



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Διπλωματική Εργασία

Ανάλυση και βελτιστοποίηση συνήθων ψυκτικών
κύκλων μηχανικής συμπίεσης ατμών για
διάφορα εργαζόμενα μέσα

Χριστοφιλάκης Π.Κωνσταντίνος

Επιβλέπων καθηγητής: Τζιβανίδης Χρήστος

Αθήνα, Ιούλιος 2015

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη	4
Abstract.....	5
Εισαγωγή	6
1. Γενικά περί ψύξης.	7
1.1 Θεμοδυναμικοί Κύκλοι.	7
1.2 Ψύξη με μηχανική συμπίεση ατμών.....	8
1.3 Περιγραφή του κύκλου μηχανικής συμπίεσης ατμών.	8
2. Ψυκτικά μέσα και ιδιότητες αυτών.....	12
2.1 Γενικά περί ψυκτικών μέσων.	12
2.2 Κριτήρια αποδοχής και ασφάλειας ενός ψυκτικού μέσου.....	13
2.3 Ονοματολογία και κατάταξη των ψυκτικών μέσων.	14
2.4 Ιδιότητες μερικών κυριότερων ψυκτικών μέσων.....	16
2.5 Απαραίτητες πληροφορίες για χρήση σε ψυκτικά κυκλώματα.	22
2.6 Μίγματα ψυκτικών μέσων.	22
2.7 Δευτερεύοντα ψυκτικά μέσα ή ψυκτικοί φορείς.....	25
2.8 Πίνακας ιδιοτήτων κυριότερων βιομηχανικών ψυκτικών μέσων.	27
3. Συμπιεστές αερίου.	31
3.1 Γενικά περί συμπιεστών.	31
3.2 Παλινδρομικός συμπιεστής.	31
3.3 Περιστροφικοί κοχλιοειδείς συμπιεστές (τύπου Lysholm).....	33
3.4 Φυγοκεντρικοί (ή ακτινικοί) συμπιεστές.	34
4. Ο Ατμοποιητής	38
4.1 Λειτουργία του ατμοποιητή.....	38
4.2 Διαμόρφωση εξισώσεων και διαστασιολόγηση ατμοποιητή.....	41
5. Ο Συμπυκνωτής.	45
5.1 Λειτουργία του συμπυκνωτή.	45
5.2 Τύποι συμπυκνωτών.....	48
6. Συσκευές Εκτόνωσης.	52
7. Μερική ατμοποίηση ,τύμπανο διαχωρισμού και εναλλάκτες θερμότητας.	56

7.1 Μερική ατμοποίηση και τύμπανο διαχωρισμού.	56
7.2 Εναλλάκτες θερμότητας.....	59
8. Το πρόγραμμα Engineering Equation Solver ή EES.	61
8.1 Γενικά περί του λογισμικού.....	61
8.2 Επεξήγηση διαδικασίας επίλυσης.....	62
9. Ανάλυση ψυκτικών κύκλων με το λογισμικό E.E.S.....	95
9.1 Μονοβάθμιος κύκλος μηχανικής συμπίεσης ατμών.	95
9.2 Μονοβάθμιος κύκλος μηχανικής συμπίεσης ατμών με υπερθέρμανση στην έξοδο του ατμοποιητή.	104
9.3 Διβάθμιος και Τριβάθμιος ψυκτικός κύκλος μηχανικής συμπίεσης ατμών.....	110
9.3.1 Διβάθμιος κύκλος μηχανικής συμπίεσης ατμών.	112
9.3.2 Βελτιστοποίηση της σχέσης μέσης πιέσεως κύκλου.	128
9.3.3 Τριβάθμιος κύκλος μηχανικής συμπίεσης ατμών.	136
9.4 Ψυκτική διάταξη σύνδεσης κλιμακωτού καταρράκτη (Cascade).....	153
9.5 Σύγκριση των προαναφερθέντων κύκλων.....	171
9.6 Σύγκριση ψυκτικών κύκλων σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες ψύξης.....	178
9.7 Ψυκτική διάταξη διβάθμιας συμπίεσεως δύο στοιχείων ατμοποιήσεως με σύνδεση σε σειρά. .	183
Παράρτημα I: Κώδικες στο E.E.S.	199
Παράρτημα II: Πίνακες στο E.E.S.....	215
Παράρτημα III: Ευρετήριο βιβλιογραφικών και διαδικτυακών πηγών.....	223

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον πατέρα μου, την μητέρα μου και τον αδελφό μου για την αμέριστη συμπαράσταση τους στην πορεία των ακαδημαϊκών μου χρόνων. Έπισης ευχαριστώ θερμά τον φίλο και συνάδελφο υποψήφιο διδάκτορα στον τομέα θερμότητας Μπέλλο Ευάγγελο για την σημαντική βοήθεια, την συνεργασία και την υπομονή την οποία επέδειξε ασχολούμενος με την προσπάθεια μου. Τέλος ευχαριστώ από καρδιάς τον καθηγητή μου Τζιβανίδη Χρήστο για την ευκαιρία που μου έδωσε για αυτήν την διπλωματική εργασία καθώς και για την πολύτιμη βοήθεια του καθ'όλη την διάρκεια της εκπόνησης αυτής.

Περίληψη

Στην εκπόνηση της διπλωματικής αυτής εργασίας, ξεκινάμε δίδοντας ορισμένες βασικές έννοιες και ορισμούς για την διαδικασία και την σημασία της ψύξης στις μέρες μας σε βιομηχανικές καθώς και οικιακές εφαρμογές. Ακολουθεί μία σύντομη αναφορά σε θερμοδυναμικούς κύκλους και μία εκτενέστερη στο κύριο τμήμα της εργασίας το οποίο είναι η ψύξη με μηχανική συμπίεση ατμών. Στο επόμενο κεφάλαιο γίνεται μία εκτενέστατη ανάλυση για τα ψυκτικά μέσα και τις ιδιότητες αυτών, όπως π.χ. τα κριτήρια ασφάλειας και τον τρόπο ονοματολογίας. Στο ίδιο κεφάλαιο αναφέρεται η σημασία χρήσης αζεοτροπικών μιγμάτων ψυκτικών μέσων και τέλος δίδεται ένας περιεκτικός πίνακας με τα κυριότερα βιομηχανικά ψυκτικά μέσα και τις σημαντικότερες φυσικές και χημικές ιδιότητες τους. Αμέσως μετά ακολουθεί ανάλυση στο αντικείμενο των συμπιεστών αερίου, απαραίτητου τμήματος των μελετούμενων ψυκτικών εγκαταστάσεων. Δίδονται οι διάφοροι τύποι των συμπιεστών, καθώς και τα διαγράμματα λειτουργίας τους. Στην συνέχεια εξετάζουμε τα βασικά τμήματα του ψυκτικού κυκλώματος. Ξεκινώντας από τον ατμοποιητή αναλύουμε την λειτουργία του και προχωράμε σε μία διαστασιολόγηση με σκοπό την καλύτερη κατανόηση του υπολογισμού του απαιτούμενου όγκου του. Ύστερα αναλύουμε την διάταξη του συμπυκνωτή και αριθμούμε τους διάφορους τύπους οι οποίοι συναντώνται στην βιομηχανία. Για να ολοκληρώσουμε το συγκεκριμένο τμήμα, αναφερόμαστε στις συσκευές εκτόνωσης δηλαδή στις διατάξεις οι οποίες ρυθμίζουν την πίεση σε συγκεκριμένα μέρη του κύκλου και στο φαινόμενο της μερικής ατμοποίησης ύστερα από ισενθαλπικό στραγγαλισμό. Στα πλαίσια της εξήγησης του φαινομένου, αναλύουμε την λειτουργία των δοχείων μερικής ατμοποίησης και τέλος συντάσσουμε μία σύντομη αναφορά επάνω στο αντικείμενο των εναλλακτών θερμότητας. Το κύριο μέρος της εργασίας καταπιάνεται με την επεξήγηση της λειτουργίας και την ανάλυση στο λογισμικό E.E.S. (Enginnering Equation Solver). Αρχικά γίνεται μία σύντομη αναφορά στην ιστορία του προγράμματος και ύστερα ακολουθεί ένα τυπικό παράδειγμα προσομείωσης και επίλυσης για μονοβάθμιο ψυκτικό κύκλο μηχανικής συμπίεσης ατμών. Στο παράδειγμα αυτό δίδονται σημαντικές πληροφορίες για την χρησιμότητα του λογισμικού, για το περιβάλλον του και τις δυνατότητες που αυτό παρέχει προς τον χρήστη καθιστώντας το έτσι αναπόσπαστο βοήθημα για πολλές εταιρείες και ερευνητικά προγράμματα. Μετά την ολοκλήρωση του παραδείγματος προχωρούμε στην ανάλυση των ψυκτικών κύκλων οι οποίοι μας ενδιαφέρουν με επεξήγηση για την λειτουργία και τις εφαρμογές τους και ταυτόχρονη παράθεση των διαγραμμάτων που μας ενδιαφέρουν όπως ο συντελεστής συμπεριφοράς ψυκτικής εγκατάστασης, η ψυκτική ισχύς στον ατμοποιητή και η ισχύς την οποία απορροφά ο συμπιεστής, όλα συναρτήσει της θερμοκρασίας ατμοποίησης. Αναλύουμε αρχικά

τον μονοβάθμιο κύκλο και στην συνέχεια προχωρούμε σε ανάλυση διβάθμιου και τριβάθμιου κύκλου μηχανικής συμπίεσης ατμών. Παράλληλα, εισάγουμε μια βελτιστοποίηση για την σχέση της μέσης πίεσης στον διβάθμιο κύκλο. Στην συνέχεια αναλύουμε τον ψυκτικό κύκλο συνδέσεως κλιμακωτού καταρράκτη και συγκρίνουμε όλους τους παραπάνω κύκλους ως προς τον συντελεστή συμπεριφοράς. Ακόμη κάνουμε την ίδια σύγκριση σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες ψύξης και τέλος δίδουμε διαγράμματα για ψυκτική διάταξη με δύο στοιχεία ατμοποίησης σε σειρά η οποία προσομοιάζει την λειτουργία ενός οικιακού ψυγείοκαταψύκτη ο οποίος λειτουργεί σε δύο διαφορετικές θερμοκρασίες ψύξης.

Abstract

In the elaboration of this thesis, we begin by administrating some basic principles and definitions for the process and the importance of cooling nowadays in industrial as well as in domestic applications. Then we demonstrate a brief report on thermodynamic cycles and a more detailed one on the main part of the thesis which is cooling with mechanical compression of the vapor produced by the evaporation of the working fluid. In the next chapter we display a detailed analysis on the cooling fluids and their properties, as the safety criteria and their nomenclature. In the same chapter we refer to the importance of using azeotropic mixtures of cooling fluids and in the end we display a comprehensive board containing the most basic industrial cooling fluids and their physical and chemical properties. Right after, we display an analysis on the object of air compressors, which is an integral part of the studied cooling applications. Various types of compressors and their diagrams of operation are being demonstrated. Following, we will examine the basic parts of the cooling circuit. Starting from the evaporator we will analyze it's operation and then proceed to a dimensioning for better comprehension of the function and the volume needed. After that, we analyze the operation of the condenser and we number the various types tha we encounter in industrial applications. To complete this chapter we refer to the expansion devices used for pressure regulation in some parts of the cycle and the plenomenon of flash evaporation after an isenthalpic expansion. Within the explanation of the flash evaporation phenomena we analyze the function of a flash tank and finally we redact a brief report on the object of heat exchangers. The main part of the project undertakes the explanation of the operation and the analysis using the E.E.S. software (Engineering Equation Solver). In the beginning, we refer to a brief report of the history of the program and then we demonstrate a typical example of simulation and solution for one stage

vapor compression cooling cycle. In this example important information for the utility of the software, its environment and the possibilities it offers, are being given, rendering it a necessary aid for many industries and research programs. After the conclusion of the example, we proceed to the analysis of the cooling cycles which pose interest and we explain the operation and the applications of use. Simultaneously, we demonstrate diagrams such as the coefficient of performance, the cooling power of the evaporator, and the power absorbed from the compressor in respect to the evaporation temperature. In the beginning we analyze the single stage cycle and then we proceed to the analysis of the two stage and three stage cycles. After the analysis we demonstrate an optimization for the equation of mean pressure for the two stage cycle. Then we analyze the cascade cooling cycle and then we proceed to the comparison between the four abovementioned cooling cycles. We follow the same process for V.L.T. cooling (Very Low Temperature). In the end we analyze the operation of the cooling installation with two elements of evaporation which simulates a household refrigerator.

Εισαγωγή

Στα πλαίσια της εκπόνησης αυτής της διπλωματικής εργασίας θα ασχοληθούμε με την ανάλυση και λειτουργία διάφορων ψυκτικών κύκλων, θα κάνουμε αρκετές συγκρίσεις για να αποφανθούμε για το αν μία εγκατάσταση είναι οικονομικά συμφέρουσα ως προς μία άλλη και θα προσπαθήσουμε δώσουμε μία εμπειριστατωμένη προσέγγιση για την παρούσα αλλά και μελλοντική χρήση διάφορων ψυκτικών μέσων. Στην διπλωματική αυτή εργασία εργάστηκα με την βοήθεια του λογισμικού EES (Engineering Equation Solver) το οποίο είναι πρόγραμμα πολύ εύχρηστο και φιλικό προς τον μηχανικό. Με το συγκεκριμένο πρόγραμμα προσπάθησα να προσομοιάσω την λειτουργία ψυκτικών κύκλων και με την αλλαγή διάφορων σημαντικών παραμέτρων όπως το εκάστοτε εργαζόμενο μέσο και η θερμοκρασία μετά τον ατμοποιητή ψυκτικής εγκατάστασης, έκανα συγκρίσεις για την αποδοτικότητα των ερευνοούμενων κύκλων. Τέλος, παραθέτω τα αντίστοιχα διαγράμματα και τους πίνακες αποτελεσμάτων αλλά και τον κώδικα τον οποίο συνέταξα, έτσι ώστε να μπορεί ο αναγνώστης να συγκρίνει και να αποφασίσει για το ψυκτικό μέσο ή τον ψυκτικό κύκλο που θα εκλέξει ανάλογα με την εφαρμογή.

Θερμοδυναμικοί κύκλοι αντλιών θερμότητας ή αλλιώς ψυκτικοί κύκλοι ονομάζουμε τα εννοιολογικά και μαθηματικά μοντέλα για να κατανοήσουμε την λειτουργία συσκευών όπως αντλίες θερμότητας και ψύκτες. Πιο συγκεκριμένα, αντλία θερμότητας είναι μία μηχανή η οποία μεταφέρει θερμότητα από μία πηγή με χαμηλότερη θερμοκρασία, σε μία καταβόθρα με υψηλότερη θερμοκρασία, με την βοήθεια μηχανικού έργου ή μιας πηγής θερμότητας με υψηλή θερμοκρασία. Έτσι, η αντλία θερμότητας μπορεί να θεωρηθεί ως θερμαντήρας (heater) εάν ο σκοπός είναι να θερμάνουμε την καταβόθρα ή ως ψύκτης εάν ως σκοπό έχουμε να ψύξουμε την πηγή θερμότητας.

Κεφάλαιο 1.

1. Γενικά περί ψύξης.

1.1 Θερμοδυναμικοί Κύκλοι.

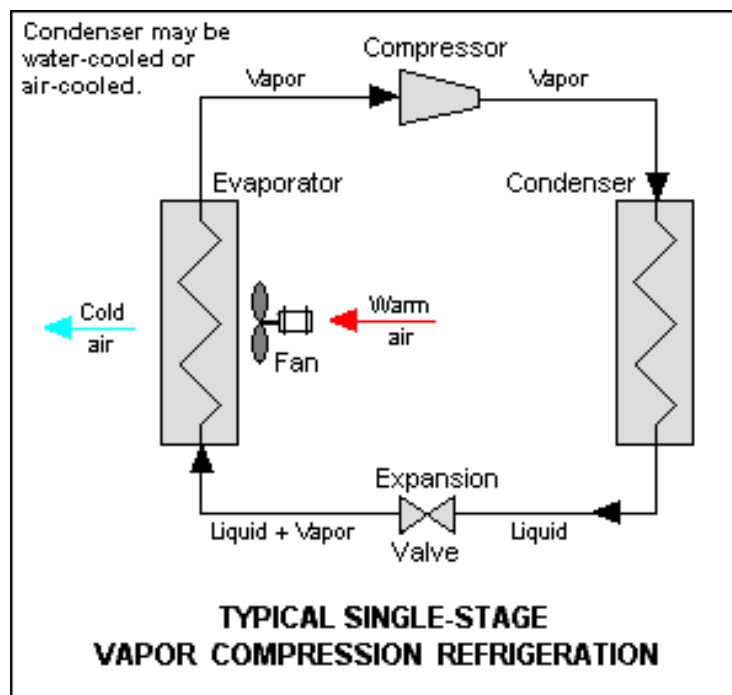
Σύμφωνα με τον δεύτερο θερμοδυναμικό νόμο η θερμότητα δεν μεταφέρεται αυθόρμητα από μία ψυχρότερη προς μία θερμότερη περιοχή. Χρειάζεται έργο για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο. Παραδείγματος χάριν, ένα κλιματιστικό καταναλώνει μηχανικό έργο με την μορφή ηλεκτρικού ρεύματος για να επιτύχει ψύξη ενός χώρου δηλαδή να μεταφέρει θερμότητα από το ψυχρότερο εσωτερικό (την πηγή θερμότητας) προς το θερμότερο περιβάλλον (την καταβόθρα θερμότητας). Ακριβώς όμοια είναι και η λειτουργία ενός ψυγείου. Η αρχή λειτουργίας του ψυκτικού κύκλου περιγράφηκε μαθηματικά από τον Γάλλο μηχανικό Sadi Carnot το 1824 ως μηχανή θερμότητας. Η αντλία θερμότητας μπορεί να περιγραφεί ως ένας ψύκτης με την ακριβώς αντίστροφη λειτουργία. Οι ψυκτικοί κύκλοι μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως: μηχανική συμπίεση ατμών, απορόφηση ατμών, κύκλος αερίου, κύκλος Stirling. [1],[5]

1.2 Ψύξη με μηχανική συμπίεση ατμών.

Η ψύξη με μηχανική συμπίεση ατμών αποτελεί ψύξη στην οποία το ψυκτικό μέσο υφίσταται αλλαγές φάσης και είναι ο πιο διαδεδομένος από τους προαναφερθέντες κύκλους. Χρησιμοποιείται για τον κλιματισμό κτηρίων, αυτοκινήτων και πλοίων, για οικιακά ψυγεία και ψυγεία εμπορίου, για μεγάλες αποθήκες κατεψυγμένων φαγητών και κρεάτων και για φορητά-καταψύκτες. Ακόμη, διυλιστήρια πετρελαίου, πετροχημικά και βιοχημικά εργοστάσια επεξεργασίας, εργοστάσια επεξεργασίας φυσικού αερίου, είναι ανάμεσα στα πολλά είδη βιομηχανικών εργοστασίων τα οποία χρησιμοποιούν ψύξη με μηχανική συμπίεση ατμών.

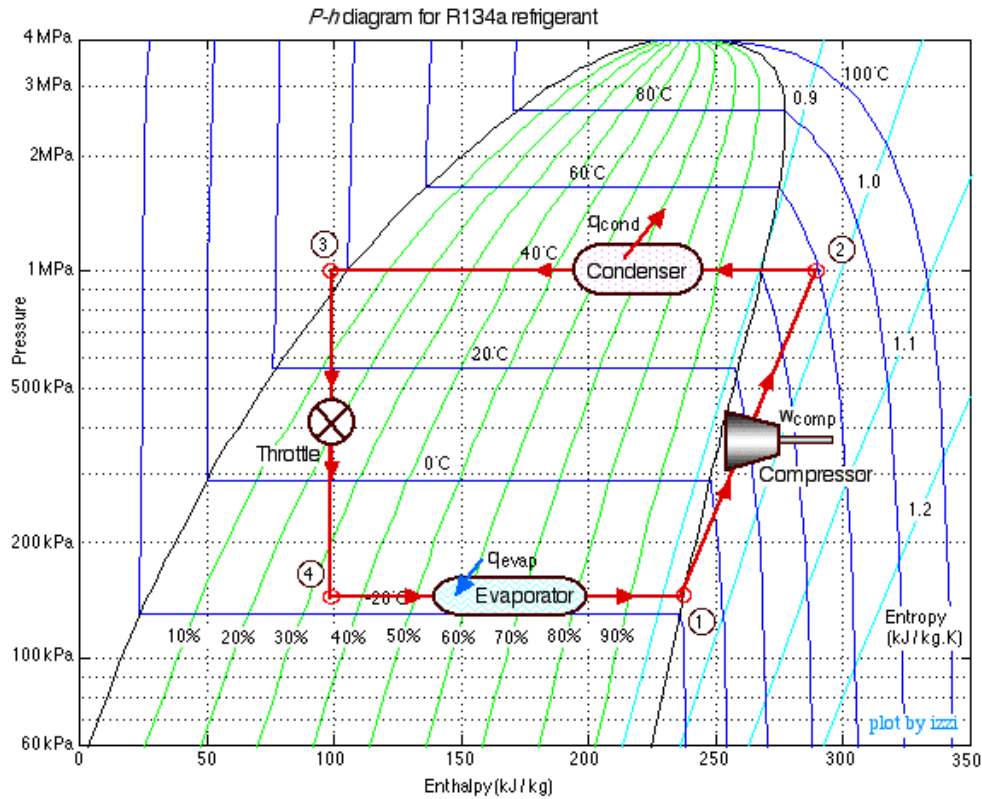
1.3 Περιγραφή του κύκλου μηχανικής συμπίεσης ατμών.

Η συμπίεση ατμών χρησιμοποιεί ένα ανακυκλοφορηθέν ψυκτικό υγρό ως μέσο απορρόφησης και απαγωγής της θερμότητας από τον ψυχόμενο χώρο και ακολούθως απόρριψης της θερμότητας αυτής. Στο επόμενο σχήμα παρατίθεται μία απλή μονοβάθμια εγκατάσταση μηχανικής συμπίεσης ατμών.



Εικόνα 1.1 Μονοβάθμιος κύκλος μηχανικής συμπίεσης ατμών [4]

Όπως φαίνεται και στο σχήμα όλα αυτά τα συστήματα διαθέτουν 4 βασικά εξαρτήματα: συμπιεστή, συμπυκνωτή, στραγγαλιστική βαλβίδα και ατμοποιητή. Στην πιο απλή λειτουργία του παραπάνω κυκλώματος, το κυκλοφορούμενο ψυκτικό μέσο εισέρχεται στον συμπιεστή ως αυτό που θερμοδυναμικά ονομάζουμε κορεσμένο ατμό δηλαδή τον καθαρό ατμό με ξηρότητα $\chi=1$ ο οποίος με ελάχιστη θέρμανση μεταπίπτει σε υπέρθερμο ατμό ενώ με ελάχιστη ψύξη σε διφασικό μίγμα δηλαδή αρχή εμφάνισης πρώτων σταγονιδίων υγρού. Ο κορεσμένος αυτός ατμός συμπιέζεται σε μεγαλύτερη πίεση πράγμα το οποίο οδηγεί σε μεγαλύτερη θερμοκρασία. Ο θερμός συμπιεσμένος ατμός αποτελεί τον υπέρθερμο ατμό. Ο υπέρθερμος ατμός περνά μέσα από έναν συμπυκνωτή όπου ψύχεται και συμπυκνώνεται σε υγρή κατάσταση περνώντας μέσα από σωλήνες η περιελίξεις οι οποίες βρίσκονται σε σύζευξη με αντίστοιχους σωλήνες από τους οποίους διέρχεται ψυχρός αέρας ή ψυχρό νερό σχηματίζοντας έναν εναλλάκτη. Στον συμπυκνωτή το ψυκτικό μέσο απορρίπτει θερμότητα από το σύστημα η οποία αποβάλλεται με την βοήθεια του αέρα ή του νερού. Παραδείγματος χάριν σε ένα πλοίο, το ψυκτικό νερό στον συμπυκνωτή είναι το θαλασσινό νερό. Τώρα, το συμπυκνωμένο ισόθλιπτα ψυκτικό μέσο στο τέλος του συμπυκνωτή βρίσκεται στην κατάσταση του κορεσμένου υγρού δηλαδή του καθαρού υγρού με ξηρότητα $\chi=0$. Το κορεσμένο υγρό στην συνέχεια οδηγείται μέσα από μια στραγγαλιστική βαλβίδα όπου υφίσταται απότομη και ισενθαλπική μείωση της πίεσης του. Η μείωση αυτή οδηγεί στην αδιαβατική μερική ατμοποίηση μέρους του ψυκτικού μέσου. Ο ισενθαλπικός στραγγαλισμός οδηγεί επίσης και σε μείωση της θερμοκρασίας του μίγματος υγρού-ατμού. Το ψυχρό μίγμα οδηγείται μέσα από σωληνώσεις στον ατμοποιητή. Ένας ανεμιστήρας κυκλοφορεί τον θερμό αέρα/νερό στον κλειστό χώρο μεταξύ των σωληνώσεων του ατμοποιητή. Ο θερμός αέρας ατμοποιεί το υγρό μέρος του ψυχρού μίγματος υγρού-ατμού. Ταυτόχρονα ο αέρας ψύχεται και έτσι χαμηλώνει την θερμοκρασία του κλειστού χώρου στα επιθυμητά επίπεδα. Ο ατμοποιητής είναι το μέρος στο οποίο το κυκλοφορούμενο ψυκτικό μέσο απορροφά και απάγει την θερμότητα η οποία ακολούθως απορρίπτεται στον συμπυκνωτή και μεταφέρεται σε άλλο μέρος με την βοήθεια του αέρα η του νερού που χρησιμοποιείται στον συμπυκνωτή. Στο σημείο αυτό σκόπιμο είναι να παραθέσουμε ένα διάγραμμα Mollier τυπικού ψυκτικού μέσου για να γίνει καλύτερα αντιληπτός ο κύκλος που περιγράφηκε. [4],[21]



Εικόνα 1.2 Μονοβάθμιος κύκλος μηχανικής συμπίεσης ατμών με αντιστοιχία σε διάγραμμα Πίεσης-Ενθαλπίας

Έτσι θα ορίσουμε τις σχέσεις οι οποίες περιγράφουν τον κύκλο.

Αρχικά ισχύει ότι η θερμότητα την οποία απορροφά ο ατμοποιητής από τον χώρο συν το πόσο μηχανικής ισχύος την οποία απορροφά ο συμπιεστής, ισούται με την θερμότητα την οποία αποδίδει ο συμπυκνωτής στο περιβάλλον, ως αρχή διατήρησης της ενέργειας.

$$Q_e + P_c = Q_c, \quad (1.1)$$

Ως βαθμός απόδοσης του κύκλου ορίζεται ο συντελεστής συμπεριφοράς ο οποίος ισούται με το πηλίκο της θερμότητας που απορροφά ο ατμοποιητής προς το ποσό της ισχύος την οποία απορροφά ο συμπιεστής. Εάν επιθυμούσαμε να λάβουμε τον βαθμό απόδοσης για θέρμανση και όχι για ψύξη, τότε όπως προαναφέρθηκε η λειτουργία θα ήταν αντίστροφη και στον αριθμητή του συντελεστή συμπεριφοράς θα τοποθετούσαμε την ισχύ του συμπυκνωτή διότι αυτός θα απέδιδε θερμότητα στον χώρο.

$$COP_c = \frac{Q_e}{P_c}, \quad (1.2)$$

$$COP_h = \frac{Q_c}{P_c}, \quad (1.3)$$

Ο ιδανικός κύκλος Carnot περιγράφεται από τους συντελεστές συμπεριφοράς με τις εξής σχέσεις, οι οποίες συνδυαζόμενες μας δίνουν την εξής:

$$COP_{carnot, c} = \frac{T_L}{T_H + T_L}, \quad (1.4)$$

$$COP_{carnot, h} = \frac{T_H}{T_H + T_L}, \quad (1.5)$$

$$COP_H = COP_C + 1, \quad (1.6)$$

Όπου T_L χαμηλή θερμοκρασία κύκλου και T_H υψηλή θερμοκρασία κύκλου.

Κεφάλαιο 2.

2. Ψυκτικά μέσα και ιδιότητες αυτών.

2.1 Γενικά περί ψυκτικών μέσων.

Σκόπιμο σε αυτό το σημείο είναι να ασχοληθούμε με την σύσταση και τις ιδιότητες των ψυκτικών μέσων τα οποία χρησιμοποιούνται ευρύτατα στις εφαρμογές ψύξης και κλιματισμού. Το γνωστό στο ευρύ κοινό φρέον (Freon) είναι η εμπορική ονομασία μίας οικογένειας αλοαλκανικών ψυκτικών μέσων τα οποία κατασκευάζονται κατά κύριο λόγο από την DuPont και άλλες εταιρείες που θα αναφερθούν εκτενέστερα στην συνέχεια. Τα ψυκτικά αυτά μέσα χρησιμοποιούνται ευρύτατα λόγω των ανώτατων ιδιοτήτων σταθερότητας και ασφάλειας. Δεν είναι εύφλεκτα σε θερμοκρασία δωματίου και ατμοσφαιρική πίεση αλλά και μη τοξικά όπως τα υγρά που αντικατέστησαν, με παράδειγμα το διοξείδιο του θείου (SO_2). Τα αλοαλκάνια είναι επίσης αρκετά πιο ακριβά από τα αντίστοιχα εύφλεκτα αλκανικά παράγωγα πετρελαίου ίδιας ή και καλύτερης ψυκτικής απόδοσης. Δυστυχώς τα ψυκτικά μέσα που φέρουν χλωρίδια και φθορίδια φτάνουν στην ανώτερη ατμόσφαιρα όταν διαφεύγουν από το κύκλωμα ή δεν αντικαθίστανται προσεκτικά. Όταν φτάσουν στην στρατόσφαιρα, οι γνωστοί σε όλους μας χλωροφθοράνθρακες ή CFCs (ChloroFluoroCarbons), διασπώνται με την βοήθεια της υπεριώδους ηλιακής ακτινοβολίας και με αυτόν τον τρόπο απελευθερώνουν της ελεύθερες ρίζες τους που φέρουν χλώριο. Αυτές οι ελεύθερες ρίζες λειτουργούν ως καταλύτες στην διαδικασία αποσύνθεσης της στοιβάδας του όζοντος (O_3) μέσω αλυσιδωτών αντιδράσεων. Ένα μόριο CFC μπορεί να οδηγήσει στην αποσύνθεση χιλιάδων μορίων όζοντος. Έτσι η στοιβάδα του όζοντος που προστατεύει την επιφάνεια της γης από την υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία υφίσταται σοβαρή ζημιά με αποτέλεσμα την αύξηση των ποσοστών καρκίνου του δέρματος. Τα χλωρίδια θα παραμείνουν ενεργά ως καταλύτες έως ότου ενώθουν με κάποιο άλλο σωματίδιο ώστε να σχηματιστεί μία σταθερή ένωση. Τα πιο συνηθισμένα ψυκτικά μέσα CFC των οποίων η χρήση συνεχώς μειώνεται είναι τα R-11 και R-12. Νεότερα ψυκτικά μέσα με μειωμένη ικανότητα αποσύνθεσης της στοιβάδας του όζοντος είναι οι υδροχλωροφθοράνθρακες HCFCs όπως το R-22 το οποίο έχει σήμερα την ευρύτερη οικιακή χρήση και οι υδροφθοράνθρακες HFCs όπως το R-134a το οποίο χρησιμοποιείται στα περισσότερα αυτοκίνητα, έχουν αντικαταστήσει την χρήση CFCs. Βέβαια αξίζει να αναφερθεί ότι τα HCFCs με την σειρά τους αντικαταστάθηκαν από τα

HFCs όπως το R-410A τα οποία δεν φέρουν χλώριο όπως υποδικνείει το πρωτόκολλο του Μόντρεαλ. [7],[8],[9],[10]

Οι ερεύνες πάνω στο αντικείμενο των ψυκτικών μέσων έχουν οδηγήσει στο υπερκρίσιμο διοξείδιο του άνθρακα γνωστό και ως R-744, το οποίο διαθέτει παρόμοιες ψυκτικές ικανότητες με τα προαναφερθέντα μέσα, αλλά σημαντικά μικρότερη ικανότητα αποσύνθεσης στοιβάδας όζοντος.

Συνοψίζοντας ψυκτικό μέσο είναι η ουσία ή το μίγμα συνήθως σε υγρή μορφή το οποίο χρησιμοποιείται σε ψυκτικό κύκλο και κύκλο αντλίας θερμότητας. Στους περισσότερους κύκλους υφίσταται αλλαγή φάσης από υγρό σε αέριο και μετά αντίστροφα. Όπως προαναφέρθηκε χρησιμοποιούνται ευρύτατα οι φθοράνθρακες και οι χλωροφθοράνθρακες ήδη από τον 20^ο αιώνα αλλά παραγκωνίζονται εξ' αιτίας της εξασθένησης της οζοντικής στοιβάδας. Άλλα συνηθισμένα ψυκτικά μέσα με πολλές εφαρμογές είναι η αμμωνία, το διοξείδιο του θείου και το προπάνιο.

2.2 Κριτήρια αποδοχής και ασφάλειας ενός ψυκτικού μέσου.

Ένα εργαζόμενο ψυκτικό μέσο πρέπει να ικανοποιεί μία συστάδα κριτηρίων και απαιτήσεων τα οποία μπορούν να διαιρεθούν σε δύο κατηγορίες:

-Το ψυκτικό δεν πρέπει να προκαλεί τραυματισμούς, πανικό, πυρκαγιά και φθορές εγκατάστασης σε περίπτωση διαρροής.

-Οι χημικές, φυσικές και θερμοδυναμικές ιδιότητες του ψυκτικού πρέπει να είναι κατάλληλες για το σύστημα και τις συνθήκες εργασίας, στο χαμηλότερο δυνατό κόστος.

Πιο συγκεκριμένα:

-Χημικά: Σταθερό και αδρανές.

-Υγεία, ασφάλεια και περιβάλλον: Μη τοξικό, μη εύφλεκτο, καλοήθες στην ατμόσφαιρα.

-Θερμικά: Θερμοκρασίες κρίσιμου σημείου και σημείου βρασμού κατάλληλες για την εκάστοτε εφαρμογή, χαμηλή συνεκτικότητα, υψηλή θερμική αγωγιμότητα.

-Διάφορα: Ικανοποιητική διαλυτότητα/αναμιξιμότητα, υψηλή διηλεκτρική σταθερά ατμού, χαμηλό σημείο πήξης, χαμηλό κόστος, εύκολος εντοπισμός διαρροής.

Είναι αδύνατο να ικανοποιηθούν όλα τα παραπάνω κριτήρια. Το πιο σημαντικό από όλα είναι η χημική σταθερότητα μέσα στο ψυκτικό σύστημα. Όλα τα υπόλοιπα κριτήρια είναι ανούσια εάν το ψυκτικό αποσυντίθεται ή αντιδρά με τα υλικά που χρησιμοποιούνται στο σύστημα.

Οι θερμοδυναμικές ιδιότητες και οι ιδιότητες φαινομένων μεταφοράς θα καθορίσουν την απόδοση του ψυκτικού συστήματος. Οι πιέσεις δεν πρέπει να είναι πολύ υψηλές (προβλήματα με βαριές και ογκώδεις εγκαταστάσεις) αλλά ούτε και πολύ μικρές. Πιέσεις κάτω από την ατμοσφαιρική είναι ανεπιθύμητες επειδή υπάρχει πιθανότητα να αναροφηθεί μέσα στο σύστημα αέρας (εάν δεν είναι πλήρως ερμητικό) και αυτό μπορεί να οδηγήσει σε προβλήματα όπως σε αδρανή αέρια στον συμπυκνωτή ή διαμόρφωση απολήξεων πάγου στην βαλβίδα εκτόνωσης. [20],[21],[27]

2.3 Ονοματολογία και κατάταξη των ψυκτικών μέσων.

Τα ψυκτικά μέσα προέρχονται από το μεθάνιο (CH_4) και το αιθάνιο (C_2H_6) με αντικατάσταση του υδρογόνου τους εν μέρει ή πλήρως από φθόριο ή φθόριο και χλώριο.

Σύμφωνα με διεθνή σύμβαση τα ψυκτικά μέσα συμβολίζονται με το γράμμα R (Refrigerant-Ψυκτικό) ακολουθούμενο από δύο ή τρία (για ακόρεστα οργανικά μίγματα-τέσσερα) αριθμητικά ψηφία τα οποία με την σειρά τους σε μερικές περιπτώσεις ακολουθούνται από ένα ή δύο γράμματα. Ο συμβολισμός R_{xyz} δίδεται από την χημική σύσταση του μορίου του ψυκτικού μέσου ως εξής:

χ : Ο αριθμός των ατόμων άνθρακα στο μόριο.

$0 < \chi < 3$: Ο αριθμός των ανθράκων στο μόριο μειωμένος κατά 1 εάν ο αριθμός είναι μικρότερος από 4. Εάν το χ γίνει 0 τότε το ψηφίο παραλείπεται.

$\chi=4$: Ζεοτροπικά μίγματα.

$\chi=5$: Αζεοτροπικά μίγματα.

$\chi=6$: Οργανικά μίγματα.

$\chi=7$: Ανόργανα μίγματα.

y : Ο αριθμός των ατόμων υδρογόνου.

$0 < \chi < 3$ y : Ο αριθμός των ατόμων υδρογόνου αυξημένος κατά 1.

$\chi=4, \chi=5$: yz : Ένας μεταβλητός αριθμός ο οποίος καθορίζει, μερικές φορές μαζί με ένα κεφαλαίο γράμμα, την σύσταση του μίγματος.

$\chi=6$: $y=0$ για υδρογονάνθρακες, $y=1$ για ενώσεις με οξυγόνο, $y=2$ για ενώσεις με θείο, $y=3$ για ενώσεις με άζωτο.

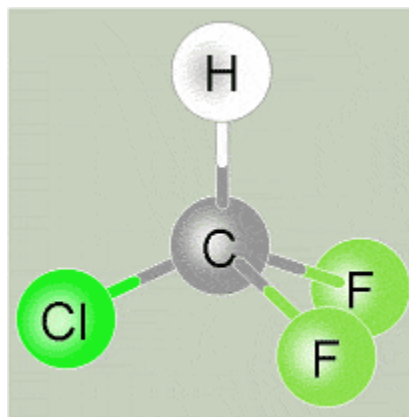
$\chi=7$: yz : Το μοριακό βάρος.

z : $0 < \chi < 3$ z : Ο αριθμός των ατόμων φθορίου.

Ο γενικός χημικός τύπος των παραγώγων υδρογονανθράκων θα είναι της μορφής:

$C_m H_n F_p Cl_q$ όπου θα πρέπει να ικανοποιείται η σχέση $n+p+q=2m+2$

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι το q είναι συνάρτηση των άλλων τριών μεταβλητών και για αυτό δεν δίνεται κατά την αριθμητική παράσταση ενός ψυκτικού μέσου.



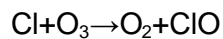
Εικόνα 2.1 Σχηματική αναπαράσταση μορίου R-22 ($\chi=1-1, y=1+1, z=2$)

Τα ψυκτικά μέσα κατηγοριοποιούνται από την ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers) σύμφωνα με το Standard 34 σε δύο τάξεις με ένα

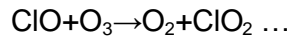
κεφαλαίο γράμμα και σε τρία group με ένα αριθμητικό ψηφίο σύμφωνα με τον κίνδυνο για την υγεία και την αναφλεξιμότητα που εμπλέκονται στην χρήση τους.

Περιβαλλοντικά τα ψυκτικά μέσα κατατάσσονται με βάση την επίδραση τους στην στοιβάδα του όζοντος στην στρατόσφαιρα όπως προαναφέρθηκε (ODP-Ozone Depletion Potential) ή ως αέρια του θερμοκηπίου (GWP-Global Warming Potential, HGWP-Halogen Global Warming Potential).

Σύμφωνα με την θεωρία των Rowland/Molina το σταθερό μόριο CFC θα μεταφερθεί στην στρατόσφαιρα (15-30 km πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας) και θα αποδομηθεί από την απορρόφηση υπεριώδους ηλιακής ακτινοβολίας μεγάλης ενέργειας. Τα ελεύθερα άτομα χλωρίου ή βρωμίου (ελεύθερες ρίζες) θα αντιδράσουν με τα μόρια του όζοντος ως εξής:



Το μόριο ClO δεν είναι σταθερό και θα συνεχίσει να αντιδρά με μόρια όζοντος έως ότου μεταπίψει σε μία σταθερή μορφή.



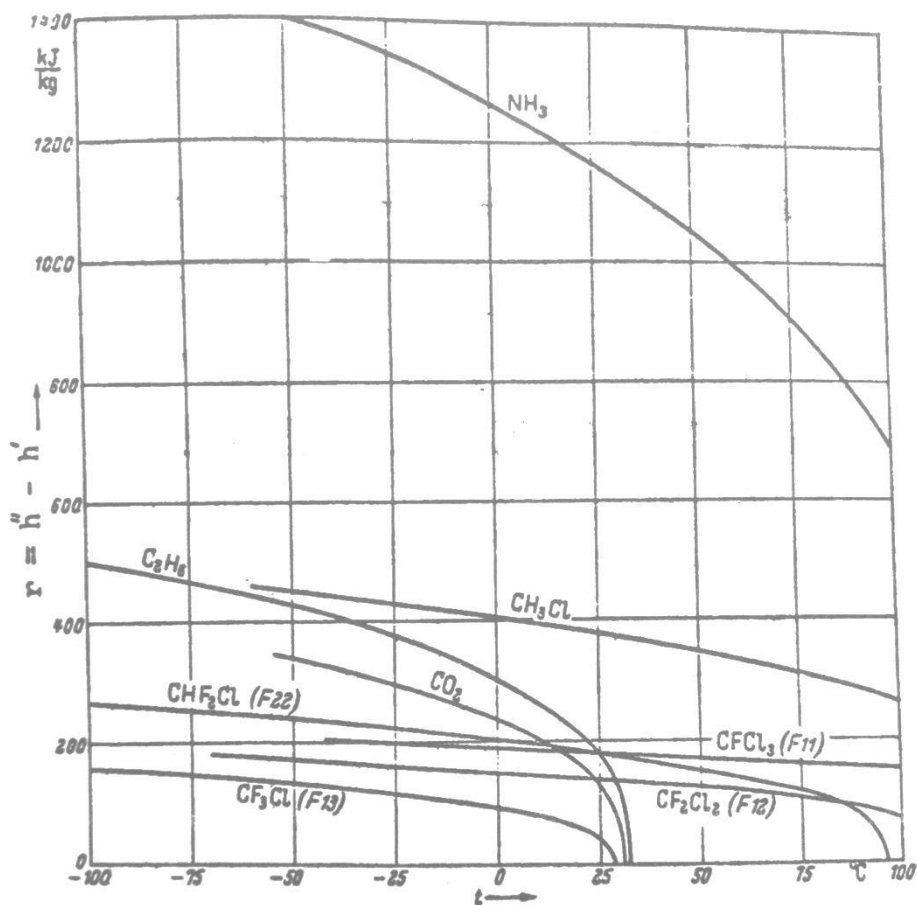
[8],[9]

2.4 Ιδιότητες μερικών κυριότερων ψυκτικών μέσων.

R717-Αμμωνία (NH₃).

Η αμμωνία χρησιμοποιήθηκε αρχικά ως ψυκτικό μέσο για ψυκτικές εγκαταστάσεις παραγωγής ψύξης με απορρόφηση το 1859. Σήμερα η αμμωνία αποτελεί ένα από τα πιο διαδεδομένα ψυκτικά μέσα, η δε θερμοκρασιακή περιοχή εφαρμογής της εκτείνεται από τους -60 °C έως τους 10 °C. Μοριακό βάρος 17,03. Σημείο ζέσεως -33,4 °C. Η αμμωνία χαρακτηρίζεται κυρίως από το πολύ χαμηλό κόστος αγοράς και τις πολύ ευνοϊκές θερμοδυναμικές ιδιότητες της. Χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπου η τοξικότητα της αποτελεί **μειονέκτημα** δευτερευούσης σημασίας. Η ογκομετρική ψυκτική απόδοση (θερμότητα ατμοποίησης) της αμμωνίας είναι πολύ υψηλή και είναι η μεγαλύτερη όλων των ψυκτικών μέσων. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιείται

κυρίως σε ψυκτικές εγκαταστάσεις μεσαίου και μεγάλου μεγέθους με εμβολοφόρους παλινδρομικούς συμπιεστές. Η χρησιμοποίηση της αμμωνίας σε ψυκτικές εγκαταστάσεις πολύ μικρής ψυκτικής ισχύος όπως π.χ. οι οικιακές, δεν ενδείκνυται διότι θα οδηγούσε αφ' ενός σε πολύ μικρές διαστάσεις συμπιεστή και αφ' ετέρου σε πολύ μικρή παροχή διακινούμενης στην εγκατάσταση μάζας και δυσκολίες στην λειτουργική ρύθμιση της εγκατάστασης. Η διαλυτότητα του νερού σε αμμωνία είναι απεριόριστη και από το διάλυμα αυτό είναι δυνατόν να εκδιωχθεί πλήρως η αμμωνία απλά με θέρμανση. Η αμμωνία ως ψυκτικό μέσο διαλύεται ελάχιστα στα λιπαντικά έλαια. Βασικό μειονέκτημα της αμμωνίας είναι η ισχυρή της τοξικότητα, έχει όμως διαπεραστική προειδοποιητική οσμή και γίνεται αντιληπτή ακόμα και σε πολύ μικρή περιεκτικότητα της τάξεως των 5 PPM. Παρακάτω δίδεται ένα διάγραμμα για την λανθάνουσα θερμότητα και άρα την ψυκτική ισχύ διάφορων ψυκτικών μέσων σε συνάρτηση με την θερμοκρασία. [20],[21]



Εικόνα 2.2 Διάγραμμα λανθάνουσας θερμότητας διάφορων ψυκτικών μέσων σε συνάρτηση με την θερμοκρασία [21]

R744-Διοξείδιο του άνθρακα (CO₂).

Το διοξείδιο του άνθρακα δε χρησιμοποιείται ιδιαίτερα ως ψυκτικό μέσο στις ψυκτικές εγκαταστάσεις, λόγω των υψηλών πιέσεων στις οποίες οδηγεί η χρήση του. Οι υψηλές πιέσεις εντός των εγκαταστάσεων συνεπάγονται βαριές και αντισυμβατικές κατασκευές. Το διοξείδιο του άνθρακα ήταν σε χρήση κυρίως σε ψυκτικές εγκαταστάσεις πλοίων. Αν και το διοξείδιο του άνθρακα μέχρι πρόσφατα είχε βασικά εκτοπισθεί από τα νεότερα ψυκτικά μέσα, τα παράγωγα του μεθανίου και του αιθανίου, επανήλθε τα τελευταία χρόνια για οικονομικούς κυρίως λόγους ως πιθανή λύση αντικατάστασης των απαγορευθέντων παραγώγων του μεθανίου και του αιθανίου που περιέχουν χλώριο. Κρίσιμη θερμοκρασία 31,1 °C.

R764-Διοξείδιο του θείου (SO₂).

Το διοξείδιο του θείου χρησιμοποιούταν συχνά σε οικιακά ψυγεία από το 1920 έως το 1940. Θερμοκρασία ατμοποίησης -10,0 °C. Είναι διαβρωτικό και τοξικό. Η χρήση του έχει ολοκληρωθεί ως ψυκτικό λόγω των έντονων προβλημάτων υγείας που προκαλεί η διαρροή του και της τοξικότητάς του. [20],[21]

Γενικές ιδιότητες παραγώγων μεθανίου και αιθανίου.

Όλα τα παράγωγα του μεθανίου που δεν περιέχουν φθόριο είναι τοξικά και έχουν ναρκωτικές ιδιότητες. Αυξάνοντας όμως την περιεκτικότητα τους σε άτομα φθορίου, με την αντικατάσταση ατόμων υδρογόνου ή χλωρίου από άτομα φθορίου, ελατώνεται ισχυρά η τοξικότητα αυτών. Το μεθάνιο είναι αναφλέξιμο, όλα όμως τα παράγωγα του που περιέχουν 3 ή 4 αλογόνα άτομα ανά μόριο, είναι μη αναφλέξιμα και δεν εκρήγνυνται.

Πρακτικά είναι μη τοξικά και δεν προσβάλλουν τα αναπνευστικά όργανα. Είναι άοσμα μέχρι περιεκτικότητας 20% vol. στον αέρα. Λόγω των ιδιοτήτων αυτών καλούνται και ψυκτικά μέσα ((ασφαλείας)) και χρησιμοποιούνται για τον κλιματισμό αιθουσών και χώρων συγκέντρωσης ατόμων.

Η παρουσία ατόμου υδρογόνου στο μόριο οδηγεί σε μειωμένη ατμοσφαιρική διάρκεια ζωής λόγω της δυνατότητας αντίδρασης του υδρογόνου με μόρια της κατώτερης στρατόσφαιρας, ενώ από την άλλη υψηλό ποσοστό ατόμων υδρογόνου στο μόριο το καθιστά πιο εύφλεκτο.

R11 Τριχλωροφθορομεθάνιο (CCl₃F).

Σημείο ζέσεως 23,77 °C. Μοριακό βάρος 137,37. Θερμοκρασιακό εύρος εφαρμογής -30 °C έως -20 °C. Λόγω του μεγάλου μοριακού βάρους του το R11 χρησιμοποιείται στις ψυκτικές εγκαταστάσεις μεγάλης ψυκτικής ισχύος, οι οποίες για την συμπίεση του ατμού διαθέτουν μονοβάθμιους και πολυβάθμιους φυγοκεντρικούς συμπιεστές. Η ψυκτική ισχύς των εγκαταστάσεων αυτών κυμαίνεται από 0,006 kW έως 7.000 kW ανά φυγοκεντρική μονάδα, βρίσκουν δε εφαρμογή στη βιομηχανία για την ψύξη μεγάλων ποσοτήτων νερού σε μεγάλες εγκαταστάσεις κεντρικού κλιματισμού, στον κλιματισμό ορυχείων και μεγάλων οικοδομικών συγκροτημάτων, στη χημική βιομηχανία κ.α.

R12 Διχλωροδιφθορομεθάνιο (CCl₂F₂).

Σημείο ζέσεως -29,80 °C. Μοριακό βάρος 120,92. Θερμοκρασιακή περιοχή χρήσης -40 °C έως +10 °C. Το R12 εμφανίσθηκε και χρησιμοποιήθηκε στην πράξη ως το R-ψυκτικό μέσο σε ψυκτικές εγκαταστάσεις μικρού και μεσαίου μεγέθους. Είχε την μεγαλύτερη χρήση από όλα τα παράγωγα του μεθανίου και του αιθανίου, με εφαρμογή στα ψυγεία οικιακής χρήσης, στους καταψύκτες, σε μικρές και μεσαίες επαγγελματικές ψυκτικές εγκαταστάσεις, σε ψυκτικές εγκαταστάσεις κλιματισμού και ψυχρής αποθήκευσης τροφίμων, σε ψυκτικές εγκαταστάσεις μεταφοράς ευπαθών τροφίμων, σε εγκαταστάσεις κλιματισμού ορυχείων κ.α. Λόγω των χαμηλών πιέσεων συμπίκνωσης το R12 χρησιμοποιήθηκε ιδιαίτερα στις εγκαταστάσεις αντλιών θερμότητας. Το R12 είναι μη τοξικό, μη εύφλεκτο, και μη εκρηκτικό αλλά δεν είναι πολύ σταθερό παράγωγο διότι περιέχει μόνο άνθρακα και τα αλογόνα χλώριο και φθόριο. Έτσι σήμερα η χρήση του έχει σταματήσει για οικολογικούς λόγους σύμφωνα με το πρωτόκολλο του Montreal.

R13 Χλωροτριφθορομεθάνιο (CClF₃).

Σημείο ζέσεως -81,40 °C. Μοριακό βάρος 104,47. Θερμοκρασιακή περιοχή εφαρμογής -100 °C έως -70 °C. Το ψυκτικό μέσο R13 χρησιμοποιήθηκε βασικά σε ψυκτικές εγκαταστάσεις παραγωγής ψύξης πολύ χαμηλών θερμοκρασιών. Η κρίσιμη θερμοκρασία του R13 είναι +28,8 °C, για αυτό ακριβώς το R13 ήταν το ψυκτικό μέσο της χαμηλής βαθμίδας ψυκτικών εγκαταστάσεων πολυβάθμιας συμπίεσεως, συνδέσεως κλιμακωτού καταρράκτη (cascade), στις οποίες ως μέσο υψηλής βαθμίδας χρησίμευε συνήθως το R22. Τα λιπαντικά έλαια δεν διαλύονται στο R13 και για τον λόγο αυτό απαιτεί επαρκή διαχωρισμό του ελαίου λιπάνσεως μετά την έξοδο από τον συμπιεστή και επαναφορά του στον ελαιοθάλαμο του συμπιεστή, ώστε να διασφαλισθεί η ομαλή λειτουργία της ψυκτικής εγκατάστασης. Για οικολογικούς λόγους σήμερα δεν χρησιμοποιείται.

R21 Διχλωροφθορομεθάνιο (CHCl₂F).

Σημείο ζέσεως +8,92 °C. Μοριακό βάρος 102,92. Το R21 έχει πολύ υψηλές θερμοκρασίες συμπυκνώσεως, συχνά της τάξεως των +70 °C έως +80 °C και για τον λόγο αυτό χρησίμευε κυρίως για τον κλιματισμό των θαλαμίσκων των χειριστών γερανογεφυρών εντός χαλυβουργείων, χυτηρίων κ.α. , όπου επικρατούν πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Παρά τις υψηλές θερμοκρασίες συμπυκνώσεως του συγκεκριμένου ψυκτικού μέσου, η πίεση συμπυκνώσεως του παραμένει συνήθως κάτω από τα 10 bar, γεγονός το οποίο οδηγεί σε ελαφρές κατασκευές των εγκαταστάσεων. Η πίεση ατμοποίησης είναι συνήθως λίγο μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής πίεσεως. Για την χρήση του, ισχύουν αυτά που αναφέρθηκαν και στο R12.

R22 Χλωροδιφθορομεθάνιο (CHClF₂).

Σημείο ζέσεως -40,80 °C. Μοριακό βάρος 86,48. Θερμοκρασιακή περιοχή εφαρμογής -80 °C έως +5 °C. Το ψυκτικό μέσο αυτό χρησιμοποιείται κυρίως για την παραγωγή ψύξης σε χαμηλές θερμοκρασίες, καθώς και για την ταχεία κατάψυξη τροφίμων από -20 °C έως -40 °C. Για την συμπίεση του R22 χρησιμοποιούνται γενικά εμβολοφόροι συμπιεστές, ανοικτού ή κλειστού τύπου. Η ογκομετρική ψυκτική ικανότητα του R22 (δηλαδή η ενέργεια ψύξης που παίρνουμε ανά κυβικό μέτρο ψυκτικού μέσου) είναι περίπου κατά 60% με 65% μεγαλύτερη της αντίστοιχης του R12. Γι'αυτό το R22 χρησιμοποιείται συχνά αντί του R12 για να πετύχουμε οικονομία χώρου και

μικρότερους συμπίεστές, δεδομένου ότι η απαιτούμενη ψυκτική ισχύς μιας συγκεκριμένης εφαρμογής, στην περίπτωση που χρησιμοποιηθεί R22 αντί του R12, είναι δυνατόν να επιτευχθεί με σημαντικά μικρότερους συμπίεστές.

Το γεγονός αυτό μπορεί να αξιοποιηθεί σε όλες εκείνες τις περιπτώσεις, στις οποίες οι απαιτήσεις σε ψυκτική ισχύ αυξηθούν και δεν μπορούν να καλυφθούν από την υφιστάμενη ψυκτική εγκατάσταση που λειτουργεί με R12. Στην περίπτωση αυτή είναι δυνατόν να αυξηθεί η ψυκτική ισχύς της εγκαταστάσεως, με τους ίδιους συμπίεστές, εάν αντικατασταθεί το R12 με το ψυκτικό μεσό R22. Προφανώς απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στην περίπτωση αυτή, γιατί οι πιέσεις λειτουργίας του R22 είναι αρκετά υψηλότερες αυτών του R12 και επομένως και οι θερμοκρασίες στο τέλος της συμπίεσεως θα είναι υψηλότερες. Επίσης πρέπει να εξεταστεί και η επάρκεια των υπόλειπων συνιστωσών, όπως ατμοποιητής και συμπυκνωτής, για την κάλυψη των αυξημένων, λόγω της αλλαγής ψυκτικού μέσου, φορτίων τους που θα προκύψουν, έτσι ώστε η λειτουργία τους να μην γίνει προβληματική. Για το R22 λόγω του ότι έχει και χλώριο εκτός από υδρογόνο υπάρχει δέσμευση ως προς την διάθεση του στην αγορά.

R134a 1,1,1,2-Τετραφθοροαιθάνιο (CH₂FCF₃).

Το R134a είναι ένας υδροφθοράνθρακας που αναπτύχθηκε για να αντικαταστήσει το R12. Δεν περιέχει άτομο χλωρίου και έτσι δεν συμβάλλει στην αποσύνθεση της στοιβάδας του όζοντος. Πάραυτα, έχει επίδραση ως αέριο θερμοκηπίου. Σημείο ζέσεως -26,16 °C. Το R134a χρωματίζεται σε ελαφρύ ιώδες χρώμα. Είναι αδρανές αέριο και χρησιμοποιείται για ως ψυκτικό μέσο υψηλών θερμοκρασιών για οικιακή ψύξη και κλιματισμό αυτοκινήτων και οχημάτων. Εισάχθηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1990 για την αντικατάσταση του R12 όπως προαναφέρθηκε και ως επακόλουθο, γίνονται ερευνητικές προσπάθειες για αντικατάσταση του από ψυκτικά μέσα με μικρότερη επίδραση αερίου ρύπου του θερμοκηπίου όπως το HFO-1234yf και άλλα.

2.5 Απαραίτητες πληροφορίες για χρήση σε ψυκτικά κυκλώματα.

Ψυκτικά μέσα για φυγοκεντρικούς συμπιεστές.

Οι φυγοκεντρικοί συμπιεστές απαιτούν ψυκτικά μέσα που να έχουν μεγάλο μοριακό βάρος και μικρή ογκομετρική ψυκτική ικανότητα. Αυτό συμβαίνει γιατί η χρήση των φυγοκεντρικών συμπιεστών προϋποθέτει την ύπαρξη μεγάλων ποσοτήτων ατμών προς συμπίεση, με κατά το δυνατόν μικρό λόγο πιέσεων συμπίεσης/ρψύξης αφού δεν είναι δυνατή η ελάττωση των διαστάσεων ενός φυγοκεντρικού συμπιεστή πέρα από ένα όριο. Κατάλληλα ψυκτικά μέσα για φυγοκεντρικούς συμπιεστές είναι: R11 (CCl_3F), R113 ($\text{C}_2\text{Cl}_3\text{F}_3$), R114 ($\text{C}_2\text{Cl}_2\text{F}_4$). Η θερμοκρασιακή περιοχή χρήσης αυτών εκτείνεται από $-30\text{ }^\circ\text{C}$ έως $-20\text{ }^\circ\text{C}$.

Ψυκτικά μέσα και υγρασία.

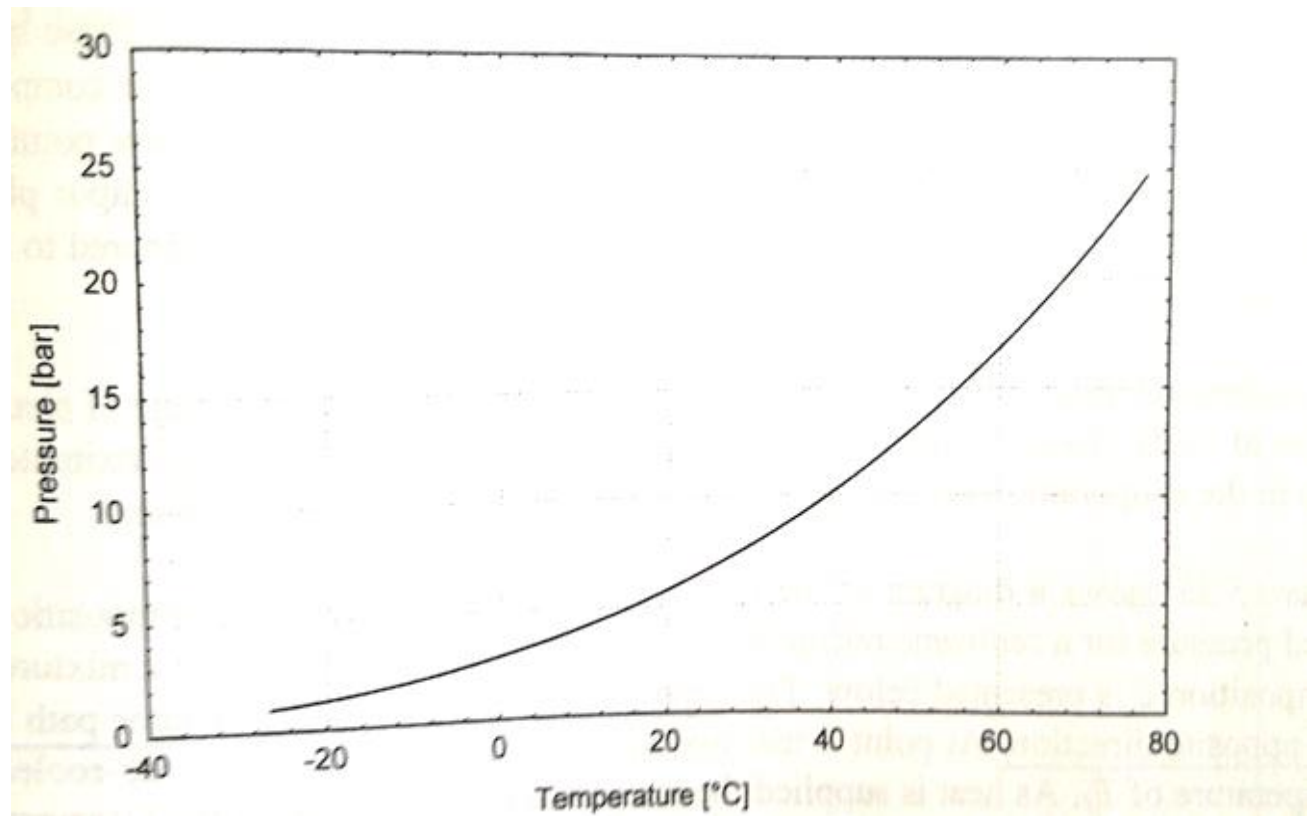
Τα επίπεδα υγρασίας σε ένα ψυκτικό σύστημα πρέπει να διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα. Η υγρασία μπορεί να προκαλέσει τον σχηματισμό ισχυρά διαβρωτικών ενώσεων (συνήθως οξέων) μαζί με τα χρησιμοποιούμενα ψυκτικά μέσα και να αντιδράσουν με το λιπαντικό έλαιο και τα υλικά του συστήματος. Η υγρασία επίσης μπορεί να εμφανίζεται και ως "ελεύθερο ύδωρ" εάν το περιεχόμενο υγρασίας είναι μεγαλύτερο από αυτό που μπορεί να διαλυθεί από το ψυκτικό μέσο και το έλαιο. Έτσι, θα το ελεύθερο αυτό ύδωρ θα παγώσει στην βαλβίδα εκτόνωσης ή/και στον ατμοποιητή εάν η θερμοκρασία πέσει κάτω από το σημείο πήξης του ύδατος. Ο σχηματισμός πάγου στην βαλβίδα εκτόνωσης θα αποτρέψει την ροή του ρευστού ψυκτικού μέσου και θα καταστήσει το σύστημα εκτός λειτουργίας έως ότου ο πάγος λιώσει και η ροή επανέλθει στα φυσιολογικά επίπεδα. Τα προβλήματα υψηλών επιπέδων υγρασίας μπορούν να περιοριστούν με αλλαγή του φίλτρου αφύγρανσης του ψυκτικού μέσου. [20],[21]

2.6 Μίγματα ψυκτικών μέσων.

Για σταθερό όγκο εμβολισμού του συμπιεστή μιας ψυκτικής εγκατάστασης και για ορισμένες θερμοκρασίες ατμοποίησης και συμπυκνώσεως είναι δυνατόν να πετύχουμε διαφοροποίηση της ψυκτικής αποδόσεως της υπόψη εγκατάστασεως, χρησιμοποιώντας διαφορετικά ψυκτικά

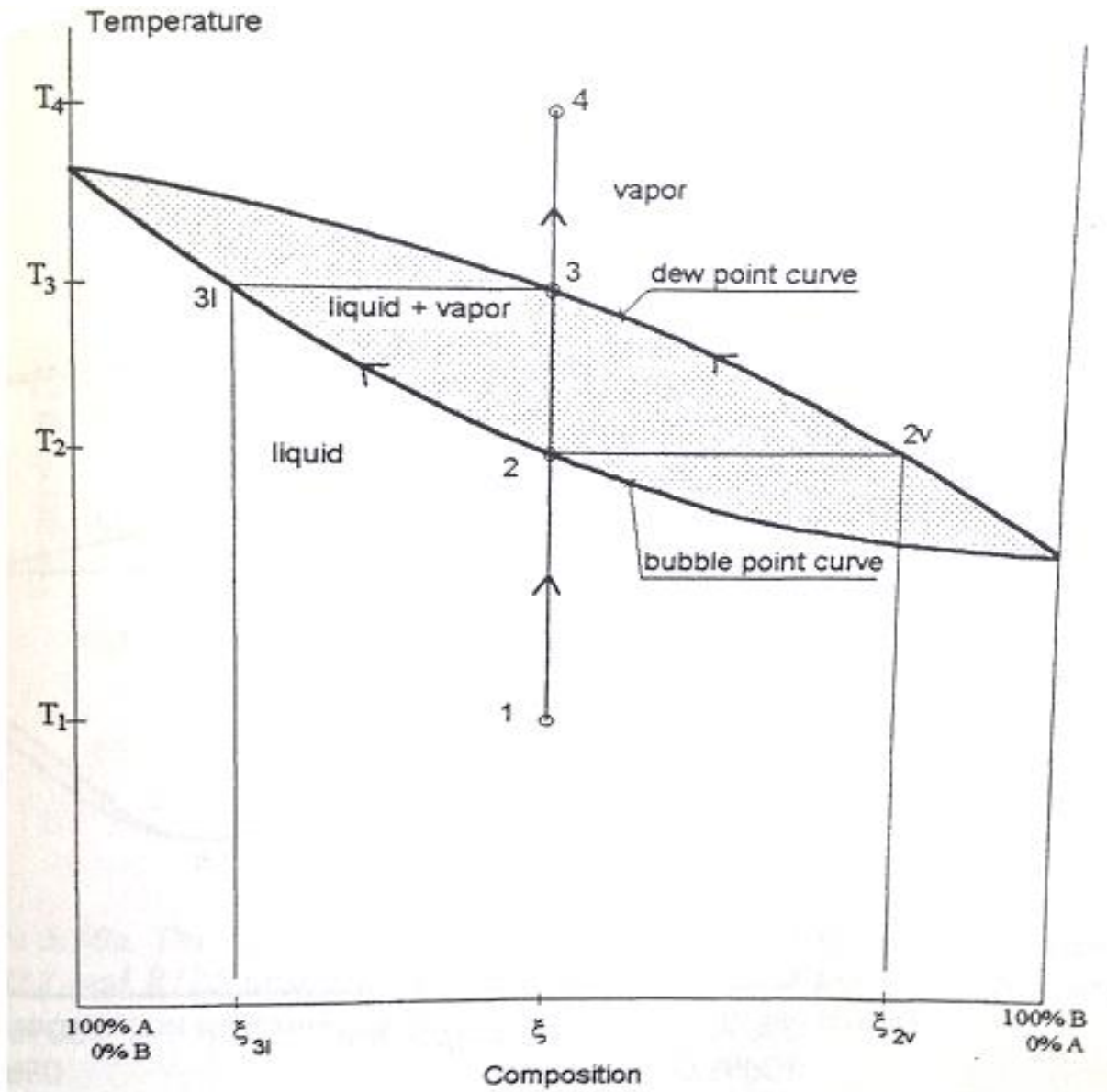
μέσα. Προϋπόθεση φυσικά είναι ,ότι ο συμπιεστής μπορεί από κατασκευαστικής πλευράς,να χρησιμοποιηθεί για διάφορα ψυκτικά μέσα.Για να πετύχουμε επακριβώς ορισμένες επιθυμητές εκάστοτε απαιτήσεις,σε ότι αφορά την ψυκτική ισχύ,χρησιμοποιούμε μίγματα ψυκτικών μέσων και κυρίως αζεοτροπικά μίγματα αυτών,τα οποία ως γνωστών συμπεριφέρονται όπως τα αμιγή ψυκτικά μέσα.Έτσι για σταθερή πίεση,η ατμοποίηση ενός αζεοτροπικού μίγματος πραγματοποιείται και υπό σταθερή θερμοκρασία ακριβώς όπως και στην περίπτωση του αμιγούς ψυκτικού μέσου,ταυτόχρονα η σύνθεση του παραμένει σταθερή,τόσο στην υγρή όσο και στην αέρια φάση του.Το γεγονός ότι στην Αμερική χρησιμοποιείται ηλεκτρικό ρεύμα 60 Hz ενώ στην Ευρώπη ρεύμα 50 Hz,έχει ως αποτέλεσμα ότι συμπιεστές που εργάζονται με ψυκτικό μέσο R12 και είναι κατασκευασμένοι για λειτουργία με ηλεκτρικό ρεύμα 60 Hz όταν χρησιμοποιηθούν σε ρεύμα 50 Hz,θα έχουν μικρότερη ψυκτική απόδοση,γιατί όπως είναι γνωστό,ο αριθμός στροφών ενός συμπιεστή είναι ανάλογος της συχνότητας του ρεύματος μέσω του ηλεκτροκινητήρα που τον κινεί και του τυχόν μειωτήρα στροφών ($n = \frac{2f60}{P}$, με P αριθμός πόλων).Έτσι όταν ελαττωθούν οι στροφές του συμπιεστή,ελαττώνεται και το ρεύμα μάζας ψυκτικού μέσου που διακινείται στην ψυκτική εγκατάσταση.Για να αποφευχθεί η ελάττωση της ψυκτικής απόδοσης των ψυκτικών εγκαταστάσεων όταν λειτουργούν με ρεύμα 50 Hz,χρησιμοποιούνται αζεοτροπικά μίγματα μεγαλύτερης ογκομετρικής ψυκτικής απόδοσης.Τέτοιο μίγμα είναι π.χ. το ψυκτικό μέσο R500 που είναι αζεοτροπικό μίγμα με κατά μάζα σύσταση 73,8% R12 και 26,2% R152a.Το αζεοτροπικό μίγμα R500 αποδίδει για τις ίδιες συνθήκες θερμοκρασίας ψύξη μεγαλύτερη κατά 20% περίπου από εκείνη του R12.Έτσι για λειτουργία με εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα 50 Hz έχουμε την ίδια ψυκτική απόδοση όπως και στην περίπτωση λειτουργίας της ίδιας ψυκτικής εγκατάστασης με R12 αλλά με εναλλασσόμενο ρεύμα συχνότητας 60 Hz. **[20],[21]**

Όταν ένα καθαρό ψυκτικό (δηλαδή αυτό που αποτελείται μόνο από μία ένωση) ατμοποιείται ή συμπυκνώνεται,η θερμοκρασία θα παραμείνει σταθερή καθ'όλη την διάρκεια της αλλαγής φάσης εάν η πίεση διατηρείται σταθερή.Η θερμοκρασία αλλαγής φάσης συνδέεται με την πίεση με μία συνάρτηση πίεσης ατμοποίησης που δίδεται με ένα διάγραμμα πίεσης ατμοποίησης όπως παρακάτω:



Εικόνα 2.3 Διάγραμμα πίεσης ατμοποίησης συναρτήσει της θερμοκρασίας [21]

Ζεοτροπικό ονομάζουμε ένα μίγμα ενώσεων το οποίο ποτέ δεν έχει την ίδια σύσταση υγρού με την σύσταση ατμού όταν βρίσκεται στην κατάσταση θερμοδυναμικής διφασικής ισορροπίας. Οι καμπύλες υγροποίησης και ατμοποίησης δεν έρχονται σε επαφή μεταξύ τους εκτός από τα σημεία καθαρών συνιστωσών. Αζεοτροπικά ονομάζουμε τα μίγματα στα διαγράμματα θερμοκρασίας-σύστασης των οποίων οι καμπύλες υγροποίησης και ατμοποίησης έρχονται σε επαφή μεταξύ τους τουλάχιστον σε ένα σημείο δείχνοντας έτσι την ύπαρξη ισότητας στην σύσταση υγρής και αέριας φάσης. Παρακάτω φαίνεται ένα διάγραμμα ζεοτροπικού μίγματος.



Εικόνα 2.4 Διάγραμμα ζεοτροπικού μίγματος ψυκτικών μέσων [21]

2.7 Δευτερεύοντα ψυκτικά μέσα ή ψυκτικοί φορείς.

Για την αντιμετώπιση περιόδων αιχμών ζήτησης ψυκτικής ισχύος στις διάφορες εφαρμογές της ψύξης (βιομηχανία τροφίμων, ψυχή αποθήκευση ευαλοϊώντων προϊόντων κ.α.) ιδιαίτερα παλιότερα όπου η τεχνική της ρύθμισης της ψυκτικής ισχύος των ψυκτικών μηχανών ήταν

δύσκολη και ανεπαρκής, άρχισε η χρησιμοποίηση των δευτερεύοντων ψυκτικών μέσων ή ψυκτικών φορέων.

Οι ψυκτικοί φορείς ψύχονται απ'ευθείας με την βοήθεια των ψυκτικών μέσων και μπορούν να αποθηκευθούν σε δεξαμενές και αργότερα να χρησιμοποιηθούν, αφ'ενός για την απομάκρυνση θερμικών φορτίων από χώρους που βρίσκονται μακριά από την ψυκτική εγκατάσταση και αφ'ετέρου χρησιμοποιούνται σε περιόδους αιχμής για την κάλυψη ακραίων απαιτήσεων σε ψυκτική ισχύ, που υπερβαίνουν την μέγιστη ψυκτική ισχύ της εγκατάστασης. Για να επιτευχθεί αυτό πρέπει να υπάρχει αποθηκευμένη επαρκής ποσότητα προψυχθέντος δευτερεύοντος ψυκτικού μέσου.

Οι απαιτήσεις που πρέπει να πληρούν οι ψυκτικοί φορείς δίδονται παρακάτω:

-Το σημείο στερεοποίησης αυτών πρέπει να βρίσκεται μακριά της θερμοκρασιακής περιοχής εφαρμογής τους.

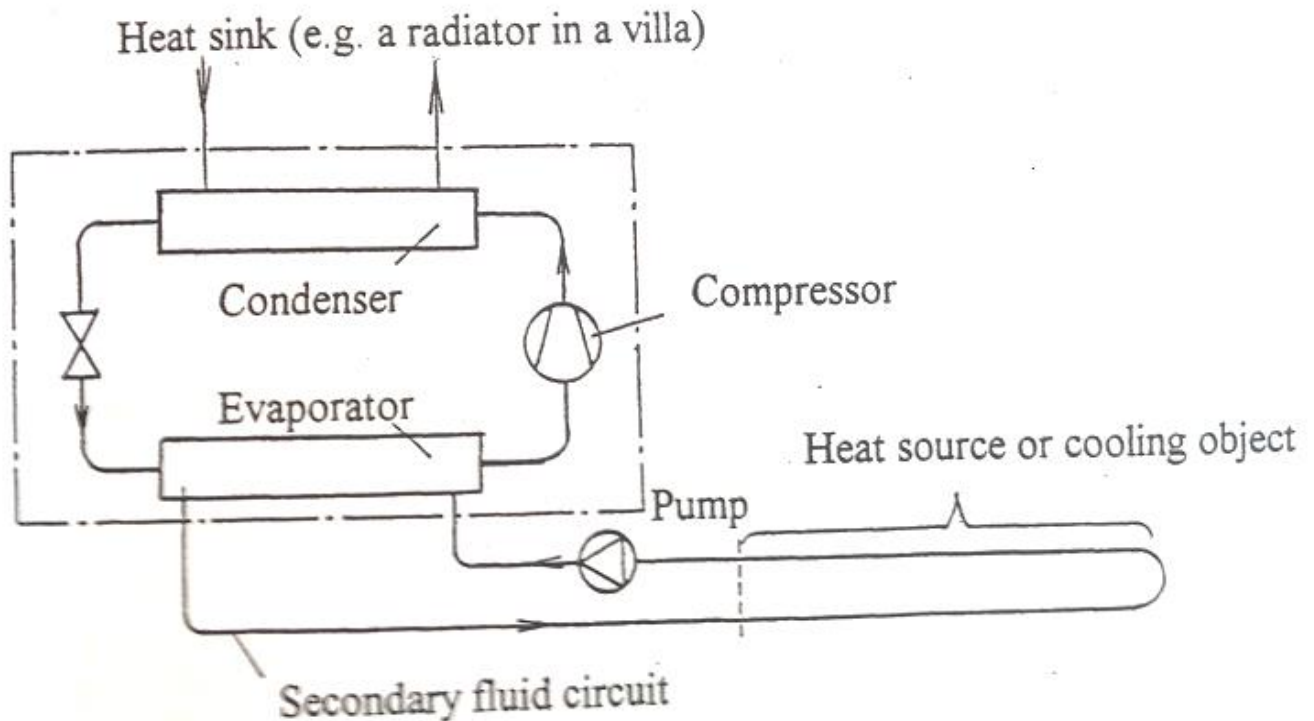
-Η ειδική θερμοχωρητικότητα τους πρέπει να είναι μεγάλη, έτσι ώστε το απαιτούμενο ρεύμα μάζας του ψυκτικού φορέα, για την απομάκρυνση συγκεκριμένου ποσού θερμότητας, να είναι μικρό.

-Να μην προσβάλλουν ούτε να διαβρώνουν τα υλικά κατασκευής των ψυκτικών εγκαταστάσεων.

-Να είναι χημικά ευσταθείς.

Οι πιο χαρακτηριστικοί ψυκτικοί φορείς είναι ο αέρας, το νερό (σε θερμοκρασίες $>0\text{ }^{\circ}\text{C}$) και για χαμηλότερες των $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ θερμοκρασίες, οι ψυκτικές άλμες δηλαδή διαλύματα χλωριούχου ασβεστίου (CaCl_2), χλωριούχου νατρίου (NaCl) και χλωριούχου μαγνησίου (MgCl_2). [21]

Παρακάτω δίνουμε μία σχηματική αποϊκόνιση ψυκτικής εγκατάστασης με ψυκτικό φορέα.



Εικόνα 2.5 Σχηματική αναπαράσταση κυκλώματος με ψυκτικό φορέα [21]

2.8 Πίνακας ιδιοτήτων κυριότερων βιομηχανικών ψυκτικών μέσων.

Παρακάτω δίδεται ένας εκτενής πίνακας για τα κυριότερα ψυκτικά μέσα στο οποίο βλέπουμε κατά σειρά: τον **τύπο της ένωσης** (π.χ. CFC=χλωροφθοράνθρακας), τον **αριθμό κατά ASHRAE**, την **ονοματολογία κατά IUPAC**, τον **μοριακό τύπο**, το **μοριακό βάρος**, το σημείο ατμοποίησης για καθαρές ενώσεις, τα σημεία ατμοποίησης/υγροποίησης για ζεοτροπικά μίγματα, το αζεοτροπικό σημείο για τα αντίστοιχα μίγματα σε °C, την **κρίσιμη θερμοκρασία** °C και τέλος την **κρίσιμη πίεση** σε MPa. [10]

Τύπος	Αριθμός	Ονοματολογία	Μοριακός Τύπος	Μοριακό Βάρος	Σημείο Ατμοποίησης	Κρίσιμη Θερμοκρασία	Κρίσιμη Πίεση
PCC	R-10	Carbon tetrachloride (Tetrachloromethane)	CCl ₄	153.8	76.72	283.35	4,56
CFC	R-11	Trichlorofluoromethane	CCl ₃ F	137.4	23.77	197.96	4,408
CFC	R-12	Dichlorodifluoromethane	CCl ₂ F ₂	120.9	-29.8	111.97	4,136
CFC	R-13	Chlorotrifluoromethane	CClF ₃	104.5	-81.5	28.73	3,877
HCC	R-20	Chloroform (Trichloromethane)	CHCl ₃	119.4	61.2	262.35	5,48
HCFC	R-21	Dichlorofluoromethane	CHCl ₂ F	102.9	8.92	178.45	5,18
HCFC	R-22	Chlorodifluoromethane	CHClF ₂	86.5	-40.7	96.14	4,99
HFC	R-23	Trifluoromethane (Fluoroform)	CHF ₃	70.0	-82.1	25.92	4,836
HFC	R-134	1,1,2,2-Tetrafluoroethane	C ₂ H ₂ F ₄	102.0			
HFC	R-134a	1,1,1,2-Tetrafluoroethane	C ₂ H ₂ F ₄	102.0	-26.3	101.06	4,059
HCFC	R-401A	R-22/152a/124 (53±2/13+.5,-1.5/34±1)	53±2% CHClF ₂ ·13+.5 , - 1.5% C ₂ H ₄ F ₂ ·34±1% C ₂ HF ₄ Cl	94.4	-34.4/-28.8	105.27	4,613
HFC	R-404A	R-125/143a/134a (44±2/52±1/4±2)	44±2% C ₂ HF ₅ ·52±1 % C ₂ H ₃ F ₃ · 4±2% C ₂ H ₂ F ₄	97.6	-46.6/-45.8	72.14	3,735
HCFC	R-406A	R-22/600a/142b (55±2/4±1/41±0)	55±2% CHClF ₂ ·4±1% C ₄ H ₁₀ ·41± 0% C ₂ H ₃ F ₂	89.9	-32.7/-23.5	116.5	4,881

			Cl				
HFC	R-407A	R-32/125/134a (20±2/40±2/40±2)	20±2% CH ₂ F ₂ ·40±2% C ₂ HF ₅ ·40 ±2% C ₂ H ₂ F ₄	90.1	-45.2/-38.7	81.91	4,487
HFC	R-407C	R-32/125/134a (23±2/25±2/52±2)	23±2% CH ₂ F ₂ ·25±2% C ₂ HF ₅ ·52 ±2% C ₂ H ₂ F ₄	86.2	-43.8/-36.7	86.05	4,634
HCFC	R-408A	R-125/143a/22 (7±2/46±1/47±2)	7±2% C ₂ H F ₅ ·46±1% C ₂ H ₃ F ₃ ·47 ±2% CHCl F ₂	87.0	-45.5/-45.0	83.5	4,34
HCFC	R-409A	R-22/124/142b (60±2/25±2/15±1)	60±2% CH ClF ₂ ·25±2 % C ₂ HF ₄ Cl ·15±1% C ₂ H ₃ F ₂ Cl	97.4	-35.4/-27.5	106.92	4,6
HFC	R-410A	R-32/125 (50+.5,- 1.5/50+1.5,-.5)	50+.5,- 1.5% CH ₂ F ₂ ·50+1.5,- .5% C ₂ HF ₅	72.6	-51.6/-51.5	70.17	4,77
HFC	R-438A	R-32/125/134a/600/601a (8.5+.5,- 1.5/45±1.5/44.2±1.5/1.7+. 1,-.2/.6+.1,-.2)	8.5+.5,- 1.5% CH ₂ F ₂ ·45±1.5% C ₂ HF ₅ ·44. 2±1.5% C ₂ H ₂ F ₄ ·1.7+. 1,- .2% C ₄ H ₁₀ · .6+.1,-	99.1	-43.0/-36.4		

			.2% C ₅ H ₁₂				
HCFC	R-500	R-12/152a (73.8/26.2)	73.8% CCl ₂ F ₂ · 26.2% C ₂ H ₄ F ₂	99.3	-33/0	102.15	4,173
HCFC	R-501	R-22/12 (75/25)	75% CHCl ₂ F ₂ · 25% CCl ₂ F ₂	93.1	-41/-41	96.19	4,764
HCFC	R-502	R-22/115 (48.8/51.2)	48.8% CHClF ₂ · 51.2% C ₂ F ₅ Cl	111.6	-45/19	80.73	4,019
	R-702	Hydrogen	H ₂	2.016	-252.87	-239.95	1,3
	R-704	Helium	He	4.002	-268.93	-267.96	227
	R-717	Ammonia	NH ₃	17.03	-33.34	132.4	11,28
	R-718	Water/Steam	H ₂ O	18.02	100	373.946	22,06
	R-728	Nitrogen	N ₂	28.01	-195.79	-146.9	3,39
	R-729	Air N2/O2/Ar (78.082/20.945/.934 vol%)	78.082% N ₂ · 20.945% O ₂ · .934% Ar	28.97	-192.97	-140.53	3,785
	R-732	Oxygen	O ₂	32.0	-182.95	-118.6	5,05
	R-744	Carbon dioxide	CO ₂	44.0	-78	31.04	7,38
	R-744A	Nitrous oxide	N ₂ O	44.0	-88.48	36.4	7,24
	R-764	Sulfur dioxide	SO ₂	64.1	-10	157.65	7,88
HFO	R-1234yf	2,3,3,3-Tetrafluoropropene	C ₃ H ₂ F ₄	114.0	-29.4		

Κεφάλαιο 3.

3. Συμπιεστές αερίου.

3.1 Γενικά περί συμπιεστών.

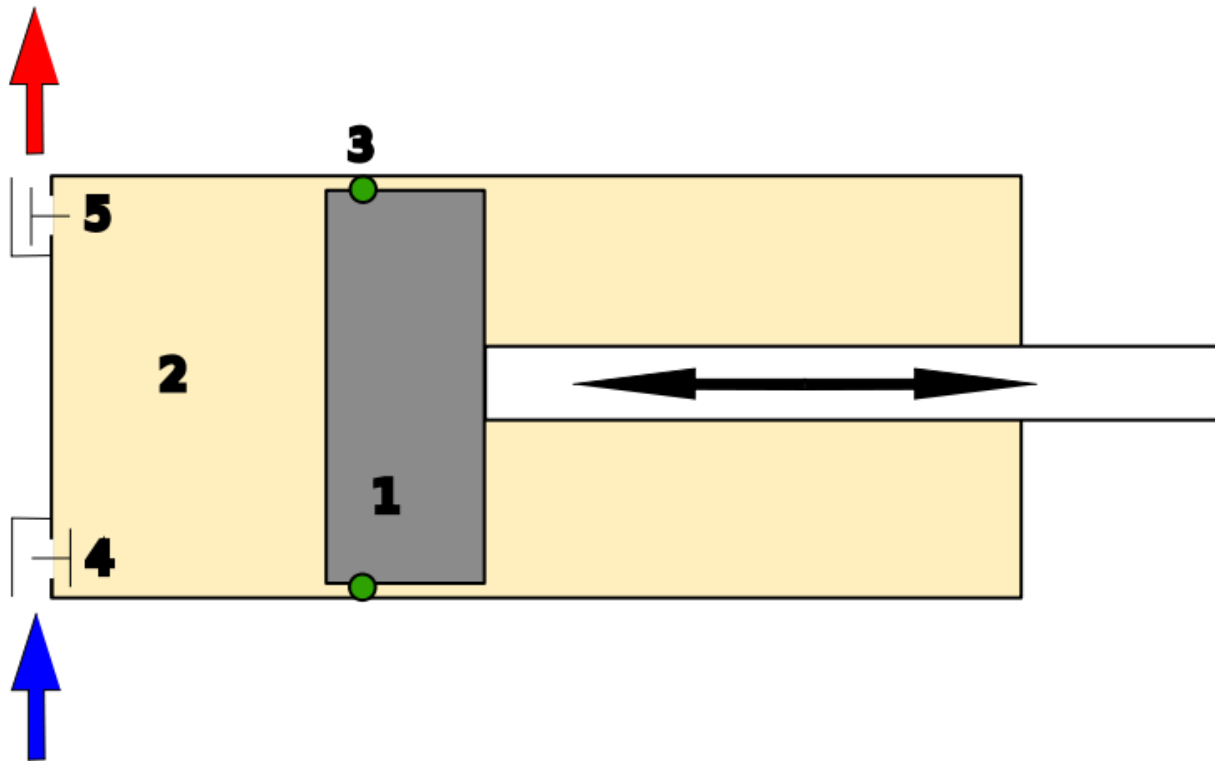
Ένα από τα πιο σημαντικά μέρη του κυκλώματος μηχανικής συμπίεσης ατμών είναι προφανώς ο συμπιεστής που χρησιμοποιείται. Οι πιο συνηθισμένοι τύποι συμπιεστών είναι: παλινδρομικοί, περιστροφικοί τύπου Lysholm, φυγοκεντρικοί, αξονικής ροής και φυσητήρες Roots. Πιο συγκεκριμένα κάθε τύπος συμπιεστή χρησιμοποιείται ανάλογα με την εφαρμογή για το μέγεθος, τον θόρυβο, τον βαθμό απόδοσης και την αύξηση της πίεσης. Οι συμπιεστές συχνά περιγράφονται και ως ανοικτοί, ερμητικοί και ημι-ερμητικοί ανάλογα με το που βρίσκεται ο συμπιεστής ή/και ο κινητήρας σε σχέση με το ψυκτικό μέσο το οποίο συμπιέζεται. Σε τυπικούς ερμητικούς και ημι-ερμητικούς μηχανισμούς ο κινητήριος μηχανισμός και ο συμπιεστής ψύχονται από το ψυκτικό το οποίο συμπιέζεται. Βέβαια σοβαρό μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι ο κινητήρας (ηλεκτροκινητήρας για πληρότητα) δεν μπορεί να συντηρηθεί επιτόπου και πρέπει να αφαιρεθεί ολόκληρο το σύστημα του συμπιεστή. Επιπλέον, τοιχόν ((καμμένες)) (δηλαδή που έχουν αστοχήσει) περιελίξεις στον ηλεκτροκινητήρα μπορεί να οδηγήσουν σε μόλυνση ολόκληρου του ψυκτικού συστήματος, με αποτέλεσμα την ανάγκη για εξ ολοκλήρου αφαίρεση και αντικατάσταση του ψυκτικού μέσου.

Οι συμπιεστές ανοικτού τύπου είναι γενικά ευκολότεροι ως προς την ψύξη τους, χρησιμοποιώντας αέρα περιβάλλοντος και έτσι αποτελούν μηχανήματα απλούστερα στον σχεδιασμό και πιο αξιόπιστα, ειδικά σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλή πίεση όπου οι θερμοκρασίες είναι πολύ υψηλές.

3.2 Παλινδρομικός συμπιεστής.

Ο παλινδρομικός συμπιεστής ή συμπιεστής με πιστόνι είναι ένας συμπιεστής θετικής εκτόπισης ο οποίος χρησιμοποιεί πιστόνια οδηγούμενα από στροφαλοφόρο άξονα για να αυξήσει την

πίεση σε αέρια.Ακριβώς όπως στην λειτουργία μίας μηχανής εσωτερικής καύσεως με απουσία βέβαια του φαινομένου της καύσης,το αέριο εισέρχεται στον οχετό εισαγωγής και από εκεί μέσω της βαλβίδας εισαγωγής οδηγείται στον κύλινδρο (θάλαμο) συμπίεσης όπου συμπιέζεται από το πιστόνι σε σχεδόν αδιαβατικό περιβάλλον και ύστερα εκκενώνεται από την βαλβίδα εξαγωγής.Οι εφαρμογές περιλαμβάνουν διυληστήρια πετρελαίου,αγωγούς αερίου,χημικές εγκαταστάσεις και βιομηχανίες,επεξεργασία φυσικού αερίου και εγκαταστάσεις ψύξης.Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η λειτουργία ενός παλινδρομικού συμπιεστή και ένας τυπικός συμπιεστής κλιματιστικού. [11],[20],[21],[26]



Εικόνα 3.1 Σχηματική παράσταση παλινδρομικού συμπιεστή

1.Έμβολο , 2.Όγκος εμβολισμού (χώρος συμπίεσης) , 3.Ελατήρια στεγανοποίησης , 4.Βαλβίδα εισαγωγής , 5.Βαλβίδα εξαγωγής



Εικόνα 3.2 Παλινδρομικός συμπιεστής κλιματιστικής μονάδας

3.3 Περιστροφικοί κοχλιοειδείς συμπιεστές (τύπου Lysholm).

Ο περιστροφικός συμπιεστής διαθέτει περιστροφικό μηχανισμό θετικής εκτόπισης και χρησιμοποιείται για να αντικαταστήσει παλινδρομικούς συμπιεστές σε εφαρμογές στις οποίες απαιτείται μεγάλος όγκος αερίου σε πολύ υψηλή πίεση όπως στα κομπρεσέρ θραύσεως σκυροδέματος. Στους συγκεκριμένους συμπιεστές η περιστροφική κίνηση είναι συνεχής έτσι ώστε να υπάρχει πολύ λίγη πάλμωση της ροής όπως συμβαίνει και στους παλινδρομικούς.

Ο περιστροφικός συμπιεστής χρησιμοποιεί δύο συζευγμένους ελικοειδής κοχλίες γνωστούς και ως ρότορες για να συμπιέσει το αέριο. Στον εν λόγω μηχανισμό χρησιμοποιούνται γρανάζια χρονισμού για να διασφαλίσουν ότι ο αρσενικός και ο θηλυκός κοχλίας διατηρούνται σε ακριβή ευθυγράμμιση.

Η αποδοτικότητα του μηχανισμού εξαρτάται από την ακριβή πλήρωση των διακένων μεταξύ των ελικοειδών κοχλιών και μεταξύ των κοχλιών και του θαλάμου για στεγάνωση των κοιλοτήτων συμπίεσης.

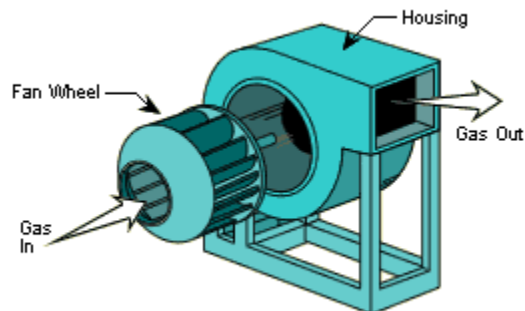
Οι περιστροφικοί συμπιεστές είναι συμπαγής με ομαλή λειτουργία και περιορισμένη δόνηση με αποτέλεσμα να μην απαιτείται ανάρτηση με ελατήριο. [11]



Εικόνα 3.3 Τυπικός συμπιεστής Lysholm.

3.4 Φυγοκεντρικοί (ή ακτινικοί) συμπιεστές.

Οι φυγοκεντρικοί συμπιεστές αποτελούν υποκατηγορία των συμπιεστών δυναμικής αξονοσυμμετρικής εργο-απορροφητικής ροής. Επιτυγχάνουν αύξηση της πίεσης αυξάνοντας την κινητική ενέργεια/ταχύτητα σε συνεχόμενη ροή ρευστού διαμέσου πτερωτής. Η κινητική αυτή ενέργεια ύστερα μετασχηματίζεται σε αύξηση στατικής πίεσης εξ'αίτιας ραγδαίας και απότομης επιβράδυνσης της ροής μέσω ενός διαχύτη δηλαδή ενός αποκλίνοντος ακροφυσίου.



Εικόνα 3.4 Ακτινικός συμπιεστής

Τυπική διάταξη φυγοκεντρικού συμπιεστή.

Μέρη ενός φυγοκεντρικού συμπιεστή.

Εισαγωγή.

Η εισαγωγή συνήθως είναι ένας απλός αγωγός. Μπορεί βέβαια να φέρει χαρακτηριστικά εξαρτήματα όπως βαλβίδες, σταθερά πτερύγια/αεροτομές (για να μορφοποιήσουν την ροή πριν εισέλθει στην πτερωτή) και όργανα μέτρησης πίεσης και θερμοκρασίας.

Πτερωτή.

Η πτερωτή φυγοκεντρικού συμπιεστή (ακτινικού) περιέχει μία συστάδα πτερυγίων τα οποία σταδιακά αυξάνουν την ενέργεια του εργαζόμενου μέσου. Στις μοντέρνες εφαρμογές το αέριο εξέρχεται από την πτερωτή με σχεδόν ηχητική ροή.

Διαχύτης.

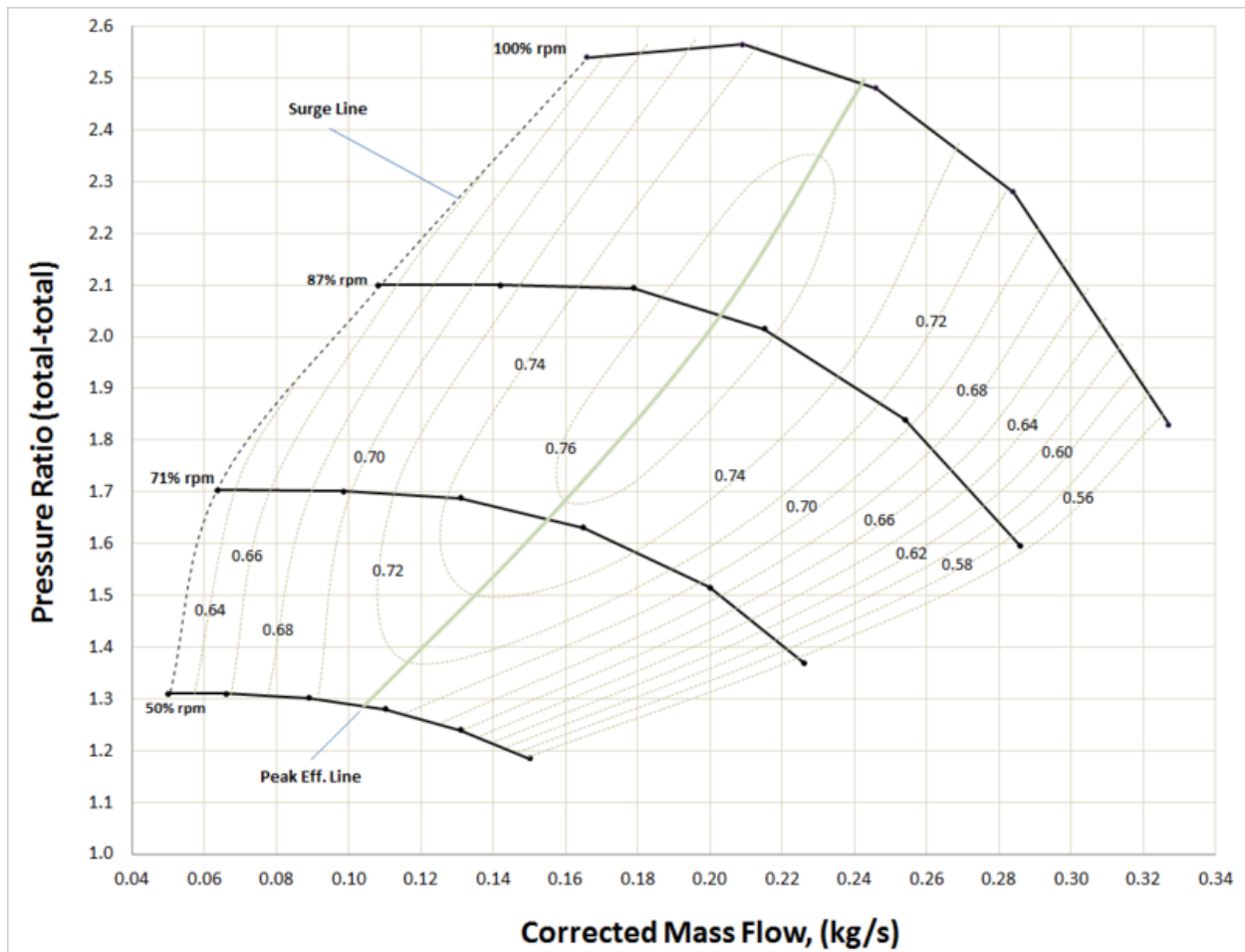
Το εξάρτημα αυτό δηλαδή ο διαχύτης ή αλλιώς μορφοποιητής ροής ακολουθεί την πτερωτή και η λειτουργία του είναι να μετατρέψει την κινητική ενέργεια (υψηλή ταχύτητα) σε δυναμική ενέργεια (υψηλή πίεση) με σταδιακή επιβράδυνση της ροής. Ο διαχύτης μπορεί να φέρει πτερύγια ή να είναι γυμνός.

Εφαρμογές.

- Αεριοστρόβιλοι και βοηθητικές μονάδες ισχύος.
- Αυτοκινητοβιομηχανία για στροβιλουπερπληρωτές και υπερσυμπιεστές (turbocharger, supercharger).
- Συμπιεστές συστημάτων αγωγών φυσικού αερίου.
- Διυληστήρια πετρελαίου, επεξεργασία φυσικού αερίου, πετροχημικά και χημικά εργοστάσια.
- Βιομηχανία κατασκευής και παροχής συμπιεσμένου αέρα για πνευματικά εργαλεία.
- Εργοστάσια διαχωρισμού αέρος, για παραγωγή καθαρών και παραγώγων αερίων.
- Σε εγκαταστάσεις αντήσεως πετρελαίου με επαν-έγχυση φυσικού αερίου υψηλής πίεσης με σκοπό την βελτίωση ανάκτησης πετρελαίου.

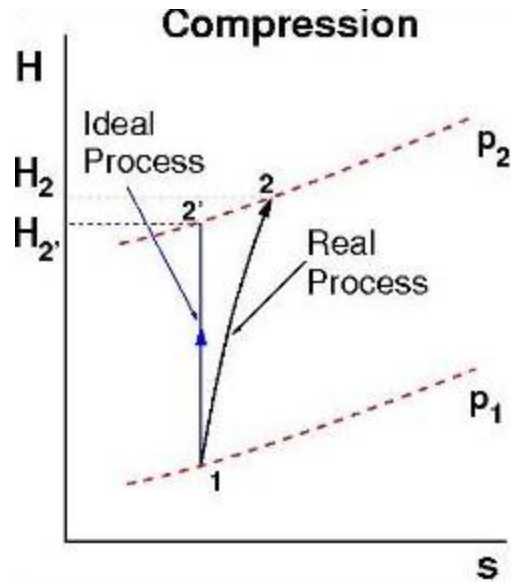
-Κλιματισμός, ψύξη και HVAC (Heating Ventilation and Air Conditioning).

Ίσως το πιο σημαντικό για να εκλέξουμε έναν ακτινικό συμπιεστή για την εκάστοτε εφαρμογή, είναι ο χάρτης του. Ο χάρτης μας δίνει πληροφορίες ζωτικής σημασίας για την πίεση, την παροχή μάζας ή όγκου, τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης και το εάν η ροή είναι ασφαλής ως προς το φαινόμενο της πάλμωσης και του στραγγαλισμού. Ο χάρτης λοιπόν είναι ένα διάγραμμα όπου στον οριζόντιο άξονα βλέπουμε την παροχή (ανηγμένη συνήθως) που διέρχεται διαμέσου του συμπιεστή, ενώ στον κατακόρυφο άξονα την αύξηση της πίεσης η οποία επιτυγχάνεται. Χαρακτηριστικές είναι οι ισοταχείς γραμμές δηλαδή οι γραμμές κατά μήκος των οποίων η ταχύτητα περιστροφής του ρότορα διατηρείται σταθερή, τα νησιά ισεντροπικού βαθμού απόδοσης, δηλαδή ελλειπτικές γραμμές πάνω στις οποίες ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης είναι σταθερός, η γραμμή πάλμωσης (surge line) δηλαδή η γραμμή πάνω στην οποία συμβαίνει το φαινόμενο της πάλμωσης κατά το οποίο ο συμπιεστής δεν μπορεί να προσθέσει αρκετή ενέργεια για να υπερνικήσει την αντίσταση του συστήματος (backpressure), ως αποτέλεσμα έχουμε ραγδαία αντιστροφή της ροής (οπισθοροή) και έτσι εμφανίζονται δονήσεις, αυξήσεις στην θερμοκρασία και απότομες αλλαγές στην αξονική ώθηση. Εξ' αιτίας αυτού του φαινομένου ο ρότορας υφίσταται ζημιά και επαναλαμβανόμενες παλμώσης οδηγούν στην ολοκληρωτική αστοχία του. Η γραμμή πάλμωσης βρίσκεται στο άνω όριο του χάρτη και πάνω από αυτήν ο συμπιεστής δεν μπορεί να λειτουργήσει. Τέλος η γραμμή στραγγαλισμού δηλαδή της κατάστασης απότομης (κατακόρυφης) πτώσης στην πίεση με μηδενική σχεδόν αλλαγή στην παροχή μάζας της ροής. Ο κύριος λόγος για την εμφάνιση του παραπάνω φαινομένου είναι ότι κάπου στην πτερωτή επιτεύχθηκε ταχύτητα ροής κοντά στην ηχητική. Η γραμμή στραγγαλισμού βρίσκεται στο κατώτερο όριο του χάρτη για τον χαμηλότερο βαθμό απόδοσης για τον οποίο η λειτουργία του συμπιεστή είναι ασφαλής και υποδεικνύει πως κάτω από αυτήν ο συμπιεστής αστοχεί. Στο παρακάτω σχήμα παρατίθεται ένας τυπικός χάρτης ακτινικού συμπιεστή όπου φαίνονται τα προαναφερθέντα. **[11],[21]**



Εικόνα 3.5 Χάρτης λόγου πίεσης συναρτήσει της διακινούμενης παροχής για ακτινικό συμπιεστή. Διαφαίνονται η γραμμή πάλμωσης, οι ισοταχείς γραμμές, τα νησιά ισεντροπικού βαθμού απόδοσης και η γραμμή στραγγαλισμού. Η γραμμή στο κέντρο αποτελεί εκφυλισμένο νησί και είναι η γραμμή του μέγιστου ισεντροπικού βαθμού απόδοσης.

Η κύρια εξίσωση την οποία θα χρησιμοποιήσουμε για τον εκάστοτε συμπιεστή, είναι ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης. Στον συμπιεστή, η αύξηση στην πίεση γίνεται μη ιδανικά, υπάρχει αύξηση της εντροπίας σύμφωνα με τον δεύτερο θερμοδυναμικό νόμο ($dQ=Tds$) η οποία προσομοιάζεται με την βοήθεια της εξίσωσης του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης. Ας δούμε ένα διάγραμμα για καλύτερη κατανόηση.



