



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**  
**ΜΕΓΙΣΤΟΣ ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΡΙΠΑΡΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΥΚΛΟΥ**



**ΝΙΚΗΦΟΡΟΥ – ΤΑΣΟΠΟΥΛΟΣ ΑΓΗΣΙΛΑΟΣ**  
**ΕΙΡΗΝΗ ΚΟΡΩΝΑΚΗ, ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ Ε.Μ.Π.**

**ΑΘΗΝΑ, ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2016**



## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Φτάνοντας στο τέλος της προπτυχιακής μου ζωής, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που με βοήθησαν καθ' όλη τη διάρκεια αυτής και ιδιαίτερα στην εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Καταρχάς, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την κα Ειρήνη Κορωνάκη, Επίκουρο Καθηγήτρια Ε.Μ.Π. , για την ανάθεση του θέματος, σε μια δύσκολη για εμένα περίοδο της ζωής μου και το οποίο με βοήθησε ώστε να διευρύνω τις γνώσεις μου πάνω στον τομέα της θερμοδυναμικής και πιο συγκεκριμένα στον τομέα των τριπααραγωγικών συστημάτων.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ακόμα τους γονείς μου, Γρηγόρη και Ευσταθία και τα αδέρφια μου, Σωτήρη και Ανδρόνικο, που με βοήθησαν όπως μπορούσαν και που ήταν δίπλα μου όταν τους χρειαζόμουν. Επίσης να ευχαριστήσω την Ελένη για τη βοήθειά της στη συγγραφή της διπλωματικής εργασίας.

Αγησίλαος Νικηφόρου - Τασόπουλος

Αθήνα, Απρίλης 2016

## Περίληψη

Το ενεργειακό πρόβλημα στη σημερινή εποχή είναι μεγαλύτερο από ποτέ. Ο άνθρωπος στην προσπάθεια του να βρει λύση, αναζητάει νέες πηγές ενέργειας και νέες τεχνολογίες για μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, μελετάται ο μέγιστος βαθμός απόδοσης ενός τριπαραγωγικού κύκλου καθώς και ορισμένων άλλων όρων με σκοπό την όσο το δυνατόν καλύτερη εκμετάλλευση της τριπαραγωγικής τεχνολογίας μέσω των βέλτιστων συνθηκών λειτουργίας. Πέρα από την ανάλυση με βάση το 1<sup>ο</sup> θερμοδυναμικό αξίωμα, παρουσιάζεται και μια ανάλυση πεπερασμένου χρόνου καθώς και τα αντίστοιχα τους διαγράμματα. Οι αναλύσεις αυτές εφαρμόζονται σε πλήρεις αναστρέψιμους κύκλους όπως Carnot και Stirling. Επίσης, επιχειρείται μια ιστορική αναδρομή των συστημάτων τριπαραγωγής καθώς και μια προσπάθεια κατανόησης της τεχνολογίας αυτών των συστημάτων και των περιβαλλοντικών οφελών που παρουσιάζουν σε σχέση με τις συμβατικές μονάδες παραγωγής ενέργειας.

## Abstract

The energy problem nowadays, is bigger than ever. Human kind in order to find a solution, seeks for new energy sources and new technologies with greater efficiency. This thesis examines the maximum output of an optimised trigeneration cycle for better exploitation of trigeneration technology. Apart from a First-law analysis, this paper presents a Finite-time analysis and their respective charts. These analysis apply to full reversible cycles like Carnot and Stirling. Furthermore, this thesis attempts a historical throwback, as well as an introduction to trigeneration systems and their environmental benefits compared to conventional energy plants.

## **ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

<b>Κεφάλαιο 1: Ενέργεια.....</b>	<b>1</b>
1.1 Ορισμός ενέργειας.....	1
1.2 Μορφές ενέργειας.....	2
1.3 Το ενεργειακό πρόβλημα σήμερα.....	4
1.3.1 Πώς δημιουργήθηκε.....	4
1.3.2 Λίγα ιστορικά στοιχεία.....	7
1.3.3 Πότε εμφανίστηκε.....	8
1.4 Τι συμβαίνει στην Ελλάδα.....	11
<b>Κεφάλαιο 2: Εισαγωγή στα συστήματα συμπαραγωγής.....</b>	<b>13</b>
2.1 Τι ονομάζουμε σύστημα συμπαραγωγής.....	13
2.2 Τα πλεονεκτήματα των συστημάτων συμπαραγωγής.....	14
2.3 Εξέλιξη της συμπαραγωγής.....	15
2.4 Χρησιμοποιούμενα καύσιμα στις μονάδες συμπαραγωγής.....	16
2.5 Προϋπόθεση για να είναι η συμπαραγωγή φιλική προς το περιβάλλον.....	17
2.6 Προϋπόθεση για να είναι η τριπαραγωγή φιλική προς το περιβάλλον.....	21
2.7 Χρήση βιοκαυσίμων σε μονάδες συμπαραγωγής.....	24
2.7.1 Συνοπτική παρουσίαση μιας συμπαραγωγικής μονάδας βιοαερίου.....	25
2.8 Η τεχνολογία τριπαραγωγής στη βιομηχανία τροφίμων.....	26
<b>Κεφάλαιο 3: Εργαζόμενο μέσο.....</b>	<b>30</b>
<b>Κεφάλαιο 4: Μέγιστος βαθμός απόδοσης Τριπαραγωγικών συστημάτων.....</b>	<b>32</b>
4.1 Ονοματολογία.....	32
4.2 Κύκλος Carnot.....	33
4.1.1 Κύκλος Carnot τριπαραγωγικών συστημάτων.....	34
4.1.2 Ανάλυση πεπερασμένου χρόνου τριπαραγωγικού κύκλου Carnot.....	38
4.2 Κύκλος Stirling.....	48
4.2.1 Κύκλος Stirling τριπαραγωγικών συστημάτων.....	51
4.3 Ανάλυση με διαφορετικές αναλογίες όγκου.....	52
<b>Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα.....</b>	<b>59</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....</b>	<b>61</b>

## **ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ**

<b>Εικόνα 1.1</b> Ποσά ενέργειας ορισμένων φαινομένων .....	1
<b>Εικόνα 1.2</b> Ορυχείο λιγνίτη .....	11
<b>Εικόνα 2.1</b> Οικονομική μελέτη μεταξύ μιας συμβατικής μονάδας και μια μονάδας τριπαραγωγής. ....	28
<b>Εικόνα 2.2</b> Εκπομπές CO <sub>2</sub> συναρτήσει του COP.....	29
<b>Εικόνα 3.1</b> Διάγραμμα κατά βάρος περιεκτικότητας αμμωνίας στη διαδικασία βρασμού ..	31
<b>Εικόνα 3.2</b> Θερμοδυναμικές ιδιότητες της αμμωνίας και του νερού .....	31
<b>Εικόνα 4.1</b> Κύκλος Carnot σε T-s.....	33
<b>Εικόνα 4.2</b> Τριπαραγωγικός κύκλος Carnot σε T-s .....	34
<b>Εικόνα 4.3</b> Διάγραμμα χαρακτηριστικών λειτουργίας τριπαραγωγικού κύκλου Carnot με T <sub>h</sub> =1800K και T <sub>r</sub> =300K .....	37
<b>Εικόνα 4.4</b> Διάγραμμα χαρακτηριστικών λειτουργίας τριπαραγωγικού κύκλου Carnot με T <sub>h</sub> =1400K και T <sub>r</sub> =200K .....	37
<b>Εικόνα 4.5</b> Διάγραμμα T-s, κύκλου Carnot πεπερασμένου χρόνου .....	39
<b>Εικόνα 4.6</b> Διάγραμμα T-s, τριπαραγωγικού κύκλου Carnot πεπερασμένου χρόνου .....	45
<b>Εικόνα 4.7</b> Διάγραμμα χαρακτηριστικών λειτουργίας τριπαραγωγικού κύκλου Carnot πεπερασμένου χρόνου με T <sub>h</sub> =1000K και T <sub>r</sub> =250K .....	47
<b>Εικόνα 4.8</b> Διάγραμμα χαρακτηριστικών λειτουργίας τριπαραγωγικού κύκλου Carnot πεπερασμένου χρόνου με T <sub>h</sub> =1600K και T <sub>r</sub> =250K .....	47
<b>Εικόνα 4.9</b> Κύκλος Stirling T-s .....	49
<b>Εικόνα 4.10</b> Κύκλος Stirling P-V .....	50
<b>Εικόνα 4.11</b> Διάγραμμα T-s, τριπαραγωγικού κύκλου Stirling.....	51
<b>Εικόνα 4.12</b> Διάγραμμα T-s, τριπαραγωγικού κύκλου Stirling πεπερασμένου χρόνου .....	52
<b>Εικόνα 4.13</b> Διάγραμμα βαθμού απόδοσης – T <sub>i</sub> /T <sub>h</sub> για διαφορετικές τιμές του x με T <sub>h</sub> =1000K και T <sub>r</sub> =250K .....	54
<b>Εικόνα 4.14</b> Διάγραμμα EUF – T <sub>i</sub> /T <sub>h</sub> για διαφορετικές τιμές του x με T <sub>h</sub> =1000K και T <sub>r</sub> =250K .....	55
<b>Εικόνα 4.15</b> Διάγραμμα Q <sub>r</sub> /Q <sub>h</sub> – T <sub>i</sub> /T <sub>h</sub> για διαφορετικές τιμές του x με T <sub>h</sub> =1000K και T <sub>r</sub> =250K .....	56
<b>Εικόνα 4.16</b> Διάγραμμα EUF – T <sub>i</sub> για διαφορετικές θερμοκρασίες T <sub>h</sub> με T <sub>r</sub> =250K και x=1... ..	57

## Κεφάλαιο 1: Ενέργεια

### 1.1 Ορισμός ενέργειας

Όλα όσα συμβαίνουν γύρω μας σχετίζονται με το φυσικό μέγεθος το οποίο ονομάζουμε ενέργεια. Η επιβίωση όλων των ζωντανών οργανισμών απαιτεί ενέργεια. Το γεγονός ότι ο άνθρωπος περπατάει, ότι τα αυτοκίνητα κινούνται, ότι η ηλιακή ακτινοβολία θερμαίνει τα σώματα στα οποία πέφτει, όλα αυτά είναι διαφορετικές μορφές ενός πράγματος: της ενέργειας. Δεν είναι πάντα εφικτή η παρατήρησή της αλλά αισθανόμαστε την επίδρασή της. Η έννοια της ενέργειας αποτελεί χρησιμότερο εργαλείο για την κατανόηση του φυσικού κόσμου. Πιο απλά, μπορούμε να πούμε πως η ενέργεια ορίζεται ως «η ικανότητα ενός φυσικού συστήματος για παραγωγή έργου». Η ενέργεια δεν εμφανίζεται από το τίποτα ούτε εξαφανίζεται. Η ενέργεια περικλείεται ή εμπεριέχεται, αποθηκεύεται, εκπέμπεται, μεταβιβάζεται, απορροφάται, μετατρέπεται, διατηρείται, υποβαθμίζεται, ρέει [1]. Στο διεθνές σύστημα μετρικών μονάδων (S.I.), μονάδα μέτρησης της ενέργειας είναι το 1 Joule (Τζάουλ) και είναι το έργο που παράγεται όταν δύναμη 1 Newton κινεί ένα αντικείμενο σε απόσταση 1 μέτρου [2]. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα ποσά ενέργειας ορισμένων φαινομένων.

Φυσικό φαινόμενο	Ενέργεια (Joule)
Δημιουργία του Σύμπαντος	$10^{68}$
Έκρηξη Σιπέρνοβα	$10^{44}$
Ετήσια Ηλιακή Ακτινοβολία	$10^{34}$
Περιστροφή της Γης γύρω από τον Ήλιο	$10^{33}$
Ηλιακή Ενέργειας που φτάνει στη Γη ανά έτος	$10^{25}$
Σεισμός 8 Richter	$10^{18}$
Έκρηξη Ατομικής Βόμβας στη Χιροσίμα	$10^{14}$
Ενέργεια που Καταναλώνεται από Πύραυλο για αποστολή στη Σελήνη	$10^{11}$
Αστραπή	$10^{10}$
Άνθρωπος που τρέχει για μία ώρα	$10^8$
Σπίρτο που καίγεται	$10^3$
Σχάση ενός Πυρήνα Ουρανίου	$10^{-11}$
Ηλεκτρόνιο σε Άτομο	$10^{-13}$

Εικόνα 1.1 Ποσά ενέργειας ορισμένων φαινομένων

## 1.2 Μορφές ενέργειας

Όπως ειπώθηκε και προηγουμένως η ενέργεια μπορεί να μετατραπεί, να αλλάξει δηλαδή μορφή. Ορισμένες από τις μορφές που μπορεί να πάρει η ενέργεια δίνονται παρακάτω [3].

Πρωταρχικές μορφές ενέργειας θεωρούνται η δυναμική και η κινητική ενέργεια:

- **Δυναμική ενέργεια:** ορίζεται η ενέργεια που κατέχει ένα σώμα, ή σύστημα, λόγω της θέσεως (σε σχέση με κάποια άλλη), ή της κατάστασής του.
- **Κινητική ενέργεια:** ορίζεται η ενέργεια που έχει ένα σώμα όταν κινείται και αναφέρεται στην ικανότητά του να παράγει έργο.

Το σύνολο της δυναμικής και της κινητικής ενέργειας αποτελούν την **Μηχανική ενέργεια**. Είτε ως κινητική ή ως δυναμική ενέργεια, η ενέργεια εμφανίζεται με μία από τις παρακάτω μορφές:

- **Ηλεκτρική ενέργεια:** είναι η ενέργεια που μεταφέρει το ηλεκτρικό ρεύμα, το οποίο αναφέρεται στην κινητική ενέργεια των κινούμενων ηλεκτρονίων (ηλεκτρικό ρεύμα), λόγω της ύπαρξης διαφοράς δυναμικού στα άκρα ενός αγωγού.
- **Θερμική ενέργεια** η θερμική ενέργεια χαρακτηρίζει το σύνολο της κινητικής ενέργειας των σωματιδίων που συγκροτούν τα υλικά σώματα, καθώς αυτά κινούνται στο εσωτερικό τους με συνέπεια να αναπτύσσουν θερμοκρασία. Πρόκειται για εσωτερική ενέργεια ενός συστήματος που βρίσκεται σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας. Απλούστερα θερμική ενέργεια ονομάζουμε την κινητική ενέργεια των μορίων λόγω των συνεχών και τυχαίων κινήσεών τους.
- **Πυρηνική ενέργεια ή ατομική ενέργεια:** ονομάζεται η ενέργεια που απελευθερώνεται κατά τη σχάση ή σύντηξη των πυρήνων κατά τον μετασχηματισμό δηλαδή ατομικών πυρήνων.
- **Χημική ενέργεια:** ορίζεται το σύνολο της δυναμικής ενέργειας που απαιτήθηκε για τη συγκρότηση μορίων χημικών ουσιών από διάφορα άτομα, κάτω από την αλληλεπίδραση ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων ή που αποθηκεύεται σε χημικές ενώσεις.
- **Ηλεκτρομαγνητική ενέργεια/ακτινοβολία:** είναι εκπομπή στον χώρο ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας υπό μορφή κυμάτων που ονομάζονται ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα είναι συγχρονισμένα ταλαντούμενα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία τα οποία



ταλαντώνονται σε κάθετα επίπεδα μεταξύ τους και κάθετα προς την διεύθυνση διάδοσης.

- **Ηλιακή ενέργεια:** χαρακτηρίζεται το σύνολο των διαφόρων μορφών ενέργειας που προέρχονται από τον Ήλιο. Τέτοιες είναι το φως ή φωτεινή ενέργεια, η θερμότητα ή θερμική ενέργεια καθώς και διάφορες ακτινοβολίες ή ενέργεια ακτινοβολίας. Η ηλιακή ενέργεια στο σύνολό της είναι πρακτικά ανεξάντλητη, αφού προέρχεται από τον ήλιο, και ως εκ τούτου δεν υπάρχουν περιορισμοί χώρου και χρόνου για την εκμετάλλευσή της.

Ο ήλιος αποτελεί την «απόλυτη» πηγή ενέργειας για τη γη. Ο ήλιος παρέχει στη γη θερμότητα με την εκπεμπόμενη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία σε ημερήσια βάση και η οποία με τη σειρά της είναι υπεύθυνη για μια σειρά δράσεων που οδηγούν στην ενέργεια από τη βιομάζα, το νερό, τον άνεμο, τα κύματα και τα θαλάσσια ρεύματα (δευτερογενής ηλιακή ενέργεια). Επίσης η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στη γη εδώ και εκατομμύρια χρόνια έχει δημιουργήσει «αποθηκευμένη» ενέργεια, με την μετατροπή των φυτικών και ζωικών υλών σε πετρέλαιο, γαιάνθρακα και φυσικό αέριο, δηλαδή σε ορυκτά ή φυσικά καύσιμα. Αυτή η διεργασία, βεβαίως, γίνεται και σήμερα, αλλά με τόσο μικρό ρυθμό που δε μπορεί να συγκριθεί με τον τεράστιο ρυθμό με τον οποίο η σημερινή κοινωνία καταναλώνει αυτούς τους εξαντλήσιμους ενεργειακούς πόρους. Ως κύρια ενέργεια (capital energy) ορίζονται οι ενεργειακοί πόροι που υπάρχουν «αποθηκευμένοι» στη γη. Η κύρια ενέργεια μπορεί να υποδιαιρεθεί στις παρακάτω έξι κατηγορίες [4]:

- Πρωτογενής ενέργεια (primary energy): η ενέργεια που προέρχεται κατευθείαν από τον ήλιο ή τη γη (ορυκτά και πυρηνικά καύσιμα), όπως παρουσιάζεται αναλυτικά στον Πίνακα 1.3. Δεν απαιτείται επεξεργασία για τη μετατροπή της σε χρήσιμη ενέργεια.
- Δευτερογενής ενέργεια (secondary energy): περιλαμβάνει τις μορφές ενέργειας που προκύπτουν από τη μετατροπή πρωτογενούς ενέργειας μέσω χημικών, φυσικών, μηχανικών, θερμικών ή πυρηνικών δράσεων (π.χ. βενζίνη, ηλεκτρική ισχύς) για να χρησιμοποιηθούν ως χρήσιμη ενέργεια.
- Ανανεώσιμη ενέργεια (renewable energy): ο όρος αναφέρεται στις μορφές δυναμικής ενέργειας, οι οποίες ανανεώνονται σε σταθερό ρυθμό και σχετικά γρήγορα. Η λέξη «γρήγορα» είναι η λέξη κλειδί στο ορισμό. Όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως και τα ορυκτά καύσιμα ανανεώνονται, αλλά σε εξαιρετικά μικρό ρυθμό.

- Μη ανανεώσιμη ενέργεια (non-renewable energy): οποιαδήποτε μορφή δυναμικής ενέργειας που δεν εμπίπτει στον ορισμό της ανανεώσιμης ενέργειας, με παράδειγμα τα ορυκτά καύσιμα.
- Ενέργεια από τη διεργασία της καύσης (combustion process): Πολλές από τις δυναμικές μορφές ενέργειας που αναφέρονται στους Πίνακες 1.3 και 1.4 θα πρέπει να αξιοποιηθούν μέσω της διεργασίας της καύσης για να μετατρέψουν την αποθηκευμένη ενέργεια σε έργο.
- Ενέργεια που δεν περιλαμβάνει διεργασία καύσης (non-combustion process): οι μορφές δυναμικής ενέργειας που δεν περιλαμβάνουν καύση, όπως είναι η υδροηλεκτρική και η αιολική ενέργεια. Οι ενέργειες αυτές διαδραμάτισαν σημαντικό ρόλο στη βιομηχανία του 19ου αιώνα.

### 1.3 Το ενεργειακό πρόβλημα σήμερα

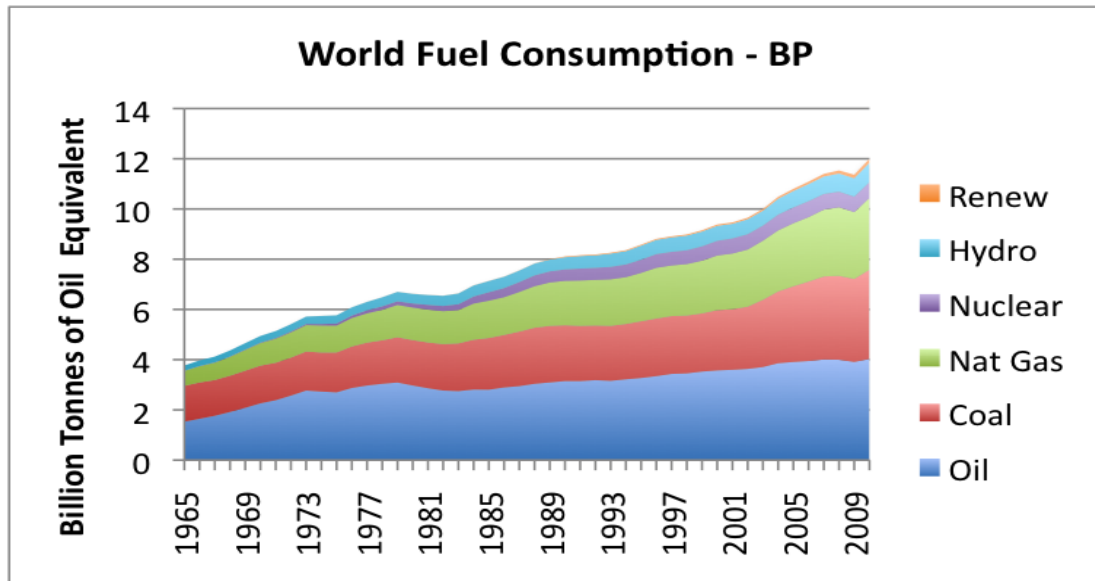
Τα τελευταία χρόνια, ακούμε και διαβάζουμε συνεχώς για το ενεργειακό πρόβλημα που υπάρχει στον πλανήτη μας και που σε λίγες δεκαετίες από τώρα θα έχει οδυνηρές επιπτώσεις στην ανθρωπότητα. Τί είναι όμως το σύγχρονο ενεργειακό πρόβλημα και πώς δημιουργήθηκε;

#### 1.3.1 Πώς δημιουργήθηκε

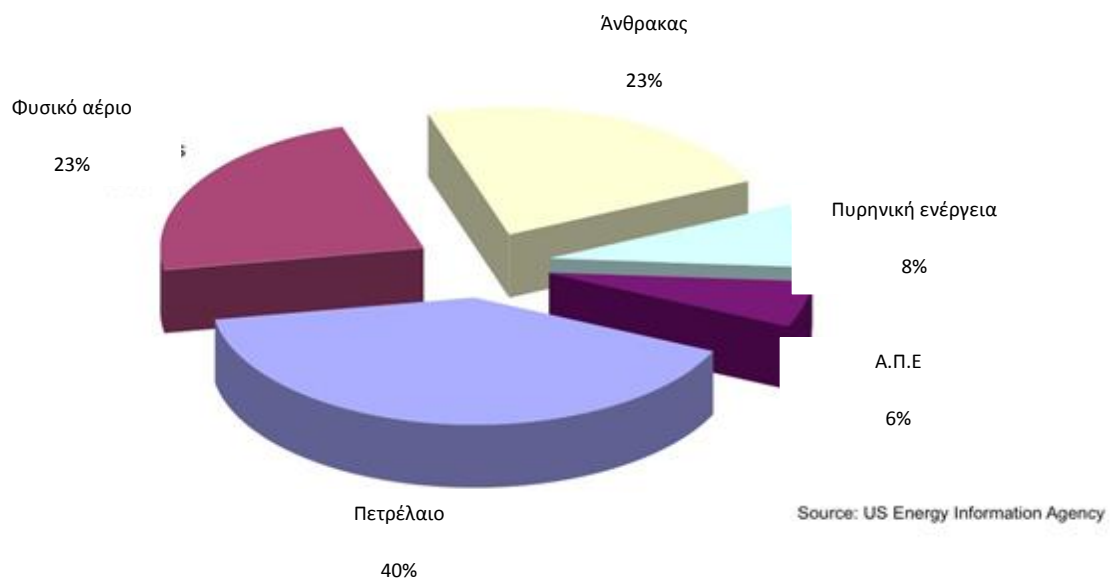
Ο άνθρωπος συνδέθηκε με την έννοια ενέργεια από την πρώτη στιγμή της ύπαρξής του πάνω στη Γη. Όπως και οι άλλοι ζωντανοί οργανισμοί μέσω της τροφής, ο πρωτόγονος άνθρωπος συσώρευε στις κατάλληλες αποθήκες του σώματός του ενέργεια, την οποία χρησιμοποιούσε για να κινηθεί, να κυνηγήσει και να αντιμετωπίσει τους εχθρούς του, με λίγα λόγια: να επιβιώσει [5]. Πολύ αργότερα άρχισε να χρησιμοποιεί τη μυϊκή δύναμη των ζώων, αυξάνοντας σημαντικά τις δυνατότητές του και ενισχύοντας τη θέση του στο όχι και τόσο φιλικό περιβάλλον στο οποίο έπρεπε να επιβιώσει. Κάθε κοινωνία χρησιμοποιούσε τις πηγές ενέργειας που έβρισκε στο περιβάλλον. Στην αρχαία Αίγυπτο για παράδειγμα συνέλεξαν πετρέλαιο που έβρισκαν στις λίμνες χρησιμοποιώντας το για φωτισμό. Οι αρχαίοι Κινέζοι χρησιμοποιούσαν το φυσικό αέριο για να θερμάνουν το θαλασσινό νερό και να μαζέψουν το αλάτι. Την ίδια περίοδο, οι άνθρωποι ξεκίνησαν να χρησιμοποιούν τη γεωθερμική ενέργεια. Διοχέτευαν με σωλήνες το καυτό νερό από τις ζεστές πηγές στα σπίτια τους και το χρησιμοποιούσαν για θέρμανση [6].

