περιβάλλοντος.

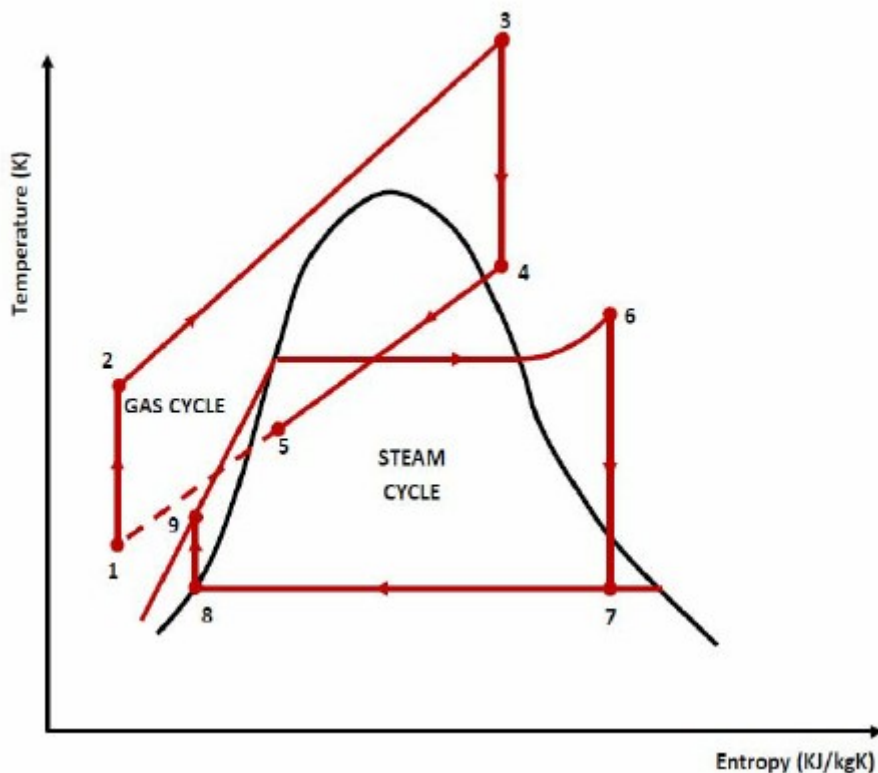
Είναι επομένως μια απλή ιδέα να χρησιμοποιηθεί η θερμότητα που απορρίπτεται από τον κύκλο αερίου, ως θερμότητα εισαγωγής στον κύκλο ατμού. Με αυτήν την ρύθμιση, ο κύκλος ατμού δεν απαιτεί συνήθως οποιαδήποτε πρόσθετη εισαγωγή θερμότητας μέσω καύσης πρόσθετου καυσίμου (supplementary firing), έτσι η παραγόμενη ισχύς του κύκλου ατμού προστίθεται στην ωφέλιμη ισχύ του αεριοστρόβιλου, αυξάνοντας σημαντικά την ολική απόδοση του συνδυασμένου κύκλου.

Γενικά, ο συνδυασμός ενός κύκλου αερίου με έναν κύκλο ατμού έχει επιπτώσεις στα χαρακτηριστικά των δύο επιμέρους κύκλων ισχύος, με άλλα λόγια το καλύτερο εργοστάσιο συνδυασμένου κύκλου απέχει πολύ από το να αποτελείται από τον καλύτερο κύκλο αεριοστρόβιλου σε συνδυασμό με τον καλύτερο δυνατό κύκλο ατμού. Πράγματι οι αεριοστρόβιλοι που είναι σχεδιασμένοι για να χρησιμοποιούνται σε συνδυασμένο κύκλο είναι εντελώς διαφορετικοί από τους αεριοστρόβιλους που είναι σχεδιασμένοι να λειτουργούν μόνοι τους σε ανοιχτό κύκλο. Ομοίως, οι κύκλοι ατμού που χρησιμοποιούνται στους συνδυασμένους κύκλους έχουν κατά βάση διαφορετικά χαρακτηριστικά σε σχέση με τους κύκλους του ατμού που χρησιμοποιείται στους συμβατικούς σταθμούς ατμού άνθρακα ή φυσικού αερίου.

Το Σχήμα 20 παρουσιάζει μία τυπική διάταξη (block διάγραμμα) της απλούστερης εγκατάστασης ηλεκτροπαραγωγής συνδυασμένου κύκλου, ενώ το Σχήμα 21 παρουσιάζει τον τυπικό συνδυασμό των δύο κύκλων (GC και SC) σε ένα διάγραμμα Mollier (T-s), που επεξηγεί πώς η απόρριψη θερμότητας από τον κύκλο αερίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως θερμότητα εισαγωγής για τον κύκλο ατμού.



Σχήμα 20: Block – διάγραμμα συνδυασμένου κύκλου [18]



Σχήμα 21: T-s διάγραμμα πραγματικού συνδυασμένου κύκλου [19]

Η βασική λοιπόν επιδίωξη ενός εργοστασίου CCPP, είναι η αξιοποίηση της θερμικής ενέργειας που έχουν τα καυσαέρια τα οποία εξέρχονται από εξαγωγή του αεριοστρόβιλου, για την παραγωγή ατμού, ο οποίος στην συνέχεια κινεί έναν ατμοστρόβιλο, όπως ακριβώς και στα εργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής. Αναλυτικά, η αρχή λειτουργίας ενός τέτοιου εργοστασίου περιγράφεται αναλυτικά στην συνέχεια του εδαφίου.

Αέρας εισέρχεται στον αεριοστρόβιλο από την κατάλληλα διαμορφωμένη εισαγωγή και αφού συμπιεστεί, καίγεται με καύσιμο, που συνήθως είναι φυσικό αέριο, NG. Τα καυσαέρια εκτονώνονται στον στρόβιλο παράγοντας έργο. Μέρος του έργου εκτόνωσης χρησιμοποιείται για να οδηγηθεί ο συμπιεστής, ενώ το υπόλοιπο (ωφέλιμο) έργο οδηγεί την

πρώτη γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τα καυσαέρια που εξέρχονται από την εξαγωγή του αεριοστρόβιλου έχοντας ικανοποιητικό θερμικό περιεχόμενο, ανάλογα με τον κύκλο Brayton που θα επιλεγεί να λειτουργεί ο αεριοστρόβιλος, οδηγούνται σε μία γεννήτρια ανάκτησης θερμότητας και παραγωγής ατμού (HeatRecoverySteamGenerator, HRSG) όπου μετατρέπουν το νερό σε υπέρκορο ατμό. Ο ατμός ακολουθώντας τον γνωστό κύκλο Rankine εκτονώνεται σε έναν ατμοστρόβιλο που οδηγεί την δεύτερη γεννήτρια για την παραγωγή πρόσθετης ηλεκτρικής ενέργειας. Ο ατμός που φεύγει από τον ατμοστρόβιλο έχει υγροποιηθεί κατά 10% περίπου, ενώ ο υπόλοιπος συμπυκνώνεται συνήθως σε πύργους ψύξης (coolingtowers). Όταν όλος ο ατμός συμπυκνωθεί, ανακυκλώνεται με τη βοήθεια τροφοδοτικών αντλιών (feedrumps).

Έτσι, η λειτουργία του CCGT εργοστασίου, στηρίζεται στον συνδυασμό δύο θερμοδυναμικών κύκλων που ο ένας λειτουργεί «πάνω», (ToppingCycle ή TC) από τον άλλο, δηλαδή τον κύκλο ατμού (BottomingCycle, ή BC). Συνήθως ισχύει η αναλογία παραγωγής ισχύος από τους κύκλους:

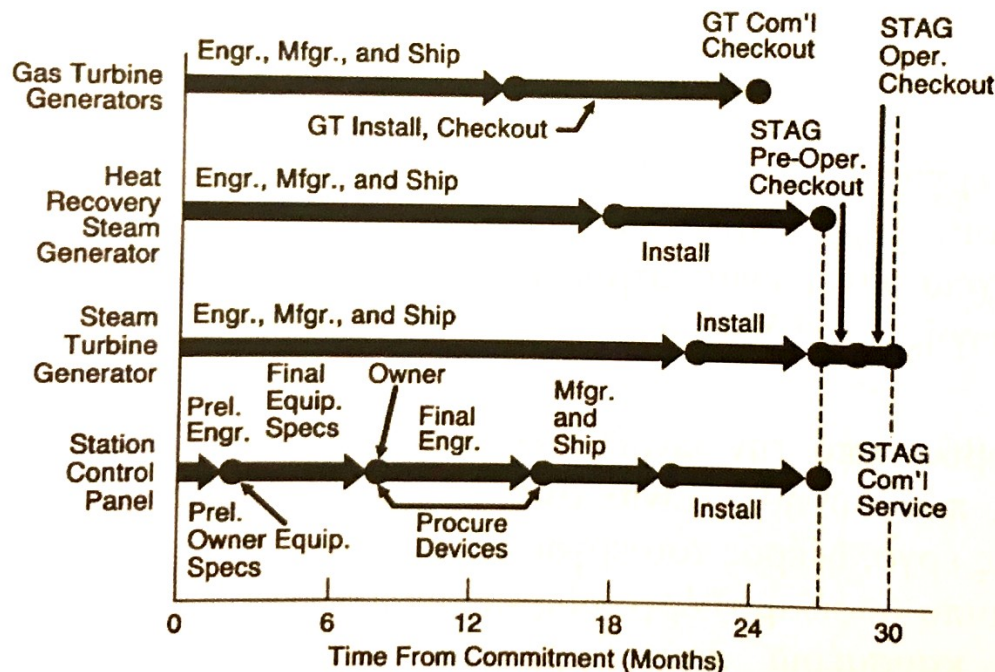
$$\frac{\dot{Q}_{\text{power output}}}{ST \text{ power output}} = \frac{2}{1} \quad [3.1]$$

Τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας συνδυασμένου κύκλου είναι τα ακόλουθα:

- Υψηλός βαθμός θερμικής απόδοσης: Ο βαθμός απόδοσης των εργοστασίων CC είναι συνάρτηση του βαθμού απόδοσης GC, του SC και της απόδοσης της HRSG. Η τεχνολογική πρόοδος που οδηγεί σε αύξηση οποιουδήποτε από τους παραπάνω βαθμούς απόδοσης οδηγεί και σε αύξηση του βαθμού απόδοσης του CC.
- Μειωμένο κόστος εγκατάστασης (Installationcost): Ο βασικός εξοπλισμός των εργοστασίων CC είναι προκατασκευασμένος (pre-engineering) και μεταφέρεται στο σημείο που πρόκειται να δημιουργηθεί το εργοστάσιο σε «κομμάτια» που έχουν κατασκευαστεί και δοκιμαστεί ήδη από τις κατασκευάστριες εταιρείες, (factorypackaging). Έτσι, μειώνεται το κόστος και ο χρόνος εγκατάστασης. Έτσι παρόλο που το κόστος εξοπλισμού είναι μεγαλύτερο από αυτό ενός συμβατικής τεχνολογίας PC αντίστοιχης ισχύος, το κόστος εγκατάστασής του είναι μικρότερο.
- Μειωμένος χρόνος εγκατάστασης (Installationcycletime): Τα εργοστάσια CC εγκαθίστανται και λειτουργούν σε μικρότερο χρόνο από τα συμβατικά. Αυτό οφείλεται στο ότι ο εξοπλισμός είναι προκατασκευασμένος και αποστέλλεται έτοιμος από την κατασκευάστρια εταιρεία, αλλά και στον σπονδυλωτό (modular) τρόπο κατασκευής του εργοστασίου CC. Το τελευταίο σημαίνει ότι επειδή το μέρος του εργοστασίου που βασίζεται στον αεριοστρόβιλο κατασκευάζεται πιο γρήγορα, μπορεί να λειτουργήσει πρώτα μόνο του παράγοντας ηλεκτρική ισχύ και έτσι να ξεκινήσει πιο γρήγορα η απόσβεση της επένδυσης, ενώ το υπόλοιπο εργοστάσιο (που βασίζεται στην παραγωγή ατμού) συνεχίζει να κατασκευάζεται.
- Ευελιξία καυσίμων: Τα CCGT μπορούν να λειτουργήσουν ικανοποιητικά με ένα ευρύ φάσμα καυσίμων όπως το φυσικό αέριο, αποστάγματα πετρελαίου, αργό πετρέλαιο, αεριοποιημένος άνθρακας, βιοαέριο.
- Ευελιξία λειτουργίας: Τα εργοστάσια CC μέσου και μεγάλου φορτίου παρουσιάζουν αξιοσημείωτη ευελιξία λειτουργίας. Αυτό σημαίνει ότι η απόδοσή τους παραμένει ικανοποιητική ακόμα και σε μερικό φορτίο και ότι ανταποκρίνονται γρήγορα στις εκκινήσεις. Για παράδειγμα ο τυπικός χρόνος εκκίνησης και παραγωγής της ονομαστικής ισχύος ενός CCGT είναι περίπου 1h, (αυτό οφείλεται στην γρήγορη εκκίνηση και πλήρη λειτουργία του αεριοστρόβιλου). Επανερχόμενοι στις συνθήκες λειτουργίας σε μερικό φορτίο, εκτός του γεγονότος ότι μπορεί να διακοπεί η λειτουργία ενός ή και περισσότερων αεριοστρόβιλων που μπορεί να διαθέτει ένα CCGT μπορεί να χρησιμοποιηθεί τεχνολογία μεταβλητής γεωμετρίας στον αεριοστρόβιλο. Όταν το φορτίο αρχίζει να μειώνεται τότε μέσω της ρύθμισης των VIGVs και VGVs του αεριοστρόβιλου μειώνεται η παροχή του αέρα, ενώ η TET

παραμένει σχετικά σταθερή, γεγονός που βοηθά να διατηρηθεί σχετικά υψηλός βαθμός απόδοσης του αεριοστρόβιλου. Αυτό σημαίνει όμως ότι μειώνεται και η παροχή των καυσαερίων που διατίθενται για ανάκτηση θερμότητας στην HRSG. Μπορεί η παροχή των καυσαερίων να μειώθηκε, όμως αυτά διατηρούν σχεδόν την ίδια EGT του σημείου σχεδιασμού, διατηρώντας τις συνθήκες σχεδιασμού στην είσοδο της HRSG, οπότε διατηρείται και η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων από την HRSG (θερμοκρασία καμινάδας, stacktemperature, t_s) σχετικά σταθερή και δεν εμφανίζονται απώλειες στον κύκλο ατμού. Εάν το φορτίο μειωθεί περαιτέρω, τότε η παροχή αέρα διατηρείται σταθερή και αναγκαστικά μειώνεται η παροχή καυσίμου ουσιαστικά δηλαδή μειώνεται η TET, μειώνοντας την απόδοση και του αεριοστρόβιλου αλλά και πολύ περισσότερο την απόδοση της HRSG>

- Υψηλή αξιοπιστία και διαθεσιμότητα: Είναι αποτέλεσμα της εξέλιξης και ωρίμανσης της τεχνολογίας των αεριοστρόβιλων και των βοηθητικών συστημάτων τους.
- Χαμηλό κόστος λειτουργίας και συντήρησης: Το πρώτο οφείλεται στον υψηλό βαθμό απόδοσης των CCPP αλλά και στο γεγονός ότι δεν απαιτείται σημαντικός αριθμός πρόσθετου εργατικού δυναμικού για να λειτουργήσει το εργοστάσιο. Το δεύτερο έχει να κάνει με την οργάνωση του προγράμματος επιθεωρήσεων/συντηρήσεων και τις τεχνικές πρόβλεψης βλαβών και διαχείρισης των ανταλλακτικών.

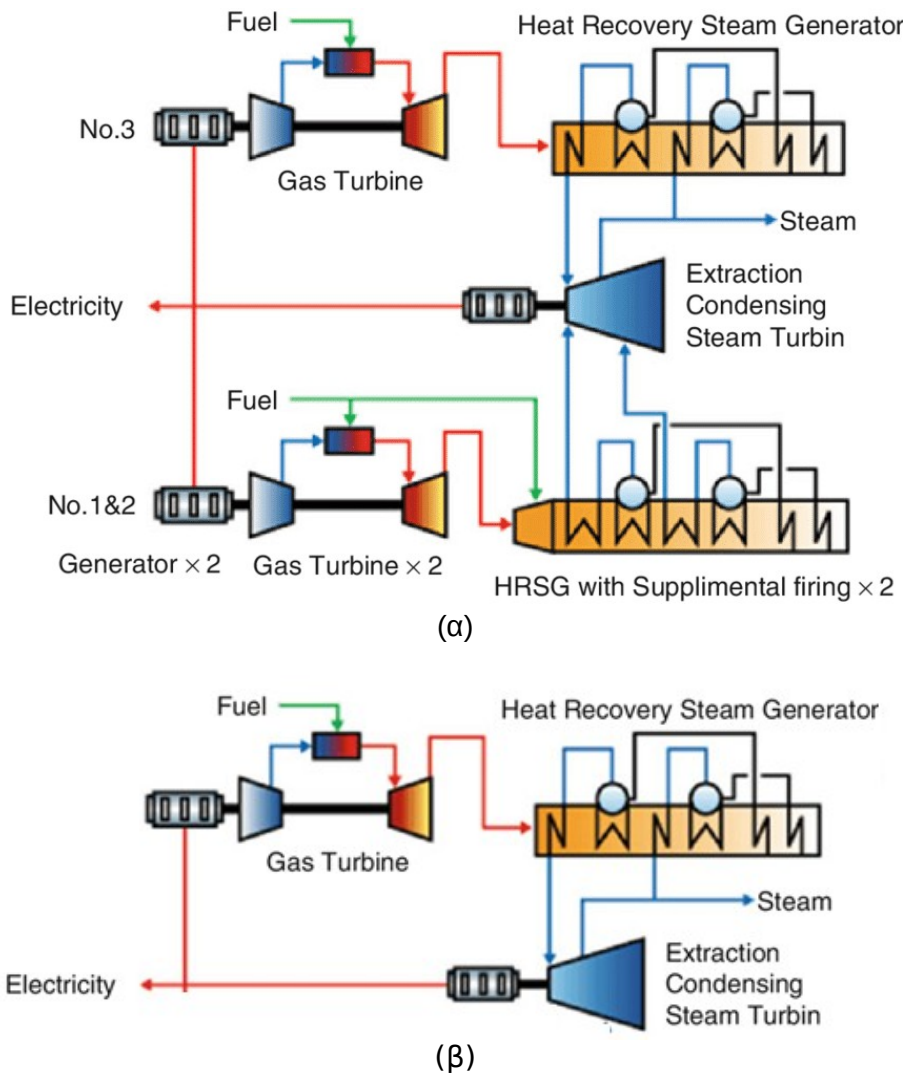


Σχήμα 22: Τυπικό διάγραμμα έργου κατασκευής CCPP [1]

3.2. ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΕΡΓΟΣΤΑΣΙΩΝ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΟΥ ΚΥΚΛΟΥ

Ένα εργοστάσιο συνδυασμένου κύκλου μπορεί να έχει πολλές διαμορφώσεις ανάλογα με ορισμένα κριτήρια. Πρώτο κριτήριο είναι ο αριθμός των ανεξάρτητων αξόνων που οδηγούν τη ή τις γεννήτριες. Έτσι εάν υπάρχουν άνω του ενός αεριοστρόβιλοι που οδηγούν αντίστοιχες γεννήτριες και τα καυσαέρια τούς οδηγούνται σε αντίστοιχες HRSGs όπου δημιουργείται ατμός που εκτονώνεται σε έναν ατμοστρόβιλο που οδηγεί με την σειρά του την δικιά του γεννήτρια, τότε αυτό το CC εργοστάσιο ονομάζεται πολλαπλών αξόνων

(Multi-shaftCCPP) (Σχήμα 23 (α)). Υπάρχουν εργοστάσια που λειτουργούν έως και 11 αεριοστρόβιλους, συνήθως όμως υπάρχουν μόνο δύο ανεξάρτητοι αεριοστρόβιλοι με τις γεννήτριές τους να διοχετεύουν τα καυσαέρια του σε μία μόνο HRSG που παράγει ατμό για τον ατμοστρόβιλο για να οδηγήσει την γεννήτριά του. Σε μία τέτοια διάταξη, ο κάθε αεριοστρόβιλος διαθέτει μία βαλβίδα εκτροπής των καυσαερίων, έτσι ώστε οποιοσδήποτε αεριοστρόβιλος να μπορεί να «βγει εκτός» για να συντηρηθεί. Από την άλλη υπάρχει η δυνατότητα τόσο ο αεριοστρόβιλος όσο και ο ατμοστρόβιλος να είναι υνδεδεμένοι στον ίδιο άξονα και να οδηγούν από κοινού την μία και μοναδική γεννήτρια (Single-shaftCCPP) (Σχήμα 23 (β)).



Σχήμα 23: Διαμόρφωση (α) Multi-shaftCCPP και(β) Single-shaftCCPP [21]

Τα πλεονεκτήματα της διαμόρφωσης Multi-shaftCCPP είναι τα εξής:

- Δίνουν τη δυνατότητα για πιο ευέλικτη τοποθέτηση των επιμέρους συστημάτων στο χώρο του εργοστασίου (flexible arrangement).
- Ο χρόνος εγκατάστασης και λειτουργίας είναι μικρότερος. Εξαιτίας της τμηματικής κατασκευής (modular construction), οπότε μπορεί να μειωθεί ακόμα περισσότερο ο χρόνος μέχρι την πρώτη παραγωγή ενέργειας.
- Χρήση μικρότερων γεννητριών.

- Συνήθως λειτουργούν με απλό κύκλο ατμού.
- Παρουσιάζουν ελάχιστα καλύτερη απόδοση σε λειτουργία στο σημείο σχεδιασμού αλλά και σε μερικό φορτίο.

Τα πλεονεκτήματα της διαμόρφωσης Single-shaftCCPP είναι τα εξής:

- Καταλαμβάνουν μικρότερο χώρο άρα έχουν και μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος με την έννοια MW/m².
- Επιτυγχάνουν ελάχιστα καλύτερη αξιοπιστία και διαθεσιμότητα.
- Οι θερμοκρασίες αναθέρμανσης του κύκλου ατμού ελέγχονται καλύτερα με αυτή την διαμόρφωση.

Σε κάθε περίπτωση δεν υπάρχει ξεκάθαρος νικητής και η τελική επιλογή εξαρτάται από τις ειδικές συνθήκες της κάθε περίπτωσης.

Δεύτερο κριτήριο διαμόρφωσης ενός εργοστασίου είναι εάν ο κύκλος αερίου (GC) διαθέτει σύστημα αναθέρμανσης ή αν ο κύκλος ατμού SC διαθέτει συστήματα αναθέρμανσης, αναγέννησης ή πολλαπλών πιέσεων. Έτσι για παράδειγμα με χρήση κύκλου ατμού διπλής πίεσης, θα επιτυγχάνονταν υψηλότερος βαθμός απόδοσης λόγω της αύξησης της μέσης θερμοκρασίας μεταφοράς θερμότητας στον ατμό. Η πρόσθετη πολυπλοκότητα όμως αυξάνει το κόστος της HRSG και του ατμοστρόβιλου και απαιτείται μία λεπτομερής μελέτη για να βρεθεί αν τελικά το κόστος της παραγόμενης μονάδας ηλεκτρικής ενέργειας θα είναι χαμηλότερο ή όχι. Κύκλοι διπλής πίεσης έχουν ευρεία διάδοση στην πράξη. Με σύγχρονους αεριοστρόβιλους να παρέχουν καυσαέρια με θερμοκρασίες εξαγωγής κοντά στους 600°C, οι κύκλοι τριπλής πίεσης με αναθέρμανση έχουν βρεθεί ότι είναι οικονομικοί και άρχισαν να χρησιμοποιούνται ευρέως.

Τρίτο κριτήριο όσον αφορά την διαμόρφωση είναι εάν υπάρχει πρόβλεψη για χρήση επιπλέον καυσίμου στην HRSG γνωστή ως βοηθητική καύση (supplementary firing). Αυτό θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για αύξησης της ωφέλιμης ισχύος για μικρά χρονικά διαστήματα ή την αποφυγή προβλημάτων ποιότητας ατμού στην λειτουργία σε μερικό φορτίο, αλλά θα προκαλούσε σημαντική αύξηση του κόστους της HRSG, στην ουσία μετατρέπεται σε λέβητα (boiler). Τα καυσαέρια από τη βοηθητική καύση δεν διέρχονται από τον αεριοστρόβιλο, οπότε δημιουργείται η δυνατότητα για καύση βαρέων πετρελαίων (heavyoils) ή άνθρακα στο λέβητα. Συνήθως αυτή η επιλογή απορρίπτεται από την αρχή λόγω της πολυπλοκότητας και του κόστους που συνεπάγεται η παροχή περισσότερων από ένα καύσιμο, όμως μπορεί να αποτελέσει μία οικονομική πρόταση στο μέλλον αν οι τιμές του πετρελαίου και του φυσικού αερίου αυξηθούν απότομα σε σχέση με τον άνθρακα.

Σε κάθε περίπτωση κοινός στόχος όλων, είναι η αύξηση της ωφέλιμης ισχύος και της απόδοσης για όλες τις συνθήκες λειτουργίας του εργοστασίου, μειώνοντας ταυτόχρονα το κόστος κτήσης, λειτουργίας, συντήρησης και επιβάρυνσης του περιβάλλοντος.

3.3. ΚΥΡΙΑ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ ΤΟΥ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΟΥ ΚΥΚΛΟΥ

Ο αεριοστρόβιλος έχει δύο βασικούς ρόλους στο συνδυασμένο κύκλο:

- Να παράγει ισχύ περιστρέφοντας μία γεννήτρια που περιστρέφεται με 3.000 rpm ή 3.600 rpm ανάλογα εάν το δίκτυο λειτουργεί σε συχνότητα 60Hz (USA) ή 60Hz (Ευρώπη).
- Να απορρίπτει θερμότητα μέσω εξαγωγής του, που χρησιμοποιείται ως θερμότητα εισαγωγής στον κύκλο ατμού.

