

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

*Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών*

**«ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΚΑΙ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ  
ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΙΘΑΝΩΝ  
ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΕΩΝ ΣΤΑΘΜΟΥ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΟΥ ΚΥΚΛΟΥ  
ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ  
ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ *Gate Cycle***

**ΠΟΛΥΧΡΟΝΙΑΔΗΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ**

*Επιβλέπων Καθηγητής*  
**Δρ. ΚΟΛΟΚΟΤΡΩΝΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ**

**ΚΟΖΑΝΗ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2020**

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας Διπλωματικής εργασίας είναι η προσομοίωση μιας Ατμοηλεκτρικής μονάδας συνδυασμένου κύκλου και ο έλεγχος για πιθανές βελτιστοποιήσεις μέσω τροποποιήσεων του κύκλου. Η προσομοίωση βασίστηκε σε πραγματική μονάδα παραγωγής ενέργειας εναλλακτικού παρόχου που έχει έδρα στην Κεντρική Μακεδονία. Ο σταθμός έχει ισχύ 400 MW χρησιμοποιώντας αεριοστρόβιλο ισχύος 265 MW κατασκευής της General Electric, λειτουργεί με βασικό καύσιμο το φυσικό αέριο και έχει την εναλλακτική δυνατότητα καύσης πετρελαίου. Αρχικά υλοποιήθηκε επιτυχώς η προσομοίωση της μονάδας σε ονομαστικό φορτίο σύμφωνα με τα δεδομένα του κατασκευαστή. Το πρώτο σενάριο που μελετήθηκε είναι ο τρόπος ελέγχου της παραγωγής ατμού μέσω ρυθμίσεων της συσκευής του αεριοστρόβιλου. Η συγκεκριμένη ρύθμιση έγινε μέσω μείωσης της παροχής αέρα στον αεριοστρόβιλο. Τα επόμενα δύο σενάρια που ακολουθούν αφορούν την απομάστευση ατμού προς χρήση σε σύστημα Τηλεθέρμανσης σύμφωνα με δεδομένα από την Δημοτική Επιχείρηση Τηλεθέρμανσης Πτολεμαΐδας και Κοζάνης. Τα αποτελέσματα των σεναρίων έδειξαν πως είναι ιδιαίτερα αποδοτική η χρήση απομάστευσης ατμού για χρήση σε σύστημα Τηλεθέρμανσης. Επίσης ελέγχθηκε η προσθήκη δεύτερου αεριοστρόβιλου στον κύκλωμα του συνδυασμένου κύκλου και έγινε προσπάθεια να κατανοήσουμε τη συμπεριφορά του συστήματος σε πλήρες και μερικό φορτίο. Από τις δοκιμές φτάσαμε στο συμπέρασμα ότι είναι αποδοτικότερο να λειτουργούν οι αεριοστρόβιλοι σε πλήρες παρά σε μερικό φορτίο.

## ABSTRACT

The subject of this thesis is to simulate a combined cycle steam power plant and investigate for possible optimizations through cycle modifications. The simulation was based on a real power plant located in Central Macedonia. The electrical power of the plant is 400 MW and is using a 265 MW gas turbine manufactured by General Electric. The main fuel of the gas turbine is natural gas and it can operate with oil too as an alternative fuel. At first the simulation of the plant was successfully conducted in nominal load according to the manufacturer's data. Firstly, the way that steam production was controlled through gas turbine settings was investigated. This adjustment was achieved by reducing gas turbine's air supply. The subject of the next two cases was the steam extraction for use in a district heating system according to data from the municipal heating company of Ptolemaida and Kozani. The results of these scenarios have shown that extracting steam for use in a district heating system is highly efficient. We have also included in the scenarios the addition of a second gas turbine to the combined cycle and investigated the behavior of the system in full and partial load. As shown in the results of the tests, we came to the conclusion that it is more efficient to run the gas turbines in full load than in partial.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Για την υλοποίηση της παρούσας Διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω πρώτα απ' όλα τους γονείς μου οι οποίοι με στήριξαν ηθικά και υλικά καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου στο μεταπτυχιακό αυτό πρόγραμμα. Θα ήθελα ακόμα να ευχαριστήσω τον Διευθυντή της μονάδας παραγωγής ενέργειας τη κ. Κτενίδη Γεώργιο και τον υπεύθυνο Μηχανικό κ. Κυριακόπουλο Αχιλλέα οι οποίοι ήταν πρόθυμοι να κανονίσουμε συναντήσεις στο χώρο του εργοστασίου και να μου λύσουν κάθε απορία, παρέχοντας μου πολύτιμη βοήθεια. Επίσης θέλω να ευχαριστήσω τον υποψήφιο Διδάκτορα Βασίλειο Τσιόγκα ο οποίος ήταν πάντα πρόθυμος να με βοηθήσει άμεσα με κάθε απορία που μπορεί να προέκυψε με το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε. Κυρίως όμως αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέποντα καθηγητή μου Δρ. Κολοκοτρώνη Δημήτριο ο οποίος μέσα από τα μαθήματα του με ενέπνευσε ώστε να τον επιλέξω ως σύμβουλο καθηγητή με το συγκεκριμένο θέμα καθώς και για την σημαντική βοήθεια που μου παρείχε κατά την προσομοίωση και συγγραφή της διπλωματικής μου εργασίας.

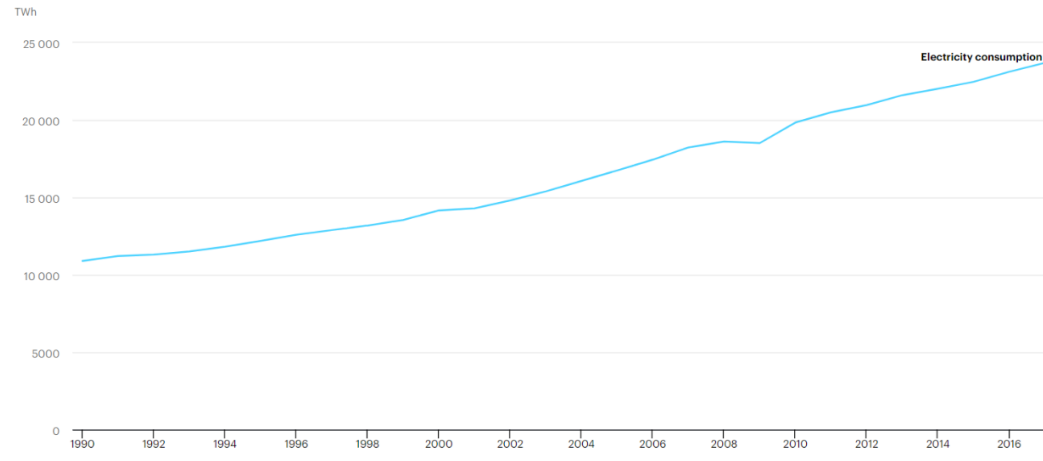
# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	2
<b>ABSTRACT</b> .....	3
<b>ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ</b> .....	4
<b>1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	7
1.2 Θερμοδυναμικοί κύκλοι.....	8
1.2.1 Ιδεατός κύκλος Rankine .....	8
1.2.2 Πραγματικός κύκλος Rankine.....	11
1.2.3 Αναθέρμανση .....	12
1.2.4 Ιδεατός κύκλος Brayton.....	13
1.2.5 Απλός κύκλος Αεριοστρόβιλου .....	14
1.2.5 Πραγματικός κύκλος Brayton.....	16
1.3 Συνδυασμένος κύκλος.....	17
1.3.1 Βασικές παράμετροι επιλογής αεριοστρόβιλου .....	20
1.3.2 Βασικές παράμετροι επιλογής HRSG .....	21
1.3.3 Πρόσθετη καύση στον χώρο του HRSG.....	22
1.4 Συμπαραγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας.....	22
1.4.1 Τρόποι λειτουργίας μονάδας Συμπαραγωγής .....	23
1.4.2 Δείκτες αποδοτικότητας μονάδας Συμπαραγωγής .....	24
1.4.3 Λειτουργικό κριτήριο μονάδας Συμπαραγωγής .....	25
<b>2. ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ GateCycle 6.0</b> .....	26
2.1 Περιγραφή GateCycle.....	26
2.2 Περιβάλλον εργασίας GateCycle.....	26
2.3 Περιγραφή βασικών συσκευών GateCycle .....	30
<b>3.ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΑΔΑΣ ΚΑΙ ΣΥΝΤΑΞΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ</b> .....	46
3.1 Προσομοίωση μονάδας στο Ονομαστικό φορτίο .....	52
3.2 Τρόπος ελέγχου παραγωγής ατμού (Σενάριο 1).....	53
3.3 Σύστημα Τηλεθέρμανσης με απομάστευση ατμού από τη μέση πίεση του στροβίλου (Σενάριο 2).....	55
3.4 Σύστημα Τηλεθέρμανσης με απομάστευση ατμού από τη χαμηλή πίεση του στροβίλου (Σενάριο 3).....	57
3.5 Λειτουργία συνδυασμένου κύκλου με δύο αεριοστρόβιλους σε μερικό φορτίο (Σενάριο 4).....	58
<b>4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ</b> .....	61
4.1 Προσομοίωση μονάδας στο Ονομαστικό φορτίο .....	61

4.2 Τρόπος ελέγχου παραγωγής ατμού (Σενάριο 1).....	70
4.3 Σύστημα Τηλεθέρμανσης με απομάστευση ατμού από τη μέση πίεση του στροβίλου (Σενάριο 2).....	79
4.4 Σύστημα Τηλεθέρμανσης με απομάστευση ατμού από τη χαμηλή πίεση του στροβίλου (Σενάριο 3).....	84
4.5 Λειτουργία Συνδυασμένου κύκλου με δύο αεριοστροβίλους σε μερικό φορτίο (Σενάριο 4).....	89
<b>5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>98</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>102</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1 .....</b>	<b>104</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2 .....</b>	<b>107</b>

## 1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ενέργεια είναι ένα βασικό και αναπόσπαστο αγαθό της σύγχρονης κοινωνίας το οποίο συμβάλει στην διαρκή ανάπτυξή της. Σύμφωνα με τα τελευταία στοιχεία της IEA (International Energy Agency) που παρουσιάζονται στην εικόνα 1.1 φαίνεται πως με την πάροδο των χρόνων και την εξέλιξη της τεχνολογίας απαιτούνται μεγαλύτερα ποσά ηλεκτρικής ενέργειας τα οποία προορίζονται για την ανάπτυξη της οικονομίας αλλά και την κοινωνική ευημερία[1]. Αυτή η αυξανόμενη ζήτηση έρχεται σε σύγκρουση με τα διαθέσιμα αποθέματα ορυκτών πόρων τα οποία δεν είναι ανεξάντλητα. Παράλληλα η παγκόσμια κοινότητα προσπαθεί να προασπίσει την προστασία του περιβάλλοντος θεσπίζοντας μέτρα για την μείωση των επιπτώσεων. Γι' αυτό το λόγο η παραγωγή, η μεταφορά και η διανομή της ενέργειας είναι ένας από τους βασικούς πυλώνες κάθε κοινωνίας. Το πρόβλημα αυτό έχει αναλάβει να λύσει η επιστήμη που αναζητά συνεχώς συστήματα αυξημένης αποδοτικότητας για την μείωση της σπατάλης ενεργειακών πόρων. Ένα σύστημα το οποίο προσφέρει υψηλή απόδοση αλλά και ενεργειακή ασφάλεια λόγω της χρήσης ορυκτών καυσίμων είναι αυτό του συνδυασμένου κύκλου. Η βασική αρχή λειτουργίας βασίζεται στην ανάκτηση την ενέργειας των καυσαερίων που υπό άλλες συνθήκες θα απορρίπτονταν στο περιβάλλον με αποτέλεσμα την ενεργειακή σπατάλη. Αυτή η τεχνολογία συνδυάζει τον κύκλο αεριοστρόβιλου με τον κύκλο νερού ατμού, δύο κύκλων με σχετικά μικρό βαθμό απόδοσης που αν συνδυαστούν δημιουργούν ένα πολύ αποδοτικό σύστημα της τάξης του 55-60%. Ο λόγος για τον οποίο επιλέχθηκε το παρών θέμα Διπλωματικής εργασίας είναι διότι η συγκεκριμένη τεχνολογία γνωρίζει άνθηση και υπάρχει πρόσφορο έδαφος για πιθανές βελτιστοποιήσεις μέσω δοκιμών σε μοντέλα προσομοίωσης. Για την καλύτερη κατανόηση της τεχνολογίας του συνδυασμένου κύκλου θα αναλύσουμε στην επόμενη ενότητα τους συγκεκριμένους θερμοδυναμικούς κύκλους που συνεργάζονται για την παραγωγή ενέργειας.



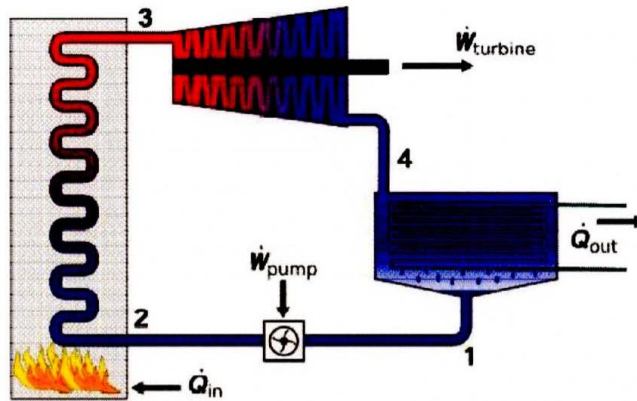
Εικόνα 1.1 Παγκόσμια κατανάλωση Ηλεκτρικής ενέργειας σύμφωνα με την IEA (Πηγή: [iea.org](http://iea.org))

## 1.2 Θερμοδυναμικοί κύκλοι

### 1.2.1 Ιδεατός κύκλος Rankine

Ο Θερμοδυναμικός κύκλος Rankine είναι ένας κύκλος ισχύος και έχει ως στόχο την μετατροπή της θερμικής ενέργειας σε ωφέλιμο μηχανικό έργο. Υλοποιείται από μηχανές εξωτερικής καύσης και η πρόσδοση θερμότητας γίνεται εκτός του χώρου παραγωγής έργου, με το εργαζόμενο μέσο να είναι συνήθως το νερό ή κάποιο άλλο ρευστό. Έπειτα το εργαζόμενο μέσο υψηλής ενθαλπίας εκτονώνεται σε κάποια διάταξη στροβίλου για την παραγωγή μηχανικού έργου[2]. Το εργαζόμενο μέσο αφού ολοκληρώσει όλες τις διεργασίες του κύκλου επιστρέφει στο σημείο που έχουμε ορίσει ως αρχή του συστήματος έχοντας τις απαραίτητες καταστατικές ιδιότητες του συγκεκριμένου σημείου με στόχο να επαναλάβει τον κύκλο, χωρίς να έχει υποστεί μεταβολές στη χημική του σύσταση καθώς δεν λαμβάνει μέρος σε χημικές διεργασίες, διατηρώντας έτσι την ίδια ποσότητα εργαζόμενου μέσου [3]. Ο κύκλος Rankine (κύκλος νερού ατμού) αποτελείται από διεργασίες οι οποίες εκτελούνται μεταξύ δυο διαδοχικών σημείων (εικόνα 1.2) και λαμβάνει χώρα σε κλειστό κύκλωμα (σταθερή ποσότητα εργαζόμενου μέσου). Οι διαδοχικές διεργασίες θεωρούνται ιδανικές (αδιαβατικές και αντιστρεπτές) δίχως να υπολογίζονται οι απώλειες του συστήματος (εσωτερικές και εξωτερικές αναντιστρεπτότητες). Ο ιδεατός κύκλος Rankine δεν μπορεί να υπάρξει σε πραγματική εφαρμογή καθώς δεν μπορούμε να έχουμε πλήρως ισεντροπικές διεργασίες. Χρησιμοποιείται όμως για τον υπολογισμό του μέγιστου βαθμού απόδοσης των συσκευών και των μέγιστων ονομαστικών τιμών λειτουργίας για συγκεκριμένες μεταβολές του συστήματος.





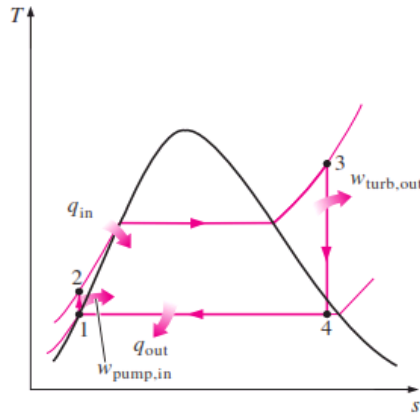
Εικόνα 1.2 Σχηματική αναπαράσταση κύκλου Rankine. (Πηγή: Wikipedia)

Οι διεργασίες του απλού κύκλου Rankine που φαίνονται στην εικόνα 1.2 είναι:

- 1-2 Ισεντροπική αύξηση πίεσης του ρευστού στην συσκευή της αντλίας
- 2-3 Ισοβαρής προσθήκη θερμότητας στον χώρο του λέβητα
- 3-4 Ισεντροπική εκτόνωση του ατμού σε στρόβιλο
- 4-1 Ισοβαρής απόρριψη θερμότητας στην συσκευή του συμπυκνωτή

Για τον ιδεατό κύκλο Rankine, οι διεργασίες μετάδοσης θερμότητας πραγματοποιούνται υπό σταθερή πίεση ενώ η παραγωγή και κατανάλωση ισχύος υπό σταθερή εντροπία.

Αναλυτικότερα, σύμφωνα με την εικόνα 1.3 το σημείο (1) βρίσκεται στην είσοδο της τροφοδοτικής αντλίας, όπου το κορεσμένο νερό συμπιέζεται ισεντροπικά στην πίεση λειτουργίας του λέβητα. Στην συγκεκριμένη διεργασία παρατηρείται μικρή θερμοκρασιακή αύξηση του νερού λόγω της μείωσης του ειδικού όγκου. Έπειτα συμπιεσμένο υγρό εισέρχεται στον λέβητα στην κατάσταση (2) και εξέρχεται στην κατάσταση (3) ως υπέρθερμος ατμός. Ο υπέρθερμος ατμός στην συνέχεια εκτονώνεται ισεντροπικά στον χώρο του στρόβιλου ατμού παράγοντας μηχανικό έργο έως την κατάσταση (4). Στην συνέχεια το ρευστό το οποίο είναι συνήθως μίγμα νερού-ατμού εισέρχεται στην συσκευή του συμπυκνωτή όπου υγροποιείται υπό σταθερή πίεση έως το σημείο (1) ώστε να επαναληφθεί ο κύκλος. [4].



Εικόνα 1.3 Διάγραμμα T-s απλού κύκλου Rankine (Πηγή: [www.Quora.com](http://www.Quora.com))

Οι μεταβολές της κινητικής και δυναμικής ενέργειας του ατμού συγκριτικά με τους όρους του έργου και της θερμότητας που μεταφέρονται θεωρούνται αμελητέες και ισχύει η εξίσωση ενέργειας μόνιμης ροής ανά μονάδα μάζας ατμού χωρίς τους όρους της κινητικής και δυναμικής ενέργειας όπως παρουσιάζεται στην σχέση 1.1. Τις συσκευές του στροβίλου και τις αντλίες τις θεωρούμε ισεντροπικές διεργασίες ενώ στον λέβητα και τον συμπυκνωτή δεν έχουμε παραγωγή έργου όπως φαίνεται στις εξισώσεις 1.2 έως και 1.5. [4]

$$\dot{Q}_{in} + \dot{W}_{in} + \sum \dot{m}_{in} \left( h_{in} + \frac{v_{in}^2}{2} + gz_{in} \right) = \dot{Q}_{out} + \dot{W}_{out} + \sum \dot{m}_{out} \left( h_{out} + \frac{v_{out}^2}{2} + gz_{out} \right) \quad (1.1)$$

Η εξίσωση διατήρησης της ενέργειας 1.1 για κάθε συσκευή μπορεί να διατυπωθεί ως εξής:

- Αντλία, ( $\Delta s=0$ ):  $W_p = v (P_2 - P_1) = -(h_2 - h_1)$  (1.2)
- Ατμοπαραγωγός, ( $w=0$ ):  $q_{in} = (h_3 - h_2)$  (1.3)
- Ατμοστρόβιλος, ( $\Delta s=0$ ):  $W_T = (h_3 - h_4)$  (1.4)
- Συμπυκνωτής, ( $w=0$ ):  $q_{out} = (h_4 - h_1)$  (1.5)

όπου,

$W_p$  και  $W_T$  το έργο των αντλιών και το μηχανικό έργο του στροβίλου αντίστοιχα,  $v$  είναι ο ειδικός όγκος του ρευστού,  $q_{in}$  και  $q_{out}$  είναι η πρόσδοση θερμότητας στο σύστημα και η απόρριψή της αντίστοιχα. Για το σχήμα 1.2, ως  $P_2 - P_1$  παρουσιάζεται η διαφορά πίεσης μεταξύ των σημείων 1 και 2, ενώ  $h_2 - h_1$  είναι η διαφορά ενθαλπίας μεταξύ των σημείων 1 και 2.

Ο θερμικός βαθμός απόδοσης του κύκλου Rankine για την εικόνα 1.5 δίνεται από την σχέση:

$$n_{th} = \frac{W_{net}}{q_{in}} = \frac{W_T - W_P}{q_{in}} \quad (1.6)$$

$$q_{in} = \dot{m}_{steam}(h_{SH} - h_{water}) + \dot{m}_{RH}(h_{HOT} - h_{COLD}) \quad (1.7)$$

όπου,

$W_{net}$  είναι το καθαρό έργο του στροβίλου χωρίς τις ιδιοκαταναλώσεις,  $\dot{m}_{steam}$  η παροχή ατμού,  $h_{SH}$  η ενθαλπία υπέρθερμου ατμού,  $h_{water}$  η ενθαλπία του νερού,  $\dot{m}_{RH}$  η μάζα ατμού αναθέρμανσης,  $h_{HOT}$  η ενθαλπία του ρευστού μετά την διεργασία αναθέρμανσης και  $h_{COLD}$  η ενθαλπία του ρευστού πριν την διεργασία αναθέρμανσης.

Ο βαθμός απόδοσης του λέβητα για την εικόνα 1.5 δίνεται από την σχέση:

$$\eta_A = \frac{\dot{m}_{steam}(h_{SH} - h_{water}) + \dot{m}_{RH}(h_{HOT} - h_{COLD})}{q_{in}} \quad (1.8)$$

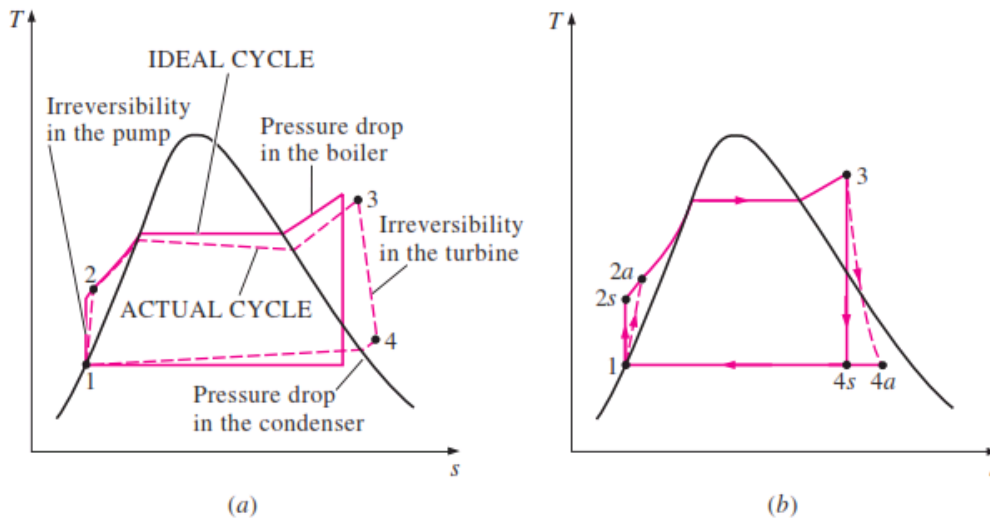
$$q_{in} = \dot{m}_B H_u \quad (1.9)$$

Όπου,

$\dot{m}_B$  είναι η παροχή καυσίμου στον χώρο του λέβητα και  $H_u$  είναι η θερμογόνο δύναμη του καυσίμου.

### 1.2.2 Πραγματικός κύκλος Rankine

Όπως φαίνεται στην εικόνα 1.4 ο πραγματικός κύκλος Rankine διαφέρει σημαντικά από τον ιδανικό λόγω των εσωτερικών και εξωτερικών αναντιστρεπτοτήτων που εμφανίζονται στις συσκευές του κυκλώματος. Βασικές πηγές αναντιστρεπτότητας είναι η τριβή του ρευστού στα τοιχώματα των συσκευών καθώς και οι θερμικές απώλειες προς το περιβάλλον.



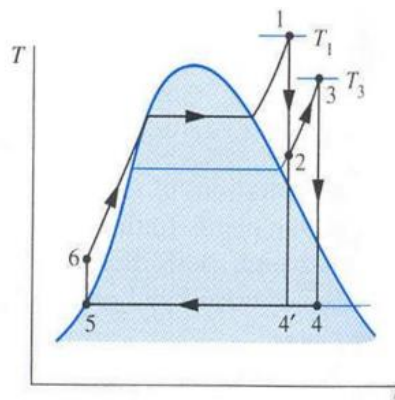
Εικόνα 1.4 Σχήμα (α) Διαφορές ιδεατού και πραγματικού κύκλου Rankine Σχήμα (β) Διαφορές εκτόνωσης και συμπίεσης πραγματικού και ιδεατού κύκλου. (Πηγή: Sounak4u.weebly.com)

Η εσωτερική αναντιστρεπτότητα του κύκλου οφείλεται στην τριβή του ρευστού στο εσωτερικό των σωληνώσεων, του στραγγαλισμού, της ανάμιξης δυο ρευστών και της μετάδοσης θερμότητας μέσω μιας πεπερασμένης θερμοκρασιακής διαφοράς [5]. Ο ρυθμός της ροής σε όλον τον κύκλο και κατ' επέκταση στις συσκευές του στρόβιλου και της αντλίας είναι υψηλός και οι διεργασίες σε αυτές τις συσκευές είναι γρήγορες αλλά οι απώλειες θερμότητας ανά μονάδα μάζας συνεχίζουν να υφίστανται. Το ρευστό που εξέρχεται από την τροφοδοτική αντλία πρέπει να έχει μεγαλύτερη πίεση από την πίεση λειτουργίας του ατμοπαραγωγού δεδομένου ότι υπάρχει πτώση πίεσης λόγω τριβής στα τοιχώματα των σωληνώσεων, στις ρυθμιστικές βαλβίδες και στους εναλλάκτες θερμότητας. Η εξωτερική αναντιστρεπτότητα οφείλεται στην θερμοκρασιακή διαφορά που υπάρχει ανάμεσα στα θερμά καυσαέρια και το εργαζόμενο μέσο στην περιοχή του ατμοπαραγωγού καθώς και μεταξύ του συμπυκνώματος και του νερού ψύξης στην συσκευή του συμπυκνωτή.

### 1.2.3 Αναθέρμανση

Ο κύκλος Rankine με αναθέρμανση (εικόνα 1.5) είναι ο ίδιος κύκλος που μελετήσαμε με την διαφορά ότι μπορεί να έχει μία ή δύο επιπλέον βαθμίδες εκτόνωσης. Όταν το εργαζόμενο μέσο εξέρχεται από την πρώτη βαθμίδα του στρόβιλου έχει μειωμένη ενθαλπία και οδηγείται στον λέβητα ανάκτησης θερμότητας όπου αναθερμαίνεται και αποκτά τις επιθυμητές ιδιότητες ώστε να εκτονωθεί περαιτέρω στον στρόβιλο ατμού [3]. Η αναθέρμανση ενός σταδίου σε ένα σύγχρονο ατμοπαραγωγό μπορεί να βελτιώσει την απόδοση της μονάδας παραγωγής ισχύος κατά 4-5% με αύξηση της μέσης θερμοκρασίας πρόσδοσης θερμότητας στον ατμό. Η μέση θερμοκρασία της αναθέρμανσης μπορεί να αυξηθεί με την αύξηση των

σταδίων αναθέρμανσης και εκτόνωσης. Η αύξηση του αριθμού των διεργασιών αναθέρμανσης σε περισσότερα από δύο στάδια αποδεικνύεται μη συμφέρουσα. Επίσης η θερμοκρασία αναθέρμανσης είναι σχεδόν ίση με τη θερμοκρασία εισόδου του υπέρθερμου ατμού στον στρόβιλο και η βέλτιστη πίεση αναθέρμανσης είναι περίπου στο 25% της μέγιστης πίεσης του κύκλου [2].



Εικόνα 1.5 Απλός κύκλος Rankine με αναθέρμανση ενός σταδίου. ( Πηγή: Θερμικοί σταθμοί και συμπαραγωγή, [6])

#### 1.2.4 Ιδεατός κύκλος Brayton

Οι παραδοχές που κάνουμε για τις συνθήκες λειτουργίας του ιδεατού κύκλου αεριοστρόβιλου είναι οι εξής [7]:

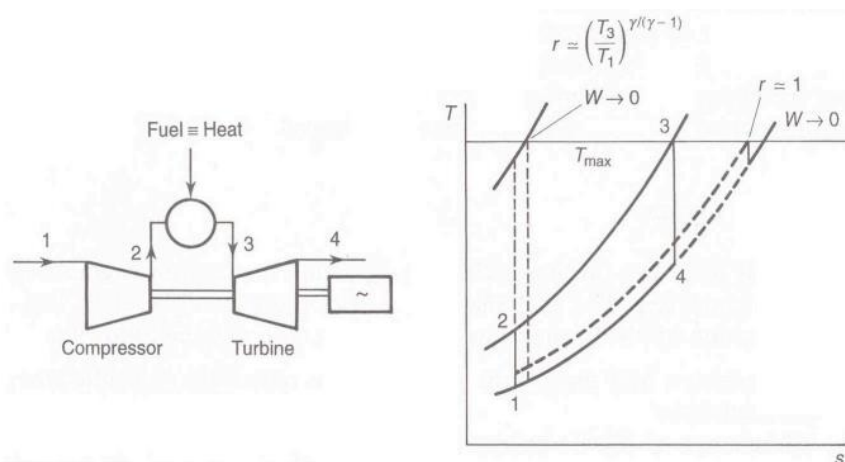
1. Οι διεργασίες συμπίεσης και εκτόνωσης είναι αντιστρεπτές (ισεντροπικές). Το περίβλημα θεωρείται αδιαβατικό και δεν υπάρχουν απώλειες τριβής
2. Οι ταχύτητες του ρευστού είναι σχετικά μικρές και οι μεταβολές της κινητικής και δυναμικής ενέργειας θεωρούνται αμελητέες. Με αυτήν την παραδοχή μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την αρχή διατήρησης της ενέργειας απαλείφοντας τους όρους της δυναμικής και κινητικής ενέργειας.
3. Στον καυστήρα του αεριοστρόβιλου δεν υπάρχει πτώση πίεσης.
4. Το αέριο διατηρεί την ίδια σύσταση εντός του κύκλου και είναι ιδανικό αέριο με σταθερές ειδικές θερμότητες. Γι' αυτό το λόγο επιλέγουμε τον αέρα ως εργαζόμενο μέσο.
5. Η παροχή μάζας παραμένει σταθερή.
6. Η καύση είναι τέλεια και στιγμιαία.
7. Από τις παραδοχές 5 και 6 δεχόμαστε ότι ο θάλαμος καύσης είναι ένας θερμικός εναλλάκτης ο οποίος τροφοδοτείται από μια εξωτερική πηγή θερμότητας, οπότε ο

υπολογισμός λειτουργίας του ιδανικού κύκλου είναι ίδιος για ανοικτό ή για κλειστό κύκλο.

8. Ροή μονοδιάστατη και ομοιόμορφη. Κάνουμε την παραδοχή ότι οι ιδιότητες του ρευστού παραμένουν σταθερές σε επίπεδα κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης.

### 1.2.5 Απλός κύκλος Αεριοστρόβιλου

Ο ιδεατός κύκλος για τον απλό αεριοστρόβιλο είναι ο κύκλος Joule Brayton που ακολουθεί τα σημεία 1,2,3,4 και παρουσιάζεται στην εικόνα 1.6



Εικόνα 1.6 Απλός κύκλος αεριοστρόβιλου. (Πηγή: Τεχνολογία αεριοστρόβιλων, [8])

Για την εικόνα 1.6 η εξίσωση ενέργειας της διεργασίας 1-2 είναι η εξής:

$$Q = (h_2 - h_1) + \frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2) + W \quad (1.10)$$

όπου,

Q και W είναι η θερμότητα και το έργο που προσδίδεται και παράγεται ή καταναλώνεται στις διεργασίες του κύκλου ενώ C είναι η ταχύτητα του αερίου στα αντίστοιχα σημεία.

Με την εφαρμογή της εξίσωσης 1.10 για κάθε συσκευή του αεριοστρόβιλου προκύπτουν οι παρακάτω σχέσεις:

- 1-2 Αδιαβατική συμπίεση ( $q=0$ )  $W_{12} = -(h_2 - h_1) = -C_p (T_2 - T_1)$  (1.11)

- 2-3 Ισοβαρής καύση ( $w=0$ )  $Q_{23} = (h_3 - h_2) = C_p (T_3 - T_2)$  (1.12)

- 3-4 Αδιαβατική εκτόνωση ( $q=0$ )  $W_{34} = (h_3 - h_4) = C_p (T_3 - T_4)$  (1.13)

- Ισοβαρής απόρριψη θερμότητας

όπου,

$c_p$  είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα του εργαζόμενου μέσου.

Ο βαθμός απόδοσης του κύκλου για την εικόνα 1.6 είναι ο εξής:

$$\eta = \frac{\text{παραγόμενο έργο}}{\text{προσδιδόμενη θερμοότητα}} = \frac{C_p (T_3 - T_4) - C_p (T_2 - T_1)}{C_p (T_3 - T_2)} \quad (1.14)$$

Κάνοντας χρήση της ισεντροπικής σχέσης  $p$ - $T$  προκύπτει η σχέση:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = r^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (1.15)$$

Όπου  $r$  είναι ο λόγος πιέσεων  $P_2/P_1=r=P_3/P_4$  μεταξύ της υψηλής και χαμηλής πίεσης του κύκλου και  $\gamma$  είναι ο λόγος ειδικών θερμοτήτων. Επίσης ισχύει πως  $P_2= P_3$  και  $P_1=P_4$ . Συνδυάζοντας τις εξισώσεις 1.14 και 1.15, ο βαθμός απόδοσης του κύκλου μπορεί οπότε να διατυπωθεί ως εξής:

$$\eta = 1 - \left(\frac{1}{r}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (1.16)$$

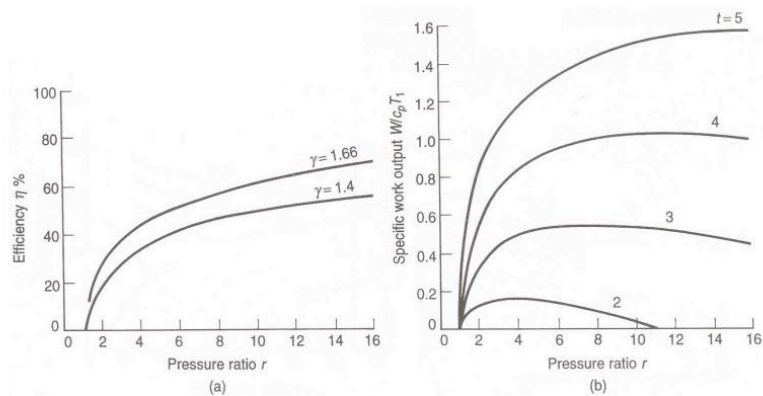
Από την σχέση 1.16 μπορούμε να συμπεράνουμε ότι ο βαθμός απόδοσης εξαρτάται μόνο από τον λόγο συμπίεσης και το είδος του εργαζομένου αερίου.

Το παραγόμενο ειδικό έργο από το οποίο εξαρτάται το μέγεθος την μονάδας ισχύος εξαρτάται πέραν από τον λόγο συμπίεσης και από την μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου  $T_3$  (σχέση 1.17).

Επομένως:

$$W = C_p (T_3 - T_4) - C_p (T_2 - T_1) \quad (1.17)$$

Και αν ορίσουμε ως  $t=T_3/T_1$ , όπου  $T_1$  είναι η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας και  $T_3$  η μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου. Ο λόγος  $t$  έχει άμεση σχέση με το μεταλλουργικό όριο καθώς αν θεωρήσουμε την  $T_1$  αμελητέα το  $T_3$  θέτει τα όρια λειτουργίας του κύκλου. Με αυτήν την διαπίστωση δεν μπορούμε να αυξήσουμε την τιμή της  $T_3$  αυθαίρετα. Παλαιότερα η τιμή της  $t$  κυμαινόταν μεταξύ 3,5 και 4, ενώ στην παρούσα στιγμή και με την χρήση αερόψυκτων πτερυγίων του στροβίλου μπορούμε να έχουμε έναν λόγο της τάξης του 5 με 6 [8].



Εικόνα 1.7 Σχήμα (α) Επίδραση του λόγου συμπίεσης στον βαθμό απόδοσης της μονάδας Σχήμα(β) επίδραση του λόγου συμπίεσης και του λόγου θερμοκρασιών στο ειδικό έργο. [Πηγή: Τεχνολογία αεριοστρόβιλων, [8]]

Παρατηρώντας την εικόνα 1.7 και συγκεκριμένα το διάγραμμα ειδικού έργου και λόγου πιέσεων βλέπουμε πως για συγκεκριμένη καμπύλη  $t$  και λόγο πιέσεων, το ειδικό έργο μεγιστοποιείται.

Η τιμή του  $r$  δίνεται από την σχέση 1.18.

$$r = \frac{\gamma}{t^{2(\gamma-1)}} \quad (1.18)$$

Η βέλτιστη τιμή του  $r$  για την μέγιστη τιμή παραγόμενου έργου δίνεται από την σχέση 1.19 [7].

$$r_{opt}^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \sqrt{t} \quad (1.19)$$

### 1.2.5 Πραγματικός κύκλος Brayton

Η απόκλιση του πραγματικού από τον ιδεατό κύκλο οφείλεται στις παραδοχές που κάναμε στον ιδεατό κύκλο και την μη τήρηση τους στην πραγματική εφαρμογή [7].

- Αρχικά οι ταχύτητες της ροής είναι υψηλές οπότε δεν μπορούμε να θεωρήσουμε αμελητέες τις μεταβολές κινητικής ενέργειας.
- Οι διεργασίες του κύκλου δεν είναι αδιαβατικές οπότε δεν μπορούν να είναι και αντιστρεπτές.
- Η τριβή του εργαζόμενου μέσου δημιουργεί απώλειες πίεσης στον θάλαμο καύσης, στους αγωγούς εισόδου και εξόδου.
- Οι τιμές της ειδικής θερμοχωρητικότητας  $C_p$  και  $\gamma$  μεταβάλλεται και αυτή η μεταβολή οφείλεται στην αλλαγή της θερμοκρασίας και την χημική σύσταση του αερίου.



- Η απόδοση του κύκλου έχει άμεση εξάρτηση από την καύση η οποία σε πραγματική εφαρμογή δεν είναι πλήρης ούτε τέλεια. Εάν γνωρίζουμε την θερμοκρασία εξόδου του συμπιεστή, την σύσταση του καυσίμου και τη θερμοκρασία εισόδου στον στρόβιλο μπορούμε να προσδιορίσουμε τον απαιτούμενο λόγο καυσίμου/αέρα, την απόδοση της καύσης και την ειδική κατανάλωση καυσίμου
- Στον πραγματικό κύκλο ο στρόβιλος διαθέτει μεγαλύτερο ποσό ισχύος για την λειτουργία του συμπιεστή καθώς πρέπει να καλύψει και τις απώλειες τριβής αλλά και τις ιδιοκαταναλώσεις τον βοηθητικών συστημάτων.
- Η ροή του εργαζόμενου μέσου στην πραγματικότητα είναι πολύπλοκη και δεν μπορεί να θεωρηθεί μονοδιάστατη και ομοιόμορφη
- Εάν χρησιμοποιηθεί εναλλάκτης θερμότητας στο κύκλωμα ο βαθμός απόδοσης είναι μικρότερος της μονάδας και αυτό συμβαίνει επειδή δεν μπορεί να απορροφήσει το εργαζόμενο μέσο όλο το ποσό της ενέργειας των καυσαερίων λόγω του μεγέθους του εναλλάκτη.

