

**ΑΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ ΤΤ**

**ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε**



**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΕΞΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΥΓΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΑΕΡΙΩΝ**

**Υπεύθυνος φοιτητής: Ακτύπης Χαράλαμπος  
Επιβλέπων καθηγητής: Αλέξης Γεώργιος**

**ΠΕΙΡΑΙΑΣ 2017**

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στην εργασία αυτή, πραγματοποιείται εξεργειακή ανάλυση του κύκλου Linde σε εγκατάσταση με εργαζόμενο μέσο τον αέρα. Αρχικά, παρατίθενται κάποια απαραίτητα θεωρητικά στοιχεία που αφορούν τις ψυκτικές μονάδες που λειτουργούν με τον κύκλο Linde, καθώς και στοιχεία για την έννοια της εξέργειας. Πραγματοποιούνται υπολογισμοί σε διάφορες πιέσεις και θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 100 έως 200 bar και 20 έως 40°C αντίστοιχα. Προκύπτουν οι απώλειες δυνητικού έργου οι οποίες υφίστανται σε μια τέτοια εγκατάσταση, τόσο συνολικά, όσο και σε κάθε εξάρτημα ξεχωριστά. Στη συνέχεια χαράσσονται συγκριτικά διαγράμματα μεταξύ των διαφόρων πιέσεων λειτουργίας, ώστε να καταστεί δυνατή η εξαγωγή συμπερασμάτων. Επιπλέον, χαράσσονται τα διαγράμματα Grassmann για όλες τις περιπτώσεις, τα οποία απεικονίζουν την καταστροφή της εξέργειας σε κάθε ένα επιμέρους σημείο της εγκατάστασης. Υπολογίζονται επίσης οι βαθμοί απόδοσης σύμφωνα με το 2<sup>ο</sup> θερμοδυναμικό νόμο και συγκρίνονται με άλλες παρόμοιες έρευνες.

## **ABSTRACT**

In this study, an omnibus exergy analysis is carried out on the field of cryogenic temperatures. In particular, our machine uses the refrigerant “air” and follows the Linde process. Initially, there are some theory principals that are cited and they are related to the meaning of exergy and the one of the refrigerant machines using the Linde process. Calculations are made for pressures and temperatures, ranging from 100 to 200 bar and 20 – 40°C. Afterwards, the potential work that is lost is calculated, as a summary but in every single compartment as well. With the results prepared, comparable diagrams are drawn to make it easier to extract conclusions. Apart from that, the Grassmann diagrams are drawn as well, which are diagrams that show the exergy destruction that occurs in every compartment of the machine. Lastly, the efficiency is calculated through the 2<sup>nd</sup> thermodynamic law and in comparison with other studies, provides further assurance.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b>	<b>2</b>
<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b>	<b>5</b>
1.1. 1 <sup>ος</sup> θερμοδυναμικός νόμος	5
1.2. 2 <sup>ος</sup> θερμοδυναμικός νόμος	5
1.3. Η έννοια της εξέργειας	5
<b>2. ΜΟΝΑΔΕΣ ΥΓΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΑΕΡΙΩΝ</b>	<b>6</b>
2.1. Υγροποίηση αερίων	6
2.2. Μέθοδος Linde - Hampson	7
2.3. Μέθοδος Claude	8
<b>3. ΕΞΕΡΓΕΙΑ</b>	<b>10</b>
3.1. Η έννοια του περιβάλλοντος	10
3.2. Έργο περιβάλλοντος	10
3.3. Αναντιστρεπτότητα	11
3.4. Εξέργεια κλειστού συστήματος	12
3.5. Εξέργεια ανοικτού συστήματος (όγκος ελέγχου)	13
<b>4. ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΗ ΤΗΣ ΕΞΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΜΟΝΑΔΕΣ LINDE</b>	<b>14</b>
4.1. Στοιχεία παρούσας εγκατάστασης	14
4.2. Σχέσεις υπολογισμών καταστροφής της εξέργειας	14
<b>5. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ</b>	<b>16</b>
5.1. Εύρεση θερμοδυναμικών ιδιοτήτων	16
Θερμοδυναμικές ιδιότητες στα 100 bar	16
Θερμοδυναμικές ιδιότητες στα 200 bar	17
Θερμοδυναμικές ιδιότητες στα 300 bar	17
Θερμοδυναμικές ιδιότητες στα 400 bar	17

<b>5.2. Υποδειγματικός υπολογισμός μεγεθών</b>	<b>18</b>
<b>Υπολογισμός ειδικών εξεργειών</b>	<b>19</b>
<b>Καταστροφή της εξέργειας στις επιμέρους διατάξεις</b>	<b>19</b>
<b>Καταστροφή εξέργειας στον ηλεκτροκινητήρα:</b>	<b>20</b>
<b>Καταστροφή εξέργειας στο συμπιεστή:</b>	<b>20</b>
<b>Καταστροφή εξέργειας στον εναλλάκτη θερμότητας:</b>	<b>20</b>
<b>Καταστροφή εξέργειας στην εκτονωτική βαλβίδα:</b>	<b>20</b>
<b>Καταστροφή εξέργειας στο δοχείο διαχωρισμού:</b>	<b>20</b>
<b>5.3. Πίνακες αποτελεσμάτων</b>	<b>21</b>
<b>Πίνακες των 100 bar</b>	<b>21</b>
<b>Πίνακες των 200 bar</b>	<b>23</b>
<b>Πίνακες των 300 bar</b>	<b>25</b>
<b>Πίνακες των 400 bar</b>	<b>27</b>
<b>Καταστροφή εξέργειας στα εξαρτήματα</b>	<b>29</b>
<b>6. ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ</b>	<b>30</b>
<b>6.1. Γραφικές παραστάσεις</b>	<b>30</b>
<b>6.2. Ιστογράμματα</b>	<b>31</b>
<b>6.3. Διαγράμματα Grassmann</b>	<b>33</b>
<b>100 bar</b>	<b>33</b>
<b>200 bar</b>	<b>35</b>
<b>300 bar</b>	<b>38</b>
<b>400 bar</b>	<b>40</b>
<b>7. ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</b>	<b>43</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ</b>	<b>44</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b>	<b>49</b>

# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στη σημερινή εποχή παρατηρείται μια μεταστροφή, στην όσο τον δυνατόν, διαφύλαξη των ορυκτών πόρων και στην περιστολή της ασύστολης εξόρυξής τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη σύναψη συμφωνιών σε παγκόσμιο επίπεδο, οι οποίες με τη σειρά τους επιφέρουν οργανωμένες δράσεις. Αυτές οι δράσεις δρομολογούνται από αρκετά κράτη εξ' αιτίας της επίγνωσης και των διαρκών προειδοποιήσεων για την περιορισμένη διαθεσιμότητα των φυσικών πόρων του πλανήτη. Στον τομέα της ενέργειας, αυτό μεταφράζεται στην ανάγκη για την κατασκευή αποτελεσματικότερων μηχανών καθώς και των διατάξεων αυτών οι οποίες μετασχηματίζουν την ενέργεια σε διάφορα είδη.

## 1.1. 1<sup>ος</sup> θερμοδυναμικός νόμος

Ο πρώτος θερμοδυναμικός νόμος εκφράζει την αρχή διατήρησης της ενέργειας. Διατυπώνει δηλαδή πως η ενέργεια σε ένα σύστημα δύναται μονάχα να μετασχηματισθεί από μια μορφή ενέργειας σε μια άλλη και όχι να δημιουργηθεί εκ του μηδενός ή να καταστραφεί. Η χρησιμότητα του πρώτου θερμοδυναμικού νόμου επομένως περιορίζεται στην ποσοτική καταγραφή της ενέργειας και για το λόγο αυτό δε θα γίνει ιδιαίτερη μνεία.

## 1.2. 2<sup>ος</sup> θερμοδυναμικός νόμος

Σε αντίθεση με τον πρώτο θερμοδυναμικό νόμο, ο δεύτερος αποτελεί αναπόσπαστο «εργαλείο» στη διαδικασία για συνεχή βελτιστοποίηση κάθε είδους θερμοδυναμικού συστήματος. Ασχολείται με την ποιότητα της ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, ασχολείται με την υποβάθμιση της ενέργειας στα στάδια μιας διεργασίας, την παραγωγή εντροπίας σε αυτά, καθώς και το απολεσθέν έργο.

## 1.3. Η έννοια της εξέργειας

Εάν επιχειρούσαμε να αποδώσουμε συνοπτικά την έννοια της εξέργειας δίχως να χρησιμοποιήσουμε όρους με επιστημονικό περιεχόμενο, θα μπορούσαμε να την ορίσουμε «ως το μέγιστο έργο το οποίο είναι διαθέσιμο προς λήψη σε μια δεδομένη κατάσταση σε ένα θερμοδυναμικό σύστημα, σε καθορισμένο περιβάλλον». Επομένως, θα μπορούσαμε να πούμε πως η εξέργεια αποτελεί το μέτρο αναφοράς για τους μηχανικούς, όταν αυτοί θα κληθούν να κατασκευάσουν μια μηχανή η οποία θα μετασχηματίσει την ενέργεια. Φυσικά και δε θα μπορέσουν να κατασκευάσουν την τέλεια μηχανή, αλλά ο προσδιορισμός του μέγιστου έργου αυτού, θα αποτελεί κίνητρο ώστε να πλησιάζουν σταδιακά. Η έννοια της εξέργειας θα αναλυθεί περαιτέρω στο κεφάλαιο 3.

## 2. ΜΟΝΑΔΕΣ ΥΓΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΑΕΡΙΩΝ

Οι μονάδες υγροποίησης αερίων υπάγονται στην ευρύτερη κατηγορία τεχνολογιών ψύξης, της ψύξης με συμπίεση αερίου. Η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιείται για την επίτευξη πολύ χαμηλών θερμοκρασιών, κάτω των  $-100^{\circ}\text{C}$  οι οποίες ονομάζονται «κρυογονικές θερμοκρασίες». Η απόπειρα χρήσης συμβατικών τεχνολογιών ψύξης θα απαιτούσε μεγάλα ποσά μηχανικής ισχύος, με φυσικό επακόλουθο το χαμηλό συντελεστή συμπεριφοράς. Το κεφάλαιο της υγροποίησης των αερίων, λόγω της φύσης της εργασίας, θα μας απασχολήσει και θα αναλυθεί εκτενέστερα.

### 2.1. Υγροποίηση αερίων

Πληθώρα επιστημονικών και μηχανικών εφαρμογών οφείλουν την ανάπτυξή τους σε αυτή τη μέθοδο. Επομένως, η υγροποίηση των αερίων αποτελεί ένα σημαντικό κεφάλαιο της ψύξης. Φαινόμενα που συνδέονται με αυτήν, είναι η «κατασκευή υγρών προωθητικών για πυραύλους, διαχωρισμός του οξυγόνου και του αζώτου από τον αέρα, καθώς και τα φαινόμενα υπεραγωγιμότητας».<sup>1</sup>

Μια ουσία η οποία βρίσκεται σε θερμοκρασία υψηλότερη από αυτή του κρίσιμου σημείου, μπορεί να βρεθεί σε αέρια φάση και μόνον. Στην παρούσα περίπτωση, ορίζουμε ως «κρυογόνα αέρια», τα αέρια αυτά τα οποία διαθέτουν θερμοκρασία ατμοποίησης, σε ατμοσφαιρική πίεση, χαμηλότερη της κρυογονικής θερμοκρασίας που ορίστηκε παραπάνω, αυτή των  $-100^{\circ}\text{C}$ . Τέτοια αέρια είναι το υδρογόνο, το οξυγόνο, το μεθάνιο, το μονοξείδιο του άνθρακα, το αργόν, το ήλιο κλπ..

Κρυογόνα αέρια	Θερμοκρασία ατμοποίησης ( $^{\circ}\text{C}$ )
Υδρογόνο	-252,26
Οξυγόνο	-182,96
Μεθάνιο	-161,52
Μονοξείδιο του άνθρακα	-191,54
Αργόν	-185,86
Άζωτο	-195,8

Πίνακας 2 - 1: Θερμοκρασίες ατμοποίησης συνηθισμένων κρυογόνων αερίων<sup>2</sup>

Οι κύκλοι των κρυογόνων αερίων, όπως ονομάζονται οι θερμοδυναμικές αυτές διεργασίες των συγκεκριμένων αερίων, αποσκοπούν στην υγροποίηση αυτών και έπειτα στο διαχωρισμό τους. Η διατήρηση της χαμηλής θερμοκρασίας είναι στόχος δευτερευούσης σημασίας. Συναντούμε τους εξής βασικούς δύο κύκλους:

- Κύκλος Linde – Hampson
- Κύκλος Claude

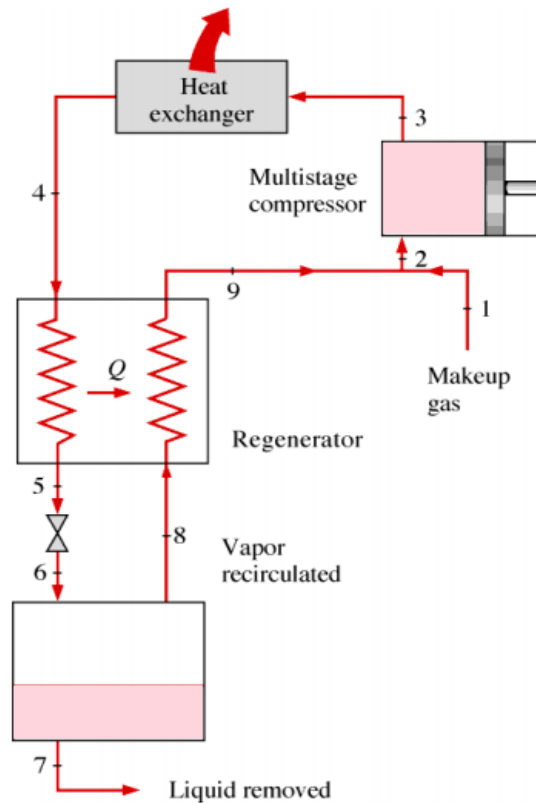
**Στην εξεργειακή ανάλυση της παρούσας εργασίας, η εγκατάσταση λειτουργεί με τον κύκλο Linde – Hampson.**

<sup>1</sup> Θερμοδυναμική για μηχανικούς, 7<sup>η</sup> έκδοση, Yunus Cengel, Michael Boles, Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ

<sup>2</sup> Η τεχνολογία της ψύξης, Γιώργος Κ. Αλέξης, Εκδόσεις ΑΘ. ΣΤΑΜΟΥΛΗΣ, 2007

## 2.2. Μέθοδος Linde - Hampson

Η μέθοδος αυτή κατοχυρώθηκε ως πατέντα από τον Carl von Linde το 1896. Διαμέσου της διεργασίας του στραγγαλισμού, επιτυγχάνεται η υγροποίηση του αέρα. Στο σχήμα 2 – 1 ακολουθεί το διάγραμμα ροής μια τέτοιας εγκατάστασης:



Σχήμα 2 - 1: Διάγραμμα ροής εγκατάστασης Linde

Τα μέρη μιας τυπικής εγκατάστασης υγροποίησης αερίων είναι:

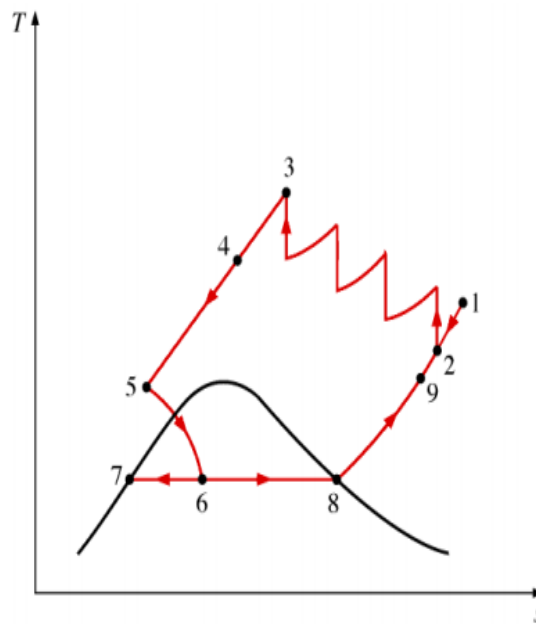
Συμπιεστής: Ο συμπιεστής αναλαμβάνει τη συμπίεση του μη υγροποιημένου αέρα. Στο παραπάνω σχήμα παρατηρούμε πολυβάθμιο συμπιεστή. Συνήθως η διαφορά πιέσεων η οποία θέλουμε να επιτύχουμε είναι υψηλή, επομένως τη βέλτιστη λύση αποτελεί η χρήση συμπιεστών τέτοιου τύπου. (διεργασία 2 – 3)

Εναλλάκτης θερμότητας: Ο αέρας, συμπιεσμένος πλέον, διέρχεται και ψύχεται από τον εναλλάκτη θερμότητας, με το ψυχρό ρεύμα το οποίο προέρχεται από το δοχείο διαχωρισμού. (διεργασία 3 – 4)

Εκτονωτική βαλβίδα: Πραγματοποιεί στραγγαλισμό του προηγουμένως συμπιεσμένου αέρα. Σε αυτό το σημείο, το μικρότερο ποσοστό υγροποιείται και συλλέγεται στο δοχείο διαχωρισμού. (διεργασία 5 – 6)

Δοχείο διαχωρισμού: Εδώ περισυλλέγεται ο υγροποιημένος αέρας. (διεργασία 6 – 7)

Στο σχήμα 2-2 παρουσιάζεται το διάγραμμα T - s του κύκλου Linde.