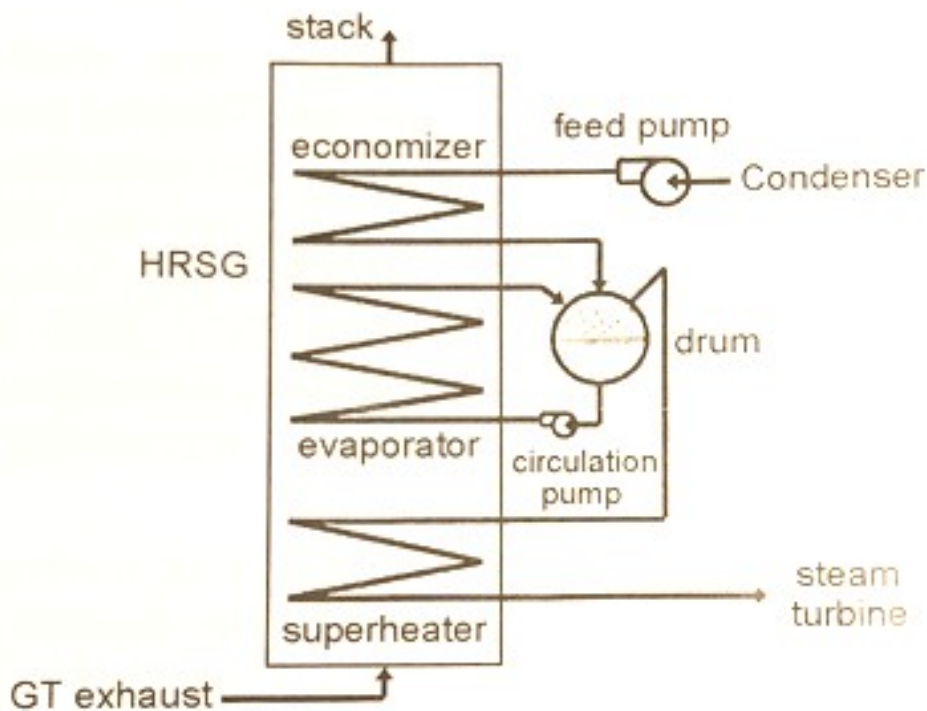
Αυτοί οι δύο ρόλοι είναι αντιφατικοί, υπό την έννοια ότι εάν κάποιος προσπαθήσει να αυξήσει την ισχύ του αεριοστρόβιλου, το αποτέλεσμα θα είναι μειωμένη απορριπτόμενη θερμότητα καυσαερίων και το αντίστροφο.

Η γεννήτρια ανάκτησης θερμότητας και παραγωγής ατμού (HeatRecoverySteamGenerator, HRSG) ονομάζεται και λέβητας ανάκτησης θερμότητας καυσαερίων (WasteHeatRecoveryBoiler, WHRB) ή απλά αμοπααραγωγός ή γεννήτρια ατμού, είναι μία βασική συνιστώσα του συνδυασμένου κύκλου, επειδή πραγματοποιεί την σύνδεση μεταξύ του κύκλου αερίου και του κύκλου ατμού. Η HRSG, είναι στην ουσία ένας πολλαπλός εναλλάκτης όπου γίνεται εναλλαγή θερμότητας μεταξύ των καυσαερίων του αεριοστρόβιλου και των κυκλωμάτων νερού/ατμού του κύκλου ατμού.

Χαρακτηριστικό όλων των τύπων HRSG είναι ο διαχωρισμός τους σε τμήματα (εναλλάκτες θερμότητας), σε καθένα από τα οποία γίνεται και μία διαφορετική διεργασία με τελικό αποτέλεσμα την παραγωγή υπέρθερμου ατμού:

- Η προθέρμανση του νερού γίνεται σε έναν εναλλάκτη θερμότητας που ονομάζεται προθερμαντήρας (economizer).
- Η εξαέρωση γίνεται στον εναλλάκτη θερμότητας που ονομάζεται εξαμιστήρας (evaporator).
- Η υπερθέρμανση του ατμού γίνεται με εναλλάκτη θερμότητας που ονομάζεται υπερθερμαντήρας (superheater).
- Τέλος, υπάρχει το τύμπανο ατμού (drum) που είναι απαραίτητο για τον διαχωρισμό της υγρής φάσης από τον ατμό σε όλη την διάρκεια της διαδικασίας.

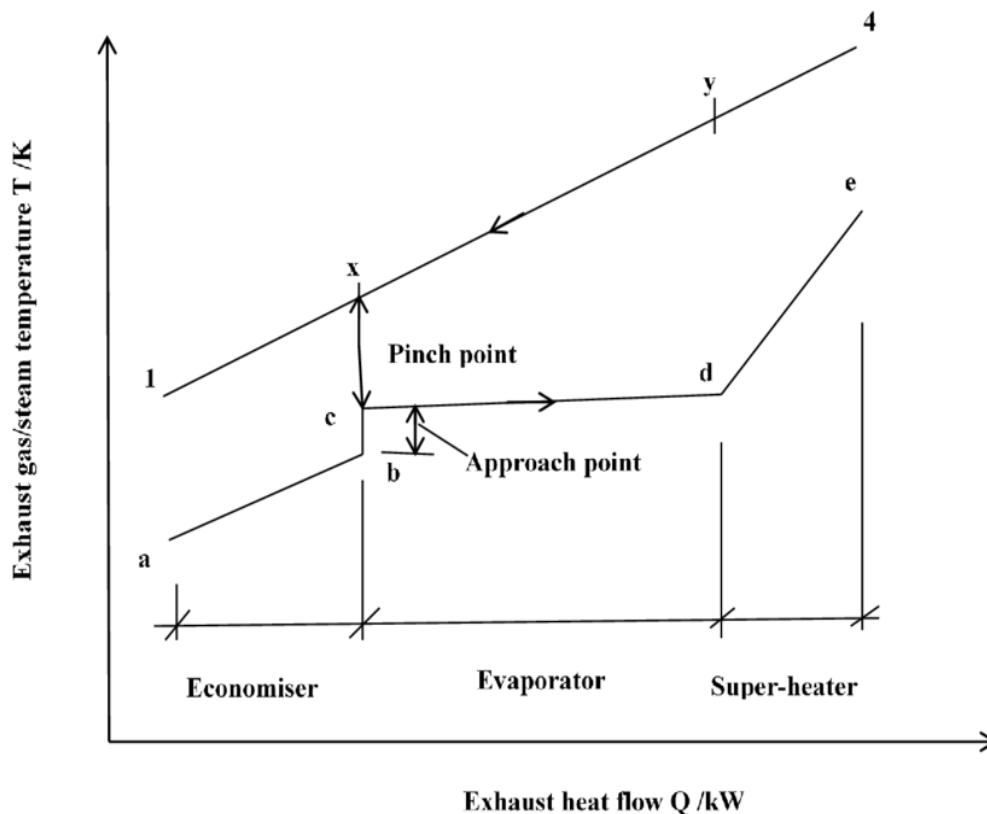
Το Σχήμα 24 παρουσιάζει το διάγραμμα της απλούστερης δυνατή HRSG, ένα επίπεδο πίεσης (κοινό), με μόνο του τρεις απαραίτητους εναλλάκτες θερμότητας και το τύμπανο ατμού που προαναφέραμε.



Σχήμα 24: Σχηματικό διάγραμμα της HRSG μόνης πίεσης [20]

Οι σημαντικότερες παράμετροι της HRSG είναι:

- Η πίεση λειτουργίας, επιλέγεται ώστε να εξασφαλίζεται η καλύτερη δυνατή ανάκτηση θερμότητας και απόδοση του συνδυασμένου κύκλου.
- Η θερμοκρασία του τροφοδοτικού νερού πρέπει να είναι σχετικά υψηλή, ώστε να αποτρέπεται η συμπύκνωση (σημείο δρόσου, dewpoint), στους σωλήνες της HRSG, γεγονός που θα δημιουργούσε προβλήματα διάβρωσης.
- Η θερμοκρασία του υπέρθερμου ατμού, η οποία καθορίζεται τόσο από τους περιορισμούς του ατμοστρόβιλου, όσο και από τη θερμοκρασία των καυσαερίων του αεριοστρόβιλου, $EGT = T_{\text{exhaust}}$.
- Στο κρίσιμο σημείο του υπερθερμαντήρα, η διαφορά θερμοκρασίας υπερθέρμανσης (superheaterpinchpoint), η οποία είναι η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των θερμών καυσαερίων και της θερμοκρασίας του υπέρθερμου ατμού (της τάξης των 20°C).
- Στο κρίσιμο σημείο του εξατμιστήρα, η διαφορά θερμοκρασίας εξάτμισης (evaporatorpinchpoint), η οποία είναι η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των καυσαερίων και του κορεσμένου ατμού στον εξατμιστήρα, (της τάξης των 10°C).
- Η διαφορά θερμοκρασίας σημείου προσέγγισης (approachpoint), η οποία είναι η θερμοκρασία κορεσμού στον εξατμιστήρα ή στο τύμπανο μείον των θερμοκρασία του νερού στην έξοδο του προθερμαντήρα. Για διάφορους λόγους (εναπόθεση αλάτων, έλεγχο, σταθερότητα κ.α.), θα ήταν επικίνδυνο να υπάρξει ατμός στον προθερμαντήρα. Για το λόγο αυτό, ο σχεδιασμός γίνεται συνήθως με ένα περιθώριο ασφαλείας (approach) περίπου 2 έως 10°C .



Σχήμα 25: Διάγραμμα μεταφοράς θερμότητας σε HRSG μονής πίεσης [20]

Ορισμένες από τις βελτιώσεις των επιδόσεων των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής συνδυασμένου κύκλου των τελευταίων χρόνων έχουν προέλθει από την εξέλιξη της τεχνολογίας των HRSG, αυξάνοντας την ποσότητα της θερμότητας που ανακτάται από τα καυσαέρια του αεριοστρόβιλου. Το περισσότερο, εάν όχι όλο, υπόλοιπο της βελτίωσης στην απόδοση συνδυασμένου κύκλου οφείλεται στον αεριοστρόβιλο. Η βελτίωση των αεριοστρόβιλων οφείλεται συνήθως στην αύξηση της TET και κατά συνέπεια της EGT. Αυτό σημαίνει ότι περισσότερη θερμότητα είναι διαθέσιμη στην HRSG και μάλιστα αυτή προσφέρεται σε υψηλότερα επίπεδα θερμοκρασίας, που απαιτούν ανάπτυξη υλικών υψηλής τεχνολογίας, αλλά και πιο σύνθετα συστήματα ανάκτησης θερμότητας.

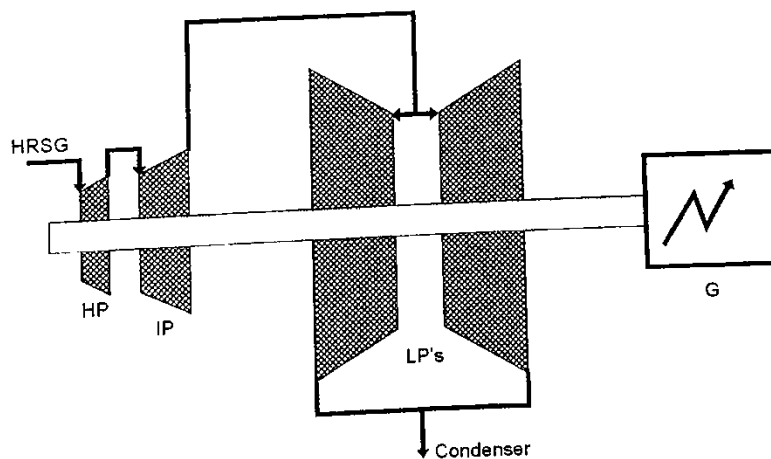
Στις σύγχρονες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας συνδυασμένου κύκλου η HRSG αντιπροσωπεύει περίπου το 10% του συνολικού κόστους και περίπου το 20% του κόστους του εξοπλισμού. Η διαθεσιμότητα της HRSG, επηρεάζει σημαντικά την διαθεσιμότητα και την κερδοφορία των εγκαταστάσεων.

Ο ατμοστρόβιλος (steamturbine, ST) παράγει ισχύ εκμεταλλευόμενος την εκτόνωση του υψηλής πίεσης υπέρθερμου ατμού έως την πίεση του συμπυκνωτή. Ο λόγος πίεσης του ατμοστρόβιλου είναι πολύ υψηλός, για παράδειγμα με τις συνήθεις μέγιστες πιέσεις της τάξης των 100 bar και τις συνήθεις ελάχιστες πιέσεις της τάξης του 0.05 bar ο λόγος πίεσης γίνεται 2.000. ο ατμοστρόβιλος αποτελείται συνήθως από διάφορα τύμπανα (spools) και το περίβλημα, όλα τοποθετημένα στον ίδιο άξονα με μία γεννήτρια η οποία περιστρέφεται στις 3.000 ή 3.600 rpm.

Οι κύριες παράμετροι του ατμοστρόβιλου είναι οι κάτωθι:

- Η πίεση λειτουργίας
- Η μέγιστη θερμοκρασία εισόδου
- Η παροχή μάζας εισόδου
- Η πίεση εξόδου (back pressure)
- Η ποιότητα του ατμού εξόδου (ποιότητες ατμού κάτω από 0,87-0.88 οδηγούν σε εμφάνιση προβλημάτων διάβρωσης)
- Η εγκάρσια διατομή της εξαγωγής (exhaustcrosssection) και ο αριθμός των τυμπάνων χαμηλής πίεσης (LowPressure, LP). Τυπική τιμή του ολικού εμβαδού της διατομής εξόδου που απαιτείται από την πίεση της εξαγωγής και την παροχή μάζας είναι $2 \text{ (LP τύμπανα)} \cdot 8\text{m}^2 = 16\text{m}^2$, για ισχύ 150MW και πίεση συμπυκνωτή 80mbars.

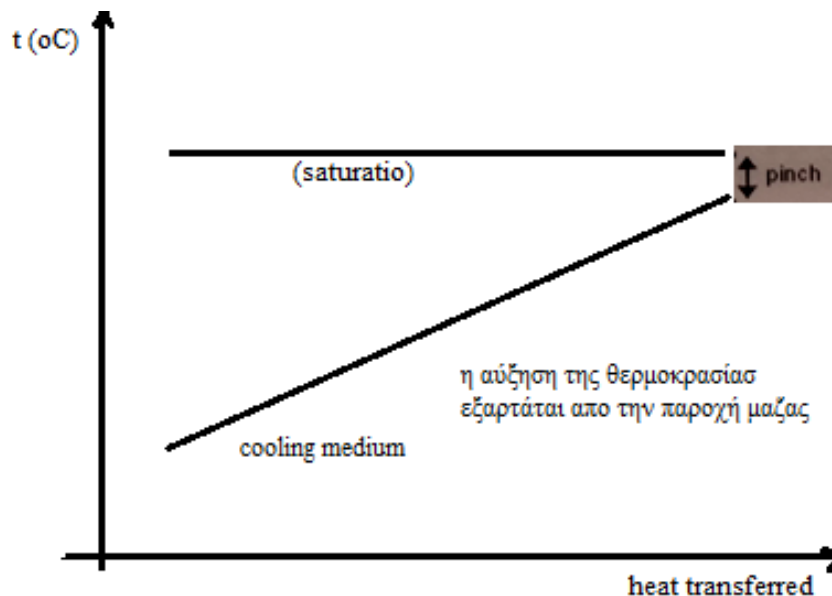
Το Σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζει μία τυπική διαμόρφωση ατμοστρόβιλου συνδυασμένου κύκλου. Το κύριο χαρακτηριστικό του είναι η κατοπτρική τοποθέτηση των δίδυμων LP τυμπάνων και των περιβλημάτων τους που έχει το πλεονέκτημα της εξισορρόπησης των αξονικών ωθήσεων.



Σχήμα 26: Τυπική διαμόρφωση αεριοστρόβιλου

Ο ρόλος του συμπυκνωτή (condenser), ο οποίος δεν είναι τίποτα περισσότερο από έναν εναλλάκτη θερμότητας, είναι να συμπυκνώνει το μίγμα ατμού στην εξαγωγή του αεριοστρόβιλου σε νερό. Το νερό πρέπει να συμπυκνωθεί προκειμένου να συμπιεστεί με μια σχετικά πολύ μικρή κατανάλωση ενέργειας. Η συμπίεση γίνεται από τις αντλίες αναρρόφησης (extraction pumps) που ακολουθούνται από τις τροφοδοτικές αντλίες (feed pumps) της HRSG. Ο συμπυκνωτής αποτελεί αναπόσπαστο μέρος του συστήματος ψύξης που περιγράφεται στην συνέχεια του εδαφίου. Οι παράμετροι του συμπυκνωτή είναι οι ακόλουθες:

- Η θερμοκρασία εισόδου του ψυκτικού μέσου
- Η αύξηση θερμοκρασίας ψυκτικού μέσου, που εξαρτάται από την παροχή μάζας του ψυκτικού μέσου και από το ποσό θερμότητας που πρέπει να αποβάλει ο συμπυκνωτής
- Η διαφορά θερμοκρασίας του κρίσιμου σημείου του συμπυκνωτή (pinchpoint). Η τιμή της εξαρτάται από τη φύση του ψυκτικού μέσου
- Η προκύπτουσα θερμοκρασία και πίεση κορεσμού του ατμού, που είναι πολύ σημαντική γιατί η απόδοση του αμοστρόβιλου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την πίεση εξόδου.



Σχήμα 27: Παράμετροι σχεδιασμού συμπυκνωτή [1]

Όσον αφορά τα συστήματα ψύξης, υπάρχουν διάφορες διατάξεις που εξάγουν τη θερμότητα της συμπύκνωσης από το συμπυκνωτή. Η άμεση ψύξη με νερό ποταμού ή θαλασσινό νερό είναι η απλούστερη διάταξη όταν νερό ποταμού ή θαλασσινό νερό είναι διαθέσιμα σε επαρκείς ποσότητες. Το νερό ρέει στο εσωτερικό των σωλήνων του συμπυκνωτή και απέξω ο ατμός συμπυκνώνεται. Χαρακτηρίζεται από τα εξής:

- Προβλήματα στόμωσης (fouling) και διάβρωσης (corrosion), λόγω χρήσης θαλασσινού νερού
- Πιθανή ανεπίτρεπτη αύξηση θερμοκρασίας του νερού του ποταμού
- Μικρή βοηθητική κατανάλωση ισχύος (αντλίες κυκλοφορίας νερού)
- Καλή ανταλλαγή θερμότητας (αλλαγή φάσης από την μία πλευρά, νερό από την άλλη) και επομένως χαμηλή πίεση εξόδου του αμοστρόβιλου και του συμπυκνωτή για δεδομένη θερμοκρασία νερού

Σε μία διάταξη πύργου ψύξης (coolingtower) ο συμπυκνωτής είναι ένας ενδιάμεσος εναλλάκτης θερμότητας μεταξύ του ατμού και του κυκλώματος νερού ψύξης που απελευθερώνει την θερμότητα του στον πύργο ψύξης. Ένα είδος πύργου ψύξης είναι αυτό της άμεσης επαφής-φυσικής ροής. Σε αυτήν την περίπτωση το νερό ψύξης αφήνεται να πέσει στον ροή του ανερχόμενου αέρα από ύψος περίπου 1/3 του ύψους των πύργων με την μορφή μικρών σταγονιδίων σε μια λίμνη που βρίσκεται στην βάση του πύργου. Η ανταλλαγή θερμότητας πραγματοποιείται επειδή οι σταγόνες έρχονται σε επαφή με τον αέρα και επειδή μερικά από τα σταγονίδια του νερού εξατμίζονται. Χαρακτηριστικά:

- Δεν απαιτείται νερό ποταμού
- Κατανάλωση νερού (εξάτμιση και παράσυρση)
- Θόρυβος (φαινόμενο της ντουζιέρας)
- Υψηλός και δαπανηρός πύργος
- Τεχνητά σύννεφα, ομίχλες και βροχές

Στους πύργους ψύξης άμεσης επαφής – αναγκαστικής ροής το νερό αφήνεται να πέσει στην ροή του ανερχόμενου αέρα που δημιουργείται από ανεμιστήρες. Χαρακτηριστικά:

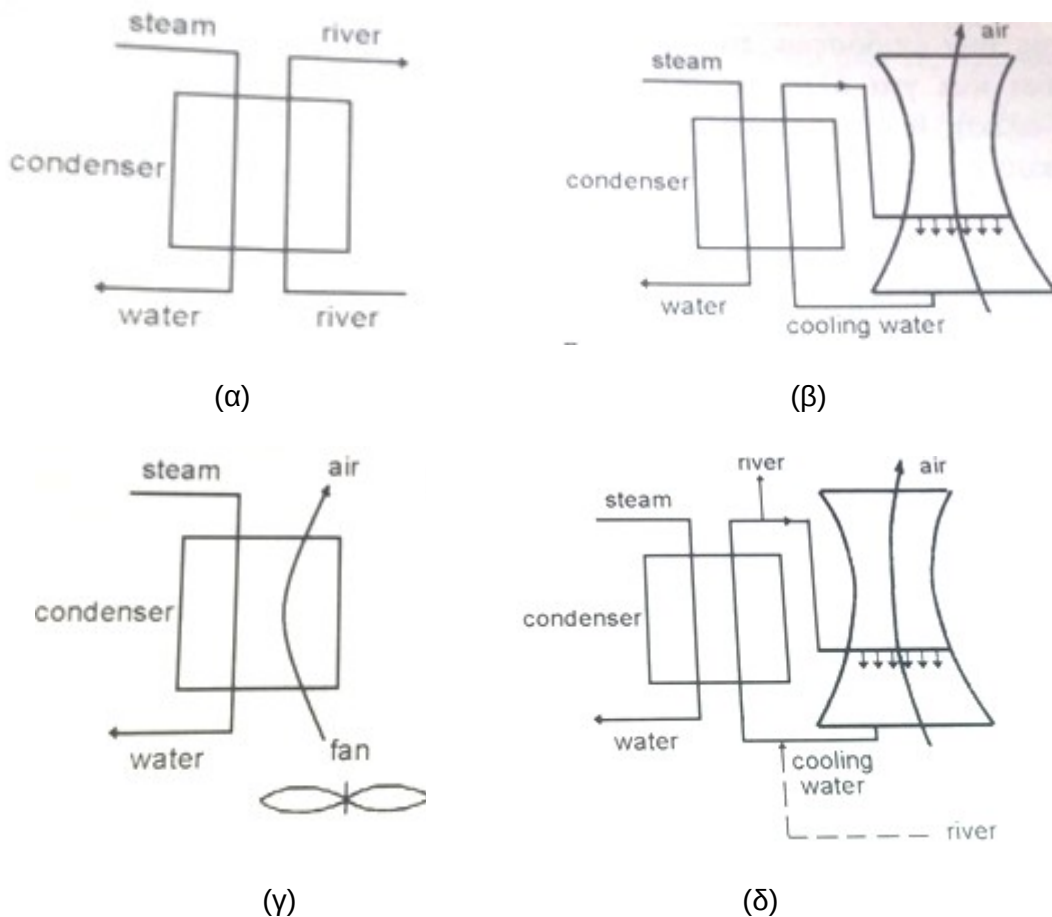
- Δεν απαιτείται νερό ποταμού
- Κατανάλωση νερού (εξάτμιση και παράσυρση)
- Θόρυβος (ανεμιστήρες)
- Μικροί πύργοι (10 έως 20m)
- Τεχνητά σύννεφα, ομίχλες και βροχές
- Μεγάλη κατανάλωση ισχύος από τους ανεμιστήρες

Ωστόσο, εάν η κατανάλωση νερού των προηγούμενων εναλλακτικών λύσεων είναι απαράδεκτη (χώρες με πολύ ξηρό κλίμα), χρησιμοποιούνται ξηροί πύργοι. Το νερό ψύξης ρέει σε σωλήνες αντί να απελευθερωθεί στη ροή του ανερχόμενου αέρα. Θεωρητικά, δεν υπάρχει καμία κατανάλωση νερού. Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της ατμόσφαιρας και του ατμού συμπυκνώνεται (και επομένως της πίεσης κορεσμού) είναι η μεγαλύτερη με αυτήν την επιλογή, οπότε το τίμημα που πρέπει να καταβληθεί είναι η μειωμένη παραγωγή ισχύος του ατμοστρόβιλου και άρα της ολικής απόδοσης του συνδυασμένου κύκλου.

Στην διάταξη του αεροσυμπυκνωτή (aerocondencer), ο συμπυκνωτής είναι ένας εναλλάκτης θερμότητας ατμού-αέρα. Ο ατμός ρέει και συμπυκνώνεται μέσα στους σωλήνες, ενώ εξωτερικά οι ανεμιστήρες δημιουργούν μία ροή του αέρα. Τα κύρια χαρακτηριστικά αυτής της διάταξης είναι τα εξής:

- Δεν απαιτείται νερό ποταμού
- Καμία κατανάλωση νερού
- Θόρυβος (ανεμιστήρες)
- Κανένας πύργος
- Μεγάλη κατανάλωση ισχύος από τους ανεμιστήρες
- Σχετικά φτωχή ανταλλαγή θερμότητας στους σωλήνες και επομένως σχετικά υψηλή διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του συμπυκνωμένου ατμού και του αέρα.

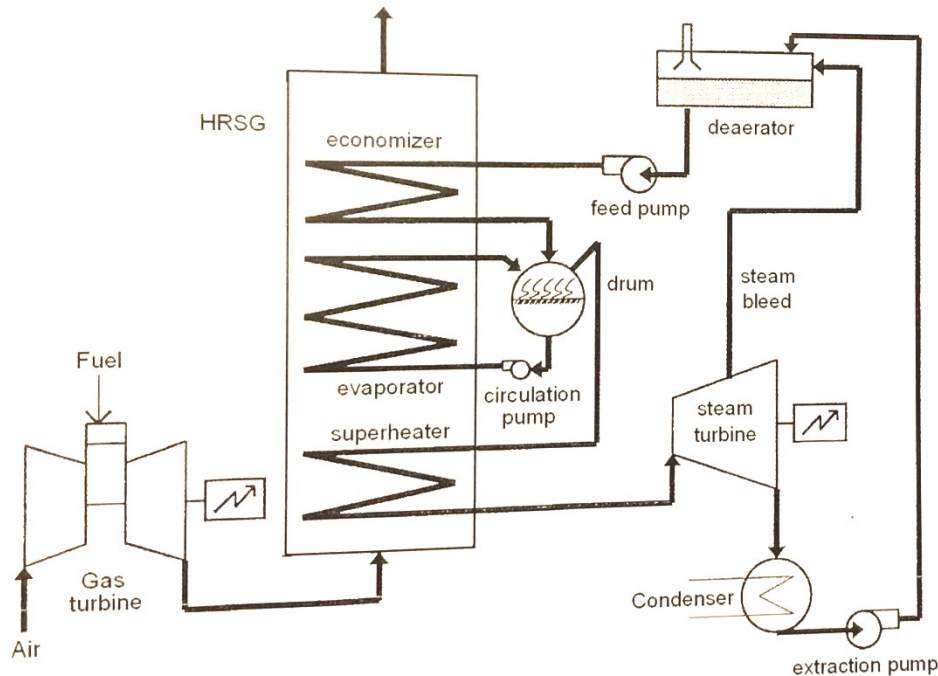
Όσον αφορά τις υβριδικές λύσεις, συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα των προηγούμενων επιλογών όπως αυτά προαναφέρθηκαν. Η πιο κοινή υβριδική λύση είναι η εγκατάσταση του πύργου ψύξης (φυσικής ροής) και του νερού ψύξης του ποταμού. Το φορτίο θερμότητας του συμπυκνωτή μπορεί να μοιραστεί μεταξύ του πύργου και του ποταμού. Συνήθως, οι αρχές προσδιορίζουν μία μέγιστη αύξηση της θερμοκρασίας νερού του ποταμού για περιβαλλοντικούς λόγους. Με μία τέτοια υβριδική διάταξη, ο ποταμός μπορεί να λάβει ακριβώς το μέγιστο ποσό θερμότητας, ενώ το υπόλοιπο πηγαίνει στον πύργο.