Ο ισεντροπικός βαθμός συμπίεσης για την εικόνα 1.6 δίνεται από την σχέση:

$$n_{iS}C = \frac{\text{Ισεντροπικό έργο συμπίεσης}}{\text{Πραγματικό έργο συμπίεσης}} = \frac{h_{2s} - h_{1s}}{h_2 - h_1} = \frac{Cp(T_{2s} - T_{1s})}{Cp(T_2 - T_1)} \quad (1.20)$$

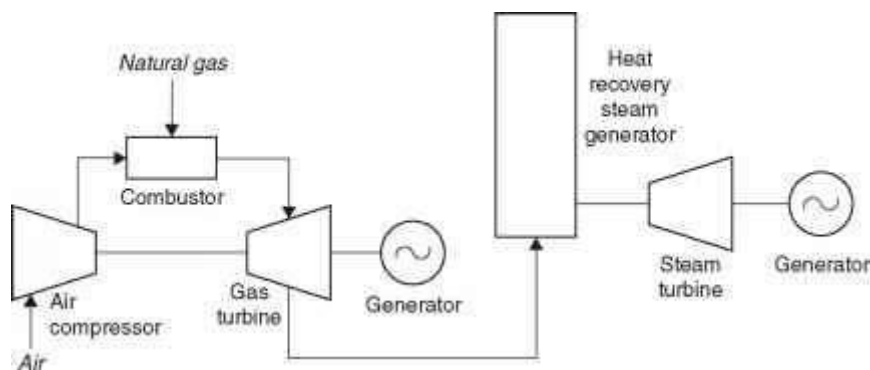
Ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του στρόβιλου για την εικόνα 1.6 δίνεται από την σχέση:

$$n_{iS}T = \frac{\text{Πραγματική παραγωγή ισχύος}}{\text{Ιδανική παραγωγή ισχύος}} = \frac{h_2 - h_1}{h_{2s} - h_{1s}} = \frac{Cp(T_2 - T_1)}{Cp(T_{2s} - T_{1s})} \quad (1.21)$$

### 1.3 Συνδυασμένος κύκλος

Ο συνδυασμένος κύκλος αποτελείται από έναν κύκλο Rankine και έναν κύκλο Brayton όπως φαίνεται στην εικόνα 1.8. Αρχικά ο κύκλος Brayton λειτουργεί σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες και μπορεί η θερμοκρασία εισόδου στον αεριοστρόβιλο να φτάσει τους 1600°C (Turbine Entry Temperature) ενώ η έξοδος των καυσαερίων να έχει ένα εύρος 500 με 700°C (Exhaust Gas Temperature). Από άλλη σκοπιά ένας κύκλος Rankine λειτουργεί σε θερμοκρασία υπέρθερμου ατμού περίπου στους 560°C. Γι' αυτό το λόγο κρίνεται συμφέρον ο συνδυασμός των δύο κύκλων. Με την προσθήκη ενός εναλλάκτη θερμότητας (Heat Recovery Steam Generator) εκμεταλλευόμαστε την ενέργεια που έχουν τα θερμά καυσαέρια και δεν μετατρέπονται σε έργο στρόβιλου για να θερμάνουμε το τροφοδοτικό νερό σε υπέρθερμο

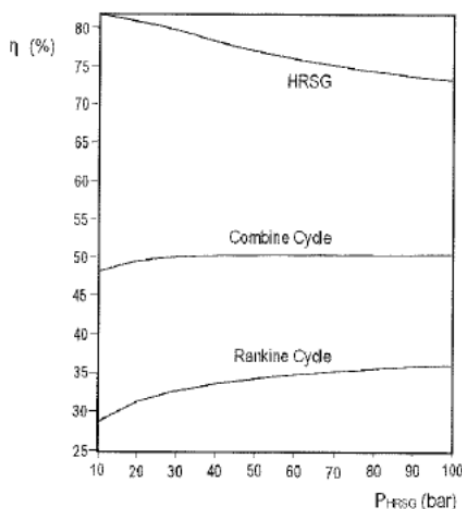
ατμό για να εκτονωθεί σε στρόβιλο ατμού. Ο συνδυασμός των δύο κύκλων όπως φαίνεται στην εικόνα 1.9 είναι περίπλοκος και η λειτουργία του ενός επηρεάζει σημαντικά τα χαρακτηριστικά του δεύτερου. Για τον σχεδιασμό ενός συστήματος συνδυασμένου κύκλου δεν αρκούν μόνο τα τεχνικά χαρακτηριστικά των συσκευών αλλά και η αλληλεπίδραση που θα έχουν μεταξύ τους στο σύστημα. Ένα ακόμα σημαντικό χαρακτηριστικό είναι πως η συσκευή του αεριοστρόβιλου καθώς και του στρόβιλου ατμού που θα συνδυαστούν για την παραγωγή έργου συμπεριφέρονται πολύ διαφορετικά απ' ό,τι αν λειτουργούσαν σε ανεξάρτητους κύκλους[9]. Στις επόμενες ενότητες θα γίνει αναφορά στα βασικά χαρακτηριστικά επιλογής του αεριοστρόβιλου καθώς και του λέβητα ανάκτησης θερμότητας καθώς έχουν ιδιαίτερη βαρύτητα για την αποδοτική λειτουργία της μονάδας.



Εικόνα 1.8 Σχηματική απεικόνιση μονάδας συνδυασμένου κύκλου. (Πηγή: ResearchGate)

Ένα βασικό πλεονέκτημα του συνδυασμένου κύκλου είναι ο υψηλός θερμικός βαθμός απόδοσης λόγω της αξιοποίησης των θερμών καυσαερίων που υπό άλλες συνθήκες θα απορρίπτονταν στο περιβάλλον. Επίσης η μονάδα συνδυασμένου κύκλου μπορεί να λειτουργήσει με ένα ευρύ φάσμα καυσίμων και αυτό τις προσφέρει μια περαιτέρω ευελιξία στην αγορά. Ένα άλλο θετικό του κύκλου είναι πως μπορεί να κατασκευαστεί πολύ γρήγορα (2 έως 3 έτη) καθώς δεν περιέχει πολλά βοηθητικά συστήματα, με την συσκευή του αεριοστρόβιλου να μπορεί να παράγει έργο στους 18 μήνες έως ότου ολοκληρωθεί και το σύστημα νερού-ατμού. Ο μικρός χρόνος περάτωσης των εργασιών και ο μικρός αριθμός συσκευών έχει αντίκτυπο και στα οικονομικά στοιχεία αφού δεν απαιτεί μεγάλο κεφάλαιο και ξεκινά γρηγορότερα η απόσβεση. Στα πλεονεκτήματα έρχεται να προστεθεί το χαμηλό κόστος λειτουργίας και συντήρησης που είναι σημαντικός παράγοντας λειτουργίας του εργοστασίου. Τέλος ο συνδυασμένος κύκλος προσφέρει υψηλή αξιοπιστία 80-85% και μέση

ετήσια διαθεσιμότητα 77-85% και πλέον φαίνεται πως είναι ένας βασικός πυλώνας για την παραγωγή ενέργειας από ορυκτά καύσιμα [10].



Εικόνα 1.9 Επίδραση της πίεσης ατμού στον λέβητα ανάκτησης θερμότητας, στον κύκλο ατμού και στον συνδυασμένο κύκλο. (Πηγή: Σταθμοί παραγωγής συνδυασμένου κύκλου, [11])

Ο βαθμός απόδοσης του συνδυασμένου κύκλου της εικόνας 1.10 δίνεται σχέση:

$$n_{CC} = \frac{P_{GT} + P_{ST}}{Q_{GT} + Q_{ST}} \quad (1.22)$$

Όπου,

$P_{GT}$ : Η παραγόμενη ισχύς του αεριοστρόβιλου

$P_{ST}$ : Η παραγόμενη ισχύς του στροβίλου ατμού

$Q_{GT}$ : Η θερμότητα που προστίθεται στο σύστημα του αεριοστρόβιλου

$Q_{ST}$ : Η θερμότητα που προστίθεται στον λέβητα (Πρόσθετη καύση)

Μεμονωμένα οι βαθμοί απόδοσης των κύκλων:

$$n_{GT} = \frac{P_{GT}}{Q_{GT}} \quad (1.23)$$

$$n_{ST} = \frac{P_{ST}}{Q_{GT,exh}} \quad (1.24)$$

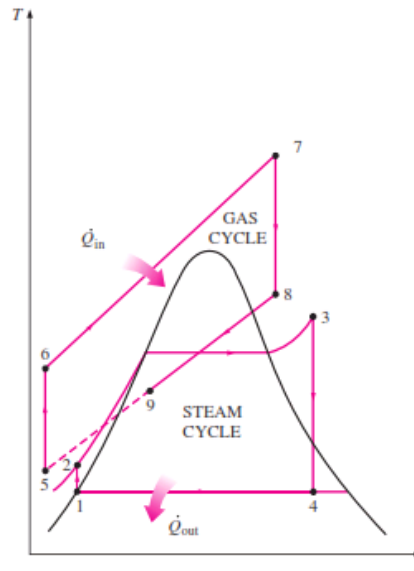
Αν συνδυάσουμε τη σχέση 1.23 και 1.24 προκύπτει ο βαθμός απόδοσης του συνδυασμένου κύκλου:

$$n_{CC} = \frac{n_{GT} Q_{GT} + n_{ST} Q_{GT}(1 - n_{ST})}{Q_{GT}} =$$

$$n_{GT} = n_{ST}(1 - n_{GT}) \quad (1.25)$$

Συνήθως η αναλογία παραγωγής ισχύος των δύο κύκλων είναι:

$$\frac{GT}{ST} = \frac{\text{παραγόμενη ενέργεια αεριοστρόβιλου}}{\text{παραγόμενη ενέργεια ατμοστρόβιλου}} = \frac{2}{1}$$



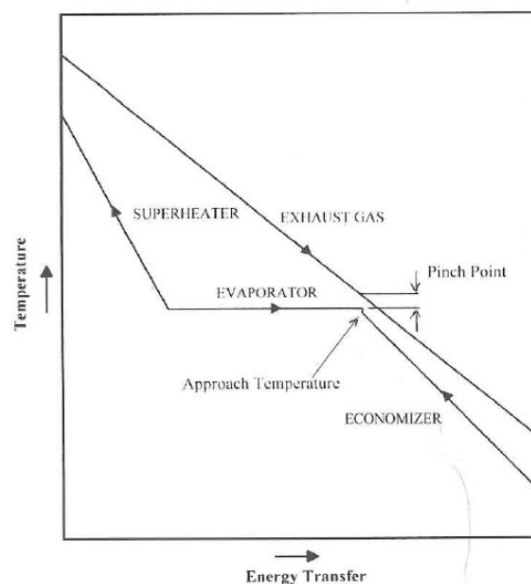
Εικόνα 1.10 Διάγραμμα T-s συνδυασμένου κύκλου. (Πηγή: sounak4u.weebly.com)

### 1.3.1 Βασικές παράμετροι επιλογής αεριοστρόβιλου

Οι αεριοστρόβιλοι που επιλέγονται για λειτουργία σε συνδυασμένο κύκλο συνήθως είναι μονού άξονα και έχουν ένα εύρος ισχύος 40 με 250 MW. Βασικά κριτήρια επιλογής του κατάλληλου αεριοστρόβιλου είναι η θερμοκρασία εισόδου στον στρόβιλο (TET) και ο λόγος πιέσεων. Επιπροσθέτως η συσκευή που θα επιλεγεί θα πρέπει να ικανοποιεί κάποιες προϋποθέσεις όπως, η υψηλή παραγωγή ισχύος, ο υψηλός βαθμός απόδοσης καθώς και η παραγωγή καυσαερίων υψηλού ενεργειακού περιεχομένου στην έξοδο του κύκλου. Στις εφαρμογές που υπάρχουν επιλέγεται κατά βάσει ένας λόγος πιέσεων κοντά στο 15 διότι προσφέρει μια υψηλή θερμοκρασία καυσαερίων από τον στρόβιλο. Εάν επιλεγεί ένας μεγαλύτερος λόγος πιέσεων που θα σημαίνει μικρότερη θερμοκρασία εξόδου, θα πρέπει να προστεθεί στο σύστημα ένας μετακαυστήρας εντός του αεριοστρόβιλου για να αυξηθεί η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων και να υπάρχει θετικό πρόσημο στον κύκλο νερού ατμού [7].

### 1.3.2 Βασικές παράμετροι επιλογής HRSG

Βασική παράμετρος επιλογής λέβητα ανάκτησης θερμότητας είναι η πίεση λειτουργίας για την καλύτερη ανάκτηση θερμότητας από τα καυσαέρια που συνεπάγεται καλύτερη απόδοση. Στην εικόνα 1.11 παρουσιάζεται η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ του νερού-ατμού και του κύκλου καυσαερίου. Η θερμοκρασία του τροφοδοτικού νερού πρέπει να είναι υψηλή για την αποφυγή της συμπίκνωσης και κατά συνέπεια της διάβρωσης των σωληνώσεων. Η επιλογή της θερμοκρασίας υπέρθερμου ατμού γίνεται τόσο από τα χαρακτηριστικά του στροβίλου ατμού όσο και από την θερμοκρασία λειτουργίας του αεριοστρόβιλου και την θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων. Το κρίσιμο σημείο του υπέρθερμαντή (superheater pinch point) το οποίο καθορίζει τη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των καυσαερίων και του υπέρθερμου ατμού πρέπει να είναι της τάξης των 20°C. Το κρίσιμο σημείο του εξατμιστή (evaporator pinch point) το οποίο εμφανίζεται στην διαφορά θερμοκρασίας των καυσαερίων και το κορεσμένου ατμού πρέπει να έχει μία τιμή 10°C. Η θερμοκρασιακή διαφορά του σημείου προσέγγισης είναι η διαφορά της θερμοκρασίας κορεσμού στον εξατμιστή και της θερμοκρασίας του τροφοδοτικού νερού στην έξοδο του προθερμαντήρα (approach point). Γι' αυτό τον λόγο και για λόγους ασφαλείας δίνεται ένα εύρος θερμοκρασιών από 2 έως 10°C. [11]. Στην επόμενη ενότητα θα γίνει μια σύντομη αναφορά για την πρόσθετη καύση εντός του λέβητα ανάκτησης θερμότητας και τα αποτελέσματα που έχει στον συνδυασμένο κύκλο.



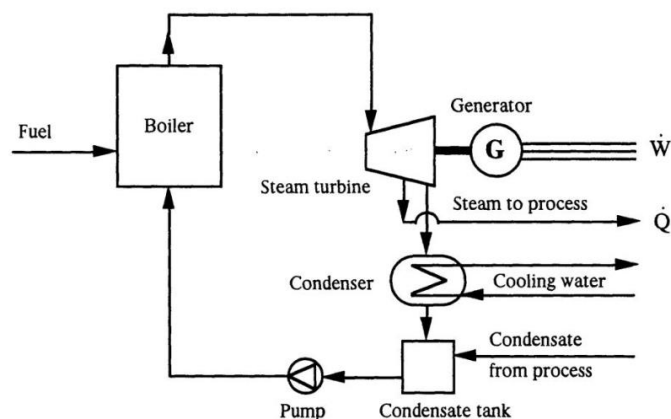
Εικόνα 1.11 Διάγραμμα ενέργειας θερμοκρασίας για την συσκευή του HRSG (Πηγή: Σταθμοί παραγωγής συνδυασμένου κύκλου, [11])

### 1.3.3 Πρόσθετη καύση στον χώρο του HRSG

Κατά την διαδικασία την πρόσθετης καύσης χρησιμοποιείται επιπλέον ποσότητα καυσίμου στον λέβητα ανάκτησης θερμότητας για καύση μαζί με τα καυσαέρια του αεριοστρόβιλου. Με την χρήση αυτής της τεχνικής αυξάνεται το θερμικό περιεχόμενο των καυσαερίων με αποτέλεσμα την αύξηση την ατμοπαραγωγής. Θερμοδυναμικά δεν επιλέγεται η χρήση πρόσθετης καύσης διότι εισάγεται στον κύκλο θερμότητα σε θερμοκρασία χαμηλότερη από τα θερμά καυσαέρια και έχει ως αποτέλεσμα την μείωση του βαθμού απόδοσης της μονάδας. [7]

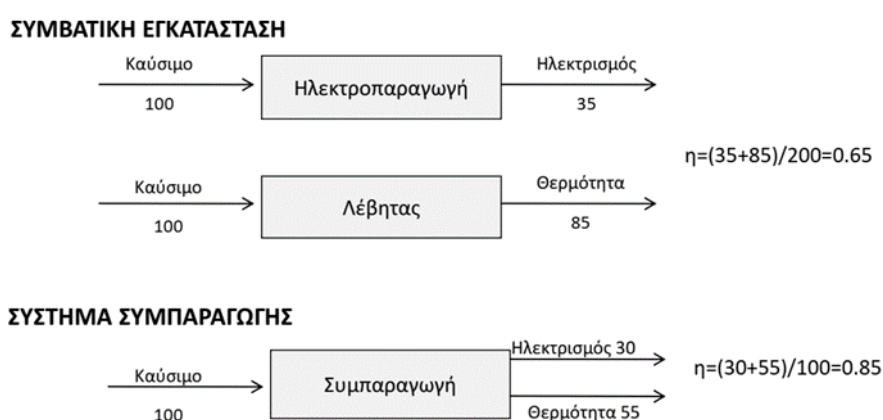
### 1.4 Συμπαγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας

Το σύστημα συμπαγωγής (εικόνα 1.12) αναφέρεται σε ένα σύστημα που συνδυάζει την παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας. Η θερμική ενέργεια απομαστεύεται από το σύστημα και χρησιμοποιείται για διεργασίες θέρμανσης ή ψύξης στο βιομηχανικό περιβάλλον. Επειδή οι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έχουν αρκετές απώλειες έως την παραγωγή μηχανικού έργου, τα συστήματα συμπαγωγής έχουν μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης επειδή μειώνονται οι μηχανικές απώλειες. Τα συμβατικά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από θερμοδυναμική σκοπιά σπαταλούν υψηλά ποσά ενέργειας για την παραγωγή του έργου. Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται αποτελεί περίπου το 1/3 της ενέργειας του καυσίμου που προσδίδουμε στο σύστημα. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα των συστημάτων συμπαγωγής είναι ότι δεν απαιτείται παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού σε ξεχωριστές μονάδες μειώνοντας την κατανάλωση καυσίμου και τις εκπομπές ρύπων προς την ατμόσφαιρα (εικόνα 1.13).



Εικόνα 1.12 Σχηματική απεικόνιση Συστήματος Συμπαγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας. (Πηγή: Ελληνικός Σύνδεσμος Συμπαγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας, [10])

Μια σημαντική παράμετρος που πρέπει να λάβουμε υπόψιν κατά τον σχεδιασμό ενός συστήματος συμπαραγωγής είναι η εξισορρόπηση μεταξύ ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας. Η ζήτηση σε ατμό εξαρτάται από τις απαιτήσεις της μονάδας για φορτία θερμικά ή ψυκτικά και είναι κατά βάση εξισορροπημένα. Η ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια επιλέγεται βάσει των απαιτήσεων της μονάδας και την στρατηγική που ακολουθεί για την κάλυψη των φορτίων της (π.χ αν είναι συμφέρον να αγοράσει την απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο). Την επιλογή των παραμέτρων σχεδιασμού την αντλούμε από την αγορά και το οικονομικό συμφέρον της μονάδας παραγωγής [8].



Εικόνα 1.13 Διαφοροποίηση Συμβατικού σταθμού και σταθμού Συμπαράγωγής. (Πηγή: Cogeneration-CHP, [12])

#### 1.4.1 Τρόποι λειτουργίας μονάδας Συμπαράγωγής

- Κάλυψη του θερμικού φορτίου: Σε αυτή την ρύθμιση της μονάδας, η ωφέλιμη παραγωγή θερμότητας είναι ίση με το θερμικό φορτίο (χωρίς υπέρβαση της δυναμικότητάς του φορτίου). Εάν η παραγόμενη ενέργεια είναι πλεονάζουσα πωλείται στο δίκτυο ενώ αν είναι εντός του φορτίου αγοράζεται από το δίκτυο ηλεκτρισμού.
- Κάλυψη του θερμικού φορτίου βάσης: Με αυτήν την λειτουργία η μονάδα σχεδιάζεται ώστε να παράγει την ελάχιστη δυνατή θερμική ενέργεια ώστε να καλύψει τις ανάγκες της. Κατά τις εποχικές περιόδους όπου η ζήτηση του φορτίου είναι υψηλότερη χρησιμοποιούνται εφεδρικοί λέβητες ενώ καθ' όλη την διάρκεια η μονάδα λειτουργεί σε πλήρες φορτίο.
- Κάλυψη ηλεκτρικού φορτίου: Με αυτή την ρύθμιση η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια είναι ίση με το ηλεκτρικό φορτίο. Εάν η παραγόμενη θερμότητα είναι μικρότερη από την απαιτούμενη χρησιμοποιείται συμπληρωματική καύση.

- Κάλυψη ηλεκτρικού φορτίου βάσης: Με τον συγκεκριμένο σχεδιασμό η μονάδα λειτουργεί ώστε να καλύψει τις ελάχιστες απαιτήσεις της σε ηλεκτρισμό ενώ η υπόλοιπη ποσότητα ηλεκτρισμού αγοράζεται από το δίκτυο.
- Μικτή κάλυψη: Σε αυτήν την περίπτωση το σύστημα είναι πιο ευέλικτο και λειτουργεί με κάλυψη κατά βάση του ηλεκτρικού ή θερμικού φορτίου ανάλογα με το συμφέρον της μονάδας. Βασικές παράμετροι για την επιλογή λειτουργίας είναι η τιμή των καυσίμων και το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας.
- Αυτόνομη λειτουργία: Η μονάδα έχει πλήρη αυτάρκεια για την κάλυψη των θερμικών και ηλεκτρικών της αναγκών χωρίς την ανάγκη για διασύνδεση με το δίκτυο. Αυτός ο σχεδιασμός απαιτεί συστήματα εφεδρείας σε περίπτωση βλάβης ενώ είναι αρκετά δαπανηρός όσον αφορά το αρχικό κεφάλαιο. [12]

#### 1.4.2 Δείκτες αποδοτικότητας μονάδας Συμπαραγωγής

Οι δείκτες αποδοτικότητας μιας μονάδας Συμπαραγωγής βοηθούν να προσδιοριστεί η θερμοδυναμική απόδοση του συστήματος και απλοποιεί την σύγκριση μεταξύ των μονάδων.

- Βαθμός απόδοσης κινητήρα:

$$n_m = \frac{W}{F} \quad (1.26)$$

$$F = \dot{m}_F H_u \quad (1.27)$$

Όπου,

W: Η ισχύς του άξονα στροβίλου

F: Η απαιτούμενη ισχύς καυσίμου

$\dot{m}_F$ : Παροχή καυσίμου

$H_u$ : Θερμογόνος δύναμη καυσίμου

- Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης

Ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης ενός συστήματος Συμπαραγωγής σε συνδυασμένο κύκλο έχει ένα εύρος τιμών 40-50%. Ο βαθμός απόδοσης προκύπτει από την σχέση 1.28.

$$n_e = \frac{W_e}{F} \quad (1.28)$$



- Θερμικός βαθμός απόδοσης

Ένα σύστημα Συμπαγωγής που λειτουργεί σε συνδυασμένο κύκλο μπορεί να έχει ένα βαθμό απόδοσης κινητήρα 55-85% και αντλείται από την σχέση 1.29.

$$n_{th} = \frac{Q_u}{F} \quad (1.29)$$

Όπου,

$Q_u$ : Η ωφέλιμη θερμική ισχύς

#### 1.4.3 Λειτουργικό κριτήριο μονάδας Συμπαγωγής

- Λόγος Ηλεκτρισμού προς Θερμότητα

Ο λόγος ηλεκτρισμού προς θερμότητα είναι ένας από τους κύριους παράγοντες για την επιλογή ενός συστήματος Συμπαγωγής. Η PHR μπορεί να έχει τιμή από 0,6 έως 1,1 και προκύπτει από την σχέση 1.30.

$$PHR = \frac{W_e}{Q_u} \quad (1.30)$$

Όπου,

$W_e$ : Η καθαρή παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς

$Q_u$ : Η ωφέλιμη θερμική ενέργεια

- Λόγος εξοικονόμησης καυσίμων

$$FESR = \frac{H_{fs} - H_{fc}}{H_{fs}} \quad (1.31)$$

όπου,

$H_{fs}$  είναι η συνολική ισχύς των καυσίμων για ξεχωριστή παραγωγή της  $W_e$  και  $Q_u$ , ενώ  $H_{fc}$  είναι η ισχύς των καυσίμων του συστήματος συμπαγωγής που παράγουν τις ίδιες ποσότητες  $W_e$  και  $Q_u$ . Για να χαρακτηριστεί ένα σύστημα συμπαγωγής ως συμφέρουσα επιλογή από άποψη εξοικονόμησης ενέργειας πρέπει ο δείκτης  $FESR > 1$ . [13].

## 2. ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ GateCycle 6.0

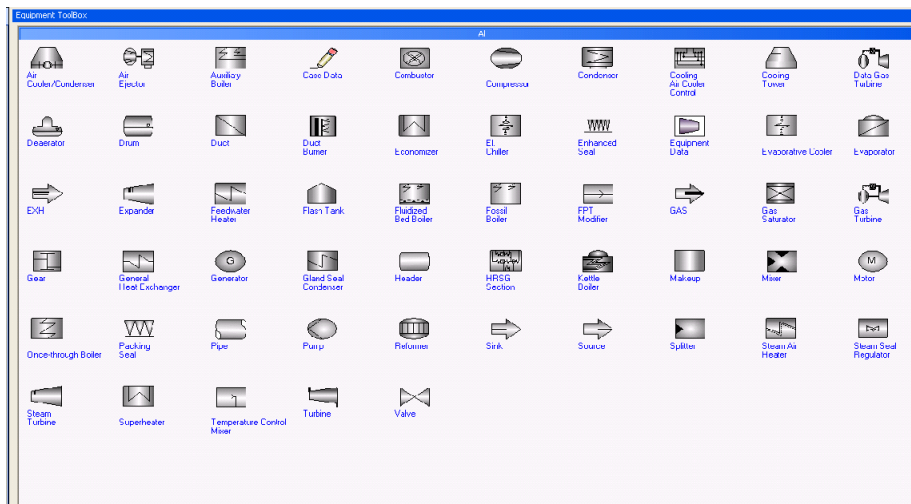
Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο την προσομοίωση μιας ατμοηλεκτρικής μονάδας, την έρευνα για πιθανές βελτιστοποιήσεις καθώς και την βαθύτερη κατανόηση του συνδυασμένου κύκλου σε πρακτικό επίπεδο. Για την προσομοίωση μας επιλέξαμε το λογισμικό GateCycle καθώς μας επιτρέπει να μεταβάλλουμε πολλά στοιχεία της μονάδας ώστε να εξάγουμε τα κατάλληλα συμπεράσματα. Ταυτόχρονα το συγκεκριμένο πρόγραμμα μας παρέχει την δυνατότητα να επιλέξουμε συσκευές από μια ευρεία λίστα για την ακριβέστερη προσομοίωση της υφιστάμενης μονάδας. Σε αυτήν την ενότητα θα γίνει μια γενική περιγραφή του προγράμματος και θα αναφέρουμε κάποια βασικά χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος εργασίας. Έπειτα θα γίνει μια περιγραφή των μαθηματικών σχέσεων που χρησιμοποιήθηκαν από τις συσκευές του προγράμματος και θα αναλύσουμε τις διαθέσιμες παροχές της κάθε συσκευής.

### 2.1 Περιγραφή GateCycle

Το λογισμικό GateCycle™ 6.0 είναι ένα προϊόν της General Electric. Βασικός στόχος του προγράμματος είναι η προσομοίωση μονάδων παραγωγής ενέργειας διαφόρων καυσίμων για τον υπολογισμό του βαθμού απόδοσης, της ισχύος καθώς και άλλων βασικών τιμών λειτουργίας. Το συγκεκριμένο λογισμικό επιτρέπει στον χρήστη να προσομοιώσει μονάδες συνδυασμένου κύκλου, συμπαραγωγής καθώς και μονάδες στερεών καυσίμων με στόχο να κατανοήσει τις μεταβολές του κυκλώματος ανάλογα με τις τιμές που εισάγονται στο σύστημα. Για τον υπολογισμό των τιμών του κυκλώματος λαμβάνονται υπόψιν πολύπλοκες μαθηματικές σχέσεις που εκφράζουν νόμους της θερμοδυναμικής, της μηχανικής των ρευστών καθώς και της μετάδοσης θερμότητας. Για τον σχεδιασμό του επιθυμητού κυκλώματος παρέχεται ένα μεγάλο εύρος συσκευών που ο χρήστης μπορεί να συνδυάσει για την προσομοίωση που επιθυμεί [Error! Reference source not found.].

### 2.2 Περιβάλλον εργασίας GateCycle

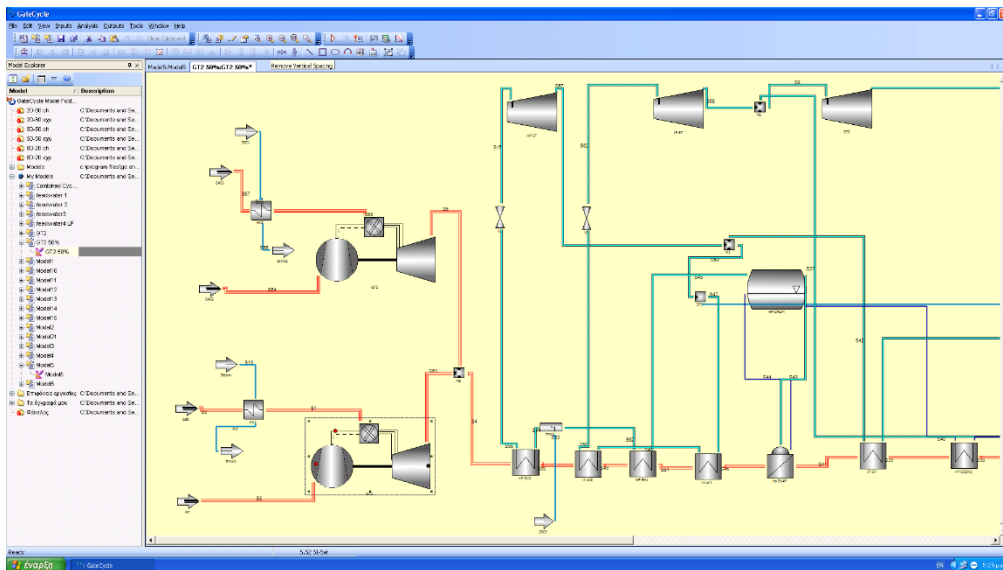
Για την έναρξη της προσομοίωσης ο χρήστης έχει την δυνατότητα επιλογής των συσκευών που επιθυμεί να εισάγει στο σύστημα μέσα από μια βιβλιοθήκη που παρουσιάζεται στην εικόνα 2.1. Οι συσκευές μπορούν να λειτουργήσουν με τιμές που θα εισάγει ο χρήστης (Design) ή με αποθηκευμένα δεδομένα από ήδη υπάρχουσες εφαρμογές (off-Design).



Εικόνα 2.1 Βιβλιοθήκη συσκευών GateCycle. (Πηγή: GateCycle)

Στο περιβάλλον εργασίας οι συσκευές ανάλογα με τις ιδιότητες τους μπορούν να συνδεθούν με ένα ρεύμα νερού-ατμού, ένα ρεύμα καυσαερίου ή ένα ρεύμα αέρα. Οι συσκευές διαθέτουν προκαθορισμένες εισόδους και εξόδους ώστε ο χρήστης να μπορέσει να επιλέξει την κατάλληλη συσκευή και να πραγματοποιήσει την σωστή διασύνδεση του κυκλώματος. Η μονάδα καθώς αποκτά μορφή καθοδηγεί τον χρήστη ανάλογα με τα πιθανά σφάλματα που θα του υποδείξει ώστε να αλλάξει κάποιο εικονίδιο ή κάποια τιμή εισαγωγής που δεν συμβαδίζει με τις μαθηματικές σχέσεις του προγράμματος.

Στην εικόνα 2.2 παρατηρούμε με κόκκινο χρώμα το κύκλωμα του καυσίμου- καυσαερίου που εισάγεται και εξάγεται από την συσκευή του αεριοστρόβιλου και την διαδρομή του μέσω των εναλλακτών θερμότητας του λέβητα ανάκτησης θερμότητας (Heat Recovery Steam Generator). Με ανοιχτό μπλε χρώμα παρουσιάζεται το κύκλωμα του νερού ενώ ο ατμός απεικονίζεται με τριχουάζ χρώμα. Για τον υπολογισμό των τιμών του κυκλώματος ο χρήστης εισάγει κάποια βασικά χαρακτηριστικά που θέλει να έχει ο κύκλος και έπειτα το πρόγραμμα υπολογίζει όλα τα υπόλοιπα δεδομένα βάσει τον μαθηματικών μοντέλων.



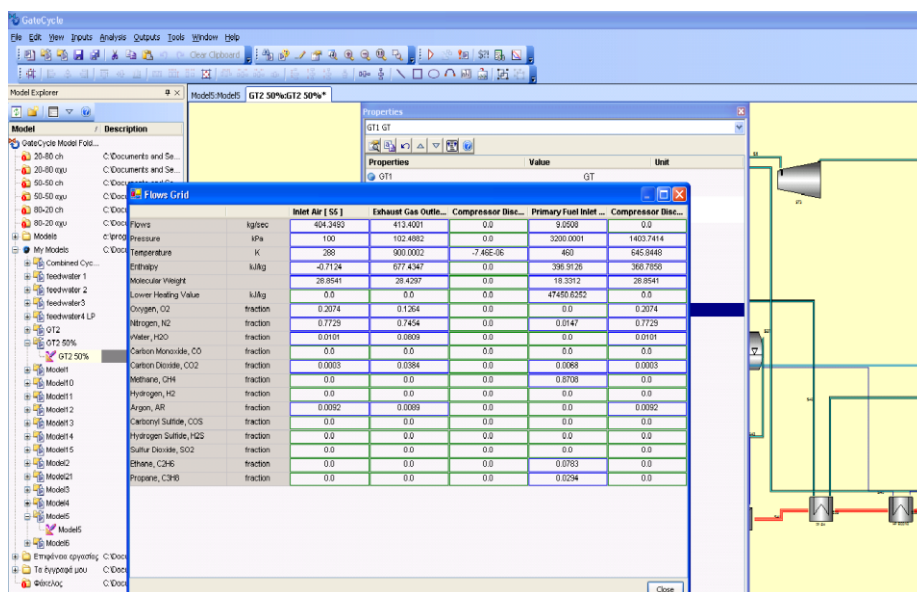
Εικόνα 2.2 Περιβάλλον εργασίας GateCycle. (Πηγή: GateCycle)

Στην εικόνα 2.3 βλέπουμε το πεδίο στο οποίο καλείται ο χρήστης να εισάγει τις επιθυμητές τιμές της συσκευής. Στην συγκεκριμένη εικόνα απεικονίζεται ο πίνακας εισαγωγής τιμών του αεριοστρόβιλου όπου το σύστημα μας ζητά να επιλέξουμε τύπο αεριοστρόβιλου από μια βιβλιοθήκη συσκευών και να εισάγουμε επιθυμητή θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων, γωνία περυγίων, παροχή αέρα καύσης, τύπο καυσίμου και άλλες τιμές για την ακριβέστερη προσομοίωση.

Property	Value	Unit
Exhaust Temperature	900	K
Net Electric Power	167819.9	MW
Engine Shaft Power	188094.1	MW
Auxiliary Power Requirement	17452.78	MW
Efficiency	0.2907	

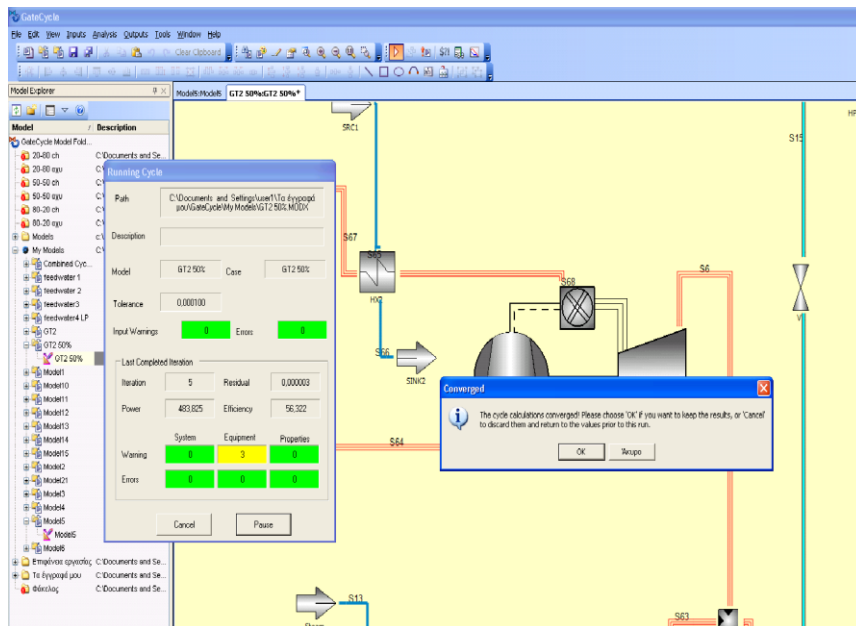
Εικόνα 2.3 Εισαγωγή τιμών στις συσκευές του προγράμματος. (Πηγή: GateCycle)

Στην εικόνα 2.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της συσκευής του αεριοστρόβιλου που προκύπτουν από την χρήση του λογισμικού. Τα αποτελέσματα προκύπτουν σύμφωνα με τους μαθηματικούς τύπους που διέπουν την κάθε συσκευή και παρέχουν μια σαφή εικόνα για το περιβάλλον που επικρατεί στην συγκεκριμένη διάταξη αλλά και τις συνθήκες που επικρατούν στην είσοδο αλλά και την έξοδο. Συνήθεις τιμές που εξάγουμε από τους πίνακες των συσκευών είναι η παροχή των εργαζόμενων μέσων, οι θερμοκρασίες λειτουργίας, πιέσεις λειτουργίας, ενθαλπίες στην είσοδο και έξοδο της διάταξης, μοριακό βάρος καθώς και εξειδικευμένες τιμές που ισχύουν για την συγκεκριμένη συσκευή.



Εικόνα 2.4 Εξαγωγή αποτελεσμάτων συσκευής. (Πηγή: GateCycle)

Στην εικόνα 2.5 παρουσιάζονται τα βασικά αποτελέσματα του συνδυασμένου κύκλου όπως είναι ο βαθμός απόδοσης και η ισχύς της μονάδας καθώς και πιθανά λάθη του κυκλώματος. Οι τιμές που εξάγουμε αναφέρονται στις καθαρές τιμές του κύκλου καθώς έχουν αφαιρεθεί οι ιδιοκαταναλώσεις. Ο πίνακας που φαίνεται στην εικόνα 2.5 είναι ο πρώτος που εμφανίζεται όταν τελειώσει η προσομοίωση και μας δίνει την δυνατότητα να ελέγξουμε αν υπάρχουν ειδοποιήσεις όπου πρέπει να γίνουν διορθώσεις για πιθανώς μη ορθή λειτουργία του κύκλου καθώς και για σφάλμα που δεν θα μας επιτρέψει να εκκινήσουμε την προσομοίωση έως ότου διορθωθεί.



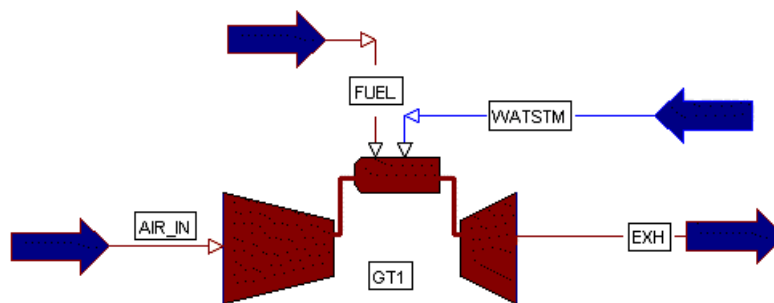
Εικόνα 2.5 Εξαγωγή βασικών τιμών Συνδυασμένου κύκλου. (Πηγή: GateCycle)

### 2.3 Περιγραφή βασικών συσκευών GateCycle

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν οι βασικές συσκευές που χρησιμοποιήσαμε κατά την προσομοίωση στο λογισμικό GateCycle και θα αναλύσουμε τις διαθέσιμες εισόδους και εξόδους της κάθε συσκευής. Επίσης θα παραθέσουμε τις μαθηματικές σχέσεις και αρχές που αντλήσαμε από το πρόγραμμα και διέπουν την κάθε συσκευή.