Μέχρι το 19<sup>ο</sup> αιώνα, ο άνθρωπος κάλυπτε τις ενεργειακές του ανάγκες κυρίως από πηγές ενέργειας φιλικές προς το περιβάλλον με ελάχιστη επιβάρυνση πάνω του, όπως η αιολική με τη χρήση ανεμόμυλων και η υδραυλική με τους νερόμυλους, χωρίς βέβαια να αμελήσουμε τη χρήση της ξυλείας που ήταν πολύ σημαντική για τις κοινωνίες τότε. Με τη βιομηχανική επανάσταση όμως, τα πράγματα άρχισαν να αλλάζουν. Τα ορυκτά καύσιμα (γαιάνθρακες, πετρέλαιο και φυσικό αέριο) έγιναν οι πρωτεύουσες πηγές ενέργειας για την ανθρώπινη κοινωνία και οικονομία αφήνοντας, σταδιακά, στην άκρη τις προηγούμενες πηγές ενέργειας. Οι ενεργειακές ανάγκες καλύπτονται πλέον από πόρους που υπάρχουν σε μια μειοψηφία χωρών ενώ οι υπόλοιπες, πρέπει να εισάγουν Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τις έντονες διακυμάνσεις στις τιμές των ορυκτών καυσίμων που οδηγεί στην οικονομική και πολιτική εξάρτηση από τις προμηθεύτριες χώρες των χωρών που εισάγουν καύσιμα. Σε ελάχιστες περιπτώσεις, οι μεγάλοι παραγωγοί είναι και μεγάλοι καταναλωτές ενέργειας. Έτσι, χώρες που παλαιότερα είχαν ελάχιστη σημασία στη διπλωματική σκακιέρα, έγιναν πρωτεύοντες στόχοι διεθνούς ενδιαφέροντος.

Καθώς η εκβιομηχάνιση διαδόθηκε ακόμη περισσότερο, οι ενεργειακές ανάγκες πολλαπλασιάστηκαν και ενέκυψαν νέα θέματα. Ένα από αυτά αφορά την εξάντληση των αποθεμάτων ορυκτού πλούτου, γεγονός που καθιστά άμεση την ανάγκη για υποκατάσταση τους πριν εξαντληθούν, με εναλλακτικές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Υπάρχουν και άλλοι παράγοντες που πιέζουν προς αυτή την κατεύθυνση, την εκμετάλλευση δηλαδή των ανανεώσιμων και καθαρών πηγών ενέργειας. Ένας από αυτούς αφορά τις επιπτώσεις που έχει στο περιβάλλον η χρήση των ορυκτών καυσίμων. Ενώ ένας άλλος αφορά τις έντονες διακυμάνσεις στις τιμές ορυκτών καυσίμων και στην ανάγκη μείωσης της οικονομικής και πολιτικής εξάρτησης των χωρών καταναλωτών από τις προμηθεύτριες χώρες [7].



Εικόνα 1.2 Εκμετάλλευση πηγών ενέργειας (1965-2009)



Εικόνα 1.3 Κατανάλωση καυσίμων στις Η.Π.Α

### 1.3.2 Λίγα ιστορικά στοιχεία

- Στο τέλος της λίθινης εποχής αρχίζει η χρησιμοποίηση τη μυϊκής δύναμης των ζώων στις μεταφορές και την καλλιέργεια της γης.
- Το 3000 π.Χ. αρχίζει η λειτουργία του μεταλλείου ασημιού στο Θορικό Λαυρίου.
- Το 2500 π.Χ. κατασκευάζονται στην Αρκαδία μεταλλευτικοί κλίβανοι αρχίζει η επεξεργασία μετάλλων.
- Το 1500 π.Χ. κατασκευάζονται στη Θήρα Ιστιοφόρα πλοία
- Το 1400 π.Χ. κατασκευάζονται αρδευτικά έργα στην Κωπαΐδα
- Το 580 π.Χ. κατασκευάζεται η πρώτη πρέσα λαδιού
- Το 350 π.Χ. κατασκευάζονται οι πρώτοι ανεμόμυλοι και λίγο αργότερα οι πρώτοι υδραυλικοί τροχοί
- Γύρω στο 100 π.Χ. ο Ήρων ο Αλεξανδρεύς κατασκευάζει την πρώτη θερμική μηχανή
- Το 1769 κατασκευάζεται η πρώτη ατμομηχανή από τον James Watt. Στην ουσία τη χρονική αυτή περίοδο τοποθετείται και η απαρχή της βιομηχανικής επανάστασης στην Αγγλία που υποδηλώνει τη συστηματική εγκατάσταση και λειτουργία της εργοστασιακής βιομηχανίας.
- Το 1807 για πρώτη φορά εισάγεται στη φυσική η έννοια και ο ορισμός της ενέργειας ως φυσικού μεγέθους
- Το 1829 στο Κεντάκυ των Η.Π.Α., αναβλύζει η πρώτη πετρελαιοπηγή
- Τον Αύγουστο του 1859 στη δυτική Πενσυλβάνια γίνεται η πρώτη γεώτρηση από τον Edwin Drake σε βάθος 21 μέτρων, με ρυθμό 20 βαρέλια ημερησίως, ανοίγοντας ουσιαστικά το δρόμο της βιομηχανίας πετρελαίου
- Την ίδια περίοδο, πετρελαϊκά κοιτάσματα ανακαλύπτονται στην Ευρώπη και την Απω Ανατολή.

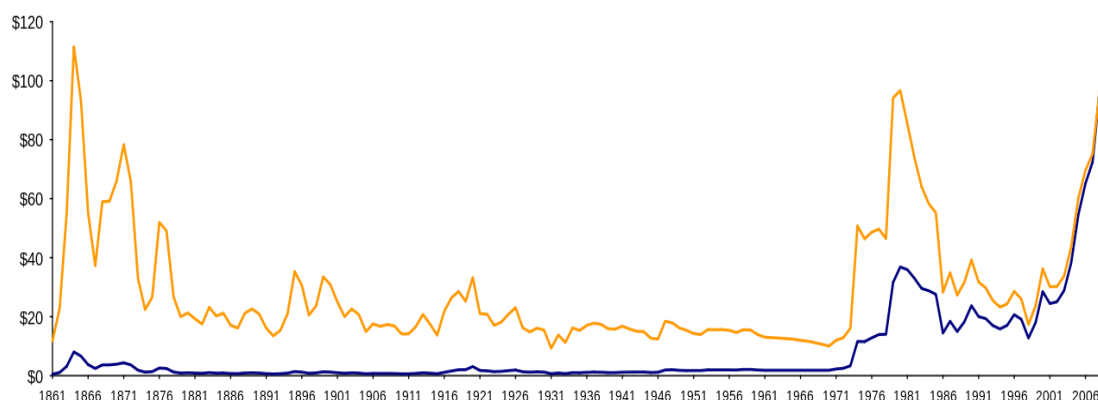
### 1.3.3 Πότε εμφανίστηκε

Το ενεργειακό πρόβλημα συνειδητοποιήθηκε με την ενεργειακή κρίση του 1973, όταν τα μέλη του Οργανισμού Αραβικών Πετρελαιοπαραγωγών Χωρών, αποτελούμενο από τα αραβικά μέλη του OPEC, καθώς και την Αίγυπτο, τη Συρία και την Τυνησία, διακήρυξαν εμπάργκο πετρελαίου [5]. Η συνειδητοποίηση του προβλήματος ήταν αποτέλεσμα :

- του περιορισμού άντλησης και συνεπώς των ποσοτήτων διάθεσης αργού πετρελαίου
- του μονομερή καθορισμού τιμών από τον OPEC.
- της επακόλουθης αύξησης της τιμής του ( τετραπλασιασμός της τιμής σε σχέση με αυτή του 2007)
- της απόφασης OPEC για εθνικοποιήσεις κοιτασμάτων αργού πετρελαίου.

Οι παράγοντες που τροφοδοτούν το ενεργειακό πρόβλημα είναι:

- οι ποσότητες των συμβατικών ενεργειακών πηγών που αργά ή γρήγορα θα εξαντληθούν
- η αβεβαιότητα της επάρκειας της παράγωγης και της σταθερότητας στην τροφοδοσία με καύσιμα, με σκοπό την διατήρηση των αποθεμάτων και παράλληλα την αύξηση των τιμών
- πολιτικά και μη γεγονότα αλλά και αστάθμητοι παράγοντες που επηρεάζουν και ανεβάζουν τις τιμές



**Εικόνα 1.4** Γράφημα της τιμής του πετρελαίου την περίοδο 1861-2007, στο οποίο φαίνεται μια απότομη αύξηση το 1973, και πάλι κατά τη διάρκεια της ενεργειακής κρίσης του 1979. Η πορτοκαλί γραμμή είναι προσαρμοσμένη ως προς τον πληθωρισμό.

Η ουσία του ενεργειακού προβλήματος βρίσκεται στη συσχέτιση των ενεργειακών αποθεμάτων που διαρκώς μειώνονται με τις απαιτήσεις για κατανάλωση ενέργειας που διαρκώς αυξάνονται. Είναι αρκετά εύκολο να κατανοήσουμε τι σημαίνει αύξηση της ενέργειας που καταναλώνεται, αν αναλογιστούμε το πλήθος των ηλεκτρικών συσκευών που έχουμε σήμερα στο σπίτι μας σε σχέση με τις συσκευές που είχαμε, ας πούμε, πριν 50 χρόνια, ή τον αριθμό των αυτοκινήτων που κυκλοφορούν τώρα στους δρόμους σε σχέση με τότε. Στο ίδιο συμπέρασμα θα καταλήξουμε αν παρατηρήσουμε τις ενεργοβόρες εγκαταστάσεις ενός σύγχρονου κτιρίου (για παράδειγμα νοσοκομείου με κεντρική εγκατάσταση κλιματισμού, δίκτυο υπολογιστών, ιατρικό εξοπλισμό) και τις συγκρίνουμε με ένα ανάλογο κτίριο που κατασκευάστηκε πριν μερικές δεκαετίες [8]. Οι παρακάτω πίνακες μας βοηθάνε να κατανοήσουμε τί πραγματικά συμβαίνει με την συνολική κατανάλωση ενέργειας σε Ευρώπη και Αμερική ανά έτος:

	ΒΟΡΕΙΑ ΑΜΕΡΙΚΗ	ΚΕΝΤΡΙΚΗ - ΝΟΤΙΑ ΑΜΕΡΙΚΗ	ΔΥΤ. ΕΥΡΩΠΗ	ΑΝ. ΕΥΡΩΠΗ	ΣΥΝΟΛΟ
ΠΕΤΡΕΛΑΙΟ	139	124	38	105	406
ΦΥΣΙΚΟ ΑΕΡΙΟ	96	54	62	536	748
ΑΝΘΡΑΚΑΣ	1824	71	716	2292	4903
ΣΥΝΟΛΟ	2059	249	816	2933	6057

Εικόνα 1.5 Αποθέματα ορυκτών καυσίμων (x 1012 kWh)

	ΒΟΡΕΙΑ ΑΜΕΡΙΚΗ	ΚΕΝΤΡΙΚΗ - ΝΟΤΙΑ ΑΜΕΡΙΚΗ	ΔΥΤ. ΕΥΡΩΠΗ	ΑΝ. ΕΥΡΩΠΗ	ΣΥΝΟΛΟ
ΠΕΤΡΕΛΑΙΟ	11,65	2,19	8,24	5,68	27,26
ΦΥΣΙΚΟ ΑΕΡΙΟ	6,83	0,68	3,41	7,68	18,6
ΑΝΘΡΑΚΑΣ	5,88	0,2	3,81	5,63	15,52
ΣΥΝΟΛΟ	24,36	3,07	15,46	18,99	61,88

Εικόνα 1.6 Κατανάλωση ενέργειας 1991 (x 1012 kWh/έτος)

Παρατηρούμε ότι η συνολική ενέργεια που καταναλώνεται ανά έτος στην Ευρώπη και Αμερική είναι :  $61,88 / 6057 = 0,0102 = 1,02\%$  στο σύνολο των αποθεμάτων.

- ενώ η Β. Αμερική κατέχει το 34% των αποθεμάτων, καταναλώνει ανά έτος το 39,4% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας .
- Η Δ. Ευρώπη ενώ κατέχει το 13,5 % των αποθεμάτων , καταναλώνει το 25% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας .
- Η Κ. και Ν. Αμερική καταναλώνει περίπου το ίδιο ποσοστό σε σχέση με τα αποθέματά της
- Αντιθέτως η Αν. Ευρώπη ενώ κατέχει το 48,4 των αποθεμάτων καταναλώνει ανά έτος μόνο το 30,6% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας. Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι η Αν. Ευρώπη είναι ενεργειακά αυτοδύναμη με δυνατότητες ενεργειακής ανάπτυξης, ενώ η Β. Αμερική και ειδικά η Δ. Ευρώπη έχουν μεγάλη εξάρτηση από τις παραγωγούς χώρες. Αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει να αναπτύξουν νέες μορφές ενέργειας ώστε να γίνουν ενεργειακά αυτοδύναμες ή τουλάχιστον λιγότερο εξαρτώμενες [5].

Η ανακάλυψη νέων κοιτασμάτων, που θα άλλαζε τη σημερινή εικόνα, ενώ δεν μπορεί να αποκλεισθεί, εν τούτοις φαίνεται ισχνή. Η σειρά των συλλογισμών που τεκμηριώνει αυτή την άποψη έχει ως εξής: Υπάρχουν περίπου 1500 κοιτάσματα πετρελαίου μεγάλου και γιγαντιαίου μεγέθους στον κόσμο σήμερα. Περιέχουν το 94% του γνωστού αργού πετρελαίου. Τα 400 μεγαλύτερα κοιτάσματα περιέχουν το 60-70%. Μόνο 41 απ' αυτά ανακαλύφθηκαν μετά το 1980. Η ουσία είναι, σύμφωνα με τους Βρετανούς ειδικούς, ότι τώρα πλέον ο πλανήτης ολόκληρος έχει ερευνηθεί εξαντλητικά και έτσι έχει καταστεί σαφές ότι δεν υπάρχουν άλλα κοιτάσματα σε νέες περιοχές που να μπορούν να συγκριθούν με εκείνα της Βόρειας Θάλασσας και της Αλάσκας και να μην έχουν ανακαλυφθεί. Η Αμερικανική Γεωλογική Επιθεώρηση, απ' την άλλη πλευρά, συμφωνεί μ' αυτή την άποψη και αναφέρει ότι η ανακάλυψη σημαντικών κοιτασμάτων πετρελαίου κορυφώθηκε το 1962 και έκτοτε βρίσκεται σε πτώση. Η χρυσή εποχή του πετρελαίου έχει τελειώσει. Αυτό δεν σημαίνει ότι δεν θα συνεχίσουν να ανακαλύπτονται νέα μικρότερα κοιτάσματα, αλλά δεν θα επαρκούν ώστε να αντισταθμίσουν τη συνεχιζόμενη μείωση στα παγκόσμια αποδεδειγμένα αποθέματα. Έτσι φτάνουμε στην πρώτη σταθερά του ενεργειακού προβλήματος στην οποία συγκλίνουν οι γνώμες όλων των ειδικών, ότι δηλαδή, σε περίπου 30 χρόνια από τώρα η κρίση θα έχει εκδηλωθεί και θα βρίσκεται στο αποκορύφωμά της.



## 1.4 Τι συμβαίνει στην Ελλάδα

Η συνεχής αύξηση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στην χώρα μας κατά την τελευταία 40-ετία θεωρήθηκε ως απολύτως φυσική και αυτονόητη. Η χρήση νέων οικιακών συσκευών, όπως για παράδειγμα το κλιματιστικό, συνδέθηκε ευθέως με την άνοδο του επιπέδου ζωής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αυξάνεται ραγδαία η ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας στον κτιριακό τομέα της χώρας. Με βάση τα στοιχεία της Eurostat η μέση ετήσια αύξηση των πωλήσεων ηλεκτρικής ενέργειας από το 1990 έως το 2006 ήταν 3,75%. Η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ανά κάτοικο έφθασε από τις 3300 kWh το έτος 1994, στις 4970 kWh το έτος 2007 [9].

Αυτό οφειλόταν στις πολύ χαμηλές τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας, λόγω της χρήσης του λιγνίτη, ο οποίος υπήρχε άφθονος στη χώρα μας, 65 έως 70% της ηλεκτροπαραγωγής της χώρας. Ο λιγνίτης σε συνδυασμό με τα μεγάλα υδροηλεκτρικά της χώρας κάλυπταν μέχρι σήμερα της αυξημένες απαιτήσεις της ζήτησης, χωρίς σημαντικές αυξήσεις τιμών ρεύματος. Λόγω αυτού, διαμορφώθηκε στην χώρα μας η κοινωνική άποψη ότι η ενεργειακή κρίση του 1973 αφορούσε μόνο το εισαγόμενο πετρέλαιο και όχι τον λιγνίτη και την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνα 1.2 Ορυχείο λιγνίτη

Σήμερα, το κύριο μερίδιο στο μείγμα ηλεκτροπαραγωγής το κατέχουν οι λιγνιτικοί σταθμοί με ποσοστό 56%. Ένα μεγάλο μερίδιο καταλαμβάνουν οι υδρογονάνθρακες, κυρίως εισαγόμενοι, όπως τα πετρελαϊκά προϊόντα και το φυσικό αέριο. Η μεγάλη εξάρτηση της χώρας από τις εισαγωγές καυσίμων και οι μη προβλέψιμες και κυρίως μη ελεγχόμενες μεταβολές στην τιμή τους, επιφέρουν ένα σημαντικό παράγοντα αβεβαιότητας στο σχεδιασμό ενεργειακών πολιτικών αλλά και στην ασφάλεια ενεργειακού εφοδιασμού. Πιο συγκεκριμένα, τα πετρελαϊκά προϊόντα, καταλαμβάνουν το 13%, λόγω της κύριας χρήσης τους στα μη διασυνδεδεμένα νησιά και το φυσικό αέριο συνδυασμένου κύκλου το 18%. Το φυσικό αέριο καθώς και οι σταθμοί ΑΠΕ που κατέχουν το 13% έχουν αρχίσει ήδη να υποκαθιστούν μέρος της παραγωγής από λιγνίτη, παρουσιάζοντας, ωστόσο, υψηλό δυναμικό περαιτέρω ανάπτυξης. Επίσης, στην Ελλάδα παρατηρείται περιορισμένη ανάπτυξη δικτύων τηλεθέρμανσης και εγκατάστασης μονάδων συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (ΣΗΘ), κυρίως λόγω της σχετικά μικρής ζήτησης για θερμική ενέργεια άρα και του περιορισμένου επενδυτικού ενδιαφέροντος αλλά και της έλλειψης των σχετικών υποδομών. Το μεγάλο μέρος της εγκατεστημένης ισχύος μονάδων ΣΗΘ βρίσκεται στα διυλιστήρια, σε μεγάλους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και στη βιομηχανία τροφίμων. Παράλληλα, κάποιες ηλεκτροπαραγωγικές μονάδες της ΔΕΗ έχουν τροποποιηθεί κατάλληλα, ώστε να καλύψουν τις θερμικές ανάγκες αστικών περιοχών με δίκτυα τηλεθέρμανσης (Πτολεμαΐδα, Κοζάνη, Αμύνταιο, Μεγαλόπολη και μελλοντικά Φλώρινα).

Σε ό,τι αφορά τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, συμπεριλαμβανομένων των μεγάλων υδροηλεκτρικών, η παραγωγή τους αποτέλεσε μόλις το 8,0% της κατανάλωσης του ηπειρωτικού συστήματος. Οι «νέες ΑΠΕ» (αιολικά, ηλιακά, βιομάζα) συνεισέφεραν μόλις 2,8%. Υπενθυμίζουμε πως σύμφωνα με την πρόσφατη απόφαση της ΕΕ για το «Ενεργειακό-Κλιματικό Πακέτο» η Ελλάδα είναι νομικά δεσμευμένη να εξασφαλίσει συνεισφορά των ΑΠΕ κατά 30-35% στην τελική κατανάλωση ηλεκτρισμού το 2020. Επομένως, ακόμα κι αν υποθέσουμε σταθεροποίηση της κατανάλωσης στα σημερινά επίπεδα, και υποθέτοντας συνεισφορά 7-8% των μεγάλων υδροηλεκτρικών, θα πρέπει σε μόλις 5 χρόνια η παραγωγή από νέες ΑΠΕ σχεδόν να δεκαπλασιαστεί (από 2,8% σε 22-28%) [10].