Σχήμα 28: α) Σύστημα άμεσης ψύξης με νερό ποταμού ή θαλασσινό νερό, β) Πύργος ψύξης, γ) Αεροσυμπυκνωτής, δ) Υβριδικές λύσεις

3.4. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΣΤΟ ΣΗΜΕΙΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ CCRP ΜΟΝΗΣ ΠΙΕΣΗΣ

Ο συνδυασμένος κύκλος μονής πίεσης (single pressure level combined cycle) είναι η πιο απλή μορφή του συνδυασμένου κύκλου. Μολονότι, πολλές μετατροπές οδηγώντας σε συνδυασμένους κύκλους πολλαπλών πιέσεων της HRSG έχουν εισαχθεί για η βελτίωση της απόδοσης, ο συνδυασμένος κύκλος μονής πίεσης παραμένει ακόμη στην αγορά. Επιπλέον, είναι σημαντικό να κατανοήσει κανείς τις έννοιες πίσω από τα συστήματα μονής πίεσης πριν να προσπαθήσει να κατανοήσει τα πιο σύνθετα ζητήματα των συστημάτων πολλαπλής πίεσης. Η επίδραση ορισμένων παραμέτρων, μερικές φορές, είναι σαφέστερη σε συστήματα μονής πίεσης και αυτός είναι ένας επιπλέον λόγος για τη μελέτη τους. Το ακόλουθο σχήμα φαίνεται το διάγραμμα ροής ενός τυπικού συνδυασμένου κύκλου μονής πίεσης, στο οποίο ο κύκλος ατμού είναι απλά με υπερθέρμανση (χωρίς αναθέρμανση και αναγέννηση), ενώ φαίνεται καθαρά ο σημαντικός ρόλος της HRSG που συνδέει τον κύκλο αερίου και τον κύκλο ατμού.



Σχήμα 29: Διάγραμμα λειτουργίας εργοστασίου συνδυασμένου κύκλου μονής πίεσης

Για τον υπολογισμό της απόδοσης του συνδυασμένου κύκλου μονής πίεσης, υπάρχουν δύο μέθοδοι: η γενική μέθοδος και η αναλυτική μέθοδος.

Η γενική μέθοδος μελέτης των επιδόσεων του συνδυασμένου κύκλου μονής πίεσης που αναλύεται στην συνέχεια του εδαφίου, ισχύει και για όλες τις διατάξεις του συνδυασμένου κύκλου. Ο προσδιορισμός του συντελεστή ολικής θερμικής απόδοσης του συνδυασμένου κύκλου μπορεί να γίνει με την χρήση του συνολικού διαγράμματος ενεργειακής ροής του (energyflowdiagram).

Η εισαγωγή θερμότητας (HI_{GT}) στον κύκλο γίνεται με την καύση του καυσίμου στον θάλαμο καύσης του αεριοστρόβιλου. Ο αεριοστρόβιλος μετατρέπει μέρος από αυτήν την θερμότητα εισόδου HI_{GT} , σε ωφέλιμη μηχανική ισχύ UW_{GT} , με απόδοση η_{GT} , έτσι ώστε αυτή να ισούται με:

$$UW_{GT} = \eta_{GT} * HI_{GT} \quad [3.2]$$

Όπου:

HI_{GT} = θερμότητα εισόδου
 UW_{GT} = ωφέλιμη μηχανική
 η_{GT} = απόδοση

Η υπόλοιπη ισχύς απορρίπτεται από την εξαγωγή του αεριοστρόβιλου με την μορφή της θερμότητας $Q_{EXHAUST}$ και ισούται:

$$Q_{EXHAUST} = (1 - \eta_{GT}) \cdot HI_{GT} \quad [3.3]$$

Όπου:

$Q_{EXHAUST}$ =θερμότητα που απορρίπτεται από την εξαγωγή του αεριοστρόβιλου
 HI_{GT} = θερμότητα εισόδου
 η_{GT} = απόδοση

Το μεγαλύτερο ποσοστό από την απορριπτόμενη θερμική ισχύ ανακτάται από την HRSG. Εάν ορίσουμε την απόδοση της HRSG (η_{HRSG}) σαν τον λόγο της πραγματικά ανακτώμενης θερμικής ισχύος προς την προσδιδόμενη σε αυτήν ισχύ, τότε η ισχύς που ανακτάται από την HRSG, είναι:

$$HI = Q_{EXHAUST} \cdot \eta_{HRSG} \quad [3.4]$$

Όπου:

HI_{GT} = θερμότητα εισόδου

$Q_{EXHAUST}$ = θερμότητα που απορρίπτεται από την εξαγωγή του αεριοστρόβιλου

η_{HRSG} = απόδοση

Η ισχύς που ανακτάται στην HRSG είναι η ισχύς θερμότητας που εισάγεται στον κύκλο ατμού (κύκλος Rankine), ο οποίος έστω ότι έχει απόδοση η_{ST} . Τότε, η ωφέλιμη ισχύς του κύκλου ατμού είναι στην περίπτωση αυτή:

$$UW_{ST} = HI_{ST} \cdot \eta_{ST} \quad [3.5]$$

Όπου:

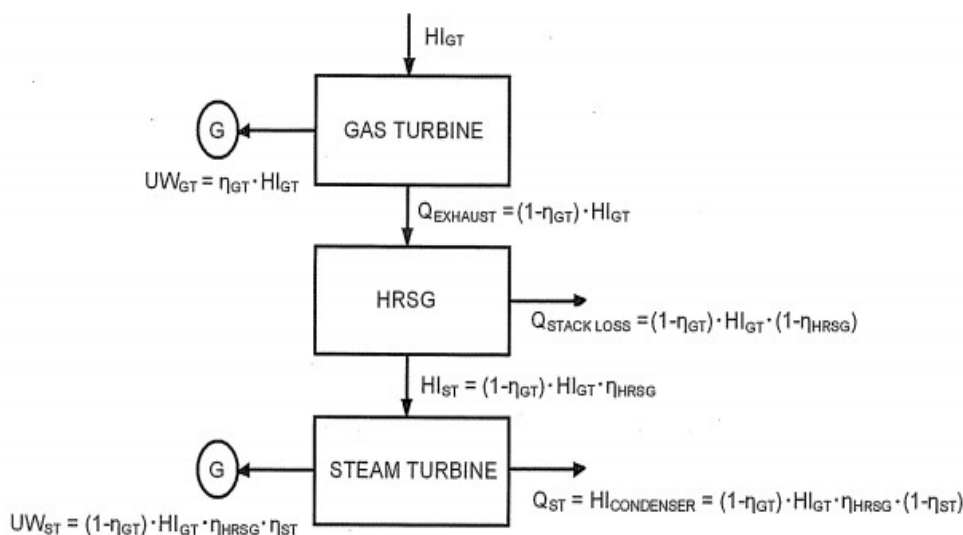
UW_{ST} = ωφέλιμη μηχανική

HI_{ST} = θερμότητα εισόδου

η_{ST} = απόδοση

Οπότε τελικά, η ολική απόδοση του συνδυασμένου κύκλου (η_{CC}) είναι το άθροισμα των δύο ωφέλιμων ισχύων εξόδου διαιρεμένο με την ισχύ θερμότητας που εισέρχεται στο σύστημα και συγκεκριμένα στον κύκλο του αερίου και δίνεται από την σχέση:

$$\eta_{CC} = \frac{UW_{GT} + UW_{ST}}{HI_{GT}} \quad [3.6]$$



Σχήμα 30: Γενικό διάγραμμα ενεργειακής ροής ισχύος γενικής μεθόδου

Κατά την αναλυτική μέθοδο στο μίγμα νερού/ατμού έχουμε:

Ισχύει $x=0$ για 100% υγρό (νερό) και $x=1$ για 100% ατμό (νερό).

Η ενθαλπία και η εντροπία του μίγματος για κάθε τιμή του x από 0 έως 1 δίνεται από τις σχέσεις:

$$h_{mix} = x \cdot h_{sat,g} + (1-x) \cdot h_{sat,f} = h_{sat,f} + x \cdot h_{fg} \quad [3.7]$$

Όπου:

$$h_{fg} = h_{sat,g} - h_{sat,f} \quad [3.8]$$

$$s_{mix} = x \cdot s_{sat,g} + (1-x) \cdot s_{sat,f} = s_{sat,f} + x \cdot s_{fg} \quad [3.9]$$

Όπου:

$$s_{fg} = s_{sat,g} - s_{sat,f} \quad [3.10]$$

Ο δείκτης f αντιστοιχεί στην υγρή φάση (fluid ή εναλλακτικά water) και ο δείκτης g αντιστοιχεί στην αέρια φάση (gas ή εναλλακτικά steam).

Το έργο συμπίεσης ανά μονάδα μάζας της τροφοδοτικής αντλίας δίνεται είτε από την σχέση (3.11) όταν είναι γνωστή η ισεντροπική απόδοσή της, ($n_{is,pump}$):

$$CW_{pump} = \frac{0.1 \cdot \Delta P_{12}}{n_{is,pump}} \quad [3.11]$$

Όπου:

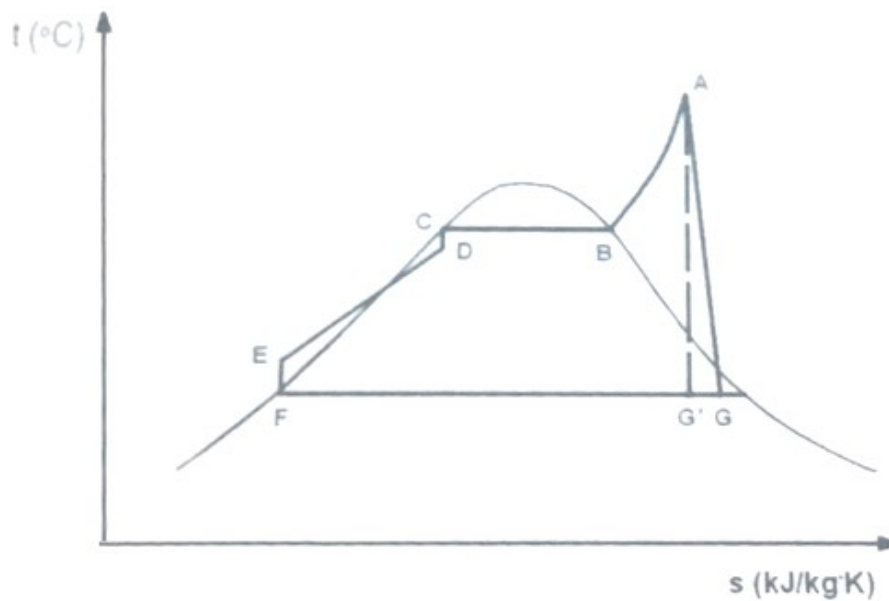
ΔP = διαφορά πιέσεων στα άκρα της τροφοδοτικής αντλίας (bars)

Από την παρακάτω σχέση [3.12] είναι γνωστός ο ειδικός όγκος:

$$CW_{pump} = v \cdot \int_1^2 \Delta P \quad [3.12]$$

Όπου:

v = ειδικός όγκος του κορεσμένου νερού σε πίεση P_1 και μετριέται σε m^3/kg ,
 P =οι πιέσεις στα άκρα της τροφοδοτικής αντλίας σε kPa.



Σχήμα 31: Κύκλος ατμού (απλός)

➤ Σημείο F:

Με δεδομένη την πίεση του συμπυκνωτή (P_{cond}), μπορούμε να υπολογίσουμε είτε με την βοήθεια των πινάκων του Παραρτήματος Α, είτε από τις σχέσεις:

Για την θερμοκρασία κορεσμού του υγρού $t_F=t_{\text{sat},t}$ και στη συνέχεια την ενθαλπία κορεσμού του υγρού $h_F=h_{\text{sat},t}$ και την εντροπία κορεσμού του υγρού $s_F=s_{\text{sat},t}$. Ωστόσο, μπορούν να υπολογισθούν και με τις κατώτερες σχέσεις:

$$h_{f(t)} = (((((((((2.788 \cdot 10^{-19} \cdot t - 3.987 \cdot 10^{-16}) \cdot t + 2.3984 \cdot 10^{-13}) \cdot t - 7.857 \cdot 10^{-11}) \cdot t + 1.51311 \cdot 10^{-8}) \cdot t - 1.76274 \cdot 10^{-6}) \cdot t + 1.208711 \cdot 10^{-4}) \cdot t + 4.45397 \cdot 10^{-3}) \cdot t + 4.25348) \cdot t \quad [3.13]$$

Για $0^\circ\text{C} < t < 370^\circ\text{C}$ και μέσο σχετικό σφάλμα 0.6%

$$s_{f(t)} = (((((8.73065 \cdot 10^{-13} \cdot t - 7.078805 \cdot 10^{-10}) \cdot t + 2.341782 \cdot 10^{-7}) \cdot t - 4.74256 \cdot 10^{-5}) \cdot t + 1.619232 \cdot 10^{-2}) \cdot t - 8.387074 \cdot 10^{-3} \quad [3.14]$$

Για $0^\circ\text{C} < t < 370^\circ\text{C}$ και μέσο σχετικό σφάλμα 0.2%

$$p_{(t)} = \exp(-5.09132 + t \cdot (0.0718934 + t \cdot (-2.72751 \cdot 10^{-4} + t \cdot (7.65835 \cdot 10^{-7} + t \cdot (1.29359 \cdot 10^{-9} + 9.5642 \cdot 10^{-13})))) \quad [3.15]$$

Για $0^\circ\text{C} < t < 370^\circ\text{C}$ και μέσο σχετικό σφάλμα 0.2%

$$t_{(t)} = (((\ln p \cdot 0.019523 + 0.2438) \cdot \ln p + 2.388) \cdot \ln p + 27.834) \cdot \ln p - 99.69 \quad [3.16]$$

Για $0.01 \text{ bar} < p < 220 \text{ bar}$ και σχετικό σφάλμα 0.2°C .

Όπου $\exp(x) = e^x$

➤ Μετάβαση από το σημείο F στο E

Με δεδομένες τις πιέσεις αμμού/λειτουργίας της ατμοπαραγωγού (HRSG) και του συμπυκνωτή, δηλαδή των πιέσεων στα άκρα της τροφοδοτικής αντλίας, $P_E = P_{\text{HRSG}}$ και $P_F = P_{\text{cond}}$ αντίστοιχα, μπορούμε να υπολογίσουμε το έργο συμπίεσης CW_{pump} από την σχέση (3.11) εάν είναι γνωστή η $\eta_{\text{is,cond}}$ από την σχέση (3.12) γνωρίζοντας τον υ ειδικό όγκο του κορεσμένου νερού σε πίεση P_f , των πινάκων του Παραρτήματος Α.

➤ Σημείο E

$$h_E = h_F + CW_{\text{pump}} \quad [3.17]$$

➤ Σημείο A

Με δεδομένη την θερμοκρασία υπερθέρμανσης t_A και την πίεση λειτουργίας της HRSG (P_{HRSG}), μπορούμε με την βοήθεια είτε των πινάκων του Παραρτήματος Α, είτε των σχέσεων (3.18), (3.19) να υπολογίσουμε την h_A και την s_A

$$h_{(p,t)} = (3.04331 \cdot 10^{-14} \cdot t + 1.81687) \cdot t + 2503.63 - 21492.63 \cdot w \cdot \left(\frac{1.93115 \cdot 10^{-2}}{v^3} \right) + \frac{w^2}{v^{14.788}} \quad [3.18]$$

Όπου:

$$v = \frac{t+276.158}{647.719} \quad [3.19]$$

$$w = \frac{p}{219.345} \quad [3.20]$$

Περιοχές: $0.01 \text{ bar} < p < 210 \text{ bar}$
 Κορεσμός $< t < 800^\circ \text{C}$ και μέσο σχετικό σφάλμα 0.1%.

$$s_{(p,t)} = \dot{i} \quad [3.21]$$

Όπου:

$$pr = \frac{p}{219.1936} \quad [3.22]$$

$$tr = \frac{t+271.8659}{645.9763} \quad [3.23]$$

$$t_{r4} = t_r^4 \quad [3.24]$$

$$p_{r4} = \frac{p_r \cdot t_r}{t_r^4} \quad [3.25]$$

➤ Μετάβαση από το σημείο E στο A

$$\Delta h_{HRSG} = h_A - h_E \quad [3.26]$$

➤ Μετάβαση από το σημείο A στο G

Αρχικά πρέπει να βρούμε την ακριβή θέση του σημείου G, όπου το σημείο G αντιστοιχεί στην έξοδο της πραγματικής εκτόνωσης στον αμοστρόβιλο. Ξέρουμε ότι $s_G = s_A$ (το σημείο G αντιστοιχεί στην έξοδο της θεωρητικής εκτόνωσης στον αμοστρόβιλο, ισεντροπική εκτόνωση). Από την δεδομένη πίεση του συμπυκνωτή και των πινάκων του Παραρτήματος Α, βρίσκουμε την τιμή s_g . Ισχύει συνήθως $s_G < s_g$, οπότε το σημείο G βρίσκεται στην περιοχή μίγματος νερού/ατμού (wetsteamsection).

Εφαρμόζουμε την σχέση (3.9) για τις εντροπίες και λύνουμε ως προς την ποιότητα ατμού ή αλλιώς το ποσοστό ξηρότητας του μίγματος x_G :

$$\begin{aligned} (3.9) &\implies \\ &\implies s_{mix} = x_G \cdot s_{sat,g} + (1 - x_G) \cdot s_{sat,f} = s_{sat,f} + x_G \cdot s_{fg} \implies \\ &\implies s_G = s_F + x_G \cdot s_{fg} \implies x_G = \frac{s_G - s_F}{s_{fg}} \end{aligned} \quad [3.27]$$

Όπου:

s_{fg} = δίνεται από τους Πίνακες του Παραρτήματος.

Στην συνέχεια εφαρμόζεται η τιμή του x_G που βρήκαμε στην σχέση (3.8) προκύπτει:

(3.8) \implies

$$\implies h_{mix} = x_G \cdot h_{sat,g} + (1 - x_G) \cdot h_{sat,f} = h_{sat,f} + x_G \cdot h_{fg} \implies$$

$$\implies h_G = h_F + x_G \cdot h_{fg} \quad [3.28]$$

Από τον ορισμό της ισεντροπικής απόδοσης του ατμοστρόβιλου έχουμε:

$$n_{is,ST} = \frac{\Delta h_{sctual}}{\Delta h_{is}} = \frac{h_A - h_G}{h_A - h_G} \quad [3.29]$$

και με δεδομένη η τιμή $n_{is,ST}$, μπορούμε να υπολογίσουμε το h_G (πραγματική),

Χρησιμοποιώντας και πάλι την σχέση (3.8) για το σημείο G, βρίσκουμε πλέον την πραγματική ποιότητα ατμού x_G :

(3.8) \implies

$$\implies h_{mix} = x_G \cdot h_{sat,g} + (1 - x_G) \cdot h_{sat,f} = h_{sat,f} + x_G \cdot h_{fg} \implies$$

$$\implies h_G = h_F + x_G \cdot h_{fg} \implies x_G = \frac{h_G - h_F}{h_{fg}} \quad [3.30]$$

Πρέπει $x_G > 0.8$ (έλεγχος) και έτσι προσδιορίστηκε η ακριβή θέση του σημείου G

Ο συντελεστής θερμικής απόδοσης του κύκλου Rankine δίνεται από την σχέση:

$$n_{ST} = \frac{\dot{m}_{st} \cdot (TW_{ST} - CW_{pump})}{HI_{HRSG}} \quad [3.31]$$

Όπου:

TW_{ST} = παραγόμενο έργο του ατμοστρόβιλου ανά μονάδα μάζας ατμού,

m_{ST} = παροχή ατμού που δημιουργεί στον κύκλο η θερμότητα των καυσαερίων του αεριοστρόβιλου και πρέπει να προσδιοριστεί για να προσδιοριστεί η ισχύς του κύκλου Rankine.

HI_{HRSG} = ισχύς της θερμότητας που απορροφά

Η ισχύς της θερμότητας που απορροφά η HRSG υπολογίζεται από την σχέση:

$$HI_{HRSG} = (\text{fuel consumption}) \cdot LCV = (sfc \cdot csr) \cdot LCV \quad [3.32]$$

Όπου:

csr = συνεχής ισχύς λειτουργίας continuous service rate (kw) του αεριοστρόβιλου.

Σημειώνεται ότι η σχέση (3.31) χρησιμοποιείται όταν θεωρείται ότι η θερμότητα προέρχεται από έναν αεριοστρόβιλο ή από ένα κινητήρα diesel. Στην κλασική περίπτωση του συστήματος αμολέβητα/ατμοστρόβιλου ο συντελεστής θερμικής απόδοσης του κύκλου Rankine είναι συναρτήσεως μόνο των ενθαλπιών και δίνεται από την σχέση:

$$n_{ST} = \frac{h_A - h_G}{h_E - h_F} \quad [3.33]$$

Στην ανάλυση που προηγήθηκε εξετάσαμε τον απλό κύκλο Rankine. Από εδώ και μετά αναλύουμε τον συνδυασμένο κύκλο Brayton/Rankine, δηλαδή υπολογίζονται τα χαρακτηριστικά και οι επιδόσεις του συνδυασμένου κύκλου λαμβάνοντας υπόψη και την αλληλεπίδρασή τους.

Έχουμε τα εξής δεδομένα:

- Ωφέλιμη ισχύς του αεριοστρόβιλου: UW_{GT}
- Απόδοση του αεριοστρόβιλου: η_{GT}
- Παροχή μάζας των καυσαερίων του αεριοστρόβιλου: m_{EXH}
- Θερμοκρασία των καυσαερίων του αεριοστρόβιλου : $EGT=T_{EXH}$ (εύρος διακύμανσης 350-600°C, γενικά η τιμή στόχος για ικανοποιητικά θερμοκρασία υπερθέρμανσης του ατμού είναι 540°C)
- Η ελάχιστη θερμοκρασία των καυσαερίων στην έξοδο της HRSG: $t_{STACK}=t_s=150-180^\circ C$ για μονής πίεσης και 100-130°C για διπλής πίεσης HRSG
- Μέση ειδική θερμότητα υπό σταθερή πίεση των καυσαερίων \dot{C}_p . Τυπικές τιμές του \dot{C}_p στην θερμοκρασιακή περιοχή 150-400°C είναι 1.35-1.39 kJ/(kg.K) για αεριοστρόβιλους και 1.03-1.06 kJ/(kg.K) για μηχανές diesel
- Πίεση κορεσμού ατμού της HRSG: $P_{HRSG}=15-120$ bar μέγιστη 170-180 bar, για υπερκρίσιμες HRSG ≥ 220 bars, συνήθεις τιμές όμως 40-80bar, ενώ όταν πρόκειται για HRSG διπλής πίεση LP=10%HP όπου HP=60-100bar
- Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης της τροφοδοτικής αντλίας: $\eta_{is,pump}=0.75$
- Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του ατμοστρόβιλου: $\eta_{ST,is}=0.85$
- Θερμικός συντελεστής απόδοσης HRSG, $\eta_{HRSG}=0.85$
- Διαφορά θερμοκρασίας στον υπερθερμαντήρα, superheaterpinchpoint $\Delta t_{p,s}=20-30$ °C, συνήθως 20°C
- Διαφορά θερμοκρασίας στον εξατμιστήρα, evaporatorpinchpoint $\Delta t_{p,e}=10-30^\circ C$, συνήθως 10°C
- Διαφορά θερμοκρασίας στο τύμπανο, drumapproachpoint $\Delta t_a=1-20^\circ C$, συνήθως 1°C στις μοντέρνες HRSG με βοηθητική κυκλοφορία, 20°C στις παλιές τεχνολογίας HRSG με φυσική κυκλοφορία
- Ποιότητα ατμού την έξοδο του ατμοστρόβιλου x (0.85 για πυρηνικούς σταθμούς, για τους υπόλοιπους συνήθως $x \geq 0.88$)
- Πίεση συμπυκνωτή P_{cond} (εύρος διακύμανσης 0.03-0.15bars, 0.035bars και 0.12bars για τις βόρειες και νότιες χώρες αντίστοιχα, συνήθεις όμως τιμές υπολογισμού 0.05-0.07bars)

Η υπολογιστική διαδικασία έχει ως εξής:

Rankine να πλησιάσει το περισσότερο δυνατόν στην κάτω γραμμή του κύκλου Brayton. Αυτό μπορεί να γίνει με δύο κυρίως τρόπους:

- Με την αύξηση της παροχής του παραγόμενου ατμού (m_s)
- Με την χρήση HRSG πολλαπλών πιέσεων (συνήθως δύο)

Σε κάθε περίπτωση δεν πρέπει να παραβιαστούν οι διαφορές θερμοκρασιών (pinchpoints) του εξατμιστήρα και του υπερθερμαντήρα.

➤ Μετάβαση από το σημείο 1 στο 3:

Η θερμότητα που προσφέρεται από τον αεριοστρόβιλο:

$$HI_{13} = \dot{m}_{EXH} \cdot \dot{C}_p \cdot (t_1 - t_3) \quad [3.38]$$

Η θερμότητα που απορροφάται από το κορεσμένο νερό για να γίνει υπέρθερμος ατμός στο τμήμα του εξατμιστήρα και του υπερθερμαντήρα είναι:

$$HI_{AD} = \dot{m}_s \cdot (h_A - h_D) \quad [3.39]$$

μία απλοποιημένη υπόθεση είναι $h_D = h_C$, δηλαδή θεωρούμε την θερμοκρασιακή διαφορά στο approachpoint αμελητέα, οπότε η σχέση (3.39) γράφεται:

$$HI_{AD} = \dot{m}_s \cdot (h_A - h_D) \quad [3.40]$$

Από το Σχήμα 32 υπολογίζεται η μέγιστη θερμοκρασία υπερθέρμανσης:

$$t_A = t_1 - \Delta t_a \quad [3.41]$$

Όπου:

$t_1 = \text{EGT}$ (δεδομένη)

Από τις σχέσεις (3.18) και (3.21) ή των πινάκων του Παραρτήματος Α με δεδομένη την πίεση της HRSG και την θερμοκρασία t_A , υπολογίζουμε την h_A και την s_A , αντίστοιχα.