#### Αεριοστρόβιλος

Στην συσκευή του αεριοστρόβιλου που φαίνεται στην εικόνα 2.6 ως  $AIR_{in}$  παρουσιάζεται η παροχή αέρα στον συμπιεστή, ως  $FUEL$  η παροχή καυσίμου στον καυστήρα, ως  $WATSTM$  είναι ο ψεκασμός νερού για βελτιστοποίηση της καύσης ενώ  $EXT$  είναι η έξοδος των καυσαερίων.



Εικόνα 2.6 Συσκευή αεριοστρόβιλου. (Πηγή: GateCycle)

### Υπολογιστικοί τύποι της συσκευής του αεριοστρόβιλου

Η αύξηση της θερμοκρασίας κατά μήκος του συμπιεστή υπολογίζεται από την σχέση 2.1.

$$T_{cd} = \frac{T_{in}}{n} \left[ \left( \frac{P_{cd}}{P_{in}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \quad (2.1)$$

Όπου,

$P_{cd}$ = Πίεση του αέρα παράκαμψης συμπιεστή

$P_{in}$ = Πίεση του αέρα εισόδου συμπιεστή

$n$ = Βαθμός απόδοσης συμπιεστή

$T_{in}$ = Θερμοκρασία εισόδου συμπιεστή

$\gamma$ = λόγος ειδικών θερμοτήτων

### Μέθοδος υπολογισμού ισεντροπικού βαθμού απόδοσης συμπιεστή

Μετά το σημείο του χώρου καύσης η μισή ποσότητα αέρα που παρακάμπτεται από την έξοδο του συμπιεστή ενώνεται με την έξοδο του καυστήρα στα ακροφύσια του στροβίλου. Η θερμοκρασία αυτού του ρεύματος (σχέση 2.2) αποτελεί την θερμοκρασία του στροβίλου. Η ροή έπειτα εκτονώνεται στα πτερύγια λαμβάνοντας την ενέργεια του καυσαερίου. Οι σχέση που περιγράφει αυτήν την διαδικασία είναι η εξής:

$$T_{out} = T_{in} - nT_{in} \left[ 1 - \left( \frac{P_{out}}{P_{in}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] \quad (2.2)$$

όπου,

$T_{out}$ = Θερμοκρασία εξόδου συμπιεστή

$P_{out}$  = Πίεση εξόδου συμπιεστή

### Συντελεστής διόρθωσης ροής συμπιεστή

Η διόρθωση της ροής του συμπιεστή δίνεται από την σχέση 2.3.

$$\dot{m} = \dot{m}_d \left( \frac{P}{P_d} \right) \left( \frac{T_d}{T} \right) [1 - angle \cdot VFC] \left[ 1 + TFC \left( \frac{T - T_d}{T_d} \right) \right] \quad (2.3)$$

Όπου,

T= Απόλυτη θερμοκρασία συμπιεστή

P= Απόλυτη πίεση συμπιεστή

$\dot{m}$ = Ρυθμός ροής μάζας συμπιεστή

TFC= Συντελεστής διόρθωσης ροής θερμότητας

VFC= Συντελεστής διόρθωσης ροής στην βαλβίδα

$T_d$ = Θερμοκρασία συμπιεστή στο σημείο σχεδιασμού

$P_d$ = Πίεση συμπιεστή στο σημείο σχεδιασμού

angle= Γωνία βαλβίδας

Η διορθωμένη ταχύτητα του αέρα στον συμπιεστή δίνεται από την σχέση 2.4.

$$CS = \text{Διορθωμένη ταχύτητα} = 100 \sqrt{\frac{T_d}{T}} \quad (2.4)$$

### Βαθμός απόδοσης συμπιεστή

Ο βαθμός απόδοσης συμπιεστή για λειτουργία εκτός σχεδίου δίνεται από τον τύπο 2.5.

$$n = n_{max} [1 - angle \cdot VEC] \left[ 1 - SEC \frac{|CS_{act} - CS_{max}^n|}{|CS_{max}^n|} \right] \quad (2.5)$$

όπου,

T=Απόλυτη θερμοκρασία

$n_{max}$ = Μέγιστος βαθμός απόδοσης

VEC= Συντελεστής διόρθωσης βαθμού απόδοσης βαλβίδας

SEC= Συντελεστής διόρθωσης βαθμού απόδοσης ταχύτητας

$CS_{act}$  = Πραγματική διορθωμένη ταχύτητα

$CS_{max}$  = Μέγιστη διορθωμένη ταχύτητα



### Παραγωγή έργου αεριοστρόβιλου

Το έργο του άξονα της γεννήτριας δίνεται από την σχέση 2.6.

$$\dot{W}_{shaft} = \dot{W}_T - \dot{W}_C \quad (2.6)$$

όπου,

$\dot{W}_{shaft}$  = Έργο άξονα γεννήτριας

$\dot{W}_T$  = Έργο στρόβιλου

$\dot{W}_C$  = Έργο συμπιεστή

Το καθαρό έργο του αεριοστρόβιλου δίνεται από την σχέση 2.7.

$$\dot{W}_{net} = n_{gen} \dot{W}_{shaft} - \dot{W}_{aux} \quad (2.7)$$

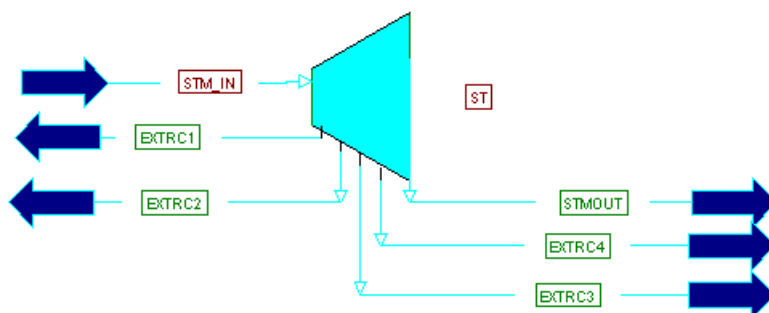
όπου,

$n_{gen}$  = Βαθμός απόδοσης γεννήτριας

$\dot{W}_{aux}$  = Απαιτούμενο έργο ιδιοκαταναλώσεων

### Ατμοστρόβιλος

Στην διάταξη του στρόβιλου ατμού της εικόνας 2.7 ως STM,in παρουσιάζεται η είσοδος του υπέρθερμου ατμού προς εκτόνωση ενώ οι EXTRC είναι οι διαθέσιμες απομαστεύσεις ατμού για διεργασίες εντός του κύκλου. Η έξοδος του στρόβιλου γίνεται μέσω της γραμμής STM,out και οδηγείται προς αναθέρμανση, περαιτέρω εκτόνωση ή συμπύκνωση. Στην συγκεκριμένη συσκευή μπορούμε να εισάγουμε ισεντροπικό βαθμό απόδοσης (σχέση 2.9), επιθυμητή ενθαλπία, πίεση εξόδου, πτώσεις πίεσης καθώς και ταχύτητα περιστροφής άξονα



Εικόνα 2.7 Συσκευή στρόβιλου ατμού. (Πηγή:GateCycle)

Το έργο του στρόβιλου ατμού δίνεται από την σχέση 2.8.

$$W = \dot{m}_{STM,in} (h_{STM,in} - h_{EXTRC1}) + (\dot{m}_{STM,in} - \dot{m}_{EXTRC1})(h_{extrc1} - h_{extrc2}) + \dots + (\dot{m}_{STM,in} - \dot{m}_{EXTRC1} - \dots - \dot{m}_{EXTRN})(h_{EXTRCN} - h_{STM,out}) \quad (2.8)$$

Στην σχέση 2.8 ως  $\dot{m}$  παριστάνεται η παροχή του υφιστάμενου ρεύματος και ως  $h$  η ενθαλπία του αντίστοιχου ρεύματος.

Ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του στροβίλου ατμού δίνεται από την εξής σχέση:

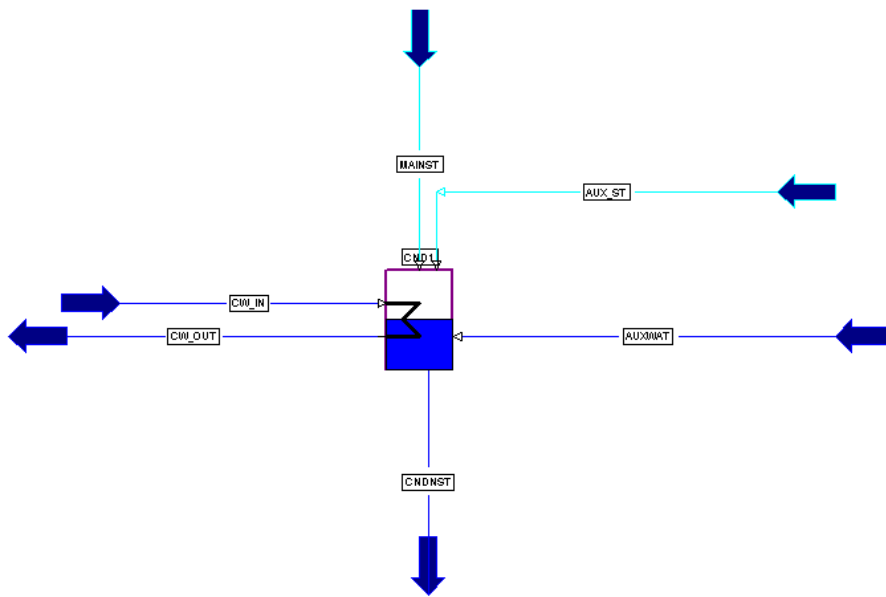
$$n_{is} = \frac{h_2 - h_1}{h_{2s} - h_{1s}} \quad (2.9)$$

Στη σχέση 2.9 ο αριθμητής  $h_2 - h_1$  είναι η διαφορά ενθαλπίας εξόδου και εισόδου του στροβίλου και αναφέρεται στο πραγματικό έργο του στροβίλου, ενώ ο παρονομαστής  $h_{2s} - h_{1s}$  είναι η διαφορά ενθαλπίας εξόδου και εισόδου του στροβίλου αλλά αναφέρεται στο ισεντροπικό έργο του στροβίλου ατμού.

### Συμπυκνωτής

Στην εικόνα 2.8 ως είσοδος στην συσκευή του συμπυκνωτή απεικονίζεται το ρεύμα MAINST που προέρχεται από τον στρόβιλο ατμού και έχει αρχίσει να υγροποιείται ενώ AUX,ST είναι μια προαιρετική είσοδος ατμού στην συσκευή προς συμπύκνωση. Ως CW,in παρουσιάζεται το ρεύμα του νερού ψύξης που αντλείται από κάποιο παρακείμενη πηγή, CW,out το ρεύμα που οδηγείται προς τους πύργους ψύξης και CNDNST η έξοδος του συμπυκνωτή που θα εισαχθεί πάλι στον χώρο του λέβητα ανάκτησης θερμότητας.

Στην συσκευή του συμπυκνωτή μπορούμε να ορίσουμε την πίεση λειτουργίας που επικοινωνεί με την πίεση εξόδου του στροβίλου ατμού χαμηλής πίεσης, τον συντελεστή μετάδοσης θερμότητας, την θερμοκρασιακή διαφορά του συμπυκνώματος και του νερού ψύξης, την επιθυμητή θερμοκρασία αύξησης του νερού ψύξης στην έξοδο της συσκευής και την επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας.



Εικόνα 2.8 Συσκευή συμπυκνωτή. (Πηγή: GateCycle)

Η αρχή διατήρησης της ενέργειας για την συσκευή του συμπυκνωτή δίνεται από την σχέση 2.10.

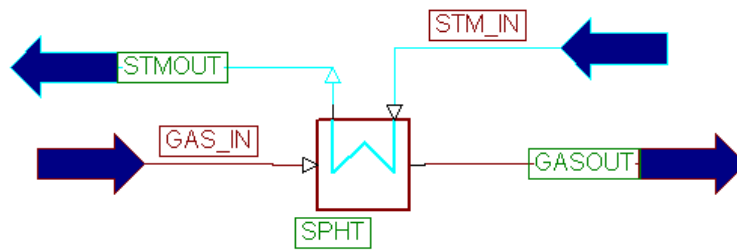
$$[\dot{m}_{MAINSTM}(h_{in} - h_{CNDNST}) + \dot{m}_{AUXST}(h_{AUXST} - h_{CNDNST})] = \dot{m}_{COOLANT}(h_{CW,out} - h_{CW,in}) \quad (2.10)$$

Στην σχέση 2.10, ως  $\dot{m}$  παριστάνεται η παροχή του υφιστάμενου ρεύματος και ως  $h$  η ενθαλπία του αντίστοιχου ρεύματος.

### Υπερθερμαντής

Ο υπερθερμαντής (εικόνα 2.9) είναι ο εναλλάκτης θερμότητας πριν την είσοδο στον στρόβιλο ατμού και έχει ως στόχο να ρυθμίσει τα απαραίτητα χαρακτηριστικά του ατμού που θα οδηγηθεί προς εκτόνωση. Ως GAS,in απεικονίζεται το ρεύμα καυσαερίου που εισάγεται στον εναλλάκτη και ως STM,in το ρεύμα ατμού προς υπερθέρμανση.

Στον συγκεκριμένο εναλλάκτη θερμότητας μπορούμε να ορίσουμε τεχνικά χαρακτηριστικά της συσκευής, τον συντελεστή μετάδοσης θερμότητας, την επιφάνεια συναλλαγής, τον βαθμό υπερθέρμανσης, την θερμοκρασία και ενθαλπία εξόδου του ατμού, την θερμοκρασιακή διαφορά των δύο ρευμάτων καθώς και την αποτελεσματικότητα του εναλλάκτη. Για την λειτουργία του προγράμματος επιλέγουμε να ορίσουμε μόνο την αποτελεσματικότητα του εναλλάκτη.



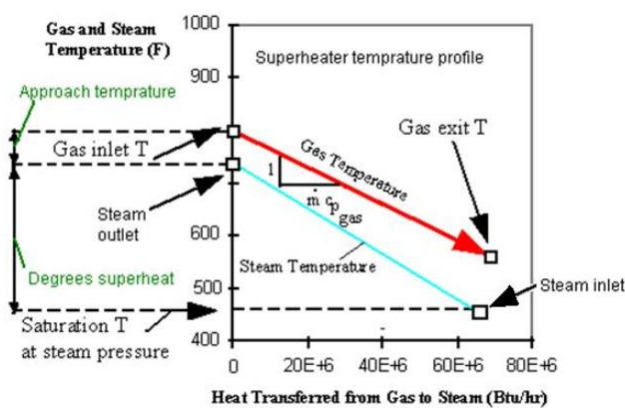
Εικόνα 2.9 Διάταξη υπερθερμαντή. (Πηγή: GateCycle)

Η αρχή διατήρησης της ενέργειας για την συσκευή του υπερθερμαντή δίνεται από την σχέση 2.11.

$$\dot{m}_{Gas} C p_{Gas} (T_{Gas,in} - T_{Gas,out}) n = \dot{m}_{Steam} (h_{Steam,out} - h_{Steam,in}) \quad (2.11)$$

Στην σχέση 2.11, ως  $\dot{m}$  παριστάνεται η παροχή του υφιστάμενου ρεύματος, ως  $h$  η ενθαλπία του αντίστοιχου ρεύματος και  $n$  είναι ο βαθμός απόδοσης του εναλλάκτη θερμότητας (εικόνα 2.9).

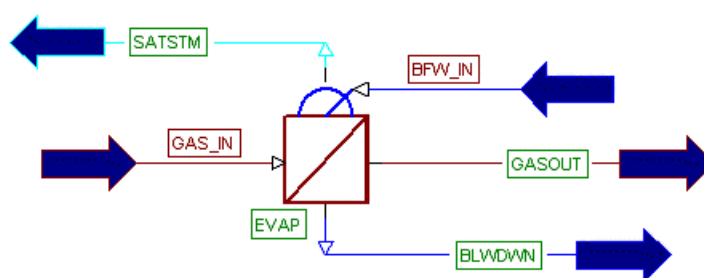
Στην εικόνα 2.10 παρατηρούμε την μετάδοση θερμότητας από τα καυσαέρια προς τον κύκλο ατμού στον υπερθερμαντή. Με κόκκινο χρώμα παρατηρούμε την κύκλο καυσαερίου και με γαλάζιο χρώμα τον κύκλο νερού ατμού. Τα βέλη μας φανερώνουν την πορεία του εργαζόμενου μέσου (πρόσδοση ή παραλαβή θερμότητας).



Εικόνα 2.10 Διάγραμμα θερμοκρασίας- μετάδοσης θερμότητας στην συσκευή του υπερθερμαντή. (Πηγή: GateCycle)

### Εξατμιστής

Η συσκευή του εξατμιστή (εικόνα 2.11) έχει ως είσοδο την BFW,in το οποίο είναι μείγμα νερού-ατμού και η βασική έξοδος του είναι η SATSTM η οποία οδηγείται στο τύμπανο ατμού για να διαχωριστεί ο ατμός από το νερό το οποίο θα επαναλάβει τον κύκλο. Η δεύτερη είσοδος στον εξατμιστή είναι η GAS,in η οποία αναφέρεται στην είσοδο των θερμών καυσαερίων στην συσκευή. Τέλος η έξοδος BLWDWN αναφέρεται στην εκτόνωση του εξατμιστή για την αφαίρεση των αλάτων και την ανανέωση του κυκλώματος νερού.



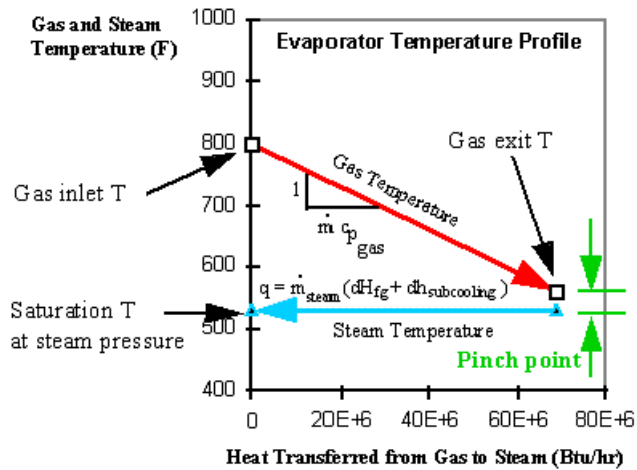
Εικόνα 2.11 Διάταξη εξατμιστή. (Πηγή: GateCycle)

Η αρχή διατήρησης της ενέργειας για την συσκευή του εξατμιστή δίνεται από την σχέση 2.12.

$$\begin{aligned} \dot{m}_{Gas} c_{p_{Gas}} (T_{Gas,in} - T_{Gas,out}) n &= \dot{m}_{water} (h_{SATstm,out} - h_{water,in}) \\ \dot{m}_{Gas} c_{p_{Gas}} (T_{Gas,in} - T_{Gas,out}) n &= \dot{m}_{water} [(h_s + h_{SAT,water}) - h_{water,in}] \end{aligned} \quad (2.12)$$

Στην εξίσωση 2.12, ως  $\dot{m}$  παριστάνεται η παροχή του υφιστάμενου ρεύματος, ως  $h$  η ενθαλπία του αντίστοιχου ρεύματος και ως  $n$  ο βαθμός απόδοσης του εξατμιστή.

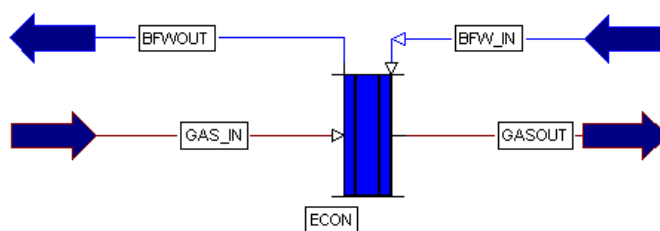
Στην εικόνα 2.12 φαίνεται η θερμοκρασία και η μεταβολή θερμότητας στη συσκευή του εξατμιστή. Παρατηρούμε ότι καθώς η θερμοκρασία των καυσαερίων μειώνεται, το τροφοδοτικό νερό απορροφά την θερμότητα και αλλάζει φάση εντός του εναλλάκτη.



Εικόνα 2.22 Διάγραμμα θερμοκρασίας- ενέργειας εξατμιστή. (Πηγή: GateCycle)

### Οικονομητήρας

Ο οικονομητήρας (εικόνα 2.13) είναι μια διάταξη εντός του λέβητα ανάκτησης θερμότητας και είναι σχεδιασμένος για την προθέρμανση του νερού τροφοδοσίας. Το ρεύμα GAS,in αναφέρεται στα θερμά καυσαέρια και το BFW στο ρεύμα νερού. Στην συγκεκριμένη συσκευή μπορούμε να εισάγουμε τιμές για τον συντελεστή μετάδοσης θερμότητας, την θερμοκρασία εξόδου του νερού, την θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των δυο ρευμάτων, την επιφάνεια συναλλαγής, την θερμοκρασία εξόδου του καυσαερίου και την αποτελεσματικότητα του εναλλάκτη. Επίσης έχουμε την δυνατότητα να επιλέξουμε κάποια τεχνικά χαρακτηριστικά για την διάταξη της συσκευής.



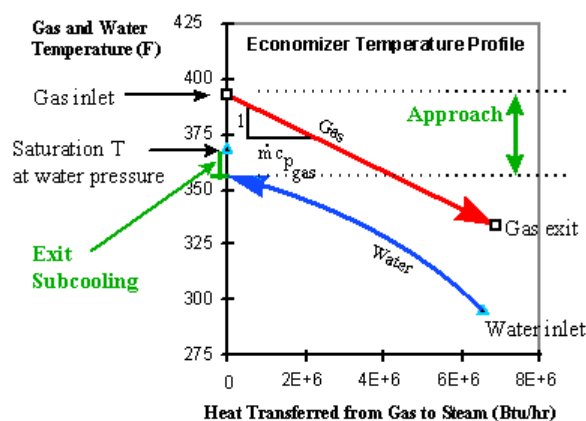
Εικόνα 2.13 Διάταξη οικονομητήρα. (Πηγή: GateCycle)

Η αρχή διατήρησης της ενέργειας για την συσκευή του οικονομητήρα δίνεται από την σχέση 2.13.

$$\dot{m}_{Gas} C_{p_{Gas}} (T_{Gas,in} - T_{Gas,out}) = \dot{m}_{BFW} (h_{BFW,out} - h_{BFW,in}) \quad (2.13)$$

Στην σχέση 2.13, ως  $\dot{m}$  παριστάνεται η παροχή του υφιστάμενου ρεύματος και ως  $h$  η ενθαλπία του αντίστοιχου ρεύματος.

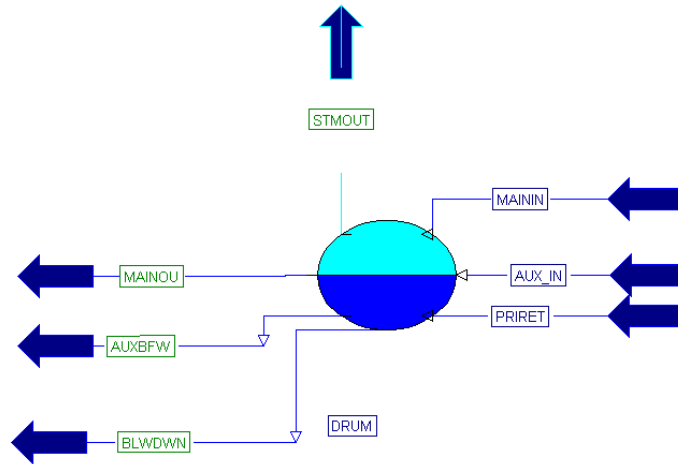
Στην εικόνα 2.14 παρουσιάζεται το διάγραμμα θερμοκρασίας ενέργειας. Με κόκκινο χρώμα το ρεύμα καυσαερίου που παραδίδει την ενέργεια του και με μπλε χρώμα το ρεύμα νερού που θερμαίνεται και αυξάνεται η θερμοκρασία του.



Εικόνα 2.14 Διάγραμμα θερμοκρασίας- μετάδοσης ενέργειας (Πηγή: GateCycle)

### Τύμπανο ατμού

Το τύμπανο ατμού (εικόνα 2.15) είναι ένας διαχωριστής των ρευμάτων νερού-ατμού και ρυθμίζει την κυκλοφορία του ρεύματος ατμού. Ως MAIN,in ορίζεται η είσοδος του νερού στην συσκευή, AUX,in κάποιο βοηθητικό ρεύμα (προαιρετική λειτουργία) και PRIRET η επιστροφή του ρεύματος νερού που κυκλοφορεί εντός των αυλών του εξατμιστή. Ως STM,out απεικονίζεται η παροχή ατμού προς τον υπερθερμαντή, MAIN,out η έξοδος του νερού προς τον εξατμιστή ώστε να κάνει το κύκλο ατμοποίησης. Οι έξοδοι AUX,BFW και BLWDWN είναι προαιρετικές έξοδοι και αναφέρονται σε εναλλακτική έξοδο για θερμό νερό και αν χρειάζεται εκτόνωση το σύστημα του διαχωριστή για την αφαίρεση αλάτων που συγκεντρώνονται στον πυθμένα. Στην συγκεκριμένη διάταξη μπορούμε να εισάγουμε τιμή για την πίεση λειτουργίας καθώς και επιθυμητή πτώση πίεσης.



Εικόνα 2.15 Τύμπανο ατμού. (Πηγή: GateCycle)

Η αρχή διατήρησης της ενέργειας για το τύμπανο ατμού δίνεται από την σχέση 2.14.

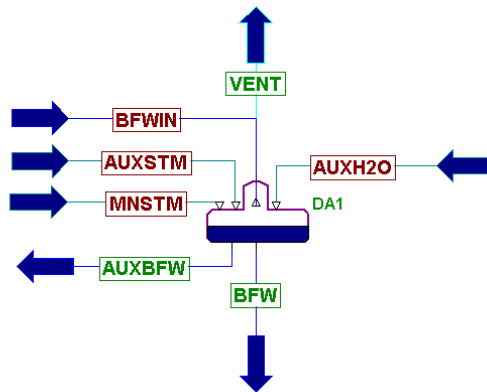
$$\begin{aligned} \dot{m}_{BLWDWN} + \dot{m}_{AUX,BFW} + \dot{m}_{MAIN,out} + \dot{m}_{STM,out} &= \dot{m}_{MAIN,in} + \dot{m}_{AUX,in} + \dot{m}_{PRIRET} \\ \dot{m}_{BLWDWN}h_{BLWDWN} + \dot{m}_{AUX,BFW}h_{AUX,BFW} + \dot{m}_{MAIN,out}h_{MAIN,out} + \dot{m}_{STM,out}h_{STM,out} &= \\ \dot{m}_{MAIN,in}h_{MAIN,in} + \dot{m}_{AUX,in}h_{AUX,in} + \dot{m}_{PRIRET}h_{PRIRET} &\quad (2.14) \end{aligned}$$

Στην σχέση 2.14, ως  $\dot{m}$  παριστάνεται η παροχή του υφιστάμενου ρεύματος και ως  $h$  η ενθαλπία του αντίστοιχου ρεύματος.

### Απαεριωτής

Η κύρια είσοδος του τροφοδοτικού νερού στη συσκευή του απαεριωτή (εικόνα 2.16) είναι η BFW,in ενώ η MNSTM είναι η είσοδος του απαραίτητου ατμού για την προθέρμανση του τροφοδοτικού νερού. Η κύρια έξοδος του νερού προς τις τροφοδοτικές αντλίες γίνεται από την έξοδο BFW ενώ η AUXBFW είναι εναλλακτική έξοδος νερού για χρήση σε διεργασίες. Η έξοδος VENT υπάρχει για την εκτόνωση της συσκευής από την ύπαρξη ατμού και την αποφυγή ύπαρξης διφασικού μείγματος εντός της συσκευής. Στην διάταξη του απαεριωτή μπορούμε να εισάγουμε τιμή για την πίεση λειτουργίας, τον απαιτούμενο ατμό που θα εισέλθει στην συσκευή καθώς και την παροχή του ατμού που θα εξαχθεί προς εκτόνωση.





Εικόνα 2.16 Συσσκευή απαεριοποιητή. (Πηγή: GateCycle)

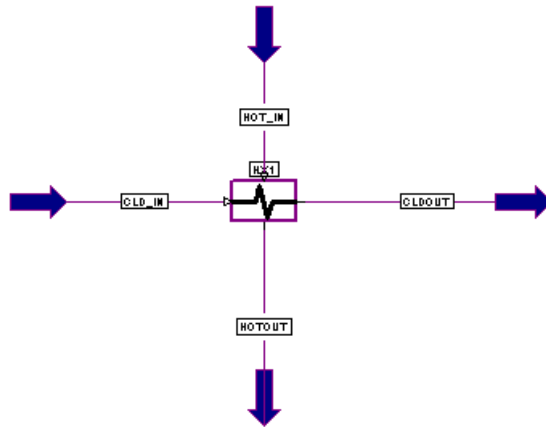
Η αρχή διατήρησης της ενέργειας για την συσκευή του απαεριοποιητή δίνεται από την σχέση 2.15.

$$\dot{m}_{BFWIN}h_{BFWIN} + \dot{m}_{AUXSTM}h_{AUXSTM} + \dot{m}_{MNSTM}h_{MNSTM} = \dot{m}_{BFW}h_{BFW} \quad (2.15)$$

Στην σχέση 2.15, ως  $\dot{m}$  παριστάνεται η παροχή του υφιστάμενου ρεύματος και ως  $h$  η ενθαλπία του αντίστοιχου ρεύματος.

### Εναλλάκτης θερμότητας

Στην παρακάτω διάταξη (εικόνα 2.17) το ρεύμα με τον χαρακτηρισμό COLD,in είναι το ψυχρό ρεύμα νερού ή καυσαερίου που εισάγεται στον εναλλάκτη ώστε να θερμανθεί. Η εισαγωγή HOT,in αναφέρεται στο θερμό ρεύμα νερού ή καυσαερίου που εισέρχεται στην συσκευή ώστε να παραδώσει την θερμική του ενέργεια. Στην συγκεκριμένη διάταξη μπορούμε να ορίσουμε τον συντελεστή μετάδοσης θερμότητας, την επιθυμητή θερμοκρασία εξόδου ενός εκ των δύο ρευμάτων, την αποτελεσματικότητα του εναλλάκτη, την θερμοκρασία υπερθέρμανσης ή την θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των δύο ρευμάτων. Ως αποτελεσματικότητα ορίζεται ο βαθμός απόδοσης της συσκευής που μας δείχνει το ποσό ενέργειας που μπορεί να παραλάβει το ψυχρό ρεύμα σε σχέση με το ενεργειακό περιεχόμενο του θερμού ρεύματος.



Εικόνα 2.17 Διάταξη εναλλάκτη θερμότητας. (Πηγή: GateCycle)

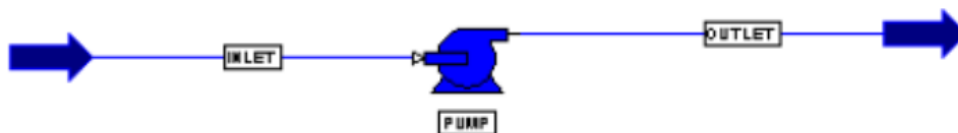
Η αρχή διατήρησης για την διάταξη του εναλλάκτη θερμότητας δίνεται από την σχέση 2.16.

$$\dot{m}_{COLD}(h_{COLD,out} - h_{COLD,in})n = \dot{m}_{HOT}(h_{HOT,in} - h_{HOT,out}) \quad (2.16)$$

Στην σχέση 2.16, ως  $\dot{m}$  παριστάνεται η παροχή του υφιστάμενου ρεύματος και ως  $h$  η ενθαλπία του αντίστοιχου ρεύματος, ενώ  $n$  είναι ο βαθμός απόδοσης του εναλλάκτη θερμότητας (εικόνα 2.18).

### Τροφοδοτική αντλία

Στην συσκευή της αντλίας που παρουσιάζεται στην εικόνα 2.18 μπορούμε να εισάγουμε τιμή για την επιθυμητή πίεση εξόδου καθώς και για τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης. Επίσης μπορούμε να τοποθετήσουμε τιμές για το μανομετρικό ύψος καθώς για την ταχύτητα περιστροφής του άξονα.



Εικόνα 2.18 Τροφοδοτική αντλία. (Πηγή: GateCycle)

Η μεταβολή της ενθαλπίας εντός της αντλίας δίνεται από την σχέση 2.17:

$$\Delta H_{is} = v \Delta p \quad (2.17)$$

Όπου,  $v$  είναι ο ειδικός όγκος του νερού στην είσοδο της αντλίας και  $\Delta p$  είναι η διαφορά πίεσης μεταξύ της εξόδου και εισόδου. Ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης της αντλίας δίνεται από την σχέση 2.18:

$$n_{is} = \frac{h_{2s} - h_{1s}}{h_2 - h_1} \quad (2.18)$$

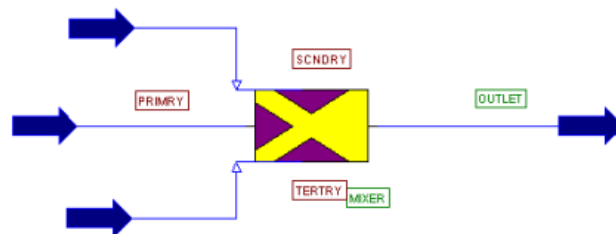
Στον αριθμητή τοποθετείται το ισεντροπικό έργο της αντλίας το οποίο έχει την μορφή της διαφοράς ενθαλπιών  $h_{2s} - h_{1s}$  για τα σημεία εισόδου και εξόδου (εικόνα 2.18) και στον παρονομαστή το πραγματικό έργο της αντλίας το οποίο ορίζεται ως η ενθαλπική διαφορά  $h_2 - h_1$ , ενώ λόγω της αναντιστρεπτότητας στην συσκευή της αντλίας το πραγματικό έργο είναι μεγαλύτερο του ισεντροπικού. Η ισχύς που απαιτείται από την αντλία δίνεται από την σχέση 2.19:

$$P = \frac{\dot{m} \cdot v \cdot \Delta p}{n \cdot n_{is}} \quad (2.19)$$

Όπου,  $\dot{m}$  είναι η παροχή μάζας του νερού,  $v$  ο ειδικός όγκος του νερού στην είσοδο της αντλίας,  $\Delta p$  η διαφορά πίεσης στα άκρα,  $n$  ο βαθμός απόδοσης της αντλίας και  $n_{is}$  ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης.

### Μίκτης

Στην συσκευή του μίκτη που παρουσιάζεται στην εικόνα 2.19 πραγματοποιείται η μίξη έως τριών ρευμάτων ρευστού σε ένα λαμβάνοντας υπόψιν όλες τις θερμοδυναμικές και χημικές μεταβολές.



Εικόνα 2.19 Συσκευή μίκτη. (Πηγή: GateCycle)

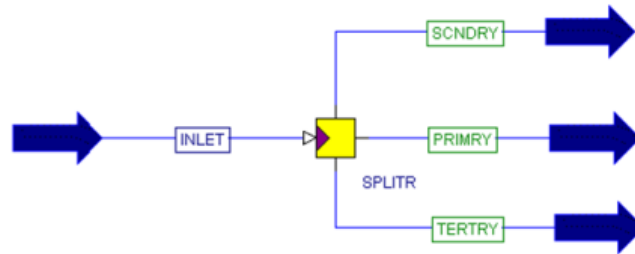
Η αρχή διατήρησης της ενέργειας για την συσκευή του μίκτη δίνεται από την σχέση 2.20.

$$\dot{m}_{PRIMARY}h_{PRIMARY} + \dot{m}_{SCNDRY}h_{SCNDRY} + \dot{m}_{TERTRY}h_{TERTRY} = (\dot{m}_{PRIMARY} + \dot{m}_{SCNDRY} + \dot{m}_{TERTRY})h_{OYTLET} \quad (2.20)$$

Στην σχέση 2.20, ως  $\dot{m}$  παριστάνεται η παροχή του υφιστάμενου ρεύματος και ως  $h$  η ενθαλπία του αντίστοιχου ρεύματος.

### Διαχωριστής

Στην συσκευή του διαχωριστή που φαίνεται στην εικόνα 2.20 μπορούμε να διαχωρίσουμε ένα ρεύμα ρευστού σε έως τρία διαφορετικά ρυθμίζοντας την παροχή μάζας.



Εικόνα 2.20 Συσκευή διαχωριστή. (Πηγή: GateCycle)

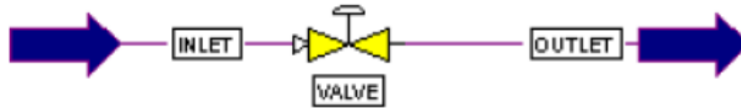
Η αρχή διατήρησης της ενέργειας για την συσκευή του διαχωριστή δίνεται από την σχέση 2.21.

$$\dot{m}_{INLET}h_{INLET} = \dot{m}_{PRIMARY}h_{PRIMARY} + \dot{m}_{SCNDRY}h_{SCNDRY} + \dot{m}_{TERTRY}h_{TERTRY} \quad (2.21)$$

Στην σχέση 2.21, ως  $\dot{m}$  παριστάνεται η παροχή του υφιστάμενου ρεύματος και ως  $h$  η ενθαλπία του αντίστοιχου ρεύματος.

### Ρυθμιστική βαλβίδα

Για τον έλεγχο της πίεσης εισόδου στις βαθμίδες του στροβίλου ατμού καθώς και για άλλες συσκευές χρησιμοποιείται ρυθμιστική βαλβίδα (εικόνα 2.21) ώστε να μειωθεί η πίεση στην επιθυμητή τιμή. Στην συγκεκριμένη συσκευή μπορούμε να ρυθμίσουμε επιθυμητή θερμοκρασία και πίεση εξόδου, την γεωμετρία της βαλβίδας καθώς και την πτώση πίεσης.



Εικόνα 2.21 Ρυθμιστική βαλβίδα. (Πηγή: GateCycle)

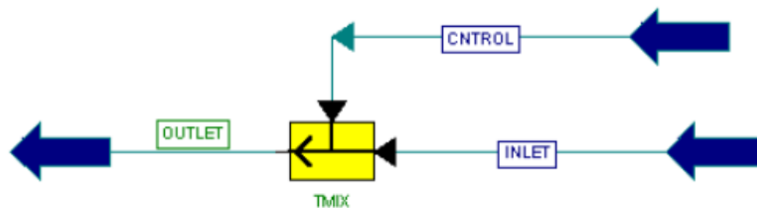
Η αρχή διατήρησης της ενέργειας για την ρυθμιστική βαλβίδα δίνεται από την σχέση 2.22.

$$\dot{m}_{INLET}h_{INLET} = \dot{m}_{OUTLET}h_{OUTLET} \quad (2.22)$$

Στην σχέση 2.22, ως  $\dot{m}$  παριστάνεται η παροχή του υφιστάμενου ρεύματος και ως  $h$  η ενθαλπία του αντίστοιχου ρεύματος.

### Ψεκασμοί

Για τον έλεγχο της θερμοκρασίας πριν από τις συσκευές του στροβίλου ατμού τοποθετείται μια συσκευή (εικόνα 2.22) ψεκασμού νερού για τη μείωση της θερμοκρασίας και την προστασία των πτερυγίων του στροβίλου καθώς και των σωληνώσεων.



Εικόνα 2.22 Ψεκασμός (Πηγή: GateCycle)

Η αρχή διατήρησης της ενέργειας για την συσκευή του ψεκασμού δίνεται από την σχέση 2.23.

$$\dot{m}_{INLET}h_{INLET} + \dot{m}_{CONTROL}h_{CONTROL} = (\dot{m}_{INLET} + \dot{m}_{CONTROL})h_{OUTLET} \quad (2.23)$$

Στην σχέση 2.23, ως  $\dot{m}$  παριστάνεται η παροχή του υφιστάμενου ρεύματος και ως  $h$  η ενθαλπία του αντίστοιχου ρεύματος.

### 3.ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΑΔΑΣ ΚΑΙ ΣΥΝΤΑΞΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ

Στο Κεφάλαιο 3 θα γίνει μια γενική περιγραφή του βασικού εξοπλισμού (αεριοστρόβιλος, ατμοστρόβιλος, συμπυκνωτής) του εργοστασίου σύμφωνα με δεδομένα που λάβαμε από το εργοστάσιο και από διάφορες πηγές. Επίσης θα παραθέσουμε έναν συγκεντρωτικό πίνακα (πίνακας 3.1) με τα κύρια χαρακτηριστικά των σεναρίων που θα μας βοηθήσουν να κατανοήσουμε τα χαρακτηριστικά στοιχεία που μεταβάλλονται ή παραμένουν σταθερά ανά σενάριο. Τέλος θα γίνει αναλυτικότερη περιγραφή των σεναρίων που μελετήσαμε και θα παραθέσουμε εικόνες από την προσομοίωση κάθε σεναρίου.