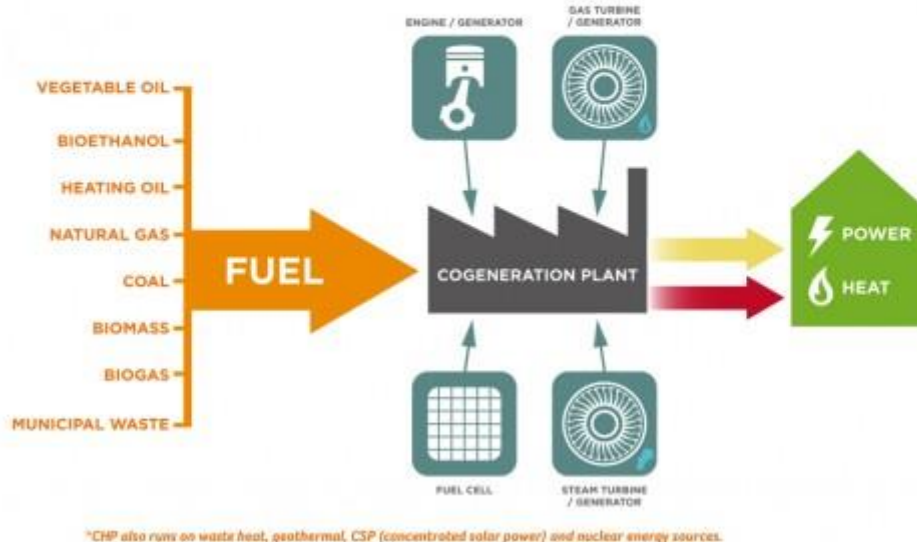
## Κεφάλαιο 2: Εισαγωγή στα συστήματα συμπαραγωγής

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια σοβαρή προσπάθεια, κυρίως από τις βιομηχανικά αναπτυγμένες χώρες, με στόχο την μείωση της εξάρτησης από τα συμβατικά καύσιμα με την χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας καθώς και την εξοικονόμηση ενέργειας. Ειδικά, για την εξοικονόμηση, αξίζει να αναφερθεί ότι περίπου το 50% της ενέργειας που χρησιμοποιείται παγκοσμίως απορρίπτεται στο περιβάλλον αχρησιμοποίητο. Είναι φανερό, πως η ανάγκη για μείωση του ποσοστού αυτού με τη χρήση ειδικά κατάλληλων συστημάτων είναι επιτακτική, είτε με την αύξηση του βαθμού απόδοσης είτε με την επαναχρησιμοποίηση της απορριφθείσας ενέργειας στο περιβάλλον. Τέτοιου είδους συστήματα είναι τα συστήματα συμπαραγωγής ενέργειας-θέρμανσης (ΣΗΘ/CHP) και τα τρι-παραγωγικά συστήματα (tri-generation systems) τα οποία είναι συνδυασμός μονάδων συμπαραγωγής και ψυκτικών συστημάτων.

### 2.1 Τι ονομάζουμε σύστημα συμπαραγωγής

Συμπαραγωγή ονομάζεται η ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρικής ή μηχανικής και θερμικής ενέργειας με τη χρήση ενός μόνο είδους καυσίμου [11]. Κύριο χαρακτηριστικό των συστημάτων συμπαραγωγής, είναι η εκμετάλλευση της θερμικής ενέργειας που απορρίπτεται στο περιβάλλον. Στους συμβατικούς σταθμούς μόνο το ένα τρίτο περίπου της ενέργειας καυσίμου μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Το υπόλοιπο ποσοστό χάνεται υπό μορφή θερμικών απωλειών, μέσω των κυκλωμάτων ψύξης (συμπυκνωτές, ψύκτες νερού, πύργοι ψύξης) και της αποβολής καυσαερίων. Με τη χρήση συστημάτων συμπαραγωγής, παρατηρείται αύξηση του βαθμού απόδοσης από 30-50% σε 80-90%, τουλάχιστον σε θεωρητικό επίπεδο [12]. Το γεγονός αυτό καθιστά την συμπαραγωγή την πιο αποτελεσματική μέθοδος μετατροπής ενέργειας. Αν υπάρχει πλεόνασμα ισχύος, αυτό διοχετεύεται στο δίκτυο ενώ στην αντίθετη περίπτωση, ισχύς αγοράζεται από αυτό ώστε να καλυφθούν οι απαιτήσεις της εγκατάστασης. Η ευρεία χρήση του έχει πολλές θετικές επιπτώσεις τόσο στην οικονομία και το περιβάλλον όσο και στην υπεύθυνη χρήση της ενέργειας καθώς και την ασφάλεια των αποθεμάτων. Λαμβάνοντας τα παραπάνω υπ' όψιν, καταλαβαίνουμε πόσο σημαντική είναι η διάδοση της χρήσης τέτοιων συστημάτων. Το παρακάτω σχήμα δείχνει απλουστευμένα τη λειτουργία μιας μονάδας συμπαραγωγής (ΣΗΘ).

## The Cogeneration Principle



Εικόνα 2.1. Λειτουργία μονάδας συμπαραγωγής

### 2.2 Τα πλεονεκτήματα των συστημάτων συμπαραγωγής

- Μεγαλύτερη εκμετάλλευση της ενέργειας, επιτυγχάνοντας μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης του συστήματος ΣΗΘ.
- Ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τα παραγόμενα καυσαέρια ιδιαίτερα των σωματιδίων του CO<sub>2</sub> που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.
- Σε περιπτώσεις παραγωγής βιοαερίου από αγροτικές καλλιέργειες το παραγόμενο βιοαέριο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ΣΗΘ παράγοντας ηλεκτρική / θερμική ενέργεια, με τον τρόπο αυτό δεν επιβαρύνεται το περιβάλλον.
- Με την εφαρμογή του συστήματος ΣΗΘ στην βιομηχανία έχουμε τεράστια εξοικονόμηση και αξιοποίηση της παραγόμενης θερμικής ενέργειας σε συστήματα τηλεθέρμανσης προς όφελος του κοινωνικού συνόλου.
- Εξασφαλίζει το δίκτυο παροχής ηλεκτρικής ενέργειας καλύπτοντας τους καταναλωτές από πιθανές διακοπές ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας, συμβάλλοντας στην αύξηση της αξιοπιστίας του δικτύου της ΔΕΗ.

Παράλληλα επιτυγχάνεται με το σύστημα της ΣΗΘ μείωση της κατανάλωσης των καυσίμων μέγιστη πρόκληση για την ενεργειακή πολιτική της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

- Περιορισμός απωλειών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας (τάξεως 8-10%), εφόσον τα συστήματα συμπαραγωγής βρίσκονται πιο κοντά στους καταναλωτές απ' ό,τι οι κεντρικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής.
- Δυνατότητα ανεξαρτητοποίησης από τις μεγάλες μονάδες παραγωγής ενέργειας που χρησιμοποιούν συμβατικά καύσιμα με τεράστιες επιπτώσεις στην Εθνική οικονομία και στο περιβάλλον. Η ΣΗΘ είναι το καλύτερο εργαλείο για την απελευθέρωση της ενεργειακής αγοράς.
- Απλή αλλά υψηλής ποιότητας κατασκευή, χωρίς κινούμενα μέρη, έχοντας έτσι χαμηλό κόστος συντήρησης και μεγάλα διαστήματα μεταξύ των γενικών επισκευών.
- Κατά τις περιόδους ψύχους, η θερμότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κάλυψη των αναγκών θέρμανσης.
- Η συμπαραγωγή μειώνει το σύνολο των δαπανών για εισαγόμενα καύσιμα, επιδρώντας θετικά στην εθνική οικονομία.

### 2.3 Εξέλιξη της συμπαραγωγής

Στα τέλη του 19<sup>ου</sup> και στις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα, ο ατμός ήταν η κύρια πηγή παραγωγής μηχανικής ενέργειας. Ωστόσο, καθώς με τις καινούργιες τεχνολογίες ο ηλεκτρισμός έγινε ευκολότερα διαχειρίσιμος, εξαπλώθηκε η ιδέα της συμπαραγωγής ατμού και ηλεκτρισμού με την ανάπτυξη νέων συστημάτων. Οι περισσότερες βιομηχανίες τότε, στην Ευρώπη και στις Η.Π.Α., παρήγαγαν με δικές τους μονάδες την απαιτούμενη ενέργεια με τη χρήση ατμοστρόβιλου-λέβητα και τη χρήση άνθρακα ως καύσιμο. Ενδεικτικό είναι το γεγονός πως στις Η.Π.Α. ποσοστό μεγαλύτερο του μισού των βιομηχανιών (58%) εκείνη την περίοδο, προερχόταν από μονάδες συμπαραγωγής [13]. Με την πάροδο του χρόνου όμως, οι βιομηχανικές εγκαταστάσεις εγκατέλειψαν την παραγωγή ενέργειας μέσω συμπαραγωγής. Η εγκατάλειψη των συστημάτων συμπαραγωγής, επήλθε εξαιτίας κυρίως δύο λόγων:

- Η ανάπτυξη τεχνολογιών γρήγορης μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας από μεγάλες κεντρικές μονάδες παραγωγής ενέργειας

- Η διαθεσιμότητα υγρών καυσίμων και οι πολύ χαμηλές τιμές αυτών

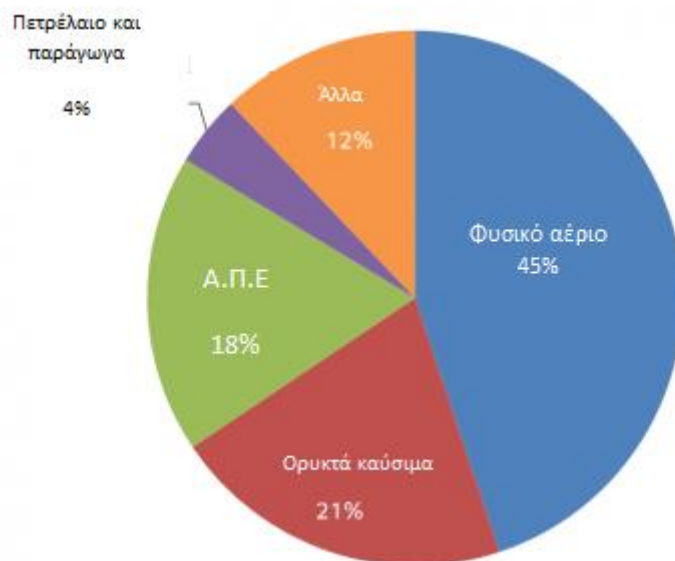
Η συμπαραγωγή συνέχισε να είναι αποδοτική και οικονομική μόνο σε βιομηχανίες που είχαν μεγάλες απαιτήσεις ατμού, μεγάλο συντελεστή πληρότητας και κατείχαν «καθαρά» καύσιμα που μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στο σύστημα συμπαραγωγής. Οι παράγοντες αυτοί οδήγησαν στην εκτεταμένη χρήση της συμπαραγωγής στις βιομηχανίες χαρτιού, χημικών προϊόντων, διύλισης και βιομηχανίες σιδήρου και χάλυβα, οι οποίες παραμένουν ακόμα και σήμερα από τους μεγαλύτερους λειτουργούς μονάδων συμπαραγωγής.

Καθώς οι εταιρείες κοινής ωφέλειας εξελίχθηκαν στην παραγωγή ηλεκτρισμού, έγιναν καλύτεροι και στην προστασία των αγορών τους. Απαγόρευαν την αγορά ηλεκτρισμού από συμπαραγωγή και χρέωναν πολύ ακριβά την τροφοδότηση εταιρειών συμπαραγωγής για εφεδρική ισχύ [14]. Αναπόφευκτα, το ποσοστό της παραγωγής μηχανικής ενέργειας από συμπαραγωγικά συστήματα στις ΗΠΑ έπεσε αισθητά στο 15% τη δεκαετία του 1950. Η αύξηση του ποσοστού αυτού και η στροφή προς τη συμπαραγωγή ήρθε το 1973 με την ενεργειακή κρίση. Το 1978 η κυβέρνηση των Η.Π.Α. επέτρεψε τη διασύνδεση των μονάδων συμπαραγωγής με το εθνικό δίκτυο έχοντας την δυνατότητα πλέον να αγοράζουν και να πουλούν ενέργεια [15]. Το ποσοστό παραγόμενης ενέργειας από τέτοιες μονάδες αυξήθηκε 350% σε διάστημα 15 ετών, από 10 GW το 1981 σε 46 GW το 1996. Οι βελτιώσεις και εξελίξεις συνεχίζονται και νέες τεχνικές αναπτύσσονται και δοκιμάζονται, αλλά ήδη η συμπαραγωγή έχει φθάσει σε επίπεδο ωριμότητας με αποδεδειγμένη αποδοτικότητα και αξιοπιστία.

## 2.4 Χρησιμοποιούμενα καύσιμα στις μονάδες συμπαραγωγής

Το είδος καυσίμου που χρησιμοποιείται στη συμπαραγωγή εξαρτάται από την τεχνολογία της εκάστοτε μονάδας [16].

- Ορυκτά καύσιμα όπως άνθρακας, φυσικό αέριο κ.α.
- Ανανεώσιμα καύσιμα, όπως τα βιοκαύσιμα που προέρχονται από τη βιομάζα
- Γεωθερμία
- Υδρογόνο



Εικόνα 2.2 Ποσοστά καυσίμων σε συστήματα συμπαραγωγής στην Ε.Ε.

## 2.5 Προϋπόθεση για να είναι η συμπαραγωγή φιλική προς το περιβάλλον

Τα συμπαραγωγικά συστήματα αποδίδουν καλύτερα από τους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό δε σημαίνει όμως πως έχει και λιγότερες επιπτώσεις προς το περιβάλλον. Παρακάτω γίνεται μια μελέτη [27], για το ποια είναι η προϋπόθεση σύμφωνα με την οποία τα συστήματα συμπαραγωγής είναι φιλικότερα προς το περιβάλλον συγκριτικά με τους συμβατικούς σταθμούς ενέργειας.

Μέσω της συμπαραγωγής, παράγεται ηλεκτρική ενέργεια ( $W$ ) και θερμότητα ( $Q$ ) από αρχική ενέργεια  $Q_p$ . Επομένως ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης  $n_{el}$  και ο ολικός  $n_g$  είναι:

- $n_{el} = \frac{W}{Q_p}$
- $n_g = \frac{W+Q}{Q_p}$

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όπου  $Q_p$  συμβολίζονται οι εκπομπές  $CO_2$  στο περιβάλλον και με  $A_f$ , οι εκπομπές  $CO_2$  ανα  $KWh$  καυσίμου, είναι:

$$E_{cog} = Q_p A_f$$

Αν η ηλεκτρική ενέργεια και η χρήσιμη θερμότητα παράγονταν σε συμβατικούς σταθμούς, οι εκπομπές θα υπολογίζονταν ως εξής:

$$E_{conv} = W A_{el} + \frac{Q}{n_b} A_f$$

Όπου  $A_{el}$  οι εκπομπές CO<sub>2</sub> ανά KWh ηλεκτρικού ρεύματος και  $n_b$  ο βαθμός απόδοσης του καυστήρα.

Η αναλογία μεταξύ των δύο παραπάνω εκπομπών  $R$  είναι:

$$R = \frac{E_{conv}}{E_{cog}} = \frac{W A_{el} + \frac{Q}{n_b} A_f}{Q_p A_f} = n_{el} \frac{A_{el}}{A_f} + \frac{n_g - n_{el}}{n_b}$$

Επομένως, το ποσοστό μείωσης εκπομπών λόγω της χρήσης συμπαραγωγικών συστημάτων είναι:

$$\varepsilon = \frac{E_{conv} - E_{cog}}{E_{conv}} = 1 - \frac{E_{cog}}{E_{conv}} = 1 - R^{-1}$$

Είναι προφανές, πως για να είναι συμπαραγωγή περισσότερο φιλική προς το περιβάλλον συγκριτικά με τους υπάρχοντες σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει:

$$\varepsilon > 0 \text{ δηλαδή: } R > 1 \Rightarrow n_{el} \frac{A_{el}}{A_f} + \frac{n_g - n_{el}}{n_b} > 1 \Rightarrow \frac{A_{el}}{A_f} > \frac{1}{n_{el}} - \frac{n_g - n_{el}}{n_{el} n_b}$$

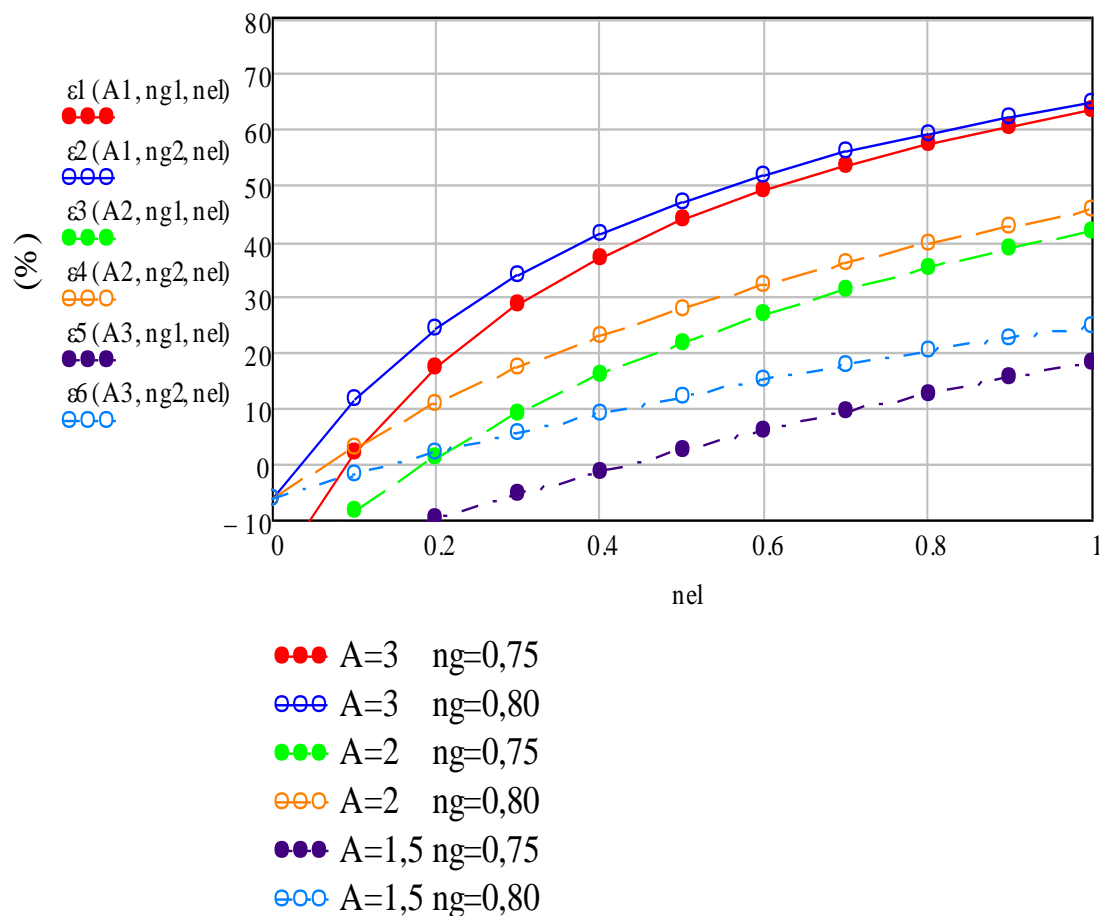
Οι βαθμοί απόδοσης  $n_{el}$  και  $n_b$  εξαρτώνται από την τεχνολογία που χρησιμοποιείται στη συμπαραγωγή. Στον παρακάτω πίνακα, εμφανίζονται τα αποτελέσματα εξοικονόμησης εκπομπών σε τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις με διαφορετικό βαθμό ηλεκτρικής απόδοσης  $n_{el}$ . Οι περιπτώσεις αυτές είναι: ένας



ατμοστρόβιλος (ST), ένας αεριοστρόβιλος (GT), μια μηχανή diesel (GE) και ένας συνδυασμένος κύκλος (CC). Οι μετρήσεις έγιναν με β.α.  $n_b = 0.9$  και  $\frac{A_{el}}{A_f} = 3$  με  $A_{el} = 0.6$  και  $A_f = 0.2 \text{ KgCO}_2 / \text{KWh}$ .

Σενάριο	$n_{el}$	$n_g$	R	$\varepsilon$ (%)
ST	0.15	0.75	1.11	10
GT	0.3	0.7	1.34	25
GE	0.4	0.75	1.58	37
CC	0.5	0.8	1.83	45

Το διάγραμμα που ακολουθεί, είναι ένα διάγραμμα  $\varepsilon - n_{el}$  για δύο τιμές του  $n_g$  και τρεις τιμές του  $\frac{A_{el}}{A_f}$ . Όπως φαίνεται, το  $\varepsilon$  αυξάνεται με την αύξηση του  $n_g$  καθώς και με αυτήν του  $n_{el}$  και  $\frac{A_{el}}{A_f}$ .



Εικόνα 2.3 Διάγραμμα  $\epsilon - n_{el}$

Ο όρος  $A_{el}/A_f$  σχετίζεται με τις εκπομπές  $CO_2$  εξαιτίας της ηλεκτρικής παραγωγής. Όταν ο όρος αυτός είναι υψηλός, αυτό η παραγωγή γίνεται με ορυκτά καύσιμα και με συστήματα παλιάς τεχνολογίας. Όταν η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται μόνο με τέτοια καύσιμα με βαθμό απόδοσης 0.33, τότε ο όρος αυτός λαμβάνει μια τιμή κοντά στο τρία. Αν η τεχνολογία που χρησιμοποιείται είναι πιο καινούργια με β.α κοντά στο 0.5, τότε λαμβάνει τιμές κοντά στο 2. Πρέπει να τονιστεί, πως η συμπαραγωγή συγκρίνεται μόνο με συμβατικούς σταθμούς που λειτουργούν με ορυκτά καύσιμα και όχι με υδροηλεκτρικούς σταθμούς ή σταθμούς πυρηνικής ενέργειας που είναι επικρατέστεροι.

## 2.6 Προϋπόθεση για να είναι η τριπαραγωγή φιλική προς το περιβάλλον

Τα συστήματα συμπαραγωγής είναι ιδανικά για θέρμανση χώρων, αλλά αυτή η ανάγκη υπάρχει μόνο το χειμώνα. Ακόμα, η χρήση κλιματιστικών το καλοκαίρι διαδίδεται ολοένα και περισσότερο τόσο στις ανεπτυγμένες χώρες όσο και σε αναπτυσσόμενες. Το πρόβλημα έγκειται στο γεγονός πως η ενέργεια που καταναλώνεται το καλοκαίρι λόγω των κλιματιστικών είναι πολύ περισσότερη από αυτήν για θέρμανση το χειμώνα. Η πολύ υψηλή ζήτηση για ενέργεια έχει ως αποτέλεσμα την συχνή αποσταθεροποίηση του ηλεκτρικού δικτύου όπως πολύ συχνά παρατηρείται. Επομένως, υπάρχουν δύο πλεονεκτήματα των τριπαραγωγικών συστημάτων: η ανακούφιση του ηλεκτρικού δικτύου σε περιπτώσεις υψηλής ζήτησης και η μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub>. Η μονάδα τριπαραγωγής παράγει ηλεκτρική ενέργεια (W) και θερμότητα (Q) για παραγωγή ψύξης (C) από ένα ποσό αρχικής ενέργεια (Q<sub>p</sub>).

$$n_{el} = \frac{W}{Q_p}$$

$$n_g = \frac{W + Q}{Q_p}$$

$$n_g^c = \frac{W + C}{Q_p} = \frac{W + QCOP_{abs}}{Q_p} = n_g + (n_g - n_{el})(COP_{abs} - 1)$$

$$COP_{abs} = \frac{C}{Q}$$

Όπου  $n_g$  και  $n_g^c$  οι συνολικοί βαθμοί απόδοσης, για Q και για ψύξη C αντίστοιχα, ενώ  $COP_{abs}$  είναι ο COP της μονάδας απορρόφησης.

