

ΓΡΑΜΜΑΤΕΙΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ



Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα
Τ.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ

ΜΗΧ
704

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΣ ΤΟΜΕΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΤΜΟΛΕΒΗΤΩΝ
-ΑΤΜΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ο ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΟΣ ΚΥΚΛΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (CCSSs)
ΣΤΟΝ ΠΑΓΚΟΣΜΙΟ ΚΑΙ ΕΛΛΑΔΙΚΟ ΧΩΡΟ-ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ



ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : Δρ. ΑΛΕΞΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ: ΑΓΓΕΛΟΠΟΥΛΟΣ ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ Α.Μ.: 36840

ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ ΔΑΝΙΗΛ Α.Μ.: 36481

-ΑΘΗΝΑ 2012-

Περιεχόμενα

ΜΕΡΟΣ Α΄

	Περίληψη	2
1.	Εισαγωγή	3
2.	Η κατανάλωση ενέργειας στον κόσμο	5
3.	Η κατανάλωση ενέργειας στην Ελλάδα	10
4.	Παραγωγή ενέργειας στην Ελλάδα	12
5.	Θερμικοί κύκλοι – Βασικά χαρακτηριστικά	16
5.1	Κύκλος Rankine	16
5.2	Ατμοηλεκτρικών σταθμών (ΑΗΣ) Τμήματα	23
5.2.1	Ατμοπαραγωγός	23
5.2.2	Αντλίες	30
5.2.3	Προθερμαντής τροφοδοτικού νερού με ατμό	33
5.2.4	Απαερωτής	34
5.2.5	Ατμοστρόβιλος	36
5.3	Κύκλος Joule-Brayton / κύκλος αεριοστρόβιλου	40
5.3.1	Γενικά	40
5.3.2	Συμπιεστής	42
5.3.3	Θάλαμοι καύσης	44
5.3.4	Καύσιμα αεριοστρόβιλου	45
5.3.5	Στρόβιλος	46
5.3.6	Σύγκριση αεριοστροβιλικών και ατμοηλεκτρικών σταθμών παραγωγής ενέργειας	47
5.4	Συνδυασμένος κύκλος	49
5.4.1	Γενικά	49
5.4.2	Κύρια μέρη συνδυασμένου κύκλου	51
5.4.3	Συμπυκνωτές και πύργοι ψύξης	52
5.4.4	Λέβητας ανάκτησης θερμότητας	57
5.4.5	Σταθμοί παραγωγής ενέργειας βάσει του συνδυασμένου κύκλου στην Ελλάδα	62
5.4.6	Σταθμοί παραγωγής ενέργειας βάσει του συνδυασμένου κύκλου στον παγκόσμιο χώρο	64

ΜΕΡΟΣ Β΄

6.1	Υπολογισμός στοιχείων στον κύκλο Brayton	72
6.1.2	Διαγράμματα βαθμού απόδοσης στο κύκλο Brayton	80
6.2	Υπολογισμός στοιχείων στον κύκλο Rankine	85
6.2.1	Συμπεράσματα-Παρατηρήσεις στο Brayton	97
6.3	Καύση	101
6.3.2	Υπολογισμός C_p	102
6.4	Υπολογισμός m	105
6.4.2	Υπολογισμός m_g, W_g	108
6.4.3	Διαγράμματα T_g-m_g, T_g-W_g	111
6.4.4	Διαγράμματα T_g-m_s	134
6.5	Υπολογισμός ολικού βαθμού απόδοσης	139
6.5.2	Διαγράμματα ολικού βαθμού απόδοσης	149
6.6	Γενικά Συμπεράσματα –Παρατηρήσεις	154
	Βιβλιογραφία	157

ΜΕΡΟΣ Α'

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η μοντελοποίηση μονάδων ηλεκτροπαραγωγής προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση στοχοθετημένων δράσεων στην συνολική απόδοση του σταθμού. Αρχικά παρουσιάζονται στοιχεία για την παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας και ηλεκτροπαραγωγή, ενώ στο δεύτερο στοιχεία που αφορούν την ηλεκτροπαραγωγή στην Ελλάδα και τους κυριότερους φυσικούς πόρους που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας.

Στη συνέχεια αναφέρεται ο τρόπο λειτουργίας των σύγχρονων μεγάλων ηλεκτροπαραγωγικών μονάδων, συγκεκριμένα των συμβατικών ατμοηλεκτρικών σταθμών, των αεριοστροβιλικών σταθμών και των μονάδων συνδυασμένου κύκλου. Γίνεται λεπτομερής παρουσίαση της λειτουργίας όλων των επιμέρους τμημάτων που απαρτίζουν τον εκάστοτε τύπο μονάδας, ενώ αναφέρονται οι σημαντικότερες παράμετροι λειτουργίας και οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν τον βαθμό απόδοσης. Στο τέλος παρατίθενται διαγράμματα του ολικού βαθμού απόδοσης του συνδυασμένου κύκλου αλλά και τα συμπεράσματα αυτών.

Parameter study: How we generate power using the “Combined Cycle”. Review of Greek and international literature.

**Charalampos Angelopoulos
Daniil Papadopoulos**

Technological Educational Institute of Piraeus, School of Engineering, Department of Mechanical Engineering

The purpose of this study is to describe the key elements of the “Combined Cycle” and the applications identified worldwide.

To address the issue this paper will discuss the challenges of the use of power plants modeling worldwide. The project investigates how specific actions impact on the overall performance of power stations. The review literature emphasize on current applications and considerations for future research. It focuses on primary themes of global energy and power and generation of electricity in Greece using the main fuel. A detailed report is given considering the function of the modern power plants. It emphasizes on the conventional steam power plants, gas turbinepower plants and combined cycle. It highlights the most important operating parameters and the main factors that influence the performance. Finally the total efficiency of the combined cycle is given in diagrams. However questions remain regarding the effectiveness and a brief discussion is made. Implications for practice and further investigation are offered.

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Από την εμφάνιση του πάνω στην γη, ο άνθρωπος προσπαθούσε να τιθασεύσει τα φαινόμενα και στοιχεία που τον περιτριγύριζαν προκειμένου να μπορέσει να αποσπάσει ένα μέρος της ενέργειάς τους για να το χρησιμοποιήσει όπως αυτός ήθελε. Έτσι, για το όργωμα στα χωράφια εκμεταλλευόταν την δύναμη των ζώων, ενώ κατασκεύασε νερόμυλους που μετέτρεπαν στις υδατοπτώσεις την δυναμική ενέργεια του νερού σε κινητική για την κίνηση των μύλων. Με την πάροδο των χρόνων οι ενεργειακές ανάγκες του ανθρώπου αυξάνονταν. Έτσι αναγκάστηκε να χρησιμοποιήσει μηχανές και εγκαταστάσεις όλο και μεγαλύτερης κλίμακας προκειμένου να πάρει την απαιτούμενη ενέργεια στη μορφή, στην οποία θα τον εξυπηρετούσε. Το μεγάλο άλμα έγινε με την βιομηχανική επανάσταση, που προέκυψε από την επινόηση της ατμομηχανής. Στη συνέχεια η πρόοδος ήταν αλματώδης με τις μηχανές εσωτερικής καύσης και την χρήση νέων πηγών ενέργειας, καθώς βασική επιδίωξη ήταν η διαρκής αύξηση του όγκου και του ρυθμού παραγωγής αγαθών για ικανοποίηση, υπαρκτών ή πλασματικών, παλαιών και διαμορφούμενων νέων αναγκών. Επίσης για την μετατροπή, μεταφορά και διαχείριση της παραγόμενης ενέργειας αναπτύχθηκε μια ολόκληρη τεχνολογία βασισμένη στον ηλεκτρισμό. Για την ικανοποίηση των ολοένα αυξανόμενων αναγκών απαιτείται μεγαλύτερη παραγωγή ηλεκτρισμού και αυτό με την σειρά του απαιτεί την χρήση όλο και περισσότερων ενεργειακών πόρων. Έτσι άρχισε να αναπτύσσεται μια άμεση εξάρτηση μεταξύ της ανάπτυξης των κοινωνιών και των διαθέσιμων ενεργειακών πόρων· η ύπαρξη πολυάριθμων ενεργειακών πηγών, που ήταν δυνατό να αξιοποιηθούν με την υπάρχουσα τεχνολογία της εκάστοτε εποχής, πυροδοτούσε μια ταχύτατη ανάπτυξη. Η ανάπτυξη αυτή συχνά οδηγούσε σε υπερεκμετάλλευση των ενεργειακών πηγών και σε αναζήτηση νέων πηγών ή νέων τεχνολογιών, ενώ πολλές φορές αποτέλεσε αιτία διαμάχης μεταξύ κρατών. Κατά την βιομηχανική επανάσταση το κατ'εξοχήν καύσιμο ήταν οι γαιάνθρακες. Μεγάλο μέρος του αντικαταστάθηκε στην συνέχεια από το πετρέλαιο (20ος αιώνας). Το πετρέλαιο, είτε το ίδιο είτε άλλα κλάσματά του κατά την διαδικασία απόσταξης, αποτέλεσε το κατ'εξοχήν καύσιμο για τις μετακινήσεις, ενώ το γεγονός ότι αυτό και τα κλάσματά του έχουν πάρα πολλές χρήσεις (από την παραγωγή ενέργειας, ως την χημική βιομηχανία και την κατασκευή δρόμων) οδήγησε στον χαρακτηρισμό του ως «μαύρος χρυσός». Πριν από αρκετές δεκαετίες υπήρχε η εντύπωση ότι τα ορυκτά καύσιμα ήταν πρακτικά ανεξάντλητα. Ωστόσο σιγά-σιγά, λόγω της υπερεκμετάλλευσης, φάνηκε ότι με την τρέχουσα ανάπτυξη και αύξηση της ζήτησης ενέργειας, τα αποθέματα των καυσίμων για τις υπάρχουσες τεχνολογίες έχουν έναν πολύ περιορισμένο ορίζοντα εκμετάλλευσης. Εκτιμήσεις που έχουν γίνει για τα ορυκτά καύσιμα, υποδεικνύουν ότι το πετρέλαιο επαρκεί (με σημερινούς ρυθμούς κατανάλωσης) για 50 χρόνια, το φυσικό αέριο για 65 χρόνια και οι γαιάνθρακες για 300 χρόνια χρησιμοποιώντας το σύνολο των αξιοποιήσιμων (τεχνικώς και οικονομικώς) αποθεμάτων. Βέβαια όλα τα παραπάνω αποτελούν εκτιμήσεις. Με την πάροδο του χρόνου διαμορφώνονται νέες τεχνολογίες που επιτρέπουν την αξιοποίηση ορισμένων κοιτασμάτων που παλαιότερα δεν ήταν

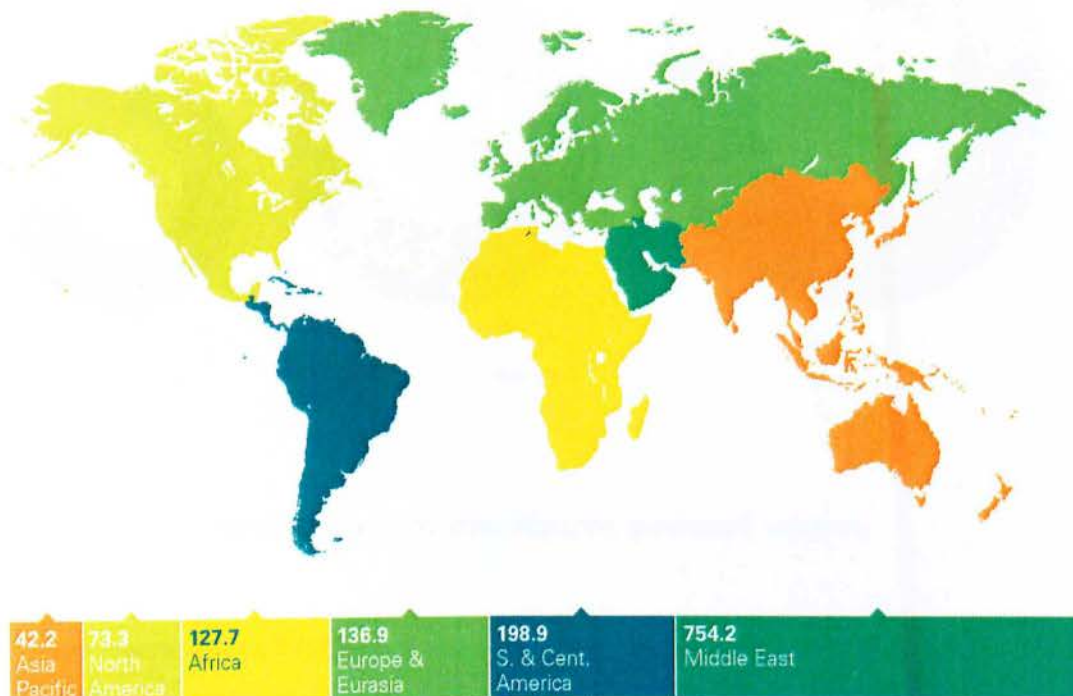
δυνατό να αξιοποιηθούν, ενώ ανακαλύπτονται συνεχώς νέα αποθέματα. Παρ' όλα αυτά το γεγονός ότι η ζήτηση ορισμένων καυσίμων (παραγώγων του πετρελαίου) αυξάνεται συνεχώς σε σχέση με την παραγωγή-προσφορά τους, οδηγεί σε αύξηση της τιμής τους, με συνακόλουθη αύξηση των τιμών αγαθών, πράγμα που προκαλεί τριγμούς σε οικονομίες κρατών. Το σίγουρο είναι ότι ο άνθρωπος έχει αρχίσει να αντιλαμβάνεται ότι οι ενεργειακές πηγές γύρω του δεν είναι ανεξάντλητες αλλά θα πρέπει να τις χρησιμοποιήσει με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη φειδώ και ταυτόχρονα να αναπτύξει τεχνολογίες που να αξιοποιούν καλύτερα τα διαθέσιμα ενεργειακά αποθέματα καθώς και τεχνολογίες που στηρίζονται σε ανανεώσιμες/εναλλακτικές πηγές ενέργειας. Παράλληλα με όλα τα παραπάνω η υπερεκμετάλλευση των ενεργειακών πόρων με γνώμονα το κέρδος έχει άμεση επίπτωση στο περιβάλλον. Η συγκέντρωση ισχύος που συμβαίνει σε έναν οποιοδήποτε θερμικό σταθμό παραγωγής ενέργειας, οδηγεί στον σχηματισμό μιας συνεχούς πηγής ρύπων. Ρύπος είναι κάθε ουσία που απελευθερώνεται στο περιβάλλον με ταχύτερο ρυθμό από αυτόν που μπορεί να απορροφηθεί. Επομένως ρύποι μπορεί να είναι αέριοι (όπως διοξείδιο του άνθρακα, διοξείδιο του θείου και οξείδια του αζώτου), υγροί ή στερεοί (σκόνη, σωματίδια) αλλά μπορεί να είναι ακτινοβολίες, ή έντονοι ήχοι και μεγάλα ποσά θερμότητας. Όλοι αυτοί οι ρύποι υποβαθμίζουν το περιβάλλον, διαταράσσουντα οικοσυστήματα, και την ποιότητα ζωής των ανθρώπων που ζουν ή εργάζονται στην περιοχή. Ειδικά το διοξείδιο του άνθρακα εντείνει το φαινόμενο του θερμοκηπίου, το οποίο φαίνεται ότι οδηγεί σε αύξηση των θερμοκρασιών χρόνο με τον χρόνο. Επομένως είναι αναγκαίο να τεθούν μέτρα για τον περιορισμό των εκλυόμενων ρύπων. Προκειμένου να ικανοποιηθούν οι δυο παραπάνω στόχοι που τέθηκαν, δηλαδή εξοικονόμηση ενεργειακών πόρων και περιορισμός των εκπομπών, έχουν προταθεί πολλά μέτρα. Ανάμεσα σε αυτά είναι και η αύξηση του βαθμού απόδοσης των θερμικών σταθμών με την αναβάθμιση των υπαρχουσών τεχνολογιών και την ανάπτυξη νέων, όπως και θα αναλυθεί στην συνέχεια της εργασίας. Αύξηση του βαθμού απόδοσης σημαίνει ότι με την ίδια ποσότητα καυσίμου θα παράγεται περισσότερη χρήσιμη ενέργεια. Αυτό οδηγεί στην εξοικονόμηση καυσίμου, καθώς περισσότερη ζήτηση θα μπορεί να ικανοποιηθεί, ενώ μπορεί να βοηθήσει στην μείωση της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης, καθώς οι εκλυόμενοι ρύποι θα μειωθούν ανά KWh παραγόμενης ενέργειας. Με αυτόν τον τρόπο θα καταστεί δυνατή η όσο το δυνατό καλύτερη χρήση των φυσικών πόρων, με σεβασμό προς το περιβάλλον και τον ίδιο τον άνθρωπο.

1. ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΝΑ ΤΟΝ ΚΟΣΜΟ

Αποδεδειγμένα αποθέματα πετρελαίου

Proved reserves at end 2009

Thousand million barrels



Εικόνα 1

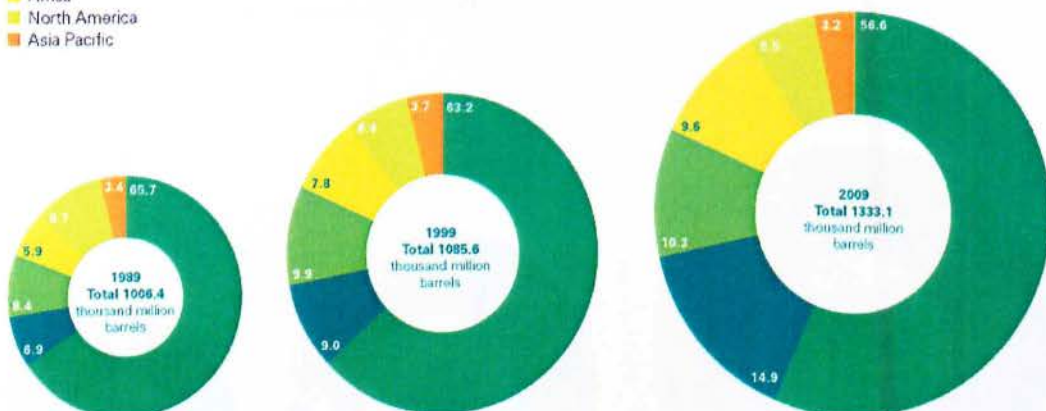
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ
ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ

Διανομή των αποδεδειγμένων αποθεμάτων πετρελαίου

Distribution of proved reserves in 1989, 1999 and 2009

Percentage

- Middle East
- S. & Cent. America
- Europe & Eurasia
- Africa
- North America
- Asia Pacific

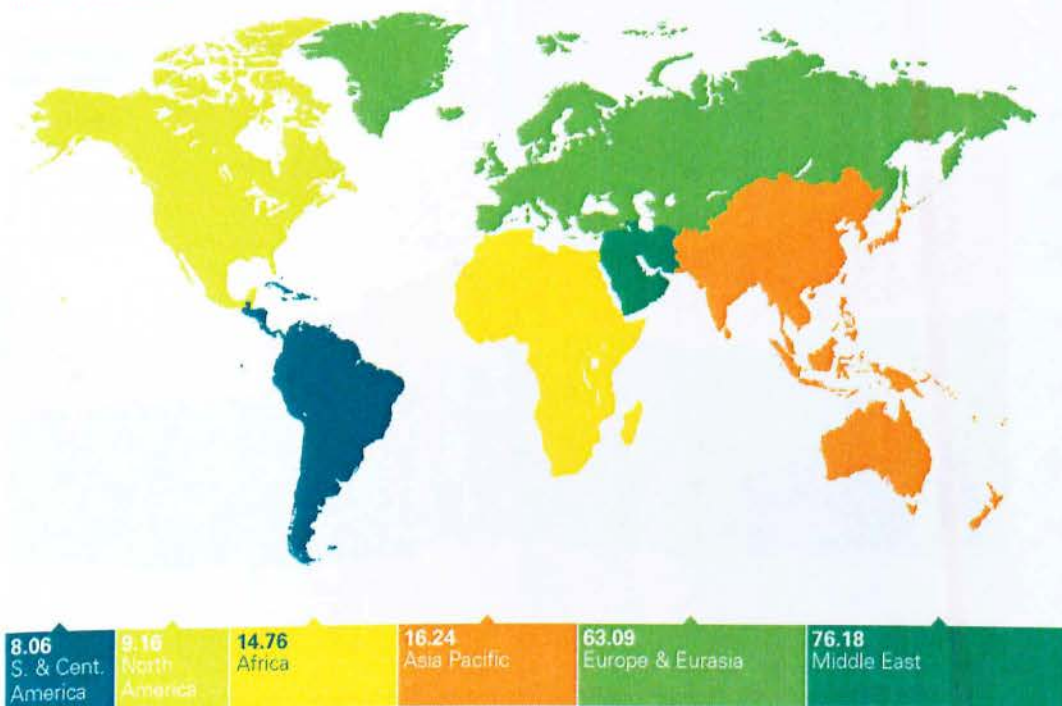


Εικόνα 2

Αποδεδειγμένα αποθέματα φυσικού αερίου

Proved reserves at end 2009

Trillion cubic metres



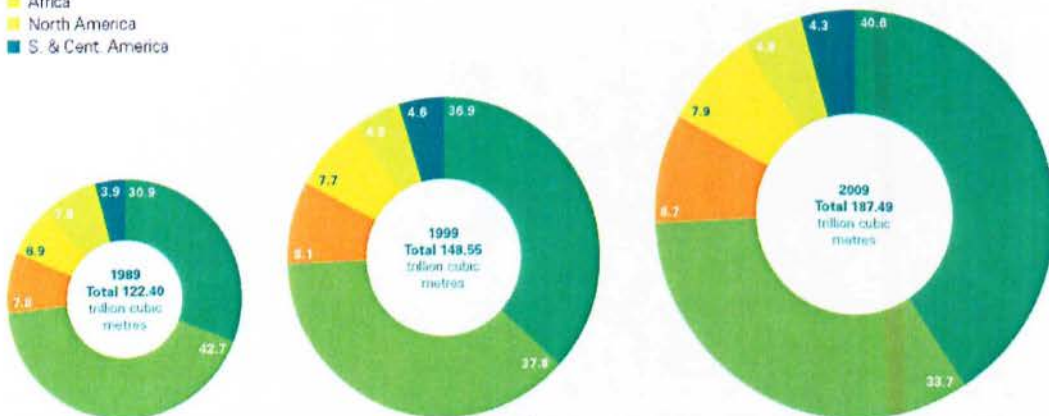
Εικόνα 3

Διανομή του αποδεδειγμένου αποθέματος φυσικού αερίου

Distribution of proved reserves in 1989, 1999 and 2009

Percentage

- Middle East
- Europe & Eurasia
- Asia Pacific
- Africa
- North America
- S. & Cent. America



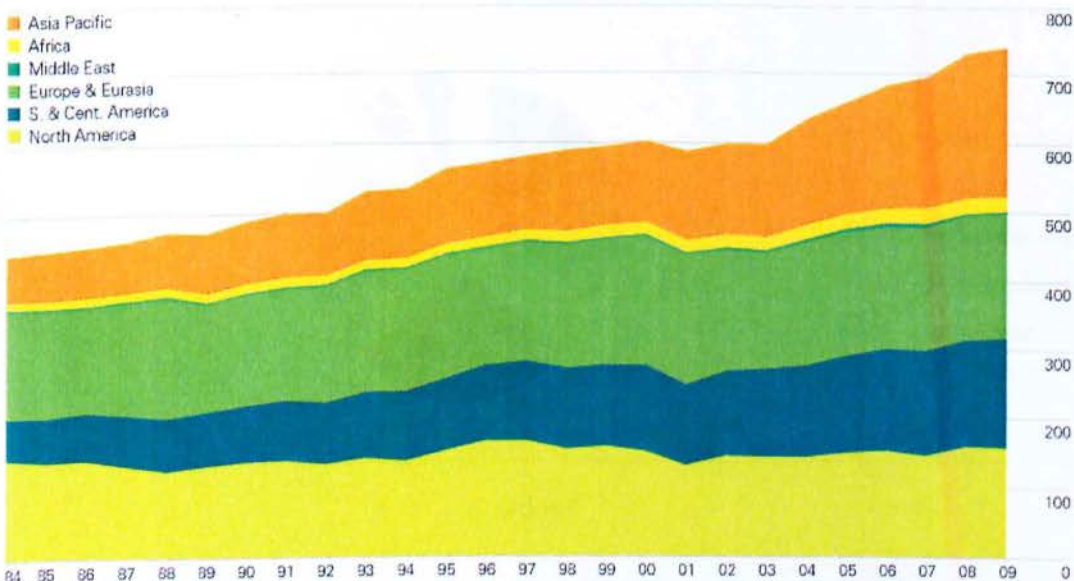
Εικόνα 4

Κατανάλωση υδροηλεκτρικής ενέργειας ανά περιοχή

Consumption by region

Million tonnes oil equivalent

- Asia Pacific
- Africa
- Middle East
- Europe & Eurasia
- S. & Cent. America
- North America



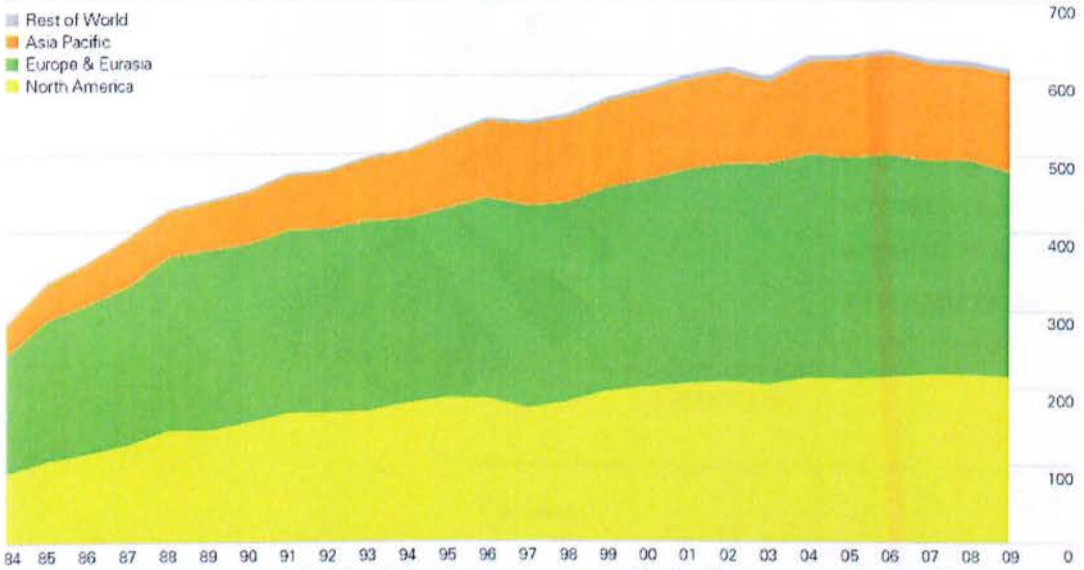
Hydroelectric output grew by a below-average 1.5%, which was nonetheless sufficient to make it the world's most rapidly-growing major fuel in 2009. Growth was led by China, Brazil and the US.

Εικόνα 5

Κατανάλωση πυρηνικής ενέργειας ανά περιοχή

Consumption by region

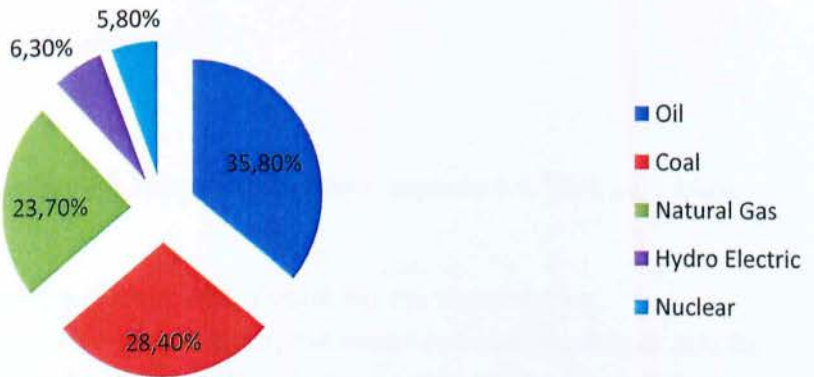
Million tonnes oil equivalent



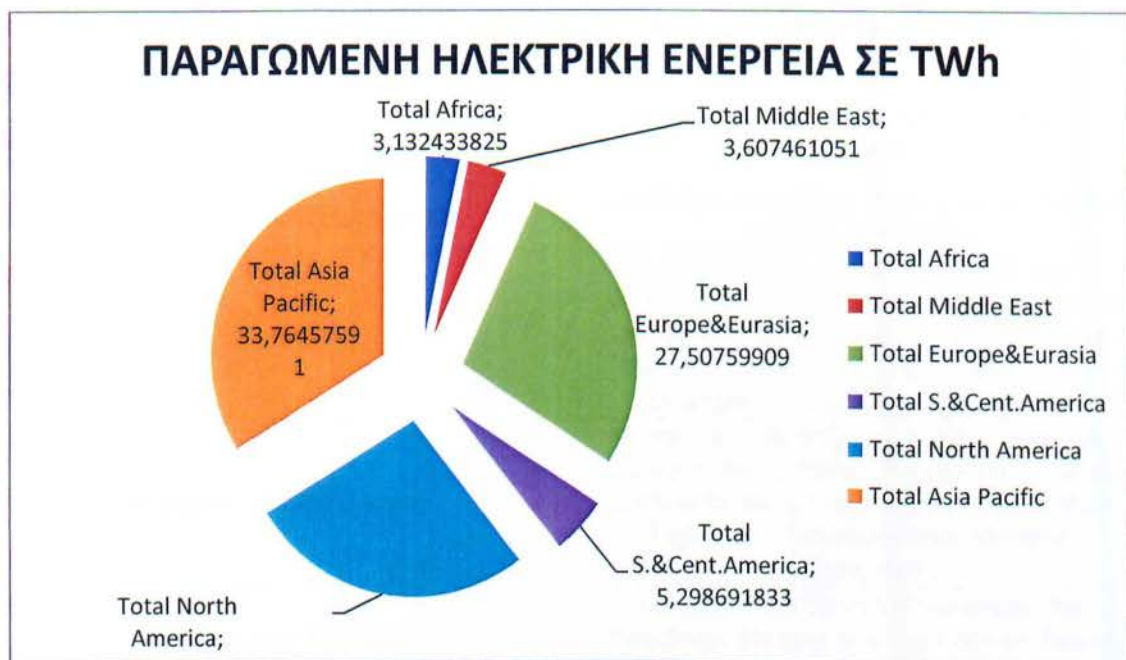
Global nuclear power generation declined by 1.3%, a third consecutive annual decline. Lower output in Europe and Eurasia, as well as North America, outweighed increases in Asia Pacific.

Εικόνα 6

ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΠΡΩΤΟΓΕΝΟΥΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΝΑ ΜΤΟΕ



Εικόνα 7



Εικόνα 8

Πηγή των παραπάνω στοιχείων είναι

<http://www.bp.com/productlanding.do?categoryId=6929&contentId=7044622>

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

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

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

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

Πίνακας: Οι χώρες που περιλαμβάνονται ανά κατηγορία

America:	USA (excluding Puerto Rico), Canada and Mexico.
South and Central America:	Caribbean (including Puerto Rico), Central and South America.
Europe:	European members of the OECD- plus Albania, Bosnia Bulgaria, Croatia, Cyprus, Former Yugoslav Republic of Macedonia, - Gibraltar, Malta, Romania, Serbia and Montenegro, Slovenia, Herzegovina
Former Soviet Union:	Armenia, Azerbaijan, Belarus, Estonia, Georgia, Kazakhstan, Kyrgyzstan, Latvia, Lithuania, Moldova, Russian Federation Tajikistan, Turkmenistan, Ukraine, Uzbekistan.,
Europe and Eurasia:	All countries listed above under the headings Europe and the Former Soviet Union
Middle East:	Arabian Peninsula, Iran, Iraq, Israel, Jordan, Lebanon, Syria.
Total Africa	All countries belonging to the African continent
Asia Pacific:	Brunei, Cambodia, China, China Hong Kong SAR, Indonesia, Japan,

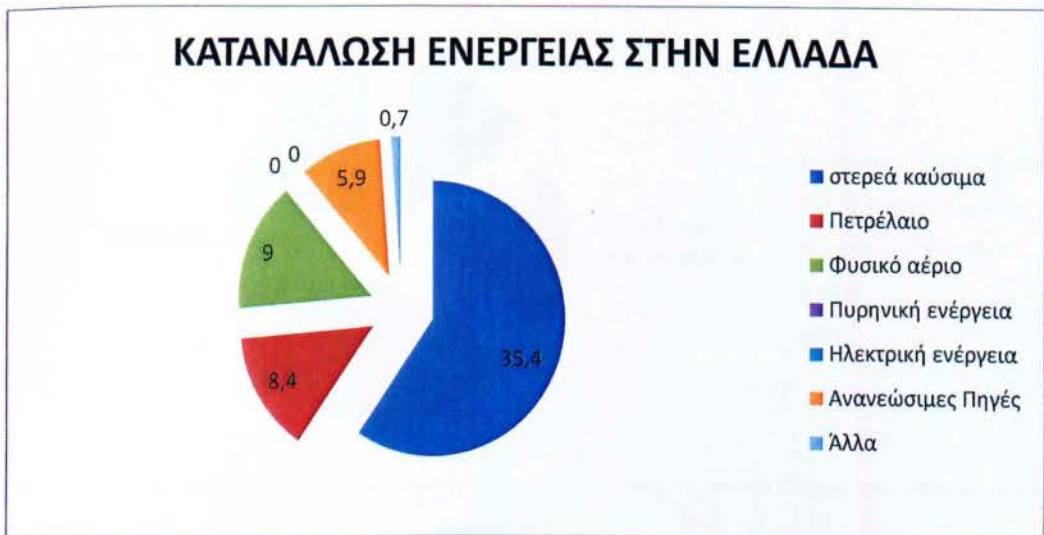
*OECD: Organization for Economic Cooperation and Development

2. ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

(στοιχεία 2004)

Μτοε	Εφοδιασμός πρωτογενούς ενέργειας	Εγχώρια παραγωγή	Καθαρές εισαγωγές	Τελική κατανάλωση ενέργειας	Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (TWh)
Στερεά καύσιμα	9,1	8,5	0,5	0,6	35,4
Πετρέλαιο	17,5	0,1	21,7	13,9	8,4
Φυσικό αέριο	2,2	0	2,2	0,5	9
Πυρηνική ενέργεια	0	0	0	0	0
Ηλεκτρική ενέργεια	0	0	0,2	4,3	0
Ανανεώσιμες Πηγές	1,6	1,6	0	1	5,9
Άλλα	0,2	0	0	0	0,7

Πίνακας 1



Εικόνα 9

Πηγή :

http://ec.europa.eu/energy/energy_policy/doc/factsheets/country/el/mix_el_el.pdf

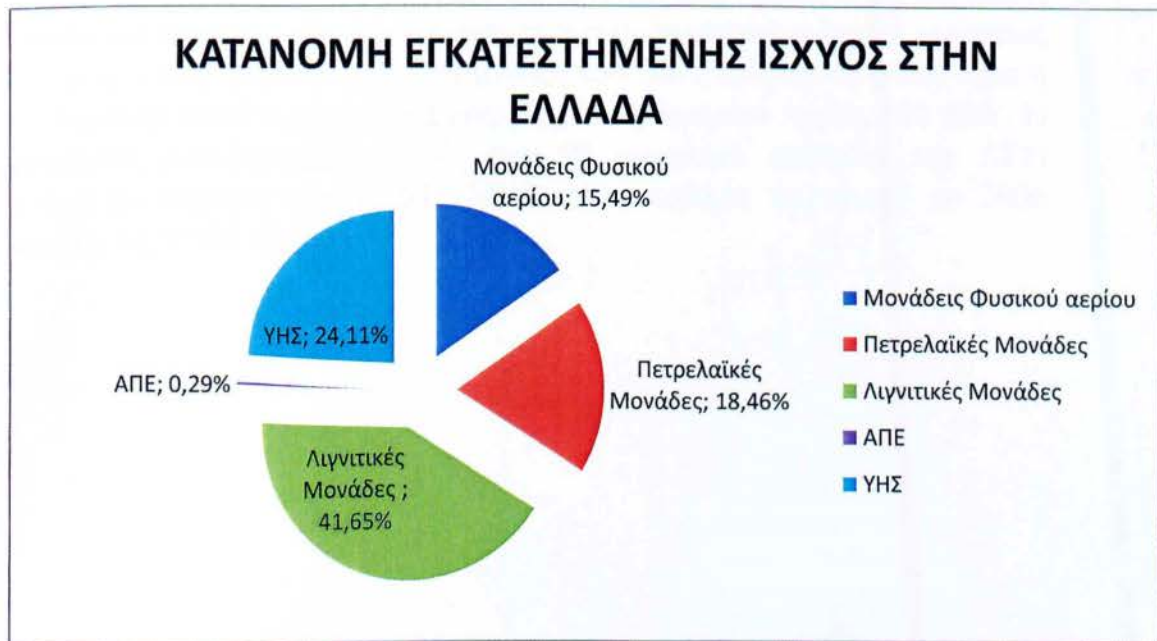
ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ (MW) ΣΤΑΘΜΩΝ ΔΕΗ Α.Ε. (31/12/2006)							
	ΘΗΣ				ΥΗΣ**	ΑΠΕ***	ΣΥΝΟΛΟ
	Λιγνιτικές Μονάδες	Πετρελαϊκές Μονάδες	Μονάδες Φυσικού Αερίου	Σύνολο ΘΗΣ*			
Διασυνδεδεμένο	5.288	750	1.966	8.004	3.060	7	11.071
Κρήτη, Ρόδος & λοιπά αυτόνομα νησιά	-	1.593	-	1.559	1	30	1.624
ΣΥΝΟΛΟ		9.597			3.061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

* Θερμοηλεκτρικοί Σταθμοί

** Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί

*** Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Πίνακας 2



Διάγραμμα 1

3. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

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

- 1) 34 μεγάλοι θερμικοί και υδροηλεκτρικοί σταθμοί
- 2) 3 αιολικά πάρκα του διασυνδεδεμένου συστήματος της ηπειρωτικής χώρας
- 3) 61 αυτόνομοι σταθμοί Κρήτης, Ρόδου και λοιπών νησιών μας (39 θερμικοί, 2 υδροηλεκτρικοί, 15 αιολικά πάρκα και 5 φωτοβολταϊκοί σταθμοί).

Τα τελευταία χρόνια η ΔΕΗ Α.Ε., πέραν της δημιουργίας νέων θερμικών (λιγνιτικών, πετρελαϊκών, φυσικού αερίου) και υδροηλεκτρικών σταθμών, στρέφεται και προς την αξιοποίηση των εναλλακτικών μορφών ενέργειας (άνεμος, ήλιος, γεωθερμία). Την άνοιξη του 2006 εισήλθε στο σύστημα η 5η Μονάδα του Ενεργειακού Συγκροτήματος Λαυρίου ισχύος 385 MW. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των 98 συνολικά σταθμών της ΔΕΗ ανέρχεται σήμερα στα 12.695 MW και η καθαρή παραγωγή το 2006 έφτασε τις 52,07 TWh.

Χάρτης των εγκατεστημένων σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας



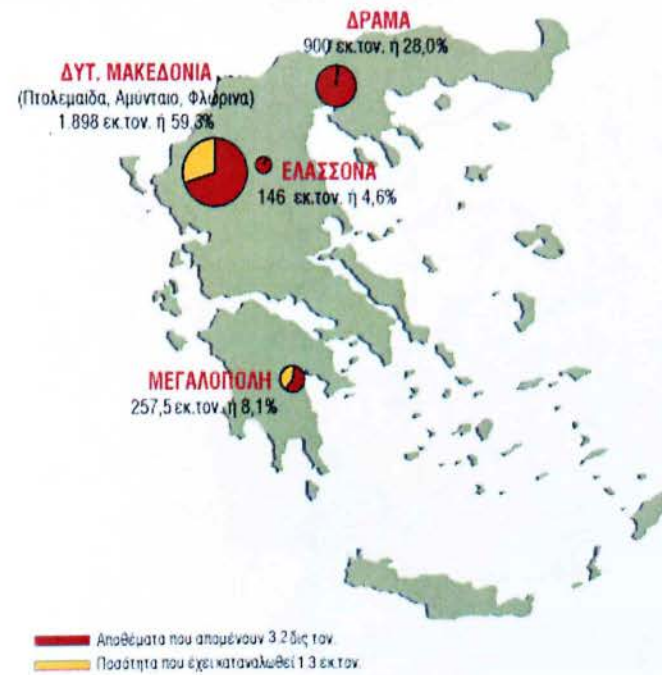
Εικόνα 10

Κατανομή σταθμών παραγωγής της ΔΕΗ Α.Ε. (πηγή: ΔΕΗ Α.Ε.)

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

στο γεγονός ότι οι λιγνιτικές μονάδες βρίσκονται αναγκαστικά στην περιοχή των ορυχείων λιγνίτη, προκειμένου να εξασφαλιστεί μικρό κόστος μεταφοράς.

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



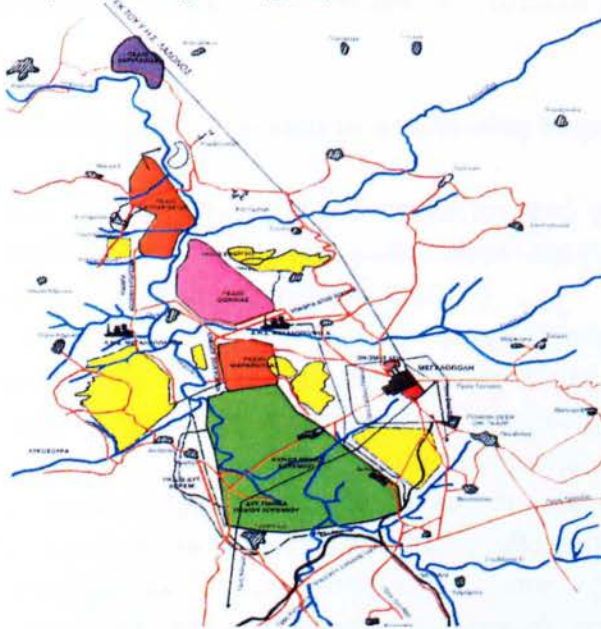
Εικόνα 11

Μεγάλα λιγνιτωρυχεία (πηγή: ΔΕΗ Α.Ε.)

Σήμερα, οι 8 λιγνιτικοί σταθμοί της ΔΕΗ αποτελούν το 42% της εγκατεστημένης ισχύος της και παράγουν το 56% περίπου της καθαρής ηλεκτρικής παραγωγής της ΔΕΗ. Η χρήση του λιγνίτη, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, αποφέρει στην Ελλάδα τεράστια εξοικονόμηση συναλλάγματος. Ο λιγνίτης είναι καύσιμο στρατηγικής σημασίας για τη ΔΕΗ, γιατί έχει χαμηλό κόστος εξόρυξης, σταθερή και άμεσα ελέγξιμη

τιμή και παρέχει σταθερότητα και ασφάλεια ανεφοδιασμού. Συγχρόνως, προσφέρει χιλιάδες θέσεις εργασίας στην ελληνική περιφέρεια, ιδιαίτερα σε περιοχές που εμφανίζουν μεγάλα ποσοστά ανεργίας. Ο λιγνίτης έχει συντελέσει τα μέγιστα στην αύξηση του ΑΕΠ.

