ΓΡΑΜΜΑΤΕΙΑ
ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΜΗΧ
650

ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

Διερεύνηση του βαθμού απόδοσης κύκλου Rankine με αναθέρμανση

Διπλωματική εργασία των
Γεωργίου Παπαδόπουλου
&
Γεωργίου Πακτίτη
Επιβλέπων καθηγητής : Δρ Γεώργιος Στρωτός

Αθήνα, Ιούνιος 2012

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ	ΣΕΛ
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	2
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	3
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	4
ΣΚΟΠΟΣ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ	6
ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΑΣΙΚΟΥ ΚΥΚΛΟΥ RANKINE	10
ΑΠΛΟΣ ΚΥΚΛΟΣ	13
ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΑΠΛΟΥ ΚΥΚΛΟΥ	14
ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΑΠΛΟΥ ΚΥΚΛΟΥ RANKINE	16
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΑΠΛΟΥ ΚΥΚΛΟΥ RANKINE	17
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΠΛΟΥ ΚΥΚΛΟΥ RANKINE	36
ΚΥΚΛΟΣ RANKINE ΜΕ ΑΝΑΘΕΡΜΑΝΣΗ	37
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΚΥΚΛΟΥ RANKINE ΜΕ ΑΝΑΘΕΡΜΑΝΣΗ	40
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΥΚΛΟΥ RANKINE ΜΕ ΑΝΑΘΕΡΜΑΝΣΗ	45
ΤΕΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	48
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	49

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία, μελετάται ο βαθμός απόδοσης και το καθαρό παραγόμενο έργο, απλού κύκλου Rankine, και κύκλου Rankine με αναθέρμανση.

Οι παράμετροι που εξετάστηκαν, είναι η μέγιστη και ελάχιστη πίεση καθώς και η μέγιστη θερμοκρασία, ενώ για την περίπτωση του κύκλου με αναθέρμανση εξετάστηκε επιπλέον η επίδραση της πίεσης αναθέρμανσης.

Παρατίθενται διαγράμματα που δίνουν τον βαθμό απόδοσης και το έργο σε συνάρτηση των παραπάνω παραμέτρων.

SUMMARY

In the present paper, we are studying the degree of efficiency and the net produced work of the simple Rankine circle, as well the Rankine circle with reheat.

The parameters that we have examined are, the minimum and maximum pressure and the maximum temperature. For the Rankine circle with reheat we have also examined the effect of the reaheat preasure.

In the end, we present charts which are giving the degree of efficiency and the net produced work, in the relation to the above parameters.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της πτυχιακής εργασίας με θέμα «**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΥ ΒΑΘΜΟΥ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΚΥΚΛΟΥ RANKINE ΜΕ ΑΝΑΘΕΡΜΑΝΣΗ**».Η ιδέα της ενασχόλησης με αυτό το θέμα προέκυψε μετά από εισήγηση του Κου Στρωτού Γεωργίου, Μηχ/γου Μηχ/κου, βοηθού και εξωτερικού συνεργάτη του Καθηγητή Κου Αλέξη Γεωργίου, στα μαθήματα της ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ & ΑΤΜΟΣΤΡΟΒΙΛΟΙ – ΑΤΜΟΛΕΒΗΤΕΣ. Η άριστη συνεργασία και η κατανόηση της διδασκαλίας των δύο δασκάλων μας, μας ώθησε στο να επιλέξουμε τελικά το πιο πάνω θέμα πτυχιακής εργασίας.

Η προσπάθεια αυτή ολοκληρώθηκε χάρις στην επιμονή και την καθοδήγηση του επιβλέποντος, Κου Στρωτού.

Θα ήταν παράλειψή μας, αν δεν ευχαριστούσαμε όλους τους καθηγητές με τους οποίους συνεργαστήκαμε στον τομέα των θερμοδυναμικών κύκλων, τους Κους Κοκκοράκη Αναστάσιο και Νάζο Αντώνιο, που με την υπομονή τους και την άριστη γνώση του αντικειμένου, μας βοήθησαν να αποκτήσουμε τις γνωσικές βάσεις ώστε να φτάσουμε στην συγγραφή της εργασίας αυτής.

ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ
ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο κύκλος Rankine είναι θερμοδυναμικός κύκλος που μετατρέπει την θερμότητα σε έργο.

Πήρε την ονομασία του από τον William John Macquorn Rankine, Σκωτσέζο Πολιτικό Μηχανικό, Φυσικό και Μαθηματικό, ο οποίος ανέπτυξε την πλήρη θεωρία της ατμομηχανής.

Η θερμότητα παρέχεται εξωτερικά σε ένα κλειστό βρόγχο ο οποίος χρησιμοποιεί συνήθως το νερό, ως ρευστό λειτουργίας. Αυτός ο κύκλος παράγει περίπου το 80% όλης της ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται στην Αμερική και σε όλο τον κόσμο, (ενώ για το υπόλοιπο χρησιμοποιούνται εγκαταστάσεις ηλιακής ενέργειας, βιομάζας, πυρηνικής και αιολικής ενέργειας).

Ο κύκλος Rankine αναφέρεται μερικές φορές και ως πρακτικός κύκλος Carnot. Η κύρια διαφορά τους είναι μια αντλία που χρησιμοποιείται για να διατηρεί το υγρό σε σταθερή ατμοσφαιρική πίεση. Αυτό απαιτεί 100 φορές λιγότερη ενέργεια από αυτή που χρειάζεται για να συμπιεστεί ένα αέριο σε ένα συμπιεστή όπως ο κύκλος Carnot.

Ενώ πολλές ουσίες μπόρεσαν να χρησιμοποιηθούν στον κύκλο Rankine, το νερό είναι το ρευστό επιλογής, λόγω των ευνοϊκών ιδιοτήτων του, όπως η μη τοξική και αδρανής χημική του σύσταση, η αφθονία, το χαμηλότερο κόστος του, καθώς και οι θερμοδυναμικές του ιδιότητες.

Τα συστήματα ατμοστροβίλων είναι τα πιο διαδεδομένα συστήματα συμπαραγωγής, κατάλληλα για ισχύεις 500kw – 100Mw ή και μεγαλύτερες. Μπορούν να χρησιμοποιήσουν οποιοδήποτε καύσιμο, ακόμα και στερεά απόβλητα, καίγονται σε ειδικούς λέβητες εφοδιασμένους με συστήματα κατακράτησης ή και εξουδετέρωσης ρύπων και τοξικών ουσιών που δημιουργούνται κατά την καύση.

Ο βαθμός απόδοσης φτάνει το 60-85%. Για σύγκριση υπενθυμίζεται ότι ο βαθμός απόδοσης ενός συμβατικού ατμοηλεκτρικού σταθμού, βρίσκεται στην περιοχή του 35%.

Τα συστήματα ατμοστροβίλου έχουν υψηλή αξιοπιστία που φτάνει το 95%, υψηλή διαθεσιμότητα (90-95%) και μεγάλη διάρκεια ζωής (25 – 35 έτη). Αρνητικό γεγονός αποτελεί ο χρόνος εγκατάστασης καθώς για μικρές μονάδες, ο χρόνος αυτός ορίζεται στους 12 -18 μήνες, ενώ για μεγαλύτερες εγκαταστάσεις, μπορεί να φτάσει και τα 3 έτη.

Ως αξιοπιστία, θεωρείται η πιθανότητα να λειτουργεί ικανοποιητικά ένα σύστημα για δεδομένο χρονικό διάστημα και με προκαθορισμένες συνθήκες.

Διαθεσιμότητα, είναι η πιθανότητα να λειτουργεί ικανοποιητικά ένα σύστημα σε τυχαία χρονική στιγμή. Η μέση ετήσια διαθεσιμότητα είναι ίση με το ποσοστό του χρόνου (πχ των 8760 ωρών του χρόνου) κατά το οποίο ένα σύστημα μπορεί να λειτουργήσει ικανοποιητικά, υπολογίζοντας την προληπτική συντήρηση, ή και έκτακτες βλάβες.

- **ΣΚΟΠΟΣ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ**

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα μελετήσουμε τη συμπεριφορά ενός κύκλου Rankine με αναθέρμανση καθώς επίσης και του βασικού κύκλου Rankine χωρίς αναθέρμανση ή απομάστευση.

Η μελέτη θα ξεκινήσει με τη διερεύνηση του απλού κύκλου Rankine και στη συνέχεια του κύκλου με αναθέρμανση. Θα μελετήσουμε την επίδραση της μέγιστης και ελάχιστης πίεσης του κύκλου, την επίδραση της πίεσης αναθέρμανσης, την επίδραση της μέγιστης θερμοκρασίας του κύκλου, με σταθερό ισεντροπικό βαθμό απόδοσης του στροβίλου, 0,85.

Στα αποτελέσματα της εργασίας θα παρατεθούν διαγράμματα που δίνουν το βαθμό απόδοσης και το παραγόμενο έργο συναρτήσει των παραπάνω παραμέτρων. Κάτι τέτοιο θα δώσει στους μηχανικούς ένα χρήσιμο εργαλείο για να υπολογίζουν άμεσα το βαθμό απόδοσης και το έργο (τάξη μεγέθους), χωρίς να χρειάζεται να μελετήσουν λεπτομερώς ένα κύκλο ή να επιλύσουν χρονοβόρες θερμοδυναμικές εξισώσεις.

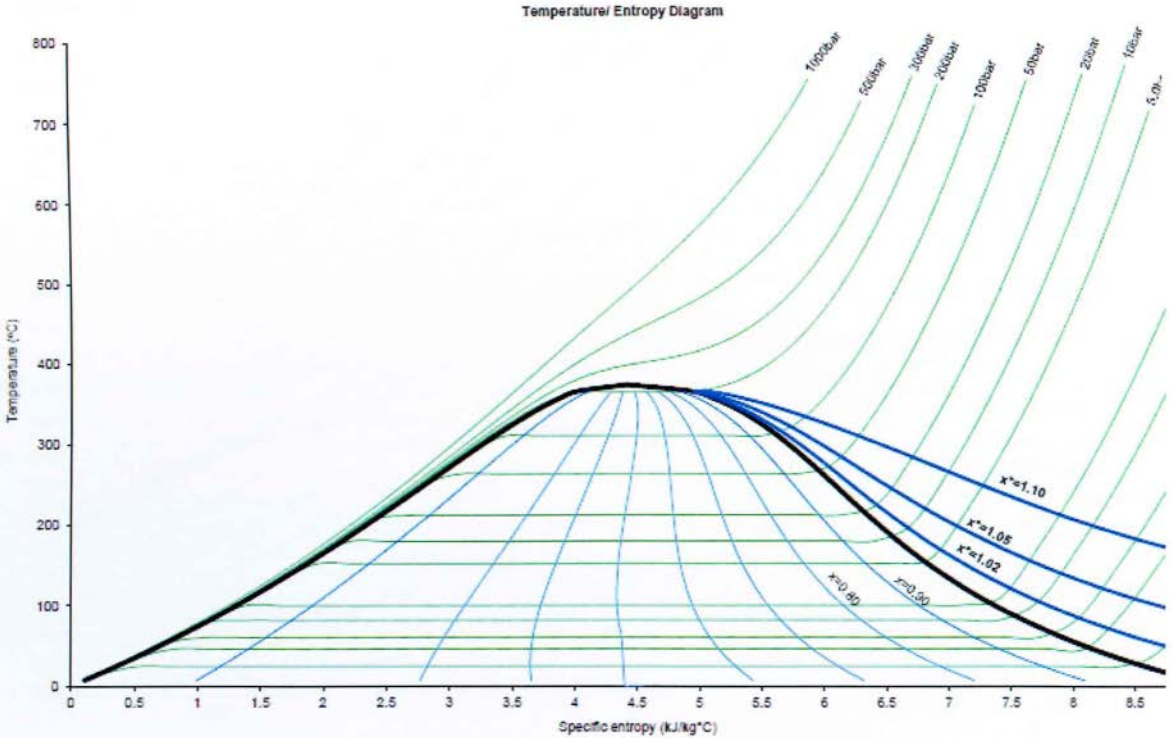
Πρίν όμως ξεκινήσουμε οποιαδήποτε μελέτη ή επεξεργασία των τιμών των διαφόρων παραμέτρων, θα ορίσουμε ένα νέο θερμοδυναμικό μέγεθος, το οποίο θα μας βοηθήσει στην κατανόηση των αποτελεσμάτων.

Το νέο αυτό μέγεθος, ονομάζεται **"ΓΕΝΙΚΕΥΜΕΝΗ ΞΗΡΟΤΗΤΑ"**, και το συμβολίζουμε ως $\mathbf{x}^*$.
Βασίζεται στην ενθαλπία και ορίζεται ως εξής:

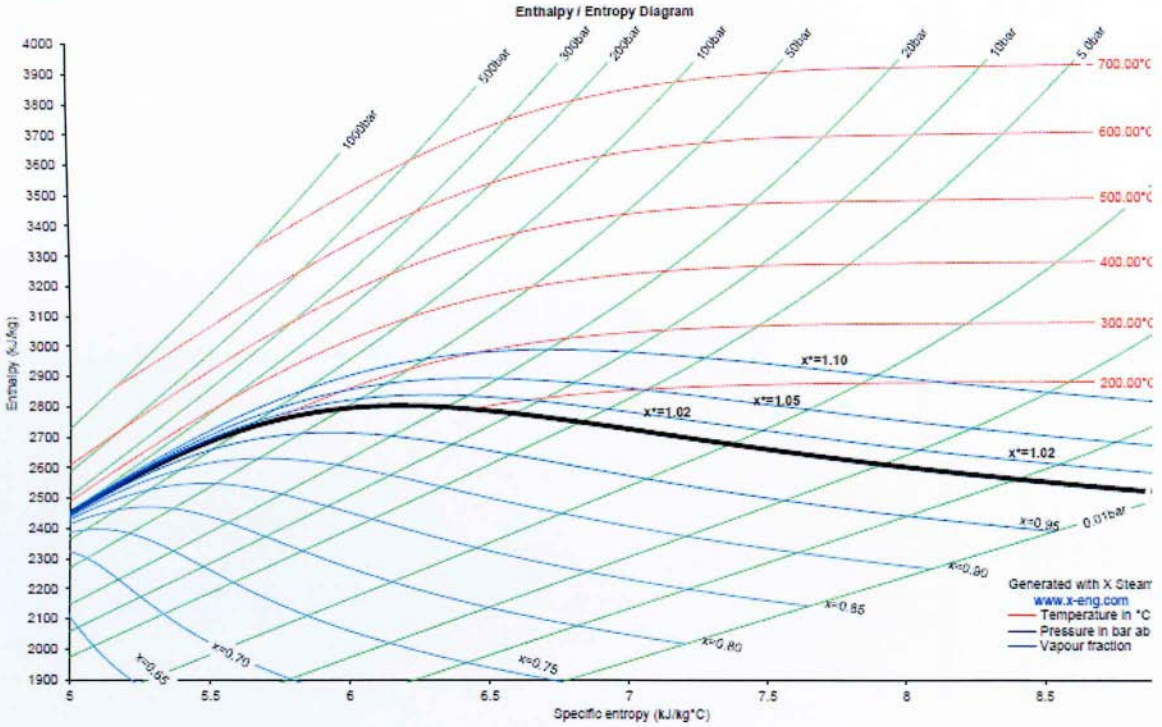
$$x^* = \frac{h - h_f}{h_{fg}}$$

Η γενικευμένη ξηρότητα έχει την ιδιότητα να ταυτίζεται με την ξηρότητα του ατμού εντός της καμπάνας, ενώ στην περιοχή του υπέρθερμου, παρέχει μια ένδειξη του βαθμού υπερθέρμανσης του ατμού.
Όλες οι ενθαλπίες αναφέρονται στην ίδια πίεση και $\mathbf{h_f}$ **= ενθαλπία κορεσμένου νερού** και $\mathbf{h_{fg}}$ **= λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης.** Ο ορισμός αυτός έχει νόημα για πιέσεις μικρότερες της κρίσιμης.

Για να δώσουμε ένα παράδειγμα, η μορφή των καμπυλών με σταθερή τιμή x* φαίνεται στα παρακάτω διαγράμματα **T-s** και **h-s**. Στα παρακάτω διαγράμματα εμφανίζονται οι τιμές **1.02, 1.05** και **1.10**.


Temperature/ Entropy Diagram
Temperature (°C)
Specific entropy (kJ/kg*C)
1000bar
500bar
300bar
200bar
100bar
50bar
20bar
10bar
x*=1.10
x*=1.05
x*=1.02
x=0.60
x=0.90

[7]


Enthalpy / Entropy Diagram
Enthalpy (kJ/kg)
Specific entropy (kJ/kg*C)
1000bar
500bar
300bar
200bar
100bar
50bar
20bar
10bar
5.0bar
0.01bar
700.00°C
600.00°C
500.00°C
400.00°C
300.00°C
200.00°C
x*=1.10
x*=1.05
x*=1.02
x*=1.02
x=0.95
x=0.90
x=0.85
x=0.80
x=0.75
x=0.70
x=0.65
Generated with X Steam
www.x-eng.com
Temperature in °C
Pressure in bar ab
Vapour fraction

[8]

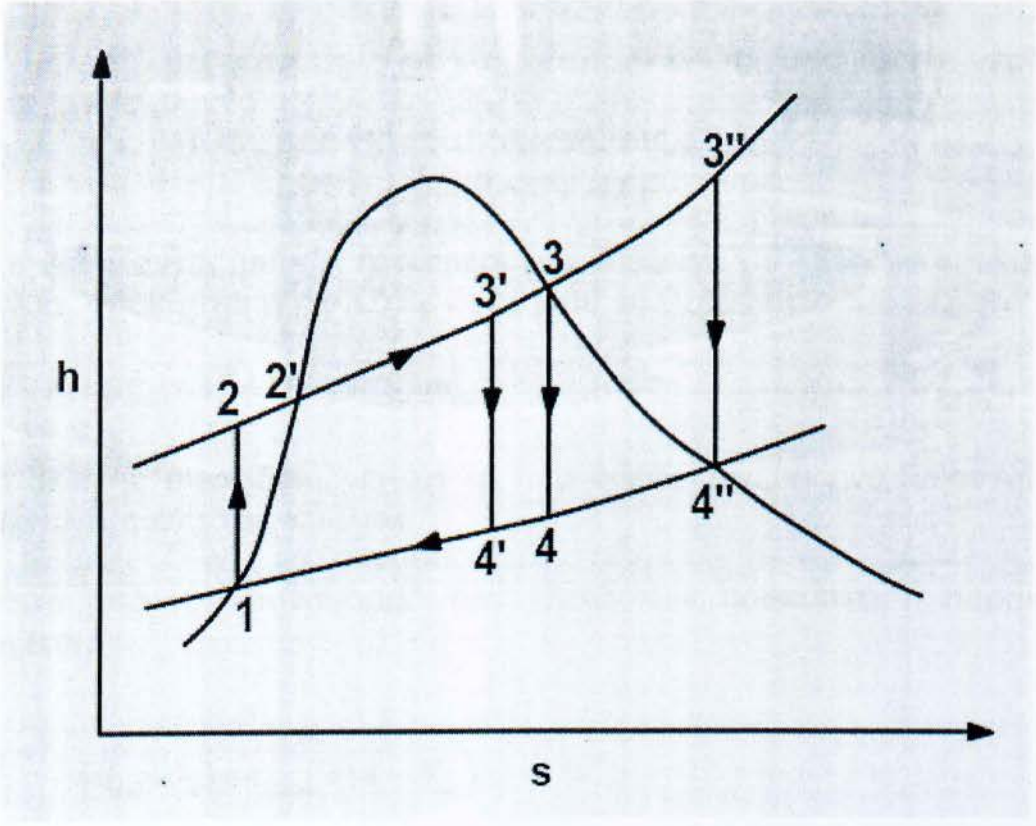
Κατά την εκτόνωση του ατμού στο στρόβιλο, έχει πολύ μεγάλη σημασία σε τι κατάσταση (ξηρότητα) βρίσκεται ο ατμός στην έξοδο του στροβίλου.

Ο λόγος για τον οποίο ενδιαφερόμαστε είναι διότι, τιμές της ξηρότητας μικρότερες του 0.85, μπορεί να προκαλέσουν καταστροφή του στροβίλου, ενώ αν στην έξοδο του στροβίλου υπάρχει υπέρθερμος ατμός, αυτό σημαίνει ότι υπάρχει ανεκμετάλλευτο έργο που ισοδυναμεί με χαμένη ενέργεια.

Ορίζουμε λοιπόν αυθαίρετα, ότι αποδεκτές τιμές της γενικευμένης ξηρότητας βρίσκονται στο εύρος 0.85 έως 1.02.

Θερμοδυναμική ανάλυση βασικού κύκλου Rankine.

Βασικός κύκλος



Σύμφωνα με τη θεωρία, ο βαθμός απόδοσης απλού κύκλου Rankine δίνεται από τη σχέση:

$$\eta = 1 - \frac{h_4 - h_1}{h_3 - h_2}$$

Ο αριθμητής του κλάσματος παριστά την ενέργεια που αποβάλλεται στο συμπυκνωτή και ο παρανομαστής την ενέργεια που δίνουμε στο λέβητα.

Για να μπορέσουμε να μελετήσουμε τη συμπεριφορά του κύκλου, θα προσπαθήσουμε να εκφράσουμε το βαθμό απόδοσης χρησιμοποιώντας κάποιες αδιάστατες παραμέτρους.

Η ενέργεια που αποβάλλεται στο συμπυκνωτή σύμφωνα με τον ορισμό της γενικευμένης ξηρότητας, ισούται με:

$$h_4 - h_1 = x^* h_{fg,\min}$$

Όπου $h_{fg,min}$ είναι η λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης της ελάχιστης πίεσης του κύκλου στην οποία γίνεται η μεταβολή 4-1.

Η θερμότητα που δίνουμε στο λέβητα, είναι το άθροισμα τριών επιμέρους θερμοτήτων:

- της θερμότητας για να μετατραπεί το υπόψυκτο νερό σε κορεσμένο.
- της θερμότητας για το ατμοποιήσουμε και
- της θερμότητας για να το υπερθερμάνουμε.

Συμβολίζοντας με «**'**» το κορεσμένο νερό και με «**''**» τον κορεσμένο ατμό, προκύπτει η πιο κάτω σχέση για τη θερμότητα στο λέβητα:

$$h_3 - h_2 = \left(h'_{\max} - h_2\right) + h_{fg,\max} + \left(h_3 - h''_{\max}\right)$$

Ο δείκτης **max** δηλώνει ότι τα παραπάνω μεγέθη αναφέρονται στη μέγιστη πίεση του κύκλου.