Η ενεργειακή ισορροπία στον εξατμιστήρα και υπερθερμαντήρα της HRSG (τμήμα 1 της HRSG), γράφεται:

$$\dot{m}_{s1} \cdot (h_A - h_C) = \dot{m}_{EXH} \cdot \dot{C}_p \cdot \Delta t_1 \cdot n_{HRSG} \quad [3.42]$$

Όπου:

$\Delta t_1 = t_1 = t_3$ και \dot{m}_{s1} είναι η μέγιστη παραγόμενη από το τμήμα 1 παροχή ατμού.

Λύνοντας την (3.42) ως προς την \dot{m}_{s1} υπολογίζεται η μέγιστη παραγόμενη από το τμήμα 1 παροχή ατμού:

$$\dot{m}_{s1} = \frac{\dot{m}_{EXH} \cdot \dot{C}_p \cdot \Delta t_1 \cdot n_{HRSG}}{(h_A - h_C)} \quad [3.43]$$

➤ Μετάβαση από το σημείο 3 στο 4:

Η θερμότητα που προσφέρεται από τον αεριοστρόβιλο:

$$HI_{34} = \dot{m}_{EXH} \cdot \dot{C}_p \cdot (t_3 - t_4) \quad [3.44]$$

Η θερμότητα που απορροφάται από το νερό για να γίνει κορεσμένο νερό στο τμήμα προθερμαντήρα:

$$HI_{DE} = \dot{m}_s \cdot (h_D - h_E) \quad [3.45]$$

Όπου:

$$h_E = h_F + CW_{pump} \cdot [\text{σχέση (3.17)}]$$

Το h_F και το s_F υπολογίζεται από τις σχέσεις (3.13) και (3.14) ή από τους πίνακες του Παραρτήματος Α με δεδομένη την πίεση του συμπυκνωτή p_{cond} , ενώ το CW_{pump} από την σχέση (3.11) ή (3.12).

Η ενεργειακή ισορροπία στον προθερμαντήρα της HRSG (τμήμα 2 της HRSG), γράφεται:

$$\dot{m}_{s2} \cdot (h_C - h_E) = \dot{m}_{EXH} \cdot \dot{C}_p \cdot \Delta t_2 \cdot n_{HRSG} \quad [3.46]$$

Όπου:

$\Delta t_2 = t_3 - t_4$ και \dot{m}_{s2} είναι η μέγιστη παραγόμενη από το τμήμα 2 παροχή ατμού.

Λύνοντας την σχέση (3.46) ως προς την \dot{m}_{s2} υπολογίζεται η μέγιστη παραγόμενη από το τμήμα 2 παροχή ατμού:

$$\dot{m}_{s2} = \frac{\dot{m}_{EXH} \cdot \dot{C}_p \cdot \Delta t_2 \cdot n_{HRSG}}{(h_C - h_E)} \quad [3.47]$$

Η θερμοκρασία $t_4 = t_s$ είναι η «θεωρητική» ελάχιστη θερμοκρασία των καυσαερίων στην έξοδο της HRSG και είναι δεδομένη. Οι δύο παραγόμενες παροχές μάζας ατμού δεν είναι απαραίτητα ίσες για δύο λόγους:

- Μπορεί ξηρός κορεσμένος ατμός να χρησιμοποιηθεί για να θερμαίνει το τροφοδοτικό νερό στους περίπου 120°C, πριν την είσοδό του στον προθερμαντήρα για να αποφευχθούν φαινόμενα διάβρωσης χαμηλής θερμοκρασίας.
- Μπορεί ξηρός κορεσμένος ατμός να χρησιμοποιηθεί σε κάποια διεργασία άσχετη με το ίδιο το CCPP. Κάτι τέτοιο όμως δεν συνιστάται ως μη αποδοτική ενέργεια. Αντί αυτού θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ατμός προερχόμενος από άλλη πηγή θερμότητας (απορριπτόμενης, ίσως).

Από τις δύο παραγόμενες παροχές μάζας ατμού πρέπει να επιλέξουμε την μικρότερη, γιατί τότε μόνο εξασφαλίζεται ότι κανένα από τα δύο pinchpoints δεν παραβιάζεται. Σημειώνεται ότι όσο πιο μεγάλη είναι η \dot{m}_s τόσο ανεβαίνει ο κύκλος Rankine. Επομένως, για τον υπολογισμό της πραγματικής ελάχιστης θερμοκρασίας των καυσαερίων στην έξοδο της HRSG, $t_{s,actual}$ διερευνώνται οι περιπτώσεις:

- Αν $\dot{m}_{s1} < \dot{m}_{s2}$, τότε αντικαθιστώντας στην σχέση (3.46) το \dot{m}_{s1} με το \dot{m}_{s2} και το t_4 με το $t_{s,actual}$ προκύπτει:

$$3.46 \implies \dot{m}_{s1} \cdot (h_C - h_E) = \dot{m}_{EXH} \cdot \dot{C}_p \cdot (t_3 - t_{s,actual}) \cdot n_{HRSG} \implies$$

$$\implies t_{s,actual} = \frac{\dot{m}_{EXH} \cdot \dot{C}_p \cdot t_3 \cdot n_{HRSG} - \dot{m}_{s1} \cdot (h_C - h_E)}{\dot{m}_{EXH} \cdot \dot{C}_p \cdot n_{HRSG}} \quad [3.48]$$

- Αν $\dot{m}_{s1} > \dot{m}_{s2}$, τότε αντικαθιστώντας στην σχέση (3.42) το m_{s1} με το m_{s2} και το t_4 με το $t_{s,actual}$ προκύπτει:

$$3.42 \implies \dot{m}_{s2} \cdot (h_A - h_C) = \dot{m}_{EXH} \cdot \dot{C}_p \cdot (t_1 - t_{3,actual}) \cdot n_{HRSG} \implies$$

$$\implies t_{s,actual} = \frac{\dot{m}_{EXH} \cdot \dot{C}_p \cdot t_3 \cdot n_{HRSG} - \dot{m}_{s2} \cdot (h_A - h_C)}{\dot{m}_{EXH} \cdot \dot{C}_p \cdot n_{HRSG}} \quad [3.49]$$

Οπότε από την σχέση (3.46) αντικαθιστώντας το t_3 με το $t_{3,actual}$ και το t_4 με το $t_{s,actual}$ προκύπτει:

$$3.46 \implies \dot{m}_{s2} \cdot (h_C - h_E) = \dot{m}_{EXH} \cdot \dot{C}_p \cdot (t_3 - t_{s,actual}) \cdot n_{HRSG} \implies$$

$$\implies t_{s,actual} = \frac{\dot{m}_{EXH} \cdot \dot{C}_p \cdot t_3 \cdot n_{HRSG} - \dot{m}_{s2} \cdot (h_C - h_E)}{\dot{m}_{EXH} \cdot \dot{C}_p \cdot n_{HRSG}} \quad [3.48]$$

Μετά από αυτήν την διερεύνηση έχει προσδιοριστεί πλέον και η παραγόμενη παροχή μάζα ατμού \dot{m}_s του κύκλου Rankine.

➤ Μετάβαση από το σημείο A στο G, (ισεντροπική εκτόνωση)

Για ισεντροπική εκτόνωση ισχύει $s_G = s_A$ οπότε η σχέση (3.9) γράφεται:

$$3.9 \implies s_{mix} = x \cdot s_{sat,g} + (1-x) \cdot s_{sat,f} = s_{sat,f} + x \cdot s_{fg} \implies$$

$$\implies s_{G'} = s_F + x_{G'} \cdot s_{fg} \implies x_{G'} = \frac{s_A - s_F}{s_{fg}} \quad [3.49]$$

Και με αντικατάσταση του x με $x_{G'}$ στη σχέση (3.8), προκύπτει:

$$h_{mix} = x \cdot h_{sat,g} + (1-x) \cdot h_{sat,f} = h_{sat,f} + x \cdot h_{fg} \implies h_{mix} = h_G \quad [3.50]$$

Τότε η ισεντροπική ισχύς του αμοστρόβιλου είναι:

$$TP_{ST,is} = \dot{m}_s \cdot TW_{ST,is} = \dot{m}_s \cdot \Delta h_{ST,is} = \dot{m}_s \cdot (h_A - h_{G'}) \quad [3.51]$$

Με δεδομένο τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης του αμοστρόβιλου $\eta_{ST,is}$, η πραγματική ισχύς του αμοστρόβιλου δίνεται από τη σχέση:

$$TP_{ST,actual} = \dot{m}_s \cdot TW_{ST,is} \cdot \eta_{ST,is} = \dot{m}_s \cdot \Delta h_{ST,is} \cdot \eta_{ST,is} = \dot{m}_s \cdot (h_A - h_{G'}) \cdot \eta_{ST,is} \quad [3.52]$$

Η απόδοση του συνδυασμένου κύκλου είναι:

$$n_{cc} = \frac{UW_{\dot{c}} + TW_{ST,actual}}{HI_{\dot{c}}} \quad [3.53]$$

Η πραγματική ποιότητα του ατμού μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την ακόλουθη διαδικασία:

Η πραγματική ενθαλπία εξόδου του ατμού h_G δίνεται από:

$$n_{ST,is} = \frac{h_A - h_G}{h_A - h_G'} \implies h_G = h_A - (h_A - h_G') \cdot n_{ST,is} \quad [3.54]$$

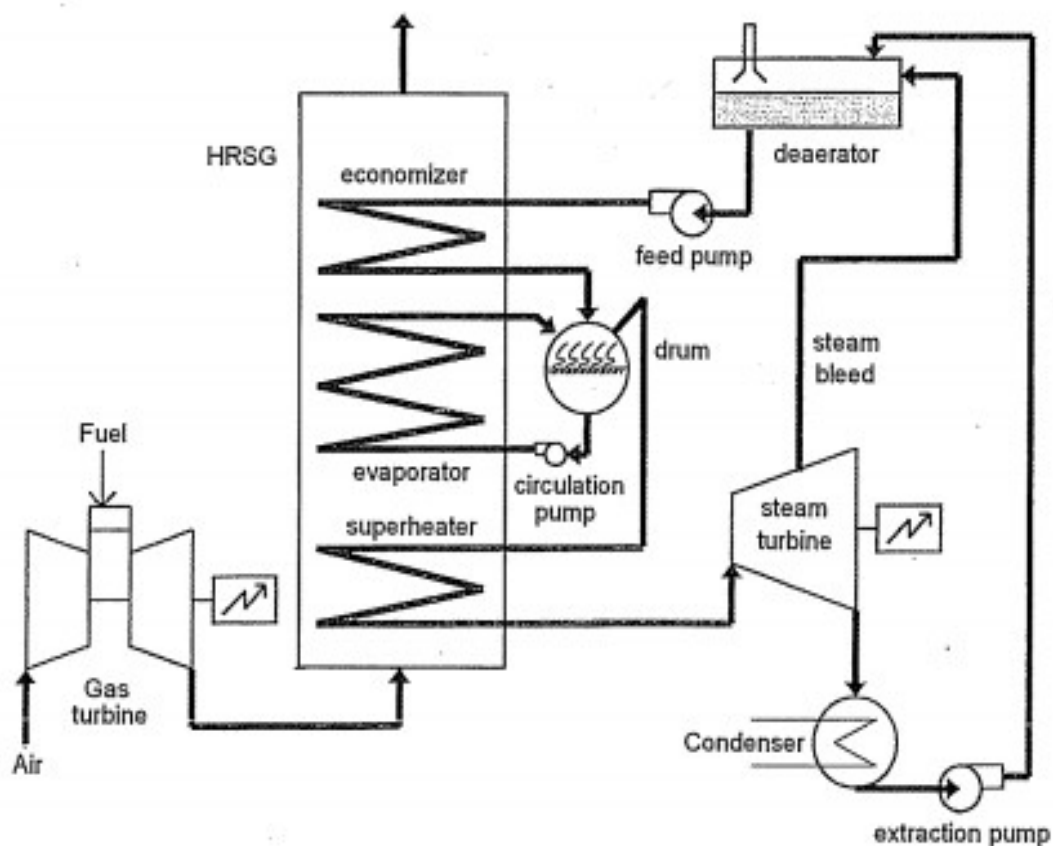
Με αντικατάσταση της h_G στην σχέση (3.8), προκύπτει η πραγματική ποιότητα εξόδου ατμού x_G :

$$\begin{aligned} (3.8) \implies h_{mix} &= x \cdot h_{sat,g} + (1-x) \cdot h_{sat,f} = h_{sat,f} + x \cdot h_{fg} \implies \\ \implies h_G &= h_F + x_G \cdot h_{fg} \implies x_G = \frac{h_G - h_F}{h_{fg}} \quad [3.55] \end{aligned}$$

4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΣΤΟ ΣΗΜΕΙΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ CCRP ΜΟΝΗΣ ΠΙΕΣΗΣ

4.1. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΓΕΝΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

Ο συνδυασμένος κύκλος μονής πίεσης (singlepressurelevelcombinedcycle) είναι η πιο απλή μορφή του συνδυασμένου κύκλου. Στο σχήμα 33 φαίνεται το διάγραμμα ροής που θα μελετηθεί στην παρούσα πτυχιακή εργασία, είναι ένας τυπικός συνδυασμένος κύκλος μονής πίεσης, στο οποίο ο κύκλος ατμού είναι απλά με υπερθέρμανση (χωρίς αναθέρμανση και αναγέννηση), ενώ φαίνεται καθαρά ο σημαντικός ρόλος της HRSG που συνδέει τον κύκλο αερίου και τον κύκλο ατμού.



Σχήμα 33: Διάγραμμα λειτουργίας εργοστασίου συνδυασμένου κύκλου μονής πίεσης

Όπως έχει προαναφερθεί για τον υπολογισμό της απόδοσης του συνδυασμένου κύκλου μονής πίεσης, υπάρχουν δύο μέθοδοι η γενική μέθοδος και η αναλυτική μέθοδος, όπου το θεωρητικό υπόβαθρό έχει δοθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο. Στην συνέχεια

ακολουθεί ο Πίνακας 4 όπου δίνονται τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν με στόχο τον υπολογισμό της ολικής απόδοσης του συνδυασμένου κύκλου με τη γενική μέθοδο.

	Μονάδες μέτρησης	Δεδομένες τιμές
Θερμότητα εισόδου (HI_{GT})	MW	8,28
Απόδοση αεριοστρόβιλου (η_{GT})	-	0,30
Απόδοση HRSG (η_{HRSG})	-	0,85
Απόδοση ατμοστρόβιλου (η_{ST})	-	0,40

Πίνακας 4: Δεδομένα υπολογισμού ολικής απόδοσης συνδυασμένου κύκλου

Η εισαγωγή θερμότητας (HI_{GT}) στον κύκλο γίνεται με την καύση του καυσίμου στον θάλαμο καύσης του αεριοστρόβιλου. Ο αεριοστρόβιλος μετατρέπει μέρος από αυτήν την θερμότητα εισόδου HI_{GT}, σε ωφέλιμη μηχανική ισχύ UW_{GT}, με απόδοση η_{GT}, έτσι ώστε αυτή να ισούται με:

$$UW_{GT} = \eta_{GT} \cdot HI_{GT} \Rightarrow UW_{GT} = 0.30 \cdot 8.28 \text{ kW} \Rightarrow UW_{GT} = 2.484 \text{ MW} \quad [4.1]$$

Όπου:

HI_{GT}= θερμότητα εισόδου
UW_{GT}= ωφέλιμη μηχανική
η_{GT}= απόδοση

Η υπόλοιπη ισχύς απορρίπτεται από την εξαγωγή του αεριοστρόβιλου με την μορφή της θερμότητας Q_{EXHAUST} και ισούται:

$$Q_{EXHAUST} = (1 - \eta_{GT}) \cdot HI_{GT} \Rightarrow Q_{EXHAUST} = (1 - 0.30) \cdot 8.28 \text{ MW} = 5.796 \text{ MW} \quad [4.2]$$

Όπου:

Q_{EXHAUST}=θερμότητα που απορρίπτεται από την εξαγωγή του αεριοστρόβιλου
HI_{GT}= θερμότητα εισόδου
η_{GT}= απόδοση

Η απόδοση της HRSG (η_{HRSG}) είναι ο λόγος της πραγματικά ανακτώμενης θερμικής ισχύος προς την προσδιδόμενη σε αυτήν ισχύ, τότε η ισχύς που ανακτάται από την HRSG, είναι:

$$HI_{ST} = Q_{EXHAUST} \cdot \eta_{HRSG} \Rightarrow HI_{ST} = 5.796 \text{ kW} \cdot 0.85 \Rightarrow HI_{ST} = 4.927 \text{ MW} \quad [4.3]$$

Όπου:

HI_{GT}= θερμότητα εισόδου
Q_{EXHAUST}=θερμότητα που απορρίπτεται από την εξαγωγή του αεριοστρόβιλου
η_{GT}= απόδοση

Η ωφέλιμη ισχύς του κύκλου ατμού είναι:

$$UW_{ST} = \eta_{ST} \cdot HI_{ST} \Rightarrow UW_{ST} = 0.40 \cdot 4.927 \text{ kW} \Rightarrow UW_{ST} = 1.971 \text{ MW} \quad [4.4]$$

Όπου:

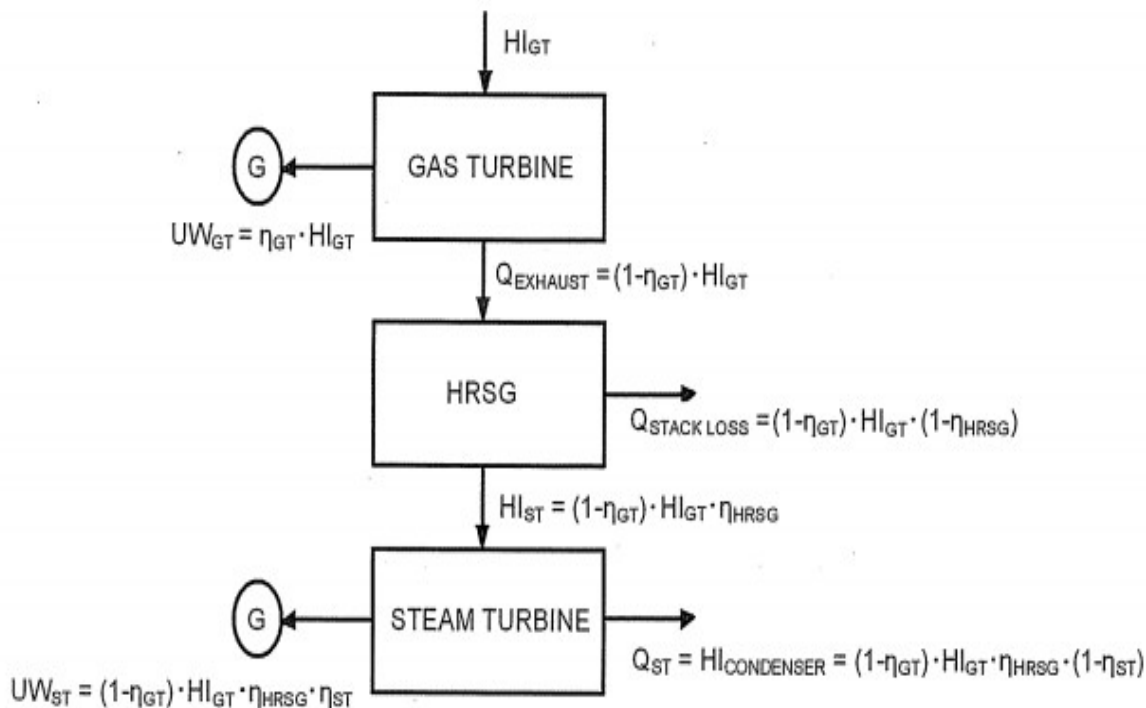
UW_{GT} = ωφέλιμη μηχανική

HI_{GT} = θερμότητα εισόδου

η_{GT} = απόδοση

Η ολική απόδοση του συνδυασμένου κύκλου (η_{CC}) είναι:

$$n_{cc} = \frac{UW_{ST} + UW_i}{HI_i} \Rightarrow n_{cc} = \frac{1.971 + 2.484}{4,927} \Rightarrow n_{cc} = 0.538 \quad [4.5]$$



Σχήμα 34: Γενικό διάγραμμα ενεργειακής ροής ισχύος γενικής μεθόδου

Στην συνέχεια ακολουθεί ο Πίνακας 5, όπου δίνονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα της γενικής μεθόδου υπολογισμού της ολικής απόδοσης του συνδυασμένου κύκλου μονής πίεσης

	Μονάδες μέτρησης	Αποτελέσματα
Ωφέλιμη μηχανική ισχύς (UW_{GT})	kW	2.484
Απορριπτόμενη θερμότητα ($Q_{EXHAUST}$)	kW	5.796
Ισχύς θερμότητας (HI_{ST})	kW	4.927
Ωφέλιμη ισχύς του κύκλου ατμού (UW_{ST})	kW	1.971
Ολική απόδοση CC (η_{CC})	-	0.538

Πίνακας 5: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων του υπολογισμού της ολικής απόδοσης συνδυασμένου κύκλου μονής πίεσης

4.2. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

Κατά την αναλυτική μέθοδο στο μίγμα νερού/ατμού ισχύει $x=0$ για 100% υγρό (νερό) και $x=1$ για 100% υγρό (νερό). Άρα στην περίπτωση:

$$h_{mix} = x \cdot h_{sat,g} + (1-x) \cdot h_{sat,f} = h_{sat,f} + x \cdot h_{fg} = 151,494 \frac{kJ}{kg} + 1 \cdot 2415,176 \frac{kJ}{kg}$$

$$h_{mix} = 2566.67 \text{ kJ/kg}$$
[4.6]

Όπου:

$$h_{fg} = h_{sat,g} - h_{sat,f} \implies h_{fg} = 2566.76 \text{ kJ/kg} - 151,494 \text{ kJ/kg} = 2415,176 \text{ kJ/kg}$$
[4.7]

$$s_{mix} = x \cdot s_{sat,g} + (1-x) \cdot s_{sat,f} = s_{sat,f} + x \cdot s_{fg} \implies s_{mix} = 0,52087 \frac{kJ}{kg} + 7,80823 \frac{kJ}{kg} = \dot{\iota}$$
[4.8]

$$s_{mix} = 8.3291 \text{ kJ/kg}$$

Όπου:

$$s_{fg} = s_{sat,g} - s_{sat,f} \implies s_{fg} = 8.3291 \text{ kJ/kg} - 0.52087 \text{ kJ/kg} = 7.80823 \text{ kJ/kg}$$
[4.9]

Ο δείκτης f αντιστοιχεί στην υγρή φάση (fluid ή εναλλακτικά water) και ο δείκτης g αντιστοιχεί στην αέρια φάση (gas ή εναλλακτικά steam).

Το έργο συμπίεσης ανά μονάδα μάζας της τροφοδοτικής αντλίας είναι:

$$CW_{pump} = \frac{0.1 \cdot \Delta P_{12}}{n_{is,pump}} \implies CW_{pump} = 0.1 \cdot \dot{\iota} \dot{\iota}$$
[4.10]

$$CW_{pump} = 17.76 \text{ kJ/kg}$$

Όπου:

ΔP = διαφορά πιέσεων στα άκρα της τροφοδοτικής αντλίας (bars)

Σημείο	Μονάδα μέτρησης	Σχέση	Αποτελέσματα
Μίγμα νερού / ατμού	kJ/kg	$h_{fg} = h_{sat,g} - h_{sat,f}$	2415.176
	kJ/kg	$h_{mix} = x \cdot h_{sat,g} + (1-x) \cdot h_{sat,f}$	2566.670
	kJ/kg K	$s_{fg} = s_{sat,g} - s_{sat,f}$	7.8082
Τροφοδοτική αντλία	kJ/kg K	$s_{mix} = x \cdot s_{sat,g} + (1-x) \cdot s_{sat,f}$	8.3291
	kJ/kg	$CW_{pump} = \frac{0.1 \cdot \Delta P_{12}}{n_{is,pump}}$	17.76
	kW	$CW_{pump} = m\dot{s} \cdot CW_{pump}$	97.70

Πίνακας 6: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων μίγμα νερού / ατμού και τροφοδοτικής αντλίας

➤ Σημείο F:

Με δεδομένη την πίεση του συμπυκνωτή (P_{cond}), μπορούμε να υπολογίσουμε με την βοήθεια των πινάκων του Παραρτήματος Α. Για την θερμοκρασία κορεσμού του υγρού $t_F = t_{sat,f}$ και στη συνέχεια την ενθαλπία κορεσμού του υγρού $h_F = h_{sat,f}$ και την εντροπία κορεσμού του υγρού $s_F = s_{sat,f}$.

Σημείο F	Μονάδα μέτρησης	Σχέση	Αποτέλεσμα
Θερμοκρασία κορεσμού του υγρού	C	$t_F = t_{sat,f}$	36.160
Ενθαλπία κορεσμού του υγρού	kJ/kg	$h_F = h_{sat,f}$	151.49
Εντροπία κορεσμού του υγρού	kJ/kg K	$s_F = s_{sat,f}$	0.521

Πίνακας 7: Στοιχεία σημείου F, θερμοκρασία κορεσμού του υγρού, ενθαλπία κορεσμού του υγρού και την εντροπία κορεσμού του υγρού

➤ Μετάβαση από το σημείο F στο E

Με δεδομένες τις πιέσεις ατμού/λειτουργίας της ατμοπαραγωγού (HRSG) και του συμπυκνωτή, ($P_E = P_{HRSG}$ και $P_F = P_{cond}$) υπολογίζεται:

➤ Σημείο E

$$h_E = h_F + CW_{pump} \implies h_E = 151.49 \frac{kJ}{kg} + 17.76 \frac{kJ}{kg} \implies h_E = 169.26 \text{ kJ/kg} \quad [4.11]$$

Σημεία	Μονάδα μέτρησης	Σχέση	Αποτέλεσμα
Μετάβαση από F σε E	bar	$P_E = P_{HRSG}$	80
	bar	$P_F = P_{cond}$	0.06
	kJ/kg	$CW_{pump} = \frac{0.1 \cdot \Delta P_{12}}{n_{is, pump}}$	17.76
Σημείο E	kJ/kg	$h_E = h_F + CW_{pump}$	169.26

Πίνακας 8: Σημεία μετάβασης από F σε E και σημείο E.

