



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ**  
**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΤΜΟΠΑΡΑΓΩΓΩΝ ΚΑΙ ΛΕΒΗΤΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ  
ΤΗΣ ΑΥΞΗΣΗΣ ΤΟΥ ΒΑΘΜΟΥ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΑΠΟ ΣΤΟΧΟΘΕΤΗΜΕΝΕΣ ΔΡΑΣΕΙΣ



ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ ΚΑΚΑΡΑΣ

ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ : ΚΟΥΚΟΥΒΙΝΗΣ ΦΟΙΒΟΣ-ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ

ΑΘΗΝΑ 2008

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή Ε.Μ.Π. Κο Εμμανουήλ Κακαρά για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου, με την ανάθεση ενός απαιτητικού και ενδιαφέροντος θέματος, αλλά και για την συνεχή επίβλεψη και καθοδήγηση σε όλα τα στάδια της εργασίας. Παράλληλα θα ήθελα να ευχαριστήσω και το επιστημονικό προσωπικό του εργαστηρίου Ατμοκινήτων και λεβήτων και συγκεκριμένα τον Κο. Άγγελο Δουκέλη (επίσημο επιστημονικό συνεργάτη) και τον Κο. Αντώνη Κουμανάκο (υποψήφιο διδάκτορα), για την εξαιρετική συνεργασία και την συνεχή βοήθεια και καθοδήγηση καθ' όλη την διάρκεια της διπλωματικής εργασίας, καθώς επίσης και για τις πολύτιμες συμβουλές τους. Επίσης θα ήθελα να δηλώσω την ευγνωμοσύνη μου στους ιδρυτές και ευεργέτες του Ε.Μ.Π., επειδή έθεσαν τις βάσεις για την δημιουργία ενός σύγχρονου εκπαιδευτικού ιδρύματος, καθώς και όλους τους κατά καιρούς δασκάλους και καθηγητές μου για τις πολύτιμες γνώσεις που μου μετέδωσαν. Τέλος ευχαριστώ το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών και εκφράζω την ευγνωμοσύνη μου προς αυτούς που θεσμοθέτησαν τις υποτροφίες/επαίνους Γρηγόρη Φαράκου, Καλλιόπης Βενιζέλου Σφαέλλου και Χριστίνας Καρυδογιάννη (ΚΑΡΥ) για την ηθική και υλική υποστήριξη.

## Περιεχόμενα

1. Περίληψη.....	4
2. Εισαγωγή.....	5
3. Η κατανάλωση ενέργειας στον κόσμο.....	7
4. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα.....	14
5. Θερμικοί κύκλοι – Βασικά στοιχεία τους.....	22
5.1. Κύκλος Rankine.....	22
5.2 Τμήματα Ατμοηλεκτρικών σταθμών (ΑΗΣ).....	27
5.2.1 Ατμοπαραγωγός.....	27
5.2.2 Αντλίες.....	32
5.2.3 Προθερμαντής τροφοδοτικού νερού με ατμό.....	35
5.2.4 Συμπυκνωτές και πύργοι ψύξης.....	35
5.2.5 Απαερωτής.....	38
5.2.6 Ατμοστρόβιλος.....	40
5.3. Κύκλος Joule-Brayton / κύκλος αεριοστροβίλου.....	48
5.3.1 Γενικά.....	48
5.3.2 Σύγκριση αεριοστροβιλικών και ατμοηλεκτρικών σταθμών παραγωγής ενέργειας.....	56
5.3.3 Χρήση αεριοστροβίλων για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.....	57
5.4 Συνδυασμένος κύκλος.....	59
5.4.1 Γενικά.....	60
5.4.2 Συνοπτική περιγραφή συνδυασμένων κύκλων.....	61
5.4.3 Λέβητας ανάκτησης θερμότητας.....	65
5.4.4 Ρύθμιση ισχύος στον συνδυασμένο κύκλο - διάταξη ατράκτων.....	69
5.4.5 Μελλοντικές εξελίξεις/προοπτικές.....	70
5.5 Συμπεράσματα.....	74
6. Περιγραφή Gatecycle.....	76
7. Μοντελοποίηση μονάδων.....	98
7.1 Μονάδα 4 ΑΗΣ Λαυρίου.....	98
7.2 Μονάδα 1&2 ΑΗΣ Λαυρίου.....	115
7.3 ΑΗΣ Κομοτηνής.....	143
7.4 Γενικά Συμπεράσματα-Αιτιολόγηση αποτελεσμάτων.....	157
8. Οικονομική ανάλυση.....	159
8.1 Μονάδα 1 ΑΗΣ Λαυρίου.....	160
8.2 Μονάδα 2 ΑΗΣ Λαυρίου.....	167
9. Μείωση του εκπεμπόμενου διοξειδίου του άνθρακα ανά KWh.....	173
10. Επίλογος.....	176
11. Βιβλιογραφία.....	177
12. Παράρτημα-μοντέλα μονάδων.....	178

## 1.Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η μοντελοποίηση μονάδων ηλεκτροπαραγωγής προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση στοχοθετημένων δράσεων στην συνολική απόδοση του σταθμού.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται στοιχεία για την παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας και ηλεκτροπαραγωγή, ενώ στο δεύτερο στοιχεία που αφορούν την ηλεκτροπαραγωγή στην Ελλάδα και τους κυριότερους φυσικούς πόρους που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα επόμενα κεφάλαια αναφέρονται στον τρόπο λειτουργίας των σύγχρονων μεγάλων ηλεκτροπαραγωγικών μονάδων, συγκεκριμένα των συμβατικών ατμοηλεκτρικών σταθμών, των αεριοστροβιλικών σταθμών και των μονάδων συνδυασμένου κύκλου. Γίνεται λεπτομερής παρουσίαση της λειτουργίας όλων των επιμέρους τμημάτων που απαρτίζουν τον εκάστοτε τύπο μονάδας, ενώ αναφέρονται οι σημαντικότερες παράμετροι λειτουργίας και οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν τον βαθμό απόδοσης. Στο τέλος αυτού του τμήματος γίνεται σύγκριση όλων των θερμικών σταθμών και εξάγονται συμπεράσματα.

Στην συνέχεια παρουσιάζεται το πρόγραμμα Gatecycle της εταιρίας GE, επεξηγείται η λειτουργία του και ο τρόπος μοντελοποίησης που ακολουθήθηκε στις μονάδες ηλεκτροπαραγωγής. Οι μονάδες είναι :

- Μονάδα 1 ΑΗΣ Λαυρίου
- Μονάδα 2 ΑΗΣ Λαυρίου
- Μονάδα 4 ΑΗΣ Λαυρίου
- ΑΗΣ Κομοτηνής

Ακολουθεί η παρουσίαση της κάθε μονάδας ξεχωριστά, με περιγραφή, μονογραμμικό σχέδιο των κυκλωμάτων νερού/ατμού και αέρα/καυσαερίων, παράθεση των βασικών στοιχείων της και περιγραφή του τύπου των δράσεων. Για όλες τις δράσεις έγινε παραμετρική μελέτη της επίδρασης του εκάστοτε μεγέθους στο βαθμό απόδοσης της μονάδας και στην παραγόμενη ισχύ. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δράσεων σε κάθε μονάδα ξεχωριστά, με σύγκριση της εκτιμώμενης βελτίωσης του βαθμού απόδοσης και της βελτίωσης που υπολογίστηκε από το Gatecycle. Στο τέλος αυτού του τμήματος επεξηγούνται και αιτιολογούνται τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

Στο τέλος της παρούσας εργασίας γίνεται οικονομική ανάλυση των δράσεων, για όσες δόθηκαν οικονομικά στοιχεία, και εκτιμάται η μείωση έκλυσης διοξειδίου του άνθρακα ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας. Κλείνοντας ακολουθεί ένας επίλογος όπου συνοψίζονται όλα τα συμπεράσματα από τα επιμέρους κεφάλαια της παρούσας εργασίας.

## 2.Εισαγωγή

Από την εμφάνιση του πάνω στην γη, ο άνθρωπος προσπαθούσε να τιθασέψει τα φαινόμενα και στοιχεία που τον περιτριγύριζαν προκειμένου να μπορέσει να αποσπάσει ένα μέρος της ενέργειάς τους για να το χρησιμοποιήσει όπως αυτός ήθελε. Έτσι, για το όργωμα στα χωράφια εκμεταλλευόταν την δύναμη των ζώων, ενώ κατασκεύασε νερόμυλους που μετέτρεπαν στις υδατοπτώσεις την δυναμική ενέργεια του νερού σε κινητική για την κίνηση των μύλων. Με την πάροδο των χρόνων οι ενεργειακές ανάγκες του ανθρώπου αυξάνονταν. Έτσι αναγκάστηκε να χρησιμοποιήσει μηχανές και εγκαταστάσεις όλο και μεγαλύτερης κλίμακας προκειμένου να πάρει την απαιτούμενη ενέργεια στη μορφή, στην οποία θα τον εξυπηρετούσε. Το μεγάλο άλμα έγινε με την βιομηχανική επανάσταση, που προέκυψε από την επινόηση της ατμομηχανής. Στη συνέχεια η πρόοδος ήταν αλματώδης με τις μηχανές εσωτερικής καύσης και την χρήση νέων πηγών ενέργειας, καθώς βασική επιδίωξη ήταν η διαρκής αύξηση του όγκου και του ρυθμού παραγωγής αγαθών για ικανοποίηση, υπαρκτών ή πλασματικών, παλαιών και διαμορφούμενων νέων αναγκών. Επίσης για την μετατροπή, μεταφορά και διαχείριση της παραγόμενης ενέργειας αναπτύχθηκε μια ολόκληρη τεχνολογία βασισμένη στον ηλεκτρισμό. Για την ικανοποίηση των ολοένα αυξανόμενων αναγκών απαιτείται μεγαλύτερη παραγωγή ηλεκτρισμού και αυτό με την σειρά του απαιτεί την χρήση όλο και περισσότερων ενεργειακών πόρων.

Έτσι άρχισε να αναπτύσσεται μια άμεση εξάρτηση μεταξύ της ανάπτυξης των κοινωνιών και των διαθέσιμων ενεργειακών πόρων· η ύπαρξη πολυάριθμων ενεργειακών πηγών, που ήταν δυνατό να αξιοποιηθούν με την υπάρχουσα τεχνολογία της εκάστοτε εποχής, πυροδοτούσε μια ταχύτατη ανάπτυξη. Η ανάπτυξη αυτή συχνά οδηγούσε σε υπερεκμετάλλευση των ενεργειακών πηγών και σε αναζήτηση νέων πηγών ή νέων τεχνολογιών, ενώ πολλές φορές αποτέλεσε αιτία διαμάχης μεταξύ κρατών. Κατά την βιομηχανική επανάσταση το κατ' εξοχήν καύσιμο ήταν οι γαιάνθρακες (κάρβουνο). Μεγάλο μέρος του αντικαταστάθηκε στην συνέχεια από το πετρέλαιο (20ος αιώνας). Το πετρέλαιο, είτε το ίδιο είτε άλλα κλάσματά του κατά την διαδικασία απόσταξης, αποτέλεσε το κατ' εξοχήν καύσιμο για τις μετακινήσεις, ενώ το γεγονός ότι αυτό και τα κλάσματά του έχουν πάρα πολλές χρήσεις (από την παραγωγή ενέργειας, ως την χημική βιομηχανία και την κατασκευή δρόμων) οδήγησε στον χαρακτηρισμό του ως «μαύρος χρυσός».

Πριν από αρκετές δεκαετίες υπήρχε η εντύπωση ότι τα ορυκτά καύσιμα ήταν πρακτικά ανεξάντλητα. Ωστόσο σιγά-σιγά, λόγω της υπερεκμετάλλευσης, φάνηκε ότι με την τρέχουσα ανάπτυξη και αύξηση της ζήτησης ενέργειας, τα αποθέματα των καυσίμων για τις υπάρχουσες τεχνολογίες έχουν έναν πολύ περιορισμένο ορίζοντα εκμετάλλευσης. Εκτιμήσεις που έχουν γίνει για τα ορυκτά καύσιμα, υποδεικνύουν ότι το πετρέλαιο επαρκεί (με σημερινούς ρυθμούς κατανάλωσης) για 50 χρόνια, το φυσικό αέριο για 65 χρόνια και οι γαιάνθρακες για 300 χρόνια χρησιμοποιώντας το σύνολο των αξιοποιήσιμων (τεχνικώς και οικονομικώς) αποθεμάτων. Βέβαια όλα τα παραπάνω αποτελούν εκτιμήσεις. Με την πάροδο του χρόνου διαμορφώνονται νέες τεχνολογίες που επιτρέπουν την αξιοποίηση ορισμένων κοιτασμάτων που παλαιότερα δεν ήταν δυνατό να αξιοποιηθούν, ενώ ανακαλύπτονται συνεχώς νέα αποθέματα. Παρ' όλα αυτά το γεγονός ότι η ζήτηση ορισμένων καυσίμων (παραγώγων του πετρελαίου) αυξάνεται συνεχώς σε σχέση με την παραγωγή-προσφορά τους, οδηγεί σε αύξηση της τιμής τους, με συνακόλουθη αύξηση των τιμών αγαθών, πράγμα που προκαλεί τριγμούς σε οικονομίες κρατών. Το σίγουρο είναι ότι ο άνθρωπος έχει αρχίσει να αντιλαμβάνεται ότι οι ενεργειακές πηγές γύρω του δεν είναι ανεξάντλητες αλλά θα πρέπει να τις χρησιμοποιήσει με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη φειδώ και ταυτόχρονα να αναπτύξει

τεχνολογίες που να αξιοποιούν καλύτερα τα διαθέσιμα ενεργειακά αποθέματα καθώς και τεχνολογίες που στηρίζονται σε ανανεώσιμες/εναλλακτικές πηγές ενέργειας.

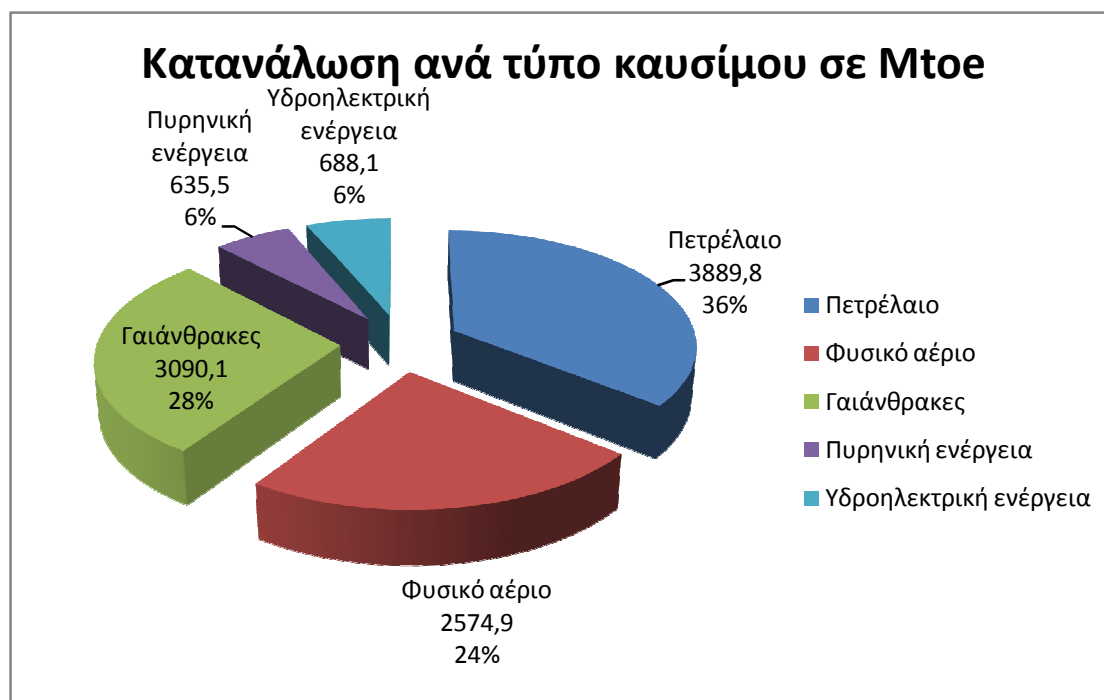
Παράλληλα με όλα τα παραπάνω η υπερεκμετάλλευση των ενεργειακών πόρων με γνώμονα το κέρδος έχει άμεση επίπτωση στο περιβάλλον. Η συγκέντρωση ισχύος που συμβαίνει σε έναν οποιοδήποτε θερμικό σταθμό παραγωγής ενέργειας, οδηγεί στον σχηματισμό μιας συνεχούς πηγής ρύπων. Ρύπος είναι κάθε ουσία που απελευθερώνεται στο περιβάλλον με ταχύτερο ρυθμό από αυτόν που μπορεί να απορροφηθεί. Επομένως ρύποι μπορεί να είναι αέριοι (όπως διοξείδιο του άνθρακα, διοξείδιο του θείου και οξείδια του αζώτου), υγροί ή στερεοί (σκόνη, σωματίδια) αλλά μπορεί να είναι ακτινοβολίες, ή έντονοι ήχοι και μεγάλα ποσά θερμότητας. Όλοι αυτοί οι ρύποι υποβαθμίζουν το περιβάλλον, διαταράσσουν οικοσυστήματα, και την ποιότητα ζωής των ανθρώπων που ζουν ή εργάζονται στην περιοχή. Ειδικά το διοξείδιο του άνθρακα εντείνει το φαινόμενο του θερμοκηπίου, το οποίο φαίνεται ότι οδηγεί σε αύξηση των θερμοκρασιών χρόνο με τον χρόνο. Επομένως είναι αναγκαίο να τεθούν μέτρα για τον περιορισμό των εκλυόμενων ρύπων.

Προκειμένου να ικανοποιηθούν οι δυο παραπάνω στόχοι που τέθηκαν, δηλαδή εξοικονόμηση ενεργειακών πόρων και περιορισμός των εκπομπών, έχουν προταθεί πολλά μέτρα. Ανάμεσα σε αυτά είναι και η αύξηση του βαθμού απόδοσης των θερμικών σταθμών με την αναβάθμιση των υπαρχουσών τεχνολογιών και την ανάπτυξη νέων, όπως και θα αναλυθεί στην συνέχεια της εργασίας. Αύξηση του βαθμού απόδοσης σημαίνει ότι με την ίδια ποσότητα καυσίμου θα παράγεται περισσότερη χρήσιμη ενέργεια. Αυτό οδηγεί στην εξοικονόμηση καυσίμου, καθώς περισσότερη ζήτηση θα μπορεί να ικανοποιηθεί, ενώ μπορεί να βοηθήσει στην μείωση της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης, καθώς οι εκλυόμενοι ρύποι θα μειωθούν ανά KWh παραγόμενης ενέργειας.

Με αυτόν τον τρόπο θα καταστεί δυνατή η όσο το δυνατό καλύτερη χρήση των φυσικών πόρων, με σεβασμό προς το περιβάλλον και τον ίδιο τον άνθρωπο.

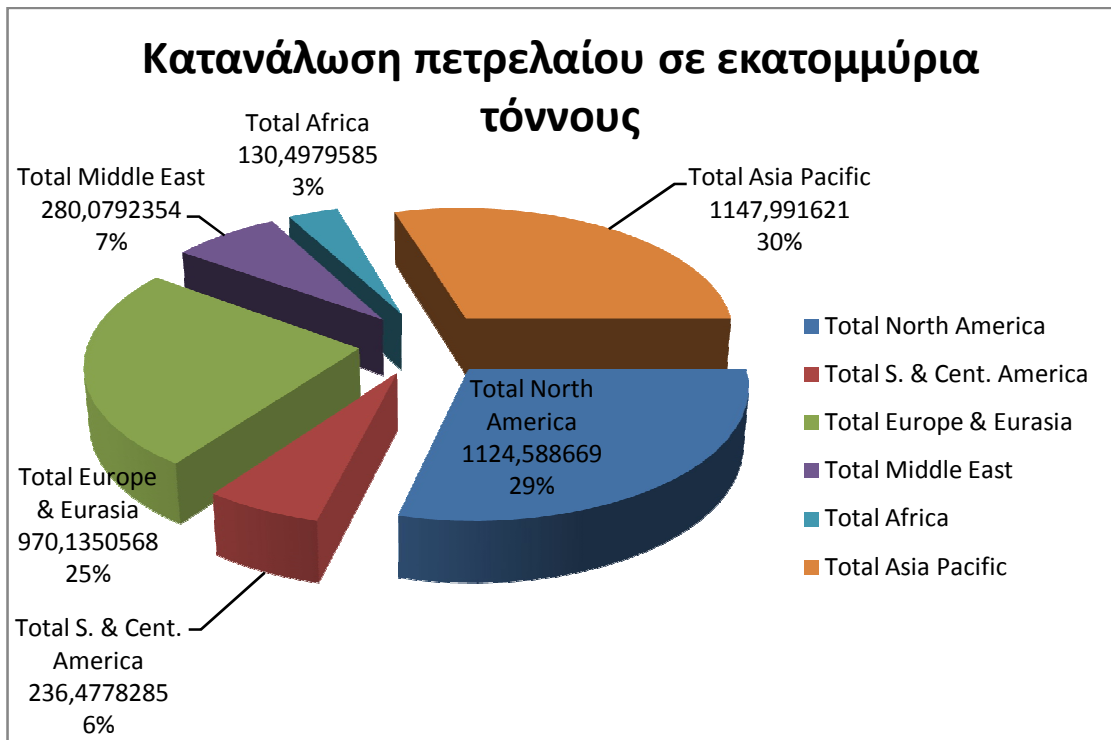
### 3.Η κατανάλωση ενέργειας στον κόσμο

Παρακάτω ακολουθεί η παρουσίαση στοιχείων για την κατανάλωση των βασικότερων καυσίμων ανά τον κόσμο. Επισημαίνεται ότι όσον αφορά το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, εννοείται συνολική κατανάλωση, περιλαμβάνοντας αυτό που χρησιμοποιείται για ηλεκτροπαραγωγή και αυτό που χρησιμοποιείται για μετακινήσεις ή άλλους λόγους (π.χ. θέρμανση).

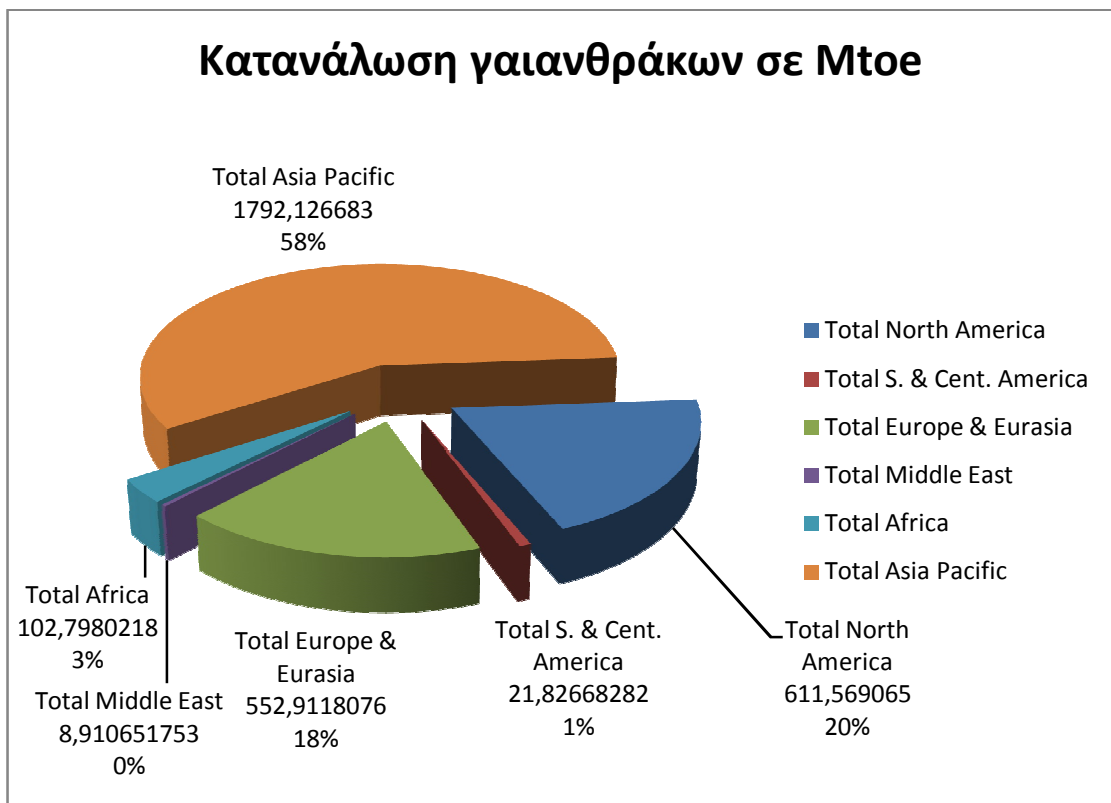


Διάγραμμα 3-1 : Κατανάλωση ανά τύπο καυσίμου (πηγή: έκθεση της BP <sup>[1]</sup>)

Όπως φαίνεται στο παραπάνω γράφημα ο ενεργειακός πόρος στον οποίο είναι βασισμένη η σημερινή οικονομία και πολιτισμός είναι το πετρέλαιο, κατά 36%, περιλαμβάνοντας και τις άλλες χρήσεις του πετρελαίου εκτός της ηλεκτροπαραγωγής. Ακολουθεί η χρήση γαιανθράκων με 28%, φυσικού αερίου με 24% και τέλος πυρηνική ενέργεια και υδροηλεκτρική ενέργεια με περίπου 6% η κάθε μια. Στο παραπάνω γράφημα δεν εμφανίζονται άλλες, πλην της υδροηλεκτρικής, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Οι υπόλοιπες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (φωτοβολταϊκά στοιχεία, αιολική ενέργεια) έχουν μικρότερα ποσοστά συμμετοχής από το 1% στην συνολική παραγωγή ενέργειας.

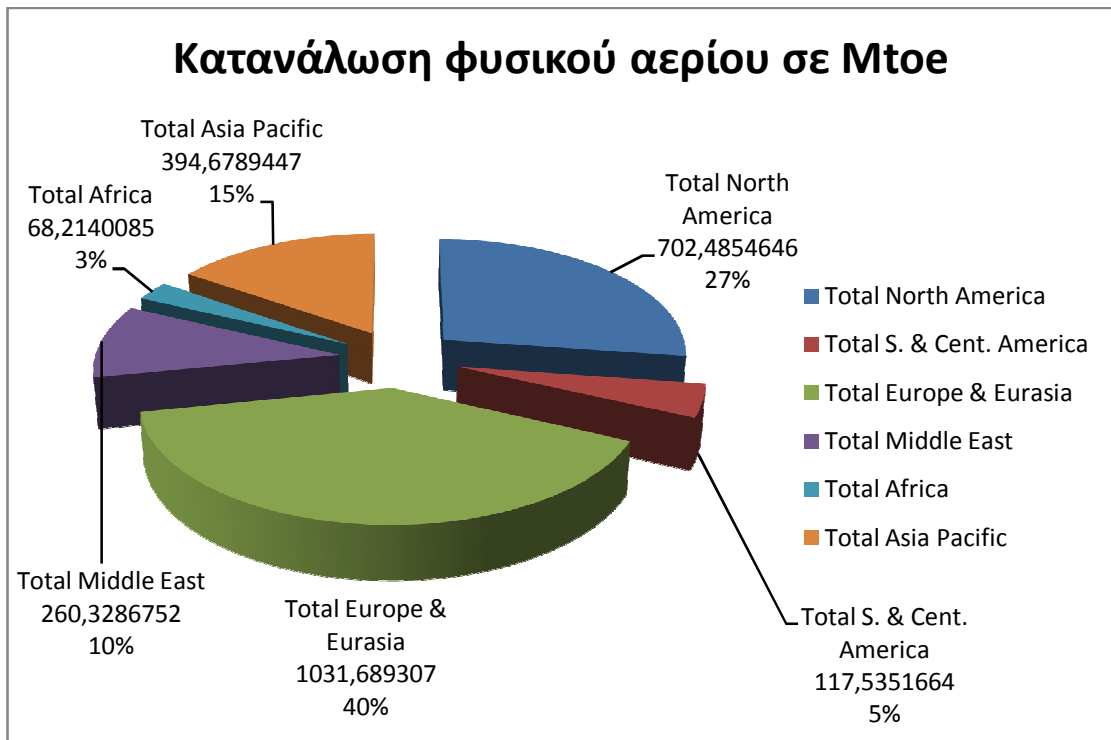


Διάγραμμα 3-2 :Κατανάλωση πετρελαίου ανά τον κόσμο (πηγή: έκθεση της BP <sup>(1)</sup>)

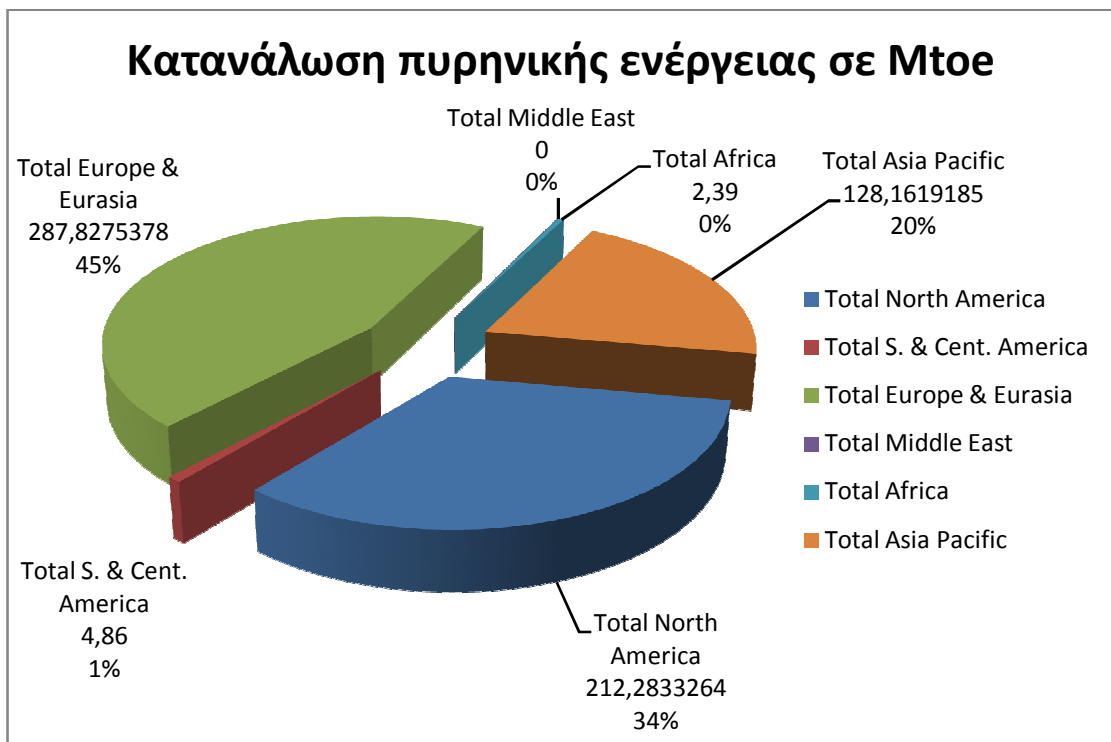


Διάγραμμα 3-3 :Κατανάλωση γαιανθράκων ανά τον κόσμο (πηγή: έκθεση της BP <sup>(1)</sup>)

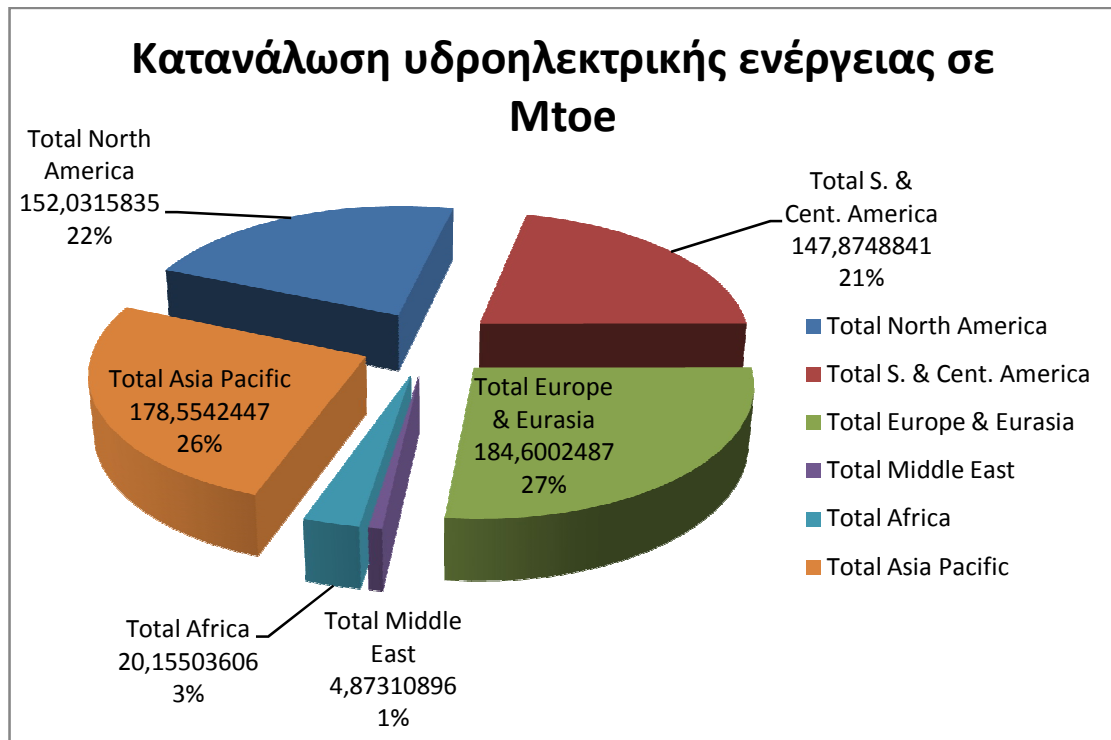




Διάγραμμα 3-4 : Κατανάλωση φυσικού αερίου ανά τον κόσμο (πηγή: έκθεση της BP <sup>[1]</sup>)



Διάγραμμα 3-5 : Κατανάλωση πυρηνικής ενέργειας ανά τον κόσμο (πηγή: έκθεση της BP <sup>[1]</sup>)



Διάγραμμα 3-6 :Κατανάλωση υδροηλεκτρικής ενέργειας ανά τον κόσμο (πηγή: έκθεση της BP <sup>[1]</sup>)

Από τα παραπάνω γραφήματα προκύπτουν τα ακόλουθα:

- Η κατανάλωση γαιανθράκων είναι εντονότερη στην Ασία λόγω της ανάπτυξης της Κίνας και της Ινδίας
- Η κατανάλωση φυσικού αερίου είναι εντονότερη στην Ευρώπη και στις χώρες της πρώην Σοβιετικής Ένωσης, λόγω των πλούσιων κοιτασμάτων φυσικού αερίου της Ρωσίας.
- Η κατανάλωση πετρελαίου είναι εντονότερη στην Βόρεια Αμερική, αναλογικά με τον πληθυσμό της.
- Η πυρηνική ενέργεια χρησιμοποιείται περισσότερο στην Ευρώπη και στην Ευρασία καθώς υπάρχουν χώρες που έχουν στηρίξει σημαντικό τμήμα της ηλεκτροπαραγωγής τους σε αυτήν, όπως η Γαλλία, προκειμένου να απεξαρτηθούν από το πετρέλαιο.
- Η χρήση υδροηλεκτρικής ενέργειας γίνεται σε όσες περιοχές έχουν πολυάριθμα και μεγάλα ποτάμια. Επομένως χρησιμοποιείται κατά το δυνατό σε όλες τις περιοχές εκτός από Αφρική και Μέση Ανατολή.

Επισημαίνεται ότι 1 toe ( tonne oil equivalent) ισοδυναμεί με:

- 10 million kcal
- 42 gigajoules
- 40 million Btu
- 1,5 tonnes hard coal / 3 tonnes lignite
- 12 MWh

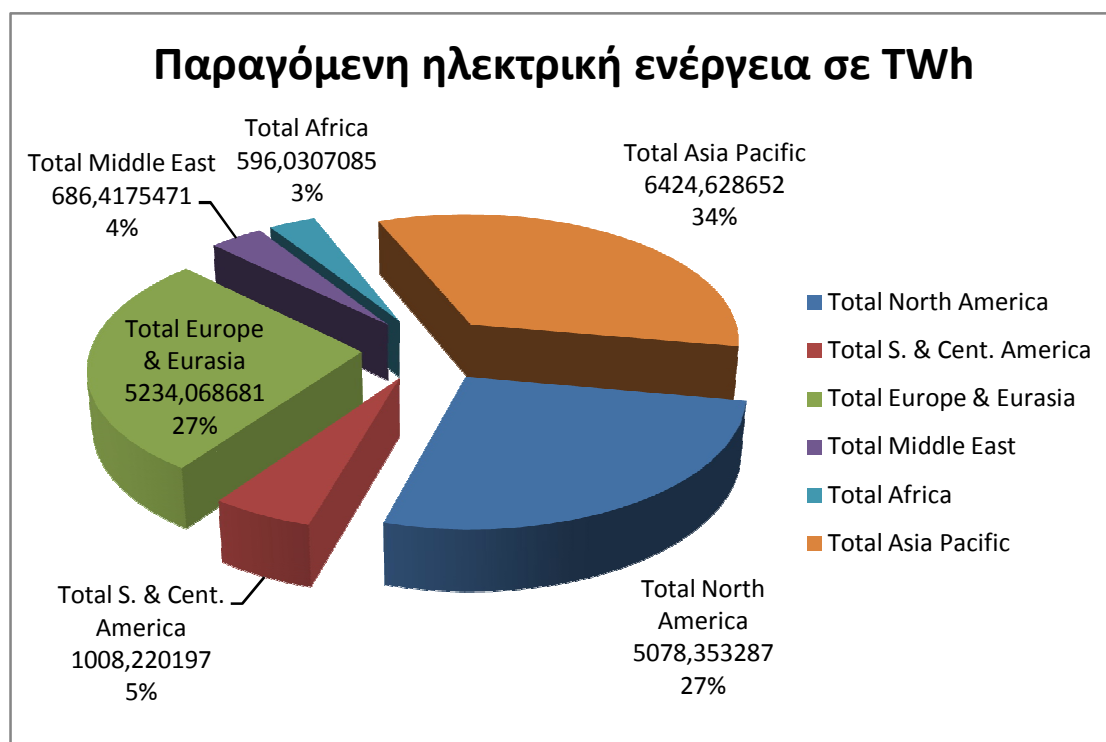
Οι σύγχρονες μονάδες παραγωγής ενέργειας παράγουν περίπου 4,5 TWh με 1 Mtoe καυσίμου.

Ο υπολογισμός των ισοδύναμων τόνων πετρελαίου για την πυρηνική και υδροηλεκτρική ενέργεια έγινε με την εκτίμηση του ποσού ορυκτών καυσίμων που θα παρήγαγε την ίδια ποσότητα ενέργειας σε έναν θερμικό σταθμό θεωρώντας βαθμό απόδοσης 38%.

<b>North America:</b>	USA (excluding Puerto Rico), Canada and Mexico.
<b>South and Central America:</b>	Caribbean (including Puerto Rico), Central and South America.
<b>Europe:</b>	European members of the OECD* plus Albania, Bosnia-Herzegovina, Bulgaria, Croatia, Cyprus, Former Yugoslav Republic of Macedonia, Gibraltar, Malta, Romania, Serbia and Montenegro, Slovenia.
<b>Former Soviet Union:</b>	Armenia, Azerbaijan, Belarus, Estonia, Georgia, Kazakhstan, Kyrgyzstan, Latvia, Lithuania, Moldova, Russian Federation, Tajikistan, Turkmenistan, Ukraine, Uzbekistan.
<b>Europe and Eurasia:</b>	All countries listed above under the headings Europe and the Former Soviet Union
<b>Middle East:</b>	Arabian Peninsula, Iran, Iraq, Israel, Jordan, Lebanon, Syria.
<b>Total Africa</b>	All countries belonging to the African continent
<b>Asia Pacific:</b>	Brunei, Cambodia, China, China Hong Kong SAR, Indonesia, Japan, Laos, Malaysia, Mongolia, North Korea, Philippines, Singapore, South Asia (Afghanistan, Bangladesh, India, Myanmar, Nepal, Pakistan and Sri Lanka), South Korea, Taiwan, Thailand, Vietnam, Australia, New Zealand, Papua New Guinea and Oceania.

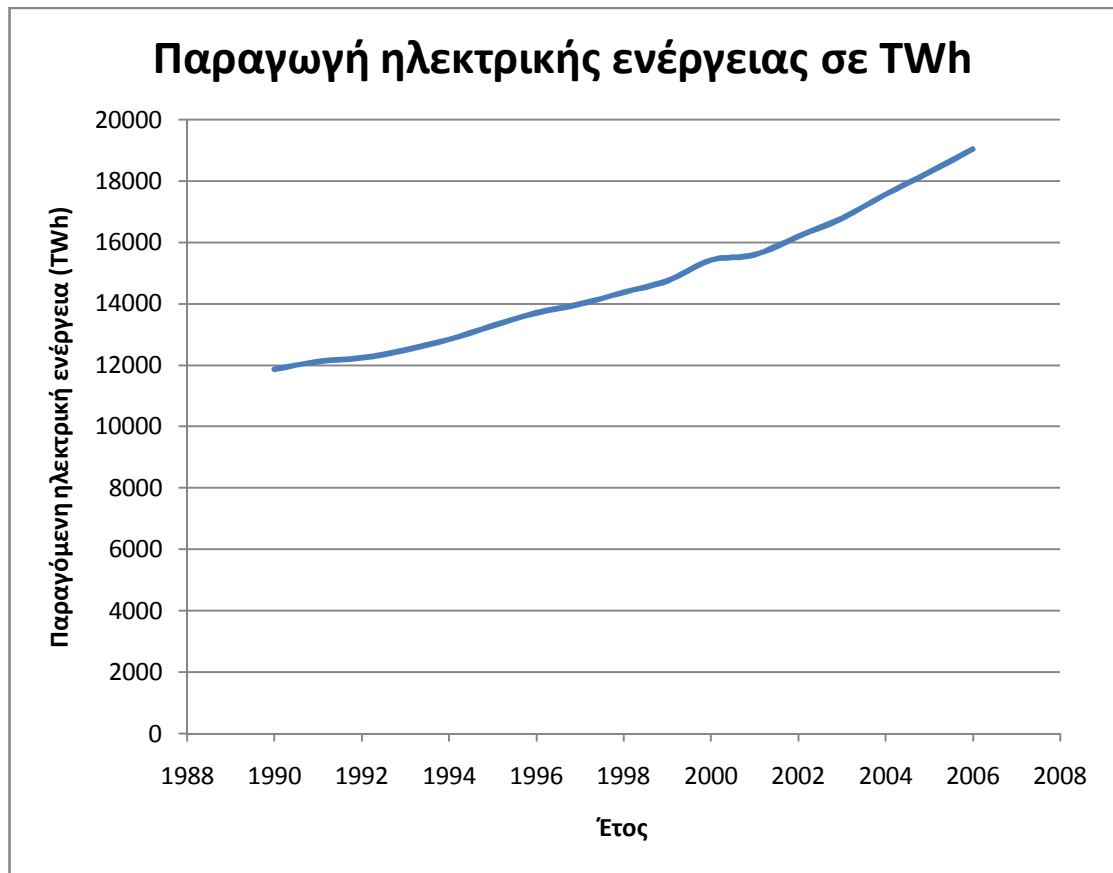
Πίνακας 3-1 :Οι χώρες που περιλαμβάνονται ανά κατηγορία

\* OECD: Organization for Economic Cooperation and Development



Διάγραμμα 3-7 : Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια ανά τον κόσμο (πηγή: έκθεση της BP <sup>[1]</sup>)

Όπως φαίνεται από το παραπάνω γράφημα η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι εντονότερη στις αναπτυσσόμενες οικονομίες της Ασίας. Στην συνέχεια ακολουθούν οι ανεπτυγμένες περιοχές της Ευρώπης και Β. Αμερικής. Η μεγαλύτερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, αναλογικά με τον πληθυσμό, γίνεται στην Βόρεια Αμερική.



Διάγραμμα 3-8 :Αύξηση ηλεκτροπαραγωγής (πηγή: έκθεση της BP <sup>[1]</sup>)

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνει με την πάροδο των χρόνων και μάλιστα με συνεχώς αυξανόμενο ρυθμό, λόγω της ανάπτυξης νέων οικονομιών.

<sup>[1]</sup> Όλα τα παραπάνω στοιχεία βρέθηκαν από την έκθεση της BP του 2007 για το έτος 2006.  
<http://www.bp.com/statisticalreview>

## 4. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα

### Γενικά

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα γίνεται κυρίως από την Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ Α.Ε.). Το σύστημα παραγωγής ενέργειας αποτελούν οι:

- 34 μεγάλοι θερμικοί και υδροηλεκτρικοί σταθμοί
- 3 αιολικά πάρκα του διασυνδεδεμένου συστήματος της ηπειρωτικής χώρας
- 61 αυτόνομοι σταθμοί Κρήτης, Ρόδου και λοιπών νησιών μας (39 θερμικοί, 2 υδροηλεκτρικοί, 15 αιολικά πάρκα και 5 φωτοβολταϊκοί σταθμοί)

Τα τελευταία χρόνια η ΔΕΗ Α.Ε., πέραν της δημιουργίας νέων θερμικών (λιγνιτικών, πετρελαϊκών, φυσικού αερίου) και υδροηλεκτρικών σταθμών, στρέφεται και προς την αξιοποίηση των εναλλακτικών μορφών ενέργειας (άνεμος, ήλιος, γεωθερμία). Την άνοιξη του 2006 εισήλθε στο σύστημα η 5η Μονάδα του Ενεργειακού Συγκροτήματος Λαυρίου ισχύος 385 MW.

Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των 98 συνολικά σταθμών της ΔΕΗ ανέρχεται σήμερα στα 12.695 MW και η καθαρή παραγωγή το 2006 έφτασε τις 52,07 TWh.

ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ (MW) ΣΤΑΘΜΩΝ ΔΕΗ Α.Ε. (31/12/2006)							
	ΘΗΣ				ΥΗΣ**	ΑΠΕ***	ΣΥΝΟΛΟ
	Λιγνιτικές Μονάδες	Πετρελαϊκές Μονάδες	Μονάδες Φυσικού Αερίου	Σύνολο ΘΗΣ*			
Διασυνδεδεμένο	5.288	750	1.966	8.004	3.060	7	11.071
Κρήτη, Ρόδος & λοιπά αυτόνομα νησιά	-	1.593	-	1.559	1	30	1.624
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>		<b>9.597</b>			<b>3.061</b>	<b>37</b>	<b>12.695</b>

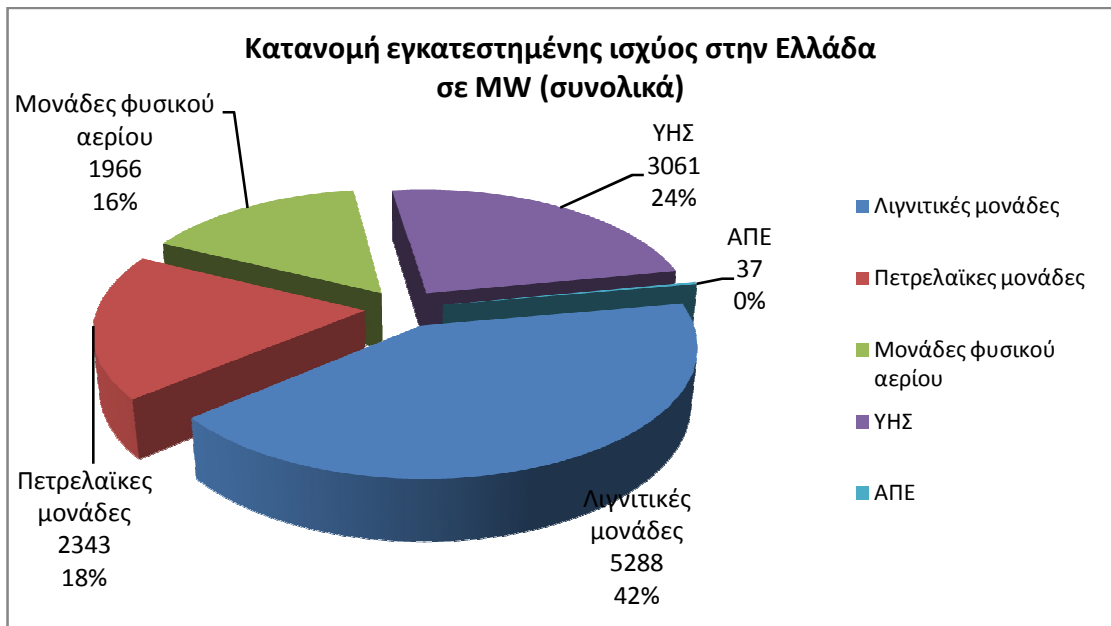
\* Θερμοηλεκτρικοί Σταθμοί

\*\* Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί

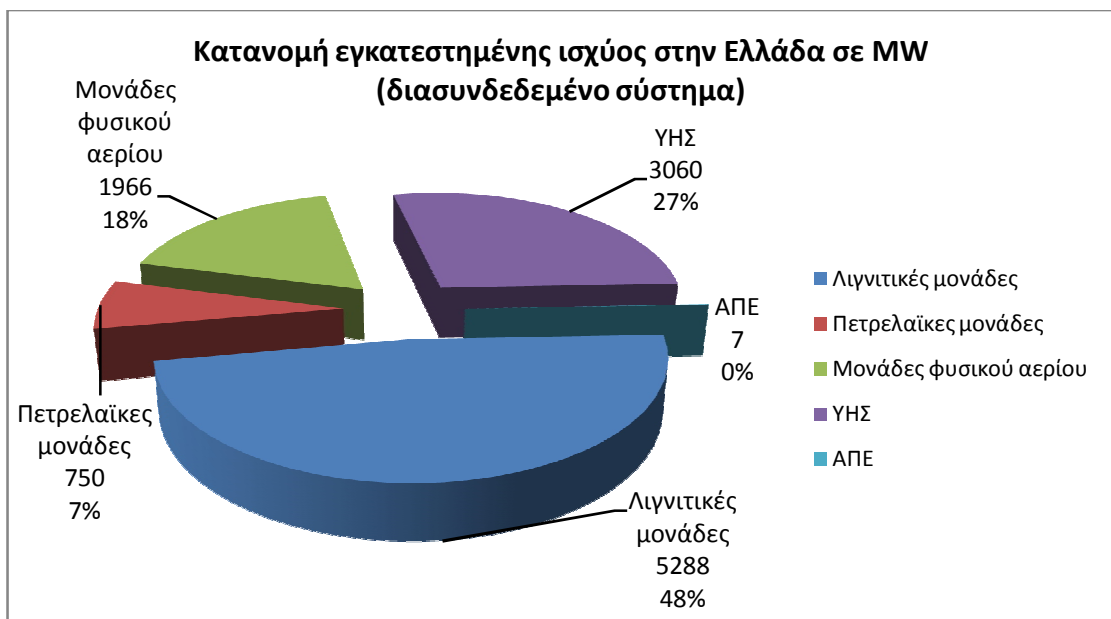
\*\*\* Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Πίνακας 4-1 : Εγκατεστημένη ισχύς μονάδων της ΔΕΗ Α.Ε. (πηγή: ΔΕΗ Α.Ε. <sup>12)</sup>)

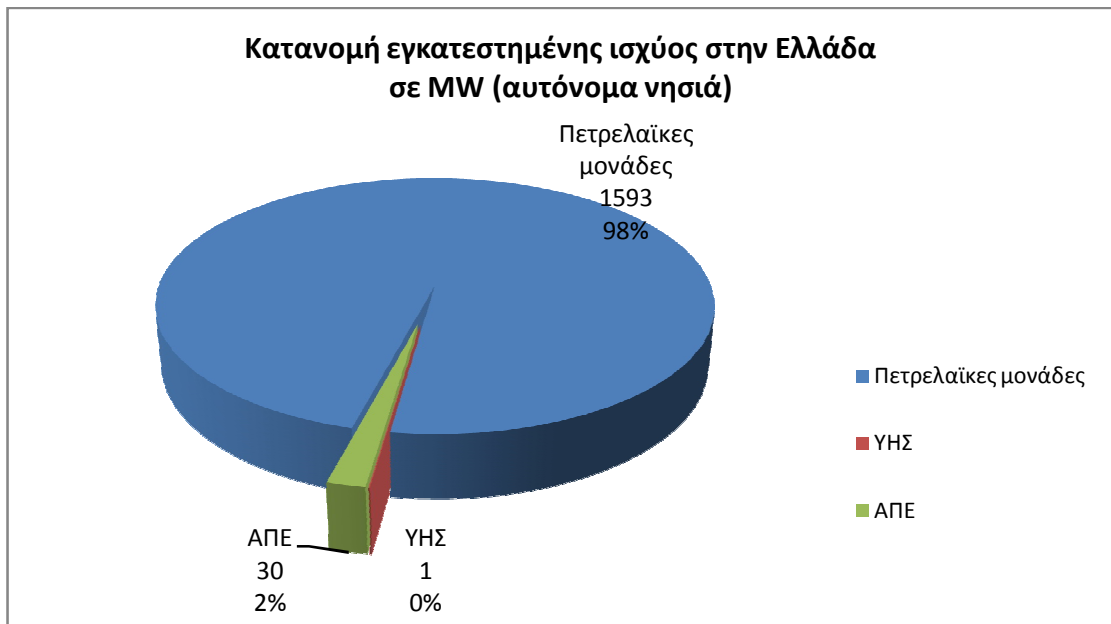
Όπως φαίνεται και από το διάγραμμα 4-1 το 41,6% της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε όλη την Ελλάδα γίνεται από λιγνιτικές μονάδες. Οι πετρελαϊκές μονάδες αποτελούν το 18,4% , ενώ οι μονάδες φυσικού αερίου το 15,5%. Στην Ελλάδα το 75,6% της ηλεκτρικής ενέργειας παράγεται από θερμικούς σταθμούς. Η παραγωγή συμπληρώνεται από υδροηλεκτρικούς σταθμούς, που συμμετέχουν κατά το 24,1% και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας κατά το 0,29%. Βέβαια πρέπει να επισημανθεί το γεγονός ότι οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας χρησιμοποιούνται περισσότερο στα αυτόνομα νησιά αποτελώντας το 1,8% της παραγωγής ενέργειας στο μη διασυνδεδεμένο σύστημα, ενώ το μεγαλύτερο μέρος (98%) παραγωγής ενέργειας γίνεται από πετρελαϊκές μονάδες.



Διάγραμμα 4-1 :Κατανομή εγκατεστημένης ισχύος στην Ελλάδα (συνολικά)

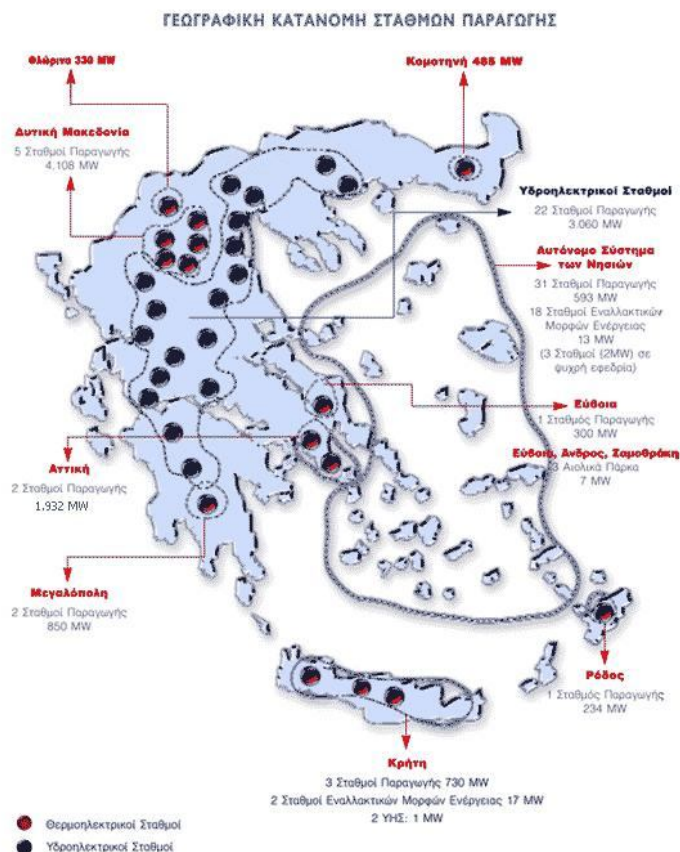


Διάγραμμα 4-2 : Κατανομή εγκατεστημένης ισχύος στην Ελλάδα (διασυνδεδεμένο σύστημα)



Διάγραμμα 4-3 :Κατανομή εγκατεστημένης ισχύος στην Ελλάδα (αυτόνομα νησιά)

Χάρτης των εγκατεστημένων σταθμών παραγωγής ενέργειας (θερμικών και υδροηλεκτρικών) παρουσιάζεται παρακάτω.



Εικόνα 4-1 :Κατανομή σταθμών παραγωγής της ΔΕΗ Α.Ε. (πηγή: ΔΕΗ Α.Ε. [2])

Παρατηρώντας τον παραπάνω χάρτη φαίνεται ότι οι μεγάλες μονάδες παραγωγής ενέργειας του διασυνδεδεμένου συστήματος είναι διεσπαρμένες και αρκετά απομακρυσμένες μεταξύ τους. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι:



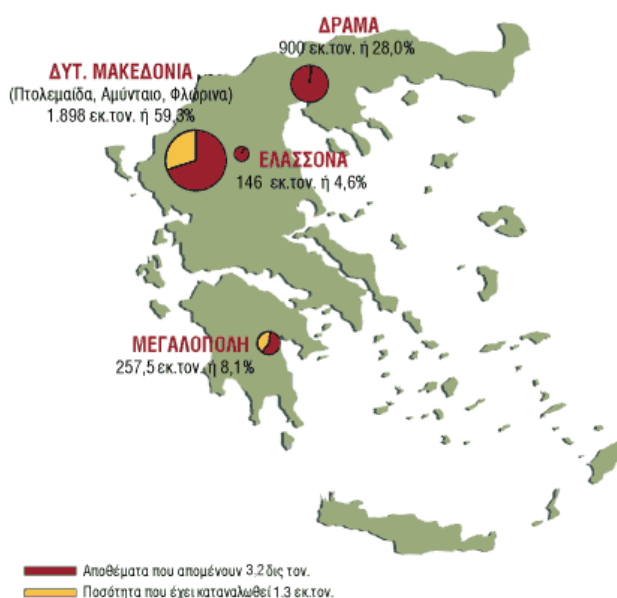
-Οι λιγνιτικές μονάδες βρίσκονται αναγκαστικά στην περιοχή των ορυχείων λιγνίτη, προκειμένου να εξασφαλιστεί μικρό κόστος μεταφοράς.

- Ο ΑΗΣ Κομοτηνής είναι σταθμός φυσικού αερίου και έχει κατασκευαστεί σε κομβικό σημείο του αγωγού μεταφοράς φυσικού αερίου.

- Οι υπόλοιποι σταθμοί είναι εγκατεστημένοι σε περιοχές κοντά στο λεκανοπέδιο Αττικής λόγω των υψηλών ενεργειακών αναγκών στην περιοχή.

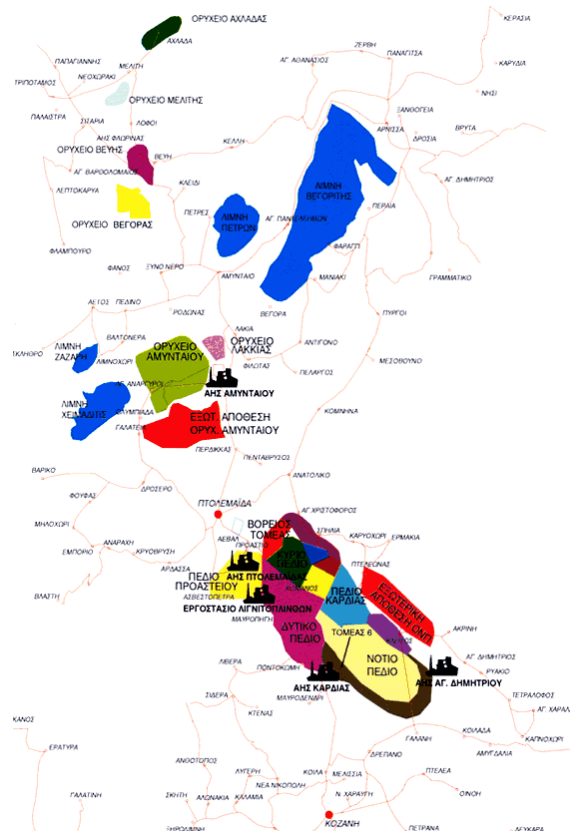
Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί υποβοηθούν την συνολική ηλεκτροπαραγωγή, παίζοντας ρόλο μονάδας αιχμής.

Η χρήση λιγνίτη για την παραγωγή του μεγαλύτερου μέρους της ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα οφείλεται στο γεγονός ότι ο λιγνίτης βρίσκεται σε αφθονία στο υπέδαφος της Ελλάδας. Η χώρα μας κατέχει τη δεύτερη θέση σε παραγωγή λιγνίτη στην Ευρωπαϊκή Ένωση και την έκτη θέση παγκοσμίως. Τα λιγνιτωρυχεία της ΔΕΗ στην Πτολεμαίδα και τη Μεγαλόπολη εξασφαλίζουν το σημαντικότερο για την ελληνική οικονομία ενεργειακό καύσιμο, το λιγνίτη, στον οποίο βασίστηκε ο εξηλεκτρισμός της χώρας μας από τη στιγμή της ίδρυσης της Επιχείρησης.



Εικόνα 4-2 :Μεγάλα λιγνιτωρυχεία (πηγή: ΔΕΗ Α.Ε. <sup>12)</sup>)

Σήμερα, οι 8 λιγνιτικοί σταθμοί της ΔΕΗ αποτελούν το 42% της εγκατεστημένης ισχύος της και παράγουν το 56% περίπου της καθαρής ηλεκτρικής παραγωγής της ΔΕΗ. Η χρήση του λιγνίτη, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, αποφέρει στην Ελλάδα τεράστια εξοικονόμηση συναλλάγματος (περίπου 1 δισ. δολάρια ετησίως). Ο λιγνίτης είναι καύσιμο στρατηγικής σημασίας για τη ΔΕΗ, γιατί έχει χαμηλό κόστος εξόρυξης, σταθερή και άμεσα ελέγξιμη τιμή και παρέχει σταθερότητα και ασφάλεια ανεφοδιασμού. Συγχρόνως, προσφέρει χιλιάδες θέσεις εργασίας στην ελληνική περιφέρεια, ιδιαίτερα σε περιοχές που εμφανίζουν μεγάλα ποσοστά ανεργίας. Ο λιγνίτης έχει συντελέσει τα μέγιστα στην αύξηση του εθνικού προϊόντος.



Εικόνα 4-3 :Λιγνιτικό κέντρο Πτολεμαΐδας - Αμυνταίου (πηγή: ΔΕΗ Α.Ε. [2])

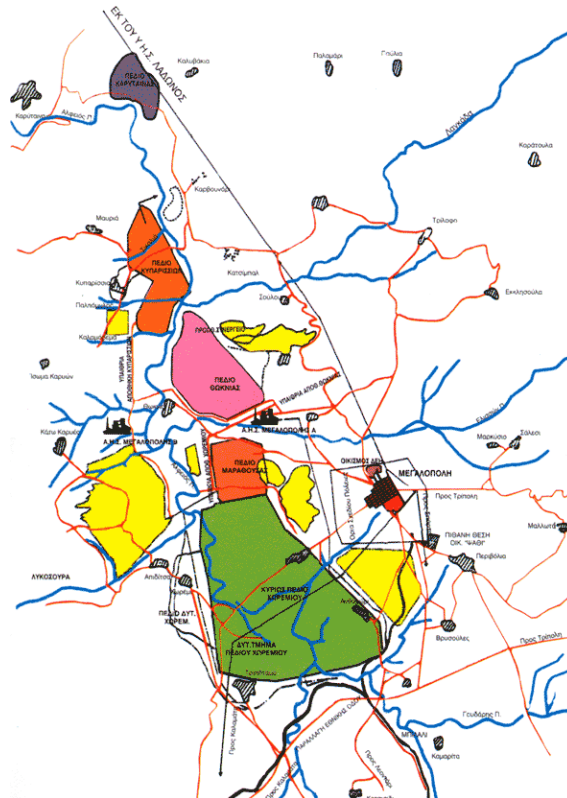
Στο Λιγνιτικό Κέντρο Πτολεμαΐδας - Αμυνταίου λειτουργούν σήμερα τέσσερα λιγνιτωρυχεία: Το Ορυχείο Νοτίου Πεδίου, το Ορυχείο Καρδιάς, το Ορυχείο Κυρίου Πεδίου και το Ορυχείο Αμυνταίου (συμπεριλαμβανομένου και του ορυχείου στη Φλώρινα). Επίσης στο Λιγνιτικό Κέντρο ανήκουν το Εργοστάσιο Λιγνιτοπλίνθων και ο ατμοηλεκτρικός σταθμός ΛΗΠΤΟΛ. Η παραγωγή λιγνίτη ανήλθε το 2006 σε 49εκ. τόνους. Οι ενεργειακές μονάδες που τροφοδοτούνται με λιγνίτη από το Λιγνιτικό Κέντρο Πτολεμαΐδας - Αμυνταίου είναι:

ΣΤΑΘΜΟΣ	ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ (MW)
ΑΗΣ ΛΙΠΤΟΛ	10+33 = 43
ΑΗΣ ΠΤΟΛΕΜΑΪΔΑΣ	70 + 2x125 + 300 = 620
ΑΗΣ ΚΑΡΔΙΑΣ	2x300 + 2x325 = 1.250
ΑΗΣ ΑΓ. ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ	2x300+2x310+375 = 1.595
ΑΗΣ ΑΜΥΝΤΑΙΟΥ	2x300 = 600
ΑΗΣ ΜΕΛΙΤΗΣ-ΑΧΛΑΔΑΣ	1x330 = 330
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	<b>4.438</b>

Πίνακας 4-2 :Τροφοδοτούμενες ενεργειακές μονάδες από το λιγνιτικό κέντρο Πτολεμαΐδας - Αμυνταίου (πηγή: ΔΕΗ Α.Ε. [2])

Με λιγνίτη τροφοδοτείται και το Εργοστάσιο Λιγνιτοπλίνθων Στην Πελοπόννησο, στο Νομό Αρκαδίας έχει δημιουργηθεί το Λιγνιτικό Κέντρο Μεγαλόπολης.

Το Λιγνιτωρυχείο τροφοδοτεί με λιγνίτη τον ΑΗΣ Μεγαλόπολης Α με εγκατεστημένη ισχύ 550MW (2 μονάδες x 125MW + 1 μονάδα 300MW) και τον ΑΗΣ Μεγαλόπολης Β ισχύος 300 MW.



Εικόνα 4-4 :Λιγνιτικό κέντρο Μεγαλόπολης (πηγή: ΔΕΗ Α.Ε. <sup>12)</sup>)

Παρ' όλο που τα αποθέματα λιγνίτη στην Ελλάδα είναι πολυάριθμα, η ποιότητα των ελληνικών λιγνιτών είναι χαμηλή. Η θερμογόνο δύναμη κυμαίνεται από 975 - 1380 kcal/kg στις περιοχές Μεγαλόπολης, Αμυνταίου και Δράμας, από 1261 - 1615 kcal/kg στην περιοχή Πτολεμαΐδας και 1927 -2257 kcal/kg στις περιοχές Φλώρινας και Ελασσόνας. Σημαντικό συγκριτικό πλεονέκτημα των λιγνιτών της χώρας μας είναι η χαμηλή περιεκτικότητα σε καύσιμο θείο. Με βάση τα συνολικά εκμεταλλεύσιμα αποθέματα λιγνίτη της χώρας και τον προγραμματιζόμενο ρυθμό κατανάλωσης στο μέλλον, υπολογίζεται ότι τα αποθέματα αυτά επαρκούν για περισσότερο από 45 χρόνια. Οι μέχρι σήμερα εξορυχθείσες ποσότητες λιγνίτη ανέρχονται στο 29% περίπου των συνολικών αποθεμάτων. Εκτός από λιγνίτη η Ελλάδα διαθέτει και ένα μεγάλο κοιτάσμα Τύρφης στην περιοχή των Φιλιππων (Ανατολική Μακεδονία). Τα εκμεταλλεύσιμα αποθέματα στο κοιτάσμα αυτό εκτιμώνται σε 4 δις κυβικά μέτρα και ισοδυναμούν περίπου με 125 εκατ. τόνους πετρελαίου.

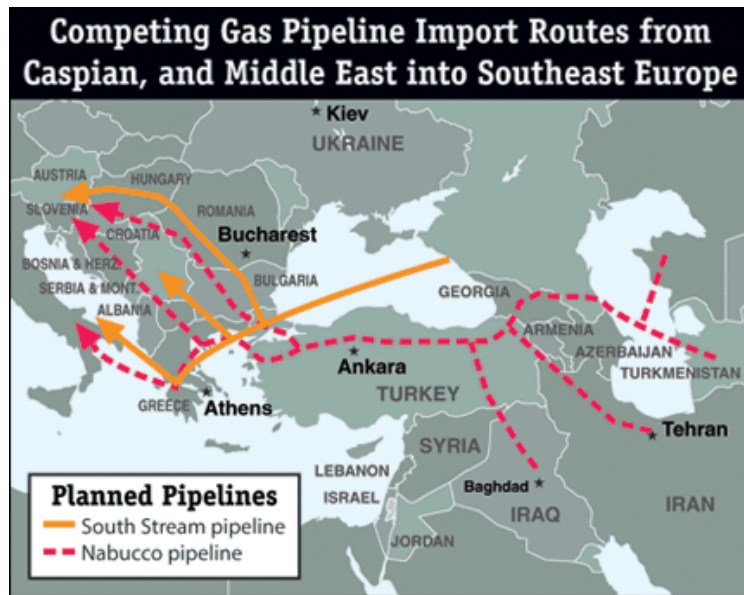
Η σύνθεση του Φυσικού Αερίου που χρησιμοποιείται στην Ελλάδα είναι 85% Μεθάνιο και το υπόλοιπο 15% Αιθάνιο, Βουτάνιο, Προπάνιο, Άζωτο και άλλα αέρια. Η ανωτέρα θερμογόνο δύναμή του ανέρχεται σε περίπου 9.500 kcal/m<sup>3</sup>. Η συνολική κατανάλωση ανήλθε σε 2,5 δις. κυβικά μέτρα το έτος 2004. Η αγορά του Φυσικού Αερίου στην Ελλάδα παρουσιάζει έντονη τάση ανάπτυξης: σήμερα αποτελεί πλέον πραγματικότητα, καλύπτοντας το 12% του εθνικού ενεργειακού ισοζυγίου με σημαντικές προοπτικές αύξησης. Το 74% περίπου του Φυσικού Αερίου που καταναλώνεται στην Ελλάδα προέρχεται από την Ρωσία. Το υπόλοιπο μεταφέρεται με πλοία από την Αλγερία σε υγροποιημένη μορφή (LNG) και εξαερώνεται εκ νέου σε ειδικές εγκαταστάσεις στη Ρεβυθούσα. Το σύστημα μεταφοράς απαρτίζεται από μια σειρά κύριων αγωγών υψηλής πίεσης (70 bar), που εκτείνονται από τα ελληνο-βουλγαρικά σύνορα μέχρι την Αττική, συνολικού μήκους 512 km και από διακλαδώσεις συνολικού μήκους 440 χλμ., με επίσης υψηλή πίεση, που μεταφέρουν το Φυσικό Αέριο στην Ανατολική Μακεδονία, τη Θράκη, τη Θεσσαλονίκη, το Βόλο και την

Αττική. Προ των πυλών της πόλης η πίεση μεταφοράς μειώνεται και αρχίζει το αστικό δίκτυο διανομής διαμέσου του οποίου το Φυσικό Αέριο μεταφέρεται στα νοικοκυριά, στους χώρους δραστηριοτήτων του τριτογενούς τομέα και στις βιομηχανίες. Η ολοκλήρωση των αστικών δικτύων διανομής και η διάθεση του Φυσικού Αερίου για οικιακές, εμπορικές και βιομηχανικές χρήσεις, στις πρώτες τρεις εξυπηρετούμενες περιοχές, ανατέθηκε αποκλειστικά στις αντίστοιχες Εταιρίες Παροχής Αερίου (ΕΠΑ), την ΕΠΑ Θεσσαλονίκης για το Νομό Θεσσαλονίκης, την ΕΠΑ Θεσσαλίας για τη Θεσσαλία και την ΕΠΑ Αττικής για το Νομό Αττικής, οι οποίες ανέλαβαν το υφιστάμενο δίκτυο της Δημόσιας Επιχείρησης Παροχής Αερίου (ΔΕΠΑ). Η ΔΕΠΑ έχει την ευθύνη της περαιτέρω ανάπτυξης του μεγάλου δικτύου μεταφοράς, προκειμένου να δώσει τη δυνατότητα και σε άλλες περιοχές να αξιοποιήσουν τα οφέλη αυτής της σύγχρονης πηγής ενέργειας.



Εικόνα 4-5 :Εγκατεστημένο ελληνικό σύστημα μεταφοράς και διανομής φυσικού αερίου (πηγή: ΕΠΑ Θεσσαλίας <sup>[3]</sup>)

Πρόσφατα υπογράφηκε συμφωνία μεταξύ Ελλάδας και Ρωσίας για την κατασκευή και την εκμετάλλευση του αγωγού φυσικού αερίου South Stream στο έδαφος της ελληνικής επικράτειας. Ο ελληνικός κλάδος του αγωγού South Stream θα ξεκινά από τα ελληνοβουλγαρικά σύνορα και θα μεταφέρει φυσικό αέριο στην Ιταλία μέσω Ελλάδας. Προβλέπεται ότι η συμφωνία θα έχει ισχύ κατ' αρχήν για 30 χρόνια και μέσω του αγωγού θα διέρχονται περίπου 10 δισ. κυβικά μέτρα φυσικού αερίου ετησίως. Μέρος της ποσότητας αυτής θα διοχετεύεται στη χώρα μας, ενώ η Ελλάδα θα εισπράττει και τέλη διέλευσης. Προβλέπεται ακόμη συμφωνία για την ίδρυση εταιρίας που θα έχει την ευθύνη για την κατασκευή και εκμετάλλευση του αγωγού, η οποία θα υπογραφεί ανάμεσα στην ελληνική ΔΕΣΦΑ (Διαχείριση Εθνικού Συστήματος Φυσικού Αερίου) και την ρωσική Gazprom. Η έδρα της εταιρίας θα είναι, κατά προτίμηση, στην Ελλάδα και το έργο της θα είναι ο σχεδιασμός, η χρηματοδότηση, η κατασκευή, η λειτουργία και η εκμετάλλευση του αγωγού.



Εικόνα 4-6 :Ο αγωγός South Stream που πρόκειται να κατασκευαστεί (πηγή: Energy Tribune <sup>[4]</sup>)

[2] <http://www.dei.gr/>

[3] <http://www.epathessalia.gr/gas3.php>

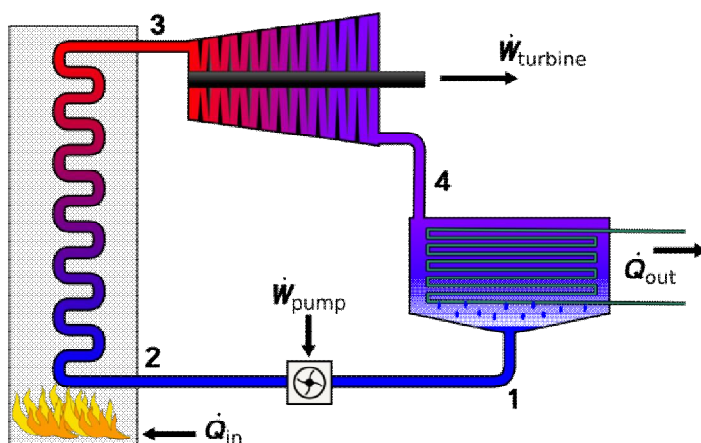
[4] <http://www.energytribune.com/articles.cfm?aid=590>

## 5.Θερμικοί κύκλοι - βασικά στοιχεία τους

Βασικό χαρακτηριστικό όλων των θερμικών σταθμών είναι ότι εκτελούν μια κυκλική μεταβολή εργαζόμενου μέσου, που ποικίλλει ανάλογα με την φύση και την λειτουργία του σταθμού, στην οποία υπάρχει ένα θερμό θερμοδοχείο, που είναι συνήθως η εστία, ο καυστήρας, ή γενικότερα ο χώρος στον οποίο γίνεται η καύση ή η είσοδος της θερμότητας στον κύκλο, και από τον οποίο απορροφάται θερμότητα μέσω του εργαζόμενου μέσου. Μέρος αυτής της θερμότητας μετατρέπεται σε μηχανικό έργο και, καθώς καμία θερμική μηχανή δεν μπορεί να μετατρέψει πλήρως την θερμότητα σε έργο λόγω του δευτέρου θερμοδυναμικού αξιώματος, η υπόλοιπη θερμότητα αποβάλλεται σε ένα ψυχρό θερμοδοχείο. Στην παρούσα εργασία θα αναλυθούν ο κύκλος με χρήση νερού-ατμού Rankine, που συμβαίνει σε συμβατικούς ατμοηλεκτρικούς σταθμούς και ο κύκλος με αέρα-καυσάεριο Joule-Brayton που συμβαίνει στους αεριοστροβίλους. Και οι δύο κύκλοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο συνδυασμένο κύκλο όπως θα αναλυθεί στην συνέχεια.

### 5.1 Κύκλος Rankine

Η παραγωγή μηχανικού έργου με την χρήση ατμού γίνεται με τον κύκλο Rankine. Ο κύκλος Rankine είναι θερμοδυναμικός κύκλος που μετατρέπει την θερμότητα σε έργο. Η θερμότητα παρέχεται εξωτερικά σε ένα κλειστό κύκλωμα, που συνήθως χρησιμοποιεί σαν εργαζόμενο μέσο νερό. Σχεδόν όλοι οι σταθμοί παραγωγής ενέργειας, πυρηνικοί, λιθανθρακικοί, πετρελαϊκοί, χρησιμοποιούν τον κύκλο Rankine για την παραγωγή έργου. Ακόμα ο κύκλος Rankine μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν δευτερεύων κύκλος σε συνδυασμένους κύκλους.



Εικόνα 5-1 :Η υλοποίηση του απλού κύκλου Rankine

Ο βαθμός απόδοσης του κύκλου, όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, είναι  $\eta = \frac{\dot{W}_{turbine} - \dot{W}_{pump}}{\dot{Q}_{in}}$ . Στους σύγχρονους ατμοηλεκτρικούς σταθμούς τυπικοί βαθμοί απόδοσης είναι 40-45%+.

Στον απλό κύκλο Rankine γίνονται οι ακόλουθες διεργασίες:

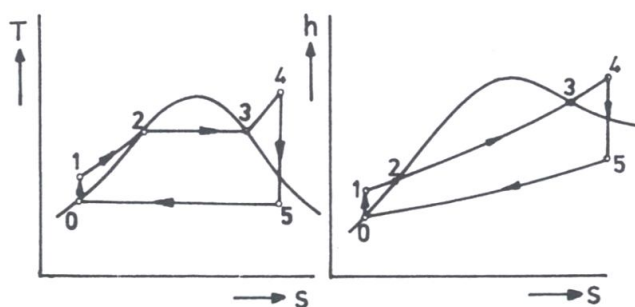
-Διεργασία 1-2 Το εργαζόμενο μέσο αντλείται από χαμηλή σε υψηλή πίεση και καθώς το εργαζόμενο μέσο είναι ασυμπιέστο ρευστό η διεργασία αυτή απαιτεί μικρή σχετικά ισχύ.

- Διεργασία 2-3 Το υψηλής πίεσης υγρό εισέρχεται σε έναν ατμοπαραγωγό, όπου θερμαίνεται σε σταθερή πίεση (πρακτικά πάντα υπάρχουν κάποιες απώλειες πίεσης) από εξωτερική πηγή θερμότητας ώστε να μετατραπεί σε ξηρό ατμό (κορεσμένος στον κύκλο κορεσμένου ατμού, υπέρθερμος στον κύκλο του υπέρθερμου ατμού). Η διεργασία αυτή μπορεί να χωριστεί στα ακόλουθα στάδια:

- Στάδιο προθέρμανσης που γίνεται από την έξοδο της αντλίας (υπόψυκτο νερό) ως την κατάσταση κορεσμού του νερού. Γίνεται στους προθερμαντήρες και στον οικονομητήρα του ατμοπαραγωγού.
- Στάδιο ατμοποίησης: το κορεσμένο νερό ατμοποιείται πλήρως ούτως ώστε να μετατραπεί σε κορεσμένο ατμό. Συντελείται στον ατμοποιητή, ο οποίος δίνει την λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης ανάλογα με την πίεση του τροφοδοτικού νερού.
- Στάδιο υπερθέρμανσης : ο κορεσμένος ατμός, που έχει παραχθεί στον ατμοποιητή, εισέρχεται στον υπερθερμαντή και θερμαίνεται μέχρι την υψηλότερη θερμοκρασία του κύκλου. Αν ο κύκλος είναι κύκλος κορεσμένου νερού τότε δεν υπάρχει υπερθερμαντής.

- Διεργασία 3-4 όπου ο ατμός (κορεσμένος στον κύκλο κορεσμένου ατμού, υπέρθερμος στον κύκλο του υπέρθερμου ατμού) οδηγείται και εκτονώνεται στον ατμοστρόβιλο. Κατά την εκτόνωση μειώνεται η θερμοκρασία και η πίεση του ατμού. Η πίεση εξόδου καθορίζεται από το κενό του συμπυκνωτή. Ανάλογα με την πίεση εξόδου μπορεί να παρουσιαστεί και μερική συμπύκνωση.

- Διεργασία 4-1 όπου ο υγρός ατμός χαμηλής πίεσης οδηγείται στον συμπυκνωτή όπου ψύχεται σε (περίπου) σταθερή πίεση και μετατρέπεται σε κορεσμένο υγρό. Η πίεση και η θερμοκρασία που επικρατούν στον συμπυκνωτή καθορίζονται από την θερμοκρασία των ψυκτικών αγωγών και περυγίων. Οι ψυκτικοί αγωγοί μπορεί να διαρρέονται από αέρα (αερίψυκτος συμπυκνωτής) ή από νερό (υδρόψυκτος συμπυκνωτής).



Εικόνα 5-2 :Ο κύκλος Rankine σε διαγράμματα T-s και h-s

Στον ιδανικό κύκλο Rankine η συμπίεση στις αντλίες και η εκτόνωση στον ατμοστρόβιλο θεωρούνται ισεντροπικές, όπως επίσης θεωρείται ότι δεν υπάρχουν απώλειες πίεσης στον ατμοπαραγωγό και στον συμπυκνωτή. Ωστόσο στην πραγματικότητα αυτές οι μεταβολές δεν είναι ισεντροπικές, είναι μη αναστρέψιμες και αυτό σημαίνει ότι η αντλία καταναλώνει περισσότερη ενέργεια από την ιδανική αντλία και ο στρόβιλος αποδίδει λιγότερη ενέργεια από τον ιδανικό στρόβιλο.

Εκτός αυτού, η απόδοση του ατμοστρόβιλου επηρεάζεται από τον σχηματισμό σταγονιδίων νερού. Κατά την εκτόνωση του ατμού ένα μέρος του ατμού συμπυκνώνεται και σχηματίζονται σταγονίδια, τα οποία προσκρούουν στον ατμοστρόβιλο με μεγάλη ταχύτητα

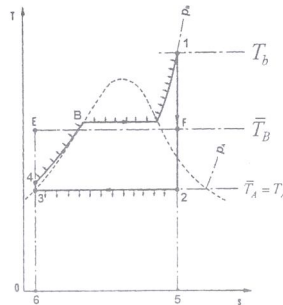
προκαλώντας διάβρωση αλλά και μειώνοντας την αποδοτικότητα του στροβίλου. Για να περιοριστεί αυτό το φαινόμενο υπερθερμαίνεται ο ατμός ή γίνεται αναθέρμανση. Ακόμα οι τελευταίες βαθμίδες του στροβίλου έχουν ιδιαίτερο σχεδιασμό ενώ υπάρχουν σημεία στο κέλυφος του στροβίλου όπου συγκεντρώνεται και απομακρύνεται τυχόν συμπυκνωμένο νερό.

Ο βαθμός απόδοσης του κύκλου Rankine είναι  $\eta_{th} = 1 - \frac{Q_{\text{απορριπτόμενο}}}{Q_{\text{προσφερόμενο}}}$ . Ο κύκλος

Rankine θα μπορούσε να προσεγγιστεί με έναν ισοδύναμο κύκλο Carnot όπου  $\eta_{th} = 1 - \frac{\bar{T}_{out}}{\bar{T}_{in}}$

, όπου  $\bar{T}_{in} = \frac{\int_2^3 T ds}{Q_{in}}$  μέση θερμοκρασία πρόσδοσης θερμότητας και αντίστοιχα  $\bar{T}_{out} = \frac{\int_4^1 T ds}{Q_{out}}$

μέση θερμοκρασία απόρριψης θερμότητας. Για την αύξηση του βαθμού απόδοσης αρκεί να αυξηθεί το  $\bar{T}_{in}$  και να μειωθεί το  $\bar{T}_{out}$ . Έτσι προκειμένου να αυξηθεί ο βαθμός απόδοσης του κύκλου μπορούν να γίνουν τα ακόλουθα:

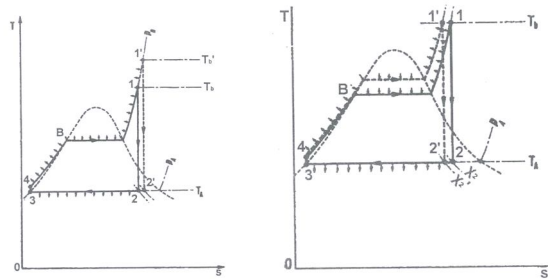


Εικόνα 5-3 :Μέσες θερμοκρασίες κύκλου Rankine σε διάγραμμα T-s

- **Αύξηση των μέσων θερμοκρασιών και πιέσεων του κύκλου**  $\bar{T}_{in} = \frac{\int_2^3 T ds}{Q_{in}}$ . Αυτό

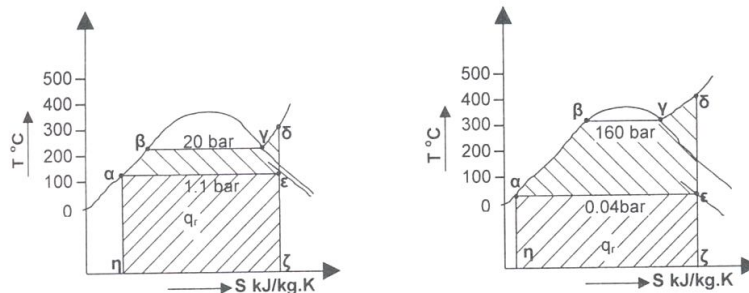
σημαίνει ότι ο ατμός οδηγείται στην υπέρθερμη περιοχή σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες και πιέσεις. Αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας αυξάνει την μέση θερμοκρασία, αλλά οδηγεί και σε μείωση της υγρότητας στην έξοδο του αμοστροβίλου, βελτιώνοντας εκτός από τον βαθμό απόδοσης όλου του κύκλου και τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης του στροβίλου. Αυτή η θερμοκρασιακή αύξηση δεν μπορεί να υπερβεί κάποια όρια δεδομένου ότι τίθεται θέμα αντοχής των υλικών που χρησιμοποιούνται στο τμήμα υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης. Στις περισσότερες σύγχρονες εγκαταστάσεις η μέγιστη θερμοκρασία δεν ξεπερνά τους 565°C. Αύξηση μόνο των πιέσεων ωστόσο με διατήρηση των θερμοκρασιών μπορεί να μην επιφέρει αύξηση του βαθμού απόδοσης καθώς παρ' όλο που αυξάνεται η μέση θερμοκρασία πρόσδοσης θερμότητας, μεγαλύτερο τμήμα της εκτόνωσης γίνεται στην διαφασική περιοχή (υγρός ατμός), πράγμα που μειώνει τον βαθμό απόδοσης του στροβίλου.