Μετά από τον συνδυασμό των εξισώσεων προκύπτει η παρακάτω σχέση:

$$\eta = 1 - \frac{x^* h_{fg,\min}}{\left(h'_{\max} - h_2\right) + h_{fg,\max} + \left(h_3 - h''_{\max}\right)}$$

Διαιρώντας αριθμητή και παρανομαστή με $h_{gf,min}$ προκύπτει η σχέση:

$$\eta = 1 - \frac{x^*}{\frac{h'_{\max} - h_2}{h_{fg,\min}} + \frac{h_{fg,\max}}{h_{fg,\min}} + \frac{h_3 - h''_{\max}}{h_{fg,\min}}}$$

Τέλος χρησιμοποιώντας τα σύμβολα c_1, c_2, c_3 προκύπτει η παρακάτω συνεπτυγμένη μορφή για το βαθμό απόδοσης:

$$\eta = 1 - \frac{x^*}{c_1 + c_2 + c_3}$$

Όπου:

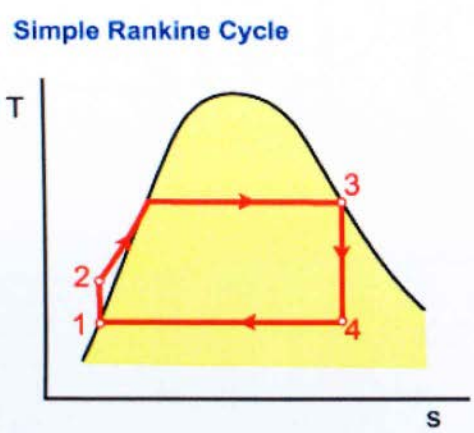
$$c_1 = \frac{h'_{\max} - h_2}{h_{fg,\min}}$$

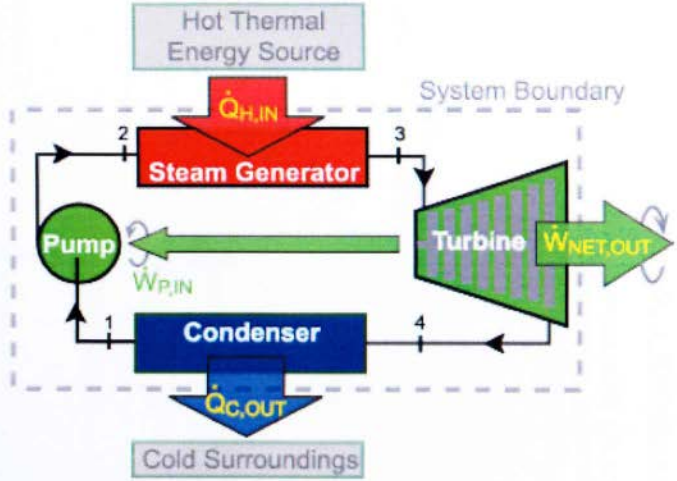
$$c_2 = \frac{h_{fg,\max}}{h_{fg,\min}}$$

$$c_3 = \frac{h_3 - h''_{\max}}{h_{fg,\min}}$$

Με τον τρόπο αυτό, εκφράζεται ο βαθμός απόδοσης χρησιμοποιώντας αδιάστατες παραμέτρους x^*, c_1, c_2, c_3.

ΑΠΛΟΣ ΚΥΚΛΟΣ RANKINE



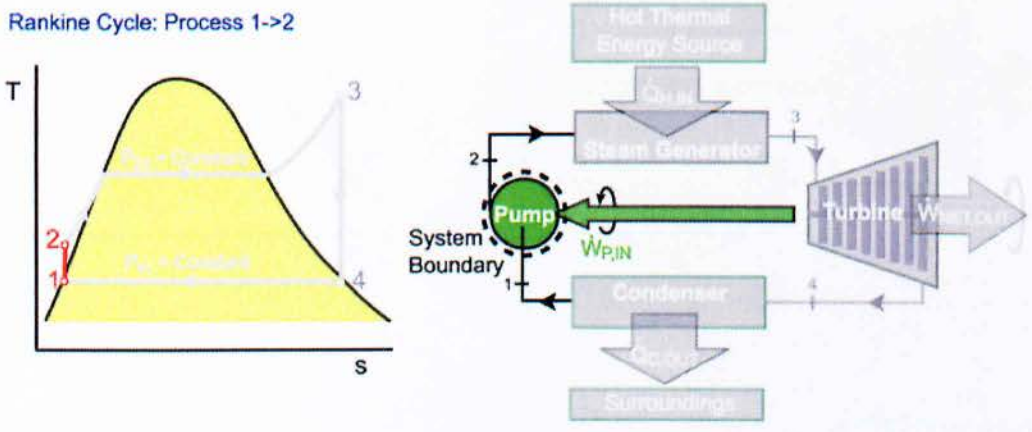


- **Οι διεργασίες του κύκλου Rankine:**

Υπάρχουν 4 διεργασίες στον κύκλο Rankine, κάθε μία από τις οποίες αλλάζει την κατάσταση του λειτουργούντος ρευστού. Αυτές οι καταστάσεις προσδιορίζονται από τους αριθμούς στο διάγραμμα T-S.

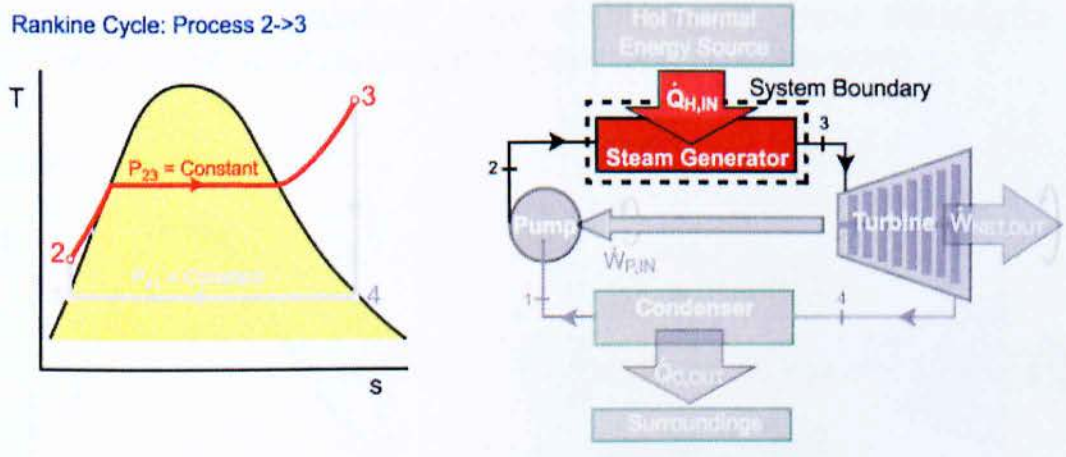
- **Διεργασία 1-2:**

Το ρευστό αντλείται από χαμηλή σε υψηλή πίεση με την βοήθεια της αντλίας (ισεντροπική συμπίεση)



- **Διεργασία 2-3:**

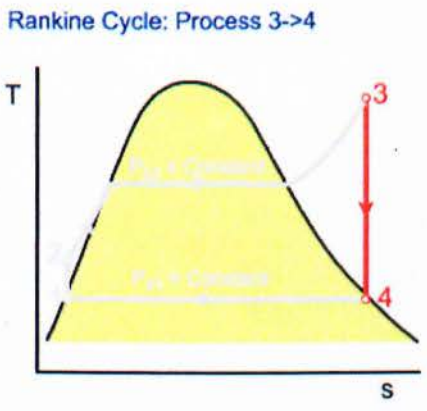
Το υψηλής πίεσης ρευστό εισάγεται σε ένα λέβητα όπου θερμαίνεται σε σταθερή πίεση, από μία εξωτερική πηγή θερμότητας, ώστε να γίνει ξηρός ατμός. (ισόθλιπτη προσθήκη θερμότητας)

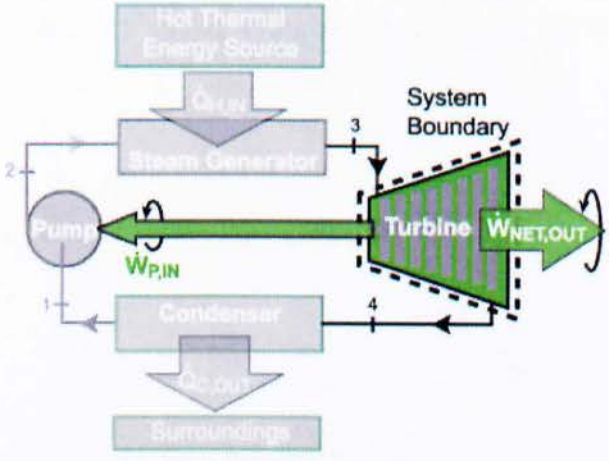


ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ
ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ

- **Διεργασία 3-4:**

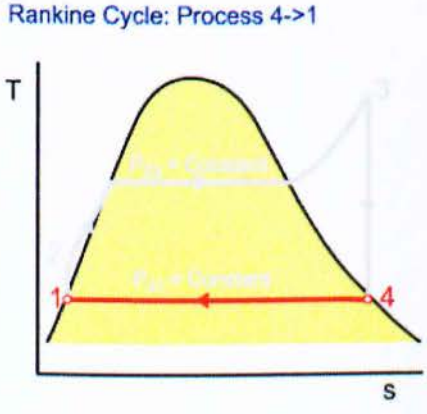
Ο ξηρός ατμός διοχετεύεται στον στρόβιλο παράγοντας έργο. Αυτό μειώνει την θερμοκρασία και την πίεση του ατμού και μπορεί να εμφανιστεί και κάποια συμπύκνωση (ισεντροπική εκτόνωση)

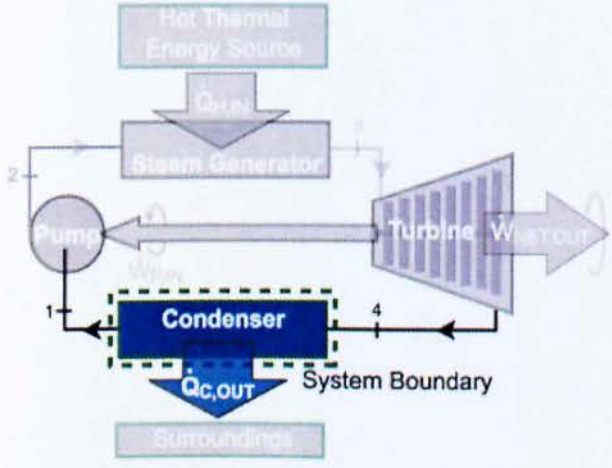




- **Διεργασία 4-1:**

Ο υγρός ατμός εισάγεται στον συμπυκνωτή όπου δροσίζεται σε σταθερή πίεση και θερμοκρασία. (ισεντροπική εκτόνωση)



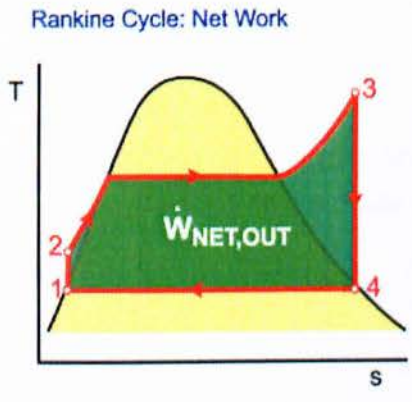


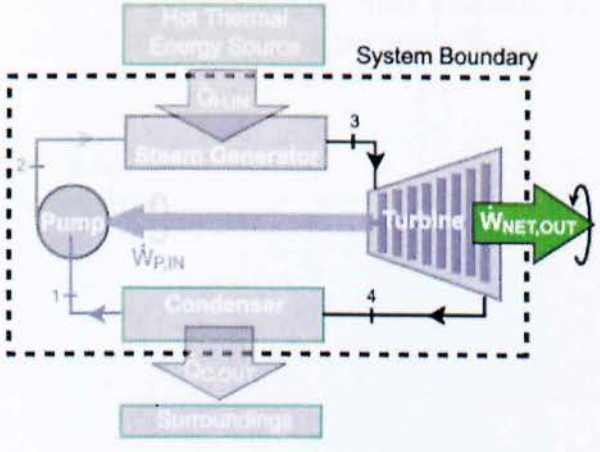
Βαθμός απόδοσης του απλού κύκλου Rankine:

Το συνολικό έργο του απλού κύκλου Rankine, ορίζεται από το εμβαδόν, σε διάγραμμα T-S (θερμοκρασίας – εντροπίας), που περικλείεται από τα σημεία των αντιστοίχων διεργασιών, όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα (πράσινη περιοχή).

Το καθαρό έργο, $\mathbf{W_{net}}$, ορίζεται, ως η διαφορά του έργου που παίρνουμε από τον στρόβιλο μείον το έργο που προσδίδουμε στην αντλία.

$$\eta_{CYCLE} = \frac{\text{Καθαρό έργο}}{\text{Προσδιδόμενη θερμότητα}} = \frac{(\dot{W}_{OUT} - \dot{W}_{IN})}{\dot{Q}_{IN}} \Rightarrow \eta_{CYCLE} = \frac{(w_{OUT} - w_{IN})}{q_{IN}}$$





ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΑΠΛΟΥ ΚΥΚΛΟΥ RANKINE

Ξεκινώντας τις δοκιμές μας, κρατήσαμε σταθερά κάποια μεγέθη, προσπαθώντας να μελετήσουμε την συμπεριφορά του απλού Κύκλου Rankine, μεταβάλλοντας τα υπόλοιπα.
Αρχικά λοιπόν, παραμένει σταθερή η ελάχιστη πίεση του συστήματος $\mathbf{P_{min}}$ στα **0,1 bar**.
Στη συνέχεια, επιλέγοντας κάθε φορά μια διαφορετική μέγιστη πίεση $\mathbf{P_{max}}$, οι τιμές της οποίας είναι οι ακόλουθες:
20, 50, 70, 100, 150 bar, αυξάνουμε με σταθερό βήμα (**20°C**) την θερμοκρασία του συστήματος, αρχίζοντας πάντα από την θερμοκρασία για την οποία η γενικευμένη ξηρότητα, είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στην ελάχιστη επιτρεπόμενη τιμή του **0,85**.

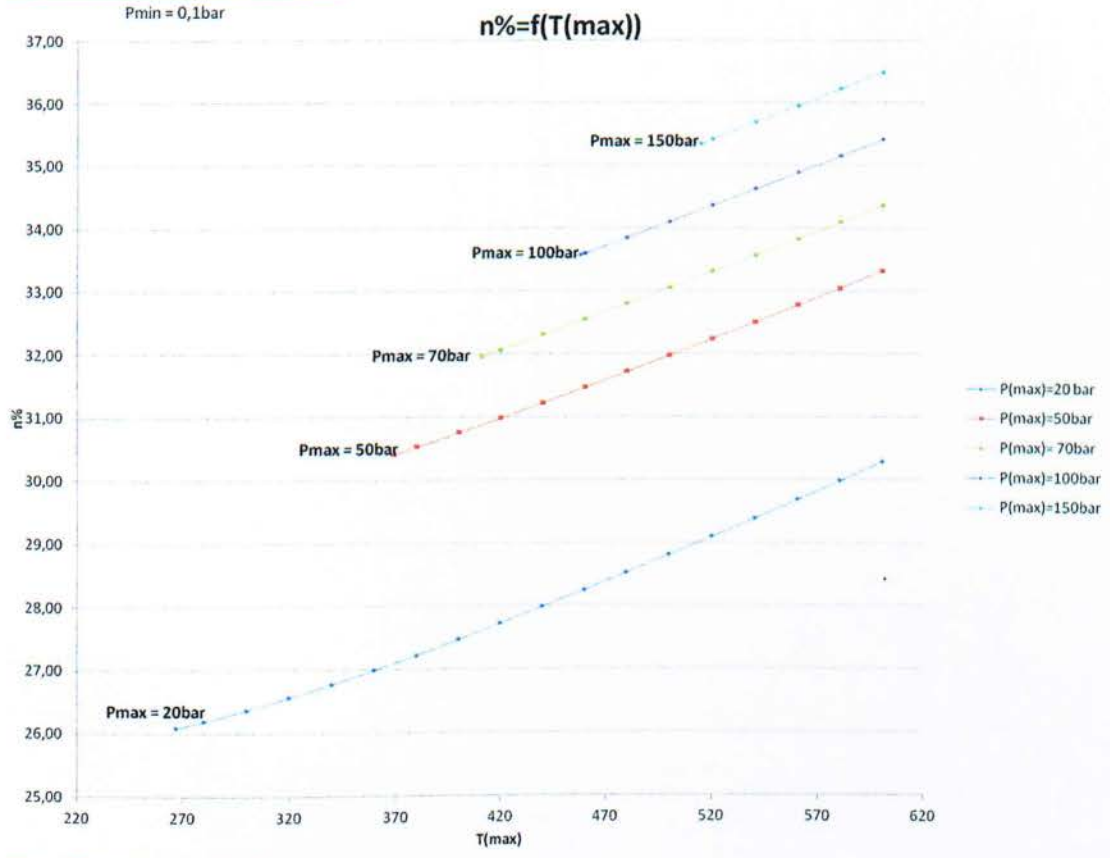
Με τις τιμές των δοκιμών δημιουργούμε δύο ειδών διαγράμματα:

Το πρώτο διάγραμμα, απεικονίζει τον βαθμό απόδοσης του κύκλου (**η%**), συναρτήσει της εκάστοτε μέγιστης θερμοκρασίας ($\mathbf{T_{max}}$).

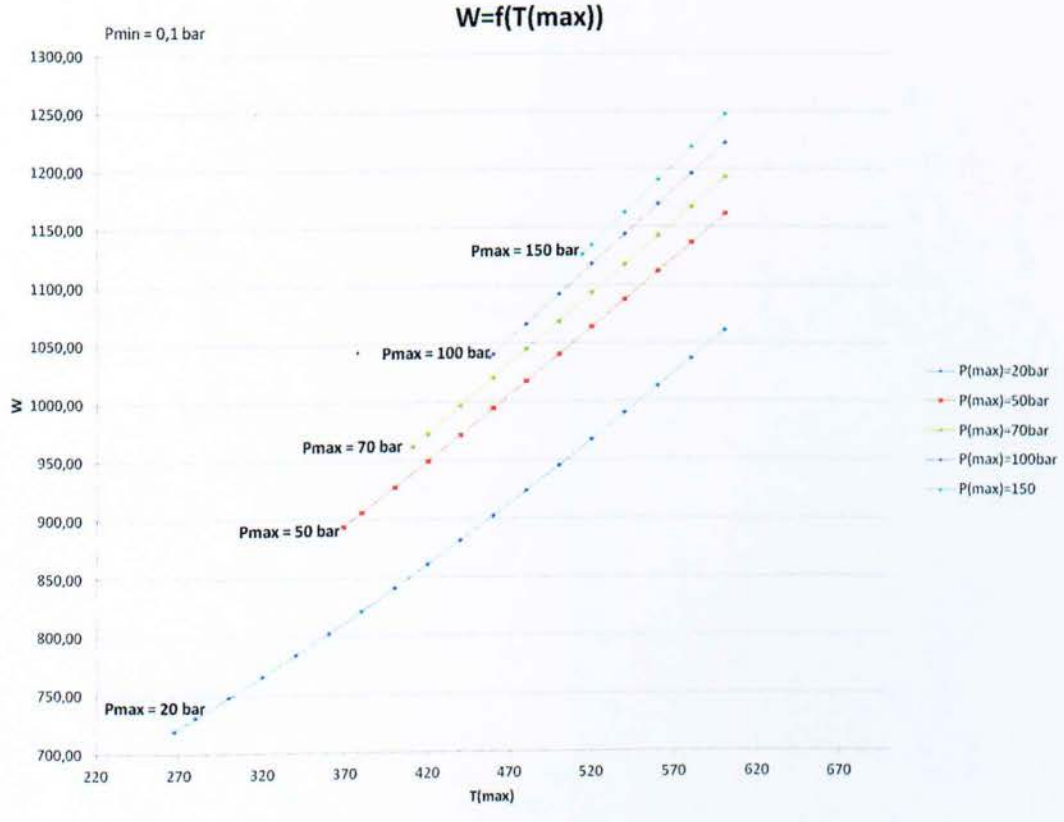
Το δεύτερο διάγραμμα, απεικονίζει το παραγόμενο του κύκλου έργο ($\mathbf{W_{net}}$), συναρτήσει της εκάστοτε μέγιστης θερμοκρασίας ($\mathbf{T_{max}}$).

Η ίδια διαδικασία θα ακολουθηθεί για:
$\mathbf{P_{min}}$ στα **0,08 bar** & $\mathbf{P_{min}}$ στα **0,06 bar**.