➤ Σημείο A

Με δεδομένη την θερμοκρασία υπερθέρμανσης t_A και την πίεση λειτουργίας της HRSG (P_{HRSG}), μπορούμε με την βοήθεια των πινάκων του Παραρτήματος Α, να υπολογισθούν τα ακόλουθα.

➤ Μετάβαση από το σημείο E στο A

$$\Delta h_{HRSG} = h_A - h_E \implies \Delta h_{HRSG} = 2953.87 \frac{kJ}{kg} - 169.29 \frac{kJ}{kg} = 2784.61 \text{ kJ/kg} \quad [4.12]$$

➤ Μετάβαση από το σημείο A στο G

Η ακριβή θέση του σημείου G, υπολογίζεται αφού είναι γνωστό ότι $s_G=s_A$. Από την δεδομένη πίεση του συμπυκνωτή και των πινάκων του Παραρτήματος A,βρίσκουμε την τιμή s_g . Ισχύει συνήθως $s_G<s_g$, οπότε το σημείο G βρίσκεται στην περιοχή μίγματος νερού/ατμού. Η ποιότητα ατμού ή αλλιώς το ποσοστό ξηρότητας του μίγματος x_G :

$$x_G = \frac{s_G - s_F}{s_{fg}} \implies x_G = \frac{6.07 \frac{kJ}{kg K} - 0.52 \frac{kJ}{kg K}}{7.08 \frac{kJ}{kg K}} \implies x_G = 0,75 \quad [4.13]$$

Στην συνέχεια εφαρμόζεται η τιμή του x_G και υπολογίζεται:

$$h_G = h_F + x_G \cdot h_{fg} \implies h_G = 151.49 \frac{kJ}{kg} + 0.75 \cdot 2415.18 \frac{kJ}{kg} \implies h_G = 1867.90 \text{ kJ/kg} \quad [4.14]$$

Από τον ορισμό της ισεντροπικής απόδοσης του ατμοστρόβιλου έχουμε:

$$n_{is,ST} = \frac{\Delta h_{actual}}{\Delta h_{is}} = \frac{h_A - h_G}{h_A - h_{G'}} \implies h_G = h_A - n_{is,ST} (h_A - h_{G'}) \implies \quad [4.15]$$

$$h_G = 2953.87 \frac{kJ}{kg} - 0.4 \left(2953.87 \frac{kJ}{kg} - 1867.90 \frac{kJ}{kg} \right) \implies h_G = 2465.19 \text{ kJ/kg}$$

Χρησιμοποιώντας τα ανωτέρω για το σημείο G, βρίσκουμε πλέον την πραγματική ποιότητα ατμού x_G :

$$x_G = \frac{h_G - h_F}{h_{fg}} \implies x_G = \frac{2465.19 \frac{kJ}{kg} - 151.49 \frac{kJ}{kg}}{2415.18 \frac{kJ}{kg}} \implies x_G = 0.9 \quad [4.16]$$

Πρέπει $x_G > 0.8$ (έλεγχος) και έτσι προσδιορίστηκε η ακριβή θέση του σημείου G.

$$\frac{\dot{Q}_{POWEROUTPUT}}{ST_{POWEROUTPUT}} = \frac{1}{2} \quad [4.17]$$

Άρα το TW_{ST} υπολογίζεται στα 3.31kWatt.

Ο συντελεστής θερμικής απόδοσης του κύκλου Rankine δίνεται από την σχέση:

$$n_{ST} = \frac{\dot{m}_{st} \cdot (TW_{ST} - CW_{pump})}{HI_{HRSG}} \implies n_{ST} = \frac{5.5 \frac{kg}{sec} \cdot (1242.00 \text{ kW} - 97.70 \text{ kW})}{39378.89 \text{ kW}} \implies \quad [4.18]$$

$$n_{ST} = 0.2 \implies n_{ST} = 20\%$$

Όπου:

TW_{ST} = παραγόμενο έργο του αμοστρόβιλου ανά μονάδα μάζας ατμού,
 m_{ST} = παροχή μάζας που δημιουργεί στον κύκλο η θερμότητα των καυσαερίων του αεριοστρόβιλου και πρέπει να προσδιοριστεί για να προσδιοριστεί η ισχύς του κύκλου Rankine.

HI_{HRSG} = ισχύς της θερμότητας που απορροφά

Η ισχύς της θερμότητας που απορροφά η HRSG υπολογίζεται από την σχέση:

$$HI_{HRSG} = (sfc \cdot csr) \cdot LCV \implies HI_{HRSG} = 0.166 \frac{kg}{kWh} \cdot 20,000 kW \cdot 42.7 \frac{Mj}{kg} \implies [4.19]$$

$$HI_{HRSG} = 39.38 MW$$

Όπου:

csr = συνεχής ισχύς λειτουργίας continuous service rate (Kw) του αεριοστρόβιλου.

Σημεία	Μονάδα μέτρησης	Σχέση	Αποτέλεσμα
Σημείο A	kJ/kg	h_A	2953.87
	kJ/kg K	s_A	6.07
Μετάβαση από E σε A	kJ/kg	$\Delta h_{HRSG} = h_A - h_E$	2784.61
Μετάβαση από A σε G	kJ/kg K	$s_G = s_A$	6.07
	-	$x_{G'} = \frac{s_G - s_F}{s_{fg}}$	0.75
	kJ/kg	$h_G = h_F + x_{G'} \cdot h_{fg}$	1867.90
	kJ/kg	$h_G = h_A - n_{is,ST} (h_A - h_{G'})$	2465.19
	-	$x_G = \frac{h_G - h_F}{h_{fg}}$	0,9
	kWatt	$GT_{PO} / ST_{PO} = 1/2$	1242.00
	-	$n_{ST} = \frac{\dot{m}_{st} \cdot (TW_{ST} - CW_{pump})}{HI_{HRSG}}$	0.2
	MWatt	$HI_{HRSG} = (sfc \cdot csr) \cdot LCV$	39.38

Πίνακας 9: Σημείο A, σημεία μετάβασης από E σε A και σημεία μετάβασης από A σε G

➤ Μετάβαση από το σημείο C στο B

Πίεση κορεσμού ατμού $P_C = P_B$ (δεδομένο). Η πίεση κορεσμού ατμού υπολογίζεται από τους Πίνακες του Παρατήματος $t_c = t_B$ και $h_c = h_B = h_f$

Σημείο C:

Με δεδομένη την $\Delta t_{p,e}$ και την υπολογισμένη t_c , μπορούμε να υπολογίσουμε την t_3 από την σχέση:

$$t_D = t_c + \Delta t_{p,c} \implies t_D = 295.06 \text{ }^\circ\text{C} + 10 \text{ }^\circ\text{C} \implies t_D = 305.06 \text{ }^\circ\text{C} [4.20]$$

Με δεδομένη την Δt_a και την υπολογισμένη t_c , μπορούμε να υπολογίσουμε την t_D από την σχέση:

$$t_D = t_C - \Delta t_a \implies t_D = 295.06^\circ C - 20^\circ C \implies t_D = 275.06^\circ C \quad [4.21]$$

Σημεία	Μονάδα μέτρησης	Σχέση	Αποτέλεσμα
Μετάβαση από C σε B	bar	$P_C = P_B$	80
	C	$t_C = t_B$	295.06
	kJ/kg	$h_C = h_B = h_f$	1316.64
Σημείο C	C	$t_D = t_C + \Delta t_{p,c}$	305.06
Σημείο B	C	$t_D = t_C - \Delta t_a$	275.06

Πίνακας 10: Σημεία μετάβασης από C σε B, σημείο C και σημείο B

Στην ανάλυση που προηγήθηκε εξετάσαμε τον απλό κύκλο Rankine. Από εδώ και μετά αναλύουμε τον συνδυασμένο κύκλο Brayton/Rankine, δηλαδή υπολογίζονται τα χαρακτηριστικά και οι επιδόσεις του συνδυασμένου κύκλου λαμβάνοντας υπόψη και την αλληλεπίδρασή τους. Δίνεται ο Πίνακας 11 με τα δεδομένα που θα χρησιμοποιηθούν στην αναλυτική μέθοδο υπολογισμού του σημείου σχεδιασμού CCPP μονής πίεσης.

	Μονάδες μέτρησης	Εύρος τιμών	Δεδομένα τιμών
Απόδοση αεριοστροβίλου (η_{GT})	-	0.3	0.3
Παροχή μάζας καυσαερίων αεριοστροβίλου (m_{EXH})	kg/s	0.12-0.06	0.08
Θερμοκρασία καυσαερίων αεριοστροβίλου ($E_{GT} = T_{EXH}$)	C	350-600	370
Ελάχιστη θερμοκρασία εξόδου HRSG ($t_{stack} = t_s$)	C	150 έως 180	165
Μέση ειδική θερμότητα υπό σταθερή πίεση καυσαερίων (C_p)	kJ/kgK	1.35 έως 1.39	1.37
Πίεση κορεσμού ατμός της HRSG (P_{HRSG})	bar	15 έως 120	
Πίεση κορεσμού ατμού της HRSGmax (P_{HRSG})	bar	170 έως 180	
Πίεση κορεσμού ατμού της HRSG ≥ 220 bar (P_{HRSG})	bar	40 έως 80	
Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης τροφοδοτικής αντλίας ($\eta_{is,rump}$)	-	0.3	0.3
Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης ατμοστροβίλου ($\eta_{ST,is}$)	-	0.40	0.40
Θερμικός συντελεστής απόδοσης HRSG (η_{HRSG})	-	0.85	0.85
Διαφορά θερμοκρασίας υπερθερμαντήρα ($\Delta t_{p,s}$)		20 έως 30	20
Διαφορά θερμοκρασίας εξατμιστήρα ($\Delta t_{p,e}$)	C	10 έως 30	10
Διαφορά θερμοκρασίας τυμπάνου (Δt_a)	C	1 έως 20	20

Ποιότητα ατμού στην έξοδο ατμοστρόβιλου x	-	≥0,9	0,9
Πίεση συμπυκνωτή (P _{cond})	bar	0.05 έως 0.07	0.06

Πίνακας 11: Δεδομένα για αναλυτική μέθοδο υπολογισμού του σημείου σχεδιασμό CCPP μονής πίεσης

Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να γίνουν κάποιες παρατηρήσεις ώστε να γίνει κατανοητή η σκοπιμότητα της διαδικασίας που ακολουθεί. Για να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή εκμετάλλευση της θερμότητας των καυσαερίων του αεριοστρόβιλου πρέπει ο κύκλος Rankine να πλησιάσει το περισσότερο δυνατόν στην κάτω γραμμή του κύκλου Brayton. Αυτό μπορεί να γίνει με δύο κυρίως τρόπους είτε με την αύξηση της παροχής του παραγόμενου ατμού (m_s) είτε με την χρήση HRSG πολλαπλών πιέσεων (συνήθως δύο). Σε κάθε περίπτωση δεν πρέπει να παραβιαστούν οι διαφορές θερμοκρασιών (pinchpoints) του εξατμιστήρα και του υπερθερμαντήρα.

➤ Μετάβαση από το σημείο 1 στο 3:

Η θερμότητα που προσφέρεται από τον αεριοστρόβιλο:

$$HI_{13} = \dot{m}_{EXH} \cdot \dot{C}_p \cdot (t_1 - t_3) \implies HI_{13} = 40 \frac{kg}{sec} \cdot 1.73 \frac{kJ}{kg \cdot K} (370 - 305.60)^\circ C \implies \quad [4.21]$$

$$HI_{13} = 3558.71 kW$$

Η θερμότητα που απορροφάται από το κορεσμένο νερό για να γίνει υπέρθερμος ατμός στο τμήμα του εξατμιστήρα και του υπερθερμαντήρα είναι σύμφωνα με μία απλοποιημένη υπόθεση $h_D = h_C$, δηλαδή η θερμοκρασιακή διαφορά στο approachpoint είναι αμελητέα, οπότε:

$$HI_{AD} = \dot{m}_s \cdot (h_A - h_D) \implies HI_{AD} = 5.5 \frac{kg}{sec} \cdot (2953.87 - 1316.64) \frac{kJ}{kg} \implies$$

$$HI_{AD} = 9004.77 kW \quad [4.22]$$

Η μέγιστη θερμοκρασία υπερθέρμανσης:

$$t_A = t_1 - \Delta t_a \implies t_A = 370^\circ C - 20^\circ C \implies t_A = 350^\circ C \quad [4.23]$$

Όπου:

$$t_1 = \text{EGT (δεδομένη)}$$

Από το Παραρτήματος Α με δεδομένη την πίεση της HRSG και την θερμοκρασία t_A , υπολογίζουμε την h_A και την s_A , αντίστοιχα. Η ενεργειακή ισορροπία στον εξατμιστήρα και υπερθερμαντήρα της HRSG (τμήμα 1 της HRSG) λύνεται ως προς την \dot{m}_{s1} υπολογίζεται η μέγιστη παραγόμενη από το τμήμα 1 παροχή ατμού:

$$\dot{m}_{s1} = \frac{\dot{m}_{EXH} \cdot \dot{C}_p \cdot \Delta t_1 \cdot n_{HRSG}}{(h_A - h_C)} \implies \dot{m}_{s1} = \frac{40 \frac{kg}{sec} \cdot 1.73 \frac{kJ}{kg \cdot K} \cdot 234.94 K \cdot 0.85}{\left(2953.87 \frac{kJ}{kg} - 1316.64 \frac{kJ}{kg}\right)} \implies$$

$$\dot{m}_{s1} = 1.85 \frac{kg}{sec} \quad [4.24]$$

➤ Μετάβαση από το σημείο 3 στο 4:

Η θερμότητα που προσφέρεται από τον αεριοστρόβιλο:

$$HI_{34} = \dot{m}_{EXH} \cdot \dot{C}_p \cdot (t_3 - t_4) \implies HI_{34} = 40 \frac{kg}{sec} \cdot 1.73 \frac{kJ}{kg \cdot K} \cdot (305.06 - 165) \text{ } ^\circ\text{C} \implies$$

$$\implies HI_{34} = 7675.29 \text{ kW} \quad [4.25]$$

Η θερμότητα που απορροφάται από το νερό για να γίνει κορεσμένο νερό στο τμήμα προθερμαντήρα:

$$HI_{DE} = \dot{m}_s \cdot (h_D - h_E) \implies HI_{DE} = 5.5 \frac{kg}{sec} \cdot \left(1316.64 \frac{kJ}{kg} - 162,15 \frac{kJ}{kg} \right) \implies$$

$$HI_{DE} = 6310.60 \text{ kW} \quad [4.26]$$

Το h_F και το s_F υπολογίζεται από τους πίνακες του Παραρτήματος Α με δεδομένη την πίεση του συμπυκνωτή p_{cond} .

Από την ενεργειακή ισορροπία στον προθερμαντήρα της HRSG (τμήμα 2 της HRSG) υπολογίζεται η μέγιστη παραγόμενη από το τμήμα 2 παροχή ατμού:

$$\dot{m}_{s2} = \frac{\dot{m}_{EXH} \cdot \dot{C}_p \cdot \Delta t_2 \cdot n_{HRSG}}{(h_C - h_E)} \implies \dot{m}_{s2} = \frac{40 \frac{kg}{sec} \cdot 1.73 \frac{kJ}{kg \cdot K} \cdot 140.06 \text{ K} \cdot 0.85}{\left(1316.64 \frac{kJ}{kg} - 169.26 \frac{kJ}{kg} \right)} \implies$$

$$\dot{m}_{s2} = 5.69 \frac{kg}{sec} \quad [4.27]$$

Όπου:

$\Delta t_2 = t_3 - t_4$ και \dot{m}_{s2} είναι η μέγιστη παραγόμενη από το τμήμα 2 παροχή ατμού.

Η θερμοκρασία $t_4 = t_s$ είναι η «θεωρητική» ελάχιστη θερμοκρασία των καυσαερίων στην έξοδο της HRSG και είναι δεδομένη. Οι δύο παραγόμενες παροχές μάζας ατμού δεν είναι απαραίτητα ίσες. Από τις δύο παραγόμενες παροχές μάζας ατμού πρέπει να επιλέξουμε την μικρότερη, γιατί τότε μόνο εξασφαλίζεται ότι κανένα από τα δύο pinchpoints δεν παραβιάζεται. Σημειώνεται ότι όσο πιο μεγάλη είναι η \dot{m}_s τόσο ανεβαίνει ο κύκλος Rankine. Επομένως, για τον υπολογισμό της πραγματικής ελάχιστης θερμοκρασίας των καυσαερίων στην έξοδο της HRSG, $t_{s,actual}$ διερευνώνται οι περιπτώσεις:

- Αν $\dot{m}_{s1} < \dot{m}_{s2}$, τότε το \dot{m}_{s1} με το \dot{m}_{s2} και το t_4 με το $t_{s,actual}$ προκύπτει:

$$t_{s,actual} = \frac{\dot{m}_{EXH} \cdot \dot{C}_p \cdot t_3 \cdot n_{HRSG} - \dot{m}_{s1} \cdot (h_C - h_E)}{\dot{m}_{EXH} \cdot \dot{C}_p \cdot n_{HRSG}} \implies$$

$$t_{s,actual} = \frac{40 \frac{kg}{sec} \cdot 1.73 \frac{kJ}{kg \cdot K} \cdot 305.06 \text{ }^\circ\text{C} \cdot 0.85 - 1.85 \frac{kg}{sec} \cdot \left(1316.64 \frac{kJ}{kg} - 169.26 \frac{kJ}{kg} \right)}{40 \frac{kg}{sec} \cdot 1.73 \frac{kJ}{kg \cdot K} \cdot 0.85} \Rightarrow \quad [4.28]$$

$$t_{s,actual} = 351.96 \text{ K}$$

Οπότε αντικαθιστώντας το t_3 με το $t_{3,actual}$ και το t_4 με το $t_{s,actual}$ προκύπτει:

$$t_{s,actual} = \frac{\dot{m}_{EXH} \cdot \dot{C}_p \cdot t_3 \cdot n_{HRSG} - \dot{m}_{s2} \cdot (h_C - h_E)}{\dot{m}_{EXH} \cdot \dot{C}_p \cdot n_{HRSG}} \Rightarrow$$

$$t_{s,actual} = \frac{40 \frac{kg}{sec} \cdot 1.73 \frac{kJ}{kg \cdot K} \cdot 305.06 \text{ }^\circ\text{C} \cdot 0.85 - 5.69 \frac{kg}{sec} \cdot \left(1316.64 \frac{kJ}{kg} - 169.26 \frac{kJ}{kg} \right)}{40 \frac{kg}{sec} \cdot 1.73 \frac{kJ}{kg \cdot K} \cdot 0.85} \Rightarrow \quad [4.29]$$

$$t_{s,actual} = 223.75 \text{ }^\circ\text{C}$$

Σημεία	Μονάδες μέτρησης	Σχέση	Αποτελέσματα
Μετάβαση από 1 έως 3	kWatt	$HI_{13} = \dot{m}_{EXH} \cdot \dot{C}_p \cdot (t_1 - t_3)$	3558.71
	kWatt	$HI_{AD} = \dot{m}_s \cdot (h_A - h_D)$	9004.77
	°C	$t_A = t_1 - \Delta t_a$	350,00
	Kg/sec	$\dot{m}_{s1} = \frac{\dot{m}_{EXH} \cdot \dot{C}_p \cdot \Delta t_1 \cdot n_{HRSG}}{(h_A - h_C)}$	1.85
Μετάβαση από 3 έως 4	kWatt	$HI_{34} = \dot{m}_{EXH} \cdot \dot{C}_p \cdot (t_3 - t_4) \Rightarrow HI_{34}$	7675,29
	kWatt	$HI_{DE} = \dot{m}_s \cdot (h_D - h_E)$	6310.60
	kJ/kg	$h_E = h_F + CW_{pump}$	169,26
	Kg/sec	$\dot{m}_{s2} = \frac{\dot{m}_{EXH} \cdot \dot{C}_p \cdot \Delta t_2 \cdot n_{HRSG}}{(h_C - h_E)}$	5.69
	°C	$t_{s,actual} = \frac{\dot{m}_{EXH} \cdot \dot{C}_p \cdot t_3 \cdot n_{HRSG} - \dot{m}_{s1} \cdot (h_C - h_E)}{\dot{m}_{EXH} \cdot \dot{C}_p \cdot n_{HRSG}}$	351.96
	°C	$t_{s,actual} = \frac{\dot{m}_{EXH} \cdot \dot{C}_p \cdot t_3 \cdot n_{HRSG} - \dot{m}_{s2} \cdot (h_C - h_E)}{\dot{m}_{EXH} \cdot \dot{C}_p \cdot n_{HRSG}}$	223.75

Πίνακας 12: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων μετάβασης σημείων από 1 έως 3 και από 3 έως 4

Μετά από αυτήν την διερεύνηση έχει προσδιοριστεί πλέον και η παραγόμενη παροχή μάζα ατμού \dot{m}_s του κύκλου Rankine.

➤ Μετάβαση από το σημείο A στο G, (ισεντροπική εκτόνωση)

Για ισεντροπική εκτόνωση ισχύει $s_G = s_A$ οπότε:

$$x_{G'} = \frac{s_A - s_F}{s_{fg}} \implies x_{G'} = \frac{6.07 \frac{kJ}{kg K} - 0.52 \frac{kJ}{kg K}}{7.81 \frac{kJ}{kg K}} \implies x_{G'} = 0.75 \quad [4.30]$$

Και με αντικατάσταση του x με x_G προκύπτει:

$$h_{mix} = h_G = 2465.19 \frac{kJ}{kg} \quad [4.31]$$

Τότε η ισεντροπική ισχύς του αμοστρόβιλου είναι:

$$TP_{ST, is} = \dot{m}_s \cdot (h_A - h_{G'}) \implies TP_{ST, is} = 5.5 \frac{kg}{sec} \cdot \left(2953.87 \frac{kJ}{kg} - 1867.91 \frac{kJ}{kg} \right) \implies \quad [4.32]$$

$$TP_{ST, is} = 5972.81 kW$$

Με δεδομένο τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης του αμοστρόβιλου $\eta_{ST, is}$, η πραγματική ισχύς του αμοστρόβιλου δίνεται από τη σχέση:

$$TW_{ST, actual} = \dot{m}_s \cdot (h_A - h_{G'}) \cdot n_{ST, is} \implies \quad [4.33]$$

$$TW_{ST, actual} = 5.5 \frac{kg}{sec} \cdot \left(2953.87 \frac{kJ}{kg} - 1867.91 \frac{kJ}{kg} \right) \cdot 0.4 \implies TW_{ST, actual} = 2687.77 kW$$

Η απόδοση του συνδυασμένου κύκλου είναι:

$$n_{cc} = \frac{UW_{\dot{c}} + TW_{ST, actual}}{HI_{\dot{c}}} \implies n_{cc} = 0.62 \implies n_{cc} = 62\% \quad [4.34]$$

Η πραγματική ποιότητα του ατμού μπορεί να υπολογιστεί από την πραγματική ενθαλπία εξόδου του ατμού h_G δίνεται από:

$$h_G = h_A - (h_A - h_{G'}) \cdot n_{ST, is} \implies h_G = 2953.87 \frac{kJ}{kg} - 0.4 \left(2953.87 \frac{kJ}{kg} - 1867.91 \frac{kJ}{kg} \right) \implies \quad [4.35]$$

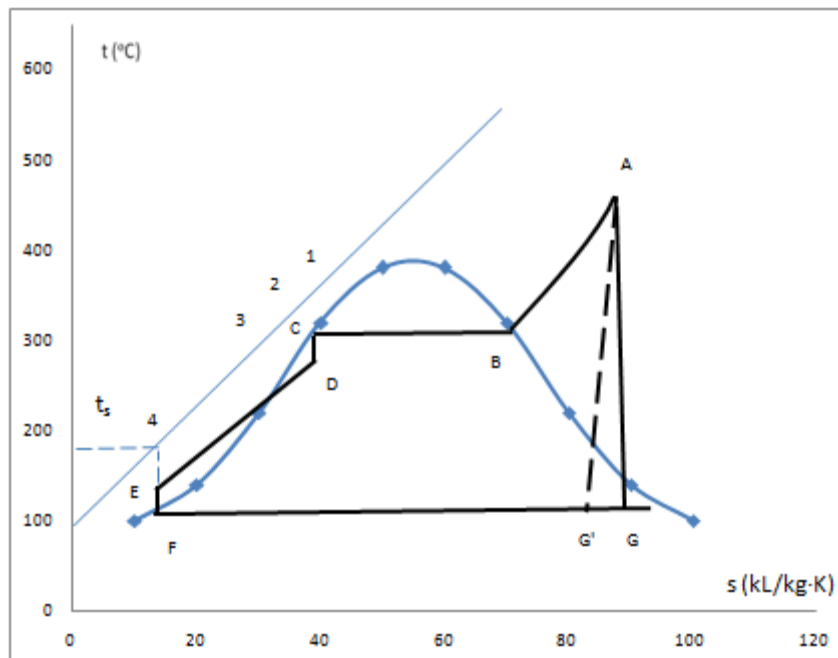
$$h_G = 2465.19 kJ/kg$$

Με αντικατάσταση της h_G προκύπτει η πραγματική ποιότητα εξόδου ατμού x_G :

$$x_G = \frac{h_G - h_F}{h_{fg}} \implies x_G = \frac{2465.19 \frac{kJ}{kg} - 151.494 \frac{kJ}{kg}}{2415.176 \frac{kJ}{kg}} \implies x_G = 0.9 \quad [4.36]$$

Σημεία	Μονάδες μέτρησης	Σχέση	Αποτελέσματα
Μετάβαση από το Α στο Γ'	-	$x_{G'} = \frac{s_A - s_F}{s_{fg}}$	0.8
	kJ/kg	$h_{mix} = h_G$	2465,19
	kJ/kg	$TP_{ST,is} = \dot{m}_s \cdot (h_A - h_{G'})$	5972,817
	kWatt	$TW_{ST,actual} = \dot{m}_s \cdot (h_A - h_{G'}) \cdot n_{ST,is}$	2687,77
	-	$n_{cc} = \frac{UW_{\dot{c}} + TW_{ST,actual}}{HI_{\dot{c}}}$	0,62
	kJ/kg	$h_G = h_A - (h_A - h_{G'}) \cdot n_{ST,is}$	2465,19
	-	$x_G = \frac{h_G - h_F}{h_{fg}}$	0.887

Πίνακας 13: Συγκεντρωτικός Πίνακας Αποτελεσμάτων μετάβασης από το σημείο Α στο Γ.