Εικόνα 3.6 Διάγραμμα Ενθαλπίας-Θερμοκρασίας για επεξήγηση του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης

$$\eta_{is} = \frac{h'_2 - h_1}{h_2 - h_1}, \quad (2.1)$$

Εδώ να σημειωθεί ότι ο συμπιεστής ενός ψυκτικού κυκλώματος σε αυτοκίνητο έχει ισχύ περίπου 3kW για ένα μικρό όχημα, το οποίο δεν είναι καθόλου αμελητέα ποσότητα (περίπου όσο χρειάζεται μία καλή αντλία θερμότητας για ένα μεγάλο σπίτι).

Κεφάλαιο 4.

4. Ο Ατμοποιητής

4.1 Λειτουργία του ατμοποιητή.

Για να εξηγήσουμε την λειτουργία του ατμοποιητή θα χρησιμοποιήσουμε το παράδειγμα του κλιματιστικού όπως αναφέρθηκε και προηγούμενα. Το κλιματιστικό απορροφά θερμότητα από την πηγή θερμότητας δηλαδή το ψυχρότερο εσωτερικό του χώρου και την αποδίδει στην

καταβόθρα θερμότητας δηλαδή το θερμότερο περιβάλλον καταναλώνοντας ηλεκτρική ενέργεια για την λειτουργία του συμπιεστή και κάποιου κυκλοφορητή στον ατμοποιητή. Το εξάρτημα λοιπόν του ψυκτικού συστήματος το οποίο μας αποδίδει την ψύξη είναι ο ατμοποιητής (evaporator). Ο ατμοποιητής αποτελείται από αγωγούς, σερπαντίνες ή τυλίγματα (coils) όπως ονομάζονται, κατασκευασμένες από χαλκό ή αλουμίνιο διαμέσου των οποίων ρέει το ψυκτικό μέσο με τον ψυχόμενο αέρα να ρέει στο εξωτερικό τους. Για σταθερή πίεση του ψυκτικού μέσου η λειτουργία του ατμοποιητή βρίσκεται μέσα στην καμπάνα του διαγράμματος Mollier. Το ψυκτικό μέσο εισέρχεται στην αρχή του ατμοποιητή σε μορφή διφασικού μίγματος δηλαδή υγρό/ατμός (σε μερικές περιπτώσεις και ως κορεσμένο υγρό δηλαδή στο όριο της καμπύλης υγροποίησης), παράλληλα, χρησιμοποιείται ένας κυκλοφορητής (ανεμιστήρας) για να επάγει την κίνηση του αέρα του δωματίου ή του χώρου που ψύχεται στο διάκενο ανάμεσα στους αγωγούς και πάλι πίσω στον χώρο. Ο θερμότερος αέρας που επάγεται στα τοιχώματα του ατμοποιητή, συναλλάσσει την θερμότητα του με το ψυκτικό μέσο το οποίο απορροφά την θερμότητα αυτή διατηρώντας σταθερή την θερμοκρασία του με αποτέλεσμα στο τέλος να ατμοποιείται δηλαδή να εκλαμβάνει την θερμότητα ως λανθάνουσα και να μεταπίπτει στην κατάσταση κορεσμένου ατμού. Ως επακόλουθο ο αέρας που επάγεται επιστρέφει ψυχρότερος στον χώρο ψύχοντας τον. Σημαντικό επίσης να αναφερθεί είναι ότι εάν η θερμοκρασία της επιφάνειας των τοιχωμάτων του ατμοποιητή είναι χαμηλότερη από το σημείο δρόσου του αέρα, η υγρασία που σχηματίζεται θα πέσει με την μορφή σταγόνων νερού από τον ατμοποιητή (όπως στο κλιματιστικό στον σωλήνα που βρίσκεται κάτω από την εξωτερική μονάδα.) Όπως έχουμε αναφέρει μετά τον ατμοποιητή σε έναν τυπικό ψυκτικό κύκλο ακολουθεί ο συμπιεστής.

Ένας φυσικός τρόπος για να κατηγοριοποιήσουμε τους ατμοποιητές είναι ανάλογα με την κατάσταση της πηγής θερμότητας: αέρια, υγρή ή στερεά. Οι ατμοποιητές που χρησιμοποιούν αέριο ως πηγή θερμότητας ονομάζονται αεροψύκτες. Κατ'αντιστοιχία οι ατμοποιητές που χρησιμοποιούν υγρό ως πηγή θερμότητας ονομάζονται υγροψύκτες. Ανεξαρτήτου της πηγής θερμότητας, υπάρχουν δύο τρόποι για να ρυθμίσουμε την ροή του ψυκτικού διαμέσου του ατμοποιητή:

Ο πρώτος είναι να οδηγήσουμε όλο το ψυκτικό μέσο που διέρχεται διαμέσου της βαλβίδας εκτόνωσης, μέσα από τον ατμοποιητή και στην συνέχεια στον συμπιεστή. Η μέθοδος αυτή ονομάζεται ξηρά εκτόνωση ή ευθεία εκτόνωση και συχνά εμφανίζεται ως DX (Direct eXpansion). Είναι απαραίτητο ο συμπιεστής να είναι απαλλαγμένος από την παρουσία σταγονιδίων υγρού για την ασφαλή λειτουργία του από διάβρωση. Για να διασφαλιστεί αυτό, το ψυκτικό μέσο πρέπει

να υπερθερμανθεί συνήθως 5-7 °C στην έξοδο του ατμοποιητή. Αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας μία θερμοστατική βαλβίδα εκτόνωσης.

Ο δεύτερος τρόπος είναι να συλλέξουμε το ψυκτικό μέσο μετά την βαλβίδα εκτόνωσης σε έναν δέκτη χαμηλής πίεσης. Σε αυτόν τον δέκτη (δηλαδή ένα δοχείο) το διφασικό μίγμα διαχωρίζεται σε υγρή και αέρια φάση και το ληφθέν υγρό τροφοδοτείται στον ατμοποιητή ενώ η αέρια φάση (ατμός) τροφοδοτεί κατ'ευθείαν τον συμπιεστή μέσω γραμμής παράκαμψης. Ο ατμοποιητής αυτού του τύπου ονομάζεται πλυμμηρισμένος ή ατμοποιητής ανακυκλοφορίας.

Παρακάτω φαίνονται 3 εικόνες από τυπικούς ατμοποιητές εμπορίου, δύο επίπεδων με σωλήνες σε μορφή σερπαντίνων και ενός ορθογωνικού.



Εικόνα 4.1 Τυπικός ατμοποιητής ψυκτικής εγκατάστασης



Εικόνα 4.2 Ατμοποιητής σε μορφή κυτίου



Εικόνα 4.3 Ατμοποιητής κλιματιστικής μονάδας

4.2 Διαμόρφωση εξισώσεων και διαστασιολόγηση ατμοποιητή.

Το πιο σημαντικό διάγραμμα για την λειτουργία του ατμοποιητή είναι αυτό της θερμοκρασιακής κατανομής σε σχέση με την θερμότητα η οποία αποδίδεται από τον αέρα του χώρου στο ψυκτικό μέσο (φορτίο ψύξης). Το διάγραμμα αυτό δείχνει την πτώση της θερμοκρασίας του ψυχόμενου χώρου και την σταθερή θερμοκρασία του ψυκτικού γιατί όπως προαναφέρθηκε η θερμότητα δεν αυξάνει την θερμοκρασία αλλά καταναλίσκεται για την αλλαγή φάσης του ψυκτικού από υγρό σε κορεσμένο ατμό.

Αν T_i είναι η διαφορά θερμοκρασίας εισόδου του αέρα του χώρου στο διάκενο του ατμοποιητή με την θερμοκρασία ατμοποίησης του ψυκτικού μέσου και T_o είναι η αντίστοιχη διαφορά θερμοκρασίας εξόδου, με την θεώρηση ότι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας U (W/m^2K) είναι σταθερός, ισχύει ότι η μέση θερμοκρασιακή διαφορά ισούται με:

$$\Delta T_{LM} = \frac{T_i - T_o}{\ln\left(\frac{T_i}{T_o}\right)}, \quad (4.1)$$

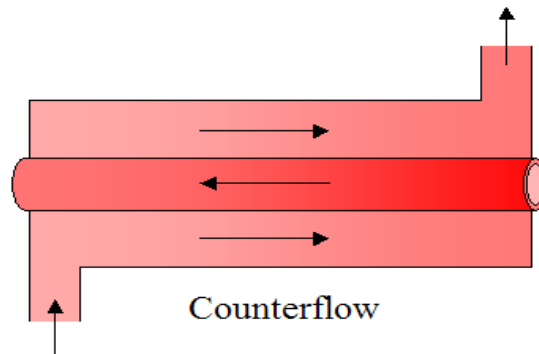
Η ψυκτική ισχύς του ατμοποιητή υπολογίζεται ως:

$$Q_e = UA\Delta T_{LM}, \quad (4.2)$$

Όπως έχουμε μάθει, ως διαφορά ενθαλπίας στην είσοδο και έξοδο του ατμοποιητή για το ψυκτικό μέσο πολλαπλασιασμένη επί την παροχή μάζας του ψυκτικού.

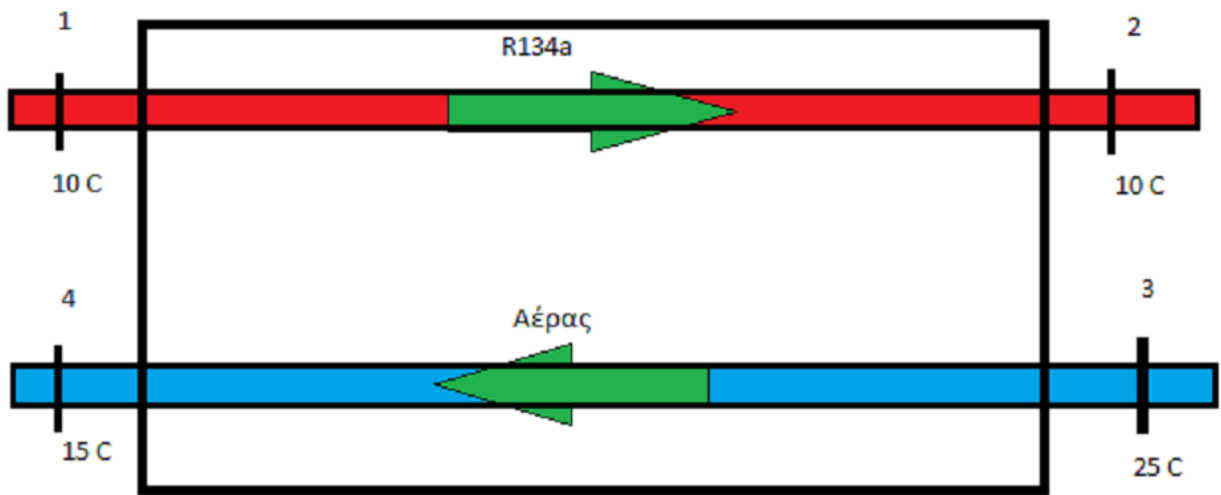
$$Q_e = m'(h_o - h_i)(W), \quad (4.3)$$

Για να κατασκευάσουμε το διάγραμμα θα θεωρήσουμε τον ατμοποιητή ως έναν εναλλάκτη θερμότητας αντιρροής.

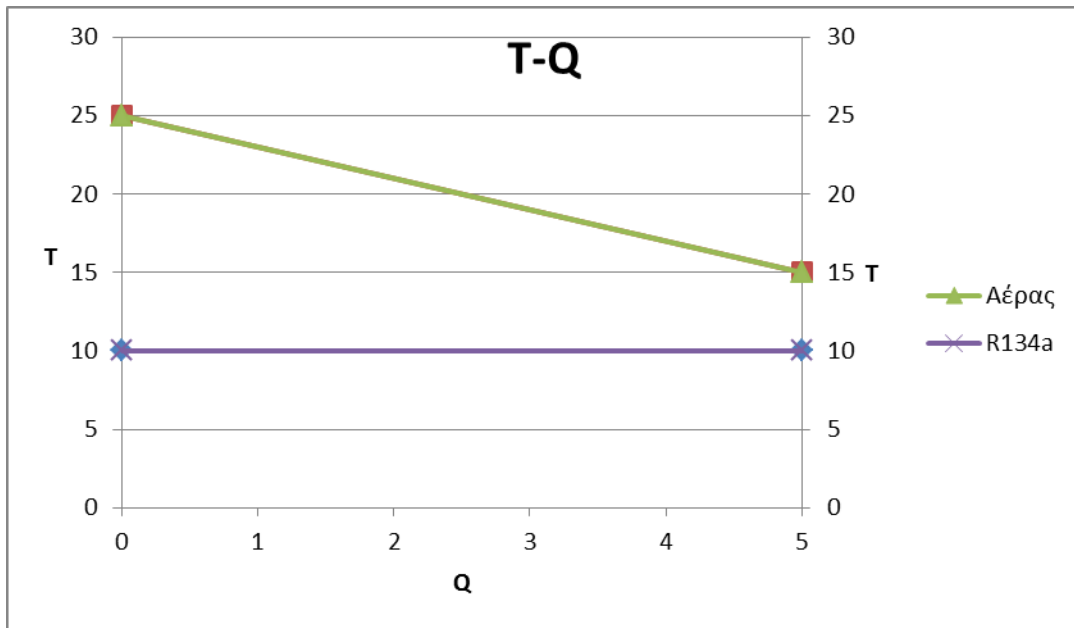


Εικόνα 4.4 Τυπικός εναλλάκτης θερμότητας αντιρροής

Ας υποθέσουμε μία απλή περίπτωση κλιματισμού στην οποία το ψυκτικό μέσο βρίσκεται σε θερμοκρασία 10 °C, ο αέρας εισέρχεται με θερμοκρασία 25 °C και εξέρχεται από τον εναλλάκτη (ατμοποιητή) με θερμοκρασία 15 °C. Παρακάτω δίδεται μία σχηματική απεικόνιση του εναλλάκτη αντιρροής.



Εικόνα 4.5 Εναλάκτης αντιρροής



Εικόνα 4.6 Διάγραμμα T-Q για την λειτουργία του εναλλάκτη θερμότητας

Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας U (W/m^2K) σε έναν εναλλάκτη με αγωγούς ορίζεται ως:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{hr} + \frac{Do - Di}{2k} + \frac{1}{hair}}, \quad (4.4)$$

Όπου:

hr (W/m^2K)=συντελεστής συναγωγής μεταξύ ψυκτικού μέσου και αγωγού.

k (W/mK)=συντελεστής αγωγιμότητας του υλικού του αγωγού.

Do, Di (m)=εξωτερική,εσωτερική διάμετρος του αγωγού.

$hair$ (W/m^2K)=συντελεστής συναγωγής μεταξύ αγωγού και αέρα.

Επειδή ο συντελεστής συναγωγής μεταξύ ψυκτικού μέσου και αγωγού είναι πολύ μεγαλύτερος σε σχέση με αυτόν μεταξύ αγωγού και αέρα,και επίσης επειδή ο συντελεστής αγωγιμότητας των μετάλλων είναι σημαντικά μεγάλος,μπορούμε με ασφάλεια να υποθέσουμε την παρακάτω προσέγγιση.

$$U \simeq hair, \quad (4.5)$$

Από τον πίνακα 8.23α σελίδα 8.17 του βιβλίου Refrigerating Engineering των Eric Granryd, Ingvar Ekroth, Bjorn Palm παρατηρούμε ότι για αέρα με εξαναγκασμένη κυκλοφορία (δράση κυκλοφορητή) έχουμε $hair=45W/m^2K$.

Η μέση λογαριθμική διαφορά θερμοκρασίας ΔTLM είναι:

$$\Delta TLM = \frac{(T3 - T2) - (T4 - T1)}{\ln\left(\frac{T3 - T2}{T4 - T1}\right)}, \quad (4.6)$$

Οπότε $\Delta TLM=9,10239$ °C.

Εάν υποθέσουμε μία ψυκτική ισχύ στον ατμοποιητή ίση με $Q_e=5$ kW δηλαδή όσο ένα κλιματιστικό ισχύος περίπου 18.000 BTU από την εξίσωση παίρνουμε με διαίρεση την απαιτούμενη επιφάνεια συναλλαγής:

$A=12,2068$ m².

Αυτή η επιφάνεια συναλλαγής εάν υποθέσουμε κλιματιστική εγκατάσταση με κυλινδρικούς αγωγούς, και επειδή η παράπλευρη επιφάνεια κυλίνδρου είναι $A_{\text{κυλ}} = \pi D_o L$ για εξωτερική διάμετρο μισής ίντσας δηλαδή $D_o = 0,5' = 1,27 \text{ cm} = 0,0127 \text{ m}$ το μήκος του αγωγού πρέπει να είναι $L = 305,9486 \text{ m}$.

Τώρα αν δεχθούμε ότι ο ατμοποιητής είναι σε μορφή κύβου, και εξ' αιτίας της μικρής διαμέτρου του αγωγού θεωρηθεί ότι οι σερπαντίνες απέχουν μεταξύ τους διάκενο τέτοιο ώστε $D_{\text{total}} = 15 \text{ mm}$ βλέπουμε ότι:

$$N = \frac{a}{Dt}, \quad (4.7)$$

$$L_o = a \frac{a}{Dt}, \quad (4.8)$$

$$L = N L_o = \frac{a^3}{Dt^2}, \quad (4.9)$$

$$a = (L D t^2)^{\frac{1}{3}}, \quad (4.10)$$

Οπότε παίρνουμε ότι $a = 0,41 \text{ m}$. Όπως γίνεται αντιληπτό το προηγούμενο αποτέλεσμα είναι επιθυμητό. Έτσι δείξαμε το πώς διαστασιολογείται ένας ατμοποιητής σύμφωνα με τις απαιτήσεις σε ψυκτική ισχύ και μείωση της θερμοκρασίας του ψυχόμενου χώρου. [12],[21]

Κεφάλαιο 5.

5. Ο Συμπυκνωτής.

5.1 Λειτουργία του συμπυκνωτή.

Ο συμπυκνωτής είναι απαραίτητος σε ένα κύκλωμα μηχανικής συμπίεσης ατμών για να μεταφέρει θερμότητα από το ψυκτικό μέσο στην καταβόθρα θερμότητας. Το ψυκτικό συνήθως εισέρχεται στον συμπυκνωτή από τον συμπιεστή σε κατάσταση υπέρθερμου ατμού και

εξέρχεται από αυτόν ως ελάχιστα υπόψυκτο υγρό,πρακτικά κορεσμένο πάνω στην καμπύλη υγροποίησης.Για ένα σύστημα κλιματιστικού η θερμότητα αυτή από τον συμπυκνωτή μεταφέρεται στον εξωτερικό (περιβαλλοντικό) αέρα.Ο συντελεστής συμπεριφοράς της ψυκτικής εγκατάστασης (COP:Coefficient Of Performance) εξαρτάται άμεσα και σε μεγάλο βαθμό από την αποτελεσματικότητα της μεταφοράς θερμότητας στον συμπυκνωτή.Στον συμπυκνωτή δηλαδή επιτελείται η ακριβώς αντίστροφη διαδικασία με τον ατμοποιητή.Θα δούμε το παράδειγμα της εξωτερικής μονάδας του κλιματιστικού.Το ψυκτικό μέσο εισέρχεται ως υπέρθερμος ατμός τυπικής θερμοκρασίας περίπου 50 °C στον συμπυκνωτή ο οποίος αποτελείται από αγωγούς αλουμινίου ή χαλκού σχηματισμένους σε σερπαντίνες.Ένας κυκλοφορητής επάγει την κυκλοφορία του αέρα περιβάλλοντος θερμοκρασίας για καλοκαίρι 35 °C, στο διάκενο μεταξύ των σερπαντίνων και λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας,μεταφέρεται θερμότητα από το ψυκτικό στον αέρα περιβάλλοντος (για αυτό η εξωτερική μονάδα απάγει θερμό αέρα) με ταυτόχρονη συμπύκνωση του ψυκτικού μέχρι την κατάσταση κορεσμένου υγρού.Γενικά μπορούμε να διαχωρήσουμε την διαδικασία συμπύκνωσης του ψυκτικού μέσου σε 3 επιμέρους τμήματα.

- 1)Αφυπερθέρμανση του υπέρθερμου ατμού ως την κατάσταση του κορεσμένου ατμού.
- 2)Συμπύκνωση του κορεσμένου ατμού ως την κατάσταση κορεσμένου υγρού.
- 3)Υπόψυξη του κορεσμένου υγρού σε χαμηλότερη θερμοκρασία και δημιουργία υπόψυκτου υγρού.

Το βέλτιστο ποσό ψυκτικού μέσου σε έναν ψυκτικό κύκλο ποικίλλει ανάλογα με το φορτίο της εγκατάστασης και τις συνθήκες λειτουργίας.Έτσι αρκετές εγκαταστάσεις είναι εφοδιασμένες με έναν παραλήπτη υγρού ο οποίος είναι τοποθετημένος μετά τον συμπυκνωτή στην πλευρά υψηλής πίεσης.Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι στον συμπυκνωτή επιτρέπεται πολύ λίγη υπόψυξη.Η ολική ποσότητα ψυκτικού μέσου αυξάνεται κατά περίπου 1% για κάθε βαθμό υπόψυξης εάν διατηρούνται σταθερές οι θερμοκρασίες συμπύκνωσης και ατμοποίησης. **[13],[21]**

Η διαστασιολόγηση του συμπυκνωτή γίνεται με την ακριβώς ίδια διαδικασία που περιγράφηκε προηγουμένως.

Παρακάτω δίνουμε ένα παράδειγμα για τις θερμοκρασίες οι οποίες υπολογίστηκαν με την βοήθεια του λογισμικού EES.(εκτενέστατη αναφορά για τον τρόπο υπολογισμού θα

ακολουθήσει στην συνέχεια της διπλωματικής αυτής εργασίας όπως έχει προαναφερθεί). Να σημειωθεί ότι χρησιμοποιούνται:

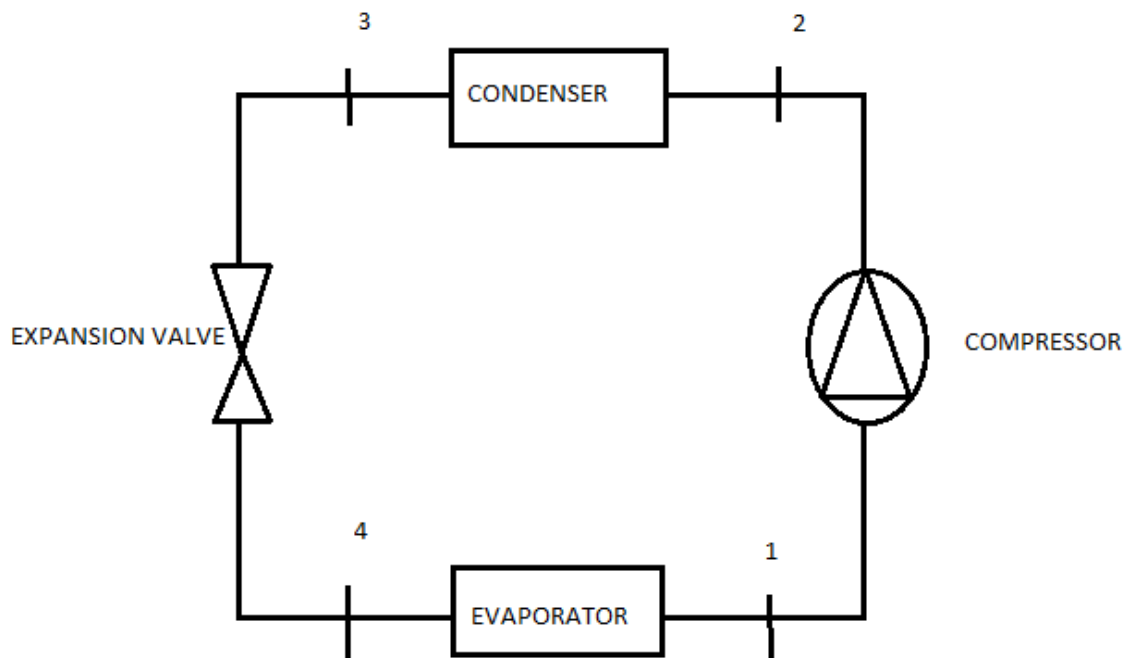
$$T_{\text{superheating}}=56,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{condensation}}=50 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{subcooling}}=48 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{air,in}}=35 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Από την ανάλυση του ατμοποιητή έχουμε $Q_e=5 \text{ kW}$ και από τις θερμοκρασίες με την βοήθεια του EES έχουμε:



Εικόνα 5.1 Μονοβάθμιος κύκλος μηχανικής συμπίεσης ατμών

$$h_1=256,2 \text{ kJ/kg}$$

$$h_2=282,8 \text{ kJ/kg}$$

$$h_3=123,5 \text{ kJ/kg}$$

$h_4=123,5 \text{ kJ/kg}$

$Q_e=m_R(h_1-h_4)\rightarrow m_R=0,0376789 \text{ kg/s.}$

$$COP = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}, \quad (5.1)$$

$COP=4,987$

Για αερόψυκτους συμπυκνωτές τυπικές τιμές του U (W/m^2K) είναι για φυσική κυκλοφορία με σερπαντίνες με πτερυγώσεις 4-7 και για εξαναγκασμένη κυκλοφορία (δηλαδή με παρουσία κυκλοφορητή) με σερπαντίνες με πτερυγώσεις 15-30.

5.2 Τύποι συμπυκνωτών.

Οι συμπυκνωτές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις συστάδες σύμφωνα με την διαθέσιμη καταβόθρα θερμότητας δηλαδή το ψυκτικό τους μέσο.

-Αερόψυκτοι συμπυκνωτές.

-Υδροψυκτοι συμπυκνωτές.

-Εξατμιστικοί συμπυκνωτές.

Οι αερόψυκτοι συμπυκνωτές είναι η κύρια επιλεγόμενη εγκατάσταση για μικρά συστήματα αλλά είναι επίσης συνηθισμένοι και για ορισμένα μεγάλα συστήματα. Ο λόγος για αυτό είναι κυρίως η πτωχή διαθεσιμότητα ψυκτικού ύδατος. Το νερό, εάν είναι διαθέσιμο, αποτελεί υπέρτερο ψυκτικό και προσφέρει λόγω των ευνοικών χαρακτηριστικών μεταφοράς θερμότητας που διαθέτει, μεγάλη ελευθερία σχεδίασης και ευκαιρίες χαμηλού κόστους εγκατάστασης. Οι υδροψυκτοι συμπυκνωτές μερικές φορές συνδυάζονται με εξατμιστικούς πύργους ψύξης τοποθετούνται σε τάρτσες κτηρίων μέσω δευτερεύοντος βρόχου. Οι εξατμιστικοί συμπυκνωτές συνηθέστερα συναντώνται σε εφαρμογές όπου το ψυκτικό ύδωρ βρίσκεται σε χαμηλές ποσότητες. Όπως υποδηλώνει και η ονομασία τους η ψύξη του συμπυκνωτή επιτυγχάνεται με εξάτμιση ύδατος επάνω στην επιφάνεια του συμπυκνωτή ή στον αέρα ψύξης.

Αερόψυκτοι συμπυκνωτές.

Οι αερόψυκτοι συμπυκνωτές μπορούν να βρεθούν σε οποιοδήποτε μέγεθος από οικιακά ψυγεία μέχρι και μεγάλες βιομηχανικές εφαρμογές. Ο τρόπος με τον οποίο ο αέρας κυκλοφορεί στο εσωτερικό τους, τους χωρίζει σε δύο μεγάλες κατηγορίες, αυτούς της φυσικής κυκλοφορίας και αυτούς της εξαναγκασμένης κυκλοφορίας.

Οι συμπυκνωτές φυσικής κυκλοφορίας συχνά χρησιμοποιούνται σε οικιακά ψυγεία. Ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της εφαρμογής είναι φυσικά η αθόρυβη λειτουργία. Οι συμπυκνωτές εξαναγκασμένης κυκλοφορίας κατασκευάζονται πολλές φορές μαζί με τον συμπιεστή στο ίδιο κάλυμα και αποτελούν αυτό που ονομάζουμε συμπυκνωτική μονάδα. Οι μονάδες αυτές συχνά τοποθετούνται σε τaráτσες κτηρίων. Επίσης η εφαρμογή αυτή προτιμάται για μικρές τιμές ψυκτικής ισχύος $<10 \text{ kW}$. Τα τυλίγματα (σερπαντίνες) του συμπυκνωτή συνήθως κατασκευάζονται από χαλκό, αλουμίνιο και χάλυβα σε ένα εύρος 6-20 mm σε διάμετρο. Ο χαλκός είναι εύκολο να χρησιμοποιηθεί στην κατασκευαστική διαδικασία (κατεργασία) και δεν απαιτεί προστασία ενάντια στην διάβρωση. Το αλουμίνιο απαιτεί ακριβή μέθοδο κατεργασίας και ειδική προστασία από φθορά και διάβρωση. Η επιλογή της διαμέτρου του σωλήνα εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως το κόστος και η αντίσταση στην μεταφορά θερμότητας. Πάραυτα μικρότερες διαμέτροι δίνουν μεγαλύτερη ευελιξία στον σχεδιασμό του κυκλώματος των τυλιγμάτων με αποτέλεσμα να ελατώνεται το ψυκτικό φορτίο. [21]

Υδροψυκτοι συμπυκνωτές.

Για μικρές εφαρμογές υπάρχουν δύο τύποι υδροψυκτων συμπυκνωτών, αυτοί των επιχαλκομένων πλακών και αυτοί του διπλού σωλήνα. Για μεγάλες εφαρμογές χρησιμοποιούνται τύπος σωλήνα σε κέλυφος και τύπος πλάκας με περίβλημα τσιμούχας. Οι πλάκες στον συμπυκνωτή επιχαλκομένων πλακών συνήθως διαμορφώνονται με κυματοειδή μορφή κάτι το οποίο οδηγεί σε υψηλή περιδίνηση και χαμηλή ευαισθησία σε αστοχία. Η σχεδίαση αυτή έχει αρκετή αντοχή σε πάγωμα και εξ' αιτίας της συμπαγούς σχεδίασης, απαιτεί χαμηλή ποσότητα ψυκτικού μέσου. Αυτό έχει μεγάλη σημασία όταν χρησιμοποιούνται ψυκτικά όπως προπάνιο, ισοβουτάνιο ή αμμωνία όπου είναι επιθυμητό να υπάρχει χαμηλό φορτίο ψυκτικού. Τιμές όπως $0,15 \text{ kg/kW}$ έχουν επιτευχθεί με αυτού του είδους τον εξοπλισμό σε μικρές εφαρμογές με ψυκτικό μέσο το R22. Για μεγάλα συστήματα με NH_3 παίρνουμε τιμές της τάξεως του $0,07 \text{ kg/kW}$. [21]

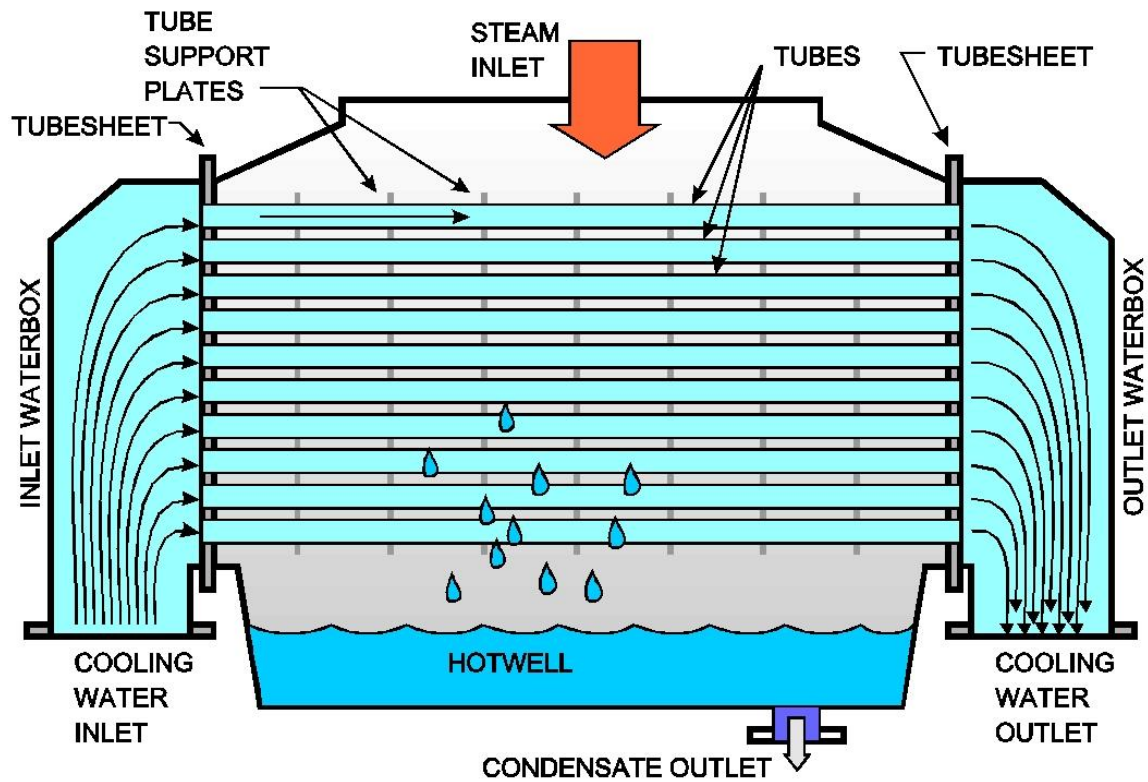
Εξατμιστικοί συμπυκνωτές.

Σε έναν εξατμιστικό συμπυκνωτή ο θερμός ατμός μεγάλης πίεσης ο οποίος έρχεται από την αποβολή φορτίου του συμπιεστή, κυκλοφορεί διαμέσου ενός συμπυκνωτικού τυλίγματος το οποίο βρέχεται συνεχώς εξωτερικά από ύδωρ. Ποσότητα αέρα οδηγείται ταυτόχρονα πάνω από το τύλιγμα προκαλώντας την εξάτμιση μίας μικρής ποσότητας του ύδατος. Η εξάτμιση αυτή απάγει θερμότητα από το τύλιγμα και έτσι οδηγεί σε ψύξη και κατ'επέκταση συμπύκνωση του ψυκτικού μέσου.

Οι εξατμιστικοί συμπυκνωτές μειώνουν την άντληση ύδατος και την απαίτηση σε χημική επεξεργασία συγκρινόμενοι με υδρόψυκτους συμπυκνωτές. Όταν συγκριθούν με αερόψυκτο συμπυκνωτή, οι εξατμιστικοί απαιτούν πολύ λιγότερη επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας και ροή αέρα για να απορρίψουν το ίδιο ποσό θερμότητας σε μία δεδομένη διαφορά θερμοκρασίας.

Σε έναν εξατμιστικό συμπυκνωτή η πιθανή θερμοκρασία συμπύκνωσης καθορίζεται από την περιβαλλοντική θερμοκρασία υγρής σφαίρας (δηλαδή την θερμοκρασία που θα είχε μία ποσότητα αέρα εάν ψυχόταν μέχρι ολικού κορεσμού (100% υγρασία) με εξάτμιση του νερού μέσα στην ποσότητα αυτή, με την λανθάνουσα θερμότητα να λαμβάνεται από την ποσότητα αέρα) ενώ σε έναν αερόψυκτο συμπυκνωτή περιορίζεται από την θερμοκρασία ξηρής σφαίρας. Το πλεονέκτημα των εξατμιστικών συμπυκνωτών είναι μεγαλύτερο σε περιοχές με ξηρότερο κλίμα. Σε περιοχές με υγρό κλίμα η διαφορά θερμοκρασίας ξηρής και υγρής σφαίρας είναι μικρή. [21]

Παρακάτω δίδονται μερικές εικόνες συμπυκνωτών για καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας τους και για πληρότητα του κεφαλαίου.



Εικόνα 5.2 Λειτουργία συμπυκνωτή



Εικόνα 5.3 Συμπυκνωτής οικιακού ψυγείου.



Εικόνα 5.4 Συμπυκνωτής κλιματιστικής μονάδας.



Εικόνα 5.5 Κέλυφος συμπυκνωτή μονάδας ατμοηλεκτρικού σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

Κεφάλαιο 6.

6. Συσκευές Εκτόνωσης.

Ο σκοπός χρήσης των συσκευών εκτόνωσης σε ένα ψυκτικό σύστημα είναι αρχικά να διατηρήσει την διαφορά πίεσης ανάμεσα στην πλευρά χαμηλής πίεσης (ατμοποιητής) και στην πλευρά υψηλής πίεσης (συμπυκνωτής) σε σύστημα που διαθέτει συμπιεστή. Σε δευτερεύον επίπεδο, οι συσκευές αυτές ρυθμίζουν την ροή του ψυκτικού μέσου για να υπάρχει συνέχεια

στην ροή θερμότητας στους εναλλάκτες.Οι συσκευές εκτόνωσης χωρίζονται σε 8 βασικές κατηγορίες:

- 1) Βαλβίδα εκτόνωσης χειρός
- 2) Τριχοειδής σωλήνας
- 3) Αυτόματη βαλβίδα εκτόνωσης
- 4) Θερμοστατική βαλβίδα εκτόνωσης
- 5) Ηλεκτρονική βαλβίδα εκτόνωσης
- 6) Βαλβίδα υψηλής πίεσης
- 7) Βαλβίδα χαμηλής πίεσης
- 8) Ρυθμιστής σταθερού επιπέδου

Για την θερμοστατική βαλβίδα εκτόνωσης ο έλεγχος της ροής του ψυκτικού μέσου επιτυγχάνεται με την χρήση ενός θαλαμίσκου ελέγχου θερμοκρασίας, πληρωμένου με παρόμοιο αέριο με αυτό του συστήματος, που αναγκάζει την βαλβίδα να ανοίξει από την πίεση μέσω ελατηρίου στο σώμα της βαλβίδας όταν η θερμοκρασία εντός του θαλαμίσκου αυξηθεί.Για την ρύθμιση της πίεσης χρησιμοποιείται βελόνα-ακροφύσιο η οποία καθορίζει το ανοίγμα του διακένου και συνεπώς την πίεση και την θερμοκρασία στον ατμοποιητή.Υπάρχουν τρία βασικά μέρη σε μια βαλβίδα εκτόνωσης τα οποία ρυθμίζουν την θέση της βελόνας.

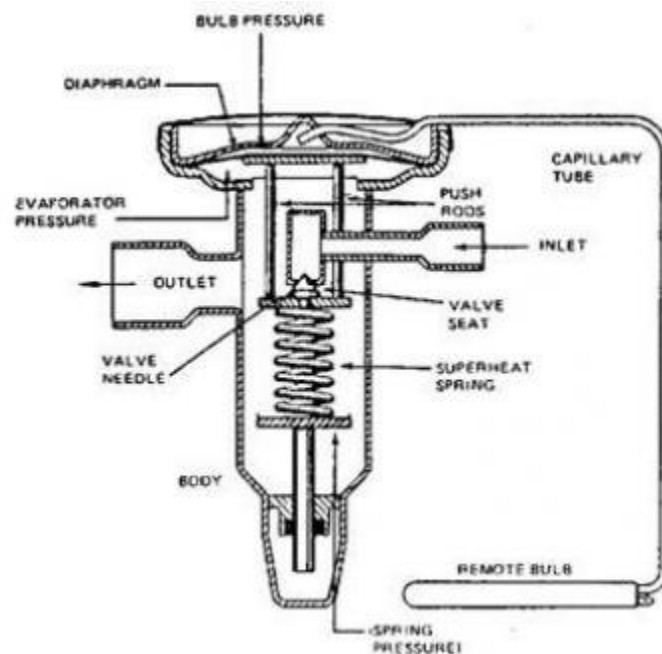
Όπως προαναφέρθηκε ο θαλαμίσκος-αισθητήρας στο τέλος του ατμοποιητή παρακολουθεί την διαφορά θερμοκρασίας στον ατμοποιητή και η διαφορά αυτή δημιουργεί μία αλλαγή στην πίεση επάνω στο διάφραγμα.

Για παράδειγμα, εάν η θερμοκρασία στον ατμοποιητή αυξηθεί, η πίεση στο διάφραγμα αυξάνεται με αποτέλεσμα η βελόνα να χαμηλώνει.Όταν η βελόνα χαμηλώσει, δίδεται η δυνατότητα στο ψυκτικό μέσο να περάσει διαμέσου της με αυξημένη παροχή μάζας και να απορροφήσει την περίσσεια και ανεπιθύμητη θερμότητα στον ατμοποιητή.Η πίεση στην είσοδο του ατμοποιητή επηρεάζει την θέση της βελόνας και αποτρέπει το εργαζόμενο μέσο από το να εισέλθει με οπισθοροή στον συμπιεστή.Αφού η πίεση πριν την βαλβίδα είναι μεγαλύτερη από την πίεση μετά από αυτήν, το ψυκτικό μέσο ρέει με φυσικό τρόπο προς τον ατμοποιητή.Επίσης η βαλβίδα διαθέτει και ένα ελατήριο το οποίο παρέχει συνεχή πίεση, κλείνοντας την βελόνα της

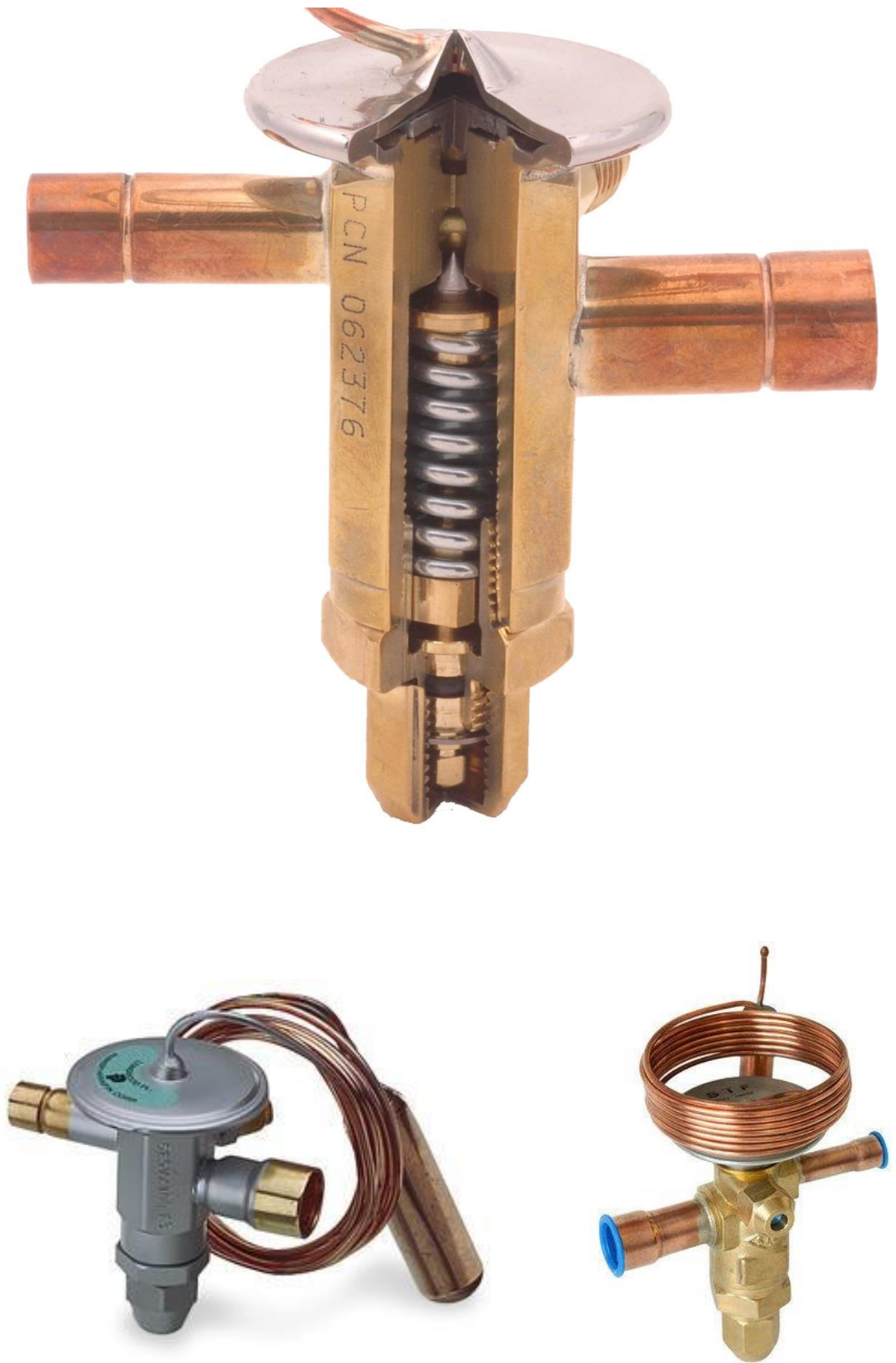
βαλβίδας. Το ελατήριο περιορίζει συνεχώς την ποσότητα του ψυκτικού μέσου που εισέρχεται στον ατμοποιητή.

Το ελατήριο πίεσεως μπορεί να ρυθμιστεί για να αυξήσει ή να μειώσει την πίεση βάση των θερμοκρασιακών απαιτήσεων. Η πίεση που δημιουργείται από το ελατήριο επιδρά στο άνοιγμα της βαλβίδας. Όταν η πίεση στον θαλαμίσκο ελέγχου θερμοκρασίας η οποία επιδρά στο διάφραγμα γίνει μεγαλύτερη από την συνδυαζόμενη πίεση ατμοποιητή και ελατηρίου, η βαλβίδα ανοίγει για να αυξηθεί η παροχή μάζας του εργαζόμενου μέσου. Η αύξηση αυτή στην παροχή μάζας του ψυκτικού μέσου χαμηλώνει την θερμοκρασία στον ατμοποιητή και επιτρέπει μεγαλύτερη απορρόφηση θερμότητας. [14],[21]

Παρακάτω δίδονται εικόνες συσκευών εκτόνωσης.



Εικόνα 6.1 Σκαρίφημα στραγγαλιστικής βαλβίδας. Φαίνονται καθαρά: το ελατήριο πίεσεως, η βελόνα και το διάφραγμα.



Εικόνα 6.2 Τυπικές βαλβίδες εκτόνωσης για κλιματιστικές συσκευές

Κεφάλαιο 7.

7. Μερική ατμοποίηση ,τύμπανο διαχωρισμού και εναλλάκτες θερμότητας.

7.1 Μερική ατμοποίηση και τύμπανο διαχωρισμού.

Το φαινόμενο της μερικής ατμοποίησης ή όπως ονομάζεται στην αγγλική ορολογία flash evaporation, είναι το μέρος του ατμού που δημιουργείται όταν μία ποσότητα κορεσμένου υγρού ρεύματος υφίσταται μείωση στην πίεση διερχόμενο από μία στραγγαλιστική βαλβίδα ή άλλη στραγγαλιστική συσκευή. Εάν η στραγγαλιστική βαλβίδα βρίσκεται στην είσοδο ενός δοχείου πίεσης έτσι ώστε η μερική ατμοποίηση να λαμβάνει χώρα εντός του δοχείου τότε αυτό ονομάζεται και **τύμπανο** (flash drum ή flash tank).

Εάν το κορεσμένο υγρό αποτελείται μόνο από μία ένωση π.χ. υγρή αμμωνία τότε ένα μέρος του υγρού ατμοποιείται κατ'ευθείαν. Ο ατμός και το εναπομένον υγρό ψύχονται μέχρι την θερμοκρασία κορεσμού του υγρού στην μειωμένη πίεση. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται και ((αυτόματη ψύξη)) και είναι η βάση των περισσότερων ψυκτικών συστημάτων με μηχανική συμπίεση ατμών.

Εάν το κορεσμένο υγρό είναι μίγμα πολλών ενώσεων, ο ατμός που προκύπτει από την μερική ατμοποίηση είναι πλουσιότερος στην πιο πτητική συνιστώσα.

Ο μη ικανοποιητικός έλεγχος της μερικής ατμοποίησης μπορεί να οδηγήσει σε αυτό που ονομάζουμε έκρηξη εκτονούμενου ατμού/ζέοντος υγρού (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion: BLEVE).

Η συσκευή που προαναφέρθηκε αναφέρεται και ως διαχωριστής υγρού-ατμού. Όταν δε χρησιμοποιείται για να απομακρύνει σταγονίδια νερού από ρεύμα αέρα ονομάζεται και demister.

Για τα περισσότερα τύμπανα διαχωρισμού εκμεταλλευόμαστε την βαρύτητα (σε κατακόρυφα τύμπανα) για να κατασταλάξει το υγρό στον πυθμένα του τυμπάνου από όπου και αποσύρεται.

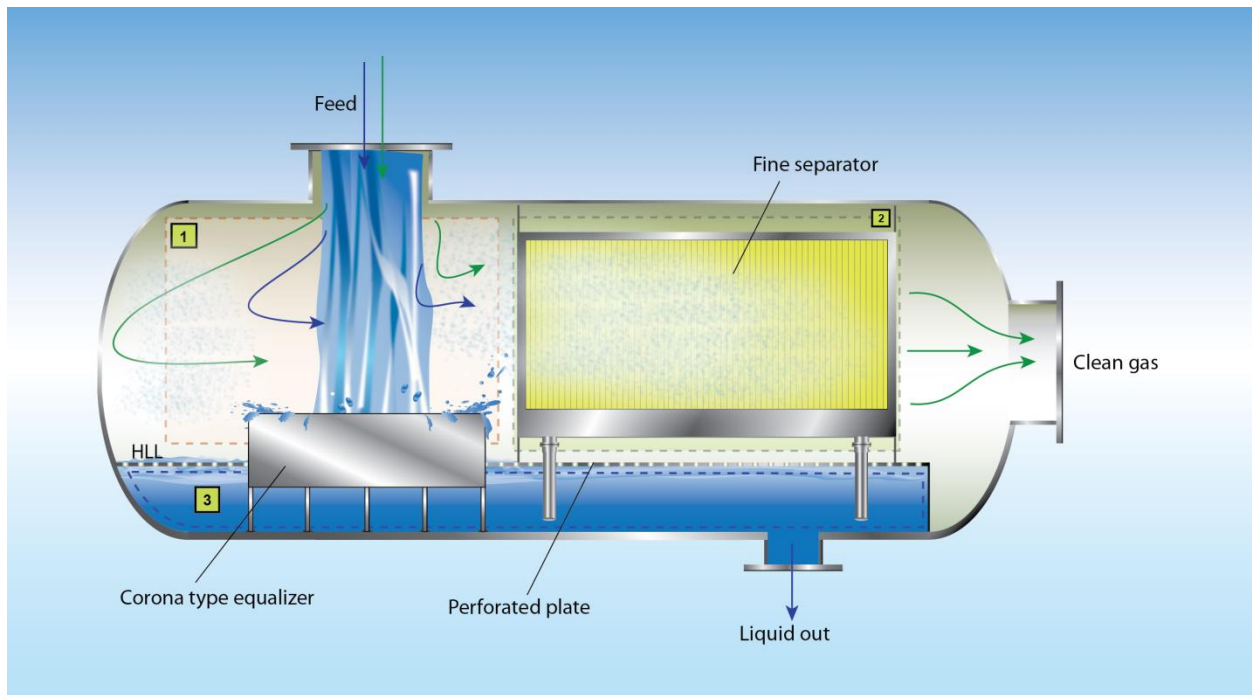
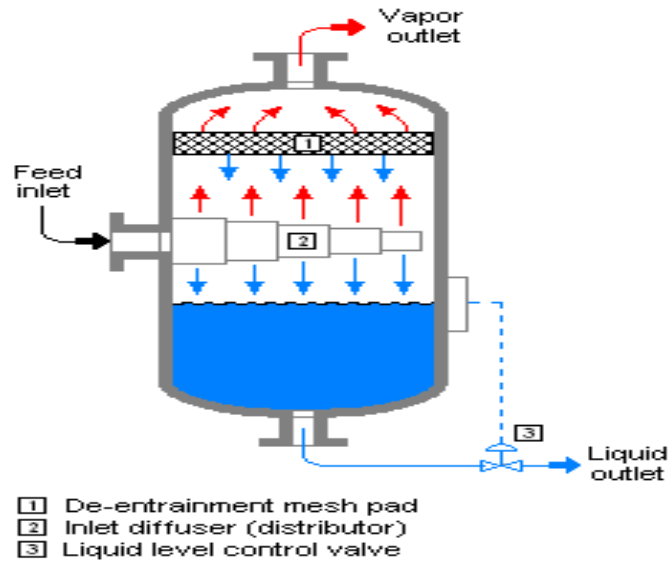
Ο ατμός μεταφέρεται μέσω της εξόδου αερίου σε συγκεκριμένη ταχύτητα σχεδίασης η οποία ελαχιστοποιεί την παράσυρση τυχόν σταγονιδίων υγρού με το ρεύμα ατμού καθώς αυτό εξέρχεται από το δοχείο.

Ο διαχωριστής είναι αποδοτικός μόνο εάν υπάρχει χώρος με αέρα μέσα στον θάλαμο. Ο διαχωριστής μπορεί να αστοχήσει εάν το ρεύμα εισόδου δεχθεί περισσότερο υλικό ή εάν ο οχετός υγρού είναι αδύνατον να ελέγξει τον όγκο του υγρού που συλλέγεται. Ο διαχωριστής μπορεί να συνδυαστεί με έναν αισθητήριο μηχανισμό για την παρακολούθηση του επιπέδου του υγρού όπως ένας αισθητήρας πλυμμήρισης. Με αυτόν τον τρόπο η τροφοδοσία και ο οχετός απόρριψης μπορούν να ρυθμιστούν με σκοπό την αποτροπή της υπερφόρτισης του διαχωριστή. [15],[16],[17],[21]

Οι διαχωριστές υγρού-ατμού χρησιμοποιούνται σε πολλά τμήματα της βιομηχανίας όπως:

- Διυληστήρια πετρελαίου
- Εγκαταστάσεις διεργασίας φυσικού αερίου
- Πετροχημικά εργοστάσια
- Ψυκτικά συστήματα
- Κλιματισμό
- Συστήματα συμπίεσης
- Αγωγούς αερίου

Σε ένα ψυκτικό σύστημα είναι σύνηθες το σύστημα να περιέχει διφασικό μίγμα υγρού-ατμού, αλλά για τον μηχανικό συμπίεστή του συστήματος η παρουσία υγρού είναι απαράδεκτη. Έτσι χρησιμοποιούνται διάφορα συστήματα πρόληψης εισόδου σταγονιδίων υγρού στον συμπίεστή, για την ασφαλή λειτουργία του καθώς και όλου του συστήματος.



Εικόνα 7.1 Λειτουργία δοχείου μερικής ατμοποίησης

7.2 Εναλλάκτες θερμότητας.

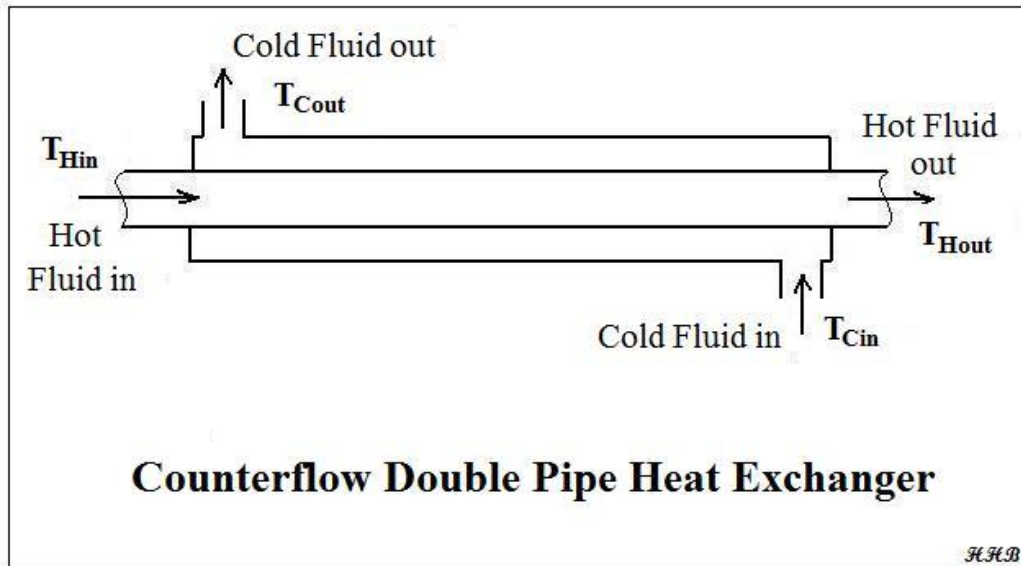
Ο εναλλάκτης θερμότητας είναι μία συσκευή η οποία επιτρέπει την αποδοτική μεταφορά θερμότητας από ένα μέσο σε ένα άλλο. Τα δύο (ή και περισσότερα) μέσα μπορεί να χωρίζονται από την παρουσία τοιχώματος για αποφυγή της ανάμιξης αυτών ή να βρίσκονται σε απ'ευθείας επαφή. Οι εναλλάκτες θερμότητας χρησιμοποιούνται ευρύτατα στην θέρμανση χώρων, την ψύξη, τον κλιματισμό, τα διυλιστήρια πετρελαίου, τα εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κ.α. Κλασικά παραδείγματα εναλλακτών θερμότητας αποτελούν τόσο ο ατμοποιητής όσο και ο συμπυκνωτής που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Για την λειτουργία των εναλλακτών θερμότητας υπάρχουν τρεις κύριες κατηγορίες όσων αφορά την φορά της ροής των συναλλασόμενων μέσων. Στους εναλλάκτες *ομορροής* τα δύο ρευστά εισέρχονται στον εναλλάκτη από το ίδιο άκρο και ρέουν παράλληλα προς την ίδια κατεύθυνση στο άλλο άκρο. Στους εναλλάκτες *αντιρροής* τα δύο ρευστά εισέρχονται από τα αντίθετα άκρα και μεταφέρονται παράλληλα με αντίθετη κατεύθυνση διαμέσου του εναλλάκτη. Η σχεδίαση με αντιρροή είναι η πιο αποδοτική διότι έτσι μεταφέρεται το μεγαλύτερο δυνατό ποσό θερμότητας από το θερμό μέσο ανά μονάδα μάζας του διότι η μέση θερμοκρασιακή διαφορά κατά μήκος του αγωγού μεταφοράς είναι μεγαλύτερη σε κάθε σημείο. Τέλος, στους εναλλάκτες *σταυροροής* τα δύο μέσα μεταφέρονται σχεδόν κάθετα μεταξύ τους μέσα στον εναλλάκτη.

Για αύξηση της απόδοσης οι εναλλάκτες θερμότητας σχεδιάζονται με σκοπό την μεγιστοποίηση της επιφάνειας του τοιχώματος μεταξύ των δύο ρευστών (επιφάνεια συναλλαγής), με ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση της αντίστασης ροής του ρευστού διαμέσου των αγωγών του εναλλάκτη. Η απόδοση του εναλλάκτη μπορεί επίσης να επηρεαστεί από την προσθήκη πτερυγίων ή αυλακώσεων στην μία ή και στις δύο κατευθύνσεις, πράγμα το οποίο αυξάνει την επιφάνεια συναλλαγής και μπορεί να επάγει τύρβη στην ροή.

Οι εναλλάκτες θερμότητας διπλού σωλήνα είναι οι πιο απλοί σχεδιαστικά εναλλάκτες που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία. Από την μία, οι συγκεκριμένοι εναλλάκτες είναι φθηνοί για την σχεδίαση και την συντήρησή τους, αποτελώντας μία καλή επιλογή για μικρές βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Από την άλλη, η χαμηλή τους αποδοτικότητα σε συνδυασμό με τον αρκετά μεγάλο χώρο που καταλαμβάνουν σε μεγαλύτερης κλίμακας εγκαταστάσεις έχει οδηγήσει τις βιομηχανίες να χρησιμοποιούν εναλλάκτες με μεγαλύτερους βαθμούς απόδοσης όπως αυτοί του σωλήνα-κελύφους ή πλάκας. [15],[21]

Σε αυτό το σημείο είναι σκόπιμο να δώσουμε την μορφή του βαθμού απόδοσης για έναν εναλλάκτη θερμότητας.



Εικόνα 7.2 Εναλλάκτης θερμότητας με τα συναλλασόμενα ρεύματα σε αντιροή

Στην παραπάνω εικόνα βλέπουμε έναν τυπικό εναλλάκτη αντιροής διπλού σωλήνα. Στους εναλλάκτες γενικά λοιπόν, ο βαθμός απόδοσης ισούται με το πηλίκο της θερμοκρασιακής μείωσης (για ψύξη) που παίρνουμε στην πράξη, προς την αντίστοιχη θεωρητική μείωση εάν ο εναλλάκτης ήταν θερμοδυναμικά τέλειος, δηλαδή εάν το θερμό ρεύμα συνάλλαζε πλήρως την θερμότητα του με το ψυχρό πράγμα το οποίο σημαίνει η θερμοκρασία εξόδου του θερμού ρευστού T_{Hout} να έφτανε να είναι ίση με την θερμοκρασία εισόδου του ψυχρού ρευστού T_{Cin} . Αυτό βέβαια είναι αδύνατο στην πράξη διότι θα σήμαινε πως θα παίρναμε τέλεια ψύξη (ή/και θέρμανση). Οπότε ο βαθμός απόδοσης για έναν εναλλάκτη αντιροής είναι:

$$\eta_{HEX} = \frac{T_{Hin} - T_{Hout}}{T_{Hin} - T_{Cin}}, \quad (7.1)$$

Κεφάλαιο 8.

8. Το πρόγραμμα Engineering Equation Solver ή EES.

8.1 Γενικά περί του λογισμικού.

Το EES είναι ένα πρόγραμμα γενικής επίλυσης εξισώσεων το οποίο έχει την δυνατότητα να λύσει αριθμητικά χιλιάδες πεπλεγμένες μη γραμμικές αλγεβρικές και διαφορικές εξισώσεις. Το πρόγραμμα μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση ολοκληρωτικών εξισώσεων, την βελτιστοποίηση, για την παροχή αναλύσεων αβεβαιότητας, για την εκτέλεση γραμμικής και μη γραμμικής παλινδρόμησης, την μετατροπή μονάδων και την παραγωγή εξαιρετικής ποιότητας διαγραμμάτων. Ένα κύριο χαρακτηριστικό του EES είναι η υψηλής ακρίβειας βάση δεδομένων για θερμοδυναμικά φαινόμενα και φαινόμενα μεταφοράς η οποία παράσχεται για εκατοντάδες ενώσεις. Το EES είναι εμπορικό λογισμικό το οποίο χρησιμοποιείται από μηχανολόγους μηχανικούς σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές. Το λογισμικό εκτελεί επαναληπτική διαδικασία, εξαλείφοντας την κουραστική και χρονοβόρα διαδικασία της απόκτησης θερμοδυναμικών ιδιοτήτων εξ' αιτίας της built-in βιβλιοθήκης του. Το EES επίσης περιέχει παραμετρικούς πίνακες οι οποίοι επιτρέπουν στον χρήστη να συγκρίνει έναν αριθμό μεταβλητών κάθε χρονική στιγμή. Με τους παραμετρικούς αυτούς πίνακες μπορούν να παραχθούν και διαγράμματα. Υπάρχουν πολλά πλεονεκτήματα μεταξύ του EES και άλλων προγραμμάτων επίλυσης εξισώσεων. Αρχικά στο συγκεκριμένο λογισμικό οι εξισώσεις μπορούν να τοποθετηθούν με οποιαδήποτε σειρά με τις άγνωστες μεταβλητές να βρίσκονται οπουδήποτε μέσα στην εξίσωση. Το EES αυτόματα αναδιατάσει τις εξισώσεις για την αποδοτικότερη λύση. Δεύτερον το EES προσφέρει πολλές ενσωματωμένες (built-in) μαθηματικές συναρτήσεις και συναρτήσεις θερμοφυσικών ιδιοτήτων χρήσιμες για υπολογισμούς στους μηχανικούς. Παραδείγματος χάριν οι υψηλής ακρίβειας πίνακες ατμού είναι πεπλεγμένοι έτσι ώστε οποιαδήποτε θερμοδυναμική ιδιότητα να μπορεί να ληφθεί από μία ενσωματωμένη συνάρτηση με δεδομένες δύο άλλες τιμές ιδιοτήτων. Ίδιες δυνατότητες υπάρχουν για τα περισσότερα ψυκτικά μέσα όπως η αμμωνία, το διοξείδιο του άνθρακα και πολλά άλλα ρευστά. Οι πίνακες Mollier και οι ψυχομετρικοί χάρτες και συναρτήσεις είναι ενσωματωμένοι

όπως και τα δεδομένα ιδιοτήτων για εκατοντάδες ασυμπίεστα στερά και υγρά συμπεριλαμβανομένων και των ιδιοτήτων μεταφοράς θερμότητας.

Το EES επιτρέπει στον χρήστη να προσθέσει εξισώσεις με τρεις τρόπους. Αρχικά, υπάρχει εγκατάσταση για την εισαγωγή και παρεμβολή πινακοποιημένων δεδομένων έτσι ώστε τα δεδομένα αυτά να χρησιμοποιούνται απ'ευθείας για την λύση του συστήματος εξισώσεων. Δεύτερον η γλώσσα προγραμματισμού του EES επιτρέπει την εισαγωγή εξισώσεων, διαδικασιών και υποπρογραμμάτων, συντεταγμένων από τον χρήστη. Οι χρησιμοποιούμενες συναρτήσεις είναι παρόμοιες με αυτές της FORTRAN. Τρίτον, οι συντεταγμένες συναρτήσεις γραμμένες σε C ή FORTRAN μπορούν να συνδεθούν δυναμικά με το EES. Με αυτές τις πρόσθετες σχέσεις συναρτήσεων είναι δυνατόν να επεκταθούν σημαντικά οι ιδιότητες του EES.

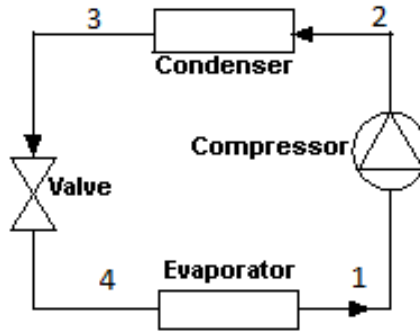
Το EES είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για την σχεδίαση προβλημάτων για τα οποία χρειάζεται να καθοριστεί η επίδραση μίας ή και περισσότερων παραμέτρων. Το πρόγραμμα προσφέρει την ιδιότητα αυτή με χρήση του παραμετρικού του πίνακα. Με το EES είναι πολύ εύκολο να σχεδιαστούν προβλήματα εξ'αιτίας των πλεονεκτημάτων που δίδονται από την απλότητα των εντολών και την τεράστια ποικιλία θερμοδυναμικών ιδιοτήτων.

Το πρόγραμμα αναπτύσσεται από την εταιρεία F-Chart Software του καθηγητή Sanford A. Klein από το τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του πανεπιστημίου του Wisconsin στις Η.Π.Α.

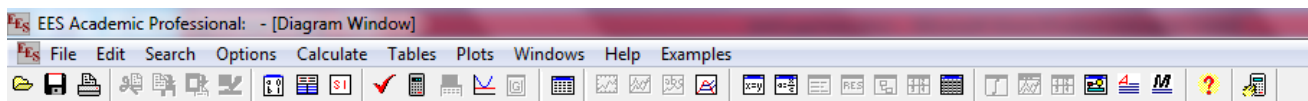
8.2 Επεξήγηση διαδικασίας επίλυσης.

Για να δείξουμε την λειτουργία του προγράμματος θα δώσουμε το παράδειγμα του απλού κύκλου μηχανικής συμπίεσης ατμών. Θα αναλύσουμε το συγκεκριμένο παράδειγμα εκτενέστατα και στην συνέχεια θα προχωρήσουμε στο κυρίως τμήμα της εργασίας το οποίο είναι η διερεύνηση πολυπλοκότερων ψυκτικών κυκλωμάτων με διάφορα εργαζόμενα μέσα.

Ξεκινώντας ανοίγουμε το πρόγραμμα και βρισκόμαστε κατ'ευθείαν στην αρχική επιφάνεια εργασίας του. Έχουμε δώσει παραπάνω την γραμμική αποικόνιση ενός απλού ψυκτικού κύκλου με μηχανική συμπίεση ατμών, με τον ατμοποιητή να ακολουθείται από τον συμπιεστή, στην συνέχεια τον συμπυκνωτή και τέλος για να κλείσει ο κύκλος, την στραγγαλιστική βαλβίδα.




Εικόνα 8.1 Μονοβάθμιος κύκλος μηχανικής συμπίεσης ατμών



Εικόνα 8.2 EES Toolbar

Βλέπουμε την αρχική toolbar του EES με κάποιες εντολές όπως options, calculate και plots με τα εικονίδια με σειρά από αριστερά προς τα δεξιά να δείχνουν:


-Ανοιγμα φακέλου 

-Εικονίδιο Save 

-Εκτύπωση 

-Πληροφορίες μεταβλητών 

-Πληροφορίες συναρτήσεων 


-Σύστημα μονάδων 

-Έλεγχος εξισώσεων 


-Solver 

-Παράθυρο μεγίστων/ελαχίστων 

-Νέος παραμετρικός πίνακας 

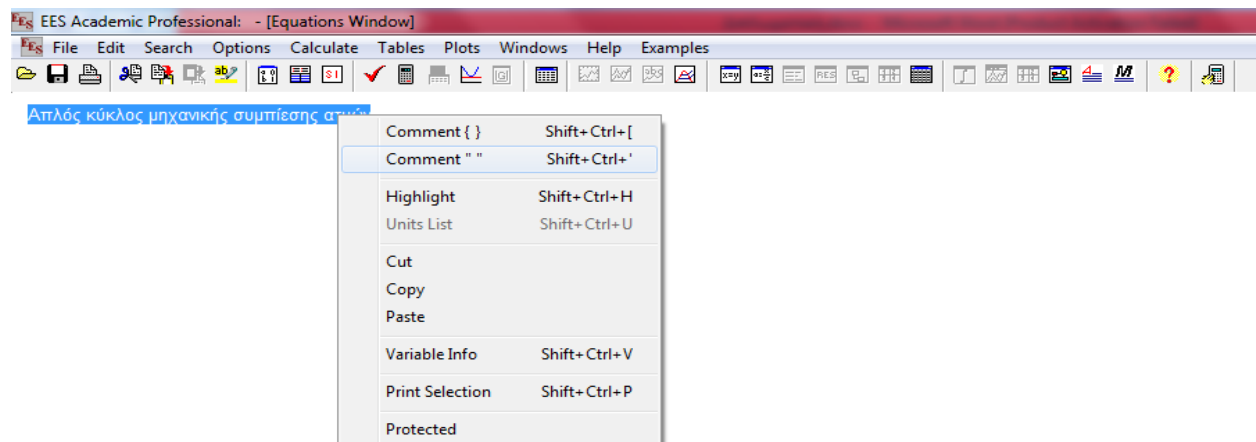
-Διαγράμματα ιδιοτήτων 

-Παράθυρο εξισώσεων 

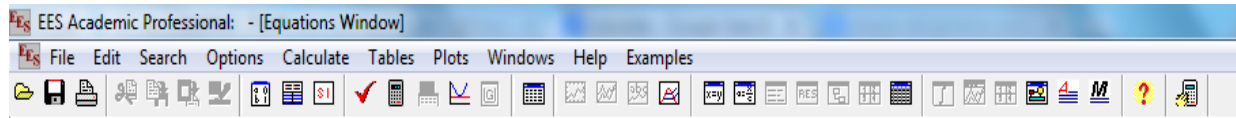
-Σχηματοποιημένες εξισώσεις 

-Παράθυρο παραμετρικών πινάκων 

Γράφουμε στην αρχή της επιφάνειας το όνομα του κύκλου. Για να μην επηρεάσει την μετέπειτα διαδικασία διαλέγουμε την επικεφαλίδα και πατάμε comment “ ”.



Για να ορίσουμε ψυκτικό μέσο και να μην χρειάζεται να το αναγράφουμε κάθε φορά στις εξισώσεις θα χρησιμοποιήσουμε την εντολή $r\$\text{'...}$ η οποία μας επιτρέπει να ορίσουμε ψυκτικό μέσο και να το αλλάξουμε χωρίς να μεταβάλλουμε καμία εξίσωση πλην της προαναφερθείσας. Θα διαλέξουμε το γνωστό ψυκτικό μέσο R-134a.



"Απλός κύκλος μηχανικής συμπίεσης ατμών"

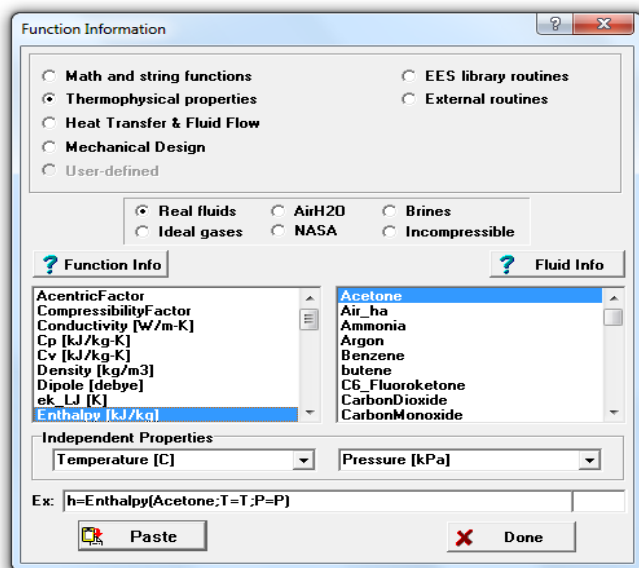
rr\$='R134a'

Στην συνέχεια θα ορίσουμε τις απαραίτητες εξισώσεις για την διαμόρφωση του προβλήματος. Ανοίγουμε το παράθυρο Function Info (πληροφορίες εξισώσεων) και διαλέγουμε αρχικά στον πρώτο πίνακα την επιλογή Thermophysical properties ενώ στον παρακάτω πίνακα την επιλογή Real fluids. Τώρα στους δύο πίνακες με τις επιλογές των ιδιοτήτων και των εργαζόμενων μέσων θα διαλέξουμε την συνάρτηση ενθαλπίας Enthalpy [kJ/kg] και την ακετόνη Acetone διότι θα την αλλάξουμε σε R-134a μέσω της σύνταξης των εξισώσεων.



"Απλός κύκλος μηχανικής συμπίεσης ατμών"

rr\$='R134a'

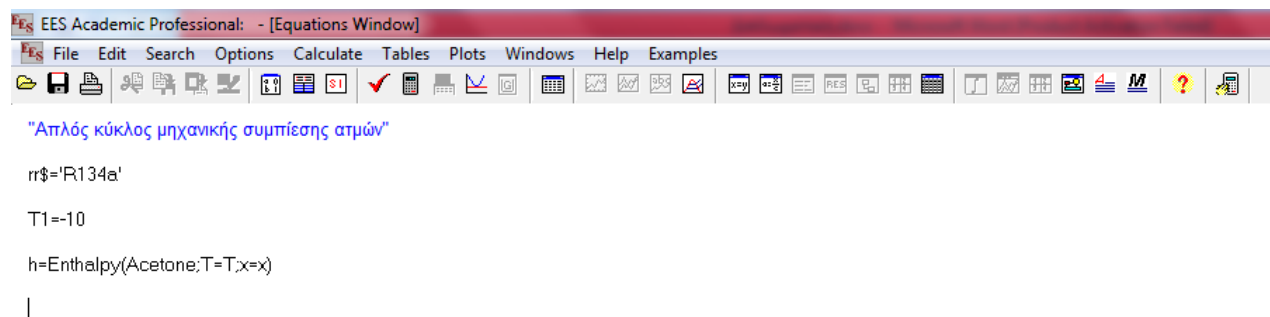


Τώρα βλέποντας στο κάτω μέρος της οθόνης την απαίτηση να δώσουμε δύο ανεξάρτητες μεταβλητές έτσι ώστε το πρόγραμμα να μπορέσει να υπολογίσει την ζητούμενη ενθαλπία πρέπει να ορίσουμε την θέση του ψυκτικού συστήματος στην οποία βρισκόμαστε και να δώσουμε μία πίεση ή θερμοκρασία ως αρχικό δεδομένο.

Έτσι υποθέτουμε ότι βρισκόμαστε στην θέση 1 αμέσως μετά τον ατμοποιητή και ορίζουμε ως θερμοκρασία $T1 = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$ η οποία είναι και η θερμοκρασία ψύξης όπως έχει προαναφερθεί και την τοποθετούμε ως εξίσωση ακριβώς κάτω από τον ορισμό του ψυκτικού μέσου με σκοπό να μπορούμε οποιαδήποτε στιγμή, να την μεταβάλλουμε με εύκολο τρόπο αφού είναι η ανεξάρτητη μεταβλητή μας. Εφόσον βρισκόμαστε στην θέση 1 γνωρίζουμε ότι το ψυκτικό μέσο βρίσκεται σε κατάσταση κορεσμένου ατμού με ξηρότητα $x=1$.

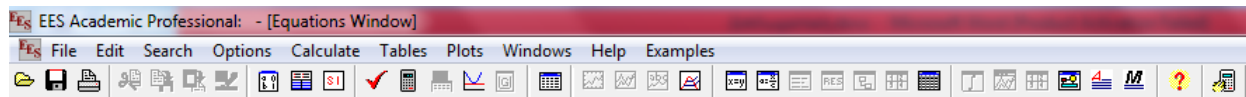
Σε αυτό το σημείο εφιστάται προσοχή διότι κάποιος θα μπορούσε να υποθέσει ότι εάν ξέρουμε την θερμοκρασία του κορεσμένου ατμού, τότε από το διάγραμμα στο άκρο της καμπύλης ατμοποίησης γνωρίζουμε και την πίεση, με αποτέλεσμα αντί για την ξηρότητα να θέσουμε ως δεύτερη ανεξάρτητη μεταβλητή εκτός της θερμοκρασίας, την πίεση. Κάτι τέτοιο όμως θα ήταν λάθος διότι εντός της καμπύλης του διαγράμματος οι ευθείες πίεσης και θερμοκρασίας συμπίπτουν, οπότε εάν επιλεχθούν ως ανεξάρτητες μεταβλητές η πίεση και η θερμοκρασία, τα σημεία λύσης θα είναι άπειρα και το EES θα επιστρέψει σφάλμα. Έτσι στο κάτω τμήμα του πίνακα επιλέγουμε ως ανεξάρτητη μεταβλητή την ξηρότητα Quality [-].

Πατώντας το πλήκτρο Paste μεταφέρουμε την συνάρτηση ενθαλπίας στην επιφάνεια εργασίας.



Τώρα παρατηρούμε την σύνταξη του EES με την μορφή $h = \text{Enthalpy}(\text{Acetone}; T = T; x = x)$

Δίπλα από το γράμμα h μπορούμε να τοποθετήσουμε έναν αριθμό ή μία παράσταση για να δηλώσουμε την θέση στην οποία αναφέρεται η εν λόγω ενθαλπία. Επίσης αντί για Acetone μπορούμε να γράψουμε την εντολή rr\$. Στην θερμοκρασία θα βάλουμε την θερμοκρασία T1 και στην ξηρότητα $x=1$.



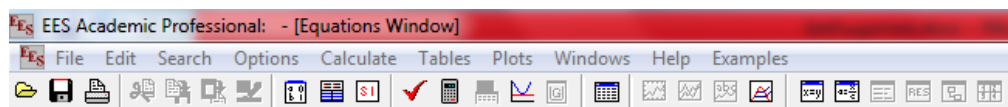
"Απλός κύκλος μηχανικής συμπίεσης ατμών"

$rr\$='R134a'$

$T1=-10$

$h=Enthalpy(rr\$,T=T1,x=1)$

Τώρα θα επιλέξουμε τις μονάδες των μεταβλητών μας από τον πίνακα Unit System και στην συνέχεια με το πλήκτρο Calculate θα κάνουμε μία δοκιμή για την ορθότητα της σύνταξης της πρώτης εντολής της ενθαλπίας πριν προχωρήσουμε στην περαιτέρω ανάλυση του κύκλου.

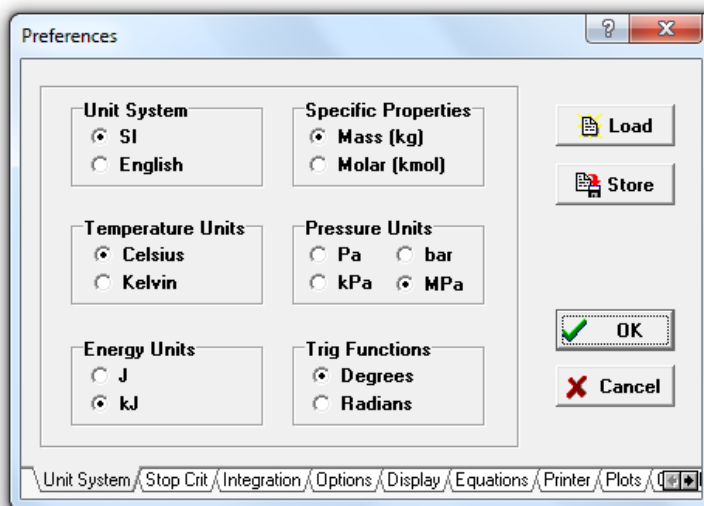


"Απλός κύκλος μηχανικής συμπίεσης ατμών"

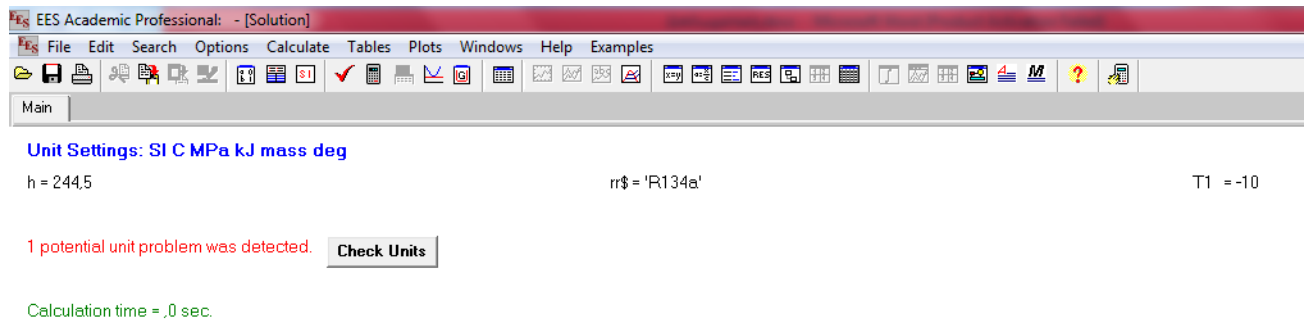
$rr\$='R134a'$

$T1=-10$

$h=Enthalpy(rr\$,T=T1,x=1)$



Μολίς δοθεί η εντολή Calculate μεταφερόμαστε στο παράθυρο λύσεων όπου βλέπουμε την τιμή της ενθαλπίας.



Διαλέγοντας το πλήκτρο Equations Window επιστρέφουμε στην επιφάνεια εργασίας μας. Τώρα προχωρούμε την ανάλυση με την εντροπία και την πίεση για το σημείο 1.

Γράφουμε:

$$s1 = \text{Entropy}(rr\$; T=T1; x=1)$$

$$P1 = \text{Pressure}(rr\$; T=T1; x=1)$$

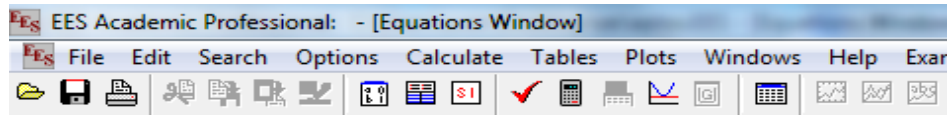
Στην συνέχεια προχωρούμε ισεντροπικά στο σημείο 2 γνωρίζοντας ότι εφόσον η θεωρητική μεταβολή είναι ισεντροπική συμπίεση θα ισχύει ότι $s2 = s1$. Στο σημείο αυτό δεν γνωρίζουμε άλλο δεδομένο για να προχωρήσουμε στο σημείο 2 οπότε θα θεωρήσουμε και δεύτερη ανεξάρτητη μεταβλητή την θερμοκρασία στον συμπυκνωτή $T3 = 50 \text{ }^\circ\text{C}$. Με αυτόν τον τρόπο και γνωρίζοντας ότι στην έξοδο του συμπυκνωτή το εργαζόμενο μέσο βρίσκεται στην κατάσταση του κορεσμένου υγρού με ξηρότητα $x=0$ μπορούμε ακριβώς όπως και πριν να υπολογίσουμε την ενθαλπία, την εντροπία και την πίεση του.

Γράφουμε:

$$h3 = \text{Enthalpy}(rr\$; T=T3; x=0)$$

$$s3 = \text{Entropy}(rr\$; T=T3; x=0)$$

$$P3 = \text{Pressure}(rr\$; T=T3; x=0)$$



"Απλός κύκλος μηχανικής συμπίεσης ατμών"

```

rr$='R134a'

T1=-10

h1=Enthalpy(rr$,T=T1;x=1)

s1=Entropy(rr$,T=T1;x=1)

P1=Pressure(rr$,T=T1;x=1)

s2=s1

T3=50

h3=Enthalpy(rr$,T=T3;x=0)

s3=Entropy(rr$,T=T3;x=0)

P3=Pressure(rr$,T=T3;x=0)

|

```

Τώρα το πρόγραμμα γνωρίζει την πίεση στο σημείο 3 δηλαδή μετά τον συμπυκνωτή, η οποία εάν δεχθούμε ότι στον συμπυκνωτή δεν υπάρχει πτώση πίεσης είναι ίδια με αυτήν του σημείου 2, δηλαδή αμέσως μετά τον συμπιεστή. Έτσι γνωρίζουμε πίεση και εντροπία στο σημείο 2 και μπορούμε να υπολογίσουμε την ενθαλπία και την θερμοκρασία του.

$$P2=P3$$

$$h2=Enthalpy(rr$,s=s2;P=P2)$$

$$T2=Temperature(rr$,s=s2;P=P2)$$

Βέβαια όπως γνωρίζουμε η μεταβολή στον συμπιεστή δεν είναι ισεντροπική. γι'αυτό άλλωστε ορίζουμε και τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης του συμπιεστή έτσι ώστε να βρούμε το πραγματικό σημείο 2r (2real) έχοντας πληροφορίες για το θεωρητικό σημείο 2. Ξέρουμε ότι η πίεση μεταξύ πραγματικού και θεωρητικού σημείου είναι ίδια διότι η αλλαγή στην εντροπία επηρεάζει μόνο την ενθαλπία και την θερμοκρασία. Οπότε τώρα χρειαζόμαστε ακόμα μία ανεξάρτητη μεταβλητή για να λύσουμε το πρόβλημα μας, την οποία λαμβάνουμε από την εξίσωση του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης του συμπιεστή αφού πρώτα του δώσουμε μία ενδεικτική τιμή:

$$isc = 0,9, \quad (8.1)$$

$$isc = \frac{h2 - h1}{h2r - h1}, \quad (8.2)$$

$$h2r = h1 + \frac{h2 - h1}{isc}, \quad (8.3)$$

$$P2r = P2, \quad (8.4)$$

Έτσι βρίσκουμε θερμοκρασία και εντροπία του σημείου που αντιστοιχεί στην πραγματική μεταβολή.

$T2r = \text{Temperature}(r; h=h2r; P=P2r)$

$s2r = \text{Entropy}(r; h=h2r; P=P2r)$

Παίρνουμε την ακόλουθη εικόνα στην επιφάνεια διαμόρφωσης των εξισώσεων στο EES.

```
s2=s1
T3=50
h3=Enthalpy(r;T=T3;x=0)
s3=Entropy(r;T=T3;x=0)
P3=Pressure(r;T=T3;x=0)
P2=P3
T2=Temperature(r;P=P2;s=s2)
h2=Enthalpy(r;P=P2;s=s2)
isc=0,9
h2r=h1+(h2-h1)/isc
P2r=P2
T2r=Temperature(r;h=h2r;P=P2r)
s2r=Entropy(r;h=h2r;P=P2r)
```

Για να ολοκληρώσουμε την ανάλυση κύκλου θα υπολογίσουμε το σημείο 4 το οποίο βρίσκεται στην έξοδο της στραγγαλιστικής βαλβίδας και εκεί το ψυκτικό μέσο βρίσκεται στην κατάσταση του διφασικού μίγματος υγρού-ατμού. Ως γνωστών το σημείο αυτό έχει ίδια πίεση με την πίεση μετά τον ατμοποιητή (χαμηλή πίεση κύκλου) και ενθαλπία ίδια με το σημείο στην έξοδο του συμπυκνωτή διότι δεχόμαστε πως ο στραγγαλισμός γίνεται πρακτικά ισενθαλπικά.

$$P_4 = P_1$$

$$h_4 = h_3$$

$$T_4 = \text{Temperature}(r; h=h_4; P=P_4)$$

$$s_4 = \text{Entropy}(r; h=h_4; P=P_4)$$

Τέλος θα ορίσουμε την ψυκτική ισχύ του ατμοποιητή, την ισχύ που απορροφά ο συμπιεστής και την ισχύ που αποδίδει στο περιβάλλον ο συμπυκνωτής, όλα για παροχή μάζας εργαζόμενου μέσου ενδεικτικά $m=1 \text{ kg/s}$. Ακόμη θα ορίσουμε τον συντελεστή συμπεριφοράς της ψυκτικής εγκατάστασης COP (Coefficient Of Performance) για να έχουμε μία πιο ολοκληρωμένη εικόνα της απόδοσης του κύκλου.

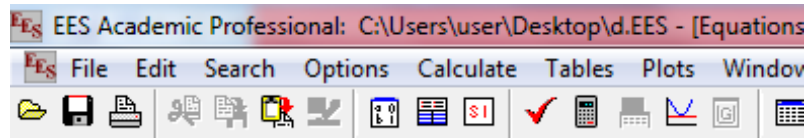
Έχουμε:

$$Q_e = m(h_1 - h_4), \quad (8.5) \quad \text{Evaporator Cooling Power}$$

$$P_c = m(h_{2r} - h_1), \quad (8.6) \quad \text{Compressor Absorbed Power}$$

$$Q_c = m(h_{2r} - h_3), \quad (8.7) \quad \text{Condenser Thermal Power}$$

$$COP = \frac{Q_e}{P_c} = \frac{h_1 - h_4}{h_{2r} - h_1}, \quad (8.8) \quad \text{Coefficient Of Performance}$$



$$T2r=Temperature(rr$,h=h2r,P=P2r)$$

$$s2r=Entropy(rr$,h=h2r,P=P2r)$$

$$P4=P1$$

$$h4=h3$$

$$T4=Temperature(rr$,h=h4,P=P4)$$

$$s4=Entropy(rr$,h=h4,P=P4)$$

$$m=1$$

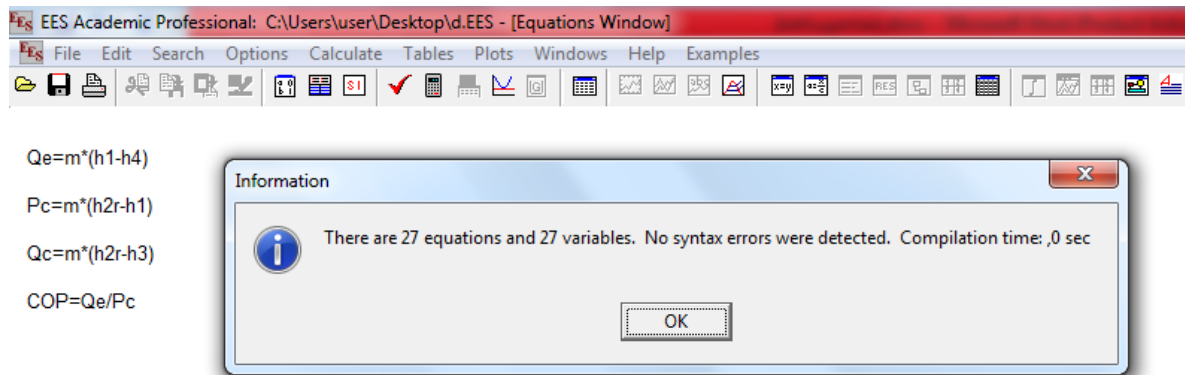
$$Qe=m*(h1-h4)$$

$$Pc=m*(h2r-h1)$$

$$Qc=m*(h2r-h3)$$

$$COP=Qe/Pc$$

Στο σημείο αυτό μπορούμε να ξεκινήσουμε τους υπολογισμούς για τις δεδομένες θερμοκρασίες. Έτσι ελέγχουμε αρχικά τις εξισώσεις μας και τον τρόπο σύνταξης διαλέγοντας το πλήκτρο Check Equations για να δούμε εάν πρέπει να κάνουμε κάποια διορθώση ή να προσθεσούμε κάτι το οποίο πιο πριν παραλήψαμε.



Τώρα προχωρούμε στην λύση του προβλήματος με το πλήκτρο Solve.

EES Academic Professional: C:\Users\user\Desktop\d.EES - [Solution]

File Edit Search Options Calculate Tables Plots Windows Help Examples

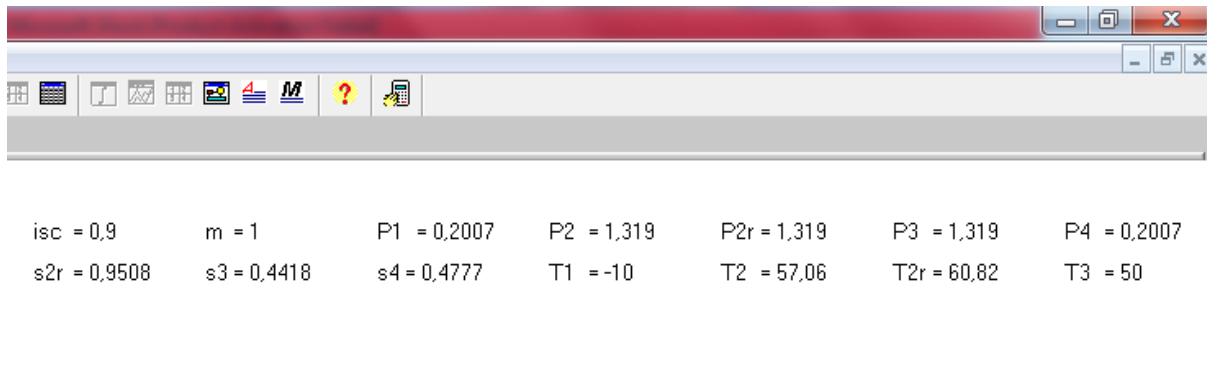
Main

Unit Settings: SI C MPa kJ mass deg

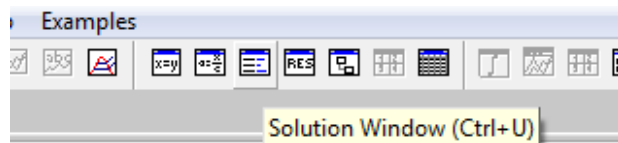
COP = 2,772	h1 = 244,5	h2 = 283,8	h2r = 288,2	h3 = 123,5	h4 = 123,5	isc = 0,9
Pc = 43,66	Qc = 164,7	Qe = 121	rr\$ = 'R134a'	s1 = 0,9377	s2 = 0,9377	s2r = 0,9508
T4 = -10						

12 potential unit problems were detected. **Check Units**

Calculation time = ,0 sec.

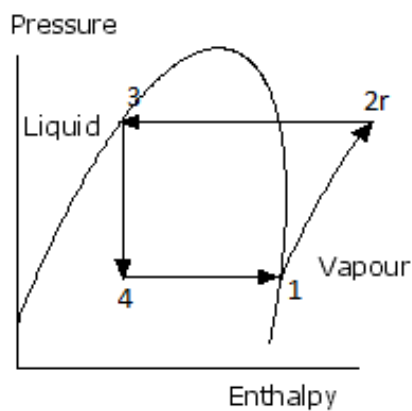


Όπως βλέπουμε μόλις πατήσουμε το πλήκτρο Solve, εμφανίζεται το παράθυρο Solution Window με τις λύσεις.



i3 = 123,5	h4 = 123,5	isc = 0,9	n
s1 = 0,9377	s2 = 0,9377	s2r = 0,9508	s

Όπως βλέπουμε τα αποτελέσματα είναι τα αναμενόμενα διότι εάν παρατηρήσουμε τον απλό ψυκτικό κύκλο σε ένα διάγραμμα Mollier θα δούμε ότι:



Εικόνα 8.3 Διάγραμμα P-h για μονοβάθμιο κύκλο

$$h_{2r} > h_1 > h_3 = h_4, \quad (8.9)$$

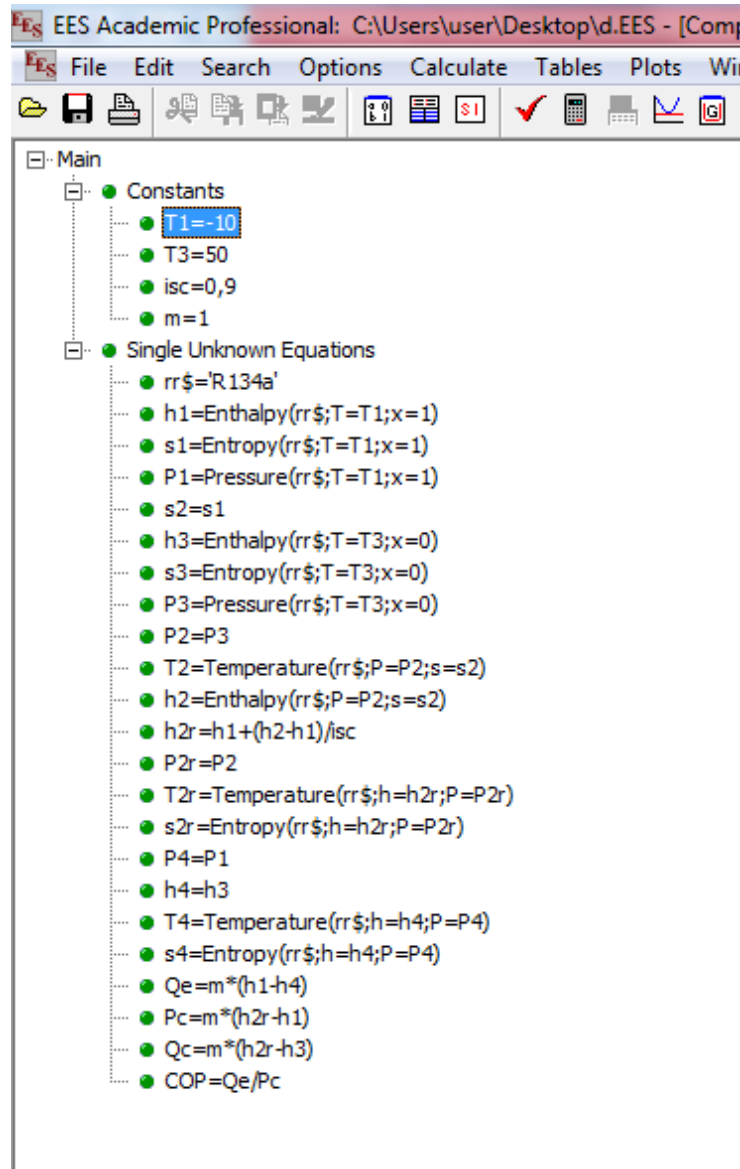
$$Q_c > Q_e > P_c, \quad (8.10)$$

Πολύ χρήσιμα είναι και τα δύο διπλανά στο Solution Window πλήκτρα, το Residuals Window και το Computational Flow Window. Το παράθυρο Residuals Window μας δείχνει το υπόλοιπο που υπάρχει στον υπολογισμό κάθε μεταβλητής, δηλαδή το πόσο αποκλίνει η υπολογιζόμενη από το πρόγραμμα άνω και κάτω τιμή και αν η διαφορά τους (residual) βρίσκεται εντός των αποδεκτών πλαισίων. Λέγοντας άνω και κάτω τιμή εννοούμε την μέγιστη και την ελάχιστη τιμή που υπάρχει στο ευρὸς επαναλήψεων του αλγορίθμου. Ακόμη σε αυτό το παράθυρο βλέπουμε την ορθότητα ως προς τις μονάδες, το πόσες φορές κλήθηκε μία εξίσωση ως υπορουτίνα και το χρόνο που χρειάστηκε για τον υπολογισμό της εκάστοτε μεταβλητής. Το παράθυρο Computational Flow Window μας δείχνει τις σταθερές και τις μεταβλητές με την μορφή εξισώσεων.

There are a total of 27 equations in the Main program.

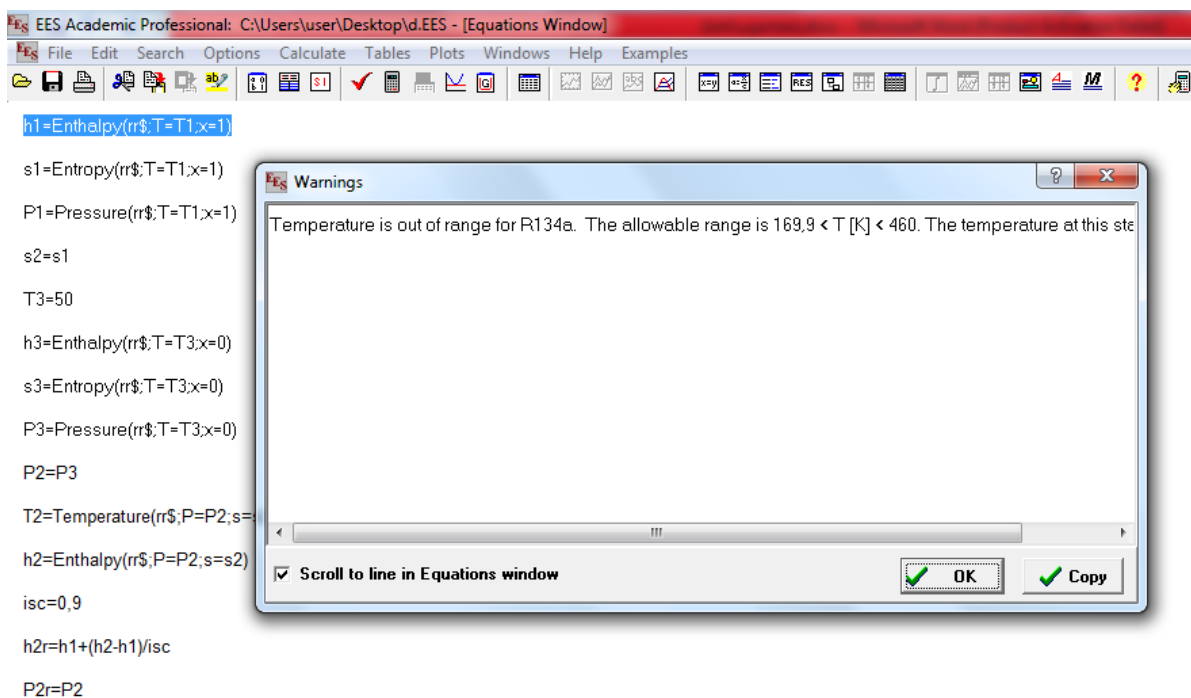
Block	Rel. Res.	Abs. Res.	Units	Calls	Time(ms)	Equations
0	0.000E+00	0.000E+00	OK	1	0	T1 =-10
0	0.000E+00	0.000E+00	OK	1	0	T3 =50
0	0.000E+00	0.000E+00	OK	1	0	isc =0.9
0	0.000E+00	0.000E+00	OK	1	0	m =1
0	0.000E+00	0.000E+00	OK	4	0	rr\$ ='R134a'
0	0.000E+00	0.000E+00	?	4	0	h1 =Enthalpy(rr\$,T=T1,x=1)
0	0.000E+00	0.000E+00	?	4	0	s1 =Entropy(rr\$,T=T1,x=1)
0	0.000E+00	0.000E+00	?	4	16	P1 =Pressure(rr\$,T=T1,x=1)
0	0.000E+00	0.000E+00	OK	4	0	s2 =s1
0	0.000E+00	0.000E+00	?	4	0	h3 =Enthalpy(rr\$,T=T3,x=0)
0	0.000E+00	0.000E+00	?	4	0	s3 =Entropy(rr\$,T=T3,x=0)
0	0.000E+00	0.000E+00	?	4	0	P3 =Pressure(rr\$,T=T3,x=0)
0	0.000E+00	0.000E+00	OK	4	0	P2 =P3
0	0.000E+00	0.000E+00	?	4	15	T2 =Temperature(rr\$,P=P2,s=s2)
0	0.000E+00	0.000E+00	?	4	0	h2 =Enthalpy(rr\$,P=P2,s=s2)
0	0.000E+00	0.000E+00	OK	4	0	h2r =h1+(h2-h1)/isc
0	0.000E+00	0.000E+00	OK	4	0	P2r =P2
0	0.000E+00	0.000E+00	?	4	0	T2r =Temperature(rr\$,h=h2r,P=P2r)
0	0.000E+00	0.000E+00	?	4	16	s2r =Entropy(rr\$,h=h2r,P=P2r)
0	0.000E+00	0.000E+00	OK	4	0	P4 =P1
0	0.000E+00	0.000E+00	OK	4	0	h4 =h3
0	0.000E+00	0.000E+00	?	4	0	T4 =Temperature(rr\$,h=h4,P=P4)
0	0.000E+00	0.000E+00	?	4	0	s4 =Entropy(rr\$,h=h4,P=P4)
0	0.000E+00	0.000E+00	OK	4	0	Qe =m*(h1-h4)
0	0.000E+00	0.000E+00	OK	4	0	Pc =m*(h2r-h1)
0	0.000E+00	0.000E+00	OK	4	0	Qc =m*(h2r-h3)
0	0.000E+00	0.000E+00	OK	4	0	COP =Qe/Pc

Variables shown in bold font are determined by the equation(s) in each block.



Τώρα θα ήταν πολύ χρήσιμο να δούμε τον τρόπο με τον οποίο το EES αντιλαμβάνεται μία λάθος εντολή. Παραδείγματος χάριν γνωρίζουμε ότι το σημείο πήξεως του R-134a είναι στους $-103,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, έτσι εάν θέσουμε ως θερμοκρασία ψύξης $T1 = -105\text{ }^{\circ}\text{C}$ θα πρέπει το πρόγραμμα να επιστρέψει σφάλμα. Όπως είναι αναμενόμενο η βιβλιοθήκη του προγράμματος είναι

εφοδιασμένη με τις απαραίτητες τιμές για το R-134a και το σφάλμα εμφανίζεται στο παράθυρο των προειδοποιήσεων (Warnings).