#### **Σενάριο 1**

Στο παρών σενάριο γίνεται έλεγχος για τα τις επιπτώσεις που έχει η μείωση της ισχύος του αεριοστρόβιλου στο συνδυασμένο κύκλο. Μελετήθηκαν δύο τρόποι μείωσης του φορτίου οι οποίοι αναλύονται στο κεφάλαιο 3.2. Ιδιαίτερη βαρύτητα για την εύρεση της βέλτιστης λύσης έχει ο βαθμός απόδοσης του συνδυασμένου κύκλου (συμπεριλαμβάνει και τους βαθμούς απόδοσης αεριοστρόβιλου και ατμοστρόβιλου) καθώς και η κατανάλωση καυσίμου.

#### *Σύγκριση 1*

Στη σύγκριση του υποσεναρίου 1 με το 1.1 ελέγχουμε τις επιπτώσεις από την μείωση του φορτίου μέσω ρύθμισης του αέρα καύσης διατηρώντας σταθερή την τιμή λ (πίνακας 3.1).

Σταθερές τιμές: Αριθμός αεριοστρόβιλων, Ισχύς αεριοστρόβιλου, Τιμή λ

Μεταβάλλουμε: Παροχή καυσίμου, Παροχή αέρα

Ελεύθερες μεταβλητές: Ισχύς συνδυασμένου κύκλου, Βαθμός απόδοσης συνδυασμένου κύκλου, Βαθμός απόδοσης αεριοστρόβιλου, Ισχύς ατμοστρόβιλου, Παροχή καυσαερίων

#### *Σύγκριση 2*

Στη σύγκριση του υποσεναρίου 1 με το 1.2 ελέγχουμε τις επιπτώσεις από την μείωση του φορτίου μέσω ρύθμισης του καυσίμου (πίνακας 3.1).

Σταθερές τιμές: Αριθμός αεριοστρόβιλων, Ισχύς αεριοστρόβιλου, Παροχή αέρα

Μεταβάλλουμε: Παροχή καυσίμου, Τιμή λ

Ελεύθερες μεταβλητές: Ισχύς συνδυασμένου κύκλου, Βαθμός απόδοσης συνδυασμένου κύκλου, Βαθμός απόδοσης αεριοστρόβιλου, Ισχύς ατμοστρόβιλου, Παροχή καυσαερίων

### Σενάριο 2

Στο συγκεκριμένο σενάριο γίνεται έλεγχος για τις επιπτώσεις στον συνδυασμένο κύκλο αν απομαστεύσουμε ατμό από την μέση πίεση του στροβίλου για χρήση σε σύστημα Τηλεθέρμανσης. Ιδιαίτερη βαρύτητα δίνεται στις επιπτώσεις που έχει η απομάστευση ατμού στον κύκλο νερού ατμού καθώς και στην ισχύ και τον βαθμό απόδοσης του συνδυασμένου κύκλου. Οι πιέσεις απομάστευσης είναι  $P_1=420$  Kpa,  $P_2=380$  Kpa, οι αντίστοιχες θερμοκρασίες είναι  $T_1=624$  K  $T_2= 612$  K και οι παροχές απομάστευσης είναι  $\dot{m}_1=8,1$  Kg/Sec.  $\dot{m}_2 = 8,1$  Kg/Sec. Επίσης η παροχή του νερού που θα οδηγηθεί για το σύστημα Τηλεθέρμανσης είναι  $\dot{m}_3=100$  Kg/Sec , η θερμοκρασία εισόδου  $T_3=293$  K είναι και εξόδου  $T_4= 395$  K.

### *Σύγκριση 3*

Στη σύγκριση του υποσεναρίου 1 με το 2.1 γίνεται έλεγχος για τις επιπτώσεις της απομάστευσης ατμού από την μέση πίεση του στροβίλου στον συνδυασμένο κύκλο (πίνακας 3.1).

Σταθερές τιμές: Αριθμός αεριοστρόβιλων, Παροχή αέρα, Παροχή καυσίμου, Τιμή λ, Χαρακτηριστικά εναλλάκτη θερμότητας

Μεταβάλλεται: Προσθήκη απομάστευσης ατμού

Ελεύθερες μεταβλητές: Ισχύς συνδυασμένου κύκλου, Βαθμός απόδοσης συνδυασμένου κύκλου, Ισχύς αεριοστρόβιλου, Βαθμός απόδοσης αεριοστρόβιλου, Ισχύς ατμοστρόβιλου, Παροχή καυσαερίων

### *Σύγκριση 4*

Στη σύγκριση του υποσεναρίου 1 με το 2.2 γίνεται έλεγχος για τις επιπτώσεις της απομάστευσης ατμού από την μέση πίεση του στροβίλου ατμού στον συνδυασμένο κύκλο. Σε αυτό το υποσενάριο διατηρούμε σταθερή την ισχύ του συνδυασμένου κύκλου ώστε να παρατηρήσουμε την συμπεριφορά της κατανάλωσης καυσίμου (πίνακας 3.1).

Σταθερές τιμές: Ισχύς συνδυασμένου κύκλου, Αριθμός αεριοστρόβιλων, Παροχή αέρα, Χαρακτηριστικά εναλλάκτη θερμότητας

Μεταβάλλεται: Παροχή καυσίμου, Τιμή λ, Προσθήκη απομάστευσης ατμού

Ελεύθερες μεταβλητές: Βαθμός απόδοσης συνδυασμένου κύκλου, Ισχύς αεριοστρόβιλου, Βαθμός απόδοσης αεριοστρόβιλου, Ισχύς ατμοστρόβιλου, Παροχή καυσαερίων

### *Σύγκριση 5*

Στη σύγκριση του υποσεναρίου 1 με το 2.3 γίνεται έλεγχος αν είναι συμφέρουσα η χρήση εξωτερικού λέβητα για το σύστημα Τηλεθέρμανσης. Ιδιαίτερη βαρύτητα δίνεται στην κατανάλωση καυσίμου του λέβητα για την θέρμανση του τροφοδοτικού νερού (πίνακας 3.1).

Σταθερές τιμές: Χαρακτηριστικά εναλλάκτη θερμότητας

Μεταβάλλουμε: Παροχή καυσίμου

Ελεύθερες μεταβλητές: Ισχύς λέβητα, Βαθμός απόδοσης λέβητα,

### **Σενάριο 3**

Στο συγκεκριμένο σενάριο γίνεται έλεγχος για τις επιπτώσεις στον συνδυασμένο κύκλο αν απομαστεύσουμε ατμό από την χαμηλή πίεση του στροβίλου για χρήση σε σύστημα Τηλεθέρμανσης. Ιδιαίτερη βαρύτητα δίνεται στις επιπτώσεις που έχει η απομάστευση ατμού στον κύκλο νερού ατμού καθώς και στον βαθμό απόδοσης και την ισχύ του συνδυασμένου κύκλου. Στο συγκεκριμένο σενάριο οι πιέσεις απομάστευσης είναι  $P_1=230$  Kpa,  $P_2=200$  Kpa, οι αντίστοιχες θερμοκρασίες είναι  $T_1=554$  K,  $T_2= 538$  K και οι παροχές απομάστευσης είναι  $\dot{m}_1=9$  Kg/Sec.  $\dot{m}_2 = 8$  Kg/Sec. Επίσης η παροχή του νερού που οδηγείται για θέρμανση από το ρεύμα απομάστευσης είναι  $\dot{m}_3=100$  Kg/Sec , η θερμοκρασία εισόδου είναι  $T_3=293$  K και εξόδου  $T_4=395$  K.

### *Σύγκριση 6*

Στη σύγκριση του υποσεναρίου 1 με το 3.1 γίνεται έλεγχος για τις επιπτώσεις της απομάστευσης ατμού από την χαμηλή πίεση του στροβίλου στον συνδυασμένο κύκλο (πίνακας 3.1).

Σταθερές τιμές: Αριθμός αεριοστρόβιλων, Παροχή αέρα, Παροχή καυσίμου, Τιμή λ, Χαρακτηριστικά εναλλάκτη θερμότητας

Μεταβάλλεται: Προσθήκη απομάστευσης ατμού



Ελεύθερες μεταβλητές: Ισχύς συνδυασμένου κύκλου, Βαθμός απόδοσης συνδυασμένου κύκλου, Ισχύς αεριοστρόβιλου, Βαθμός απόδοσης αεριοστρόβιλου, Ισχύς ατμοστρόβιλου, Παροχή καυσαερίων

#### *Σύγκριση 7*

Στη σύγκριση του υποσεναρίου 1 με το 3.2 γίνεται έλεγχος για τις επιπτώσεις της απομάστευσης ατμού από την χαμηλή πίεση του στροβίλου ατμού στον συνδυασμένο κύκλο. Σε αυτό το υποσενάριο διατηρούμε σταθερή την ισχύ του συνδυασμένου κύκλου ώστε να παρατηρήσουμε την συμπεριφορά της κατανάλωσης καυσίμου (πίνακας 3.1).

Σταθερές τιμές: Ισχύς συνδυασμένου κύκλου, Αριθμός αεριοστρόβιλων, Παροχή αέρα, Χαρακτηριστικά εναλλάκτη θερμότητας

Μεταβάλλεται: Παροχή καυσίμου, Τιμή λ, Προσθήκη απομάστευσης ατμού

Ελεύθερες μεταβλητές: Βαθμός απόδοσης συνδυασμένου κύκλου, Ισχύς αεριοστρόβιλου, Βαθμός απόδοσης αεριοστρόβιλου, Ισχύς ατμοστρόβιλου, Παροχή καυσαερίων

#### **Σενάριο 4**

Στο συγκεκριμένο σενάριο προσθέτουμε δεύτερο αεριοστρόβιλο στον συνδυασμένο κύκλο για να ελέγξουμε τις αλλαγές που θα επιφέρει στον κύκλο. Οι έλεγχοι θα γίνουν σε πλήρες και μερικό φορτίο των αεριοστρόβιλων. Για την εύρεση ικανοποιητικής λύσης θα αξιολογήσουμε την κατανάλωση καυσίμου καθώς και τον βαθμό απόδοσης του συνδυασμένου κύκλου.

#### *Σύγκριση 8*

Στη σύγκριση του υποσεναρίου 1 με το 4.1 ελέγχουμε τις επιπτώσεις στον συνδυασμένο κύκλο αν προσθέσουμε δεύτερο αεριοστρόβιλο στον κύκλο. Ιδιαίτερη βαρύτητα δίνουμε στην κατανάλωση καυσίμου, τον βαθμό απόδοσης συνδυασμένου κύκλου και στις επιπτώσεις που έχει η συγκεκριμένη προσθήκη στον κύκλο νερού ατμού (πίνακας 3.1).

Σταθερές τιμές: Τιμή λ

Μεταβάλλεται: Αριθμός αεριοστρόβιλων, Παροχή αέρα, Παροχή καυσίμου

Ελεύθερες μεταβλητές: Ισχύς συνδυασμένου κύκλου, Βαθμός απόδοσης συνδυασμένου κύκλου, Ισχύς αεριοστρόβιλου, Βαθμός απόδοσης αεριοστρόβιλου, Ισχύς ατμοστρόβιλου, Παροχή καυσαερίων

### Σύγκριση 9

Στη σύγκριση του υποσεναρίου 1 με το 4.2 ελέγχουμε τις επιπτώσεις στον συνδυασμένο κύκλο αν μειώσουμε στο 50% την ισχύ των αεριοστρόβιλων. Ιδιαίτερη βαρύτητα δίνουμε στην κατανάλωση καυσίμου, τον βαθμό απόδοσης του συνδυασμένου κύκλου και τις επιπτώσεις αυτής της ρύθμισης στον κύκλο νερού ατμού (πίνακας 3.1).

Σύγκριση του υποσεναρίου 1 με το 4.2 (πίνακας 3.1).

Σταθερές τιμές: : Τιμή λ

Μεταβάλλεται: Αριθμός αεριοστρόβιλων, Παροχή αέρα, Παροχή καυσίμου

Ελεύθερες μεταβλητές: Ισχύς συνδυασμένου κύκλου, Βαθμός απόδοσης συνδυασμένου κύκλου, Ισχύς αεριοστρόβιλου, Βαθμός απόδοσης αεριοστρόβιλου, Ισχύς ατμοστρόβιλου, Παροχή καυσαερίων

Πίνακας 3.1 Συγκεντρωτικός πίνακας σεναρίων

Υποσενάρια	Μονάδες	Προσομοίωση	Σενάριο 1			Σενάριο 2			Σενάριο 3		Σενάριο 4	
			1	1.1	1.2	2.1	2.2	2.3	3.1	3.2	4.1	4.2
		Ονομαστικό Φορτίο	Μείωση Αέρα	Μείωση καυσίμου	Απομάστευση Μέσης Πίεσης	Απομάστευση Μέσης Πίεσης 2	Λέβητας	Απομάστευση Χαμηλής Πίεσης	Απομάστευση Χαμηλής Πίεσης 2	2 Αεριοστρόβιλοι	2 Αεριοστρόβιλοι (Μερικό Φορτίο)	
Ισχύς CC	[MW]	Ελ.Μεταβλητή	Ελ.Μεταβλητή	Ελ.Μεταβλητή	Ελ.Μεταβλητή	Σταθερό	-	Ελ.Μεταβλητή	Σταθερό	Ελ.Μεταβλητή	Ελ.Μεταβλητή	
Βαθμός Απόδοσης CC	[%]	Ελ.Μεταβλητή	Ελ.Μεταβλητή	Ελ.Μεταβλητή	Ελ.Μεταβλητή	Ελ.Μεταβλητή	-	Ελ.Μεταβλητή	Ελ.Μεταβλητή	Ελ.Μεταβλητή	Ελ.Μεταβλητή	
Αριθμός GT	[-]	Σταθερό	Σταθερό	Σταθερό	Σταθερό	Σταθερό	-	Σταθερό	Σταθερό	Μεταβάλεται	Μεταβάλεται	
Ισχύς GT	[KW]	Ελ.Μεταβλητή	Σταθερό	Σταθερό	Ελ.Μεταβλητή	Ελ.Μεταβλητή	-	Ελ.Μεταβλητή	Ελ.Μεταβλητή	Ελ.Μεταβλητή	Ελ.Μεταβλητή	
Βαθμός Απόδοσης GT	[%]	Ελ.Μεταβλητή	Ελ.Μεταβλητή	Ελ.Μεταβλητή	Ελ.Μεταβλητή	Ελ.Μεταβλητή	-	Ελ.Μεταβλητή	Ελ.Μεταβλητή	Ελ.Μεταβλητή	Ελ.Μεταβλητή	
Ισχύς ST	[KW]	Ελ.Μεταβλητή	Ελ.Μεταβλητή	Ελ.Μεταβλητή	Ελ.Μεταβλητή	Ελ.Μεταβλητή	-	Ελ.Μεταβλητή	Ελ.Μεταβλητή	Ελ.Μεταβλητή	Ελ.Μεταβλητή	
Ισχύς Λέβητα	[MW]	-	-	-	-	-	Ελ μεταβλητή	-	-	-	-	
Βαθμός Απόδοσης Λέβητα	[%]	-	-	-	-	-	Ελ μεταβλητή	-	-	-	-	
Τιμή λ	[-]	Σταθερό	Σταθερό	Μεταβάλεται	Σταθερό	Μεταβάλεται	-	Σταθερό	Μεταβάλεται	Σταθερό	Σταθερό	
Παροχή κασίμου	[Kg/sec]	Σταθερό	Μεταβάλεται	Μεταβάλεται	Σταθερό	Μεταβάλεται	Μεταβάλεται	Σταθερό	Μεταβάλεται	Μεταβάλεται	Μεταβάλεται	
Παροχή αέρα	[Kg/sec]	Σταθερό	Μεταβάλεται	Σταθερό	Σταθερό	Σταθερό	-	Σταθερό	Σταθερό	Μεταβάλεται	Μεταβάλεται	
Παροχή καυσαερίων	[Kg/sec]	Ελ.Μεταβλητή	Ελ.Μεταβλητή	Ελ.Μεταβλητή	Ελ.Μεταβλητή	Ελ.Μεταβλητή	-	Ελ.Μεταβλητή	Ελ.Μεταβλητή	Ελ.Μεταβλητή	Ελ.Μεταβλητή	
Χαρακτηριστικά απομάστευσης ατμού	[-]	-	-	-	Σταθερά για σενάριο 2	Σταθερά για σενάριο 2	-	Σταθερά για σενάριο 3	Σταθερά για σενάριο 3	-	-	
Χαρακτηριστικά εναλλάκτη	[-]	-	-	-	Σταθερά	Σταθερά	Σταθερό	Σταθερά	Σταθερά	-	-	

### 3.1 Προσομοίωση μονάδας στο Ονομαστικό φορτίο

Η υφιστάμενη μονάδα που καλούμαστε να μελετήσουμε και να προσομοιώσουμε έχει ονομαστική ισχύ 400 MW και λειτουργεί σε συνδυασμένο κύκλο. Οι βασικές συσκευές που χρησιμοποιούνται είναι[16]:

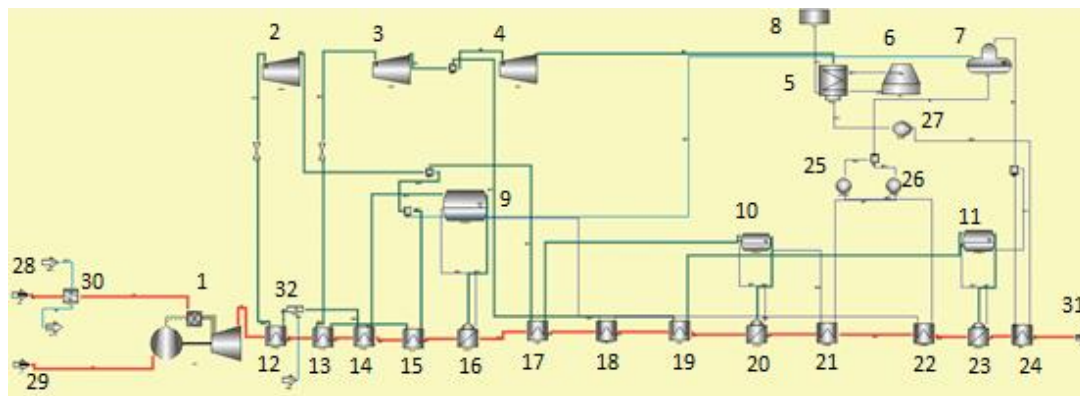
- Αεριοστρόβιλος τύπου GE FRAME 9FA 2.0+ με ονομαστική ισχύ 265 MW, βαθμό απόδοσης 35% και λόγο συμπίεσης 14.
- Ατμοστρόβιλος τύπου CSI 33 RD/50/2 δύο βαθμίδων ονομαστικής ισχύος 130 MW και βαθμό απόδοσης 37%.
- Λέβητας ανάκτησης θερμότητας με τρία τύμπανα ατμού και τρία στάδια πιέσεων (HP,IP,LP).
- Συμπυκνωτής κατασκευασμένος από τιτάνιο με ψυκτικό μέσο το θαλασσινό νερό.
- Συστοιχία πύργων ψύξης εξαναγκασμένης ροής θαλασσινού νερού.
- Δύο μονάδες αφαλάτωσης και απιονισμού.
- Μετασχηματιστής ανύψωσης τάσης από 15 KV / 400 KV.

Η διάταξη του αεριοστρόβιλου για την βέλτιστη λειτουργία της απαιτεί την ύπαρξη πρότυπων συνθηκών για την είσοδο του αέρα καύσης στον συμπιεστή, οι οποίες είναι:

- Θερμοκρασία περιβάλλοντος 15°C
- Πίεση 1,0050 atm
- Σχετική υγρασία 0,6500

Η συσκευή του αεριοστρόβιλου λειτουργεί με βασικό καύσιμο το φυσικό αέριο ενώ για λόγους εφεδρείας έχει την δυνατότητα εναλλακτικής καύσης με ελαφρύ πετρέλαιο. Το καύσιμο όπως παρατηρούμε στην εικόνα 3.1 της προσομοίωσης προθερμαίνεται (συσκευή 30) και αυξάνεται η πίεση του πριν την εισαγωγή του στον χώρο καύσης. Τα καυσαέρια από την έξοδο του αεριοστρόβιλου οδηγούνται στην είσοδο του λέβητα ανάκτησης θερμότητας (HRSG) όπου θα θερμάνουν το νερό τροφοδοσίας. Το σύστημα διαθέτει ένα στάδιο αναθέρμανσης, τρία στάδια πιέσεων και ως εκ τούτου τρία τύμπανα ατμού για καλύτερη απόδοση του λέβητα ανάκτησης θερμότητας (HRSG), μεγαλύτερη ευελιξία και ταχύτητα απόκρισης στο σύστημα. Τα τύμπανα είναι συνδεδεμένα με διατάξεις εξατμιστή για την ατμοποίηση του νερού τροφοδοσίας. Επίσης έχουμε ψεκασμούς και ρυθμιστικές βαλβίδες

για τον έλεγχο της πίεσης και της θερμοκρασίας πριν από την είσοδο του ατμού στις βαθμίδες του στροβίλου.



Εικόνα 3.1 Προσομοίωση μονάδας σε ονομαστικό φορτίο. [1] Αεριοστρόβιλος, [2] Στρόβιλος Υ.Π, [3] Στρόβιλος Μ.Π, [4] Στρόβιλος Χ.Π, [5] Συμπυκνωτής, [6] Πύργος ψύξης, [7] Απαεριοποιητής, [8] Προσθήκη νερού, [9] Τύμπανο ατμού Υ.Π, [10] Τύμπανο ατμού Μ.Π, [11] Τύμπανο ατμού Χ.Π, [12] Υπερθερμαντής 2 Υ.Π, [13] Αναθερμαντής 2, [14] Υπερθερμαντής 1 Υ.Π, [15] Αναθερμαντής 1, [16] Εξατμιστής Υ.Π, [17] Υπερθερμαντής Μ.Π, [18] Οικονομητήρας 2 Υ.Π, [19] Υπερθερμαντής Χ.Π, [20] Εξατμιστής Μ.Π, [21] Οικονομητήρας Μ.Π, [22] Οικονομητήρας 1 Υ.Π, [23] Εξατμιστής Χ.Π, [24] Οικονομητήρας, [25] Τροφοδοτική αντλία Υ.Π, [26] Τροφοδοτική αντλία Μ.Π, [27] Αντλία συμπυκνώματος, [28] Τροφοδοσία καυσίμου, [29] Τροφοδοσία αέρα, [30] Προθέρμανση καυσίμου, [31] Καμινάδα, [32] Ψεκασμός. (Πηγή: GateCycle)

### 3.2 Τρόπος ελέγχου παραγωγής ατμού (Σενάριο 1)

Κύριος στόχος του κεφαλαίου είναι ο προσδιορισμός και η κατανόηση των διαφορών που εμφανίζονται στην παραγωγή του ατμού και σε βασικά χαρακτηριστικά του αεριοστρόβιλου λόγω διαφόρων ρυθμίσεων στο κύκλωμα του συνδυασμένου κύκλου. Έπειτα από δοκιμές θεωρήθηκε σωστό ο έλεγχος του κυκλώματος του συνδυασμένου κύκλου να γίνει μέσω ρυθμίσεων της συσκευής του αεριοστρόβιλου, διότι η αρχή λειτουργίας του συνδυασμένου κύκλου είναι δομημένη να ελέγχεται από κάποιες χαρακτηριστικές τιμές του αεριοστρόβιλου (θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων, παροχή καυσαερίων). Ελέγχθηκαν οι διαφορές που προκύπτουν από δυο διαφορετικές ρυθμίσεις και αφορούν το κύκλωμα νερού-ατμού καθώς και το κύκλωμα του καυσίμου. Στις δοκιμές που έγιναν κάνουμε σύγκριση μεταξύ της λειτουργίας του αεριοστρόβιλου σε πλήρες (277 MW) και μερικό φορτίο (221 MW). Το πλήρες φορτίο αναφέρεται στις ονομαστικές τιμές της πραγματικής μονάδας. Η συγκεκριμένη ισχύς επιτεύχθηκε με τις εξής μεθόδους:

Πρώτη μέθοδος ελέγχου του Αεριοστρόβιλου:

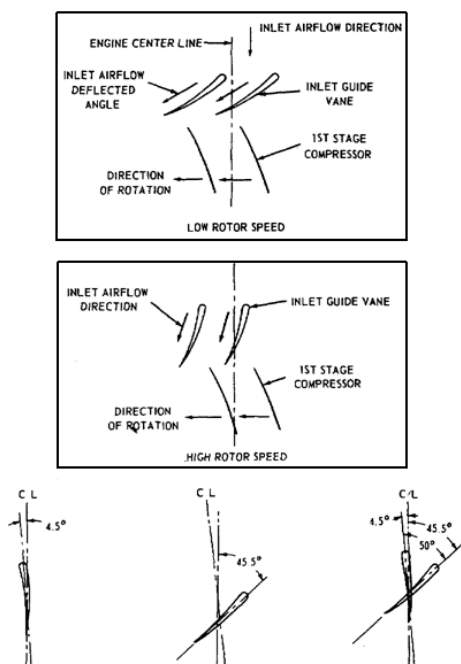
- Μείωση του καυσίμου διατηρώντας σταθερή την παροχή του αέρα (μεταβολή λ)

Δεύτερη μέθοδος ελέγχου του Αεριοστρόβιλου:

- Μείωση του αέρα εισόδου στον συμπιεστή μέσω στραγγαλισμού στις 19° των μεταβλητών περυγίων (VIGV-Variable inlet guide vanes) με παράλληλη μείωση της παροχής καυσίμου (διατηρώντας σταθερή την τιμή λ)

Με την μείωση της παροχής καυσίμου στο τμήμα του καυστήρα και διατηρώντας σταθερή την παροχή του αέρα καύσης, μειώνεται η TET (Θερμοκρασία Εισόδου στον Στρόβιλο) που έχει ως αποτέλεσμα και την μείωση του λόγου πίεσης, την μείωση της ισχύος και του βαθμού απόδοσης του αεριοστρόβιλου και κατ' επέκταση του συνδυασμένου κύκλου. Αυτό συμβαίνει διότι η θερμοκρασία εισόδου στο κύκλωμα νερού-ατμού είναι μικρότερη από την ονομαστική τιμή και δεν μπορούμε να επιτύχουμε το ίδιο ποσοστό υπερθέρμανσης για συγκεκριμένη παροχή με την δεύτερη μέθοδο. Γι' αυτό το λόγο παρατηρούμε μικρότερη παροχή ατμού στον ατμοστρόβιλο με αυτήν την μέθοδο [17].

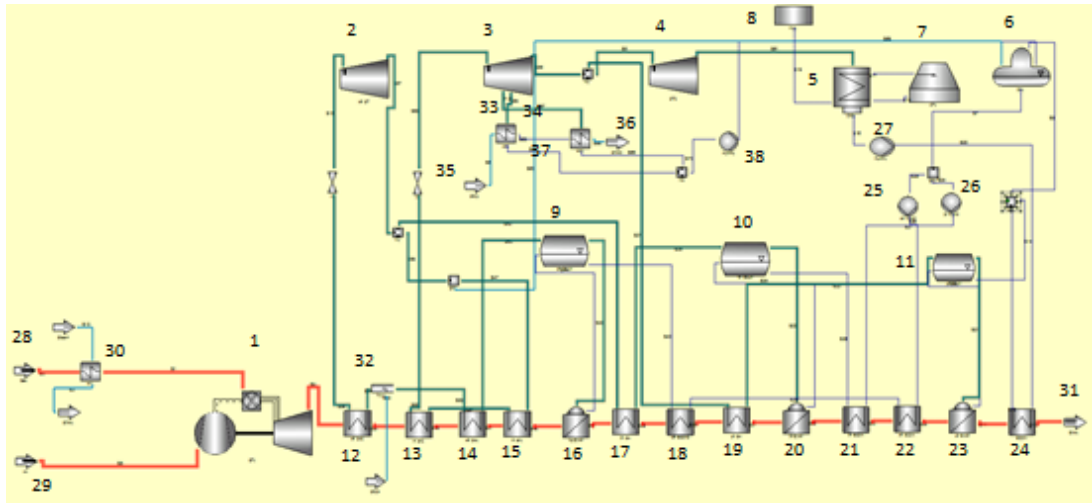
Με την ρύθμιση των μεταβλητών περυγίων εισόδου του αέρα (VIGV) σε θέση φραγμού (εικόνα 3.2) και διατηρώντας σταθερή την τιμή λ, επιτυγχάνεται μείωση της παροχής καυσίμου, μείωση του αέρα καύσης καθώς και μείωση της παροχής των καυσαερίων προς τον χώρο του εναλλάκτη θερμότητας (HRSG). Με την χρήση αυτής της μεθοδολογίας έχουμε μικρότερη μείωση στον βαθμό απόδοσης του συνδυασμένου κύκλου για μία δεδομένη τιμή μερικού φορτίου του αεριοστρόβιλου. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται επίσης και η διατήρηση της μέγιστης θερμοκρασίας εισόδου στο πρώτο στάδιο του αεριοστρόβιλου και η μέγιστη θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων στην έξοδο του στροβίλου προς περαιτέρω αξιοποίηση [14Error! Reference source not found.].



Εικόνα 3.2 Σχηματική απεικόνιση ρύθμισης μεταβλητών πτερυγίων συμπιεστή.(Πηγή Quora)

### 3.3 Σύστημα Τηλεθέρμανσης με απομάστευση ατμού από τη μέση πίεση του στροβίλου (Σενάριο 2)

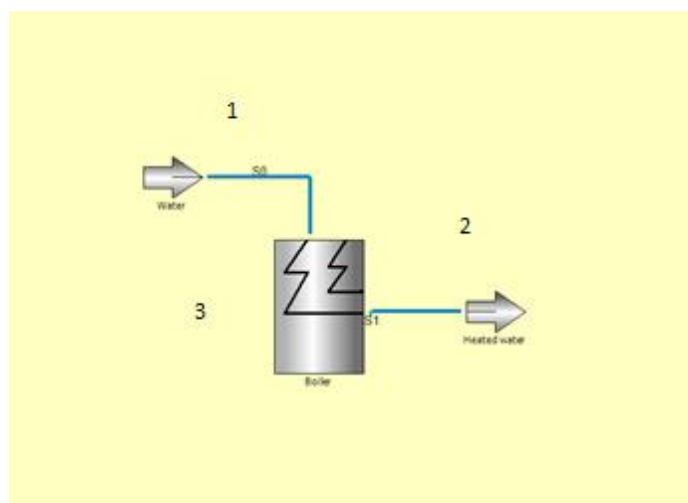
Στο σενάριο αυτό (εικόνα 3.3) συγκρίνουμε τις διαφορές που προκύπτουν στο κύκλωμα του συνδυασμένου κύκλου και ειδικότερα στο κύκλωμα νερού- ατμού αν προσθέσουμε μια απομάστευση ατμού για θέρμανση νερού τροφοδοσίας που θα χρησιμοποιηθεί για διεργασίες εντός ή εκτός εργοστασίου. Η πρώτη υπόθεση γίνεται για απομάστευση δύο ρευμάτων ατμού από την μεσαία βαθμίδα του στροβίλου. Η δεύτερη υπόθεση αφορά την θέρμανση της ίδιας παροχής τροφοδοτικού νερού με την χρήση εξωτερικού λέβητα (εικόνα 3.4). Σκοπός του σεναρίου είναι να κατανοήσουμε ποια από τις δύο μεθόδους είναι οικονομικά και ενεργειακά συμφέρουσα για την λειτουργία του εργοστασίου. Τα στοιχεία για την απομάστευση του ατμού έχουν ληφθεί από την Δημοτική Επιχείρηση Τηλεθέρμανσης Πτολεμαΐδας και Κοζάνης και εφαρμόζονται στους Ατμοηλεκτρικούς σταθμούς της Καρδιάς, του Αγίου Δημητρίου και του υποσταθμού της Πτολεμαΐδας.



Εικόνα 3.3 Απομάστευση ατμού από τη μέση πίεση του στροβίλου. [1] Αεριοστροβίλος, [2] Στρόβιλος Υ.Π, [3] Στρόβιλος Μ.Π, [4] Στρόβιλος Χ.Π, [5] Συμπυκνωτής, [6] Απαεριοποιητής, [7] Πύργος ψύξης, [8] Προσθήκη νερού, [9] Τύμπανο ατμού Υ.Π, [10] Τύμπανο ατμού Μ.Π, [11] Τύμπανο ατμού Χ.Π, [12] Υπερθερμαντής 2 Υ.Π, [13] Αναθερμαντής 2, [14] Υπερθερμαντής 1 Υ.Π, [15] Αναθερμαντής 1, [16] Εξατμιστής Υ.Π, [17] Υπερθερμαντής Μ.Π, [18] Οικονομητήρας 2 Υ.Π, [19] Υπερθερμαντής Χ.Π, [20] Εξατμιστής Μ.Π, [21] Οικονομητήρας Μ.Π, [22] Οικονομητήρας 1 Υ.Π, [23] Εξατμιστής Χ.Π, [24] Οικονομητήρας, [25] Τροφοδοτική αντλία Υ.Π, [26] Τροφοδοτική αντλία Μ.Π, [27] Αντλία συμπυκνώματος, [28] Τροφοδοσία καυσίμου, [29] Τροφοδοσία αέρα, [30] Προθέρμανση καυσίμου, [31] Καμινάδα, [32] Ψεκασμός, [33] Απομάστευση 1 Μ.Π, [34] Απομάστευση 2 Μ.Π, [35] Τροφοδοσία νερού, [36] Έξοδος νερού προς Τηλεθέρμανση, [37] Εναλλάκτες θερμότητας, [38] Αντλία συμπυκνώματος (Πηγή: GateCycle)

Όπως φαίνεται στην εικόνα 3.3 το νερό εισάγεται στον εναλλάκτη θερμότητας στους 293 K (συσκευή 35) και εξάγεται στους 395 K (συσκευή 36). Η πίεση του νερού τροφοδοσίας είναι 16 bar [18] και η αποτελεσματικότητα των εναλλακτών παραμένει ίδια και για τα δύο σενάρια. Ο ατμός έπειτα από την διεργασία εναλλαγής θερμότητας οδηγείται στον απαερωτή και επαναλαμβάνει τον κύκλο. Η εναλλαγή θερμότητας λαμβάνει χώρα σε δύο ξεχωριστούς εναλλάκτες θερμότητας. Αυτό συμβαίνει για την ομοιόμορφη πρόσδοση θερμότητας και την ελάττωση της μη αντιστρεψιμότητας. Επίσης η αποτελεσματικότητα των εναλλακτών διαφέρει μεταξύ των δύο διατάξεων για την καλύτερη προσομοίωση σε πραγματικές συνθήκες.

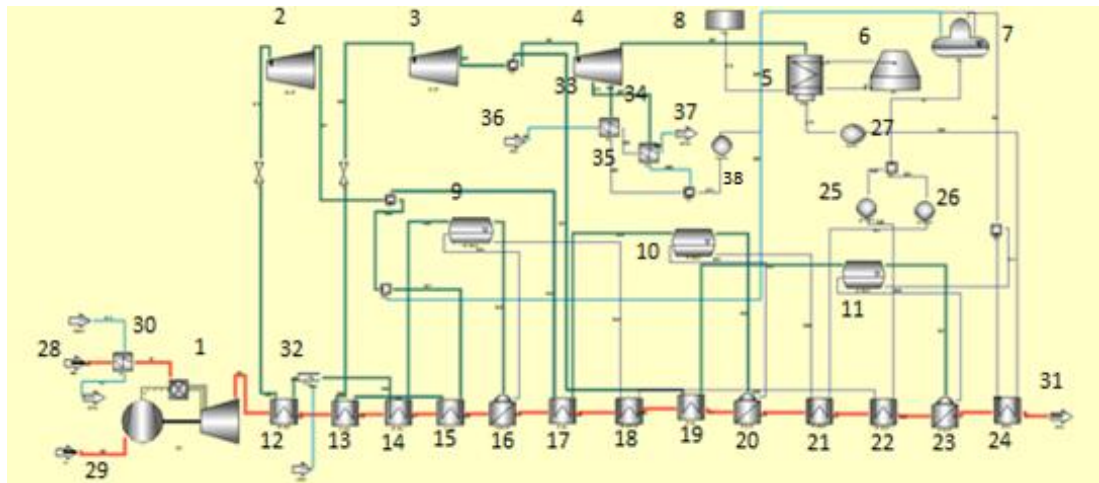




Εικόνα 3.4 Σύστημα Τηλεθέρμανσης με χρήση εξωτερικού λέβητα. [1] Είσοδος νερού τροφοδοσίας, [2] Έξοδος εργαζόμενου μέσου προς Τηλεθέρμανση, [3] Λέβητας. (Πηγή: GateCycle)

### 3.4 Σύστημα Τηλεθέρμανσης με απομάστευση ατμού από τη χαμηλή πίεση του στροβίλου (Σενάριο 3)

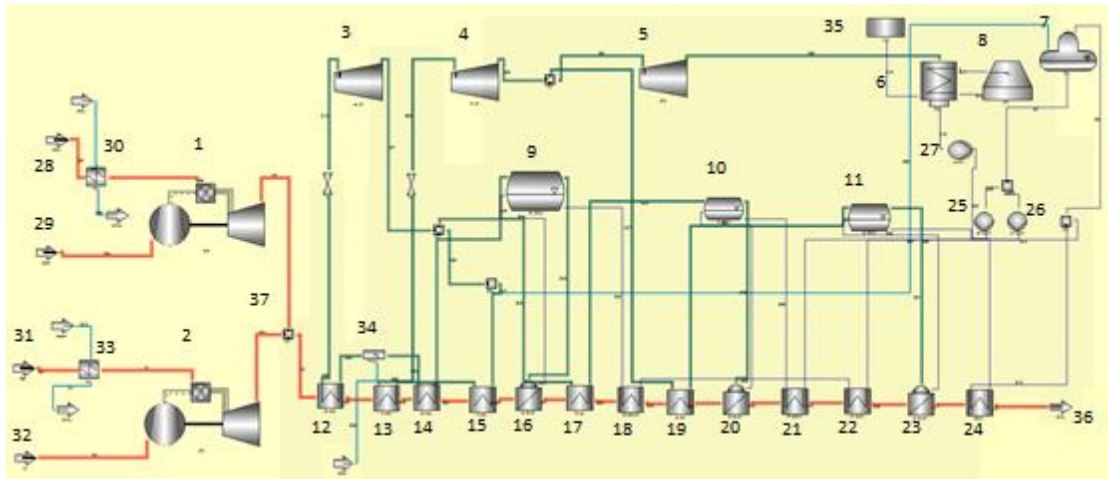
Στο συγκεκριμένο σενάριο (εικόνα 3.5) χρησιμοποιείται απομάστευση ατμού από την βαθμίδα χαμηλής πίεσης του στροβίλου και θα γίνει σύγκριση με τα αποτελέσματα που αντλήθηκαν από το προηγούμενο σενάριο, στο οποίο το κύκλωμα του συνδυασμένου κύκλου λειτουργεί με απομάστευση ατμού από την μέση πίεση του στροβίλου. Βασικά στοιχεία που αναμένεται να μεταβληθούν είναι οι παροχή μάζας ατμού που προορίζεται για εκτόνωση στον ατμοστρόβιλο, η παραγωγή ατμού καθώς και η ισχύς των στροβίλων. Θα δοθεί επίσης βαρύτητα στην διάταξη του εναλλάκτη θερμότητας που χρησιμοποιείται για την θέρμανση του τροφοδοτικού νερού προς χρήση σε σύστημα τηλεθέρμανσης. Θα εξεταστεί η μετάδοση θερμότητας του ατμού στο νερό και η διαφορά που πιθανόν να έχει με τα αποτελέσματα του εναλλάκτη θερμότητας του προηγούμενου σεναρίου. Στην συσκευή του εναλλάκτη θερμότητας διατηρήθηκαν οι τιμές της αποτελεσματικότητας καθώς και τα στοιχεία του νερού στην είσοδο και έξοδο της συσκευής.