Σχήμα 2 - 2: Διάγραμμα T-s κύκλου Linde

### 2.3. Μέθοδος Claude

Η μέθοδος Claude αποτελεί μια παραλλαγή, ή ορθότερα μια προσθήκη του Γάλλου μηχανικού Georges Claude το 1902 στη μέθοδο του Linde. Η διαφοροποίηση της μεθόδου αυτής έγκειται στην, κατά μέρους, αντικατάσταση της διαδικασίας στραγγαλισμού με ταυτόχρονη λειτουργία ενός στροβίλου με σκοπό την παραγωγή έργου. Μετά το πέρας το συγκριτικών μελετών, αποδείχθηκε όντως ότι η ψύξη που προσφέρεται με τη μέθοδο Claude είναι κατά πολύ μεγαλύτερη με την αντίστοιχη της μεθόδου Linde, ενώ εργαζόμαστε μεταξύ κοινών ακραίων πιέσεων.

Από θερμικό ισολογισμό προκύπτει:

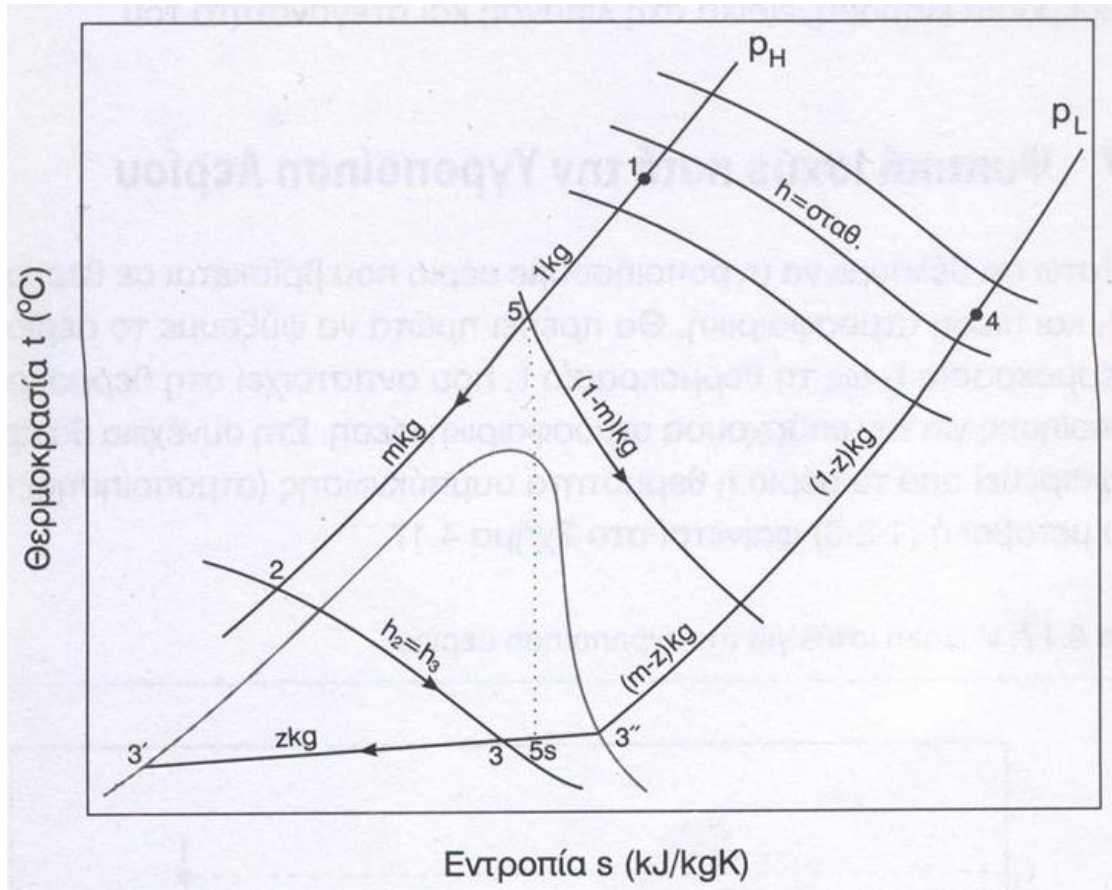
$$z = \frac{h_4 - h_1}{h_4 - h_{3'}} + (1 - m) \frac{h_5 - h_6}{h_4 - h_{3'}} \quad (2.1)$$

Το οποίο συγκρινόμενο με την αντίστοιχη σχέση που προκύπτει για Linde:

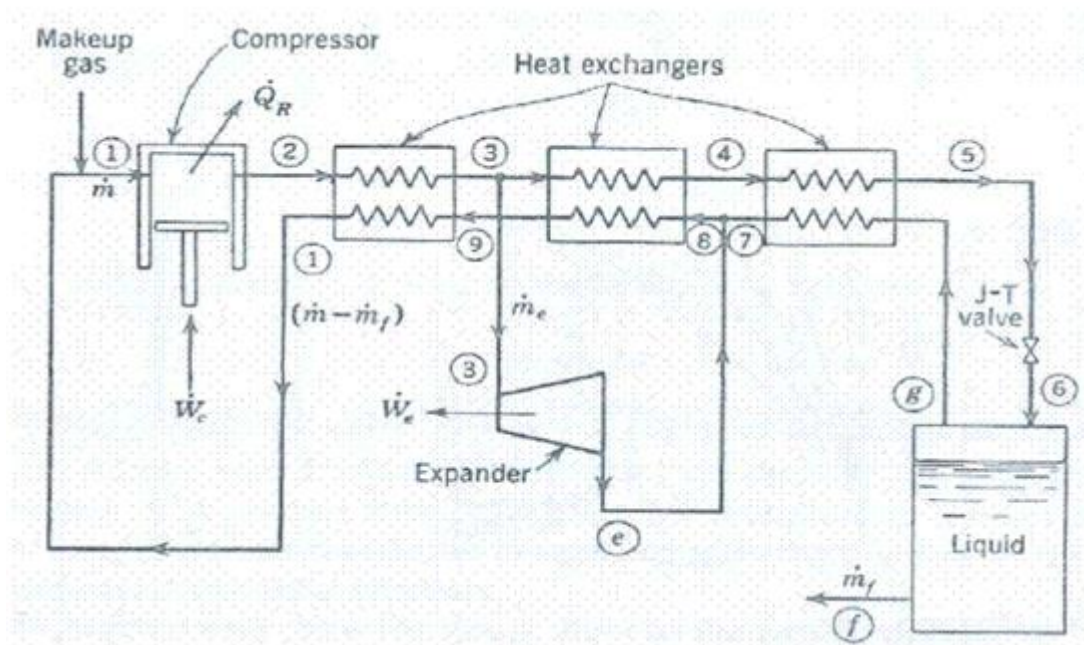
$$z = \frac{h_4 - h_1}{h_4 - h_{3'}} \quad (2.2)$$

Στις παραπάνω σχέσεις, παρατηρείται πως η διαφορά στην ποσότητα υγροποιημένου αέρα χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Claude είναι το δεύτερο σκέλος της σχέσης (2.1)





Σχήμα 2 3: Διάγραμμα T-s κύκλου Claude



Σχήμα 2 - 4: Διάγραμμα ροής κύκλου Claude

### 3. ΕΞΕΡΓΕΙΑ

Στο κεφάλαιο 1 της εισαγωγής, δόθηκε μια σύντομη και μη δόκιμη ερμηνεία της έννοιας της εξέργειας. Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται διεξοδικότερα και παρατίθενται οι μαθηματικές σχέσεις οι οποίες την περιγράφουν.

Όπως ήδη αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 1 της εισαγωγής, η εξέργεια ορίζεται ως το μέγιστο ωφέλιμο έργο το οποίο δύναται να ληφθεί από σύστημα, το οποίο ευρίσκεται σε συγκεκριμένη κατάσταση και περιβάλλον.

#### 3.1. Η έννοια του περιβάλλοντος

Η έννοια του περιβάλλοντος υποδηλώνει το κάθε τι το οποίο περιβάλλει έναν προκαθορισμένο χώρο. Στη θερμοδυναμική, ένα σύστημα λέμε πως βρίσκεται σε ισορροπία, ή σε κατάσταση πλήρους εξάντλησης, όταν βρεθεί στις ίδιες συνθήκες με το περιβάλλον του. Υπό αυτές τις συνθήκες η εξέργεια είναι μηδενική, γεγονός το οποίο υποδηλώνει πως το σύστημα αυτό αδυνατεί να προσδώσει περαιτέρω ωφέλιμο έργο. Η κατάσταση αυτή επίσης καλείται νεκρή κατάσταση.

#### 3.2. Έργο περιβάλλοντος

Παραπάνω αποδόθηκε ο ορισμός της νεκρής κατάστασης. Η νεκρή κατάσταση στην πραγματικότητα δεν αποτελεί την τελική κατάσταση, όσον αφορά πραγματικές μηχανικές διατάξεις. Σε αυτό συμβάλλει το έργο του περιβάλλοντος, ή ατμοσφαιρικό έργο.

Θεωρούμε διάταξη εμβόλου – κυλίνδρου. Το έμβολο για να εκτονωθεί μέχρι το κατώτερο σημείο, πρέπει να υπερνικήσει την ατμοσφαιρική πίεση. Ποσοστό επομένως της ενέργειας του αερίου που εκτονώνεται καταναλίσκεται εκεί. Το έργο αυτό, το οποίο δε δύναται να ανακτηθεί, υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$W_{περ} = P_0 (V_2 - V_1) \quad (3.1)$$

Όπου:

$P_0$ : η ατμοσφαιρική πίεση

$V_2, V_1$ : ο τελικός και αρχικός όγκος

Εάν από το πραγματικό έργο αφαιρέσουμε το έργο του περιβάλλοντος, προκύπτει το ωφέλιμο έργο:

$$W_x = W - W_{περ} = W - P_0 (V_2 - V_1) \quad (3.2)$$

Παραπάνω αναφέρθηκε πως το έργο του περιβάλλοντος εμποδίζει την εκτόνωση του εμβόλου, καθώς πρέπει να υπερνικηθεί. Σε αυτή την περίπτωση αποτελεί απώλεια. Υπάρχουν όμως περιπτώσεις στις οποίες επενεργεί σαν απολαβή. Στο ίδιο παράδειγμα του συστήματος εμβόλου – κυλίνδρου, στη φάση της συμπίεσης η ατμοσφαιρική πίεση επενεργεί θετικά. Δεδομένης της μαθηματικής σχέσης η οποία περιγράφει το φαινόμενο (σχέση 3.1), είναι φανερό πως έχει σημασία μόνο σε συστήματα στα οποία μεταβάλλεται ο όγκος, επενεργεί επομένως έργο ογκομεταβολής.

### Χρήσιμο ή ωφέλιμο έργο $W_x$

Το ωφέλιμο έργο είναι η διαφορά του πραγματικού έργου  $W$  από το ατμοσφαιρικό έργο:

$$W_x = W - W_{περ} = W - p_o(V_2 - V_1) \quad (3.3)$$

### **3.3. Αναντιστρεπτότητα**

Για να πραγματοποιηθεί μια διεργασία από μια αρχική σε μια τελική κατάσταση, απαιτείται η πρόσδοση έργου. **Αντιστρεπτό έργο** «ορίζεται ως το μέγιστο ωφέλιμο έργο που μπορεί να παραχθεί», ή το ελάχιστο το οποίο απαιτείται, στην παραπάνω διεργασία. Το έργο αυτό αναφέρεται στην περίπτωση στην οποία η μετάβαση από την αρχική στην τελική διεργασία πραγματοποιείται με τρόπο πλήρως αντιστρεπτό.

Οι διαφορές στις τιμές που προκύπτουν μεταξύ του ωφέλιμου με το αντιστρεπτό έργο είναι αποτέλεσμα της μη αναντιστρεπτότητας των διεργασιών. Η διαφορά αυτή ορίζεται ως αναντιστρεπτότητα και εκφράζεται:

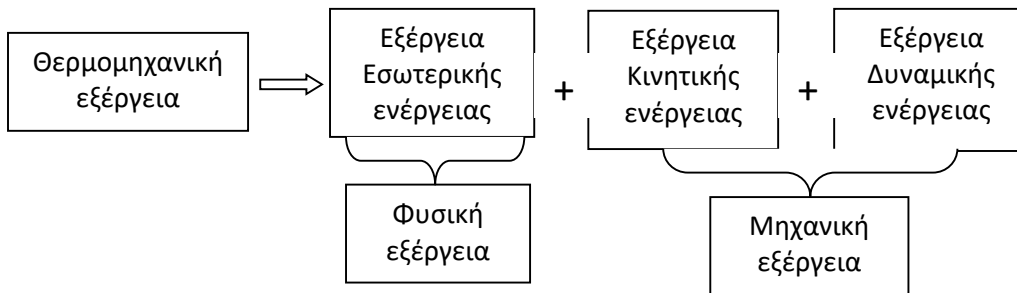
$$I = W_x - W_{περ} \quad (3.4)$$

όπου το μέγεθος  $W_x$  αναφέρεται στο ωφέλιμο έργο.

Το ποσό της εξέργειας που καταστρέφεται είναι ισοδύναμο με την αντιστρεπτότητα. Σε περιπτώσεις όπου ένα σύστημα αποτελείται από πλήρως αντιστρεπτές διεργασίες, προκύπτει πως η καταστροφή της εξέργειας και συνεπώς η αντιστρεπτότητα, θα είναι μηδενική. Η καταστροφή της εξέργειας θα αναλυθεί διεξοδικά στο κεφάλαιο 4.

### 3.4. Εξέργεια κλειστού συστήματος

Τα κλειστά συστήματα διαθέτουν φυσική και μηχανική εξέργεια.



Η μεταβολή της εξέργειας σε κλειστό σύστημα είναι ίση:

$$\Phi - \Phi_o = (U - U_o) - T_o(S - S_o) + p_o(V - V_o) \quad (3.5)$$

Απόδειξη:

Έστω ότι προσφέρουμε στο σύστημα ποσό θερμότητας  $Q$  σε θερμοκρασία περιβάλλοντος  $T_o$ .

Από τον Α' και Β' θερμοδυναμικό νόμο ισχύουν αντίστοιχα:

$$Q_o - W = U_2 - U_1$$

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} + S_{gen} \quad \text{ή} \quad S_2 - S_1 = \frac{Q_o}{T_o} + S_{gen}$$

Με συνδυασμό των δύο παραπάνω εξισώσεων προκύπτει το πραγματικό έργο:

$$W = (U_1 - U_2) - T_o(S_1 - S_2) - T_o S_{gen} \quad (3.6)$$

Το χρήσιμο έργο σε κλειστό σύστημα είναι:

$$W_x = W + p_o(V_1 - V_2) = (U_1 - U_2) - T_o(S_1 - S_2) + p_o(V_1 - V_2) - T_o S_{gen} \quad (3.7)$$

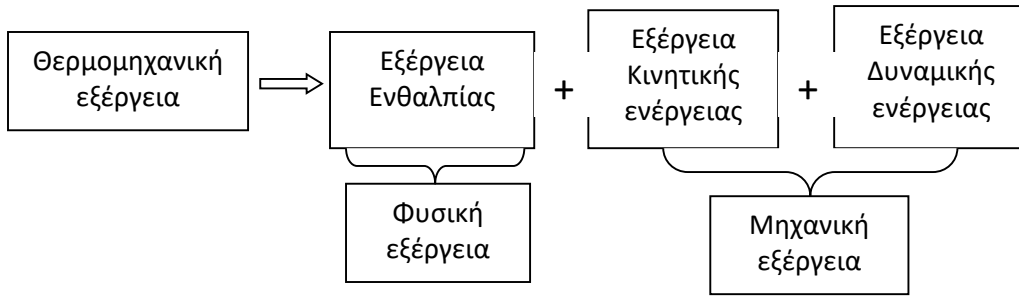
Σε αντιστρεπτές διεργασίες, η παραγόμενη εντροπία είναι μηδενική,  $S_{gen} = 0$  οπότε προκύπτει το αντιστρεπτό έργο.

$$W_R = (U_1 - U_2) - T_o(S_1 - S_2) + p_o(V_1 - V_2) \quad (3.8)$$

Στην περίπτωση όπου η τελική κατάσταση συμπίπτει με τη νεκρή, προκύπτει το μέγιστο αντιστρεπτό έργο, το οποίο αποτελεί και τη φυσική εξέργεια (κινητική και δυναμική ενέργεια παραμένουν αμετάβλητες).

$$W_{R,max} = Ex = \Phi - \Phi_o = (U - U_o) - T_o(S - S_o) + p_o(V - V_o) \quad (3.9)$$

### 3.5. Εξέργεια ανοικτού συστήματος (όγκος ελέγχου)



$$\Psi - \Psi_o = (H - H_o) - T_o(S - S_o) \quad (3.10)$$

Απόδειξη:

Έστω ότι προσφέρουμε σε ένα σύστημα θερμότητα  $Q_o$  σε θερμοκρασία περιβάλλοντος  $T_o$ .