Στην συνέχεια θα ασχοληθούμε με μία ακόμη πολύ σημαντική και χρήσιμη ιδιότητα του προγράμματος η οποία είναι η επιλογή των μεγίστων και ελαχίστων τιμών που μπορεί να πάρει μία μεταβλητή (δηλαδή η φραγή της) με σκοπό την καλύτερη σύγκλιση των τιμών της καθώς και η εκλογή του αριθμού των επαναλήψεων που εκτελεί, το σχετικό παραδεκτό υπόλοιπο στον υπολογισμό μίας μεταβλητής και τέλος ο χρόνος που μπορεί να δαπανηθεί στον υπολογισμό της.

Πατώντας το πλήκτρο Variable Info εμφανίζεται ένα παράθυρο στην επιφάνεια εργασίας το οποίο περιέχει έναν πίνακα με την κάθε μεταβλητή, την άνω και κάτω τιμή την οποία αυτή μπορεί να πάρει και την οπτική παρουσίαση της μεταβλητής (π.χ. αριθμός δεκαδικών ψηφίων που εμφανίζονται). Στο παράθυρο αυτό μπορούμε να επέμβουμε ορίζοντας τα άνω και κάτω άκρα των μεταβλητών σύμφωνα με την πραγματικότητα για να επιτύχουμε καλύτερη σύγκλιση. Παραδείγματος χάριν οι τιμές των ενθαλπιών απαραίτητο είναι να βρίσκονται πάνω από μηδέν και κάτω από την λογική τιμή των 500 kJ/kg για τις δεδομένες θερμοκρασίες του

προβλήματος. Βέβαια επειδή το πρόβλημα μας είναι απλό η συγκεκριμένη ενέργεια δεν θα αλλάξει κάτι στις τιμές των μεταβλητών, αλλά στην ανάλυση των σημαντικά πολυπλοκότερων ψυκτικών κύκλων η οποία θα ακολουθήσει (όπως π.χ. ένας τριβάθμιος ψυκτικός κύκλος) με 100 μεταβλητές αντί για 27 που έχουμε τώρα, η φραγή των τιμών μεταβλητών είναι απαραίτητη για την επιτυχή σύγκλιση του αλγορίθμου.

EES Academic Professional: C:\Users\user\Desktop\d.EES - [Equations Window]

File Edit Search Options Calculate Tables Plots Windows Help Examples

T1=-10
 h1=Enthalpy(rr\$,T=T1,x=1)
 s1=Entropy(rr\$,T=T1,x=1)
 P1=Pressure(rr\$,T=T1,x=1)
 s2=s1
 T3=50
 h3=Enthalpy(rr\$,T=T3,x=0)
 s3=Entropy(rr\$,T=T3,x=0)
 P3=Pressure(rr\$,T=T3,x=0)
 P2=P3
 T2=Temperature(rr\$,P=P2,s=s3)
 h2=Enthalpy(rr\$,P=P2,s=s2)
 isc=0,9
 h2r=h1+(h2-h1)/isc

Variable Information

Show array variables
 Show string variables

Variable	Guess	Lower	Upper	Display	Units	Key	Comment
COP	2,772	-infinity	infinity	A 3 N			
h1	244,5	-infinity	infinity	A 0 N			
h2	283,8	-infinity	infinity	A 0 N			
h2r	288,2	-infinity	infinity	A 0 N			
h3	123,5	-infinity	infinity	A 0 N			
h4	123,5	-infinity	infinity	A 0 N			
isc	0,9	-infinity	infinity	A 3 N			
m	1	-infinity	infinity	A 3 N			
P1	0,2007	-infinity	infinity	A 0 N			
P2	1,319	-infinity	infinity	A 0 N			
P2r	1,319	-infinity	infinity	A 0 N			
P3	1,319	-infinity	infinity	A 0 N			
P4	0,2007	-infinity	infinity	A 0 N			

OK Apply Print Update Cancel

EES Academic Professional: C:\Users\user\Desktop\d.EES - [Equations Window]

File Edit Search Options Calculate Tables Plots Windows Help Examples

T1=-10
h1=Enthalpy(rr\$,T=T1,x=1)
s1=Entropy(rr\$,T=T1,x=1)
P1=Pressure(rr\$,T=T1,x=1)
s2=s1
T3=50
h3=Enthalpy(rr\$,T=T3,x=0)
s3=Entropy(rr\$,T=T3,x=0)
P3=Pressure(rr\$,T=T3,x=0)
P2=P3
T2=Temperature(rr\$,P=P2,s=s2)
h2=Enthalpy(rr\$,P=P2,s=s2)
isc=0,9
h2r=h1+(h2-h1)/isc

Variable Information

Show array variables
 Show string variables

Variable	Guess	Lower	Upper	Display	Units	Key	Comment
COP	1	0,0000E+00	8,0000E+00	A 3 N			
h1	1	0,0000E+00	5,0000E+02	A 0 N			
h2	1	0,0000E+00	5,0000E+02	A 0 N			
h2r	1	0,0000E+00	5,0000E+02	A 0 N			
h3	1	0,0000E+00	5,0000E+02	A 0 N			
h4	1	0,0000E+00	5,0000E+02	A 0 N			
isc	1	0,0000E+00	1,0000E+00	A 3 N			
m	1	1,0000E+00	1,0000E+00	A 3 N			
P1	1	0,0000E+00	5,0000E+00	A 0 N			
P2	1	0,0000E+00	5,0000E+00	A 0 N			
P2r	1	0,0000E+00	5,0000E+00	A 0 N			
P3	1	0,0000E+00	5,0000E+00	A 0 N			
P4	1	0,0000E+00	5,0000E+00	A 0 N			

OK Apply Print Update Cancel

Τώρα πατώντας τα πλήκτρο Options και από εκεί την επιλογή Stop Criteria εμφανίζεται ένας πίνακας στον οποίο επιλέγουμε τον αριθμό των επαναλήψεων, το σχετικό επιτρεπόμενο υπόλοιπο και τον χρόνο υπολογισμού.

EES Academic Professional: C:\Users\user\Desktop\d.EES - [Equations Window]

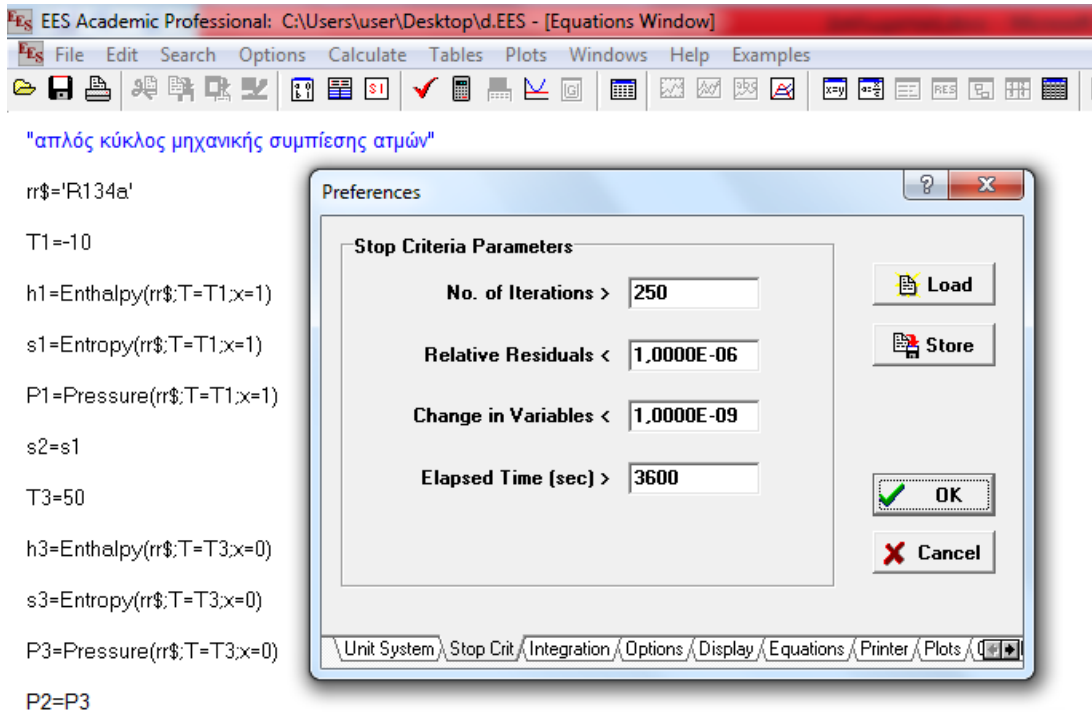
File Edit Search Options Calculate Tables Plots Windows Help Ex

"απλός κύκλος μηχαν"

rr\$='R134a'

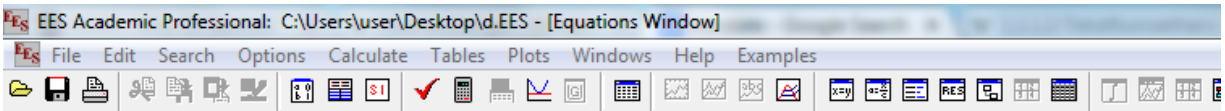
T1=-10
h1=Enthalpy(rr\$,T=T1,x=1)
s1=Entropy(rr\$,T=T1,x=1)
P1=Pressure(rr\$,T=T1,x=1)
s2=s1
T3=50

Variable Info F9
Function Info Ctrl+Alt+F
Unit Conversion Info
Constants
Unit System Ctrl+Alt+U
Stop Criteria Ctrl+Alt+S
Default Info
Show Diagram Tool Bar Shift+Ctrl+D
Preferences
Purge Unused Variables



Σε αυτό το σημείο θα δούμε πως μπορούμε να δημιουργήσουμε έναν πίνακα τιμών με την βοήθεια του EES δίδοντας μία από τις σταθερές θερμοκρασίες, ως μεταβλητή παράμετρο με συγκεκριμένο βήμα. Αυτή η ιδιότητα είναι πολύ χρήσιμη διότι μας επιτρέπει να συγκρίνουμε άμεσα δεδομένα όπως ο συντελεστής συμπεριφοράς της ψυκτικής εγκατάστασης για διάφορες θερμοκρασίες ψύξης στον ίδιο πίνακα.

Ανοίγουμε το παράθυρο επιλογών New Parametric Table και από εκεί επιλέγουμε όλες τις μεταβλητές εκτός από το ψυκτικό μέσο και πατάμε OK.

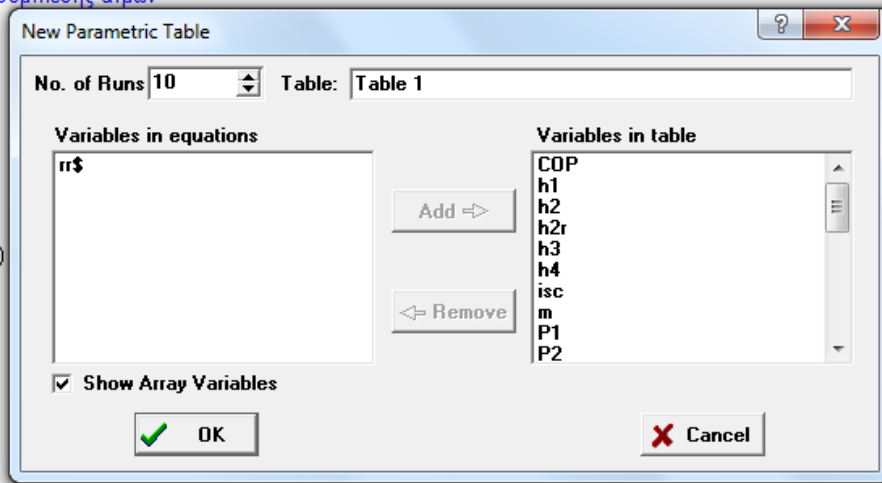


"απλός κύκλος μηχανικής συμπίεσης ατμών"

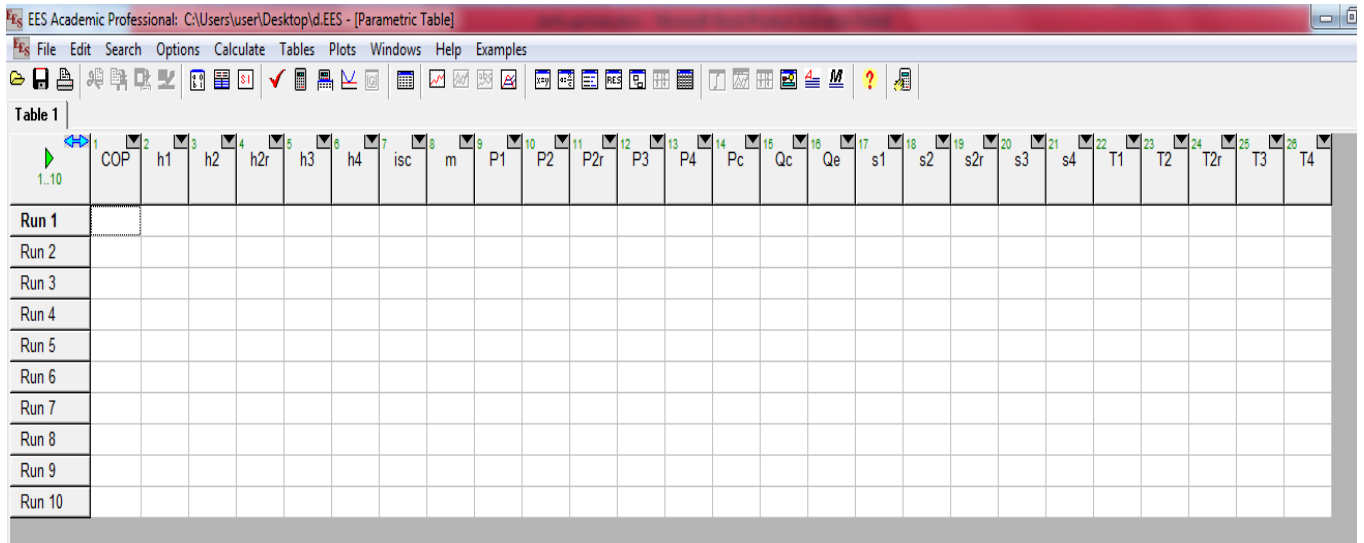
```

rr$='R134a'
T1=-10
h1=Enthalpy(rr$,T=T1,x=1)
s1=Entropy(rr$,T=T1,x=1)
P1=Pressure(rr$,T=T1,x=1)
s2=s1
T3=50
h3=Enthalpy(rr$,T=T3,x=0)
s3=Entropy(rr$,T=T3,x=0)
P3=Pressure(rr$,T=T3,x=0)

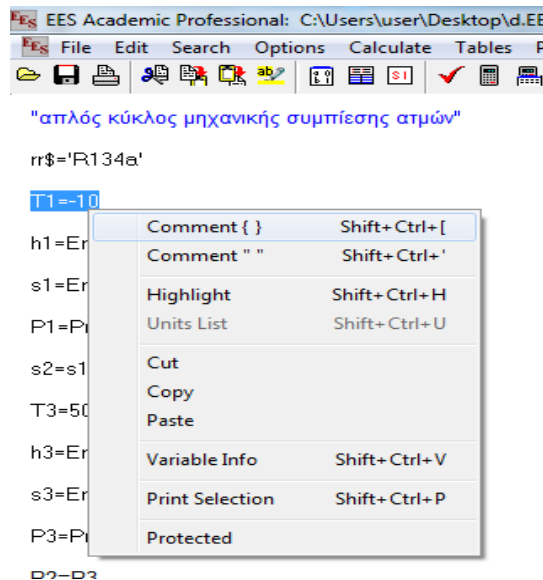
```



Τώρα θα εμφανιστεί στην επιφάνεια εργασίας του EES το παράθυρο επεξεργασίας παραμετρικών πινάκων.



Για να καθορίσουμε την σταθερά την οποία θα μετατρέψουμε σε μεταβλητή παράμετρο εργαζόμαστε ως ακολούθως. Αρχικά εκλέγουμε την σταθερά αυτή η οποία στην περίπτωση μας θα είναι η θερμοκρασία μετά τον ατμοποιητή ή T1. Διαλέγουμε το πλήκτρο Equations Window και από εκεί στην T1 επιλέγουμε την παράσταση της εξίσωσης και πατάμε Comment { }.

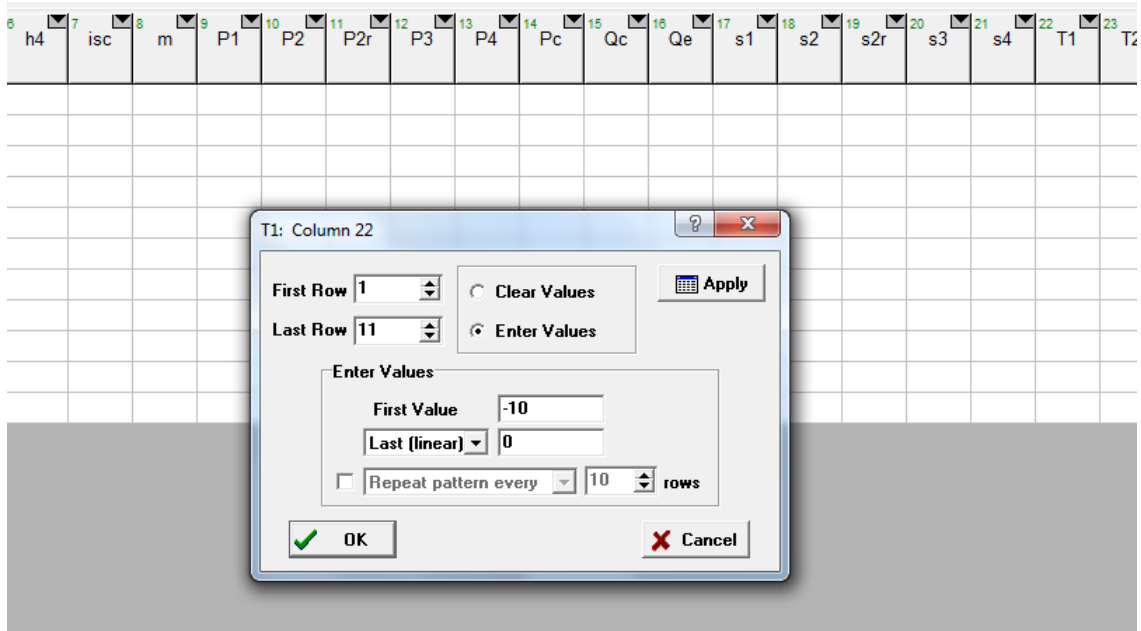


rr\$='R134a'

{T1=-10}

h1=Enthalpy(rr\$:T:

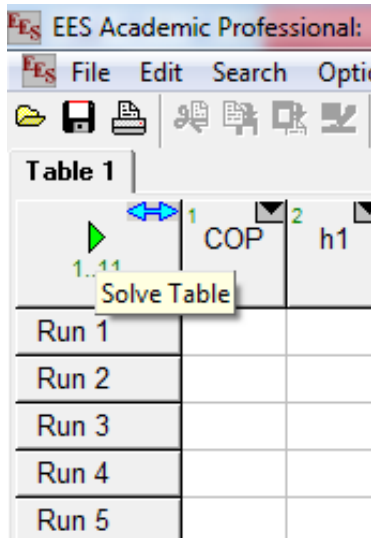
Τώρα το EES εκλαμβάνει την σταθερά T1 ως παράμετρο. Επανερχόμαστε στο interface του παραμετρικού πίνακα επιλέγοντας το πλήκτρο Parametric Table. Για να ορίσουμε το βήμα και το εύρος τιμών της παραμέτρου μας θα διαλέξουμε στο κουτί της T1 το μαύρο βελάκι στο πάνω δεξιό μέρος του κουτιού και έτσι θα εμφανιστεί το παράθυρο επιλογών της παραμέτρου. Στο παράθυρο αυτό θα προσθέσουμε μία επιλέον γραμμή (από 10 σε 11 για να υπάρχουν μόνο ακέραιες τιμές) και θα θεωρήσουμε ως πρώτη τιμή τους $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ και ως τελευταία τους $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ με γραμμική μεταβολή.



Πατώντας το OK εμφανίζονται στον πίνακα οι τιμές που επιθυμούμε με μορφή παραμέτρου.

18	19	20	21	22	23	24	25	26
s2	s2r	s3	s4	T1	T2	T2r	T3	T4
				-10				
				-9				
				-8				
				-7				
				-6				
				-5				
				-4				
				-3				
				-2				
				-1				
				0				

Πατώντας το πλήκτρο Solve Table στο πάνω αριστερά άκρο του πίνακα παίρνουμε την λύση για κάθε τιμή της παραμέτρου.

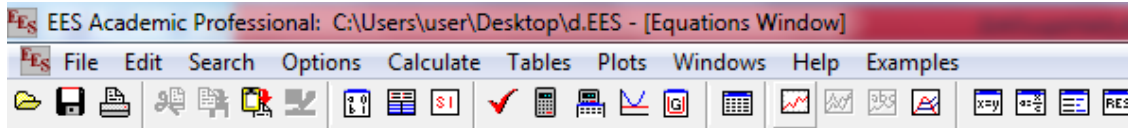


1..11	COP	h1	h2	h2r	h3	h4	isc	m	P1	P2	P2r	P3	P4	Pc	Qc	Qe	s1	s2	s2r	s3	s4	T1	T2	T2r	T3	T4
Run 1	2,772	244,5	283,8	288,2	123,5	123,5	0,9	1	0,2007	1,319	1,319	1,319	0,2007	43,66	164,7	121	0,9377	0,9377	0,9508	0,4418	0,4777	-10	57,06	60,82	50	-10
Run 2	2,847	245,1	283,6	287,8	123,5	123,5	0,9	1	0,2088	1,319	1,319	1,319	0,2088	42,73	164,4	121,6	0,937	0,937	0,9498	0,4418	0,4765	-9	56,87	60,54	50	-9
Run 3	2,923	245,7	283,4	287,5	123,5	123,5	0,9	1	0,2171	1,319	1,319	1,319	0,2171	41,82	164,1	122,2	0,9363	0,9363	0,9489	0,4418	0,4753	-8	56,68	60,26	50	-8
Run 4	3,003	246,3	283,1	287,2	123,5	123,5	0,9	1	0,2256	1,319	1,319	1,319	0,2256	40,91	163,7	122,8	0,9356	0,9356	0,948	0,4418	0,4741	-7	56,49	59,99	50	-7
Run 5	3,085	246,9	282,9	286,9	123,5	123,5	0,9	1	0,2344	1,319	1,319	1,319	0,2344	40,01	163,4	123,4	0,935	0,935	0,9471	0,4418	0,473	-6	56,31	59,73	50	-6
Run 6	3,171	247,5	282,7	286,6	123,5	123,5	0,9	1	0,2435	1,319	1,319	1,319	0,2435	39,11	163,1	124	0,9343	0,9343	0,9462	0,4418	0,4718	-5	56,14	59,47	50	-5
Run 7	3,26	248,1	282,5	286,3	123,5	123,5	0,9	1	0,2529	1,319	1,319	1,319	0,2529	38,23	162,9	124,6	0,9337	0,9337	0,9453	0,4418	0,4707	-4	55,96	59,22	50	-4
Run 8	3,352	248,7	282,3	286	123,5	123,5	0,9	1	0,2625	1,319	1,319	1,319	0,2625	37,35	162,6	125,2	0,9331	0,9331	0,9444	0,4418	0,4697	-3	55,8	58,98	50	-3
Run 9	3,448	249,3	282,1	285,8	123,5	123,5	0,9	1	0,2724	1,319	1,319	1,319	0,2724	36,48	162,3	125,8	0,9325	0,9325	0,9436	0,4418	0,4686	-2	55,63	58,74	50	-2
Run 10	3,548	249,9	281,9	285,5	123,5	123,5	0,9	1	0,2825	1,319	1,319	1,319	0,2825	35,62	162	126,4	0,932	0,932	0,9427	0,4418	0,4676	-1	55,47	58,5	50	-1
Run 11	3,652	250,5	281,7	285,2	123,5	123,5	0,9	1	0,293	1,319	1,319	1,319	0,293	34,77	161,7	127	0,9314	0,9314	0,9419	0,4418	0,4666	0	55,32	58,27	50	-7,437E

Βλέπουμε τα αποτελέσματα τα οποία παίρνουμε με την παραπάνω διαδικασία. Ο πίνακας αυτός μπορεί να χρησιμοποιηθεί για σύγκριση αποτελεσμάτων και χάραξη διαγραμμάτων.

Παραδείγματος χάριν θέλουμε να χαράξουμε το διάγραμμα του συντελεστή συμπεριφοράς της ψυκτικής εγκατάστασης συνάρτηση με την θερμοκρασία ψύξης και τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης του συμπιεστή. Εργαζόμαστε ως ακολούθως:

Διαλέγουμε το πλήκτρο New Plot Window και εμφανίζεται το σχετικό παράθυρο επιλογών.

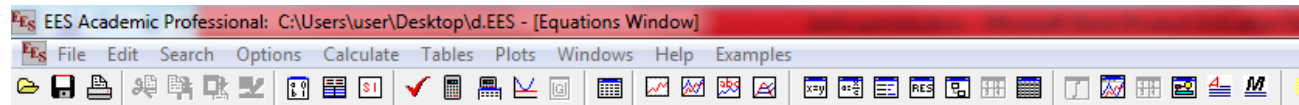


"απλός κύκλος μηχανικής συμπίεσης ατμών"

$rr = 'R134a'$

$\{T1 = -10\}$

Ορίζουμε ως όνομα διαγράμματος COP-T1, επιλέγουμε το μήκος και το βήμα των αξόνων για καλύτερη παρουσίαση του και τέλος το χρώμα και το είδος της καμπύλης.



"απλός κύκλος μηχανικής συμπίεσης ατμών"

$rr = 'R134a'$

$\{T1 = -10\}$

$h1 = \text{Enthalpy}(rr; T=T1; x=1)$

$s1 = \text{Entropy}(rr; T=T1; x=1)$

$P1 = \text{Pressure}(rr; T=T1; x=1)$

$s2 = s1$

$T3 = 50$

$h3 = \text{Enthalpy}(rr; T=T3; x=0)$

$s3 = \text{Entropy}(rr; T=T3; x=0)$

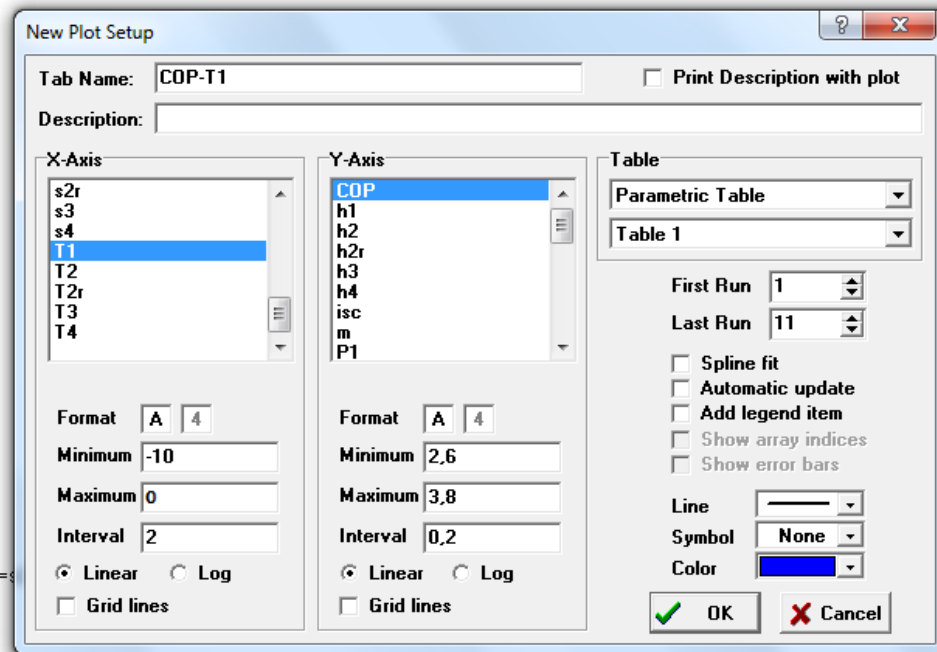
$P3 = \text{Pressure}(rr; T=T3; x=0)$

$P2 = P3$

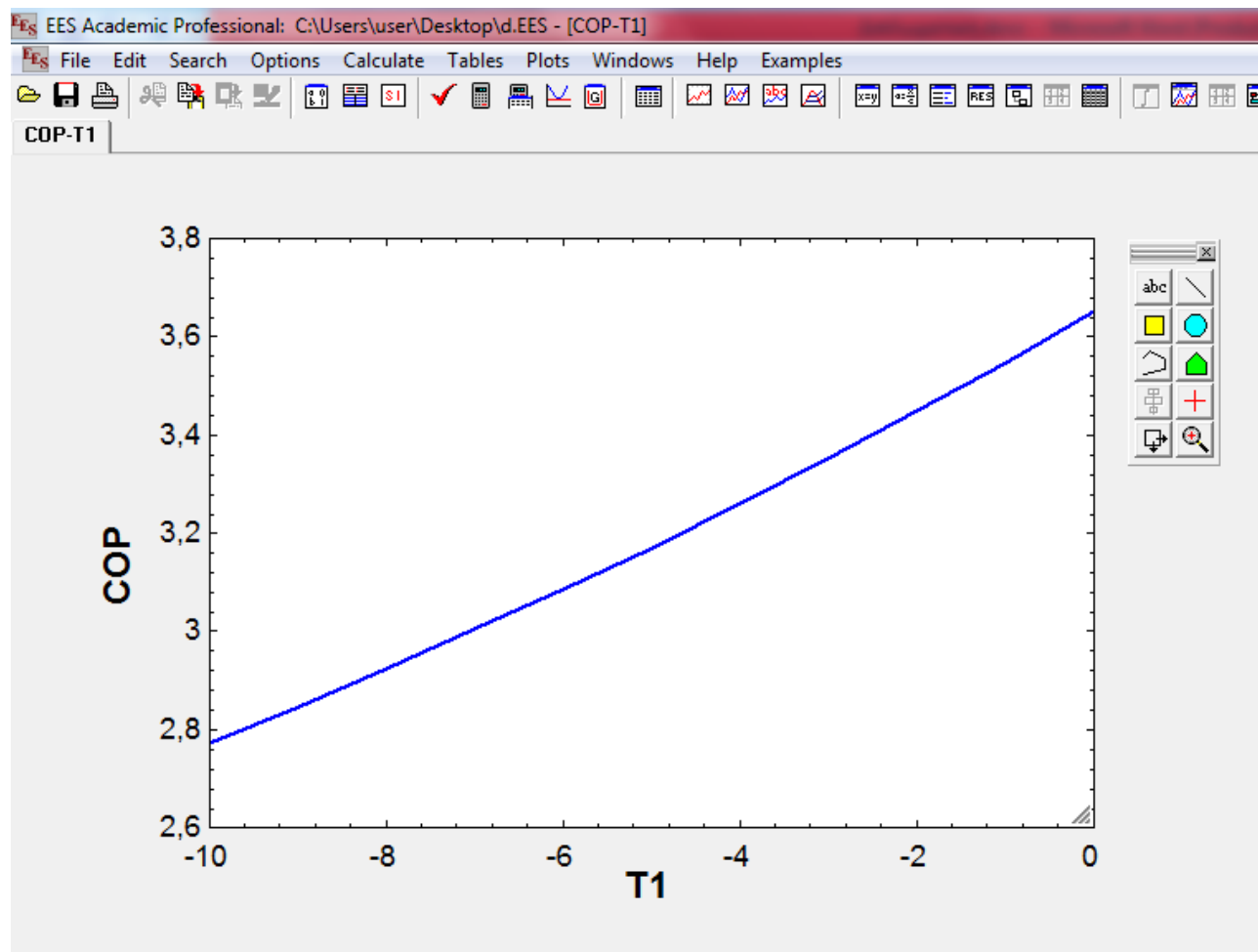
$T2 = \text{Temperature}(rr; P=P2; s=s2)$

$h2 = \text{Enthalpy}(rr; P=P2; s=s2)$

$isc = 0,9$



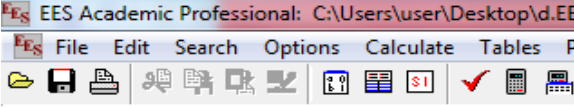
Χτυπώντας το πλήκτρο OK εμφανίζεται το παράθυρο διαγραμμάτων Plot Window με το διάγραμμα που επιθυμούμε.



Εικόνα 8.4 Διάγραμμα συντελεστή συμπεριφοράς-θερμοκρασίας ατμοποίησης για μονοβάθμιο κύκλο και ψυκτικό μέσο R-134a

Για το διάγραμμα του συντελεστή συμπεριφοράς σε συνάρτηση με τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης πρέπει να αλλάξουμε ελάχιστα τον κώδικα τον οποίο έχουμε συντάξει. Έτσι στην επιφάνεια εργασίας εξισώσεων ή Equations Window διαγράφουμε το σχόλιο Comment { } από την θερμοκρασία T1 έτσι ώστε αυτή να πάψει να είναι παράμετρος όπως προαναφέρθηκε και

να το προσθέσουμε στον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης isc με την διαφορά ότι τώρα θα επέμβουμε αλλάζοντας την τιμή 0,9 για να ξεκινήσει ο μετρητής του προγράμματος από μία χαμηλότερη τιμή, έστω 0,5 και να περατώνεται στην τιμή 1 με σκοπό να προσομοιάσουμε την ιδανική θεωρητική μεταβολή.

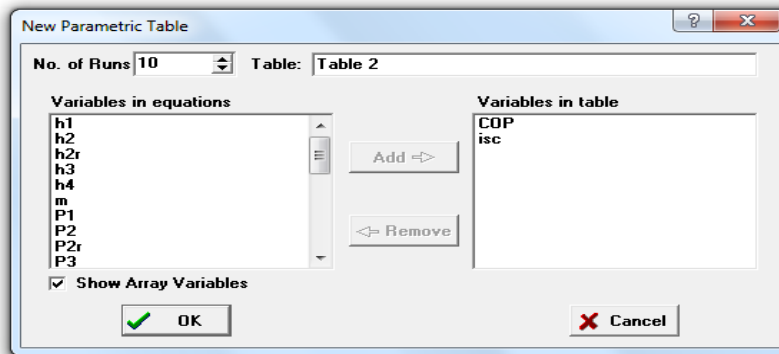


```

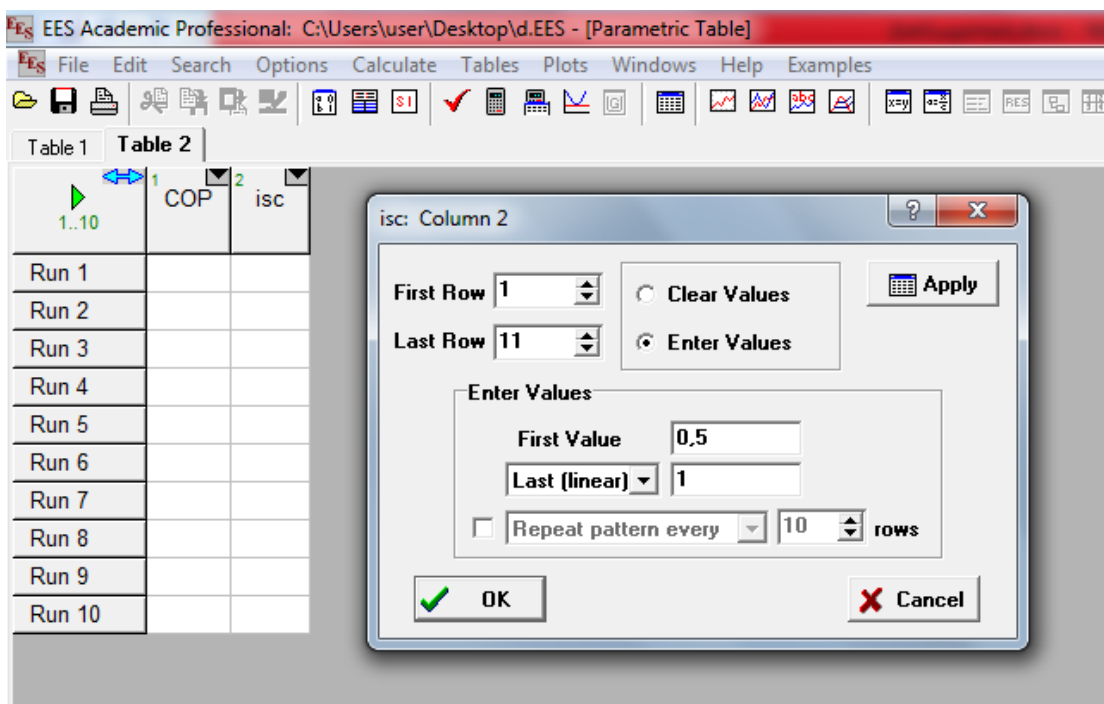
EES Academic Professional: C:\Users\user\Desktop\d.EE
File Edit Search Options Calculate Tables F
"απλός κύκλος μηχανικής συμπίεσης ατμών"
rr$='R134a'
T1=-10
h1=Enthalpy(rr$,T=T1;x=1)
s1=Entropy(rr$,T=T1;x=1)
P1=Pressure(rr$,T=T1;x=1)
s2=s1
T3=50
h3=Enthalpy(rr$,T=T3;x=0)
s3=Entropy(rr$,T=T3;x=0)
P3=Pressure(rr$,T=T3;x=0)
P2=P3
T2=Temperature(rr$,P=P2;s=s2)
h2=Enthalpy(rr$,P=P2;s=s2)
{isc=0.5}
h2r=h1+(h2-h1)/isc

```

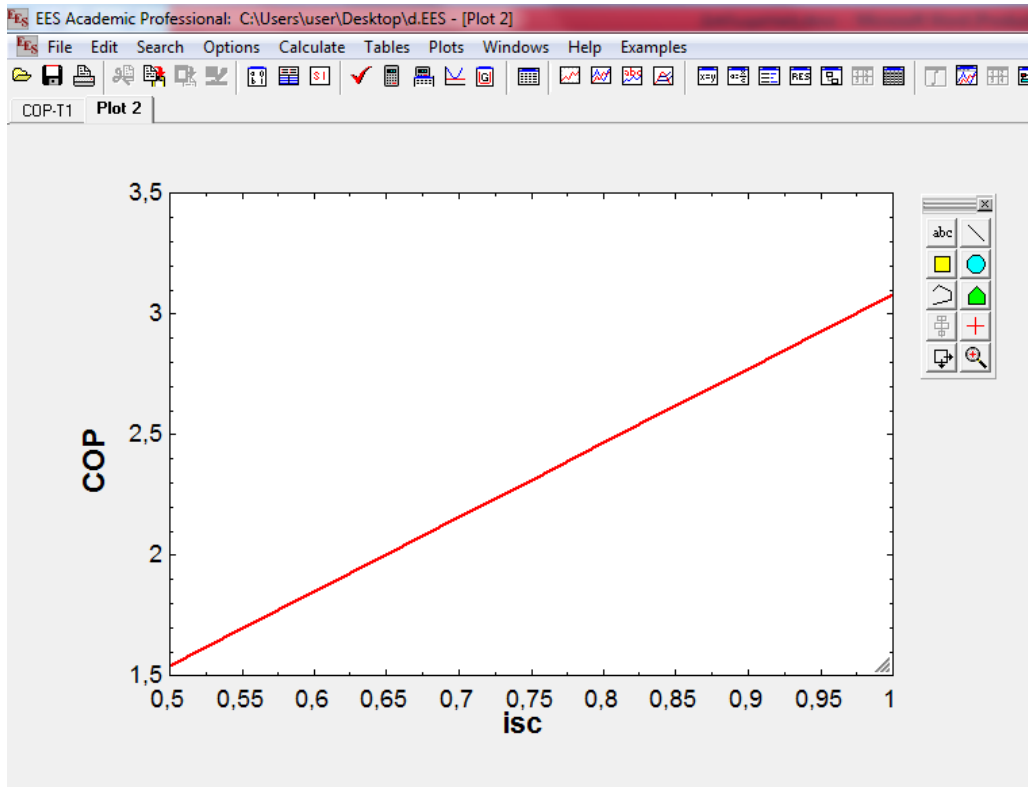
Τώρα θα ορίσουμε έναν καινούργιο παραμετρικό πίνακα με την επιλογή New Parametric Table, αλλά στην περίπτωση αυτή γνωρίζουμε πως επιθυμούμενα επιδείξουμε την μεταβολή του συντελεστή συμπεριφοράς της ψυκτικής εγκατάστασης σε συνάρτηση με τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης του συμπιεστή. Για τον λόγο αυτό δεν χρειάζεται να εισάγουμε στον πίνακα καμία άλλη μεταβλητή πλην των δύο προαναφερθέντων. Έτσι στον παραμετρικό πίνακα εισάγουμε μόνο τα COP, isc .



Όπως και πριν με το μαύρο πλήκτρο τύπου βέλους στο πάνω δεξιά μέρος του κουτιού στο οποίο βρίσκεται η παράμετρος isc κατασκευάζουμε τον παραμετρικό πίνακα μας.



Με το πλήκτρο Solve Table λύνουμε τον πίνακα και έχουμε τις τιμές του COP. Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία με πριν λαμβάνουμε το ακόλουθο διάγραμμα.



Εικόνα 8.5 Διάγραμμα συντελεστή συμπεριφοράς-ισεντροπικού βαθμού απόδοσης για μονοβάθμιο κύκλο και ψυκτικό μέσο R-134a

Για να ολοκληρώσουμε το κεφάλαιο προσομοίωσης του περιβάλλοντος του λογισμικού EES θα προσπαθήσουμε να δημιουργήσουμε με την βοήθεια της βιβλιοθήκης διαγραμμάτων του προγράμματος, το διάγραμμα πίεσης-ενθαλπίας (P-h) του ψυκτικού κύκλου τον οποίο μελετήσαμε. Για να κατασκευάσουμε το παραπάνω διάγραμμα είναι απαραίτητο να εκτελέσουμε μία σειρά αλλαγών στον κώδικα εξισώσεων με σκοπό το πρόγραμμα EES να αντιληφθεί ορθά την εντολή μας. Έτσι, πρέπει να αναφέρουμε πως για την χάραξη ενός τέτοιου είδους διαγράμματος πρέπει οι μεταβλητές των εξισώσεων να μετατραπούν σε αυτό που το πρόγραμμα αντιλαμβάνεται ως ορίσματα (arrays). Για να γίνουν οι μεταβλητές ορίσματα, απλά ανοίγουμε και κλείνουμε αγκύλες δίπλα από τον αριθμό της μεταβλητής π.χ. :

Μεταβλητή h1 → Όρισμα h[1].

Επίσης, εντός των ορισμάτων δεν επιτρέπεται από τον έλεγχο σύνταξης του προγράμματος να υπάρχουν γράμματα αλφαβήτου ή σύμβολα διότι εκλαμβάνεται ως αναγκαιότητα εκτέλεσης πράξεων. Έτσι πρέπει τα σημεία να συμβολίζονται μόνο με αριθμούς και για τον λόγο αυτό το

σημείο 2r γίνεται 3, το σημείο 3 γίνεται 4 και ούτω καθεξής. Επίσης για να κλείσει ο κύκλος, είναι απαραίτητο να ορίσουμε ένα 6^ο σημείο το οποίο θα είναι ίδιο θερμοδυναμικά με το 1^ο αλλά στο με αριθμό μεγαλύτερο από το τελευταίο σημείο του κύκλου (διφασικό μίγμα υγρού-ατμού).

Τέλος επειδή επιθυμούμε να παραλείψουμε από το διάγραμμα μας το ισεντροπικό σημείο διότι αυτό πραγματικά δεν υφίσταται αλλά απλά μας βοηθάει στην κατανόηση προχωρούμε ορίζοντας μερικά νέα ορίσματα x,y τα οποία αντιστοιχούν στις ενθαλπίες και πιέσεις των σημείων του κύκλου εκτός από το ισεντροπικό σημείο με αύξουσα αριθμητική σειρά χωρίς να παραλείπεται κάποιος αριθμός πράγμα το οποίο δεν επιτρέπει το πρόγραμμα.

$$Q_c = m \cdot (h[3] - h[4])$$

$$COP = Q_e / P_c$$

$$x[1] = h[1]$$

$$x[2] = h[3]$$

$$x[3] = h[4]$$

$$x[4] = h[5]$$

$$x[5] = h[6]$$

$$y[1] = P[1]$$

$$y[2] = P[3]$$

$$y[3] = P[4]$$

$$y[4] = P[5]$$

$$y[5] = P[6]$$

Έτσι μόλις χτυπήσουμε το πλήκτρο Solve θα εμφανιστεί πέρα από τον πίνακα των αποτελεσμάτων και ο πίνακας των ορισμάτων Arrays Table ο οποίος περιέχει όλα τα ορίσματα τα οποία ορίσαμε.

EES Academic Professional: C:\Users\user\Desktop\d1.EES - [Arrays Table]

File Edit Search Options Calculate Tables Plots Windows Help Examples

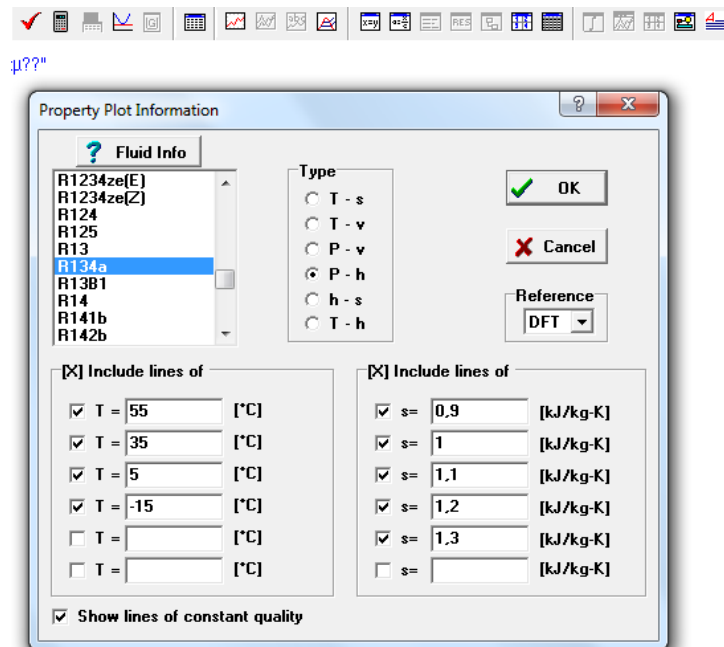
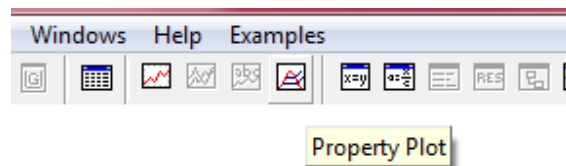
Main

Sort

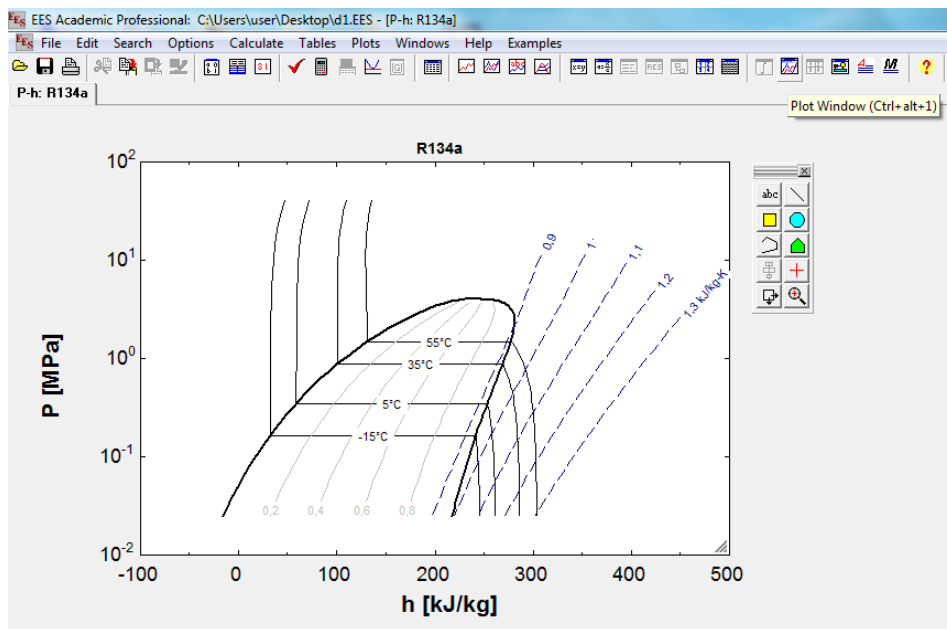
	1	2	3	4	5	6	7
	h_i	P_i	s_i	T_i	x_i	y_i	
[1]	244,5	0,2007	0,9377	-10	244,5	0,2007	
[2]	279,9	1,319	0,9257	53,76	283,8	1,319	
[3]	283,8	1,319	0,9377	57,06	123,5	1,319	
[4]	123,5	1,319	0,4418	50	123,5	0,2007	
[5]	123,5	0,2007	0,4777	-10	244,5	0,2007	
[6]	244,5	0,2007	0,9377	-10			

Arrays Table (Ctrl+Y)

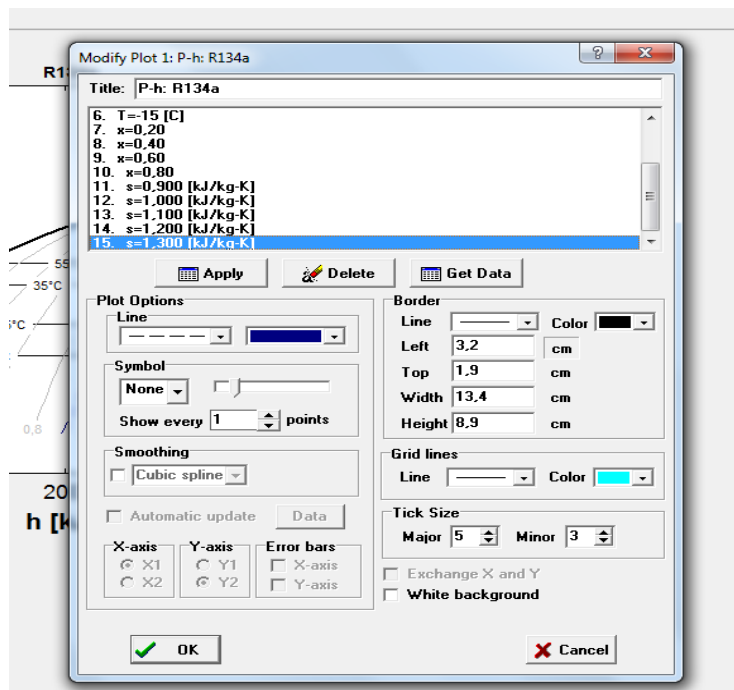
Στην συνέχεια χτυπώντας το πλήκτρο Property Plot εμφανίζεται το παράθυρο επιλογών για την χάραξη του διαγράμματος. Στο παράθυρο αυτό επιλέγουμε ως εργαζόμενο μέσο το R-134a, το είδος του διαγράμματος ως P-h και κάποιες ισοθερμοκρασιακές και ισηντροπικές καμπύλες ανάλογα με τις θερμοκρασίες που έχουμε στο συγκεκριμένο παράδειγμα.



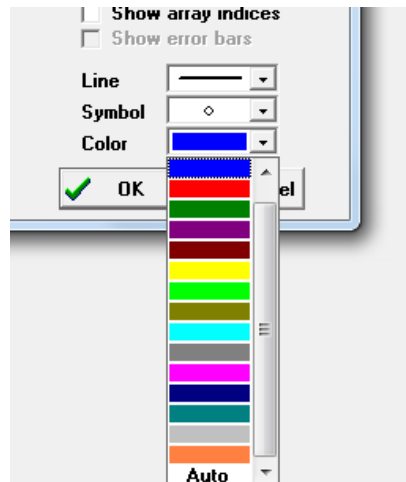
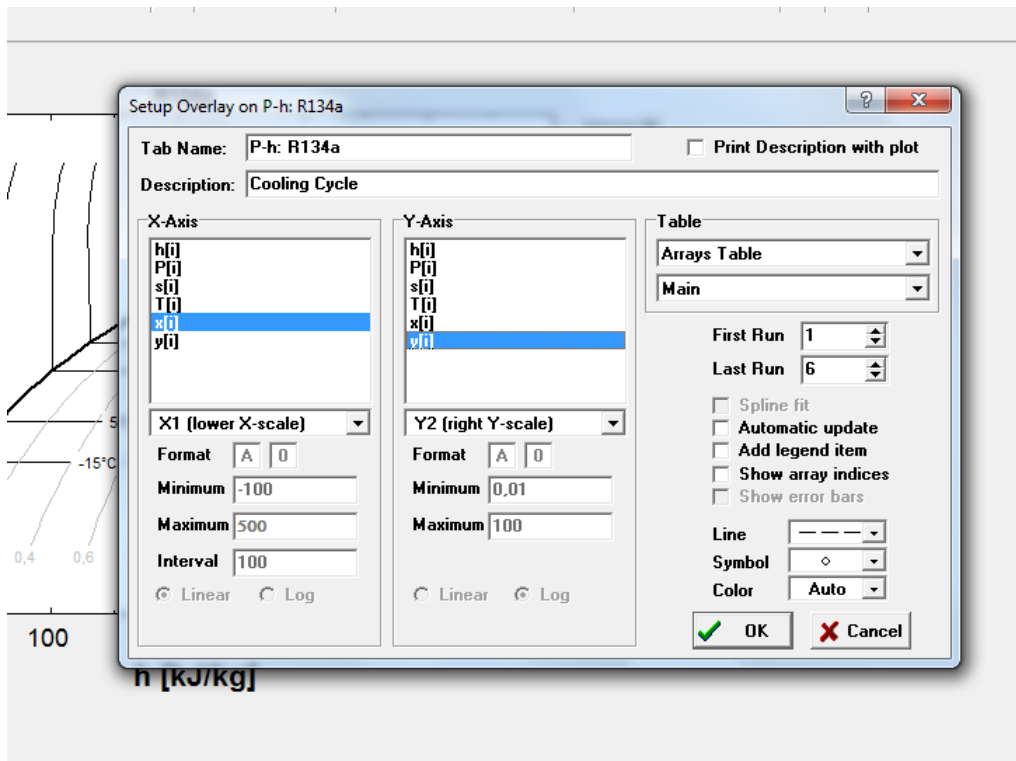
Έτσι διαλέγοντας το πλήκτρο OK εμφανίζεται πλέον το Plot Window με το διάγραμμα που ζητήσαμε.



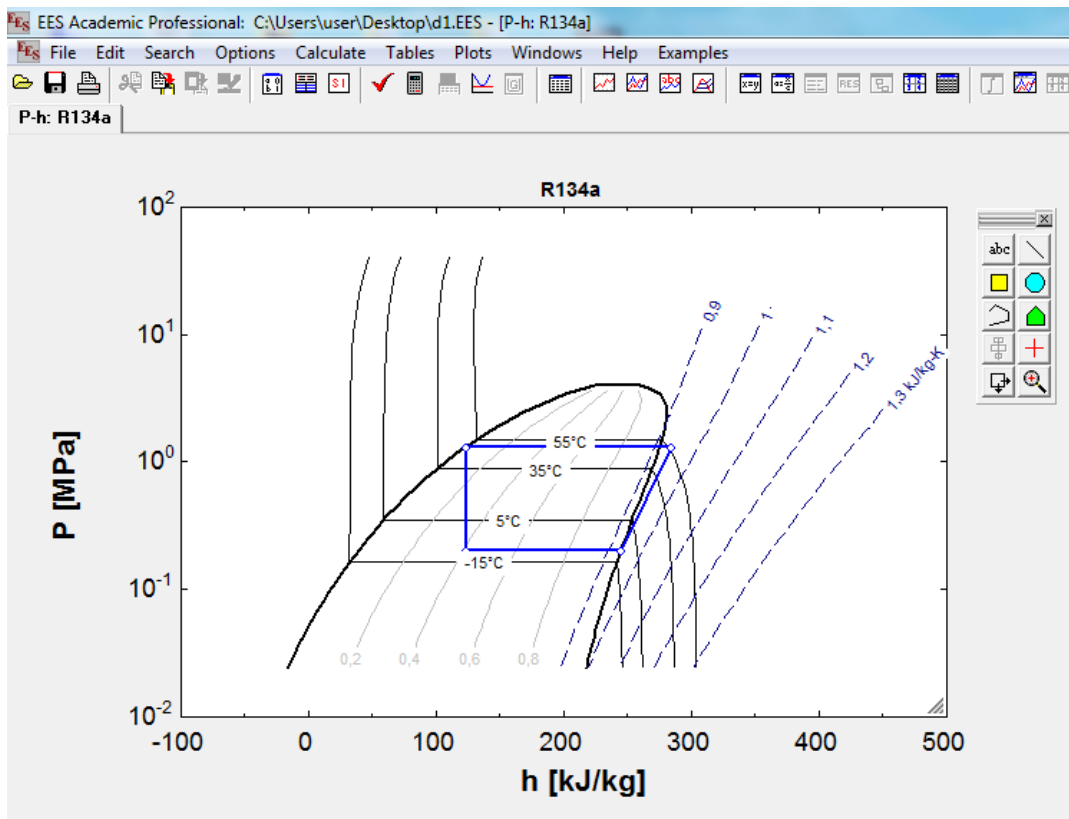
Πατώντας δεξί κλικ επάνω στην επιφάνεια του διαγράμματος, εμφανίζεται ένας πίνακας ο οποίος ονομάζεται Modify Plot και μας επιτρέπει να τροποποιήσουμε το διάγραμμα, αλλάζοντας π.χ. τις ισοθερμοκρασιακές τις οποίες έχουμε εισάγει ή αφαιρώντας τις τελείως.



Τώρα για να εισάγουμε τα σημεία που επιθυμούμε και να προσομοιάσουμε τον ψυκτικό κύκλο διαλέγουμε το πλήκτρο Overlay Plot (δηλαδή: διάγραμμα επικάλυψης). Εμφανίζεται ένα παράθυρο το οποίο στην επικεφαλίδα του μας αναφέρει ότι μπορούμε να εγκαταστήσουμε ένα διάγραμμα επικάλυψης επάνω στο ήδη υπάρχον διάγραμμα βάσης P-h : R-134a. Στην περιγραφή ορίζουμε Cooling Cycle και στην συνέχεια επιλέγουμε στον X άξονα τις array μεταβλητές $x[i]$ και στον Y άξονα τις array μεταβλητές $y[i]$ για τον λόγο που προαναφέρθηκε. Τέλος επιλέγουμε παχεία συνεχόμενη γραμμή με κυκλικά σύμβολα για τα σημεία και μπλε χρώμα από το κάτω δεξιά μέρος του πίνακα.



Διαλέγοντας το πλήκτρο OK εμφανίζεται μία χαρακτηριστική προειδοποίηση με την μορφή παραθύρου pop-up το οποίο ενημερώνει τον χρήστη πως τα δεδομένα για την 6^η σειρά σημείων χ[i] λείπουν. Ο χρήστης πρέπει να κατανοήσει πως ο σκοπός για τον οποίο παραλείψαμε το ισεντροπικό σημείο ήταν ακριβώς αυτός δηλαδή το πρόγραμμα να κατανοήσει πως θα χαρράξει ένα σημείο λιγότερο, και να συνεχίσει βλέποντας πως το παράθυρο ζητάει την άδεια να χαρράξει τα εναπομείναντα δεδομένα πατώντας Yes. Έτσι εμφανίζεται στο διάγραμμα ο ψυκτικός κύκλος τον οποίο αναλύσαμε.



Εικόνα 8.6 Διάγραμμα P-h για μονοβάθμιο κύκλο και ψυκτικό μέσο R-134a

Τέλος, αναφέρουμε για πληρότητα της διπλωματικής αυτής εργασίας ότι εξ' αιτίας της πολύ καλής προσαρμοστικότητας και χρηστικότητας του προγράμματος Microsoft Excel στην επεξεργασία δεδομένων και στην χάραξη διαγραμμάτων, το χρησιμοποιούμε σε πολλά σημεία της εργασίας ως εργαλείο για την βέλτιστη παρουσίαση των αποτελεσμάτων τα οποία λαμβάνουμε από το EES.

Κεφάλαιο 9.

9. Ανάλυση ψυκτικών κύκλων με το λογισμικό E.E.S.

Το κεφάλαιο αυτό αποτελεί το κυρίως τμήμα της εργασίας αυτής και περιέχει τα αποτελέσματα με την μορφή πινάκων και διαγραμμάτων τα οποία προκύπτουν με την βοήθεια του EES από την ανάλυση 6 ψυκτικών κυκλωμάτων. Για τον λόγο αυτό, το κεφάλαιο χωρίζεται σε 6 επιμέρους τμήματα καθένα από τα οποία καταπιάνεται με ένα διαφορετικό κύκλωμα με αύξουσα την σειρά πολυπλοκότητας τους.

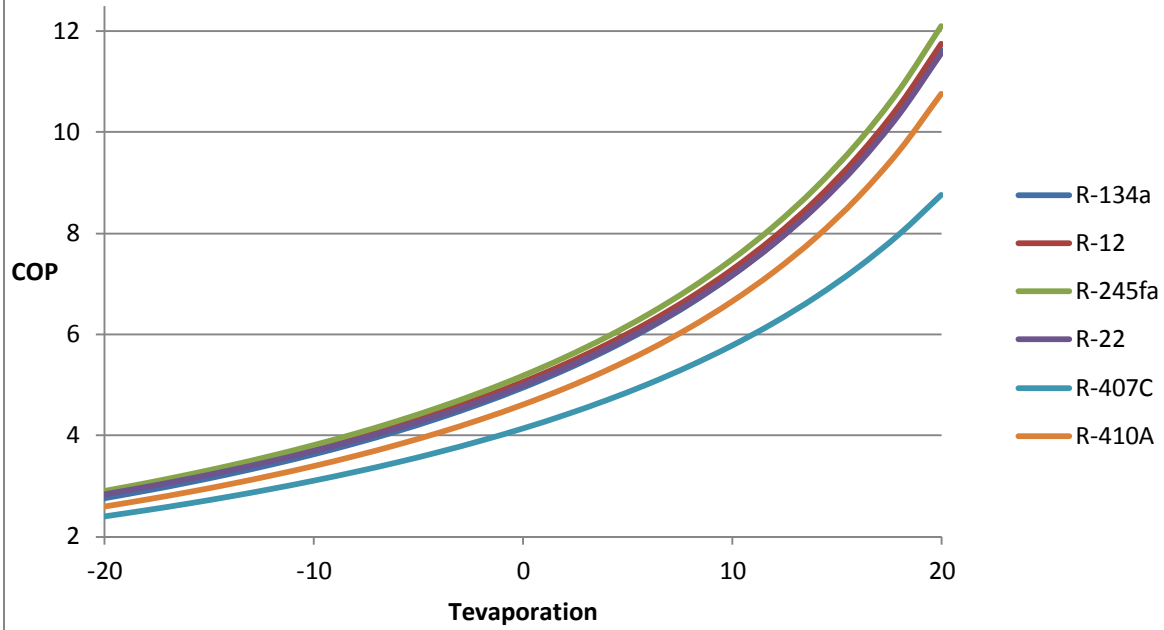
9.1 Μονοβάθμιος κύκλος μηχανικής συμπίεσης ατμών.

Ο ψυκτικός αυτός κύκλος έχει αναλυθεί επανειλημμένα και εκτενέστατα σε προηγούμενα τμήματα της εργασίας. Για τον λόγο αυτό θα προχωρήσουμε κατ'ευθείαν στην παράθεση των διαγραμμάτων τα οποία μας ενδιαφέρουν.

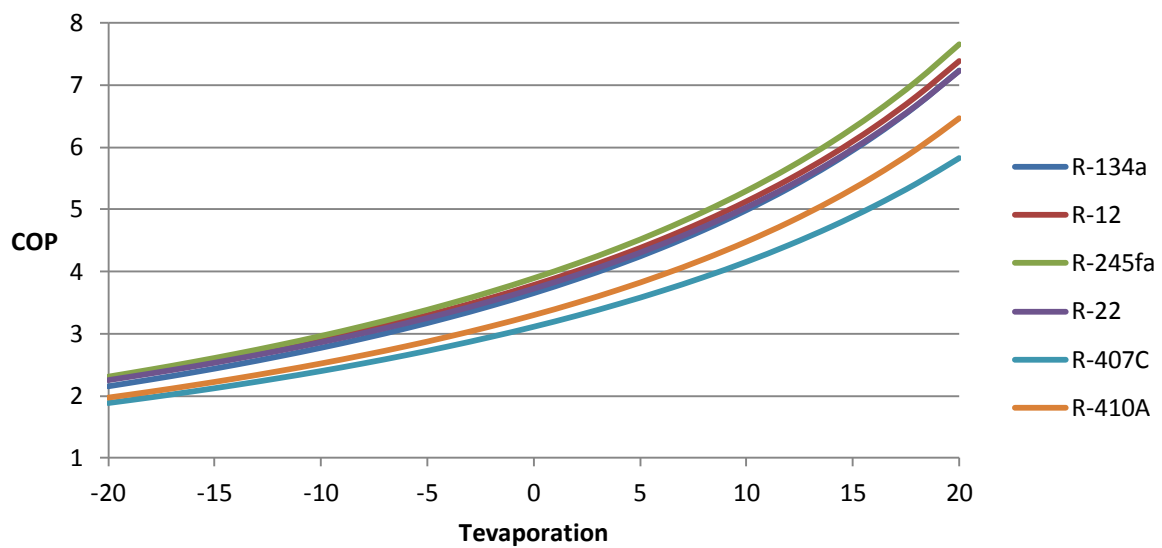
Παρακάτω δίδονται τα διαγράμματα COP-Tevaporation με σταθερή Tcondensation για διάφορα εργαζόμενα μέσα και ισεντροπικό βαθμό απόδοσης συμπιεστή $i_{sc}=0,9$ με παροχή μάζας ψυκτικού μέσου $m=1$ kg/s.

Τα εργαζόμενα αυτά μέσα είναι τα R-134a, R-12, R-22, R-245fa λόγω της πολύ μεγάλης βιομηχανικής εφαρμογής τους αλλά και των ενδιαφερόντων ιδιοτήτων τους και τα R-407C και R-410 A τα οποία κρίνεται σκόπιμο να αναλυθούν ως τυπικά αζεοτροπικά ψυκτικά μέσα.

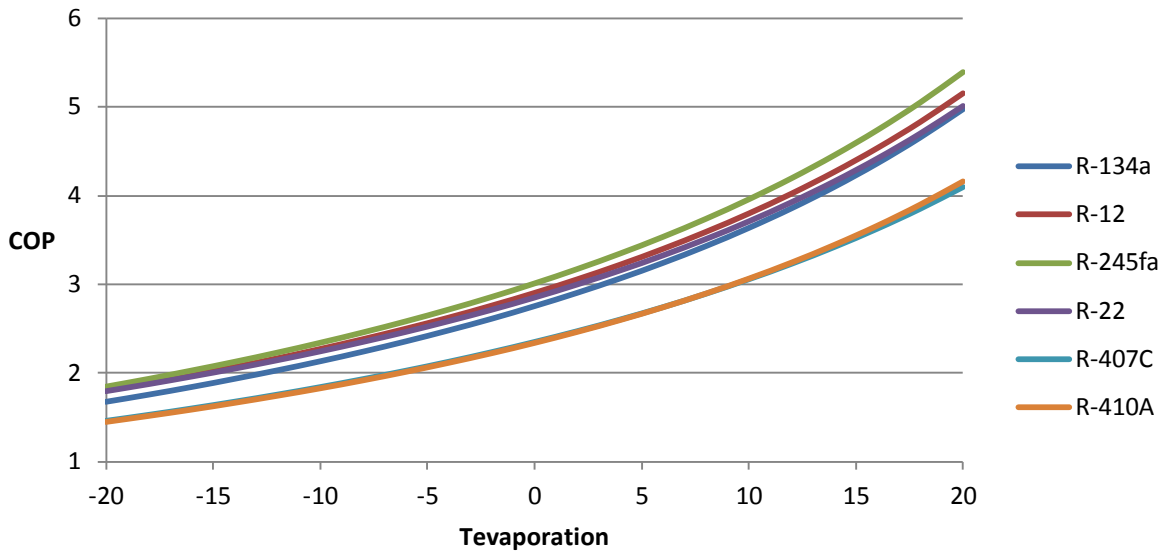
Διάγραμμα 9.1 COP-Tevaporation για $T_{\text{condensation}}=40^{\circ}\text{C}$



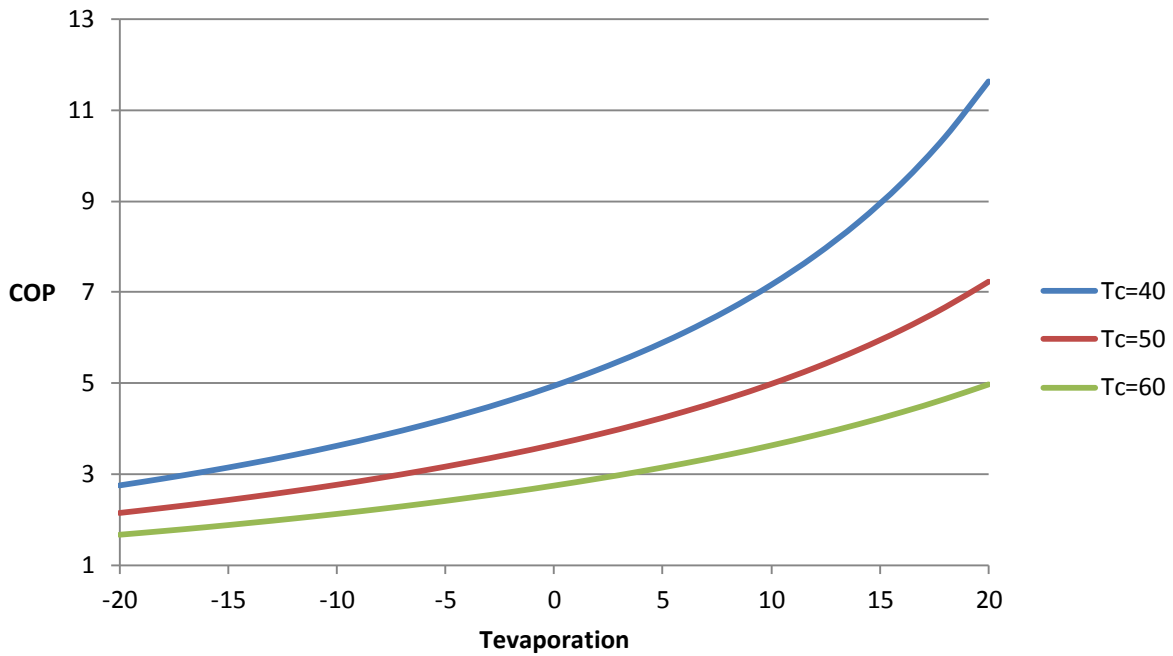
Διάγραμμα 9.2 COP-Tevaporation για $T_{\text{condensation}}=50^{\circ}\text{C}$



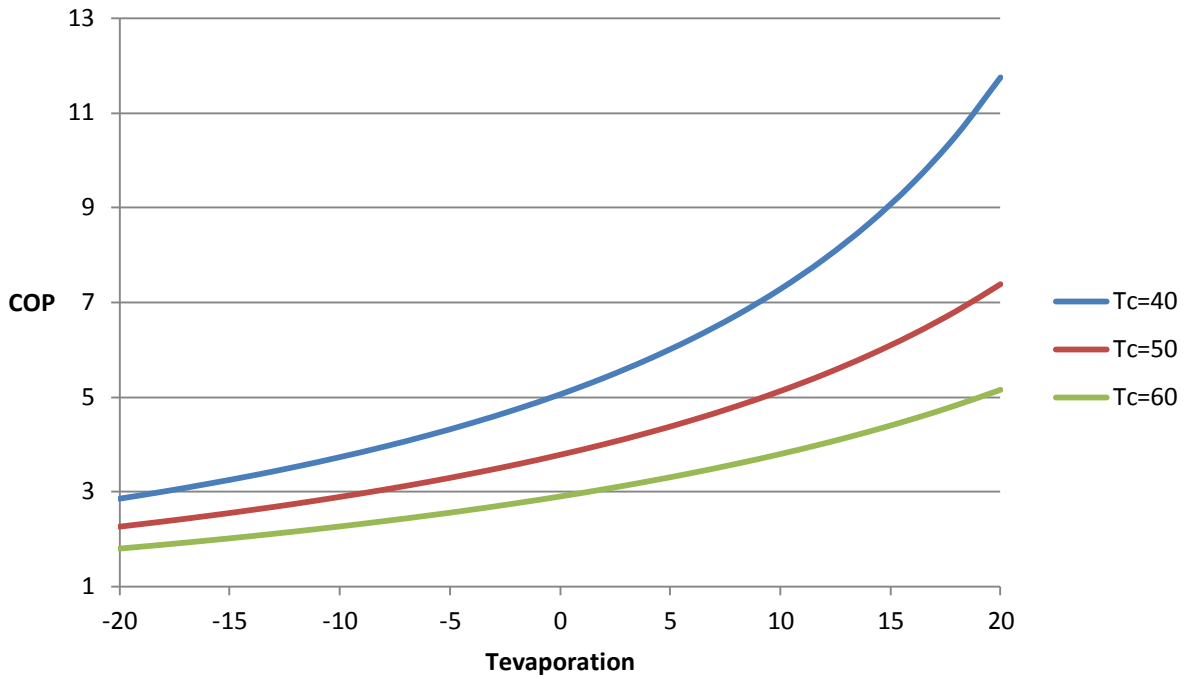
Διάγραμμα 9.3 COP-Tevaporation για $T_{\text{condensation}}=60\text{ }^{\circ}\text{C}$



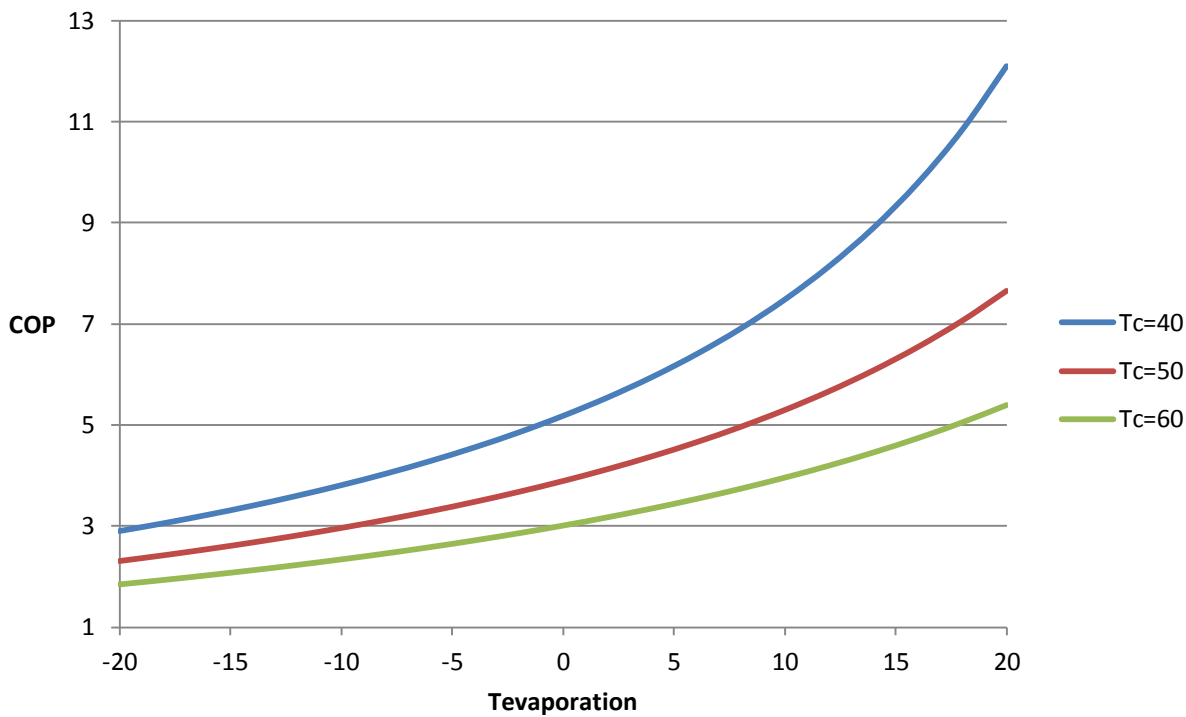
Διάγραμμα 9.4 COP-Tevaporation για R-134a



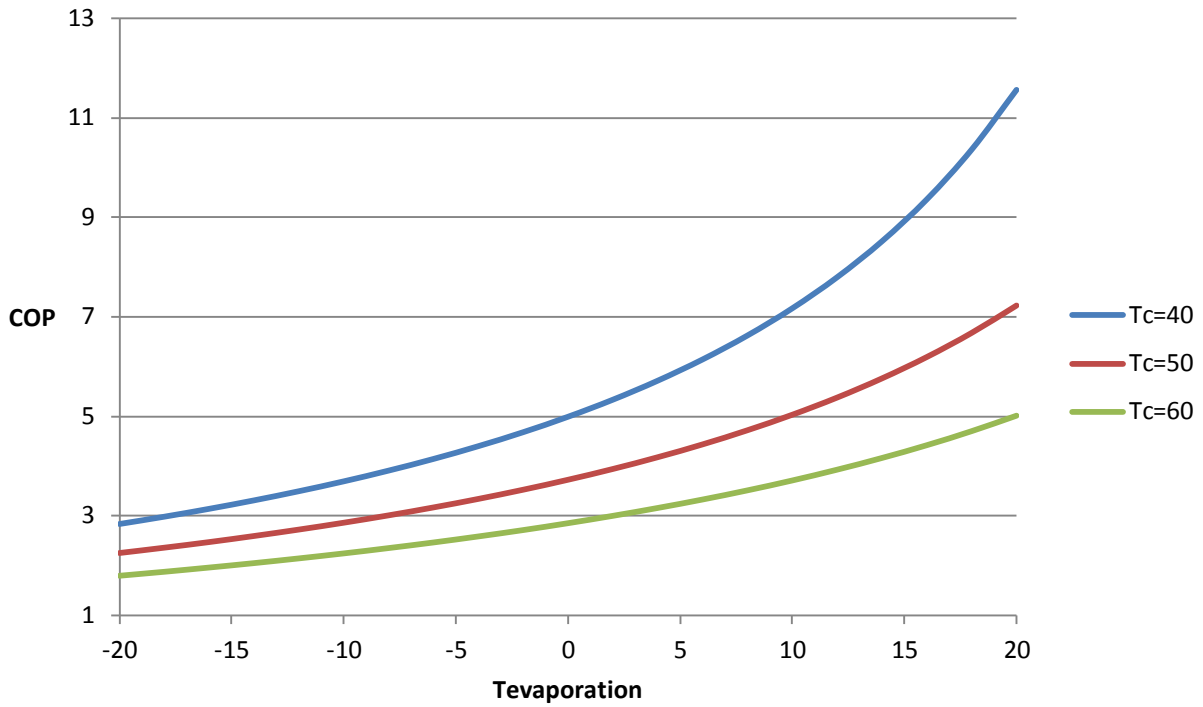
Διάγραμμα 9.5 COP-Tevaporation για R-12



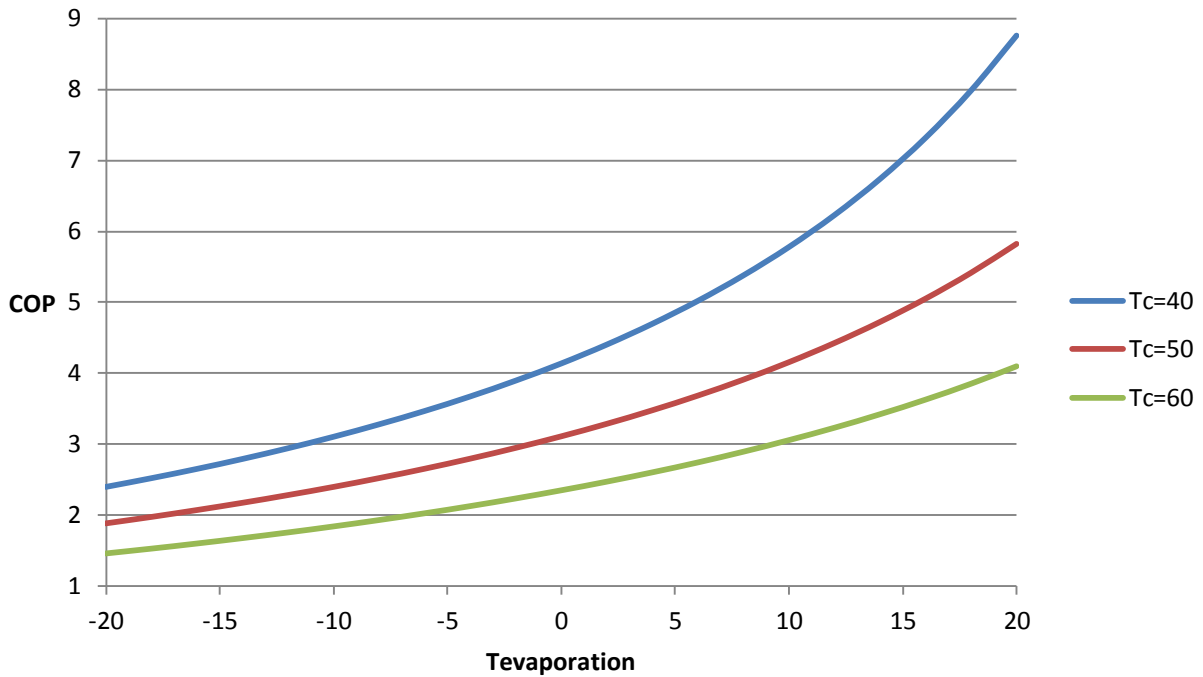
Διάγραμμα 9.6 COP-Tevaporation για R-245fa



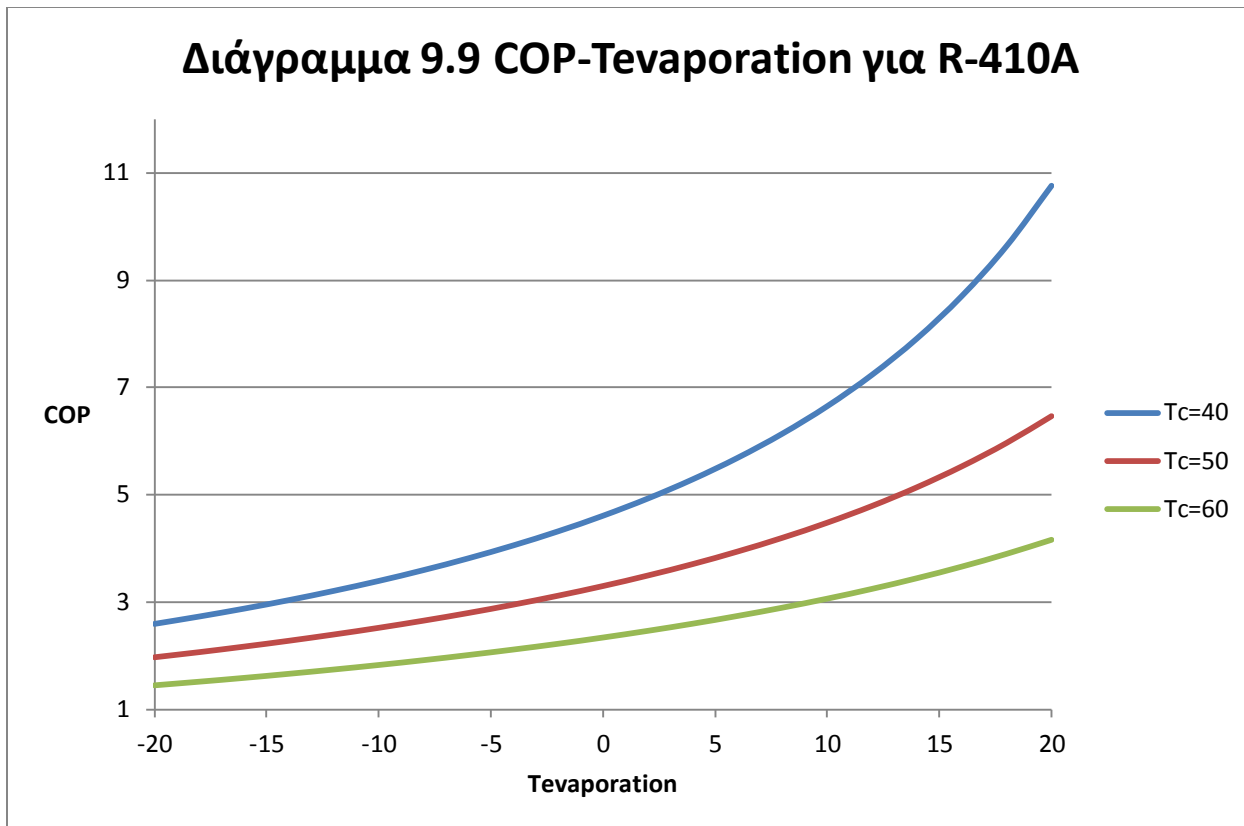
Διάγραμμα 9.7 COP-Tevaporation για R-22



Διάγραμμα 9.8 COP-Tevaporation για R-407C

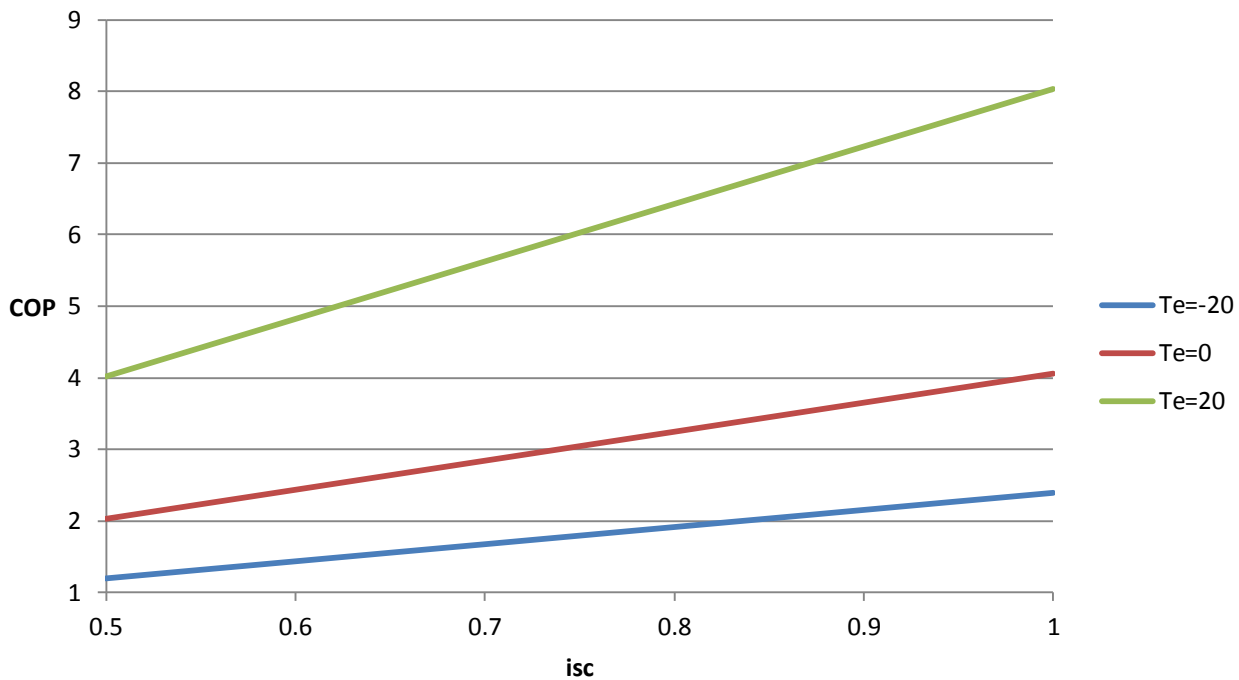


Διάγραμμα 9.9 COP-Tevaporation για R-410A

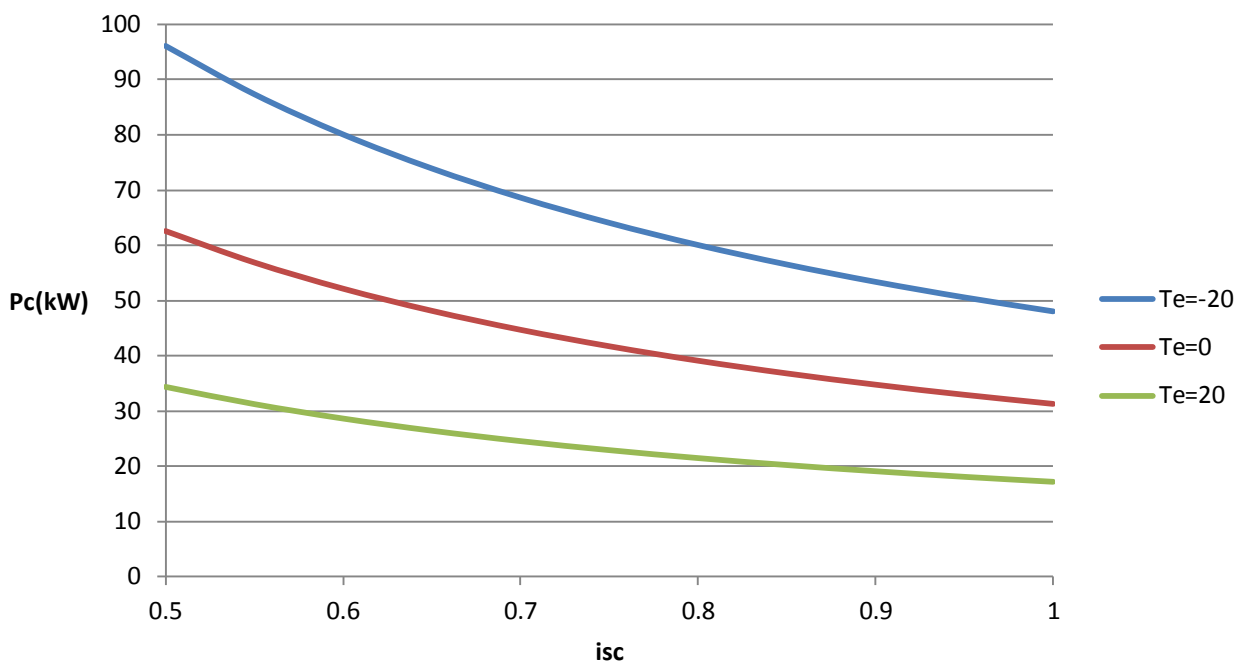


Στην επόμενη σειρά διαγραμμάτων θα παραθέσουμε την εξάρτηση του συντελεστή συμπεριφοράς της ψυκτικής εγκατάστασης COP, της ηλεκτρικής ισχύος την οποία απορροφά ο συμπιεστής P_c και της ισχύος του συμπυκνωτή Q_c δηλαδή της θερμότητας την οποία απορρίπτει το ψυκτικό κύκλωμα στο περιβάλλον, όλα ως συνάρτηση του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης του συμπιεστή. Τέτοια διαγράμματα είναι πολύ χρήσιμα διότι μας επιτρέπουν να παρατηρήσουμε πόσο αυξάνεται ο συντελεστής συμπεριφοράς της ψυκτικής εγκατάστασης και συνεπώς πόσο πιο αποδοτική αυτή γίνεται ανά μονάδα αύξησης του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης του συμπιεστή. Έτσι είναι δυνατόν να διεξαχθεί μελέτη οικονομικής βελτιστοποίησης για να βρεθεί το σημείο στο οποίο ο συνδυασμός συντελεστή συμπεριφοράς ψυκτικής εγκατάστασης και ισεντροπικού βαθμού απόδοσης του συμπιεστή δίνει το ελάχιστο κόστος εγκατάστασης. Επίσης μπορούμε να παρατηρήσουμε την μεταβολή στην απορροφώμενη ηλεκτρική ισχύ από τον συμπιεστή ανά μονάδα αύξησης του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης αυτού καθώς και την μείωση την θερμότητας του συμπυκνωτή δηλαδή της απορριπτόμενης στο περιβάλλον θερμότητας από την ψυκτική εγκατάσταση. Να σημειωθεί ότι στα διαγράμματα θα επιδεικνύεται η μεταβολή του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης από 0,5 έως 1 για να γίνει κατανοητή η σημασία του ισεντροπικού σημείου, καθώς και ότι η διαδικασία γίνεται για ψυκτικό μέσο R-134a και θερμοκρασία συμπύκνωσης $T_c=50$ °C.

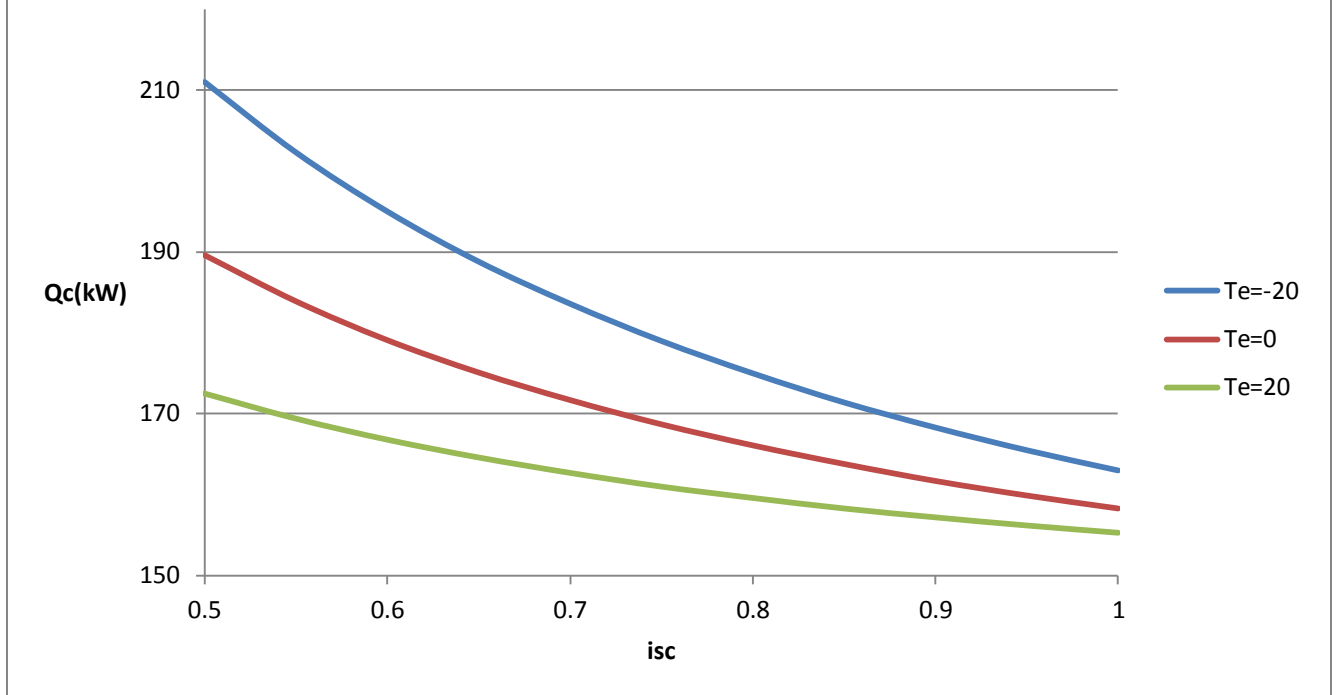
Διάγραμμα 9.10 COP-isc



Διάγραμμα 9.11 Pc-isc

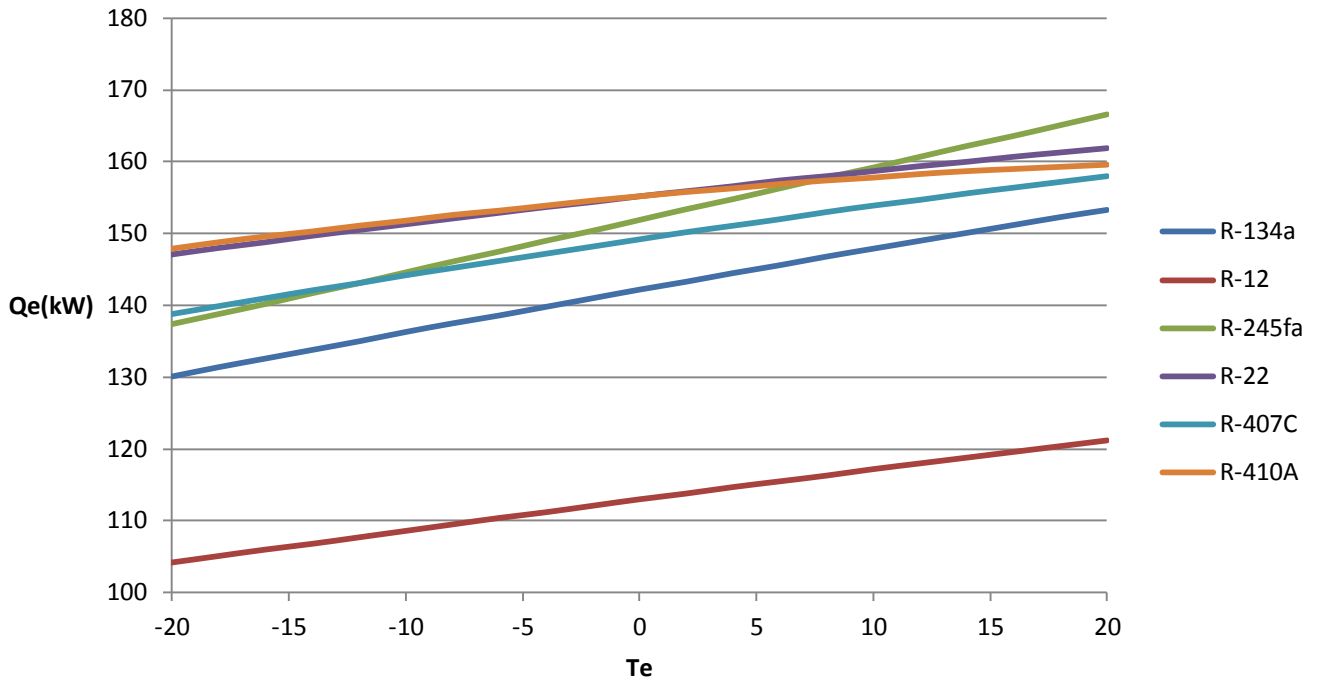


Διάγραμμα 9.12 Qc-isc

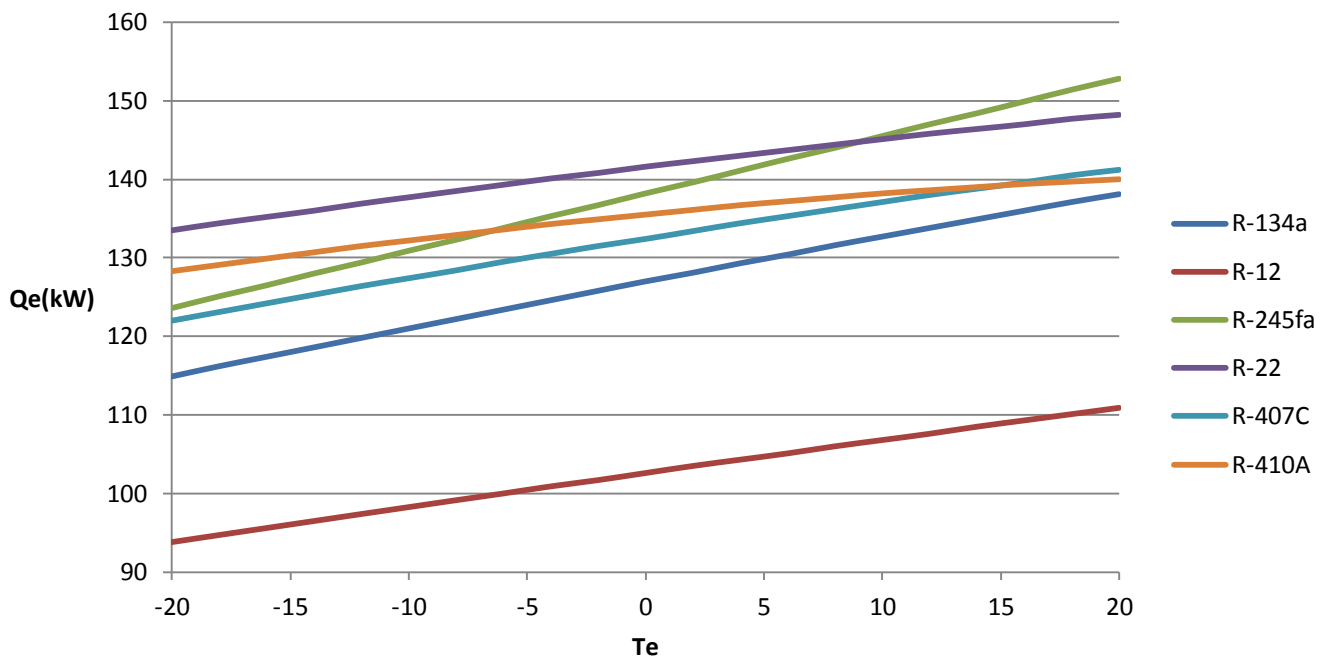


Όπως γνωρίζουμε, σε ένα ψυκτικό κύκλωμα μας ενδιαφέρει ο συντελεστής συμπεριφοράς αλλά και η ψυκτική ισχύς, δηλαδή η ισχύς στον ατμοποιητή την οποία αποδίδει. Παρακάτω δίδονται διαγράμματα για την μεταβολή της ψυκτικής ισχύος της εγκατάστασης σε συνάρτηση με την μεταβολή της θερμοκρασίας στον ατμοποιητή για διάφορα ψυκτικά μέσα και θερμοκρασίες συμπύκνωσης με ισεντροπικό βαθμό απόδοσης συμπίεστη $isc=0,9$.

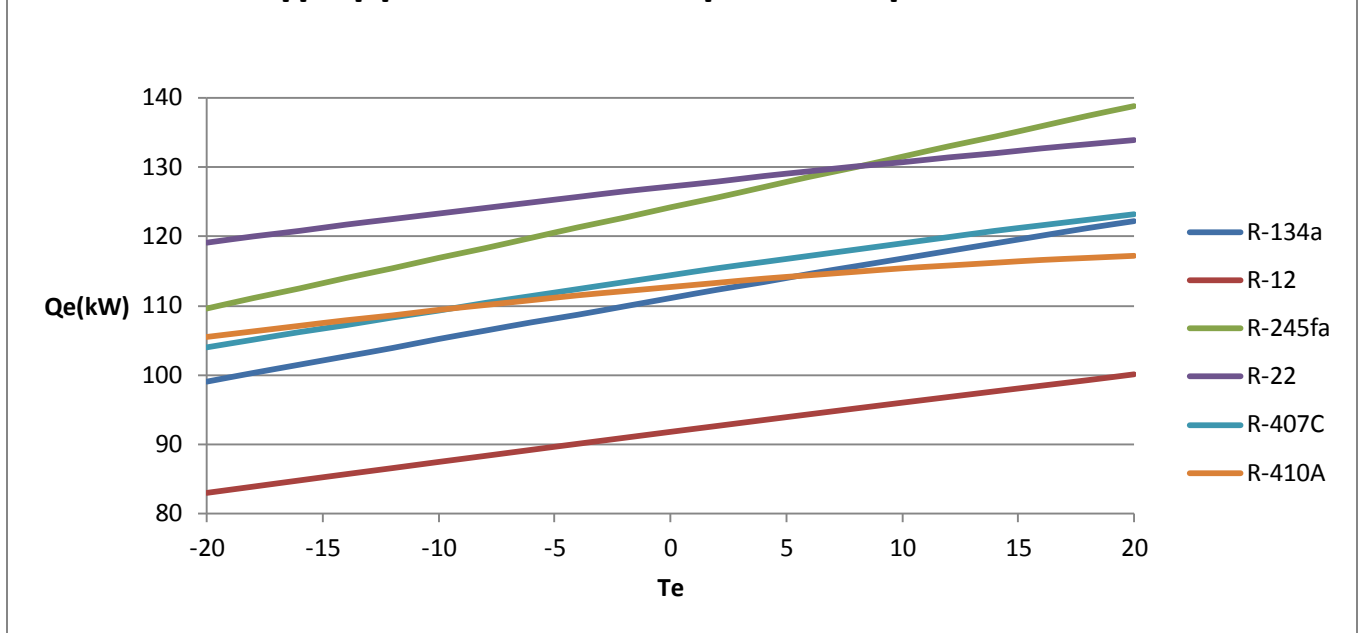
Διάγραμμα 9.13 Qe-Tevaporation για Tc=40 °C



Διάγραμμα 9.14 Qe-Tevaporation για Tc=50 °C



Διάγραμμα 9.15 Qe-Tevaporation για Tc=60 °C

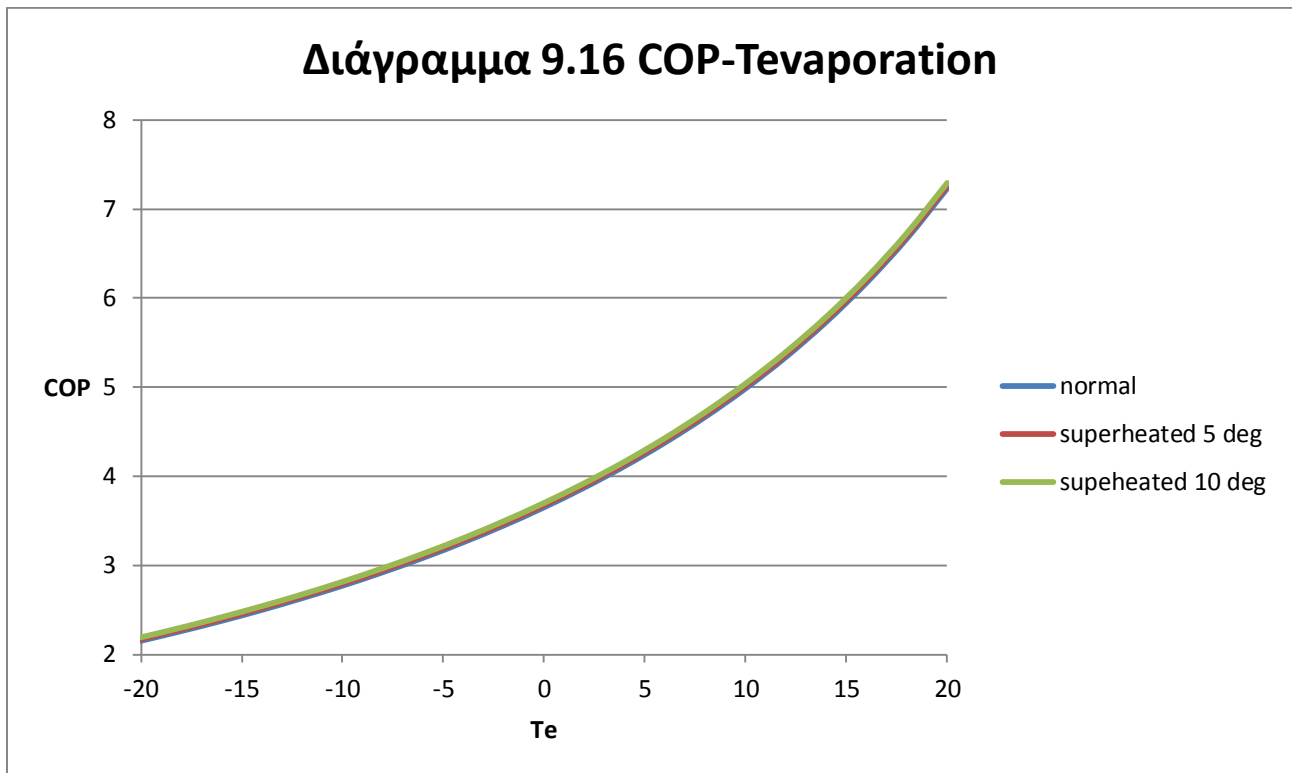


9.2 Μονοβάθμιος κύκλος μηχανικής συμπίεσης ατμών με υπερθέρμανση στην έξοδο του ατμοποιητή.