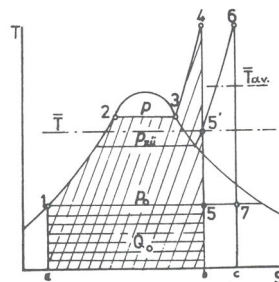
Εικόνα 5-4 :Επίδραση αύξησης θερμοκρασίας και αύξησης πίεσης

- Μείωση των θερμοκρασιών και των πιέσεων συμπίκνωσης.** Η θερμοκρασία συμπίκνωσης είναι άμεσα συνδεδεμένη με την πίεση συμπίκνωσης καθώς η συμπίκνωση γίνεται στην διφασική περιοχή. Αυτό το μέτρο έχει ως αποτέλεσμα την μείωση των μέσων θερμοκρασιών απόρριψης της θερμότητας και άμεση αύξηση του βαθμού απόδοσης. Στο παρακάτω γράφημα φαίνεται η επίδραση αύξησης μέγιστης θερμοκρασίας και πίεσης με παράλληλη μείωση των θερμοκρασιών και πιέσεων συμπίκνωσης. Το εμβαδό του κύκλου αυξάνεται (αύξηση παραγόμενης ισχύος) ενώ μειώνεται η απορριπτόμενη θερμότητα (εμβαδό κάτω από τον κύκλο)

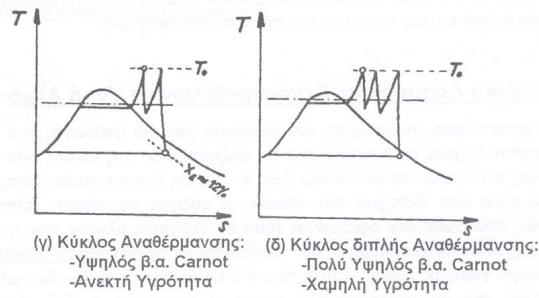


Εικόνα 5-5 :Επίδραση αύξησης μέγιστης θερμοκρασίας και πίεσης με παράλληλη μείωση θερμοκρασίας και πίεσης συμπίκνωσης

- Αναθέρμανση του εργαζόμενου μέσου.** Σε αυτήν την περίπτωση ο ατμός αφού εκτονωθεί κατά ένα μέρος στον αμοστρόβιλο στις βαθμίδες υψηλής πίεσης (ΥΠ), αναθερμαίνεται περίπου σε παρόμοια θερμοκρασία με αυτήν της υπερθέρμανσης, και μετά οδηγείται ξανά στον αμοστρόβιλο στις υπόλοιπες βαθμίδες (μέσης και χαμηλής πίεσης ΜΠ και ΧΠ αντίστοιχα). Αυτό το μέτρο αυξάνει την μέση θερμοκρασία πρόσδοσης της θερμότητας και αυξάνει τον βαθμό απόδοσης, περιορίζει την συμπίκνωση σταγονιδίων στον αμοστρόβιλο και έτσι αυξάνει τον βαθμό απόδοσης και του αμοστροβίλου. Συνήθως γίνεται μια ή δυο αναθερμάνσεις.

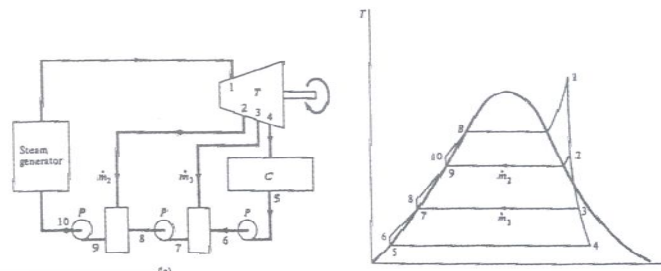


Εικόνα 5-6 :Επίδραση αναθέρμανσης στην απόδοση ισχύος και στην τελική υγρότητα

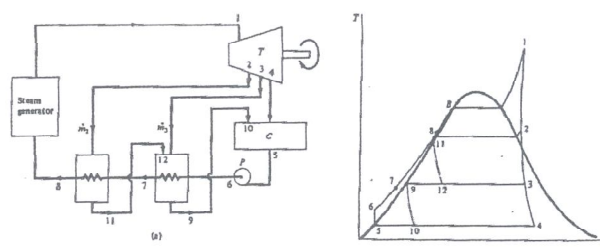


Εικόνα 5-7 :Επίδραση πολλών σταδίων αναθέρμανσης στην απόδοση ισχύος και στην υγρότητα

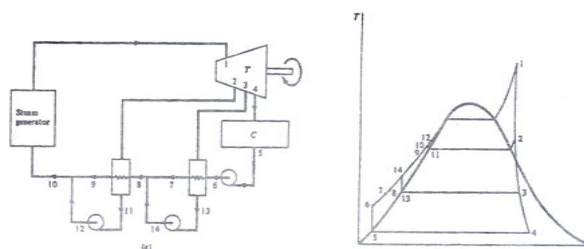
- **Αναγεννητική προθέρμανση.** Κατά την αναγεννητική προθέρμανση γίνεται προθέρμανση του τροφοδοτικού νερού με ατμό που απομαστεύεται από συγκεκριμένες θέσεις του ατμοστρόβιλου. Οι προθερμαντές μειώνουν την απαιτούμενη ενέργεια για την θέρμανση του νερού αλλά μειώνουν και την αποδιδόμενη ενέργεια στον ατμοστρόβιλο. Με σωστό σχεδιασμό μπορούν να αυξήσουν τον βαθμό απόδοσης. Υπάρχουν διάφοροι τύποι προθερμαντών, όπως ανοικτού τύπου, κλειστού τύπου όπου τα συμπυκνώματα οδηγούνται προς τα εμπρός (αναμειγνύονται με το προθερμαινόμενο νερό αφού αυξηθεί η πίεσή τους από κατάλληλη αντλία) και κλειστού τύπου όπου τα συμπυκνώματα οδηγούνται προς τα πίσω (στραγγαλίζονται και οδηγούνται προς τον συμπυκνωτή).



Εικόνα 5-8 :Αναγεννητική προθέρμανση με ανοικτούς προθερμαντές



Εικόνα 5-9 :Αναγεννητική προθέρμανση με εναλλάκτες και τα συμπυκνώματα οδηγούνται προς τα πίσω



Εικόνα 5-10 :Αναγεννητική προθέρμανση με εναλλάκτες και τα συμπυκνώματα οδηγούνται προς τα μπρος

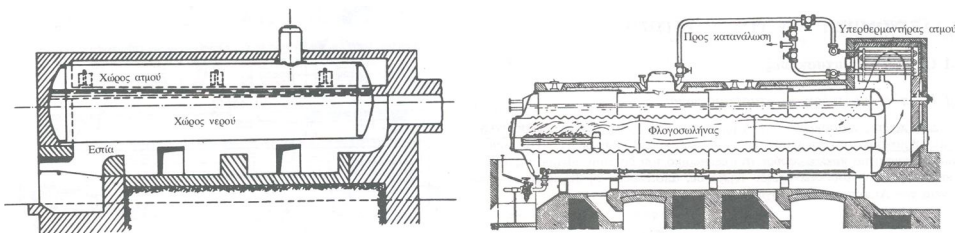
## 5.2 Τμήματα Ατμοηλεκτρικών σταθμών

### 5.2.1 Ατμοπαραγωγός

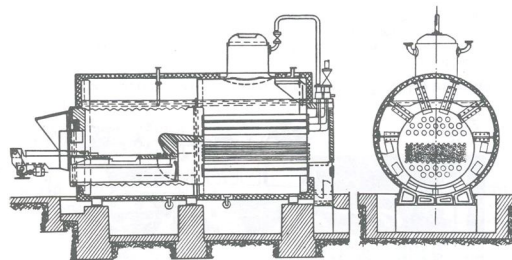
#### Ιστορική αναδρομή και εξέλιξη

Το σημαντικότερο κομμάτι ενός Ατμοηλεκτρικού σταθμού (ΑΗΣ) είναι ο ατμοπαραγωγός. Στις πρώτες κατασκευές ατμοπαραγωγών, το εργαζόμενο μέσο (νερό/ατμός) βρισκόταν στο εσωτερικό ενός μεγάλου κυλινδρικού δοχείου (τυμπάνου), ενώ το καυσαέριο κυκλοφορούσε στο εξωτερικό του δοχείου και μέρος της εξωτερικής επιφάνειας αποτελούσε την θερμαινόμενη επιφάνεια του ατμοπαραγωγού. Ωστόσο, επειδή αυτές οι κατασκευές είχαν ελάχιστη θερμαινόμενη επιφάνεια σε σχέση με τον όγκο τους, είχαν μικρό βαθμό απόδοσης, λόγω της μικρής θερμικής εκμετάλλευσης της θερμικής ενέργειας και έδιναν μικρές παροχές ατμού, ενώ ταυτόχρονα ήταν δαπανηρές. Ακόμα ο ατμός ήταν μικρής πίεσης και θερμοκρασίας, λόγω περιορισμών από την ίδια την κατασκευή.

Επόμενες προσπάθειες κατασκευής ήταν ο ατμοπαραγωγός με φλογοσωλήνα, όπου στο εσωτερικό του τυμπάνου βρίσκεται σωλήνας μέσα στον οποίο γίνεται η καύση και αποτελεί την πρώτη διαδρομή του καυσαερίου, ο ατμοπαραγωγός με φλογοσωλήνα και αεριαυλούς, παρόμοιος με τον προηγούμενο αλλά στους αεριαυλούς το καυσαέριο ρέει σε δεύτερη ή και τρίτη διαδρομή, ενώ υπήρξαν και παραλλαγές των παραπάνω τύπων, π.χ. ατμοπαραγωγός μόνο με αεριαυλούς.



Εικόνα 5-11 :Απλός κυλινδρικός ατμοπαραγωγός (αριστερά) και ατμοπαραγωγός με φλογοσωλήνα (δεξιά)



Εικόνα 5-12 :Ατμοπαραγωγός με αεριαυλούς

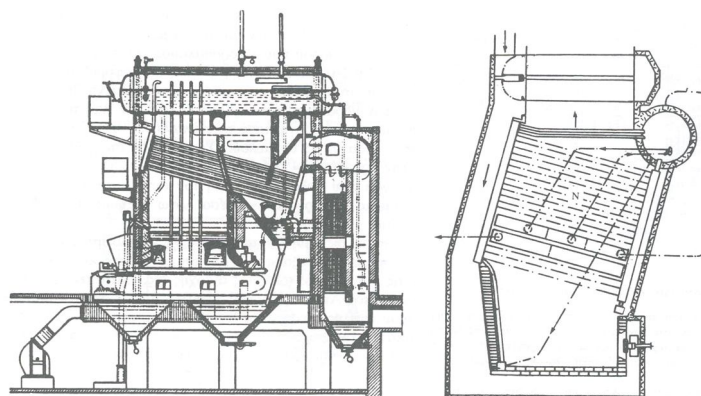
Όλοι οι ατμοπαραγωγοί που περιγράφηκαν παραπάνω χαρακτηρίζονται από μεγάλο υδροθάλαμο, που ένα μέρος της εξωτερικής του επιφάνειας αποτελεί επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας μεταξύ καυσαερίου και νερού. Η εγκατάσταση αυτή χαρακτηρίζεται από μικρή θερμαινόμενη επιφάνεια, ανά μονάδα όγκου της εγκατάστασης. Εξαιτίας αυτού οι ατμοπαραγωγοί αυτοί είναι ακατάλληλοι για υψηλές τιμές ατμοπαραγωγής γιατί συνεπάγονται τεράστιες κατασκευές μεγάλου κόστους. Πέρα από αυτό και η πίεση του παραγόμενου ατμού είναι πολύ μικρή, καθώς μεγάλη πίεση συνεπάγεται μεγάλα πάχη ελάσματος τυμπάνου και φλογοσωλήνα που σημαίνει ογκώδη και δαπανηρή κατασκευή.

Επίσης ο τρόπος συγκρότησής τους κάνει τον ατμοπαραγωγό ακατάλληλο για θερμικές φορτίσεις και καταπονήσεις.

Γι' αυτούς τους λόγους όλοι οι ατμοπαραγωγοί αυτοί αντικαταστάθηκαν, τουλάχιστον στις μεγάλες μονάδες, με κατασκευές βασισμένες σε τελείως διαφορετικές αρχές. Στους νέους ατμοπαραγωγούς, ολόκληρη η επιφάνεια συναλλαγής αποτελείται από πλήθος σωλήνων μικρής διαμέτρου, μέσα στους οποίους κυκλοφορεί το ατμοποιούμενο νερό ή ο υπερθερμαινόμενος ατμός, ενώ στο εξωτερικό κυκλοφορεί το καυσαέριο και γι' αυτό τον λόγο ονομάστηκαν υδραυλωτοί. Πλεονεκτούν έναντι των παλαιών ως προς:

- Μεγάλη επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας ανά μονάδα όγκου περιεχόμενου νερού, με συνέπεια, μεγάλη συνεχής παροχή ατμού για μικρό σχετικά όγκο της εγκατάστασης
- Επίτευξη μικρών χρόνων ατμοποίησης
- Δυνατότητα παραγωγής ατμού μεγάλης πίεσης με σχετικά μικρά απαιτούμενα πάχη σωλήνων, λόγω της μικρής διαμέτρου.
- Ελαστικότητα κατασκευής και δυνατότητα μεγάλων θερμικών φορτίσεων
- Βελτίωση βαθμού απόδοσης ατμοπαραγωγού, λόγω πληρέστερης εκμετάλλευσης της θερμότητας του καυσαερίου, αλλά και καλύτερης λειτουργίας όλου του θερμοδυναμικού κύκλου λόγω αυξημένων πιέσεων και θερμοκρασιών.
- Μικρό κόστος κατασκευής επειδή το υλικό κατασκευής είναι φθηνό αλλά και το κόστος συγκρότησης είναι σχετικά μικρό.

Οι υδραυλωτοί ατμοπαραγωγοί συνεχίζουν να έχουν τύμπανο αλλά αυτό έπαψε να είναι μέρος της θερμαινόμενης επιφάνειας και ο ρόλος του περιορίστηκε στην αποθήκευση του νερού και στον διαχωρισμό του νερού από τον ατμό.

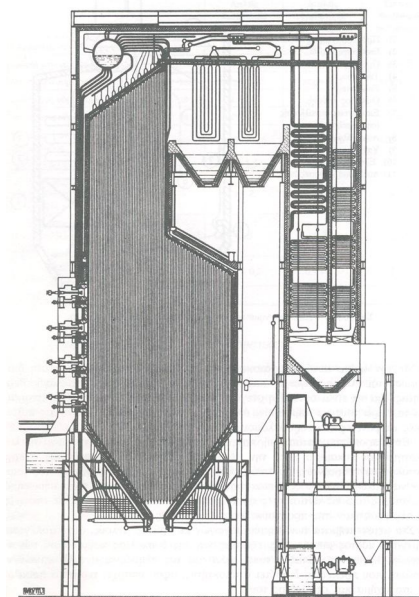


**Εικόνα 5-13 :Υδραυλωτός ατμοπαραγωγός με στοιχεία και υδροθάλαμο τοποθετημένο κατά μήκος (αριστερά) και υδραυλωτός ατμοπαραγωγός με στοιχεία και εγκάρσιο υδροθάλαμο (δεξιά)**

#### *Ατμοπαραγωγός με ορθούς υδραυλούς*

Αυτού του τύπου ο ατμοπαραγωγός αποτελείται από κυλινδρικά τύμπανα, υδραυλούς και συλλέκτες (χαλύβδινα δοχεία κυκλικής ή ορθογωνικής διατομής στα οποία συγκεντρώνεται το περιεχόμενο ορισμένων υδραυλών και στην συνέχεια διαμοιράζεται σε άλλη ομάδα υδραυλών). Το τροφοδοτικό νερό μετά την προθέρμανσή του οδηγείται στο κύριο υδροθάλαμο απ' όπου με σωλήνες μεγάλης σχετικά διατομής με μέτρια ή και χωρίς θερμική φόρτιση, κατεβαίνει προς τους συλλέκτες. Από τους συλλέκτες διαμοιράζεται στους υδραυλούς ατμοποίησης, οι οποίοι μετά την θέρμανση, το οδηγούν ως πλούσιο σε υδρατμό μείγμα, πίσω στον υδροθάλαμο. Κάθε υδραυλός επικοινωνεί κατευθείαν με το εσωτερικό του αντίστοιχου συλλέκτη και υδροθαλάμου, πάνω στους οποίους είναι στεγανά συγκολλημένος.

Με τον τρόπο αυτό ο κατασκευαστής έχει μεγαλύτερη ευχέρεια στη διαμόρφωση του ατμοπαραγωγού και τη διάταξη της επιφάνειας συλλογής θερμότητας. Έτσι προκύπτει κατασκευή που αν στερεωθεί κατάλληλα έχει μεγάλη ελαστικότητα και ευκαμψία κατά την θέρμανση, εξαιτίας της δυνατότητας διαστολής των υδραυλών. Ως μειονέκτημα όμως παρουσιάζεται το γεγονός του αυξημένου κόστους συντήρησης, αλλά και το γεγονός ότι θα πρέπει να υπάρχει διαθέσιμη μια πληθώρα διαφορετικών ανταλλακτικών υδραυλών.



**Εικόνα 5-14 :Ατμοπαραγωγός με ορθούς υδραυλούς**

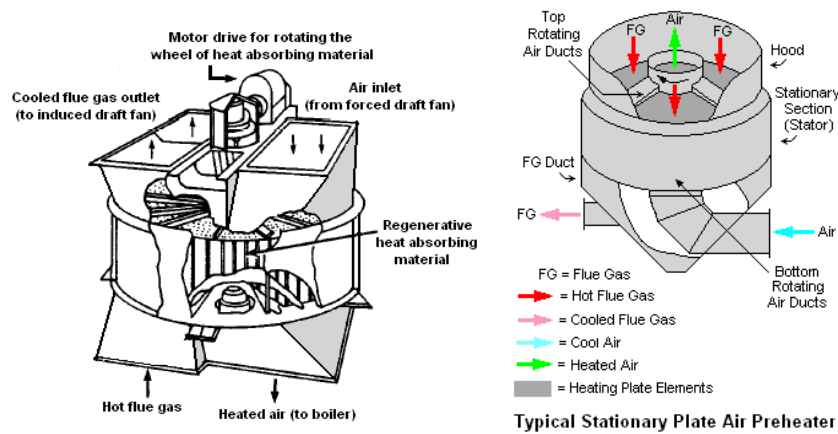
Η παραπάνω κατηγορία αποτελεί και τους σύγχρονους ατμοπαραγωγούς. Οι σύγχρονοι ατμοπαραγωγοί ονομάζονται ατμοπαραγωγοί ακτινοβολίας καθώς ένα μεγάλο μέρος της αναγκαίας για την ατμοποίηση θερμότητας προσδίδεται στους σωλήνες που περιέχουν το εργαζόμενο μέσο με την μορφή ακτινοβολίας από το εργαζόμενο μέσο στον θάλαμο καύσης. Στους ατμοπαραγωγούς ακτινοβολίας ο θάλαμος καύσης επενδύεται μερικά ή ολικά με τους σωλήνες που αποτελούν την επιφάνεια ατμοποίησης. Έτσι καθ' όλη την διάρκεια της καύσης η φλόγα και το παραγόμενο καυσαέριο ακτινοβολούν έντονα προς τους σωλήνες προσδίδοντάς τους μεγάλα ποσά θερμότητας για την ατμοποίηση. Η εισαγωγή της επένδυσης του θαλάμου με τους υδραυλούς είχε γίνει για την αντιμετώπιση της ψύξης των τοιχωμάτων του θαλάμου, αλλά το γεγονός ότι οι σωλήνες αυτοί απορροφούσαν μεγάλα ποσά θερμότητας μέσω της ακτινοβολίας, εξαιτίας της υψηλής θερμοκρασίας φλόγας και του καυσαερίου, οδήγησε στην χρησιμοποίηση αυτής της θερμότητας για την ατμοποίηση και καθιέρωσε τον ατμοπαραγωγό ακτινοβολίας, που χρησιμοποιείται αποκλειστικά στις μεγάλες μονάδες.

Οι σύγχρονοι ατμοπαραγωγοί εκτός από το σύστημα ατμοποίησης που έχει ήδη αναφερθεί, συμπεριλαμβάνουν και :

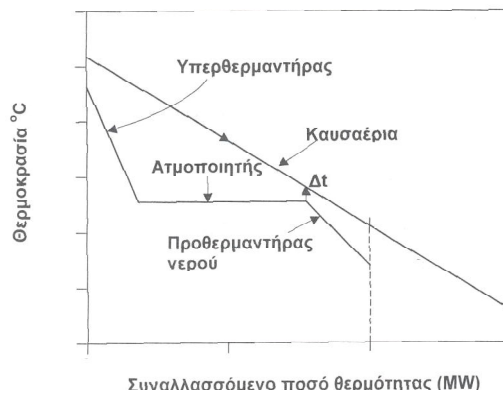
- Υπερθερμαντήρες. Μετά τον ατμοποιητή ακολουθεί το σύστημα υπερθέρμανσης. με σκοπό την αύξηση της θερμοκρασίας του κορεσμένου ατμού. Ο υπερθερμαντήρας αποτελείται από ένα ή περισσότερα τμήματα (σερπαντίνες σωλήνων) που τοποθετούνται σε διαφορετικά σημεία στην ροή των καυσαερίων. Μεταξύ των τμημάτων του υπερθερμαντήρα τοποθετούνται ψύκτες ατμού, συνήθως με την ανάμειξη υπέρθερμου ατμού με τροφοδοτικό νερό, για τον έλεγχο της θερμοκρασίας του ατμού. Ανάλογα με την θέση τοποθέτησης του υπερθερμαντήρα και τον τρόπο

μετάδοσης της θερμότητας γίνεται η διάκριση σε υπερθερμαντήρες ακτινοβολίας και σε υπερθερμαντήρες επαφής-μεταφοράς.

- Αναθερμαντήρες. Ο αναθερμαντής ατμού, είναι μια επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας που χρησιμεύει για την αναθέρμανση του ατμού μετά την μερική του αποτόνωση στον αμοστρόβιλο. Η κατασκευή του αναθερμαντή είναι ίδια με αυτήν του υπερθερμαντή, ενώ η θερμοκρασία εξόδου από τον αναθερμαντή είναι περίπου ίδια με αυτήν του υπερθερμαντή. Και εδώ γίνεται έλεγχος της θερμοκρασίας του ατμού με διάφορους τρόπους, όπως ψεκασμό νερού, επαναφορά ψυχρών καυσαερίων, εναλλάκτη θερμότητας κλπ.
- Προθερμαντήρες νερού (ECO, οικονομητήρας). Ο προθερμαντήρας νερού προθερμαίνει το νερό τροφοδοσίας του αμοπααραγωγού, πριν οδηγηθεί στο σύστημα ατμοποίησης. Η θερμότητα που φέρουν ακόμα τα καυσαέρια, τα οποία έχουν προσφέρει ήδη θερμότητα στις επιφάνειες του συστήματος ατμοποίησης, υπερθερμαντήρα και αναθερμαντήρα, αξιοποιούνται με την θέρμανση τροφοδοτικού νερού μέχρις θερμοκρασίας μικρότερης 30-50° C της θερμοκρασίας κορεσμού που αντιστοιχεί στην πίεση λειτουργίας. Αυτό συμβαίνει για να αποφευχθεί ατμοποίηση στον οικονομητήρα σε περίπτωση μείωσης της πίεσης, κάτι που θα επέφερε ανομοιόμορφη κατανομή του μείγματος στους σωλήνες του συστήματος ατμοποίησης. Οι οικονομητήρες αποτελούνται από συλλέκτες εισόδου και εξόδου από σερπαντίνες χαλυβδοσωλήνων γυμνών ή με πτερύγια.
- Προθερμαντήρας αέρα καύσης. Η χρησιμοποίηση προθερμαντήρων αέρα καύσης, βελτιώνει τον βαθμό απόδοσης του αμοπααραγωγού, μειώνοντας τη θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων (και κατά συνέπεια την απορριπτόμενη θερμότητα από αυτήν την οδό) και επίσης συμβάλλει σημαντικά στην καλύτερη και ταχύτερη διεργασία της καύσης ιδιαίτερα αν το καύσιμο έχει μεγάλη περιεκτικότητα σε υγρασία. Η τελική θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων από τον προθερμαντήρα αέρα εξαρτάται από το σημείο δρόσου των καυσαερίων και δεν πρέπει ποτέ να είναι μικρότερη από αυτήν, αλλιώς υπάρχει έντονος κίνδυνος διάβρωσης από συμπύκνωση θεικού οξέος (σε περίπτωση που χρησιμοποιείται καύσιμο με θείο). Όσο μεγαλύτερη είναι η περιεκτικότητα του καυσίμου σε θείο τόσο μικρότερη είναι η επιτρεπόμενη μείωση της θερμοκρασίας των καυσαερίων στην έξοδο του προθερμαντή αέρα. Υπάρχουν διάφοροι προθερμαντήρες αέρα, όπως προθερμαντήρες με πλάκες και προθερμαντήρες αέρα με σωλήνες. Οι προθερμαντήρες με σωλήνες αποτελούνται από σωλήνες που διέρχονται από τον χώρο εξαγωγής των καυσαερίων, μέσα στους οποίους διέρχεται ο αέρας καύσης για την προθέρμανσή του. Οι προθερμαντήρες με πλάκες χωρίζονται σε δυο κατηγορίες : στους αναγεννητικούς προθερμαντήρες περιστρεφόμενων πλακών και στους αναγεννητικούς προθερμαντήρες σταθερών πλακών. Στην πρώτη κατηγορία η κατασκευή αποτελείται από μια περιστρεφόμενη συστοιχία πλακών που βρίσκονται σε ένα περίβλημα αποτελούμενο από δυο ή παραπάνω τμήματα. Τα χωρίσματα είναι σφραγισμένα ώστε να διατηρούν τις διαρροές αέρα στο ελάχιστο. Στο ένα τμήμα διέρχεται το καυσαέριο και θερμαίνει τις πλάκες οι οποίες μετά βρίσκονται μέσα στο ρεύμα του αέρα θερμαίνοντάς το. Στην δεύτερη περίπτωση, οι πλάκες δεν περιστρέφονται, αλλά αντίθετα αλλάζουν περιοδικά οι χώροι από τους οποίους διέρχεται ο αέρας και το καυσαέριο.



Εικόνα 5-15 :Προθερμαντές αέρα με καυσαέριο. Αριστερά με περιστρεφόμενες πλάκες και δεξιά με σταθερή συστοιχία πλακών



Εικόνα 5-16 :Μεταβολή θερμοκρασία νερού/ατμού και καυσαερίου

### Ατμοπαραγωγός υπερκρίσιμων πιέσεων

Η ιδέα της κατασκευής ατμοπαραγωγών με πίεση λειτουργίας πάνω από την κρίσιμη (221bar) στηρίχθηκε στην ιδιότητα του υδρατμού, ο οποίος στην κρίσιμη πίεση έχει θερμότητα ατμοποίησης μηδενική. Αυτό σημαίνει ότι αν το τροφοδοτικό νερό θερμανθεί στον ατμοπαραγωγό διατηρούμενο σε πίεση πάνω από την κρίσιμη, τότε θα μετασχηματιστεί αμέσως σε ατμό χωρίς να περάσει από την κατάσταση διφασικού μείγματος. Σε τέτοιου είδους ατμοπαραγωγούς δεν χρειάζεται και το τύμπανο, του οποίου σκοπός είναι ο διαχωρισμός υγρής και αέριας φάσης.

Την παραπάνω ιδέα χρησιμοποίησε ο Benson, ο οποίος δημιούργησε έναν ατμοπαραγωγό που αποτελείται μόνο από σωλήνες και συλλέκτες. Χαρακτηριστικό αυτού του ατμοπαραγωγού είναι ότι η προθέρμανση του νερού, η ατμοποίηση και η υπερθέρμανση συμβαίνουν σε μια διαδρομή του εργαζόμενου μέσου. Το σύστημα ατμοποίησης αποτελείται από σωληνοτοιχώματα, χωρίς την ανάγκη ενδιάμεσων συλλεκτών. Οι σωλήνες στο σωληνοτοιχώμα μπορούν να τοποθετηθούν εναλλάξ υπό κλίση, κατακόρυφα ή υπό κλίση ανερχόμενη. Η υπό κλίση κατασκευή του σωληνοτοιχώματος έχει το μεγάλο πλεονέκτημα ίδιου μήκους σωλήνων και της ίδιας θερμικής φόρτισης αφού κάθε σωλήνας θα διατρέχει τις ίδιες περιοχές θέρμανσης. Η ταχύτητα στους σωλήνες θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε να αποφεύγεται η υπερθέρμανση των τοιχωμάτων, αλλά και να αποφεύγονται διάφορα προβλήματα αστάθειας που μπορούν να προκύψουν στο σύστημα ατμοποίησης. Σε χαμηλό φορτίο πρέπει να τοποθετηθεί αντλία ανακυκλοφορίας, ενώ στο τέλος του συστήματος πρέπει

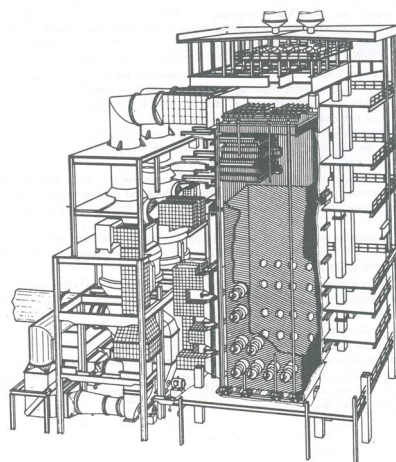
να υπάρχει σύστημα διαχωρισμού νερού ατμού. Το νερό που δεν χρησιμοποιήθηκε επαναφέρεται πριν από τον προθερμαντήρα στην είσοδο του συστήματος ατμοποίησης.

Κατά τις μεταβολές φορτίου μεταβάλλεται και το σημείο ατμοποίησης ενώ αν η παροχή καυσίμου μειωθεί πάρα πολύ μπορεί το τελικό σημείο ατμοποίησης να βρεθεί μέσα στο δοχείο διαχωρισμού.

Λόγω της έλλειψης τυμπάνου, το οποίο αποτελεί και αποθήκη νερού για τον ατμοπαραγωγό, το περιεχόμενο του ατμοπαραγωγού είναι σχετικά μικρό με αποτέλεσμα ο ατμοπαραγωγός να είναι ευαίσθητος σε μεταβολές του φορτίου και να απαιτούνται ιδιαίτερες διατάξεις ρύθμισης του καυσίμου και του νερού.

Πλεονεκτήματα αυτού του τύπου ατμοπαραγωγού είναι:

- Φθινό κόστος
- Μεγάλη ατμοπαραγωγή
- Αύξηση της πίεσης λειτουργίας και πάνω από το κρίσιμο σημείο
- Μεγάλη ταχύτητα μεταβολής θερμοκρασιών
- Σταθερή θερμοκρασία υπέρθερμου ατμού



Εικόνα 5-17: Ατμοπαραγωγός Benson

### 5.2.2 Αντλίες

Ένας ατμοηλεκτρικός σταθμός περιλαμβάνει πάρα πολλές αντλίες. Οι κυριότερες είναι :

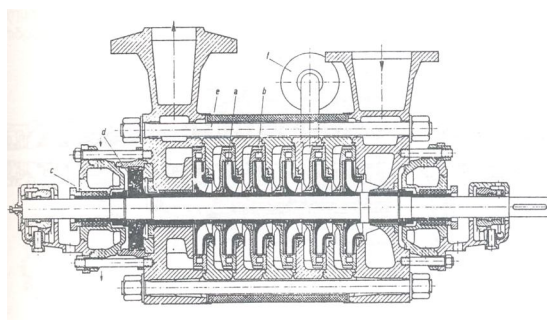
- Τροφοδοτικές αντλίες που αντλούν το τροφοδοτικό νερό από την τροφοδοτική δεξαμενή και το καταθλίζουν στον ατμοπαραγωγό μέσω των προθερμαντών νερού υψηλής πίεσης. Αυτές οι αντλίες είναι υψηλής πίεσης και μπορεί να είναι φυγοκεντρικές ή θετικής εκτόπισης. Στην περίπτωση των φυγοκεντρικών αντλιών αυτές είναι πολυβάθμιες προκειμένου να φτάσουν την υψηλή πίεση που απαιτείται. Είναι μεγάλης ισχύος και κινούνται από ηλεκτροκινητήρα που δεν είναι ενσωματωμένος στο κύριο σώμα της αντλίας αλλά είναι μηχανικά συνδεδεμένος με αυτήν, ενώ συνήθως τροφοδοτούνται από δυο ανεξάρτητες μεταξύ τους πηγές ενέργειας. Η αντλία πρέπει να υπερνικήσει την πίεση ατμού που σχηματίζεται στον ατμοπαραγωγό. Σε κάθε μονάδα γίνεται εγκατάσταση τριών ηλεκτροκίνητων αντλιών και κάθε αντλία μπορεί να παρέχει το 50% της αναγκαίας παροχής τροφοδοτικού νερού. Έτσι για το πλήρες φορτίο είναι αναγκαία η λειτουργία δυο



αντλιών ενώ η τρίτη μένει σε εφεδρεία. Κατά τον υπολογισμό της πίεσης της τροφοδοτικής αντλίας πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν οι ακόλουθες αντιστάσεις:

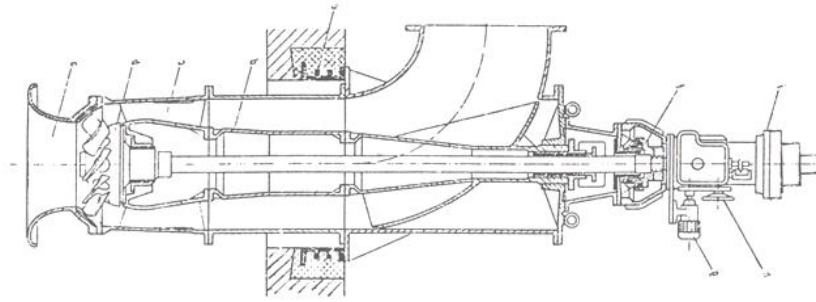
- Αντίσταση των σωλήνων μεταξύ αντλίας ατμοπαραγωγού
- Αντίσταση προθερμαντών νερού υψηλής πίεσης
- Αντίσταση απομονωτικών βαλβίδων και οργάνων
- Αντίσταση ρυθμιστικών βαλβίδων
- Αντιστάσεις μέσα στον ατμοπαραγωγό

Μια τροφοδοτική αντλία πρέπει να έχει όσο το δυνατό καλύτερο βαθμό απόδοσης σε όσο το δυνατό μεγαλύτερη περιοχή φορτίου, γρήγορη εκκίνηση από ψυχρή και θερμή κατάσταση και όσο το δυνατό μεγαλύτερη ασφάλεια λειτουργίας.



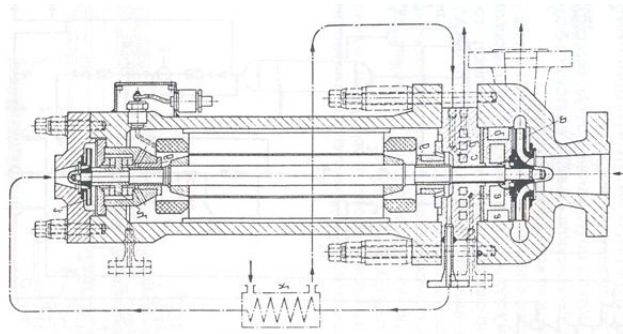
Εικόνα 5-18 : Σχέδιο τροφοδοτικής αντλίας

- Αντλίες συμπυκνώματος που αντλούν το συμπύκνωμα από τον συμπυκνωτή και το καταθλίβουν μέσω των προθερμαντών χαμηλής πίεσης στον απαερωτή και στην δεξαμενή τροφοδοτικού νερού. Κατά κανόνα εγκαθίστανται δυο αντλίες συμπυκνώματος μια εκ των οποίων είναι εφεδρική. Κάθε αντλία πρέπει να είναι σε θέση να αντλεί την μέγιστη ποσότητα συμπυκνώματος που μπορεί να προκύψει στις δυσμενέστερες συνθήκες λειτουργίας. Οι αντλίες συμπυκνώματος αντλούν νερό κοντά στην κατάσταση κορεσμού. Εάν η γεωδαιτική διαφορά ύψους μεταξύ της στάθμης του συμπυκνωτή και της αναρρόφησης της αντλίας δεν είναι αρκετή επέρχεται με τον σχηματισμό φυσαλίδων ατμού σπηλαίωση με καταστρεπτικές συνέπειες.
- Αντλίες κυκλοφορίας ψυκτικού νερού, που είναι οι υπεύθυνες για την κυκλοφορία του ψυκτικού νερού μέσα στον συμπυκνωτή της μονάδας. Η παροχή του ψυκτικού νερού καθορίζεται από το νερό που απαιτείται για την συμπύκνωση του ατμού που εξέρχεται από τον στρόβιλο. Το απαιτούμενο ψυκτικό νερό για τις υπόλοιπες λειτουργίες είναι περίπου το 5-10% του νερού για την ψύξη του συμπυκνωτή. Η πιο συνήθης διάταξη αυτών των αντλιών είναι δυο αντλίες κάθε μια από τα οποίες διακινεί τα 2/3 της συνολικής παροχής. Οι αντλίες που χρησιμοποιούνται στους μεγάλους σύγχρονους ατμοηλεκτρικούς σταθμούς είναι τύπου έλικας και συνήθως τοποθετούνται κάτω από την στάθμη του νερού για την εξοικονόμηση χρημάτων για την κατασκευή ειδικών στεγανών χώρων για την εγκατάστασή τους. Είναι συνήθως κατακόρυφου άξονα και για την περιστροφή τους χρησιμοποιούνται τριφασικοί κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα με ή χωρίς μειωτή στροφών ανάλογα με τις στροφές της αντλίας. Μπορούν να ρυθμίζονται εύκολα χωρίς απώλειες με μεταβολή της γωνίας κλίσης των πτερυγίων.



**Εικόνα 5-19 : Σχέδιο αντλίας ψυκτικού μέσου**

- Αντλίες ανακυκλοφορίας νερού ατμοπαραγωγού σε περίπτωση ατμοπαραγωγών τεχνητής κυκλοφορίας ή ατμοπαραγωγών τύπου Benson-Sulzer με διάταξη εκκίνησης με αντλίες ανακυκλοφορίας. Οι αντλίες αυτές λειτουργούν σε πολύ μεγάλες θερμοκρασίες και πιέσεις στην αναρρόφηση ενώ η πίεση στην αντλία αυξάνει κατά 2,5bar περίπου. Για πιέσεις μεγαλύτερες των 120bar δεν χρησιμοποιούνται στυπιοθλίπτες και χρησιμοποιείται κινητήρας υγρού δρομέα, όπου το εσωτερικό του κινητήρα της αντλίας βρίσκεται στην πλήρη πίεση του νερού του ατμοπαραγωγού. Επειδή είναι αναγκαία η προστασία της μόνωσης των τυλιγμάτων του κινητήρα, χρησιμοποιείται ένα θερμικό φράγμα από διακινούμενο (από μια μικρότερη αντλία) ψυκτικό νερό.



**Εικόνα 5-20 : Σχέδιο αντλίας ανακυκλοφορίας**

- Αντλίες διακίνησης πετρελαίου
- Αντλίες νερού δικτύου πυρκαγιάς
- Αντλίες κυκλοφορίας νερού κλειστών κυκλωμάτων ψύξης
- Αντλίες διακίνησης αφαλατωμένου νερού στο σύστημα χημικής ή θερμικής κατεργασίας του νερού
- Αντλίες διακίνησης διαφόρων χημικών ουσιών
- Αντλίες απόνερων
- Αντλίες δημιουργίας κενού στον συμπυκνωτή
- Αντλίες του συστήματος απομάκρυνσης τέφρας
- Αντλίες ελαίου λίπανσης και στεγανοποίησης
- Άλλες αντλίες.

### 5.2.3 Προθερμαντής τροφοδοτικού νερού με ατμό

Πριν την είσοδο του νερού στον οικονομητήρα του ατμοπαραγωγού πολλές φορές το νερό προθερμαίνεται με την χρήση προθερμαντήρων με ατμό. Ο ατμός αυτός προέρχεται από απομάστευση από τον ατμοστρόβιλο της εγκατάστασης σε κατάλληλη πίεση ούτως ώστε να έχει την κατάλληλη θερμοκρασία. Επομένως ένα ποσοστό της ατμοπαραγωγής δεν χρησιμοποιείται για την παραγωγή έργου αλλά για την προθέρμανση του τροφοδοτικού νερού. Με κατάλληλο σχεδιασμό αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι:

- Προσδίδεται λιγότερη θερμότητα εξωτερικά για ατμοποίηση
- Οι σταδιακές προθερμάνσεις (που είναι απαραίτητες για να αποφευχθούν οι θερμικές τάσεις λόγω της μεγάλης θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ εξόδου του συμπυκνωμένου νερού από τον συμπυκνωτή και εισόδου θερμών καυσαερίων στον οικονομητήρα) έχουν ως αποτέλεσμα να μειώνεται η μη αντιστρεπτότητα της μεταφοράς θερμότητας, αυξάνοντας τον βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης.

Η προθέρμανση του τροφοδοτικού νερού μπορεί να γίνει σε ανοικτούς ή κλειστούς προθερμαντές. Στους ανοικτούς προθερμαντές ο ατμός αναμειγνύεται άμεσα με το προς προθέρμανση τροφοδοτικό νερό. Ένα παράδειγμα ανοικτού προθερμαντή είναι ο απαιρειωτής. Οι κλειστοί προθερμαντές είναι ουσιαστικά εναλλάκτες θερμότητας στους οποίους συμπυκνώνεται ατμός προσδίδοντας θερμότητα στο νερό, ενώ είναι πιθανό να υποψυχθεί το συμπύκνωμα δίνοντας επιπλέον θερμότητα για την προθέρμανση του νερού. Το συμπύκνωμα που προκύπτει μπορεί είτε να οδηγηθεί στον συμπυκνωτή (συμπυκνώματα οδηγούνται πίσω), είτε με αντλίες να αυξηθεί η πίεσή του και να αναμειχθεί με το τροφοδοτικό νερό (συμπυκνώματα οδηγούνται εμπρός).

### 5.2.4 Συμπυκνωτές και πύργοι ψύξης

Ο συμπυκνωτής χρησιμεύει για να συμπυκνώσει τον ατμό που βγαίνει από τον στρόβιλο, με σκοπό το συμπυκνούμενο νερό να ξαναχρησιμοποιηθεί από τον ατμοπαραγωγό. Ο λόγος που το νερό ξαναχρησιμοποιείται είναι γιατί το νερό αυτό είναι υψηλής καθαρότητας, απαλλαγμένο από άλατα ( πράγμα που σημαίνει αποφυγή διαβρώσεων ή επικαθήσεων) και εκ του λόγου αυτού είναι ασύμφορο να αποσυρθεί από την διαδικασία.

Πρακτικά ο συμπυκνωτής είναι ένας εναλλάκτης θερμότητας όπου ατμός με χαμηλή πίεση συμπυκνώνεται με την βοήθεια ψυκτικού μέσου, που μπορεί να είναι νερό ή αέρας. Όσο χαμηλότερη είναι η πίεση του συμπυκνωτή τόσο καλύτερη είναι η απόδοση του ατμοστρόβιλου καθώς αυξάνεται η ενθαλπική πτώση στον στρόβιλο. Επομένως ο συμπυκνωτής είναι βασικό τμήμα της εγκατάστασης, αλλά παράλληλα αποτελεί και την μέγιστη θερμική απώλεια ενός θερμικού σταθμού καθώς η λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης απάγεται από το νερό ψύξης. Η πίεση του συμπυκνωτή εξαρτάται από την θερμοκρασία συμπύκνωσης που με την σειρά της καθορίζεται από την θερμότητα του ψυκτικού μέσου και την μετάδοση θερμότητας.

Κατά τις εκκινήσεις, κρατήσεις καθώς και σε ξαφνικές πτώσεις φορτίου ένα μέρος του ατμού παρακάμπτει τον στρόβιλο και εισέρχεται απ' ευθείας στον συμπυκνωτή όπου συμπυκνώνεται. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγονται απώλειες συμπυκνώματος ή το άνοιγμα των ασφαλιστικών βαλβίδων. Ακόμα ο συμπυκνωτής χρησιμοποιείται σαν δεξαμενή

συγκέντρωσης των συμπυκνωμάτων του στροβίλου, των προθερμαντών και του νερού συμπλήρωσης του κυκλώματος νερού - ατμού της εγκατάστασης.

Τμήματα του συμπυκνωτή:

- Κυρίως συμπυκνωτής
- Αντλίες ψυκτικού νερού ή ανεμιστήρες ψυκτικού αέρα
- Αντλίες συμπυκνώματος
- Συσκευή αναρρόφησης του αέρα και δημιουργίας κενού
- Σωλήνες βαλβίδες κ.λπ.

### *Ψυκτικό μέσο*

Υπάρχουν τρεις κατηγορίες συμπυκνωτών ανάλογα με το ψυκτικό μέσο που χρησιμοποιούν:

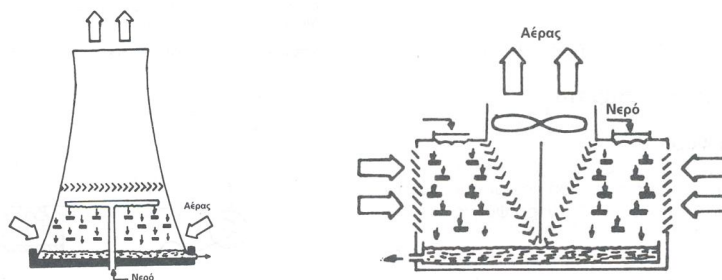
- Άμεσα αερόψυκτοι
- Έμμεσα αερόψυκτοι
- Άμεσα υδρόψυκτοι

Στους άμεσα αερόψυκτους δεν απαιτείται καθόλου νερό, αλλά η παραγόμενη ισχύς και ο βαθμός απόδοσης είναι χαμηλός καθώς τα επίπεδα κενού δεν είναι τόσο χαμηλά, λόγω μειωμένης μετάδοσης θερμότητας. Ωστόσο χρησιμοποιούνται σε ξηρές και άνυδρες περιοχές.

Στους άμεσα υδρόψυκτους απαιτείται νερό για την ψύξη του συμπυκνωτή. Αυτού του τύπου ο συμπυκνωτής χρησιμοποιείται σε περιοχές πλούσιες σε νερό. Το νερό αφού διέλθει από τον συμπυκνωτή ψύχοντάς τον αποβάλλεται στην πηγή από την οποία προήλθε (ποτάμι, λίμνη κ.λπ.). Δεδομένου ότι με την μέθοδο αυτή υπάρχει πάντα ο φόβος της θερμικής φόρτισης των υδάτων και επειδή με μικρή ανύψωση της θερμοκρασίας των υδάτων είναι πιθανή η καταστροφή των ζωντανών οργανισμών στο υδάτινο οικοσύστημα προτιμάται η χρήση πύργου ψύξης. Τότε έχουμε έμμεσα αερόψυκτους όπου το νερό ψύχει τον συμπυκνωτή και αυτό ψύχεται στην συνέχεια σε έναν πύργο ψύξης.

Οι πύργοι ψύξης χωρίζονται σε δυο κατηγορίες, στους υγρούς πύργους ψύξης και στους ξηρούς πύργους ψύξης.

Οι υγροί πύργοι ψύξης είναι μια δεξαμενή νερού σχήματος τετραγωνικού ή συνηθέστερα κυλινδρικού. Το νερό εισέρχεται σε ανώτερα τμήματα της δεξαμενής όπου και κατανέμεται σε μεγάλο αριθμό καναλιών, απ' όπου με μικρές οπές πέφτει σε δίσκους διασκορπισμού ή σε κυματοειδείς επιφάνειες, ενώ η επιφάνειά του έρχεται σε άμεση επαφή με τον αέρα που εισέρχεται από το κάτω μέρος. Το αποτέλεσμα είναι η εξάτμιση μέρους του νερού με αποτέλεσμα το υπόλοιπο να ψύχεται. Λόγω του γεγονότος ότι μέρος του νερού εξατμίζεται χρειάζεται συνεχής αναπλήρωση του νερού στο κύκλωμα ψύξης. Στους πύργους ψύξης φυσικής κυκλοφορίας ο πύργος έχει πολύ μεγάλο ύψος (200 μέτρα ύψος) και ο αέρας κινείται λόγω διαφοράς πίεσης στο κάτω και στο πάνω μέρος της κατασκευής και λόγω του σχήματος του πύργου (που μοιάζει από κάτω προς τα πάνω με συγκλίνον ακροφύσιο). Στους πύργους ψύξης εξαναγκασμένης κυκλοφορίας η κυκλοφορία του αέρα γίνεται με ανεμιστήρες που ωθούν τον αέρα διαμέσου του πύργου. Σημειώνεται ότι το νερό που απαιτείται για αναπλήρωση είναι πολύ λιγότερο από το νερό που απαιτείται στην περίπτωση της άμεσης ψύξης.



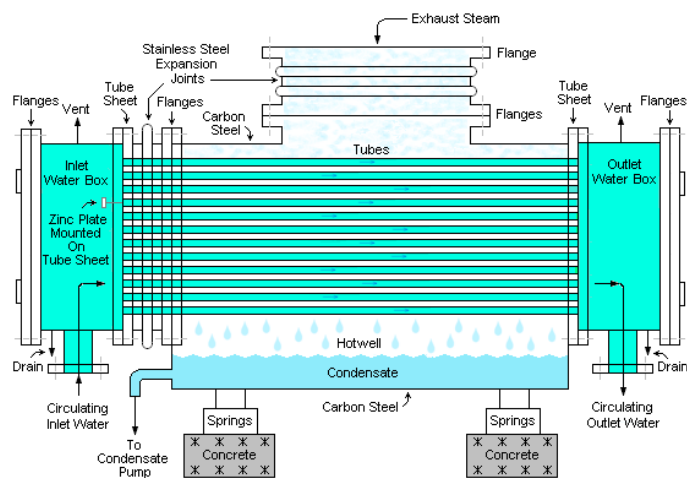
Εικόνα 5-21 : Πύργος ψύξης φυσικής κυκλοφορίας(αριστερά) και εξαναγκασμένης (δεξιά)



Εικόνα 5-22 : Πύργος ψύξης φυσικής κυκλοφορίας του ατμοηλεκτρικού σταθμού Didcot A Power Station Μ. Βρετανία (αριστερά) και πύργος ψύξης εξαναγκασμένης κυκλοφορίας Evartech (δεξιά)

Στους ξηρούς πύργους ψύξης το χρησιμοποιούμενο νερό για την ψύξη του συμπυκνωτή δεν εξατμίζεται αλλά απλά ψύχεται στον πύργο ψύξης που λειτουργεί σαν εναλλάκτης θερμότητας. Τα δυο ρεύματα δεν έρχονται σε άμεση επαφή αλλά μόνο μέσω μιας επιφάνειας συναλλαγής θερμότητας. Το πλεονέκτημα αυτού του τύπου είναι ότι δεν χρειάζεται συνεχής αναπλήρωση νερού του ψυκτικού κυκλώματος και γι' αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε άνυδρα κλίματα. Η ροή του αέρα γίνεται με φυσική ή με βεβιασμένη κυκλοφορία. Το μεγάλο μειονέκτημα αυτού του τύπου πύργων ψύξης είναι το σχετικά μεγαλύτερο κόστος και η μεγάλη απαιτούμενη επιφάνεια για την συναλλαγή θερμότητας.

Οι συμπυκνωτές που ψύχονται από νερό είναι συνήθως τύπου κελύφους-σωλήνα (shell and tube). Δηλαδή αποτελούνται από ένα κέλυφος μέσα στο οποίο διέρχονται οι σωλήνες του ψυκτικού.



Note: Tubes are brass, cupro nickel, titanium or stainless steel. The tubes are expanded or rolled and bell mouthed at the ends in the tubesheets.

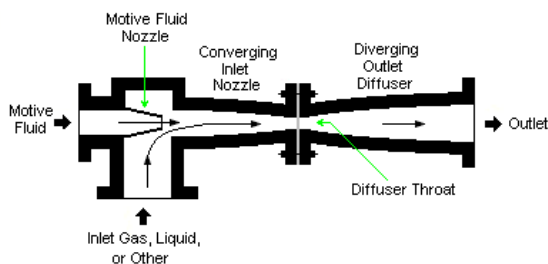
Typical Power Plant Condenser

Εικόνα 5-23 : Τυπικός υδρόψυκτος συμπυκνωτής

Σημειώνεται πως στους σταθμούς συνδυασμένου κύκλου απαιτείται μικρότερη ποσότητα νερού από ότι για ένα καθαρά ατμοηλεκτρικό σταθμό, ίδιας ονομαστικής ισχύος και τούτο γιατί περίπου το 1/3 της συνολικά παραγόμενης ισχύος οφείλεται στον ατμοστρόβιλο.

#### *Δημιουργία και διατήρηση του κενού*

Κατά την λειτουργία του ατμοστρόβιλου μπορεί να έχουμε είσοδο αέρα από ατελή κατασκευή του άκρου χαμηλής πίεσης που λειτουργεί με πιέσεις κάτω από την ατμοσφαιρική. Ο αέρας αυτός πρέπει να αφαιρεθεί, γιατί μειώνει την απόδοση του κύκλου αυξάνοντας την πίεση του συμπυκνωτή και μειώνοντας το αποδιδόμενο έργο του ατμοστρόβιλου. Έτσι χρησιμοποιούνται διατάξεις για την αναρρόφηση του αέρα αυτού. Συνήθως χρησιμοποιείται σύστημα έγχυσης ατμού ή νερού. Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στην δημιουργία χαμηλής πίεσης με επιτάχυνση του ρευστού έγχυσης μέσα από συγκλίνον ή συγκλίνον/αποκλίνον ακροφύσιο. Αέρας μαζί με ατμό αναρροφάται από τον συμπυκνωτή αναμειγνύεται με την δέσμη υψηλής ταχύτητας και στην συνέχεια επιβραδύνεται για αύξηση της πίεσης με σκοπό η τελική πίεση να γίνει μεγαλύτερη ή ίση με την ατμοσφαιρική, ώστε να γίνει δυνατή η αποβολή του στην ατμόσφαιρα. Για να γίνει αυτό μπορεί να απαιτηθούν πολλαπλές βαθμίδες έγχυσης. Τέτοιου είδους διατάξεις χρησιμοποιούνται για την αρχική δημιουργία του κενού κατά την έναρξη λειτουργίας. Εκτός από τους εγχυτές χρησιμοποιούνται και αντλίες εκτοπίσεως για τη δημιουργία του κενού στον συμπυκνωτή.



Εικόνα 5-24 : Εγχυτής για την δημιουργία κενού

### 5.2.5 Απαερίωτης

#### *Απαερίωση*

Η απαερίωση είναι μια διαδικασία απαραίτητη για την σωστή λειτουργία του ατμοπαραγωγού προκειμένου να απαλλάξει το νερό από αέριες διαλυμένες ουσίες που μπορεί να προκαλέσουν διάβρωση. Γενικά ονομάζουμε απαερίωση την διαδικασία με την οποία απομακρύνονται από το νερό διαλυμένα αέρια, η παρουσία των οποίων θα προκαλούσε επικίνδυνες διαβρώσεις σε σωλήνες, τύμπανα, συλλέκτες και προθερμαντήρες νερού. Αυτά τα αέρια είναι το οξυγόνο, το διοξείδιο του άνθρακα και το χλώριο. Το οξυγόνο και το διοξείδιο του άνθρακα είναι διαλυμένα στο φυσικό νερό μαζί με άλλα αδρανή αέρια, όπως άζωτο. Το χλώριο βρίσκεται σε νερό που έχει υποστεί διαδικασία απομάκρυνσης των βλαβερών μικροοργανισμών.

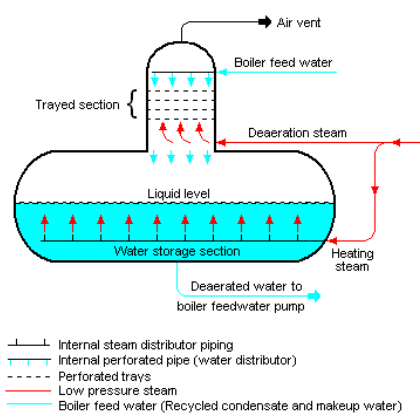
Η σπουδαιότερη μέθοδος απαερίωσης είναι η θερμική απαερίωση. Ο τρόπος λειτουργίας αυτής της μεθόδου βασίζεται στο ότι η διαλυτότητα των αερίων στο νερό

ελαττώνεται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία. Σύμφωνα με τους νόμους του Henry και του Dalton η διαλυτότητα ενός αερίου στο νερό είναι κατευθείαν ανάλογη της μερικής πίεσης του αερίου στο νερό. Με την αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει η πίεση του υδρατμού και μειώνονται έτσι οι μερικές πιέσεις των διαλυμένων αερίων. Στο σημείο βρασμού η πίεση υδρατμού είναι τόσο υψηλή ώστε οι μερικές πιέσεις των αερίων να είναι μηδενικές. Έτσι θερμαίνεται το νερό μέχρι την θερμοκρασία βρασμού, οπότε μηδενίζεται η διαλυτότητα των αερίων και τα αέρια μπορούν να απομακρυνθούν. Τα αέρια μπορούν να εξέλθουν μόνον από την εξωτερική επιφάνεια του νερού που βρίσκεται σε κατάσταση βρασμού. Για τον λόγο αυτό σε μια εγκατάσταση θερμικής απαερίωσης θα πρέπει να δημιουργείται όσο το δυνατό μεγαλύτερη επιφάνεια νερού. Αύξηση της επιφάνειας του νερού γίνεται με καταιονισμό και διασκορπισμό του νερού ώστε να δημιουργηθούν σωματίδια. Έτσι τα αέρια μπορούν να απομακρυνθούν γρήγορα, εφόσον το νερό έχει θερμανθεί αρκετά.

### *Απαεριστής ανάμειξης με πτώση νερού*

Είναι ο πιο διαδεδομένος τύπος θερμικού απαεριστή. Το νερό εισέρχεται στην κεφαλή του απαεριστή, όπου με την βοήθεια ακροφυσίων ή άλλης διάταξης κατανέμεται σ' όλη την διατομή του κυλίνδρου του απαεριστή. Με την τοποθέτηση κατάλληλων διαφραγμάτων επιβραδύνεται η πτώση του νερού, ενώ συγχρόνως διασπάται σε όλο και μικρότερα σταγονίδια. Έτσι προκύπτει μεγάλη επιφάνεια νερού που μεταβάλλεται συνέχεια. Η διαδρομή διάχυσης των αερίων προς την επιφάνεια είναι πολύ μικρή και έτσι μπορούν εύκολα τα αέρια να απομακρυνθούν από το νερό.

Σε αντίθετη ροή προς το νερό δηλαδή από κάτω προς τα πάνω ρέει υπέρθερμος ατμός ο οποίος προθερμαίνει το νερό μέχρι το σημείο βρασμού. Μια καλή απαερίωση μπορεί να επιτευχθεί μόνο αν η θερμοκρασία του νερού είναι το πολύ 15°C περίπου κάτω από το σημείο βρασμού. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται ικανοποιητική ροή ατμού από κάτω προς τα άνω ενώ τα αέρια με μια ποσότητα ατμού εξέρχονται από την κεφαλή του απαεριστή. Το απαερισθέν νερό συγκεντρώνεται στην τροφοδοτική δεξαμενή κάτω από ένα στρώμα ατμού. Εάν έχουμε υψηλές απαιτήσεις για τροφοδοτικό νερό, τότε υπάρχει στην τροφοδοτική δεξαμενή μια επιπλέον εγκατάσταση παροχής ατμού. Με αυτόν τον τρόπο το νερό διατηρείται σε κατάσταση κορεσμού. Η εγκατάσταση αυτή χρησιμεύει και για προθέρμανση του τροφοδοτικού νερού μέχρι το σημείο βρασμού.

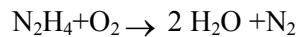


**Εικόνα 5-25 : Απαεριστής ανάμειξης με πτώση νερού**

### *Απαεριωτής κενού*

Σε μερικές περιπτώσεις τοποθετείται ο απαεριωτής σε περιοχή υποπίεσης. Οι απαεριωτές κενού εργάζονται με παρόμοιο τρόπο με τους προηγούμενους απαεριωτές, με την διαφορά ότι για την διατήρηση του κενού και την απομάκρυνση των αερίων χρησιμοποιείται αντλία κενού. Ο απαεριωτής αυτού του τύπου είναι πιο δαπανηρός λόγω της αντλίας κενού ενώ έχει και το μειονέκτημα ότι υπάρχει κίνδυνος εισροής αέρα στο νερό λόγω υποπίεσης.

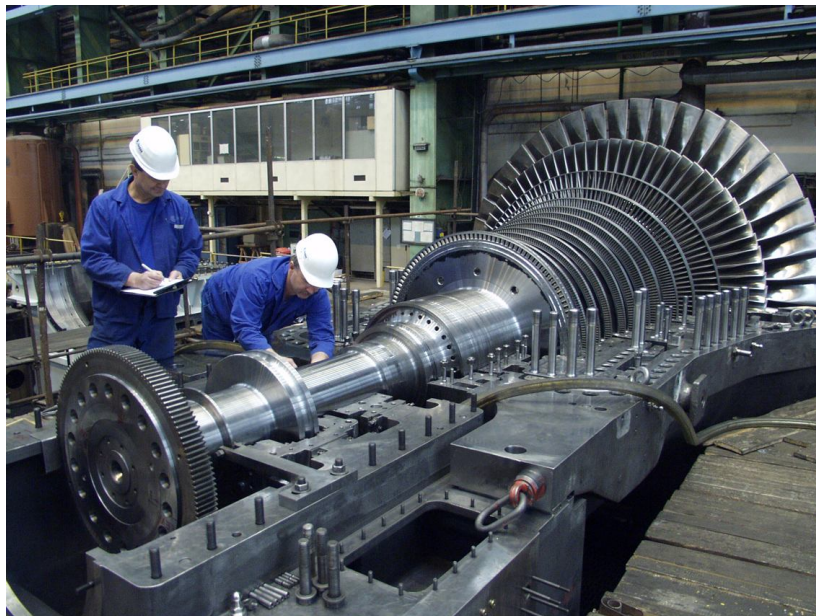
Συμπληρωματικά με όλες τις παραπάνω μεθόδους απαερίωσης μπορεί να γίνει και χημική απαερίωση με την προσθήκη υδραζίνης ( $N_2H_4$ ) που αντιδρά με το οξυγόνο ως εξής



### **5.2.6 Ατμοστρόβιλος**

#### *Γενικά*

Ο ατμοστρόβιλος είναι μια θερμική μηχανή που απορροφά θερμική ενέργεια από τον ατμό και την μετατρέπει σε χρήσιμη μηχανική ενέργεια. Έχει εκτοπίσει πλήρως την παλινδρομική μηχανή ατμού επειδή έχει πολύ μεγαλύτερη απόδοση και μεγαλύτερη συγκέντρωση ισχύος. Επίσης παράγει άμεσα κυκλική κίνηση, χωρίς να χρειάζεται κάποιον μηχανισμό μετατροπής της κίνησης από παλινδρομική σε περιστροφική. Έτσι είναι κατάλληλος για την σύνδεση με ηλεκτρική γεννήτρια. Όπως και ο στρόβιλος των αεριοστρόβιλων έτσι και αυτός αποτελείται από στοιχειώδεις βαθμίδες που συνίστανται σε μια σταθερή και μια κινητή πτερύγωση.



**Εικόνα 5-26 : 35MW ατμοστρόβιλος SKODA (Komorany Heating Plant)**

#### *Ιστορική αναδρομή*

Η πρώτη συσκευή η οποία θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως ατμοστρόβιλος ήταν η αιολόσφαιρα επινοηθείσα από τον Έρωνα τον Αλεξανδρινό τον πρώτο μ.Χ. αιώνα.



Αντίστοιχη συσκευή κατασκευάστηκε και από τον Taqi al-Din στην Οθωμανική Αίγυπτο το 1551 και τον Ιταλό Giovanni Branca το 1629. Αυτές οι πρώιμες συσκευές έχουν πολλές διαφορές από τους σύγχρονους αμμοστρόβιλους.

Ο de Laval κατασκεύασε αρχικά έναν μικρό αεριοστρόβιλο αντίδρασης υψηλής ταχύτητας. Προχώρησε στην κατασκευή της πρώτης βαθμίδας δράσεως που φέρει και το όνομά του. Ήταν ο πρώτος που χρησιμοποίησε το συγκλίνον/αποκλίνον ακροφύσιο για να προσδώσει την υψηλή ταχύτητα ατμού που απαιτείται για να κινήσει τον τροχό του στροβίλου του.

Ο Sir Parsons, Βρετανός αριστοκράτης, κατασκεύασε τον πρώτο πολυβάθμιο αμμοστρόβιλο αντίδρασης με σκοπό την κίνηση πλοίων. Ο πρώτος στρόβιλος του Parsons κατασκευάστηκε το 1884 ενώ το πρώτο πλοίο που κινήθηκε από τον αμμοστρόβιλό του κατελκύστηκε το 1895 και ονομάστηκε «Turbina». Ακόμα ο Parson κατασκεύασε και έναν αμμοστρόβιλο που τον συνέδεσε με δυναμό που παρήγαγε 7,5kW ηλεκτρικής ενέργειας. Η πατέντα του Parsons καταχωρήθηκε και ο Westinghouse ήταν ο πρώτος που εξασφάλισε τα δικαιώματα της πατέντας αυξάνοντας την ισχύ του αμμοστρόβιλου. Ο σχεδιασμός των αμμοστρόβιλων του ήταν απλό να αναχθεί σε κατασκευές μεγαλύτερης κλίμακας. Έτσι κατά την διάρκεια ζωής του Parsons η ισχύς των αμμοστρόβιλων αυξήθηκε κατά 75000 φορές.

Άλλοι που κατασκεύασαν αμμοστρόβιλους ήταν ο Γάλλος C.E.A. Rateau που κατασκεύασε πολυβάθμιο αμμοστρόβιλο δράσης, ενώ ο Αμερικάνος C.G. Curtis ανέπτυξε τον ομώνυμο στρόβιλο δράσης με διαβάθμιση ταχύτητας.

### Κατηγοριοποίηση των αμμοστρόβιλων

*Ανάλογα με τον τύπο των πτερυγώσεων που χρησιμοποιούνται*

Ο σχεδιασμός της κινητής και σταθερής πτερύγωσης ενός στροβίλου στηρίζεται στην αεροθερμοδυναμική ανάλυση της ροής. Χαρακτηριστικό των πτερυγώσεων είναι ο βαθμός αντίδρασης. Με βάση τον βαθμό αντίδρασης μπορούμε να διακρίνουμε δυο τύπους βαθμίδων, τις βαθμίδες δράσης και αντίδρασης. Ο βαθμός αντίδρασης ορίζεται ως η ενθαλπική πτώση που συμβαίνει στην κινητή πτερύγωση (στάτορα) προς την συνολική

ενθαλπική πτώση όλης της βαθμίδας δηλαδή  $r = \frac{h_2 - h_3}{h_1 - h_3} \approx \frac{p_2 - p_3}{p_1 - p_3}$ . Ταυτόχρονα δηλώνει

που γίνεται η μεταβολή της πίεσης.

Έτσι στους στροβίλους δράσης ο βαθμός αντίδρασης ( $r$ ) είναι κοντά στο 0 και η μεταβολή πίεσης είναι πολύ μεγαλύτερη στην σταθερή πτερύγωση. Τέτοιοι αμμοστρόβιλοι είναι οι :

- Μονοβάθμιοι στρόβιλοι δράσης
- Βαθμίδες ταχύτητας (Curtis)
- Βαθμίδες πίεσης (Rateau)

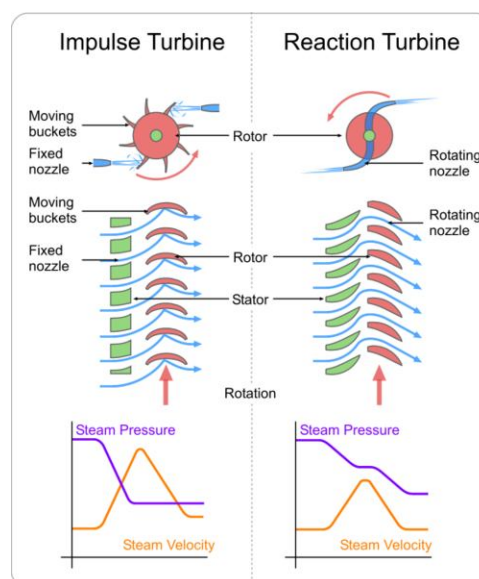
Στους στροβίλους δράσης (ισόθλιπτοι, impulse turbines) η μορφή των σταθερών πτερυγίων είναι τέτοια ούτως ώστε να σχηματίζουν ακροφύσια και να επιταχύνουν την ροή, ελαττώνοντας την πίεση. Η ροή αφού εξέλθει από την σταθερή πτερύγωση προσπίπτει στην κινητή πτερύγωση και ωθεί τα πτερύγιά της με δύναμη που ασκεί σε αυτά λόγω μεταβολής της ορμής του ρευστού και μόνο. Η δύναμη που προκαλείται οφείλεται στην μεταβολή της κατεύθυνσης της ροής, χωρίς να μεταβάλλεται η σχετική ταχύτητα της πτερωτής. Κατά την δίοδο του ρευστού μέσω των κινούμενων πτερυγίων δεν έχουμε μεταβολή της στατικής πίεσης μεταξύ της εισόδου και της εξόδου του ρότορα.

Στους στρόβιλους με βαθμό αντίδρασης μεγαλύτερο του μηδενός (υπέρθλιπτοι, reaction turbines), ανάλογα με τον βαθμό αντίδρασης έχουμε πτώση πίεσης τόσο στο ρότορα όσο και στο στάτορα. Σε έναν αξονικό στρόβιλο με βαθμό αντίδρασης 100% τα σταθερά πτερύγια μεταβάλλουν την γωνία ροής χωρίς μεταβολή της πίεσης η οποία γίνεται αποκλειστικά στα κινητά πτερύγια, που δημιουργούν συγκλίνοντα ακροφύσια, επιταχύνοντας τη ροή και ασκώντας δύναμη αντίδρασης που περιστρέφει τα κινητά πτερύγια.

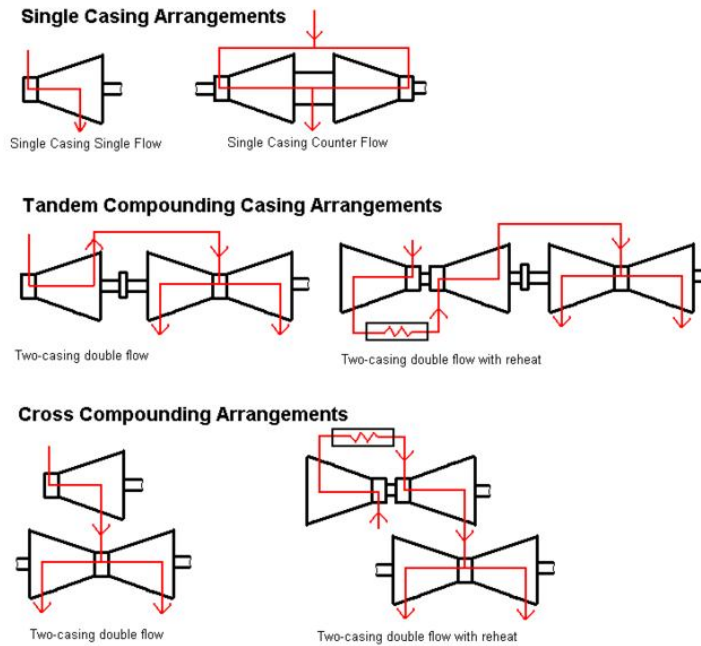
Οι δυο μηχανισμοί ανάπτυξης δύναμης πάνω στα πτερύγια δεν έχουν φυσική διαφορά, καθώς ο τρόπος με τον οποίο αναπτύσσονται δυνάμεις στις αεροτομές είναι ουσιαστικά ο ίδιος. Αυτός ο διαχωρισμός έχει παραμείνει από τις πρώτες μηχανές που αναπτύχθηκαν και λόγω του γεγονότος ότι ο τύπος της κάθε βαθμίδας συνδέεται με ιδιότητες που θα αναφερθούν στην συνέχεια. Στην πράξη έχουμε πάντα συνδυασμό και των δυο μηχανισμών εξάσκησης δυνάμεων πάνω στις πτερυγώσεις, απλά σε ορισμένες περιπτώσεις ένας από τους δυο μηχανισμούς είναι προέχων.

Στρόβιλος δράσης		Στρόβιλος αντίδρασης	
Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Εκμετάλλευση διαθέσιμης ενθαλπικής πτώσης σε λίγες βαθμίδες	Δαπανηρή κατασκευή διαφραγμάτων	Φθηνή κατασκευή	Απαιτήση μικρών αξονικών και ακτινικών διακένων
Τήρηση μεγάλων διακένων από την κινητή στεφάνη	Υψηλός αριθμός στροφών για την επίτευξη καλής απόδοσης	Πολύ καλή ροή ατμού	Δυσμενείς συνθήκες λειτουργίας
Ταχεία εκκίνηση του στρόβιλου		Καλός βαθμός απόδοσης στις μικρές στροφές	Μεγάλες αξονικές ώσεις
Πολύ καλή στεγανότητα στο διάφραγμα			Μεγάλες απώλειες ατμού στις αξονικές βαθμίδες
			Μεγάλος αριθμός βαθμίδων

Πίνακας 5-1 : Σύγκριση στρόβιλου δράσης και αντίδρασης



Εικόνα 5-27 : Βαθμίδες δράσης (αριστερά) και αντίδρασης (δεξιά)



Εικόνα 5-28 : Συνήθεις διατάξεις της ροής σε ατμοστρόβιλους

Με κριτήριο τις συνθήκες τροφοδοσίας και τη ροή ατμού

-Ατμοστρόβιλοι συμπυκνώσεως όπου η έξοδος του ατμοστρόβιλου γίνεται στο συμπυκνωτή όπου έχουμε χαμηλές πιέσεις (0,06-0,02bar). Επίσης στην έξοδο του ατμοστρόβιλου εμφανίζεται μερική υγροποίηση του ατμού. Συνήθως μέγιστο όριο υγροποίησης είναι η ξηρότητα να είναι  $x=85\%$ . Αυτοί οι στρόβιλοι συνήθως χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία ηλεκτροπαραγωγής. Χρησιμοποιούνται σε όλους τους λιθανθρακικούς, πυρηνικούς και συνδυασμένους κύκλους σταθμούς. Η συμπυκνούμενη υγρασία που εμφανίζεται στις τελευταίες βαθμίδες απαιτεί ιδιαίτερη κατασκευή των πτερυγίων με υψηλή αντοχή.

-Ατμοστρόβιλοι αντίθλιψης όπου ο ατμός στην έξοδο έχει μεγάλη πίεση, δηλαδή 1-6bar. Αυτοί οι στρόβιλοι χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν καταναλώσεις ατμού σε μεγάλη πίεση και θερμοκρασία ή ακόμα και ένας άλλος στρόβιλος χαμηλότερης πίεσης. Η πίεση εξόδου του στρόβιλου καθορίζεται από μια ρυθμιστική βαλβίδα που ρυθμίζει την πίεση ανάλογα με τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής. Αυτές είναι συχνές στα διυλιστήρια, στις χαρτοβιομηχανίες, στις εγκαταστάσεις αφαλάτωσης.

-Ατμοστρόβιλοι με αναθέρμανση που χρησιμοποιούνται αποκλειστικά στην παραγωγή ενέργειας. Στη διάταξη με αναθέρμανση ο ατμός εξέρχεται από το τμήμα υψηλής πίεσης του στρόβιλου και επιστρέφει στον ατμοποιητή όπου υπερθερμαίνεται περαιτέρω. Μετά ο ατμός εισέρχεται στη μέση πίεση και συνεχίζει την εκτόνωση. Οι ατμοστρόβιλοι αυτού του τύπου θεωρούνται και ατμοστρόβιλοι συμπύκνωσης.

-Ατμοστρόβιλοι με απομαστεύσεις για εξωτερική τροφοδοσία, όπου μέρος του ατμού απομαστεύεται σε κατάλληλο μέρος του ατμοστρόβιλου, ώστε να έχει την επιθυμητή πίεση, για την επιτέλεση κάποιας άλλης διεργασίας. Έτσι δεν εκτονώνεται όλη η ποσότητα του ατμού στο στρόβιλο. Σε έναν θερμικό σταθμό οι απομαστεύσεις μπορεί να εξυπηρετούν π.χ. την προθέρμανση του νερού. Οι απομαστεύσεις μπορεί να υπόκεινται σε έλεγχο πίεσης με στραγγαλιστική βαλβίδα ή να μην ελέγχονται. Ωστόσο πάντα υπάρχει μια βαλβίδα μιας

κατεύθυνσης σε κάθε έξοδο απομάστευσης. Επίσης υπάρχει βαλβίδα ασφαλείας που ελέγχει την πίεση στις απομαστεύσεις σε περίπτωση θέσης εκτός λειτουργίας.

### *Χαρακτηριστικά αμοστροβίλων*

Οι περισσότεροι αμοστροβίλοι που συναντώνται στην πράξη, ιδιαίτερα οι μεγάλης ισχύος, έχουν μεγάλο αριθμό βαθμίδων. Αυτό συμβαίνει γιατί ο στροβίλος πρέπει να λειτουργήσει σε θλιπτικά φορτία που συνεπάγονται μεγάλους λόγους πίεσης. Έτσι σε έναν αμοστροβίλο ένας λόγος πίεσης της τάξης του 2000 δεν είναι ασυνήθιστος ενώ μπορεί να συναντήσει κανείς τιμές ως και 4000. Αυτή είναι μια μεγάλη διαφορά μεταξύ αμοστροβίλων και αεριοστροβίλων. Η διαφορά αυτή οφείλεται στον τρόπο δημιουργίας της πίεσης. Στον αεριοστροβίλο η υψηλή πίεση δημιουργείται από έναν αεροσυμπιεστή που είναι πολυβάθμιος και υπόκειται σε περιορισμούς λειτουργίας, λόγω της συμπίεστικότητας του ρευστού. Ακόμα η εκτόνωση γίνεται πάντα σε συνθήκες κοντά στις ατμοσφαιρικές. Αντίθετα σε έναν κύκλο ατμού η αύξηση της πίεσης δημιουργείται από αντλίες που διαχειρίζονται ασυμπίεστο ρευστό και έχουν την δυνατότητα πολύ μεγαλύτερης αύξησης της πίεσης με πολύ λιγότερη ισχύ από τους αεροσυμπιεστές.

Ακόμα η πίεση εκτόνωσης στους αμοστροβίλους καθορίζεται από την πίεση του ψυγείου που αυτή με την σειρά της καθορίζεται από την θερμοκρασία του ψυκτικού μέσου που χρησιμοποιείται, ενώ το όλο κύκλωμα είναι απομονωμένο από το περιβάλλον. Οι τεράστιες μεταβολές πίεσης που καλούνται να αποτονώσουν οι αμοστροβίλοι οδηγούν σε έναν μεγάλο αριθμό βαθμίδων και σε έναν ιδιαίτερο σχεδιασμό που δεν συναντάται σε αεριοστροβίλους.

Η μεγάλη διαφορά πίεσης εισόδου και εξόδου συνεπάγεται μεγάλες αξονικές δυνάμεις. Οι αξονικές δυνάμεις αυτές δεν είναι τόσο έντονες στους στροβίλους δράσης, όπου η μεταβολή της αξονικής ορμής είναι μικρή, όσο στους στροβίλους αντίδρασης, όπου υπάρχει μεγάλη μεταβολή της στατικής πίεσης σε κάθε πτερύγωση. Σε μικρές εγκαταστάσεις το πρόβλημα λύνεται με έμβολα εξισορρόπησης. Ωστόσο σε μεγάλες εγκαταστάσεις η λύση που ακολουθείται είναι η διαίρεση της ροής σε αντίρροπα ρεύματα που διοχετεύονται σε διάταξη αντιρροής. Έχοντας ταυτόσημους στροβίλους οι αντίθετες φορές διέλευσης του ατμού προκαλούν ίσες και αντίθετες αξονικές δυνάμεις. Άλλη λύση είναι η τοποθέτηση ενός τμήματος του στροβίλου (π.χ. μέσης πίεσης) με αντίθετη κατεύθυνση ροής. Με κατάλληλο σχεδιασμό των υπόλοιπων τμημάτων είναι δυνατό πάλι να εξαιρεθεί η αξονική δύναμη. Ακόμα είναι δυνατό με την διαίρεση της ροής να μειωθεί το ύψος της διατομής από όπου διέρχεται ο ατμός με αποτέλεσμα να μειωθεί το ύψος των πτερυγίων. Αυτό είναι πολύ σημαντικό ιδιαίτερα στις τελευταίες βαθμίδες χαμηλής πίεσης όπου η πυκνότητα έχει μειωθεί πολύ και ο διακινούμενος όγκος είναι πολύ μεγάλος και κατά συνέπεια απαιτούνται μεγάλες διατομές και μεγάλα ύψη πτερυγίων που παρουσιάζουν προβλήματα αντοχής.

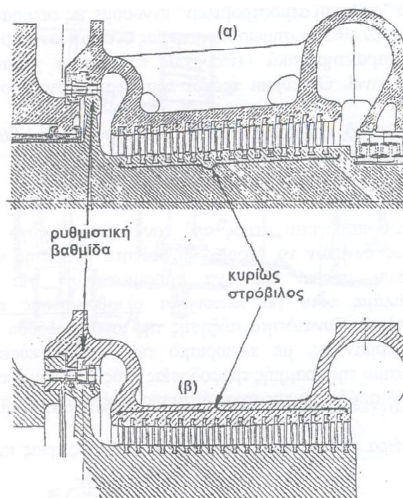
Σύνηθες είναι σε αμοστροβίλους να χρησιμοποιούνται βαθμίδες μερικής προσβολής που περιλαμβάνουν σταθερά πτερύγια, τα οποία δεν καταλαμβάνουν ολόκληρη την περιφέρεια αλλά μόνο ορισμένους τομείς της. Αυτό γίνεται:

1. Αν η παροχή, πίεση και θερμοκρασία του ατμού είναι τέτοιες που να οδηγήσουν σε πολύ μικρά ύψη πτερυγίων, είναι πιθανό να είναι επωφέλεστερη η χρήση βαθμίδας μερικής προσβολής. Αυτό συμβαίνει επειδή στα πτερύγια με πολύ μικρό ύψος είναι έντονα τα οριακά στρώματα με αποτέλεσμα να υπάρχουν μεγάλες απώλειες λόγω στροβιλισμών. Με την χρήση μερικών τομέων της περιφέρειας αυξάνεται το ύψος των πτερυγίων σε σχέση με την αντίστοιχη περίπτωση όπου χρησιμοποιείτο όλη η περιφέρεια, δεδομένου ότι απαιτείται ίδιο εμβαδό διατομής εισόδου.

2. Η μερική προσβολή μπορεί να προσφέρει καλύτερο τρόπο ελέγχου της ισχύος εξόδου του αμοστροβίλου όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια. Είναι ευκολότερος και αποδοτικότερος ο έλεγχος της ισχύος εξόδου του στροβίλου με μείωση της παροχής ( με ελάττωση του ενεργού εμβαδού ροής) από ότι με μείωση της πίεσης εισόδου (στραγγαλισμός).

Η μερική προσβολή μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο σε ισόθλιπτους (δράσης) στροβίλους, καθώς η στατική πίεση δεν μεταβάλλεται σημαντικά στην κινητή περύγωση. Σε αντίθετη περίπτωση, δηλαδή σε υπέρθλιπτους, η μεταβολή της πίεσης θα οδηγούσε στην εμφάνιση σημαντικών απωλειών διαφυγών προς την μη προσβαλλόμενη περιοχή.