Οι μόνες εκπομπές του τριπαραγωγικού συστήματος είναι αυτές του καυσίμου :

$$E_{trig} = Q_p A_f$$

Όπου  $A_f$ , οι εκπομπές CO<sub>2</sub> ανά kW καυσίμου.

Αν η  $W$  και  $C$  παράγονταν από συμβατικά μέσα, δηλαδή το  $W$  από το ηλεκτρικό δίκτυο και το  $C$  από ψύκτη συμπύεσης ατμού με ρεύμα, με COP ίσο με COP<sub>comp</sub>, οι έμμεσες εκπομπές CO<sub>2</sub> μόνο λόγω της κατανάλωσης ενέργειας, θα ήταν:

$$E_{conv}^{ind} = WA_{el} + \frac{C}{COP_{comp}} A_{el}$$

Το ποσοστό έμμεσων εκπομπών ανάμεσα στα συμβατικά μέσα και το σύστημα τριπαραγωγής είναι:

$$R_{trig}^{ind} = \frac{E_{conv}^{ind}}{E_{trig}} = \frac{WA_{el} + \frac{C}{COP_{comp}} A_{el}}{Q_p A_f} = n_{el} \frac{A_{el}}{A_f} + \frac{C}{COP_{comp} Q_p} \frac{A_{el}}{A_f}$$

Εισάγοντας τους όρους  $n_g$  και  $\beta = COP_{abs}/COP_{comp}$  η παραπάνω εξίσωση γίνεται:

$$R_{trig}^{ind} = [n_{el} + \beta(n_g - n_{el})] \frac{A_{el}}{A_f}$$

Το ποσοστό εξοικονόμησης εκπομπών CO<sub>2</sub> είναι:

$$\varepsilon = \frac{E_{conv}^{ind} - E_{trig}}{E_{conv}^{ind}} = 1 - \frac{E_{trig}}{E_{conv}^{ind}}$$

Η προϋπόθεση για να είναι η τριπαραγωγή φιλική προς το περιβάλλον είναι:

$$\varepsilon > 0 \Rightarrow 1 - R_{trig}^{ind}{}^{-1} > 0 \Rightarrow R_{trig}^{ind} > 1 \Rightarrow$$

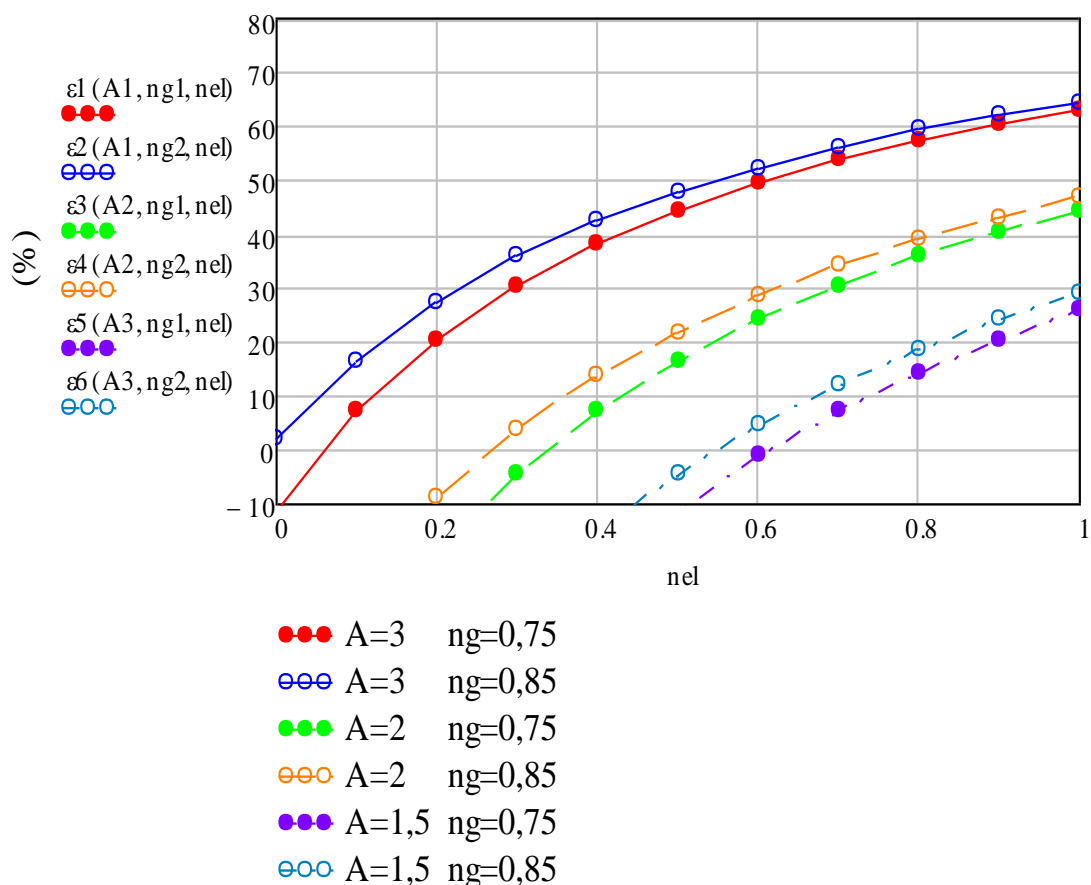
$$[n_{el} + \beta(n_g - n_{el})] \frac{A_{el}}{A_f} > 1 \Rightarrow$$

$$\frac{A_{el}}{A_f} > \frac{1}{n_{el} + \beta(n_g - n_{el})}$$

Για  $\frac{A_{el}}{A_f} = 3$  και  $\beta = 0.4$  (COP<sub>abs</sub> = 1,2 and COP<sub>comp</sub> = 0.3) και τέσσερις τιμές  $n_{el}$  προκύπτει ο παρακάτω πίνακας με τις αντίστοιχες τιμές εξοικονόμησης εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα.

Σενάριο	$n_{el}$	$n_g$	R	$\epsilon$ (%)
ST	0.15	0.75	1.17	15
GT	0.3	0.7	1.38	27
GE	0.4	0.75	1.62	38
CC	0.5	0.8	1.836	46

Όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα, υπάρχει μια τιμή του  $\frac{A_{el}}{A_f}$ , κάτω από την οποία τα τριπαραγωγικά συστήματα δεν είναι φιλικά προς το περιβάλλον.



Εικόνα 2.4 Διάγραμμα  $\epsilon - n_{el}$

Σημαντική μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> που κυμαίνονται από 25% έως 45% είναι δυνατή με τη χρήση κατάλληλων εγκαταστάσεων τριπαραγωγής. Αυτό σημαίνει επίσης ότι η αντικατάσταση των απαρχαιωμένων σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στο άμεσο μέλλον, θα συμβάλει τα μέγιστα στην εξοικονόμηση εκπομπών CO<sub>2</sub>. Το συγκεκριμένο γεγονός θα είναι πολύ πιο σημαντικό σε χώρες όπου η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι σε υψηλό επίπεδο εκπομπών CO<sub>2</sub>. Ιδανική περίπτωση θα ήταν η χρήση βιοκαυσίμων τα οποία δεν επιδρούν στην παγκόσμια υπερθέρμανση, όπως αναλύεται εκτενέστερα στην επόμενη ενότητα.

## 2.7 Χρήση βιοκαυσίμων σε μονάδες συμπαραγωγής

Ως βιοκαύσιμα χαρακτηρίζονται [18] όλα τα στερεά, υγρά και αέρια καύσιμα που προέρχονται από τη βιομάζα. Τα κυριότερα είναι:

- Το βιοντίζελ που παράγεται από τα φυτικά έλαια και τα ζωικά λίπη. Αποτελεί ένα άριστο υποκατάστατο του συμβατικού ντίζελ και μπορεί να χρησιμοποιείται αυτούσιο ή σε μίγματα στους ήδη υπάρχοντες πετρελαιοκινητήρες.
- Η βιοιθανόλη που παράγεται από σακχαρούχα, κυτταρινούχα και αμυλούχα φυτά και μπορεί να χρησιμοποιείται σε μίγματα με τη βενζίνη.
- Το βιοαέριο που παράγεται από τα οργανικά αγροτοβιομηχανικά και άλλα απόβλητα και υπολείμματα.
- Τα πέλλετς (pellets) και οι μπρικέττες (briquettes), που παράγονται από υπολείμματα γεωργικών καλλιεργειών και επεξεργασίας των γεωργικών προϊόντων.

Βιομάζα είναι το κλάσμα προϊόντων, αποβλήτων και κατάλοιπων που προέρχονται από αγροτικές δραστηριότητες, τις δασοκομικές και τις συναφείς βιομηχανικές δραστηριότητες. Τα βιοκαύσιμα, όντας προϊόντα ανανεώσιμων πηγών είναι καθαρά, βιοαποικοδομήσιμα μη τοξικά καύσιμα, δεν περιέχουν αρωματικές ενώσεις και οι εκπομπές των ρυπαντών οξειδίων του θείου, μονοξειδίου του άνθρακα και άκαυστων υδρογονανθράκων που παράγονται με την καύση, είναι πολύ μικρές. Αυτό φάνηκε και από τη σύγκριση μιας μονάδας παραγωγής ενέργειας συνδυασμένου κύκλου που λειτουργούσε με βιοκαύσιμα και μιας μονάδας που λειτουργούσε με φυσικό αέριο. Από τη σύγκριση, το δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη (GWP) της πρώτης μονάδας είναι κατά πολύ χαμηλότερο της δεύτερης. Πιο συγκεκριμένα, η μονάδα που λειτουργούσε με βιοκαύσιμα παρήγαγε 0,05 kg CO<sub>2</sub>/kWhel ενώ η μονάδα φυσικού αερίου 0,5 kg CO<sub>2</sub>/kWhel. Πρέπει να αναφερθεί, πως μια συμβατική μονάδα παραγωγής ενέργειας που λειτουργούσε με υπολείμματα βιομάζας είχε αρνητικό GWP -0,41 kg CO<sub>2</sub>/kWhel. Η αύξηση της χρήσης βιοκαυσίμων είναι επιτακτική, καθώς συμβάλλουν στη μείωση των εκπομπών επικίνδυνων για την υγεία ρυπαντών, υπεύθυνων για το φαινόμενο του θερμοκηπίου, μειώνουν την εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα και δημιουργούν νέες θέσεις εργασίας.

### **2.7.1 Συνοπτική παρουσίαση μιας συμπαραγωγικής μονάδας βιοαερίου**

Τα υπολείμματα από τις καλλιέργειες συλλέγονται δίπλα στην μονάδα συμπαραγωγής και τοποθετούνται στο χωνευτήρι όπου λαμβάνει χώρα η διαδικασία αναερόβιας χώνευσης [19]. Η διαδικασία αυτή αποσυνθέτει την οργανική ύλη στα απλούστερα στοιχεία. Έτσι παράγεται βιοαέριο που αποτελείται κυρίως από μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα. Μετά από διάστημα περίπου 60 ημερών η ύλη μεταφέρεται μέσω αντλίας σε ένα νέο χωνευτήρι όπου συνεχίζεται η παραγωγή βιοαερίου. Το παραγόμενο βιοαέριο αποθηκεύεται αρχικά σε ένα σιλό

και στη συνέχεια καίγεται στην μονάδα συμπαραγωγής. Η μονάδα έχει συνήθως δύο κινητήρες. Ο πρώτος λειτουργεί μόνιμα ενώ ο δεύτερος όταν απαιτείται μέγιστη παραγωγή ή όταν το σιλό είναι γεμάτο.

Η χρήση βιοαερίου σε μονάδες συμπαραγωγής έχει μεγάλα οφέλη για το περιβάλλον. Τα υπολείμματα βιομάζας είναι ανανεώσιμες πηγές. Οι εκπομπές CO<sub>2</sub> από τέτοιου είδους μονάδες, δεν λαμβάνονται υπόψη καθώς θεωρούνται ήδη δεσμευμένες από την ατμόσφαιρα. Ακόμα, αν η βιομάζα αυτή διαχειριστεί με πιο συμβατικό τρόπο, όπως για παράδειγμα μέσω της διεργασίας της κομποστοποίησης, οι εκπομπές μεθανίου CH<sub>4</sub> θα επιβαρύνουν κατά πολύ την υπερθέρμανση του πλανήτη, καθώς η χημική αυτή ένωση έχει υψηλό GWP (GWP<sub>ch4</sub> = 21). Οι εκπομπές μεθανίου αποφεύγονται με τη χρήση των βιοκαυσίμων σε μονάδες συμπαραγωγής ή τριπαραγωγής, καθώς με την παραγωγή βιοαερίου μέσω της διαδικασίας της χώνεψης, μειώνεται το ποσοστό μεθανίου ενώ αντίστοιχα αυξάνεται το ποσοστό εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα που έχει ως αποτέλεσμα αρνητικό δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη καθώς το CH<sub>4</sub> είναι 21 φορές υψηλότερο από του CO<sub>2</sub>.

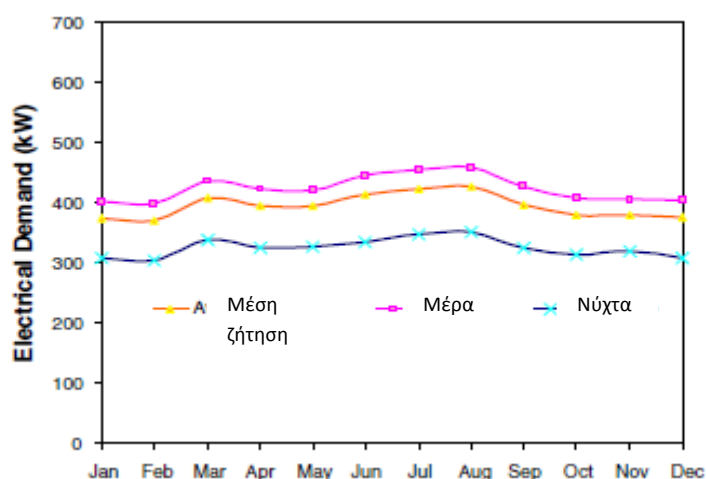
## 2.8 Η τεχνολογία τριπαραγωγής στη βιομηχανία τροφίμων

Η βιομηχανία τροφίμων [20], τόσο στον τομέα της παραγωγής καθώς και στον τομέα του εμπορίου έχει ανάγκη από ηλεκτρική ενέργεια, θέρμανση και ψύξη. Το ηλεκτρικό ρεύμα που απαιτείται για να καλύψει τις ενεργειακές της ανάγκες, το προμηθεύεται από το εθνικό δίκτυο και εξαιτίας του χαμηλού ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης του δικτύου και των ενδιάμεσων απωλειών, ο συνολικός βαθμός απόδοσης είναι πολύ μικρός. Στις ανεπτυγμένες χώρες, η βιομηχανία τροφίμων αποτελεί μια από τις πιο ενεργοβόρες βιομηχανίες ανεξαρτήτως προϊόντος και έχουν μεγάλες επιπτώσεις στο περιβάλλον λόγω εκπομπών CO<sub>2</sub> στις μονάδες παραγωγής, ψυκτικών μέσων που χρησιμοποιούνται στην ψύξη των τροφίμων και οργανικών αποβλήτων. Ακόμα, το λιανικό εμπόριο όπως τα σούπερ μάρκετ, καταναλώνουν μεγάλες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας καταλαμβάνοντας το 3-5% της συνολικής κατανάλωσης μιας χώρας. Για αυτούς τους λόγους, είναι επιθυμητή αν όχι αναγκαία, η δημιουργία τριπαραγωγικών μονάδων στις βιομηχανικές εγκαταστάσεις τροφίμων για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος θέρμανσης και ψύξης.

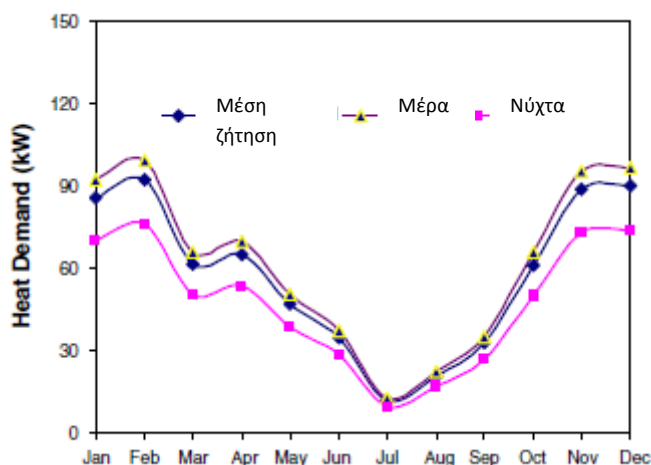
Η μηνιαία ενεργειακή κατανάλωση καθώς και η ζήτηση θέρμανση των μονάδων λιανικού εμπορίου δίνονται στα παρακάτω διαγράμματα. Όπως φαίνεται, η κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος παρουσιάζει μια μικρή αύξηση τους θερινούς



μήνες. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της αύξησης της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος που αυξάνει το φορτίο στην ψυκτική μονάδα λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας συμπύκνωσης. Από την άλλη, από το διάγραμμα της ζήτησης για θέρμανση, παρατηρείται σημαντική μείωση το καλοκαίρι λόγω της μειωμένης ανάγκης για θέρμανση των χώρων.



Εικόνα 2.5 Διάγραμμα μηνιαίας ενεργειακής ζήτησης μονάδων λιανικού εμπορίου



Εικόνα 2.6 Διάγραμμα μηνιαίας ζήτησης για θέρμανση μονάδων λιανικού εμπορίου

Παρακάτω γίνεται μια σύγκριση των εκπομπών CO<sub>2</sub> μια συμβατικής μονάδας που λειτουργεί με φυσικό αέριο και μιας τριπαραγωγικής μονάδας, ενώ στη συνέχεια παρουσιάζεται μια οικονομική μελέτη μεταξύ μιας συμβατικής μονάδας και μια μονάδας τριπαραγωγής.

Εκπομπές CO <sub>2</sub>	
Ηλ. Ρεύμα εθνικού δικτύου	0.00043 t/kWh
Φυσικό αέριο	0.00019 t/kWh
Συμβατική μονάδα	1601 t/έτος
Τριπαραγωγική μονάδα	1522 t/έτος
Μείωση εκπομπών	48.9 t/έτος

**Εικόνα 2.7** Σύγκριση εκπομπών CO<sub>2</sub>

Όπως φαίνεται, με την λειτουργία της μονάδας τριπαραγωγής, η επιβάρυνση του περιβάλλοντος μειώνεται κατά 48.9 τόνους CO<sub>2</sub> το χρόνο, νούμερο αρκετά μεγάλο το οποίο δείχνει το πόσο φιλική με το περιβάλλον είναι η τεχνολογία της τριπαραγωγής.

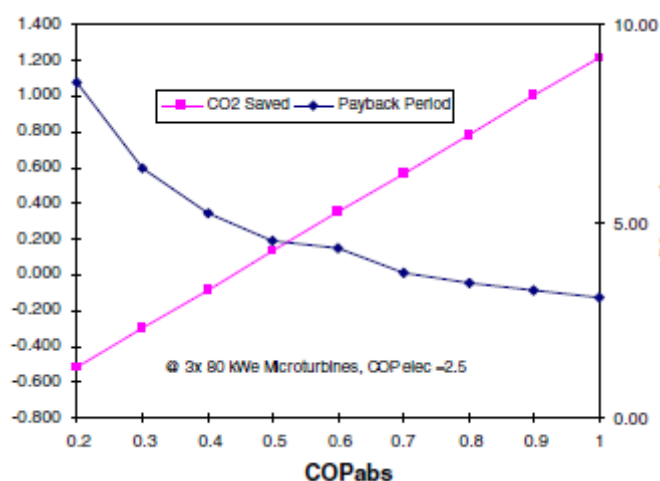
	Ποσό (€)
<b>Συμβατική μονάδα</b>	
Ετήσιο ηλεκτρικό κόστος	377.521,27
Ετήσιο κόστος φυσικού αερίου	22.084,81
Ετήσια πάγια τέλη	1.641,15
Ετήσιο κόστος διάθεσης	1.641,15
Ετήσια κόστη λειτουργίας και συντήρησης ψυκτών	1.641,15
<b>Σύνολο</b>	<b>404.529,53</b>
<b>Τριπαραγωγική μονάδα</b>	
Ετήσιο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο	57.894,25
Ετήσιο κόστος φυσικού αερίου	245.015,05
Ετήσια πάγια τέλη	1.641,15
Ετήσιο κόστος διαθεσης	4.074,07
Ετήσιο κόστος λειτουργίας και συντήρησης της μονάδας	32.396,28
Ετήσια ηλεκτρική ενέργεια που πωλείται στο δίκτυο	-11.518,13
<b>Σύνολο</b>	<b>329.502,68</b>
Ετήσια εξοικονόμηση	116.967,67
Επένδυση	527.523,88
<b>Περίοδος αποπληρωμής</b>	<b>4,51 χρόνια</b>

**Εικόνα 2.1** Οικονομική μελέτη μεταξύ μιας συμβατικής μονάδας και μια μονάδας τριπαραγωγής.

Σύμφωνα με την παραπάνω οικονομική μελέτη η αντικατάσταση της συμβατικής μονάδας φυσικού αερίου με μια μονάδα τριπαραγωγής εξοικονομεί 116.967,67€ ετησίως και η περίοδος αποπληρωμής είναι 4,5 χρόνια.

Οι οικονομικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις των τριπαραγωγικών συστημάτων είναι συνάρτηση πολλών παραγόντων, το πιο σημαντικό είναι το σχετικό κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας και του φυσικού αερίου, το κόστος κεφαλαίου των εγκαταστάσεων, η απόδοση της μονάδας, και η COP της μονάδας απορρόφησης.

Το διάγραμμα 3 δείχνει τις εκπομπές CO<sub>2</sub> συναρτήσει του COP του συστήματος απορρόφησης-ψύξης. Καθώς ο COP<sub>abs</sub> αυξάνεται από 0.5 έως 1.0, ο χρόνος αποπληρωμής μειώνεται από 4,5 χρόνια σε 3, ενώ οι εκπομπές μειώνονται κατά 1,4 τόνο την ημέρα από 0,2.