Από τον Α' θερμοδυναμικό νόμο:  $Q_o - W = U_2 - U_1$

Στα ανοιχτά θερμοδυναμικά συστήματα υπάρχει το έργο εξωθήσεως:

$$W_f = p_2V_2 - p_1V_1$$

Σε αυτήν την περίπτωση, το έργο είναι το άθροισμα του παραγόμενου (ή προσφερόμενου) έργου και του έργου εξωθήσεως.

$$Q_o - (W_t - W_f) = U_2 - U_1$$

$$\text{ή } Q_o - W_t = U_2 - U_1 + p_2V_2 - p_1V_1 = (U_2 - p_2V_2) - (U_1 - p_1V_1)$$

Από τον Β' θερμοδυναμικό νόμο:  $S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} + S_{gen}$  ή  $S_2 - S_1 = \frac{Q_o}{T_o} + S_{gen}$

Με το συνδυασμό των δύο εξισώσεων, προκύπτει το πραγματικό έργο:

$$W_t \equiv W = (H_1 - H_2) - T_o(S_1 - S_2) - T_oS_{gen} \quad (3.11)$$

Το χρήσιμο έργο σε ανοικτό σύστημα είναι:

$$W_x = W = (H_1 - H_2) - T_o(S_1 - S_2) - T_oS_{gen} \quad (3.12)$$

Στις αντιστρεπτές διεργασίες  $S_{gen} = 0$ . Προκύπτει επομένως το αντιστρεπτό έργο:

$$W_R = (H_1 - H_2) - T_o(S_1 - S_2) \quad (3.13)$$

$$\text{ή } W_x = W_R - T_oS_{gen}$$

Εάν η τελική κατάσταση είναι η νεκρή κατάσταση, τότε προκύπτει  $W_{R,max}$  που αποτελεί και την φυσική εξέργεια (χωρίς μεταβολή κινητικής και δυναμικής ενέργειας):

$$W_{R,max} = Ex = \Psi - \Psi_o = (H - H_o) - T_o(S - S_o) \quad (3.14)$$

## 4. ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΗ ΤΗΣ ΕΞΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΜΟΝΑΔΕΣ LINDE

Στα προηγούμενα κεφάλαια καλύφθηκε το θεωρητικό μέρος το οποίο διέπει τη λειτουργία μια μονάδας υγροποίησης αερίων, όσον αφορά την ψύξη. Επίσης αναλύθηκε η έννοια της εξέργειας. Σε αυτό το κεφάλαιο πραγματοποιείται μια «σύνδεση» των εννοιών αυτών, ώστε να πραγματοποιηθεί ολοκληρωμένη μελέτη σε ότι αφορά την καταστροφή της εξέργειας σε πραγματικές διατάξεις, στην παρούσα περίπτωση της μονάδας υγροποίησης αερίων που ακολουθεί τον κύκλο Linde.

### 4.1. Στοιχεία παρούσας εγκατάστασης

Στην παρούσα εργασία, θεωρούμε μονάδα υγροποίησης αερίων Linde. Οι επιμέρους διατάξεις στις οποίες θα μελετηθεί η καταστροφή της εξέργειας είναι οι εξής:

- Ηλεκτρικός κινητήρας
- Συμπιεστής
- Εναλλάκτης θερμότητας
- Εκτονωτική βαλβίδα
- Δοχείο διαχωρισμού

Σημειώνεται επίσης πως το ψυκτικό υγρό είναι ο αέρας (**R729**). Πραγματοποιείται μονοβάθμια συμπίεση του ψυκτικού. Επίσης λαμβάνονται ο μηχανικός βαθμός απόδοσης και βαθμός απόδοσης ηλεκτροκινητήρα αντίστοιχα:

$$\eta_m = 0,95 \text{ και } \eta_{el} = 0,98$$

### 4.2. Σχέσεις υπολογισμών καταστροφής της εξέργειας

#### Καταστροφή εξέργειας στον ηλεκτροκινητήρα

Το έργο του συμπιεστή υπολογίζεται από τη σχέση:

$$W = -m [T_o(s_1 - s_4) - (h_1 - h_4)] \quad (4.1)$$

Λαμβάνοντας υπ' όψιν το μηχανικό καθώς και το βαθμό απόδοσης του ηλεκτροκινητήρα:

$$W_c = \frac{W}{\eta_m} = \text{έργο συμπιεστή} \quad (4.2)$$

$$W_{el} = \frac{W_c}{\eta_{el}} = \text{έργο ηλεκτροκινητήρα} \quad (4.3)$$

$$E_d = W_{el} - W_c \quad (4.4)$$

Τέλος, η διαφορά μεταξύ του έργου ηλεκτροκινητήρα και του συμπιεστή αποτελεί την καταστροφή της εξέργειας στον ηλεκτροκινητήρα.

Καταστροφή εξέργειας στο συμπιεστή

$$E_d = W_c - m \cdot e_1 \quad (4.5)$$

Καταστροφή εξέργειας στον εναλλάκτη θερμότητας

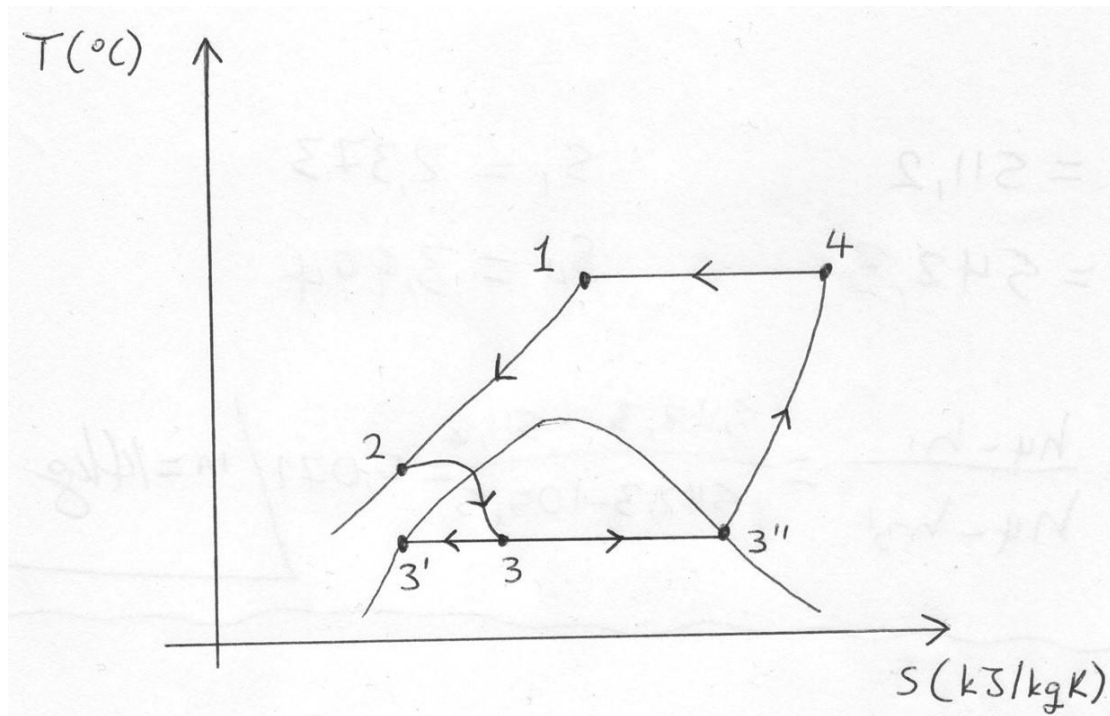
$$E_d = m_3'' \cdot (e_3'' - e_4) - m_1 \cdot (e_2 - e_1) \quad (4.6)$$

Καταστροφή εξέργειας στην εκτονωτική βαλβίδα

$$E_d = m_1 \cdot (e_2 - e_3) \quad (4.7)$$

Καταστροφή εξέργειας στο δοχείο διαχωρισμού

$$E_d = m_3 \cdot e_3 - m_3' \cdot e_3' - m_3'' \cdot e_3'' \quad (4.8)$$



Σχήμα 4 1: Διάγραμμα κύκλου Linde όπου εμφανίζονται οι διεργασίες

Όπως θα παρατηρήσουμε στην πορεία της εργασίας και των υπολογισμών, προκύπτει πως η καταστροφή της εξέργειας στο δοχείο διαχωρισμού υπολογίζεται σε ποσά της τάξεως δύναμης εις την -12. Επομένως από εδώ και στο εξής θα θεωρείται μηδενική.

## 5. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

### 5.1. Εύρεση θερμοδυναμικών ιδιοτήτων

Αρχικά, θα πρέπει να προσδιορίσουμε τις θερμοδυναμικές ιδιότητες που επικρατούν σε κάθε ένα σημείο. Στην εργασία αυτή, μελετιούνται οι πιέσεις των 100, 200, 300 και 400 bar στις θερμοκρασίες 20, 25, 30, 35, 40 βαθμών Κελσίου. Η εύρεση των ιδιοτήτων αυτών πραγματοποιείται με το λογισμικό *Coolpack*.<sup>3</sup>

Σημειώνεται πως λόγω της σταθερής χαμηλής πίεσης την οποία χρησιμοποιούμε (1 bar) σε όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις, οι παρακάτω θερμοδυναμικές ιδιότητες παραμένουν σταθερές και ίσες με:

$$\begin{array}{lll} s_{3''} = 2,622 \text{ kJ/kgK} & T_{3''} = -194,5^{\circ}\text{C} & h_{3''} = 307 \text{ kJ/kg} \\ s_{3'} = 0,029 \text{ kJ/kgK} & T_{3'} = -191,4^{\circ}\text{C} & h_{3'} = 99,4 \text{ kJ/kg} \end{array}$$

Επιπλέον, οι τιμές ενθαλπίας και εντροπίας αντίστοιχα, παραμένουν σταθερές στο σημείο 4 ανάλογα με τη θερμοκρασία την οποία μελετούμε:

Θερμοκρασία (°C)	h <sub>4</sub> (kJ/kg)	s <sub>4</sub> (kJ/kgK)
20	522	3,928
25	527	3,945
30	532	3,961
35	537	3,978
40	542	3,994

Πίνακας 1: Τιμές h<sub>4</sub> και s<sub>4</sub>

#### Θερμοδυναμικές ιδιότητες στα 100 bar

t <sub>4</sub> =t <sub>1</sub> (°C)	h <sub>1</sub> (kJ/kg)	s <sub>1</sub> (kJ/kgK)
20	501	2,539
25	506	2,560
30	512	2,579
35	518	2,598
40	524	2,616

Πίνακας 2: Ιδιότητες για P<sub>1</sub> = 100 bar

<sup>3</sup> Department of Mechanical Engineering, Technical University of Denmark.



Θερμοδυναμικές ιδιότητες στα 200 bar

$t_4=t_1$ (°C)	$h_1$ (kJ/kg)	$s_1$ (kJ/kgK)
20	486	2,289
25	492	2,311
30	498	2,332
35	505	2,352
40	511	2,373

*Πίνακας 3: Ιδιότητες για  $P_1 = 200$  bar*

Θερμοδυναμικές ιδιότητες στα 300 bar

$t_4=t_1$ (°C)	$h_1$ (kJ/kg)	$s_1$ (kJ/kgK)
20	477	2,137
25	484	2,160
30	491	2,182
35	497	2,203
40	504	2,225

*Πίνακας 4: Ιδιότητες για  $P_1 = 300$  bar*

Θερμοδυναμικές ιδιότητες στα 400 bar

$t_4=t_1$ (°C)	$h_1$ (kJ/kg)	$s_1$ (kJ/kgK)
20	474	2,032
25	481	2,055
30	488	2,077
35	494	2,099
40	501	2,120

*Πίνακας 5: Ιδιότητες για  $P_1 = 400$  bar*

## 5.2. Υποδειγματικός υπολογισμός μεγεθών

Σε αυτό το κεφάλαιο παρατίθεται ένα πλήρες παράδειγμα υπολογισμού μιας εκ των περιπτώσεων που μελετήθηκαν. Επιλέγεται η περίπτωση για  $P_1 = 100 \text{ bar}$ ,  $P_2 = 1 \text{ bar}$  και  $t_4 = t_1 = 30^\circ\text{C}$ .

Αρχικά υπολογίζεται η ποσότητα  $z$ :

$$z = \frac{h_4 - h_1}{h_4 - h_3'} = \frac{532 - 512}{532 - 99,4} = \frac{20}{432,6} = 0,046 \text{ kg}$$

Από την ποσότητα  $z$  υπολογίζεται η μάζα του φρέσκου αέρα ανά κιλό υγροποιημένου αέρα στην εγκατάσταση:

$$m = \frac{1}{z} = \frac{1}{0,046} = 21,74 \text{ kg}$$

Στη συνέχεια υπολογίζεται η τιμή της ενθαλπίας στο σημείο 2:

$$z = \frac{h_3 - h_3''}{h_3' - h_3''} \Rightarrow 0,046 = \frac{h_3 - 307}{99,4 - 307} \Rightarrow h_3 = h_2 = 297,4 \text{ kJ/kg}$$

Με αυτές τις τιμές και μέσω του λογισμικού Coolpack, καταγράφουμε τη θερμοκρασία καθώς και την ειδική εντροπία στο σημείο 2.

$$t_2 = -110,7^\circ\text{C} \text{ και } s_2 = 1,579 \text{ kJ/kgK}$$

Υπολογίζεται η ξηρότητα:

$$h_3 = x \cdot h_3'' + (1 - x) \cdot h_3' \Rightarrow 297,4 = x \cdot 307 + (1 - x) \cdot 99,4 \Rightarrow x = 0,95$$

Η ειδική εντροπία στο σημείο 3:

$$s_3 = x \cdot s_3'' + (1 - x) \cdot s_3' \Rightarrow s_3 = 0,95 \cdot 2,622 + (1 - 0,95) \cdot 0,029 \Rightarrow s_3 = 2,492 \text{ kJ/kgK}$$

## Υπολογισμός ειδικών εξεργειών

Ο υπολογισμός των ειδικών εξεργειών πραγματοποιείται με τη σχέση (3.13), που χαρακτηρίζει την εξέργεια σε ανοιχτά συστήματα.

$$e_1 = (h_1 - h_0) - T_o \cdot (s_1 - s_0) = (512 - 532) - 303 \cdot (2,579 - 3,961) = 398,7 \text{ kJ/kgK}$$

$$e_2 = (h_2 - h_0) - T_o \cdot (s_2 - s_0) = (297,4 - 532) - 303 \cdot (1,579 - 3,961) = 487,1 \text{ kJ/kgK}$$

$$e_3 = (h_3 - h_0) - T_o \cdot (s_3 - s_0) = (297,4 - 532) - 303 \cdot (2,502 - 3,961) = 207,4 \text{ kJ/kgK}$$

$$e_3' = (h_3' - h_0) - T_o \cdot (s_3' - s_0) = (99,4 - 532) - 303 \cdot (0,029 - 3,961) = 758,8 \text{ kJ/kgK}$$

$$e_3'' = (h_3'' - h_0) - T_o \cdot (s_3'' - s_0) = (307 - 532) - 303 \cdot (2,622 - 3,961) = 180,7 \text{ kJ/kgK}$$

$$e_4 = (h_4 - h_0) - T_o \cdot (s_4 - s_0) = (532 - 532) - 303 \cdot (3,961 - 3,961) = 0 \text{ kJ/kgK}$$

## Καταστροφή της εξέργειας στις επιμέρους διατάξεις

Πριν υπολογιστεί η καταστροφή της εξέργειας υπολογίζονται τα παρακάτω μεγέθη:

Πραγματικό έργο:

$$W = -m [T_o(s_1 - s_4) - (h_1 - h_4)] \\ = -21,63 \cdot [303 \cdot (2,579 - 3,961) - (512 - 532)] = 8.625 \text{ kJ}$$

Συνδυάζοντας τους βαθμούς αποδόσεως ηλεκτροκινητήρα καθώς και το μηχανικό βαθμό απόδοσης του συμπιεστή, προκύπτει:

$$W_c = \frac{W}{\eta_m} = \frac{8.625}{0,95} = 9.079 \text{ kJ}, \text{ έργο συμπιεστή}$$

$$W_{el} = \frac{W_c}{\eta_{el}} = \frac{9.079}{0,98} = 9.264 \text{ kJ}, \text{ έργο ηλεκτροκινητήρα}$$

Με τα παρόντα δεδομένα μπορούμε να υπολογίσουμε την καταστροφή της εξέργειας στις επιμέρους διατάξεις της εγκατάστασης που αναφέρθηκαν παραπάνω:

Καταστροφή εξέργειας στον ηλεκτροκινητήρα:

$$E_d = W_{el} - W_c = 9.264 - 9.079 = 185 \text{ kJ}$$

Καταστροφή εξέργειας στο συμπιεστή:

$$E_d = W_c - m \cdot e_1 = 9.079 - 21,63 \cdot 398,7 = 455 \text{ kJ}$$

Καταστροφή εξέργειας στον εναλλάκτη θερμότητας:

$$\begin{aligned} E_d &= m_3'' \cdot (e_3'' - e_4) - m_1 \cdot (e_2 - e_1) = \\ &= 20,63 \cdot (180,7 - 0) - 21,63 \cdot (487 - 398) = 1.816 \text{ kJ} \end{aligned}$$

Καταστροφή εξέργειας στην εκτονωτική βαλβίδα:

$$E_d = m_1 \cdot (e_2 - e_3) = 21,63 \cdot (487 - 207) = 6.056 \text{ kJ}$$

Καταστροφή εξέργειας στο δοχείο διαχωρισμού:

$$\begin{aligned} E_d &= m_3 \cdot e_3 - m_3' \cdot e_3' - m_3'' \cdot e_3'' = \\ &= 21,63 \cdot 207,4 - 1 \cdot 758,8 - 20,63 \cdot 180,7 = 0 \end{aligned}$$

Τέλος, υπολογίζεται ο βαθμός απόδοσης με βάση το Β' θερμοδυναμικό νόμο:

$$\eta_{II} = \frac{E_3'}{W_{el}} = \frac{759}{9.264} = 0,082$$

Σημείωση: Όλοι οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν με το λογισμικό Mathcad. Για το λόγο αυτό, στους πίνακες που ακολουθούν καταγεγραμμένοι οι παραπάνω υπολογισμοί, παρατηρούνται διαφορές οι οποίες οφείλονται στην μεγαλύτερη ακρίβεια με την οποία το λογισμικό έχει υπολογίσει τα αποτελέσματα.

