



# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών  
Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών  
**«Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας»**

Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 73, Ζωγράφου – Τηλ. 210-7723655, Fax 210-7723565

## **ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**«ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΟΥ  
ΑΤΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ (ΑΗΣ) ΜΕ  
ΧΡΗΣΗ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ  
ΒΙΟΜΑΖΑΣ»**

## **Του Μεταπτυχιακού Φοιτητή**

Ανδρεαδάκη Νικηφόρου

## **Επιβλέπων**

Κακαράς Εμμανουήλ, Καθηγητής, Ε.Μ.Π.



## Ευχαριστίες...

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Κακαρά Εμμανουήλ, Καθηγητή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και διευθυντή του εργαστηρίου Ατμοκινητήρων και Λεβήτων Ε.Μ.Π., για την ευκαιρία που μου πρόσφερε να ασχοληθώ με το εξαιρετικά ενδιαφέρον θέμα της αναβάθμισης του Ατμοηλεκτρικού Σταθμού Μελίτη. Ταυτόχρονα, θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς τον κ. Σωτήρη Καρέλλα, Καθηγητή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την πολύτιμη στήριξη και καθοδήγηση στην προσπάθεια μου να ολοκληρώσω την μεταπτυχιακή εργασία.

Ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ ανήκει στο εξαιρετικό προσωπικό του εργαστηρίου Ατμοκινητήρων και Λεβήτων του Ε.Μ.Π. για το άριστο και πραγματικά ευχάριστο κλίμα συνεργασίας. Πιο συγκεκριμένα, θα ήθελα ευχαριστήσω τον Δρ. Μηχανολόγο Μηχανικό κ. Άγγελο Δουκέλη που συνείσφερε στην ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας με καταλυτικής σημασίας συμβουλές. Επίσης, ένα μεγάλο ευχαριστώ και στους υποψήφιους διδάκτορες Εμμανουήλ Καραμπίνη και Τρύφωνα Ρουμπεδάκη για τις πολύτιμες υποδείξεις και πληροφορίες σχετικά με την εργασία.

Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμότερες ευχαριστίες μου προς τους γονείς μου και τα αδέρφια μου για όλη την πνευματική και υλική υποστήριξη που μου προσφέρουν όλα αυτά τα χρόνια σε όλους τους τομείς της ζωής μου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω του φίλους μου οι οποίοι είναι δίπλα μου σε κάθε εύκολη αλλά και δύσκολη στιγμή της ζωής μου. Σας ευχαριστώ από καρδιάς για όλα.

## Σύνοψη

Η συνεχής βελτίωση του ανθρώπινου βιοτικού επιπέδου από τα τέλη του 18<sup>ου</sup> αιώνα και μετά έχει ως κύριο χαρακτηριστικό γνώρισμα την διαρκώς αυξανόμενη κατανάλωση ενέργειας σε Παγκόσμιο επίπεδο. Η ζήτηση αυτή καλύπτεται κυρίως από ορυκτά καύσιμα τα οποία είναι άρρηκτα συνδεδεμένα με την ρύπανση της Γης. Η εκπομπή μεγάλων ποσοτήτων διοξειδίων του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) από τους συμβατικούς Ατμοηλεκτρικούς Σταθμούς ενισχύει το φαινόμενο του θερμοκηπίου και συμβάλει στην κλιματική αλλαγή. Η σημαντική ανάπτυξη των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Α.Π.Ε.) τα τελευταία χρόνια αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα στην περαιτέρω αύξηση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα και δείχνει το δρόμο για ένα καλύτερο ενεργειακά και καθαρότερο περιβαλλοντικά μέλλον. Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία μελετάται η δυνατότητα αναβάθμισης του Ατμοηλεκτρικού Σταθμού Μελίτη μέσω σύζευξης Παραβολικών Κοίλων Ηλιακών Συλλεκτών (Parabolic Trough Collectors, PTCs) καθώς και χρήση Βιομάζας με σκοπό την μερική υποκατάσταση του καταναλισκόμενου λιγνίτη.

## Περίληψη

Ο ΑΗΣ Μελίτη βρίσκεται στο χωριό Μελίτη στη Φλώρινα και ξεκίνησε να λειτουργεί το 2003. Ανήκει στη Δ.Ε.Η. και έχει εγκατεστημένη ισχύ 330 MW<sub>el</sub>, καθαρά ηλεκτρική ισχύ 297 MW<sub>el</sub> και βαθμό απόδοσης στο πλήρες φορτίο 36,25%. Αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η εξέταση της δυνατότητας αναβάθμισης του ΑΗΣ Μελίτη με αξιοποίηση της Ηλιακής ενέργειας και της Βιομάζας. Αρχικά, γίνεται μελέτη για την ολική υποκατάσταση του τελευταίου εν σειρά προθερμαντήρα του Σταθμού με την εγκατάσταση Παραβολικών Κοίλων Ηλιακών Συλλεκτών (Parabolic Trough Collectors) οι οποίοι εκμεταλλεύονται την άμεση ηλιακή ακτινοβολία. Στη συνέχεια εξετάζεται η περίπτωση της μεικτής καύσης λιγνίτη και Βιομάζας με μετασκευή του υπάρχοντα λέβητα, με στόχο την μερική υποκατάσταση του πρώτου.

Στο πρώτο Κεφάλαιο αναφέρεται το πρόβλημα της κλιματικής αλλαγής λόγω των αυξανόμενων συγκεντρώσεων του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα και τονίζεται η ανάπτυξη των Α.Π.Ε. τόσο σε Ευρωπαϊκό όσο και Εθνικό επίπεδο. Δίνεται ο ορισμός της Βιομάζας και οι κατηγοριοποιήσεις της. Επίσης, γίνεται ανάλυση της ηλιακής ακτινοβολίας και περιγράφεται η αξιοποίηση της από τα Συγκεντρωτικά Ηλιακά Συστήματα (CSP Systems).

Στο δεύτερο Κεφάλαιο παρουσιάζεται το εμπορικό λογισμικό «GateCycle» της εταιρείας *General Electric* στο οποίο γίνεται η προσομοίωση του ΑΗΣ Μελίτη. Επίσης, μέσω του λογισμικού αυτού μοντελοποιείται το ηλιακό πεδίο με τους Παραβολικούς Κοίλους Ηλιακούς Συλλέκτες (PTCs) και καταγράφεται η λειτουργία του Σταθμού. Τέλος, γίνεται μοντελοποίηση της μεικτής καύσης λιγνίτη και Βιομάζας στον ΑΗΣ.

Στο τρίτο Κεφάλαιο γίνεται αναλυτική περιγραφή των επιμέρους υπό-συστημάτων από τα οποία αποτελείται ένας Σταθμός με Παραβολικούς Κοίλους Ηλιακούς Συλλέκτες. Αναλύεται το Ηλιακό Πεδίο, το Σύστημα Παραγωγής Ισχύος και το Σύστημα Αποθήκευσης Θερμότητας τέτοιων Ηλιοθερμικών Σταθμών.

Στο τέταρτο Κεφάλαιο, μελετάται η ενσωμάτωση Παραβολικών Κοίλων Ηλιακών Συλλεκτών στον ΑΗΣ Μελίτη με στόχο την ολική υποκατάσταση του τελευταίου εν σειρά προθερμαντήρα στο σημείο σχεδίασης. Η μελέτη γίνεται για δύο διαφορετικούς τύπους συλλεκτών, τον LS-3 και τον ET-150. Καταγράφεται η συλλογή της θερμικής ενέργειας των δύο ηλιακών πεδίων από την ηλιακή ακτινοβολία

και στη συνέχεια υπολογίζονται οι απώλειες πίεσης τόσο στο εκάστοτε ηλιακό πεδίο, όσο και στον ενδιάμεσο εναλλάκτη θερμότητας. Επιπλέον, αφού καταγραφούν οι καταναλώσεις των αντλιών των δύο διαφορετικών ηλιακών πεδίων, υπολογίζεται η καθαρά παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από αυτά. Τέλος, γίνεται οικονομική αξιολόγηση της εκάστοτε επένδυσης και συγκρίνονται τα αποτελέσματα.

Στο πέμπτο Κεφάλαιο ερευνάται η συμπεριφορά του ΑΗΣ Μελίτη στην περίπτωση της μεικτής καύσης λιγνίτη και Βιομάζας. Ως βιοκαύσιμα εξετάζονται ενεργειακές καλλιέργειες από Αγριαγκινάρα, Μίσχανθο, Παυλώνια, Ιτιά και Λεύκη, ενώ η υποκατάσταση του λιγνίτη γίνεται σε ποσοστά 5%, 10% και 15% της συνολικής θερμικής ισχύος. Γίνεται ανάλυση της μεικτής καύσης και καταγράφεται η λειτουργία του ΑΗΣ. Τέλος, γίνεται οικονομική αξιολόγηση για τα διαφορετικά βιοκαύσιμα και συγκρίνονται τα αποτελέσματα.

Στο έκτο και τελευταίο Κεφάλαιο καταγράφονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την μεταπτυχιακή εργασία και προτείνονται θέματα για μελλοντική έρευνα.

**Λέξεις κλειδιά:** Ατμοηλεκτρικός Σταθμός Μελίτη, Συγκεντρωτικά Ηλιακά Συστήματα, Παραβολικοί Κοίλοι Συλλέκτες, Βιομάζα, Ενεργειακές καλλιέργειες, Μεικτή καύση.

## Abstract

The continuous improvement of the human standard of living since the end of the 18<sup>th</sup> century has as its main feature the ever-increasing energy consumption worldwide. This demand is met mainly by fossil fuels which are inextricably linked to earth's pollution. The large amount of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions from coal-fired Power Plants exacerbates the Greenhouse effect and contributes to climate change. The significant growth of Renewable Energy Sources in the last decades is held as a deterrent against the further increase of CO<sub>2</sub> emissions and promises a cleaner energy future. This study investigates the upgrade of the Power Plant in Meliti by exploiting the thermal energy produced by Parabolic Trough Collectors, as well as utilizing biomass in order to reduce lignite consumption.

## Summary

The Meliti Power Plant is located at the homonymous village in Florina and commenced its operation in 2003. It belongs to P.P.C. and has a nominal capacity of 330 MW<sub>el</sub> and a net capacity of 297 MW<sub>el</sub>. The overall efficiency of the Plant at nominal conditions is 36.25%. The main purpose of this diploma thesis is to investigate the upgrade of Meliti Power Plant with the exploitation of thermal energy as well as biomass. First of all, the complete substitution of the last preheater of the plant with thermal energy generated by Parabolic Trough Collectors is studied. Furthermore, in order to reduce the lignite consumption, the retrofit of boiler for biomass co-firing is carried out.

The first chapter refers to climate change due to rising CO<sub>2</sub> emissions and emphasizes the development of Renewable Energy Sources in EU and Greece. Moreover, the definition and categories of biomass are provided. The final part of the chapter analyses the solar radiation and describes the principles of Concentrated Solar Power Plants.

In the second chapter, the commercial software «GateCycle» of the company *General Electric*, with which the modelling of Meliti Power Plant was developed, is presented. In addition, the model created in the software «GateCycle» of the solar field with Parabolic Trough Collectors is explained and the performance of the plant is carried out. Lastly, the model created in the software «GateCycle» of biomass co-firing is presented.

The third chapter is dedicated to the detailed description of power plant stations that use Parabolic Trough Collectors. The solar field, power block and thermal energy storage systems are presented.

In chapter four, the implementation of Parabolic Trough Collectors at Meliti Power Plant is examined. The main goal is to substitute completely the last preheater of the station with solar energy at the design point of solar field. The study contains two different collectors, namely LS-3 and ET-150. Moreover, the thermal energy produced by the solar field is explored and also the pressure drop in the solar field and heat exchanger is calculated in order to evaluate the solar field pump consumption. Finally, the net electricity production is calculated and subsequently a techno-economical study is carried out.

In the fifth chapter, the biomass co-firing of Meliti Power Plant is considered. The biofuels studied are energy crops of Cardoon, Miscanthus, Paulownia, Willow and Poplar. The substitution of lignite was performed at 5%, 10% and 15% of the total thermal energy content. Moreover, analysis of co-firing and Meliti Power Plant performance is presented. The final part of the chapter provides a techno-economical study for the different energy crops.

Lastly, in chapter six the conclusions of this study are summarized, including some ideas for further research.

**Key Words:** Meliti Power Plant, Concentrated Solar Power Plants, Parabolic Trough Collectors, Biomass, Energy crops, Co-firing

# Περιεχόμενα

<b>Ευχαριστίες</b> .....	i
<b>Σύνοψη</b> .....	ii
<b>Περίληψη</b> .....	ii
<b>Abstract</b> .....	iv
<b>Summary</b> .....	iv
<b>Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup> Εισαγωγικό κεφάλαιο</b> .....	1
1.1 Το ενεργειακό πρόβλημα .....	1
1.2 ΑΠΕ σε Ευρώπη και Ελλάδα.....	2
1.2.1 Η βιομάζα σε Παγκόσμιο επίπεδο .....	8
1.2.2 Η βιομάζα στην Ελλάδα .....	10
1.3 Ηλιακή Ενέργεια .....	11
1.3.1 Ενέργεια από τον ήλιο .....	11
1.3.2 Ηλιακός χρόνος .....	12
1.3.3 Ηλιακές γωνίες.....	12
1.3.4 Ηλιακή ακτινοβολία.....	13
1.4 Συγκεντρωτικά Ηλιακά Συστήματα.....	14
1.4.1 Ιστορικά στοιχεία .....	14
1.4.2 Περιγραφή λειτουργίας .....	18
1.4.3 Παραβολικοί κοίλοι ηλιακοί συλλέκτες.....	19
1.4.4 Ηλιακός πύργος ισχύος.....	20
1.4.5 Σύστημα με γραμμικούς ανακλαστήρες τύπου Fresnel .....	21
1.4.6 Συστήματα Δίσκου Μηχανής .....	23
<b>Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup> Μοντελοποίηση θερμοδυναμικού κύκλου με χρήση του λογισμικού GateCycle</b> .....	28
2.1 Το λογισμικό GateCycle .....	28
2.2 Μοντελοποίηση ΑΗΣ Μελίτη.....	30
2.3 Μοντελοποίηση Παραβολικών κοίλων συλλεκτών.....	32
2.4 Μοντελοποίηση Μεικτής καύσης.....	36
<b>Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup> Σταθμοί Παραγωγής Ενέργειας με Συστήματα Παραβολικών Κοίλων Συλλεκτών</b> .....	40
3.1 Εισαγωγή.....	40
3.2 Ηλιακό πεδίο.....	40
3.2.1 Γενικά .....	40
3.2.2 Παραβολικός Κοίλος Συλλέκτης.....	43



3.2.3 Ρευστό Μεταφοράς Θερμότητας .....	50
3.2.4 Απώλειες ηλιακού πεδίου .....	54
3.3 Μονάδα Παραγωγής Ισχύος.....	59
3.2.1 Σύστημα Παραγωγής ατμού .....	59
3.2.2 Σύστημα Παραγωγής Ενέργειας .....	59
3.4 Συστήματα αποθήκευσης θερμότητας.....	60
3.4.1 Ενεργά συστήματα αποθήκευσης .....	62
3.4.2 Παθητικά συστήματα αποθήκευσης .....	65
<b>Κεφάλαιο 4° Ενσωμάτωση Παραβολικών Κοίλων Συλλεκτών στον ΑΗΣ Μελίτη .....</b>	<b>67</b>
4.1 Δεδομένα .....	67
4.1.1 Σχεδιασμός ηλιακού πεδίου .....	69
4.2 Υδραυλικές Απώλειες ηλιακού πεδίου.....	72
4.3 Σχεδιασμός εναλλάκτη θερμότητας θερμικού ελαίου/νερού .....	74
4.3.1 Γενικά .....	74
4.3.2 Θερμική ανάλυση εναλλακτών θερμότητας .....	76
4.4 Αντλία ηλιακού πεδίου .....	86
4.5 Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια .....	87
4.6 Οικονομική αξιολόγηση.....	89
<b>Κεφάλαιο 5° Καύση βιομάζας στον ΑΗΣ Μελίτη.....</b>	<b>98</b>
5.1 Γενικά .....	98
5.2 Μεικτή καύση περισσότερων καυσίμων.....	98
5.3 Ανάλυση μεικτής καύσης.....	100
5.4 Εξεταζόμενα βιοκαύσιμα.....	101
5.4.1 Αγριαγκινάρα .....	102
5.4.2 Μίσχανθος .....	104
5.4.3 Παυλώνια.....	105
5.4.4 Ιτιά.....	106
5.4.5 Λεύκη .....	107
5.5 Αποτελέσματα μεικτής καύσης .....	108
5.6 Οικονομική αξιολόγηση.....	112
<b>Κεφάλαιο 6° Συμπεράσματα – προτάσεις για μελλοντική έρευνα .....</b>	<b>120</b>
<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>124</b>

# Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup> Εισαγωγικό κεφάλαιο

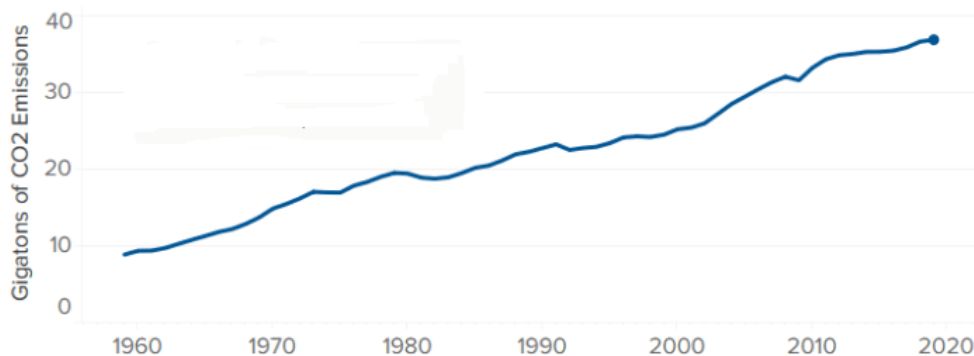
## 1.1 Το ενεργειακό πρόβλημα

Τους τελευταίους δύο αιώνες ο άνθρωπος έχει πραγματοποιήσει τεράστια τεχνολογικά άλματα τα οποία έχουν βελτιώσει όλους τους τομείς της δραστηριότητας του και φυσικά την ποιότητα της ζωής του. Κύριο χαρακτηριστικό της προόδου αυτής, ήταν και παραμένει, η συνεχώς αυξανόμενη παραγωγή και κατανάλωση ενέργειας. Πράγματι, από την βιομηχανική επανάσταση στα τέλη του 18<sup>ου</sup> αιώνα και μετά, παρατηρείται εκθετική αύξηση της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας. Η ζήτηση αυτή καλύπτονταν για πολλά χρόνια κυρίως από ορυκτά καύσιμα, όπως ο γαιάνθρακας, ο λιθάνθρακας, το αργό πετρέλαιο με τα παράγωγα του κ.α.. Η κατανάλωση συμβατικών καυσίμων αρχικά γινόταν από τις χώρες του Δυτικού κόσμου, όμως με το πέρασμα των χρόνων ολοένα και περισσότερες χώρες συμμετείχαν στην κατανάλωση αυτή.

Ανάλογη ήταν και η κατάσταση στην Ελλάδα από το 1970 μέχρι και τα πρώτα χρόνια της νέας χιλιετίας. Η ζήτηση ικανοποιείτο κυρίως από ηλεκτρισμό που παράγεται από την καύση λιγνίτη, ενός καυσίμου το οποίο είναι φτωχό ενεργειακά και ιδιαίτερα ρυπογόνο για το περιβάλλον αλλά ταυτόχρονα εγχώριο και φτηνό. Η πολιτική αυτή ανταποκρίθηκε στις απαιτήσεις των καιρών, εξασφαλίζοντας χαμηλό κόστος ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και ενεργειακή ασφάλεια για την χώρα.

Η χρήση συμβατικών καυσίμων όμως είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την ατμοσφαιρική ρύπανση. Η απελευθέρωση στην ατμόσφαιρα τοξικών αερίων, όπως τα SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, σωματίδια κ.α. αλλά και μη τοξικών, όπως το CO<sub>2</sub>, δημιουργούν αναπνευστικά προβλήματα στους ανθρώπους και άλλα φαινόμενα όπως η όξινη βροχή και το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Στην Εικόνα 1.1 φαίνεται η εξέλιξη των εκπομπών CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα στο πέρασμα των χρόνων. Τα τελευταία 30 χρόνια έχουν θεσμοθετηθεί νόμοι και διατάξεις που υποχρεώνουν τους φορείς που καίνε συμβατικά καύσιμα (παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, μεταφορές, βιομηχανία κλπ.) να χρησιμοποιούν συστήματα αντιρρύπανσης ώστε να περιορίζονται κατά το δυνατόν περισσότερο οι εκπομπές των τοξικών ρύπων. Παρόλο αυτά, οι εκπομπές CO<sub>2</sub> εξαρτώνται αποκλειστικά από τη σύσταση του καυσίμου και τις συνθήκες της καύσης, και όχι από την ύπαρξη ή μη συστημάτων αντιρρύπανσης. Το CO<sub>2</sub> είναι ένας παγκόσμιος “ρύπος” που συμμετέχει στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, συμβάλλοντας στην υπερθέρμανση του πλανήτη και την κλιματική αλλαγή. Η μείωση της εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα είναι ένα από τα σοβαρότερα ζητήματα για την αποφυγή της κλιματικής αλλαγής.

## Εκπομπές CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα



SOURCE: Global Carbon Project/CDIAC/Friedlingstein et al 2019. Data for 2019 is a Global Carbon Project projection.



Εικόνα 1.1: Εξέλιξη εκπομπών CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα [1]

### 1.2 ΑΠΕ σε Ευρώπη και Ελλάδα

Τη λύση σε αυτό το μείζονος σημασίας πρόβλημα μπορεί να δώσει η αυξημένη συμμετοχή των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) στο παγκόσμιο ενεργειακό μίγμα. Οι ΑΠΕ μπορούν να αποτελέσουν βασικό συστατικό ενός νέου ενεργειακού δόγματος και να καλύψουν σημαντικό μέρος της ενεργειακής ζήτησης των χωρών σε σύντομο χρονικό διάστημα, με ταυτόχρονη μείωση των εκπομπών του CO<sub>2</sub>. Χρειάζεται δηλαδή ένα μακροπρόθεσμο σχέδιο δράσης με γνώμονα την βιωσιμότητα σε παγκόσμιο, ευρωπαϊκό και εθνικό επίπεδο, ώστε να αντιμετωπιστούν έγκαιρα και αποτελεσματικά οι περιβαλλοντικές και οικονομικές προκλήσεις. Οι επικρατέστερες ΑΠΕ για την επίλυση του ενεργειακού προβλήματος είναι:

- Υδροηλεκτρική Ενέργεια
- Αιολική Ενέργεια
- Ηλιακή Ενέργεια
- Βιομάζα
- Γεωθερμία

Η Ευρωπαϊκή Ένωση όντας πρωτοπόρος των ΑΠΕ και σύμφωνα με τα παραπάνω εξέδωσε οδηγία το 2007 σύμφωνα με την οποία θα πρέπει στην Ευρώπη μέχρι το τέλος του 2020,

- να μειωθούν οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά 20% σε σχέση με τα επίπεδα του 1990
- να γίνει 20% διείσδυση των ΑΠΕ στο ενεργειακό σύστημα και 10% (κατ' ελάχιστον) των βιοκαυσίμων στις μεταφορές
- να μειωθεί κατά 20% η ενεργειακή κατανάλωση μέσω αποτελεσματικότερης ενεργειακής αξιοποίησης

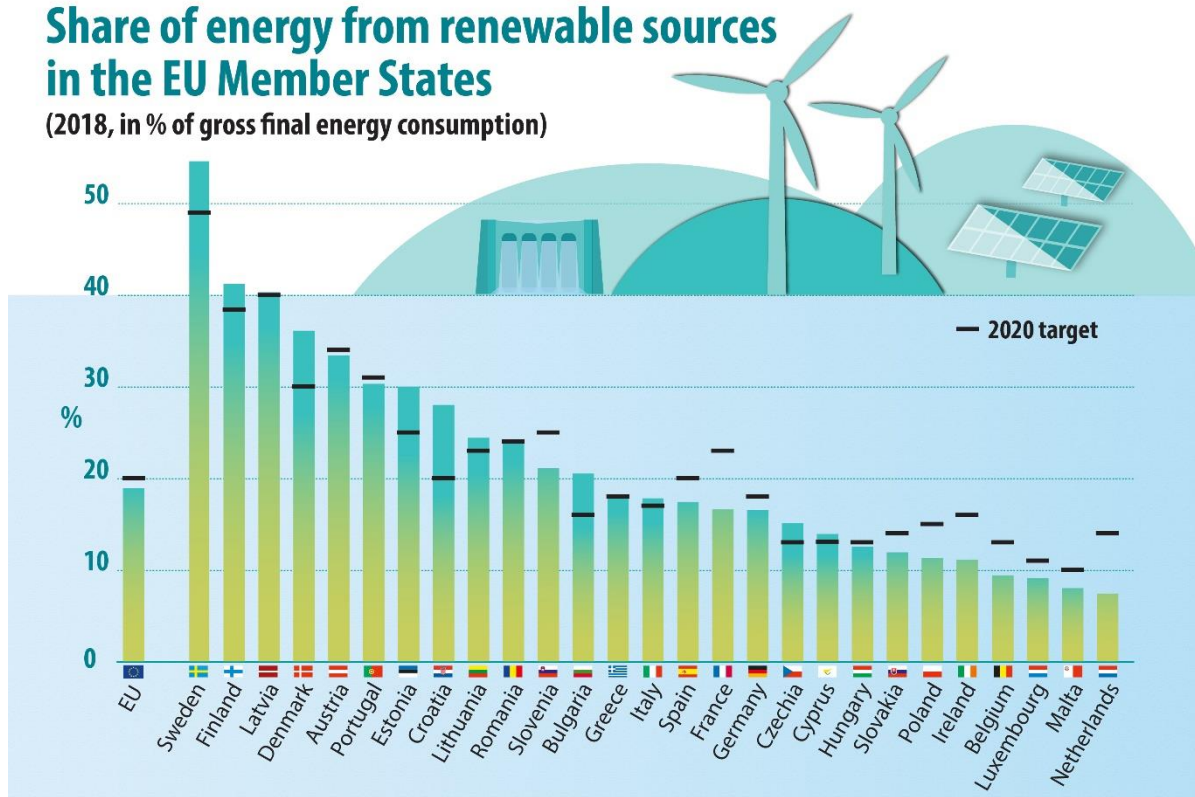
Ο στόχος που αφορά το 20% στις ΑΠΕ κατανέμεται μεταξύ των κρατών μελών με εθνικούς στόχους που κυμαίνονται από 10% για τη Μάλτα έως 49% για τη Σουηδία [2]. Η κατάσταση με τη συμμετοχή των

ΑΠΕ έως το 2018 για κάθε κράτος μέλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης φαίνεται στην Εικόνα 1.2. Οι χώρες τις Κεντρικής και Νότιας Ευρώπης παρουσιάζουν την μεγαλύτερη ανάπτυξη των ΑΠΕ τα τελευταία χρόνια. Στην Ευρώπη, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ βασίζεται κυρίως στην υδροηλεκτρική και την αιολική ενέργεια ενώ ακολουθούν η βιομάζα και η ηλιακή ενέργεια. Ωστόσο η χρήση των αιολικών και ηλιακών πάρκων στηρίζεται στις καιρικές συνθήκες οι οποίες μεταβάλλονται τόσο σε εποχική όσο και σε καθημερινή βάση. Επιπλέον η αιολική ενέργεια χαρακτηρίζεται από στοχαστικότητα και οι διακυμάνσεις στην ταχύτητα του ανέμου «εμφανίζονται» στην τάση του δικτύου, δημιουργώντας ορισμένα προβλήματα στα ηλεκτρικά δίκτυα. Για τους λόγους αυτούς η χρήση της στερεής βιομάζας κερδίζει ολοένα και περισσότερο έδαφος τα τελευταία χρόνια. Η χρήση βιομάζας για θέρμανση, ψύξη και ηλεκτρισμό μπορεί να έχει αξιοσημείωτα οφέλη σε ενεργειακό, οικονομικό, περιβαλλοντικό και εργασιακό επίπεδο. Επίσης, η βιομάζα μπορεί να συμβάλει στην ενεργειακή ασφάλεια της Ευρωπαϊκής Ένωσης όσο το μεγαλύτερο μέρος της ζήτησης καλύπτεται από πρώτες ύλες που βρίσκονται εντός Ευρώπης.

Τον Οκτώβριο του 2014 το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο ενέκρινε το νέο πλαίσιο για την Ενέργεια και το Κλίμα στην Ευρώπη έως το 2030 σύμφωνα με το οποίο αυξάνεται το ποσοστό των ΑΠΕ στο 27% της καταναλισκόμενης ενέργειας σε επίπεδο Ευρωπαϊκής Ένωσης. Μάλιστα το πλαίσιο αυτό αναθεωρήθηκε το 2018 και ο στόχος για το ποσοστό των ΑΠΕ αυξήθηκε στο 32%. Το πλαίσιο αυτό δεν θέτει δεσμευτικούς στόχους για τα κράτη μέλη. Αυτό σημαίνει ότι κάθε κράτος μέλος θα μπορεί να έχει ακόμη πιο αισιόδοξους εθνικούς στόχους. Μένει να φανεί τι αντίκτυπο θα έχει η αλλαγή αυτή στις αντίστοιχες πολιτικές εφαρμογές των επί μέρους κρατών μελών. Επίσης, το πλαίσιο αυτό περιλαμβάνει τη μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου κατά 40% σε σχέση με τα αντίστοιχα επίπεδα του 1990 καθώς και εξοικονόμηση ενέργειας τουλάχιστον κατά 32,5%. Οι κινήσεις αυτές δείχνουν την κατεύθυνση προς την δημιουργία μίας «νέας Ευρωπαϊκής Ένωσης», η οποία μέσα από την απανθρακοποίηση, την περεταίρω ανάπτυξη των ΑΠΕ και τη συνεργασία των κρατών μελών της, θα επιτύχει τον δύσκολο στόχο της αποφυγής της κλιματικής αλλαγής.

## Share of energy from renewable sources in the EU Member States

(2018, in % of gross final energy consumption)



ec.europa.eu/eurostat 

Εικόνα 1.2: Συμμετοχή ΑΠΕ ανά κράτος μέλος στην συνολική καταναλισκόμενη ενέργεια του [3]

Παράλληλα η προώθηση των ΑΠΕ συνάδει και με την εκπλήρωση των δεσμεύσεων που έχει αναλάβει η χώρα μας ως κράτος μέλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Με βάση την οδηγία του 2009 η Ελλάδα θα πρέπει να έχει πετύχει συμμετοχή των ΑΠΕ σε ποσοστό 18% στην συνολική κατανάλωση ενέργειας μέχρι το τέλος του 2020. Η χώρα μας χαρακτηρίζεται από μέρη με υψηλό αιολικό δυναμικό, υψηλή ηλιοφάνεια και προσφέρεται για την ανάπτυξη των ΑΠΕ. Πράγματι τα τελευταία 20 χρόνια έχουν εγκατασταθεί πολλά αιολικά πάρκα αλλά και φωτοβολταϊκά συστήματα σε πολλές περιοχές της Ελληνικής επικράτειας. Μάλιστα, στο τέλος του 2019 το σύνολο των αιολικών πάρκων που βρίσκονταν σε εμπορική ή δοκιμαστική λειτουργία ήταν 3576,4 MW, ενώ η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των φωτοβολταϊκών συστημάτων ανέρχεται στα 2828 MW. Επίσης, η υδροηλεκτρική ενέργεια έχει γνωρίσει σημαντική ανάπτυξη στη χώρα μας. Στη Δυτική και Βόρεια Ελλάδα υπάρχει ιδιαίτερα πλούσιο δυναμικό υδατοπτώσεων λόγω της διαμόρφωσης λεκανών απορροής και των σημαντικών βροχοπτώσεων, κάνοντας τις περιοχές αυτές κατάλληλες για αξιοποίηση της υδραυλικής ενέργειας του νερού. Από το 1927 και τα πρώτα 4 μικρά υδροηλεκτρικά έργα σε Γλαύκο, Βέρμιο, Αγιά Χανίων και Αγίου Ιωάννη Σερρών συνολικής ισχύος 6 MW, έχουμε φτάσει τα 3,4 GW εγκατεστημένης ισχύος το 2020 σε όλο τον Ελλαδικό χώρο. Όσον αφορά τα πεδία βιομάζας, βιοαερίου και βιορευστών η κατάσταση μέχρι σήμερα στη χώρα μας είναι η εξής, [4],

- 56 έργα διαθέτουν άδεια παραγωγής με πρώτη ύλη το βιοαέριο, συνολικής ισχύος 168,2 MW
- 7 έργα διαθέτουν άδεια λειτουργίας συνολικής ισχύος 48,8 MW

- 11 έργα διαθέτουν εμπορική άδεια λειτουργίας συνολικής ισχύος 35,1 MW
- 12 έργα διαθέτουν περιβαλλοντική αδειοδότηση συνολικής ισχύος 25,3 MW
- 26 έργα διαθέτουν άδεια παραγωγής πριν το στάδιο της Απόφασης Έγκρισης Περιβαλλοντικών Όρων (ΑΕΠΟ) συνολικής ισχύος 59 MW

Η Ελλάδα θεωρείται προνομιούχος χώρα όσον αφορά και την γεωθερμία καθώς διαθέτει δύο πεδία υψηλής ενθαλπίας (350 °C) σε Μήλο και Νίσυρο και πολλά πεδία μέσης και χαμηλής ενθαλπίας (από 35 °C έως 140 °C) σε λεκάνες της Βόρειας Ελλάδας και σε πολλά μεγάλα νησιά του Κεντρικού και Βόρειου Αιγαίου. Αν και παρουσιάζονται πολύ μεγάλες δυνατότητες για την αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας με οικονομικά συμφέροντες όρους, αυτές δεν είναι γνωστές στους κατοίκους πολλών περιοχών της Ελλάδας. Έτσι, η γεωθερμία περιορίζεται στη θέρμανση θερμοκηπίων, στις ιχθυοκαλλιέργειες για την ξήρανση ψαριών, τον ιαματικό τουρισμό και τις γεωθερμικές αντλίες θερμότητας. Η εγκατεστημένη ισχύς της γεωθερμικής ενέργειας στην χώρα μας είναι 250 MW (Νοέμβριος 2017) [5].

Πίνακας 1.1: Αναλυτικά στοιχεία συμμετοχής ΑΠΕ στην Ελλάδα. Πηγή Eurostat [3]

Συμμετοχή ΑΠΕ	2005	2010	2015	2016	2017
Ηλεκτροπαραγωγή	8,21%	12,31%	22,09%	22,66%	24,48%
Μεταφορές	0,05%	1,91%	1,08%	1,61%	4,00%
Ψύξη / Θέρμανση	12,76%	17,91%	25,76%	24,57%	26,57%
<b>Συνολική παραγόμενη ενέργεια</b>	<b>7,02%</b>	<b>9,81%</b>	<b>15,39%</b>	<b>15,08%</b>	<b>16,95%</b>

Επιπλέον η χώρα μας, με βάση το Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα, έχει εξαγγείλει το κλείσιμο όλων των λιγνιτικών μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέχρι το 2028, ενώ ταυτόχρονα θέτει ως στόχο την αύξηση της συμμετοχής των ΑΠΕ στο 35% Ακαθάριστης Τελικής Κατανάλωσης Ενέργειας και στο 61% με 64% της Ακαθάριστης Τελικής Κατανάλωσης Ηλεκτρικής Ενέργειας έως το τέλος του 2030. Το κλείσιμο των λιγνιτικών μονάδων πρόκειται να καλυφθεί από περισσότερες ΑΠΕ και από μονάδες φυσικού αερίου, οι οποίες εκπέμπουν σημαντικά μικρότερες ποσότητες CO<sub>2</sub> σε σχέση με τις αντίστοιχες λιγνιτικές.

## Βιομάζα

Ο όρος βιομάζα περιλαμβάνει οποιοδήποτε υλικό προέρχεται από ζωντανούς οργανισμούς. Πιο συγκεκριμένα, η βιομάζα ορίζεται ως το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα προϊόντων, αποβλήτων και κατάλοιπων βιολογικής προέλευσης από τη γεωργία (συμπεριλαμβανομένων των φυτικών και των ζωικών ουσιών), τη δασοκομία και τους συναφείς κλάδους, συμπεριλαμβανομένης της αλιείας και της υδατοκαλλιέργειας, καθώς και το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα των βιομηχανικών αποβλήτων και των αστικών απορριμμάτων.

Ο χαρακτηρισμός της βιομάζας ως «ουδέτερη CO<sub>2</sub>» (CO<sub>2</sub> neutral) προκύπτει από το γεγονός ότι κατά την διάρκεια της καύσης απελευθερώνεται επακριβώς η ποσότητα CO<sub>2</sub> η οποία προηγουμένως είχε αφομοιωθεί από την ατμόσφαιρα για την ανάπτυξη των φυτών. Σε αντίθεση με τη φυσική αποσύνθεση της βιομάζας και οργανικών υπολειμμάτων σε δάση ή σε χώρους υγειονομικής ταφής, αποφεύγεται η εμφάνιση επιπρόσθετων αερίων του θερμοκηπίου, όπως το μεθάνιο (CH<sub>4</sub>), το οποίο είναι 22,8 φορές πιο επικίνδυνο από το CO<sub>2</sub>.

Στην πράξη υπάρχουν δύο τύποι βιομάζας: οι υπολειμματικές μορφές βιομάζας (τα κάθε είδους φυτικά υπολείμματα, ζωικά απόβλητα και αστικά απορρίμματα) και αυτή που παράγεται από ενεργειακές καλλιέργειες.

Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν τα αγροτικά και δασικά υπολείμματα που προκύπτουν κατά τις περιόδους συγκομιδής και κοπής αντίστοιχα, όπως για παράδειγμα άχυρα, στελέχη αραβοσίτου, στελέχη βαμβακιάς, κλαδιά και φλοιοί δέντρων, κληματίδες κλπ. Επίσης ανήκουν και τα υποπροϊόντα που προέρχονται από τη μεταποίηση ή επεξεργασία τέτοιων υλικών, όπως τα ελαιοπυρηνόξυλα, τα υπολείμματα βαμβακιού, το πριονίδι κ.α.. Τα παραπάνω αποτελούν την λεγόμενη στερεή βιομάζα, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή θερμότητας σε οικισμούς, την παραγωγή ηλεκτρισμού σε ατμοηλεκτρικούς σταθμούς, μονάδες συνδυασμένου κύκλου, αποκεντρωμένες μονάδες κλπ. ή την ταυτόχρονη παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας σε μονάδες συμπαραγωγής. Επιπλέον, στην κατηγορία της υπολειμματικής βιομάζας εμπεριέχονται τα ζωικά απόβλητα, όπως τα απόβλητα κτηνοτροφικών μονάδων (βουστασίων, χοιροστασίων, πτηνοτροφείων). Στα ζωικά απόβλητα περιλαμβάνεται κυρίως η κοπριά. Συνήθως η κοπριά εναποτίθεται στα χωράφια όπου χρησιμοποιείται ως λίπασμα για την βελτίωση της σοδιάς. Επίσης, τα ζωικά υπολείμματα χρησιμοποιούνται σε βιοαντιδραστήρες όπου μέσω της διεργασίας της αναερόβιας χώνεψης παράγεται το βιοαέριο. Μέσω της διαδικασίας αυτής το οργανικό κλάσμα ενός υλικού αποσυντίθεται από τους αναερόβιους μικροοργανισμούς που περιέχει, σε συνθήκες απουσίας οξυγόνου. Το βιοαέριο αποτελείται κυρίως από μεθάνιο (CH<sub>4</sub>) και διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) σε ποσοστά 55-70% και 30-45% αντίστοιχα. Επίσης, περιέχει ελάχιστες ποσότητες άλλων αερίων όπως άζωτο (N<sub>2</sub>), υδρογόνο (H<sub>2</sub>), αμμωνία (NH<sub>3</sub>), υδρατμούς (H<sub>2</sub>O), υδρόθειο (H<sub>2</sub>S), στο οποίο οφείλεται η έντονη οσμή του κ.α.. Η Θερμογόνος Ικανότητα του βιοαερίου κυμαίνεται από 20 έως 25 MJ/m<sup>3</sup>. Το βιοαέριο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για θέρμανση ή μαγείρεμα, ενώ επίσης μπορεί να τροφοδοτήσει Μηχανές Εσωτερικής Καύσης (ΜΕΚ), καυστήρες αερίου ή αεριοστροβίλους για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο μεταφορών, αφού προηγηθεί ένα στάδιο καθαρισμού και αναβάθμισής του. Τέλος, στην κατηγορία της υπολειμματικής βιομάζας εμπεριέχονται τα βιομηχανικά και αστικά απόβλητα. Πρόκειται για το οργανικό κλάσμα των αστικών και βιομηχανικών λυμάτων, των σκουπιδιών, των απορριμμάτων που προέρχονται από κήπους καθώς και υπολειμμάτων φαγητού.

Η μεγαλύτερη μονάδα βιοαερίου στην Ευρώπη ανήκει στην εταιρεία «Επίλεκτος» και βρίσκεται στα Φάρσαλα, Εικόνα 1.3. Η μονάδα έχει εγκατεστημένη ισχύ 6 MW, μέγιστη καθαρή ηλεκτρική ισχύ 5,252 MW<sub>e</sub> και παράγει ηλεκτρική ενέργεια τροφοδοτούμενη με φυτικά και ζωικά απόβλητα τα οποία προέρχονται από περίπου 100 κτηνοτροφικές και μεταποιητικές μονάδες της ευρύτερης περιοχής. Το κόστος της κατασκευής της έφτασε τα 17,5 εκατομμύρια ευρώ και ξεκίνησε την λειτουργίας της το 2019.



Εικόνα 1.3: Μονάδα βιοαερίου της εταιρείας «Επίλεκτος» στα Φάρσαλα Λάρισας

Στην δεύτερη κατηγορία ανήκουν οι ενεργειακές καλλιέργειες. Πρόκειται για φυτά τα οποία καλλιεργούνται με αποκλειστικό σκοπό την παραγωγή ενέργειας και όχι την κατανάλωση τους. Η παραγόμενη ενέργεια από τα ενεργειακά φυτά μπορεί να είναι υπό τη μορφή θερμότητας, ηλεκτρισμού ή και βιοκαυσίμων, όπως το βιοντίζελ και η βιοαιθανόλη. Οι ενεργειακές καλλιέργειες διακρίνονται με βάση την κατηγοριοποίηση των παραγόμενων βιοκαυσίμων καθώς και με βάση τον κύκλο ζωής τους.

Όσον αφορά το πρώτο κριτήριο, οι καλλιέργειες διακρίνονται με βάση την κατηγορία βιοκαυσίμων που παράγουν. Έτσι προκύπτουν τα βιοκαύσιμα 1<sup>ης</sup>, 2<sup>ης</sup>, 3<sup>ης</sup> και 4<sup>ης</sup> γενιάς. Τα βιοκαύσιμα 1<sup>ης</sup> γενιάς προέρχονται από καρπούς φυτών και βρώσιμες καλλιέργειες όπως το ζαχαροκάλαμο για την παραγωγή αιθανόλης στη Βραζιλία, το καλαμπόκι για την παραγωγή αιθανόλης στις Η.Π.Α. και ποικιλίες ελαιούχων σπόρων για την παραγωγή βιοντίζελ στη Γερμανία. Μάλιστα, οι Η.Π.Α. και η Βραζιλία παράγουν το 87,5% της αιθανόλης παγκοσμίως. Αν και τα φυτά αυτά παράγουν βιοκαύσιμα υψηλού επιπέδου υπάρχουν ηθικοί ενδοιασμοί και παγκόσμια ανησυχία ως προς την χρήση τους, την στιγμή που χιλιάδες άνθρωποι πεθαίνουν από την πείνα ετησίως. Εναλλακτική λύση αποτελούν τα βιοκαύσιμα 2<sup>ης</sup> γενιάς, τα οποία χρησιμοποιούν πρώτη ύλη μη ανταγωνιστική με τα τρόφιμα, όπως κυτταρίνη, ημικυτταρίνη, λιγνίνη ή πηκτίνη, καθώς και απόβλητα, ενώ παράγουν κατά κύριο λόγο βιοντίζελ [6]. Τα βιοκαύσιμα 3<sup>ης</sup> γενιάς προέρχονται από μικροφύκη (άλγη) και υπολογίζονται ότι μπορούν να αποδώσουν περίπου 30 φορές περισσότερη ενέργεια ανά μονάδα καλλιεργούμενης έκτασης. Στους μικροοργανισμούς αυτούς γίνεται χρήση CO<sub>2</sub> ως θρεπτική ύλη για την παραγωγή βιοντίζελ, συνθετικού ντίζελ ή βιοαιθανόλης. Τέλος, τα βιοκαύσιμα 4<sup>ης</sup> γενιάς έχουν ως στόχο της ανάπτυξη βιομάζας με αυξημένη δέσμευση CO<sub>2</sub> και διεργασιών παραγωγής βιοκαυσίμων αρνητικού άνθρακα με γεω-αποθήκευση του CO<sub>2</sub>. Τέτοια βιοκαύσιμα αποτελούν βιουδρογόνο και το βιομεθάνιο [7].



Με βάση το κριτήριο του κύκλου ζωής του φυτού υπάρχουν οι εξής υποκατηγορίες,

- Πολυετείς δασικές: Ψευδακακία (*Robinia pseudoacacia*), Ευκάλυπτος (*Eucalyptus globulus* Labill, *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh) κ.α.
- Πολυετείς γεωργικές: Καλάμι (*Arundo donax* L.), Μίσχανθος (*Miscanthus x giganteus*), Γιατρόφα (*Jatropha curcas* L.), switchgrass (*Panicum virgatum*), Αγριαγκινάρα (*Cynara cardunculus* L.) κ.α. Ανάλογα με το είδος της, η Ιτιά (*Willow*, οικογένεια *Salix*) μπορεί να ανήκει, είτε στις γεωργικές, είτε στις δασικές πολυετείς καλλιέργειες
- Ετήσιες: Ηλίανθος (*Helianthus annuus* L.), σακχαρούχο σόργο και ινώδες σόργο (*Sorghum bicolor* L. Moench), κενάφ (*Hibiscus cannabinus* L.), ελαιοκράμβη (*Brassica napus* L.), βρασσική η αιθιοπία (*Brassica carinata* L. Braun) κ.α.

Σε κάθε περίπτωση, η επιλογή των καλλιεργειών σχετίζεται άμεσα με τις κλιματικές συνθήκες και την ποιότητα του χώματος κάθε περιοχής. Αυτός είναι και ο βασικός λόγος που διαφορετικές καλλιέργειες ευδοκιμούν σε διαφορετικές περιοχές του πλανήτη και έτσι πρέπει να εξετάζονται οι δυνατότητες παραγωγής βιοενέργειας σε σχέση με τα χαρακτηριστικά της διαθέσιμης βιομάζας.

#### 1.2.1 Η βιομάζα σε Παγκόσμιο επίπεδο

Η βιοενέργεια είναι η μεγαλύτερη πηγή ανανεώσιμης ενέργειας παγκοσμίως. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τον Πίνακα 1.2, το 2017 η πρωτογενής ενέργεια που προήλθε από βιομάζα ήταν 55,6 EJ (ExaJoule) και για πρώτη φορά από το 2000 παρατηρήθηκε μείωση στην τιμή της. Παρόλο την μείωση αυτή, η συμμετοχή της βιομάζας στην συνολική ενέργεια που προέρχεται από ΑΠΕ αγγίζει το 70%. Ωστόσο, είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η μεγαλύτερη συνεισφορά στο ποσοστό αυτό προέρχεται από την παραδοσιακή χρήση της βιομάζας για μαγείρεμα και θέρμανση σε αναπτυσσόμενες περιοχές.

Πίνακας 1.2: Πρωτογενής ενέργεια από ΑΠΕ σε EJ [8]

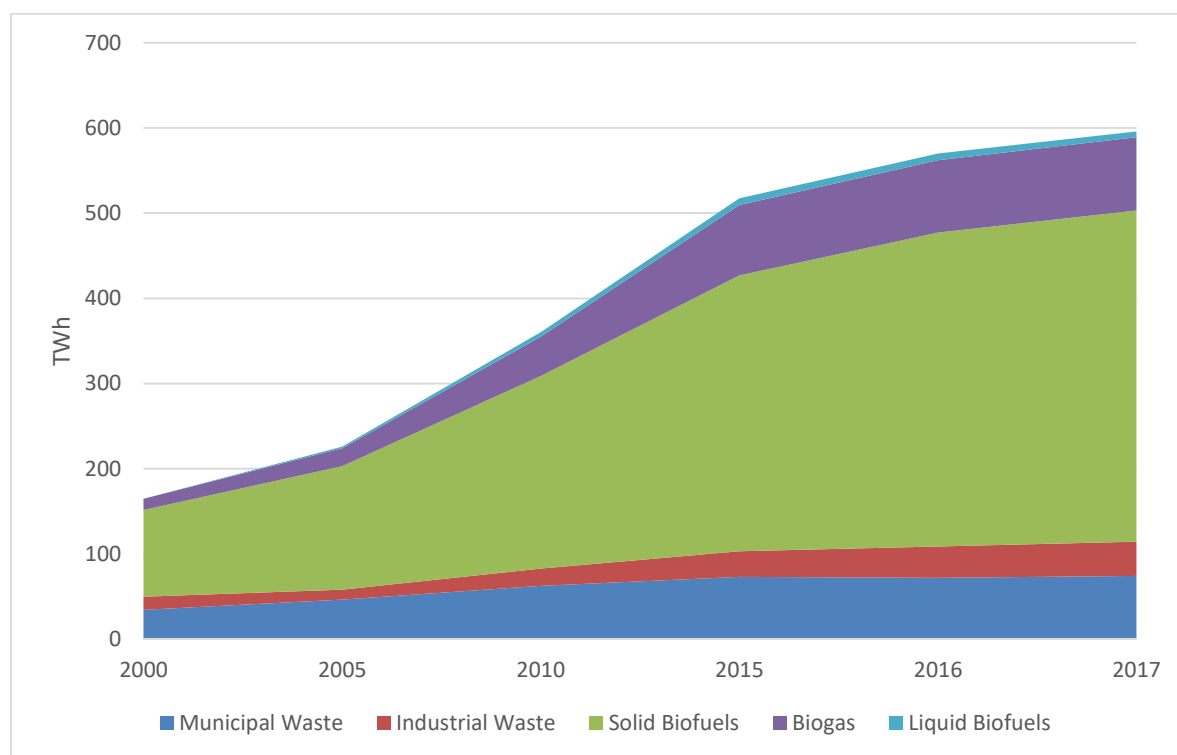
Year	Biomass	Hydro	Solar	Wind	Geothermal	Tide etc.	Total
2000	42,8	9,43	0,21	0,11	2,19	0,002	54,7
2005	45,9	10,6	0,31	0,37	2,25	0,002	59,4
2010	51,2	12,4	0,77	1,23	2,61	0,002	68,2
2015	55,1	14,1	2,27	3,02	3,02	0,004	77,7
2016	56,5	14,6	2,60	3,45	2,45	0,004	80,5
2017	55,6	14,7	3,07	4,06	4,06	0,004	81,1

Η κατάσταση είναι λίγο διαφορετική όσον αφορά τον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής, Πίνακας 1.3 [9]. Από το 2000 έως το 2017 το ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας που προέρχεται από ΑΠΕ έχει αυξηθεί από το 19% στο 25%, ενώ η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας την ίδια περίοδο έχει αυξηθεί περισσότερο από 10000 TWh. Όσον αφορά τις ΑΠΕ, κυρίαρχο ρόλο παίζει η υδροηλεκτρική ενέργεια, ενώ ακολουθούν η αιολική, η βιομάζα και η ηλιακή ενέργεια. Ωστόσο, η ραγδαία ανάπτυξη της αιολικής και ηλιακής ενέργειας, φαίνεται από το γεγονός ότι σε αυτά τα 17 χρόνια η ηλεκτροπαραγωγή πολλαπλασιάστηκε κατά σχεδόν 36 και 300 φορές αντίστοιχα, την στιγμή που η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από βιομάζα αυξήθηκε κατά σχεδόν 4 μόνο φορές.