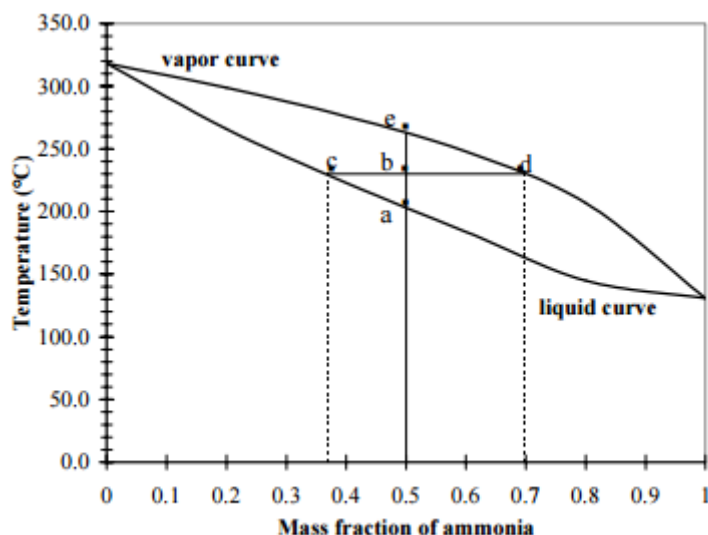


Εικόνα 2.2 Εκπομπές CO<sub>2</sub> συναρτήσει του COP

## Κεφάλαιο 3: Εργαζόμενο μέσο

Όπως έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενη ενότητα, η ζήτηση για ενέργεια θα αυξηθεί σημαντικά στο μέλλον ενώ οι πηγές ενέργειας, τουλάχιστον οι μη ανανεώσιμες, θα μειωθούν. Είναι επομένως απαραίτητη η καλύτερη μελέτη και η εξεύρεση λύσεων, με σκοπό την όσο την δυνατόν καλύτερη διαχείριση των πηγών ενέργειας η οποία συνεπάγεται την αύξηση του βαθμού απόδοσης των σταθμών παραγωγής ενέργειας. Με τον τρόπο αυτό, θα μειωθούν οι αρνητικές επιπτώσεις προς το περιβάλλον ενώ θα υπάρξουν και πολλαπλά οικονομικά οφέλη. Προς αυτήν την κατεύθυνση οδηγεί και η χρήση ενός κατάλληλου εργαζόμενου μέσου. Τα τελευταία χρόνια η χρήση του μίγματος αμμωνίας-νερού ως ψυκτικού μέσου, κερδίζει συνεχώς έδαφος και βρίσκει εφαρμογή σε όλο και περισσότερες εφαρμογές, ειδικά και μετά την σταδιακή κατάργηση των χλωροφθορανθράκων (CFCs) εξαιτίας των επιπτώσεών τους στο στρώμα του όζοντος.

Το μίγμα αμμωνίας-νερού παρουσιάζει κάποια πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλα ψυκτικά μέσα. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα του διαλύματος [21] είναι ότι το νερό μοιάζει αρκετά με την αμμωνία και είναι διαλυτά μεταξύ τους. Επίσης, το διάλυμα είναι εξαιρετικά σταθερό επειδή έχουν παρόμοιο μοριακό βάρος όπως φαίνεται και από τον πίνακα 1, και λειτουργεί καλά με πολλά υλικά εκτός του χαλκού και των κραμάτων του που παθαίνουν διάβρωση λόγω της παρουσίας αμμωνίας. Ακόμη, [22] λόγω του ότι είναι μίγμα δύο ουσιών βράζει και συμπυκνώνεται, υπό σταθερή πίεση, σε αυξημένη θερμοκρασία και μειωμένη θερμοκρασία αντίστοιχα σε αντίθεση με τα ψυκτικά υγρά ενός συστατικού που οι θερμοκρασίες βρασμού και συμπύκνωσης είναι σταθερές. Είναι δηλαδή μη-αζεοτροπικό μίγμα. Το χαρακτηριστικό των μη-αζεοτροπικών μιγμάτων είναι ότι η σύνθεση και θερμοκρασία αλλάζει κατά τη διάρκεια βρασμού για όλες τις πιθανές συνθέσεις του μίγματος. Στο παρακάτω διάγραμμα [23] περιγράφεται η διαδικασία βρασμού του μίγματος. Όταν ξεκινάει ο βρασμός, τα συστατικά του μίγματος αρχίζουν και διαχωρίζονται (σημείο a). Η περιεκτικότητα του ατμού σε αμμωνία είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτήν στο υγρό. Καθώς ο βρασμός συνεχίζεται, η θερμοκρασία αυξάνεται. Στο σημείο b, στους 230 °C, η περιεκτικότητα του υγρού σε αμμωνία είναι 0,37% (σημείο c) ενώ στον ατμό 0,7% (σημείο d). Στο τέλος της διαδικασίας βρασμού (σημείο e), το μίγμα έχει εξατμιστεί πλήρως και η κατά βάρος περιεκτικότητα του ατμού σε αμμωνία είναι 0,5.



**Εικόνα 3.1** Διάγραμμα κατά βάρος περιεκτικότητας αμμωνίας στη διαδικασία βρασμού

Η αμμωνία και το νερό είναι δύο ισχυρά πολικές ουσίες και έχουν την ίδια σχεδόν μοριακή δομή και μάζα. Παρά τις πολλές ομοιότητες, έχουν διαφορετικά σημεία βρασμού και κρίσιμα σημεία.

Ιδιότητα	Αμμωνία	Νερό
Μοριακό βάρος (g/mol)	17,031	18,015
Σημείο βρασμού (0,101 Μρα), (°C)	-33,4	100
Κρίσιμη θερμοκρασία (°C)	132,3	374,1
Κρίσιμη πίεση (Μρα)	11,35	22,12

**Εικόνα 3.2** Θερμοδυναμικές ιδιότητες της αμμωνίας και του νερού

Κύκλοι ισχύος που λειτουργούν με το μίγμα αμμωνία-νερό ως εργαζόμενο μέσο είναι ιδανικοί για χρήση της απορριπτόμενης ενέργειας. Μπορούν να δώσουν έως και 32% περισσότερη ισχύ στην παραγωγή θερμότητας από βιομηχανικά απόβλητα σε σύγκριση με έναν κύκλο Rankine με χρήση ατμού. Παρόλα αυτά όμως, ενδελεχείς μελέτες έδειξαν πάνω σε έναν τριπαραγωγικό κύκλο και έναν κύκλο Rankine, πως η απόδοση στον δεύτερο κύκλο είναι μεγαλύτερη. Αυτό οφείλεται κυρίως στις μεγάλες απώλειες της ελεύθερης ενθαλπίας στο λέβητα.

## Κεφάλαιο 4: Μέγιστος βαθμός απόδοσης Τριπαραγωγικών συστημάτων

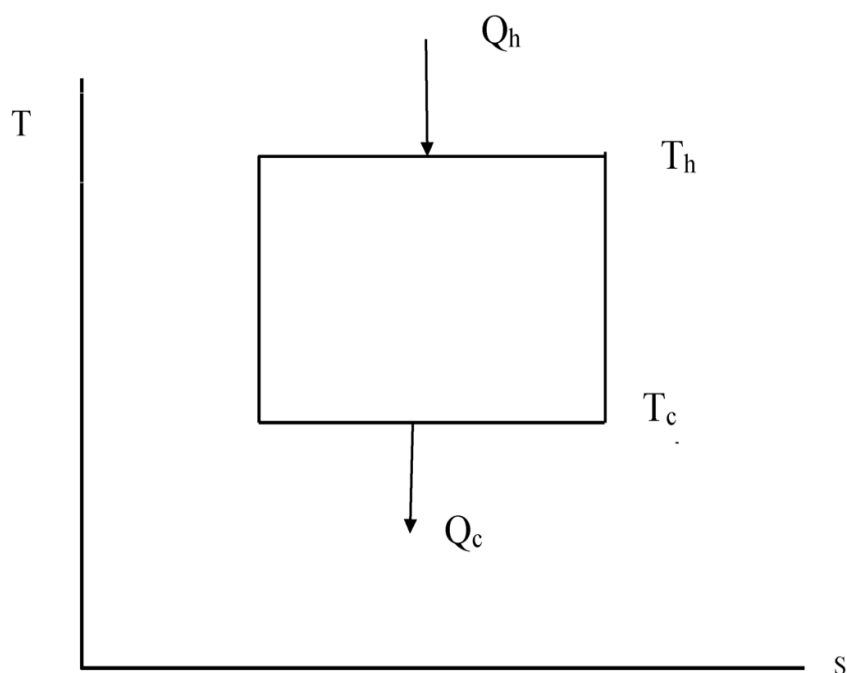
### 4.1 Ονοματολογία

<u>Σύμβολο</u>	<u>Μονάδα</u>	<u>Σημασία</u>
eff	-	βαθμός θερμικής απόδοσης
eff <sub>p</sub>	-	βαθμός απόδοσης σε συνθήκες μέγιστης ισχύς
COP	-	συντελεστής θερμικής απόδοσης
Q	J	διάδοση θερμότητας
Q <sub>h</sub>	J	θερμότητα εισόδου
Q <sub>R</sub>	J	θερμότητα εξόδου
R	J/KgK	ειδικός συντελεστής αερίου
T	K	θερμοκρασία
ΔT	K	θερμοκρασιακή διαφορά
S	J/KgK	εντροπία
V <sub>r</sub>	-	αναλογία όγκων
EU <sub>F</sub>	-	συντελεστής φορτίου
h	W/m <sup>2</sup> K	συντελεστής μεταφοράς θερμότητας
P	W	ισχύς εξόδου
W	W	έργο
θ	W/A	hA
<b><u>Δείκτες</u></b>		
H,h	-	υψηλή θερμοκρασία
C,c	-	χαμηλή θερμοκρασία
I,l	-	ενδιάμεση θερμοκρασία
R,r	-	θερμοκρασία ψύξης

Όπου με κεφαλαία οι θερμοκρασίες περιβάλλοντος και με μικρά, οι θερμοκρασίες στις ισόθερμες μεταβολές του κύκλου.

## 4.2 Κύκλος Carnot

Ο κύκλος Carnot είναι ένας θεωρητικός θερμοδυναμικός κύκλος που προτάθηκε το 1824 από τον Nicolas Léonard Sadi Carnot και έθεσε το ανώτατο όριο απόδοσης των υπόλοιπων κύκλων. Αποτελείται από δύο ισοθερμοκρασιακές και δύο αδιαβατικές διαδικασίες.

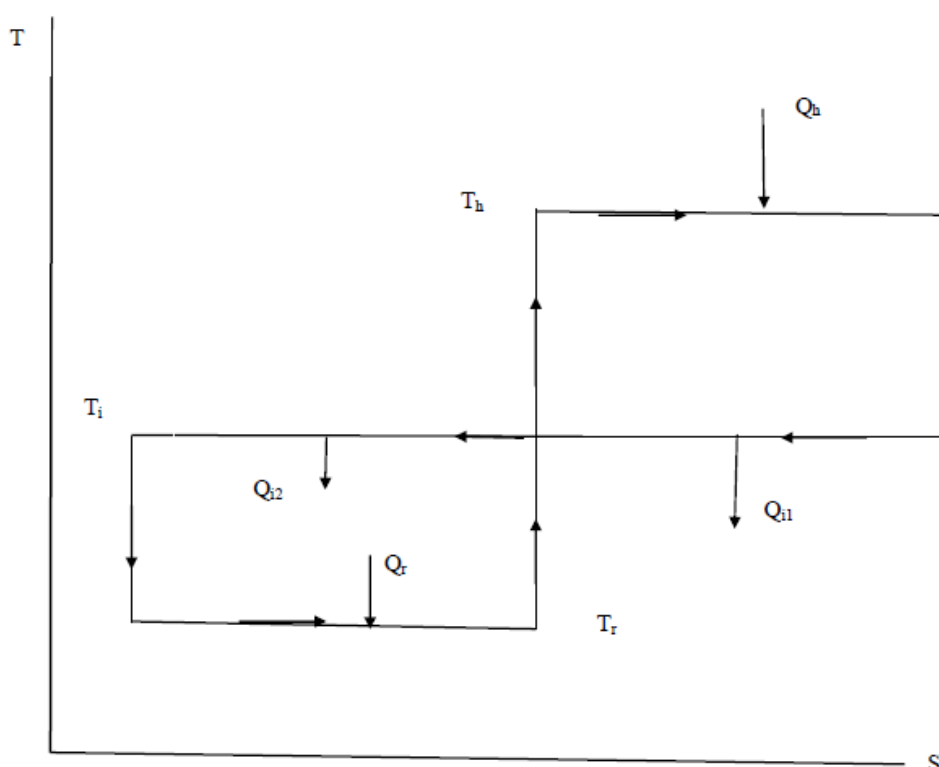


Εικόνα 4.1 Κύκλος Carnot σε T-s

- 1-2 Ισόθερμη εκτόνωση σε θερμοκρασία  $T_h$
- 2-3 Αδιαβατική εκτόνωση από θερμοκρασία  $T_h$  σε θερμοκρασία  $T_c$
- 3-4 Ισόθερμη συμπίεση σε θερμοκρασία  $T_c$
- 4-1 Αδιαβατική συμπίεση από θερμοκρασία  $T_c$  σε θερμοκρασία  $T_h$

### 4.1.1 Κύκλος Carnot τριπαραγωγικών συστημάτων

Ο κύκλος Carnot που χρησιμοποιείται στα τριπαραγωγικά συστήματα φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα. Αποτελείται από δύο κύκλους Carnot, έναν κύκλο παραγωγής μηχανικού έργου και έναν ψυκτικό κύκλο, οι οποίοι συνδέονται με τέτοιο τρόπο ώστε να έχουν μια κοινή θερμοκρασία  $T_i$ .



Εικόνα 4.2 Τριπαραγωγικός κύκλος Carnot σε T-s

Σύμφωνα με το 1<sup>ο</sup> θερμοδυναμικό αξίωμα, ο βαθμός απόδοσης αυτού του συνδυασμένου κύκλου θα είναι ίσος με:

$$eff = \frac{Q_h + Q_r - Q_{i1} - Q_{i2}}{Q_h + Q_r} \quad (1)$$



Ως γνωστόν, κατά την ισοθερμοκρασιακή μεταβολή, το ποσό της μεταφερόμενης ενέργειας ισούται με το έργο καθώς δεν υπάρχει αλλαγή στην ενέργεια του εργαζόμενου ρευστού:

$$W = m \int_{V_1}^{V_2} P dv = mRT \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \quad (2)$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (1) την (2) και θεωρώντας τις αναλογίες όγκου  $V_1, V_2$  ίσες, ο βαθμός απόδοσης υπολογίζεται από τον τύπο:

$$eff = \frac{T_h + T_r - 2T_i}{T_h + T_r} = 1 - \frac{T_i}{\frac{T_h + T_r}{2}} \quad (3)$$

Από την παραπάνω εξίσωση φαίνεται πόσο μεγάλο ρόλο παίζει η μέση θερμοκρασία. Στον τριπαραγωγικό κύκλο που μελετάται, η μέση θερμοκρασία θέτει το άνω όριο στην ενδιάμεση θερμοκρασία  $T_i$ , πάνω από το οποίο δεν παράγεται άλλο έργο, όπως φαίνεται και από την εξίσωση (3). Ως γνωστόν, σκοπός της τριπαραγωγικής μονάδας είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, θέρμανση και ψύξη, επομένως το  $Q_r$  είναι επιθυμητό προϊόν. Το συνολικό προϊόν του συνδυασμένου κύκλου Stirling είναι:

$$\Omega\text{φελιμο έργο} = W_{net} + Q_{ref} + Q_{heating} \quad (4)$$

Αντικαθιστώντας τους όρους του δεξιού μέρους με όρους από το διάγραμμα 2 και σύμφωνα με τον 1<sup>ο</sup> θερμοδυναμικό νόμο η σχέση γίνεται:

$$W_{net} = Q_h - Q_{i1} - Q_{i2} + Q_r \quad (5)$$

$$Q_{ref} = Q_r \quad (6)$$

$$Q_{heating} = Q_{i1} + Q_{i2} \quad (7)$$

Οπότε τελικά, η σχέση (4) γίνεται:

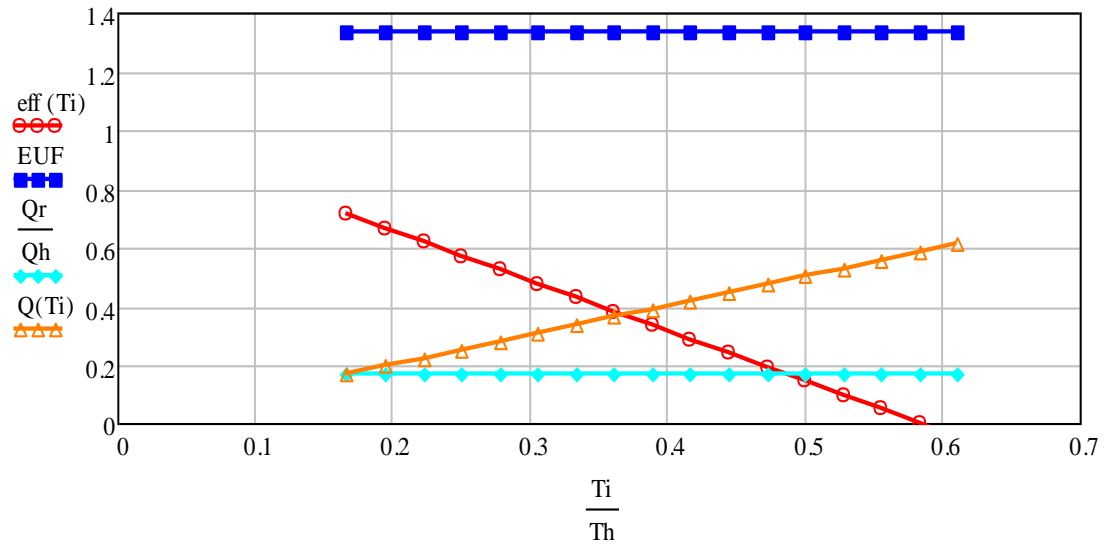
$$\Omega\text{φέλιμο έργο} = Q_h - Q_{i1} - Q_{i2} + Q_r + Q_{i1} + Q_{i2} + Q_r = Q_h + 2Q_r$$

Για να υπολογίσουμε την απόδοση ενός θερμοδυναμικού κύκλου διαιρούμε την χρήσιμη παραγόμενη ενέργεια προς την αρχική εισερχόμενη. Έτσι, υπολογίζουμε τον βαθμό απόδοσης ή το συντελεστή θερμικής απόδοσης. Για τον τριπαραγωγικό κύκλο, έχουν προταθεί διάφοροι τρόποι υπολογισμού της επίδοσης, όπως για παράδειγμα ο EUF (Energy Utilisation Factor) [24] και ο EPT (Energetic Performance of Trigeneration) [25]. Στη συγκεκριμένη εργασία επιλέχθηκε ο EUF του Horlock.

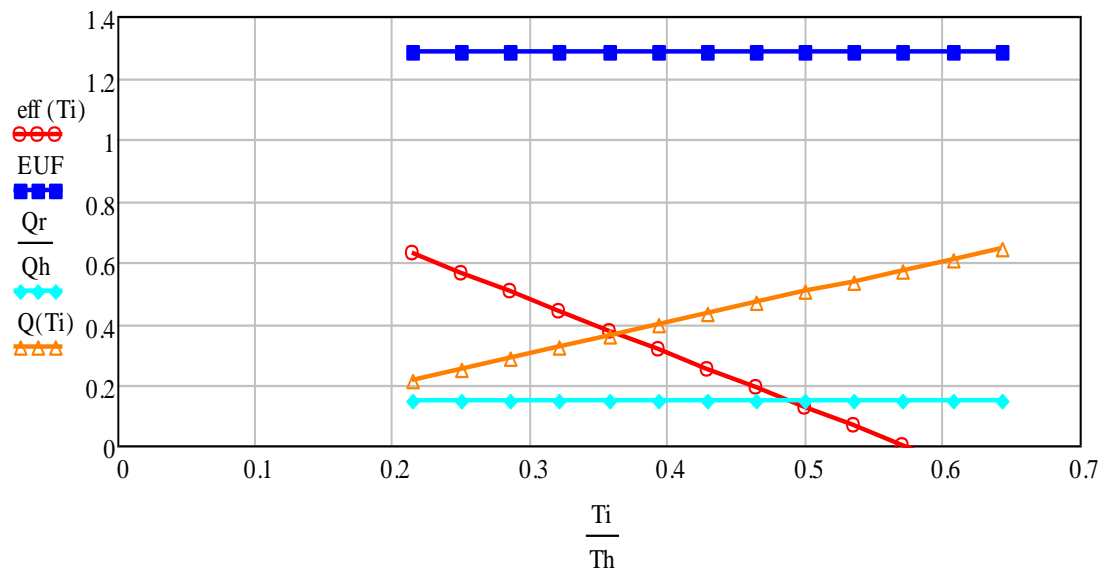
Ο EUF ισούται ουσιαστικά με το ωφέλιμο παραγόμενο έργο, διαιρεμένο με την θερμότητα εισόδου:

$$EUF = \frac{Q_h + 2Q_r}{Q_h} = 1 + \frac{2T_r}{T_h} \quad (9)$$

Όπως φαίνεται, ο παράγοντας EUF είναι σταθερός καθώς εξαρτάται μόνο από την υψηλή και την χαμηλή θερμοκρασία του κύκλου. Στα παρακάτω διαγράμματα έχουν σχεδιαστεί ο βαθμός απόδοσης  $eff$ , ο  $EUF$  και οι λόγοι  $\frac{Q_r}{Q_h}$  και  $\frac{Q_i}{Q_h}$  συναρτήσει του κλάσματος θερμοκρασιών  $\frac{T_l}{T_h}$ . Όπως έχει αναφερθεί και πριν και φαίνεται και στο διάγραμμα, μετά την τιμή  $T_i = \frac{T_h + T_r}{2}$ , ο κύκλος σταματάει να παράγει ωφέλιμο έργο αλλά συνεχίζει να λειτουργεί ως ψύκτης με τον ίδιο συντελεστή EUF.



Εικόνα 4.3 Διάγραμμα χαρακτηριστικών λειτουργίας τριπαραγωγικού κύκλου Carnot με  $T_h=1800K$  και  $T_r=300K$



Εικόνα 4.4 Διάγραμμα χαρακτηριστικών λειτουργίας τριπαραγωγικού κύκλου Carnot με  $T_h=1400K$  και  $T_r=200K$

### 4.1.2 Ανάλυση πεπερασμένου χρόνου τριπαραγωγικού κύκλου Carnot

Οι θερμοδυναμικές αναλύσεις πεπερασμένου χρόνου γίνονται με σκοπό την βελτιστοποίηση των συστημάτων και την όσο το δυνατόν μεγαλύτερη παραγωγή ωφέλιμου έργου. Εξετάζοντας την ιστορική εξέλιξη της θερμοδυναμικής, γίνεται αντιληπτό πως αναπτύχθηκε λόγω της θέλησης και της περιέργειας του ανθρώπου να κατανοήσει και να βελτιώσει την απόδοση των μηχανών. Ο Carnot και οι συνεργάτες του κατέληξαν στο συμπέρασμα πως η μέγιστη απόδοση μιας κυκλικής θερμικής διαδικασίας λαμβάνεται κατά την ανάστροφη λειτουργία του κύκλου. Με βάση αυτό, έθεσαν με το έργο τους, το άνω όριο της απόδοσης των κύκλων.