### Τρόποι ρύθμισης αμοστροβίλων



Εικόνα 5-29 : Θέση ρυθμιστικής βαθμίδας σε σχέση με τον υπόλοιπο αμοστρόβιλο

Λέγοντας τρόπους ρύθμισης αμοστροβίλων εννοούμε τους τρόπους με τους οποίους μεταβάλλουμε τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του αμοστροβίλου ώστε να ταιριάζουν με την μηχανή την οποία κινεί. Οι κύριοι τρόποι είναι οι ακόλουθοι:

1. Με στραγγαλισμό που πραγματοποιείται από ρυθμιστική βάνα πριν την είσοδο του ατμού στον αμοστρόβιλο. Η μεταβολή κατά τον στραγγαλισμό είναι ισενθαλπική. Άρα στο διάγραμμα h-s του νερού-ατμού το σημείο έναρξης της εκτόνωσης μεταφέρεται δεξιά σε σχέση με την λειτουργία χωρίς στραγγαλισμό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η διαθέσιμη ενθαλπική πτώση για την ίδια πίεση εξόδου να μειωθεί. Εκτός αυτού η πτώση πίεσης στην είσοδο του στροβίλου έχει ως αποτέλεσμα μείωση της παροχής του. Αυτό προκύπτει από τον νόμο του κώνου (προτάθηκε από τον Stodolla και θεμελιώθηκε

από τον Flugel) που εκφράζεται ως

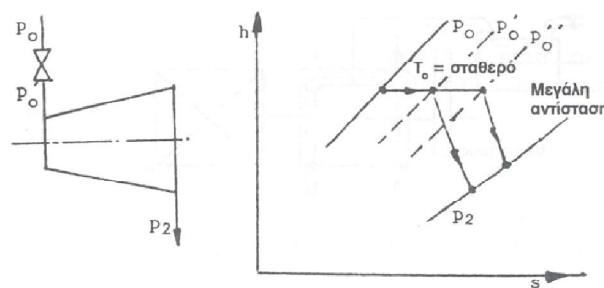
$$\frac{\dot{m}}{\dot{m}_d} = \frac{P_a}{P_{ad}} \cdot \sqrt{\frac{P_{ad}}{P_a} \cdot \frac{\rho_a}{\rho_{ad}}} \cdot \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{P_\omega}{P_a}\right)^{\frac{n+1}{n}}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{P_{ad}}{P_a}\right)^{\frac{n+1}{n}}}}, \text{ όπου ο}$$

δείκτης  $\alpha$  δηλώνει συνθήκες εισόδου ενώ ο  $\omega$  εξόδου και  $n$  πολυτροπικός εκθέτης της εκτόνωσης και  $\rho$  η πυκνότητα. Θεωρώντας ότι :1) ισχύει η καταστατική εξίσωση του τελείου αερίου για τον ατμό, 2) ο πολυτροπικός εκθέτης  $\approx 1$ , 3)η θερμοκρασία τροφοδοσίας

παραμένει σταθερή και 4) ο λόγος  $\left(\frac{p_w}{p_a}\right) \ll 1$  τότε ο νόμος του κώνου απλοποιείται στην

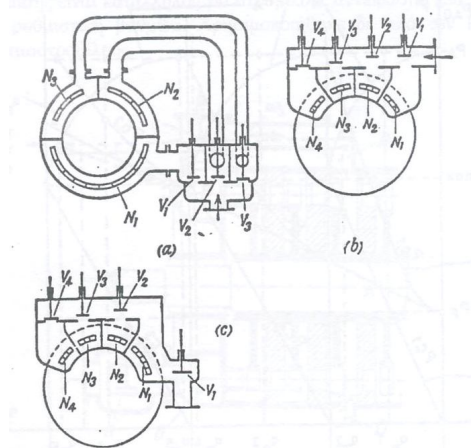
ακόλουθη έκφραση :  $\frac{\dot{m}}{\dot{m}_d} = \frac{p_a}{p_{ad}}$ . Επομένως η παροχή του αμοστροβίλου είναι (περίπου)

γραμμική συνάρτηση της πίεσης εισόδου. Όλα τα παραπάνω εφαρμόζονται στην περίπτωση λειτουργίας με σταθερή πίεση. Ωστόσο στις σύγχρονες εγκαταστάσεις υπάρχει η δυνατότητα ρύθμισης της πίεσης του αμοστροβίλου για σταθερή θερμοκρασία παραγόμενου ατμού, με την βοήθεια των τροφοδοτικών αντλιών (λειτουργία ολισθαίνουσας πίεσης). Αυτός ο τρόπος είναι πλεονεκτικότερος καθώς το σημείο εισόδου του αμοστροβίλου στο διάγραμμα Mollier κινείται σε γραμμή σταθερής θερμοκρασίας, ενώ στην προηγούμενη περίπτωση σε γραμμή σταθερής ενθαλπίας. Ακόμα με αυτόν τον τρόπο η εκτόνωση γίνεται σε περιοχή μικρότερης υγρασίας που αυξάνει τον βαθμό απόδοσης του αμοστροβίλου. Τέλος υπάρχει μείωση της απορροφούμενης ενέργειας από την αντλία καθώς μειώνεται η ταχύτητα περιστροφής για μείωση της πίεσης..



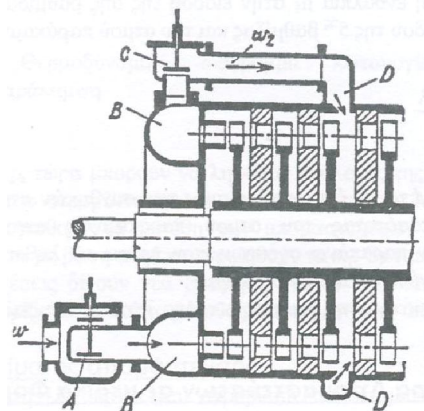
Εικόνα 5-30 : Επίδραση ρύθμισης πίεσης

2. Με έλεγχο των ακροφυσίων εισόδου. Ένας άλλος τρόπος ρύθμισης του φορτίου είναι με ρύθμιση της ποσότητας του ατμού που παρέχεται στον αμοστροβίλο, ρυθμίζοντας το εμβαδό των ακροφυσίων εισόδου. Ιδανική περίπτωση θα ήταν η ομοιόμορφη μεταβολή του εμβαδού στο λαιμό όλων των ακροφυσίων, πράγμα αδύνατο. Η λύση είναι ο χωρισμός των ακροφυσίων εισόδου σε ομάδες και η διοχέτευση της παροχής σε ομάδες ακροφυσίων. Για δεδομένες συνθήκες εισόδου και στραγγαλισμένα ακροφύσια εισόδου η παροχή του ατμού είναι ευθέως ανάλογη με τον αριθμό των εν λειτουργία ακροφυσίων. Αυτή η ρύθμιση επηρεάζει μόνο την ρυθμιστική βαθμίδα του αμοστροβίλου ενώ οι βαθμίδες που ακολουθούν έχουν σταθερή γεωμετρία. Η μεταβολή του αριθμού των ανοικτών ακροφυσίων και της παροχής ατμού από την ρυθμιστική βαθμίδα καθορίζει την πίεση εξόδου από αυτήν. Ουσιαστικά αυτή η μέθοδος ρύθμισης μοιάζει με την προηγούμενη περίπτωση (ρύθμιση με στραγγαλισμό), μόνο που αντί ο στραγγαλισμός να γίνει σε όλη την παροχή του ατμού γίνεται σε κάθε τομέα ξεχωριστά από διαφορετική βαλβίδα και έτσι γίνεται ρύθμιση της παροχής διαμέσου της κάθε ομάδας ακροφυσίων (και κατ' επέκταση της πίεσης). Το πλεονέκτημα σε σχέση με την προηγούμενη μέθοδο είναι ότι ο στραγγαλισμός δεν γίνεται σε όλη την ροή με αποτέλεσμα να «καταστρέφεται» μικρότερο μέρος της διαθέσιμης ενέργειας του ατμού.



Εικόνα 5-31: Ομάδες ακροφυσίων για ρύθμιση παροχής

3. Με παράκαμψη. Ρύθμιση αυτού του είδους επιτρέπει την λειτουργία του ατμοστροβίλου με φορτία μεγαλύτερα του ονομαστικού. Αυτό που γίνεται είναι διοχέτευση ατμού αρχικών ολικών συνθηκών σε κάποιες πίσω βαθμίδες, παρακάμπτοντας τις πρώτες. Με αυτόν τον τρόπο διοχετεύεται μεγαλύτερη ποσότητα ατμού στις πίσω βαθμίδες με αποτέλεσμα να παράγεται μεγαλύτερη ισχύς από την ονομαστική. Ο λόγος που εφαρμόζεται αυτή η μέθοδος είναι γιατί με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται ο στραγγαλισμός μέρους της ποσότητας ατμού. Έτσι αποφεύγονται οι απώλειες λόγω στραγγαλισμού που δημιουργούνται από την στραγγαλιστική βαλβίδα και δεν υπάρχουν απώλειες μερικής προσβολής καθώς δεν υπάρχουν ακροφύσια. Η ρύθμιση με παράκαμψη συνδυάζεται με κατάλληλη βαλβίδα ελέγχου, που ρυθμίζει την λειτουργία και ενεργοποιείται από κάποιο φορτίο και μετά. Η πίεση του παραγόμενου ατμού από τον ατμοπαραγωγό συνήθως είναι σταθερή (λειτουργία σταθερής πίεσης), μπορεί όμως και να μεταβάλλεται μέσω μεταβολής των στροφών των τροφοδοτικών αντλιών (ολισθαίνουσα πίεση). Άλλοι τρόποι ρύθμισης είναι με τον περιορισμό των απομαστεύσεων. Έτσι με το κλείσιμο μιας απομάστευσης προς έναν προθερμαντήρα μπορεί να αυξηθεί η παραγόμενη ισχύς αλλά να μειωθεί ο βαθμός απόδοσης.

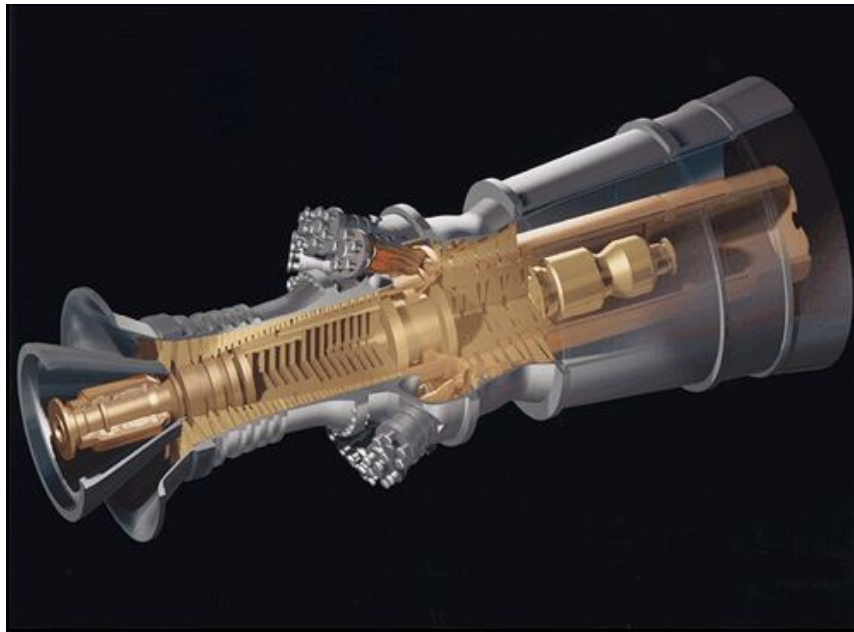


Εικόνα 5-32 : Ρύθμιση με παράκαμψη

## 5.3 Κύκλος Joule-Brayton / Κύκλος αεριοστροβίλου

### 5.3.1 Γενικά

Ο αεριοστροβίλος είναι μια θερμική μηχανή που παράγει ισχύ μέσω των δυνάμεων που ασκούνται από το αέριο που τον διαρρέει, σε πτερύγια στερεωμένα στην άτρακτο. Το μεγάλο του πλεονέκτημα σε σχέση με τις παλινδρομικές μηχανές εσωτερικής καύσης είναι ότι έχει πολύ μεγαλύτερη συγκέντρωση ισχύος. Χρησιμοποιείται ευρύτατα, σε πολλές εφαρμογές, από την παραγωγή ενέργειας σε βιομηχανίες, ως την κίνηση πλοίων, αεροπλάνων και βαρέων οχημάτων.



Εικόνα 5-33 : Αεριοστροβίλος της σειράς GE\_H series

#### *Ιστορική αναδρομή*

Η ιδέα για την κατασκευή μιας θερμικής μηχανής που λειτουργεί με τον θερμικό κύκλο του αεριοστροβίλου εμφανίστηκε στα τέλη του 18<sup>ου</sup> με αρχές 19<sup>ου</sup> αιώνα. Ωστόσο η κατασκευή τους έγινε δυνατή αρκετά αργότερα, η δε εμπορική τους διάθεση τη δεκαετία του 1930. Η πρώτη ευρεσιτεχνία για μηχανή που λειτουργεί με την αρχή του αεριοστροβίλου δόθηκε το 1791 στον John Barber στην Μεγάλη Βρετανία, όπου και αργότερα μελετήθηκε για πρώτη φορά ο θερμοδυναμικός κύκλος του αεριοστροβίλου, το 1818, από τον James Joule. Η σύλληψη μιας μηχανής με τη μορφή που την γνωρίζουμε σήμερα έγινε αργότερα. Διατάξεις αεριοστροβίλων ανοικτού κυκλώματος πρότειναν οι Franz Stolze (Γερμανία, 1872) και Charles Parsons (Μ. Βρετανία 1884). Στην Αμερική το πρώτο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας δόθηκε στον Charles Curtis το 1895.

Αεριοστροβίλοι που παρήγαγαν μηχανική ισχύ κατασκευάστηκαν για πρώτη φορά στις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα από την ελβετική εταιρία BROWN-BOVERI&CIE σε συνεργασία με τον Γάλλο καθηγητή Rateau, έναν από τους πρωτοπόρους στην κατασκευή στροβιλομηχανών. Η πρώτη μονάδα που λειτούργησε ήταν στο Neuchatel της Ελβετίας, το 1939, σαν μονάδα αιχμής με 4 MW ισχύ και απόδοση 17,4%.



Εκτός από την χρήση τους στην παραγωγή ενέργειας, την ίδια εποχή έκαναν την εμφάνισή τους αεριοστρόβιλοι για την πρόωση αεροπλάνων, οι λεγόμενοι στροβιλοαντιδραστήρες. Η σύλληψη της μηχανής αυτού του τύπου έγινε από τον Βρετανό Sir Frank Whittle, που πήρε το αντίστοιχο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας το 1930. Ανεξάρτητα εργαζόμενος ο Γερμανός Von Ohain απέκτησε, επίσης, δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για την κατασκευή στροβιλοαντιδραστήρα, το 1935.

Ο λόγος που καθυστέρησε η ανάπτυξη των αεριοστροβίλων σε σχέση με τις εμβολοφόρες μηχανές, είναι γιατί ο τρόπος λειτουργίας των εμβολοφόρων μηχανών ήταν πιο απλός για την αντίληψη του ανθρώπου. Η κατασκευή των αεριοστροβίλων απαιτούσε την ανάπτυξη της επιστήμης της μηχανικής των ρευστών, ώστε να γίνει αποδοτική σχεδίαση. Ακόμα, το γεγονός ότι οι αεριοστρόβιλοι, για να επιτύχουν ικανοποιητικούς βαθμούς απόδοσης, πρέπει να περιστρέφονται σε μεγάλες ταχύτητες δημιούργησε τεχνικά προβλήματα, τα οποία συνέτειναν στην καθυστέρηση της ανάπτυξης του αεριοστροβίλου.

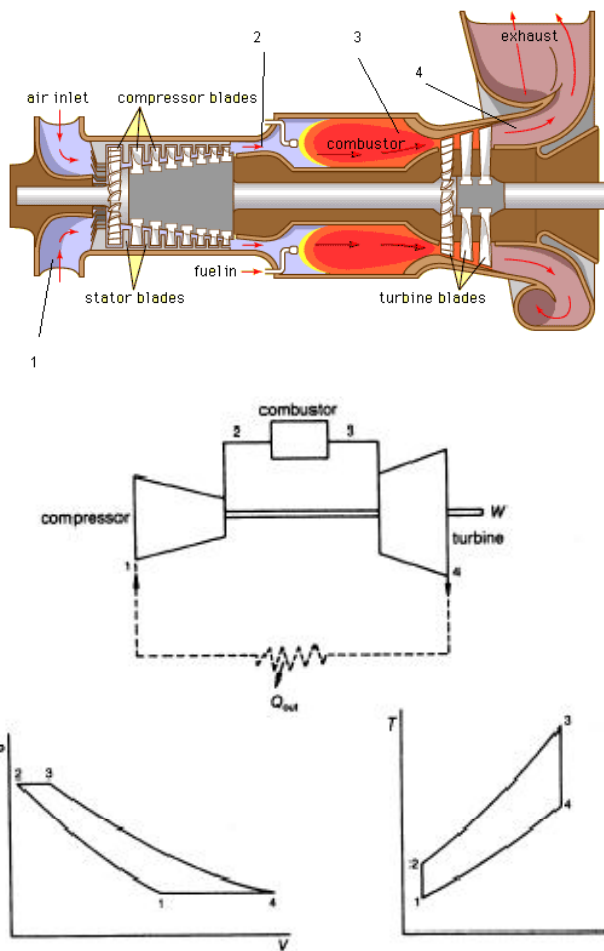
### *Κύκλος του αεριοστροβίλου*

Οι αεριοστρόβιλοι λειτουργούν με βάση τον κύκλο Joule- Brayton.

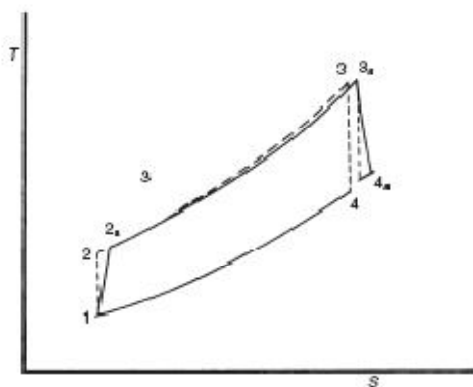
Ο απλός αεριοστρόβιλος αποτελείται από τρία τμήματα:

- τον συμπιεστή
- τον θάλαμο καύσης
- τον στρόβιλο

Οι διεργασίες που συμβαίνουν στον απλό ιδεατό κύκλο Joule- Brayton είναι οι ακόλουθες: ο αέρας του εξωτερικού περιβάλλοντος αναρροφάται στο συμπιεστή, όπου και συμπιέζεται (1-2), μετά οδηγείται στο θάλαμο καύσης, όπου αναμειγνύεται με το καύσιμο και αναφλέγεται (2-3) και, τέλος, τα καυσαέρια οδηγούνται στο στρόβιλο, όπου και εκτονώνονται μέχρι την τελική πίεση που είναι η ατμοσφαιρική (3-4). Η μεταβολή (4-1), που είναι ισόθλιπη αποβολή θερμότητας γίνεται μόνο στους αεριοστροβίλους κλειστού κυκλώματος. Η παραπάνω αρίθμηση μπορεί να γίνει θεωρώντας 0 την ατμόσφαιρα, 1 την είσοδο του αγωγού εισόδου, 2 την είσοδο του συμπιεστή και 3 την έξοδό του και παράλληλα είσοδο στον θάλαμο καύσης, 4 έξοδο από τον θάλαμο καύσης και είσοδο στον στρόβιλο και 5 έξοδο στρόβιλου, ενώ 6 έξοδο της μηχανής, οπότε ο κύκλος θα είναι 2-3 η συμπίεση, 3-4 η καύση και 4-5 η εκτόνωση. Στον απλό κύκλο θεωρείται ότι τόσο η συμπίεση όσο και η εκτόνωση είναι ισεντροπικές και η καύση είναι ισόθλιπη. Ωστόσο στην πραγματικότητα επειδή δεν υφίστανται μεταβολές χωρίς απώλειες η απόδοση ενός πραγματικού κύκλου είναι μικρότερη. Έτσι στον πραγματικό κύκλο έχουμε αδιαβατική συμπίεση, πρόσδοση θερμότητας σε, περίπου, σταθερή πίεση και αδιαβατική εκτόνωση.



Εικόνα 5-34 : Χαρακτηριστικές θέσεις του αεροστροβίλου και απλός κύκλος σε p-V και T-S

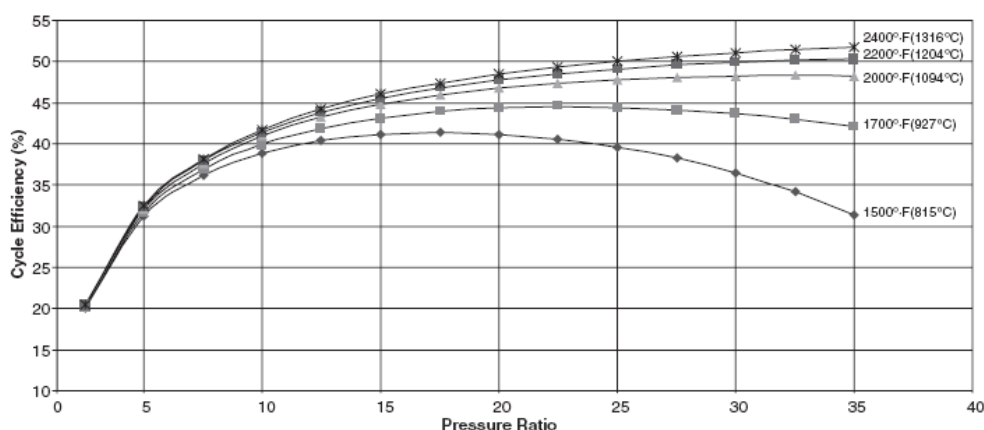


Εικόνα 5-35 : Πραγματικός κύκλος σε T-s

Ο βαθμός απόδοσης του απλού κύκλου εξαρτάται άμεσα από την μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου, που αυτή είναι η θερμοκρασία εισόδου των καυσαερίων στο στρόβιλο. Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία αυτή, τόσο αυξάνεται και η απόδοση και η συγκέντρωση ισχύος. Ωστόσο υπάρχει περιορισμός που τίθεται από τα υλικά του στροβίλου λόγω αντοχής στις συνεχείς υψηλές θερμοκρασίες.

Όσον αφορά την σχέση λόγου πίεσης και βαθμού απόδοσης, υπάρχει ένας βέλτιστος λόγος πίεσης που εξαρτάται από τις θερμοκρασίες εισόδου συμπιεστή και στροβίλου και το βαθμό απόδοσής τους. Περαιτέρω αύξηση του λόγου πίεσης οδηγεί σε μείωση του βαθμού απόδοσης, εάν δεν χρησιμοποιηθεί ενδιάμεση ψύξη στο συμπιεστή. Αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας του κύκλου οδηγεί σε μετατόπιση αυτού του βέλτιστου σημείου σε μεγαλύτερους λόγους πίεσης. Μεγάλοι λόγοι πίεσης όμως καθιστούν το συμπιεστή ευαίσθητο σε μεταβολές φορτίου, περιορίζοντας την περιοχή λειτουργίας του με καλή απόδοση, ενώ ενδέχεται να προκληθούν φαινόμενα πάλμωσης (surge) που μπορεί να καταστρέψουν τον συμπιεστή.

Τυπικοί βαθμοί απόδοσης σύγχρονων αεριοστροβίλων είναι από 28-40%+ (οι μεγαλύτεροι βαθμοί απόδοσης συναντώνται σε παράγωγους αεροπορικών).



Εικόνα 5-36 : Επίδραση θερμοκρασίας καύσης και λόγου πίεσης στην απόδοση

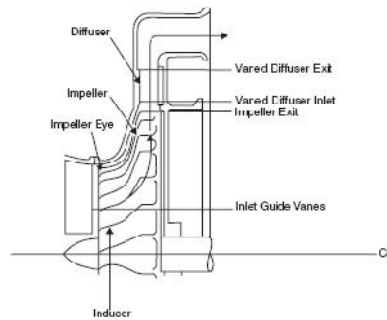
Τα βασικά τμήματα ενός απλού αεριοστροβίλου είναι:

- **Ο συμπιεστής:** που μπορεί να είναι αξονικής ή ακτινικής ροής. Και οι δυο τύποι είναι δυναμικές περιστρεφόμενες μηχανές που χρησιμοποιούν πτερυγώσεις για να αλληλεπιδρούν με τον αέρα.

Οι συμπιεστές ακτινικής ροής χρησιμοποιούν μια διαμορφωμένη πτερύγωση (impeller), η οποία, περιστρέφεται (ρότορας) και αναρροφά αέρα, τον επιταχύνει, ωθώντας τον προς την περιφέρεια της πτερύγωσης, χρησιμοποιώντας την φυγόκεντρο δύναμη. Η πτερωτή χωρίζεται σε δυο τμήματα : τον επαγωγό (inducer), που μοιάζει με πτερύγιο αξονικού συμπιεστή και πραγματοποιεί στροφή της ροής από την γωνία εισόδου σε μια περίπου αξονική κατεύθυνση, ενώ το δεύτερο μέρος είναι αυτό που επιτελεί την καθαρά ακτινική/φυγόκεντρη κίνηση. Στην περιφέρεια βρίσκεται ο διαχύτης που ουσιαστικά είναι το κέλυφος του συμπιεστή και μπορεί να φέρει πτερύγωση (στάτορας) αλλά μπορεί και όχι. Ο διαχύτης μετατρέπει την κινητική ενέργεια σε στατική πίεση.

Ανάλογα με τον τρόπο διάταξης και την μορφή των πτερυγίων συναντώνται και διάφοροι τύποι πτερωτών. Γενικά οι ακτινικοί συμπιεστές που χρησιμοποιούνται σε αεριοστροβίλους δεν έχουν προσδεδεμένα τα πτερύγια της πτερωτής στην κεφαλή τους και έχουν σχεδόν πάντοτε ένα πρώτο αξονικό τμήμα, δηλαδή επαγωγό.

Το ρευστό που εξέρχεται από τον διαχύτη συλλέγεται από το σπειροειδές κέλυφος και οδηγείται στον αγωγό εξόδου. Από το τελευταίο αυτό τμήμα απαιτείται η δημιουργία ομοιόμορφης κατανομής πίεσης στην έξοδο του συμπιεστή.



**Εικόνα 5-37 : Ακτινικός συμπιεστής**

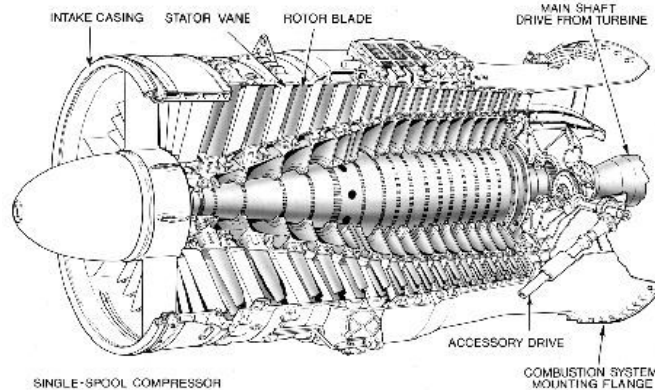
Οι συμπιεστές αξονικής ροής χρησιμοποιούν συστοιχίες από περιστρεφόμενα πτερύγια που προοδευτικά συμπιέζουν την ροή. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι γιατί η συμπίεση γίνεται με επιβράδυνση της ροής και υπάρχει μέγιστο επιτρεπόμενο όριο για την επιβράδυνση ανά βαθμίδα, προκειμένου να μην αυξηθούν πολύ οι απώλειες. Η μέγιστη τιμή λόγου πίεσης ανά βαθμίδα που έχει επιτευχθεί σήμερα είναι της τάξης του 2 ενώ συμπιεστές υψηλών επιδόσεων έχουν τιμή λόγου πίεσης ανά βαθμίδα της τάξης του 1,4 με 1,6. Οι συμπιεστές αξονικής ροής χρησιμοποιούνται όταν απαιτούνται μεγάλες παροχές. Οι συστοιχίες των πτερυγίων τοποθετούνται σε ζεύγη κινητής και σταθερής πτερυγώσης. Η κάθε βαθμίδα πτερυγίων επιβραδύνει την ροή, αυξάνοντας τη στατική πίεση. Συγκεκριμένα, η κινητή πτερυγώση επιταχύνει την ροή, ωστόσο η ροή σε σχέση με τα κινητά πτερύγια επιβραδύνεται. Ακόμα ο στάτορας κάθε βαθμίδας επιβραδύνει περαιτέρω την ροή ενώ την προετοιμάζει για να εισέλθει στην επόμενη βαθμίδα.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό των συμπιεστών είναι ότι λόγω της επιβραδυνόμενης ροής παρουσιάζουν μεγάλες ευαισθησίες στην αλλαγή των συνθηκών λειτουργίας. Φαινόμενα όπως η αποκόλληση της ροής μπορούν να οδηγήσουν σε ασταθή λειτουργία που μπορεί να είναι καταστρεπτική για τον συμπιεστή. Αυτού του είδους τα φαινόμενα περιορίζουν την λειτουργία του. Ακόμα κάθε αλλαγή του σημείου λειτουργίας συνεπάγεται αλλαγή του βαθμού απόδοσης, επειδή η επιβράδυνση ευνοεί τον σχηματισμό οριακών στρωμάτων. Γι' αυτό και ο συμπιεστής παρουσιάζει μέγιστη απόδοση σε στενές περιοχές λειτουργίας του. Σε πολλούς αξονικούς συμπιεστές υπάρχει στην είσοδό τους μια βαθμίδα σταθερών πτερυγίων που είναι μεταβλητής γεωμετρίας (IGV- inlet guide vanes) και πολλοί σύγχρονοι συμπιεστές έχουν στάτορες μεταβλητής γεωμετρίας σε αρκετές βαθμίδες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την καλύτερη λειτουργία του συμπιεστή σε καταστάσεις εκτός σημείου σχεδίασης και κατά την μεταβατική λειτουργία (εκκινήσεις, επιταχύνσεις/επιβραδύνσεις κλπ).

Ακόμα χαρακτηριστικό των αξονικών συμπιεστών είναι το γεγονός ότι κατά την κατεύθυνση της ροής η διατομή του συμπιεστή μειώνεται. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι γιατί κατά την σχεδίαση των πτερυγώσεων είναι επιθυμητό να μην μεταβάλλεται πολύ η αξονική ταχύτητα κατά μήκος του συμπιεστή. Ακόμα λόγω της συμπίεσης αυξάνεται η πυκνότητα του ρευστού με αποτέλεσμα λόγω διατήρησης της μάζας η διατομή πρέπει να μειώνεται.

Η αξονική ταχύτητα σε έναν συμπιεστή είναι άμεσα συνδεδεμένη με το λόγο πίεσης και την αύξηση της συγκέντρωσης ισχύος που επιτυγχάνεται με αύξηση της διακινούμενης παροχής. Η υπέρμετρη αύξηση όμως της αξονικής ταχύτητας περιορίζεται από αεροδυναμικούς λόγους, καθώς ο αριθμός Mach σχετικά με τα

πτερύγια δεν πρέπει να ξεπερνά κάποια όρια γιατί αλλιώς αυξάνονται υπέρμετρα οι απώλειες. Σε παλαιότερες μηχανές ήταν αναγκαίο η ροή σχετικά με τα πτερύγια να είναι υποηχητική. Όμως κατάλληλος σχεδιασμός των πτερυγίων των πρώτων βαθμίδων έδωσε την δυνατότητα κατασκευής συμπιεστών που λειτουργούν με διηχητική ροή στην πρώτη ή στις πρώτες βαθμίδες. Επιθυμητό θα ήταν να κατασκευαστεί συμπιεστής με πλήρως υπερηχητική ροή. Ωστόσο μέχρι σήμερα, αν και τέτοιοι συμπιεστές έχουν κατασκευαστεί εργαστηριακά, παρουσιάζονται σημαντικά προβλήματα που δεν επιτρέπουν την χρησιμοποίησή τους στις εφαρμογές.



Εικόνα 5-38 : Αξονικός συμπιεστής

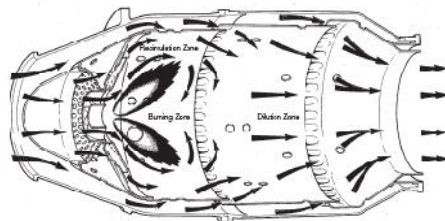
Γενικά οι αξονικοί συμπιεστές έχουν καλύτερη απόδοση από τους ακτινικούς αλλά έχουν μικρότερους λόγους πίεσης ανά βαθμίδα και είναι πιο πολύπλοκοι και ακριβοί.

Εκτός από τις δυο παραπάνω κατηγορίες, υπάρχουν και οι συμπιεστές μικτής ροής που συνδυάζουν χαρακτηριστικά των δυο τύπων συμπιεστών.

Όλοι οι συμπιεστές έχουν ένα πεδίο χαρακτηριστικών το οποίο προκύπτει από την συμπεριφορά του συμπιεστή σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας. Το πεδίο χαρακτηριστικών εκφράζεται με αδιάστατες μεταβλητές (λόγο πίεσης, ανηγμένη παροχή και ανηγμένες στροφές) και αποτελεί τον χάρτη του συμπιεστή.

Στην είσοδο του συμπιεστή στους περισσότερους βιομηχανικούς αεριοστροβίλους υπάρχουν φίλτρα, τα οποία εμποδίζουν την είσοδο διάφορων σωματιδίων που θα μπορούσαν να προκαλέσουν ζημιά στα πτερύγια του συμπιεστή. Ακόμα περιορίζουν την είσοδο σωματιδίων σκόνης που προκαλούν επικαθήσεις στα πτερύγια του συμπιεστή. Επίσης στην είσοδο των αεριοστροβίλων υπάρχει σιγαστήρας για τον περιορισμό του θορύβου. Όλες αυτές οι διατάξεις προκαλούν μια πτώση πίεσης στην είσοδο του αεριοστροβίλου, η οποία μάλιστα μεταβάλλεται λόγω επικαθήσεων σκόνης και σωματιδίων στα φίλτρα.

- **Ο θάλαμος καύσης** : Στον θάλαμο καύσης γίνεται η πρόσδοση θερμότητας με την καύση του καυσίμου. Πριν όμως γίνει η καύση πρέπει να γίνει έγχυση, πλήρης εξαέρωση και ανάμειξη του καυσίμου με τον αέρα. Ο θάλαμος καύσης αποτελείται από όλα αυτά τα τμήματα που επιτρέπουν την πραγματοποίηση όλων αυτών των διεργασιών που είναι απαραίτητες για την καύση. Όλες αυτές οι διεργασίες πρέπει να γίνονται ούτως ώστε να εξασφαλίζεται μέγιστη εκμετάλλευση του καυσίμου για την παραγωγή έργου ενώ ικανοποιούνται οι απαιτήσεις για αξιοπιστία κατά την λειτουργία της μηχανής.



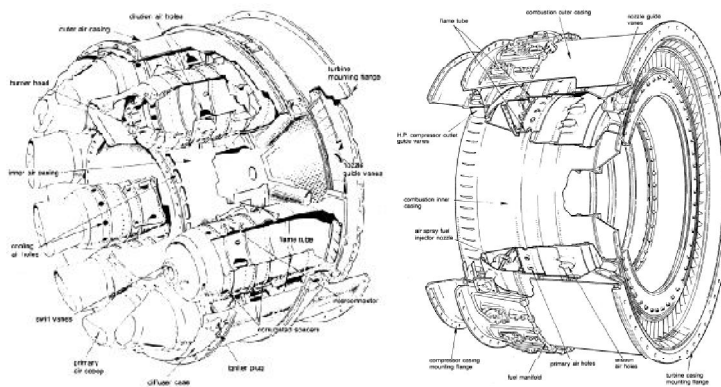
Εικόνα 5-39 : Θάλαμος καύσης

Τα κύρια μέρη ενός τυπικού θαλάμου καύσης είναι τα ακόλουθα:

1. Ο διαχύτης, ο οποίος επιβραδύνει την έξοδο του συμπιεστού
2. Ο διαχωριστής, που διαχωρίζει το ρεύμα αέρα σε κύριο και δευτερεύον
3. Ο θόλος, που δημιουργεί υψηλή τύρβη προκειμένου να επιτευχθεί καλή ανάμειξη καυσίμου και αέρα
4. Ο μανδύας ή φλογοσωλήνας, που εμπεριέχει την φλόγα
5. Ο εγχυτήρας καυσίμου, του οποίου η μορφή διαφοροποιείται ανάλογα με την μορφή τους καυσίμου
6. Ο αναφλεκτήρας, που ξεκινά την διαδικασία καύσης

Το πρωτεύον τμήμα του αέρα δημιουργεί τοπικά στοιχειομετρικό μείγμα. Το ενδιάμεσο μείγμα βοηθά στην επιπλέον ελάττωση CO και H για την ολοκλήρωση της καύσης, ενώ το ρεύμα αραίωσης ρυθμίζει την τελική θερμοκρασία προς τον στρόβιλο.

Σημαντικό είναι ότι για την σωστή λειτουργία του αεριοστροβίλου απαιτείται η επίτευξη και η διατήρηση μιας ευσταθούς φλόγας. Για να συμβεί αυτό μέσα σε μια συνεχή ροή αερίου, απαιτείται ταχύτητα μετώπου φλόγας ίση με την ταχύτητα της ροής. Η ταχύτητα μετάδοσης εξαρτάται από τον ρυθμό της αντίδρασης που με την σειρά της εξαρτάται από την χημική κινητική και τον βαθμό τύρβης.



Εικόνα 5-40 : Διατάξεις θαλάμων καύσης

- **Στρόβιλος** : Ο ρόλος του στροβίλου συνίσταται στην αφαίρεση ενέργειας που μεταφέρεται από το εργαζόμενο μέσο, την οποία μεταφέρει ως ενέργεια περιστροφής στον άξονα της μηχανής. Ο στρόβιλος εκμεταλλεύεται την υψηλή θερμοκρασία και πίεση του εισερχόμενου μέσου το οποίο αποτονώνει σε χαμηλότερη πίεση και θερμοκρασία. Ωστόσο η έκθεση του στροβίλου σε υψηλές θερμοκρασίες έχει ως συνέπεια την θερμική καταπόνηση μέρους του στροβίλου, για αυτό συνήθως πρακτική είναι η ψύξη των πτερυγίων του στροβίλου. Η απόδοση της ενέργειας του ρευστού στον άξονα του στροβίλου ενδεχομένως να γίνεται σε περισσότερες από μια βαθμίδες. Σε αυτήν την περίπτωση μιλάμε για έναν πολυβάθμιο στρόβιλο. Η κάθε βαθμίδα του στροβίλου αποτελείται από μια σταθερή

και μια κινητή περύγωση. Η σταθερή περύγωση αποτελείται από περύγια που ονομάζονται και ακροφύσια. Ο αριθμός των βαθμίδων αποφασίζεται κατά τον σχεδιασμό ανάλογα με την ισχύ που θα πρέπει ο στρόβιλος να απορροφά από το ρευστό, την ταχύτητα περιστροφής και άλλα.

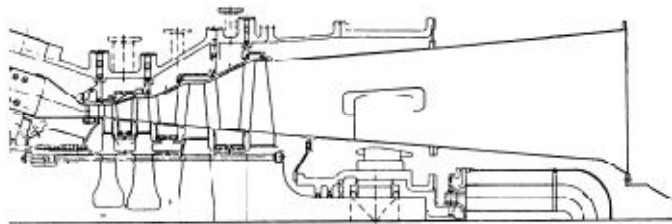
Όπως οι συμπιεστές έτσι και οι στρόβιλοι χωρίζονται σε ακτινικούς και αξονικούς. Διαφορά των αξονικών από τους ακτινικούς στρόβιλους είναι ότι δεν αλλάζει πρακτικά η μέση ακτίνα ροής, πράγμα που σημαίνει ότι οι αξονικοί στρόβιλοι ενδείκνυνται για την διακίνηση υψηλών παροχών μάζας, αλλά ο λόγος αποτόνωσής τους, δηλαδή ο λόγος πίεσης, που μπορούν να διαχειριστούν ικανοποιητικά, είναι περιορισμένος. Η απλή μορφή που παρουσιάζει η διαδρομή του ρευστού μέσα στην μηχανή επιτρέπει την χρήση πολλαπλών βαθμίδων, δηλαδή πολυβάθμιων αξονικών στρόβιλων με τους οποίους επιτυγχάνονται υψηλοί λόγοι πίεσης.

Ο σχεδιασμός της κινητής και σταθερής περύγωσης ενός στρόβιλου στηρίζεται στην αεροθερμοδυναμική ανάλυση της ροής και για τον λόγο αυτό τα περύγια τους έχουν τη βασική μορφή αεροτομής, ώστε να εξασφαλίζεται η βέλτιστη απόδοση του αεροστρόβιλου. Ανάλογα με τον βαθμό αντίδρασης μπορούμε να διακρίνουμε δυο τύπους βαθμίδων, τις βαθμίδες δράσης και αντίδρασης, ακριβώς όπως και στους ατμοστρόβιλους. Ο βαθμός αντίδρασης

ορίζεται ως  $r = \frac{h_2 - h_3}{h_1 - h_3} = \frac{p_2 - p_3}{p_1 - p_3}$  και δηλώνει που γίνεται η μεταβολή της πίεσης,

στους στρόβιλους δράσης  $r=0$  και η μεταβολή γίνεται στη σταθερή περύγωση, αντίθετα στους στρόβιλους αντίδρασης.

Στην πράξη οι αξονικοί στρόβιλοι σπάνια σχεδιάζονται αποτελούμενοι μόνο από βαθμίδες δράσης ή αντίδρασης, αλλά με συνδυασμένες βαθμίδες δράσης-αντίδρασης. Έτσι η δύναμη που ασκείται στα περύγια τους οφείλεται κατά ένα μέρος στην πρόσπτωση πάνω στο πρώτο τμήμα της πλευράς υπερπίεσης και κατά το υπόλοιπο μέρος στην δύναμη αντίδρασης λόγω επιτάχυνσης της ροής στο τελευταίο τμήμα τους που σχηματίζει συγκλίνοντα ακροφύσια. Η αναλογία δράσης-αντίδρασης σε μια βαθμίδα αξονικού στρόβιλου εξαρτάται από τον τύπο εφαρμογής αν και συνήθως συναντώνται βαθμίδες με ισομοιρασμένη δράση και αντίδραση (σε μια τυπική βαθμίδα  $r=0,5$  και η μισή πτώση πίεσης γίνεται στην σταθερή βαθμίδα ενώ η άλλη μισή στην κινητή περύγωση). Αντίθετα από τους αξονικούς συμπιεστές στους αξονικούς στρόβιλους παρουσιάζεται αύξηση της διατομής. Αυτό οφείλεται σε μείωση της πυκνότητας και κατά συνέπεια αύξηση της παροχής όγκου που συνεπάγεται αυξανόμενη διατομή.



Εικόνα 5-41 : Τομή αξονικού στρόβιλου

Στους στρόβιλους ακτινικής εισόδου της ροής, μέρος της ενέργειας του εργαζόμενου μέσου μεταφέρεται στον άξονα του στρόβιλου από τα περύγια της

κινητής περύγωσης, καθώς αυτό κινείται από την μεγάλη προς την μικρή ακτίνα. Χρησιμοποιώντας τα σταθερά περύγια η ροή εισέρχεται στην κινητή περύγωση με μεγάλη τιμή περιφερειακής ταχύτητας. Η έξοδος γίνεται με ακτινική ταχύτητα. Οι καθαρά ακτινικοί στρόβιλοι δεν χρησιμοποιούνται τόσο όσο οι στρόβιλοι μικτής ροής που συνδυάζουν χαρακτηριστικά των παραπάνω τύπων. Συγκεκριμένα στους στροβίλους μικτής ροής η είσοδος γίνεται από ακτινικό στάτορα, ο οποίος επιταχύνει την ροή προς τον ρότορα (διαμορφωμένη περύγωση impeller), η οποία ροή εισέρχεται ακτινικά με αμελητέα αξονική ταχύτητα και εξέρχεται αξονικά με μικρή ακτινική ταχύτητα.



Εικόνα 5-42 : Ακτινικοί στρόβιλοι (αριστερά ακτινικής και δεξιά μικτής ροής)

Αντίστοιχα με τους συμπιεστές έτσι και οι στρόβιλοι χαρακτηρίζονται από ένα αντίστοιχο πεδίο χαρακτηριστικών που αποτελούν τον χάρτη του στροβίλου και εκφράζεται με αδιάστατες μεταβλητές (λόγο πίεσης, ανηγμένη παροχή και ανηγμένες στροφές). Η μεγάλη διαφορά με τον χάρτη του συμπιεστή είναι ότι στον χάρτη του στροβίλου ακόμη και για πολύ μικρά φορτία το πεδίο χαρακτηριστικών εκφυλίζεται σε μια γραμμή ή μια ομάδα γραμμών σε πολύ στενή περιοχή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι σύγχρονοι στρόβιλοι σχεδιάζονται ώστε η ροή σε κάποιο σημείο τους να γίνεται ηχητική. Το αποτέλεσμα είναι ότι η ταχύτητα δεν μπορεί να αυξηθεί παραπάνω και έτσι γίνεται στραγγαλισμός της παροχής.

### 5.3.2 Σύγκριση αεριοστροβιλικών και ατμοηλεκτρικών σταθμών παραγωγής ενέργειας

Πλεονεκτήματα αεριοστροβίλων:

- Μικρός χρόνος παράδοσης. Οι περισσότεροι κατασκευαστές έχουν τυποποιήσει την παραγωγή τους έτσι ώστε μικρές μονάδες μέχρι 70MW να έχουν χρόνο παράδοσης μέχρι 12 μήνες. Μεγαλύτερες μονάδες χρειάζονται περίπου 20-26 μήνες. Οι κτιριακές εγκαταστάσεις, μηχανολογικά εξαρτήματα κ.λπ. επηρεάζουν τον χρόνο παράδοσης.
- Απαιτούμενος χώρος. Οι αεριοστροβίλοι απαιτούν σημαντικά μικρότερο χώρο τοποθέτησης από έναν ατμοπαραγωγό με ατμοστρόβιλο. Ενδεικτικά απαιτούνται 10-20m<sup>2</sup>/MW για έναν αεριοστρόβιλο ενώ 50-80m<sup>2</sup>/MW για έναν σταθμό ΑΗΣ.



- Μικρό κόστος παραγωγής. Το κόστος κατασκευής ενός σταθμού με αεριοστρόβιλο κυμαίνεται στο μισό με 2/3 του κόστους κατασκευής ενός αντίστοιχου ΑΗΣ
- Μικρός χρόνος εκκίνησης που φθάνει και μέχρι τα 14-20 λεπτά
- Νερό ψύξης, το οποίο ενδεχομένως απαιτείται για την ψύξη της γεννήτριας ή άλλων εξαρτημάτων είναι σχετικά λίγο και μπορεί να επαναφερθεί στην αρχική του θερμοκρασία σε κλειστό κύκλωμα.
- Μικρή εσωτερική κατανάλωση
- Δεν απαιτούνται πολύπλοκοι χειρισμοί λόγω της αυτοματοποίησης της εγκατάστασης. Έτσι απαιτείται λίγο προσωπικό λειτουργίας.

Μειονεκτήματα αεριοστρόβιλων:

- Αεριοστρόβιλοι απαιτούν αέρια ή υγρά καύσιμα και κυρίως φυσικό αέριο. Η χρήση βαρέως πετρελαίου απαιτεί ειδικό σχεδιασμό και δημιουργεί διαβρώσεις και ρυπάνσεις που απαιτούν διακοπή λειτουργίας για συντήρηση και επισκευή
- Ο βαθμός απόδοσης είναι κατώτερος των αντίστοιχων ΑΗΣ
- Παρόλο που οι αεριοστρόβιλοι κατασκευάζονται και υπολογίζονται για λειτουργία 100000 ωρών ορισμένα τμήματα προσβάλλονται πολύ γρήγορα και απαιτούν αντικατάσταση.
- Οι εκπομπές ήχου και αιθάλης μπορούν εύκολα να μειωθούν, αλλά η εκπομπή NOx χρειάζεται ειδική κατασκευή και μέτρα.

### 5.3.3 Χρήση αεριοστρόβιλων στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Οι αεριοστρόβιλοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη βιομηχανία για συμπαραγωγή. Στη συμπαραγωγή παράγεται ταυτόχρονα ηλεκτρική (ή μηχανική ενέργεια) και θερμότητα, που εξυπηρετεί ορισμένες διεργασίες, από την ίδια πηγή θερμότητας. Ακόμα η θερμότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη θέρμανση ή για την ψύξη με τη χρήση διάταξης απορρόφησης.

Η θερμότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ακόμα άμεσα μέσω των καυσαερίων σε διεργασίες ξήρανσης είτε με την μορφή ατμού ο οποίος δημιουργείται σε έναν λέβητα ανάκτησης θερμότητας (Heat Recovery Steam Generator –HRSG). Οι περισσότερες εγκαταστάσεις χρησιμοποιούν ως καύσιμο φυσικό αέριο μπορούν να χρησιμοποιήσουν όμως και αέρια που προέρχονται από διάφορες διεργασίες, όπως για παράδειγμα στα διυλιστήρια. Το πλεόνασμα παραγωγής ενέργειας διοχετεύεται στο ηλεκτρικό δίκτυο. Σημαντικές παράμετροι για τη λειτουργία μονάδας συμπαραγωγής είναι:

1. Θερμικός βαθμός απόδοσης του απλού κύκλου και του κύκλου συμπαραγωγής
2. Ο λόγος παραγόμενης θερμότητας προς την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ.
3. Η θερμοκρασία της διαθέσιμης θερμότητας καθώς αποτελεί καθοριστικό ρόλο για την επιτέλεση των διαφόρων διεργασιών

Ο συνολικός βαθμός απόδοσης της συμπαραγωγής είναι πολύ υψηλός και έτσι το κόστος της μονάδας, ο χρόνος εκκίνησης, ο όγκος και το βάρος δεν είναι σημαντικές παράμετροι.

Οι αεριοστρόβιλοι στην ηλεκτροπαραγωγή χρησιμοποιούνται ως:

- Μονάδες αιχμής για την κίνηση γεννητριών εναλλασσομένου ρεύματος. Οι μονάδες αιχμής έχουν μικρή εκμετάλλευση το έτος, περί τα 10%, και

χρησιμοποιούνται για την κάλυψη των αναγκών του δικτύου για ορισμένες ώρες της ημέρας όταν αυξάνει η κατανάλωση. Η βασική απαίτηση των μονάδων αεριοστρόβιλων είναι η δυνατότητα εκκίνησης σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα, ενώ ο βαθμός απόδοσης είναι δευτερεύουσας σημασίας. Οι μονάδες αιχμής είναι συνήθως αεροστρόβιλοι. Μονάδες Diesel χρησιμοποιούνται όταν οι απαιτήσεις ισχύος είναι μικρές. Οι ατμοηλεκτρικοί σταθμοί έχουν πολύ μεγάλους χρόνους εκκίνησης για να χρησιμοποιηθούν σαν μονάδες αιχμής.

- Βοηθητικές μονάδες βάσης. Σαν βοηθητικές μονάδες βάσης ονομάζονται οι μονάδες που έχουν εκμετάλλευση περί το 30 με 50%. Χρησιμοποιούνται για την κάλυψη εποχικών αναγκών του δικτύου, όπως το καλοκαίρι σε περιοχές υψηλού τουρισμού. Οι απαιτήσεις των βοηθητικών μονάδων βάσης είναι ο βαθμός απόδοσης και η υψηλή διαθεσιμότητα, αντί του κόστους. Σε αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιούνται παράγωγοι αεροπορικών αεριοστρόβιλοι όπως της εταιρίας Rolls Royce Trent ( $\eta=41\%$ ) ή της GE LMS 100 ( $\eta=46\%$  με ενδιάμεση ψύξη μεταξύ των συμπιεστών και λόγο πίεσης 42).
- Μονάδες βάσης όπου έχουν εκμετάλλευση περί το 100%. Η βασική απαίτηση είναι υψηλός βαθμός απόδοσης και διαθεσιμότητα, ενώ δεν ενδιαφέρει το κόστος και ο χρόνος εκκίνησης. Στις μονάδες βάσης ο αεριοστρόβιλος συναγωνίζεται με τους λιγνιτικούς και φαιανθρακικούς σταθμούς, τους πυρηνικούς σταθμούς και τους ατμοηλεκτρικούς σταθμούς πετρελαίου. Για να αντιμετωπιστούν τα μειονεκτήματα των αεριοστρόβιλων (χαμηλός βαθμός απόδοσης), αλλά και των συμβατικών ατμοηλεκτρικών σταθμών (μεγάλος χρόνος εκκίνησης) δημιουργήθηκε ο συνδυασμένος κύκλος, στον οποίο ένας αεριοστρόβιλος παράγει ηλεκτρική ενέργεια και τα καυσαέρια του υψηλής θερμοκρασίας που εξέρχονται από τον στρόβιλο διοχετεύονται σε λέβητα ανάκτησης θερμότητας (HRSG) όπου παράγεται ατμός που με την σειρά του εκτονώνεται σε έναν ατμοστρόβιλο για την επιπρόσθετη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ο βαθμός απόδοσης του όλου συστήματος ξεπερνά τον βαθμό απόδοσης των επιμέρους υποσυστημάτων και φτάνει μέχρι το 60%. Έτσι για να μπορέσουν να φτάσουν σε ικανοποιητικούς βαθμούς απόδοσης οι αεριοστρόβιλοι πρέπει να χρησιμοποιηθούν σε μονάδες συνδυασμένου κύκλου και έτσι επιτυγχάνονται αποδόσεις της τάξης του 50-60%. Οι αεριοστρόβιλοι αυτών των περιπτώσεων είναι βαρέως τύπου, έχουν λόγο πίεσης στην περιοχή του 10-16 ο οποίος οδηγεί σε μέγιστο βαθμό απόδοσης της όλης εγκατάστασης, ενώ η θερμοκρασία εισόδου στον στρόβιλο κυμαίνεται από 1450-1550K (1100-1200°C). Τέλος, πολλές τέτοιες μονάδες έχουν λειτουργήσει για 100000 ώρες χωρίς πρόβλημα ενώ υπάρχουν μονάδες που έχουν φτάσει τις 200000 ώρες λειτουργίας.

## 5.4 Συνδυασμένος κύκλος

### *Εισαγωγή*

Η συνεχής αύξηση της ζήτησης της ηλεκτρικής ενέργειας και οι απαιτήσεις για μείωση των ρύπων οδηγούν σε προσπάθεια αύξησης του βαθμού απόδοσης που έχει σαν επακόλουθη μείωση της κατανάλωσης καυσίμων, την επέκταση του χρονικού ορίου επάρκειας αυτών. Η αύξηση της απόδοσης γίνεται με αύξηση των επιπέδων των θερμοκρασιών και πιέσεων του θερμικού κύκλου. Αυτό είναι πολυδάπανο για τους κλασικούς θερμικούς σταθμούς, εφικτό όμως όσον αφορά την αύξηση του βαθμού απόδοσης στους συνδυασμένους κύκλους αεριοστροβίλων και ατμοστροβίλων. Ο συνδυασμός αεριοστροβίλων με ατμοστροβίλους παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον ειδικά τα τελευταία χρόνια γιατί παρ' όλο που δίνει ένα πολυπλοκότερο σύστημα σε σχέση με τους κλασικούς ΑΗΣ, έχει μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης με μικρότερο κόστος επένδυσης και λειτουργίας.

Γενικά, όταν δυο κύκλοι συνδυάζονται σε μια μονάδα παραγωγής ενέργειας τότε η απόδοση του συνολικού κύκλου είναι μεγαλύτερη από αυτήν που θα μπορούσε να επιτευχθεί από τους δύο κύκλους ξεχωριστά. Οι θερμικοί κύκλοι μπορούν να χρησιμοποιούν το ίδιο ή διαφορετικό εργαζόμενο μέσο. Ωστόσο μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν κύκλοι με διαφορετικά εργαζόμενα μέσα καθώς τα πλεονεκτήματά τους μπορούν να συνδυαστούν.

Όταν λοιπόν δυο κύκλοι συνδυάζονται, ο ένας λειτουργεί σε υψηλότερα θερμοκρασιακά επίπεδα από τον άλλο. Ο κύκλος που λειτουργεί σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες ονομάζεται ανώτερο κύκλος (topping cycle). Η απορριπτόμενη θερμότητα που παράγεται αξιοποιείται περαιτέρω από τον κύκλο όπου γίνεται η δεύτερη διεργασία. Αυτός ο κύκλος λειτουργεί σε χαμηλότερη θερμοκρασία και γι' αυτό ονομάζεται κατώτερος κύκλος (bottoming cycle).

Η προσεκτική επιλογή των εργαζόμενων μέσων σημαίνει μια συνολική διεργασία που μπορεί να κάνει ιδανική θερμοδυναμική χρήση της θερμότητας σε υψηλή θερμοκρασία, ενώ απορρίπτει θερμότητα στην χαμηλότερη δυνατή θερμοκρασία. Συνήθως ο ανώτερος και κατώτερος κύκλος είναι συνδεδεμένοι με έναν εναλλάκτη θερμότητας.

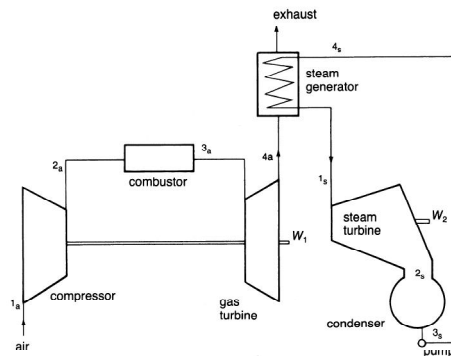
Ο συνδυασμός ο οποίος χρησιμοποιείται συνηθέστερα για την εμπορική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι αυτός όπου ο ανώτερος κύκλος είναι με αέρα ενώ ο κατώτερος με νερό και ατμό. Η αντικατάσταση του νερού – ατμού στον κατώτερο κύκλο με οργανικά υλικά ή με αμμωνία έχει προταθεί λόγω της δυνατότητας που προσφέρεται για ακόμα μεγαλύτερη μείωση της θερμοκρασίας της απορριπτόμενης θερμότητας. Ωστόσο καθώς οι μέγιστες θερμοκρασίες των αεριοστροβίλων αυξάνονται με την πρόοδο της τεχνολογίας, ομοίως αυξάνεται και η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων. Αυτό έχει ως συνέπεια τα πλεονεκτήματα των άλλων υλικών έναντι του νερού να μην είναι τόσο σημαντικά, δεδομένου του υψηλότερου κόστους κατασκευής και του πιθανού κινδύνου που παρουσιάζεται π.χ. σε περιπτώσεις διαφυγής της αμμωνίας στο περιβάλλον. Αυτοί οι εναλλακτικοί κύκλοι δεν φαίνεται να αντικαταστήσουν τον συνδυασμένο κύκλο με αέρα και νερό-ατμό στο εγγύς μέλλον. Στην συνέχεια όποτε γίνεται αναφορά για συνδυασμένο κύκλο θα εννοείται ότι μιλάμε για τον κύκλο με αέρα και νερό-ατμό.

Τα πλεονεκτήματα του συνδυασμένου κύκλου είναι:

- Τα πλεονεκτήματα των αεριοστροβίλων που ήδη έχουν αναφερθεί
- Ο αέρας αποτελεί ένα απλό μέσο που χρησιμοποιείται ευρέως στις σύγχρονες στροβιλομηχανές σε μεγάλες θερμοκρασίες εισόδου του αέρα στον στρόβιλο, δίνοντας καλύτερες προϋποθέσεις για έναν καλό ανώτερο κύκλο

- Το νερό/ατμός είναι ένα φθινό μέσο, το οποίο βρίσκεται άφθονο στην φύση, δεν εγκυμονεί κινδύνους και είναι κατάλληλο για τις μέτριες και χαμηλές θερμοκρασίες του κύκλου αποτελώντας το μέσο για τον κατώτερο κύκλο.

Η εξέλιξη αυτού του είδους κύκλων έγινε δυνατή με την εξέλιξη του αεριοστρόβιλου. Αυτή η εξέλιξη είναι πρόσφατο γεγονός· περί το 1970 άρχισαν να κατασκευάζονται αεριοστρόβιλοι με θερμοκρασίες εισόδου στον στρόβιλο και συνεπώς θερμοκρασίες εξόδου από αυτόν αρκετά υψηλές ούτως ώστε να είναι δυνατή η σχεδίαση συνδυασμένων κύκλων υψηλής απόδοσης. Η εξέλιξη διευκολύνθηκε καθώς η τεχνολογία που χρησιμοποιήθηκε είχε ήδη αποδεδειγμένη αξία: σε μονάδες παραγωγής ενέργειας χρησιμοποιούνταν αεριοστρόβιλοι αλλά και ατμοπαραγωγοί με ατμοστρόβιλους. Αυτό βοήθησε στο να μείνει το κόστος της επένδυσης αλλά και της περαιτέρω ανάπτυξης αρκετά χαμηλό. Το αποτέλεσμα ήταν ένας κύκλος με αρκετά μεγάλη απόδοση, μικρό κόστος επένδυσης και μικρό χρόνο παράδοσης.



Εικόνα 5-43 : Μονογραμμικό σχέδιο συνδυασμένου κύκλου

### 5.4.1 Γενικά

Ο συνδυασμένος κύκλος, όπως ήδη αναφέρθηκε, αποτελείται από τον συνδυασμό των κύκλων του Joule – Brayton (σαν ανώτερος κύκλος) και του Rankine (κατώτερος κύκλος). Ο αεριοστρόβιλος που χρησιμοποιείται είναι ένας κλασικός αεριοστρόβιλος όπως έχει περιγραφεί σε προηγούμενη ενότητα. Μπορεί να είναι βιομηχανικός ή παράγωγος αεροπορικού, αλλά αυτό δεν έχει τόσο σημασία. Στην απλή περίπτωση του συνδυασμένου κύκλου ο αεριοστρόβιλος αναρροφά αέρα, τον συμπιέζει μέχρι μια ανώτερη πίεση, μετά εκτελεί την καύση ανεβάζοντας την θερμοκρασία στην ανώτερη του κύκλου και εκτονώνει το καυσαέριο στον στρόβιλο. Τα θερμά καυσαέρια που παράγονται εισέρχονται σε λέβητα ανάκτησης θερμότητας (Heat Recovery Steam Generator –HRSG) και παράγεται ατμός. Ο ατμός στην συνέχεια διοχετεύεται στον ατμοστρόβιλο για την επιπρόσθετη παραγωγή ενέργειας. Στην συνέχεια ο εκτονωμένος ατμός οδηγείται στον συμπυκνωτή και τέλος συμπιέζεται από τις αντλίες για την ανατροφοδότηση του κύκλου.

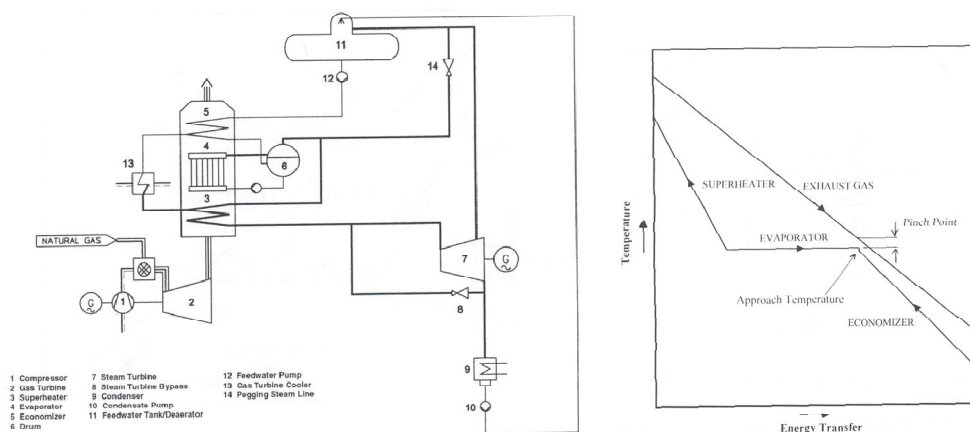
Προφανώς ο κύκλος που αναφέρθηκε είναι ο απλούστερος δυνατός αλλά σχεδόν ποτέ δεν χρησιμοποιείται έτσι. Πρώτα απ’ όλα, αντί ενός απλού αεριοστρόβιλου μπορούν να χρησιμοποιηθούν κάποιες παραλλαγές του (διπλής ατράκτου, με αναθέρμανση των καυσαερίων κλπ). Ακόμα σχεδόν ποτέ δεν χρησιμοποιείται μόνο μια πίεση· συνήθως χρησιμοποιούνται δυο ή και τρεις πιέσεις ενώ είναι πιθανές παραλλαγές του κύκλου Rankine όπως π.χ. με αναθέρμανση ή προθέρμανση τροφοδοτικού νερού, που θα αναλυθούν στην συνέχεια. Ακόμα μια βασική διαφορά μεταξύ κλασικών ατμοηλεκτρικών σταθμών και σταθμών συνδυασμένου κύκλου είναι η κατασκευή του ατμοπαραγωγού/λέβητα ανάκτησης

θερμότητας. Τα υπόλοιπα εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται (ατμοστρόβιλοι, τροφοδοτικές αντλίες, συμπυκνωτές κλπ.) είναι παρόμοια και έχει ήδη αναλυθεί η σημασία τους.

#### 5.4.2 Συνοπτική παρουσίαση συνδυασμένων κύκλων

Παρακάτω παρουσιάζονται οι συνηθέστεροι συνδυασμένοι κύκλοι, ξεκινώντας από τον πιο απλό κύκλο και καταλήγοντας στους πιο πολύπλοκους, θεωρώντας απλό κύκλο αεριοστρόβιλου.

Ο απλούστερος κύκλος είναι ο βασικός κύκλος μιας πίεσης καθώς ο λέβητας ανάκτησης θερμότητας (HRSG) παράγει ατμό μιας πίεσης για τον ατμοστρόβιλο. Ο ατμοστρόβιλος διαθέτει παράκαμψη ατμού που στέλνει τον ατμό στον συμπυκνωτή σε περίπτωση που δεν είναι δυνατό ο ατμός να διέλθει από τον ατμοστρόβιλο. Μετά τον συμπυκνωτή το συμπυκνωμένο νερό οδηγείται με αντλίες στον απαερωτή και μετά στον λέβητα ανάκτησης θερμότητας. Για την θέρμανση του απαερωτή χρησιμοποιείται ατμός που απομαστεύεται από τον ατμοστρόβιλο. Ο λέβητας ανάκτησης χωρίζεται στα ακόλουθα τμήματα: τον οικονομητήρα, τον ατμοποιητή και τον υπερθερμαντή. Το τροφοδοτικό νερό θερμαίνεται σε θερμοκρασία κοντά στον κορεσμό από τον απαερωτή και τον οικονομητήρα και μετά οδηγείται στον ατμοποιητή όπου και ατμοποιείται σε σταθερή θερμοκρασία. Ο ατμός και το νερό επανέρχονται στο τύμπανο απ' όπου ο ατμός συνεχίζει προς τον υπερθερμαντή για να φτάσει στην επιθυμητή θερμοκρασία. Μέρος της παροχής του υπερθερμαντή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για βοηθητικές καταναλώσεις.



Εικόνα 5-44 : Συνδυασμένος κύκλος μίας πίεσης (αριστερά) και διάγραμμα θερμοκρασίας νερού/ατμού-καυσαερίων (δεξιά)

Ωστόσο αυτός ο κύκλος δεν κάνει τόσο καλή αξιοποίηση της θερμότητας των καυσαερίων. Ακόμα:

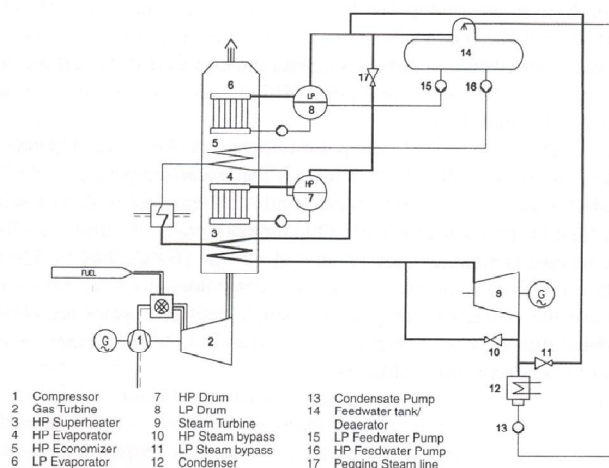
-Η αύξηση της πίεσης στον κύκλο δεν σημαίνει αναγκαία καλή απόδοση γιατί παρ' όλο που σε μεγάλη πίεση αυξάνεται η ενθαλπική πτώση στον ατμοστρόβιλο, αυξάνεται και η θερμοκρασία ατμοποίησης και παράγεται λιγότερος ατμός. Κατά συνέπεια αυξάνεται η απορριπτόμενη θερμότητα μέσω των καυσαερίων και μειώνεται ο βαθμός απόδοσης. Ακόμα μεγάλη πίεση του κύκλου συνεπάγεται αύξηση του ποσοστού υγρασίας στην έξοδο του στρόβιλου που έχει σαν αποτέλεσμα μείωση του βαθμού απόδοσης του ατμοστρόβιλου. Ωστόσο, δεδομένου ότι η πίεση επιδρά στην ποσότητα του παραγόμενου ατμού, η χαμηλή

πίεση θα οδηγήσει στην απόρριψη περισσότερης ενέργειας στο συμπυκνωτή, γιατί η ποσότητα του ατμού θα είναι περισσότερη.

-Η αύξηση της θερμοκρασίας έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της παραγόμενης ενέργειας του κύκλου. Αυτό συμβαίνει γιατί αυξάνοντας την θερμοκρασία αυξάνεται μεν η ενθαλπική πτώση στον αμοστρόβιλο, αλλά μειώνεται η ποσότητα ατμού λόγω της υπερθέρμανσης σε μεγαλύτερη θερμοκρασία. Το κυριότερο φαινόμενο από τα προαναφερθέντα είναι το δεύτερο με αποτέλεσμα την μείωση της παραγόμενης ισχύος.

-Η χρήση προθέρμανσης του τροφοδοτικού νερού με την χρήση απομάστευσης ατμού από τον αμοστρόβιλο δεν θα οδηγούσε σε βελτίωση της απόδοσης του κύκλου καθώς θα οδηγούσε σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες εξόδου των καυσαερίων. Όσο μεγαλύτερες θερμοκρασίες τροφοδοτικού νερού επιτυγχάνονται τόσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων. Αυτή είναι μια σημαντική διαφορά μεταξύ συμβατικών ΑΗΣ και των σταθμών συνδυασμένου κύκλου. Στους κλασσικούς αμοπαγωγούς υπάρχει αναγεννητικός εναλλάκτης θερμότητας που αξιοποιεί την θερμότητα των καυσαερίων μετά την έξοδο από τον οικονομητήρα σε αντίθεση με τους συνδυασμένους κύκλους όπου τα καυσαέρια αποβάλλονται στην ατμόσφαιρα μετά τον οικονομητήρα. Ακόμα η χαμηλότερη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ νερού και εξόδου καυσαερίων στον συνδυασμένο κύκλο παρουσιάζεται στο θερμό άκρο του εναλλάκτη σε αντίθεση με τους κλασσικούς αμοηλεκτρικούς σταθμούς, όπου παρουσιάζεται στο ψυχρότερο άκρο. Έτσι στον συνδυασμένο κύκλο η αμοπαγωγή δεν εξαρτάται από την προθέρμανση, αντίθετα από τους κλασσικούς αμοηλεκτρικούς σταθμούς.

Κατά συνέπεια, το επόμενο βήμα είναι η χρήση ενός προθερμαντικού βρόχου χαμηλότερης πίεσης. Ο απαερωτής σε αυτήν την περίπτωση δεν θα χρησιμοποιεί απομάστευση ατμού από τον αμοστρόβιλο, αλλά κορεσμένο ατμό της χαμηλότερης πίεσης. Στην συνέχεια το τροφοδοτικό νερό του απαερωτή θα οδηγείται στον προθερμαντικό βρόχο χαμηλής πίεσης και στο κύκλωμα υψηλής πίεσης. Σε αυτήν την περίπτωση ο βαθμός απόδοσης αυξάνεται καθώς γίνεται καλύτερη εκμετάλλευση της θερμότητας των καυσαερίων. Επίσης υπάρχει η δυνατότητα προθέρμανσης με την χρήση προθερμαντήρα ατμού. Ο προθερμαντήρας ατμού μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της αμοπαγωγής χωρίς να έχει τόσο αρνητική επίδραση στον βαθμό απόδοσης, λόγω του προθερμαντικού βρόχου χαμηλής πίεσης.



Εικόνα 5-45 : Συνδυασμένος κύκλος μιας πίεσης με προθερμαντικό βρόχο

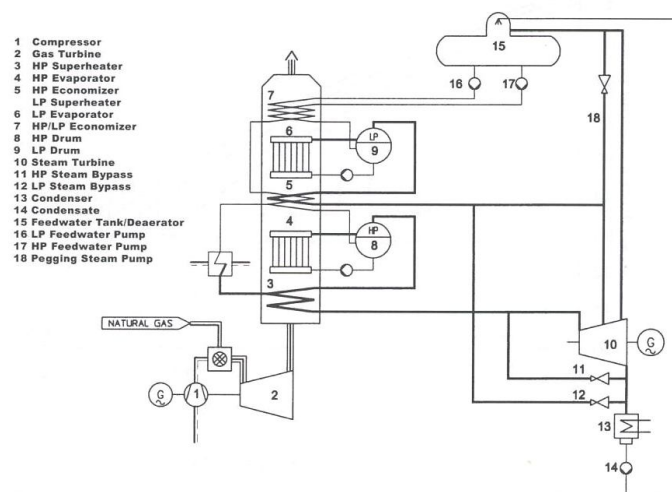
Επομένως ο κύκλος αυτός γίνεται ιδανικός για την χρήση καυσίμων με μεγάλη περιεκτικότητα σε θείο, καθώς τα καυσαέρια θα απελευθερώνονταν σε αρκετά μεγάλη

θερμοκρασία· μεγαλύτερη από αυτήν του όξινου σημείου δρόσου για να αποφευχθεί συμπύκνωση θεικού οξέως. Ωστόσο θα υπήρχε περαιτέρω δυνατότητα αύξησης αν ο ατμός χαμηλής πίεσης διοχετευόταν σε κατάλληλη βαθμίδα του ατμοστρόβιλου.

Έτσι το επόμενο βήμα είναι η χρήση διπλής πίεσης, μιας χαμηλής και μιας υψηλής. Ο βρόχος χαμηλής πίεσης δημιουργεί ατμό για τον ατμοστρόβιλο και για την προθέρμανση του τροφοδοτικού νερού. Το τροφοδοτικό νερό στην συνέχεια οδηγείται με αντλίες στα κυκλώματα χαμηλής και υψηλής πίεσης και στην συνέχεια η υψηλή πίεση εκτονώνεται στον στρόβιλο. Σε κάποια βαθμίδα του στρόβιλου εισέρχεται και ο ατμός χαμηλής πίεσης. Το όλο σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για καύσιμα με θείο με την προσθήκη προθερμαντών του τροφοδοτικού νερού με ατμό. Σε αυτήν την περίπτωση κάθε προθερμαντής οδηγεί σε αύξηση της παραγόμενης ισχύος λόγω αύξησης της ατμοπαραγωγής, ενώ συμφέρει τοποθέτηση προθερμαντών που απομαστεύουν ατμό σε διαφορετικές πιέσεις (σταδιακή προθέρμανση) ούτως ώστε μεγαλύτερο τμήμα του ατμού να μπορεί να εκτονωθεί στον ατμοστρόβιλο. Εναλλακτικά σε περίπτωση χρήσης καυσίμων με μικρή περιεκτικότητα σε θείο μπορεί να αποφευχθεί η χρήση προθερμαντών με ατμό, για την περαιτέρω αξιοποίηση της θερμότητας των καυσαερίων. Η προθέρμανση του τροφοδοτικού νερού στον απαερωτή μπορεί να γίνει με απομάστευση από τον στρόβιλο.

-Σε τέτοιου είδους κύκλους η υψηλή πίεση είναι επιθυμητό να είναι σε υψηλά επίπεδα, ούτως ώστε να εξασφαλιστεί μεγάλη δυνατότητα απόδοσης έργου στον ατμοστρόβιλο. Αντίθετα η χαμηλή πίεση πρέπει να είναι τέτοια ώστε να γίνεται καλή αξιοποίηση της θερμότητας των καυσαερίων. Ωστόσο, η υψηλή πίεση δεν μπορεί να ξεπεράσει κάποια όρια λόγω αύξησης της υγρότητας του ατμού στην έξοδο του στρόβιλου. Αυτό βέβαια εξετάζεται σε συνάρτηση με την χαμηλή πίεση. Όσο χαμηλότερη είναι η χαμηλή πίεση, τόσο αυξάνεται ο βαθμός απόδοσης. Όμως, επειδή η πίεση μειώνεται, αυξάνεται ο ειδικός όγκος με αποτέλεσμα να απαιτούνται μεγάλες διατομές για τους σωλήνες, μηχανές κ.λπ. που σημαίνει ακριβές μηχανές.

-Αντίθετα με τον κύκλο μονής πίεσης η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε άμεση αύξηση της παραγόμενης ισχύος, καθώς δίνεται περισσότερη ισχύς στην χαμηλή πίεση, πράγμα που αποζημιώνει την μείωση του έργου από την υψηλή πίεση (που οφείλεται σε μείωση της ατμοπαραγωγής).



Εικόνα 5-46 : Συνδυασμένος κύκλος δυο πιέσεων

Εάν προστεθεί ακόμα μια βαθμίδα πίεσης στο κύκλωμα διπλής πίεσης, θα είναι δυνατή μεγαλύτερη ανάκτηση της θερμότητας των καυσαερίων. Έτσι δημιουργήθηκε ο

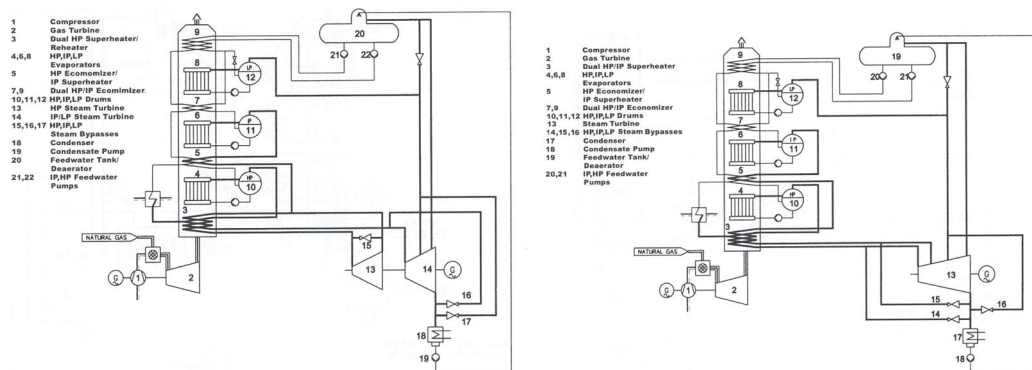
κύκλος των τριών πιέσεων. Σε αυτήν την περίπτωση από τον απαερωτή υπάρχουν οι τρεις τροφοδοσίες μία για κάθε πίεση. Σε κάθε πίεση υπάρχει προθερμαντής, ατμοποιητής και υπερθερμαντής. Η κάθε πίεση εισέρχεται σε διαφορετική βαθμίδα του στροβίλου, ενώ η απαερίωση γίνεται με απομάστευση και/ή χρήση μέρους του ατμού χαμηλής πίεσης. Κύκλοι αυτού του είδους έχουν την δυνατότητα επίτευξης βαθμών απόδοσης της τάξης του 58%.

- Η υψηλή πίεση είναι περίπου 100bar, καθώς επιπλέον αύξησή της έχει ως συνέπεια μεγάλη αύξηση της υγρότητας στην έξοδο του ατμοστροβίλου, η μέση πίεση έχει βέλτιστη τιμή περίπου στα 25 bar, ενώ η χαμηλή δεν πρέπει να πέσει κάτω από τα 3bar καθώς αποδίδει λίγο έργο στον στροβίλο ενώ απαιτεί ακριβή κατασκευή, λόγω μεγάλων διατομών στους σωλήνες μεταφοράς και στον ατμοστροβίλο.

-Η θερμοκρασία της υψηλής πίεσης είναι που καθορίζει ουσιαστικά την παραγόμενη ισχύ. Η μέση πίεση θερμαίνεται συνήθως στα ίδια επίπεδα με την υψηλή πίεση και βοηθά στην μείωση της υγρότητας του ατμού καθώς οδηγεί την καμπύλη εκτόνωσης δεξιότερα στο διάγραμμα T-s, εκτός από την επιπρόσθετη παραγωγή έργου (δρα σαν αναθέρμανση). Ωστόσο το σημείο ανάμειξης πρέπει να είναι κατάλληλα σχεδιασμένο για να αποφευχθούν θερμικές καταπονήσεις.

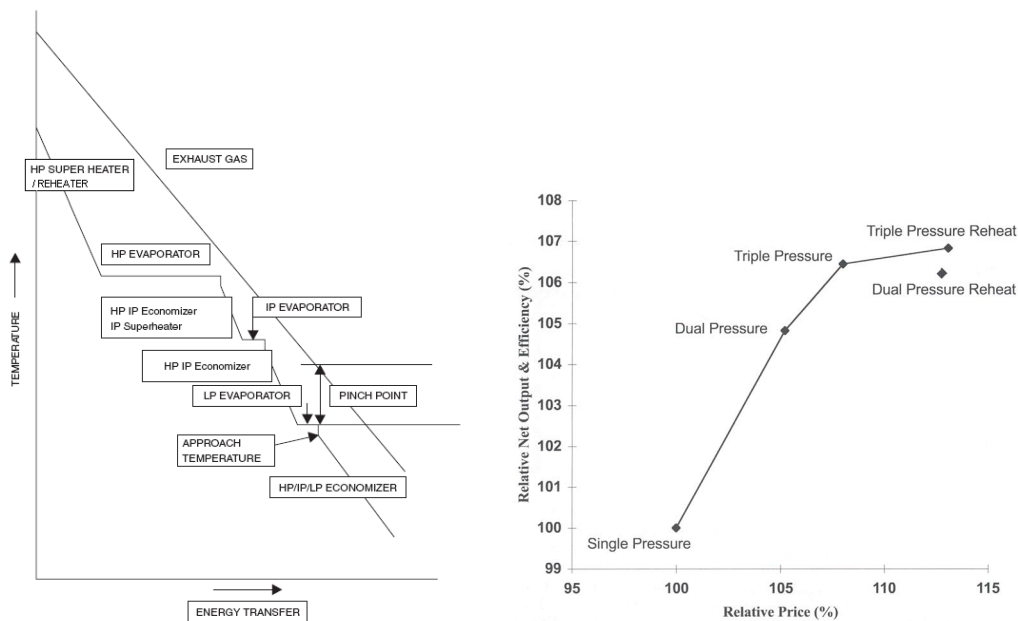
Χρήση προθερμαντών με απομάστευση ατμού δεν συνηθίζεται, καθώς η θερμοκρασία του ατμού είναι αρκετά κοντά στην θερμοκρασία των καυσαερίων.

Ακόμα αύξηση της αποδιδόμενης ισχύος γίνεται με χρήση αναθέρμανσης. Σε αυτόν τον κύκλο η υψηλή πίεση είναι στα 120bar και αφού αποτονωθεί μερικώς στον ατμοστροβίλο αναθερμαίνεται και συνεχίζει την εκτόνωση. Λόγω της αναθέρμανσης, η εκτόνωση οδηγείται δεξιότερα με αποτέλεσμα να μην υπάρχει αυξημένη υγρότητα στην έξοδο του ατμοστροβίλου.



Εικόνα 5-47 : Συνδυασμένος κύκλος τριών πιέσεων (αριστερά) με αναθέρμανση (δεξιά)





Εικόνα 5-48 : Διάγραμμα θερμοκρασίας νερού/ατμού-καυσαερίων (αριστερά) και αύξηση βαθμού απόδοσης σε σχέση με το κόστος (δεξιά)

### 5.4.3 Λέβητας ανάκτησης θερμότητας (HSRG)

Ο λέβητας ανάκτησης θερμότητας είναι ο σύνδεσμος μεταξύ του αεριοστροβίλου και του κύκλου νερού/ατμού. Υπάρχουν τρεις κύριες κατηγορίες:

- Λέβητας ανάκτησης χωρίς συμπληρωματική καύση
- Λέβητας ανάκτησης με συμπληρωματική καύση. Η συμπληρωματική καύση μπορεί να χρησιμοποιείται σε μερικές περιπτώσεις ή συνεχώς.
- Λέβητες ανάκτησης με συνεχή συμπληρωματική καύση.

Όσον αφορά την κατασκευή ο λέβητας ανάκτησης θερμότητας χωρίς συμπληρωματική καύση είναι ουσιαστικά ένας εναλλάκτης θερμότητας με συναγωγή. Επίσης πρέπει να είναι κατασκευασμένος με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζει γρήγορη απόκριση σε αλλαγές του φορτίου. Παράλληλα πρέπει να είναι αξιόπιστος ενώ θα πρέπει να έχει υψηλή διαθεσιμότητα.

Με κριτήριο τον τρόπο κατασκευής μπορούν να χωριστούν στους κατακόρυφους και στους οριζόντιους λέβητες ανάκτησης.

Οι κατακόρυφοι λέβητες ανάκτησης παλιά ήταν πιο γνωστοί ως βεβιασμένης κυκλοφορίας, καθώς χρησιμοποιούσαν αντλίες για να εξασφαλίσουν την κυκλοφορία του νερού μέσα από τις επιφάνειες του ατμοποιητή. Σε αυτού του τύπου τον λέβητα, οι σωλήνες που διαρρέονται από νερό/ατμό είναι τοποθετημένοι οριζόντια, στηριζόμενοι από μη ψυχόμενα στηρίγματα που βρίσκονται στην πορεία του καυσαερίου. Παρ' όλα αυτά μπορούν να σχεδιαστούν χωρίς να χρειάζονται αντλίες κυκλοφορίας, με κατάλληλη κλίση των σωλήνων νερού/ατμού.

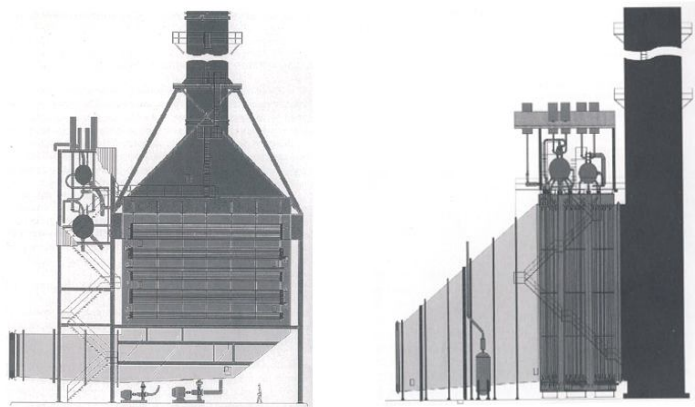
Οι οριζόντιοι λέβητες ανάκτησης είναι γνωστοί ως φυσικής κυκλοφορίας, καθώς η κυκλοφορία που γίνεται στον ατμοποιητή εξασφαλίζεται από την διαφορά πυκνότητας νερού και μείγματος νερού ατμού και την βαρύτητα. Σε αυτήν την περίπτωση οι σωλήνες είναι κατακόρυφοι.

Σε κάθε περίπτωση και οι δυο τύποι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμένο κύκλο. Στο παρελθόν οι κατακόρυφοι τύπου λέβητες είχαν ορισμένα πλεονεκτήματα που τους καθιστούσαν ιδανικούς για εφαρμογές συνδυασμένου κύκλου, όπως:

- λίγο απαιτούμενο χώρο λόγω της κατακόρυφης διάταξης
- μικρότερος όγκος του λέβητα, εξαιτίας της χρήσης μικρότερης διαμέτρου σωλήνων
- μικρότερη ευαισθησία σε φράξιμο ατμού στους οικονομητήρες κατά την διάρκεια της εκκίνησης.