Πίνακας 1.3: Ηλεκτροπαραγωγή από ΑΠΕ σε TWh [8]

Year	Total Electricity	Renewable Electricity	Biomass	Hydro	Solar	Wind	Geothermal	Tide etc.	Renewable (%)
2000	15522	2950	164	2700	1,52	31,4	52,0	0,55	19
2005	18381	3412	226	3019	4,50	104	58,3	0,52	19
2010	21571	4337	360	3532	33,8	341	68,1	0,51	20
2015	24732	5689	517	3993	260	839	80,5	1,01	23
2016	25082	6119	571	4170	339	958	81,7	1,03	24
2017	25717	6461	596	4197	454	1127	85,3	1,04	25

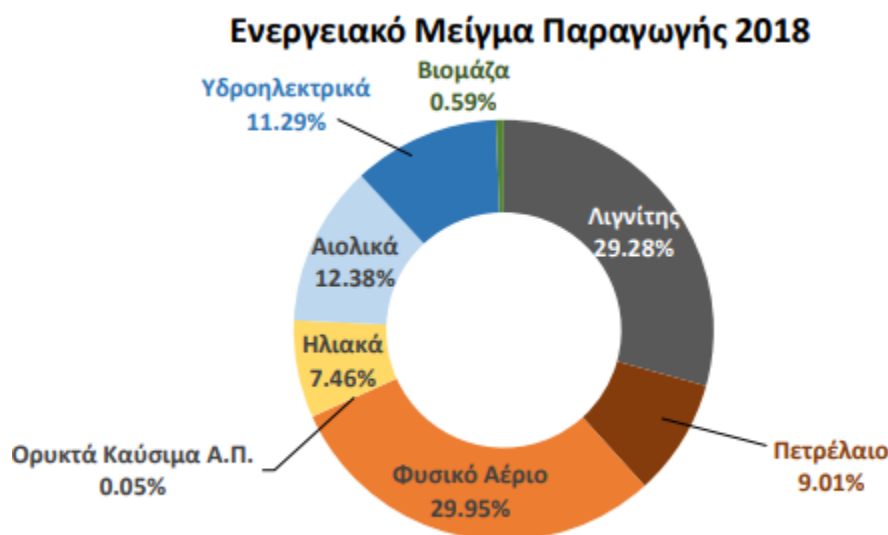
Πιο συγκεκριμένα, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από βιομάζα βασίζεται κυρίως στην καύση στερεής βιομάζας (wood pellets, wood chips κ.λ.π.) σε μεγάλους ατμοηλεκτρικούς σταθμούς καθώς και σε σταθμούς συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (Combined Heat & Power Plants, CHP). Στην συνέχεια ακολουθούν το βιοαέριο, τα αστικά και βιομηχανικά απόβλητα και τέλος τα υγρά βιοκαύσιμα. Μάλιστα, το 2017 η συμμετοχή των αστικών και βιομηχανικών αποβλήτων ξεπέρασε το 19% και το βιοαέριο συνεισέφερε κατά 14% στη συνολική παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από βιομάζα. Τα υγρά βιοκαύσιμα δεν συμμετέχουν πολύ στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής αφού είναι περισσότερο κατάλληλα στον τομέα των μεταφορών.



Εικόνα 1.4: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από βιομάζα παγκοσμίως [8]

### 1.2.2 Η βιομάζα στην Ελλάδα

Σήμερα η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στη χώρα μας προέρχεται κυρίως από τον λιγνίτη, ο οποίος είναι και το εθνικό μας καύσιμο, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, δηλαδή από ρυπογόνα συμβατικά καύσιμα. Παράλληλα, αν και η διείσδυση του φυσικού αερίου παρουσίασε σημαντική πρόοδο τα τελευταία χρόνια, εξακολουθεί να καταλαμβάνει ένα σχετικά μικρό μερίδιο της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος και να βρίσκεται μακριά από τον Ευρωπαϊκό μέσο όρο. Επιπλέον, η διείσδυση των ΑΠΕ παρουσίασε σημαντική αύξηση την τελευταία δεκαετία, κυρίως μέσω της εφαρμογής ισχυρών πολιτικών μέτρων. Αν και στην αρχή της προηγούμενης δεκαετίας οι εφαρμογές των ΑΠΕ παρουσίασαν υψηλούς ρυθμούς ανάπτυξης, στη συνέχεια σημείωσαν ύφεση. Αυτό συνέβη διότι υπάρχουν σημαντικά περιθώρια βελτίωσης του θεσμικού πλαισίου που αφορά τις ΑΠΕ, ανάγκη ενίσχυσης των σχετικών υποδομών για την πρόσβαση και σύνδεση των ΑΠΕ καθώς και διασφάλιση της ασφαλούς λειτουργίας του Εθνικού Ηλεκτρικού Συστήματος σε συνθήκες υψηλής διείσδυσης των ΑΠΕ.



Εικόνα 1.5: Ενεργειακό μείγμα ηλεκτροπαραγωγής στην Ελλάδα για το έτος 2018 [10]

Ως χώρα, έχουμε ένα πολύ αξιόλογο δυναμικό, τόσο για αξιοποίηση δασικών και αγροτικών υπολειμμάτων, όσο και για νέες καλλιέργειες ενεργειακών φυτών υψηλής απόδοσης, κάποια από τα οποία ευνοούνται από τις εγχώριες κλιματολογικές συνθήκες σε σύγκριση με χώρες του Ευρωπαϊκού Βορρά. Ωστόσο, όπως φαίνεται και από την Εικόνα 1.5, η Ελλάδα έχει καθυστερήσει σημαντικά στην αξιοποίηση του πλούσιου δυναμικού βιομάζας που διαθέτει. Μέχρι σήμερα έχουν γίνει κάποια θετικά πρώτα βήματα σε επίπεδο νομοθεσίας και κινήτρων και ασφαλώς υπάρχουν αξιόλογες εφαρμογές (κυρίως σε εφαρμογές βιοκαυσίμων και βιοαερίου), όμως βρισκόμαστε ακόμα πολύ πίσω σε σύγκριση με άλλες Ευρωπαϊκές χώρες. Για παράδειγμα, ως προς την τελική κατανάλωση ενέργειας, βρισκόμαστε στην 19<sup>η</sup> θέση από τα 27 μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Δηλαδή, η συμμετοχή της βιομάζας στη χώρα μας είναι μόλις στο 5% περίπου, ενώ σύμφωνα με μελέτη του ΚΑΠΕ είναι εφικτό να καλύπτει το 75% των

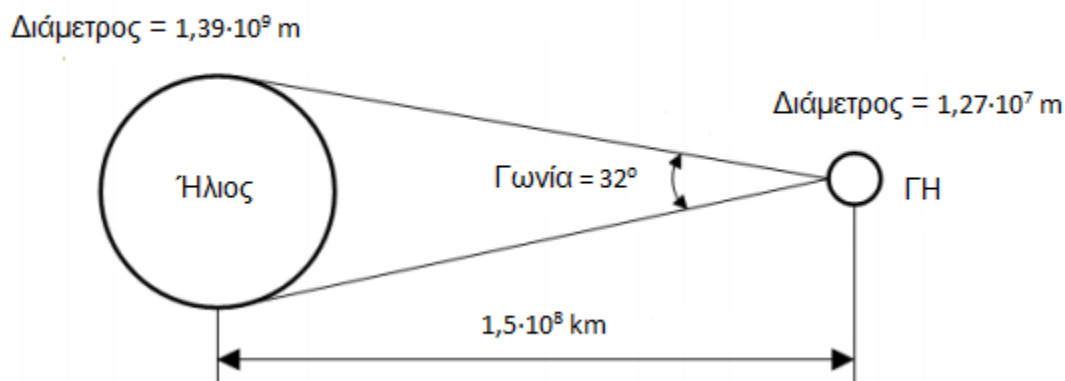
συνολικών αναγκών μας σε ενέργεια. Αντίστοιχα, όσον αφορά την ηλεκτροπαραγωγή διαθέτουμε αισίως εγκατεστημένη ισχύ περί τα 90 MW, έναντι στόχου των 350 MW μέχρι το τέλος του 2020.

### 1.3 Ηλιακή Ενέργεια

#### 1.3.1 Ενέργεια από τον ήλιο

Ο ήλιος είναι μια σχεδόν τέλεια σφαίρα διαμέτρου  $1,39 \cdot 10^9$  m και αποτελείται από θερμή ύλη αέριας μορφής με θερμοκρασία μέλανος σώματος 5778 K. Η θερμοκρασία τον πυρήνα του είναι σημαντικά υψηλότερη. Πρόκειται για έναν αντιδραστήρα σύντηξης που μετατρέπει συνεχώς το υδρογόνο σε ήλιο. Τα 3/4 περίπου της μάζας του αποτελούνται από υδρογόνο και το υπόλοιπο 1/4 κυρίως από ήλιο. Επίσης, περιέχει σε πολύ μικρές ποσότητες και ορισμένα βαρύτερα στοιχεία όπως οξυγόνο, διοξείδιο του άνθρακα, νέον, σίδηρο κ.α.. Η μάζα του είναι περίπου  $2 \cdot 10^{30}$  kg και αντιπροσωπεύει περίπου το 99,86% της συνολικής μάζας του ηλιακού μας συστήματος. Η απόσταση του ήλιου από τη Γη είναι  $1,5 \cdot 10^8$  km και καθώς η ηλιακή ακτινοβολία ταξιδεύει στο κενό με την ταχύτητα του φωτός, φτάνει τελικά σε αυτήν μετά από 8 λεπτά και 20 δευτερόλεπτα [11, 12, 13].

Η ηλιακή ενέργεια είναι το προϊόν της ακατάπαυστης σύντηξης του υδρογόνου σε ήλιο που συμβαίνει στον πυρήνα του και μεταφέρεται προς κάθε κατεύθυνση με την μορφή ακτινοβολίας. Η συνολική ενέργεια που παράγεται από τον ήλιο είναι  $3,8 \cdot 10^{20}$  MW, ενέργεια που αντιστοιχεί σε  $63,51$  MW/m<sup>2</sup> (επιφανείας του). Ωστόσο, η Γη δέχεται ένα μικρό ποσοστό μόνο από την ενέργεια αυτή που ισοδυναμεί με  $1,7 \cdot 10^{14}$  kW. Παρόλο αυτά, ακόμα και με αυτό το μικρό ποσοστό υπολογίζεται ότι η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στη Γη σε διάστημα 84 λεπτών είναι ικανή να καλύψει τις παγκόσμιες ενεργειακές ανάγκες ετησίως.



Εικόνα 1.6: Κύρια γεωμετρικά χαρακτηριστικά Γης-Ήλιου

Η ελλειπτική τροχιά της Γης γύρω από τον ήλιο, καθώς και η κλίση  $23,45^\circ$  του άξονα περιστροφής της σε σχέση με την κάθετο στην τροχιά της, παίζουν κυρίαρχο ρόλο στη θέση που βλέπει τον ήλιο ένας παρατηρητής πάνω στη Γη ανά πάση στιγμή και κατ' επέκταση της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της. Αυτοί οι δύο παράγοντες είναι υπεύθυνοι για την ύπαρξη των εποχών στον πλανήτη μας.

Η γνώση της διαδρομής που ακολουθεί ο ήλιος κατά μήκος του ουρανού είναι απαραίτητη για τον υπολογισμό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στην επιφάνεια της Γης, της ληφθείσας θερμότητας, τον σωστό προσανατολισμό των ηλιακών συλλεκτών καθώς και την σωστή τοποθέτηση τους ώστε να αποφεύγονται οι σκιάσεις [14].

### 1.3.2 Ηλιακός χρόνος

Για τους υπολογισμούς σε συστήματα που αφορούν την ηλιακή ενέργεια ο χρόνος κατά την διάρκεια της ημέρας πρέπει να εκφράζεται σε Ηλιακή Ώρα. Ηλιακός χρόνος (True Solar Time, TST) είναι ο χρόνος που μετριέται με βάση την φαινόμενη κίνηση του ηλίου στον ουρανό. Έτσι, ηλιακό μεσημέρι είναι η χρονική στιγμή κατά την οποία ο ήλιος τέμνει τον μεσημβρινό του παρατηρητή. Ο ηλιακός χρόνος δεν συμπίπτει με τον τοπικό χρόνο που δείχνει το ρολόι (Local Solar Time, LST). Η παρακάτω σχέση συνδέει τους δύο χρόνους,

$$TST = LST \pm 4 \cdot (L_{ST} - L_{Loc}) + E$$

όπου,  $L_{ST}$  είναι το γεωγραφικό μήκος του μεσημβρινού στον οποίο βασίζεται ο τοπικός χρόνος (για την Ελλάδα είναι  $L_{ST}=30^\circ$ ) και  $L_{Loc}$  είναι το τοπικό γεωγραφικό μήκος του παρατηρητή. Η σχέση ισχύει με + για τα δυτικά μήκη και με - για τα ανατολικά. Ο συντελεστής 4 εκφράζει min/μείρα. Τέλος, E (σε min) είναι η εξίσωση του χρόνου που λαμβάνεται για κάθε ημέρα του έτους από την παρακάτω σχέση,

$$E \text{ (min)} = 9,87 \cdot \sin(2 \cdot B) - 7,53 \cdot \cos(B) - 1,5 \cdot \sin(B)$$

$$B = 360 \cdot \frac{n - 81}{364}$$

και  $n=1 \div 365$  η ημέρα του έτους.

### 1.3.3 Ηλιακές γωνίες

#### Ωριαία γωνία (Hour angle, $\omega$ )

Είναι η γωνιακή μετατόπιση του ηλίου ανατολικά ή δυτικά του τοπικού μεσημβρινού λόγω της περιστροφής της Γης περί τον άξονα της με ρυθμό  $15^\circ$  ανά ώρα. Με σημείο αναφοράς τον Ηλιακό χρόνο, η ωριαία γωνία δίνεται από τη σχέση,

$$\omega = 15^\circ / h \cdot (TST - 12)$$

#### Ηλιακή απόκλιση (Declination, $\delta$ )

Είναι η γωνιακή θέση του ηλίου κατά το ηλιακό μεσημέρι ως προς το επίπεδο του ισημερινού. Ισχύει ότι  $-23,45 < \delta < 23,45$ , με τις θετικές τιμές προς τον Βορρά. Υπολογίζεται από τη σχέση,

$$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(\frac{360 \cdot (284 + n)}{365}\right)$$

όπου και πάλι  $n=1 \div 365$  η ημέρα του έτους.

### Ηλιακό ύψος (Elevation angle, EL)

Πρόκειται για την γωνία που σχηματίζεται από την ευθεία οράσεως του ηλίου και την προβολή της στο οριζόντιο επίπεδο. Για τους υπολογισμούς που θα ακολουθήσουν μπορεί να προσεγγιστεί ικανοποιητικά από την σχέση,

$$\sin(EL) = \cos(\omega) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(lat) + \sin(\delta) \cdot \sin(lat)$$

όπου lat το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής.

### Αζιμούθιο ηλίου (Azimuth angle, AZ)

Είναι η γωνία που σχηματίζεται από την προβολή της ευθείας οράσεως του ηλίου στο οριζόντιο επίπεδο και την Νότια κατεύθυνση. Δίνεται από την σχέση,

$$\sin(AZ) = \frac{\cos(\delta) \cdot \sin(\omega)}{\cos(EL)}$$

### 1.3.4 Ηλιακή ακτινοβολία

Η ηλιακή ακτινοβολία ταξιδεύοντας στο διάστημα εισέρχεται στην ατμόσφαιρα της Γης μέσω της ιονόσφαιρας. Ένα μέρος της ακτινοβολίας αυτής απορροφάται από τα σύννεφα και τα διάφορα στοιχεία που υπάρχουν στα στρώματα της ατμόσφαιρας ( $O_3$ ,  $H_2O$ ,  $CO_2$ ), ένα μέρος ανακλάται πίσω στο διάστημα (περίπου το 50%) και ένα μέρος φτάνει τελικά στην επιφάνεια της Γης. Η τροχία κίνησης της Γης γύρω από τον ήλιο αλλά και η περιστροφή της γύρω από τον άξονα της, προκαλούν ανισοκατανομές της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στα διάφορα μέρη του κόσμου. Όλα τα παραπάνω σε συνάρτηση με τις γρήγορες αλλαγές των μετεωρολογικών συνθηκών που μπορεί να συμβούν σε μία τοποθεσία που μελετάται η εγκατάσταση συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων, καθιστούν επιτακτική την γνώση των τιμών της ηλιακής ακτινοβολίας ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Για την καλύτερη κατανόηση του όρου της ηλιακής ακτινοβολίας, αυτή χωρίζεται σε διάχυτη και άμεση.

#### Διάχυτη ακτινοβολία (Diffuse Normal Irradiance)

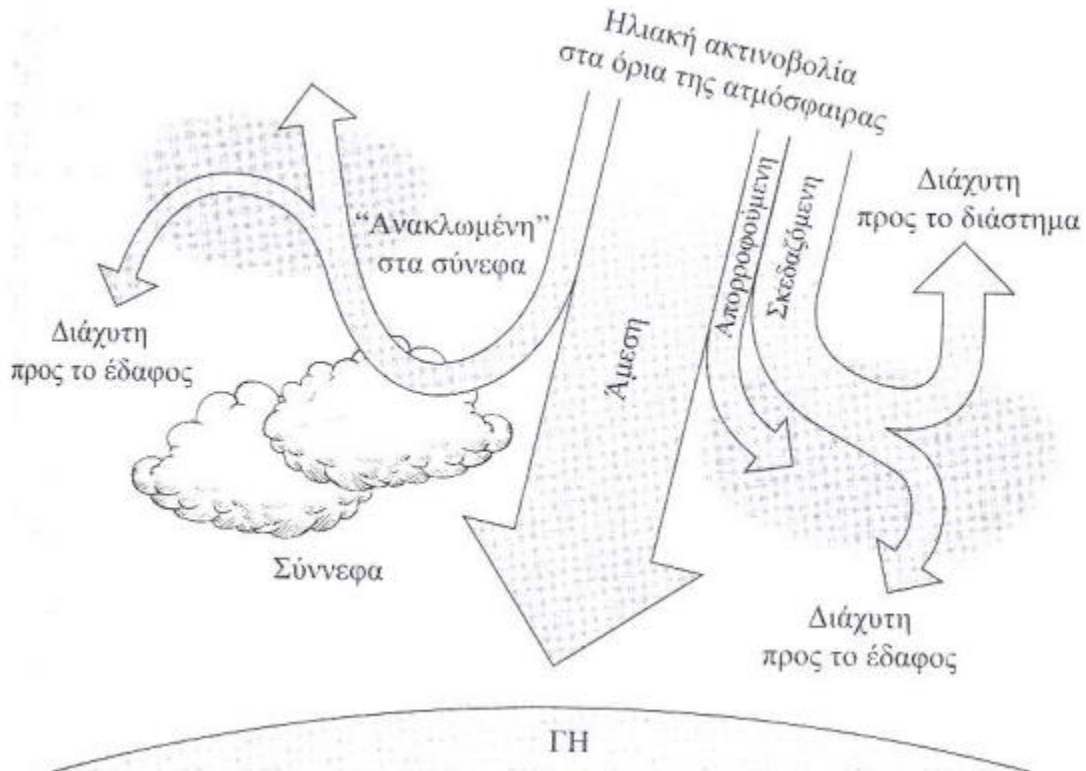
Ονομάζεται το μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στη Γη μετά από διασκορπισμό και αλλαγή κατεύθυνσης κατά τη διαδρομή της μέσα στην ατμόσφαιρα. Πρόκειται ουσιαστικά για την ακτινοβολία η οποία κατά τη διάρκεια της μέρας μας δίνει την αίσθηση της ηλιοφάνειας ακόμα και όταν δεν μπορούμε να δούμε τον ήλιο. Συμβολίζεται συνήθως με  $G_d$  ( $W/m^2$ ).

#### Άμεση ακτινοβολία (Direct Normal Irradiance)

Είναι το μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει κατευθείαν στη Γη από τον ήλιο, χωρίς να μεσολάβησει διασκορπισμός μέσα στην ατμόσφαιρα. Συμβολίζεται συνήθως με  $G_b$  ή DNI ( $W/m^2$ ). Τονίζεται στο σημείο αυτό ότι τα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα έχουν τη δυνατότητα να εκμεταλλεύονται μόνο την άμεση ακτινοβολία και όχι την διάχυτη, καθώς αυτή δεν μπορεί να συγκεντρωθεί. Συνεπώς, έχει μεγάλη σημασία η γνώση των τιμών της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας ανά τακτά χρονικά διαστήματα (π.χ. ανά ώρα) για την μελέτη ηλιοθερμικών συστημάτων.

## Ολική ακτινοβολία (Global Normal Irradiance)

Είναι το άθροισμα της άμεσης και της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας, συμπεριλαμβανομένης και της ανακλώμενης ακτινοβολίας από παρακείμενες επιφάνειες. Συνήθως συμβολίζεται με  $G$  ( $W/m^2$ ) και είναι  $G=G_b+G_d$ . Τα μεγέθη  $G$ ,  $G_b$  και  $G_d$  αναφέρονται σε στιγμιαίες τιμές.



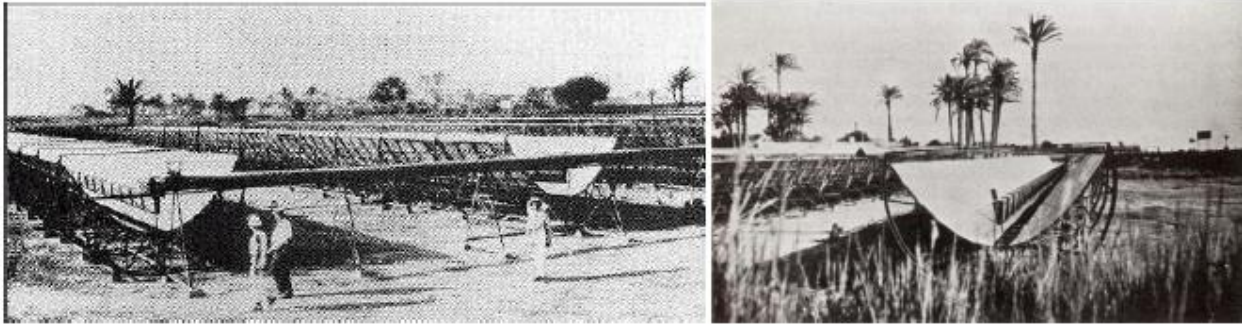
Εικόνα 1.7: Διαχωρισμός ηλιακής ακτινοβολίας (τυπικό σχήμα)

## 1.4 Συγκεντρωτικά Ηλιακά Συστήματα

### 1.4.1 Ιστορικά στοιχεία

Οι πρώτες εφαρμογές που είχαν ως στόχο την αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας έγιναν τον 19<sup>ο</sup> αιώνα. Πιο συγκεκριμένα, το 1860 ο *Auguste Mouchout* ανέπτυξε την πρώτη ηλιακή διάταξη για να δώσει θερμική ισχύ σε μία ατμομηχανή, ενώ το 1880 ο *John Ericsson* κατασκεύασε τον πρώτο παραβολικό ηλιακό συλλέκτη για να δώσει θερμότητα σε μία μηχανή που λειτουργούσε με αέρα. Αργότερα, το 1907 οι Γερμανοί *Wilhelm Meier* και *Adolf Remshardt*, κατοχύρωσαν την πρώτη πατέντα για την παραγωγή ατμού με χρήση παραβολικού ηλιακού συλλέκτη. Επίσης, το 1913 ο Άγγλος *F. Shuman* και ο Αμερικανός *C.V. Boys* κατασκεύασαν μια αντλητική εγκατάσταση ισχύος 45 kW για άρδευση στην περιοχή Maadi στην Αίγυπτο, Εικόνα 1.8, η οποία λειτουργούσε με θερμότητα που προέρχονταν από παραβολικούς ηλιακούς συλλέκτες. Πιο αναλυτικά, η θερμότητα που συλλέγονταν από τους παραβολικούς συλλέκτες χρησιμοποιούνταν για την παραγωγή ατμού, ο οποίος τροφοδοτούσε τους κινητήρες ατμού οι οποίοι με τη σειρά τους κινούσαν τις αντλίες του νερού. Οι παραβολικοί συλλέκτες είχαν μήκος 62m και

παραβολικό άνοιγμα 4m ενώ η συνολική έκταση γης για τους συλλέκτες ήταν 1200 m<sup>2</sup>. Η αντλητική εγκατάσταση ήταν ικανή να αντλήσει 27000 λίτρα νερού ανά λεπτό. Παρόλο αυτά, η εγκατάσταση σταμάτησε να λειτουργεί το 1915 εξαιτίας του 1<sup>ου</sup> Παγκοσμίου Πολέμου καθώς επίσης και των μειωμένων τιμών των συμβατικών καυσίμων που έκαναν τις αντίστοιχες εγκαταστάσεις με καυστήρες συμβατικών καυσίμων περισσότερο κερδοφόρες.



Εικόνα 1.8: Παραβολικοί ηλιακοί συλλέκτες, Αίγυπτος 1913 [15]

Από την περίοδο εκείνη μέχρι και την πετρελαϊκή κρίση στα μέσα της δεκαετίας του 1970 δεν υπήρχε κάποια σημαντική τεχνολογική ανάπτυξη των ηλιακών συστημάτων. Αντιθέτως η αύξηση των τιμών των συμβατικών καυσίμων, λόγω της κρίσης αυτής, είχε ως συνέπεια την αναζωπύρωση του ενδιαφέροντος για τις ηλιακές τεχνολογίες και πιο συγκεκριμένα,

- Από το 1977 έως το 1982 η εταιρεία *Acurex* εγκατέστησε πιλοτικούς παραβολικούς ηλιακούς συλλέκτες με συνολική έκταση γης κοντά στα 10000 m<sup>2</sup> στις Η.Π.Α. για εφαρμογές θερμικών διεργασιών
- Κατασκευάστηκε το 1979 στην Αριζόνα το πρώτο θερμικό ηλιακό εργοστάσιο ισχύος 150 kW<sub>e</sub> με παραβολικούς ηλιακούς συλλέκτες
- Εννέα μέλη του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας συμμετείχαν στο ερευνητικό σχέδιο κατασκευής εγκαταστάσεων επίδειξης ισχύος 500 kW στην Αλμερία που ξεκίνησαν την λειτουργία τους το 1981
- Με ιδιωτική χρηματοδότηση κατασκευάστηκε η πρώτη μηχανή θερμικής επεξεργασίας που χρησιμοποιούσε παραβολικούς ηλιακούς συλλέκτες συνολικής επιφάνειας 5580 m<sup>2</sup> και τέθηκε σε λειτουργία το 1983 στην Αριζόνα για θέρμανση δεξαμενών με ηλεκτρολύτες σε εταιρεία επεξεργασίας χαλκού. Το σύστημα αυτό ήταν ικανό να παράγει θερμότητα για βιομηχανική χρήση σε θερμοκρασίες υψηλότερες των 260 °C

Το 1983 η *Southern California Edison (SCE)*, πάροχος ηλεκτρικού ρεύματος στην Νότια Καλιφόρνια, υπογράφει συμβόλαιο με την Αμερικανική/Ισραηλινή εταιρεία *Luz International* για να αγοράζει από αυτήν ηλεκτρική ενέργεια από τους δύο σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής με συστήματα παραβολικών ηλιακών συλλεκτών που θα κατασκευάζονταν στην έρημο Mojave της Καλιφόρνιας. Οι Ηλίο-Θερμικοί σταθμοί αυτοί, που ονομάστηκαν SEGS (Solar Electric Generating Station) I και II, ξεκίνησαν να λειτουργούν το 1985 και 1986, και είχαν ισχύ 14 MW και 30 MW αντίστοιχα. Πρόκειται για μία μεγάλη τεχνολογική υπέρβαση που τελικά οδήγησε στην κατασκευή επτά επιπλέον σταθμών έως το 1991. Η συνολική ισχύς και των εννέα σταθμών ανέρχεται στα 354 MW. Σε αντίθεση με τους σταθμούς που κατασκευάζονται την τελευταία περίοδο, η εξέλιξη, κατασκευή και λειτουργία των SEGS ήταν έργο ιδιωτικής εταιρείας. Οι σταθμοί SEGS συνεχίζουν την λειτουργία τους μέχρι και σήμερα, τροφοδοτώντας



με ηλεκτρική ενέργεια το εθνικό σύστημα της Νότιας Καλιφόρνιας. Περισσότερες πληροφορίες δίνονται στον Πίνακα 1.4.

Πίνακας 1.4: Ηλιο-Θερμικοί σταθμοί (SEGS) I έως IX [15]

Ηλιο-Θερμικός Σταθμός / SEGS	Έτος λειτουργίας	Καθαρή Ισχύς (MW <sub>e</sub> )	Θερμοκρασία εξόδου από ηλιακό πεδίο (°C)	Έκταση ηλιακού πεδίου (m <sup>2</sup> )	Ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (GWh <sub>e</sub> )	Δυνατότητα υβριδοποίησης
I	1985	14	307	82960	30	Σύστημα αποθήκευσης 3 ωρών
II	1986	30	316	190338	80	Υπερθεμαντήρας με καύση αερίου
III & IV	1987	30	349	230300	93	λέβητας αερίου
V	1988	30	349	250500	93	λέβητας αερίου
VI	1989	30	390	188000	91	λέβητας αερίου
VII	1989	30	390	194280	93	λέβητας αερίου
VIII	1990	80	390	464340	253	καυστήρας αερίου για θέρμανση του ρευστού μετάδοσης θερμότητας
IX	1991	80	390	483960	256	καυστήρας αερίου για θέρμανση του ρευστού μετάδοσης θερμότητας

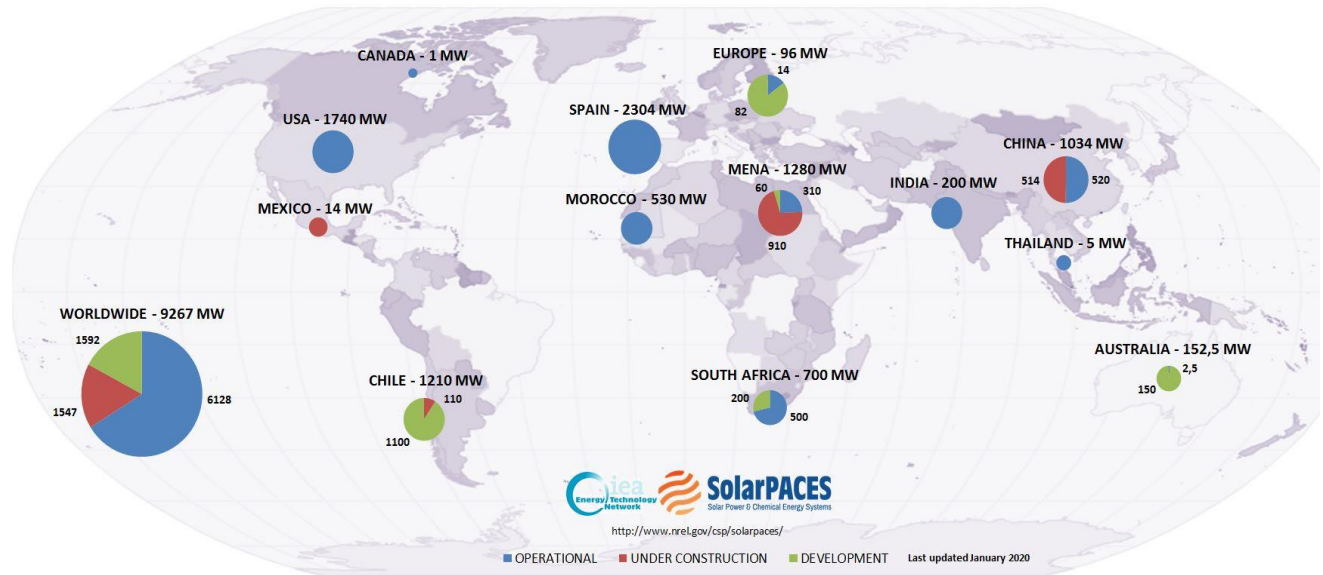
Η κατασκευή και η εμπειρία από τη λειτουργία των σταθμών αυτών βοήθησαν στην κατανόηση και ωρίμανση των παραβολικών ηλιακών συλλεκτών και παρείχαν τη βασική γνώση για την περαιτέρω ανάπτυξη της τεχνολογίας αυτής. Μετά το 1991, η επόμενη κατασκευή θερμικού ηλιακού σταθμού με παραβολικούς συλλέκτες έγινε το 2007 στην Νεβάδα με το εργοστάσιο Solar One, ισχύος 64 MW<sub>e</sub>. Το πρώτο θερμικό ηλιακό εργοστάσιο με παραβολικούς ηλιακούς συλλέκτες στην Ευρώπη κατασκευάστηκε στην Γρανάδα της Ισπανίας. Πρόκειται για το εργοστάσιο Andasol I, το οποίο βρίσκεται στην οροσειρά Sierra Nevada και ξεκίνησε την λειτουργία του το 2008. Στα μέσα του 2009 ξεκίνησε τη λειτουργία του και το εργοστάσιο Andasol II, ενώ το 2011 το Andasol III, τα οποία βρίσκονται δίπλα στο πρώτο, Εικόνα 1.9. Κάθε εργοστάσιο από τα τρία έχει ισχύ 50 MW<sub>e</sub> και παράγει περίπου 179 GWh<sub>e</sub> ετησίως, οι οποίες πωλούνται στην εταιρεία Endesa που είναι πάροχος ενέργειας στην Ισπανία. Τα εργοστάσια αυτά ήταν τα πρώτα που διέθεταν σύστημα αποθήκευσης θερμότητας (7,5 ωρών στο πλήρες φορτίο) ενώ μπορούν να λειτουργούν σχεδόν ολόκληρο το 24ωρο. Το σύστημα αποθήκευσης αποτελείται από δύο δεξαμενές που μπορούν να αποθηκεύσουν 30000 τόνους τετηγμένου άλατος, το οποίο είναι το μέσο αποθήκευσης θερμότητας [16].



*Εικόνα 1.9: Τα ηλιακά θερμικά εργοστάσια Andasol I, II και III*

Τονίζεται στο σημείο αυτό ότι εκτός από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, οι παραβολικοί ηλιακοί συλλέκτες μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την παραγωγή θερμότητας για βιομηχανική χρήση. Η θερμότητα αυτή μπορεί να απαιτείται σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Για παράδειγμα, στην χημική βιομηχανία ή την βιομηχανία τροφίμων η θερμότητα μπορεί να απαιτείται από τους 80 °C έως τους 250 °C. Για τις περιπτώσεις που χρειάζεται θερμότητα για θερμοκρασίες από 150 °C έως 250 °C χρησιμοποιούνται συγκεντρωτικοί ηλιακοί συλλέκτες ενώ για θερμοκρασίες μικρότερες των 100 °C μπορούν να χρησιμοποιηθούν μη συγκεντρωτικοί ηλιακοί συλλέκτες. Οι συλλέκτες που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ωφέλιμης θερμότητας είναι μικρότερων διαστάσεων από τους αντίστοιχους που χρησιμοποιούνται στην ηλεκτροπαραγωγή.

Την τελευταία κυρίως δεκαετία με έντονο τον προβληματισμό γύρω από την κλιματική αλλαγή έχουν αλλάξει οι πολιτικές πολλών Ευρωπαϊκών και άλλων Παγκοσμίων χωρών σχετικά με την ηλεκτροπαραγωγή, στρεφόμενες προς τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να έχουν κατασκευαστεί ή να σχεδιάζονται να κατασκευαστούν αρκετά ηλιακά εργοστάσια με παραβολικούς συλλέκτες τόσο στην Ισπανία και την Αμερική, όσο και σε άλλες χώρες όπως η Κίνα, η Αίγυπτος, το Μαρόκο η Αυστραλία κ.α.. Στην Εικόνα 1.10 φαίνεται η κατάσταση που επικρατεί παγκοσμίως για όλα τα συγκεντρωτικά Ηλιακά Συστήματα [17].



Εικόνα 1.10: Παγκόσμια κατάσταση συγκεντρωτικών ηλιακών σταθμών [17]

#### 1.4.2 Περιγραφή λειτουργίας

Οι θερμικοί ηλιακοί σταθμοί παραγωγής ενέργειας είναι μία τεχνολογία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας η οποία χρησιμοποιεί την θερμότητα που προέρχεται από τη συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας πάνω σε μία μικρή επιφάνεια [18]. Πιο συγκεκριμένα, η προσπίπτουσα άμεση ηλιακή ακτινοβολία μέσω του ηλιακού συλλέκτη συγκεντρώνεται στον ηλιακό δέκτη για την επίτευξη υψηλών θερμοκρασιών. Η θερμότητα που συγκεντρώνεται στον συλλέκτη χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε θερμική μηχανή. Η θερμική μηχανή εκτελεί συνήθως είτε τον συμβατικό κύκλο Rankine, είτε τον οργανικό κύκλο Rankine, είτε τον κύκλο Stirling.

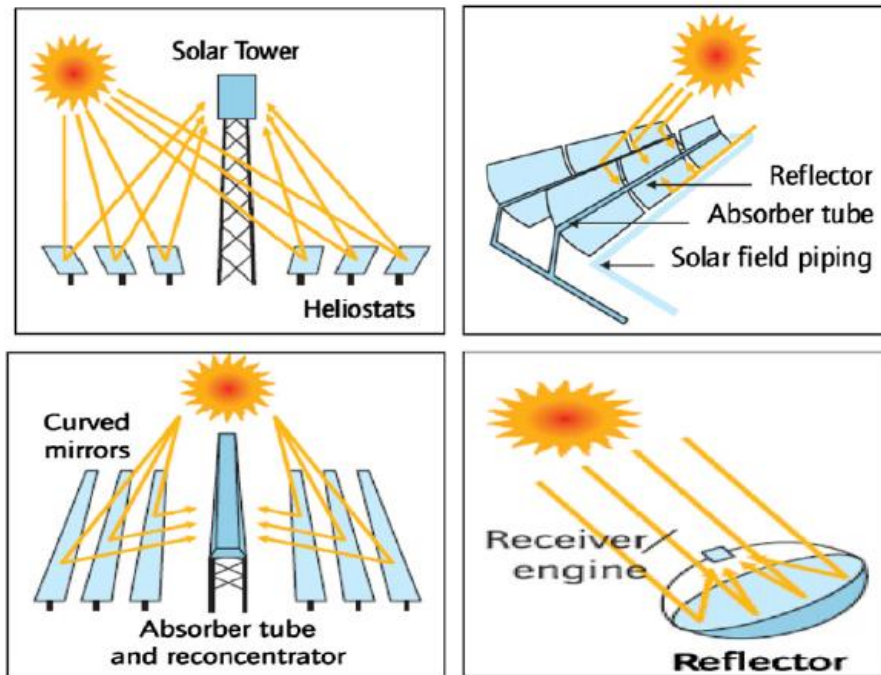
Τα ΘΗΣ χαρακτηρίζονται από την χρήση κατάλληλων διατάξεων που περιλαμβάνουν καθρέπτες και φακούς, τα οποία επιτρέπουν την ανακατεύθυνση της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μία συγκεκριμένη επιφάνεια (επιφάνεια συλλέκτη) και την συγκέντρωσή της σε μια μικρότερη επιφάνεια (επιφάνεια απορροφητή). Το πηλίκο των δύο αυτών επιφανειών ορίζεται ως γεωμετρικός λόγος συγκέντρωσης,

$$\text{Λόγος Συγκέντρωσης} = \frac{\text{Επιφάνεια Συλλέκτη}}{\text{Επιφάνεια Απορροφητή}}$$

Με την συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας έχουμε την συλλογή ενέργειας καλύτερης ποιότητας, καθώς οι υψηλές θερμοκρασίες που επιτυγχάνονται επιτρέπουν την παραγωγή μηχανικού έργου με μεγαλύτερους βαθμούς απόδοσης. Σύμφωνα με τον Δεύτερο Θερμοδυναμικό Νόμο, όσο μεγαλύτερη είναι η μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου τόσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός απόδοσης της θερμικής μηχανής. Η θερμοκρασία λειτουργίας της θερμικής μηχανής εξαρτάται άμεσα από το Λόγο Συγκέντρωσης και από τα χαρακτηριστικά του ηλιακού συλλέκτη.

Τα θερμικά ηλιακά συστήματα κατηγοριοποιούνται στις εξής τέσσερις κατηγορίες, Εικόνα 1.11, ανάλογα με τον τρόπο που συλλέγουν και επεξεργάζονται την ηλιακή ακτινοβολία:

- Συστήματα με Παραβολικούς Κοίλους Ηλιακούς Συλλέκτες (Parabolic Trough Collectors, PTC)
- Ηλιακοί Πύργοι Ισχύος ή Συστήματα Κεντρικού Δέκτη (Solar Power Tower, SPT, ή Central Receiver Systems, CRS)
- Συστήματα με Γραμμικούς Ανακλαστήρες τύπου Fresnel (Linear Fresnel Reflector Systems)
- Συστήματα Δίσκου Μηχανής (Dish Engine Systems, DE)



Εικόνα 1.11: Διαθέσιμες CSP τεχνολογίες (α) Σύστημα Πύργου Ισχύος (β) Παραβολικοί Κοίλοι Συλλέκτες (γ) Σύστημα με Γραμμικούς Ανακλαστήρες τύπου Fresnel (δ) Σύστημα Δίσκου Μηχανής [18]

### 1.4.3 Παραβολικοί κοίλοι ηλιακοί συλλέκτες

Ένα συγκεντρωτικό ηλιακό σύστημα με Παραβολικούς Ηλιακούς Συλλέκτες αποτελείται από ένα γκρούπ ανακλαστήρων οι οποίοι είναι κυρτοί κατά τον έναν άξονα σε σχήμα παραβολικό, ώστε να συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία προς έναν σωλήνα απορρόφησης ο οποίος βρίσκεται στην εστιακή γραμμή του παραβόλου. Ο σωλήνας αυτός (Heat Collector Element, HCE) είναι μεταλλικός και έχει ένα γυάλινο περίβλημα εξωτερικά, ενώ ανάμεσα τους υπάρχει αέρας ή κενό ώστε να μειωθούν οι απώλειες θερμότητας προς το περιβάλλον. Επίσης ο σωλήνας είναι επικαλυμμένος με κατάλληλα υλικά που έχουν υψηλή απορροφητικότητα της ηλιακής ακτινοβολίας και χαμηλή απαγωγή θερμότητας. Οι ανακλαστήρες μπορούν και περιστρέφονται κατά έναν άξονα ώστε να παρακολουθούν την κίνηση του ήλιου από την ανατολή μέχρι τη δύση του. Με τον τρόπο αυτό μειώνουν την γωνία πρόσπτωσης της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας και κατ' επέκταση τις απώλειες συνημιτόνου. Ένα γκρούπ παράλληλα συνδεδεμένων παραβολικών κατόπτρων ονομάζεται ηλιακό πεδίο. Μέσα στον σωλήνα απορρόφησης και με τη βοήθεια μίας αντλίας, ρέει το ρευστό μετάδοσης θερμότητας (Heat Transfer Fluid, HTF) το οποίο θερμαίνεται κατά την πορεία του από την είσοδο έως την έξοδο του ηλιακού πεδίου. Τέτοια ρευστά είναι συνήθως συνθετικά έλαια ή τετηγμένα άλατα. Το ρευστό αυτό αφού θερμανθεί εισέρχεται σε έναν

εναλλάκτη θερμότητας για να δώσει την θερμότητα του σε ένα κύκλωμα νερού ή κάποιου άλλου οργανικού ρευστού, το οποίο ατμοποιείται και στη συνέχεια εκτονώνεται σε έναν ατμοστρόβιλο ή άλλη εκτονωτική διάταξη για να παράξει έργο, και κατ' επέκταση ηλεκτρική ενέργεια, κατά τον συμβατικό ή οργανικό κύκλο Rankine αντίστοιχα. Η επιλογή ανάμεσα στον συμβατικό ή οργανικό κύκλο Rankine εξαρτάται από τη μέγιστη θερμοκρασία που μπορεί να θερμανθεί το εργαζόμενο μέσο και κατ' επέκταση από το ηλιακό δυναμικό της περιοχής της εγκατάστασης. Υπάρχει και η περίπτωση της άμεσης ατμοποίησης (Direct Steam Generator, DSG) κατά την οποία μέσα στον σωλήνα απορρόφησης ρέει νερό το οποίο ατμοποιείται μέσα στους σωλήνες, εκτονώνεται στον στρόβιλο, συμπυκνώνεται στον συμπυκνωτή και επιστρέφει πάλι στην είσοδο του ηλιακού πεδίου για να τρέξει εκ νέου τον κύκλο. Στην περίπτωση αυτή δεν υπάρχει ο ενδιάμεσος εναλλάκτης θερμότητας και κατ' επέκταση το εργαζόμενο μέσο μπορεί να φτάσει σε υψηλότερες θερμοκρασίες, ενώ ταυτόχρονα είναι μειωμένες και οι απώλειες πίεσης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την λειτουργία του θερμοδυναμικού κύκλου σε μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης και με μειωμένη κατανάλωση της αντλίας του ηλιακού πεδίου [19]. Φυσικά το εργαζόμενο μέσο δεν μπορεί να φτάσει σε μεγάλες πιέσεις καθώς αυτό ρέει αποκλειστικά μέσα στον σωλήνα απορρόφησης του ηλιακού πεδίου και δεν διέρχεται από κάποιον εναλλάκτη θερμότητας. Ένας τυπικός παραβολικός ηλιακός συλλέκτης φαίνεται στην Εικόνα 1.12. Πρόκειται για την πιο ώριμη εφαρμογή συγκεντρωτικού ηλιακού συστήματος καθώς το 96,3% των εφαρμογών χρησιμοποιούν αυτήν την τεχνολογία [18].



Εικόνα 1.12: Παραβολικός Κοίλος Συλλέκτης (Parabolic Trough Collector, PTC) [20]

#### 1.4.4 Ηλιακός πύργος ισχύος

Ο Ηλιακός Πύργος Ισχύος ή Σύστημα Κεντρικού Δέκτη, χρησιμοποιεί ένα ηλιακό πεδίο το οποίο αποτελείται από ανεξάρτητους ηλιακούς ανακλαστήρες ή ηλιοστάτες, οι οποίοι ανακλούν την άμεση

ηλιακή ακτινοβολία σε έναν κεντρικό δέκτη που βρίσκεται τοποθετημένος στην κορυφή ενός σταθερού πύργου. Οι ηλιοστάτες αποτελούνται από επίπεδους ή ελαφρώς κοίλους καθρέπτες οι οποίοι παρακολουθούν την πορεία του ήλιου κινούμενοι κατά δύο άξονες. Στον κεντρικό δέκτη, η θερμότητα από την συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας απορροφάται από ένα ρευστό μετάδοσης θερμότητας (Heat Transfer Fluid, HTF), συνήθως τετηγμένο άλας, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σαν μέσο αποθήκευσης θερμότητας. Άλλα ρευστά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι υγρός ατμός, υπέρθερμος ατμός καθώς και ατμοσφαιρικός ή πεπιεσμένος αέρας. Στη συνέχεια το ρευστό αυτό διέρχεται μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας για να δώσει την θερμότητά του σε ένα κύκλωμα νερού το οποίο ατμοποιείται και εκτελεί τον συμβατικό κύκλο Rankine. Υπάρχουν και ορισμένα εργοστάσια με ηλιακό πύργο τα οποία χρησιμοποιούν το σύστημα άμεσης ατμοποίησης (Direct Steam Generation, DSG), σύμφωνα με το οποίο το ρευστό μετάδοσης θερμότητας και το εργαζόμενο μέσο του κύκλου Rankine ταυτίζονται. Στην περίπτωση αυτή δηλαδή, δεν υπάρχει ο ενδιάμεσος εναλλάκτης θερμότητας. Το σύστημα του ηλιακού πύργου πετυχαίνει λόγους συγκέντρωσης από 200 έως 1000 με αποτέλεσμα να επιτυγχάνονται πολύ υψηλές θερμοκρασίες στο ρευστό μετάδοσης θερμότητας, έως και 1000 °C. Αυτό έχει σαν συνέπεια ο κύκλος Rankine να λειτουργεί σε υψηλότερο βαθμό απόδοσης μειώνοντας έτσι και το κόστος αποθήκευσης θερμότητας [18].



Εικόνα 1.13: Ηλιακός Πύργος Ισχύος (Solar Power Tower), Noor III, Morocco [21]

#### 1.4.5 Σύστημα με γραμμικούς ανακλαστήρες τύπου Fresnel

Ο γραμμικός ανακλαστήρας τύπου Fresnel πήρε το όνομα του από τον «φακό Fresnel», ο οποίος έχει πολλαπλά επίπεδα διάθλασης, σχεδιασμένα να βελτιώνουν τη συγκέντρωση του φωτός που προέρχεται από πολλές διαφορετικές γωνίες σε ένα μόνο σημείο ή γραμμή. Ο φακός αυτός σχεδιάστηκε από τον *Augustin- Jean Fresnel* τον 18<sup>ο</sup> αιώνα επιτυγχάνοντας σημαντική μείωση του πάχους, του όγκου και του βάρους του φακού, μειώνοντας όμως ταυτόχρονα και την ποιότητα της απεικόνισης [22]. Ο Ιταλός

*Giovanni Francia* χρησιμοποίησε πρώτος αυτόν τον φακό για ένα τέτοιο σύστημα παραγωγής ατμού με δυνατότητα περιστροφής των ανακλαστήρων/φακών σε δύο άξονες.

Τα συστήματα με γραμμικούς ανακλαστήρες τύπου Fresnel διαθέτουν ανακλαστήρες οι οποίοι συγκεντρώνουν την άμεση ηλιακή ακτινοβολία σε έναν σωληνοειδή απορροφητή που είναι τοποθετημένος στο εστιακό τους σημείο, και «κρέμεται» από μία σταθερή κατασκευή, Εικόνα 1.14. Μέσα στον απορροφητή ρέει το ρευστό μετάδοσης θερμότητας (Heat Transfer Fluid, HTF) το οποίο μπορεί να είναι νερό, τετηγμένα άλατα ή συνθετικά έλαια. Στην περίπτωση του νερού, έχουμε το σύστημα άμεσης ατμοποίησης (Direct Steam Generation, DSG) όπου αυτό ατμοποιείται απευθείας από το ηλιακό πεδίο και στη συνέχεια εκτελεί το συμβατικό κύκλο Rankine για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αντίθετα, στην περίπτωση των τετηγμένων αλάτων ή συνθετικών ελαίων υπάρχει ενδιάμεσος εναλλάκτης θερμότητας μέσω του οποίου παράγεται ατμός σε ξεχωριστό κύκλωμα νερού, το οποίο με τη σειρά του αποτονώνεται στον ατμοστρόβιλο για την παραγωγή ωφέλιμου έργου.