Σχήμα 35: T-s διάγραμμα μεταφορά θερμότητας CCPP εργοστασίου μονής πίεσης (Γερίπτωση μελέτης)

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία στόχευε στην υλοποίηση μελέτης εργοστασίου παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος συνδυασμένου κύκλου μέσω μιας γενικής μεθόδου υπολογισμού του βαθμού απόδοσης και μιας αναλυτικής δίνοντας τα πραγματικά αποτελέσματα λειτουργίας.

Η παρούσα μελέτη για το εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος υλοποιήθηκε βασιζόμενη στα δεδομένα και τα στοιχεία που δόθηκαν από το θεωρητικό υπόβαθρό (Πολυζάκης, 2012), τις αρχές των συνδυασμένων κύκλων, τις διαμορφώσεις του εργοστασίου συνδυασμένου κύκλου καθώς και τα κύρια εξαρτήματα. Ακόμα η μελέτη βασίστηκε στην διαδικασία υπολογισμών στο σημείο σχεδιασμού του εργοστασίου παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος CCPP μονής πίεσης μέσα από μια γενική και αναλυτική μέθοδο. Με την υλοποίηση της εφαρμογής μέσω των δεδομένων (Πολυζάκης, 2012), έγινε η διεξαγωγή των αποτελεσμάτων. Τα βασικά σημεία των αποτελεσμάτων του απλού κύκλου Rankine ήταν ότι το έργο συμπίεσης ανά μονάδα μάζας της τροφοδοτικής αντλίας, $CW_{\text{pump}} = 17.76 \text{ kJ/kg} = 97.70 \text{ kW}$ με παροχή μάζας $5,5 \text{ kg}$, η ποιότητα ατμού ή αλλιώς το ποσοστό ξηρότητας του μίγματος $x_G = 0,75$ και η πραγματική ποιότητα ατμού $x_G = 0,9$, ο συντελεστής θερμικής απόδοσης του κύκλου Rankine $\eta_{\text{st}} = 20\%$ και η ισχύς της θερμότητας που απορροφά η HRSG, $HI_{\text{HRSG}} = 39.38 \text{ MW}$.

Στην συνέχεια ακολουθούν τα βασικά στοιχεία που υπολογίστηκαν του συνδυασμένου κύκλου Brayton/Rankine, δηλαδή υπολογίστηκαν τα χαρακτηριστικά και οι επιδόσεις του συνδυασμένου κύκλου λαμβάνοντας υπόψη και την αλληλεπίδρασή τους. Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να γίνουν κάποιες παρατηρήσεις ώστε να γίνει κατανοητή η σκοπιμότητα της διαδικασίας που ακολουθεί. Για να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή εκμετάλλευση της θερμότητας των καυσαερίων του αεριοστρόβιλου πρέπει ο κύκλος Rankine να πλησιάσει το περισσότερο δυνατόν στην κάτω γραμμή του κύκλου Brayton. Αυτό μπορεί να γίνει με δύο κυρίως τρόπους είτε με την αύξηση της παροχής του παραγόμενου ατμού (m_s) είτε με την χρήση HRSG πολλαπλών πιέσεων (συνήθως δύο). Σε κάθε περίπτωση δεν πρέπει να παραβιαστούν οι διαφορές θερμοκρασιών (pinchpoints) του εξατμιστήρα και του υπερθερμαντήρα.

Τα βασικά στοιχεία υπολογισμού του συνδυασμένου κύκλου είναι η θερμότητα που προσφέρεται από τον αεριοστρόβιλο $HI_{13} = 3558.71 \text{ kW}$, η θερμότητα που απορροφάται από το κορεσμένο νερό για να γίνει υπέρθερμος ατμός στο τμήμα του εξατμιστήρα και του υπερθερμαντήρα $HI_{\text{AD}} = 9004.77 \text{ kW}$, η μέγιστη θερμοκρασία υπερθέρμανσης 350°C , η μέγιστη παραγόμενη από το τμήμα 1 παροχή ατμού $m_{s1} = 1.85 \text{ kg/sec}$, η θερμότητα που προσφέρεται από τον αεριοστρόβιλο $HI_{34} = 7675.29 \text{ kW}$, η θερμότητα που απορροφάται από το νερό για να γίνει κορεσμένο νερό στο τμήμα προθερμαντήρα $HI_{\text{DE}} = 6310.60 \text{ kW}$, η μέγιστη παραγόμενη από το τμήμα 2 παροχή ατμού $m_{s2} = 5.69 \text{ kg/sec}$, η πραγματική ελάχιστη θερμοκρασία των καυσαερίων στην έξοδο της HRSG, $t_{s,\text{actual}1} = 351.96^\circ\text{C}$ και $t_{s,\text{actual}2} = 223.75^\circ\text{C}$. Για ισεντροπική εκτόνωση έχει ποιότητα ατμού $x_G = 0,75$, η ισεντροπική ισχύς του αμοστρόβιλου $TP_{\text{ST,IS}} = 5972.81 \text{ kW}$. Με δεδομένο τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης του αμοστρόβιλου $\eta_{\text{ST,IS}}$, η πραγματική ισχύς του αμοστρόβιλου $TW_{\text{ST,actual}} = 2687.77 \text{ kW}$, η απόδοση του συνδυασμένου κύκλου $\eta_{\text{cc}} = 62\%$ και με πραγματική ποιότητα εξόδου ατμού $x_G = 0.9$.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Πολυζάκης Α., 2012, Λειτουργία αεροστροβίλων και παραγωγή ενέργειας – Προώθησης Θεωρία, Εκδόσεις HeatCoolPower.
2. Πυργιώτης Ν., 2014, Οι ναυτικοί αεριοστροβίλοι και η εξέλιξη τους από αεροπορικούς σε ναυτικούς, Πτυχιακή Εργασία, Ακαδημία Εμπορικού Ναυτικού Μακεδονίας, Νέα Μηχανιώνα
3. Χαραλαμπόπουλος Ν., 2007, Ναυτική και θαλάσσια τεχνολογία και επιστήμη, Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Διπλωματική Εργασία, Αθήνα
4. http://dspace.lib.ntua.gr/dspace2/bitstream/handle/123456789/492/charalampopoulosn_gasturbines.pdf?sequence=1
5. https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/1122/1/02_chapter_11.pdf
6. Ηλεκτρονική εγκυκλοπαίδεια: <https://en.wikipedia.org>
7. <http://www.pi-schools.gr/download/lessons/tee/mechanical/>
8. http://www.lat.upatras.gr/pdf/LECTURE_NOTES_AERIOSTROBILOI/KEFALAIO-01.pdf
9. <http://iceal.wikidot.com/aeriokinitires-strovilokinitires>
10. <https://www.rizospastis.gr/story.do?id=3491867>
11. <https://gr.pinterest.com/pin/314970567672015646/>
- 12.
13. <https://www.engineering.com/DesignerEdge/DesignerEdgeArticles/ArticleID/13785/Materials-Microscopy-and-Modeling-Combine-to-Improve-Jet-Engine-Performance.aspx>
14. Aviticion<https://aviation.stackexchange.com/questions/16177/what-are-the-differences-between-a-helicopter-engine-turboshaft-and-an-aircraf>
15. Καρασάβας Ι., 2013, Η σφαίρα του Ήρωνα <https://www.slideshare.net/John3008/ss-27526152>
16. Γιαννόπουλος Ανδρέας, 2011, Ατμοηλεκτρικοί σταθμοί, Εκδόσεις ΙΩΝ, Αθήνα
17. Μερετάκης Α., Στοιχεία ατμοστροβίλων 2008, Εκδόσεις Τ.Ε.Ι Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης, Πτυχιακή Εργασία, Καβάλα.
18. AlabedNafeh, 2012, Σύγχρονες εγκαταστάσεις ατμοστροβίλων, Ακαδημία εμπορικού Ναυτικού Μακεδονίας, Νέα Μηχανιώνα
19. Mechanical Engineering, Blog for Mechanical and Production Engineers <https://basicmechanicalengineering.com/pressure-velocity-graph-for-impulse-and-reaction-turbine-explained/>

20. <http://3.1.15.reisen-fuer-meister.de/wiring/power-plant-block-diagram.html>
21. https://zwrotpodatku.co/gear_diagram_of_combined_cycle_power_plant.php
22. https://www.researchgate.net/figure/Single-steam-pressure-HRSG-exhaust-gas-steam-temperature-profiles_fig1_281745315
23. https://www.researchgate.net/figure/Combined-cycle-power-plant-with-multi-shaft-configuration_fig4_300857212
24. Ντελκλής Κ., Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας, Αεριοστρόβιλοι - Μονάδες Συνδυασμένου Κύκλου, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
25. Φραγκόπουλος Χ. και συν., 1993, Συμπαράγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας, ΕΛΚΕΠΑ,
26. STREETER V. and Wylie E. , 2000, Μηχανική Ρευστών, Εκδόσεις Φουντάς, Αθήνα
27. Cohen H., Rogers G.F.C. and Saravanamuttoo G.F.C., 1972, Gas turbine theory, Εκδόσεις LOGMAN.
28. Παπανίκας Δ., 2012, Εφαρμοσμένη Ρευστομηχανική, Εκδόσεις MEDIA GURU
29. Παπαηλίου Δ., Τεχνική Θερμοδυναμική (Στροβιλοκινητήρες), Διδακτικές Σημειώσεις Πανεπιστήμιο Πατρών

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΠΙΝΑΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

Πίνακας Α.1: Κορεσμένο νερό (πίνακας με βάση τη θερμοκρασία)

Saturated water-Temperature table												
Temp.	Sat. press.	Specific volume (m ³ /kg)		Internal energy (kJ/kg)			Enthalpy (kJ/kg)			Entropy (kJ/(kg · K))		
		Sat. Liquid	Sat. Vapor	Sat. Liquid	Evap.	Sat. Vapor	Sat. Liquid	Evap.	Sat. Vapor	Sat. Liquid	Evap.	Sat. Vapor
t (°C)	Psat (kPa)	v _f	v _g	u _f	u _g	u _g	h _f	h _g	h _g	s _f	s _g	s _g
0.01	0.6113	0.001000	206.14	0.0	2375.3	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.000	9.1562	9.1562
5	0.8721	0.001000	147.12	20.97	2361.3	2382.3	20.98	2489.6	2510.6	0.0761	8.9496	9.0257
10	1.2276	0.001000	106.38	42.00	2347.2	2389.2	42.01	2477.7	2519.8	0.1510	8.7498	8.9008
15	1.7051	0.001001	77.93	62.99	2333.1	2396.1	62.99	2465.9	2528.9	0.2245	8.5569	8.7814
20	2.339	0.001002	57.79	83.95	2319.0	2402.9	83.96	2454.1	2538.1	0.2966	8.3706	8.6672
25	3.169	0.001003	43.36	104.88	2304.9	2409.8	104.89	2442.3	2547.2	0.3674	8.1905	8.5580
30	4.246	0.001004	32.89	125.78	2290.8	2416.6	125.79	2430.5	2556.3	0.4369	8.0164	8.4533
35	5.628	0.001006	25.22	146.67	2276.7	2423.4	146.68	2418.6	2565.3	0.5053	7.8478	8.3531
40	7.384	0.001008	19.52	167.56	2262.6	2430.1	167.57	2406.7	2574.3	0.5725	7.6845	8.2570
45	9.593	0.001010	15.26	188.44	2248.4	2436.8	188.45	2394.8	2583.2	0.6387	7.5261	8.1648
50	12.349	0.001012	12.03	209.32	2234.2	2443.5	209.33	2382.7	2592.1	0.7038	7.3725	8.0763
55	15.758	0.001015	9.568	230.21	2219.9	2450.1	230.23	2370.7	2600.9	0.7679	7.2234	7.9913
60	19.940	0.001017	7.671	251.11	2205.5	2456.6	251.13	2358.5	2609.6	0.8312	7.0784	7.9096
65	25.03	0.001020	6.197	272.02	2191.1	2463.1	272.06	2346.2	2618.3	0.8935	6.9375	7.8310
70	31.19	0.001023	5.042	292.95	2176.6	2469.6	292.98	2333.8	2626.8	0.9549	6.8004	7.7553
75	38.58	0.001026	4.131	313.90	2162.0	2475.9	313.93	2321.4	2635.3	1.0155	6.6669	7.6824
80	47.39	0.001029	3.407	334.86	2147.4	2482.2	334.91	2308.8	2643.7	1.0753	6.5369	7.6122
85	57.83	0.001033	2.828	355.84	2132.6	2488.4	355.90	2296.0	2651.9	1.1343	6.4102	7.5445
90	70.14	0.001036	2.361	376.85	2117.7	2494.5	376.92	2283.2	2660.1	1.1925	6.2866	7.4791
95	84.55	0.001040	1.982	397.88	2102.7	2500.6	397.96	2270.2	2668.1	1.2500	6.1659	7.4159
	Sat. Press (MPa)											
100	0.10135	0.001044	1.6729	418.94	2087.6	2506.5	419.04	2257.0	2676.1	1.3069	6.0480	7.3549
105	0.12082	0.001048	1.4194	440.02	2072.3	2512.4	440.15	2243.7	2683.8	1.3630	5.9328	7.2958
110	0.14327	0.001052	1.2102	461.14	2057.0	2518.1	461.30	2230.2	2691.5	1.4185	5.8202	7.2387
115	0.16906	0.001056	1.0366	482.30	2041.4	2523.7	482.48	2216.5	2699.0	1.4734	5.7100	7.1833
120	0.19853	0.001060	0.8919	503.50	2025.8	2529.3	503.71	2202.6	2706.3	1.5276	5.6020	7.1296
125	0.2321	0.001065	0.7706	524.74	2009.9	2534.6	524.99	2188.5	2713.5	1.5813	5.4962	7.0775
130	0.2701	0.001070	0.6685	546.02	1993.9	2539.9	546.31	2174.2	2720.5	1.6344	5.3925	7.0269
135	0.3130	0.001075	0.5822	567.35	1977.7	2545.0	567.69	2159.6	2727.3	1.6870	5.2907	6.9777
140	0.3613	0.001080	0.5089	588.74	1961.3	2550.0	589.13	2144.7	2733.9	1.7391	5.1908	6.9299
145	0.4154	0.001085	0.4463	610.18	1944.7	2554.9	610.63	2129.6	2740.3	1.7907	5.0926	6.8833
150	0.4758	0.001091	0.3928	631.68	1927.9	2559.5	632.20	2114.3	2746.5	1.8418	4.9960	6.8379
155	0.5431	0.001096	0.3468	653.24	1910.8	2564.1	653.84	2098.6	2752.4	1.8925	4.9010	6.7935
160	0.6178	0.001102	0.3071	674.87	1893.5	2568.4	675.55	2082.6	2758.1	1.9427	4.8075	6.7502
165	0.7005	0.001108	0.2727	696.56	1876.0	2572.5	697.34	2066.2	2763.5	1.9925	4.7153	6.7078
170	0.7917	0.001114	0.2428	718.33	1858.1	2576.5	719.21	2049.5	2768.7	2.0419	4.6244	6.6663
175	0.8920	0.001121	0.2168	740.17	1840.0	2580.2	741.17	2032.4	2773.6	2.0909	4.5347	6.6256
180	1.0021	0.001127	0.19405	762.09	1821.6	2583.7	763.22	2015.0	2778.2	2.1396	4.4461	6.5857
185	1.1227	0.001134	0.17409	784.10	1802.9	2587.0	785.37	1997.1	2782.4	2.1879	4.3586	6.5465
190	1.2544	0.001141	0.15654	806.19	1783.8	2590.0	807.62	1978.8	2786.4	2.2359	4.2720	6.5079
195	1.3978	0.001149	0.14105	828.37	1764.4	2592.8	829.98	1960.0	2790.0	2.2835	4.1863	6.4698

Πίνακας Α.1: (συνέχεια)

Saturated water-Temperature table (Concluded)												
		Specific volume (m ³ /kg)		Internal energy (kJ/kg)			Enthalpy (kJ/kg)			Entropy kJ/(kg · K)		
Temp. t (°C)	Sat. press.	Sat. liquid	Sat. vapor	Sat. liquid	Evap.	Sat. vapor	Sat. liquid	Evap.	Sat. vapor	Sat. liquid	Evap.	Sat. vapor
	Psat (kPa)	v _f	v _g	u _f	u _{fg}	u _g	h _f	h _{fg}	h _g	s _f	s _{fg}	s _g
200	1.5538	0.001157	0.13736	850.65	1744.7	2595.3	852.45	1940.7	2793.2	2.3309	4.1014	6.4323
205	1.7230	0.001164	0.11521	873.04	1724.5	2597.5	875.04	1921.0	2796.0	2.3780	4.0172	6.3952
210	1.9062	0.001173	0.10441	895.53	1703.9	2599.5	897.76	1900.7	2798.5	2.4248	3.9337	6.3585
215	2.104	0.001181	0.09479	918.14	1682.9	2601.1	920.62	1879.9	2800.5	2.4714	3.8507	6.3221
220	2.318	0.001190	0.08619	940.87	1661.5	2602.4	943.62	1858.5	2802.1	2.5178	3.7683	6.2861
225	2.548	0.001199	0.07849	963.73	1639.6	2603.3	966.78	1836.5	2803.3	2.5639	3.6863	6.2503
230	2.795	0.001209	0.07158	986.74	1617.2	2603.9	990.12	1813.8	2804.0	2.6099	3.6047	6.2146
235	3.060	0.001219	0.06537	1009.89	1594.2	2604.1	1013.62	1790.5	2804.2	2.6558	3.5233	6.1791
240	3.344	0.001229	0.05976	1033.21	1570.8	2604.0	1037.32	1766.5	2803.8	2.7015	3.4422	6.1437
245	3.648	0.001240	0.05471	1056.71	1546.7	2603.4	1061.23	1741.7	2803.0	2.7472	3.3612	6.1083
250	3.973	0.001251	0.05013	1080.39	1522.0	2602.4	1085.36	1716.2	2801.5	2.7927	3.2802	6.0730
255	4.319	0.001263	0.04598	1104.28	1496.7	2600.9	1109.73	1689.8	2799.5	2.8383	3.1992	6.0375
260	4.688	0.001276	0.04221	1128.39	1470.6	2599.0	1134.37	1662.5	2796.9	2.8838	3.1181	6.0019
265	5.081	0.001289	0.03877	1152.74	1443.9	2596.6	1159.28	1634.4	2793.6	2.9294	3.0368	5.9662
270	5.499	0.001302	0.03564	1177.36	1416.3	2593.7	1184.51	1605.2	2789.7	2.9751	2.9551	5.9301
275	5.942	0.001317	0.03279	1202.25	1387.9	2590.2	1210.07	1574.9	2785.0	3.0208	2.8730	5.8938
280	6.412	0.001332	0.03017	1227.46	1358.7	2586.1	1235.99	1543.6	2779.6	3.0668	2.7903	5.8571
285	6.909	0.001348	0.02777	1253.00	1328.4	2581.4	1262.31	1511.0	2773.3	3.1130	2.7070	5.8199
290	7.436	0.001366	0.02557	1278.92	1297.1	2576.0	1289.07	1477.1	2766.2	3.1594	2.6227	5.7821
295	7.993	0.001384	0.02354	1305.2	1264.7	2569.9	1316.3	1441.8	2758.1	3.2062	2.5375	5.7437
300	8.581	0.001404	0.02167	1332.0	1231.0	2563.0	1344.0	1404.9	2749.0	3.2534	2.4511	5.7045
305	9.202	0.001425	0.019948	1359.3	1195.9	2555.2	1372.4	1366.4	2738.7	3.3010	2.3633	5.6643
310	9.856	0.001447	0.018330	1387.1	1159.4	2546.4	1401.3	1326.0	2727.3	3.3493	2.2737	5.6230
315	10.547	0.001472	0.016867	1415.5	1121.1	2536.6	1431.0	1283.5	2714.5	3.3982	2.1821	5.5804
320	11.274	0.001499	0.015488	1444.6	1080.9	2525.5	1461.5	1238.6	2700.1	3.4480	2.0882	5.5362
330	12.845	0.001561	0.012996	1505.3	993.7	2498.9	1525.3	1140.6	2665.9	3.5507	1.8909	5.4417
340	14.586	0.001638	0.010797	1570.3	894.3	2464.6	1594.2	1027.9	2622.0	3.6594	1.6763	5.3357
350	16.513	0.001740	0.008813	1641.9	776.6	2418.4	1670.6	893.4	2563.9	3.7777	1.4335	5.2112
360	18.651	0.001893	0.006945	1725.2	626.3	2351.5	1760.5	720.3	2481.0	3.9147	1.1379	5.0526
370	21.03	0.002213	0.004925	1844.0	384.5	2228.5	1890.5	441.6	2332.1	4.1106	0.6865	4.7971
374.14	22.09	0.003155	0.003155	2029.6	0	2029.6	2099.3	0	2099.3	4.4298	0	4.4298

Πίνακας Α.2: Κορεσμένο νερό (πίνακας με βάση την κλίση)

Saturated water-Pressure table												
		Specific volume (m ³ /kg)		Internal energy (kJ/kg)			Enthalpy (kJ/kg)			Entropy (kJ/kg · K)		
Press. (kPa)	Sat. Temp. t (°C)	Sat. liquid v _f	Sat. vapor v _g	Sat. liquid u _f	Evap. u _{fg}	Sat. vapor u _g	Sat. liquid h _f	Evap. h _{fg}	Sat. vapor h _g	Sat. liquid s _f	Evap. s _{fg}	Sat. vapor s _g
0.0113	0.01	0.001000	206.14	0.00	2375.3	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.0000	9.1562	9.1562
1.0	6.98	0.001000	129.23	39.38	2333.7	2385.0	39.38	2484.9	2514.2	0.1019	8.8997	8.9756
1.5	13.00	0.001000	83.98	54.71	2338.4	2393.3	54.71	2470.6	2525.3	0.1997	8.8322	8.9319
2.0	17.54	0.001000	67.00	73.48	2336.8	2399.5	73.48	2460.0	2533.5	0.2687	8.8029	8.9237
3.0	21.05	0.001002	54.23	88.48	2333.9	2404.4	88.49	2451.8	2540.0	0.3120	8.7911	8.9432
3.0	24.86	0.001003	43.67	101.84	2329.5	2408.5	101.85	2444.5	2546.3	0.3548	8.7221	8.9776
4.0	28.96	0.001004	34.80	121.45	2323.7	2413.2	121.46	2432.9	2554.4	0.4226	8.6520	8.9748
5.0	32.88	0.001005	28.19	137.81	2317.2	2420.5	137.82	2423.7	2562.3	0.4764	8.6187	8.9691
7.5	40.28	0.001008	19.24	168.78	2301.7	2438.3	168.79	2406.0	2574.8	0.5764	8.4739	8.9315
10	45.81	0.001010	14.67	191.83	2284.1	2457.9	191.83	2390.8	2584.7	0.6483	8.5089	8.9302
15	53.97	0.001014	10.02	229.82	2252.8	2488.7	229.94	2373.3	2599.1	0.7349	8.2536	8.9881
20	60.06	0.001017	7.649	253.38	2235.4	2496.7	251.48	2358.3	2609.7	0.8320	7.9366	9.0083
25	64.97	0.001020	6.284	271.90	2221.2	2493.1	271.93	2348.3	2618.2	0.8911	6.9380	7.8314
30	69.10	0.001022	5.329	289.20	2179.2	2468.4	289.23	2336.1	2625.3	0.9409	6.8247	7.7686
40	75.87	0.001027	3.893	317.53	2139.5	2477.8	317.58	2319.2	2638.8	1.0299	6.6641	7.6700
50	81.33	0.001030	3.240	340.44	2143.4	2482.9	340.49	2305.4	2645.9	1.0910	6.5029	7.5839
75	91.78	0.001037	2.217	384.31	2102.4	2496.7	384.38	2278.6	2665.0	1.2130	6.2434	7.4964
Press. (MPa)												
0.100	99.63	0.001043	1.8948	417.36	2088.7	2506.1	417.46	2258.0	2679.5	1.3008	6.0568	7.3584
0.125	105.99	0.001048	1.3749	444.19	2088.3	2513.3	444.32	2241.0	2685.4	1.3760	5.9104	7.2844
0.150	111.37	0.001053	1.1393	466.94	2082.7	2519.7	467.11	2226.5	2693.6	1.4326	5.7887	7.2233
0.175	116.06	0.001057	1.0036	486.88	2088.1	2524.9	486.99	2213.6	2700.6	1.4809	5.6888	7.1717
0.200	120.23	0.001061	0.8857	504.49	2025.0	2529.5	504.78	2201.8	2706.7	1.5301	5.5870	7.1271
0.225	124.08	0.001064	0.7953	520.47	2013.1	2533.6	520.72	2191.3	2712.1	1.5706	5.5179	7.0878
0.250	127.44	0.001067	0.7187	535.10	2002.1	2537.2	535.37	2181.5	2716.8	1.6072	5.4459	7.0527
0.275	130.80	0.001070	0.6573	548.59	1991.8	2540.3	548.89	2172.4	2721.3	1.6408	5.3804	7.0209
0.300	133.51	0.001073	0.6088	561.15	1982.4	2543.8	561.47	2163.8	2725.3	1.6708	5.3201	6.9919
0.325	136.38	0.001076	0.5620	572.98	1973.5	2546.4	573.25	2155.8	2729.0	1.7006	5.2646	6.9652
0.350	138.88	0.001079	0.5243	583.95	1965.0	2548.9	584.32	2148.1	2732.4	1.7275	5.2134	6.9409
0.375	141.32	0.001081	0.4914	594.40	1956.9	2551.3	594.81	2140.8	2735.6	1.7528	5.1647	6.9175
0.40	143.83	0.001084	0.4623	604.31	1949.2	2553.6	604.74	2133.8	2738.6	1.7768	5.1193	6.8959
0.43	146.33	0.001088	0.4148	622.77	1944.9	2557.6	623.25	2126.7	2743.9	1.8287	5.0719	6.8965
0.58	151.86	0.001093	0.3749	639.68	1931.8	2562.3	648.23	2118.5	2748.7	1.8687	4.9686	6.8213
0.75	155.48	0.001097	0.3427	655.32	1920.3	2564.3	665.93	2097.0	2753.0	1.8973	4.8920	6.7893
0.90	158.85	0.001101	0.3157	669.98	1897.5	2567.4	679.56	2096.2	2756.8	1.9112	4.8288	6.7600
0.95	162.81	0.001104	0.2937	683.38	1886.5	2570.1	684.28	2076.6	2760.3	1.9227	4.7702	6.7311
0.70	164.87	0.001108	0.2728	694.44	1876.1	2572.5	697.22	2068.3	2763.3	1.9323	4.7148	6.7080
0.75	167.78	0.001112	0.2556	708.84	1866.1	2574.7	709.47	2057.8	2766.4	1.9399	4.6647	6.6847
0.80	170.43	0.001115	0.2404	720.22	1856.4	2576.8	721.31	2048.0	2769.1	1.9462	4.6186	6.6628
0.85	172.94	0.001118	0.2270	731.37	1847.4	2578.7	732.32	2039.4	2771.6	1.9510	4.5771	6.6421
0.90	175.38	0.001121	0.2150	741.83	1838.8	2580.5	742.83	2031.1	2773.9	1.9546	4.5380	6.6236
0.95	177.69	0.001124	0.2042	751.95	1830.2	2582.1	753.03	2023.1	2776.1	1.9573	4.4869	6.6041
1.00	179.81	0.001127	0.19444	761.68	1822.0	2583.6	762.81	2015.2	2778.1	1.9591	4.4478	6.5865
1.10	184.09	0.001133	0.17753	788.89	1806.3	2586.4	781.34	2006.4	2871.7	2.0792	4.3744	6.5136
1.20	187.96	0.001139	0.16353	792.29	1791.3	2588.6	798.45	1998.2	2784.8	2.2166	4.3067	6.4335
1.30	191.64	0.001144	0.15133	815.44	1777.3	2591.0	814.85	1972.7	2787.6	2.2915	4.2438	6.4483