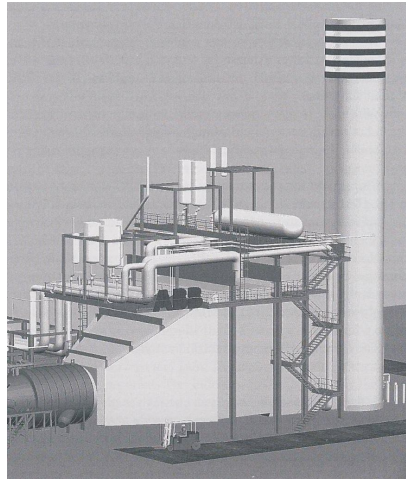
Το μεγαλύτερο όμως προσόν του οριζόντιου τύπου είναι το γεγονός ότι δεν απαιτούνται αντλίες ανακυκλοφορίας, κάτι που είναι σημαντικό σε εφαρμογές όπου συναντώνται πιέσεις της τάξης των 100bar, όπου οι αντλίες πρέπει να λειτουργούν και να συντηρούνται με ιδιαίτερο τρόπο. Ακόμα η σύγχρονη κατασκευή αυτού του τύπου λέβητα έχει ξεπεράσει τα μειονεκτήματα σε σχέση με τους κατακόρυφους λέβητες. Οι απαιτήσεις για χώρο και ο χρόνος εκκίνησης έχουν μειωθεί και ο όγκος νερού στον ατμοποιητή έχει μειωθεί με την χρήση σωλήνων μικρότερης διαμέτρου. Ακόμα οι ίδιες παροχές ατμού μπορούν να παραχθούν.

Το γεγονός ότι και οι δυο τεχνολογίες είναι παρούσες στην αγορά σημαίνει ότι πληρούν τις απαιτήσεις του πελάτη. Η προτίμηση για κάποιο είδος γίνεται για λόγους μάλλον ιστορικούς ή τοπικούς.



Εικόνα 5-49 : Κατακόρυφος (αριστερά) και οριζόντιος (δεξιά) λέβητας ανάκτησης θερμότητας

Όλοι οι παραπάνω λέβητες χρησιμοποιούν τύμπανο για τον διαχωρισμό νερού ατμού. Συχνά όμως συνδυασμένοι κύκλοι χρησιμοποιούνται με συχνές αλλαγές φορτίου και εκκινήσεις. Έτσι σε περίπτωση που η πίεση σχεδιασμού ξεπερνά τα 100bar υπάρχει πρόβλημα σε τέτοιου είδους χρήσεις. Σε αυτές τις περιπτώσεις απαιτείται ένας λέβητας ανάκτησης θερμότητας εξαναγκασμένης κυκλοφορίας (once through boiler). Σε αυτόν τον τύπο ο οικονομητήρας, ο ατμοπαραγωγός και ο υπερθερμαντής είναι ουσιαστικά ένας σωλήνας. Το νερό εισέρχεται από την μια άκρη, ενώ ο υπέρθερμος ατμός εξέρχεται από την άλλη. Με αυτόν τον τρόπο δεν χρειάζεται ούτε τύμπανο για τον διαχωρισμό νερού ατμού, ούτε αντλίες ανακυκλοφορίας. Έτσι δεν τίθενται οι περιορισμοί στις εκκινήσεις και στις αλλαγές φορτίου λόγω του τυμπάνου. Και οι δυο διατάξεις, οριζόντιες και κατακόρυφες, μπορούν να κατασκευαστούν σαν λέβητες εξαναγκασμένης κυκλοφορίας.



Εικόνα 5-50 : Λέβητας ανάκτησης θερμότητας εξαναγκασμένης κυκλοφορίας

Καθώς η μεταφορά θερμότητας στον λέβητα ανάκτησης γίνεται κυρίως με συναγωγή και επειδή η μεταφορά θερμότητας στην πλευρά του νερού είναι πολύ καλύτερη από αυτήν στην πλευρά του καυσαερίου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σωλήνες με πτερυγώσεις για την επίτευξη καλύτερης μεταφοράς από την πλευρά του καυσαερίου. Το καύσιμο του συνδυασμένου κύκλου επιβάλλει την πυκνότητα πτερυγώσεως (π.χ. 200-280 πτερυγώσεις ανά μέτρο για φυσικό αέριο ή No. 2 oil και 120 με 160 πτερυγώσεις για βαρύτερα καύσιμα).

Οι βασικές παράμετροι του λέβητα είναι:

- η θερμοκρασία προσέγγισης (approach temperature) που είναι η διαφορά της θερμοκρασίας κορεσμού στο τύμπανο από την θερμοκρασία εξόδου του νερού από τον οικονομητήρα
- η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της θερμοκρασίας κορεσμού μέσα στο τύμπανο και της θερμοκρασίας εξόδου των καυσαερίων από τον ατμοποιητή (pinch point temperature).

Όσον αφορά την κατασκευή του λέβητα ανάκτησης θερμότητας θα ήταν επιθυμητό η θερμοκρασία προσέγγισης και pinch point να είναι όσο το δυνατό μικρότερες γιατί κάτι τέτοιο θα επέτρεπε καλύτερα την μεταφορά της προσδιδόμενης θερμότητας αυξάνοντας την ατμοπαραγωγή. Ωστόσο, όσο αυτές οι θερμοκρασίες τείνουν προς το μηδέν οι επιφάνειες των αντίστοιχων εναλλακτών θερμότητας τείνουν προς το άπειρο, αυξάνοντας το κόστος και τον όγκο της κατασκευής. Επομένως πρέπει να βρεθεί ο καλύτερος συνδυασμός που θα δίνει καλή εκμετάλλευση της προσδιδόμενης θερμότητας με λογικό εμβαδό επιφανειών συναλλαγής θερμότητας.

Η βέλτιστη σχεδίαση ατμοπαραγωγού πρέπει να εξασφαλίζει μεγάλη αξιοποίηση θερμότητας των καυσαερίων (δηλαδή καλή απόδοση) με όσο το δυνατό μικρότερη πτώση πίεσης. Αυτοί οι στόχοι είναι μάλλον αντικρουόμενοι καθώς η μεταφορά θερμότητας γίνεται με συναγωγή και προκειμένου να επιτευχθούν μικρές θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ των δυο ρευμάτων (νερού/ατμού και καυσαερίου) απαιτούνται μεγάλες επιφάνειες. Μεγάλες επιφάνειες όμως συνεπάγονται και μεγάλες απώλειες πίεσης, εκτός και αν η ταχύτητα του καυσαερίου είναι μικρή, πράγμα όμως που θα αποτελούσε εμπόδιο για την μεταφορά θερμότητας. Έτσι χρησιμοποιούνται σωλήνες μικρής διαμέτρου με πτερυγώσεις. Αυτοί οι σωλήνες προσφέρουν το πλεονέκτημα ότι το περιεχόμενο νερό αποτελεί μικρή ποσότητα και έτσι μπορεί να δεχτεί γρήγορες μεταβολές φορτίου.

Μέριμνα θα πρέπει να δοθεί για να αποφευχθεί και η διάβρωση στις χαμηλές θερμοκρασίες, λόγω συμπύκνωσης θεικού οξέος όταν καίγονται καύσιμα με θείο. Στην περίπτωση καύσης καυσίμων χωρίς θείο, το όριο είναι η θερμοκρασία συμπύκνωσης του

νερού. Επομένως, κατά τον σχεδιασμό είτε πρέπει να αποφεύγεται θερμοκρασία εξόδου του καυσαερίου σε κατώτερες θερμοκρασίες από την θερμοκρασία συμπύκνωσης θεικού οξέος (όξινο σημείο δρόσου) είτε οι επιφάνειες που βρίσκονται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες να προστατεύονται με κατάλληλες επικαλύψεις.

Ο σχεδιασμός ενός λέβητα ανάκτησης περιλαμβάνει βελτιστοποίηση ανάμεσα στο κόστος και στο κέρδος. Ο κύριος παράγοντας κόστους είναι η επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας. Η επιφάνεια συναλλαγής αυξάνεται εκθετικά όσο μειώνεται το pinch point, ενώ η ατμοπαραγωγή αυξάνεται γραμμικά. Έτσι το pinch point αποτελεί καθοριστικό παράγοντα της επιφάνειας συναλλαγής θερμότητας. Σε εγκαταστάσεις μεγάλης απόδοσης έχει τιμή 8 με 15K. Σε περιπτώσεις χαμηλότερης απόδοσης 15 με 25K.

Ένας ακόμα παράγοντας σχεδιασμού του λέβητα ανάκτησης είναι η γρήγορη εκκίνηση του αεριοστροβίλου σε ψυχρές και θερμές συνθήκες του όλου κύκλου. Οι ταχείες θερμικές διαστολές που συμβαίνουν κατά την εκκίνηση απαιτούν κατάλληλο σχεδιασμό των σωλήνων, του τύμπανου, των συνδέσμων κλπ. Ο μεγαλύτερος περιορισμός κατά τις γρήγορες εκκινήσεις προκύπτει από το τύμπανο. Για να είναι η εκκίνηση όσο το δυνατό πιο γρήγορη απαιτείται τύμπανο με μικρό πάχος τοιχωμάτων κάτι που σημαίνει μικρές πιέσεις. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τις σύγχρονες κατασκευές που οι θερμοκρασίες εξόδου από τον αεριοστροβίλο είναι υψηλές και έτσι απαιτούνται υψηλές πιέσεις, ειδικά μάλιστα αν υπάρχει αναθέρμανση. Όλα αυτά οδηγούν σε μεγάλους χρόνους εκκίνησης. Σε λέβητες εξαναγκασμένης κυκλοφορίας δεν τίθεται τέτοιος περιορισμός καθώς δεν υπάρχει τύμπανο.

Η ογκομετρική αλλαγή μέσα στον ατμοποιητή κατά την εκκίνηση είναι κάτι άλλο επίσης σημαντικό. Οι μεγάλες διαφορές ειδικού όγκου νερού και ατμού σε χαμηλές και μέσες πιέσεις οδηγούν σε μεγάλη εκτόπιση νερού από τον ατμοποιητή στην εκκίνηση της διαδικασίας ατμοποίησης. Αν το τύμπανο δεν μπορεί να διαχειριστεί αυτή την ποσότητα νερού, τότε αναγκαστικά το νερό αυτό θα απομακρυνθεί από το κύκλωμα μέσω της εξόδου ανάγκης από το τύμπανο σε κάθε εκκίνηση, ή θα προκαλείται σταμάτημα της λειτουργίας της εγκατάστασης για την αποφυγή μεταφοράς νερού στο σύστημα ατμού.

Για την βελτίωση της συμπεριφοράς της όλης εγκατάστασης σε μερικό φορτίο, χρησιμοποιείται η μέθοδος της ολισθαίνουσας πίεσης του λέβητα (δηλαδή η πίεση του κυκλώματος μπορεί να μεταβληθεί ανά πάσα στιγμή μεταβάλλοντας τις στροφές των αντλιών) και διατηρώντας τις ρυθμιστικές βαλβίδες του ατμοστροβίλου ανοικτές.

Ακόμα στην περίπτωση λειτουργίας εκτός σημείου σχεδίασης οι οικονομητήρες μπορεί να αρχίσουν να παράγουν ατμό, φράσσοντας τους σωλήνες και μειώνοντας την απόδοσή τους. Έτσι ο οικονομητήρας είναι σχεδιασμένος συνήθως με τέτοιο τρόπο ώστε το νερό στην έξοδό του να είναι ελαφρώς υπόψυκτο, αυξάνοντας την θερμοκρασία προσέγγισης (approach temperature). Αυτή η αύξηση πρέπει να είναι όσο το δυνατό μικρότερη γιατί επηρεάζει την ατμοπαραγωγή αρνητικά. Ακόμα με κατάλληλο σχεδιασμό του οικονομητήρα και της εξόδου του στο τύμπανο μπορεί να αποφευχθεί η φραγή με ατμό.

#### *Λέβητας ανάκτησης με συμπληρωματική καύση*

Παρά το γεγονός ότι οι περισσότεροι λέβητες ανάκτησης δεν χρησιμοποιούν συμπληρωματική καύση, υπάρχουν ορισμένες περιπτώσεις όπου χρησιμοποιείται.

Οι συνθήκες λειτουργίας ενός λέβητα με καύση και ενός χωρίς είναι πρακτικά οι ίδιες. Υπάρχουν διάφοροι σχεδιασμοί για το σύστημα καύσης. Μονάδες που δεν ξεπερνούν την θερμοκρασία των 780° C μετά την συμπληρωματική καύση, μπορούν να κατασκευαστούν με την χρήση σωληνωτών καυστήρων (duct burners). Οι καυστήρες του λέβητα ανάκτησης συνήθως καίνε φυσικό αέριο, το οποίο δημιουργεί ομοιόμορφη κατανομή

της θερμοκρασίας μετά την καύση. Υπάρχουν και καυστήρες που καίνε πετρέλαιο αλλά αποτελούν πιο σύνθετες κατασκευές, που συνεπάγονται αυξημένο κόστος εγκατάστασης, συντήρησης και λειτουργίας τους.

Η χρήση συμπληρωματικής καύσης εξασθενεί με την πάροδο του χρόνου γιατί:

-Οι θερμοκρασίες εξόδου των καυσαερίων από τον αεριοστροβίλο είναι αρκετά υψηλές πολύ κοντά στην μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία του λέβητα ανάκτησης, μειώνοντας την σημασία της συμπληρωματικής καύσης.

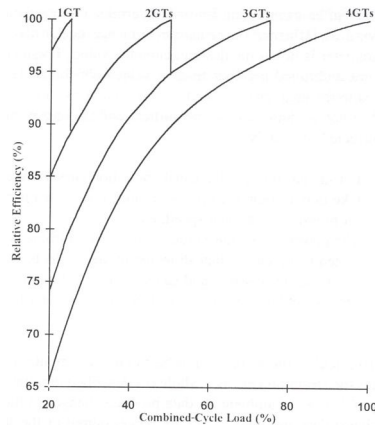
-Συμπληρωματική καύση μετά από τον αεριοστροβίλο συνεπάγεται μείωση του βαθμού απόδοσης σε συνδυασμένο κύκλο.

Η συμπληρωματική καύση χρησιμοποιείται περισσότερο σε συνδυασμένους κύκλους με συμπαραγωγή θερμότητας, όπου η ποσότητα του παραγόμενου ατμού πρέπει να μεταβάλλεται ανεξάρτητα από την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια. Σε αυτήν την περίπτωση η συμπληρωματική καύση ρυθμίζει την παραγόμενη ποσότητα ατμού. Η μέγιστη ποσότητα καυσίμου κατά την καύση καθορίζεται από την περιεκτικότητα των καυσαερίων του αεριοστροβίλου σε οξυγόνο.

Υπάρχουν, τέλος, και περιπτώσεις όπου τα καυσαέρια του αεριοστροβίλου χρησιμοποιούνται περισσότερο ως φορείς οξυγόνου και η προερχόμενη θερμότητα από τα καυσαέρια είναι μικρή σε σύγκριση με αυτήν που παράγεται από την συμπληρωματική καύση. Σε αυτήν την περίπτωση μιλάμε περισσότερο για λέβητα καύσης και όχι για λέβητα ανάκτησης θερμότητας. Το καύσιμο του λέβητα μπορεί να είναι πετρέλαιο, άνθρακας ή φυσικό αέριο.

#### **5.4.4 Ρύθμιση ισχύος στον συνδυασμένο κύκλο- διάταξη ατράκτων**

Η ρύθμιση ισχύος στον συνδυασμένο κύκλο γίνεται με ρύθμιση του αεριοστροβίλου, ενώ ο ατμοστροβίλος ακολουθεί. Στον αεριοστροβίλο ρυθμίζεται η παροχή του καυσίμου και τα πτερύγια εισόδου (inlet guide vanes) ή όποια άλλα πτερύγια μεταβλητής γεωμετρίας μπορεί να έχει, ρυθμίζοντας έτσι την παροχή του εισερχόμενου αέρα. Από αυτά μεταβάλλεται η παραγόμενη ισχύς του αεριοστροβίλου αλλά και τα παραγόμενα θερμά καυσαέρια. Έτσι, λόγω μεταβολής της παροχής και της θερμοκρασίας των καυσαερίων, μεταβάλλεται και η ατμοπαραγωγή του κυκλώματος νερού/ατμού, με συνακόλουθη μεταβολή του φορτίου του ατμοστροβίλου. Εν γένει οι αεριοστροβίλοι που λειτουργούν σε συνδυασμένους κύκλους (σε αυτούς που λειτουργούν σαν μονάδες βάσης περισσότερο) έχουν σχεδιαστεί ώστε να παρουσιάζουν βέλτιστο βαθμό απόδοσης στο πλήρες φορτίο. Προκειμένου να επιτευχθεί καλή διαχείριση της παραγόμενης ισχύος με τον μέγιστο βαθμό απόδοσης, χρησιμοποιούνται πολλαπλοί αεριοστροβίλοι που τροφοδοτούν με τα καυσαέρια τους ξεχωριστούς λέβητες ανάκτησης θερμότητας και ο παραγόμενος ατμός τους τροφοδοτεί έναν ατμοστροβίλο. Ο κάθε αεριοστροβίλος είναι συνδεδεμένος σε ξεχωριστή γεννήτρια, ομοίως και ο ατμοστροβίλος. Στην περίπτωση χρήσης πολλαπλών αεριοστροβίλων είναι δυνατό να γίνει καλύτερη ρύθμιση του φορτίου. Για παράδειγμα, σε μια εγκατάσταση με τέσσερις αεριοστροβίλους και έναν ατμοστροβίλο μπορεί να γίνει το ακόλουθο για την μείωση του φορτίου: μέχρι το 75% γίνεται ομοιόμορφη μείωση των φορτίων σε κάθε αεριοστροβίλο, μετά κλείνει ο ένας αεριοστροβίλος και οι άλλοι λειτουργούν στο 100%. Για περαιτέρω μείωση του φορτίου μειώνεται ομοιόμορφα η ισχύς μέχρι το 50% όπου τίθεται εκτός λειτουργίας και άλλος ένας αεριοστροβίλος ενώ οι άλλοι λειτουργούν στο 100% κ.ο.κ.



**Εικόνα 5-51 : Μεταβολή φορτίου σε συνδυασμένο κύκλο με τέσσερις αεριοστρόβιλους**

Άλλο πλεονέκτημα είναι ότι ο αεριοστρόβιλος μπορεί να λειτουργήσει ξεχωριστά από τον ατμοστρόβιλο, αν υπάρχει καμινάδα παράκαμψης (bypass stack), ενώ οι επιθεωρήσεις και οι συντηρήσεις είναι πιο εύκολες.

Παρ' όλα αυτά η διάταξη με έναν αεριοστρόβιλο και έναν ατμοστρόβιλο, που συνηθέστερα βρίσκονται και στην ίδια άτρακτο και στην ίδια γεννήτρια, είναι πολύ πιο απλή, έχοντας μια γεννήτρια σε σχέση με τις πολλαπλές γεννήτριες του προηγούμενου τρόπου σύνδεσης. Στην σύνδεση με μια άτρακτο η γεννήτρια:

1. μπορεί να βρίσκεται μεταξύ αεριοστρόβιλου και ατμοστρόβιλου, όπου ο ατμοστρόβιλος συνδέεται και αποσυνδέεται αυτομάτως με έναν αυτό-ενεργοποιούμενο και συγχρονιζόμενο σύνδεσμο
2. μπορεί να βρίσκεται στην άκρη της ατράκτου με τον αεριοστρόβιλο και τον ατμοστρόβιλο στην άλλη άκρη.

Η καμινάδα παράκαμψης και το διάφραγμα παράκαμψης επιτρέπουν σε μια διάταξη συνδυασμένου κύκλου, συνήθως πολλαπλών ατράκτων, να λειτουργήσει ως απλή αεριοστροβλική μονάδα. Συγκεκριμένα το διάφραγμα καθορίζει την πορεία των καυσαερίων του αεριοστρόβιλου, στον λέβητα ανάκτησης ή στην καμινάδα παράκαμψης. Η όλη διάταξη μπορεί να αυξάνει το κόστος της εγκατάστασης και να προκαλεί απώλειες, αλλά επιτρέπει την λειτουργία του αεριοστρόβιλου ανεξάρτητα από το κύκλωμα ατμού. Έτσι για παράδειγμα σε περίπτωση βλάβης ή συντήρησης του ατμοστρόβιλου, οι αεριοστρόβιλοι μπορούν να συνεχίσουν να λειτουργούν.

#### **5.4.5 Μελλοντικές εξελίξεις / προοπτικές**

##### *Αύξηση θερμοκρασιών του αεριοστρόβιλου/αύξηση θερμοκρασίας καύσης*

Η υψηλή θερμοκρασία εισόδου των καυσαερίων στον στρόβιλο του αεριοστρόβιλου παρουσιάζει θετική επίδραση στον βαθμό απόδοσης του συνδυασμένου κύκλου και επόμενη μείωση του κόστους του καυσίμου στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Επομένως είναι φυσικό να υπάρχει τάση αύξησης των θερμοκρασιών αυτών.

Με την κατασκευή και χρήση νέων κραμάτων και νέων και αποτελεσματικότερων τεχνικών ψύξης έχει αυξηθεί η θερμοκρασία καύσης στους αεριοστρόβιλους. Τώρα τα ερευνητικά προγράμματα είναι κυρίως επικεντρωμένα στις τεχνικές ψύξης και στην εύρεση

αποτελεσματικότερων τρόπων ψύξης με αέρα των πτερυγίων που βρίσκονται ακριβώς μετά τον θάλαμο καύσης στην πορεία του καυσαερίου. Εναλλακτικοί τρόποι ψύξης συμπεριλαμβάνουν την χρήση ατμού.

Η χρήση κεραμικών υλικών για την κατασκευή πτερυγώσεων του στροβίλου δεν έχει εφαρμοστεί σε εμπορικούς αεριοστροβίλους για παραγωγή ισχύος. Τα κεραμικά χρησιμοποιούνται για την κατασκευή συγκεκριμένων τμημάτων που βρίσκονται εκτεθειμένα στις υψηλές θερμοκρασίες. Ακόμα κατασκευάζονται κεραμικές επιστρώσεις που δρουν σαν μονωτικά στις μεταλλικές επιφάνειες,

### *Αναθέρμανση*

Ένας αεριοστρόβιλος με αναθέρμανση αποτελείται από έναν συμπιεστή, ένα θάλαμο καύσης υψηλής πίεσης, έναν στρόβιλο υψηλής πίεσης, ένα θάλαμο καύσης χαμηλής πίεσης και ένα στρόβιλο χαμηλής πίεσης. Με αυτήν την διάταξη μπορούν να επιτευχθούν μεγαλύτεροι λόγοι πίεσης, απ' ότι σε έναν αεριοστρόβιλο με ένα θάλαμο καύσης. Έτσι αυξάνεται η προσφερόμενη θερμότητα και ο βαθμός απόδοσης του συνδυασμένου κύκλου, καθώς τα καυσαέρια είναι σε μεγάλη θερμοκρασία επιτρέποντας την λειτουργία ενός κύκλου ατμού με μεγάλη απόδοση. Ακόμα το γεγονός ότι χρησιμοποιούνται δυο θάλαμοι καύσης, σε συνδυασμό με την χρήση των ρυθμιστικών πτερυγίων του στροβίλου, δίνει σταθερή θερμοκρασία εξόδου από τον αεριοστρόβιλο στο μερικό φορτίο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα:

1. Ο συνδυασμένος κύκλος έχει πολύ καλή απόδοση και σε μερικό φορτίο με αποτέλεσμα οι μονάδες που διαθέτουν τέτοιους αεριοστροβίλους να μπορούν να λειτουργήσουν ακόμα και σε ώρες πολύ χαμηλής κατανάλωσης, χωρίς να απαιτείται απενεργοποίηση της εγκατάστασης και ενεργοποίησή της όταν η ζήτηση αυξηθεί ξανά.
2. Λόγω της σταθερής θερμοκρασίας εξόδου από τον αεριοστρόβιλο η θερμοκρασία στον κύκλο νερού ατμού παραμένει σταθερή μειώνοντας τις θερμικές καταπονήσεις, τόσο του αμοστροβίλου όσο και του λέβητα ανάκτησης, κατά την μεταβολή του φορτίου.

### *Χρήση ατμού για την ψύξη σταθερών εξαρτημάτων*

Η ψύξη των πτερυγίων επιτρέπει την αύξηση των θερμοκρασιών καύσης πέρα από τα επιτρεπόμενα όρια αντοχής των μετάλλων. Η πλειονότητα των αεριοστροβίλων έχει αερόψυκτα πτερύγια και θαλάμους καύσης. Συνήθως στην ψύξη με αέρα, ο αέρας ψύχει εσωτερικά το πτερύγιο και μετά εξέρχεται από την επιφάνεια δημιουργώντας ένα μονωτικό φιλμ. Η ανάμειξη όμως των δυο ρευμάτων, του διερχόμενου θερμού αέρα και του αέρα ψύξης, οδηγεί σε διαταραχή της ροής και σε ψύξη του θερμού ρεύματος. Εναλλακτικός τρόπος ψύξης είναι με κλειστό κύκλωμα ατμού. Ο ατμός έχει μεγαλύτερη θερμοχωρητικότητα και έτσι επιτυγχάνονται ακόμα μικρότερες θερμοκρασίες πτερυγίων. Ακόμα το γεγονός ότι ο ατμός κυκλοφορεί σε κλειστό κύκλωμα δεν οδηγεί σε διαταραχές της ροής. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι ότι περισσότερος αέρας είναι διαθέσιμος για την καύση, καθώς δεν απομαστεύεται για την ψύξη.

Ο ατμός μπορεί να εξαχθεί από το κύκλωμα ατμού του συνδυασμένου κύκλου π.χ. από την έξοδο του αμοστροβίλου υψηλής πίεσης. Με αυτόν τον τρόπο οι θερμοκρασίες καύσης στον αεριοστρόβιλο μπορούν να αυξηθούν οδηγώντας σε αύξηση του συνολικού βαθμού απόδοσης. Ωστόσο η ανάγκη χρήσης ατμού από τον αεροστρόβιλο, οδηγεί σε

στενότερη σχέση αεριοστροβίλου-ατμοστροβίλου κάτι που δεν επιτρέπει την λειτουργία σε απλό κύκλο.

Έρευνα γίνεται και για την διαμόρφωση ενός συστήματος ψύξης με ατμό και για τα κινητά πτερύγια, καθώς κάτι τέτοιο θα οδηγούσε σε κατακόρυφη αύξηση του βαθμού απόδοσης. Υπάρχουν βέβαια κάποια εμπόδια που απαιτούν λύση, όπως η επίτευξη στεγανότητας και η ψύξη ορισμένων περιοχών των πτερυγίων που είναι πολύ λεπτές.

#### *Μεγαλύτεροι και ισχυρότεροι συμπιεστές*

Παράλληλα με όλες αυτές τις εξελίξεις, βελτιώσεις γίνονται και στους συμπιεστές των αεριοστροβίλων. Τα πλεονεκτήματα που προσφέρονται από την αύξηση των θερμοκρασιών μπορούν να γίνουν εκμεταλλεύσιμα αν αυξηθεί ο λόγος πίεσης των αεριοστροβίλων. Δεδομένου ότι οι επιδόσεις των σύγχρονων συμπιεστών φάνταζαν ουτοπικές μερικά χρόνια πριν, δεν είναι απίθανο να αυξηθεί στο εγγύς μέλλον η δυνατότητα αύξησης πίεσης με παράλληλη μείωση του αριθμού των βαθμίδων.

#### *Υψηλότερες συνθήκες ατμού*

Οι πρώτοι σταθμοί συνδυασμένου κύκλου είχαν κύκλους νερού/ατμού με χαμηλές συνθήκες του ατμού, δηλαδή χαμηλές θερμοκρασίες και πιέσεις. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η υψηλή πίεση του κύκλου κυμαινόταν από 50 ως 80bar ενώ η μέγιστη θερμοκρασία από 450 ως 500°C. Σημερινοί συνδυασμένοι κύκλοι χρησιμοποιούν ατμό σε μέγιστη πίεση 100 με 160 bar και θερμοκρασίες 520 με 565°C, ενώ για μεγάλες μονάδες η αναθέρμανση του ατμού λαμβάνεται σημαντικά υπ' όψιν. Αυτά τα μεγέθη έγιναν δυνατά είτε με αναθέρμανση στον αεριοστροβίλο είτε με αύξηση της θερμοκρασίας καύσης του αεριοστροβίλου. Επομένως είναι αρκετά πιθανό στο εγγύς μέλλον τα μεγέθη αυτά να αυξηθούν και άλλο. Η αύξηση των χαρακτηριστικών του ατμού θέτει κυρίως προβλήματα αντοχής, καθώς υψηλότερες θερμοκρασίες απαιτούν νέα θερμοανθεκτικά κράματα για τις σωληνώσεις και τον λέβητα ανάκτησης και οι μεγαλύτερες πιέσεις πιο παχιά τοιχώματα. Επομένως τίθεται περισσότερο θέμα τεχνοοικονομικής ανάλυσης για την εκτίμηση της βέλτιστης αύξησης των χαρακτηριστικών του ατμού προκειμένου η λύση να είναι οικονομικά ελκυστική.

#### *Καύση με μικρότερη παραγωγή οξειδίων του αζώτου (NOx)*

Ο σχηματισμός των οξειδίων του αζώτου σε μεγάλες ποσότητες στον αέρα οφείλεται στις υψηλές θερμοκρασίες. Οι παράγοντες που επηρεάζουν λοιπόν την παραγωγή NOx στον καυστήρα είναι οι ακόλουθοι:

- Λόγος αέρα καυσίμου
- Πίεση καύσης
- Θερμοκρασία αέρα στον θάλαμο καύσης
- Διάρκεια της καύσης

Προκειμένου να γίνει μείωση των εκπομπών των οξειδίων του αζώτου απαιτούνται μικρότερες θερμοκρασίες φλόγας ή λιγότερο οξυγόνο στον θάλαμο καύσης. Προκειμένου να επιτευχθούν μικρότερες θερμοκρασίες φλόγας είναι δυνατή η έγχυση νερού ή ατμού. Όμως η λύση αυτή έχει ως μειονεκτήματα ότι μειώνει την απόδοση, ειδικά στην περίπτωση έγχυσης νερού, ενώ απαιτεί σχετικά μεγάλες ποσότητες νερού. Αυτή η μέθοδος είναι η υγρή μείωση των NOx (wet low-NOx method). Έτσι χρησιμοποιείται μια ακόμα πιο αποτελεσματική



μέθοδος που δεν οδηγεί σε τόσο μεγάλη μείωση του βαθμού απόδοσης. Σε αυτήν την μέθοδο οδηγείται στον θάλαμο καύσης μεγάλη ποσότητα παραπληθισμένου αέρα που, όπως το νερό ή ο ατμός, ψύχει την φλόγα. Η μέθοδος αυτή υπόκειται σε περιορισμούς για λόγους ευστάθειας της φλόγας, κυρίως στο μερικό φορτίο καθώς στο πλήρες φορτίο υπάρχει σχεδόν διπλάσια ποσότητα αέρα από την απαιτούμενη στοιχειομετρική. Αυτή η μέθοδος είναι ξηρής μείωσης των NOx (dry low-NOx method). Με αυτήν την μέθοδο και με καύση φυσικού αερίου είναι δυνατό οι εκπομπές NOx να φτάσουν τα 25ppm (15% O<sub>2</sub> dry).

Η μείωση της περισσειας οξυγόνου κατά την καύση οδηγεί σε μείωση των παραγόμενων NOx επειδή δεν υπάρχει οξυγόνο για τον σχηματισμό τους. Προκειμένου όμως να γίνει πλήρης καύση πρέπει να υπάρχει ένα δεύτερο στάδιο καύσης, με αρκετό αέρα για την πλήρη καύση του καυσίμου, όπου όμως δεν θα σχηματίζονται NOx επειδή οι θερμοκρασίες θα είναι αρκετά χαμηλές.

Ακόμα γίνεται περαιτέρω ανάπτυξη και έρευνα για καυστήρες με χαμηλές εκπομπές NOx. Έτσι σήμερα υπάρχει η δυνατότητα κατασκευής συνδυασμένων κύκλων με μεγάλη απόδοση (55%+) και παράλληλα με χαμηλές εκπομπές NOx.

#### *Άλλες περιβαλλοντικές επιπτώσεις*

Άλλες εκπομπές του συνδυασμένου κύκλου εκτός από τα οξείδια του αζώτου είναι :

- Οξείδια του θείου SOx. Η παραγωγή οξειδίων του θείου εξαρτάται αποκλειστικά από την παρουσία θείου στο καύσιμο. Το φυσικό αέριο, που είναι το κατ'εξοχήν καύσιμο στους συνδυασμένους κύκλους, είναι απαλλαγμένο από προσμίξεις θείου και έτσι οι εκπομπές οξειδίων του θείου είναι αμελητέες.

- Διοξείδιο του άνθρακα CO<sub>2</sub>. Κάθε σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με καύση ορυκτών καυσίμων παράγει CO<sub>2</sub>. Ωστόσο οι σύγχρονοι συνδυασμένοι κύκλοι επιτυγχάνουν κατά 40% λιγότερη εκπομπή CO<sub>2</sub> ανά MWh ηλεκτρισμού ενός συμβατικού λιγνιτικού σταθμού λόγω μεγαλύτερης απόδοσης και μεγαλύτερης θερμικής ικανότητας του καυσίμου.

- Εκπομπές θορύβου που μπορούν να εξαλειφθούν με την χρήση ηχομονωτικών υλικών και με την χρήση σιγαστήρων στις εισόδους των αεριοστροβίλων.

Εκτός από αυτές τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις πρέπει να αναφερθεί και η αποβολή θερμότητας στο περιβάλλον. Όλοι οι θερμικοί σταθμοί, επειδή δεν μπορούν να μετατρέψουν εξ'ολοκλήρου την θερμότητα σε μηχανικό έργο, απορρίπτουν ένα μέρος της θερμότητας που εισέρχεται μέσω του καυσίμου στο περιβάλλον. Ωστόσο ο συνδυασμένος κύκλος απορρίπτει την λιγότερη ενέργεια σε σύγκριση με τους άλλους σταθμούς λόγω του μεγάλου βαθμού απόδοσης, δηλαδή μετατρέπει μεγαλύτερο ποσό θερμότητας του καυσίμου σε χρήσιμο μηχανικό έργο και απορρίπτει λιγότερη θερμική ενέργεια στο περιβάλλον.

## 5.5 Συμπεράσματα

Τα θερμοδυναμικά πλεονεκτήματα του συνδυασμένου κύκλου επιτρέπουν αποδόσεις πολύ μεγαλύτερες από οποιαδήποτε άλλου τύπου θερμικό σταθμό. Αυτή η τεχνολογία επιτρέπει την μεγάλη εκμετάλλευση των υψηλών θερμοκρασιών των αεριοστρόβιλων και των χαμηλότερων θερμοκρασιών του κύκλου ατμού.

Από καθαρά οικονομική σκοπιά ο συνδυασμένος κύκλος είναι ιδανικός για ηλεκτροπαραγωγή, δεδομένου ότι έχει :

- Μικρό, σχετικά με άλλες μονάδες, κόστος κατασκευής
- Μικρό χρόνο κατασκευής καθώς πολλά από τα βασικά τους τμήματα (ειδικά αεριοστρόβιλοι) είναι τυποποιημένα και παραδίδονται σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα.
- Μικρό κόστος συντήρησης και λειτουργίας
- Έχει μεγάλη αξιοπιστία ενώ απαιτεί λιγότερες συντηρήσεις από έναν συμβατικό ατμοηλεκτρικό σταθμό ή έναν πυρηνικό σταθμό
- Είναι μια επένδυση μικρού ρίσκου δεδομένου ότι είναι τεχνολογία που έχει δοκιμαστεί επιτυχώς

Όλα τα παραπάνω εγγυώνται το μικρό κόστος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Τα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά του συνδυασμένου κύκλου τον καθιστούν ιδανικό και για συμπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας, καθόσον η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τον αεριοστρόβιλο δεν επηρεάζεται από τον κύκλο ατμού. Η δυνατότητα συμπληρωματικής καύσης στον λέβητα ανάκτησης θερμότητας δίνει την δυνατότητα μεγαλύτερης ευελιξίας στην παραγωγή ατμού.

Ακόμα οι συνδυασμένοι κύκλοι έχουν την δυνατότητα γρήγορων εκκινήσεων και μεταβολών του φορτίου ενώ μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σαν μονάδες βάσης. Η ψύξη τους μπορεί να γίνει με πύργους ψύξης ή με αερόψυκτους συμπυκνωτές σε περίπτωση έλλειψης νερού. Έτσι έχουν την δυνατότητα να εγκατασταθούν και σε άνυδρες περιοχές καθώς η εξάρτησή τους από το νερό είναι μικρή. Ακόμα σημαντικό χαρακτηριστικό τους είναι η δυνατότητα χρήσης περισσοτέρων του ενός καυσίμων.

Η έρευνα στους συνδυασμένους κύκλους συνεχίζεται, με την ανάπτυξη και βελτίωση τμημάτων (π.χ. αεριοστρόβιλοι) που είναι σχεδιασμένα για τον συνδυασμένο κύκλο, αυξάνοντας ακόμα περισσότερο τον βαθμό απόδοσης.

Παράλληλα η τεχνολογία συνδυασμένου κύκλου είναι αποδεκτή ως η πιο οικολογική λύση σε σχέση με τις άλλες μονάδες παραγωγής ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα. Το κύριο καύσιμο είναι το φυσικό αέριο, το οποίο θεωρείται καθαρό καύσιμο, ενώ οι εκπομπές ρύπων είναι μικρές· τόσο μικρές που εγκαταστάσεις συνδυασμένου κύκλου μπορούν να εγκατασταθούν ακόμα και σε κατοικημένες περιοχές. Ο μεγάλος βαθμός απόδοσης σημαίνει ότι για λιγότερη ποσότητα καυσίμου παράγεται περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια, κάτι που μετέχει στην μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων.

Γενικά συγκρίνοντας :

- Σταθμούς ηλεκτρικής ενέργειας με την χρήση μηχανών εσωτερικής καύσης Diesel
- Συμβατικούς ατμοηλεκτρικούς σταθμούς
- Αεριοστρόβιλικούς σταθμούς
- Πυρηνικούς σταθμούς
- Σταθμούς συνδυασμένου κύκλου

Για μικρή ισχύ (ως 30MW) μια μονάδα με μηχανές εσωτερικής καύσης Diesel είναι καλή εναλλακτική λύση του συνδυασμένου κύκλου επειδή έχει βαθμό απόδοσης λίγο λιγότερο από τον αντίστοιχο συνδυασμένο κύκλο. Παρ' όλα αυτά οι κινητήρες Diesel δεν είναι τόσο επιθυμητοί λόγω εκπομπών NOx.

Οι συμβατικοί ατμοηλεκτρικοί σταθμοί είναι αποτελεσματικοί για λειτουργία με καύση άνθρακα και για λειτουργία ως μονάδες βάσης, εάν υπάρχουν φθηνά κοιτάσματα άνθρακα ή το φυσικό αέριο είναι ακριβό. Σε περίπτωση χρήσης πετρελαίου τότε η λειτουργία ενός συνδυασμένου κύκλου με φυσικό αέριο είναι πιο συμφέρουσα λόγω χαμηλότερης τιμής του φυσικού αερίου έναντι του πετρελαίου.

Η πυρηνική ενέργεια είναι η πιο ακριβή ενέργεια, καθώς το καύσιμο της μπορεί να είναι φθηνό σχετικά με το άλλα καύσιμα αλλά η κατασκευή ενός πυρηνικού σταθμού απαιτεί πολύ χρόνο, έχει μεγάλο κόστος συντήρησης, ενώ πάντα υπάρχει ο κίνδυνος πυρηνικού ατυχήματος. Όλα αυτά την καθιστούν επισφαλή επένδυση, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο σαν μονάδα βάσης, όταν δεν μπορεί να βρεθεί άνθρακας με μικρό κόστος και η τιμή του φυσικού αερίου είναι υψηλή.

Για την παραγωγή ενέργειας σε ώρες αιχμής οι αεριοστροβιλικές μονάδες είναι οι καταλληλότερες, λόγω της δυνατότητάς τους για γρήγορη εκκίνηση. Το γεγονός ότι δεν χρησιμοποιούν νερό για την ψύξη τους τις καθιστά ιδανικές για την χρήση σε άνυδρα και ξηρά κλίματα. Ακόμα εγκαθίστανται πολύ γρήγορα.

Εάν όλα τα καύσιμα ήταν διαθέσιμα στις παρούσες διεθνείς τιμές, οι συνδυασμένοι κύκλοι φυσικού αερίου θα αποτελούσαν την πιο οικονομική λύση για την ηλεκτροπαραγωγή βάσης λόγω υψηλού βαθμού απόδοσης, μειωμένων εκπομπών ρύπων και γρήγορης απόσβεσης του επενδεδυμένου κεφαλαίου.

## 6.Περιγραφή Gatecycle

### Γενικά

Η μοντελοποίηση των μονάδων που εξετάστηκαν έγινε στο πρόγραμμα Gatecycle. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα έχει αναπτυχθεί από την GE Enter Software LLC, με σκοπό την μοντελοποίηση ενός μεγάλου εύρους ενεργειακών συστημάτων.

Το πρόγραμμα προβλέπει την επίδραση των ακόλουθων παραγόντων:

- Μεταβολή καυσίμου
- Μεταβολή συνθηκών περιβάλλοντος
- Ρυθμίσεις οδηγών πτερυγίων εισόδου
- Λέβητα ανάκτησης θερμότητας πολλαπλών πιέσεων
- Λειτουργία ολισθαίνουσας πίεσης
- Επικαθήσεις σε συνιστώσες
- Λειτουργία σε μερικό φορτίο
- Απώλειες πίεσης
- Έγχυση ατμού
- Λειτουργία καυστήρων
- Τροποποιημένο εξοπλισμού
- Λειτουργία πύργου ψύξης

Η εφαρμογή αυτή δίνει την δυνατότητα υπολογισμού του βαθμού απόδοσης και της παραγόμενης ισχύος σε απλούς αεριοστροβίλους, συνδυασμένους κύκλους, συμβατικούς ατμοηλεκτρικούς σταθμούς και πυρηνικούς σταθμούς. Επίσης έχει τρεις σημαντικές εφαρμογές: το Cyclelink, το οποίο επιτρέπει την χρήση του Gatecycle μέσω του excel, το CycleExpress, το οποίο δίνει την δυνατότητα υπολογισμών θερμικών κύκλων και το EfficiencyMap για την παρακολούθηση της λειτουργίας και την βελτιστοποίηση των σταθμών.

Το πρόγραμμα επιτρέπει τον εύκολο σχεδιασμό των κυκλωμάτων νερού/ατμού και αέρα / καυσαερίων με την χρήση στοιχείων (blocks) που μοντελοποιούν βασικές συνιστώσες του θερμικού σταθμού, όπως εναλλάκτες θερμότητας, συμπιεστές, στροβίλους κ.λπ. Κάθε στοιχείο περιλαμβάνει τις βασικές εξισώσεις που το διέπουν, δηλαδή π.χ. ο εναλλάκτης τον ισολογισμό ενέργειας και την εξίσωση μεταφοράς θερμότητας. Τα επιμέρους στοιχεία ενώνονται μεταξύ τους με ρεύματα είτε νερού/ατμού, είτε αέρα/ καυσαερίου, είτε καυσίμου. Σε κάθε ρεύμα βασικά χαρακτηριστικά είναι η παροχή, η πίεση, η θερμοκρασία και η ενθαλπία. Χρησιμοποιώντας κάποιες αρχικές τιμές των ρευμάτων και των στοιχείων είναι δυνατός ο υπολογισμός της παραγόμενης ισχύος και του βαθμού απόδοσης των μοντελοποιημένων μονάδων. Στα πλαίσια αυτής της εργασίας έγινε μοντελοποίηση συγκεκριμένων μονάδων της ΔΕΗ Α.Ε. και παραμετρική μελέτη με βάση στόχους που δόθηκαν από την εταιρία.

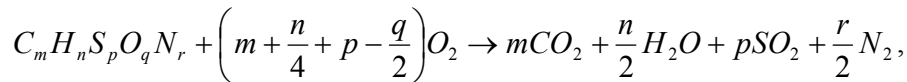
Στην συνέχεια ακολουθεί περιγραφή της βασικής λειτουργίας των στοιχείων του Gatecycle και μετά ακολουθούν τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης.

### Καύση-θάλαμος καύσης

Ο βαθμός απόδοσης μιας οποιαδήποτε θερμικής μηχανής ορίζεται ως  $\eta = 1 - \frac{Q_{out}}{Q_{in}}$  ή

ως  $\eta = \frac{W_{\omega\phi}}{Q_{προσδ}}$ . Το  $Q_{προσδ}$  είναι η προσδιδόμενη θερμότητα στο σύστημα που προσφέρεται

συνήθως με την καύση καυσίμου. Στην περίπτωση καύσης καυσίμου η θερμότητα αυτή προέρχεται από την θερμογόνο ικανότητα του καυσίμου. Κατά την τέλεια καύση ενός καυσίμου του τύπου  $C_m H_n S_p O_q N_r$  παράγονται διοξείδιο του άνθρακα, υδρατμοί και διοξείδιο του θείου. Ορίζεται λοιπόν ανώτερη και κατώτερη θερμογόνος ικανότητα του καυσίμου ως εξής: η ανώτερη θερμογόνος ικανότητα του καυσίμου είναι η αποδιδόμενη θερμότητα που προκύπτει από την καύση 1 kg καυσίμου και ο υδρατμός που σχηματίζεται αποδίδει την θερμότητά του με την συμπύκνωσή του σε νερό. Αντίθετα η κατώτερη θερμογόνος ικανότητα είναι η θερμότητα που απελευθερώνεται από την καύση 1 kg καυσίμου χωρίς την συμπύκνωση του υδρατμού. Έτσι κατά την καύση:



Όπου  $M_{καυσίμου} = m \cdot M_C + \frac{n}{2} \cdot M_{H_2} + p \cdot M_S + \frac{q}{2} \cdot M_{O_2} + \frac{r}{2} \cdot M_{N_2}$ , όπου  $M_x$  η μοριακή μάζα του  $x$  στοιχείου (kg/kmol). Επομένως από την καύση 1kmol καυσίμου απαιτούνται  $\left(m + \frac{n}{4} + p - \frac{q}{2}\right)$  kmol  $O_2$  και παράγονται  $m$  kmol  $CO_2$ ,  $\frac{n}{2}$  kmol  $H_2O$ ,  $p$  kmol  $SO_2$  και  $\frac{r}{2}$

kmol  $N_2$ . Επομένως για την καύση 1kg καυσίμου απαιτούνται  $\frac{\left(m + \frac{n}{4} + p - \frac{q}{2}\right) M_{O_2}}{M_{καυσίμου}}$  kg  $O_2$

και παράγονται  $\frac{m M_{CO_2}}{M_{καυσίμου}}$  kg  $CO_2$ ,  $\frac{n M_{H_2O}}{2 M_{καυσίμου}}$  kg  $H_2O$ ,  $\frac{p M_{SO_2}}{M_{καυσίμου}}$  kg  $SO_2$  και

$\frac{r M_{N_2}}{2 M_{καυσίμου}}$  kg N. Επειδή στον αέρα υπάρχει 23,21%  $O_2$  και 76,79%  $N_2$  ο απαιτούμενος

αέρας είναι (χωρίς την υγρασία)  $\mu_{L\alpha T} = \frac{\mu_{O_2\alpha}}{x_{O_2}}$ , όπου  $\mu_{O_2\alpha} = \frac{\left(m + \frac{n}{4} + p - \frac{q}{2}\right) M_{O_2}}{M_{καυσίμου}}$  και  $x_{O_2}$

=23,21%. Εκτός από αυτόν τον τρόπο ο απαιτούμενος αέρας καύσης μπορεί να υπολογιστεί και από την σχέση  $\mu_{L\alpha T} = \mu_{L\alpha T}^c \cdot \gamma_c + \mu_{L\alpha T}^H \cdot \gamma_H + \dots - \mu_{L\alpha T}^O \cdot \gamma_O$ , όπου  $\gamma_x$  η κατά μάζα σύσταση του καυσίμου σε άνθρακα, υδρογόνο, ... και οξυγόνο, ενώ  $\mu_{L\alpha T x}$  ο απαιτούμενος αέρας καύσης του κάθε επιμέρους στοιχείου. Το οξυγόνο δεν χρειάζεται αέρα, αντίθετα το ίδιο λαμβάνει μέρος στην οξείδωση και γι' αυτό η ποσότητά του αφαιρείται.

Όνομα	Σύμβολο	$\mu_{LoT}$
Άνθρακας	C	11,48
Υδρογόνο	H	34,194
Θείο	S	4,3
Οξυγόνο	O	(-)4,308
Άζωτο	N	0
Υδρατμός	H <sub>2</sub> O	0
Μεθάνιο	CH <sub>4</sub>	17,189
Αιθάνιο	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	16,049
Υδρόθειο	H <sub>2</sub> S	6,6068
Προπάνιο	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	15,634

Πίνακας 6-1 : Απαιτούμενος αέρας καύσης ανά στοιχείο

Επειδή η καύση γίνεται τις περισσότερες φορές με περίσσεια αέρα, ορίζεται η λόγος αέρα καύσης, δηλαδή ο λόγος της πραγματικά χρησιμοποιούμενης ποσότητας αέρα προς την στοιχειομετρικά απαιτούμενη ποσότητα αέρα. Άρα  $\mu_{LT} = n \cdot \mu_{LoT}$  ο συνολικός απαιτούμενος αέρας με την περίσσεια και  $\mu_L = \mu_{LT} \cdot (1 + x_{H_2O})$  η ποσότητα του αέρα με την υγρασία. Επομένως στο καυσαέριο θα υπάρχει:

- Άζωτο:  $\mu_{N_2} = \mu_{N_{20}} + n(1 - x_{O_2})\mu_{LoT}$ , όπου  $\mu_{N_{20}} = \frac{rM_{N_2}}{2M_{καυσίμου}}$  το άζωτο του καυσίμου (kg/kg καυσίμου).
- Οξυγόνο:  $\mu_{O_2G} = (n - 1)x_{O_2}\mu_{LoT}$  (kg/kg καυσίμου)
- Υδρατμός:  $\mu_{H_2O} = n \cdot \mu_{LoT} \cdot x_{H_2OL} + \frac{nM_{H_2O}}{2M_{καυσίμου}}$  (kg/kg καυσίμου)
- Διοξείδιο του άνθρακα  $\mu_{CO_2} = \frac{mM_{CO_2}}{M_{καυσίμου}}$  (kg/kg καυσίμου)
- Διοξείδιο του θείου  $\mu_{SO_2} = \frac{pM_{SO_2}}{M_{καυσίμου}}$  (kg/kg καυσίμου)

Έτσι η συνολική ποσότητα καυσαερίου ανά kg καυσίμου είναι  $\mu_G = \mu_{N_2} + \mu_{O_2G} + \mu_{H_2O} + \mu_{CO_2} + \mu_{SO_2}$ . Επίσης είναι προφανές ότι  $\mu_G = \mu_L + 1$ , δηλαδή  $m_{air} + m_{fuel} = m_{gas}$ . Με βάση αυτήν την ποσότητα μπορεί να υπολογιστεί η περιεκτικότητα των καυσαερίων σε κάθε συστατικό:

- Άζωτο:  $x_{N_2} = \frac{\mu_{N_2}}{\mu_G}$
- Οξυγόνο:  $x_{O_2} = \frac{\mu_{O_2}}{\mu_G}$

- Υδρατμός:  $x_{H_2O} = \frac{\mu_{H_2O}}{\mu_G}$  (kg/kg καυσίμου)
- Διοξείδιο του άνθρακα  $x_{CO_2} = \frac{\mu_{CO_2}}{\mu_G}$  (kg/kg καυσίμου)
- Διοξείδιο του θείου  $x_{SO_2} = \frac{\mu_{SO_2}}{\mu_G}$  (kg/kg καυσίμου)

Με βάση τις παραπάνω περιεκτικότητες μπορούν να υπολογιστούν τα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά του καυσαερίου, όπως το  $c_p$  (θερμοχωρητικότητα για σταθερή πίεση) και  $R$  (η σταθερά καταστατικής εξίσωσης για το καυσαέριο). Συγκεκριμένα το  $c_p$  προσεγγίζεται με την χρήση πολυωνύμων του τύπου  $c_p = b_0 + b_1 \theta + b_2 \theta^2 + b_3 \theta^3 + b_4 \theta^4$ , όπου  $\theta$  θερμοκρασία σε  $^{\circ}C$ .

	Αέρας	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>
b <sub>0</sub>	0,100186 · 10	0,103693 · 10	0,902430	0,828204	0,185042 · 10	0,592914
b <sub>1</sub>	0,722153 · 10 <sup>-4</sup>	0,278472 · 10 <sup>-4</sup>	0,361332 · 10 <sup>-3</sup>	0,981404 · 10 <sup>-3</sup>	0,288423 · 10 <sup>-3</sup>	0,638217 · 10 <sup>-3</sup>
b <sub>2</sub>	0,348066 · 10 <sup>-6</sup>	0,392958 · 10 <sup>-6</sup>	-0,164362 · 10 <sup>-6</sup>	-0,790052 · 10 <sup>-6</sup>	0,714063 · 10 <sup>-6</sup>	-0,618659 · 10 <sup>-6</sup>
b <sub>3</sub>	-0,321086 · 10 <sup>-9</sup>	-0,313739 · 10 <sup>-9</sup>	0,216244 · 10 <sup>-10</sup>	0,328413 · 10 <sup>-9</sup>	-0,478786 · 10 <sup>-9</sup>	0,283124 · 10 <sup>-9</sup>
b <sub>4</sub>	0,930682 · 10 <sup>-13</sup>	0,720044 · 10 <sup>-13</sup>	0,354211 · 10 <sup>-13</sup>	-0,546602 · 10 <sup>-13</sup>	0,943951 · 10 <sup>-13</sup>	-0,491597 · 10 <sup>-13</sup>

Πίνακας 6-2 : Ενδεικτικές τιμές όρων πολυωνύμου για υπολογισμό θερμοχωρητικότητας

Για τον υπολογισμό της θερμοχωρητικότητας μεταξύ  $0^{\circ}C$  και  $\theta$

$c_p = \int_0^{\theta} c_p d\theta = b_0 + b_1 \theta/2 + b_2 \theta^2/3 + b_3 \theta^3/4 + b_4 \theta^4/5$  και για τον υπολογισμό της μέσης θερμοχωρητικότητας ανάμεσα σε δυο θερμοκρασίες:

$$\bar{c}_p \Big|_{\theta_1}^{\theta_2} = \frac{\bar{c}_p \Big|_0^{\theta_2} \cdot \theta_2 - \bar{c}_p \Big|_0^{\theta_1} \cdot \theta_1}{\theta_2 - \theta_1} \text{ kJ/kg}$$

Οπότε για μείγμα  $C_p = \sum_k x_k C_{p,k}$  [kJ/kg.K],

Για τον υπολογισμό της σταθεράς  $R$  του καυσαερίου:

$$R_G = \sum_k x_k R_k,$$

όπου  $R_k$  η σταθερά του κάθε αέριου συστατικού. Η παγκόσμια σταθερά των αερίων είναι

$\bar{R} = 8134 \text{ J/kmoleK}$ , άρα  $R_k = \frac{\bar{R}}{MB_k}$ . Τέλος η σταθερά  $\gamma = \frac{c_p}{c_p - R}$  και μπορεί να

χρησιμοποιηθεί και για τον αέρα και για το καυσαέριο.

Με βάση όλα τα παραπάνω μπορεί να γίνει υπολογισμός της θερμοκρασίας μετά την καύση με ισολογισμό στον θάλαμο καύσης θεωρώντας αδιαβατικά τοιχώματα. Οπότε:

$$\dot{m}_{air} c_{p,air} (T_{air} - T_{ref}) + \dot{m}_{fuel} c_{p,fuel} (T_{fuel} - T_{ref}) + \eta_b \dot{m}_{fuel} Hu = \dot{m}_{gas} c_{p,gas} (T_{gas} - T_{ref})$$

$$\mu_L c_{p,air} (T_{air} - T_{ref}) + c_{p,fuel} (T_{fuel} - T_{ref}) + \eta_b Hu = \mu_G c_{p,gas} (T_{gas} - T_{ref})$$

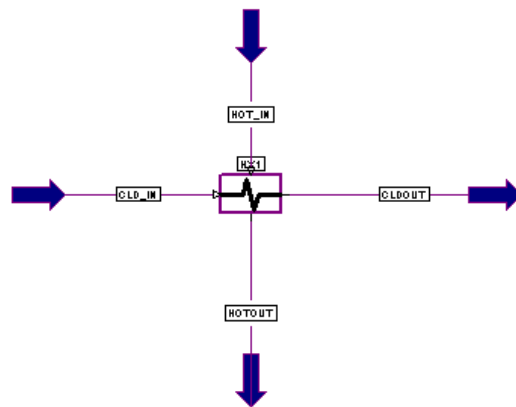
Όπου  $H_u$  η θερμογόνος ικανότητα του καυσίμου (συνήθως η κατώτερη) στη θερμοκρασία αναφοράς  $T_{ref}$  και  $\eta_b$  βαθμός απόδοσης καύσης. Επειδή αυτή η θερμοκρασία είναι πολύ μικρή σε σχέση με τους άλλους όρους μπορεί να αμεληθεί δίνοντας:

$$\mu_L c_p_{air} T_{air} + c_p_{fuel} T_{fuel} + \eta_b H_u = \mu_G c_p_{gas} T_{gas}$$

Στο Gatecycle δίνεται η θερμογόνος ικανότητα του καυσίμου (ή υπολογίζεται βάσει σύνθεσης καυσίμου), ενώ μπορεί να δοθεί είτε η ποσότητα του καυσίμου, είτε η θερμοκρασιακή ανύψωση είτε η ίδια η θερμοκρασία καύσης. Θερμοκρασία, ποσότητα αέρα και θερμοκρασία του καυσαερίου δίνονται από άλλα τμήματα του σχεδιαγράμματος ή είναι δεδομένα.

### Εναλλάκτες

Σαν εναλλάκτες αντιμετωπίζονται όλες οι διαδικασίες όπου μεταφέρεται θερμότητα από ένα ρεύμα σε ένα άλλο, δηλαδή υπερθερμαντές, ατμοποιητές, προθερμαντές-οικονομητήρες και προθερμαντές με ατμό.



Εικόνα 6-1 : Εικονίδιο του εναλλάκτη θερμότητας στο Gatecycle

Βασική εξίσωση των εναλλακτών είναι η

$$\dot{m}_{HOT} (H_{hot\_in} - H_{hot\_out}) \eta = \dot{m}_{COLD} (H_{cold\_out} - H_{cold\_in}), \text{ ή}$$

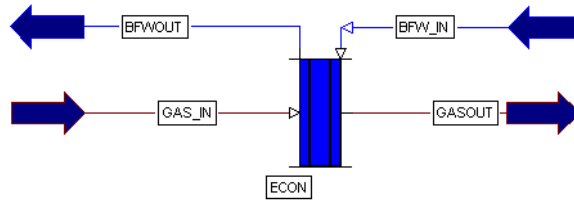
$$\dot{m}_{HOT} c_{pHOT} (T_{hot\_in} - T_{hot\_out}) \eta = \dot{m}_{COLD} c_{pCOLD} (T_{cold\_out} - T_{cold\_in})$$

Όπου  $m_{hot}$  και  $m_{cold}$  οι παροχές του θερμού και ψυχρού ρεύματος αντίστοιχα,  $H$  η ενθαλπία του κάθε ρεύματος (εναλλακτικά  $T$  η θερμοκρασία του και  $C_p$  η θερμοχωρητικότητα του). Το μέγεθος  $\eta$  εκφράζει τις απώλειες κατά την μεταφορά θερμότητας του εναλλάκτη και θα μπορούσε να χαρακτηριστεί σαν βαθμός απόδοσης του εναλλάκτη. Ο παραπάνω τύπος εναλλάκτη χρησιμοποιείται επιπλέον σε περιπτώσεις όπου δεν υπάρχει τύμπανο διαχωρισμού νερού/ατμού. Στην περίπτωση χρήσης τυμπάνου χρησιμοποιούνται τα παρακάτω.



## Οικονομητήρας

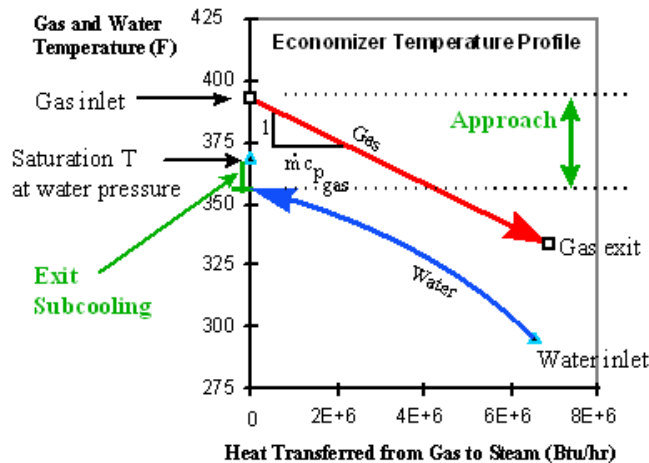
Για τον οικονομητήρα ισχύει



Εικόνα 6-2 : Εικονίδιο του οικονομητήρα στο Gatecycle

$$\dot{m}_{GAS} c_{pGAS} (T_{gas\_in} - T_{gas\_out}) \eta = \dot{m}_{water} (H_{water\_out} - H_{water\_in})$$

Ο οικονομητήρας περιγράφεται από το ακόλουθο γράφημα:



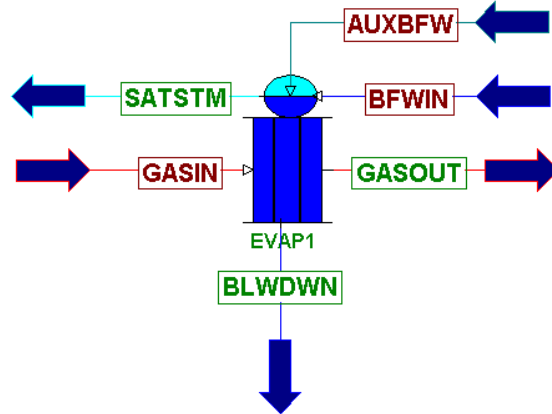
Εικόνα 6-3 : Μεταφορά θερμότητας στον οικονομητήρα

Επομένως για να οριστεί η συναλλαγή θερμότητας πρέπει να οριστεί κάτι από τα ακόλουθα:

- θερμοκρασία εξόδου του νερού ή του καυσαερίου
- θερμοκρασία εξόδου του νερού κάτω από τον κορεσμό στην αντίστοιχη πίεση (exit subcooling)
- Θερμοκρασία προσέγγισης (approach temperature) που δηλώνει την διαφορά θερμοκρασίας εισόδου του καυσαερίου και εξόδου του νερού.
- Αποδοτικότητα του εναλλάκτη που ορίζεται ως η πραγματική συναλλαγή θερμότητας

προς την μέγιστη δυνατή δηλαδή  $\eta_{HE} = \frac{T_{BFWOUT} - T_{BFW\_IN}}{T_{GASIN} - T_{BFW\_IN}}$ .

Ατμοποιητής με τύμπανο



Εικόνα 6-4 : Εικονίδιο του ατμοποιητή στο Gatecycle

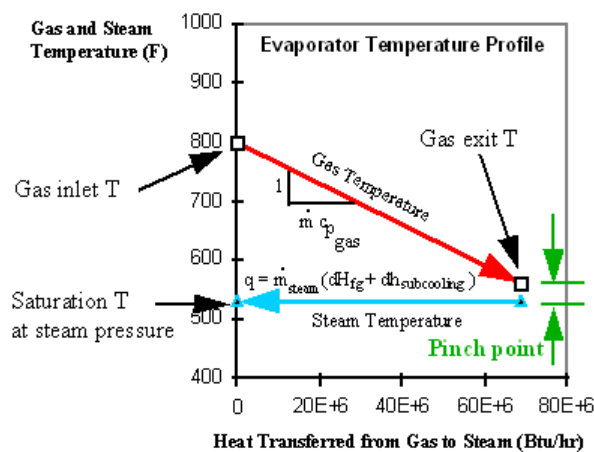
Για τον ατμοποιητή με τύμπανο ισχύει ότι (BLWDWN και AUXBFW αμελούνται καθώς είναι προαιρετική η χρήση τους):

$$\dot{m}_{GAS} c_{pGAS} (T_{gas\_in} - T_{gas\_out}) \eta = \dot{m}_{water} (H_{water\_out} - H_{water\_in}) \Rightarrow$$

$$\dot{m}_{GAS} c_{pGAS} (T_{gas\_in} - T_{gas\_out}) \eta = \dot{m}_{water} [(H_s + H_{sat\_water}) - H_{water\_in}]$$

Όπου  $H_s$  η θερμότητα ατμοποίησης (kJ/kg) για την συγκεκριμένη πίεση, καθώς έχουμε αλλαγή φάσης.

Ο ατμοποιητής περιγράφεται από το ακόλουθο γράφημα:

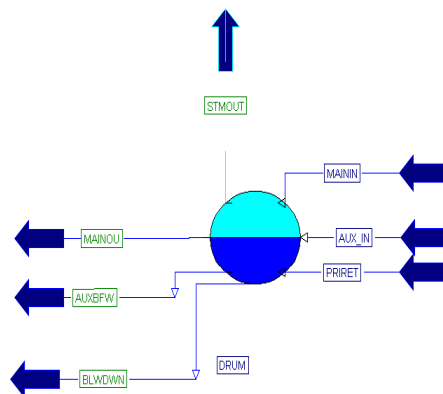


Εικόνα 6-5 : Μεταφορά θερμότητας στον ατμοποιητή

Επομένως για να οριστεί πλήρως η συναλλαγή θερμότητας πρέπει να οριστεί κάτι από τα παρακάτω:

- Η απαιτούμενη ατμοπαραγωγή
- Pinch point που είναι η διαφορά της θερμοκρασίας εξόδου των καυσαερίων από την θερμοκρασία ατμοποίησης.
- Θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων.
- Αποδοτικότητα του εναλλάκτη

Για το τύμπανο ισχύει ισολογισμός μάζας και ενέργειας.



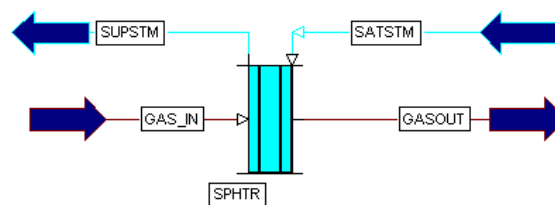
Εικόνα 6-6 : Εικονίδιο του τυμπάνου στο Gatecycle

Δηλαδή:  $\dot{m}_{BLWDWN} + \dot{m}_{AUXBFW} + \dot{m}_{MAINOUT} + \dot{m}_{STEAMOUT} = \dot{m}_{MAININ} + \dot{m}_{AUXIN} + \dot{m}_{PRIRET}$  και

$$\dot{m}_{BLWDWN}H_{BLWDWN} + \dot{m}_{AUXBFW}H_{AUXBFW} + \dot{m}_{MAINOUT}H_{MAINOUT} + \dot{m}_{STEAMOUT}H_{STEAMOUT} = \dot{m}_{MAININ}H_{MAININ} + \dot{m}_{AUXIN}H_{AUXIN} + \dot{m}_{PRIRET}H_{PRIRET}$$

Η ύπαρξη του BLWDWN είναι για την απομάκρυνση μέρους του νερού για τον έλεγχο της συγκέντρωσης των αλάτων. MAININ είναι η κύρια είσοδος του νερού από τον προθερμαντή, MAINOUT είναι η έξοδος του νερού που κατευθύνεται προς τον ατμοποιητή PRIRET είναι η επιστροφή της προηγούμενης εξόδου δηλαδή η είσοδος του νερού/ατμού καθώς αυτό επιστρέφει από τον ατμοποιητή και STMOUT είναι η έξοδος του ατμού. Τα υπόλοιπα έχουν προαιρετική χρήση.

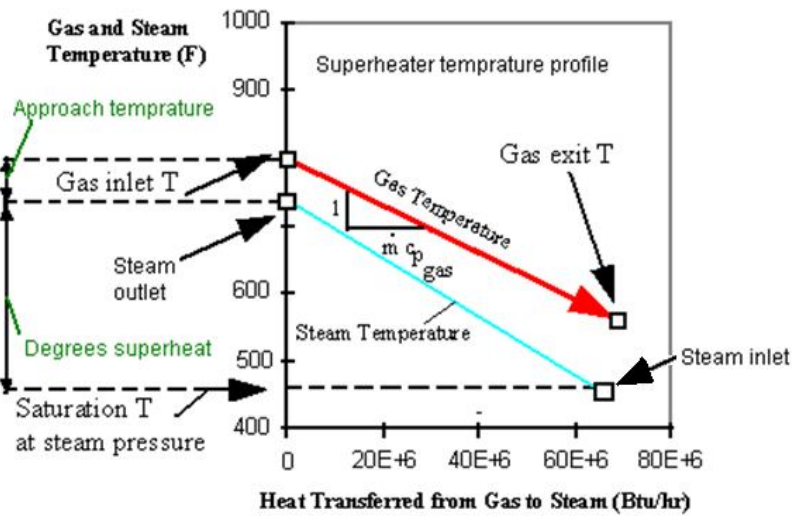
### Υπερθερμαντής



Εικόνα 6-7 : Εικονίδιο του υπερθερμαντή στο Gatecycle

Ο υπερθερμαντής είναι ένας απλός εναλλάκτης θερμότητας για τον οποίο ισχύει

$$\dot{m}_{GAS} c_{pGAS} (T_{gas\_in} - T_{gas\_out}) \eta = \dot{m}_{steam} (H_{steam\_out} - H_{steam\_in})$$



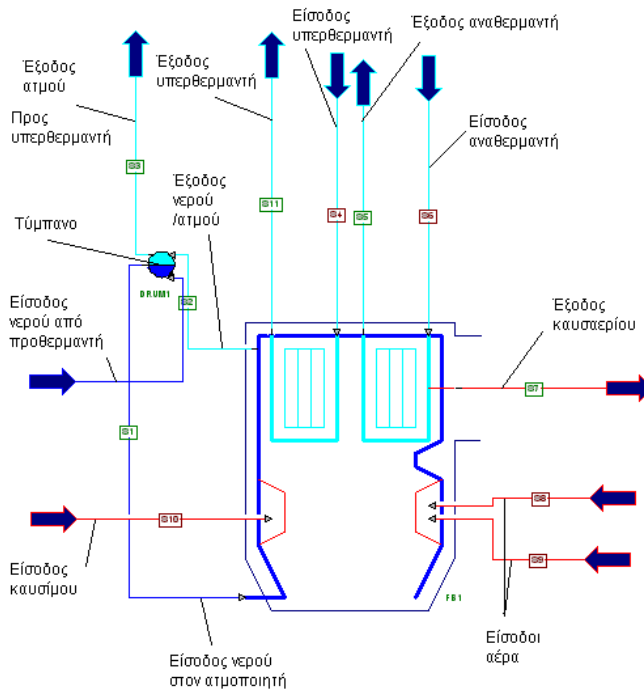
Εικόνα 6-8 : Μεταφορά θερμότητας στον υπερθερμαντή

Συνήθως η είσοδος του υπερθερμαντή είναι κορεσμένος ατμός. Για την λειτουργία του πρέπει να οριστεί κάτι από τα παρακάτω:

- Θερμοκρασία εξόδου του ατμού
- Θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων
- Θερμοκρασία προσέγγισης (approach temperature) που δηλώνει την διαφορά θερμοκρασίας εισόδου του καυσαερίου και εξόδου του ατμού.
- Θερμοκρασία υπερθέρμανσης (degrees superheat) που δηλώνει την θερμοκρασία του ατμού πάνω από την θερμοκρασία κορεσμού, για την συγκεκριμένη πίεση

Αντίστοιχα ισχύουν και για τους ατμοπαραγωγούς ορυκτών καυσίμων. Η διαφορά είναι ότι στο Gatecycle στον ατμοπαραγωγό ορυκτών καυσίμων ορίζεται και η ποσότητα και η θερμογόνος ικανότητα του καυσίμου (η θερμογόνος ικανότητα μπορεί και να υπολογιστεί βάσει σύνθεσης καυσίμου όπως αναφέρθηκε), ή του μείγματος καυσίμων αν χρησιμοποιούνται περισσότερα από ένα καύσιμα. Εναλλακτικά μπορεί να οριστεί η θερμική φόρτιση (J/sec ισχύς προσδιδόμενης θερμότητας με την καύση των καυσίμων). Δίνεται η περίσσεια αέρα ως ποσοστό του συνολικού αέρα, ή η περιεκτικότητα κατ' όγκο οξυγόνου στο καυσαέριο, με το οποίο μπορεί να υπολογιστεί η περίσσεια του αέρα ως  $n = \frac{21}{21 - O_2}$ .

Ακόμα ορίζεται η θερμοκρασία εξόδου του αέρα για τον υπέρθερμο ατμό, τον ανάθερμο ατμό και η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων.

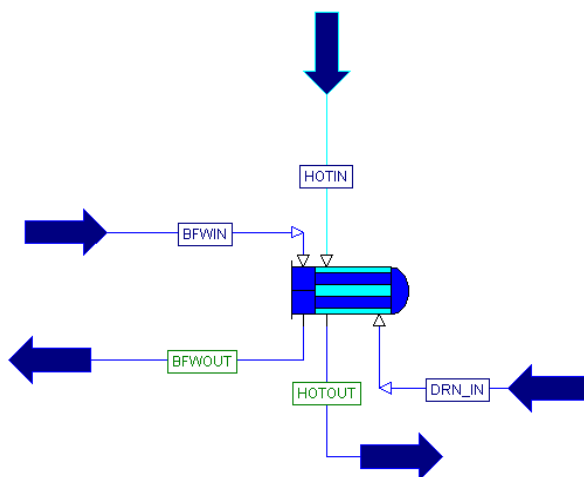


Εικόνα 6-9 : Διάταξη καυστήρα ορυκτών καυσίμων στο Gatecycle

Ο αναθερμαντής είναι και αυτός εναλλάκτης αντίστοιχος με τον υπερθερμαντή, δηλαδή δεν συμβαίνει αλλαγή φάσης απλά θέρμανση του ατμού. Έχει τις ίδιες δυνατότητες ρύθμισης με τον υπερθερμαντή.

### Προθερμαντής με ατμό

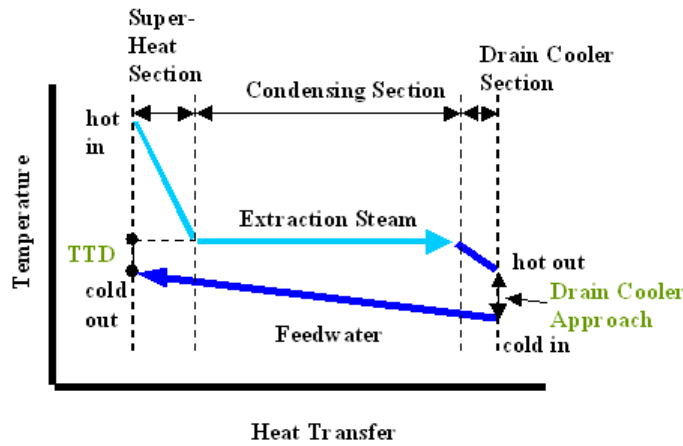
Ο προθερμαντής νερού με ατμό λειτουργεί ως εξής: Εισέρχεται ατμός από μια απομάστευση με συγκεκριμένη πίεση και συμπυκνώνεται θερμαίνοντας το ψυχρό ρεύμα νερού. Ο συμπυκνούμενος ατμός είναι δυνατό να υποψυχθεί. Έτσι:



Εικόνα 6-10 : Εικονίδιο του προθερμαντή νερού με ατμό στο Gatecycle

$$[\dot{m}_{STEAM} (H_{hot\_in} - H_{hot\_out}) + \dot{m}_{DRN\_IN} (H_{DRN\_in} - H_{hot\_out})] \eta = \dot{m}_{BFW} (H_{BFWOUT} - H_{BFWIN}),$$

Η αποδιδόμενη θερμότητα οφείλεται: στην ψύξη του υπέρθερμου ατμού μέχρι το σημείο κορεσμού, τη συμπύκνωση του ατμού και, ενδεχομένως, την υπόψυξη του συμπυκνώματος. Η είσοδος DRAIN οφείλεται στην είσοδο συμπυκνωμάτων που μπορούν να αποδώσουν κάποια θερμότητα στο ψυχρό ρεύμα από άλλους εναλλάκτες, μεγαλύτερης πίεσης. Για την λειτουργία του προθερμαντή με ατμό ισχύει το ακόλουθο γράφημα:



Εικόνα 6-11 : Μεταφορά θερμότητας στον προθερμαντή νερού με ατμό

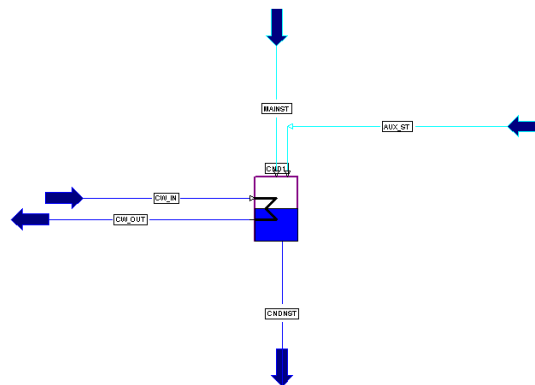
Για την λειτουργία του πρέπει να οριστεί το αν θα γίνει υπόψυξη του συμπυκνώματος και κάτι από τα παρακάτω:

- Η ποσότητα του ατμού που εισέρχεται και συμπυκνώνεται
- Η τελική θερμοκρασιακή διαφορά (terminal temperature difference – TTD) που δηλώνει την διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας του θερμαινόμενου ρεύματος από την θερμοκρασία συμπύκνωσης του ατμού στην συγκεκριμένη πίεση.
- Στην περίπτωση υπόψυξης πρέπει να οριστεί και η θερμοκρασία προσέγγισης (drain cooler approach) προκειμένου να εκτιμηθεί μέχρι ποια θερμοκρασία θα υποψυχθεί το συμπύκνωμα.

Με ανάλογο τρόπο λειτουργεί και ο προθερμαντής αέρα με ατμό.

### Συμπυκνωτής

Ο συμπυκνωτής αναλαμβάνει την συμπύκνωση του ατμού από την έξοδο του ατμοστροβίλου.



Εικόνα 6-12 : Εικονίδιο του συμπυκνωτή στο Gatecycle

Ισχύει:

$$[\dot{m}_{MAINSTM}(H_{IN} - H_{CONDST}) + \dot{m}_{AUXST}(H_{AUXST} - H_{CONDST})] = \dot{m}_{COOLANT}(H_{CWOUT} - H_{CWIN})$$

Η πίεση που επικρατεί στον συμπυκνωτή εξαρτάται από την θερμοκρασία του ψυκτικού νερού. Συγκεκριμένα για την λειτουργία του συμπυκνωτή είναι απαραίτητο να καθοριστεί η θερμοκρασιακή ανύψωση του ψυκτικού νερού, ή η παροχή του ψυκτικού νερού (έχοντας ως δεδομένο την θερμοκρασία εισόδου του). Ακόμα πρέπει να καθοριστεί κάτι από τα ακόλουθα:

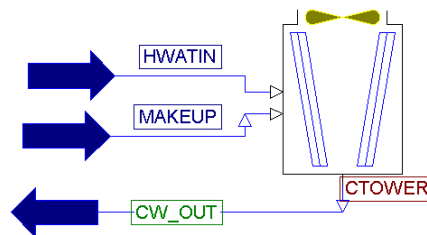
- Πίεση που επικρατεί στο ψυγείο
- Θερμοκρασιακή διαφορά συμπυκνώματος – εισόδου ψυκτικού. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να υπολογιστεί η πίεση δεδομένου ότι το σχηματιζόμενο νερό είναι συμπυκνωμένο.

Πέρα από αυτά μπορούν να προστεθούν απώλειες πίεσης κατά την είσοδο του ατμού, αλλά μπορεί να γίνει και υπόψυξη του συμπυκνώματος που πρέπει να προσδιοριστεί.

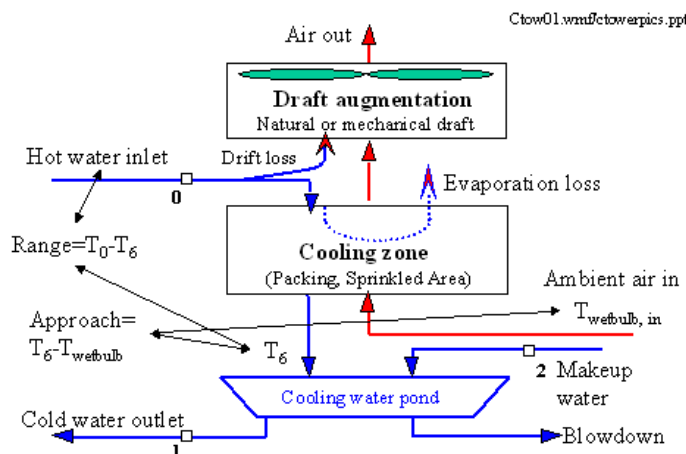
Όλα τα παραπάνω αναφέρονται για εναλλάκτες θερμότητας σε κατάσταση σχεδιασμού (design). Στο Gatecycle υπολογίζεται στην κατάσταση σχεδιασμού μια επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας χρησιμοποιώντας έναν τυπικό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας για κάθε εναλλάκτη. Με αυτόν τον τρόπο προσομοιώνεται η συμπεριφορά των εναλλακτών σε εκτός σχεδιασμού συνθήκες (off design).

### Πύργος ψύξης

Ο πύργος ψύξης αναλαμβάνει την ψύξη του ψυκτικού νερού μετά την έξοδό του από τον συμπυκνωτή:



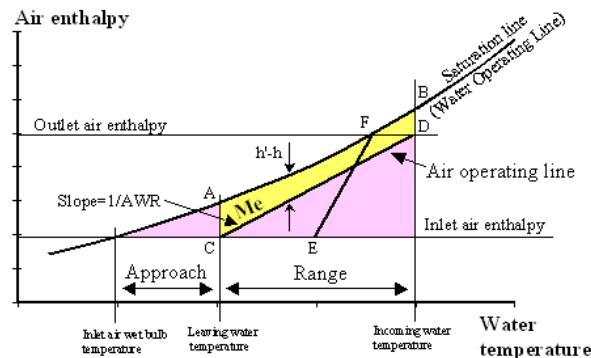
Εικόνα 6-13 : Εικονίδιο του πύργου ψύξης στο Gatecycle



Εικόνα 6-14 : Λειτουργία πύργου ψύξης

Η θερμοκρασία εισόδου στον πύργο ψύξης και η παροχή μάζας νερού είναι γνωστά από το συμπυκνωτή. Η θερμοκρασία εξόδου ορίζεται ως προσέγγιση (approach) που είναι η διαφορά θερμοκρασίας εξόδου του νερού από τη θερμοκρασία υγρού βολβού του αέρα εισόδου (για

τις συνθήκες θερμοκρασίας ξηρού βολβού και σχετικής υγρασίας). Η σχετική υγρασία εξόδου του αέρα ορίζεται 98%. Για την λειτουργία του πύργου ψύξης ισχύει το ακόλουθο γράφημα:



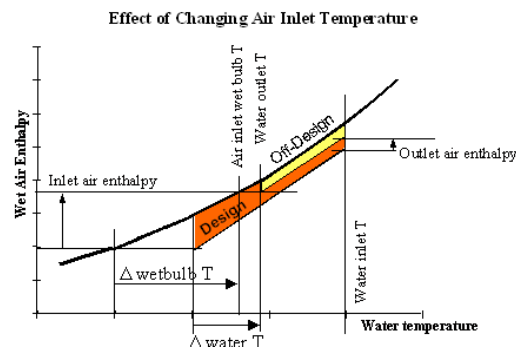
Εικόνα 6-15 : Διάγραμμα λειτουργίας πύργου ψύξης

Η κλίση της ευθείας που δηλώνει την ψύξη του εισερχόμενου νερού, ορίζεται ως λόγος νερού/αέρα (Air to Water Ratio- AWR). Γνωρίζοντας την θερμοκρασία εισόδου του νερού, την θερμοκρασία υγρού βολβού εισόδου του αέρα και τον λόγο νερού/αέρα, προσδιορίζεται η θερμοκρασία εξόδου του νερού. Ακόμα με την χρήση της εξίσωσης του Merkel προσδιορίζονται τα χαρακτηριστικά του πύργου:

$$\frac{KaV}{L} = \int_{T_1}^{T_2} \frac{cp_w}{h'-h} dT, \text{ όπου } K \text{ συντελεστής μεταφοράς μάζας, } a \text{ επιφάνεια επαφής}$$

(διεπιφάνεια νερού, αέρα) ανά μονάδα όγκου, L παροχή νερού, h'-h διαφορά ενθαλπίας υγρού-αέριου ρεύματος και cp\_w η θερμοχωρητικότητα του νερού.

Σε περίπτωση μεταβολής της θερμοκρασίας εισόδου του αέρα, προφανώς μεταβάλλεται και όλη η λειτουργία του πύργου ψύξης όπως φαίνεται παρακάτω.

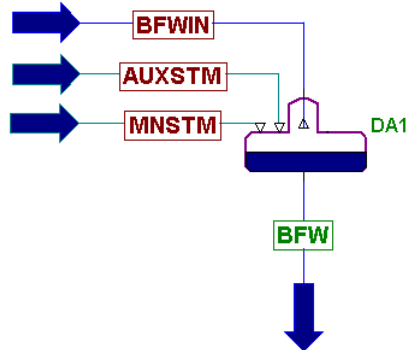


Εικόνα 6-16 : Επίδραση της αύξησης θερμοκρασίας περιβάλλοντος στη λειτουργία του πύργου ψύξης



### Απαεριοτής

Ο απαεριοτής είναι ένας ανοικτού τύπου εναλλάκτης θερμότητας.