Στο Λιγνιτικό Κέντρο Πτολεμαΐδας - Αμυνταίου λειτουργούν σήμερα τέσσερα λιγνιτωρυχεία: Το Ορυχείο Νοτίου Πεδίου, το Ορυχείο Καρδιάς, το Ορυχείο Κυρίου Πεδίου και το Ορυχείο Αμυνταίου (συμπεριλαμβανομένου και του ορυχείου στη Φλώρινα). Επίσης στο Λιγνιτικό Κέντρο ανήκουν το Εργοστάσιο Λιγνιτοπλίνθων και ο ατμοηλεκτρικός σταθμός ΛΙΠΤΟΛ. Στην Πελοπόννησο, στο Νομό Αρκαδίας έχει δημιουργηθεί το Λιγνιτικό Κέντρο Μεγαλόπολης. Το Λιγνιτωρυχείο τροφοδοτεί με λιγνίτη τον ΑΗΣ Μεγαλόπολης Α με εγκατεστημένη ισχύ 550MW (2 μονάδες x 125MW + 1 μονάδα 300MW) και τον ΑΗΣ Μεγαλόπολης Β ισχύος 300 MW.



Εικόνα 12

Λιγνιτικό κέντρο Μεγαλόπολης (πηγή: ΔΕΗ Α.Ε.)

Παρ' όλο που τα αποθέματα λιγνίτη στην Ελλάδα είναι πολυάριθμα, η ποιότητα των ελληνικών λιγνιτών είναι χαμηλή. Η θερμογόνο δύναμη κυμαίνεται από 975 - 1380 kcal/kg στις περιοχές Μεγαλόπολης, Αμυνταίου και Δράμας, από 1261 - 1615 kcal/kg στην περιοχή Πτολεμαΐδας και 1927 - 2257 kcal/kg στις περιοχές Φλώρινας και Ελασσόνας. Σημαντικό συγκριτικό πλεονέκτημα των λιγνιτών της χώρας μας είναι η χαμηλή περιεκτικότητα σε καύσιμο θείο.

4. ΘΕΡΜΙΚΟΙ ΚΥΚΛΟΙ-ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

5.1. Κύκλος Rankine

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

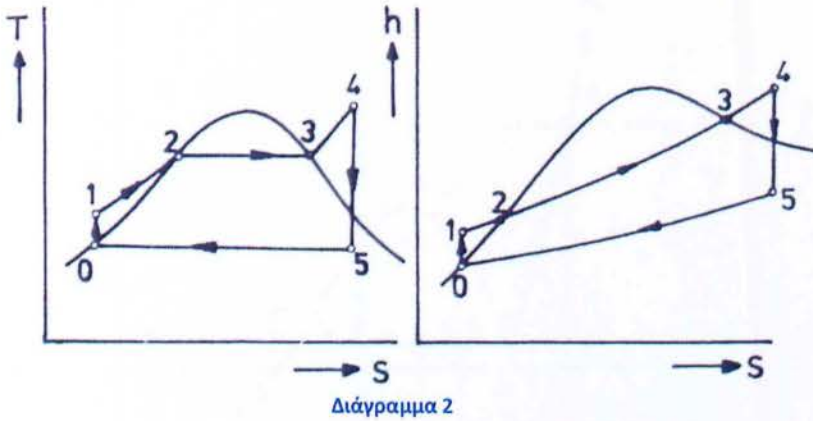
Ο βαθμός απόδοσης του κύκλου, όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, είναι $\eta = \frac{W_{\text{turbine}} - W_{\text{pump}}}{Q_{\text{in}}}$.

Στους σύγχρονους ατμοηλεκτρικούς σταθμούς τυπικοί βαθμοί απόδοσης είναι 40-45%.

Στον απλό κύκλο Rankine γίνονται οι ακόλουθες διεργασίες:

- Διεργασία 1-2 Το εργαζόμενο μέσο αντλείται από χαμηλή σε υψηλή πίεση και καθώς το εργαζόμενο μέσο είναι ασυμπίεστο ρευστό η διεργασία αυτή απαιτεί μικρή σχετικά ισχύ.
- Διεργασία 2-3 Το υψηλής πίεσης υγρό εισέρχεται σε έναν ατμοπαραγωγό, όπου θερμαίνεται σε σταθερή πίεση (πρακτικά πάντα υπάρχουν κάποιες απώλειες πίεσης) από εξωτερική πηγή θερμότητας ώστε να μετατραπεί σε ξηρό ατμό (κορεσμένος στον κύκλο κορεσμένου ατμού, υπέρθερμος στον κύκλο του υπέρθερμου ατμού). Η διεργασία αυτή μπορεί να χωριστεί στα ακόλουθα στάδια:
 - i) Στάδιο προθέρμανσης που γίνεται από την έξοδο της αντλίας (υπόψυκτο νερό) ως την κατάσταση κορεσμού του νερού. Γίνεται στους προθερμαντήρες και στον οικονομητήρα του ατμοπαραγωγού.
 - ii) Στάδιο ατμοποίησης: το κορεσμένο νερό ατμοποιείται πλήρως ούτως ώστε να μετατραπεί σε κορεσμένο ατμό. Συντελείται στον ατμοποιητή, ο οποίος δίνει την λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης ανάλογα με την πίεση του τροφοδοτικού νερού.
 - iii) Στάδιο υπερθέρμανσης: ο κορεσμένος ατμός, που έχει παραχθεί στον ατμοποιητή, εισέρχεται στον υπερθερμαντή και θερμαίνεται μέχρι την υψηλότερη θερμοκρασία του κύκλου. Αν ο κύκλος είναι κύκλος κορεσμένου νερού τότε δεν υπάρχει υπερθερμαντής.

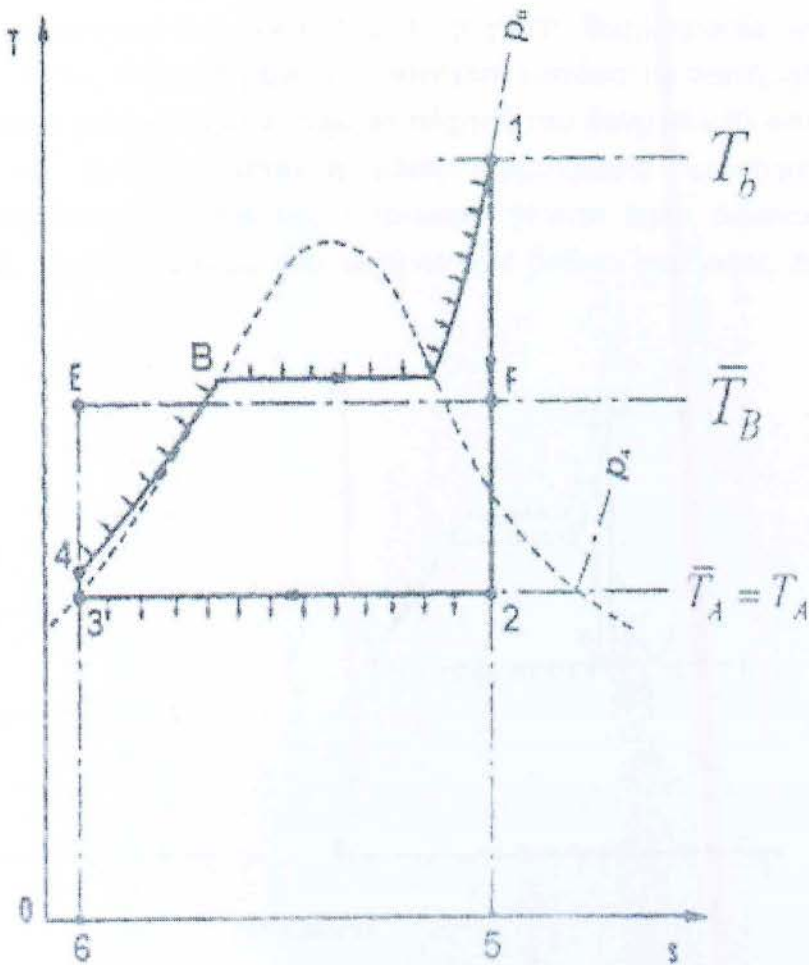
- Διεργασία 3-4 όπου ο ατμός (κορεσμένος στον κύκλο κορεσμένου ατμού, υπέρθερμος στον κύκλο του υπέρθερμου ατμού) οδηγείται και εκτονώνεται στον αμοστρόβιλο. Κατά την εκτόνωση μειώνεται η θερμοκρασία και η πίεση του ατμού. Η πίεση εξόδου καθορίζεται από το κενό του συμπυκνωτή. Ανάλογα με την πίεση εξόδου μπορεί να παρουσιαστεί και μερική συμπύκνωση.
- Διεργασία 4-1 όπου ο υγρός ατμός χαμηλής πίεσης οδηγείται στον συμπυκνωτή όπου ψύχεται σε (περίπου) σταθερή πίεση και μετατρέπεται σε κορεσμένο υγρό. Η πίεση και η θερμοκρασία που επικρατούν στον συμπυκνωτή καθορίζονται από την θερμοκρασία των ψυκτικών αγωγών και πτερυγίων. Οι ψυκτικοί αγωγοί μπορεί να διαρρέονται από αέρα (αερίψυκτος συμπυκνωτής) ή από νερό (υδρόψυκτος συμπυκνωτής).



Ο κύκλος Rankine σε διαγράμματα T-s και h-s

Στον ιδανικό κύκλο Rankine η συμπίεση στις αντλίες και η εκτόνωση στον αμοστρόβιλο θεωρούνται ισεντροπικές, όπως επίσης θεωρείται ότι δεν υπάρχουν απώλειες πίεσης στον αμοπαραγωγό και στον συμπυκνωτή. Ωστόσο στην πραγματικότητα αυτές οι μεταβολές δεν είναι ισεντροπικές, είναι μη αναστρέψιμες και αυτό σημαίνει ότι η αντλία καταναλώνει περισσότερη ενέργεια από την ιδανική αντλία και ο στρόβιλος αποδίδει λιγότερη ενέργεια από τον ιδανικό στρόβιλο. Εκτός αυτού, η απόδοση του αμοστρόβιλου επηρεάζεται από τον σχηματισμό σταγονιδίων νερού. Κατά την εκτόνωση του ατμού ένα μέρος του ατμού συμπυκνώνεται και σχηματίζονται σταγονίδια, τα οποία προσκρούουν στον αμοστρόβιλο με μεγάλη ταχύτητα προκαλώντας διάβρωση αλλά και μειώνοντας την αποδοτικότητα του στρόβιλου. Για να περιοριστεί αυτό το φαινόμενο υπερθερμαίνεται ο ατμός ή γίνεται αναθέρμανση. Ακόμα οι τελευταίες βαθμίδες του στρόβιλου έχουν ιδιαίτερο σχεδιασμό ενώ

υπάρχουν σημεία στο κέλυφος του στροβίλου όπου συγκεντρώνεται και απομακρύνεται τυχόν συμπυκνωμένο νερό. Ο βαθμός απόδοσης του κύκλου Rankine είναι $\eta_{th} = 1 - \frac{Q_{απορριπτόμενο}}{Q_{προσφερόμενο}}$. Ο κύκλος Rankine θα μπορούσε να προσεγγιστεί με έναν ισοδύναμο κύκλο Carnot όπου $\eta_{th} = 1 - \frac{T_{out}}{T_{in}}$ όπου $T_{in} = \frac{\int_2^3 T ds}{Q_{in}}$ μέση θερμοκρασία πρόσδοσης θερμότητας και αντίστοιχα $T_{out} = \frac{\int_4^1 T ds}{Q_{out}}$ μέση θερμοκρασία απόρριψης θερμότητας. Για την αύξηση του βαθμού απόδοσης αρκεί να αυξηθεί το T_{in} και να μειωθεί το T_{out} .



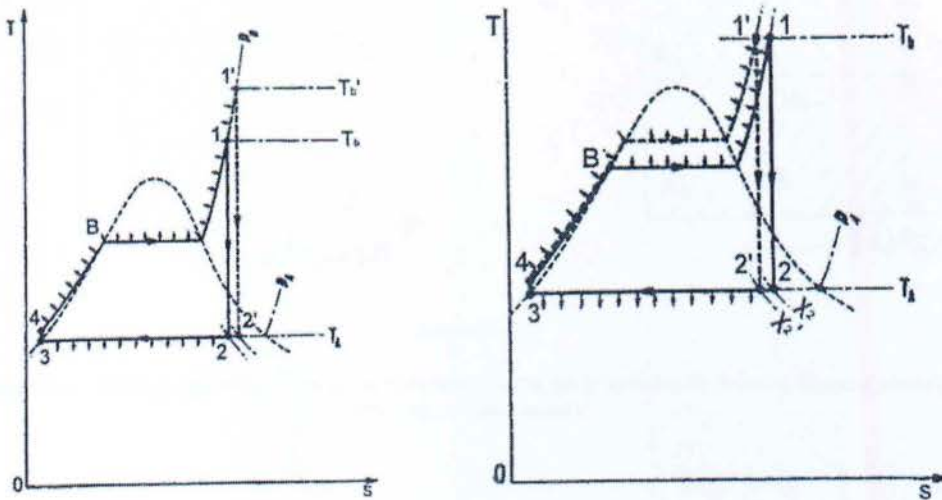
Διάγραμμα 3

Μέσες θερμοκρασίες κύκλου Rankine σε διάγραμμα T-s

Έτσι, προκειμένου να αυξηθεί ο βαθμός απόδοσης του κύκλου μπορούν να γίνουν τα ακόλουθα:

Αύξηση των μέσων θερμοκρασιών και πιέσεων του κύκλου $T_{in} = \frac{\int_2^3 T ds}{q_{in}}$

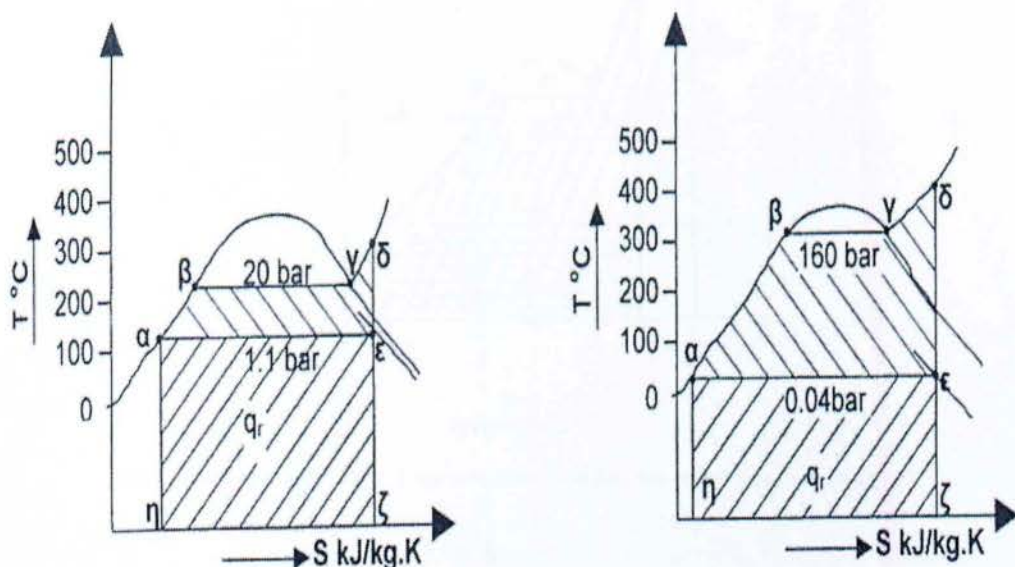
Αυτό σημαίνει ότι ο ατμός οδηγείται στην υπέρθερμη περιοχή σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες και πιέσεις. Αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας αυξάνει την μέση θερμοκρασία, αλλά οδηγεί και σε μείωση της υγρότητας στην έξοδο του ατμοστροβίλου, βελτιώνοντας εκτός από τον βαθμό απόδοσης όλο του κύκλου και τον ισεντροπικό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



Διάγραμμα 4

Επίδραση αύξησης θερμοκρασίας και αύξησης πίεσης

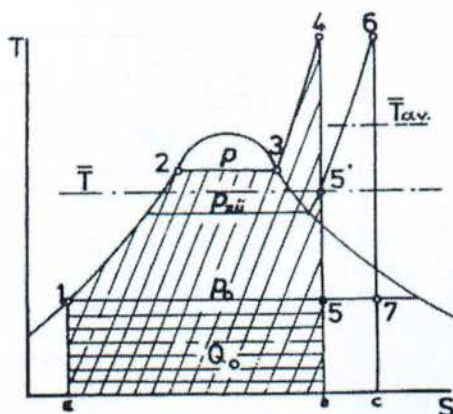
Μείωση των θερμοκρασιών και των πιέσεων συμπίκνωσης. Η θερμοκρασία συμπίκνωσης είναι άμεσα συνδεδεμένη με την πίεση συμπίκνωσης καθώς η συμπίκνωση γίνεται στην διφασική περιοχή. Αυτό το μέτρο έχει ως αποτέλεσμα την μείωση των μέσων θερμοκρασιών απόρριψης της θερμότητας και άμεση αύξηση του βαθμού απόδοσης.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



Διάγραμμα 5

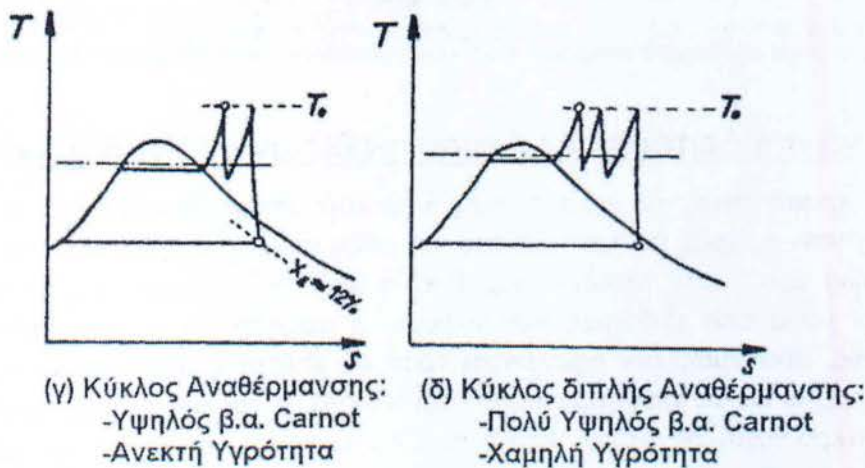
Επίδραση αύξησης μέγιστης θερμοκρασίας και πίεσης με παράλληλη μείωση θερμοκρασίας και πίεσης συμπίκνωσης

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



Διάγραμμα 6

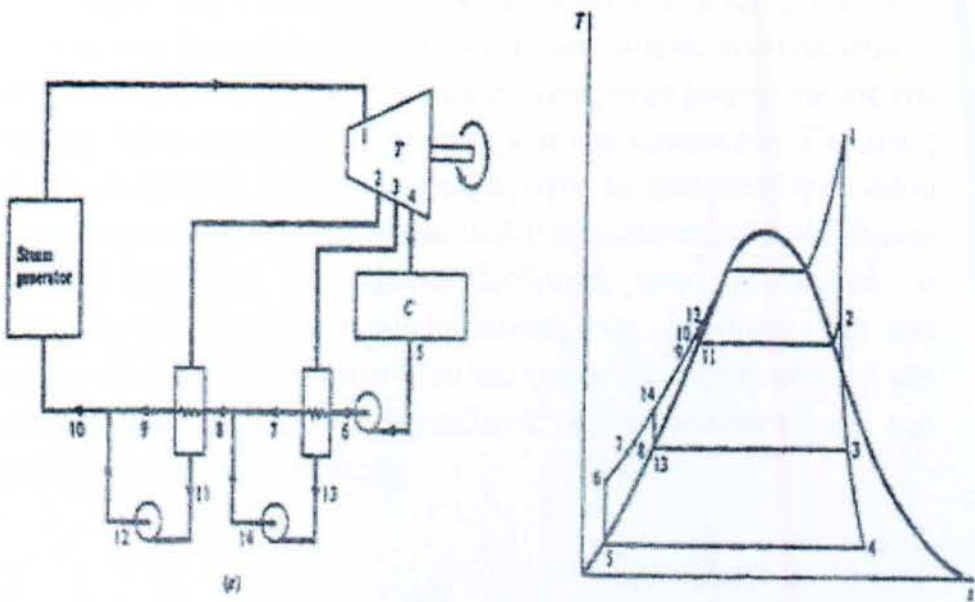
Επίδραση αναθέρμανσης στην απόδοση ισχύος και στην τελική υγρότητα



Διάγραμμα 7

Επίδραση πολλών σταδίων αναθέρμανσης στην απόδοση ισχύος και στην υγρότητα

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



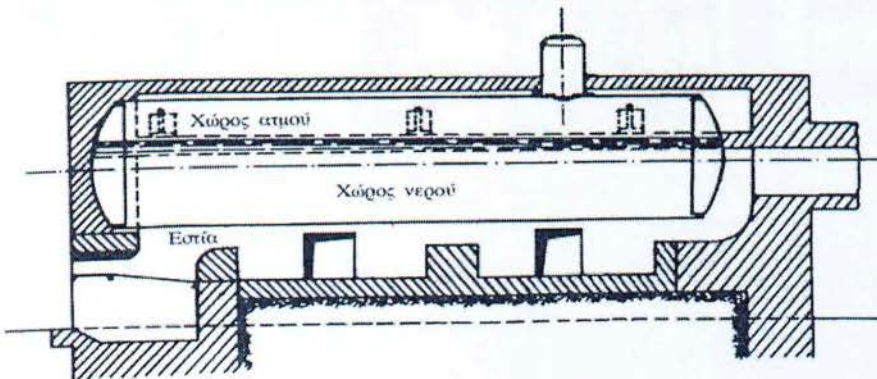
Διάγραμμα 8

Αναγεννητική προθέρμανση με εναλλάκτες και τα συμπυκνώματα οδηγούνται προς τα μπρος

5.2. Τμήματα Ατμοηλεκτρικών σταθμών (ΑΗΣ)

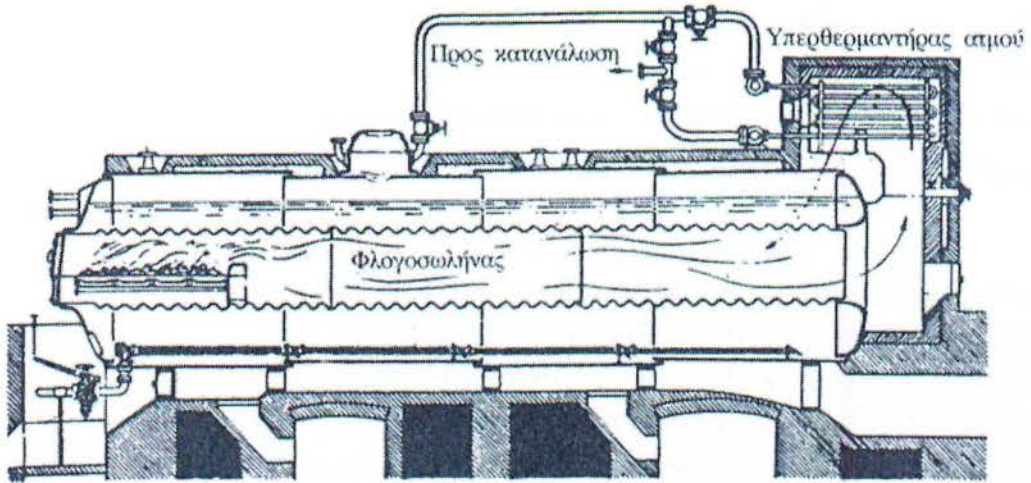
4.2.1. Ατμοπαραγωγός

Το σημαντικότερο κομμάτι ενός Ατμοηλεκτρικού σταθμού (ΑΗΣ) είναι ο ατμοπαραγωγός. Στις πρώτες κατασκευές ατμοπαραγωγών, το εργαζόμενο μέσο(νερό/ατμός) βρισκόταν στο εσωτερικό ενός μεγάλου κυλινδρικού δοχείου (τυμπάνου), ενώ το καυσαέριο κυκλοφορούσε στο εξωτερικό του δοχείου και μέρος της εξωτερικής επιφάνειας αποτελούσε την θερμαινόμενη επιφάνεια του ατμοπαραγωγού. Ωστόσο, επειδή αυτές οι κατασκευές είχαν ελάχιστη θερμαινόμενη επιφάνεια σε σχέση με τον όγκο τους, είχαν μικρό βαθμό απόδοσης, λόγω της μικρής θερμικής εκμετάλλευσης της θερμικής ενέργειας και έδιναν μικρές παροχές ατμού, ενώ ταυτόχρονα ήσαν δαπανηρές. Ακόμα ο ατμός ήταν μικρής πίεσης και θερμοκρασίας, λόγω περιορισμών από την ίδια την κατασκευή. Επόμενες προσπάθειες κατασκευής ήταν ο ατμοπαραγωγός με φλογοσωλήνα, όπου στο εσωτερικό του τυμπάνου βρίσκεται σωλήνας μέσα στον οποίο γίνεται η καύση και αποτελεί την πρώτη διαδρομή του καυσαερίου, ο ατμοπαραγωγός με φλογοσωλήνα και αεριαλούς, παρόμοιος με τον προηγούμενο αλλά στους αεριαλούς το καυσαέριο ρέει σε δεύτερη ή και τρίτη διαδρομή, ενώ υπήρξαν και παραλλαγές των παραπάνω τύπων, π.χ. ατμοπαραγωγός μόνο με αεριαλούς.



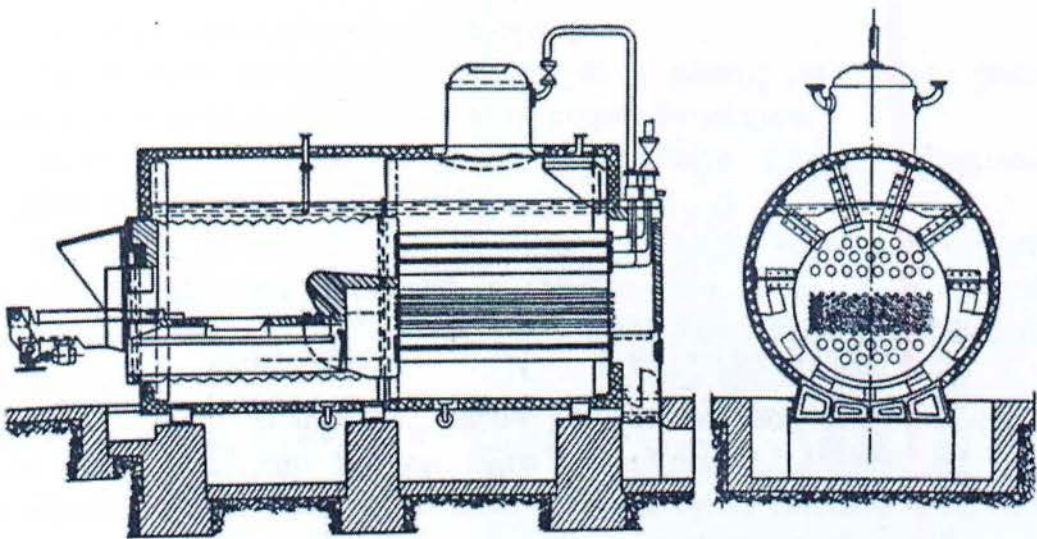
Εικόνα 13

Απλός κυλινδρικός ατμοπαραγωγός



Εικόνα 14

ατμοπαραγωγός με φλογοσωλήνα



Εικόνα 15

Ατμοπαραγωγός με αεριοαυλός

Όλοι οι ατμοπαραγωγοί που περιγράφηκαν παραπάνω χαρακτηρίζονται από μεγάλο υδροθάλαμο, που ένα μέρος της εξωτερικής του επιφάνειας αποτελεί επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας μεταξύ καυσαερίου και νερού. Η εγκατάσταση αυτή χαρακτηρίζεται από μικρή θερμαινόμενη επιφάνεια, ανά μονάδα όγκου της εγκατάστασης. Εξαιτίας αυτού οι ατμοπαραγωγοί αυτοί είναι ακατάλληλοι για υψηλές τιμές

ατμοπαραγωγής γιατί συνεπάγονται τεράστιες κατασκευές μεγάλου κόστους. Πέρα από αυτό και η πίεση του παραγόμενου ατμού είναι πολύ μικρή, καθώς μεγάλη πίεση συνεπάγεται μεγάλα πάχη ελάσματος τυμπάνου και φλογοσωλήνα που σημαίνει ογκώδη και δαπανηρή κατασκευή.

Γι' αυτούς τους λόγους όλοι οι ατμοπαραγωγοί αυτοί αντικαταστάθηκαν, τουλάχιστον στις μεγάλες μονάδες, με κατασκευές βασισμένες σε τελείως διαφορετικές αρχές. Στους νέους ατμοπαραγωγούς, ολόκληρη η επιφάνεια συναλλαγής αποτελείται από πλήθος σωλήνων μικρής διαμέτρου, μέσα στους οποίους κυκλοφορεί το ατμοποιούμενο νερό

ή ο υπερθερμαινόμενος ατμός, ενώ στο εξωτερικό κυκλοφορεί το καυσαέριο και γι' αυτό τον λόγο ονομάστηκαν υδραυλωτοί. Πλεονεκτούν έναντι των παλαιών ως προς:

i) Μεγάλη επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας ανά μονάδα όγκου περιεχόμενου νερού, με συνέπεια, μεγάλη συνεχής παροχή ατμού για μικρό σχετικά όγκο της εγκατάστασης

ii) Επίτευξη μικρών χρόνων ατμοποίησης

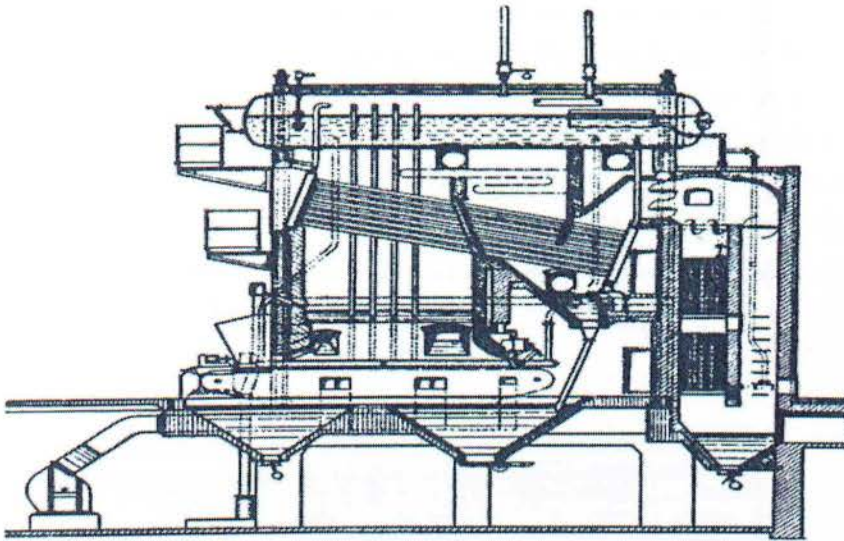
iii) Δυνατότητα παραγωγής ατμού μεγάλης πίεσης με σχετικά μικρά απαιτούμενα πάχη σωλήνων, λόγω της μικρής διαμέτρου.

iv) Ελαστικότητα κατασκευής και δυνατότητα μεγάλων θερμικών φορτίσεων

v) Βελτίωση βαθμού απόδοσης ατμοπαραγωγού, λόγω πληρέστερης εκμετάλλευσης της θερμότητας του καυσαερίου, αλλά και καλύτερης λειτουργίας όλου του θερμοδυναμικού κύκλου λόγω αυξημένων πιέσεων και θερμοκρασιών.

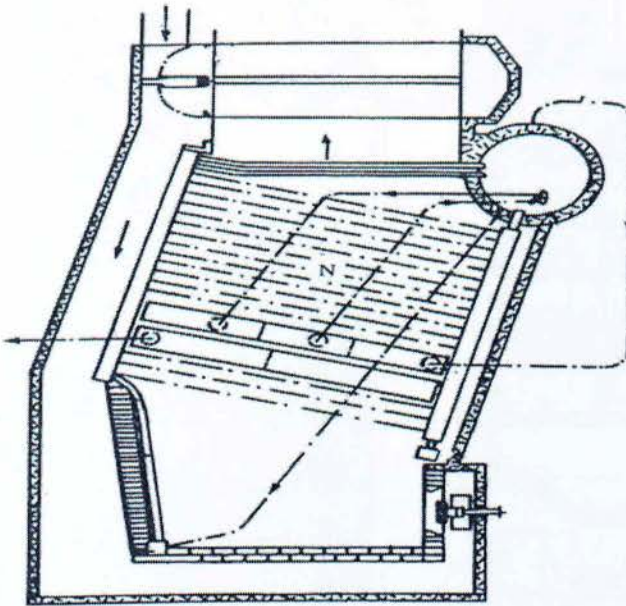
vi) Μικρό κόστος κατασκευής επειδή το υλικό κατασκευής είναι φθηνό αλλά και το κόστος συγκρότησης είναι σχετικά μικρό.

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



Εικόνα 16

Υδραυλτός ατμοπαραγωγός με στοιχεία και υδροθάλαμο τοποθετημένο κατά μήκος

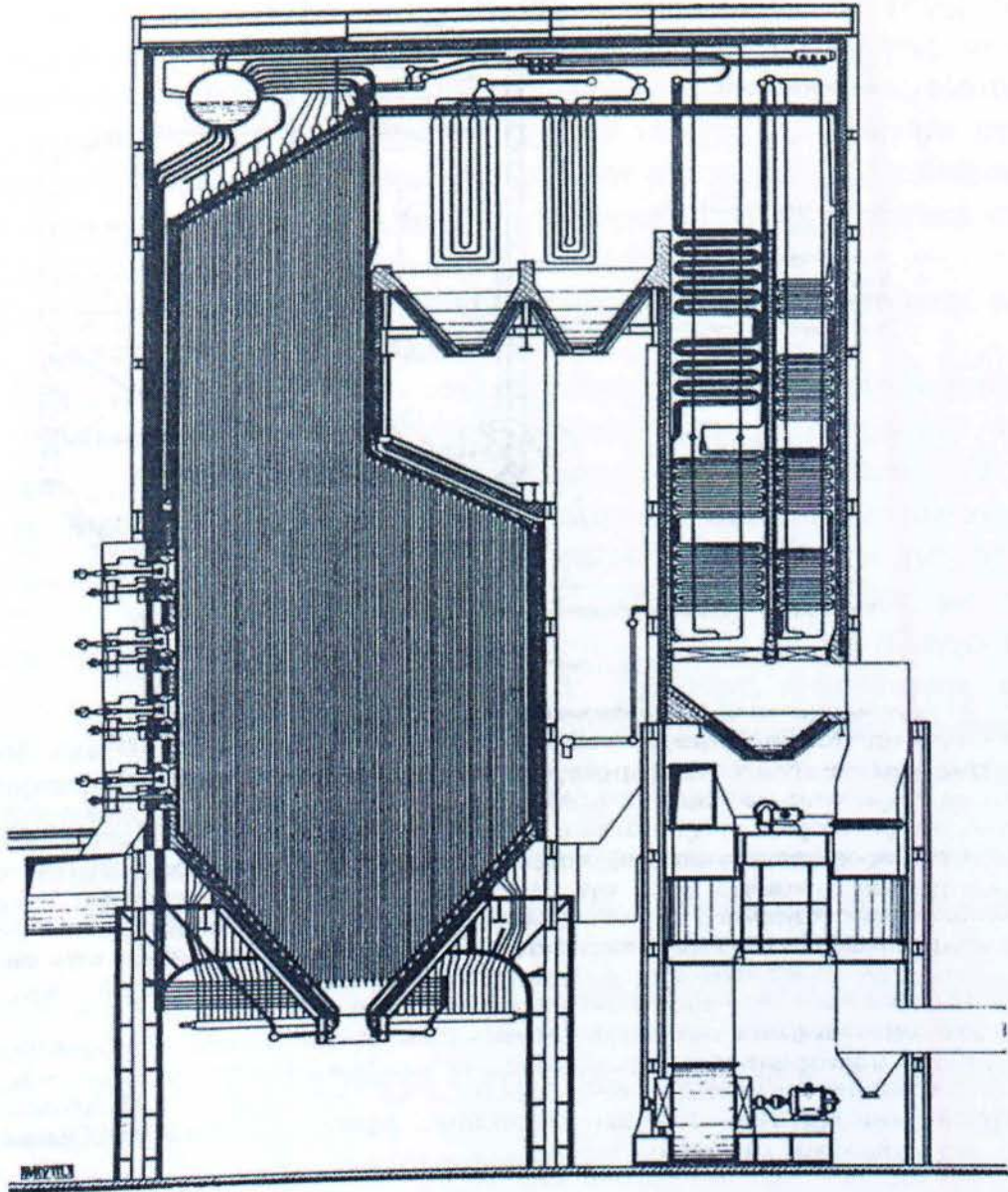


Εικόνα 17

Υδραυλτός ατμοπαραγωγός με στοιχεία και εγκάρσιο υδροθάλαμο

Επίσης, υπάρχει και ένας άλλος τύπος ατμοπαραγωγού που αποτελείται από κυλινδρικά τύμπανα, υδραυλούς και συλλέκτες και ονομάζεται ατμοπαραγωγός με ορθούς υδραυλούς. Το τροφοδοτικό νερό μετά την προθέρμανσή του οδηγείται στο κύριο υδροθάλαμο απ' όπου με σωλήνες μεγάλης σχετικά διατομής με μέτρια ή και χωρίς θερμική φόρτιση, κατεβαίνει προς τους συλλέκτες. Από τους συλλέκτες διαμοιράζεται στους υδραυλούς ατμοποίησης, οι οποίοι μετά την θέρμανση, το οδηγούν ως πλούσιο σε υδρατμό μείγμα, πίσω στον υδροθάλαμο. Κάθε υδραυλός επικοινωνεί κατευθείαν με το εσωτερικό του αντίστοιχου συλλέκτη και

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



Εικόνα 18

Ατμοπαραγωγός με ορθούς υδραυλούς

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

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

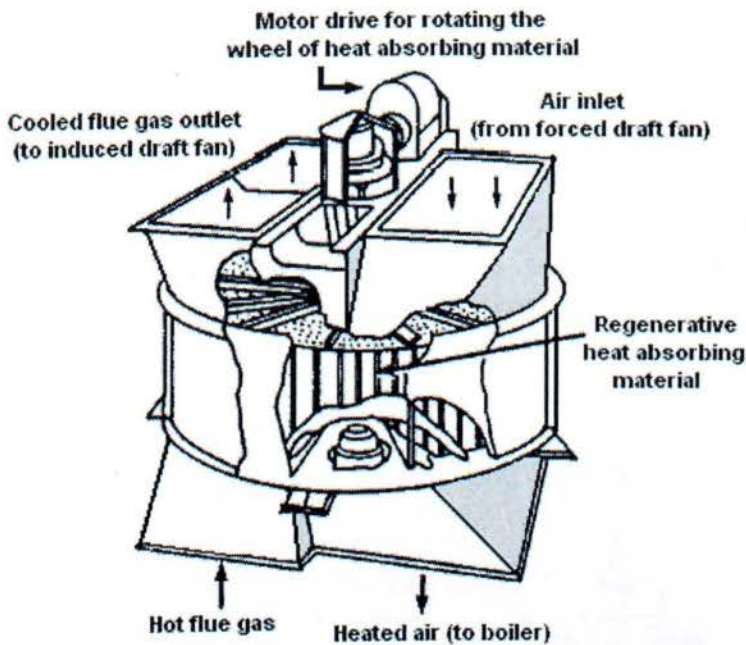
i) **Υπερθερμαντήρες.** Μετά τον ατμοποιητή ακολουθεί το σύστημα υπερθέρμανσης. Με σκοπό την αύξηση της θερμοκρασίας του κορεσμένου ατμού. Ο υπερθερμαντήρας αποτελείται από ένα ή περισσότερα τμήματα (σερπαντίνες σωλήνων) που τοποθετούνται σε διαφορετικά σημεία στην ροή των καυσαερίων. Μεταξύ των τμημάτων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

ii) **Αναθερμαντήρες.** Ο αναθερμαντής ατμού, είναι μια επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας που χρησιμεύει για την αναθέρμανση του ατμού μετά την μερική του αποτόνωση στον ατμοστρόβιλο. Η κατασκευή του αναθερμαντή είναι ίδια με αυτήν του υπερθερμαντή, ενώ η θερμοκρασία εξόδου από τον αναθερμαντή είναι περίπου ίδια με αυτήν του υπερθερμαντή. Και εδώ γίνεται έλεγχος της θερμοκρασίας του ατμού με διάφορους τρόπους, όπως ψεκασμό νερού, επαναφορά ψυχρών καυσαερίων, εναλλάκτη θερμότητας κλπ.

iii) **Προθερμαντήρες νερού (ECO, οικονομητήρας).** Ο προθερμαντήρας νερού προθερμαίνει το νερό τροφοδοσίας του ατμοπαραγωγού, πριν οδηγηθεί στο σύστημα ατμοποίησης. Η θερμότητα που φέρουν ακόμα τα καυσαέρια, τα οποία έχουν προσφέρει ήδη θερμότητα στις επιφάνειες του συστήματος ατμοποίησης, υπερθερμαντήρα και αναθερμαντήρα,

αξιοποιούνται με την θέρμανση τροφοδοτικού νερού μέχρις θερμοκρασίας μικρότερης $30-50^{\circ}\text{C}$ της θερμοκρασίας κορεσμού που αντιστοιχεί στην πίεση λειτουργίας. Αυτό συμβαίνει για να αποφευχθεί ατμοποίηση στον οικονομητήρα σε περίπτωση μείωσης της πίεσης, κάτι που θα επέφερε ανομοιόμορφη κατανομή του μείγματος στους σωλήνες του συστήματος ατμοποίησης. Οι οικονομητήρες αποτελούνται από συλλέκτες εισόδου και εξόδου από σερπαντίνες χαλυβδοσωλήνων γυμνών ή με πτερύγια.

iv) **Προθερμαντήρας αέρα καύσης.** Η χρησιμοποίηση προθερμαντήρων αέρα καύσης, βελτιώνει τον βαθμό απόδοσης του ατμοπαραγωγού, μειώνοντας τη θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων (και κατά συνέπεια την απορριπτόμενη θερμότητα από αυτήν την οδό) και επίσης συμβάλλει σημαντικά στην καλύτερη και ταχύτερη διεργασία της καύσης ιδιαίτερα αν το καύσιμο έχει μεγάλη περιεκτικότητα σε υγρασία. Η τελική θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων από τον προθερμαντήρα αέρα εξαρτάται από το σημείο δρόσου των καυσαερίων και δεν πρέπει ποτέ να είναι μικρότερη από αυτήν, αλλιώς υπάρχει έντονος κίνδυνος διάβρωσης από συμπύκνωση θεικού οξέος (σε περίπτωση που χρησιμοποιείται καύσιμο με θείο). Όσο μεγαλύτερη είναι η περιεκτικότητα του καυσίμου σε θείο τόσο μικρότερη είναι η επιτρεπόμενη μείωση της θερμοκρασίας των καυσαερίων στην έξοδο του προθερμαντή αέρα. Υπάρχουν διάφοροι προθερμαντήρες αέρα, όπως προθερμαντήρες με πλάκες και προθερμαντήρες αέρα με σωλήνες. Οι προθερμαντήρες με σωλήνες αποτελούνται από σωλήνες που διέρχονται από τον χώρο εξαγωγής των καυσαερίων, μέσα στους οποίους διέρχεται ο αέρας καύσης για την προθέρμανσή του. Οι προθερμαντήρες με πλάκες χωρίζονται σε δυο κατηγορίες :στους αναγεννητικούς προθερμαντήρες περιστρεφόμενων πλακών και στους αναγεννητικούς προθερμαντήρες σταθερών πλακών. Στην πρώτη κατηγορία η κατασκευή αποτελείται από μια περιστρεφόμενη συστοιχία πλακών που βρίσκονται σε ένα περίβλημα αποτελούμενο από δυο ή παραπάνω τμήματα. Τα χωρίσματα είναι σφραγισμένα ώστε να διατηρούν τις διαρροές αέρα στο ελάχιστο. Στο ένα τμήμα διέρχεται το καυσαέριο και θερμαίνει τις πλάκες οι οποίες μετά βρίσκονται μέσα στο ρεύμα του αέρα θερμαίνοντάς το. Στην δεύτερη περίπτωση, οι πλάκες δεν περιστρέφονται, αλλά αντίθετα αλλάζουν περιοδικά οι χώροι από τους οποίους διέρχεται ο αέρας και το καυσαέριο.