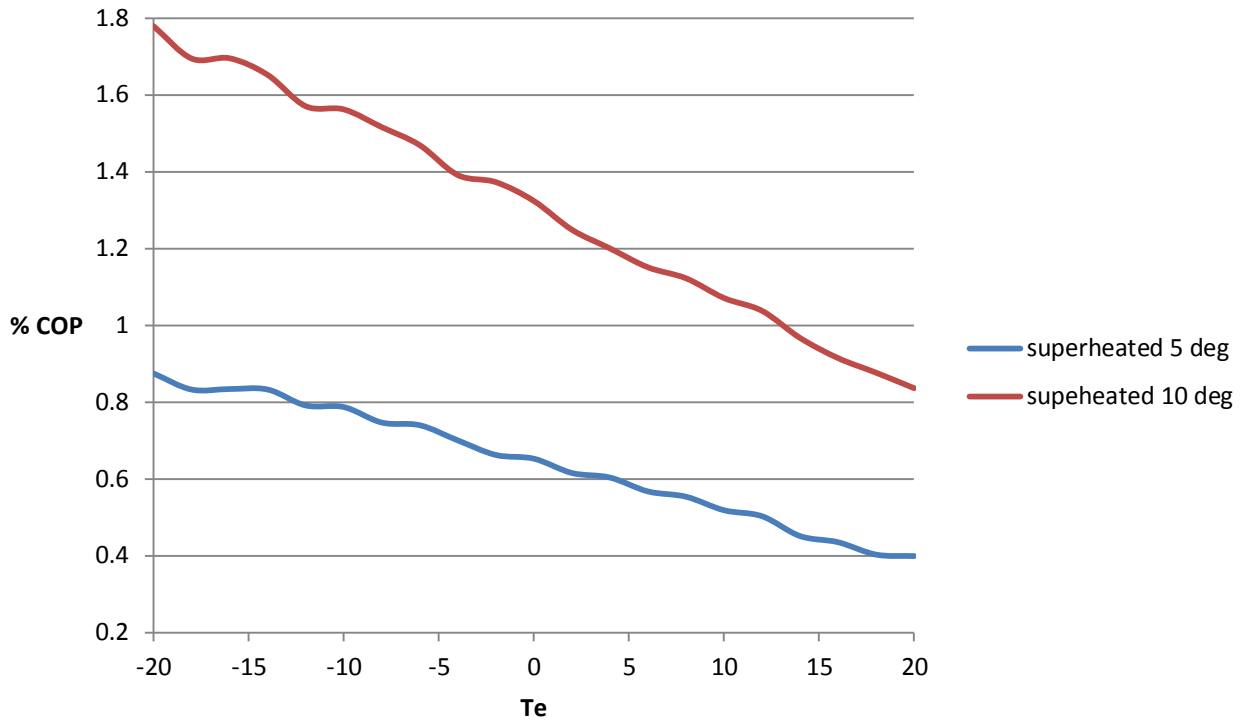
Στους κύκλους τους οποίους μελετάμε και κατ'επέκταση και στον μονοβάθμιο ψυκτικό κύκλο μηχανικής συμπίεσης ατμών, όπως έχει προαναφερθεί σε προηγούμενο τμήμα της εργασίας, πρακτικά μετά τον ατμοποιητή στις περισσότερες εφαρμογές υπάρχει υπερθέρμανση (superheating) του κορεσμένου ατμού του ψυκτικού μέσου και μετά τον συμπυκνωτή υπάρχει υπόψυξη (subcooling) του κορεσμένου υγρού του ψυκτικού μέσου. Παρακάτω θα δούμε διαγράμματα τα οποία μας δείχνουν την μεταβολή του συντελεστή συμπεριφοράς ψυκτικής εγκατάστασης μονοβάθμιας συμπίεσης ατμών σε συνάρτηση με την θερμοκρασία ψύξης, καθώς και την μεταβολή της ισχύος του συμπιεστή και της ψυκτικής ισχύος σε συνάρτηση με την ίδια θερμοκρασία. Ακόμη θα δωθούν τα ίδια διαγράμματα για σταθερή θερμοκρασία ψύξης με μεταβλητή θερμοκρασία υπερθέρμανσης και υπόψυξης. Όλα τα διαγράμματα παρατίθενται για σταθερή θερμοκρασία συμπύκνωσης 50 °C και ψυκτικό μέσο το R-134a. Τα παραπάνω θα αναλυθούν για υπερθέρμανση στην έξοδο του ατμοποιητή.

Να σημειωθεί ότι για να πάρουμε τα αποτελέσματα που επιθυμούμε έγιναν σημαντικές αλλαγές στον κώδικα του EES οι οποίες θα δωθούν παρακάτω στο παράρτημα του κώδικα καθώς και οι σχετικοί πίνακες, στο παράρτημα πινάκων αποτελεσμάτων.

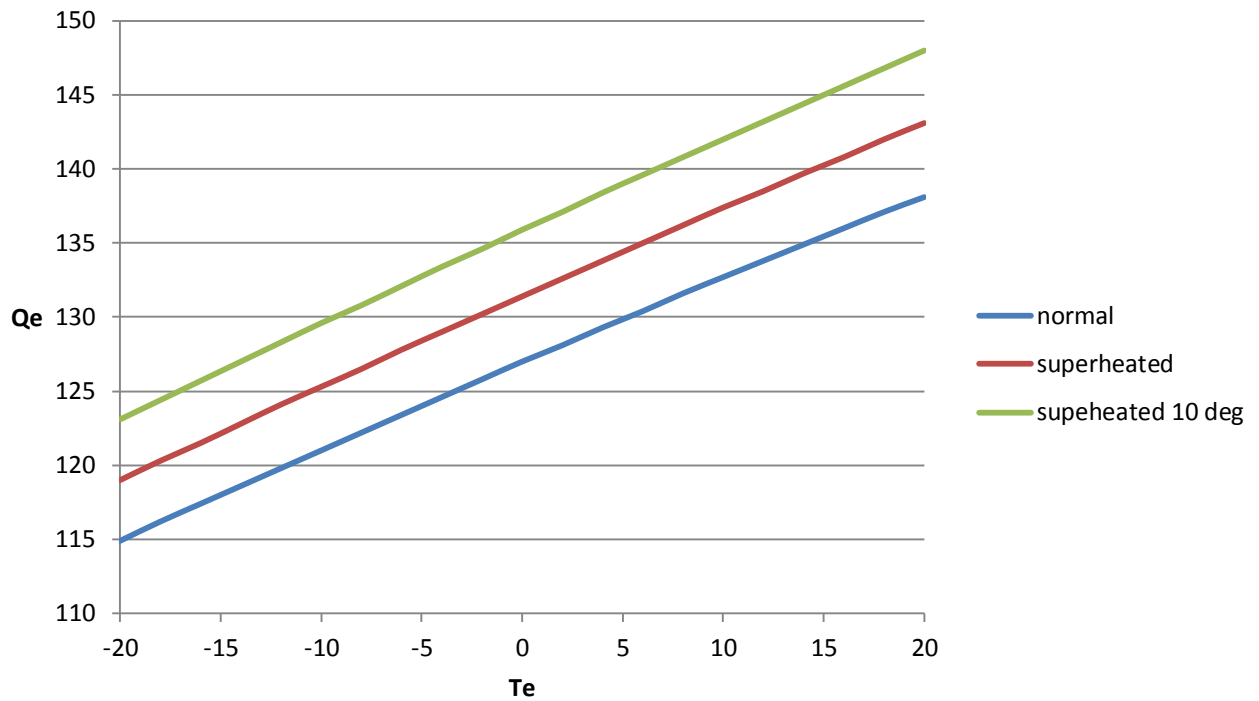
Τα διαγράμματα προφανώς παρατίθενται και με τις τιμές του απλού κύκλου χωρίς υπερθέρμανση και υπόψυξη, ως μέτρο σύγκρισης.



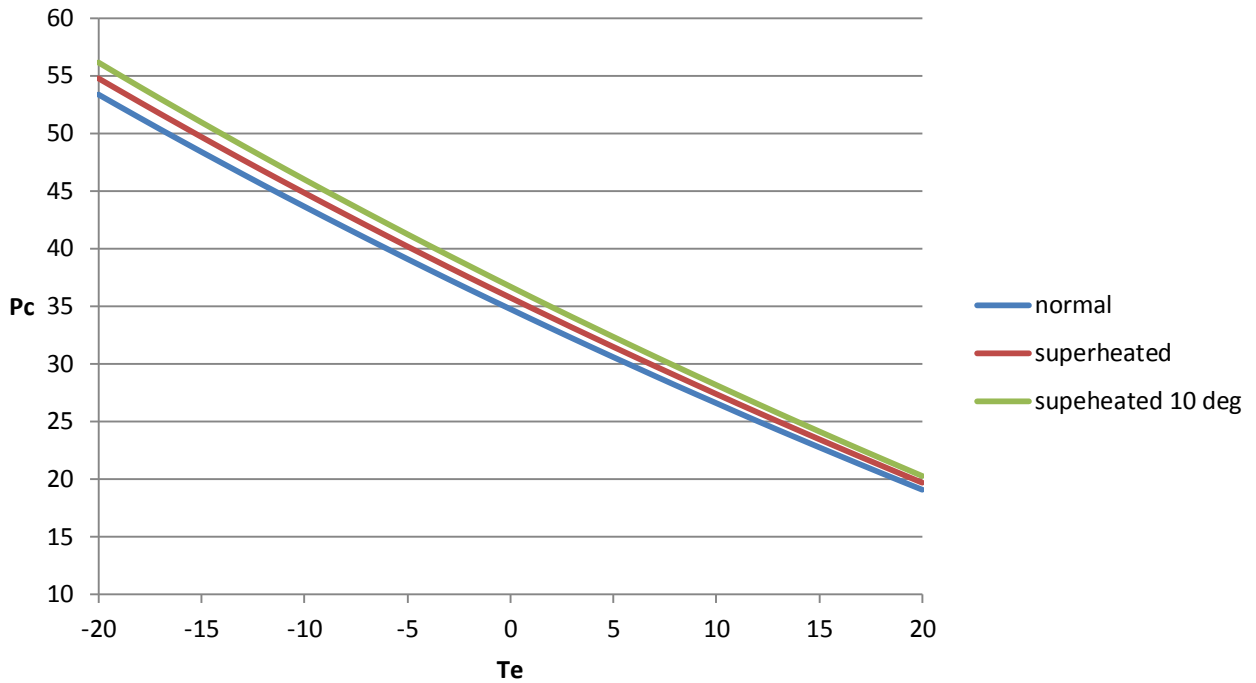
Διάγραμμα 9.17 % COP Increase-Tevaporation



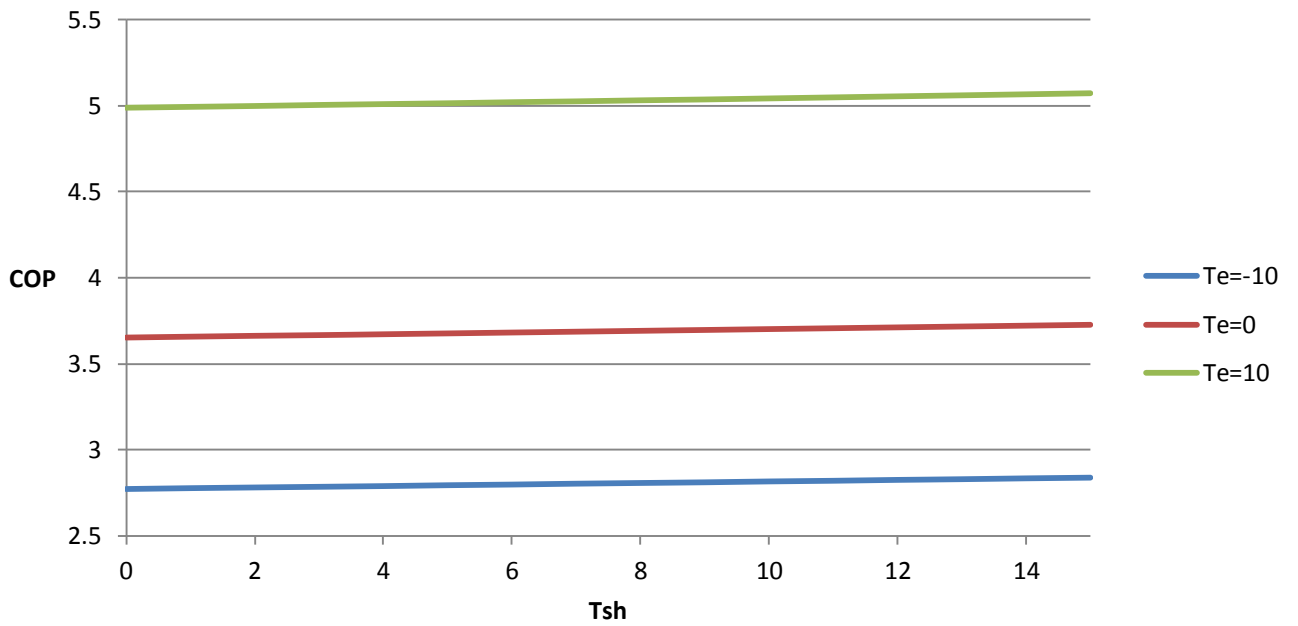
Διάγραμμα 9.18 Cooling Power-Tevaporation



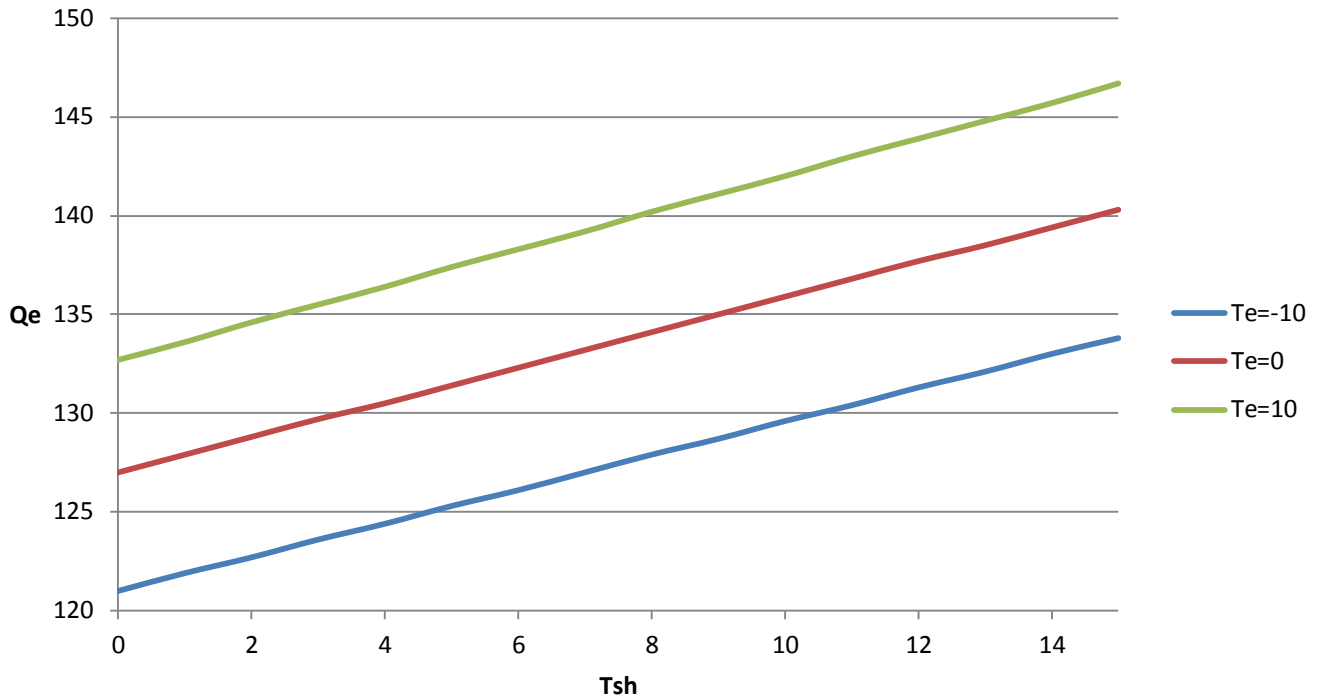
Διάγραμμα 9.19 Pcompression-Tevaporation



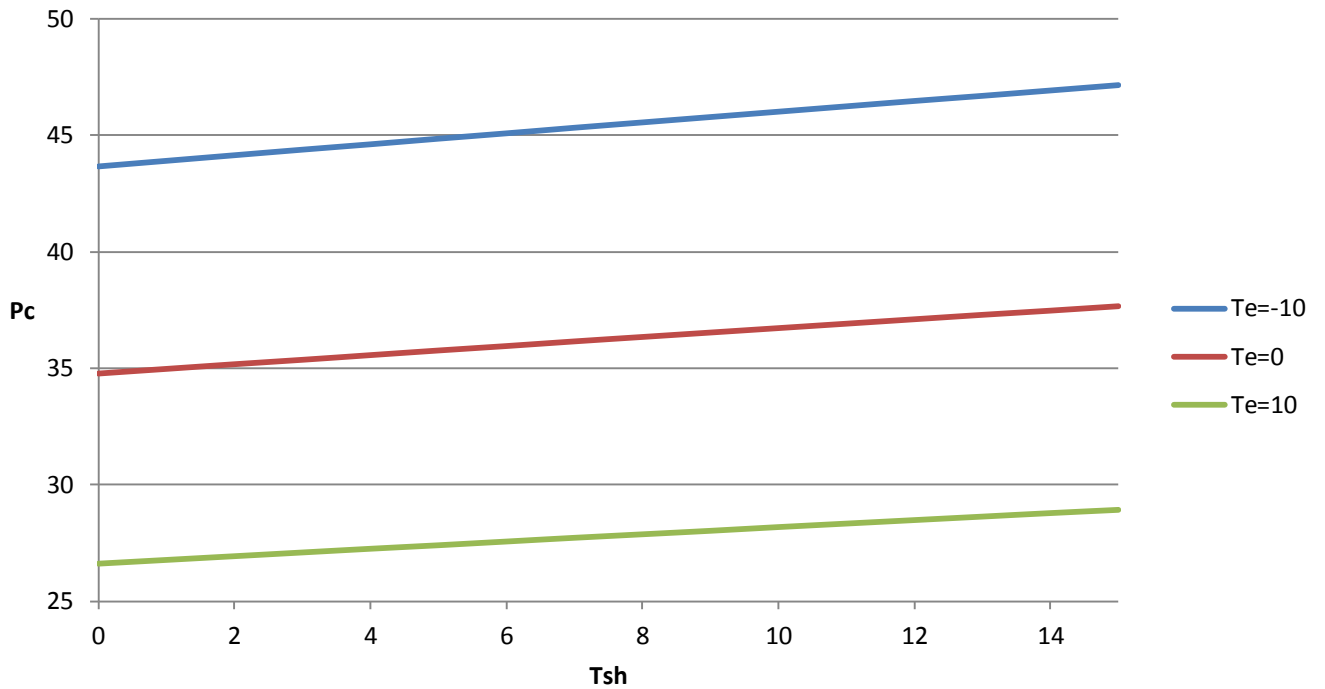
Διάγραμμα 9.20 COP-Tsuperheating



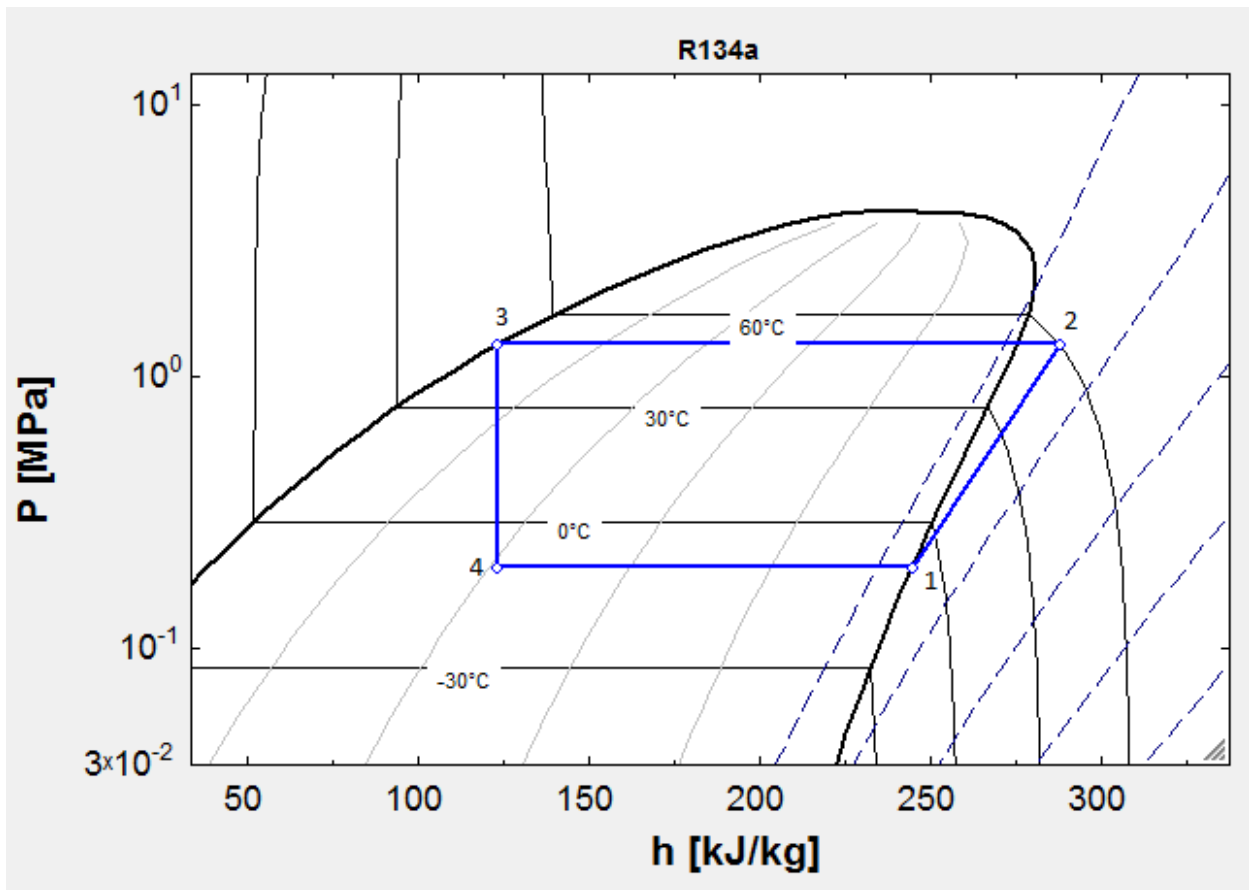
Διάγραμμα 9.21 Cooling Power-Tsuperheating



Διάγραμμα 9.22 Pcompression-Tsuperheating



Τέλος για να ολοκληρώσουμε την ανάλυση του μονοβάθμιου ψυκτικού κύκλου μηχανικής συμπίεσης ατμών θα παραθέσουμε το διάγραμμα πίεσης-ενθαλπίας P-h για ψυκτικό μέσο R-134a και θερμοκρασίες ατμοποίησης $T_e = -10\text{ }^\circ\text{C}$ και συμπύκνωσης $T_c = 50\text{ }^\circ\text{C}$ καθώς και τα αντίστοιχα για υπερθέρμανση $10\text{ }^\circ\text{C}$



Εικόνα 9.1 Διάγραμμα P-h μονοβάθμιου ψυκτικού κύκλου μηχανικής συμπίεσης ατμών

9.3 Διβάθμιος και Τριβάθμιος ψυκτικός κύκλος μηχανικής συμπίεσης ατμών.

Η πίεση στον ατμοποιητή ψυκτικής εγκατάστασης ορίζεται από την θερμοκρασία του χώρου τον οποίο πρόκειται να ψύξουμε και από τις θερμοδυναμικές ιδιότητες του ψυκτικού μέσου το οποίο χρησιμοποιούμε. Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος προς το οποίο αποβάλλεται η θερμότητα συμπυκνώσεως του ψυκτικού μέσου ορίζει την πίεση του στοιχείου συμπυκνώσεως. Ο συμπιεστής καλείται να καλύψει την διαφορά μεταξύ των δύο αυτών πιέσεων, που επικρατούν στον ατμοποιητή, έστω p_{Low} και τον συμπυκνωτή, έστω p_{High} μίας ψυκτικής εγκατάστασης. Προφανώς, όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά των πιέσεων αυτών τόσο μεγαλύτερο είναι και το απαιτούμενο τεχνικό μηχανικό έργο για την συμπίεση του ψυκτικού μέσου. Η περίπτωση αυτή γίνεται ακραία κατά την παραγωγή ψυκτικής ισχύος σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, όπου ο λόγος των πιέσεων p_{High}/p_{Low} καθίσταται πολύ μεγάλος λόγω της μεγάλης διαφοράς της θερμοκρασίας του συμπυκνωτή και του ατμοποιητή.

Είναι προφανές ότι όσο κατέρχεται η θερμοκρασία ατμοποίησης υπό σταθερή θερμοκρασία συμπυκνώσεως, τόσο ο λόγος πιέσεων p_{High}/p_{Low} του ψυκτικού κύκλου αυξάνει υπερβολικά, με αποτέλεσμα η συμπίεση εντός μίας βαθμίδας να γίνεται αντιοικονομική και ασύμφορη. Στις περιπτώσεις αυτές χρησιμοποιείται διβάθμια ή και πολυβάθμια (συνήθως τριβάθμια) συμπίεση, ανάλογα με την αύξηση του λόγου των πιέσεων, με ενδιάμεση ισόθλιπτη ψύξη του υπερθερμανθέντος ατμού ψυκτικού μέσου με την χρήση ψύκτη (flash tank).

Η ενδιάμεση πίεση (για διβάθμιο ψυκτικό κύκλο) p_m υπό την οποία πρέπει να πραγματοποιηθεί η ενδιάμεση ψύξη των υπέρθερμων ατμών, για βέλτιστη λειτουργία της ψυκτικής εγκατάστασης, οφείλει να είναι ο γεωμετρικός μέσος των δύο ακραίων πιέσεων p_{Low} και p_{High} δηλαδή:

$$\frac{p_m}{p_{Low}} = \frac{p_{High}}{p_m} \text{ ή } p_m = \sqrt{p_{Low} * p_{High}}, \quad (9.1)$$

Στην περίπτωση της τριβάθμιας συμπίεσης με δύο ενδιάμεσες ισόθλιπτες ψύξεις του υπέρθερμου ατμού, πρέπει να ισχύει αντίστοιχα:

$$\frac{Pm1}{Plow} = \frac{Pm2}{Pm1} = \frac{Phigh}{Pm2}, \quad (9.2)$$

$$Pm1 = \sqrt[3]{Plow^2 * Phigh}, \quad (9.3)$$

$$Pm2 = \sqrt[3]{Plow * Phigh^2}, \quad (9.4)$$

Συνήθως για λόγο ακραίων πιέσεων:

$p_{High}/p_{Low} > 8-9$ χρησιμοποιείται διβάθμια συμπίεση

και για λόγο:

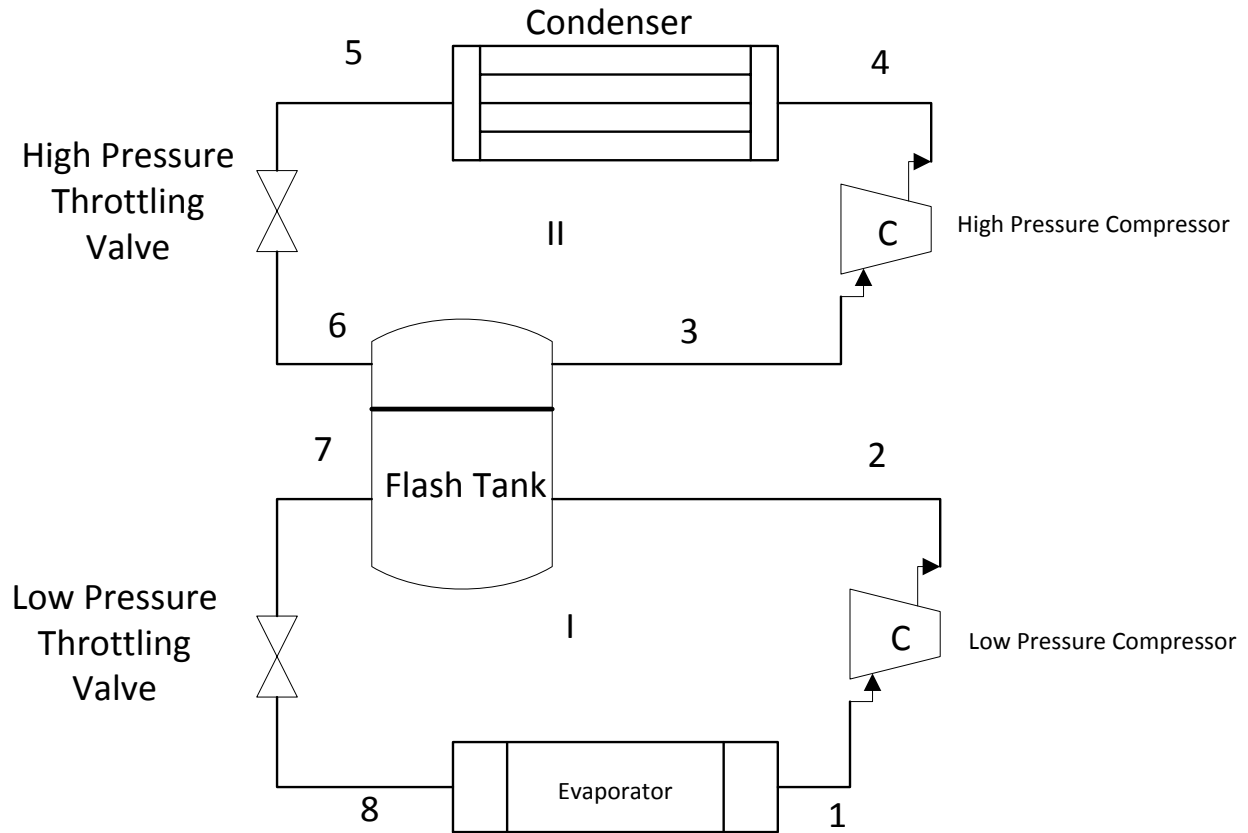
$p_{High}/p_{Low} > 25-28$ χρησιμοποιείται τριβάθμια συμπίεση.

Στην πράξη λόγω του ότι η συμπίεση των ατμών του ψυκτικού μέσου δεν ακολουθεί αδιαβατική αλλά πολυτροπική πορεία, για την επίτευξη καλύτερων αποτελεσμάτων η ενδιάμεση πίεση σε MPa υπολογίζεται από την σχέση:

$$Pm = \sqrt{Plow * Phigh} + 3,5678, \quad (9.5)$$

9.3.1 Διβάθμιος κύκλος μηχανικής συμπίεσης ατμών.

Η σχηματική διάταξη μίας ψυκτικής εγκατάστασης διβάθμιας συμπίεσεως με μονοβάθμια ατμοποίηση και σύνδεση σε σειρά απεικονίζεται παρακάτω:



Εικόνα 9.2 Σχηματική αναπαράσταση ψυκτικού κυκλώματος διβάθμιας συμπίεσης ατμού

Ο κορεσμένος ατμός του ψυκτικού μέσου που προέρχεται από το στοιχείο ατμοποίησης της βαθμίδας I, χαμηλής πίεσεως, συμπιέζεται από τον συμπιεστή χαμηλής πίεσεως μέχρι την ενδιάμεση πίεση p_m , που επικρατεί στο εσωτερικό του ενδιάμεσου ψύκτη. Ο υπέρθερμος τώρα ατμός εισέρχεται στον ενδιάμεσο ψύκτη ο οποίος είναι πρακτικά ένα δοχείο μερικής ατμοποίησης (flash tank), και λειτουργεί ως διαχωριστής υγρού-ατμού από διφασικό μίγμα. Ο υπέρθερμος ατμός καταστάσεως 2 εισέρχεται στον ψύκτη κάτω από την επιφάνεια του υγρού ψυκτικού μέσου καταστάσεως 7. Σε αυτό το σημείο ο ψύκτης λειτουργεί ως εναλλάκτης θερμότητας και ο υπέρθερμος ατμός αποβάλλει την θερμότητα υπερθερμάνσεως και φθάνει

στην κατάσταση κορεσμένου ατμού. Για την ψύξη αυτή ατμοποιείται αντίστοιχη ποσότητα υγρού ψυκτικού μέσου καταστάσεως 7 από αυτό που υπάρχει στο εσωτερικό του ενδιάμεσου ψύκτη το οποίο τελικά φθάνει στην κατάσταση 3. Στην συνέχεια ακολουθεί συμπίεση του συνόλου του κορεσμένου ατμού καταστάσεως 3 στον συμπιεστή υψηλής πίεσεως μέχρι την πίεση p_{High} και ακολούθως συμπύκνωση του ψυκτικού μέσου. Μετά την συμπύκνωση ακολουθεί ισενθαλπική εκτόνωση του ψυκτικού μέσου στην βαλβίδα εκτόνωσης της βαθμίδας II μέχρι την ενδιάμεση πίεση. Εντός του ενδιάμεσου ψύκτη εκτός από την μερική ατμοποίηση (flash evaporation) λόγω του ισενθαλπικού στραγγαλισμού στην διάταξη στραγγαλισμού, ατμοποιείται και ένα επιπλέον μέρος του υγρού του διφασικού μίγματος ψυκτικού μέσου καταστάσεως 6 για την ενδιάμεση ψύξη των υπέρθερμων ατμών της βαθμίδας I. Τα δύο αυτά μέρη του ατμού, καθώς και ο προερχόμενος από τον συμπιεστή της βαθμίδας I ενδιάμεσα ψυχθείς στην κατάσταση 3 ατμός, αναρροφώνται και συμπιέζονται από τον συμπιεστή υψηλής πίεσεως της βαθμίδας II. Το ψυκτικό μέσο καταστάσεως 7 οδηγείται στην δεύτερη βαλβίδα στραγγαλισμού και διά μέσου αυτής στο στοιχείο ατμοποίησης της βαθμίδας χαμηλής πίεσεως I.

Από τα προηγούμενα προκύπτει ότι η μάζα του ψυκτικού μέσου που κυκλοφορεί εντός της βαθμίδας II (κύκλος 34563) είναι μεγαλύτερη από την μάζα που κυκλοφορεί εντός της βαθμίδας I (12781), (θα αποδειχθεί μαθηματικά παρακάτω).

Η διβάθμια ψυκτική εγκατάσταση μπορεί να θεωρηθεί και ως συνδυασμός δύο μονοβάθμιων ψυκτικών εγκαταστάσεων, που συνδέονται μεταξύ τους μέσω του ενδιάμεσου ψύκτη, που λειτουργεί ως ένας εναλλάκτης αναμίξεως και η ανάμιξη αυτή θεωρείται αδιαβατική.

Εάν m_I είναι το ρεύμα μάζας του ψυκτικού μέσου εντός της βαθμίδας χαμηλής πίεσεως I, τότε η ψυκτική ισχύς της διβάθμιας ψυκτικής εγκαταστάσεως δίδεται από την σχέση:

$$Q_e = m_I(h_1 - h_8), \quad (9.6)$$

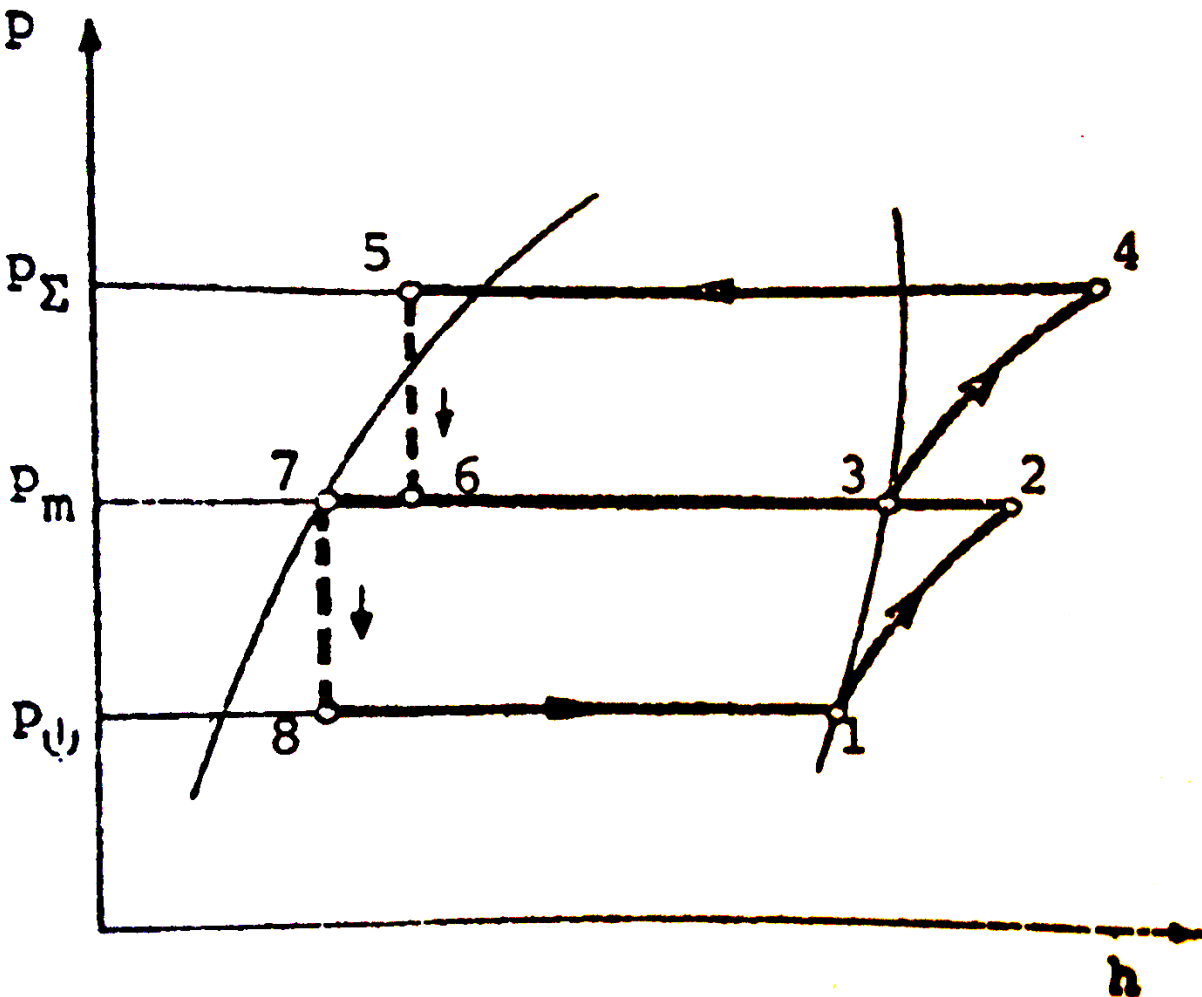
Για την απαιτούμενη θεωρητική μηχανική ισχύ συμπίεσεως, ισχύει αντίστοιχα, εάν m_{II} είναι το ρεύμα μάζας του ψυκτικού μέσου που κυκλοφορεί εντός της βαθμίδας υψηλής πίεσεως II:

$$P_{I+II} = m_I(h_2 - h_1) + m_{II}(h_4 - h_3), \quad (9.7)$$

Για το ρεύμα μάζας m_I δεν υφίσταται θεωρητικά κανένας περιορισμός, υπολογίζεται δε από την εκάστοτε απαιτούμενη ψυκτική ισχύ Q_e της βαθμίδας χαμηλής πίεσης I. Η επιλογή της μάζας m_{II} δεν είναι ελεύθερη, γιατί η μάζα m_{II} προκύπτει από τον θερμικό ισολογισμό της αδιαβατικής αναμίξεως των δύο ρευμάτων ψυκτικού μέσου εντός του ενδιαμέσου ψύκτη, οπότε θα ισχύει:

$$m_I(h_2 - h_7) = m_{II}(h_3 - h_6), \quad (9.8)$$

Εάν παρατηρήσουμε τον ψυκτικό κύκλο σε διάγραμμα P-h βλέπουμε ότι:



Εικόνα 9.3 Διάγραμμα P-h διβάθμιου ψυκτικού κύκλου [20]

Οπότε:

$$\frac{m_{II}}{m_I} = \frac{h_2 - h_7}{h_3 - h_6} > 1, \quad (9.9)$$

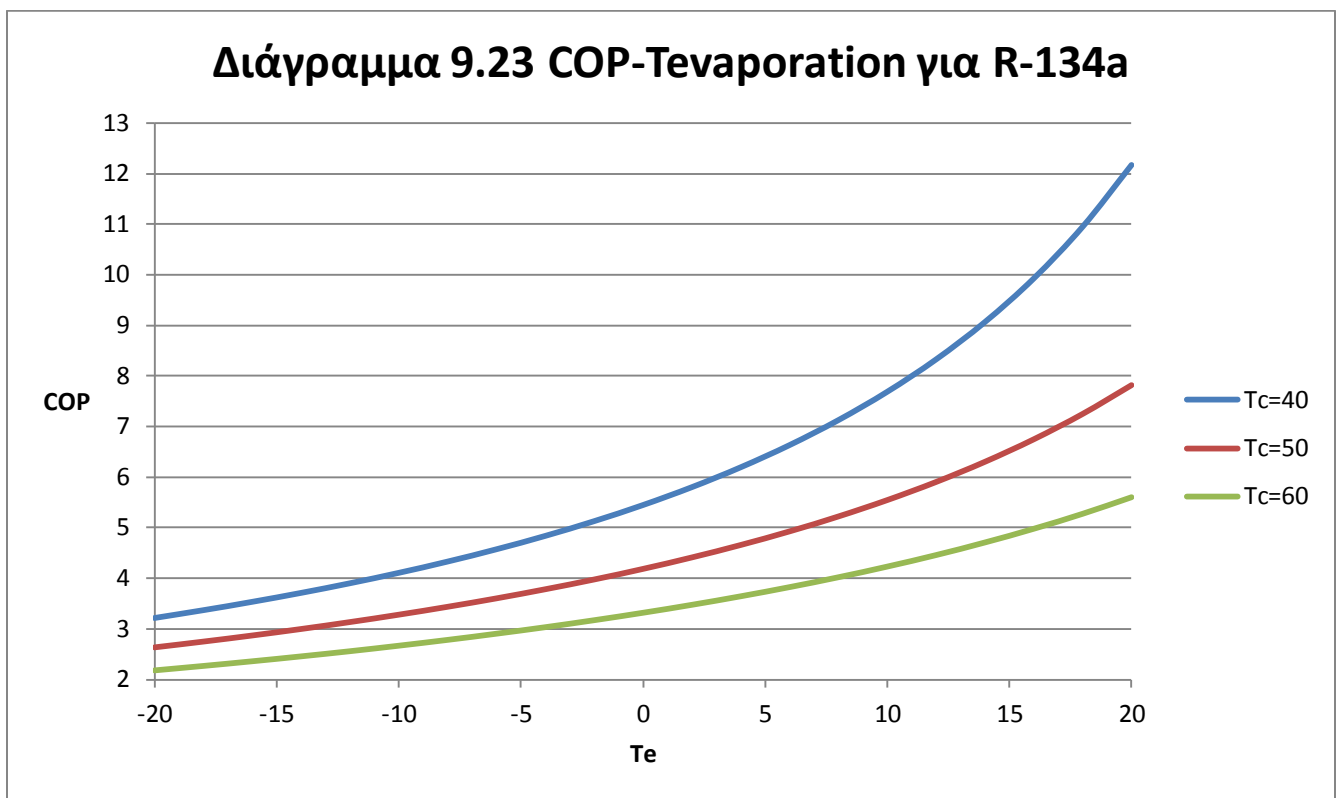
Από την τελευταία σχέση φαίνεται ότι το ρεύμα μάζας m_{II} που οδηγείται στον συμπιεστή υψηλής πίεσεως της βαθμίδας II, είναι πάντοτε μεγαλύτερο από το ρεύμα μάζας m_I που συμπιέζει ο συμπιεστής χαμηλής πίεσεως της βαθμίδας I.

Να σημειωθεί από τα παραπάνω βλέπουμε πως η διβάθμια συμπίεση ατμού χρησιμοποιείται για λόγους πίεσεων από 10 έως και 25 περίπου. Εάν εκλέξουμε το τυπικό ψυκτικό μέσο R-134a και πραγματοποιήσουμε μαθηματική ανάλυση με ανισότητες και την βοήθεια του EES θα παρατηρήσουμε πως για θερμοκρασίες συμπύκνωσης από 40 °C έως 60 °C η θερμοκρασία ψύξης για να συμφέρει ο κύκλος διβάθμιας συμπίεσης κυμαίνεται από -45 °C έως -15 °C. Στην συγκεκριμένη ανάλυση θα συνεχίσουμε να εργαζόμαστε με θερμοκρασίες ψύξης από -20 °C έως 20 °C διότι έτσι θα επιτύχουμε ορθή σύγκριση μεταξύ του συντελεστή συμπεριφοράς των ψυκτικών κύκλων. Ακόμη να σημειωθεί ότι από την σύγκριση για τα ψυκτικά μέσα στον μονοβάθμιο κύκλο κρίνεται σκόπιμη η περαιτέρω ανάλυση για τους υπόλοιπους κύκλους των εξής ψυκτικών μέσων:

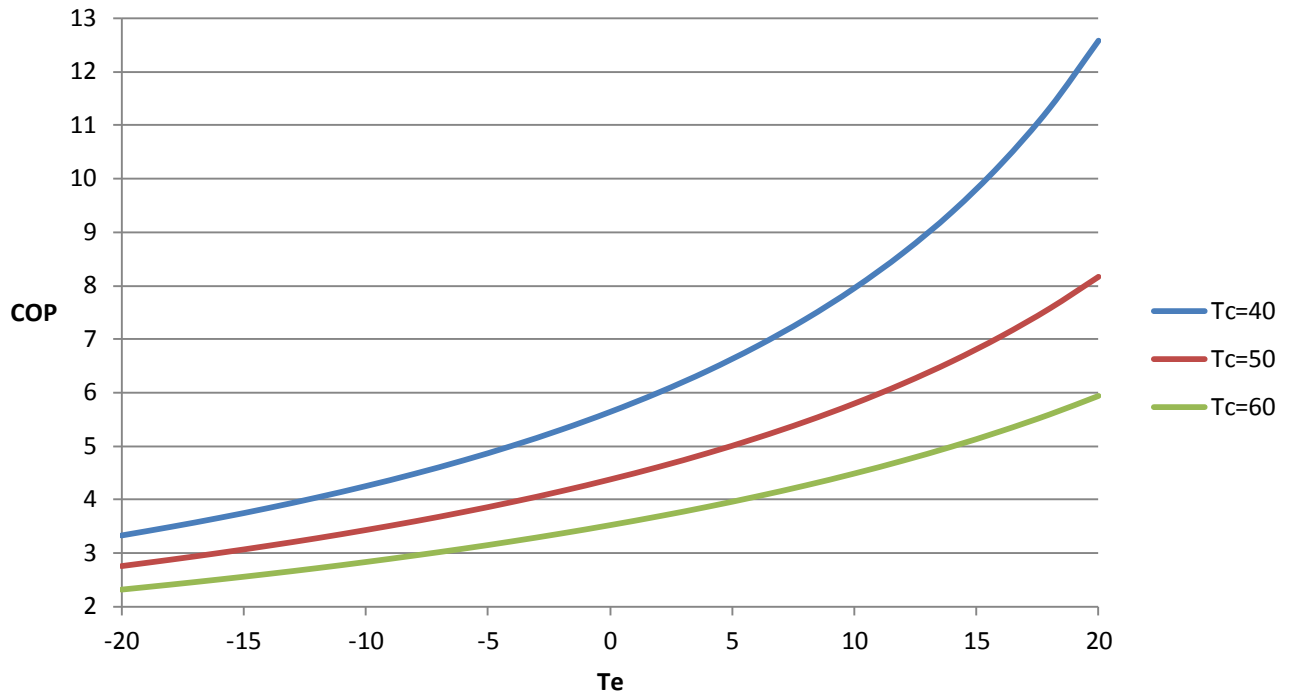
- R-245fa διότι με αυτό επιτυγχάνεται ο βέλτιστος συντελεστής συμπεριφοράς.
- R-134a διότι έχει περίπου τον ίδιο συντελεστή συμπεριφοράς με τα R-12 και R-22 και επιπρόσθετα αποτελεί πιο εμπορικό ψυκτικό μέσο με σημαντικά περισσότερες εφαρμογές.
- R-410A ως πιο αποδοτικό αζεοτροπικό ψυκτικό μέσο από το R-407C.

Προχωρούμε στην παράθεση των διαγραμμάτων για τον διβάθμιο ψυκτικό κύκλο μηχανικής συμπίεσης ατμών. Ακολουθούν διαγράμματα μεταβολής του συντελεστή συμπεριφοράς της ψυκτικής εγκατάστασης σε συνάρτηση με την θερμοκρασία ψύξης για διάφορα ψυκτικά μέσα και θερμοκρασίες συμπύκνωσης. Επίσης παρατίθενται τα ίδια διαγράμματα με εξαρτημένη

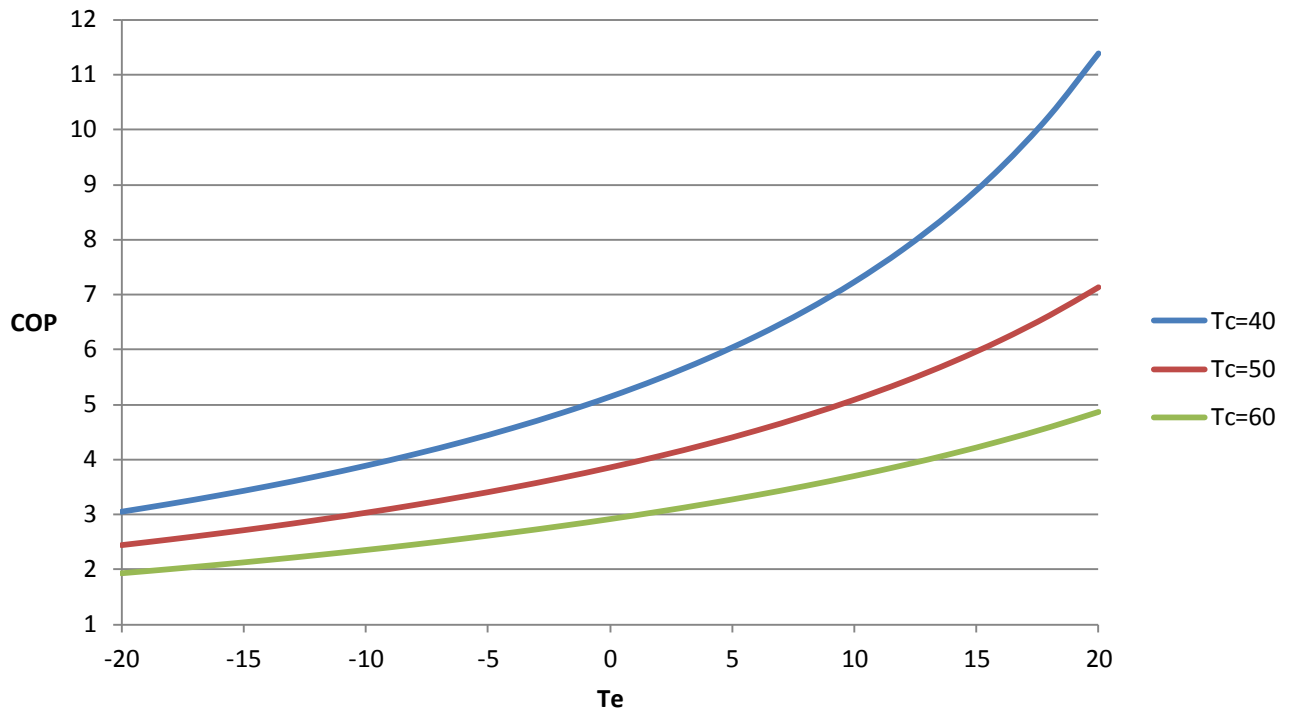
μεταβλητή τους επιμέρους συντελεστές συμπεριφοράς των δύο βαθμίδων καθώς και την ψυκτική ισχύ της εγκατάστασης, την ισχύ στο δοχείο μερικής ατμοποίησης, την ισχύ στον συμπυκνωτή και την συνολική μηχανική ισχύ που απορροφούν οι δύο συμπιεστές. Να σημειωθεί ότι σε όλη την παραπάνω διαδικασία δημιουργίας των διαγραμμάτων εργαστήκαμε με έναν σταθερό ισεντροπικό βαθμό απόδοσης συμπιεστή, ίδιο και για τους δύο συμπιεστές, ίσο με $\eta_{sc}=0,9$ τιμή η οποία βρίσκεται πολύ κοντά στην πραγματικότητα.



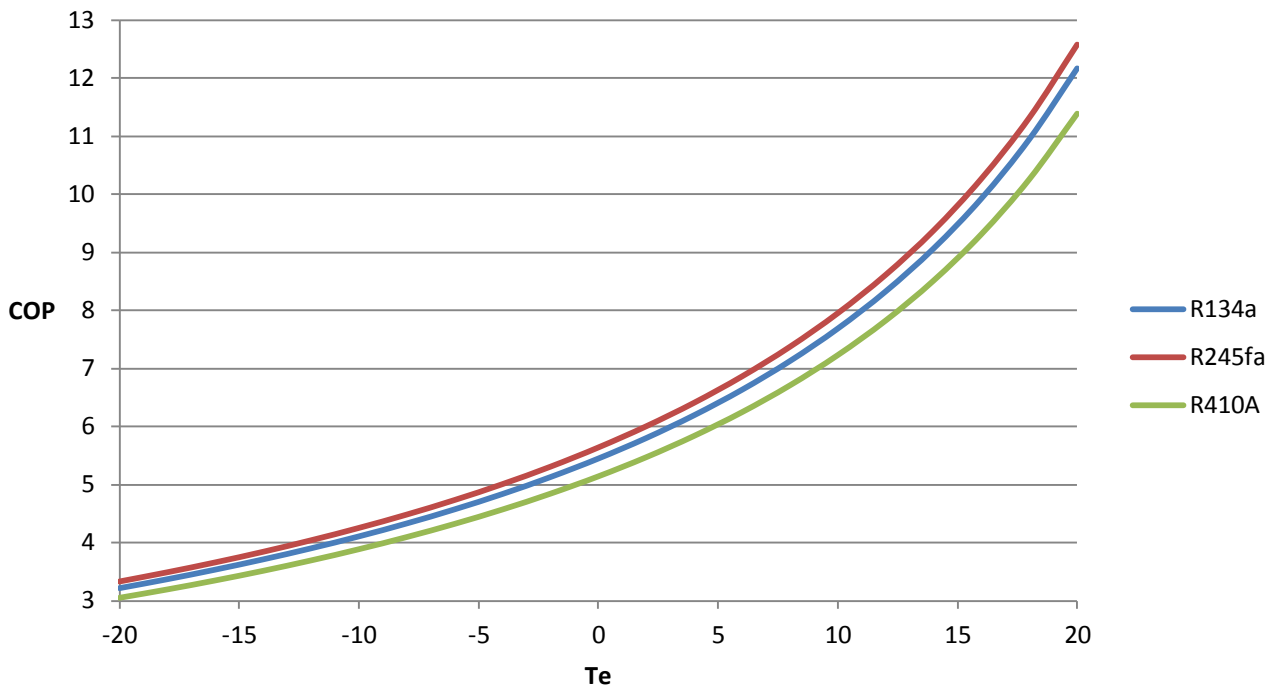
Διάγραμμα 9.24 COP-Τεναporation για R-245fa



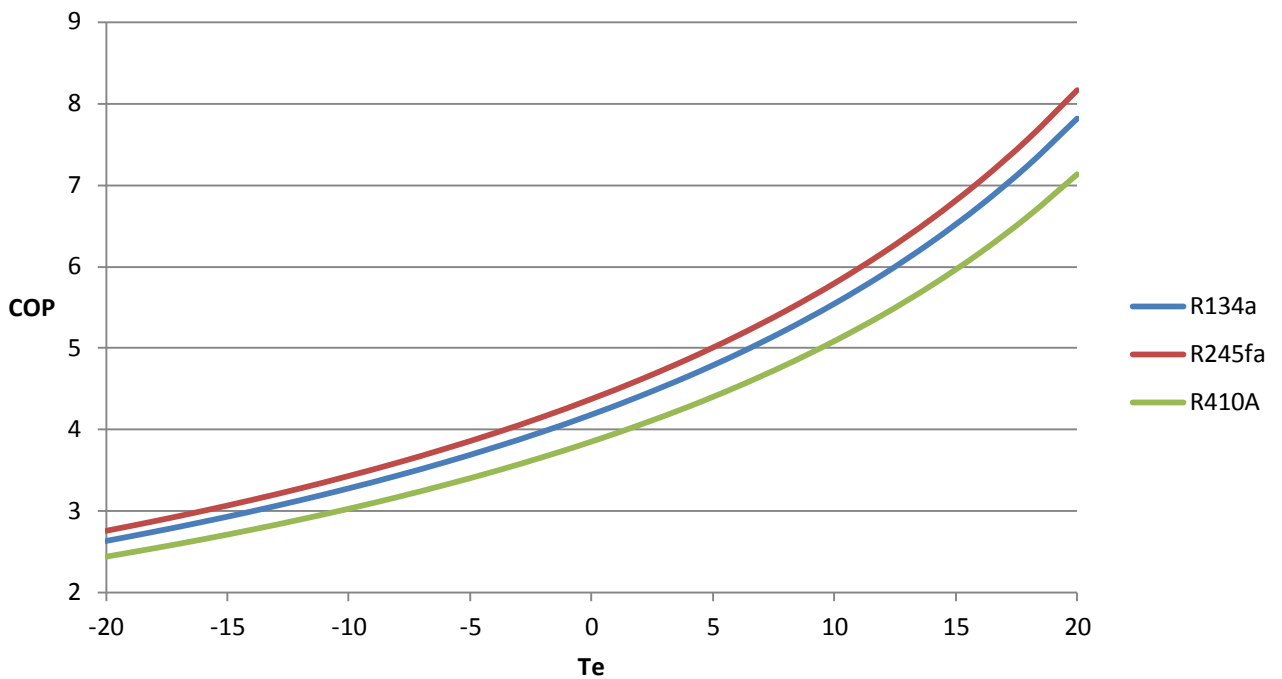
Διάγραμμα 9.25 COP-Τεναporation για R-410A



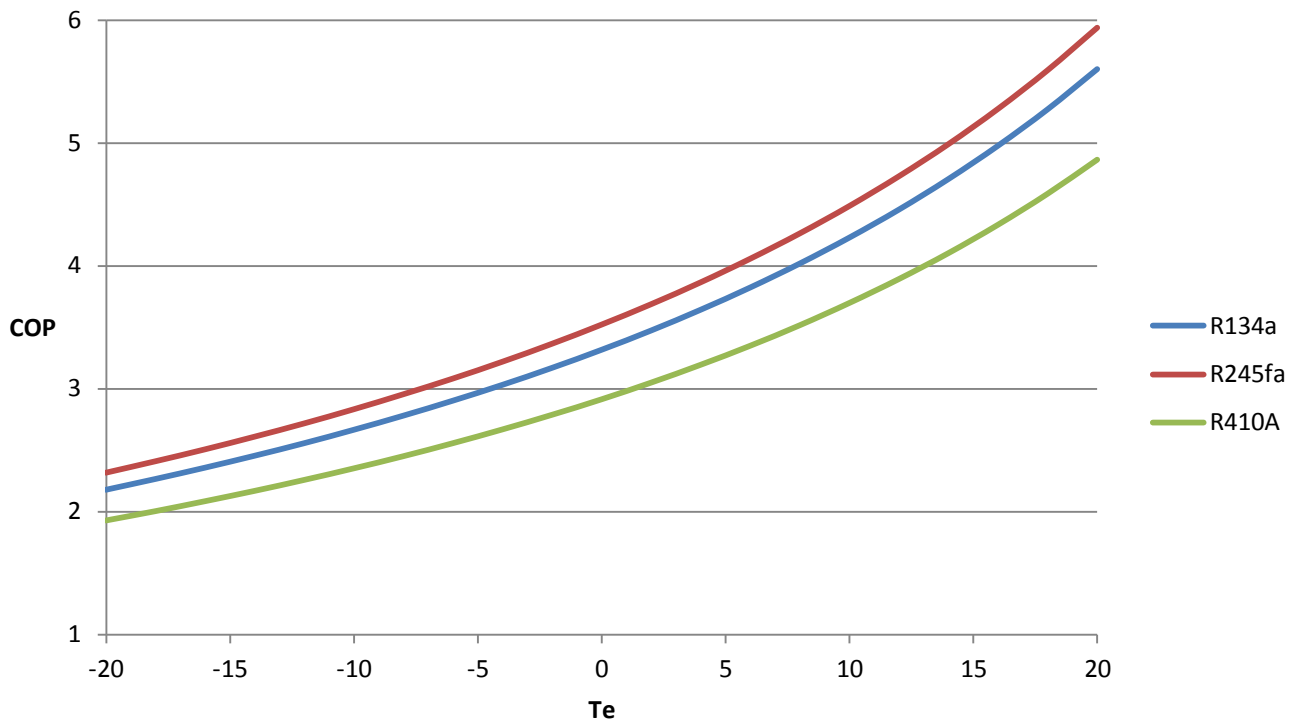
Διάγραμμα 9.26 COP-Tevaporation για Tc=40



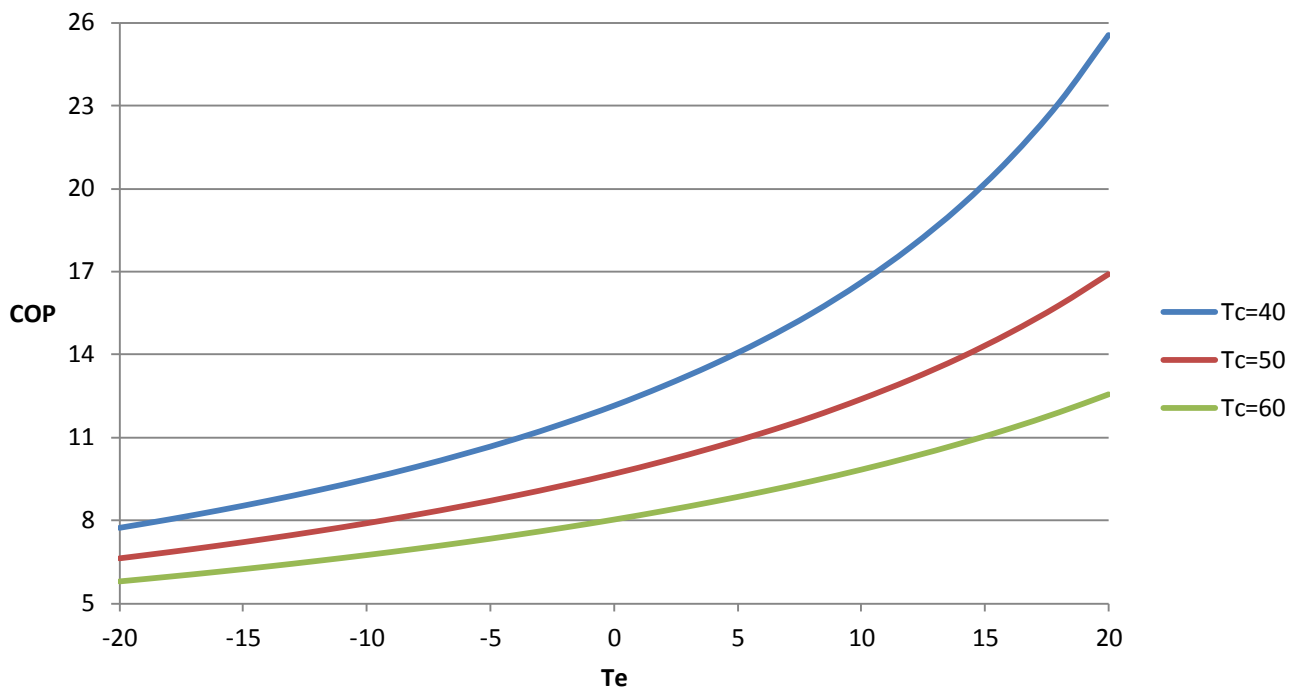
Διάγραμμα 9.27 COP-Tevaporation για Tc=50



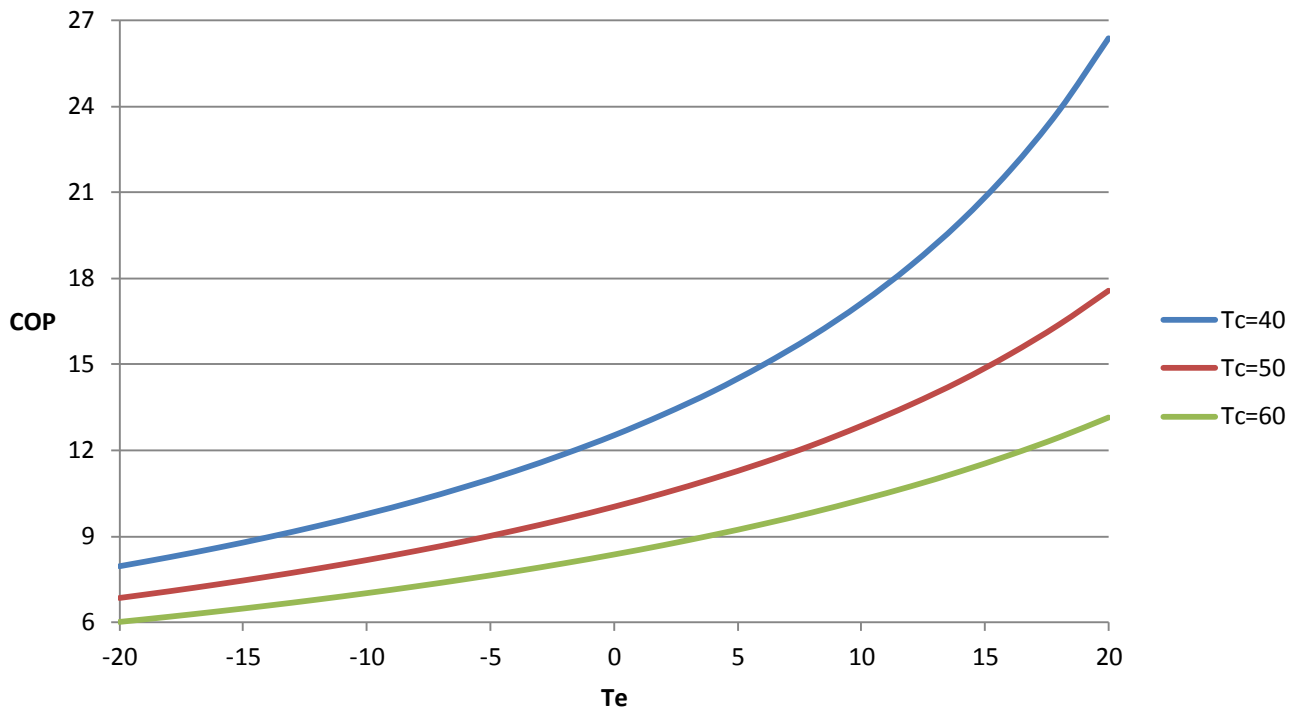
Διάγραμμα 9.28 COP-Tevaporation για $T_c=60$



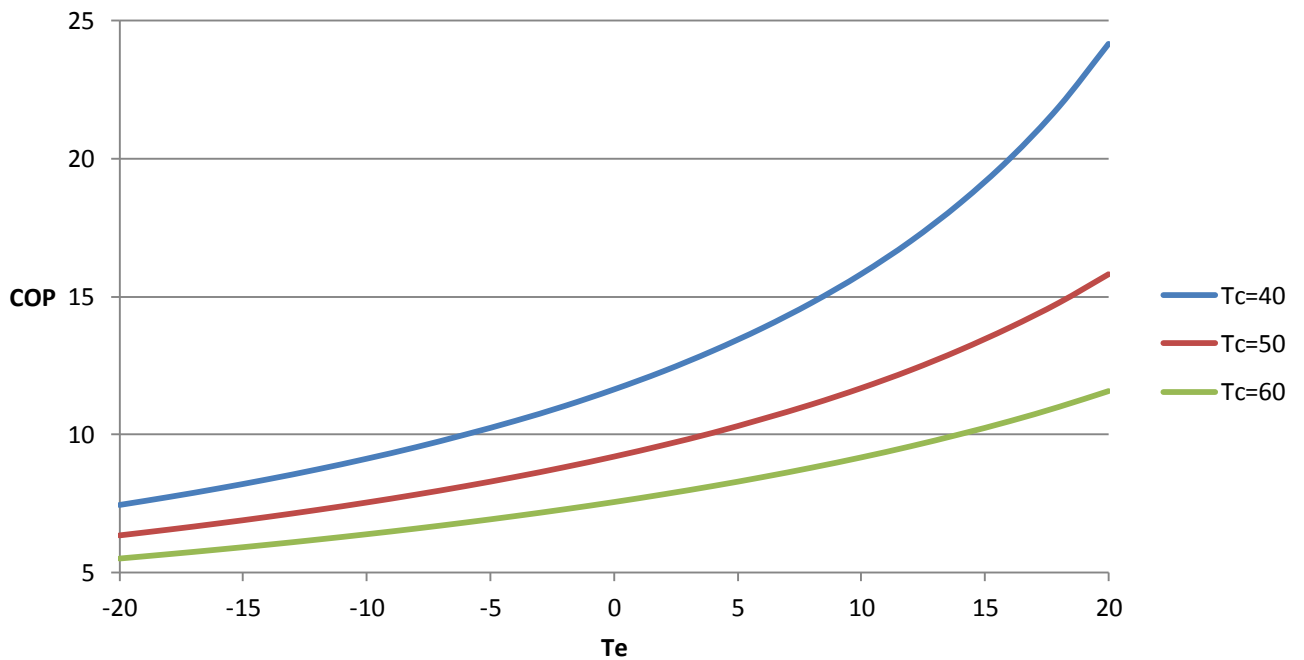
Διάγραμμα 9.29 COP1-Tevaporation για R-134a



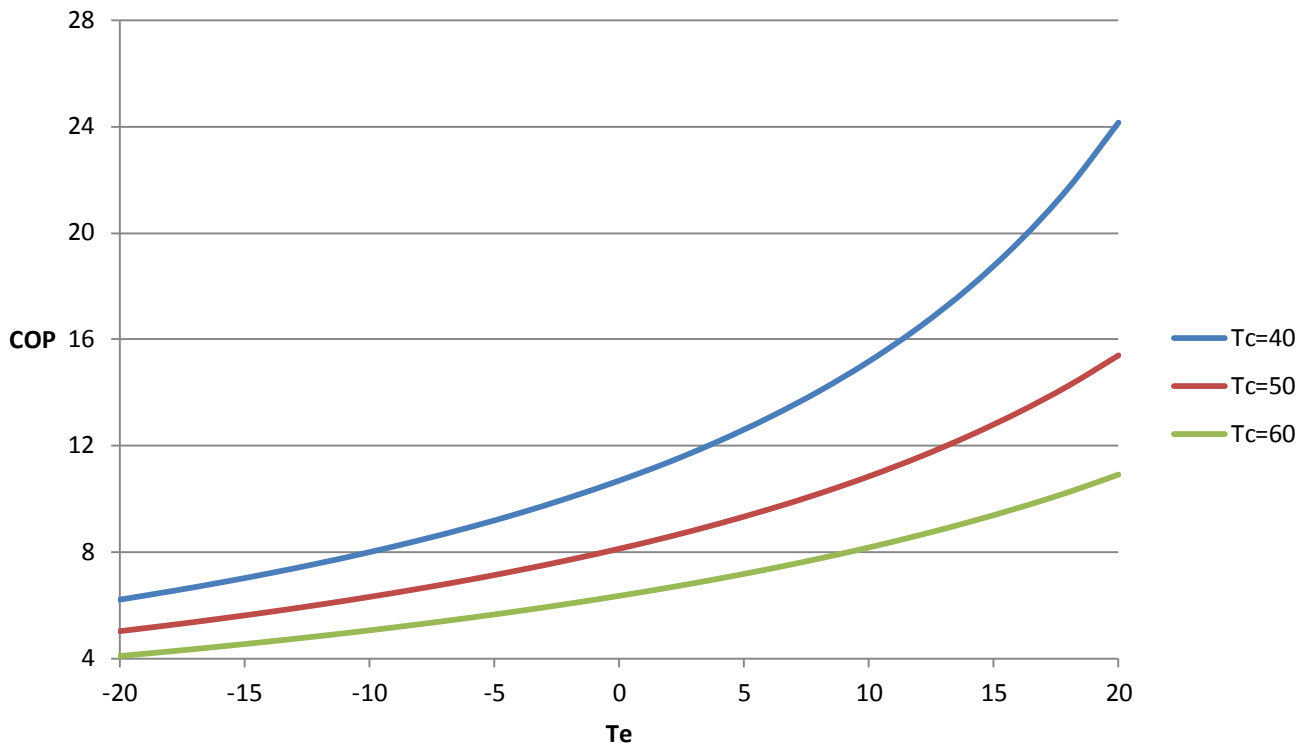
Διάγραμμα 9.30 COP1-Tevaporation για R-245fa



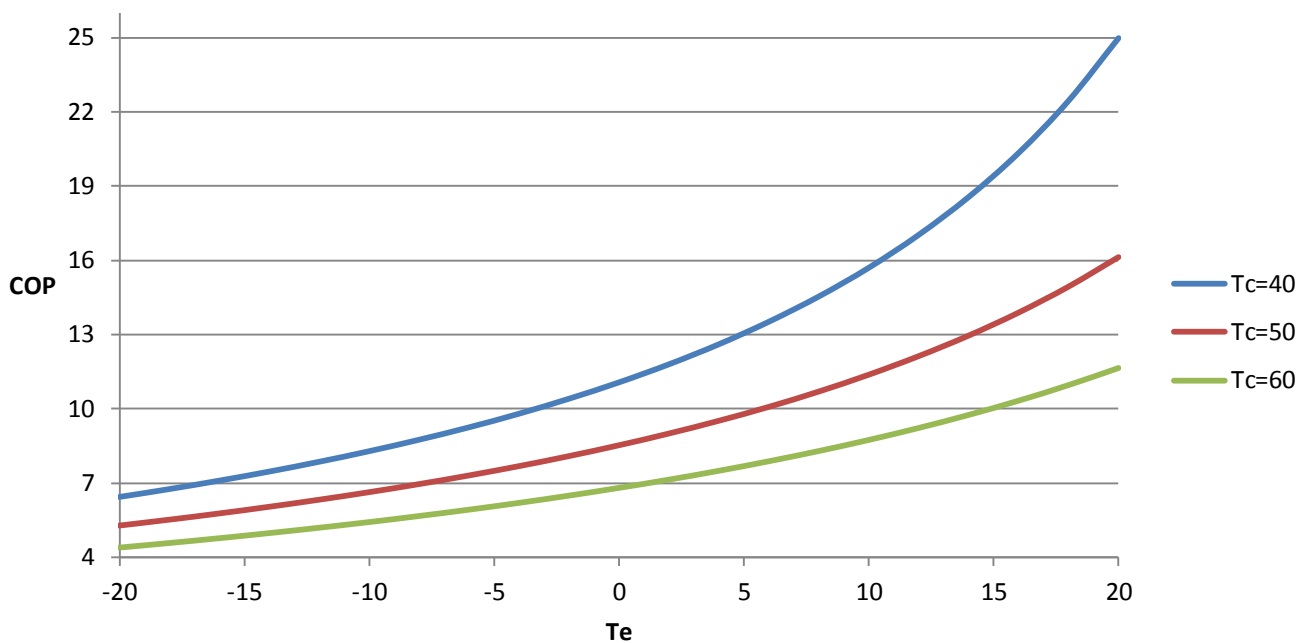
Διάγραμμα 9.31 COP1-Tevaporation για R-410A



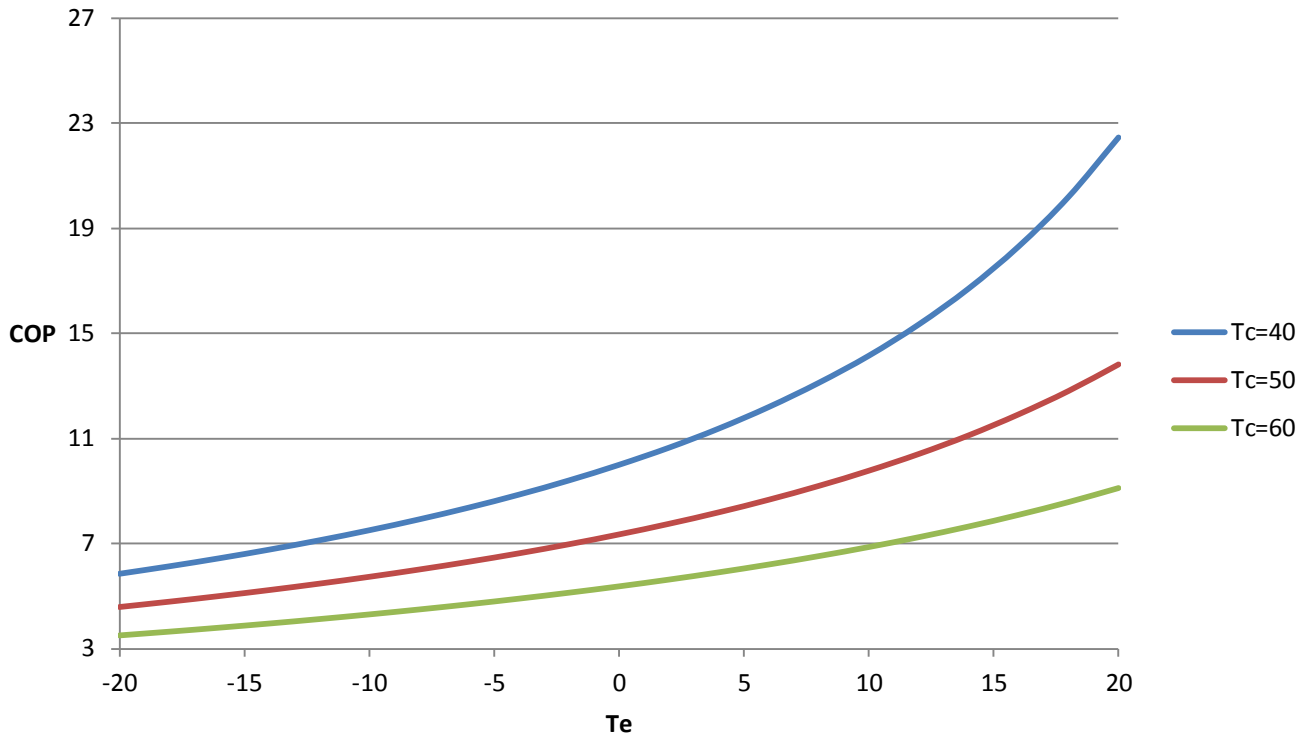
Διάγραμμα 9.32 COP2-Tevaporation για R-134a



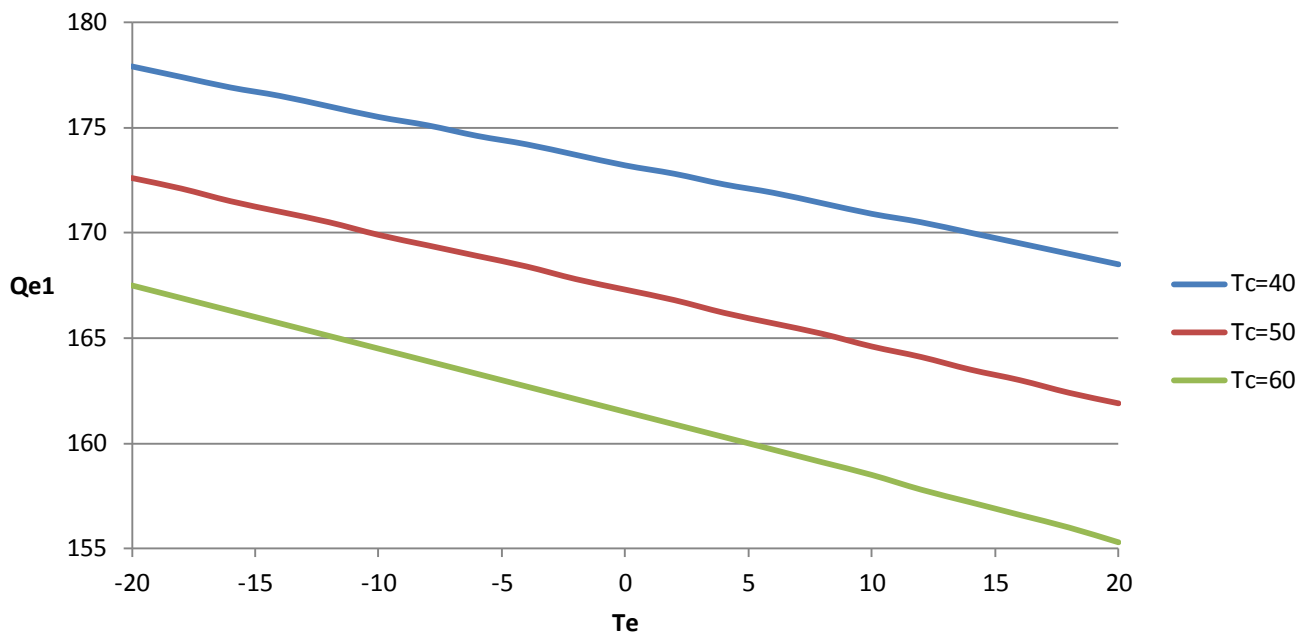
Διάγραμμα 9.33 COP2-Tevaporation για R-245fa



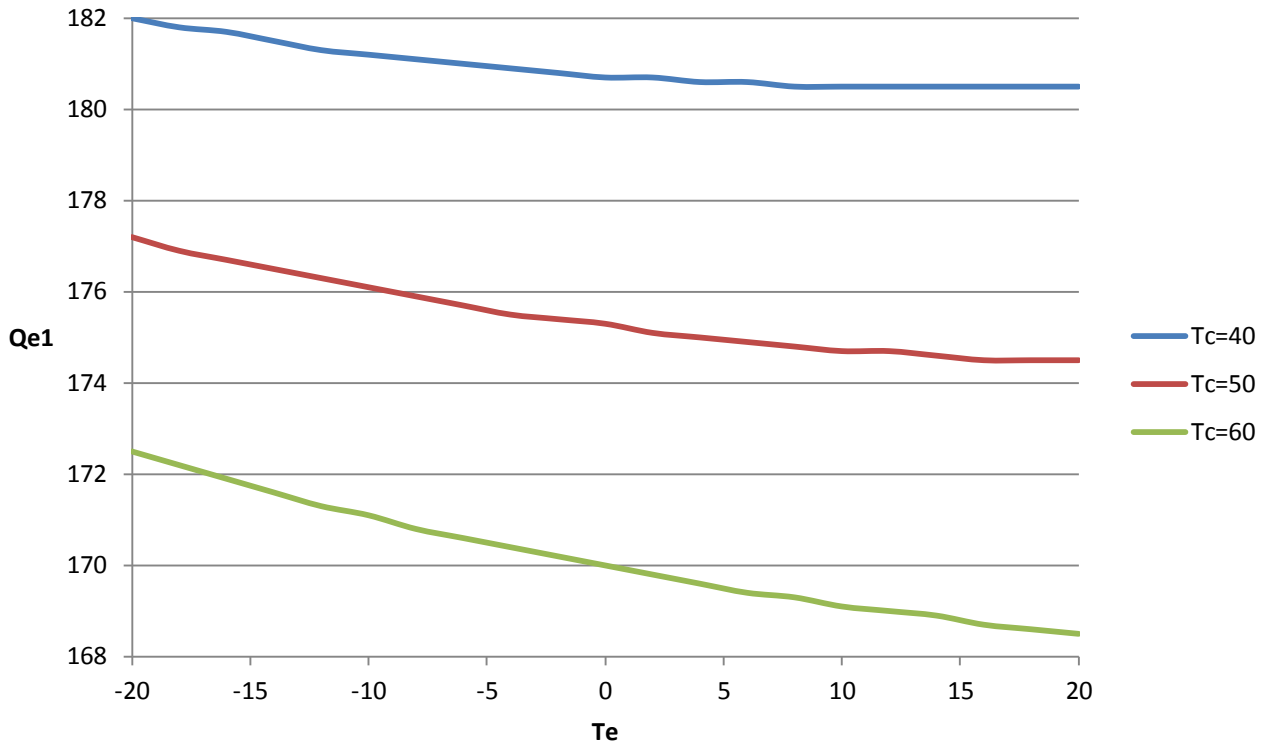
Διάγραμμα 9.34 COP2-Τevaporation για R-410A



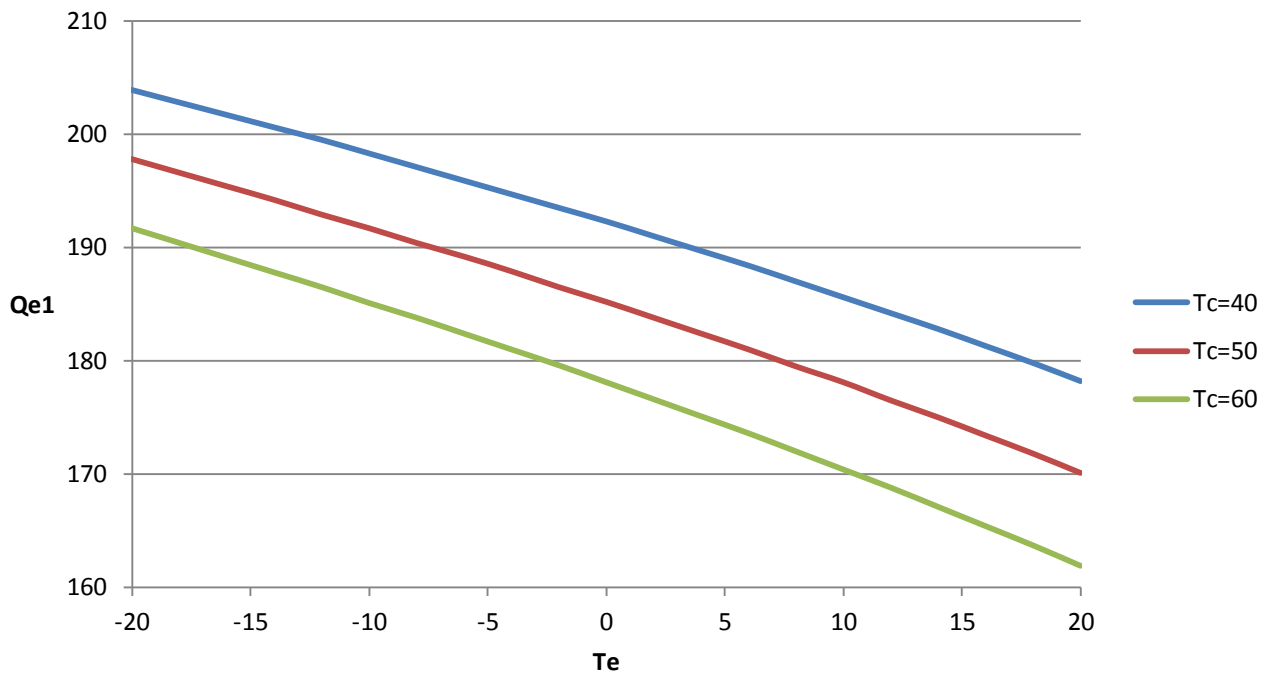
Διάγραμμα 9.35 Qe1-Τevaporation για R-134a



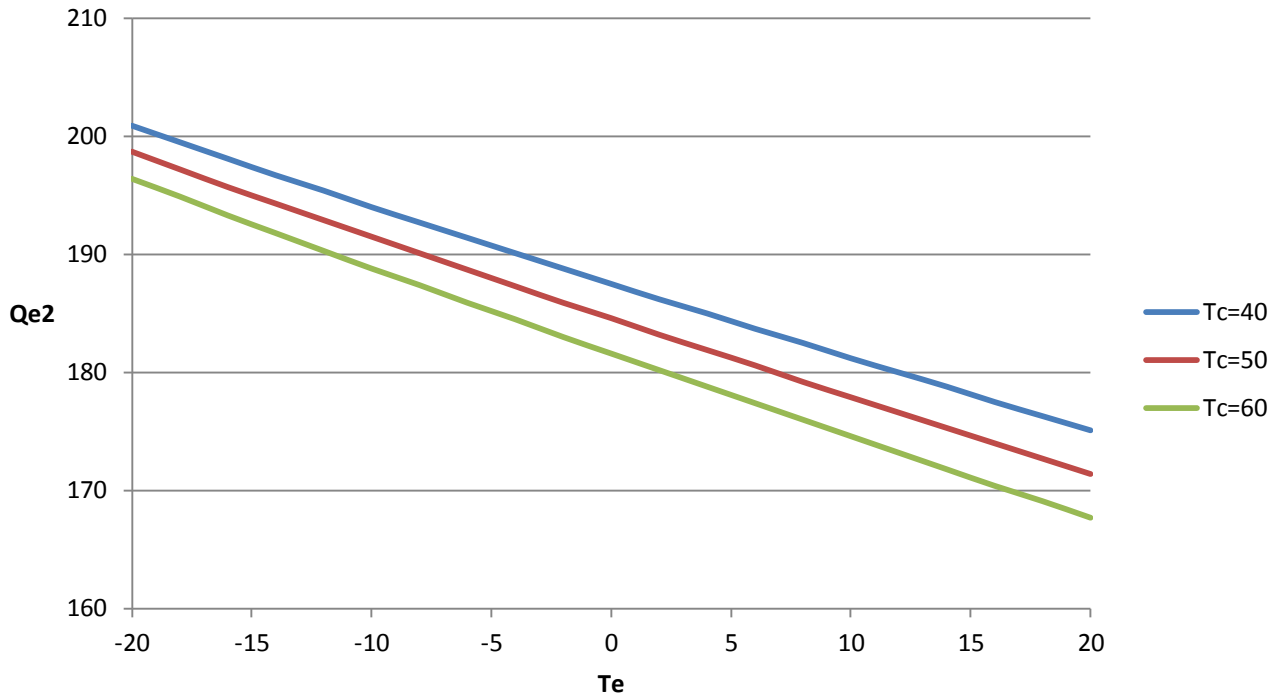
Διάγραμμα 9.36 Qe1-Tevaporation για R-245fa



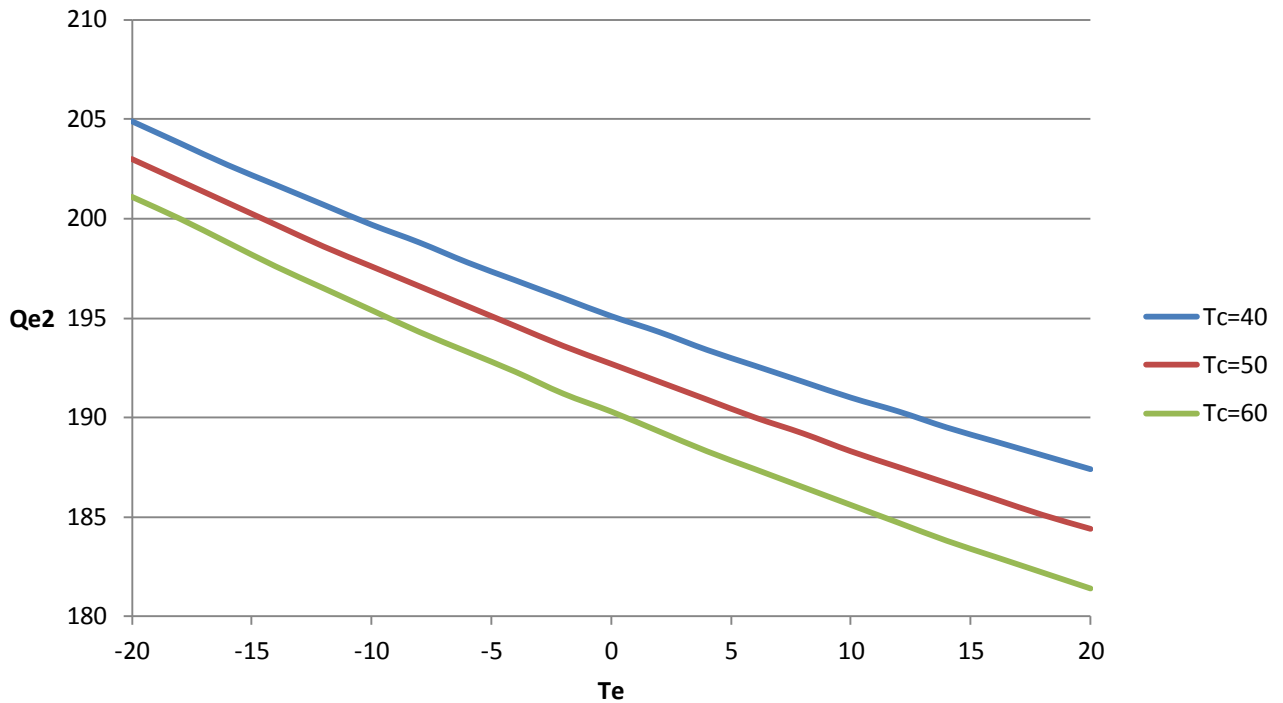
Διάγραμμα 9.37 Qe1-Tevaporation για R-410A



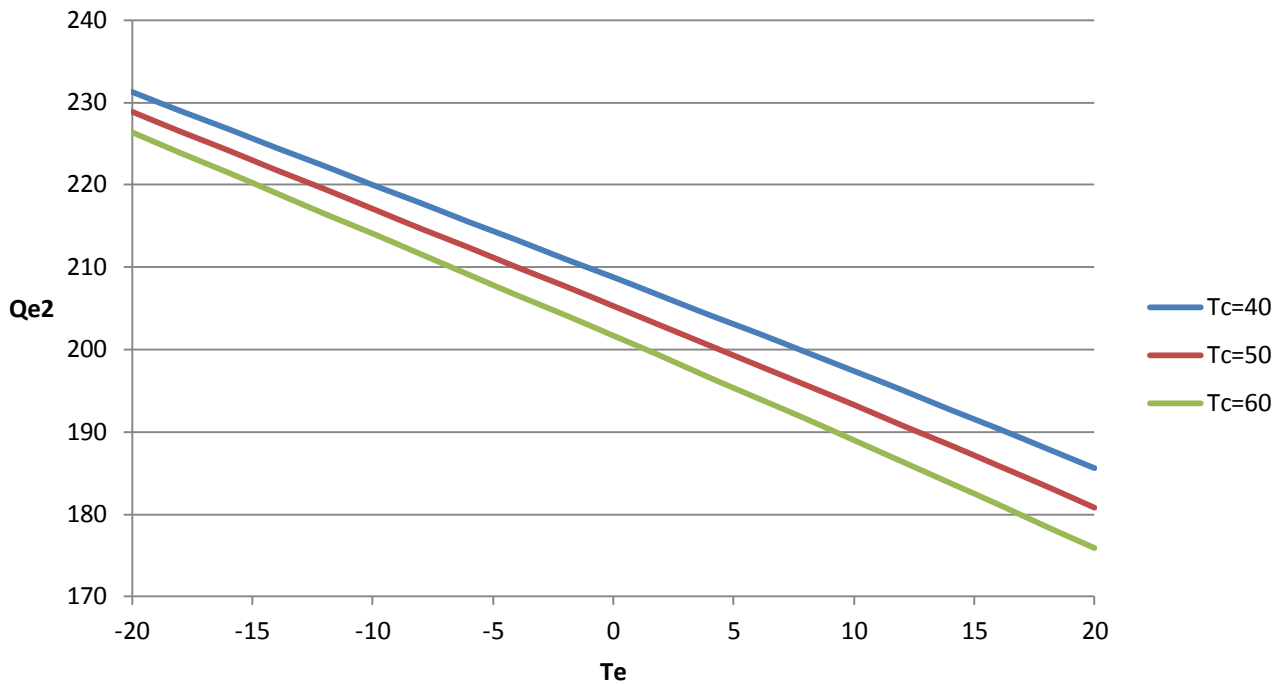
Διάγραμμα 9.38 Qe2-Tevaporation για R-134a



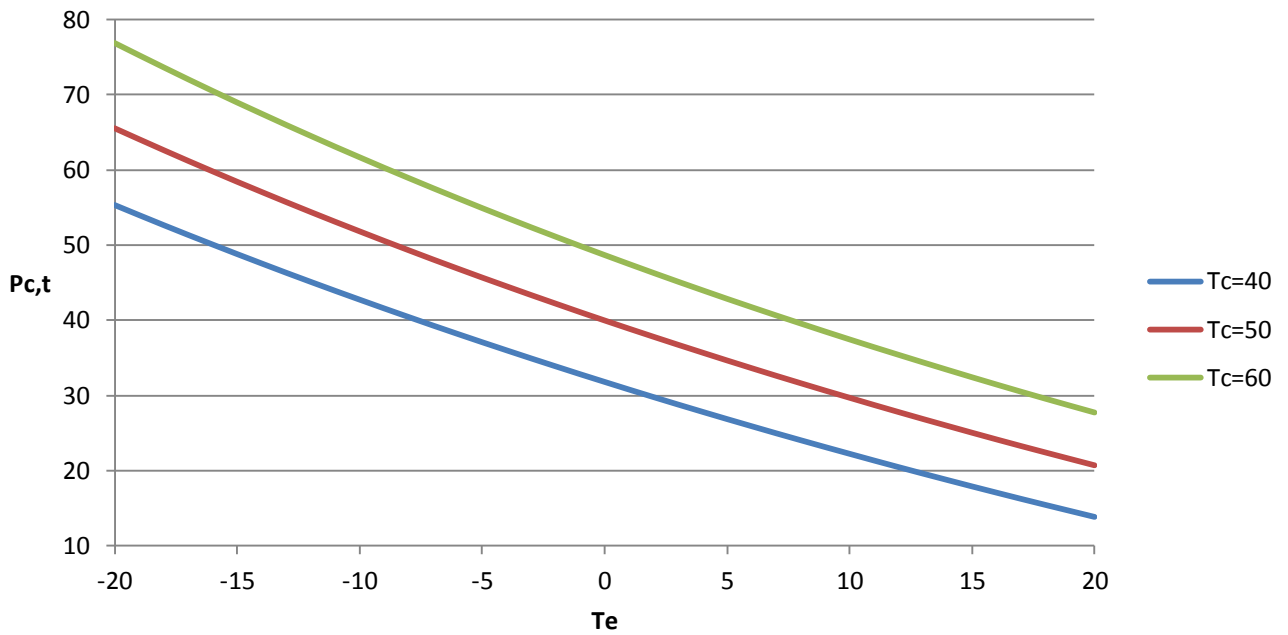
Διάγραμμα 9.39 Qe2-Tevaporation για R-245fa



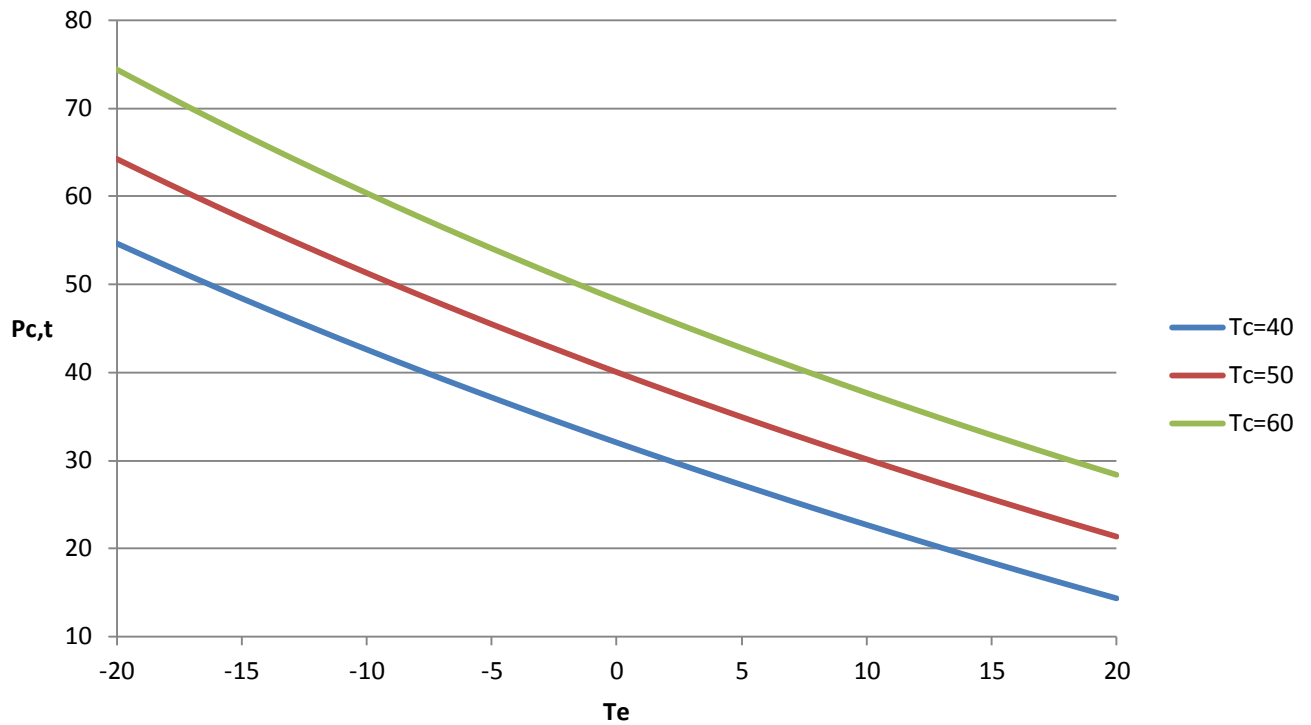
Διάγραμμα 9.40 Qe2-Tevaporation για R-410A



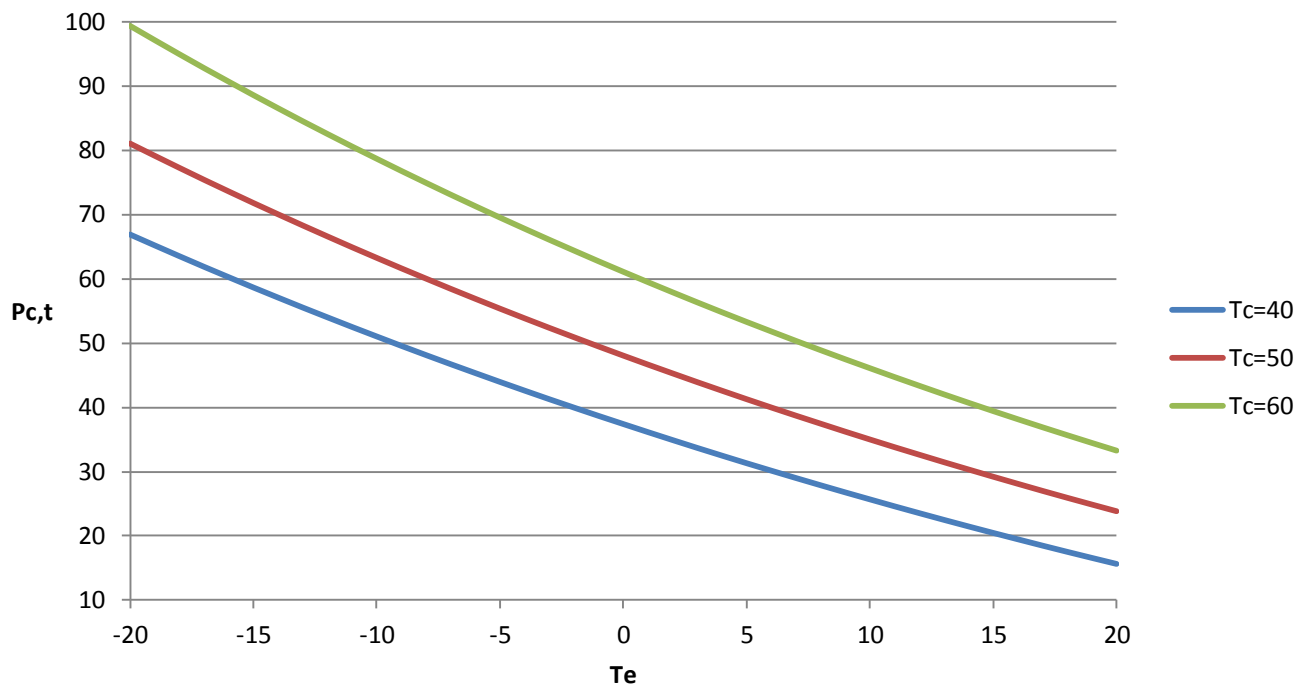
Διάγραμμα 9.41 Pc total-Tevaporation για R-134a



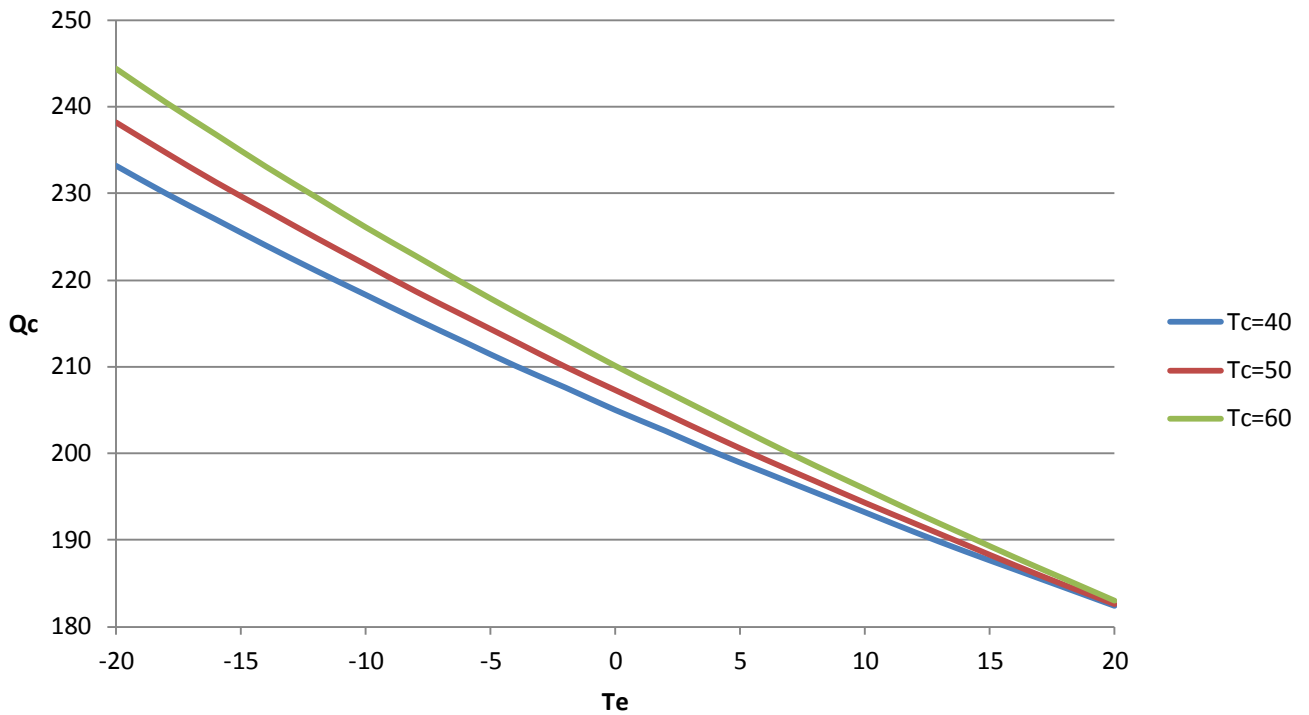
Διάγραμμα 9.42 P_c total-Tevaporation για R-245fa



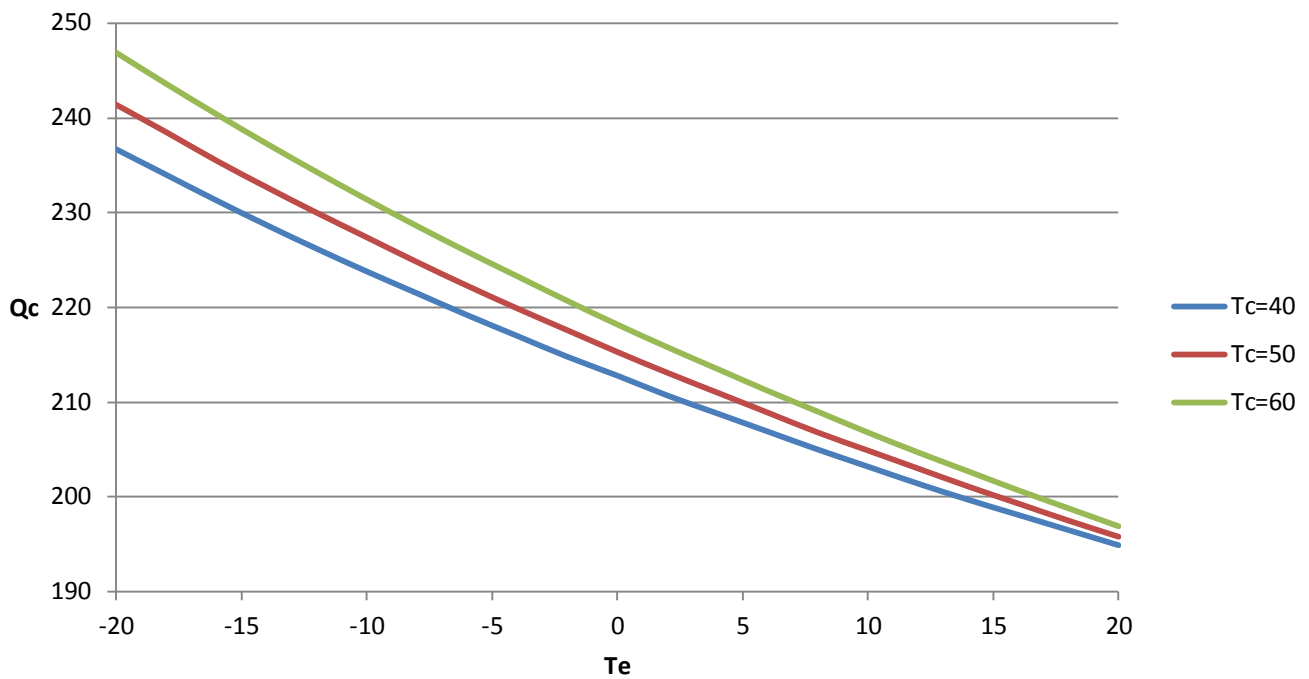
Διάγραμμα 9.43 P_c total-Tevaporation για R-410A



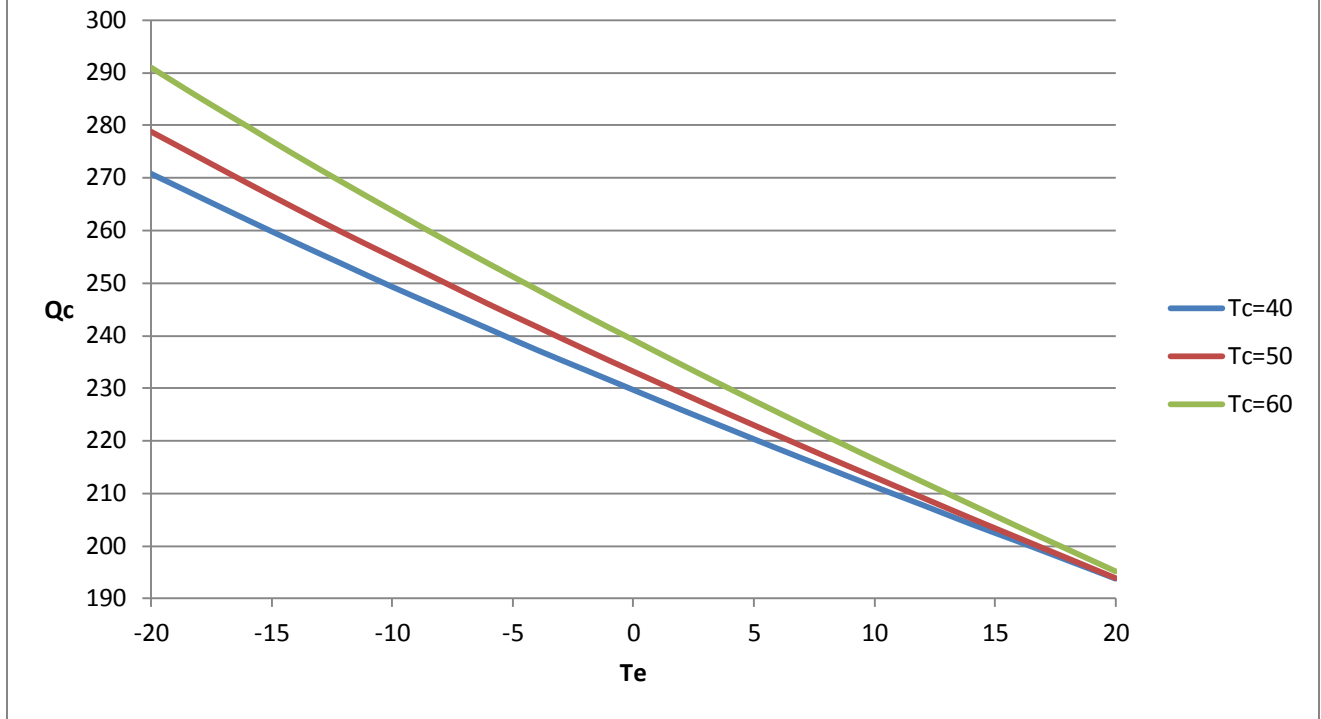
Διάγραμμα 9.44 Qc-Tevaporation για R-134a



Διάγραμμα 9.45 Qc-Tevaporation για R-245fa



Διάγραμμα 9.46 Qc-Tevaporation για R-410A



9.3.2 Βελτιστοποίηση της σχέσης μέσης πιέσεως κύκλου.