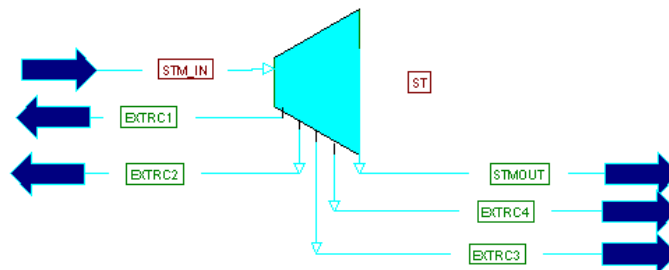
Εικόνα 6-17 : Εικονίδιο του απαεριοτή στο Gatecycle

Περιγράφεται από την αδιαβατική ανάμειξη, δηλαδή:

$\dot{m}_{BFWIN} H_{BFWIN} + \dot{m}_{AUXSTM} H_{AUXSTEAM} + \dot{m}_{MNSTM} H_{MNSTM} = \dot{m}_{BFW} H_{BFW}$ , όπου BFWIN είναι η είσοδος του τροφοδοτικού νερού, ενώ MNSTM είναι η κύρια είσοδος του ατμού για την προθέρμανση, ενώ AUXSTM είσοδος τυχόν βοηθητικού ατμού και τέλος BFW είναι η έξοδος του τροφοδοτικού νερού μετά την προθέρμανση. Στον απαεριοτή επιδιώκεται η θέρμανση του νερού ως την κατάσταση κορεσμού. Στο Gatecycle σε περίπτωση που ο ατμός δεν επαρκεί για την θέρμανση τότε το νερό υποψύχεται. Στην περίπτωση που ο ατμός είναι παραπάνω από τον απαιτούμενο, τότε για την αποφυγή σχηματισμού διαφασικού μείγματος στον απαεριοτή, ο σχηματιζόμενος ατμός απορρίπτεται και έτσι μένει στον απαεριοτή μόνο κορεσμένο νερό.

### Ατμοστρόβιλος

Στον ατμοστρόβιλο εισέρχεται ατμός σε μεγάλη θερμοκρασία και πίεση (STM\_IN) και εξέρχεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία (STMOUT) και πίεση αποδίδοντας έργο. Είναι πιθανό να υπάρχουν απομαστεύσεις ατμού και έτσι να απομακρύνεται μέρος της συνολικής ποσότητας ατμού προτού εκτονωθεί πλήρως.

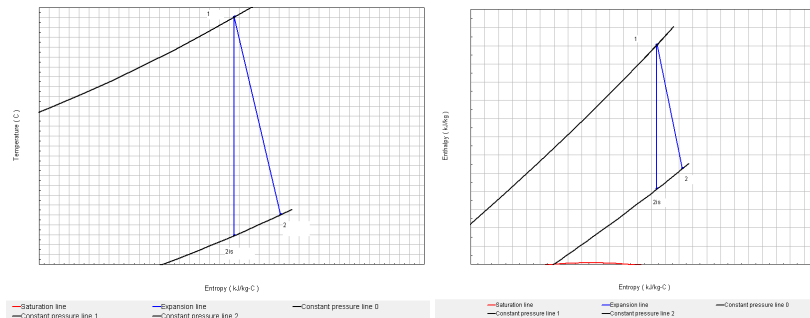


Εικόνα 6-18 : Εικονίδιο του υπερθερμαντή στο Gatecycle

Ισχύει ότι:

$$W = \dot{m}_{STM\_IN} (H_{STM\_IN} - H_{EXTRC1}) + (\dot{m}_{STM\_IN} - \dot{m}_{EXTRC1}) (H_{EXTRC1} - H_{EXTRC2}) + \dots + (\dot{m}_{STM\_IN} - \dot{m}_{EXTRC1} - \dots - \dot{m}_{EXTRN}) (H_{EXTRCN} - H_{STMOUT})$$

Χαρακτηριστικό του αμμοστρόβιλου είναι ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης, καθώς όλες οι μεταβολές συνεπάγονται αύξηση της εντροπίας. Αμμοστρόβιλος με μικρό ισεντροπικό βαθμό απόδοσης αξιοποιεί λιγότερο την διαθέσιμη ενθαλπική πτώση και έτσι μειώνεται το αποδιδόμενο έργο, όπως φαίνεται και στα παρακάτω διαγράμματα (1-2 πραγματική μεταβολή, 1-2<sub>is</sub> ισεντροπική μεταβολή).



Εικόνα 6-19 : Εκτόνωση ατμού σε αμμοστρόβιλο σε διάγραμμα T-s (αριστερά) και h-s (δεξιά)

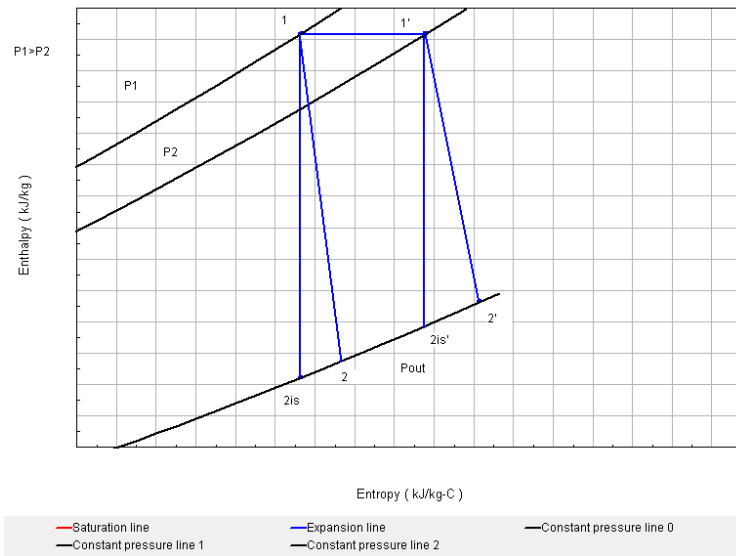
Ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης ορίζεται ως  $\eta_{is} = \frac{H_1 - H_2}{H_1 - H_{2is}}$

Άλλη παράμετρος που καθορίζει την αποδιδόμενη ισχύ του στροβίλου είναι η διαφορά πίεσης στα άκρα του. Στην είσοδο η πίεση καθορίζεται από ρυθμιστική βαλβίδα. Η πίεση εξόδου πρέπει να εισαχθεί στην κατάσταση σχεδιασμού (design), ενώ υπολογίζεται σε εκτός σχεδιασμού περιπτώσεις (off design). Σε περιπτώσεις εκτός σχεδιασμού, χρησιμοποιείται ο κανόνας του κώνου:

$$\frac{\dot{m}}{\dot{m}_d} = \frac{p_a}{p_{ad}} \cdot \sqrt{\frac{p_{ad}}{\rho_{ad}} \cdot \frac{\rho_a}{p_a}} \cdot \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{p_{\omega}}{p_a}\right)^{\frac{n+1}{n}}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{p_{\omega d}}{p_{ad}}\right)^{\frac{n+1}{n}}}}, \text{ όπου ο δείκτης } \alpha \text{ δηλώνει συνθήκες εισόδου}$$

ενώ ο  $\omega$  εξόδου και  $n$  πολυτροπικός εκθέτης της εκτόνωσης και  $\rho$  η πυκνότητα και  $d$  συνθήκες σχεδιασμού (design). Ο κανόνας του κώνου ισχύει για αμμοστρόβιλο με ενιαία παροχή και χωρίς ρυθμιστικά πτερύγια. Σε περίπτωση ύπαρξης απομαστεύσεων τότε ο νόμος του κώνου ισχύει για τα επί μέρους τμήματα-τομείς με ενιαία παροχή.

Με μεταβολή της πίεσης εισόδου στον αμμοστρόβιλο (θεωρώντας πίεση εξόδου σταθερή), αλλάζει και η διαθέσιμη ενθαλπική πτώση, παρ' όλο που ο στραγγαλισμός για την μείωση της πίεσης είναι ισενθαλπικός, όπως φαίνεται και στο παρακάτω γράφημα. Ακόμα λόγω μείωσης της πίεσης μειώνεται και η διερχόμενη παροχή από τον αμμοστρόβιλο σύμφωνα με τον νόμο του κώνου.



**Εικόνα 6-20 : Ρύθμιση πίεσης εισόδου ατμοστρόβιλου**

### *Ρυθμιστικές βαλβίδες και σωλήνες*

Και οι βαλβίδες και οι σωλήνες αποτελούν εξαρτήματα ρύθμισης της πίεσης.



**Εικόνα 6-21 : Εικονίδιο των ρυθμιστικών βαλβίδων (αριστερά) και σωλήνων (δεξιά) στο Gatecycle**

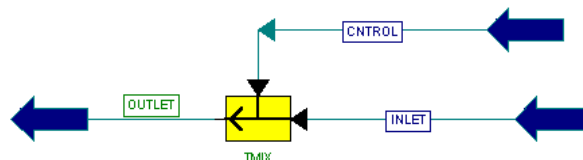
Οι βαλβίδες χρησιμοποιούνται για να δηλώσουν την ύπαρξη ρυθμιστικών βαλβίδων που ρυθμίζουν την πίεση π.χ. πριν τον ατμοστρόβιλο, δηλαδή εκτελούν ισενθαλπικό στραγγαλισμό. Μπορούν όμως να χρησιμοποιηθούν και για να μεταβάλλουν την ενθαλπία του εισερχόμενου ρεύματος, δηλαδή μπορούν να προσφέρουν ή να απάγουν θερμότητα.

Οι σωλήνες χρησιμοποιούνται για να δηλώσουν απώλειες πίεσης, ή θερμότητας.

Σε κάθε περίπτωση οι ζητούμενες μεταβολές πρέπει να οριστούν.

### *Ρύθμιση θερμοκρασίας με έγχυση νερού- ατμού*

Πολλές φορές για τον έλεγχο της θερμοκρασίας του υπέρθερμου ή ανάθερμου ατμού χρησιμοποιείται ρύθμιση με έγχυση νερού ή ατμού. Σε αυτήν την περίπτωση ισχύει η αδιαβατική ανάμειξη.



**Εικόνα 6-22 : Εικονίδιο του ρυθμιστή θερμοκρασίας με χρήση νερού/ατμού στο Gatecycle**

Δηλαδή:

$$\dot{m}_{INLET} \cdot H_{INLET} + \dot{m}_{CONTROL} \cdot H_{CONTROL} = (\dot{m}_{INLET} + \dot{m}_{CONTROL}) \cdot H_{OUTLET}$$

Καθοριστικός παράγοντας της λειτουργίας του παραπάνω στοιχείου είναι η θερμοκρασία ελέγχου που καθορίζει και την απαιτούμενη ποσότητα εγγεόμενου νερού ή ατμού.

### Αντλίες

Μαζί με τους σωλήνες και τις βαλβίδες, οι αντλίες καθορίζουν την πίεση που επικρατεί σε κάθε σημείο του κυκλώματος.

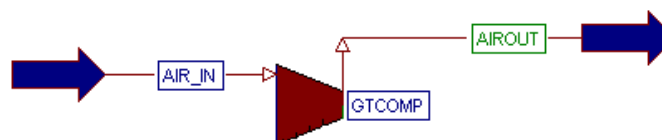


Εικόνα 6-23 : Εικονίδιο της αντλίας στο Gatecycle

Για την αντλία μπορεί να οριστεί ένας λόγος πίεσης ή μια σταθερή πίεση εξόδου (ρυθμιζόμενη με βαλβίδα). Το υγρό υπόκειται ενθαλπική αύξηση ίση με  $\Delta H_{is} = v \cdot \Delta p \cdot 100$  [kJ/kg], αν η λειτουργία της αντλίας ήταν ισεντροπική, όπου  $v$  ο ειδικός όγκος ( $m^3/kg$ ) στην είσοδο της αντλίας (κατάθλιψη),  $\Delta p$  μεταβολή πίεσης της αντλίας (bar). Έτσι ορίζεται και εδώ ισεντροπικός βαθμός απόδοσης  $\eta_{is} = \frac{\Delta H_{is}}{\Delta H}$ . Η καταναλισκόμενη ισχύς ισούται με

$P = \frac{\dot{m} \cdot v \cdot \Delta p}{\eta \cdot \eta_{is}} \cdot 100$  [KW],  $\dot{m}$  παροχή του υγρού (kg/sec) και η βαθμός απόδοσης της αντλίας (περιλαμβάνοντας μηχανικό, ογκομετρικό, υδραυλικό κ.λπ. βαθμούς απόδοσης).

### Συμπιεστής



Εικόνα 6-24 : Εικονίδιο του συμπιεστή στο Gatecycle

Οι συμπιεστές είναι ογκομετρικές μηχανές, δηλαδή σε σταθερές στροφές διακινούν σταθερή παροχή όγκου, που αναρροφούν αέρα σε χαμηλή πίεση και τον συμπιέζουν σε μεγαλύτερη πίεση. Στους αεριοστροβίλους χρησιμοποιούνται περισσότερο ολικά μεγέθη έναντι των στατικών. Τα ολικά μεγέθη που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι:

$$p_t = p + \frac{1}{2} \rho V^2$$

$$h_t = h + \frac{1}{2} V^2$$

$$T_t = T + \frac{1}{2c_p} V^2$$

Όπου  $V$  ταχύτητα,  $\rho$  πυκνότητα και  $T$  θερμοκρασία πάντα σε Κέλβιν. Δεδομένου ότι στην είσοδο του συμπιεστή η ροή έχει πολύ μικρή ταχύτητα, τότε  $p_{t1} = p_{\text{είσοδου}}$  και  $T_{t1} = T_1$ . Εάν η συμπίεση ήταν ισεντροπική τότε η θερμοκρασία στην έξοδο του συμπιεστή θα ήταν  $T_{t2}'$ .

Έτσι ορίζεται ισεντροπικός βαθμός απόδοσης  $\eta_{t-t,C} = \frac{T_{t2}' - T_{t1}}{T_{t2} - T_{t1}}$ . Επομένως για την

συμπίεση ισχύει:

$$\frac{T_{t2}'}{T_{t1}} = \pi_c^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \left(\frac{p_{t2}}{p_{t1}}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \text{ και τελικά}$$

$$T_{t2} = T_{t1} \left[ 1 + \frac{1}{\eta_{isC}} \left[ \left(\frac{p_{t2}}{p_{t1}}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \right]$$

Το απαιτούμενο έργο για την συμπίεση είναι:

$W_C = c_{p\text{αέρα}} (T_{t2} - T_{t1})$  [kJ/kg διακινούμενου αέρα], άρα η καταναλισκόμενη ισχύς:

$$P_C = \dot{m}_{\text{αέρα}} c_{p\text{αέρα}} (T_{t2} - T_{t1}).$$

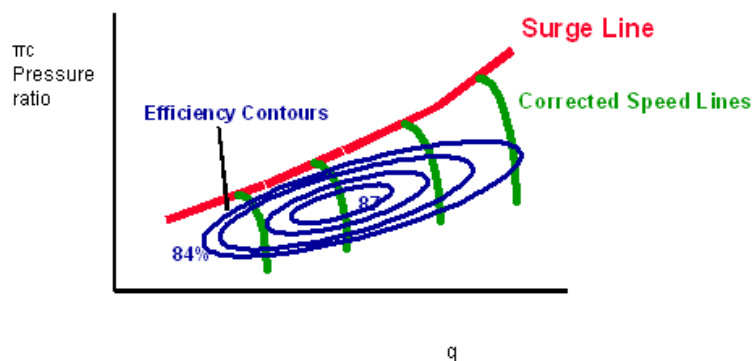
Για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας εξόδου από τον συμπιεστή και της ισχύος του συμπιεστή στο Gatecycle απαιτείται η εισαγωγή του λόγου πίεσης, της διακινούμενης παροχής μάζας και:

- Του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης
- Του πολυτροπικού βαθμού απόδοσης  $\eta_{PC}$ , όπου  $\frac{T_{t2}}{T_{t1}} = \pi_c^{\frac{n-1}{n}} = \left(\frac{p_{t2}}{p_{t1}}\right)^{\frac{n-1}{n}}$  και

$$\frac{n-1}{n} = \frac{\gamma-1}{\gamma \cdot \eta_{PC}}$$

- Της θερμοκρασίας εξόδου
- Της απαιτούμενης ισχύος

Ο λόγος πίεσης, ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης, η διακινούμενη παροχή μάζας και οι στροφές του συμπιεστή είναι μεγέθη συνδεδεμένα μεταξύ τους που φαίνονται στον χάρτη του συμπιεστή, όπου όλα τα παραπάνω μεγέθη έχουν αδιαστατοποιηθεί.

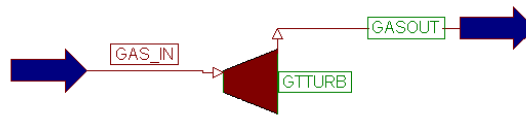


Εικόνα 6-25 : Χάρτης συμπιεστή

Όπου  $q = \frac{\dot{m}\sqrt{T_t}}{P_t} \Big|_{\text{εισόδου}}$  ή  $q = \frac{\dot{m}\sqrt{\theta}}{\delta} \Big|_{\text{εισόδου}}$  ανηγμένη παροχή και Corrected speed lines =  $\frac{N[rpm]}{\sqrt{T_{inlet}}}$  ή  $\frac{N[rpm]}{\sqrt{\theta}}$  ανηγμένες στροφές ( $\theta = \frac{T_t}{T_{ref}}$  και  $\delta = \frac{P_t}{P_{ref}}$ ,  $T_{ref}$ ,  $P_{ref}$  συνθήκες αναφοράς συνήθως ατμοσφαιρικές). Με βάση αυτά τα δεδομένα μπορεί να βρεθεί για οποιοδήποτε σημείο λειτουργίας τα χαρακτηριστικά μεγέθη του συμπιεστή.

### Στρόβιλος

Ο στρόβιλος αναλαμβάνει την εκτόνωση του αέρα μετά την συμπίεση στον συμπιεστή και την αύξηση της θερμοκρασίας του στον θάλαμο καύσης.



Εικόνα 6-26 : Εικονίδιο του στρόβιλου στο Gatecycle

Για τον στρόβιλο ισχύουν, αν 3 είσοδος και 4 έξοδος:  $\eta_{t-t,T} = \frac{T_{t3} - T_{t4}}{T_{t3} - T_{t4}'}$  και

$$\frac{T_{t4}'}{T_{t3}} = \left(\frac{1}{\pi_T}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \left(\frac{P_{t4}}{P_{t3}}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \text{ και συνολικά } T_{t4} = T_{t3} \left[ 1 - \frac{1}{\eta_{isT}} \left[ 1 - \left(\frac{P_{t4}}{P_{t3}}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] \right]. \text{ Επομένως το}$$

αποδιδόμενο έργο είναι  $W_T = c_{p\text{καυσαερίου}} (T_{t3} - T_{t4})$  [kJ/kg διακινούμενου καυσαερίου] και η αποδιδόμενη ισχύς  $P_T = \dot{m}_{\text{καυσαερίου}} c_{p\text{καυσαερίου}} (T_{t3} - T_{t4})$ . Ο λόγος πίεσης του στρόβιλου είναι μικρότερος από αυτόν του συμπιεστή, γιατί στον θάλαμο καύσης του αεριοστρόβιλου υπάρχουν πάντα απώλειες που μειώνουν την πίεση εισόδου και στην έξοδο ενδεχομένως

υπάρχουν κάποιες απώλειες πίεσης. Ακόμα  $P_{t\text{εξόδου}} = P_{\text{εξόδου}} \left[ 1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$ , όπου  $P_{\text{εξόδου}}$

συνήθως ατμοσφαιρική πίεση και  $M = \frac{V}{\sqrt{\gamma RT}}$ , αριθμός Mach. Παρ' όλα αυτά, επειδή η

ταχύτητα εξόδου είναι μικρή στους βιομηχανικούς αεριοστρόβιλους, μπορεί να θεωρηθεί προσεγγιστικά ότι  $P_{t\text{εξόδου}} = P_{\text{εξόδου}}$ . Για την λειτουργία του στρόβιλου στο Gatecycle απαιτούνται η πίεση εξόδου, η οποία όμως μπορεί να οριστεί και από τα στοιχεία που τοποθετούνται στην πορεία των καυσαερίων μετά τον στρόβιλο, και :

- Ισεντροπικό βαθμό απόδοσης

- Πολυτροπικό βαθμό απόδοσης  $\eta_{PT}$ , όπου  $\frac{T_{t4}}{T_{t3}} = \pi_T^{\frac{n-1}{n}} = \left(\frac{P_{t4}}{P_{t3}}\right)^{\frac{n-1}{n}}$  και

$$\frac{n-1}{n} = \frac{\gamma-1}{\gamma \cdot \eta_{PC}}$$

- Αποδιδόμενη ισχύ

Και ο στρόβιλος χαρακτηρίζεται από έναν χάρτη που συνδέει τα ίδια μεγέθη (ανηγμένη παροχή, ανηγμένες στροφές, βαθμό απόδοσης και λόγο πίεσης) με την διαφορά ότι για το μεγαλύτερο μέρος του φορτίου ο χάρτης αποτελείται από μια χαρακτηριστική που δηλώνει σταθερή ανηγμένη παροχή για διάφορους λόγους πίεσης. Αυτό συμβαίνει γιατί η παροχή στους σύγχρονους στρόβιλους είναι στραγγαλισμένη στο μεγαλύτερο μέρος του πεδίου των χαρακτηριστικών τους και έτσι δεν μπορεί να μεταβληθεί. Ωστόσο ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης μεταβάλλεται με τον λόγο πίεσης και τις ανηγμένες στροφές.

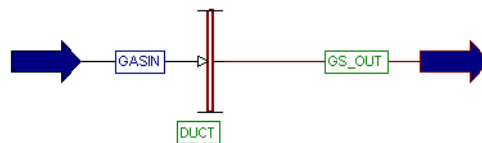
Επομένως για τον ακριβή υπολογισμό της συμπεριφοράς ενός αεριοστρόβιλου απαιτείται γνώση του χάρτη του συμπιεστή και του στρόβιλου. Ωστόσο επειδή αυτό δεν είναι δυνατό στην παρούσα εργασία θεωρήθηκε ότι ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης δεν μεταβάλλεται με μεταβολές της ανηγμένης παροχής, λόγου πίεσης και ανηγμένων στροφών (οι στροφές της μηχανής μπορεί να μην αλλάζουν ενδεχομένως όμως να αλλάξει η θερμοκρασία).

Ακόμα για την σύζευξη συμπιεστή και στρόβιλου πρέπει να ισχύει η σχέση συμβιβαστότητας παροχών δηλαδή:

$$q_T = q_C \frac{1}{\pi_c} \frac{1}{1 - K_b} \sqrt{\frac{T_{t3}}{T_{t1}}}$$

Όπου  $K_b$  απώλειες στον θάλαμο καύσης.

#### Αεραγωγοί



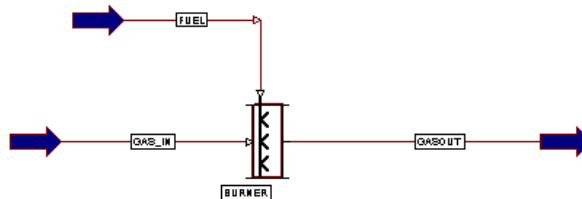
Εικόνα 6-27 : Εικονίδιο των αεραγωγών στο Gatecycle

Οι αεραγωγοί χρησιμοποιούνται για να μοντελοποιήσουν στο Gatecycle απώλειες πίεσης στο ρεύμα αερίων καυσαερίων. Η επιθυμητή πτώση πίεσης δίνεται σαν δεδομένο. Οι απώλειες πίεσης χρησιμοποιήθηκαν για την μοντελοποίηση της συμπεριφοράς των φίλτρων των αεριοστρόβιλων καθώς με την πάροδο του χρόνου οι απώλειες πίεσης αυξάνονται λόγω επικαθήσεων σκόνης και σωματιδίων. Για την εκτίμηση της συμπεριφοράς του αεριοστρόβιλου :

- Τίθεται μειωμένη πίεση εισόδου καθώς υπάρχουν μεγαλύτερες απώλειες, άρα  $p_{t1νέο}$  μικρότερο.
- Λόγω των απωλειών μειώνεται η αναρροφούμενη παροχή. Αυτό συμβαίνει γιατί οι συμπιεστές αναρροφούν σταθερή παροχή όγκου για σταθερές στροφές. Άρα από τις ονομαστικές συνθήκες εισόδου μπορεί να βρεθεί ο ειδικός όγκος του αέρα,  $v$  [ $m^3/kg$ ], από ψυχομετρικό διάγραμμα για την συγκεκριμένη πίεση. Από την ονομαστική παροχή μάζας  $\dot{m}$  [ $kg/sec$ ], μπορεί να βρεθεί η παροχή όγκου  $\dot{V} = v \cdot \dot{m}$  [ $m^3/sec$ ] που είναι σταθερή υπό την προϋπόθεση ότι δεν αλλάζουν οι στροφές, κάτι που συμβαίνει σε αεριοστρόβιλους απλής ατράκτου άμεσα συνδεδεμένους σε γεννήτρια. Κάνοντας την παραδοχή ότι ισχύει η καταστατική εξίσωση:  $P_1 \cdot v_1 = P_2 \cdot v_2$ . Οπότε για μειωμένη πίεση εισόδου  $P_2$  αυξάνεται ο ειδικός όγκος και μειώνεται η παροχή μάζας

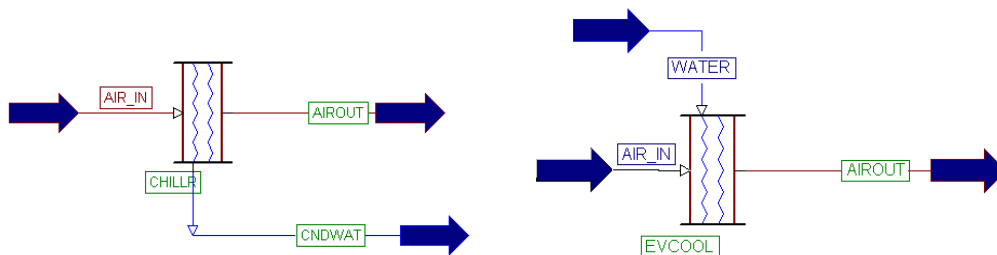
$\dot{m}_2 = \frac{\dot{V}}{v_2}$ . Στη συνέχεια υπολογίζονται τα υπόλοιπα μεγέθη του αεριοστροβίλου ή του συνδυασμένου κύκλου. Ωστόσο, δεδομένου ότι αλλάζει η παροχή, θα αλλάξει και ο λόγος πίεσης και ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης, σύμφωνα με τον χάρτη του συμπιεστή.

Εκτός από τους απλούς αεραγωγούς, υπάρχει και η καύση σε αεραγωγούς (συμπληρωματική καύση duct firing). Σε αυτήν την περίπτωση προσδιορίζεται η θερμοκρασία του καυσαερίου μετά την καύση, ή η ποσότητα του καυσίμου, ή η θερμοκρασιακή άνοδος.



Εικόνα 6-28 : Εικονίδιο της καύσης σε αεραγωγούς (duct firing) στο Gatecycle

Συστήματα ψύξης εισόδου του αεριοστροβίλου, ψύκτες και εξατμιστές (chillers – evaporators)



Εικόνα 6-29 : Εικονίδιο του ψύκτη (αριστερά) και εξατμιστή (δεξιά) στο Gatecycle

Και τα δυο συστήματα αποσκοπούν στη μείωση της θερμοκρασίας του εισερχόμενου αέρα στον αεριοστροβίλο. Με αυτόν τον τρόπο μειώνεται ο ειδικός όγκος του αέρα. Όπως αναφέρθηκε πιο πριν, οι συμπιεστές αναρροφούν σταθερή παροχή όγκου για σταθερές στροφές και από τις ονομαστικές συνθήκες εισόδου μπορεί να βρεθεί ο ειδικός όγκος του αέρα,  $v_1$  [m<sup>3</sup>/kg], από ψυχομετρικό διάγραμμα για την συγκεκριμένη πίεση η παροχή όγκου  $\dot{V} = v \cdot \dot{m}$  [m<sup>3</sup>/sec] που είναι σταθερή υπό την προϋπόθεση ότι δεν αλλάζουν οι στροφές. Μετά την ψύξη του εισερχόμενου αέρα ο ειδικός του όγκος  $v_2$  μειώνεται. Οπότε για τον

ψυχρό αέρα η παροχή μάζας αυξάνεται  $\dot{m}_2 = \frac{\dot{V}}{v_2}$ , και ο λόγος πίεσης και ο ισεντροπικός

βαθμός απόδοσης.

Για τον ψύκτη (chiller) η απαιτούμενη ψυκτική ισχύς είναι  $Q_{chiller} = \dot{m}_{air} [(h_{in} - h_{out}) - (W_1 - W_2)h_{water}]$ , όπου  $h$  ενθαλπία [kJ/kg dry air] και  $W$  απόλυτη υγρασία [g H<sub>2</sub>O/kg dry air] (ότι και το  $x_{H2O}$ ). Η ενθαλπία και η απόλυτη υγρασία του αέρα μπορούν να βρεθούν από ψυχομετρικό διάγραμμα. Σε περίπτωση όπου δεν γίνεται συμπύκνωση, ο όρος  $(W_1 - W_2)h_{water}$  παραλείπεται. Απαραίτητος είναι ο συντελεστής συμπεριφοράς της ψυκτικής εγκατάστασης (Coefficient of performance – COP) που δηλώνει



το απαιτούμενο μηχανικό έργο για την επίτευξη του ψυκτικού αποτελέσματος. Έτσι

$$P_{chiller} = \frac{Q_{chiller}}{COP}. \text{ Η θερμοκρασία εξόδου του αέρα, η μεταβολή της σχετικής υγρασίας και ο}$$

συντελεστής συμπεριφοράς είναι απαραίτητα στοιχεία για την λειτουργία του ψύκτη στο Gatecycle.

Στον εξατμιστή εγχύεται ποσότητα νερού  $m_{water}$  συγκεκριμένης θερμοκρασίας που αυξάνει την υγρασία του εισερχόμενου αέρα. Στην ποσότητα του εισερχόμενου αέρα  $m_{in}$  περιλαμβάνεται ο ξηρός αέρας και η υγρασία του δηλαδή  $m_{in} = m_{dry\ air}(W+1)$ , όπου  $W$  απόλυτη υγρασία [g H<sub>2</sub>O/kg dry air]. Ισχύει αδιαβατική ανάμειξη των ρευμάτων δηλαδή:  $\dot{m}_{dryair} \cdot h_{in} + \dot{m}_{water} \cdot H_{water} = \dot{m}_{dryair} \cdot h_{out}$  και  $\dot{m}_{dryair} \cdot W_{in} + \dot{m}_{water} = \dot{m}_{dryair} \cdot W_{out}$ . Απ' αυτές τις σχέσεις μπορεί να προσδιοριστεί η κατάσταση του εξερχόμενου αέρα και με ψυχομετρικό διάγραμμα μπορεί να βρεθεί η θερμοκρασία του εξερχόμενου αέρα. Στη συνέχεια όμως θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν η μεταβολή της σύστασης του αέρα.

## 7.Μοντελοποίηση μονάδων

### 7.1 Μονάδα 4 ΑΗΣ Λαυρίου

Η μονάδα 4 του ΑΗΣ Λαυρίου είναι μια μονάδα συνδυασμένου κύκλου συνολικής ονομαστικής ισχύος περίπου 560000KW και αποτελείται από :

- τρεις αεριοστροβίλους τύπου EGT PG 9171 E με τις γεννήτριές τους
- τρεις λέβητες ανάκτησης θερμότητας, ένα για κάθε αεριοστρόβιλο
- έναν ατμοστρόβιλο ALSTOM με την γεννήτριά του

Οι αεριοστρόβιλοι λειτουργούν κανονικά με φυσικό αέριο, αλλά μπορούν να λειτουργήσουν και με ελαφρύ πετρέλαιο (το οποίο έχει υποστεί επεξεργασία για να απομακρυνθούν μέταλλα όπως το βανάδιο, το νάτριο, το κάλιο κλπ που προκαλούν ενώσεις και διαβρώνουν τα μέταλλα του αεριοστροβίλου) σε περίπτωση προβλήματος στο σύστημα τροφοδοσίας του φυσικού αερίου. Οι αεριοστρόβιλοι διαθέτουν συστήματα ελέγχου της θερμοκρασίας για την καλή λειτουργία των στροβίλων και για την κατά το δυνατό μείωση των οξειδίων του αζώτου. Η έξοδος των καυσαερίων του κάθε αεριοστροβίλου οδηγείται σε ένα λέβητα ανάκτησης θερμότητας, ενώ υπάρχει διάφραγμα (damper) με το οποίο μπορεί να γίνει η εκτροπή των καυσαερίων και το οποίο επιτρέπει στον κάθε αεριοστρόβιλο να λειτουργεί σε ανοικτό κύκλο, δηλαδή να απορρίπτει τα καυσαέρια στην ατμόσφαιρα.

Στον λέβητα ανάκτησης υπάρχουν δυο κυκλώματα νερού/ατμού, ένα υψηλής και ένα χαμηλής πίεσης. Η ροή και η θερμοκρασία των καυσαερίων αλλά και η πίεση και η θερμοκρασία του κύριου ατμού αλλάζουν ανάλογα με το φορτίο της εγκατάστασης. Η τελική ρύθμιση της θερμοκρασίας του ατμού γίνεται με ψεκάσμο. Επίσης υπάρχει η δυνατότητα απόρριψης του ατμού στον συμπυκνωτή/ψυγείο της εγκατάστασης σε κάποια στάδια της λειτουργίας της εγκατάστασης (όπως π.χ. κατά την φάση εκκίνησης)

Ο ατμοστρόβιλος αποτελείται από δυο τμήματα: ένα τμήμα υψηλής πίεσης ατμού και ένα χαμηλής πίεσης. Στο κάθε τμήμα συγκεντρώνεται η αντίστοιχη ατμοπαραγωγή κάθε λέβητα ανάκτησης θερμότητας. Ο υπέρθερμος ατμός υψηλής πίεσης αφού εκτονωθεί στις βαθμίδες υψηλής πίεσης αναμειγνύεται με τον ατμό χαμηλής πίεσης και εκτονώνεται τελικά στις βαθμίδες χαμηλής πίεσης μέχρι την πίεση του συμπυκνωτή. Οι βαθμίδες υψηλής πίεσης του ατμοστροβίλου λειτουργούν με την μέθοδο της ολισθαίνουσας πίεσης ατμού. Οι βαθμίδες χαμηλής πίεσης είναι συμμετρικής ροής και λειτουργούν με σταθερή πίεση.

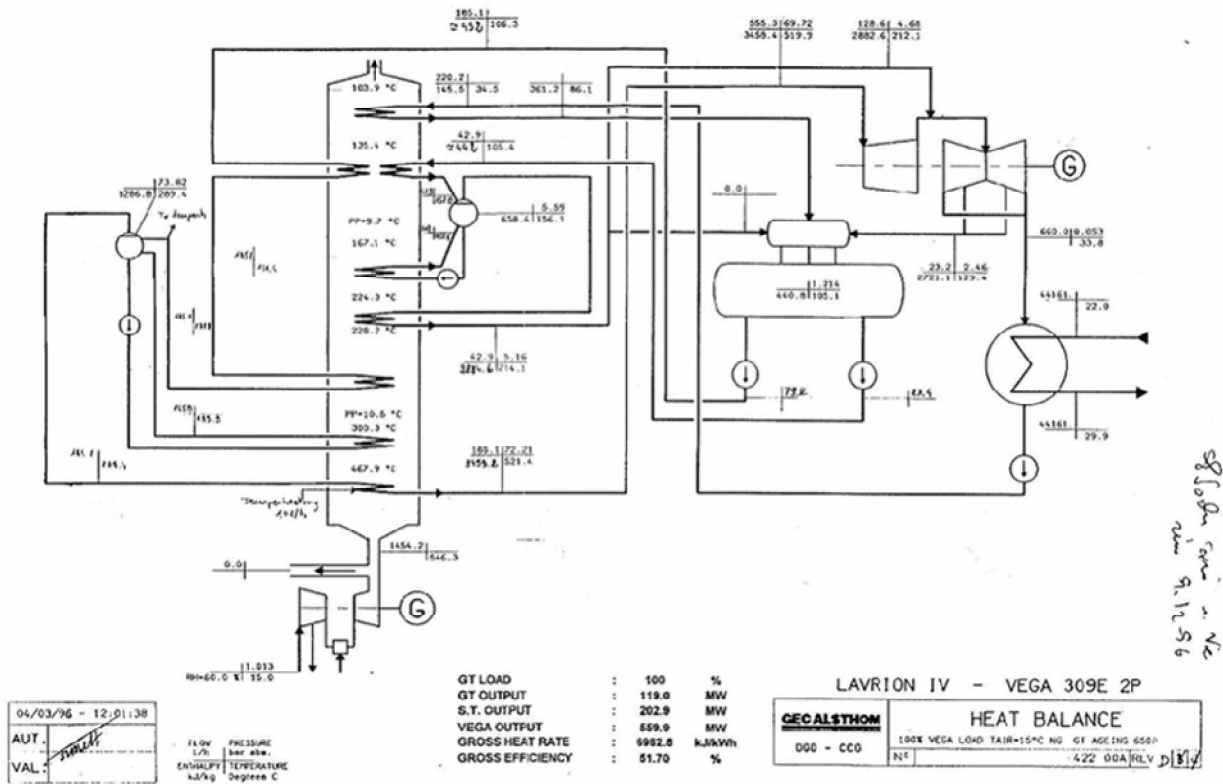
Ο συμπυκνωτής χρησιμοποιεί για τη συμπύκνωση του ατμού θαλασσινό νερό, ενώ υπάρχει και σύστημα καθαρισμού των επιφανειών με σφαιρίδια. Απλοποιημένο διάγραμμα της εγκατάστασης με τα προαναφερθέντα στοιχεία παρουσιάζεται παρακάτω.

Ακόμα η γεννήτρια και η διεγέρτρια στρέφονται στις 3000rpm, ενώ ψύχονται με αέρα, ο οποίος κυκλοφορεί σε κλειστό κύκλωμα, ο οποίος με τη σειρά του ψύχεται από δυο εναλλάκτες θερμότητας νερού-αέρα.

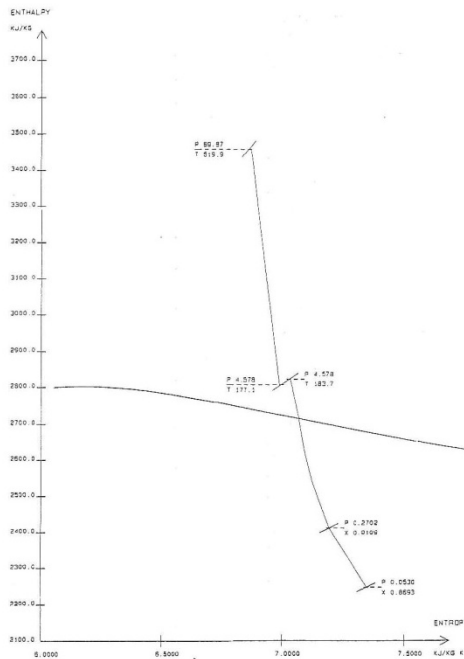
Η αλλαγή του φορτίου γίνεται πρώτα στους αεριοστροβίλους και μετά ακολουθεί ο ατμοστρόβιλος.

Ο έλεγχος της μονάδας γίνεται μέσω του σύγχρονου καταναμημένου συστήματος (DCS) του οίκου CEGELEC, το οποίο εποπτεύει τα επιμέρους συστήματα ελέγχου Speedtronic των τριών αεριοστροβίλων και Microtec για τον έλεγχο του ατμοστροβίλου.

3 similar boilers



Εικόνα 7-1 : Διάγραμμα εγκατάστασης της μονάδας 4 ΑΗΣ Λαυρίου



Εικόνα 7-2 : Εκτόνωση στον ατμοστρόβιλο της μονάδας 4 ΑΗΣ Λαυρίου

Τα βασικά στοιχεία της μονάδας αναφέρονται στον παρακάτω πίνακα:

Δεδομένα	$\dot{m}$	p	T	Άλλο
Στοιχεία καυσαερίου των αεριοστροβίλων	1454,2t/h	1,04 bar	546,3 °C	
Τροφοδοτικό νερό στην έξοδο του οικονομητήρα	220,2t/h	2,5bar	86°C	
Συνθήκες τροφοδοτικού δοχείου		1,214bar	105,1°C	
Πίεση του κάθε κυκλώματος στην έξοδο των αντλιών		Y-Π 79,2bar X-Π 23,4bar		
Έξοδος νερού από τον πρώτο οικονομητήρα της Y-Π			156,4°C	
Έξοδος καυσαερίου από τον δεύτερο οικονομητήρα Y-Π			228,2°C	
Έξοδος υπέρθερμου ατμού από τον υπερθερμαντή Y-Π	185,1t/h	72,21bar	521,4°C	
Έξοδος νερού από τον οικονομητήρα της X-Π			157°C	
Έξοδος υπέρθερμου ατμού από τον υπερθερμαντή X-Π	42,9t/h	5,16bar	214,1°C	
Είσοδος ατμού Y-Π στον ατμοστρόβιλο Y-Π	555,3t/h	69,72bar	519,9°C	
Έξοδος ατμού από τον στρόβιλο Y-Π		4,5bar	177°C	
Χαρακτηριστικά ατμού X-Π πριν την ανάμειξή του στην έξοδο του ατμοστροβίλου Y-Π	128,7t/h	4,68bar	212°C	
Απομάστευση από τον στρόβιλο X-Π	23,2t/h	2,46bar	129°C	
Έξοδος από τον στρόβιλο X-Π /κενό συμπυκνωτή		0,053bar		x=0,8693
Απώλειες πίεσης στο κύκλωμα αέρα-καυσαερίου	Είσοδος αέρα 11,8 mbar, Έξοδος καυσαερίων από τον αεριοστρόβιλο 12,4mbar, Λέβητας ανάκτησης 7,35mbar			
Τύμπανο Y-Π		73,82bar		
Τύμπανο X-Π		5,59bar		

Πίνακας 7-1 : Χαρακτηριστικά εγκατάστασης της μονάδας 4 ΑΗΣ Λαυρίου

Επισημαίνεται το γεγονός ότι στη μονάδα 4 του Λαυρίου υπάρχουν τρεις λέβητες ανάκτησης θερμότητας, γι' αυτό τον λόγο η παροχή του ατμού Y-Π στην είσοδο του ατμοστροβίλου Y-Π είναι τριπλάσια της παροχής της εξόδου υπέρθερμου ατμού από τον υπερθερμαντή Y-Π. Το ίδιο συμβαίνει και στην παροχή της X-Π.

Αρχικά σχεδιάστηκε το διάγραμμα της εγκατάστασης της μονάδας 4 του ΑΗΣ Λαυρίου στο πρόγραμμα GateCycle και εισήχθησαν τα παραπάνω δεδομένα. Επίσης ρυθμίστηκαν οι υπόλοιπες παράμετροι του προγράμματος (όπως βαθμοί απόδοσης γεννητριών), ούτως ώστε το μοντέλο που σχεδιάστηκε να αποδίδει 550,2MW με βαθμό απόδοσης 50,8 σε συνθήκες περιβάλλοντος: θερμοκρασία 15°C, ατμοσφαιρική πίεση 1,0132bar (μια ατμόσφαιρα), σχετική υγρασία 60%, θερμοκρασία θαλάσσης (είσοδος ψυκτικού νερού στο ψυγείο/συμπυκνωτή) 22°C και κατανάλωση καυσίμου 7,6kg/sec ανά αεριοστρόβιλο (με θερμογόνο ικανότητα 47451 kJ/kg), όπως προβλέπει η σύμβαση του έργου δηλαδή. Μετά το μοντέλο αυτό ρυθμίστηκε στην παρούσα κατάσταση όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

	Δράσεις	Ελεγχόμενο μέγεθος			Εκτιμώμενη βελτίωση β.α.	
			Υπάρχουσα κατάσταση	Συμβατικές τιμές		Στόχος
1	Μείωση ιδιοκαταναλώσεων ηλεκτρικής ενέργειας	Ισχύς βοηθητικών / Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας βοηθητικών μονάδας	Ισχύς βοηθητικών ως 7,5MW / ημερήσια κατανάλωση ως 180MWH	7643KW σε μέγιστο φορτίο	Εξοικονόμηση ως και 5,5 MWH κατά μέσο όρο ημερησίως σε μηνιαία βάση σε σχέση με το 2005	0,05
2	Μείωση καταναλώσεων θερμότητας	1) Θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων 2) Ατμοπαραγωγή Υ-Π 3) Κενό συμπυκνωτή	1) Θερμοκρασία εξόδου καπνοδόχου 108-112°C 2) Παροχή ατμού <175t/h 3) 39,5mbar (αντί για 34,5) κενό σε πλήρες φορτίο, 13,5°C θερμοκρασία θάλασσας	1) Θερμοκρασία εξόδου καπνοδόχου 104°C 2) Παροχή ατμού 185t/h 3) 53mbar κενό σε πλήρες φορτίο, 22°C θερμοκρασία θάλασσας	1&2) επίτευξη ονομαστικών μεγεθών (θερμοκρασία εξόδου καπνοδόχου 104°C και παροχή ατμού 185t/h) 3) Δρ κενού συμπυκνωτή <3mbar	0,15

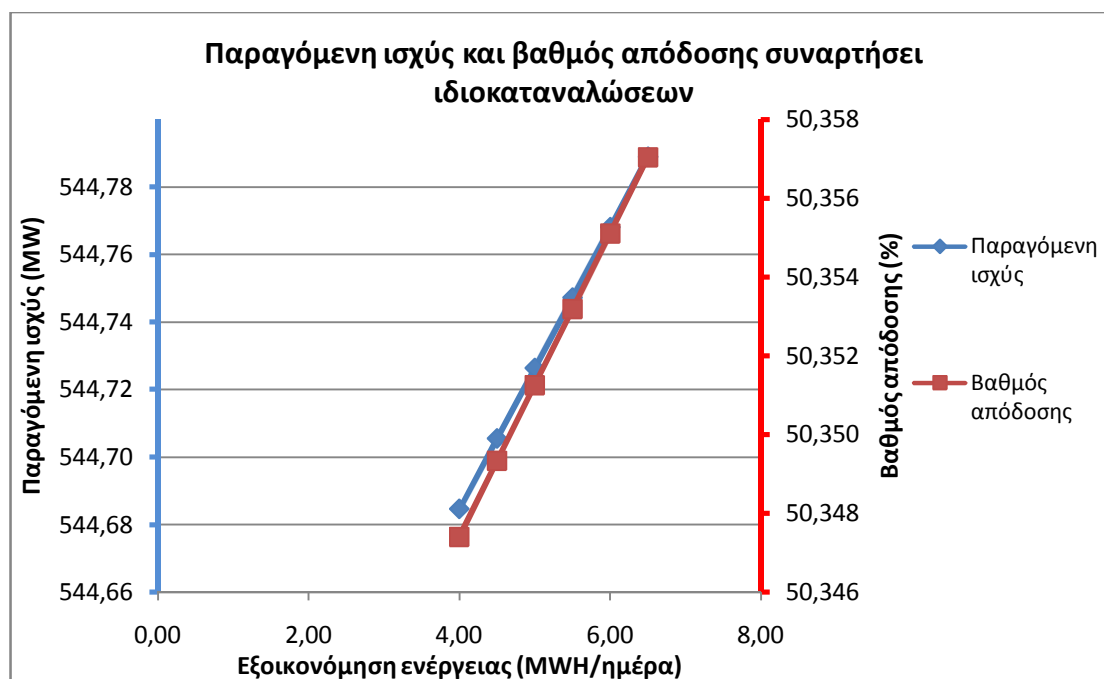
**Πίνακας 7-2 : Στοχοθετημένες δράσεις για την μονάδα 4 ΑΗΣ Λαυρίου**

Το μοντέλο που δημιουργήθηκε για την λειτουργία στην υπάρχουσα κατάσταση, προέκυψε από την μοντελοποίηση της μονάδας (η οποία έχει πραγματοποιηθεί με χρήση τιμών από τις δοκιμές παραλαβής), αφού ενσωματώθηκαν οι τιμές της υπάρχουσας κατάστασης για τα μεγέθη των υπό εξέταση δράσεων. Υπολογίστηκε ότι έχει παραγωγή ισχύος 544,518MW και απόδοση 50,33. Τονίζεται ότι η ατμοπαραγωγή χαμηλής πίεσης θεωρείται αμετάβλητη (Α' περίπτωση). Στην συνέχεια έγινε διερεύνηση της κάθε μια δράσης ξεχωριστά και υπολογισμός της αύξησης του βαθμού απόδοσης.

Από τα διαγράμματα που ακολουθούν είναι εμφανές ότι η μεγαλύτερη βελτίωση στον βαθμό απόδοσης της μονάδας 4 του Λαυρίου μπορεί να γίνει με αύξηση της ατμοπαραγωγής από τους 175t/h στους 185t/h ανά λέβητα ανάκτησης, καθώς ένα μεγάλο μέρος της ενέργειας των καυσαερίων μένει αναξιοποίητο. Επίσης μια μικρότερη αύξηση του βαθμού απόδοσης μπορεί να γίνει από την μείωση των απωλειών του ψυγείου, αλλά και με την εξοικονόμηση ενέργειας από τις ιδιοκαταναλώσεις του σταθμού.

Εξοικονόμηση (MWH/ημέρα)	Αύξηση ισχύος (MW)	Παραγόμενη ισχύς (MW)	Απόδοση (%)	Αύξηση βαθμού απόδοσης
0,00	0,00	544,52	50,332	0,00
4,00	0,17	544,68	50,347	0,015
4,50	0,19	544,71	50,349	0,017
5,00	0,21	544,73	50,351	0,019
<b>5,50</b>	<b>0,23</b>	<b>544,75</b>	<b>50,353</b>	<b>0,021</b>
6,00	0,25	544,77	50,355	0,023
6,50	0,27	544,79	50,357	0,025

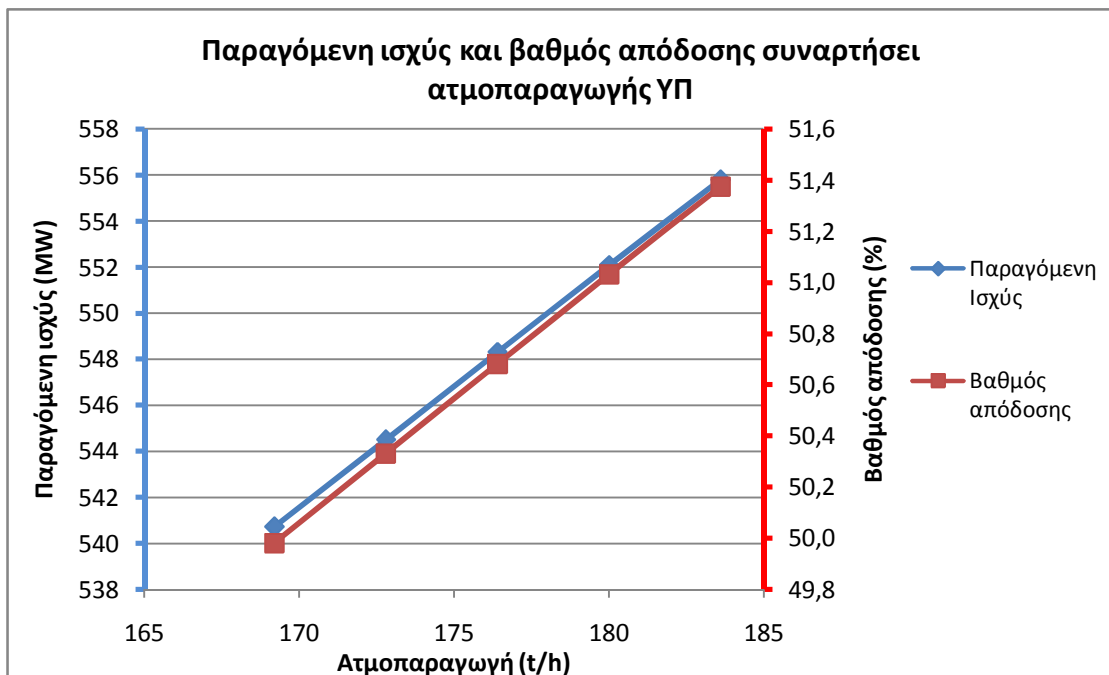
Πίνακας 7-3 : Αύξηση ισχύος με μείωση των ιδιοκαταναλώσεων



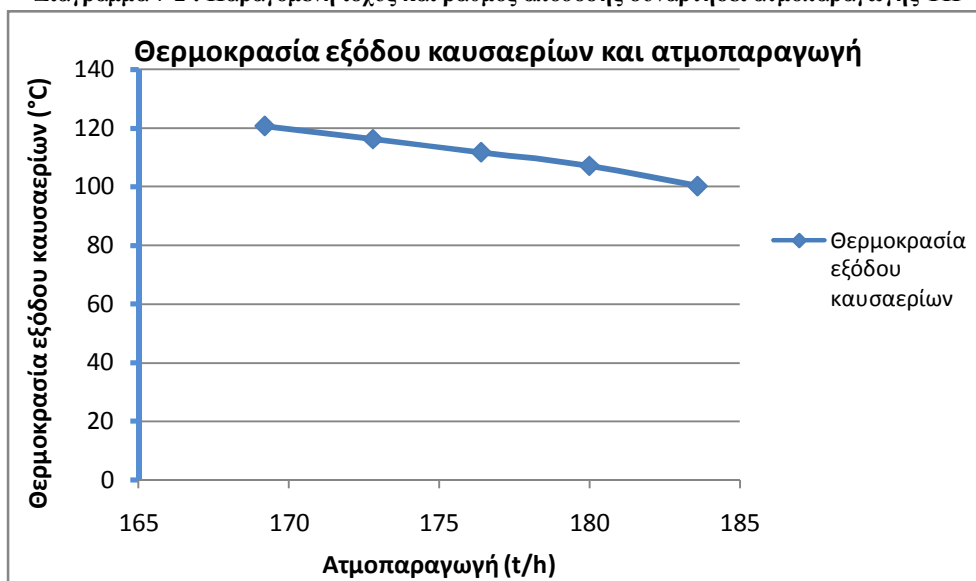
Διάγραμμα 7-1 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει ιδιοκαταναλώσεων

Ατμοπαραγωγή ΥΠ ανά λέβητα ανάκτησης		Θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων (°C)	Παραγόμενη ισχύς (MW)	Απόδοση (%)	Αύξηση βαθμού απόδοσης
kg/sec	t/h				
47	169,2	120,7	540,73	49,98	-0,35
48	172,8	116,2	544,52	50,33	0,00
49	176,4	111,7	548,32	50,68	0,35
50	180,0	107,1	552,09	51,03	0,70
<b>51</b>	<b>183,6</b>	<b>100,3</b>	<b>555,81</b>	<b>51,38</b>	<b>1,04</b>

Πίνακας 7-4 : Μεταβολή παραγόμενης ισχύος και βαθμού απόδοσης συναρτήσει μεταβολής της ατμοπαραγωγής ΥΠ



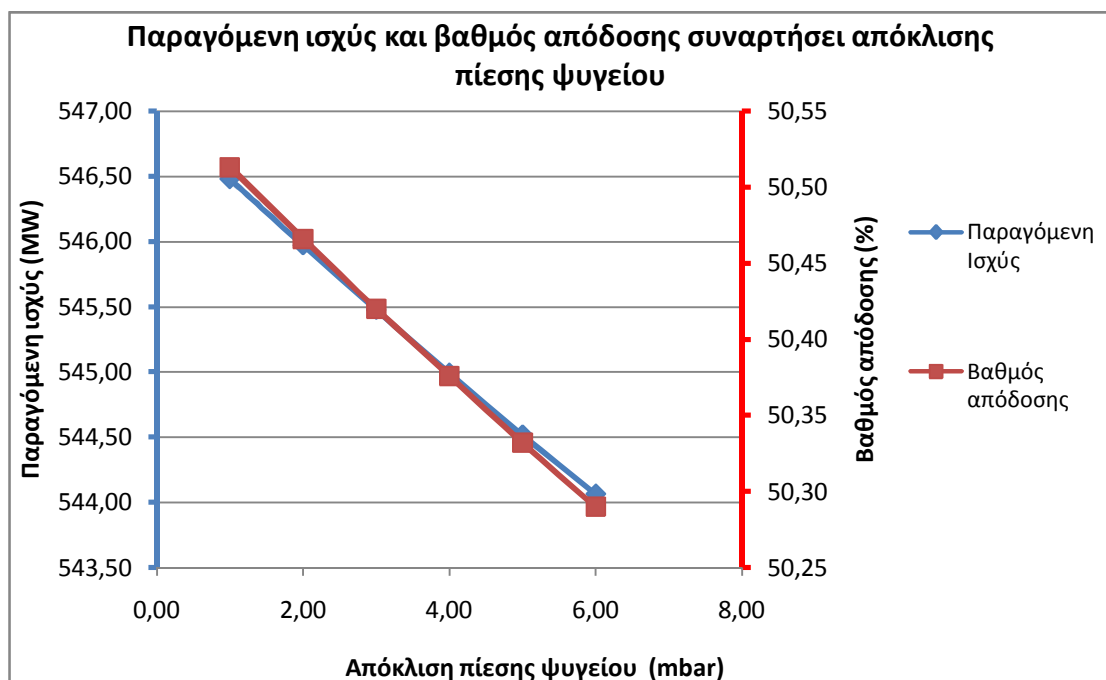
Διάγραμμα 7-2 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει ατμοπαραγωγής ΥΠ



Διάγραμμα 7-3 : Θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων συναρτήσει ατμοπαραγωγής ΥΠ

Πίεση ψυγείου (mbar)	Απόκλιση πίεσης ψυγείου (mbar)	Παραγόμενη ισχύς (MW)	Απόδοση (%)	Αύξηση βαθμού απόδοσης
40,50	6,00	544,06	50,29	-0,04
39,50	5,00	544,52	50,33	0,00
38,50	4,00	544,99	50,38	0,04
<b>37,50</b>	<b>3,00</b>	<b>545,48</b>	<b>50,42</b>	<b>0,09</b>
36,50	2,00	545,97	50,47	0,13
35,50	1,00	546,48	50,51	0,18

Πίνακας 7-5 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει μεταβολής της απόκλισης πίεσης του ψυγείου/ συμπυκνωτή



Διάγραμμα 7-4 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει απόκλισης πίεσης συμπυκνωτή

Συνοπτικά όλα τα αποτελέσματα των παραπάνω δράσεων φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. Όπως φαίνεται υπάρχουν αποκλίσεις μεταξύ των υπολογισμένων αποτελεσμάτων και των εκτιμήσεων, οι οποίες θα σχολιαστούν στην επόμενη ενότητα. Η συνολική αύξηση της απόδοσης υπολογίζεται στο 1,15%.



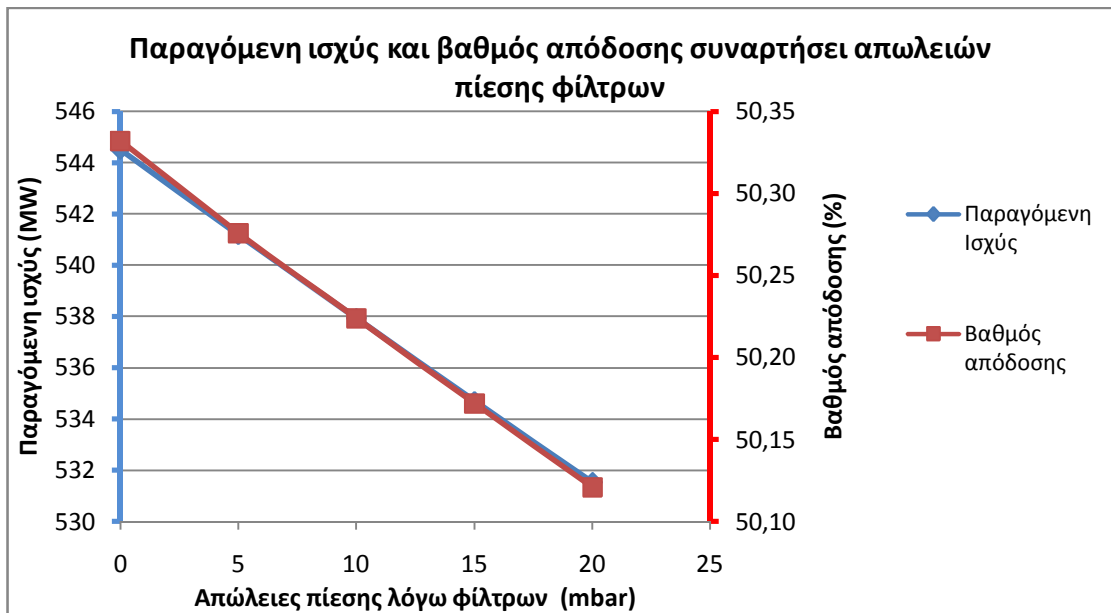
	Δράσεις	Ελεγχόμενο μέγεθος			Εκτιμώμενη βελτίωση β.α.	Υπολογισμένη βελτίωση β.α.
			Υπάρχουσα κατάσταση	Συμβατικές τιμές		
1	Μείωση ιδιοκαταναλώσεων ηλεκτρικής ενέργειας	Ισχύς βοηθητικών / Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας βοηθητικών μονάδας	Ισχύς βοηθητικών ως 7,5MW / ημερήσια κατανάλωση ως 180MWH	7643KW σε μέγιστο φορτίο	Εξοικονόμηση ως και 5,5 MWH κατά μέσο όρο ημερησίως σε μηνιαία βάση σε σχέση με το 2005	0,05 0,021
2	Μείωση καταναλώσεων θερμότητας	1) Θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων 2) Ατμοπαραγωγή Υ-Π 3) Κενό συμπυκνωτή	1) Θερμοκρασία εξόδου καπνοδόχου 108-112°C 2) Παροχή ατμού <175t/h 3) 39,5mbar (αντί για 34,5) κενό σε πλήρες φορτίο, 13,5°C θερμοκρασία θάλασσας	1) Θερμοκρασία εξόδου καπνοδόχου 104°C 2) Παροχή ατμού 185t/h 3) 53mbar κενό σε πλήρες φορτίο, 22°C θερμοκρασία θάλασσας	1&2) επίτευξη ονομαστικών μεγεθών (θερμοκρασία εξόδου καπνοδόχου 104°C και παροχή ατμού 185t/h) 3) Δρ κενού συμπυκνωτή <3mbar	0,15 1,13

**Πίνακας 7-6 : Παρουσίαση αποτελεσμάτων**

Εκτός από όλες τις παραπάνω δράσεις εξετάστηκε και η επίδραση των απωλειών στα φίλτρα εισόδου του αεριοστροβίλου και η απόφραξη των σωλήνων ψύξης του συμπυκνωτή (τούμπων).

Απώλειες φίλτρων (mbar)	Παραγόμενη Ισχύς (MW)	Απόδοση (%)	Μείωση βαθμού απόδοσης
0	544,52	50,33	0,00
5	541,20	50,28	-0,06
10	537,95	50,22	-0,11
15	534,71	50,17	-0,16
20	531,55	50,12	-0,21

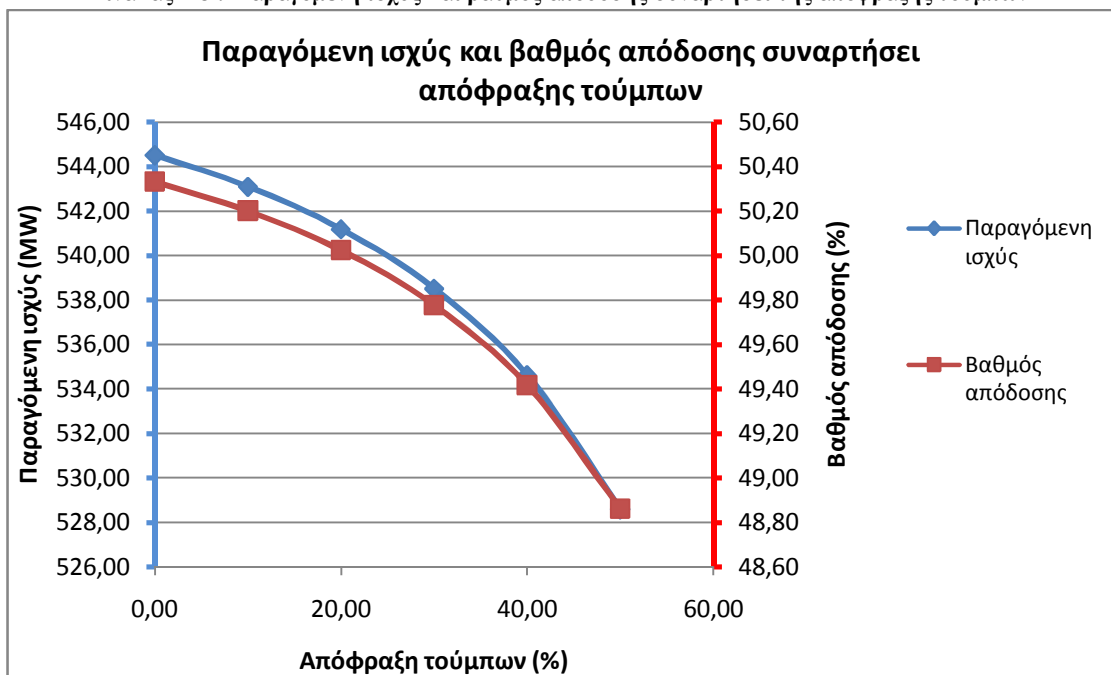
**Πίνακας 7-7 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει μεταβολής των απωλειών φίλτρων**



Διάγραμμα 7-5 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει απωλειών πίεσης φίλτρων

Απόφραξη τούμπων (%)	Παραγόμενη ισχύς (MW)	Απόδοση (%)	Πίεση ψυγείου
0,00	544,52	50,33	0,035
10,00	543,10	50,20	0,038
20,00	541,19	50,02	0,042
30,00	538,52	49,78	0,049
40,00	534,63	49,42	0,062
50,00	528,60	48,86	0,086

Πίνακας 7-8 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει της απόφραξης τούμπων



Διάγραμμα 7-6 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει της απόφραξης τούμπων

Αν θεωρήσουμε ότι η ατμοπαραγωγή της χαμηλής πίεσης μεταβάλλεται ούτως ώστε να έχουμε (περίπου) σταθερή θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων 108-112°C με μεταβαλλόμενη ατμοπαραγωγή υψηλής πίεσης (Β' περίπτωση), τότε οι στόχοι διαμορφώνονται ως εξής:

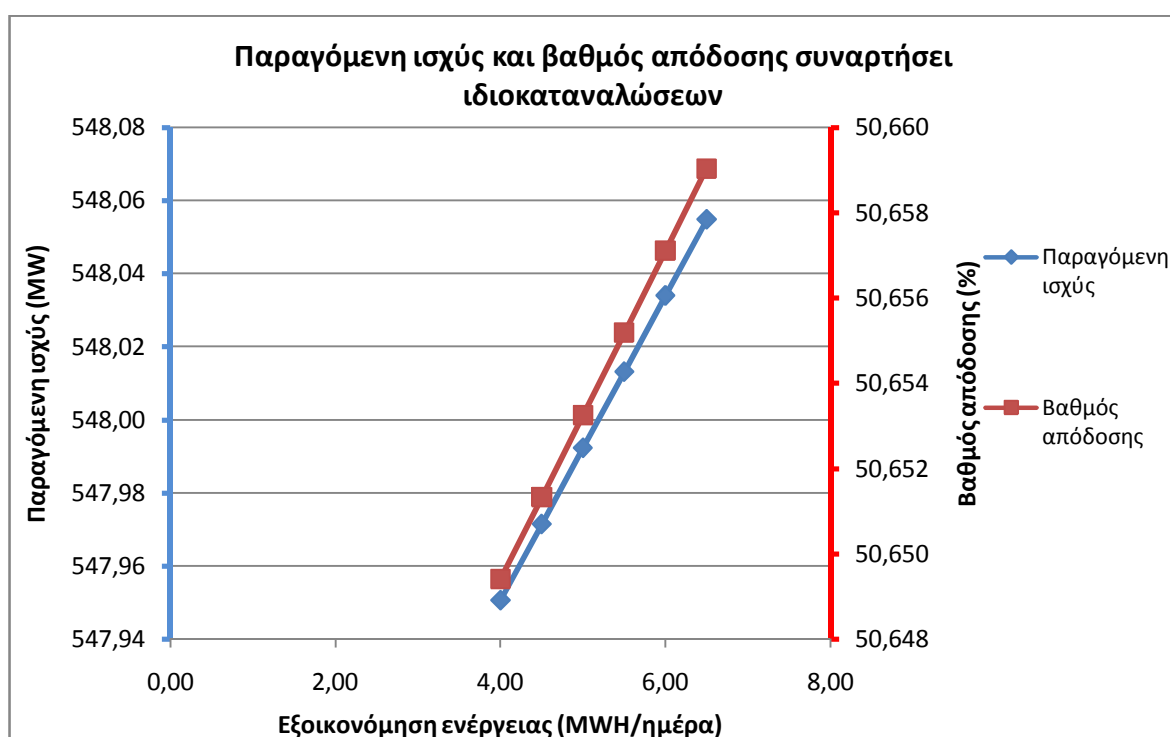
	Δράσεις	Ελεγχόμενο μέγεθος			Εκτιμώμενη βελτίωση β.α.	
			Υπάρχουσα κατάσταση	Συμβατικές τιμές		Στόχος
1	Μείωση ιδιοκαταναλώσεων ηλεκτρικής ενέργειας	Ισχύς βοηθητικών / Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας βοηθητικών μονάδας	Ισχύς βοηθητικών ως 7,5MW / ημερήσια κατανάλωση ως 180MWH	7643KW σε μέγιστο φορτίο	Εξοικονόμηση ως και 5,5 MWH κατά μέσο όρο ημερησίως σε μηνιαία βάση σε σχέση με το 2005	0,05
2	Μείωση καταναλώσεων θερμότητας	1) Θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων 2) Ατμοπαραγωγή Υ-Π 3) Κενό συμπυκνωτή	1) Θερμοκρασία εξόδου καπνοδόχου 108-112°C 2) Παροχή ατμού <175t/h 3) 39,5mbar (αντί για 34,5) κενό σε πλήρες φορτίο, 13,5°C θερμοκρασία θάλασσας	1) Θερμοκρασία εξόδου καπνοδόχου 104°C 2) Παροχή ατμού 185t/h 3) 53mbar κενό σε πλήρες φορτίο, 22°C θερμοκρασία θάλασσας	1) διατήρηση θερμοκρασιών εξόδου καπνοδόχου 2) επίτευξη ονομαστικών μεγεθών ατμοπαραγωγής ΥΠ 3) Δρ κενού συμπυκνωτή <3mbar	0,15

Πίνακας 7-9 : Στοχοθετημένες δράσεις για την μονάδα 4 ΑΗΣ Λαυρίου

Τότε το μοντέλο που προκύπτει θα έχει όλες τις τιμές ίδιες με τις συμβατικές, αλλά ατμοπαραγωγή υψηλής πίεσης 48kg/sec (172,8t/h), χαμηλής πίεσης 13,3kg/sec (47,98t/h) ανά λέβητα ανάκτησης και θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων 110°C θα αποδίδει ισχύ ίση με 547,784MW και βαθμό απόδοσης 50,63%. Οπότε αν επαναληφθούν όλοι οι παραπάνω υπολογισμοί:

Εξοικονόμηση (MWH/ημέρα)	Αύξηση ισχύος (MW)	Παραγόμενη ισχύς (MW)	Απόδοση (%)	Αύξηση βαθμού απόδοσης
0,00	0,00	547,78	50,634	0,000
4,00	0,17	547,95	50,649	0,015
4,50	0,19	547,97	50,651	0,017
5,00	0,21	547,99	50,653	0,019
<b>5,50</b>	<b>0,23</b>	<b>548,01</b>	<b>50,655</b>	<b>0,021</b>
6,00	0,25	548,03	50,657	0,023
6,50	0,27	548,05	50,659	0,025

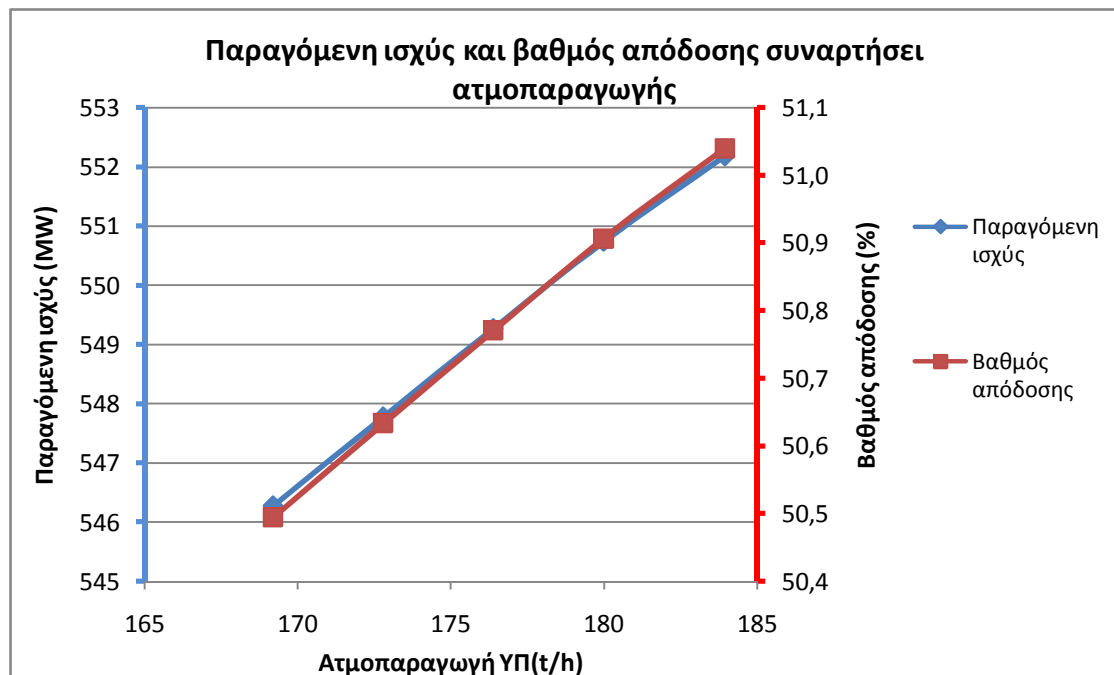
Πίνακας 7-10 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει ιδιοκαταναλώσεων



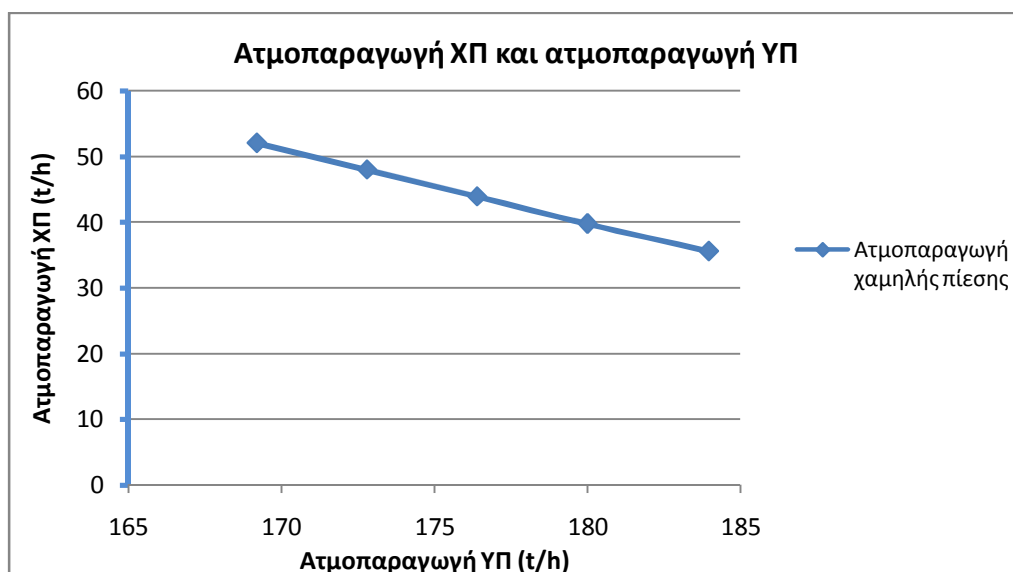
Διάγραμμα 7-7 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει ιδιοκαταναλώσεων

Ατμοπαραγωγή ΥΠ ανά λέβητα ανάκτησης		Θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων (°C)	Παραγόμενη ισχύς (MW)	Απόδοση (%)	Αύξηση βαθμού απόδοσης	Ατμοπαραγωγή ΧΠ ανά λέβητα ανάκτησης	
kg/sec	t/h					kg/sec	t/h
47	169,2	110	546,28	50,50	-0,14	14,5	52,06
48	172,8	110	547,78	50,63	0,00	13,3	47,99
49	176,4	110	549,27	50,77	0,14	12,2	43,92
50	180,0	110	550,70	50,91	0,27	11,1	39,78
<b>51</b>	<b>184,0</b>	<b>110</b>	<b>552,18</b>	<b>51,04</b>	<b>0,41</b>	<b>9,9</b>	<b>35,60</b>

Πίνακας 7-11 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει μεταβολής ατμοπαραγωγής ΥΠ



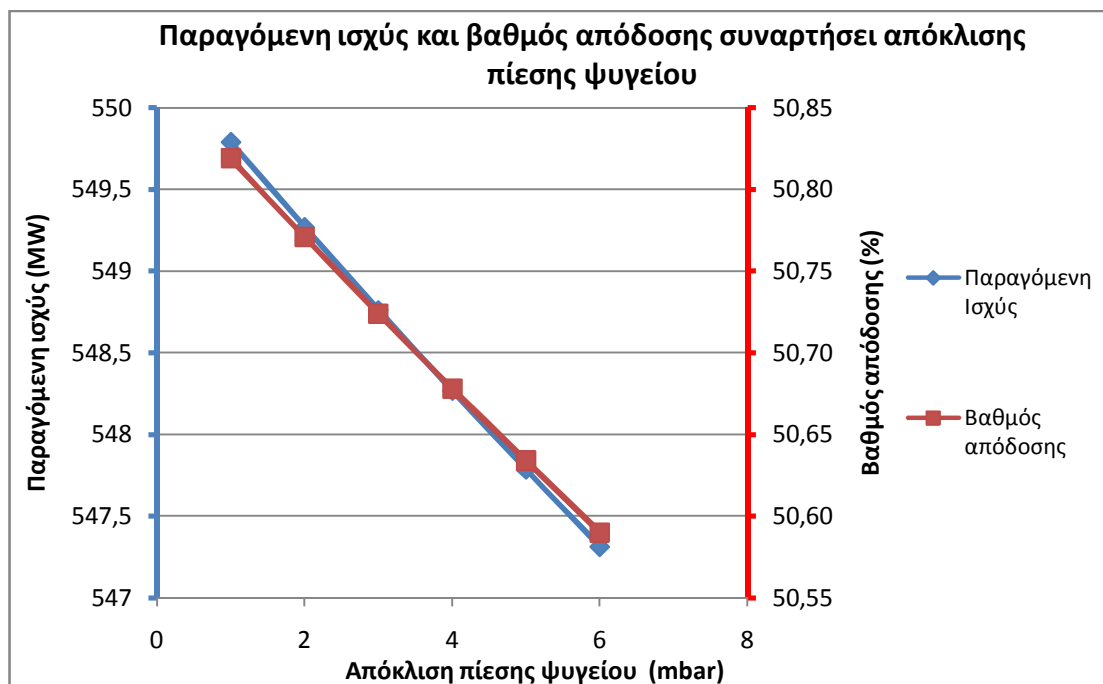
Διάγραμμα 7-8 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει ατμοπαραγωγής ΥΠ



Διάγραμμα 7-9 : Ατμοπαραγωγή ΧΠ συναρτήσει ατμοπαραγωγής ΥΠ

Πίεση ψυγείου (mbar)	Απόκλιση πίεσης ψυγείου	Παραγόμενη ισχύς (MW)	Απόδοση (%)	Αύξηση βαθμού απόδοσης
40,5	6	547,31	50,59	-0,04
39,5	5	547,78	50,63	0,00
38,5	4	548,27	50,68	0,04
<b>37,5</b>	<b>3</b>	<b>548,76</b>	<b>50,72</b>	<b>0,09</b>
36,5	2	549,27	50,77	0,14
35,5	1	549,79	50,82	0,19

Πίνακας 7-12 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει μεταβολής απόκλισης πίεσης ψυγείου



Διάγραμμα 7-10 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει απόκλισης πίεσης ψυγείου

	Δράσεις	Ελεγχόμενο μέγεθος			Εκτιμώμενη βελτίωση β.α.	Υπολογισμένη βελτίωση β.α.	
		Υπάρχουσα κατάσταση	Συμβατικές τιμές	Στόχος			
1	Μείωση ιδιοκαταναλώσεων ηλεκτρικής ενέργειας	Ισχύς βοηθητικών / Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας βοηθητικών μονάδας	Ισχύς βοηθητικών ως 7,5MW / ημερήσια κατανάλωση ως 180MWH	7643KW σε μέγιστο φορτίο	Εξοικονόμηση ως και 5,5 MWH κατά μέσο όρο ημερησίως σε μηνιαία βάση σε σχέση με το 2005	0,05	0,021
2	Μείωση καταναλώσεων θερμότητας	1) Θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων 2) Ατμοπαραγωγή Υ-Π 3) Κενό συμπυκνωτή	1) Θερμοκρασία εξόδου καπνοδόχου 108-112°C 2) Παροχή ατμού <175t/h 3) 39,5mbar (αντί για 34,5) κενό σε πλήρες φορτίο, 13,5°C θερμοκρασία θάλασσας	1) Θερμοκρασία εξόδου καπνοδόχου 104°C 2) Παροχή ατμού 185t/h 3) 53mbar κενό σε πλήρες φορτίο, 22°C θερμοκρασία θάλασσας	1) διατήρηση θερμοκρασιών εξόδου καπνοδόχου 2) επίτευξη ονομαστικών μεγεθών ατμοπαραγωγής ΥΠ 3) Δρ κενού συμπυκνωτή <3mbar	0,15	0,50

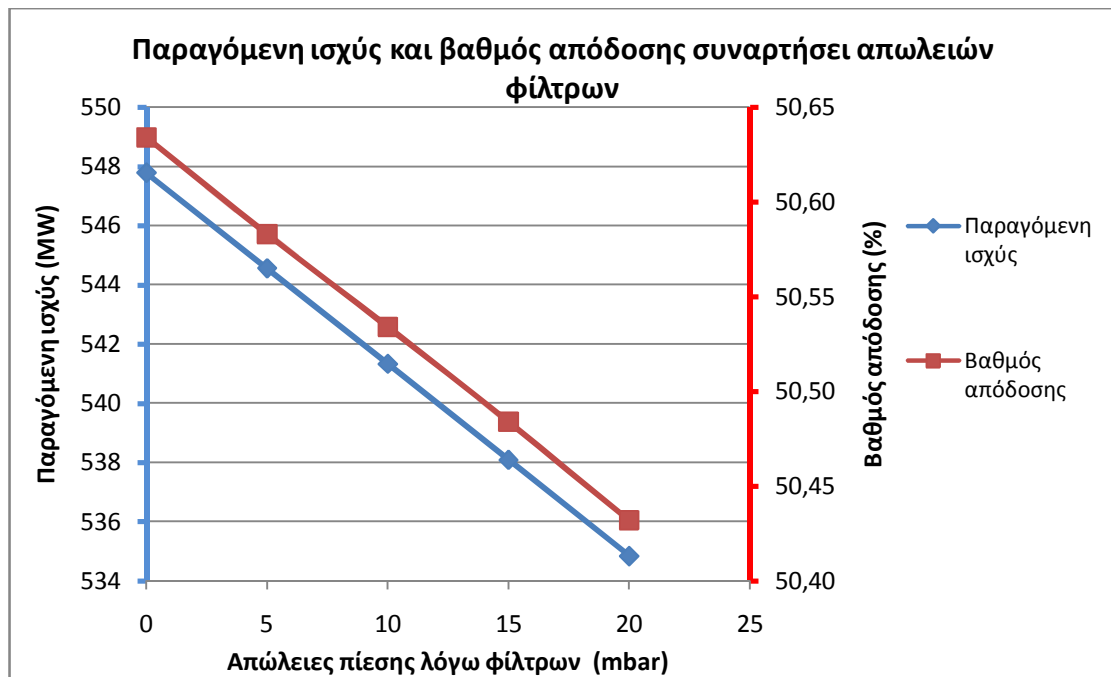
**Πίνακας 7-13 : Παρουσίαση αποτελεσμάτων**

Η συνολική αύξηση της απόδοσης με την προαναφερθείσα κατάσταση λειτουργίας (σταθερή θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων και μεταβαλλόμενη ατμοπαραγωγή ΧΠ) υπολογίζεται στο 0,52%.

Τέλος μελετήθηκε και η επίδραση των απωλειών στα φίλτρα εισόδου του αεριοστροβίλου. Όπως και πριν οι απώλειες πίεσης στην είσοδο του επηρεάζουν τελικά την πίεση εισόδου στον στρόβιλο και κατά συνέπεια την δυνατότητα απόδοσης έργου.

Απώλειες φίλτρων (mbar)	Παραγόμενη ισχύς (MW)	Απόδοση (%)	Μείωση βαθμού απόδοσης
0	547,78	50,63	0,00
5	544,56	50,58	-0,05
10	541,33	50,53	-0,10
15	538,09	50,48	-0,15
20	534,84	50,43	-0,20

Πίνακας 7-14 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει μεταβολής απωλειών φίλτρων

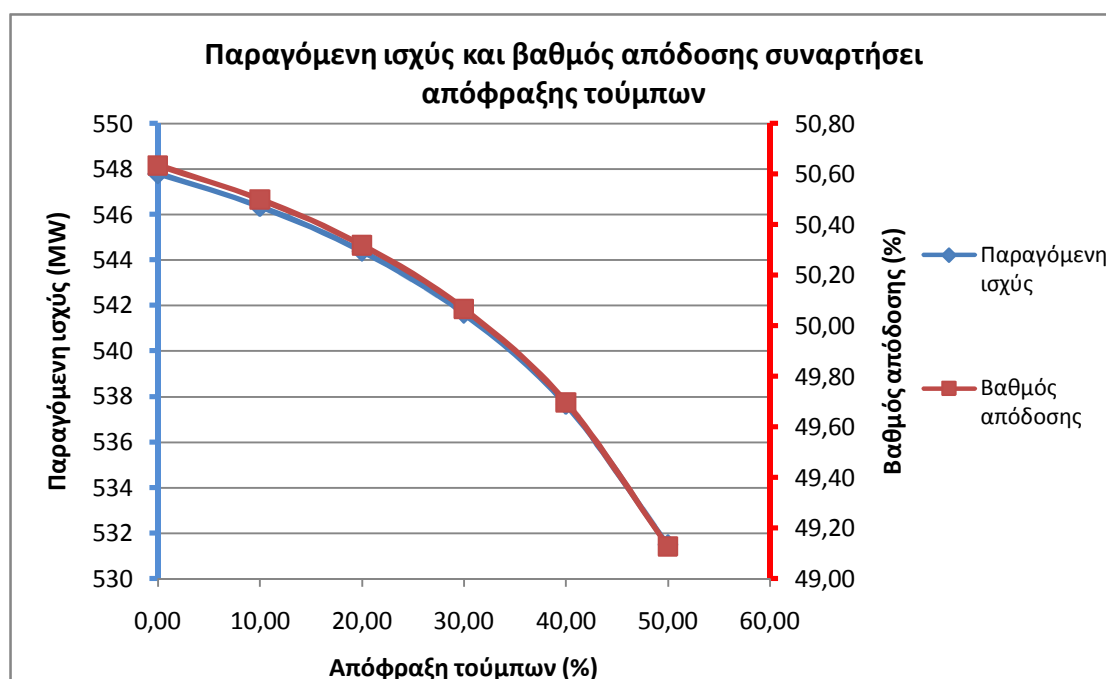


Διάγραμμα 7-11 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει απωλειών πίεσης φίλτρων



Απόφραξη τούμπων (%)	Παραγόμενη ισχύς (MW)	Απόδοση (%)	Πίεση ψυγείου
0,00	547,78	50,63	0,035
10,00	546,34	50,50	0,038
20,00	544,38	50,32	0,042
30,00	541,65	50,07	0,049
40,00	537,66	49,70	0,061
50,00	531,50	49,13	0,085

Πίνακας 7-15 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει της απόφραξης τούμπων



Διάγραμμα 7-12 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει της απόφραξης τούμπων

## Συμπεράσματα-προτάσεις

Όπως φαίνεται από τους παραπάνω πίνακες, υπάρχουν αποκλίσεις μεταξύ των υπολογισμένων αποτελεσμάτων και των εκτιμήσεων για τον βαθμό απόδοσης. Η μεγαλύτερη απόκλιση παρουσιάζεται στην εκτίμηση της αύξησης της ατμοπαραγωγής.