Εικόνα 3.5 Απομάστευση ατμού από τη χαμηλή πίεση του στρόβιλο. [1] Αεριοστρόβιλος, [2] Στρόβιλος Υ.Π, [3] Στρόβιλος Μ.Π, [4] Στρόβιλος Χ.Π, [5] Συμπυκνωτής, [6] Πύργος ψύξης, [7] Απαεριοποιητής, [8] Προσθήκη νερού, [9] Τύμπανο ατμού Υ.Π, [10] Τύμπανο ατμού Μ.Π, [11] Τύμπανο ατμού Χ.Π, [12] Υπερθερμαντής 2 Υ.Π, [13] Αναθερμαντής 2, [14] Υπερθερμαντής 1 Υ.Π, [15] Αναθερμαντής 1, [16] Εξατμιστής Υ.Π, [17] Υπερθερμαντής Μ.Π, [18] Οικονομητήρας 2 Υ.Π, [19] Υπερθερμαντής Χ.Π, [20] Εξατμιστής Μ.Π, [21] Οικονομητήρας Μ.Π, [22] Οικονομητήρας 1 Υ.Π, [23] Εξατμιστής Χ.Π, [24] Οικονομητήρας, [25] Τροφοδοτική αντλία Υ.Π, [26] Τροφοδοτική αντλία Μ.Π, [27] Αντλία συμπυκνώματος, [28] Τροφοδοσία καυσίμου, [29] Τροφοδοσία αέρα, [30] Προθέρμανση καυσίμου, [31] Καμινάδα, [32] Ψεκασμός, [33] Απομάστευση 1 Χ.Π, [34] Απομάστευση 2 Χ.Π, [35] Εναλλάκτες θερμότητας, [36] Είσοδος νερού τροφοδοσίας, [37] Έξοδος νερού προς Τηλεθέρμανση, [38] Αντλία συμπυκνώματος. (Πηγή: GateCycle)

### 3.5 Λειτουργία συνδυασμένου κύκλου με δύο αεριοστρόβιλους σε μερικό φορτίο (Σενάριο 4)

Σε αυτό το σενάριο (εικόνα 3.6) εξετάζουμε τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την χρήση δύο αεριοστρόβιλων στο σύστημα του συνδυασμένου κύκλου. Θα συγκρίνουμε τις ονομαστικές τιμές του συνδυασμένου κύκλου με έναν αεριοστρόβιλο και τις τιμές του κύκλου με την χρήση δύο αεριοστρόβιλων σε πλήρες φορτίο καθώς και σε μερικό φορτίο. Με αυτές τις δοκιμές αποσκοπούμε να ανακαλύψουμε την συμπεριφορά του συνδυασμένου κύκλου σε λειτουργία εκτός ονομαστικών προδιαγραφών. Βασικός μας στόχος είναι να διευκρινίσουμε εάν είναι οικονομικά και ενεργειακά συμφέρουσα η λειτουργία της μονάδας παραγωγής ενέργειας με δύο αεριοστρόβιλους σε μερικό φορτίο για κάλυψη της ζήτησης ή της χρήσης ενός αεριοστρόβιλου σε πλήρες φορτίο θέτοντας εκτός λειτουργίας τον έναν εκ των δύο.



Εικόνα 3.6 Συνδυασμένος κύκλος με χρήση δύο αεριοστρόβιλων. [1] Αεριοστρόβιλος 1, [2] Αεριοστρόβιλος 2, [3], Στρόβιλος ατμού Υ.Π, [4] Στρόβιλος ατμού Μ.Π, [5] Στρόβιλος ατμού Χ.Π, [6] Συμπυκνωτής, [7] Απαεριοποιητής, [8] Πύργος ψύξης, [9] Τύμπανο ατμού Υ.Π, [10] Τύμπανο ατμού Μ.Π, [11] Τύμπανο ατμού Χ.Π, [12] Υπερθερμαντής 2 Υ.Π, [13] Αναθερμαντής 2, [14] Υπερθερμαντής 1 Υ.Π, [15] Αναθερμαντής 1, [16] Εξατμιστής Υ.Π, [17] Υπερθερμαντής Μ.Π, [18] Οικονομητήρας 2 Υ.Π, [19] Υπερθερμαντής Χ.Π, [20] Εξατμιστής Μ.Π, [21] Οικονομητήρας Μ.Π, [22] Οικονομητήρας 1 Υ.Π, [23] Εξατμιστής Χ.Π, [24] Οικονομητήρας, [25] Τροφοδοτική αντλία Υ.Π, [26] Τροφοδοτική αντλία Μ.Π, [27] Αντλία συμπυκνώματος, [28] Τροφοδοσία καυσίμου 1, [29] Τροφοδοσία αέρα 1, [30] Προθέρμανση καυσίμου 1, [31] Τροφοδοσία καυσίμου 2, [32] Τροφοδοσία αέρα 2, [33] Προθέρμανση καυσίμου 2, [34] Ψεκάσμος, [35] Προσθήκη νερού, [36] Καμινάδα, [37] Μίκτης. (Πηγή: GateCycle)

Στον πίνακα 3.2 παρουσιάζονται χαρακτηριστικές τιμές αεριοστρόβιλων που αποτελούν αναβαθμίσεις του υφιστάμενου αεριοστρόβιλου του κύκλου μας. Ο πίνακας χωρίζεται σε τρία τμήματα, το πρώτο αναφέρεται σε λειτουργία ανοιχτού κύκλου με έναν αεριοστρόβιλο, το δεύτερο αναφέρεται στην λειτουργία συνδυασμένου κύκλου με την χρήση ενός αεριοστρόβιλου και το τρίτο σε συνδυασμένο κύκλο με παράλληλη λειτουργία δύο αεριοστρόβιλων. Από τον πίνακα 3.2 αντλούμε στοιχεία που δεν παρατίθενται στην προσομοίωση αλλά είναι ενδιαφέροντα και προσεγγίζουν τα στοιχεία του υφιστάμενου αεριοστρόβιλου. Αυτά τα στοιχεία είναι ο τύπος του αεριοστρόβιλου (9F.04, 9F.05), η καθαρή ισχύς του κύκλου, ο καθαρός βαθμός απόδοσης, ο απαιτούμενος ρυθμός ροής θερμότητας προς το σύστημα, η αυξομείωση της ισχύος του συστήματος για την κάλυψη της ζήτησης καθώς και ο χρόνος εκκίνησης την μονάδας.

			9F.04	9F.05
Απόδοση Μονάδας με 1 GT	Καθαρή ισχύς	[MW]	288	314
	Ρυθμός ροής θερμότητας	[Btu/KWh]	8,81	8,846
	Ρυθμός ροής θερμότητας	[Kj/KWh]	8,295	9,333
	Καθαρός βαθμός απόδοσης	[%]	38,7	38,6
Απόδοση Μονάδας CC με 1 GT	Καθαρή ισχύς	[MW]	443	499
	Ρυθμός ροής θερμότητας	[Btu/KWh]	5,66	5,619
	Ρυθμός ροής θερμότητας	[Kj/KWh]	5,978	5,928
	Καθαρός βαθμός απόδοσης	[%]	60,2	60,7
	Ελάχιστο φορτίο μονάδας	[%]	48	43
	Ρυθμός αύξησης φορτίου	[MW/min]	22	24
	Χρόνος εκκίνησης	min	30	30
Απόδοση Μονάδας CC με 2 GT	Καθαρή ισχύς	[MW]	889	1000
	Ρυθμός ροής θερμότητας	[Btu/KWh]	5,649	5,603
	Ρυθμός ροής θερμότητας	[Kj/KWh]	5,96	5,911
	Καθαρός βαθμός απόδοσης	[%]	60,4	60,9
	Ελάχιστο φορτίο μονάδας	[%]	22	20
	Ρυθμός αύξησης φορτίου	[MW/min]	44	48
	Χρόνος εκκίνησης	min	39	39

Πίνακας 3.2 Λειτουργικά στοιχεία αεριοστρόβιλων 9FA. (Πηγή: [gerpower.com](http://gerpower.com))

## 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

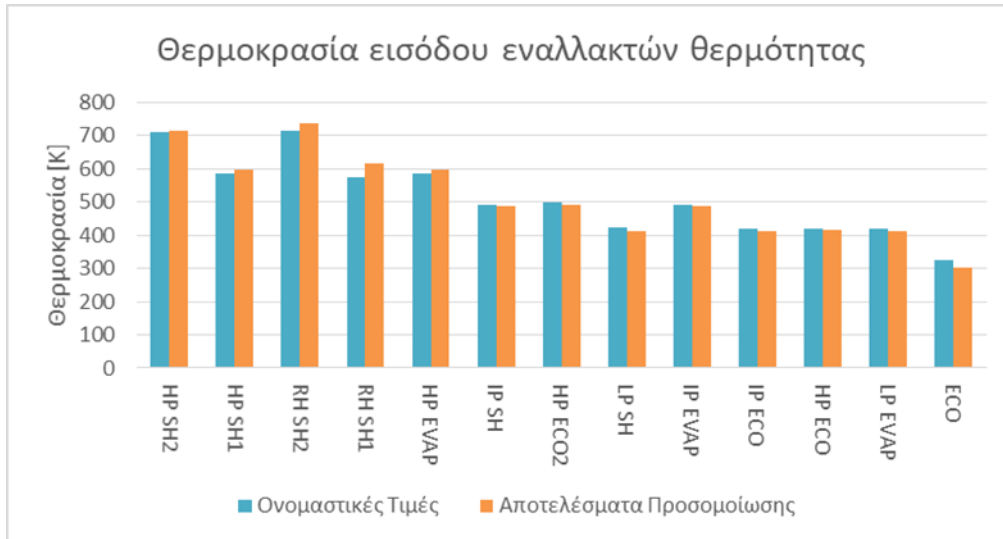
Το κεφάλαιο 4 έρχεται ως συνέχεια των προηγούμενων δυο κεφαλαίων καθώς μας παραθέτει τα αποτελέσματα των σεναρίων που εξεζηγήθηκαν στο κεφάλαιο 3 και προέρχονται από το λογισμικό GateCycle που αναλύσαμε στο κεφάλαιο 2. Ξεκινώντας θα αναφερθούμε στα αποτελέσματα της προσομοίωσης συγκριτικά με τα δεδομένα που λάβαμε από το εργοστάσιο και θα γίνει έλεγχος για την τιμή σφάλματος. Για την καλύτερη κατανόηση υπάρχουν οι αντίστοιχοι πίνακες, διαγράμματα καθώς και επιπρόσθετα στοιχεία στο Παράρτημα 1. Στην συνέχεια θα αναλύσουμε τα αποτελέσματα από τα τέσσερα βασικά σενάρια παραθέτοντας επίσης τους αντίστοιχους πίνακες και διαγράμματα. Επίσης στο Παράρτημα 1 παρατίθεται ο συγκεντρωτικός πίνακας 1 με τα αποτελέσματα των σεναρίων.

### 4.1 Προσομοίωση μονάδας στο Ονομαστικό φορτίο

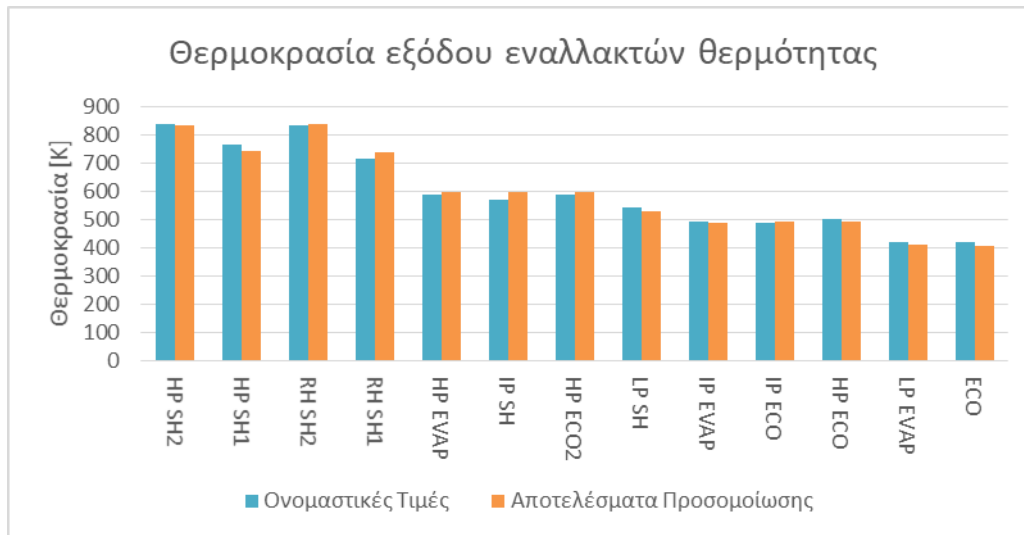
#### 1. Θερμοκρασία ατμού στο λέβητα ανάκτησης θερμότητας HRSG

Στα διαγράμματα 4.1 και 4.2 παρουσιάζεται η θερμοκρασία του ρευστού (νερό, μίγμα νερού ατμού, ατμός) εντός του λέβητα ανάκτησης θερμότητας HRSG. Επιπλέον γίνεται μια πιο ενδελεχής περιγραφή της πρόσδοσης θερμότητας στους επιμέρους εναλλάκτες εντός της συσκευής καθώς τα διαγράμματα αναφέρονται στην θερμοκρασία εισόδου και εξόδου της κάθε διάταξης. Η στοίχιση των εναλλακτών στο διάγραμμα ακολουθεί την φυσική θέση τους εντός του λέβητα. Η προσομοίωση της μονάδας έγινε στο ονομαστικό φορτίο καθώς είχαμε αρκετά δεδομένα από τα σχέδια των κατασκευαστών καθώς και από μετρούμενες τιμές σε πρότυπες συνθήκες λειτουργίας. Από την ποσοστιαία διαφορά των ονομαστικών τιμών με τα αποτελέσματα προσομοίωσης που φαίνεται στον πίνακα 2 του Παραρτήματος 1 είναι φανερό ότι κατά βάση δεν υπάρχει απόκλιση άνω του 4% και ως εκ τούτου η προσομοίωση γίνεται αποδεκτή.

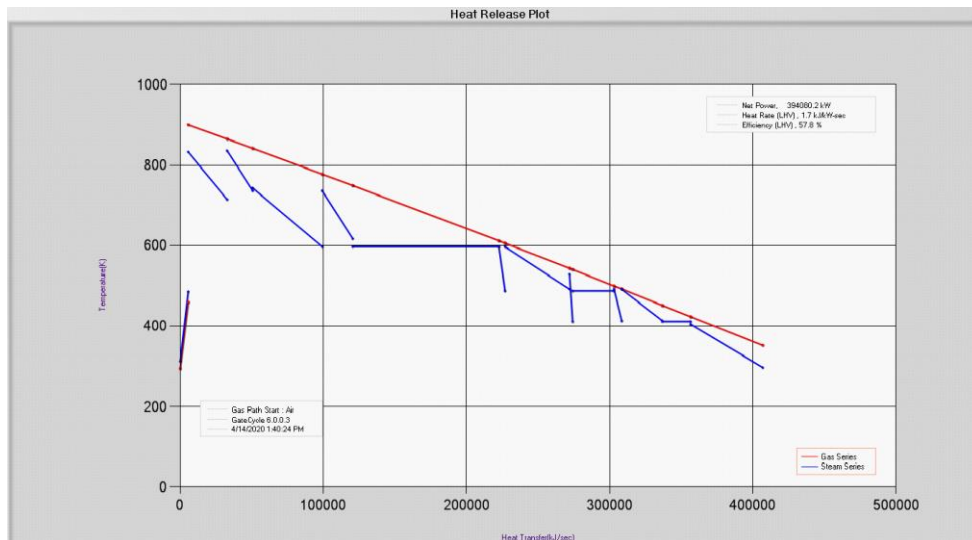
Οι συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν στα διαγράμματα 4.1 και 4.2 είναι ο Υπερθερμαντής (Superheater-SH), ο Αναθερμαντής (Reheater-RH), ο Εξατμιστής (Evaporator- Evap) και ο Οικονομητήρας (Economizer-Eco). Η κάθε συσκευή μπορεί να χωρίζεται σε περισσότερα τμήματα ανάλογα με την θέση τους στον λέβητα και την θερμοκρασία που επιθυμούμε να έχει το εργαζόμενο μέσο.



Διάγραμμα 4.1 Θερμοκρασία εισόδου ατμού στους εναλλάκτες θερμότητας του λέβητα ανάκτησης θερμότητας



Διάγραμμα 4.2 Θερμοκρασία εξόδου ατμού στους εναλλάκτες θερμότητας του λέβητα ανάκτησης θερμότητας



Εικόνα 4.1 Διάγραμμα μετάδοσης θερμότητας από τον κύκλο καυσαερίου στον κύκλο νερού – ατμού

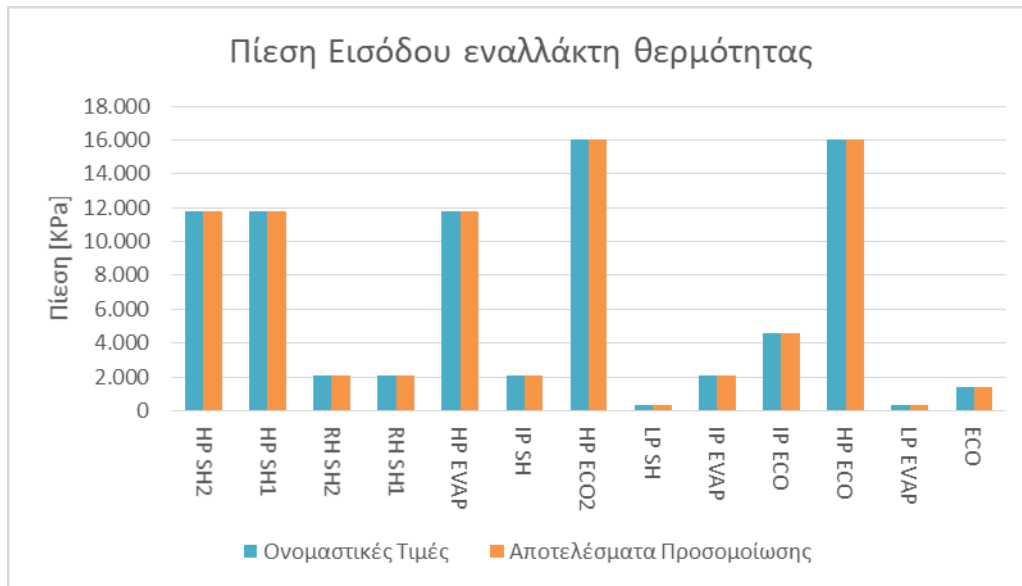
Στην εικόνα 4.1 φαίνεται το διάγραμμα μετάδοσης θερμότητας του συνδυασμένου κύκλου σε άξονες θερμοκρασίας- ενθαλπίας. Με κόκκινο χρώμα διακρίνουμε τον κύκλο καυσαερίου που παραδίδει την θερμότητα του καθώς και τον κύκλο νερού- ατμού με μπλε χρώμα που παραλαμβάνει θερμότητα και τμηματικά αυξάνει της ενθαλπία του. Επεξηγηματική για το συγκεκριμένη εικόνα είναι η εικόνα 1.10 στο κεφάλαιο 1. Με βάση την κλίση των γραμμών μπορούμε να αντιληφθούμε τον τύπο του εναλλάκτη θερμότητας (οι οριζόντιες μπλε γραμμές αντιστοιχούν σε συσκευές εξατμιστή) ενώ φαίνονται καθαρά και τα σημεία προσέγγισης του ρευστού με το καυσαέριο.

## 2. Πίεση ατμού στο λέβητα ανάκτησης θερμότητας HRSG

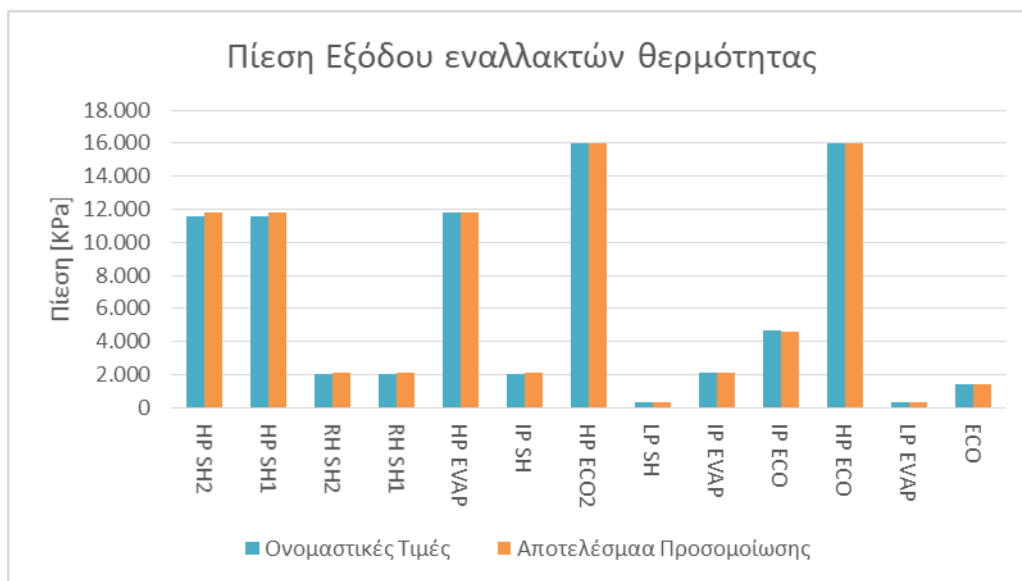
Στα διαγράμματα 4.3 και 4.4 απεικονίζονται οι ονομαστικές τιμές της πίεσης εντός του λέβητα ανάκτησης θερμότητας καθώς και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Από τα διαγράμματα 4.3, 4.4 καθώς και από τον πίνακα 3 του Παραρτήματος 1, παρατηρούμε πως δεν υπάρχει απόκλιση σε καμία τιμή και αυτό οφείλεται διότι η πίεση ρυθμίζεται από τον χρήστη του προγράμματος μέσω των τροφοδοτικών αντλιών.

Οι συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν στα διαγράμματα 4.3 και 4.4 είναι ο Υπερθερμαντής (Superheater-SH), ο Αναθερμαντής (Reheater-RH), ο Εξατμιστής ( Evaporator- Evap) και ο Οικονομητήρας (Economizer-Eco). Η κάθε συσκευή μπορεί να χωρίζεται σε περισσότερα

τμήματα ανάλογα με την θέση τους στον λέβητα και την θερμοκρασία που επιθυμούμε να έχει το εργαζόμενο μέσο.



Διάγραμμα 4.3 Πίεση εισόδου ατμού στους εναλλάκτες θερμότητας του λέβητα ανάκτησης θερμότητας



Διάγραμμα 4.4 Πίεση εξόδου ατμού στους εναλλάκτες θερμότητας του λέβητα ανάκτησης θερμότητας

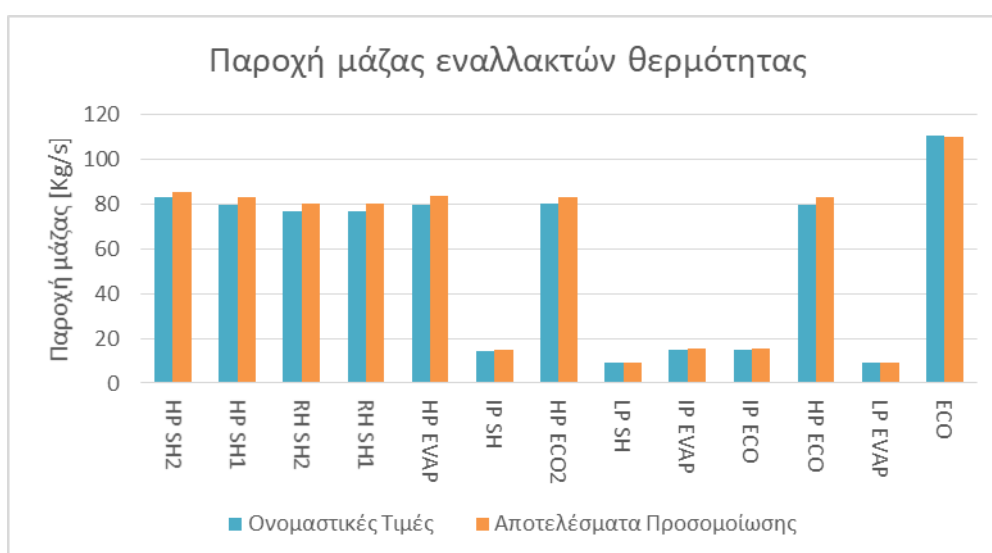
### 3. Παροχή μάζας ατμού λέβητα ανάκτησης θερμότητας HRSG

Στο διάγραμμα 4.5 διακρίνουμε την παροχή μάζας νερού-ατμού στους εναλλάκτες θερμότητας εντός του λέβητα ανάκτησης θερμότητας. Η προσέγγιση των τιμών κρίνεται ιδιαίτερα δύσκολη καθώς επηρεάζονται από την παροχή και τη θερμοκρασία των



καυσαερίων, την αποτελεσματικότητα του εναλλάκτη καθώς και από την λειτουργία του στροβίλου ατμού. Από τα αποτελέσματα προσομοίωσης καθώς και από την ποσοστιαία διαφορά που εμφανίζεται στον πίνακα 4 του Παραρτήματος 1 φανερώνεται πως η προσομοίωση ήταν επιτυχής (σφάλμα μικρότερο του 5%).

Οι συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν στο διάγραμμα 4.5 είναι ο Υπερθερμαντής (Superheater-SH), ο Αναθερμαντής (Reheater-RH), ο Εξατμιστής ( Evaporator- Evap) και ο Οικονομητήρας (Economizer-Eco). Η κάθε συσκευή μπορεί να χωρίζεται σε περισσότερα τμήματα ανάλογα με την θέση τους στον λέβητα και την θερμοκρασία που επιθυμούμε να έχει το εργαζόμενο μέσο.



Διάγραμμα 4.5 Παροχή μάζας ατμού εναλλακτών θερμότητας του λέβητα ανάκτησης θερμότητας

#### 4. Παροχή μάζας συσκευών

Στον πίνακα 4.1 φαίνεται η παροχή μάζας καυσαερίων καθώς και ο ψεκασμός νερού πριν την είσοδο του στροβίλου υψηλής πίεσης για τον έλεγχο της θερμοκρασίας. Η θέση του ψεκασμού νερού είναι ανάμεσα στις δύο συσκευές του υπερθερμαντή. Η ποσοστιαία διαφορά είναι σχεδόν μηδενική καθώς ο τύπος αεριοστροβίλου που επιλέχθηκε προσεγγίζει σε υψηλό βαθμό την υφιστάμενη συσκευή και η τιμή του ψεκασμού μαρτυρά την σωστή

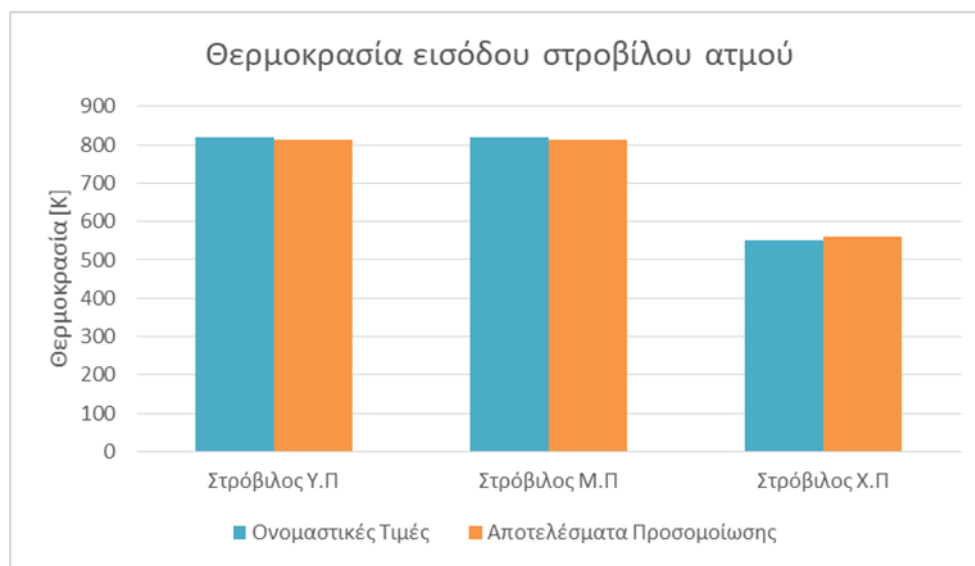
αποτελεσματικότητα των υπερθερμαντών καθώς δεν απαιτείται αυξημένη παροχή ψεκασμού για ρύθμιση της θερμοκρασίας.

Πίνακας 4.1 Συγκριτικά αποτελέσματα παροχής μάζας για διάφορες συσκευές

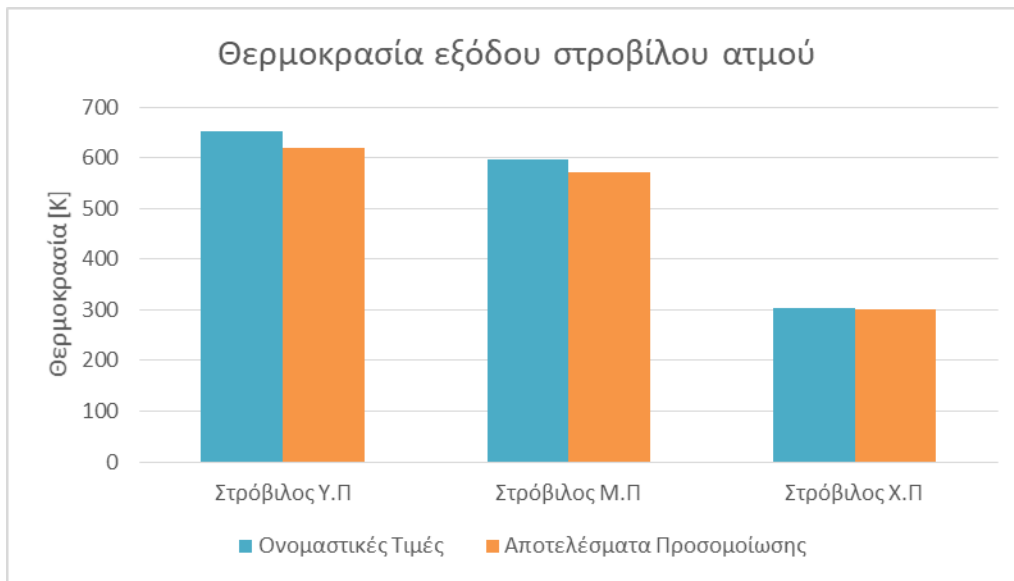
Στοιχεία	Ονομαστικές Τιμές	Αποτελέσματα Προσομοίωσης	Ποσοστιαία Διαφορά %
	Παροχή Μάζας [kg/s]	Παροχή Μάζας [kg/s]	Παροχή Μάζας [kg/s]
Καυσαέριο	657	656,17	-0,13
Ψεκασμός ΑΦ/ΥΠ	2,18	2,17	-0,46

### 5.Θερμοκρασία ατμού στρόβιλου

Στα διαγράμματα 4.6 και 4.7 παρατηρείται μια διαφοροποίηση στην θερμοκρασία εξόδου των βαθμίδων του στρόβιλου υψηλής και μέσης πίεσης καθώς δεν υπήρχαν τα απαραίτητα στοιχεία ισεντροπικών βαθμών απόδοσης για την ακριβή προσομοίωση της συσκευής. Από τα στοιχεία που αντλούμε από τα διαγράμματα 4.6 και 4.7 καθώς και από τον πίνακα 5 του Παραρτήματος 1 φαίνεται πως η απόκλιση του ονομαστικού φορτίου και της προσομοίωσης είναι κάτω του 5% και επιβεβαιώνεται η ορθή προσομοίωση της μονάδας. Οι υπολογισμοί έγιναν βάσει στοιχείων από την μονάδα παραγωγής ενέργειας καθώς και από βιβλιογραφικά δεδομένα.



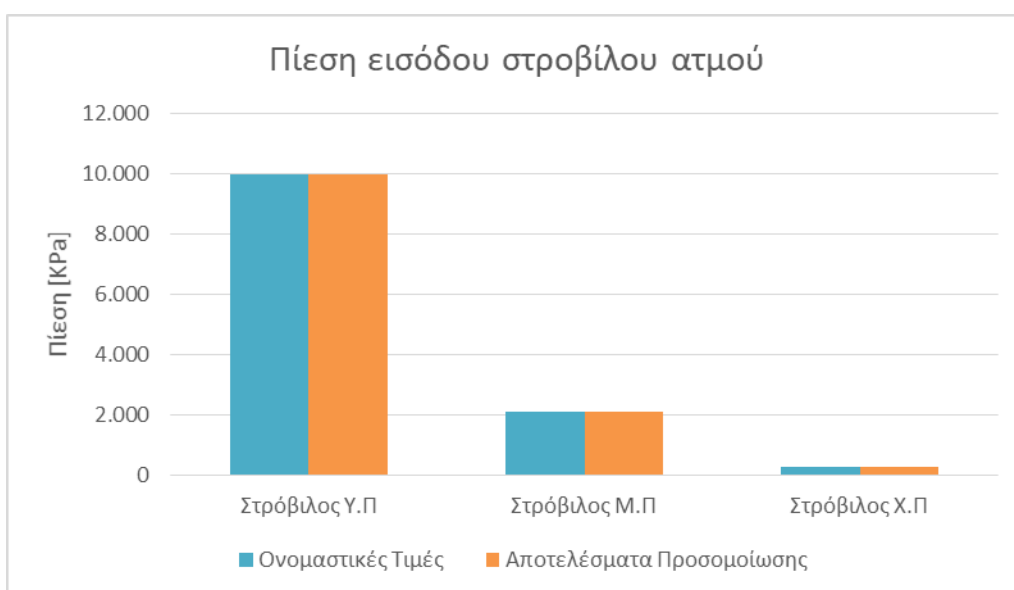
Διάγραμμα 4.6 Θερμοκρασία εισόδου ατμού στον στρόβιλο



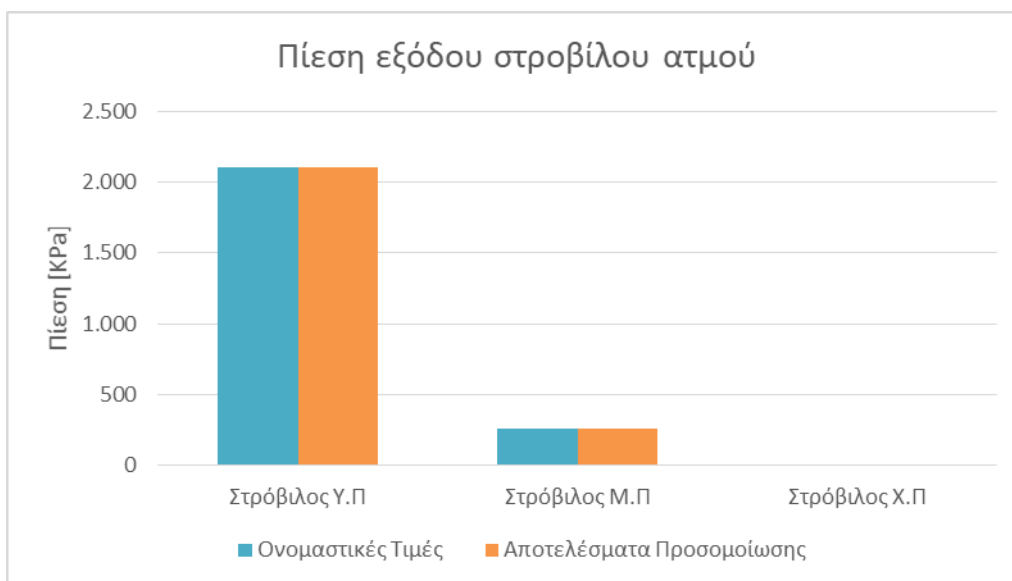
Διάγραμμα 4.7 Θερμοκρασία εισόδου ατμού στον στρόβιλο

#### 6. Πίεση ατμού στρόβιλου

Στα διαγράμματα 4.8 και 4.9 παρατηρούμε την πίεση εισόδου και εξόδου του στρόβιλου ατμού αντίστοιχα. Οι τιμές των διαγραμμάτων προκύπτουν έπειτα από στραγγαλισμό της πίεσης πριν την είσοδο του στρόβιλου. Από ότι παρατηρούμε δεν υπάρχει απόκλιση μεταξύ των ονομαστικών τιμών και των τιμών προσομοίωσης καθώς όπως αναφέραμε προηγουμένως η πίεση ελέγχεται από τις ρυθμιστικές βαλβίδες. Ο πίνακας με τις τιμές πίεσης εισόδου στον στρόβιλο ατμού παρατίθεται στον πίνακα 6 του παραρτήματος 1.



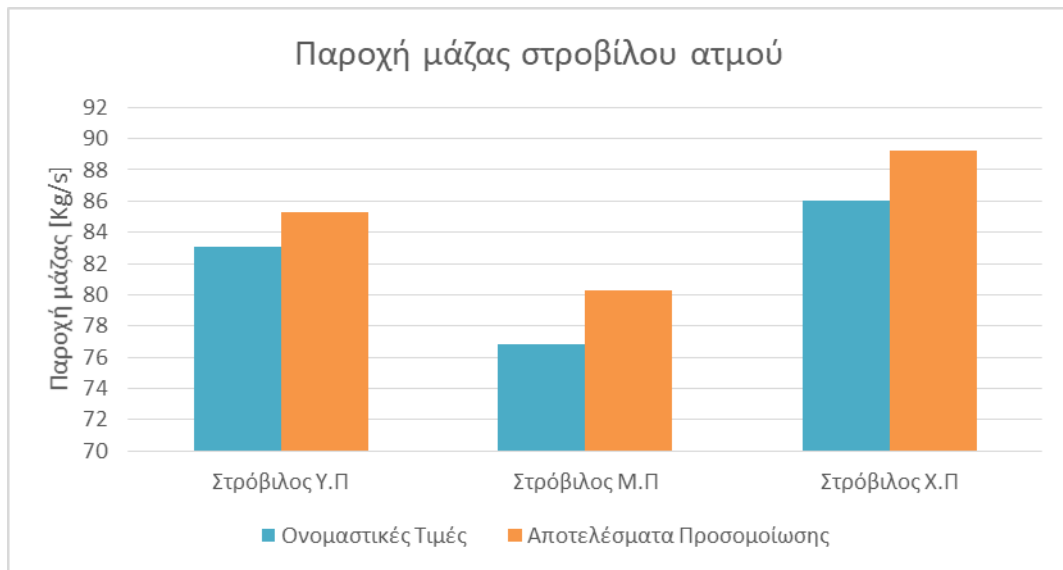
Διάγραμμα 4.8 Πίεση εισόδου στον στρόβιλο ατμού



Διάγραμμα 4.9 Πίεση εξόδου στον στρόβιλο ατμού

### 7. Παροχή μάζας ατμού στρόβιλου ατμού

Στο διάγραμμα 4.10 παρατηρούμε την παροχή μάζας ατμού στον στρόβιλο, σε ονομαστικό φορτίο και τιμές προσομοίωσης. Η προσομοίωση της παροχής μάζας ατμού είχε και σε αυτό το κεφάλαιο αυξημένο βαθμό δυσκολίας καθώς επηρεάζεται από τον βαθμό απόδοσης του στρόβιλου, την θερμοκρασία εισόδου του ατμού στον στρόβιλο. Οι τιμές προσομοίωσης είναι ελαφρώς αυξημένες συγκριτικά με τις ονομαστικές τιμές αλλά αξίζει να σημειωθεί πως και εδώ το σφάλμα είναι κάτω του 5% επιτυγχάνοντας καλή προσομοίωση. Ο πίνακας με τις τιμές παροχής μάζας ατμού παρατίθενται στον πίνακα 7 του παραρτήματος 1.



*Διάγραμμα 4.10 Παροχή μάζας ατμού στον σρόβιλο*

#### 8. Θερμοκρασία καυσαερίων λέβητα ανάκτησης θερμότητας

Στον πίνακα 4.2 παρουσιάζονται οι τιμές προσομοίωσης για τον κύκλο καυσαερίου. Οι τιμές αυτές δεν συγκρίνονται με τις αντίστοιχες μετρούμενες καθώς δεν υπάρχει η συγκεκριμένη μέτρηση στα όργανα της μονάδας. Η θερμοκρασία εισόδου στον ατμοπαραγωγό ελέγχεται από τον χρήστη ορίζοντας την θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων αεριοστροβίλου ενώ η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων προς το περιβάλλον είναι αποδεκτή καθώς συμπίπτει με τις τιμές των σχεδίων.

Οι συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν στον πίνακα 4.2 είναι ο Υπερθερμαντής (Superheater-SH), ο Αναθερμαντής (Reheater-RH), ο Εξατμιστής ( Evaporator- Evap) και ο Οικονομητήρας (Economizer-Eco). Η κάθε συσκευή μπορεί να χωρίζεται σε περισσότερα τμήματα ανάλογα με την θέση τους στον λέβητα και την θερμοκρασία που επιθυμούμε να έχει το εργαζόμενο μέσο.