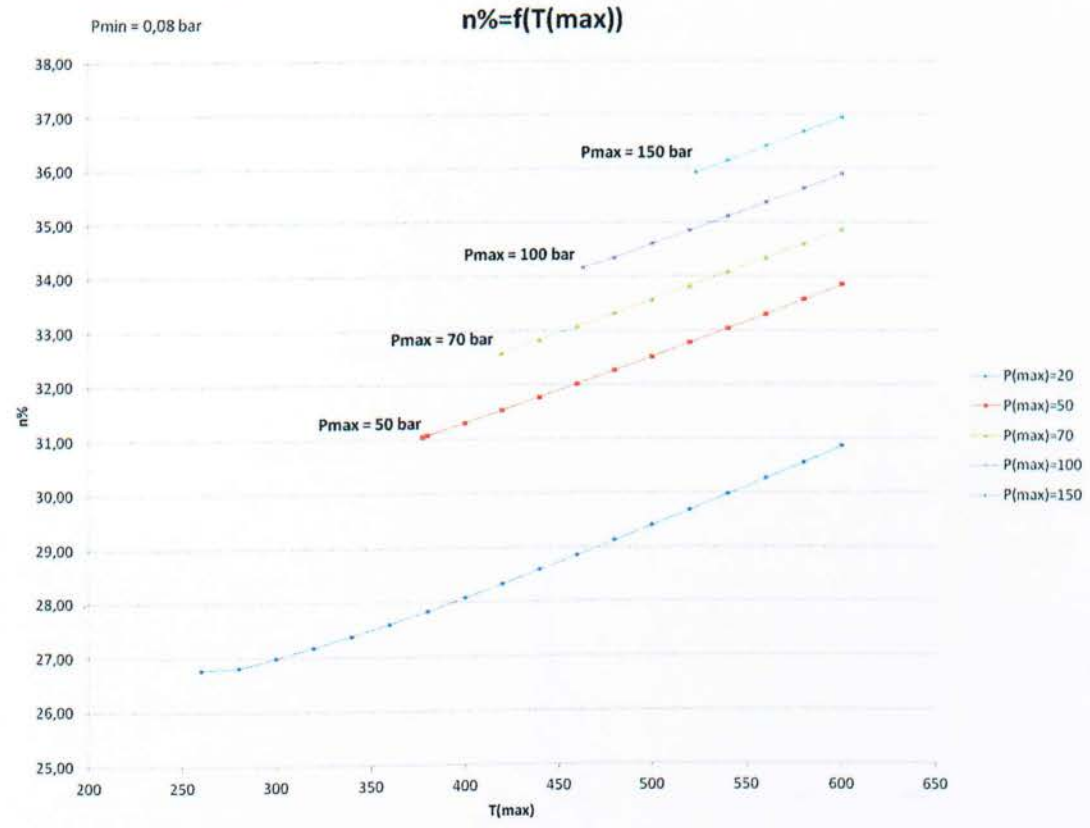
Για Pmin = 0,1 bar



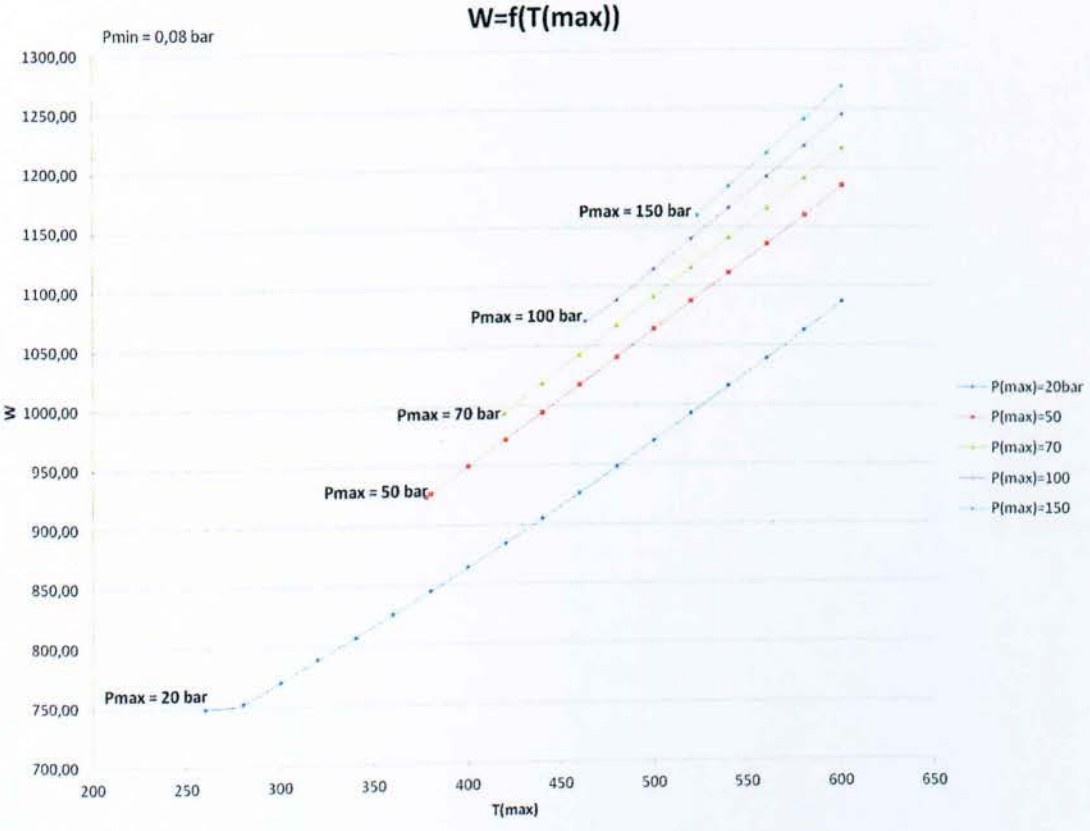
Για Pmin = 0,1 bar



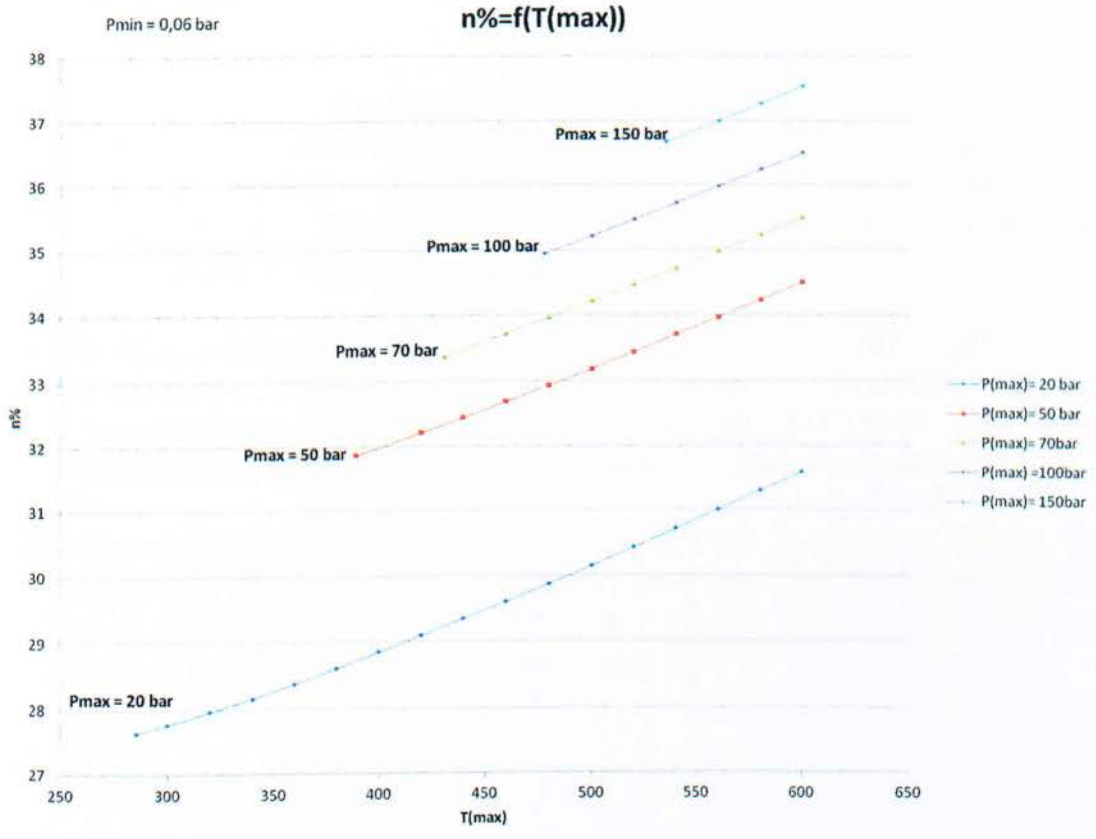
Για P_{min} στα 0,08 bar



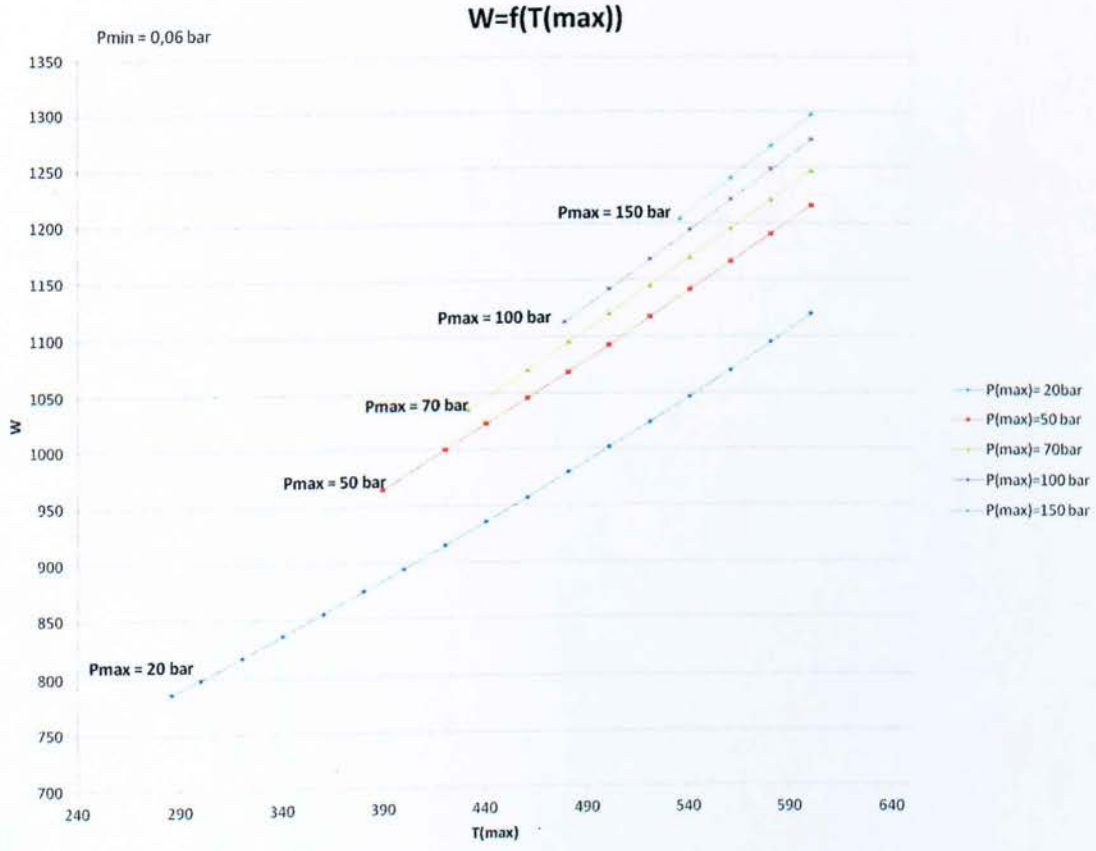
Για P_{min} στα 0,08 bar



Για P_{min} στα 0,06 bar



Για P_{min} στα 0,06 bar



Από τα πιο πάνω διαγράμματα, μπορούμε να κάνουμε τις εξής διαπιστώσεις:

- Για όλες τις ελάχιστες πιέσεις (0,1), (0,08), (0,06) bar, όσο αυξάνεται η μέγιστη πίεση, αυξάνεται ο βαθμός απόδοσης του κύκλου καθώς και το έργο του. Κάτι το οποίο ήταν αναμενόμενο αφού αυξάνεται το εμβαδόν του κύκλου στο διάγραμμα T-S δηλαδή το Wnet.

- Επίσης, έχοντας εξαρχής ορίσει ότι η ελάχιστη αποδεκτή ξηρότητα, είναι της τάξης του (0,85), παρατηρούμε ότι αυξανομένης της μέγιστης πίεσης, το σύστημά μας έχει αποδεκτή ξηρότητα, για όλο και μεγαλύτερη θερμοκρασία.

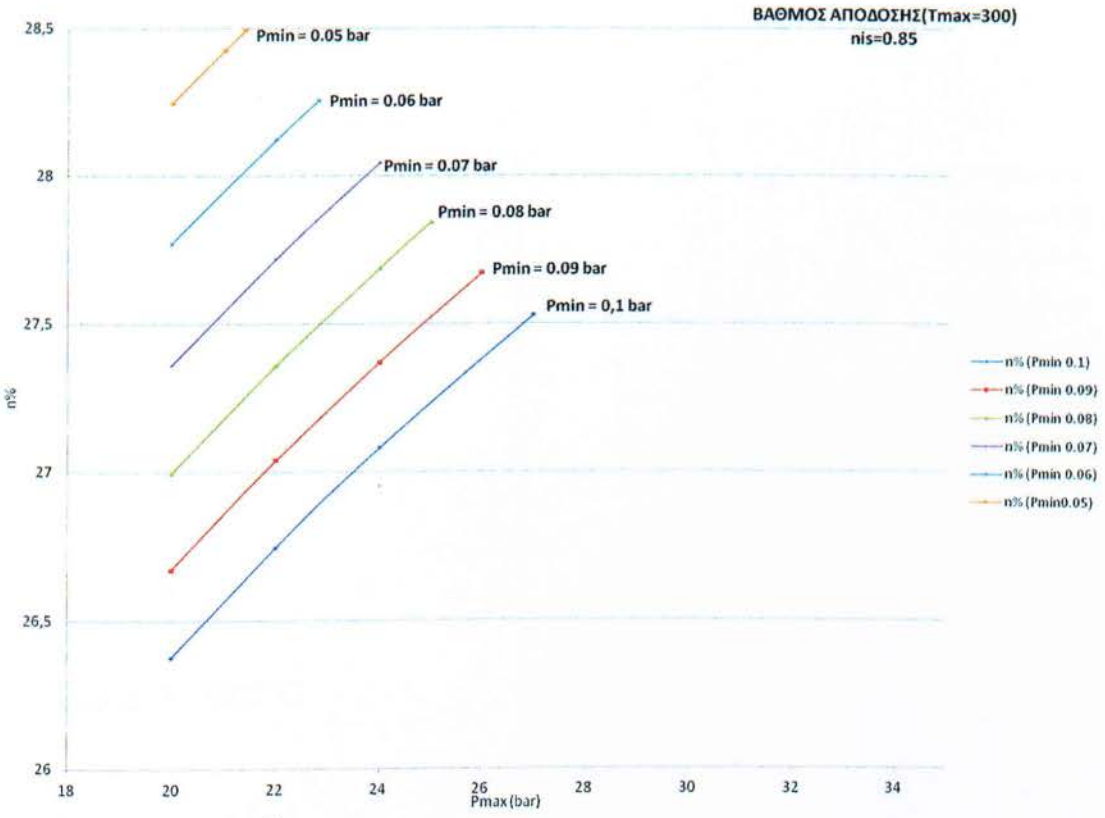
- Για παράδειγμα, με ελάχιστη πίεση 0,1bar & μέγιστη 20bar, το σύστημα ξεκινά να έχει αποδεκτή τιμή ξηρότητας στους 267°C, ενώ για ελάχιστη πίεση 0,1bar & μέγιστη 150bar το σύστημα ξεκινά τις αποδεκτές τιμές από τους 514°C.

Στο δεύτερο μέρος του απλού κύκλου, θέλοντας να μελετήσουμε πώς συμπεριφέρεται ο κύκλος **Rankine** υπό σταθερή μέγιστη θερμοκρασία, θα πειραματιστούμε με τρεις μέγιστες θερμοκρασίες: $\mathbf{T_{max1} = 300^oC}$, $\mathbf{T_{max2} = 400^oC}$, $\mathbf{T_{max3} = 500^oC}$.

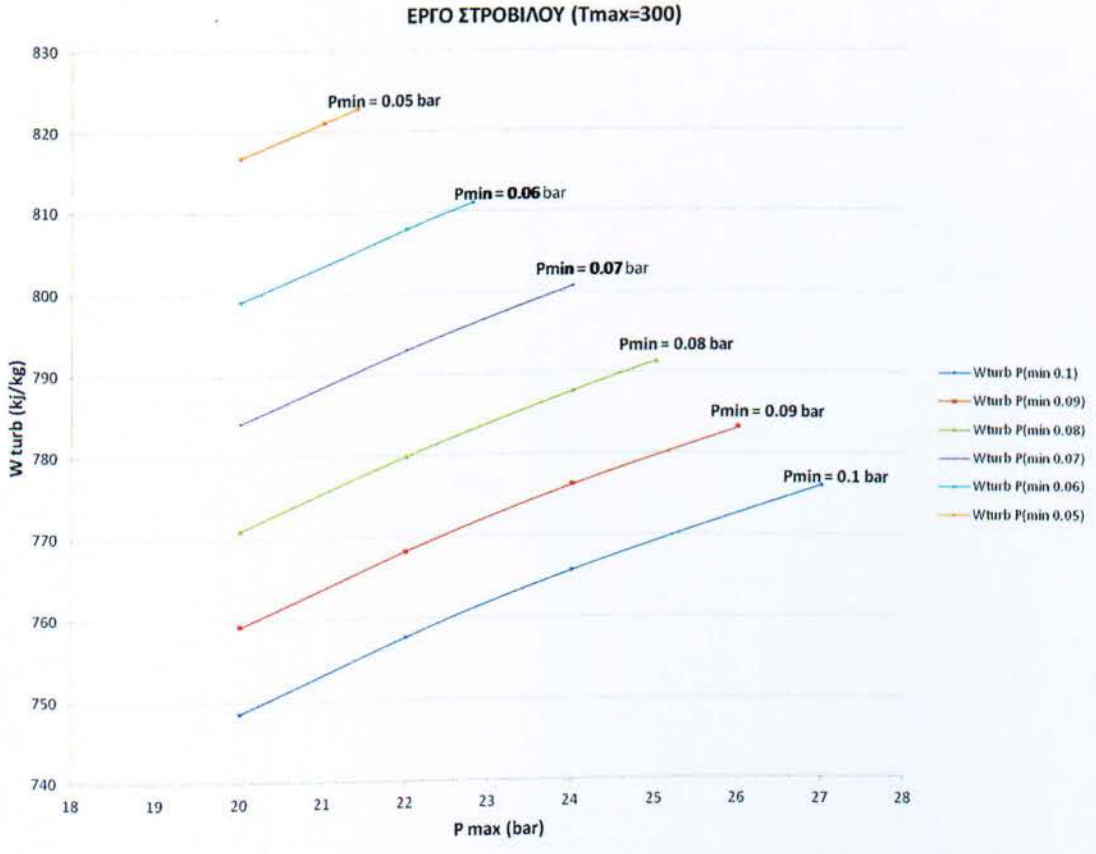
Έτσι, θα μεταβάλλουμε κάθε φορά την ελάχιστη πίεση του κύκλου, μέχρις ότου η μέγιστη πίεση θα οδηγεί τον κύκλο σε αποδεκτές τιμές γενικευμένης ξηρότητας.

Στην συνέχεια θα παρουσιάσουμε με γραφήματα, πως μεταβάλλονται οι αδιάστατοι παράμετροι $\mathbf{c_1}$, $\mathbf{c_2}$, $\mathbf{c_3}$, καθώς και το νέο μέγεθος **«ΓΕΝΙΚΕΥΜΕΝΗ ΞΗΡΟΤΗΤΑ» x***.