Πίνακας Α.2: (συνέχεια)

Saturated water-Pressure table (Concluded)												
		Specific volume (m ³ /kg)		Internal energy (kJ/kg)			Enthalpy (kJ/kg)			Entropy kJ/(kg · K)		
Press	Sat. Tem.	Sat. liquid	Sat. vapor	Sat. liquid	Evap.	Sat. vapor	Sat. liquid	Evap.	Sat. vapor	Sat. liquid	Evap.	Sat. vapor
P _{sat} (MPa)	t (°C)	v _f	v _g	u _f	u _{fg}	u _g	h _f	h _{fg}	h _g	s _f	s _{fg}	s _g
1.40	195.07	0.001149	0.14084	828.70	1764.1	2592.8	830.30	1957.7	27900	2.2842	4.1850	6.4693
1.50	198.32	0.001154	0.13177	843.16	1751.3	2594.5	844.89	1947.3	2792.2	2.3150	4.1298	6.4448
175	205.76	0.001166	0.11349	876.46	1721.4	2597.8	878.50	1917.9	2796.4	2.3851	4.0044	6.3896
2.00	212.42	0.001177	0.09963	906.44	1693.8	2600.3	908.79	1890.7	2799.5	2.4474	3.8935	6.3409
2.25	218.45	0.001187	0.08875	933.83	1668.2	2602.0	936.49	1865.2	2801.7	2.5035	3.7937	6.2972
2.5	223.99	0.001197	0.07998	959.11	1644.0	2603.1	962.11	1841.0	2803.1	2.5547	3.7028	6.2575
3.0	233.90	0.001217	0.06668	1004.78	1599.3	2604.1	1008.42	1795.7	2804.2	2.6457	3.5412	6.1869
35	242.60	0.001235	0.05707	1045.43	1558.3	2603.7	1049.75	1753.7	2803.4	2.7253	3.4000	6.1253
4	250.40	0.001252	0.04978	1082.31	1520.0	2602.3	1087.31	1714.1	2801.4	2.7964	3.2737	6.0701
5	263.99	0.001286	0.03944	1147.81	1449.3	2597.1	1154.23	1640.1	2794.3	2.9202	3.0532	5.9734
6	275.64	0.001319	0.03244	1205.44	1384.3	2589.7	1213.35	1571.0	2784.3	3.0267	2.8625	5.8892
7	285.88	0.001351	0.02737	1257.55	1323.0	2580.5	1267.00	1505.1	2772.1	3.1211	2.6922	5.8133
8	295.06	0.001384	0.02352	1305.57	1264.2	2569.8	1316.64	1441.3	2758.0	3.2068	2.5364	5.7432
9	303.40	0.001418	0.02048	1350.51	1207.3	2557.8	1363.26	1378.9	2742.1	3.2858	2.3915	5.6722
10	311.06	0.001452	0.018026	1393.04	1151.4	2544.4	1407.56	1317.1	2724.7	3.3596	2.2544	5.6141
11	318.15	0.001489	0.015987	1433.7	1096.0	2529.8	1450.1	1255.5	2705.6	3.4295	2.1233	5.5527
12	324.75	0.001527	0.014263	1473.0	1040.7	2513.7	1491.3	1193.3	2684.9	3.4962	1.9962	5.4924
13	330.93	0.001567	0.012780	1511.1	985.0	2496.1	1531.5	1130.7	2662.2	3.5606	1.8718	5.4323
14	336.75	0.001611	0.011485	1548.6	928.2	2476.8	1571.1	1066.5	2637.6	3.6232	1.7485	5.3717
15	342.24	0.001658	0.010337	1585.6	869.8	2455.5	1610.5	1000.0	2610.5	3.6848	1.6249	5.3098
16	347.44	0.001711	0.009306	1622.7	809.0	2431.7	1650.1	930.6	2580.6	3.7461	1.4994	5.2455
17	352.37	0.001770	0.008364	1660.2	744.8	2405.0	1690.3	856.9	2547.2	3.8079	1.3698	5.1777
18	357.06	0.001840	0.007489	1698.9	675.4	2374.3	1732.0	777.1	2509.1	3.8715	1.2329	5.1044
19	361.54	0.001924	0.006657	1739.9	598.1	2338.1	1776.5	688.0	2464.5	3.9388	1.0839	5.0228
20	365.81	0.002036	0.005834	1785.6	507.5	2293.0	1826.3	583.4	2409.7	4.0139	0.9130	4.9269
21	369.89	0.002207	0.004952	1842.1	388.5	2230.6	1888.4	446.2	2334.6	4.1075	0.6938	4.8013
22	373.80	0.002742	0.003568	1961.9	125.2	2087.1	2022.2	143.4	2165.6	4.3110	0.2216	4.5327
22.09	374.14	0.003155	0.003155	2029.6	0	2029.6	2099.3	0	2099.3	4.4298	0	4.4298

Πίνακας Α.3: Υαλοβάρος αερός

t (°C)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg·K)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg·K)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg·K)
P = 0.01MPa (45.81°C)¹				P = 0.05MPa (81.33°C)				P = 0.10MPa (99.63°C)				
Sat. ²	14.874	2437.9	2584.7	8.1502	3.240	2483.9	2643.9	7.9939	1.6940	2506.1	2675.5	7.9594
50	14.869	2443.9	2492.6	8.1749								
100	17.196	2515.5	2687.5	8.4479	3.418	2511.6	2682.5	7.6947	1.6938	2506.7	2676.3	7.9614
150	19.512	2587.9	2783.0	8.6882	3.889	2585.6	2780.1	7.9401	1.9364	2582.8	2776.4	7.6134
200	21.825	2661.3	2879.5	8.9038	4.356	2659.9	2877.7	8.1580	2.172	2658.1	2875.3	7.8343
250	24.136	2736.0	2977.3	9.1002	4.820	2735.0	2976.0	8.3556	2.406	2733.7	2974.3	8.0333
300	26.445	2812.1	3076.5	9.2813	5.284	2811.3	3075.5	8.5373	2.639	2810.4	3074.3	8.2198
400	31.043	2948.9	3279.6	9.6077	6.309	2968.5	3278.9	8.8642	3.103	2967.9	3278.2	8.5433
500	35.679	3132.3	3489.1	9.8978	7.134	3132.0	3488.7	9.1546	3.468	3131.6	3488.1	8.8342
600	40.295	3302.5	3705.4	10.1608	8.057	3302.2	3705.1	9.4178	4.028	3301.9	3704.4	9.0896
700	44.911	3479.6	3928.7	10.4028	8.981	3479.4	3928.5	9.6599	4.490	3479.2	3928.2	9.3398
800	49.526	3663.8	4159.0	10.6241	9.904	3663.6	4158.9	9.8852	4.952	3663.5	4158.6	9.5682
900	54.141	3855.0	4396.4	10.8296	10.828	3854.9	4396.3	10.0967	5.414	3854.8	4396.1	9.7787
1000	58.757	4053.0	4640.6	11.0793	11.751	4052.9	4640.5	10.2964	5.875	4052.8	4640.3	9.9764
1100	63.372	4257.5	4891.2	11.2287	12.674	4257.4	4891.1	10.4839	6.337	4257.3	4891.0	10.1659
1200	67.987	4467.9	5147.8	11.4091	13.597	4467.8	5147.7	10.6662	6.799	4467.7	5147.6	10.3463
1300	72.602	4683.7	5409.7	11.5811	14.521	4683.6	5409.6	10.8382	7.260	4683.5	5409.5	10.5183
P = 0.20MPa (120.23°C)				P = 0.30MPa (133.85°C)				P = 0.40MPa (143.63°C)				
Sat.	0.8837	2529.5	2706.7	7.1272	0.6088	2543.6	2723.5	6.9919	0.4623	2531.6	2738.6	6.9939
150	0.9596	2576.9	2788.8	7.2795	0.6339	2570.8	2761.0	7.0778	0.4708	2564.5	2752.8	6.9299
200	1.0803	2654.4	2870.5	7.5066	0.7163	2650.7	2865.6	7.3115	0.5342	2646.8	2860.5	7.1706
250	1.1988	2731.3	2951.0	7.7086	0.7964	2728.7	2967.6	7.5166	0.5961	2726.1	2964.2	7.3789
300	1.3162	2808.6	3031.8	7.8926	0.8733	2806.7	3069.3	7.7022	0.6598	2804.8	3066.8	7.5602
400	1.5493	2966.7	3236.6	8.2318	1.0313	2963.6	3275.0	8.0330	0.7726	2964.4	3273.4	7.8893
500	1.7814	3130.8	3487.1	8.5133	1.1867	3130.0	3486.0	8.3251	0.8893	3129.2	3484.9	8.1913
600	2.013	3301.4	3794.0	8.7770	1.3414	3300.8	3703.2	8.5892	1.0093	3300.1	3702.4	8.4558
700	2.244	3478.8	3927.6	9.0194	1.4957	3478.4	3927.1	8.8319	1.1233	3477.9	3926.5	8.6987
800	2.475	3663.1	4158.2	9.2449	1.6499	3662.9	4157.8	9.0576	1.2372	3662.4	4157.3	8.9244
900	2.705	3854.5	4395.8	9.4566	1.8041	3854.2	4395.4	9.2892	1.3509	3853.9	4395.1	9.1362
1000	2.937	4052.5	4640.0	9.6563	1.9581	4052.3	4639.7	9.4680	1.4685	4052.0	4639.4	9.3360
1100	3.168	4257.0	4890.7	9.8448	2.1121	4256.8	4890.4	9.6385	1.5840	4256.5	4890.2	9.5256
1200	3.399	4467.5	5147.5	10.0262	2.2661	4467.2	5147.1	9.8389	1.6996	4467.0	5146.8	9.7000
1300	3.630	4683.2	5409.3	10.1982	2.4201	4683.0	5409.0	10.0110	1.8151	4682.8	5408.8	9.8780
P = 0.50MPa (151.86°C)				P = 0.60MPa (158.85°C)				P = 0.80MPa (170.43°C)				
Sat.	0.3749	2561.2	2748.7	6.8213	0.3157	2567.4	2756.8	6.7800	0.2404	2576.8	2769.1	6.6628
200	0.4349	2641.9	2855.4	7.0592	0.3520	2638.9	2850.1	6.9665	0.2608	2630.6	2839.3	6.8158
250	0.4744	2723.5	2960.7	7.2709	0.3938	2700.9	2957.2	7.1816	0.2931	2715.5	2950.0	7.0384
300	0.5226	2802.9	3064.2	7.4599	0.4394	2801.0	3061.6	7.3724	0.3241	2797.2	3066.5	7.2328
350	0.5701	2882.6	3167.7	7.6309	0.4792	2881.2	3165.7	7.5464	0.3544	2878.2	3161.7	7.4089
400	0.6173	2963.2	3271.9	7.7938	0.5137	2962.1	3270.3	7.7079	0.3843	2959.7	3267.1	7.5716
500	0.7109	3128.4	3483.9	8.0873	0.5920	3127.6	3482.8	8.0021	0.4433	3126.0	3480.6	7.8633
600	0.8041	3299.6	3701.7	7.3322	0.6697	3299.1	3700.9	8.2674	0.5018	3297.9	3699.4	8.1333
700	0.8969	3477.5	3923.9	8.5952	0.7472	3477.0	3923.3	8.5107	0.5601	3476.2	3924.2	8.3790
800	0.9896	3662.1	4156.9	8.8211	0.8248	3661.8	4156.5	8.7367	0.6181	3661.1	4155.6	8.6033
900	1.0822	3851.6	4394.7	9.0329	0.9017	3853.4	4394.4	8.9486	0.6761	3852.8	4393.7	8.8133
1000	1.1747	4051.8	4639.1	9.2328	0.9788	4051.5	4638.8	9.1485	0.7340	4051.0	4638.2	9.0153
1100	1.2672	4294.3	4889.9	9.4224	1.0539	4256.1	4889.6	9.3381	0.7919	4255.6	4889.1	9.2090
1200	1.3596	4466.8	5146.6	9.6029	1.1330	4466.5	5146.3	9.5185	0.8497	4466.1	5145.9	9.3853
1300	1.4521	4682.5	5408.6	9.7749	1.2101	4682.3	5408.3	9.6906	0.9076	4681.8	5407.9	9.5575

Πίνακας Α.3: (Συνέχεια)

t (°C)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg·K)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg·K)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg·K)
P = 1.00MPa (179.91°C)				P = 1.20MPa (187.99°C)				P = 1.40MPa (195.0°C)				
Sat.	0.19444	2303.6	2778.1	4.5065	0.16333	2388.8	2784.8	4.5233	0.14034	2592.8	2790.0	4.4973
200	0.20660	2621.9	2827.9	4.6940	0.16930	2612.8	2813.9	4.5898	0.14303	2603.1	2803.3	4.4973
250	0.23327	2709.9	2942.6	4.9247	0.19234	2704.2	2895.0	4.8204	0.16330	2698.3	2927.3	4.7467
300	0.2579	2793.2	3051.3	5.1229	0.2138	2789.2	3045.8	5.0317	0.18228	2785.2	3040.4	4.9534
350	0.2823	2875.2	3157.7	5.3011	0.2348	2872.2	3193.6	5.2121	0.2005	2869.2	3149.5	5.1360
400	0.3066	2957.3	3263.9	5.4651	0.2548	2954.9	3340.7	5.3774	0.2178	2952.5	3257.5	5.3026
500	0.3541	3134.4	3478.5	5.7622	0.2946	3122.8	3476.3	5.6759	0.2521	3121.1	3474.1	5.6037
600	0.4011	3296.8	3697.9	6.0290	0.3339	3295.6	3696.3	5.9435	0.2860	3294.4	3694.8	5.8710
700	0.4478	3475.3	3923.1	6.2731	0.3729	3474.4	3922.0	6.1881	0.3195	3473.6	3920.8	6.1160
800	0.4943	3660.4	4154.7	6.4996	0.4118	3659.7	4153.8	6.4148	0.3528	3659.0	4153.0	6.3431
900	0.5407	3852.2	4392.9	6.7118	0.4508	3851.6	4392.2	6.6272	0.3861	3851.1	4391.5	6.5536
1000	0.5871	4050.5	4637.6	6.9119	0.4892	4050.0	4637.0	6.8274	0.4192	4049.5	4636.4	6.7559
1100	0.6335	4255.1	4888.6	7.1017	0.5278	4254.6	4888.0	7.0172	0.4524	4254.1	4887.5	6.9457
1200	0.6798	4465.6	5145.4	7.2822	0.5665	4465.1	5144.9	7.1977	0.4855	4464.7	5144.4	7.1362
1300	0.7261	4681.3	5407.4	7.4543	0.6051	4680.9	5407.0	7.3688	0.5186	4680.4	5406.5	7.2984
P = 1.60MPa (201.41°C)				P = 1.80 MPa (207.15°C)				P = 2.00 MPa (212.42°C)				
Sat.	0.12380	2396.0	2794.0	4.4318	0.11042	2398.4	2797.1	4.3794	0.09963	2600.3	2799.5	4.3409
225	0.13287	2644.7	2857.3	4.5518	0.11673	2636.6	2846.7	4.4808	0.10377	2628.3	2835.8	4.4147
250	0.14184	2682.3	2919.2	4.6732	0.12497	2669.0	2911.9	4.6066	0.11144	2670.6	2902.5	4.5453
300	0.15862	2781.1	3034.8	4.8844	0.14021	2736.9	3029.2	4.8226	0.12547	2772.6	3033.5	4.7664
350	0.17456	2866.1	3145.4	5.0694	0.15457	2803.0	3141.2	5.0100	0.13857	2839.8	3137.0	4.9563
400	0.19008	2950.1	3254.2	5.2374	0.16847	2947.7	3250.9	5.1794	0.15120	2945.2	3247.6	5.1271
500	0.2203	3119.5	3473.0	5.5390	0.19530	3117.9	3469.8	5.4825	0.17568	3116.2	3467.6	5.4317
600	0.2500	3293.1	3693.2	5.8080	0.2220	3292.1	3691.7	5.7323	0.19960	3290.9	3690.1	5.7034
700	0.2794	3472.7	3919.7	6.0535	0.2482	3471.8	3918.9	5.9983	0.2232	3470.8	3917.4	5.9467
800	0.3086	3658.3	4152.1	6.2808	0.2742	3657.6	4151.2	6.2338	0.2467	3657.0	4150.3	6.1765
900	0.3377	3850.5	4390.8	6.4935	0.3001	3848.9	4390.1	6.4386	0.2700	3849.3	4389.4	6.3895
1000	0.3668	4049.0	4635.8	6.6938	0.3260	4048.5	4635.2	6.6391	0.2933	4048.0	4634.6	6.5901
1100	0.3958	4253.7	4887.0	6.8837	0.3518	4253.2	4886.4	6.8290	0.3166	4252.7	4885.9	6.7600
1200	0.4248	4464.2	5143.9	7.0643	0.3776	4463.7	5143.4	7.0096	0.3398	4463.3	5142.9	6.9607
1300	0.4538	4679.9	5406.0	7.2364	0.4034	4679.5	5405.6	7.1818	0.3631	4679.0	5405.1	7.1329
P = 2.50 MPa (223.99°C)				P = 3.00 MPa (233.96°C)				P = 3.50 MPa (242.86°C)				
Sat.	0.07968	2603.1	2805.1	4.2575	0.06668	2604.1	2804.2	4.1869	0.05707	2603.7	2803.4	4.1250
225	0.08027	2605.6	2806.3	4.2639								
250	0.080700	2662.6	2880.1	4.4065	0.07058	2644.0	2855.8	4.2872	0.05872	2623.7	2829.2	4.1749
300	0.08890	2761.6	3008.8	4.6438	0.08114	2750.1	2993.5	4.5390	0.06862	2738.0	2977.5	4.4461
350	0.10076	2851.9	3126.3	4.8403	0.09053	2843.7	3115.3	4.7428	0.07678	2835.3	3104.0	4.6579
400	0.12010	2939.1	3239.3	5.0148	0.09936	2932.8	3239.9	4.9212	0.08453	2926.4	3222.3	4.8405
450	0.13014	3024.9	3350.8	5.1746	0.10787	3020.4	3344.0	5.0834	0.09196	3015.3	3337.2	5.0052
500	0.13993	3112.1	3462.1	5.3234	0.11619	3108.0	3458.5	5.2338	0.09918	3103.0	3450.9	5.1572
600	0.15930	3288.0	3686.3	5.5960	0.13243	3285.0	3682.3	5.5085	0.11324	3282.1	3678.4	5.4339
700	0.17632	3468.7	3914.5	5.8435	0.14638	3466.5	3911.7	5.7571	0.12699	3464.3	3908.8	5.6837
800	0.19716	3644.3	4148.2	6.0720	0.16414	3653.5	4145.9	5.9862	0.14056	3651.8	4143.7	5.9134
900	0.21590	3847.9	4387.6	6.2853	0.17980	3846.5	4383.9	6.1999	0.15402	3843.0	4384.1	6.1276
1000	0.2346	4048.7	4633.1	6.4861	0.19841	4045.4	4631.6	6.4039	0.16743	4044.1	4630.1	6.3288
1100	0.2532	4251.5	4884.6	6.6762	0.21098	4250.3	4883.3	6.5912	0.18089	4249.2	4881.9	6.5192
1200	0.2718	4462.1	5141.7	6.8569	0.22623	4460.9	5140.5	6.7720	0.19415	4459.8	5139.3	6.7000
1300	0.2905	4677.8	5404.0	7.0291	0.24206	4676.6	5402.8	6.9442	0.20749	4675.5	5401.7	6.8723

Πίνακας Α.3: (Συνέχεια)

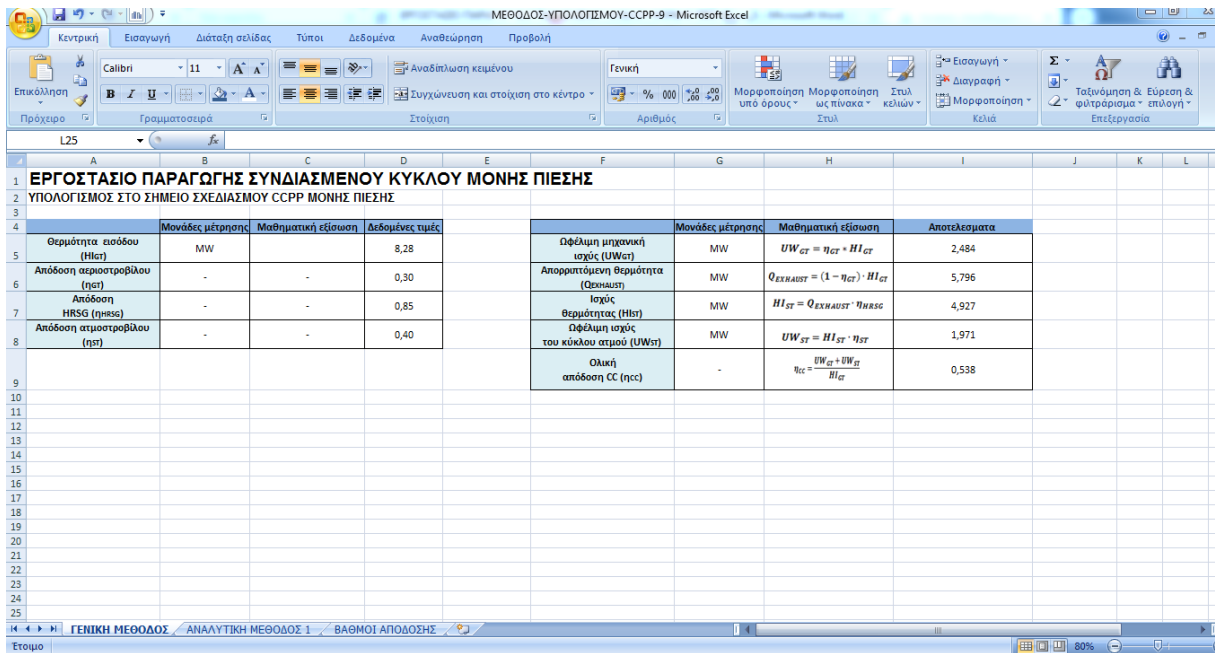
	P = 4.0 MPa (250.40°C)			P = 4.5 MPa (257.49°C)			P = 5.0 MPa (263.99°C)					
265	0.04978	2602.3	2801.4	6.0701	0.04498	2600.1	2798.3	6.0198	0.03944	2597.1	2794.3	5.9734
275	0.05457	2667.9	2886.2	6.2283	0.04790	2680.3	2863.2	6.1401	0.04341	2631.3	2838.3	6.0944
300	0.05884	2724.3	2960.7	6.3615	0.05135	2712.0	2943.1	6.2828	0.04532	2698.0	2924.5	6.2084
350	0.06643	2826.7	3092.5	6.5821	0.05840	2817.8	3080.6	6.5131	0.05184	2808.7	3068.4	6.4493
400	0.07341	2919.9	3213.6	7.7690	0.06475	2913.3	3204.7	6.7047	0.05781	2906.6	3195.7	6.6489
450	0.08002	3010.2	3330.3	6.9363	0.07074	3066.0	3323.3	6.8746	0.06330	2999.7	3316.2	6.8186
500	0.08643	3099.5	3444.3	7.0901	0.07631	3093.3	3439.6	7.0301	0.06857	3091.0	3433.8	6.9739
600	0.09885	3279.1	3674.4	7.3688	0.08769	3276.0	3670.5	7.3100	0.07889	3273.0	3666.5	7.2589
700	0.11093	3462.1	3903.9	7.6198	0.09847	3459.9	3903.0	7.5631	0.08949	3457.6	3900.1	7.5122
800	0.12287	3650.0	4141.5	7.8502	0.10911	3648.3	4139.3	7.7942	0.09811	3646.6	4137.1	7.7440
900	0.13469	3843.6	4382.3	8.0647	0.11965	3842.2	4380.6	8.0091	0.10762	3840.3	4378.8	7.9589
1000	0.14645	4042.9	4628.7	8.2662	0.13013	4041.6	4627.2	8.2108	0.11703	4040.4	4625.7	8.1612
1100	0.15817	4248.0	4880.6	8.4567	0.14056	4246.8	4879.3	8.4015	0.12648	4245.6	4878.0	8.3530
1200	0.16987	4458.6	5138.1	8.6376	0.15098	4447.5	5136.9	8.5825	0.13587	4446.3	5135.7	8.5331
1300	0.18156	4674.3	5400.3	8.8100	0.16139	4673.1	5399.4	8.7549	0.14526	4672.0	5398.2	8.7089
	P = 6.0 MPa (275.64°C)			P = 7.0 MPa (285.88°C)			P = 8.0 MPa (295.06°C)					
265	0.05244	2589.7	2784.3	5.8893	0.02737	2580.5	2772.1	5.8133	0.02352	2569.8	2758.0	5.7432
300	0.05616	2667.2	2884.2	6.0674	0.02947	2632.2	2838.4	5.9305	0.02436	2590.9	2785.0	5.7906
350	0.06223	2789.6	3043.0	6.3333	0.03324	2769.4	3016.0	6.2383	0.02993	2747.7	2867.3	6.1304
400	0.06739	2892.9	3177.2	6.5408	0.03693	2878.6	3138.1	6.4478	0.03432	2853.8	3138.3	6.3634
450	0.07214	2988.9	3301.8	6.7193	0.04116	2978.0	3287.1	6.6327	0.03817	2966.7	3272.0	6.5351
500	0.07665	3082.2	3422.2	6.8803	0.04484	3073.4	3410.3	6.7975	0.04173	3064.3	3398.3	6.7240
550	0.08101	3174.6	3540.6	7.0288	0.04819	3167.2	3530.9	6.9486	0.04516	3158.8	3521.0	6.8778
600	0.08525	3266.9	3658.4	7.1677	0.05166	3260.7	3650.7	7.0894	0.04865	3254.4	3642.0	7.0206
700	0.09332	3473.1	3894.2	7.4234	0.06283	3468.5	3888.3	7.3476	0.05681	3443.9	3882.4	7.2812
800	0.098160	3643.1	4132.7	7.6366	0.06881	3639.5	4128.2	7.5822	0.06097	3636.0	4123.8	7.5173
900	0.09898	3837.8	4373.3	7.8227	0.07669	3835.0	4371.8	7.7991	0.06702	3832.1	4368.3	7.7351
1000	0.09749	4037.8	4622.7	8.0131	0.08390	4035.3	4619.8	8.0020	0.07301	4032.8	4616.9	7.9384
1100	0.10336	4243.3	4873.4	8.2661	0.09027	4240.9	4872.8	8.1933	0.07896	4238.6	4870.3	8.1300
1200	0.11121	4454.0	5133.3	8.4434	0.09703	4431.7	5130.9	8.3747	0.08489	4449.5	5128.5	8.3115
1300	0.12106	4669.6	5396.0	8.6199	0.10377	4667.3	5393.7	8.5475	0.09080	4665.0	5391.9	8.4842
	P = 9.0 MPa (303.40°C)			P = 10.0 MPa (311.06°C)			P = 12.5 MPa (327.8°C)					
265	0.05048	2537.8	2742.1	5.6772	0.01802	2544.4	2724.7	5.6141	0.01349	2508.1	2673.8	5.4624
325	0.05227	2646.6	2836.0	5.8712	0.01986	2610.4	2809.1	5.7368				
350	0.05380	2724.4	2956.6	6.0361	0.02242	2699.2	2923.4	5.9443	0.01612	2624.6	2826.2	5.7118
400	0.05893	2848.4	3117.8	6.2834	0.02641	28324	3096.5	6.2120	0.02000	2789.3	3039.3	6.0417
450	0.06330	2933.2	3256.6	6.4844	0.02879	2943.4	3240.9	6.4190	0.02299	2912.3	3199.8	6.2719
500	0.06677	3083.2	3386.1	6.6578	0.03279	3045.8	3373.7	6.5966	0.02560	3021.7	3341.8	6.4618
550	0.06987	3152.2	3511.0	6.8142	0.03664	3144.6	3500.9	6.7561	0.02801	3133.0	3475.2	6.6390
600	0.04283	3248.1	3631.7	6.9589	0.03937	3241.7	3623.3	6.9029	0.03029	3225.4	3604.0	6.7810
650	0.04574	3343.6	3755.3	7.0943	0.04180	3338.2	3748.2	7.0366	0.03248	3334.4	3770.4	6.9218
700	0.04857	3439.3	3876.5	7.2221	0.04398	3434.7	3870.5	7.1687	0.03460	3422.9	3855.3	7.0536
800	0.05409	3632.5	4119.3	7.4996	0.04899	3628.9	4114.8	7.4077	0.03869	3620.0	4103.6	7.2905
900	0.05930	3829.2	4364.8	7.6783	0.05349	3826.3	4361.2	7.6272	0.04267	3819.1	4352.5	7.5182
1000	0.06485	4030.3	4614.0	7.8821	0.05832	4023.8	4611.0	7.8315	0.04638	4031.6	4603.8	7.7237
1100	0.07016	4236.3	4867.7	8.0740	0.06312	4234.0	4865.1	8.0237	0.05045	4228.2	4858.8	7.9168
1200	0.07544	4447.2	5126.2	8.2566	0.06789	4444.9	5121.8	8.2035	0.05430	4439.3	5118.0	8.0937
1300	0.08072	4662.7	5389.2	8.4284	0.07265	4660.5	5387.0	8.3783	0.05813	4654.8	5381.4	8.2717