Πίνακας 4.2 Συγκριτικά αποτελέσματα της θερμοκρασίας καυσαερίων για τα αποτελέσματα προσομοίωσης

Στοιχεία	Ονομαστικές Τιμές	
	Θερμοκρασία εισόδου [K]	Θερμοκρασία εξόδου [K]
HP SH2	899,97	864,95
HP SH1	841,86	778,28
RH SH2	864,95	841,86
RH SH1	778,2	749,93
HP EVAP	749,93	612,13
IP SH	612,13	606,18
HP ECO2	606,18	543,81
LP SH	543,81	540,68
IP EVAP	540,68	500,17
IP ECO	400,17	492,53
HP ECO	492,53	452,34
LP EVAP	452,34	424,14
ECO	424,14	351,65

#### 4.2 Τρόπος ελέγχου παραγωγής ατμού (Σενάριο 1)

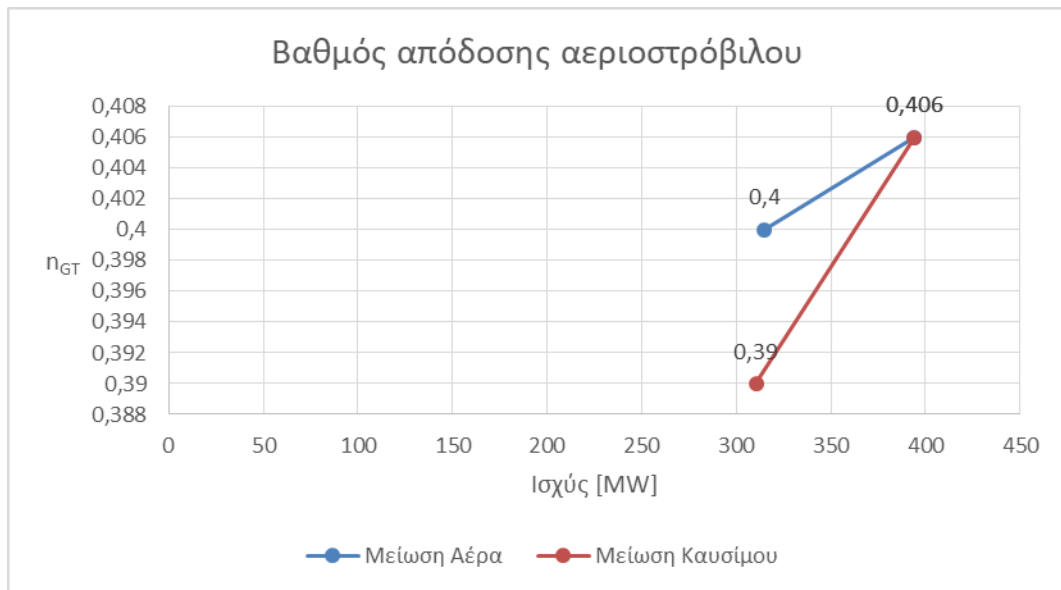
##### Ρύθμιση μεταβλητών πτερυγίων σε θέση στραγγαλισμού

Στα αποτελέσματα του πίνακα 4.3 παρατηρούμε την συμπεριφορά χαρακτηριστικών τιμών του συνδυασμένου κύκλου, του αεριοστρόβιλου και του συμπυκνωτή. Οι διαφορές προκύπτουν λόγω της μείωσης του φορτίου του αεροστροβίλου στο 80% (221 MW) της ονομαστικής του ισχύος (277 MW) μέσω μείωσης του αέρα στον συμπιεστή (ρύθμιση των μεταβλητών πτερυγίων IGV από τις 86° στις 19°). Με αυτήν την μέθοδο παρατηρούμε μια μείωση στον βαθμό απόδοσης του αεριοστρόβιλου της τάξης του 1.48% και του συνδυασμένου κύκλου κατά 1.33%. Η συσκευή του συμπιεστή πέραν της μεταβολής της παροχής δεν επηρεάζεται από την αλλαγή την γωνίας εισαγωγής και δεν παρατηρείται διαφοροποίηση στον βαθμό απόδοσης. Σημαντικό στοιχείο είναι η μέγιστη θερμοκρασία εισόδου του στροβίλου (TET) που επίσης δεν επηρεάζεται και έχει θετικό πρόσημο για τον κύκλο νερού-ατμού (διατηρείται σταθερό το λ).

Πίνακας 4.3 Συγκριτικός πίνακας ονομαστικού φορτίου συνδυασμένου κύκλου και μερικού φορτίου με ρύθμιση των μεταβλητών πτερυγίων IGV

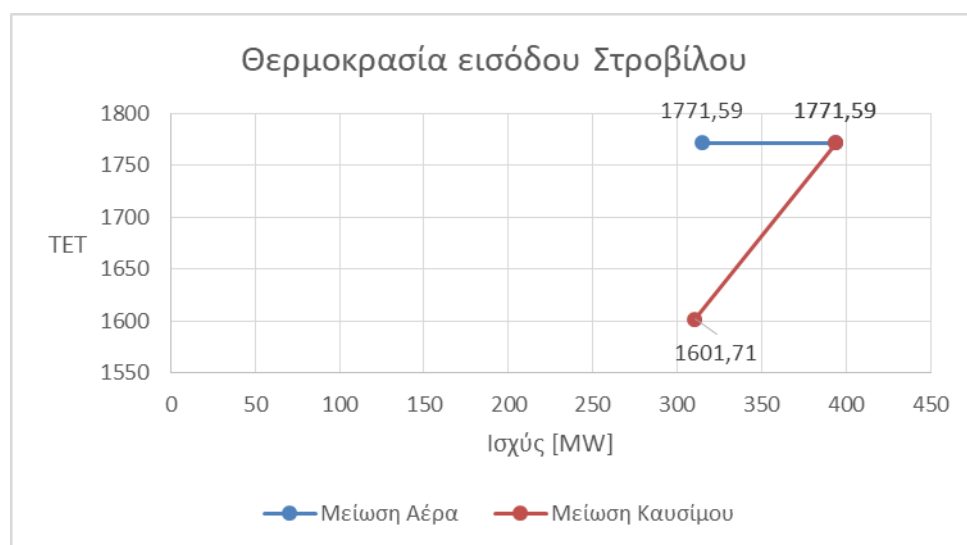
Συνδιασμένος Κύκλος	Μονάδες	Ονομαστικές Τιμές	Μερικό φορτίο 80% [Μείωση Αέρα]	Ποσοστιαία Διαφορά %
Ισχύς	[MW]	394,08	314,98	-20,07
Αποδοτικότητα	[-]	57,8	57,03	-1,33
Θερμοκρασία Θυσάνου	[K]	351,8	350	-0,51
<b>Αεριοστρόβιλος</b>				
Καθαρή Ηλεκτρική Ισχύς	[KW]	276.545	220.685	-20,20
Ισχύς Ρότοτρα	[KW]	298.474	241.764	-19,00
Ίδιο Καταναλώσεις	[KW]	17.452,8	17.452,8	0,00
Heat Rate	[KJ/KW-s]	2,46	2,50	1,50
Αποδοτικότητα	[-]	0,41	0,40	-1,48
Πίεση Εισόδου Συμπιεστή	[Kpa]	99,37	99,37	0,00
Λόγος Πίεσης Συμπιεστή	[-]	14,14	14,13	-0,07
Αποδοτικότητα Συμπιεστή	[-]	0,89	0,89	0,00
Θερμοκρασία Εξόδου Συμπιεστή	[K]	645,84	645,84	0,00
Θερμοκρασία Εξόδου Καυστήρα	[K]	1.771,59	1.771,59	0,00
Υπολογισμένος Ισεντροπικός Β.Α Στροβίλου	[-]	0,97	0,97	0,00
<b>Συμπυκνωτής</b>				
Υπολογισμένο Έργο	[KJ/Sec]	203.554	159.140	-21,82
Υπολογισμένη Αποδοτικότητα	[-]	0,90	0,90	0,00
Εξεργειακός Β.Α	[-]	0,54	0,54	0,00

Στην εικόνα 4.2 γίνεται σύγκριση του βαθμού απόδοσης του αεριοστρόβιλου μεταξύ της υπόθεσης όπου μειώνουμε την παροχή καυσίμου (μεταβάλλουμε την τιμή λ) και της πρώτης δοκιμής όπου αλλάζουμε την γωνία μεταβλητών πτερυγίων (διατηρούμε σταθερή την τιμή λ). Ο πίνακας παρατίθεται για να γίνει πιο κατανοητή σύγκριση του βαθμού απόδοσης που υπάρχει στους πίνακες 4.3 και 4.4. Από την εικόνα φαίνεται πως και στις δυο δοκιμές έχουμε μείωση του βαθμού απόδοσης αλλά στην υπόθεση όπου μειώνουμε το καύσιμο (μεταβάλλουμε την τιμή λ) έχουμε την μεγαλύτερη πτώση του βαθμού απόδοσης αεριοστρόβιλου.



Εικόνα 4.2 Διαφοροποίηση βαθμού απόδοσης αεριοστρόβιλου βάσει σεναρίων

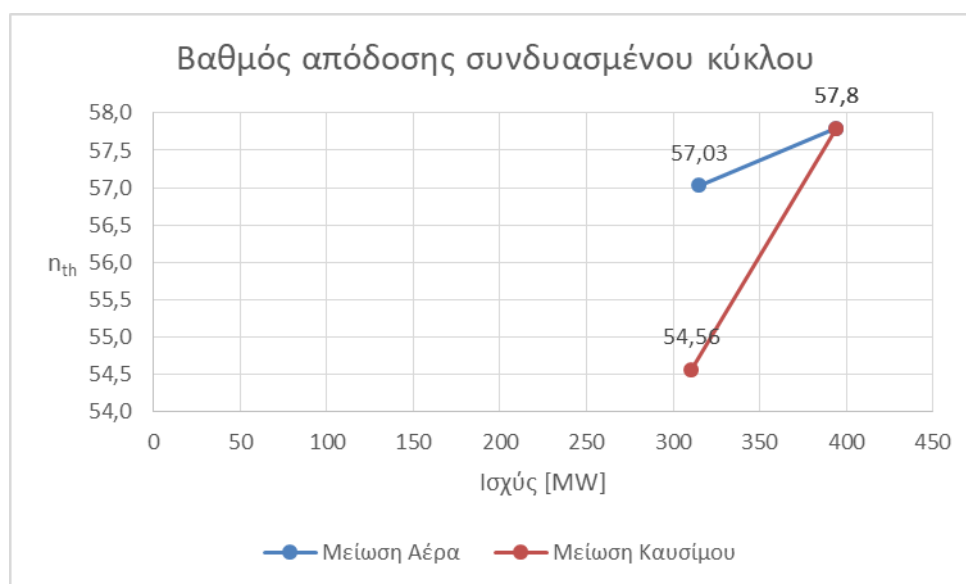
Στην εικόνα 4.3 φαίνεται η θερμοκρασία εισόδου των καυσαερίων στην είσοδο του στροβίλου. Στην εικόνα αυτή γίνεται σύγκριση μεταξύ της υπόθεσης όπου μειώνουμε τον αέρα στον συμπιεστή (αλλάζουμε την γωνία μεταβλητών πτερυγίων διατηρώντας σταθερό λ) και της δεύτερης υπόθεσης όπου μειώνουμε το καύσιμο (μεταβάλλουμε την τιμή λ). Παραθέτουμε το διάγραμμα για να γίνει κατανοήσουμε καλύτερα την διαφορά της συγκεκριμένης τιμής που εμφανίζεται στους πίνακες 4.3 και 4.4. Η θερμοκρασία εισόδου του στροβίλου είναι πολύ σημαντική καθώς έχει αντίκτυπο και στο κύκλωμα νερού ατμού. Όπως και στην εικόνα 4.2 με την επιλογή να μεταβάλλουμε την τιμή λ παρατηρείται η μεγαλύτερη μείωση της συγκεκριμένης θερμοκρασίας.



Εικόνα 4.3 Διαφοροποίηση μέγιστης θερμοκρασίας εισόδου στροβίλου βάσει σεναρίων



Στην εικόνα 4.4 παρουσιάζεται ο βαθμός απόδοσης του συνδυασμένου κύκλου. Στην συγκεκριμένη εικόνα γίνεται σύγκριση των βαθμών απόδοσης συνδυασμένου κύκλου που εμφανίζονται στους πίνακες 4.3 και 4.4 για τις δύο υποθέσεις που αναφέραμε και στις εικόνες 4.2 και 4.3. Όπως ήταν αναμενόμενο από τα στοιχεία που αντλήσαμε από τις δύο προηγούμενες εικόνες ο βαθμός απόδοσης του συνδυασμένου κύκλου επηρεάζεται περισσότερο ( μειώνεται) από την μεταβολή της τιμής  $\lambda$  του αεριοστρόβιλου.



Εικόνα 4.4 Διαφοροποίηση βαθμού απόδοσης συνδυασμένου κύκλου βάσει σεναρίων

#### Μείωση της παροχής καυσίμου (Μεταβολή του $\lambda$ )

Στον πίνακα 4.4 παρατηρούμε τις διαφορές που προκύπτουν από την μείωση του φορτίου του αεριοστρόβιλου στο 80% (221 MW) μέσω μείωσης της παροχής καυσίμου και διατηρώντας σταθερή την παροχή του αέρα στον χώρο καύσης (μεταβολή της τιμής  $\lambda$ ). Ο πίνακας αναφέρεται σε χαρακτηριστικές τιμές της μονάδας, του αεριοστρόβιλου και του συμπυκνωτή. Παρατηρούμε πως ο βαθμός απόδοσης του συνδυασμένου κύκλου μειώνεται αισθητά κατά 5.61% ενώ από την θερμοκρασία θυσάνου αντιλαμβανόμαστε ότι επηρεάζεται και ο κύκλος νερού-ατμού καθώς υπάρχει διαφορά στην θερμοκρασία εξόδου της καμινάδας της τάξης του 3.47%. Ο ρυθμός ροής θερμότητας αυξάνεται κατά 4.34% που σημαίνει ότι απαιτείται περισσότερο καύσιμο για την παραγωγή της αντίστοιχης ηλεκτρικής ενέργειας. Στον χώρο του στροβίλου παρατηρούμε μεγάλη μείωση της μέγιστης θερμοκρασίας εισόδου (TET) που επηρεάζει τον βαθμό απόδοσης του αεριοστρόβιλου κατά 3.94% και την λειτουργία του κυκλώματος νερού-ατμού.

Πίνακας 4.4 Συγκριτικός πίνακας ονομαστικών τιμών συνδυασμένου κύκλου και μερικού φορτίου με μείωση της παροχής καυσίμου

Συνδιασμένος Κύκλος	Μονάδες	Ονομαστικές Τιμές	Μερικό φορτίο 80% [Μείωση Καυσίμου]	Ποσοστιαία Διαφορά %
Ισχύς	[KW]	394,08	310,36	-21,24
Αποδοτικότητα	[-]	57,80	54,56	-5,61
Θερμοκρασία Θυσάνου	[K]	351,8	364,01	3,47
<b>Αεριοστρόβιλος</b>				
Καθαρή Ηλεκτρική Ισχύς	[KW]	276.545	221.021,1	-20,08
Ισχύς Ρότοτρα	[KW]	298.474,4	242.105,4	-18,89
Ίδιο Καταναλώσεις	[KW]	17.452,8	17.452,8	0,00
Heat Rate	[KJ/KW-s]	2,46	2,57	4,34
Αποδοτικότητα	[-]	0,41	0,39	-3,94
Πίεση Εισόδου Συμπιεστή	[Kpa]	99,37	99,37	0,00
Λόγος Πίεσης Συμπιεστή	[-]	14,14	14,19	0,35
Αποδοτικότητα Συμπιεστή	[-]	0,89	0,89	-0,03
Θερμοκρασία Εξόδου Συμπιεστή	[K]	646,16	646,81	0,10
Θερμοκρασία Εξόδου Καυστήρα	[K]	1.771,59	1.601,71	-9,59
Υπολογισμένος Ισεντροπικός Β.Α Στροβίλου	[-]	0,97	0,97	0,00
<b>Συμπυκνωτής</b>				
Υπολογισμένο Έργο	[KJ/Sec]	203.554	167.189	-17,86
Υπολογισμένη Αποδοτικότητα	[-]	0,90	0,90	0,00
Εξεργειακός Β.Α	[-]	0,54	0,54	0,00

Στους πίνακες 4.5, 4.6 και 4.7 παρουσιάζονται οι διαφορές που εμφανίζονται στην συσκευή του αεριοστρόβιλου σε πλήρες και μερικό φορτίο με ρύθμιση της παροχής αέρα (ρύθμιση μεταβλητών πτερυγίων IGV με διατήρηση της τιμής λ) και ρύθμιση της παροχής καυσίμου (μεταβολή της τιμής λ). Με την ρύθμιση των πτερυγίων επιτυγχάνεται μια μείωση της κατανάλωσης καυσίμου ενώ του αέρα εισόδου στο συμπιεστή κατά 18% και κατ' επέκταση στην παροχή των καυσαερίων. Βασικό αποτέλεσμα της αλλαγής των μεταβλητών πτερυγίων είναι πως διατηρείται η θερμοκρασία των καυσαερίων προς τον λέβητα ανάκτησης θερμότητας HRSG. Στο σενάριο όπου μειώνουμε την παροχή καυσίμου με παράλληλη διατήρηση της παροχής αέρα σε σταθερή τιμή (μεταβολή λ) παρατηρούμε μικρότερη μείωση στο καύσιμο, μια μικρή μείωση της παροχής καυσαερίων και μικρότερη θερμοκρασία καυσαερίων που θα χρησιμοποιηθεί για την θέρμανση του τροφοδοτικού νερού. Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε ότι με την διατήρηση της τιμής λ επιτυγχάνουμε μεγαλύτερη οικονομία στο καύσιμο καθώς και υψηλότερο βαθμό απόδοσης. Σε πραγματική εφαρμογή η μείωση της ισχύος σε μια μονάδα γίνεται με συνδυασμό των δυο μεθόδων.

Στον πίνακα 4.5 παρατηρούμε κάποια βασικά χαρακτηριστικά του αεριοστρόβιλου σε ονομαστικό φορτίο. Παραθέτουμε τον πίνακα για να εστιάσουμε κυρίως στην κατανάλωση καυσίμου, την παροχή μάζας αέρα και καυσαερίων. Αυτά τα στοιχεία θα μας βοηθήσουν να έχουμε μια σαφή εικόνα για την συμπεριφορά της παροχής καυσίμου στον αεριοστρόβιλο καθώς και για τα χαρακτηριστικά που θα μεταβάλουν τις τιμές του κύκλου νερού ατμού.

Πίνακας 4.5 Χαρακτηριστικά στοιχεία αεριοστρόβιλου σε ονομαστικό φορτίο

Ονομαστικές Τιμές				
GT Table	Πίεση [kPa]	Θερμοκρασία [K]	Παροχή Μάζας [kg/s]	Ενθαλπία [kJ/kg]
Αέρας εισόδου	100	288	641,82	-0,71
Καύσιμο	3.200	460	14,37	396,91
Ψεκασμός νερού	3.200	288	0,00	65,37
Καυσαέριο	102,49	900,05	656,19	677,49

Ο πίνακας 4.6 περιλαμβάνει τα χαρακτηριστικά του αεριοστρόβιλου για την υπόθεση όπου μεταβάλλουμε την γωνία μεταβλητών πτερυγίων (σταθερή τιμή λ). Παρατηρούμε μια λογική μείωση της παροχής καυσίμου καθώς και του αέρα εισόδου. Ως αποτέλεσμα παρατηρούμε μειωμένη παροχή καυσαερίων προς τον λέβητα ανάκτησης θερμότητας αλλά έχουμε διατήρηση της θερμοκρασίας εξόδου των καυσαερίων το οποίο είναι θετικό για τον κύκλο νερού ατμού.

Πίνακας 4.6 Χαρακτηριστικά στοιχεία αεριοστρόβιλου σε μερικό φορτίο με ρύθμιση των μεταβλητών στοιχείων IGV

Μερικό φορτίο 80% [Μείωση Αέρα]				
GT Table	Πίεση [kPa]	Θερμοκρασία [K]	Παροχή Μάζας [kg/s]	Ενθαλπία [kJ/kg]
Αέρας εισόδου	100	288	519,87	-0,71
Καύσιμο	3.200	460	11,64	396,91
Ψεκασμός νερού	3.200	288	0,00	65,37
Καυσαέριο	102,49	900	531,5	677,43

Ο πίνακας 4.7 παραθέτει παρομοίως τα χαρακτηριστικά του αεριοστρόβιλου για την υπόθεση ότι μειώνουμε την παροχή καυσίμου (μεταβάλλουμε την τιμή λ διατηρώντας σταθερή την παροχή αέρα). Εδώ φαίνεται πως η κατανάλωσή καυσίμου είναι υψηλότερη συγκριτικά με το προηγούμενο σενάριο καθιστώντας το λιγότερο αποδοτικό. Αντιθέτως έχουμε μεγαλύτερη παροχή καυσαερίων αλλά με μικρότερη ενθαλπία.

Πίνακας 4.7 Χαρακτηριστικά στοιχεία αεριοστρόβιλου σε μερικό φορτίο με μείωση της κατανάλωσης καυσίμου

<b>Μερικό φορτίο 80% [Μείωση Καυσίμου]</b>				
<b>GT Table</b>	Πίεση [kPa]	Θερμοκρασία [K]	Παροχή Μάζας [kg/s]	Ενθαλπία [kJ/kg]
Αέρας εισόδου	100	288	641,82	-0,71
Καύσιμο	3.200	460	12	396,91
Ψεκάσμος νερού	3.200	288	0,00	65,37
Καυσαέριο	102,48	810,59	653,81	568,44

Στον πίνακα 4.8 παρουσιάζονται οι επιπτώσεις στον στρόβιλο ατμού λόγω της μείωσης του ονομαστικού φορτίου του αεριοστρόβιλου που επιτεύχθηκε με ρύθμιση του αέρα του συμπιεστή (ρύθμιση των μεταβλητών πτερυγίων IGV διατηρώντας σταθερό το λ). Από τα αποτελέσματα προκύπτει μια μείωση 18,46-22,62% στην ισχύ της κάθε βαθμίδας στροβίλου. Στον στρόβιλο υψηλής πίεσης έχουμε μια μικρότερη μείωση στην ισχύ και αυτό αποδίδεται στην υψηλή θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων από το αεριοστρόβιλο. Στην βαθμίδα μέσης πίεσης παρατηρείται η μεγαλύτερη μείωση της ισχύος και αυτό αποδίδεται στο γεγονός ότι μεγάλο μέρος της ενθαλπίας των καυσαερίων απορροφήθηκε από το κύκλωμα ατμού υψηλής πίεσης. Η βαθμίδα χαμηλής πίεσης έχει μια μείωση ισχύος 18,46% αλλά μια αύξηση της αποδοτικότητας του στροβίλου κατά 4,88%.

Πίνακας 4.8 Συγκριτικός πίνακας ονομαστικών τιμών στρόβιλου ατμού και μερικού φορτίου με ρύθμιση των μεταβλητών πτερυγίων IGV

Στρόβιλος Ατμού	Μονάδες	Ονομαστικές Τιμές	Μερικό φορτίο 80% [Μείωση Αέρα]	Ποσοστιαία Διαφορά %
<b>Στρόβιλος Ατμού Υ.Π</b>				
Ισχύς	[KW]	29.264,4	23.948,5	-18,16
Αποδοτικότητα	[-]	0,74	0,74	0,00
Εξεργειακός Β.Α	[-]	0,96	0,96	0,00
Παροχή Ατμού	[Kg/Sec]	85,27	69,78	-18,17
<b>Στρόβιλος Ατμού Μ.Π</b>				
Ισχύς	[KW]	39.341,62	30.345,3	-22,87
Αποδοτικότητα	[-]	0,81	0,81	0,00
Εξεργειακός Β.Α	[-]	0,95	0,95	0,00
Παροχή Ατμού	[Kg/Sec]	80,30	61,94	-22,86
<b>Στρόβιλος Ατμού Χ.Π</b>				
Ισχύς	[KW]	54.730,4	44.628,3	-18,46
Αποδοτικότητα	[-]	0,82	0,86	4,88
Εξεργειακός Β.Α	[-]	0,84	0,88	4,76
Παροχή Ατμού	[Kg/Sec]	89,37	69,15	-22,62
<b>Συνολικά Στοιχεία</b>				
Συνολική Ισχύς Ατμοστρόβιλου	[KW]	123.336,42	98.922,13	-19,79
Συνολική Παραγωγή Ατμού	[Kg/Sec]	109	90,1	-17,34

Στον πίνακα 4.9 παρουσιάζονται οι διαφορές στις συσκευές του στρόβιλου ατμού λόγω της μεταβολής του ονομαστικού φορτίου σε μερικό φορτίο μέσω ρύθμισης της παροχής καυσίμου του αεριοστρόβιλου (μεταβολή της τιμής λ). Σε αυτήν την μέθοδο παρατηρούμε μια αντίθετη συμπεριφορά της ισχύος των βαθμίδων καθώς εμφανίζεται μια μεγάλη μείωση ισχύος στον στρόβιλο υψηλής πίεσης και έπειτα μια σταδιακή μείωση σε μικρότερα ποσοστά. Αυτό είναι αποτέλεσμα της μικρότερης ΤΕΤ (θερμοκρασίας εισόδου στρόβιλου) διότι δεν υπάρχει το κατάλληλο θερμοκρασιακό προφίλ για να θερμάνει την απαιτούμενη παροχή ατμού προς υπερθέρμανση και εκτόνωση στον στρόβιλο. Γι' αυτό έχουμε αισθητή μείωση της παροχής ατμού προς την υψηλή και μέση πίεση. Βασικό στοιχείο και σε αυτό το σενάριο (μεταβολή του λ με διατήρηση της παροχής αέρα) είναι η αύξηση του βαθμού απόδοσης του στρόβιλου χαμηλής πίεσης κατά 4,88%. Η μείωση της συνολικής ισχύος των στρόβιλων έχει μια απόκλιση 0,05% μεταξύ των σεναρίων, με την ρύθμιση των μεταβλητών πτερυγίων να αποδίδει υψηλότερη ισχύ προς το σύστημα. Τέλος η απαιτούμενη παραγωγή ατμού είναι

μεγαλύτερη κατά 0,03% στο σενάριο όπου η μείωση του φορτίου γίνεται με ρύθμιση της παροχής καυσίμου.

Πίνακας 4.9 Συγκριτικός πίνακας ονομαστικών τιμών στρόβιλου ατμού και μερικού φορτίου με μείωση της κατανάλωσης καυσίμου

Στρόβιλος Ατμού	Μονάδες	Ονομαστικές Τιμές	Μερικό Φορτίο 80% [Μείωση Καυσίμου]	Ποσοστιαία Διαφορά %
<b>Στρόβιλος Ατμού Υ.Π</b>				
Ισχύς	[KW]	29.264,4	20.351,6	-30,46
Αποδοτικότητα	[-]	0,74	0,74	0,00
Εξεργειακός Β.Α	[-]	0,96	0,96	0,00
Παροχή Ατμού	[Kg/Sec]	85,27	60,9	-28,64
<b>Στρόβιλος Ατμού Μ.Π</b>				
Ισχύς	[KW]	39.341,62	28.390,49	-27,84
Αποδοτικότητα	[-]	0,81	0,81	0,00
Εξεργειακός Β.Α	[-]	0,95	0,95	0,00
Παροχή Ατμού	[Kg/Sec]	80,3	60,3	-24,94
<b>Στρόβιλος Ατμού Χ.Π</b>				
Ισχύς	[KW]	54.730,4	45.020	-17,74
Αποδοτικότητα	[-]	0,82	0,86	4,88
Εξεργειακός Β.Α	[-]	0,84	0,88	4,76
Παροχή Ατμού	[Kg/Sec]	89,37	71,88	-19,57
<b>Συνολικά Στοιχεία</b>				
Συνολική Ισχύς Ατμοστρόβιλου	[KW]	123.336,42	93.762,18	-23,98
Συνολική Παραγωγή Ατμού	[Kg/Sec]	109	93	-14,90

Στον πίνακα 4.10 παρατηρούμε χαρακτηριστικά του στρόβιλου ατμού σε ονομαστικό φορτίο. Ο συγκεκριμένος πίνακας μας παρέχει συγκεντρωτικά βασικές τιμές όπως η παροχή ατμού σε κάθε βαθμίδα, η θερμοκρασία εισόδου και εξόδου από την συσκευή, η πίεση εισόδου και εξόδου αλλά και η ενθαλπία που έχει στα άκρα.

Πίνακας 4.10 Χαρακτηριστικές τιμές στρόβιλου ατμού σε ονομαστικό φορτίο

ST Table	Ονομαστικές Τιμές						
	Θερμοκρασία Εισόδου [K]	Θερμοκρασία Εξόδου [K]	Πίεση Εισόδου [KPa]	Πίεση Εξόδου [KPa]	Παροχή Μάζας [kg/s]	Ενθαλπία Εισόδου [KJ/Kg]	Ενθαλπία Εξόδου [KJ/Kg]
Στρόβιλος Υ.Π	813	620,88	10.000	2.100	85,27	3.474	3.132
Στρόβιλος Μ.Π	813	570,74	1.950	260	80,30	3.556	3.066
Στρόβιλος Χ.Π	566,41	299,35	260	3,4	89,29	3.057	2.444

Ο πίνακας 4.11 μας παρέχει στοιχεία για τα χαρακτηριστικά του στροβίλου ατμού για το σενάριο όπου μειώνουμε τον αέρα συμπιεστή (διατηρούμε την τιμή λ μεταβάλλοντας την γωνία μεταβλητών πτερυγίων). Σε αυτόν τον πίνακα παρατηρούμε πως οι τιμές θερμοκρασίας, πίεσης και ενθαλπίας παραμένουν σταθερές αλλά έχουμε μια μεταβολή στην παροχή μάζας ατμού των στροβίλων που θα έχει επίπτωση στην ισχύ τους.

Πίνακας 4.11 Χαρακτηριστικές τιμές στροβίλου ατμού σε μερικό φορτίο με ρύθμιση των μεταβλητών πτερυγίων IGV

ST Table	Μερικό φορτίο 80% [Μείωση Αέρα]						Ενθαλπία Εισόδου [KJ/Kg]	Ενθαλπία Εξόδου [KJ/Kg]
	Θερμοκρασία Εισόδου [K]	Θερμοκρασία Εξόδου [K]	Πίεση Εισόδου [KPa]	Πίεση Εξόδου [KPa]	Παροχή Μάζας [kg/s]	Παροχή Μάζας [kg/s]		
Στρόβιλος Υ.Π	813	620,88	10.000	2.100	69,78	3.474	3.132	
Στρόβιλος Μ.Π	813	570,74	1.950	260	61,94	3.556	3.066	
Στρόβιλος Χ.Π	566,41	299,35	260	3,4	69,15	3.057	2.411	

Στον πίνακα 4.12 βλέπουμε τα χαρακτηριστικά των στροβίλων ατμού για την υπόθεση όπου μειώνεται η παροχή καυσίμου (μεταβάλλεται η τιμή λ διατηρώντας σταθερή την παροχή αέρα). Σε αυτόν τον πίνακα παρατηρούμε πως η θερμοκρασία εισόδου και εξόδου των στροβίλων μεταβάλλεται καθώς δεν υπάρχει το κατάλληλο θερμοκρασιακό προφίλ στα καυσαέρια για να θερμάνει τον ατμό στις επιθυμητές τιμές (πίνακας 4.10). Η τιμές της πίεσης διατηρούνται σταθερές καθώς όπως προ είπαμε καθορίζονται από τον χρήστη μέσω των αντλιών. Η παροχή ατμού επίσης μειώνεται οδηγώντας σε πτώση της ισχύος των βαθμίδων.

Πίνακας 4.12 Χαρακτηριστικές τιμές στροβίλου ατμού σε μερικό φορτίο με μείωση της παροχής καυσίμου

ST Table	Μερικό φορτίο 80% [Μείωση Καυσίμου]						Ενθαλπία Εισόδου [KJ/Kg]	Ενθαλπία Εξόδου [KJ/Kg]
	Θερμοκρασία Εισόδου [K]	Θερμοκρασία Εξόδου [K]	Πίεση Εισόδου [KPa]	Πίεση Εξόδου [KPa]	Παροχή Μάζας [kg/s]	Παροχή Μάζας [kg/s]		
Στρόβιλος Υ.Π	797,2	607,29	10.000	2.100	60,9	3.435	3.101	
Στρόβιλος Μ.Π	784,32	548,32	1.950	260	60,2	3.492	3.021	
Στρόβιλος Χ.Π	547,66	299,35	260	3,4	71,88	3.019	2.393	

### 4.3 Σύστημα Τηλεθέρμανσης με απομάστευση ατμού από τη μέση πίεση του στροβίλου (Σενάριο 2)

Στον συγκεντρωτικό πίνακα 4.13 παρατηρούμε τις διαφορές που προκύπτουν αν στο κύκλωμα του συνδυασμένου κύκλου προσθέσουμε μία απομάστευση ατμού από τον ατμοστρόβιλο για θέρμανση νερού και ένα εναλλακτικό σενάριο χρήσης λέβητα για την ίδια ακριβώς λειτουργία. Για την σύνταξη του σεναρίου πρέπει να σημειωθεί πως διατηρούνται σταθερά τα χαρακτηριστικά του αεριοστροβίλου (παροχή καυσίμου, αέρα, ισχύς) και αφήνουμε να μεταβληθεί ο βαθμός απόδοσης, η ισχύς του συνδυασμένου κύκλου καθώς και η ισχύς των στροβίλων ατμού. Παρουσιάζεται στις τρεις περιπτώσεις η κατανάλωση

καυσίμου, η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς των στροβίλων καθώς και η θερμική ισχύς των απομαστεύσεων του ατμού που προορίζεται για τον εναλλάκτη θερμότητας. Στο σενάριο με την απομάστευση ατμού παρατηρούμε μια αύξηση στην ισχύ του στροβίλου υψηλής πίεσης 0.10% αλλά μια λογική μείωση στην μεσαία βαθμίδα καθώς μέρος του ατμού δεν οδηγείται για εκτόνωση και παραγωγή μηχανικού έργου. Μεγάλη απώλεια ισχύος υπάρχει στην βαθμίδα της χαμηλής πίεσης καθώς μειώνεται κατά πολύ η παροχή ατμού. Επίσης υπάρχει μια σημαντική μείωση στην παραγωγή ατμού. Η κατανάλωση καυσίμου στον αεριοστρόβιλο παραμένει σταθερή για το σενάριο με την απομάστευση ατμού. Για το υποσενάριο όπου χρησιμοποιείται αυτόνομος λέβητας πρέπει να σημειωθεί πως διατηρούμε σταθερά τα χαρακτηριστικά του νερού στην είσοδο και έξοδο του λέβητα αφήνοντας να μεταβληθεί η κατανάλωση καυσίμου και ο βαθμός απόδοσης του. Εδώ η θέρμανση του νερού με την χρήση λέβητα έχει μια αξιοσημείωτη κατανάλωση καυσίμου της τάξης του 1,13 Kg/sec. Συνδυάζοντας τους πίνακες 4.13 και 4.14 παρατηρούμε πως τα 10MW που χάνει η μονάδα για την Τηλεθέρμανση θα μπορούσε να τα παράγει με 0,30 Kg/Sec επιπλέον καύσιμο στον αεριοστρόβιλο. Συγκρίνοντας αυτήν την κατανάλωση με την αντίστοιχη του λέβητα κρίνεται συμφέρουσα η χρήση απομάστευσης ατμού για το σύστημα Τηλεθέρμανσης.

Πίνακας 4.13 Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων

Συνδιασμένος Κύκλος	Μονάδες	Ονομαστικές Τιμές	Σενάριο Απομάστευσης Μέσης Πίεσης	Λέβητας	Ποσοστιαία Διαφορά %
Ισχύς	[MW]	394	384	47,5	2,54
Αποδοτικότητα	[-]	57,8	56,38	0,90	2,46
<b>Αεριοστρόβιλος</b>					
Καθαρή Ηλεκτρική Ισχύς	[KW]	276.544	276.544	-	-
Ισχύς Ρότοτρα	[KW]	298.474	298.474	-	-
Κατανάλωση καυσίμου	[Kg/sec]	14,36	14,36	1,13	-
<b>Ατμοστρόβιλος</b>					
Υψηλή Πίεση	[KW]	29.264	29.294	-	-0,10
Μέση Πίεση	[KW]	39.341	37.640	-	4,32
Απομάστευση 1	[KW]	-	25.685	-	-
Απομάστευση 2	[KW]	-	25.498	-	-
Χαμηλή Πίεση	[KW]	54.730	46.436	-	15,15
Παραγωγή Ατμού	[Kg/sec]	109,88	93,31	-	15,08
Μεταφορά ενέργειας	[Kj/sec]	-	42.806	42.781	-
<b>Απαεριωτής</b>					
Επιστροφή ατμού	[Kg/Sec]	20,33	16,2	-	20,31
Επιστροφή νερού	[Kg/Sec]	100,88	84,33	-	16,41



Στον πίνακα 4.14 γίνεται σύγκριση του συνδυασμένου κύκλου σε ονομαστικό φορτίο και του σεναρίου απομάστευσης ατμού από την μέση πίεση. Για την σύνταξη αυτού του σεναρίου πρέπει να σημειωθεί πως διατηρούμε σταθερή την τιμή της ισχύος του συνδυασμένου κύκλου και αφήνουμε να μεταβληθούν τα χαρακτηριστικά του αεριοστρόβιλου, ο βαθμός απόδοσης του συνδυασμένου κύκλου καθώς και η ισχύς των στροβίλων. Κάποια από τα χαρακτηριστικά που θέλουμε να ελέγξουμε είναι η μεταβολή της κατανάλωσης καυσίμου στον αεριοστρόβιλο και του βαθμού απόδοσης του συνδυασμένου κύκλου. Στα αποτελέσματα παρατηρούμε μια μείωση στην απόδοση του κύκλου κατά 1,99% ενώ υπάρχει μια λογική αύξηση της ισχύος του αεριοστρόβιλου λόγω της αυξημένης παροχής καυσίμου. Όπως και στο σενάριο απομάστευσης από τη μέση πίεση η ισχύς του στροβίλου υψηλής πίεσης αυξάνεται και αυτό γίνεται λόγω της μειωμένης παροχής του ατμού αναθέρμανσης με αποτέλεσμα να δέχεται ο ατμός υψηλής πίεσης μεγαλύτερο ποσό θερμότητας.

Πίνακας 4.14 Συγκριτικός πίνακας ονομαστικών τιμών και σεναρίου απομάστευσης ατμού από την μέση πίεση με διατήρηση της ισχύος του συνδυασμένου κύκλου

Συνδυασμένος Κύκλος	Μονάδες	Ονομαστικές Τιμές	Σενάριο Απομάστευσης Μέσης Πίεσης 2	Ποσοστιαία Διαφορά %
Ισχύς	[MW]	394	394	0,00
Αποδοτικότητα	[-]	57,8	56,65	1,99
<b>Αεριοστρόβιλος</b>				
Καθαρή Ηλεκτρική Ισχύς	[KW]	276.544	284.025	-2,71
Ισχύς Ρότοτρα	[KW]	298.474	306.069	-2,54
Κατανάλωση καυσίμου	[Kg/sec]	14,36	14,66	-2,09
<b>Ατμοστρόβιλος</b>				
Υψηλή Πίεση	[KW]	29.264	30.025	-2,60
Μέση Πίεση	[KW]	39.341	38.512	2,11
Απομάστευση 1	[KW]	-	25.685	-
Απομάστευση 2	[KW]	-	25.498	-
Χαμηλή Πίεση	[KW]	54.730	47.257	13,65
Παραγωγή Ατμού	[Kg/sec]	109,88	94,56	13,94
Μεταφορά ενέργειας	[Kj/sec]	-	42.806	-
<b>Απαεριωτής</b>				
Επιστροφή ατμού	[Kg/Sec]	20,33	20,8	-2,31
Επιστροφή νερού	[Kg/Sec]	100,88	85,77	14,98

Στον πίνακα 4.15 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του στροβίλου ατμού σε ονομαστικό φορτίο. Στόχος του πίνακα είναι να γίνει σύγκριση με τον πίνακα 4.16 για να κατανοήσουμε τις μεταβολές που έχουν οι υποθέσεις που κάναμε προηγουμένως στην συσκευή του στροβίλου.