Σε αυτό το σημείο, έχοντας παραθέσει τα περισσότερα διαγράμματα που είναι απαραίτητα για την κατανόηση της λειτουργίας και της συμπεριφοράς του κύκλου, χρήσιμο είναι να αποφανθούμε για το εάν η παραδοχή την οποία κάναμε στην αρχή της ανάλυσης για την βέλτιστη εξίσωση μέσα από την οποία θα λάβουμε την ενδιάμεση πίεση P_m είναι αληθής, και αν όχι, πόσο απέχει από την βέλτιστη λύση. Να θυμήθουμε πως δεχθήκαμε ως βέλτιστη λύση τον γεωμετρικό μέσο των ακραίων πιέσεων, δηλαδή:

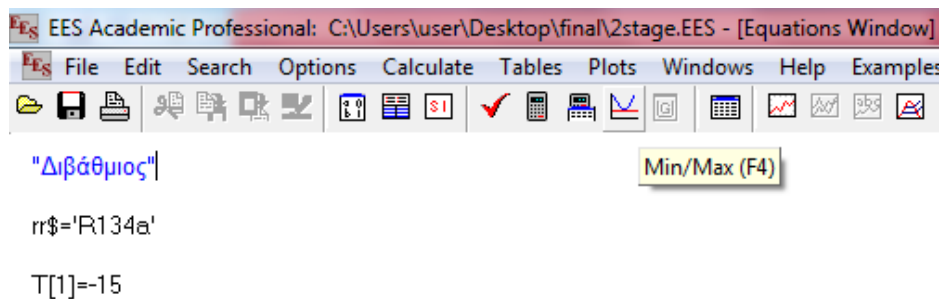
$$P_m = \sqrt{P_{low} * P_{high}}, \quad (9.10)$$

Τώρα, με την βοήθεια του EES θα προσπαθήσουμε να ελέγξουμε την ορθότητα αυτής της υπόθεσης. Αρχικά θα υποθέσουμε μία μεταβλητή α η οποία θα είναι ο πολλαπλασιαστής της παραπάνω εξίσωσης και μέσω ανάλυσης μεγίστου/ελαχίστου θα πάρουμε διάφορες τιμές για αυτήν για διάφορες θερμοκρασίες ατμοποίησης, διάφορα εργαζόμενα μέσα και θερμοκρασίες συμπύκνωσης. Έτσι η παραπάνω εξίσωση γίνεται:

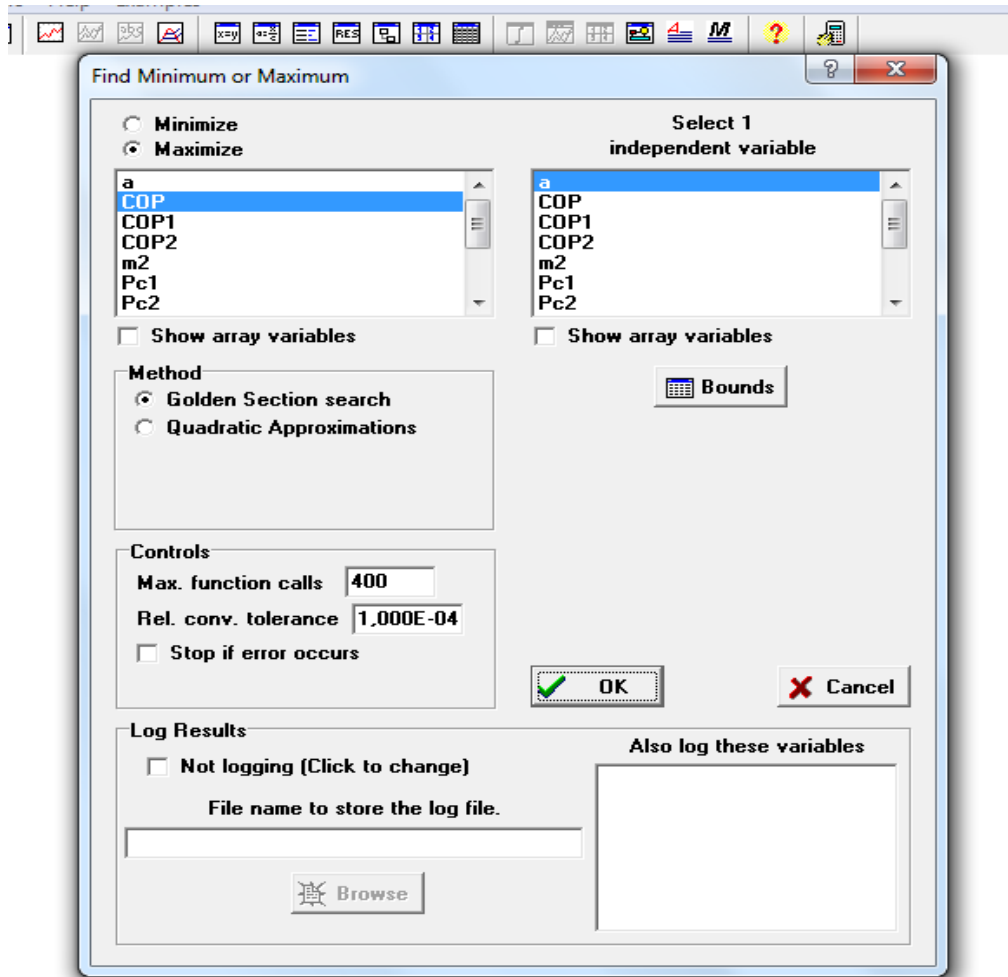
$$P_m = \alpha \sqrt{P_{low} * P_{high}}, \quad (9.11)$$

Για να πραγματοποιήσουμε βελτιστοποίηση πρέπει να εκλέξουμε την μεταβλητή ως προς την οποία θα βελτιστοποιήσουμε την ανάλυση. Προφανώς μας ενδιαφέρει ο συντελεστής συμπεριφοράς της ψυκτικής εγκατάστασης οπότε προς αυτόν θα πραγματοποιήσουμε την προαναφερθείσα βελτιστοποίηση.

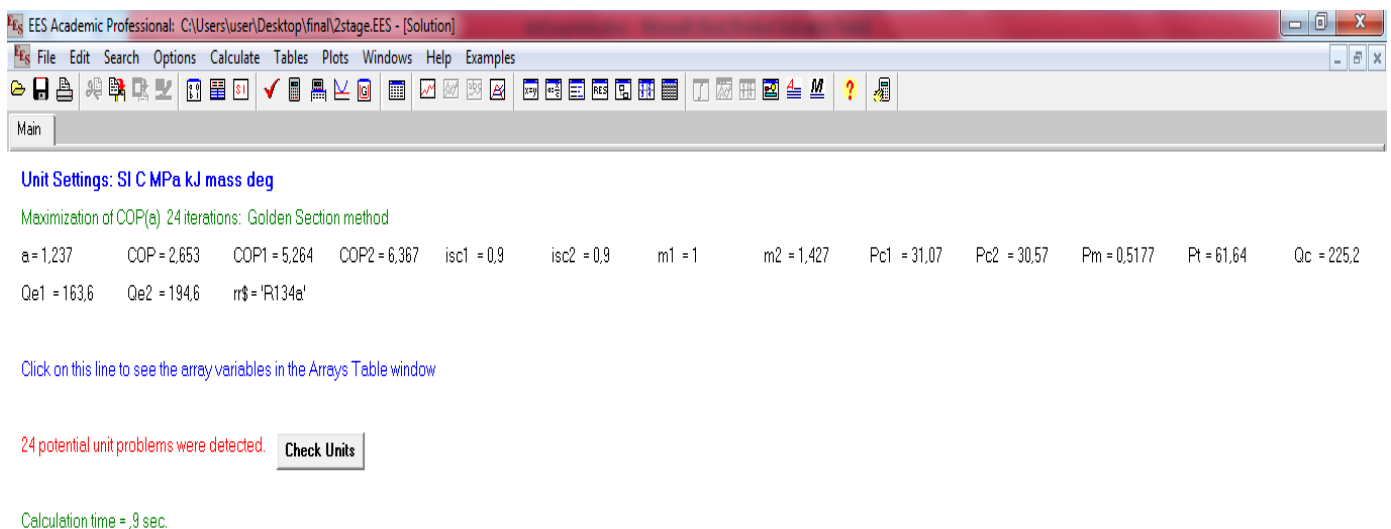
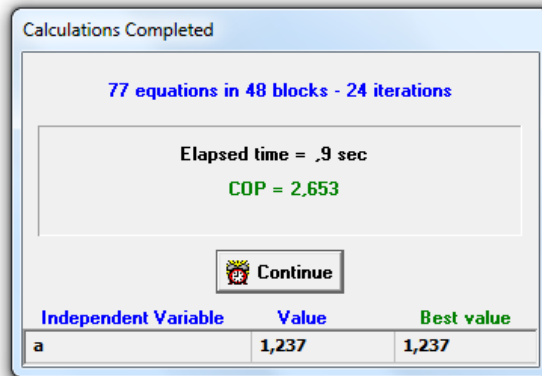
Ευρισκόμενοι στην επιφάνεια εργασίας του EES και έχοντας αλλάξει την παραπάνω εξίσωση πολλαπλασιάζοντας την με α , επιλέγουμε το πλήκτρο Min/Max και έτσι εμφανίζεται το αντίστοιχο παράθυρο επιλογών.



Αρχικά επιλέγουμε την μεγιστοποίηση τιμής (Maximize) και στην συνέχεια διαλέγουμε εξαρτημένη και ανεξάρτητη μεταβλητή. Ύστερα επιλέγουμε την αλγεβρική μέθοδο επίλυσης (εύρεση χρήσης τομής ή τετραγωνικές προσεγγίσεις) και τέλος, τον αριθμό των επαναλήψεων τις οποίες θα εκτελέσει το πρόγραμμα καθώς και την σχετικό επιτρεπτό σφάλμα.



Έτσι χτυπώντας το OK παίρνουμε με μορφή pop-up window την λύση με την τιμή της ανεξάρτητης και της εξαρτημένης μεταβλητής καθώς και με τον χρόνο τον οποίο χρειάστηκε για την εύρεση της. Σε λίγα δευτερόλεπτα το παράθυρο αποσύρεται και εμφανίζεται ένας μεγαλύτερος πίνακας ο οποίος περιέχει όλες τις τιμές των μεταβλητών οι οποίες δεν έχουν συνταχθεί από τον χρήστη ως arrays, για την τιμή του α που βρέθηκε.



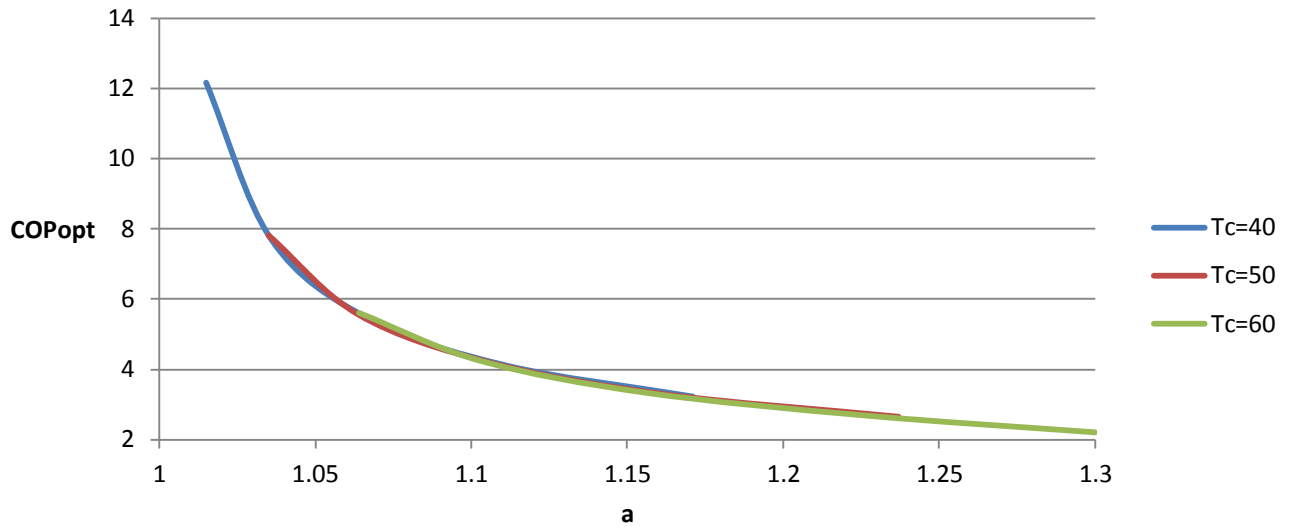
Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνουμε βελτιστοποίηση του συντελεστή συμπεριφοράς της ψυκτικής εγκατάστασης. Παρακάτω παρατίθενται τα εξής διαγράμματα:

-Βέλτιστος COP-παράμετρος α , για διάφορα ψυκτικά μέσα και θερμοκρασίες συμπύκνωσης με την θερμοκρασία ατμοποίησης να βαίνει μειούμενη.

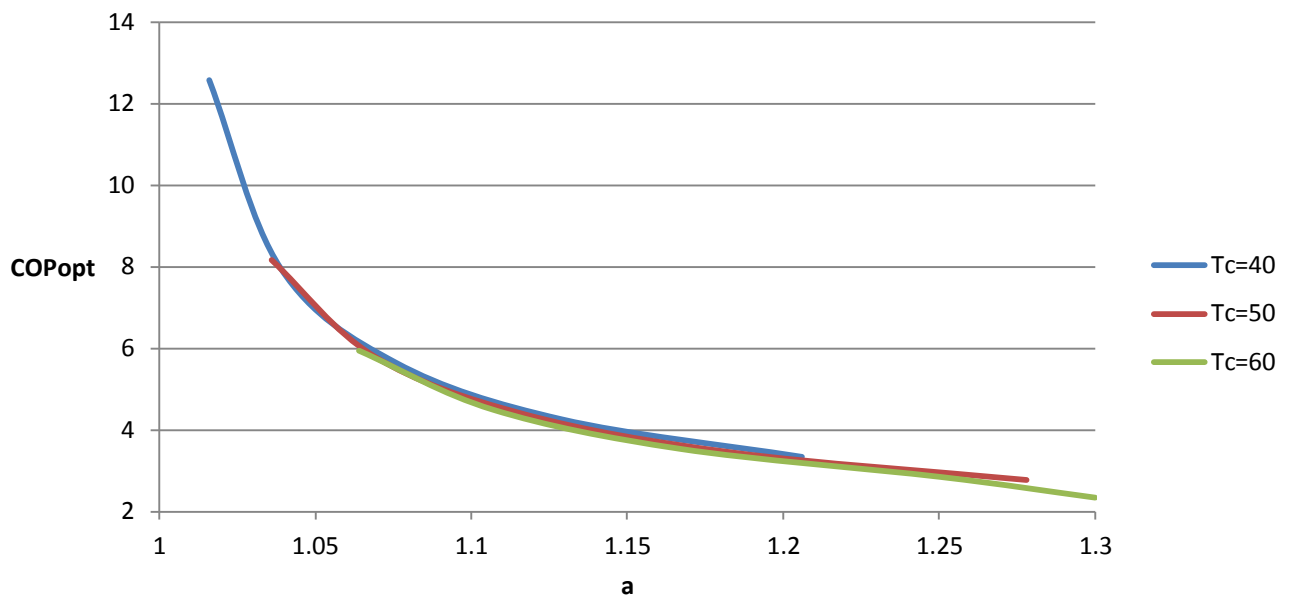
-Ποσοστιαία μεταβολή του συντελεστή συμπεριφοράς από τον βέλτιστο σε συνάρτηση με την θερμοκρασία ατμοποίησης για το R-134a και διάφορες θερμοκρασίες συμπύκνωσης.

-Συντελεστής συμπεριφοράς σε συνάρτηση με την παράμετρο α για το R-134a και $T_{\text{condensation}}=50\text{ }^{\circ}\text{C}$ για διάφορες θερμοκρασίες ατμοποίησης.

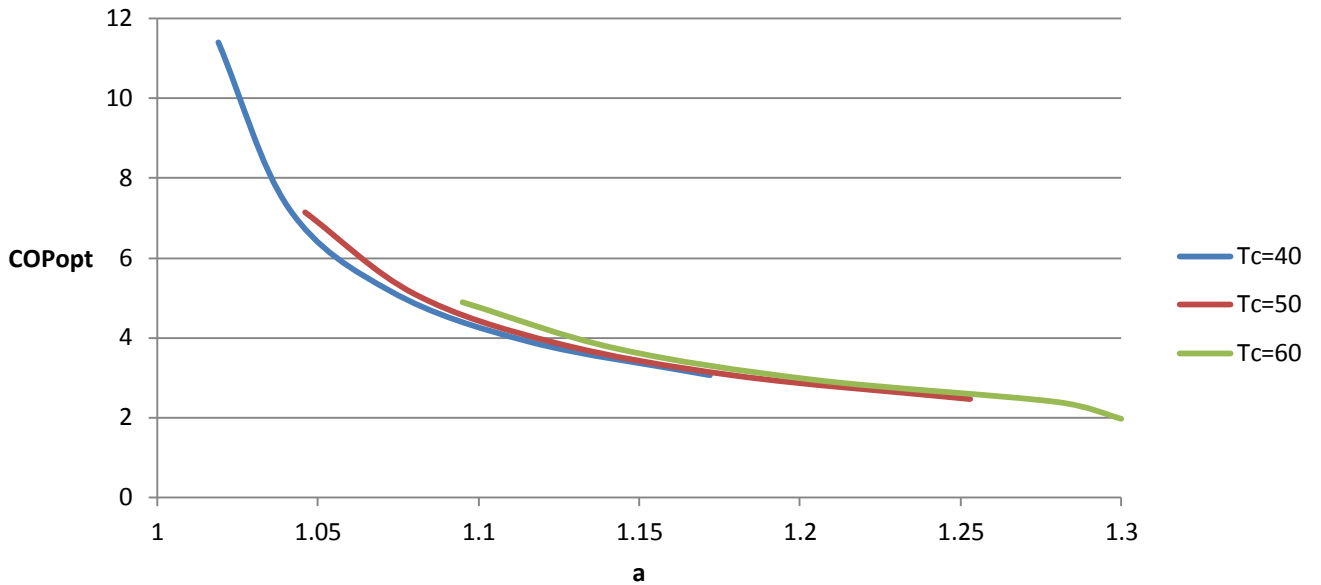
**Διάγραμμα 9.47 COP_{opt}-α για R-134a και
-20 °C < T_{ev} < 20 °C**



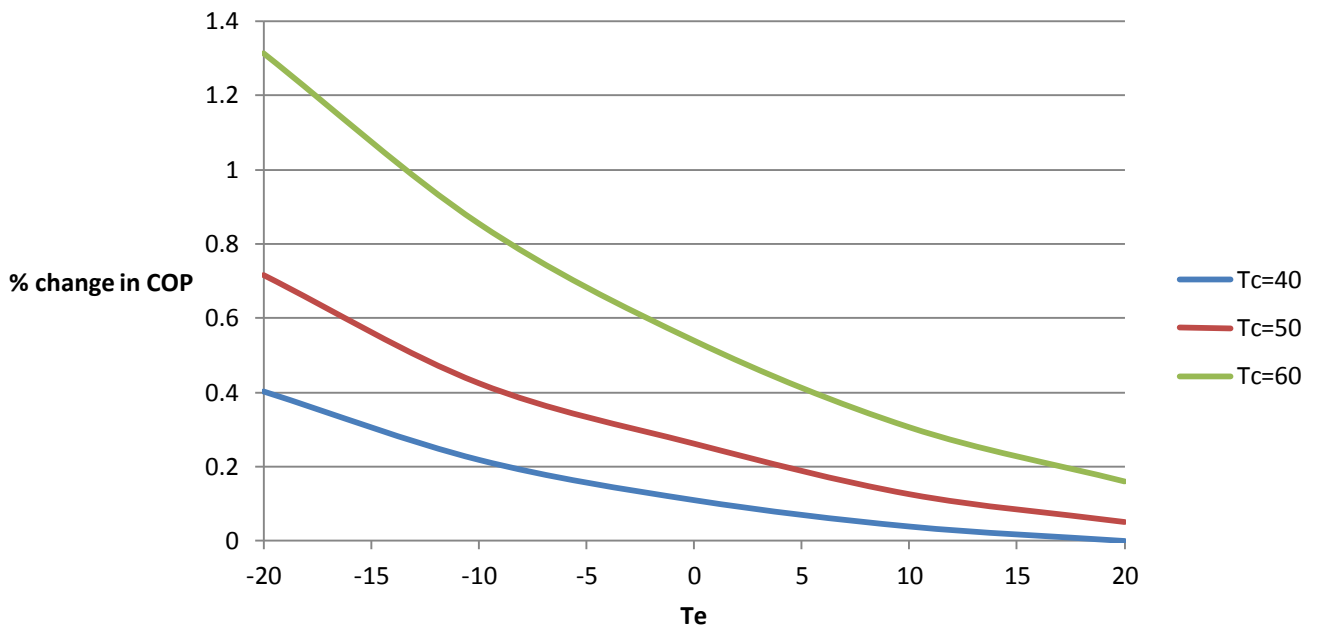
**Διάγραμμα 9.48 COP_{opt}-α για R-245fa και
-20 °C < T_{ev} < 20 °C**

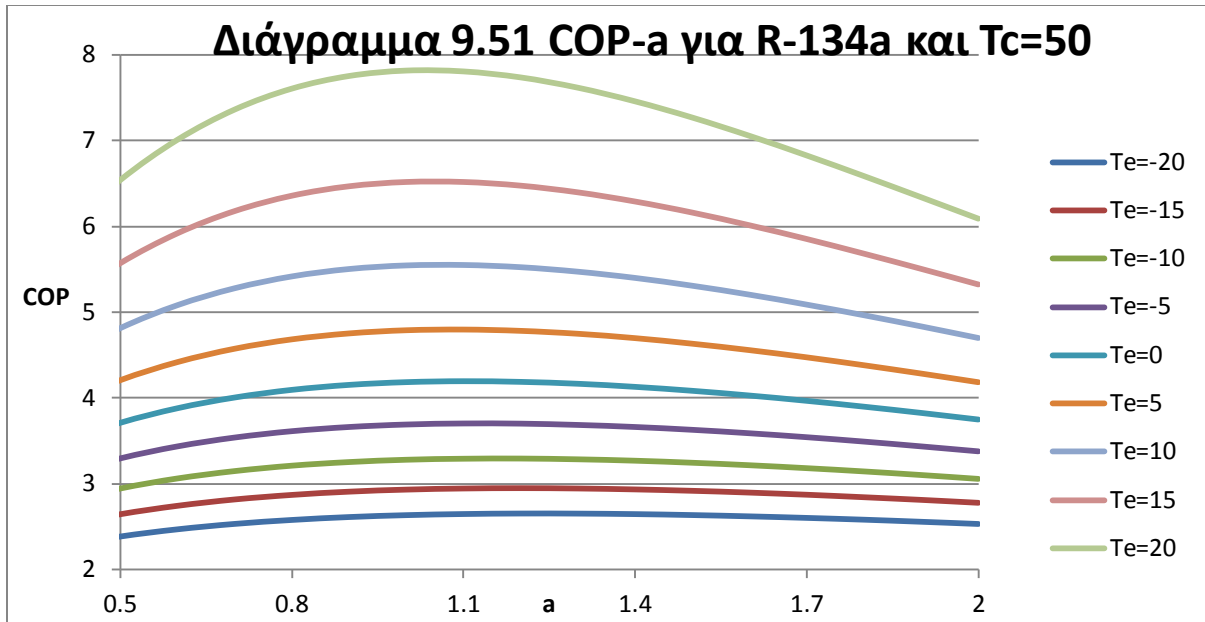


**Διάγραμμα 9.49 COP_{opt}-a για R-410A και
-20 °C < T_{ev} < 20 °C**

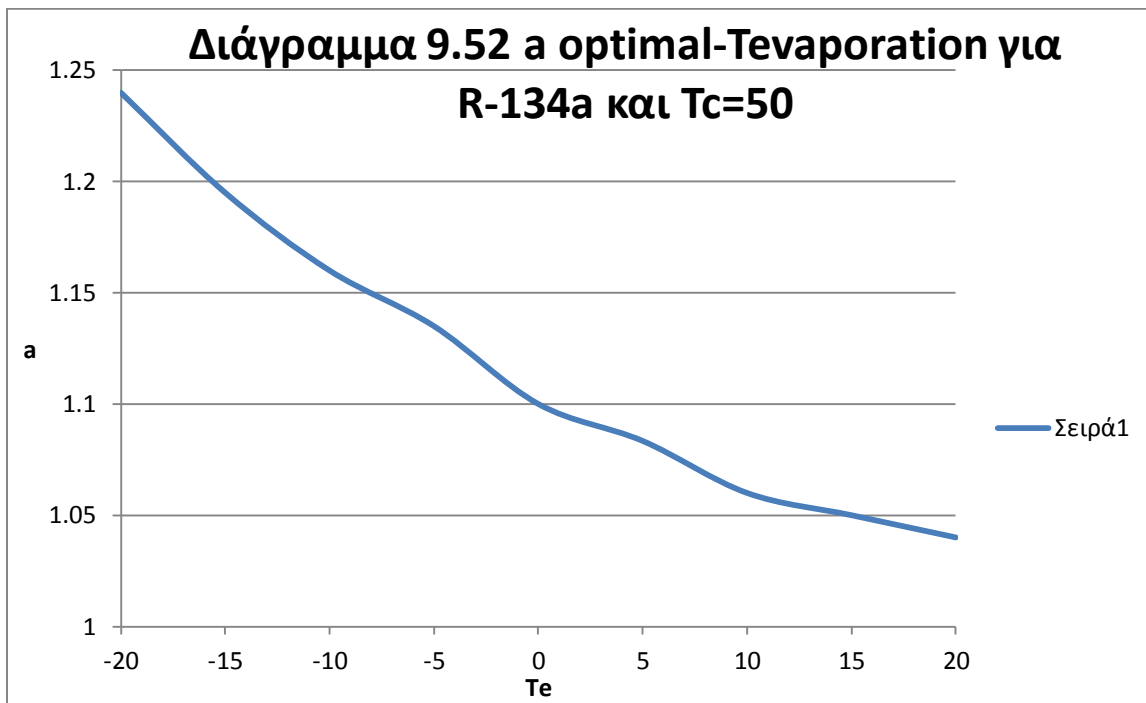


**Διάγραμμα 9.50 % Μεταβολή COP_{opt}-COP -
Tevaporation για R-134a**

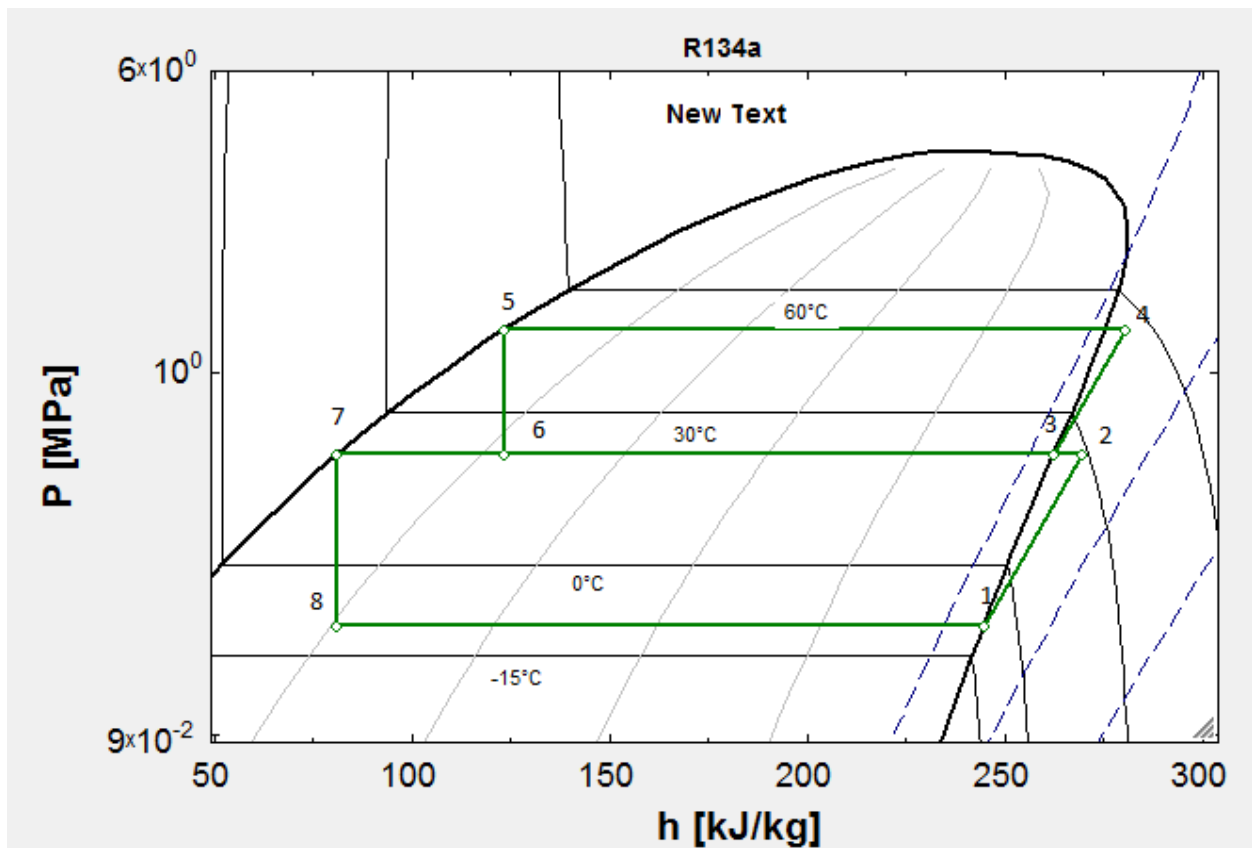




Το τελευταίο και ίσως πιο σημαντικό διάγραμμα είναι το ακόλουθο διότι μας επιτρέπει να κατανοήσουμε πως η παραδοχή που κάναμε ισχύει με πολύ καλή προσέγγιση σε υψηλές θερμοκρασίες ατμοποίησης αλλά όσο η θερμοκρασία αυτή ελατώνεται (δηλαδή όσο αυξάνεται η ψύξη), η εξίσωση δεν παράγει ασφαλή αποτελέσματα δηλαδή π.χ. για θερμοκρασία ψύξης $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ο συντελεστής a για τον οποίο ο συντελεστής συμπεριφοράς είναι μέγιστος, παίρνει την τιμή 1,2 περίπου.



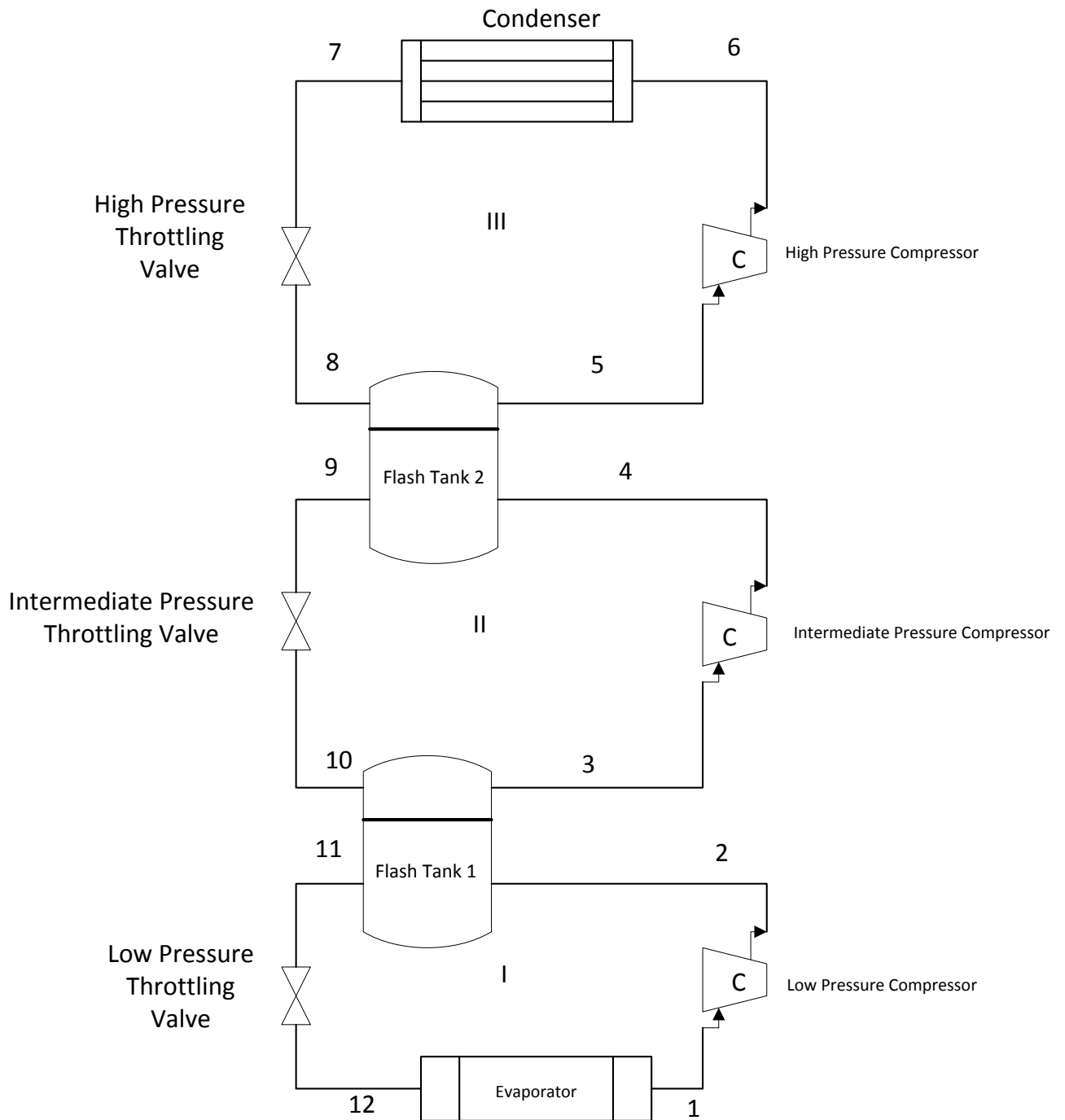
Για να κλείσουμε το κεφάλαιο της διβάθμιας συμπίεσης θα δώσουμε το απαραίτητο διάγραμμα πίεσης-ενθαλπίας του κύκλου για $T_e = -10^\circ\text{C}$, $T_c = 50^\circ\text{C}$, R-134a και $\alpha = 1,16$.



Εικόνα 9.4 Διάγραμμα P-h διβάθμιου κύκλου

9.3.3 Τριβάθμιος κύκλος μηχανικής συμπίεσης ατμών.

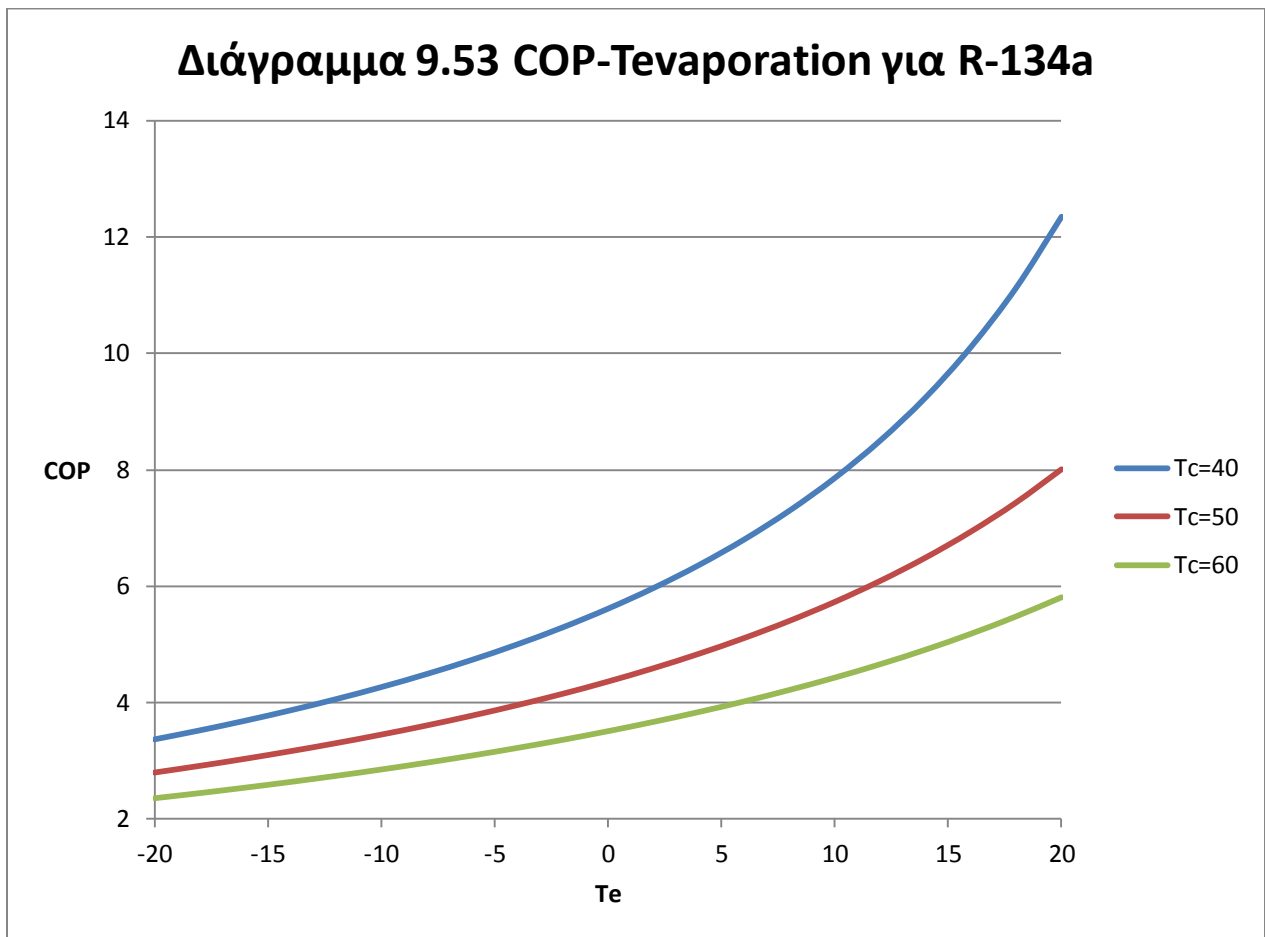
Η σχηματική διάταξη ψυκτικού κύκλου τριβάθμιας συμπίεσης ατμών φαίνεται παρακάτω.



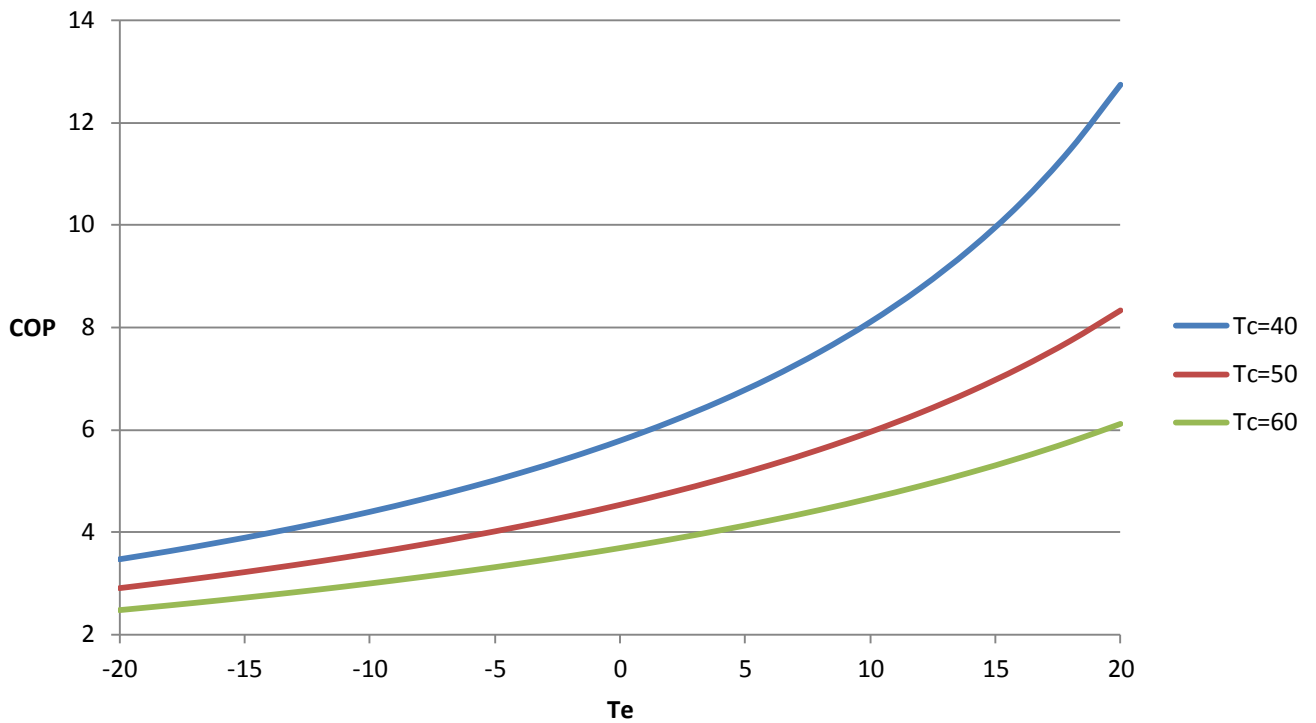
Εικόνα 9.5 Σχηματική παράσταση ψυκτικού κυκλώματος τριβάθμιας συμπίεσης ατμού

Η λειτουργία του τριβάθμιου κύκλου είναι ακριβώς όμοια με αυτήν του διβάθμιου, με τις ανάλογες προσθήκες βέβαια. Στην ανάλυση του κύκλου αυτού θα εργαστούμε μεταξύ των ίδιων θερμοκρασιών ατμοποίησης με τους προηγούμενους, δηλαδή από $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ έως $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Όπως γίνεται κατανοητό, θα ισχύει $m_{III} > m_{II} > m_I$ κατ'αναλογία με τον διβάθμιο κύκλο, η ανισότητα θα κατανοηθεί καλύτερα όταν παρατεθεί το διάγραμμα P-h του ψυκτικού κύκλου.

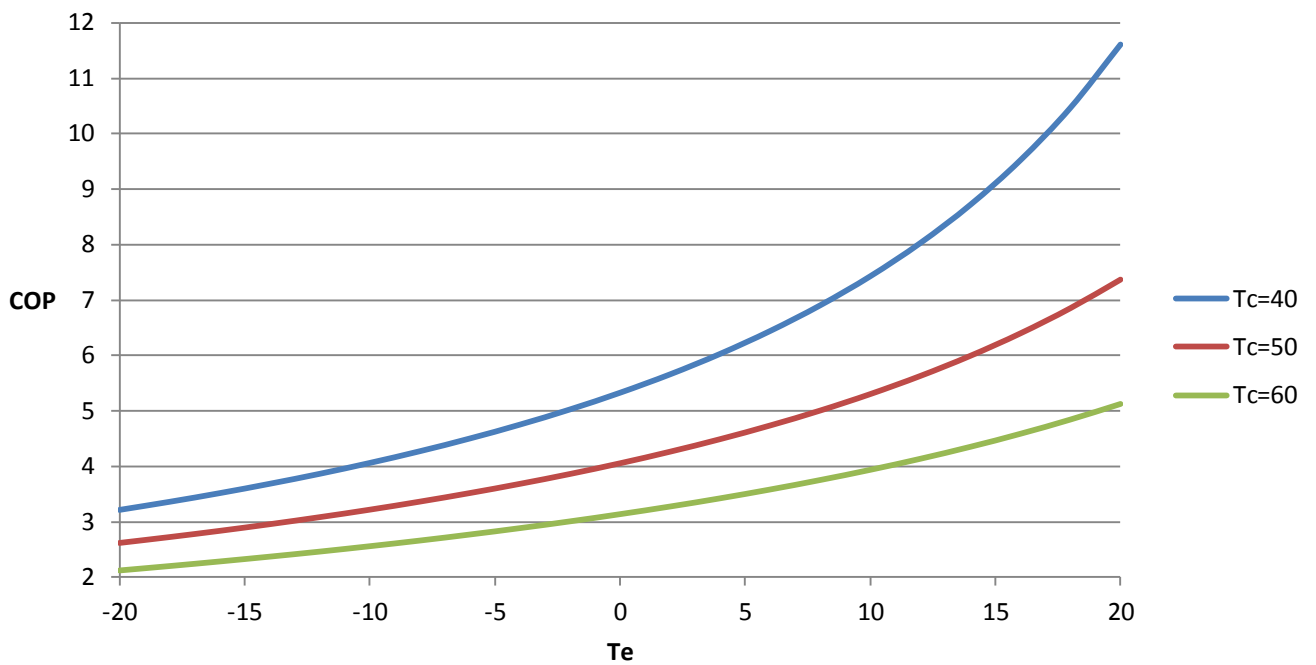
Τώρα θα προχωρήσουμε στην παράθεση των διαγραμμάτων του τριβάθμιου κύκλου. Παρατίθενται διαγράμματα του συντελεστή συμπεριφοράς της ψυκτικής εγκατάστασης σε συνάρτηση με την θερμοκρασία ατμοποίησης για τα προαναφερθέντα στον διβάθμιο κύκλο ψυκτικά μέσα και για τρεις θερμοκρασίες συμπύκνωσης, οι επιμέρους συντελεστές συμπεριφοράς των τριών βαθμίδων για τα τρία ψυκτικά μέσα και τις τρεις θερμοκρασίες συμπύκνωσης, ομοίως για τις ισχύεις των συμπιεστών των τριών βαθμίδων και τέλος οι ισχύεις στον ατμοποιητή και στον συμπυκνωτή.



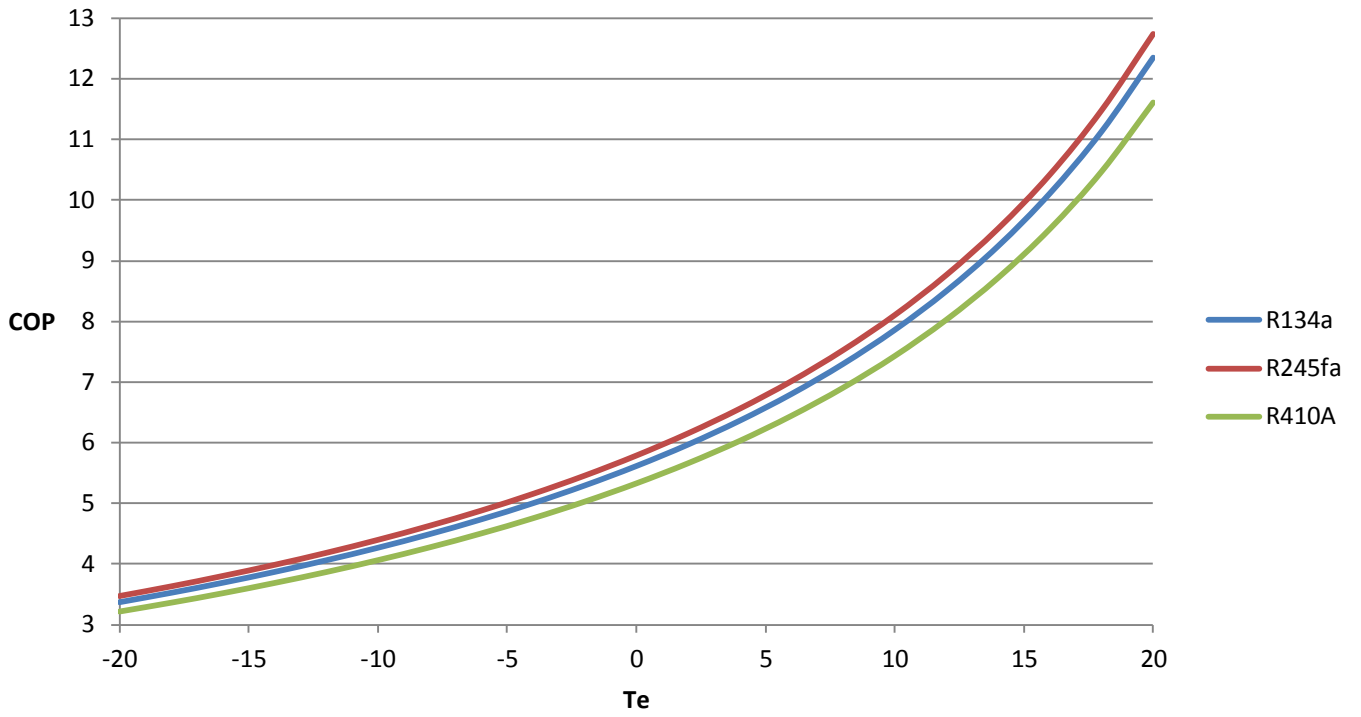
Διάγραμμα 9.54 COP-Τevaporation για R-245fa



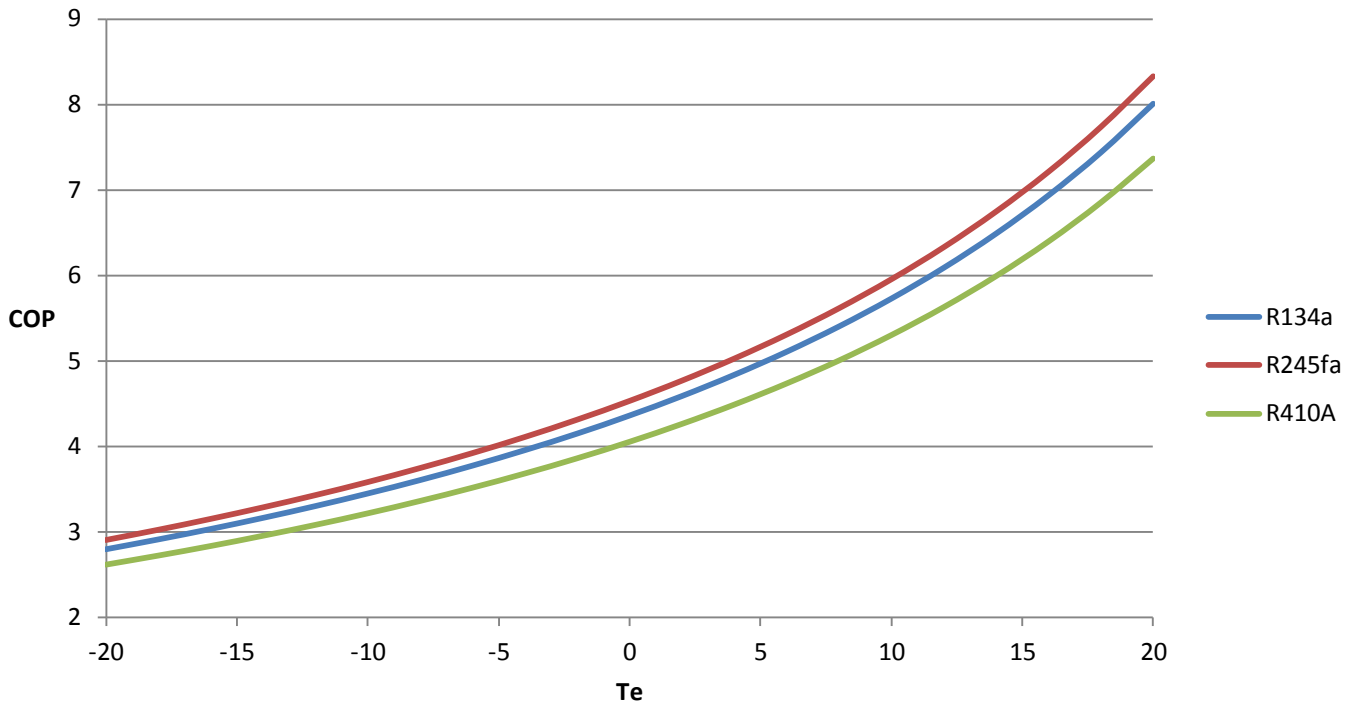
Διάγραμμα 9.55 COP-Τevaporation για R-410A



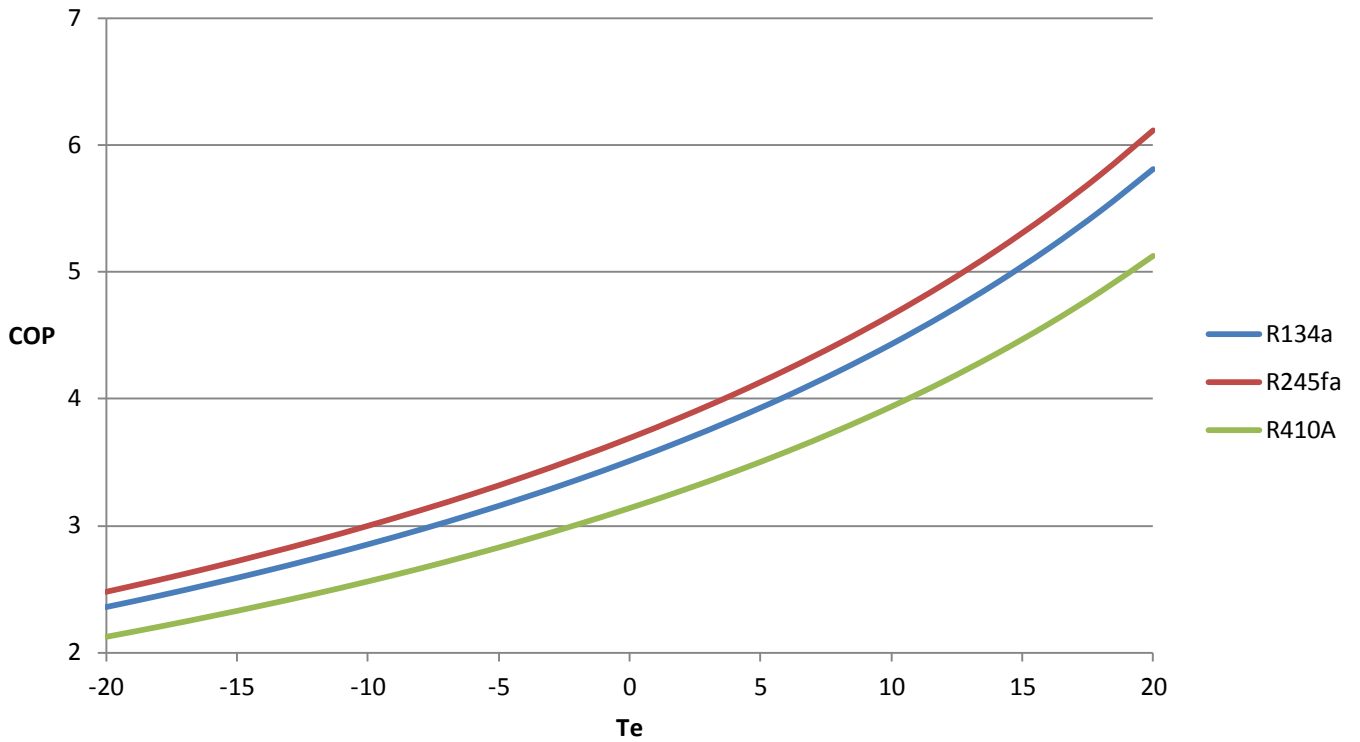
Διάγραμμα 9.56 COP-Tevaporation για Tc=40



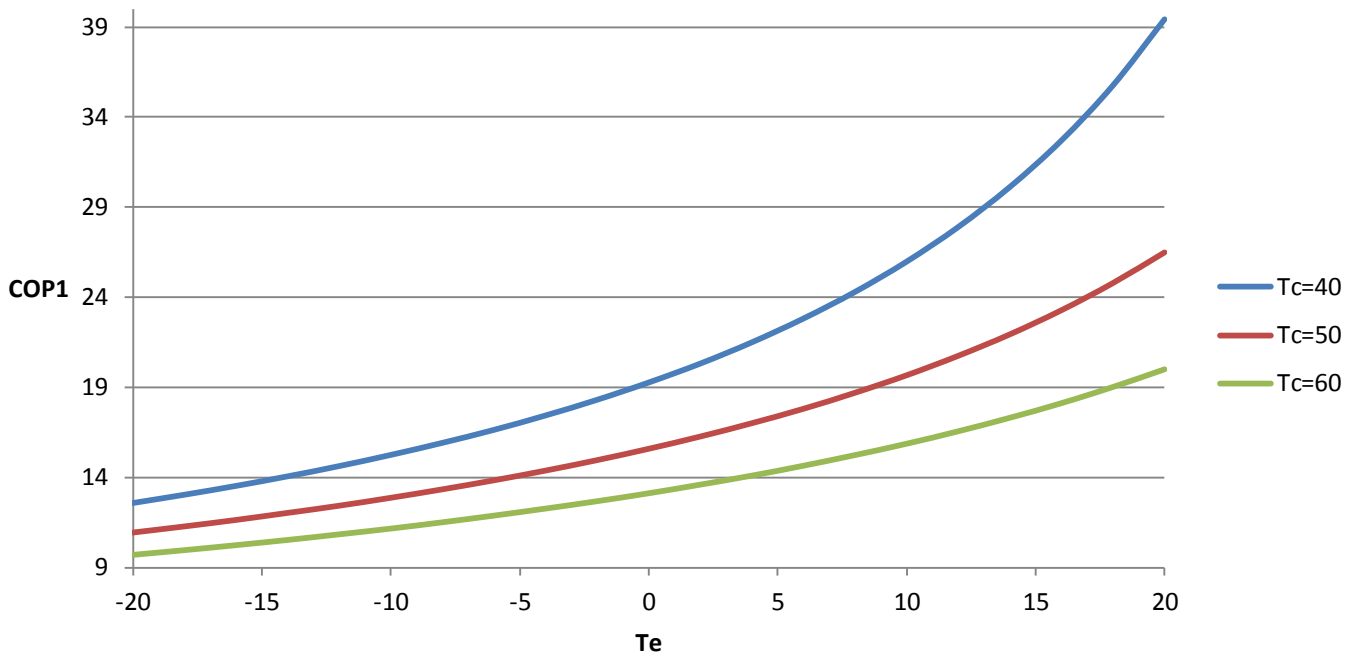
Διάγραμμα 9.57 COP-Tevaporation για Tc=50



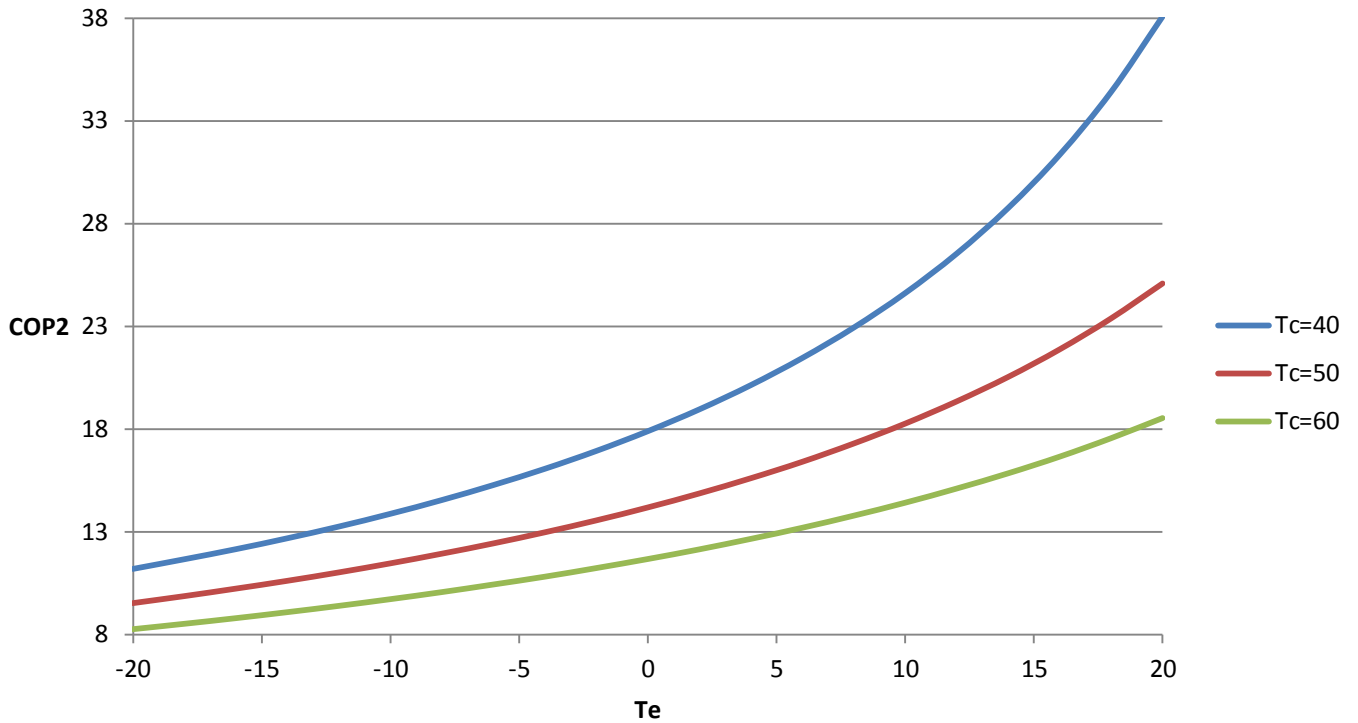
Διάγραμμα 9.58 COP-Tevaporation για $T_c=60$



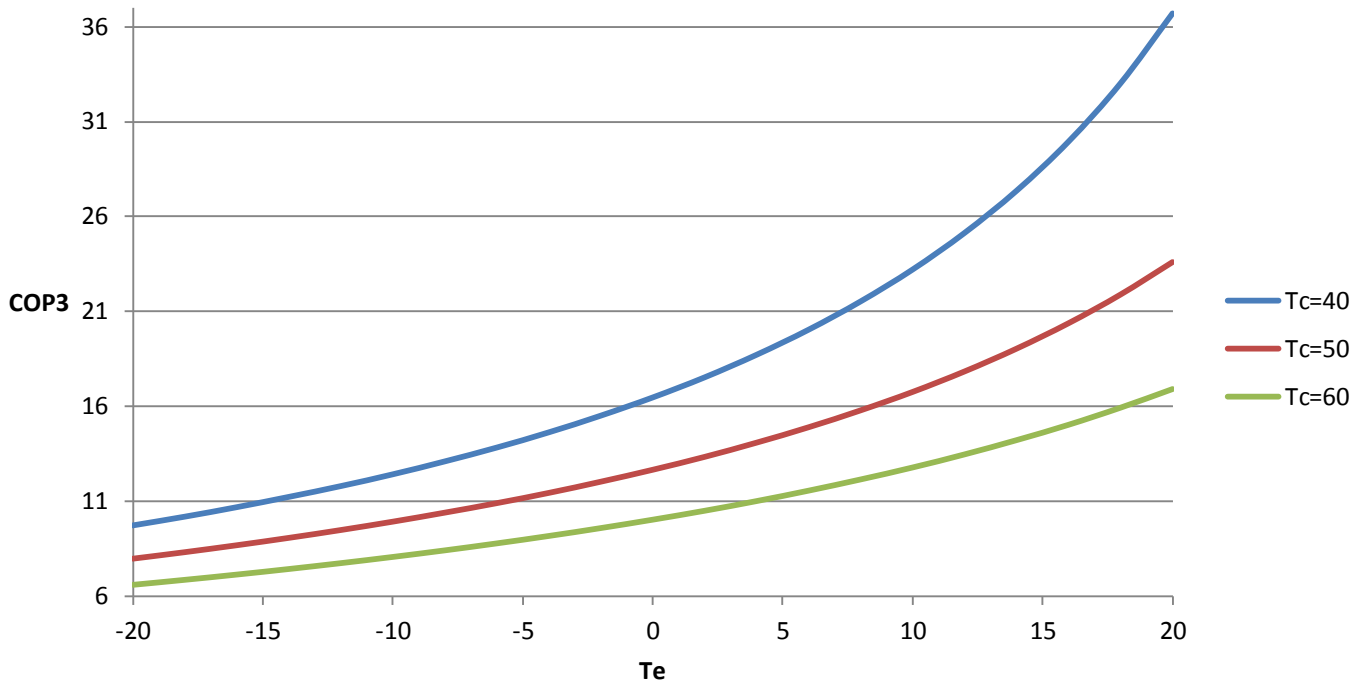
Διάγραμμα 9.59 COP1-Tevaporation για R-134a



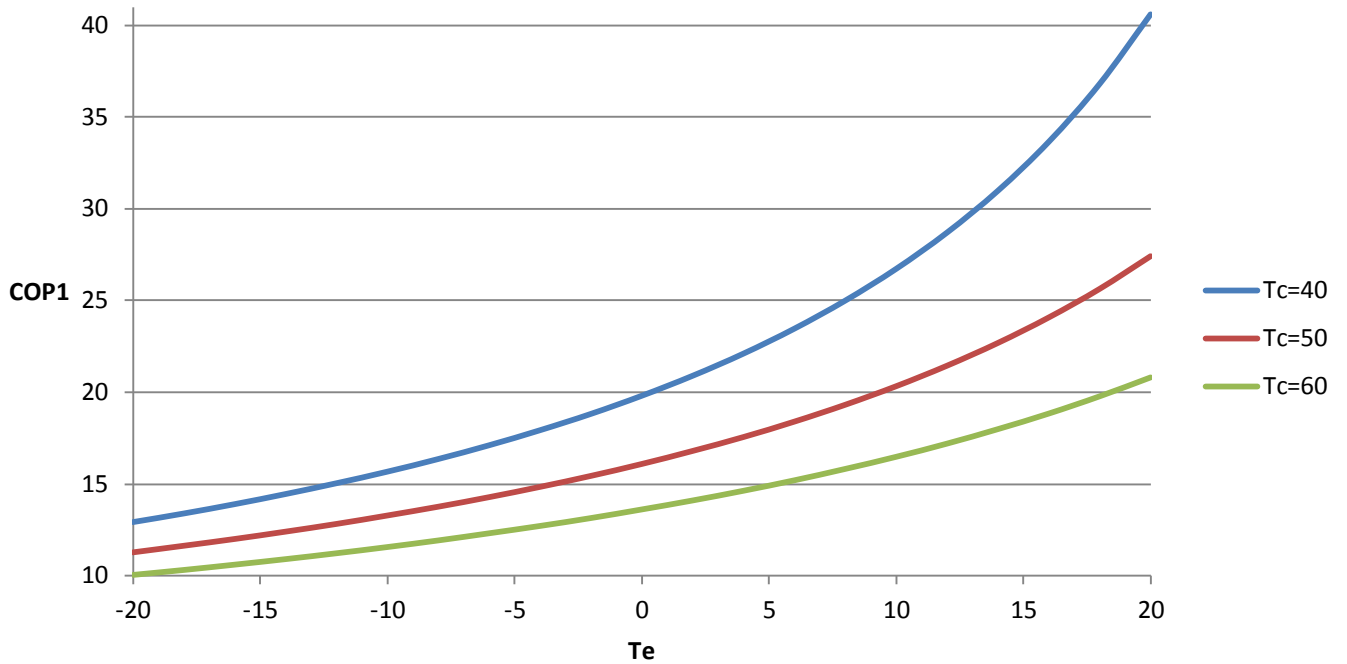
Διάγραμμα 9.60 COP2-Teνaporation για R-134a



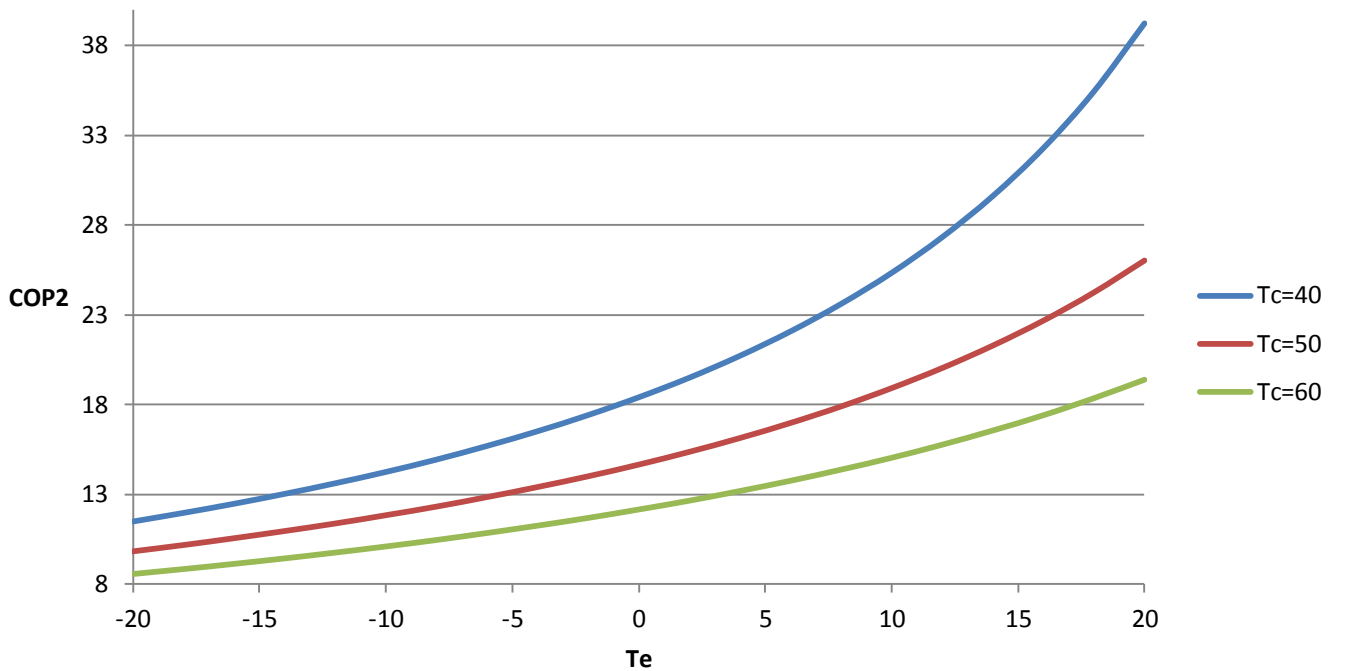
Διάγραμμα 9.61 COP3-Teνaporation για R-134a



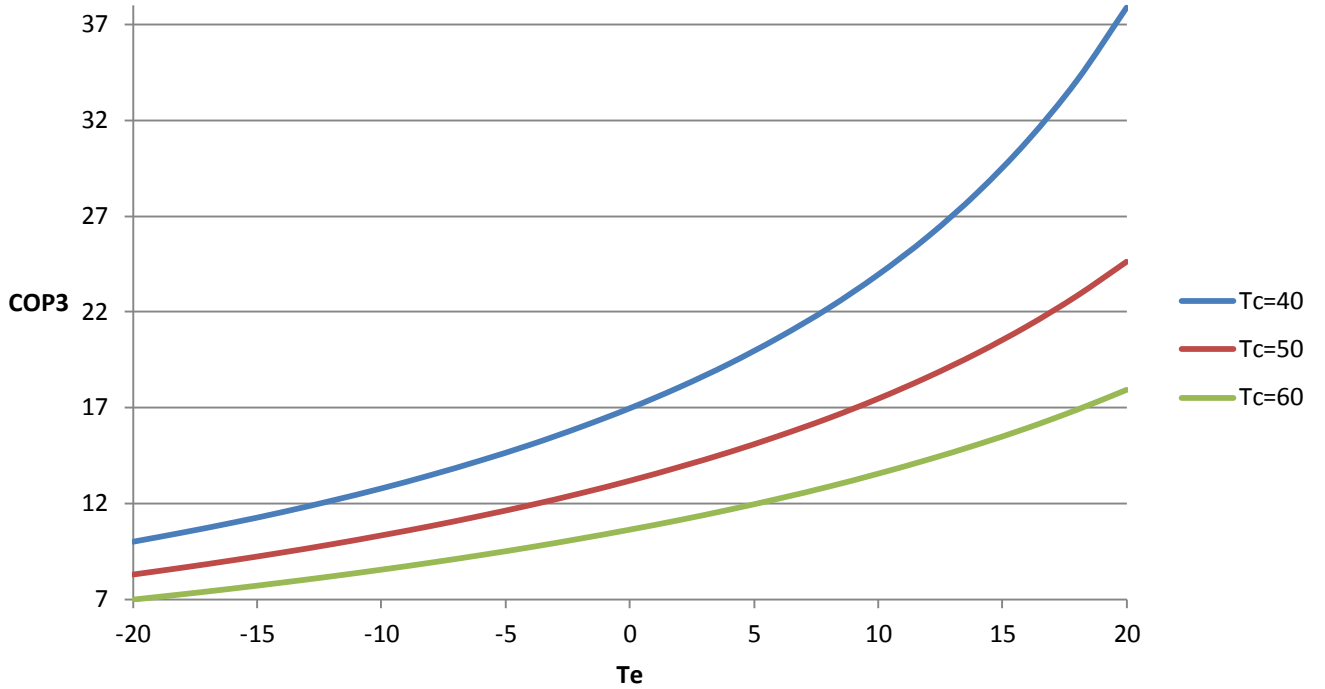
Διάγραμμα 9.62 COP1-Tevaporation για R-245fa



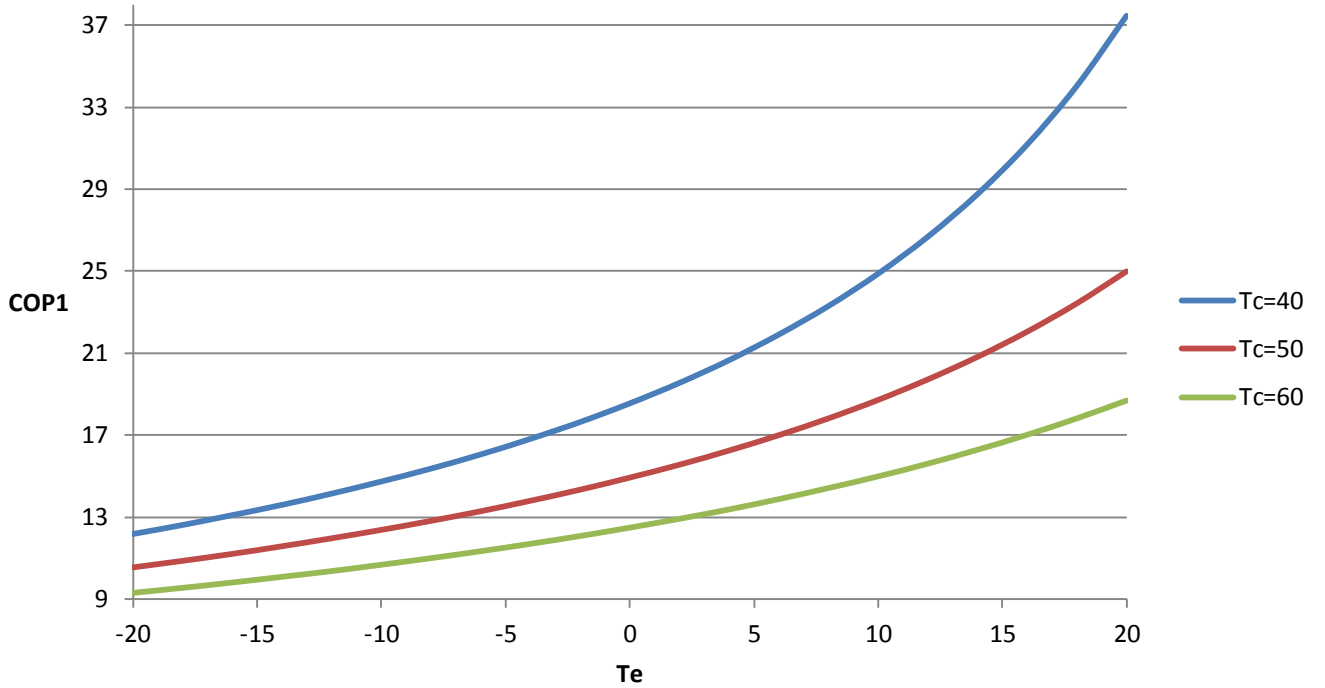
Διάγραμμα 9.63 COP2-Tevaporation για R-245fa



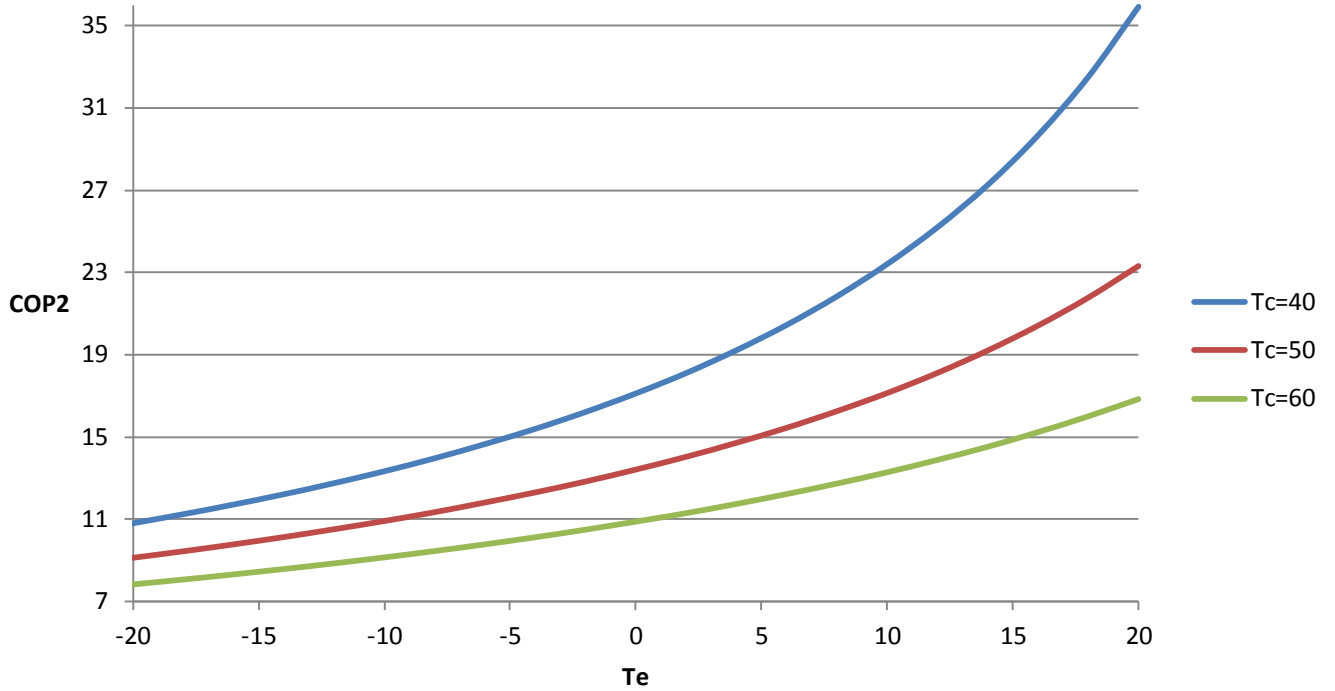
Διάγραμμα 9.64 COP3-Τevaporation για R-245fa



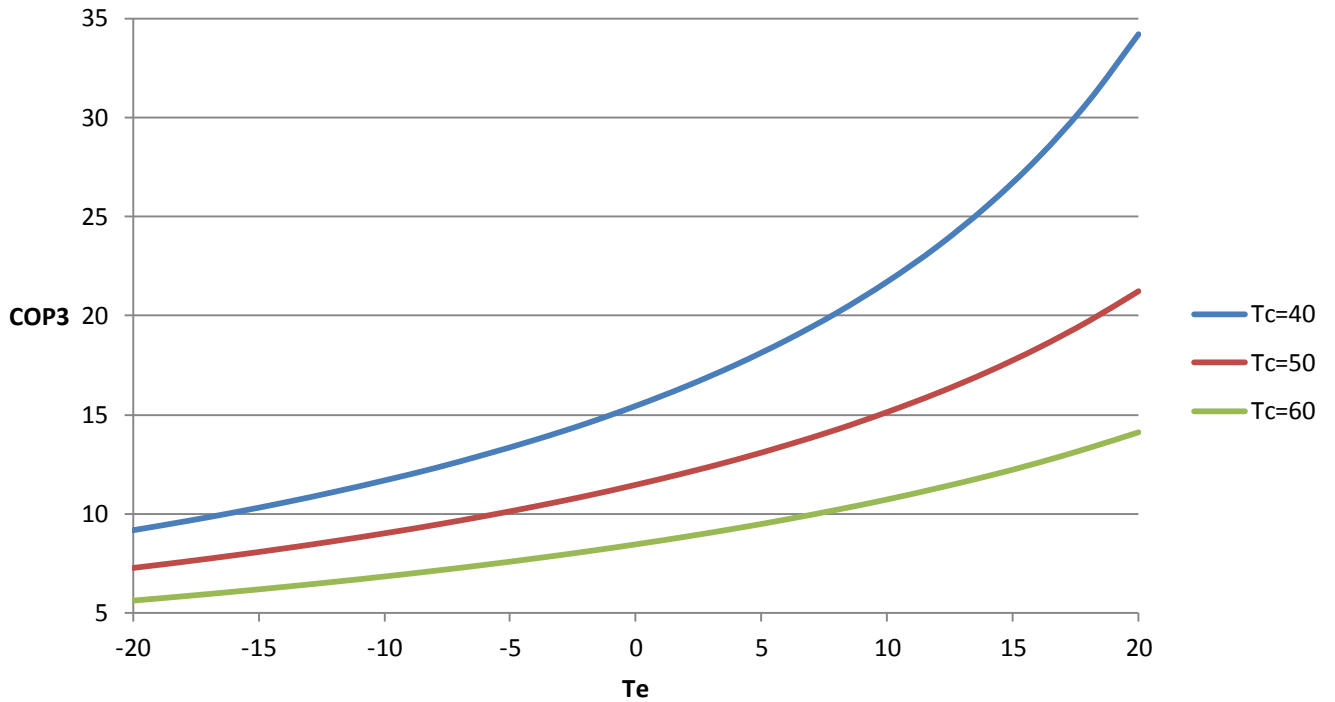
Διάγραμμα 9.65 COP1-Τevaporation για R-410A



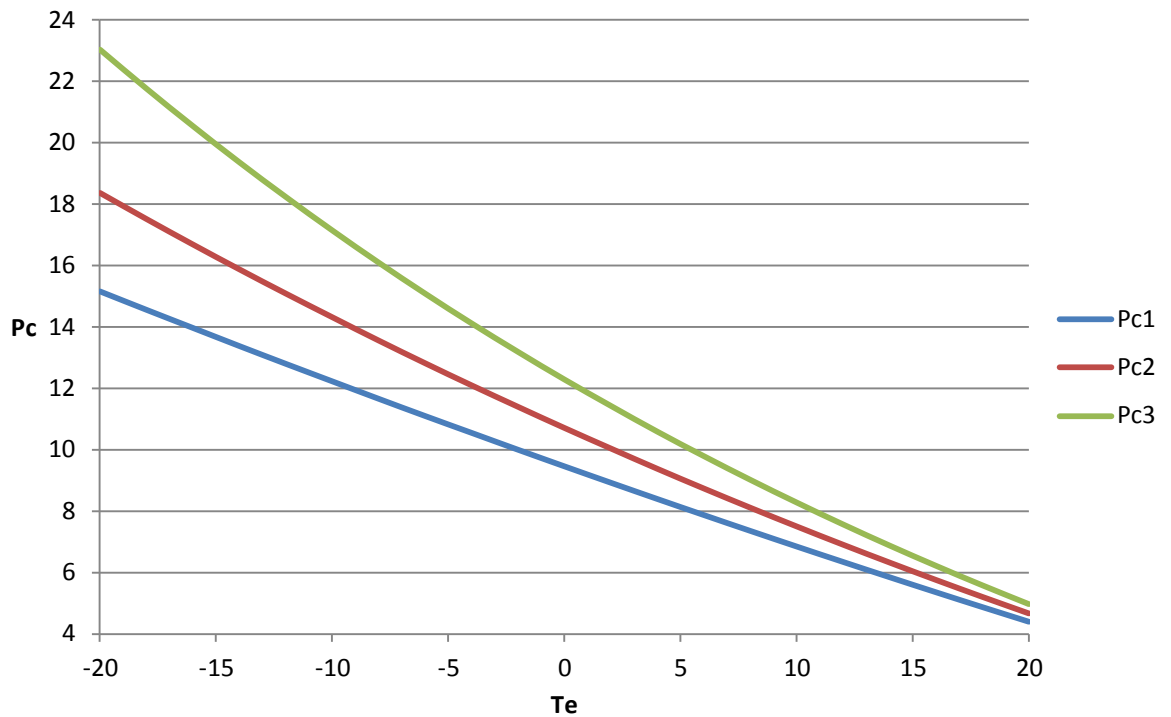
Διάγραμμα 9.66 COP2-Tevaporation για R-410A



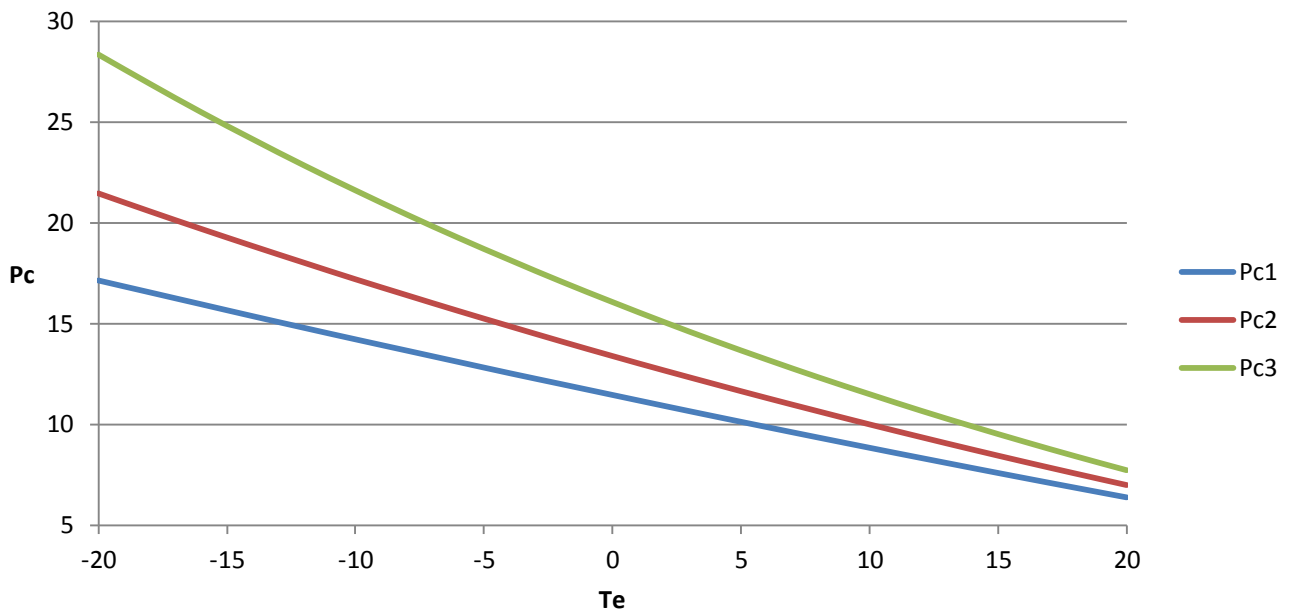
Διάγραμμα 9.67 COP3-Tevaporation για R-410A



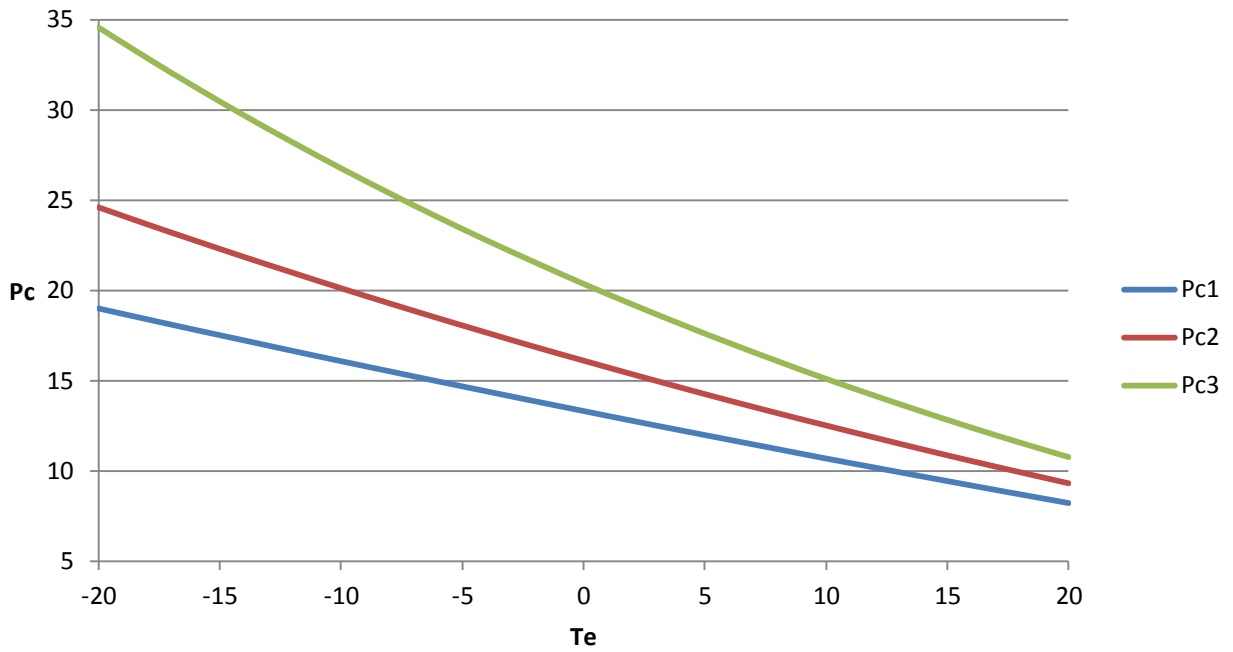
Διάγραμμα 9.68 P_c βαθμίδων-Τεναporation για R-134a και $T_c=40$



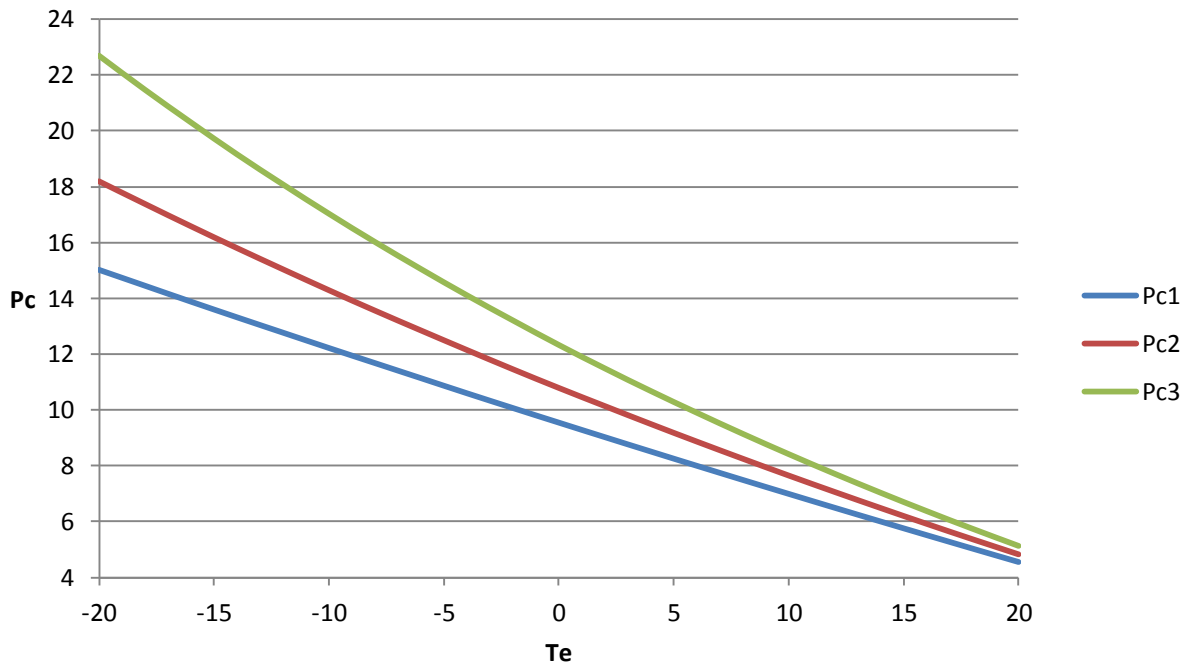
Διάγραμμα 9.69 P_c βαθμίδων-Τεναporation για R-134a και $T_c=50$



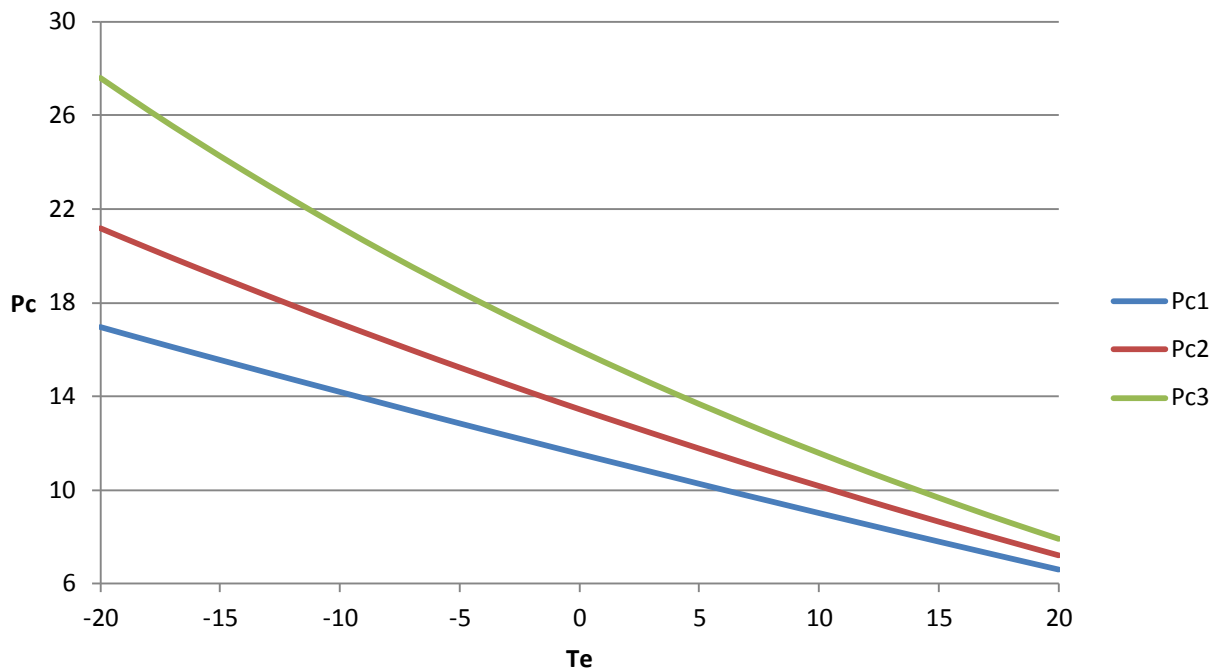
Διάγραμμα 9.70 P_c βαθμίδων-Τevaporation για R-134a και T_c=60



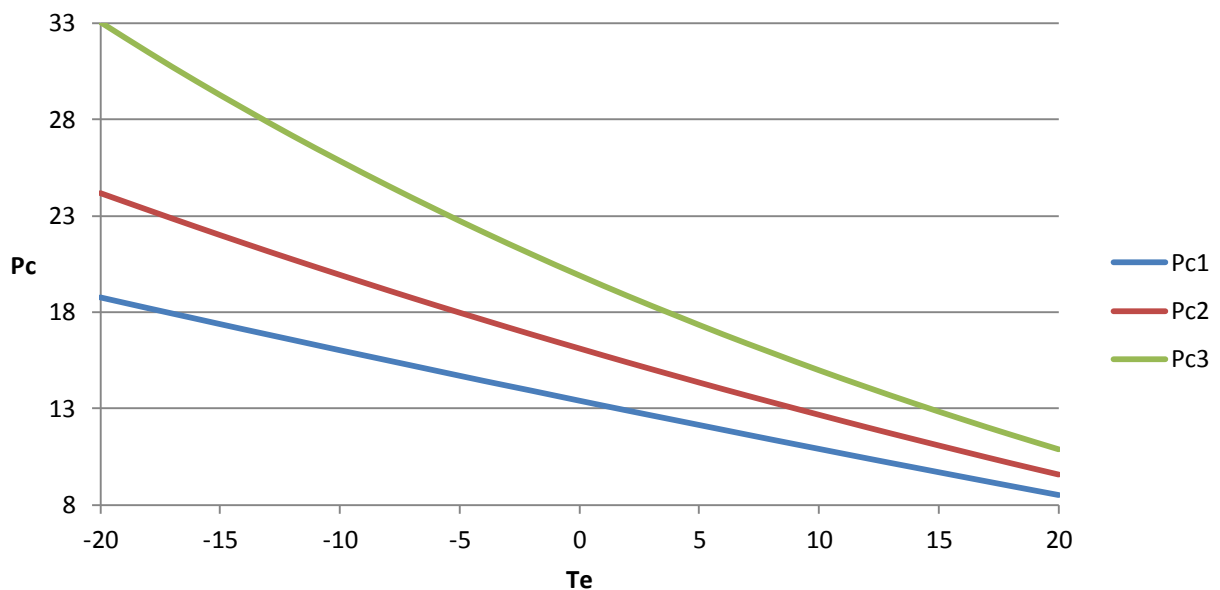
Διάγραμμα 9.71 P_c βαθμίδων-Τevaporation για R-245fa και T_c=40