Για την αύξηση του βαθμού απόδοσης απαιτείται η αύξηση της ατμοπαραγωγής στα ονομαστικά μεγέθη. Επειδή όμως αυτό δεν είναι ίσως δυνατό, λόγω του γεγονότος ότι η μονάδα 4 του Λαυρίου δεν λειτουργεί συνεχώς σαν μονάδα βάσης, εναλλακτικές λύσεις είναι:

1. Η μείωση της απόκλισης πίεσης του ψυγείου και αύξηση της αποδοτικότητάς του, πράγμα που μπορεί να γίνει με τον καθαρισμό του από τις επικαθήσεις αλάτων στις επιφάνειες συναλλαγής θερμότητας

2. Η μείωση των ιδιοκαταναλώσεων που μπορεί να γίνει με την συντήρηση του υπάρχοντος εξοπλισμού ούτως ώστε να λειτουργεί πιο αποδοτικά αλλά και με την διακοπή της λειτουργίας ορισμένων βοηθητικών συστημάτων, όταν δεν χρειάζονται (όπως στα μερικά φορτία για παράδειγμα)

Τέλος σημαντική είναι η επίδραση της πτώσης πίεσης στα φίλτρα εισόδου του αεριοστροβίλου καθώς και μια μικρή, επιπλέον, πτώση πίεσης, λόγω των επικαθήσεων σκόνης και σωματιδίων στα φίλτρα, μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική πτώση της παραγόμενης ισχύος. Επομένως συνιστάται ο συχνός καθαρισμός τόσο των φίλτρων όσο και του αεριοστροβίλου.

## 7.2 Μονάδες 1 και 2 του ΑΗΣ Λαυρίου

### *Μονάδα 1 ΑΗΣ Λαυρίου*

Η μονάδα 1 του ΑΗΣ Λαυρίου είναι μια ατμοστροβλική μονάδα συνολικής ονομαστικής ισχύος περίπου 150000KW και αποτελείται από :

-ένα λέβητα του οίκου VKW

-έναν ατμοστρόβιλο AEG με τη γεννήτριά του

Ο λέβητας της μονάδας 1 είναι σταθερής πίεσης, φυσικής κυκλοφορίας με υπερπίεση εστίας. Η ονομαστική πίεση τυμπάνου είναι 162ata ενώ η μέγιστη συνεχής ατμοπαραγωγή είναι 475t/h. Το τμήμα υπέρθερμου ατμού περιλαμβάνει τρεις βαθμίδες υπερθέρμανσης με δυο ενδιάμεσα στάδια αφυπερθέρμανσης. Το τμήμα του ανάθερμου ατμού περιλαμβάνει μια βαθμίδα αγωγιμότητας με διάταξη αφυπερθέρμανσης. Η τελική θερμοκρασία του υπέρθερμου ατμού, όπως αναφέρθηκε, ελέγχεται με ψεκασμό (αφυπερθέρμανση), ενώ η θερμοκρασία του ανάθερμου μπορεί να ρυθμιστεί και με τον ανεμιστήρα ανακυκλοφορίας των καυσαερίων. Ο λέβητας είναι εφοδιασμένος με δώδεκα καυστήρες για την καύση πετρελαίου MAZOYT που είναι τοποθετημένοι στην μπροστινή πλευρά του λέβητα (μετωπική διάταξη). Οι καυστήρες είναι τύπου μηχανικού διασκορπισμού και λειτουργούν σε συνθήκες μεταβλητής πίεσης. Για τον αέρα καύσης υπάρχουν δυο ανεμιστήρες αξονικής ροής ενώ ο αέρας προθερμαίνεται σε δύο στάδια, με ατμό και με καυσαέρια.

Ο ατμοστρόβιλος της μονάδας είναι σταθερής πίεσης, δράσης και περιλαμβάνει τρεις βαθμίδες υψηλής, μέσης και χαμηλής πίεσης. Ο υπέρθερμος ατμός υψηλής πίεσης, αφού εκτονωθεί στις βαθμίδες υψηλής πίεσης, αναθερμαίνεται και μετά εκτονώνεται στις βαθμίδες μέσης και ακολούθως χαμηλής πίεσης. Η βαθμίδα χαμηλής πίεσης είναι διπλής εξόδου με συμπυκνωτή τύπου επιφανείας.

Η γεννήτρια της μονάδας είναι υδρογονόψυκτη στο στάτη και στο δρομέα της, η δε ψύξη του υδρογόνου γίνεται με κλειστό κύκλωμα ψυκτικού νερού. Παράλληλα συστήματα λαδιού στεγανοποίησης της γεννήτριας, καθαρισμού και ελέγχου του υδρογόνου συμπληρώνουν την εγκατάσταση.

Για τις μεταβατικές καταστάσεις (όπως τις εκκινήσεις και τις ανωμαλίες) υπάρχει διάταξη παράκαμψης του ατμού της βαθμίδας υψηλής πίεσης ικανότητας 100% της πλήρους ατμοπαραγωγής, ενώ υπάρχει και η δυνατότητα παράκαμψης του ατμού χαμηλής πίεσης μέχρι το 60% της πλήρους ατμοπαραγωγής.

## Μονάδα 2 ΑΗΣ Λαυρίου

Η μονάδα 2 του ΑΗΣ Λαυρίου είναι και αυτή μια ατμοστροβιλική μονάδα. Έχει συνολική ονομαστική ισχύ περίπου 300000KW και αποτελείται από :

-ένα λέβητα του οίκου STEIN INDUSTRIE

-έναν ατμοστρόβιλο ALSTHOM με τη γεννήτριά του

Ο λέβητας της μονάδας 2 είναι σταθερής πίεσης, φυσικής κυκλοφορίας με υπερπίεση εστίας. Η ονομαστική πίεση τυμπάνου είναι 178ata ενώ η μέγιστη συνεχής ατμοπαραγωγή είναι 945t/h. Το τμήμα υπέρθερμου ατμού περιλαμβάνει τρεις βαθμίδες υπερθέρμανσης με δυο ενδιάμεσα στάδια αφυπερθέρμανσης. Το τμήμα του ανάθερμου ατμού περιλαμβάνει μια βαθμίδα αγωγιμότητας με διάταξη αφυπερθέρμανσης. Η τελική θερμοκρασία του υπέρθερμου ατμού, όπως αναφέρθηκε, ελέγχεται με ψεκασμό (αφυπερθέρμανση) ενώ η θερμοκρασία του ανάθερμου μπορεί να ρυθμιστεί και με τον ανεμιστήρα ανακυκλοφορίας των καυσαερίων. Ο λέβητας είναι εφοδιασμένος με δεκαέξι καυστήρες για την καύση πετρελαίου MAZOYT που είναι τοποθετημένοι σε τέσσερα επίπεδα στις τέσσερις γωνίες του λέβητα (γωνιακή διάταξη). Οι καυστήρες είναι τύπου διασκορπισμού με ατμό και λειτουργούν σε συνθήκες μεταβλητής πίεσης. Για τον αέρα καύσης υπάρχουν δυο ανεμιστήρες αξονικής ροής ενώ ο αέρας προθερμαίνεται σε δύο στάδια, με ατμό και με καυσαέρια.

Ο ατμοστρόβιλος της μονάδας είναι σταθερής πίεσης, δράσης και περιλαμβάνει τρεις βαθμίδες υψηλής, μέσης και χαμηλής πίεσης. Ο υπέρθερμος ατμός υψηλής πίεσης, αφού εκτονωθεί στις βαθμίδες υψηλής πίεσης, αναθερμαίνεται και μετά εκτονώνεται στις βαθμίδες μέσης και ακολούθως χαμηλής πίεσης. Η βαθμίδα χαμηλής πίεσης έχει τρεις εξόδους προς το ψυγείο. Ο συμπυκνωτής είναι τύπου επιφανείας, διπλής ροής και ψύχεται με θαλασσινό νερό.

Η γεννήτρια της μονάδας είναι υδρογονόψυκτη στο στάτη και στο δρομέα της. Το τύλιγμα του στάτη ψύχεται επιπρόσθετα με απιονισμένο νερό ενώ υπάρχουν και συστήματα λαδιού στεγανοποίησης της γεννήτριας, καθαρισμού και ελέγχου του υδρογόνου που συμπληρώνουν την εγκατάσταση.

Ο ρυθμιστής στροφών του στροβίλου απαρτίζεται από ηλεκτρονικά και υδραυλικά μέσα για την ακριβή ρύθμιση των στροφών.

Για τις μεταβατικές καταστάσεις (όπως τις εκκινήσεις και τις ανωμαλίες υπάρχει διάταξη παράκαμψης του ατμού της βαθμίδας υψηλής πίεσης ικανότητας ως 285t/h ατμού, ενώ υπάρχει και η δυνατότητα παράκαμψης του ατμού χαμηλής πίεσης μέχρι 268t/h.

Για την μοντελοποίηση των μονάδων 1 και 2 του ΑΗΣ Λαυρίου, τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται από την δοκιμή παραλαβής και από τη σύμβαση της εγκατάστασης και από την επί τόπου συλλογή στοιχείων από το κέντρο ελέγχου της μονάδας. Τα κύρια στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα ακόλουθα:

Μονάδα 1 ΑΗΣ Λαυρίου		
Στοιχεία καυσίμου		
Σύσταση	%wt	
Θείο (Sulfur)	2,5	
Υδρογόνο (Hydrogen)	11,5	
Άνθρακας (Carbon)	85,6	
Τέφρα (Ash)	0,023	
Άζωτο και οξυγόνο (Nitrogen & Oxygen)	0,4	
Νερό (Water)	0,1	
Θερμογόνος Ικανότητα	kJ/kg	
Ανώτερη	43179,4	
Κατώτερη	40587,8	
Παροχές ατμού	(kg/sec)	(t/h)
Παροχή ατμού ΥΠ (υψηλής πίεσης)	122,8	442,1
Παροχή ατμού ΜΠ (μέσης πίεσης)	110,5	397,8
Απομάστευση Νο7	11,14	40,1
Απομάστευση Νο6	5,05	18,2
Απομάστευση Νο5	3,47	12,5
Απομάστευση Νο4	4,53	16,3
Απομάστευση Νο3	4,33	15,6
Απομάστευση Νο2	3,83	13,8
Απομάστευση Νο1	5,44	19,6
Παροχή συμπυκνωτή	82,94	298,6
Πίεση ατμού	(kg/cm <sup>2</sup> )	
Υψηλής πίεσης	141	
Εξόδου υψηλής πίεσης (εισόδου ανάθερμου)	40,8	
Εισόδου μέσης πίεσης	37,4	
Εξόδου χαμηλής πίεσης	0,05	
Πίεση συμπυκνωτή	0,046	
Θερμοκρασία εισόδου τροφοδοτικού νερού στον οικονομητήρα	247,4°C	

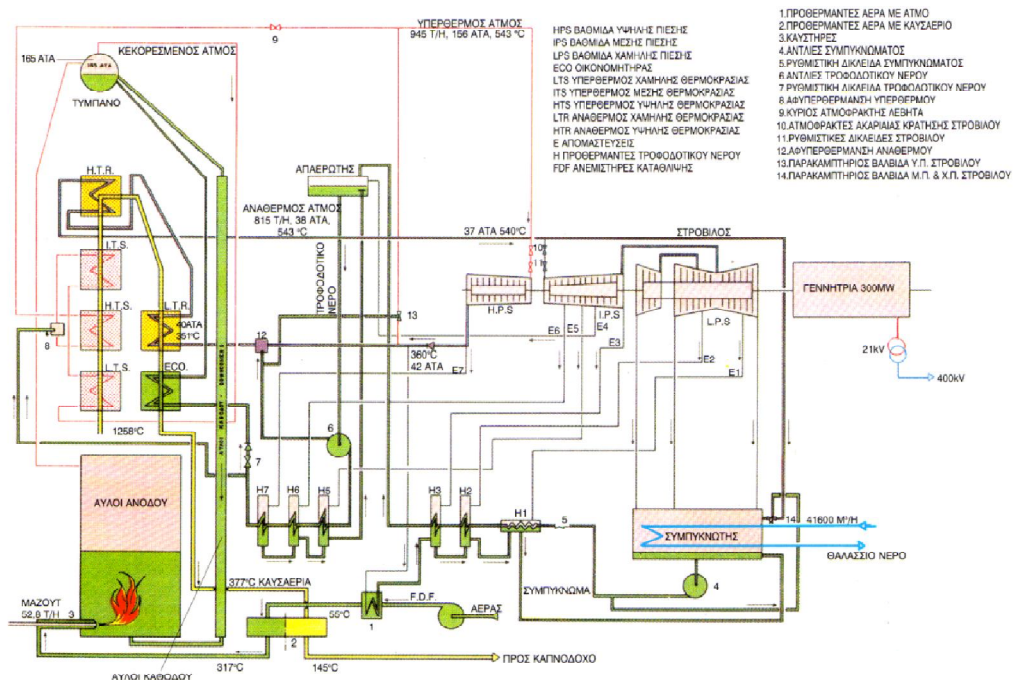
Πίνακας 7-16 : Χαρακτηριστικά εγκατάστασης της μονάδας 1 ΑΗΣ Λαυρίου

Μονάδα 2 ΑΗΣ Λαυρίου		
Στοιχεία καυσίμου		
Σύσταση	%wt	
Θείο (Sulfur)	2,5	
Υδρογόνο (Hydrogen)	11,5	
Άνθρακας (Carbon)	85,6	
Τέφρα (Ash)	0,023	
Άζωτο και οξυγόνο (Nitrogen & Oxygen)	0,4	
Νερό (Water)	0,1	
Θερμογόνος Ικανότητα	kJ/kg	
Ανώτερη	43179,4	
Κατώτερη	40587,8	
Παροχές ατμού	(kg/sec)	(t/h)
Παροχή ατμού ΥΠ(υψηλής πίεσης)	240,6	866,1
Παροχή ατμού ΜΠ (μέσης πίεσης)	229,5	826,1
Απομάστευση Νο7	11,1	40,0
Απομάστευση Νο6	9,2	33,1
Απομάστευση Νο5	7,6	27,2
Απομάστευση Νο4	11,3	40,6
Απομάστευση Νο3	13,7	49,4
Απομάστευση Νο2	11,6	41,8
Απομάστευση Νο1	11,8	42,6
Πίεση ατμού	(kg/cm <sup>2</sup> )	
Υψηλής πίεσης	151	
Εξόδου υψηλής πίεσης (εισόδου ανάθερμου)	42,06	
Εισόδου μέσης πίεσης	37	
Πίεση συμπυκνωτή	0,046	
Θερμοκρασία εισόδου τροφοδοτικού νερού στον οικονομητήρα	247,1°C	

Πίνακας 7-17 : Χαρακτηριστικά εγκατάστασης της μονάδας 2 ΑΗΣ Λαυρίου

Διάγραμμα της εγκατάστασης της μονάδας 2 παρουσιάζεται παρακάτω. Επειδή οι δυο μονάδες 1 και 2 είναι παρόμοιες, θεωρήθηκε ότι το διάγραμμα αυτό αντιστοιχεί και στην μονάδα 1 με διαφοροποιημένες παροχές ατμού.

Σχηματικό Λειτουργικό Διάγραμμα Μονάδας II - 300 MW



Εικόνα 7-3 : Σχηματικό διάγραμμα εγκατάστασης μονάδας 2 ΑΗΣ Λαυρίου

Αρχικά σχεδιάστηκε το διάγραμμα της εγκατάστασης της μονάδας 1 και 2 του ΑΗΣ Λαυρίου στο πρόγραμμα GateCycle και εισήχθησαν τα παραπάνω δεδομένα. Επίσης ρυθμίστηκαν οι υπόλοιπες παράμετροι του προγράμματος (όπως βαθμοί απόδοσης γεννητριών), ούτως ώστε το μοντέλο που σχεδιάστηκε να αποδίδει (gross) 150MW με βαθμό απόδοσης περίπου 42% για την μονάδα 1 και 300MW με βαθμό απόδοσης 42,6% για την μονάδα 2. Στη συνέχεια το κάθε μοντέλο ρυθμίστηκε στην υπάρχουσα κατάσταση όπως φαίνεται και από τους ακόλουθους πίνακες.

Οι δράσεις κάθε μονάδας είναι οι ακόλουθες:

**Μονάδα 1 ΑΗΣ Λαυρίου**

Α/Α	ΔΡΑΣΕΙΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ	ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΟ ΜΕΓΕΘΟΣ		
			ΥΠΑΡΧΟΥΣΑ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ	ΣΤΟΧΟΣ
ΚΥΚΛΩΜΑ ΨΥΚΤΙΚΟΥ - ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ (Καθαρότητα, επάρκεια ψυκτικού, εισροή αέρα)	Α. Συντήρηση συστήματος ψυκτικού και βαλβίδων υγρών π/θ προς ΚΨ Β. Αποτίμηση κατάστασης αυλών συμπυκνωτή Γ. Εγκατάσταση συστήματος συνεχούς καθαρισμού Δ. Χημ. καθαρισμός συμπυκνωτή (αν απαιτηθεί)	1. Απόκλιση πίεσης συμπύκνωσης από ονομαστική για ίδια θερμοκρασία ψυκτικού 2. ΔΤ συμπυκνώματος/ ψυκτικού 3. ΔΤ εισόδου/ εξόδου ψυκτικού 4. Υπόψυξη συμπυκνώματος	1. 12 gr/cm <sup>2</sup> χειρότερη πίεση 2. ΔΤ=10 -11 °C 3. ΔΤ= 9 - 10 °C 4. ΔΤ= 1 - 1,2 °C (για 11°C Θάλασσα)	1. 43 gr/cm <sup>2</sup> abs 2. ΔΤ=3,3 °C 3. ΔΤ=7,4 °C 4. .... ( για 20°C Θάλασσα)	1. Δρ=< 5 gr/cm <sup>2</sup> 2. ΔΤ=< 7 °C 3. ΔΤ=< 8 °C 4. ΔΤ=< 1,5 °C
ΣΤΕΓΑΝΟΠΟΙΗΣΕΙΣ Π/Θ ΑΕΡΑ ΔΙΑ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ (LUVO)	Α. Συντήρηση συστήματος - Υποβολή προτάσεων από κατασκευαστή Β. Ανακαίνιση - τροποποιήσεις συστ. στεγανοποιήσεων	O <sub>2</sub> μετά LUVO για δεδομένο ποσοστό προ LUVO (0,5 - 0,6 %)	0,65 / 4,75% O <sub>2</sub> % κ.ο. στα καυσάερια προ/μετά LUVO , ή 140 T/H διαρροή αέρα	0,5 / 2,3% O <sub>2</sub> % κ.ο. στα καυσάερια προ/μετά LUVO	O <sub>2</sub> μετά LUVO =<3,5%
ΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΘΕΡΜΑΝΤΙΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ Π/Θ Νο 15	Α. Εγκατάσταση νέου θερμαντικού στοιχείου	1. ΔΤ προ / μετά Π/Θ από πλευράς τροφοδ. Νερού 2. T τροφοδοτικού νερού προ ECO	1. ΔΤ= 21 °C 2. T = 240 °C	Θερμοκρασία °C 1. προ/μετά R15: 158,1/ 176,93 2. προ ECO 247,3	1. ΔΤ >= 19°C 2. Θερμοκρασία °C ECO >240
ΜΕΙΩΣΗ ΔΙΑΦΥΓΩΝ ΑΤΜΟΥ - ΝΕΡΟΥ	Α. Επισκευή / Αντικατάσταση φθαρμένων επιστομίων - ασφαλιστικών - ατμοπαγίδων - δικτύων	Μέση συμπλήρωση νερού (make-up) θερμικού κύκλου σε ημερήσια βάση	Ενδεικτική τιμή ~200 TN την ημέρα		Περιορισμός make-up σε <125 TN την ημέρα
ΜΕΙΩΣΗ ΙΔΙΟΚΑΤΑΝΑΛΩΣΕΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ		1. Μέση ημερήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας Βοηθητικών Μονάδας σε ελάχιστη φόρτιση (συνεχή)	112-115 MWH ημερησίως καταναλώνονται για τα βοηθητικά με ελάχιστο φορτίο συνεχώς	Τα βοηθητικά είναι 6,8 MW στο πλήρες, 4,3 MW στα 90 MW	Εξοικονόμηση 3500 MWH ετησίως για 4800 ώρες λειτουργίας στο ελάχιστο
ΜΕΙΩΣΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΕΩΝ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ	Α. Μελέτη - βελτιστ/ση κατ/σεων θερμότητας Β. Προμήθεια θερμοκάμερας	Μέγιστη κατανάλωση βοηθητικού ατμού (για θερμάνσεις κλπ χρήσεις).	έως και 25 TN/H β. ατμού		περιορισμός σε <20 TN/H (εξοικονόμηση 5 TN/H)

**Πίνακας 7-18 : Στοχοθετημένες δράσεις για την μονάδα 1 ΑΗΣ Λαυρίου**

Συνολική εκτιμώμενη αύξηση, 1,4% για την μονάδα 1 του ΑΗΣ Λαυρίου



**Μονάδα 2 ΑΗΣ Λαυρίου**

Α/Α	ΔΡΑΣΕΙΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ	ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΟ ΜΕΓΕΘΟΣ		
			ΥΠΑΡΧΟΥΣΑ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ	ΣΤΟΧΟΣ
ΚΥΚΛΩΜΑ ΨΥΚΤΙΚΟΥ - ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ (Καθαρότητα, ελάρκεια ψυκτικού, εισροή αέρα)	Α. Συντήρηση συστήματος ψυκτικού και βαλβίδων υγρών π/θ προς ΚΨ Β. Αποκατάσταση συστήματος συνεχούς καθαρισμού	1. Απόκλιση πίεσης συμπύκνωσης από ονομαστική για ίδια θερμοκρασία ψυκτικού 2. ΔΤ συμπυκνώματος/ ψυκτικού 3. ΔΤ εισόδου/ εξόδου ψυκτικού 4. Υπόψυξη συμπυκνώματος	1. 1,5-2 gr/cm2 χειρότερη πίεση 2. ΔΤ=6,5 °C 3. ΔΤ= 8,5 °C 4. ΔΤ= 1 - 1,5 °C (για 17°C Θάλασσα και 285 MW)	45,68gr/cm <sup>2</sup> abs, ΔΤ=2,78 °C, 20°C Θάλασσα	1. Δρ=< 5 gr/cm2 2. ΔΤ=< 4 °C 3. ΔΤ=< 8,5 °C 4. ΔΤ=< 1,5 °C
ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΕΣ ΠΡΑΚΤΙΚΕΣ ΣΤΟ ΛΕΒΗΤΑ (εκκαπνισμός, SAH, διαφυγές καυσαερίων κλπ)	Α. Συντήρηση συστήματος εκκαπνισμού, αποκατάσταση διαφυγών καυσαερίων Β. Τροποποιήσεις υγρών SAH	Παροχή ψεκασμού Α/Θ (ως ένδειξη της κατάστασης και β.α. λέβητα)	Ο ψεκασμός Α/Θ είναι έως 15 TN/H	1. β.α. = 94,4% σε πλήρες φορτίο 2. Ψεκ. Α/Θ = 0 TN/H	Επίτευξη ονομ. τιμών μετά κάθε ετήσια συντήρηση
ΜΕΙΩΣΗ ΔΙΑΦΥΓΩΝ ΑΤΜΟΥ - ΝΕΡΟΥ	Α. Επισκευή / Αντικατάσταση φθαρμένων επιστομιών - ασφαλιστικών - ατμοπαγίδων - δικτύων	Συμπλήρωση νερού (make-up) θερμικού κύκλου	Ενδεικτική τιμή 300~400 TN την ημέρα, αναλόγως εποχής και συνθηκών	1% στην ατμοπαραγωγή και 100TN ημερησίως για ατμό διασκορπισμού καυστήρων	Περιορισμός make-up σε <250 TN την ημέρα
ΜΕΙΩΣΗ ΙΔΙΟΚΑΤΑΝΑΛΩΣΕΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ		1. Μέση ημερήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας Βοηθητικών Μονάδας σε ελάχιστη φόρτιση (συνεχή)	123-230 MWH ημερησίως καταναλώνονται για τα βοηθητικά με ελάχιστο φορτίο συνεχώς	13 MW στο πλήρες, 8,5 MW στα 180 MW	Εξοικονόμηση 4000 MWH ετησίως για 4800 ώρες λειτουργίας στο ελάχιστο
ΜΕΙΩΣΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΕΩΝ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ	Α. Συντήρηση συστήματος ατμού διασκορπισμού καυστήρων	Μέγιστη κατανάλωση βοηθητικού ατμού (για θερμάνσεις κλπ χρήσεις).	έως και 28 TN/H β. ατμού		περιορισμός σε <23 TN/H (εξοικονόμηση 5 TN/H)

**Πίνακας 7-19 : Στοχοθετημένες δράσεις για την μονάδα 2 ΑΗΣ Λαυρίου**

Συνολική εκτιμώμενη αύξηση, 0,93% για την μονάδα 2 του ΑΗΣ Λαυρίου

Με βάση λοιπόν τα παραπάνω στοιχεία της υπάρχουσας κατάστασης :

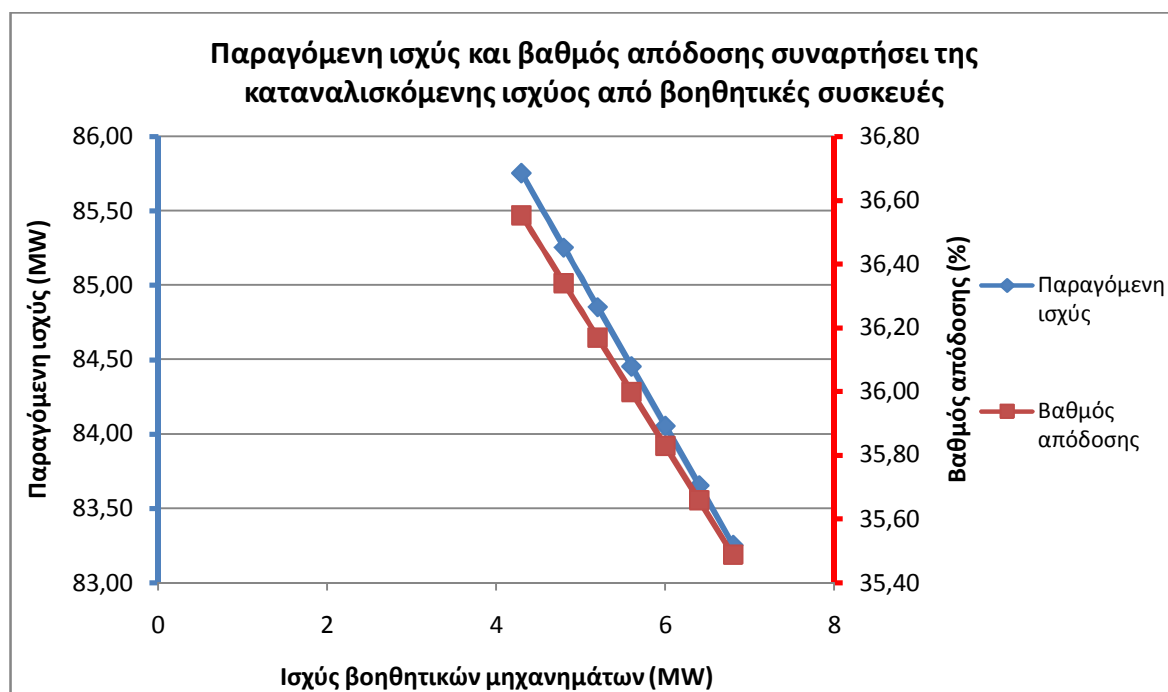
- Η μονάδα 1 του ΑΗΣ Λαυρίου υπολογίστηκε ότι παράγει 136,295MW με βαθμό απόδοσης 38,159% και
- Η μονάδα 2 του ΑΗΣ Λαυρίου 275,137MW με βαθμό απόδοσης 39,093%

*Σημείωση: τα παραπάνω μεγέθη είναι καθαρά δηλαδή έχουν αφαιρεθεί οι ιδιοκαταναλώσεις ηλεκτρικής ενέργειας του σταθμού*

### Λαύριο μονάδα 1

Χαμηλό φορτίο 90MW gross				
Ισχύς βοηθητικών (MW)	Παραγόμενη ισχύς (MW)	Βαθμός απόδοσης (%)	Εξοικονομούμενη ισχύς (MW)	Εξοικονομούμενη ενέργεια (MWh)
6,8	83,25	35,49	0	0
6,4	83,65	35,66	0,4	1920
6	84,05	35,83	0,8	3840
5,6	84,45	36,00	1,2	5760
5,2	84,85	36,17	1,6	7680
4,8	85,25	36,34	2	9600
4,3	85,75	36,55	2,5	12000

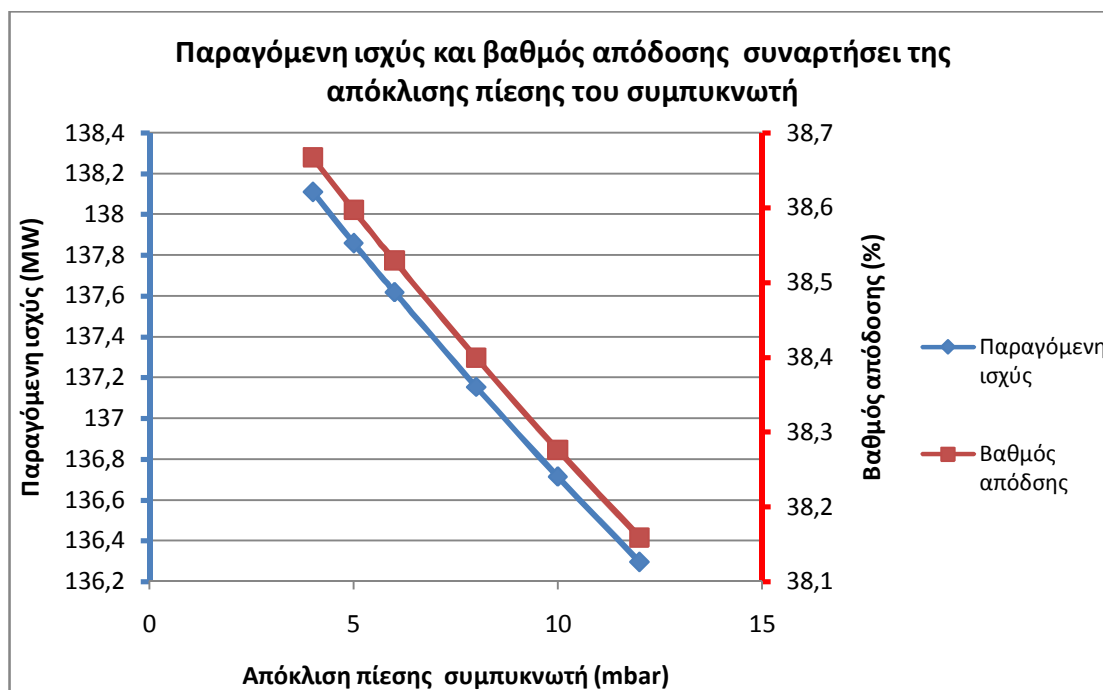
Πίνακας 7-20 : Αύξηση ισχύος με μείωση των ιδιοκαταναλώσεων στο μερικό φορτίο



Διάγραμμα 7-13 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει ιδιοκαταναλώσεων

Δρ συμπυκνωτή (mbar)	Παραγόμενη ισχύς (MW)	Βαθμός απόδοσης (%)	Μεταβολή βαθμού απόδοσης
12	136,30	38,16	0,00
10	136,71	38,28	0,12
8	137,15	38,40	0,24
6	137,62	38,53	0,37
<b>5</b>	<b>137,86</b>	<b>38,60</b>	<b>0,44</b>
4	138,11	38,67	0,51

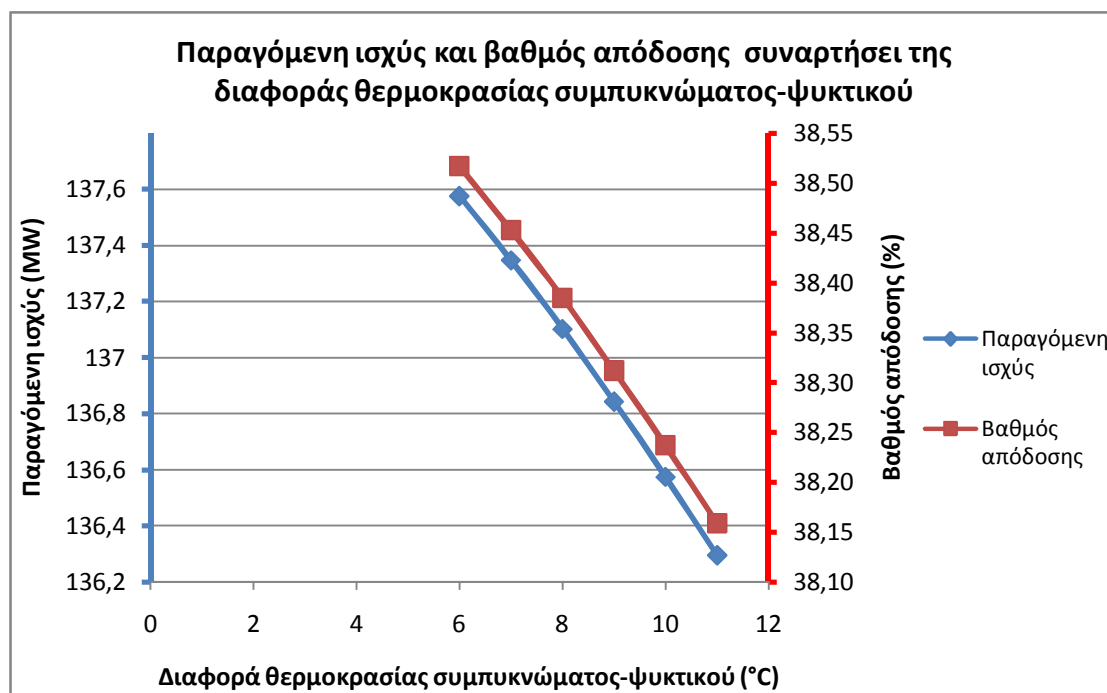
Πίνακας 7-21 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει μεταβολής της απόκλισης πίεσης του ψυγείου/ συμπυκνωτή



Διάγραμμα 7-14 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει απόκλισης πίεσης συμπυκνωτή

ΔΤ συμπυκνώματος-ψυκτικού (°C)	Παραγόμενη ισχύς (MW)	Βαθμός απόδοσης (%)	Μεταβολή βαθμού απόδοσης
11	136,30	38,16	0,00
10	136,57	38,24	0,08
9	136,84	38,31	0,15
8	137,10	38,39	0,23
7	<b>137,35</b>	<b>38,45</b>	<b>0,29</b>
6	137,58	38,52	0,36

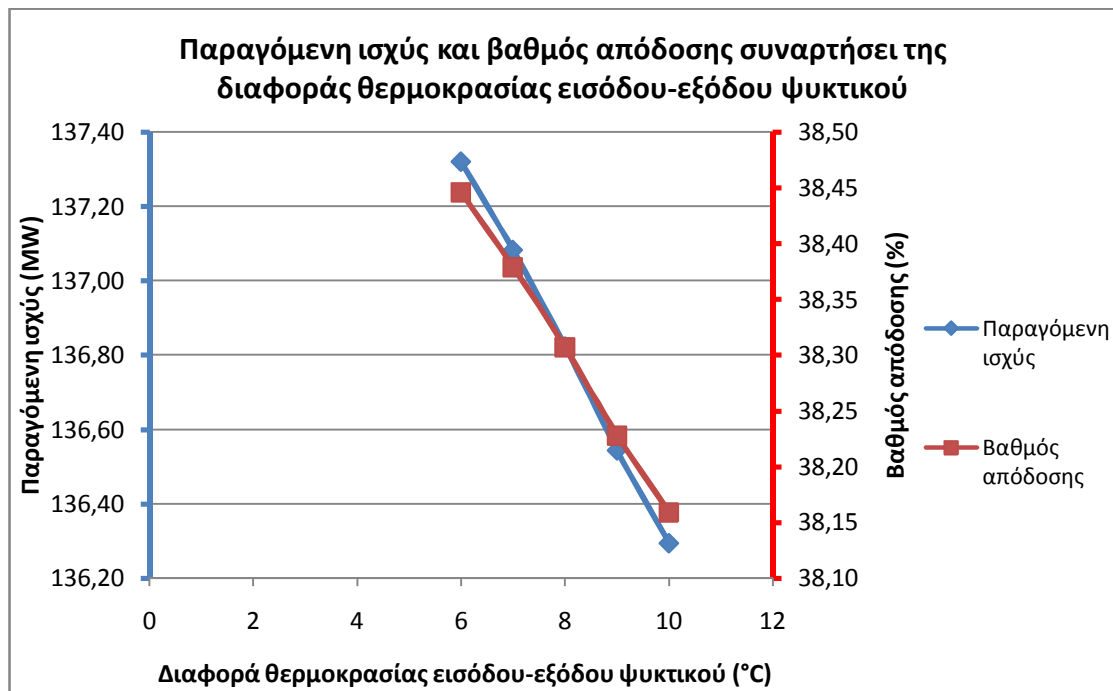
Πίνακας 7-22 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει θερμοκρασιακής διαφοράς συμπυκνώματος/ψυκτικού



Διάγραμμα 7-15 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει θερμοκρασιακής διαφοράς συμπυκνώματος/ψυκτικού

ΔΤ ψυκτικού (°C)	Παραγόμενη ισχύς (MW)	Βαθμός απόδοσης (%)	Μεταβολή βαθμού απόδοσης
10	136,30	38,159	0,00
9	136,54	38,228	0,07
<b>8</b>	<b>136,82</b>	<b>38,307</b>	<b>0,15</b>
7	137,08	38,379	0,22
6	137,32	38,446	0,29

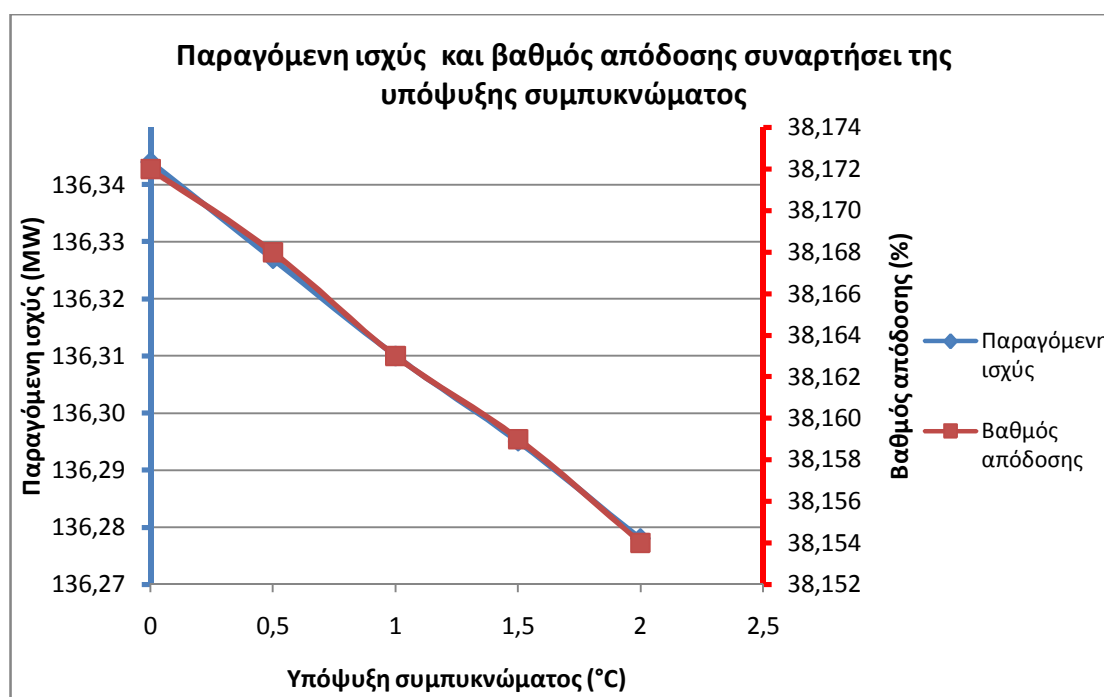
Πίνακας 7-23 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει θερμοκρασιακής διαφοράς εισόδου/εξόδου ψυκτικού



Διάγραμμα 7-16 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει θερμοκρασιακής διαφοράς εισόδου/εξόδου ψυκτικού

Υπόψυξη (°C)	Παραγόμενη ισχύς (MW)	Βαθμός απόδοσης (%)	Μεταβολή βαθμού απόδοσης
2	136,28	38,154	-0,005
<b>1,5</b>	<b>136,30</b>	<b>38,159</b>	<b>0,000</b>
1	136,31	38,163	0,004
0,5	136,33	38,168	0,009
0	136,34	38,172	0,013

Πίνακας 7-24 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει υπόψυξης συμπυκνώματος

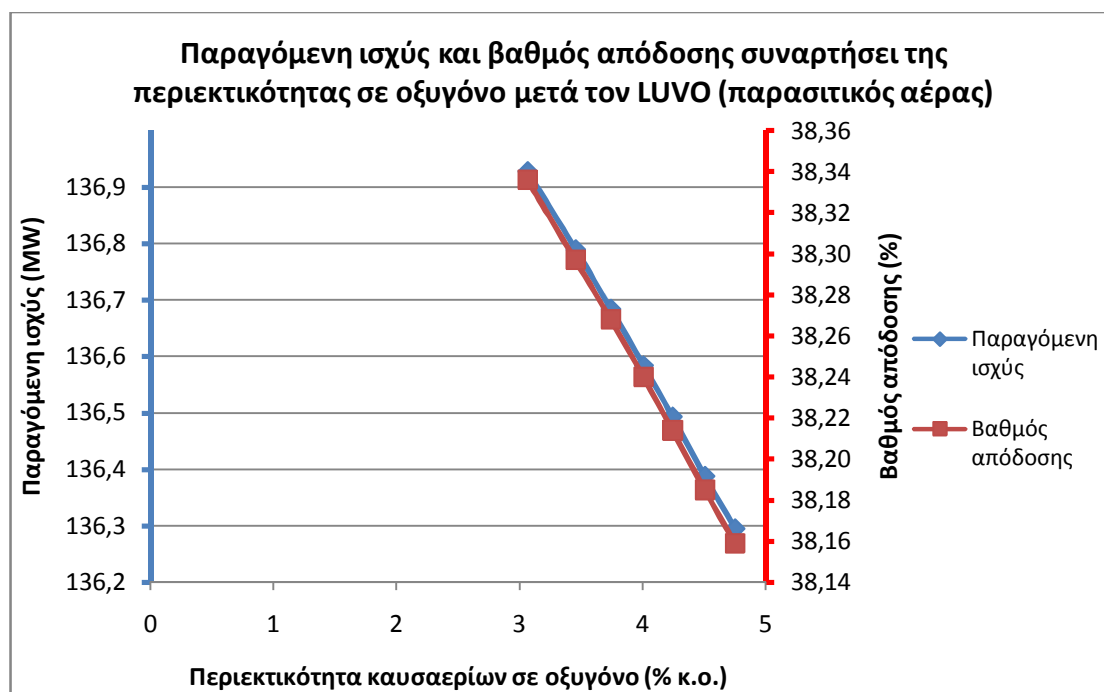


Διάγραμμα 7-17 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει υπόψυξης συμπυκνώματος

Περιεκτικότητα καυσαερίων σε οξυγόνο (% κ.ο.)	Παραγόμενη ισχύς (MW)	Βαθμός απόδοσης (%)	Μεταβολή βαθμού απόδοσης
4,75	136,30	38,16	0,00
4,51	136,39	38,19	0,03
4,24	136,49	38,21	0,05
4,01	136,58	38,24	0,08
3,74	136,68	38,27	0,11
3,45	136,79	38,30	0,14
3,06	136,93	38,34	0,18

Πίνακας 7-25 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει παρασιτικού αέρα

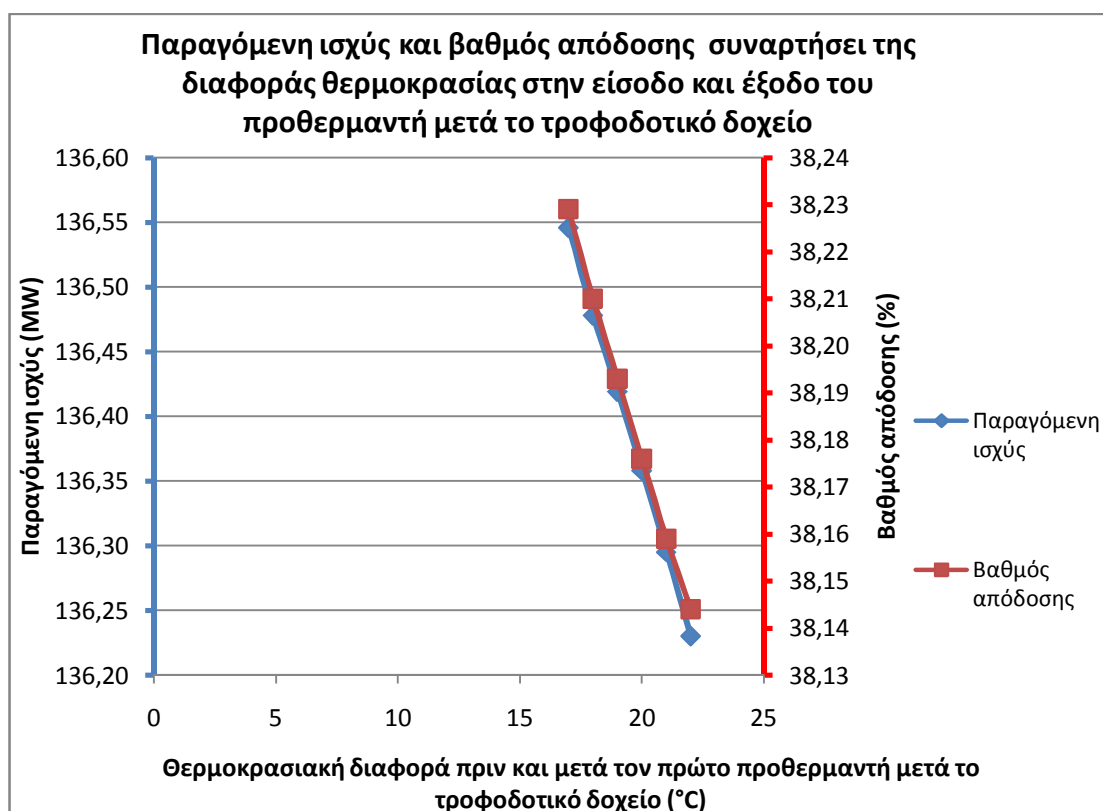
Από τα παραπάνω δεδομένα και με παρεμβολή για την στοχοθετημένη δράση (οξυγόνο μετά τον LUVO 3,5% κ.ο.) υπολογίζεται αύξηση του βαθμού απόδοσης 0,13%. Σε όλα τα παραπάνω η περιεκτικότητα αναφέρεται σε ξηρά καυσαέρια.



Διάγραμμα 7-18 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει της περιεκτικότητας των καυσαερίων σε οξυγόνο (λόγω παρασιτικού αέρα)

ΔΤ τροφοδοτικού νερού (°C)	Παραγόμενη ισχύς (MW)	Βαθμός απόδοσης (%)	Μεταβολή βαθμού απόδοσης
22	136,23	38,14	-0,02
21	136,30	38,16	0,00
20	136,36	38,18	0,02
<b>19</b>	<b>136,42</b>	<b>38,19</b>	<b>0,03</b>
18	136,48	38,21	0,05
17	136,55	38,23	0,07

Πίνακας 7-26 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει διαφοράς θερμοκρασίας στα άκρα του προθερμαντή μετά το τροφοδοτικό δοχείο/απαεριοτή

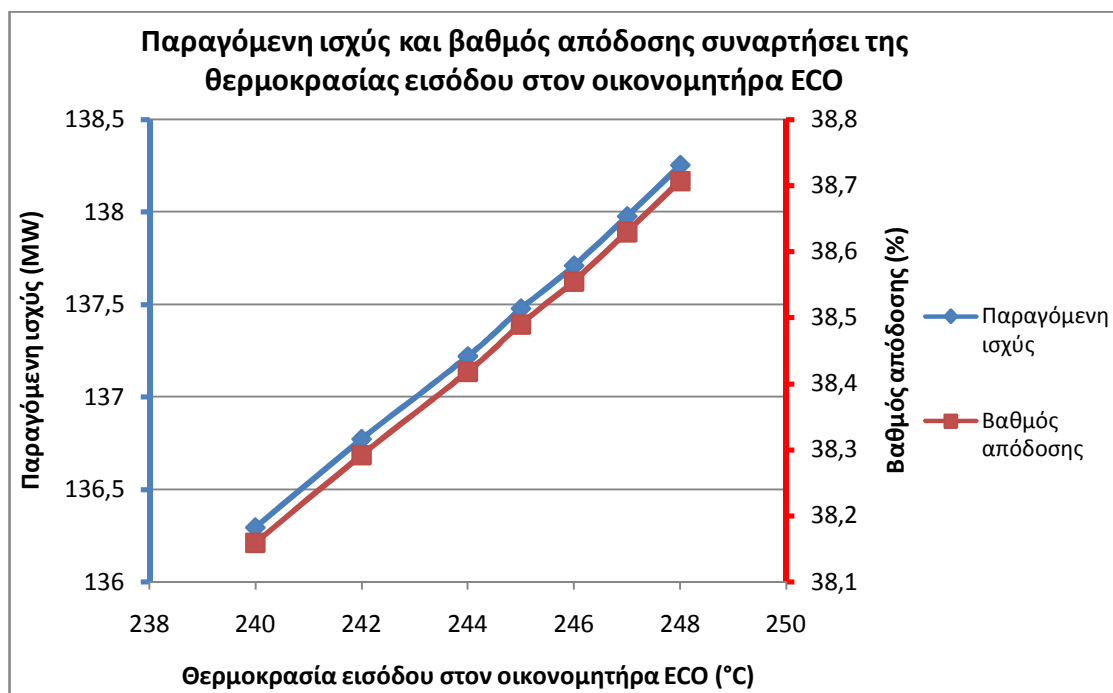


Διάγραμμα 7-19 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει θερμοκρασιακής διαφοράς τροφοδοτικού νερού



Θερμοκρασία εισόδου ECO (°C)	Παραγόμενη ισχύς (MW)	Βαθμός απόδοσης (%)	Μεταβολή βαθμού απόδοσης
<b>240</b>	<b>136,30</b>	<b>38,16</b>	<b>0,00</b>
242	136,77	38,29	0,13
244	137,22	38,42	0,26
245	137,48	38,49	0,33
246	137,71	38,56	0,40
247	137,98	38,63	0,47
248	138,25	38,71	0,55

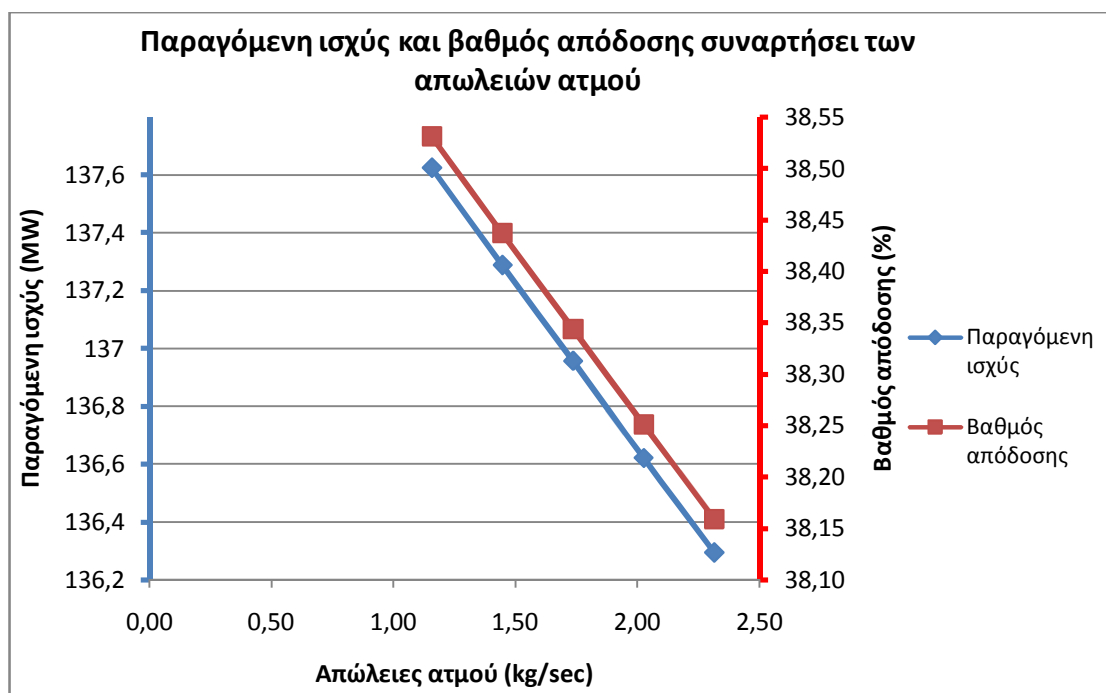
Πίνακας 7-27 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει της θερμοκρασίας του τροφοδοτικού νερού πριν από τον οικονομητήρα



Διάγραμμα 7-20 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει της θερμοκρασίας του τροφοδοτικού νερού πριν από τον οικονομητήρα

Απώλειες ατμού		Παραγόμενη ισχύς (MW)	Βαθμός απόδοσης (%)	Μεταβολή βαθμού απόδοσης
t/d	kg/sec			
200	2,31	136,30	38,16	0,00
175	2,03	136,62	38,25	0,09
150	1,74	136,96	38,34	0,19
<b>125</b>	<b>1,45</b>	<b>137,29</b>	<b>38,44</b>	<b>0,28</b>
100	1,16	137,63	38,53	0,37

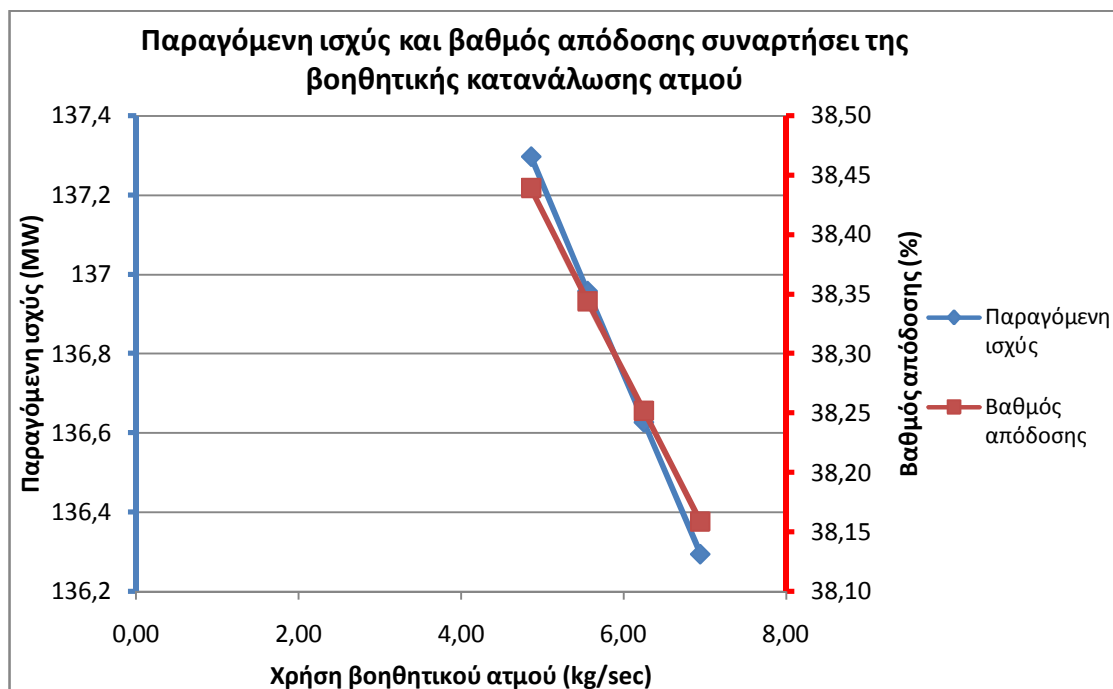
Πίνακας 7-28 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει απωλειών ατμού



Διάγραμμα 7-21 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει απωλειών ατμού

Χρήση βοηθητικού ατμού		Παραγόμενη ισχύς (MW)	Βαθμός απόδοσης (%)	Μεταβολή βαθμού απόδοσης
t/h	kg/sec			
25	6,94	136,30	38,16	0,00
22,5	6,25	136,63	38,25	0,09
<b>20</b>	<b>5,56</b>	<b>136,96</b>	<b>38,34</b>	<b>0,19</b>
17,5	4,86	137,30	38,44	0,28

Πίνακας 7-29 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσεις κατανάλωσης βοηθητικού ατμού

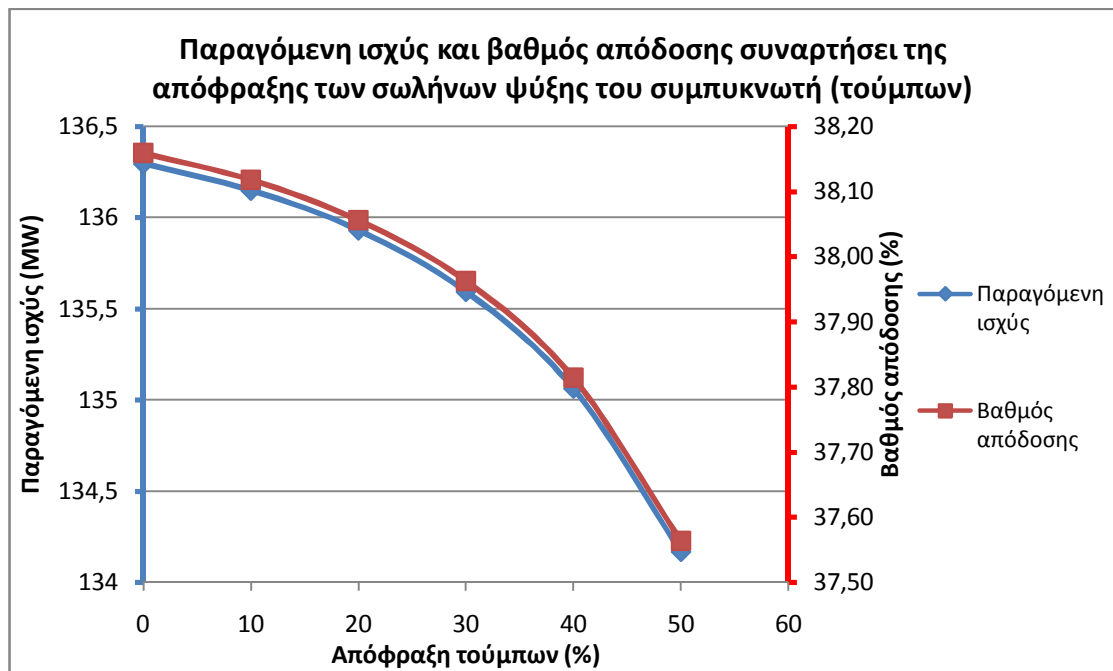


Διάγραμμα 7-22 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσεις κατανάλωσης βοηθητικού ατμού

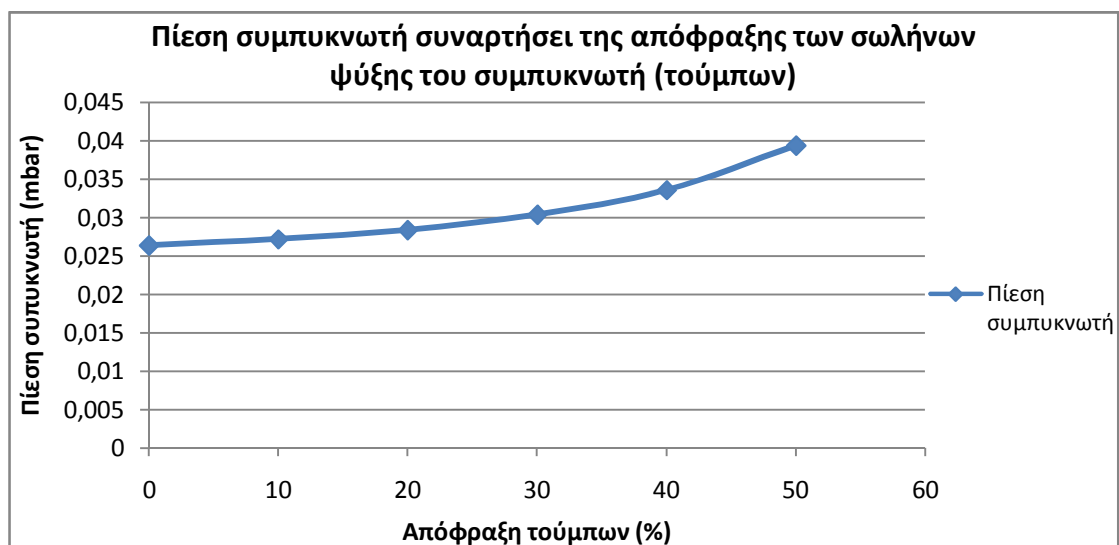
Όπως προαναφέρθηκε εξετάστηκε και η επίδραση της απόφραξης των σωλήνων ψύξης του συμπυκνωτή (τούμπων).

Πίεση συμπυκνωτή (mbar)	Απόφραξη σωλήνων ψύξης (%)	Παραγόμενη ισχύς (MW)	Βαθμός απόδοσης (%)
0,026	0	136,30	38,16
0,027	10	136,15	38,12
0,028	20	135,93	38,06
0,030	30	135,59	37,96
0,034	40	135,06	37,81
0,039	50	134,17	37,56

Πίνακας 7-30 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει της απόφραξης τούμπων



Διάγραμμα 7-23 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει της απόφραξης τούμπων



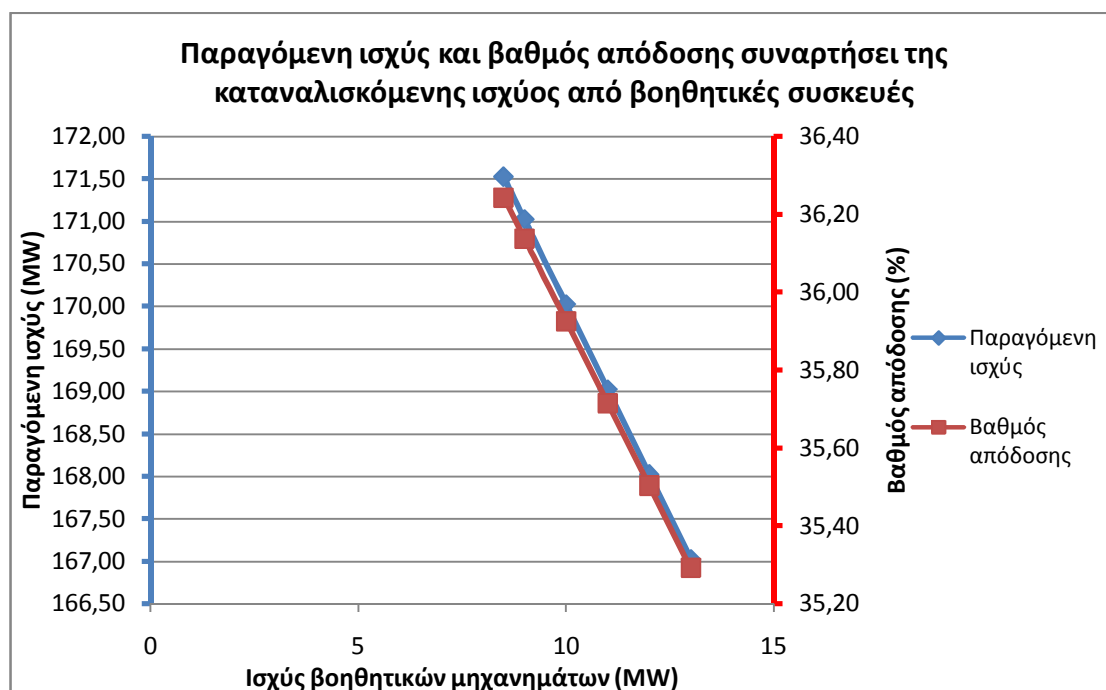
Διάγραμμα 7-24 : Πίεση συμπυκνωτή συναρτήσει της απόφραξης τούμπων

Συνολικά η αύξηση του βαθμού απόδοσης από τις δράσεις όπως περιγράφηκαν παραπάνω υπολογίστηκε στο 1,51%, που είναι πολύ κοντά στην εκτίμηση (1,4%).

### Λαύριο μονάδα 2

Χαμηλό φορτίο 180MW gross				
Ισχύς βοηθητικών (MW)	Παραγόμενη ισχύς (MW)	Βαθμός απόδοσης (%)	Εξοικονομούμενη ισχύς (MW)	Εξοικονομούμενη ενέργεια (MWh)
13	167,02	35,29	0	0
12	168,02	35,50	1	4800
11	169,02	35,71	2	9600
10	170,02	35,93	3	14400
9	171,02	36,14	4	19200
8,5	171,52	36,24	4,5	21600

Πίνακας 7-31 : Αύξηση ισχύος με μείωση των ιδιοκαταναλώσεων στο μερικό φορτίο

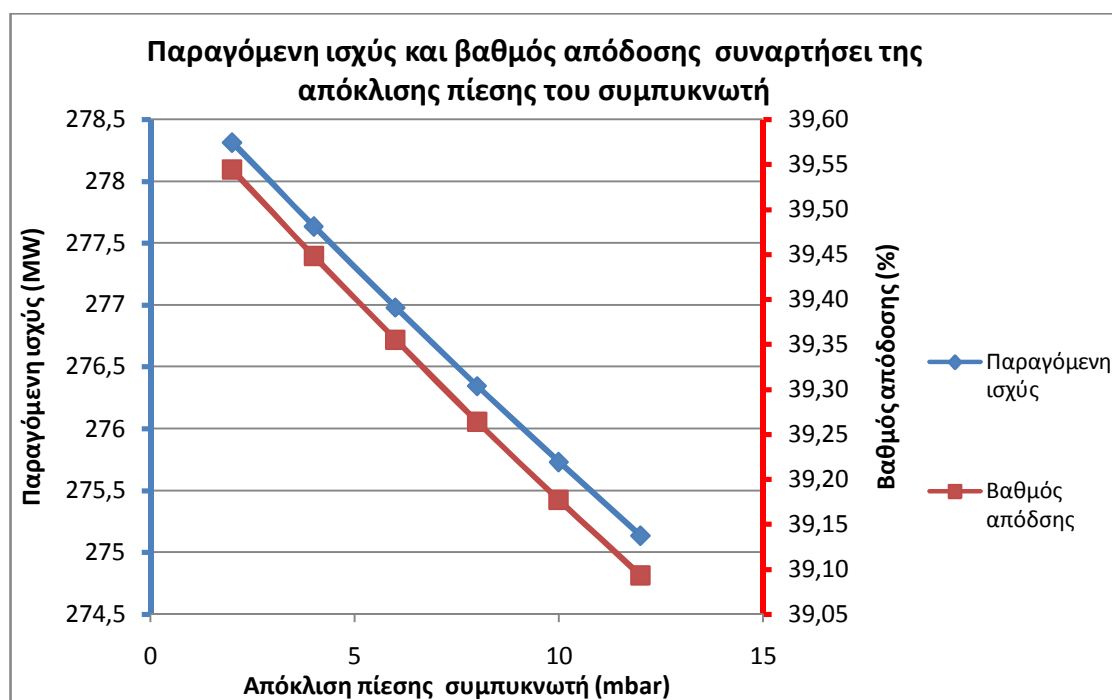


Διάγραμμα 7-25 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει ιδιοκαταναλώσεων

Δρ συμπυκνωτή (mbar)	Παραγόμενη ισχύς (MW)	Βαθμός απόδοσης (%)	Αύξηση βαθμού απόδοσης
12	275,14	39,09	0,00
10	275,73	39,18	0,08
8	276,35	39,26	0,17
6	276,98	39,36	0,26
4	277,64	39,45	0,35
2	278,31	39,54	0,45

Πίνακας 7-32 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει μεταβολής της απόκλισης πίεσης του ψυγείου/ συμπυκνωτή

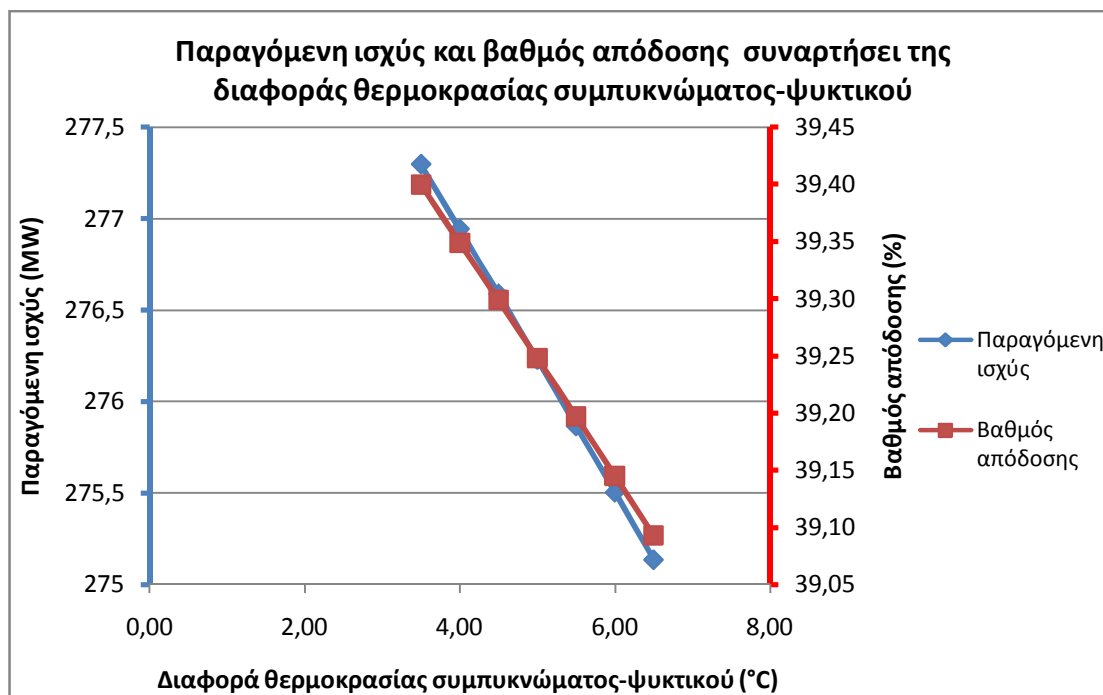
Από τα παραπάνω δεδομένα και με παρεμβολή για την στοχοθετημένη δράση (απόκλιση πίεσης ψυγείου <5mbar) υπολογίζεται αύξηση του βαθμού απόδοσης 0,31%.



Διάγραμμα 7-26 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει απόκλισης πίεσης συμπυκνωτή

ΔΤ συμπυκνώματος-ψυκτικού (°C)	Παραγόμενη ισχύς (MW)	Βαθμός απόδοσης (%)	Αύξηση βαθμού απόδοσης
6,50	275,14	39,09	0,00
6,00	275,51	39,15	0,05
5,50	275,87	39,20	0,10
5,00	276,23	39,25	0,15
4,50	276,59	39,30	0,21
<b>4,00</b>	<b>276,94</b>	<b>39,35</b>	<b>0,26</b>
3,50	277,30	39,40	0,31

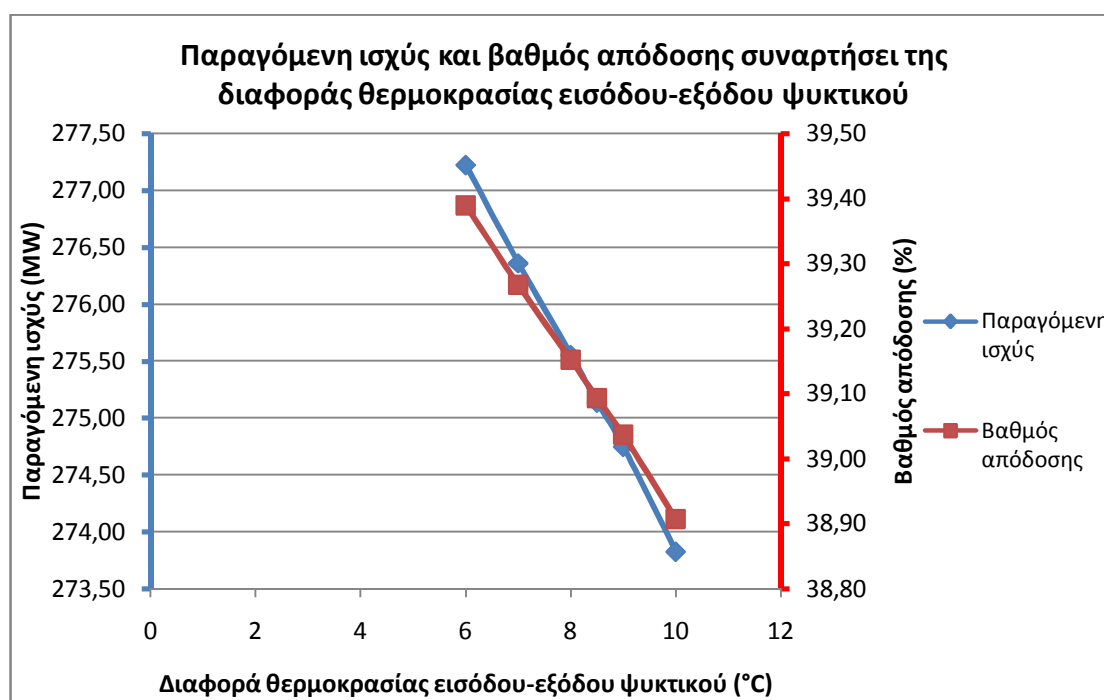
Πίνακας 7-33 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει θερμοκρασιακής διαφοράς συμπυκνώματος/ψυκτικού



Διάγραμμα 7-27 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει θερμοκρασιακής διαφοράς συμπυκνώματος/ψυκτικού

ΔΤ ψυκτικού (°C)	Παραγόμενη ισχύς (MW)	Βαθμός απόδοσης (%)	Αύξηση βαθμού απόδοσης
10	273,83	38,91	-0,19
9	274,75	39,04	-0,06
8,5	275,14	39,09	0,00
<b>8</b>	<b>275,56</b>	<b>39,15</b>	<b>0,06</b>
7	276,36	39,27	0,17
6	277,22	39,39	0,30

Πίνακας 7-34 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει θερμοκρασιακής διαφοράς εισόδου/εξόδου ψυκτικού

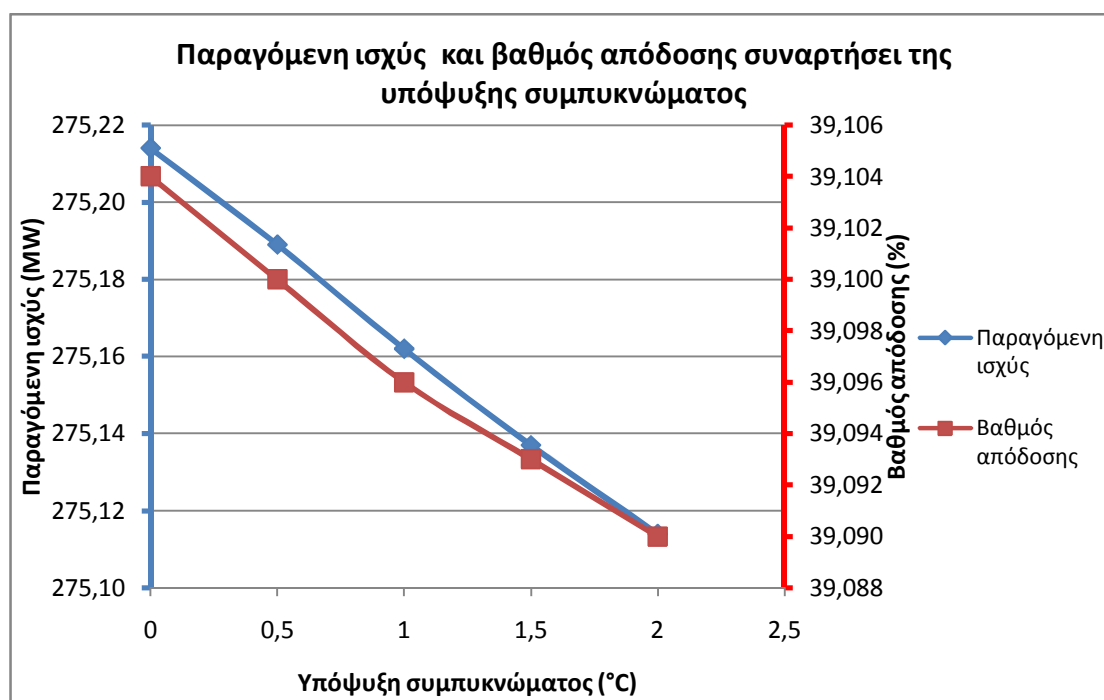


Διάγραμμα 7-28 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει θερμοκρασιακής διαφοράς εισόδου/εξόδου ψυκτικού



Υπόψυξη (°C)	Παραγόμενη ισχύς (MW)	Βαθμός απόδοσης (%)	Αύξηση βαθμού απόδοσης
2	275,11	39,090	-0,003
1,5	275,14	39,093	0,000
1	275,16	39,096	0,003
0,5	275,19	39,100	0,007
0	275,21	39,104	0,011

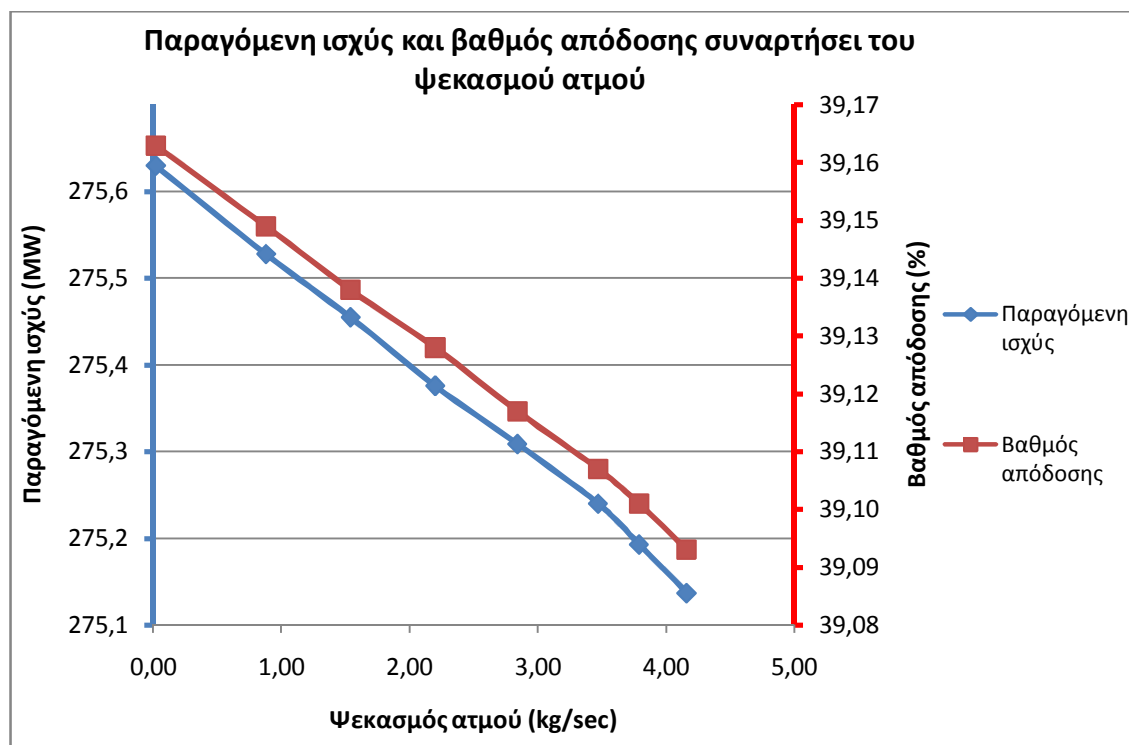
Πίνακας 7-35 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει υπόψυξης συμπυκνώματος



Διάγραμμα 7-29 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει υπόψυξης συμπυκνώματος

Ψεκασμός ατμού		Παραγόμενη ισχύς (MW)	Βαθμός απόδοσης (%)	Αύξηση βαθμού απόδοσης
t/d	kg/sec			
15	4,16	275,14	39,09	0,00
13,6	3,79	275,19	39,10	0,01
12,5	3,47	275,24	39,11	0,01
10,2	2,84	275,31	39,12	0,02
7,9	2,20	275,38	39,13	0,03
5,5	1,54	275,46	39,14	0,04
3,2	0,88	275,53	39,15	0,06
<b>0</b>	<b>0,0</b>	<b>275,63</b>	<b>39,16</b>	<b>0,07</b>

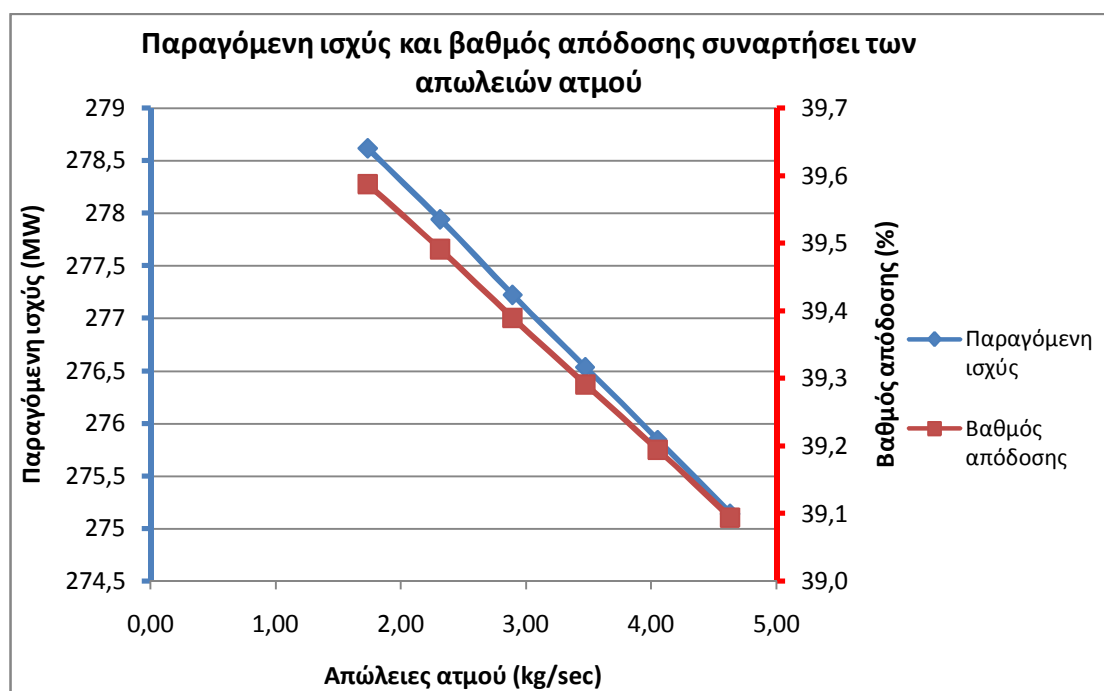
Πίνακας 7-36 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει ψεκασμού ατμού



Διάγραμμα 7-30 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει ψεκασμού ατμού

Απώλειες ατμού		Παραγόμενη ισχύς (MW)	Βαθμός απόδοσης (%)	Αύξηση βαθμού απόδοσης
t/d	kg/sec			
400	4,63	275,14	39,09	0,00
350	4,05	275,85	39,19	0,10
300	3,47	276,54	39,29	0,20
<b>250</b>	<b>2,89</b>	<b>277,22</b>	<b>39,39</b>	<b>0,30</b>
200	2,31	277,94	39,49	0,40
150	1,74	278,62	39,59	0,49

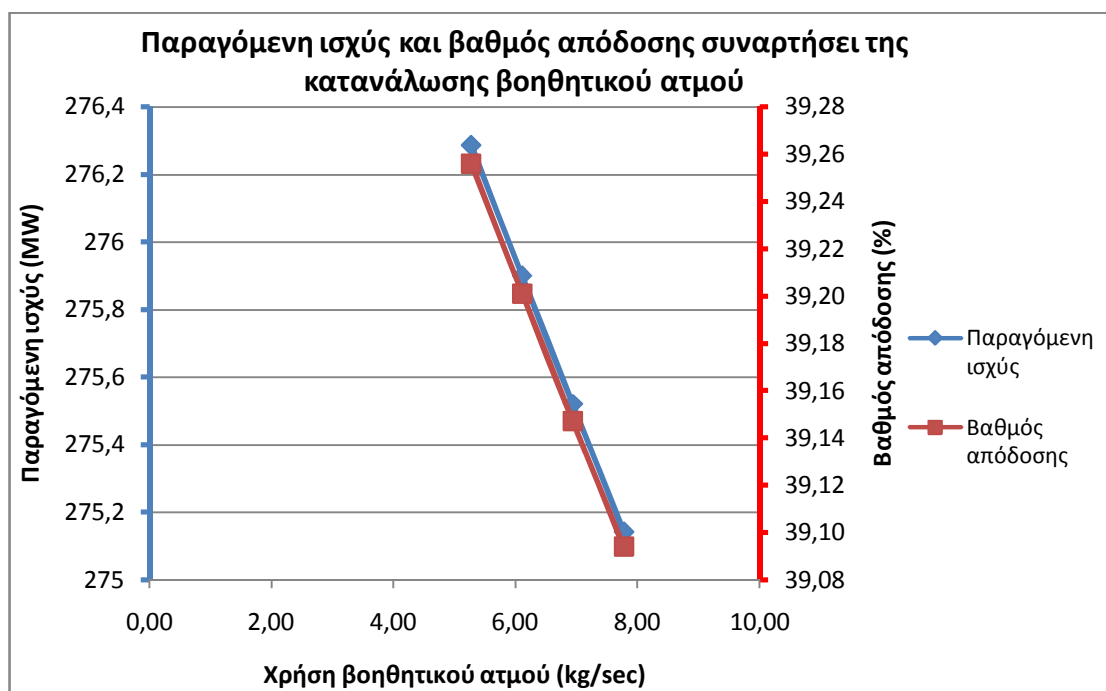
Πίνακας 7-37 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει απωλειών ατμού



Διάγραμμα 7-31 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει απωλειών ατμού

Χρήση βοηθητικού ατμού		Παραγόμενη ισχύς (MW)	Βαθμός απόδοσης (%)	Αύξηση βαθμού απόδοσης
t/h	kg/sec			
28	7,78	275,14	39,09	0,00
25	6,94	275,52	39,15	0,05
<b>22</b>	<b>6,11</b>	<b>275,90</b>	<b>39,20</b>	<b>0,11</b>
19	5,28	276,29	39,26	0,16

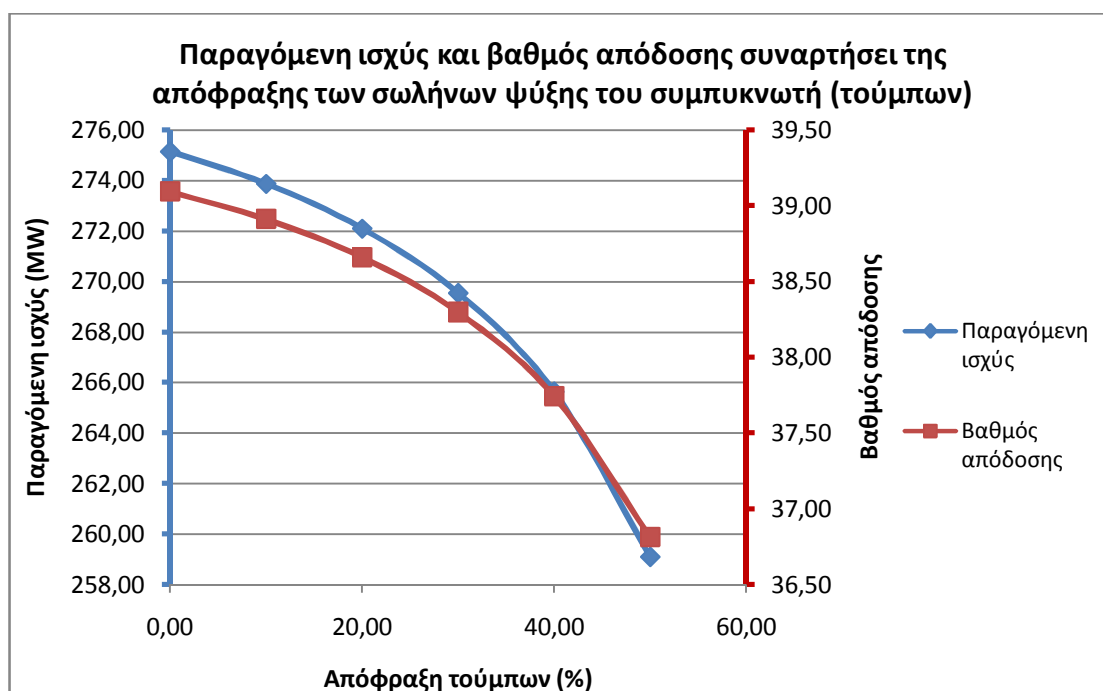
Πίνακας 7-38 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει της κατανάλωσης βοηθητικού ατμού



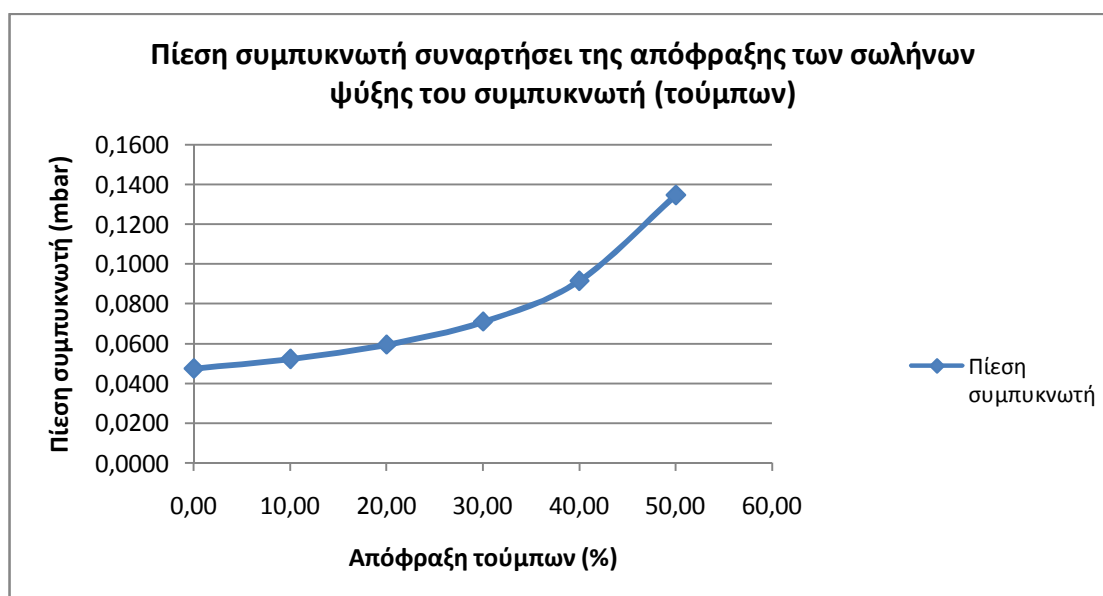
Διάγραμμα 7-32 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει κατανάλωσης βοηθητικού ατμού

Πίεση συμπυκνωτή (mbar)	Απόφραξη σωλήνων ψύξης (%)	Παραγόμενη ισχύς (MW)	Βαθμός απόδοσης (%)
0,048	0,00	275,14	39,09
0,052	10,00	273,87	38,91
0,060	20,00	272,10	38,66
0,071	30,00	269,55	38,30
0,092	40,00	265,65	37,75
0,135	50,00	259,12	36,82

Πίνακας 7-39 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει της απόφραξης τούμπων



Διάγραμμα 7-33 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει της απόφραξης τούμπων



Διάγραμμα 7-34 : Πίεση συμπυκνωτή συναρτήσει της απόφραξης τούμπων

Η συνολική αύξηση του βαθμού απόδοσης από τις παραπάνω δράσεις, για την μονάδα 2 του ΑΗΣ Λαυρίου, υπολογίστηκε στο 1,11%. Και αυτή η τιμή είναι κοντά στην εκτίμηση (0,93%).