### 5.3. Πίνακες αποτελεσμάτων

Ακολουθούν οι πίνακες με συγκεντρωμένα τα αποτελέσματα των οποίων οι υπολογισμοί υποδείχθηκαν παραπάνω:

Πίνακες των 100 bar

<b>100/20</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>3'</b>	<b>3''</b>	<b>4</b>
<b>P (bar)</b>	100	100	1	1	1	1
<b>T (K)</b>	293	-110,9	-191,4	-194,5	-191,4	293
<b>m (kg)</b>	20,1	20,1	20,1	1,0	19,1	20,1
<b>h (kJ/kg)</b>	501	296,7	296,7	99,4	307	522
<b>s (kJ/kgK)</b>	2,539	1,575	2,493	0,029	2,622	3,928
<b>e (kJ/kg)</b>	386	464	195	720	168	0
<b>E (kJ)</b>	7767	9340	3926	720	3206	0

*Πίνακας 5.3.1: Αποτελέσματα σε πίεση 100 bar και θερμοκρασία 20 °C*

<b>100/25</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>3'</b>	<b>3''</b>	<b>4</b>
<b>P (bar)</b>	100	100	1	1	1	1
<b>T (K)</b>	298	-110,8	-191,4	-194,5	-191,4	298
<b>m (kg)</b>	20,4	20,4	20,4	1,0	19,4	20,4
<b>h (kJ/kg)</b>	506,0	296,8	296,8	99,4	307,0	527
<b>s (kJ/kgK)</b>	2,560	1,576	2,495	0,029	2,622	3,945
<b>e (kJ/kg)</b>	392	476	202	739	174	0
<b>E (kJ)</b>	7976	9688	4113	739	3374	0

*Πίνακας 5.3.2: Αποτελέσματα σε πίεση 100 bar και θερμοκρασία 25 °C*

<b>100/30</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>3'</b>	<b>3''</b>	<b>4</b>
<b>P (bar)</b>	100	100	1	1	1	1
<b>T (K)</b>	303	-110,7	-191,4	-194,5	-191,4	303
<b>m (kg)</b>	21,6	21,6	21,6	1,0	20,6	21,6
<b>h (kJ/kg)</b>	512	297,4	297,4	99,4	307	532
<b>s (kJ/kgK)</b>	2,579	1,579	2,502	0,029	2,622	3,961
<b>e (kJ/kg)</b>	399	487	207	759	181	0
<b>E (kJ)</b>	8625	10537	4487	759	3728	0

*Πίνακας 5.3.3: Αποτελέσματα σε πίεση 100 bar και θερμοκρασία 30 °C*

<b>100/35</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>3'</b>	<b>3''</b>	<b>4</b>
<b>P (bar)</b>	100	100	1	1	1	1
<b>T (K)</b>	308	-110,5	-191,4	-194,5	-191,4	308
<b>m (kg)</b>	23,0	23,0	23,0	1,0	22,0	23,0
<b>h (kJ/kg)</b>	518,0	298,0	298,0	99,4	307,0	537,0
<b>s (kJ/kgK)</b>	2,598	1,583	2,509	0,029	2,622	3,978
<b>e (kJ/kg)</b>	406	499	213	779	188	0
<b>E (kJ)</b>	9352	11485	4913	779	4134	0

*Πίνακας 5.3.4: Αποτελέσματα σε πίεση 100 bar και θερμοκρασία 35 °C*

<b>100/40</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>3'</b>	<b>3''</b>	<b>4</b>
<b>P (bar)</b>	100	100	1	1	1	1
<b>T (K)</b>	313	-110,3	-191,4	-194,5	-191,4	313
<b>m (kg)</b>	24,6	24,6	24,6	1,0	23,6	24,6
<b>h (kJ/kg)</b>	524,0	298,6	298,6	99,4	307,0	542,0
<b>s (kJ/kgK)</b>	2,616	1,587	2,517	0,029	2,622	3,994
<b>e (kJ/kg)</b>	413	510	219	798	194	0
<b>E (kJ)</b>	10163	12539	5385	798	4587	0

*Πίνακας 5.3.5: Αποτελέσματα σε πίεση 100 bar και θερμοκρασία 40 °C*

Πίνακες των 200 bar

<b>200/20</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>3'</b>	<b>3''</b>	<b>4</b>
<b>P (bar)</b>	200	200	1	1	1	1
<b>T (K)</b>	293	-102,5	-191,4	-194,5	-191,4	293
<b>m (kg)</b>	11,7	11,7	11,7	1,0	10,7	11,7
<b>h (kJ/kg)</b>	486,0	289,3	289,3	99,4	307,0	522,0
<b>s (kJ/kgK)</b>	2,289	1,402	2,401	0,029	2,622	3,928
<b>e (kJ/kg)</b>	444	507	215	720	168	0
<b>E (kJ)</b>	5215	5957	2520	720	1800	0

*Πίνακας 5.3.6: Αποτελέσματα σε πίεση 200 bar και θερμοκρασία 20 °C*

<b>200/25</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>3'</b>	<b>3''</b>	<b>4</b>
<b>P (bar)</b>	200	200	1	1	1	1
<b>T (K)</b>	298	-102,1	-191,4	-194,5	-191,4	298
<b>m (kg)</b>	12,2	12,2	12,2	1,0	11,2	12,2
<b>h (kJ/kg)</b>	492,0	290,0	290,0	99,4	307,0	527,0
<b>s (kJ/kgK)</b>	2,311	1,406	2,410	0,029	2,622	3,945
<b>e (kJ/kg)</b>	452	520	221	739	174	0
<b>E (kJ)</b>	5521	6348	2694	739	1955	0

*Πίνακας 5.3.7: Αποτελέσματα σε πίεση 200 bar και θερμοκρασία 25 °C*

<b>200/30</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>3'</b>	<b>3''</b>	<b>4</b>
<b>P (bar)</b>	200	200	1	1	1	1
<b>T (K)</b>	303	-101,8	-191,4	-194,5	-191,4	303
<b>m (kg)</b>	12,7	12,7	12,7	1,0	11,7	12,7
<b>h (kJ/kg)</b>	498,0	290,7	290,7	99,4	307,0	532,0
<b>s (kJ/kgK)</b>	2,332	1,410	2,418	0,029	2,622	3,961
<b>e (kJ/kg)</b>	460	532	226	759	181	0
<b>E (kJ)</b>	5848	6764	2877	759	2119	0

*Πίνακας 5.3.8: Αποτελέσματα σε πίεση 200 bar και θερμοκρασία 30 °C*

<b>200/35</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>3'</b>	<b>3''</b>	<b>4</b>
<b>P (bar)</b>	200	200	1	1	1	1
<b>T (K)</b>	308	-101,2	-191,4	-194,5	-191,4	308
<b>m (kg)</b>	13,7	13,7	13,7	1,0	12,7	13,7
<b>h (kJ/kg)</b>	505,0	291,8	291,8	99,4	307,0	537,0
<b>s (kJ/kgK)</b>	2,352	1,417	2,432	0,029	2,622	3,978
<b>e (kJ/kg)</b>	469	544	231	779	188	0
<b>E (kJ)</b>	6411	7435	3157	779	2378	0

*Πίνακας 5.3. 9: Αποτελέσματα σε πίεση 200 bar και θερμοκρασία 35 °C*

<b>200/40</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>3'</b>	<b>3''</b>	<b>4</b>
<b>P (bar)</b>	200	200	1	1	1	1
<b>T (K)</b>	313	-100,9	-191,4	-194,5	-191,4	313
<b>m (kg)</b>	14,3	14,3	14,3	1,0	13,3	14,3
<b>h (kJ/kg)</b>	511,0	292,5	292,5	99,4	307,0	542,0
<b>s (kJ/kgK)</b>	2,373	1,420	2,440	0,029	2,622	3,994
<b>e (kJ/kg)</b>	476	556	237	798	194	0
<b>E (kJ)</b>	6801	7938	3380	798	2582	0

*Πίνακας 5.3.10: Αποτελέσματα σε πίεση 200 bar και θερμοκρασία 40 °C*



Πίνακες των 300 bar

<b>300/20</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>3'</b>	<b>3''</b>	<b>4</b>
<b>P (bar)</b>	300	300	1	1	1	1
<b>T (K)</b>	293	-102,9	-191,4	-194,5	-191,4	293
<b>m (kg)</b>	9,4	9,4	9,4	1,0	8,4	9,4
<b>h (kJ/kg)</b>	477,0	284,9	284,9	99,4	307,0	522,0
<b>s (kJ/kgK)</b>	2,137	1,275	2,346	0,029	2,622	3,928
<b>e (kJ/kg)</b>	480	540	226	720	168	0
<b>E (kJ)</b>	4506	5074	2127	720	1407	0

*Πίνακας 5.3.11: Αποτελέσματα σε πίεση 300 bar και θερμοκρασία 20 °C*

<b>300/25</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>3'</b>	<b>3''</b>	<b>4</b>
<b>P (bar)</b>	300	300	1	1	1	1
<b>T (K)</b>	298	-102,2	-191,4	-194,5	-191,4	298
<b>m (kg)</b>	9,9	9,9	9,9	1,0	8,9	9,9
<b>h (kJ/kg)</b>	484,0	286,1	286,1	99,4	307,0	527,0
<b>s (kJ/kgK)</b>	2,160	1,282	2,361	0,029	2,622	3,945
<b>e (kJ/kg)</b>	489	553	231	739	174	0
<b>E (kJ)</b>	4862	5497	2298	739	1559	0

*Πίνακας 5.3.12: Αποτελέσματα σε πίεση 300 bar και θερμοκρασία 25 °C*

<b>300/30</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>3'</b>	<b>3''</b>	<b>4</b>
<b>P (bar)</b>	300	300	1	1	1	1
<b>T (K)</b>	303	-101,5	-191,4	-194,5	-191,4	303
<b>m (kg)</b>	10,6	10,6	10,6	1,0	9,6	10,6
<b>h (kJ/kg)</b>	491,0	287,3	287,3	99,4	307,0	532,0
<b>s (kJ/kgK)</b>	2,182	1,289	2,376	0,029	2,622	3,961
<b>e (kJ/kg)</b>	498	565	236	759	181	0
<b>E (kJ)</b>	5255	5961	2485	759	1726	0

*Πίνακας 5.3.13: Αποτελέσματα σε πίεση 300 bar και θερμοκρασία 30 °C*

<b>300/35</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>3'</b>	<b>3''</b>	<b>4</b>
<b>P (bar)</b>	300	300	1	1	1	1
<b>T (K)</b>	308	-101,3	-191,4	-194,5	-191,4	308
<b>m (kg)</b>	10,9	10,9	10,9	1,0	9,9	10,9
<b>h (kJ/kg)</b>	497,0	288,0	288,0	99,4	307,0	537,0
<b>s (kJ/kgK)</b>	2,203	1,293	2,385	0,029	2,622	3,978
<b>e (kJ/kg)</b>	507	578	242	779	188	0
<b>E (kJ)</b>	5543	6324	2644	779	1865	0

*Πίνακας 5.3.14: Αποτελέσματα σε πίεση 300 bar και θερμοκρασία 35 °C*

<b>300/40</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>3'</b>	<b>3''</b>	<b>4</b>
<b>P (bar)</b>	300	300	1	1	1	1
<b>T (K)</b>	313	-100,5	-191,4	-194,5	-191,4	313
<b>m (kg)</b>	11,6	11,6	11,6	1,0	10,6	11,6
<b>h (kJ/kg)</b>	504,0	289,2	289,2	99,4	307,0	542,0
<b>s (kJ/kgK)</b>	2,225	1,300	2,399	0,029	2,622	3,994
<b>e (kJ/kg)</b>	516	591	246	799	194	0
<b>E (kJ)</b>	6007	6878	2869	799	2070	0

*Πίνακας 5.3.15: Αποτελέσματα σε πίεση 300 bar και θερμοκρασία 40 °C*

Πίνακες των 400 bar

<b>400/20</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>3'</b>	<b>3''</b>	<b>4</b>
<b>P (bar)</b>	400	400	1	1	1	1
<b>T (K)</b>	293	-104,9	-191,4	-194,5	-191,4	293
<b>m (kg)</b>	8,8	8,8	8,8	1,0	7,8	8,8
<b>h (kJ/kg)</b>	474,0	283,4	283,4	99,4	307,0	522,0
<b>s (kJ/kgK)</b>	2,032	1,175	2,328	0,029	2,622	3,928
<b>e (kJ/kg)</b>	508	568	230	720	168	0
<b>E (kJ)</b>	4468	5002	2028	720	1308	0

*Πίνακας 5.3.16: Αποτελέσματα σε πίεση 400 bar και θερμοκρασία 20 °C*

<b>400/25</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>3'</b>	<b>3''</b>	<b>4</b>
<b>P (bar)</b>	400	400	1	1	1	1
<b>T (K)</b>	298	-104,2	-191,4	-194,5	-191,4	298
<b>m (kg)</b>	9,3	9,3	9,3	1,0	8,3	9,3
<b>h (kJ/kg)</b>	481,0	284,7	284,7	99,4	307,0	527,0
<b>s (kJ/kgK)</b>	2,055	1,182	2,343	0,029	2,622	3,945
<b>e (kJ/kg)</b>	517	581	235	739	174	0
<b>E (kJ)</b>	4808	5401	2185	739	1446	0

*Πίνακας 5.3.17: Αποτελέσματα σε πίεση 400 bar και θερμοκρασία 25 °C*

<b>400/30</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>3'</b>	<b>3''</b>	<b>4</b>
<b>P (bar)</b>	400	400	1	1	1	1
<b>T (K)</b>	303	-103,5	-191,4	-194,5	-191,4	303
<b>m (kg)</b>	9,8	9,8	9,8	1,0	8,8	9,8
<b>h (kJ/kg)</b>	488,0	285,9	285,9	99,4	307,0	532,0
<b>s (kJ/kgK)</b>	2,077	1,189	2,358	0,029	2,622	3,961
<b>e (kJ/kg)</b>	527	594	240	759	181	0
<b>E (kJ)</b>	5180	5837	2355	759	1596	0

*Πίνακας 5.3.18: Αποτελέσματα σε πίεση 400 bar και θερμοκρασία 30 °C*

<b>400/35</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>3'</b>	<b>3''</b>	<b>4</b>
<b>P (bar)</b>	400	400	1	1	1	1
<b>T (K)</b>	308	-103	-191,4	-194,5	-191,4	308
<b>m (kg)</b>	10,2	10,2	10,2	1,0	9,2	10,2
<b>h (kJ/kg)</b>	494,0	286,6	286,6	99,4	307,0	537,0
<b>s (kJ/kgK)</b>	2,099	1,194	2,367	0,029	2,622	3,978
<b>e (kJ/kg)</b>	536	607	246	779	188	0
<b>E (kJ)</b>	5452	6179	2501	779	1722	0

*Πίνακας 5.3.19: Αποτελέσματα σε πίεση 400 bar και θερμοκρασία 35 °C*

<b>400/40</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>3'</b>	<b>3''</b>	<b>4</b>
<b>P (bar)</b>	400	400	1	1	1	1
<b>T (K)</b>	313	-102,4	-191,4	-194,5	-191,4	313
<b>m (kg)</b>	10,8	10,8	10,8	1,0	9,8	10,8
<b>h (kJ/kg)</b>	501,0	287,8	287,8	99,4	307,0	542,0
<b>s (kJ/kgK)</b>	2,120	1,200	2,382	0,029	2,622	3,994
<b>e (kJ/kg)</b>	546	620	250	798	194	0
<b>E (kJ)</b>	5889	6695	2703	798	1905	0