Εικόνα 19

Προθερμαντές αέρα με καυσαέριο με περιστρεφόμενες πλάκες

4.2.2. Αντλίες

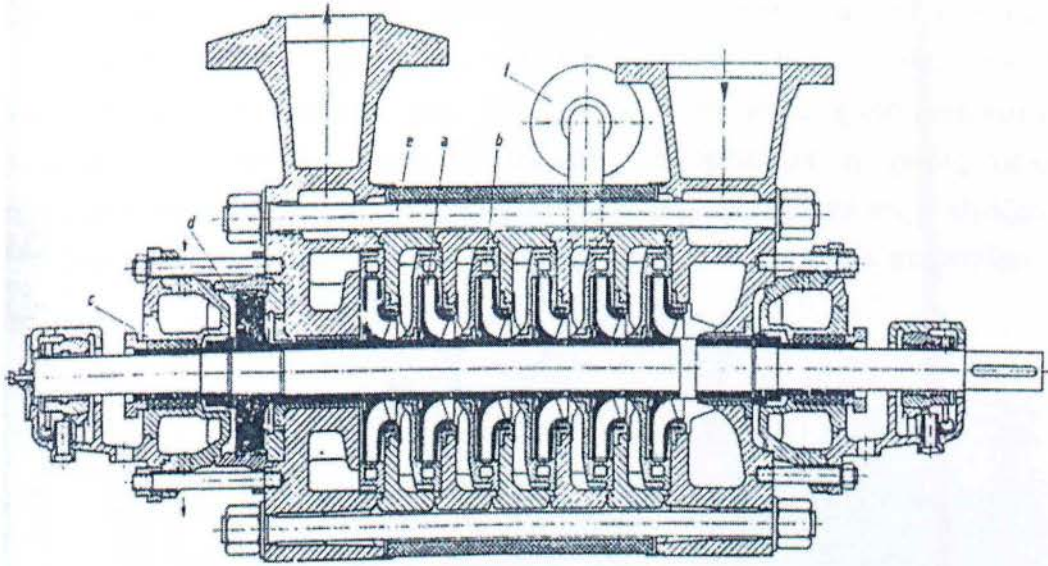
Ένας ατμοηλεκτρικός σταθμός περιλαμβάνει πάρα πολλές αντλίες. Οι κυριότερες είναι :

i) **Τροφοδοτικές αντλίες** που αντλούν το τροφοδοτικό νερό από την τροφοδοτική δεξαμενή και το καταθλίνουν στον ατμοπαραγωγό μέσω των προθερμαντών νερού υψηλής πίεσης. Αυτές οι αντλίες είναι υψηλής πίεσης και μπορεί να είναι φυγοκεντρικές ή θετικής εκτόπισης. Στην περίπτωση των φυγοκεντρικών αντλιών αυτές είναι πολυβάθμιες προκειμένου να φτάσουν την υψηλή πίεση που απαιτείται.

Είναι μεγάλης ισχύος και κινούνται από ηλεκτροκινητήρα που δεν είναι ενσωματωμένος στο κύριο σώμα της αντλίας αλλά είναι μηχανικά συνδεδεμένος με αυτήν, ενώ συνήθως τροφοδοτούνται από δυο ανεξάρτητες μεταξύ τους πηγές ενέργειας. Η αντλία πρέπει να υπερνικήσει την πίεση αμού που σχηματίζεται στον ατμοπαραγωγό. Σε κάθε μονάδα γίνεται εγκατάσταση τριών ηλεκτροκίνητων αντλιών και κάθε αντλία μπορεί να παρέχει το 50% της αναγκαίας παροχής τροφοδοτικού νερού. Έτσι για το πλήρες φορτίο είναι αναγκαία η λειτουργία δυο αντλιών ενώ η τρίτη μένει σε εφεδρεία. Κατά τον υπολογισμό της πίεσης της τροφοδοτικής αντλίας πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν οι ακόλουθες αντιστάσεις:

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

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



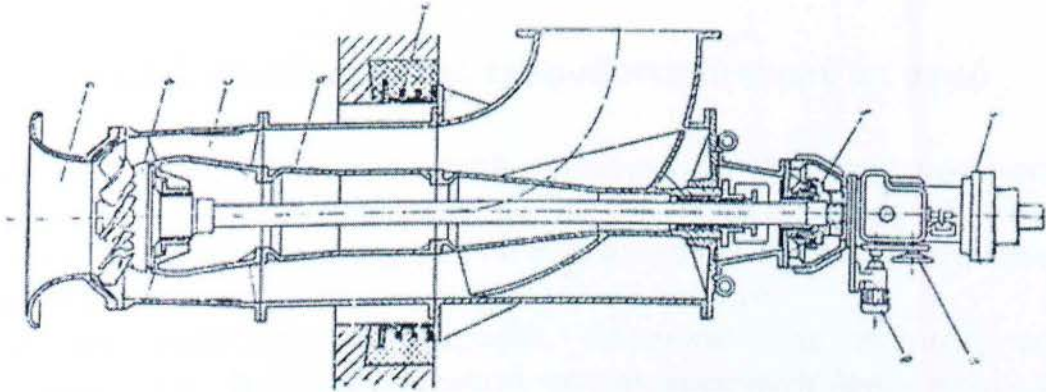
Εικόνα 20

τροφοδοτική αντλία

ii) **Αντλίες συμπυκνώματος** που αντλούν το συμπύκνωμα από τον συμπυκνωτή και το καταθλίβουν μέσω των προθερμαντών χαμηλής πίεσης στον απαεριωτή και στην δεξαμενή τροφοδοτικού νερού. Κατά κανόνα εγκαθίστανται δυο αντλίες συμπυκνώματος μια εκ των οποίων είναι εφεδρική. Κάθε αντλία πρέπει να είναι σε θέση να αντλεί την μέγιστη ποσότητα συμπυκνώματος που μπορεί να προκύψει στις δυσμενέστερες συνθήκες λειτουργίας. Οι αντλίες συμπυκνώματος αντλούν νερό κοντά στην κατάσταση κορεσμού. Εάν η γεωδαιτική διαφορά ύψους μεταξύ της στάθμης του συμπυκνωτή και της αναρρόφησης της αντλίας δεν είναι αρκετή επέρχεται με τον σχηματισμό φυσαλίδων ατμού σπηλαιώση με καταστρεπτικές συνέπειες.

iii) **Αντλίες κυκλοφορίας ψυκτικού νερού**, που είναι οι υπεύθυνες για την κυκλοφορία του ψυκτικού νερού μέσα στον συμπυκνωτή της

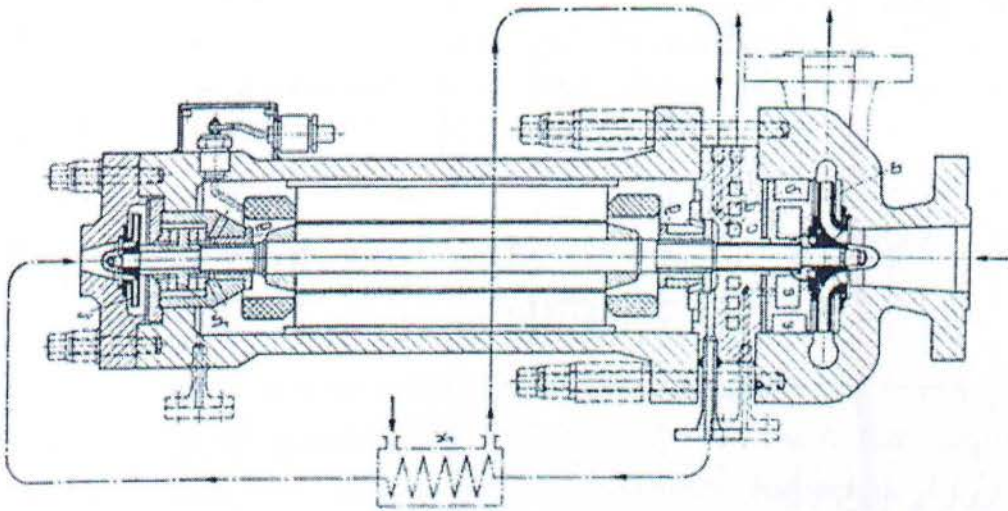
μονάδας. Η παροχή του ψυκτικού νερού καθορίζεται από το νερό που απαιτείται για την συμπύκνωση του ατμού που εξέρχεται από τον στρόβιλο. Το απαιτούμενο ψυκτικό νερό για τις υπόλοιπες λειτουργίες είναι περίπου το 5-10% του νερού για την ψύξη του συμπυκνωτή. Η πιο συνήθης διάταξη αυτών των αντλιών είναι δυο αντλίες κάθε μια από τα οποίες διακινεί τα 2/3 της συνολικής παροχής. Οι αντλίες που χρησιμοποιούνται στους μεγάλους σύγχρονους ατμοηλεκτρικούς σταθμούς είναι τύπου έλικας και συνήθως τοποθετούνται κάτω από την στάθμη του νερού για την εξοικονόμηση χρημάτων για την κατασκευή ειδικών στεγανών χώρων για την εγκατάστασή τους. Είναι συνήθως κατακόρυφου άξονα και για την περιστροφή τους χρησιμοποιούνται τριφασικοί κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα με ή χωρίς μειωτή στροφών ανάλογα με τις στροφές της αντλίας. Μπορούν να ρυθμίζονται εύκολα χωρίς απώλειες με μεταβολή της γωνίας κλίσης των πτερυγίων.



Εικόνα 21

αντλία ψυκτικού μέσου

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



Εικόνα 22

Αντλία ανακυκλοφορία

4.2.3. Προθερμαντής τροφοδοτικού νερού με ατμό

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

- Προσδίδεται λιγότερη θερμότητα εξωτερικά για ατμοποίηση
- Οι σταδιακές προθερμάνσεις (που είναι απαραίτητες για να αποφευχθούν οι θερμικές τάσεις λόγω της μεγάλης θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ εξόδου του συμπυκνωμένου νερού από τον συμπυκνωτή και εισόδου θερμών καυσαερίων στον οικονομητήρα) έχουν ως αποτέλεσμα να μειώνεται η μη αντιστρεπτότητα της μεταφοράς θερμότητας, αυξάνοντας τον βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης. Η προθέρμανση του τροφοδοτικού νερού μπορεί να γίνει σε ανοικτούς ή κλειστούς προθερμαντές. Στους ανοικτούς προθερμαντές ο ατμός αναμειγνύεται άμεσα με το προς προθέρμανση τροφοδοτικό νερό. Ένα παράδειγμα ανοικτού προθερμαντή είναι ο απαερωτής. Οι κλειστοί προθερμαντές είναι ουσιαστικά εναλλάκτες θερμότητας στους οποίους συμπυκνώνεται ατμός προσδίδοντας θερμότητα στο νερό, ενώ είναι πιθανό να υποψυχθεί το συμπύκνωμα δίνοντας επιπλέον θερμότητα για

την προθέρμανση του νερού. Το συμπύκνωμα που προκύπτει μπορεί είτε να οδηγηθεί στον συμπυκνωτή (συμπυκνώματα οδηγούνται πίσω), είτε με αντλίες να αυξηθεί η πίεσή του και να αναμειχθεί με το τροφοδοτικό νερό (συμπυκνώματα οδηγούνται εμπρός).

4.2.4. Απαερίωτής

Η απαερίωση είναι μια διαδικασία απαραίτητη για την σωστή λειτουργία του ατμοπαραγωγού προκειμένου να απαλλάξει το νερό από αέριες διαλυμένες ουσίες που μπορεί να προκαλέσουν διάβρωση. Γενικά ονομάζουμε απαερίωση την διαδικασία με την οποία απομακρύνονται από το νερό διαλυμένα αέρια, η παρουσία των οποίων θα προκαλούσε επικίνδυνες διαβρώσεις σε σωλήνες, τύμπανα, συλλέκτες και προθερμαντήρες νερού. Αυτά τα αέρια είναι το οξυγόνο, το διοξείδιο του άνθρακα και το χλώριο. Το οξυγόνο και το διοξείδιο του άνθρακα είναι διαλυμένα στο φυσικό νερό μαζί με άλλα αδρανή αέρια, όπως άζωτο. Το χλώριο βρίσκεται σε νερό που έχει υποστεί διαδικασία απομάκρυνσης των βλαβερών μικροοργανισμών. Η σπουδαιότερη μέθοδος απαερίωσης είναι η θερμική απαερίωση. Ο τρόπος λειτουργίας αυτής της μεθόδου βασίζεται στο ότι η διαλυτότητα των αερίων στο νερό ελαττώνεται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία. Σύμφωνα με τους νόμους του Henry και του Dalton η διαλυτότητα ενός αερίου στο νερό είναι κατευθείαν ανάλογη της μερικής πίεσης του αερίου στο νερό. Με την αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει η πίεση του υδρατμού και μειώνονται έτσι οι μερικές πιέσεις των διαλυμένων αερίων. Στο σημείο βρασμού η πίεση υδρατμού είναι τόσο υψηλή ώστε οι μερικές πιέσεις των αερίων να είναι μηδενικές. Έτσι θερμαίνεται το νερό μέχρι την θερμοκρασία βρασμού, οπότε μηδενίζεται η διαλυτότητα των αερίων και τα αέρια μπορούν να απομακρυνθούν. Τα αέρια μπορούν να εξέλθουν μόνον από την εξωτερική επιφάνεια του νερού που βρίσκεται σε κατάσταση βρασμού. Για τον λόγο αυτό σε μια εγκατάσταση θερμικής απαερίωσης θα πρέπει να δημιουργείται όσο το δυνατό μεγαλύτερη επιφάνεια νερού. Αύξηση της επιφάνειας του νερού γίνεται με καταιονισμό και διασκορπισμό του νερού ώστε να δημιουργηθούν σωματίδια. Έτσι τα αέρια μπορούν να απομακρυνθούν γρήγορα, εφόσον το νερό έχει θερμανθεί αρκετά.

Απαεριωτής κενού

Σε μερικές περιπτώσεις τοποθετείται ο απαεριωτής σε περιοχή υποπίεσης. Οι απαεριωτές κενού εργάζονται με παρόμοιο τρόπο με τους προηγούμενους απαεριωτές, με την διαφορά ότι για την διατήρηση του κενού και την απομάκρυνση των αερίων χρησιμοποιείται αντλία κενού. Ο απαεριωτής αυτού του τύπου είναι πιο δαπανηρός λόγω της αντλίας κενού ενώ έχει και το μειονέκτημα ότι υπάρχει κίνδυνος εισροής αέρα στο νερό λόγω υποπίεσης. Συμπληρωματικά με όλες τις παραπάνω μεθόδους απαερίωσης μπορεί να γίνει και χημική απαερίωση με την προσθήκη υδραζίνης (N_2H_4) που αντιδρά με το οξυγόνο ως εξής



Απαεριωτής ανάμειξης με πτώση νερού

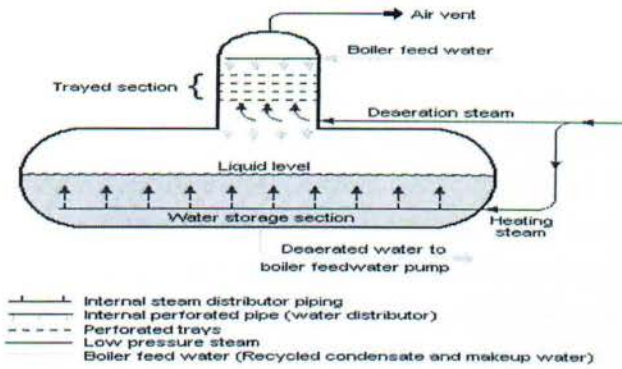
Είναι ο πιο διαδεδομένος τύπος θερμικού απαεριωτή. Το νερό εισέρχεται στην κεφαλή του απαεριωτή, όπου με την βοήθεια ακροφυσίων ή άλλης διάταξης κατανέμεται σ' όλη την διατομή του κυλίνδρου του απαεριωτή. Με την τοποθέτηση κατάλληλων διαφραγμάτων επιβραδύνεται η πτώση του νερού, ενώ συγχρόνως διασπάται σε όλο και μικρότερα σταγονίδια. Έτσι προκύπτει μεγάλη επιφάνεια νερού που μεταβάλλεται συνέχεια.

Η διαδρομή διάχυσης των αερίων προς την επιφάνεια είναι πολύ μικρή και έτσι μπορούν εύκολα τα αέρια να απομακρυνθούν από το νερό.

Σε αντίθετη ροή προς το νερό δηλαδή από κάτω προς τα πάνω ρέει υπέρθερμος ατμός ο οποίος προθερμαίνει το νερό μέχρι το σημείο βρασμού. Μια καλή απαερίωση μπορεί να επιτευχθεί μόνο αν η θερμοκρασία του νερού είναι το πολύ $15^\circ C$ περίπου κάτω από το

σημείο βρασμού. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται ικανοποιητική ροή ατμού από κάτω προς τα άνω ενώ τα αέρια με μια ποσότητα ατμού εξέρχονται από την κεφαλή του απαεριωτή. Το απαεριωθέν νερό συγκεντρώνεται στην τροφοδοτική δεξαμενή κάτω από ένα

στρώμα ατμού. Εάν έχουμε υψηλές απαιτήσεις για τροφοδοτικό νερό, τότε υπάρχει στην τροφοδοτική δεξαμενή μια επιπλέον εγκατάσταση παροχής ατμού. Με αυτόν τον τρόπο το νερό διατηρείται σε κατάσταση κορεσμού. Η εγκατάσταση αυτή χρησιμεύει και για προθέρμανση του τροφοδοτικού νερού μέχρι το σημείο βρασμού



Εικόνα 23

Απαεριοτής ανάμιξης με πτώση νερού

4.2.5. Ατμοστρόβιλος

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

Οι ατμοστρόβιλοι χωρίζονται σε διάφορες κατηγορίες :

α) Ανάλογα με τον τύπο των περυγώσεων που χρησιμοποιούνται. Ο σχεδιασμός της κινητής και σταθερής περυγώσης ενός στροβίλου στηρίζεται στην αεροθερμοδυναμική ανάλυση της ροής. Χαρακτηριστικό των περυγώσεων είναι ο βαθμός αντίδρασης. Με βάση τον βαθμό αντίδρασης μπορούμε να διακρίνουμε δυο τύπους βαθμίδων, τις βαθμίδες δράσης και αντίδρασης. Ο βαθμός αντίδρασης ορίζεται ως η ενθαλπική πτώση που συμβαίνει στην κινητή περυγώση (στάτορα) προς την συνολική ενθαλπική πτώση όλης της βαθμίδας δηλαδή $r = \frac{h_2 - h_3}{h_1 - h_3} = \frac{p_2 - p_3}{p_1 - p_3}$.

Ταυτόχρονα δηλώνει που γίνεται η μεταβολή της πίεσης.

Έτσι στους στροβίλους δράσης ο βαθμός αντίδρασης (r) είναι κοντά στο 0 και η μεταβολή πίεσης είναι πολύ μεγαλύτερη στην σταθερή περυγώση.

Τέτοιοι ατμοστρόβιλοι είναι οι :

i) Μονοβάθμιοι στρόβιλοι δράσης

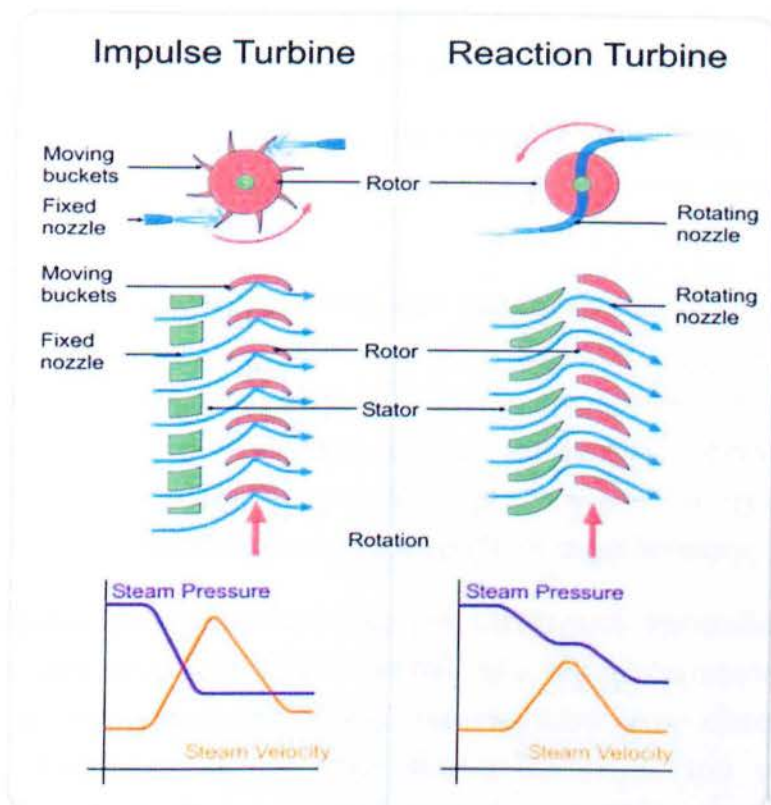
ii) Βαθμίδες ταχύτητας (Curtis)

iii) Βαθμίδες πίεσης (Rateau)

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

Πίνακας 3. Πλεονεκτήματα –Μειονεκτήματα Στροβίλων Δράσης-Αντίδρασης

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



Εικόνα 24

Βαθμίδες δράσης (αριστερά) και αντίδρασης (δεξιά)

β) Με κριτήριο τις συνθήκες τροφοδοσίας και τη ροή ατμού.

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

-Ατμοστροβίλοι αντίθλιψης όπου ο ατμός στην έξοδο έχει μεγάλη πίεση, δηλαδή 1- 6bar. Αυτοί οι στροβίλοι χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν καταναλώσεις ατμού σε μεγάλη πίεση και θερμοκρασία ή

ακόμα και ένας άλλος στρόβιλος χαμηλότερης πίεσης. Η πίεση εξόδου του στρόβιλου καθορίζεται από μια ρυθμιστική βαλβίδα που ρυθμίζει

την πίεση ανάλογα με τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής. Αυτές είναι συχνές στα διωλιστήρια, στις χαρτοβιομηχανίες, στις εγκαταστάσεις αφαλάτωσης.

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

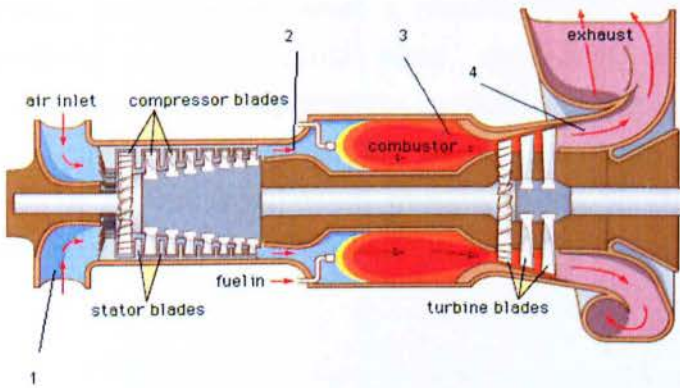
-Ατμοστρόβιλοι με απομαστεύσεις για εξωτερική τροφοδοσία, όπου μέρος του ατμού απομαστεύεται σε κατάλληλο μέρος του ατμοστρόβιλου, ώστε να έχει την επιθυμητή πίεση, για την επιτέλεση κάποιας άλλης διεργασίας. Έτσι δεν εκτονώνεται όλη η ποσότητα του ατμού στο στρόβιλο. Σε έναν θερμικό σταθμό οι απομαστεύσεις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

4.3. Κύκλος αεριοστρόβιλου- Κύκλος Joule-Brayton

4.3.1. Γενικά

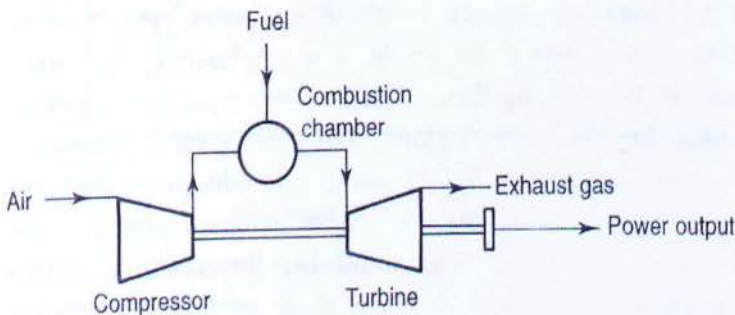
Οι αεριοστρόβιλοι ανήκουν στην κατηγορία των **μηχανών εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ)** και μπορούν να χωριστούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- **Αεροπορικοί αεριοστρόβιλοι (στροβιλοαντιδραστήρες)**, που χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για την κίνηση των μέσης και υψηλής ταχύτητας πτήσεως αεροσκαφών.
- **Βιομηχανικοί αεριοστρόβιλοι**, η δομή των οποίων είναι ίδια με αυτή των αεροπορικών εκτός του γεγονότος ότι οι πρώτοι αντί ακροφυσίου, φέρουν **στρόβιλο ισχύος (power turbine)** βιομηχανικού τύπου (ή στρόβιλος χαμηλής πίεσης), ο οποίος παρέχει όλο το ωφέλιμο έργο της εγκατάστασης, κινώντας ηλεκτρική γεννήτρια ή έλικα πλοίου, ή γενικώς ένα φορτίο G



Εικόνα 25

Αεριοστρόβιλος



Διάγραμμα 9

Κύκλος Brayton

Οι αεριοστρόβιλοι λειτουργούν με βάση τον κύκλο Joule- Brayton.

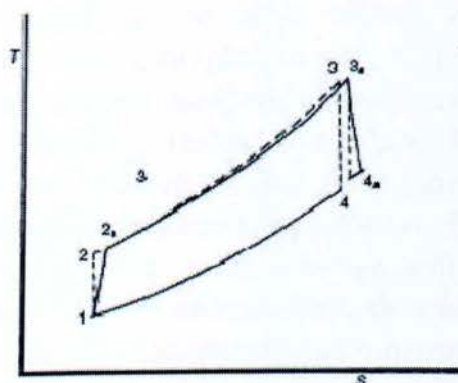
Ο απλός αεριοστρόβιλος αποτελείται από τρία τμήματα(αναλύονται στις παρακάτω παραγράφους):

- τον **συμπιεστή**
- τον **θάλαμο καύσης**
- τον **στρόβιλο**

Οι διεργασίες που συμβαίνουν στον απλό ιδεατό κύκλο Joule- Brayton είναι οι ακόλουθες:

ο αέρας του εξωτερικού περιβάλλοντος αναρροφάται στο συμπιεστή, όπου και συμπιέζεται, μετά οδηγείται στο θάλαμο καύσης, όπου αναμειγνύεται με το καύσιμο και αναφλέγεται και τέλος, τα καυσαέρια οδηγούνται στο στρόβιλο, όπου και εκτονώνονται μέχρι την τελική πίεση που είναι η ατμοσφαιρική .

Στον απλό κύκλο θεωρείται ότι τόσο η συμπίεση όσο και η εκτόνωση είναι ισηντροπικές και η καύση είναι ισόθλιπτη. Ωστόσο στην πραγματικότητα επειδή δεν υφίστανται μεταβολές χωρίς απώλειες η απόδοση ενός πραγματικού κύκλου είναι μικρότερη. Έτσι στον πραγματικό κύκλο έχουμε αδιαβατική συμπίεση, πρόσδοση θερμότητας σε, περίπου, σταθερή πίεση και αδιαβατική εκτόνωση.



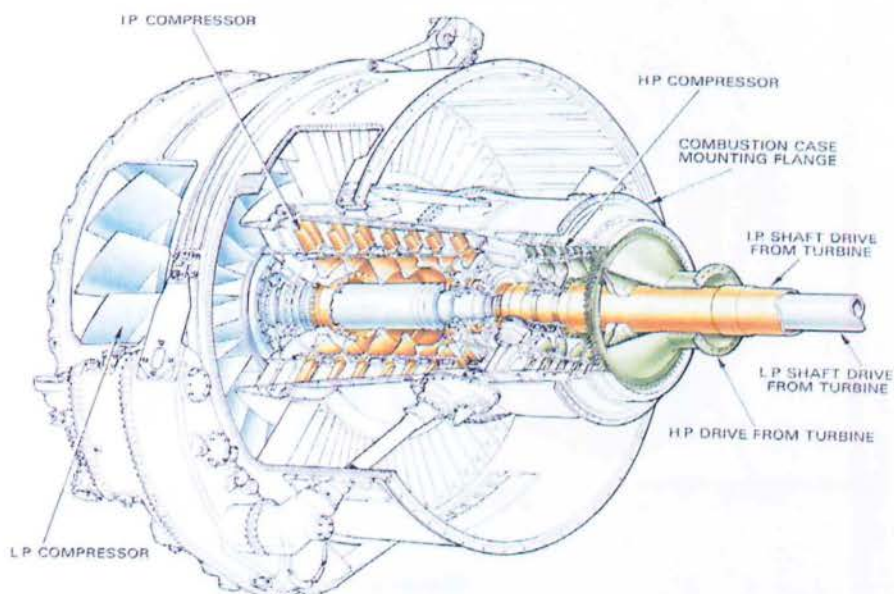
Διάγραμμα 10

Πραγματικός κύκλος σε T-s

και οδηγείται στον αγωγό εξόδου. Από το τελευταίο αυτό τμήμα απαιτείται η δημιουργία ομοιόμορφης κατανομής πίεσης στην έξοδο του συμπιεστή.

Οι συμπιεστές αξονικής ροής χρησιμοποιούν συστοιχίες από περιστρεφόμενα πτερύγια που προοδευτικά συμπιέζουν την ροή. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι γιατί η συμπίεση γίνεται με επιβράδυνση της ροής και υπάρχει μέγιστο επιτρεπόμενο όριο για την επιβράδυνση ανά βαθμίδα, προκειμένου να μην αυξηθούν πολύ οι απώλειες. Η μέγιστη τιμή λόγου πίεσης ανά βαθμίδα που έχει επιτευχθεί σήμερα είναι της τάξης του 2 ενώ συμπιεστές υψηλών επιδόσεων έχουν τιμή λόγου πίεσης ανά βαθμίδα της τάξης του 1,4 με 1,6. Οι συμπιεστές αξονικής ροής χρησιμοποιούνται όταν απαιτούνται μεγάλες παροχές. Οι συστοιχίες των πτερυγίων τοποθετούνται σε ζεύγη κινητής και σταθερής πτερύγωσης. Η κάθε βαθμίδα πτερυγίων επιβραδύνει την ροή, αυξάνοντας τη στατική πίεση. Συγκεκριμένα, η κινητή πτερύγωση επιταχύνει την ροή, ωστόσο η ροή σε σχέση με τα κινητά πτερύγια επιβραδύνεται. Ακόμα ο στάτορας κάθε βαθμίδας επιβραδύνει περαιτέρω την ροή ενώ την προετοιμάζει για να εισέλθει στην επόμενη βαθμίδα. Ένα άλλο χαρακτηριστικό των συμπιεστών είναι ότι λόγω της επιβραδυνόμενης ροής παρουσιάζουν μεγάλες ευαισθησίες στην αλλαγή των συνθηκών λειτουργίας. Φαινόμενα όπως η αποκόλληση της ροής μπορούν να οδηγήσουν σε ασταθή λειτουργία που μπορεί να είναι καταστρεπτική για τον συμπιεστή. Αυτού του είδους τα φαινόμενα περιορίζουν την λειτουργία του. Ακόμα κάθε αλλαγή του σημείου λειτουργίας συνεπάγεται αλλαγή του βαθμού απόδοσης, επειδή η επιβράδυνση ευνοεί τον σχηματισμό οριακών στρωμάτων. Γι' αυτό και ο συμπιεστής παρουσιάζει μέγιστη απόδοση σε στενές περιοχές λειτουργίας του. Η αξονική ταχύτητα σε έναν συμπιεστή είναι άμεσα συνδεδεμένη με το λόγο πίεσης και την αύξηση της συγκέντρωσης ισχύος που επιτυγχάνεται με αύξηση της διακινούμενης παροχής. Η υπέρμετρη αύξηση όμως της αξονικής ταχύτητας περιορίζεται από αεροδυναμικούς λόγους, καθώς ο αριθμός Mach σχετικά με τα πτερύγια δεν πρέπει να ξεπερνά κάποια όρια γιατί αλλιώς αυξάνονται υπέρμετρα οι απώλειες. Σε παλαιότερες μηχανές ήταν αναγκαίο η ροή σχετικά με τα πτερύγια να είναι υποηχητική. Όμως κατάλληλος σχεδιασμός των πτερυγίων των πρώτων βαθμίδων έδωσε την δυνατότητα κατασκευής συμπιεστών που λειτουργούν με διηχητική ροή στην πρώτη ή στις πρώτες βαθμίδες. Επιθυμητό θα ήταν να κατασκευαστεί συμπιεστής με πλήρως υπερηχητική ροή. Ωστόσο μέχρι σήμερα, αν και τέτοιοι συμπιεστές έχουν κατασκευαστεί εργαστηριακά, παρουσιάζονται σημαντικά προβλήματα που δεν επιτρέπουν την χρησιμοποίησή τους στις εφαρμογές.

4.3.2. Συμπιεστής



Εικόνα 26

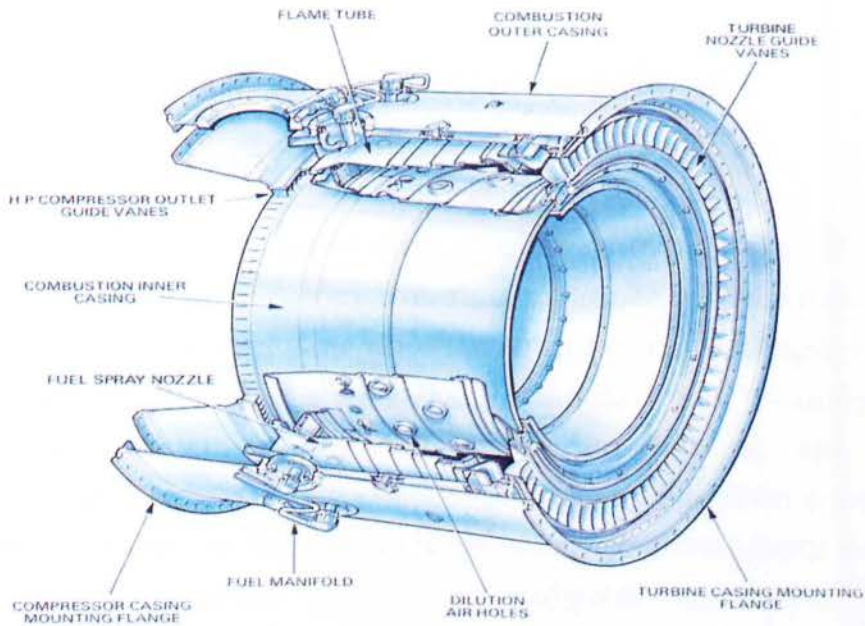
Συμπιεστής

Μπορεί να είναι αξονικής ή ακτινικής ροής. Και οι δυο τύποι είναι δυναμικές περιστρεφόμενες μηχανές που χρησιμοποιούν πτερυγώσεις για να αλληλεπιδρούν με τον αέρα.

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

Ανάλογα με τον τρόπο διάταξης και την μορφή των πτερυγίων συναντώνται και διάφοροι τύποι πτερωτών. Γενικά οι ακτινικοί συμπιεστές που χρησιμοποιούνται σε αεριοστρόβιλους δεν έχουν προσδεδμεμένα τα πτερύγια της πτερωτής στην κεφαλή τους και έχουν σχεδόν πάντοτε ένα πρώτο αξονικό τμήμα, δηλαδή επαγωγό. Το ρευστό που εξέρχεται από τον διαχύτη συλλέγεται από το σπειροειδές κέλυφος

4.3.3. Θάλαμος Καύσης



Εικόνα 27

Θάλαμος Καύσης

Τα κύρια μέρη ενός τυπικού θαλάμου καύσης είναι τα ακόλουθα:

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

Το πρωτεύον τμήμα του αέρα δημιουργεί τοπικά στοιχειομετρικό μείγμα. Το ενδιάμεσο μείγμα βοηθά στην επιπλέον ελάττωση CO και H για την ολοκλήρωση της καύσης, ενώ το ρεύμα αραίωσης ρυθμίζει την τελική θερμοκρασία προς τον στρόβιλο. Σημαντικό είναι ότι για την σωστή λειτουργία του αεριοστροβίλου απαιτείται η επίτευξη και η διατήρηση μιας ευσταθούς φλόγας. Για να συμβεί αυτό μέσα σε μια συνεχή ροή αερίου, απαιτείται ταχύτητα μετώπου φλόγας ίση με την ταχύτητα της ροής. Η ταχύτητα μετάδοσης εξαρτάται από τον ρυθμό της αντίδρασης

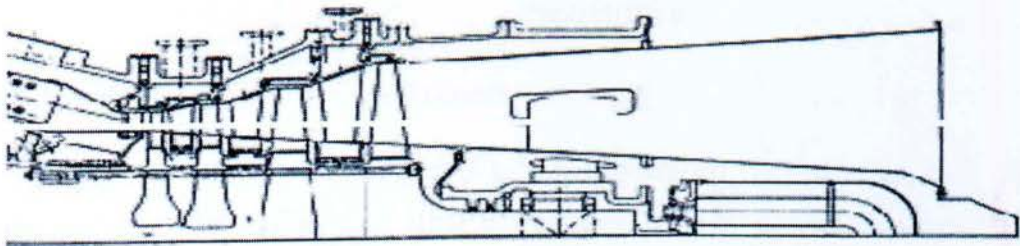
που με την σειρά της εξαρτάται από την χημική κινητική και τον βαθμό τύρβης.

4.3.4. Καύσιμα Αεριοστρόβιλων

Οι βιομηχανικοί αεριοστρόβιλοι είναι ογκώδεις μηχανές κατάλληλες για λειτουργία σε ένα ευρύ πεδίο καυσίμων χαμηλών δυνατοτήτων και κυρίως χαμηλού κόστους, που αποτελεί σήμερα ένα σοβαρό κριτήριο επιλογής καυσίμου. Τα κυριότερα καύσιμα των βιομηχανικών αεριοστροβίλων είναι το φυσικό αέριο, τα ελαφρά και βαρεία αποστάγματα του πετρελαίου, το προπάνιο και το βουτάνιο (συστατικά υγραερίου). Από αυτά το βουτάνιο και το προπάνιο είναι άριστα καύσιμα, διότι μπορούν να καούν εύκολα με ελάχιστο καπνό και στερεά υπολείμματα άνθρακα, δημιουργούν φλόγα με χαμηλό συντελεστή ακτινοβολίας και δεν σχηματίζουν διαβρωτικά οξείδια. Έχουν όμως το μειονέκτημα του μεγάλου ειδικού όγκου (πρόβλημα αποθήκευσης). Το ίδιο μειονέκτημα έχει και το φυσικό αέριο, που είναι μείγμα αερίων υδρογονανθράκων (κυρίως μεθανίου και αιθανίου), που έχει την ίδια ποιότητα καύσης με το βουτάνιο και το προπάνιο με σχετικό πλεονέκτημα ότι πολλές φορές έχει χαμηλότερο κόστος. Όταν δεν είναι δυνατή η χρησιμοποίηση των ανωτέρω αερίων καυσίμων, χρησιμοποιούνται σε αρκετά ευρεία κλίμακα τα ελαφρά αποστάγματα του πετρελαίου, δηλαδή το κοινό ελαφρύ καύσιμο Diesel, που σε σύγκριση με αυτά των αεροπορικών αεριοστρόβιλων είναι χαμηλότερης ποιότητας και κόστους. Σαν πλεονεκτήματά τους μπορούν να θεωρηθούν η καλή τους καύση, η δυνατότητα καλού μηχανικού διασκορπισμού τους χωρίς να απαιτείται προς τούτο προθέρμανση για να μειωθεί η συνεκτικότητά τους και η σχετικά χαμηλή περιεκτικότητά τους σε θείο και τέφρα. Σε μεγάλους βιομηχανικούς αεριοστρόβιλους σπανιότατα χρησιμοποιούνται και βαριά κατάλοιπα του πετρελαίου, δηλαδή το καύσιμο των λεβήτων ή μαζούτ. Η χρήση τους παρουσιάζει τα εξής προβλήματα. Δεν είναι δυνατή η χρησιμοποίησή τους στην θερμοκρασία του περιβάλλοντος και απαιτείται μία θέρμανσή τους στους 600°C περίπου για να είναι δυνατή η άντλησή τους και στους 900°C ή περισσότερο για ικανοποιητικό διασκορπισμό. Κατά την καύση τους η σχηματιζόμενη φλόγα έχει μεγάλο συντελεστή

ακτινοβολίας, ώστε να απαιτείται ισχυρή ψύξη των τοιχωμάτων του φλογοσωλήνα. Επίσης η άκαυστη τέφρα, που σχηματίζεται σε σχετικά μεγάλο ποσοστό, διαβρώνει σημαντικά τις μεταλλικές επιφάνειες, είτε δι' επικαθήσεως, είτε δια κρούσεως. Τα καύσιμα αυτά περιέχουν τα πολύ διαβρωτικά συστατικά Βανάδιο, Νάτριο και Κάλιο. Το βανάδιο σχηματίζει ενώσεις με χαμηλό σημείο τήξης, όπως το πεντοξείδιο του βαναδίου με σημείο τήξης 690°C , που διαβρώνουν έντονα τα, σε υψηλή θερμοκρασία ευρισκόμενα, κράματα των πτερυγίων του στροβίλου. Τα νάτριο και κάλιο σχηματίζουν με το βανάδιο εύτηκτες ενώσεις, με σημεία τήξης κάτω των 570°C , που σε περαιτέρω αντίδραση με το θείο παράγουν πολύ διαβρωτικές ενώσεις, με σημεία τήξης στην περιοχή των θερμοκρασιών του στροβίλου. Τούτο το τελευταίο ισχύει, διότι και η περιεκτικότητα του μαζούτ σε θείο είναι μεγάλη ($\sim 3-4\%$). Έτσι η μέγιστη θερμοκρασία πρέπει να τηρηθεί σε χαμηλά επίπεδα ($600-650^{\circ}\text{C}$), πράγμα που συνεπάγεται πολύ κακό βαθμό απόδοσης. Τα βαριά αποστάγματα του πετρελαίου, δηλαδή το κοινό βαρύ καύσιμο Diesel, έχουν κόστος ενδιάμεσο των δύο προηγούμενων, συνεκτικότητα όμοια με τα βαριά κατάλοιπα και χαμηλή περιεκτικότητα σε τέφρα και θείο όπως τα ελαφρά αποστάγματα. Οι λόγοι αυτοί έχουν καταστήσει την κατηγορία αυτή των καυσίμων σαν την πλέον χρησιμοποιούμενη. Μερικές εγκαταστάσεις αεριοστροβίλων τοποθετούνται κοντά σε υψικάμινους, ώστε να χρησιμοποιούν το αέριό τους σαν καύσιμο, που τα κύρια συστατικά του είναι τα CO και N_2 . Αυτό έχει μεγάλο ειδικό όγκο και ταχύτητα καύσης μικρή.