Εικόνα 1.14: Σύστημα με γραμμικούς ανακλαστήρες τύπου Fresnel, Liddell Power Station, Australia [17]

Οι ανακλαστήρες είναι μακριές σειρές επίπεδων ή ελαφρώς κοίλων καθρεπτών που έχουν την δυνατότητα να περιστρέφονται ανεξάρτητα κατά έναν ή και δύο άξονες ώστε να παρακολουθούν την πορεία του ήλιου[23]. Το σύστημα αυτό είναι στην ουσία μία απλοποιημένη περίπτωση των Παραβολικών Κοίλων Συλλεκτών. Οι παραβολικοί ανακλαστήρες έχουν αντικατασταθεί από επίπεδους ή ελαφρώς κοίλους καθρέπτες οι οποίοι είναι πλέον τοποθετημένοι πολύ κοντά στο έδαφος, κάνοντας απλούστερη την κατασκευή και μειώνοντας τα φορτία που δέχονται από τον άνεμο. Επιπλέον, επειδή τα φαινόμενα σκίασης μεταξύ των ανακλαστήρων δεν είναι τόσο έντονα όσο στην περίπτωση των παραβολικών συλλεκτών, μπορεί να γίνει πιο πυκνή η τοποθέτησή τους στον ίδιο χώρο κάνοντας καλύτερη χρήση αυτού. Όσον αφορά τον σωλήνα απορρόφησης, πάνω από αυτόν τοποθετείται ένας

μικρός κοίλος καθρέπτης για καλύτερη συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας [24]. Επιπλέον, δεν χρειάζεται η τοποθέτηση αρθρώσεων στήριξης αλλά ούτε και ο γυάλινος σωλήνας γύρω του, όπως στην περίπτωση των παραβολικών κοίλων συλλεκτών, μειώνοντας την κατασκευαστική δυσκολία και το κόστος της εγκατάστασης [25]. Παρόλο αυτά, ο λόγος συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας είναι μικρότερος και κατ' επέκταση οι θερμοκρασίες που επιτυγχάνονται και φυσικά ο συνολικός βαθμός απόδοσης του συστήματος. Ένας πιο πρόσφατος σχεδιασμός, γνωστός ως «Ενιαίο Σύστημα με γραμμικούς ανακλαστήρες τύπου Fresnel» (Compact Linear Fresnel Reflectors, CLFR), χρησιμοποιεί δύο παράλληλους σωλήνες απορρόφησης για κάθε σειρά ανακλαστήρων, μειώνοντας έτσι την απαίτηση σε έκταση γης που θα χρειαζόμασταν αν χρησιμοποιούσαμε Παραβολικούς Κοίλους Συλλέκτες, για την ίδια δεδομένη ισχύ [26]. Το πρώτο εργοστάσιο με γραμμικούς ανακλαστήρες τύπου Fresnel ονομάζεται Puerto Errado 1 plant (PE 1) και κατασκευάστηκε το 2009 στη Ισπανία. Έχει ισχύ 1,4 MW, καταλαμβάνει έκταση 50000 m<sup>2</sup> και λειτουργεί μέχρι και σήμερα [18]. Αργότερα, το 2012 κατασκευάστηκε και το Puerto Errado 2 το οποίο έχει ισχύ 30 MW και καταλαμβάνει συνολική έκταση 700000 m<sup>2</sup>. Αποτελείται από 28 σειρές ανακλαστήρων που έχουν συνολική επιφάνεια 302000m<sup>2</sup>. Πρόκειται για το μεγαλύτερο εργοστάσιο με γραμμικούς ανακλαστήρες τύπου Fresnel παγκοσμίως. Η ενέργεια που παράγεται από αυτό το εργοστάσιο πωλείται στην τιμή των 0,2687 €/kWh<sub>e</sub> για τα πρώτα 25 χρόνια και 0,2155 €/kWh<sub>e</sub> για τα επόμενα [27].

#### 1.4.6 Συστήματα Δίσκου Μηχανής

Τα συστήματα αυτά είναι στην ουσία μικρές αυτόνομες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, Εικόνα 1.15. Ο δίσκος έχει σχήμα παραβολικό και συγκεντρώνει την άμεση ηλιακή ακτινοβολία στον δέκτη, ο οποίος βρίσκεται στο σημείο εστίασης του παραβολικού κατόπτρου. Στον δέκτη είναι συνήθως τοποθετημένη κάποια μηχανή Stirling ή κάποιος μικροστρόβιλος Joule Brayton, ισχύος από 5 kW έως 25 kW [28]. Σπανιότερα οι δέκτες των ανεξάρτητων δίσκων μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους μέσω σωληνώσεων δημιουργώντας ένα ηλιακό πεδίο στο οποίο ρέει κάποιο ρευστό μετάδοσης θερμότητας (Heat Transfer Fluid, HTF) που απορροφάει τη θερμότητα από την ηλιακή ακτινοβολία και την μεταδίδει μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας σε ένα κύκλωμα νερού για την λειτουργία ενός συμβατικού κύκλου Rankine. Η ανάγκη ανακυκλοφορίας του ρευστού μέσω του ηλιακού πεδίου εγείρει ζητήματα σχεδιασμού σχετικά με τη διάταξη των σωληνώσεων, τις απαιτήσεις της αντλίας και τις θερμικές απώλειες του ρευστού [29].

Οι δίσκοι είναι παραβολικοί συγκεντρωτές τριών διαστάσεων με λόγους συγκέντρωσης από 1000 έως 4000, υψηλότερους από κάθε άλλο θερμικό ηλιακό σύστημα, ικανούς να επιτύχουν πολύ υψηλές θερμοκρασίες στο σύστημα του απορροφητή/δέκτη. Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούν μηχανισμό ανίχνευσης της ηλιακής ακτινοβολίας και μπορούν να περιστραφούν κατά δύο άξονες. Επιπλέον, παρουσιάζουν τον υψηλότερο βαθμό μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική σε σύγκριση με τα άλλα θερμικά ηλιακά συστήματα.

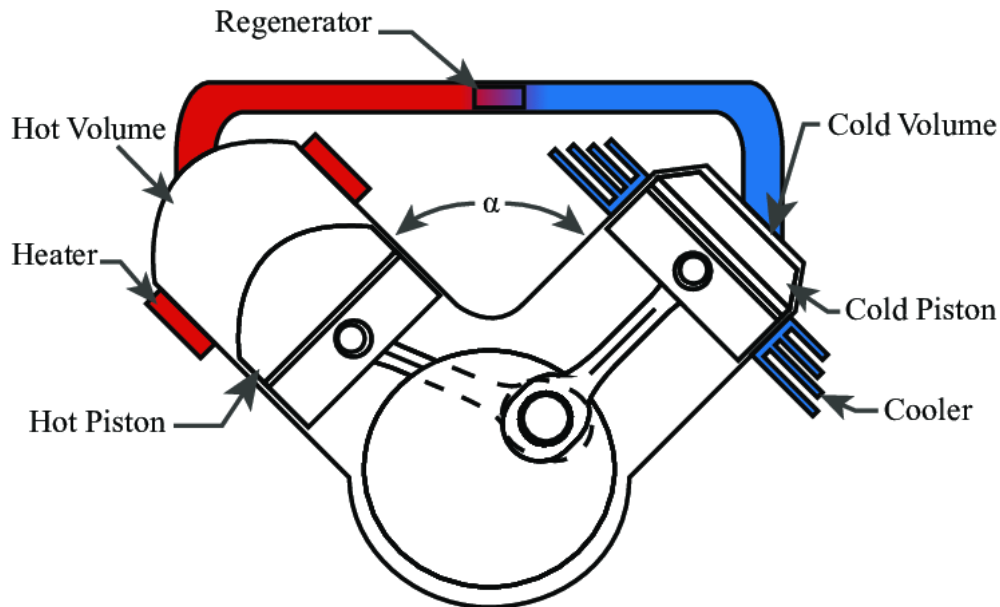




Εικόνα 1.15: Σύστημα δίσκου μηχανής (Parabolic Dish System) [30]

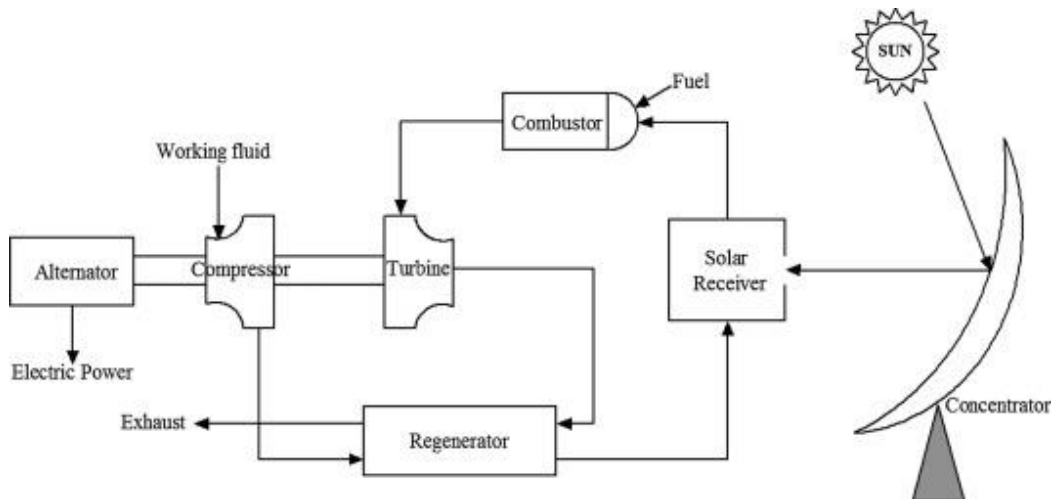
Η θερμική μηχανή που χρησιμοποιείται πιο συχνά στα Συστήματα Δίσκου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι τύπου Stirling. Πρόκειται για μηχανές υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας που τροφοδοτούνται από εξωτερική πηγή θερμότητας και χρησιμοποιούν σαν εργαζόμενο μέσο το Ήλιο (He) ή το Υδρογόνο ( $H_2$ ). Στις σύγχρονες μηχανές Stirling υψηλής απόδοσης το εργαζόμενο μέσο φθάνει σε θερμοκρασίες άνω των  $700\text{ }^\circ\text{C}$  και σε πιέσεις της τάξης των  $200\text{ bar}$ . Στον κύκλο Stirling το εργαζόμενο ρευστό θερμαίνεται και ψύχεται διαδοχικά. Στην πιο συνηθισμένη της μορφή, τύπου  $\alpha$ , η μηχανή Stirling αποτελείται από δύο κινούμενα έμβολα, το θερμό και το ψυχρό έμβολο, Εικόνα 1.16. Το εργαζόμενο μέσο θερμαίνεται από μία εξωτερική πηγή θερμότητας με αποτέλεσμα να αυξηθεί η πίεση και η θερμοκρασία του. Στη συνέχεια εκτονώνεται ωθώντας το θερμό έμβολο προς τα κάτω, περιστρέφοντας την άτρακτο και παράγοντας μηχανικό έργο. Καθώς περιστρέφεται η άτρακτος σπρώχνει το ίδιο έμβολο προς τα επάνω με αποτέλεσμα να αναγκάσει το αέριο να διέλθει μέσα από έναν αναγεννητή, αποθηκεύοντας σε αυτόν ένα μέρος της θερμότητας του. Στη συνέχεια το αέριο ψύχεται στο ψυγείο, μειώνοντας έτσι περαιτέρω την θερμοκρασία του και κάνοντας κατά αυτόν τον τρόπο ευκολότερη την μετέπειτα συμπίεσή του (όσο χαμηλότερη είναι η θερμοκρασία ενός αερίου τόσο λιγότερο έργο απαιτείται για την συμπίεση του σε δεδομένη πίεση). Καθώς το θερμό έμβολο κινείται προς τα πάνω, το ψυχρό έμβολο κινείται προς τα κάτω ώστε ο να διατηρείται διαθέσιμος όγκος του αερίου σταθερός. Τη στιγμή αυτή η άτρακτος συνεχίζει να περιστρέφει το ψυχρό έμβολο αναγκάζοντας το να ανέβει προς τα πάνω και να ωθήσει το αέριο πάλι πίσω στον αναγεννητή, συμπιέζοντας το. Καθώς το αέριο διέρχεται εκ νέου λοιπόν από τον αναγεννητή, απορροφάει μέρος της θερμότητας που υπήρχε εκεί αυξάνοντας την θερμοκρασία και την πίεση του. Στη συνέχεια το αέριο εκτονώνεται και πάλι ωθώντας το θερμό έμβολο προς τα κάτω, παράγοντας και πάλι έργο. Ταυτόχρονα μειώνεται η θερμοκρασία και η πίεση του

εργαζόμενου μέσου. Για την αποφυγή περεταίρω μείωσης της θερμοκρασίας του, το εργαζόμενο μέσο συνεχίζει να θερμαίνεται από την εξωτερική πηγή θερμότητας, ώστε αυτή να διατηρείται σταθερή στην έξοδο του αναγεννητή. Με τον τρόπο αυτό ολοκληρώνεται ο κύκλος και αρχίζει εκ νέου [31]. Στην περίπτωση των Συστημάτων Δίσκου Μηχανής με μηχανή Stirling, τον ρόλο της εξωτερικής πηγής θερμότητας παίζει η θερμότητα που προέρχεται από τον ήλιο και η μηχανή Stirling τοποθετείται στον δέκτη του δίσκου.



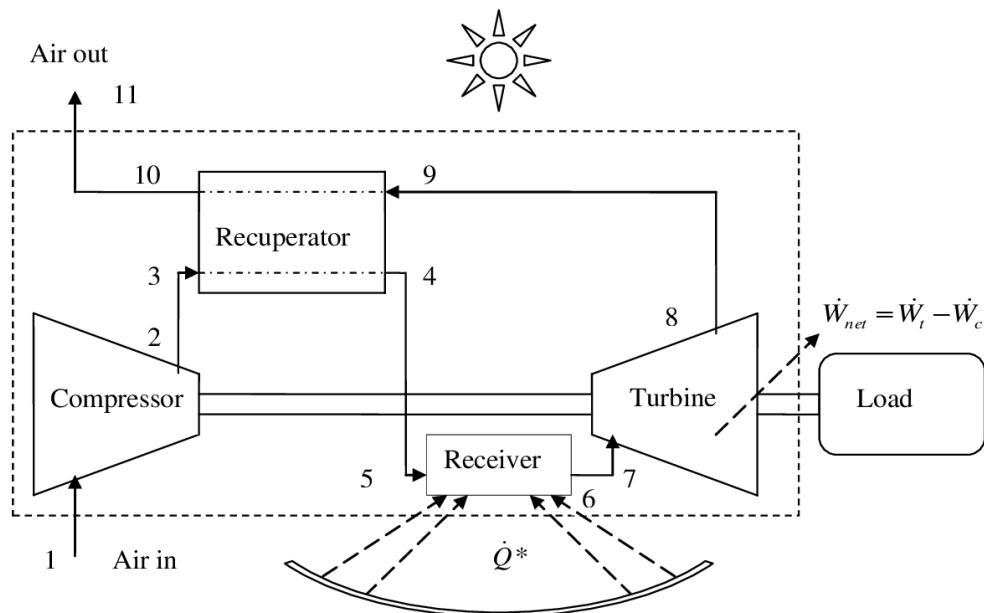
Εικόνα 1.16: Σχηματική αναπαράσταση μηχανής Stirling τύπου  $\alpha$  [32]

Μία άλλη περίπτωση για τα Συστήματα Δίσκου Μηχανής είναι η τοποθέτηση μικροστροβίλου στον δέκτη του. Σύμφωνα με τον ανοικτό κύκλο Joule Brayton, αέρας εισέρχεται σε έναν συμπιεστή όπου αυξάνεται η πίεση και η θερμοκρασία του πριν μπει στον θάλαμο καύσης για να γίνει καύση κάποιου καυσίμου. Τα καυσαέρια υψηλής θερμοκρασίας εκτονώνονται στον στρόβιλο, ο οποίος είναι συζευγμένος στην ίδια άτρακτο με τον συμπιεστή και μία γεννήτρια, και στη συνέχεια απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα. Ένα μέρος του έργου της αποτόνωσης καταναλώνεται στον συμπιεστή (περίπου το 40%) και το υπόλοιπο στρέφει την γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στην περίπτωση συνεργασίας του παραβολικού δίσκου με μικροστρόβιλο υπάρχουν οι εξής περιπτώσεις ανάλογα με την μερική ή ολική υποκατάσταση του καυσίμου. Στην περίπτωση της μερικής υποκατάστασης του καυσίμου ο αέρας μετά την έξοδο από τον συμπιεστή εισέρχεται στον δέκτη του παραβολικού δίσκου για να αυξηθεί η θερμοκρασία του, Εικόνα 1.17. Επομένως, στον θάλαμο καύσης θα χρειαστεί μικρότερη ποσότητα καυσίμου για να επιτευχθεί η ίδια θερμοκρασιακή άνοδος  $\sigma'$  αυτόν. Στη συνέχεια τα καυσαέρια εκτονώνονται στον στρόβιλο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Με την τοποθέτηση ενός εναλλάκτη θερμότητας (αναγεννητής - regenerator) μετά τον στρόβιλο εκμεταλλευόμαστε την απορριπτόμενη θερμότητα των καυσαερίων, αυξάνοντας την συνολική απόδοση του κύκλου [33].



Εικόνα 1.17: Σχηματική αναπαράσταση κύκλου Joule Brayton με χρήση ηλιακής ενέργειας [33]

Όσον αφορά την περίπτωση ολικής υποκατάστασης του καυσίμου ο αέρας μετά την έξοδο από τον συμπιεστή εισέρχεται και πάλι στον δέκτη του παραβολικού δίσκου για να αυξηθεί σημαντικά η θερμοκρασία του. Πλέον δεν υπάρχει θάλαμος καύσης και ο ζεστός αέρας εισέρχεται απευθείας στον στρόβιλο όπου εκτονώνεται για την παραγωγή ωφέλιμου έργου, Εικόνα 1.18. Η τοποθέτηση του αναγεννητή (Recuperator) μετά τον στρόβιλο για την ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας από τον αέρα μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική αύξηση του βαθμού απόδοσης του κύκλου όταν αυτός λειτουργεί σε χαμηλούς λόγους πίεσης [34]. Ο κύκλος αυτός ονομάζεται ηλιακός θερμικός κύκλος Bryton (Solar Thermal Bryton cycle).



Εικόνα 1.18: Ηλιακός Θερμικός κύκλος Joule Brayton [34]

Στον Πίνακα 1.5 γίνεται μία σύγκριση των τεσσάρων διαφορετικών τεχνολογιών των ηλιακών θερμικών συστημάτων.

Πίνακας 1.5: Σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών τεχνολογιών ηλιακών θερμικών συστημάτων [18]

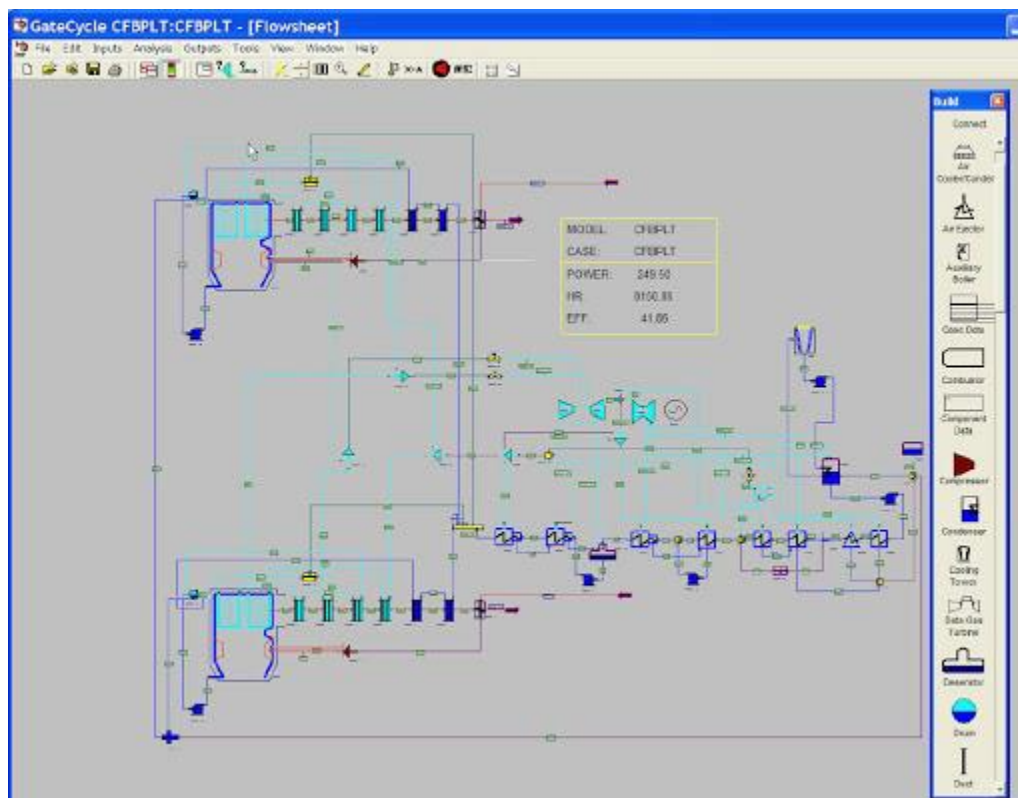
	Σχετικό κόστος	Απαιτήσεις σε έκταση γης	Ψυκτικό μέσο (I/MWh)	Θερμοδυναμικός βαθμός απόδοσης	Θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας (°C)	Λόγος Συγκέντρωσης	Προοπτικές βελτίωσης
<b>PTC</b>	Χαμηλό	Υψηλή	3000	Χαμηλός	20 – 400	15–45	Περιορισμένες
<b>LFR</b>	Πολύ υψηλό	Μεσαία	3000	Χαμηλός	50 – 300	10–40	Σημαντικές
<b>SPT</b>	Υψηλό	Μεσαία	1500	Υψηλός	300 – 565	150–1500	Πολύ σημαντικές
<b>PDC</b>	Πολύ υψηλό	Χαμηλή	κανένα	Υψηλός	120 – 1500	100–1000	Υψηλές μέσω μαζικής παραγωγής

## Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup> Μοντελοποίηση θερμοδυναμικού κύκλου με χρήση του λογισμικού GateCycle

### 2.1 Το λογισμικό GateCycle














Το GateCycle είναι ένα εμπορικό λογισμικό προσομοίωσης θερμοδυναμικών κύκλων της εταιρείας *General Electric* με το οποίο πραγματοποιείται η αναλυτική μοντελοποίηση σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης, διευκολύνεται η ανάλυση της λειτουργίας ατμοηλεκτρικών σταθμών και μονάδων συνδυασμένου κύκλου σε συνθήκες λειτουργίας διαφορετικές από τις ονομαστικές. Η έκδοση του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία είναι η 5.51.

Το λογισμικό παρέχει ευκολία και ταχύτητα στο σχεδιασμό διαφόρων μοντέλων και παρέχει γρήγορες προσεγγίσεις και αναλύσεις. Ένα μοντέλο του GateCycle απεικονίζει ένα θερμοδυναμικό κύκλο σε ένα σχηματικό διάγραμμα που δημιουργεί ο χρήστης, Εικόνα 2.1. Ο σχεδιασμός γίνεται διαλέγοντας τα διάφορα στοιχεία εξοπλισμού του προγράμματος και συνδέοντάς τα μεταξύ τους. Ο χρήστης καθορίζει τις διάφορες συνδέσεις μεταξύ των στοιχείων αρκεί οι επιλογές του να είναι συμβατές με τους κανόνες που αφορούν την κάθε συνιστώσα. Στον Πίνακα 2.1 παρατίθενται η ονομασία και το αντίστοιχο εικονίδιο ορισμένων βασικών στοιχείων εξοπλισμού του προγράμματος.



Εικόνα 2.1: Γραφικό περιβάλλον λογισμικού GateCycle

Πίνακας 2.1: Ονομασία και αντίστοιχο εικονίδιο βασικών στοιχείων εξοπλισμού του λογισμικού GateCycle

Ονομασία	Εικονίδιο
Compressor (Συμπιεστής)	 Compressor
Condenser (Συμπυκνωτής)	 Condenser
Deaerator (Απαερωτής / Τροφοδοτικό δοχείο)	 Deaerator
Economizer (Οικονομητήρας)	 Economizer
Εναποροτορ (Ατμοποιητής)	 Evaporator
Fossil Boiler (Λέβητας ορυκτών καυσίμων)	 Fossil Boiler
Gas Turbine (Αεριοστρόβιλος)	 Gas Turbine
General Heat Exchanger (Εναλλάκτης θερμότητας)	 General Heat Exchanger
Mixer (Μείκτης ροών)	 Mixer
Pump (Αντλία)	 Pump
Splitter (Διαχωριστής ροών)	 Splitter
Steam Turbine (Ατμοστρόβιλος)	 Steam Turbine
Superheater (Υπερθεμαντήρας)	 Superheater

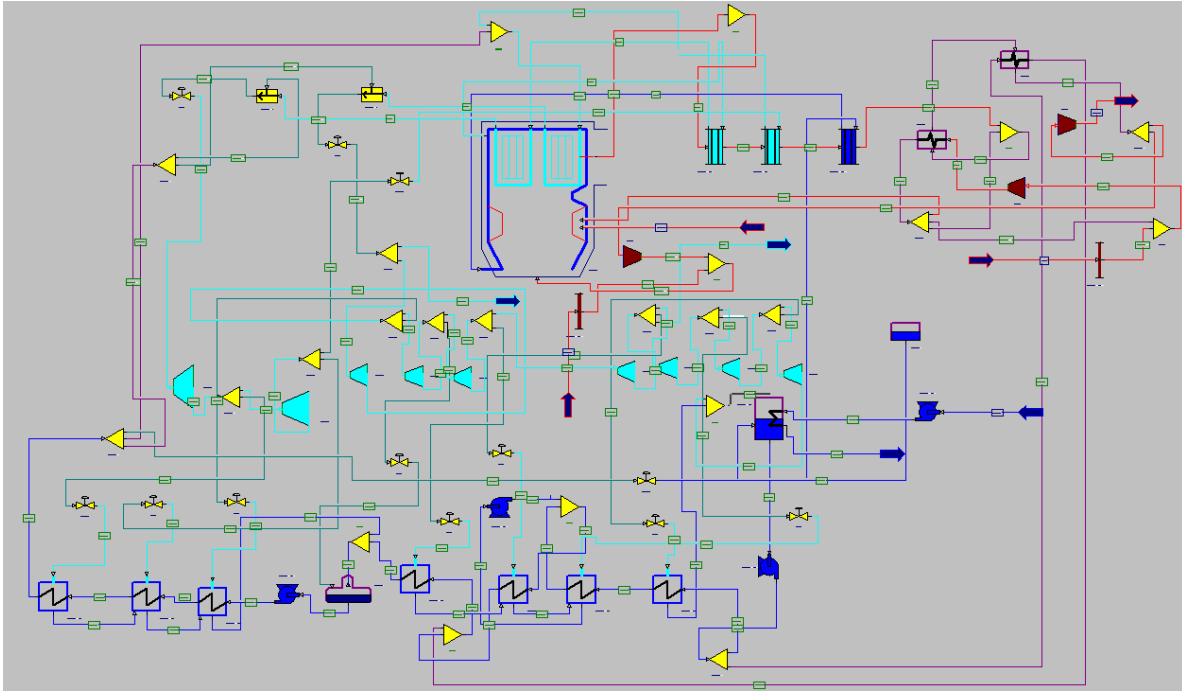
Μια σημαντική λειτουργία του GateCycle είναι η δυνατότητα επιλογής μεταξύ λειτουργίας σχεδιασμού (design-mode) και λειτουργίας εκτός σχεδιασμού (off design-mode). Συγκεκριμένα, το μοντέλο σχεδιάζεται στο design-mode όπου καθορίζονται όλα τα σχεδιαστικά και λειτουργικά του χαρακτηριστικά, ενώ το off design-mode στηρίζεται στο design μοντέλο, όπου θεωρείται ότι τα κύρια σχεδιαστικά στοιχεία του παραμένουν σταθερά και αμετάβλητα (όπως επιφάνειες συναλλαγής, χαρακτηριστικές αντλιών κλπ.). Ο χρήστης δεν μπορεί να αλλάξει τη δομή ενός μοντέλου σε κατάσταση off-design, αλλά μπορεί να τροποποιήσει τις εξωτερικές συνθήκες αυτού, το φορτίο λειτουργίας κλπ. Για παράδειγμα, με δεδομένο ότι οι τεχνικές προδιαγραφές ενός μοντέλου διατηρούνται ίδιες, μπορεί να τροποποιηθεί η παροχή του καυσίμου ή η σύστασή του κτλ. Έτσι δίνεται η δυνατότητα να ελεγχθεί η συμπεριφορά κάθε μοντέλου κάτω από διάφορες συνθήκες λειτουργίας εκτός σχεδιασμού.

Αφού τελικά σχεδιαστεί το μοντέλο και εισαχθούν όλα τα απαραίτητα δεδομένα στα διάφορα στοιχεία του, ο χρήστης μπορεί να το «τρέξει» ώστε να δει τη λειτουργία και τα αποτελέσματα του κύκλου. Υπάρχουν δύο πιθανά σενάρια. Το πρώτο είναι το μοντέλο να «τρέξει» επιτυχώς οπότε και θα εμφανιστεί στην οθόνη το ανάλογο μήνυμα προς τον χρήστη, ενημερώνοντας τον ταυτόχρονα για την ισχύ και τον βαθμό απόδοσης του σταθμού. Σε αντίθετη περίπτωση το πρόγραμμα θα ενημερώσει τον χρήστη ότι δεν έγινε επιτυχώς το «τρέξιμο» του μοντέλου και εκείνος θα μπορεί να δει τις αιτίες που εμπόδισαν το λογισμικό να επιλύσει πλήρως τον κύκλο.

Όταν το μοντέλο συγκλίνει επιτυχώς ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να δει αναλυτικά τα αποτελέσματα του κύκλου. Τα αποτελέσματα αυτά αφορούν την ισχύ που παράγεται στον κύκλο ατμού, τις επιμέρους ιδιοκαταναλώσεις σε αντλίες, γεννήτριες κλπ., την καθαρά παραγόμενη ισχύ του σταθμού, τον βαθμό απόδοσης του κ.α.. Επιπλέον, υπάρχουν συγκεντρωμένα τα δεδομένα παροχής μάζας, πίεσης, θερμοκρασίας και ενθαλπίας σε κάθε καίρια θέση για όλα τα ρεύματα (streams) που υπάρχουν στο μοντέλο.

## 2.2 Μοντελοποίηση ΑΗΣ Μελίτη

Ο υφιστάμενος Ατμοηλεκτρικός Σταθμός Ηλεκτροπαραγωγής (ΑΗΣ) που εξετάζεται η αναβάθμισή του, ανήκει στην Δ.Ε.Η. και βρίσκεται στο χωριό Μελίτη, στη Φλώρινα. Έχει ισχύ 302,5 MW<sub>e</sub> και βαθμό απόδοσης στο πλήρες φορτίο 37,24%. Ο Σταθμός χρησιμοποιεί σαν καύσιμο στερεό λιγνίτη από την κοντινή περιοχή, κατώτερης Θερμογόνου Ικανότητας 7955 kJ/kg καυσίμου και παροχής 100,5 kg/s. Ο Σταθμός αποτελείται από ατμοστρόβιλους υψηλής, μέσης και χαμηλής πίεσης, οι οποίοι στο GateCycle μοντελοποιήθηκαν ως 9 ξεχωριστοί εν σειρά στρόβιλοι, Εικόνα 2.2. Ακολουθούν 2 υπερθερμαντήρες και πραγματοποιούνται 2 αναθερμάνσεις μέσα στον ίδιο τον λέβητα. Έπειτα από κάθε ατμοστρόβιλο γίνεται απομάστευση ατμού, η οποία οδηγείται είτε σε έναν εκ των επτά προθερμαντήρων του κύκλου, είτε στο τροφοδοτικό δοχείο για την απαερίωση του τροφοδοτικού νερού. Ο ατμός παροχής 265,08 kg/s και θερμοκρασίας 418°C εξέρχεται από τον λέβητα και οδηγείται στον πρώτο από τους δύο υπερθερμαντήρες έως ότου φτάσει τους 493°C. Μετά επιστρέφει στον λέβητα για αναθέρμανση στους 543°C και από εκεί στον πρώτο ατμοστρόβιλο για να πραγματοποιηθεί η πρώτη απομάστευση προς τον πρώτο εν σειρά προθερμαντήρα και μετά στον δεύτερο όπου ξαναγίνεται απομάστευση για τον αμέσως επόμενο. Τα 228,21 kg/s θερμοκρασίας 299,75 °C που απομένουν οδηγούνται στον δεύτερο υπερθερμαντήρα και φτάνουν τους 441 °C. Ύστερα ξανά πραγματοποιείται αναθέρμανση στον λέβητα έως τους 542 °C. Στη συνέχεια ο ατμός κατευθύνεται στη σειρά των ατμοστρόβιλων για τις επιμέρους εκτονώσεις και απομαστεύσεις.



Εικόνα 2.2: Μοντελοποίηση ΑΗΣ Μελίτη στο λογισμικό GateCycle

Πιο αναλυτικά, ο ατμός που προέρχεται από τον πρώτο υπερθεμαντήρα, θερμοκρασίας 543 °C και πίεσης 240,08 bar οδηγείται στον ατμοστρόβιλο υψηλής πίεσης. Εκεί αποτονώνεται μέχρι την πίεση 56,97 bar και ένα μέρος του, παροχής 12,33 kg/s οδηγείται στον πρώτο κατά σειρά προθερμαντήρα. Ο υπόλοιπος ατμός αποτονώνεται μέχρι την πίεση των 42,45 bar από όπου και πάλι ένα μέρος του, παροχής 23,87 kg/s οδηγείται στον δεύτερο κατά σειρά προθερμαντήρα. Η υπόλοιπη παροχή ατμού, 228,87 kg/s, οδηγείται πίσω στον λέβητα όπου αναθερμαίνεται μέχρι την θερμοκρασία των 542 °C. Ο ατμός αυτός οδηγείται στον στρόβιλο μέσης πίεσης όπου αποτονώνεται έως τα 19,37 bar. Ένα μέρος του, παροχής 6,40 kg/s, οδηγείται στον τρίτο κατά σειρά προθερμαντήρα. Οι επιστροφές και των τριών αυτών προθερμαντήρων οδηγούνται στο τροφοδοτικό δοχείο. Η εναπομείνουσα παροχή ατμού οδηγείται στον επόμενο στρόβιλο όπου αποτονώνεται μέχρι την πίεση των 12,62 bar. Ένα μέρος του, παροχής 10,30 kg/s οδηγείται στο τροφοδοτικό δοχείο για να γίνει η απαερίωση του τροφοδοτικού νερού. Με τον ίδιο τρόπο υπάρχουν ακόμα πέντε αποτονώσεις σε ισάριθμους στρόβιλους από τους οποίους οι τέσσερις πρώτοι κατά σειρά οδηγούν μία ποσότητα ατμού σε τέσσερις ακόμη προθερμαντήρες ενώ μετά την τελευταία αποτόνωση ο ατμός οδηγείται στον συμπυκνωτή. Ο συμπυκνωτής είναι υδρόψυκτος και λειτουργεί στην πίεση των 0,06 bar. Η ποσότητα υγρού-ατμού που οδηγείται σε αυτόν είναι 174,32 kg/s. Μετά τον συμπυκνωτή υπάρχει μία αντλία που ανυψώνει την πίεση του νερού στα 19,90 bar για να διέλθει μέσα από τους δύο τελευταίους προθερμαντήρες. Στη συνέχεια, λόγω της πτώσης πίεσης του νερού μέσα από τους προθερμαντήρες, υπάρχει ακόμα μία αντλία που ανυψώνει την πίεση στα 18,90 bar ώστε αυτό να περάσει μέσα από τον τρίτο και τέταρτο από το τέλος προθερμαντήρα και να επιστρέψει στο τροφοδοτικό δοχείο. Στην έξοδο του τροφοδοτικού δοχείου υπάρχει μία τελευταία αντλία που ανυψώνει την πίεση στα 292,50 bar και το νερό μετά τους πρώτους τρεις προθερμαντήρες οδηγείται στον λέβητα για την υπερθέρμανση του και την επανάληψη του κύκλου.



## 2.3 Μοντελοποίηση Παραβολικών κοίλων συλλεκτών

Σκοπός την μεταπτυχιακής αυτής εργασίας είναι η ολική υποκατάσταση του τελευταίου εν σειρά προθερμαντήρα με θερμότητα που θα προέρχεται από τον ήλιο. Η απομάστευση που οδηγείται σε αυτόν τον προθερμαντήρα έχει παροχή ατμού 6,15 kg/s και διαφορά ενθαλπίας εκατέρωθεν αυτού ίση με  $\Delta h = h_{in} - h_{out} = 2477,98 \frac{kJ}{kg} - 169.30 \frac{kJ}{kg} = 2308,68 \frac{kJ}{kg}$ . Αντίστοιχα το νερό παροχής μάζας ίση με 177,10 kg/s θερμαίνεται από τους 34,97 °C στους 54,02 °C. Τονίζεται στο σημείο αυτό ότι η αύξηση της ισχύος της γεννήτριας λόγω της εκτόνωσης της παροχής απομάστευσης είναι αρκετά μικρή και δεν δημιουργεί πρόβλημα σε αυτή.

Για την μοντελοποίηση των Παραβολικών Κοίλων Συλλεκτών χρησιμοποιείται το στοιχείο «Duct» από τη βιβλιοθήκη του προγράμματος. Τα αρχικά δεδομένα που πρέπει να καθορίσει ο χρήστης στην είσοδο του στοιχείου αυτού είναι,

- Το είδος του ρευστού
- Την πίεση και τη θερμοκρασία του
- Την παροχή μάζας του

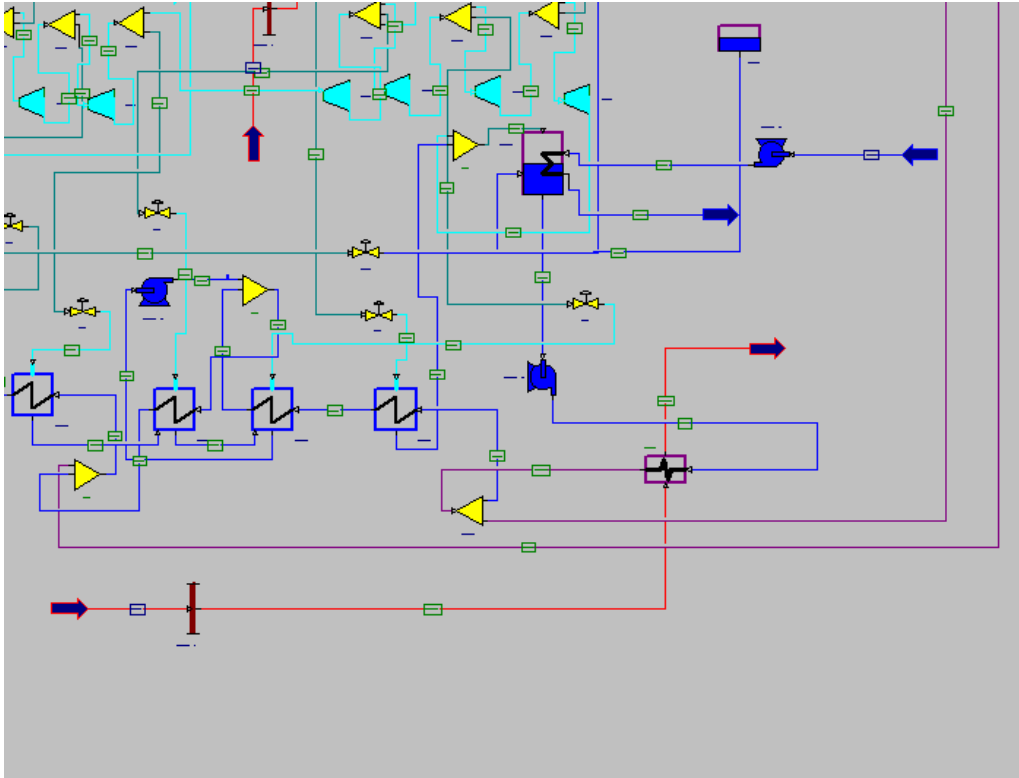
Οι επιλογές που έχει ο χρήστης σχετικά με το στοιχείο είναι,

- Ο καθορισμός της θερμοκρασίας εξόδου από αυτό
- Να μην υπάρξει διαφορά ενθαλπίας μεταξύ εισόδου και εξόδου
- Να υπάρξει δεδομένα πτώση θερμοκρασίας
- Πρόσδοση/ αφαίρεση δεδομένης ποσότητας θερμότητας στη μονάδα του χρόνου
- Ο καθορισμός της πίεσης εξόδου από αυτό
- Να υπάρξει δεδομένη πτώση πίεσης μεταξύ εισόδου και εξόδου

The image shows a software dialog box titled "DUCT". It has a menu bar with "UOM", "Report", and "Help". The "Steam" section is active. The "ID" field contains "DUCT3" and the "Description" field contains "Duct". The "Temperature Method" dropdown is set to "No Enthalpy Change" and the "Pressure Method" dropdown is set to "No Pressure Drop". There are three buttons on the right: "Flows...", "Tolerances", and "Correlations". At the bottom, there are checkboxes for "Run Off Design" and "Do Not Overwrite", and "OK" and "Cancel" buttons.

Εικόνα 2.3: Εισαγωγή δεδομένων στο στοιχείο Duct

Στη συνέχεια το ρεύμα εξόδου από το στοιχείο Duct εισέρχεται σε έναν εναλλάκτη θερμότητας ο οποίος μοντελοποιείται από το πρόγραμμα από το στοιχείο «General Heat Exchanger». Στον ίδιο εναλλάκτη εισέρχεται και το τροφοδοτικό νερό μετά την έξοδο του από την πρώτη αντλία μετά τον συμπυκνωτή, Εικόνα 2.4.



Εικόνα 2.4: Μοντελοποίηση παραβολικών κοίλων ηλιακών συλλεκτών στο λογισμικό GateCycle

Στην πραγματικότητα το ηλιακό πεδίο χρησιμοποιεί σαν ρευστό μετάδοσης θερμότητας το συνθετικό έλαιο Therminol VP-1. Επειδή όμως δεν είναι δυνατή η μοντελοποίηση του στο λογισμικό GateCycle, θα χρησιμοποιηθεί αντί αυτού ο αέρας. Στην είσοδο του στοιχείου Duct, δηλαδή στην είσοδο του ηλιακού πεδίου, επιλέγουμε να εισέρχεται ατμοσφαιρικός αέρας σε πίεση 1 bar και θερμοκρασίας 70 °C. Τονίζεται στο σημείο αυτό ότι η αρχική πίεση του ρεύματος εισόδου δεν παίζει κανένα ρόλο στην λειτουργία του κύκλου [35]. Επιπλέον, επιλέγεται από το στοιχείο Duct να εξέρχεται το ρεύμα αέρα από αυτό στην ίδια πίεση (επιλογή μηδενικής πτώσης πίεσης) και στην θερμοκρασία των 250 °C. Με τον τρόπο αυτό έχει μοντελοποιηθεί το ηλιακό πεδίο με τη διαφορά ότι σαν ρευστό μετάδοσης θερμότητας έχει χρησιμοποιηθεί αέρας αντί για Therminol VP-1. Για να είναι σωστά τα αποτελέσματα, με δεδομένο ότι οι θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου από το ηλιακό πεδίο παραμένουν ίδιες για τον αέρα και το Therminol VP-1, η παροχή μάζας του αέρα που θα επιλέγεται από τον χρήστη σαν είσοδος στο στοιχείο Duct, θα δίνεται από την εξίσωση,

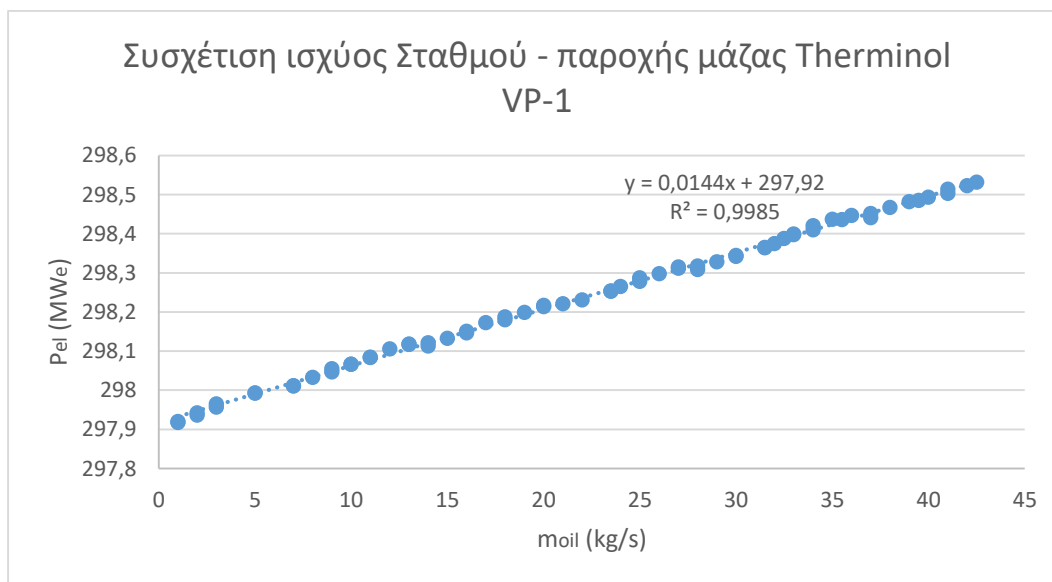
$$\dot{m}_{oil} \cdot C_{p,oil} = \dot{m}_{air} \cdot C_{p,air}$$

$$\text{ή } \dot{m}_{air} = \dot{m}_{oil} \cdot \frac{C_{p,oil}}{C_{p,air}} = \dot{m}_{oil} \cdot \frac{1,9433 \frac{kJ}{kg \cdot K}}{1,0503 \frac{kJ}{kg \cdot K}} = 1,850 \cdot \dot{m}_{oil}$$

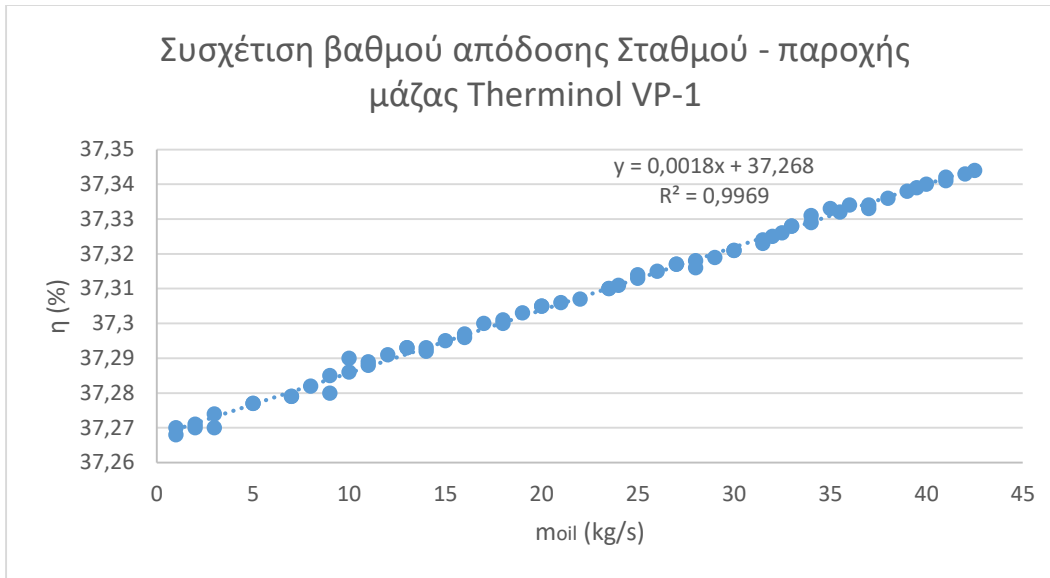
όπου οι θερμοχωρητικότητες του θερμικού ελαίου και του αέρα έχουν υπολογιστεί στη μέση θερμοκρασία,  $\bar{T} = \frac{70^{\circ}C + 250^{\circ}C}{2} = 160^{\circ}C$ .

Όσον αφορά τον εναλλάκτη θερμότητας επιλέγεται να εξέρχεται το θερμό ρεύμα (το ρεύμα του αέρα) από αυτόν στην θερμοκρασία των 70 °C. Στη συνέχεια επιλέγεται να γίνουν όλα τα τρεξίματα σε «Off Design mode», δηλαδή τα χαρακτηριστικά όλων των εξαρτημάτων του κύκλου (πχ επιφάνειες συναλλαγής, χαρακτηριστικές αντλιών κ.λ.π.) να παραμείνουν σταθερά, και να βρεθεί η νέα λειτουργία του σταθμού.

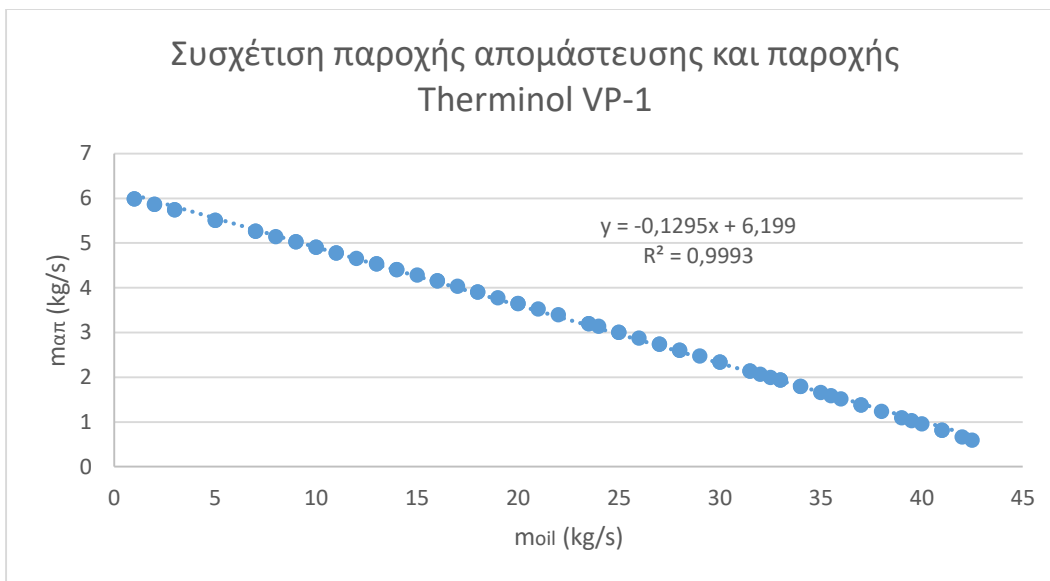
Η επιλογή του Therminol VP-1 ως ρευστό μετάδοσης θερμότητας καθώς και των θερμοκρασιών εισόδου και εξόδου από το ηλιακό πεδίο θα δικαιολογηθεί σε επόμενο κεφάλαιο. Μάλιστα με βάση τα ηλιακά δεδομένα της περιοχής που μελετάται και της τεχνολογίας των Παραβολικών Κοίλων Συλλεκτών θα προκύψουν οι παροχές μάζας του Therminol VP-1 που είναι δυνατόν να θερμανθούν από τους 70°C στους 250°C ανά ώρα και για όλες τις ώρες του έτους. Επιπλέον, η ανάλυση θα γίνει για δύο διαφορετικούς τύπους συλλεκτών, τον παραβολικό ηλιακό συλλέκτη LS-3 και τον ET-150. Συνεπώς θα υπάρξουν 8760x2 διαθέσιμες τιμές παροχών μάζας (υπάρχουν πολλές μηδενικές τιμές όμως και πάλι οι μη μηδενικές τιμές είναι εξίσου πολλές). Επειδή είναι εξαιρετικά επίπονο να εισαχθούν με το χέρι αυτές οι διαφορετικές τιμές παροχών μάζας στο λογισμικό και να καταγραφούν τα αποτελέσματα του σταθμού, επιλέχθηκε αντ' αυτού το εξής: Έγιναν τρεξίματα στο λογισμικό με 67 διαφορετικές τιμές παροχών μάζας ρευστού μετάδοσης θερμότητας και καταγράφηκε η εξάρτηση της ισχύος, του βαθμού απόδοσης του Σταθμού, καθώς και της παροχής μάζας απομάστευσης. Τα αποτελέσματα φαίνονται στα Σχήματα 2.5, 2.6 και 2.7 μαζί με τις αντίστοιχες καμπύλες και βαθμούς προσαρμογής.