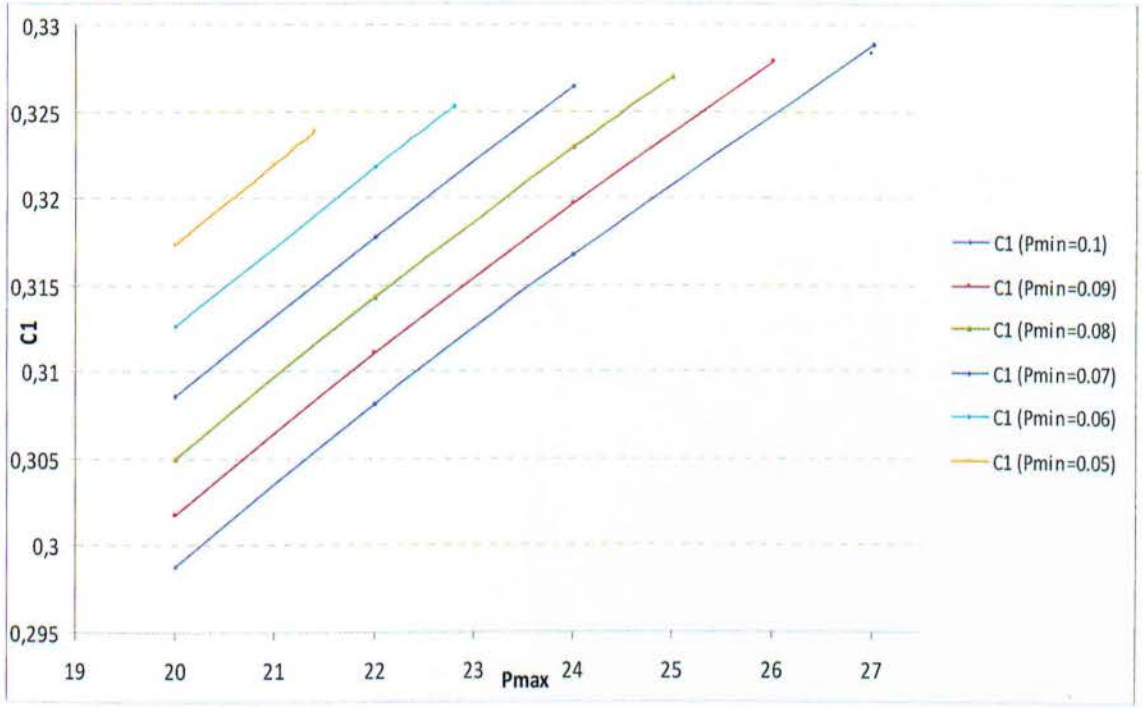
Για T_{max1} = 300°C



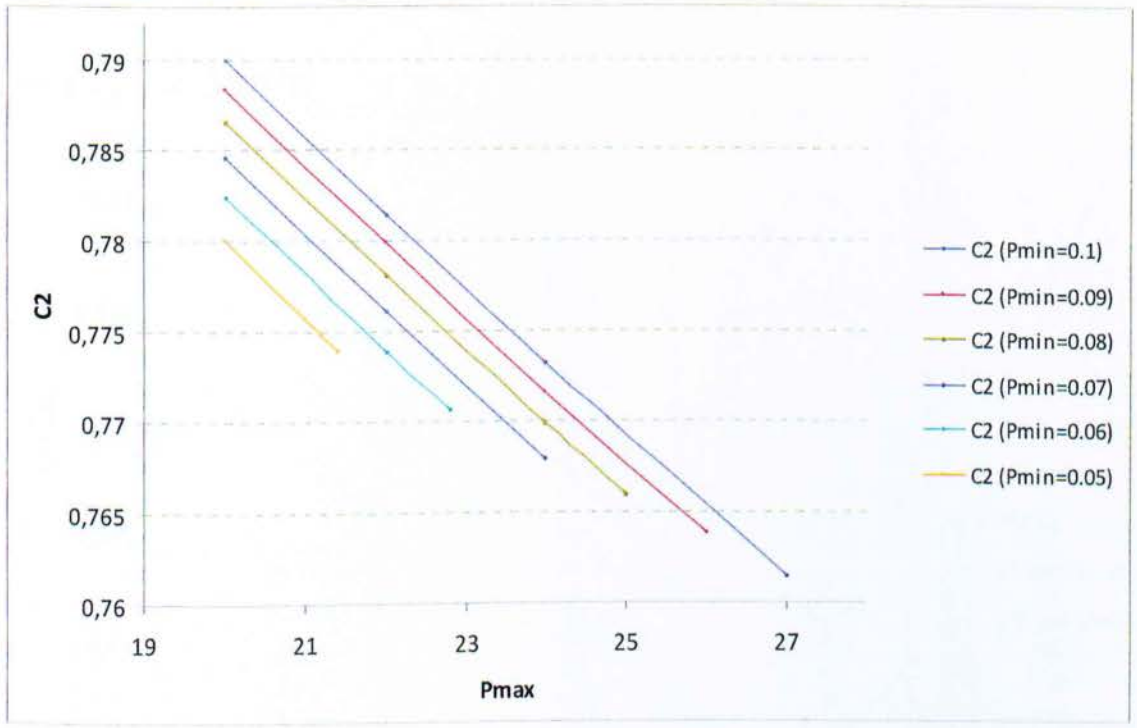
Για T_{max1} = 300°C



Για T_{max1} = 300°C

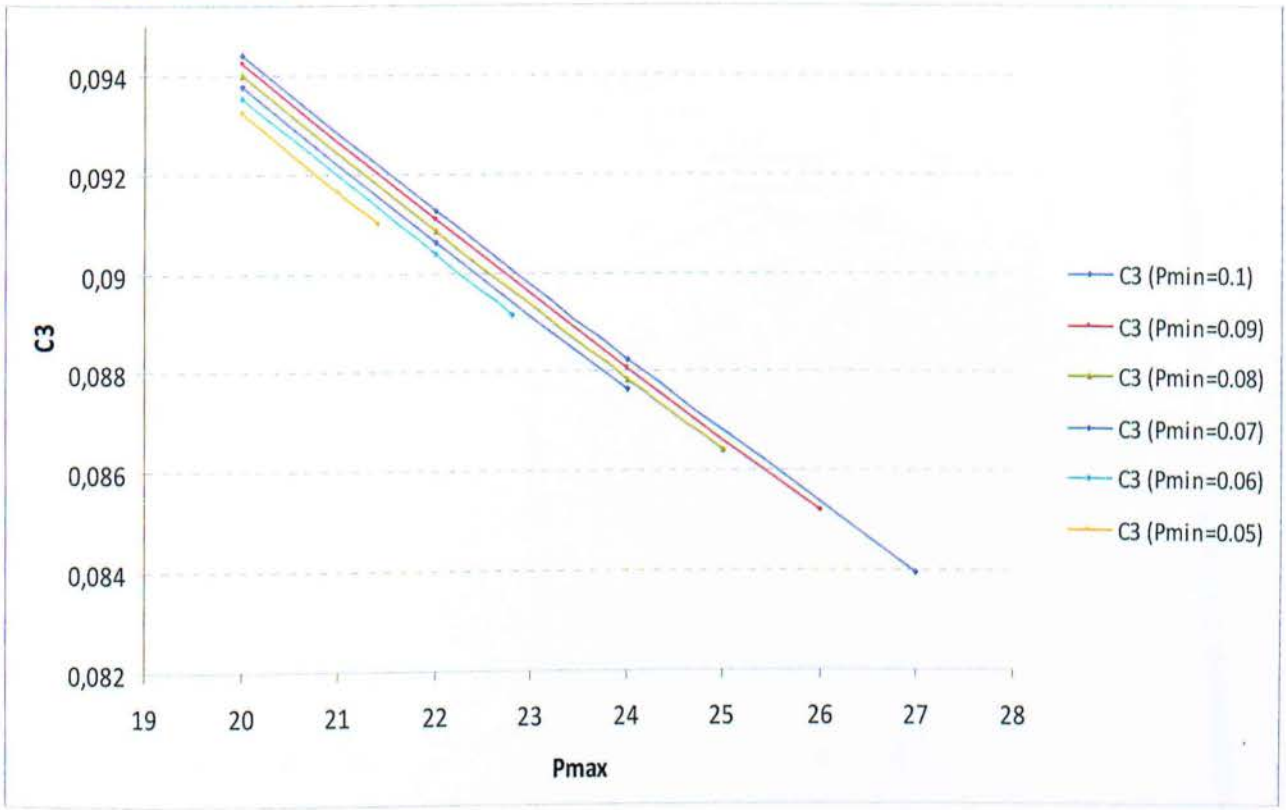


Για T_{max1} = 300°C

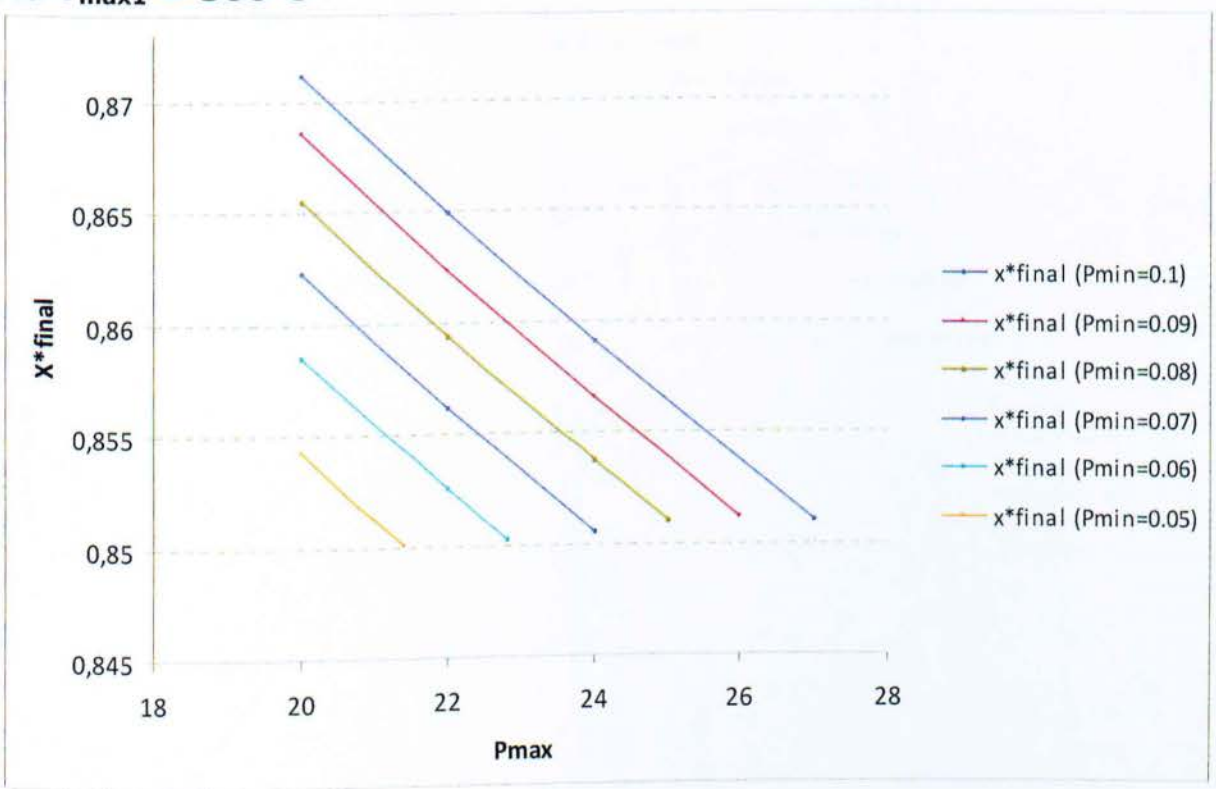


ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ
ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ

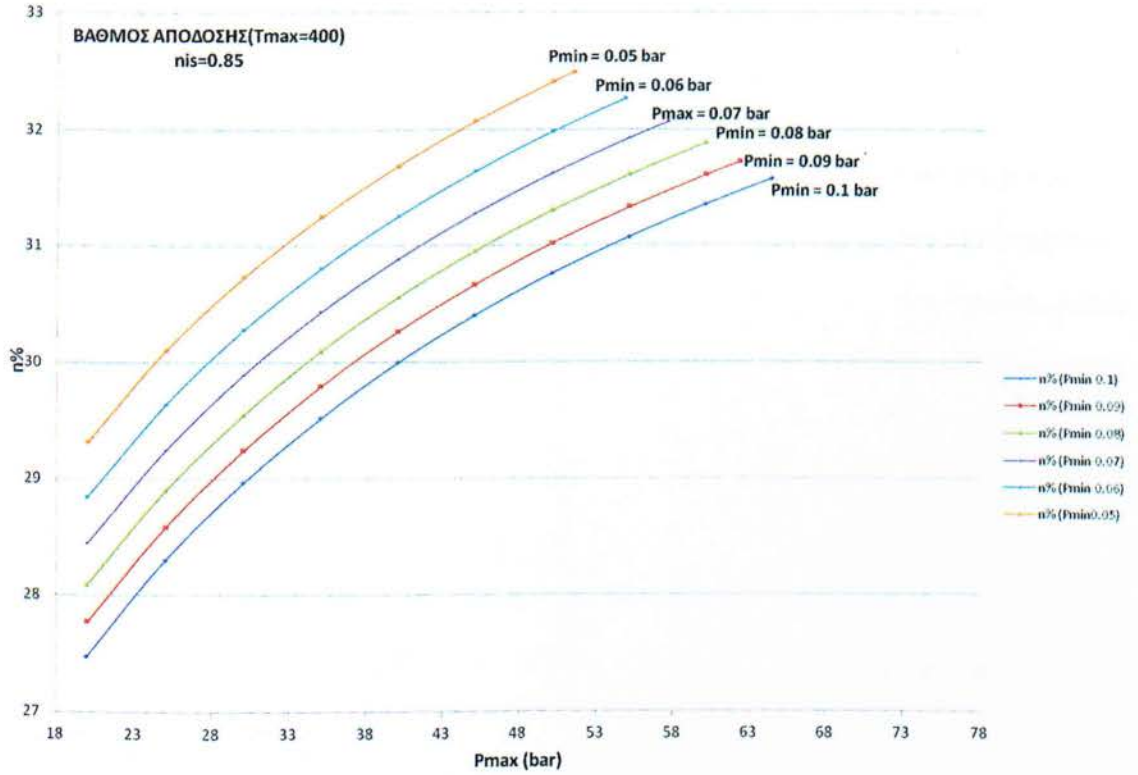
Για T_{max1} = 300°C



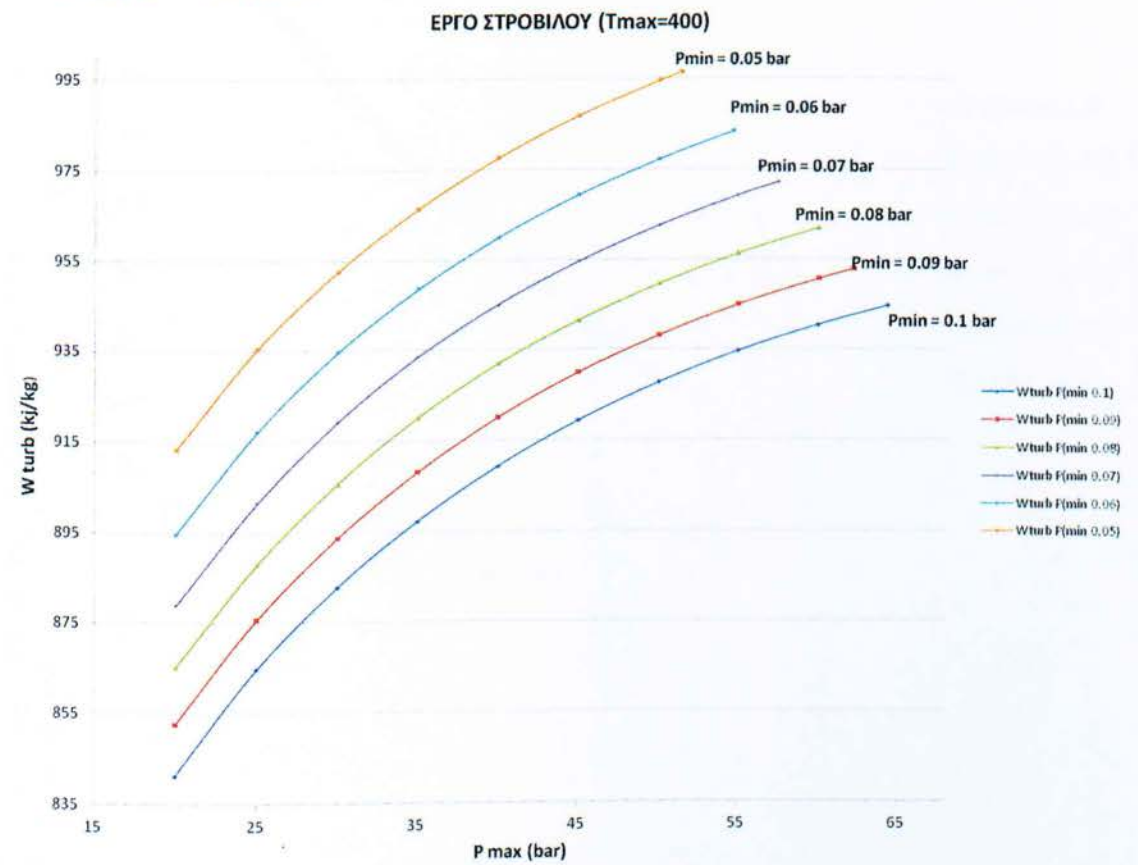
Για T_{max1} = 300°C



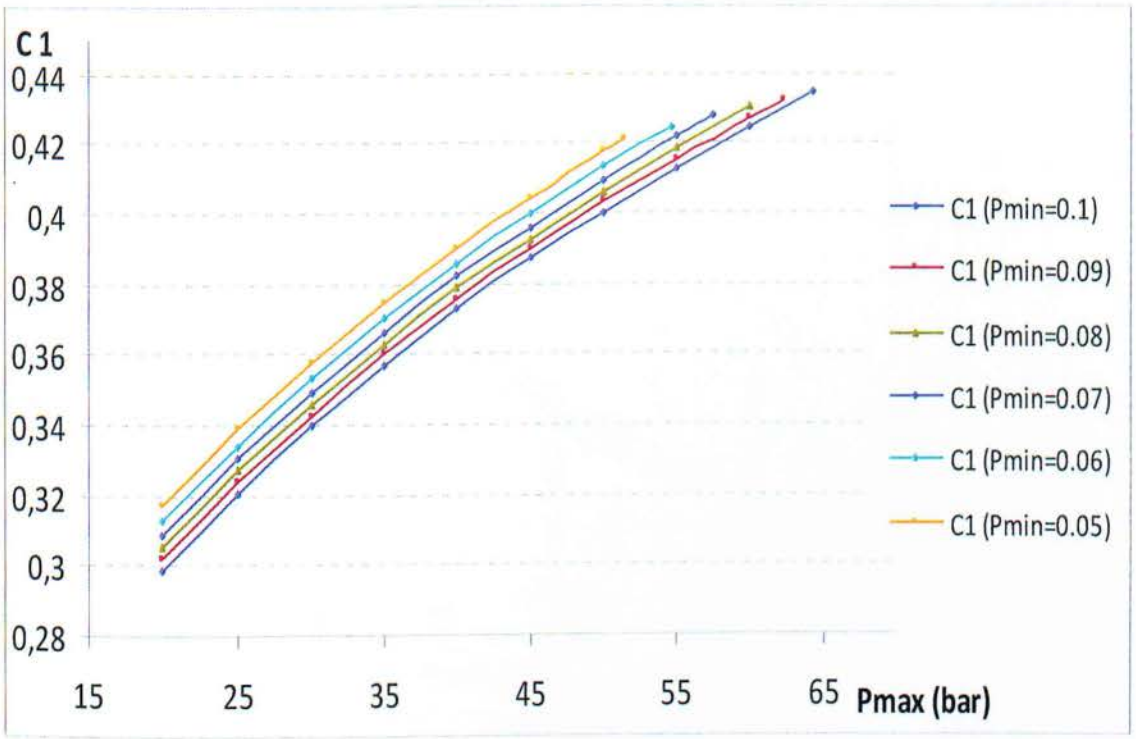
Για T_{max1} = 400°C



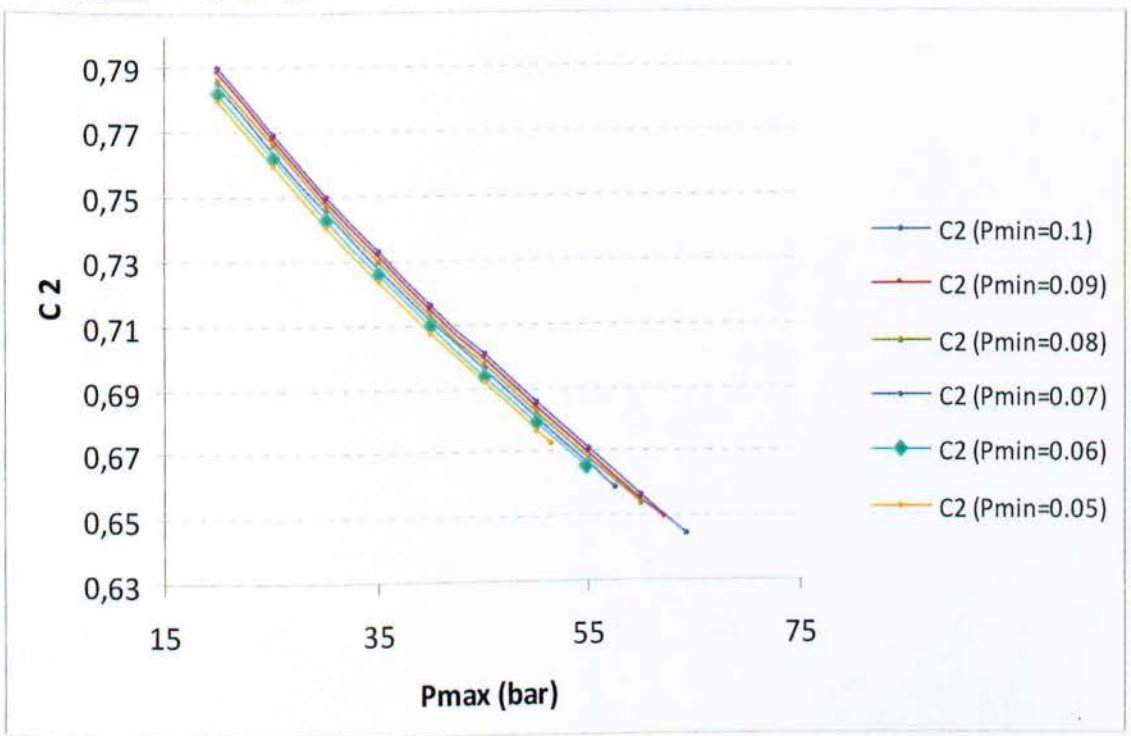
Για T_{max1} = 400°C



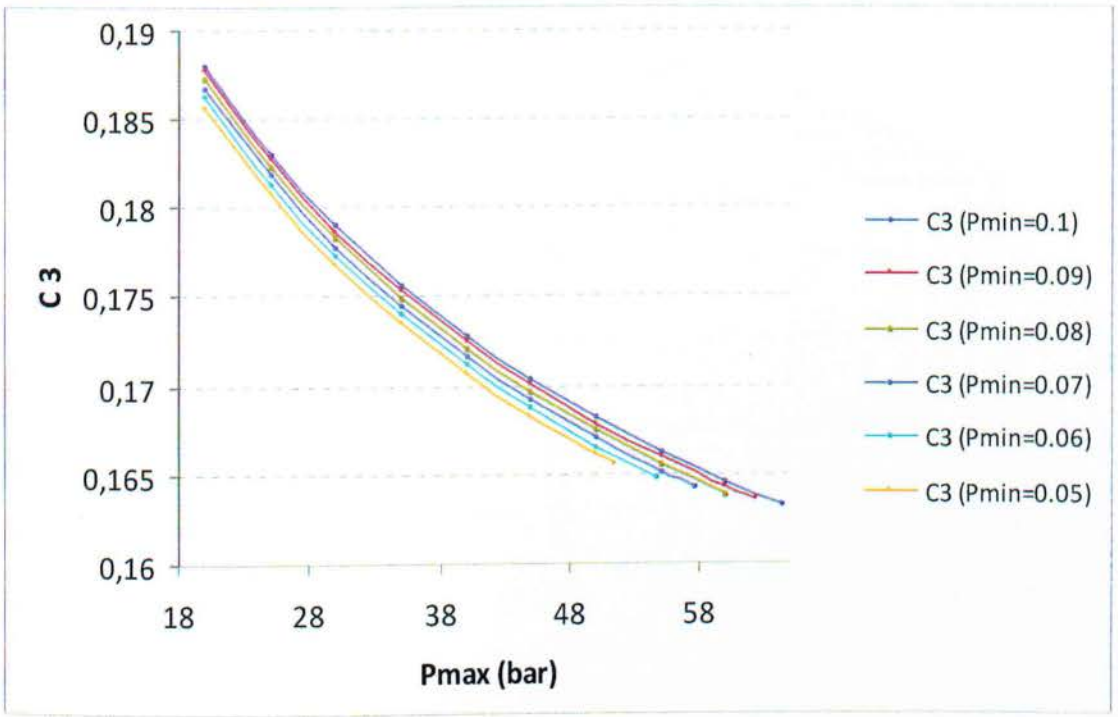
Για T_{max1} = 400°C



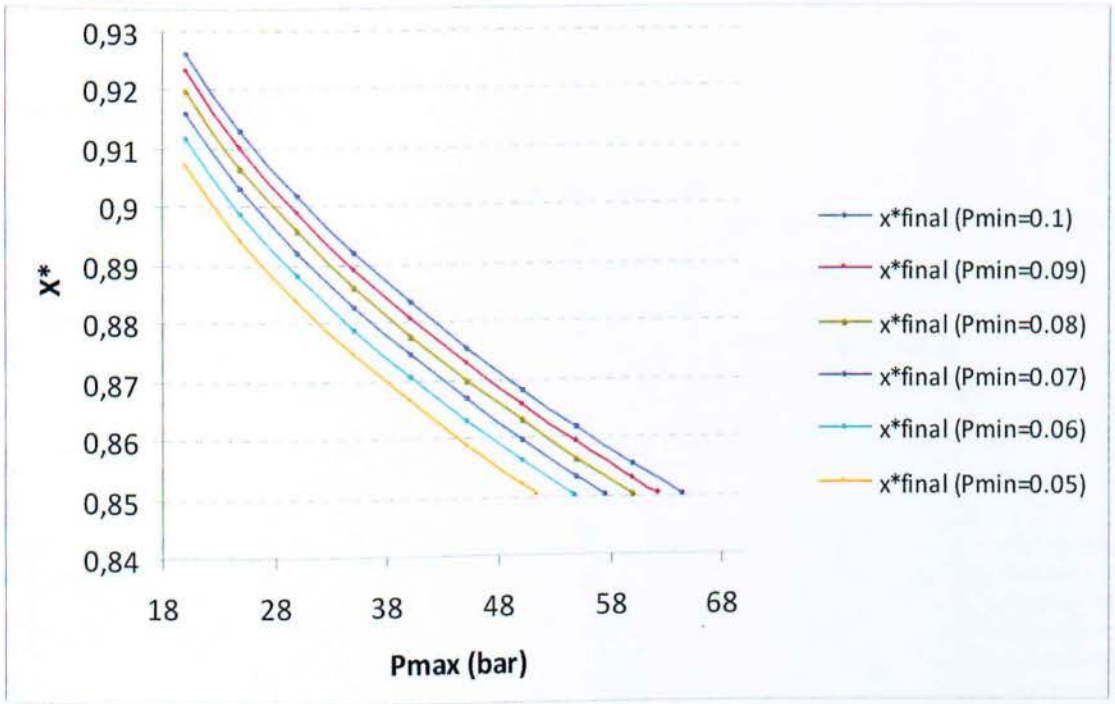
Για T_{max1} = 400°C



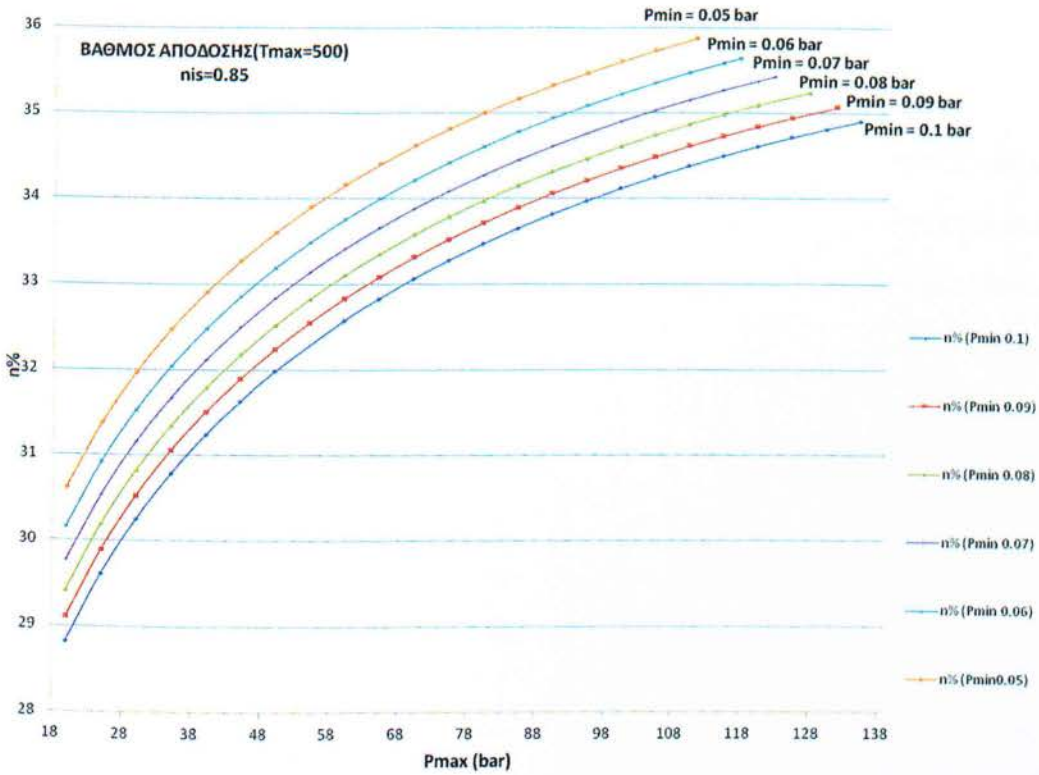
Για T_{max1} = 400°C



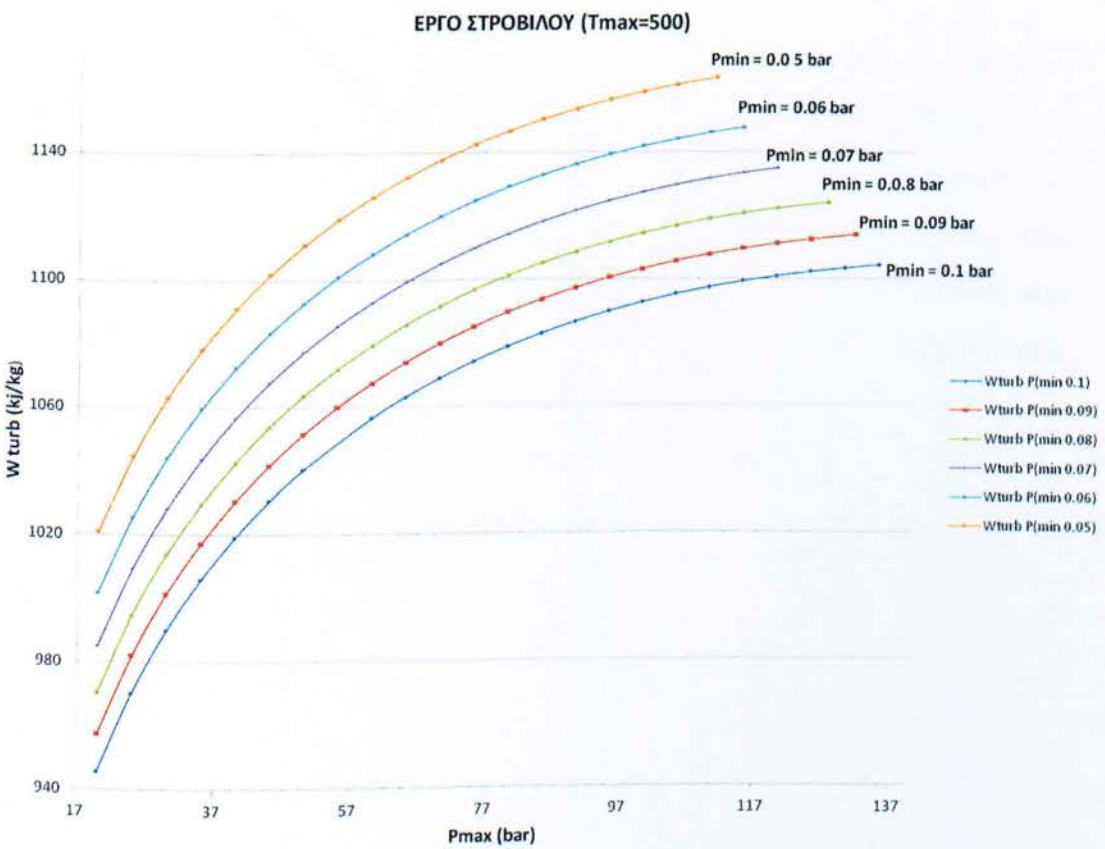
Για T_{max1} = 400°C



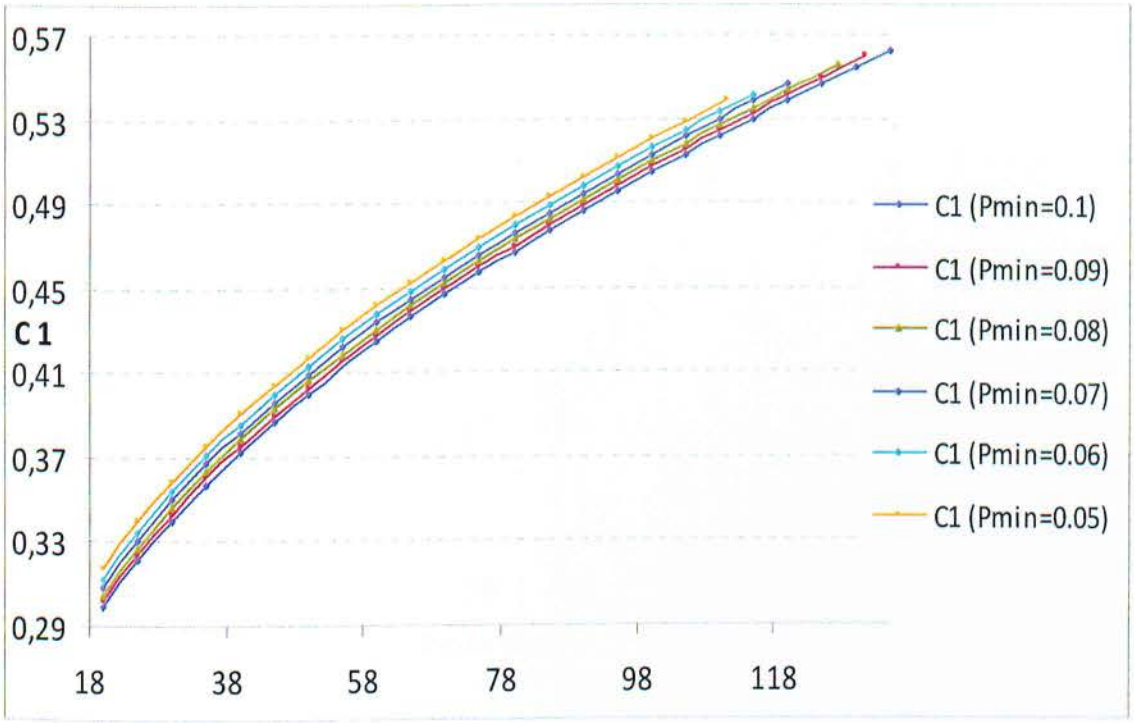
Για T_{max1} = 500°C



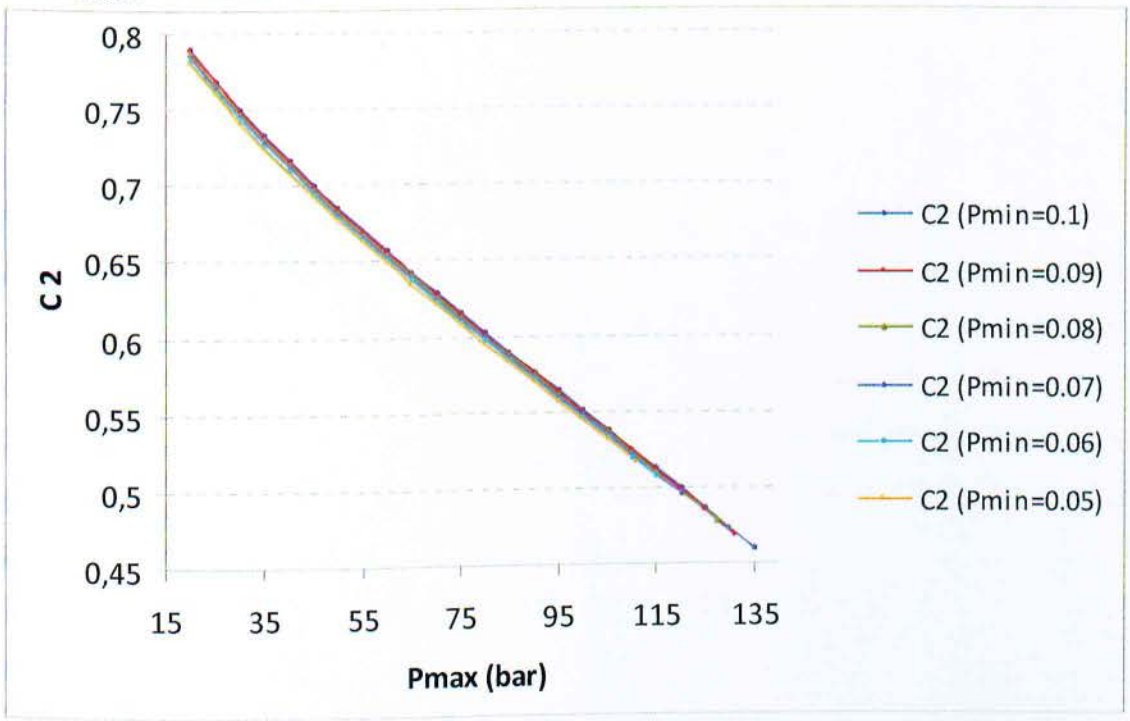
Για T_{max1} = 500°C



Για T_{max1} = 500°C

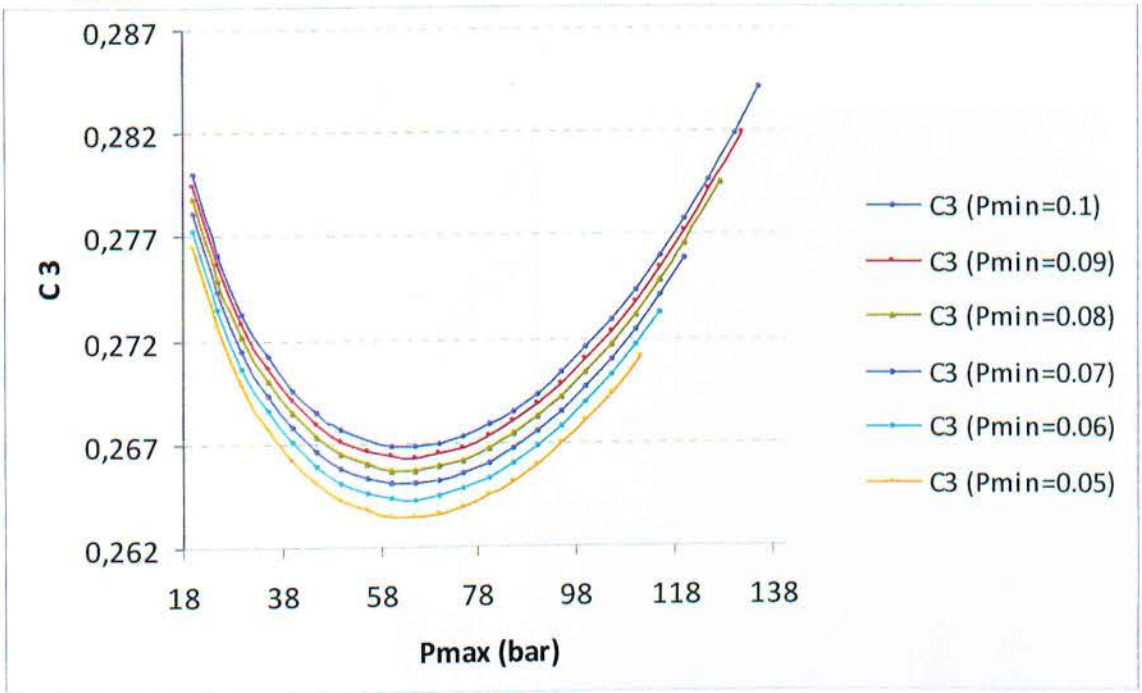


Για T_{max1} = 500°C

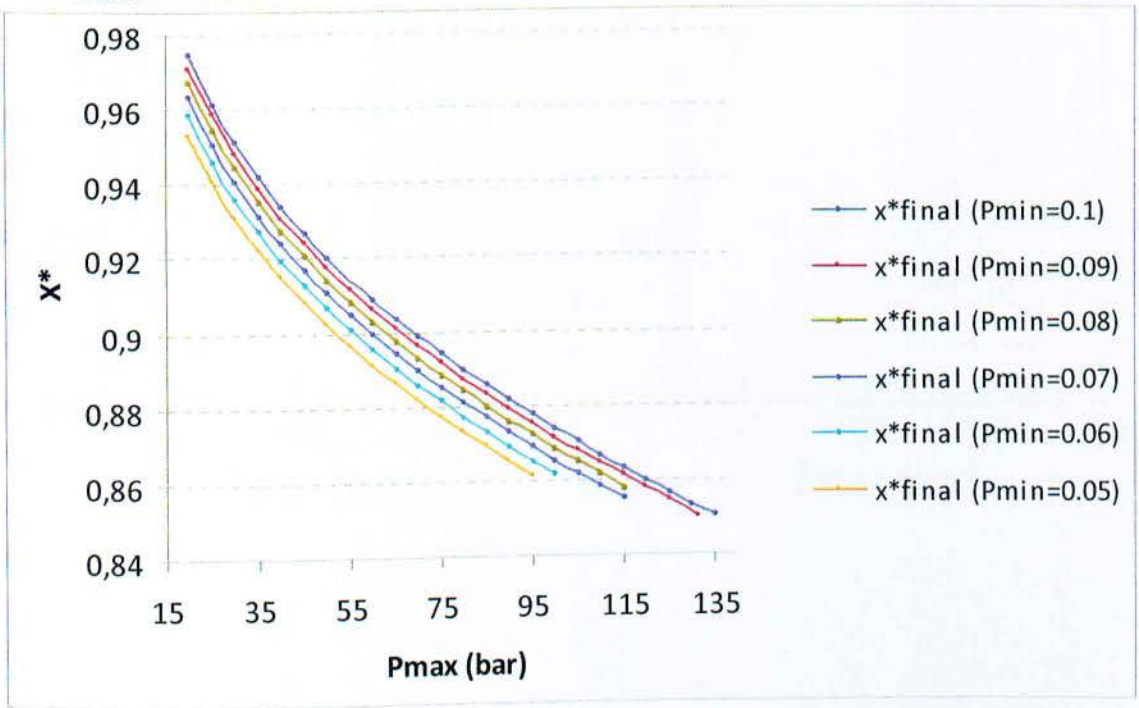


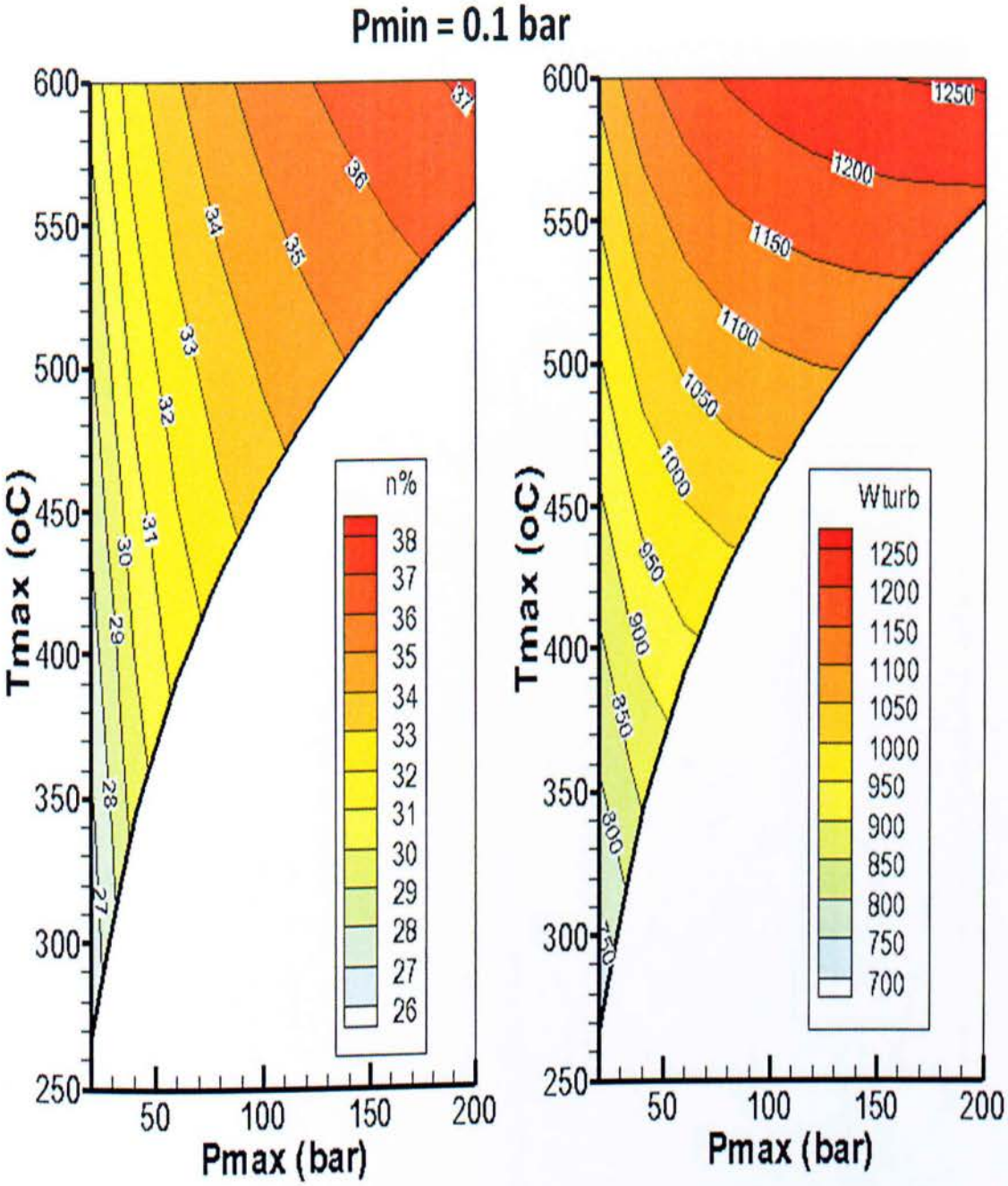
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ
ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ

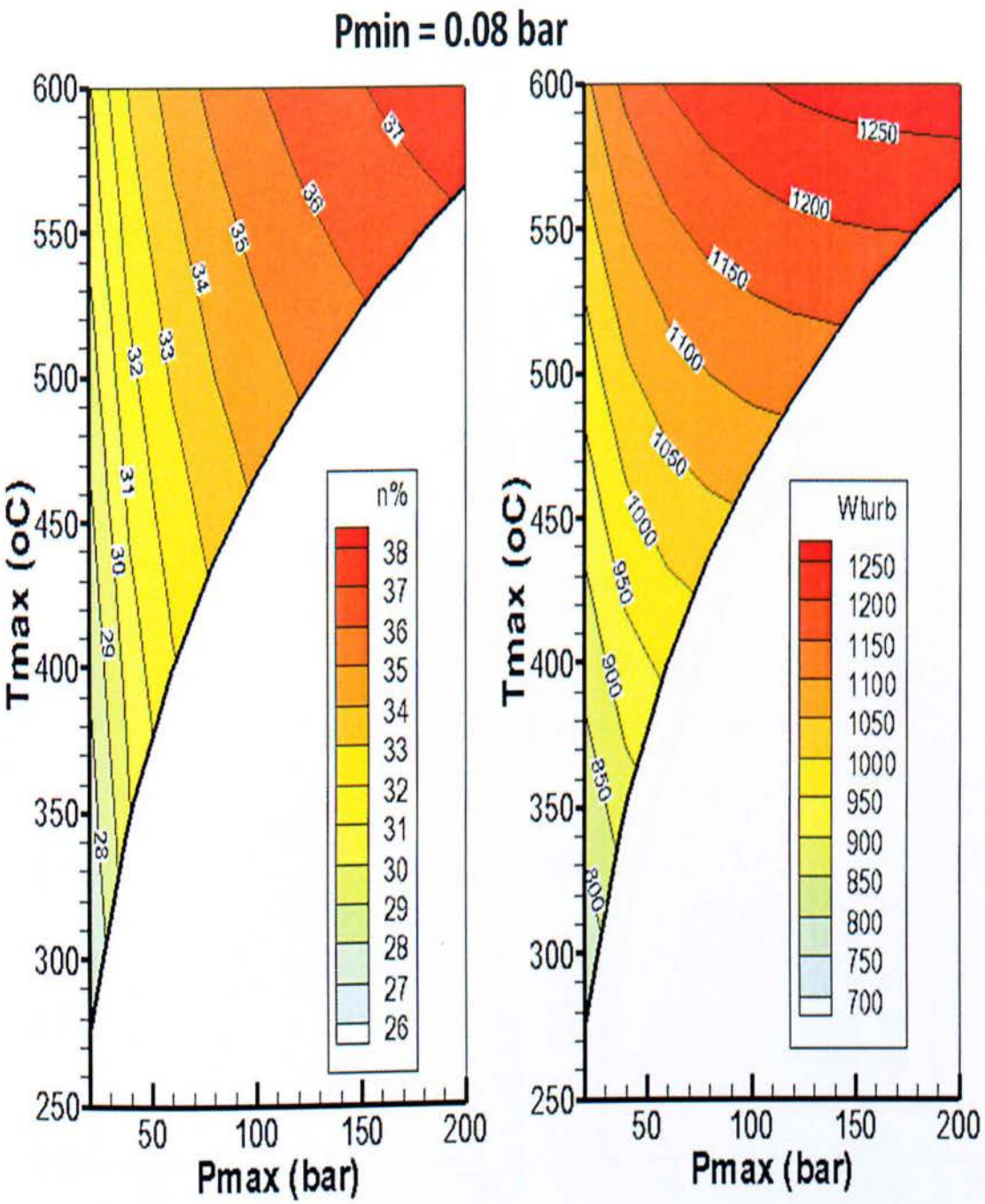
Για T_{max1} = 500°C

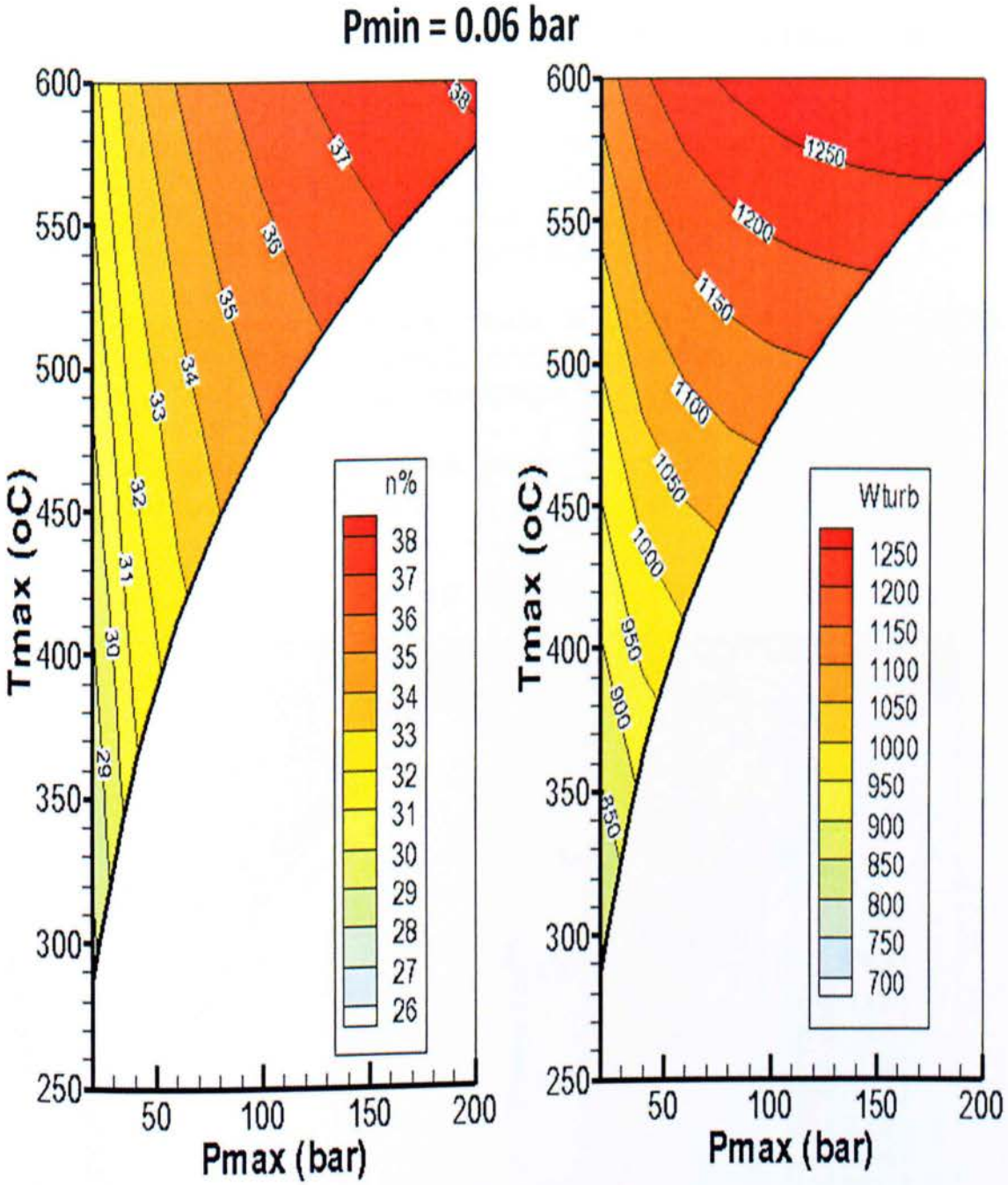


Για T_{max1} = 500°C




Pmin = 0.1 bar
Tmax (oC)
Pmax (bar)
n%
38
37
36
35
34
33
32
31
30
29
28
27
26
Wturb
1250
1200
1150
1100
1050
1000
950
900
850
800
750
700

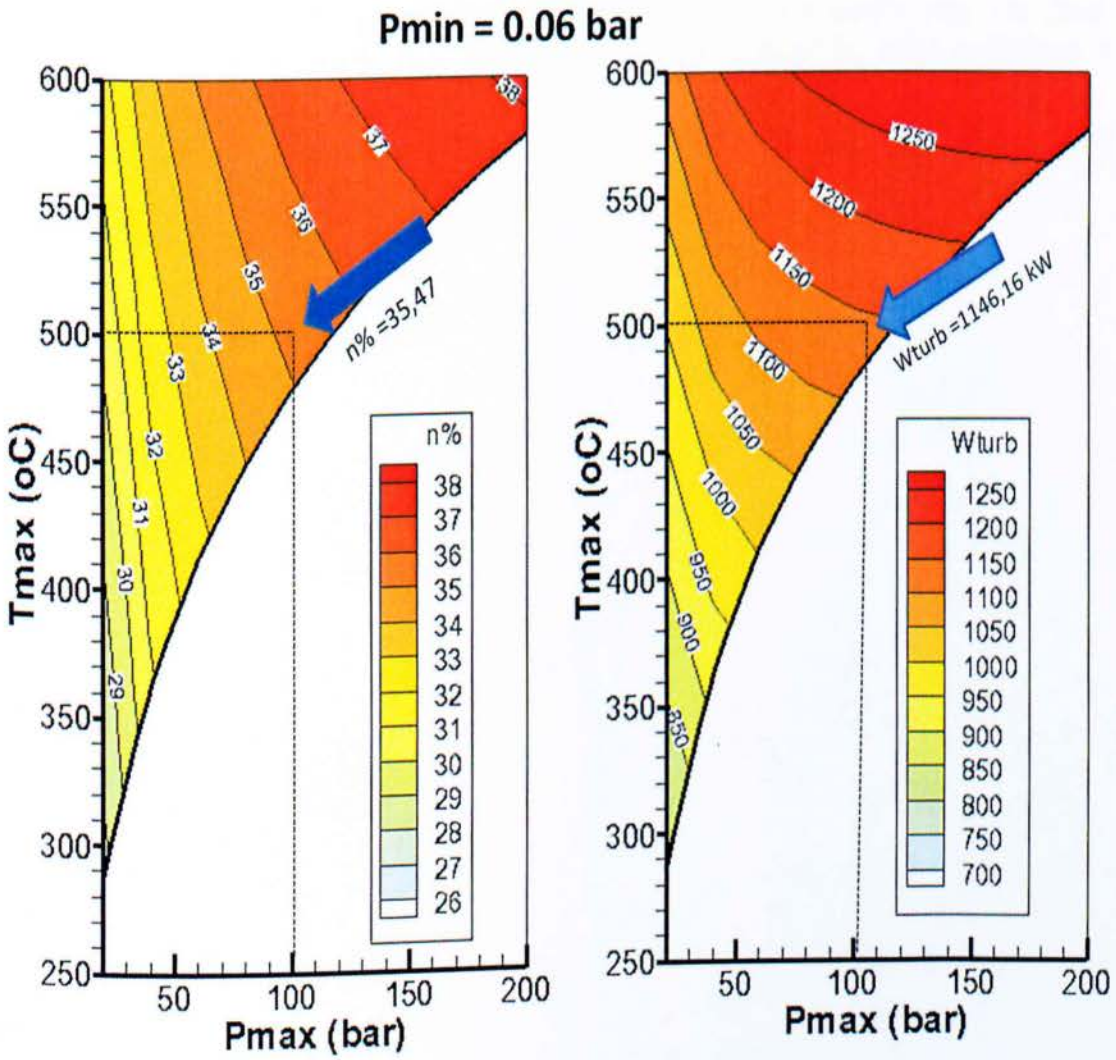

Pmin = 0.08 bar
Tmax (oC)
Pmax (bar)
n%
38
37
36
35
34
33
32
31
30
29
28
27
26
Wturb
1250
1200
1150
1100
1050
1000
950
900
850
800
750
700


Pmin = 0.06 bar
Tmax (oC)
Pmax (bar)
n%
38
37
36
35
34
33
32
31
30
29
28
27
26
Wturb
1250
1200
1150
1100
1050
1000
950
900
850
800
750
700

Σε αυτά τα διαγράμματα, τα οποία είναι και το αποτέλεσμα των δοκιμών και τα ουσιαστικά συμπεράσματα αυτών, πρέπει να τονίσουμε ότι οι λευκές περιοχές είναι τιμές μη αποδεκτές, όπως έχουμε από την αρχή ορίσει τις αποδεκτές τιμές στις δοκιμές μας.

Έτσι, ξέροντας την μέγιστη πίεση, την ελάχιστη πίεση και την μέγιστη θερμοκρασία, μέσω των πιο πάνω διαγραμμάτων μπορούμε να βρούμε τον βαθμό απόδοσης καθώς και το έργο, χωρίς να χρειαστεί να βρεθούν οι ενθαλπίες στο διάγραμμα Mollier, και να γίνουν οι χρονοβόρες μαθηματικές πράξεις.

Για παράδειγμα, στις συνθήκες **Pmin = 0,06 bar – Pmax = 100 bar – Tmax = 500°C**, ο βαθμός απόδοσης βρίσκεται μεταξύ του **35 & 36 %** ενώ το έργο του στροβίλου μεταξύ των **1100 & 1150 Kj/Kg**.
Δηλαδή, μπορούμε να γνωρίζουμε σε τι πεδίο τιμών κυμαίνεται ο βαθμός απόδοσης και το έργο.



ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΠΛΟΥ ΚΥΚΛΟΥ

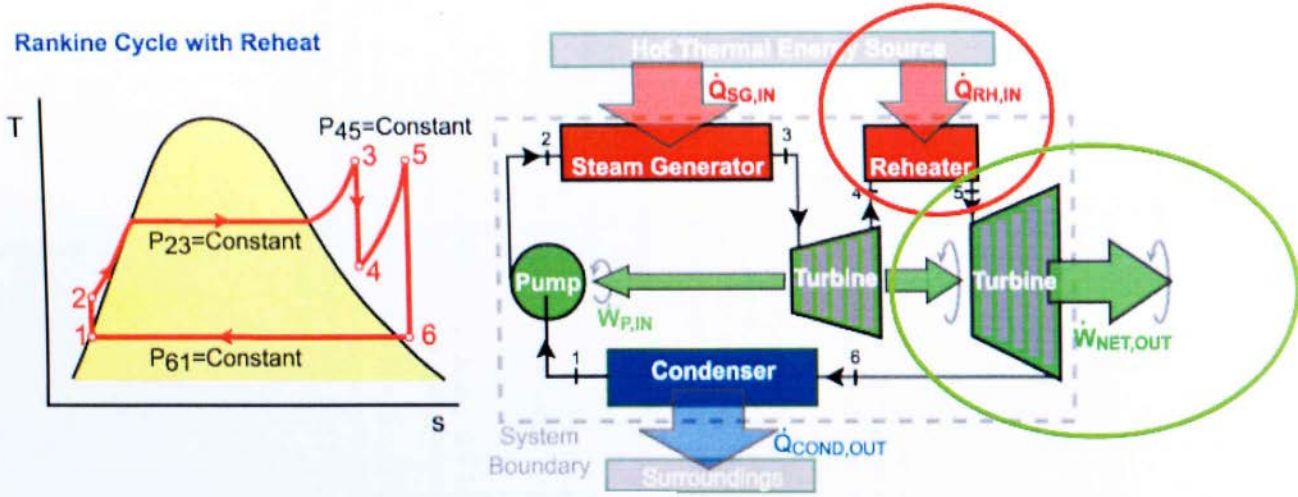
Συνειδητοποιούμε πλέον, πόσο σημαντικός είναι ο ρόλος των αδιάστατων μεταβλητών c_1, c_2, c_3, x^*, για τον **κύκλο Rankine** και εν συνεχεία για μία οικονομοτεχνική μελέτη ενός ατμοστροβίλου.

Με λίγα λόγια, μπορούμε να προσδιορίσουμε από τα στοιχεία του κατασκευαστή, για ένα ατμοστρόβιλο, που αποδίδει καλύτερα, ποιό είναι το μέγιστο έργο και ο βαθμός απόδοσης και σε ποιές συνθήκες, χωρίς καν να μπει σε λειτουργία.

Επίσης μπορούμε να επιλέξουμε ανάμεσα σε δύο ή περισσότερους ατμοστροβίλους, ποιος λειτουργεί καλύτερα στις συνθήκες που εμείς θέλουμε ή μπορούμε να παράγουμε **(Pmax, Pmin, Tmax, Tmin)**.

Για τα c_1, c_2, c_3, χρειάζεται μια περεταίρω στατιστική επεξεργασία, η οποία προτείνεται ως μελλοντική εργασία. Σκοπός αυτής της επεξεργασίας είναι η δημιουργία μαθηματικών (εμπειρικών) τύπων, με τους οποίους θα μπορούμε να βρίσκουμε το έργο και το βαθμό απόδοσης ενός στροβίλου, θέτοντας τις μεταβλητές των πιέσεων και της θερμοκρασίας.

ΚΥΚΛΟΣ RANKINE
ΜΕ ΑΝΑΘΕΡΜΑΝΣΗ



Προσπαθώντας να βελτιώσουμε την λειτουργία και την απόδοση του απλού κύκλου Rankine, από την εποχή της αρχικής λειτουργίας του μέχρι σήμερα, προχωρήσαμε σε διάφορες τροποποιήσεις ή δοκιμές. Μία από αυτές είναι και η αναθέρμανση.

Η αναθέρμανση αναπτύχθηκε προς τον σκοπό της εκμετάλλευσης του πλεονεκτήματος της αύξησης της απόδοσης του κύκλου Rankine, σε υψηλές πιέσεις και προς αποφυγή περίσσιας υγρότητας στις τελευταίες βαθμίδες του στροβίλου χαμηλής πίεσης.

Το μοναδικό γνώρισμα του κύκλου αυτού είναι ότι ο ατμός μετά την πρώτη εκτόνωση και απόδοση του έργου, στον στρόβιλο υψηλής πίεσης αναθερμαίνεται στον λέβητα σε μια χωριστή δέσμη αυλών, με σταθερή πίεση και θερμοκρασία, συνήθως της αρχικής του υπερθέρμανσης και στην συνέχεια εισάγεται και εκτονώνεται σε άλλο στρόβιλο καλούμενο στρόβιλο χαμηλής πίεσης μέχρι την πίεση του ψυγείου.

Από το διάγραμμα T-S (θερμοκρασίας – εντροπίας), είναι φανερό ότι ένα μικρό κέρδος απόδοσης προέρχεται από την υπερθέρμανση του ατμού, γιατί ο μέσος όρος θερμοκρασίας κατά την διάρκεια της οποίας προσφέρεται θερμότητα, είναι σε μικρά όρια μεταβαλλόμενος.

Ο λόγος για τον οποίο προχωρούμε σε αναθέρμανση, είναι η ανθεκτικότητα των μετάλλων στις θερμοκρασιακές τάσεις. Έτσι αν αυτή ήταν επαρκώς ικανή, ο απλός κύκλος θα ήταν περισσότερο αποδοτικός, με την παροχή ατμού στον υψηλότερο βαθμό υπερθέρμανσης και καμία ανάγκη χρήσης της υπερθέρμανσης δεν θα επιβαλλόταν.

Οι διεργασίες του κύκλου Rankine με αναθέρμανση δεν διαφέρουν πολύ από του απλού κύκλου, εκτός από το προφανές, την αναθέρμανση.
Όπως φαίνεται και στο πιο πάνω σχήμα, ο ατμός μετά το σημείο 3, επιστρέφει στο λέβητα, σε διαφορετικούς αυλούς και επιστρέφει στον στρόβιλο χαμηλής πίεσης, στην ίδια θερμοκρασία που είχε πρίν την αναθέρμανση και κατά την έξοδό του από τον λέβητα.

Στην παραπάνω ανάλυση μπορούμε να συμπεριλάβουμε και την θερμότητα αναθέρμανσης. Οδηγούμαστε έτσι στη γενική σχέση:

$$c_1 = \frac{h'_{\max} - h_2}{h_{fg,\min}}$$

$$c_2 = \frac{h_{fg,\max}}{h_{fg,\min}}$$

$$c_3 = \frac{h_3 - h''_{\max}}{h_{fg,\min}}$$

$$c_3 = \frac{h_5 - h_4}{h_{fg,\min}}$$

Συνοψίζοντας, ο βαθμός απόδοσης εκφράζεται με τη σχέση:

$$\eta = 1 - \frac{x^*}{c_1 + c_2 + c_3 + c_4}$$

όπου:

x^*= τελική κατάσταση ατμού
c_1= αδιάστατη θερμότητα προθέρμανσης
c_2= αδιάστατη λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης
c_3= αδιάστατη θερμότητα υπερθέρμανσης
c_4= αδιάστατη θερμότητα αναθέρμανσης (0 για απλό κύκλο)

Επίσης, θα χρησιμοποιήσουμε ένα νέο μέγεθος, αδιάστατο, το οποίο ονομάζουμε **«ΑΔΙΑΣΤΑΤΗ ΠΙΕΣΗ»** και το συμβολίζουμε ως $\mathbf{P^*}$.

Ο ορισμός του νέου μεγέθους $\mathbf{P^* = (P - P_{min}) / (P_{max} - P_{min})}$ και μας δίνει την βέλτιστη πίεση αναθέρμανσης σε σχέση με τις $\mathbf{P_{max} - P_{min}}$.