Η παρακάτω ανάλυση [26] αφορά την απόδοση ενός τριπαραγωγικού κύκλου Carnot σταθερής ροής, ο οποίος λειτουργεί σε συνθήκες μέγιστης παραγόμενης ισχύος. Ο λόγος που επιλέχθηκε η συγκεκριμένη διαμόρφωση είναι λόγω του γεγονότος πως η ισχύς θεωρείται πολυτιμότερο προϊόν από την θερμότητα καθώς είναι πιο ευέλικτη και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ψύξης. Είναι αποδεκτό, πως πρέπει να υπάρχει μια θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στις δεξαμενές και στις ισοθερμοκρασιακές διαδικασίες του κύκλου έτσι ώστε να αυξηθεί το ποσοστό της μεταφερόμενης ενέργειας. Ακόμα εξυπηρετεί στο να υπάρχει βελτιστοποίηση του κύκλου και ως εκ τούτου μέγιστη παραγωγή ισχύος με δεδομένη θερμοκρασία των δεξαμενών και συγκεκριμένο εναλλάκτη θερμότητας. Η ανάλυση αυτή, έγινε από τους B. Agnew, A. Anderson και T. H. Frost και αποτελεί επέκταση της ανάλυσης των F.L. Curzon και B.Ahlborn οι οποίοι μελέτησαν έναν μη-αναστρέψιμο κύκλο Carnot μηδενικής-ροής και στην οποία ο βαθμός απόδοσης ενός τέτοιου κύκλου ισούται με:

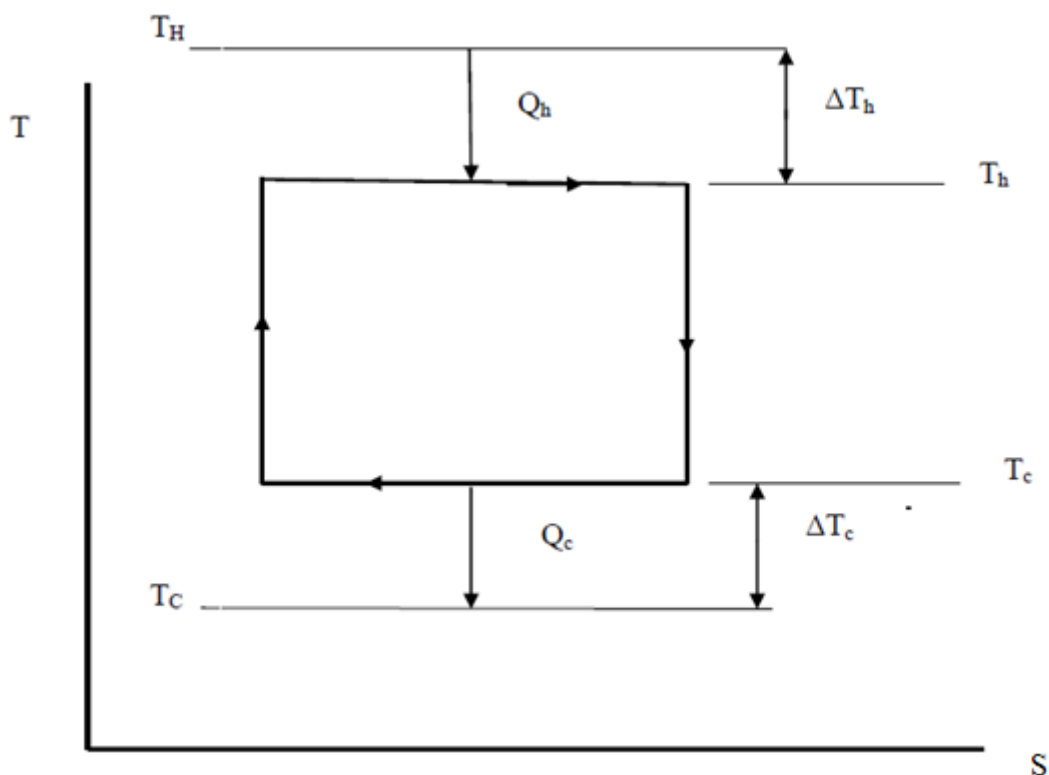
$$n = 1 - \sqrt{\frac{T_C}{T_H}}$$

Ο τύπος αυτός βρίσκει εφαρμογή σε οποιοδήποτε κύκλο σταθερής ροής, όπως καταλήγει και η παρακάτω ανάλυση.

Για έναν εναλλάκτη θερμότητας με πεπερασμένη επιφάνεια  $A$  και συγκεκριμένο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας  $h_o$  είναι:

$$\dot{Q} = h_o A \Delta T \quad (1)$$

Στην παρακάτω ανάλυση ο εναλλάκτης που χρησιμοποιείται, είναι τέτοιος ώστε ο  $h_o$  είναι ανεξάρτητος από τη θερμοκρασιακή διαφορά  $\Delta T$  και τη λανθάνουσα θερμότητα εξατμίσεως. Με σκοπό να βρούμε τις  $\Delta T_c$  και  $\Delta T_h$ , για δεδομένο γινόμενο  $Ah_o$ , η ενέργεια μεγιστοποιείται. Δεδομένου ότι ο κύκλος είναι εσωτερικά πλήρως αναστρέψιμος οι απώλειες πίεσης έχουν αμεληθεί.



Εικόνα 4.5 Διάγραμμα T-s, κύκλου Carnot πεπερασμένου χρόνου

Για έναν κύκλο σταθερής ροής, σύμφωνα και με το πιο πάνω διάγραμμα, ισχύει:

$$P = \dot{Q}_h + \dot{Q}_c$$

$$P = h_h A_h (T_H - T_h) - h_c A_c (T_c - T_C) = \theta_h \Delta T_h - \theta_c \Delta T_c \quad (2)$$

Καθώς η μεταφορά θερμότητας συμβαίνει σε όλη την επιφάνεια του εναλλάκτη δίχως τη μεταβολή της θερμοκρασίας :

$$\frac{Q_h}{Q_c} = \frac{T_h}{T_c} \quad (3)$$

Το οποίο οδηγεί :

$$\frac{\theta_h (T_H - T_h)}{\theta_c (T_c - T_c)} = \frac{T_h}{T_c} \quad (4)$$

Κρατώντας από την παραπάνω εξίσωση τις θερμοκρασίες των δεξαμενών και εισάγοντας στην εξίσωση τους όρους  $\Delta T_h$ ,  $\Delta T_c$  :

$$\frac{\theta_h \Delta T_h}{\theta_c \Delta T_c} = \frac{T_H - \Delta T_h}{T_c - \Delta T_c} \quad (5)$$

Απομονώνοντας τις θερμοκρασιακές διαφορές  $\Delta T_c$  και  $\Delta T_h$  :

$$\Delta T_h = \frac{\theta_c}{\theta_h} \frac{\Delta T_c T_H}{\left(1 + \frac{\theta_c}{\theta_h}\right) \Delta T_c + T_c} \quad (6), \Delta T_c = \frac{\theta_h}{\theta_c} \frac{\Delta T_h T_c}{T_H - \left(1 + \frac{\theta_h}{\theta_c}\right) \Delta T_h} \quad (7)$$

Με βάση τις εξισώσεις (6) και (7) , η εξίσωση (2) γίνεται:

$$\stackrel{(6)}{\Rightarrow} P = \theta_c \left[ \frac{\Delta T_c T_H}{\left(1 + \frac{\theta_c}{\theta_h}\right) \Delta T_c + T_c} - \Delta T_c \right] \quad (8)$$

$$\stackrel{(7)}{\Rightarrow} P = \theta_h \left[ \Delta T_h - \frac{\Delta T_h T_c}{T_H - \left(1 + \frac{\theta_h}{\theta_c}\right) \Delta T_h} \right] \quad (9)$$

Για σταθερές προδιαγραφές του εναλλάκτη (οι οποίες ορίζονται από τις σταθερές  $\theta_c$ ,  $\theta_h$ ) :

$$\left( \frac{dP}{d\Delta T_c} \right)_{\theta_c \theta_h} = \theta_c \left( \frac{T_H \left( \left(1 + \frac{\theta_c}{\theta_h}\right) \Delta T_c + T_c \right) - \left(1 + \frac{\theta_c}{\theta_h}\right) \Delta T_c T_H}{\left( \left(1 + \frac{\theta_c}{\theta_h}\right) \Delta T_c + T_c \right)^2} - 1 \right) \quad (10)$$

$$\left( \frac{dP}{d\Delta T_h} \right)_{\theta_c \theta_h} = \theta_h \left( 1 - \frac{T_c T_H}{\left( T_H - \Delta T_h \left(1 - \frac{\theta_h}{\theta_c}\right) \right)^2} \right) \quad (11)$$

Ως γνωστόν, για τη μέγιστη ισχύ είναι:

$$\left( \frac{dP}{d\Delta T_c} \right)_{\theta_c \theta_h} = \left( \frac{dP}{d\Delta T_h} \right)_{\theta_c \theta_h} = 0 \quad (12)$$

Οπότε:

$$(10) \Rightarrow \theta_c \left( \frac{T_H \left( \left(1 + \frac{\theta_c}{\theta_h}\right) \Delta T_c + T_C \right) - \left(1 + \frac{\theta_c}{\theta_h}\right) \Delta T_c T_H}{\left( \left(1 + \frac{\theta_c}{\theta_h}\right) \Delta T_c + T_C \right)^2} - 1 \right) = 0 \Rightarrow$$

$$\frac{T_H \left( \left(1 + \frac{\theta_c}{\theta_h}\right) \Delta T_c + T_C \right) - \left(1 + \frac{\theta_c}{\theta_h}\right) \Delta T_c T_H}{\left( \left(1 + \frac{\theta_c}{\theta_h}\right) \Delta T_c + T_C \right)^2} - 1 = 0 \Rightarrow$$

$$\frac{T_H \left( \left(1 + \frac{\theta_c}{\theta_h}\right) \Delta T_c + T_C \right) - \left(1 + \frac{\theta_c}{\theta_h}\right) \Delta T_c T_H}{\left( \left(1 + \frac{\theta_c}{\theta_h}\right) \Delta T_c + T_C \right)^2} = 1 \Rightarrow$$

$$T_H \left( \left(1 + \frac{\theta_c}{\theta_h}\right) \Delta T_c + T_C \right) - \left(1 + \frac{\theta_c}{\theta_h}\right) \Delta T_c T_H = \left( \left(1 + \frac{\theta_c}{\theta_h}\right) \Delta T_c + T_C \right)^2 \Rightarrow$$

$$T_H T_C = \left( \left(1 + \frac{\theta_c}{\theta_h}\right) \Delta T_c + T_C \right)^2$$

Και τελικά:

$$\Delta T_c = \frac{T_C \left( \sqrt{\frac{T_H}{T_C}} - 1 \right)}{\left(1 + \frac{\theta_c}{\theta_h}\right)} \quad (13)$$



Αντίστοιχα, για την (11) ισχύει:

$$\theta_h \left( 1 - \frac{T_C T_H}{\left( T_H - \Delta T_h \left( 1 - \frac{\theta_h}{\theta_c} \right) \right)^2} \right) = 0 \Rightarrow$$

$$1 - \frac{T_C T_H}{\left( T_H - \Delta T_h \left( 1 - \frac{\theta_h}{\theta_c} \right) \right)^2} = 0 \Rightarrow$$

$$\frac{T_C T_H}{\left( T_H - \Delta T_h \left( 1 - \frac{\theta_h}{\theta_c} \right) \right)^2} = 1 \Rightarrow$$

$$T_C T_H = \left( T_H - \Delta T_h \left( 1 - \frac{\theta_h}{\theta_c} \right) \right)^2 \Rightarrow$$

$$\Delta T_h = \frac{T_H \left( 1 - \sqrt{\frac{T_C}{T_H}} \right)}{\left( 1 + \frac{\theta_h}{\theta_c} \right)} \quad (14)$$

Ο βαθμός απόδοσης δίνεται από τον τύπο:

$$n = 1 - \frac{T_C + \Delta T_c}{T_H - \Delta T_h} \quad (15)$$

Στο σημείο μέγιστης ισχύς και με σταθερή απόδοση εναλλάκτη θερμότητας το  $\theta_c$  είναι ίσο με το  $\theta_h$ . Συνεπώς, οι τύποι των θερμοκρασιακών διαφορών γίνονται:

$$\Delta T_c = \frac{T_C \left( \sqrt{\frac{T_H}{T_C}} - 1 \right)}{2} \quad (16)$$

$$\Delta T_h = \frac{T_H \left( 1 - \sqrt{\frac{T_C}{T_H}} \right)}{2} \quad (17)$$

Και τελικά:

$$n = 1 - \sqrt{\frac{T_C}{T_H}}$$

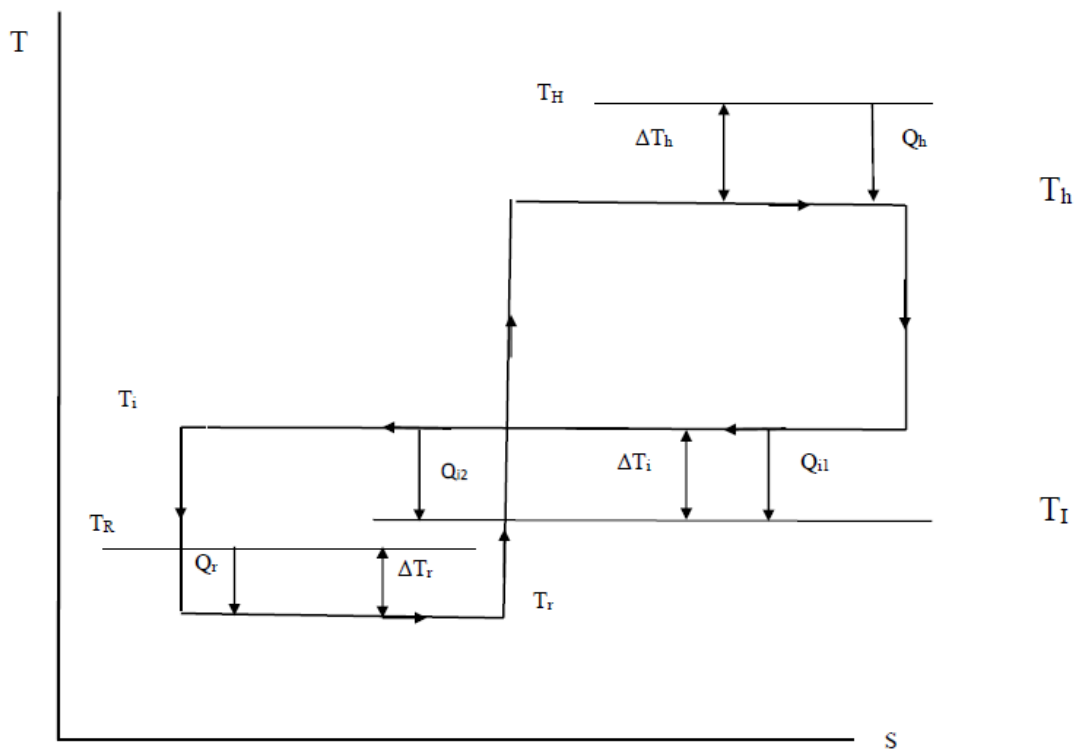
Υποθέτουμε πως η θερμοκρασιακή διαφορά  $\Delta T_i$  υπάρχει καθ' όλη τη διάρκεια της απόρριψης θερμότητας και πως η διαφορά  $\Delta T_r$  προσδιορίζεται από τη σχέση του συντελεστή θερμικής απόδοσης (COP) με τον κύκλο ψύξης [27]. Επομένως θα ισούται με :

$$\Delta T_r = \frac{T_R \Delta T_C}{T_C} = \frac{T_R \left( \sqrt{\frac{T_H}{T_I}} - 1 \right)}{2} \quad (18)$$

Τότε το έργο δικτύου και η μεταφορά θερμότητας υπολογίζονται από τους τύπους:

$$\frac{Q_{i1} + Q_{i2}}{Q_h} = \frac{Q_i}{Q_h} = \frac{2T_I \left( \sqrt{\frac{T_H}{T_I}} - 1 \right)}{T_H \left( 1 - \sqrt{\frac{T_I}{T_H}} \right)} \quad (19)$$

$$\frac{Q_r}{Q_h} = \frac{T_R \left( \sqrt{\frac{T_H}{T_I}} - 1 \right)}{T_H \left( 1 - \sqrt{\frac{T_I}{T_H}} \right)} \quad (20)$$



Εικόνα 4.6 Διάγραμμα T-s, τριπαραγωγικού κύκλου Carnot πεπερασμένου χρόνου

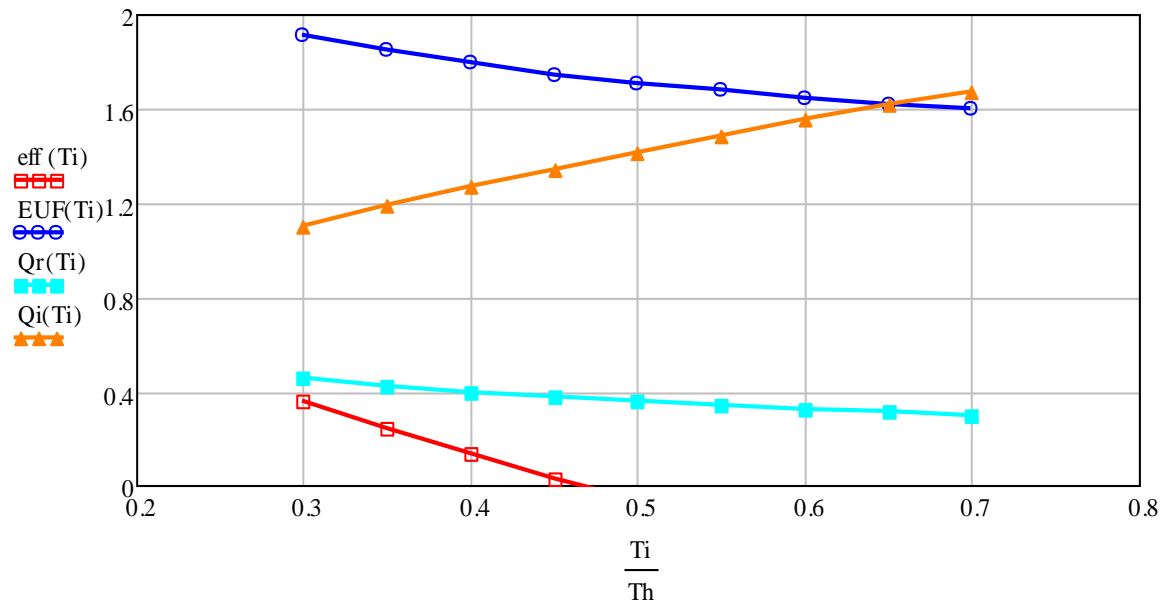
Οι παρακάτω εξισώσεις αφορούν τον βαθμό απόδοσης και τον EUF:

$$eff = \frac{Q_h - Q_{i1} - Q_{i2} + Q_r}{Q_h} = 1 - \frac{Q_{i2} + Q_{i2} - Q_r}{Q_h} \Rightarrow$$

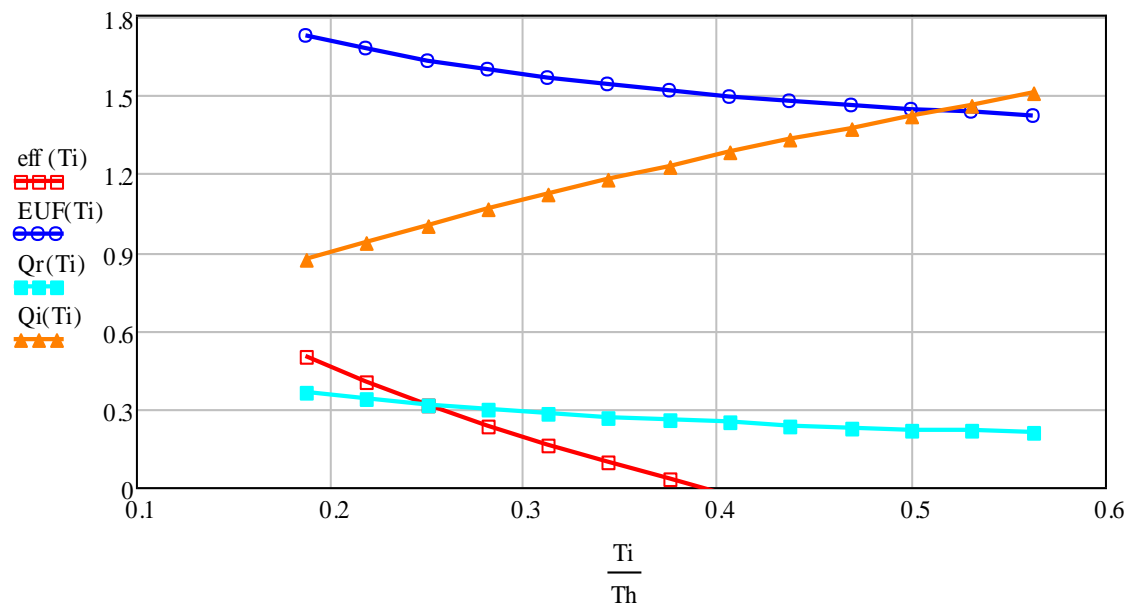
$$\Rightarrow eff = 1 - \frac{Q_i - Q_r}{Q_h} = 1 - \frac{2T_I \left( \sqrt{\frac{T_H}{T_I}} - 1 \right) - T_R \left( \sqrt{\frac{T_H}{T_I}} - 1 \right)}{T_H \left( 1 - \sqrt{\frac{T_I}{T_H}} \right)}$$

$$EUF = \frac{Q_h + 2Q_r}{Q_h} = \frac{T_H \left( 1 - \sqrt{\frac{T_I}{T_H}} \right) + 2T_R \left( \sqrt{\frac{T_H}{T_I}} - 1 \right)}{T_H \left( 1 - \sqrt{\frac{T_I}{T_H}} \right)}$$

Στα διαγράμματα 3 και 4 που ακολουθούν, παρουσιάζονται, όπως και στην ενότητα 4.1.1, οι χαρακτηριστικές καμπύλες του βαθμού απόδοσης  $eff$ ,  $EUF$ ,  $\frac{Q_r}{Q_h}$  και  $\frac{Q_i}{Q_h}$  συναρτήσει του  $\frac{T_I}{T_H}$  και φαίνεται η σημασία που έχει η ενδιάμεση θερμοκρασία  $T_I$  στον κύκλο.



Εικόνα 4.7 Διάγραμμα χαρακτηριστικών λειτουργίας τριπαραγωγικού κύκλου Carnot πεπερασμένου χρόνου με  $T_h=1000K$  και  $T_r=250K$



Εικόνα 4.8 Διάγραμμα χαρακτηριστικών λειτουργίας τριπαραγωγικού κύκλου Carnot πεπερασμένου χρόνου με  $T_h=1600K$  και  $T_r=250K$

Ο ΕΥΦ αυτή τη φορά δεν είναι σταθερός αλλά μειώνεται συνεχώς καθώς εξαρτάται πλέον από την ενδιάμεση θερμοκρασία  $T_I$  και του ρόλου που παίζει αυτή στις θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ των ισοθερμοκρασιακών διαδικασιών και των θερμοκρασιών δεξαμενών, όπως φαίνεται και από τις παραπάνω εξισώσεις. Λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του, όπως και ο βαθμός απόδοσης, όταν το κλάσμα  $\frac{T_I}{T_H}$  είναι μικρότερο. Όπως φαίνεται από τη σύγκριση των δύο διαγραμμάτων, ο συντελεστής ΕΥΦ μειώνεται με την αύξηση της υψηλής θερμοκρασίας περιβάλλοντος  $T_H$ . Η παραγωγή έργου του κύκλου σταματάει σε μια τιμή του κλάσματος αυτού κοντά στο 0.4 και όπως και ο ΕΥΦ, μειώνεται με την αύξηση του  $\frac{T_I}{T_H}$ .