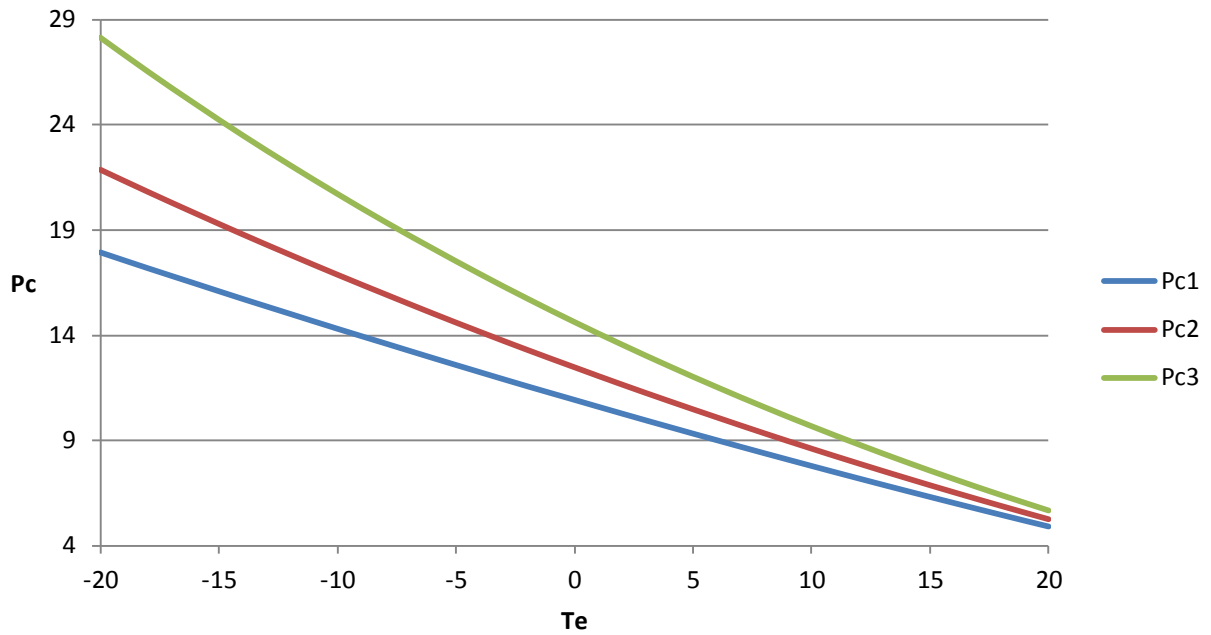
Διάγραμμα 9.72 P_c βαθμίδων-Τεναporation για R-245fa και T_c=50



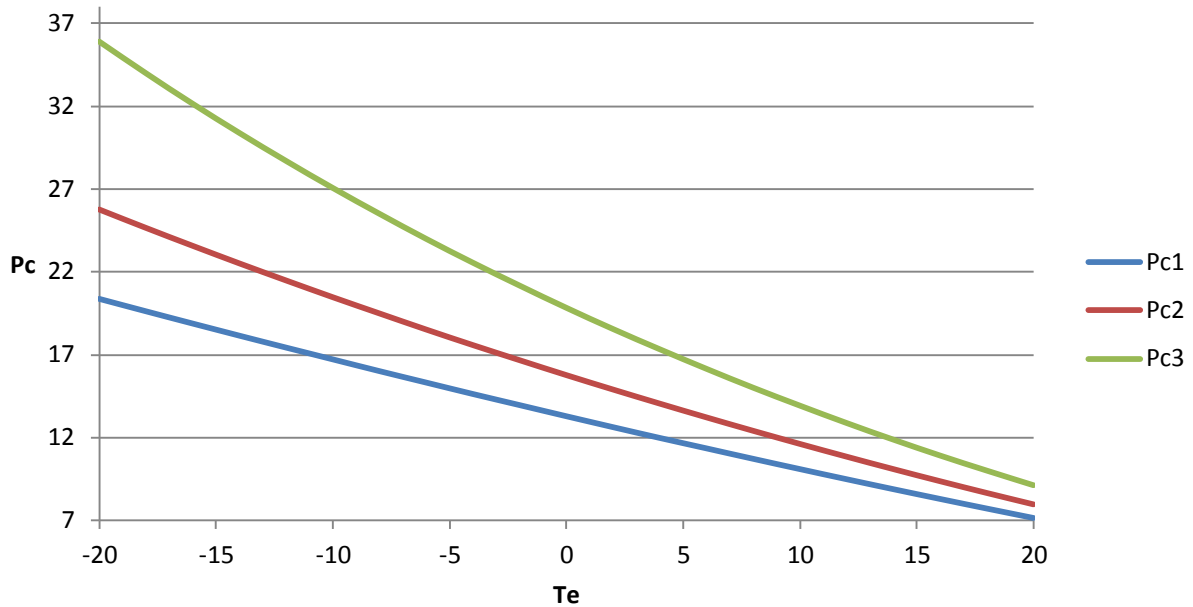
Διάγραμμα 9.73 P_c βαθμίδων-Τεναporation για R-245fa και T_c=60



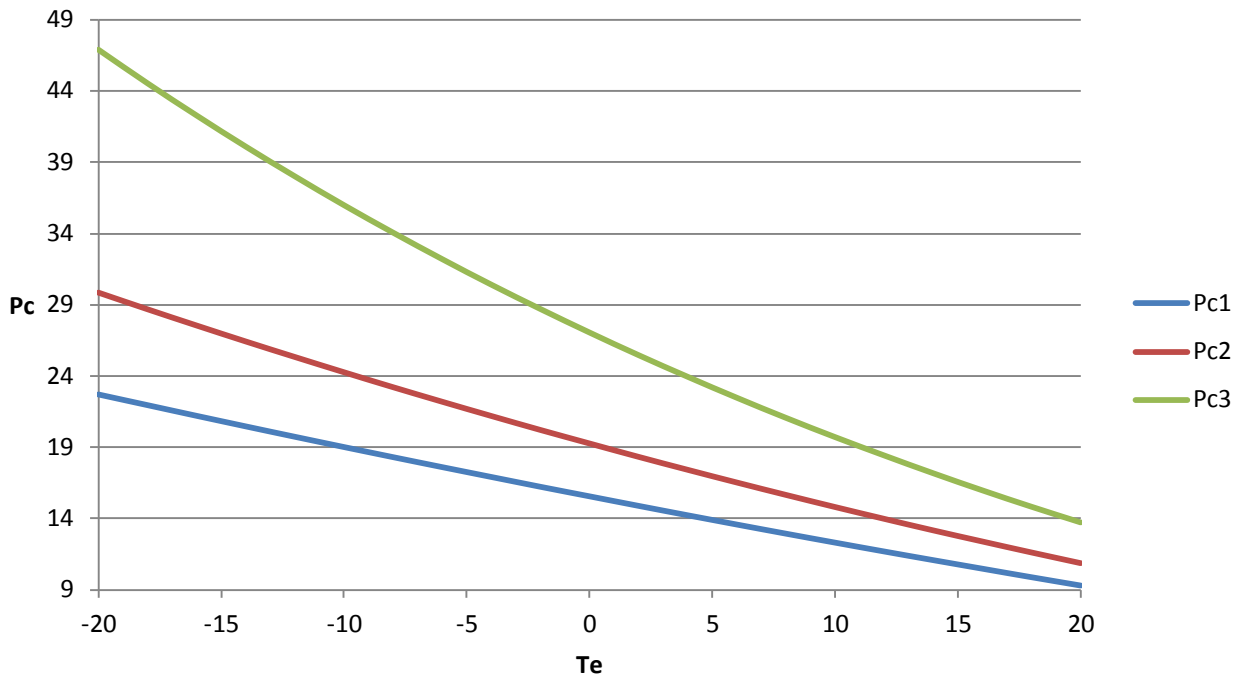
Διάγραμμα 9.74 P_c βαθμίδων-Τεναporation για R-410A και $T_c=40$



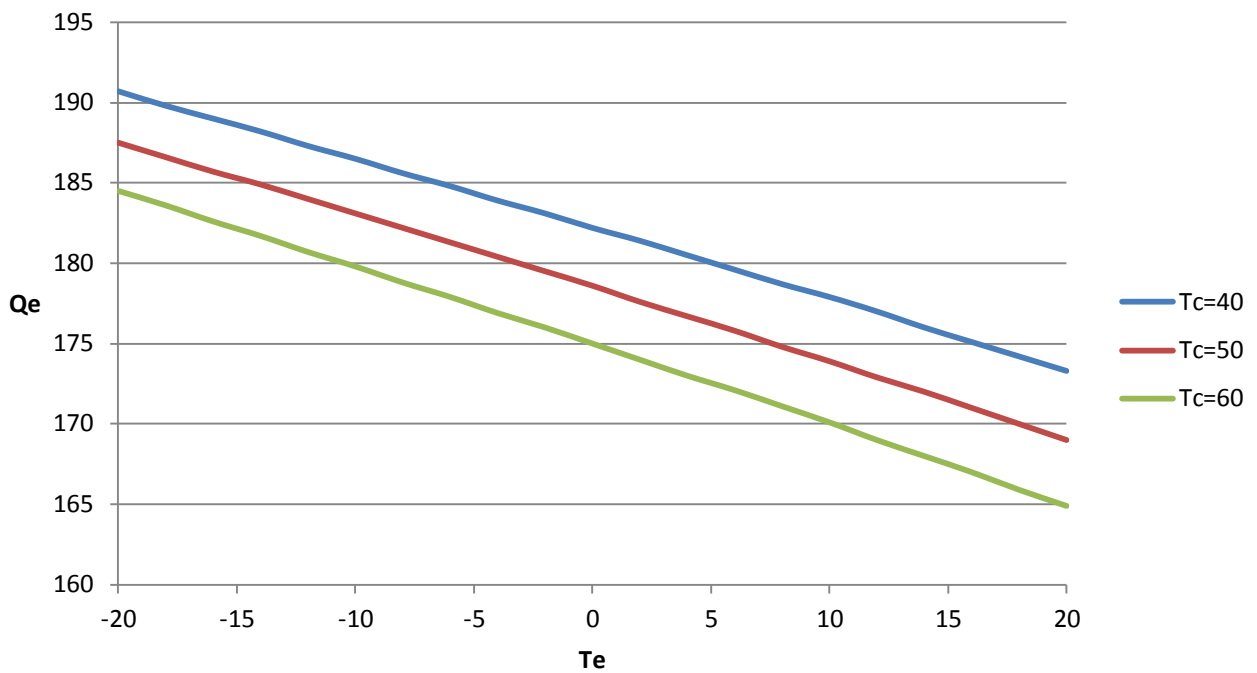
Διάγραμμα 9.75 P_c βαθμίδων-Τεναporation για R-410A και $T_c=50$



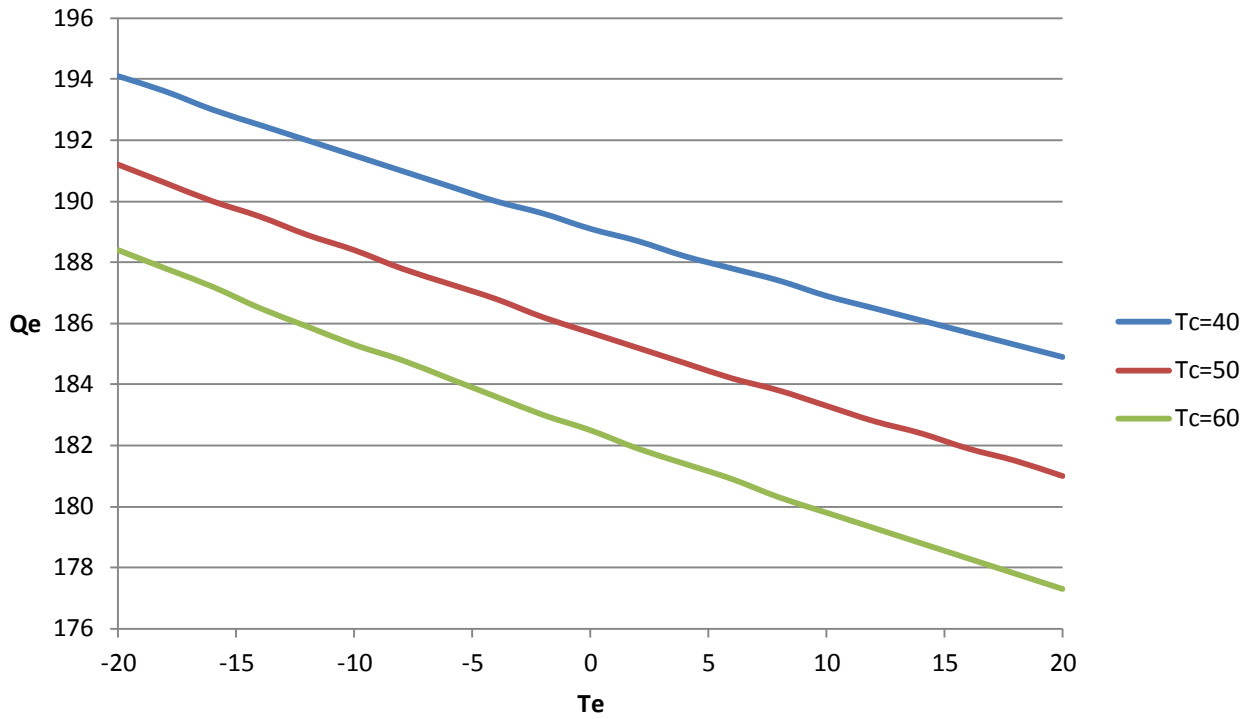
Διάγραμμα 9.76 P_c βαθμίδων-Τevaporation για R-410A και $T_c=60$



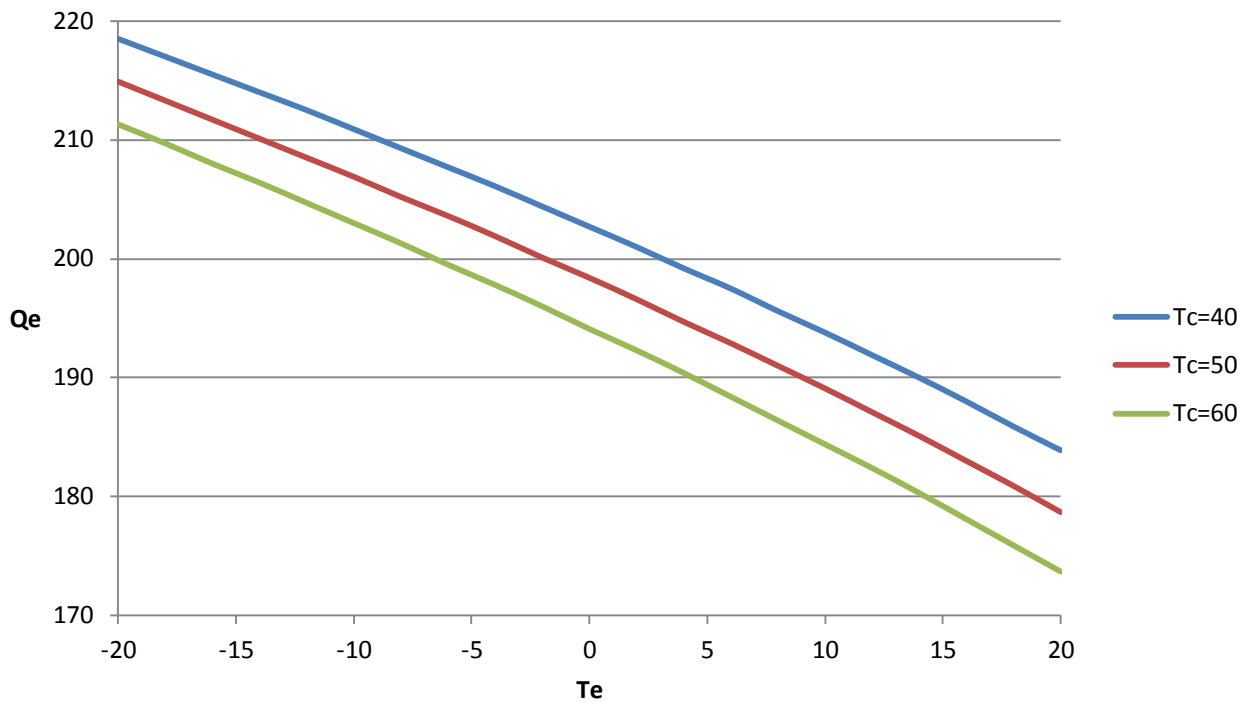
Διάγραμμα 9.77 Q_e -Τevaporation για R-134a



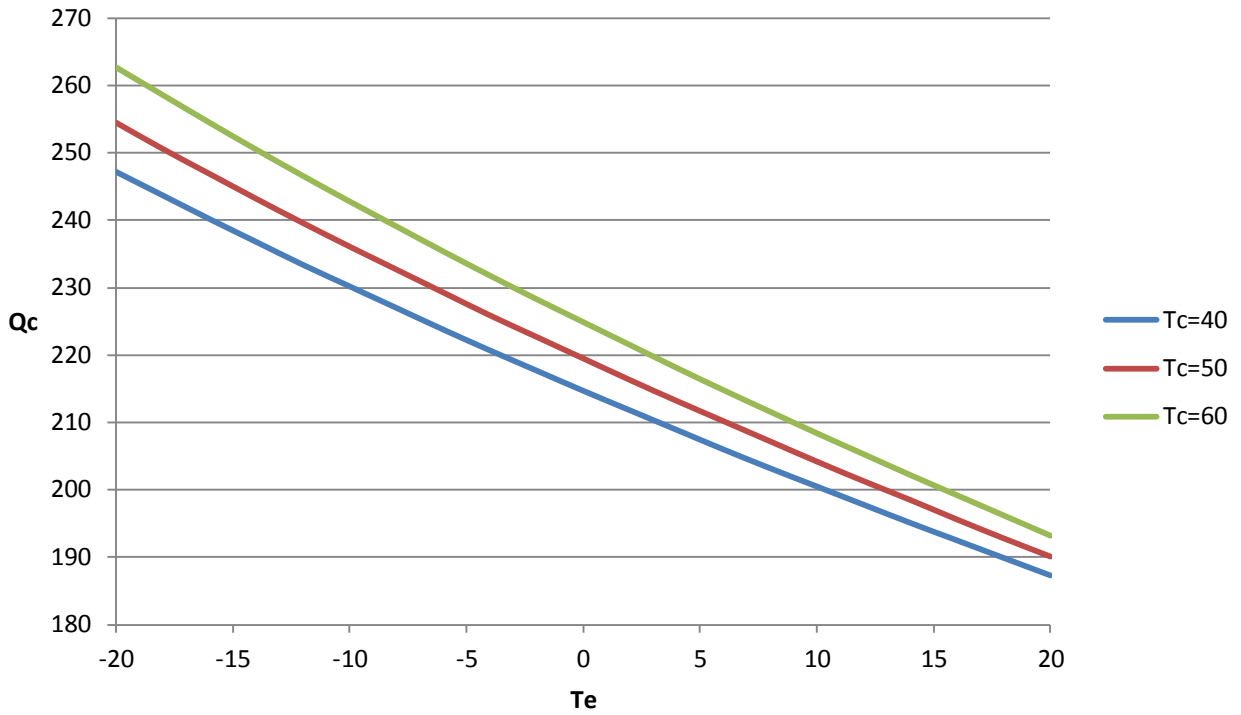
Διάγραμμα 9.78 Qe-Tevaporation για R-245fa



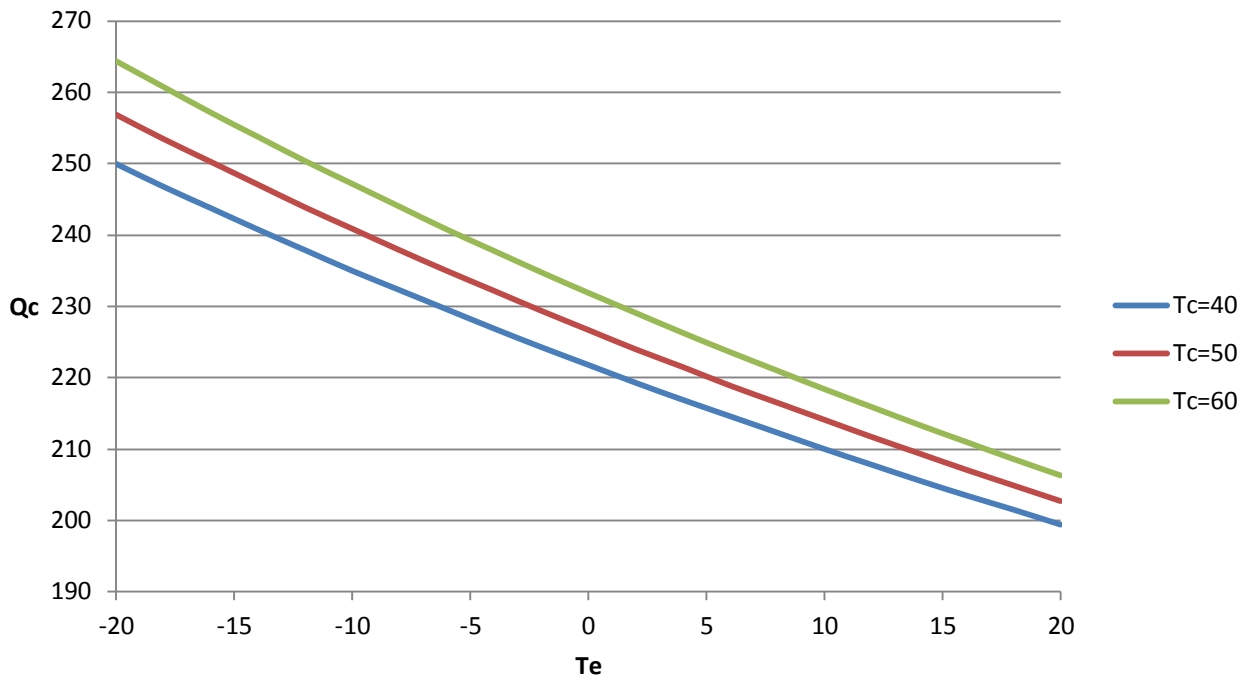
Διάγραμμα 9.79 Qe-Tevaporation για R-410A



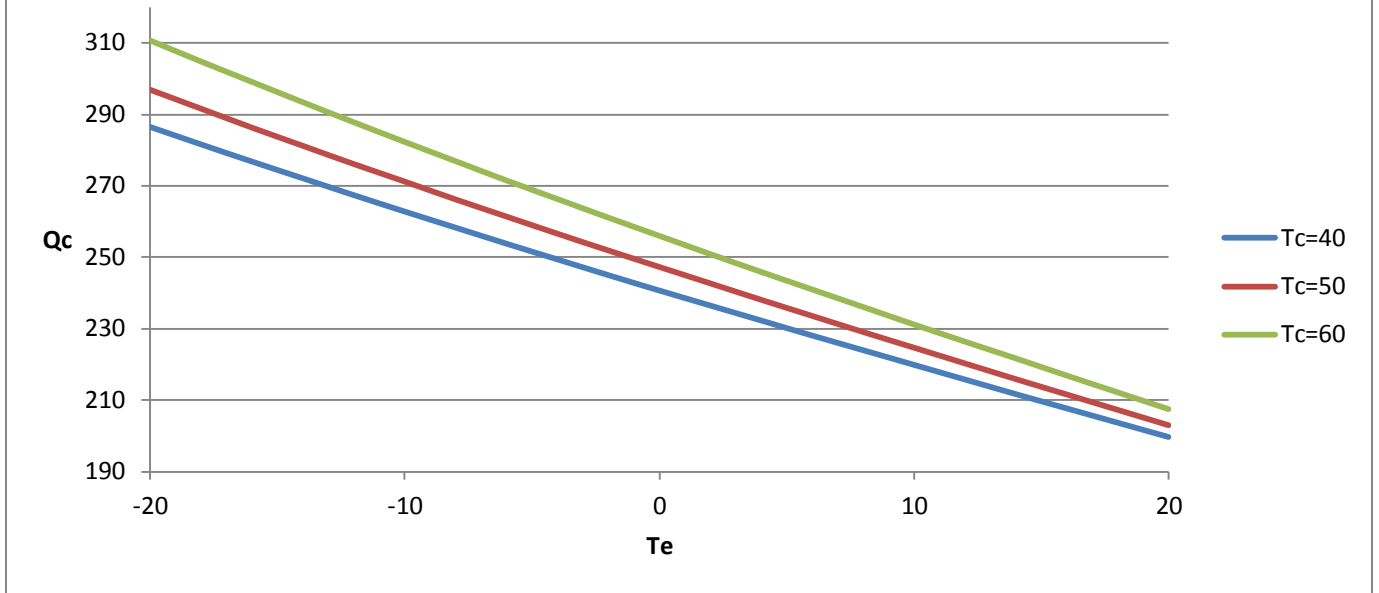
Διάγραμμα 9.80 Qc-Τevaporation για R-134a



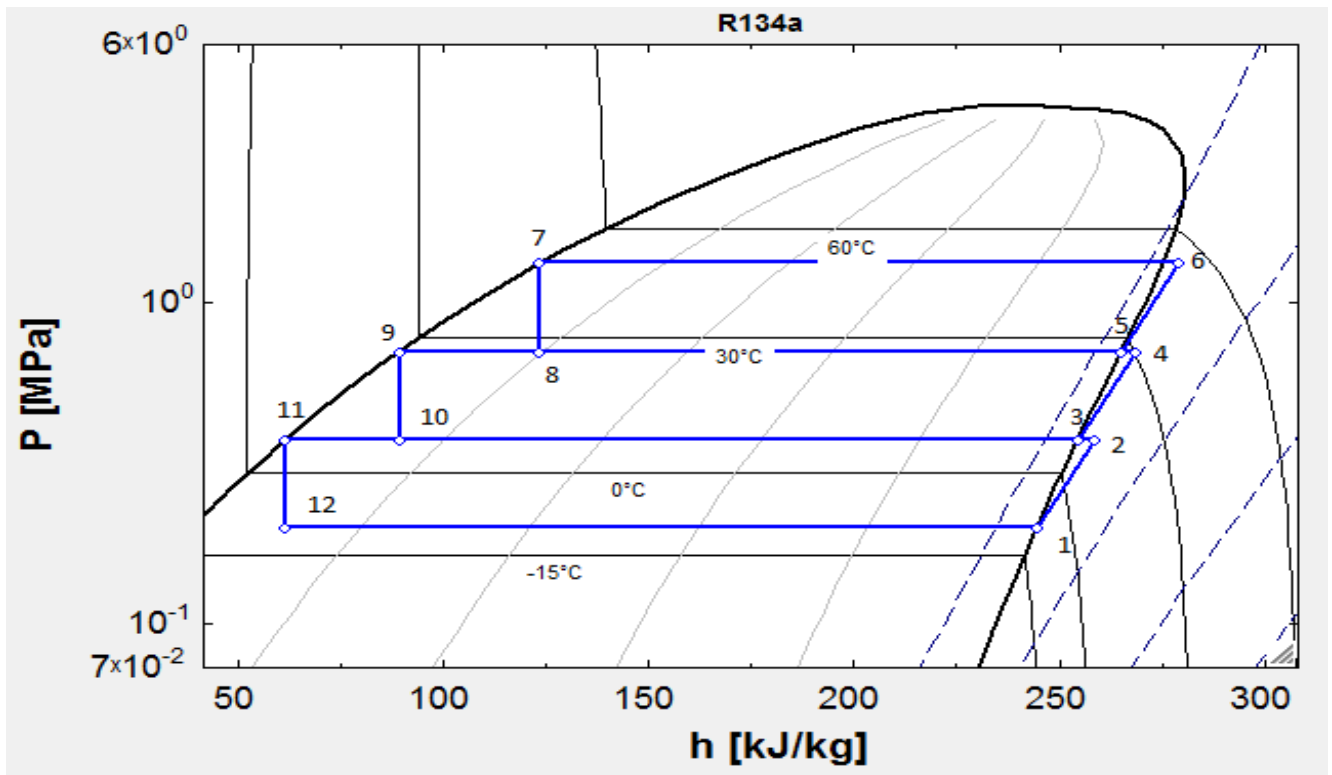
Διάγραμμα 9.81 Qc-Τevaporation για R-245fa



Διάγραμμα 9.82 Qc-Tevaporation για R-410A



Για να ολοκληρώσουμε το κεφάλαιο παραθέτουμε το διάγραμμα P-h του τριβάθμιου κύκλου μηχανικής συμπίεσης ατμών για $T_e=-10$ °C, $T_c=50$ °C και ψυκτικό μέσο R-134a.



Εικόνα 9.6 Διάγραμμα P-h τριβάθμιου κύκλου

9.4 Ψυκτική διάταξη σύνδεσης κλιμακωτού καταρράκτη (Cascade).

Οι ψυκτικές εγκαταστάσεις πολυβάθμιας συμπίεσης, συνδέσεως σε σειρά, παρά το γεγονός ότι το αρχικό κόστος τους είναι σχετικά υψηλό, βρίσκουν εφαρμογή σε πολλές βιομηχανικές εγκαταστάσεις μεσαίου και μεγάλου μεγέθους συνεχούς λειτουργίας, για θερμοκρασίες ατμοποίησης από $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ έως $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, λόγω του χαμηλότερου κόστους λειτουργίας, σε σύγκριση με μονοβάθμιες ψυκτικές εγκαταστάσεις.

Σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες της τάξεως των $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ έως $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$, γίνεται αντισυμβατική έως αδύνατη και η λειτουργία των πολυβάθμιων ψυκτικών εγκαταστάσεων, συνδέσεως σε σειρά, δηλαδή λειτουργίας με ένα και μόνο ψυκτικό μέσο, εξ' αιτίας των θερμικών ιδιοτήτων των ψυκτικών μέσων και της υπερβολικής αυξήσεως της διαφοράς πίεσεως μεταξύ της πρώτης και της τελευταίας βαθμίδας της ψυκτικής εγκαταστάσεως.

Στις περιπτώσεις αυτές χρησιμοποιείται για κάθε βαθμίδα ξεχωριστό ψυκτικό μέσο και διαχωρίζεται πλήρως, με κλειστό κάθε φορά κύκλωμα, η κυκλική λειτουργία των διάφορων βαθμίδων. Στην περίπτωση αυτή δηλαδή χρησιμοποιούμε περισσότερες μονοβάθμιες ψυκτικές εγκαταστάσεις κλειστού κυκλώματος, όπου η ψυκτική ισχύς κάθε βαθμίδας χρησιμεύει για την απομάκρυνση της θερμότητας συμπυκνώσεως της προηγούμενης χαμηλής βαθμίδας. Η διάταξη αυτή των ψυκτικών εγκαταστάσεων χαρακτηρίζεται ως διάταξη σύνδεσεως κλιμακωτού καταρράκτη (cascade). [20],[21]

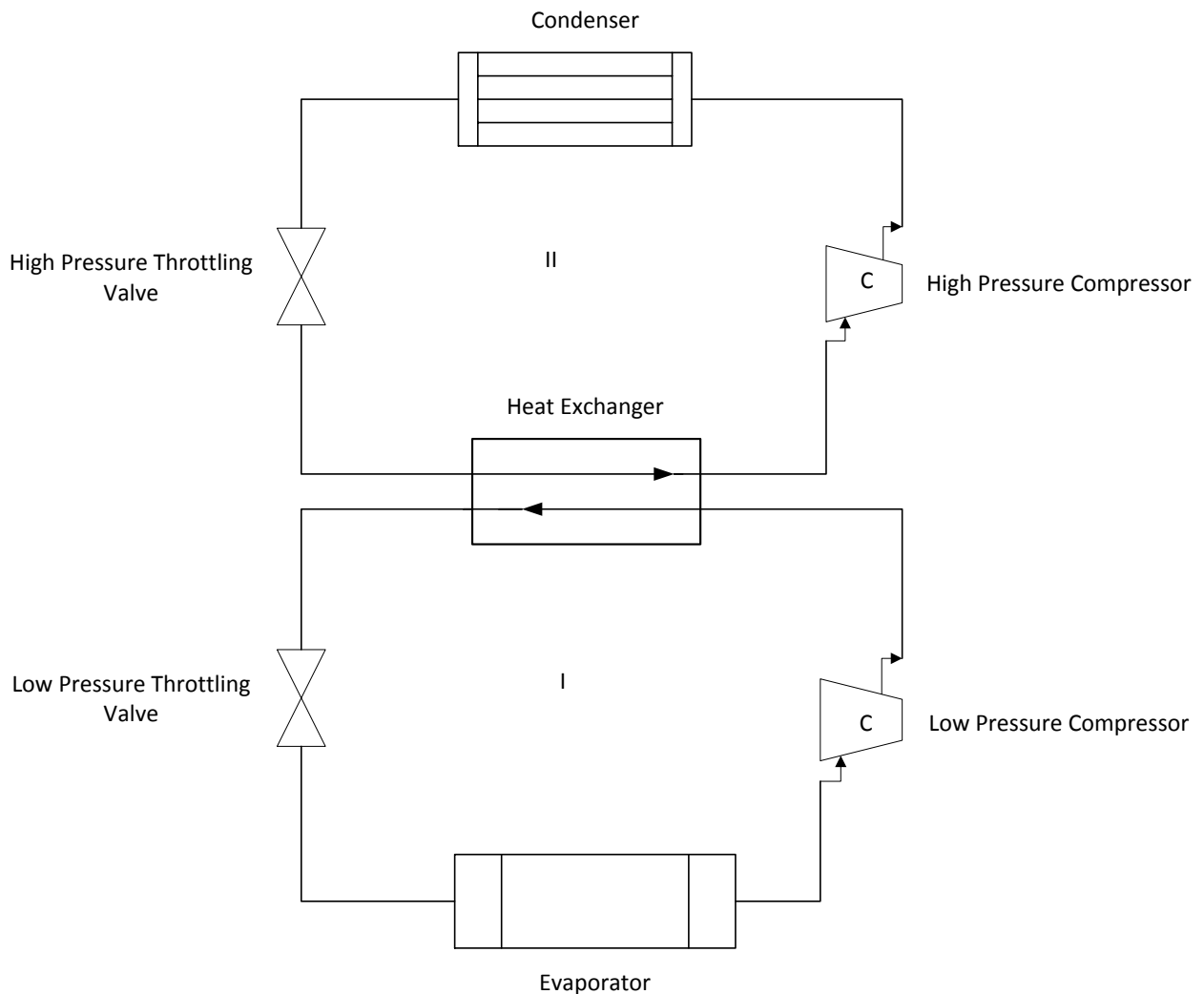
Η ψύξη της τελευταίας βαθμίδας αποτελεί την ωφέλιμη ψύξη, η οποία τελικά παράγεται από την ψυκτική εγκατάσταση και αξιοποιείται για την εκάστοτε συγκεκριμένη εφαρμογή.

Μπορούμε ανάλογα με την εφαρμογή και την ψύξη που επιθυμούμε να διαλέξουμε διάφορα ζεύγη εργαζόμενων ψυκτικών μέσων. Για διβάθμιες ψυκτικές εγκαταστάσεις σύνδεσεως Cascade όπως αυτή με την οποία θα ασχοληθούμε στην συνέχεια, γνωστά ζεύγη εργαζόμενων μέσων είναι τα ακόλουθα:

-Αιθάνιο (C_2H_6) ή αιθυλένιο (C_2H_4) για την χαμηλή βαθμίδα και αμμωνία (NH_3) για την υψηλή βαθμίδα.

-Ψυκτικό μέσο Freon 13 για την χαμηλή βαθμίδα και ψυκτικό μέσο Freon 22 για την υψηλή βαθμίδα.

Σχηματική αναπαράσταση ψυκτικού κυκλώματος συνδέσεως κλιμακωτού καταρράκτη δίδεται παρακάτω.



Εικόνα 9.7 Σχηματική αναπαράσταση ψυκτικού κυκλώματος συνδέσεως κλιμακωτού καταρράκτη

Θα εργαστούμε με 4 ψυκτικά μέσα τα οποία αναφέρθηκαν και μελετήθηκαν στον μονοβάθμιο κύκλο μηχανικής συμπίεσης ατμών. Η εκλογή των ψυκτικών μέσων αυτών έγινε με βάση την τιμή του συντελεστή συμπεριφοράς του διβάθμιου κύκλου.

- R-134a

- R-12

- R-245fa

- R-410A

Με αυτά τα ψυκτικά μέσα θα δημιουργηθούν ζεύγη, ανάλογα με την κρίσιμη θερμοκρασία τους με σκοπό την τοποθέτηση του καθενός είτε στην βαθμίδα I είτε στην βαθμίδα II ανάλογα με το ζεύγος τους για να λάβουμε ως αποτέλεσμα τον βέλτιστο συντελεστή συμπεριφοράς της ψυκτικής εγκατάστασης.

Τώρα για τα προαναφερθέντα ψυκτικά μέσα δίδουμε τον πίνακα των ορίων του συντελεστή συμπεριφοράς για όλα τα πιθανά ζεύγη των ψυκτικών μέσων. Από τον πίνακα αυτό εκλέγουμε τα τρία ζεύγη τα οποία μας επιστρέφουν τον υψηλότερο συντελεστή συμπεριφοράς και εργαζόμαστε με αυτά για την παραγωγή των ζητούμενων διαγραμμάτων. Να σημειωθεί ότι ο πίνακας κατασκευάστηκε με την βοήθεια του EES.

Δοκιμή	Βαθμίδα I	Βαθμίδα II	COP (για $T_{ev} = -20$ και 20 °C)	
1	R-134a	R-12	2,446	6,590
2	R-134a	R-245fa	2,491	6,738
3	R-134a	R-410A	2,262	6,089
4	R-12	R-134a	2,423	6,554
5	R-12	R-245fa	2,507	6,759
6	R-12	R-410A	2,276	6,106
7	R-245fa	R-12	2,479	6,690
8	R-245fa	R-134a	2,440	6,633
9	R-245fa	R-410A	2,291	6,176
10	R-410A	R-12	2,405	6,394
11	R-410A	R-134a	2,368	6,342
12	R-410A	R-245fa	2,449	6,534

Ακολούθως θα ονομάσουμε τις περιπτώσεις μελέτης με σκοπό την συντόμηση κειμένου στα διαγράμματα.

1: R-12~R-245fa

2: R-134a~R-245fa

3: R-245fa-R-12

Σημαντική παράμετρος στην λειτουργία του ψυκτικού κύκλου συνδέσεως κλιμακωτού καταρράκτη, είναι η διαφορά θερμοκρασίας ΔT μεταξύ της θερμοκρασίας συμπύκνωσης του ψυκτικού μέσου της χαμηλής βαθμίδας και της θερμοκρασίας ατμοποίησης του ψυκτικού μέσου της υψηλής βαθμίδας. Αυτή η διαφορά θερμοκρασίας λαμβάνεται για το πρόβλημα μας ίση με $5\text{ }^\circ\text{C}$ διότι η τιμή αυτή αποτελεί τυπική τιμή για εναλλάκτη θερμότητας για την εγκατάσταση την οποία μελετάμε. Επίσης η χαμηλή θερμοκρασία της υψηλής βαθμίδας λαμβάνεται από την εξίσωση:

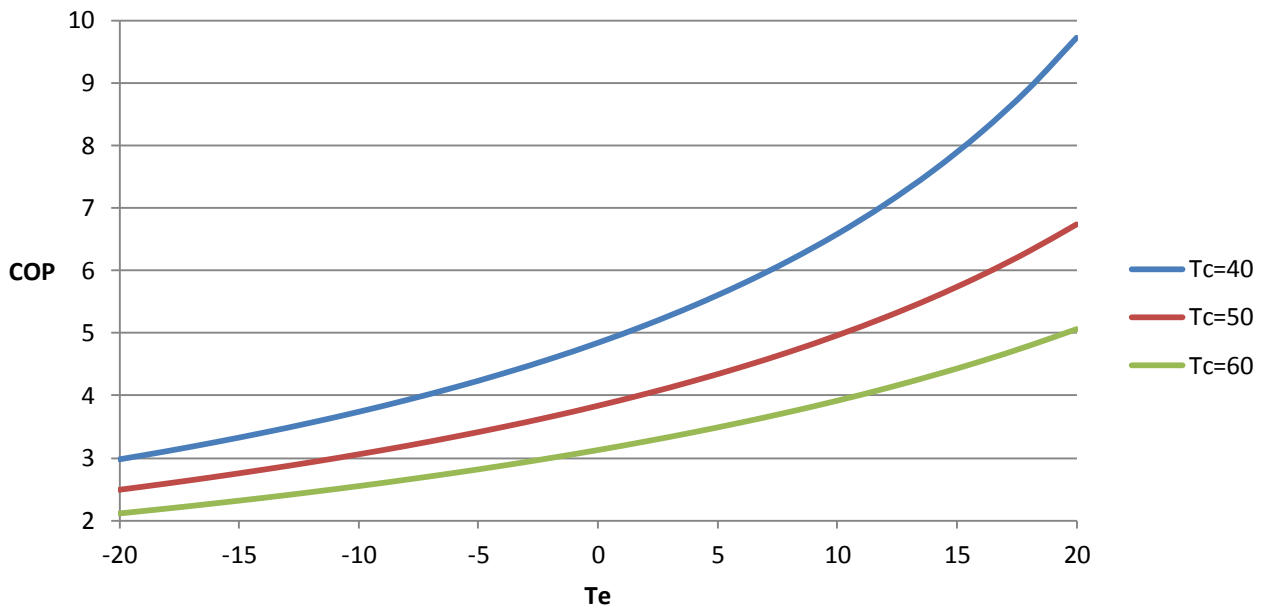
$$T_M = \frac{T_{\text{condensation}} + T_{\text{evaporation}}}{2}, \quad (9.12)$$

ως η μέση θερμοκρασία μεταξύ της θερμοκρασίας ατμοποίησης του κύκλου και της θερμοκρασίας συμπυκνώσεως αυτού.

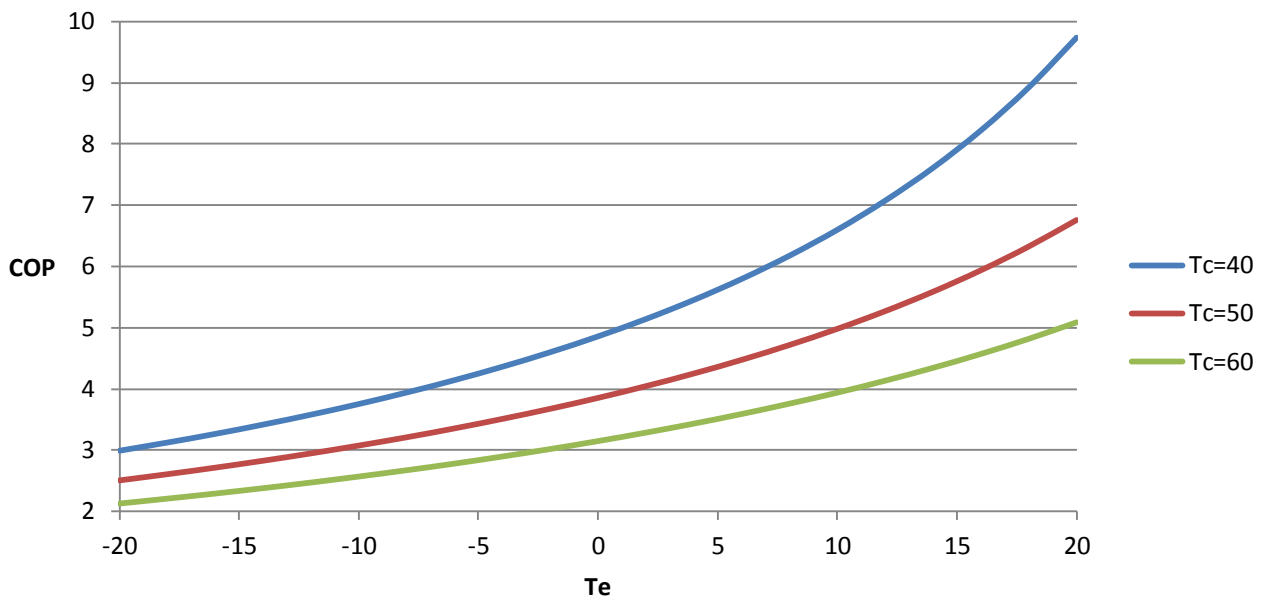
Λαμβάνουμε τα εξής διαγράμματα για τα τρία επικρατέστερα ζεύγη ψυκτικών μέσων, συντελεστής συμπεριφοράς ψυκτικής εγκατάστασης, η συνολικά απορροφούμενη ισχύς από τους δύο συμπιεστές, η ισχύς στον ατμοποιητή, η ισχύς στον συμπυκνωτή και ο βαθμός απόδοσης του εναλλάκτη θερμότητας, όλα τα παραπάνω σε συνάρτηση με την θερμοκρασία ατμοποίησης για τις δεδομένες τρεις θερμοκρασίες συμπυκνώσεως $40, 50, 60\text{ }^\circ\text{C}$ και για ισεντροπικούς βαθμούς απόδοσης για τους συμπιεστές ίσους με $0,9$.

Στα διαγράμματα που ακολουθούν το ψυκτικό μέσο που αναγράφεται πρώτο θα αναφέρεται στην χαμηλή βαθμίδα ενώ το ψυκτικό μέσο το οποίο αναγράφεται στην συνέχεια θα αναφέρεται στην υψηλή βαθμίδα. Τα δύο ψυκτικά μέσα θα διαχωρίζονται με (,) στους τίτλους των διαγραμμάτων.

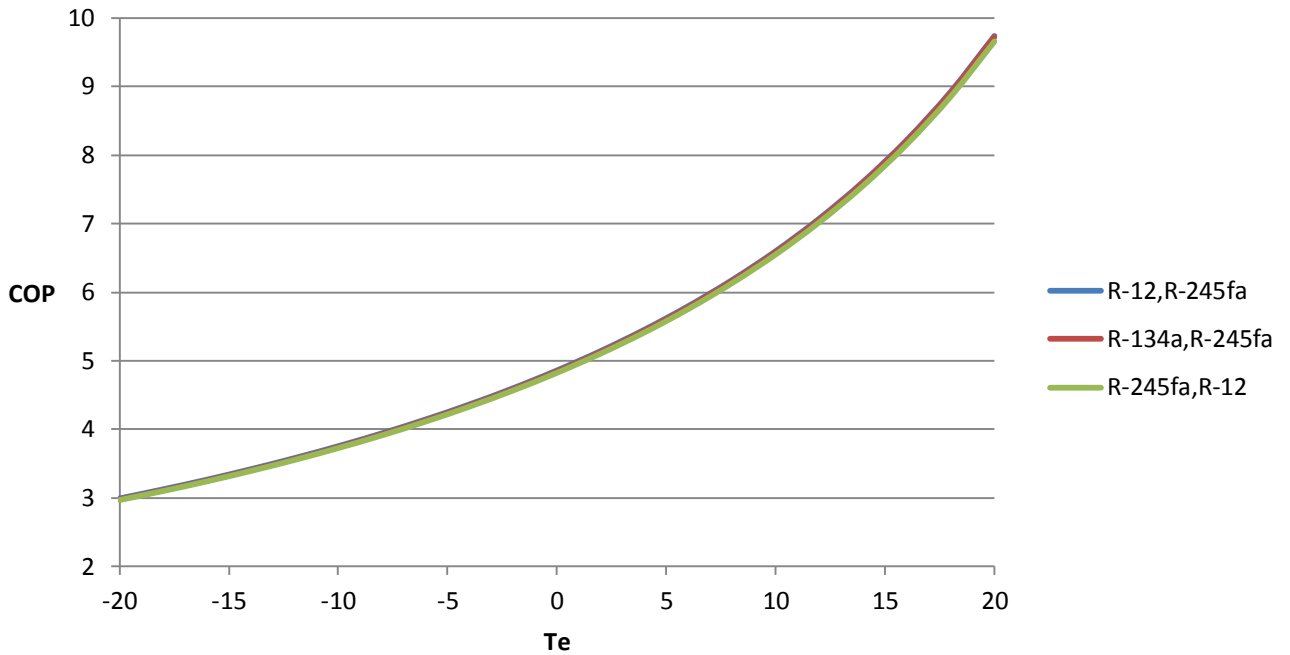
**Διάγραμμα 9.84 COP-Tevaporation για
R-134a,R-245fa**



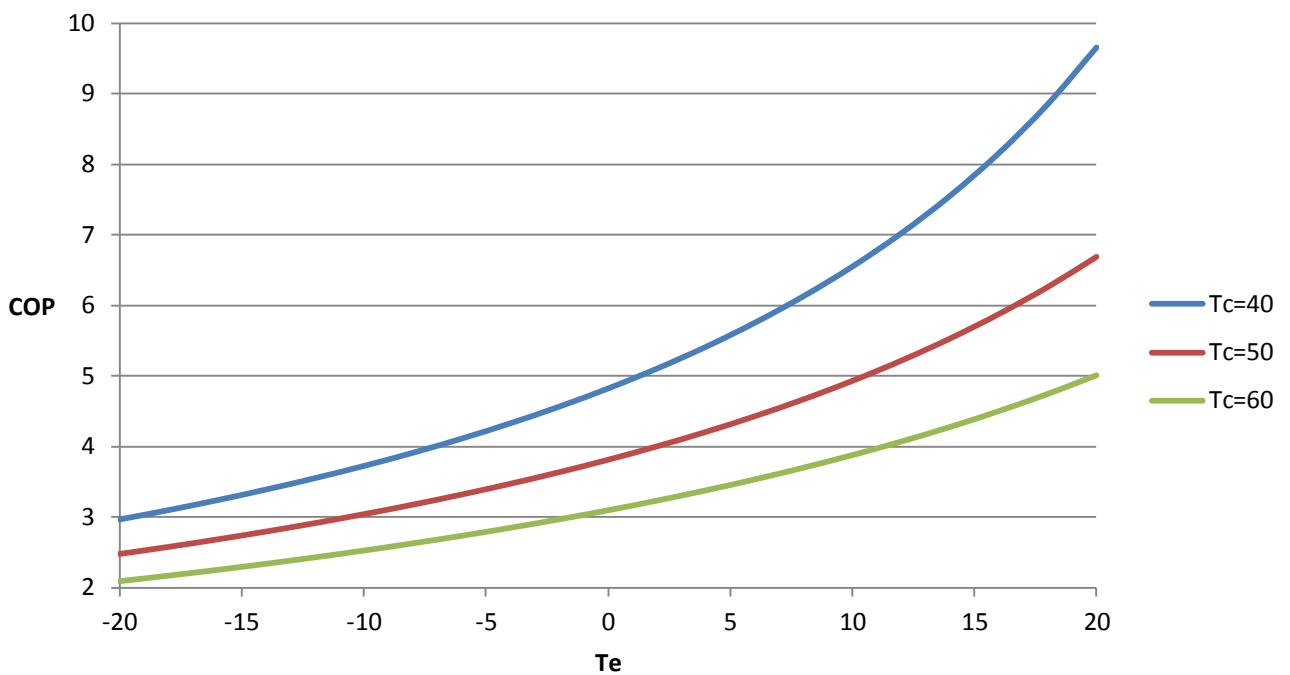
**Διάγραμμα 9.83 COP-Tevaporation για
R-12,R-245fa**



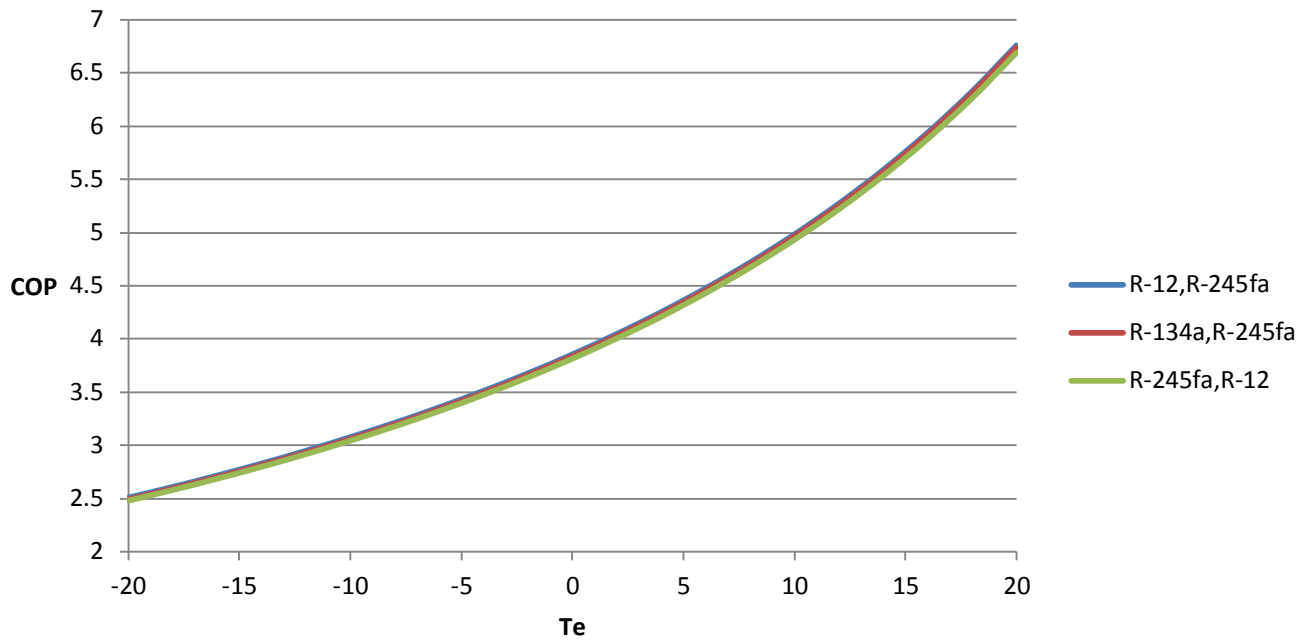
Διάγραμμα 9.86 COP-Tevaporation για $T_c=40\text{ }^\circ\text{C}$



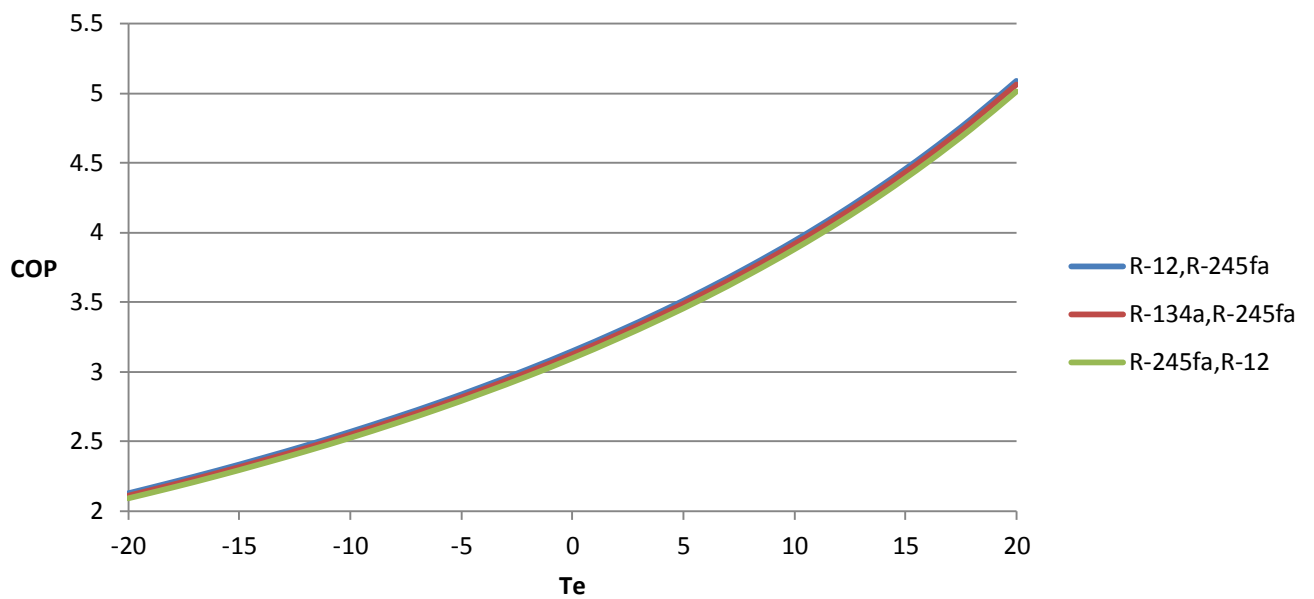
Διάγραμμα 9.85 COP-Tevaporation για R-245fa,R-12



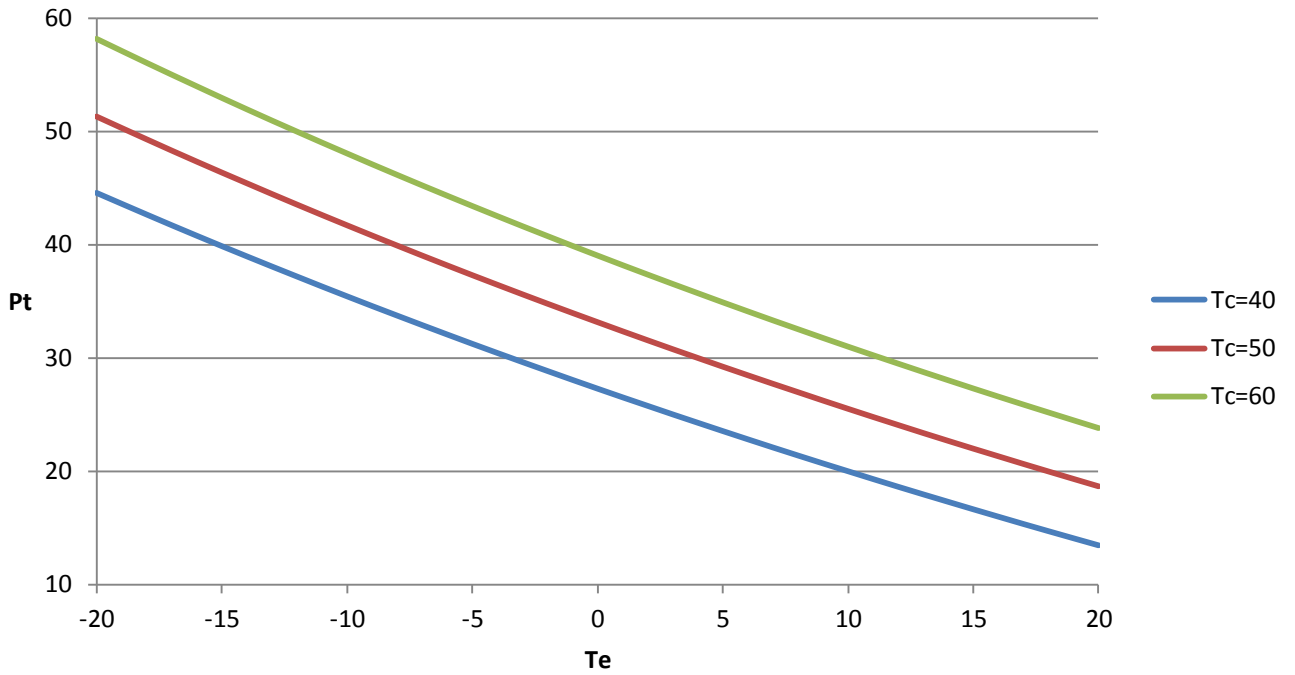
Διάγραμμα 9.87 COP-Tevaporation για Tc=50 °C



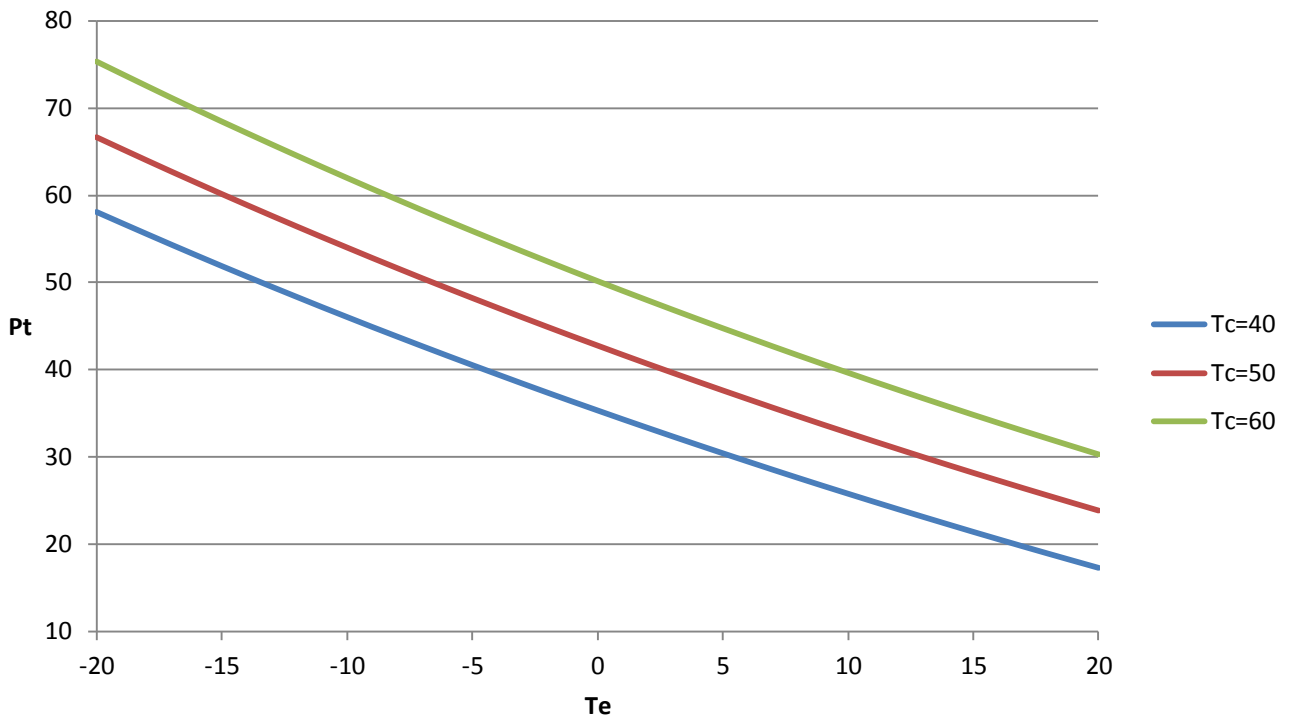
Διάγραμμα 9.88 COP-Tevaporation για Tc=60 °C



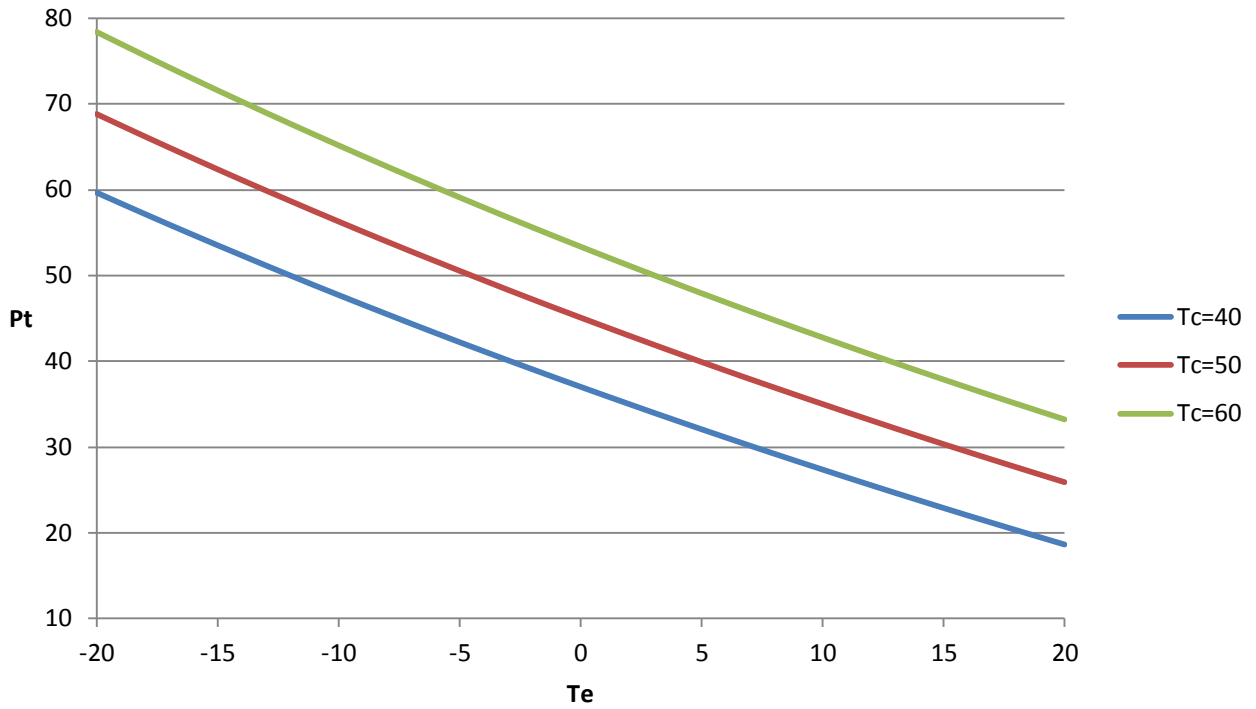
Διάγραμμα 9.89 Pt-Tevaporation για R-12,R-245fa



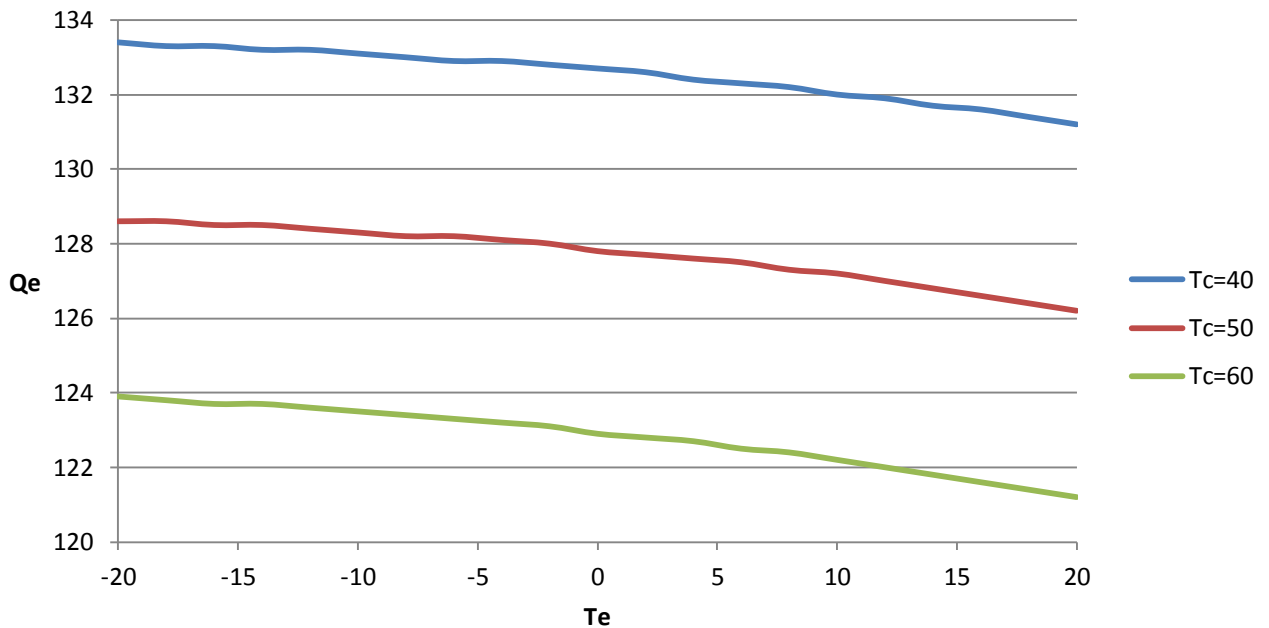
Διάγραμμα 9.90 Pt-Tevaporation για R-134a,R-245fa



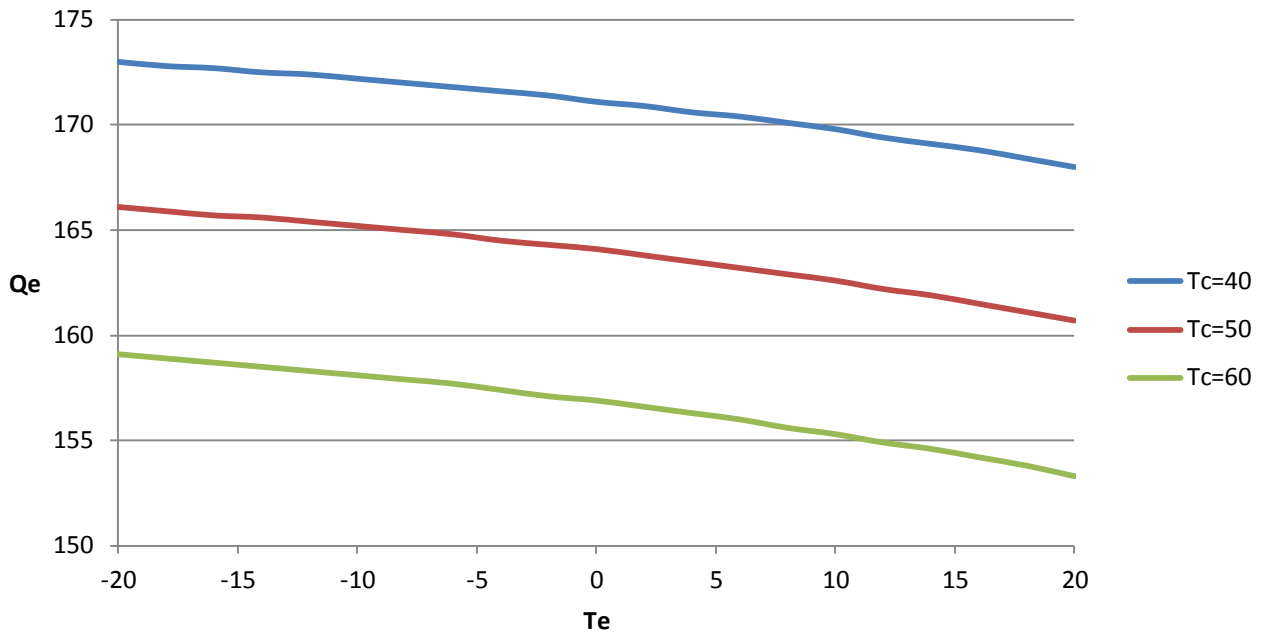
Διάγραμμα 9.91 Pt-Tevaporation για R-245fa,R-12



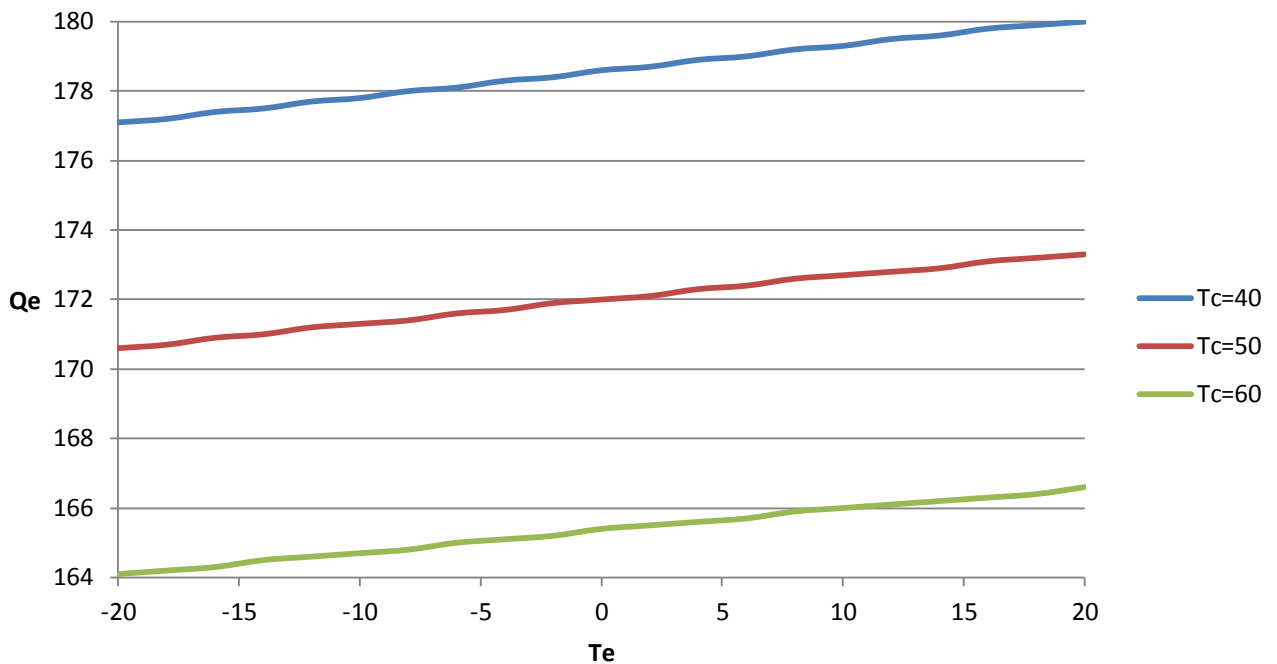
Διάγραμμα 9.92 Qevaporation-Tevaporation για R-12,R-245fa



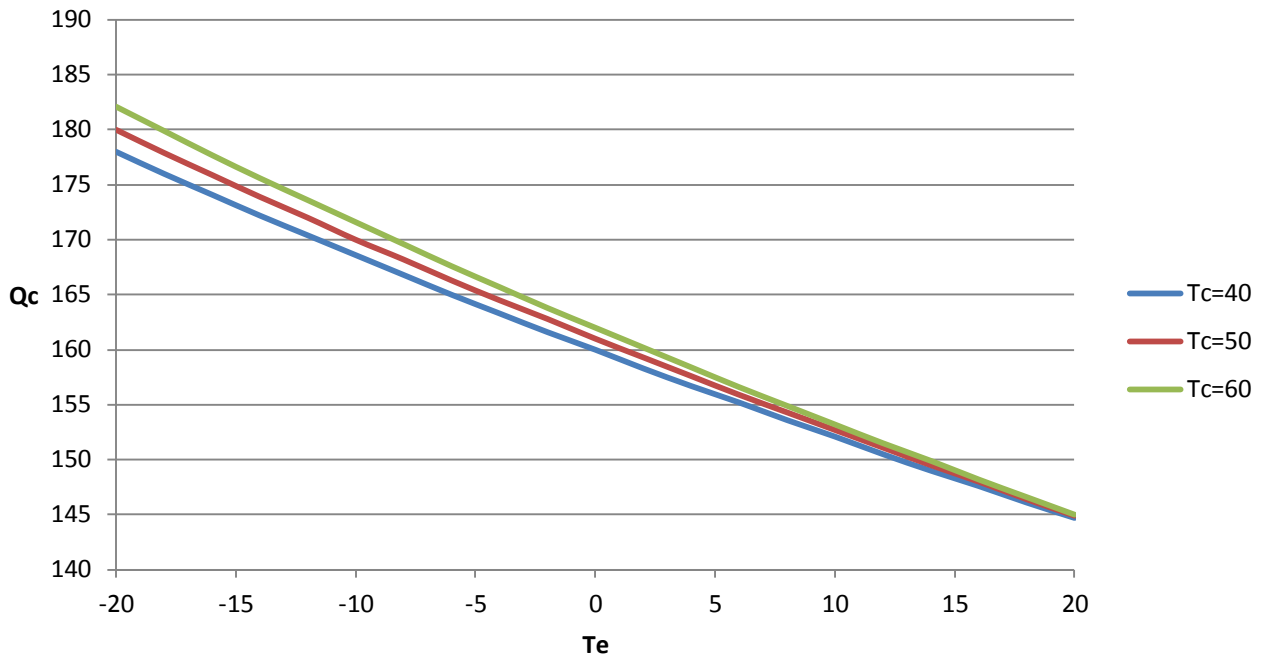
Διάγραμμα 9.93 Qevaporation-Tevaporation για R-134a,R-245fa



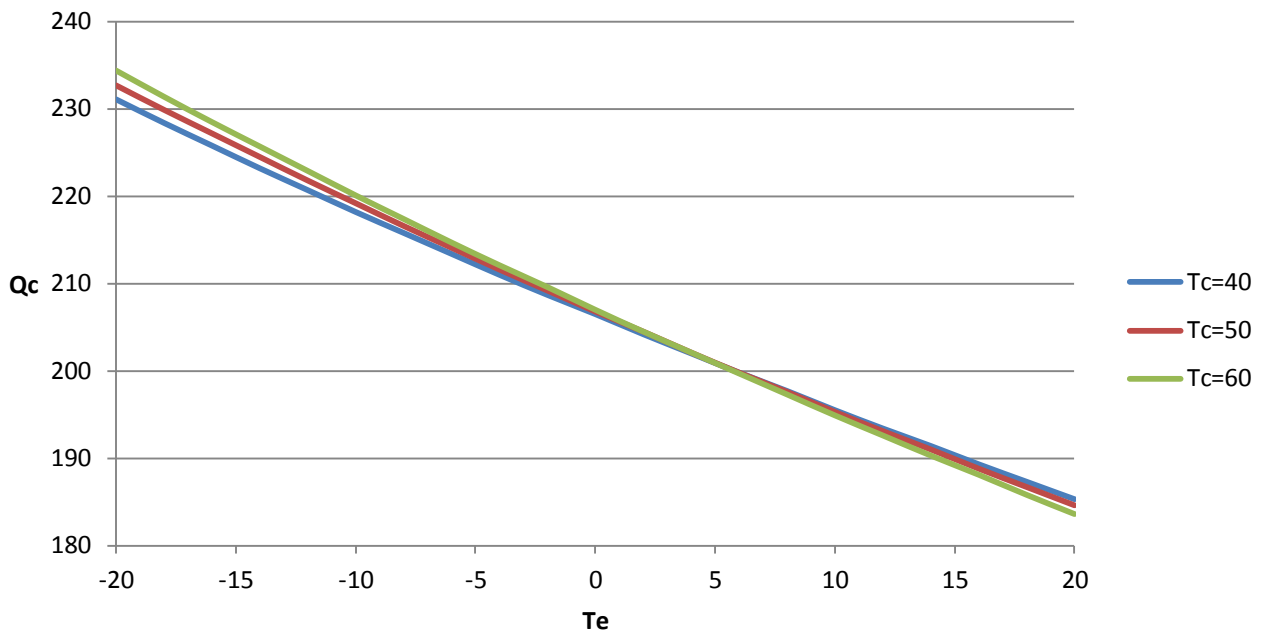
Διάγραμμα 9.94 Qevaporation-Tevaporation για R-245fa,R-12



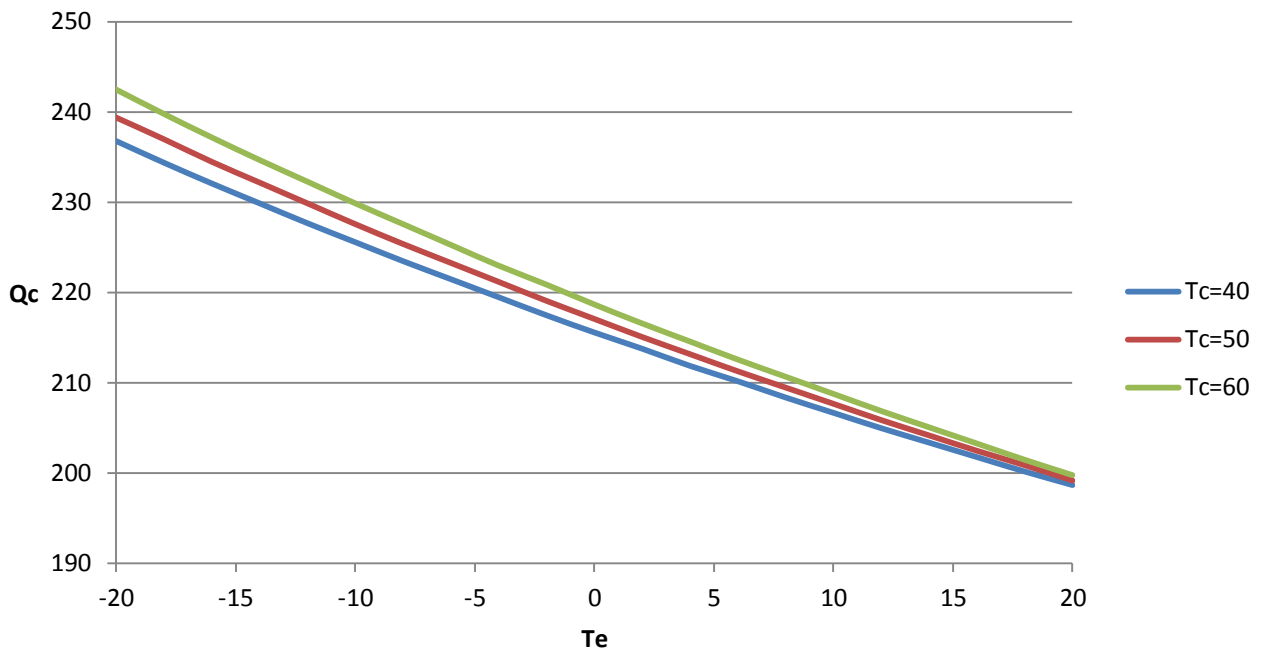
Διάγραμμα 9.95 Qcondensation-Tevaporation για R-12,R-245fa



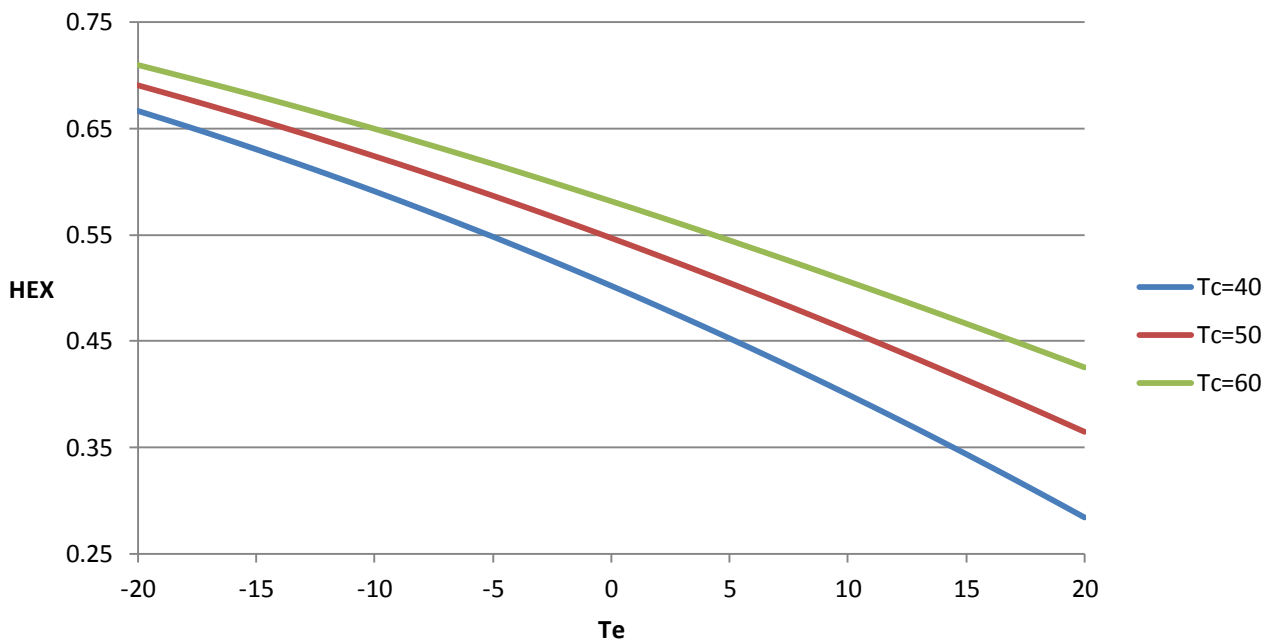
Διάγραμμα 9.96 Qcondensation-Tevaporation για R-134a,R-245fa



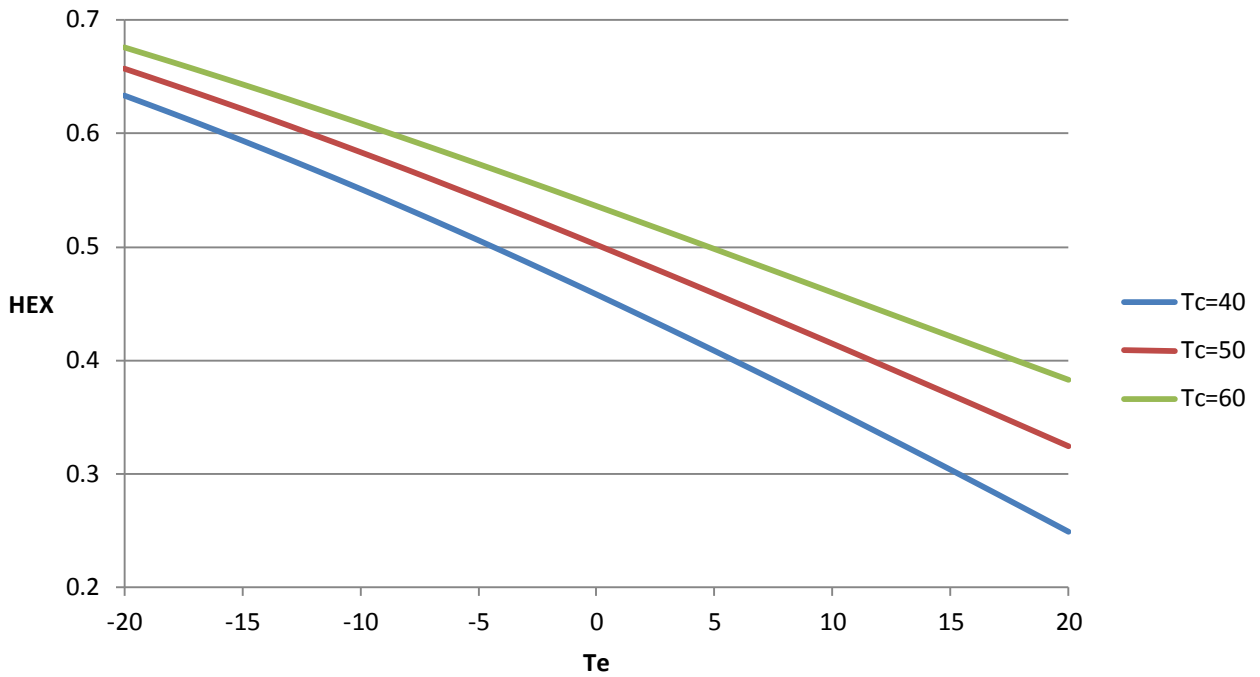
Διάγραμμα 9.97 $Q_{\text{condensation-Tevaporation}}$ για R-245fa,R-12



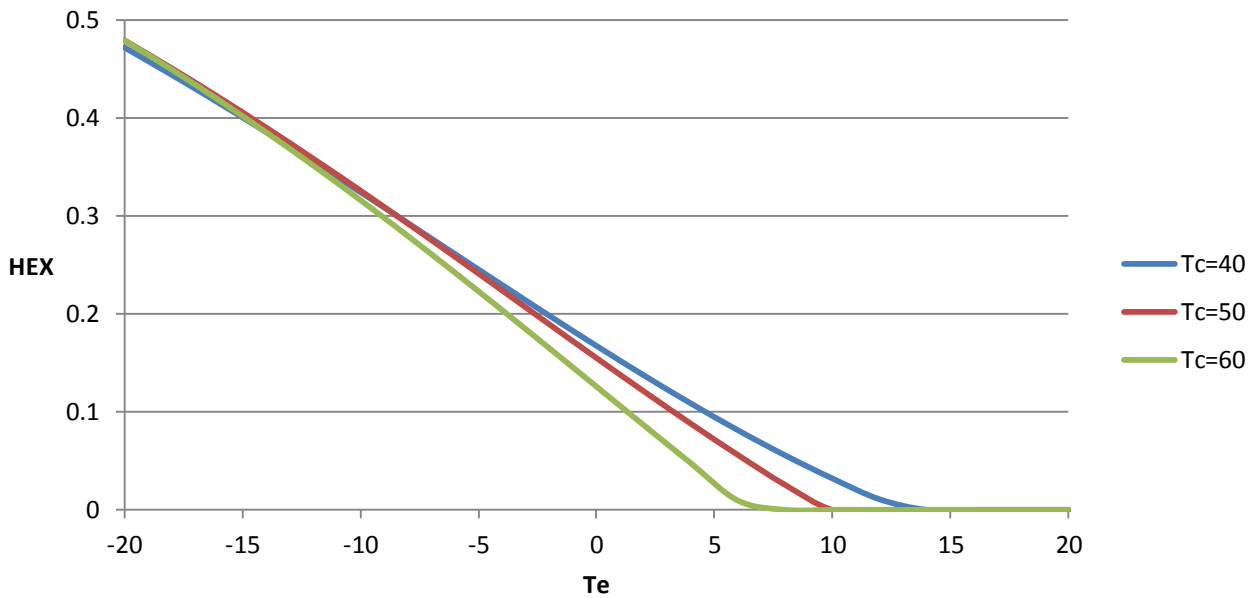
Διάγραμμα 9.98 $HEX_{\text{eff-Tevaporation}}$ για R-12,R-245fa



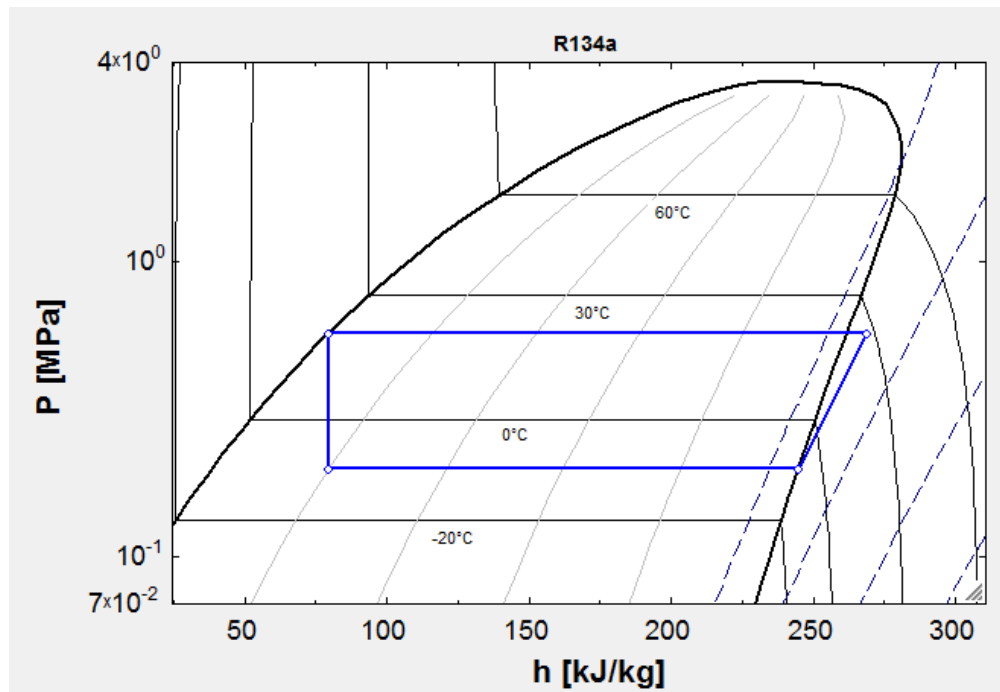
Διάγραμμα 9.99 HEXeff-Tevaporation για R-134a,R-245fa



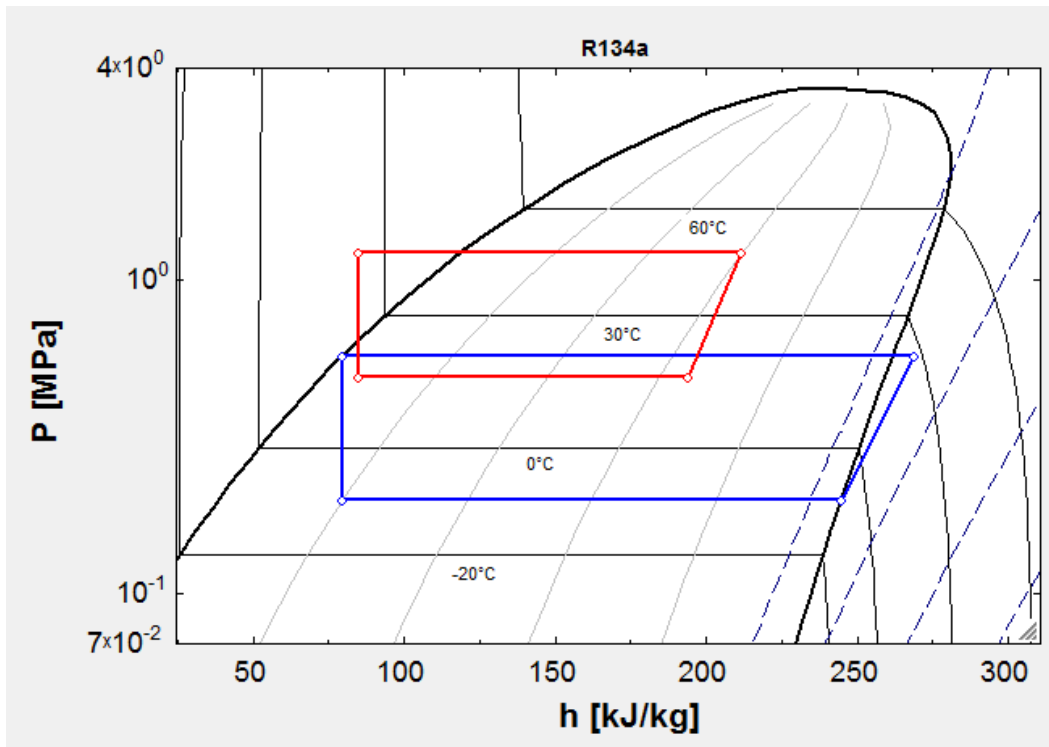
Διάγραμμα 9.100 HEXeff-Tevaporation για R-245fa,R-12



Σε αυτό το σημείο είναι πολύ ενδιαφέρον να δείξουμε τον τρόπο με τον οποίο θα εργαστούμε για να δημιουργήσουμε το διάγραμμα P-h για τον ψυκτικό κύκλο συνδέσεως κλιμακωτού καταρράκτη. Αρχικά θα εργαστούμε όπως και στον μονοβάθμιο κύκλο μηχανικής συμπίεσης ατμών. Έτσι εάν υποθέσουμε ότι έχουμε στην χαμηλή βαθμίδα ψυκτικό μέσο R-134a και στην υψηλή βαθμίδα ψυκτικό μέσο R-12 με θερμοκρασία ψύξης χαμηλής βαθμίδας $T_e = -10\text{ }^\circ\text{C}$ και θερμοκρασία συμπυκνώσεως υψηλής βαθμίδας $T_c = 50\text{ }^\circ\text{C}$ παίρνουμε το ακόλουθο διάγραμμα, με τον τρόπο που έχει προαναφερθεί.

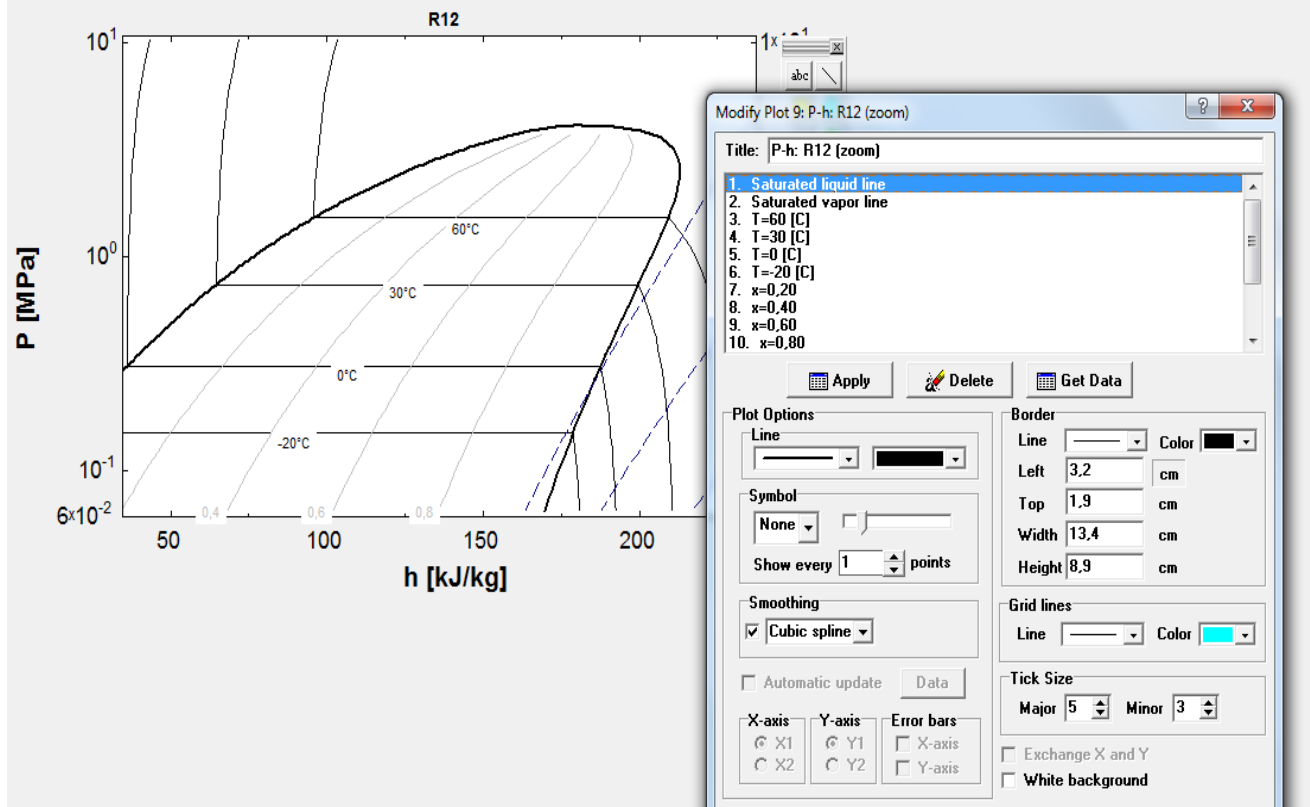


Τώρα θα δημιουργήσουμε με την βοήθεια του Overlay Plot, τον κύκλο της υψηλής βαθμίδος επάνω στο διάγραμμα βάσης το οποίο είναι το διάγραμμα P-h του R-134a χρησιμοποιώντας ακριβώς την ίδια διαδικασία με πριν με απλή αλλαγή των ορισμάτων. Έτσι παίρνουμε την ακόλουθη μορφή.

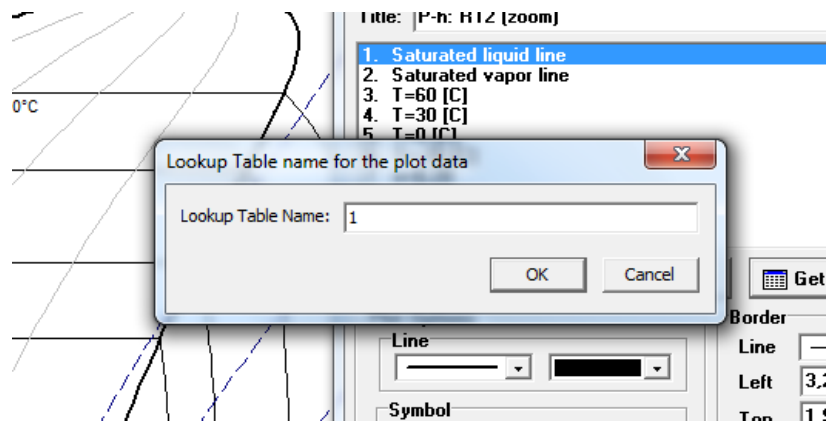


Και με αυτόν τον τρόπο φτάνουμε στην χάραξη της καμπύλης υγροποίησης/ατμοποίησης για το R-12 με σκοπό την ολοκλήρωση του διαγράμματος. Ακολουθούμε την εξής διαδικασία:

Αρχικά με όμοιο τρόπο θα δημιουργήσουμε το διάγραμμα P-h για το R-12 και πατώντας δεξί κλικ επάνω στην επιφάνεια του διαγράμματος και θα εμφανιστεί αμέσως ο πίνακας Modify Plot ο οποίος μας επιτρέπει να τροποποιήσουμε το διάγραμμα και περιέχει τα δεδομένα για όλες τις γραμμές οι οποίες σχηματίζουν το διάγραμμα. Πηγαίνοντας στην αρχή, διαλέγουμε την επιλογή 1. Saturated liquid line και ύστερα το πλήκτρο Get Data.



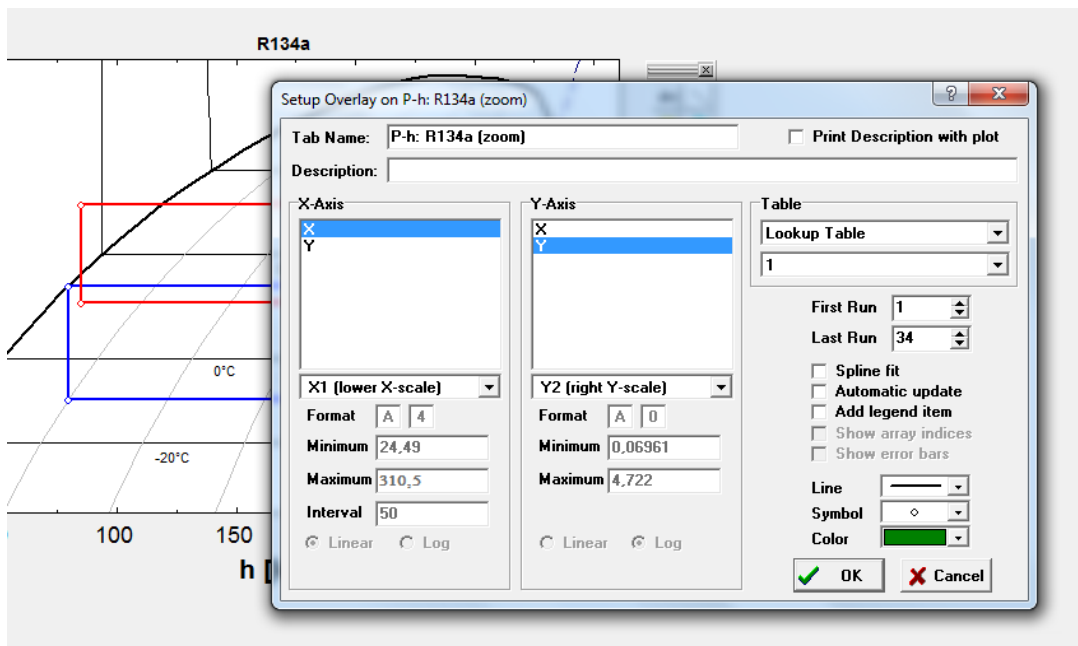
Έτσι θα εμφανιστεί ένα Pop-Up Window το οποίο μας ζητάει να ονομάσουμε τον ειδικό πίνακα ή Lookup Table στον οποίο το EES θα επιστρέψει τα δεδομένα σημεία από τα οποία είναι κατασκευασμένη η γραμμή που επιλέξαμε.

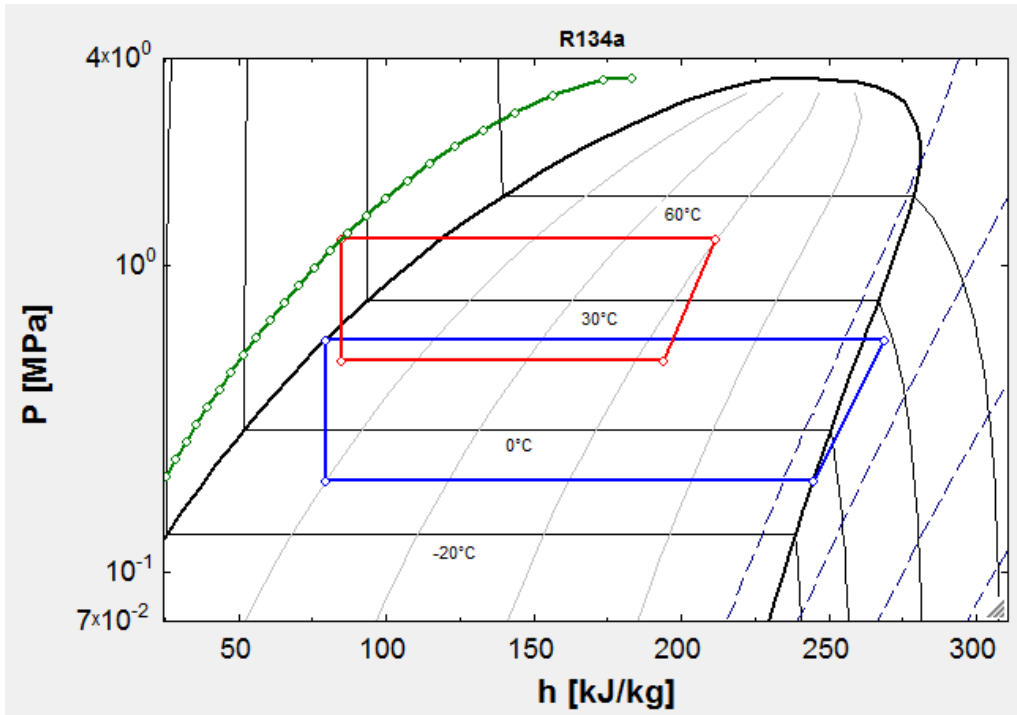


Χτυπώντας το OK το πρόγραμμα επιστρέφει τον ζητούμενο πίνακα.