4.3.5. Στρόβιλος



Εικόνα 28

Τομή αξονικού στροβίλου

Ο ρόλος του στροβίλου συνίσταται στην αφαίρεση ενέργειας που μεταφέρεται από το εργαζόμενο μέσο, την οποία μεταφέρει ως ενέργεια περιστροφής στον άξονα της μηχανής. Ο στρόβιλος εκμεταλλεύεται την υψηλή θερμοκρασία και πίεση του εισερχόμενου μέσου το οποίο αποτονώνει σε χαμηλότερη πίεση και θερμοκρασία. Ωστόσο η έκθεση του στροβίλου σε υψηλές θερμοκρασίες έχει ως συνέπεια την θερμική καταπόνηση μέρους του στροβίλου, για αυτό συνήθως πρακτική είναι η ψύξη των περυγίων του στροβίλου. Η απόδοση της ενέργειας του ρευστού στον άξονα του στροβίλου ενδεχομένως να γίνεται σε

περισσότερες από μια βαθμίδες. Σε αυτήν την περίπτωση μιλάμε για έναν πολυβάθμιο στρόβιλο. Η κάθε βαθμίδα του στροβίλου αποτελείται από μια σταθερή και μια κινητή περύγωση. Η σταθερή περύγωση αποτελείται από περύγια που ονομάζονται και ακροφύσια. Ο αριθμός των βαθμίδων αποφασίζεται κατά τον σχεδιασμό ανάλογα με την ισχύ που θα πρέπει ο στρόβιλος να απορροφά από το ρευστό, την ταχύτητα περιστροφής και άλλα. Όπως οι συμπιεστές έτσι και οι στρόβιλοι χωρίζονται σε ακτινικούς και αξονικούς. Διαφορά των αξονικών από τους ακτινικούς στροβίλους είναι ότι δεν αλλάζει πρακτικά η μέση ακτίνα ροής, πράγμα που σημαίνει ότι οι αξονικοί στρόβιλοι ενδείκνυνται για την διακίνηση υψηλών παροχών μάζας, αλλά ο λόγος αποτόνωσής τους, δηλαδή ο λόγος πίεσης, που μπορούν να χειριστούν ικανοποιητικά, είναι περιορισμένος. Η απλή μορφή που παρουσιάζει η διαδρομή του ρευστού μέσα στην μηχανή επιτρέπει την χρήση πολλαπλών βαθμίδων, δηλαδή πολυβάθμιων αξονικών στροβίλων με τους οποίους επιτυγχάνονται υψηλοί λόγοι πίεσης.

4.3.6. Σύγκριση αεριοστροβιλικών και ατμοηλεκτρικών σταθμών

Πλεονεκτήματα αεριοστροβίλων:

- Μικρός χρόνος παράδοσης. Οι περισσότεροι κατασκευαστές έχουν τυποποιήσει την παραγωγή τους έτσι ώστε μικρές μονάδες μέχρι 70MW να έχουν χρόνο παράδοσης μέχρι 12 μήνες. Μεγαλύτερες μονάδες χρειάζονται περίπου 20-26 μήνες. Οι κτιριακές εγκαταστάσεις, μηχανολογικά εξαρτήματα κ.λπ. επηρεάζουν τον χρόνο παράδοσης.

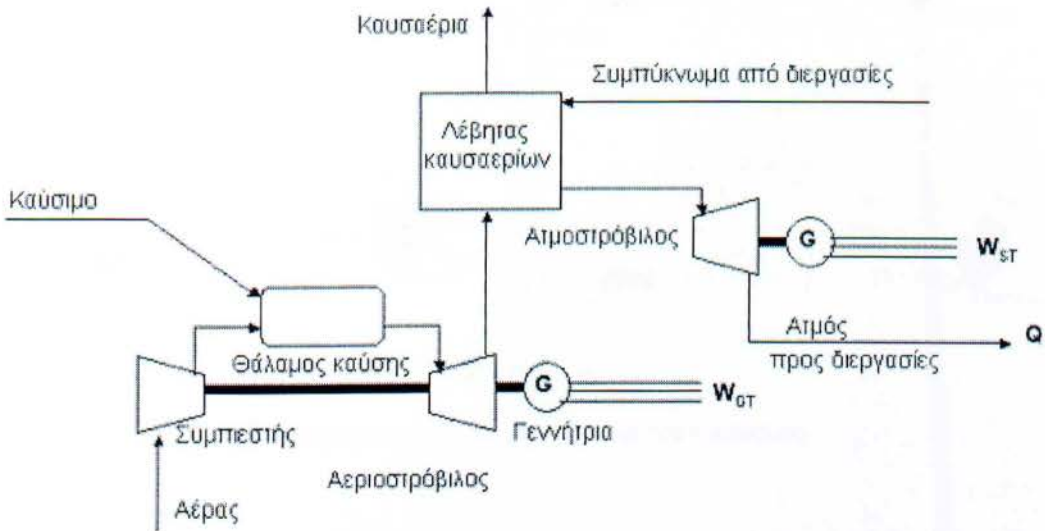
- Απαιτούμενος χώρος. Οι αεριοστρόβιλοι απαιτούν σημαντικά μικρότερο χώρο τοποθέτησης από έναν ατμοπαραγωγό με ατμοστρόβιλο. Ενδεικτικά απαιτούνται 10-20m²/MW για έναν αεριοστρόβιλο ενώ 50-80m²/MW για έναν σταθμό ΑΗΣ.
- Μικρό κόστος παραγωγής. Το κόστος κατασκευής ενός σταθμού με αεριοστρόβιλο κυμαίνεται στο μισό με 2/3 του κόστους κατασκευής ενός αντίστοιχου ΑΗΣ
- Μικρός χρόνος εκκίνησης που φθάνει και μέχρι τα 14-20 λεπτά
- Νερό ψύξης, το οποίο ενδεχομένως απαιτείται για την ψύξη της γεννήτριας ή άλλων εξαρτημάτων είναι σχετικά λίγο και μπορεί να επαναφερθεί στην αρχική του θερμοκρασία σε κλειστό κύκλωμα.
- Μικρή εσωτερική κατανάλωση
- Δεν απαιτούνται πολύπλοκοι χειρισμοί λόγω της αυτοματοποίησης της εγκατάστασης. Έτσι απαιτείται λίγο προσωπικό λειτουργίας.

Μειονεκτήματα αεριοστροβίλων:

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

4.4. Συνδυασμένος Κύκλος

4.4.1. Γενικά



Διάγραμμα 11

Συνδυασμένος Κύκλος

Ο συνδυασμός της αεριοστροβιλικής και ατμοηλεκτρικής εγκατάστασης συνιστούν τον λεγόμενο συνδυασμένο κύκλο (Combined Cycle, CC). Ο κύκλος αυτός λειτουργεί με βάση τους κύκλους Brayton και Rankine. Στους σταθμούς συνδυασμένου κύκλου τα καυσαέρια θερμοκρασίας 300-6000C από την έξοδο του αεριοστρόβιλου διοχετεύονται σε κατάλληλο ατμολέβητα (Heat Recovery Steam Generator, HRSG – λέγεται και λέβητας καυσαερίων). Εκεί παράγεται ατμός που κινεί ατμοστρόβιλο. Ένας σταθμός συνδυασμένου κύκλου αποτελείται από μια ή, συνήθως, περισσότερες αεριοστροβιλικές μονάδες με τους αντίστοιχους λέβητες καυσαερίων και από ένα ζεύγος ατμοστρόβιλου-γεννήτριας. **Ο συνολικός βαθμός απόδοσης ξεπερνά το 50%**. Όπως είναι φυσικό, χρησιμοποιούνται τα καύσιμα των αεριοστρόβιλων, δηλαδή πετρέλαιο ντήζελ και φυσικό αέριο. Η ρύθμιση της εξόδου τους λόγω του κύκλου ατμού δεν μπορεί να γίνει τόσο γρήγορα όσο στους αεριοστροβιλικούς σταθμούς. Χρησιμοποιούνται συνήθως ως σταθμοί κυμαινόμενου φορτίου.

Simple-cycle generation

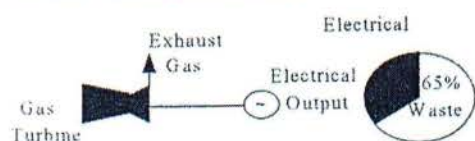


FIGURE 25

Simple-cycle cogeneration

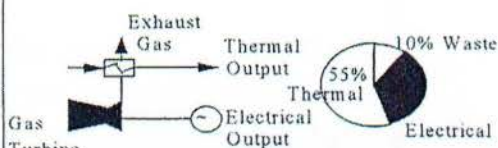
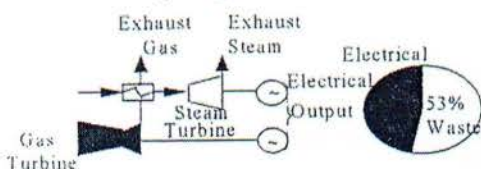
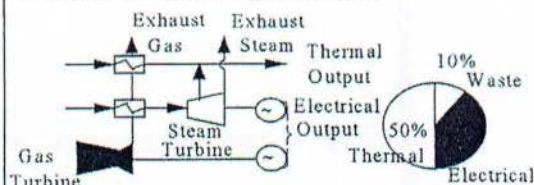


FIGURE 26

Combined-cycle generation



Combined-cycle cogeneration



Διάγραμμα 12

Τυπικά συστήματα συνδυασμένου κύκλου

Τα πλεονεκτήματα του συνδυασμένου κύκλου είναι:

- Τα πλεονεκτήματα των αεριοστροβίλων που ήδη έχουν αναφερθεί
- Ο αέρας αποτελεί ένα απλό μέσο που χρησιμοποιείται ευρέως στις σύγχρονες στροβιλομηχανές σε μεγάλες θερμοκρασίες εισόδου του αέρα στον στρόβιλο, δίνοντας καλύτερες προϋποθέσεις για έναν καλό ανώτερο κύκλο
- Το νερό/ατμός είναι ένα φθηνό μέσο, το οποίο βρίσκεται άφθονο στην φύση, δεν εγκυμονεί κινδύνους και είναι κατάλληλο για τις μέτριες και χαμηλές θερμοκρασίες του κύκλου αποτελώντας το μέσο για τον κατώτερο κύκλο.

5.4.2. Κύρια Συνιστώσα Μέρη ενός Συνδυασμένου Κύκλου Ισχύος

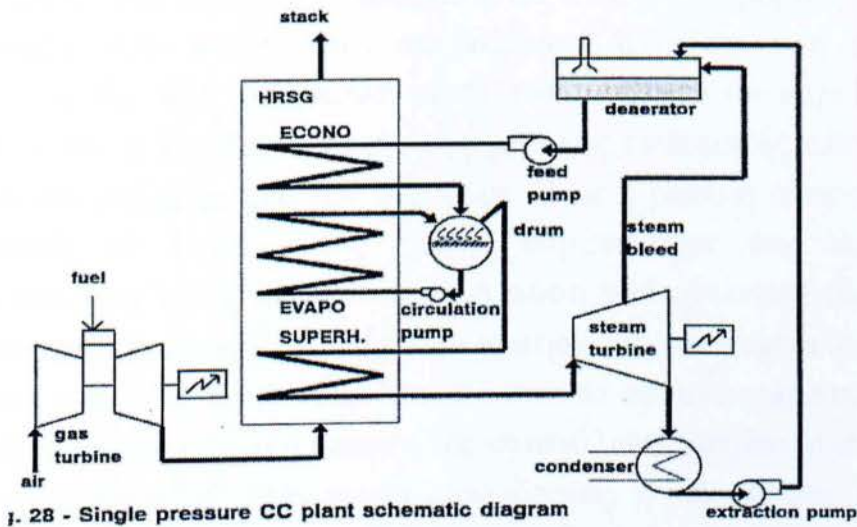
Αεριοστρόβιλος (Gas Turbine)

Έχει να διαδραματίσει δύο σημαντικούς ρόλους

- Παράγει την ισχύ που απαιτείται για την ηλεκτρογεννήτρια.
- Η θερμότητα που περιέχουν τα καυσαέρια εξόδου χρησιμοποιείται σαν θερμότητα εισόδου στο κύκλο του ατμού

Ατμολέβητας (Heat Recovery Steam Generator, HRSG)

Ο ατμολέβητας αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά τμήματα του συνδυασμένου κύκλου αφού αποτελεί την σύνδεση μεταξύ των δύο κύκλων. Πρόκειται στην ουσία για ένα λέβητα ο οποίος παράγει υπέρθερμο ατμό τον οποίο στην πλειοψηφία των περιπτώσεων αναθερμαίνει αφού πρώτα ο ατμός περάσει από βαθμίδα του στροβίλου. Ολόκληρο το σύστημα με την προσθήκη όλων των εξαρτημάτων, ονομάζεται ακριβέστερα ατμογεννήτρια.



Εικόνα 29

Σχηματικό διάγραμμα συνδυασμένου κύκλου μιας βαθμίδας πίεσης που περιλαμβάνει τον HRSG

Στρόβιλος Ατμού (Steam Turbine)

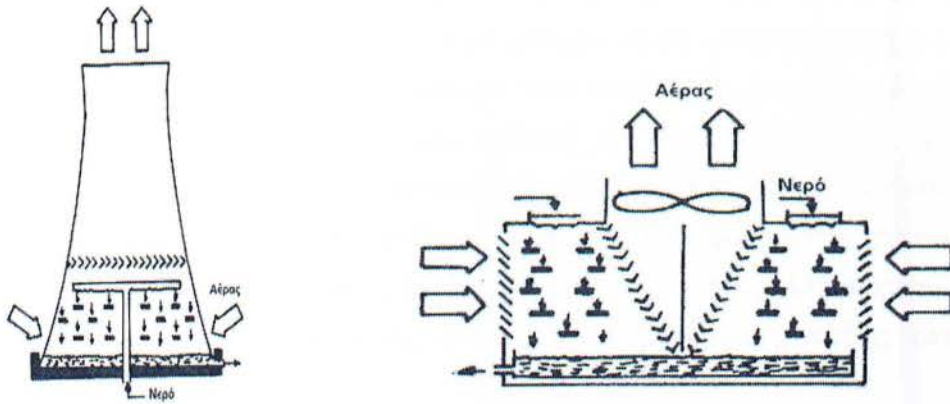
Ο ατμοστρόβιλος μετατρέπει την ενέργεια του ατμού σε περιστροφική κινητική ενέργεια ενός περιστρεφόμενου άξονα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τόσο την πτώση πίεσης του ατμού όσο και της θερμοκρασίας του. Αν και η ενέργεια του ατμού είναι μεγάλη, μόνο ένα μέρος της ενέργειας μπορεί να μετατραπεί σε μηχανική ενέργεια στον άξονα. Το ποσό της ενέργειας που μπορεί να μετατραπεί, μπορεί να υπολογιστεί π.χ. από το διάγραμμα Mollier. Τα δύο βασικά στοιχεία των ατμοστροβίλων είναι τα ακροφύσια (ή σταθερά πτερύγια) και τα κινητά πτερύγια ή κάδοι. Σκοπός των ακροφυσίων είναι η δημιουργία στενής δέσμης ατμού μεγάλης ταχύτητας με σκοπό την μετατροπή της ενέργειας του ατμού σε κινητική ενέργεια και στη συνέχεια απλώς τα πτερύγια μετατρέπουν την κινητική αυτή ενέργεια σε περιστροφική κινητική ενέργεια

5.4.3. Συμπυκνωτής (Condenser)

Ο συμπυκνωτής είναι ένας εναλλάκτης θερμότητας τύπου αυλών-κελύφους. Το ψυκτικό υγρό ρέει στους αυλούς. Ως γνωστό, ο θερμοδυναμικός βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης βελτιώνεται με την πτώση πίεσης του ατμού που αποβάλλεται από τον στρόβιλο. Με την συμπύκνωση του ατμού που αποβάλλεται από τον στρόβιλο, ο συμπυκνωτής διατηρεί μια χαμηλή πίεση στο απόβλητο του στρόβιλου. Η δημιουργία και η διατήρηση αυτής της χαμηλής επιθυμητής πίεσης στον ατμό που αποβάλλεται από τον στρόβιλο, είναι η βασική αποστολή του συμπυκνωτή. Ο συμπυκνωτής επίσης συμπυκνώνει τον ατμό που αποβάλλεται από τον στρόβιλο σε υγρή φάση που αντλείται εύκολα. Ο συμπυκνωτής δέχεται τον χαμηλής πίεσης ατμό από τον στρόβιλο και έτσι προηγείται από τους θερμαντές. Μερικά από τα **πλεονεκτήματα** από τη χρήση συμπυκνωτών είναι η μείωση της κατανάλωσης ατμού, η ανάκτηση του μεγαλύτερου μέρους του νερού τροφοδοσίας, η μείωση του μεγέθους του λέβητα και η διάθεση του νερού τροφοδοσίας σε θερμοκρασία 45-500C. Μερικά από τα **μειονεκτήματα** είναι ο πρόσθετος εξοπλισμός και η δυσκολία να διατηρηθούν στεγανές οι συνδέσεις.

Πολλές νεώτερες μονάδες χτίζονται με μεγάλους πύργους ψύξης στους οποίους ψύχεται (ατμοσφαιρικά) το ψυκτικό νερό που κυκλοφορεί στον συμπυκνωτή. Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται νερό θάλασσας, λίμνης ή ποταμού η λειτουργία του συμπυκνωτή μπορεί να επηρεαστεί

από τις βιοακαθαρσίες που εμφανίζονται στις σωληνώσεις του. Ασφαλώς εκτός από τα παραπάνω συνιστώσα τμήματα του κύκλου υπάρχουν και πολλά άλλα που επιτελούν άλλες λειτουργίες-εργασίες.



Εικόνα 30

Πύργοι ψύξης: φυσικής κυκλοφορίας(αριστερά) και εξαναγκασμένης (δεξιά)

Τμήματα του συμπυκνωτή:

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

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

- Άμεσα αερόψυκτοι
- Έμμεσα αερόψυκτοι
- Άμεσα υδρόψυκτοι

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

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

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



Εικόνα 31



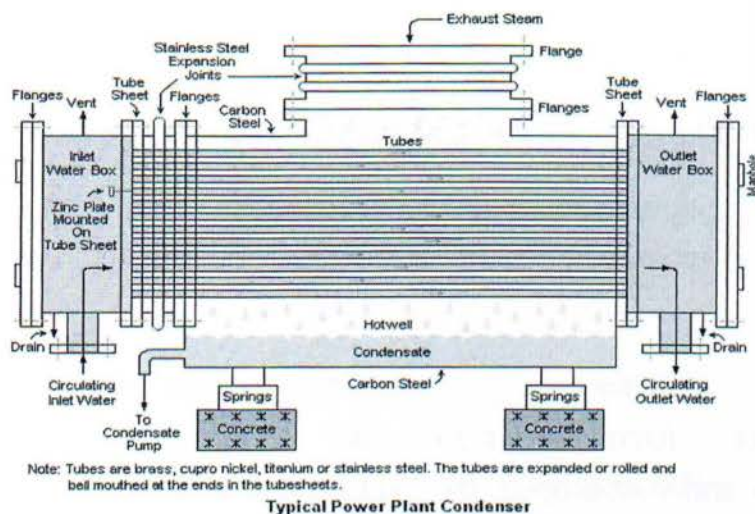
Εικόνα 32

Πύργοι ψύξης φυσικής κυκλοφορίας

πύργος ψύξης εξαναγκασμένης κυκλοφορίας

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

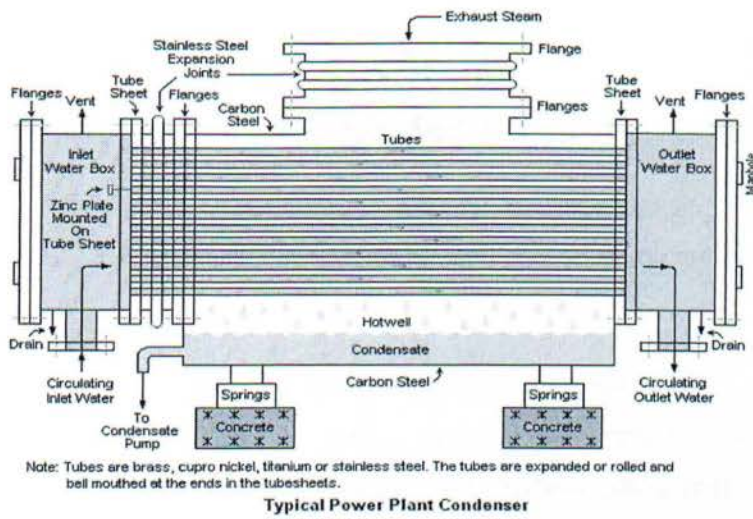
Οι συμπυκνωτές που ψύχονται από νερό είναι συνήθως τύπου κελύφους-σωλήνα (shell and tube). Δηλαδή αποτελούνται από ένα κέλυφος μέσα στο οποίο διέρχονται οι σωλήνες του ψυκτικού



Εικόνα 33

Τυπικός υδρόψυκτος συμπυκνωτής

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



Εικόνα 33

Τυπικός υδρόψυκτος συμπυκνωτής

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

5.4.4. Λέβητας ανάκτησης θερμότητας (HSRG)

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

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

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

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

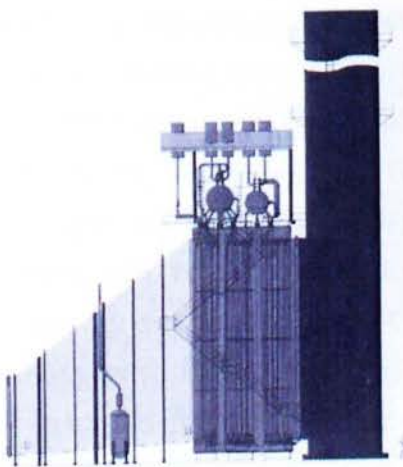
Οι **κατακόρυφοι λέβητες ανάκτησης** παλιά ήταν πιο γνωστοί ως βεβιασμένης κυκλοφορίας, καθώς χρησιμοποιούσαν αντλίες για να εξασφαλίσουν την κυκλοφορία του νερού μέσα από τις επιφάνειες του ατμοποιητή. Σε αυτού του τύπου τον λέβητα, οι σωλήνες που διαρρέονται από νερό/ατμό είναι τοποθετημένοι οριζόντια,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

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

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

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

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



Εικόνα 34



Εικόνα 35

Οριζόντιος λέβητας ανάκτησης θερμότητας

Κατακόρυφος λέβητας ανάκτησης θερμότητας

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

Οι βασικές παράμετροι του λέβητα είναι:

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

Όσον αφορά την κατασκευή του λέβητα ανάκτησης θερμότητας θα ήταν επιθυμητό η θερμοκρασία προσέγγισης και pinch point να είναι όσο το δυνατό μικρότερες γιατί κάτι τέτοιο θα επέτρεπε καλύτερα την μεταφορά της προσδιδόμενης θερμότητας αυξάνοντας την ατμοπαραγωγή. Ωστόσο, όσο αυτές οι θερμοκρασίες τείνουν προς το μηδέν οι επιφάνειες των αντίστοιχων εναλλακτών θερμότητας τείνουν προς το άπειρο, αυξάνοντας το κόστος και τον όγκο της κατασκευής. Επομένως πρέπει να βρεθεί ο καλύτερος συνδυασμός που θα δίνει καλή εκμετάλλευση της προσδιδόμενης θερμότητας με λογικό εμβαδό επιφανειών συναλλαγής θερμότητας. Η βέλτιστη σχεδίαση ατμοπαραγωγού πρέπει να εξασφαλίζει μεγάλη αξιοποίηση θερμότητας των καυσαερίων (δηλαδή καλή απόδοση) με όσο το δυνατό μικρότερη πτώση πίεσης. Αυτοί οι στόχοι είναι μάλλον αντικρουόμενοι καθώς η μεταφορά θερμότητας γίνεται με συναγωγή και προκειμένου να επιτευχθούν μικρές θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ των

δυο ρευμάτων (νερού/ατμού και καυσαερίου) απαιτούνται μεγάλες επιφάνειες. Μεγάλες επιφάνειες όμως συνεπάγονται και μεγάλες απώλειες πίεσης, εκτός και αν η ταχύτητα του καυσαερίου είναι μικρή, πράγμα όμως που θα αποτελούσε εμπόδιο για την μεταφορά θερμότητας. Έτσι χρησιμοποιούνται σωλήνες μικρής διαμέτρου με πτερυγώσεις. Αυτοί οι σωλήνες προσφέρουν το πλεονέκτημα ότι το περιεχόμενο νερό αποτελεί μικρή ποσότητα και έτσι μπορεί να δεχτεί γρήγορες μεταβολές φορτίου. Μέριμνα θα πρέπει να δοθεί για να αποφευχθεί και η διάβρωση στις χαμηλές θερμοκρασίες, λόγω συμπύκνωσης θεικού οξέος όταν καίγονται καύσιμα με θείο. Στην περίπτωση καύσης καυσίμων χωρίς θείο, το όριο είναι η θερμοκρασία συμπύκνωσης του νερού. Επομένως, κατά τον σχεδιασμό είτε πρέπει να αποφεύγεται θερμοκρασία εξόδου του καυσαερίου σε κατώτερες θερμοκρασίες από την θερμοκρασία συμπύκνωσης θεικού οξέος (όξινο σημείο δρόσου) είτε οι επιφάνειες που βρίσκονται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες να προστατεύονται με κατάλληλες επικαλύψεις.

Ο σχεδιασμός ενός λέβητα ανάκτησης περιλαμβάνει βελτιστοποίηση ανάμεσα στο κόστος και στο κέρδος. Ο κύριος παράγοντας κόστους είναι η επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας. Η επιφάνεια συναλλαγής αυξάνεται εκθετικά όσο μειώνεται το pinch point, ενώ η ατμοπαραγωγή αυξάνεται γραμμικά. Έτσι το pinch point αποτελεί καθοριστικό παράγοντα της επιφάνειας συναλλαγής θερμότητας. Σε εγκαταστάσεις μεγάλης απόδοσης έχει τιμή 8 με 15K. Σε περιπτώσεις χαμηλότερης απόδοσης 15 με 25K. Ένας ακόμα παράγοντας σχεδιασμού του λέβητα ανάκτησης είναι η γρήγορη εκκίνηση του αεριοστροβίλου σε ψυχρές και θερμές συνθήκες του όλου κύκλου. Οι ταχείες θερμικές διαστολές που συμβαίνουν κατά την εκκίνηση απαιτούν κατάλληλο σχεδιασμό των σωλήνων, του τυμπάνου, των συνδέσμων κλπ. Ο μεγαλύτερος περιορισμός κατά τις γρήγορες εκκινήσεις προκύπτει από το τύμπανο. Για να είναι η εκκίνηση όσο το δυνατό πιο γρήγορη απαιτείται τύμπανο με μικρό πάχος τοιχωμάτων κάτι που σημαίνει μικρές πιέσεις. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τις σύγχρονες κατασκευές που οι θερμοκρασίες εξόδου από τον αεριοστρόβιλο είναι υψηλές και έτσι απαιτούνται υψηλές πιέσεις, ειδικά μάλιστα αν υπάρχει αναθέρμανση. Όλα αυτά οδηγούν σε μεγάλους χρόνους εκκίνησης. Σε λέβητες εξαναγκασμένης κυκλοφορίας δεν τίθεται τέτοιος περιορισμός καθώς δεν υπάρχει τύμπανο. Η ογκομετρική αλλαγή μέσα στον ατμοποιητή κατά την εκκίνηση είναι κάτι άλλο επίσης

σημαντικό. Οι μεγάλες διαφορές ειδικού όγκου νερού και ατμού σε χαμηλές και μέσες πιέσεις οδηγούν σε μεγάλη εκτόπιση νερού από τον ατμοποιητή στην εκκίνηση της διαδικασίας ατμοποίησης. Αν το τύμπανο δεν μπορεί να διαχειριστεί αυτή την ποσότητα νερού, τότε αναγκαστικά το νερό αυτό θα απομακρυνθεί από το κύκλωμα μέσω της εξόδου ανάγκης από το τύμπανο σε κάθε εκκίνηση, ή θα προκαλείται σταμάτημα της λειτουργίας της εγκατάστασης για την αποφυγή μεταφοράς νερού στο σύστημα ατμού. Για την βελτίωση της συμπεριφοράς της όλης εγκατάστασης σε μερικό φορτίο, χρησιμοποιείται η μέθοδος της ολισθαίνουσας πίεσης του λέβητα (δηλαδή η πίεση του κυκλώματος μπορεί να μεταβληθεί ανά πάσα στιγμή μεταβάλλοντας τις στροφές των αντλιών) και διατηρώντας τις ρυθμιστικές βαλβίδες του ατμοστροβίλου ανοικτές. Ακόμα στην περίπτωση λειτουργίας εκτός σημείου σχεδίασης οι οικονομητήρες μπορεί να αρχίσουν να παράγουν ατμό, φράσσοντας τους σωλήνες και μειώνοντας την απόδοσή τους. Έτσι ο οικονομητήρας είναι σχεδιασμένος συνήθως με τέτοιο τρόπο ώστε το νερό στην έξοδό του να είναι ελαφρώς υπόψυκτο, αυξάνοντας την θερμοκρασία προσέγγισης (approach temperature). Αυτή η αύξηση πρέπει να είναι όσο το δυνατό μικρότερη γιατί επηρεάζει την ατμοπαραγωγή αρνητικά. Ακόμα με κατάλληλο σχεδιασμό του οικονομητήρα και της εξόδου του στο τύμπανο μπορεί να αποφευχθεί η φραγή με ατμό.

5.4.5. ΣΤΑΘΜΟΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟΝ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΟ ΚΥΚΛΟ ΣΤΟΝ ΕΛΛΑΔΙΚΟ ΧΩΡΟ

Παρακάτω παρατίθενται σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με βάση τον συνδυασμένο κύκλο τόσο στον ελλαδικό χώρο όσο και στον υπόλοιπο κόσμο.

Αρχικά , στην Ελλάδα τέτοιες μονάδες βρίσκονται στο **Λαύριο** (Μονάδα 4 και Μονάδα 5) με ισχύ **550,2** και **377,6MW** αντίστοιχα και τέλος στην **Κομοτηνή 476,3 MW**.

Στο Λαύριο η Μονάδα 4 αποτελείται από τρεις αεριοστροβίλους ,τρεις λέβητες ανάκτησης θερμότητας δύο πιέσεων και έναν ατμοστρόβιλο με βαθμό απόδοσης του αεριοστροβίλου 33,55% ενώ η Μονάδα 5 αποτελείται από έναν αεριοστρόβιλο έναν λέβητα ανάκτησης θερμότητας τριών πιέσεων με αναθέρμανση και έναν ατμοστρόβιλο(διάταξη μόνου άξονα) και με βαθμό απόδοσης του αεριοστροβίλου 36,88%.



Εικόνα 36

Μονάδα 4 ΑΗΣ Λαυρίου



Εικόνα 37

Μονάδα 5 ΑΗΣ Λαυρίου



Εικόνα 38

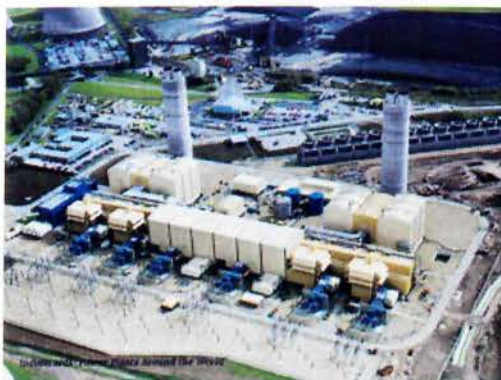
Μονάδα ΑΗΣ Κομοτηνή

Πηγή των παραπάνω στοιχείων 1η ΔΙΕΘΝΗΣ ΕΚΘΕΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ- ΠΗΓΕΣ, ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ, ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ, 23-25 ΝΟΕΜΒΡΙΟΥ 2006, ΑΘΗΝΑ (www.dei.gr)

5.4.6.ΣΤΑΘΜΟΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟΝ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΟ ΚΥΚΛΟ ΣΤΟΝ ΠΑΓΚΟΣΜΙΟ ΧΩΡΟ

Στον υπόλοιπο κόσμο παρατηρούνται πάρα πολλοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που εργάζονται με βάση το συνδυασμένο κύκλο. Για αυτό το λόγο παρακάτω παρατίθενται ενδεικτικά ανά ήπειρο τέτοιοι σταθμοί.

Στην Ευρώπη παρατηρούμε σταθμούς συνδυασμένου κύκλου στην **Αγγλία** στην περιοχή του **Oxfordshire** με ισχύ **686MW** (διπλού άξονα με φυσικό αέριο)



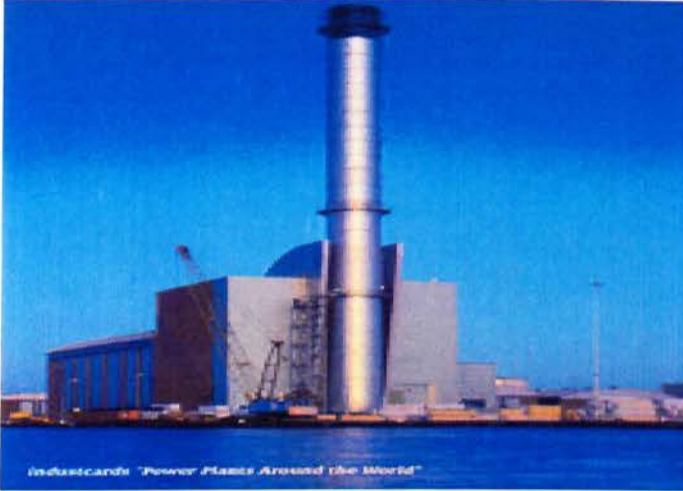
Εικόνα 39

Στην περιοχή **Middlesex** με ισχύ **400MW** (μονού άξονα με φυσικά αερίο)



Εικόνα 40

,στο **Sussex 400MW** (μονού άξονα με φυσικό αέριο)



Εικόνα 41

Στην **Ισπανία** στην περιοχή **Tarragona 2X400 MW** (μονού άξονα με φυσικό αέριο και πετρέλαιο)



Εικόνα 42

Στην **Βαρκελώνη 2X425 MW** (μονού άξονα με φυσικό αέριο)



Εικόνα 43

Στην **Γαλλία** στην περιοχή **Allier 400MW** (μονού άξονα με φυσικό αέριο)



Εικόνα 44

,στην περιοχή **Meuthe-et-Moselle 440 MW** (μονού άξονα με φυσικό αέριο)



Εικόνα 45

Στην **Γερμανία** στην περιοχή **BE 380 MW** (διπλού άξονα με φυσικό αέριο)



Εικόνα 46

Στην Ασία παρατηρούμε σταθμούς στην **Ινδία** στην περιοχή **Andhra Pradesh 915 MW** διπλού άξονα.

Στην **Κίνα** στο **Πεκίνο 390 MW** (μονού άξονα με φυσικό αέριο)



Εικόνα 47

,στη **Σαγκάη 3X403 MW**(μονού άξονα με φυσικό αέριο)

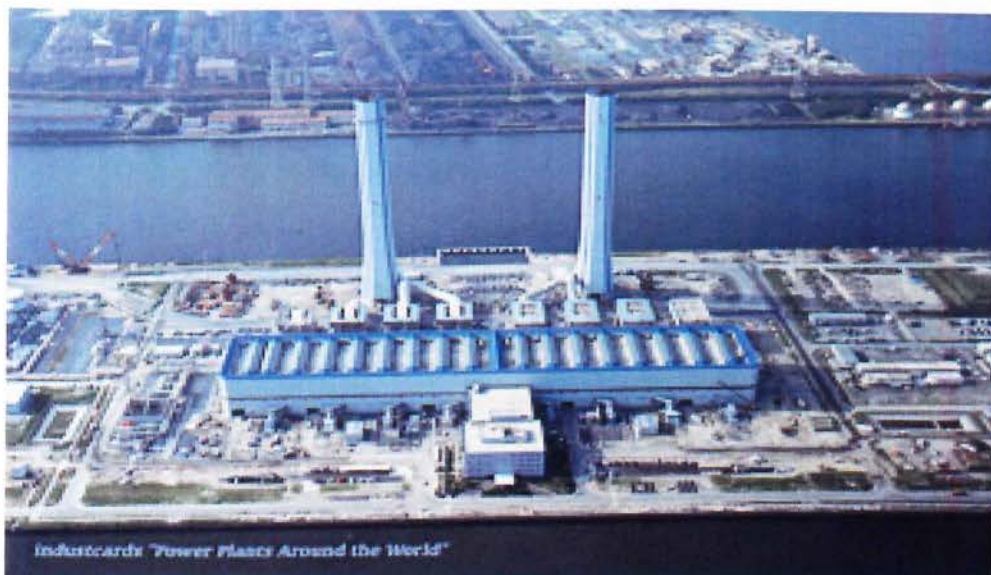


Εικόνα 48

Στη **Μαλαισία** στην περιοχή **Selangor 808 MW** που χρησιμοποιούν φυσικό αέριο και πετρέλαιο.

,στην περιοχή **Melaka 720 MW** με φυσικό αέριο και πετρέλαιο.

Στην **Ιαπωνία** βρίσκεται ένα από τα μεγαλύτερα εργοστάσια στην περιοχή **Chiba 2880 MW** με 8 μονούς άξονες και σαν καύσιμο χρησιμοποιεί υγρό φυσικό αέριο



Εικόνα 49

,στην περιοχή **Kanagawa 1500MW** με 5 μονούς άξονες και σαν καύσιμο χρησιμοποιεί υγρό φυσικό αέριο.



Εικόνα 50

Στην **Αμερική** και συγκεκριμένα στη **Δυτική Αμερική** στην περιοχή **Chehalis 520 MW** με καύσιμο φυσικό αέριο



Εικόνα 51

,στην περιοχή **Lake Side 545 MW** μονού άξονα με καύσιμο φυσικό αέριο και πετρέλαιο.



Εικόνα 52

Στον Καναδά στην περιοχή **Goreway 905 MW** διπλού άξονα με καύσιμο φυσικό αέριο



Εικόνα 53

Στη **Βραζιλία** στο **Ρίο Ντιτζανειρο 780 MW** διπλού άξονα με καύσιμο φυσικό αέριο.



Εικόνα 54

Στην **Αυστραλία** στην περιοχή **Queensland 630 MW** διπλού άξονα με καύσιμο φυσικό αέριο.

Πηγή όλων των παραπάνω είναι <http://www.industcards.com>

Όπως παρατηρούμε και από τα παραπάνω σταθμοί συνδυασμένου κύκλου υπάρχουν σε όλες τις περιοχές του κόσμου και συγκεκριμένα σε χώρες όπου η κατανάλωση ενέργειας είναι μεγάλη. Αυτό οφείλεται στο μεγάλο βαθμό απόδοσης των εγκαταστάσεων αυτών.

ΜΕΡΟΣ Β'

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ**5. 1. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΥΚΛΟΥ
BRAYTON**

Για την παραμετρική μελέτη του συνδιασμένου κύκλου χρησιμοποιήσαμε δεδομένα τα παρακάτω στοιχεία. Το καύσιμο του αεριοστροβίλου είναι **100% CH₄**. Θεωρούμε ότι κατά τον κύκλο Brayton ο αέρας που υπάρχει συμπεριφέρεται σαν ιδανικό αέριο οπότε $\gamma=1,4$. Επίσης ο ισεντροπικός βαθμός των στοβίλων είναι $n_t=85\%$ και $n_g=90\%$

Στη συνέχεια παρουσιάζετε ενδεικτικά ο τρόπος υπολογισμού των στοιχείων στον κύκλο Brayton.

Από τις εξισώσεις της αδιαβατικής μεταβολής έχουμε :

$$T_{2s} = T_1 * r_p^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad T_2 = T_1 + \frac{T_{2s} - T_1}{n_t} \quad T_{4s} = \frac{T_3}{r_p^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}$$

$$T_4 = T_3 - n_t * (T_3 - T_{4s})$$

$$w_c = C_p * (T_2 - T_1) \quad w_t = C_p * (T_3 - T_4) \quad q_{cc} = C_p * (T_3 - T_2)$$

$$\eta_{th} = \frac{(w_t - w_c) * n_g}{q_{cc}}$$

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

Έχουμε θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_1=293,15\text{K}$, λόγος συμπίεσης $r_p=6\text{K}$ και θεωρούμε ότι η θερμοκρασία εξόδου από το θάλαμο καύσης είναι $1000^\circ\text{C}-1200^\circ\text{C}-1400^\circ\text{C}-1600^\circ\text{C}$ ($1273,15\text{K}-1473,15\text{K}-1673,15\text{K}-1873,15\text{K}$).