Σχήμα 2.5: Διάγραμμα Ισχύος σταθμού και παροχής μάζας Therminol VP-1



Σχήμα 2.6: Συσχέτιση βαθμού απόδοσης Σταθμού και παροχής μάζας Therminol VP-1



Σχήμα 2.7: Συσχέτιση παροχής απομάστευσης προθερμαντήρα και παροχής Therminol VP-1

Πράγματι παρατηρείται η μείωση της παροχής απομάστευσης με την αύξηση της παροχής του ρευστού μετάδοσης θερμότητας, αφού έτσι αυξάνεται η θερμότητα που μεταφέρεται από το ηλιακό πεδίο στον προθερμαντήρα. Ταυτόχρονα το μέρος της απομάστευσης που δεν πηγαίνει στον προθερμαντήρα, οδηγείται στον στρόβιλο όπου αποτονώνεται και παράγει έργο. Έτσι, όπως αναμενόταν αυξάνεται η ισχύς και ο βαθμός απόδοσης του Σταθμού.

## 2.4 Μοντελοποίηση Μεικτής καύσης

Η μοντελοποίηση της καύσης βιομάζας στο λογισμικό GateCycle είναι ευκολότερη από την περίπτωση των θερμικών ηλιακών συστημάτων, καθώς δεν χρειάζεται η προσθήκη κάποιου επιπλέον στοιχείου εξοπλισμού. Η βασική αλλαγή γίνεται στο στοιχείο του λέβητα (Fossil Boiler). Γενικά, στο στοιχείο αυτό ο χρήστης μπορεί να επιλέξει το φορτίο του λέβητα ως,

- Θερμικό φορτίο (kJ/s) με βάση την Ανώτερη Θερμογόνο Ικανότητα (HHV)
- Θερμικό φορτίο (kJ/s) με βάση την Κατώτερη Θερμογόνο Ικανότητα (LHV)
- Συνολική κατανάλωση καυσίμου (kg/s)
- Υπολογισμός καυσίμου με βάση την εισερχόμενη ποσότητα αέρα
- Υπολογισμός καυσίμου με βάση τη θερμότητα που μεταφέρεται στις επιφάνειες συναλλαγής του νερού (kJ/s)
- Υπολογισμός καυσίμου με βάση την κάλυψη της παροχής μάζας του τροφοδοτικού νερού (kg/s)
- Υπολογισμός καυσίμου με βάση την θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων (°C) (αφορά την περίπτωση Off-Design)

Στην περίπτωση που εξετάζουμε επιλέγεται η μέθοδος της συνολικής κατανάλωσης καυσίμου, η οποία είναι ίση με 100,5 kg/s.

Fuel Type	Value
Solid	1.0000
Gas	0.00000
Oil	0.00000

Εικόνα 2.8: Εισαγωγή δεδομένων στο στοιχείο Fossil Boiler

Επιπλέον, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει το καύσιμο που θα χρησιμοποιήσει, το οποίο μπορεί να είναι στερεό, υγρό, αέριο ή και συνδυασμός αυτών. Στην περίπτωση μας γίνεται αποκλειστική χρήση στερεού καυσίμου (λιγνίτης και στερεή βιομάζα). Ο καθορισμός της σύστασης του καυσίμου γίνεται στο παράθυρο «Settings». Συγκεκριμένα ο χρήστης πρέπει να καθορίσει την κατά βάρος περιεκτικότητα σε

C, H, O, N και S ή την προσεγγιστική κατά βάρος περιεκτικότητα σε VM, FC, Ash και Water. Επίσης πρέπει να καθοριστεί η Θερμογόνος Ικανότητα του καυσίμου (Ανώτερη ή Κατώτερη). Η ανάλυση του καυσίμου και η Θερμογόνος Ικανότητα του μπορεί να είναι σε κατάσταση «ως έχει», «χωρίς υγρασία» ή «χωρίς υγρασία και τέφρα». Στην Εικόνα 2.9, φαίνονται τα δεδομένα που έχουν εισαχθεί για τον λιγνίτη και τον ΑΗΣ που μελετάμε.

**Boiler-Solid Fuel Settings**

UOM Define Help Steam

ID:  Description:

Ultimate Analysis Method:  Heating Value Method:   kJ/kg

Ultimate Analysis by Weight:		Proximate Analysis by Weight:	
Carbon (C):	<input type="text" value="0.22580"/>	Volatile Matter:	<input type="text" value="0.17920"/>
Hydrogen (H):	<input type="text" value="0.020700"/>	Fixed Carbon:	<input type="text" value="0.17920"/>
Oxygen (O):	<input type="text" value="0.098800"/>	Ash:	<input type="text" value="0.27360"/>
Nitrogen (N):	<input type="text" value="0.0037000"/>	Water:	<input type="text" value="0.36800"/>
Sulfur (S):	<input type="text" value="0.0094000"/>		

Pulverizer Specific Power Consumption:  kJ/kg

Fuel Inlet Temperature:  C

Εικόνα 2.9: Εισαγωγή σύστασης στερεού καυσίμου

**Fossil Boiler-Combustion**

UOM Define Help Steam

ID:  Description:

Combustion Controls:

Fraction by Volume

Flue Gas Exit Temperature:  C

Primary Combustion Air:

Weight Fraction of Coal Input:

Weight Fraction of Oil Input:

Weight Fraction of Gas Input:

Disable Minimum Flue Gas Temperature Warning

Combustion Method Flag (CombustionMethodFlag[0])

Εικόνα 2.10: Εισαγωγή δεδομένων καύσης

Επίσης ο χρήστης πρέπει να καθορίσει και τις συνθήκες της καύσης. Αυτό γίνεται στο παράθυρο «Combustion» στο οποίο επιλέγεται η περίσσεια αέρα για την καύση καθώς και η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων.

**Boiler-Design**

UOM Define Help Steam

ID:  Description:

Water Walls Design Method:

C

Superheater Design Method:

C

Reheater Design Method:

C

Desired RH Exit Temperature (DesiredRHExitTemp[0])

Εικόνα 2.11: Εισαγωγή δεδομένων στο παράθυρο Design

Τέλος, στο παράθυρο «Design» ο χρήστης οφείλει να καθορίσει την θερμοκρασία εξόδου του νερού από τον λέβητα, την θερμοκρασία εξόδου του υπέρθερμου ατμού καθώς και την θερμοκρασία της αναθέρμανσης του ατμού σε περίπτωση που υπάρχει αναθέρμανση. Στην Εικόνα 2.11, φαίνονται τα δεδομένα για τον ΑΗΣ που μελετάμε.

Στην περίπτωση της μεικτής καύσης λιγνίτη και στερεής βιομάζας θα πρέπει να εισαχθεί η νέα σύσταση και η νέα Θερμογόνος Ικανότητα του καυσίμου στο παράθυρο «Settings». Τα «τρεξίματα» θα γίνουν σε κατάσταση «Off-Design» για να διατηρηθούν όλα τα υπόλοιπα στοιχεία του Σταθμού σταθερά και να μελετηθεί η συμπεριφορά του κατά τη μεικτή καύση. Η παροχή του (νέου) καυσίμου θα μεταβάλλεται έως ότου η Ισχύς του Σταθμού γίνει ίση με 302,5 MW<sub>e</sub>.



## Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup> Σταθμοί Παραγωγής Ενέργειας με Συστήματα Παραβολικών Κοίλων Συλλεκτών

### 3.1 Εισαγωγή

Τα συστήματα με παραβολικούς κοίλους ηλιακούς συλλέκτες έχουν την δυνατότητα να θερμάνουν το ρευστό μετάδοσης θερμότητας έως τους 400°C. Για το λόγο αυτό είναι κατάλληλα για εφαρμογές σε σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ένας τέτοιος σταθμός αποτελείται από τα εξής τμήματα:

- Το ηλιακό πεδίο
- Το σύστημα παραγωγής ατμού
- Το σύστημα παραγωγής ενέργειας
- Το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στο ηλιακό πεδίο γίνεται η συλλογή της ηλιακής ακτινοβολίας η οποία μετατρέπεται σε θερμότητα την οποία παραλαμβάνει ένα ρευστό μετάδοσης θερμότητας. Στη συνέχεια, μέσω του συστήματος παραγωγής ατμού, η θερμότητα του ρευστού μετάδοσης θερμότητας χρησιμοποιείται για την παραγωγή υπέρθερμου ατμού (ή και κορεσμένου ατμού ανάλογα με τον κύκλο Rankine). Ο ατμός αυτός χρησιμοποιείται στο σύστημα παραγωγής ενέργειας όπου εκτονώνεται σε κάποιο στρόβιλο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τέλος, στο σύστημα αποθήκευσης θερμότητας, εάν υπάρχει, γίνεται αποθήκευση πλεονάζουσας θερμότητας για μελλοντική χρήση.

### 3.2 Ηλιακό πεδίο

#### 3.2.1 Γενικά

Το ηλιακό πεδίο αποτελείται από τους παραβολικούς κοίλους ανακλαστήρες, τον σωληνοειδή δέκτη, το ρευστό μεταφοράς θερμότητας καθώς επίσης την αντλία και τις απαραίτητες σωληνώσεις για την κυκλοφορία του. Η προσπίπτουσα άμεση ηλιακή ακτινοβολία με τη χρήση των παραβολικών ανακλαστήρων συγκεντρώνεται στον σωληνοειδή δέκτη, στον οποίο θερμαίνεται το ρευστό μετάδοσης θερμότητας καθώς ρέει μέσα από αυτόν. Οι σωληνώσεις δημιουργούν ένα κλειστό κύκλωμα για την κυκλοφορία του ρευστού μέσα στο ηλιακό πεδίο ενώ η αντλία χρησιμοποιείται για την κάλυψη την απωλειών πίεσης. Οι απώλειες πίεσης κατά τη ροή του ρευστού μέσα από το ηλιακό πεδίο είναι το άθροισμα των γραμμικών και των εντοπισμένων απωλειών.

Πρόκειται για το βασικότερο τμήμα μίας εγκατάστασης παραγωγής ενέργειας με παραβολικούς ηλιακούς συλλέκτες. Η απαιτούμενη έκταση της εγκατάστασης καθορίζεται ουσιαστικά από το μέγεθος του ηλιακού πεδίου, καθώς τα άλλα συστήματα της εγκατάστασης έχουν πολύ μικρότερο μέγεθος. Το μέγεθος του επηρεάζεται άμεσα από το ηλιακό δυναμικό της περιοχής στην οποία θα γίνει η εγκατάσταση, την ονομαστική ισχύ του σταθμού παραγωγής αλλά και από την ύπαρξη ή όχι συστήματος αποθήκευσης. Η διαστασιολόγηση του ηλιακού πεδίου διαδραματίζει ουσιαστικό ρόλο στην ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια του σταθμού.

Ένα τυπικό ηλιακό πεδίο αποτελείται από έναν αριθμό παράλληλα τοποθετημένων συλλεκτών οι οποίοι σχηματίζουν βρόχους με τέτοιο τρόπο ώστε το ρευστό μετάδοσης θερμότητας να θερμαίνεται από την είσοδο του ηλιακού πεδίου προς την έξοδο. Όσον αφορά την διάταξη του, τρεις είναι οι επικρατέστερες διατάξεις που χρησιμοποιούνται.

Η διάταξη Άμεσης Επιστροφής (Direct Return) αποτελεί τον πιο απλό τρόπο τοποθέτησης του ηλιακού πεδίου και χρησιμοποιείται πιο συχνά σε έργα μικρού μεγέθους. Το βασικό της μειονέκτημα είναι οι μεγάλες διαφορές στην πίεση εισόδου και εξόδου κάθε παράλληλης γραμμής και για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται βαλβίδες εξισορρόπησης ώστε να υπάρχει σταθερή ροή του ρευστού σε κάθε γραμμή. Όμως η χρήση των βαλβίδων έχει σαν συνέπεια τη σημαντική πτώση πίεσης σε ολόκληρο το σύστημα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι ιδιοκαταναλώσεις του ηλιακού πεδίου να είναι αυξημένες.

Η διάταξη Αντίστροφης Επιστροφής (Reverse Return) χαρακτηρίζεται από πιο ομαλή ροή. Η χρήση βαλβίδων για την διατήρηση της ισορροπίας στο σύστημα μπορεί και πάλι να χρειάζονται, όμως οι συνολικές απώλειες πίεσης του συστήματος είναι αρκετά μικρότερες σε σύγκριση με την διάταξη της άμεσης επιστροφής. Το βασικό μειονέκτημα της διάταξης αυτής είναι η απαίτηση σωληνώσεων μεγαλύτερου μήκους. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους της εγκατάστασης του ηλιακού πεδίου αλλά και των θερμικών απωλειών του συστήματος. Παρόλο αυτά, όσο μικρότερη είναι η μέγιστη θερμοκρασία του ηλιακού πεδίου, τόσο χαμηλότερες είναι και οι θερμικές απώλειες.

Τέλος, η διάταξη της Κεντρικής Τροφοδοσίας (Central Feed) είναι αυτή που χρησιμοποιείται πιο συχνά σε μεγάλα ηλιακά πεδία. Όπως και στην περίπτωση της Άμεσης Επιστροφής, οι απώλειες πίεσης είναι μεγαλύτερες όταν χρησιμοποιούνται βαλβίδες εξισορρόπησης στην είσοδο των γραμμών. Η διάταξη αυτή ελαχιστοποιεί το συνολικό μήκος της σειράς. Επιπλέον, προσφέρει άμεση πρόσβαση σε κάθε γραμμή συλλέκτη χωρίς της ανάγκη υπόγειων σωληνώσεων.

#### Προσανατολισμός ηλιακού πεδίου

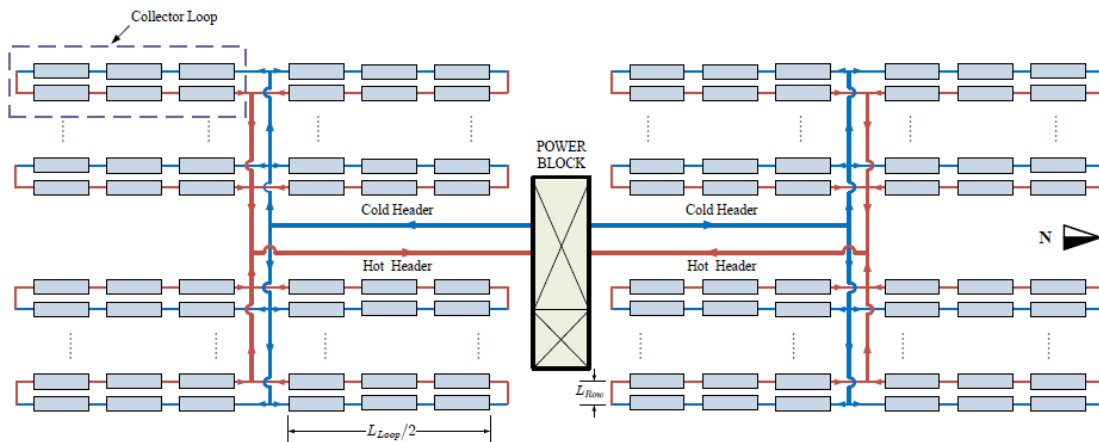
Ο προσανατολισμός του άξονα των ηλιακών συλλεκτών επηρεάζει την γωνία πρόσπτωσης στον παραβολικό ανακλαστήρα και κατ' επέκταση την απόδοση ολόκληρου του συλλέκτη, ενώ εξαρτάται τόσο από την τοπογραφία της περιοχής όσο και από τον προσανατολισμό ολόκληρης της εγκατάστασης. Οι προσανατολισμοί που χρησιμοποιούνται πιο συχνά στην πράξη για τον προσανατολισμό του άξονα περιστροφής των παραβολικών κοίλων συλλεκτών είναι αυτοί των Βορρά – Νότου και Ανατολής – Δύσης. Φυσικά και οποιοσδήποτε άλλος προσανατολισμός μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Όσον αφορά τον προσανατολισμό Βορρά – Νότου, οι εποχιακές διαφορές στην απόδοση του ηλιακού συλλέκτη μπορεί να είναι μεγάλες. Τρεις έως τέσσερις φορές περισσότερη ενέργεια παράγεται την περίοδο του καλοκαιριού σε σχέση με τον χειμώνα, γεγονός που επηρεάζεται φυσικά από το γεωγραφικό πλάτος και τις τοπικές συνθήκες της περιοχής. Αντίστοιχα, για τον προσανατολισμό Ανατολής – Δύσης, οι εποχιακές διαφορές στον ηλιακό συλλέκτη είναι αρκετά μικρότερες (συνήθως κάτω από 50%). Σε κάθε περίπτωση πάντως, ο προσανατολισμός Βορρά – Νότου χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη ετήσια παραγωγή ενέργειας. Τέλος, η ημερήσια διακύμανση στη γωνία πρόσπτωσης είναι μεγαλύτερη για προσανατολισμό Ανατολής – Δύσης, με μέγιστες τιμές στην Ανατολή του ήλιου και ελάχιστη τιμή μηδέν μοίρες κατά το ηλιακό μεσημέρι κάθε ημέρας.

### Χωροθέτηση παραβολικών ηλιακών συλλεκτών

Η σωλήνωση του ηλιακού πεδίου δημιουργεί ένα κλειστό κύκλωμα, στο οποίο ρέει το ρευστό μετάδοσης θερμότητας, από το ηλιακό πεδίο προς το σύστημα παραγωγή ατμού και αντίστροφα. Το σύστημα των σωληνώσεων σχεδιάζεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε διατηρείται σταθερή η παροχή μάζας του ρευστού σε κάθε βρόχο συλλεκτών και να αποφεύγονται τα ζεστά ή κρύα σημεία (hot and cold spots). Δύο χωροθέτησις των συλλεκτών που χρησιμοποιούνται συχνά είναι η χωροθέτηση «H» και «I» [36].

### Χωροθέτηση «H»

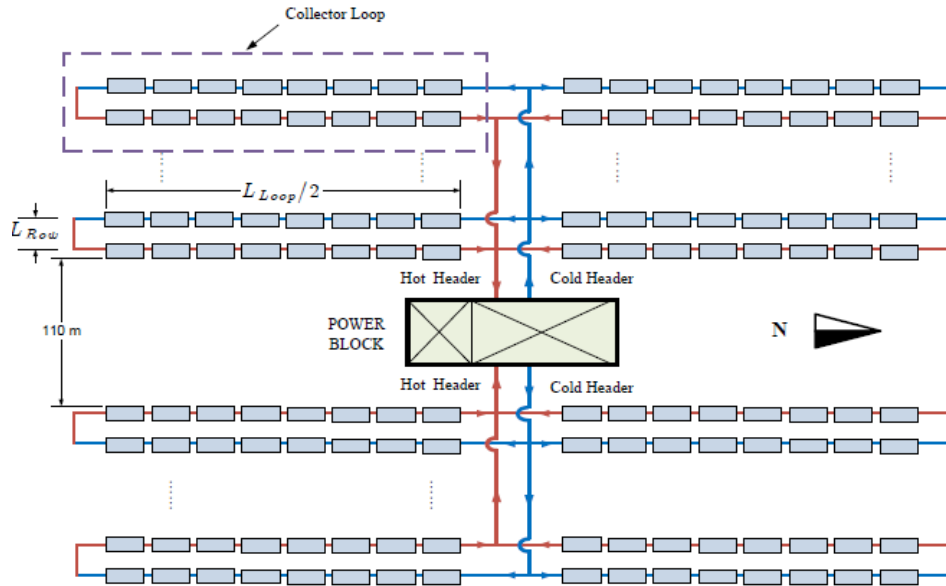
Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.1, στην περίπτωση αυτή το ηλιακό πεδίο χωρίζεται σε 4 υποσυστήματα τροφοδοσίας, ενώ το σύστημα παραγωγής ενέργειας βρίσκεται τοποθετημένο στο κέντρο του, δημιουργώντας το γράμμα «H». Το κρύο ρευστό διανέμεται από τον αντίστοιχο αγωγό σε κάθε βρόχο συλλεκτών και μέσω του θερμού αγωγού επιστρέφει στο σύστημα παραγωγής ενέργειας. Σε κάθε επιμέρους βρόχο οι ηλιακοί συλλέκτες συνδέονται μεταξύ τους με σφαιρικές αρθρώσεις επιτρέποντας στους εκατέρωθεν συλλέκτες να περιστρέφονται ανεξάρτητα [37]. Οι αρθρώσεις αυτές προτιμώνται έναντι εύκαμπτων σωλήνων καθώς έχουν μειωμένο κόστος και χαμηλότερες απώλειες πίεσης και θερμοκρασίας. Με στόχο τη μείωση της απαίτησης σε έκταση γης, κάθε βρόχος συλλεκτών επεκτείνεται και κατά την αντίθετη κατεύθυνση. Η χωροθέτηση αυτή χρησιμοποιείται όταν η συνολική επιφάνεια των ηλιακών συλλεκτών είναι μεγαλύτερη των  $400 \times 10^3 \text{ m}^2$ .



Εικόνα 3.1: Χωροθέτηση «H» ηλιακού πεδίου [36]

### Χωροθέτηση «I»

Η χωροθέτηση αυτή χρησιμοποιείται όταν η συνολική επιφάνεια των ηλιακών συλλεκτών είναι μικρότερη των  $400 \times 10^3 \text{ m}^2$ . Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.2, το ηλιακό πεδίο χωρίζεται σε 2 υποσυστήματα τροφοδοσίας, ενώ το σύστημα παραγωγής ενέργειας είναι τοποθετημένο και πάλι στο κέντρο του, σχηματίζοντας το γράμμα «I». Και στην περίπτωση αυτή κάθε βρόχος μπορεί να επεκτείνεται και κατά την αντίθετη κατεύθυνση, μειώνοντας την απαίτηση σε έκταση γης.



Εικόνα 3.2: Χωροθέτηση «1» ηλιακού πεδίου [36]

### Συντελεστής Μεγέθους ηλιακού πεδίου (Solar Multiple, SM)

Ως Συντελεστής Μεγέθους ηλιακού πεδίου ορίζεται ο λόγος της θερμικής ενέργειας που λαμβάνεται από το ηλιακό πεδίο κατά την ονομαστική λειτουργία, προς της απαιτούμενη θερμότητα από το σύστημα παραγωγής ενέργειας για την λειτουργία του στο ονομαστικό φορτίο. Συντελεστής Μεγέθους ηλιακού πεδίου ίσος με την μονάδα σημαίνει ότι στο σημείο σχεδιασμού το ηλιακό πεδίο παρέχει την απαιτούμενη θερμότητα που ακριβώς χρειάζεται το σύστημα παραγωγής ενέργειας για να λειτουργήσει στο ονομαστικό του φορτίο. Η τιμή του Συντελεστή Μεγέθους ηλιακού πεδίου που βελτιστοποιεί το ανηγμένο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για περιοχές με υψηλό ηλιακό δυναμικό είναι 1,15 [38].

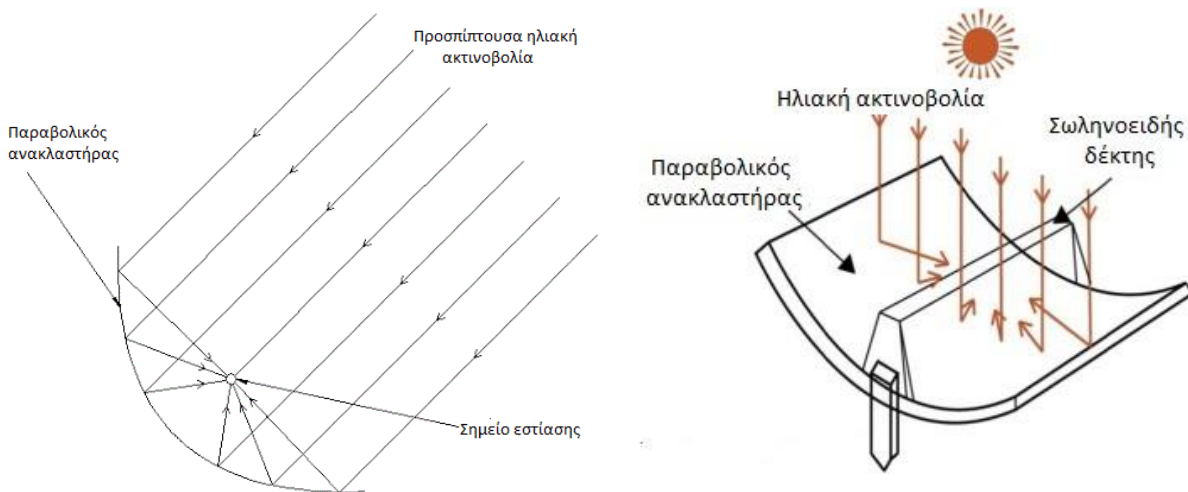
### 3.2.2 Παραβολικός Κοίλος Συλλέκτης

Τα κύρια μέρη ενός παραβολικού κοίλου συλλέκτη είναι ο παραβολικός ανακλαστήρας, στον οποίο ανακλάται η ηλιακή ακτινοβολία, και ο σωληνοειδής δέκτης, στον οποίο συγκεντρώνεται. Ο σωληνοειδής δέκτης που ονομάζεται και σωληνοειδής απορροφητής ή στοιχείο συλλογής θερμότητας (Heat Collecting Element, HCE), είναι τοποθετημένος στην εστιακή γραμμή της παραβολής και μέσα σε αυτόν ρέει το ρευστό μετάδοσης θερμότητας. Με τον τρόπο αυτό η συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία μετατρέπεται σε αισθητή θερμότητα του ρευστού μετάδοσης θερμότητας.

#### Παραβολικός ανακλαστήρας

Οι παραβολικοί ανακλαστήρες συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία στην εστιακή γραμμή, η οποία είναι παράλληλη στον άξονα του παραβόλου, Εικόνα 3.3. Οι ανακλαστήρες αυτού του τύπου παρουσιάζουν υψηλό βαθμό αντανάκλασης (μεγαλύτερο από 88%) με σκοπό την βέλτιστη αντανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας. Οι ανακλαστικές επιφάνειες που χρησιμοποιούνται συχνότερα σε συστήματα παραβολικών κοίλων συλλεκτών είναι γυάλινοι καθρέπτες με φύλλο αλουμινίου στην πίσω πλευρά, καθώς αυτά τα κάτοπτρα παρουσιάζουν υψηλότερη αντοχή και φασματική ανάκλαση σε σχέση με τα

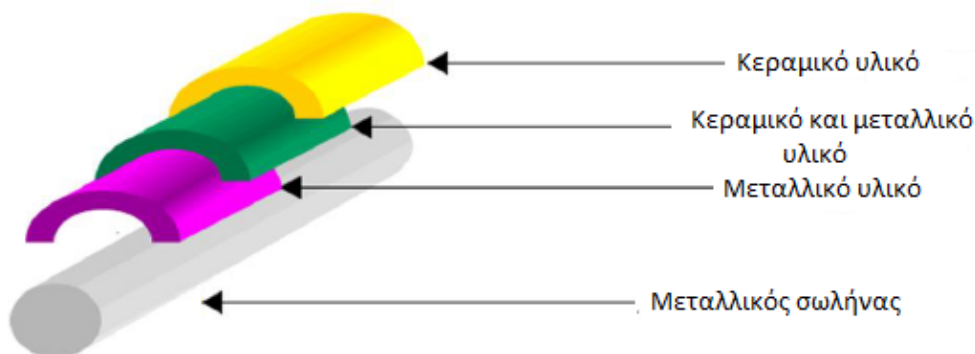
κάτοπτρα που είναι κατασκευασμένα από στιλβωμένο αλουμίνιο ή άλλα μεταλλοποιημένα ακρυλικά υλικά. Οι παραβολικοί ανακλαστήρες εδράζονται σε αστάλινους πυλώνες οι οποίοι διαθέτουν μηχανισμό κίνησης ενός άξονα ώστε να μπορούν να παρακολουθούν της πορεία του ηλίου και να μειώνουν τις οπτικές απώλειες. Αυτό επιτυγχάνεται με τοπικές μονάδες ελέγχου οι οποίες βασίζονται σε αισθητήρες ηλίου ή σε αστρονομικούς αλγορίθμους. Η ανακλαστική επιφάνεια των παραβολικών κοίλων συλλεκτών που χρησιμοποιούνται σήμερα ξεπερνά τα 700m<sup>2</sup> και το μήκος φτάνει τα 150m.



Εικόνα 3.3: Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας παραβολικού ανακλαστήρα (τυπικό σχήμα)

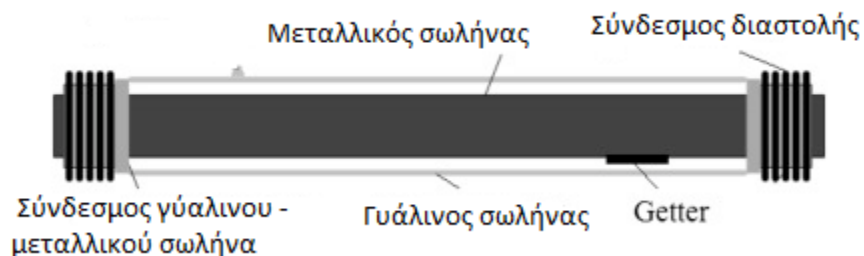
### Σωληνοειδής δέκτης

Ένας τυπικός σωληνοειδής δέκτης αποτελείται από έναν μεταλλικό σωλήνα ο οποίος περιβάλλεται από έναν γυάλινο σωλήνα, με σκοπό την μείωση των θερμικών απωλειών προς το περιβάλλον. Για τον ίδιο λόγο ο μεταλλικός σωλήνας έχει μία επίστρωση που χαρακτηρίζεται από υψηλό συντελεστή απορρόφησης, μεγαλύτερο από 90%, και χαμηλό συντελεστή εκπομπής, χαμηλότερο από 30% για την υπέρυθη ακτινοβολία. Η επίστρωση αυτή περιλαμβάνει τρεις στρώσεις διαφορετικών υλικών, Εικόνα 3.4 [39]. Η πρώτη στρώση αποτελείται από κάποιο μεταλλικό υλικό με υψηλή αντί-ανακλαστικότητα στην υπέρυθη ακτινοβολία, όπως ο χαλκός, το αλουμίνιο ή το μολυβδαίνιο. Η δεύτερη στρώση αποτελείται από συνδυασμό κεραμικού υλικού με σωματίδια μετάλλων (cermet, the combination of ceramic (cer) and metallic materials (met)), όπως για παράδειγμα  $Al_2O_3$  ή  $SiO_2$  με μολυβδαίνιο. Η τρίτη στρώση αποτελείται από κεραμικά υλικά με καλή αντί-ανακλαστική ιδιότητα όπως  $Al_2O_3$  ή  $SiO_2$ .



Εικόνα 3.4: Επίπεδα στρώσεων του μεταλλικού σωλήνα [39]

Η ύπαρξη κενού μεταξύ των δύο σωλήνων, καθώς και η αντί-ανακλαστική επίστρωση στον γυάλινο σωλήνα μεγιστοποιεί τον θερμικό βαθμό απόδοσης και την ετήσια επίδοση των παραβολικών κοίλων συλλεκτών, ειδικότερα για τις περιπτώσεις υψηλών θερμοκρασιών λειτουργίας. Σωληνοειδείς δέκτες χωρίς συνθήκες κενού ανάμεσα στους δύο σωλήνες χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου οι απαιτούμενες θερμοκρασίες δεν ξεπερνούν τους 250 °C και έτσι οι θερμικές απώλειες είναι σημαντικά χαμηλότερες. Ο εξωτερικός γυάλινος σωλήνας συνδέεται με τον εσωτερικό σωλήνα μέσω ευλύγιστων μεταλλικών συνδέσμων, Εικόνα 3.5, οι οποίοι ισοσταθμίζουν τις διαφορετικές θερμικές διαστολές του χάλυβα και του γυαλιού όταν ο δέκτης λειτουργεί στην ονομαστική θερμοκρασία του. Ο σύνδεσμος αυτός καθώς και ο σύνδεσμος διαστολής (πρόκειται για άρθρωση), αποτελούν το αδύναμο σημείο του δέκτη και πρέπει να προστατεύονται κατάλληλα από την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία ώστε να αποφεύγεται η ανάπτυξη υψηλών θερμικών τάσεων που μπορεί να οδηγήσουν σε αστοχία της συνδεσμολογίας. Συνήθως για την προστασία του συνδέσμου χρησιμοποιείται ένα κάλυμμα από αλουμίνιο. Επιπλέον, στον μεταλλικό σωλήνα βρίσκεται και ένας «getter» ώστε να διατηρείται η συνθήκη κενού μεταξύ γυάλινου και μεταλλικού σωλήνα. Πιο συγκεκριμένα, όταν στον μεταλλικό σωλήνα ρέει κάποιο συνθετικό έλαιο, είναι πολύ πιθανό λόγω θερμοκρασιών να υποστεί κάποια θερμική διάσπαση και να εμφανιστεί μικρή ποσότητα υδρογόνου η οποία ταξιδεύοντας στον σωλήνα χειροτερεύει τις συνθήκες κενού. Ο «getter» είναι μεταλλικές ενώσεις που έχουν σχεδιαστεί για να απορροφούν το υδρογόνο και άλλα αέρια που διεισδύουν με την πάροδο του χρόνου στον χώρο μεταξύ των δύο σωλήνων και να διατηρούν την θερμική μόνωση του δέκτη σε υψηλά επίπεδα [40].



Εικόνα 3.5: Σωληνοειδής απορροφητής [41]

Λόγω κατασκευαστικών περιορισμών το μέγιστο μήκος ενός σωληνοειδούς δέκτη δεν ξεπερνά τα 6m. Για το λόγο αυτό σε έναν παραβολικό κοίλο συλλέκτη, ο δέκτης αποτελείται από περισσότερους επί μέρους σωληνοειδείς δέκτες, οι οποίοι ενώνονται κατάλληλα με σκοπό να καλύψουν το συνολικό μήκος του. Επιπλέον, οι συλλέκτες, και πιο συγκεκριμένα οι μεταλλικοί αγωγοί, δεν θα πρέπει να ξεπεράσουν την μέγιστη πίεση λειτουργίας τους. Η μέγιστη πίεση εξαρτάται από τα κατασκευαστικά όρια των δεκτών και είναι για παράδειγμα 20 bar για τον συλλέκτη Archimede και 40 bar για τον συλλέκτη Schott. Η πίεση αυτή είναι πολύ σημαντική για την περίπτωση του συστήματος της άμεσης ατμοπαραγωγής (Direct Steam Generator) η οποία καθορίζει και την μέγιστη πίεση του ατμού στην είσοδο του ατμοστροβίλου. Στις περιπτώσεις αυτές χρησιμοποιούνται κατάλληλα ανεπτυγμένοι σωληνοειδείς δέκτες που μπορούν να φτάσουν και τα 55 bar (Σταθμός Novatec PE1 και PE2 με γραμμικούς ανακλαστήρες τύπου Fresnel). Στην Εικόνα 3.6 φαίνονται ορισμένοι τυπικοί εμπορικοί σωληνοειδείς δέκτες.



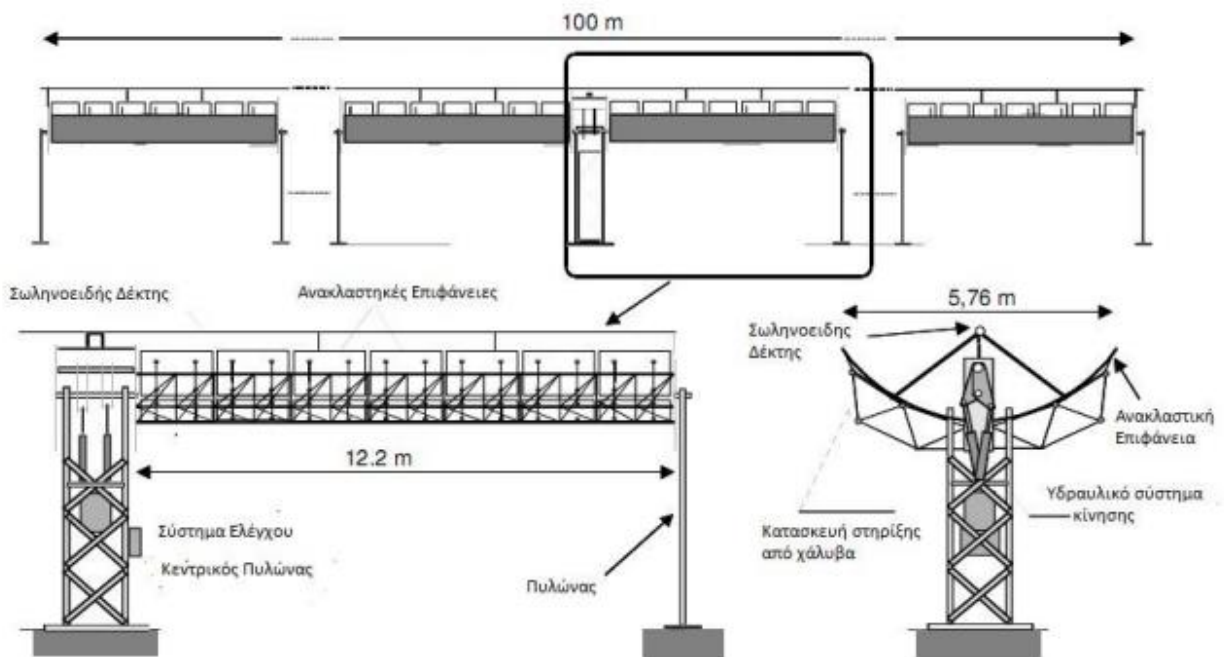
Εικόνα 3.6: Σωληνοειδής συλλέκτης εγκατεστημένος στον παραβολικό ανακλαστήρα (πάνω αριστερά), Siemens UVAC 2010 (πάνω δεξιά), Archimede HEMS08 (κάτω αριστερά), Scott PTR 70 (κάτω δεξιά) [39]

### Εμπορικοί Συλλέκτες

Οι παραβολικοί κοίλοι ηλιακοί συλλέκτες που χρησιμοποιήθηκαν στους πρώτους θερμικούς ηλιακούς σταθμούς (SEGS) κατασκευάστηκαν από την Αμερικανική/Ισραηλινή εταιρεία Luz International. Η εταιρεία αυτή κατασκεύασε τρία μοντέλα που ονομάστηκαν LS-1, LS-2, και LS-3. Τα μοντέλα LS-1 και LS-2 χρησιμοποιήθηκαν στους πρώτους σταθμούς SEGS, ενώ ο συλλέκτης LS-3 στους τελευταίους δύο και πιο σύγχρονους σταθμούς.

Οι δύο πρώτες γενιές συλλεκτών, LS-1 και LS-2, αποτελούνταν από παρόμοιες κατασκευές, τοποθετημένες σε βάσεις ίδιου μήκους, με την διαφορά ότι η επιφάνεια ανοίγματος του LS-2 ήταν διπλάσια από αυτή του LS-1. Οι βάσεις των συλλεκτών αυτών είναι τοποθετημένες σε μία άκαμπτη σωληνοειδή κατασκευή, η οποία ονομάζεται σωληνοειδής βάση ροπής. Στην κατασκευή του συλλέκτη

LS-3 η βάση αυτή αντικαταστάθηκε από ένα μεταλλικό δικτύωμα. Επίσης, το πλάτος της επιφάνειας ανοίγματος του συλλέκτη LS-3 αυξήθηκε κατά 14% και το μήκος του διπλασιάστηκε σε σχέση με το μοντέλο LS-2. Αλλαγές έγιναν και στο σύστημα κίνησης τω συλλεκτών με τη χρήση υδραυλικών συστημάτων ελέγχου, αντί των μεταλλικών μηχανισμών με καλώδια. Στην κατασκευή των συλλεκτών LS-3 η εταιρεία Luz, πέρα από την αξιοποίηση της εμπειρίας που υπήρχε από την λειτουργία των SEGS, σημαντικός παράγοντας ήταν η προσπάθεια περιορισμού του κόστους καθώς και η δυνατότητα για μαζική παραγωγή. Το στοιχείο συλλογής θερμότητας που χρησιμοποιείται στους συλλέκτες αυτούς, αποτελείται από έναν ανοξείδωτο χαλύβδινο σωλήνα, με μία ειδική επίστρωση, τοποθετημένο μέσα σε έναν άλλο γυάλινο. Μεταξύ των δύο ομοαξονικών σωλήνων επικρατούν συνθήκες κενού για τη μείωση των θερμικών απωλειών προς το περιβάλλον. Ο εξωτερικός γυάλινος σωλήνας περιέχει μικρή ποσότητα σιδήρου (μέγιστη τιμή 0,015%), ενώ επίσης έχει μια αντί-ανακλαστική επίστρωση σε κάθε πλευρά του με σκοπό τη μέγιστη απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Η επιλεκτική επίστρωση που χρησιμοποιήθηκε στους συλλέκτες LS-1 και LS-2 ήταν από μαύρο χρώμιο, ενώ στον συλλέκτη LS-3 αποτελούνταν από μία λεπτή στρώση από μίξη κεραμικού και μεταλλικού υλικού. Το 1992 η εταιρεία Luz International χρεοκόπησε και η Βέλγικη εταιρεία SOLEL αγόρασε την τεχνογνωσία της. Προτού χρεοκοπήσει η Luz, είχε σχεδιάσει έναν συλλέκτη 4<sup>ης</sup> γενιάς, τον LS-4, για να χρησιμοποιηθεί σε συστήματα άμεσης ατμοποίησης (Direct Steam Generator). Τα χαρακτηριστικά των συλλεκτών Luz φαίνονται στον Πίνακα 3.1 [42].



Εικόνα 3.7: Παραβολικός κοίλος συλλέκτης LS-3 [43]



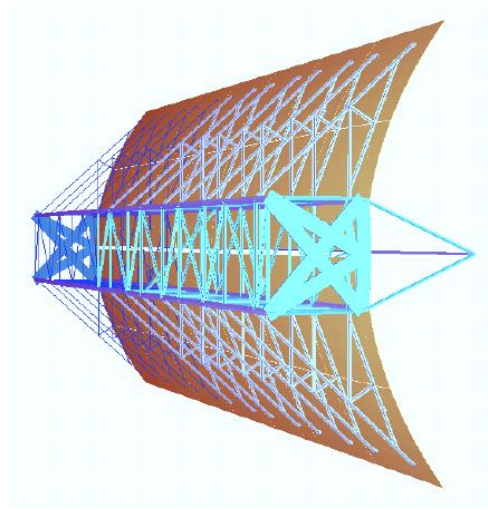
Πίνακας 3.1: Αναλυτικά χαρακτηριστικά συλλεκτών της εταιρείας Luz International [54]

Μοντέλο	LS-1	LS-2	LS-3
Ακρίβεια εντοπισμού ηλίου (°)	0,1	0,1	0,1
Μέγιστη ταχύτητα αέρα λειτουργίας (km/h)	56	56	56
Χαλύβδινη κατασκευή βάσης	Σωλήνες	Σωλήνες	Δικτύωμα
Επίστρωση σωληνοειδούς δέκτη	Μαύρο χρώμιο	Μαύρο χρώμιο	Κεραμικό/μέταλλο
Συντελεστής απορρόφησης (%)	94	94	96
Συντελεστής μετάδοσης (%)	94	94	95
Συντελεστής εκπομπής (%)	39 (300°C)	24 (300°C)	18 (350°C)
Εστιακή απόσταση δέκτη (m)	0,68	1,49	1,71
Γωνιακό άνοιγμα (°)	85	80	80
Συντελεστής αντανάκλασης (%)	94	94	94
Άνοιγμα/πλάτος παραβόλου (m)	2,5	5	5,76
Εξωτερική διάμετρος σωλήνα απορρόφησης (m)	0,042	0,07	0,07
Γεωμετρική συγκέντρωση	19	23	26
Συνολικό μήκος συλλέκτη (m)	50,2	47,1	99
Απόσταση εδράσεων (m)	6,3	8	12
Επιφάνεια καθρεπτών συλλέκτη (m <sup>2</sup> )	128	235	545
Μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας (°C)	307	350	390
Απόσταση μεταξύ παράλληλων συλλεκτών (m)	7	12,5/15	17
Βαθμός παρεμπόδισης (%)	87	89	93

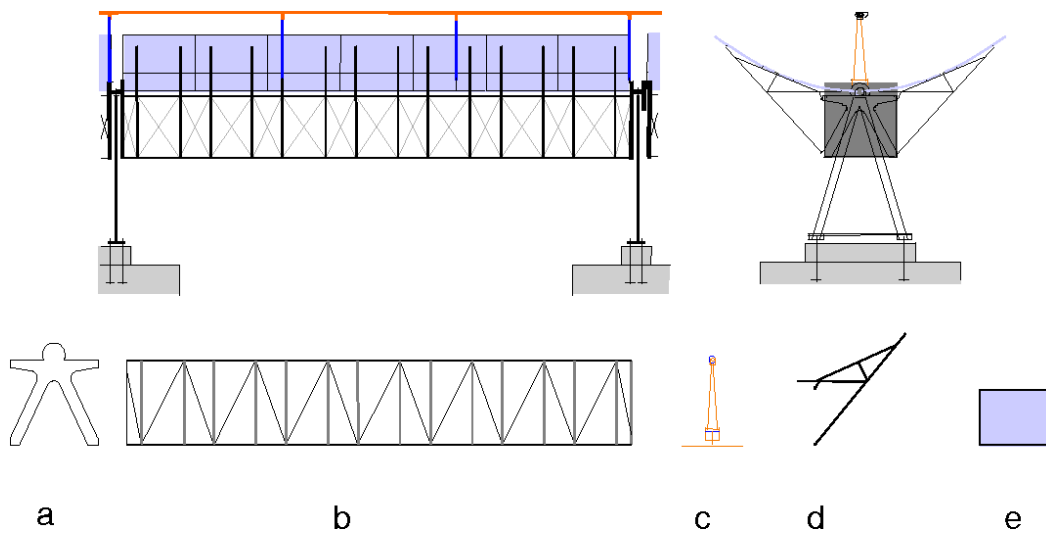
Το 1998 μια διεθνής συνεργασία από Ευρωπαϊκές εταιρείες και εργαστήρια ερευνών (Abengoa/Inabensa, Flabeg Solar International, Schlaich Bergermannund Partner, Iberdrola, Solel Solar Systems, CIEAMAT, CRES και DLR), δημιούργησε μία νέα γενιά παραβολικών κοίλων συλλεκτών μειωμένου κόστους, καθώς τα μοντέλα της εταιρείας Luz δεν ήταν πλέον ανταγωνιστικά.

Η δημιουργία του συλλέκτη «Euro Trough» ήρθε ως αποτέλεσμα ανάλυσης πολλών διαφορετικών τρόπων κατασκευής συλλεκτών, με γεωμετρικά χαρακτηριστικά παρόμοια του συλλέκτη LS-3, αλλά με βασική διαφορά στη βάση υποστήριξης, η οποία συνδυάζει τα πλεονεκτήματα της κατασκευής που είχαν χρησιμοποιηθεί στον συλλέκτη LS-2 και το οικονομικό πλεονέκτημα της κατασκευής του LS-3. Η βάση υποστήριξης, γνωστή και ως «ορθογώνιο ροπής», αποτελείται από ένα δικτύωμα τετραγωνικής διατομής, μήκους 12m, στην οποία στηρίζονται οι βραχίονες, πάνω στους οποίους τοποθετούνται τα κάτοπτρα. Η κατασκευή αυτή αποτελείται από τέσσερα διαφορετικά χαλύβδινα μέρη, κάνοντας έτσι ευκολότερη την κατασκευή της και μειώνοντας την προσπάθεια και το κόστος συναρμολόγησης της. Το βάρος της κατασκευής αυτής έχει μειωθεί κατά 14% σε σύγκριση με το συλλέκτη LS-3 [44]. Επιπλέον, τα οπτικά χαρακτηριστικά των συλλεκτών αυτών έχουν βελτιωθεί σε σύγκριση με την προηγούμενη γενιά συλλεκτών. Ο πρώτος εμπορικός συλλέκτης Euro Trough είναι ο ET-100, ο οποίος αποτελείται από 8 τμήματα με συνολικό μήκος 100m και επιφάνεια αντανάκλασης 545m<sup>2</sup>. Η υψηλή στιβαρότητα της νέας κατασκευής στήριξης επέτρεψε την αύξηση του μήκους του συλλέκτη. Στο δεύτερο μοντέλο που

παρουσιάστηκε από την Euro Trough, το ET-150, το συνολικό μήκος αυξήθηκε στα 150m, ο αριθμός των τμημάτων του συλλέκτη αυξήθηκε στα 12 και η συνολική επιφάνεια αντανάκλασης στα 817,50m<sup>2</sup>. Τα χαρακτηριστικά των συλλεκτών αυτών φαίνονται στον Πίνακα 3.2.