Πίνακας 4.15 Χαρακτηριστικά στοιχεία στροβίλου ατμού σε ονομαστικό φορτίο

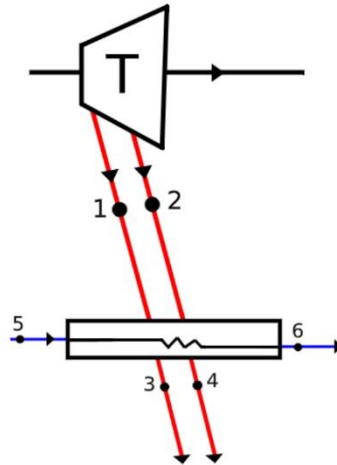
ST Table	Ονομαστικές Τιμές						
	Θερμοκρασία Εισόδου [K]	Θερμοκρασία Εξόδου [K]	Πίεση Εισόδου [KPa]	Πίεση Εξόδου [KPa]	Παροχή Μάζας [kg/s]	Ενθαλπία Εισόδου [KJ/Kg]	Ενθαλπία Εξόδου [KJ/Kg]
Στρόβιλος Υ.Π	813	620	10.000	2.100	85,27	3.474	3.131
Στρόβιλος Μ.Π	813	570	1.950	260	80,3	3.555	3.065
Στρόβιλος Χ.Π	566	299	260	3,4	89,2	3.056	2.444

Στον πίνακα 4.16 παρουσιάζονται τα στοιχεία των βαθμίδων του στροβίλου ατμού για το σενάριο όπου γίνεται χρήση απομάστευσης ατμού από τη μέση πίεση. Σε αυτόν τον πίνακα φαίνεται πως οι τιμές θερμοκρασίας και πίεσης παραμένουν αμετάβλητα. Αντιθέτως η παροχή ατμού της μέσης και χαμηλής βαθμίδας έχει μια διαφοροποίηση ως προς τις ονομαστικές τιμές του πίνακα 4.15. Στις στήλες της ενθαλπίας εισόδου και εξόδου φαίνεται μια μικρή μεταβολή στην ενθαλπία της χαμηλής πίεσης λόγω της απομάστευσης ατμού από την προηγούμενη βαθμίδα.

Πίνακας 4.16 Χαρακτηριστικά στοιχεία στροβίλου ατμού με απομάστευση από τη μέση πίεση

ST Table	Απομάστευση Μέσης Πίεσης						
	Θερμοκρασία Εισόδου [K]	Θερμοκρασία Εξόδου [K]	Πίεση Εισόδου [KPa]	Πίεση Εξόδου [KPa]	Παροχή Μάζας [kg/s]	Ενθαλπία Εισόδου [KJ/Kg]	Ενθαλπία Εξόδου [KJ/Kg]
Στρόβιλος Υ.Π	813	620	10.000	2.100	85,27	3.474	3.131
Στρόβιλος Μ.Π	813	570	1.950	260	79,95	3.555,5	3.065
Στρόβιλος Χ.Π	565	299	260	3,4	72,7	3.054	2.416

Στην εικόνα 4.5 απεικονίζεται η απομάστευση ατμού από τις δύο εξαγωγές της μέσης πίεσης του στροβίλου καθώς και ο εναλλάκτης θερμότητας. Σημαντικό στοιχείο που αξίζει να σημειωθεί είναι ότι απομαστεύεται ατμός από δύο εξαγωγές για να επιτύχουμε καλύτερη θερμοκρασιακή διαφορά εντός του εναλλάκτη. Η συσκευή εναλλαγής θερμότητας που χρησιμοποιείται αποτελείται από δύο εναλλάκτες για την μείωση της αναντιστρεπτότητας (μείωση της πεπερασμένης θερμοκρασιακής διαφοράς).



Εικόνα 4.5 Εναλλάκτης θερμότητας με απομάστεση ατμού

Ο πίνακας 4.17 μας επεξηγεί την κατάσταση των σημείων (θερμοκρασία, ενθαλπία) του εναλλάκτη θερμότητας που παρουσιάζεται στην εικόνα 4.5.

Πίνακας 4.17 Χαρακτηριστικές τιμές εναλλάκτη θερμότητας

Σημείο	Θερμοκρασία [K]	Ενθαλπία [Kj/Kg]
1	624	3.171
2	612	3.148
3	413	591,67
4	366	390,11
5	293	84,74
6	395	512,8

Ο πίνακας 4.18 μας δείχνει τα χαρακτηριστικά των απομαστεύσεων ατμού καθώς και του νερού τροφοδοσίας που θα οδηγηθεί για το σύστημα Τηλεθέρμανσης. Βασικές τιμές που παρατηρούμε σε αυτό το διάγραμμα είναι η παροχή ατμού που απομαστεύεται από την βαθμίδα του στροβίλου, η θερμοκρασία εισόδου και εξόδου από τον εναλλάκτη θερμότητας καθώς και οι αντίστοιχες ενθαλπίες. Στις δύο τελευταίες στήλες παρατηρούμε την ισχύ του ατμού που απομαστεύεται και την ισχύ του μετά την διεργασία μετάδοσης θερμότητας.

Τέλος, στην τρίτη γραμμή μπορούμε να δούμε την παροχή του νερού, την θερμοκρασία εισόδου και εξόδου καθώς και την ισχύ του πριν και μετά την διεργασία.

Πίνακας 4.18 Χαρακτηριστικά στοιχεία εναλλάκτη θερμότητας

Εναλλάκτης Θερμότητας	Παροχή Μάζας [kg/s]	Θερμοκρασία Εισόδου [K]	Θερμοκρασία Εξόδου [K]	Ενθαλπία Εισόδου [Kj/Kg]	Ενθαλπία Εξόδου [Kj/Kg]	Q <sub>in</sub> [KW]	Q <sub>out</sub> [KW]
1η Απομάστευση	8,1	624	413,7	3.171	591,6	25.685,1	4.792
2η Απομάστευση	8,1	612	366,2	3.148	390,1	25.498,8	3.159,8
Νερό	100	293	395	84,74	512,8	8.474	51.280

#### 4.4 Σύστημα Τηλεθέρμανσης με απομάστευση ατμού από τη χαμηλή πίεση του στρόβιλου (Σενάριο 3)

Στο παρών σενάριο μελετούμε τον συνδυασμένο κύκλο με απομάστευση ατμού από τον στρόβιλο χαμηλής πίεσης και τις επιπτώσεις που έχει στο κύκλωμα. Τα δεδομένα που επιλέγονται για να μείνουν σταθερά είναι τα χαρακτηριστικά του αεριοστρόβιλου (παροχή καυσίμου, παροχή αέρα, θερμοκρασία καυσαερίων) και οι τιμές εισόδου και εξόδου του νερού προς τον εναλλάκτη θερμότητας που θα χρησιμοποιηθεί για την Τηλεθέρμανση. Όλα τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά αφήνονται ελεύθερα να μεταβληθούν (ισχύς στρόβιλου, παροχή μάζας ατμού στρόβιλου). Στον πίνακα 4.19 παρατηρούμε διαφοροποίηση του βαθμού απόδοσης του συνδυασμένου κύκλου καθώς και της ισχύος του συγκριτικά με τις τιμές του ονομαστικού φορτίου. Συγκριτικά με το σενάριο 4.3 (πίνακας 4.13) μπορούμε να πούμε πως για το ίδιο ποσό ενέργειας που απομαστεύεται από τον στρόβιλο ατμού φαίνεται πως είναι προτιμότερο να επέμβουμε στην βαθμίδα χαμηλής πίεσης καθώς αποδίδει 2 MW υψηλότερη ισχύ προς το σύστημα και 0,5% μεγαλύτερη αποδοτικότητα. Στην συσκευή του αεριοστρόβιλου δεν υπάρχει καμία διαφοροποίηση διότι δεν έχει αλλάξει κάποιο δεδομένο που να επηρεάζει την λειτουργία του. Στην διάταξη του στρόβιλου ατμού βλέπουμε πως υπάρχει μια μικρή αύξηση στην ισχύ του στρόβιλου υψηλής πίεσης, μια μείωση 0,57% στην ισχύ της μέσης πίεσης και μια αξιοσημείωτη πτώση 14,7% στην χαμηλή πίεση που οφείλεται στην μειωμένη παροχή ατμού λόγω της απομάστευσης.

Πίνακας 4.19 Συγκριτικός πίνακας ονομαστικών τιμών και σεναρίου απομάστευσης ατμού από τη χαμηλή πίεση του στροβίλου

Συνδυασμένος Κύκλος	Μονάδες	Ονομαστικές Τιμές	Σενάριο Απομάστευσης Χαμηλής Πίεσης	Ποσοστιαία Διαφορά %
Ισχύς	[MW]	394	386	2,03
Αποδοτικότητα	[-]	57,8	56,63	2,02
<b>Αεριοστρόβιλος</b>				
Καθαρή Ηλεκτρική Ισχύς	[KW]	276.544	276.544	0,00
Ισχύς Ρότοτρα	[KW]	298.474	298.474	0,00
Κατανάλωση καυσίμου	[Kg/sec]	14,36	14,36	0,00
<b>Ατμοστρόβιλος</b>				
Υψηλή Πίεση	[KW]	29.264	29.296	-0,11
Μέση Πίεση	[KW]	39.341	39.118	0,57
Απομάστευση 1	[KW]	-	27.297	-
Απομάστευση 2	[KW]	-	24.008	-
Χαμηλή Πίεση	[KW]	54.730	46.686	14,70
Παραγωγή ατμού	[Kg/sec]	109,88	92,41	15,90
Μεταφορά ενέργειας	[Kj/sec]	-	42.806	-
<b>Απαεριωτής</b>				
Επιστροφή ατμού	[Kg/Sec]	20,33	20,87	-2,66
Επιστροφή νερού	[Kg/Sec]	100,88	83,42	17,31

Στον πίνακα 4.20 γίνεται σύγκριση των συστημάτων απομάστευσης ατμού από την μέση και χαμηλή πίεση. Παρατηρούμε πως στο σενάριο απομάστευσης ατμού από την χαμηλή πίεση υπάρχει μία αύξηση της ισχύος του συνδυασμένου κύκλου κατά 0,52% καθώς και 0,44% στην αποδοτικότητα. Επίσης φαίνεται πως σε κάθε βαθμίδα του στροβίλου η ισχύς που αποδίδεται στο σύστημα είναι μεγαλύτερη για το σενάριο απομάστευσης από τη χαμηλή πίεση. Αντιθέτως η ανάγκη για επιστροφή ατμού προς την συσκευή του απαεριωτή είναι μικρότερη στο σενάριο μέσης πίεσης κατά 28,33% λόγω της υψηλότερης ενθαλπίας του.

Πίνακας 4.20 Συγκριτικός πίνακας απομάστευσης ατμού από τις βαθμίδες μέσης και χαμηλής πίεσης του στροβίλου

Συνδυασμένος Κύκλος	Μονάδες	Σενάριο Απομάστευσης Μέσης Πίεσης	Σενάριο Απομάστευσης Χαμηλής Πίεσης	Ποσοστιαία Διαφορά %
Ισχύς	[MW]	384	386	-0,52
Αποδοτικότητα	[-]	56,38	56,63	-0,44
<b>Αεριοστρόβιλος</b>				
Καθαρή Ηλεκτρική Ισχύς	[KW]	276.544	276.544	0,00
Ισχύς Ρότοτρα	[KW]	298.474	298.474	0,00
Κατανάλωση καυσίμου	[Kg/sec]	14,36	14,36	0,00
<b>Ατμοστρόβιλος</b>				
Υψηλή Πίεση	[KW]	29.294	29.296	-0,01
Μέση Πίεση	[KW]	37.640	39.118	-3,93
Απομάστευση 1	[KW]	25.685	27.297	-6,28
Απομάστευση 2	[KW]	25.498	24.008	5,84
Χαμηλή Πίεση	[KW]	46.436	46.686	-0,54
Παραγωγή ατμού	[Kg/sec]	93,31	92,41	0,96
Μεταφορά ενέργειας	[Kj/sec]	42.806	42.806	0,00
<b>Απαερωτής</b>				
Επιστροφή ατμού	[Kg/Sec]	16,2	20,87	-28,83
Επιστροφή νερού	[Kg/Sec]	84,33	83,42	1,08

Στον πίνακα 4.21 συγκρίνονται οι ονομαστικές τιμές του συνδυασμένου κύκλου με το σενάριο απομάστευσης ατμού από την χαμηλή πίεση του στροβίλου διατηρώντας την ισχύ του συνδυασμένου κύκλου σταθερή. Η διατήρηση της ισχύος γίνεται για να παρατηρήσουμε την μεταβολή της κατανάλωσης καυσίμου καθώς και άλλες πιθανές μεταβολές στο κύκλωμα. Από τα αποτελέσματα φαίνεται μια μείωση στην απόδοση της μονάδας κατά 1,63% αλλά και μια αύξηση στην ισχύ του αεριοστρόβιλου. Αυτή η μεταβολή στην ισχύ του αεριοστρόβιλου αποδίδεται στην αύξηση της κατανάλωσης του καυσίμου κατά 1,73% για να διατηρηθεί η ισχύς του κύκλου. Αύξηση ισχύος παρατηρούμε στον στρόβιλο ατμού υψηλής και μέσης πίεσης αλλά μια λογική μείωση στην ισχύ της χαμηλής πίεσης. Η αύξηση της ισχύος στις βαθμίδες του στροβίλου δικαιολογούνται λόγω της αυξημένης παροχής των καυσαερίων στον εναλλάκτη θερμότητας (HRSG).

Πίνακας 4.21 Συγκριτικός πίνακας ονομαστικών τιμών και σεναρίου απομάστευσης ατμού από τη χαμηλή πίεση του στροβίλου με διατήρηση της ισχύος συνδυασμένου κύκλου

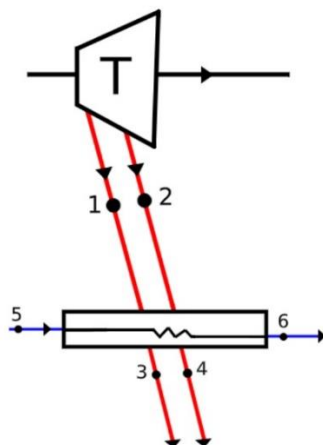
Συνδυασμένος Κύκλος	Μονάδες	Ονομαστικές Τιμές	Σενάριο Απομάστευσης Χαμηλής Πίεσης 2	Ποσοστιαία Διαφορά %
Ισχύς	[MW]	394	394	0,00
Αποδοτικότητα	[-]	57,8	56,86	1,63
<b>Αεριοστρόβιλος</b>				
Καθαρή Ηλεκτρική Ισχύς	[KW]	276.544	282.726	-2,24
Ισχύς Ρότοτρα	[KW]	298.474	304.750	-2,10
Κατανάλωση καυσίμου	[Kg/sec]	14,36	14,61	-1,73
<b>Ατμοστρόβιλος</b>				
Υψηλή Πίεση	[KW]	29.264	29.896	-2,16
Μέση Πίεση	[KW]	39.341	39.830	-1,24
Απομάστευση 1	[KW]	-	27.297	-
Απομάστευση 2	[KW]	-	24.008	-
Χαμηλή Πίεση	[KW]	54.730	47.357	13,47
Παραγωγή ατμού	[Kg/sec]	109,88	93,43	14,97
Μεταφορά ενέργειας	[Kj/sec]	-	42.806	-
<b>Απαεριοτής</b>				
Επιστροφή ατμού	[Kg/Sec]	20,33	20,91	-2,85
Επιστροφή νερού	[Kg/Sec]	100,88	84,59	16,15

Στον πίνακα 4.22 φαίνονται τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των στροβίλων ατμού στο σενάριο όπου υπάρχει απομάστευση ατμού από την χαμηλή πίεση του στροβίλου και έχουν ως στόχο να παρουσιάσουν την κατάσταση που υπάρχει στον στρόβιλο ατμού. Παρατηρούμε πως οι τιμές θερμοκρασίας, πίεσης και ενθαλπίας δεν μεταβάλλονται συγκριτικά με τον πίνακα 4.15 (ονομαστικές τιμές στροβίλων ατμού). Ένα σημαντικό στοιχείο που παρουσιάζεται είναι η διαφορά της παροχής ατμού στα στις βαθμίδες του στροβίλου.

Πίνακας 4.22 Χαρακτηριστικές τιμές στροβίλου ατμού για το σενάριο απομάστευσης ατμού από τη χαμηλή πίεση

ST Table	Απομάστευση Χαμηλής Πίεσης						
	Θερμοκρασία Εισόδου [K]	Θερμοκρασία Εξόδου [K]	Πίεση Εισόδου [KPa]	Πίεση Εξόδου [KPa]	Παροχή Μάζας [kg/s]	Ενθαλπία Εισόδου [KJ/Kg]	Ενθαλπία Εξόδου [KJ/Kg]
Στρόβιλος Υ.Π	813	620	10.000	2.100	85,36	3.474	3.131
Στρόβιλος Μ.Π	813	570	1.950	260	79,84	3.555	3.065
Στρόβιλος Χ.Π	566,38	299	260	3,4	88,38	3.056	2.416

Στην εικόνα 4.6 παρατηρούμε το σχήμα του εναλλάκτη θερμότητας που χρησιμοποιείται για την θέρμανση του νερού τροφοδοσίας προς το σύστημα Τηλεθέρμανσης. Τα σημεία που υπάρχουν επάνω στην εικόνα εξηγούνται από τον πίνακα 4.23.



Εικόνα 4.6 Εναλλάκτης θερμότητας με απομάστευση ατμού

Ο πίνακας 4.23 λειτουργεί επεξηγηματικά για την εικόνα 4.6 και τα χαρακτηριστικά που διέπουν τον εναλλάκτη θερμότητας (θερμοκρασία, ενθαλπία).

Πίνακας 4.23 Επεξήγηση χαρακτηριστικών τιμών εναλλάκτη θερμότητας απομάστευσης από τη χαμηλή πίεση του στρόβιλου

Σενάριο Απομάστευσης Χαμηλής Πίεσης		
Σημείο	Θερμοκρασία [K]	Ενθαλπία [Kj/Kg]
1	554	3.033
2	538	3.001
3	397	565
4	362	375
5	293	84,74
6	395	512,8

Στον πίνακα 4.24 παρουσιάζονται τα στοιχεία των απομαστεύσεων ατμού καθώς και του νερού τροφοδοσίας για το σενάριο απομάστευσης από την χαμηλή πίεση. Η γραμμή η οποία αναφέρεται στο νερό παραμένει σταθερή με το σενάριο 4.3 (πίνακας 4.18) για την καλύτερη σύγκριση των αποτελεσμάτων. Βασικό στοιχείο είναι πως έχουμε διαφορετική παροχή απομαστευμένου ατμού συγκριτικά με το προηγούμενο σενάριο και αυτό οφείλεται στην διαφορά ενθαλπίας των απομαστεύσεων. Επίσης μπορούμε να δούμε την θερμοκρασία στην οποία επιλέγεται να εξάγουμε τον ατμό από τον στρόβιλο καθώς και την θερμοκρασία του.



Οι δύο τελευταίες στήλες αναφέρονται στο ενεργειακό περιεχόμενο του ατμού και ισούνται με το γινόμενο της μάζας του ατμού- νερού και της ενθαλπίας στο συγκεκριμένο σημείο.

Πίνακας 4.24 Χαρακτηριστικές τιμές εναλλάκτη θερμότητας με απομάστευση από τη χαμηλή πίεση του στροβίλου

Σενάριο Απομάστευσης Χαμηλής Πίεσης							
Εναλλάκτης Θερμότητας	Παροχή Μάζας [kg/s]	Θερμοκρασία Εισόδου [K]	Θερμοκρασία Εξόδου [K]	Ενθαλπία Εισόδου [Kj/Kg]	Ενθαλπία Εξόδου [Kj/Kg]	Q <sub>in</sub> [KW]	Q <sub>out</sub> [KW]
1η Απομάστευση	9	554	397	3.033	565,78	27.297	5.092
2η Απομάστευση	8	538	362	3.001	375,22	24.008	3.002
Νερό	100	293	395	84,74	512,8	8.474	51.280

#### 4.5 Λειτουργία Συνδυασμένου κύκλου με δύο αεριοστροβίλους σε μερικό φορτίο (Σενάριο 4)

Στον πίνακα 4.25 γίνεται σύγκριση του συνδυασμένου κύκλου με δύο αεριοστροβίλους σε πλήρες φορτίο και του ίδιου κύκλου με δύο αεριοστροβίλους σε μερικό φορτίο. Οι τιμές που παραμένουν σταθερές για το συγκεκριμένο σενάριο φαίνονται στον πίνακα 3.1. Η μείωση του φορτίου επιτυγχάνεται μέσω ρύθμισης των μεταβλητών πτερυγίων IGV στις 48° (Inlet Guide Vanes) στραγγαλίζοντας την παροχή αέρα στην είσοδο των συμπιεστών με παράλληλη μείωση της παροχής καυσίμου (διατηρείται σταθερή η τιμή λ). Από τα αποτελέσματα φαίνεται πως με την μείωση του φορτίου έχουμε μια αξιοσημείωτη πτώση στον βαθμό απόδοσης του συνδυασμένου κύκλου κατά 3,55% καθώς και στον βαθμό απόδοσης του αεριοστροβίλου της τάξης του 5,82%. Βάσει του ζητούμενου που θέσαμε στο σενάριο, η ισχύς του συνδυασμένου κύκλου μειώνεται στο μισό της ονομαστικής, ενώ δεν ισχύει το ίδιο για την κατανάλωση του καυσίμου που φαίνεται να μην μειώνεται κατά το ήμισυ. Λόγω της αυξημένης παροχής καυσίμου, έχουμε μια λογική αύξηση και στην παροχή καυσαερίων που αναμένουμε να επηρεάσει τον κύκλο νερού-ατμού.

Πίνακας 4.25 Συγκριτικός πίνακας συνδυασμένου κύκλου με δύο αεριοστρόβιλους σε πλήρες και μερικό φορτίο

Συνδυασμένος Κύκλος	Μονάδες	2 Αεριοστρόβιλοι	2 Αεριοστρόβιλοι (Μερικό Φορτίο)	Ποσοστιαία Διαφορά %
Ισχύς	[MW]	784,15	393,23	49,85
Αποδοτικότητα	[-]	57,50	55,46	3,55
Θερμοκρασία Θυσάνου	[K]	354,3	351,86	0,69
<b>Αεριοστρόβιλος</b>				
Καθαρή Ηλεκτρική Ισχύς	[KW]	553.089	270.852	51,03
Κατανάλωση καυσίμου	[Kg/Sec]	28,72	14,94	47,98
Παροχή αέρα	[Kg/Sec]	1.284	668	47,96
Αποδοτικότητα	[-]	0,41	0,38	5,82
<b>Αναμείκτης</b>				
Παροχή καυσαερίων	[Kg/Sec]	1.312	682,44	48,00
Θερμοκρασία καυσαερίων	[K]	900,05	900	0,01
Ενθαλπία καυσαερίων	[KJ/Kg]	677,51	677,47	0,01

Στον πίνακα 4.26 παρουσιάζονται οι τιμές του συνδυασμένου κύκλου με έναν αεριοστρόβιλο σε πλήρες φορτίο και γίνεται σύγκριση με έναν κύκλο δύο αεριοστρόβιλων σε μερικό φορτίο. Από τον συγκεκριμένο πίνακα αντλούμε σημαντικά δεδομένα όπως για παράδειγμα ότι για την ίδια ισχύ του συνδυασμένου κύκλου ο βαθμός απόδοσης στο σενάριο με την χρήση δύο αεριοστρόβιλων μειώνεται κατά 4,05% ενώ ο βαθμός απόδοσης του αεριοστρόβιλου κατά 5,82%. Η κατανάλωση του καυσίμου είναι αυξημένη κατά 4,04% συγκριτικά με την χρήση ενός αεριοστρόβιλου για την επίτευξη της ίδιας ισχύος.

Πίνακας 4.26 Συγκριτικός πίνακας συνδυασμένου κύκλου με έναν αεριοστρόβιλο σε πλήρες φορτίο και δύο αεριοστρόβιλων σε μερικό φορτίο

Συνδυασμένος Κύκλος	Μονάδες	Ονομαστικές Τιμές	2 Αεριοστρόβιλοι (Μερικό Φορτίο)	Ποσοστιαία Διαφορά %
Ισχύς	[MW]	394,08	393,23	0,22
Αποδοτικότητα	[-]	57,8	55,46	4,05
Θερμοκρασία Θυσάνου	[K]	351,8	351,86	-0,02
<b>Αεριοστρόβιλος</b>				
Καθαρή Ηλεκτρική Ισχύς	[KW]	276.545	270.852	2,06
Κατανάλωση καυσίμου	[Kg/Sec]	14,36	14,94	-4,04
Παροχή αέρα	[Kg/Sec]	641,82	668	-4,08
Αποδοτικότητα	[-]	0,41	0,38	5,82

Στους πίνακες 4.27, 4.28 και 4.29 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές τιμές λειτουργίας των αεριοστρόβιλων (παροχή αέρα εισόδου, καυσίμου, καυσαερίου). Οι τιμές που διαφοροποιούνται και αξίζει να σχολιαστούν είναι η παροχή του αέρα προς τον συμπιεστή, η κατανάλωση καυσίμου και η παροχή των καυσαερίων προς τον εναλλάκτη θερμότητας

(HRSG). Οι τιμές της πίεσης και της θερμοκρασίας δεν αλλάζουν καθώς έχει γίνει ρύθμιση βάσει των προδιαγραφών λειτουργίας του αεριοστρόβιλου.

Πίνακας 4.27 Χαρακτηριστικές τιμές συνδυασμένου κύκλου με έναν αεριοστρόβιλο σε πλήρες φορτίο

<b>Ονομαστικές Τιμές</b>				
<b>GT Table</b>	Πίεση [kPa]	Θερμοκρασία [K]	Παροχή Μάζας [kg/s]	Ενθαλπία [kJ/kg]
Αέρας εισόδου	100	288	641,82	-0,71
Καύσιμο	3.200	460	14,37	396,91
Καυσαέριο	102	900	656,19	677,5

Ο πίνακας 4.28 μας παρέχει στοιχεία των αεριοστρόβιλων για το σενάριο όπου λειτουργούν δύο αεριοστρόβιλοι παράλληλα σε πλήρες φορτίο. Σε αυτό το σενάριο έχουμε τα ίδια δεδομένα με τον πίνακα 4.27 με την διαφορά πως η παροχή μάζας καυσαερίων αναφέρεται αθροιστικά για τις δυο συσκευές.

Πίνακας 4.28 Χαρακτηριστικές τιμές συνδυασμένου κύκλου με δύο αεριοστρόβιλους σε πλήρες φορτίο

<b>2 Αεριοστρόβιλοι</b>				
<b>GT Table</b>	Πίεση [kPa]	Θερμοκρασία [K]	Παροχή Μάζας [kg/s]	Ενθαλπία [kJ/kg]
Αέρας εισόδου	100	288	1.283,64	-0,71
Καύσιμο	3.200	460	28,74	396,91
Καυσαέριο	102	900	1.312,39	677,5

Ο πίνακας 4.29 μας παρέχει στοιχεία των αεριοστρόβιλων για το σενάριο όπου χρησιμοποιούνται δύο αεριοστρόβιλοι σε μερικό φορτίο. Για την επίτευξη του φορτίου διατηρούμε σταθερή την τιμή λ ρυθμίζοντας παράλληλα την παροχή του αέρα στον συμπιεστή. Αυτή η ρύθμιση γίνεται μέσω την κλίσης των μεταβλητών πτερυγίων IGV. Σταθερή παραμένει επίσης και η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων από τον αεριοστρόβιλο. Τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του στρόβιλου είναι ελεύθερα να μεταβληθούν (παροχή καυσίμου, παροχή καυσαερίων).

Πίνακας 4.29 Χαρακτηριστικές τιμές συνδυασμένου κύκλου με δύο αεριοστρόβιλους σε μερικό φορτίο

<b>2 Αεριοστρόβιλοι (Μερικό Φορτίο)</b>				
<b>GT Table</b>	Πίεση [kPa]	Θερμοκρασία [K]	Παροχή Μάζας [kg/s]	Ενθαλπία [kJ/kg]
Αέρας εισόδου	100	288	668	-0,71
Καύσιμο	3.200	460	14,94	396,91
Καυσαέριο	102	900	682,44	677,4

Στον πίνακα 4.30 γίνεται σύγκριση των επιπτώσεων λειτουργίας των βοηθητικών συσκευών στα σενάρια του συνδυασμένου κύκλου όπου γίνεται χρήση δύο αεριοστρόβιλων σε πλήρες και μερικό φορτίο. Μειώνοντας την ισχύ του συνδυασμένου κύκλου στο ήμισυ, το έργο του συμπυκνωτή και η ισχύς των πύργων ψύξης μειώνεται κατά 54,08%. Αυτό συμβαίνει διότι η παροχή ατμού στην έξοδο του στροβίλου χαμηλής πίεσης για το σενάριο του μερικού φορτίου είναι 52,3% μικρότερη συγκριτικά με το σενάριο λειτουργίας δύο αεριοστρόβιλων σε πλήρες φορτίο με αποτέλεσμα ο συμπυκνωτής να καλείται να διαχειριστεί μικρότερο ποσό κορεσμένου ατμού. Το ίδιο συμπέρασμα αντλούμε και από τον πίνακα 4.31 με την διαφορά ότι εδώ έχουμε μια αύξηση στο σενάριο με την χρήση δύο αεριοστρόβιλων συγκριτικά με την λειτουργία του κύκλου ενός αεριοστρόβιλου λόγω της αυξημένης παροχής ατμού στο κύκλωμα και κατά συνέπεια της αυξημένης λειτουργίας του συμπυκνωτή. Είναι σημαντικό να σχολιάσουμε την λειτουργία των αντλιών όπου στον πίνακα 4.30 παρατηρούμε μία μείωση 47,03% στο υπολογισμένο έργο. Αυτή η τιμή μαρτυρά πως η αντλίες έχουν συγκεκριμένο σημείο σχεδιασμού και η μείωση του φορτίου μετά από αυτό το σημείο δεν μειώνει αναλογικά το έργο της αντλίας.

Πίνακας 4.30 Χαρακτηριστικές τιμές βοηθητικών συστημάτων συνδυασμένου κύκλου με δύο αεριοστρόβιλους σε πλήρες και μερικό φορτίο

Συνδυασμένος Κύκλος	Μονάδες	2 Αεριοστρόβιλοι	2 Αεριοστρόβιλοι (Μερικό Φορτίο)	Ποσοστιαία Διαφορά %
<b>Συμπυκνωτής</b>				
Υπολογισμένο Έργο	[KJ/Sec]	476.729,2	218.929,3	54,08
Υπολογισμένη Αποδοτικότητα	[-]	0,9	0,9	0,00
Εξεργειακός Β.Α	[-]	0,54	0,54	0,00
<b>Πύργος ψύξης</b>				
Συνολική ισχύς πύργων	[KW]	3.240,49	1.488,17	54,08
<b>Απαερωτής</b>				
Επιστροφή ατμού	[Kg/Sec]	21,22	20,37	4,01
Επιστροφή νερού	[Kg/Sec]	195,52	104,67	46,47
<b>Τροφοδοτικές αντλίες</b>				
Υπολογισμένο Έργο	[KW]	3.398,47	1.800,18	47,03
<b>Αφυπερθέρμανση</b>				
Παροχή νερού	[Kg/Sec]	4,1	2,25	45,12

Πίνακας 4.31 Χαρακτηριστικές τιμές βοηθητικών συστημάτων συνδυασμένου κύκλου με έναν αεριοστρόβιλο σε πλήρες φορτίο και δύο αεριοστρόβιλων σε μερικό φορτίο

Συνδυασμένος Κύκλος	Μονάδες	Ονομαστικές Τιμές	2 Αεριοστρόβιλοι (Μερικό Φορτίο)	Ποσοστιαία Διαφορά %
<b>Συμπυκνωτής</b>				
Υπολογισμένο Έργο	[KJ/Sec]	208.451,1	218.929,3	-5,03
Υπολογισμένη Αποδοτικότητα	[-]	0,9	0,9	0,00
Εξεργειακός Β.Α	[-]	0,54	0,54	-0,18
<b>Πύργος ψύξης</b>				
Συνολική ισχύς πύργων	[KW]	1.416,88	1.488,17	-5,03
<b>Απαερωτής</b>				
Επιστροφή ατμού	[Kg/Sec]	20,33	20,37	-0,20
Επιστροφή νερού	[Kg/Sec]	100,88	104,67	-3,76
<b>Τροφοδοτικές αντλίες</b>				
Υπολογισμένο Έργο	[KW]	1.732,00	1.800,18	-3,94
<b>Αφυπερθέρμανση</b>				
Παροχή νερού	[Kg/Sec]	2,18	2,25	-3,21

Στους πίνακες 4.32, 4.33 και 4.34 που έπονται απεικονίζεται η λειτουργία του εξατμιστή και οι διαφορές που προκύπτουν στις τιμές του λόγω των σεναρίων που υποθέσαμε. Από τα αποτελέσματα φαίνεται πως η πίεση, η θερμοκρασία και η ενθαλπία δεν μεταβάλλονται. Θα σταθούμε επίσης στις τιμές της παροχής ατμού που όπως φαίνεται έχουμε μια μικρή αύξηση στις τιμές του σεναρίου όπου γίνεται χρήση δύο αεριοστρόβιλων σε μερικό φορτίο συγκριτικά με το σενάριο που χρησιμοποιείται ένας αεριοστρόβιλος. Αυτή η μεταβολή στην παροχή ατμού οφείλεται στην αυξημένη παροχή των καυσαερίων και αναμένουμε μια αναλογική αύξηση και στην παραγόμενη ισχύ του στρόβιλου ατμού.

Πίνακας 4.32 Χαρακτηριστικές τιμές εξατμιστή με έναν αεριοστρόβιλο σε πλήρες φορτίο

Εξατμιστής	Ονομαστικές Τιμές				
	Θερμοκρασία [K]	Πίεση [kPa]	Παροχή Μάζας [kg/s]	Ενθαλπία Εισόδου [KJ/Kg]	Ενθαλπία Εξόδου [KJ/Kg]
Εξατμιστής Υ.Π	596,5	11.800	83,5	1484	2.693
Εξατμιστής Μ.Π	488	2.100	15,21	920	2.798
Εξατμιστής Χ.Π	412,03	350	9,11	584,3	2.732

Πίνακας 4.33 Χαρακτηριστικές τιμές εξατμιστή με δύο αεριοστρόβιλους σε πλήρες φορτίο

Εξατμιστής	2 Αεριοστρόβιλοι				
	Θερμοκρασία [K]	Πίεση [kPa]	Παροχή Μάζας [kg/s]	Ενθαλπία Εισόδου [KJ/Kg]	Ενθαλπία Εξόδου [KJ/Kg]
Εξατμιστής Υ.Π	596,5	11.800	163,72	1.484	2.693
Εξατμιστής Μ.Π	488	2.100	31,12	920	2.798
Εξατμιστής Χ.Π	412,03	350	18,64	584,3	2.732

Πίνακας 4.34 Χαρακτηριστικές τιμές εξατμιστή με δύο αεριοστρόβιλους σε μερικό φορτίο

Εξατμιστής	2 Αεριοστρόβιλοι (Μερικό Φορτίο)				
	Θερμοκρασία [K]	Πίεση [kPa]	Παροχή Μάζας [kg/s]	Ενθαλπία Εισόδου [KJ/Kg]	Ενθαλπία Εξόδου [KJ/Kg]
Εξατμιστής Υ.Π	596,5	11.800	86,71	1.484	2.693
Εξατμιστής Μ.Π	488	2.100	15,86	920	2.798
Εξατμιστής Χ.Π	412,03	350	9,49	584,3	2.732

Στους πίνακες 4.35, 4.36 και 4.37 παρατίθενται τα στοιχεία των στρόβιλων ατμού. Ένα στοιχείο που μπορούμε να αντλήσουμε από τους πίνακες είναι πως στο σενάριο του συνδυασμένου κύκλου με την χρήση δύο αεριοστρόβιλων δεν έχουμε επαρκή αξιοποίηση της ενθαλπίας ατμού στην βαθμίδα χαμηλής πίεσης με αποτέλεσμα ο ατμός να οδηγείται στην έξοδο του στρόβιλου σε σχετικά υψηλή ενθαλπία.

Πίνακας 4.35 Χαρακτηριστικές τιμές στρόβιλου ατμού με έναν αεριοστρόβιλο σε πλήρες φορτίο

ST Table	Ονομαστικές Τιμές						
	Θερμοκρασία Εισόδου [K]	Θερμοκρασία Εξόδου [K]	Πίεση Εισόδου [kPa]	Πίεση Εξόδου [kPa]	Παροχή Μάζας [kg/s]	Ενθαλπία [KJ/Kg]	Ενθαλπία [KJ/Kg]
Στρόβιλος Υ.Π	813	620,88	10.000	2.100	85,27	3.474	3.132
Στρόβιλος Μ.Π	813	570,74	1.950	260	80,3	3.556	3.066
Στρόβιλος Χ.Π	566,41	299,35	260	3,4	89,29	3.057	2.444

Πίνακας 4.36 Χαρακτηριστικές τιμές στρόβιλου ατμού με δύο αεριοστρόβιλους σε πλήρες φορτίο

ST Table	2 Αεριοστρόβιλοι						
	Θερμοκρασία Εισόδου [K]	Θερμοκρασία Εξόδου [K]	Πίεση Εισόδου [kPa]	Πίεση Εξόδου [kPa]	Παροχή Μάζας [kg/s]	Ενθαλπία Εισόδου [KJ/Kg]	Ενθαλπία Εξόδου [KJ/Kg]
Στρόβιλος Υ.Π	813	620,88	10.000	2.100	166,63	3.475	3.132
Στρόβιλος Μ.Π	813	570,74	1.950	260	176,86	3.556	3.066
Στρόβιλος Χ.Π	566,79	300,15	260	3,4	195,28	3.058	2.551

Πίνακας 4.37 Χαρακτηριστικές τιμές στρόβιλου ατμού με δύο αεριοστρόβιλους σε μερικό φορτίο

ST Table	2 Αεριοστρόβιλοι (Μερικό Φορτίο)						Ενθαλπία Εισόδου [KJ/Kg]	Ενθαλπία Εξόδου [KJ/Kg]
	Θερμοκρασία Εισόδου [K]	Θερμοκρασία Εξόδου [K]	Πίεση Εισόδου [KPa]	Πίεση Εξόδου [KPa]	Παροχή Μάζας [kg/s]	Ενθαλπία Εισόδου [KJ/Kg]		
Στρόβιλος Υ.Π	813	620,88	10.000	2.100	88,52	3.475	3.132	
Στρόβιλος Μ.Π	813	570,74	1.950	260	84,17	3.556	3.066	
Στρόβιλος Χ.Π	566,44	299,35	260	3,4	93,54	3.058	2.450	

Στους πίνακες 4.38 και 4.39 παρουσιάζεται η ισχύς των στρόβιλων ατμού, η αποδοτικότητα καθώς και η παραγωγή του ατμού. Στην σύγκριση των σεναρίων του συνδυασμένου κύκλου με την χρήση των δύο αεριοστρόβιλων παρατηρούμε πως στον στρόβιλο ατμού υψηλής πίεσης παρότι η ισχύς του κύκλου μειώνεται στο ήμισυ η ισχύς του στρόβιλου μειώνεται κατά 46,88%. Αυτό συμβαίνει επειδή έχουμε αυξημένη παροχή καυσαερίου στην είσοδο του λέβητα ανάκτησης θερμότητας λόγω αυξημένης παροχής αέρα και καυσίμου στους αεριοστρόβιλους. Ο ατμός που προορίζεται για τον στρόβιλο υψηλής πίεσης δεσμεύει μεγάλο ποσό από την ισχύ των καυσαερίων και προσδίδει μικρότερο ποσό ενέργειας στον στρόβιλο μέσης πίεσης όπου έχουμε μειωμένη παροχή ατμού. Στην βαθμίδα χαμηλής πίεσης του στρόβιλου ατμού παρατηρούμε μια μείωση 52,10% στην παροχή ατμού αλλά δεν μειώνεται αναλογικά και η παραγόμενη ισχύς με το ποσοστό μείωσης να είναι 42,64%. Αυτή η διαφοροποίηση των τιμών οφείλεται στην μεταβολή της αποδοτικότητας και του εξεργειακού βαθμού απόδοσης της χαμηλής βαθμίδας του στρόβιλου. Η πτώση των βαθμών απόδοσης δικαιολογούνται από την αύξηση της μάζας ατμού που καλείται να διαχειριστεί ο στρόβιλος με τα αποτελέσματα να δείχνουν την ανεπάρκεια του στρόβιλου να λειτουργήσει με αυτήν την παροχή ατμού.