### **Αποτελέσματα**

Ο 1<sup>ος</sup> θερμοδυναμικός νόμος ενός τριπαραγωγικού κύκλου δείχνει μια σταθερή τιμή για τον ΕΥΦ ο οποίος εξαρτάται από την μέγιστη και την ελάχιστη θερμοκρασία. Όταν το παραγόμενο έργο μηδενιστεί, τότε ο κύκλος λειτουργεί σαν αντλία θερμότητας.

Η ανάλυση πεπερασμένου χρόνου έδειξε, πως μεγάλες τιμές του ΕΥΦ είναι δυνατό να παραχθούν με καινοτόμους κύκλους. Οι τιμές αυτές είναι μεγαλύτερες σε σχέση με αυτές που έχουν επιτευχθεί έως σήμερα συνδυάζοντας έναν κύκλο ισχύος με έναν ψυκτικό κύκλο. Η απόδοση τέτοιων συνδυασμένων κύκλων θα μπορούσε να βελτιωθεί αν ήταν εφικτή η επαναχρησιμοποίηση της αποβαλλόμενης θερμότητας από τον ψυκτικό κύκλο.

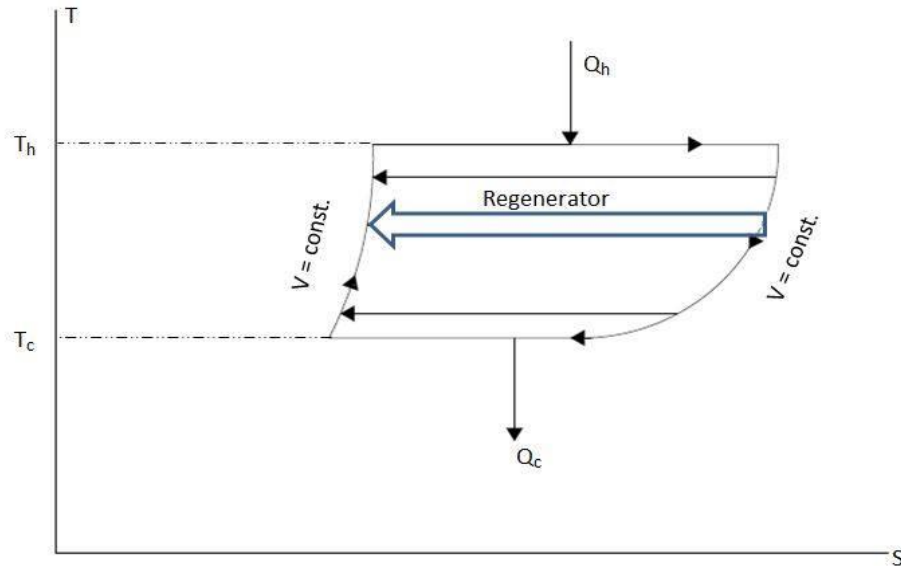
Η απόδοση του κύκλου βελτιώνεται όσο η  $T_H$  μειώνεται όπως φαίνεται και από τα διαγράμματα. Αυτό δείχνει πως ο κύκλος είναι ιδανικός για χρήση της απορριπτόμενης θερμότητας. Η μέγιστη παραγόμενη ισχύ αυξάνεται καθώς η ενδιάμεση θερμοκρασία μειώνεται εις βάρος της παραγωγής θερμότητας, ενώ η παραγωγή ψύξης δεν επηρεάζεται τόσο από την μείωση αυτή.

## **4.2 Κύκλος Stirling**

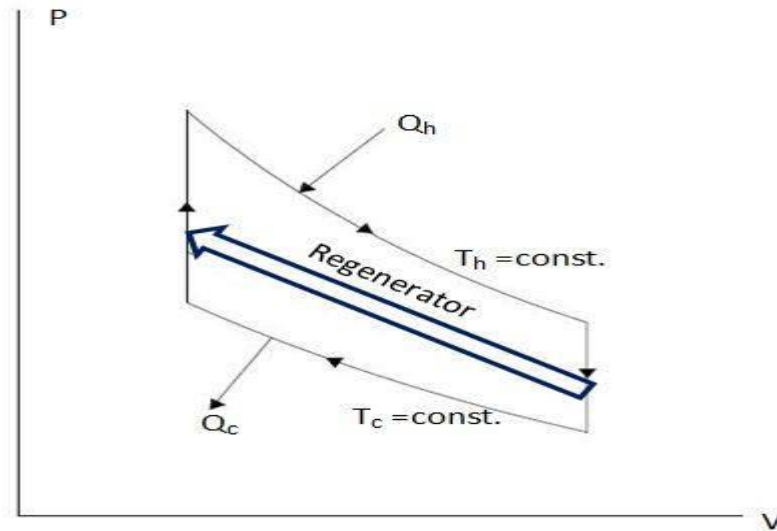
Ο απλός κύκλος Stirling αποτελείται από δύο ισοθερμοκρασιακές μεταβολές και, σε αντίθεση με τον κύκλο Carnot, οι δύο ισεντροπικές μεταβολές έχουν αντικατασταθεί από δύο ισόχωρες μεταβολές αναθέρμανσης. Ο κύκλος Stirling ενός

ιδανικού αερίου όπως του εργαζόμενου ρευστού φαίνεται στα παρακάτω διαγράμματα θερμοκρασίας – εντροπίας (T-s) και πίεσης – όγκου (P-v). Η απορρόφηση και η απόρριψη θερμότητας, πραγματοποιούνται κατά τις ισοθερμοκρασιακές μεταβολές. Κατά τη διαδικασία της αναθέρμανσης, η ενέργεια μεταφέρεται από την περιοχή θερμών αερίων χαμηλής πίεσης σε μια αποθηκευτική συσκευή (αναθερμαντήρας) και στη συνέχεια στην περιοχή ψυχρών αερίων υψηλής πίεσης.

Οι λόγοι που χρησιμοποιούμε κύκλο Stirling σε τριπαραγωγικά συστήματα και γενικότερα σε συστήματα συμπαραγωγής, ποικίλλουν. Ο πιο σημαντικός θα μπορούσε να χαρακτηριστεί η αναστρεψιμότητα του, κάτι που δεν χαρακτηρίζει τους κύκλους Diesel και Otto. Ένας κύκλος χαρακτηρίζεται αναστρέψιμος, όταν με την παροχή μηχανικής ενέργειας μπορεί να λειτουργήσει ως αντλία θερμότητας για θέρμανση ή ψύξη. Αυτό συμβαίνει διότι οι κύκλοι αυτοί παρουσιάζουν μια πεπερασμένη θερμοκρασιακή διαφορά κατά τις διαδικασίες μεταφοράς θερμότητας. Αυτή η μη αναστρεψιμότητα των προηγούμενων κύκλων, καθιστά τη θερμική απόδοσή τους μικρότερη από αυτή του κύκλου Stirling. Άλλοι λόγοι για τους οποίους ο κύκλος Stirling μελετάται διεξοδικά και χρησιμοποιείται ευρέως σε συστήματα συμπαραγωγής είναι οι χαμηλές εκπομπές και η μεγάλη του ανοχή σε διαφορετικά είδη καυσίμων.



Εικόνα 4.9 Κύκλος Stirling T-s



Εικόνα 4.10 Κύκλος Stirling P-V

1-2 Ισόθερμη εκτόνωση: απορρόφηση θερμότητας από εξωτερική πηγή

2-3 Ισόχωρη μεταφορά θερμότητας: εσωτερική μεταφορά θερμότητας από το αέριο στον αναθερμαντήρα

3-4 Ισόθερμη συμπίεση: απόρριψη θερμότητας

4-1 Ισόχωρη μεταφορά θερμότητας: εσωτερική μεταφορά θερμότητας από τον αναθερμαντήρα στο αέριο

Όπου

$$Q_h = mRT_h \ln(V_r) \text{ και } Q_c = mRT_c \ln(V_r)$$

Και ο βαθμός θερμικής απόδοσης ισούται με:

$$eff = \frac{Q_h - Q_c}{Q_h} = 1 - \frac{T_c}{T_h}$$



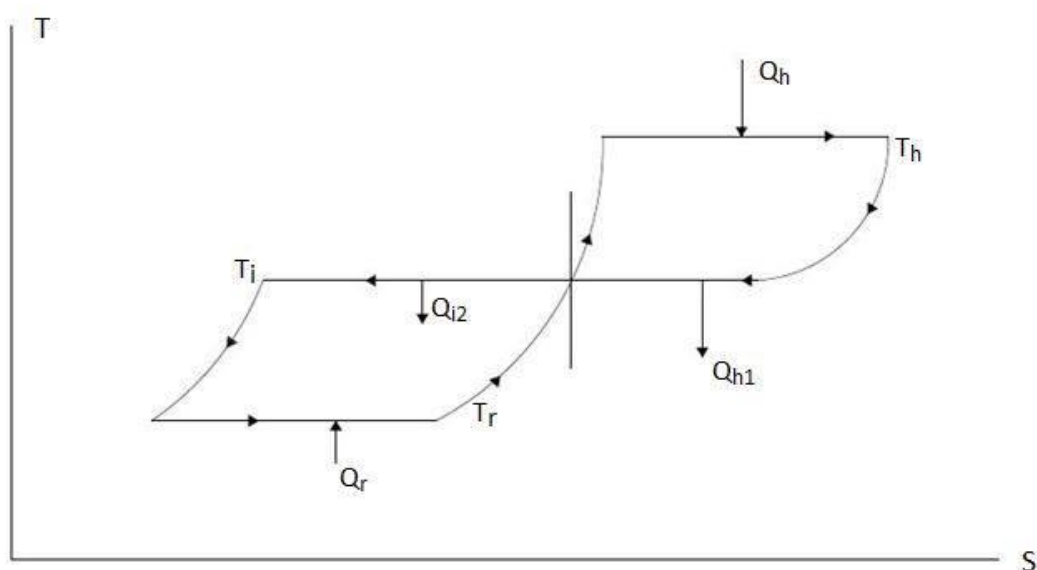
Αν ο, ιδανικός, κύκλος λειτουργήσει ως ψυκτική συσκευή ή αντλία θερμότητας, δηλαδή η ροή στο διάγραμμα T-S είναι αριστερόστροφη, τότε οι συντελεστές θερμικής απόδοσης θα είναι ίσοι με:

$$COP_{Ref} = \frac{T_c}{T_h - T_c}, COP_{HP} = \frac{T_h}{T_h - T_c} \text{ αντίστοιχα}$$

και ίδιοι με τους COP ενός κύκλου Carnot.

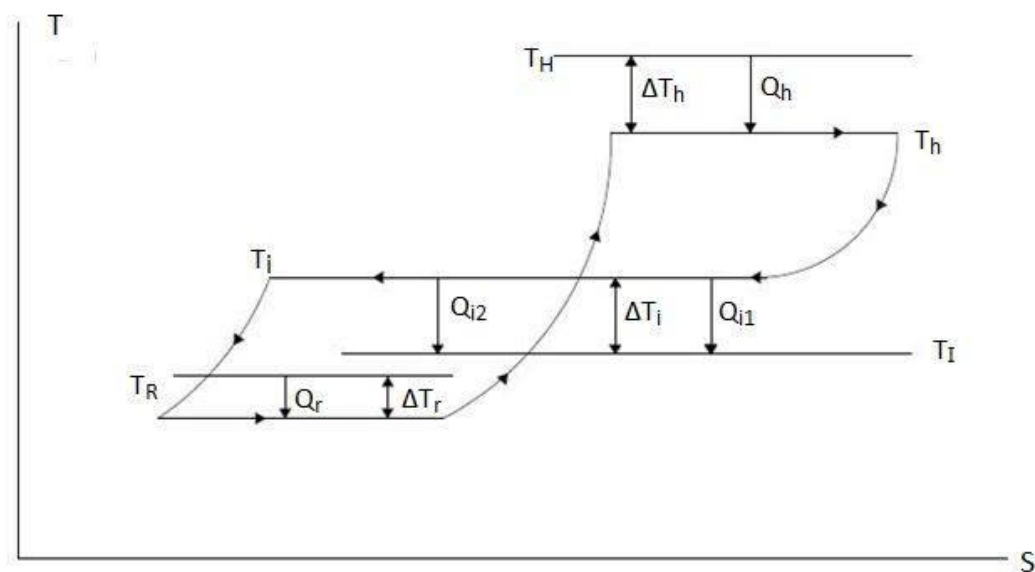
#### 4.2.1 Κύκλος Stirling τριπαραγωγικών συστημάτων

Όπως και με τον κύκλο Carnot, ο κύκλος Stirling που χρησιμοποιείται στα τριπαραγωγικά συστήματα, αποτελείται από δύο κύκλους Stirling που συνδέονται με μια κοινή θερμοκρασία  $T_i$ .



Εικόνα 4.11 Διάγραμμα T-s, τριπαραγωγικού κύκλου Stirling

Ενώ ο κύκλος Stirling για ανάλυση πεπερασμένου χρόνου είναι [29]:



**Εικόνα 4.12** Διάγραμμα T-s, τριπαραγωγικού κύκλου Stirling πεπερασμένου χρόνου

Οι σχέσεις που ισχύουν στον τριπαραγωγικό κύκλο Stirling είναι παρόμοιες με αυτές του τριπαραγωγικού κύκλου Carnot που χρησιμοποιήθηκαν στην αντίστοιχη ενότητα. Συνεπώς και τα διαγράμματα θα είναι αυτά που παρουσιάστηκαν στην ενότητα του κύκλου Carnot.

### 4.3 Ανάλυση με διαφορετικές αναλογίες όγκου

Στην ανάλυση πεπερασμένου χρόνου ενός τριπαραγωγικού κύκλου που έγινε στην προηγούμενη ενότητα, ελήφθη σαν δεδομένο πως οι αναλογίες όγκου του κύκλου ισχύος και του ψυκτικού κύκλου είναι ίσες. Αυτό θα μπορούσε να αλλάξει αν γινόταν επιθυμητή η παραγωγή επιπλέον έργου [28]. Έτσι, θα ήταν εφικτή η λειτουργία ενός ψυκτικού κύκλου με μεγαλύτερο COP από αυτόν που τροφοδοτείται από τα ψυκτικά στοιχεία του τριπαραγωγικού κύκλου. Με άλλα λόγια, είναι δυνατό να παραχθεί περισσότερο έργο ή περισσότερη θερμότητα ή ψύξη αλλάζοντας τις αναλογίες όγκου μεταξύ των δύο κύκλων. Αυτό είναι ισοδύναμο με το να έχουμε διαφορετικές περιοχές μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του ψυκτικού κύκλου και του κύκλου ισχύος στην εξίσωση (2). Η αναλογία όγκου του ψυκτικού κύκλου προς τον κύκλο ισχύος, που ισοδυναμεί με την αναλογία των συντελεστών μεταφοράς θερμότητας, συμβολίζεται με  $\chi$ . Αν είναι επιθυμητή η επιπλέον παραγωγή έργου, τότε το  $\chi$  παίρνει τιμές μικρότερες του 1 ενώ αν είναι

επιθυμητή η επιπλέον παραγωγή θερμότητας τότε λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες του 1 με την προϋπόθεση φυσικά, το έργο που παράγεται από τον κύκλο ισχύος να επαρκεί για την λειτουργία του ψυκτικού κύκλου.

$$P = \frac{T_H \left(1 - \sqrt{\frac{T_I}{T_H}}\right)}{2} - \frac{(1+x)T_I \left(\sqrt{\frac{T_H}{T_I}} - 1\right)}{2} + \frac{xT_R \left(\sqrt{\frac{T_H}{T_I}} - 1\right)}{2}$$

$$\frac{Q_{i1} + Q_{i2}}{Q_h} = \frac{Q_i}{Q_h} = \frac{(1+x)T_I \left(\sqrt{\frac{T_H}{T_I}} - 1\right)}{T_H \left(1 - \sqrt{\frac{T_I}{T_H}}\right)} \quad (23)$$

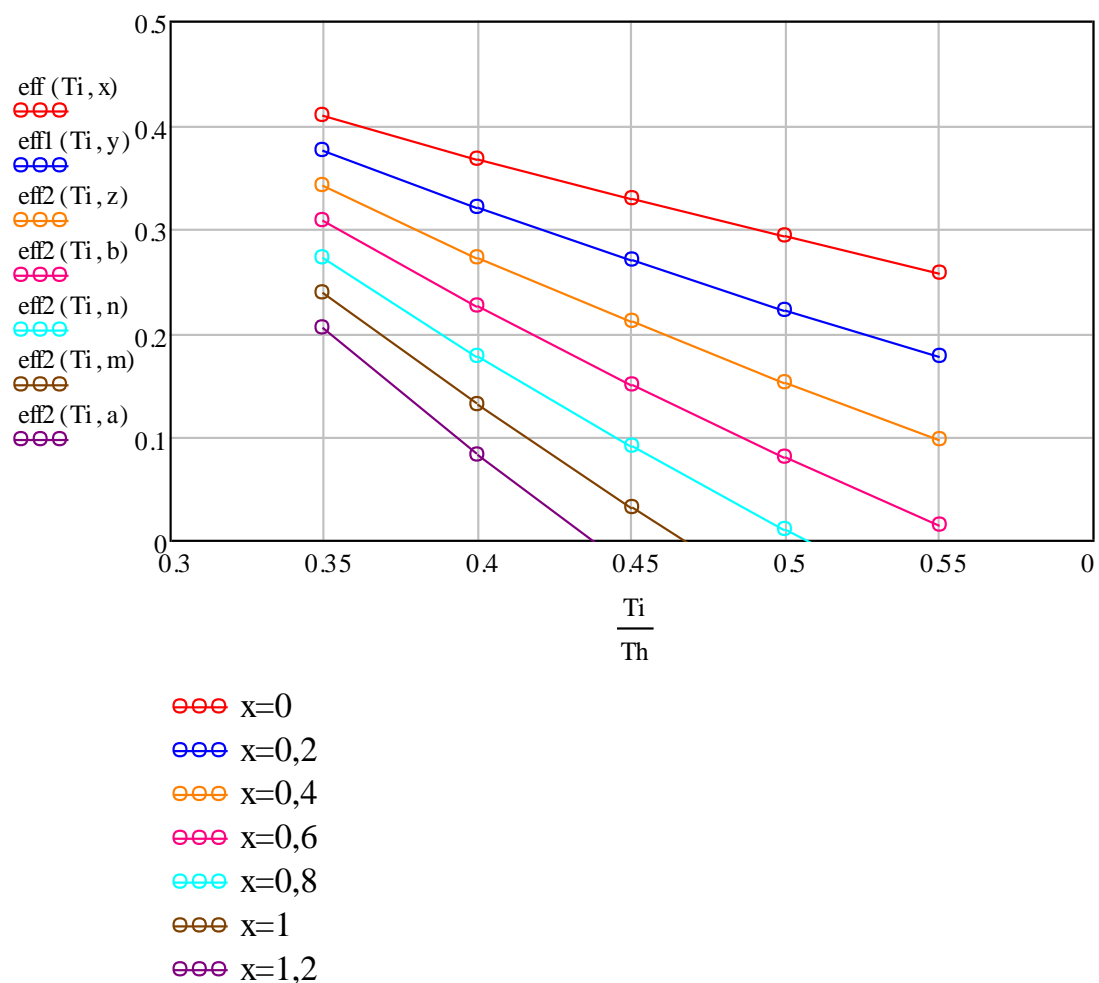
$$\frac{Q_r}{Q_h} = \frac{xT_R \left(\sqrt{\frac{T_H}{T_I}} - 1\right)}{T_H \left(1 - \sqrt{\frac{T_I}{T_H}}\right)} \quad (24)$$

Ο βαθμός απόδοσης και ο EUF γίνονται αντίστοιχα:

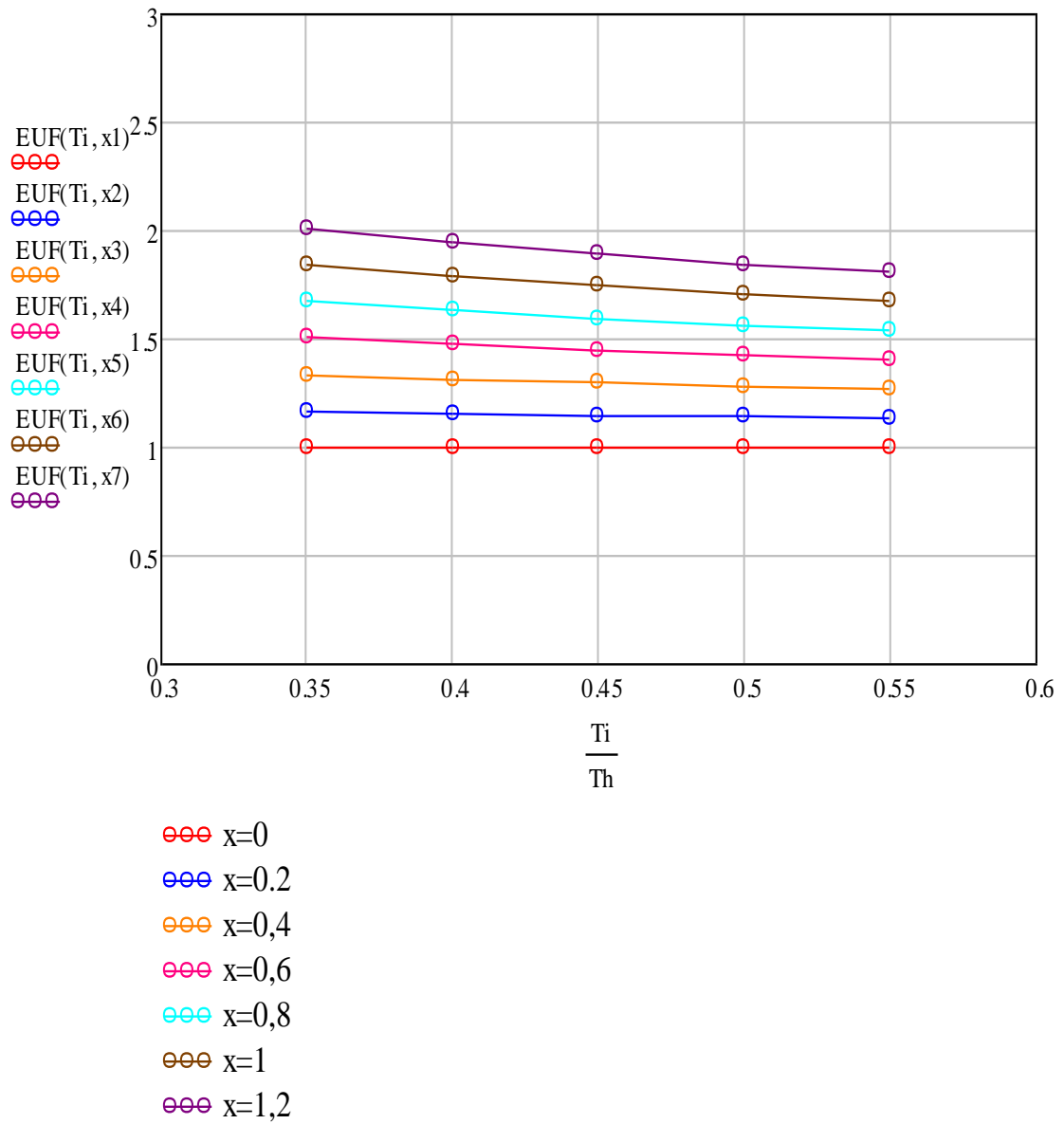
$$eff = 1 - \frac{(1+x)T_I \left(\sqrt{\frac{T_H}{T_I}} - 1\right) - xT_R \left(\sqrt{\frac{T_H}{T_I}} - 1\right)}{T_H \left(1 - \sqrt{\frac{T_I}{T_H}}\right)} \quad (25)$$

$$EUF = \frac{T_H \left(1 - \sqrt{\frac{T_I}{T_H}}\right) + 2xT_R \left(\sqrt{\frac{T_H}{T_I}} - 1\right)}{T_H \left(1 - \sqrt{\frac{T_I}{T_H}}\right)} \quad (26)$$