Εικόνα 3.8: Μοντέλο συλλέκτη Euro Trough σε υπολογιστή [45]



Εικόνα 3.9: Παραβολικός κοίλος συλλέκτης Euro Trough, (a) Πυλώνες στήριξης, (b) Δικτύωμα βάσης, (c) Στήριξη σωληνοειδούς δέκτη, (d) Βραχίονας στήριξης, (e) καθρέπτες αντανάκλασης [45]

Πίνακας 3.2: Αναλυτικά χαρακτηριστικά συλλεκτών Euro Trough [54]

Μοντέλο	ET-100	ET-150
Εστιακό μήκος (m)	1,71	1,71
Εξωτερική διάμετρος απορροφητή (m)	0,07	0,07
Εσωτερική διάμετρος απορροφητή (m)	0,065	0,065
Φαινόμενο πλάτος (m)	5,77	5,77
Φαινόμενη επιφάνεια (m <sup>2</sup> )	545	817,5
Συνολικό μήκος (m)	99,5	148,5
Αριθμός τμημάτων	8	12
Αριθμός σωλήνων/ απορροφητών (4,1m)	24	36
Συντελεστής αναχαίτησης (%)	92	92
Συντελεστής Αντανάκλασης (%)	94	94
Συντελεστής απορρόφησης (%)	94	94
Συντελεστής μετάδοσης (%)	94,5	94,5
Μέγιστος οπτικός βαθμός απόδοσης (%)	75	75

### 3.2.3 Ρευστό Μεταφοράς Θερμότητας

Το ρευστό μεταφοράς θερμότητας είναι το μέσο με το οποίο η θερμότητα που προσλαμβάνεται από το ηλιακό πεδίο μεταφέρεται στο σύστημα παραγωγής ατμού. Τα χαρακτηριστικά του πρέπει να είναι κατάλληλα ώστε να αντέχει τις θερμοκρασίες και πιέσεις που αναπτύσσονται στον σωληνοειδή δέκτη. Τα μέσα που χρησιμοποιούνται πιο συχνά σαν ρευστά μεταφοράς θερμότητας είναι θερμικά έλαια, ειδικότερα για συλλέκτες όπου αναπτύσσονται θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 200 °C. Ο βασικότερος παράγοντας στην επιλογή του κατάλληλου θερμικού ελαίου για μία εγκατάσταση παραγωγής ενέργειας με παραβολικούς κοίλους συλλέκτες είναι η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας του, καθώς αν ξεπεραστεί η θερμοκρασία αυτή αλλάζει η δομή του ελαίου και καταστρέφεται ταχύτατα. Επίσης χρησιμοποιούνται τετηγμένα άλατα, κυρίως στις περιπτώσεις όπου υπάρχει και σύστημα αποθήκευσης ενέργειας, καθώς και νερό, το οποίο ατμοποιείται μέσα στους συλλέκτες και οδηγείται στο σύστημα παραγωγής ενέργειας – σύστημα άμεσης ατμοποίησης (Direct Steam Generator).

#### Therminol VP-1

Το θερμικό έλαιο που χρησιμοποιείται πιο συχνά σε συστήματα παραγωγής ενέργειας με παραβολικούς συλλέκτες στα οποία η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας φτάνει τους 395 °C είναι το Therminol VP-1. Πρόκειται για ένα εύτηκτο μίγμα που αποτελείται σε ποσοστό 73,5% από οξείδιο του DIPHENYLL (C<sub>12</sub>H<sub>10</sub>O) και 26,5% από DIPHENYLL (C<sub>12</sub>H<sub>10</sub>). Το βασικότερο ζήτημα σχετικά με τη χρήση του ελαίου αυτού είναι η υψηλή θερμοκρασία στερεοποίησης του (12 °C) πράγμα που απαιτεί την ύπαρξη εφεδρικού συστήματος θέρμανσής του όταν η θερμοκρασία του πέσει κάτω από την τιμή αυτή. Επίσης στην ατμοσφαιρική πίεση το έλαιο αυτό έχει θερμοκρασία βρασμού 257 °C. Επομένως, όταν απαιτούνται υψηλότερες θερμοκρασίες το κύκλωμα πρέπει να βρίσκεται υπό πίεση. Μάλιστα για τις περιπτώσεις που

το έλαιο αυτό θερμαίνεται μέχρι την μέγιστη θερμοκρασία του ( $\approx 400$  °C), το κύκλωμα δεν πρέπει να πέσει κάτω από την πίεση των 14 bar καθώς τότε θα αρχίσει να ατμοποιείται (στους 400 °C η πίεση ατμοποίησης είναι τα 12 bar) [38]. Παρά το γεγονός ότι υπάρχουν και άλλα έλαια που είναι κατάλληλα για χρήση σε σταθμούς με παραβολικούς κοίλους συλλέκτες, τα οποία είναι ικανά να φτάσουν σε λίγο μεγαλύτερες θερμοκρασίες και έχουν υψηλότερη θερμοκρασία στερεοποίησης, το κόστος τους είναι αρκετά υψηλό για χρήση σε μεγάλες εγκαταστάσεις. Οι περισσότεροι εν λειτουργία σταθμοί με παραβολικούς κοίλους συλλέκτες χρησιμοποιούν ως μέσο μεταφοράς θερμότητας το Therminol VP-1.

Στις παρακάτω εξισώσεις δίνονται η πυκνότητα και η θερμοχωρητικότητα του Therminol VP-1 συναρτήσει της θερμοκρασίας του, οι οποίες θα χρειαστούν στην μετέπειτα ανάλυση [46].

$$\rho \left[ \frac{kg}{m^3} \right] = -0,90797 \cdot T + 7,8116 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 - 2,367 \cdot 10^{-6} \cdot T^3 + 1083,25$$

$$C_p \left[ \frac{kJ}{kg \cdot K} \right] = 0,002414 \cdot T + 5,9591 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 - 2,9879 \cdot 10^{-8} \cdot T^3 + 4,4172 \cdot 10^{-11} \cdot T^4 + 1,489$$

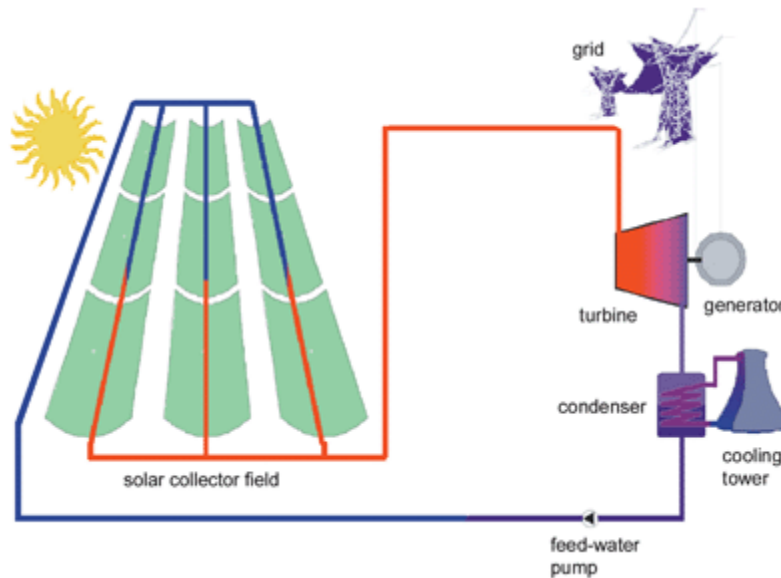
όπου η θερμοκρασία T δίνεται σε Kelvin.

### Τετηγμένα άλατα

Η χρήση τετηγμένων αλάτων στους σταθμούς παραγωγής ενέργειας με παραβολικούς συλλέκτες επιτρέπει την επίτευξη θερμοκρασιών 450 – 600 °C και κατ' επέκταση την αύξηση του βαθμού απόδοσης του κύκλου Rankine. Η θερμοκρασία που αναπτύσσεται στους συλλέκτες μπορεί να είναι και 2,5 φορές μεγαλύτερη σε σχέση με την περίπτωση των θερμικών ελαίων, μειώνοντας έτσι το μέγεθος του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας για δεδομένη ισχύ του σταθμού [47]. Τα άλατα που χρησιμοποιούνται στην πράξη είναι το «Solar Salt», που αποτελείται κατά 60% από  $NaNO_3$  και κατά 60% από  $KNO_3$ , και το «HitecXL», που αποτελείται κατά 48% από  $Ca(NO_3)_2$ , κατά 45% από  $KNO_3$  και κατά 7% από  $NaNO_3$  [47]. Πρόκειται για φιλικά προς το περιβάλλον ρευστά, τα οποία εν αντιθέσει με τα θερμικά έλαια δεν είναι εύφλεκτα. Βασικό ζήτημα των τετηγμένων αλάτων είναι η πολύ υψηλή θερμοκρασία στερεοποίησης τους, 120 °C για το Solar Salt και 220 °C για το HitecXL, κάτι που απαιτεί καινοτόμα συστήματα προστασίας έναντι στερεοποίησης του ηλιακού πεδίου και φυσικά αυξημένο κόστος συντήρησης και λειτουργίας. Επιπλέον, η μέγιστη θερμοκρασία των αλάτων περιορίζεται από τη λειτουργία και την αντοχή του σωληνοειδή δέκτη και συγκεκριμένα της επίστρωσης του, ενώ τίθεται θέμα και με τις απώλειες θερμότητας του δέκτη στις μεγαλύτερες θερμοκρασίες. Όλα τα παραπάνω καθιστούν τα τετηγμένα άλατα προτιμότερα για τους σταθμούς ηλιακών πύργων και για συστήματα αποθήκευσης ενέργειας [48].

### Σύστημα άμεσης ατμοποίησης (Direct Steam Generator)

Στην περίπτωση αυτή το μέσο μεταφοράς θερμότητας του ηλιακού πεδίου και το εργαζόμενο μέσο του κύκλου Rankine είναι το ίδιο, το νερό, Εικόνα 3.10. Στην είσοδο του ηλιακού πεδίου εισέρχεται νερό το οποίο ατμοποιείται απ' ευθείας μέσα στους σωληνοειδείς δέκτες. Στη συνέχεια ο ατμός εκτονώνεται στον ατμοστρόβιλο, αποβάλλει την θερμότητα του στον συμπυκνωτή μέχρι την κατάσταση κορεσμένου υγρού και μέσω της τροφοδοτικής αντλίας εισέρχεται εκ νέου στο ηλιακό πεδίο για την επανάληψη του κύκλου.



Εικόνα 3.10: Διάταξη σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με άμεση ατμοποίηση

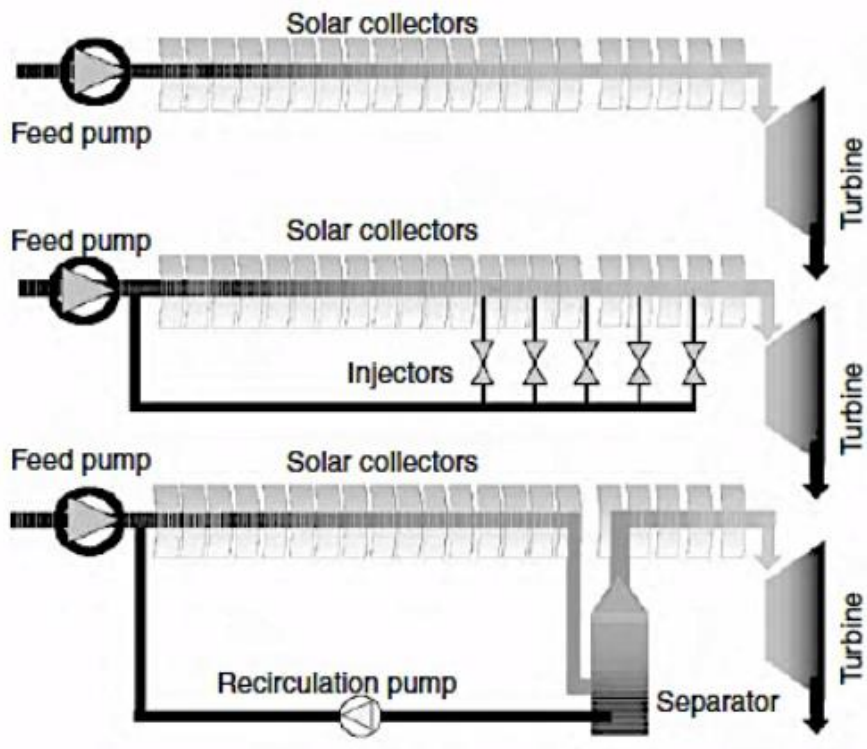
Το σύστημα της άμεσης παραγωγής ατμού παρουσιάζει τα εξής πλεονεκτήματα

- Επίτευξη θερμοκρασιών που ξεπερνούν τους 400 °C και κατά συνέπεια μεγαλύτερος βαθμός απόδοσης του κύκλου Rankine
- Μεγαλύτερος βαθμός απόδοσης και χαμηλότερο κόστος επένδυσης του ηλιακού πεδίου λόγω της απουσίας του ενδιάμεσου εναλλάκτη θερμότητας
- Απλοποιημένη διάταξη του ηλιακού πεδίου λόγω απουσίας του εφεδρικού συστήματος θέρμανσης και του εναλλάκτη θερμότητας
- Απουσία περιβαλλοντικών κινδύνων που σχετίζονται με τα θερμικά έλαια (διαρροές, φωτιές κλπ)
- Μικρότερο κόστος συντήρησης και λειτουργίας λόγω απουσίας του συστήματος ελαίου και της ανάγκης για περιοδική αντικατάσταση του

Ωστόσο, το σύστημα άμεσης παραγωγής ατμού έχει να αντιμετωπίσει ορισμένες βασικές προκλήσεις για την περαιτέρω ανάπτυξη της συγκεκριμένης τεχνολογίας. Αυτές αφορούν κυρίως την κατασκευή ενός σωληνοειδούς δέκτη που θα αντέχει πιέσεις μεγαλύτερες των 100 bar, καθώς και τη συνύπαρξη νερού και ατμού μέσα σε αυτόν. Τα προβλήματα της διφασικής ροής έχουν να κάνουν με τον έλεγχο του ηλιακού πεδίου και την όλη σταθερότητα της διαδικασίας.

Τρεις διατάξεις έχουν επικρατήσει σήμερα ώστε να μην υπάρχουν επικίνδυνες αποκλίσεις θερμοκρασίας στους δέκτες. Η Εισόδου – Εξόδου, η Έκχυση και η Ανακυκλοφορία, Εικόνα 3.11. Αυτές οι τρεις επιλογές απαιτούν ένα ηλιακό πεδίο που αποτελείται από μεγάλες σειρές παραβολικών κοίλων συλλεκτών συνδεδεμένων εν σειρά όπου κάθε γκρουπ ανακλαστήρων αναλαμβάνει και μία διεργασία: την προθέρμανση του νερού, την ατμοποίηση του και την υπερθέρμανση του ατμού. Στην διάταξη Εισόδου-Εξόδου διατηρείται μεγάλη ποσότητα νερού σε όλους του σωλήνες των συλλεκτών ώστε να αποφεύγεται η διαστρωμάτωση. Όλο το νερό εισέρχεται στους σωλήνες των συλλεκτών και καθώς κυκλοφορεί μέσα σε αυτούς μετατρέπεται σε ατμό. Στην διάταξη της Έκχυσης, μικρά κλάσματα νερού εγχύονται κατά μήκος των συλλεκτών ατμοποίησης και υπερθέρμανσης με σκοπό να ελέγχονται οι παράμετροι του υπέρθερμου ατμού. Φυσικά πρόκειται για ένα περισσότερο πολύπλοκο σύστημα με αυξημένο κόστος. Τέλος, στην περίπτωση της ανακυκλοφορίας, ένας διαχωριστής νερού/ατμού

τοποθετείται στην έξοδο του τελευταίου συλλέκτη που αφορά την εξάτμιση του νερού. Στο τέλος της ατμοποίησης, ο κορεσμένος ή σχεδόν κορεσμένος ατμός εισέρχεται στον διαχωριστή όπου το υγρό νερό επιστρέφει μέσω μιας αντλίας ανακύκλωσης στην είσοδο του ηλιακού πεδίου, ενώ ο υπόλοιπος ατμός εισέρχεται στο γκρουπ συλλεκτών για την υπερθέρμανση του. Έτσι δηλαδή, από το συνολικό νερό που κυκλοφορεί στα γκρουπ των συλλεκτών της προθέρμανσης και της ατμοποίησης, μόνο ένα μέρος του μετατρέπεται σε ατμό, ενώ το υπόλοιπο επιστρέφει στην είσοδο του ηλιακού πεδίου. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται καλύτερος έλεγχος του συστήματος όμως ταυτόχρονα η πρόσθετη αντλία ανακύκλωσης μειώνει τη συνολική του απόδοση.

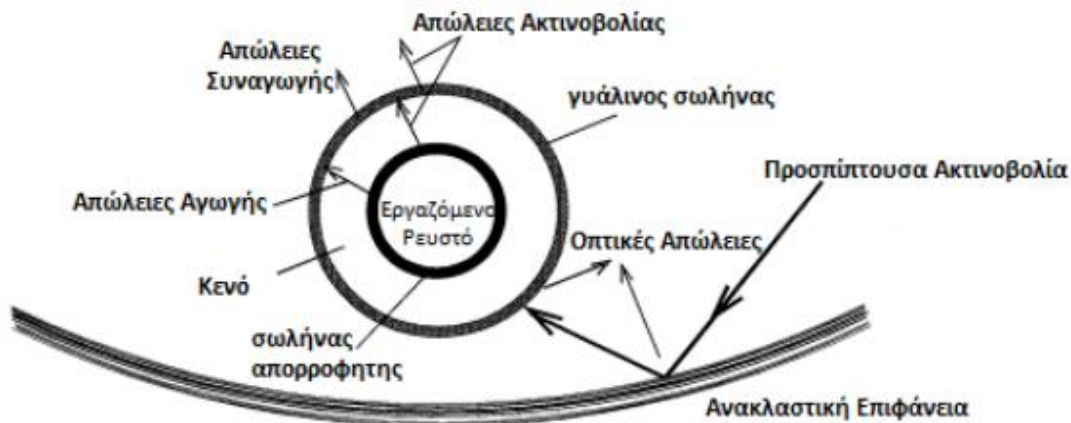


Εικόνα 3.11: Διατάξεις άμεσης ατμοποίησης, Εισόδου-Εξόδου (πάνω), Έκχυση (μέση), Ανακυκλοφορία (κάτω)

### 3.2.4 Απώλειες ηλιακού πεδίου

Ένα σημαντικό ποσοστό της ακτινοβολίας που προσπίπτει στον παραβολικό κοίλο συλλέκτη χάνεται λόγω διαφόρων παραγόντων. Οι συνολικές απώλειες μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες,

- Οπτικές απώλειες
- Απώλειες από τον σωληνοειδή δέκτη προς το περιβάλλον
- Γεωμετρικές απώλειες



Εικόνα 3.12: Θερμικές και οπτικές απώλειες στον σωληνοειδή απορροφητή

#### Οπτικές απώλειες

Οι οπτικές απώλειες συνδέονται με τις εξής τέσσερις παραμέτρους,

- Συντελεστής Αντανάκλασης (Reflectivity)  $\rho$ , της αντανάκλαστικής επιφάνειας του συλλέκτη. Μια τυπική τιμή της παραμέτρου αυτής για μία καθαρισμένη επιφάνεια καθρέπτη είναι 0,93. Ο συντελεστής αντανάκλασης μιας επιφάνειας μειώνεται όσο περισσότερο βρώμικη είναι η επιφάνεια του καθρέπτη. Σε μία εγκατάσταση με παραβολικούς κοίλους συλλέκτες, τα κάτοπτρα καθαρίζονται όταν η τιμή της παραμέτρου αυτής πέσει στο 0,9.
- Παράγοντας αναχίτησης (Intercept Factor)  $\gamma$ , ο οποίος εκφράζει το ποσοστό της ακτινοβολίας που ανακλάται από το κάτοπτρο αλλά δεν προσπίπτει στον σωληνοειδή δέκτη. Τυπική τιμή της παραμέτρου αυτής για έναν σωστά συναρμολογημένο συλλέκτη είναι 0,95. Ο συντελεστής αυτός μπορεί να μειωθεί αρκετά λόγω κακής συναρμολόγησης του συλλέκτη.
- Συντελεστής Μεταβίβασης (Transmissivity)  $\tau$ , του εξωτερικού γυάλινου σωλήνα. Πρόκειται για τον λόγο της ακτινοβολίας που διαπερνά τον γυάλινο σωλήνα προς την ακτινοβολία που προσπίπτει πάνω σε αυτόν. Τυπική τιμή για τον συντελεστή  $\tau$  είναι 0,93.
- Συντελεστής απορρόφησης (Absorptivity)  $\alpha$ , του επιλεκτικού περιβλήματος (επίστρωσης) του μεταλλικού απορροφητή. Ο συντελεστής αυτός εκφράζει την ποσότητα της ακτινοβολίας που απορροφάται από τον μεταλλικό σωλήνα προς την συνολική ακτινοβολία που φτάνει στην εξωτερική του επιφάνεια. Τυπική τιμή για τον συντελεστή απορρόφησης είναι 0,95.

Το γινόμενο αυτών των τεσσάρων παραμέτρων, για μηδενική γωνία πρόσπτωσης, δίνει την μέγιστη οπτική απόδοση του συλλέκτη,  $\eta_{opt,0^\circ}$ ,

$$\eta_{opt,0^\circ} = \rho \cdot \gamma \cdot \tau \cdot \alpha|_{\varphi=0^\circ}$$

Για έναν καλής ποιότητας και καθαρό παραβολικό συλλέκτη, ο συντελεστής  $\eta_{opt,0^\circ}$  κυμαίνεται μεταξύ 0,70 – 0,79.

#### Απώλειες θερμότητας από τον συλλέκτη προς το περιβάλλον

Σε έναν παραβολικό κούλο συλλέκτη οι συνολικές θερμικές απώλειες είναι το άθροισμα των απωλειών λόγω ακτινοβολίας από τον μεταλλικό απορροφητή προς το περιβάλλον και των απωλειών λόγω αγωγής και συναγωγής από τον μεταλλικό απορροφητή προς τον εξωτερικό γυάλινο σωλήνα. Παρόλο που οι απώλειες αυτές μπορούν να υπολογιστούν αναλυτικά μέσω των εξισώσεων που διέπουν τους μηχανισμούς ακτινοβολίας, αγωγής και συναγωγής, κάτι τέτοιο κρίνεται επίπονο και αποφεύγεται. Αντ' αυτού χρησιμοποιείται ο συντελεστής συνολικών θερμικών απωλειών,  $U_{L,abs}$ , σύμφωνα με τον οποίο οι συνολικές θερμικές απώλειες του συλλέκτη είναι,

$$P_{Q,collector \rightarrow amb}(W) = U_{L,abs} \cdot \pi \cdot d_o \cdot l \cdot (\bar{T}_{abs} - T_{amb})$$

Όπου

- $d_o(m)$  η εξωτερική διάμετρος του μεταλλικού απορροφητή
- $l(m)$  το μήκος του μεταλλικού απορροφητή
- $\bar{T}_{abs}(K)$  η μέση θερμοκρασία του απορροφητή
- $T_{amb}(K)$  η θερμοκρασία περιβάλλοντος

Η τιμή του συντελεστή συνολικών θερμικών απωλειών εξαρτάται από τη θερμοκρασία του απορροφητή και βρίσκεται πειραματικά. Η τιμή του μπορεί να προσεγγιστεί με ένα πολυώνυμο δευτέρου βαθμού ως προς τη διαφορά θερμοκρασίας απορροφητή και περιβάλλοντος, του οποίου οι σταθερές προσδιορίζονται πειραματικά,

$$U_{L,abs} \left( \frac{W}{m^2_{abs} \cdot K} \right) = a + b \cdot (\bar{T}_{abs} - T_{amb}) + c \cdot (\bar{T}_{abs} - T_{amb})^2$$

Η εύρεση των σταθερών α,β,γ για ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών είναι δύσκολη και συνήθως όχι πολύ αξιόπιστη. Για το λόγο αυτό οι τιμές των σταθερών είναι διαφορετικές για διαφορετικά θερμοκρασιακά εύρη. Στον Πίνακα 3.3 δίνονται οι τιμές των σταθερών α,β,γ όπως έχουν προκύψει πειραματικά για τον συλλέκτη LS-3 των σταθμών SEGS VIII και IX.

Πίνακας 3.3: Τιμές των σταθερών του πολυωνύμου συντελεστή συνολικών θερμικών απωλειών συλλέκτη LS-3

$\bar{T}_{abs} (^{\circ}C)$	<b>α</b>	<b>β</b>	<b>γ</b>
<b>&lt;200</b>	0,687257	0,001941	0,000026
<b>&gt;200 ; &lt;300</b>	1,433242	-0,00566	0,000046
<b>&gt;300</b>	2,895473	-0,0164	0,000065



Για απορροφητή στον οποίο επικρατούν συνθήκες κενού μεταξύ εσωτερικού μεταλλικού σωλήνα και εξωτερικού γυάλινου περιβλήματος η τιμή του συντελεστή συνολικών θερμικών απωλειών είναι μικρότερη των  $5 \left( \frac{W}{m_{abs}^2 \cdot K} \right)$ .

Επιπλέον, αντίστοιχα δεδομένα έχουν προκύψει και για τον συλλέκτη Euro Trough με στοιχείο συλλογής θερμότητας τον απορροφητή PTR70. Στην περίπτωση αυτή δεν δίνεται ο συντελεστής συνολικών θερμικών απωλειών αλλά οι συνολικές απώλειες του συλλέκτη ανά μονάδα μήκος αυτού [49]. Είναι δηλαδή,

$$p_{Q,collector \rightarrow amb} (W/m_{abs}) = 0,33 \cdot (\bar{T}_{abs} - T_{amb}) + 1,54 \cdot 10^{-8} \cdot (\bar{T}_{abs} - T_{amb})^4$$

Επομένως, οι απώλειες του παραβολικού συλλέκτη γράφονται ως,

$$P_{Q,collector \rightarrow amb}(W) = p_{Q,collector \rightarrow amb} \cdot l$$

όπου και πάλι  $l$  (m) το συνολικό μήκος του μεταλλικού σωλήνα.

#### Απώλειες λόγω της γωνίας πρόσπτωσης

Η γωνία πρόσπτωσης της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας αποτελεί πολύ σημαντικό παράγοντα για τον παραβολικό συλλέκτη, γιατί το ποσό της ακτινοβολίας που είναι χρήσιμη σε αυτόν είναι ανάλογο του συνημιτόνου της γωνίας αυτής. Επιπλέον, η γωνία αυτή είναι υπεύθυνη για τη μείωση της ωφέλιμης επιφάνειας του συλλέκτη (γεωμετρικές απώλειες), ενώ έχει επίδραση και στα οπτικά χαρακτηριστικά του, τα οποία αναφέρθηκαν προηγουμένως. Η επίδραση της γωνίας πρόσπτωσης στις οπτικές απώλειες και την ωφέλιμη περιοχή του συλλέκτη μπορεί να ποσοτικοποιηθεί με τον συντελεστή μετατροπής της γωνίας πρόσπτωσης – Incident Angle Modifier (IAM),  $K(\varphi)$ , οποίος περιλαμβάνει όλες τις γεωμετρικές και οπτικές απώλειες για γωνία πρόσπτωσης μεγαλύτερη του μηδενός. Στις παρακάτω εξισώσεις δίνονται οι συντελεστές μετατροπής γωνίας πρόσπτωσης για του συλλέκτες LS-3 και Euro Trough-150. Οι εξισώσεις φαίνονται και στο Σχήμα 3.13, από όπου παρατηρείται και η βελτίωση των οπτικών χαρακτηριστικών του συλλέκτη ET-150 σε σύγκριση με τον LS-3.

$$\underline{\text{LS-3}} \quad K(\varphi) = 1 - 2,23073 \cdot 10^{-4} \cdot \varphi - 1,1 \cdot 10^{-4} \cdot \varphi^2 + 3,18596 \cdot 10^{-6} \cdot \varphi^3 - 4,85509 \cdot 10^{-8} \cdot \varphi^4$$

$$\underline{\text{ET-150}} \quad K(\varphi) = 1 - 5,25097 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{\varphi}{\cos \varphi} - 2,859621 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{\varphi^2}{\cos \varphi}$$



Σχήμα 3.13: Incident Angle Modifier συναρτήσεως της γωνίας πρόσπτωσης για συλλέκτη LS-3 και ET-150

Η γωνία πρόσπτωσης εξαρτάται από τον προσανατολισμό του συλλέκτη και από την θέση του ήλιου και μπορεί να υπολογιστεί εύκολα με χρήση της γωνίας αζιμούθιου και της γωνίας ανύψωσης,

Για προσανατολισμό Βορρά – Νότου

$$\varphi = \cos^{-1}[(1 - \cos^2(EL) \cdot \sin^2(AZ))^{1/2}]$$

Για προσανατολισμό Ανατολή – Δύση

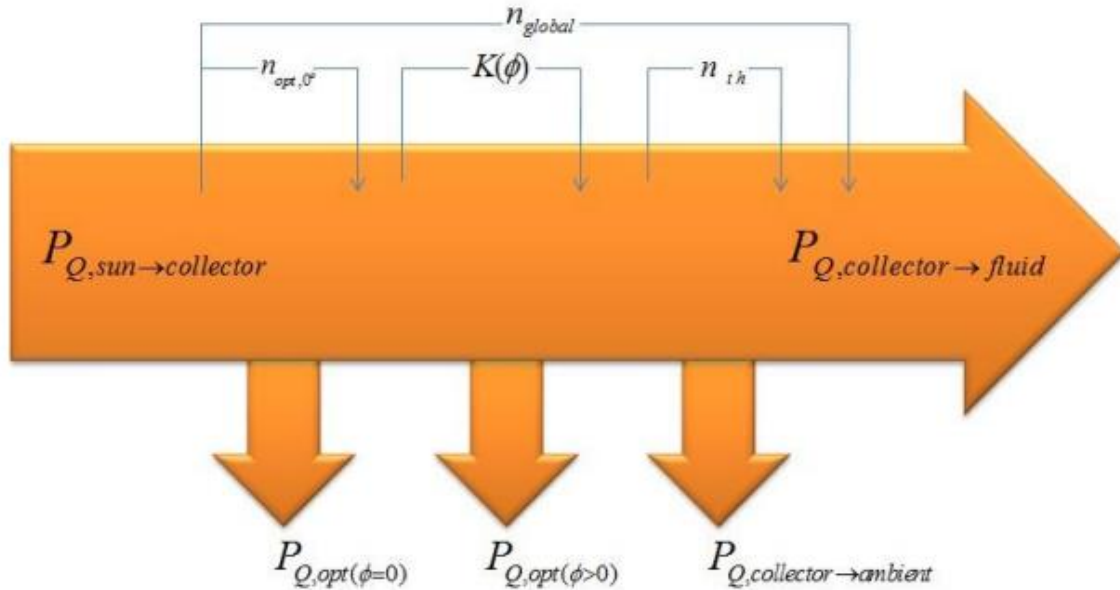
$$\varphi = \cos^{-1}[(1 - \cos^2(EL) \cdot \cos^2(AZ))^{1/2}]$$

### Βαθμοί απόδοσης-ροή ισχύος

Η απόδοση ενός παραβολικού κοίλου συλλέκτη περιγράφεται από τον συνδυασμό του συντελεστή μετατροπής γωνίας πρόσπτωσης,  $K(\varphi)$  και τριών επί μέρους βαθμών απόδοσης,

- Του ολικού βαθμού απόδοσης,  $\eta_{global}$
- Του μέγιστου οπτικού βαθμού απόδοσης για μηδενική γωνία πρόσπτωσης,  $\eta_{opti,0^\circ}$
- Και του θερμικού βαθμού απόδοσης,  $\eta_{th}$

Η επίδραση αυτών των βαθμών απόδοσης στην απορροφούμενη ενέργεια από το ρευστό φαίνεται στην Εικόνα 3.14.



Εικόνα 3.14: Ροή Ισχύος σε παραβολικό κοίλο ηλιακό συλλέκτη

Όπως δείχνεται παραπάνω, ο ολικός βαθμός απόδοσης μπορεί να οριστεί ως,

$$\eta_{global} = \frac{P_{Q,collector \rightarrow fluid}}{P_{Q,sun \rightarrow collector}}$$

όπου  $P_{Q,sun \rightarrow collector} (W) = A_c \cdot E_d \cdot \cos \varphi$  η ενέργεια που φτάνει από τον ήλιο στον συλλέκτη και

$A_c (m^2)$  η επιφάνεια του συλλέκτη

$E_d \left( \frac{W}{m^2} \right)$  η τιμή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας (DNI)

Επομένως, η ενέργεια που μεταφέρεται από τον ήλιο στο ρευστό μετάδοσης θερμότητας μπορεί να γραφτεί ως,

$$P_{Q,collector \rightarrow fluid} = A_c \cdot E_d \cdot \cos \varphi \cdot \eta_{global}$$

Επίσης, ο ολικός βαθμός απόδοσης μπορεί να οριστεί σαν το γινόμενο των άλλων δύο βαθμών απόδοσης και του παράγοντα  $K(\varphi)$ ,

$$\eta_{global} = \eta_{opt,0^\circ} \cdot \eta_{th} \cdot K(\varphi) \cdot F_e$$

Στην παραπάνω εξίσωση, ο όρος  $F_e$  είναι ο συντελεστής καθαρότητας των κατόπτρων και παίρνει τιμές από 0 έως 1. Συνηθέστερη τιμή είναι το 0,97.

Με βάση τα παραπάνω μπορεί να γραφτεί ότι,

$$P_{Q,collector \rightarrow fluid} = A_c \cdot E_d \cdot \cos \varphi \cdot K(\varphi) \cdot \eta_{opt,0^\circ} \cdot \eta_{th} \cdot F_e$$

ή διαφορετικά,

$$\begin{aligned}
P_{Q,collector \rightarrow fluid} &= A_c \cdot E_d \cdot \cos \varphi \cdot K(\varphi) \cdot \eta_{opt,0^\circ} \cdot Fe - P_{Q,collector \rightarrow amb} \\
&= A_c \cdot E_d \cdot \cos \varphi \cdot K(\varphi) \cdot \eta_{opt,0^\circ} \cdot Fe - U_{l,abs} \cdot \pi \cdot d_o \cdot l \cdot (\bar{T}_{abs} - T_{amb}) \\
&= A_c \cdot E_d \cdot \cos \varphi \cdot K(\varphi) \cdot \eta_{opt,0^\circ} \cdot Fe - p_{Q,collector \rightarrow amb} \cdot l
\end{aligned}$$

Με τη χρήση της παραπάνω σχέσης είναι δυνατός ο υπολογισμός της θερμότητας που προσδίδεται από τον ήλιο στο ρευστό μετάδοσης θερμότητας και κατ' επέκταση η ωφέλιμη θερμότητα από το ηλιακό πεδίο.

### 3.3 Μονάδα Παραγωγής Ισχύος

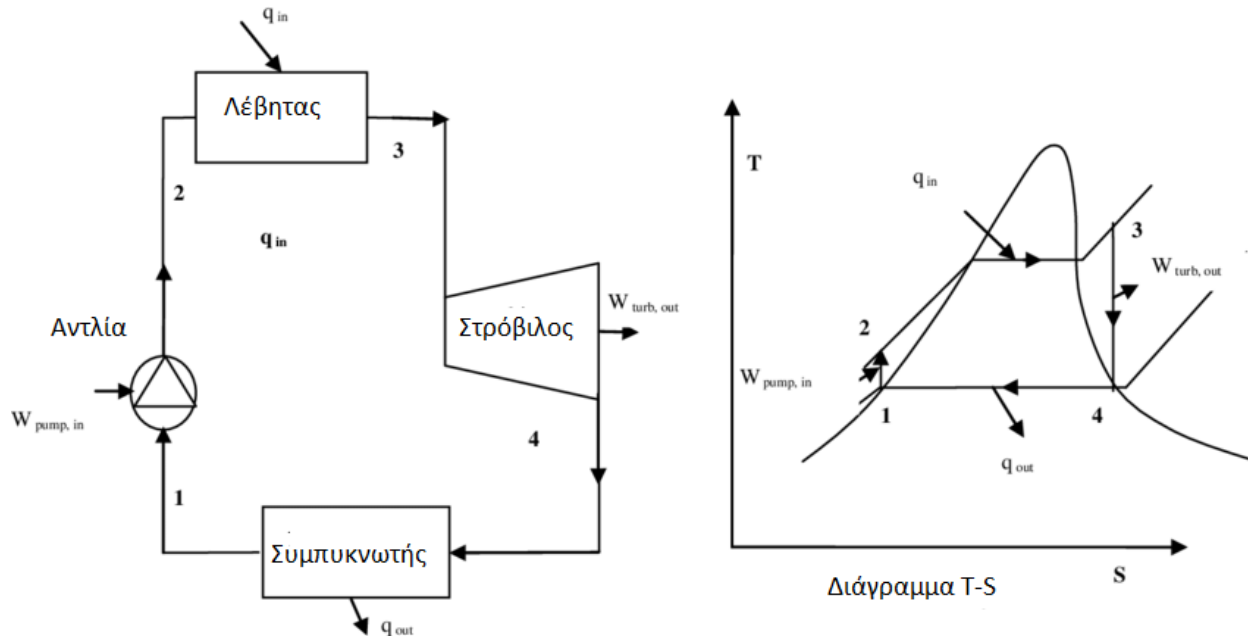
#### 3.2.1 Σύστημα Παραγωγής ατμού

Η θερμότητα που προέρχεται από το ηλιακό πεδίο χρησιμοποιείται για την παραγωγή ατμού. Το ρευστό μετάδοσης θερμότητας, αφού θερμανθεί στο ηλιακό πεδίο, δίνει την θερμότητα του μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας σε ένα κύκλωμα νερού, όπου και παράγεται ατμός. Το σύστημα παραγωγής ατμού αποτελεί τον συνδετικό κρίκο μεταξύ ηλιακού πεδίου και συστήματος παραγωγής ενέργειας. Συνήθως, ένα σύστημα παραγωγής ατμού αποτελείται από:

- Τον προθερμαντήρα όπου το υπόψυκτο νερό που επιστρέφει από τον συμπυκνωτή της εγκατάστασης προθερμαίνεται κοντά στην θερμοκρασία ατμοποίησης
- Τον ατμοποιητή στον οποίο το προθερμασμένο νερό ατμοποιείται
- Τον υπερθερμαντήρα στον οποίο ο κορεσμένος ατμός υπερθερμαίνεται σε υψηλότερη θερμοκρασία
- Έναν αναθερμαντήρα (προαιρετικά) όπου ο εξερχόμενος ατμός από τον στρόβιλο υψηλής πίεσης αναθερμαίνεται πριν εισέλθει στον στρόβιλο χαμηλής πίεσης

#### 3.2.2 Σύστημα Παραγωγής Ενέργειας

Ο υπέρθερμος ατμός που παράγεται από το σύστημα παραγωγής ατμού αποτονώνεται σε μια σειρά ατμοστρόβιλων για την παραγωγή μηχανικού έργου, σύμφωνα με τον κύκλο Rankine. Οι ατμοστρόβιλοι είναι συζευγμένοι με την γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Τις περισσότερες φορές γίνονται απομαστεύσεις από διάφορες θέσεις των στρόβιλων και μέσω προθερμαντήρων γίνεται προθέρμανση του τροφοδοτικού νερού πριν αυτό εισέλθει στο σύστημα παραγωγής ατμού. Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται η απόδοση του κύκλου.



Εικόνα 3.15: Σχηματική απεικόνιση και απεικόνιση σε διάγραμμα T-S κύκλου Rankine [50]

### 3.4 Συστήματα αποθήκευσης θερμότητας

Η χρήση συστημάτων αποθήκευσης θερμότητας συνδέεται συχνά με τις εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας από τον ήλιο, λόγω της περιορισμένης διαθεσιμότητας της ηλιακής ακτινοβολίας κατά την διάρκεια της ημέρας. Για την λειτουργία του συστήματος αποθήκευσης είναι απαραίτητη η κατασκευή ηλιακού πεδίου μεγαλύτερου μεγέθους, με σκοπό την πρόσληψη της απαραίτητης θερμότητας για το σύστημα αποθήκευσης. Η επίδραση του συστήματος αποθήκευσης στο μέγεθος της συνολικής εγκατάστασης είναι πολύ σημαντική, καθώς σε περιπτώσεις συστημάτων αποθήκευσης υψηλής δυναμικότητας το ηλιακό πεδίο μπορεί να είναι ακόμα και διπλάσιο συγκριτικά με έναν σταθμό χωρίς αυτό.

Η χρήση των συστημάτων αποθήκευσης προσδίδει μία σειρά πλεονεκτημάτων στην μονάδα παραγωγής ενέργειας όπως,

- Αύξηση της αξιοπιστίας του συστήματος μέσω περιορισμού των αιχμών της ηλεκτροπαραγωγής. Με τον τρόπο αυτόν ο σταθμός μπορεί να λειτουργεί υπό πιο σταθερά όρια, μειώνοντας ταυτόχρονα τις πιθανότητες βλάβης του
- Αύξηση της ικανότητας για ηλεκτροπαραγωγή. Πιθανότατα το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της χρήσης συστημάτων αποθήκευσης είναι η αύξηση της παραγόμενης ενέργειας. Αρκετές ώρες στη διάρκεια ενός έτους η θερμότητα που προέρχεται από τον ήλιο μπορεί όχι απλά να επαρκεί για τη λειτουργία του σταθμού στο πλήρες φορτίο του, αλλά να περισσεύει κιόλας. Η επιπλέον θερμότητα αυτή μπορεί να αποθηκευτεί στο σύστημα και να χρησιμοποιηθεί αργότερα που η ηλιακή ακτινοβολία θα έχει χαμηλότερη ισχύ. Αυτό έχει σαν συνέπεια την λειτουργία του σταθμού σε υψηλότερους συντελεστές φορτίου και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κατά πιο σταθερό και αποδοτικό τρόπο

- Μειωμένο κόστος παραγωγής ενέργειας. Οι ενεργειακές ανάγκες σε εμπορικούς, βιομηχανικούς και οικιακούς τομείς μεταβάλλονται σε ημερήσια, εβδομαδιαία και εποχιακή βάση, παρουσιάζοντας ελάχιστες αλλά και μέγιστες τιμές (Peaks). Η ενέργεια που έχει αποθηκευτεί στο σύστημα αποθήκευσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά τις ώρες αιχμής όπου η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας είναι μεγαλύτερη σε σύγκριση με τις υπόλοιπες ώρες της ημέρας. Με τον τρόπο αυτό αυξάνονται τα έσοδα του σταθμού μειώνοντας έτσι και το κόστος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας

#### Διαχωρισμός συστημάτων αποθήκευσης

Τα συστήματα αποθήκευσης θερμότητας που χρησιμοποιούνται στους ηλιοθερμικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας χωρίζονται σε ενεργά και παθητικά.

Τα ενεργά συστήματα χαρακτηρίζονται από βεβαιωμένη μεταγωγή θερμότητας στο μέσο αποθήκευσης, το οποίο διέρχεται από έναν εναλλάκτη θερμότητας. Το σύστημα χρησιμοποιεί μία ή δύο δεξαμενές για την αποθήκευση του μέσου. Τα ενεργά συστήματα χωρίζονται επιπλέον σε άμεσα και έμμεσα. Σε ένα άμεσο σύστημα, το μέσο μεταφοράς θερμότητας λειτουργεί και σαν μέσο αποθήκευσης θερμότητας, ενώ σε ένα έμμεσο σύστημα χρησιμοποιείται διαφορετικό μέσο για την αποθήκευση θερμότητας.

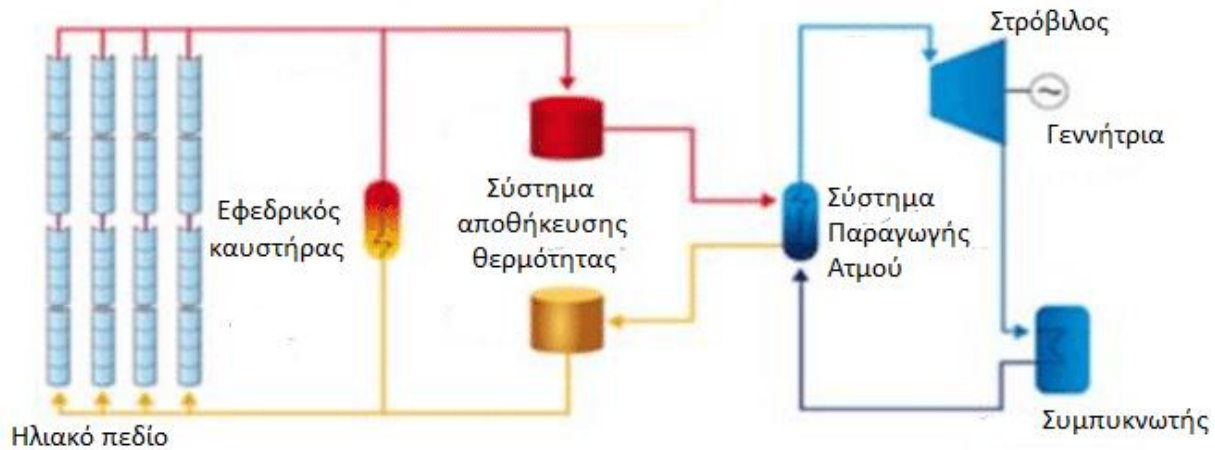
Τα παθητικά συστήματα αποθήκευσης είναι συνήθως συστήματα δύο μέσων. Το ρευστό μεταφοράς θερμότητας κυκλοφορεί μέσα από το υλικό αποθήκευσης μόνο για να το φορτίσει ή να το αποφορτίσει. Θερμότητα μεταφέρεται από το ηλιακό πεδίο στο υλικό αποθήκευσης κατά την διάρκεια της φόρτισης, ενώ κατά την διάρκεια της αποφόρτισης θερμότητα μεταφέρεται από το υλικό αποθήκευσης στο ρευστό μεταφοράς θερμότητας (τα συστήματα αυτά ονομάζονται και αναγεννητές, «regenerators»). Το κύριο μειονέκτημα των αναγεννητών είναι το γεγονός ότι η θερμοκρασία του ρευστού μεταφοράς θερμότητας μειώνεται κατά την αποφόρτιση, καθώς το υλικό αποθήκευσης ψύχεται, καθώς επίσης και η απουσία άμεσης επαφής μεταξύ ρευστού μεταφοράς και μέσου αποθήκευσης, λόγω της ύπαρξης εναλλάκτη θερμότητας.



Εικόνα 3.16: Διαχωρισμός συστημάτων αποθήκευσης θερμότητας [51]

### 3.4.1 Ενεργά συστήματα αποθήκευσης

#### Άμεσα ενεργά συστήματα αποθήκευσης



Εικόνα 3.17: Σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με άμεσα ενεργό σύστημα αποθήκευσης θερμότητας [52]

Στα ενεργά άμεσα συστήματα αποθήκευσης, το μέσο μεταφοράς θερμότητας που χρησιμοποιείται στο ηλιακό πεδίο, χρησιμοποιείται και σαν μέσο αποθήκευσης. Για το λόγο αυτό το υλικό πρέπει να έχει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά ώστε να είναι κατάλληλο τόσο σαν ρευστό μεταφοράς θερμότητας όσο και σαν μέσο αποθήκευσης.

Η χρήση ατμού ή τετηγμένων αλάτων ως ρευστό μεταφοράς θερμότητας και μέσο αποθήκευσης, εξαλείφει την ανάγκη εγκατάστασης ενός εναλλάκτη θερμότητας μεταξύ ηλιακού πεδίου και συστήματος αποθήκευσης θερμότητας. Επιπλέον, επιτρέπει την λειτουργία του ηλιακού πεδίου σε υψηλότερες θερμοκρασίες από αυτές που επιτρέπουν τα τωρινά μέσα μετάδοσης θερμότητας. Ο συνδυασμός αυτός επίσης επιτρέπει την ακόμα περεταίρω μείωση του κόστους του συστήματος αποθήκευσης και οδηγεί σε χαμηλότερες τιμές παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο, στην περίπτωση των τετηγμένων αλάτων υπάρχει ο κίνδυνος στερεοποίησης λόγω της υψηλής θερμοκρασίας πήξης (120- 220 °C). Για τον λόγο αυτό πρέπει να ληφθούν ειδικά μέτρα ώστε να αποφευχθεί το πάγωμα των αλάτων κατά τη διάρκεια της νύχτας. Η χρήση κατάλληλων συστημάτων για την κυκλοφορία του ρευστού από σωληνώσεις κατά τη διάρκεια της νύχτας καθώς και η χρήση εφεδρικού συστήματος καυστήρα για την αποφυγή του παγώματος του ρευστού, οδηγεί σε αυξημένο κόστος συντήρησης και λειτουργίας του συστήματος. Η χρήση τετηγμένων αλάτων ως μέσο μεταφοράς θερμότητας είναι οικονομικά συμφέρουσα όταν υπάρχει και σύστημα αποθήκευσης. Για τη λειτουργία του άμεσου ενεργού συστήματος αποθήκευσης, είναι απαραίτητη η χρήση δύο δεξαμενών. Στη μία δεξαμενή έχουμε την αποθήκευση του μέσου με την χαμηλότερη θερμοκρασία (ψυχρή δεξαμενή) και στην άλλη έχουμε την αποθήκευση του ρευστού με την υψηλότερη θερμοκρασία (θερμή δεξαμενή). Τα πλεονεκτήματα των συστημάτων αυτών είναι,

- Δυνατότητα για υψηλότερες θερμοκρασίες στους σταθμούς με παραβολικούς ηλιακούς συλλέκτες (450 – 500 °C) με συνέπεια την αύξηση του βαθμού απόδοσης του κύκλου Rankine έως το 40%

- Διαχωρισμός θερμού και ψυχρού υλικού αποθήκευσης
- Δυνατότητα για μεγαλύτερη θερμοκρασιακή διαφορά εισόδου – εξόδου από το ηλιακό πεδίο

Στον αντίποδα, τα μειονεκτήματα των συστημάτων αυτών είναι,

- Υψηλό κόστος υλικού μετάδοσης θερμότητας και αποθήκευσης
- Αυξημένο κόστος λόγω της απαίτησης για δύο δεξαμενές
- Σχετικά μικρή διαφορά ψυχρού- θερμού ρευστού στο σύστημα αποθήκευσης
- Υψηλός κίνδυνος στερεοποίησης του εργαζόμενου μέσου
- Αυξημένες θερμικές απώλειες λόγω της υψηλής θερμοκρασίας τόσο της θερμής όσο και της ψυχρής δεξαμενής

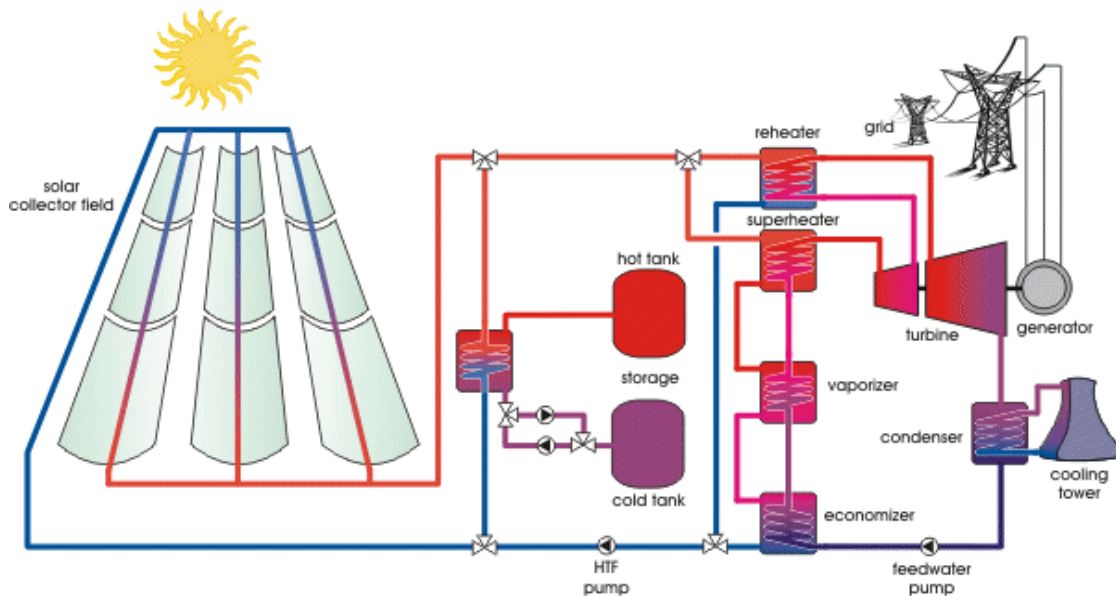
Στον ηλιοθερμικό σταθμό παραγωγής SEGS II υπήρχε άμεσο ενεργό σύστημα αποθήκευσης με δύο δεξαμενές, ενώ σαν ρευστό μεταφοράς θερμότητας χρησιμοποιούνταν συνθετικό έλαιο.