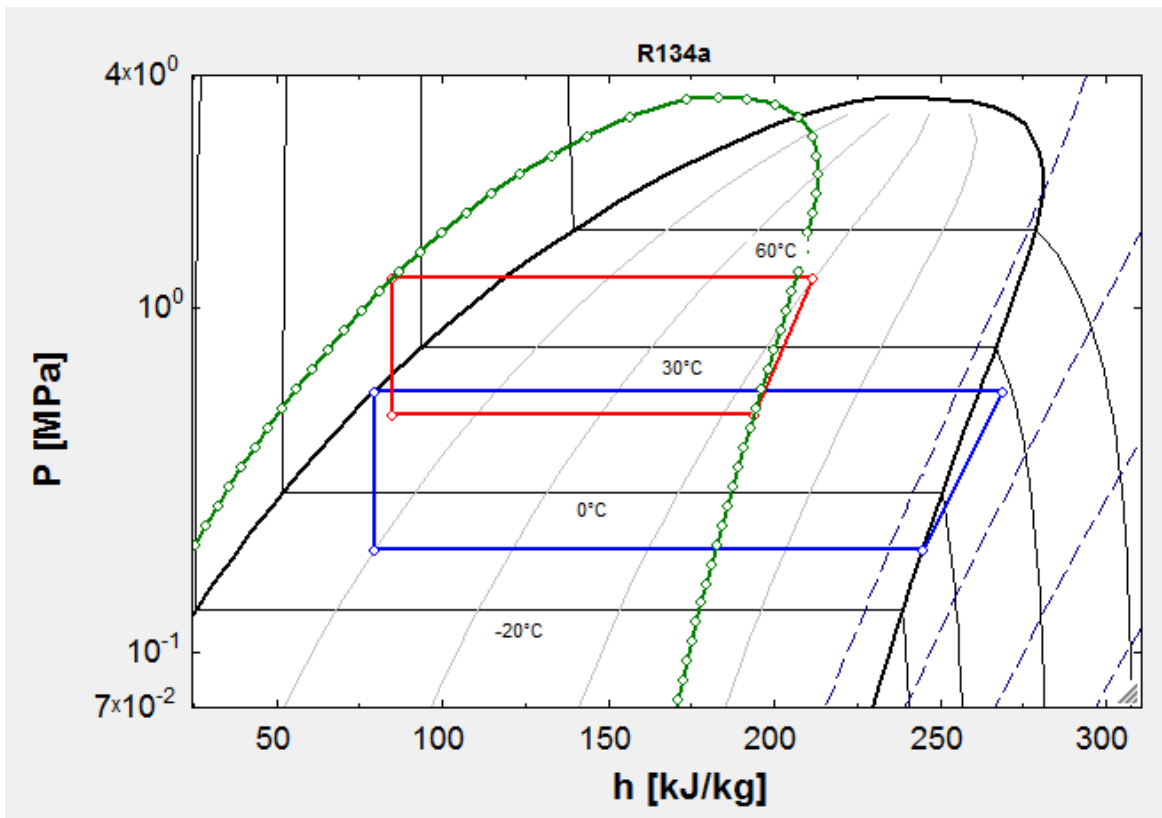
	X	Y
Row 1	0,147	0,06466
Row 2	2,625	0,07362
Row 3	5,179	0,08382
Row 4	7,814	0,09544
Row 5	10,53	0,1087
Row 6	13,34	0,1237
Row 7	16,24	0,1409
Row 8	19,24	0,1604
Row 9	22,34	0,1826
Row 10	25,55	0,2079
Row 11	28,88	0,2367
Row 12	32,33	0,2695
Row 13	35,9	0,3069
Row 14	39,62	0,3494
Row 15	43,48	0,3978
Row 16	47,51	0,453
Row 17	51,7	0,5158
Row 18	56,07	0,5872
Row 19	60,64	0,6686
Row 20	65,42	0,7613
Row 21	70,44	0,8668
Row 22	75,72	0,9869
Row 23	81,29	1,124
Row 24	87,17	1,279
Row 25	93,42	1,457
Row 26	100,1	1,659
Row 27	107,3	1,886

Τώρα επιστρέφουμε στο αρχικό διάγραμμα μας το οποίο περιέχει τους δύο κύκλους και με την επιλογή Overlay Plot διαλέγουμε να λάβουμε δεδομένα από τον Lookup Table 1.Χτυπάμε το Ok και λαμβάνουμε το ακόλουθο διάγραμμα.



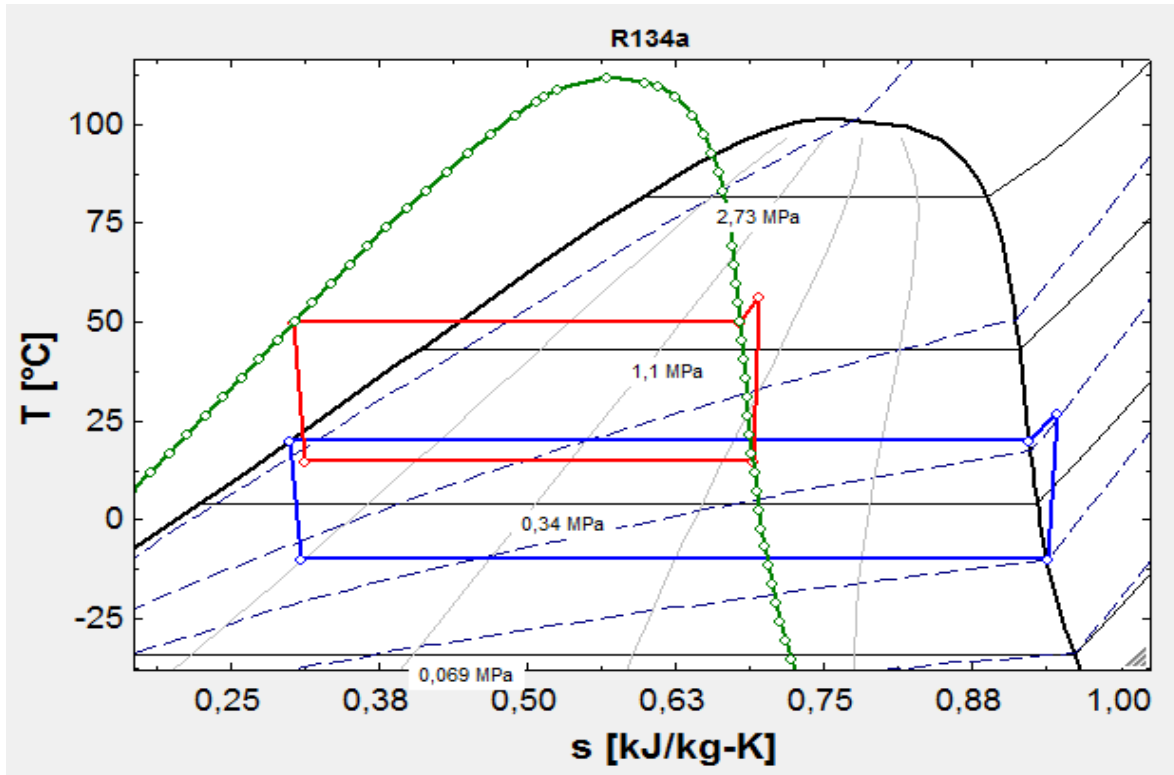


Ακολουθώντας ακριβώς την ίδια διαδικασία για την 2.Saturated vapor line τελικά λαμβάνουμε:



Εικόνα 9.8 Διάγραμμα P-h κύκλου Cascade

Ακολουθούμε την ίδια διαδικασία για να δημιουργήσουμε το διάγραμμα T-s. Το διάγραμμα T-s κατασκευάζεται για να δείξουμε ποιο από τα δύο εργαζόμενα μέσα έχει την υψηλότερη κρίσιμη θερμοκρασία και συνεπώς μπορεί να λειτουργήσει σε υψηλότερες θερμοκρασίες ψύξης.

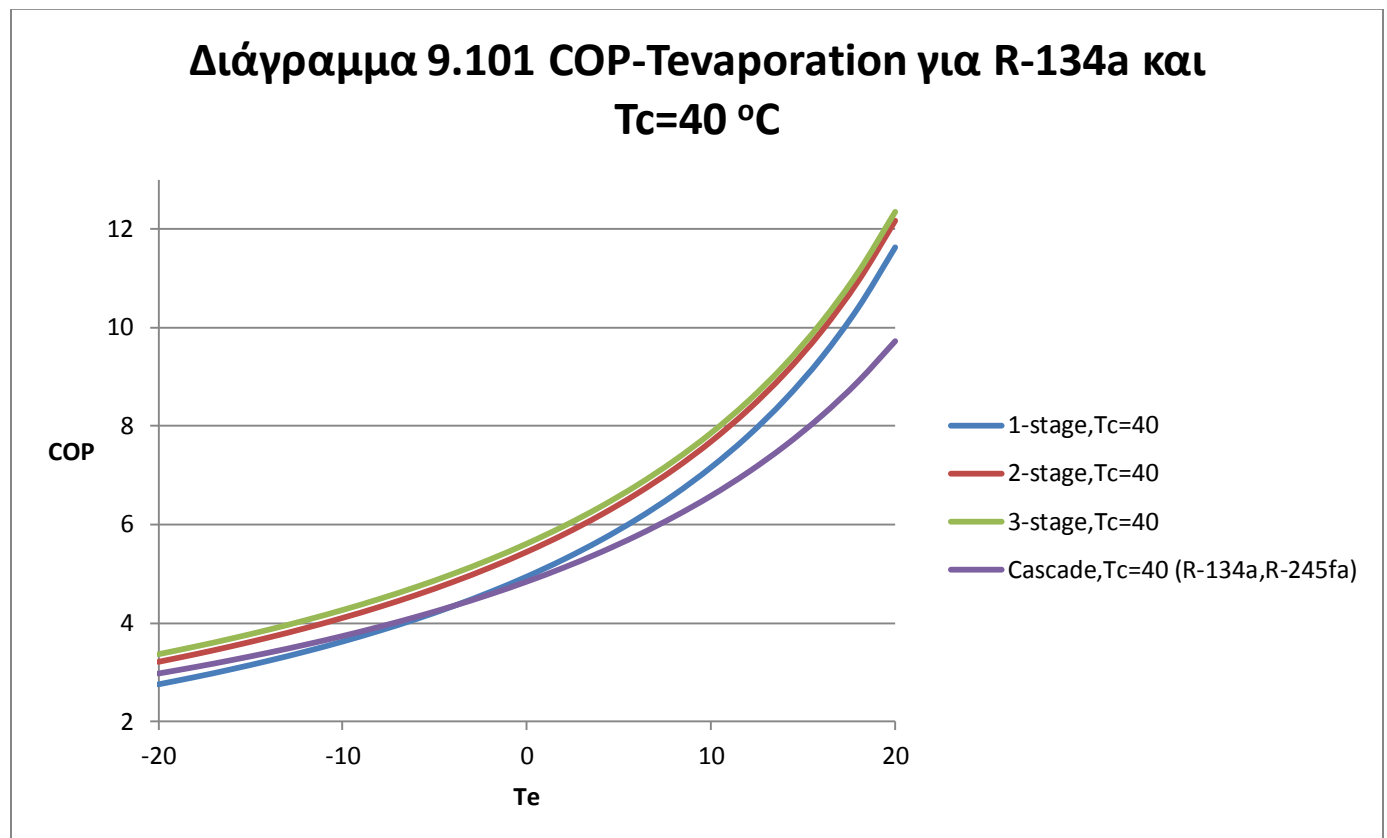


Εικόνα 9.9 Διάγραμμα T-s κύκλου Cascade

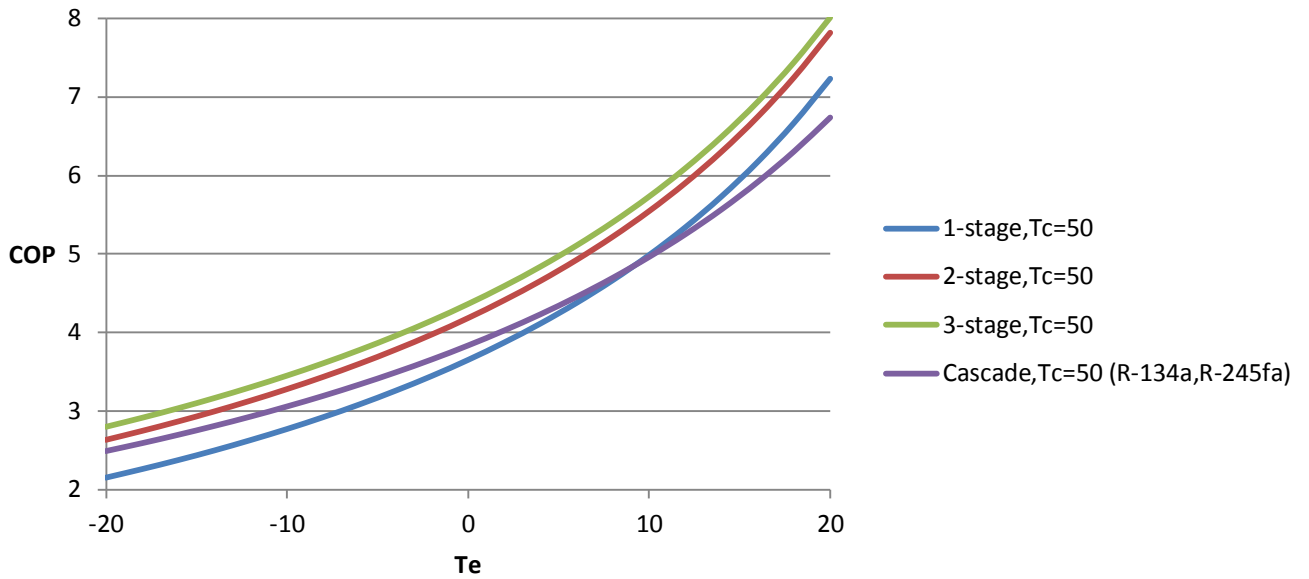
9.5 Σύγκριση των προαναφερθέντων κύκλων.

Σε αυτό το σημείο και πριν προχωρήσουμε στην ανάλυση πιο σύνθετων ψυκτικών κυκλωμάτων, χρήσιμο είναι να παραθέσουμε μία σύγκριση μεταξύ των κύκλων που μελετήθηκαν μέχρι στιγμής. Δηλαδή, θα συγκρίνουμε τον μονοβάθμιο, τον διβάθμιο, τον τριβάθμιο και τον κύκλο συνδέσεως κλιμακωτού καταρράκτη. Για να είναι η σύγκριση αληθής και να μην υπάρχει σφάλμα στα αποτελέσματά μας, θα πρέπει οι αντίστοιχες παράμετροι των ψυκτικών κυκλωμάτων τα οποία θα συγκριθούν, να είναι ίδιες. Έτσι όλοι οι ισεντροπικοί βαθμοί απόδοσης των

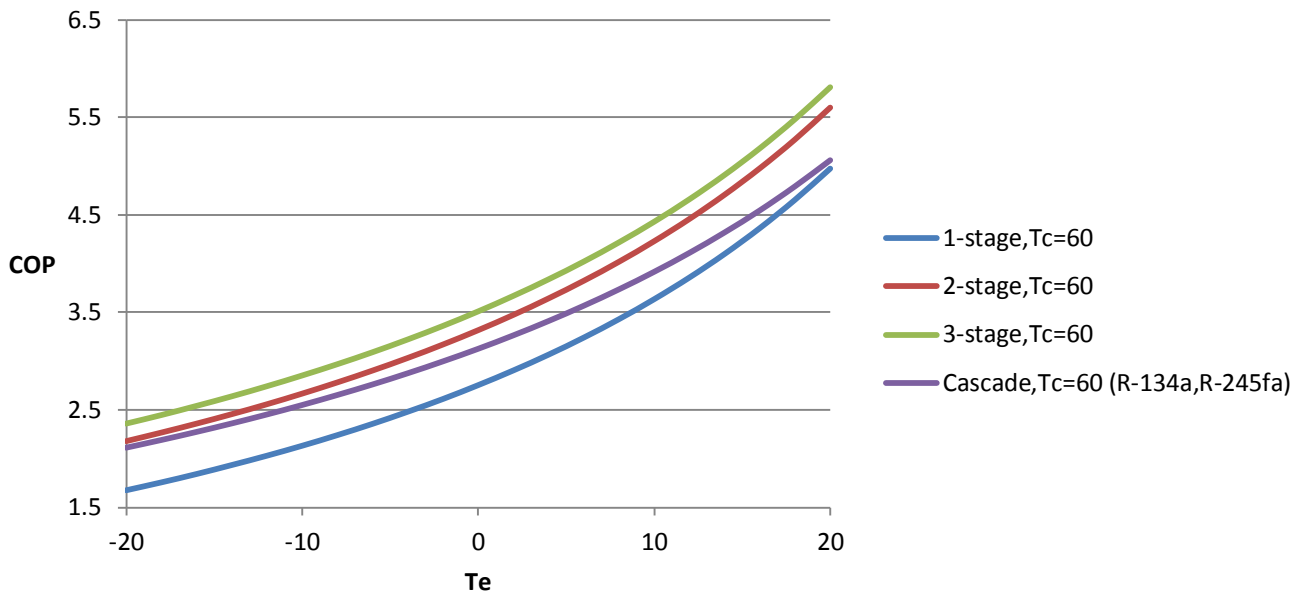
συμπιεστών των κυκλωμάτων λαμβάνονται ίσοι προς 0,9. Ακόμη το εύρος της θερμοκρασίας ατμοποίησης είναι από $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ έως $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ και η μελέτη γίνεται για τις τρεις γνωστές θερμοκρασίες συμπυκνώσεως $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Για να επιτευχθεί σύγκριση η οποία θα μας επιτρέψει να καθορίσουμε ποιος ψυκτικός κύκλος είναι ο κατάλληλος, θα δοθούν τα συγκεντρωτικά διαγράμματα του συντελεστή συμπεριφοράς της ψυκτικής εγκατάστασης σε συνάρτηση με την θερμοκρασία ατμοποίησης. Η σύγκριση γίνεται για τα τρία ψυκτικά μέσα τα οποία μελετήθηκαν δηλαδή τα R-134a, R-245fa, R-410A ενώ για τον κύκλο σύνδεσης κλιμακωτού καταρράκτη το ζεύγος ψυκτικών μέσων τα οποία χρησιμοποιούνται είναι τα R-134a~R-245fa, R-12~R-245fa και R-410A~R-245fa. Τα ζεύγη εκλέχθηκαν με βάση την βέλτιστη απόδοση του κύκλου για κάθε ψυκτικό μέσο από τον Πίνακα και έτσι επιλέχθηκε το ζεύγος του. Δηλαδή όταν για την μελέτη των τριών κύκλων εκλέγουμε το R-134a, με την βοήθεια του Πίνακα παρατηρούμε ότι το συγκεκριμένο ψυκτικό μέσο δίνει τον καλύτερο συντελεστή συμπεριφοράς για τον κύκλο σύνδεσης κλιμακωτού καταρράκτη όταν λειτουργεί στην χαμηλή βαθμίδα με αντίστοιχο ψυκτικό μέσο στην υψηλή βαθμίδα το R-245fa. Στην συνέχεια δίδουμε τα διαγράμματα του συντελεστή συμπεριφοράς της ψυκτικής εγκατάστασης



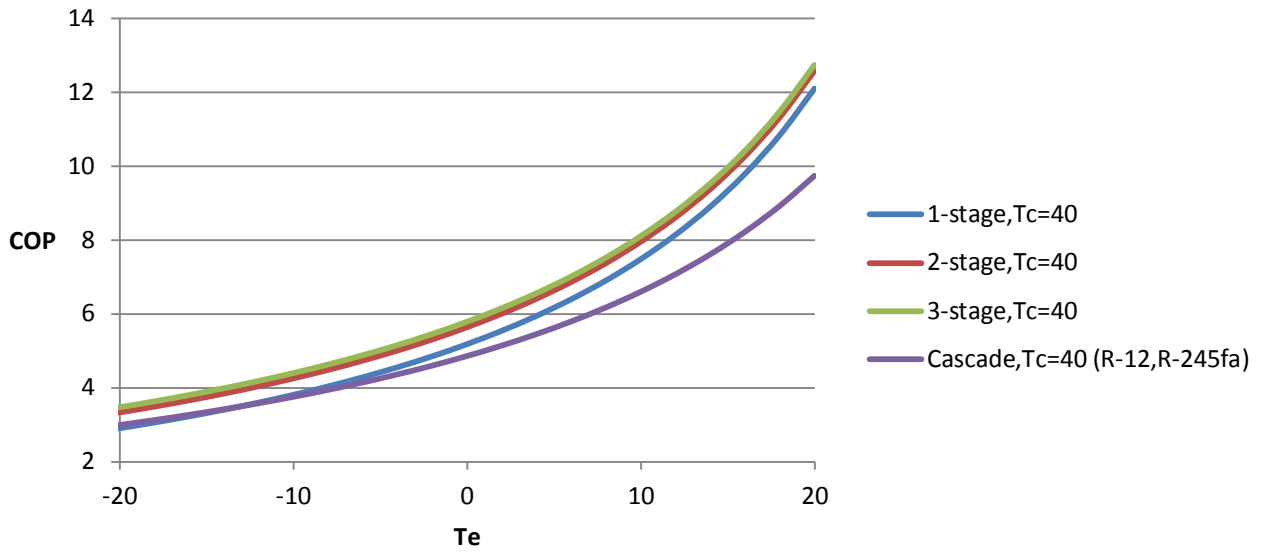
**Διάγραμμα 9.102 COP-Tevaporation για R-134a και
T_c=50 °C**



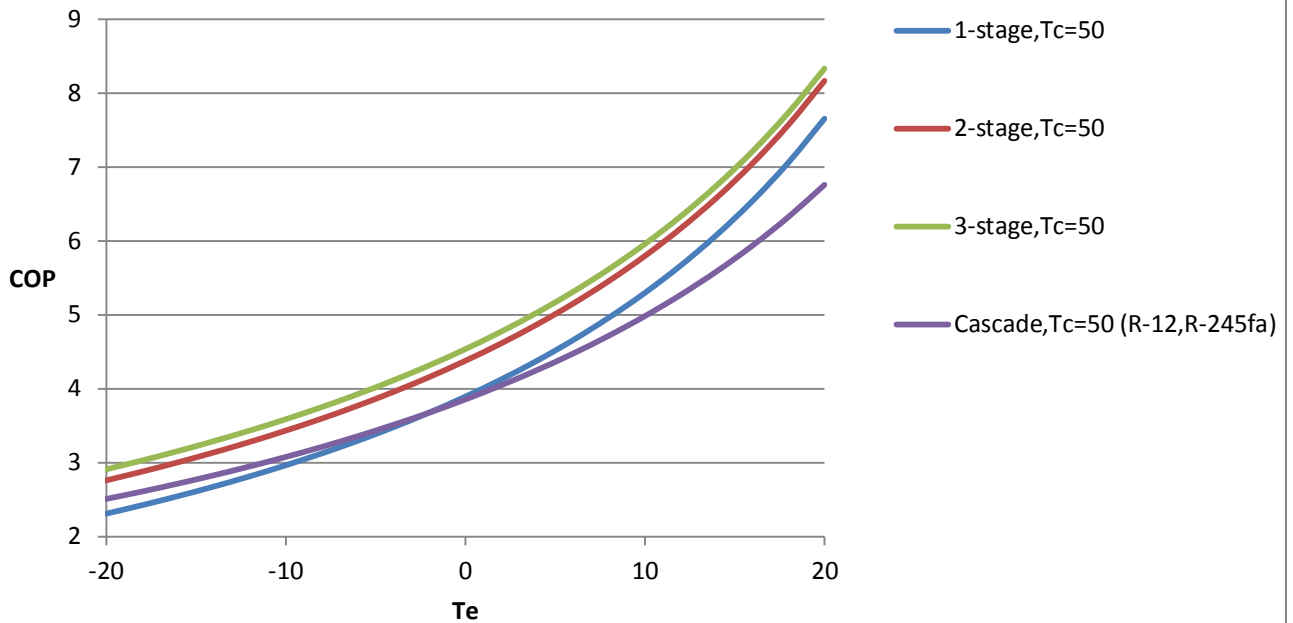
**Διάγραμμα 9.103 COP-Tevaporation για R-134a και
T_c=60 °C**



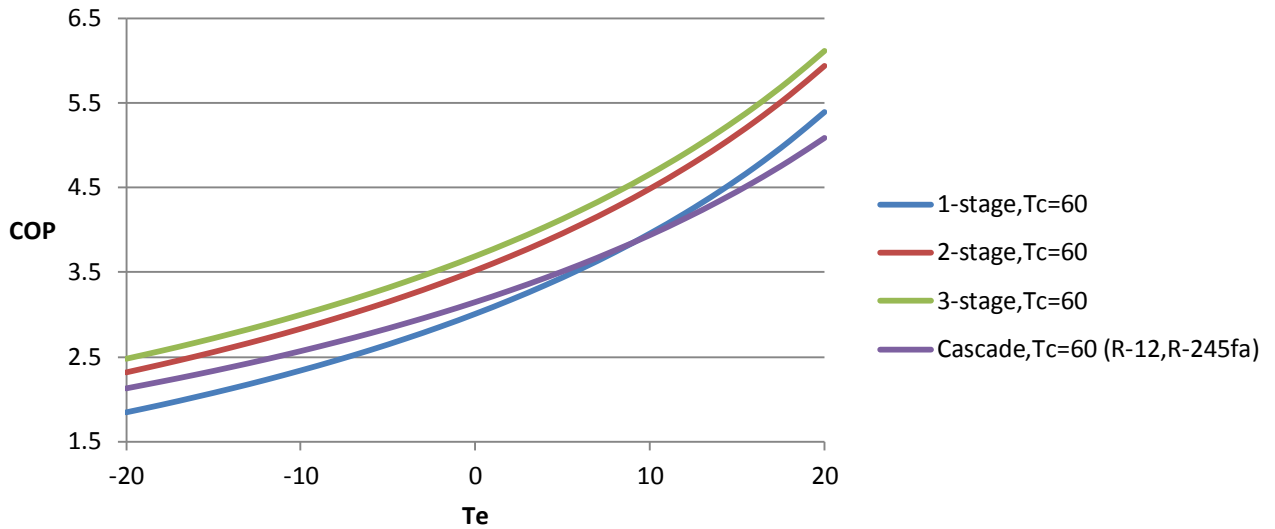
**Διάγραμμα 9.104 COP-Tevaporation για R-245fa
και $T_c=40\text{ }^\circ\text{C}$**



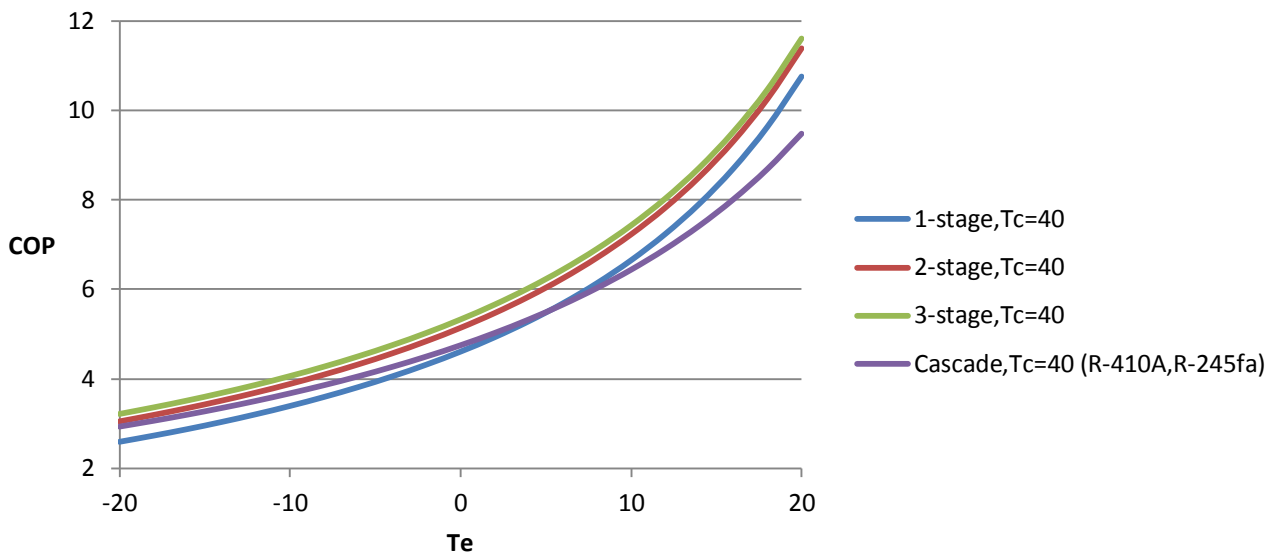
**Διάγραμμα 9.105 COP-Tevaporation για R-245fa και
 $T_c=50\text{ }^\circ\text{C}$**



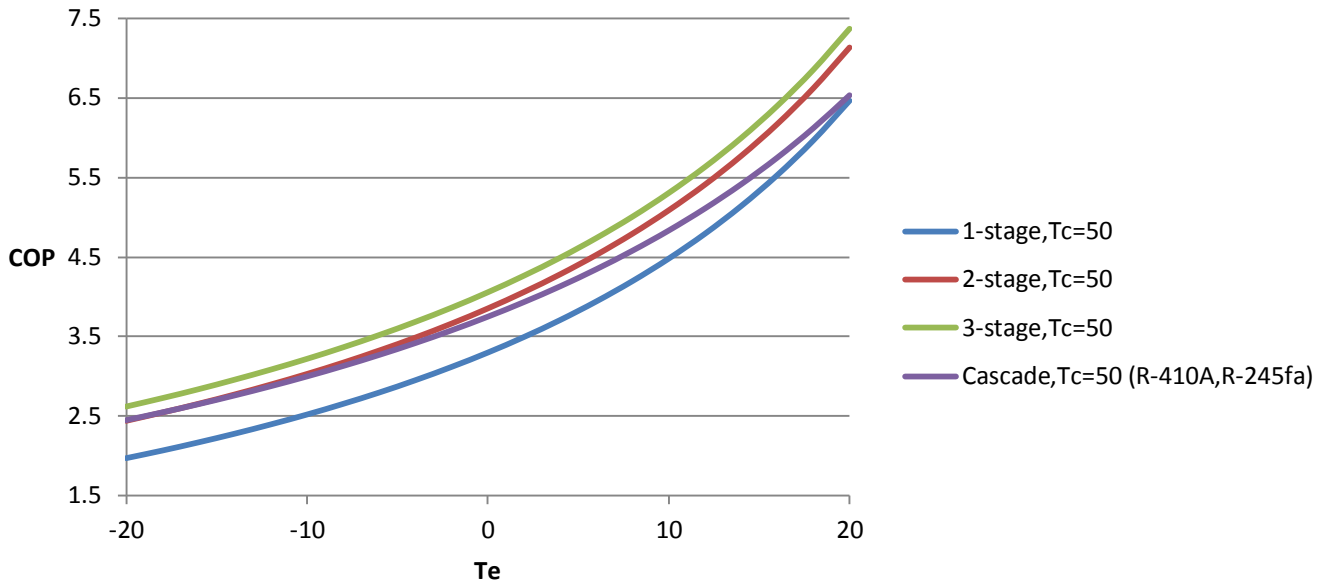
Διάγραμμα 9.106 COP-Tevaporation για R-245fa και $T_c=60\text{ }^\circ\text{C}$



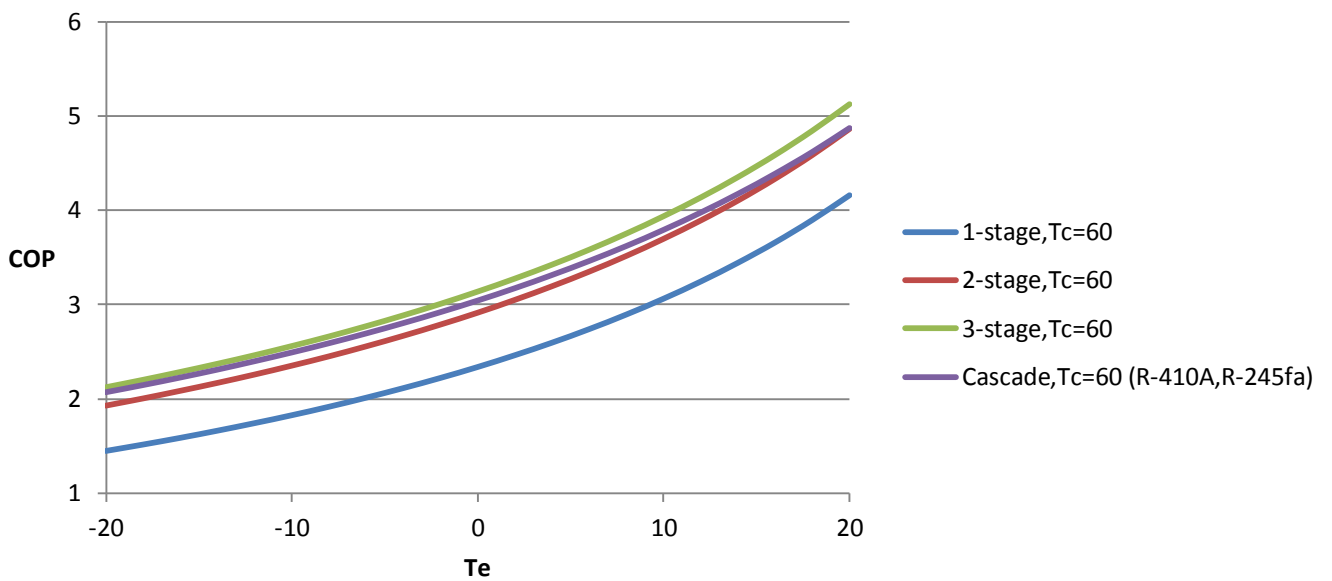
Διάγραμμα 9.107 COP-Tevaporation για R-410A και $T_c=40\text{ }^\circ\text{C}$



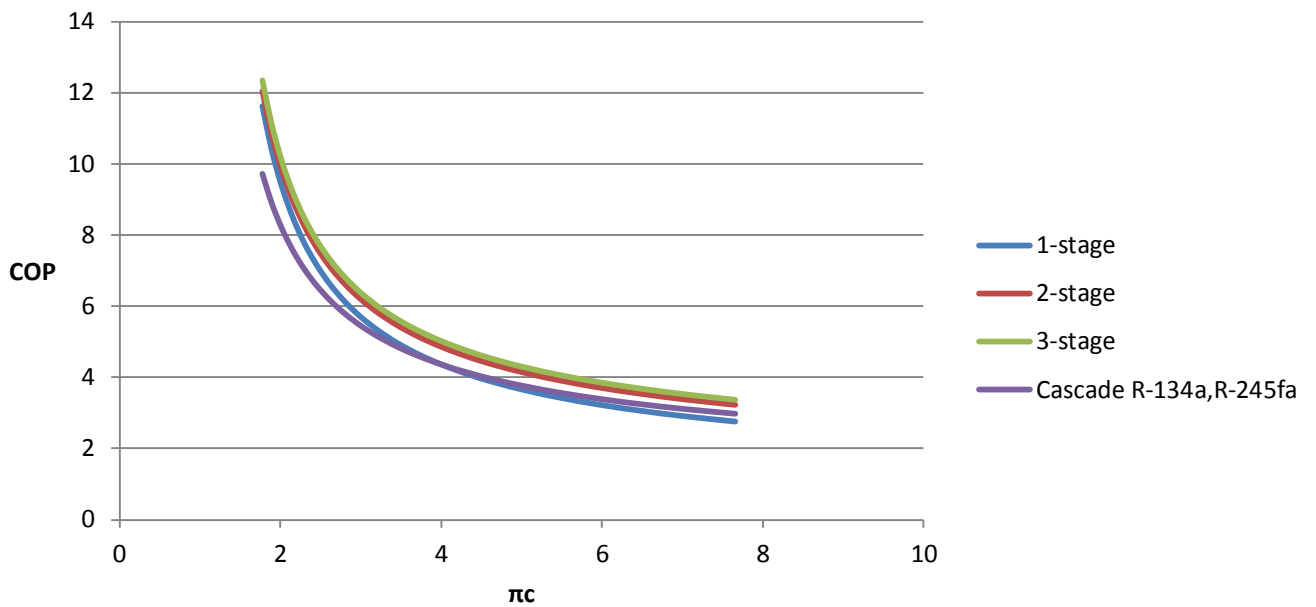
Διάγραμμα 9.108 COP-Tevaporation για R-410A και Tc=50 °C



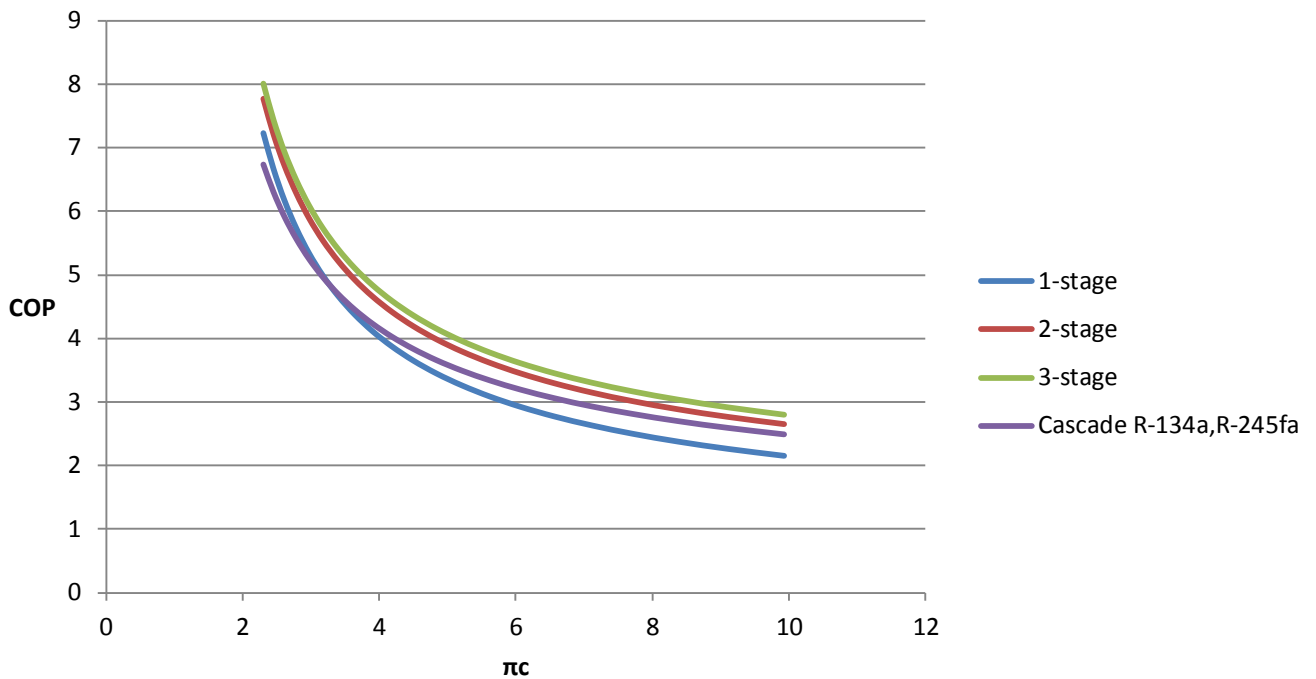
Διάγραμμα 9.109 COP-Tevaporation για R-410A και Tc=60 °C



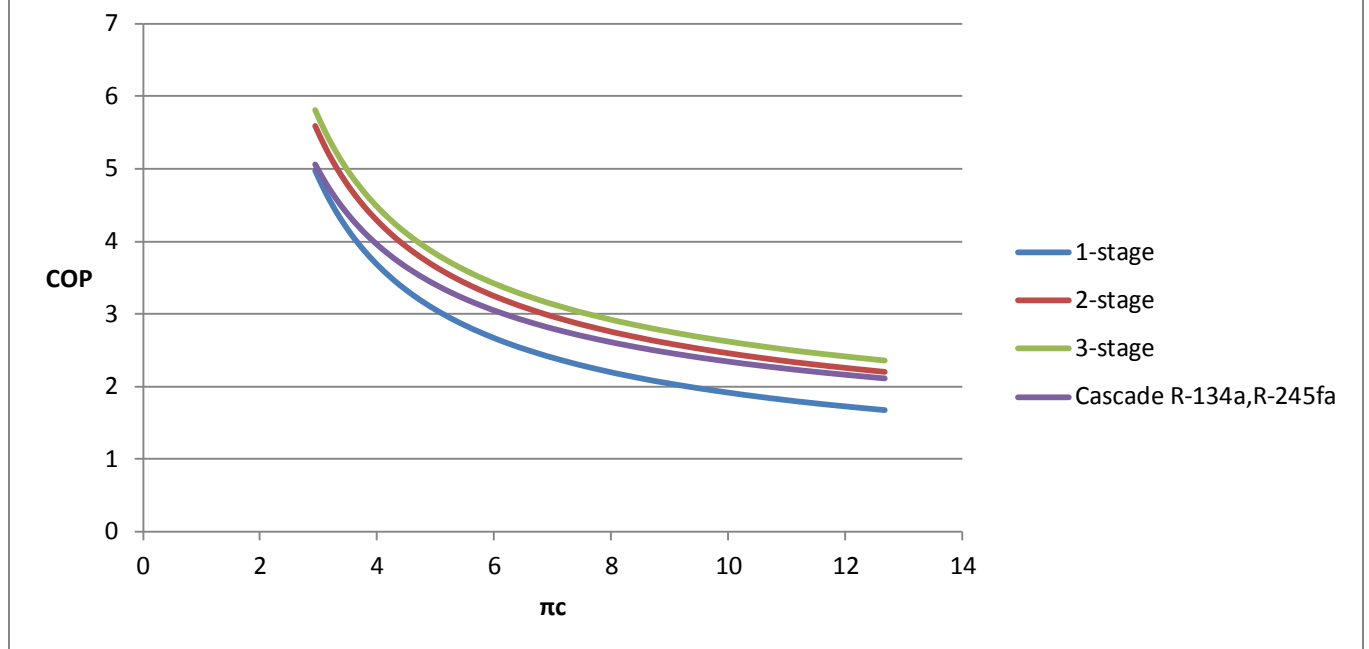
Διάγραμμα 9.110 COP-πς για R-134a και T_c=40 °C



Διάγραμμα 9.111 COP-πς για R-134a και T_c=50 °C



Διάγραμμα 9.112 COP-πς για R-134a και Tc=60 °C

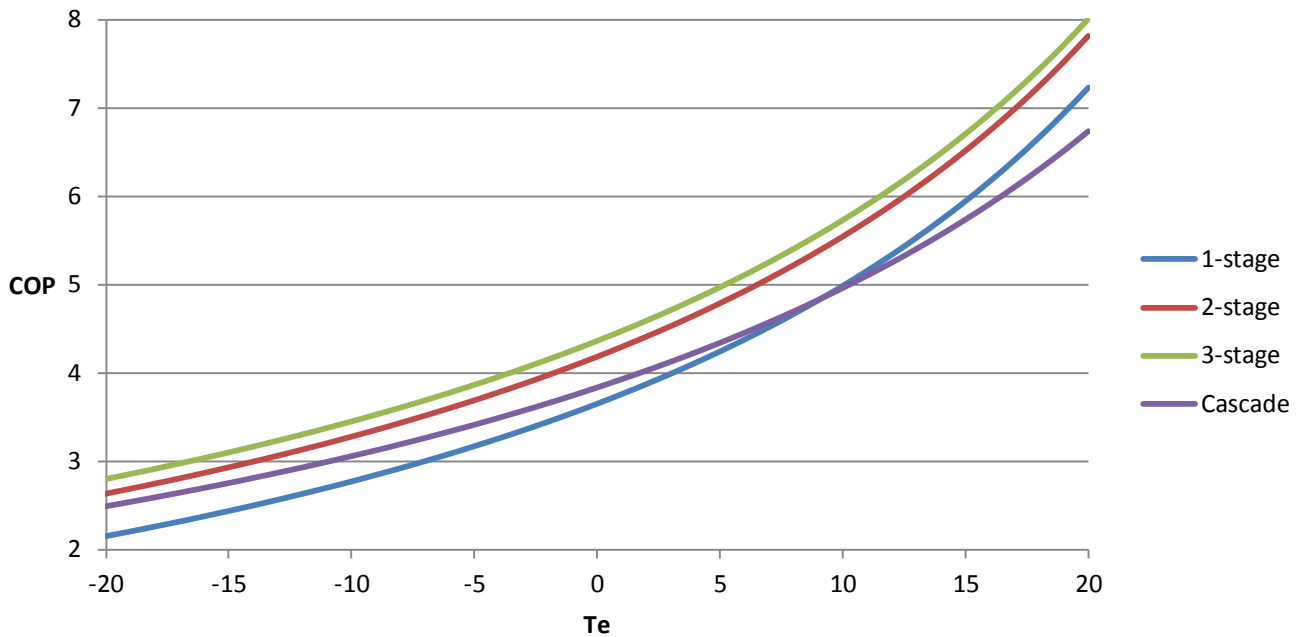


9.6 Σύγκριση ψυκτικών κύκλων σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες ψύξης.

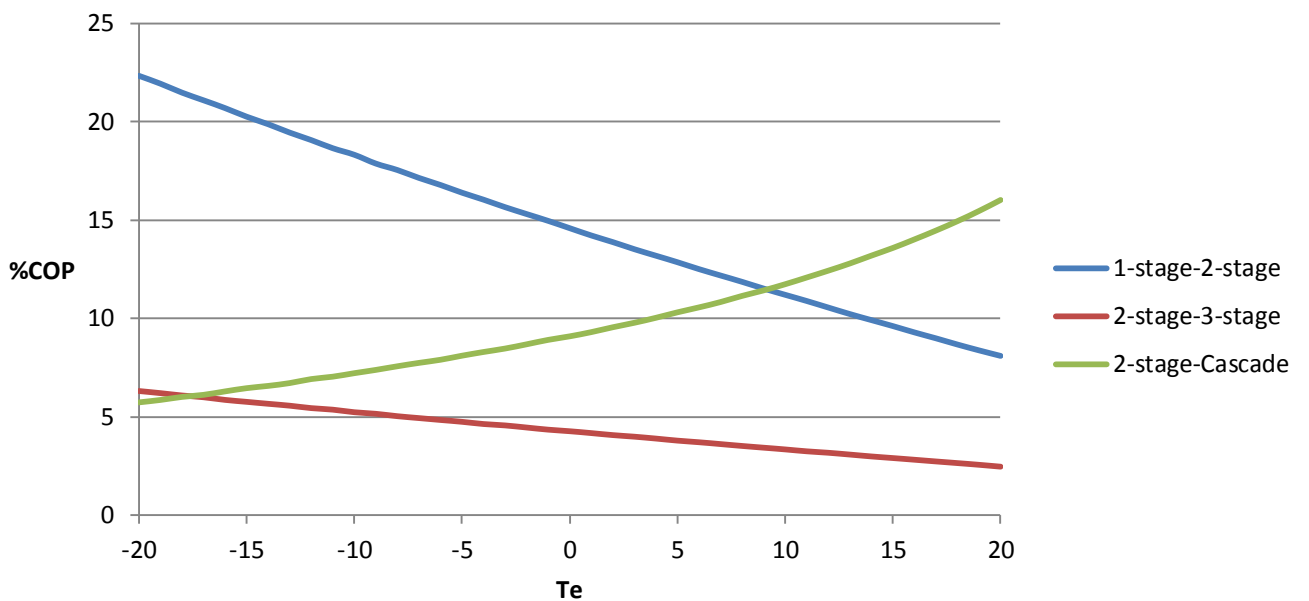
Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως ο διβάθμιος και ο τριβάθμιος ψυκτικός κύκλος μηχανικής συμπίεσης ατμών αυξάνουν την διαφορά στον συντελεστή συμπεριφοράς τους σε σχέση με τον μονοβάθμιο με την πτώση της θερμοκρασίας ψύξης. Έτσι θα συγκρίνουμε τον συντελεστή συμπεριφοράς των τριών προαναφερθέντων ψυκτικών κυκλωμάτων και επιπρόσθετα και του ψυκτικού κύκλου συνδέσεως κλιμακωτού καταρράκτη, για ψυκτικό μέσο R-134a (στον κύκλο συνδέσεως κλιμακωτού καταρράκτη κατ'αναλογία θα χρησιμοποιηθεί ψυκτικό μέσο R-134a στην χαμηλή βαθμίδα και R-245fa στην υψηλή βαθμίδα), θερμοκρασία συμπυκνώσεως $T_c=50\text{ }^\circ\text{C}$ και για τρεις συστάδες θερμοκρασιών, όπως αναφέρεται στο βιβλίο του Σ.Χατζηδάκη ((Σημειώσεις Ψύξης)). Οι συστάδες είναι : $-20\text{ }^\circ\text{C} < T < 20\text{ }^\circ\text{C}$, $-45\text{ }^\circ\text{C} < T < -15\text{ }^\circ\text{C}$, $-100\text{ }^\circ\text{C} < T < -40\text{ }^\circ\text{C}$.

Έτσι δημιουργούμε τα ακόλουθα διαγράμματα τα οποία αποικονίζουν την μεταβολή του συντελεστή συμπεριφοράς των ερευνούμενων ψυκτικών κύκλων με την θερμοκρασία ατμοποίησης καθώς και την ποσοστιαία μεταβολή του συντελεστή συμπεριφοράς μεταξύ αυτών. Τα παρακάτω διαγράμματα μας προσφέρουν πολύ χρήσιμα συμπεράσματα όσων αφορά την επιλογή εγκατάστασης ψυκτικού κύκλου ανάλογα με την εφαρμογή και την θερμοκρασία ψύξης.

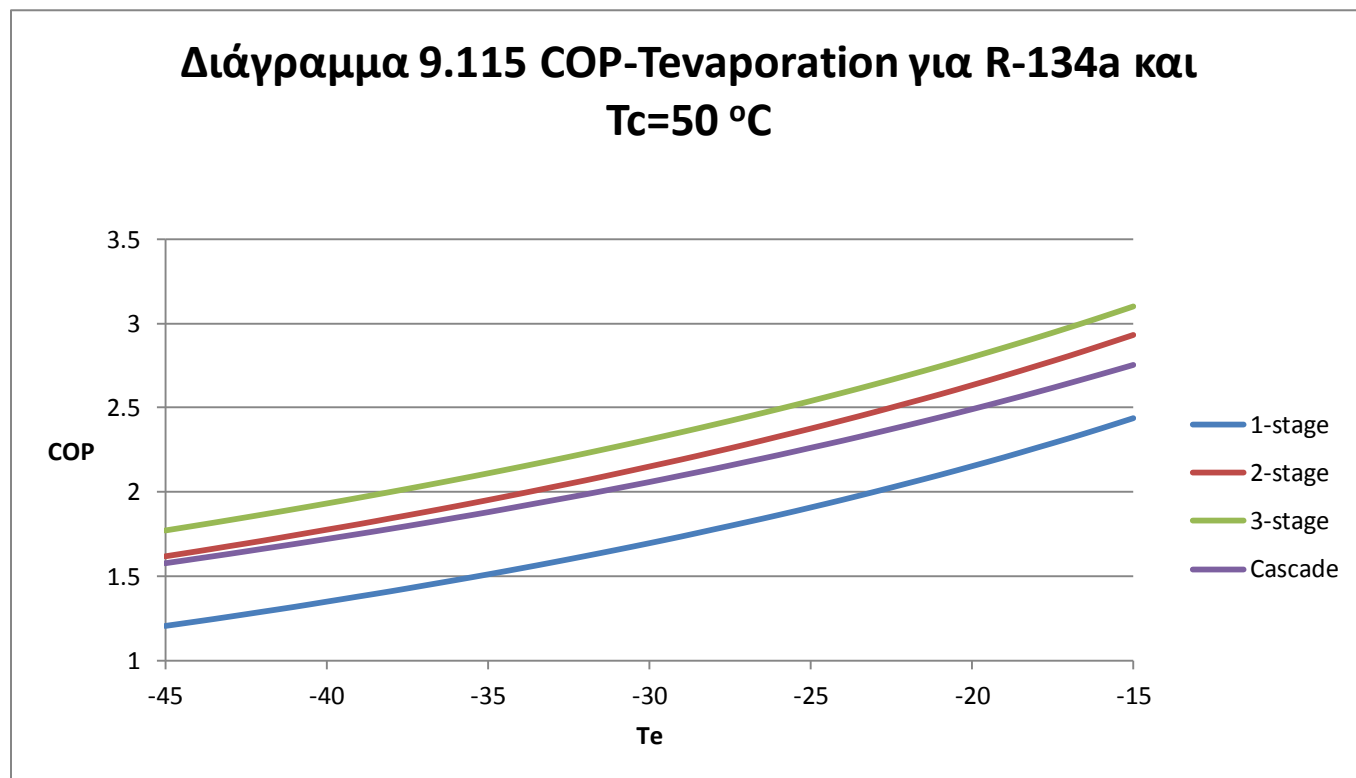
Διάγραμμα 9.113 COP-Tevaporation για R-134a και T_c=50 °C



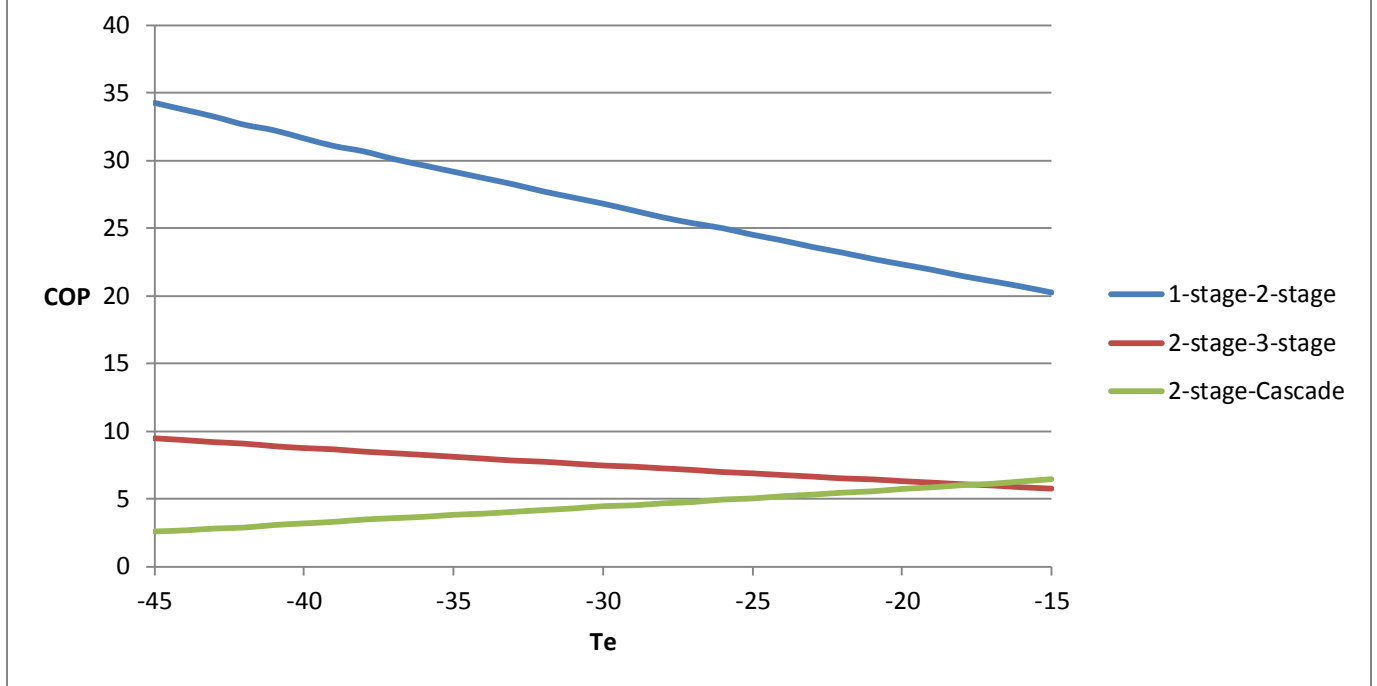
Διάγραμμα 9.114 %Μεταβολή COP-Tevaporation για R-134a και T_c=50 °C



Παρατηρούμε ότι για την πρώτη συστάδα θερμοκρασιών ο συντελεστής συμπεριφοράς διαθέτει συμπεριφορά σχεδόν γραμμικά μειούμενης αύξησης μεταξύ μονοβάθμιου-διβάθμιου και διβάθμιου-τριβάθμιου. Βλέπουμε ότι η επί τοις εκατό μεταβολή του συντελεστή συμπεριφοράς είναι σημαντική αλλά όχι αρκετά μεγάλη μεταξύ του μονοβάθμιου και του διβάθμιου κύκλου μηχανικής συμπίεσης ατμών. Ακόμη παρατηρούμε ότι η επί τοις εκατό μεταβολή του συντελεστή συμπεριφοράς μεταξύ διβάθμιου και τριβάθμιου είναι ελάχιστη και η ίδια μεταβολή μεταξύ διβάθμιου και συνδέσεως κλιμακωτού καταρράκτη είναι στα πλαίσια της μικρής μεταβολής με τον διβάθμιο κύκλο να υπερισχύει. Τέλος βλέπουμε πως κοντά σε θερμοκρασία ατμοποίησης 10 °C και παραπάνω ο μονοβάθμιος ψυκτικό κύκλος είναι πιο αποδοτικός σε σχέση με τον κύκλο συνδέσεως κλιμακωτού καταρράκτη ο οποίος πρακτικά είναι διβάθμιος, συμπέρασμα πολύ χρήσιμο και ενδιαφέρον.

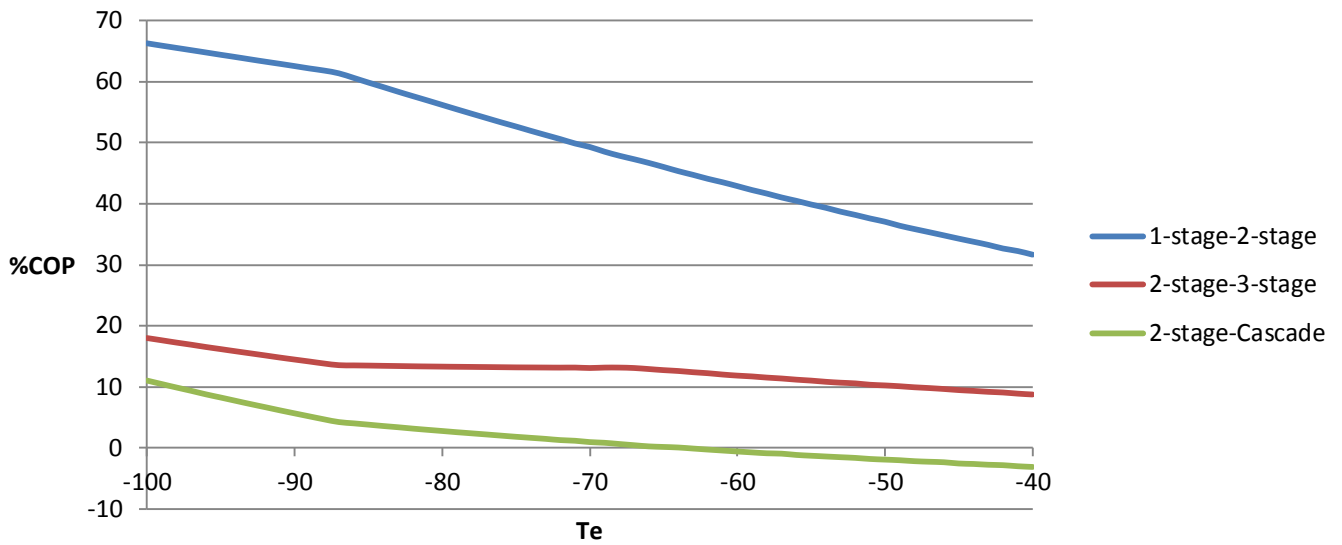


Διάγραμμα 9.116 %Μεταβολή COP-Τevaporation για R-134a και $T_c=50\text{ }^\circ\text{C}$

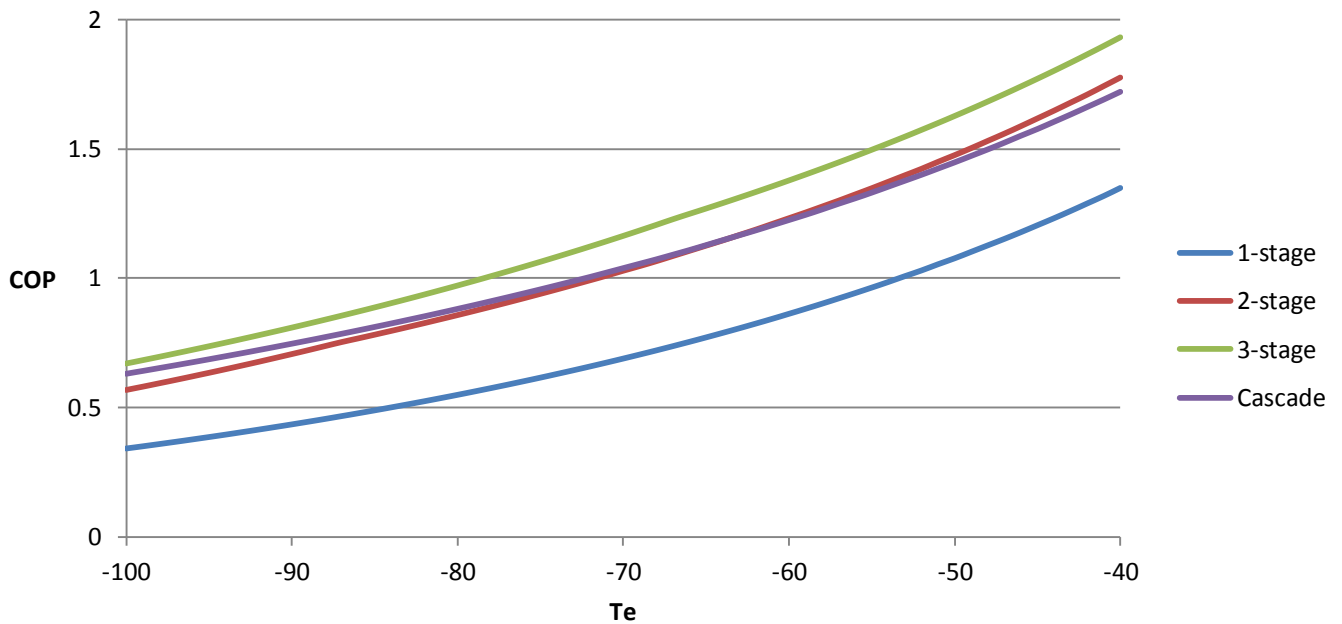


Για την δεύτερη συστάδα θερμοκρασιών τα αποτελέσματα αλλάζουν όπως περιμέναμε, δηλαδή, η ποσοστιαία διαφορά στον συντελεστή συμπεριφοράς μεταξύ μονοβάθμιου και διβάθμιου κύκλου αυξήθηκε σημαντικά ενώ η διαφορά μεταξύ διβάθμιου και τριβάθμιου κύκλου παρουσιάζει αύξηση σε σχέση με την προηγούμενη συστάδα αλλά και πάλι η τιμή είναι αρκετά μικρή για να υπερισχύσει ο τριβάθμιος έναντι του διβάθμιου. Τέλος βλέπουμε ότι η διαφορά στον συντελεστή συμπεριφοράς μεταξύ διβάθμιου και κλιμακωτού καταρράκτη έχει μειωθεί στο ελάχιστο και επίσης ο τελευταίος κύκλος, έχει αποσπαστεί πλήρως από τον μονοβάθμιο.

Διάγραμμα 9.118 %Μεταβολή COP-Τevaporation για R-134a και $T_c=50\text{ }^\circ\text{C}$



Διάγραμμα 9.117 COP-Τevaporation για R-134a και $T_c=50\text{ }^\circ\text{C}$



Για την τελευταία συστάδα θερμοκρασιών παρατηρούμε όπως αναμενόταν εξ' αιτίας της πολύ χαμηλής θερμοκρασίας (ή όπως αναφέρεται στην βιβλιογραφία VLT Cooling~Very Low Temperature) η ποσοστιαία αύξηση του συντελεστή συμπεριφοράς από μονοβάθμιο σε διβάθμιο είναι πάρα πολύ σημαντική. Επίσης σημαντική είναι και η μεταβολή μεταξύ διβάθμιου και τριβάθμιου εάν λάβουμε υπ' όψη μας ότι διπλασιάστηκε σχεδόν, σχετικά με την προηγούμενη σύσταδα. Τέλος εξαιρετικά ενδιαφέρον είναι το γεγονός ότι κοντά στους $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$ και για χαμηλότερες θερμοκρασίες ο κύκλος συνδέσεως κλιμακωτού καταρράκτη γίνεται πιο αποδοτικός από τον διβάθμιο ψυκτικό κύκλο μηχανικής συμπίεσης ατμών. Βέβαια η διαφορά είναι μικρή αλλά το συμπέρασμα επεκτείνεται και για χαμηλότερες των $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ θερμοκρασίες με μεγαλύτερη ποσοστιαία αύξηση.

9.7 Ψυκτική διάταξη διβάθμιας συμπίεσεως δύο στοιχείων ατμοποίησης με σύνδεση σε σειρά.

Οι ψυκτικές εγκαταστάσεις διβάθμιας συμπίεσεως με διβάθμια ατμοποίηση δηλαδή με δύο στοιχεία ατμοποίησης, για την παραγωγή ψύξης σε δύο διαφορετικές μεταξύ τους χαμηλές θερμοκρασίες, βρίσκουν ευρεία εφαρμογή στην πράξη. Χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία διατήρησης τροφίμων με ψυχρή αποθήκευση, όπου π.χ. απαιτούνται αφ' ενός μεν θερμοκρασίες γύρω από το μηδέν, για τους ψυκτικούς θαλάμους απλής ψύξης και αφ' ετέρου θερμοκρασίες χαμηλότερες των $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, για τους θαλάμους διατήρησης κατεψυγμένων προϊόντων και αυτό ανάλογα με την διάρκεια της αποθήκευσης και το είδος του αποθηκευόμενου προϊόντος.

Στις σύραγγες ταχείας κατάψυξης απαιτούνται για μεν την κατάψυξη των νωπών προϊόντων θερμοκρασίες της τάξεως των $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, ενώ στην συνέχεια για την ψυχρή αποθήκευση των εξερχόμενων της σήραγγας προϊόντων, απαιτούνται θερμοκρασίες της τάξεως των $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Παρακάτω θα δώσουμε μία σχηματική αναπαράσταση μίας τέτοιας ψυκτικής εγκαταστάσεως.

Όπως φαίνεται στο σχήμα αυτό ένα μέρος του υγρού ψυκτικού μέσου οδηγείται από τον ενδιάμεσο ψύκτη στο στοιχείο ατμοποίησης της μέσης πίεσεως όπου ατμοποιείται για την παραγωγή ψύξης Q_{e2} υπό πίεση P_m .

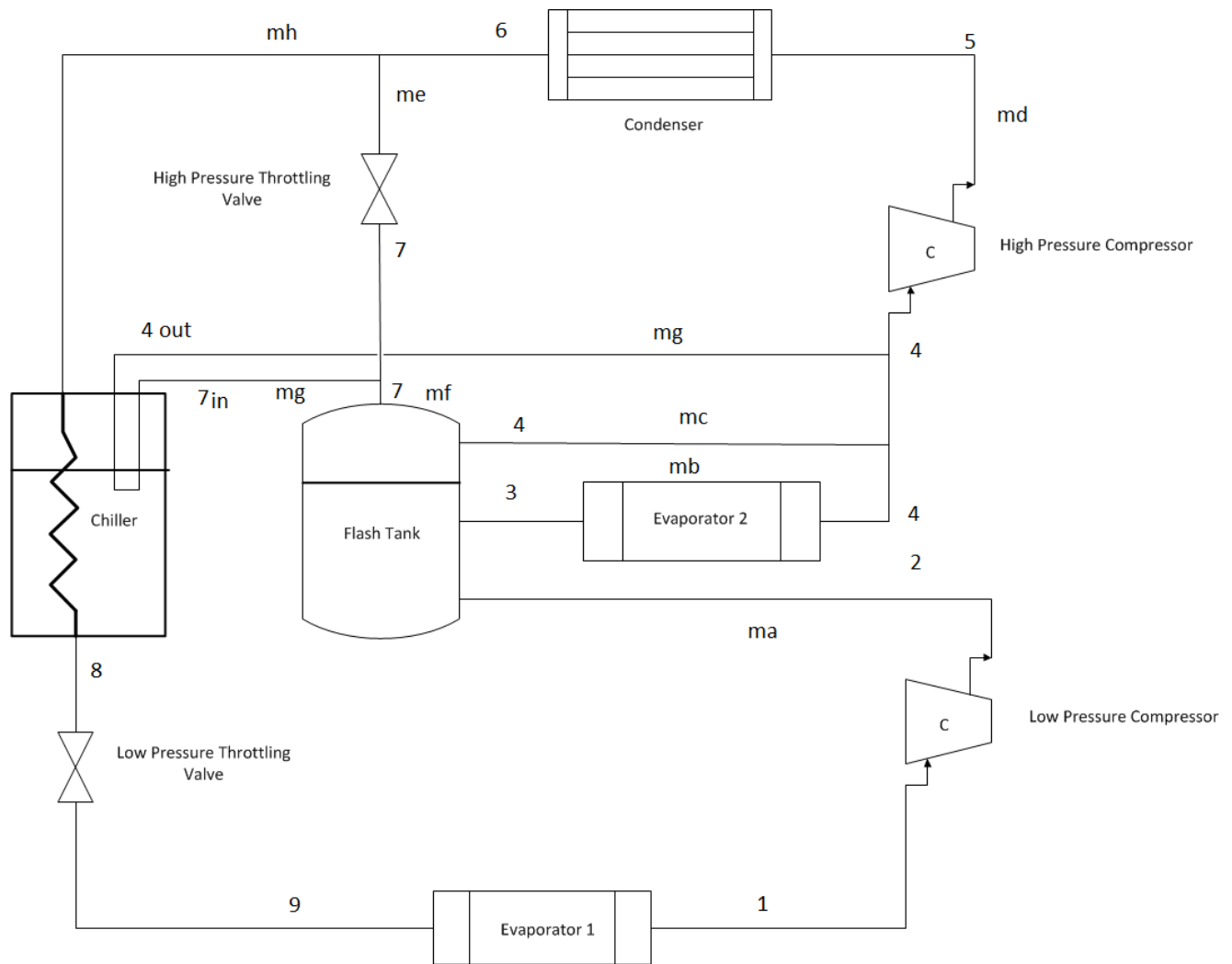
Ο ενδιάμεσος ψύκτης, όπως και στην περίπτωση της διάταξης διβάθμιας μηχανικής συμπίεσης ατμών, είναι ένα δοχείο μερικής ατμοποίησης (flash tank ή διαχωριστής υγρού-ατμού) το οποίο δέχεται 2 ρεύματα μάζας ψυκτικού μέσου, το ένα αποτελεί την ροή από την συμπιεστή χαμηλής πίεσης και βρίσκεται στην κατάσταση του υπέρθερμου ατμού, το δεύτερο βρίσκεται στην κατάσταση του διφασικού μίγματος υγρού/ατμού ύστερα από τον ισενθαλπικό στραγγαλισμό που υφίσταται εξερχόμενο από τον συμπυκνωτή. Το διφασικό μίγμα έχοντας προφανώς χαμηλότερη θερμοκρασία από τον εισερχόμενο υπέρθερμο ατμό (εφόσον βρίσκονται στην ίδια πίεση) ψύχει τον υπέρθερμο ατμό πετυχαίνοντας να γίνει ο τελευταίος, κορεσμένος. Ύστερα με την λειτουργία την οποία έχουμε προαναφέρει διαχωρίζεται το διφασικό μίγμα σε κορεσμένο υγρό το οποίο οδηγείται στον ατμοποιητή μέσης πίεσης για να παραχθεί η ψύξη υψηλής θερμοκρασίας ενώ το εναπομένον αέριο δηλαδή ο κορεσμένος ατμός οδηγείται με απομάστευση (bleed) κατευθείαν σε οχετό αναμίξεως όπου θα αναμνηθεί με το ρεύμα μάζας το οποίο βρίσκεται σε κατάσταση κορεσμένου ατμού από τον ατμοποιητή υψηλής θερμοκρασίας καθώς και με ρεύμα μάζας κορεσμένου ατμού από τον ψύκτη υπόψυξης του συμπυκνώματος, το ρεύμα αυτό αναλύεται ακολούθως. Τώρα, στον οχετό αναμίξεως βρίσκεται κορεσμένος ατμός ο οποίος έχει προέλθει από την ανάμιξη των τριών προαναφερθέντων ρευμάτων. Ο κορεσμένος αυτός ατμός, οδηγείται στον συμπιεστή υψηλής πίεσης όπου υπερθερμαίνεται λόγω της αύξησης στην πίεση του. Ύστερα ο υπέρθερμος ατμός οδηγείται στον συμπυκνωτή όπου από αυτήν την κατάσταση μεταπίπτει σε κατάσταση κορεσμένου υγρού. Τώρα ένα μέρος της μάζας του κορεσμένου συμπυκνώματος απομαστεύεται και με ισενθαλπικό στραγγαλισμό μεταπίπτει σε διφασικό μίγμα υγρού-ατμού. Από αυτήν την ήδη απομαστευμένη ποσότητα, απομαστεύεται εκ νέου μέρος του διφασικού μίγματος και οδηγείται στον ψύκτη υπόψυξης συμπυκνώματος κλειστού κυκλώματος στον οποίο δεν υπάρχει ανάμιξη των ρευμάτων τα οποία συναλλάσσουν θερμότητα. Το εναπομένον διφασικό μίγμα είναι το προαναφερθέν το οποίο οδηγείται στο δοχείο μερικής ατμοποίησης (flash tank). Τώρα, η ποσότητα του κορεσμένου συμπυκνώματος η οποία βρίσκεται μετά την απομάστευση, οδηγείται στον ψύκτη όπου ψύχεται από το ρεύμα του διφασικού μίγματος το οποίο έχει αρκετά χαμηλότερη θερμοκρασία, και μεταπίπτει στην κατάσταση του υπόψυκτου υγρού. Στην έξοδο του ψύκτη υπόψυξης βρίσκεται στραγγαλιστική βαλβίδα η οποία επιβάλλει στο υπόψυκτο συμπύκνωμα την χαμηλή πίεση του κύκλου. Η πτώση αυτή σε πίεση σε συνδυασμό με τον στραγγαλισμό ο οποίος συμβαίνει ισενθαλπικά φέρνει το συμπύκνωμα σε κατάσταση διφασικού μίγματος υγρού-ατμού το οποίο με την σειρά του οδηγείται στον ατμοποιητή για την παραγωγή ψύξης χαμηλής θερμοκρασίας.

Η ψύξη στο συγκεκριμένο ψυκτικό κύκλωμα παράγεται σε δύο διαφορετικές θερμοκρασίες και γι'αυτό δεν είναι δυνατόν να ορισθεί και να υπολογισθεί ένας ενιαίος συντελεστής συμπεριφοράς COP, για ολόκληρη την ψυκτική εγκατάσταση αλλά πρέπει να υπολογισθεί ξεχωριστά για κάθε βαθμίδα ο συντελεστής COP αυτής. Στον υπολογισμό του συντελεστή συμπεριφοράς της βαθμίδας υψηλής πίεσεως πρέπει να ληφθούν υπ'όψη όχι μόνο η ψυκτική ισχύς Q_{e2} της βαθμίδας αυτής αλλά και η εντός του ενδιάμεσου ψύκτη αποβαλλόμενη θερμότητα συμπυκνώσεως, που απορρίπτεται από την βαθμίδα χαμηλής πίεσεως. Για τον συντελεστή συμπεριφοράς της βαθμίδας χαμηλής πίεσεως ισχύουν οι ίδιες σχέσεις που αναφέρθηκαν και στους προηγούμενους ψυκτικούς κύκλους.

Έχουμε:

$$COP1 = \frac{Q_{e1}}{P_{c1}}, \quad (9.13)$$

Στο σημείο αυτό χρήσιμο είναι να παραθέσουμε ένα διάγραμμα σχηματικής αναπαράστασης του ψυκτικού κυκλώματος διβάθμιας μηχανικής συμπίεσης ατμών με δύο στοιχεία ατμοποίησης σε σύνδεση σε σειρά.



Εικόνα 9.10 Σχηματική αναπαράσταση ψυκτικού κυκλώματος δύο στοιχείων ατμοποίησης με σύνδεση σε σειρά

Για την εύρεση του συντελεστή συμπεριφοράς της βαθμίδας 2 ή βαθμίδας υψηλής πίεσεως θα εργαστούμε ως ακολούθως. Ο συντελεστής συμπεριφοράς ορίζεται ως η ψυκτική ισχύς την οποία λαμβάνουμε από τον ατμοποιητή προς την μηχανική ισχύ η οποία καταναλίσκεται από τον συμπιεστή για την συμπίεση του εκάστοτε εργαζόμενου ψυκτικού μέσου. Δηλαδή με λίγα λόγια ο συντελεστής συμπεριφοράς αποτελεί ένα πηλίκο (τι λαμβάνω)/(τι πληρώνω). Η χαμηλή βαθμίδα διαθέτει τον ατμοποιητή Evaporator 1, τον συμπιεστή χαμηλής πίεσεως και ως συμπυκνωτή, διαθέτει το δοχείο μερικής ατμοποίησης (flash tank). Η υψηλή βαθμίδα διαθέτει ως ατμοποιητή τον Evaporator 2, ως συμπιεστή τον συμπιεστή υψηλής πίεσεως και ως συμπυκνωτή, τον συμπυκνωτή της ψυκτικής εγκαταστάσεως. Έτσι για να ορίσουμε ορθά τον

ζητούμενο συντελεστή συμπεριφοράς, θα κάνουμε μία τομή στο παραπάνω διάγραμμα απομονώνοντας τον συμπυκνωτή και τον συμπιεστή υψηλής πίεσεως από το υπόλοιπο ψυκτικό κύκλωμα. Αυτό γίνεται διότι θεωρούμε πως η υψηλή βαθμίδα ((βλέπει)) ως ψύξη όχι την παραγόμενη από τον ατμοποιητή Evaporator 2 αλλά την ενθαλπική διαφορά από την είσοδο του συμπιεστή υψηλής πίεσεως, έως την έξοδο του συμπυκνωτή εξ' αιτίας του γεγονότος ότι η βαθμίδα υψηλής πίεσεως παράγει ψύξη όχι μόνο από τον ατμοποιητή Evaporator 2 αλλά και από τον ενδιάμεσο ψύκτη δηλαδή το δοχείο μερικής ατμοποίησης (flash tank). Για να εξηγηθεί καλύτερα η τελευταία πρόταση ας δούμε την μορφή του ισοζυγίου μάζας και του ενεργειακού ισοζυγίου στον ενδιάμεσο ψύκτη και στον ψύκτη υπόψυξης κορεσμένου συμπυκνώματος (να σημειωθεί ότι επειδή ο ψύκτης υπόψυξης αποτελεί κλειστό σύστημα δεν χρειάζεται να γραφεί εξίσωση ισοζυγίου μάζας διότι δεν υπάρχει ανάμιξη μάζας μεταξύ των συναλλασόμενων θερμότητα ρευμάτων):

Ενδιάμεσος ψύκτης:

$$m_a + m_f = m_b + m_c, \quad (9.14)$$

$$m_f = m_b + m_c - m_a, \quad (9.15)$$

$$m_a * h_2 + m_f * h_7 = m_b * h_3 + m_c * h_4, \quad (9.16)$$

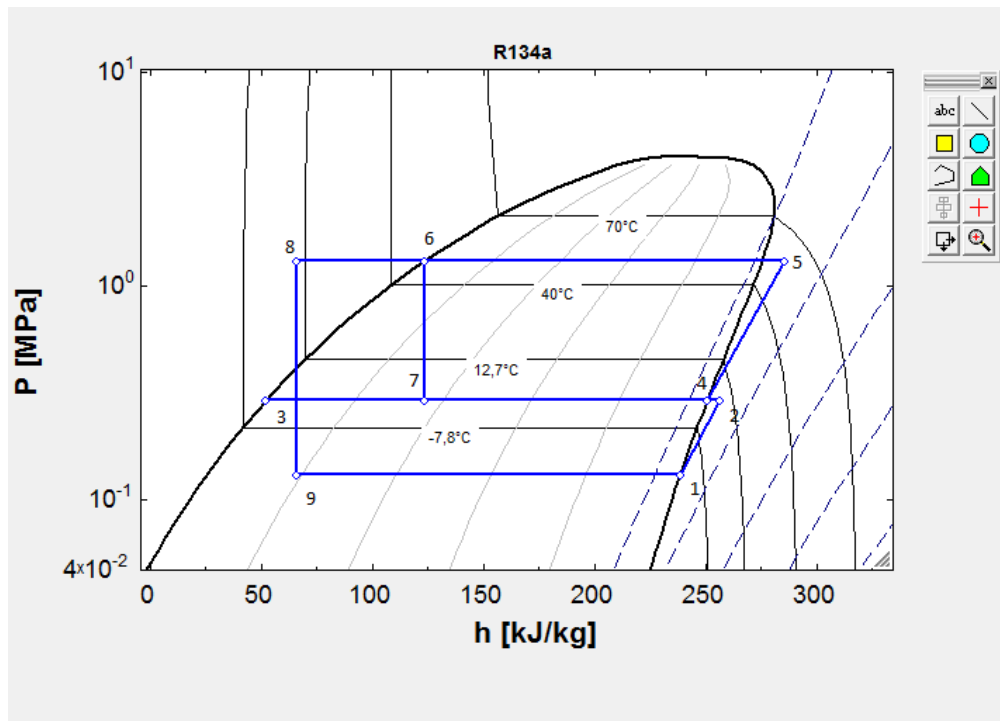
$$m_a * h_2 + m_b * h_7 + m_c * h_7 - m_a * h_7 = m_b * h_3 + m_c * h_4, \quad (9.17)$$

$$m_a * (h_2 - h_7) + m_b (h_7 - h_3) = m_c * (h_4 - h_7), \quad (9.18)$$

Ψύκτης υπόψυξης:

$$m_g * h_7 + m_h * h_6 = m_g * h_4 + m_h * h_8, \quad (9.19)$$

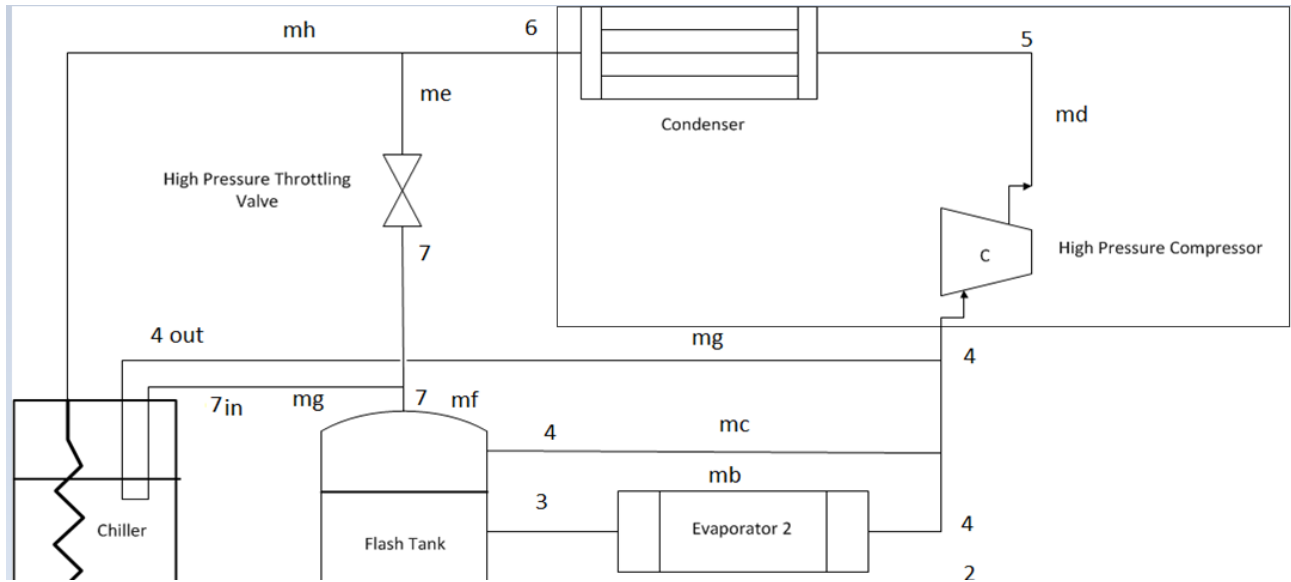
$$m_h * (h_6 - h_8) = m_g * (h_4 - h_7), \quad (9.20)$$



Εικόνα 9.11 Διάγραμμα P-h κύκλου με δύο ατμοποιητές

Με την βοήθεια του διαγράμματος P-h το οποίο κατασκευάστηκε με το EES και δόθηκε στο συγκεκριμένο σημείο ως επεξηγηματικό όργανο μπορούμε να διακρίνουμε ότι εάν παραλείψουμε τις ροές μάζας στο δοχείο μερικής ατμοποίησης διότι αυτές υφίστανται αδιαβατική ανάμιξη εντός αυτού όπως έχει προαναφερθεί και ασχοληθούμε μόνο με τις ενθαλπίες βλέπουμε ότι με ενδιάμεση κατάσταση την κατάσταση διφασικού μίγματος υγρού-ατμού (7) η συμπύκνωση (2) → (3) καλύπτεται ενεργειακά από την ατμοποίηση (7) → (4) η οποία αποτελεί παραγωγή ψύξης για την υψηλή βαθμίδα πίεσης. Παρατηρούμε επίσης ότι η υπόψυξη του κορεσμένου συμπυκνώματος πραγματοποιείται με συναλλαγή θερμότητας με το ρεύμα μάζας m_g το οποίο από την κατάσταση διφασικού μίγματος υγρού-ατμού μεταπίπτει στην κατάσταση του κορεσμένου ατμού αφού παραλάβει την θερμότητα του ρεύματος κορεσμένου συμπυκνώματος στον ψύκτη υπόψυξης.

Έτσι παίρνουμε το ακόλουθο διάγραμμα:



Εικόνα 9.12 Διάγραμμα με τομή για ορισμό του COP υψηλής βαθμίδας

Έτσι ο συντελεστής συμπεριφοράς της βαθμίδας υψηλής πίεσεως ορίζεται ως η ενθαλπική διαφορά από την είσοδο του συμπιεστή ως την έξοδο του συμπυκνωτή προς την αύξηση της ενθαλπίας στον συμπιεστή υψηλής πίεσεως (προφανώς αναφερόμαστε σε ενθαλπίες διότι η ροή μάζας στον συμπιεστή υψηλής πίεσεως και στον συμπυκνωτή είναι ίδια και ίση με md).

$$COP2 = \frac{h4 - h6}{h5 - h4} = \frac{h4 - h5 + h5 - h6}{h5 - h4} = \frac{Qc - Pc2}{Pc2}, \quad (9.21)$$

Έτσι, τέλος λαμβάνουμε την πολύ ενδιαφέρουσα σχέση η οποία μας δείχνει ότι ο συντελεστής συμπεριφοράς της βαθμίδας υψηλής πίεσεως ισούται με την διαφορά στην αποδιδόμενη στο περιβάλλον ισχύ του συμπυκνωτή με την ισχύ την οποία απορροφά ο συμπιεστής υψηλής πίεσεως, προς την ισχύ αυτού.

Τώρα εάν λάβουμε το ενεργειακό ισοζύγιο ολόκληρης της εγκατάστασης δεχόμενοι ότι δεν υπάρχουν απώλειες θερμότητας στους δύο ψύκτες λαμβάνουμε ότι:

$$Qc = Qe1 + Qe2 + Pc1 + Pc2, \quad (9.22)$$

$$COP2 = \frac{Qe1 + Qe2 + Pc1}{Pc2}, \quad (9.23)$$

Τώρα, ορίζουμε τα διαγράμματα τα οποία μας ενδιαφέρουν με διάφορες παραμέτρους με σκοπό την βέλτιστη ανάλυση και κατανόηση του κύκλου.

Αρχικά ορίζουμε ως μεταβλητές στο EES, την χαμηλή θερμοκρασία ψύξης ή την κατάψυξη να μεταβάλλεται από -40 °C έως -1 °C και την υψηλή θερμοκρασία ψύξης να μεταβάλλεται από -5 °C έως 15 °C. Ορίζουμε τις ισχύεις στους δύο ατμοποιητές ίσες με 100 kW έκαστη (λόγω του ότι στις περισσότερες βιομηχανίες δίδεται η απαιτούμενη ισχύς ατμοποίησης και ζητούνται τα ρεύματα μάζας ψυκτικού μέσου που κυκλοφορούν στους ατμοποιητές, εδώ θα ληφθούν ως μεταβλητές). Παράλληλα, θεωρούμε σταθερούς ισεντροπικού βαθμούς απόδοσης στους συμπιεστές και ίσους με 0,9. Επίσης ο βαθμός απόδοσης του ψύκτη υπόψυξης λαμβάνεται ίσος προς 0,7 και επίσης η θερμοκρασία συμπύκνωσης ίση με 50 °C. Ακόμη, να αναφερθεί ότι ο κύκλος αναλύεται για ψυκτικό μέσο R-134a.

Αρχικά με την βοήθεια του EES και εξ' αιτίας της ύπαρξης δύο ανεξάρτητων μεταβλητών οι οποίες βαίνουν αύξουσες με μαθηματική σχέση βήματος μεταξύ τους, είναι απαραίτητο να παραστήσουμε τις ζητούμενες ποσότητες σε διάγραμμα τριών αξόνων.

Ως παράδειγμα θα δώσουμε την μεταβολή του συντελεστή συμπεριφοράς της χαμηλής βαθμίδας σε συνάρτηση με τις δύο θερμοκρασίες ατμοποίησης COP1(Te1, Te2).

Αρχικά ξεκινάμε ορίζοντας της μεταβλητές όπως έχουμε προαναφέρει κάνοντας Comment {...} στον κώδικα μας.

```

EES Academic Professional: C:\Users\user\Desktop\final\D
File Edit Search Options Calculate Tables Plot
"??p??? atμ?p???t??"
rr$='R134a'
{T[1]=--40}
h[1]=Enthalpy(rr$:T=T[1];x=1)
P[1]=Pressure(rr$:T=T[1];x=1)
s[1]=Entropy(rr$:T=T[1];x=1)
s[2]=s[1]
P[2]=Pm
h[2]=Enthalpy(rr$:s=s[2];P=P[2])
T[2]=Temperature(rr$:s=s[2];P=P[2])
isc1=0.9
P[3]=Pm
h[3]=h[1]+(h[2]-h[1])/isc1
s[3]=Entropy(rr$:P=P[3];h=h[3])
T[3]=Temperature(rr$:P=P[3];h=h[3])
P[4]=Pm
h[4]=Enthalpy(rr$:P=P[4];x=0)
s[4]=Entropy(rr$:P=P[4];x=0)
T[4]=Temperature(rr$:P=P[4];x=0)
{T[5]=--5}

```

Ύστερα δημιουργούμε τον πίνακα μεταβλητών ο οποίος θα περιέχει όλες τις μεταβλητές που μας ενδιαφέρουν. Δηλαδή τα COP1, COP2, Pc1, Pc2, Pt, Qc, Te1, Te2.; Έτσι συντάσσοντας τον πίνακα με τις διαδικασίες που έχουμε προαναφέρει και πατώντας το πλήκτρο run λαμβάνουμε έναν ολοκληρωμένο πίνακα τιμών για τα ζεύγη των μεταβλητών θερμοκρασιών ατμοποίησης.

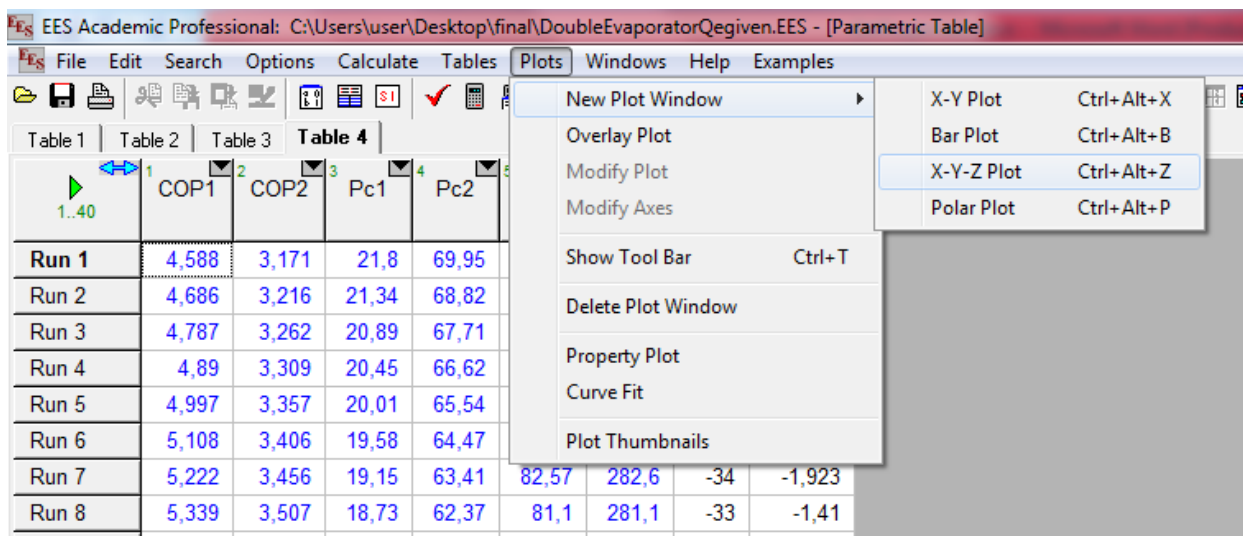
EES Academic Professional: C:\Users\user\Desktop\final\DoubleEvaporatorQegiven.EES - [Para

File Edit Search Options Calculate Tables Plots Windows Help Examples

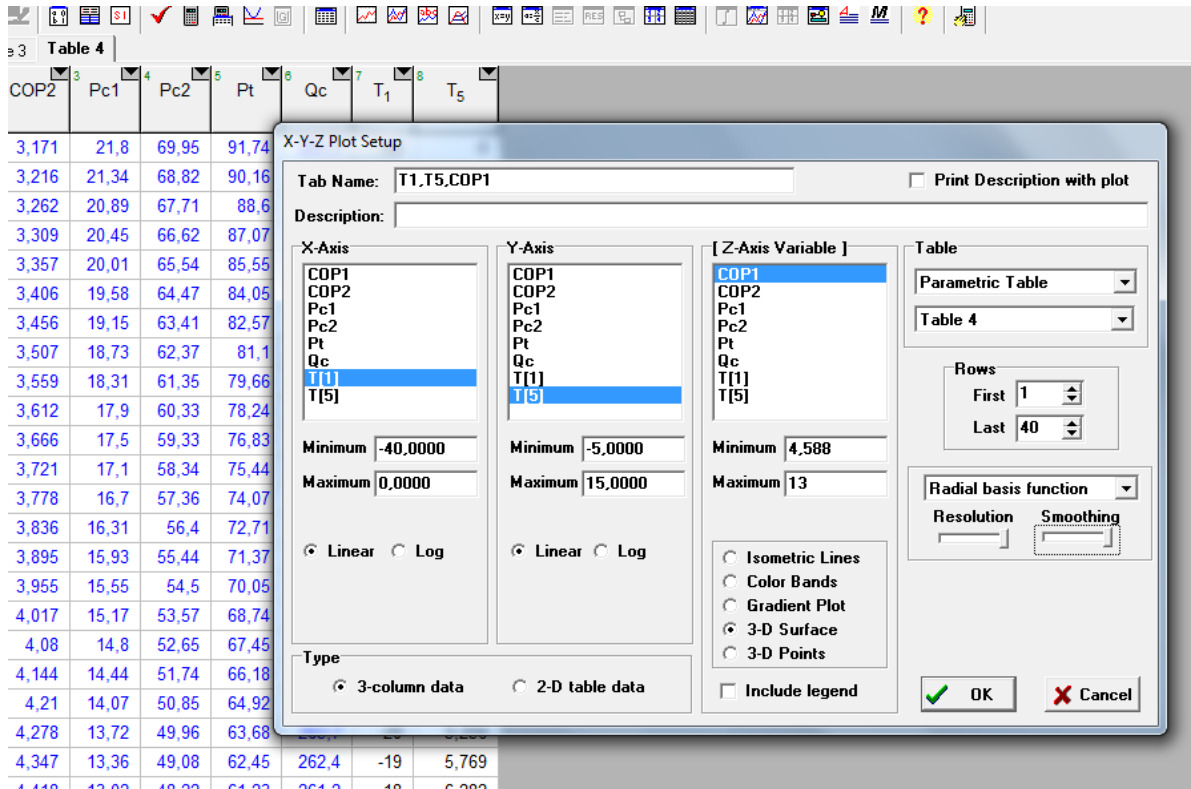
Table 1 | Table 2 | Table 3 | **Table 4**

	1	2	3	4	5	6	7	8
	COP1	COP2	Pc1	Pc2	Pt	Qc	T ₁	T ₅
Run 1	4,588	3,171	21,8	69,95	91,74	291,7	-40	-5
Run 2	4,686	3,216	21,34	68,82	90,16	290,2	-39	-4,487
Run 3	4,787	3,262	20,89	67,71	88,6	288,6	-38	-3,974
Run 4	4,89	3,309	20,45	66,62	87,07	287,1	-37	-3,462
Run 5	4,997	3,357	20,01	65,54	85,55	285,5	-36	-2,949
Run 6	5,108	3,406	19,58	64,47	84,05	284	-35	-2,436
Run 7	5,222	3,456	19,15	63,41	82,57	282,6	-34	-1,923
Run 8	5,339	3,507	18,73	62,37	81,1	281,1	-33	-1,41
Run 9	5,46	3,559	18,31	61,35	79,66	279,7	-32	-0,8974
Run 10	5,585	3,612	17,9	60,33	78,24	278,2	-31	-0,3846
Run 11	5,715	3,666	17,5	59,33	76,83	276,8	-30	0,1282
Run 12	5,848	3,721	17,1	58,34	75,44	275,4	-29	0,641
Run 13	5,987	3,778	16,7	57,36	74,07	274,1	-28	1,154
Run 14	6,13	3,836	16,31	56,4	72,71	272,7	-27	1,667
Run 15	6,278	3,895	15,93	55,44	71,37	271,4	-26	2,179
Run 16	6,431	3,955	15,55	54,5	70,05	270,1	-25	2,692
Run 17	6,591	4,017	15,17	53,57	68,74	268,7	-24	3,205
Run 18	6,756	4,08	14,8	52,65	67,45	267,5	-23	3,718
Run 19	6,927	4,144	14,44	51,74	66,18	266,2	-22	4,231
Run 20	7,105	4,21	14,07	50,85	64,92	264,9	-21	4,744
Run 21	7,29	4,278	13,72	49,96	63,68	263,7	-20	5,256
Run 22	7,483	4,347	13,36	49,08	62,45	262,4	-19	5,769
Run 23	7,683	4,418	13,02	48,22	61,23	261,2	-18	6,282
Run 24	7,892	4,491	12,67	47,36	60,03	260	-17	6,795
Run 25	8,11	4,565	12,33	46,51	58,84	258,8	-16	7,308
Run 26	8,337	4,641	11,99	45,68	57,67	257,7	-15	7,821
Run 27	8,574	4,719	11,66	44,85	56,54	256,5	-14	8,334

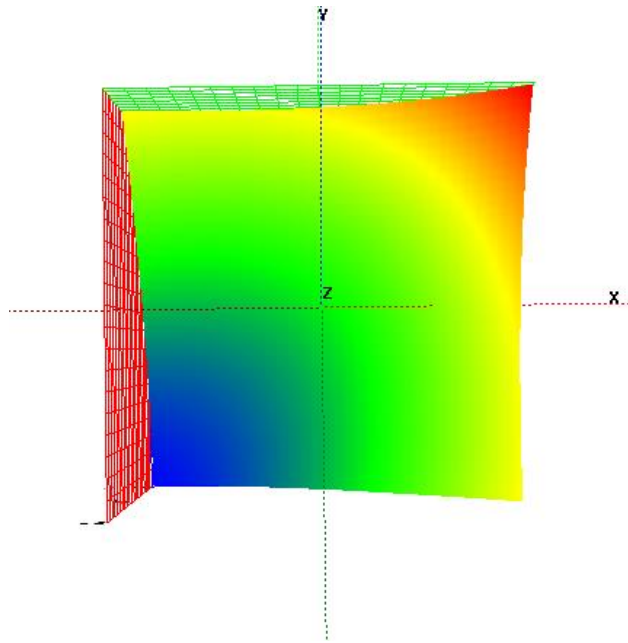
Τώρα για να κατασκευάσουμε το διάγραμμα που επιθυμούμε, διαλέγουμε την επιλογή Plots στην Toolbar μας και από εκεί τις επιλογές New Plot Window και X-Y-Z Plot.



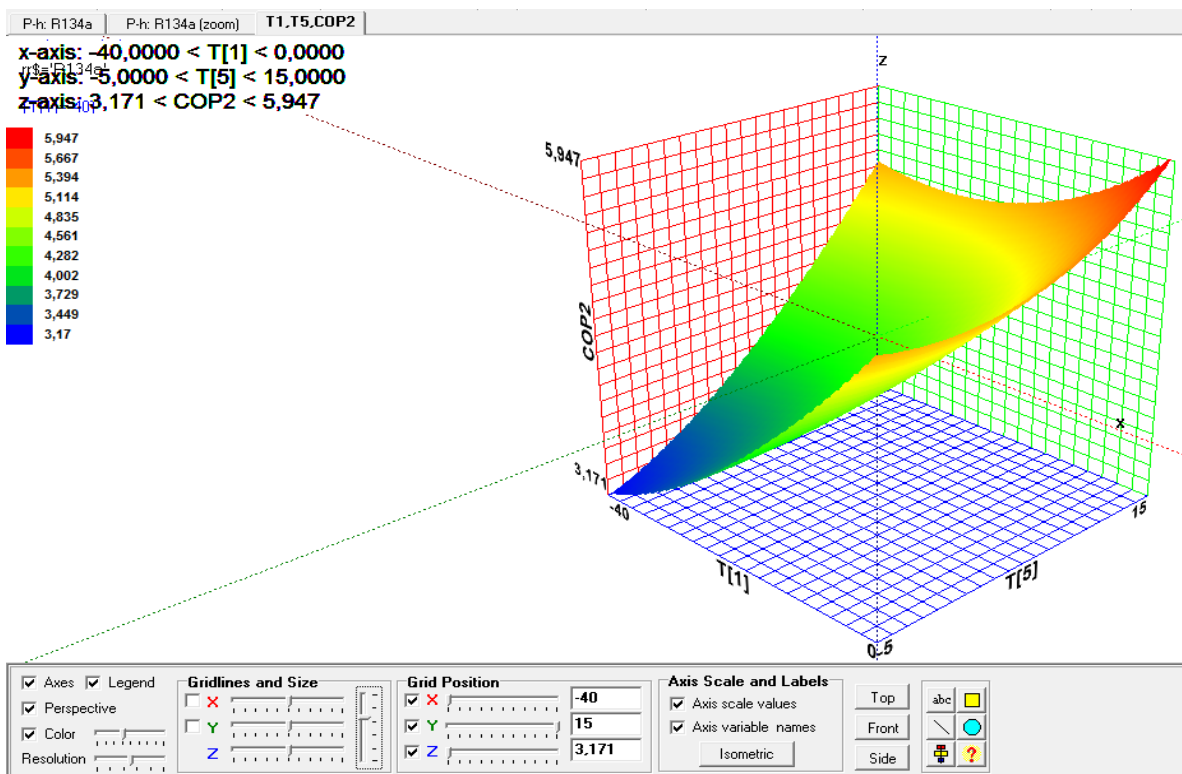
Τώρα εμφανίζεται ένα pop-up window με τις επιλογές δημιουργίας του διαγράμματος. Διαλέγουμε τις μεταβλητές οι οποίες μας ενδιαφέρουν δηλαδή το διάγραμμα να καταλαμβάνει επιφάνεια 3-D Surface και η ομαλότητα και η ανάλυση της επιφάνειας να είναι μέγιστες.



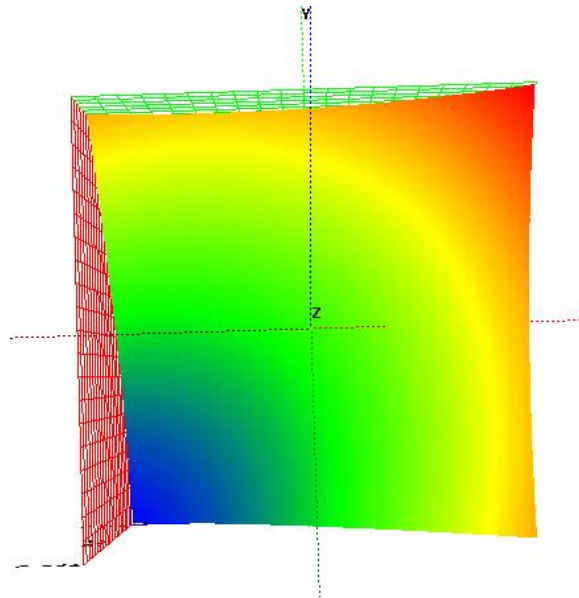
Χτυπώντας το πλήκτρο OK λαμβάνουμε το επιθυμητό διάγραμμα, και με τις απαραίτητες ενέργειες το παρουσιάζουμε με πιο φιλικό προς τον μηχανικό τρόπο. Έτσι έχουμε μία μορφή της επιφάνειας σε προοπτική και με κίνηση του διαγράμματος ώστε να διαγράφεται μόνο από τους άξονες X-Y παίρνουμε χρωματικά την μεταβολή του COP1.