*Πίνακας 5.3.20: Αποτελέσματα σε πίεση 400 bar και θερμοκρασία 40 °C*

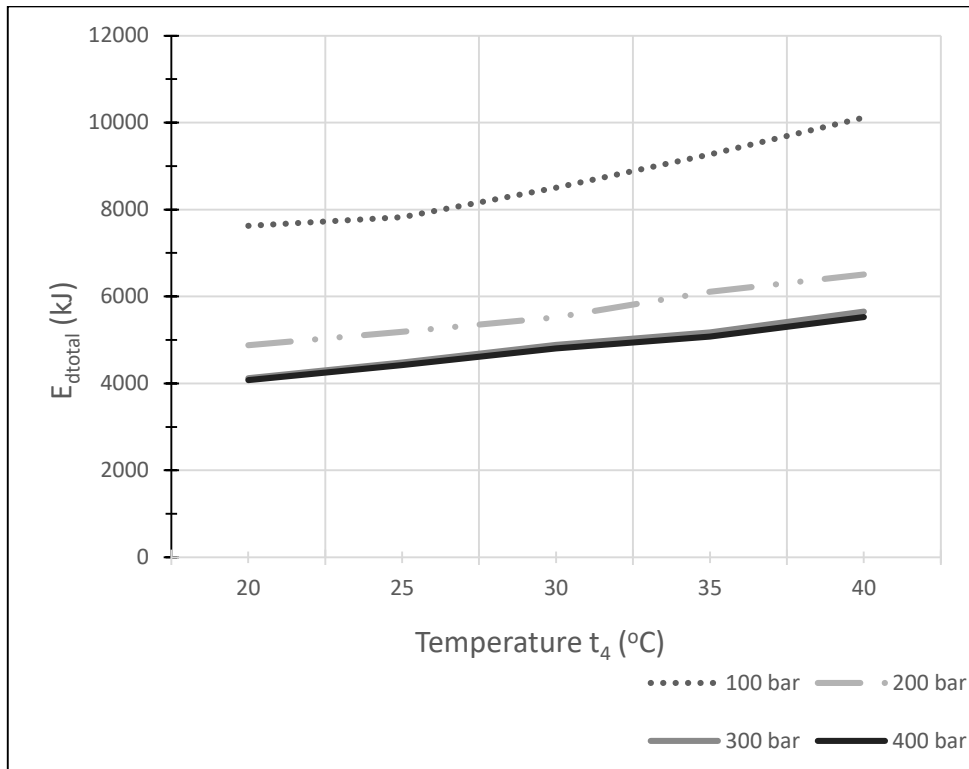
### Καταστροφή εξέργειας στα εξαρτήματα

			Καταστροφή της εξέργειας E <sub>a</sub> (kJ)					
P (bar)	t <sub>4</sub> (°C)	m (kg)	Ηλ/ρας	Συμπιεστής	Εναλ/της	Βαλβίδα	Δοχείο	Σύνολο
100	20	20,1	167	409	1634	5414	0	7623
	25	20,4	171	420	1663	5574	0	7828
	30	21,6	185	454	1816	6050	0	8505
	35	23,0	201	492	2001	6572	0	9266
	40	24,6	218	535	2210	7154	0	10118
200	20	11,7	112	274	1058	3436	0	4881
	25	12,2	119	291	1128	3654	0	5191
	30	12,7	126	308	1202	3887	0	5522
	35	13,7	138	337	1354	4278	0	6107
	40	14,3	146	358	1445	4558	0	6507
300	20	9,4	97	237	838	2948	0	4120
	25	9,9	104	256	924	3199	0	4483
	30	10,6	113	277	1020	3476	0	4886
	35	10,9	119	292	1085	3680	0	5175
	40	11,6	129	316	1199	4009	0	5653
400	20	8,8	96	235	775	2974	0	4080
	25	9,3	103	253	853	3216	0	4425
	30	9,8	111	273	939	3482	0	4805
	35	10,2	117	287	995	3679	0	5077
	40	10,8	127	310	1099	3992	0	5527

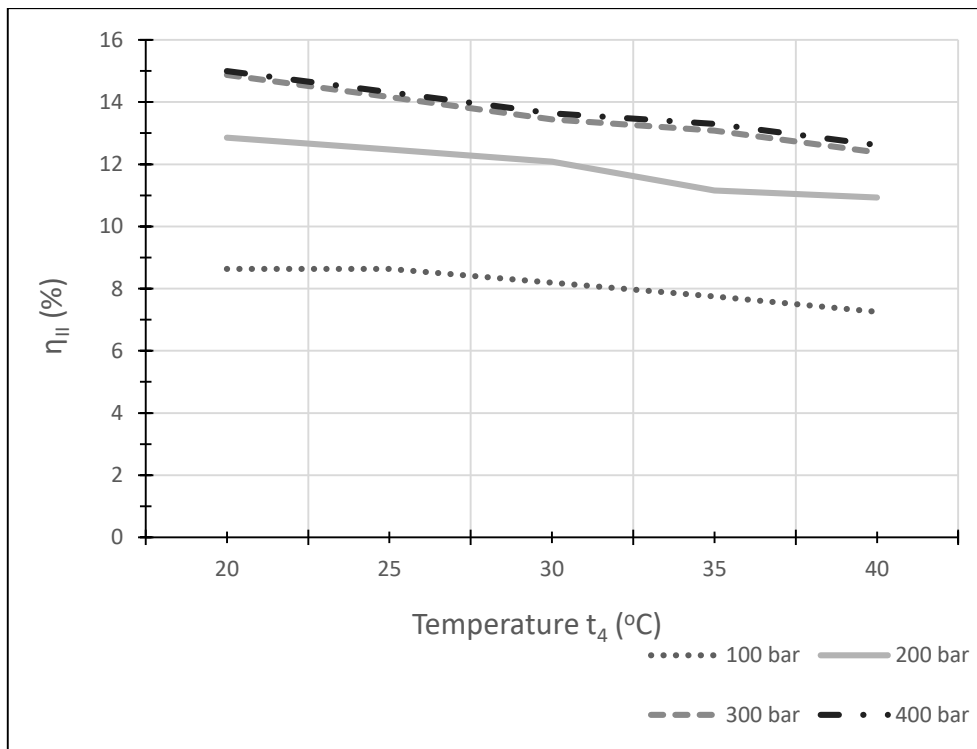
Πίνακας 6: Συγκεντρωτικός πίνακας καταστροφής εξέργειας

## 6. ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

### 6.1. Γραφικές παραστάσεις

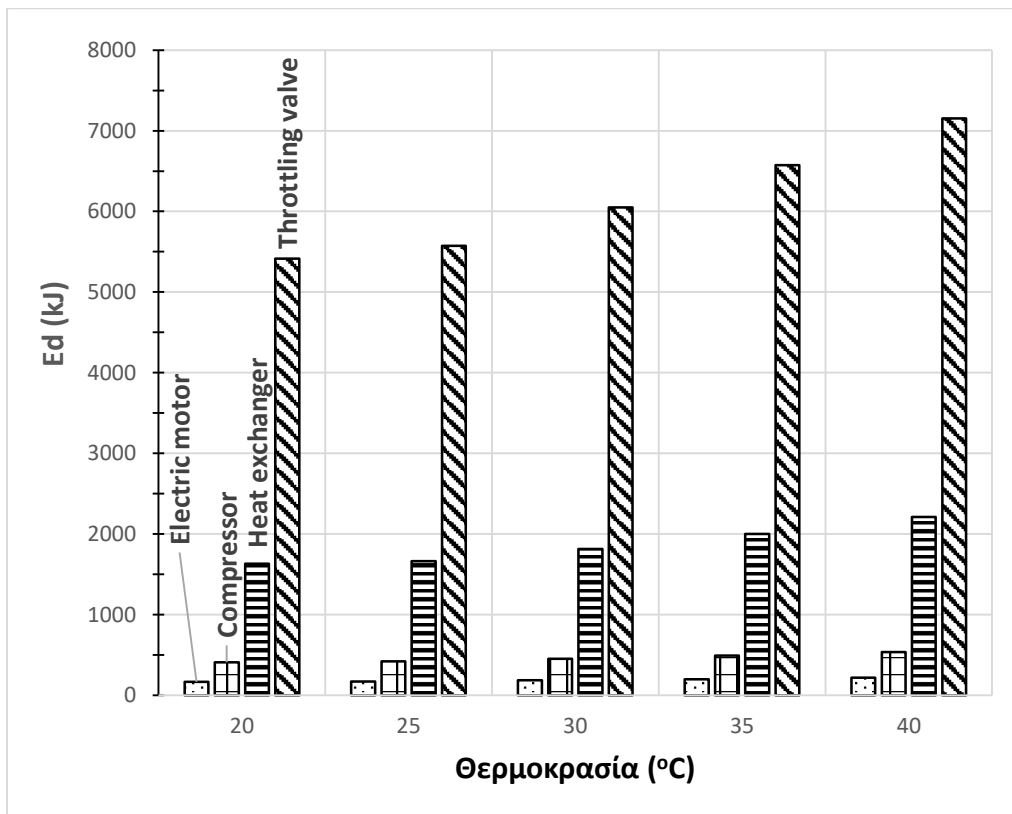


Γράφημα 1: Ολική καταστροφή εξέργειας συναρτήσει της θερμοκρασίας  $t_4$

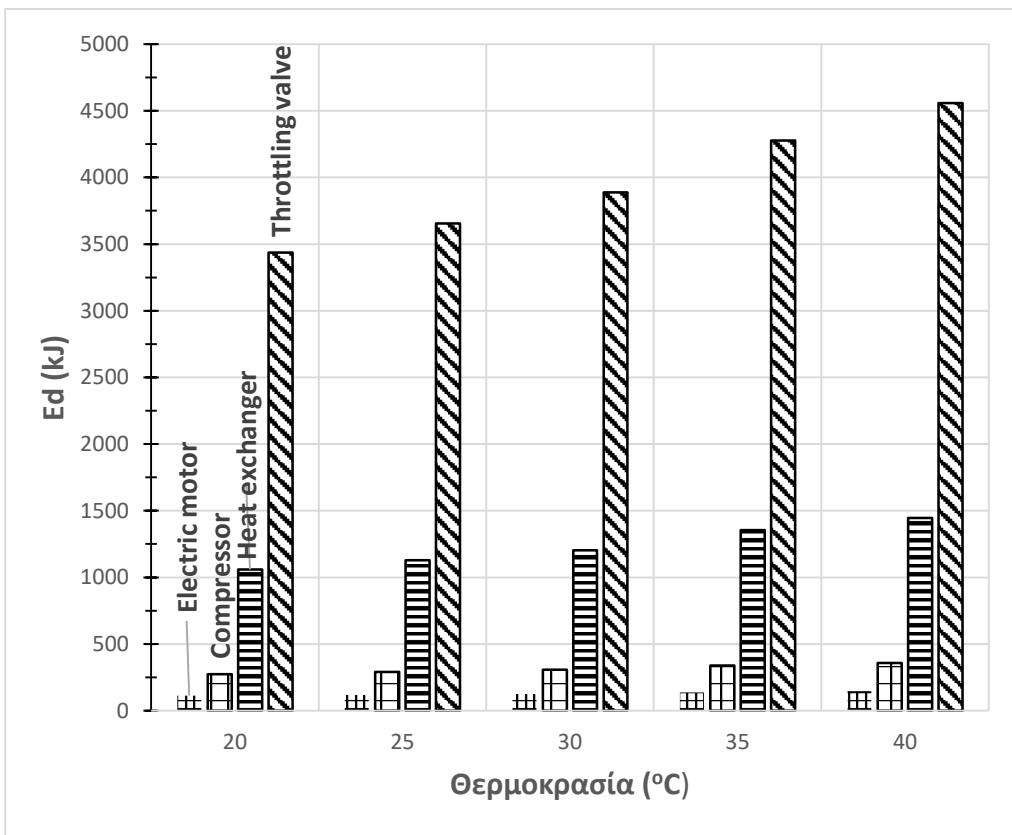


Γράφημα 2: Βαθμοί απόδοσης συναρτήσει της θερμοκρασίας  $t_4$

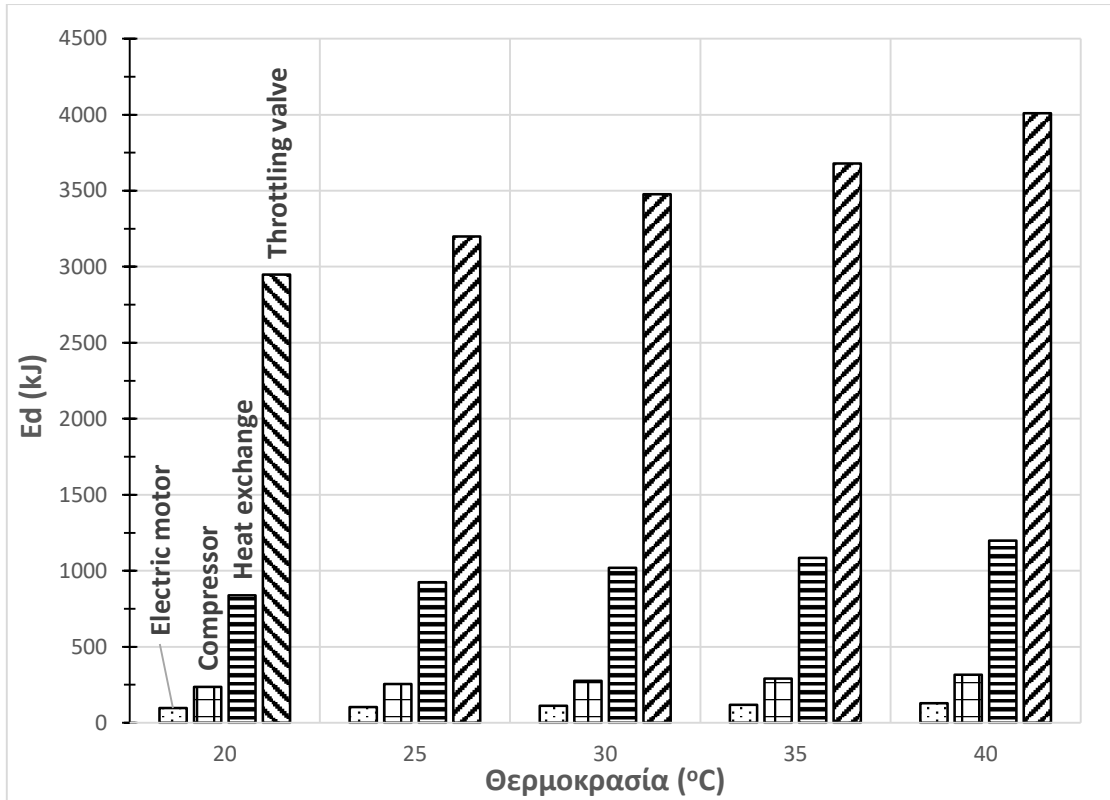
## 6.2. Ιστογράμματα



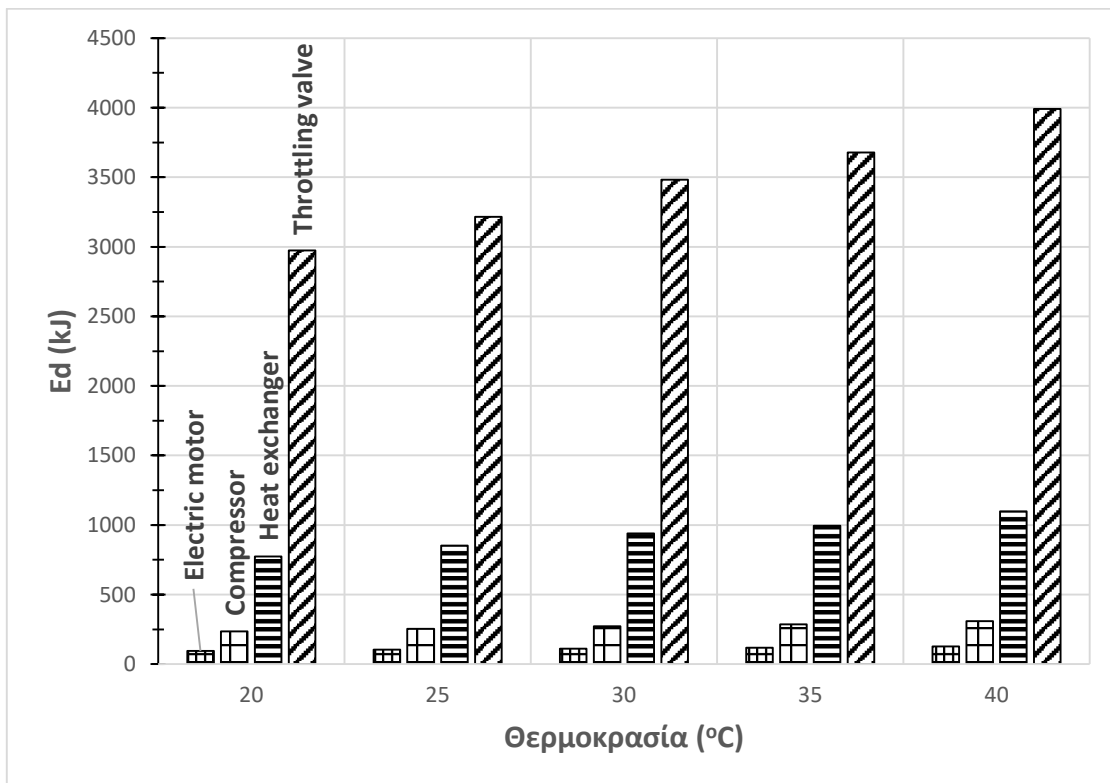
Γράφημα 3: Καταστροφή της εξέργειας ανά εξάρτημα με  $P_1 = 100$  bar