### Συμπεράσματα-προτάσεις

Όπως φαίνεται από τους παραπάνω πίνακες, υπάρχουν αρκετά περιθώρια για την βελτίωση του βαθμού απόδοσης των μονάδων 1 και 2 του ΑΗΣ Λαυρίου. Οι εκτιμήσεις που προέκυψαν από το μοντέλο των μονάδων, από το GateCycle, επιβεβαιώνουν τις εκτιμήσεις για αρκετά μεγάλη αύξηση του βαθμού απόδοσης και στις δυο μονάδες (της τάξης του 1%), από τις στοχοθετημένες δράσεις. Φυσικά υπάρχουν κάποιες αποκλίσεις μεταξύ των υπολογισμένων αποτελεσμάτων και των εκτιμήσεων για τον βαθμό απόδοσης.

Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν φαίνεται ότι η μεγαλύτερη δυνατότητα για την αύξηση του βαθμού απόδοσης δίνεται από :

- Για την μονάδα 1 του ΑΗΣ Λαυρίου:

1. Μείωση απόκλισης πίεσης του συμπυκνωτή
2. Μείωση θερμοκρασιακής διαφοράς συμπυκνώματος-ψυκτικού
3. Μείωση διαφυγών ατμού
4. Περιορισμός χρήσης βοηθητικού ατμού
5. Μείωση της θερμοκρασιακής διαφοράς εισόδου-εξόδου ψυκτικού νερού
6. Στεγανοποίηση προθερμαντή αέρα με καυσαέριο (LUVO)
7. Περιορισμός υπόψυξης του συμπυκνώματος

Επομένως την μεγαλύτερη επίδραση στην αύξηση του βαθμού απόδοσης θα έχει ο καθαρισμός και η βελτίωση της λειτουργίας του ψυγείου/συμπυκνωτή, ακολούθως η αντικατάσταση φθαρμένων εξαρτημάτων που προκαλούν διαρροές ατμού, η μείωση καταναλώσεων θερμότητας και τέλος η στεγανοποίηση του προθερμαντή αέρα με καυσαέριο (LUVO). Παράλληλα φάνηκε ότι υπάρχουν ακόμα πολλές δυνατότητες για περαιτέρω αύξηση του βαθμού απόδοσης με βελτίωση της λειτουργίας των προθερμαντών του τροφοδοτικού νερού, μάλιστα, εάν επιτευχθεί θερμοκρασία εισόδου στον οικονομητήρα ίση με την ονομαστική τιμή (247°C), θα υπάρξει αύξηση 0,47%.

-Για την μονάδα 2 του ΑΗΣ Λαυρίου:

1. Μείωση απόκλισης πίεσης του συμπυκνωτή
2. Μείωση διαφυγών ατμού
3. Μείωση θερμοκρασιακής διαφοράς συμπυκνώματος-ψυκτικού
4. Περιορισμός χρήσης βοηθητικού ατμού
5. Περιορισμός ψεκασμού
6. Μείωση της θερμοκρασιακής διαφοράς εισόδου-εξόδου ψυκτικού νερού
7. Περιορισμός υπόψυξης του συμπυκνώματος

Άρα και στη μονάδα αυτή τη μεγαλύτερη επίδραση στην αύξηση του βαθμού απόδοσης θα έχει ο καθαρισμός και η βελτίωση της λειτουργίας του ψυγείου/συμπυκνωτή.

### 7.3 ΑΗΣ Κομοτηνής

#### *Μονάδα συνδυασμένου κύκλου φυσικού αερίου Κομοτηνής*

Η μονάδα της Κομοτηνής είναι μονάδα συνδυασμένου κύκλου, συνολικής ονομαστικής ισχύος περίπου 485000KW και αποτελείται από :

-δυο αεριοστρόβιλους με τις γεννήτριές τους, της ABB Power Generation (13E2), με ισχύ 165100KW και βαθμό απόδοσης 35,7%

-δυο λέβητες ανάκτησης θερμότητας, της Austrian Energy and Environment

-έναν ατμοστρόβιλο ANSALDO ENERGIA με τη γεννήτριά του

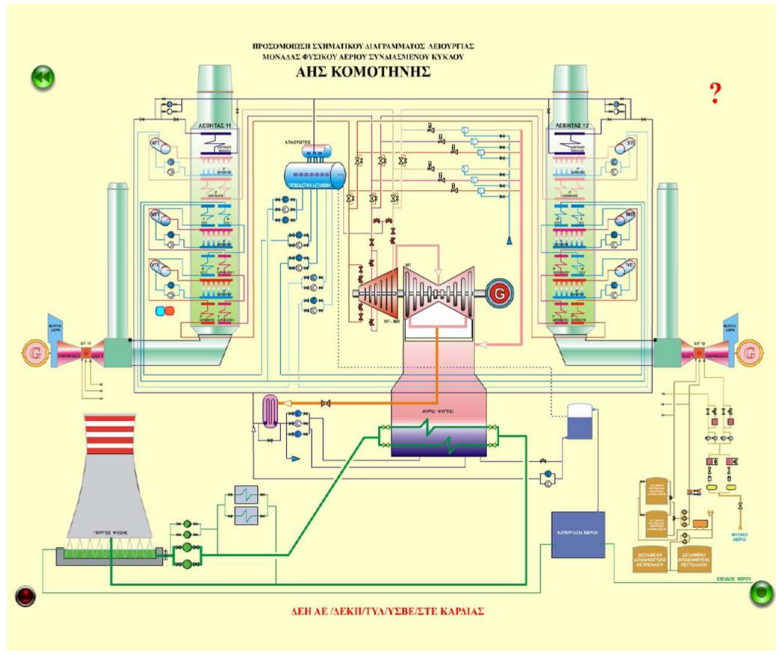
Οι αεριοστρόβιλοι της μονάδας Κομοτηνής είναι φυσικού αερίου, αλλά έχουν την δυνατότητα καύσης πετρελαίου ως εναλλακτικού καύσιμου. Το φυσικό αέριο πριν την καύση του προθερμαίνεται από ένα μέρος του θερμού νερού, από τους λέβητες ανάκτησης. Στους αεριοστρόβιλους υπάρχει επίσης η δυνατότητα ψεκασμού νερού στο θάλαμο καύσης για τη μείωση των θερμοκρασιών και κατά συνέπεια των παραγόμενων NOx.

Οι λέβητες ανάκτησης είναι τριών πιέσεων, βεβιασμένης κυκλοφορίας κατακόρυφοι. Τα κυκλώματα μέσης και υψηλής πίεσης διαθέτουν οικονομητήρα, ατμοποιητή και υπερθερμαντή (το κύκλωμα υψηλής πίεσης διαθέτει δυο οικονομητήρες ενώ το κύκλωμα μέσης πίεσης δυο υπερθερμαντές). Ένα μέρος του νερού μέσης πίεσης, που έχει προθερμανθεί, οδηγείται για την προθέρμανση του φυσικού αερίου, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Το κύκλωμα χαμηλής πίεσης δεν διαθέτει προθερμαντήρα αλλά τροφοδοτείται απευθείας από νερό από τον απαεριοτή. Ο απαεριοτής με τη σειρά του δέχεται νερό που έχει προθερμανθεί από τον τελευταίο εναλλάκτη του λέβητα ανάκτησης κατά την πορεία των καυσαερίων. Ακόμα δέχεται μέρος του ατμού κάθε πίεσης ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας. Το τροφοδοτικό νερό προθερμαίνεται από προθερμαντές με χρήση ατμού, οι οποίοι τροφοδοτούνται από απομαστεύσεις υψηλής και χαμηλής πίεσης. Ένα μέρος του ατμού μέσης πίεσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για άλλες χρήσεις, δηλαδή για βοηθητικές καταναλώσεις θερμότητας.

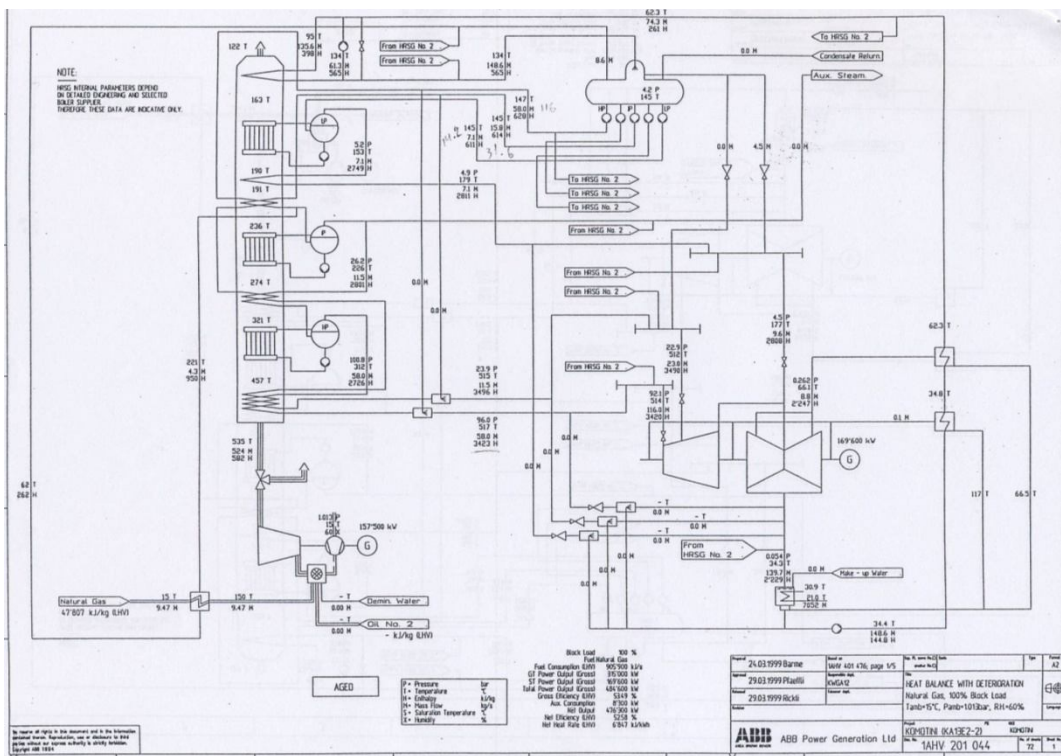
Ο ατμοστρόβιλος της μονάδας είναι σταθερής πίεσης, τύπου αντίδρασης, τριών πιέσεων. Ο ατμός υψηλής πίεσης αφού εκτονωθεί στις βαθμίδες υψηλής πίεσης, αναμειγνύεται με τον ατμό μέσης πίεσης και ακολούθως, μετά την εκτόνωση στις βαθμίδες μέσης πίεσης, αναμειγνύεται με τον ατμό χαμηλής πίεσης και τελικά εκτονώνεται ως την πίεση του συμπυκνωτή στις βαθμίδες χαμηλής πίεσης που είναι συμμετρικής ροής.

Ο συμπυκνωτής χρησιμοποιεί για την συμπύκνωση του ατμού νερό που έχει ψυχθεί σε πύργο ψύξης.

Για τις μεταβατικές καταστάσεις (όπως τις εκκινήσεις και τις ανωμαλίες) υπάρχει δυνατότητα παράκαμψης του ατμού της υψηλής, μέσης και χαμηλής πίεσης στο συμπυκνωτή. Απλοποιημένο διάγραμμα δίνεται παρακάτω.



Εικόνα 7-4 : Σχηματικό διάγραμμα εγκατάστασης ΑΗΣ Κομοτηνής



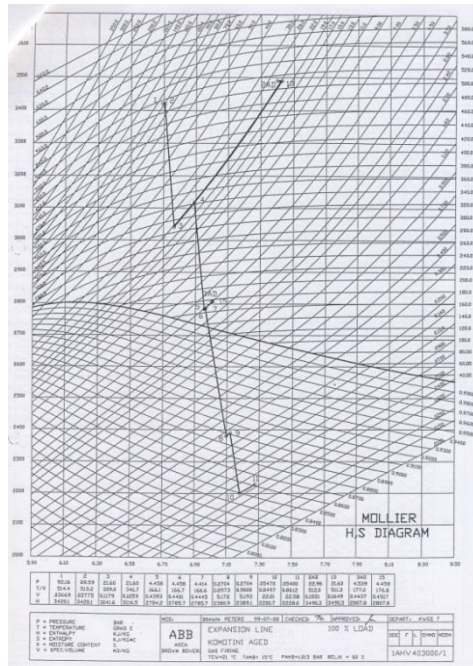
Εικόνα 7-5 : Μονογραμμικό διάγραμμα εγκατάστασης ΑΗΣ Κομοτηνής

Για την μοντελοποίηση της μονάδας του ΑΗΣ Κομοτηνής τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται από την δοκιμή παραλαβής και από τη σύμβαση της εγκατάστασης. Τα κύρια στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα ακόλουθα:



Δεδομένα	$\dot{m}$	$p$	T	Άλλο
Στοιχεία καυσαερίου των αεριοστροβίλων (ανά αεριοστρόβιλο)	524kg/sec	1,04 bar	535° C	
Τροφοδοτικό νερό στην έξοδο του οικονομητήρα	148,6kg/sec συνολικά		134°C	
Συνθήκες τροφοδοτικού δοχείου		4,2bar	145°C	
Πίεση στο κάθε τύμπανο		Y-Π 100,8bar M-Π 26,2bar X-Π 5,2bar		
Παροχές αντλιών σε κάθε κύκλωμα (ανά λέβητα, x2 συνολικά)	Y-Π 58kg/sec M-Π 15,8 kg/sec X-Π 7,1kg/sec			4,3kg/sec από τον ατμό μέσης πίεσης κάθε λέβητα χρησιμοποιούνται για την προθέρμανση του φυσικού αερίου
Στοιχεία ατμού πριν τις ρυθμιστικές βαλβίδες	Y-Π 58kg/sec M-Π 11,5 kg/sec X-Π 7,1kg/sec	Y-Π 96bar M-Π 23,9bar X-Π 4,9bar	Y-Π 517° C M-Π 515° C X-Π 179° C	
Στοιχεία ατμού στην είσοδο κάθε βαθμίδα	Y-Π 58kg/sec M-Π 11,5 kg/sec X-Π 7,1kg/sec	Y-Π 92,1bar M-Π 22,9bar X-Π 4,5bar	Y-Π 514° C M-Π 512° C X-Π 177° C	
Απομαστευόμενος ατμός για την προθέρμανση τροφοδοτικού νερού	8,8kg/sec	0,262bar	66,1° C	
Έξοδος από τον στρόβιλο X-Π /κενό συμπτυκνωτή		0,054bar		x=0,85
Νερό για προθέρμανση φυσικού αερίου (ανά λέβητα, x2 συνολικά)	4,3kg/sec	26,2bar	221° C	
Καύσιμο φυσικό αέριο	H=47807kj/kg			

Πίνακας 7-40 : Χαρακτηριστικά εγκατάστασης ΑΗΣ Κομοτηνής



Εικόνα 7-6 : Εκτόνωση ατμού στον αμοστρόβιλο ΑΗΣ Κομοτηνής

Μονογραμικό διάγραμμα της μονάδας παρουσιάζεται παραπάνω, όπου φαίνονται όλα τα χαρακτηριστικά της εγκατάστασης.

Αρχικά σχεδιάστηκε το διάγραμμα της εγκατάστασης της μονάδας του ΑΗΣ Κομοτηνής στο πρόγραμμα GateCycle και εισήχθησαν τα παραπάνω δεδομένα. Επίσης ρυθμίστηκαν οι υπόλοιπες παράμετροι του προγράμματος (όπως βαθμοί απόδοσης γεννητριών), ούτως ώστε το μοντέλο που σχεδιάστηκε να αποδίδει (gross) 484,6MW και καθαρά (net) 476,3MW με βαθμό απόδοσης περίπου 52,58%, σε συνθήκες περιβάλλοντος: θερμοκρασία 15°C, ατμοσφαιρική πίεση 1,0132bar (μια ατμόσφαιρα), σχετική υγρασία 60%, θερμοκρασία ψυκτικού (είσοδος ψυκτικού νερού στο ψυγείο/συμπυκνωτή) 21°C.

Διερευνήθηκε η επίδραση των παρακάτω παραγόντων:

Δράσεις	Περιγραφή
Μείωση ιδιοκαταναλώσεων ηλεκτρικής ενέργειας	
Συντήρηση του κυκλώματος ψυκτικού/ βελτίωση της λειτουργίας του συμπυκνωτή	1.Μείωση πτώσης πίεσης ψυγείου-συμπυκνωτή 2. Επίδραση απόφραξης σωλήνων ψύξης (τούμπων)
Βελτίωση λειτουργίας θερμαντικού στοιχείου προθέρμανσης τροφοδοτικού νερού	Επίδραση της απόδοσης του προθερμαντικού στοιχείου στην συνολική απόδοση
Απώλειες φίλτρων	
Μείωση καταναλώσεων θερμότητας (βοηθητικού ατμού)	
Μείωση διαφυγών νερού-ατμού	

Πίνακας 7-41 : Δράσεις που μοντελοποιήθηκαν

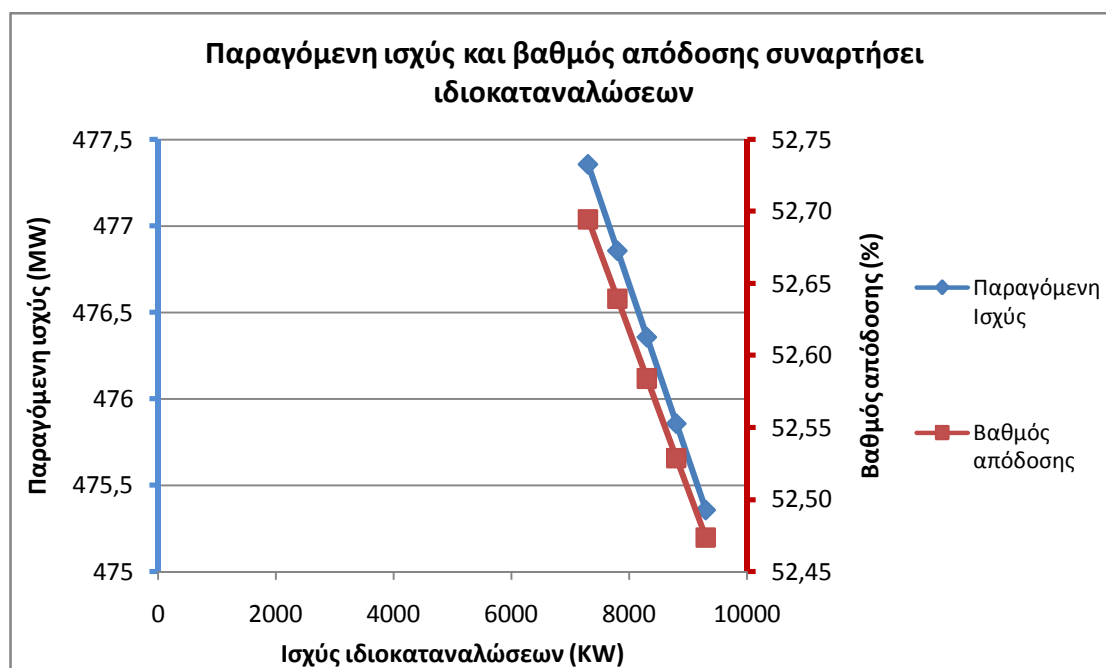
Ακόμα μελετήθηκε η επίδραση των παρακάτω:

-Μεταβολή παροχής ατμού στη συνολική ηλεκτροπαραγωγή (θεωρώντας θερμοκρασία εξόδου περίπου σταθερή)

-Μεταβολή στη θερμοκρασία εισόδου του ψυκτικού νερού στο ψυγείο συμπυκνωτή

Ιδιοκαταναλώσεις (KW)	Παραγόμενη Ισχύς (MW)	Βαθμός απόδοσης (%)
9300	475,36	52,47
8800	475,86	52,53
8300	476,36	52,58
7800	476,86	52,64
7300	477,36	52,69

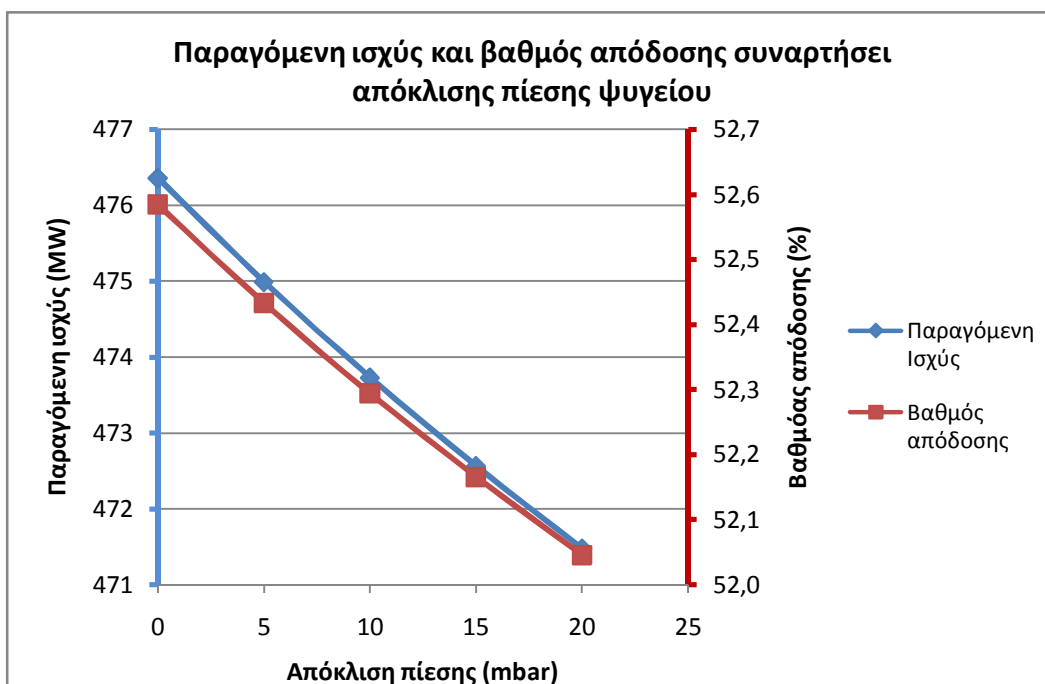
Πίνακας 7-42 : Αύξηση ισχύος με μείωση των ιδιοκαταναλώσεων



Διάγραμμα 7-35 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει ιδιοκαταναλώσεων

Δρ συμπυκνωτή (mbar)	Παραγόμενη Ισχύς (MW)	Βαθμός απόδοσης (%)
0	476,36	52,58
5	474,99	52,43
10	473,73	52,29
15	472,57	52,17
20	471,48	52,05

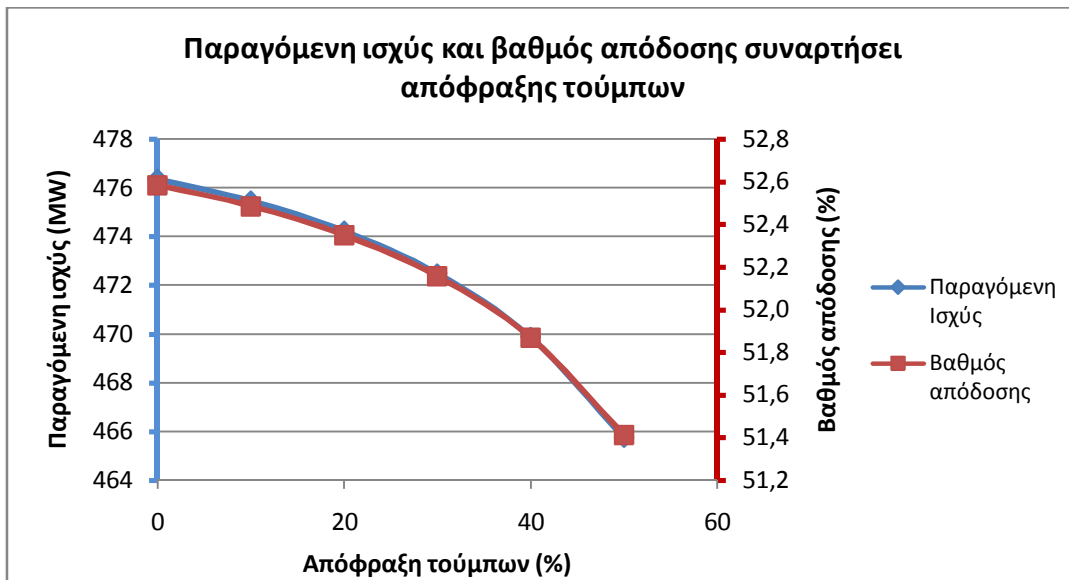
Πίνακας 7-43 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει απόκλισης πίεσης ψυγείου



Διάγραμμα 7-36 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει απόκλισης πίεσης ψυγείου

Απόφραξη τούμπων (%)	Παραγόμενη Ισχύς (MW)	Βαθμός απόδοσης (%)	Πίεση ψυγείου (bar)
0	476,36	52,58	0,054
10	475,47	52,49	0,057
20	474,24	52,35	0,063
30	472,49	52,16	0,071
40	469,89	51,87	0,085
50	465,75	51,41	0,110

Πίνακας 7-44 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει απόφραξης τούμπων



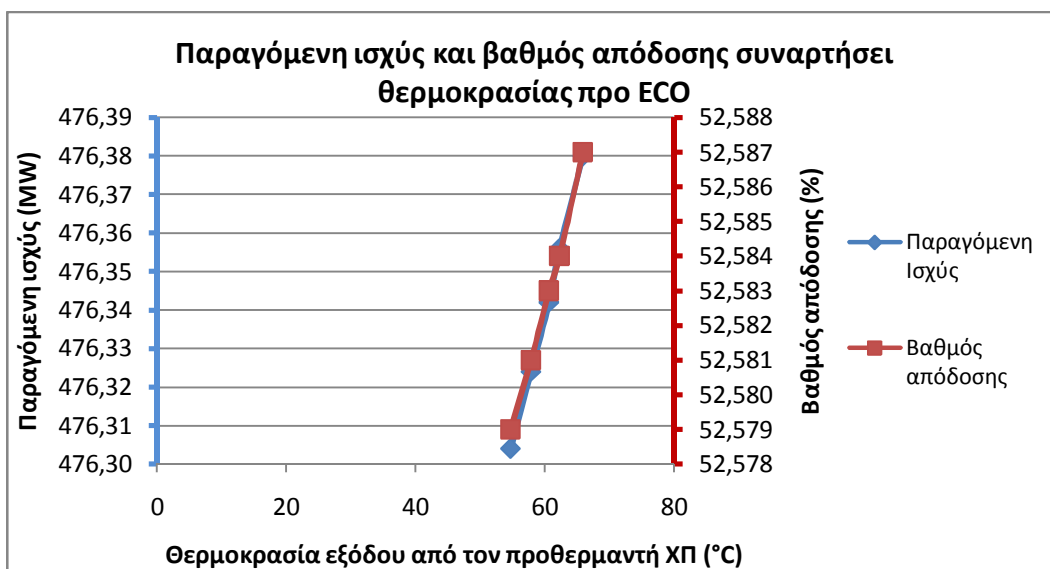
Διάγραμμα 7-37 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει απόφραξης τούμπων



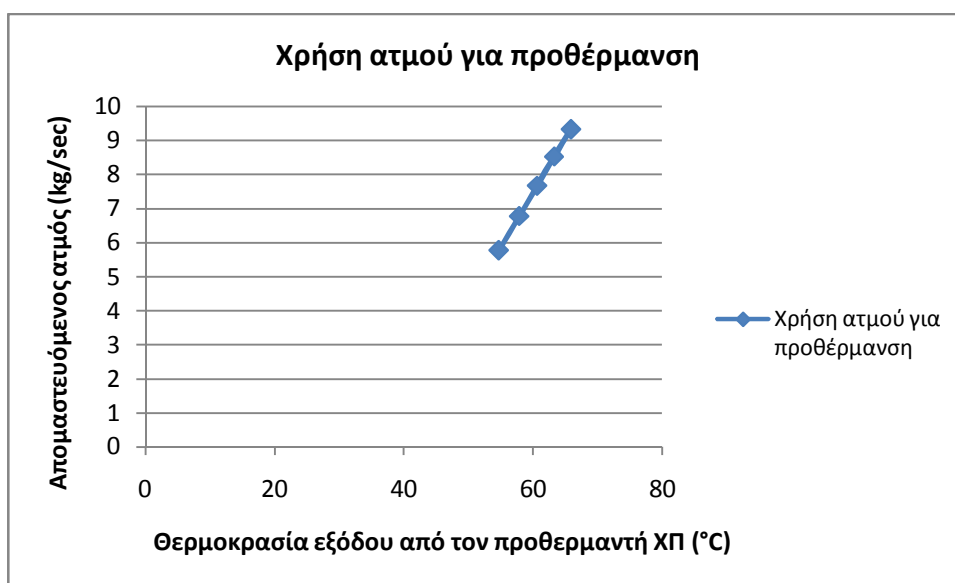
Διάγραμμα 7-38 : Πίεση ψυγείου συναρτήσει απόφραξης τούμπων

Θερμοκρασία εξόδου από προθερμαντήρα με ατμό προ ECO (°C)	Παραγόμενη Ισχύς (MW)	Βαθμός απόδοσης (%)	Χρήση ατμού για προθέρμανση (kg/sec)
65,9	476,38	52,587	9,3
62,3	476,36	52,584	8,5
60,6	476,34	52,583	7,7
57,9	476,32	52,581	6,8
54,7	476,30	52,579	5,8

Πίνακας 7-45 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει θερμοκρασίας εξόδου από τον προθερμαντήρα με ατμό πριν τον οικονομητήρα



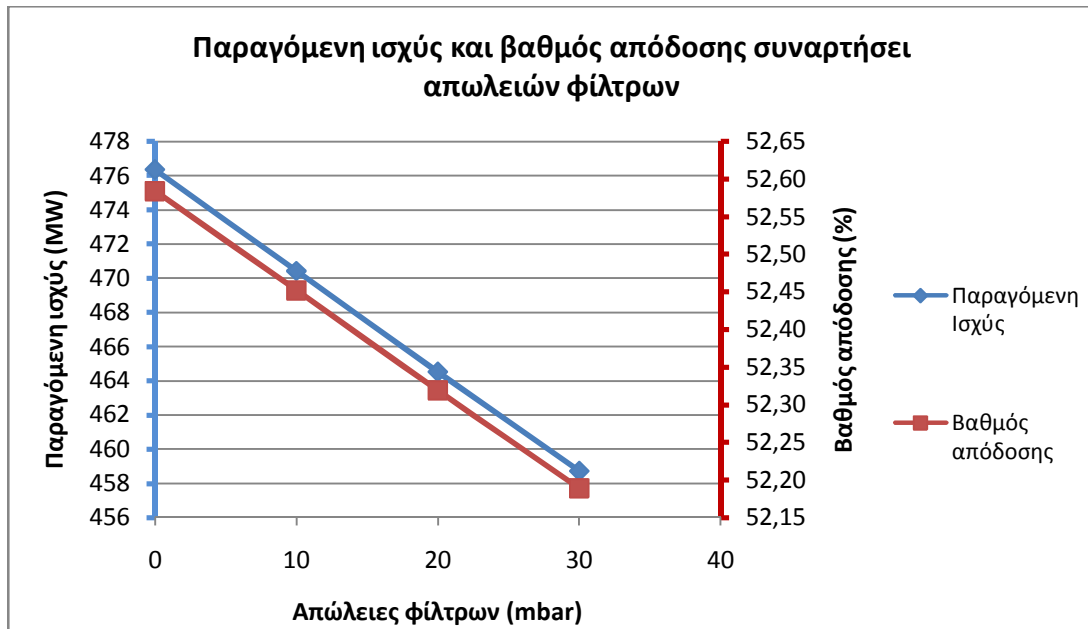
Διάγραμμα 7-39 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει θερμοκρασίας εξόδου από τον προθερμαντήρα με ατμό πριν τον οικονομητήρα



Διάγραμμα 7-40 : Απομαστευόμενος ατμός συναρτήσει θερμοκρασίας εξόδου από τον προθερμαντήρα με ατμό πριν τον οικονομητήρα

Απώλειες φίλτρων (mbar)	Παραγόμενη Ισχύς (MW)	Βαθμός απόδοσης (%)
0	476,36	52,58
10	470,42	52,45
20	464,52	52,32
30	458,72	52,19

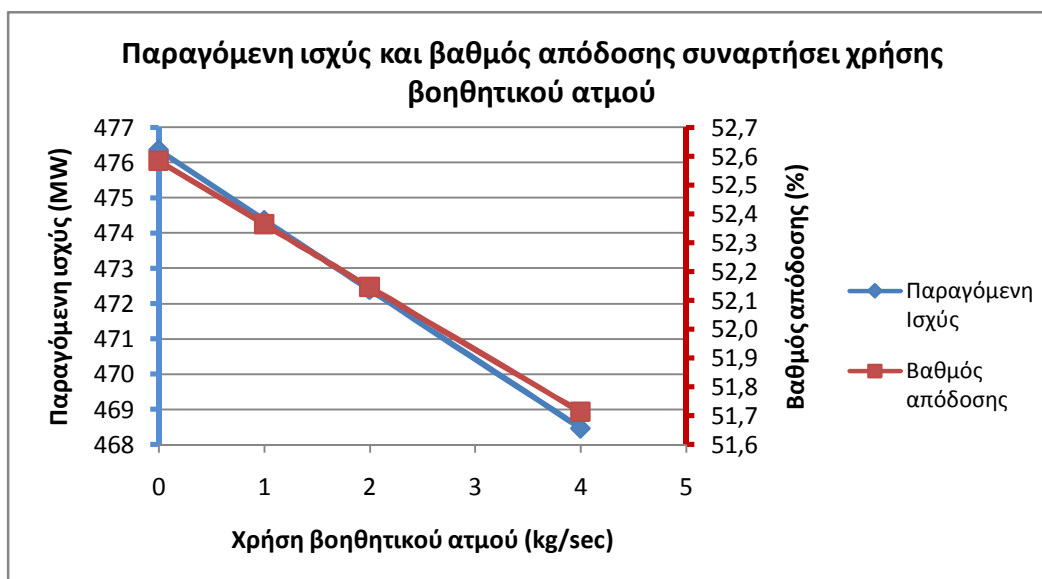
Πίνακας 7-46 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει απωλειών φίλτρων



Διάγραμμα 7-41 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει απωλειών φίλτρων

Χρήση βοηθητικού ατμού ανά λέβητα ανάκτησης (kg/sec)	Παραγόμενη Ισχύς (MW)	Βαθμός απόδοσης (%)
0	476,36	52,58
1	474,37	52,37
2	472,39	52,15
4	468,46	51,71

Πίνακας 7-47 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει χρήσης βοηθητικού ατμού

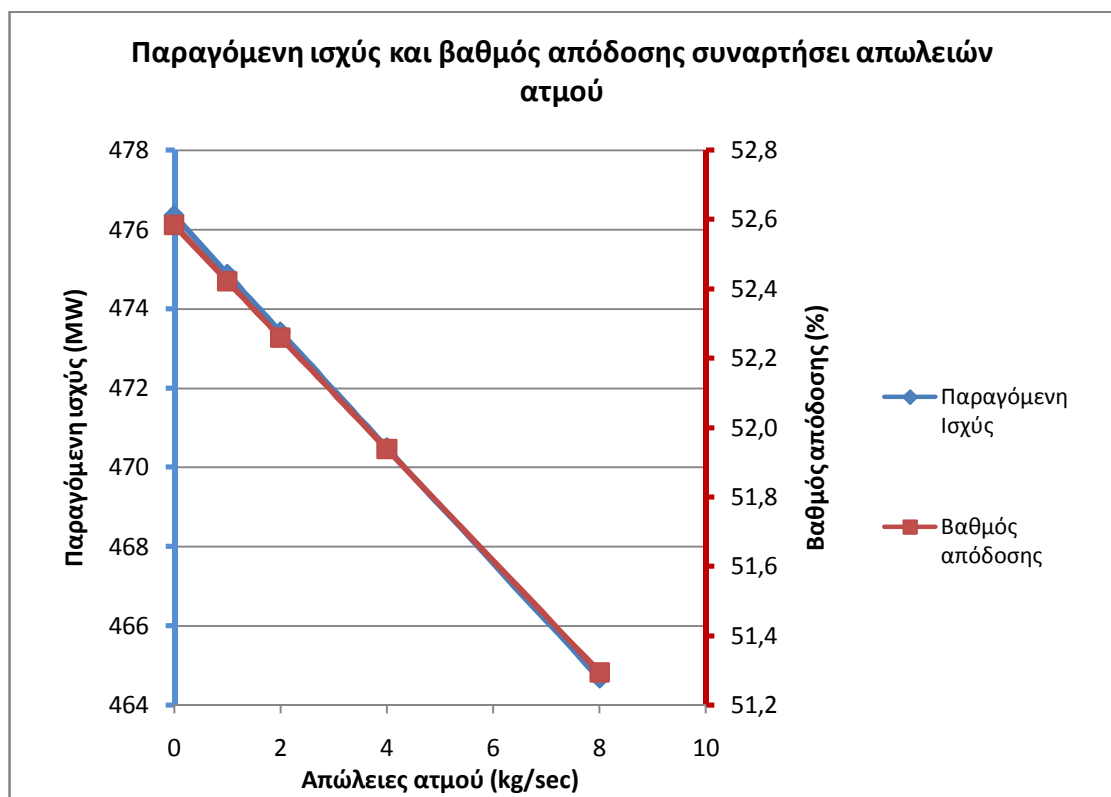


Διάγραμμα 7-42 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει χρήσης βοηθητικού ατμού



Απώλειες ατμού από το κύκλωμα ΥΠ (kg/sec)	Παραγόμενη Ισχύς (MW)	Βαθμός απόδοσης (%)
0	476,36	52,58
1	474,88	52,42
2	473,42	52,26
4	470,50	51,94
8	464,68	51,30

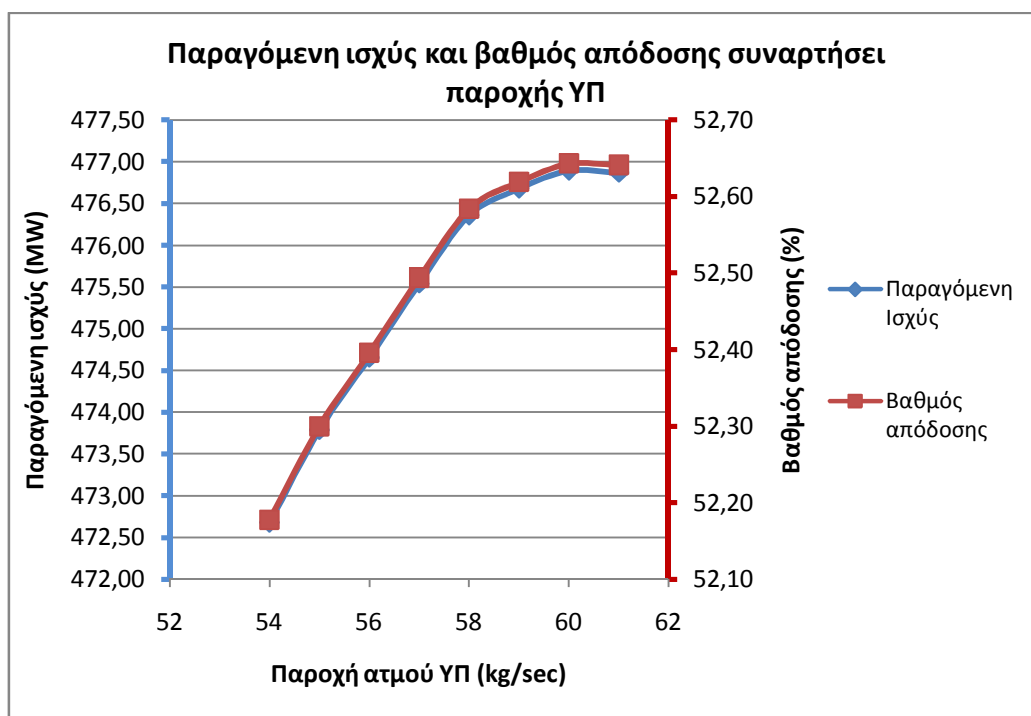
Πίνακας 7-48 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει απωλειών ατμού ΥΠ



Διάγραμμα 7-43 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει απωλειών ατμού ΥΠ

Παροχή ατμού ΥΠ ανά λέβητα ανάκτησης (kg/sec)	Παραγόμενη Ισχύς (MW)	Βαθμός απόδοσης (%)
61	476,87	52,64
60	476,89	52,64
59	476,68	52,62
58	476,36	52,58
57	475,54	52,49
56	474,65	52,40
55	473,79	52,30
54	472,68	52,18

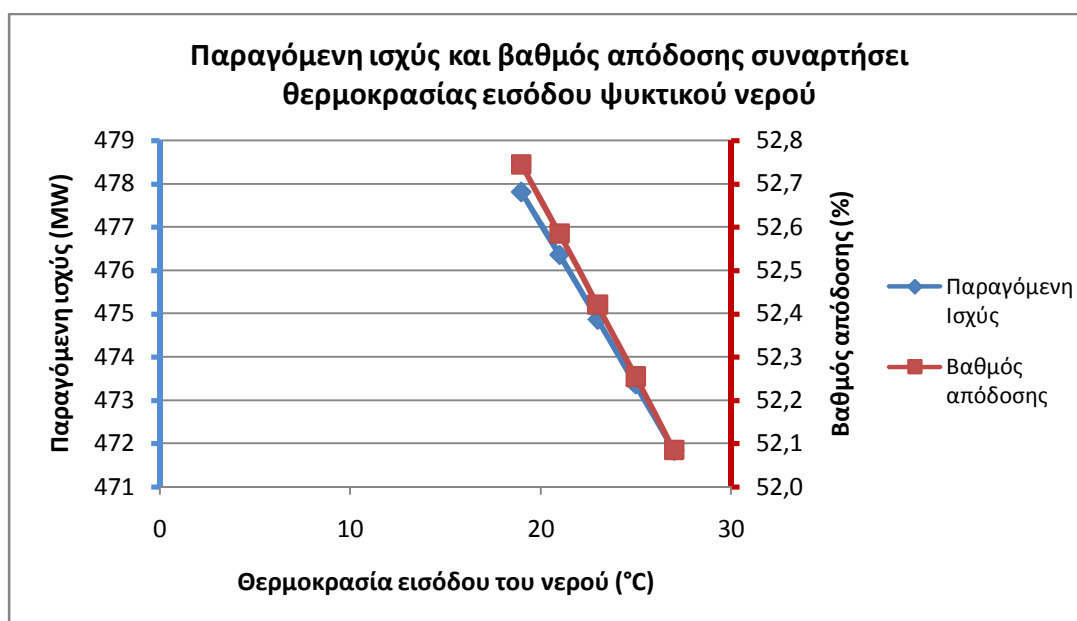
Πίνακας 7-49 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει μεταβολής παροχής στο κύκλωμα ΥΠ



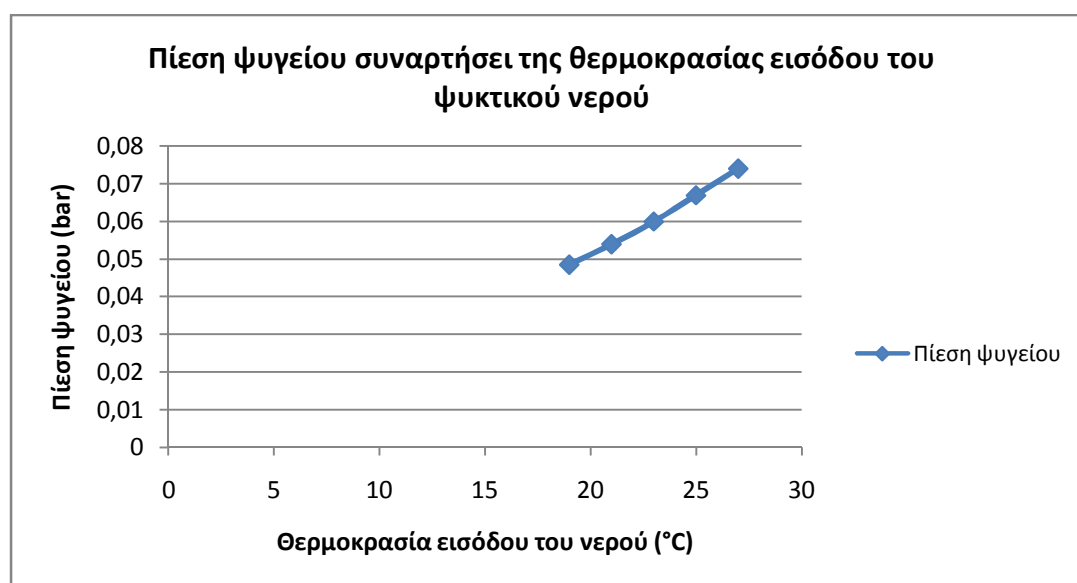
Διάγραμμα 7-44 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει μεταβολής παροχής στο κύκλωμα ΥΠ

Θερμοκρασία εισόδου ψυκτικού νερού (°C)	Παραγόμενη Ισχύς (MW)	Βαθμός απόδοσης (%)	Πίεση ψυγείου (bar)
19	477,81	52,74	0,049
21	476,36	52,58	0,054
23	474,87	52,42	0,060
25	473,36	52,25	0,067
27	471,84	52,09	0,074

Πίνακας 7-50 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει θερμοκρασίας εισόδου ψυκτικού νερού



Διάγραμμα 7-45 : Παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης συναρτήσει θερμοκρασίας εισόδου ψυκτικού νερού



Διάγραμμα 7-46 : Πίεση ψυγείου συναρτήσει θερμοκρασίας εισόδου ψυκτικού νερού

## Συμπεράσματα-προτάσεις

Όπως φαίνεται από τους παραπάνω πίνακες, τον μεγαλύτερο ρόλο στην παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος για τον ΑΗΣ Κομοτηνής, παίζουν οι ακόλουθοι παράγοντες κατά φθίνουσα σειρά σημαντικότητας:

- Διαφυγές ατμού
- Απόκλιση πίεσης του συμπυκνωτή
- Χρήση βοηθητικού ατμού
- Απώλειες φίλτρων
- Ιδιοκαταναλώσεις
- Λειτουργία προθερμαντή τροφοδοτικού νερού με ατμό

Επομένως την μεγαλύτερη επίδραση στην αύξηση του βαθμού απόδοσης θα έχει η αντικατάσταση φθαρμένων εξαρτημάτων που προκαλούν διαρροές ατμού, ακολούθως ο καθαρισμός και η βελτίωση της λειτουργίας του ψυγείου/συμπυκνωτή και τέλος, ο περιορισμός βοηθητικών καταναλώσεων ατμού. Επίσης συνιστάται ο συχνός καθαρισμός ή η αντικατάσταση των φίλτρων των αεριοστροβίλων. Παράλληλα κατέστη φανερό ότι υπάρχουν ακόμα δυνατότητες για περαιτέρω αύξηση του βαθμού απόδοσης με βελτίωση της λειτουργίας του προθερμαντή του τροφοδοτικού νερού. Ακόμα φάνηκε η σημαντική επίδραση της θερμοκρασίας του ψυκτικού νερού στη συνολική λειτουργία της εγκατάστασης, γι' αυτόν τον λόγο είναι σημαντική η καλή λειτουργία του πύργου ψύξης.

#### 7.4. Γενικά συμπεράσματα-αιτιολόγηση αποτελεσμάτων

Για όλες τις μονάδες είναι προφανές ότι με τη μείωση των ιδιοκαταναλώσεων ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή των εσωτερικών καταναλώσεων του σταθμού, αυξάνεται η καθαρά παραγόμενη ενέργεια του σταθμού, αυξάνοντας τον καθαρό βαθμό απόδοσης.

Όσον αφορά τον συμπυκνωτή στο κύκλωμα του ατμού, όσο μειώνεται η πίεση που επικρατεί στο εσωτερικό του τόσο αυξάνεται η διαφορά πίεσης στα άκρα του ατμοστροβίλου, με αποτέλεσμα να αποδίδεται περισσότερη ισχύς στον ατμοστροβίλο και να απορρίπτεται λιγότερη στο συμπυκνωτή. Έτσι αυξάνεται ο βαθμός απόδοσης. Για να γίνει δυνατό αυτό πρέπει:

-να χρησιμοποιείται όσο το δυνατό ψυχρότερο ψυκτικό μέσο, κάτι που δεν είναι πάντα εφικτό δεδομένου ότι στις μονάδες 1,2 και 4 του ΑΗΣ Λαυρίου η θερμοκρασία του ψυκτικού είναι η θερμοκρασία της θάλασσας. Για τον ΑΗΣ Κομοτηνής, που για τον συμπυκνωτή χρησιμοποιείται νερό που ψύχεται από πύργο ψύξης, είναι απαραίτητη η καλή λειτουργία του συστήματος του πύργου ψύξης, ώστε το ψυκτικό νερό να έχει την μικρότερη δυνατή θερμοκρασία.

-να βελτιωθεί η μετάδοση θερμότητας μεταξύ ψυκτικού νερού και συμπυκνώματος-ατμού, ώστε να μειωθεί η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ συμπυκνώματος ψυκτικού. Βεβαίως αυτό είναι κάτι που εξαρτάται από την κατασκευή του συμπυκνωτή. Εξαρτάται όμως και από την επικάλυψη αλάτων (fouling) στους σωλήνες συναλλαγής θερμότητας του συμπυκνωτή, ιδιαίτερα στις μονάδες 1,2 και 4 του Λαυρίου που χρησιμοποιούν θαλασσινό νερό για την ψύξη του συμπυκνωτή. Οι επικαθήσεις χειροτερεύουν τη συναλλαγή θερμότητας ενώ μπορούν να οδηγήσουν και σε φραγή των σωλήνων του συμπυκνωτή (tube blocking). Όλα αυτά οδηγούν σε αποκλίσεις της πίεσης του συμπυκνωτή από την πίεση που θα έχει ονομαστικά στην ίδια θερμοκρασία ψυκτικού και σε μείωση της παραγόμενης ισχύος και βαθμού απόδοσης.

Η υπόψυξη του συμπυκνώματος είναι κάτι ανεπιθύμητο, καθώς απαιτεί επιπλέον ενέργεια για:

1. την εισροή επιπλέον ψυκτικού νερού στον συμπυκνωτή για την υπόψυξη του συμπυκνώματος
2. την θέρμανση του υπόψυκτου συμπυκνώματος ως τον κορεσμό από τους προθερμαντές, τον οικονομητήρα και τον ατμοποιητή.

Η μείωση της θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ της εισόδου και της εξόδου του ψυκτικού νερού οδηγεί σε αύξηση του βαθμού απόδοσης, καθώς οι χαμηλές θερμοκρασίες του ψυκτικού ευνοούν την μεταφορά θερμότητας, επιφέροντας μείωση στην θερμοκρασία συμπύκνωσης του ατμού και κατά συνέπεια οδηγούν σε μικρότερη πίεση του συμπυκνωτή.

Ακόμα άμεση επίδραση στην παραγόμενη ισχύ και στο βαθμό απόδοσης ασκούν τυχόν απώλειες ατμού. Ο ατμός αυτός αποτελεί νερό, για το οποίο έχει απαιτηθεί ενέργεια για να αυξηθεί η πίεσή του και να θερμανθεί, να ατμοποιηθεί και να υπερθερμανθεί. Απώλειά του ισοδυναμεί με απώλεια της αντίστοιχης ενέργειας που θα μπορούσε να αποδώσει στον ατμοστροβίλο. Οι βοηθητικές καταναλώσεις ατμού, επίσης, επειδή δεν χρησιμοποιούνται για την απόδοση έργου στον ατμοστροβίλο, μειώνουν την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια και τον βαθμό απόδοσης ηλεκτροπαραγωγής. Τονίζεται ότι, στα πλαίσια αυτής της εργασίας, σαν ωφέλιμη ενέργεια θεωρείται μόνο η ηλεκτρική ενέργεια, ή η θερμική που χρησιμοποιείται άμεσα σε κάποιο σημείο των κυκλωμάτων νερού/ατμού ή αέρα/καυσαερίου, όπως π.χ. για προθέρμανση καυσίμου.

Στους συμβατικούς ατμοηλεκτρικούς σταθμούς του Λαυρίου 1 και 2 παράγοντα απωλειών αποτελεί και ο παρασιτικός αέρας μέσα από τον περιστροφικό προθερμαντή LUVO. Ο παρασιτικός αέρας εισέρχεται από τους ανεμιστήρες της εγκατάστασης, δεν συμμετέχει στην καύση, ενώ απορρίπτεται στο περιβάλλον σε μεγαλύτερη θερμοκρασία απ' αυτήν που εισήλθε, αποτελώντας μια επιπλέον θερμική απώλεια.

Σημαντική είναι και η σωστή λειτουργία των προθερμαντών με την χρήση ατμού. Όπως φαίνεται και από τα αποτελέσματα για την μονάδα 1 του ΑΗΣ Λαυρίου, είναι απαραίτητο η θερμοκρασία τροφοδοτικού νερού που επιτυγχάνεται από έναν προθερμαντήρα να είναι αυτή του σχεδιασμού, ούτε μικρότερη, καθώς το τροφοδοτικό νερό δεν θα θερμανθεί αρκετά και αυτό θα έχει επίπτωση στη συνολική ατμοπαραγωγή, ούτε μεγαλύτερη, για να μην οδηγήσει σε μεγάλη χρήση απομαστευόμενου ατμού από τον ατμοστρόβιλο.

Η χρήση ψεκασμού για την ρύθμιση της θερμοκρασίας, επιδρά αρνητικά στη συνολική απόδοση μιας μονάδας όπως φάνηκε και από την επίδραση στη μονάδα του ΑΗΣ Λαυρίου 2, όπου μελετήθηκε η επίδραση του ψεκασμού στον ανάθερμο ατμό.

Στους συνδυασμένους κύκλους Λαυρίου 4 και Κομοτηνής φαίνεται η επίδραση της παροχής ατμού υψηλής πίεσης στην παραγωγή έργου. Αυτό επιβεβαιώνει το γεγονός που αναφέρθηκε και στην ενότητα των συνδυασμένων κύκλων, ότι η υψηλή πίεση δίνει το μεγαλύτερο μέρος παραγωγής έργου, ενώ οι άλλες πιέσεις, μέση και χαμηλή, βοηθούν στην καλύτερη αξιοποίηση της θερμότητας των καυσαερίων. Μείωση της ατμοπαραγωγής υψηλής πίεσης θα οδηγήσει σε άμεση μείωση της παραγόμενης ισχύος.

Επίσης φαίνεται η επίδραση της προθέρμανσης του τροφοδοτικού νερού με ατμό στον συνδυασμένο κύκλο. Στην περίπτωση της Κομοτηνής η προθέρμανση του τροφοδοτικού νερού με την χρήση ατμού δεν προκαλεί μείωση της απόδοσης λόγω της ανακυκλοφορίας που γίνεται πριν από τον οικονομητήρα. Αντίθετα βελτιώνει τον βαθμό απόδοσης καθώς αυξάνεται η ατμοπαραγωγή. Εάν όμως δεν γινόταν ανακυκλοφορία του νερού, τότε η επίδραση της προθέρμανσης θα ήταν αρνητική, καθώς μεγαλύτερο μέρος της θερμικής ενέργειας των καυσαερίων θα απορριπτόταν, όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο της παρούσας που αφορά στους συνδυασμένους κύκλους.

Τέλος, η επίδραση των φίλτρων στη συμπεριφορά του συνδυασμένου κύκλου είναι πολύ σημαντική. Τα φίλτρα, αυξάνοντας τις απώλειες πίεσης, μειώνουν την διερχόμενη ποσότητα του αέρα από τον αεριοστρόβιλο, και κατά συνέπεια την συνολική αποδιδόμενη ισχύ ολόκληρου του συνδυασμένου κύκλου. Ο βαθμός απόδοσης επίσης μειώνεται λόγω της μικρότερης διαφοράς μέγιστης πίεσης και πίεσης περιβάλλοντος, στη συμπίεση και κατά συνέπεια στην εκτόνωση στον αεριοστρόβιλο.

## 8. Οικονομική ανάλυση

Προκειμένου να επιτευχθούν όλες οι παραπάνω δράσεις (π.χ. μείωση απόκλισης πίεσης συμπτωτική), απαιτούνται κάποιες επενδύσεις από πλευράς της ΔΕΗ Α.Ε. (π.χ. χημικός καθαρισμός συμπτωτική). Στις περιπτώσεις αυτών των μεγάλων δημοσίων έργων απαιτείται μια μεγάλη αρχική δαπάνη, η οποία ενδεχομένως να συνοδεύεται περιοδικά από άλλες δαπάνες για την συντήρηση της κατασκευής. Επομένως πρέπει να εκτιμηθεί η οικονομική βιωσιμότητα της επένδυσης και να εκτιμηθεί το κατά πόσο είναι συμφέρουσα σε σχέση με άλλες επενδύσεις.

Για τον έλεγχο της οικονομικής βιωσιμότητας αλλά και γενικά για την αξιολόγηση ενός έργου απαιτείται να τεθεί ένας χρονικός ορίζοντας της οικονομικής ανάλυσης, ο οποίος μπορεί να εκφράζει τη χρήσιμη φυσική ζωή ενός συστήματος, την οικονομική ζωή του συστήματος ή τη χρονική διάρκεια που μας ενδιαφέρει η πορεία της επένδυσης.

Οι μέθοδοι αξιολόγησης που θα χρησιμοποιηθούν είναι το κριτήριο του λόγου ωφελειών προς δαπάνες (benefit to cost ratio – BCR) και η μέθοδος της καθαρής παρούσας αξίας. Μια οικονομική δραστηριότητα θεωρείται οικονομικά αποδεκτή αν ο λόγος ωφελειών προς τις δαπάνες είναι μεγαλύτερος ή ίσος του 1.

Το κριτήριο της καθαρής παρούσας αξίας (Net Present Value-NPV): Ο λόγος που αναφέρεται ο όρος παρούσα αξία είναι γιατί το χρήμα δεν έχει την ίδια αξία με την πάροδο του χρόνου. Συγκεκριμένα 100€ με επιτόκιο κατάθεσης 8% ανά έτος, σε 5 χρόνια δεν θα αξίζουν 100€, αλλά 146,9€. Αντίστοιχα καταβλητέο μετά από 5 χρόνια ποσό ύψους σε 100€ και εφόσον το επιτόκιο είναι 8% ανά έτος, δεν έχει παρούσα αξία 100€ αλλά 68€ περίπου.

Η καθαρή παρούσα αξία ορίζεται ως η διαφορά του αθροίσματος της παρούσας αξίας όλων των μελλοντικών εισροών από το άθροισμα της παρούσας αξίας όλων των μελλοντικών εκροών ή δαπανών. Συγκεκριμένα:

$$NPV = B_o - C_o = \sum_{j=0}^n \frac{B_j}{(1+r)^j} - \sum_{j=0}^n \frac{C_j}{(1+r)^j}$$

Όπου  $B_o$  και  $C_o$  η παρούσα αξία των εσόδων και εξόδων αντίστοιχα, η χρονικός ορίζοντας,  $B_j$  και  $C_j$  τα έσοδα και έξοδα στο  $j$  έτος, ενώ  $r$  το επιτόκιο προεξόφλησης. Αντίστοιχα ο λόγος ωφελειών προς δαπάνες

$$BCR = \frac{B_o}{C_o} = \frac{\sum_{j=0}^n \frac{B_j}{(1+r)^j}}{\sum_{j=0}^n \frac{C_j}{(1+r)^j}}$$

Στην περίπτωση όπου μέρος του απαιτούμενου κεφαλαίου της επένδυσης προέρχεται από δάνειο, τότε ως επιπλέον έξοδο ανά έτος πρέπει να θεωρηθεί το τοκοχρεολύσιο δανεισμού που ισούται με :

$$X = \frac{K \cdot i}{1 - (1+i)^{-N}}, \text{ όπου } i \text{ το επιτόκιο δανεισμού (μεγαλύτερο από το}$$

προεξοφλητικό),  $K$  ύψος δανεισμού και  $N$  έτη αποπληρωμής του δανείου.

Τέλος πρέπει να αναφερθεί το γεγονός ότι και η καθαρή παρούσα αξία και ο λόγος ωφελειών προς δαπάνες εξαρτώνται από το προεξοφλητικό επιτόκιο  $r$ . Όσο η τιμή του  $r$

αυξάνει τόσο μειώνεται και η τιμή του NPV και BCR. Επομένως ορίζεται η εσωτερική απόδοση μιας επένδυσης (internal rate of return- IRR), ως το επιτόκιο για το οποίο η καθαρή παρούσα αξία μηδενίζεται, ενώ ο προσδιορισμός του γίνεται με δοκιμές.

Εν προκειμένω, το κόστος σε κάθε περίπτωση έχει δοθεί από τον κατάλογο δράσεων και αποτελεί το ύψος επένδυσης για την εκάστοτε δράση της κάθε μονάδας. Θα θεωρηθεί ότι όλο το ποσό της επένδυσης καλύπτεται από ίδια κεφάλαια. Ακόμα θα υπολογιστεί ένα επιπρόσθετο περιοδικό κόστος ανά έτος, ίσο με το 1/10 της αρχικής επένδυσης, προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι η μονάδα θα συνεχίσει να έχει σταθερό βαθμό απόδοσης. Τα έσοδα θα αποτελούνται από τα κέρδη από την πώληση επιπλέον KWh στους καταναλωτές. Θεωρείται ως τιμή πώλησης 0,1275€/KWh τιμή που απευθύνεται στους καταναλωτές χαμηλής τάσης (υπολογίστηκε σαν σταθμισμένος μέσος όρος για τις τιμές που δίνονται από το τιμολόγιο της ΔΕΗ στην κατηγορία 1.4, 2001-3000KWh ανά τετράμηνο). Επίσης θεωρείται ότι η κάθε συνδυασμένου κύκλου μονάδα προσφέρει 5500 ώρες λειτουργίας τον χρόνο, ενώ οι μονάδες 1 και 2 του Λαυρίου 3500hrs/έτος, οι υπόλοιπες ώρες αποτελούν προγραμματισμένες συντηρήσεις, διακοπές λειτουργίας λόγω μείωσης της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας και βλάβες. Επομένως σαν κέρδος θα θεωρείται μεταβολή (αύξηση) της ισχύος λόγω της εκάστοτε δράσης [MW] επί 5500 ή 3500 [hrs/έτος] επί 1000 [KW/MW] επί 0,1275 [€/KWh]. Ο ορίζοντας οικονομικής ανάλυσης είναι 20 χρόνια, ενώ το προεξοφλητικό επιτόκιο θεωρείται 6%.

Ο βαθμός απόδοσης και η αύξησή του από κάθε δράση θεωρούνται σταθερά, ενώ θεωρείται ότι η εξεταζόμενη μονάδα λειτουργεί στο πλήρες φορτίο. Στην πραγματικότητα όμως τα παραπάνω δεν ισχύουν γιατί:

1. Ο βαθμός απόδοσης σε ατμοηλεκτρικούς σταθμούς εξαρτάται από την πίεση του συμπυκνωτή και κατά συνέπεια την θερμοκρασία του ψυκτικού, που μεταβάλλεται κατά την διάρκεια του έτους. Όσον αφορά τον συνδυασμένο κύκλο τα πράγματα είναι μάλλον πιο ευμετάβλητα καθώς, εκτός από την επίδραση του ψυκτικού στο κύκλωμα ατμού, υπάρχει και η έντονη επίδραση της θερμοκρασίας του αέρα στην απόδοση του αεριοστροβίλου, η επίδραση των επικαθήσεων σε φίλτρα αλλά και στον ίδιο τον αεριοστρόβιλο κλπ.
2. Οι μονάδες ηλεκτροπαραγωγής δεν λειτουργούν στο πλήρες φορτίο καθώς υπάρχουν διακυμάνσεις στην ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας κατά την διάρκεια του έτους.

Η οικονομική ανάλυση θα γίνει για τις μονάδες 1 και 2 του ΑΗΣ Λαυρίου για τις οποίες έχουν δοθεί και αναλυτικά στοιχεία του ύψους και του είδους των επενδύσεων.

### **8.1 Μονάδα 1 ΑΗΣ Λαυρίου**

Για την μονάδα 1 του ΑΗΣ Λαυρίου με ισχύ παρούσας κατάστασης 136,30MW και βαθμό απόδοσης 38,16% :

1. Η συντήρηση του ψυγείου απαιτεί κεφάλαιο ύψους 100.000€, ενώ οδηγεί σε αύξηση του βαθμού απόδοσης κατά 0,88%
2. Η στεγανοποίηση του LUVO 150.000€, ενώ δίνει αύξηση 0,13%
3. Αντικατάσταση προθερμαντικών στοιχείων 150.000€, δίνοντας 0,5% (για θερμοκρασία τροφοδοτικού νερού εισόδου στον οικονομητήρα 247°C)
4. Η στεγανοποίηση του κυκλώματος ατμού 130.000€, δίνοντας 0,28%
5. Μείωση των καταναλώσεων θερμότητας 50.000€, δίνοντας 0,19%



**Πίνακας 8-1:Συντήρηση του ψυγείου (Μονάδα 1 ΑΗΣ Λαυρίου)**

Έτη	Κόστος	Δάνειο	Τοκοχρεολύσιο	Έξοδα	Έσοδα	Συντελεστής Παρούσας Αξίας	Παρούσα αξία		NPV κάθε έτους	NPV αθροιστικά
							Έξοδα	Έσοδα		
0	100000	0	-	-	-	1	100000	-	-100000	-100000
1			0	10000	1402926	0,943396226	9433,9623	1323515	1314081	1214080,826
2			0	10000	1402926	0,88999644	8899,9644	1248599	1239699	2453779,719
3			0	10000	1402926	0,839619283	8396,1928	1177923	1169527	3623306,976
4			0	10000	1402926	0,792093663	7920,9366	1111249	1103328	4726634,577
5			0	10000	1402926	0,747258173	7472,5817	1048348	1040875	5767509,673
6			0	10000	1402926	0,70496054	7049,6054	989007,2	981957,6	6749467,31
7			0	10000	1402926	0,665057114	6650,5711	933025,7	926375,1	7675842,439
8			0	10000	1402926	0,627412371	6274,1237	880212,9	873938,8	8549781,241
9			0	10000	1402926	0,591898464	5918,9846	830389,6	824470,6	9374251,808
10			0	10000	1402926	0,558394777	5583,9478	783386,4	777802,4	10152054,23
11			0	10000	1402926	0,526787525	5267,8753	739043,7	733775,9	10885830,1
12			0	10000	1402926	0,496969364	4969,6936	697211,1	692241,4	11578071,49
13			0	10000	1402926	0,468839022	4688,3902	657746,3	653057,9	12231129,4
14			0	10000	1402926	0,442300964	4423,0096	620515,4	616092,4	12847221,77
15			0	10000	1402926	0,417265061	4172,6506	585391,9	581219,2	13428440,98
16			0	10000	1402926	0,393646284	3936,4628	552256,5	548320	13976761
17			0	10000	1402926	0,371364419	3713,6442	520996,7	517283	14494044,03
18			0	10000	1402926	0,350343791	3503,4379	491506,3	488002,9	14982046,9
19			0	10000	1402926	0,33051301	3305,1301	463685,2	460380,1	15442426,95
20			0	10000	1402926	0,311804727	3118,0473	437438,9	434320,8	15876747,76
						Σύνολο	214699,21	16091447		
<b>Περίοδος αποπληρωμής</b>	<b>0,913186</b>	<b>μήνες</b>				NPV=	15876748	€	BCR	74,94879377

Πίνακας 8-2:Στεγανοποίηση LUVO (Μονάδα 1 ΑΗΣ Λαυρίου)

Έτη	Κόστος	Δάνειο	Τοκοχρεολύσιο	Έξοδα	Έσοδα	Συντελεστής Παρούσας Αξίας	Παρούσα αξία		NPV κάθε έτους	NPV αθροιστικά
							Έξοδα	Έσοδα		
0	150000	0	-	-	-	1	150000	-	-150000	-150000
1			0	15000	207250,4	0,943396226	14150,943	195519,2	181368,3	31368,28672
2			0	15000	207250,4	0,88999644	13349,947	184452,1	171102,2	202470,444
3			0	15000	207250,4	0,839619283	12594,289	174011,4	161417,1	363887,5735
4			0	15000	207250,4	0,792093663	11881,405	164161,7	152280,3	516167,8844
5			0	15000	207250,4	0,747258173	11208,873	154869,5	143660,7	659828,555
6			0	15000	207250,4	0,70496054	10574,408	146103,3	135528,9	795357,4896
7			0	15000	207250,4	0,665057114	9975,8567	137833,3	127857,5	923214,975
8			0	15000	207250,4	0,627412371	9411,1856	130031,5	120620,3	1043835,244
9			0	15000	207250,4	0,591898464	8878,477	122671,2	113792,7	1157627,951
10			0	15000	207250,4	0,558394777	8375,9217	115727,5	107351,6	1264979,561
11			0	15000	207250,4	0,526787525	7901,8129	109176,9	101275,1	1366254,665
12			0	15000	207250,4	0,496969364	7454,5405	102997,1	95542,55	1461797,216
13			0	15000	207250,4	0,468839022	7032,5853	97167,07	90134,48	1551931,698
14			0	15000	207250,4	0,442300964	6634,5145	91667,04	85032,53	1636964,229
15			0	15000	207250,4	0,417265061	6258,9759	86478,34	80219,37	1717183,597
16			0	15000	207250,4	0,393646284	5904,6943	81583,34	75678,65	1792862,246
17			0	15000	207250,4	0,371364419	5570,4663	76965,42	71394,95	1864257,198
18			0	15000	207250,4	0,350343791	5255,1569	72608,89	67353,73	1931610,926
19			0	15000	207250,4	0,33051301	4957,6952	68498,95	63541,25	1995152,179
20			0	15000	207250,4	0,311804727	4677,0709	64621,65	59944,58	2055096,758
						Σύνολο	322048,82	2377146		
<b>Περίοδος αποπληρωμής</b>	<b>9,924558</b>	<b>μήνες</b>				NPV=	2055096,8	€	BCR	7,381320599

**Πίνακας 8-3: Αντικατάσταση προθερμαντικών στοιχείων (247°C είσοδος οικονομητήρα) (Μονάδα 1 ΑΗΣ Λαυρίου)**

Έτη	Κόστος	Δάνειο	Τοκοχρεολύσιο	Έξοδα	Έσοδα	Συντελεστής Παρούσας Αξίας	Παρούσα αξία		NPV κάθε έτους	NPV αθροιστικά
							Έξοδα	Έσοδα		
0	150000	0	-	-	-	1	150000	-	-150000	-150000
1			0	15000	797116,9	0,943396226	14150,943	751997	737846,1	587846,0955
2			0	15000	797116,9	0,88999644	13349,947	709431,2	696081,2	1283927,318
3			0	15000	797116,9	0,839619283	12594,289	669274,7	656680,4	1940607,716
4			0	15000	797116,9	0,792093663	11881,405	631391,2	619509,8	2560117,526
5			0	15000	797116,9	0,747258173	11208,873	595652,1	584443,2	3144560,742
6			0	15000	797116,9	0,70496054	10574,408	561935,9	551361,5	3695922,268
7			0	15000	797116,9	0,665057114	9975,8567	530128,2	520152,4	4216074,65
8			0	15000	797116,9	0,627412371	9411,1856	500121	490709,8	4706784,444
9			0	15000	797116,9	0,591898464	8878,477	471812,2	462933,8	5169718,213
10			0	15000	797116,9	0,558394777	8375,9217	445105,9	436730	5606448,183
11			0	15000	797116,9	0,526787525	7901,8129	419911,2	412009,4	6018457,589
12			0	15000	797116,9	0,496969364	7454,5405	396142,7	388688,1	6407145,708
13			0	15000	797116,9	0,468839022	7032,5853	373719,5	366686,9	6773832,612
14			0	15000	797116,9	0,442300964	6634,5145	352565,6	345931	7119763,654
15			0	15000	797116,9	0,417265061	6258,9759	332609	326350	7446113,694
16			0	15000	797116,9	0,393646284	5904,6943	313782,1	307877,4	7753991,09
17			0	15000	797116,9	0,371364419	5570,4663	296020,8	290450,4	8044441,463
18			0	15000	797116,9	0,350343791	5255,1569	279264,9	274009,8	8318451,25
19			0	15000	797116,9	0,33051301	4957,6952	263457,5	258499,8	8576951,048
20			0	15000	797116,9	0,311804727	4677,0709	248544,8	243867,7	8820818,782
						Σύνολο	322048,82	9142868		
<b>Περίοδος αποπληρωμής</b>	<b>2,439533</b>	<b>μήνες</b>				NPV=	8820818,8	€	BCR	28,38969461

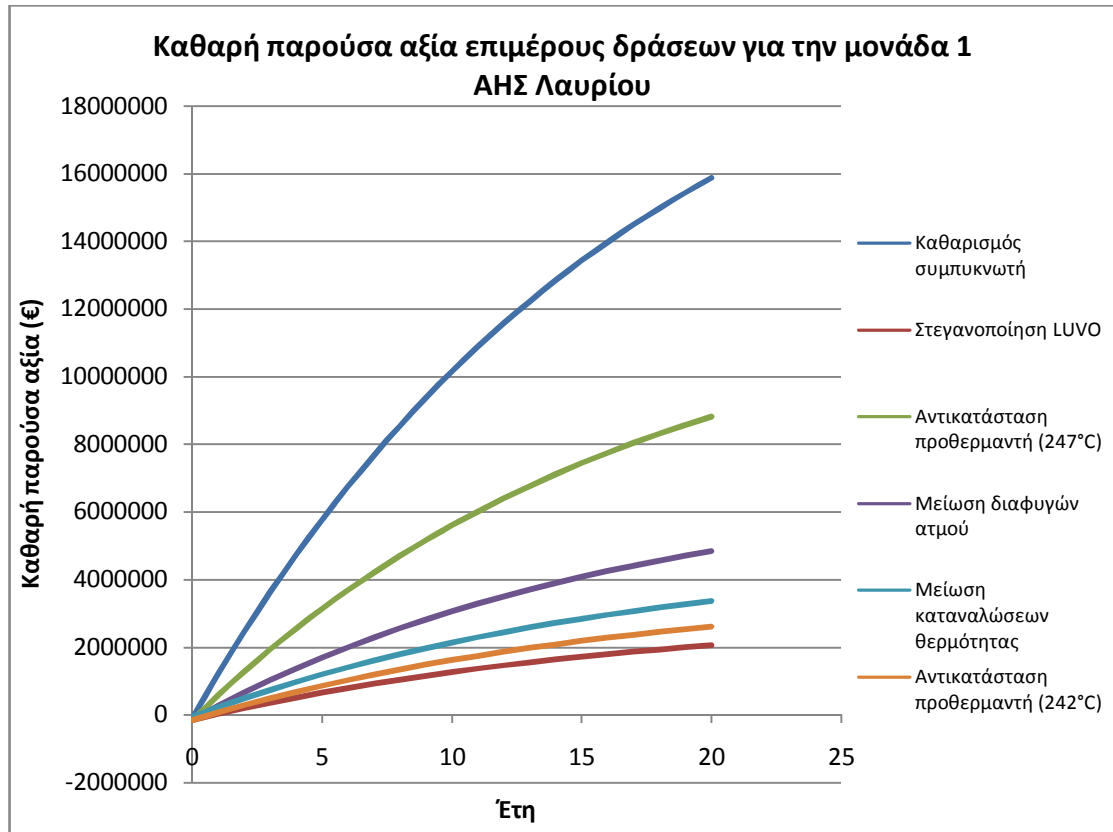
**Πίνακας 8-4:Στεγανοποίηση του κυκλώματος ατμού (Μονάδα 1 ΑΗΣ Λαυρίου)**

Έτη	Κόστος	Δάνειο	Τοκοχρεολύσιο	Έξοδα	Έσοδα	Συντελεστής Παρούσας Αξίας	Παρούσα αξία		NPV κάθε έτους	NPV αθροιστικά
							Έξοδα	Έσοδα		
0	130000	0	-	-	-	1	130000	-	-130000	-130000
1			0	13000	446385,4	0,943396226	12264,151	421118,3	408854,2	278854,1908
2			0	13000	446385,4	0,88999644	11569,954	397281,5	385711,5	664565,6916
3			0	13000	446385,4	0,839619283	10915,051	374793,8	363878,8	1028444,466
4			0	13000	446385,4	0,792093663	10297,218	353579,1	343281,9	1371726,329
5			0	13000	446385,4	0,747258173	9714,3562	333565,2	323850,8	1695577,142
6			0	13000	446385,4	0,70496054	9164,487	314684,1	305519,6	2001096,778
7			0	13000	446385,4	0,665057114	8645,7425	296871,8	288226,1	2289322,849
8			0	13000	446385,4	0,627412371	8156,3608	280067,7	271911,4	2561234,237
9			0	13000	446385,4	0,591898464	7694,68	264214,9	256520,2	2817754,415
10			0	13000	446385,4	0,558394777	7259,1321	249259,3	242000,2	3059754,582
11			0	13000	446385,4	0,526787525	6848,2378	235150,3	228302	3288056,627
12			0	13000	446385,4	0,496969364	6460,6017	221839,9	215379,3	3503435,914
13			0	13000	446385,4	0,468839022	6094,9073	209282,9	203188	3706623,921
14			0	13000	446385,4	0,442300964	5749,9125	197436,7	191686,8	3898310,72
15			0	13000	446385,4	0,417265061	5424,4458	186261	180836,6	4079147,323
16			0	13000	446385,4	0,393646284	5117,4017	175718	170600,6	4249747,892
17			0	13000	446385,4	0,371364419	4827,7374	165771,7	160943,9	4410691,825
18			0	13000	446385,4	0,350343791	4554,4693	156388,4	151833,9	4562525,724
19			0	13000	446385,4	0,33051301	4296,6691	147536,2	143239,5	4705765,251
20			0	13000	446385,4	0,311804727	4053,4614	139185,1	135131,6	4840896,88
						Σύνολο	279108,98	5120006		
<b>Περίοδος αποπληρωμής</b>	<b>3,815541</b>	<b>μήνες</b>				NPV=	4840896,9	€	BCR	18,34411036

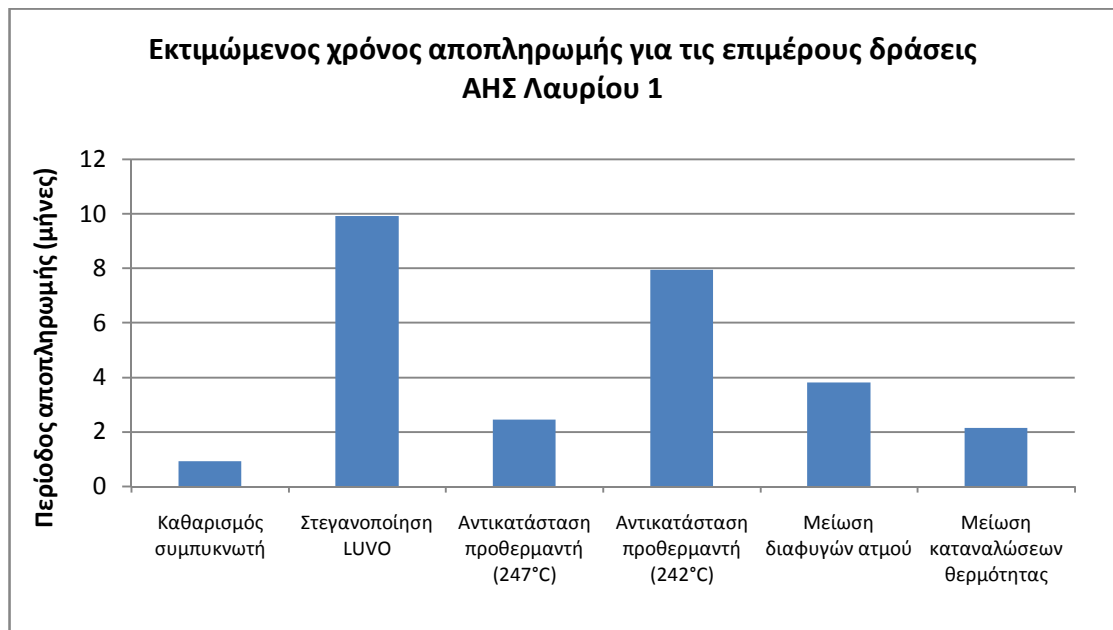
**Πίνακας 8-5: Δράσεις για μείωση των καταναλώσεων θερμότητας (Μονάδα 1 ΑΗΣ Λαυρίου)**

Έτη	Κόστος	Δάνειο	Τοκοχρεολύσιο	Έξοδα	Έσοδα	Συντελεστής Παρούσας Αξίας	Παρούσα αξία		NPV κάθε έτους	NPV αθροιστικά
							Έξοδα	Έσοδα		
0	50000	0	-	-	-	1	50000	-	-50000	-50000
1			0	5000	302904,4	0,943396226	4716,9811	285758,9	281041,9	231041,8937
2			0	5000	302904,4	0,88999644	4449,9822	269583,8	265133,9	496175,7556
3			0	5000	302904,4	0,839619283	4198,0964	254324,4	250126,3	746302,0404
4			0	5000	302904,4	0,792093663	3960,4683	239928,7	235968,2	982270,2337
5			0	5000	302904,4	0,747258173	3736,2909	226347,8	222611,5	1204881,737
6			0	5000	302904,4	0,70496054	3524,8027	213535,7	210010,9	1414892,589
7			0	5000	302904,4	0,665057114	3325,2856	201448,7	198123,4	1613016,034
8			0	5000	302904,4	0,627412371	3137,0619	190046	186908,9	1799924,945
9			0	5000	302904,4	0,591898464	2959,4923	179288,7	176329,2	1976254,105
10			0	5000	302904,4	0,558394777	2791,9739	169140,2	166348,3	2142602,371
11			0	5000	302904,4	0,526787525	2633,9376	159566,3	156932,3	2299534,696
12			0	5000	302904,4	0,496969364	2484,8468	150534,2	148049,4	2447584,06
13			0	5000	302904,4	0,468839022	2344,1951	142013,4	139669,2	2587253,271
14			0	5000	302904,4	0,442300964	2211,5048	133974,9	131763,4	2719016,677
15			0	5000	302904,4	0,417265061	2086,3253	126391,4	124305,1	2843321,778
16			0	5000	302904,4	0,393646284	1968,2314	119237,2	117269	2960590,741
17			0	5000	302904,4	0,371364419	1856,8221	112487,9	110631,1	3071221,838
18			0	5000	302904,4	0,350343791	1751,719	106120,7	104369	3175590,797
19			0	5000	302904,4	0,33051301	1652,5651	100113,8	98461,28	3274052,08
20			0	5000	302904,4	0,311804727	1559,0236	94447,03	92888	3366940,082
						Σύνολο	107349,61	3474290		
<b>Περίοδος αποπληρωμής</b>	<b>2,134913</b>	<b>μήνες</b>				NPV=	3366940,1	€	BCR	32,36425186

Με συνοπτική απεικόνιση όλων των αποτελεσμάτων



Διάγραμμα 8-1: Καθαρή παρούσα αξία επιμέρους δράσεων για την μονάδα 1 ΑΗΣ Λαυρίου



Διάγραμμα 8-2: Εκτιμώμενος χρόνος αποπληρωμής επιμέρους δράσεων για την μονάδα 1 ΑΗΣ Λαυρίου

Όπως φαίνεται και από την οικονομική ανάλυση, οικονομικά πιο συμφέρων είναι ο καθαρισμός του συμπυκνωτή, καθώς εξασφαλίζει μεγάλη αύξηση του βαθμού απόδοσης, το μεγαλύτερο κέρδος σε καθαρή παρούσα αξία και τον μικρότερο χρόνο αποπληρωμής, αποτελώντας τελικά μια επένδυση μικρού ρίσκου. Ακολουθεί η μείωση διαφυγών νερού-ατμού, η μείωση καταναλώσεων θερμότητας και η στεγανοποίηση του προθερμαντή αέρα με καυσαέριο (LUVO). Το κατά πόσο είναι συμφέρουσα η αντικατάσταση των προθερμαντών εξαρτάται από την θερμοκρασία εισόδου στον οικονομητήρα που θα επιτευχθεί μετά την αντικατάσταση.