Πίνακας 4.38 Χαρακτηριστικές τιμές στροβίλου ατμού με δύο αεριοστρόβιλους σε πλήρες φορτίο και μερικό φορτίο

Στρόβιλος Ατμού	Μονάδες	2 Αεριοστρόβιλοι	2 Αεριοστρόβιλοι (Μερικό Φορτίο)	Ποσοστιαία Διαφορά %
<b>Στρόβιλος Ατμού Υ.Π</b>				
Ισχύς	[KW]	57.185,6	30.379,6	46,88
Αποδοτικότητα	[-]	0,74	0,74	0,00
Εξεργειακός Β.Α	[-]	0,96	0,96	0,00
Μάζα Ατμού	[Kg/Sec]	166,63	88,52	46,88
<b>Στρόβιλος Ατμού Μ.Π</b>				
Ισχύς	[KW]	86.647	41.235	52,41
Αποδοτικότητα	[-]	0,81	0,81	0,00
Εξεργειακός Β.Α	[-]	0,95	0,95	0,00
Μάζα ατμού	[Kg/Sec]	176,6	84,17	52,34
<b>Στρόβιλος Ατμού Χ.Π</b>				
Ισχύς	[KW]	98.966,8	56.769,73	42,64
Αποδοτικότητα	[-]	0,68	0,81	-18,94
Εξεργειακός Β.Α	[-]	0,72	0,84	-16,67
Μάζα ατμού	[Kg/Sec]	195,29	93,54	52,10
<b>Συνολικά Στοιχεία</b>				
Συνολική Ισχύς Ατμοστρόβιλου	[KW]	242.799,2	128.384,33	47,12
Συνολική Παραγωγή Ατμού	[Kg/Sec]	213,95	114,05	46,69

Στον πίνακα 4.39 πραγματοποιείται η σύγκριση των βαθμίδων στροβίλου ατμού βάσει τον δύο βασικών μας σεναρίων. Η ισχύς καθώς και η παροχή ατμού αυξάνεται σε όλες τις βαθμίδες του στροβίλου στο σενάριο του συνδυασμένου κύκλου με την χρήση δύο αεριοστρόβιλων και αυτό δικαιολογείται από την αυξημένη παροχή καυσαερίων στον εναλλάκτη θερμότητας (HRSG).



Πίνακας 4.39 Χαρακτηριστικές τιμές στρόβιλου ατμού με έναν αεριοστρόβιλο σε ονομαστικό φορτίο και δύο αεριοστρόβιλων σε μερικό φορτίο

Στρόβιλος Ατμού	Μονάδες	Ονομαστικές Τιμές	2 Αεριοστρόβιλοι (Μερικό Φορτίο)	Ποσοστιαία Διαφορά %
<b>Στρόβιλος Ατμού Υ.Π</b>				
Ισχύς	[KW]	29.264,4	30.379,6	-3,81
Αποδοτικότητα	[-]	0,74	0,74	-0,14
Εξεργειακός Β.Α	[-]	0,96	0,96	0,00
Μάζα Ατμού	[Kg/Sec]	85,27	88,52	-3,81
<b>Στρόβιλος Ατμού Μ.Π</b>				
Ισχύς	[KW]	39.341,62	41.235	-4,81
Αποδοτικότητα	[-]	0,81	0,81	0,43
Εξεργειακός Β.Α	[-]	0,95	0,95	0,00
Μάζα ατμού	[Kg/Sec]	80,3	84,17	-4,82
<b>Στρόβιλος Ατμού Χ.Π</b>				
Ισχύς	[KW]	54.730,4	56.769,73	-3,73
Αποδοτικότητα	[-]	0,82	0,81	1,22
Εξεργειακός Β.Α	[-]	0,84	0,84	0,00
Μάζα ατμού	[Kg/Sec]	89,3	93,54	-4,75
<b>Συνολικά Στοιχεία</b>				
Συνολική Ισχύς Ατμοστρόβιλου	[KW]	123.336,42	128.384,33	-4,09
Συνολική Παραγωγή Ατμού	[Kg/Sec]	109,88	114,05	-3,80

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι στόχοι που θέσαμε στην παρούσα διπλωματική εργασία ήταν η καλύτερη δυνατή προσομοίωση της ατμοηλεκτρικής μονάδας, η έρευνα για πιθανές βελτιστοποιήσεις καθώς και η μελέτη των αποτελεσμάτων για την βαθύτερη κατανόηση της αρχής λειτουργίας του κύκλου. Αναλυτικότερα μπορούμε να πούμε πως η προσομοίωση ήταν επιτυχής καθώς η τιμή της ποσοστιαίας διαφοράς μεταξύ των ονομαστικών τιμών λειτουργίας του εργοστασίου και των αποτελεσμάτων προσομοίωσης που παρατέθηκε στο κεφάλαιο 4 ήταν στην πλειοψηφία της κάτω του 4%. Ένα από τα βασικά συμπεράσματα της παρούσας εργασίας είναι πως η κατασκευή της μονάδας δεν έχει μεγάλο αριθμό συσκευών αλλά έχει αυξημένο βαθμό δυσκολίας στην προσομοίωση της καθώς ο κύκλος λειτουργεί σε τρεις πιέσεις (υψηλή, μέση, χαμηλή) και αυτό συνεπάγεται ότι υπάρχουν τρία τύμπανα ατμού. Αυτή η τεχνολογία καθιστά το σύστημα ευέλικτο, προσφέρει υψηλή διαθεσιμότητα και βαθμό απόδοσης αλλά κάθε αλλαγή παραμέτρου επιφέρει αλλαγές σε όλο το κύκλωμα. Λόγω αυτής της λειτουργίας κρίνεται πολύπλοκη η επίτευξη των επιθυμητών τιμών του κυκλώματος

Για την καλύτερη κατανόηση της παρούσας εργασίας θα παραθέσουμε τον πίνακα 5.1 που περιέχει τα αποτελέσματα των σεναρίων για την εύρεση της βέλτιστης λύσης.

Πίνακας 5.1 Πίνακας αποτελεσμάτων για τον χαρακτηρισμό της βέλτιστης πρακτικής

Υποσενάρια	Μονάδες	Προσομοίωση	Σενάριο 1			Σενάριο 2			Σενάριο 3		Σενάριο 4	
		1	1.1	1.2	2.1	2.2	2.3	3.1	3.2	4.1	4.2	
		Ονομαστικό Φορτίο	Μείωση Αέρα	Μείωση καυσίμου	Απομάστευση Μέσης Πίεσης	Απομάστευση Μέσης Πίεσης 2	Λέβητας	Απομάστευση Χαμηλής Πίεσης	Απομάστευση Χαμηλής Πίεσης 2	2 Αεριοστρόβιλοι	2 Αεριοστρόβιλοι (Μερικό Φορτίο)	
Ισχύς CC	[MW]	394	314,98	310,36	384	394	-	386	394	784,15	393,23	
Βαθμός Απόδοσης CC	[%]	57,8	57,03	54,56	56,38	56,65	-	56,63	56,86	57,5	55,46	
Ισχύς GT	[KW]	276.545	220.685	221.021	276.545	284.025	-	276.544	282.726	553.089	270852	
Βαθμός Απόδοσης GT	[%]	0,41	0,40	0,39	0,41	0,41	-	0,41	0,41	0,41	0,382	
Ισχύς ST	[KW]	123.336	98.922	93.762	113.370	115.794	-	115.100	117.083	242.799	128.384	
Παροχή κασίμου	[Kg/sec]	14,37	11,64	12	14,37	14,66	1,13	14,37	14,61	28,74	14,94	
Παροχή καυσαερίων	[Kg/sec]	656,19	531,51	654	656,19	656,59	-	656,19	656,43	1312,38	682,44	

### **Σενάριο 1**

Στο πρώτο σενάριο εξετάσαμε ποια είναι η βέλτιστη μέθοδος για να ελέγξουμε την παραγωγή ατμού, η οποία έπειτα από δοκιμές επιτεύχθηκε με μείωση του φορτίου στον αεριοστρόβιλο.

Στο παρών σενάριο γίνεται έλεγχος για την εύρεση της βέλτιστης πρακτικής ανάμεσα στην σύγκριση 1 και τη σύγκριση 2 (πίνακας 3.1)

Όπως παρατηρούμε στον πίνακα 5.1 η βέλτιστη πρακτική για τον έλεγχο της παραγωγής ατμού δίνεται στη σύγκριση 1 και αναλυτικότερα στο υποσενάριο 1.1 καθώς η ισχύς και ο βαθμός απόδοσης του συνδυασμένου κύκλου είναι υψηλότεροι από το υποσενάριο 1.2. Επίσης ο αεριοστρόβιλος παρουσιάζει υψηλότερο βαθμό απόδοσης καθώς και χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου.

### **Σενάριο 2**

Στο δεύτερο σενάριο μελετήθηκαν οι επιπτώσεις στον συνδυασμένο κύκλο αν απομαστεύσουμε ατμό για χρήση σε σύστημα Τηλεθέρμανσης από την μέση πίεση του στροβίλου. Στο ίδιο σενάριο μελετήθηκε η χρήση ενός εξωτερικού λέβητα για την αυτόνομη λειτουργία του συστήματος Τηλεθέρμανσης.

Στο παρών σενάριο γίνεται έλεγχος για την εύρεση της βέλτιστης πρακτικής ανάμεσα στην σύγκριση 3, τη σύγκριση 4 και τη σύγκριση 5 (πίνακας 3.1)

Σε αυτό το σενάριο παρατηρούμε πως είναι ενεργειακά συμφέρον να χρησιμοποιήσουμε απομάστευση ατμού για το σύστημα Τηλεθέρμανσης καθώς δεν μειώνεται κατά πολύ η ισχύς και ο βαθμός απόδοσης του συνδυασμένου κύκλου. Αυτόν τον ισχυρισμό τον επαληθεύει η σύγκριση 3 και πιο συγκεκριμένα το υποσενάριο 1.2 (πίνακας 5.1). Επίσης αν αποφασίσουμε να αυξήσουμε την ισχύ του κύκλου λειτουργώντας παράλληλα το σύστημα Τηλεθέρμανσης η κατανάλωση καυσίμου δεν αυξάνεται ιδιαίτερα. Τέλος, το υποσενάριο όπου χρησιμοποιείται ανεξάρτητος λέβητας για την λειτουργία του συστήματος Τηλεθέρμανσης κρίνεται μη συμφέρον καθώς η κατανάλωση καυσίμου είναι υψηλή.

### **Σενάριο 3**

Στο τρίτο σενάριο μελετήθηκαν οι επιπτώσεις στον συνδυασμένο κύκλο αν απομαστεύσουμε ατμό για χρήση σε σύστημα Τηλεθέρμανσης από την χαμηλή πίεση του στροβίλου.

Στο παρών σενάριο γίνεται έλεγχος για την εύρεση της βέλτιστης πρακτικής ανάμεσα στην σύγκριση 6 και τη σύγκριση 7 (πίνακας 3.1)

Σε αυτό το σενάριο όπως και στο προηγούμενο παρατηρούμε πως είναι συμφέρουσα η απομάστευση ατμού για το σύστημα Τηλεθέρμανσης όπως φαίνεται στη σύγκριση 6 και πιο συγκεκριμένα στο υποσενάριο 3.1 (πίνακας 5.1). Σε αυτήν την σύγκριση φαίνεται πως είναι ιδιαίτερα αποδοτική η απομάστευση ατμού καθώς γίνεται από χαμηλές πιέσεις και δεν μειώνεται ιδιαίτερα η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ένα σημαντικό στοιχείο που αντλούμε από την σύγκριση 7 είναι πως αν υπάρχει απαίτηση για επιπλέον ενέργεια, η κατανάλωση καυσίμου δεν εμφανίζει μεγάλη αύξηση.

#### **Σενάριο 4**

Στο τέταρτο σενάριο μελετήσαμε την παράλληλη λειτουργία δύο αεριοστρόβιλων σε πλήρες και μερικό φορτίο για την κατανόηση της συμπεριφοράς του συνδυασμένου κύκλου εκτός του σημείου σχεδιασμού. Έπειτα έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων με τις τιμές λειτουργίας του κύκλου με την χρήση ενός αεριοστρόβιλου για να έχουμε μια σαφή εικόνα της βέλτιστης λειτουργίας του κύκλου σε μερική ζήτηση φορτίου από το σύστημα.

Στο παρών σενάριο γίνεται έλεγχος για την εύρεση της βέλτιστης πρακτικής ανάμεσα στην σύγκριση 8 και σύγκριση 9 (πίνακας 3.1)

Όπως φαίνεται στην σύγκριση 8 και πιο συγκεκριμένα στο υποσενάριο 4.1 η μονάδα είναι πιο αποδοτική αν λειτουργεί σε πλήρες φορτίο παρά σε μερικό. Αυτό φαίνεται και στον πίνακα 5.1 όπου παρατηρούμε τον βαθμό απόδοσης και την ισχύ του συνδυασμένου κύκλου καθώς και τον βαθμό απόδοσης του αεριοστρόβιλου.

Ένα αντικείμενο που έχει πρόσφορο έδαφος για περαιτέρω έρευνα είναι η δοκιμή πολλαπλών τιμών πίεσης για την απομάστευση ατμού και πιθανή εύρεση βέλτιστων τιμών. Επίσης ένα ακόμη αντικείμενο που θα μπορούσε να δεχτεί περεταίρω μελέτη είναι η δοκιμή συστοιχίας αεριοστρόβιλων μικρότερης ισχύος και η εξαγωγή αποτελεσμάτων για την αλληλεπίδραση τους και τις επιπτώσεις που έχει η χρήση τους στον κύκλο.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. International Energy Agency, <<Ιστοσελίδα,>> [Ηλεκτρονικό], Available, [www.iae.org](http://www.iae.org)
2. Ενεργειακές Τεχνολογίες, κύκλοι ισχύος με ατμό, Εργαστήριο Τεχνολογίας Καυσίμων και λιπαντικών ΕΜΠ.
3. Αλαμπρίτης Δημήτρης, Ανάλυση οργανικού κύκλου Rankine και μελέτη εργαζόμενων μέσων για μικρής κλίμακας σύστημα ηλιακών συλλεκτών, Διπλωματική εργασία, Εργαστήριο Θερμοδυναμικής Τομέας Θερμότητας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα, Φεβρουάριος 2016.
4. Σκόδρας Γ, Θερμοδυναμικοί κύκλοι παραγωγής ισχύος με ατμό, Energy resources: Technologies & Management, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Δυτική Μακεδονίας.
5. YUNUS A. CENGEL, MICHAEL A. BOLES, Θερμοδυναμική για Μηχανικούς, 7η Έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, Αθήνα 2013, ISBN 978-960-418-345-6.
6. Κολοκοτρώνης Δημήτριος, Τομπουλίδης Α.Γ, Τουρλιδάκης Α, Θερμικοί σταθμοί και συμπαραγωγή, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας.
7. Πολυζάκης Απόστολος, Λειτουργία Αεριοστρόβιλων και Παραγωγή Ενέργειας-Προώθηση, 1<sup>η</sup> Έκδοση, Πτολεμαΐδα 2012, ISBN 978-960-98311-1-6.
8. Τουρλιδάκης Αντώνιος, Τεχνολογία αεριοστρόβιλων, θερμοδυναμικοί κύκλοι παραγωγής ισχύος, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών.
9. ResearchGate, <<Ιστοσελίδα,>> [Ηλεκτρονικό], Available, [www.researchgate.net](http://www.researchgate.net)
10. Ελληνικός Σύνδεσμος Συμπαραγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας, <<Ιστοσελίδα,>> [Ηλεκτρονικό], Available, [www.hacchp.gr](http://www.hacchp.gr)
11. Τουρλιδάκης Αντώνιος, Σταθμοί παραγωγής συνδυασμένου κύκλου, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας.
12. Αλέξης Γεώργιος, Συμπαραγωγή(Cogeneration-CHP), Σταθμοί παραγωγής ενέργειας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε, Ανώτατο Τεχνολογικό Ίδρυμα Πειραιά.
13. Κέντρο ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, CRES, Οδηγός Συστημάτων Συμπαραγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας.
14. General Electric, <<Ιστοσελίδα,>> [Ηλεκτρονικό], Available, [www.ge.com](http://www.ge.com)
15. GateCycleTM, <<Help Menu>>.

16. Τζούρος Ανδρέας, Η εμπειρία ενός ανεξάρτητου παραγωγού στην Ελληνική αγορά ηλεκτρισμού, Διημερίδα ΤΕΕ λιγνίτης και φυσικό αέριο στην ηλεκτροπαραγωγή της χώρας, Αθήνα 10 Ιουνίου 2005.
17. Quora, <<Ιστοσελίδα,>> [Ηλεκτρονικό], Available, [www.quora.com](http://www.quora.com)
18. Δ.Ε.ΤΗ.Π, <<Ιστοσελίδα,>> [Ηλεκτρονικό], Available, [www.tpt.gr](http://www.tpt.gr)
19. ΠΑΠΑΓΕΩΡΓΙΟΥ Ν, Ατμοπαραγωγοί Ι, Γενικές Αρχές, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα Ιούνιος 1991, ISBN 960-7888-61-8.
20. Καρέλλας Σ, Κακαράς Ε, Παπαγεωργίου Ν, Παπαπαύλου Χ, Ασκήσεις- Θέματα Ατμοπαραγωγών και θερμικών εγκαταστάσεων, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 2007.
21. ΤΕΧΝΙΚΟ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟ ΕΛΛΑΔΑΣ, Εισαγωγή στον τομέα της ενέργειας, Κατάρτιση ενεργειακών επιθεωρητών, Ά Έκδοση, Αθήνα, Ιούνιος 2011.
22. Χατζηκωνσταντής Κ. Γεώργιος, Επίκουρος Καθηγητής, Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Αθήνας.

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1

## Αποτελέσματα Σεναρίων

Πίνακας 1 Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων των σεναρίων

Μονάδες	Προσομοίωση	Σενάριο 1		Σενάριο 2			Σενάριο 3		Σενάριο 4	
		Μείωση Αέρα	Μείωση καυσίμου	Απομάστευση Μέσης Πίεσης	Απομάστευση Μέσης Πίεσης 2	Απομάστευση Χαμηλής Πίεσης	Απομάστευση Χαμηλής Πίεσης 2	2 Αεριοστρόβιλοι	2 Αεριοστρόβιλοι (Μερικό Φορτίο)	
Ισχύς CC	394	314,98	310,36	384	394	386	394	784,15	393,23	
Βαθμός Απόδοσης CC	57,8	57,03	54,56	56,38	56,65	56,63	56,86	57,5	55,46	
Αριθμός GT	1	1	1	1	1	1	1	2	2	
Ισχύς GT	276.545	220.685	221.021	276.545	284.025	276.544	282.726	553.089	270852	
Βαθμός Απόδοσης GT	0,41	0,40	0,39	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,382	
Ισχύς ST	123.336	98.922	93.762	113.370	115.794	115.100	117.083	242.799	128.384	
Ισχύς Λέβητα	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Βαθμός Απόδοσης Λέβητα	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Τιμή λ	44,66	44,66	53,49	44,66	43,78	44,66	43,93	44,66	44,71	
Παροχή καυσίμου	14,37	11,64	12	14,37	14,66	14,37	14,61	28,74	14,94	
Παροχή αέρα	641,82	519,87	641,82	641,82	641,82	641,82	641,82	1283,64	668	
Παροχή καυσαερίων	656,19	531,51	654	656,19	656,59	656,19	656,43	1312,38	682,44	
Χαρακτηριστικά απομάστευσης ατμού	-	-	-	Σταθερά για σενάριο 2	Σταθερά για σενάριο 2	Σταθερά για σενάριο 3	Σταθερά για σενάριο 3	Σταθερά για σενάριο 3	-	
Χαρακτηριστικά εναλλακτη	-	-	-	Σταθερά	Σταθερά	Σταθερά	Σταθερά	Σταθερά	-	



## Στοιχεία προσομοίωσης μονάδας

Πίνακας 2 Συγκριτικά αποτελέσματα θερμοκρασίας ατμού για ονομαστικό φορτίο και αποτελέσματα προσομοίωσης

Στοιχεία	Ονομαστικές Τιμές		Αποτελέσματα Προσομοίωσης		Ποσοστιαία Διαφορά %	
	Θερμοκρασία εισόδου [K]	Θερμοκρασία εξόδου [K]	Θερμοκρασία εισόδου [K]	Θερμοκρασία εξόδου [K]	Θερμοκρασία εισόδου	Θερμοκρασία εξόδου
HP SH2	709	838	715	833,98	0,85	-0,48
HP SH1	586	763	596,51	743,85	1,79	-2,51
RH SH2	714	833	735,7	836,03	3,04	0,36
RH SH1	575	713	615	736,7	6,96	3,32
HP EVAP	586	586	596,51	596,51	1,79	1,79
IP SH	491	571	488	596,50	-0,61	4,47
HP ECO2	499	586	491,77	597,20	-1,45	1,91
LP SH	423	544	412,02	529,02	-2,60	-2,75
IP EVAP	491	491	488	488	-0,61	-0,61
IP ECO	418	486	412,64	490,70	-1,28	0,97
HP ECO	420	503	414,27	491,77	-1,36	-2,23
LP EVAP	421	421	412,02	412,02	-2,13	-2,13
ECO	326	418	302	405	-7,36	-3,11

Πίνακας 3 Συγκριτικά αποτελέσματα πίεσης ατμού για ονομαστικό φορτίο και αποτελέσματα προσομοίωσης

Στοιχεία	Ονομαστικές Τιμές		Αποτελέσματα Προσομοίωσης		Ποσοστιαία Διαφορά %	
	Πίεση Εισόδου [kPa]	Πίεση Εξόδου [kPa]	Πίεση Εισόδου [kPa]	Πίεση Εξόδου [kPa]	Πίεση Εισόδου	Πίεση Εξόδου
HP SH2	11.605	11.605	11.800	11.800	1,68	1,68
HP SH1	11.605	11.605	11.800	11.800	1,68	1,68
RH SH2	2.070	2.070	2.100	2.100	1,45	1,45
RH SH1	2.070	2.070	2.100	2.100	1,45	1,45
HP EVAP	11.800	11.800	11.800	11.800	0,00	0,00
IP SH	2.070	2.070	2.100	2.100	1,45	1,45
HP ECO2	16.000	16.000	16.000	16.000	0,00	0,00
LP SH	340	340	350	350	2,94	2,94
IP EVAP	2.100	2.100	2.100	2.100	0,00	0,00
IP ECO	4.670	4.670	4.600	4.600	-1,50	-1,50
HP ECO	16.000	16.000	16.000	16.000	0,00	0,00
LP EVAP	350	350	350	350	0,00	0,00
ECO	1.420	1.420	1.420	1.420	0,00	0,00

Πίνακας 4 Συγκριτικά αποτελέσματα παροχής μάζας ατμού για ονομαστικό φορτίο και αποτελέσματα προσομοίωσης

Στοιχεία	Ονομαστικές Τιμές		Αποτελέσματα Προσομοίωσης		Ποσοστιαία Διαφορά %	
	Παροχή Μάζας [kg/s]		Παροχή Μάζας [kg/s]		Παροχή Μάζας	
HP SH2	83,04		85,27		2,69	
HP SH1	79,86		83		3,93	
RH SH2	76,8		80,3		4,56	
RH SH1	76,8		80,3		4,56	
HP EVAP	79,86		83,5		4,56	
IP SH	14,5		15		3,45	
HP ECO2	80,5		83		3,11	
LP SH	9,1		8,99		-1,21	
IP EVAP	14,7		15,2		3,47	
IP ECO	15		15,44		2,91	
HP ECO	80		83		3,75	
LP EVAP	9,1		9,11		0,11	
ECO	110,55		109,88		-0,61	

Πίνακας 5 Συγκριτικά αποτελέσματα θερμοκρασίας ατμού στρόβιλου για ονομαστικό φορτίο και αποτελέσματα προσομοίωσης

Στοιχεία	Ονομαστικές Τιμές		Αποτελέσματα Προσομοίωσης		Ποσοστιαία Διαφορά %	
	Θερμοκρασία εισόδου [K]	Θερμοκρασία εξόδου [K]	Θερμοκρασία εισόδου [K]	Θερμοκρασία εξόδου [K]	Θερμοκρασία εισόδου	Θερμοκρασία εξόδου
Στρόβιλος Υ.Π	818	653	813	621	-0,61	-4,90
Στρόβιλος Μ.Π	818	596	813	571	-0,61	-4,19
Στρόβιλος Χ.Π	596	303	567	300	-4,87	-0,99

Πίνακας 6 Συγκριτικά αποτελέσματα πίεσης ατμού στρόβιλου για ονομαστικό φορτίο και αποτελέσματα προσομοίωσης

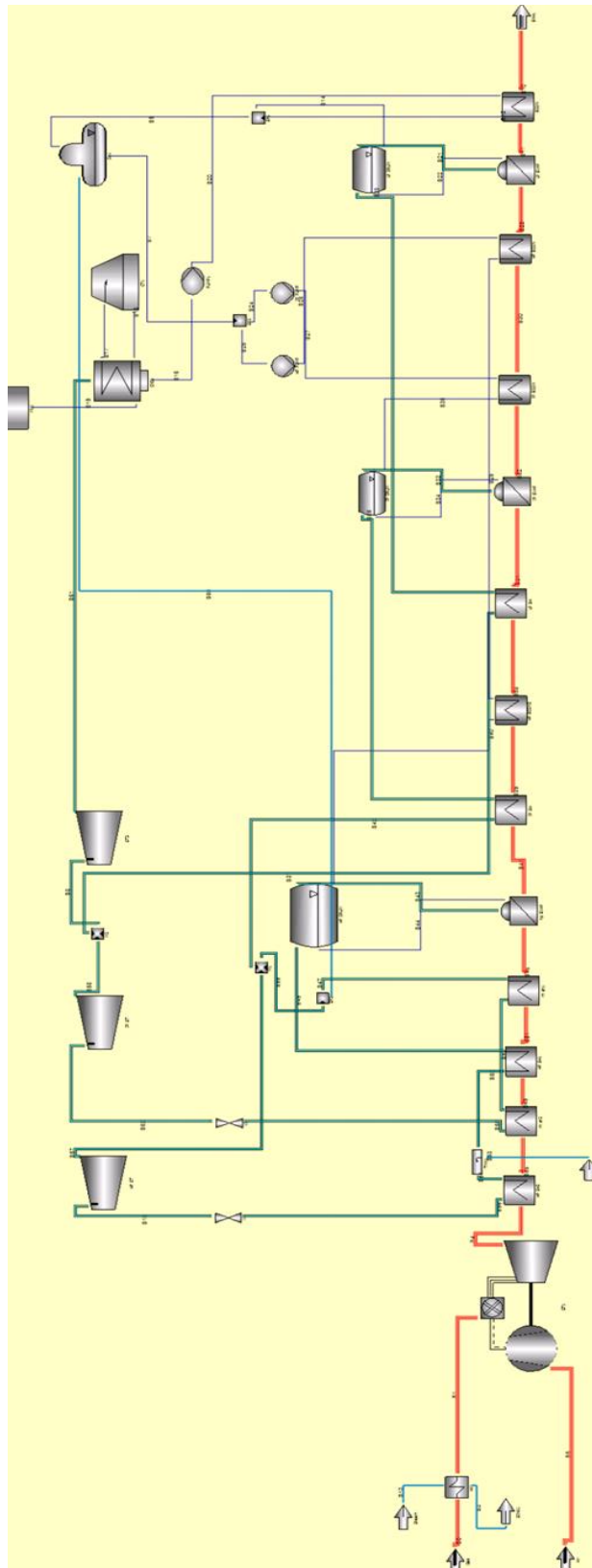
Στοιχεία	Ονομαστικές Τιμές		Αποτελέσματα Προσομοίωσης		Ποσοστιαία Διαφορά %	
	Πίεση Εισόδου [kPa]	Πίεση Εξόδου [kPa]	Πίεση Εισόδου [kPa]	Πίεση Εξόδου [kPa]	Πίεση Εισόδου	Πίεση Εξόδου
Στρόβιλος Υ.Π	10.000	2.100	10.000	2.100	0,00	0,00
Στρόβιλος Μ.Π	2.100	260	2.100	260	0,00	0,00
Στρόβιλος Χ.Π	260	3,4	260	3,4	0,00	0,00

Πίνακας 7 Συγκριτικά αποτελέσματα παροχής μάζας ατμού στρόβιλου για ονομαστικό φορτίο και αποτελέσματα προσομοίωσης

Στοιχεία	Ονομαστικές Τιμές		Αποτελέσματα Προσομοίωσης		Ποσοστιαία Διαφορά %	
	Παροχή Μάζας [kg/s]		Παροχή Μάζας [kg/s]		Παροχή Μάζας	
Στρόβιλος Υ.Π	83,04		85,27		2,69	
Στρόβιλος Μ.Π	76,8		80,3		4,56	
Στρόβιλος Χ.Π	86		89,2		3,72	

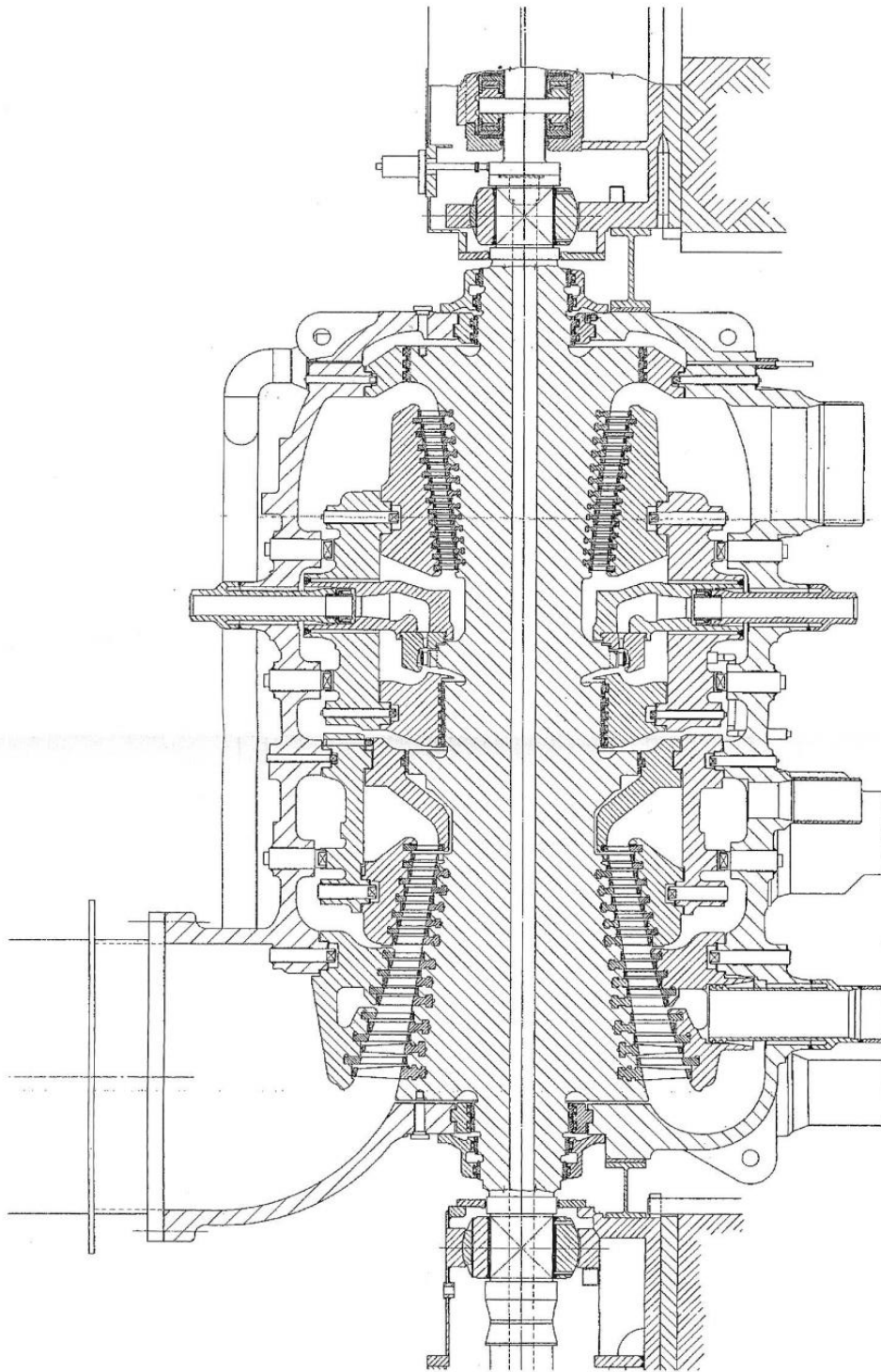
## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2

### Σχέδιο προσομοίωσης μονάδας παραγωγής ενέργειας 395 MW

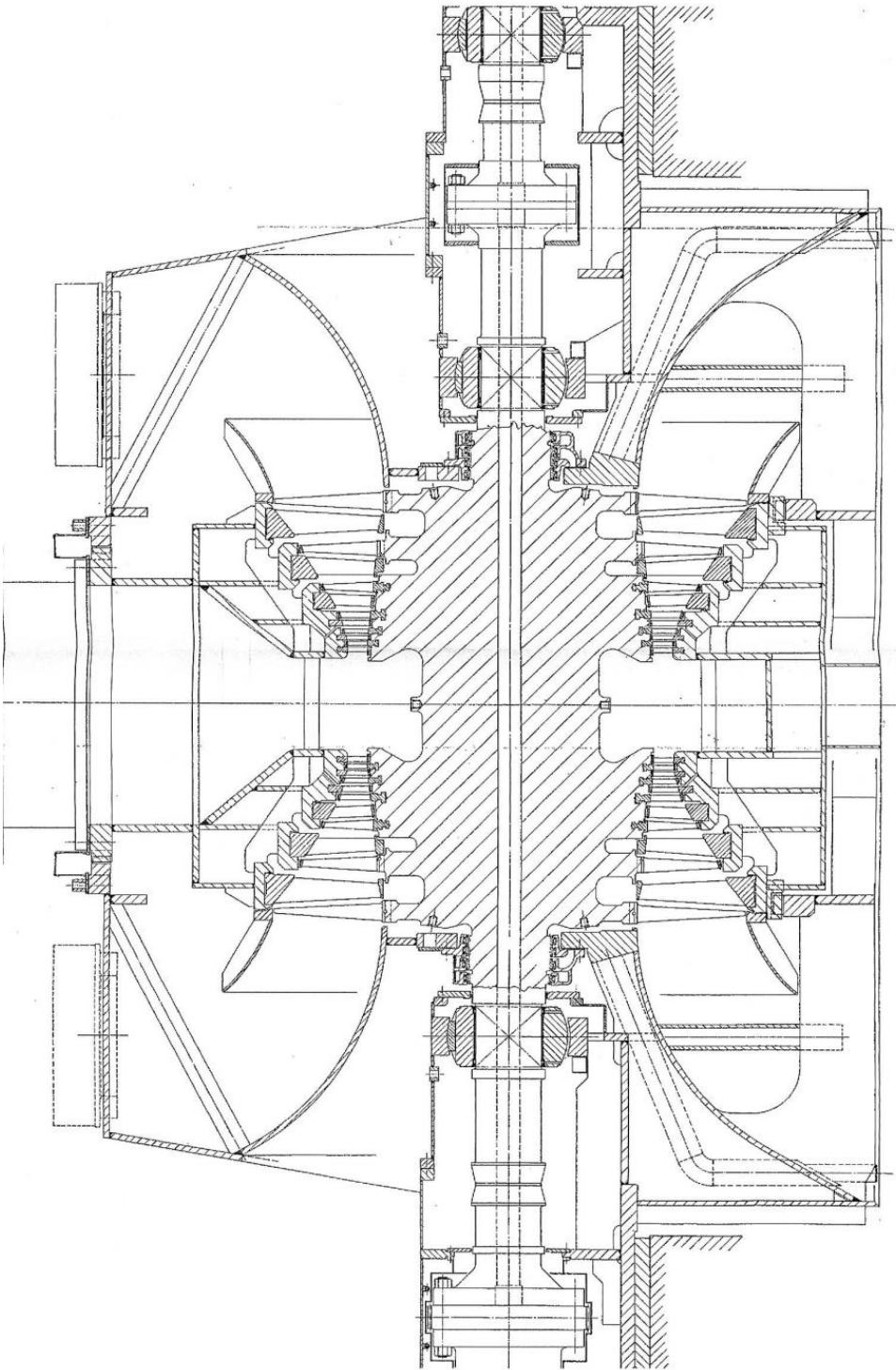


Εικόνα 1 Προσομοίωση μονάδας παραγωγής ενέργειας στο ονομαστικό φορτίο. (Πηγή: GateCycle)

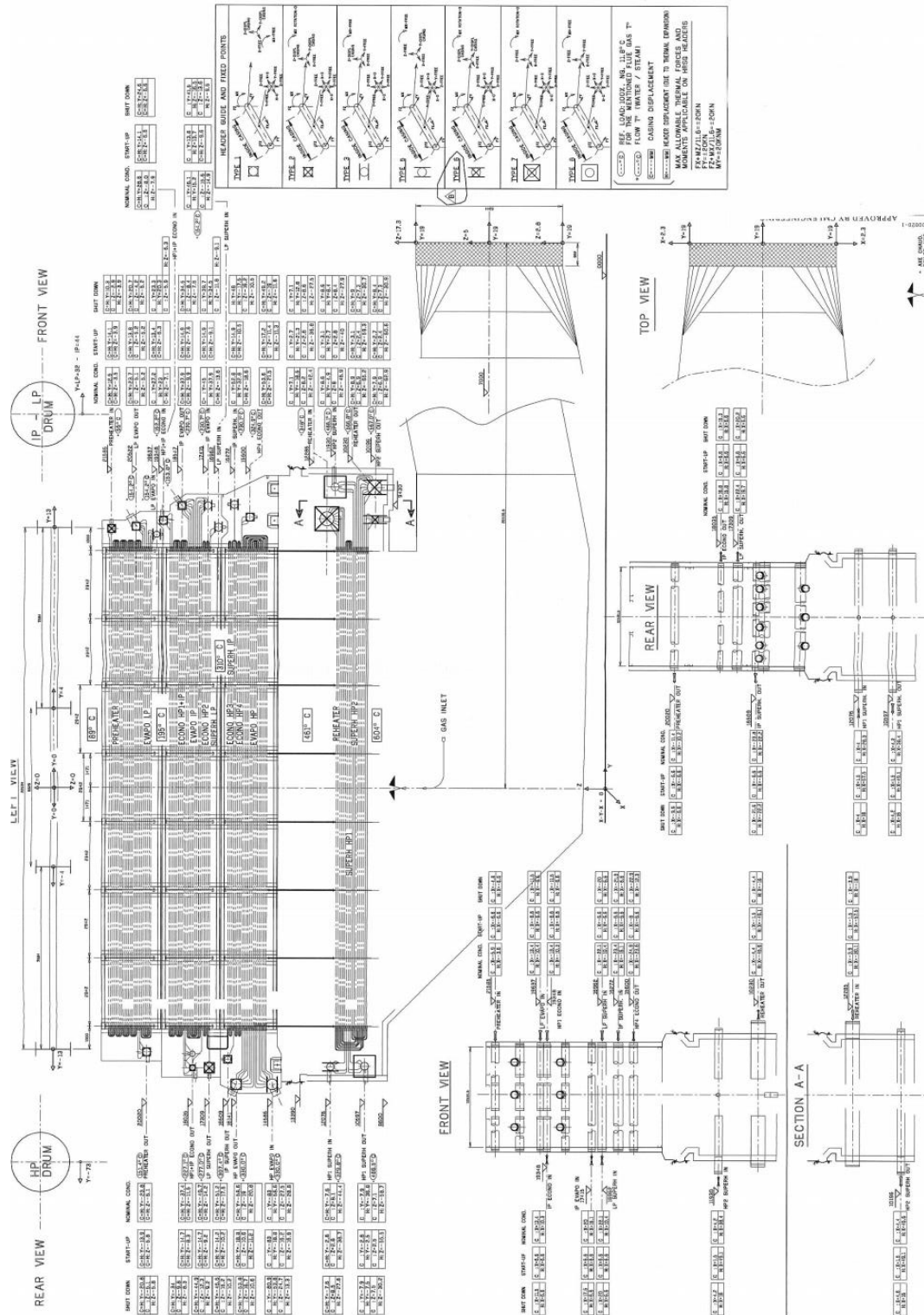




Εικόνα 3 Διάταξη βαθμίδων στροβίλου ατμού υψηλής και μέσης πίεσης



Εικόνα 4 Διάταξη στροβίλου ατμού χαμηλής πίεσης



Εικόνα 3 Διάταξη λέβητα ανάκτησης θερμότητας HRSG