$T_3(\text{K})$	$T_4(\text{K})$	$w_c(\text{kJ/Kg})$	$w_t(\text{kJ/Kg})$	$q_{cc}(\text{kJ/Kg})$	η
1273,15	839,561	231,71	435,756	753,19	0,244
1473,15	971,449		504,21	954,19	0,257
1673,15	1103		572,663	1155	0,266
1873,15	1235		641,116	1356	0,272

Πίνακας 4

Παρακάτω, παρουσιάζετε ενδεικτικά ο υπολογισμός των στοιχείων του πίνακα για $T_3=1273,15\text{K}$, $T_1=293,15\text{K}$ και $r_p=6$.

$$T_{2s}=T_1 * r_p^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = 293,15 * 6^{0,2857} \text{K} = 489,11\text{K}$$

$$T_2 = T_1 + \frac{T_{2s}-T_1}{nt} = 293,15\text{K} + \frac{489,11-293,15}{0,85} \text{K} = 523,707\text{K}$$

$$T_{4s} = \frac{T_3}{r_p^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} = \frac{1273,15}{6^{0,2857}} \text{K} = 763,065\text{K}$$

$$T_4 = T_3 - \eta_t * (T_3 - T_{4s}) = 1273,15\text{K} - 0,85 * (1273,15 - 763,065)\text{K} = 839,561\text{K}$$

$$w_c = C_p * (T_2 - T_1) = 1,005 \frac{\text{kJ}}{\text{Kg} * \text{K}} * (523,707 - 293,15)\text{K} = 231,71 \frac{\text{kJ}}{\text{Kg}}$$

$$w_t = C_p * (T_3 - T_4) = 1,005 \frac{\text{kJ}}{\text{Kg} * \text{K}} * (1273,15 - 839,561)\text{K} = 435,76 \frac{\text{kJ}}{\text{Kg}}$$

$$q_{cc} = C_p * (T_3 - T_2) = 1,005 \frac{\text{kJ}}{\text{Kg} * \text{K}} * (1273,15 - 523,71)\text{K} = 753,19 \frac{\text{kJ}}{\text{Kg}}$$

$$\eta_{th} = \frac{(w_t - w_c) * \eta_g}{q_{cc}} = \frac{(435,76 - 231,71) * 0,90}{753,19} = 0,242$$

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

Για θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_1=25^\circ\text{C}$ και λόγο συμπίεσης $r_p=6$

$T_3(\text{K})$	$T_4(\text{K})$	$w_c(\text{kJ/Kg})$	$w_t(\text{kJ/Kg})$	$q_{cc}(\text{kJ/Kg})$	η
1273,15	839,561	235,662	435,756	744,213	0,242
1473,15	971,449		504,21	945,213	0,256
1673,15	1103		572,663	1146	0,265
1873,15	1235		641,116	1347	0,271

Πίνακας 5

Για θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_1=30^\circ\text{C}$ και λόγο συμπίεσης $r_p=6$

$T_3(\text{K})$	$T_4(\text{K})$	$w_c(\text{kJ/Kg})$	$w_t(\text{kJ/Kg})$	$q_{cc}(\text{kJ/Kg})$	η
1273,15	839,561	239,614	435,756	735,236	0,24
1473,15	971,449		504,21	936,236	0,254
1673,15	1,103		572,663	1137	0,264
1873,15	1,235		641,116	1338	0,27

Πίνακας 6

Για θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_1=35^\circ\text{C}$ και λόγο συμπίεσης $r_p=6$

$T_3(\text{K})$	$T_4(\text{K})$	$w_c(\text{kJ/Kg})$	$w_t(\text{kJ/Kg})$	$q_{cc}(\text{kJ/Kg})$	η
1273,15	839,561	243,566	435,756	726,259	0,238
1473,15	971,449		504,21	927,259	0,253
1673,15	1103		572,663	1128	0,263
1873,15	1235		641,116	1329	0,269

Πίνακας 7

Για θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_1=40^\circ\text{C}$ και λόγο συμπίεσης $r_p=6$

$T_3(\text{K})$	$T_4(\text{K})$	$w_c(\text{kJ/Kg})$	$w_t(\text{kJ/Kg})$	$q_{cc}(\text{kJ/Kg})$	η
1273,15	839,561	247,519	435,756	717,281	0,236
1473,15	971,449		504,21	918,281	0,252
1673,15	1103		572,663	1119	0,261
1873,15	1235		641,116	1320	0,268

Πίνακας 8

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

Για θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_1=20^{\circ}\text{C}$ και λόγο συμπίεσης $r_p=7$

$T_3(\text{K})$	$T_4(\text{K})$	$w_c(\text{kJ/Kg})$	$w_t(\text{kJ/Kg})$	$q_{cc}(\text{kJ/Kg})$	η
1273,15	811,616	257,75	463,842	727,15	0,255
1473,15	939,113		536,707	928,15	0,27
1673,15	1067		609,573	1129	0,28
1873,15	1194		682,438	1330	0,287

Πίνακας 9

Για θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_1=25^{\circ}\text{C}$ και λόγο συμπίεσης $r_p=7$

$T_3(\text{K})$	$T_4(\text{K})$	$w_c(\text{kJ/Kg})$	$w_t(\text{kJ/Kg})$	$q_{cc}(\text{kJ/Kg})$	η
1273,15	811,616	262,147	463,842	717,728	0,253
1473,15	939,113		536,707	918,728	0,269
1673,15	1067		609,573	1120	0,279
1873,15	1194		682,438	1,321	0,286

Πίνακας 10

Για θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_1=30^{\circ}\text{C}$ και λόγο συμπίεσης $r_p=7$

$T_3(\text{K})$	$T_4(\text{K})$	$w_c(\text{kJ/Kg})$	$w_t(\text{kJ/Kg})$	$q_{cc}(\text{kJ/Kg})$	η
1273,15	811,616	266,543	463,842	708,307	0,251
1473,15	939,113		536,707	909,307	0,267
1673,15	1067		609,573	1110	0,278
1873,15	1194		682,438	1311	0,285

Πίνακας 11

Για θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_1=35^{\circ}\text{C}$ και λόγο συμπίεσης $r_p=7$

$T_3(\text{K})$	$T_4(\text{K})$	$w_c(\text{kJ/Kg})$	$w_t(\text{kJ/Kg})$	$q_{cc}(\text{kJ/Kg})$	η
1273,15	811,616	270,939	463,842	698,886	0,248
1473,15	939,113		536,707	899,886	0,266
1673,15	1067		609,573	1101	0,277
1873,15	1194		682,438	1302	0,284

Πίνακας 12

Για θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_1=40^{\circ}\text{C}$ και λόγο συμπίεσης $r_p=7$

$T_3(\text{K})$	$T_4(\text{K})$	$w_c(\text{kJ/Kg})$	$w_t(\text{kJ/Kg})$	$q_{cc}(\text{kJ/Kg})$	η
1273,15	811,616	275,335	463,842	689,465	0,246
1473,15	939,113		536,707	890,465	0,264
1673,15	1067		609,573	1091	0,276
1873,15	1194		682,438	1292	0,283

Πίνακας 13

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

Για θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_1=20^\circ\text{C}$ και λόγο συμπίεσης $r_p=8$

$T_3(\text{K})$	$T_4(\text{K})$	$w_c(\text{kJ/Kg})$	$w_t(\text{kJ/Kg})$	$q_{cc}(\text{kJ/Kg})$	η
1273,15	788,383	281,253	463,842	703,647	0,263
1473,15	912,231		536,707	904,647	0,281
1673,15	1036		609,573	1106	0,292
1873,15	1160		682,438	1307	0,3

Πίνακας 14

Για θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_1=25^\circ\text{C}$ και λόγο συμπίεσης $r_p=8$

$T_3(\text{K})$	$T_4(\text{K})$	$w_c(\text{kJ/Kg})$	$w_t(\text{kJ/Kg})$	$q_{cc}(\text{kJ/Kg})$	η
1273,15	811,616	286,05	463,842	693,825	0,261
1473,15	939,113		536,707	894,825	0,279
1673,15	1067		609,573	1096	0,291
1873,15	1194		682,438	1297	0,299

Πίνακας 15

Για θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_1=30^\circ\text{C}$ και λόγο συμπίεσης $r_p=8$

$T_3(\text{K})$	$T_4(\text{K})$	$w_c(\text{kJ/Kg})$	$w_t(\text{kJ/Kg})$	$q_{cc}(\text{kJ/Kg})$	η
1273,15	811,616	290,847	463,842	684,003	0,258
1473,15	939,113		536,707	885,003	0,278
1673,15	1067		609,573	1086	0,29
1873,15	1194		682,438	1287	0,298

Πίνακας 16

Για θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_1=35^\circ\text{C}$ και λόγο συμπίεσης $r_p=8$

$T_3(\text{K})$	$T_4(\text{K})$	$w_c(\text{kJ/Kg})$	$w_t(\text{kJ/Kg})$	$q_{cc}(\text{kJ/Kg})$	η
1273,15	811,616	295,644	463,842	674,181	0,256
1473,15	939,113		536,707	875,181	0,276
1673,15	1067		609,573	1076	0,288
1873,15	1194		682,438	1277	0,297

Πίνακας 17

Για θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_1=40^\circ\text{C}$ και λόγο συμπίεσης $r_p=8$

$T_3(\text{K})$	$T_4(\text{K})$	$w_c(\text{kJ/Kg})$	$w_t(\text{kJ/Kg})$	$q_{cc}(\text{kJ/Kg})$	η
1273,15	811,616	300,441	463,842	664,359	0,253
1473,15	939,113		536,707	865,359	0,274
1673,15	1067		609,573	1066	0,287
1873,15	1194		682,438	1267	0,296

Πίνακας 18

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

Για θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_1=20^{\circ}\text{C}$ και λόγο συμπίεσης $r_p=9$

$T_3(\text{K})$	$T_4(\text{K})$	$w_c(\text{kJ/Kg})$	$w_t(\text{kJ/Kg})$	$q_{cc}(\text{kJ/Kg})$	η
1273,15	768,613	302,742	507,059	682,158	0,27
1473,15	889,355		586,714	883,158	0,289
1673,15	1010		666,368	1084	0,302
1873,15	1131		746,022	1285	0,31

Πίνακας 19

Για θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_1=25^{\circ}\text{C}$ και λόγο συμπίεσης $r_p=9$

$T_3(\text{K})$	$T_4(\text{K})$	$w_c(\text{kJ/Kg})$	$w_t(\text{kJ/Kg})$	$q_{cc}(\text{kJ/Kg})$	η
1273,15	768,613	307,905	507,059	671,97	0,267
1473,15	889,355		586,714	872,97	0,287
1673,15	1010		666,368	1074	0,3
1873,15	1131		746,022	1275	0,309

Πίνακας 20

Για θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_1=30^{\circ}\text{C}$ και λόγο συμπίεσης $r_p=9$

$T_3(\text{K})$	$T_4(\text{K})$	$w_c(\text{kJ/Kg})$	$w_t(\text{kJ/Kg})$	$q_{cc}(\text{kJ/Kg})$	η
1273,15	768,613	313,069	507,059	661,781	0,264
1473,15	889,355		586,714	862,781	0,285
1673,15	1010		666,368	1064	0,299
1873,15	1131		746,022	1265	0,308

Πίνακας 21

Για θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_1=35^{\circ}\text{C}$ και λόγο συμπίεσης $r_p=9$

$T_3(\text{K})$	$T_4(\text{K})$	$w_c(\text{kJ/Kg})$	$w_t(\text{kJ/Kg})$	$q_{cc}(\text{kJ/Kg})$	η
1273,15	768,613	318,232	507,059	651,593	0,261
1473,15	889,355		586,714	852,593	0,283
1673,15	1010		666,368	1054	0,297
1873,15	1131		746,022	1255	0,307

Πίνακας 22

Για θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_1=40^{\circ}\text{C}$ και λόγο συμπίεσης $r_p=9$

$T_3(\text{K})$	$T_4(\text{K})$	$w_c(\text{kJ/Kg})$	$w_t(\text{kJ/Kg})$	$q_{cc}(\text{kJ/Kg})$	η
1273,15	768,613	323,396	507,059	641,404	0,258
1473,15	889,355		586,714	842,404	0,281
1673,15	1010		666,368	1043	0,296
1873,15	1131		746,022	1244	0,306

Πίνακας 23

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

Για θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_1=20^\circ\text{C}$ και λόγο συμπίεσης $r_p=10$

$T_3(\text{K})$	$T_4(\text{K})$	$w_c(\text{kJ/Kg})$	$w_t(\text{kJ/Kg})$	$q_{cc}(\text{kJ/Kg})$	η
1273,15	751,484	322,586	524,275	662,314	0,274
1473,15	869,535		606,633	863,314	0,296
1673,15	987,586		688,992	1064	0,31
1873,15	1106		771,351	1265	0,319

Πίνακας 24

Για θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_1=25^\circ\text{C}$ και λόγο συμπίεσης $r_p=10$

$T_3(\text{K})$	$T_4(\text{K})$	$w_c(\text{kJ/Kg})$	$w_t(\text{kJ/Kg})$	$q_{cc}(\text{kJ/Kg})$	η
1273,15	751,484	328,088	524,275	651,787	0.271
1473,15	869,535		606,633	852,787	0.294
1673,15	987,586		688,992	1054	0.308
1873,15	1106		771,351	1255	0.318

Πίνακας 25

Για θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_1=30^\circ\text{C}$ και λόγο συμπίεσης $r_p=10$

$T_3(\text{K})$	$T_4(\text{K})$	$w_c(\text{kJ/Kg})$	$w_t(\text{kJ/Kg})$	$q_{cc}(\text{kJ/Kg})$	η
1273,15	751,484	333,59	524,275	641,26	0,268
1473,15	869,535		606,633	842,26	0,292
1673,15	987,586		688,992	1043	0,307
1873,15	1106		771,351	1244	0,317

Πίνακας 26

Για θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_1=35^\circ\text{C}$ και λόγο συμπίεσης $r_p=10$

$T_3(\text{K})$	$T_4(\text{K})$	$w_c(\text{kJ/Kg})$	$w_t(\text{kJ/Kg})$	$q_{cc}(\text{kJ/Kg})$	η
1273,15	751,484	339,092	524,275	630,733	0,264
1473,15	869,535		606,633	831,733	0,29
1673,15	987,586		688,992	1033	0,305
1873,15	1106		771,351	1234	0,315

Πίνακας 27

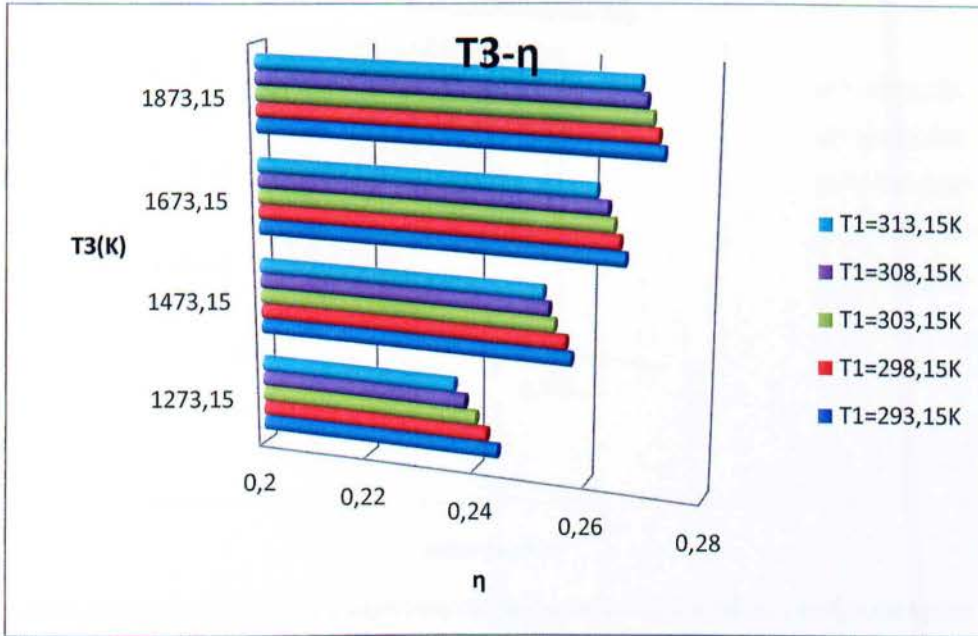
Για θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_1=40^\circ\text{C}$ και λόγο συμπίεσης $r_p=10$

$T_3(\text{K})$	$T_4(\text{K})$	$w_c(\text{kJ/Kg})$	$w_t(\text{kJ/Kg})$	$q_{cc}(\text{kJ/Kg})$	η
1273,15	751,484	344,594	524,275	620,206	0,261
1473,15	869,535		606,633	821,206	0,287
1673,15	987,586		688,992	1022	0,303
1873,15	1106		771,351	1223	0,314

Πίνακας 28

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

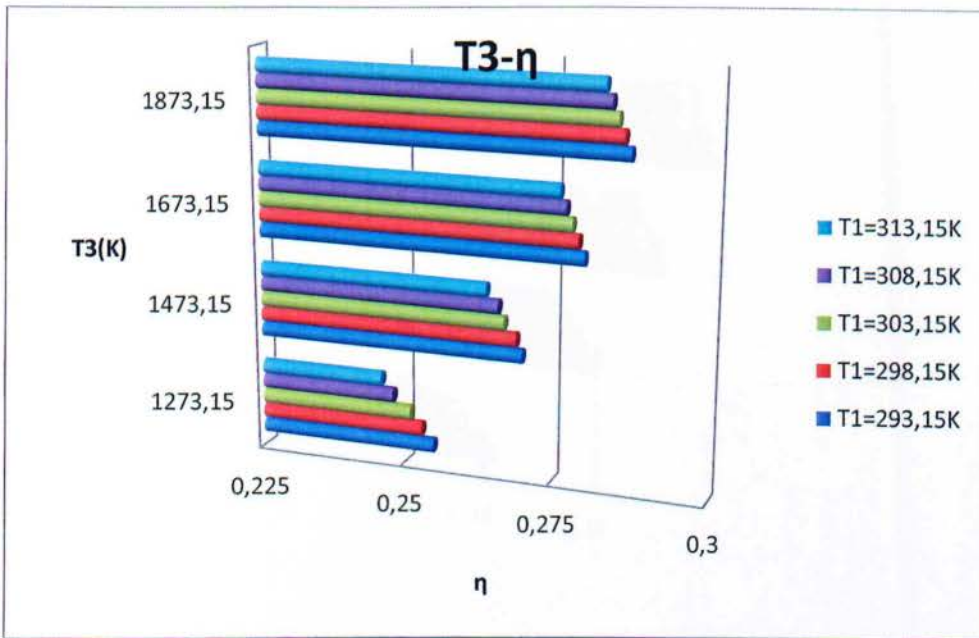
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα του βαθμού απόδοσης η με τη θερμοκρασία εξόδου από το θάλαμο καύσης T_3 , για τις παραπάνω τιμές του λόγου συμπίεσης και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ**6. 2. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΒΑΘΜΟΥ ΑΠΟΔΟΣΗΣ
ΚΥΚΛΟΥ BRAYTON**Για λόγο συμπίεσης $r_p=6$ 

Διάγραμμα 13

Μεταβολή Βαθμού Απόδοσης συναρτήσει της Θερμοκρασίας Εισόδου των Καυσαερίων στο Στρόβιλο

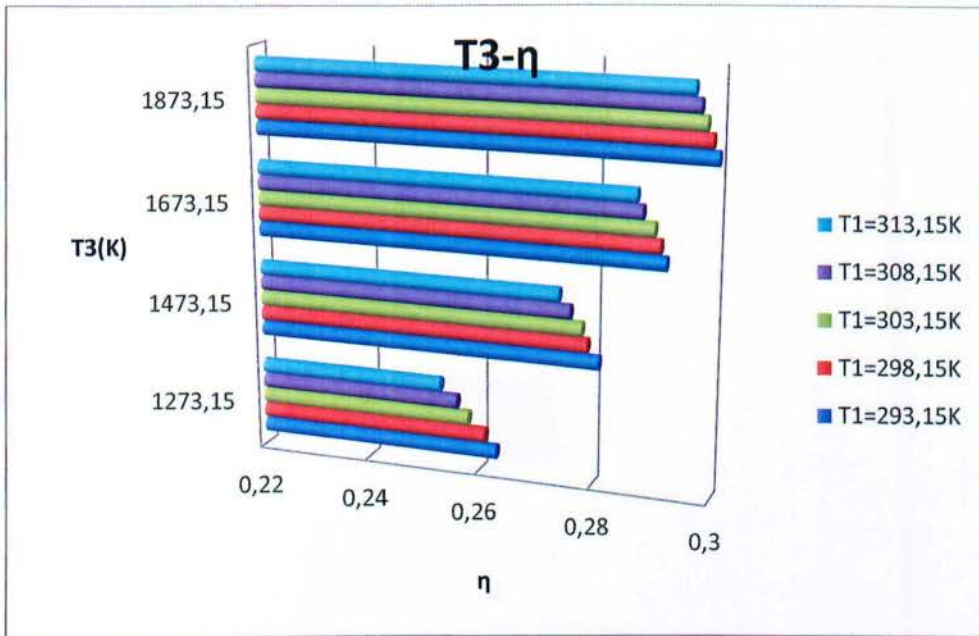
Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι αυξάνοντας τη θερμοκρασία εισόδου των καυσαερίων στο στρόβιλο αυξάνεται η απόδοση του κύκλου. Λαμβάνοντας υπόψη μας τη θεωρία το αποτέλεσμα είναι αναμενόμενο καθώς για σταθερό λόγο συμπίεσης αυξάνοντας τη θερμοκρασία εισόδου των καυσαερίων αυξάνεται και η θερμοκρασία κατά την εξόδο τους από το στρόβιλο με αποτέλεσμα το έργο του στροβίλου να μεγαλώνει, άρα και ο βαθμός συμπίεσης. Επίσης, με την αύξηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος παρατηρούμε μείωση του βαθμού απόδοσης.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗΓια λόγο συμπίεσης $r_p=7$ 

Διάγραμμα 14

Μεταβολή Βαθμού Απόδοσης συναρτήσει της Θερμοκρασίας Εισόδου των Καυσαερίων στο Στρόβιλο

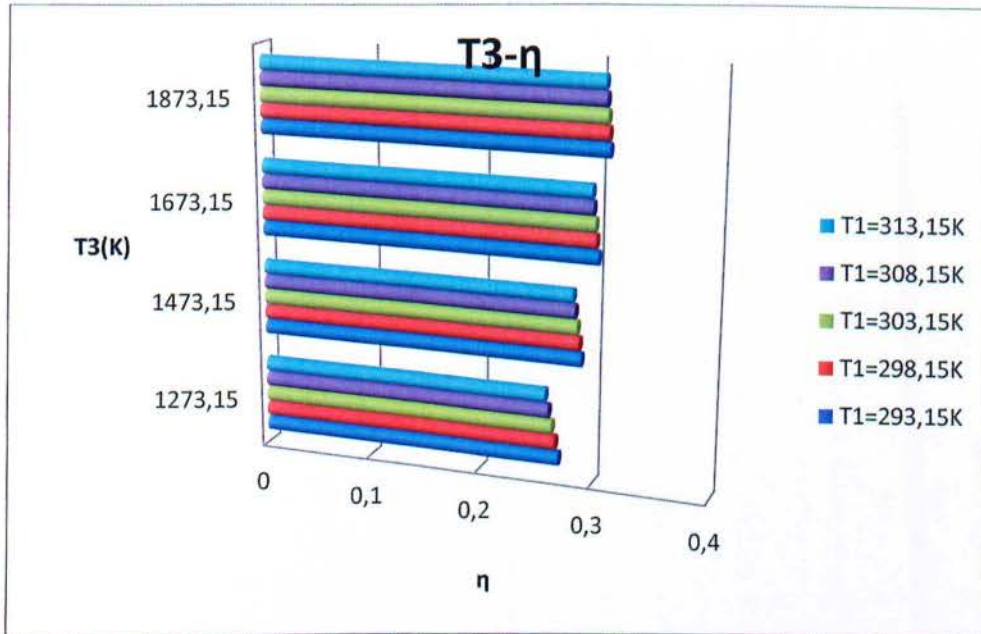
Παρατηρώντας το παραπάνω διάγραμμα διαπιστώνουμε ότι η αύξηση του λόγου συμπίεσης αυξάνει το βαθμό απόδοσης του κύκλου. Όπως και στο Διάγραμμα 13 έτσι και εδώ η αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου των καυσαερίων στο στρόβιλο αυξάνει το βαθμό απόδοσης του κύκλου. Αντίστοιχα με την αύξηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος μειώνεται ο βαθμός απόδοσης. Τέλος, παρατηρούμε μεγαλύτερες τιμές βαθμού απόδοσης σε σύγκριση με μικρότερο λόγο συμπίεσης.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗΓια λόγο συμπίεσης $r_p=8$ 

Διάγραμμα 15

Μεταβολή Βαθμού Απόδοσης συναρτήσει της Θερμοκρασίας Εισόδου των Καυσαερίων στο Στρόβιλο

Όμοια με τα Διαγράμματα 13-14 μεταβάλλεται ο βαθμός απόδοσης του κύκλου σε συνδυασμό με τη μεταβολή της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και τη θερμοκρασίας εισόδου των καυσαερίων στο θάλαμο καύσης. Η μέγιστη τιμή του είναι 0,3 για τη μέγιστη θερμοκρασία εισόδου των καυσαερίων στο στρόβιλο και τη μικρότερη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Το εύρος του βαθμού απόδοσης για το συγκεκριμένο λόγο συμπίεσης($r_p=8$) κυμαίνεται από 0,263 έως 0,3

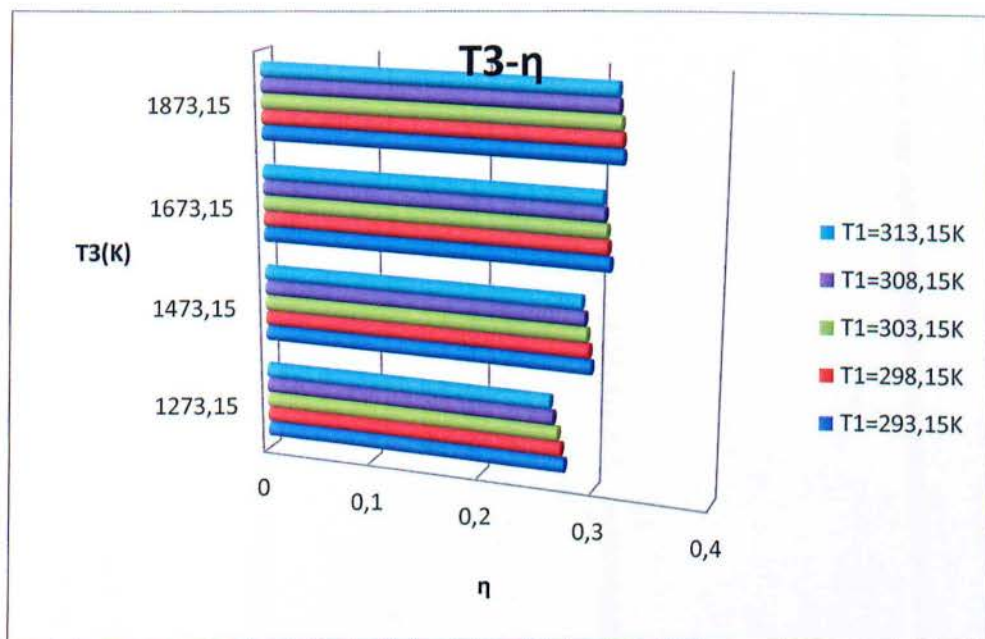
ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗΓια λόγο συμπίεσης $r_p=9$ 

Διάγραμμα 16

Μεταβολή Βαθμού Απόδοσης συναρτήσει της Θερμοκρασίας Εισόδου των Καυσαερίων στο Στρόβιλο

Όμοια με τα διαγράμματα 13,14 και 15 η μείωση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος για σταθερή θερμοκρασία εισόδου των καυσαερίων στο στρόβιλο οδηγεί σε αύξηση του βαθμού απόδοσης του κύκλου.

Αντίστοιχα αποτελέσματα παρουσιάζονται με την αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου των καυσαερίων διατηρώντας σταθερή αυτή του περιβάλλοντος. Το εύρος του βαθμού απόδοσης είναι από 0,27 έως 0,31. Η μέγιστη τιμή παρουσιάζεται για τη μικρότερη θερμοκρασία περιβάλλοντος σε συνδυασμό με τη μέγιστη κατά την είσοδο στο στρόβιλο.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗΓια λόγο συμπίεσης $r_p=10$ 

Διάγραμμα 17

Μεταβολή Βαθμού Απόδοσης συναρτήσει της Θερμοκρασίας Εισόδου των Καυσαερίων στο Στρόβιλο

Αντίστοιχα με τα Διαγράμματα 13,14,15 και 16 η μεταβολή του βαθμού απόδοσης του κύκλου επηρεάζεται άμεσα από τη μεταβολή της θερμοκρασίας τόσο κατά την είσοδο των καυσαερίων στο στρόβιλο όσο και από αυτή του περιβάλλοντος. Όπως ήταν αναμενόμενο η μέγιστη τιμή του βαθμού απόδοσης είναι για λόγο συμπίεσης $r_p=10$ και για τη μεγαλύτερη τιμή της θερμοκρασίας εισόδου των καυσαερίων στο θάλαμο καύσης και τη μικρότερη του περιβάλλοντος. Η τιμή αυτή είναι 0,319

6. 2. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΟΥ ΚΥΚΛΟΥ RANKINE

Στον **κύκλο Rankine** λάβαμε υπόψη μας τις ακόλουθες παραδοχές. Οι πιέσεις μετά το λέβητα είναι **20,25,30,35,40 bar** ,οι αντίστοιχες θερμοκρασίες είναι **300-400-500°C** και οι πιέσεις μετά το στρόβιλο είναι **0,06-0,08-0,10-0,12 bar** .

Οι εξισώσεις που χρησιμοποιήσαμε για την επίλυση της παραμετρικής μελέτης του κύκλου είναι δημοσιευμένες από τους Ziegler και Trepp οι εξής :

$$HwV(T,P) := 1.9982272810^3 + 185.48642454T - 1.1942693T^2 + 0.30027608T^3 + 0.98583365P - 5.8505657210^3 \cdot \frac{P}{T^3} - 2.56671510^7 \cdot \frac{P}{T^{11}}$$

$$SwV(T,P) := 4.13816853 + 1.85486425 \ln(T) - 0.02388539T + 4.5041412310^{-3} \cdot T^2 - \ln(P) - 43.87924292 \frac{P}{T^4} - 2.3527822110^5 \cdot \frac{P}{T^{12}}$$

$$VwV(T,P) := \frac{T}{P} + 9.8583364610^{-4} - \frac{1.46264143}{T^3} - \frac{2.1388929110^3}{T^{11}}$$

$$HwV(T, P) := 1.99822728 \cdot 10^3 + 185.48642454 \cdot T - 1.1942693 \cdot T^2 + 0.30027608 \cdot T^3 + 0.98583365 \cdot P - 5.85056572 \cdot 10^3 \times \frac{P}{T^3} - 2.566715 \cdot 10^7 \times \frac{P}{T^{11}}$$

$$SwL(T, P) := -3.74106893 + 5.6052328n(T) - 0.87596516T + 0.06719424T^2 + 2.05462869 \cdot 10^{-3} \cdot P - 7.74334624 \cdot 10^{-4} \cdot P \cdot T$$

$$VwL(T, P) := 1.26858118 \cdot 10^{-3} - 4.69195271 \cdot 10^{-7} \cdot P - 2.05462869 \cdot 10^{-4} \cdot T + 3.87167312 \cdot 10^{-5} \cdot T^2$$

$$up_6 = VwL\left(\frac{t_9}{100}, \frac{p_9}{100}\right)$$

$$w_p = up_6 \cdot (P_6 - P_9) \cdot 10^2$$

$$X_s = \frac{s_7 - s_f}{s_g - s_f} \quad q_b = h_7 - h_6 \quad q_L = h_8 - h_9$$

$$\eta = \frac{W_t - W_p}{q_b}$$

Θεωρούμε πίεση μετά το στρόβιλο $P_9=0,06 \text{ bar}$ και θερμοκρασία $T_9=309,35\text{K}$, ισεντροπικό βαθμό απόδοσης $\eta_s=0,85$ και βαθμό απόδοσης του στροβίλου $\eta_g=0,96$.

Για πιέσεις μετά το λέβητα **20,25,30,35,40 bar** και θερμοκρασίες **300-400-500°C** έχουμε τα εξής αποτελέσματα

Για $T_7=573,15\text{K}$

P_6 (bar)	w_p (kJ/Kg)	x_s	h_6 (kJ/Kg)	h_7 (kJ/Kg)	h_{8s} (kJ/Kg)	h_8 (kJ/Kg)	h_9 (kJ/Kg)	q_B (kJ/Kg)	q_L (kJ/Kg)	w_T (kJ/Kg)	η
20	2,001	0,78	153,879	3018	2037	2184	151,878	2864	2032	800,969	0,279
25	2,503	0,749	154,381	3003	1961	2118		2849	1966	850,149	0,298
30	3,004	0,723	154,883	2988	1899	2062		2833	1910	889,021	0,313
35	3,506	0,701	155,385	2973	1845	2014		2818	1862	920,779	0,326
40	4,008	0,681	155,886	2958	1797	1971		2802	1819	947,331	0,337

Πίνακας 29

Ενδεικτικά παρατίθεται παρακάτω ο υπολογισμός των στοιχείων του παραπάνω πίνακα.

$$u_{p6} = VwL\left(\frac{t_9}{100}, \frac{p_9}{10}\right) = VwL\left(\frac{309,35}{100}, \frac{0,06}{10}\right) = 0,001003 \text{ m}^3/\text{Kg}_m$$

$$w_p = u_{p6} * (P_6 - P_9) * 10^2 = 0,001003 * (20 - 0,06) * 10^2 = 2,001 \text{ (kJ/Kg)}$$

$$h_9 = HwL\left(\frac{t_9}{100}, \frac{p_9}{10}\right) = \left(\frac{309,35}{100}, \frac{0,06}{10}\right) = 151,878 \text{ (kJ/Kg)}$$

$$h_6 = h_9 + w_p = (151,878 + 2,001) \text{ (KJ/Kg)} = 153,879 \text{ (kJ/Kg)}$$

$$S_7 = S_w V \left(\frac{t_7}{100}, \frac{p_6}{10} \right) = S_{wv} \left(\frac{573,15}{100}, \frac{20}{10} \right) = 6,613 \text{ (kJ/Kg)}$$

$$S_f = S_w L \left(\frac{t_9}{100}, \frac{p_9}{10} \right) = S_{wL} \left(\frac{309,35}{100}, \frac{0,06}{10} \right) = 0,522 \text{ (kJ/Kg)}$$

$$S_g = S_w V \left(\frac{t_9}{100}, \frac{p_9}{10} \right) = S_{wV} \left(\frac{309,35}{100}, \frac{0,06}{10} \right) = 8,329 \text{ (kJ/Kg)}$$

$$X_s = \frac{s_7 - s_f}{s_g - s_f} = \frac{6,613 - 0,522}{8,085 - 0,522} = 0,78$$

$$h_7 = H_w V \left(\frac{t_7}{100}, \frac{p_6}{10} \right) = 3018 \text{ (KJ/Kg)}$$

$$q_b = h_7 - h_6 = (3018 - 153,879) \text{ (KJ/Kg)} = 2864 \text{ (KJ/Kg)}$$

$$h_g = H_w V \left(\frac{t_9}{100}, \frac{p_9}{10} \right) = H_{wV} \left(\frac{308,95}{100}, \frac{0,06}{10} \right) = 2568 \text{ (KJ/Kg)}$$

$$h_f = HwL \left(\frac{t_9}{100}, \frac{p_9}{10} \right) = HwL \left(\frac{308,95}{100}, \frac{0,06}{10} \right) = 151,878 \text{ (kJ/Kg)}$$

$$h_{8s} = X_s * h_g + (1 - X_s) * h_f = [0,805 * 2568 + (1 - 0,805) * 151,878] \text{ (KJ/Kg)} = 2037 \text{ (kJ/Kg)}$$

$$h_8 = h_7 - n_s * (h_7 - h_{8s}) = [3018 - 0,85 * (3018 - 2097)] \text{ (KJ/Kg)} = 2184 \text{ (kJ/Kg)}$$

$$q_L = h_8 - h_9 = (2236 - 151,878) \text{ (KJ/Kg)} = 2032 \text{ (kJ/Kg)}$$

$$w_i = (h_7 - h_8) * n_g = (3018 - 2236) * 0,96 \text{ (KJ/Kg)} = 800,969 \text{ (kJ/Kg)}$$

$$\eta = \frac{Wt - Wp}{qb} = \frac{751,35 - 2,001}{2864} = 0,279 \text{ (kJ/Kg)}$$

Για $T_7=673,15K$

P_6 (bar)	w_p (kJ/Kg)	x_s	h_6 (kJ/Kg)	h_7 (kJ/Kg)	h_{8s} (kJ/Kg)	h_8 (kJ/Kg)	h_9 (kJ/Kg)	q_B (kJ/Kg)	q_L (kJ/Kg)	w_T (kJ/Kg)	η
20	2,001	0,828	153,879	3248	2151	2316	151,878	3094	2164	895,064	0,289
25	2,503	0,798	154,381	3239	2079	2253		3084	2101	946,68	0,306
30	3,004	0,773	154,883	3230	2019	2201		3075	2049	987,988	0,32
35	3,506	0,752	155,385	3221	1968	2156		3065	2004	1022	0,332
40	4,008	0,733	155,886	3211	1923	2116		3056	1965	1051	0,343

Πίνακας 30

Για $T_7=773,15K$

P_6 (bar)	w_p (kJ/Kg)	x_s	h_6 (kJ/Kg)	h_7 (kJ/Kg)	h_{8s} (kJ/Kg)	h_8 (kJ/Kg)	h_9 (kJ/Kg)	q_B (kJ/Kg)	q_L (kJ/Kg)	w_T (kJ/Kg)	η
20	2,001	0,868	153,879	3476	2249	2433	151,878	3322	2281	1002	0,301
25	2,503	0,839	154,381	3471	2178	2372		3316	2220	1055	0,317
30	3,004	0,815	154,883	3465	2120	2321		3310	2169	1098	0,331
35	3,506	0,794	155,385	3459	2070	2278		3303	2126	1133	0,342
40	4,008	0,776	155,886	3453	2027	2241		3297	2089	1164	0,352

Πίνακας 31

Για $T_7=573,15K$

P_6 (bar)	w_p (kJ/Kg)	x_s	h_6 (kJ/Kg)	h_7 (kJ/Kg)	h_{8s} (kJ/Kg)	h_8 (kJ/Kg)	h_9 (kJ/Kg)	q_B (kJ/Kg)	q_L (kJ/Kg)	w_T (kJ/Kg)	η
20	2,003	0,789	176,039	3018	2069	2211	174,036	2842	2037	774,502	0,272
25	2,505	0,757	176,542	3003	1992	2144		2827	1970	824,746	0,291
30	3,008	0,73	177,045	2988	1929	2088		2811	1913	864,505	0,306
35	3,511	0,707	177,547	2973	1874	2039		2795	1864	897,026	0,32
40	4,014	0,687	178,05	2958	1825	1995		2780	1821	924,251	0,331

Πίνακας 32

Για $T_7=673,15K$

P_6 (bar)	w_p (kJ/Kg)	x_s	h_6 (kJ/Kg)	h_7 (kJ/Kg)	h_{8s} (kJ/Kg)	h_8 (kJ/Kg)	h_9 (kJ/Kg)	q_B (kJ/Kg)	q_L (kJ/Kg)	w_T (kJ/Kg)	η
20	2,003	0,837	176,039	3248	2185	2345	174,036	3072	2171	866,981	0,282
25	2,505	0,806	176,542	3239	2112	2281		3062	2107	919,619	0,299
30	3,008	0,781	177,045	3230	2051	2228		3053	2054	961,771	0,314
35	3,511	0,759	177,547	3221	1999	2182		3043	2008	996,686	0,326
40	4,014	0,741	178,05	3211	1954	2142		3033	1968	1026	0,337

Πίνακας 33

Για $T_7=773,15K$

P_6 (bar)	w_p (kJ/Kg)	x_s	h_6 (kJ/Kg)	h_7 (kJ/Kg)	h_{8s} (kJ/Kg)	h_8 (kJ/Kg)	h_9 (kJ/Kg)	q_B (kJ/Kg)	q_L (kJ/Kg)	w_T (kJ/Kg)	η
20	2,003	0,878	176,039	3476	2285	2464	174,036	3300	229	972,138	0,294
25	2,505	0,848	176,542	3471	2213	2401		3294	2227	1026	0,311
30	3,008	0,824	177,045	3465	2153	2350		3288	2176	1070	0,325
35	3,511	0,803	177,547	3459	2103	2306		3281	2132	1106	0,336
40	4,014	0,784	178,05	3453	2059	2268		3275	2094	1137	0,346

Πίνακας 34

Για πίεση μετά το στρόβιλο $P_9=0,10 \text{ bar}$ και θερμοκρασία $T_9=318,95\text{K}$

Για $T_7=573,15\text{K}$

P_6 (bar)	w_p (kJ/Kg)	x_s	h_6 (kJ/Kg)	h_7 (kJ/Kg)	h_{8s} (kJ/Kg)	h_8 (kJ/Kg)	h_9 (kJ/Kg)	q_B (kJ/Kg)	q_L (kJ/Kg)	w_T (kJ/Kg)	η
20	2,004	0,795	194,012	3018	2095	2233	192,008	2824	2041	753,562	0,266
25	2,508	0,763	194,515	3003	2017	2165		2809	1973	804,658	0,286
30	3,011	0,736	195,019	2988	1952	2108		2793	1916	845,125	0,302
35	3,515	0,712	195,522	2973	1897	2058		2777	1866	878,257	0,315
40	4,018	0,692	196,026	2958	1848	2014		2762	1822	906,02	0,327

Πίνακας 35

Για $T_7=673,15\text{K}$

P_6 (bar)	w_p (kJ/Kg)	x_s	h_6 (kJ/Kg)	h_7 (kJ/Kg)	h_{8s} (kJ/Kg)	h_8 (kJ/Kg)	h_9 (kJ/Kg)	q_B (kJ/Kg)	q_L (kJ/Kg)	w_T (kJ/Kg)	η
20	2,004	0,844	194,012	3248	2213	2368	192,008	3054	2176	844,749	0,276
25	2,508	0,813	194,515	3239	2138	2303		3044	2111	898,205	0,294
30	3,011	0,788	195,019	3230	2076	2249		3035	2057	941,031	0,309
35	3,515	0,766	195,522	3221	2024	2203		3025	2011	976,523	0,322
40	4,018	0,746	196,026	3211	1978	2163		3015	1971	1007	0,333

Πίνακας 36

Για $T_7=773,15K$

P_6 (bar)	w_p (kJ/Kg)	x_s	h_6 (kJ/Kg)	h_7 (kJ/Kg)	h_{8s} (kJ/Kg)	h_8 (kJ/Kg)	h_9 (kJ/Kg)	q_B (kJ/Kg)	q_L (kJ/Kg)	w_T (kJ/Kg)	η
20	2,004	0,887	194,012	3476	2314	2488	192,008	3282	2296	948,801	0,288
25	2,508	0,856	194,515	3471	2240	2425		3276	2233	1004	0,306
30	3,011	0,831	195,019	3465	2180	2373		3270	2181	1048	0,32
35	3,515	0,81	195,522	3459	2129	2329		3263	2137	1085	0,331
40	4,018	0,791	196,026	3453	2085	2290		3257	2098	1117	0,342

Πίνακας

Για πίεση μετά το στρόβιλο $P_9=0,12 \text{ bar}$ και θερμοκρασία $T_9=322,55\text{K}$

Για $T_7=573,15\text{K}$

P_6 (bar)	w_p (kJ/Kg)	x_s	h_6 (kJ/Kg)	h_7 (kJ/Kg)	h_{8s} (kJ/Kg)	h_8 (kJ/Kg)	h_9 (kJ/Kg)	q_B (kJ/Kg)	q_L (kJ/Kg)	w_T (kJ/Kg)	η
20	2,005	0,801	209,056	3018	2116	2252	192,008	2809	2044	736,021	0,261
25	2,51	0,768	209,56	3003	2038	2182		2794	1975	787,836	0,281
30	3,014	0,74	210,065	2988	1972	2125		2778	1918	828,902	0,297
35	3,518	0,717	210,569	2973	1916	2074		2762	1867	862,55	0,311
40	4,023	0,696	211,073	2958	1866	2030		2747	1823	890,768	0,323

Πίνακας 37

Για $T_7=673,15\text{K}$

P_6 (bar)	w_p (kJ/Kg)	x_s	h_6 (kJ/Kg)	h_7 (kJ/Kg)	h_{8s} (kJ/Kg)	h_8 (kJ/Kg)	h_9 (kJ/Kg)	q_B (kJ/Kg)	q_L (kJ/Kg)	w_T (kJ/Kg)	η
20	2,005	0,851	209,056	3248	2235	2387	192,008	3039	2180	826,117	0,271
25	2,51	0,819	209,56	3239	2160	2322		3029	2115	880,263	0,29
30	3,014	0,793	210,065	3230	2098	2268		3020	2060	923,66	0,305
35	3,518	0,771	210,569	3221	2045	2221		3010	2014	959,638	0,318
40	4,023	0,751	211,073	3211	1998	2180		3000	1973	990,187	0,329

Πίνακας 38

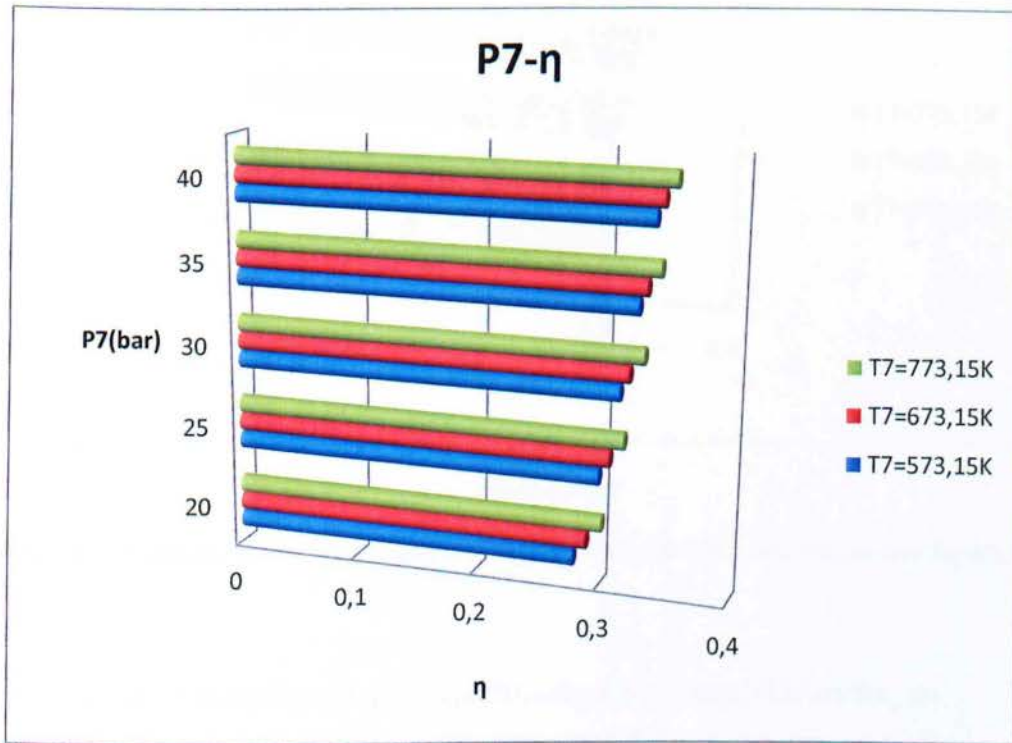
Για $T_7=773,15K$

P_6 (bar)	w_p (kJ/Kg)	x_s	h_6 (kJ/Kg)	h_7 (kJ/Kg)	h_{8s} (kJ/Kg)	h_8 (kJ/Kg)	h_9 (kJ/Kg)	q_B (kJ/Kg)	q_L (kJ/Kg)	w_T (kJ/Kg)	η
20	2,005	0,894	209,056	3476	2338	2508	192,008	3267	2301	929,234	0,284
25	2,51	0,863	209,56	3471	2264	2445		3261	2238	984,847	0,301
30	3,014	0,837	210,065	3465	2203	2392		3255	2185	1030	0,315
35	3,518	0,815	210,569	3459	2151	2347		3248	2140	1067	0,327
40	4,023	0,796	211,073	3453	2106	2308		3242	2101	1099	0,338