Γράφημα 4: Καταστροφή της εξέργειας ανά εξάρτημα με  $P_1 = 200$  bar



Γράφημα 5: Καταστροφή της εξέργειας ανά εξάρτημα με  $P_1 = 300 \text{ bar}$

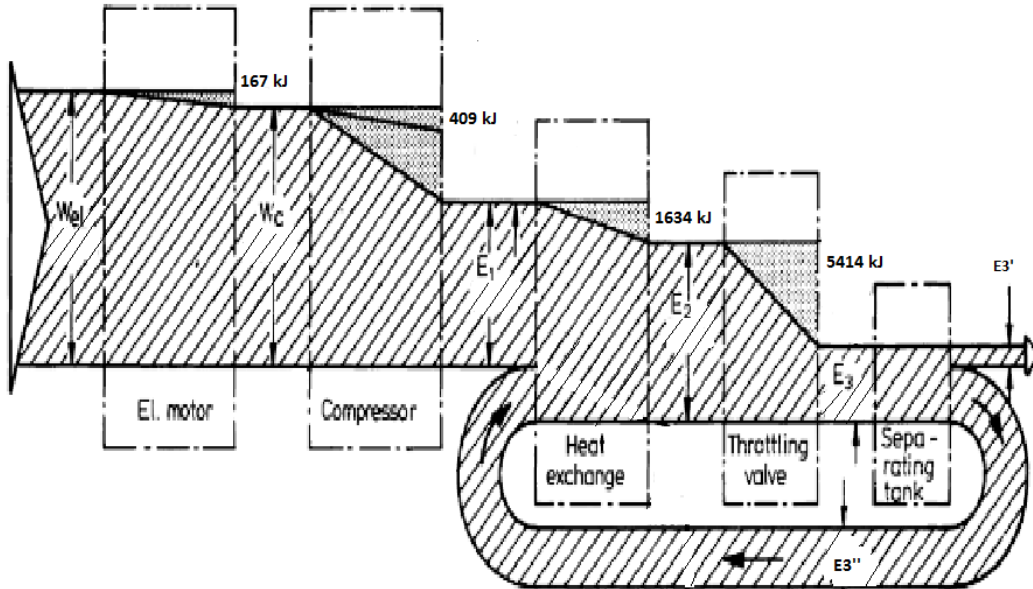


Γράφημα 6: Καταστροφή της εξέργειας ανά εξάρτημα με  $P_1 = 400 \text{ bar}$

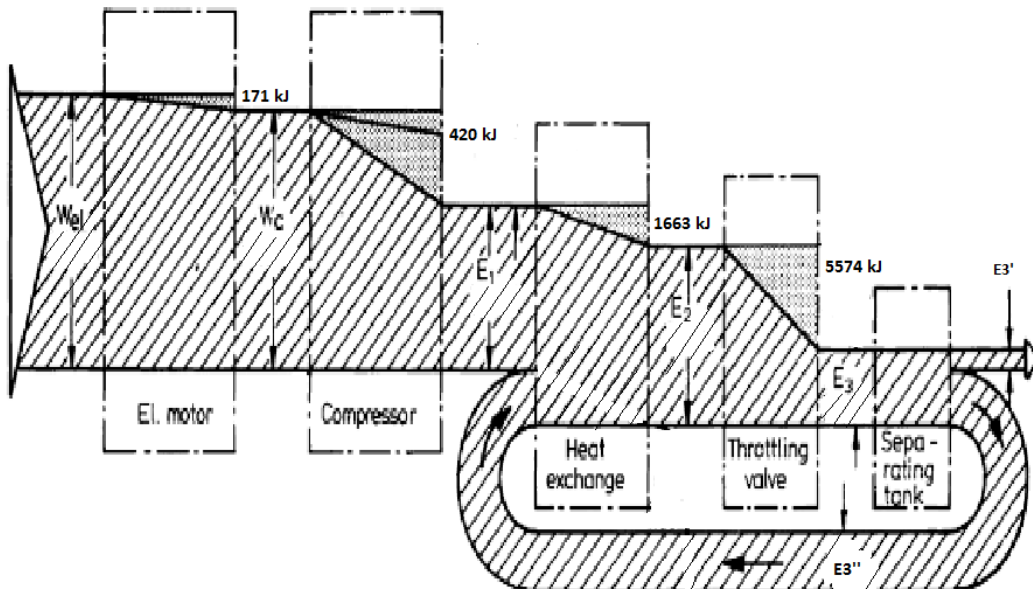


### 6.3. Διαγράμματα Grassmann

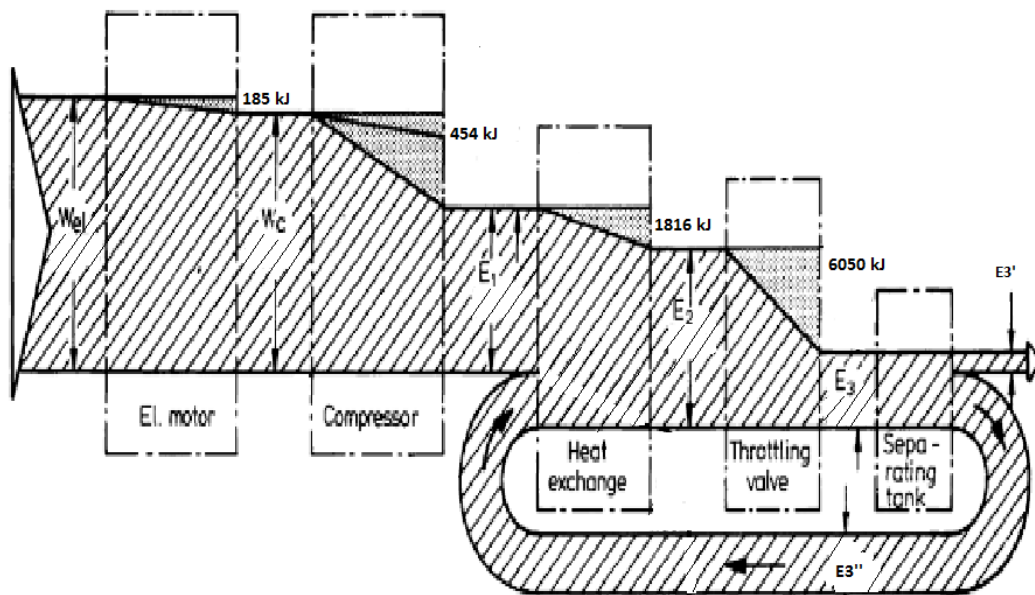
100 bar



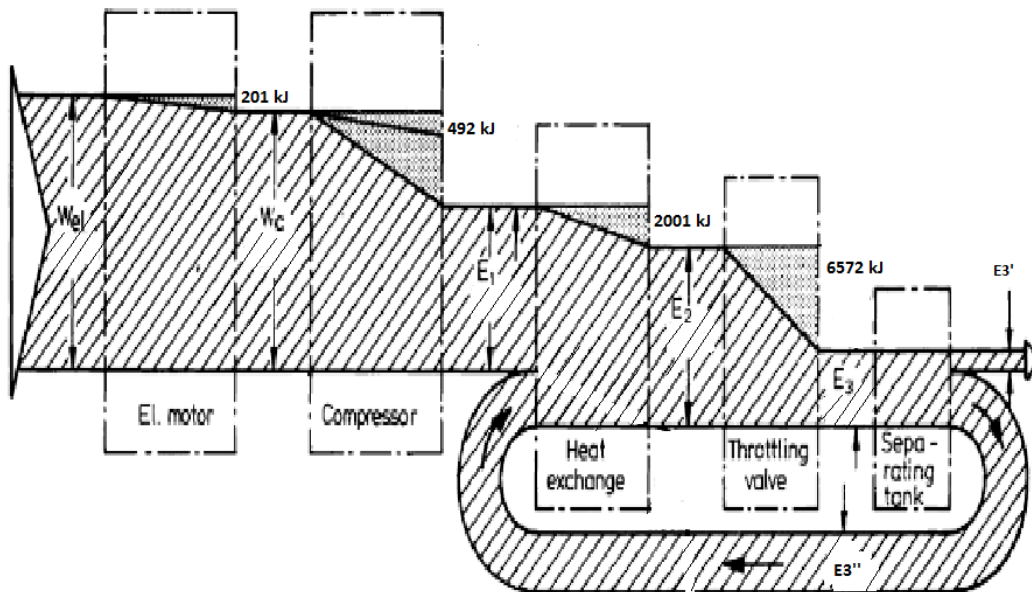
Εικόνα 1: Διάγραμμα Grassmann για  $P_1 = 100 \text{ bar}$  και  $t_1 = t_4 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$



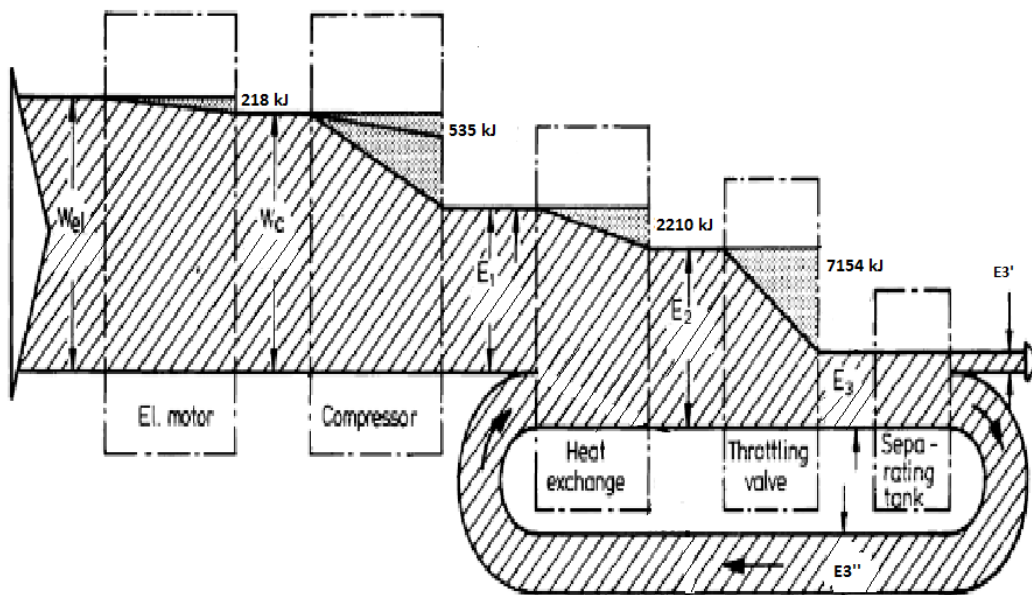
Εικόνα 2: Διάγραμμα Grassmann για  $P_1 = 100 \text{ bar}$  και  $t_1 = t_4 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$



Εικόνα 3: Διάγραμμα Grassmann για  $P_1 = 100 \text{ bar}$  και  $t_1 = t_4 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$

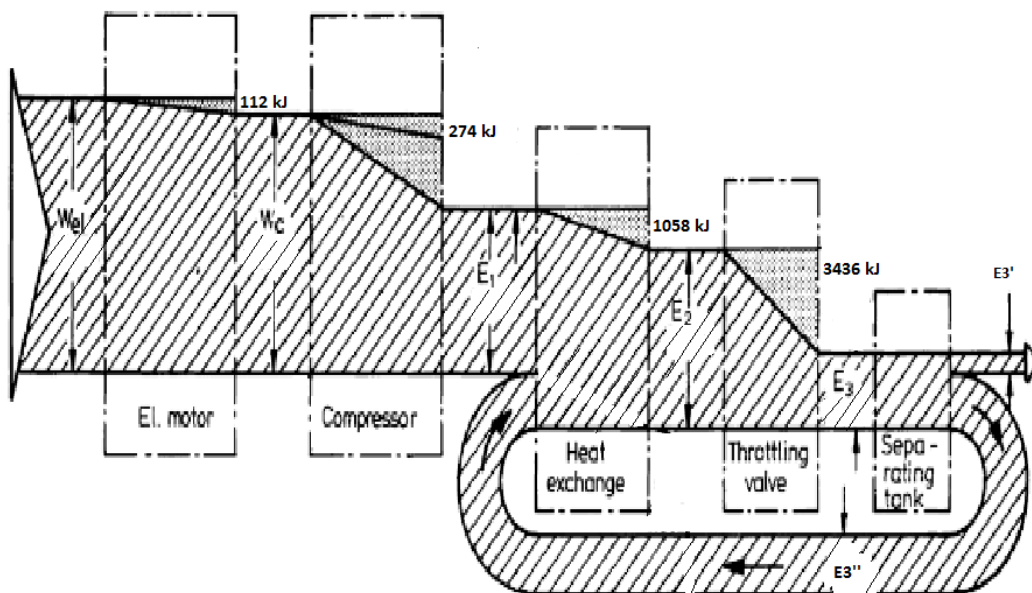


Εικόνα 4: Διάγραμμα Grassmann για  $P_1 = 100 \text{ bar}$  και  $t_1 = t_4 = 35 \text{ }^\circ\text{C}$

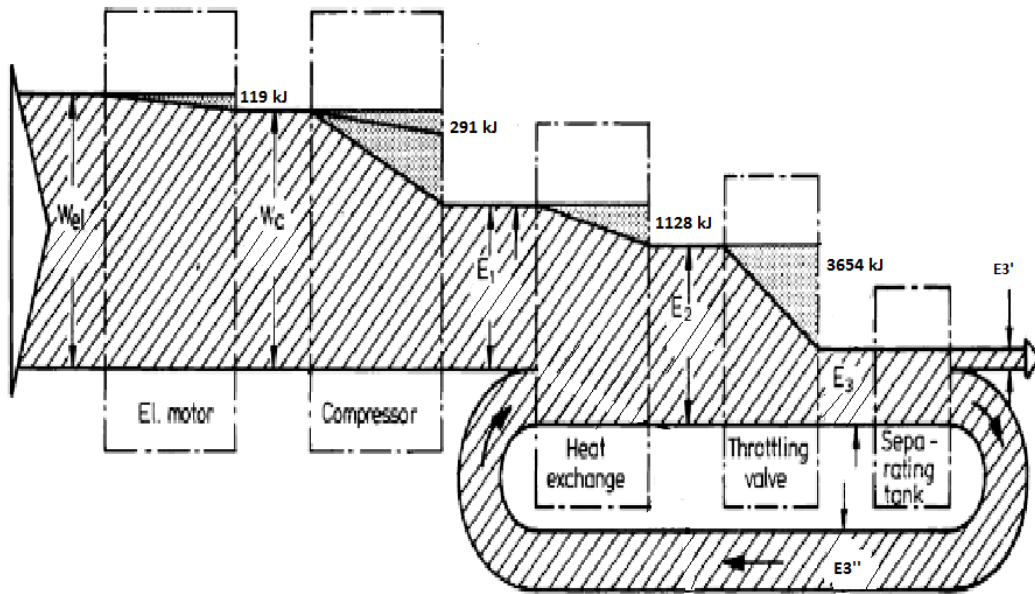


Εικόνα 5: Διάγραμμα Grassmann για  $P_1 = 100 \text{ bar}$  και  $t_1 = t_4 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$

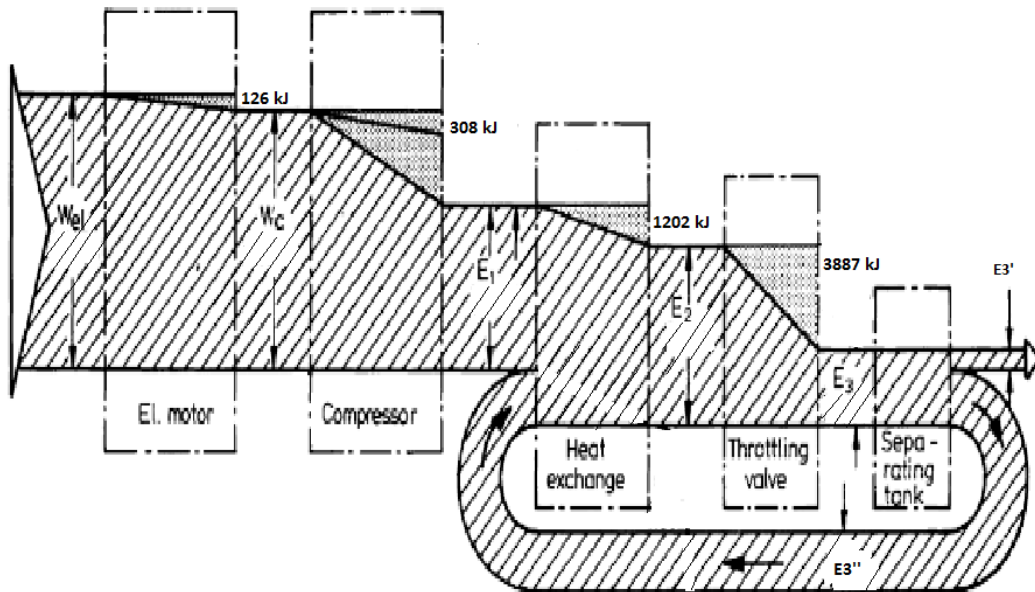
200 bar



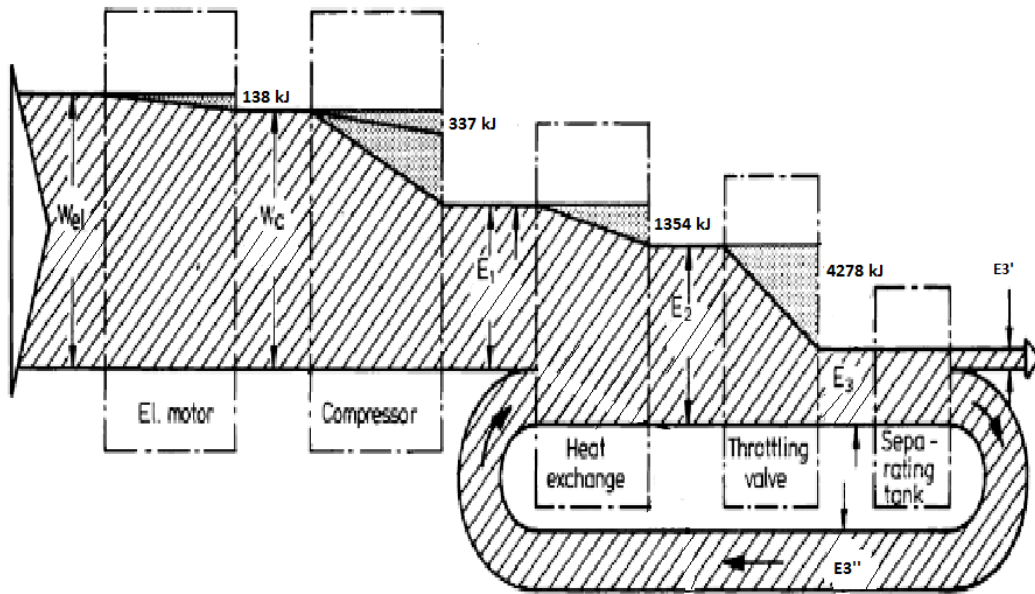
Εικόνα 6: Διάγραμμα Grassmann για  $P_1 = 200 \text{ bar}$  και  $t_1 = t_4 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$