#### Ενεργά έμμεσα συστήματα αποθήκευσης

Στα έμμεσα ενεργά συστήματα αποθήκευσης, η θερμότητα δεν αποθηκεύεται στο ρευστό μεταφοράς θερμότητας αλλά σε διαφορετικό υλικό αποθήκευσης. Στα συστήματα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν διατάξεις είτε με συστήματα δύο δεξαμενών αποθήκευσης είτε συστήματα μίας δεξαμενής.

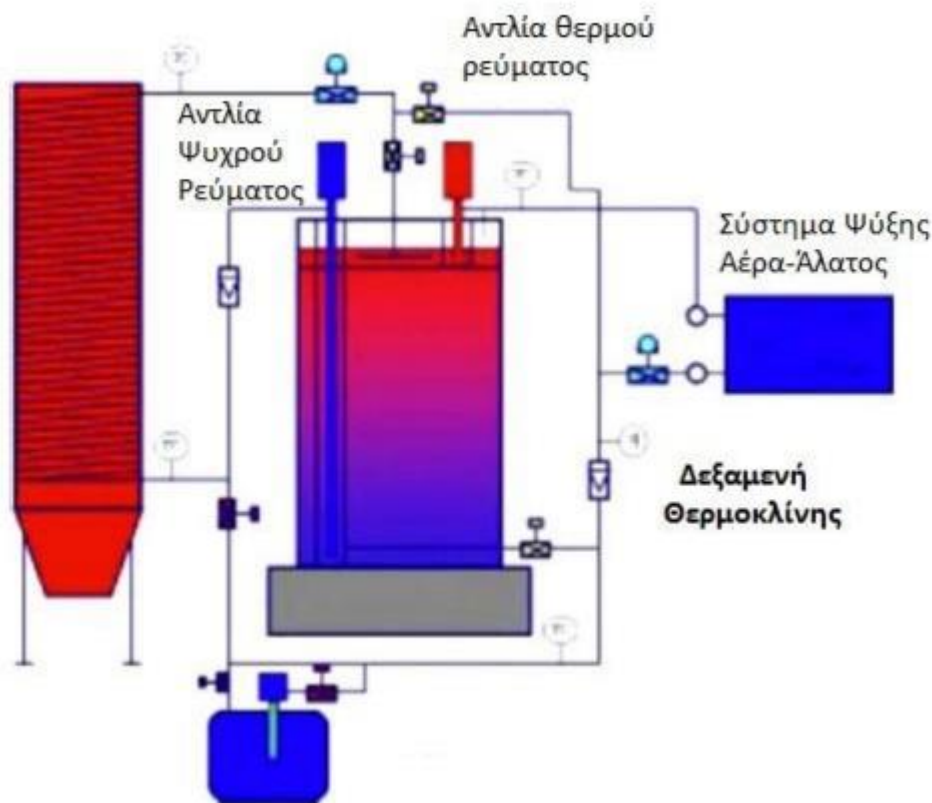
Στα έμμεσα ενεργά συστήματα αποθήκευσης με δύο δεξαμενές, ένα μέρος του ρευστού μεταφοράς θερμότητας θερμαίνει μέσω ενός εναλλάκτη το ρευστό αποθήκευσης, το οποίο κυκλοφορεί από την ψυχρή προς θερμή δεξαμενή. Στους σταθμούς Andasol, το συνθετικό έλαιο (Therminol VP-1) εισέρχεται στον εναλλάκτη ελαίου/ τηγμένων αλάτων με θερμοκρασία 391 °C και εξέρχεται από αυτόν σε θερμοκρασία περίπου 298 °C. Τα τετηγμένα άλατα (60% sodium nitrate  $\text{NaNO}_3$ , 40% potassium nitrate  $\text{KNO}_3$ ) από την ψυχρή δεξαμενή εισέρχονται στον εναλλάκτη στους 291 °C και εξέρχονται στους 384 °C, για να εισέλθουν στην συνέχεια στη θερμή δεξαμενή. Το βασικότερο πλεονέκτημα της τεχνολογίας αυτής είναι η απουσία τετηγμένων αλάτων στο κύκλωμα του ηλιακού πεδίου.





Εικόνα 3.18: Σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με έμμεσο ενεργό σύστημα αποθήκευσης δύο δεξαμενών [53]

Στα ενεργά έμμεσα συστήματα αποθήκευσης μίας δεξαμενής, το ψυχρό και το θερμό ρευστό αποθηκεύονται στην ίδια δεξαμενή. Η μέθοδος αυτή παρέχει την δυνατότητα για περαιτέρω μείωση του συνολικού κόστους της εγκατάστασης. Όπως και στη μέθοδο με τη χρήση δύο δεξαμενών το ρευστό μεταφοράς θερμότητας διέρχεται από τον εναλλάκτη θερμότητας, θερμαίνοντας το ρευστό αποθήκευσης. Στη συνέχεια, το μέσο αποθηκεύεται στην ίδια δεξαμενή με το ψυχρό ρευστό. Η μέθοδος αυτή εκμεταλλεύεται την διαφορά θερμοκρασίας του ψυχρού και του θερμού ρευστού με αποτέλεσμα το θερμό να αποθηκεύεται στο πάνω μέρος της δεξαμενής και το ψυχρό στο κάτω. Συνήθως χρησιμοποιείται και κατάλληλο υλικό που βοηθάει στη δημιουργία του φαινομένου αυτού και του σχηματισμού της ενδιάμεσης ζώνης η οποία ονομάζεται θερμοκλίνη. Πειραματικές μελέτες δείχνουν ότι το υλικό αυτό λειτουργεί και σαν μέσο αποθήκευσης θερμότητας. Αναλόγως του κόστους του υλικού αποθήκευσης τα συστήματα μίας δεξαμενής μπορεί να αποτελέσουν συστήματα αποθήκευσης πολύ χαμηλού κόστους, ενώ μεγάλο μέρος του υλικού αποθήκευσης μπορεί να αντικατασταθεί με πιο φθηνά υλικά διαχωρισμού όπως η άμμος.



Εικόνα 3.19: Δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας με θερμοκλίνη [54]

### 3.4.2 Παθητικά συστήματα αποθήκευσης

Στα παθητικά συστήματα αποθήκευσης θερμότητας, το ρευστό μεταφοράς θερμότητας διέρχεται από το σύστημα αποθήκευσης, μόνο για φόρτιση ή αποφόρτιση του συστήματος, καθώς το μέσο αποθήκευσης δεν επανακυκλοφορεί. Σαν παθητικά συστήματα αποθήκευσης χρησιμοποιούνται κυρίως στερεά υλικά, όπως το σκυρόδεμα, και υλικά αλλαγής φάσης (Phase Change Materials, PCM). Τα παθητικά συστήματα με υλικά αλλαγής φάσης είναι σε αρκετά πρώιμο στάδιο για να χρησιμοποιηθούν σε εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας.

#### Αποθήκευση με χρήση σκυροδέματος

Στην περίπτωση αποθήκευσης με χρήση σκυροδέματος, η θερμότητα που συλλέγεται από το ηλιακό πεδίο μεταφέρεται μέσω του ρευστού μεταφοράς θερμότητας στο στερεό υλικό αποθήκευσης από σκυρόδεμα. Το υλικό αποθήκευσης διαθέτει σωληνοειδή εναλλάκτη θερμότητας όπου θερμότητα μεταφέρεται από το θερμό ρευστό στο στερεό μέσο αποθήκευσης, Εικόνα 3.20. Ο ενσωματωμένος στο στερεό μέσο αποθήκευσης σωληνοειδής εναλλάκτης αποτελεί ένα ακριβό τμήμα του συστήματος αποθήκευσης. Παράλληλα, οι παράμετροι σχεδιασμού, όπως ο απαιτούμενος αριθμός σωληνώσεων και η διάμετρος τους, διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην απόδοση του συστήματος αποθήκευσης. Τα πλεονεκτήματα των συστημάτων αποθήκευσης με σκυρόδεμα είναι το χαμηλό κόστος του υλικού αποθήκευσης, ο υψηλός βαθμός εναλλαγής θερμότητας μεταξύ ρευστού μετάδοσης και μέσου

αποθήκευσης (λόγω της πολύ καλής επαφής τους) καθώς και η χαμηλή εξασθένηση της θερμότητας μεταξύ του εναλλάκτη και του υλικού αποθήκευσης. Το βασικότερο μειονέκτημα του συστήματος αυτού είναι το αυξημένο κόστος του εναλλάκτη θερμότητας και η ανάγκη για επιπλέον εξέλιξη του συστήματος, λόγω μακροπρόθεσμης αστάθειας του [51].

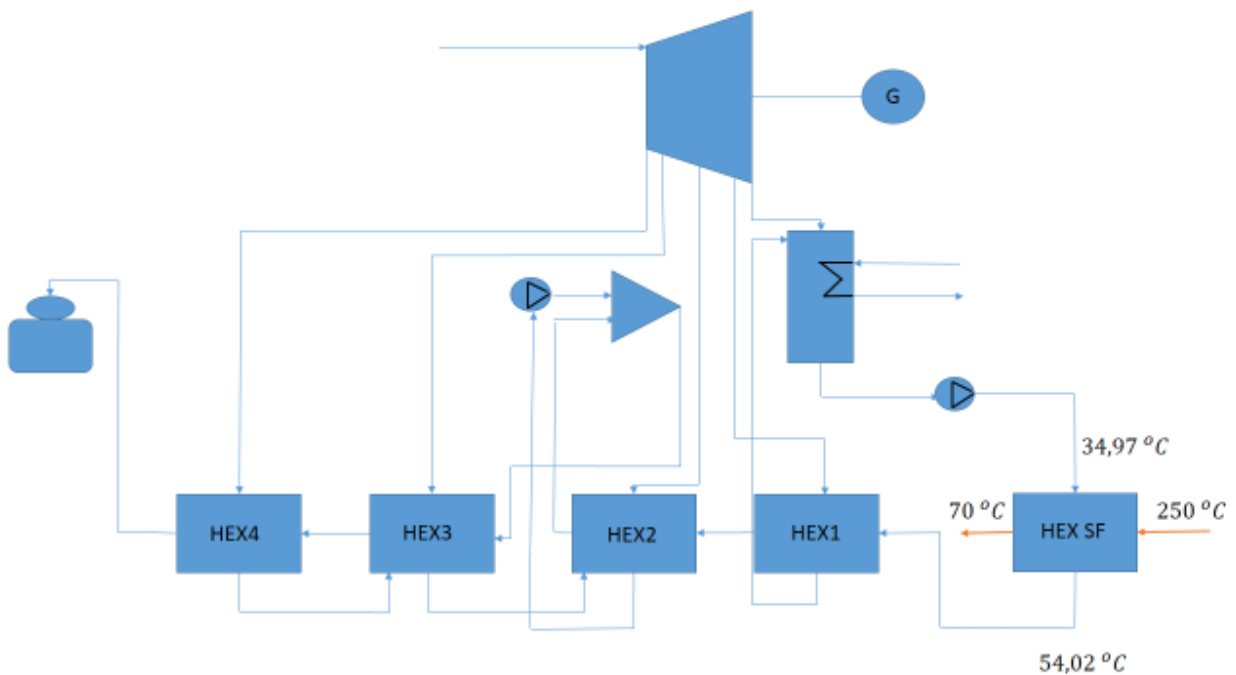


*Εικόνα 3.20: Τυπικό παθητικό σύστημα αποθήκευσης με χρήση σκυροδέματος*

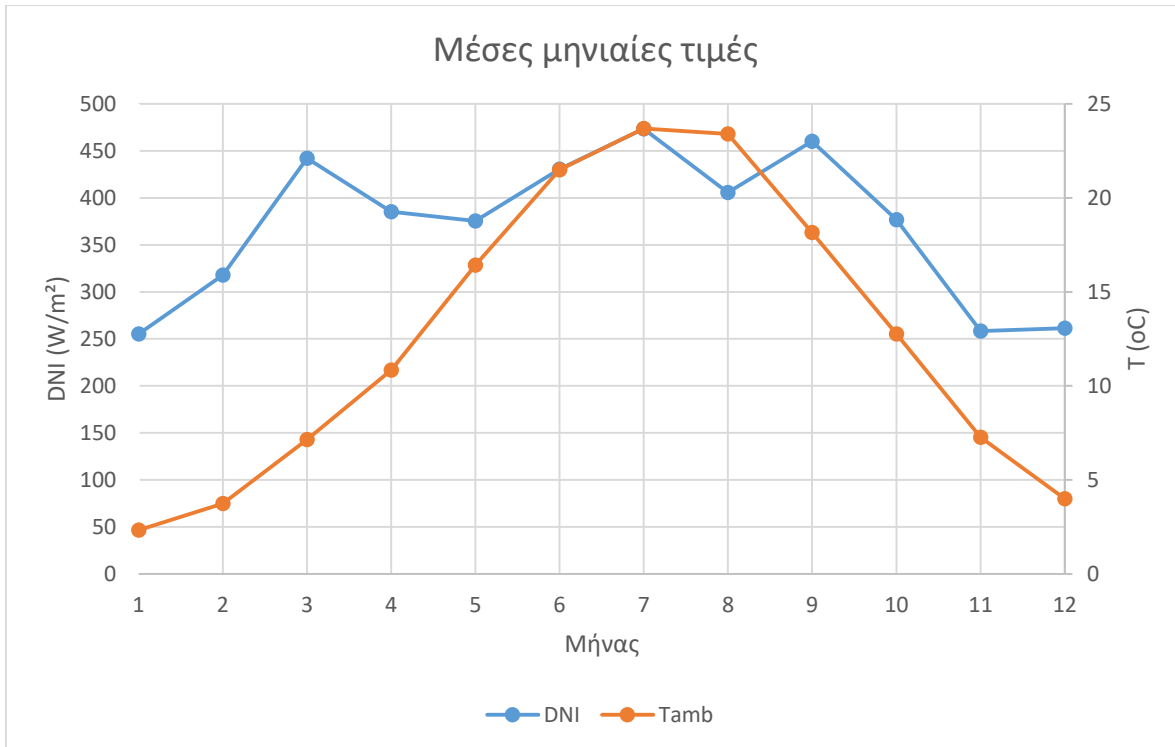
## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup> Ενσωμάτωση Παραβολικών Κοίλων Συλλεκτών στον ΑΗΣ Μελίτη

### 4.1 Δεδομένα

Στην Εικόνα 4.1 φαίνεται η μελέτη της υποκατάστασης του τελευταίου εν σειρά προθερμαντήρα. Για την περιοχή που μελετάται υπάρχουν διαθέσιμα τα μετεωρολογικά δεδομένα (στιγμιαία άμεση ηλιακή ακτινοβολία, DNI, και μέση ημερήσια θερμοκρασία περιβάλλοντος,  $\bar{T}_{amb}$ ) ανά ώρα και για ολόκληρο το έτος από [55]. Οι μέσες μηνιαίες τιμές των μεγεθών αυτών φαίνονται στο Σχήμα 4.2. Το ετήσιο DNI είναι  $1466 \text{ kWh/m}^2$  και το ηλιακό δυναμικό της περιοχής χαρακτηρίζεται ως μέτριο.



Εικόνα 4.1: Σχηματική απεικόνιση μέρος του Σταθμού που περιλαμβάνει τον εναλλάκτη θερμότητας θερμικού ελαίου/νερού (HEX SF) και τον υπό μελέτη προθερμαντήρα (HEX1)



Σχήμα 4.2: Μέσες μηνιαίες τιμές DNI και Tamb για την Φλώρινα

Όπως έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, ο σταθμός ΑΗΣ που μελετάται βρίσκεται στην Φλώρινα, στο χωριό Μελίτη. Σκοπός της μελέτης αυτής είναι η υποκατάσταση του τελευταίου εν σειρά προθερμαντήρα με ηλιακή ενέργεια. Η ισχύς του προθερμαντήρα αυτού στο ονομαστικό φορτίου του σταθμού είναι  $\dot{Q}_{th} = 176,19 \frac{kg}{s} \cdot (227,28 - 147,87) \frac{kJ}{kg} = 13991,25 kW$ .

Η ανάλυση θα γίνει για δύο διαφορετικούς τύπους συλλεκτών, τον **LS-3** και τον **ET-150**. Επιλέγεται προσανατολισμός του ηλιακού πεδίου (και στις δύο περιπτώσεις) Βορρά – Νότου καθώς όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο προσανατολισμός αυτός χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη ετήσια παραγωγή ενέργειας. Ως ρευστό μετάδοσης θερμότητας επιλέγεται το Therminol-VP1 που είναι σύνηθες για αυτές τις εφαρμογές και ως θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου από το ηλιακό πεδίο οι 70°C και 250°C αντίστοιχα. Η επιλογή της θερμοκρασίας εισόδου στο ηλιακό πεδίο (συνεπώς εξόδου από τον εναλλάκτη θερμότητας) έγινε με βάση την ύπαρξη ασφαλούς θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ θερμοκρασίας εξόδου νερού ( $\approx 54$  °C) από τον εναλλάκτη και θερμοκρασίας εισόδου Therminol VP-1 σε αυτόν.

Με βάση τα παραπάνω, η συνολική μάζα ελαίου που θα πρέπει να θερμανθεί στα παραπάνω θερμοκρασιακά όρια ώστε να υποκαταστήσει τον προθερμαντήρα είναι,

$$\dot{Q}_{th} = \dot{m}_{oil} \cdot C_{p_{oil}} \cdot (T_{in} - T_{out}) \Rightarrow \dot{m}_{oil} = \frac{13991,25 kW}{1,9433 \frac{kJ}{kg \cdot K} (250 - 70)K} = 39,997 kg/s$$

όπου η θερμοχωρητικότητα του ελαίου έχει υπολογιστεί στη μέση θερμοκρασία  $(250^{\circ}C + 70^{\circ}C)/2 = 160^{\circ}C$ .

#### 4.1.1 Σχεδιασμός ηλιακού πεδίου

##### Σημείο σχεδιασμού

Το σημείο σχεδιασμού της εγκατάστασης των ηλιακών συστημάτων ορίζεται στις 12 το μεσημέρι της 21<sup>ης</sup> Ιουνίου (ηλιακή ώρα). Τη στιγμή αυτή έχει καταγραφεί τιμή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας ίσης με  $DNI=628 \text{ W/m}^2$  και μέση ημερήσια θερμοκρασία περιβάλλοντος ίση με  $\bar{T}_{amb} = 25^\circ\text{C}$ . Επιπλέον τη στιγμή αυτή η γωνία πρόσπτωσης στους παραβολικούς συλλέκτες είναι μηδενική,  $\phi=0^\circ$ , επομένως  $K(\phi=0)=1$  (και για τους δύο τύπους συλλεκτών).

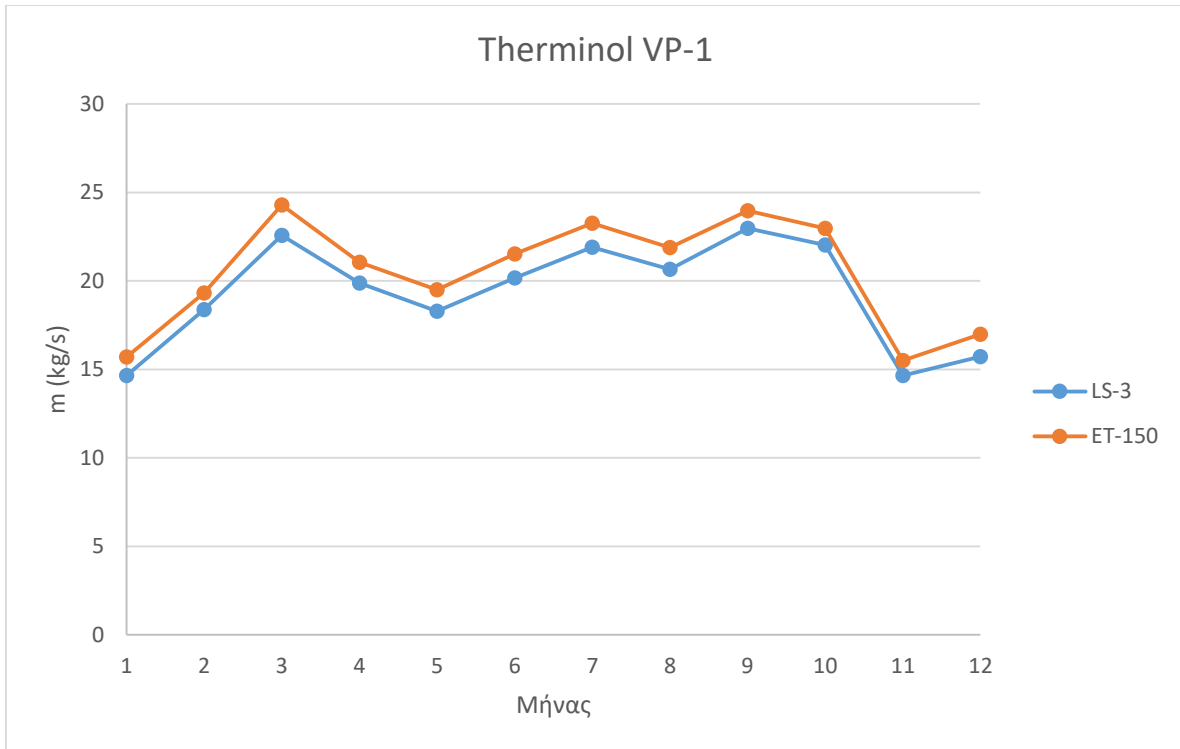
Η διάταξη του ηλιακού πεδίου που θα χρησιμοποιηθεί είναι αυτή της Άμεσης επιστροφής, η οποία χρησιμοποιείται συνηθέστερα σε περιπτώσεις έργων μικρού μεγέθους. Σύμφωνα με αντίστοιχα ηλιακά πεδία χρησιμοποιούνται 4 έως 6 παραβολικοί ανακλαστήρες σε σειρά ανά βρόγχο [44]. Στην περίπτωση μας επιλέγεται να χρησιμοποιηθούν 4 συλλέκτες (για κάθε τύπο) σε σειρά. Επίσης, κάθε σειρά συλλεκτών θα πρέπει να απέχει από τις γειτονικές της απόσταση ίση με 17m για να αποφεύγεται η σκίαση τους κατά τη διάρκεια της ημέρας[56]. Τελικά, με βάση τα παραπάνω και για να καλυφθεί η απαιτούμενη παροχή μάζας ελαίου στο σημείο σχεδίασης προκύπτουν τα αποτελέσματα του Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1: Δεδομένα ηλιακών πεδίων

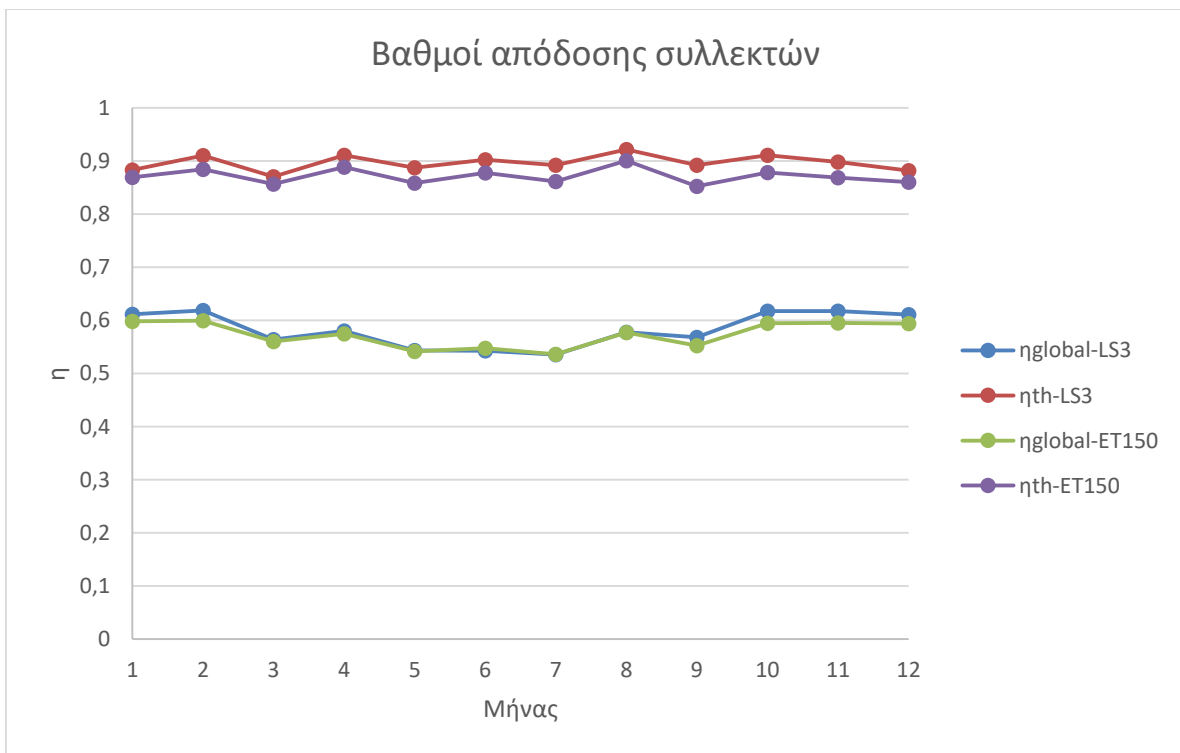
Τύπος συλλέκτη	LS-3	ET-150
# συλλεκτών/βρόγχο	4	4
# βρόγχων	14	10
Σύνολο συλλεκτών	56	40
$\dot{m}_{loop} \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right)$	3,04	4,39
Συνολική επιφάνεια συλλεκτών (m <sup>2</sup> )	32256	34274
Συνολική επιφάνεια ηλιακού πεδίου	87516	90882

##### Ανάλυση ολόκληρου έτους

Από τα δεδομένα των ηλιακών γωνιών του 1<sup>ου</sup> Κεφαλαίου προκύπτει η γωνία πρόσπτωσης,  $\phi$ , στους ηλιακούς συλλέκτες ανά ώρα και για ολόκληρο το έτος. Επιπλέον, από το Κεφάλαιο των απωλειών του ηλιακού πεδίου βρίσκεται για κάθε ώρα και για ολόκληρο το έτος η παροχή μάζας του Therminol VP-1 που μπορεί να θερμανθεί στα παραπάνω θερμοκρασιακά όρια. Στο Σχήμα 4.3 φαίνεται η μέση μηνιαία τιμή της παροχής μάζας του θερμικού ελαίου για τα δύο ηλιακά πεδία. Επιπλέον, με βάση το ίδιο Κεφάλαιο υπολογίζονται οι ολικοί και θερμικοί βαθμοί απόδοσης των συλλεκτών των δύο ηλιακών πεδίων (μέσες μηνιαίες τιμές). Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 4.4.

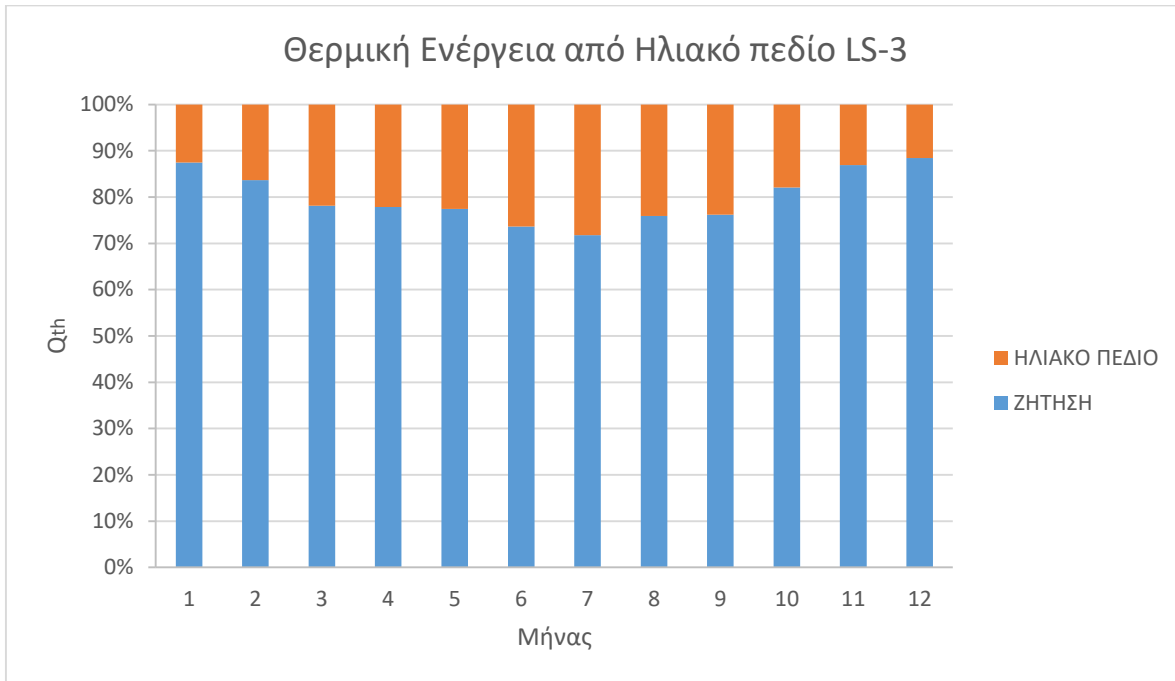


Σχήμα 4.3: Μέση μηνιαία τιμή παροχής μάζας Therminol VP-1 για τα δύο ηλιακά πεδία



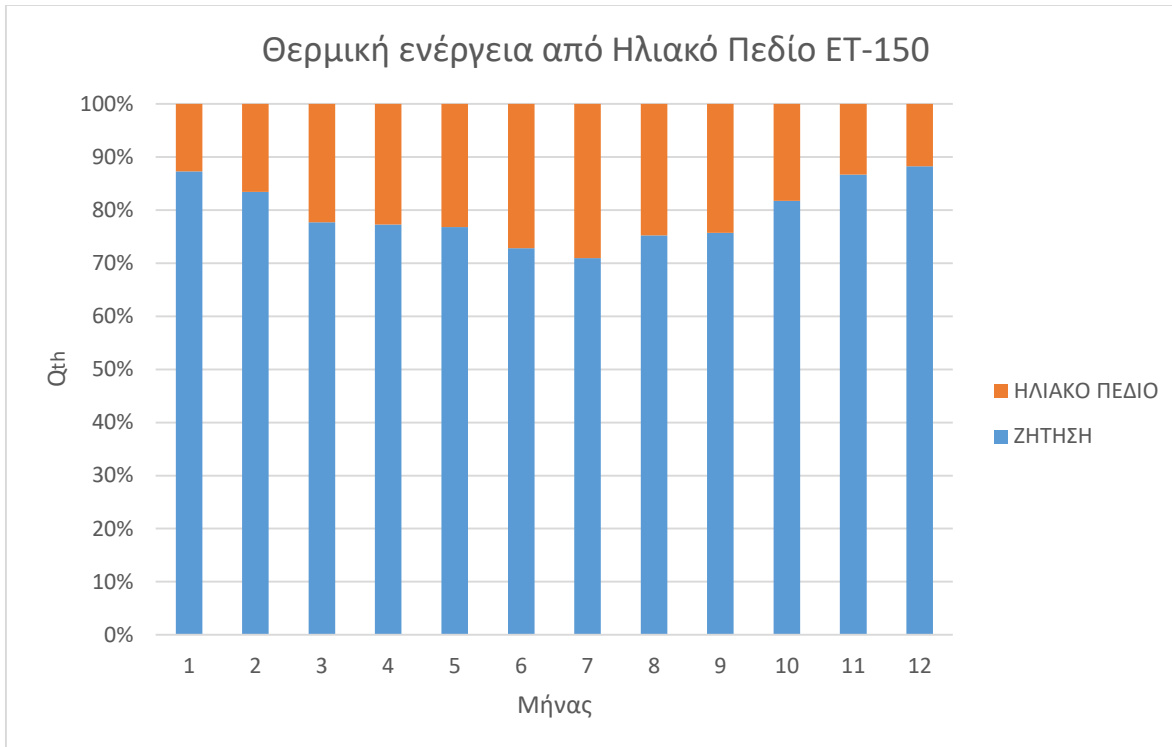
Σχήμα 4.4: Μέσες μηνιαίες τιμές ολικών και θερμικών βαθμών απόδοσης συλλεκτών

Έχοντας υπολογίσει την παροχή μάζας του θερμικού ελαίου που θερμαίνεται από κάθε ηλιακό πεδίο, μπορεί να υπολογιστεί στη συνέχεια η θερμική ενέργεια που προσδίδεται από το κάθε ηλιακό πεδίο στον προθερμαντήρα. Η σύγκριση της θερμικής ενέργειας που χρειάζεται ο προθερμαντήρας και της αντίστοιχης που προσδίδεται από τα ηλιακά πεδία κάθε μήνα φαίνεται στα Σχήματα 4.5 και 4.6. Όπως φαίνεται δεν παρατηρείται κάποια ουσιαστική διαφορά ανάμεσα στα δύο ηλιακά πεδία.



Σχήμα 4.5: Προσδιδόμενη θερμική ενέργεια στον προθερμαντήρα από ηλιακό πεδίο LS-3





Σχήμα 4.6: Προσδιόριση θερμική ενέργεια στον προθερμαντήρα από ηλιακό πεδίο ET-150

#### 4.2 Υδραυλικές Απώλειες ηλιακού πεδίου

Όπως είναι γνωστό από τη Μηχανική των Ρευστών, οι υδραυλικές απώλειες σε μία σωλήνωση είναι το άθροισμα γραμμικών και εντοπισμένων απωλειών. Θα εκφράζονται λοιπόν ως,

$$\delta_h (mSY) = \sum \lambda_i \cdot \frac{L_i}{d_i} \cdot \frac{c_i^2}{2 \cdot g} + \sum \zeta_k \cdot \frac{c_k^2}{2 \cdot g}$$

στην οποία ο πρώτος όρος εκφράζει τις γραμμικές απώλειες στα διάφορα τμήματα  $i$  της σωλήνωσης διαμέτρου  $d_i$  (m) και μήκους  $L_i$  (m) και ο δεύτερος όρος τις υδραυλικές απώλειες στις διάφορες εντοπισμένες αντιστάσεις της σωλήνωσης. Στην περίπτωση που εξετάζουμε αμελούμε τον όρο των εντοπισμένων απωλειών. Ο συντελεστής  $\lambda_i$  των γραμμικών απωλειών είναι ως γνωστόν συνάρτηση της σχετικής τραχύτητας του αγωγού και του αριθμού Reynolds της ροής. Για ηλιακά πεδία δίνεται ότι  $\lambda_i = \frac{1}{(0,79 \cdot \ln Re - 1,64)^2}$  [57]. Επίσης,  $c_i$  (m/s) είναι η ταχύτητα της ροής στο τμήμα  $i$  και  $g=9,81$  m/s<sup>2</sup> η επιτάχυνση της βαρύτητας.

Για τα διάφορα τμήματα της σωλήνωσης ισχύει προφανώς η αρχή της συνέχειας, δηλαδή η κινούμενη από αυτή παροχή  $Q$ , είναι η ίδια για τα διάφορα τμήματα της σωλήνωσης και για την αντλία,

$$Q \left( \frac{m^3}{s} \right) = c_i \cdot A_i = c_k \cdot A_k = c_A \cdot A_a$$

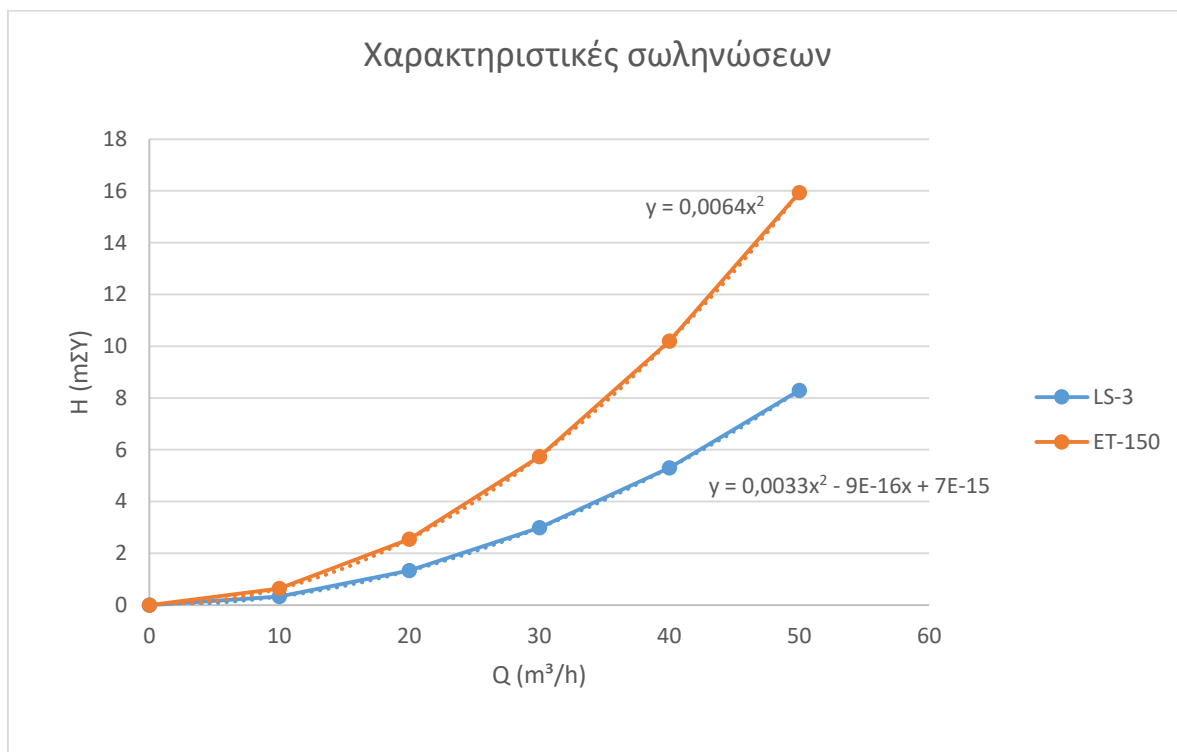
στην οποία με  $A$  ( $m^2$ ) συμβολίζεται η διατομή των τμημάτων της σωλήνωσης και των εξαρτημάτων της.

Επομένως, η σχέση των υδραυλικών απωλειών για το ηλιακό πεδίο μπορεί να γραφτεί ως,

$$\delta_{h,SF}(m\Sigma Y) = \sum \left( \lambda_i \cdot \frac{L_i}{d_i} \cdot \frac{1}{2 \cdot g \cdot A_i^2} \right) \cdot Q^2$$

Η ροή στο ηλιακό πεδίο χωρίζεται σε 3 τμήματα. Το πρώτο τμήμα είναι αυτό της εισόδου στο ηλιακό πεδίο (cold header) μέχρι τους συλλέκτες, στο οποίο η θερμοκρασία του ρευστού είναι  $70^\circ C$ , το δεύτερο τμήμα αφορά τους συλλέκτες, στους οποίους η μέση θερμοκρασία είναι  $160^\circ C$  και τέλος το τρίτο τμήμα είναι η έξοδος από τους συλλέκτες έως τον εναλλάκτη θερμότητας (hot header), στο οποίο η θερμοκρασία είναι  $250^\circ C$ . Στο Σχήμα 4.7 φαίνονται οι χαρακτηριστικές των σωληνώσεων των δύο ηλιακών πεδίων όπως προκύπτουν από την παραπάνω εξίσωση. Η διαφορά ανάμεσα στα δύο ηλιακά πεδία οφείλεται κυρίως στην ροή μέσα στους συλλέκτες, όπου για την περίπτωση των συλλεκτών ET-150 η παροχή μάζας είναι περίπου 1,45 φορές μεγαλύτερη σε σχέση με αυτή των συλλεκτών LS-3.

Στο σημείο αυτό τονίζεται ότι χρησιμοποιείται ο σωλήνας απορρόφησης PTR70 για τον οποίο η μέγιστη πίεση λειτουργίας του είναι τα 41bar [58]. Επιπλέον για τις συγκεκριμένες θερμοκρασίες λειτουργίας του Therminol VP-1 η πίεση ατμοποίησης του ρευστού είναι 0,86 bar. Αυτό σημαίνει ότι το ρευστό δεν πρέπει να πέσει κάτω από την πίεση αυτή γιατί θα αρχίσει να ατμοποιείται. Προφανώς η πίεση αυτή είναι πολλή χαμηλή και δεν τίθεται πρόβλημα. Αντιθέτως, σε άλλα ηλιακά πεδία όπου η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας φτάνει τους  $400^\circ C$  η πίεση δεν πρέπει να πέσει κάτω από τα 12 bar για τον ίδιο λόγο [38].



Σχήμα 4.7: Χαρακτηριστικές σωληνώσεων των δύο ηλιακών πεδίων

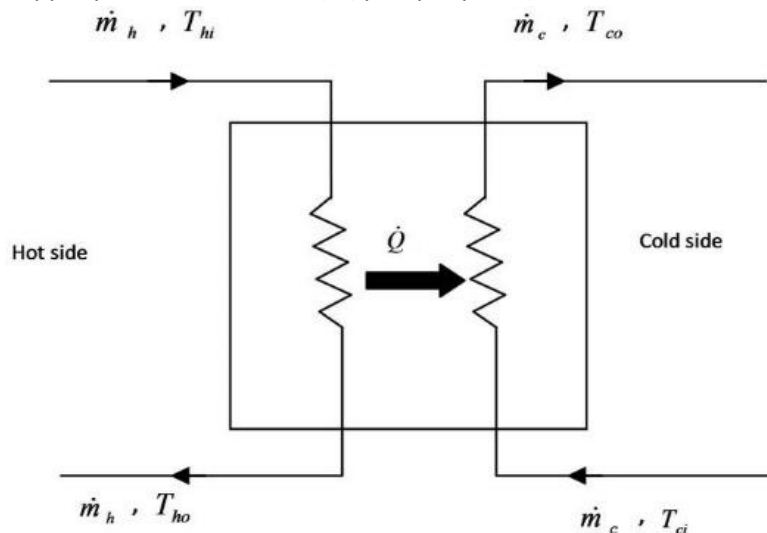
Μετά τον καθορισμό της πτώσης πίεσης στο ηλιακό πεδίο θα προσδιοριστεί η αντίστοιχη στον εναλλάκτη θερμότητας ώστε να προκύψουν οι συνολικές απώλειες πίεσης και επομένως η κατανάλωση της αντλίας κάθε ηλιακού πεδίου. Η μεγαλύτερη κλίση στην καμπύλη της χαρακτηριστικής του πεδίου ET-150 (συνεπάγεται μεγαλύτερες απώλειες) οφείλεται στην μεγαλύτερη παροχή μάζας ελαίου που διακινείται από αυτό.

#### 4.3 Σχεδιασμός εναλλάκτη θερμότητας θερμικού ελαίου/νερού

##### 4.3.1 Γενικά

Οι εναλλάκτες θερμότητας αποτελούν τις συσκευές στις οποίες λαμβάνει χώρα μετάδοση θερμότητας από ένα μέσο σε ένα άλλο, (σπανίως μεταξύ περισσοτέρων μέσων), δηλαδή αποτελούν την κατ' εξοχήν εφαρμογή της μετάδοσης θερμότητας. Στην Εικόνα 4.8 φαίνεται σχηματικά ένας τυπικός εναλλάκτης θερμότητας. Στην μόνιμη κατάσταση, θα είναι  $\dot{Q} = \dot{m}_h \cdot C_{p,h} \cdot (T_{hi} - T_{ho}) = \dot{m}_c \cdot C_{p,c} \cdot (T_{co} - T_{ci})$ , όπου

- $\dot{Q}$  (W), θερμότητα που συναλλάσσεται μεταξύ των δύο ρευστών
- $\dot{m}_h$  ( $\frac{kg}{s}$ ), η παροχή μάζας του θερμού ρεύματος
- $C_{p,h}$  ( $\frac{J}{kg \cdot K}$ ), η θερμοχωρητικότητα του θερμού ρεύματος
- $T_{hi}$  ( $^{\circ}C$ ), η θερμοκρασία εισόδου του θερμού ρεύματος
- $T_{ho}$  ( $^{\circ}C$ ), η θερμοκρασία εξόδου του θερμού ρεύματος
- $\dot{m}_c$  ( $\frac{kg}{s}$ ), η παροχή μάζας του ψυχρού ρεύματος
- $C_{p,c}$  ( $\frac{J}{kg \cdot K}$ ), η θερμοχωρητικότητα του ψυχρού ρεύματος
- $T_{ci}$  ( $^{\circ}C$ ), η θερμοκρασία εισόδου του ψυχρού ρεύματος
- $T_{co}$  ( $^{\circ}C$ ), η θερμοκρασία εξόδου του ψυχρού ρεύματος



Εικόνα 4.8: Σχηματική αναπαράσταση εναλλάκτη θερμότητας

Η ποικιλία των μορφών των εναλλακτών θερμότητας και η ποικιλία των συνδυασμών των μηχανισμών μετάδοσης θερμότητας (αγωγή, συναγωγή, ακτινοβολία) καθιστά δύσκολη την ταξινόμηση των εναλλακτών. Γενικά, οι εναλλάκτες διακρίνονται σε

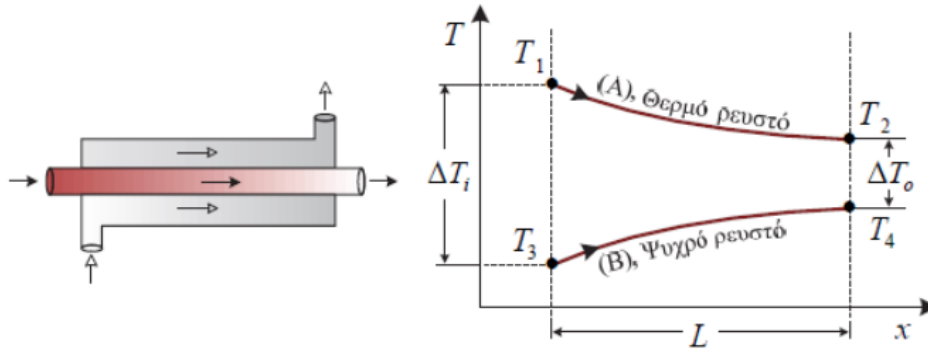
- άμεσης
- έμμεσης και
- ημιάμεσης μετάδοσης θερμότητας

Στους εναλλάκτες άμεσης μετάδοσης η θερμότητα μεταφέρεται από το θερμό στο ψυχρό μέσο με άμεση επαφή ή ανάμιξη. Χαρακτηριστικό παράδειγμα εναλλάκτη άμεσης μετάδοσης είναι ο πύργος ψύξης. Στους εναλλάκτες έμμεσης μετάδοσης ένα ενδιάμεσο τοίχωμα διαχωρίζει τα δύο ρευστά τα οποία συναλλάσσουν θερμότητα. Προφανώς το τοίχωμα πρέπει να είναι κατασκευασμένο από υλικό με καλή αγωγιμότητα. Οι εναλλάκτες αυτοί αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος των χρησιμοποιούμενων εναλλακτών. Χαρακτηριστικά παραδείγματα εναλλακτών έμμεσης μετάδοσης είναι ο εναλλάκτης δέσμης σωλήνων (ή εναλλάκτης κελύφους αυλών), ο εναλλάκτης διπλού σωλήνα, ο πλακοειδής εναλλάκτης, ο σπειροειδής εναλλάκτης και ο εναλλάκτης πτερυγοφόρων σωλήνων. Στους εναλλάκτες ημιάμεσης μετάδοσης, οι οποίοι είναι γνωστοί και ως αναγεννητές, το θερμότερο ρευστό ρέει περιοδικά μέσα από τη μάζα αποθήκευσης, στην οποία αποδίδει θερμότητα. Στη συνέχεια διακόπτεται η ροή του θερμού ρευστού και ακολουθεί ροή του ψυχρού ρευστού για ορισμένο χρόνο μέσα από τη μάζα αποθήκευσης, όπου τώρα το δεύτερο ρευστό παραλαμβάνει την αποθηκευμένη θερμότητα.

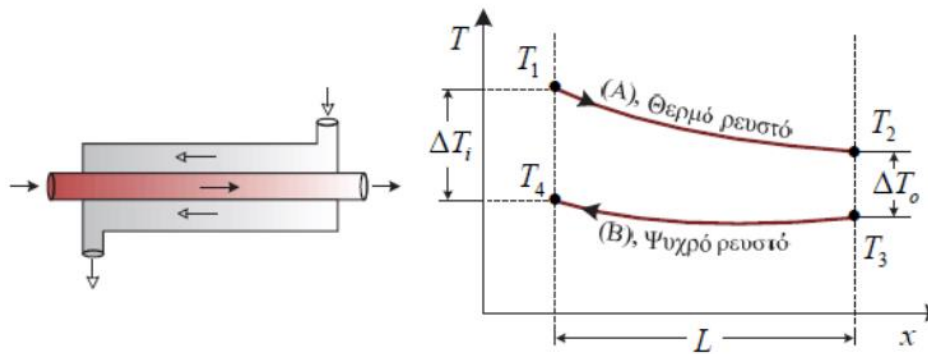
Επιπλέον, οι εναλλάκτες θερμότητας διακρίνονται με βάση τη φύση των ρευστών σε εναλλάκτες

- αερίου – αερίου
- αερίου – υγρού και αντίστροφα
- υγρού – υγρού
- συμπύκνωσης ατμού με υγρό
- συμπύκνωσης ατμού με αέριο
- εξάτμισης υγρού με θερμό αέριο ή υγρό
- εξάτμισης υγρού με συμπυκνούμενο ατμό

Στους εναλλάκτες θερμότητας ρευστού – ρευστού, με τους οποίους και θα ασχοληθούμε, συναντάμε ποικιλία συνδυασμών των ροών των ρευστών, οι οποίοι συνδυασμοί μπορούν να είναι από απλοί έως σχετικά περίπλοκοι. Οι συνδυασμοί των ροών είναι καθοριστικοί, τόσο για τους συντελεστές συναγωγής, όσο και για τη μέση θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των δύο ρευστών. Είναι δηλαδή καθοριστικοί για τη θερμορροή που μεταφέρεται από το θερμό στο ψυχρό μέσο. Ο συνδυασμός των ροών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ταξινόμηση των εναλλακτών. Οι απλούστεροι συνδυασμοί ροών είναι η περίπτωση της ομορροής, Εικόνα 4.9, στην οποία τα δύο ρευστά ρέουν παράλληλα προς την ίδια κατεύθυνση και η περίπτωση της αντιρροής, Εικόνα 4.10, στην οποία τα δύο ρευστά ρέουν παράλληλα, αλλά προς αντίθετες κατευθύνσεις. Τονίζεται εδώ ότι η αντιρροή δίνει μεγαλύτερη θερμορροή για την ίδια επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας σε σύγκριση με την ομορροή.