Πίνακας Α.3: (Επιέγταση)

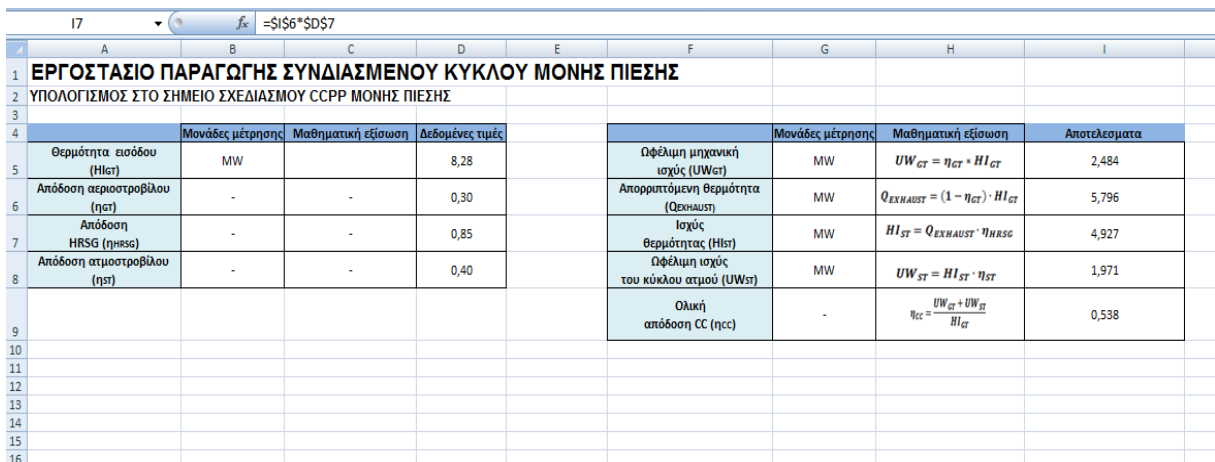
	P = 15.0 MPa (342.24°C)				P = 17.5 MPa (354.75°C)				P = 20.0 MPa (365.81°C)			
5mL	0.010337	2453.5	2610.5	5.3008	0.007920	2360.2	25288	5.1419	0.005834	2293.0	2409.7	4.9069
150	0.011470	2520.4	2692.4	5.4421								
400	0.015649	2740.7	2975.5	5.8811	0.012447	2685.0	2902.9	5.7213	0.009943	2619.3	2818.1	5.5540
450	0.018443	28795	3156.3	6.1404	0.015374	2844.3	3109.7	6.0184	0.012895	2905.3	3066.1	5.9017
500	0.020880	2996.6	3308.6	6.3443	0.017358	2970.3	3274.1	6.2383	0.014768	2942.9	3238.3	6.1401
550	0.02295	3104.7	3448.6	6.5199	0.019288	3083.9	3421.4	6.4290	0.016855	3062.4	3393.5	6.3548
600	0.02491	3208.6	3582.3	6.6776	0.02106	3191.5	3560.1	6.5866	0.018178	3174.0	3537.6	6.5048
650	0.02680	3310.3	3712.3	6.8224	0.02274	3296.0	3693.9	6.7357	0.019669	3281.4	3675.9	6.6582
700	0.02861	3410.9	3840.1	6.9572	0.02434	3398.7	3824.6	6.8736	0.02113	3386.4	3809.0	6.7993
800	0.03210	3610.9	40934	7.2040	0.02738	3601.8	4081.1	7.1344	0.02385	3592.7	4068.7	7.0544
900	0.03546	3811.9	4343.8	7.4279	0.03031	3804.7	4335.1	7.3597	0.02645	3797.5	4326.4	7.2830
1000	0.03875	4014	4596.6	7.6348	0.03316	4009.3	4589.5	7.5589	0.02897	4003.1	4582.5	7.4925
1100	0.04200	4222.6	4852.6	7.8283	0.03597	4216.9	4846.4	7.7531	0.03145	4211.3	4840.2	7.6874
1200	0.04525	4433.8	5113	8.0108	0.03876	4428.3	5106.6	7.9360	0.03391	4422.8	5101.0	7.8701
1300	0.04845	4649.1	5376.0	8.1840	0.04154	4643.5	5370.5	8.1093	0.03636	4638.0	5365.1	8.0442
	P = 25.0 MPa				P = 30.0 MPa				P = 35.0 MPa			
375	0.0019731	1798.7	1848.0	4.0320	0.001789	1737.8	1791.5	3.9305	0.001700	1702.9	1762.4	3.8722
400	0.006904	2430.1	25802	5.1418	0.002790	2067.4	2151.1	4.4728	0.003100	1914.1	1987.6	4.2126
425	0.007881	2609.2	2806.3	5.4723	0.003303	2455.1	2614.3	5.1504	0.004238	2253.4	23734	4.7047
450	0.009162	2720.7	2949.7	5.6744	0.003735	2619.3	2821.4	5.4424	0.004961	2498.7	2672.4	5.1962
500	0.011123	2884.3	3162.4	5.9592	0.004798	2820.7	3031.1	5.7905	0.006827	2751.9	2994.4	5.6282
550	0.012724	3017.3	3335.6	6.1765	0.010168	2970.3	3273.4	6.0343	0.008345	2921.0	3213.0	5.9026
600	0.014137	3157.9	3491.4	6.3602	0.011446	3100.0	3443.9	6.2-31	0.009527	3062.0	3395.5	6.1179
650	0.015433	3251.6	3637.4	6.5229	0.012496	3221.0	3598.9	6.4058	0.010875	3189.8	3559.9	6.3010
700	0.016646	3361.3	3777.5	6.6707	0.013661	3335.4	3745.0	6.5606	0.011533	3309.8	3713.5	6.4631
800	0.018913	3574.3	4047.1	6.9345	0.015623	3555.3	4034.3	6.8333	0.013278	3536.7	4001.5	6.7450
900	0.021043	3783.0	4309.1	7.1690	0.017448	3768.3	4291.9	7.0718	0.014863	3754.0	4274.9	6.9306
1000	0.02310	3990.9	4568.5	7.3803	0.019196	3978.8	4534.7	7.2867	0.016410	3969.7	4541.1	7.2094
1100	0.02512	4200.2	4828.3	7.5765	0.020903	4189.2	4816.5	7.4845	0.017895	4178.5	4804.6	7.4037
1200	0.02711	4412.0	5089.9	7.7605	0.022589	4401.3	5079.0	7.6692	0.019360	4390.7	5068.3	7.5910
1300	0.02910	4626.9	5354.4	7.9342	0.024266	4616.0	5344.0	7.8432	0.020815	4605.1	5333.6	7.7653
	P = 40.0 MPa				P = 50.0 MPa				P = 60.0 MPa			
375	0.0016407	1677.1	1742.8	3.8290	0.001589	1638.6	1716.6	3.7839	0.001502	1609.4	1669.5	3.7141
400	0.0019077	1854.6	1930.9	4.1135	0.001730	1788.1	1874.6	4.0031	0.001633	1745.4	1843.4	3.9318
425	0.002331	2096.9	2198.1	4.3029	0.002007	1939.7	2060.0	4.2734	0.001816	1892.7	2001.7	4.1620
450	0.002693	2365.1	2512.8	4.4939	0.002486	2159.6	2284.0	4.5884	0.002085	2053.9	2179.0	4.4121
500	0.003622	2678.4	2903.3	5.4700	0.003892	2525.5	2720.1	5.1728	0.003956	2390.6	2567.9	4.9321
550	0.004984	2889.7	3149.1	5.7785	0.005198	2763.6	3019.5	5.5485	0.005956	2658.8	2896.2	5.3441
600	0.006094	3022.6	3346.4	6.0144	0.006112	2942.0	3247.6	5.8178	0.006834	2841.1	3151.3	5.6452
650	0.006963	3158.0	3520.6	6.2054	0.006966	3093.5	3441.8	6.0343	0.006995	3028.8	3364.5	5.8929
700	0.009941	3283.6	3681.2	6.3750	0.007727	32305	3616.8	6.2189	0.006272	3177.2	3553.5	6.0834
800	0.011523	3517.8	3978.7	6.6662	0.009076	3479.8	3933.6	6.5290	0.007459	3441.5	3689.1	6.4109
900	0.013862	3739.4	4257.9	6.9150	0.010383	3710.3	4224.4	6.7882	0.008308	3681.0	4191.5	6.6905
1000	0.014324	3954.6	4527.6	7.1356	0.011411	3930.3	4501.1	7.0146	0.009420	3906.4	4475.2	6.9127
1100	0.015843	4167.4	4793.1	7.3364	0.012496	4145.7	4770.5	7.2184	0.010409	4124.1	4748.6	7.1195
1200	0.016940	4380.1	5057.7	7.5224	0.013561	4359.1	5037.2	7.4058	0.011317	4338.2	5017.2	7.3083
1300	0.018329	4594.3	5323.5	7.6949	0.014616	4572.8	5309.6	7.5808	0.012215	45514	5284.3	7.4837

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: EXCEL ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

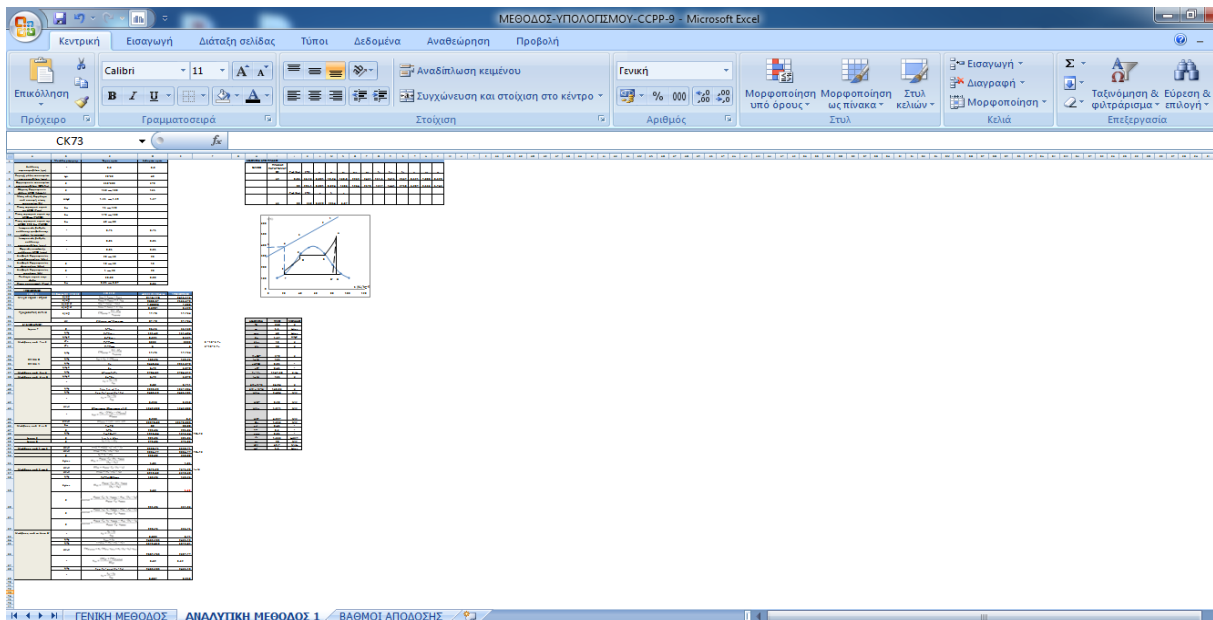
Στο παράρτημα Β παρατίθεται φωτογραφικό υλικό από το υπολογιστικό πρόγραμμα excelΠου υλοποιήθηκαν οι υπολογισμοί της παρούσας πτυχιακής εργασίας.



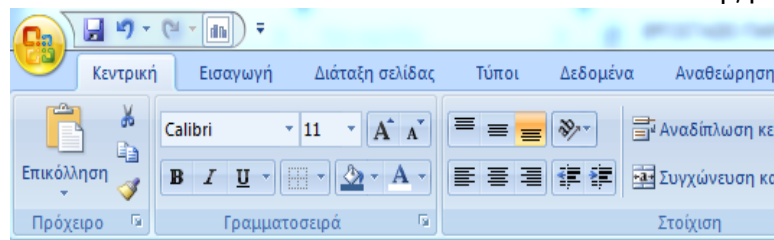
Εικόνα 1: Φύλλο 1 – Γενική μέθοδος



Εικόνα 2: Φύλλο 1 – Γενική μέθοδος



Εικόνα 3: Φύλλο 2 – Αναλυτικής μέθοδος



	A	B	C	D
1		Μονάδες μέτρησης	Έυρος τιμών	Δεδομένα τιμών
2	Απόδοση αεριοστρόβιλου (ηστ)	-	0,8	0,8
3	Παροχή μάζας καυσαερίων αεριοστρόβιλου (m _{κα})	kg/s	20-60	40
4	Θερμοκρασία καυσαερίων αεριοστρόβιλου (EGT=T _{αε})	C	350-600	370
5	Ελάχιστη θερμοκρασία εξόδου HRSG (t _{αε,εξ})	C	150 έως 180	165
6	Μέση ειδική θερμότητα υπό σταθερή πίεση καυσαερίων (C _p)	kJ/kgK	1,35 έως 1,39	1,37
7	Πίεση κορεσμού ατμού της HRSG (P _{HRSG})	bar	15 έως 120	
8	Πίεση κορεσμού ατμού της HRSGmax (P _{HRSGmax})	bar	170 έως 180	
9	Πίεση κορεσμού ατμού της HRSGe 220 bar (P _{HRSGe})	bar	40 έως 80	
10	Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης τροφοδοτικής αντλίας (η _{is,oump})	-	0,75	0,75
11	Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης ατμοστρόβιλου (ηστ,α)	-	0,85	0,85
12	Θερμικός συντελεστής απόδοσης HRSG (η _{HRSG})	-	0,85	0,85
13	Διαφορά θερμοκρασίας υπερθερμαντήρα (Δt _α)	C	20 έως 30	20
14	Διαφορά θερμοκρασίας εξατμιστήρα (Δt _{α,ε})	C	10 έως 30	10
15	Διαφορά θερμοκρασίας τυμπάνου (Δt _α)	C	1 έως 20	20
16	Ποιότητα ατμού στην έξοδο ατμοστρόβιλου (x)	-	≥0,88	0,88
17	Πίεση συμπυκνωτή (P _{κων})	bar	0,05 έως 0,07	0,06

ΔΕΔΟΜΕΝΑ	ΤΙΜΕΣ	ΜΟΝΑΔΕΣ
TA	350	K
m _α	5,5	kg/sec
m _{κα}	40	kg/sec
C _p	1,37	kJ/kgK
Δt _{α,ε}	10	K
Δt _α	20	K
t ₁ =EGT	370	K
t _s =t ₄	165	
n _{HRSG}	0,85	-
n _{ST}	0,45	-
h _c - h _c	1147,38	KJ/kg
t _s =t ₄	165	K
Δt ₁ =t ₁ -t ₃	64,94	K
Δt ₂ = t ₃ -t ₄	140,06	K
UW _{στ}	2,484	MW
H _{IGT}	8,28	MW
UW _{στ}	1,971	MW
H _{IST}	4,927	MW
Q _{εκ}	1,656	MW
n _{στ}	0,45	-
η _{στ}	0,3	-
η _{HRSG}	0,85	-
sfc	1,666	kg/kWh
c _{rs}	20	MW
LCV	42,7	MJ/kg

Εικόνα 4: Φύλλο 2 – Βασικά δεδομένα αναλυτικής μέθοδος

E37		f_x	=E35-E34	
A	B	C	D	E
ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ:				
ΣΗΜΕΙΟ	ΜΟΝΑΔΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ	ΣΧΕΣΕΙΣ	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ
Μίγμα νερού / ατμού	kJ/kg	$h_{fg} = h_{sat,g} - h_{sat,f}$	2415,176	2415,176
	kJ/kg	$h_{mix} = h_{sat,f} + x \cdot h_{fg}$	2566,87	2566,670
	kJ/kg K	$s_{fg} = s_{sat,g} - s_{sat,f}$	7,80823	7,808
	kJ/kg K	$s_{mix} = s_{sat,f} + x \cdot s_{fg}$	8,3291	8,329
Τροφοδοτική αντλία	kJ/kg	$CW_{pump} = \frac{0.1 \cdot \Delta P_{12}}{\eta_{is,pump}}$	17,76	17,764
	kW	$CW_{pump} = m \cdot CW_{pump}$	97,70	97,704
ΚΥΚΛΟΣ ΑΤΜΟΥ				
Σημείο F	C	$t_c = t_{sat,l}$	36,16	36,160
	kJ/kg	$h_c = h_{sat,l}$	151,49	151,494
	kJ/kg K	$s_c = s_{sat,l}$	0,521	0,521
Μετάβαση από F σε E	kPa	$P_c = P_{HRSG}$	8000	8000
	kPa	$P_r = P_{cond}$	6	6
Σημείο E Σημείο A	kJ/kg	$CW_{pump} = \frac{0.1 \cdot \Delta P_{12}}{\eta_{is,pump}}$	17,76	17,764
	kJ/kg	$h_g = h_f + CW_{pump}$	169,26	169,26
	kJ/kg	h_a	3448,64	2953,870
	kJ/kg K	s_a	6,79	6,070
Μετάβαση από E σε A	kJ/kg	$\Delta h_{HRSG} = h_a - h_g$	2784,61	2784,612
Μετάβαση από A σε G	kJ/kg K	$s_g = s_a$	6,79	6,070
	-	$x_G = \frac{s_G - s_F}{s_{fg}}$	0,80	0,711
	kJ/kg	$h_G = h_a + x_G \cdot h_{fg}$	2090,39	1867,904
	kJ/kg	$h_G = h_a - \eta_{is,ST} \cdot (h_a - h_G)$	2465,19	2465,185
	-	$x_G = \frac{h_G - h_F}{h_{fg}}$	0,958	0,958
	kWatt	GTOWER OUTPUT / STOWER OUTPUT = 1/2	1242,000	1242,000
	-	$\eta_{ST} = \frac{m_{st} \cdot (TW_{ST} - CW_{pump})}{HI_{HRSG}}$	0,200	0,2

Εικόνα 5: Φύλλο 2 – Βασικοί υπολογισμοί αναλυτικής μέθοδος

E56		f_x	=I29*130*(E49-I38)	
A	B	C	D	E
Μετάβαση από C σε B	bar	$P_c = P_B$	80	80,00
	C	$t_c = t_g$	295,06	295,06
	kJ/kg	$h_c = h_B = h_f$	1316,64	1316,64
Σημείο C	C	$t_2 = t_c + \Delta t_{2,c}$	305,06	305,06
Σημείο B	C	$t_D = t_c - \Delta t_D$	275,06	275,06
Μετάβαση από 1 έως 3	kWatt	$HI_{13} = \dot{m}_{EXH} \cdot C_p \cdot (t_1 - t_3)$	3558,71	3558,71
	kWatt	$HI_{1D} = \dot{m}_2 \cdot (h_A - h_D)$	9004,77	9004,77
	C	$t_A = t_1 - \Delta t_A$	350,00	350,00
	Kg/sec	$\dot{m}_{21} = \frac{\dot{m}_{EXH} \cdot C_p \cdot \Delta t_1 \cdot \eta_{HRSG}}{(h_A - h_C)}$	1,85	1,85
Μετάβαση από 3 έως 4	kWatt	$HI_{34} = \dot{m}_{EXH} \cdot C_p \cdot (t_3 - t_4)$	7675,29	7675,29
	kWatt	$HI_{DE} = \dot{m}_2 \cdot (h_D - h_E)$	6310,60	6310,60
	kJ/kg	$h_g = h_f + CW_{pump}$	169,26	169,26
	Kg/sec	$\dot{m}_{22} = \frac{\dot{m}_{EXH} \cdot C_p \cdot \Delta t_2 \cdot \eta_{HRSG}}{(h_C - h_E)}$	5,69	5,69
	C	$t_{2,actual} = \frac{\dot{m}_{EXH} \cdot C_p \cdot t_3 \cdot \eta_{HRSG} - \dot{m}_{21} \cdot (h_C - h_E)}{\dot{m}_{EXH} \cdot C_p \cdot \eta_{HRSG}}$	351,96	351,96
	C	$t_{3,actual} = \frac{\dot{m}_{EXH} \cdot C_p \cdot t_3 \cdot \eta_{HRSG} - \dot{m}_{22} \cdot (h_A - h_C)}{\dot{m}_{EXH} \cdot C_p \cdot \eta_{HRSG}}$		
	C	$t_{4,actual} = \frac{\dot{m}_{EXH} \cdot C_p \cdot t_3 \cdot \eta_{HRSG} - \dot{m}_{22} \cdot (h_C - h_E)}{\dot{m}_{EXH} \cdot C_p \cdot \eta_{HRSG}}$	223,75	223,75

Εικόνα 5: Φύλλο 2 – Βασικοί υπολογισμοί αναλυτικής μέθοδος

E68		f_x	=E35-I36*(E35-E40)	
A	B	C	D	E
Μετάβαση από το Α στο G'	-	$x_G = \frac{s_A - s_F}{s_{f\theta}}$	0,803	0,71
	kJ/kg	$h_{mix} = h_G$	2465,185	2465,19
	kJ/kg	$TP_{ST,th} = \dot{m}_x \cdot (h_A - h_G)$	5972,812	5972,81
	kWatt	$TW_{ST,actual} = \dot{m}_x \cdot TW_{ST,th} \cdot \eta_{ST,th} = \dot{m}_x \cdot (h_A - h_G) \cdot \eta_{ST,th}$	2687,765	2687,77
	-	$\eta_{cc} = \frac{UW_{GT} + TW_{ST,actual}}{HI_{GT}}$	0,62	0,62
	kJ/kg	$h_G = h_A - \eta_{cc,ST} \cdot (h_A - h_G)$	2465,185	2465,19
	-	$x_G = \frac{h_G - h_F}{h_{f\theta}}$	0,887	0,958

Εικόνα 6: Φύλλο 2 – Βασικοί υπολογισμοί αναλυτικής μέθοδος