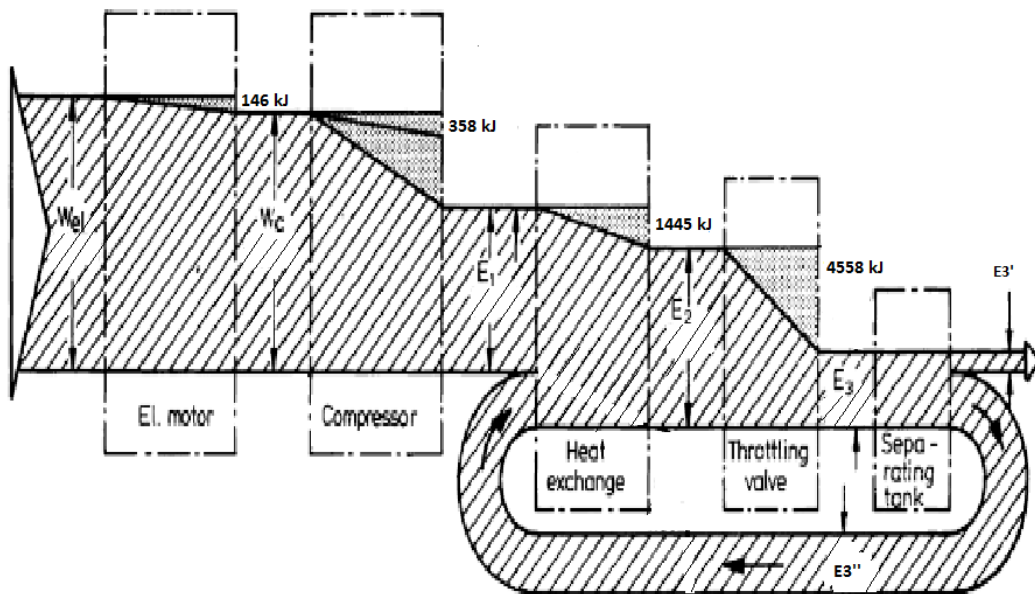
Εικόνα 7: Διάγραμμα Grassmann για  $P_1 = 200 \text{ bar}$  και  $t_1 = t_4 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$



Εικόνα 8: Διάγραμμα Grassmann για  $P_1 = 200 \text{ bar}$  και  $t_1 = t_4 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$



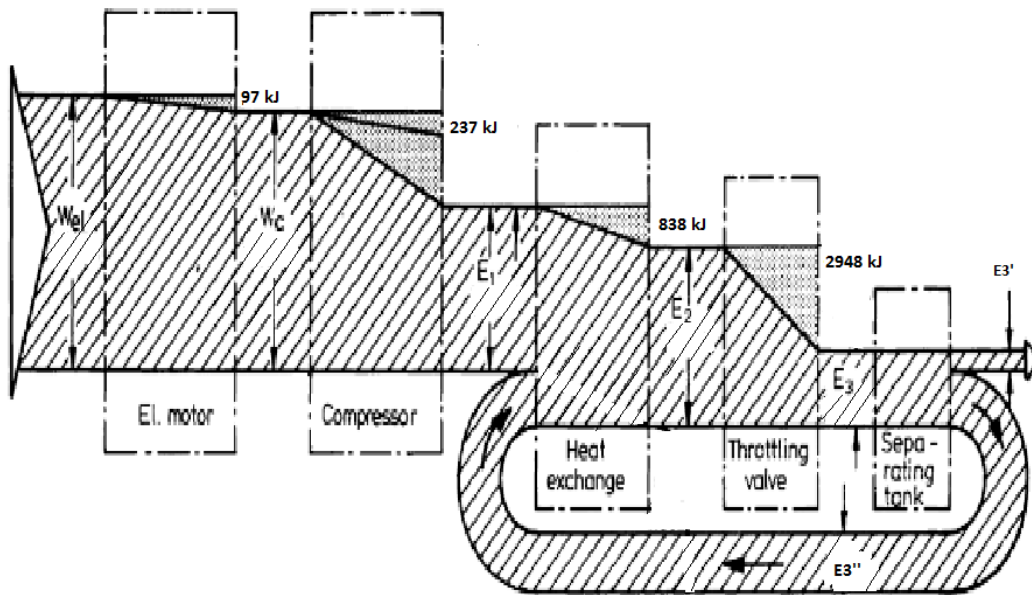
Εικόνα 9: Διάγραμμα Grassmann για  $P_1 = 200 \text{ bar}$  και  $t_1 = t_4 = 35 \text{ }^\circ\text{C}$



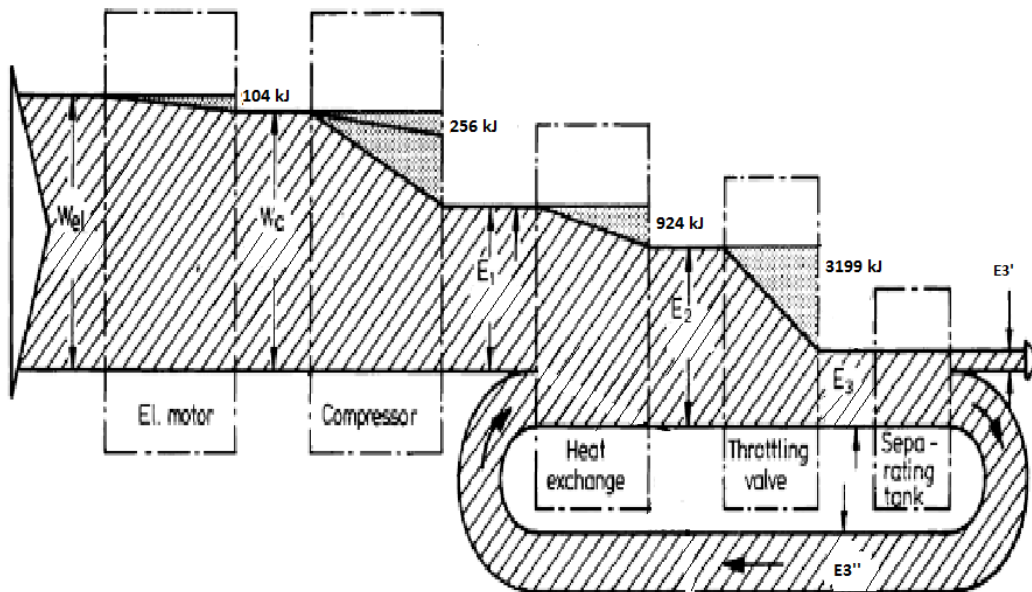
Εικόνα 10: Διάγραμμα Grassmann για  $P_1 = 200 \text{ bar}$  και  $t_1 = t_4 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$



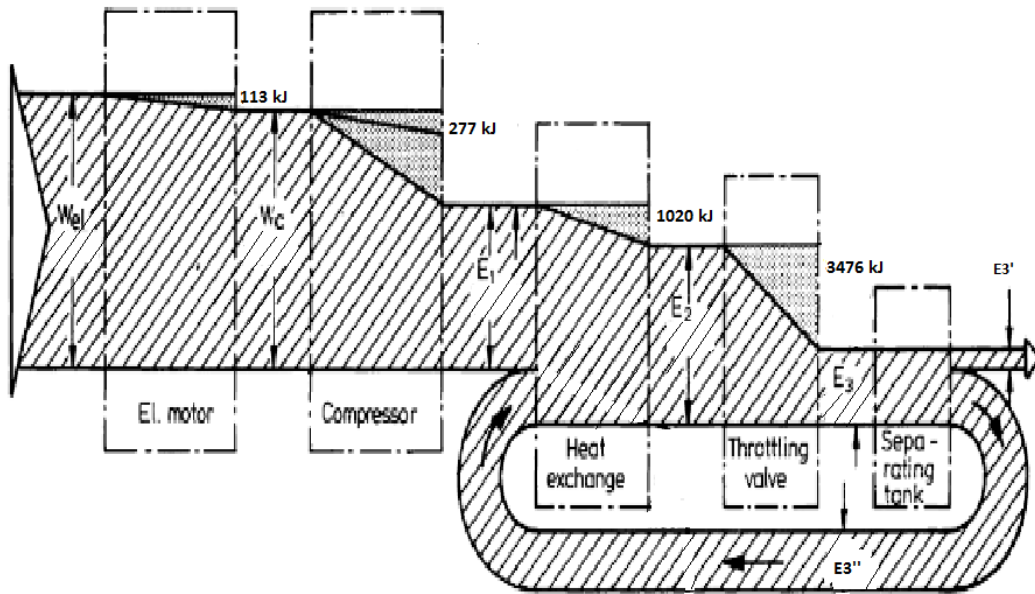
300 bar



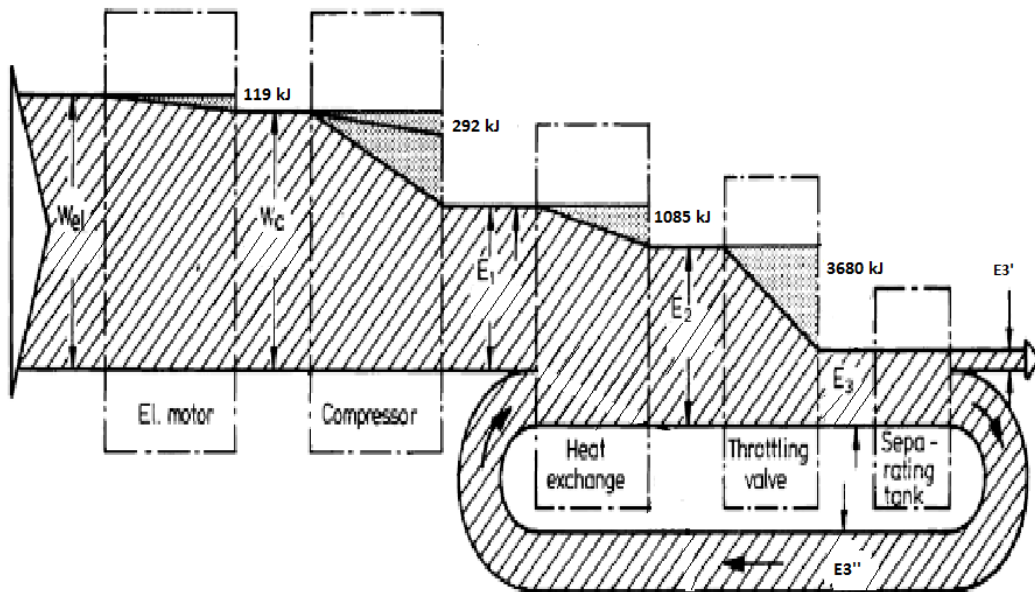
Εικόνα 11: Διάγραμμα Grassmann για  $P_1 = 300 \text{ bar}$  και  $t_1 = t_4 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$



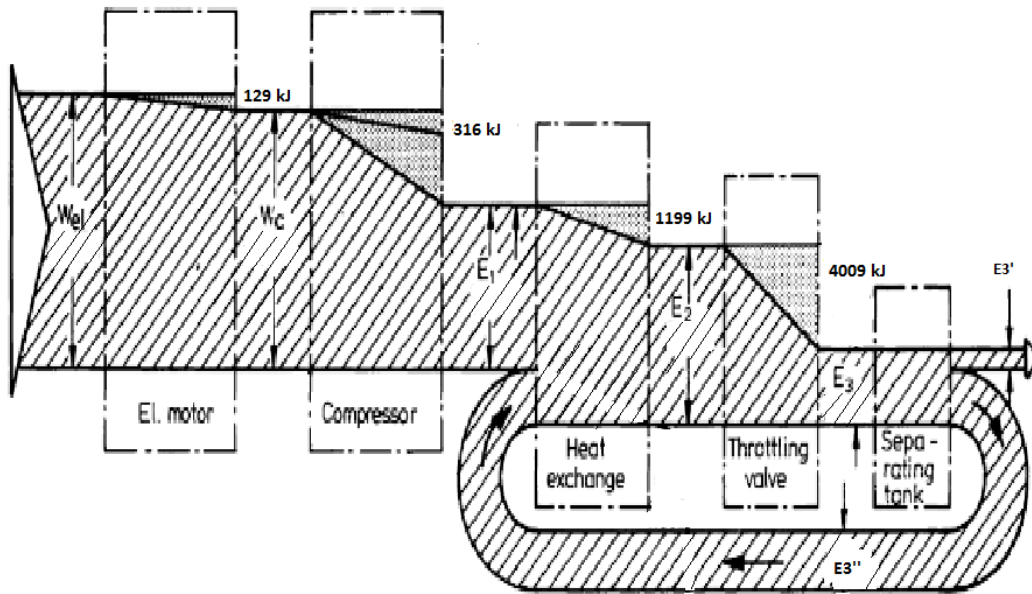
Εικόνα 12: Διάγραμμα Grassmann για  $P_1 = 300 \text{ bar}$  και  $t_1 = t_4 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$



Εικόνα 13: Διάγραμμα Grassmann για  $P_1 = 300 \text{ bar}$  και  $t_1 = t_4 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$

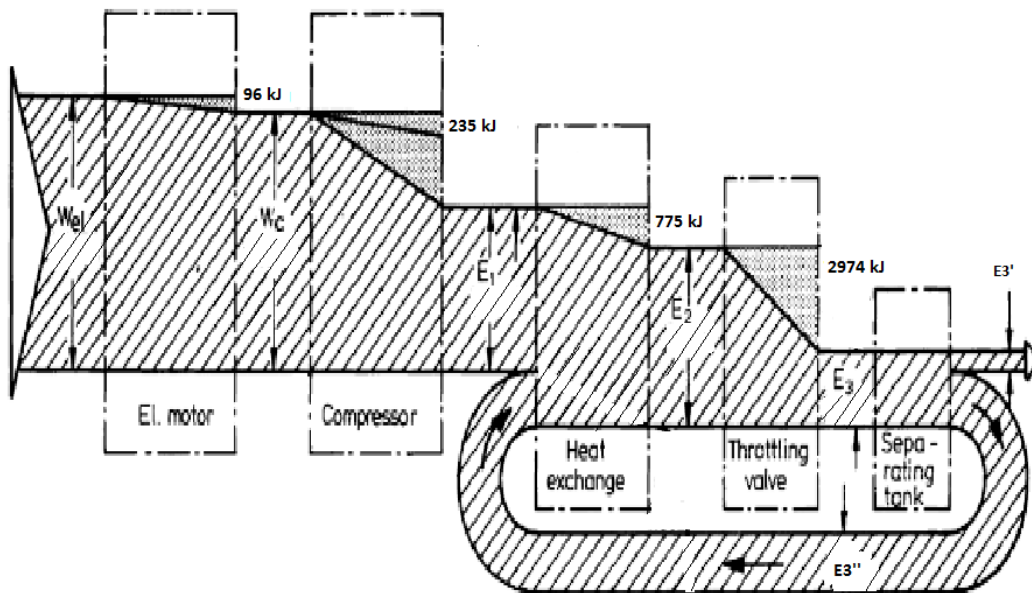


Εικόνα 14: Διάγραμμα Grassmann για  $P_1 = 300 \text{ bar}$  και  $t_1 = t_4 = 35 \text{ }^\circ\text{C}$