Εικόνα 4.9: Τυπικός εναλλάκτης ομορροής



Εικόνα 4.10: Τυπικός εναλλάκτης αντιρροής

Τρίτη απλή διάταξη ροών είναι η περίπτωση της καθαρής σταυρωτής ροής, στην οποία τα δύο ρευστά ρέουν κάθετο το ένα προς το άλλο. Στην περίπτωση αυτή διακρίνουμε ροές εγκάρσιως μιγνυόμενες και ροές μη μιγνυόμενες (ανάλογα με το αν τα ρευστά ρέουν ή όχι μέσα σε κανάλια και σωλήνες). Η ανάμιξη ή μη της ροής στην εγκάρσια διεύθυνση επηρεάζει τις κατανομές των θερμοκρασιών των ρευστών και κατ' επέκταση τις θερμοροές.

Στην περίπτωση μας (εναλλάκτης ρευστού – ρευστού (νερό / έλαιο)) θα χρησιμοποιήσουμε εναλλάκτη κελύφους αυλών, ο οποίος είναι ο πλέον συνηθισμένος για τις περιπτώσεις προθέρμανσης τροφοδοτικού νερού. Οι εναλλάκτες αυτοί χρησιμοποιούνται λόγω της σχετικά απλής παραγωγής τους και της πολύπλευρης χρήσης τους για αέρια και υγρά σε πολύ μεγάλες περιοχές θερμοκρασιών και πιέσεων καθώς και σε αλλαγή φάσης (συμπύκνωση και εξάτμιση) σε πολυάριθμους κλάδους της βιομηχανίας, ιδιαίτερα στη χημική βιομηχανία και τις ενεργειακές μονάδες. Είναι το μόνο είδος εναλλακτών για το οποίο υπάρχει Γερμανική (DIN) και Αμερικανική (TEMA) τυποποίηση, όχι όμως διεθνής.

#### 4.3.2 Θερμική ανάλυση εναλλακτών θερμότητας

Δύο είναι οι πλέον γνωστοί μέθοδοι για την θερμική ανάλυση των εναλλακτών θερμότητας. Η πρώτη ονομάζεται μέθοδος απόδοσης των μονάδων μεταφοράς θερμότητας (NTU) και βασίζεται στην

αποτελεσματικότητα ή αποδοτικότητα του εναλλάκτη,  $\varepsilon$ , η οποία ορίζεται ως το πηλίκο της πραγματικά μεταφερόμενης θερμότητας προς τη θεωρητικά μέγιστη που θα μπορούσε να μεταφερθεί,

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{max}}$$

Όπου

$$\dot{Q} = \dot{m}_c \cdot C_{p,c} \cdot (T_{c,out} - T_{c,in}) = \dot{m}_h \cdot C_{p,h} \cdot (T_{h,in} - T_{h,out})$$

Και

$$\dot{Q}_{max} = (\dot{m} \cdot C_p)_{min} \cdot \Delta T_{max} = (\dot{m} \cdot C_p)_{min} \cdot (T_{h,in} - T_{c,in})$$

Η μέθοδος αυτή δεν απαιτεί τη γνώση της μεταβολής των θερμοκρασιών και των δύο ρευστών.

Η δεύτερη μέθοδος ονομάζεται μέθοδος της μέσης θερμοκρασιακής διαφοράς (LMTD) και σύμφωνα με αυτήν η θερμορροή  $\dot{Q}$ , μπορεί να γραφτεί σαν το γινόμενο ενός μέσου συντελεστή θερμοπερατότητας  $U$  ( $W/m^2 \cdot K$ ), της επιφάνειας συναλλαγής  $A$  ( $m^2$ ) και μίας κατάλληλης μέσης θερμοκρασιακής διαφοράς  $\Delta T_m$  (K),

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot \Delta T_m = \dot{m}_h \cdot C_{p,h} \cdot (T_{h,in} - T_{h,out}) = \dot{m}_c \cdot C_{p,c} \cdot (T_{c,out} - T_{c,in})$$

Η μέση θερμοκρασιακή διαφορά, σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, προκύπτει ως το γινόμενο της μέσης λογαριθμικής διαφοράς και ενός διορθωτικού συντελεστή  $F$ ,

$$\Delta T_m = \Delta T_{lm} \cdot F = \frac{\Delta T_a - \Delta T_b}{\ln\left(\frac{\Delta T_a}{\Delta T_b}\right)} \cdot F$$

όπου  $\Delta T_{lm}$  η μέση λογαριθμική θερμοκρασιακή διαφορά,  $\Delta T_a$  και  $\Delta T_b$  η μεγάλη και η μικρή θερμοκρασιακή διαφορά στον εναλλάκτη αντίστοιχα [59]. Ο διορθωτικός συντελεστής  $F$  προσδιορίζεται με τη βοήθεια διαγραμμάτων ή εξισώσεων, ανάλογα με τη μορφή του εναλλάκτη. Η μέθοδος αυτή απαιτεί τη γνώση των θερμοκρασιών των δύο ρευστών και στα δύο άκρα.

Ακριβώς επειδή στην περίπτωση μας γνωρίζουμε τις θερμοκρασίες των δύο ρευστών και στα δύο άκρα, θα χρησιμοποιηθεί η δεύτερη μέθοδος. Παρακάτω φαίνονται τα δεδομένα του προβλήματος μας, ενώ σκοπός της ανάλυσης είναι μία πρώτη εκτίμηση της διαστασιολόγησης του εναλλάκτη και φυσικά η εύρεση της πτώσης πίεσης μέσω αυτού. Τονίζουμε ότι το θερμό ρευστό είναι το θερμικό έλαιο που έρχεται από το ηλιακό πεδίο και ψυχρό το νερό που έρχεται από τον συμπυκνωτή.

- $\dot{m}_h = \dot{m}_{oil} = 39,997 \frac{kg}{s}$
- $\dot{m}_c = \dot{m}_{water} = 176,19 \frac{kg}{s}$
- $T_{h,in} = T_{oil,in} = 250^\circ C$
- $T_{h,out} = T_{oil,out} = 70^\circ C$
- $T_{c,in} = T_{water} = 34,9^\circ C$

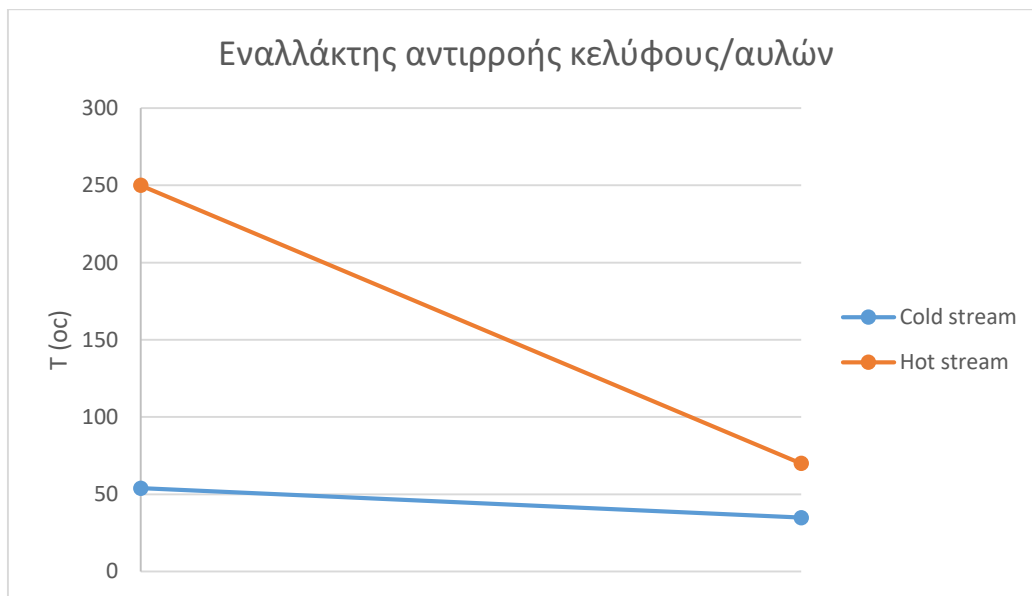
Κατά συνέπεια η θερμορροή του εναλλάκτη θα είναι,  $\dot{Q} = \dot{m}_h \cdot C_{p,h} \cdot (T_{h,in} - T_{h,out}) = 39,997 \frac{kg}{s} \cdot 1,9434 \frac{kJ}{kg \cdot K} \cdot (250 - 70) K = 13991,25 kW_{th}$

Από την ίδια εξίσωση γραμμένη για το ρεύμα του νερού θα προκύψει η θερμοκρασία εξόδου του νερού από τον εναλλάκτη,  $T_{c,out}$ ,

$$\dot{Q} = \dot{m}_c \cdot C_{p,c} \cdot (T_{c,out} - T_{c,in}) \Rightarrow T_{c,out} = \frac{\dot{Q}}{\dot{m}_c \cdot C_{p,c}} + T_{c,in} = \frac{13991,25 kW}{176,19 \frac{kg}{s} \cdot 4,18 \frac{kJ}{kg \cdot K}} + 34,9^\circ C =$$

$$> T_{c,out} = 53,90^\circ C$$

Στο Σχήμα 4.11 φαίνονται οι θερμοκρασιακές μεταβολές στον εναλλάκτη.



Σχήμα 4.11: Θερμοκρασιακές μεταβολές στον εναλλάκτη κελύφους - αυλών

Επιπλέον, για καθαρά αντιρροή υπολογίζεται η μέση λογαριθμική θερμοκρασιακή διαφορά  $\Delta T_{lm}$ ,

$$\Delta T_{lm} = \frac{(250^\circ C - 53,90^\circ C) - (70^\circ C - 34,9^\circ C)}{\ln \frac{(250^\circ C - 53,90^\circ C)}{(70^\circ C - 34,9^\circ C)}} = 93,582^\circ C$$

Για την εύρεση του διορθωτικού συντελεστή F, έχουμε ότι

$$R = \frac{(T_{h,in} - T_{h,out})}{(T_{c,out} - T_{c,in})} = \frac{(250^\circ C - 70^\circ C)}{(53,90^\circ C - 34,9^\circ C)} = 9,475$$

$$P = \frac{(T_{c,out} - T_{c,in})}{(T_{h,in} - T_{c,in})} = \frac{(53,90^\circ C - 34,9^\circ C)}{(250^\circ C - 34,9^\circ C)} = 0,0883$$

Στη συνέχεια υπολογίζουμε τις βοηθητικές μεταβλητές

$$S = \frac{(R^2 + 1)^{0,5}}{R - 1} \text{ για } R \neq 1$$

Και

$$W = \frac{1 - R \cdot P}{(1 - P)^{\left(\frac{1}{N_p}\right)}} \text{ για } P \neq 1$$

Τελικά, ο διορθωτικός συντελεστής προκύπτει από

$$F = \frac{S \cdot \ln(W)}{\ln\left(\frac{1 + W - S + S \cdot W}{1 + W + S - S \cdot W}\right)}$$

Με διαδοχικές αντικαταστάσεις βρίσκουμε ότι  $S=1,1242$  ,  $W=0,1789$  και τελικά  $F=0,9186$ .

Στον Πίνακα 4.2 δίνονται τυπικές τιμές θερμοπερατότητας ανάλογα με τη φύση των ρευστών στον εναλλάκτη [60].

*Πίνακας 4.2: Προσεγγιστικές τιμές συντελεστών θερμοπερατότητας*

<b>Συνθήκες μετάδοσης θερμότητας</b>	<b>U (W/m<sup>2</sup>·K)</b>
<b>υγρό – υγρό</b>	150 έως 1200
<b>αέριο (≈1 bar) – αέριο (≈1 bar)</b>	5 έως 35
<b>υγρό – αέριο (≈1 bar)</b>	15 έως 70
<b>αέριο (200 ÷ 300 bar) - αέριο (200 ÷ 300 bar)</b>	150 έως 500
<b>αέριο (200 ÷ 300 bar) στους σωλήνες, υγρό γύρω από τους σωλήνες</b>	200 έως 400
<b>ατμός έξω από τους σωλήνες, υγρό μέσα στους σωλήνες</b>	300 έως 1200
<b>νερό – νερό</b>	850 έως 1700

Από τον παραπάνω Πίνακα παίρνουμε μία μέση τιμή για τον συντελεστή θερμοπερατότητας και την περίπτωση μας (υγρό – υγρό), δηλαδή,

$$U = \frac{150 + 1200}{2} = 675 \frac{W}{m^2 \cdot K} = 0,675 \frac{kW}{m^2 \cdot K}$$

Επομένως, η επιφάνεια συναλλαγής που θα χρειαστούμε θα είναι,

$$A = \frac{\dot{Q}}{U \cdot \Delta T_{lm} \cdot F} = \frac{13991,25 \text{ kW}}{0,675 \frac{kW}{m^2 \cdot K} \cdot 93,582 \text{ K} \cdot 0,9186} = 241,112 \text{ m}^2$$

Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, ο εναλλάκτης μας είναι κελύφους αυλών. Στο σημείο αυτό θα καθορίσουμε ποιο ρευστό θα ρέει εσωτερικά και ποιο εξωτερικά από τους σωλήνες. Η επιλογή των ροών εξαρτάται από θερμοδυναμικά και ρευστομηχανικά ζητήματα, από τις επιτρεπτές απώλειες πίεσης, καθώς και από τη συμπεριφορά ρύπανσης (fouling) των ρευστών. Επί πλέον, η επιλογή των ροών



καθορίζεται και από κατασκευαστικά κριτήρια. Ανάλογα με τις δυνατότητες, επιλέγεται η ροή μέσα στους σωλήνες,

- Του ρευστού με την υψηλότερη πίεση
- Των ρευστών με τάση για ρύπανση, καθώς και
- Των ρευστών τα οποία λόγω της υψηλής διαβρωτικής δράσης απαιτούν ακριβό υλικό

Με βάση τα παραπάνω, επιλέγεται η ροή του θερμικού ελαίου εσωτερικά των σωλήνων και του νερού εξωτερικά. Επιπλέον, τονίζεται εδώ ότι λόγω της πολύ μεγαλύτερης παροχής του νερού θα απαιτούνταν και πολύ μεγαλύτερες διαμέτρους για του σωλήνες ώστε η ταχύτητα του νερού να ήταν μέσα σε αποδεκτά όρια. Όμως, μεγαλύτερες διαμέτρους συνεπάγεται και μεγαλύτερο κόστος υλικού.

Ένα άλλο σημαντικό ζήτημα για το σωστό σχεδιασμό ενός εναλλάκτη είναι οι ταχύτητες οι οποίες αναπτύσσονται μέσα σε αυτόν. Οι συντελεστές μετάδοσης θερμότητας αυξάνονται με την αύξηση της ταχύτητας της ροής (επομένως χρειαζόμαστε μικρότερη επιφάνεια συναλλαγής για δεδομένη θερμορροή), όμως ταυτόχρονα έχουμε και αυξημένη απώλεια πίεσης στον εναλλάκτη. Το τελευταίο συνεπάγεται και αύξηση της ισχύος των αντλιών ή ανεμιστήρων. Επιπλέον, ανάλογα και με το είδος των ρευστών, πρέπει να τηρούνται και κάποιες ελάχιστες ταχύτητες ροής προς αποφυγή ρύπανσης. Για την περίπτωση του νερού, συνιστάται μέσα στους σωλήνες η ταχύτητα να μην πέσει κάτω από 1 m/s, ενώ πρέπει να επιδιώκονται ταχύτητες μεταξύ 1,5 m/s και 2,5 m/s. Έξω από τους σωλήνες πρέπει να υφίστανται ταχύτητες μεταξύ 1 και 1,5 m/s. Η ταχύτητα της ροής περιορίζεται προς τα πάνω και λόγω της εμφάνισης ταλαντώσεων, σπηλαίωσης και μηχανικής διάβρωσης. Τα φαινόμενα αυτά εμφανίζονται για το νερό σε ταχύτητα περίπου 2 m/s σε σωλήνες από μαλακά κράματα (π.χ. Cu, Al) 3 έως 4 m/s σε κοινό χάλυβα και περίπου 4 έως 5 m/s σε ανοξείδωτο χάλυβα.

Όσον αφορά τους σωλήνες, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σωλήνες χωρίς ραφή (διεγκυσμένοι, DIN 28180, TEMA) ή με ραφή (συγκολλητοί, DIN 28181, TEMA). Οι σωλήνες είναι τυποποιημένοι ως προς τη διάμετρο, το πάχος, το μήκος και το υλικό κατασκευής τους. Στους Πίνακες 4.3, 4.4 και 4.5 φαίνεται αυτή η τυποποίηση.

Πίνακας 4.3: Εξωτερικές διαμέτρους σωλήνων με ή χωρίς ραφή [mm] (DIN28181 και 28180)

16	20	25	30	38
----	----	----	----	----

Πίνακας 4.4: Πάχη σωλήνων με ή χωρίς ραφή [mm] (DIN 28181 και 28180)

1,2	1,6	2,0	2,6	3,2
-----	-----	-----	-----	-----

Πίνακας 4.5: Μήκη σωλήνων με ή χωρίς ραφή [mm] (DIN 28181 και 28180)

500	750	1000	1500	2000	2500	3000	4000	5000	6000	8000
-----	-----	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Στη χημική βιομηχανία χρησιμοποιούνται κατά προτίμηση σωλήνες με εξωτερική διάμετρο 20 και 25mm. Σωλήνες με μικρότερη διάμετρο χρησιμοποιούνται κυρίως σε ψύκτες. Το συνηθέστερα χρησιμοποιούμενο πάχος είναι αυτό των 2,0mm.

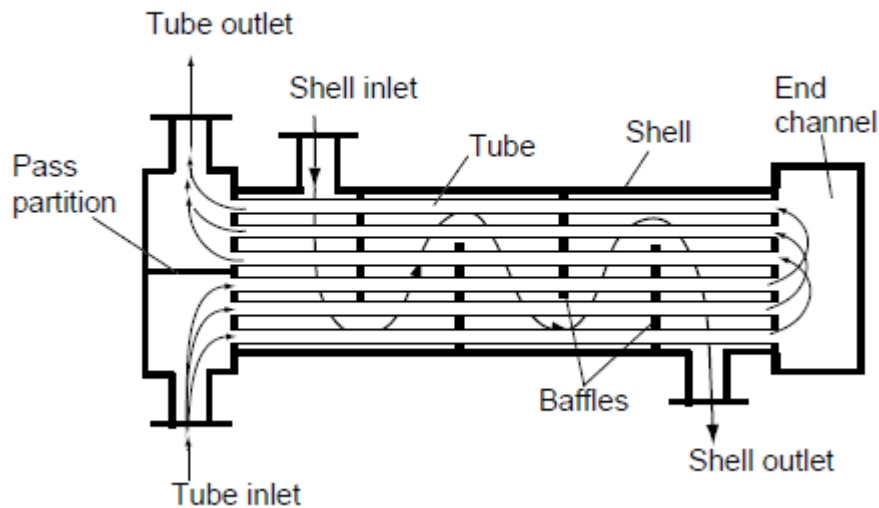
Με βάση λοιπόν τα παραπάνω, επιλέγεται εξωτερική διάμετρος ίση με  $d_o=25$  mm και πάχος σωλήνα  $t=2,0$  mm. Κατά συνέπεια η εσωτερική διάμετρος των σωλήνων θα είναι ίση με  $d_i=d_o-2\cdot t=21$  mm. Για επιλογή μήκους σωλήνων  $L=8000\text{mm}=8\text{m}$ , προκύπτει ο αριθμός των σωλήνων,  $N_t$ , ως

$$A = N_t \cdot \pi \cdot d_o \cdot L \Rightarrow N_t = \frac{A}{\pi \cdot d_o \cdot L} = \frac{241,112 \text{ m}^2}{\pi \cdot 0,025 \text{ m} \cdot 8 \text{ m}} = 383,74 \text{ ή } N_t = 384 \text{ σωλήνες}$$

Επειδή το μήκος των σωλήνων είναι μεγάλο, επιλέγουμε ο εναλλάκτης μας να έχει δύο διαδρομές σωλήνων (Number of passes,  $N_p=2$ ), επομένως το μήκος του κελύφους του εναλλάκτη θα είναι,

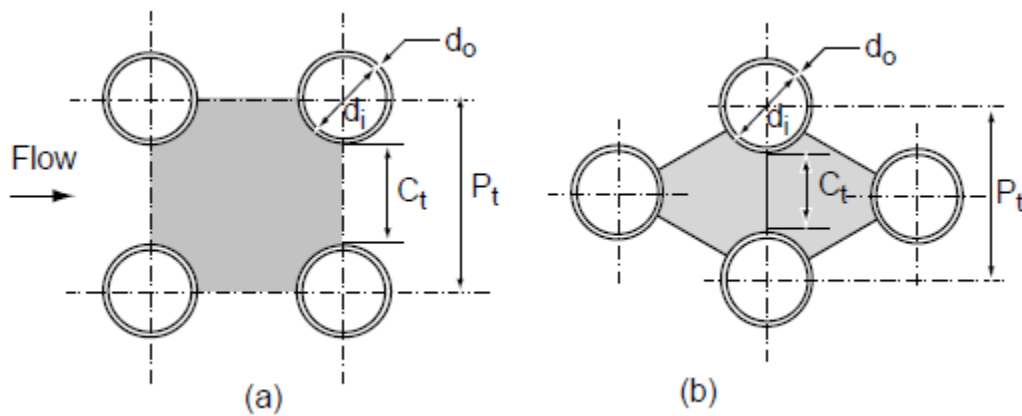
$$L_t = \frac{L}{N_p} = \frac{8 \text{ m}}{2} = 4 \text{ m}$$

Στην παρακάτω Εικόνα 4.12, φαίνεται ένας τυπικός εναλλάκτης κελύφους αυλών με ένα κέλυφος και δύο διαδρομές σωλήνων.



Εικόνα 4.12: Εναλλάκτης κελύφους αυλών με ένα κέλυφος και δύο διαδρομές σωλήνων

Ως προς την διάταξη των σωλήνων, δύο είναι οι επικρατέστερες κατανομές, η τριγωνική και η τετραγωνική, Εικόνα 4.13.



Εικόνα 4.13: Κατανομή σωλήνων: (a) τετραγωνική, (b) τριγωνική

Το πρότυπο DIN 28182 καθορίζει τις κατανομές σωλήνων των εναλλακτών, τις κατάλληλες οπές στους δίσκους σωλήνων και τις μέγιστες διαμέτρους των οπών στα ελάσματα αλλαγής πορείας και τις πλάκες στήριξης. Οι συνιστάμενες κατανομές σωλήνων δίνονται ανάλογα με την εξωτερική διάμετρο του σωλήνα  $d_o$ , σύμφωνα με τον παρακάτω Πίνακα 4.6. Φυσικά μπορούν να επιλεγούν και μικρότερες κατανομές, εάν υπάρχει κατασκευαστική πιθανότητα.

Πίνακας 4.6: Κατανομές σωλήνων [mm] (DIN 28182)

Εξωτερική διάμετρος $d_o$	Κατανομή σωλήνων $P_t$
16	21
20	26
25	32
30	38
38	47

Επιλέγουμε την τετραγωνική κατανομή και για  $d_o=25$  mm προκύπτει ότι  $P_t=32$  mm. Επίσης, η απόσταση των σωλήνων (tube clearance) προκύπτει ίση με  $C_t = P_t - d_o = 32\text{mm} - 25\text{mm} = 7\text{mm}$ .

Με βάση τα παραπάνω, μπορούμε να καθορίσουμε την ταχύτητα της ροής μέσα στους σωλήνες. Αρχικά η παροχή μάζας του θερμικού ελαίου διαιρείται σε  $N_t/N_p=384/2=192$  σωλήνες. Δηλαδή σε κάθε σωλήνα περνάει παροχή μάζας ίση με  $\dot{m}_i = \frac{\dot{m}_{oil}}{96} = \frac{39,997\text{ kg/s}}{192} = 0,2083\text{ kg/s}$ . Επιπλέον, κάθε σωλήνας έχει εμβαδόν ίσο με  $A_i = \frac{\pi \cdot d_i^2}{4} = 3,4636 \cdot 10^{-4}\text{ m}^2$ .

Κατά συνέπεια η ταχύτητα του ελαίου μέσα στους σωλήνες θα είναι,

$$\dot{m}_i = \rho_{oil} \cdot A_i \cdot u_i \Rightarrow u_i = \frac{\dot{m}_i}{\rho_{oil} \cdot A_i} = \frac{0,2083 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{1022,708 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 3,4636 \cdot 10^{-4}\text{ m}^2} = 0,6343\text{ m/s}$$

όπου η πυκνότητα για το Therminol VP-1 προκύπτει από την παρακάτω εξίσωση για τη μέση θερμοκρασία  $\bar{T} = \frac{T_{h,in} + T_{h,out}}{2} = \frac{70 + 250}{2} = 160^\circ\text{C}$ ,

$$\rho_{oil}(T) = -0,9079 \cdot T + 7,8116 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 - 2,367 \cdot 10^{-6} \cdot T^3 + 1083,25$$

Όπου  $\rho_{oil}$  σε  $(\text{kg}/\text{m}^3)$  και  $T$  σε  $(^\circ\text{C})$ .

Τα τελευταία στοιχεία που πρέπει να καθοριστούν είναι αυτά σχετικά με τη γεωμετρία του κελύφους. Η διάμετρος του κελύφους θα είναι,

$$D_s = \left( \frac{4}{\pi} \cdot N_t \cdot P_t^2 \cdot \left( \frac{CL}{CTP} \right) \right)^{0,5} = \left( \frac{4}{\pi} \cdot 384 \cdot 0,032^2 \text{m}^2 \cdot \frac{1}{0,9} \right)^{0,5} = 0,7460\text{ m}$$

Όπου

- $CTP=0,93$  για μία διαδρομή σωλήνων
- $CTP=0,9$  για δύο διαδρομές σωλήνων

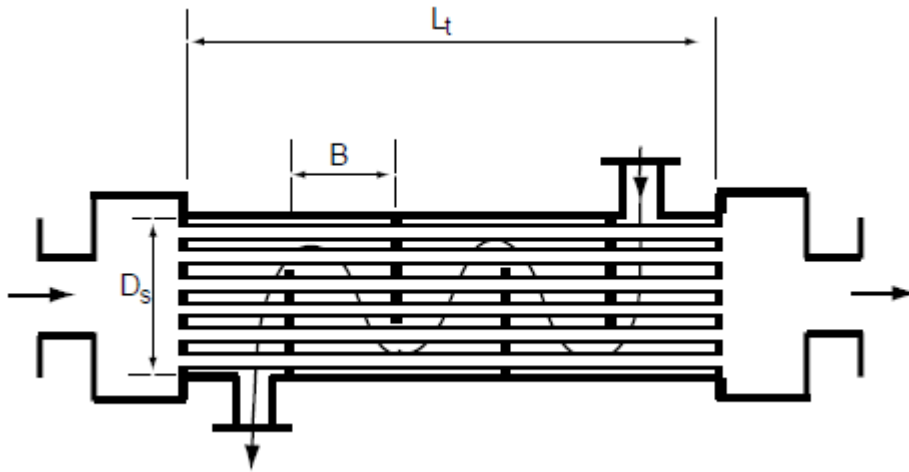
- CTP=0,85 για τρεις διαδρομές σωλήνων

Και

- CL=1 για τετραγωνική κατανομή
- CL=sin(60°)=0,866 για τριγωνική κατανομή

Επιπλέον για αριθμό χωρισμάτων (Baffles) ίσο με  $N_b=4$  θα έχουμε απόσταση χωρισμάτων ίση με  $B = \frac{L_s}{N_b+1} = \frac{4m}{4+1} = 0,8$  m

Στην Εικόνα 4.14, δίνονται τα κύρια χαρακτηριστικά στοιχεία του κελύφους.



Εικόνα 4.14: Κύρια χαρακτηριστικά στοιχεία του κελύφους [61]

Επιπλέον, δίνεται ένας δεύτερος τρόπος υπολογισμού της διαμέτρου του κελύφους [60]. Σύμφωνα με τον τρόπο αυτό, η διάμετρος του κύκλου των εξωτερικών σωλήνων της δέσμης,  $D_T$ , είναι

$$D_T = \sqrt{f_1 \cdot N_t \cdot P_t^2 + f_2 \cdot \sqrt{N_t} \cdot P_t}$$

όπου

- $f_1=1,1$  για τριγωνική κατανομή
- $f_1=1,3$  για τετραγωνική κατανομή

Αριθμός διαδρομών	1	2	4	8
$f_2$	0	22	70	105

Τελικά, με αντικατάσταση για  $f_1=1,3$  και  $f_2=22$  προκύπτει ότι  $D_T=0,7676$  m που είναι αρκετά κοντά στην τιμή που βρήκαμε προηγουμένως (απόκλιση 2,80%).

Η πτώση πίεσης στο τμήμα των σωλήνων δίνεται από [61],

$$\Delta P = 4 \cdot \left( \frac{f \cdot L_t}{d_i} + 1 \right) \cdot N_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_{oil} \cdot u_i^2$$

με  $f$  τον συντελεστή αντίστασης της ροής να προκύπτει προσεγγιστικά από την παρακάτω σχέση, συναρτήσει του αριθμού Reynolds,

Στρωτή ροή

$$f = 16/Re_D$$

Τυρβώδης ροή

$$f = (1,58 \cdot \log(Re_D) - 3,28)^{-2}$$

$$\text{Ο αριθμός } Re_D \text{ για την περίπτωση μας είναι } Re_D = \frac{\rho_{oil} \cdot u_i \cdot d_i}{\mu} = \frac{1022,708 \frac{kg}{m^3} \cdot 0,6343 \frac{m}{s} \cdot 0,021m}{0,537 \cdot 10^{-3} \frac{N}{m^2 \cdot sec}} = 23520,50$$

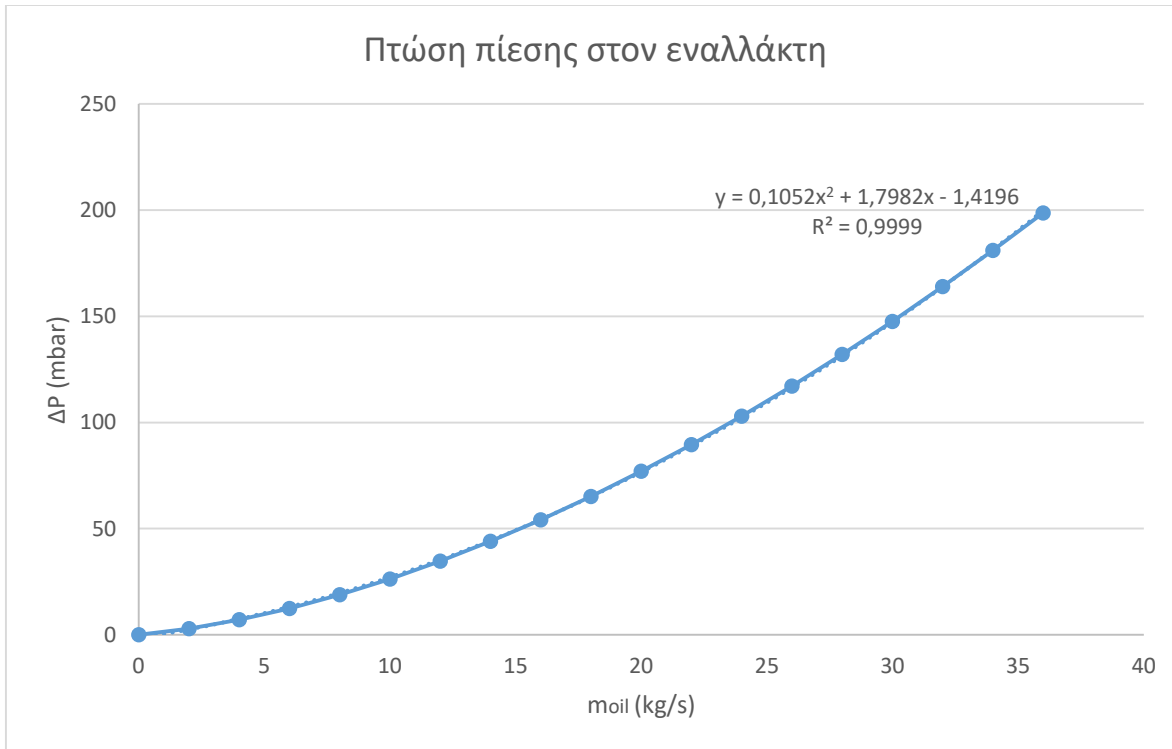
Πρόκειται για καθαρά τυρβώδη ροή ( $Re_D > 2300$ ), συνεπώς

$$f = (1,58 \cdot \log(23520,50) - 3,28)^{-2} = 0,076$$

Τελικά η πτώση πίεσης στο τμήμα των σωλήνων του εναλλάκτη θα είναι,

$$\begin{aligned} \Delta P &= 4 \cdot \left( \frac{0,076 \cdot 4m}{0,021m} + 1 \right) \cdot 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1022,708 \frac{kg}{m^3} \cdot \frac{0,6343^2 m^2}{s^2} = 23621,26 N/m^2 = 0,23613 \text{ bar} \\ &= 236,13 \text{ mbar} \end{aligned}$$

Στο παρακάτω Σχήμα 4.15, φαίνεται και η καμπύλη της πτώσης πίεσης στους σωλήνες του εναλλάκτη συναρτήσει της παροχής μάζας του θερμικού ελαίου.



Σχήμα 4.15: Πτώση πίεσης συναρτήσει παροχής μάζας

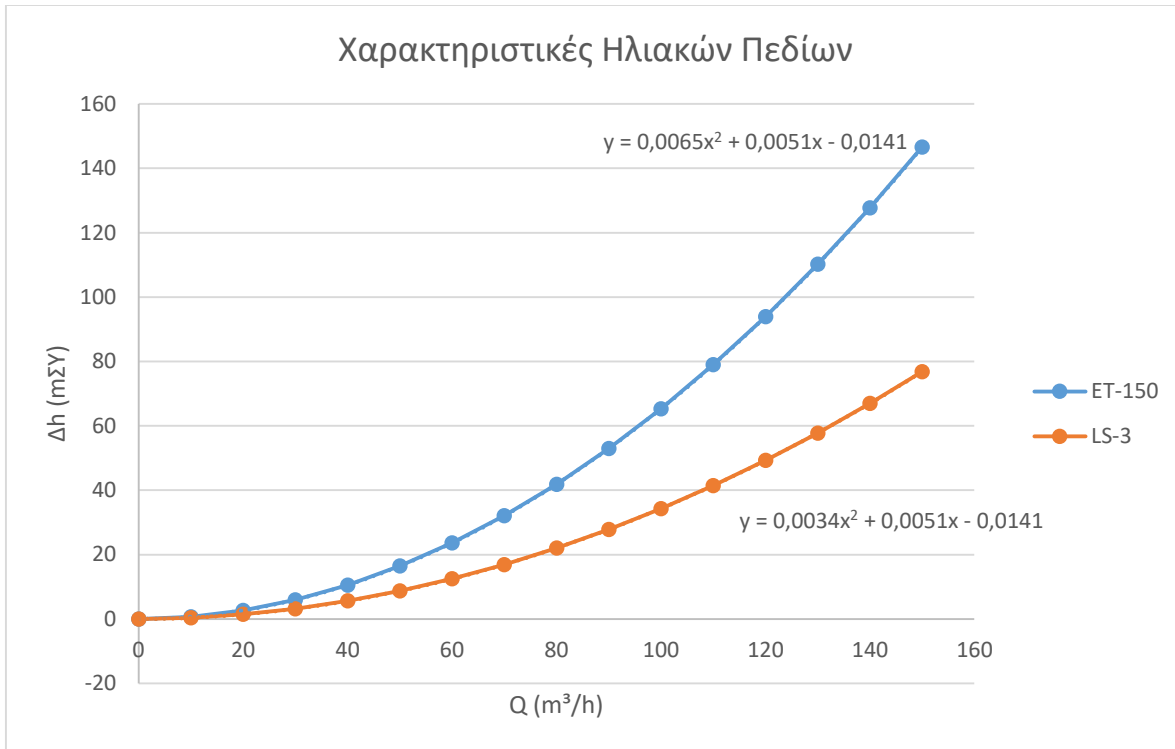
Η προσεγγιστική καμπύλη που δίνει την πτώση πίεσης –  $\Delta P$  (mbar) – συναρτήσει της παροχής μάζας του ελαίου –  $\dot{m}_{oil}$  ( $\frac{kg}{s}$ ) – με βαθμό προσαρμογής  $R^2=0,9999$  είναι,

$$\Delta P(\dot{m}_{oil}) = 0,1052 \cdot \dot{m}_{oil}^2 + 1,7982 \cdot \dot{m}_{oil} - 1,4196$$

Τελικά η συνολική πτώση πίεσης στο ηλιακό πεδίο και τον εναλλάκτη θερμότητας για τα δύο διαφορετικά ηλιακά πεδία φαίνεται στο Σχήμα 4.16. Από τις αντίστοιχες εξισώσεις που φαίνονται στο Σχήμα θα προκύπτει η συνολική πτώση πίεσης κάθε τύπου συλλεκτών για κάθε παροχή μάζας που θα διέρχεται από αυτούς. Στον Πίνακα 4.7 δίνονται η παροχή όγκου και η πτώση πίεσης στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας των ηλιακών πεδίων.

Πίνακας 4.7: Συνολική πτώση πίεσης για κάθε ηλιακό πεδίο στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας

Σημείο σχεδίασης	LS-3	ET-150
$Q_{nom}$ (m <sup>3</sup> /h)	149,73	154,57
$H_{nom}$ (mΣΥ)	76,97	156,08
$\Delta P_{nom}$ (bar)	7,72	15,66



Σχήμα 4.16: Συνολική πτώση πίεσης στο ηλιακό πεδίο και τον εναλλάκτη θερμότητας

#### 4.4 Αντλία ηλιακού πεδίου

Το ρευστό μετάδοσης θερμότητας κυκλοφορεί μέσα στο ηλιακό πεδίο με τη βοήθεια μίας φυγοκεντρικής αντλίας [62]. Η αντλία αποτελεί το στοιχείο με τη μεγαλύτερη κατανάλωση στο ηλιακό πεδίο και για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται αντλία μεταβλητών στροφών ώστε να μειώνεται η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας όταν η παροχή μάζας του ρευστού μετάδοσης θερμότητας είναι χαμηλότερη από την ονομαστική. Η ισχύς της αντλίας στο σημείο σχεδίασης είναι,

$$\dot{W}_{p,nom}(W) = \frac{\gamma \cdot H_{nom} \cdot Q_{nom}}{\eta_{p,SF,nom}}$$

όπου  $\gamma = \rho \cdot g$  (N/m<sup>3</sup>) το ειδικό βάρος του ρευστού,  $\rho$  η πυκνότητα (kg/m<sup>3</sup>),  $H_{nom}$  (mΣΥ) το ονομαστικό ολικό ύψος,  $Q_{nom}$  (m<sup>3</sup>/s) η ονομαστική παροχή όγκου του ρευστού και  $\eta_{p,SF,nom}$  ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης της αντλίας στο σημείο σχεδίασης.

Για λειτουργία της αντλίας σε διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής θα ισχύει [63],

$$\dot{W}_p(W) = \frac{\dot{W}_{p,nom}}{\eta_{p,SF}} \cdot \left(\frac{\dot{m}_{SF}}{\dot{m}_{SF,nom}}\right)^3$$

όπου  $\dot{m}_{SF}$  ( $\frac{kg}{s}$ ) η τρέχουσα παροχή μάζας του ηλιακού πεδίου και  $\dot{m}_{SF,nom}$  ( $\frac{kg}{s}$ ) η αντίστοιχη ονομαστική. Η μεταβολή του βαθμού απόδοσης της αντλίας σε συνάρτηση με την παροχή μάζας του ηλιακού πεδίου δίνεται από,

$$\frac{\eta_{p,SF}}{\eta_{p,SF,nom}} = \alpha_o + 2 \cdot (1 - \alpha_o) \cdot \frac{\dot{m}_{SF}}{\dot{m}_{SF,nom}} - (1 - \alpha_o) \cdot \left( \frac{\dot{m}_{SF}}{\dot{m}_{SF,nom}} \right)^2$$

Για την περίπτωση αντλίας σταθερών στροφών είναι  $\alpha_o=0$  και για μεταβλητών  $\alpha_o=-0,4$  [37].

Η ισχύς αυτή όμως αντιστοιχεί στην άτρακτο της αντλίας. Η ηλεκτρική ενέργεια που προσδίνεται από τον ηλεκτροκινητήρα για την κίνηση της αντλίας θα είναι,

$$\dot{W}_{p,net}(W) = \frac{\dot{W}_p(W)}{\eta_M}$$

όπου  $\eta_M$ , ο ηλεκτρομηχανικός βαθμός απόδοσης του κινητήρα. Οι βαθμοί απόδοσης της αντλίας που χρησιμοποιήθηκαν δίνονται στον Πίνακα 4.8.

Πίνακας 4.8: Βαθμοί απόδοσης φυγοκεντρικής αντλίας

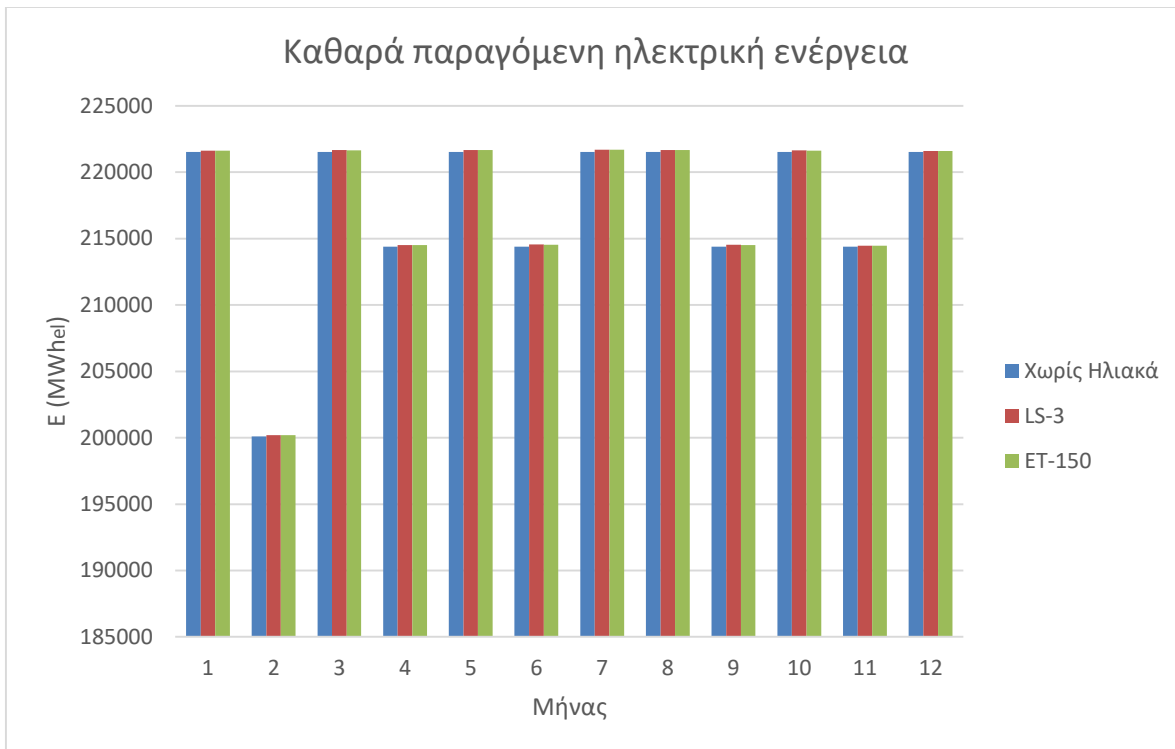
<b>Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης σε ονομαστικές συνθήκες</b>	82 (%)
<b>Ηλεκτρομηχανικός βαθμός απόδοσης</b>	90 (%)

Τονίζεται στο σημείο αυτό ότι κατά τη διάρκεια της νύχτας η αντλία λειτουργεί στο 20% του ονομαστικού της φορτίου ώστε να διατηρούνται οι σωληνώσεις και οι συλλέκτες «θερμοί» και να αποφεύγονται θερμικές τάσεις λόγω απότομων μεταβολών της θερμοκρασίας. Όταν η θερμοκρασία του ρευστού πέσει κάτω από ένα καθορισμένο όριο μία εξωτερική πηγή θερμότητας χρησιμοποιείται ώστε να αποφεύγονται προβλήματα στερεοποίησης αυτού.

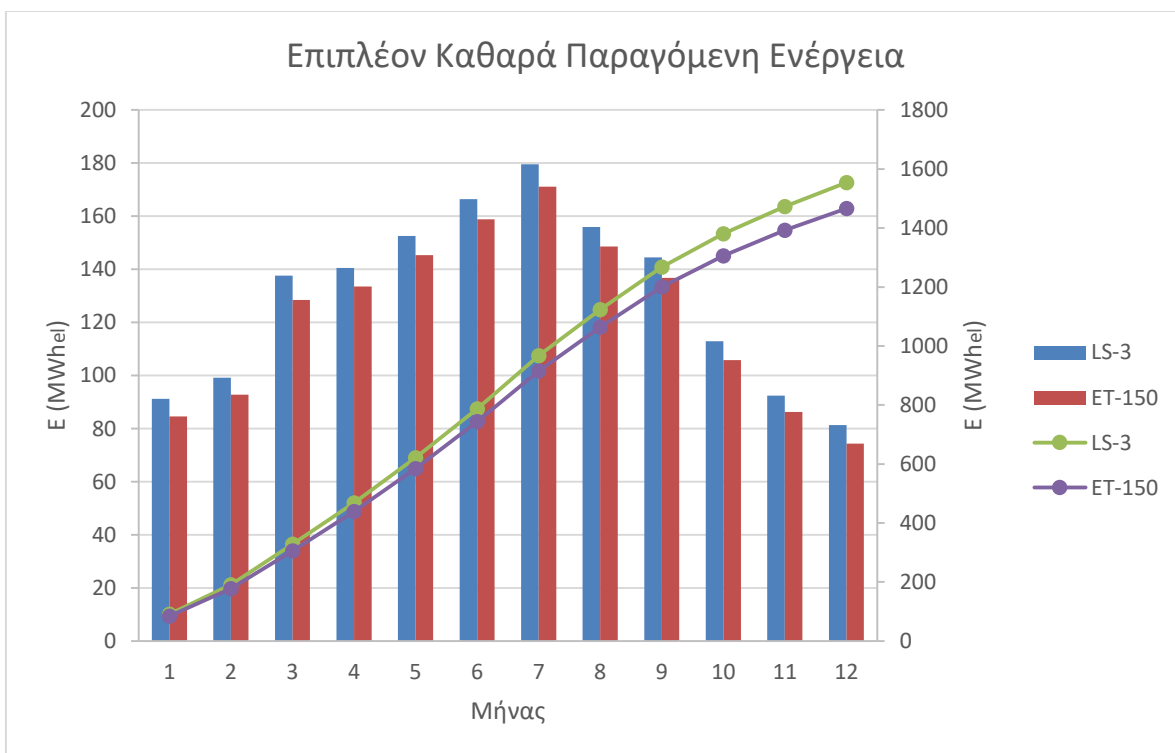
#### 4.5 Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια

Με βάση τα παραπάνω στα Σχήματα 4.17 και 4.18 φαίνονται τα αποτελέσματα της εγκατάστασης των ηλιακών συστημάτων στην παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια.





Σχήμα 4.17: Σύγκριση καθαρά παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας



Σχήμα 4.18: Σύγκριση επιπλέον καθαρά παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω η επιπλέον ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από το ηλιακό πεδίο με τους συλλέκτες LS-3 είναι 1554,268 MWh<sub>el</sub>/year και από τους συλλέκτες ET-150 είναι 1466,467 MWh<sub>el</sub>/year. Αν και οι συλλέκτες ET-150 έχουν καλύτερα οπτικά χαρακτηριστικά από τους LS-3, η μεγαλύτερη κατανάλωση της αντλίας λόγω μεγαλύτερων απωλειών πίεσης έχει σαν συνέπεια την παραγωγή λιγότερης ηλεκτρικής ενέργειας ετησίως σε σύγκριση με το ηλιακό πεδίο των LS-3. Επιπλέον, στον Πίνακα 4.9 δίνονται οι ιδιοκαταναλώσεις των δύο ηλιακών πεδίων λόγω των φυγοκεντρικών αντλιών. Παρατηρείται η μεγαλύτερη κατανάλωση για το ηλιακό πεδίο με τους συλλέκτες ET-150 λόγω της μεγαλύτερης παροχής μάζας ελαίου που διαχειρίζεται.

Πίνακας 4.9: Ιδιοκαταναλώσεις ηλιακών πεδίων

Ηλιακό πεδίο	LS-3	ET-150
Ιδιοκαταναλώσεις	4,32 (%)	9,66 (%)

#### 4.6 Οικονομική αξιολόγηση

Το κόστος εγκατάστασης ενός σταθμού παραγωγής ενέργειας με χρήση Παραβολικών Κοίλων Συλλεκτών αποτελείται από

- Κόστος ηλιακού πεδίου
- Κόστος Συστήματος Παραγωγής Ενέργειας
- Κόστος Συστήματος Αποθήκευσης
- Κόστος μελέτης - κατασκευής
- Κόστος συντήρησης και λειτουργίας

Στην περίπτωση του υφιστάμενου ΑΗΣ που μελετάμε θα μας απασχολήσουν μόνο το κόστος του ηλιακού πεδίου, το κόστος μελέτης - κατασκευής και το κόστος συντήρησης και λειτουργίας. Τονίζεται στο σημείο αυτό ότι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας που παίζει καθοριστικό ρόλο για το συνολικό κόστος μίας τέτοιας εγκατάστασης είναι το ηλιακό δυναμικό της εξεταζόμενης περιοχής. Σε περιοχές με χαμηλό ηλιακό δυναμικό είναι απαραίτητη η τοποθέτηση μεγαλύτερου αριθμού συλλεκτών προκειμένου να έχουμε την απαραίτητη συλλογή ηλιακής ενέργειας. Το αυξημένο μέγεθος του ηλιακού πεδίου συνεπάγεται το αυξημένο κόστος της συνολικής εγκατάστασης.

##### Κόστος ηλιακού πεδίου

Το ηλιακό πεδίο αποτελεί το μεγαλύτερο τμήμα της εγκατάστασης και συνήθως αποτελεί το 50% του συνολικού κόστους αυτής [64]. Από αυτό αιτιολογείται η αύξηση του συνολικού κόστους της εγκατάστασης για περιοχές με χαμηλό ηλιακό δυναμικό. Το κόστος αυτό είναι περίπου ίσο με 178 €/m<sup>2</sup> επιφάνειας του συλλέκτη [65]. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το κόστος του συλλέκτη ET-150 είναι κατά 14% μικρότερο σε σχέση με αυτό του LS-3, δηλαδή 156 €/m<sup>2</sup>.

### Κόστος μελέτης - κατασκευής

Το κόστος μελέτης – κατασκευής αποτελεί συνήθως το 15% του συνολικού κόστους της εγκατάστασης [38, 64], το οποίο είναι σύμφωνο και με την οδηγία της P.A.E.. Επίσης, το κόστος κτήσης της Γης θεωρούμε ότι είναι ίσο με 3 €/m<sup>2</sup> [66].