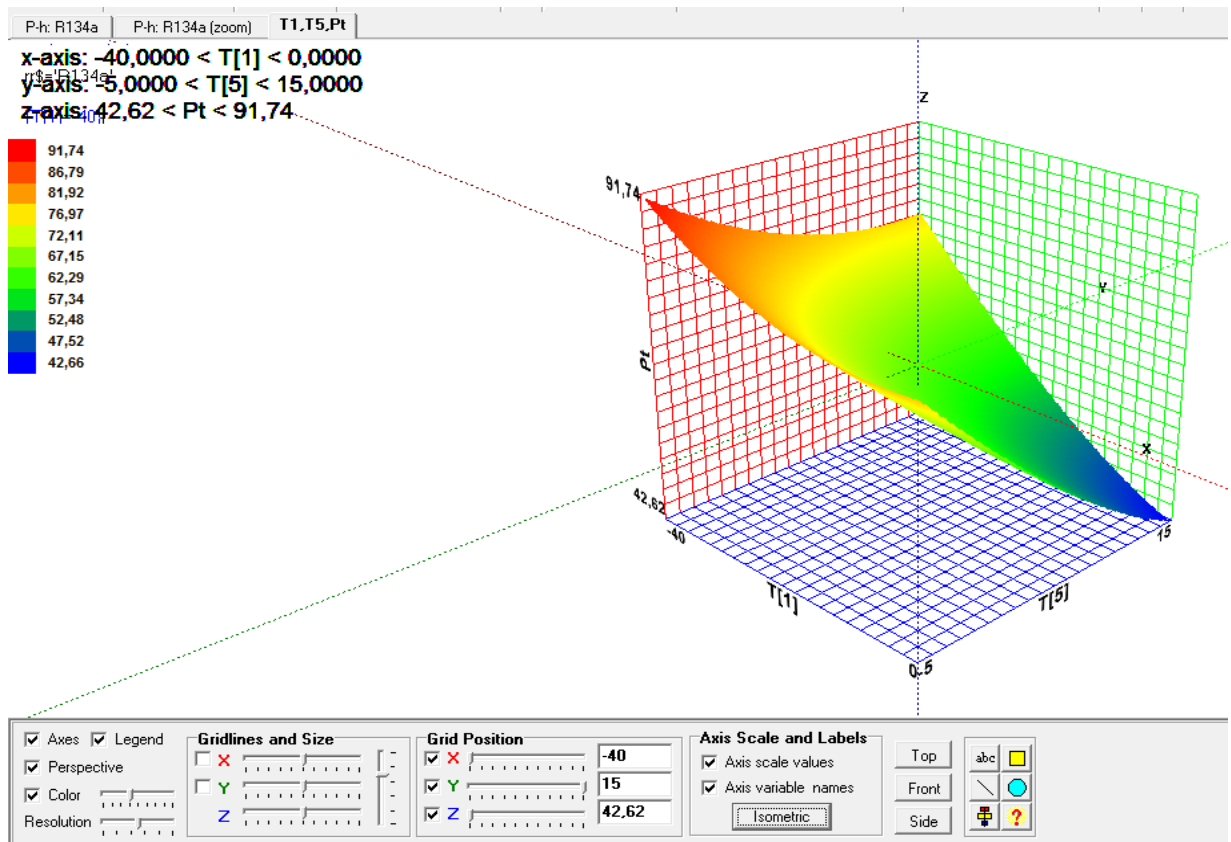
Στο παραπάνω σχήμα ο άξονας X παριστά την T_{e1} από $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ έως $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ και ο άξονας Y την T_{e2} από $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ έως $15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ακολουθούμε την ίδια διαδικασία και για τον συντελεστή συμπεριφοράς της υψηλής βαθμίδας.



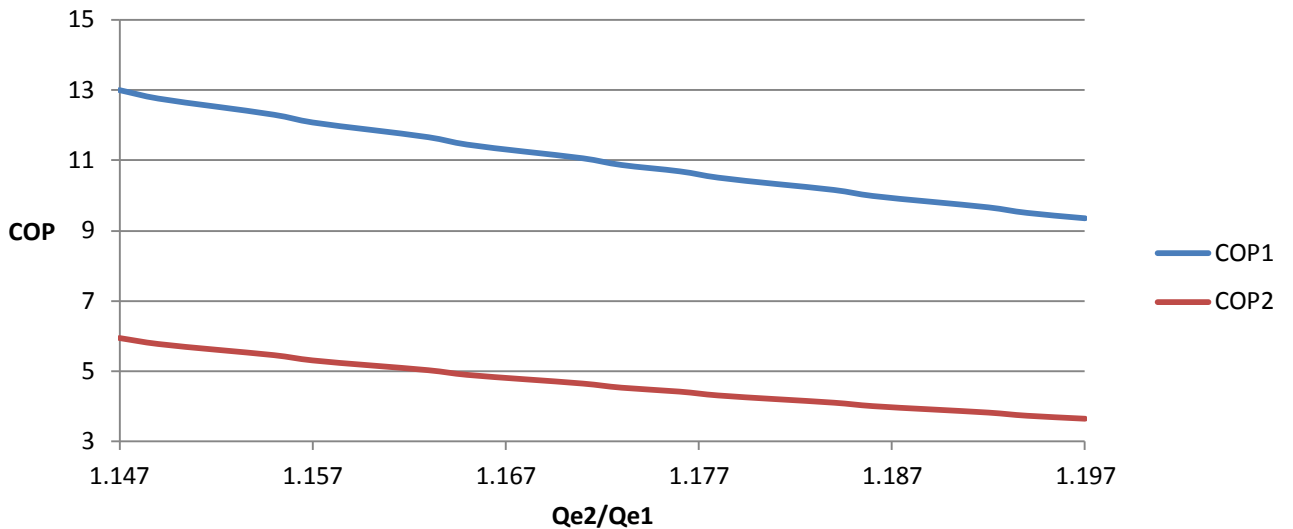
Διάγραμμα 9.120 Μεταβολή COP2 συναρτήση των δύο θερμοκρασιών ψύξης



Ενδεικτικά παραθέτουμε και το **Διάγραμμα 9.121** μεταβολής της απορροφούμενης ισχύος από τους δύο συμπιεστές.

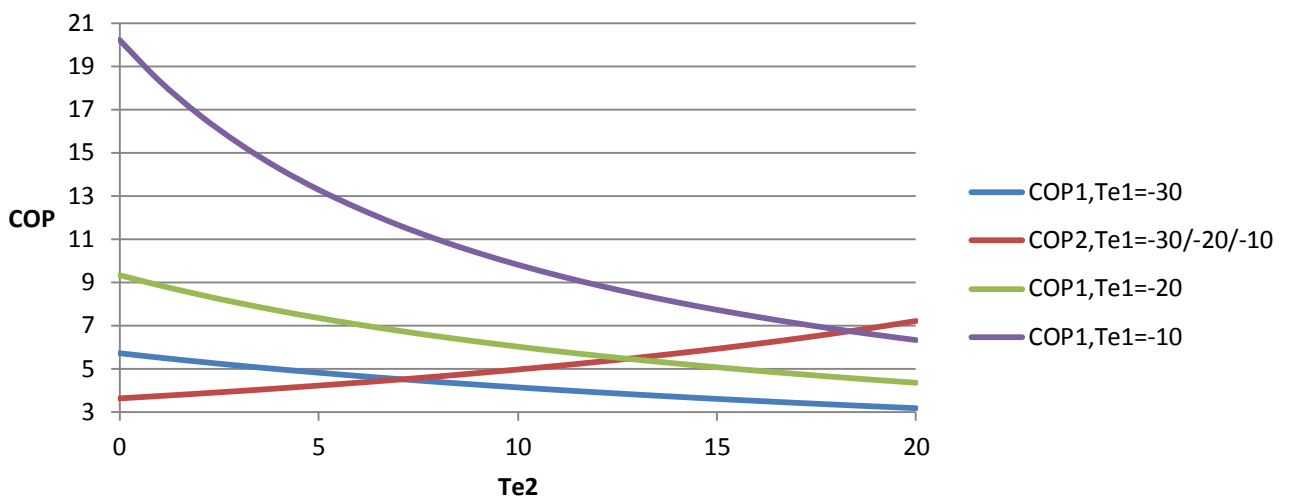


Διάγραμμα 9.122 COP-Qe2/Qe1 για R-134a και Tc=50 °C



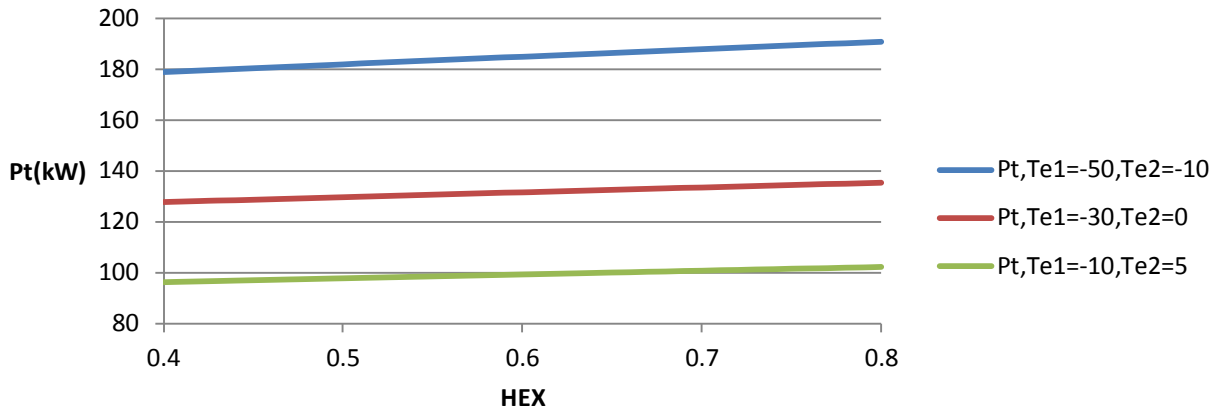
Διάγραμμα μεταβολής συντελεστή συμπεριφοράς σε συνάρτηση με το πηλίκο των ψυκτικών ισχύων των δύο ατμοποιητών

Διάγραμμα 9.123 COP-Tevaporation2 για R-134a και Tc=50 °C



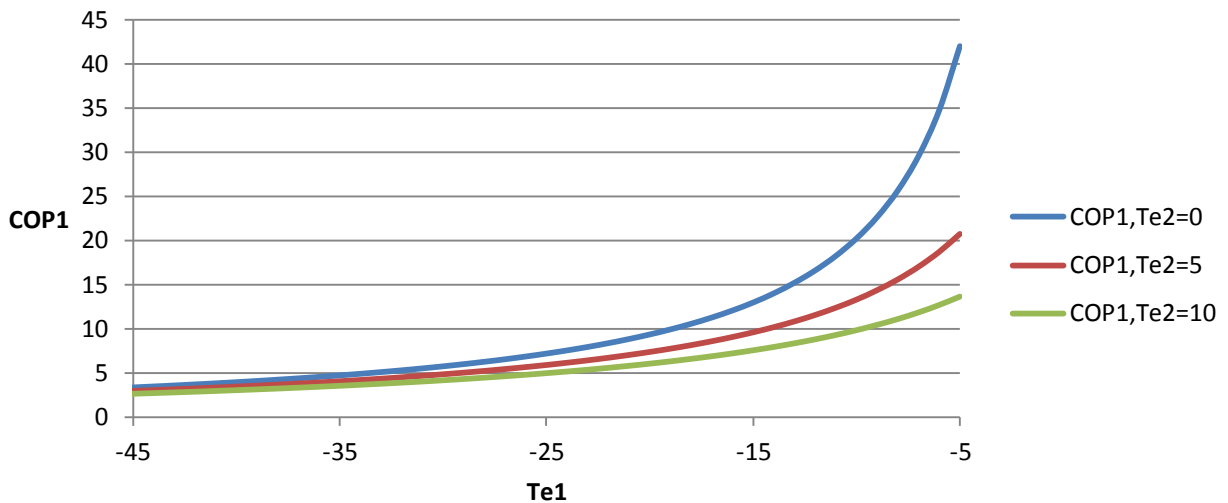
Μεταβολή του συντελεστή συμπεριφοράς σε συνάρτηση με την υψηλή θερμοκρασία ψύξης

Διάγραμμα 9.124 Pt-HEX για R-134a και $T_c=50\text{ }^\circ\text{C}$



Μεταβολή της ισχύος των συμπιεστών σε συνάρτηση σε μτον βαθμό απόδοσης του ψύκτη υπόψυξης.

Διάγραμμα 9.125 COP1-Tevaporation1 για R-134a και $T_c=50\text{ }^\circ\text{C}$



Μεταβολή του συντελεστή συμπεριφοράς της χαμηλής βαθμίδας σε συνάρτηση με την χαμηλή θερμοκρασία ψύξης

Παράρτημα Ι: Κώδικες στο E.E.S.

Μονοβάθμιος ψυκτικός κύκλος μηχανικής συμπίεσης ατμών.

"Μονοβάθμιος κύκλος μηχανικής συμπίεσης ατμών"

rr\$='R134a'

{T[1]=-100}

h[1]=Enthalpy(rr\$;T=T[1];x=1)

s[1]=Entropy(rr\$;T=T[1];x=1)

P[1]=Pressure(rr\$;T=T[1];x=1)

s[2]=s[1]

T[4]=50

h[4]=Enthalpy(rr\$;T=T[4];x=0)

s[4]=Entropy(rr\$;T=T[4];x=0)

P[4]=Pressure(rr\$;T=T[4];x=0)

P[2]=P[4]

T[2]=Temperature(rr\$;P=P[2];s=s[2])

h[2]=Enthalpy(rr\$;P=P[2];s=s[2])

isc=0,9

h[3]=h[1]+(h[2]-h[1])/isc

P[3]=P[2]

T[3]=Temperature(rr\$;h=h[3];P=P[3])

s[3]=Entropy(rr\$;h=h[3];P=P[3])

P[5]=P[1]

h[5]=h[4]

T[5]=Temperature(rr\$;h=h[5];P=P[5])

s[5]=Entropy(rr\$;h=h[5];P=P[5])

P[6]=P[1]

s[6]=s[1]

$$h[6]=h[1]$$

$$T[6]=T[1]$$

$$m=1$$

$$Q_e=m*(h[1]-h[5])$$

$$P_c=m*(h[3]-h[1])$$

$$Q_c=m*(h[3]-h[4])$$

$$COP=Q_e/P_c$$

$$COP_o=(h[1]-h[5])/(h[3]-h[1])$$

$$x[1]=h[1]$$

$$x[2]=h[3]$$

$$x[3]=h[4]$$

$$x[4]=h[5]$$

$$x[5]=h[6]$$

$$y[1]=P[1]$$

$$y[2]=P[3]$$

$$y[3]=P[4]$$

$$y[4]=P[5]$$

$$y[5]=P[6]$$

$$p=P[4]/P[1]$$

Μονοβάθμιος κύκλος μηχανικής συμπίεσης ατμών με υπερθέρμανση.

"Μονοβάθμιος κύκλος μηχανικής συμπίεσης ατμών με υπερθέρμανση"

$$rr\$='R134a'$$

$$T[1]=-10$$

$$h[1]=Enthalpy(rr\$,T=T[1];x=1)$$

$$s[1]=Entropy(rr\$,T=T[1];x=1)$$

$$P[1]=Pressure(rr\$,T=T[1];x=1)$$

$$sh=10$$

$$Tsh=T[1]+sh$$

$$Psh=P[1]$$

$$hsh=Enthalpy(rr\$,T=Tsh;P=Psh)$$

$$ssh=Entropy(rr\$,T=Tsh;P=Psh)$$

$$s[2]=ssh$$

$$T[4]=50$$

$$h[4]=\text{Enthalpy}(rr\$,T=T[4];x=0)$$

$$s[4]=\text{Entropy}(rr\$,T=T[4];x=0)$$

$$P[4]=\text{Pressure}(rr\$,T=T[4];x=0)$$

$$P[2]=P[4]$$

$$T[2]=\text{Temperature}(rr\$,P=P[2];s=s[2])$$

$$h[2]=\text{Enthalpy}(rr\$,P=P[2];s=s[2])$$

$$isc=0,9$$

$$h[3]=hsh+(h[2]-hsh)/isc$$

$$P[3]=P[2]$$

$$T[3]=\text{Temperature}(rr\$,h=h[3];P=P[3])$$

$$s[3]=\text{Entropy}(rr\$,h=h[3];P=P[3])$$

$$P[5]=P[1]$$

$$h[5]=h[4]$$

$$T[5]=\text{Temperature}(rr\$,h=h[5];P=P[5])$$

$$s[5]=\text{Entropy}(rr\$,h=h[5];P=P[5])$$

$$P[6]=Psh$$

$$s[6]=ssh$$

$$h[6]=hsh$$

$$T[6]=Tsh$$

$$m=1$$

$$Qe=m*(hsh-h[5])$$

$$Pc=m*(h[3]-hsh)$$

$$Qc=m*(h[3]-h[4])$$

$$COP=Qe/Pc$$

$$COPo=(hsh-h[5])/(h[3]-hsh)$$

$$x[1]=h[1]$$

$$x[2]=hsh$$

x[3]=h[3]
x[4]=h[4]
x[5]=h[5]
x[6]=h[6]
y[1]=P[1]
y[2]=Psh
y[3]=P[3]
y[4]=P[4]
y[5]=P[5]
y[6]=P[6]

Διβάθμιος ψυκτικός κύκλος μηχανικής συμπίεσης ατμών.

"Διβάθμιος"

rr\$='R134a'

{T[1]=-45}

h[1]=Enthalpy(rr\$;T=T[1];x=1)

P[1]=Pressure(rr\$;T=T[1];x=1)

s[1]=Entropy(rr\$;T=T[1];x=1)

s[2]=s[1]

P[2]=Pm

h[2]=Enthalpy(rr\$;s=s[2];P=P[2])

T[2]=Temperature(rr\$;s=s[2];P=P[2])

isc1=0,9

P[3]=P[2]

h[3]=h[1]+(h[2]-h[1])/isc1

T[3]=Temperature(rr\$;P=P[3];h=h[3])

s[3]=Entropy(rr\$;P=P[3];h=h[3])

P[4]=P[3]

h[4]=Enthalpy(rr\$;P=P[4];x=1)

T[4]=Temperature(rr\$;P=P[4];x=1)

s[4]=Entropy(rr\$;P=P[4];x=1)

T[7]=50

$$P[7]=\text{Pressure}(\text{rr}\$,T=T[7];x=0)$$

$$h[7]=\text{Enthalpy}(\text{rr}\$,T=T[7];x=0)$$

$$s[7]=\text{Entropy}(\text{rr}\$,T=T[7];x=0)$$

$$\text{isc2}=0,9$$

$$P[5]=P[7]$$

$$s[5]=s[4]$$

$$h[5]=\text{Enthalpy}(\text{rr}\$,P=P[5];s=s[5])$$

$$T[5]=\text{Temperature}(\text{rr}\$,P=P[5];s=s[5])$$

$$P[6]=P[5]$$

$$h[6]=h[4]+(h[5]-h[4])/\text{isc2}$$

$$T[6]=\text{Temperature}(\text{rr}\$,P=P[6];h=h[6])$$

$$s[6]=\text{Entropy}(\text{rr}\$,P=P[6];h=h[6])$$

$$P_m=\text{sqrt}(P[1]*P[7])$$

$$P[8]=P_m$$

$$h[8]=h[7]$$

$$T[8]=\text{Temperature}(\text{rr}\$,P=P[8];h=h[8])$$

$$s[8]=\text{Entropy}(\text{rr}\$,P=P[8];h=h[8])$$

$$P[9]=P_m$$

$$h[9]=\text{Enthalpy}(\text{rr}\$,P=P[9];x=0)$$

$$T[9]=\text{Temperature}(\text{rr}\$,P=P[9];x=0)$$

$$s[9]=\text{Entropy}(\text{rr}\$,P=P[9];x=0)$$

$$P[10]=P[1]$$

$$h[10]=h[9]$$

$$T[10]=\text{Temperature}(\text{rr}\$,P=P[10];h=h[10])$$

$$s[10]=\text{Entropy}(\text{rr}\$,P=P[10];h=h[10])$$

$$P[11]=P[1]$$

$$h[11]=h[1]$$

$$T[11]=T[1]$$

$$s[11]=s[1]$$

$$m1=1$$

$$Qe1=m1*(h[1]-h[10])$$

$$m2=m1*((h[3]-h[9])/(h[4]-h[8]))$$

$$Qe2=m2*(h[4]-h[8])$$

$$Pc1=m1*(h[3]-h[1])$$

$$Pc2=m2*(h[6]-h[4])$$

$$Qc=m2*(h[6]-h[7])$$

$$COP1=Qe1/Pc1$$

$$COP2=Qe2/Pc2$$

$$COP=Qe1/(Pc1+Pc2)$$

$$x[1]=h[1]$$

$$x[2]=h[3]$$

$$x[3]=h[4]$$

$$x[4]=h[8]$$

$$x[5]=h[4]$$

$$x[6]=h[6]$$

$$x[7]=h[7]$$

$$x[8]=h[8]$$

$$x[9]=h[9]$$

$$x[10]=h[10]$$

$$x[11]=h[11]$$

$$y[1]=P[1]$$

$$y[2]=P[3]$$

$$y[3]=P[4]$$

$$y[4]=P[8]$$

$$y[5]=P[4]$$

$$y[6]=P[6]$$

$$y[7]=P[7]$$

$$y[8]=P[8]$$

$$y[9]=P[9]$$

$$y[10]=P[10]$$

$$y[11]=P[11]$$

$$Pt=Pc1+Pc2$$

$$p=P[7]/P[1]$$

Τριβάθμιος ψυκτικός κύκλος μηχανικής συμπίεσης ατμών.

"Τριβάθμιος"

rr\$='R134a'

{T[1]=-20}

h[1]=Enthalpy(rr\$;T=T[1];x=1)

P[1]=Pressure(rr\$;T=T[1];x=1)

s[1]=Entropy(rr\$;T=T[1];x=1)

s[2]=s[1]

P[2]=Pm1

h[2]=Enthalpy(rr\$;s=s[2];P=P[2])

T[2]=Temperature(rr\$;s=s[2];P=P[2])

isc1=0,9

h[3]=h[1]+(h[2]-h[1])/isc1

P[3]=Pm1

s[3]=Entropy(rr\$;h=h[3];P=P[3])

T[3]=Temperature(rr\$;h=h[3];P=P[3])

P[4]=Pm1

h[4]=Enthalpy(rr\$;P=P[4];x=1)

s[4]=Entropy(rr\$;P=P[4];x=1)

T[4]=Temperature(rr\$;P=P[4];x=1)

s[5]=s[4]

P[5]=Pm2

h[5]=Enthalpy(rr\$;s=s[5];P=P[5])

T[5]=Temperature(rr\$;s=s[5];P=P[5])

isc2=0,9

P[6]=Pm2

h[6]=h[4]+(h[5]-h[4])/isc2

s[6]=Entropy(rr\$;h=h[6];P=P[6])

$$T[6]=\text{Temperature}(\text{rr}\$,h=h[6];P=P[6])$$

$$P[7]=Pm2$$

$$h[7]=\text{Enthalpy}(\text{rr}\$,P=P[7];x=1)$$

$$s[7]=\text{Entropy}(\text{rr}\$,P=P[7];x=1)$$

$$T[7]=\text{Temperature}(\text{rr}\$,P=P[7];x=1)$$

$$\text{isc3}=0,9$$

$$P[8]=P[10]$$

$$s[8]=s[7]$$

$$h[8]=\text{Enthalpy}(\text{rr}\$,P=P[8];s=s[8])$$

$$T[8]=\text{Temperature}(\text{rr}\$,P=P[8];s=s[8])$$

$$P[9]=P[10]$$

$$h[9]=h[7]+(h[8]-h[7])/\text{isc3}$$

$$s[9]=\text{Entropy}(\text{rr}\$,P=P[9];h=h[9])$$

$$T[9]=\text{Temperature}(\text{rr}\$,P=P[9];h=h[9])$$

$$T[10]=50$$

$$P[10]=\text{Pressure}(\text{rr}\$,T=T[10];x=0)$$

$$h[10]=\text{Enthalpy}(\text{rr}\$,T=T[10];x=0)$$

$$s[10]=\text{Entropy}(\text{rr}\$,T=T[10];x=0)$$

$$Pm1=((P[1]^{2/3})*(P[10]^{1/3}))$$

$$Pm2=((P[1]^{1/3})*(P[10]^{2/3}))$$

$$P[11]=Pm2$$

$$h[11]=h[10]$$

$$s[11]=\text{Entropy}(\text{rr}\$,P=P[11];h=h[11])$$

$$T[11]=\text{Temperature}(\text{rr}\$,P=P[11];h=h[11])$$

$$P[12]=Pm2$$

$$h[12]=\text{Enthalpy}(\text{rr}\$,P=P[12];x=0)$$

$$s[12]=\text{Entropy}(\text{rr}\$,P=P[12];x=0)$$

$$T[12]=\text{Temperature}(\text{rr}\$,P=P[12];x=0)$$

$$P[13]=Pm1$$

$$h[13]=h[12]$$

$$s[13]=\text{Entropy}(r\$;P=P[13];h=h[13])$$

$$T[13]=\text{Temperature}(r\$;P=P[13];h=h[13])$$

$$P[14]=Pm1$$

$$h[14]=\text{Enthalpy}(r\$;P=P[14];x=0)$$

$$s[14]=\text{Entropy}(r\$;P=P[14];x=0)$$

$$T[14]=\text{Temperature}(r\$;P=P[14];x=0)$$

$$P[15]=P[1]$$

$$h[15]=h[14]$$

$$s[15]=\text{Entropy}(r\$;P=P[15];h=h[15])$$

$$T[15]=\text{Temperature}(r\$;P=P[15];h=h[15])$$

$$P[16]=P[1]$$

$$h[16]=h[1]$$

$$T[16]=T[1]$$

$$s[16]=s[1]$$

$$m1=1$$

$$m2=m1*((h[3]-h[14])/(h[4]-h[13]))$$

$$m3=m2*((h[6]-h[12])/(h[7]-h[11]))$$

$$Qe=m1*(h[1]-h[15])$$

$$Pc1=m1*(h[3]-h[1])$$

$$Pc2=m2*(h[6]-h[4])$$

$$Pc3=m3*(h[9]-h[7])$$

$$Qc=m3*(h[9]-h[10])$$

$$Pt=Pc1+Pc2+Pc3$$

$$COP=Qe/Pt$$

$$COP1=Qe/Pc1$$

$$COP2=(Qe+Pc1)/Pc2$$

$$\text{COP3}=(Q_e+P_{c1}+P_{c2})/P_{c3}$$

x[1]=h[1]
x[2]=h[3]
x[3]=h[4]
x[4]=h[13]
x[5]=h[4]
x[6]=h[6]
x[7]=h[7]
x[8]=h[11]
x[9]=h[7]
x[10]=h[9]
x[11]=h[10]
x[12]=h[11]
x[13]=h[12]
x[14]=h[13]
x[15]=h[14]
x[16]=h[15]
x[17]=h[16]

y[1]=P[1]
y[2]=P[3]
y[3]=P[4]
y[4]=P[13]
y[5]=P[4]
y[6]=P[6]
y[7]=P[7]
y[8]=P[11]
y[9]=P[7]
y[10]=P[9]
y[11]=P[10]
y[12]=P[11]
y[13]=P[12]
y[14]=P[13]
y[15]=P[14]
y[16]=P[15]
y[17]=P[16]

$$p=P[10]/P[1]$$

Ψυκτικός κύκλος συνδέσεως κλιμακωτού καταρράκτη.

"Cascade"

rr1\$='R134a'

rr2\$='R245fa'

{T[1]=-20}

h[1]=Enthalpy(rr1\$,T=T[1];x=1)

P[1]=Pressure(rr1\$,T=T[1];x=1)

$s[1]=\text{Entropy}(\text{rr1}\$;T=T[1];x=1)$
 $s[2]=s[1]$
 $P[2]=Pm1$
 $h[2]=\text{Enthalpy}(\text{rr1}\$;P=P[2];s=s[2])$
 $T[2]=\text{Temperature}(\text{rr1}\$;P=P[2];s=s[2])$
 $\text{isc1}=0,9$
 $P[3]=Pm1$
 $h[3]=h[1]+(h[2]-h[1])/\text{isc1}$
 $T[3]=\text{Temperature}(\text{rr1}\$;P=P[3];h=h[3])$
 $s[3]=\text{Entropy}(\text{rr1}\$;P=P[3];h=h[3])$
 $T[9]=(T[7]+T[1])/2$
 $P[9]=\text{Pressure}(\text{rr1}\$;T=T[9];x=0)$
 $Pm1=P[9]$
 $h[9]=\text{Enthalpy}(\text{rr1}\$;T=T[9];x=0)$
 $s[9]=\text{Entropy}(\text{rr1}\$;T=T[9];x=0)$
 $h[10]=h[9]$
 $P[10]=P[1]$
 $T[10]=\text{Temperature}(\text{rr1}\$;h=h[10];P=P[10])$
 $s[10]=\text{Entropy}(\text{rr1}\$;h=h[10];P=P[10])$
 $P[11]=P[1]$
 $h[11]=h[1]$
 $T[11]=T[1]$
 $s[11]=s[1]$
 $DT=5$
 $T[4]=T[9]-DT$
 $h[4]=\text{Enthalpy}(\text{rr2}\$;T=T[4];x=1)$
 $P[4]=\text{Pressure}(\text{rr2}\$;T=T[4];x=1)$
 $s[4]=\text{Entropy}(\text{rr2}\$;T=T[4];x=1)$

$$T[7]=50$$

$$h[7]=\text{Enthalpy}(\text{rr2}\$,T=T[7];x=0)$$

$$P[7]=\text{Pressure}(\text{rr2}\$,T=T[7];x=0)$$

$$s[7]=\text{Entropy}(\text{rr2}\$,T=T[7];x=0)$$

$$s[5]=s[4]$$

$$P[5]=P[7]$$

$$h[5]=\text{Enthalpy}(\text{rr2}\$,P=P[5];s=s[5])$$

$$T[5]=\text{Temperature}(\text{rr2}\$,P=P[5];s=s[5])$$

$$\text{isc2}=0,9$$

$$P[6]=P[7]$$

$$h[6]=h[4]+(h[5]-h[4])/\text{isc2}$$

$$T[6]=\text{Temperature}(\text{rr2}\$,P=P[6];h=h[6])$$

$$s[6]=\text{Entropy}(\text{rr2}\$,P=P[6];h=h[6])$$

$$h[8]=h[7]$$

$$P[8]=P[4]$$

$$T[8]=\text{Temperature}(\text{rr2}\$,h=h[8];P=P[8])$$

$$s[8]=\text{Entropy}(\text{rr2}\$,h=h[8];P=P[8])$$

$$P[12]=P[4]$$

$$h[12]=h[4]$$

$$T[12]=T[4]$$

$$s[12]=s[4]$$

$$m1=1$$

$$Qe=m1*(h[1]-h[10])$$

$$Pc1=m1*(h[3]-h[1])$$

$$m2=m1*((h[3]-h[9])/(h[4]-h[8]))$$

$$Pc2=m2*(h[6]-h[4])$$

$$Qc=m2*(h[6]-h[7])$$

$$Pt=Pc1+Pc2$$

$$\text{COP} = Q_e / P_t$$

$$\text{HEX} = (T[3] - T[9]) / (T[3] - T[4])$$

$$x[1] = h[1]$$

$$x[2] = h[3]$$

$$x[3] = h[9]$$

$$x[4] = h[10]$$

$$x[5] = h[11]$$

$$y[1] = P[1]$$

$$y[2] = P[3]$$

$$y[3] = P[9]$$

$$y[4] = P[10]$$

$$y[5] = P[11]$$

$$z[1] = h[4]$$

$$z[2] = h[6]$$

$$z[3] = h[7]$$

$$z[4] = h[8]$$

$$z[5] = h[12]$$

$$v[1] = P[4]$$

$$v[2] = P[6]$$

$$v[3] = P[7]$$

$$v[4] = P[8]$$

$$v[5] = P[12]$$

$$p = P[7] / P[1]$$

Ψυκτική διάταξη διβάθμιας συμπίεσεως δύο στοιχείων ατμοποίησης με σύνδεση σε σειρά.

"Διπλός ατμοποιητής"

$$\text{rr}\$ = \text{'R134a'}$$

$$\{T[1] = -20\}$$

$$h[1] = \text{Enthalpy}(\text{rr}\$, T = T[1]; x = 1)$$

$$P[1] = \text{Pressure}(\text{rr}\$, T = T[1]; x = 1)$$

$$s[1] = \text{Entropy}(\text{rr}\$, T = T[1]; x = 1)$$

$$s[2] = s[1]$$

$$P[2] = P_m$$

$$h[2] = \text{Enthalpy}(\text{rr}\$, s = s[2]; P = P[2])$$

$$T[2]=\text{Temperature}(\text{rr}\$,s=s[2];P=P[2])$$

$$\text{isc1}=0,9$$

$$P[3]=P_m$$

$$h[3]=h[1]+(h[2]-h[1])/\text{isc1}$$

$$s[3]=\text{Entropy}(\text{rr}\$,P=P[3];h=h[3])$$

$$T[3]=\text{Temperature}(\text{rr}\$,P=P[3];h=h[3])$$

$$P[4]=P_m$$

$$h[4]=\text{Enthalpy}(\text{rr}\$,P=P[4];x=0)$$

$$s[4]=\text{Entropy}(\text{rr}\$,P=P[4];x=0)$$

$$T[4]=\text{Temperature}(\text{rr}\$,P=P[4];x=0)$$

$$T[5]=0$$

$$P[5]=\text{Pressure}(\text{rr}\$,T=T[5];x=1)$$

$$P_m=P[5]$$

$$h[5]=\text{Enthalpy}(\text{rr}\$,T=T[5];x=1)$$

$$s[5]=\text{Entropy}(\text{rr}\$,T=T[5];x=1)$$

$$T[8]=50$$

$$P[8]=\text{Pressure}(\text{rr}\$,T=T[8];x=0)$$

$$h[8]=\text{Enthalpy}(\text{rr}\$,T=T[8];x=0)$$

$$s[8]=\text{Entropy}(\text{rr}\$,T=T[8];x=0)$$

$$s[6]=s[5]$$

$$P[6]=P[8]$$

$$h[6]=\text{Enthalpy}(\text{rr}\$,P=P[6];s=s[6])$$

$$T[6]=\text{Temperature}(\text{rr}\$,P=P[6];s=s[6])$$

$$\text{isc2}=0,9$$

$$P[7]=P[8]$$

$$h[7]=h[5]+(h[6]-h[5])/\text{isc2}$$

$$s[7]=\text{Entropy}(\text{rr}\$,P=P[7];h=h[7])$$

$$T[7]=\text{Temperature}(\text{rr}\$,P=P[7];h=h[7])$$

$$P[9]=P_m$$

$$h[9]=h[8]$$

$$s[9]=\text{Entropy}(\text{rr}\$,P=P[9];h=h[9])$$

$$T[9]=\text{Temperature}(\text{rr}\$,P=P[9];h=h[9])$$

$$\text{HEX}=0,7$$

$$T[10]=T[8]-\text{HEX}*(T[8]-T[9])$$

$$P[10]=P[8]$$

$$s[10]=\text{Entropy}(\text{rr}\$,T=T[10];P=P[10])$$

$$h[10]=\text{Enthalpy}(\text{rr}\$,T=T[10];P=P[10])$$

$$P[11]=P[1]$$

$$h[11]=h[10]$$

$$s[11]=\text{Entropy}(\text{rr}\$,P=P[11];h=h[11])$$

$$T[11]=\text{Temperature}(\text{rr}\$,P=P[11];h=h[11])$$

$$m_a=1$$

$$m_b=1$$

$$m_c=(m_a*(h[3]-h[9])+m_b*(h[9]-h[4]))/(h[5]-h[9])$$

$$m_h=m_a$$

$$m_g=m_h*(h[8]-h[10])/(h[5]-h[9])$$

$$m_d=m_b+m_c+m_g$$

$$m_e=m_d-m_h$$

$$Q_{e1}=m_a*(h[1]-h[11])$$

$$Q_{e2}=m_b*(h[5]-h[4])$$

$$P_{c1}=m_a*(h[3]-h[1])$$

$$P_{c2}=m_d*(h[7]-h[5])$$

$$Q_c=m_d*(h[7]-h[8])$$

$$\text{DTSC}=T[8]-T[10]$$

$$\text{COP1}=Q_{e1}/P_{c1}$$

$$\text{COP1c}=(h[1]-h[11])/(h[3]-h[1])$$

$$\text{COP2}=(Q_c-P_c2)/P_c2$$

$$\text{COP2c}=(h[5]-h[8])/(h[7]-h[5])$$

$$\text{COP2cn}=(Q_{e1}+Q_{e2}+P_c1)/P_c2$$

$$x[1]=h[1]$$

$$x[2]=h[3]$$

$$x[3]=h[4]$$

$$x[4]=h[9]$$

$$x[5]=h[5]$$

$$x[6]=h[7]$$

$$x[7]=h[8]$$

$$x[8]=h[10]$$

$$x[9]=h[11]$$

$$x[10]=h[1]$$

$$x[11]=h[11]$$

$$x[12]=h[10]$$

$$x[13]=h[8]$$

$$x[14]=h[9]$$

$$y[1]=P[1]$$

$$y[2]=P[3]$$

$$y[3]=P[4]$$

$$y[4]=P[9]$$

$$y[5]=P[5]$$

$$y[6]=P[7]$$

$$y[7]=P[8]$$

$$y[8]=P[10]$$

$$y[9]=P[11]$$

$$y[10]=P[1]$$

$$y[11]=P[11]$$

$$y[12]=P[10]$$

$$y[13]=P[8]$$

$$y[14]=P[9]$$

Παράρτημα II: Πίνακες στο E.E.S.

Μονοβάθμιος.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
COP	COP ₀	h ₁	h ₂	h ₃	h ₄	h ₅	h ₆	isc	m	p	P _c	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆
2,153	2,153	238,4	286,4	291,8	123,5	123,5	238,4	0,9	1	9,928	53,38	0,1328	1,319	1,319	1,319	0,1328	0,1328
2,262	2,262	239,6	285,9	291	123,5	123,5	239,6	0,9	1	9,113	51,36	0,1447	1,319	1,319	1,319	0,1447	0,1447
2,377	2,377	240,9	285,3	290,3	123,5	123,5	240,9	0,9	1	8,378	49,38	0,1574	1,319	1,319	1,319	0,1574	0,1574
2,5	2,5	242,1	284,8	289,5	123,5	123,5	242,1	0,9	1	7,714	47,44	0,1709	1,319	1,319	1,319	0,1709	0,1709
2,632	2,632	243,3	284,3	288,8	123,5	123,5	243,3	0,9	1	7,113	45,53	0,1854	1,319	1,319	1,319	0,1854	0,1854
2,772	2,772	244,5	283,8	288,2	123,5	123,5	244,5	0,9	1	6,569	43,66	0,2007	1,319	1,319	1,319	0,2007	0,2007
2,923	2,923	245,7	283,4	287,5	123,5	123,5	245,7	0,9	1	6,074	41,82	0,2171	1,319	1,319	1,319	0,2171	0,2171
3,085	3,085	246,9	282,9	286,9	123,5	123,5	246,9	0,9	1	5,625	40,01	0,2344	1,319	1,319	1,319	0,2344	0,2344
3,26	3,26	248,1	282,5	286,3	123,5	123,5	248,1	0,9	1	5,215	38,23	0,2529	1,319	1,319	1,319	0,2529	0,2529
3,448	3,448	249,3	282,1	285,8	123,5	123,5	249,3	0,9	1	4,841	36,48	0,2724	1,319	1,319	1,319	0,2724	0,2724
3,652	3,652	250,5	281,7	285,2	123,5	123,5	250,5	0,9	1	4,5	34,77	0,293	1,319	1,319	1,319	0,293	0,293
3,874	3,874	251,6	281,4	284,7	123,5	123,5	251,6	0,9	1	4,188	33,08	0,3148	1,319	1,319	1,319	0,3148	0,3148
4,115	4,115	252,8	281	284,2	123,5	123,5	252,8	0,9	1	3,902	31,42	0,3379	1,319	1,319	1,319	0,3379	0,3379
4,379	4,379	253,9	280,7	283,7	123,5	123,5	253,9	0,9	1	3,64	29,79	0,3622	1,319	1,319	1,319	0,3622	0,3622
4,668	4,668	255	280,4	283,2	123,5	123,5	255	0,9	1	3,4	28,18	0,3879	1,319	1,319	1,319	0,3879	0,3879
4,987	4,987	256,2	280,1	282,8	123,5	123,5	256,2	0,9	1	3,178	26,61	0,4149	1,319	1,319	1,319	0,4149	0,4149
5,34	5,34	257,3	279,8	282,3	123,5	123,5	257,3	0,9	1	2,974	25,05	0,4433	1,319	1,319	1,319	0,4433	0,4433
5,734	5,734	258,4	279,5	281,9	123,5	123,5	258,4	0,9	1	2,787	23,53	0,4732	1,319	1,319	1,319	0,4732	0,4732
6,174	6,174	259,5	279,3	281,5	123,5	123,5	259,5	0,9	1	2,613	22,03	0,5046	1,319	1,319	1,319	0,5046	0,5046
6,67	6,67	260,5	279	281,1	123,5	123,5	260,5	0,9	1	2,453	20,55	0,5375	1,319	1,319	1,319	0,5375	0,5375
7,232	7,232	261,6	278,8	280,7	123,5	123,5	261,6	0,9	1	2,305	19,1	0,5721	1,319	1,319	1,319	0,5721	0,5721

19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
Q _c	Q _e	s ₁	s ₂	s ₃	s ₄	s ₅	s ₆	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆
168,3	114,9	0,9456	0,9456	0,9616	0,4418	0,4917	0,9456	-20	59,33	63,97	50	-20	-20
167,5	116,2	0,9439	0,9439	0,9593	0,4418	0,4887	0,9439	-18	58,83	63,29	50	-18	-18
166,8	117,4	0,9422	0,9422	0,957	0,4418	0,4857	0,9422	-16	58,35	62,63	50	-16	-16
166,1	118,6	0,9406	0,9406	0,9549	0,4418	0,483	0,9406	-14	57,9	62	50	-14	-14
165,4	119,8	0,9391	0,9391	0,9528	0,4418	0,4803	0,9391	-12	57,47	61,39	50	-12	-12
164,7	121	0,9377	0,9377	0,9508	0,4418	0,4777	0,9377	-10	57,06	60,82	50	-10	-10
164,1	122,2	0,9363	0,9363	0,9489	0,4418	0,4753	0,9363	-8	56,68	60,26	50	-8	-8
163,4	123,4	0,935	0,935	0,9471	0,4418	0,473	0,935	-6	56,31	59,73	50	-6	-6
162,9	124,6	0,9337	0,9337	0,9453	0,4418	0,4707	0,9337	-4	55,96	59,22	50	-4	-4
162,3	125,8	0,9325	0,9325	0,9436	0,4418	0,4686	0,9325	-2	55,63	58,74	50	-2	-2
161,7	127	0,9314	0,9314	0,9419	0,4418	0,4666	0,9314	0	55,32	58,27	50	-7,437E	0
161,2	128,1	0,9303	0,9303	0,9403	0,4418	0,4646	0,9303	2	55,02	57,82	50	2	2
160,7	129,3	0,9293	0,9293	0,9388	0,4418	0,4628	0,9293	4	54,73	57,39	50	4	4
160,2	130,4	0,9283	0,9283	0,9373	0,4418	0,4611	0,9283	6	54,46	56,97	50	6	6
159,7	131,6	0,9273	0,9273	0,9359	0,4418	0,4594	0,9273	8	54,2	56,57	50	8	8
159,3	132,7	0,9264	0,9264	0,9345	0,4418	0,4578	0,9264	10	53,95	56,19	50	10	10
158,9	133,8	0,9255	0,9255	0,9332	0,4418	0,4564	0,9255	12	53,72	55,81	50	12	12
158,4	134,9	0,9247	0,9247	0,9319	0,4418	0,455	0,9247	14	53,49	55,45	50	14	14
158	136	0,9239	0,9239	0,9306	0,4418	0,4536	0,9239	16	53,27	55,1	50	16	16
157,6	137,1	0,9231	0,9231	0,9294	0,4418	0,4524	0,9231	18	53,06	54,77	50	18	18
157,2	138,1	0,9223	0,9223	0,9282	0,4418	0,4512	0,9223	20	52,85	54,44	50	20	20

Διβάθμιος (Μη βελτιστοποιημένος).

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
COP	COP1	COP2	h ₁	h ₂	h ₃	h ₄	h ₅	h ₆	h ₇	h ₈	h ₉	h ₁₀	h ₁₁	isc1	isc2	m1	m2	p
2,634	6,627	5,031	238,4	261,8	264,5	256,3	280,1	282,7	123,5	123,5	65,79	65,79	238,4	0,9	0,9	1	1,496	9,928
2,748	6,851	5,258	239,6	262,2	264,8	257	279,9	282,4	123,5	123,5	67,56	67,56	239,6	0,9	0,9	1	1,477	9,113
2,869	7,088	5,499	240,9	262,6	265,1	257,7	279,7	282,1	123,5	123,5	69,33	69,33	240,9	0,9	0,9	1	1,458	8,378
2,997	7,341	5,755	242,1	263,1	265,4	258,4	279,5	281,9	123,5	123,5	71,09	71,09	242,1	0,9	0,9	1	1,44	7,714
3,134	7,61	6,028	243,3	263,5	265,7	259,1	279,4	281,6	123,5	123,5	72,84	72,84	243,3	0,9	0,9	1	1,422	7,113
3,28	7,898	6,319	244,5	263,9	266	259,8	279,2	281,4	123,5	123,5	74,58	74,58	244,5	0,9	0,9	1	1,405	6,569
3,436	8,205	6,631	245,7	264,3	266,4	260,5	279	281,1	123,5	123,5	76,31	76,31	245,7	0,9	0,9	1	1,387	6,074
3,603	8,536	6,965	246,9	264,7	266,7	261,1	278,9	280,9	123,5	123,5	78,03	78,03	246,9	0,9	0,9	1	1,371	5,625
3,783	8,891	7,324	248,1	265,1	267	261,8	278,7	280,6	123,5	123,5	79,75	79,75	248,1	0,9	0,9	1	1,354	5,215
3,976	9,274	7,711	249,3	265,6	267,4	262,4	278,6	280,4	123,5	123,5	81,45	81,45	249,3	0,9	0,9	1	1,338	4,841
4,185	9,688	8,129	250,5	266	267,7	263	278,5	280,2	123,5	123,5	83,15	83,15	250,5	0,9	0,9	1	1,323	4,5
4,412	10,14	8,582	251,6	266,4	268,1	263,6	278,3	279,9	123,5	123,5	84,84	84,84	251,6	0,9	0,9	1	1,307	4,188
4,658	10,63	9,075	252,8	266,8	268,4	264,2	278,2	279,7	123,5	123,5	86,52	86,52	252,8	0,9	0,9	1	1,292	3,902
4,927	11,16	9,613	253,9	267,3	268,8	264,8	278	279,5	123,5	123,5	88,2	88,2	253,9	0,9	0,9	1	1,278	3,64
5,222	11,74	10,2	255	267,7	269,1	265,4	277,9	279,3	123,5	123,5	89,87	89,87	255	0,9	0,9	1	1,263	3,4
5,546	12,39	10,85	256,2	268,1	269,5	266	277,8	279,1	123,5	123,5	91,53	91,53	256,2	0,9	0,9	1	1,249	3,178
5,904	13,1	11,57	257,3	268,5	269,8	266,5	277,7	278,9	123,5	123,5	93,18	93,18	257,3	0,9	0,9	1	1,235	2,974
6,303	13,89	12,37	258,4	269	270,1	267,1	277,5	278,7	123,5	123,5	94,83	94,83	258,4	0,9	0,9	1	1,221	2,787
6,748	14,78	13,26	259,5	269,4	270,5	267,6	277,4	278,5	123,5	123,5	96,46	96,46	259,5	0,9	0,9	1	1,207	2,613
7,249	15,78	14,26	260,5	269,8	270,8	268,1	277,3	278,3	123,5	123,5	98,1	98,1	260,5	0,9	0,9	1	1,194	2,453
7,818	16,91	15,4	261,6	270,2	271,2	268,7	277,2	278,1	123,5	123,5	99,72	99,72	261,6	0,9	0,9	1	1,181	2,305

19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
p	Pc1	Pc2	Pm	Pt	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇	P ₈	P ₉	P ₁₀	P ₁₁	Qc	Qe1	Qe2	s ₁	s ₂	s ₃
9,928	26,05	39,49	0,4185	65,53	0,1328	0,4185	0,4185	0,4185	1,319	1,319	1,319	0,4185	0,4185	0,1328	0,1328	238,2	172,6	198,7	0,9456	0,9456	0,9546
9,113	25,12	37,5	0,4368	62,62	0,1447	0,4368	0,4368	0,4368	1,319	1,319	1,319	0,4368	0,4368	0,1447	0,1447	234,7	172,1	197,2	0,9439	0,9439	0,9525
8,378	24,2	35,6	0,4556	59,8	0,1574	0,4556	0,4556	0,4556	1,319	1,319	1,319	0,4556	0,4556	0,1574	0,1574	231,3	171,5	195,7	0,9422	0,9422	0,9505
7,714	23,29	33,76	0,4748	57,06	0,1709	0,4748	0,4748	0,4748	1,319	1,319	1,319	0,4748	0,4748	0,1709	0,1709	228,1	171	194,3	0,9406	0,9406	0,9486
7,113	22,4	32	0,4944	54,4	0,1854	0,4944	0,4944	0,4944	1,319	1,319	1,319	0,4944	0,4944	0,1854	0,1854	224,9	170,5	192,9	0,9391	0,9391	0,9467
6,569	21,52	30,3	0,5145	51,82	0,2007	0,5145	0,5145	0,5145	1,319	1,319	1,319	0,5145	0,5145	0,2007	0,2007	221,8	169,9	191,5	0,9377	0,9377	0,945
6,074	20,65	28,66	0,535	49,31	0,2171	0,535	0,535	0,535	1,319	1,319	1,319	0,535	0,535	0,2171	0,2171	218,7	169,4	190,1	0,9363	0,9363	0,9433
5,625	19,79	27,09	0,556	46,87	0,2344	0,556	0,556	0,556	1,319	1,319	1,319	0,556	0,556	0,2344	0,2344	215,8	168,9	188,7	0,935	0,935	0,9416
5,215	18,94	25,57	0,5774	44,51	0,2529	0,5774	0,5774	0,5774	1,319	1,319	1,319	0,5774	0,5774	0,2529	0,2529	212,9	168,4	187,3	0,9337	0,9337	0,9401
4,841	18,1	24,11	0,5993	42,21	0,2724	0,5993	0,5993	0,5993	1,319	1,319	1,319	0,5993	0,5993	0,2724	0,2724	210	167,8	185,9	0,9325	0,9325	0,9386
4,5	17,27	22,7	0,6216	39,97	0,293	0,6216	0,6216	0,6216	1,319	1,319	1,319	0,6216	0,6216	0,293	0,293	207,3	167,3	184,6	0,9314	0,9314	0,9372
4,188	16,45	21,35	0,6443	37,8	0,3148	0,6443	0,6443	0,6443	1,319	1,319	1,319	0,6443	0,6443	0,3148	0,3148	204,6	166,8	183,2	0,9303	0,9303	0,9358
3,902	15,65	20,04	0,6675	35,69	0,3379	0,6675	0,6675	0,6675	1,319	1,319	1,319	0,6675	0,6675	0,3379	0,3379	201,9	166,2	181,9	0,9293	0,9293	0,9345
3,64	14,85	18,78	0,6911	33,63	0,3622	0,6911	0,6911	0,6911	1,319	1,319	1,319	0,6911	0,6911	0,3622	0,3622	199,3	165,7	180,6	0,9283	0,9283	0,9332
3,4	14,06	17,57	0,7152	31,63	0,3879	0,7152	0,7152	0,7152	1,319	1,319	1,319	0,7152	0,7152	0,3879	0,3879	196,8	165,2	179,2	0,9273	0,9273	0,932
3,178	13,29	16,4	0,7396	29,69	0,4149	0,7396	0,7396	0,7396	1,319	1,319	1,319	0,7396	0,7396	0,4149	0,4149	194,3	164,6	177,9	0,9264	0,9264	0,9308
2,974	12,53	15,27	0,7646	27,79	0,4433	0,7646	0,7646	0,7646	1,319	1,319	1,319	0,7646	0,7646	0,4433	0,4433	191,9	164,1	176,6	0,9255	0,9255	0,9296
2,787	11,77	14,18	0,7899	25,95	0,4732	0,7899	0,7899	0,7899	1,319	1,319	1,319	0,7899	0,7899	0,4732	0,4732	189,5	163,5	175,3	0,9247	0,9247	0,9285
2,613	11,03	13,13	0,8157	24,15	0,5046	0,8157	0,8157	0,8157	1,319	1,319	1,319	0,8157	0,8157	0,5046	0,5046	187,1	163	174	0,9239	0,9239	0,9275
2,453	10,29	12,11	0,8419	22,41	0,5375	0,8419	0,8419	0,8419	1,319	1,319	1,319	0,8419	0,8419	0,5375	0,5375	184,8	162,4	172,7	0,9231	0,9231	0,9264
2,305	9,572	11,13	0,8685	20,71	0,5721	0,8685	0,8685	0,8685	1,319	1,319	1,319	0,8685	0,8685	0,5721	0,5721	182,6	161,9	171,4	0,9223	0,9223	0,9254

41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59
s ₄	s ₅	s ₆	s ₇	s ₈	s ₉	s ₁₀	s ₁₁	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇	T ₈	T ₉	T ₁₀	T ₁₁
0,9263	0,9263	0,9343	0,4418	0,4576	0,2541	0,2638	0,9456	-20	16,15	18,95	10,26	53,92	56,14	50	10,26	10,26	-20	-20
0,9257	0,9257	0,9335	0,4418	0,4567	0,2603	0,2695	0,9439	-18	17,06	19,74	11,55	53,77	55,9	50	11,55	11,55	-18	-18
0,9252	0,9252	0,9326	0,4418	0,4558	0,2664	0,2752	0,9422	-16	17,99	20,55	12,83	53,62	55,66	50	12,83	12,83	-16	-16
0,9247	0,9247	0,9318	0,4418	0,4549	0,2725	0,2808	0,9406	-14	18,92	21,37	14,1	53,48	55,44	50	14,1	14,1	-14	-14
0,9241	0,9241	0,931	0,4418	0,4541	0,2785	0,2864	0,9391	-12	19,86	22,2	15,36	53,34	55,21	50	15,36	15,36	-12	-12
0,9236	0,9236	0,9302	0,4418	0,4533	0,2845	0,2919	0,9377	-10	20,81	23,04	16,61	53,2	55	50	16,61	16,61	-10	-10
0,9232	0,9232	0,9295	0,4418	0,4525	0,2904	0,2974	0,9363	-8	21,77	23,89	17,85	53,07	54,79	50	17,85	17,85	-8	-8
0,9227	0,9227	0,9287	0,4418	0,4518	0,2963	0,3029	0,935	-6	22,73	24,75	19,08	52,95	54,59	50	19,08	19,08	-6	-6
0,9222	0,9222	0,928	0,4418	0,4511	0,3021	0,3083	0,9337	-4	23,71	25,62	20,3	52,82	54,39	50	20,3	20,3	-4	-4
0,9218	0,9218	0,9273	0,4418	0,4504	0,3078	0,3136	0,9325	-2	24,68	26,5	21,51	52,7	54,2	50	21,51	21,51	-2	-2
0,9213	0,9213	0,9266	0,4418	0,4498	0,3135	0,319	0,9314	0	25,67	27,39	22,71	52,59	54,01	50	22,71	22,71	-7,437E	0
0,9209	0,9209	0,9259	0,4418	0,4492	0,3191	0,3242	0,9303	2	26,65	28,28	23,9	52,47	53,82	50	23,9	23,9	2	2
0,9205	0,9205	0,9253	0,4418	0,4486	0,3247	0,3295	0,9293	4	27,65	29,18	25,09	52,36	53,64	50	25,09	25,09	4	4
0,9201	0,9201	0,9246	0,4418	0,4481	0,3303	0,3347	0,9283	6	28,64	30,09	26,26	52,25	53,46	50	26,26	26,26	6	6
0,9197	0,9197	0,9239	0,4418	0,4476	0,3357	0,3399	0,9273	8	29,64	31	27,42	52,14	53,29	50	27,42	27,42	8	8
0,9193	0,9193	0,9233	0,4418	0,4471	0,3412	0,345	0,9264	10	30,63	31,91	28,58	52,03	53,11	50	28,58	28,58	10	10
0,9189	0,9189	0,9227	0,4418	0,4466	0,3466	0,3501	0,9255	12	31,63	32,83	29,72	51,93	52,95	50	29,72	29,72	12	12
0,9185	0,9185	0,9221	0,4418	0,4462	0,3519	0,3552	0,9247	14	32,63	33,75	30,86	51,83	52,78	50	30,86	30,86	14	14
0,9181	0,9181	0,9215	0,4418	0,4458	0,3573	0,3602	0,9239	16	33,63	34,67	31,99	51,72	52,62	50	31,99	31,99	16	16
0,9177	0,9177	0,9209	0,4418	0,4454	0,3625	0,3652	0,9231	18	34,63	35,59	33,11	51,62	52,45	50	33,11	33,11	18	18
0,9174	0,9174	0,9203	0,4418	0,445	0,3677	0,3702	0,9223	20	35,63	36,51	34,22	51,52	52,29	50	34,22	34,22	20	20

Τριβάθμιος.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
COP	COP1	COP2	COP3	h ₁	h ₂	h ₃	h ₄	h ₅	h ₆	h ₇	h ₈	h ₉	h ₁₀	h ₁₁	h ₁₂	h ₁₃	h ₁₄	h ₁₅	h ₁₆
2,80043	10,94	9,535	7,975	238,4	253,8	255,5	250	265,8	267,6	262,8	278,5	280,3	123,5	123,5	82,54	82,54	50,89	50,89	238,4
2,91540	11,28	9,876	8,319	239,6	254,5	256,2	251	266,2	267,9	263,3	278,4	280,1	123,5	123,5	83,88	83,88	53,01	53,01	239,6
3,03733	11,64	10,24	8,684	240,9	255,2	256,8	251,9	266,5	268,1	263,7	278,3	279,9	123,5	123,5	85,2	85,2	55,12	55,12	240,9
3,16688	12,03	10,62	9,072	242,1	255,9	257,5	252,8	266,8	268,4	264,2	278,2	279,7	123,5	123,5	86,51	86,51	57,23	57,23	242,1
3,30479	12,43	11,03	9,485	243,3	256,6	258,1	253,6	267,2	268,7	264,7	278,1	279,6	123,5	123,5	87,81	87,81	59,34	59,34	243,3
3,45189	12,87	11,47	9,926	244,5	257,3	258,7	254,5	267,5	268,9	265,1	278	279,4	123,5	123,5	89,1	89,1	61,44	61,44	244,5
3,60913	13,34	11,94	10,4	245,7	258	259,4	255,4	267,8	269,2	265,6	277,9	279,2	123,5	123,5	90,38	90,38	63,54	63,54	245,7
3,77761	13,84	12,44	10,9	246,9	258,7	260	256,2	268,2	269,5	266	277,8	279,1	123,5	123,5	91,65	91,65	65,63	65,63	246,9
3,95856	14,38	12,98	11,44	248,1	259,4	260,6	257,1	268,5	269,7	266,4	277,7	278,9	123,5	123,5	92,9	92,9	67,73	67,73	248,1
4,15343	14,96	13,56	12,03	249,3	260,1	261,3	257,9	268,8	270	266,9	277,6	278,8	123,5	123,5	94,15	94,15	69,81	69,81	249,3
4,36389	15,59	14,19	12,66	250,5	260,8	261,9	258,7	269,1	270,3	267,3	277,5	278,6	123,5	123,5	95,39	95,39	71,9	71,9	250,5
4,59188	16,27	14,87	13,34	251,6	261,4	262,5	259,6	269,4	270,5	267,7	277,4	278,5	123,5	123,5	96,61	96,61	73,98	73,98	251,6
4,83970	17,01	15,61	14,09	252,8	262,1	263,2	260,4	269,7	270,8	268,1	277,3	278,3	123,5	123,5	97,83	97,83	76,06	76,06	252,8
5,11003	17,81	16,41	14,9	253,9	262,8	263,8	261,1	270	271	268,5	277,2	278,2	123,5	123,5	99,04	99,04	78,13	78,13	253,9
5,40611	18,7	17,3	15,79	255	263,5	264,4	261,9	270,3	271,3	268,8	277,1	278	123,5	123,5	100,2	100,2	80,2	80,2	255
5,73179	19,67	18,27	16,76	256,2	264,1	265	262,7	270,6	271,5	269,2	277	277,9	123,5	123,5	101,4	101,4	82,27	82,27	256,2
6,09174	20,75	19,35	17,84	257,3	264,8	265,6	263,4	270,9	271,8	269,6	276,9	277,8	123,5	123,5	102,6	102,6	84,34	84,34	257,3
6,49167	21,94	20,54	19,04	258,4	265,4	266,2	264,2	271,2	272	269,9	276,9	277,6	123,5	123,5	103,8	103,8	86,41	86,41	258,4
6,93864	23,28	21,88	20,38	259,5	266,1	266,8	264,9	271,5	272,2	270,3	276,8	277,5	123,5	123,5	104,9	104,9	88,47	88,47	259,5
7,44146	24,79	23,39	21,89	260,5	266,7	267,4	265,6	271,8	272,4	270,6	276,7	277,3	123,5	123,5	106,1	106,1	90,53	90,53	260,5
8,01131	26,49	25,09	23,6	261,6	267,3	268	266,3	272	272,7	271	276,6	277,2	123,5	123,5	107,2	107,2	92,59	92,59	261,6

20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
h ₁₆	isc1	isc2	isc3	m1	m2	m3	p	Pc1	Pc2	Pc3	Pm1	Pm2	Pt	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇
238,4	0,9	0,9	0,9	1	1,222	1,623	9,928	17,14	21,46	28,35	0,2855	0,6135	66,96	0,1328	0,2855	0,2855	0,2855	0,6135	0,6135	0,6135
239,6	0,9	0,9	0,9	1	1,216	1,601	9,113	16,55	20,57	26,9	0,3022	0,6313	64,01	0,1447	0,3022	0,3022	0,3022	0,6313	0,6313	0,6313
240,9	0,9	0,9	0,9	1	1,21	1,578	8,378	15,96	19,7	25,49	0,3197	0,6492	61,15	0,1574	0,3197	0,3197	0,3197	0,6492	0,6492	0,6492
242,1	0,9	0,9	0,9	1	1,204	1,557	7,714	15,37	18,85	24,15	0,3377	0,6673	58,37	0,1709	0,3377	0,3377	0,3377	0,6673	0,6673	0,6673
243,3	0,9	0,9	0,9	1	1,199	1,535	7,113	14,79	18,02	22,85	0,3565	0,6856	55,67	0,1854	0,3565	0,3565	0,3565	0,6856	0,6856	0,6856
244,5	0,9	0,9	0,9	1	1,193	1,514	6,569	14,22	17,2	21,61	0,3759	0,7041	53,04	0,2007	0,3759	0,3759	0,3759	0,7041	0,7041	0,7041
245,7	0,9	0,9	0,9	1	1,187	1,494	6,074	13,66	16,41	20,41	0,3961	0,7227	50,48	0,2171	0,3961	0,3961	0,3961	0,7227	0,7227	0,7227
246,9	0,9	0,9	0,9	1	1,181	1,473	5,625	13,1	15,63	19,26	0,4169	0,7415	47,99	0,2344	0,4169	0,4169	0,4169	0,7415	0,7415	0,7415
248,1	0,9	0,9	0,9	1	1,175	1,453	5,215	12,54	14,87	18,16	0,4385	0,7604	45,57	0,2529	0,4385	0,4385	0,4385	0,7604	0,7604	0,7604
249,3	0,9	0,9	0,9	1	1,169	1,434	4,841	12	14,12	17,09	0,4608	0,7795	43,21	0,2724	0,4608	0,4608	0,4608	0,7795	0,7795	0,7795
250,5	0,9	0,9	0,9	1	1,163	1,415	4,5	11,46	13,39	16,07	0,4838	0,7987	40,92	0,293	0,4838	0,4838	0,4838	0,7987	0,7987	0,7987
251,6	0,9	0,9	0,9	1	1,157	1,396	4,188	10,92	12,68	15,08	0,5075	0,818	38,68	0,3148	0,5075	0,5075	0,5075	0,818	0,818	0,818
252,8	0,9	0,9	0,9	1	1,151	1,377	3,902	10,39	11,99	14,13	0,532	0,8375	36,51	0,3379	0,532	0,532	0,532	0,8375	0,8375	0,8375
253,9	0,9	0,9	0,9	1	1,145	1,359	3,64	9,867	11,31	13,22	0,5572	0,8572	34,4	0,3622	0,5572	0,5572	0,5572	0,8572	0,8572	0,8572
255	0,9	0,9	0,9	1	1,139	1,34	3,4	9,35	10,65	12,34	0,5832	0,877	32,34	0,3879	0,5832	0,5832	0,5832	0,877	0,877	0,877
256,2	0,9	0,9	0,9	1	1,133	1,323	3,178	8,839	10	11,5	0,61	0,8969	30,34	0,4149	0,61	0,61	0,61	0,8969	0,8969	0,8969
257,3	0,9	0,9	0,9	1	1,127	1,305	2,974	8,335	9,369	10,68	0,6375	0,9169	28,39	0,4433	0,6375	0,6375	0,6375	0,9169	0,9169	0,9169
258,4	0,9	0,9	0,9	1	1,121	1,287	2,787	7,836	8,752	9,901	0,6659	0,937	26,49	0,4732	0,6659	0,6659	0,6659	0,937	0,937	0,937
259,5	0,9	0,9	0,9	1	1,115	1,27	2,613	7,344	8,15	9,148	0,695	0,9573	24,64	0,5046	0,695	0,695	0,695	0,9573	0,9573	0,9573
260,5	0,9	0,9	0,9	1	1,109	1,253	2,453	6,858	7,563	8,424	0,7249	0,9777	22,84	0,5375	0,7249	0,7249	0,7249	0,9777	0,9777	0,9777
261,6	0,9	0,9	0,9	1	1,102	1,237	2,305	6,379	6,99	7,727	0,7557	0,9982	21,09	0,5721	0,7557	0,7557	0,7557	0,9982	0,9982	0,9982

40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
P ₇	P ₈	P ₉	P ₁₀	P ₁₁	P ₁₂	P ₁₃	P ₁₄	P ₁₅	P ₁₆	Qc	Qe	s ₁	s ₂	s ₃	s ₄	s ₅	s ₆	s ₇	s ₈	s ₉
0,6135	1,319	1,319	1,319	0,6135	0,6135	0,2855	0,2855	0,1328	0,1328	254,5	187,5	0,9456	0,9456	0,9518	0,9318	0,9318	0,9377	0,9215	0,9215	0,9269
0,6313	1,319	1,319	1,319	0,6313	0,6313	0,3022	0,3022	0,1447	0,1447	250,6	186,6	0,9439	0,9439	0,9498	0,9309	0,9309	0,9366	0,9212	0,9212	0,9263
0,6492	1,319	1,319	1,319	0,6492	0,6492	0,3197	0,3197	0,1574	0,1574	246,9	185,7	0,9422	0,9422	0,9479	0,9301	0,9301	0,9355	0,9208	0,9208	0,9258
0,6673	1,319	1,319	1,319	0,6673	0,6673	0,3377	0,3377	0,1709	0,1709	243,2	184,9	0,9406	0,9406	0,9461	0,9293	0,9293	0,9345	0,9205	0,9205	0,9253
0,6856	1,319	1,319	1,319	0,6856	0,6856	0,3565	0,3565	0,1854	0,1854	239,6	184	0,9391	0,9391	0,9443	0,9285	0,9285	0,9335	0,9202	0,9202	0,9247
0,7041	1,319	1,319	1,319	0,7041	0,7041	0,3759	0,3759	0,2007	0,2007	236,1	183,1	0,9377	0,9377	0,9427	0,9278	0,9278	0,9325	0,9199	0,9199	0,9242
0,7227	1,319	1,319	1,319	0,7227	0,7227	0,3961	0,3961	0,2171	0,2171	232,7	182,2	0,9363	0,9363	0,9411	0,927	0,927	0,9316	0,9196	0,9196	0,9238
0,7415	1,319	1,319	1,319	0,7415	0,7415	0,4169	0,4169	0,2344	0,2344	229,3	181,3	0,935	0,935	0,9395	0,9263	0,9263	0,9307	0,9193	0,9193	0,9233
0,7604	1,319	1,319	1,319	0,7604	0,7604	0,4385	0,4385	0,2529	0,2529	225,9	180,4	0,9337	0,9337	0,9381	0,9257	0,9257	0,9298	0,919	0,919	0,9228
0,7795	1,319	1,319	1,319	0,7795	0,7795	0,4608	0,4608	0,2724	0,2724	222,7	179,5	0,9325	0,9325	0,9367	0,925	0,925	0,929	0,9187	0,9187	0,9223
0,7987	1,319	1,319	1,319	0,7987	0,7987	0,4838	0,4838	0,293	0,293	219,5	178,6	0,9314	0,9314	0,9353	0,9244	0,9244	0,9282	0,9184	0,9184	0,9219
0,818	1,319	1,319	1,319	0,818	0,818	0,5075	0,5075	0,3148	0,3148	216,3	177,6	0,9303	0,9303	0,934	0,9238	0,9238	0,9274	0,9181	0,9181	0,9214
0,8375	1,319	1,319	1,319	0,8375	0,8375	0,532	0,532	0,3379	0,3379	213,2	176,7	0,9293	0,9293	0,9328	0,9232	0,9232	0,9266	0,9178	0,9178	0,921
0,8572	1,319	1,319	1,319	0,8572	0,8572	0,5572	0,5572	0,3622	0,3622	210,2	175,8	0,9283	0,9283	0,9316	0,9227	0,9227	0,9259	0,9175	0,9175	0,9205
0,877	1,319	1,319	1,319	0,877	0,877	0,5832	0,5832	0,3879	0,3879	207,2	174,8	0,9273	0,9273	0,9305	0,9221	0,9221	0,9251	0,9172	0,9172	0,9201
0,8969	1,319	1,319	1,319	0,8969	0,8969	0,61	0,61	0,4149	0,4149	204,2	173,9	0,9264	0,9264	0,9294	0,9216	0,9216	0,9244	0,917	0,917	0,9196
0,9169	1,319	1,319	1,319	0,9169	0,9169	0,6375	0,6375	0,4433	0,4433	201,3	172,9	0,9255	0,9255	0,9283	0,921	0,921	0,9237	0,9167	0,9167	0,9192
0,937	1,319	1,319	1,319	0,937	0,937	0,6659	0,6659	0,4732	0,4732	198,5	172	0,9247	0,9247	0,9273	0,9205	0,9205	0,923	0,9164	0,9164	0,9188
0,9573	1,319	1,319	1,319	0,9573	0,9573	0,695	0,695	0,5046	0,5046	195,6	171	0,9239	0,9239	0,9263	0,92	0,92	0,9224	0,9161	0,9161	0,9184
0,9777	1,319	1,319	1,319	0,9777	0,9777	0,7249	0,7249	0,5375	0,5375	192,8	170	0,9231	0,9231	0,9254	0,9195	0,9195	0,9217	0,9159	0,9159	0,9179
0,9982	1,319	1,319	1,319	0,9982	0,9982	0,7557	0,7557	0,5721	0,5721	190,1	169	0,9223	0,9223	0,9244	0,919	0,919	0,921	0,9156	0,9156	0,9175

s ₁₀	s ₁₁	s ₁₂	s ₁₃	s ₁₄	s ₁₅	s ₁₆	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇	T ₈	T ₉	T ₁₀	T ₁₁	T ₁₂	T ₁₃	T ₁₄	T ₁₅	T ₁₆
0,4418	0,45	0,3115	0,317	0,2009	0,205	0,9456	-20	3,55	5,482	-0,718	25,31	27,07	22,28	52,63	54,07	50	22,28	22,28	-0,718	-0,718	-20	-20
0,4418	0,4495	0,3159	0,3212	0,2086	0,2125	0,9439	-18	4,845	6,695	0,8585	26,09	27,77	23,23	52,54	53,93	50	23,23	23,23	0,8585	0,8585	-18	-18
0,4418	0,4491	0,3203	0,3254	0,2162	0,2199	0,9422	-16	6,147	7,917	2,427	26,87	28,47	24,16	52,45	53,78	50	24,16	24,16	2,427	2,427	-16	-16
0,4418	0,4486	0,3247	0,3294	0,2238	0,2274	0,9406	-14	7,456	9,148	3,987	27,64	29,18	25,08	52,36	53,64	50	25,08	25,08	3,987	3,987	-14	-14
0,4418	0,4482	0,329	0,3335	0,2313	0,2347	0,9391	-12	8,771	10,39	5,539	28,41	29,88	25,99	52,27	53,5	50	25,99	25,99	5,539	5,539	-12	-12
0,4418	0,4478	0,3332	0,3375	0,2388	0,242	0,9377	-10	10,09	11,63	7,083	29,18	30,58	26,89	52,19	53,37	50	26,89	26,89	7,083	7,083	-10	-10
0,4418	0,4474	0,3374	0,3415	0,2462	0,2493	0,9363	-8	11,42	12,89	8,619	29,94	31,28	27,78	52,11	53,23	50	27,78	27,78	8,619	8,619	-8	-8
0,4418	0,447	0,3416	0,3454	0,2536	0,2565	0,935	-6	12,75	14,15	10,15	30,71	31,98	28,66	52,03	53,1	50	28,66	28,66	10,15	10,15	-6	-6
0,4418	0,4467	0,3457	0,3493	0,2609	0,2636	0,9337	-4	14,09	15,41	11,67	31,47	32,67	29,53	51,95	52,97	50	29,53	29,53	11,67	11,67	-4	-4
0,4418	0,4464	0,3498	0,3531	0,2681	0,2707	0,9325	-2	15,42	16,68	13,18	32,22	33,37	30,4	51,87	52,85	50	30,4	30,4	13,18	13,18	-2	-2
0,4418	0,446	0,3538	0,3569	0,2753	0,2778	0,9314	0	16,77	17,96	14,68	32,98	34,06	31,25	51,79	52,72	50	31,25	31,25	14,68	14,68	-7,437E	0
0,4418	0,4457	0,3577	0,3607	0,2825	0,2848	0,9303	2	18,11	19,24	16,18	33,72	34,75	32,09	51,72	52,6	50	32,09	32,09	16,18	16,18	2	2
0,4418	0,4454	0,3617	0,3644	0,2896	0,2917	0,9293	4	19,46	20,52	17,67	34,47	35,44	32,93	51,64	52,48	50	32,93	32,93	17,67	17,67	4	4
0,4418	0,4452	0,3655	0,3681	0,2966	0,2986	0,9283	6	20,81	21,81	19,15	35,21	36,12	33,75	51,57	52,36	50	33,75	33,75	19,15	19,15	6	6
0,4418	0,4449	0,3694	0,3718	0,3036	0,3055	0,9273	8	22,16	23,1	20,63	35,94	36,8	34,57	51,49	52,24	50	34,57	34,57	20,63	20,63	8	8
0,4418	0,4447	0,3732	0,3754	0,3106	0,3123	0,9264	10	23,51	24,39	22,09	36,67	37,48	35,38	51,42	52,13	50	35,38	35,38	22,09	22,09	10	10
0,4418	0,4444	0,3769	0,379	0,3175	0,3191	0,9255	12	24,86	25,69	23,55	37,4	38,15	36,18	51,35	52,01	50	36,18	36,18	23,55	23,55	12	12
0,4418	0,4442	0,3807	0,3825	0,3243	0,3259	0,9247	14	26,22	26,98	25	38,12	38,82	36,97	51,27	51,9	50	36,97	36,97	25	25	14	14
0,4418	0,444	0,3843	0,3861	0,3312	0,3326	0,9239	16	27,57	28,28	26,45	38,83	39,49	37,76	51,2	51,79	50	37,76	37,76	26,45	26,45	16	16
0,4418	0,4438	0,388	0,3896	0,3379	0,3393	0,9231	18	28,92	29,58	27,89	39,54	40,15	38,53	51,13	51,68	50	38,53	38,53	27,89	27,89	18	18
0,4418	0,4436	0,3916	0,393	0,3447	0,3459	0,9223	20	30,27	30,87	29,32	40,25	40,81	39,3	51,06	51,57	50	39,3	39,3	29,32	29,32	20	20

Cascade.

1 COP	2 DT	3 HEX	4 h ₁	5 h ₂	6 h ₃	7 h ₄	8 h ₅	9 h ₆	10 h ₇	11 h ₈	12 h ₉	13 h ₁₀	14 h ₁₁	15 h ₁₂	16 isc1	17 isc2	18 m1	19 m2	20 p
2,491	5	0,657	238,4	265,1	268,1	411,8	436,5	439,3	266,3	266,3	72,34	72,34	238,4	411,8	0,9	0,9	1	1,346	2,584
2,592	5	0,643	239,6	265,3	268,2	412,5	436,6	439,2	266,3	266,3	73,73	73,73	239,6	412,5	0,9	0,9	1	1,33	2,372
2,699	5	0,6287	240,9	265,5	268,2	413,3	436,6	439,2	266,3	266,3	75,12	75,12	240,9	413,3	0,9	0,9	1	1,314	2,181
2,812	5	0,614	242,1	265,7	268,3	414	436,6	439,2	266,3	266,3	76,52	76,52	242,1	414	0,9	0,9	1	1,298	2,008
2,931	5	0,5989	243,3	265,9	268,4	414,7	436,7	439,1	266,3	266,3	77,92	77,92	243,3	414,7	0,9	0,9	1	1,283	1,852
3,059	5	0,5835	244,5	266,1	268,5	415,5	436,8	439,1	266,3	266,3	79,32	79,32	244,5	415,5	0,9	0,9	1	1,268	1,71
3,194	5	0,5678	245,7	266,4	268,7	416,2	436,8	439,1	266,3	266,3	80,73	80,73	245,7	416,2	0,9	0,9	1	1,254	1,581
3,339	5	0,5517	246,9	266,6	268,8	416,9	436,9	439,1	266,3	266,3	82,14	82,14	246,9	416,9	0,9	0,9	1	1,239	1,464
3,493	5	0,5354	248,1	266,9	269	417,7	436,9	439,1	266,3	266,3	83,56	83,56	248,1	417,7	0,9	0,9	1	1,225	1,357
3,658	5	0,5188	249,3	267,1	269,1	418,4	437	439,1	266,3	266,3	84,98	84,98	249,3	418,4	0,9	0,9	1	1,211	1,26
3,836	5	0,5019	250,5	267,4	269,3	419,1	437,1	439,1	266,3	266,3	86,4	86,4	250,5	419,1	0,9	0,9	1	1,197	1,171
4,027	5	0,4848	251,6	267,7	269,5	419,9	437,2	439,1	266,3	266,3	87,83	87,83	251,6	419,9	0,9	0,9	1	1,183	1,09
4,233	5	0,4676	252,8	268	269,7	420,6	437,3	439,1	266,3	266,3	89,26	89,26	252,8	420,6	0,9	0,9	1	1,17	1,016
4,456	5	0,4501	253,9	268,3	269,9	421,3	437,4	439,1	266,3	266,3	90,69	90,69	253,9	421,3	0,9	0,9	1	1,156	0,9475
4,698	5	0,4325	255	268,7	270,2	422,1	437,5	439,2	266,3	266,3	92,13	92,13	255	422,1	0,9	0,9	1	1,143	0,8849
4,963	5	0,4148	256,2	269	270,4	422,8	437,6	439,2	266,3	266,3	93,58	93,58	256,2	422,8	0,9	0,9	1	1,13	0,8273
5,251	5	0,3969	257,3	269,3	270,6	423,5	437,7	439,2	266,3	266,3	95,03	95,03	257,3	423,5	0,9	0,9	1	1,117	0,7742
5,568	5	0,3789	258,4	269,6	270,9	424,3	437,8	439,3	266,3	266,3	96,48	96,48	258,4	424,3	0,9	0,9	1	1,104	0,7253
5,918	5	0,3609	259,5	270	271,1	425	437,9	439,3	266,3	266,3	97,93	97,93	259,5	425	0,9	0,9	1	1,091	0,6802
6,306	5	0,3427	260,5	270,3	271,4	425,7	438	439,3	266,3	266,3	99,4	99,4	260,5	425,7	0,9	0,9	1	1,079	0,6385
6,738	5	0,3245	261,6	270,7	271,7	426,5	438,1	439,4	266,3	266,3	100,9	100,9	261,6	426,5	0,9	0,9	1	1,066	0,6

20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
p	Pc1	Pc2	Pm1	Pt	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇	P ₈	P ₉	P ₁₀	P ₁₁	P ₁₂	Qc	Qe	s ₁	s ₂
2,584	29,7	36,96	0,4887	66,66	0,1328	0,4887	0,4887	0,081960,3432	0,3432	0,3432	0,081960,4887	0,1328	0,1328	0,08196	232,7	166,1	0,9456	0,9456		
2,372	28,52	35,49	0,5046	64,01	0,1447	0,5046	0,5046	0,085440,3432	0,3432	0,3432	0,085440,5046	0,1447	0,1447	0,08544	229,9	165,9	0,9439	0,9439		
2,181	27,35	34,07	0,5209	61,42	0,1574	0,5209	0,5209	0,089040,3432	0,3432	0,3432	0,089040,5209	0,1574	0,1574	0,08904	227,2	165,7	0,9422	0,9422		
2,008	26,21	32,68	0,5375	58,89	0,1709	0,5375	0,5375	0,092760,3432	0,3432	0,3432	0,092760,5375	0,1709	0,1709	0,09276	224,5	165,6	0,9406	0,9406		
1,852	25,1	31,32	0,5546	56,42	0,1854	0,5546	0,5546	0,09660,3432	0,3432	0,3432	0,09660,5546	0,1854	0,1854	0,0966	221,8	165,4	0,9391	0,9391		
1,71	24	30,01	0,5721	54,01	0,2007	0,5721	0,5721	0,10060,3432	0,3432	0,3432	0,10060,5721	0,2007	0,2007	0,1006	219,2	165,2	0,9377	0,9377		
1,581	22,93	28,72	0,59	51,65	0,2171	0,59	0,59	0,10470,3432	0,3432	0,3432	0,10470,59	0,2171	0,2171	0,1047	216,6	165	0,9363	0,9363		
1,464	21,89	27,47	0,6083	49,35	0,2344	0,6083	0,6083	0,10890,3432	0,3432	0,3432	0,10890,6083	0,2344	0,2344	0,1089	214,1	164,8	0,935	0,935		
1,357	20,86	26,25	0,627	47,11	0,2529	0,627	0,627	0,11330,3432	0,3432	0,3432	0,11330,627	0,2529	0,2529	0,1133	211,6	164,5	0,9337	0,9337		
1,26	19,85	25,06	0,6462	44,91	0,2724	0,6462	0,6462	0,11770,3432	0,3432	0,3432	0,11770,6462	0,2724	0,2724	0,1177	209,2	164,3	0,9325	0,9325		
1,171	18,87	23,9	0,6658	42,77	0,293	0,6658	0,6658	0,12240,3432	0,3432	0,3432	0,12240,6658	0,293	0,293	0,1224	206,8	164,1	0,9314	0,9314		
1,09	17,9	22,77	0,6858	40,67	0,3148	0,6858	0,6858	0,12720,3432	0,3432	0,3432	0,12720,6858	0,3148	0,3148	0,1272	204,5	163,8	0,9303	0,9303		
1,016	16,96	21,67	0,7063	38,63	0,3379	0,7063	0,7063	0,13210,3432	0,3432	0,3432	0,13210,7063	0,3379	0,3379	0,1321	202,1	163,5	0,9293	0,9293		
0,9475	16,03	20,59	0,7273	36,63	0,3622	0,7273	0,7273	0,13720,3432	0,3432	0,3432	0,13720,7273	0,3622	0,3622	0,1372	199,8	163,2	0,9283	0,9283		
0,8849	15,13	19,55	0,7487	34,67	0,3879	0,7487	0,7487	0,14240,3432	0,3432	0,3432	0,14240,7487	0,3879	0,3879	0,1424	197,6	162,9	0,9273	0,9273		
0,8273	14,24	18,52	0,7706	32,76	0,4149	0,7706	0,7706	0,14780,3432	0,3432	0,3432	0,14780,7706	0,4149	0,4149	0,1478	195,3	162,6	0,9264	0,9264		
0,7742	13,37	17,53	0,793	30,9	0,4433	0,793	0,793	0,15330,3432	0,3432	0,3432	0,15330,793	0,4433	0,4433	0,1533	193,1	162,2	0,9255	0,9255		
0,7253	12,52	16,56	0,8159	29,07	0,4732	0,8159	0,8159	0,1590,3432	0,3432	0,3432	0,1590,8159	0,4732	0,4732	0,159	191	161,9	0,9247	0,9247		
0,6802	11,68	15,61	0,8392	27,29	0,5046	0,8392	0,8392	0,16490,3432	0,3432	0,3432	0,16490,8392	0,5046	0,5046	0,1649	188,8	161,5	0,9239	0,9239		
0,6385	10,87	14,69	0,8631	25,55	0,5375	0,8631	0,8631	0,1710,3432	0,3432	0,3432	0,1710,8631	0,5375	0,5375	0,171	186,7	161,1	0,9231	0,9231		
0,6	10,07	13,79	0,8875	23,85	0,5721	0,8875	0,8875	0,17720,3432	0,3432	0,3432	0,17720,8875	0,5721	0,5721	0,1772	184,6	160,7	0,9223	0,9223		

41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62
s ₃	s ₄	s ₅	s ₆	s ₇	s ₈	s ₉	s ₁₀	s ₁₁	s ₁₂	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇	T ₈	T ₉	T ₁₀	T ₁₁	T ₁₂
0,9557	1,749	1,749	1,757	1,222	1,235	0,2768	0,2897	0,9456	1,749	-20	21,46	24,58	10	50	50	50	10	15	-20	-20	10
0,9535	1,749	1,749	1,757	1,222	1,234	0,2816	0,2937	0,9439	1,749	-18	22,03	25,01	11	50	50	50	11	16	-18	-18	11
0,9514	1,749	1,749	1,757	1,222	1,234	0,2864	0,2977	0,9422	1,749	-16	22,63	25,47	12	50	50	50	12	17	-16	-16	12
0,9494	1,749	1,749	1,757	1,222	1,233	0,2911	0,3018	0,9406	1,749	-14	23,25	25,95	13	50	50	50	13	18	-14	-14	13
0,9475	1,749	1,749	1,757	1,222	1,232	0,2959	0,3058	0,9391	1,749	-12	23,89	26,47	14	50	50	50	14	19	-12	-12	14
0,9457	1,75	1,75	1,757	1,222	1,232	0,3006	0,31	0,9377	1,75	-10	24,56	27	15	50	50	50	15	20	-10	-10	15
0,9439	1,75	1,75	1,757	1,222	1,231	0,3054	0,3141	0,9363	1,75	-8	25,25	27,57	16	50	50	50	16	21	-8	-8	16
0,9423	1,75	1,75	1,757	1,222	1,231	0,3101	0,3182	0,935	1,75	-6	25,95	28,15	17	50	50	50	17	22	-6	-6	17
0,9407	1,75	1,75	1,757	1,222	1,23	0,3148	0,3224	0,9337	1,75	-4	26,68	28,76	18	50	50	50	18	23	-4	-4	18
0,9391	1,75	1,75	1,757	1,222	1,23	0,3196	0,3266	0,9325	1,75	-2	27,42	29,39	19	50	50	50	19	24	-2	-2	19
0,9376	1,751	1,751	1,757	1,222	1,229	0,3243	0,3308	0,9314	1,751	0	28,18	30,04	20	50	50	50	20	25	-7,437E	0	20
0,9362	1,751	1,751	1,757	1,222	1,229	0,329	0,3351	0,9303	1,751	2	28,95	30,71	21	50	50	50	21	26	2	2	21
0,9349	1,751	1,751	1,757	1,222	1,228	0,3337	0,3394	0,9293	1,751	4	29,74	31,39	22	50	50	50	22	27	4	4	22
0,9335	1,751	1,751	1,757	1,222	1,228	0,3385	0,3436	0,9283	1,751	6	30,54	32,09	23	50	50	50	23	28	6	6	23
0,9323	1,752	1,752	1,757	1,222	1,227	0,3432	0,3479	0,9273	1,752	8	31,36	32,81	24	50	50	50	24	29	8	8	24
0,9311	1,752	1,752	1,757	1,222	1,227	0,3479	0,3523	0,9264	1,752	10	32,19	33,54	25	50	50	50	25	30	10	10	25
0,9299	1,752	1,752	1,757	1,222	1,227	0,3526	0,3566	0,9255	1,752	12	33,03	34,29	26	50	50	50	26	31	12	12	26
0,9288	1,753	1,753	1,757	1,222	1,226	0,3573	0,3609	0,9247	1,753	14	33,88	35,05	27	50	50	50	27	32	14	14	27
0,9277	1,753	1,753	1,757	1,222	1,226	0,362	0,3653	0,9239	1,753	16	34,74	35,82	28	50	50	50	28	33	16	16	28
0,9266	1,753	1,753	1,758	1,222	1,225	0,3667	0,3697	0,9231	1,753	18	35,6	36,61	29	50	50	50	29	34	18	18	29
0,9256	1,754	1,754	1,758	1,222	1,225	0,3714	0,3741	0,9223	1,754	20	36,48	37,4	30	50	50	50	30	35	20	20	30

Διπλός ατμοποιητής.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
COP1	COP1c	COP2	COP2c	COP2cn	DTSC	HEX	h ₁	h ₂	h ₃	h ₄	h ₅	h ₆	h ₇	h ₈	h ₉	h ₁₀	h ₁₁	isc1	isc2
9,353	9,353	3,652	3,652	3,652	35	0,7	238,4	254,4	256,1	51,86	250,5	281,7	285,2	123,5	123,5	72,45	72,45	0,9	0,9
9,507	9,507	3,737	3,737	3,737	34,45	0,7	239	254,7	256,5	52,92	250,9	281,6	285	123,5	123,5	73,21	73,21	0,9	0,9
9,664	9,664	3,826	3,826	3,826	33,89	0,7	239,6	255,1	256,8	53,98	251,4	281,5	284,8	123,5	123,5	73,97	73,97	0,9	0,9
9,825	9,825	3,917	3,917	3,917	33,34	0,7	240,3	255,4	257,1	55,05	251,8	281,3	284,6	123,5	123,5	74,74	74,74	0,9	0,9
9,989	9,989	4,011	4,011	4,011	32,79	0,7	240,9	255,8	257,4	56,11	252,3	281,2	284,4	123,5	123,5	75,51	75,51	0,9	0,9
10,16	10,16	4,108	4,108	4,108	32,24	0,7	241,5	256,1	257,7	57,18	252,7	281,1	284,2	123,5	123,5	76,27	76,27	0,9	0,9
10,33	10,33	4,209	4,209	4,209	31,68	0,7	242,1	256,5	258,1	58,25	253,2	280,9	284	123,5	123,5	77,04	77,04	0,9	0,9
10,51	10,51	4,314	4,314	4,314	31,13	0,7	242,7	256,8	258,4	59,32	253,6	280,8	283,8	123,5	123,5	77,81	77,81	0,9	0,9
10,69	10,69	4,423	4,423	4,423	30,58	0,7	243,3	257,2	258,7	60,4	254,1	280,7	283,6	123,5	123,5	78,58	78,58	0,9	0,9
10,87	10,87	4,535	4,535	4,535	30,03	0,7	243,9	257,5	259	61,47	254,5	280,5	283,4	123,5	123,5	79,35	79,35	0,9	0,9
11,06	11,06	4,652	4,652	4,652	29,47	0,7	244,5	257,9	259,4	62,55	255	280,4	283,2	123,5	123,5	80,13	80,13	0,9	0,9
11,25	11,25	4,774	4,774	4,774	28,92	0,7	245,1	258,2	259,7	63,63	255,4	280,3	283,1	123,5	123,5	80,9	80,9	0,9	0,9
11,45	11,45	4,9	4,9	4,9	28,37	0,7	245,7	258,6	260	64,71	255,9	280,2	282,9	123,5	123,5	81,68	81,68	0,9	0,9
11,66	11,66	5,032	5,032	5,032	27,82	0,7	246,3	259	260,4	65,79	256,3	280,1	282,7	123,5	123,5	82,45	82,45	0,9	0,9
11,87	11,87	5,169	5,169	5,169	27,26	0,7	246,9	259,3	260,7	66,88	256,7	280	282,5	123,5	123,5	83,23	83,23	0,9	0,9
12,08	12,08	5,311	5,311	5,311	26,71	0,7	247,5	259,7	261	67,97	257,2	279,8	282,4	123,5	123,5	84,01	84,01	0,9	0,9
12,3	12,3	5,46	5,46	5,46	26,16	0,7	248,1	260	261,4	69,06	257,6	279,7	282,2	123,5	123,5	84,79	84,79	0,9	0,9
12,53	12,53	5,615	5,615	5,615	25,61	0,7	248,7	260,4	261,7	70,15	258,1	279,6	282	123,5	123,5	85,57	85,57	0,9	0,9
12,76	12,76	5,778	5,778	5,778	25,05	0,7	249,3	260,8	262	71,24	258,5	279,5	281,9	123,5	123,5	86,35	86,35	0,9	0,9
13	13	5,947	5,947	5,947	24,5	0,7	249,9	261,1	262,4	72,34	258,9	279,4	281,7	123,5	123,5	87,14	87,14	0,9	0,9

20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
isc2	ma	mb	mc	md	me	mg	mh	Pc1	Pc2	Pm	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇	P ₈	P ₉	P ₁₀
0,9	1	1	1,609	3,011	2,011	0,4019	1	17,74	104,7	0,293	0,1328	0,293	0,293	0,293	0,293	1,319	1,319	1,319	0,293	1,319
0,9	1	1	1,597	2,992	1,992	0,3945	1	17,44	102	0,3015	0,1387	0,3015	0,3015	0,3015	0,3015	1,319	1,319	1,319	0,3015	1,319
0,9	1	1	1,586	2,973	1,973	0,3871	1	17,14	99,38	0,3101	0,1447	0,3101	0,3101	0,3101	0,3101	1,319	1,319	1,319	0,3101	1,319
0,9	1	1	1,574	2,954	1,954	0,3797	1	16,85	96,8	0,319	0,1509	0,319	0,319	0,319	0,319	1,319	1,319	1,319	0,319	1,319
0,9	1	1	1,563	2,935	1,935	0,3724	1	16,55	94,27	0,328	0,1574	0,328	0,328	0,328	0,328	1,319	1,319	1,319	0,328	1,319
0,9	1	1	1,552	2,917	1,917	0,3652	1	16,26	91,77	0,3373	0,164	0,3373	0,3373	0,3373	0,3373	1,319	1,319	1,319	0,3373	1,319
0,9	1	1	1,54	2,898	1,898	0,358	1	15,98	89,31	0,3467	0,1709	0,3467	0,3467	0,3467	0,3467	1,319	1,319	1,319	0,3467	1,319
0,9	1	1	1,529	2,88	1,88	0,3508	1	15,69	86,9	0,3563	0,178	0,3563	0,3563	0,3563	0,3563	1,319	1,319	1,319	0,3563	1,319
0,9	1	1	1,518	2,862	1,862	0,3437	1	15,41	84,53	0,3662	0,1854	0,3662	0,3662	0,3662	0,3662	1,319	1,319	1,319	0,3662	1,319
0,9	1	1	1,508	2,844	1,844	0,3367	1	15,14	82,19	0,3762	0,1929	0,3762	0,3762	0,3762	0,3762	1,319	1,319	1,319	0,3762	1,319
0,9	1	1	1,497	2,826	1,826	0,3297	1	14,86	79,89	0,3865	0,2007	0,3865	0,3865	0,3865	0,3865	1,319	1,319	1,319	0,3865	1,319
0,9	1	1	1,486	2,809	1,809	0,3227	1	14,59	77,63	0,397	0,2088	0,397	0,397	0,397	0,397	1,319	1,319	1,319	0,397	1,319
0,9	1	1	1,475	2,791	1,791	0,3157	1	14,32	75,41	0,4076	0,2171	0,4076	0,4076	0,4076	0,4076	1,319	1,319	1,319	0,4076	1,319
0,9	1	1	1,465	2,774	1,774	0,3089	1	14,06	73,22	0,4185	0,2256	0,4185	0,4185	0,4185	0,4185	1,319	1,319	1,319	0,4185	1,319
0,9	1	1	1,454	2,756	1,756	0,302	1	13,79	71,07	0,4297	0,2344	0,4297	0,4297	0,4297	0,4297	1,319	1,319	1,319	0,4297	1,319
0,9	1	1	1,444	2,739	1,739	0,2952	1	13,53	68,96	0,441	0,2435	0,441	0,441	0,441	0,441	1,319	1,319	1,319	0,441	1,319
0,9	1	1	1,434	2,722	1,722	0,2884	1	13,28	66,88	0,4526	0,2529	0,4526	0,4526	0,4526	0,4526	1,319	1,319	1,319	0,4526	1,319
0,9	1	1	1,423	2,705	1,705	0,2817	1	13,02	64,83	0,4644	0,2625	0,4644	0,4644	0,4644	0,4644	1,319	1,319	1,319	0,4644	1,319
0,9	1	1	1,413	2,688	1,688	0,275	1	12,77	62,82	0,4764	0,2724	0,4764	0,4764	0,4764	0,4764	1,319	1,319	1,319	0,4764	1,319
0,9	1	1	1,403	2,672	1,672	0,2683	1	12,52	60,84	0,4887	0,2825	0,4887	0,4887	0,4887	0,4887	1,319	1,319	1,319	0,4887	1,319

41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66
P ₁₁	Q _c	Q _{e1}	Q _{e2}	s ₁	s ₂	s ₃	s ₄	s ₅	s ₆	s ₇	s ₈	s ₉	s ₁₀	s ₁₁	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇	T ₈	T ₉	T ₁₀	T ₁₁
0,1328	487	166	198,6	0,9456	0,9456	0,952	0,2044	0,9314	0,9314	0,9419	0,4418	0,4666	0,2749	0,2901	-20	4,389	6,382	-7,437E	0	55,32	58,27	50	-7,437E	15	-20
0,1387	483,3	165,8	198	0,9448	0,9448	0,951	0,2082	0,931	0,931	0,9413	0,4418	0,4658	0,2775	0,2924	-19	5,033	6,985	0,7895	0,7895	55,2	58,09	50	0,7895	15,55	-19
0,1447	479,6	165,7	197,4	0,9439	0,9439	0,95	0,2121	0,9305	0,9305	0,9407	0,4418	0,465	0,2802	0,2946	-18	5,682	7,593	1,579	1,579	55,08	57,91	50	1,579	16,11	-18
0,1509	475,9	165,5	196,8	0,943	0,943	0,9491	0,2159	0,9301	0,9301	0,9401	0,4418	0,4643	0,2828	0,2969	-17	6,335	8,206	2,368	2,368	54,97	57,74	50	2,368	16,66	-17
0,1574	472,3	165,4	196,2	0,9422	0,9422	0,9481	0,2198	0,9297	0,9297	0,9395	0,4418	0,4636	0,2855	0,2992	-16	6,992	8,823	3,158	3,158	54,85	57,57	50	3,158	17,21	-16
0,164	468,8	165,2	195,6	0,9414	0,9414	0,9472	0,2236	0,9293	0,9293	0,9389	0,4418	0,4629	0,2881	0,3015	-15	7,653	9,445	3,947	3,947	54,74	57,4	50	3,947	17,76	-15
0,1709	465,3	165	194,9	0,9406	0,9406	0,9463	0,2274	0,9289	0,9289	0,9383	0,4418	0,4622	0,2907	0,3038	-14	8,318	10,07	4,737	4,737	54,63	57,23	50	4,737	18,32	-14
0,178	461,8	164,9	194,3	0,9399	0,9399	0,9454	0,2313	0,9285	0,9285	0,9377	0,4418	0,4615	0,2934	0,3061	-13	8,988	10,7	5,526	5,526	54,53	57,07	50	5,526	18,87	-13
0,1854	458,4	164,7	193,7	0,9391	0,9391	0,9445	0,2351	0,9281	0,9281	0,9371	0,4418	0,4608	0,296	0,3084	-12	9,66	11,34	6,316	6,316	54,42	56,91	50	6,316	19,42	-12
0,1929	454,9	164,6	193,1	0,9384	0,9384	0,9437	0,2389	0,9277	0,9277	0,9365	0,4418	0,4601	0,2987	0,3107	-11	10,34	11,98	7,105	7,105	54,32	56,75	50	7,105	19,97	-11
0,2007	451,6	164,4	192,4	0,9377	0,9377	0,9429	0,2427	0,9274	0,9274	0,936	0,4418	0,4595	0,3013	0,313	-10	11,02	12,62	7,895	7,895	54,22	56,59	50	7,895	20,53	-10
0,2088	448,2	164,2	191,8	0,937	0,937	0,9421	0,2465	0,927	0,927	0,9354	0,4418	0,4589	0,3039	0,3153	-9	11,7	13,27	8,684	8,684	54,12	56,44	50	8,684	21,08	-9
0,2171	444,9	164	191,2	0,9363	0,9363	0,9413	0,2503	0,9267	0,9267	0,9349	0,4418	0,4582	0,3066	0,3177	-8	12,39	13,92	9,474	9,474	54,02	56,29	50	9,474	21,63	-8
0,2256	441,7	163,9	190,5	0,9356	0,9356	0,9405	0,2541	0,9263	0,9263	0,9343	0,4418	0,4576	0,3092	0,32	-7	13,08	14,58	10,26	10,26	53,92	56,14	50	10,26	22,18	-7
0,2344	438,4	163,7	189,9	0,935	0,935	0,9398	0,2579	0,926	0,926	0,9338	0,4418	0,4571	0,3118	0,3223	-6	13,77	15,24	11,05	11,05	53,83	55,99	50	11,05	22,74	-6
0,2435	435,2	163,5	189,2	0,9343	0,9343	0,939	0,2617	0,9256	0,9256	0,9333	0,4418	0,4565	0,3144	0,3247	-5	14,47	15,9	11,84	11,84	53,74	55,84	50	11,84	23,29	-5
0,2529	432	163,3	188,6	0,9337	0,9337	0,9383	0,2655	0,9253	0,9253	0,9328	0,4418	0,4559	0,3171	0,327	-4	15,17	16,57	12,63	12,63	53,64	55,7	50	12,63	23,84	-4
0,2625	428,9	163,1	187,9	0,9331	0,9331	0,9376	0,2693	0,9249	0,9249	0,9323	0,4418	0,4554	0,3197	0,3293	-3	15,87	17,24	13,42	13,42	53,55	55,56	50	13,42	24,39	-3
0,2724	425,8	162,9	187,2	0,9325	0,9325	0,9369	0,273	0,9246	0,9246	0,9317	0,4418	0,4548	0,3223	0,3317	-2	16,58	17,91	14,21	14,21	53,47	55,42	50	14,21	24,95	-2
0,2825	422,7	162,7	186,6	0,932	0,932	0,9363	0,2768	0,9243	0,9243	0,9312	0,4418	0,4543	0,325	0,334	-1	17,29	18,59	15	15	53,38	55,28	50	15	25,5	-1

Παράρτημα ΙΙΙ: Ευρετήριο βιβλιογραφικών και διαδικτυακών πηγών

- [1] <https://www.ashrae.org>
 - [2] <https://en.wikipedia.org/wiki/Cooling>
 - [3] https://en.wikipedia.org/wiki/Air_conditioning
 - [4] <https://en.wikipedia.org/wiki/Refrigeration>
 - [5] https://en.wikipedia.org/wiki/Heat_pump_and_refrigeration_cycle
 - [6] <https://en.wikipedia.org/wiki/HVAC>
 - [7] <https://en.wikipedia.org/wiki/Freon>
 - [8] <https://en.wikipedia.org/wiki/Coolant>
 - [9] <https://en.wikipedia.org/wiki/1,1,1,2-Tetrafluoroethane>
 - [10] https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_refrigerants
 - [11] <https://en.wikipedia.org/wiki/Compressor>
 - [12] <https://en.wikipedia.org/wiki/Evaporator>
 - [13] <https://en.wikipedia.org/wiki/Condenser>
 - [14] https://en.wikipedia.org/wiki/Expansion_valve
 - [15] https://en.wikipedia.org/wiki/Heat_exchanger
 - [16] https://en.wikipedia.org/wiki/Flash_tank
 - [17] https://en.wikipedia.org/wiki/Flash_evaporation
 - [18] <https://en.wikipedia.org/wiki/Chiller>
 - [19] <http://www.samsung.com/in/consumer/home-appliances/air-conditioner/>
 - [20] Σημειώσεις Ψύξης Α' και Β' μέρος, Σ.Χατζηδάκης εκδόσεις Ε.Μ.Π.
 - [21] Refrigerating Engineering, Eric Granryd, Ingvar Ekroth, Per Lundqvist, Ake Melinder, Bjorn Palm, Peter Rohlin, KTH Department of Energy Technology, Division of Applied Thermodynamics and Refrigeration
 - [22] <http://www.traulsen.com/>
 - [23] <http://www.thomasnet.com/southern-california/refrigeration-contractors-1239-1.html>
 - [24] <http://www.dupont.com/>
- Από ιστοσελίδα www.sciencedirect.com
- [25] Performance and exergy destruction analysis of optimal subcooling for vapor-compression refrigeration systems
 - [26] Enhanced-efficiency operating variables selection for vapor-compression refrigeration cycle system

- [27] Refrigerant charge reduction in vapor-compression refrigeration cycles via liquid-to-suction heat exchange**
- [28] Thermodynamic performance analysis of a vapor-compression absorption cascaded refrigeration system**
- [29] Thermodynamic design and simulation of a CO₂ based transcritical vapour compression refrigeration system**
- [30] A proposed subcooling method for vapor compression refrigeration cycle based on expansion power recovery**
- [31] Theoretical energy performance evaluation of different single stage vapour compression refrigeration configurations using R-1234yf and R-1234ze (E) as working fluids**
- [32] Optimal performance of an absorption refrigerator based on maximum COP**
- [33] The coefficient of performance of an ideal air-conditioner**
- [34] Experimental study on cooling performance of an air-conditioning system with dual independent evaporative condensers**
- [35] Experimental and theoretical investigation of internal two-stage evaporative cooler**