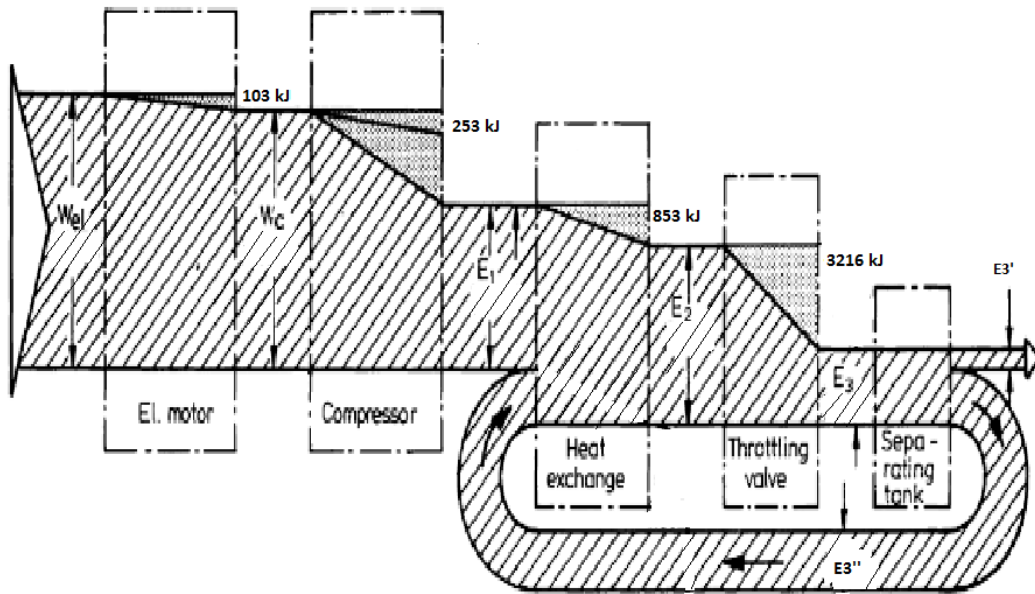
Εικόνα 15: Διάγραμμα Grassmann για  $P_1 = 300 \text{ bar}$  και  $t_1 = t_4 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$

400 bar

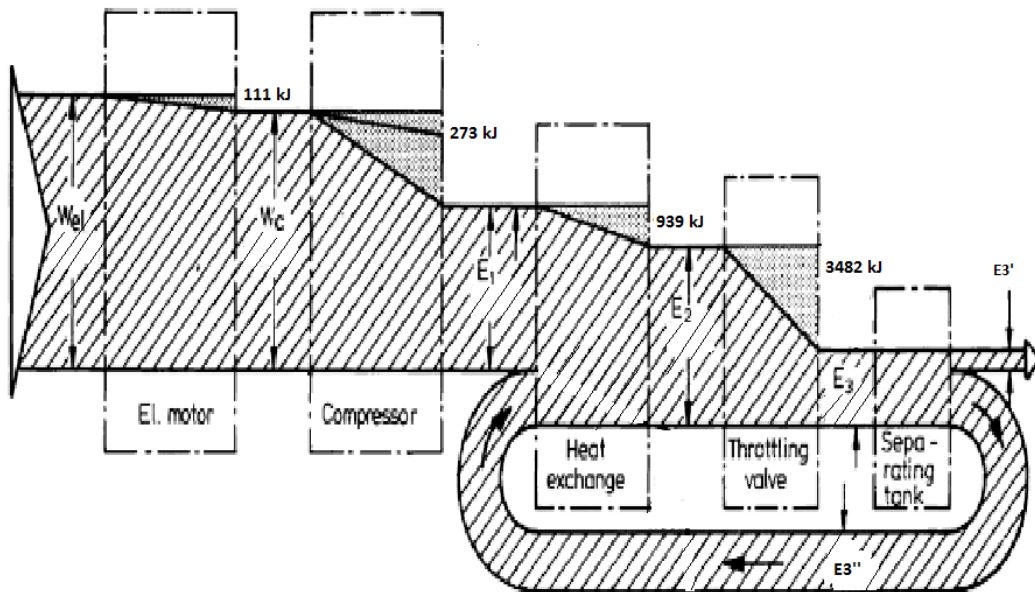


Εικόνα 16: Διάγραμμα Grassmann για  $P_1 = 400 \text{ bar}$  και  $t_1 = t_4 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

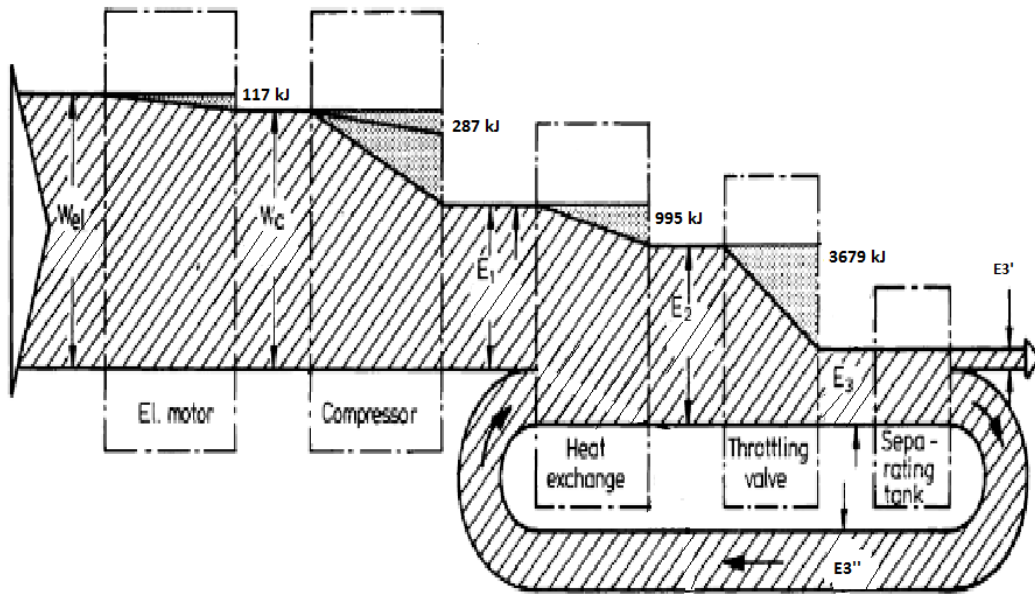




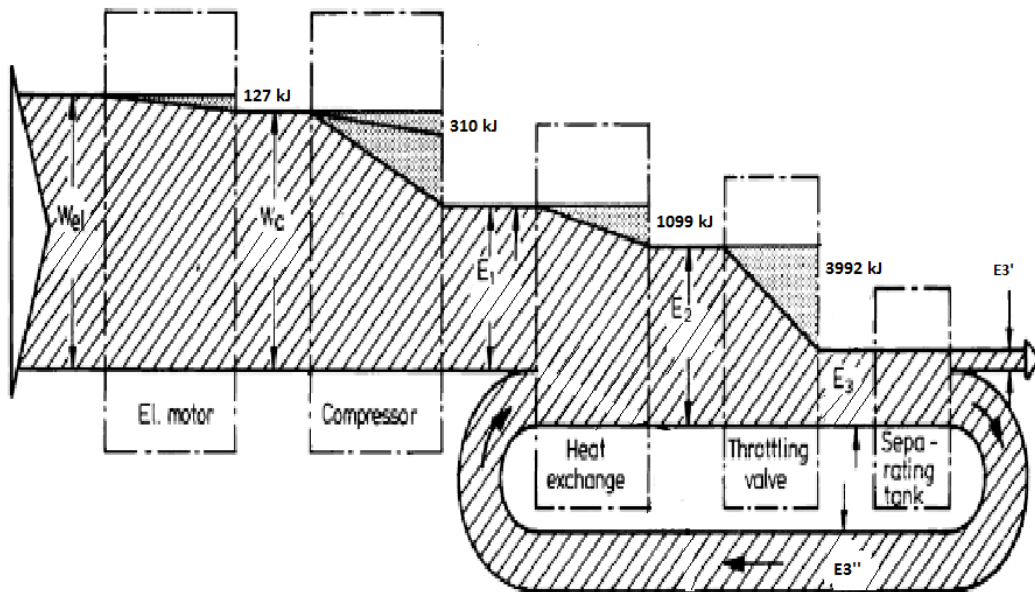
Εικόνα 17: Διάγραμμα Grassmann για  $P_1 = 400 \text{ bar}$  και  $t_1 = t_4 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$



Εικόνα 18: Διάγραμμα Grassmann για  $P_1 = 400 \text{ bar}$  και  $t_1 = t_4 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$



Εικόνα 19: Διάγραμμα Grassmann για  $P_1 = 400$  bar και  $t_1 = t_4 = 35$  °C



Εικόνα 20: Διάγραμμα Grassmann για  $P_1 = 400$  bar και  $t_1 = t_4 = 40$  °C

## 7. ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

1) Στο γράφημα 1 παρατηρούμε πως η μεγαλύτερη καταστροφή της εξέργειας συναρτήσει της θερμοκρασίας  $t_4$  παρατηρείται στην πίεση των 100 bar. Ακολουθεί αυτή των 200 bar, ενώ οι καμπύλες των 300 και των 400 σχεδόν ταυτίζονται. Επομένως παρατηρούμε μικρότερα ποσά καταστροφής της εξέργειας καθώς αυξάνεται η πίεση  $P_1$ . Επίσης παρατηρείται αύξουσα τάση της καταστρεφόμενης ενέργειας καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία  $t_4$ .

2) Στα ιστογράμματα στα οποία απεικονίζεται η καταστροφή εξέργειας στις επιμέρους διατάξεις της εγκατάστασης, παρατηρείται πως στην εκτονωτική βαλβίδα εμφανίζεται η μεγαλύτερη καταστροφή της εξέργειας. Αυτό ήταν απολύτως αναμενόμενο, καθώς στο σημείο αυτό πραγματοποιείται εκτόνωση της μεγάλης πίεσης του εργαζόμενου μέσου στην ατμόσφαιρα. Επομένως «ξοδεύονται» μεγάλες ποσότητες δυνητικού έργου.

3) Στο γράφημα 2 παρατηρούμε μείωση του βαθμού απόδοσης με την αύξηση της θερμοκρασίας  $t_4$  σε όλες τις πιέσεις  $P_1$ . Επίσης με σταθερή θερμοκρασία  $t_4$  παρατηρούμε αύξηση του βαθμού απόδοσης με την αύξηση της πίεσης  $P_1$ .

4) Ο βαθμός απόδοσης συμφωνεί με παρόμοια έρευνα<sup>4</sup>. Συγκεκριμένα, για θερμοκρασία 25°C και πίεση  $P_1 = 200$  bar, με εργαζόμενο ψυκτικό μέσο τον αέρα, υπολογίζεται ίσος με 12,64%. Στην παρούσα εργασία με τις ίδιες συνθήκες υπολογίζουμε το βαθμό απόδοσης 12,47%.

---

<sup>4</sup> Thermodynamic Analysis of Linde System for Liquefaction of Gases, Devender Kumar, R.S Mishra.

Στιγμιότυπα οθόνης από τα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας:

- Mathcad
- Coolpack

```

+
                                P1 := 100

to := 20          To := to + 273
h1 := 501         s1 := 2.539      T1 := To
h4 := 522         s4 := 3.928      T4 := To
h3ii := 307      s3ii := 2.622     T3ii := -194.5
h3i := 99.4      s3i := 0.029     T3i := -191.4

ho := h4         so := s4

ηm := 0.95      ηel := 0.98

-----

m := 20          h2 := 300
Given
m·h1 + (m - 1)·h3ii = m·h2 + (m - 1)·h4
m·h2 = h3i + (m - 1)·h3ii
(m
 h2) := Find(m, h2)
m = 20.1238     h2 = 296.6839     s2 := 1.575
m3i := 1        m3ii := m - m3i

h3 := h2
x := (h2 - 99.4) / (307 - 99.4)      x = 0.9503

```

Στιγμιότυπο 1: Οθόνη επεξεργασίας στο λογισμικό Mathcad (1/3)

(παράδειγμα  $P_1 = 100 \text{ bar}$ ,  $t_4 = t_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ )

$x := \frac{h2 - 99.4}{307 - 99.4}$	$x = 0.9503$
$s3 := 2.622 \cdot x + (1 - x) \cdot 0.029$	$s3 = 2.4931$
$e1 := (h1 - ho) - To \cdot (s1 - so)$	$e1 = 385.977$
$e2 := (h2 - ho) - To \cdot (s2 - so)$	$e2 = 464.1129$
$e3 := (h3 - ho) - To \cdot (s3 - so)$	$e3 = 195.0956$
$e3i := (h3i - ho) - To \cdot (s3i - so)$	$e3i = 719.807$
$e3ii := (h3ii - ho) - To \cdot (s3ii - so)$	$e3ii = 167.658$
$e4 := (h4 - ho) - To \cdot (s4 - so)$	$e4 = 0$
$W := -m \cdot [To \cdot (s1 - s4) - (h1 - h4)]$	$W = 7767.3276$
$Wc := \frac{W}{\eta m}$	$Wc = 8176.1343$
$Wel := \frac{Wc}{\eta e1}$	$Wel = 8342.9942$

Στιγμιότυπο 2: Οθόνη επεξεργασίας στο λογισμικό Mathcad (2/3)

$$\begin{aligned}
W_{e1} &:= \frac{W_c}{\eta_{e1}} & W_{e1} &= 8342.9942 \\
E_{d1} &:= W_{e1} - W_c & E_{d1} &= 166.8599 \\
E_{d3} &:= W_c - m \cdot e_1 & E_{d3} &= 408.8067 \\
E_{dhe} &:= m_{3ii} \cdot (e_{3ii} - e_4) - m \cdot (e_2 - e_1) & E_{dhe} &= 1633.8685 \\
E_{dtv} &:= m \cdot (e_2 - e_3) & E_{dtv} &= 5413.6522 \\
E_{dst} &:= m \cdot e_3 - m_{3i} \cdot e_{3i} - m_{3ii} \cdot e_{3ii} & E_{dst} &= 1.819 \times 10^{-12} \\
E_1 &:= m \cdot e_1 = 7767.3276 \\
E_2 &:= m \cdot e_2 = 9339.7188 \\
E_3 &:= m \cdot e_3 = 3926.0667 \\
E_{3i} &:= m_{3i} \cdot e_{3i} = 719.807 \\
E_{3ii} &:= m_{3ii} \cdot e_{3ii} = 3206.2597 \\
E_4 &:= m_{3i} \cdot e_4 = 0 & \eta_{II} &:= \frac{E_{3i}}{W_{e1}} = 0.0863
\end{aligned}$$

Στιγμιότυπο 3 Οθόνη επεξεργασίας στο λογισμικό Mathcad (3/3)

## Στιγμιότυπο 4: Λογισμικό Coolpack

The screenshot shows the Coolpack software interface. The main window displays a list of tools under the 'Refrigeration Utilities' category. The 'Refrigerant calculator' tool is highlighted. A dialog box titled 'Refrigerant calculator' is open, showing the following data:

Property	Value
Refrigerant	R729, N2/O2/A (76/23/1), Air
P in.	Bar
T in.	°C
T	20.000
P	100.0000
V	0.000000
h <sub>gas</sub>	500.87
s <sub>gas</sub>	2539.76
Other	0

The dialog box also includes sections for 'Saturated liquid' and 'Gas' properties, with columns for temperature (T), pressure (p), enthalpy (h), entropy (s), and specific volume (v). The 'Saturated liquid' section shows values for T (p), T (v), p (T), v (T), h (T), s (T), Cp (T), and Visc (T). The 'Gas' section shows values for T (v,p), T (h,v), T (s,v), T (v,h,p), T (v,s,p), p (T,v), v (T,p), v (T,s), h (T,p), h (T,v), s (T,p), s (T,v), Cp (T,p), Cv (T,v), Visc (T,p), and isentrop Exp (T,v). The 'V\_Sound (T,v,p)' field is also present.

Secondary fluids for heat transfer is a program that can be used to calculate transport properties and pressure drop for a range of fluids. When the program is started, an icon will appear in the menu-bar right beside the clock (bottom part of the screen to the right).

- The program can be started by double clicking on the icon.
- The program is terminated by right clicking on the icon and choose "Exit"

### Secondary fluids for heat transfer



## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

1. Yunus A. Cengel, Michael A. Boles. *Θερμοδυναμική για μηχανικούς*. Αθήνα : ΤΖΙΟΛΑ, 2012.
2. Αλέξης, Γιώργος Κ. *Η τεχνολογία της ψύξης*. Αθήνα : Αθ. Σταμούλης, 2007.
3. Desco energy. [Ηλεκτρονικό] 22 Ιανουάριος 2017. <http://www.desco-energy.com>.
4. The Linde Group. *125 years of Linde - A chronicle*. [Ηλεκτρονικό] 15 Μάρτιος 2017. <http://www.the-linde-group.com>.
5. Devender Kumar, R.S Mishra. Thermodynamic Analysis of Linde System for Liquefaction of Gases. *International Journal of Advance Research and Innovation*. Volume 3 (2013) 172-178 , 30 Νοέμβριος 2013.
6. Βασιλική, Καρκαλέτση. *Διπλωματική εργασία «Συστήματα ψύξης με συμπίεση αερίου»*. Αθήνα : s.n., 2014.