Πίνακας 39

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

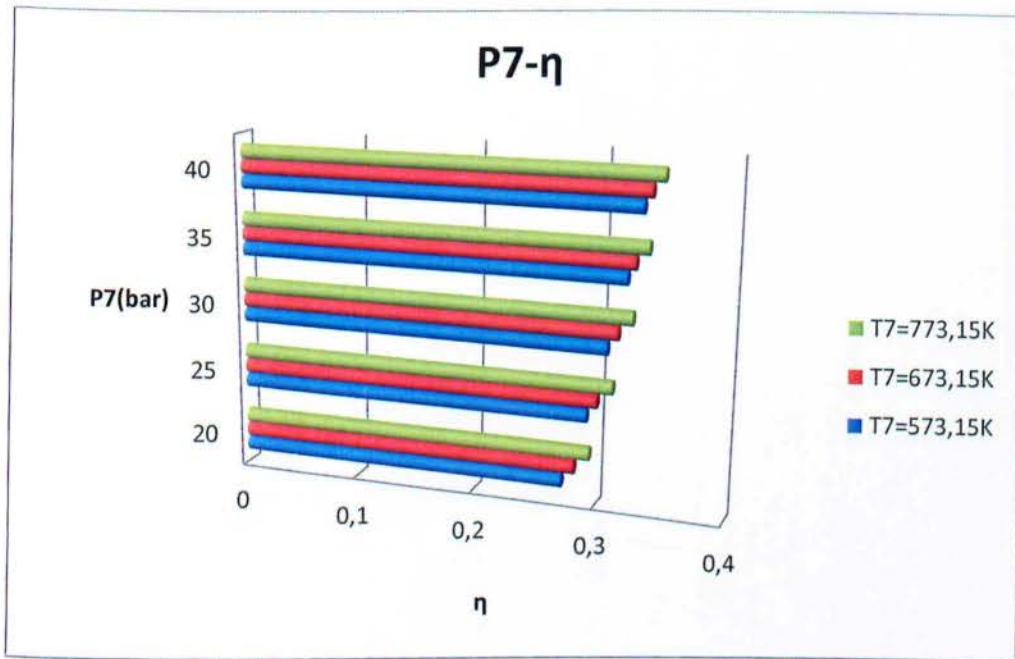
6. 2 .1.ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΒΑΘΜΟΥ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΚΥΚΛΟΥ RANKINE

Για $P_9=0,06 \text{ bar}$ και $T_9=309,35\text{K}$ 

Διάγραμμα 18

Μεταβολή Βαθμού Απόδοσης συναρτήσει της Πίεσης Εισόδου του Ατμού στο Στρόβιλο

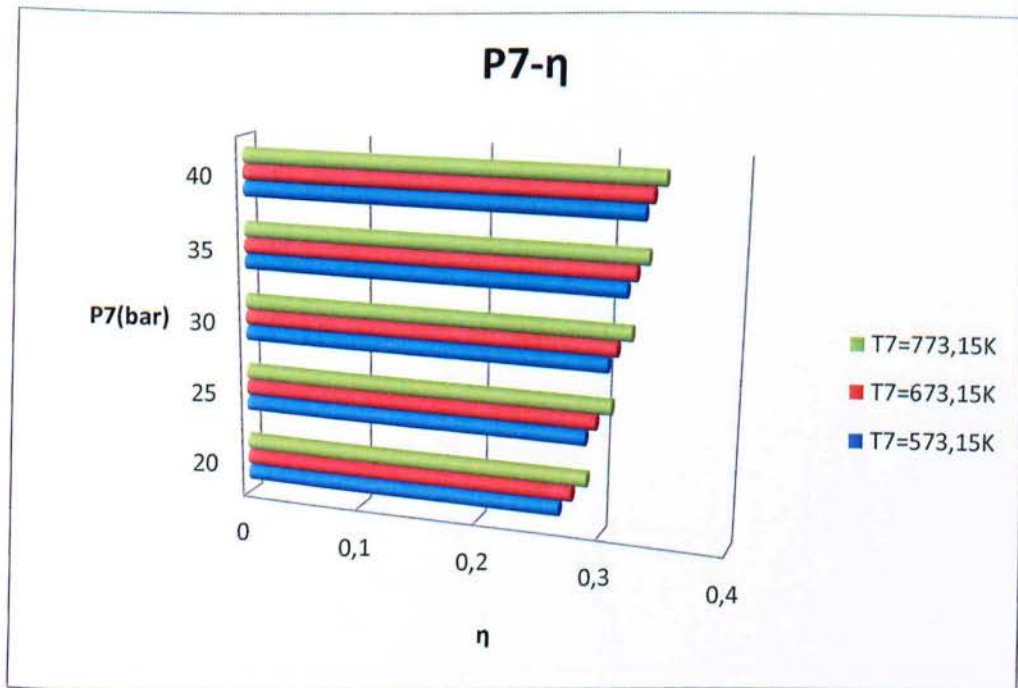
Παρατηρώντας ,το παραπάνω διάγραμμα διαπιστώνουμε ότι αυξάνοντας τη θερμοκρασία εισόδου του ατμού στο στρόβιλο αυξάνεται ο βαθμός απόδοσης του κύκλου για σταθερή πίεση. Λαμβάνοντας υπόψη μας τη θεωρία το αποτέλεσμα αυτό είναι το προσδοκώμενο καθώς αυξάνοντας τη θερμοκρασία του ατμού κατά την είσοδο στο στρόβιλο αυξάνεται το έργο του άρα και ο βαθμός απόδοσης. Το εύρος των τιμών της απόδοσης του κύκλου κυμαίνεται από 0,279 έως 0,352. Όσο αυξάνεται η πίεση πριν το στρόβιλο αυξάνεται και ο βαθμός απόδοσης του κύκλου όπως επίσης αυξάνεται όσο μεγαλώνει η θερμοκρασία του ατμού πριν το στρόβιλο

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗΓια $P_9=0,08 \text{ bar}$ και $T_9=314,65\text{K}$ 

Διάγραμμα 19

Μεταβολή Βαθμού Απόδοσης συναρτήσει της Πίεσης Εισόδου του Ατμού στο Στρόβιλο

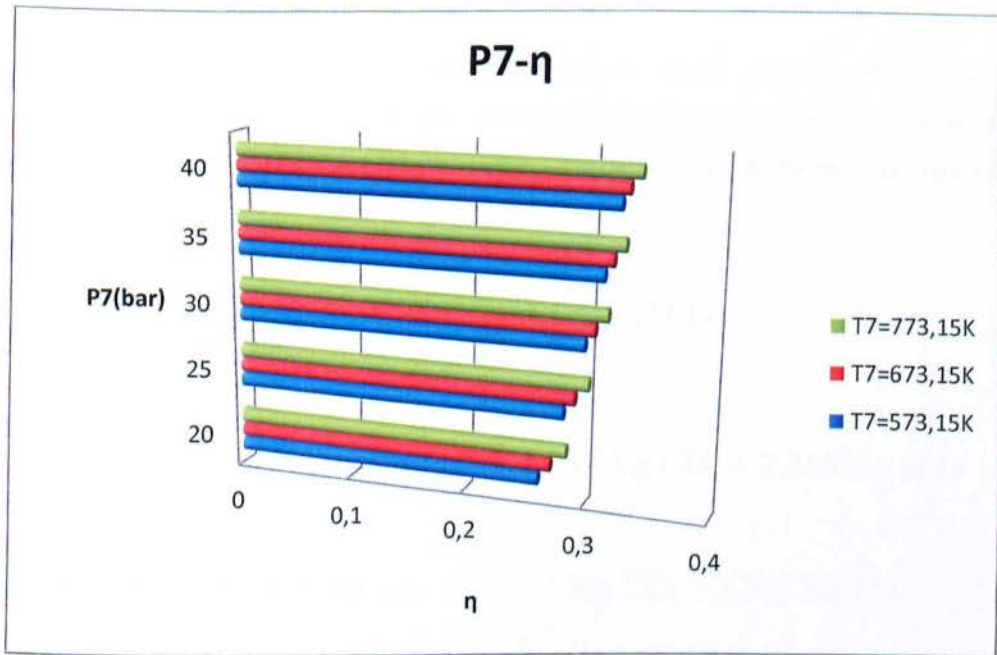
Όμοια με το Διάγραμμα 18 παρατηρούμε ότι μεταβάλλοντας τη θερμοκρασία εισόδου του ατμού στο στρόβιλο αυξάνεται ο βαθμός απόδοσης του κύκλου. Διατηρώντας σταθερή τη θερμοκρασία του ατμού αυξανόμενης της πίεσης πριν το στρόβιλο παρατηρείται αύξηση του βαθμού απόδοσης. Λαμβάνοντας υπόψη μας τη θεωρία το αποτέλεσμα αυτό είναι το προσδοκώμενο καθώς όσο μεγαλώνει η πίεση του ατμού πριν το στρόβιλο αυξάνεται και το έργο του άρα ο βαθμός απόδοσης, με εύρος τιμών από 0,272 έως 0,346.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗΓια $P_9=0,10 \text{ bar}$ και $T_9=318,95\text{K}$ 

Διάγραμμα 20

Μεταβολή Βαθμού Απόδοσης συναρτήσει της Πίεσης Εισόδου του Ατμού στο Στρόβιλο

Αντίστοιχα με τα Διαγράμματα 18,19 ο βαθμός απόδοσης του κύκλου μεταβάλλεται με την αύξηση της πίεσης μετά το στρόβιλο όπως και με τη την αύξηση της θερμοκρασίας του ατμού πριν από το στρόβιλο. Το εύρος των τιμών του βαθμού απόδοσης κυμαίνεται από 0,262 έως 0,342 με τη μέγιστη τιμή να παρουσιάζεται για τη μεγαλύτερη πίεση(40bar) και για θερμοκρασία ατμού $T_7=1600^\circ\text{C}$

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗΓια $P_9=0,12 \text{ bar}$ και $T_9=322,55\text{K}$ 

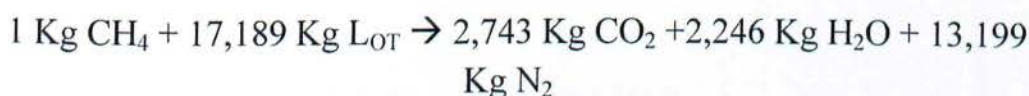
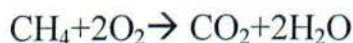
Διάγραμμα 21

Μεταβολή Βαθμού Απόδοσης συναρτήσει της Πίεσης Εισόδου του Ατμού στο Στρόβιλο

Όμοια με τα Διαγράμματα 18,19,20 αυξάνοντας τη πίεση του ατμού μετά το στρόβιλο παρατηρείται μείωση του βαθμού απόδοσης του κύκλου σε σύγκριση με τις προηγούμενες τιμές. Το εύρος των τιμών είναι από 0,261 έως 0,338 με τη μέγιστη τιμή να παρουσιάζεται για τη μεγαλύτερη τιμή της πίεσης του ατμού κατά την είσοδό του στο στρόβιλο και για τη μέγιστη θερμοκρασία.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ**6.3 ΚΑΥΣΗ**

Θεωρώντας ότι η ισχύς του στροβίλου κατά κύκλο Rankine είναι $W_s=10\text{MW}$ και λαμβάνοντας υπόψη μας ότι το καύσιμο στον κύκλο Brayton είναι **100% CH₄** από τις εξισώσεις της καύσης έχουμε ότι :



Το απαιτούμενο O₂ για στοιχειομετρική καύση είναι O₂ :0,2321 L_{OT} Kg O₂/Kg καυσίμου

Άρα το O₂ για την καύση είναι O₂:0,2321*17,189=3,9896 Kg O₂/Kg καυσίμου

$$\lambda = \frac{L_t}{L_{ot}} \Rightarrow \lambda = 1,2 * 17,189 = 20,6268\text{ Kg αέρα/Kg καυσίμου}$$

Για την περίσσεια έχουμε : O₂=0,2321*20,6268 Kg O₂/Kg καυσίμου = 4,7875 Kg O₂/Kg καυσίμου

Το O₂ στα καυσαέρια είναι O_{2περ}-O_{2στοιχ}=(4,7875-3,9896) Kg O₂/Kg καυσίμου =0,7979 Kg O₂/Kg καυσίμου

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

Το N_2 στα καυσαέρια είναι : $0,7679 * 20,6268 \text{ Kg } N_2/\text{Kg καυσίμου} =$
15,839 Kg $N_2/\text{Kg καυσίμου}$

Στα καυσαέρια έχουμε : CO_2 : $2,743 \text{ Kg } CO_2/\text{Kg καυσίμου}$ ή **14,15%**

N_2 : $15,839 \text{ Kg } N_2/\text{Kg καυσίμου}$ ή **81,73%**

O_2 : $0,7978 \text{ Kg } O_2/\text{Kg καυσίμου}$ ή **4,12%**

Από την εξίσωση της μέσης ειδικής θερμότητας αερίων υπό σταθερή πίεση έχουμε :

$$C_{p_{in}} = 0,1415 * C_{p_{CO_2}} + 0,8173 * C_{p_{N_2}} + 0,041 * C_{p_{O_2}}$$

$$C_{p_{out}} = 0,1415 * C_{p_{CO_2}} + 0,8173 * C_{p_{N_2}} + 0,041 * C_{p_{O_2}}$$

Θεωρούμε τη θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων ίση με $t_{out} = 453,15K$
 άρα

σύμφωνα με τον πίνακα της ειδικής θερμότητας αερίων υπό σταθερή πίεση έχουμε :

$$C_{p_{out}} = 0,1415 * C_{p_{CO_2}} + 0,8173 * C_{p_{N_2}} + 0,041 * C_{p_{O_2}}$$

$$= 0,1415 * 0,979 + 0,8173 * 1,049 + 0,041 * 0,957 = 1,036$$

Για θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_1 = 293,15K - 298,15K - 303,15K -$
 $308,15K - 313,13K$ και λόγο συμπίεσης $r_p = 6$

T4 (K)	$C_{p_{CO_2}}$ (kJ/Kg*K)	$C_{p_{N_2}}$ (kJ/Kg*K)	$C_{p_{O_2}}$ (kJ/Kg*K)	$C_{p_{in}}$ (kJ/Kg*K)
39,561	1,183	1,132	1,062	1,136
71,449	1,291	1,225	1,12	1,213
1103	1,313	1,229	1,123	1,217
1235	1,332	1,246	1,498	1,285

Πίνακας 40

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

Ο υπολογισμός του παραπάνω πίνακα έγινε με τη χρήση γραμμικής παρεμβολής στα στοιχεία του πίνακα των ειδικών θερμοτήτων αερίων υπό σταθερή πίεση. Όμοια και για τις παρακάτω τιμές.

Για θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_1=293,15\text{K}-298,15\text{K}-303,15\text{K}-308,15\text{K}-313,13\text{K}$ και λόγο συμπίεσης $r_p=7$.

T_4 (K)	C_{pCO_2} (kJ/Kg*K)	C_{pN_2} (kJ/Kg*K)	C_{pO_2} (kJ/Kg*K)	$C_{p_{in}}$ (kJ/Kg*K)
811,616	1,183	1,183	1,102	1,18
939,113	1,284	1,21	1,117	1,217
1067	1,307	1,217	1,13	1,226
1194	1,326	1,24	1,139	1,248

Πίνακας 41

Για θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_1=293,15\text{K}-298,15\text{K}-303,15\text{K}-308,15\text{K}-313,13\text{K}$ και λόγο συμπίεσης $r_p=8$.

T_4 (K)	C_{pCO_2} (kJ/Kg*K)	C_{pN_2} (kJ/Kg*K)	C_{pO_2} (kJ/Kg*K)	$C_{p_{in}}$ (kJ/Kg*K)
788,383	1,251	1,179	1,098	1,186
912,231	1,279	1,201	1,114	1,208
1036	1,302	1,221	1,127	1,229
1160	1,321	1,236	1,137	1,244

Για θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_1=293,15\text{K}-298,15\text{K}-303,15\text{K}-308,15\text{K}-313,13\text{K}$ και λόγο συμπίεσης $r_p=9$.

T_4 (K)	C_{pCO_2} (kJ/Kg*K)	C_{pN_2} (kJ/Kg*K)	C_{pO_2} (kJ/Kg*K)	$C_{p_{in}}$ (kJ/Kg*K)
768,613	1,246	1,175	1,095	1,182
889,355	1,274	1,197	1,112	1,196
1010	1,298	1,217	1,124	1,225
1131	1,317	1,233	1,135	1,241

Πίνακας 42

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

Για θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_1=293,15\text{K}-298,15\text{K}-303,15\text{K}-308,15\text{K}-313,13\text{K}$ και λόγο συμπίεσης $r_p=10$.

T_4 (K)	$C_{p\text{CO}_2}$ (kJ/Kg*K)	$C_{p\text{N}_2}$ (kJ/Kg*K)	$C_{p\text{O}_2}$ (kJ/Kg*K)	$C_{p_{in}}$ (kJ/Kg*K)
751,484	1,241	1,172	1,093	1,179
869,535	1,27	1,194	1,109	1,201
987,586	1,294	1,214	1,122	1,222
1106	1,313	1,217	1,124	1,227

Πίνακας 43

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

Έπειτα λαμβάνοντας υπόψη μας ότι $W_s=10\text{MW}$ και για πίεση μετά το στρόβιλο ίση με $P_9=0,06-0,08-0,10-0,12$ bar και θερμοκρασία μετά το λέβητα $T_7=573,15-673,15-773,15\text{K}$ χρησιμοποιώντας την παρακάτω σχέση έχουμε:

$$W_s = m_s \cdot (h_7 - h_8) \Rightarrow m_s = \frac{W_s}{h_7 - h_8}$$

Για πίεση μετά το στρόβιλο $P_9=0,06$ bar και θερμοκρασία $T_9=309,35\text{K}$

Για $T_7=573,15\text{K}$

h_7 (kJ/Kg)	h_8 (kJ/Kg)	m_s (Kg/s)
3018	2184	12,777
3003	2118	11,962
2988	2062	11,387
2973	2014	10,956
2958	1971	10,619

Πίνακας 44

Για $T_7=673,15\text{K}$

h_7 (kJ/Kg)	h_8 (kJ/Kg)	m_s (Kg/s)
3248	2316	11,396
3239	2253	10,715
3230	2201	10,225
3221	2156	9,852
3211	2116	9,557

Πίνακας 45

Για $T_7=773,15\text{K}$

h_7 (kJ/Kg)	h_8 (kJ/Kg)	m_s (Kg/s)
3476	2433	10,144
3471	2372	9,587
3465	2321	9,18
3459	2278	8,866
3453	2241	8,614

Πίνακας 46

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

Για πίεση μετά το στρόβιλο $P_9=0,08 \text{ bar}$ και θερμοκρασία $T_9=314,65\text{K}$

Για $T_7=573,15\text{K}$

h_7 (kJ/Kg)	h_8 (kJ/Kg)	m_s (Kg/s)
3018	2211	12,883
3003	2144	12,051
2988	2088	11,464
2973	2039	11,025
2958	1995	10,682

Πίνακας 47

Για $T_7=673,15\text{K}$

h_7 (kJ/Kg)	h_8 (kJ/Kg)	m_s (Kg/s)
3248	2345	11,485
3239	2281	10,791
3230	2228	10,292
3221	2182	9,913
3211	2142	9,612

Πίνακας 48

Για $T_7=773,15\text{K}$

h_7 (kJ/Kg)	h_8 (kJ/Kg)	m_s (Kg/s)
3476	2464	10,218
3471	2401	9,651
3465	2350	9,237
3459	2306	8,918
3453	2268	8,662

Πίνακας 49

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

Για πίεση μετά το στρόβιλο $P_9=0,10$ bar και θερμοκρασία $T_9=318,95K$

Για $T_7=573,15K$

h_7 (kJ/Kg)	h_8 (kJ/Kg)	m_s (Kg/s)
3018	2233	12,97
3003	2165	12,124
2988	2108	11,528
2973	2058	11,082
2958	2014	10,734

Πίνακας 50

Για $T_7=673,15K$

h_7 (kJ/Kg)	h_8 (kJ/Kg)	m_s (Kg/s)
3248	2368	11,559
3239	2303	10,853
3230	2249	10,347
3221	2203	9,962
3211	2163	9,657

Πίνακας 51

Για $T_7=773,15K$

h_7 (kJ/Kg)	h_8 (kJ/Kg)	m_s (Kg/s)
3476	2488	10,279
3471	2425	9,703
3465	2373	9,284
3459	2329	8,96
3453	2290	8,701

Πίνακας 52

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

Για πίεση μετά το στρόβιλο $P_9=0,12$ bar και θερμοκρασία $T_9=322,55$ K

Για $T_7=573,15$ K

h_7 (kJ/Kg)	h_8 (kJ/Kg)	m_s (Kg/s)
3018	2252	13,043
3003	2182	12,185
2988	2125	11,582
2973	2074	11,13
2958	2030	10,777

Πίνακας 53

Για $T_7=673,15$ K

h_7 (kJ/Kg)	h_8 (kJ/Kg)	m_s (Kg/s)
3248	2387	11,621
3239	2322	10,906
3230	2268	10,393
3221	2221	10,004
3211	2180	9,695

Πίνακας 54

Για $T_7=773,15$ K

h_7 (kJ/Kg)	h_8 (kJ/Kg)	m_s (Kg/s)
3476	2508	10,331
3471	2445	9,748
3465	2392	9,323
3459	2347	8,996
3453	2308	8,734

Πίνακας 55

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

Για θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_1=293,15K-298,15K-303,15K-308,15K-313,13K$ και λόγο συμπίεσης $r_p=6$

T_4 (K)	$C_{p_{in}}$ (kJ/Kg*K)	$C_{p_{out}}$ (kJ/Kg*K)	m_g (Kg/s)	W_g (MW)
839,561	1,136	1,041	89,3888	38,95171
971,449	1,213		56,77388	28,62596
1103	1,217		43,62449	24,98213
1235	1,285		32,58528	20,89095

Πίνακας 56

Παρακάτω παρουσιάζεται ενδεικτικά ο υπολογισμός των στοιχείων του παραπάνω πίνακα.

$$m_g = \frac{Q_s}{0,85*(C_{p_{in}}*T_{in} - C_{p_{out}}*T_{out})} = \frac{m_s*(h_7 - h_6)}{0,85*(C_{p_{in}}*T_{in} - C_{p_{out}}*T_{out})}$$

$$W_g = m_g * w_i = 89,3888 \text{ Kg/s} * 435,756 \text{ kJ/Kg} = 38,95171 \text{ MW}$$

Όμοια και για τα στοιχεία των παρακάτω πινάκων.

Για θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_1=293,15K-298,15K-303,15K-308,15K-313,13K$ και λόγο συμπίεσης $r_p=7$

T_4 (K)	$C_{p_{in}}$ (kJ/Kg*K)	$C_{p_{out}}$ (kJ/Kg*K)	m_g (Kg/s)	W_g (MW)
839,561	1,136	1,041	89,65939	39,63386
971,449	1,213		59,77402	30,13866
1103	1,217		45,40872	26,00389
1235	1,285		35,68462	24,87798

Πίνακας 57

Για θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_1=293,15K-298,15K-303,15K-308,15K-313,13K$ και λόγο συμπίεσης $r_p=8$

T_4 (K)	$C_{p_{in}}$ (kJ/Kg*K)	$C_{p_{out}}$ (kJ/Kg*K)	m_g (Kg/s)	W_g (MW)
788,383	1,186	1,041	93,0005	40,52553
912,231	1,208		63,65549	32,09573
1036	1,229		47,38581	27,1361
1160	1,244		37,41398	23,9867

Πίνακας 58

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

Για θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_1=293,15\text{K}-298,15\text{K}-303,15\text{K}-308,15\text{K}-313,13\text{K}$ και λόγο συμπίεσης $r_p=9$

T4 (K)	C_p_{in} (kJ/Kg*K)	C_p_{out} (kJ/Kg*K)	m_g (Kg/s)	W_g (MW)
768,613	1,182	1,041	98,64768	42,98632
889,355	1,196		67,77486	34,17276
1010	1,225		49,61385	28,41201
1131	1,241		38,99868	25,00268

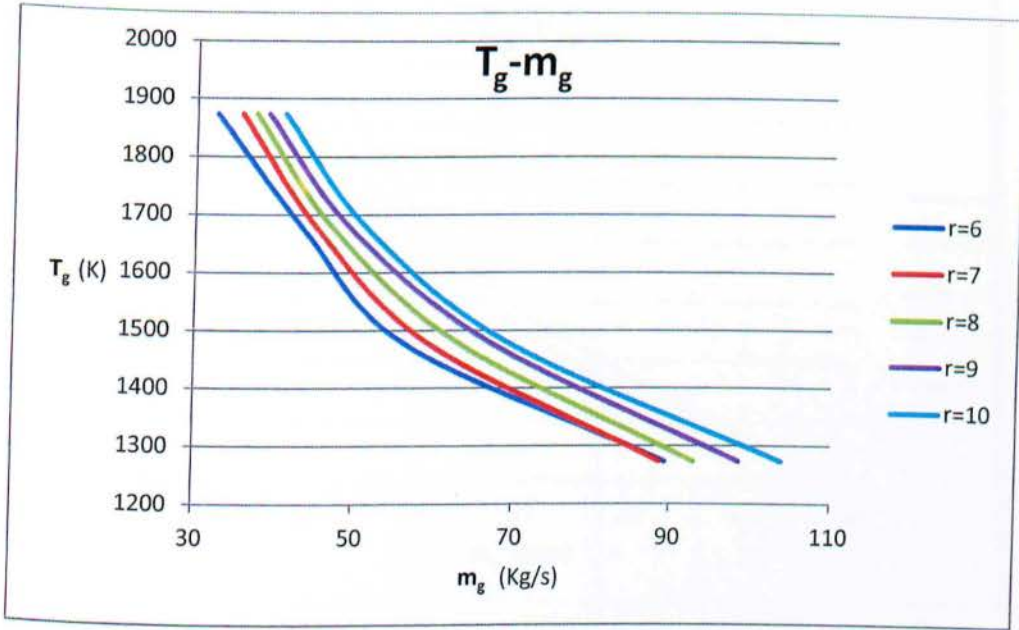
Πίνακας 59

Για θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_1=293,15\text{K}-298,15\text{K}-303,15\text{K}-308,15\text{K}-313,13\text{K}$ και λόγο συμπίεσης $r_p=10$

T4 (K)	C_p_{in} (kJ/Kg*K)	C_p_{out} (kJ/Kg*K)	m_g (Kg/s)	W_g (MW)
751,484	1,179	1,041	104,0057	45,3211
869,535	1,201		70,06609	35,32802
987,586	1,222		51,66696	29,58776
1106	1,227		41,04739	26,31614

Πίνακας 60

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

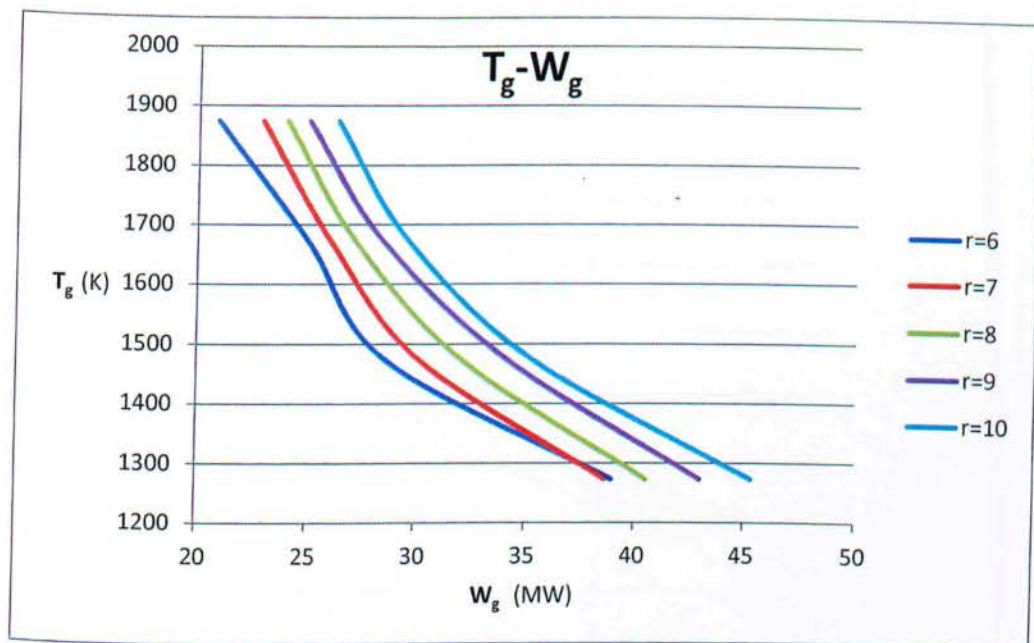
6.4.3 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ T_g-m_g, T_g-W_g 

Διάγραμμα 22

Μεταβολή της παροχής μάζας των καυσαερίων συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου τους στο στρόβιλο

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι καθώς αυξάνεται ο λόγος συμπίεσης μεγαλώνει η παροχή μάζας των καυσαερίων. Λαμβάνοντας υπόψη μας τη θεωρία το αποτέλεσμα αυτό είναι αναμενόμενο καθώς όσο μεγαλύτερο λόγο συμπίεσης έχουμε τόσο αυξάνεται η απόδοση του κύκλου άρα παράγονται και περισσότερα καυσαέρια. Επίσης, για συγκεκριμένο λόγο συμπίεσης η αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου των καυσαερίων στο στρόβιλο οδηγεί σε μείωση των παραγόμενων καυσαερίων. Το αποτέλεσμα αυτό είναι το προσδοκώμενο καθώς όσο αυξάνεται η θερμοκρασία τόσο αυξάνεται ο βαθμός απόδοσης του κύκλου με συνέπεια να παράγονται λιγότερα καυσαέρια.

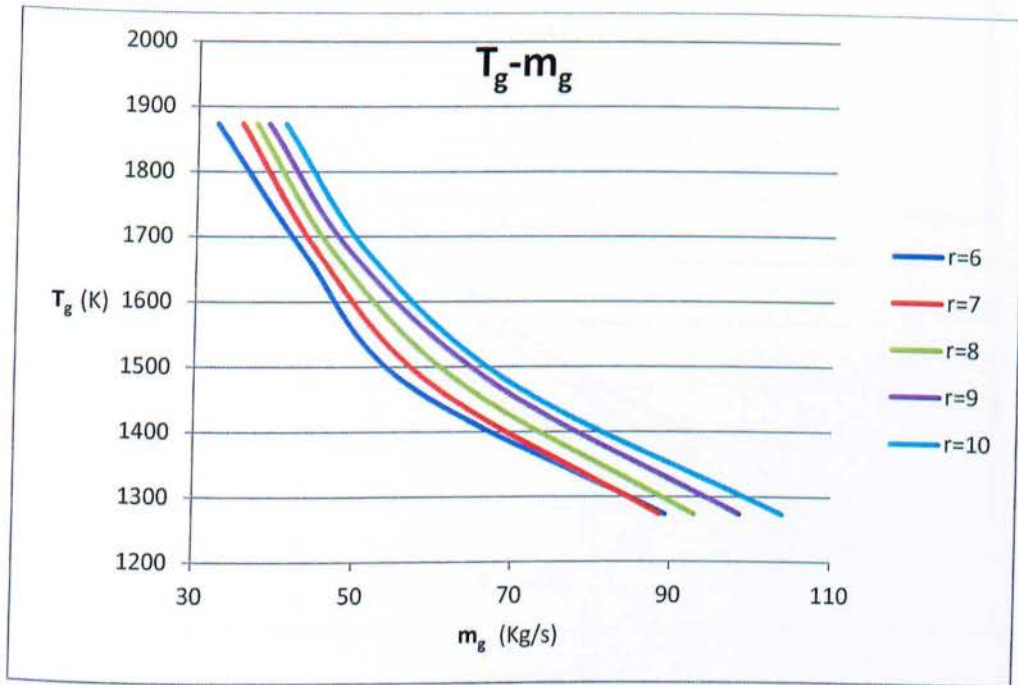
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ
ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑΣ

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

Διάγραμμα 23

Μεταβολή του έργου του στροβίλου συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου των καυσαερίων στο στρόβιλο

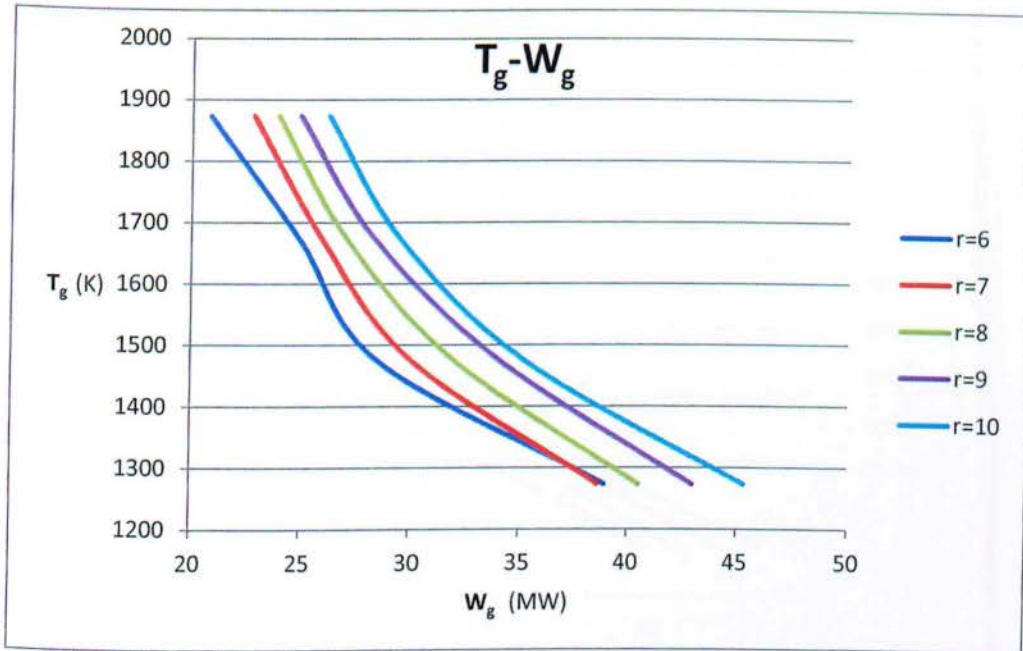
Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι η αύξηση του λόγου συμπίεσης οδηγεί σε αύξηση της ισχύς του στροβίλου. Λαμβάνοντας υπόψη μας τους πίνακες και τα διαγράμματα του βαθμού απόδοσης του κύκλου Brayton το αποτέλεσμα αυτό είναι το προσδοκώμενο καθώς με την αύξηση του λόγου συμπίεσης αυξάνεται ο βαθμός απόδοσης του κύκλου άρα και η ισχύς του στροβίλου.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

Διάγραμμα 24

Μεταβολή της παροχής μάζας των καυσαερίων συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου τους στο στρόβιλο

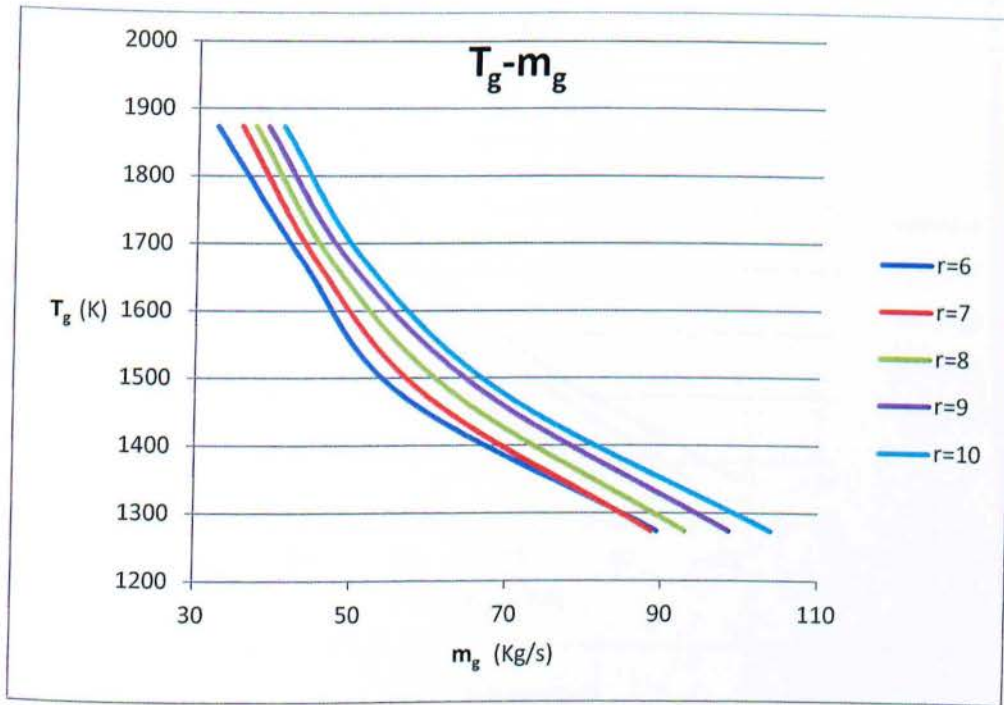
Όμοια με το Διάγραμμα 22 η αύξηση του λόγου συμπίεσης οδηγεί σε αύξηση της παροχής μάζας των καυσαερίων, με το εύρος των τιμών να είναι από 32,51 έως 103,98 Kg/s . Ακόμη παρατηρούμε ότι η παροχή μάζας αυξάνεται όσο μεγαλώνει η πίεση του ατμού μετά το στρόβιλο διατηρώντας τη θερμοκρασία εισόδου του ατμού σταθερή.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

Διάγραμμα 25

Μεταβολή του έργου του στροβίλου συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου των καυσαερίων στο στρόβιλο

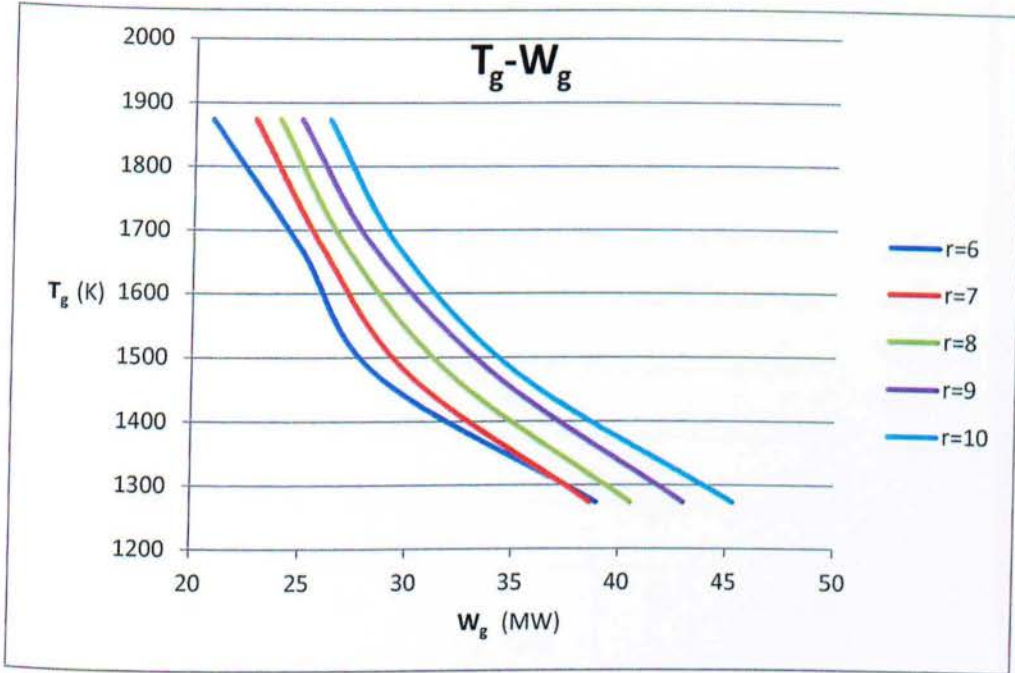
Όμοια με το Διάγραμμα 23 η αύξηση του λόγου συμπίεσης οδηγεί σε αύξηση της ισχύς του στροβίλου με εύρος τιμών που κυμαίνεται από 20,85 έως 45,31 MW. Ακόμη παρατηρούμε ότι η η ισχύς του στροβίλου αυξάνεται όσο μεγαλώνει η πίεση του ατμού μετά το στρόβιλο διατηρώντας τη θερμοκρασία εισόδου του ατμού σταθερή

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

Διάγραμμα 26

Μεταβολή της παροχής μάζας των καυσαερίων συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου τους στο στρόβιλο

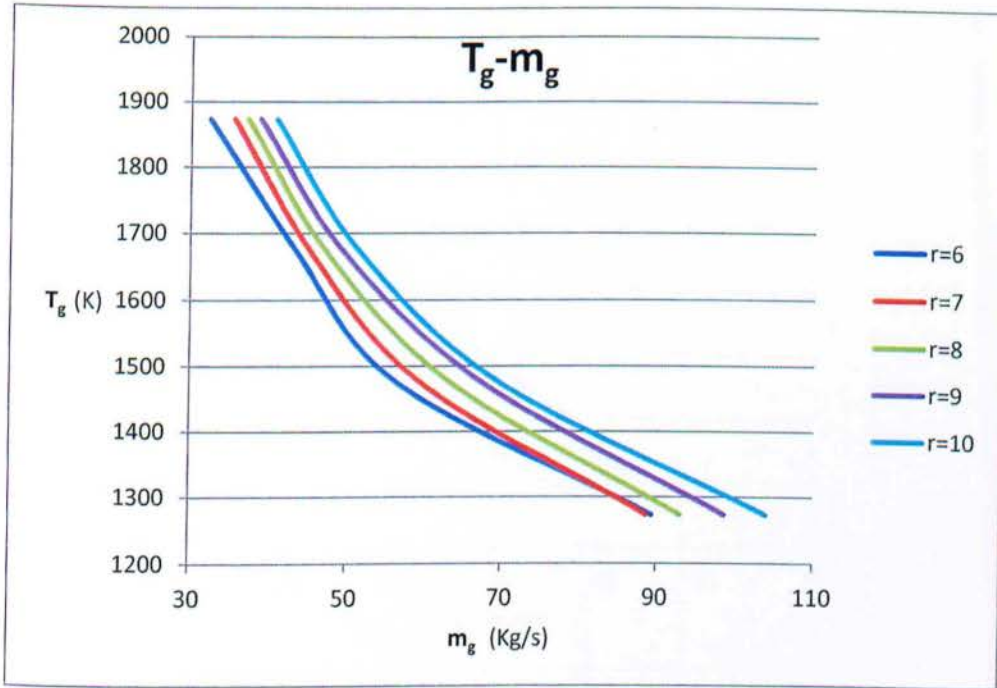
Όμοια με τα Διαγράμματα 22,24 η παροχή της μάζας αυξάνεται με την αύξηση του λόγου συμπίεσης. Το εύρος τιμών είναι από 32,47 έως 104,02 Kg/s . Ακόμη παρατηρούμε ότι η παροχή μάζας αυξάνεται όσο μεγαλώνει η πίεση του ατμού μετά το στρόβιλο διατηρώντας τη θερμοκρασία εισόδου του ατμού σταθερή

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

Διάγραμμα 27

Μεταβολή του έργου του στροβίλου συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου των καυσαερίων στο σρόβιλο

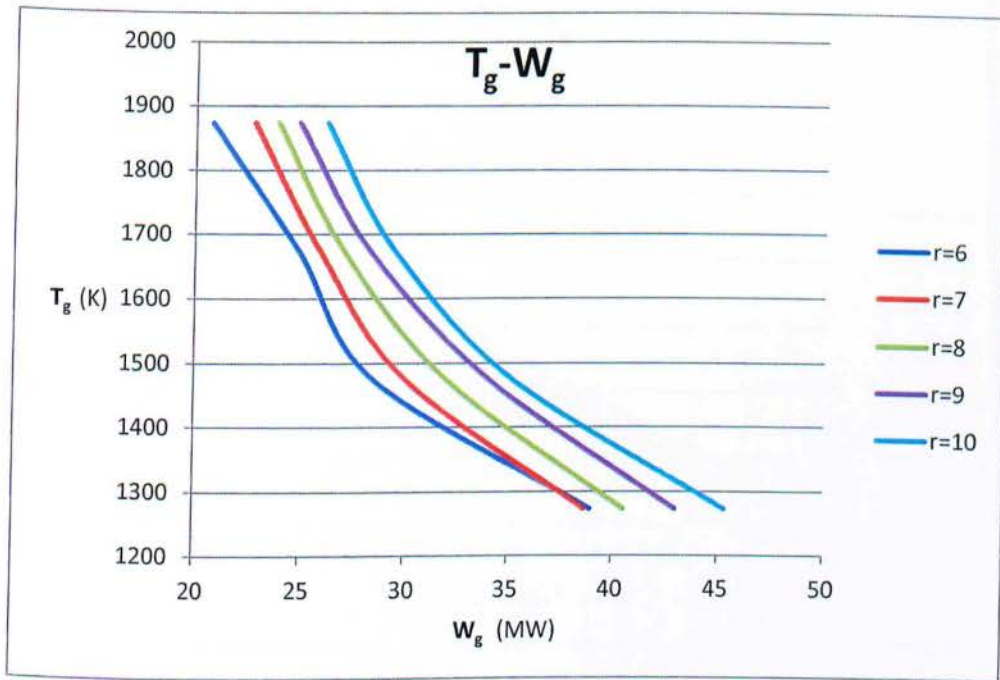
Όμοια με το Διάγραμμα 23,25 η αύξηση του λόγου συμπίεσης οδηγεί σε αύξηση της ισχύς του στροβίλου με εύρος τιμών που κυμαίνεται από 20,85 έως 45,33 MW. Ακόμη παρατηρούμε ότι η η ισχύς του στροβίλου αυξάνεται όσο μεγαλώνει η πίεση του ατμού μετά το σρόβιλο διατηρώντας τη θερμοκρασία εισόδου του ατμού σταθερή

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

Διάγραμμα 28

Μεταβολή της παροχής μάζας των καυσαερίων συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου τους στο στρόβιλο

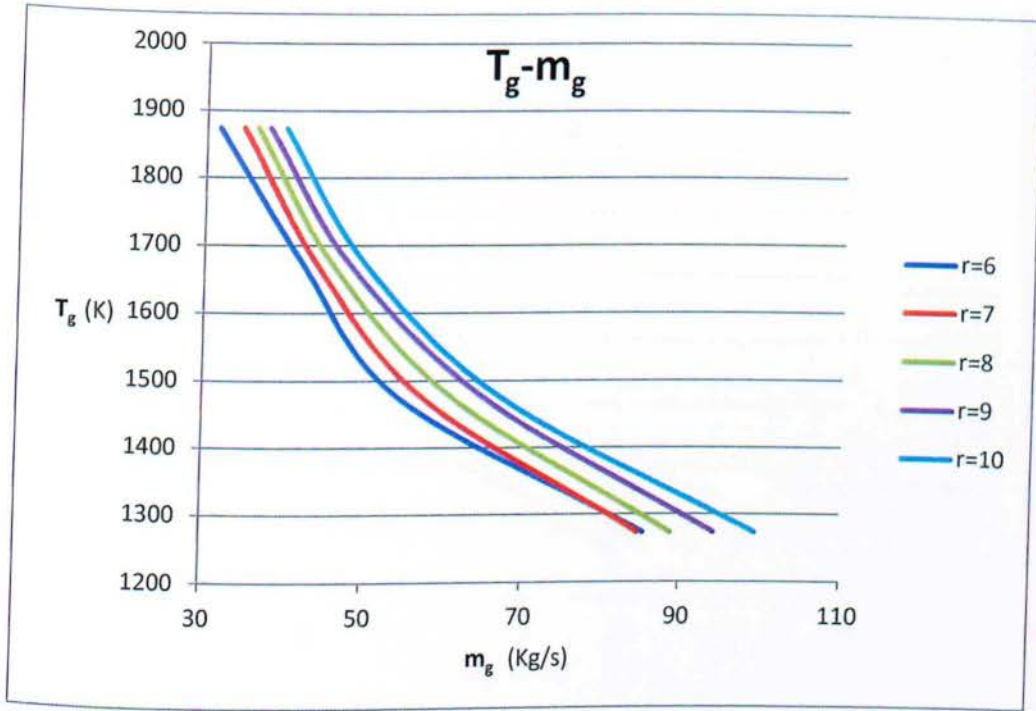
Όμοια με τα Διαγράμματα 22,24,26 η παροχή της μάζας αυξάνεται με την αύξηση του λόγου συμπίεσης. Το εύρος τιμών είναι από 32,43 έως 104,05 Kg/s .