## **8.2 Μονάδα 2 ΑΗΣ Λαυρίου**

Ομοίως για την μονάδα 2 του ΑΗΣ Λαυρίου με ισχύ παρούσας κατάστασης 275,14MW και βαθμό απόδοσης 39,09% :

1. Η συντήρηση του ψυγείου απαιτεί κεφάλαιο ύψους 50.000€, ενώ οδηγεί σε αύξηση του βαθμού απόδοσης κατά 0,63%
2. Η ρύθμιση του λέβητα και ο περιορισμός του ψεκασμού 90.000€, ενώ δίνει αύξηση 0,07%
3. Η στεγανοποίηση του κυκλώματος ατμού 120.000€, δίνοντας 0,3%
4. Μείωση των καταναλώσεων θερμότητας 110.000€, δίνοντας 0,11%

**Πίνακας 8-6: Συντήρηση του ψυγείου (Μονάδα 2 ΑΗΣ Λαυρίου)**

Έτη	Κόστος	Δάνειο	Τοκοχρεολύσιο	Έξοδα	Έσοδα	Συντελεστής Παρούσας Αξίας	Παρούσα αξία		NPV κάθε έτους	NPV αθροιστικά
							Έξοδα	Έσοδα		
0	50000	0	-	-	-	1	50000	-	-50000	-50000
1			0	5000	1979077	0,943396226	4716,9811	1867054	1862337	1812337,073
2			0	5000	1979077	0,88999644	4449,9822	1761372	1756922	3569258,84
3			0	5000	1979077	0,839619283	4198,0964	1661671	1657473	5226732,205
4			0	5000	1979077	0,792093663	3960,4683	1567615	1563654	6790386,323
5			0	5000	1979077	0,747258173	3736,2909	1478882	1475145	8265531,717
6			0	5000	1979077	0,70496054	3524,8027	1395171	1391647	9657178,316
7			0	5000	1979077	0,665057114	3325,2856	1316199	1312874	10970052,47
8			0	5000	1979077	0,627412371	3137,0619	1241698	1238561	12208612,98
9			0	5000	1979077	0,591898464	2959,4923	1171413	1168453	13377066,3
10			0	5000	1979077	0,558394777	2791,9739	1105106	1102314	14479380,75
11			0	5000	1979077	0,526787525	2633,9376	1042553	1039919	15519300,05
12			0	5000	1979077	0,496969364	2484,8468	983540,8	981055,9	16500355,99
13			0	5000	1979077	0,468839022	2344,1951	927868,7	925524,5	17425880,46
14			0	5000	1979077	0,442300964	2211,5048	875347,8	873136,3	18299016,75
15			0	5000	1979077	0,417265061	2086,3253	825799,8	823713,5	19122730,23
16			0	5000	1979077	0,393646284	1968,2314	779056,4	777088,2	19899818,42
17			0	5000	1979077	0,371364419	1856,8221	734958,9	733102,1	20632920,49
18			0	5000	1979077	0,350343791	1751,719	693357,4	691605,7	21324526,22
19			0	5000	1979077	0,33051301	1652,5651	654110,8	652458,2	21976984,45
20			0	5000	1979077	0,311804727	1559,0236	617085,7	615526,6	22592511,08
						Σύνολο	107349,61	22699861		
<b>Περίοδος αποπληρωμής</b>	<b>0,322176</b>	<b>μήνες</b>				NPV=	22592511	€	BCR	211,4573263



**Πίνακας 8-7: Συντήρηση λέβητα (Μονάδα 2 ΑΗΣ Λαυρίου)**

Έτη	Κόστος	Δάνειο	Τοκοχρεολύσιο	Έξοδα	Έσοδα	Συντελεστής Παρούσας Αξίας	Παρούσα αξία		NPV κάθε έτους	NPV αθροιστικά
							Έξοδα	Έσοδα		
0	90000	0	-	-	-	1	90000	-	-90000	-90000
1			0	9000	219895,9	0,943396226	8490,566	207448,9	198958,4	108958,3765
2			0	9000	219895,9	0,88999644	8009,968	195706,5	187696,6	296654,958
3			0	9000	219895,9	0,839619283	7556,5735	184628,8	177072,2	473727,2048
4			0	9000	219895,9	0,792093663	7128,843	174178,1	167049,3	640776,4941
5			0	9000	219895,9	0,747258173	6725,3236	164319	157593,7	798370,1634
6			0	9000	219895,9	0,70496054	6344,6449	155017,9	148673,3	947043,4362
7			0	9000	219895,9	0,665057114	5985,514	146243,3	140257,8	1087301,241
8			0	9000	219895,9	0,627412371	5646,7113	137965,4	132318,7	1219619,924
9			0	9000	219895,9	0,591898464	5327,0862	130156	124828,9	1344448,871
10			0	9000	219895,9	0,558394777	5025,553	122788,7	117763,2	1462212,029
11			0	9000	219895,9	0,526787525	4741,0877	115838,4	111097,3	1573309,347
12			0	9000	219895,9	0,496969364	4472,7243	109281,5	104808,8	1678118,138
13			0	9000	219895,9	0,468839022	4219,5512	103095,8	98876,22	1776994,355
14			0	9000	219895,9	0,442300964	3980,7087	97260,16	93279,45	1870273,806
15			0	9000	219895,9	0,417265061	3755,3855	91754,87	87999,48	1958273,288
16			0	9000	219895,9	0,393646284	3542,8166	86561,2	83018,38	2041291,667
17			0	9000	219895,9	0,371364419	3342,2798	81661,51	78319,23	2119610,892
18			0	9000	219895,9	0,350343791	3153,0941	77039,16	73886,06	2193496,954
19			0	9000	219895,9	0,33051301	2974,6171	72678,45	69703,83	2263200,786
20			0	9000	219895,9	0,311804727	2806,2425	68564,57	65758,33	2328959,118
						Σύνολο	193229,29	2522188		
<b>Περίοδος αποπληρωμής</b>	<b>5,428271</b>	<b>μήνες</b>				NPV=	2328959,1	€	BCR	13,0528265

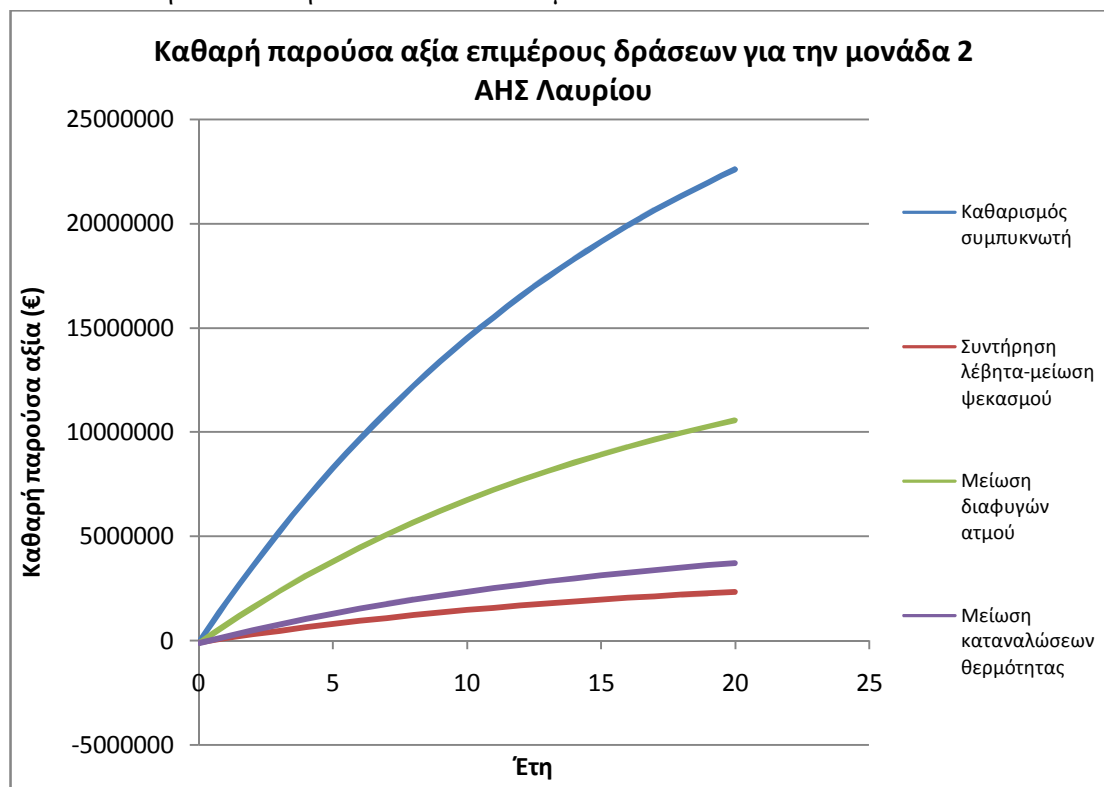
**Πίνακας 8-8: Στεγανοποίηση του κυκλώματος ατμού (Μονάδα 2 ΑΗΣ Λαυρίου)**

Έτη	Κόστος	Δάνειο	Τοκοχρεολύσιο	Έξοδα	Έσοδα	Συντελεστής Παρούσας Αξίας	Παρούσα αξία		NPV κάθε έτους	NPV αθροιστικά
							Έξοδα	Έσοδα		
0	120000	0	-	-	-	1	120000	-	-120000	-120000
1			0	12000	942410,9	0,943396226	11320,755	889066,9	877746,1	757746,1417
2			0	12000	942410,9	0,88999644	10679,957	838742,4	828062,4	1585808,539
3			0	12000	942410,9	0,839619283	10075,431	791266,4	781190,9	2366999,481
4			0	12000	942410,9	0,792093663	9505,124	746477,7	736972,6	3103972,067
5			0	12000	942410,9	0,747258173	8967,0981	704224,3	695257,2	3799229,224
6			0	12000	942410,9	0,70496054	8459,5265	664362,5	655903	4455132,202
7			0	12000	942410,9	0,665057114	7980,6854	626757,1	618776,4	5073908,596
8			0	12000	942410,9	0,627412371	7528,9485	591280,3	583751,3	5657659,912
9			0	12000	942410,9	0,591898464	7102,7816	557811,6	550708,8	6208368,7
10			0	12000	942410,9	0,558394777	6700,7373	526237,3	519536,6	6727905,292
11			0	12000	942410,9	0,526787525	6321,4503	496450,3	490128,9	7218034,153
12			0	12000	942410,9	0,496969364	5963,6324	468349,4	462385,7	7680419,871
13			0	12000	942410,9	0,468839022	5626,0683	441839	436212,9	8116632,813
14			0	12000	942410,9	0,442300964	5307,6116	416829,3	411521,6	8528154,455
15			0	12000	942410,9	0,417265061	5007,1807	393235,1	388228	8916382,42
16			0	12000	942410,9	0,393646284	4723,7554	370976,6	366252,8	9282635,218
17			0	12000	942410,9	0,371364419	4456,373	349977,9	345521,5	9628156,724
18			0	12000	942410,9	0,350343791	4204,1255	330167,8	325963,7	9954120,41
19			0	12000	942410,9	0,33051301	3966,1561	311479,1	307512,9	10261633,32
20			0	12000	942410,9	0,311804727	3741,6567	293848,2	290106,5	10551739,84
						Σύνολο	257639,05	10809379		
<b>Περίοδος αποπληρωμής</b>	<b>1,640565</b>	<b>μήνες</b>				NPV=	10551740	€	BCR	41,95551374

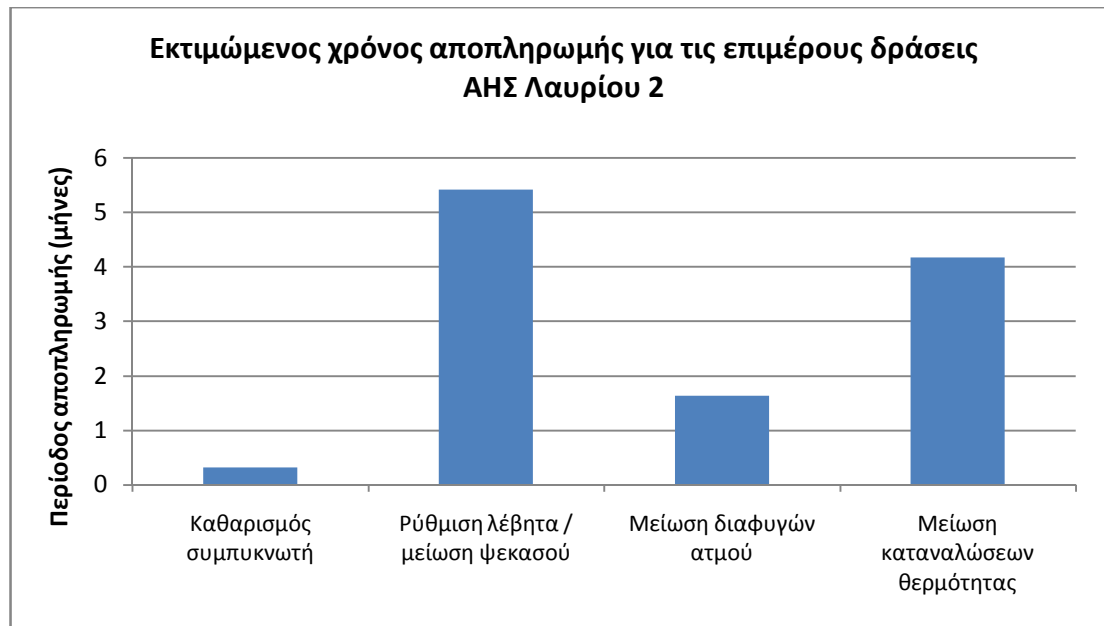
**Πίνακας 8-9: Δράσεις για μείωση βοηθητικών καταναλώσεων θερμότητας (Μονάδα 2 ΑΗΣ Λαυρίου)**

Έτη	Κόστος	Δάνειο	Τοκοχρεολύσιο	Έξοδα	Έσοδα	Συντελεστής Παρούσας Αξίας	Παρούσα αξία		NPV κάθε έτους	NPV αθροιστικά
							Έξοδα	Έσοδα		
0	110000	0	-	-	-	1	110000	-	-110000	-110000
1			0	11000	345550,7	0,943396226	10377,358	325991,2	315613,8	205613,8368
2			0	11000	345550,7	0,88999644	9789,9608	307538,9	297748,9	503362,7395
3			0	11000	345550,7	0,839619283	9235,8121	290131	280895,2	784257,9308
4			0	11000	345550,7	0,792093663	8713,0303	273708,5	264995,5	1049253,394
5			0	11000	345550,7	0,747258173	8219,8399	258215,6	249995,7	1299249,114
6			0	11000	345550,7	0,70496054	7754,5659	243599,6	235845	1535094,133
7			0	11000	345550,7	0,665057114	7315,6282	229810,9	222495,3	1757589,434
8			0	11000	345550,7	0,627412371	6901,5361	216802,8	209901,2	1967490,662
9			0	11000	345550,7	0,591898464	6510,8831	204530,9	198020	2165510,688
10			0	11000	345550,7	0,558394777	6142,3425	192953,7	186811,3	2352322,033
11			0	11000	345550,7	0,526787525	5794,6628	182031,8	176237,1	2528559,151
12			0	11000	345550,7	0,496969364	5466,663	171728,1	166261,4	2694820,583
13			0	11000	345550,7	0,468839022	5157,2292	162007,6	156850,4	2851670,99
14			0	11000	345550,7	0,442300964	4865,3106	152837,4	147972,1	2999643,073
15			0	11000	345550,7	0,417265061	4589,9157	144186,2	139596,3	3139239,377
16			0	11000	345550,7	0,393646284	4330,1091	136024,7	131694,6	3270934,004
17			0	11000	345550,7	0,371364419	4085,0086	128325,2	124240,2	3395174,218
18			0	11000	345550,7	0,350343791	3853,7817	121061,5	117207,7	3512381,967
19			0	11000	345550,7	0,33051301	3635,6431	114209	110573,3	3622955,315
20			0	11000	345550,7	0,311804727	3429,852	107744,3	104314,5	3727269,795
						Σύνολο	236169,13	3963439		
<b>Περίοδος αποπληρωμής</b>	<b>4,182326</b>	<b>μήνες</b>				NPV=	3727269,8	€	BCR	16,78220549

Με συνοπτική απεικόνιση όλων των αποτελεσμάτων



Διάγραμμα 8-3: Καθαρή παρούσα αξία επιμέρους δράσεων για την μονάδα 2 ΑΗΣ Λαυρίου



Διάγραμμα 8-4: Εκτιμώμενος χρόνος αποπληρωμής επιμέρους δράσεων για την μονάδα 2 ΑΗΣ Λαυρίου

Και για την μονάδα 2 του ΑΗΣ Λαυρίου προέχει ο καθαρισμός του συμπυκνωτή, ενώ ακολουθεί η μείωση διαφυγών νερού-ατμού, η μείωση καταναλώσεων θερμότητας και τέλος η συντήρηση του λέβητα, προκειμένου να περιοριστεί ο ψεκασμός.

## 9.Μείωση εκπεμπόμενου διοξειδίου του άνθρακα ανά KWh

Το διοξείδιο του άνθρακα απελευθερώνεται από την καύση ουσιών που περιέχουν άνθρακα, όπως τα ορυκτά καύσιμα και το φυσικό αέριο. Επομένως κάθε μονάδα που χρησιμοποιεί τα προαναφερθέντα καύσιμα για την παραγωγή ισχύος αναπόφευκτα παράγει διοξείδιο του άνθρακα. Ωστόσο, το παραγόμενο διοξείδιο του άνθρακα ανά μονάδα παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας δεν είναι σε κάθε περίπτωση το ίδιο, καθώς εξαρτάται από το είδος του καυσίμου, δηλαδή την αναλογία του άνθρακα με τα υπόλοιπα συστατικά του καυσίμου και από την ποσότητα του καυσίμου που απαιτείται για την παραγωγή της συγκεκριμένης ενέργειας, δηλαδή τον βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης.

Λόγω του φαινομένου του θερμοκηπίου, του οποίου οι επιδράσεις γίνονται ολοένα και εντονότερες, είναι αναγκαίος ο περιορισμός του εκπεμπόμενου διοξειδίου του άνθρακα, ενός από τα βασικότερα αέρια του θερμοκηπίου. Προκειμένου να γίνει αυτό απαιτείται μείωση της παραγόμενης ποσότητας διοξειδίου του άνθρακα ανά MWh ηλεκτρικής ενέργειας. Μερικά από τα μέτρα που μπορούν να εφαρμοστούν είναι τα ακόλουθα:

1. Αύξηση του βαθμού απόδοσης των θερμικών σταθμών, ώστε με λιγότερο καύσιμο και κατά συνέπεια λιγότερο παραγόμενο διοξείδιο του άνθρακα, να παράγεται η ίδια ηλεκτρική ενέργεια
2. Χρήση συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας στη βιομηχανία
3. Εξοικονόμηση ενέργειας
4. Χρήση καυσίμων με χαμηλή ειδική εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα ανά KWh
5. Χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας
6. Αύξηση της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας
7. Επιδότηση μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας

Η χρήση καυσίμων με χαμηλή ειδική εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα είναι μια λύση που υλοποιείται σε συνδυασμένους κύκλους, όπου το καύσιμο είναι φυσικό αέριο. Το φυσικό αέριο καθώς αποτελείται από μεθάνιο ( $\text{CH}_4$ ) κατά το μεγαλύτερο μέρος, έχει μικρή αναλογία άνθρακα/υδρογόνου. Ακόμα το γεγονός ότι ο συνδυασμένος κύκλος επιτυγχάνει μεγάλο βαθμό απόδοσης σημαίνει ότι οι εκπομπές  $\text{CO}_2$  ανά MWh είναι χαμηλότερες από όλους τους, άλλου τύπου, θερμικούς σταθμούς ορυκτών καυσίμων, όπως αναφέρθηκε και στο αντίστοιχο κεφάλαιο του συνδυασμένου κύκλου.

Τυπική Σύσταση Φυσικού Αερίου		
ΣΥΣΤΑΣΗ	ΡΩΣΙΚΟ ΦΥΣΙΚΟ ΑΕΡΙΟ	ΑΛΓΕΡΙΝΟ ΦΥΣΙΚΟ ΑΕΡΙΟ
Περιεκτικότητα (% κ.ο.) σε :		
Μεθάνιο ( $\text{CH}_4$ )	98	91.2
Αιθάνιο ( $\text{C}_2 \text{H}_6$ )	0.6	6.5
Προπάνιο ( $\text{C}_3 \text{H}_8$ )	0.2	1.1
Βουτάνιο ( $\text{C}_4 \text{H}_{10}$ )	0.2	0.2
Πεντάνιο ( $\text{C}_5 \text{H}_{12}$ ) και βαρύτερα	0.1	-
Άζωτο ( $\text{N}_2$ )	0.8	1.0
Διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ )	0.1	-
Ανωτέρα Θερμογόνα Δύναμη	από 8,600 kcal/Nm <sup>3</sup> έως 9,500 kcal/Nm <sup>3</sup>	από 9,640 kcal/Nm <sup>3</sup> έως 10,650 kcal/Nm <sup>3</sup>

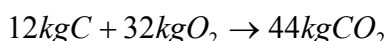
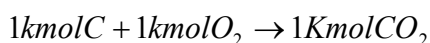
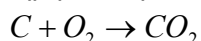
Το φυσικό αέριο δεν περιέχει στερεά σώματα

Πίνακας 9-1 : Σύσταση φυσικού αερίου (πηγή: ΕΠΑ Θεσσαλίας<sup>[5]</sup>)

Συστατικό	Ρώσικο	Αλγερινό	Ρώσικο	Αλγερινό
	Αναλογία όγκων/αναλογία mol		Αναλογία μάζας	
CH <sub>4</sub>	0,98	0,912	0,955864	0,837562
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,006	0,065	0,010973	0,111927
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,002	0,011	0,005365	0,027781
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,002	0,002	0,007071	0,006658
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0,001	0	0,004389	0
CO <sub>2</sub>	0,001	0	0,002682	0
N <sub>2</sub>	0,008	0,01	0,013655	0,016072

Πίνακας 9-2 : Σύσταση φυσικού αερίου

Εδώ περισσότερο θα μας απασχολήσει η μείωση που μπορεί να γίνει με την αύξηση του βαθμού απόδοσης. Οι μονάδες που έχουν μοντελοποιηθεί, χρησιμοποιούν ως καύσιμο φυσικό αέριο (Μονάδα 4 ΑΗΣ Λαυρίου, ΑΗΣ Κομοτηνής) και πετρέλαιο (Μονάδες 1 και 2 ΑΗΣ Λαυρίου). Κατά την πλήρη καύση του άνθρακα συμβαίνει η ακόλουθη αντίδραση:



Επομένως κατά την πλήρη καύση 1kg C απελευθερώνονται 3,66kg CO<sub>2</sub>. Όσο περισσότερο άνθρακα περιέχει ένα καύσιμο τόσο περισσότερο διοξείδιο του άνθρακα εκλύει. Για το πετρέλαιο που χρησιμοποιείται από τις μονάδες 1 και 2 του Λαυρίου, είναι γνωστό από τα δεδομένα ότι περιέχει 85,6% κατά βάρος άνθρακα. Άρα καύση 1kg αυτού του πετρελαίου απελευθερώνει  $0,856 \cdot 3,66 = 3,133kg$  διοξειδίου του άνθρακα.

Αντίστοιχα το φυσικό αέριο, λαμβάνοντας υπ' όψιν την σύσταση που αναφέρεται στον παραπάνω πίνακα, περιέχει (σύσταση του κάθε συστατικού σε άνθρακα, επί την σύσταση του καυσίμου στο αντίστοιχο συστατικό):

- Το ρώσικο 74,03% κατά βάρος άνθρακα. Άρα 2,71kg CO<sub>2</sub> με την καύση 1kg φυσικού αερίου
- Το αλγερινό 74,59% κατά βάρος άνθρακα. Άρα 2,73kg CO<sub>2</sub> με την καύση 1kg φυσικού αερίου.

	Ισχύς (MW)	Βαθμός απόδοσης (%)	Αύξηση βαθμού απόδοσης		Συνολική κατανάλωση καυσίμου (kg/sec)
			A' περίπτωση	B' περίπτωση	
Λαύριο 4	A' 544,52	A' 50,33	A' περίπτωση	B' περίπτωση	3 x 7,6 = 22,8
	B' 547,78	B' 50,63	1,15	0,52	
Λαύριο 1	136,30	38,16	1,51	-	8,8
Λαύριο 2	275,14	39,09	1,11	-	17,34
Κομοτηνή	476,36	52,58	-	-	2 x 9,47 = 18,94

Πίνακας 9-3 : Κατανάλωση καυσίμου, εκτιμώμενη παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς και αύξηση βαθμού απόδοσης ανά μονάδα ηλεκτροπαραγωγής

Η μονάδα 1 του ΑΗΣ Λαυρίου καταναλώνει 8,8kg/sec πετρέλαιο παράγοντας 136,30MW και εκλύοντας 27,57kg CO<sub>2</sub>/sec. Με την αρχική απόδοση παράγει 0,728kg CO<sub>2</sub> ανά KWh. Με την βελτίωση θα παράγει 0,700 kg CO<sub>2</sub>/KWh (παραγόμενη ισχύς περίπου 141700KW).

Η μονάδα 2 του ΑΗΣ Λαυρίου καταναλώνει 17,34kg/sec πετρέλαιο παράγοντας 275,14MW και εκλύοντας 54,33kg CO<sub>2</sub>/sec. Με την αρχική απόδοση παράγει 0,711kg CO<sub>2</sub> ανά KWh. Με την βελτίωση θα παράγει 0,691 kg CO<sub>2</sub>/KWh (παραγόμενη ισχύς περίπου 283000 KW).

Τέλος η μονάδα 4 του ΑΗΣ Λαυρίου καταναλώνει 22,8 kg/sec φυσικό αέριο (για το οποίο χρησιμοποιείται ο μέσος όρος των παραπάνω τιμών έκλυσης CO<sub>2</sub>), απελευθερώνοντας 62,012kg CO<sub>2</sub>/sec. Με την αρχική απόδοση παράγει 0,410 kg CO<sub>2</sub>/KWh (Α' περίπτωση) και 0,408 kg CO<sub>2</sub>/KWh (Β' περίπτωση). Με την βελτίωση της πρώτης περίπτωσης θα παράγει 0,401 kg CO<sub>2</sub>/KWh (ισχύς περίπου 557000 KW) και στην δεύτερη περίπτωση 0,403 kg CO<sub>2</sub>/KWh (ισχύς περίπου 553400 KW).

Η μονάδα Κομοτηνής καταναλώνει 18,94kg/sec φυσικό αέριο απελευθερώνοντας 51,51 kg CO<sub>2</sub>/sec. Άρα με την παρούσα απόδοση της παράγει 0,389 kg CO<sub>2</sub>/KWh, το χαμηλότερο ποσό εκπομπής σε σύγκριση με όλες τις άλλες μονάδες λόγω του γεγονότος ότι, όπως αναφέρθηκε, χρησιμοποιεί φυσικό αέριο και έχει τον καλύτερο βαθμό απόδοσης.

Σε όλα τα παραπάνω έχουν γίνει οι ακόλουθες παραδοχές:

1. Η καύση του άνθρακα είναι τέλεια
2. Η παροχή του καυσίμου είναι σταθερή και δεν αυξομειώνεται.
3. Σταθερή σύσταση του καυσίμου με συγκεκριμένη θερμογόνο ικανότητα
4. Η αύξηση του βαθμού απόδοσης είναι σταθερή, που όπως αναφέρθηκε παραπάνω στην οικονομική ανάλυση δεν ισχύει.
5. Λειτουργία μονάδων στο πλήρες φορτίο.

Παρ' όλα αυτά τα προαναφερθέντα μεγέθη είναι ενδεικτικά της μείωσης που μπορεί να επέλθει με την αύξηση του βαθμού απόδοσης. Η αύξηση αυτή από καθαρά οικονομική σκοπιά είναι κάτι που συμφέρει την ίδια την εταιρία καθώς θα οδηγήσει σε μείωση του κόστους παραγωγής της KWh. Από την άλλη θα δώσει την δυνατότητα περιορισμού των εκλυόμενων ρύπων κατ' ανάλογο τρόπο με αυτόν που περιγράφηκε παραπάνω για το διοξείδιο του άνθρακα, με αποτέλεσμα να είναι πιο εύκολη η εκπλήρωση των στόχων που έχουν τεθεί από την Ευρωπαϊκή ένωση για περιορισμό των ρυπογόνων εκπομπών.

[5] <http://www.epathessalia.gr/gas3.php>

## 10. Επίλογος

Λόγω της συνεχούς ανάπτυξης του ανθρώπινου πολιτισμού είναι αναμενόμενο οι ενεργειακές ανάγκες του ανθρώπου να συνεχίσουν να αυξάνονται. Στην Ελλάδα επί του παρόντος το μεγαλύτερο μέρος της ηλεκτροπαραγωγής γίνεται με την χρήση λιγνιτικών σταθμών, ενώ παράλληλα ανοίγονται νέοι δρόμοι για την εξέλιξη της χώρας με την ολοένα και αυξανόμενη διείσδυση του φυσικού αερίου στην παραγωγή ενέργειας (Μονάδα 5 ΑΗΣ Λαυρίου και ΑΗΣ Κομοτηνής).

Συγκρίνοντας τους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς ορυκτών καυσίμων, εξάγεται σαν συμπέρασμα ότι ο προτιμότερος τύπος θερμοηλεκτρικού σταθμού είναι ο συνδυασμένος κύκλος, καθώς συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των δύο κύκλων (Joule-Brayton και Rankine) που τον απαρτίζουν, έχοντας ευελιξία και γρήγορη απόκριση, προσφέροντας την μεγαλύτερη απόδοση που ως τώρα έχει επιτευχθεί με θερμική μηχανή, σε χαμηλό κόστος, αποτελώντας επένδυση χαμηλού ρίσκου, για νέες μονάδες ηλεκτροπαραγωγής, προκειμένου να καλυφθεί αυξανόμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας.

Από την μοντελοποίηση που έγινε στο Gatecycle φάνηκε, ωστόσο, ότι υπάρχει και δυνατότητα βελτίωσης των υπάρχοντων και ήδη εγκατεστημένων σταθμών, συνδυασμένου κύκλου ή και απλού κύκλου, οι οποίοι με την πάροδο του χρόνου «γερνούν». Η δράση που αποφέρει την μεγαλύτερη αύξηση απόδοσης είναι η συντήρηση του συμπυκνωτή που παίζει σημαντικό ρόλο στην απόδοση ισχύος από τον ατμοστρόβιλο. Παράλληλα φάνηκε και η επίδραση των άλλων δράσεων στην συνολική απόδοση.

Από οικονομικής άποψης οι επενδύσεις που απαιτούνται για την αύξηση του βαθμού απόδοσης, οδηγούν σε κέρδη που γρηγορότερα ή αργότερα, ανάλογα με την επένδυση, καλύπτουν το αρχικό κόστος αποφέροντας μάλιστα πολλαπλάσια έσοδα. Σε κάθε περίπτωση η βελτίωση του βαθμού απόδοσης οδηγεί σε μείωση των εκλυόμενων ρύπων ανά μονάδα παραγωγής ενέργειας (KWh), κάτι που υπαγορεύεται από την προσπάθεια μείωσης των ρυπογόνων εκπομπών.



## 11. Βιβλιογραφία

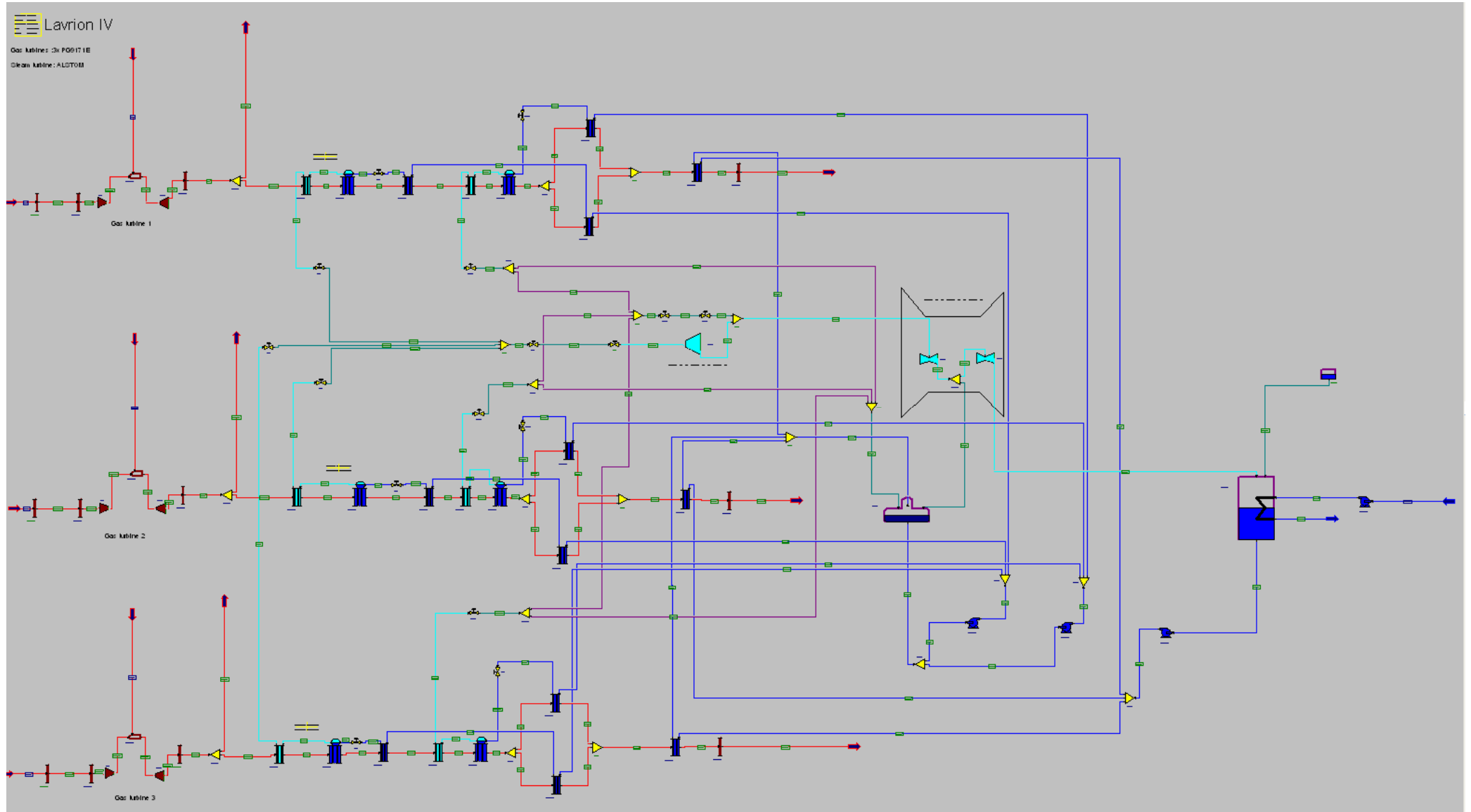
1. Ν. Παπαγεωργίου, «Ατμοπαραγωγοί Ι Γενικές αρχές», εκδόσεις Συμμεών.
2. Εμμ. Κ. Κακαράς, «Θερμοηλεκτρικοί σταθμοί», εκδόσεις Φούντας.
3. Κ. Δ Παπαηλίου, Κ.Μ. Μαθιουδάκης, Κ.Χ. Γιαννάκογλου, «Εισαγωγή στις θερμικές στροβιλομηχανές», εκδόσεις ΕΜΠ.
4. Κ. Μαθιουδάκης, «Λειτουργία αεριοστροβίλων και ατμοστροβίλων».
5. Εμμ. Κακαράς, Σημειώσεις μαθήματος «Αντιρρυπαντική τεχνολογία θερμικών εγκαταστάσεων».
6. Δημήτριος Χ. Παναγιωτακόπουλος, «Συστημική μεθοδολογία και τεχνική οικονομική».
7. «Τεχνικά χαρακτηριστικά εγκαταστάσεως», φυλλάδιο του Ενεργειακού Κέντρου Ηλεκτροπαραγωγής Λαυρίου της ΔΕΗ Α.Ε.
8. «Ενεργειακό Κέντρο Ηλεκτροπαραγωγής Λαυρίου», φυλλάδιο του Ενεργειακού Κέντρου Ηλεκτροπαραγωγής Λαυρίου της ΔΕΗ Α.Ε.
9. Rolf H. Kehlhofer, «Combined-Cycle Gas Steam Turbine Power Plants».
10. Meherwan P. BOYCE, «Gas Turbine Engineering Handbook» 3d ed.
11. John H. Horlock, «Combined Power Plants, Including Combined Cycle Gas Turbine Plants».
12. Henry Cohen, G. F. C. Rogers, H. I. H. Saravanamuttoo, «Gas Turbine Theory» 4th ed
13. GER4200\_ECONTECH\_PERFENH από την ιστοσελίδα της GEPOWER\*.

### Ιστοσελίδες

1. <http://www.bp.com/statisticalreview>
2. <http://www.dei.gr/>
3. <http://www.epathessalia.gr/gas3.php>
4. <http://www.energytribune.com/articles.cfm?aid=590>
5. \*[http://www.gepower.com/prod\\_serv/products/tech\\_docs/en/all\\_gers.htm](http://www.gepower.com/prod_serv/products/tech_docs/en/all_gers.htm)
6. <http://www.wikipedia.org>

## 12. Παράρτημα-Μοντέλα μονάδων

Μονάδα 4 ΑΗΣ Λαυρίου



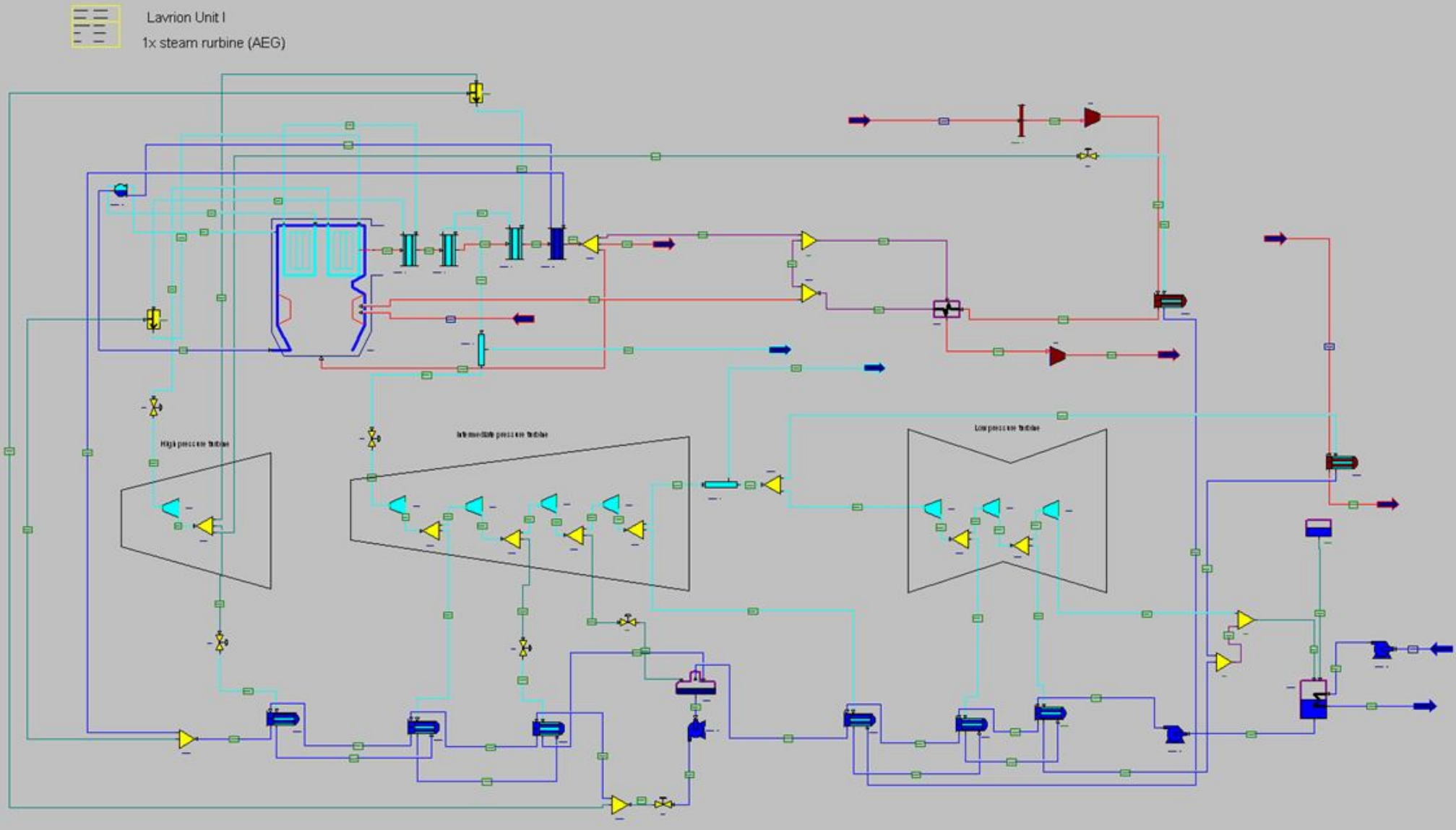
Stream report LAV4							
STREAM	FROM	TO	TEMPRATURE	PRESSURE	FLOW	ENTHALPY	QUALITY
S1	-	DUCT6	15	1,0132	397,25	-0,55911	4
S10	SP1	ECON4	167	1	332	159,4355	3,8813
S100	ECON5	V2	271	79	51,00824	1187,039	0
S101	ECON9	V3	271	79	51,00766	1187,043	0
S102	V4	M8	521	72	51,00796	3457,546	1
S103	V6	M8	521	72	51,00824	3457,546	1
S104	V5	M8	521	72	51,00766	3457,546	1
S105	V7	V8	520	70	153,0238	3457,546	1
S106	V8	ST1	520	70	153,0238	3457,546	1
S107	V11	EVAP2	156	6	11,9	663,5032	0,002385
S108	V10	EVAP4	156	6	11,9	663,5032	0,002385
S109	V9	EVAP6	156	6	11,9	663,5032	0,002385
S11	ECON3	M1	133	1	73	123,6627	3,8813
S110	V12	SP2	213	5	11,9	2882,641	1
S111	V13	SP9	213	5	11,9	2882,641	1
S112	V14	SP10	213	5	11,9	2882,641	1
S113	V15	V16	212	5	35,7	2882,641	1
S114	ST3	SP11	130	2	188,7239	2721,639	1
S115	SP11	ST2	130	2	182,0739	2721,639	1
S116	V16	M2	212	5	35,7	2882,641	1
S117	SP12	SPHT1	546	1	405	580,9866	3,8813
S118	SP12	-	546,2866	1	0	580,9865	3,8813
S119	SP14	-	546,2865	1	0	580,9845	3,8813
S12	ECON4	M1	136	1	332	126,9912	3,8813
S120	SP14	SPHT5	546	1	405	580,9846	3,8813
S121	SP13	-	546,2864	1	0	580,9844	3,8813
S122	SP13	SPHT3	546	1	405	580,9844	3,8813
S123	DUCT3	-	105	1	405	93,34034	3,8813
S124	DUCT2	-	105	1	405	93,34129	3,8813
S125	DUCT1	-	105	1	405	93,34124	3,8813
S126	C1	CMB1	325	12	397,25	318,5157	4
S127	CMB1	EX1	1.054	12	405	1199,026	3,8813
S128	EX1	DUCT4	546	1	405	580,9865	3,8813
S129	DUCT6	DUCT5	15	1,0132	397,25	-0,55911	4
S13	M1	ECON2	136	1	405	126,3911	3,8813
S130	DUCT5	C1	15	1,0014	397,25	-0,55911	4
S131	DUCT10	DUCT9	15	1,0132	397,25	-0,55911	4
S132	DUCT9	C2	15	1,0014	397,25	-0,55911	4
S133	C2	CMB2	325	12	397,25	318,5151	4
S134	CMB2	EX2	1.054	12	405	1198,957	3,8813
S135	EX2	DUCT7	546	1	405	580,9844	3,8813
S136	DUCT12	DUCT11	15	1,0132	397,25	-0,55911	4

S137	DUCT11	C3	15	1,0014	397,25	-0,55911	4
S138	C3	CMB3	325	12	397,25	318,5144	4
S139	EX3	DUCT8	546	1	405	580,9845	3,8813
S14	ECON2	DUCT1	105	1	405	93,34212	3,8813
S140	CMB3	EX3	1.054	12	405	1198,954	3,8813
S141	MU1	CND1	15,55999	1	0	65,38245	0
S142	-	PUMP1	22	1	12266,9	92,31645	0
S15	SPHT1	V4	521	74	51,00796	3457,546	1
S16	ST1	M2	177	5	153,0238	2808,688	1
S17	M2	ST3	184	5	188,7239	2822,677	1
S18	SPHT2	V12	214	6	11,9	2882,641	1
S19	SP11	DA1	130	2	6,65	2721,639	1
S2	-	CMB1	20	37	8	9,781304	3,8813
S20	ST2	CND1	34	0	182,0739	2216,699	0,856782
S21	PUMP1	CND1	22	1	12266,9	92,32825	0
S22	CND1	-	29	1	12266,9	123,1205	0
S23	CND1	PUMP3	34	0	182,0739	142,1246	0
S24	SP8	ECON2	34	3	60,69128	142,4141	0
S25	ECON2	M5	86	3	60,69128	360,6894	0
S26	ECON1	V1	271	79	51,00796	1187,042	0
S27	SP2	M6	213	5	11,9	2882,641	1
S28	DA1	SP3	106	1	188,7239	443,8814	0
S29	SP3	PUMP2	106	1	153,0238	443,8814	0
S3	DUCT4	SP12	546	1	405	580,9865	3,8813
S30	SP3	PUMP4	106	1	35,7	443,8814	0
S31	SP6	ECON4	107	79	51,00796	453,4901	0
S32	ECON4	ECON1	156	79	51,00796	662,5582	0
S33	V1	EVAP1	270	74	51,00796	1187,042	0
S34	EVAP1	SPHT1	289	74	51,00796	2768,509	1
S35	SP7	ECON3	106	23	11,9	446,6073	0
S36	ECON3	V11	157	23	11,9	663,5032	0
S37	EVAP2	SPHT2	156	6	11,9	2752,418	1
S38	-	DUCT10	15	1,0132	397,25	-0,55911	4
S39	-	CMB2	20	37	8	9,781304	3,8813
S4	SPHT1	EVAP1	470	1	405	493,3052	3,8813
S40	DUCT7	SP13	546	1	405	580,9844	3,8813
S41	SPHT3	EVAP3	470	1	405	493,3024	3,8813
S42	EVAP3	ECON5	290	1	405	292,0575	3,8813
S43	ECON5	SPHT4	228	1	405	225,3157	3,8813
S44	SPHT4	EVAP4	225	1	405	221,4497	3,8813
S45	EVAP4	SP4	167	1	405	159,4353	3,8813
S46	SP4	ECON6	167	1	73	159,4359	3,8813
S47	SP4	ECON7	167	1	332	159,4359	3,8813
S48	ECON6	M3	133	1	73	123,663	3,8813

S49	ECON7	M3	136	1	332	126,9913	3,8813
S5	EVAP1	ECON1	290	1	405	292,0596	3,8813
S50	M3	ECON8	136	1	405	126,3912	3,8813
S51	ECON8	DUCT2	105	1	405	93,34216	3,8813
S52	DUCT8	SP14	546	1	405	580,9845	3,8813
S53	SPHT5	EVAP5	470	1	405	493,3035	3,8813
S54	EVAP5	ECON9	290	1	405	292,0572	3,8813
S55	ECON9	SPHT6	228	1	405	225,3157	3,8813
S56	SPHT6	EVAP6	225	1	405	221,4497	3,8813
S57	EVAP6	SP5	167	1	405	159,4353	3,8813
S58	SP5	ECON10	167	1	73	159,4347	3,8813
S59	SP5	ECON11	167	1	332	159,4347	3,8813
S6	ECON1	SPHT2	228	1	405	225,3164	3,8813
S60	ECON10	M4	133	1	73	123,6618	3,8813
S61	ECON11	M4	136	1	332	126,9905	3,8813
S62	M4	ECON12	136	1	405	126,3903	3,8813
S63	ECON12	DUCT3	105	1	405	93,34124	3,8813
S64	PUMP2	SP6	107	79	153,0238	453,4901	0
S65	PUMP4	SP7	106	23	35,7	446,6073	0
S66	PUMP3	SP8	34	3	182,0739	142,4141	0
S67	M7	DA1	213,1557	5	0	2882,643	1
S68	M6	V15	213	5	35,7	2882,641	1
S69	EVAP3	SPHT3	289	74	51,00824	2768,509	1
S7	SPHT2	EVAP2	225	1	405	221,4504	3,8813
S70	V2	EVAP3	270	74	51,00824	1187,039	0
S71	SPHT3	V6	521	74	51,00824	3457,546	1
S72	ECON7	ECON5	156	79	51,00824	662,5582	0
S73	SPHT4	V13	214	6	11,9	2882,641	1
S74	EVAP4	SPHT4	156	6	11,9	2752,418	1
S75	ECON6	V10	157	23	11,9	663,5032	0
S76	SP7	ECON6	106	23	11,9	446,6073	0
S77	SP6	ECON7	107	79	51,00824	453,4901	0
S78	SPHT5	V5	521	74	51,00766	3457,546	1
S79	EVAP5	SPHT5	289	74	51,00766	2768,509	1
S8	EVAP2	SP1	167	1	405	159,4361	3,8813
S80	V3	EVAP5	270	74	51,00766	1187,043	0
S81	ECON11	ECON9	156	79	51,00766	662,5582	0
S82	SP6	ECON11	107	79	51,00766	453,4901	0
S83	SP7	ECON10	106	23	11,9	446,6073	0
S84	ECON10	V9	157	23	11,9	663,5032	0
S85	EVAP6	SPHT6	156	6	11,9	2752,418	1
S86	SPHT6	V14	214	6	11,9	2882,641	1
S87	SP8	ECON12	34	3	60,69128	142,4141	0
S88	ECON12	M5	86	3	60,69128	360,6894	0

S89	SP8	ECON8	34	3	60,69128	142,4141	0
S9	SP1	ECON3	167	1	73	159,4355	3,8813
S90	ECON8	M5	86	3	60,69128	360,6894	0
S91	SP2	M7	213,1557	5	0	2882,641	1
S92	SP9	M7	213,1557	5	0	2882,641	1
S93	SP9	M6	213	5	11,9	2882,641	1
S94	SP10	M7	213,1557	5	0	2882,641	1
S95	SP10	M6	213	5	11,9	2882,641	1
S96	M8	V7	521	72	153,0238	3457,546	1
S97	-	DUCT12	15	1,0132	397,25	-0,55911	4
S98	-	CMB3	20	37	8	9,781304	3,8813
S99	M5	DA1	86	3	182,0739	360,6894	0

Μονάδα 1&2 ΑΗΣ Λαυρίου



Stream report LAV1							
STREAM	FROM	TO	TEMPRATURE	PRESSURE	FLOW	ENTHALPY	QUALITY
S1	FB1	DRUM1	348,3355	162	907,0625	1842,519	0,2
S10	CND1	-	30,41787	1,3	5311,164	127,5247	0
S11	SP2	FB1	303,1482	1,11452	134,3488	295,2033	4
S12	-	FB1	14,99999	1,0132	0	-0,56169	4
S13	FB1	SPHT3	900	1,113294	143,0716	1034,729	0
S14	PUMP1	FWH6	31,48684	10	100,09	132,7801	0
S15	ECON1	SP1	350	1,113294	143,0716	364,6981	0
S16	ECON1	DRUM1	288,1321	175	127,8964	1273,55	0
S17	SP1	M1	350	1,113294	143,0716	364,6981	0
S18	SP1	FB1	350	1,113294	0	364,6981	0
S19	SP2	M1	303,1482	1,11452	0	295,2033	4
S2	DRUM1	FB1	348,3355	162	127,8964	2578,533	1
S20	M1	HX1	349,9995	1,113294	143,0716	364,6981	0
S21	HX1	SP2	303,1482	1,11452	134,3488	295,2033	4
S22	C1	AHT1	24,33511	1,11452	134,3488	8,875912	4
S23	HX1	C2	145	1,113294	143,0716	137,5541	0
S24	V1	ST1	529,2514	141	127,8965	3402,594	1
S25	SP3	TMX2	352,045	42	111,0475	3095,621	1
S26	SP3	V5	352,045	42	14,15285	3095,621	1
S27	AHT1	HX1	70,60696	1,11452	134,3488	55,69622	4
S28	SP3	V4	352,045	42	2,696226	3095,621	1
S29	FWH1	SP13	247,1326	175	127,8964	1072,953	0
S3	DRUM1	FB1	348,3355	162	907,0625	1658,516	0
S30	FWH1	FWH2	250,3326	40	14,15285	1087,407	0
S31	AHT1	FWH4	179,8844	10	2,696187	762,6089	0
S32	V2	ST2	535,9819	37,4	111,0473	3529,315	1
S33	SP4	ST3	477,3579	25	106,8074	3411,68	1
S34	SP4	FWH2	477,3579	25	4,239879	3411,68	1
S35	FWH2	FWH1	198,5596	175	127,8964	852,9264	0
S36	FWH2	FWH3	223,9429	25	18,39273	961,9663	0
S37	ST3	SP5	432,6914	18	106,8074	3322,855	1
S38	SP5	ST4	432,6914	18	103,2927	3322,855	1
S39	SP5	V6	432,6914	18	3,514704	3322,855	1
S4	FB1	SPHT3	370	162	127,8964	2780,569	1
S40	ST4	SP6	356,8833	10	103,2927	3173,122	1
S41	FWH3	FWH2	177,0016	175	127,8964	758,7762	0
S42	FWH3	DA1	201,3716	16	21,90749	858,5651	0
S43	SP6	ST5	356,8833	10	97,39383	3173,122	1
S44	SP6	V3	356,8833	10	5,898847	3173,122	1
S45	ST5	SP7	184,1019	2	97,39385	2838,304	1
S46	DA1	PUMP2	157,8616	10	127,8964	666,4334	0
S47	V7	SP12	158	175	127,8964	677,0027	0



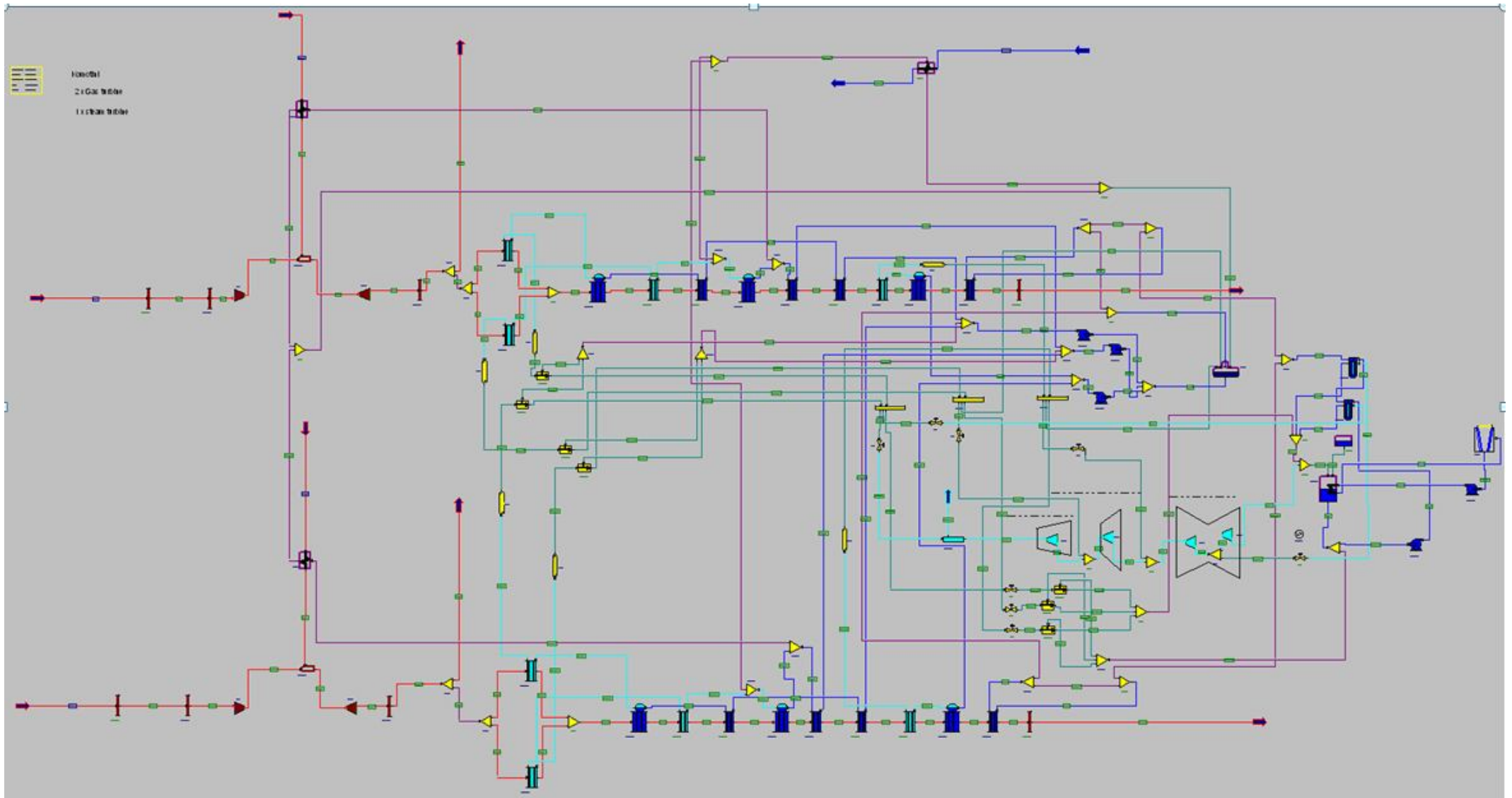
S48	SP7	SEAL2	184,1019	2	91,90736	2838,304	1
S49	ST6	SP8	123,8814	1	91,90738	2724,268	1
S5	ST1	SP3	352,045	42	127,8965	3095,621	1
S50	SP7	FWH4	184,1019	2	5,486489	2838,304	1
S51	FWH4	FWH5	120,2309	2	8,182652	504,7031	0
S52	FWH4	DA1	113,4774	10	100,09	476,6474	0
S53	SP8	ST7	123,8814	1	88,23557	2724,268	1
S54	SP8	FWH5	123,8814	1	3,671808	2724,268	1
S55	FWH5	FWH4	81,77438	10	100,09	343,1178	0
S56	FWH5	FWH6	99,63165	1	11,85442	417,5128	0
S57	ST7	SP9	60,08642	0,2	88,23559	2502,342	0,954406
S58	SP9	FWH6	60,08642	0,2	4,492135	2502,342	0,954406
S59	SP9	ST8	60,08642	0,2	83,74345	2502,342	0,954406
S6	SPHT3	TMX1	400,0001	162	127,8964	2945,516	1
S60	ST8	M3	32,89764	0,05	83,74347	2338,935	0,908134
S61	FWH6	FWH5	60,08645	10	100,09	252,2748	0
S62	FWH6	M2	60,08642	0,2	16,3466	251,4538	0
S63	DUCT1	C1	14,99999	1,0132	134,3488	-0,56169	4
S64	-	DUCT1	14,99999	1,0132	134,3488	-0,56169	4
S65	C2	-	151,3857	1,168959	143,0716	144,4468	0
S66	V3	DA1	356,8833	10	5,898847	3173,122	1
S67	SEAL1	V2	538,0013	42	111,0473	3529,315	1
S68	SEAL1	-	528,1606	20	0	3529,315	1
S69	SP11	ST6	184,1019	2	91,90736	2838,304	1
S7	ST2	SP4	477,3579	25	111,0473	3411,68	1
S70	SP11	AHT2	184,1019	2	0	2838,304	1
S71	MU1	CND1	15,55999	1,0342	0	65,38245	0
S72	SP12	FWH3	158	175	127,8964	677,0027	0
S73	SP12	TMX2	158	175	0	677,0027	0
S74	SP13	ECON1	247,1326	175	127,8964	1072,953	0
S75	SP13	TMX1	247,1326	175	0	1072,953	0
S76	TMX1	FB1	400,0001	162	127,8964	2945,516	1
S77	TMX2	SPHT2	352,045	42	111,0475	3095,621	1
S78	SEAL2	SP11	184,1019	2	91,90736	2838,304	1
S79	SEAL2	-	182,1621	1,313	0	2838,304	1
S8	M3	CND1	32,89764	0,05	100,0901	1998,01	0,767478
S80	AHT2	M2	197,1239	6,89476	0	2838,304	1
S81	M2	M3	60,08642	0,2	16,3466	251,4538	0
S82	-	AHT2	14,99999	1,0132	500,0004	-0,56169	4
S83	AHT2	-	14,99999	1,0132	500,0004	-0,56169	4
S84	V4	AHT1	320,3466	10	2,696226	3095,621	1
S85	SP1	-	350	1,113294	0	364,6981	0
S86	V5	FWH1	350,2074	40	14,15285	3095,621	1
S87	V6	FWH3	431,4087	16	3,514704	3322,855	1

S88	PUMP3	CND1	22,00176	1,3	5311,164	92,35182	0
S89	CND1	PUMP1	31,42126	0,046	100,09	131,6034	0
S9	FB1	V1	538,0046	162	127,8965	3402,594	1
S90	SPHT2	SPHT1	399,9977	42	111,0475	3212,288	1
S91	SPHT1	SEAL1	538,0013	42	111,0473	3529,315	1
S92	SPHT3	SPHT1	783,1643	1,113294	143,0716	885,8032	0
S93	-	PUMP3	22,00002	1	5311,164	92,31645	0
S94	PUMP2	V7	160,5162	175	127,8964	687,7753	0
S95	SPHT1	SPHT2	582,0787	1,113294	143,0716	637,2714	0
S96	SPHT2	ECON1	505,7258	1,113294	143,0716	545,811	0

Stream report LAV2							
STREAM	FROM	TO	TEMPRATURE	PRESSURE	FLOW	ENTHALPY	QUALITY
S1	FB1	DRUM1	356,0361	178	1948,999	1885,341	0,2
S10	SPHT2	SEAL1	538,0013	42	221,9584	3529,315	1
S11	SP2	FB1	299,6051	1,11452	264,7283	291,4758	4
S12	-	FB1	14,99999	1,0132	0	-0,56169	4
S13	FB1	SPHT1	950	1,113294	281,916	1099,35	0
S14	PUMP1	FWH6	31,50002	12	197,4557	133,0165	0
S15	ECON1	SP1	350	1,113294	281,916	364,6983	0
S16	ECON1	DRUM1	290,0935	200	250,235	1282,497	0
S17	SP1	M1	350	1,113294	281,916	364,6981	0
S18	SP1	FB1	350	1,113294	0	364,6981	0
S19	SP2	M1	299,6051	1,11452	0	291,4758	4
S2	DRUM1	FB1	356,0361	178	250,2371	2521,823	1
S20	M1	HX1	349,9997	1,113294	281,916	364,6981	0
S21	HX1	SP2	299,6051	1,11452	264,7283	291,4758	4
S22	C1	AHT1	24,01736	1,11452	264,7283	8,554659	4
S23	HX1	C2	145	1,113294	281,916	137,5541	0
S24	V1	ST1	526,8076	151	250,235	3384,362	1
S25	SP3	TMX2	337,7815	42	221,9584	3059,061	1
S26	SP3	V5	337,7815	42	23,27185	3059,061	1
S27	AHT1	HX1	66,92751	1,11452	264,7283	51,96886	4
S28	SP3	V4	337,7815	42	5,00471	3059,061	1
S29	FWH1	SP13	248,7149	200	250,235	1080,712	0
S3	DRUM1	FB1	356,0361	178	1948,999	1726,221	0
S30	FWH1	FWH2	253,241	42	23,27185	1101,607	0
S31	AHT1	FWH4	179,8844	10	5,00471	762,6089	0
S32	V2	ST2	535,9819	37,4	221,9584	3529,315	1
S33	SP4	ST3	487,782	27	213,0801	3432,409	1
S34	SP4	FWH2	487,782	27	8,878337	3432,409	1
S35	FWH2	FWH1	209,0592	200	250,235	900,4721	0

S36	FWH2	FWH3	228,0707	27	32,15019	981,2263	0
S37	ST3	SP5	445,7513	20	213,0801	3348,569	1
S38	SP5	ST4	445,7513	20	206,0484	3348,569	1
S39	SP5	V6	445,7513	20	7,031642	3348,569	1
S4	FB1	SPHT1	370	178	250,2371	2696,214	1
S40	ST4	SP6	397,9524	14	206,0484	3253,79	1
S41	FWH3	FWH2	186,9422	200	250,235	803,2801	0
S42	FWH3	DA1	212,3747	20	39,18177	908,5929	0
S43	SP6	ST5	397,9524	14	192,451	3253,79	1
S44	SP6	V3	397,9524	14	13,59748	3253,79	1
S45	ST5	SP7	178,8842	2	192,4511	2827,702	1
S46	DA1	PUMP2	165,9385	12	250,235	701,626	0
S47	PUMP2	SP12	169,1118	200	250,235	726,1553	0
S48	SP7	SEAL2	178,8842	2	182,6361	2827,702	1
S49	ST6	SP8	118,0067	1	182,6361	2712,491	1
S5	ST1	SP3	337,7815	42	250,235	3059,061	1
S50	SP7	FWH4	178,8842	2	9,815004	2827,702	1
S51	FWH4	FWH5	120,2309	2	14,81971	504,7031	0
S52	FWH4	DA1	115,3708	12	197,4557	484,8062	0
S53	SP8	ST7	118,0067	1	173,5043	2712,491	1
S54	SP8	FWH5	118,0067	1	9,131803	2712,491	1
S55	FWH5	FWH4	86,71346	12	197,4557	364,0071	0
S56	FWH5	FWH6	99,63165	1	23,95139	417,5128	0
S57	ST7	SP9	60,08642	0,2	173,5043	2487,157	0,947967
S58	SP9	FWH6	60,08642	0,2	8,874067	2487,157	0,947967
S59	SP9	ST8	60,08642	0,2	164,6302	2487,157	0,947967
S6	FB1	V1	538,0001	178	250,235	3384,362	1
S60	ST8	M3	32,89764	0,05	164,6303	2321,135	0,90079
S61	FWH6	FWH5	60,08645	12	197,4557	252,4423	0
S62	FWH6	M2	60,08642	0,2	32,82546	251,4538	0
S63	DUCT1	C1	14,99999	1,0132	264,7283	-0,56169	4
S64	-	DUCT1	14,99999	1,0132	264,7283	-0,56169	4
S65	C2	-	151,1713	1,168959	281,916	144,2152	0
S66	V3	DA1	396,4757	12	13,59748	3253,79	1
S67	SEAL1	V2	538,0013	42	221,9584	3529,315	1
S68	SEAL1	-	528,1606	20	0	3529,315	1
S69	SP11	ST6	178,8842	2	182,6361	2827,702	1
S7	ST2	SP4	487,782	27	221,9584	3432,409	1
S70	SP11	AHT2	178,8842	2	0	2827,702	1
S71	MU1	CND1	15,55999	1,0342	0	65,38245	0
S72	SP12	FWH3	169,1118	200	250,235	726,1553	0
S73	SP12	TMX2	169,1118	200	0	726,1553	0
S74	SP13	ECON1	248,7149	200	250,235	1080,712	0
S75	SP13	TMX1	248,7149	200	0	1080,712	0

S76	TMX1	FB1	400	178	250,2372	2896,788	1
S77	TMX2	SPHT3	337,7815	42	221,9584	3059,061	1
S78	SEAL2	SP11	178,8842	2	182,6361	2827,702	1
S79	SEAL2	-	176,85	1,313	0	2827,702	1
S8	M3	CND1	32,89764	0,05	197,4557	1977,066	0,758838
S80	AHT2	M2	192,4766	6,89476	0	2827,702	1
S81	M2	M3	60,08642	0,2	32,82546	251,4538	0
S82	-	AHT2	14,99999	1,0132	500,0004	-0,56169	4
S83	AHT2	-	14,99999	1,0132	500,0004	-0,56169	4
S84	V4	AHT1	303,2211	10	5,00471	3059,061	1
S85	V5	FWH1	337,7815	42	23,27185	3059,061	1
S86	V6	FWH3	445,7513	20	7,031642	3348,569	1
S87	CND1	PUMP1	31,42126	0,046	197,4557	131,6034	0
S88	PUMP3	CND1	22,00176	1,3	10286,99	92,35182	0
S89	SPHT1	TMX1	400	178	250,2371	2896,788	1
S9	SPHT3	SPHT2	399,9977	42	221,9584	3212,288	1
S90	SPHT1	SPHT2	809,8418	1,113294	281,916	919,535	0
S91	CND1	-	30,47778	1,3	10286,99	127,7749	0
S92	-	PUMP3	22,00002	1	10286,99	92,31645	0
S93	SPHT2	SPHT3	606,9626	1,113294	281,916	667,4405	0
S94	SPHT3	ECON1	505,5451	1,113294	281,916	545,5965	0



Stream report KOMOT							
STREAM	FROM	TO	TEMPRATURE	PRESSURE	FLOW	ENTHALPY	QUALITY
S1	-	DUCT3	14,99999	1,0132	514,53	-0,56169	4
S10	M4	EVAP1	458,7498	1,015	524,0042	479,9282	4
S100	M8	DA1	134	4,2	148,7	563,4777	0
S101	PUMP4	SP14	145,9365	100,8	116	620,7745	0
S102	SP14	ECON7	145,9365	100,8	58,00001	620,7745	0
S103	PUMP2	SP12	144,8267	26,2	31,6	611,2537	0
S104	PUMP3	SP10	144,5136	5,2	14,2	608,5736	0
S105	SP12	ECON6	144,8267	26,2	15,8	611,2537	0
S106	SP10	EVAP6	144,5136	5,2	7,1	608,5736	0
S107	EVAP6	SPHT7	153,3294	5,2	7,1	2749,268	1
S108	PI1	HDR3	188,6564	4,9	7,1	2831,065	1
S109	ECON7	ECON5	224,445	100,8	58,00001	966,2739	0
S11	EVAP1	SPHT3	320,7669	1,015	524,0042	325,5912	4
S110	ECON6	SP11	221	26,2	15,8	948,3744	0
S111	SP11	EVAP5	221	26,2	11,5	948,3744	0
S112	SP11	HX2	221	26,2	4,3	948,3744	0
S113	HX2	M9	54,20205	26,2	4,3	229,0473	0
S114	ECON5	EVAP4	300,4373	100,8	58,00001	1345,767	0
S115	SP18	SPHT8	226,4489	26,2	11,5	2801,458	1
S116	SPHT8	SPHT6	309,2023	26,2	11,5	3029,442	1
S117	EVAP4	SPHT5	311,5503	100,8	58,00001	2726,327	1
S118	SPHT5	PI2	517	100,8	58,00001	3416,708	1
S119	SPHT6	PI5	515,0002	26,2	11,5	3493,74	1
S12	SPHT3	ECON1	316,1712	1,015	524,0042	320,5376	4
S120	M9	M10	54,20205	26,2	8,6	229,0473	0
S121	SP14	SP9	145,9365	100,8	0	620,7745	0
S122	SP12	SP13	144,8267	26,2	0	611,2537	0
S123	SP9	TMX1	145,9365	100,8	0	620,7745	0
S124	SP9	TMX2	145,9365	100,8	0	620,7745	0
S125	SP13	TMX3	144,8267	26,2	0	611,2537	0
S126	SP13	TMX4	144,8267	26,2	0	611,2537	0
S127	TMX1	HDR1	514,8103	96	58,00001	3416,708	1
S128	TMX2	HDR1	514,8103	96	58,00001	3416,708	1
S129	TMX3	HDR2	513,9022	23,9	11,5	3493,74	1
S13	ECON1	EVAP2	277,3964	1,015	524,0042	278,1154	4
S130	TMX4	HDR2	513,9022	23,9	11,5	3493,74	1
S131	V1	SEAL1	513,015	92,1	115,9	3416,708	1
S132	V2	M1	513,4229	22,9	23	3493,74	1
S133	V3	M2	182,225	4,5	9,7	2819,471	1
S134	PI3	TMX1	514,8103	96	58,00001	3416,708	1
S135	PI4	TMX3	513,9022	23,9	11,5	3493,74	1
S136	PI2	TMX2	514,8103	96	58,00001	3416,708	1

S137	PI5	TMX4	513,9022	23,9	11,5	3493,74	1
S138	SPHT4	PI6	178,9997	5,2	7,1	2807,878	1
S139	SPHT7	PI1	189,4667	5,2	7,1	2831,065	1
S14	EVAP2	ECON3	239,5222	1,015	524,0042	237,0402	4
S140	HDR1	V4	514,8103	96	0	3416,708	1
S141	HDR2	V5	513,9022	23,9	0	3493,74	1
S142	HDR3	V6	183,3654	4,9	0	2819,471	1
S143	V4	TMX6	514,8103	96	0	3416,708	0
S144	V5	TMX5	513,9022	23,9	0	3493,74	0
S145	V6	TMX7	183,3654	4,9	0	2819,471	0
S146	SP15	PUMP1	34,27483	0,054	148,7	143,5278	0
S147	SP15	SP16	34,27483	0,054	0	143,5278	0
S148	SP16	TMX6	34,27483	0,054	0	143,5278	0
S149	SP16	TMX5	34,27483	0,054	0	143,5278	0
S15	ECON2	SPHT4	194,0283	1,015	524,0042	188,1474	4
S150	SP16	TMX7	34,27483	0,054	0	143,5278	0
S151	TMX6	M6	514,8103	96	0	3416,708	1
S152	TMX5	M6	513,9022	23,9	0	3493,74	1
S153	TMX7	M6	183,3654	4,9	0	2819,471	1
S154	M6	M3	183,3654	4,9	0	2819,471	1
S155	EVAP2	SP17	226,4489	26,2	11,5	2801,458	1
S156	SP17	M7	226,4489	26,2	0	2801,458	1
S157	EVAP5	SP18	226,4489	26,2	11,5	2801,458	1
S158	SP18	M7	226,4489	26,2	0	2801,458	1
S159	M7	HX3	226,4489	26,2	0	973,6445	0
S16	ECON3	ECON2	230,0058	1,015	524,0042	226,7736	4
S160	-	HX3	9,999994	1	50	42,09064	0
S161	HX3	-	9,999994	1	50	42,09064	0
S162	HX3	M10	226,4489	26,2	0	973,6445	0
S163	M10	DA1	54,20205	26,2	8,6	229,0473	0
S164	CT1	PUMP5	20,9262	1,0132	6996,464	87,82807	0
S165	M11	ECON4	95,40081	4,2	135,65	399,9323	0
S166	ECON4	SP19	134	4,2	135,65	563,4777	0
S167	SP19	M11	134	4,2	61,3	563,4777	0
S168	SP20	M12	134	4,2	61,3	563,4777	0
S169	SP8	M12	63,26553	4,2	74,35001	265,0926	0
S17	SPHT4	EVAP3	193,2784	1,015	524,0042	187,3454	4
S170	SP20	M8	134	4,2	74,35001	563,4777	0
S171	M13	CND1	34,27483	0,054	148,7	2090,494	0,804346
S172	MU1	CND1	15,55999	1,0342	0	65,38245	0
S173	SEAL1	ST2	513,015	92,1	115,9	3416,708	1
S174	SEAL1	-	487,5387	40	0	3416,708	1
S175	HDR1	V7	514,8103	96	0,1	3416,708	1
S176	SP3	V8	66,04333	0,262	8,526084	2382,586	0,898633

S18	EVAP3	ECON4	165,8121	1,015	524,0042	158,0501	4
S19	ECON4	DUCT6	125,4706	1,015	524,0042	115,2894	4
S2	C1	CMB1	340,6229	11,73744	514,53	334,8122	4
S20	SP1	SP5	535,0013	1,015	524,0042	567,3929	4
S21	SP1	-	535,0013	1,015	0	567,3929	4
S22	EVAP1	SPHT1	311,5503	100,8	58,00001	2726,327	1
S23	SPHT3	SPHT2	309,2047	26,2	11,5	3029,448	1
S24	SPHT2	PI4	515,0002	26,2	11,5	3493,74	1
S25	SPHT1	PI3	517	100,8	58,00001	3416,708	1
S26	ECON1	EVAP1	300,4373	100,8	58,00001	1345,767	0
S27	ECON2	ECON1	224,4503	100,8	58,00001	966,2982	0
S28	ECON3	SP4	221	26,2	15,8	948,3744	0
S29	SP17	SPHT3	226,4489	26,2	11,5	2801,458	1
S3	CMB1	EX1	1054,491	11,73744	524,0042	1198,942	4
S30	SP12	ECON3	144,8267	26,2	15,8	611,2537	0
S31	SP14	ECON2	145,9365	100,8	58,00001	620,7745	0
S32	FWH2	SP8	63,26553	4,2	148,7	265,0926	0
S33	SP10	EVAP3	144,5136	5,2	7,1	608,5736	0
S34	EVAP3	SPHT4	153,3294	5,2	7,1	2749,268	1
S35	PI6	HDR3	178,1117	4,9	7,1	2807,878	1
S36	SP19	M8	134	4,2	74,35001	563,4777	0
S37	HDR1	V1	514,8103	96	115,9	3416,708	1
S38	HDR2	V2	513,9022	23,9	23	3493,74	1
S39	M1	ST1	345,7133	22,9	138,9	3122,962	1
S4	EX1	DUCT1	534,999	1,025	524,0042	567,3929	4
S40	ST2	M1	313,7779	22,9	115,9	3049,382	1
S41	ST1	M2	169,618	4,5	138,9	2791,802	1
S42	HDR3	V3	183,3654	4,9	9,7	2819,471	1
S43	M2	ST3	170,4342	4,5	148,6	2793,608	1
S44	ST3	SP3	66,04333	0,262	148,6	2382,586	0,898633
S45	ST4	M13	34,27483	0,054	140,0739	2201,584	0,85024
S46	CND1	SP15	34,27483	0,054	148,7	143,5278	0
S47	HDR3	DA1	183,3654	4,9	4,5	2819,471	1
S48	HDR2	DA1	513,9022	23,9	0	3493,74	1
S49	DA1	SP2	144,4987	4,2	161,8	608,446	0
S5	DUCT3	DUCT2	14,99999	1,0132	514,53	-0,56169	4
S50	SP2	PUMP3	144,4987	4,2	14,2	608,446	0
S51	SP2	PUMP2	144,4987	4,2	31,6	608,446	0
S52	SP2	PUMP4	144,4987	4,2	116	608,446	0
S53	PUMP5	CND1	20,92669	1,1	6996,464	87,8383	0
S54	CND1	CT1	30,82757	1,1	6996,464	129,2184	0
S55	SP3	ST4	66,04333	0,262	140,0739	2382,586	0,898633
S56	V7	FWH1	492,6576	50	0,1	3416,708	1
S57	FWH1	FWH2	34,66357	4,2	148,7	145,5247	0



S58	PUMP1	FWH1	34,303	4,2	148,7	144,0183	0
S59	V8	FWH2	66,04333	0,262	8,526084	2382,586	0,898633
S6	DUCT2	C1	14,99999	1,0032	514,53	-0,56169	4
S60	FWH2	M3	66,04333	0,262	8,526084	276,3961	0
S61	FWH1	M3	263,9113	50	0,1	1154,473	0
S62	M3	M13	66,04333	0,262	8,626084	286,5755	0,004343
S63	SP4	EVAP2	221	26,2	11,5	948,3744	0
S64	SP4	HX1	221	26,2	4,3	948,3744	0
S65	-	HX1	14,99999	19	9,474117	-1,21757	4
S66	HX1	M9	54,20205	26,2	4,3	229,0473	0
S67	SP5	SPHT1	535,0013	1,015	419,2033	567,3956	4
S68	SPHT2	M4	490,3091	1,015	104,8008	515,9384	4
S69	SPHT1	M4	450,8235	1,015	419,2033	470,921	4
S7	HX1	CMB1	150	19	9,474117	322,0296	4
S70	DUCT6	-	125,4707	1,015	524,0042	115,2893	4
S71	-	DUCT4	14,99999	1,0132	514,53	-0,56169	4
S72	DUCT4	DUCT5	14,99999	1,0132	514,53	-0,56169	4
S73	DUCT5	C2	14,99999	1,0032	514,53	-0,56169	4
S74	C2	CMB2	340,6226	11,73744	514,53	334,8118	4
S75	CMB2	EX2	1051,049	11,73744	524,0042	1194,591	4
S76	EX2	DUCT7	534,999	1,025	524,0042	567,3929	4
S77	DUCT7	SP6	534,9988	1,015	524,0042	567,3929	4
S78	SP6	-	534,9988	1,015	0	567,3929	4
S79	SP6	SP7	534,9988	1,015	524,0042	567,3929	4
S8	DUCT1	SP1	535,0013	1,015	524,0042	567,3929	4
S80	SP7	SPHT5	534,9988	1,015	419,2033	567,3928	4
S81	SP7	SPHT6	534,9988	1,015	104,8008	567,3928	4
S82	SPHT6	M5	490,3059	1,015	104,8008	515,9349	4
S83	SPHT5	M5	450,8208	1,015	419,2033	470,9182	4
S84	M5	EVAP4	458,747	1,015	524,0042	479,9251	4
S85	EVAP4	SPHT8	320,7641	1,015	524,0042	325,5882	4
S86	SPHT8	ECON5	316,1685	1,015	524,0042	320,5347	4
S87	ECON5	EVAP5	277,3912	1,015	524,0042	278,1096	4
S88	EVAP5	ECON6	239,5169	1,015	524,0042	237,0345	4
S89	ECON6	ECON7	230,0005	1,015	524,0042	226,7678	4
S9	SP5	SPHT2	535,0013	1,015	104,8008	567,3956	4
S90	ECON7	SPHT7	194,0255	1,015	524,0042	188,1445	4
S91	SPHT7	EVAP6	192,9788	1,015	524,0042	187,0251	4
S92	EVAP6	ECON8	165,511	1,015	524,0042	157,7297	4
S93	ECON8	DUCT8	125,1674	1,015	524,0042	114,969	4
S94	DUCT8	-	125,1674	1,015	524,0042	114,969	4
S95	-	HX2	14,99999	19	9,474117	-1,21757	4
S96	HX2	CMB2	150	19	9,474117	322,0296	4
S97	SP8	M11	63,26553	4,2	74,35001	265,0926	0

S98	M12	ECON8	95,40081	4,2	135,65	399,9323	0
S99	ECON8	SP20	134	4,2	135,65	563,4777	0