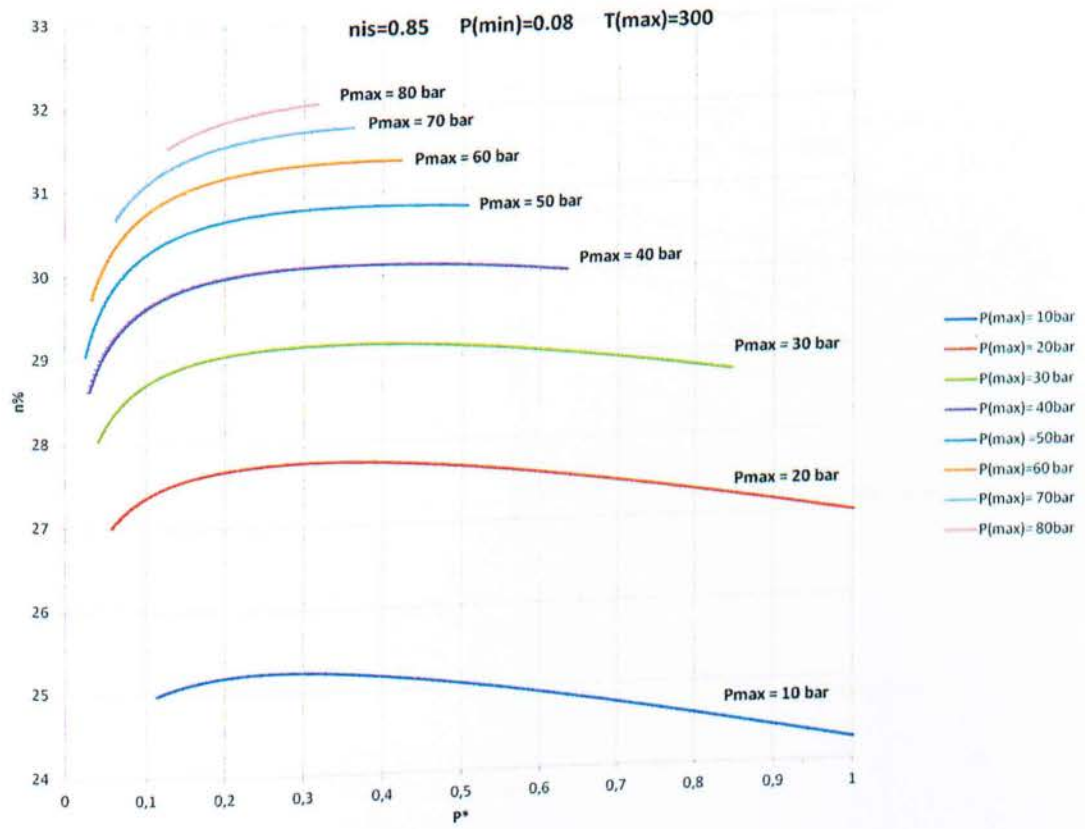
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΚΥΚΛΟΥ RANKINE ΜΕ ΑΝΑΘΕΡΜΑΝΣΗ

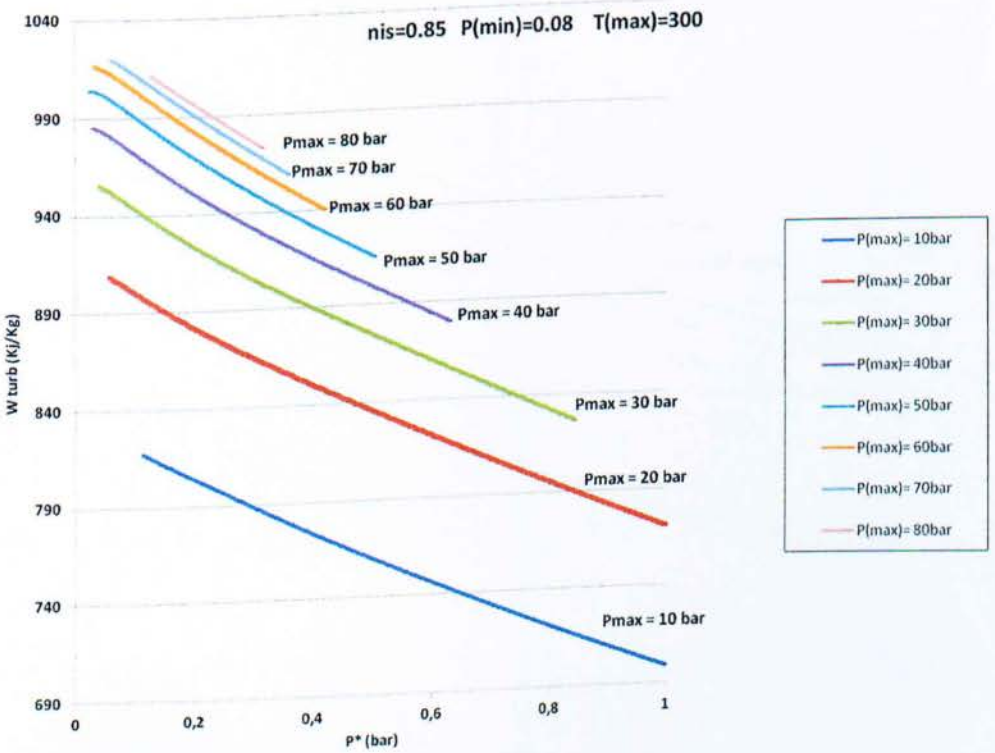
Ξεκινώντας τις δοκιμές μας, κρατήσαμε σταθερά κάποια μεγέθη, προσπαθώντας να μελετήσουμε την συμπεριφορά του απλού Κύκλου Rankine, μεταβάλλοντας τα υπόλοιπα.
Αρχικά λοιπόν, παραμένει σταθερή η ελάχιστη πίεση του συστήματος $\mathbf{P_{min}}$ στα **0,08 bar**.
Στη συνέχεια, επιλέγοντας κάθε φορά μια διαφορετική μέγιστη πίεση $\mathbf{P_{max}}$, (οι τιμές της οποίας είναι οι ακόλουθες):
10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 bar, επιλέγουμε τρείς βασικές θερμοκρασίες (**300 – 400 - 500°C**) ως θερμοκρασία του συστήματος, προσέχοντας πάντα ο βαθμός απόδοσης να βρίσκεται στις επιτρεπόμενες τιμές. Έτσι παρακολουθούμε τον βαθμό απόδοσης καθώς και το νέο μέγεθος που έχουμε ορίσει, την αδιάστατη πίεση P*.

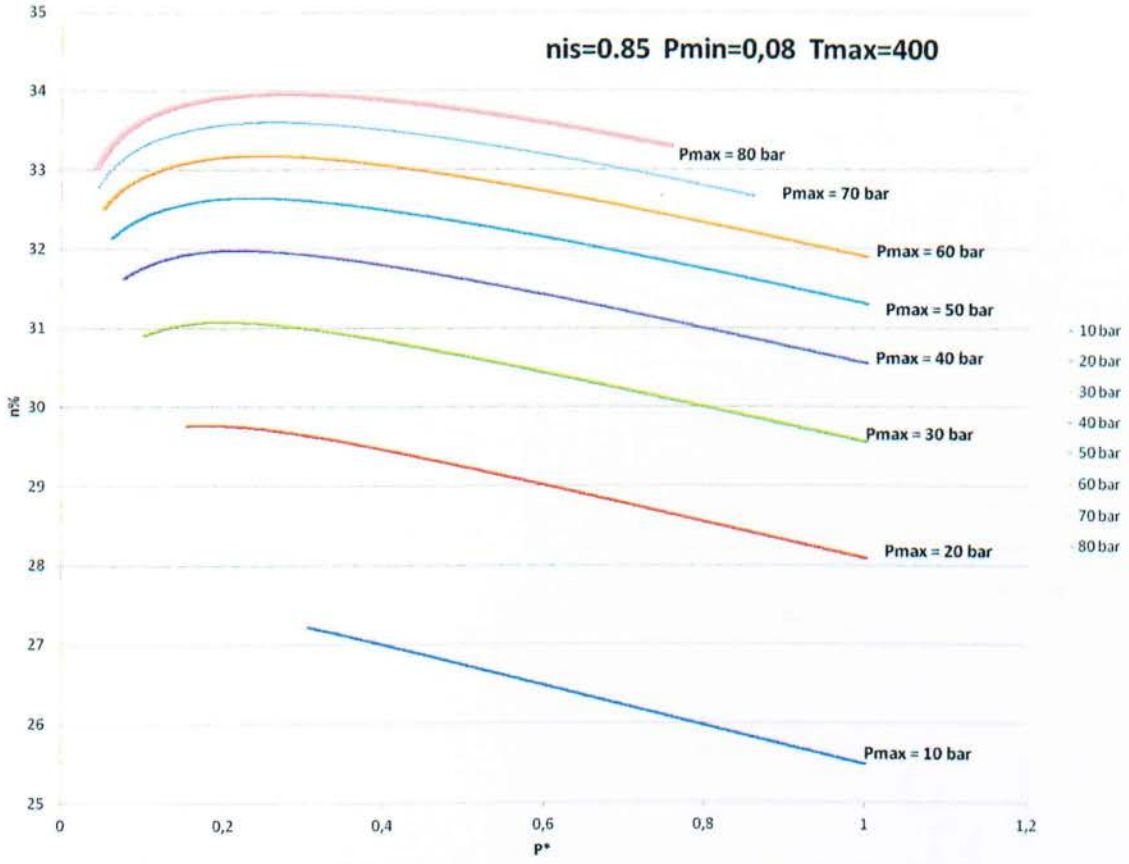
Με τις τιμές των δοκιμών δημιουργούμε δύο ειδών διαγράμματα:

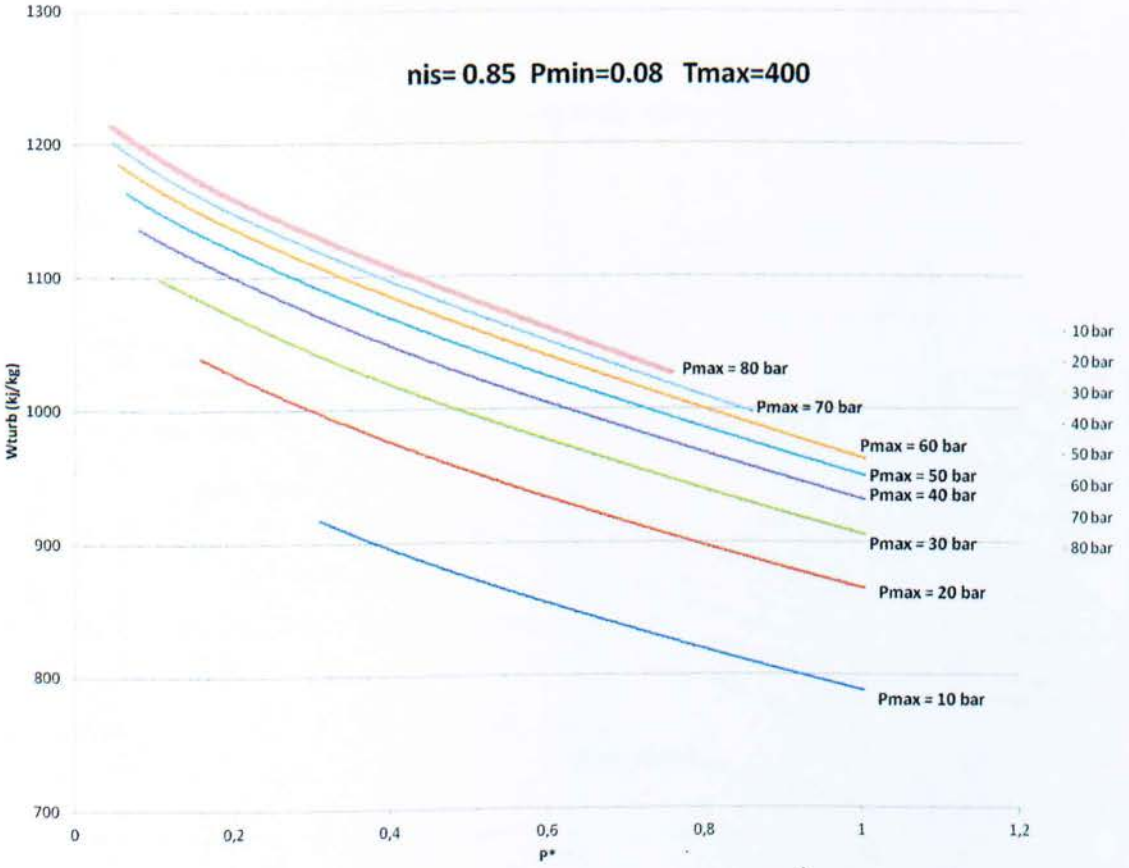
Το πρώτο διάγραμμα, απεικονίζει τον βαθμό απόδοσης του κύκλου (**η%**), συναρτήσει της εκάστοτε μέγιστης θερμοκρασίας ($\mathbf{T_{max}}$).

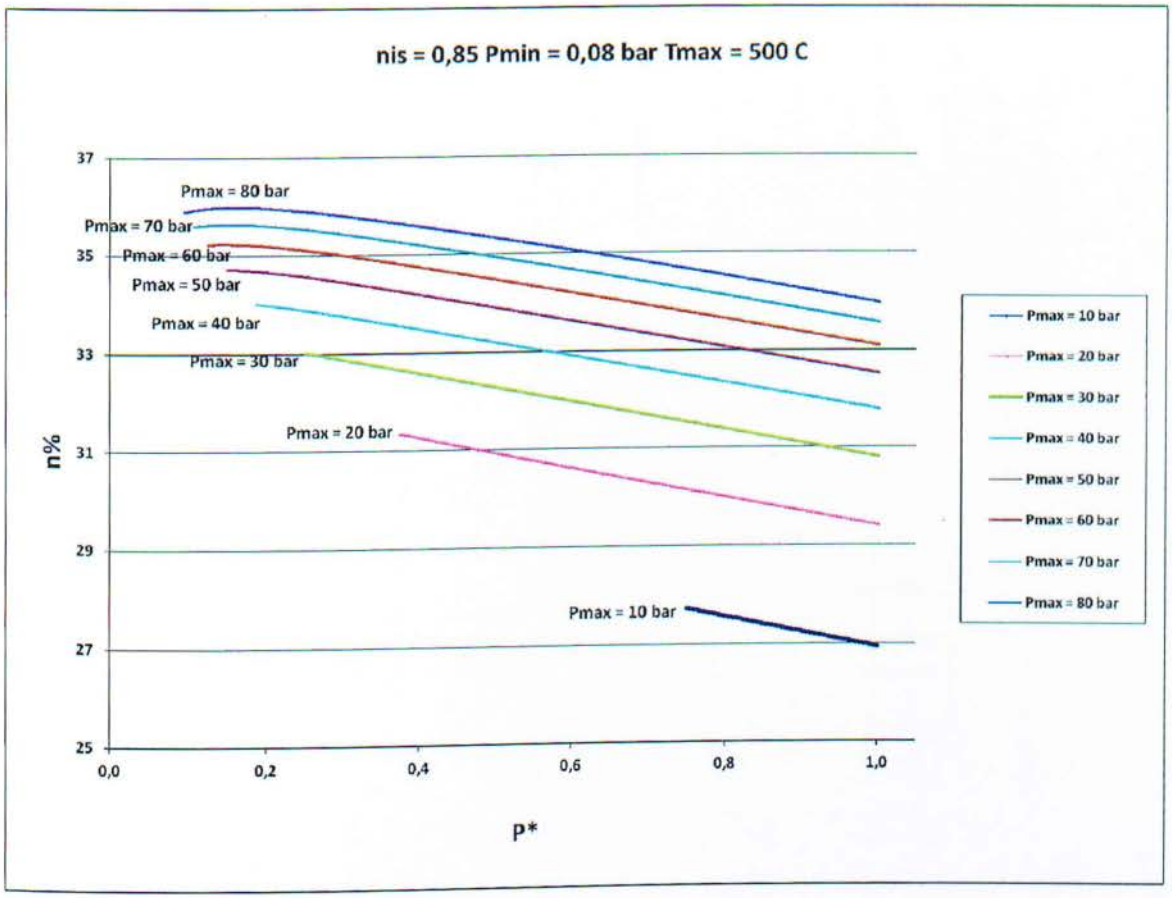
Το δεύτερο διάγραμμα, απεικονίζει το παραγόμενο του κύκλου έργο ($\mathbf{W_{net}}$), συναρτήσει της εκάστοτε μέγιστης θερμοκρασίας ($\mathbf{T_{max}}$).

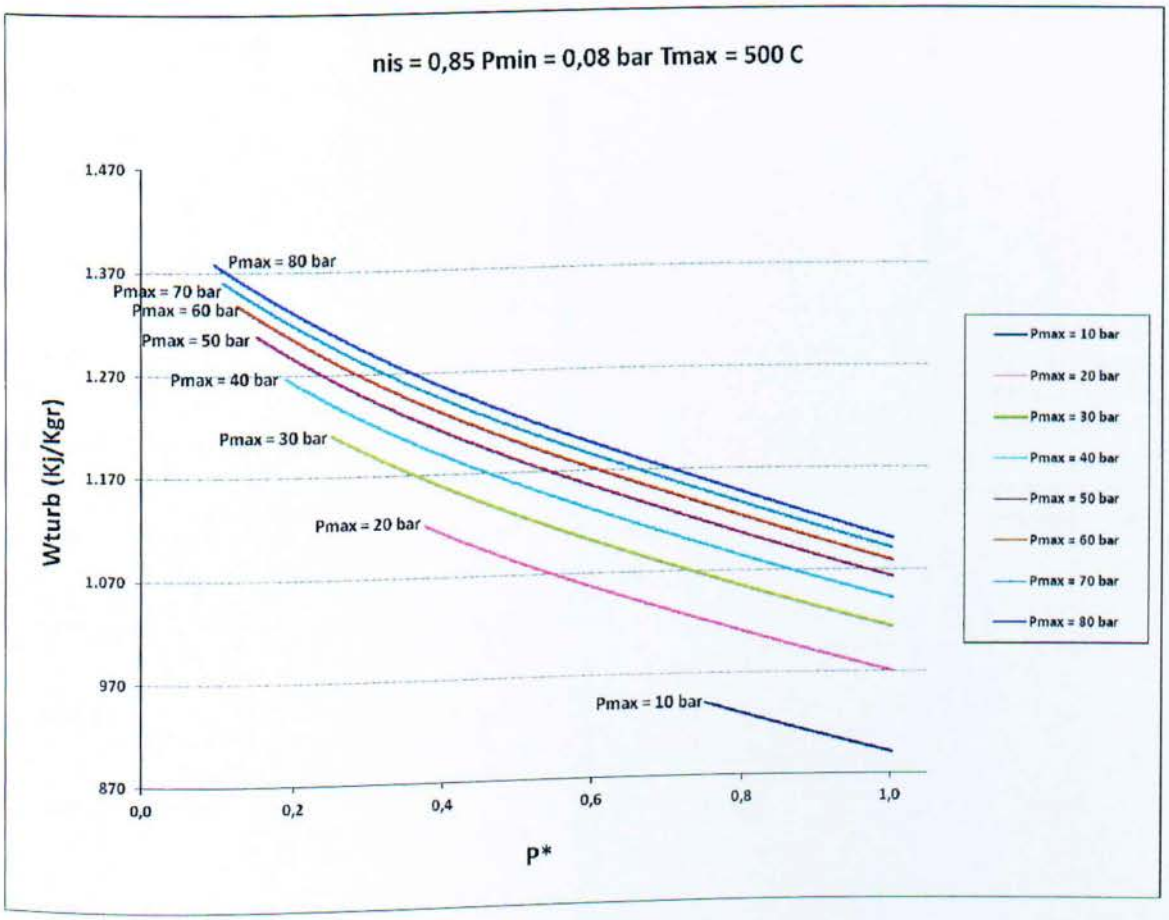

nis=0.85 P(min)=0.08 T(max)=300
Pmax = 80 bar
Pmax = 70 bar
Pmax = 60 bar
Pmax = 50 bar
Pmax = 40 bar
Pmax = 30 bar
Pmax = 20 bar
Pmax = 10 bar
n%
P*
P(max)= 10bar
P(max)= 20bar
P(max)= 30bar
P(max)= 40bar
P(max)= 50bar
P(max)=60 bar
P(max)= 70bar
P(max)= 80bar


nis=0.85 P(min)=0.08 T(max)=300
Pmax = 80 bar
Pmax = 70 bar
Pmax = 60 bar
Pmax = 50 bar
Pmax = 40 bar
Pmax = 30 bar
Pmax = 20 bar
Pmax = 10 bar
W turb (Kj/Kg)
P* (bar)
P(max)= 10bar
P(max)= 20bar
P(max)= 30bar
P(max)= 40bar
P(max)= 50bar
P(max)= 60bar
P(max)= 70bar
P(max)= 80bar

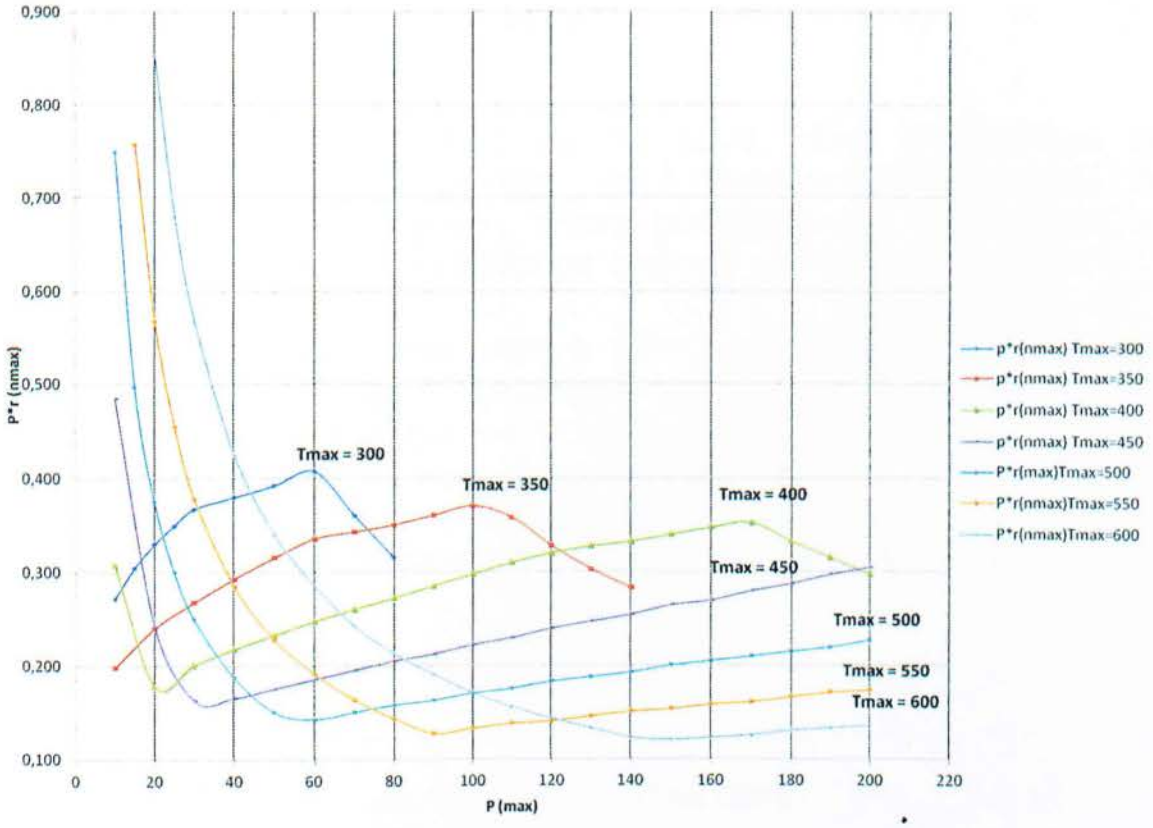

nis=0.85 Pmin=0,08 Tmax=400
Pmax = 80 bar
Pmax = 70 bar
Pmax = 60 bar
Pmax = 50 bar
Pmax = 40 bar
Pmax = 30 bar
Pmax = 20 bar
Pmax = 10 bar
10 bar
20 bar
30 bar
40 bar
50 bar
60 bar
70 bar
80 bar
n%
P*