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

Διάγραμμα 29

Μεταβολή του έργου του στροβίλου συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου των καυσαερίων στο στρόβιλο

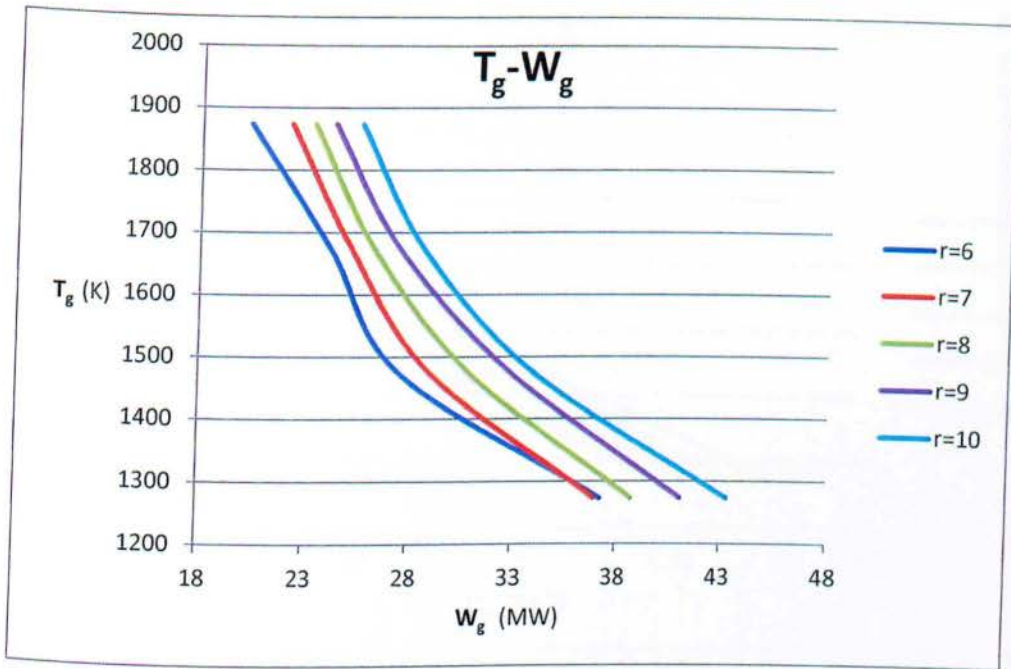
Όμοια με το Διάγραμμα 23,25,27 η αύξηση του λόγου συμπίεσης οδηγεί σε αύξηση της ισχύς του στροβίλου με εύρος τιμών που κυμαίνεται από 20,85 έως 45,34 MW. Ακόμη παρατηρούμε ότι η ισχύς του στροβίλου αυξάνεται όσο μεγαλώνει η πίεση του ατμού μετά το στρόβιλο διατηρώντας τη θερμοκρασία εισόδου του ατμού σταθερή

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

Διάγραμμα 30

Μεταβολή της παροχής μάζας των καυσαερίων συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου τους στο στρόβιλο

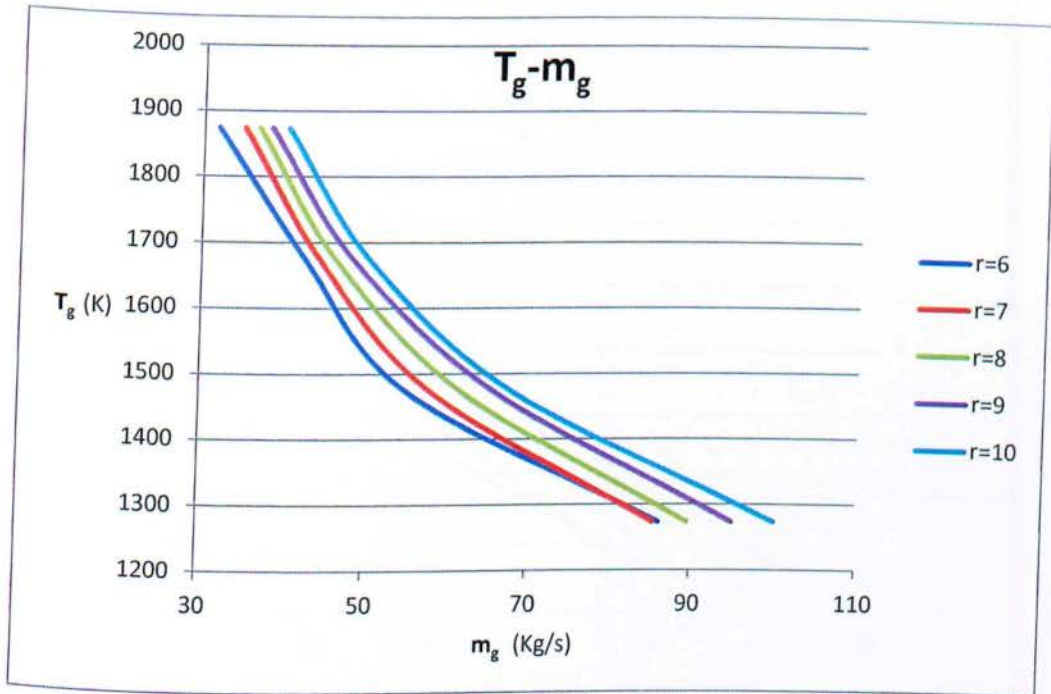
Όμοια με τα Διαγράμματα 22,24,26,28 η αύξηση του λόγου συμπίεσης έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της παροχής μάζας των καυσαερίων. Το εύρος των τιμών είναι από 31,63 έως 99,42 Kg/s. Παρατηρούμε ότι για την ίδια τιμή της πίεσης του ατμού μετά το στρόβιλο ($P_6=0,06$ bar) και για μεγαλύτερη θερμοκρασία εισόδου του ατμού η παροχή μάζας μειώνεται.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

Διάγραμμα 31

Μεταβολή του έργου του στροβίλου συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου των καυσαερίων στο στρόβιλο

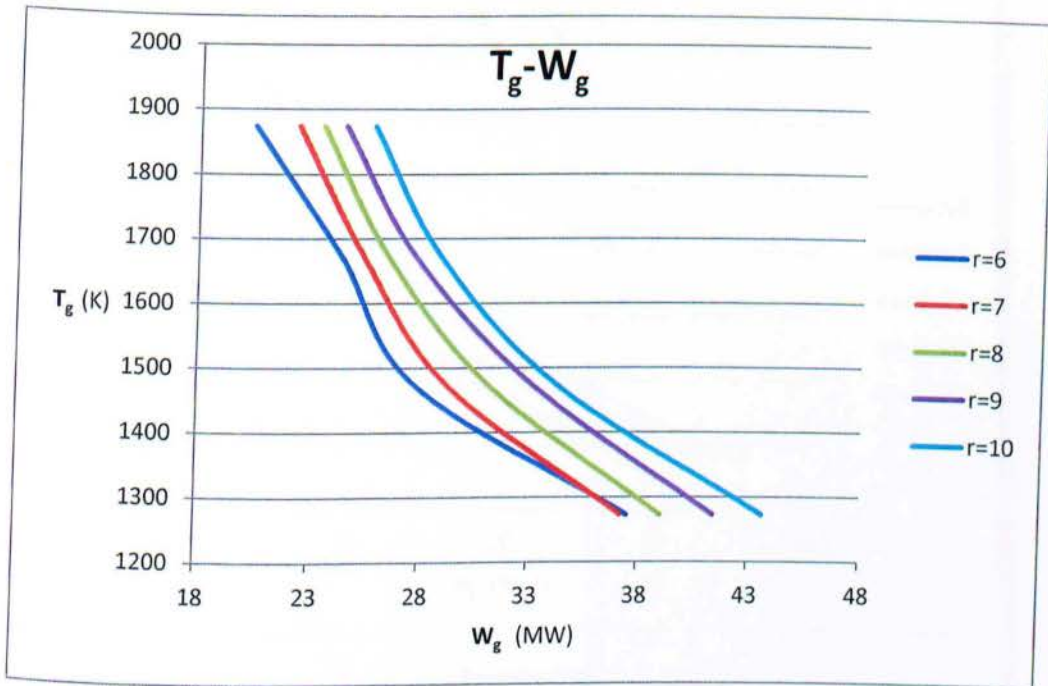
Όμοια με το Διάγραμμα 23,25,27,29 η αύξηση του λόγου συμπίεσης οδηγεί σε αύξηση της ισχύς του στροβίλου με εύρος τιμών που κυμαίνεται από 31,63 έως 43,32 MW. Ακόμη παρατηρούμε ότι η ισχύς του στροβίλου αυξάνεται όσο μεγαλώνει η πίεση του ατμού μετά το στρόβιλο διατηρώντας τη θερμοκρασία εισόδου του ατμού σταθερή. Επίσης παρατηρούμε ότι για σταθερή πίεση ατμού μετά το στρόβιλο ($P_6 = 0,06 \text{ bar}$) αυξάνοντας τη θερμοκρασία εισόδου του στο στρόβιλο η ισχύς του κύκλου Brayton μειώνεται

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

Διάγραμμα 32

Μεταβολή της παροχής μάζας των καυσαερίων συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου τους στο στρόβιλο

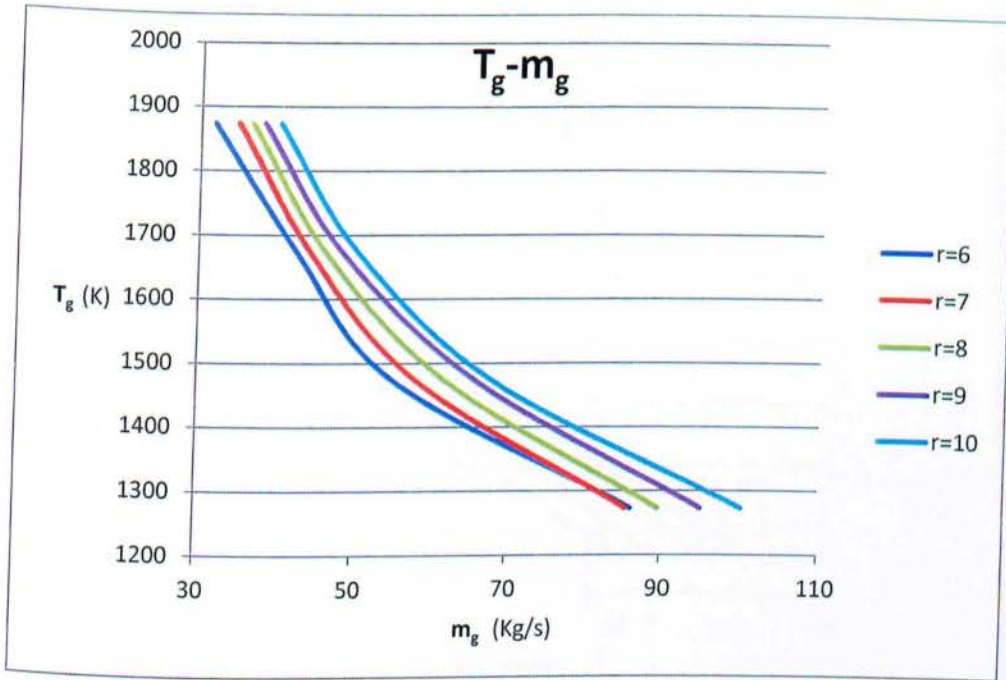
Όμοια με τα Διαγράμματα 22,24,26,28,30 η αύξηση του λόγου συμπίεσης έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της παροχής μάζας των καυσαερίων. Το εύρος των τιμών είναι από 31,83 έως 100,2 Kg/s. Αυξάνοντας την πίεση του ατμού η παροχή μάζας των καυσαερίων μειώνεται για σταθερή θερμοκρασία εισόδου του ατμού στο στρόβιλο

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

Διάγραμμα 33

Μεταβολή του έργου του στροβίλου συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου των καυσαερίων στο στρόβιλο

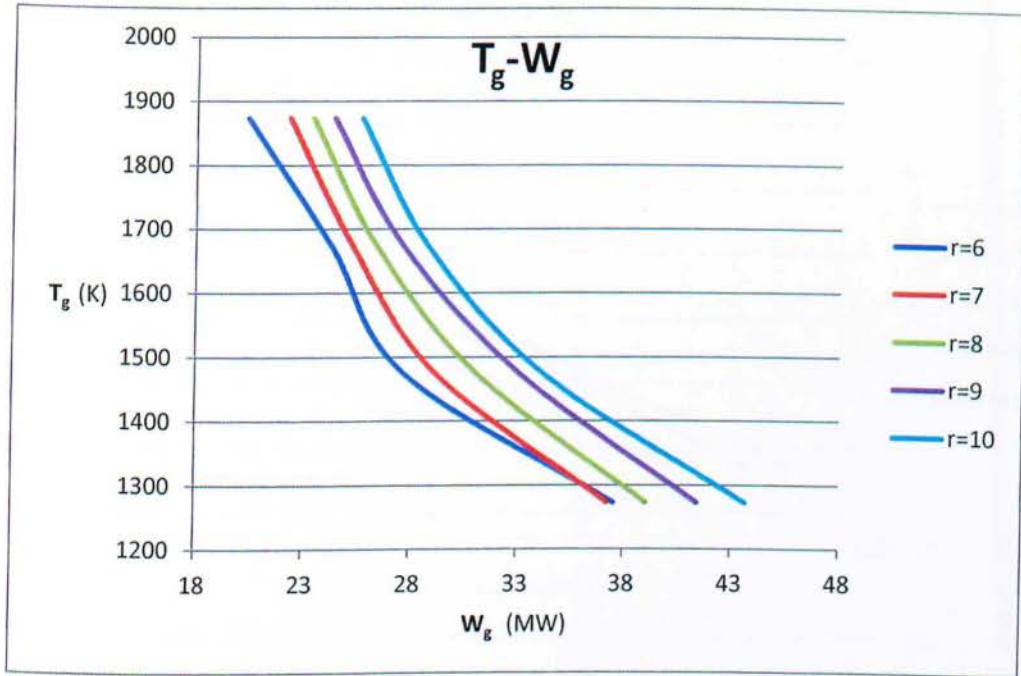
Όμοια με το Διάγραμμα 23,25,27,29,31 η αύξηση του λόγου συμπίεσης οδηγεί σε αύξηση της ισχύς του στροβίλου με εύρος τιμών που κυμαίνεται από 20,41 έως 43,66 MW. Ακόμη παρατηρούμε ότι η η ισχύς του στροβίλου στο κύκλο Brayton αυξάνεται όσο μεγαλώνει η πίεση του ατμού μετά το στρόβιλο διατηρώντας τη θερμοκρασία εισόδου του ατμού σταθερή.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

Διάγραμμα 34

Μεταβολή της παροχής μάζας των καυσαερίων συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου τους στο στρόβιλο

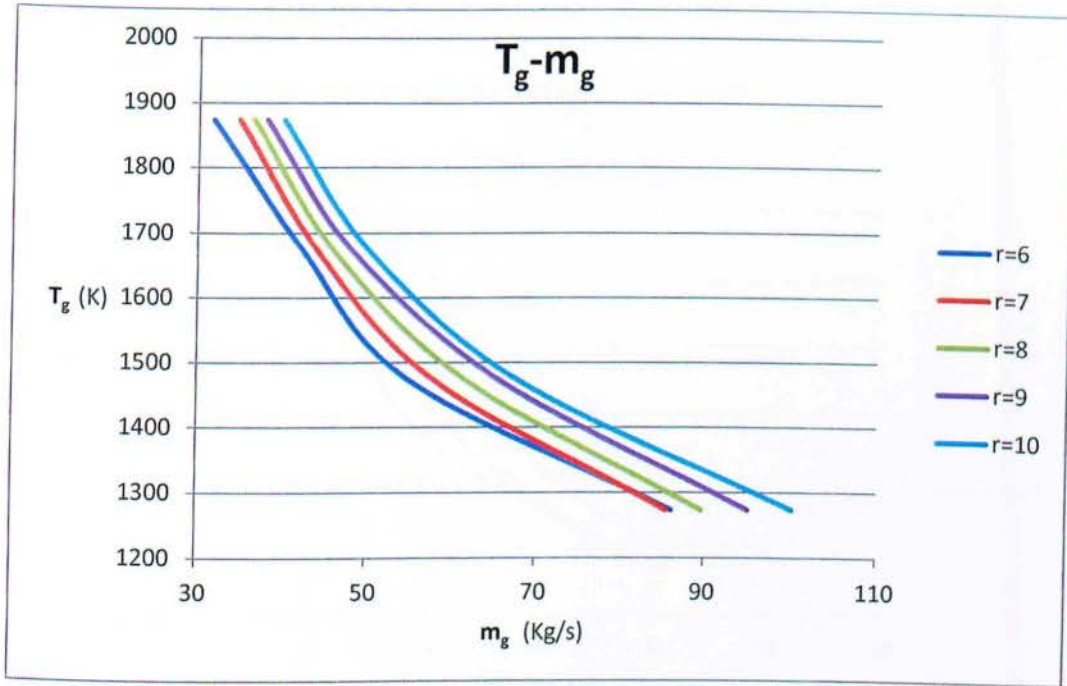
Όμοια με τα Διαγράμματα 22,24,26,28,30,32 η αύξηση του λόγου συμπίεσης έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της παροχής μάζας των καυσαερίων. Το εύρος των τιμών είναι από 31,8 έως 100,25 Kg/s. Αυξάνοντας την πίεση του ατμού η παροχή μάζας των καυσαερίων μειώνεται για σταθερή θερμοκρασία εισόδου του ατμού στο στρόβιλο

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

Διάγραμμα 35

Μεταβολή του έργου του στροβίλου συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου των καυσαερίων στο στρόβιλο

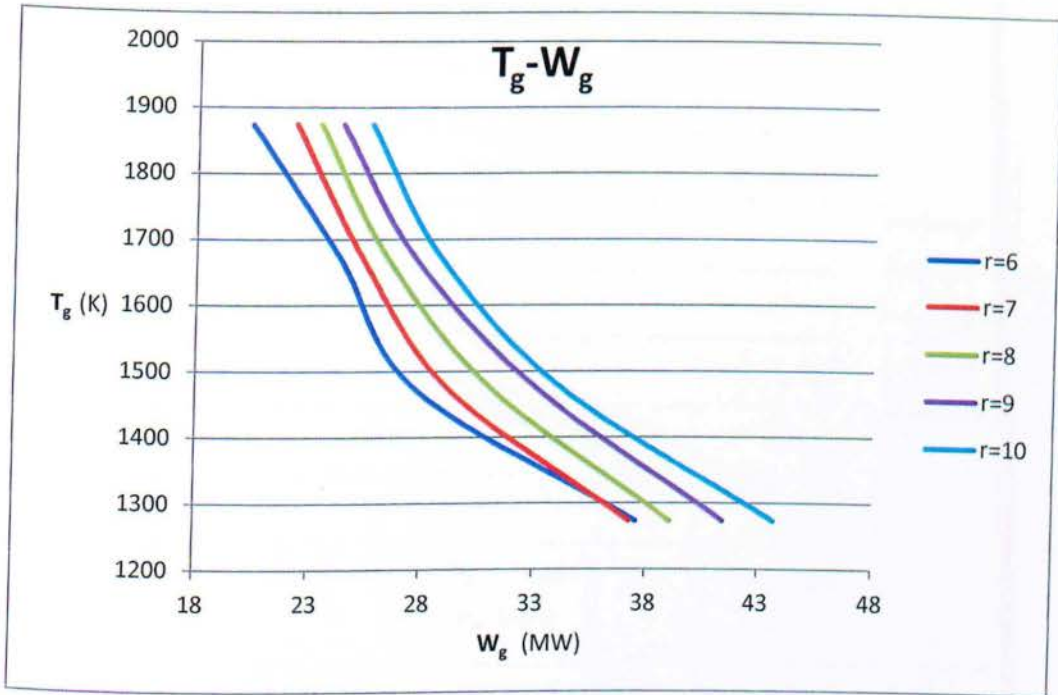
Όμοια με το Διάγραμμα 23,25,27,29,31,33 η αύξηση του λόγου συμπίεσης οδηγεί σε αύξηση της ισχύς του στροβίλου με εύρος τιμών που κυμαίνεται από 20,41 έως 43,66 MW. Ακόμη παρατηρούμε ότι η η ισχύς του στροβίλου στο κύκλο Brayton αυξάνεται όσο μεγαλώνει η πίεση του ατμού μετά το στρόβιλο διατηρώντας τη θερμοκρασία εισόδου του ατμού σταθερή.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

Διάγραμμα 36

Μεταβολή της παροχής μάζας των καυσαερίων συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου τους στο στρόβιλο

Όμοια με τα Διαγράμματα 22,24,26,28,30,32,34 η αύξηση του λόγου συμπίεσης έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της παροχής μάζας των καυσαερίων. Το εύρος των τιμών είναι από 31,77 έως 100,29 Kg/s. Αυξάνοντας την πίεση του ατμού η παροχή μάζας των καυσαερίων μειώνεται για σταθερή θερμοκρασία εισόδου του ατμού στο στρόβιλο

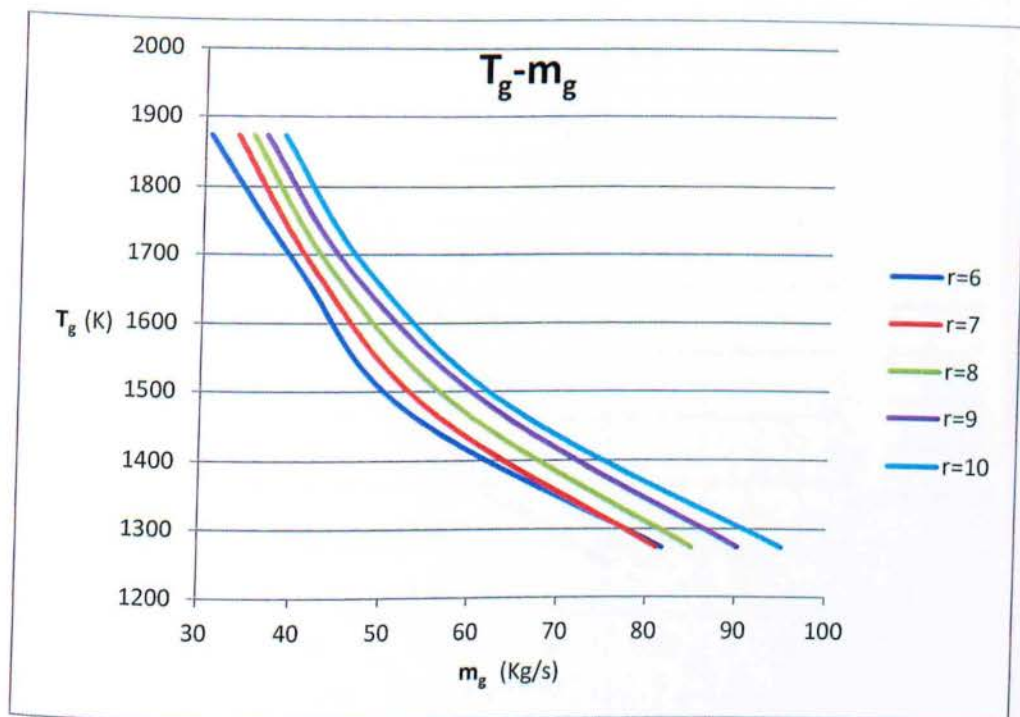
ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

Διάγραμμα 37

Μεταβολή του έργου του στροβίλου συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου των καυσαερίων στο σρόβιλο

Όμοια με το Διάγραμμα 23,25,27,29,31,33,35 η αύξηση του λόγου συμπίεσης οδηγεί σε αύξηση της ισχύς του στροβίλου με εύρος τιμών που κυμαίνεται από 20,37 έως 43,7 MW. Ακόμη παρατηρούμε ότι η η ισχύς του στροβίλου στο κύκλο Brayton αυξάνεται όσο μεγαλώνει η πίεση του ατμού μετά το σρόβιλο διατηρώντας τη θερμοκρασία εισόδου του ατμού σταθερή.

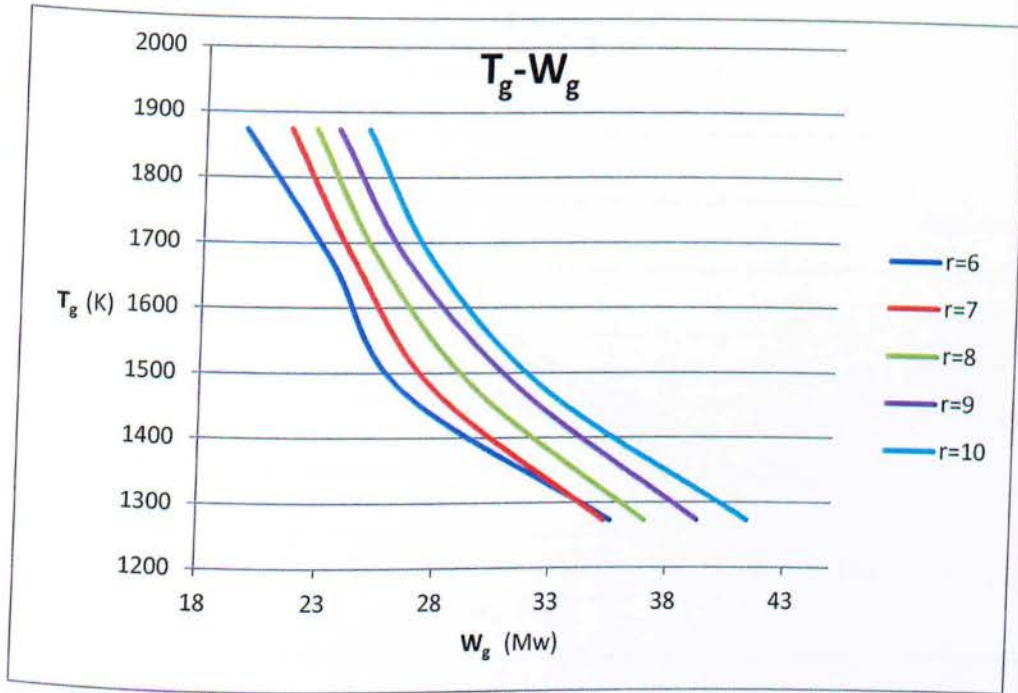
ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ



Διάγραμμα 38

Μεταβολή της παροχής μάζας των καυσαερίων συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου τους στο στρόβιλο

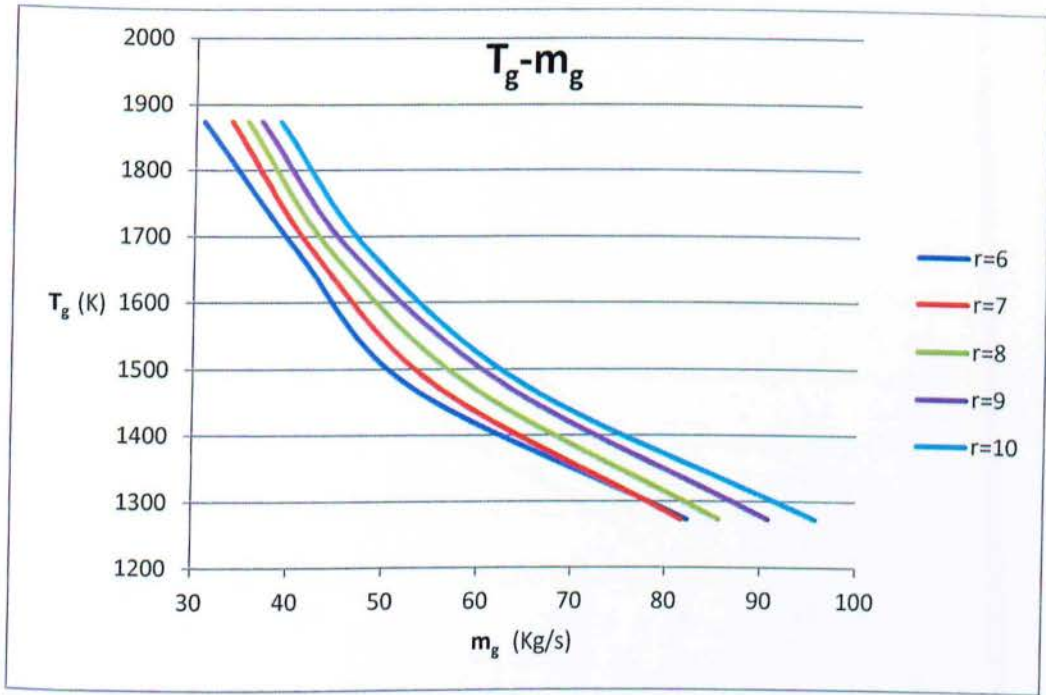
Όμοια με τα Διαγράμματα 22,24,26,28,30,32,34,36 η αύξηση του λόγου συμπίεσης έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της παροχής μάζας των καυσαερίων. Το εύρος των τιμών είναι από 30,69 έως 95,06 Kg/s. Αυξάνοντας την πίεση του ατμού η παροχή μάζας των καυσαερίων μειώνεται για σταθερή θερμοκρασία εισόδου του ατμού στο στρόβιλο

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

Διάγραμμα 39

Μεταβολή του έργου του στροβίλου συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου των καυσαερίων στο στρόβιλο

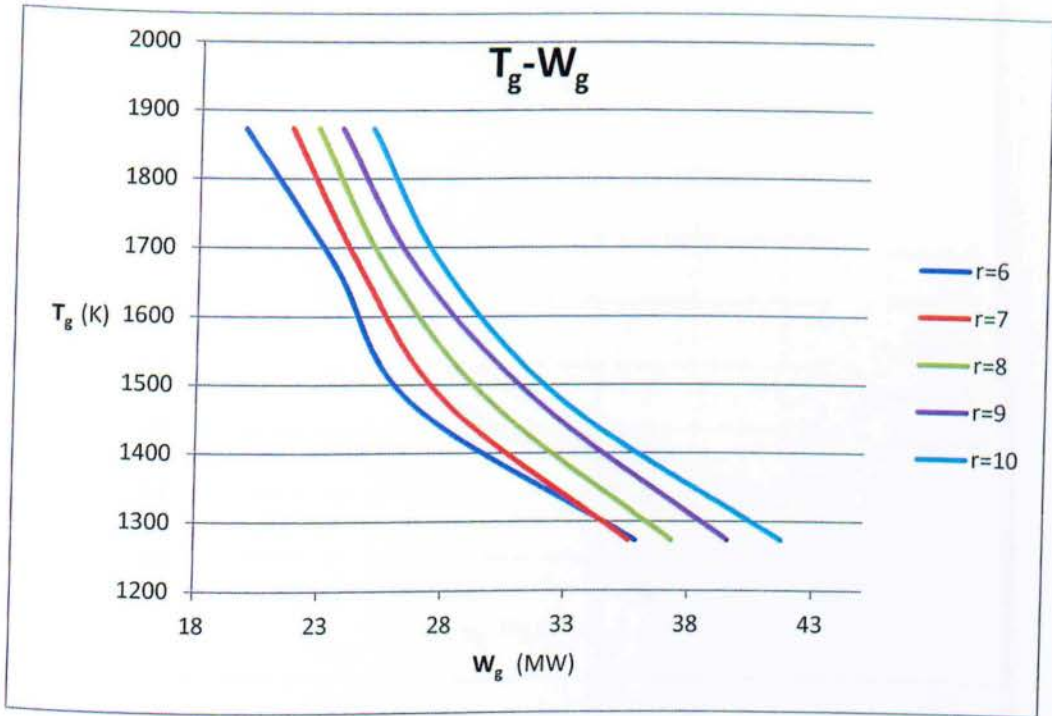
Όμοια με το Διάγραμμα 23, 25, 27, 29, 31, 33, 35, 37 η αύξηση του λόγου συμπίεσης οδηγεί σε αύξηση της ισχύς του στροβίλου με εύρος τιμών που κυμαίνεται από 19,68 έως 41,42 MW. Ακόμη παρατηρούμε ότι η ισχύς του στροβίλου στο κύκλο Brayton αυξάνεται όσο μεγαλώνει η πίεση του ατμού μετά το στρόβιλο διατηρώντας τη θερμοκρασία εισόδου του ατμού σταθερή.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

Διάγραμμα 40

Μεταβολή της παροχής μάζας των καυσαερίων συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου τους στο στρόβιλο

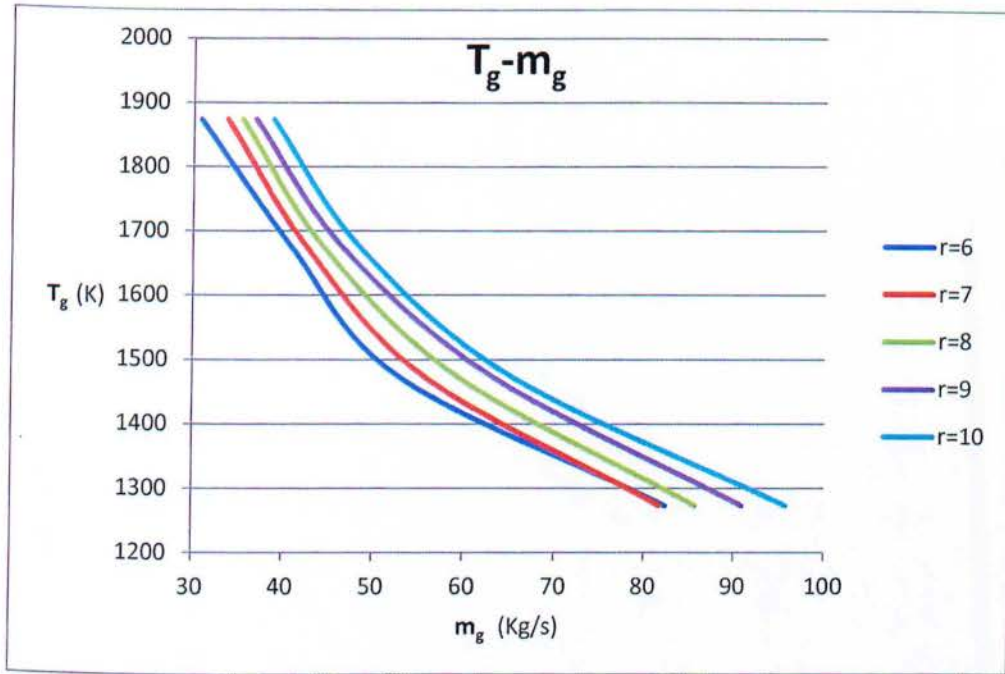
Όμοια με τα Διαγράμματα 22,24,26,28,30,32,34,36,38 η αύξηση του λόγου συμπίεσης έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της παροχής μάζας των καυσαερίων. Το εύρος των τιμών είναι από 30,87 έως 95,75 Kg/s. Αυξάνοντας την πίεση του ατμού η παροχή μάζας των καυσαερίων μειώνεται για σταθερή θερμοκρασία εισόδου του ατμού στο στρόβιλο

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

Διάγραμμα 41

Μεταβολή του έργου του στροβίλου συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου των καυσαερίων στο σρόβιλο

Όμοια με το Διάγραμμα 23,25,27,29,31,33,35,37,39 η αύξηση του λόγου συμπίεσης οδηγεί σε αύξηση της ισχύς του στροβίλου με εύρος τιμών που κυμαίνεται από 19,79 έως 41,73 MW. Ακόμη παρατηρούμε ότι η η ισχύς του στροβίλου στο κύκλο Brayton αυξάνεται όσο μεγαλώνει η πίεση του ατμού μετά το σρόβιλο διατηρώντας τη θερμοκρασία εισόδου του ατμού σταθερή.