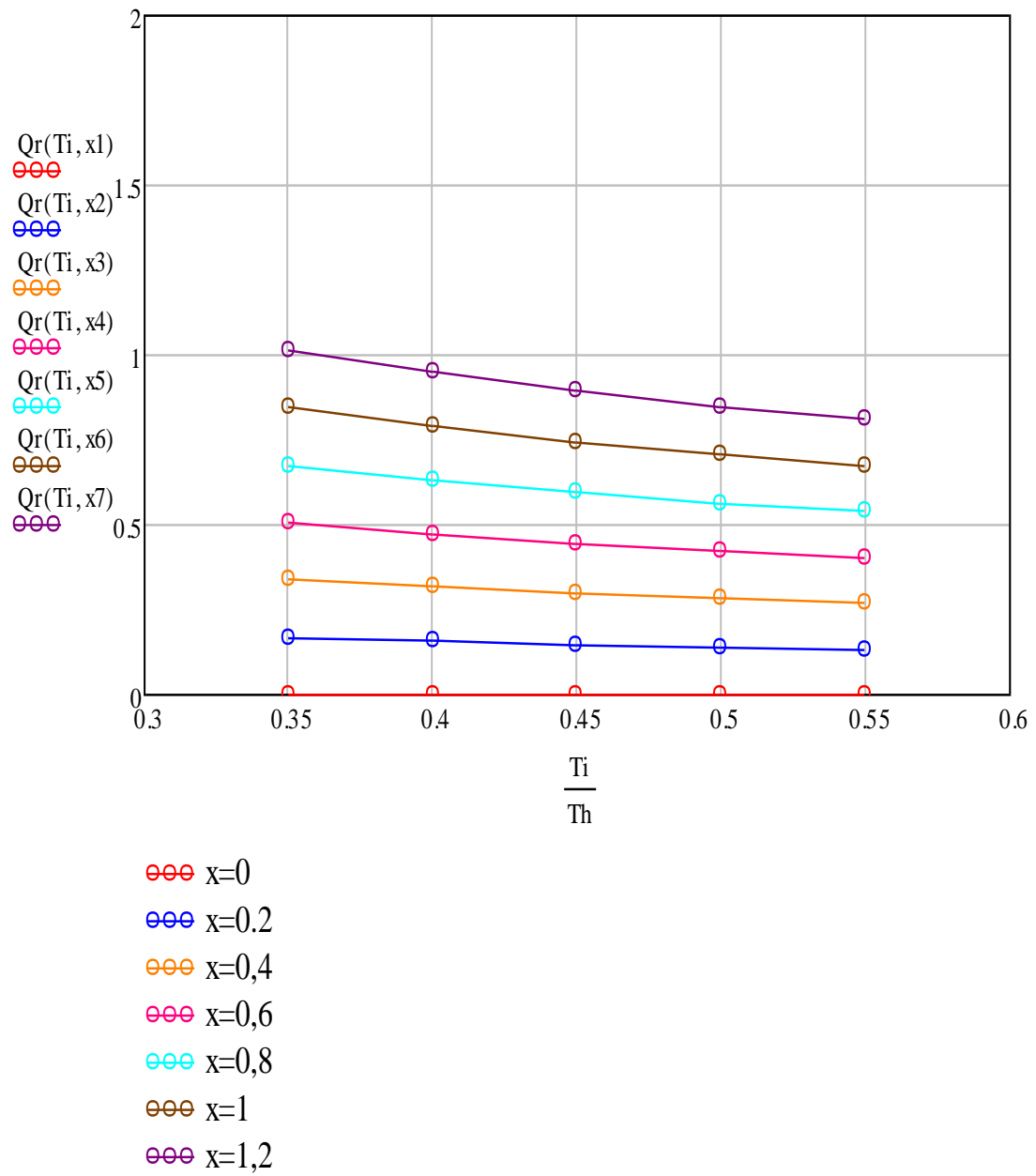
Με δεδομένες τις μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες των δεξαμενών,  $T_H$  και  $T_R$ , η θερμοκρασία  $T_I$  μπορεί να πάρει οποιαδήποτε τιμή ανάμεσα σε αυτές τις δύο. Ο αντίκτυπος που έχει το  $x$  φαίνεται στα διαγράμματα παρακάτω όπου για διαφορετικές τιμές του, σχεδιάζονται ο βαθμός απόδοσης, ο EUF και ο λόγος  $\frac{Q_i}{Q_h}$  σε σχέση με τον  $\frac{T_I}{T_H}$ , ενώ στο τελευταίο διάγραμμα φαίνεται η σημασία της μέγιστης θερμοκρασίας  $T_H$  στον EUF.



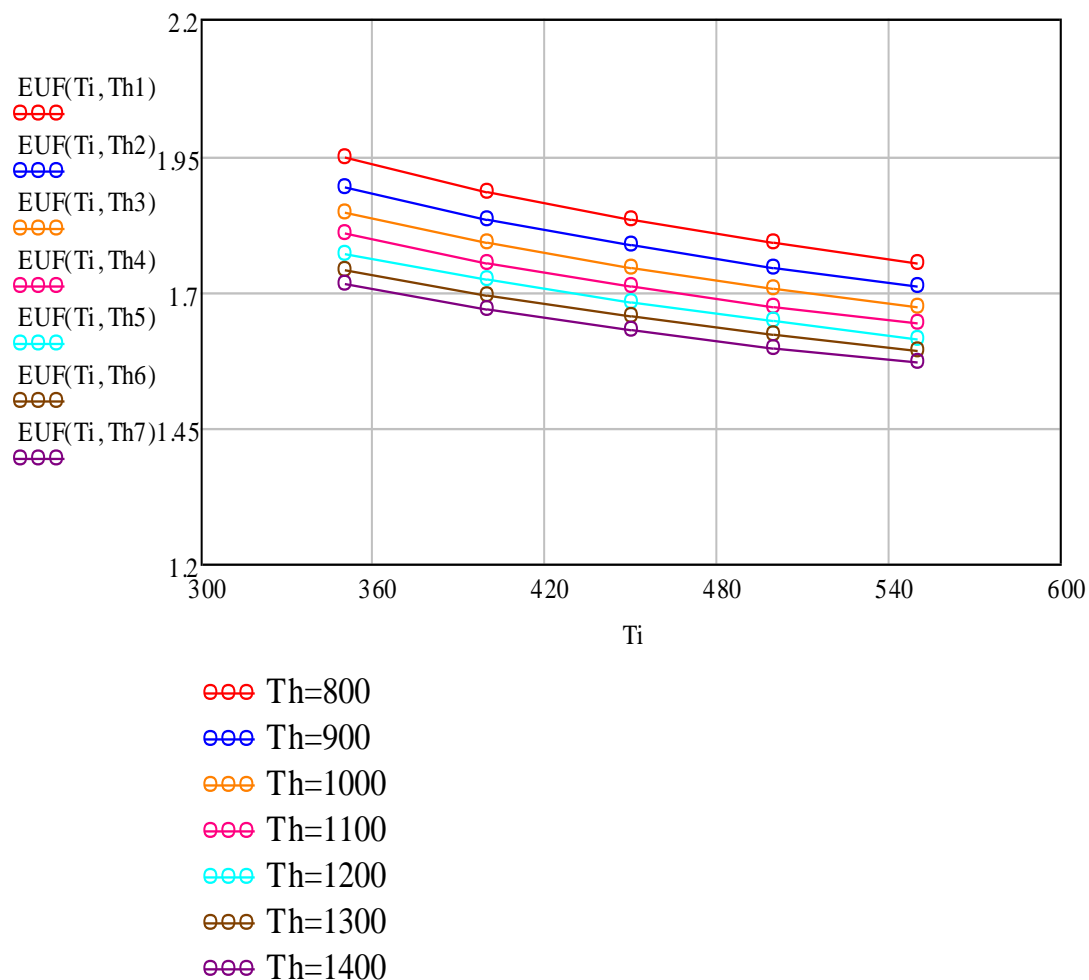
**Εικόνα 4.13** Διάγραμμα βαθμού απόδοσης –  $T_I/T_H$  για διαφορετικές τιμές του  $x$  με  $T_H=1000K$  και  $T_R=250K$



Εικόνα 4.14 Διάγραμμα EUF –  $T_i/T_h$  για διαφορετικές τιμές του  $x$  με  $T_h=1000K$  και  $T_r=250K$



Εικόνα 4.15 Διάγραμμα  $Q_r/Q_h - T_i/T_h$  για διαφορετικές τιμές του  $x$  με  $T_h=1000K$  και  $T_r=250K$



Εικόνα 4.16 Διάγραμμα EUF –  $T_i$  για διαφορετικές θερμοκρασίες  $Th$  με  $T_r=250K$  και  $x=1$

### Αποτελέσματα

Από τα παραπάνω διαγράμματα, γίνεται αντιληπτός ο ρόλος της μεταβλητής  $x$ , δηλαδή της αναλογίας όγκων. Αν  $x = 0$ , τότε ο κύκλος λειτουργεί σαν κύκλος συμπαραγωγής παράγοντας καθαρή ισχύ και θερμότητα όπως γίνεται ευκολότερα αντιληπτό από την εξίσωση (24). Στην κατάσταση αυτή ο EUF παίρνει την τιμή 1 (εξίσωση 26), συνεπώς όλο το έργο που παράγεται είναι ωφέλιμο.

Στο διάγραμμα βαθμού απόδοσης, όλες οι χαρακτηριστικές τείνουν να μηδενιστούν σε μια τιμή κοντά στο 0,5, όπως και στην ανάλυση πεπερασμένου χρόνου του τριπαραγωγικού κύκλου Carnot που μελετήθηκε σε προηγούμενη

ενότητα. Η απόδοση του κύκλου λαμβάνει τη μέγιστη τιμή όταν αυτός λειτουργεί μόνο σαν κύκλος ισχύος και προφανώς θα είναι  $EU\!F=1$ . Οι καμπύλες των διαγραμμάτων απόδοσης τέμνουν τον άξονα  $x$  όταν ο τριπαραγωγικός κύκλος σταματήσει να παράγει επιπλέον ενέργεια και πλέον λειτουργεί μόνο σαν αντλία θερμότητας καθώς η παραγόμενη ενέργεια καταναλώνεται εξολοκλήρου από τον κύκλο ψύξης.

Ο κύκλος δεν παρουσιάζει συνθήκες μέγιστου  $EU\!F$  αλλά από τα διαγράμματα 5 και 8, τείνει να παρουσιάζει μέγιστο όταν το κλάσμα θερμοκρασιών  $\frac{T_I}{T_H}$  είναι ελάχιστο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως η θερμοκρασιακή διαφορά  $\Delta T_r$ , που είναι συνάρτηση των θερμοκρασιών  $T_I$ ,  $T_H$  και  $T_R$ , δεν αλλάζει με το  $T_H$ . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, καθώς η θερμοκρασία  $T_H$  μειώνεται, να αυξάνεται το ποσοστό του έργου που παράγεται κατά την διαστολή στον ψυκτικό κύκλο της εισαγόμενης θερμότητας. Επιπλέον, η θερμότητα που εκλύεται από τον κύκλο ισχύος και το έργο που παράγεται κατά την συστολή και που σχετίζεται με αυτήν την μεταφορά θερμότητας σαν ποσοστό της εισαγόμενης θερμότητας είναι σταθερά. Οι δυο αυτοί παράγοντες έχουν ως αποτέλεσμα να αυξάνουν το βαθμό απόδοσης και τον  $EU\!F$  καθώς η θερμοκρασία  $T_H$  μειώνεται.



## Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται αρχικά, μια προσπάθεια κατανόησης του ενεργειακού προβλήματος, των αιτιών που το δημιούργησαν και η κατάσταση που επικρατεί στον κόσμο σήμερα καθώς και στην Ελλάδα. Το ενεργειακό πρόβλημα ξεκίνησε κατά την βιομηχανική επανάσταση με την αυξανόμενη χρήση ορυκτών καυσίμων που είχε ως αποτέλεσμα την σταδιακή εξάρτηση από αυτά. Ενδεικτικό παράδειγμα η Β. Αμερική και η Δ. Ευρώπη, οι οποίες καταναλώνουν το 64,4% της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας ενώ κατέχουν το 47,5% των αποθεμάτων. Με την πάροδο του χρόνου, οι ενεργειακές ανάγκες του ανθρώπου πολλαπλασιάζονται, τα αποθέματα εξαντλούνται, οι πιθανότητες εύρεσης νέων κοιτασμάτων ολοένα και ελαττώνονται, ενώ το περιβάλλον συνεχώς επιβαρύνεται από τα σωματίδια των καυσαερίων. Στη χώρα μας τα πράγματα δεν είναι διαφορετικά, καθώς εξαρτάται σε ποσοστό 56% από τον λιγνίτη και σε 31% από εισαγωγές πετρελαϊκών προϊόντων όπως το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο. Για αυτό είναι αναγκαία η χρήση φιλικότερων προς το περιβάλλον τεχνολογιών με μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση.

Στη συνέχεια, επιχειρείται μια εισαγωγή στην τεχνολογία της συμπαραγωγής και τριπαραγωγής και μια ανάλυση των πλεονεκτημάτων αυτής της τεχνολογίας σε σχέση με τις συμβατικές μονάδες παραγωγής ενέργειας. Τα βασικότερα είναι η επαναχρησιμοποίηση της απορριπτόμενης ενέργειας, επιτυγχάνοντας αύξηση του βαθμού απόδοσης σε ποσοστό 30%, σε θεωρητικό επίπεδο και η παραγωγή πολύ λιγότερων σωματιδίων που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Συγκεκριμένα, αν χρησιμοποιείται παλιά τεχνολογία στους συμβατικούς σταθμούς και ορυκτά καύσιμα τότε οι εκπομπές των CO<sub>2</sub> μπορούν να μειωθούν από 25 – 45% με τη χρήση κατάλληλων συστημάτων τριπαραγωγής. Θα ήταν ιδανικό το σενάριο χρήσης βιοκαυσίμων σε τέτοιες μονάδες αφού οι εκπομπές CO<sub>2</sub> δεν επιδρούν στην παγκόσμια υπερθέρμανση καθώς θεωρούνται ήδη δεσμευμένες από την ατμόσφαιρα. Η εξάπλωση της τριπαραγωγής θεωρείται επιτακτική στην αντιμετώπιση του συνεχώς αυξανόμενου ενεργειακού προβλήματος. Επίσης, μια μονάδα τριπαραγωγής έχει πολύ μικρή περίοδο αποπληρωμής, σχεδόν 5 χρόνια, κάτι που καθιστά την τεχνολογία αυτή, οικονομικά βιώσιμη.

Η απόδοση ενός τριπαραγωγικού κύκλου ο οποίος βασίζεται σε μικρο-στρόβιλο και σε μια ψυκτική μονάδα απορρόφησης είναι πολύ χαμηλότερη συγκριτικά με έναν ιδανικό κύκλο. Αυτό οφείλεται στις εσωτερικές αναστρεψιμότητες καθώς και στη έλλειψη αλληλεπίδρασης με το περιβάλλον. Η απόδοσης ενός τριπαραγωγικού κύκλου αυξάνεται καθώς η υψηλή θερμοκρασία της δεξαμενής μειώνεται. Αυτό καθιστά τον κύκλο ιδανικό για χρήση της απορριπτόμενης θερμότητας. Ακόμα, η καθαρή ισχύς που παράγεται, αυξάνεται καθώς η  $T_l$  μειώνεται εις βάρος της

παραγόμενης θερμότητας ενώ η ψύξη δεν επηρεάζεται τόσο από την αλλαγή της ενδιάμεσης θερμοκρασίας. Η ανάλυση πεπερασμένου χρόνου σε τριπαραγωγικό κύκλο Carnot δείχνει υψηλότερες τιμές του ΕΥΦ και πως ο κύκλος είναι κατάλληλος όταν η θερμοκρασία της δεξαμενή υψηλής θερμοκρασίας είναι όσο το δυνατόν πιο χαμηλή. Ο ΕΥΦ λαμβάνει τη μέγιστη τιμή όταν τα τρία προϊόντα είναι σχεδόν ίσα. Η ανάλυση αυτή, δείχνει πως ο ΕΥΦ μειώνεται καθώς ο όρος  $\frac{T_I}{T_H}$  αυξάνεται και πως μεγαλύτερες τιμές μπορούν να επιτευχθούν, με κύκλους νέας τεχνολογίας.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. [http://kpe-kastor.kas.sch.gr/energy1/human\\_activities/what\\_is\\_energy.htm](http://kpe-kastor.kas.sch.gr/energy1/human_activities/what_is_energy.htm)  
(τελευταία πρόσβαση: 12/04/2016)
2. <http://www.allaboutenergy.gr/Intro11.html> (τελευταία πρόσβαση: 12/04/2016)
3. [http://kpe-kastor.kas.sch.gr/energy1/human\\_activities/forms\\_of\\_energy.htm](http://kpe-kastor.kas.sch.gr/energy1/human_activities/forms_of_energy.htm)  
(τελευταία πρόσβαση: 12/04/2016)
4. Ανδρίτσος Ν., «Ενέργεια και περιβάλλον», *Διδακτικές σημειώσεις, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος, 2008*
5. Καπλάνη Α., «Το ενεργειακό πρόβλημα στη σύγχρονη εποχή», *Ερευνητική Εργασία, 2013*
6. [http://5dim-pyrgou.ilei.sch.gr/energy/html/hist\\_ener4.htm](http://5dim-pyrgou.ilei.sch.gr/energy/html/hist_ener4.htm)  
(τελευταία πρόσβαση: 12/04/2016)
7. [http://mde-didaktiki.biol.uoa.gr/mde6/Lazaridis\\_Giorgos/files/energiako%20zitim.pdf](http://mde-didaktiki.biol.uoa.gr/mde6/Lazaridis_Giorgos/files/energiako%20zitim.pdf) (τελευταία πρόσβαση: 12/04/2016)
8. <http://epas-amarous.att.sch.gr/daidalosapospasmata.htm>  
(τελευταία πρόσβαση: 12/04/2016)
9. Ευθυμιάδης Α., «Εξοικονόμηση ενέργειας στα κτίρια: Δημιουργία νέων οικονομικά βιώσιμων θέσεων εργασίας», *Συνέδριο Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας, Αθήνα, 2010*
10. <http://medsos.gr/medsos/news/2008-12-16-00-12-16/2009-01-21-14-33-49/294-2009-01-20-14-26-20.html> (τελευταία πρόσβαση: 12/04/2016)
11. <https://www.clarke-energy.com/chp-cogeneration/> (τελευταία πρόσβαση: 12/04/2016)
12. Zogou O., “Transient Simulation of a Combined Cycle Trigeneration System Fueled by Natural Gas”, *Master thesis in Mechanical Engineering Department, University of Thessaly, School of Engineering, Volos, 2007*
13. Περδίκας Α., Παπαμελετίου Γ., «Συμπαράγωγή και Τριπαράγωγή Ηλεκτρισμού Θερμότητας με Έμφαση στη Χρήση Ανανεώσιμων

- Πηγών Ενέργειας», Πτυχιακή εργασία, Τεχνολογικό Ίδρυμα Κρήτης, Παράρτημα Χανίων, Τμήμα Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Χανιά, 2013,
14. Joel Bluestein, “Historical Impacts and Future Trends in Industrial Cogeneration”, *Energy and Environmental Analysis, Inc. Marie Lihn, Gas Research Institute, 1999*
15. <http://science.jrank.org/pages/1572/Cogeneration-History-cogeneration.html> (τελευταία πρόσβαση: 12/04/2016)
16. Σουγκάρα Α., «Πρότυπη Μονάδα Συμπααραγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας», Διπλωματική εργασία, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη, 2009
17. Meunier F., “Co- and Tri- generation Contribution to Climate Change Control”, *Applied Thermal Engineering, Vol. 22, Issue 6, April 2002, Pages 703–718*
18. <http://www.agroenergy.gr/categories/%CE%B2%CE%B9%CE%BF%CE%BA%CE%B1%CF%8D%CF%83%CE%B9%CE%BC%CE%B1> (τελευταία πρόσβαση: 12/04/2016)
19. Chen X., “Integration and Optimisation of Bio-fuel Micro Tri-generation with Energy Storage, PhD Thesis, Newcastle University, 2013.
20. Ge T., Tassou S.A., Chaer I, Suguartha N., “Application of Tri-generation Systems to the Food Retail Industry”, *Original Research article, Energy Conversion and Management, Vol. 48, Issue 11, November 2007, Pages 2988-2995*
21. <http://www.brightengineering.com/hvac/66065-ammonia-water-vapor-absorption-refrigeration-system/> (τελευταία πρόσβαση: 12/04/2016)
22. Kyoung Hoon Kim, Gimam Kim, and Chul Ho Han, “Performance Assessment of Ammonia-Water Based Power and Refrigeration Cogeneration Cycle”, *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing, Vol. 1, No. 1, February 2013*
23. Eva Thorin, “Power Cycles with Ammonia-water Mixtures as Working Fluids”, *Doctoral thesis in Department of Chemical*

- Engineering and Technology / Energy Processes, Royal Institute of Technology, Stockholm Sweden, 2000*
24. Horlock J.H., "Approximate Analysis of Feed and District Heating Cycles for Steam Combined Heat and Power", *Proc. Inst. Mech. Eng., Vol. 199 No C1, 1985*
25. Minciuc E., Le Corre O., Athanasovici V., Tazerout M., Bitir I., "Thermodynamic Analysis of Tri-generation with Absorption Chilling machine", *Applied Thermal Engineering, Vol. 23, Issue 11, August 2003, Pages 1391–1405*
26. Agnew B., Anderson A., Frost T.H. "Optimisation of a Steady Flow Carnot Cycle with External Irreversibility for Maximum Specific Output", *Applied thermal Engineering, Vol. 17, Issue 1, January 1997, Pages 3-15*
27. Agnew B., Walker S., B. Ng, I.C.K. Tam, "Maximum Output from a Tri- generation Cycle", *Applied Thermal Engineering, Vol. 20, 5 November 2015, Pages 1015-1020*
28. Agnew B., Walker S., B. Ng, I.C.K. Tam, "Finite Time Analysis of a Tri-generation Cycle", *Energies 2015, Vol. 8, Issue 6, pages 6215-6229*