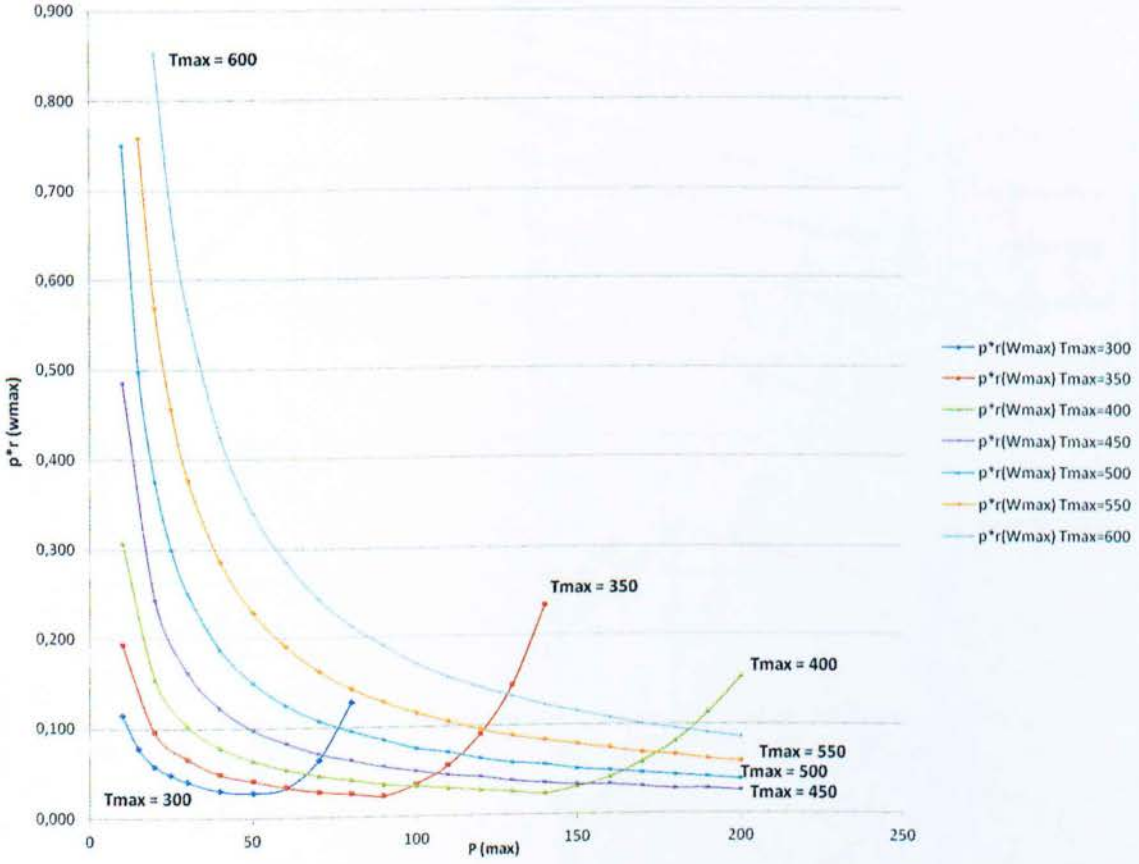

nis= 0.85 Pmin=0.08 Tmax=400
Pmax = 80 bar
Pmax = 70 bar
Pmax = 60 bar
Pmax = 50 bar
Pmax = 40 bar
Pmax = 30 bar
Pmax = 20 bar
Pmax = 10 bar
10 bar
20 bar
30 bar
40 bar
50 bar
60 bar
70 bar
80 bar
Wturb (kj/kg)
P*





ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ
ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ

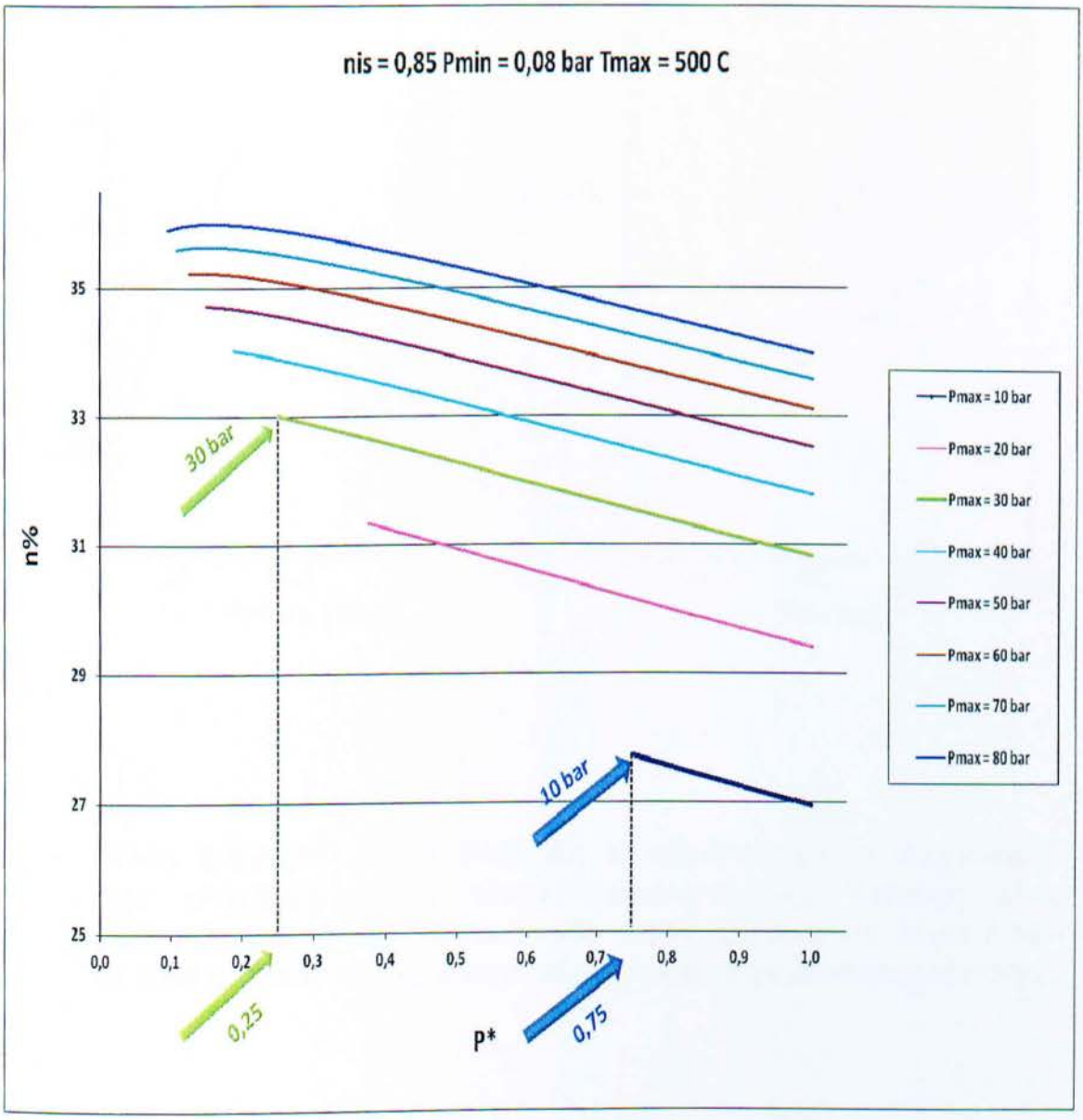

0,900
0,800
0,700
0,600
0,500
0,400
0,300
0,200
0,100
P*r (nmax)
0
20
40
60
80
100
120
140
160
180
200
220
P (max)
Tmax = 300
Tmax = 350
Tmax = 400
Tmax = 450
Tmax = 500
Tmax = 550
Tmax = 600
p*r(nmax) Tmax=300
p*r(nmax) Tmax=350
p*r(nmax) Tmax=400
p*r(nmax) Tmax=450
P*r(max)Tmax=500
P*r(nmax)Tmax=550
P*r(nmax)Tmax=600


0,900
0,800
0,700
0,600
0,500
0,400
0,300
0,200
0,100
0,000
p*r (wmax)
0
50
100
150
200
250
P (max)
Tmax = 600
Tmax = 350
Tmax = 400
Tmax = 550
Tmax = 500
Tmax = 450
Tmax = 300
p*r(Wmax) Tmax=300
p*r(Wmax) Tmax=350
p*r(Wmax) Tmax=400
p*r(Wmax) Tmax=450
p*r(Wmax) Tmax=500
p*r(Wmax) Tmax=550
p*r(Wmax) Tmax=600

Από τα παραπάνω διαγράμματα, διαπιστώνουμε τα εξής ενδιαφέροντα:

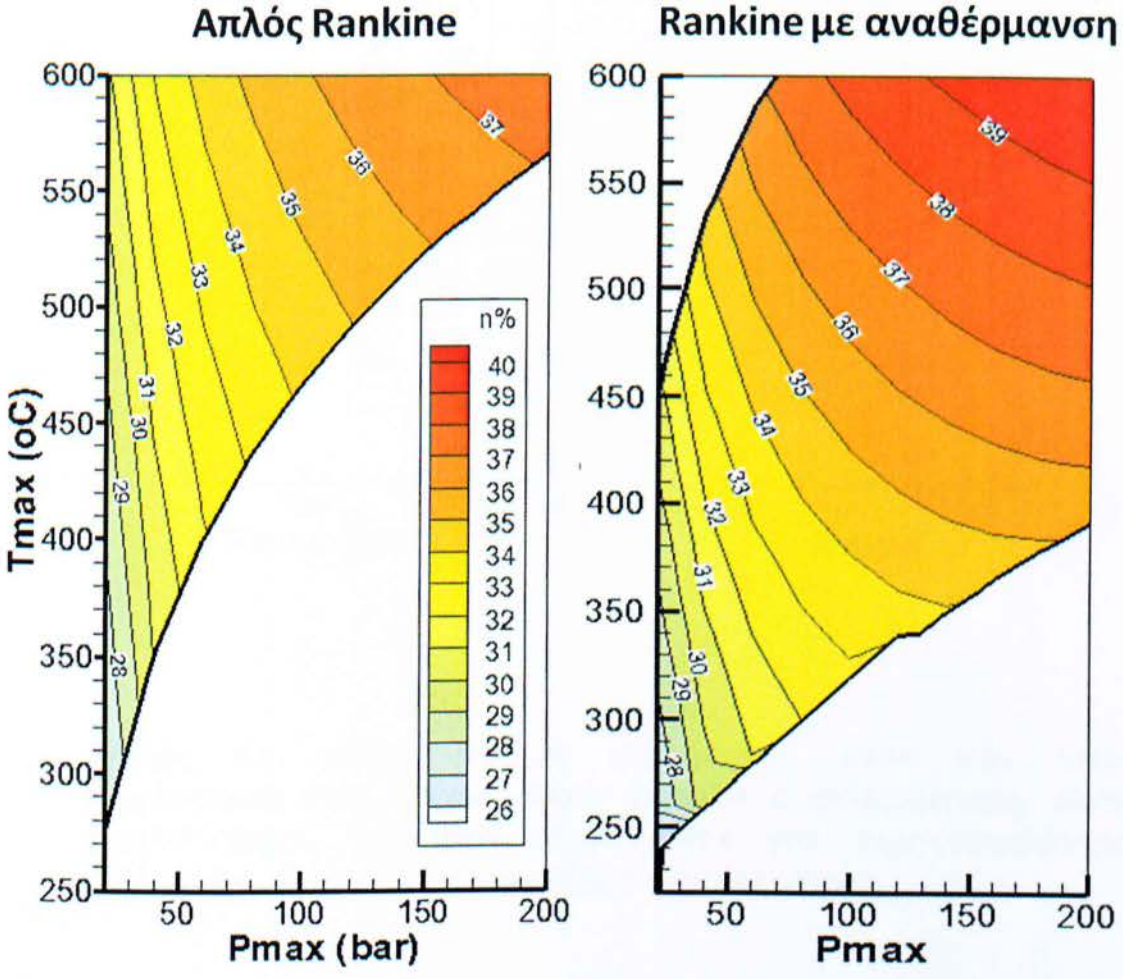
Ο βαθμός απόδοσης καθώς και το έργο, είναι μεγαλύτερα σε μικρότερη πίεση αναθέρμανσης. Αυτό είναι απόλυτα λογικό, αν αναλογισθούμε ότι η μικρή πίεση αναθέρμανσης μεγαλώνει το εμβαδόν του έργου που κερδίζουμε από την αναθέρμανση.

Επίσης, δεν ισχύει πάντα πως η πίεση αναθέρμανσης πρέπει να βρίσκεται στο 0,25 της P* (η γενικά αποδεκτή τιμή αναθέρμανσης) που αναφέρεται στο βιβλίο του Cengel.
Είναι φανερό ότι ισχύει για κάποιες πιέσεις, αλλά με τις δοκιμές μας, διαπιστώνουμε ότι π.χ. για Tmax=500° C, και Pmax=10 bar, η βέλτιστη πίεση αναθέρμανσης, βρίσκεται στο 0,75 με βαθμό απόδοσης 27,73.

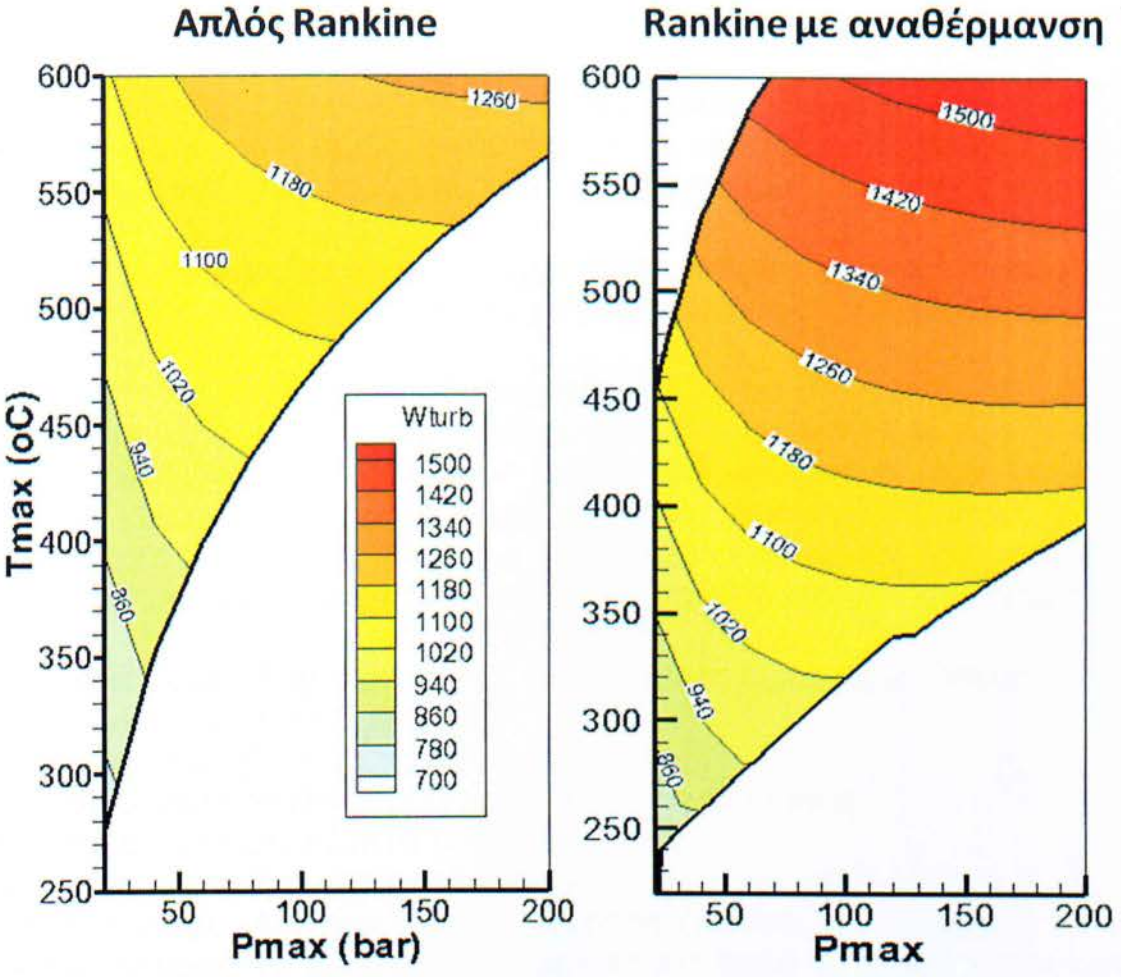


Για τον Κύκλο Rankine με αναθέρμανση μπορούμε να δημιουργήσουμε αντίστοιχα διαγράμματα του απλού, που θα μας δίνουν τον βαθμό απόδοσης και το έργο του στροβίλου, μόνο από τις συνθήκες λειτουργίας.

Τα παρακάτω ισχύουν για $\mathbf{P_{min}}$ **= 0,08 bar** και για τον κύκλο Rankine με αναθέρμανση $\mathbf{P^*_{reheat}}$ **= 0,25** (πρακτικά αποδεκτή πίεση αναθέρμανσης). Παραθέτουμε συγκριτικά τα διαγράμματα με και χωρίς αναθέρμανση.



- **Είναι φανερό ότι ο βαθμός απόδοσης στην περίπτωση της αναθέρμανσης είναι μεγαλύτερος. Επίσης είναι μεγαλύτερη η επιφάνεια που καλύπτεται, με λίγα λόγια οι επιτρεπτές τιμές, στην περίπτωση της αναθέρμανσης.**



- **Όπως και στον βαθμό απόδοσης, έτσι και στην περίπτωση του έργου, όταν έχουμε αναθέρμανση, είναι μεγαλύτερο. Το ίδιο ισχύει και για την επιφάνεια κάλυψης, δηλαδή στις επιτρεπόμενες τιμές.**

ΤΕΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Όλες οι δοκιμές που κάναμε για τον κύκλο Rankine καθώς και τα διαγράμματα που δημιουργήθηκαν από αυτές, μας επιβεβαιώνουν την σπουδαιότητα του έργου, του πρωτοπόρου αυτού Μηχανικού.

Επίσης μπορούμε να καταλάβουμε πόσο σημαντική είναι η βελτίωση πάνω στο συγκεκριμένο κύκλο, χρησιμοποιώντας αναθέρμανση.

Η αύξηση του βαθμού απόδοσης και του έργου σε ένα ατμοστρόβιλο είναι τρομερά σημαντική, ενώ επιπλέον αποφεύγεται ο κίνδυνος σπηλαίωσης στο στρόβιλο. Αν σκεφθούμε ότι μια εκ των βασικών του χρήσεων είναι η παραγωγή ρεύματος, αντιλαμβανόμαστε ότι με μία μικρή παρέμβαση, τεχνικά αλλά και οικονομικά, μας επιφέρει μεγαλύτερο έργο και βαθμό απόδοσης, δηλαδή φθηνότερη ενέργεια!

Προσπαθήσαμε δημιουργώντας τις σταθερές $\mathbf{c_1, c_2, c_3, x^*}$ όπου:
x^*= τελική κατάσταση ατμού
c_1= αδιάστατη θερμότητα προθέρμανσης
c_2= αδιάστατη λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης
c_3= αδιάστατη θερμότητα υπερθέρμανσης
c_4= αδιάστατη θερμότητα αναθέρμανσης (0 για απλό κύκλο)
να φτιάξουμε νέες μαθηματικές σχέσεις (**πάντα εμπειρικές**), με τις οποίες σχέσεις θα μπορούμε να βρίσκουμε πολύ γρήγορα και εύκολα την «ταυτότητα» κάθε ατμοστρόβιλου, στις συνθήκες λειτουργίας που δίνει ο κατασκευαστής του.

Δεν μπορέσαμε να φτάσουμε στην δημιουργία αυτών των σχέσεων. Ίσως γατί ο χρόνος δεν επαρκούσε, ίσως γιατί το εγχείρημα ήταν πάνω από τις δυνάμεις μας. Αυτό που έχει σημασία, είναι ότι αφήσαμε υλικό για μια νέα πτυχιακή εργασία κάνοντας αρκετά βήματα προς αυτή την κατεύθυνση.

Επίσης, διαπιστώσαμε, μέσα από το αδιάστατο μέγεθος **P***, το οποίο όπως είπαμε μας καθορίζει την πίεση αναθέρμανσης, ότι υπάρχουν αρκετές περιπτώσεις που ισχύει η λογική της «σταθεράς» **0,25** της P*, αλλά μπορούμε να δούμε πολλές περιπτώσεις όπου η «σταθερά» αυτή φτάνει στο 0,75 ώστε να μας οδηγήσει στο μέγιστο έργο.
Με λίγα λόγια, μπορούμε να βελτιώσουμε ακόμα περισσότερο με απλό τρόπο, όπως το διάβασμα ενός διαγράμματος, την ιδανική θερμοκρασία αναθέρμανσης, για την παραγωγή του μέγιστου έργου.
Και στην εποχή μας, την εποχή της ενεργειακής επανάστασης, νομίζουμε ότι αυτό μπορεί να αποδειχθεί ιδιαίτερα χρήσιμο.

Ελπίζουμε πως αυτή η εργασία, θα μπορέσει να γίνει ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο στα χέρια όσων ασχολούνται με το κομμάτι αυτό της θερμοδυναμικής.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ, ΤΟΜΟΣ ΙΙ, 5η ΕΚΔΟΣΗ,
(ΠΑΝΑΓ. ΚΩΝ/ΝΟΥ ΝΙΚΑ
ΔΙΠ/ΧΟΥ ΜΗΧ/ΓΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ, B.Sc.(H) – M.Sc. (by Research)
U.M.I.S.T, ΚΑΘΗΓΗΤΟΥ Α.Τ.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ)

- ΤΕΧΝΙΚΗ ΤΟΥ ΥΔΡΑΤΜΟΥ, ΤΟΜΟΣ Β'
(ΚΩΝ/ΝΟΥ ΛΕΦΑ
ΤΕΩΣ ΤΑΚΤΙΚΟΥ ΚΑΘΗΓΗΤΗ ΣΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ)

- http://www.cres.gr/kape/education/CHP_gr.pdf
(ΟΔΗΓΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ &
ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ, Κ.Α.Π.Ε)

- http://users.ntua.gr/koronaki/RANKINE.pdf
(ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ Ι, ΚΥΚΛΟΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΜΕ ΑΤΜΟ,
ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΣ ΣΥΜΠΙΕΣΤΟΤΗΤΑΣ
ΚΟΡΩΝΑΚΗ ΕΙΡΗΝΗ
ΛΕΚΤΟΡΑΣ, ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΜΠ)

- http://twt.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/PTU/Rankine.xmcd
(ΜΟΣΧΑ, POWER ENGINEERING INSTITUTE
RANKINE CYCLE)

- http://www.qrg.northwestern.edu/thermo/design-ibrary/regen/regen.html
(CYCLEPAD DESING LIBRARY)

- ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΕΩΣ
ΑΤΜΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ
(ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ, ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ,
Ι.Π.ΙΩΑΝΝΙΔΗ
ΟΜΟΤ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ
ΑΘΗΝΑ 2004)