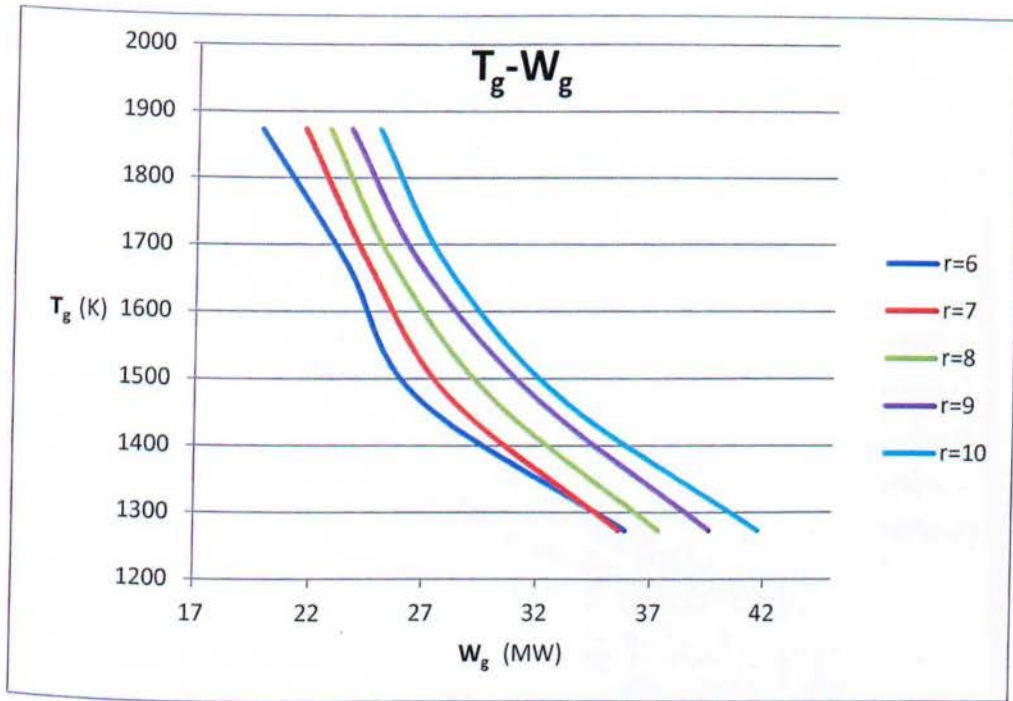
ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

Διάγραμμα 42

Μεταβολή της παροχής μάζας των καυσαερίων συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου τους στο στρόβιλο

Όμοια με τα Διαγράμματα 22,24,26,28,30,32,34,36,38,40 η αύξηση του λόγου συμπίεσης έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της παροχής μάζας των καυσαερίων. Το εύρος των τιμών είναι από 30,85 έως 95,80 Kg/s. Αυξάνοντας την πίεση του ατμού η παροχή μάζας των καυσαερίων μειώνεται για σταθερή θερμοκρασία εισόδου του ατμού στο στρόβιλο

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

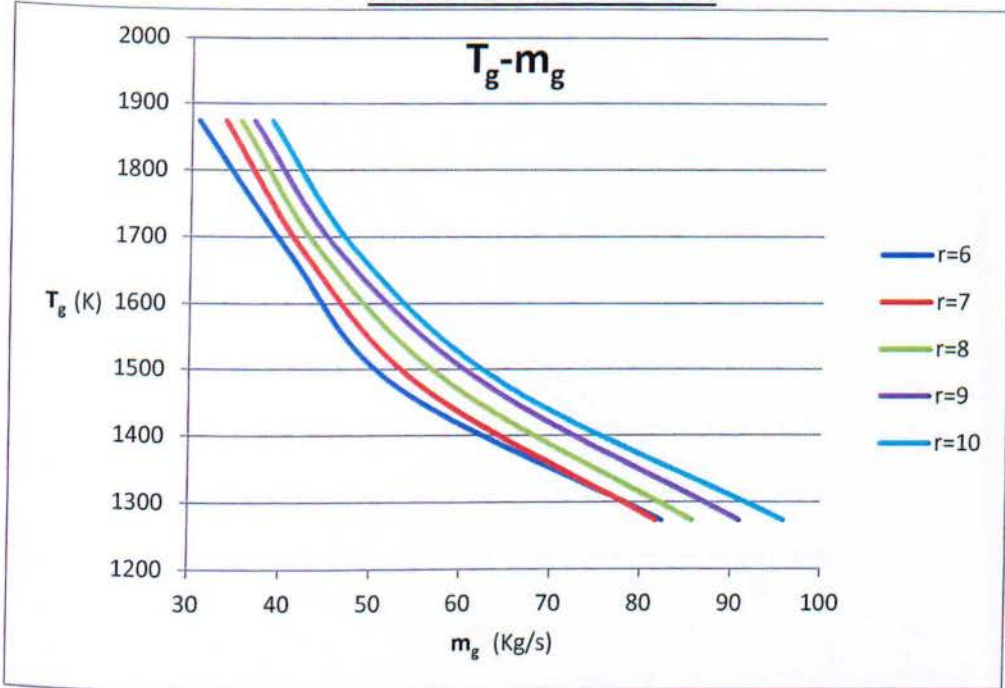


Διάγραμμα 43

Μεταβολή του έργου του στροβίλου συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου των καυσαερίων στο στρόβιλο

Όμοια με το Διάγραμμα 23,25,27,29,31,33,35,37,39,41 η αύξηση του λόγου συμπίεσης οδηγεί σε αύξηση της ισχύς του στροβίλου με εύρος τιμών που κυμαίνεται από 19,78 έως 41,75 MW. Ακόμη παρατηρούμε ότι η ισχύς του στροβίλου στο κύκλο Brayton αυξάνεται όσο μεγαλώνει η πίεση του ατμού μετά το στρόβιλο διατηρώντας τη θερμοκρασία εισόδου του ατμού σταθερή.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

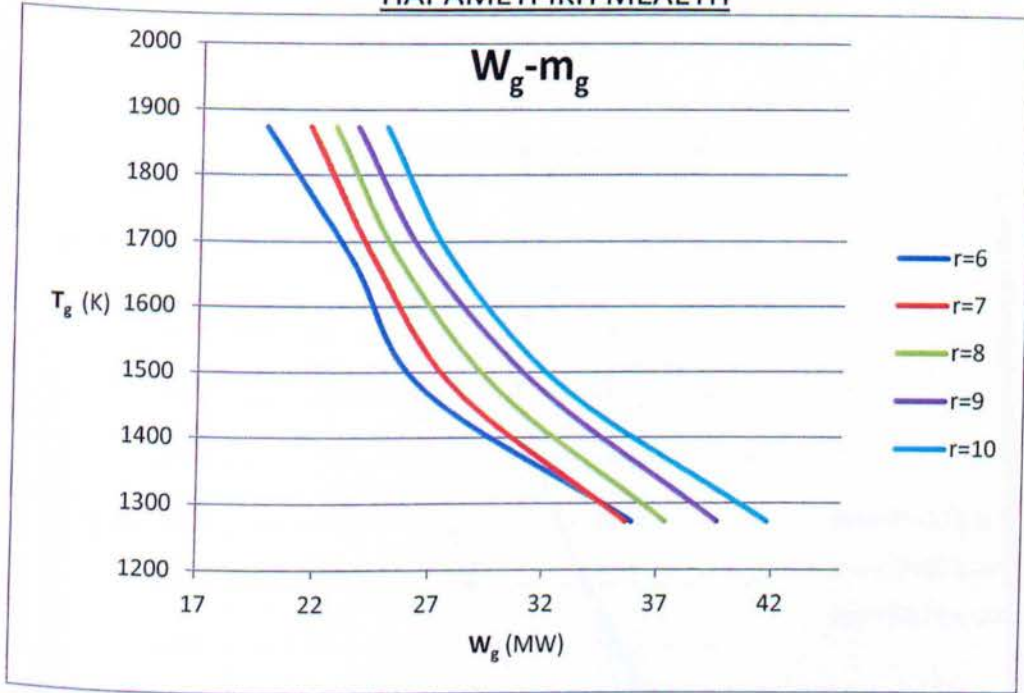


Διάγραμμα 44

Μεταβολή της παροχής μάζας των καυσαερίων συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου τους στο στρόβιλο

Όμοια με τα Διαγράμματα 22,24,26,28,30,32,34,36,38,40 η αύξηση του λόγου συμπίεσης έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της παροχής μάζας των καυσαερίων. Το εύρος των τιμών είναι από 30,83 έως 95,85 Kg/s. Αυξάνοντας την πίεση του ατμού η παροχή μάζας των καυσαερίων μειώνεται για σταθερή θερμοκρασία εισόδου του ατμού στο στρόβιλο

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ



Διάγραμμα 45

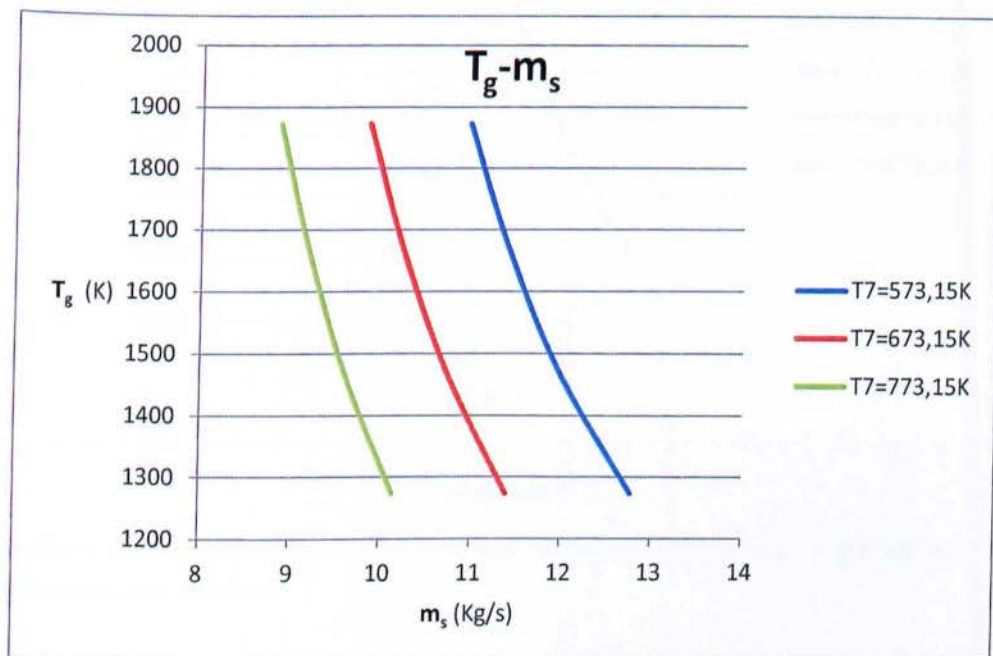
Μεταβολή του έργου του στροβίλου συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου των καυσαερίων στο στρόβιλο

Όμοια με το Διάγραμμα 23,25,27,29,31,33,35,37,39,41,43 η αύξηση του λόγου συμπίεσης οδηγεί σε αύξηση της ισχύς του στροβίλου με εύρος τιμών που κυμαίνεται από 19,76 έως 41,77 MW. Ακόμη παρατηρούμε ότι η ισχύς του στροβίλου στο κύκλο Brayton αυξάνεται όσο μεγαλώνει η πίεση του ατμού μετά το στρόβιλο διατηρώντας τη θερμοκρασία εισόδου του ατμού σταθερή

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

6.4.3 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ Tg-ms

Για P9=0,06 bar και T9=309,35K



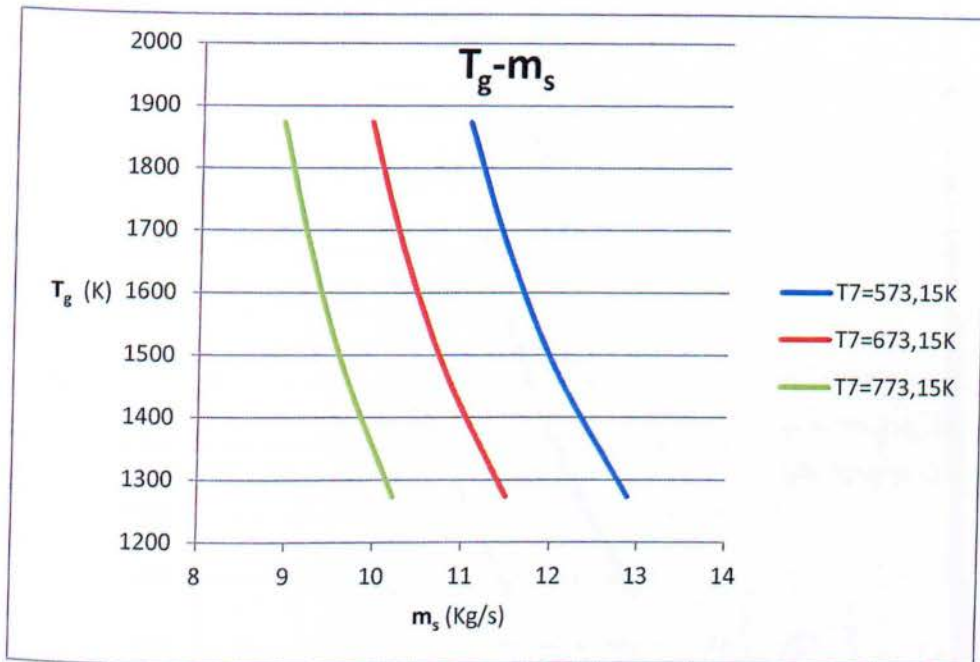
Διάγραμμα 46

Μεταβολή της παροχής μάζας του ατμού συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου των καυσαερίων στο στρόβιλο

Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι η παροχή μάζας του ατμού μειώνεται αυξανόμενης της θερμοκρασίας εισόδου του στο στρόβιλο. Το εύρος των τιμών κυμαίνεται από 8,62 έως 12,78 Kg/s.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

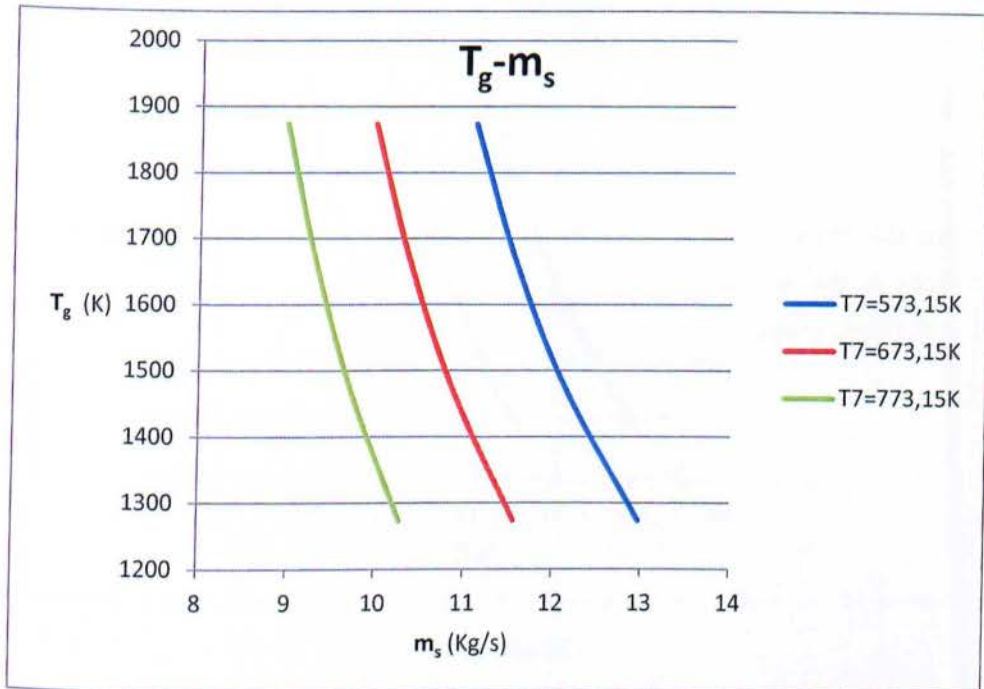
Για P9=0,08 bar και T9=315,65K



Διάγραμμα 47

Μεταβολή της παροχής μάζας του ατμού συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου των καυσαερίων στο στρόβιλο

Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι η παροχή μάζας του ατμού μειώνεται αυξανόμενης της θερμοκρασίας εισόδου του στο στρόβιλο. Το εύρος των τιμών κυμαίνεται από 8,66 έως 12,88 Kg/s. Διατηρώντας σταθερή τη θερμοκρασία εισόδου του ατμού στο στρόβιλο σύμφωνα με το Διάγραμμα 46 η τιμή της παροχής μάζας αυξάνεται.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗΓια $P_9=0,10$ bar και $T_9=318,95$ K

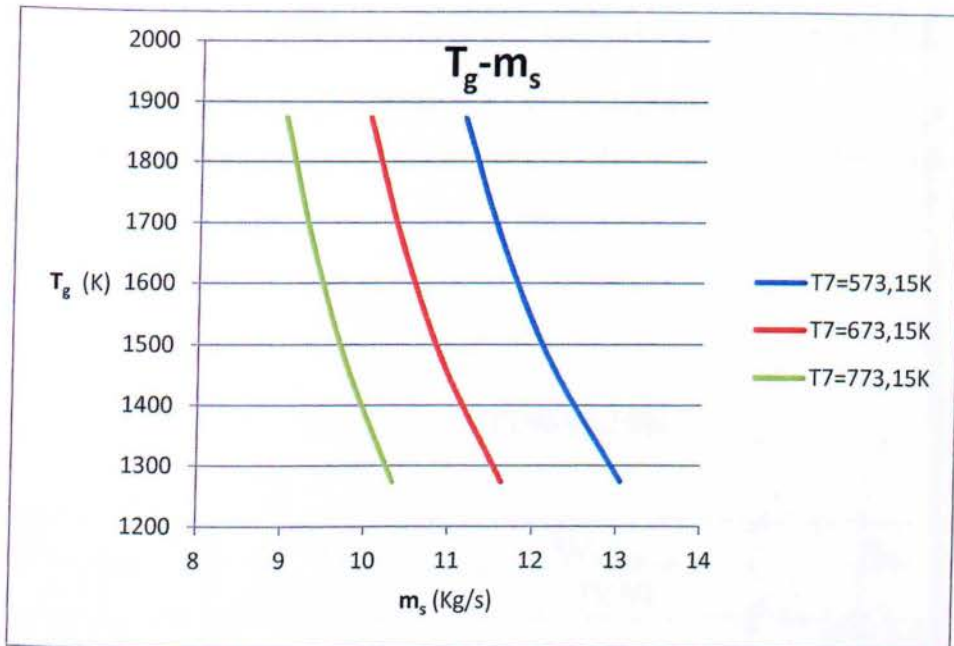
Διάγραμμα 48

Μεταβολή της παροχής μάζας του ατμού συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου των καυσαερίων στο στρόβιλο

Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι η παροχή μάζας του ατμού μειώνεται αυξανόμενης της θερμοκρασίας εισόδου του στο στρόβιλο. Το εύρος των τιμών κυμαίνεται από 8,7 έως 12,97 Kg/s.

Διατηρώντας σταθερή τη θερμοκρασία εισόδου του ατμού στο στρόβιλο σύμφωνα με το Διάγραμμα 46,47 η τιμή της παροχής μάζας αυξάνεται.

ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ
ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗΓια $P_9=0,12$ bar και $T_9=322,55$ K

Διάγραμμα 49

Μεταβολή της παροχής μάζας του ατμού συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου των καυσαερίων στο στρόβιλο

Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι η παροχή μάζας του ατμού μειώνεται αυξανόμενης της θερμοκρασίας εισόδου του στο στρόβιλο. Το εύρος των τιμών κυμαίνεται από 8,74 έως 13,04 Kg/s. Διατηρώντας σταθερή τη θερμοκρασία εισόδου του ατμού στο στρόβιλο σύμφωνα με το Διάγραμμα 46,47,48 η τιμή της παροχής μάζας αυξάνεται.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ**6.4. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΟΛΙΚΟΥ ΒΑΘΜΟΥ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ**

Τέλος, παρουσιάζετε ο ολικός βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία **T3**, μετά το θάλαμο καύσης στο κύκλο Brayton.

Για r=6 και T1=293,15K

$W_{brayton}$ (MW)	Q_{cc} (MW)	$W_{rankine}$ (MW)	$\eta_{ολ}$
38,95171	87,32675	10	0,560558
28,62596	74,17307		0,520754
24,98213	70,38629		0,497002
20,89095	64,18564		0,481275

Πίνακας 61

Ενδεικτικά ο τρόπος υπολογισμού των στοιχείων του παραπάνω πίνακα είναι :

$$\eta_{ολ} = \frac{W_{brayton} + W_{rankine}}{Q_{cc}} = \frac{38,95171 + 10}{87,32675} = 0,560558$$

Για r=6 και T1=298,15K

$W_{brayton}$ (MW)	Q_{cc} (MW)	$W_{rankine}$ (MW)	$\eta_{ολ}$
38,95171	86,52431	10	0,565757
28,62596	73,66341		0,524357
24,98213	69,99366		0,49979
20,89095	63,89238		0,483484

Πίνακας 62

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ
Για r=6 και T₁=303,15K

W_{brayton} (MW)	Q_{cc} (MW)	W_{rankine} (MW)	η_{ολ}
38,95171	85,72187	10	0,571053
28,62596	73,15375		0,528011
24,98213	69,60104		0,502609
20,89095	63,59911		0,485714

Πίνακας 63

Για r=6 και T₁=308,15K

W_{brayton} (MW)	Q_{cc} (MW)	W_{rankine} (MW)	η_{ολ}
38,95171	84,91942	10	0,576449
28,62596	72,64409		0,531715
24,98213	69,20842		0,505461
20,89095	63,30584		0,487964

Πίνακας 64

Για r=6 και T₁=313,15K

W_{brayton} (MW)	Q_{cc} (MW)	W_{rankine} (MW)	η_{ολ}
38,95171	84,11689	10	0,581949
28,62596	72,13438		0,535472
24,98213	68,8158		0,508344
20,89095	63,01258		0,490235

Πίνακας 65

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗΓια $r=7$ και $T_1=293,15K$

$W_{brayton}$ (MW)	Q_{cc} (MW)	$W_{rankine}$ (MW)	$\eta_{ολ}$
46,84804	94,46868	10	0,541174
32,08113	85,47926		0,492296
27,67993	81,26644		0,463659
24,35254	77,46054		0,443484

Πίνακας 66

Για $r=7$ και $T_1=298,15K$

$W_{brayton}$ (MW)	Q_{cc} (MW)	$W_{rankine}$ (MW)	$\eta_{ολ}$
46,84804	93,63333	10	0,546002
32,08113	84,91607		0,495562
27,67993	80,85777		0,466003
24,35254	77,13938		0,445331

Πίνακας 67

Για $r=7$ και $T_1=303,15K$

$W_{brayton}$ (MW)	Q_{cc} (MW)	$W_{rankine}$ (MW)	$\eta_{ολ}$
46,84804	92,79807	10	0,550916
32,08113	84,35293		0,49887
27,67993	80,40368		0,468634
24,35254	76,78254		0,4474

Πίνακας 68

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗΓια $r=7$ και $T_1=308,15K$

$W_{brayton}$ (MW)	Q_{cc} (MW)	$W_{rankine}$ (MW)	$\eta_{ολ}$
46,84804	91,96281	10	0,55592
32,08113	83,7898		0,502223
27,67993	79,995		0,471029
24,35254	76,46138		0,44928

Πίνακας 69

Για $r=7$ και $T_1=313,15K$

$W_{brayton}$ (MW)	Q_{cc} (MW)	$W_{rankine}$ (MW)	$\eta_{ολ}$
41,12395	91,12755	10	0,561015
32,08113	73,22667		0,574669
27,67993	69,54091		0,541838
24,35254	66,10453		0,51967

Πίνακας 70

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗΓια $r=8$ και $T_1=293,15K$

$W_{brayton}$ (MW)	Q_{cc} (MW)	$W_{rankine}$ (MW)	$\eta_{ολ}$
69,5763	105,4395	10	0,503962
53,6707	97,58575		0,45257
37,18395	92,40871		0,420795
29,34483	88,90007		0,399693

Πίνακας 71

Για $r=8$ και $T_1=298,15K$

$W_{brayton}$ (MW)	Q_{cc} (MW)	$W_{rankine}$ (MW)	$\eta_{ολ}$
69,5763	104,5261	10	0,508366
53,6707	96,96052		0,455488
37,18395	91,93485		0,422964
29,34483	88,52593		0,401382

Πίνακας 72

Για $r=8$ και $T_1=303,15K$

$W_{brayton}$ (MW)	Q_{cc} (MW)	$W_{rankine}$ (MW)	$\eta_{ολ}$
69,5763	103,6126	10	0,512848
53,6707	96,3353		0,458444
37,18395	91,46099		0,425155
29,34483	88,15179		0,403086

Πίνακας 73

Για $r=8$ και $T_1=308,15K$

$W_{brayton}$ (MW)	Q_{cc} (MW)	$W_{rankine}$ (MW)	$\eta_{ολ}$
69,5763	102,6992	10	0,51741
53,6707	95,71008		0,461439
37,18395	90,98713		0,427369
29,34483	87,77765		0,404804

Πίνακας 74

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗΓια $r=8$ και $T_1=313,15\text{K}$

W_{brayton} (MW)	Q_{cc} (MW)	W_{rankine} (MW)	$\eta_{\text{ολ}}$
69,5763	101,7857	10	0,522053
53,6707	95,08485		0,464473
37,18395	90,51327		0,429607
29,34483	87,40351		0,406537

Πίνακας 75

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗΓια $r=9$ και $T_1=293,15K$

$W_{brayton}$ (MW)	Q_{cc} (MW)	$W_{rankine}$ (MW)	$\eta_{ολ}$
106,4824	107,2933	10	0,559403
64,53854	99,85591		0,498363
41,98118	93,78141		0,459164
35,80906	90,1133		0,43383

Πίνακας 76

Για $r=9$ και $T_1=298,15K$

$W_{brayton}$ (MW)	Q_{cc} (MW)	$W_{rankine}$ (MW)	$\eta_{ολ}$
50,02019	106,2883	10	0,564692
39,76446	99,16542		0,501833
33,06108	93,28527		0,461606
29,09387	89,72332		0,435716

Πίνακας 77

Για $r=9$ και $T_1=303,15K$

$W_{brayton}$ (MW)	Q_{cc} (MW)	$W_{rankine}$ (MW)	$\eta_{ολ}$
50,02019	105,2832	10	0,570084
39,76446	98,47486		0,505352
33,06108	92,78914		0,464075
29,09387	89,33333		0,437618

Πίνακας 78

Για $r=9$ και $T_1=308,15K$

$W_{brayton}$ (MW)	Q_{cc} (MW)	$W_{rankine}$ (MW)	$\eta_{ολ}$
50,02019	104,2781	10	0,575578
39,76446	97,78437		0,50892
33,06108	92,293		0,466569
29,09387	88,94334		0,439537

Πίνακας 79

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗΓια $r=9$ και $T_1=313,15K$

$W_{brayton}$ (MW)	Q_{cc} (MW)	$W_{rankine}$ (MW)	$\eta_{ολ}$
50,02019	103,273	10	0,58118
39,76446	97,09381		0,51254
33,06108	91,74725		0,469345
29,09387	88,51436		0,441667

Πίνακας 80

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ
Για r=10 και T₁=293,15K

W_{brayton} (MW)	Q_{cc} (MW)	W_{rankine} (MW)	η_{ολ}
54,52759	118,8844	10	0,542776
42,5044	110,489		0,4752
35,59812	104,9736		0,465377
31,66195	101,9249		0,438894

Πίνακας 81

Για r=10 και T₁=298,15K

W_{brayton} (MW)	Q_{cc} (MW)	W_{rankine} (MW)	η_{ολ}
54,52759	117,7896	10	0,547821
42,5044	109,7515		0,478394
35,59812	104,457		0,436525
31,66195	101,5145		0,410404

Πίνακας 82

Για r=10 και T₁=303,15K

W_{brayton} (MW)	Q_{cc} (MW)	W_{rankine} (MW)	η_{ολ}
54,52759	116,6947	10	0,552961
42,5044	109,0139		0,481631
35,59812	103,8886		0,438913
31,66195	101,063		0,412238

Πίνακας 83

Για r=10 και T₁=308,15K

W_{brayton} (MW)	Q_{cc} (MW)	W_{rankine} (MW)	η_{ολ}
54,52759	115,5998	10	0,558198
42,5044	108,2763		0,484911
35,59812	103,372		0,441107
31,66195	100,6525		0,413919

Πίνακας 84

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ
Για $r=10$ και $T_1=313,15K$

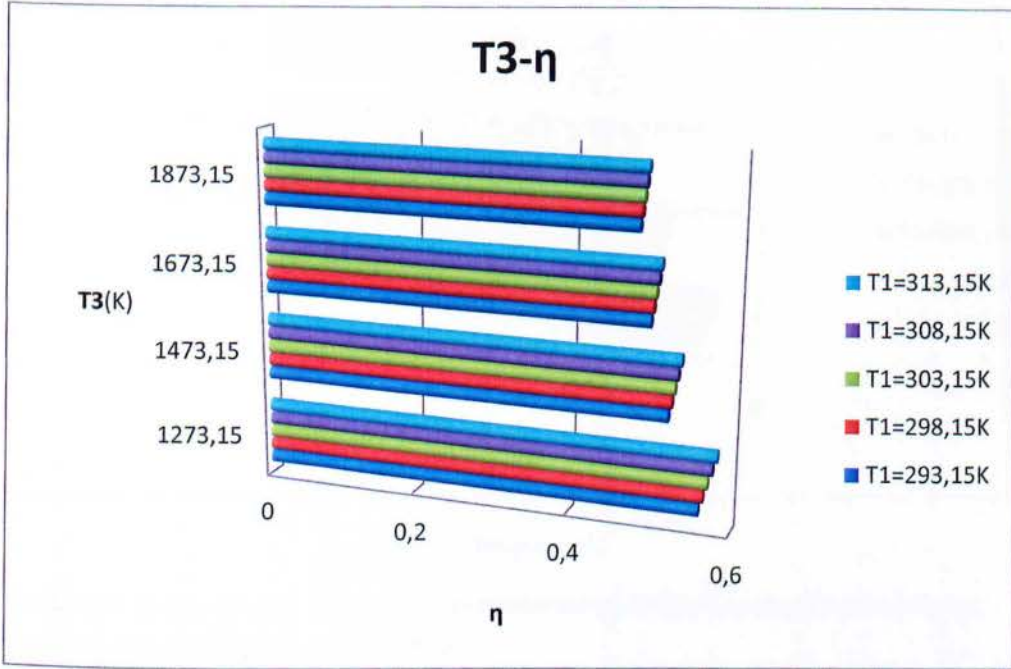
$W_{brayton}$ (MW)	Q_{cc} (MW)	$W_{rankine}$ (MW)	$\eta_{ολ}$
54,52759	114,505	10	0,589266
42,5044	107,5387		0,512045
35,59812	102,8036		0,466221
31,66195	100,201		0,437621

Πίνακας 85

Παρακάτω παρατίθενται τα αντίστοιχα διαγράμματα του ολικού βαθμού απόδοσης

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

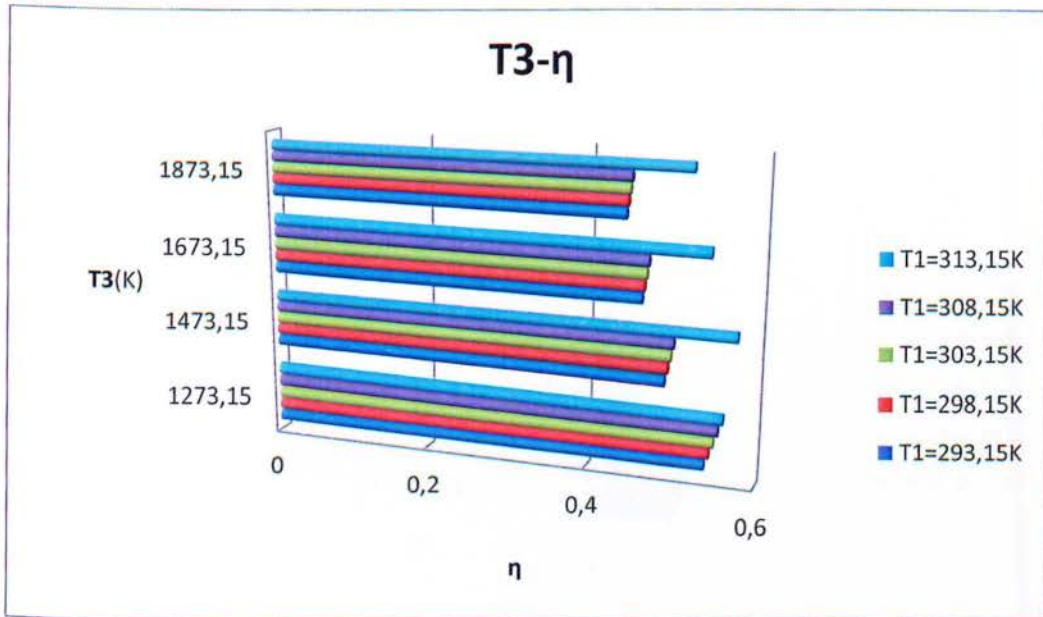
6.5.1.ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΟΛΙΚΟΥ ΒΑΘΜΟΥ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

Για $r=6$ 

Διάγραμμα 50

Μεταβολή του Συνολικού Βαθμού της εγκατάστασης συναρτήσει της Θερμοκρασίας εισόδου των καυσαερίων στο στρόβιλο

Από το παραπάνω Διάγραμμα παρατηρούμε ότι για σταθερό λόγο συμπίεσης ο συνολικός βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου των καυσαερίων στο στρόβιλο. Λαμβάνοντας υπόψη μας αρχικά ότι η ισχύς του κύκλου Rankine είναι σταθερή και ίση με 10 MW και επιπλέον, τα διαγράμματα-πίνακες της ισχύς του κύκλου Brayton το παραπάνω αποτέλεσμα είναι αναμενόμενο. Επίσης, παρατηρούμε ότι για σταθερή θερμοκρασία εισόδου των καυσαερίων στο στρόβιλο ο συνολικός βαθμός απόδοσης του κύκλου αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος

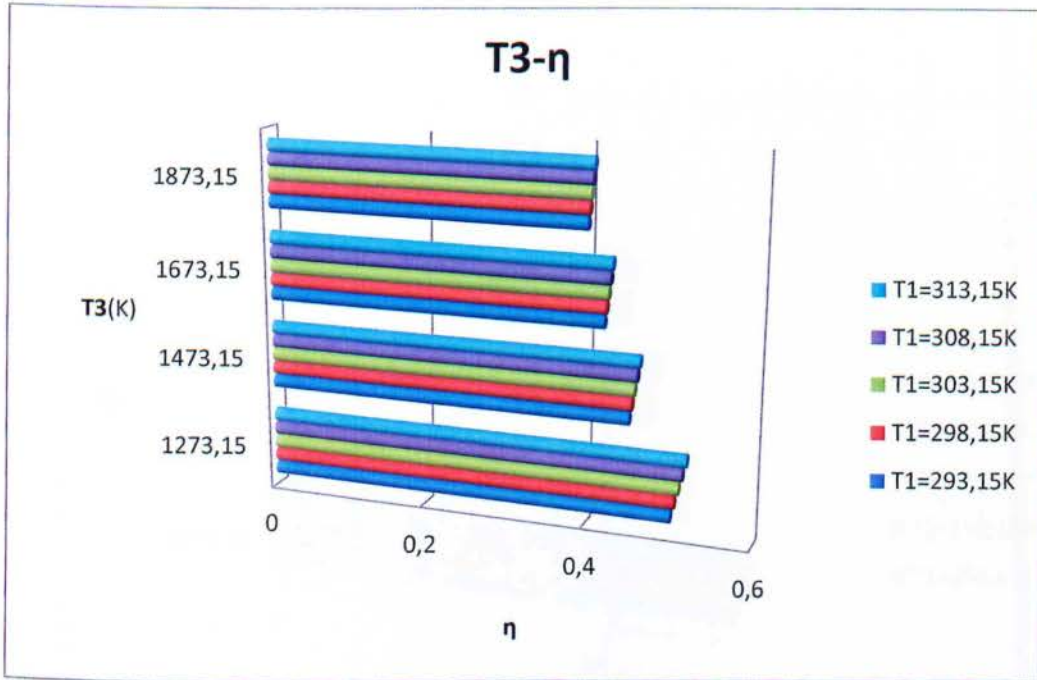
ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗΓια $r=7$ 

Διάγραμμα 51

Μεταβολή του Συνολικού Βαθμού της εγκατάστασης συναρτήσει της Θερμοκρασίας εισόδου των καυσαερίων στο στρόβιλο

Όμοια με το Διάγραμμα 50 μεταβάλλεται ο συνολικός βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης. Το εύρος των τιμών είναι από 0,44 έως 0,56.

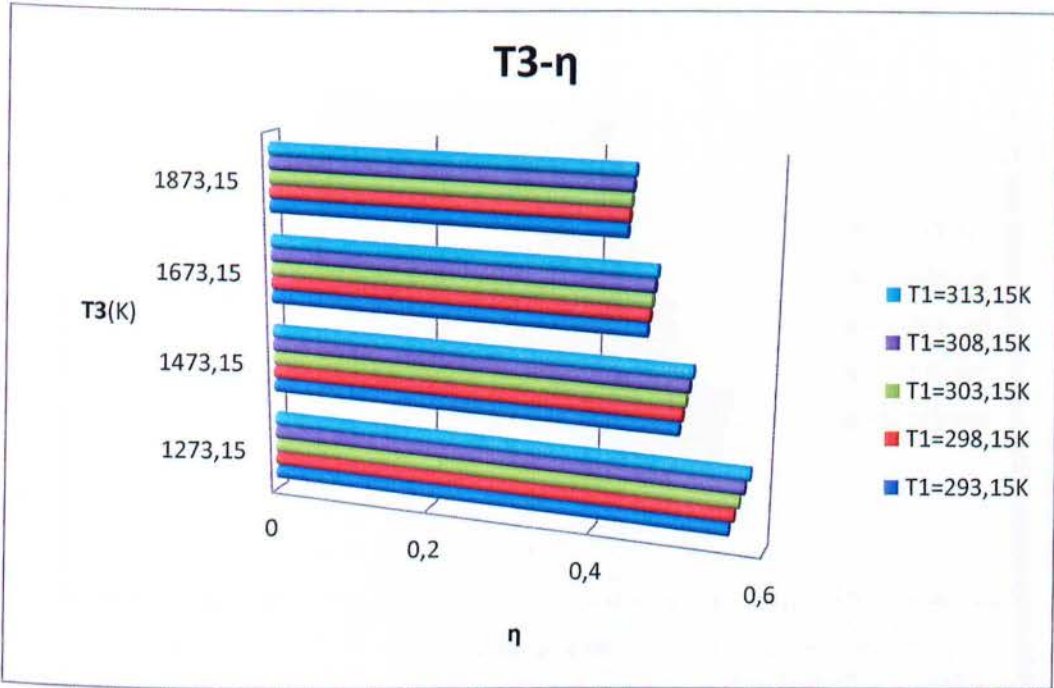
Παρατηρούμε ότι αυξάνοντας το λόγο συμπίεσης αυξάνεται ο βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗΓια $r=8$ 

Διάγραμμα 52

Μεταβολή του Συνολικού Βαθμού της εγκατάστασης συναρτήσει της Θερμοκρασίας εισόδου των καυσαερίων στο στρόβιλο

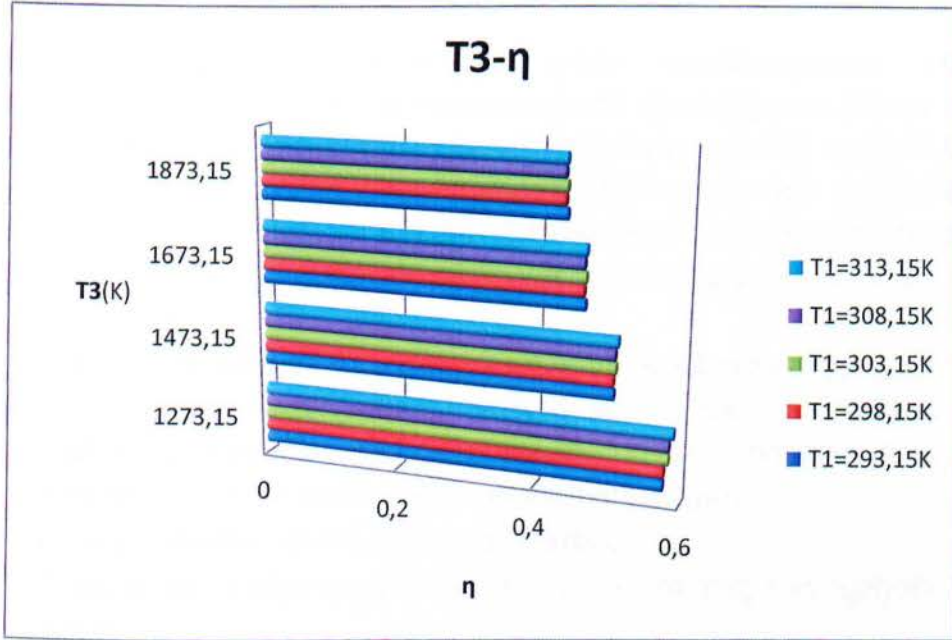
Όμοια με το Διάγραμμα 50,51 μεταβάλλεται ο συνολικός βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης αυξανόμενης της θερμοκρασίας εισόδου των καυσαερίων στο στρόβιλο. Το εύρος των τιμών είναι από 0,39 έως 0,53. Παρατηρούμε ότι αυξάνοντας το λόγο συμπίεσης αυξάνεται ο βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης όπως επίσης και αν αυξήσουμε τη θερμοκρασία περιβάλλοντος διατηρώντας σταθερή αυτή της εισόδου των καυσαερίων στο στρόβιλο.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗΓια $r=9$ 

Διάγραμμα 53

Μεταβολή του Συνολικού Βαθμού της εγκατάστασης συναρτήσει της Θερμοκρασίας εισόδου των καυσαερίων στο στρόβιλο

Όμοια με τα Διαγράμματα 50,51,52 η αύξηση του λόγου συμπίεσης προκαλεί αύξηση του ολικού βαθμού απόδοσης με εύρος τιμών 0,43 έως 0,58. Η μέγιστη τιμή παρουσιάζεται για τη μικρότερη θερμοκρασία των καυσαερίων (1000°C) και τη μέγιστη του περιβάλλοντος (40°C).

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗΓια $r=10$ 

Διάγραμμα 54

Μεταβολή του Συνολικού Βαθμού της εγκατάστασης συναρτήσει της Θερμοκρασίας εισόδου των καυσαερίων στο στρόβιλο

Όμοια με τα Διαγράμματα 50,51,52,53 η αύξηση του λόγου συμπίεσης προκαλεί αύξηση του ολικού βαθμού απόδοσης με εύρος τιμών 0,44 έως 0,59. Η μέγιστη τιμή της απόδοσης της εγκατάστασης παρουσιάζεται για τη μέγιστη τιμή του λόγου συμπίεσης και πιο συγκεκριμένα για για τη μικρότερη θερμοκρασία των καυσαερίων (1000°C) και τη μέγιστη του περιβάλλοντος (40°C).

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ**6.6. ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-
ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ**

Τα θερμοδυναμικά πλεονεκτήματα του συνδυασμένου κύκλου επιτρέπουν αποδόσεις πολύ μεγαλύτερες από οποιαδήποτε άλλου τύπου θερμικό σταθμό. Αυτή η τεχνολογία επιτρέπει την μεγάλη εκμετάλλευση των υψηλών θερμοκρασιών των αεριοστροβίλων και των χαμηλότερων θερμοκρασιών του κύκλου ατμού. Από καθαρά οικονομική σκοπιά ο συνδυασμένος κύκλος είναι ιδανικός για ηλεκτροπαραγωγή, δεδομένου ότι έχει :

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

Όλα τα παραπάνω εγγυώνται το μικρό κόστος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Τα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά του συνδυασμένου κύκλου τον καθιστούν ιδανικό και για συμπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας, καθόσον η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τον αεριοστροβίλο δεν επηρεάζεται από τον κύκλο ατμού. Η δυνατότητα συμπληρωματικής καύσης στον λέβητα ανάκτησης θερμότητας δίνει την δυνατότητα μεγαλύτερης ευελιξίας στην παραγωγή ατμού. Ακόμα οι συνδυασμένοι κύκλοι έχουν την δυνατότητα γρήγορων εκκινήσεων και μεταβολών του φορτίου ενώ μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σαν μονάδες βάσης. Η ψύξη τους μπορεί να γίνει με πύργους ψύξης ή με αερόψυκτους συμπυκνωτές σε περίπτωση έλλειψης νερού. Έτσι έχουν την δυνατότητα να εγκατασταθούν και σε άνυδρες περιοχές καθώς η εξάρτησή τους από το νερό είναι μικρή. Ακόμα σημαντικό χαρακτηριστικό τους είναι η δυνατότητα χρήσης περισσοτέρων του ενός καυσίμων.

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

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

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

Γενικά συγκρίνοντας :

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

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

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

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

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

Εάν όλα τα καύσιμα ήταν διαθέσιμα στις παρούσες διεθνείς τιμές, οι συνδυασμένοι κύκλοι φυσικού αερίου θα αποτελούσαν την πιο οικονομική λύση για την ηλεκτροπαραγωγή βάσης λόγω υψηλού βαθμού

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

απόδοσης, μειωμένων εκπομπών ρύπων και γρήγορης απόσβεσης του επενδεδυμένου κεφαλαίου.

Βιβλιογραφία

1. Ν. Παπαγεωργίου, «Ατμοπαραγωγοί Ι Γενικές αρχές», εκδόσεις Συμμεών.
 2. Εμμ. Κ. Κακαράς, «Θερμοηλεκτρικοί σταθμοί», εκδόσεις Φούντας.
 3. Κ. Δ Παπαηλίου, Κ.Μ. Μαθιουδάκης, Κ.Χ. Γιαννάκογλου, «Εισαγωγή στις θερμικές στροβιλομηχανές», εκδόσεις ΕΜΠ.
 4. Κ. Μαθιουδάκης, «Λειτουργία αεριοστροβίλων και ατμοστροβίλων».
 5. Εμμ. Κακαράς, Σημειώσεις μαθήματος «Αντιρρυπαντική τεχνολογία θερμικών εγκαταστάσεων».
 6. Π.Κ.ΝΙΚΑ «ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ».
 7. «Τεχνικά χαρακτηριστικά εγκαταστάσεως», φυλλάδιο του Ενεργειακού Κέντρου Ηλεκτροπαραγωγής Λαυρίου της ΔΕΗ Α.Ε.
 8. Rolf H. Kehlhofer, «Combined-Cycle Gas Steam Turbine Power Plants».
 9. Meherwan P. BOYCE, «Gas Turbine Engineering Handbook» 3d ed.
 10. John H. Horlock, «Combined Power Plants, Including Combined Cycle Gas Turbine Plants».
 11. B.Ziegler, Ch. Trepp Equation of state for ammonia-water Revue International du Froid 7(2) (1984) 101-106
- Ιστοσελίδες
1. <http://www.bp.com/statisticalreview>
 2. <http://www.dei.gr/>
 3. <http://www.epathessalia.gr/gas3.php>
 4. <http://www.energytribune.com>
 5. http://www.gepower.com/prod_serv/products/tech_docs/en/all_gers.htm
 6. <http://www.wikipedia.org>
- Τέλος, να επισημανθεί ότι ο υπολογισμός όλων των παραπάνω στοιχείων έγινε με τη χρήση του προγράμματος MATHCAD**