### Κόστος συντήρησης και λειτουργίας

Στο κόστος αυτό συμπεριλαμβάνονται το απαραίτητο κόστος συντήρησης του τεχνολογικού εξοπλισμού καθώς και το κόστος των εργαζομένων. Τυπική τιμή του κόστους συντήρησης και λειτουργίας τέτοιων Σταθμών είναι 1% του συνολικού κόστους επένδυσης.

### Κόστος εναλλάκτη θερμότητας

Ο εναλλάκτης θερμότητας μέσω του οποίου μεταφέρεται θερμότητα από το ηλιακό πεδίο στο τροφοδοτικό νερό, έχει ισχύ  $\dot{Q} = 13991,25 \text{ kW}_{th}$  και επιφάνεια συναλλαγής  $A=241,112 \text{ m}^2$ . Η σχέση υπολογισμού του κόστους του εναλλάκτη προκύπτει σύμφωνα με τη διδακτορική διατριβή του Κωνσταντίνου Μπραϊμάκη ο οποίος παρεμβάλει τα σημεία (κόστη) από την εταιρεία *Alfa Laval* στο διάγραμμα επιφανείας συναλλαγής και κόστους εναλλάκτη [67, 68]. Η σχέση αυτή είναι,

$$C_{HEX}(\text{€}) = 1100,39 \cdot A^{0,644}$$

όπου η επιφάνεια συναλλαγής,  $A$ , δίνεται σε m<sup>2</sup>. Επίσης, θεωρούμε ότι το κόστος συντήρησης του εναλλάκτη είναι  $0,5\% \cdot C_{HEX}$ .

### Κόστος φυγοκεντρικής αντλίας

Ο υπολογισμός του κόστους των αντλιών έγινε με βάση την σχέση που έχει καταλήξει ο Marco Astolfi στην διδακτορική του διατριβή [67]. Η σχέση αυτή περιλαμβάνει το κόστος του ηλεκτρικού κινητήρα της αντλίας (motor pump drive) και συνάδει με τις πιο δημοφιλείς σχέσεις του Turton και του NETL σε εύρος ισχύος αντλιών από 1kW – 1MW [60]. Σύμφωνα με τη μεθοδολογία αυτή είναι,

$$\log_{10}(C_{pump}) = K_1 + K_2 \cdot \log_{10}(Q) + K_3 \cdot (\log_{10}(Q))^2$$

Όπου

- $C_{pump}$ (€) το κόστος της αντλίας
- $K_1 = 3,985497, K_2 = 0,000294, K_3 = 0,143086$  σταθερές
- $Q$  χαρακτηριστικό μέγεθος. Στην περίπτωση μας η ονομαστική ισχύς της αντλίας σε kW

Επίσης, θεωρούμε ότι το κόστος συντήρησης της αντλίας είναι ίσο με  $0,5\% \cdot C_{pump}$ .

Στον Πίνακα 4.10 δίνονται τα συνολικά κόστη για τα δύο διαφορετικά ηλιακά πεδία.

Πίνακας 4.10: Οικονομικά στοιχεία των δύο ηλιακών πεδίων

Τύπος συλλέκτη	LS-3	ET-150
Κόστος ηλιακού πεδίου	5.741.568,00 €	5.246.633,30 €
Κόστος μελέτης – κατασκευής	861.235,20 €	786.995,00 €
Κόστος Γης	262.548,00 €	272.646,00 €
Κόστος εναλλάκτη θερμότητας	61.811,81 €	61.811,81 €
Κόστος φυγοκεντρικής αντλίας	20.763,50 €	32.368,54 €
<b>Σύνολο</b>	<b>6.947.926,51 €</b>	<b>6.400.454,65 €</b>
Κόστος συντήρησης & λειτουργίας	69.892,14 €	64.475,45 €

#### Οικονομικοί δείκτες

Η απόφαση για την προώθηση μίας επένδυσης είναι ιδιαίτερα σημαντική και επομένως είναι απαραίτητη η διερεύνηση της χρηματό-οικονομικής αποδοτικότητας του εξεταζόμενου σχεδίου επένδυσης, για τον ίδιο τον επενδυτή. Οι οικονομικοί δείκτες που θα χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση των επενδύσεων είναι η Καθαρή Παρούσα Αξία (Net Present Value, NPV), ο Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (Internal Rate of Return, IRR) και ο Χρόνος Αποπληρωμής της επένδυσης με προεξόφληση (Discounted Payback Period, DPP). Επιπλέον, θα υπολογιστεί το Ανηγμένο Κόστος Παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας (Levelized Cost Of Energy, LCOE).

#### Levelized Cost Of Energy (LCOE)

Ένα μέγεθος που χρησιμοποιείται ευρύτατα για την οικονομική αξιολόγηση επενδύσεων Σταθμών Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας (συμβατικών, Α.Π.Ε. κλπ) είναι το κόστος της παραγόμενης ενέργειας, LCOE, που δίνεται από τον τύπο,

$$LCOE \left( \frac{\text{€}}{MWh_{el}} \right) = \frac{R \cdot C_{inv} + C_{OM}}{E_{net}}$$

όπου

$C_{inv}$  (€) το συνολικό κόστος επένδυσης

$C_{OM} \left( \frac{\text{€}}{\text{year}} \right)$  το ετήσιο κόστος συντήρησης και λειτουργίας

$R = \frac{i}{1-(1+i)^{-N}}$  ο συντελεστής αναγωγής,  $i=8\%$  το επιτόκιο αναγωγής και  $N=25$  ο χρονικός ορίζοντας της επένδυσης

$E_{net} \left( \frac{MWh_{el}}{\text{year}} \right)$  η ετήσια καθαρή παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια

Τα αποτελέσματα δίνονται στον Πίνακα 4.11.

Πίνακας 4.11: Levelized Cost Of Energy για τα δύο ηλιακά πεδία

Ηλιακό πεδίο	LS-3	ET-150
LCOE (€/MWh <sub>el</sub> )	463,73	452,83

### Τιμή πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας

Σύμφωνα με το Άρθρο 2 του Σχεδίου Νόμου «Νέο καθεστώς στήριξης των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και Συμπαραγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας Υψηλής Απόδοσης» που ισχύει από τις 27/6/2016, η τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία προέρχεται από την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας από Ηλιοθερμικούς Σταθμούς χωρίς σύστημα αποθήκευσης θερμότητας, είναι 257 €/MWh<sub>el</sub> [69].

Όπως είναι φανερό από τα παραπάνω, η τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας είναι μικρότερη από αυτή που στοιχίζει στον Σταθμό να την παράξει, συνεπώς η επένδυση κρίνεται εξ' ορισμού μη αποδοτική. Στη συνέχεια θα εξεταστούν δύο σενάρια.

### Σενάριο 1<sup>ο</sup>

Αρχικά, θα θεωρήσουμε ότι θα γίνει επιδότηση της υπάρχουσας τιμής πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας και θα υπολογιστούν οι οικονομικοί δείκτες NPV, IRR και Payback Period για τα δύο διαφορετικά ηλιακά πεδία.

### Σενάριο 2<sup>ο</sup>

Στο σενάριο αυτό θα θεωρήσουμε ότι θα γίνει ταυτόχρονα επιδότηση της τιμής πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας και επιχορήγηση του αρχικού κόστους επένδυσης. Θα υπολογιστεί η συσχέτιση των δύο αυτών μεγεθών ώστε η επένδυση να κριθεί οριακά συμφέρουσα, δηλαδή να γίνει η NPV οριακά θετική και ο IRR οριακά μεγαλύτερος του επιτοκίου αναγωγής της μελέτης.

### Ετήσια έσοδα

Τα Έσοδα προκύπτουν από την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας που προέρχεται από το ηλιακό πεδίο στο δίκτυο και το κόστος αποφυγής των εκπομπών CO<sub>2</sub> λόγω χρήσης της ηλιακής ενέργειας. Το κόστος εκπομπών CO<sub>2</sub> θεωρείται ίσο με 25,15 €/tCO<sub>2</sub>.

Για τον Σταθμό ΑΗΣ Μελίτη, οι εκπομπές CO<sub>2</sub> είναι,

$$M_{CO_2} \left( \frac{t_{CO_2}}{MWh_{el}} \right) = \frac{3,665 \frac{kgCO_2}{kgLignite} \cdot \gamma_C \cdot \dot{m}_A \cdot 3600 \frac{sec}{h} \cdot 8760 \frac{h}{year} \cdot \frac{1}{1000} \frac{kg}{t}}{P_{el} \cdot 8760 \frac{h}{year}}$$

όπου

$\gamma_C = 22,58\%$  η περιεκτικότητα του λιγνίτη σε Άνθρακα

$\dot{m}_A = 100,5 \frac{kg}{sec}$  η κατανάλωση λιγνίτη του Σταθμού

$P_{el} = 302,5 MW_e$  η ισχύς του Σταθμού

Τελικά προκύπτει ότι  $M_{CO_2} = 0,990 \frac{tCO_2}{MWh_{el}}$ .

Στον Πίνακα 4.12 δίνονται οι εκπομπές CO<sub>2</sub> που αποφεύγονται από την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας για κάθε ηλιακό πεδίο.

Πίνακας 4.12: Αποφυγή CO<sub>2</sub> για κάθε ηλιακό πεδίο

Ηλιακό πεδίο	LS-3	ET-150
Αποφυγή CO <sub>2</sub> (tCO <sub>2</sub> /year)	1538,4	1451,5

#### Διάρκεια ζωής έργου – Ετήσια έξοδα απόσβεσης

Η διάρκεια ζωής του έργου ορίζεται στα N=25 έτη. Ως ετήσια έξοδα απόσβεσης ορίζουμε το πηλίκιο του αρχικού κόστους της επένδυσης (από ίδια κεφάλαια) προς την διάρκεια ζωής του έργου.

#### Επιτόκιο αναγωγής

Το επιτόκιο αναγωγής ή κόστος κεφαλαίου θεωρούμε ότι είναι ίσο με i=8%.

#### Ετήσια έξοδα

Ως ετήσια έξοδα θεωρούμε το κόστος συντήρησης και λειτουργίας, όπως έχει υπολογιστεί από στον Πίνακα 4.10.

#### Δεδομένα Δανείου

Θεωρούμε δάνειο διάρκειας n=25 ετών με επιτόκιο δανεισμού j=8%. Το ποσό του δανείου είναι ίσο με το 20% του συνολικού κόστους της επένδυσης. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των δόσεων του δανείου είναι αυτή των ισόποσων τοκοχρεολυσίων.

#### Φορολογία

Ο συντελεστής Φορολογία που χρησιμοποιήθηκε είναι ίσος με 29%.

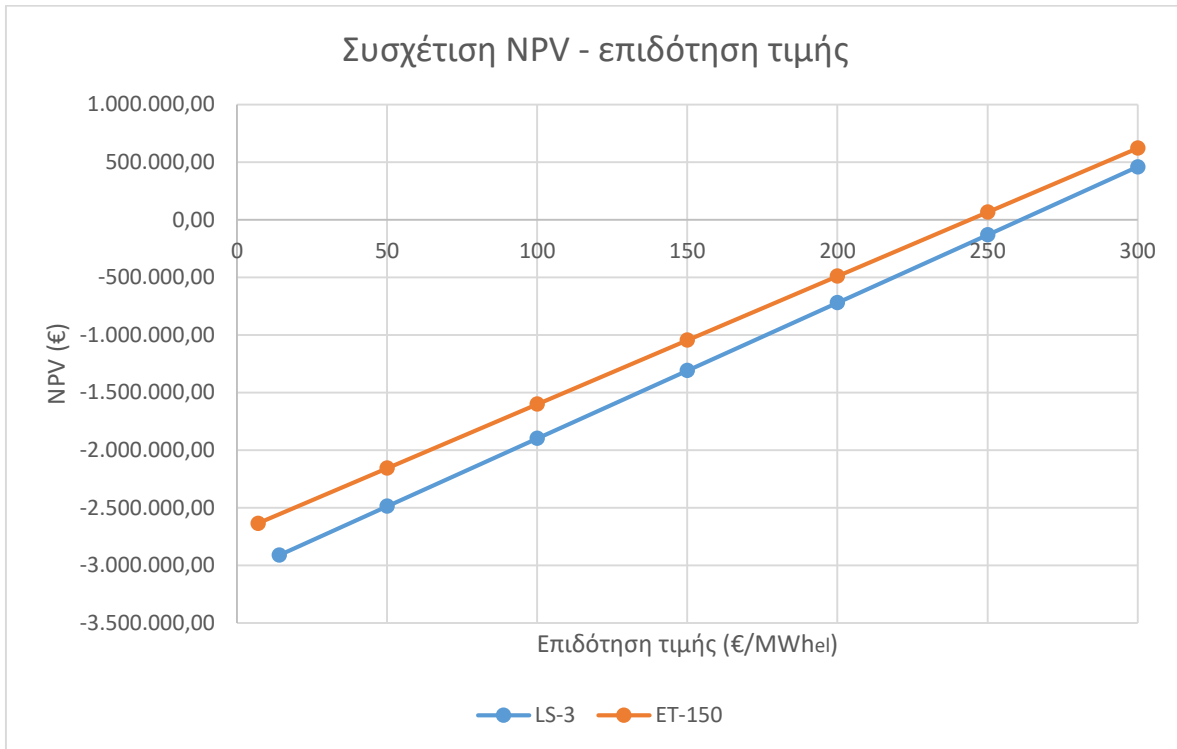
#### Χρηματοροές – Καθαρό Κέρδος

Αρχικά, για κάθε έτος αφαιρούνται από τα ετήσια έσοδα τα ετήσια κόστη συντήρησης και λειτουργίας, τα ετήσια έξοδα απόσβεσης και οι τόκοι του δανείου. Στο ποσό αυτό επιβάλλεται φορολογία για να προκύψουν τα καθαρά κέρδη. Στη συνέχεια στα καθαρά κέρδη προστίθενται τα ετήσια έξοδα απόσβεσης και αφαιρούνται τα χρεολύσια του δανείου για να προκύψει το καθαρό αποτέλεσμα. Με βάση αυτό το καθαρό αποτέλεσμα υπολογίζεται η Καθαρή Παρούσα Αξία, ο Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης και η Έντοκη Περίοδος Αποπληρωμής.

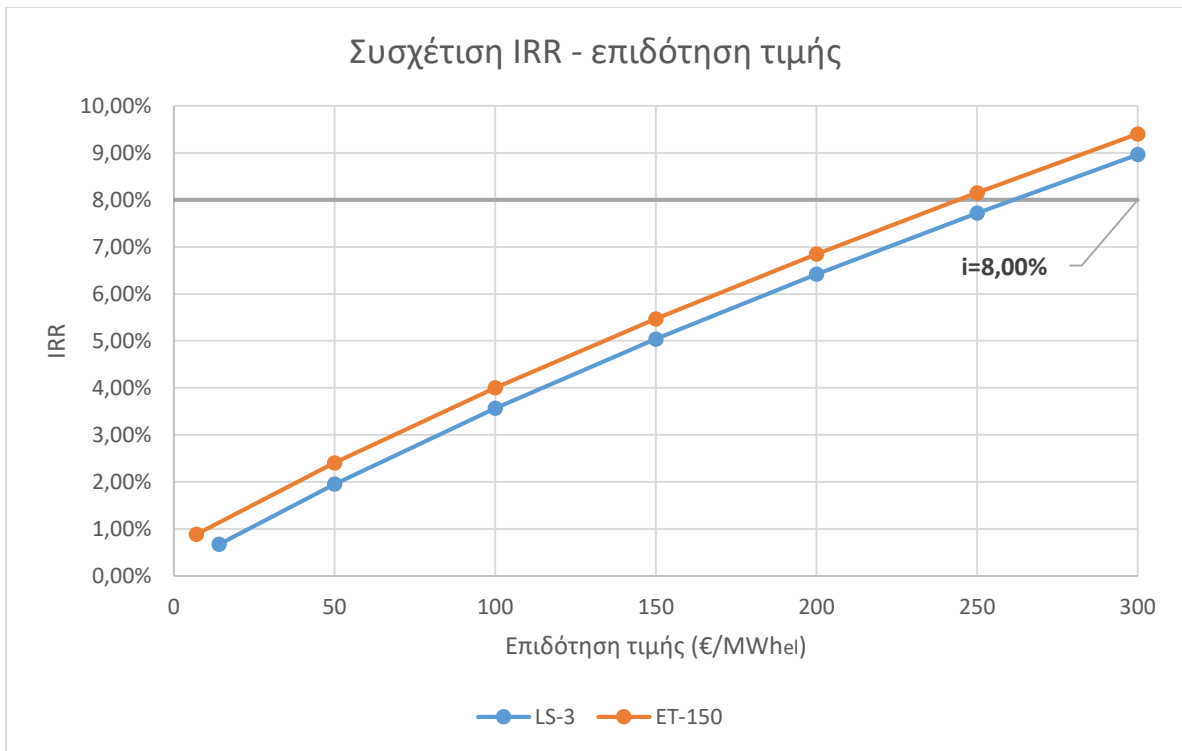
#### Αποτελέσματα 1<sup>ου</sup> σεναρίου

Στα Σχήματα 4.19, 4.20 και 4.21 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα με βάση την παραπάνω ανάλυση. Όπως φαίνεται, η Καθαρά Παρούσα Αξία αρχίζει να γίνεται θετική για τιμή επιδότησης κοντά στα 250 €/MWh<sub>el</sub> και για τα δύο ηλιακά πεδία, δηλαδή τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας τουλάχιστον 507 €/MWh<sub>el</sub>. Ομοίως, για την ίδια τιμή επιδότησης παρατηρείται η τιμή του IRR να ξεπερνάει το όριο του επιτοκίου αναγωγής της μελέτης (8%) και κατά συνέπεια να κρίνεται βιώσιμη. Τέλος, από το Σχήμα 4.21 φαίνεται ότι για την ίδια τιμή επιδότησης ο χρόνος αποπληρωμής της κάθε επένδυσης είναι κοντά στα

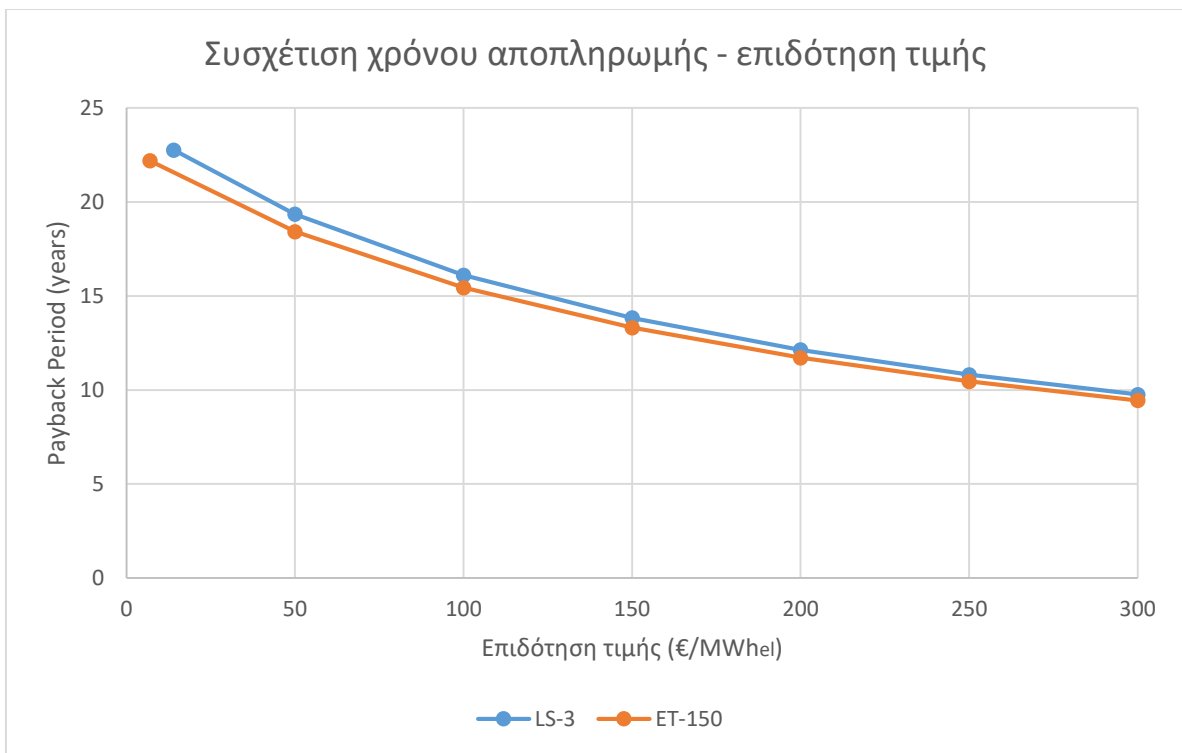
10 έτη, η οποία κρίνεται ικανοποιητική με βάση τη χρονική διάρκεια αυτής. Ελαφρώς καλύτερα αποτελέσματα παρουσιάζει η περίπτωση με το ηλιακό πεδίο των συλλεκτών ET-150.



Σχήμα 4.19: Συσχέτιση NPV και επιδότηση τιμής ηλεκτρικής ενέργειας



Σχήμα 4.20: Συσχέτιση IRR και επιδότηση τιμής ηλεκτρικής ενέργειας

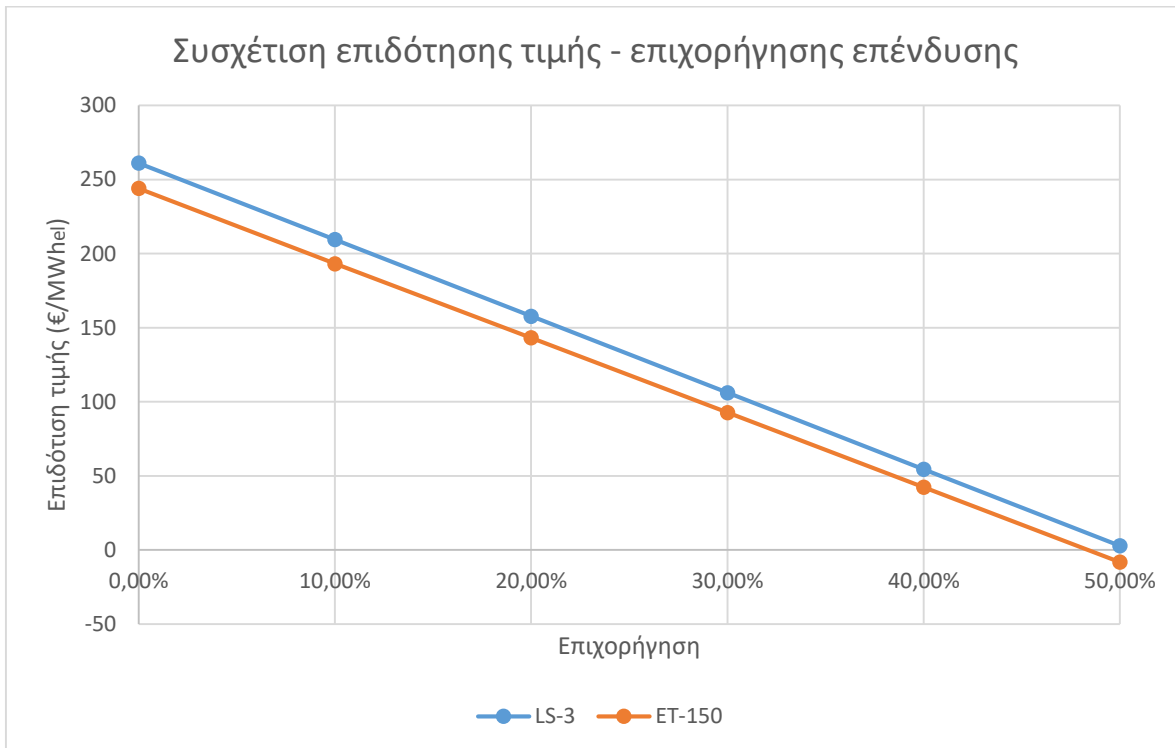


Σχήμα 4.21: Συσχέτιση χρόνου αποπληρωμής και επιδότηση τιμής ηλεκτρικής ενέργειας

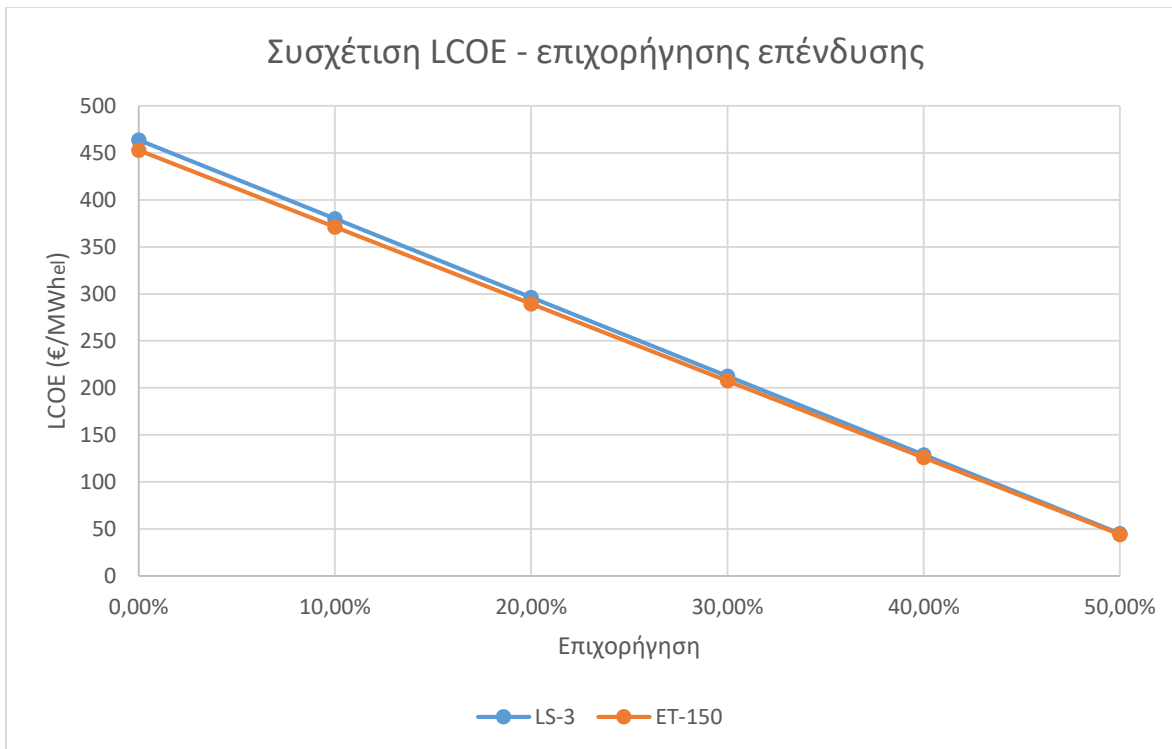


## Αποτελέσματα 2<sup>ου</sup> σεναρίου

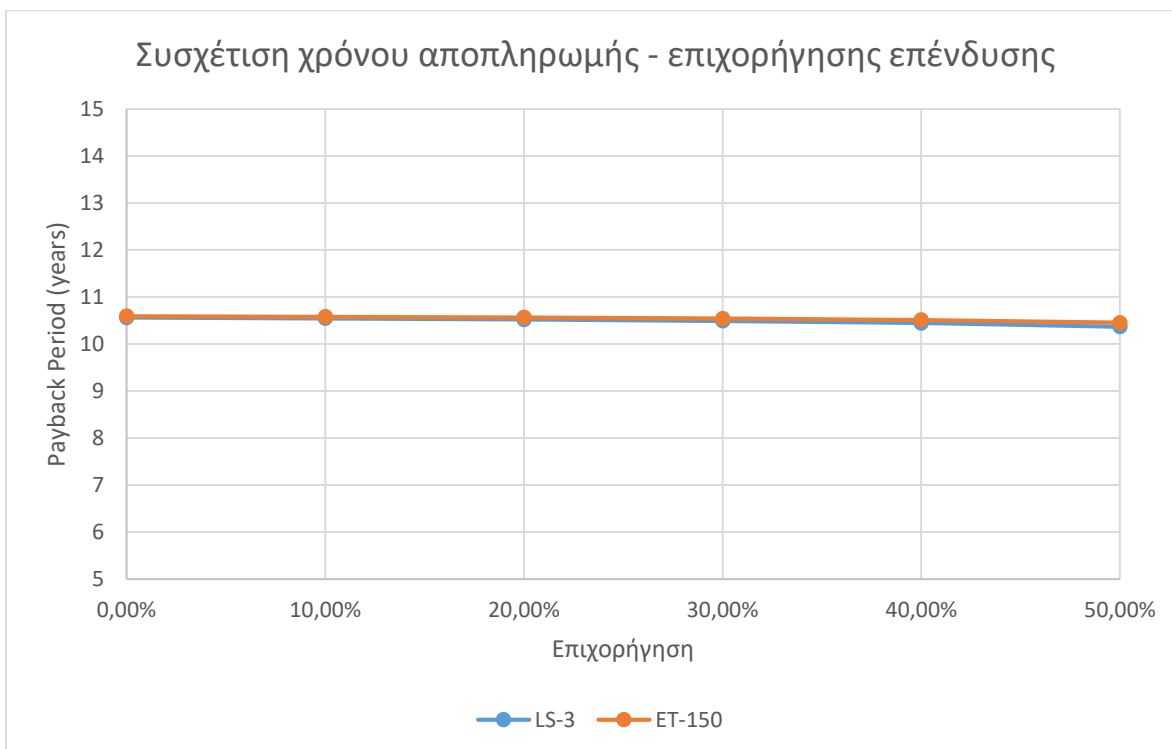
Στην περίπτωση αυτή εξετάζεται το ενδεχόμενο της ταυτόχρονης επιδότησης της τιμής πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας και επιχορήγησης του αρχικού ποσού της επένδυσης. Κριτήριο για τους υπολογισμούς είναι η NPV να είναι οριακά μεγαλύτερη του μηδενός και ο IRR οριακά μεγαλύτερος του 8% ώστε η επένδυση να αρχίσει να γίνεται βιώσιμη. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.22, 4.23 και 4.24. Όπως αναμενόταν, παρατηρείται μείωση της τιμής επιδότησης με αύξηση του ποσοστού της επιχορήγησης. Μάλιστα, για επιχορήγηση κοντά στο 50% του αρχικού ποσού της επένδυσης δεν χρειάζεται επιδότηση της τιμής για να χαρακτηριστούν οι επενδύσεις οριακά βιώσιμες. Επίσης, παρατηρείται μείωση του LCOE με την αύξηση της επιχορήγησης και μάλιστα φτάνει σε αρκετά χαμηλά επίπεδα για ποσοστά κοντά στο 50%. Τέλος, στο Σχήμα 4.24 δίνεται η μεταβολή του χρόνου αποπληρωμής της επένδυσης σε σχέση με το ποσοστό επιχορήγησης. Όπως φαίνεται δεν παρατηρείται κάποια ουσιαστική διαφορά ανάμεσα στα δύο ηλιακά πεδία και ο χρόνος αποπληρωμής είναι σχεδόν σταθερός και ίσος με  $\approx 10,5$  έτη. Αυτό οφείλεται στο ότι κατά την αύξηση της επιχορήγησης κατά ένα ποσοστό έχουμε την ταυτόχρονη μείωση της τιμής επιδότησης κατά ένα ίσο ποσοστό.



Σχήμα 4.22: Συσχέτιση επιδότηση τιμής ηλεκτρικής ενέργειας και επιχορήγησης



Σχήμα 4.23: Συσχέτιση LCOE και επιχορήγησης



Σχήμα 4.24: Συσχέτιση χρόνου αποπληρωμής και επιχορήγησης

## Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup> Καύση βιομάζας στον ΑΗΣ Μελίτη

### 5.1 Γενικά

Λόγω των προβλεπόμενων συνεπειών της κλιματικής αλλαγής, οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου είναι μακράν το μεγαλύτερο πρόβλημα στη μετατροπή της ενέργειας. Επομένως, το σημαντικότερο κριτήριο για την οικολογική αποτίμηση ενός ενεργειακού συστήματος είναι αναμφίβολα οι σχετικές με την παραγόμενη θερμότητα εκπομπές CO<sub>2</sub>.

Ένα αποτελεσματικό μέτρο για τη μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> είναι η αύξηση της θερμικής απόδοσης μίας διαδικασίας. Η μείωση της σχετικής με το παραγόμενο έργο ή θερμότητας κατανάλωσης καυσίμου, οδηγεί στη μείωση των εκπεμπόμενων κατά την καύση, εκπομπών CO<sub>2</sub>. Επίσης, οι εκπομπές CO<sub>2</sub> μπορούν να μειωθούν όταν γίνεται χρήση καυσίμων με χαμηλή ή μηδενική περιεκτικότητα σε CO<sub>2</sub> ή μέσω της αύξησης του βαθμού αξιοποίησης του καυσίμου. Πολύ σημαντική είναι και η σύνθεση του καυσίμου. Πλούσια σε υδρογόνο καύσιμα, όπως το μεθάνιο (CH<sub>4</sub>), η βιομάζα ή άλλοι υδρογονάνθρακες, οφείλουν ένα μεγάλο μέρος της απελευθερωμένης θερμότητας καύσης, στην καύση του δεσμευμένου στο καύσιμο υδρογόνου. Αυτό έχει ως συνέπεια την απελευθέρωση μικρότερης ποσότητας CO<sub>2</sub> ανά μονάδα θερμικής κλοβατώρας καυσίμου.

Στον Πίνακα 5.1, δίνονται οι ποσότητες CO<sub>2</sub> που απελευθερώνονται ανά μετατρεπόμενη κλοβατώρα θερμότητας καυσίμου. Γίνεται σαφές ότι οι ειδικές εκπομπές CO<sub>2</sub> είναι υψηλότερες στην περίπτωση του λιγνίτη λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα και της χαμηλής Θερμογόνου Ικανότητας [70].

Πίνακας 5.1: Ειδικές εκπομπές CO<sub>2</sub> ορυκτών καυσίμων [70]

Καύσιμο	Κατώτερη Θερμογόνου Ικανότητα [kJ/kg]	Ειδικές εκπομπές CO <sub>2</sub> [kg/kWh <sub>th</sub> ]
Λιθάνθρακας	29000-33000	0,34-0,35
Λιγνίτης	8000-12000	0,37-0,43
Πετρέλαιο	42600	0,26
Φυσικό αέριο	50015	0,20

### 5.2 Μεικτή καύση περισσότερων καυσίμων

Η πιο αποτελεσματική προσέγγιση για την αξιοποίηση μεγάλων ποσοτήτων βιοκαυσίμων με υψηλή απόδοση σε συμβατικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής, είναι η μεικτή καύση βιομάζας σε υφιστάμενες μονάδες ηλεκτροπαραγωγής με καύση άνθρακα. Μεικτή καύση είναι η ταυτόχρονη καύση δύο ή περισσότερων καυσίμων στην ίδια μονάδα για την παραγωγή ενός ή περισσότερων ενεργειακών φορέων. Η μεικτή καύση αναφέρεται συνήθως στη μερική υποκατάσταση του άνθρακα από βιομάζα σε μία υφιστάμενη ανθρακική μονάδα και χωρίζεται σε άμεση, έμμεση και παράλληλη.

Κατά την άμεση μεικτή καύση η βιομάζα (ξυλώδης, ποώδης, απορρίμματα κ.α.) και ο άνθρακας καίγονται στην ίδια εστία, με χρήση ίδιων ή διαφορετικών μύλων και καυστήρων, ανάλογα με την περίπτωση. Στα θετικά αυτής της περίπτωσης είναι η γρήγορη υλοποίηση και το χαμηλό κόστος, ενώ στα

αρνητικά συγκαταλέγονται ο περιορισμός στο ποσοστό υποκατάστασης του καυσίμου (θερμική συνεισφορά ξυλώδους βιομάζας έως και 20%) και η ανάμειξη της τέφρας. Πρόκειται για την εφαρμογή με τις περισσότερες βιομηχανικές αναφορές (περισσότερες από 100) σε σχέση με τις άλλες δύο περιπτώσεις.

Στην περίπτωση της έμμεσης μεικτής καύσης γίνεται αεριοποίηση της βιομάζας για την παραγωγή συνθετικού αερίου (Syngas) και στη συνέχεια καύση του συνθετικού αερίου στον ανθρακικό λέβητα. Με τον τρόπο αυτό δεν υπάρχει πρόβλημα με την ανάμειξη της τέφρας (τα αέρια καύσιμα δεν περιέχουν τέφρα) ενώ η θερμική συνεισφορά της βιομάζας μπορεί να φτάσει και το 40%. Επιπλέον, μπορεί να γίνει αξιοποίηση πιο «δύσκολων» καυσίμων, όπως η απορριπτόμενη ξυλεία και τα κλάσματα απορριμμάτων. Στα μειονεκτήματα της περίπτωσης αυτής περιλαμβάνεται το υψηλό κόστος λόγω της εγκατάστασης του αεριοποιητή.

Κατά την παράλληλη καύση υπάρχει ξεχωριστός λέβητας για την καύση της βιομάζας, ο οποίος είναι συζευγμένος με τον ανθρακικό λέβητα στον κύκλο ατμού. Λόγω της καύσης των διαφορετικών καυσίμων σε ξεχωριστούς λέβητες δεν τίθεται περιορισμός ως προς την θερμική υποκατάσταση του λιγνίτη και δεν γίνεται ανάμειξη της τέφρας. Υπάρχει μεγάλο εύρος ως προς το καύσιμο της βιομάζας, συμπεριλαμβανομένων και ορισμένων «δύσκολων» καυσίμων, όπως το άχυρο. Επίσης, ο βαθμός απόδοσης των μονάδων αυτών είναι υψηλότερος σε σχέση με τις μονάδες που κάνουν αποκλειστική καύση βιομάζας, ενώ το κόστος τους είναι μεν υψηλό, αλλά όχι τόσο όσο μιας νέας μονάδας βιομάζας.

Η μεικτή καύση κερδίζει ολοένα και περισσότερο έδαφος τα τελευταία χρόνια λόγω των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει. Η δυνατότητα επιλογής φθηνότερων καυσίμων από τον άνθρακα, όπως η απορριπτόμενη ξυλεία, τα ενεργειακά φυτά, τα απορρίμματα κ.α. αποτελεί ισχυρό κίνητρο. Επιπλέον οικονομικά κίνητρα προκύπτουν από τις Εγγυημένες Τιμές (Feed In Tariffs) και τα Πράσινα Πιστοποιητικά (Green Certificates) που παρέχονται σε όσους κάνουν χρήση βιομάζας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης, το μεταβλητό κόστος των συμβατικών μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μειώνεται σημαντικά όταν γίνεται υποκατάσταση του συμβατικού καυσίμου με βιομάζα, λόγω των μειωμένων εκπομπών CO<sub>2</sub>. Μάλιστα, ο φόρος εκπομπής CO<sub>2</sub> έχει εκτοξευτεί από τα 4 €/tCO<sub>2</sub> στα μέσα του 2017, στα 25,15 €/tCO<sub>2</sub> τον Φεβρουάριο του 2020, ενώ αναμένεται να φτάσει τα 40 €/tCO<sub>2</sub> το 2023 [71]. Τέλος, ο βαθμός απόδοσης των ανθρακικών μονάδων είναι μεγαλύτερος σε σχέση με τις μονάδες που καίνε αποκλειστικά βιομάζα, ενώ και το κόστος της μεικτής καύσης είναι μικρότερο σε σύγκριση με το κόστος κατασκευής μιας νέας μονάδας βιομάζας (500\$/kW<sub>e</sub> έναντι 2,500 – 4,500 \$/kW<sub>e</sub>).

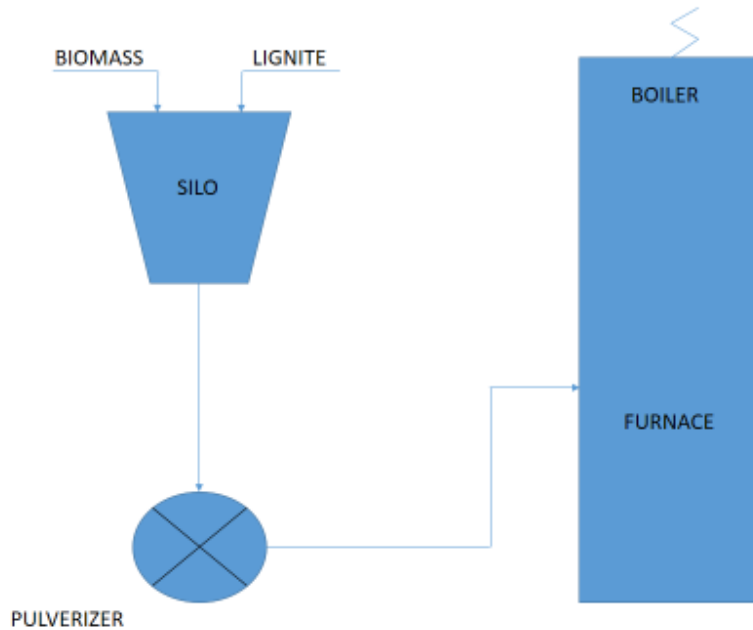
Παρά τα πλεονεκτήματα της, η μεικτή καύση δεν υιοθετείται από όλες τις ανθρακικές μονάδες, καθώς υπάρχουν θέματα που σχετίζονται με τη διαθεσιμότητα της βιομάζας, την ύπαρξη οικονομικών κινήτρων για την κάλυψη του αυξημένου κόστους του βιοκαυσίμου ή ζητήματα αειφορίας αυτού. Παράλληλα, η εφαρμογή της μεικτής καύσης δημιουργεί ορισμένες σημαντικές τεχνικές και περιβαλλοντικές προκλήσεις που σχετίζονται με τη διαχείριση και μετατροπή του καυσίμου, την εμφάνιση φαινομένων επικαθίσεων και διάβρωσης, το σχηματισμό εκπομπών και την απόδοση των συστημάτων καθαρισμού καυσαερίων και τέλος την αξιοποίηση της παραγόμενης τέφρας.

### 5.3 Ανάλυση μεικτής καύσης

Παρακάτω αναλύεται η άμεση μεικτή καύση δύο καυσίμων, του λιγνίτη και ενός βιοκαυσίμου. Η μεικτή καύση θα πραγματοποιηθεί με μετασκευή του υπάρχοντα λέβητα, Εικόνα 5.1. Τα στοιχεία του λιγνίτη που χρησιμοποιείται στον ΑΗΣ Μελίτη φαίνονται στον Πίνακα 5.2. Η Κατώτερη Θερμογόνος Ικανότητα του είναι  $H_{u\lambda}=7955,0$  kJ/kg.

Πίνακας 5.2: Στοιχειακή ανάλυση λιγνίτη ΑΗΣ Μελίτη

Λιγνίτης	C	H	N	O	S	Ash	Moisture
Σύσταση ως έχει (%)	22,58	2,07	0,37	9,88	0,94	27,36	36,8



Εικόνα 5.1: Σχηματική αναπαράσταση άμεσης μεικτής καύσης

Η συμμετοχή του βιοκαυσίμου «Κ» στην ενέργεια που εκλύεται κατά την καύση του μίγματος λιγνίτη και βιοκαυσίμου είναι,

$$u_{\mu_K} = \frac{\dot{m}_K \cdot H_{u_K}}{\dot{m}_\lambda \cdot H_{u_\lambda} + \dot{m}_K \cdot H_{u_K}}$$

όπου,

- $u_{\mu_K}$  το ποσοστό συμμετοχής του βιοκαυσίμου στη θερμική ισχύ του μίγματος
- $\dot{m}_K$  ( $\frac{kg}{s}$ ) η παροχή μάζας του βιοκαυσίμου
- $\dot{m}_\lambda$  ( $\frac{kg}{s}$ ) η παροχή μάζας του λιγνίτη

- $H_{u_K}$  ( $\frac{kJ}{kg}$ ) η Θερμογόνος Ικανότητα του βιοκαυσίμου

Αντίστοιχα, το ποσοστό συμμετοχής του λιγνίτη στη θερμική ισχύ του μίγματος θα είναι,

$$u_{\mu_\Lambda} = \frac{\dot{m}_\Lambda \cdot H_{u_\Lambda}}{\dot{m}_\Lambda \cdot H_{u_\Lambda} + \dot{m}_K \cdot H_{u_K}}$$

Προφανώς θα ισχύει ότι,  $u_{\mu_\Lambda} + u_{\mu_K} = 1$

Η Θερμογόνος Ικανότητα του μίγματος του καυσίμου δίνεται από την σχέση,

$$\frac{1}{H_{u_\mu}} = \sum_i \frac{u_{\mu_i}}{H_{u_i}} = \frac{u_{\mu_\Lambda}}{H_{u_\Lambda}} + \frac{u_{\mu_K}}{H_{u_K}}$$

Επιπλέον, οι κατά μάζα περιεκτικότητες των δύο καυσίμων στο συνολικό μίγμα θα είναι,

$$\gamma_{\mu_K} = \frac{\dot{m}_K}{\dot{m}_{tot}} = u_{\mu_K} \cdot \frac{H_{u_\mu}}{H_{u_K}}$$

$$\gamma_{\mu_\Lambda} = \frac{\dot{m}_\Lambda}{\dot{m}_{tot}} = u_{\mu_\Lambda} \cdot \frac{H_{u_\mu}}{H_{u_\Lambda}}$$

όπου  $\dot{m}_{tot} = \dot{m}_\Lambda + \dot{m}_K$  η συνολική παροχή καυσίμου.

Οι εκπομπές  $CO_2$  της μεικτής καύσης είναι ανεξάρτητες των συνθηκών της καύσης (λόγος αέρα καύσης) και οφείλονται αποκλειστικά στην καύση του λιγνίτη, δηλαδή,

$$\mu_{CO_2} = 3,665 \cdot \gamma_{C_\Lambda} \cdot \gamma_{\mu_\Lambda} = 3,665 \cdot 0,2258 \cdot \gamma_{\mu_\Lambda} \quad \left( \frac{kg \ CO_2}{kg \ \mu\acute{\iota}\gamma\mu\alpha\tau\omicron\varsigma \ \kappa\alpha\upsilon\sigma\acute{\iota}\mu\omicron\upsilon} \right)$$

#### 5.4 Εξεταζόμενα βιοκαύσιμα

Τα βιοκαύσιμα που εξετάζονται για την υποκατάσταση του λιγνίτη είναι ενεργειακές καλλιέργειες από Αγριαγκινάρα (Cardoon), Μίσχανθο (Miscanthus), Παυλώνια (Paulownia), Ιτιά (Willow) και Λεύκη (Poplar). Η στοιχειακή ανάλυση των βιοκαυσίμων φαίνονται στον Πίνακα 5.3 [72]. Η υποκατάσταση του λιγνίτη θα γίνει με συμμετοχή του εκάστοτε βιοκαυσίμου στη θερμική ισχύ του μίγματος σε ποσοστά **5%**, **10%** και **15%**.

Πίνακας 5.3: Σύσταση ως έχει και Κατώτερη Θερμογόνος Ικανότητα βιοκαυσίμων

Βιοκαύσιμο	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	S (%)	Ash (%)	Moisture (%)	LHV (kJ/kg)
Αγριαγκινάρα	42,16	4,84	27,07	0,74	0,16	13,02	12,00	14050
Μίσχανθος	40,97	4,86	39,96	1,19	0,24	6,30	6,48	16080
Παυλώνια	45,78	5,19	39,45	0,34	0,24	0,85	8,15	16550
Ιτιά	46,25	5,50	39,21	0,68	0,31	1,81	6,25	18410
Λεύκη	45,91	5,67	43,33	0,74	0,029	1,66	2,66	17410

#### 5.4.1 Αγριαγκινάρα



Εικόνα 5.2: Καλλιέργεια Αγριαγκινάρας

Πρόκειται για ένα φυτό μεσογειακής προέλευσης, καλά προσαρμοσμένο στις ξηροθερμικές συνθήκες της Νότιας Ευρώπης. Η ανάπτυξη της αρχίζει με τις πρώτες βροχές του φθινοπώρου και συνεχίζεται, εκμεταλλευόμενη τις βροχές του χειμώνα και την άνοιξης, μέχρι τις αρχές του καλοκαιριού, όταν και η υγρασία του εδάφους μειωθεί σε πολύ χαμηλά επίπεδα. Τότε, το εναέριο τμήμα του φυτού αποξηραίνεται και μπορεί να συγκομισθεί ξηρό την περίοδο Ιουλίου – Σεπτεμβρίου. Η καλλιέργεια της είναι πολυετής και η σπορά του αγρού θα γίνει μία φορά στα 7 με 12 χρόνια. Επίσης, λόγω του γεγονότος ότι η Αγριαγκινάρα είναι η ίδια ισχυρό ζιζάνιο, δεν επιτρέπει την ανάπτυξη άλλων ζιζανίων, ενώ σε μακροχρόνια πειράματα δεν εμφανίστηκαν ασθένειες και εχθροί του φυτού κι έτσι η καλλιέργεια της μπορεί να επιτευχθεί χωρίς τη χρήση φυτοφαρμάκων.

Η καλλιέργεια της Αγριαγκινάρας παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον στη χώρα μας. Η ικανότητα της να αναπτύσσεται σε άγονα εδάφη καθώς και οι μηδαμινές ανάγκες της σε άρδευση, λίπανση και φυτοφάρμακα, την καθιστούν μία ελπιδοφόρα προοπτική για τους Έλληνες παραγωγούς με ελκυστικά περιθώρια κέρδους. Μάλιστα, χαρακτηρίζεται ως «Πετρέλαιο της Ελλάδας» και μπορεί να αποτελέσει τη μελλοντική ελληνική απάντηση στην Παγκόσμια αγορά των βιοκαυσίμων.

Η Αγριαγκινάρα, ως ενεργειακό φυτό, απορροφάει κατά την ανάπτυξη της τα αέρια του θερμοκηπίου που εκπέμπονται κατά την καύση της με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται ο λεγόμενος κλειστός κύκλος CO<sub>2</sub>. Στην αγορά διατίθεται συνήθως με την μορφή πελλετών (Pellets), δηλαδή μικρών κυλινδρικών τεμαχίων από συμπιεσμένο ξύλο Αγριαγκινάρας. Αξίζει να αναφερθεί ότι το 2010 στη Μακεδονία, επιδοτήθηκε η καλλιέργεια Αγριαγκινάρας για δύο χρόνια με τιμή 200 Ευρώ/στρέμμα και δεκάδες αγρότες της περιοχής έσπειραν με το πολυετές φυτό 4000 στρέμματα σε όλο το λεκανοπέδιο. Την περίοδο εκείνη έγινε

συλλογή της βιομάζας και παραδόθηκαν στη Δ.Ε.Η./ΑΗΣ Καρδιάς 1800 τόνοι ξηρής μάζας Αγριαγκινάρας, η οποία κάηκε σε μίγμα 8-10% με λιγνίτη. Ωστόσο, παρά τα θετικά αποτελέσματα τόσο για τη Δ.Ε.Η. όσο και για τους αγρότες, λόγω γραφειοκρατικών προβλημάτων την επόμενη χρονιά η Δ.Ε.Η. καθυστέρησε να δώσει τιμή αγοράς με αποτέλεσμα οι αγρότες να στραφούν σε άλλες καλλιέργειες [73].

Έχοντας καθορίσει το ποσοστό συμμετοχής του βιοκαυσίμου στη θερμική ισχύ του μίγματος,  $u_{\mu_K}$ , προκύπτει και το  $u_{\mu_A} = 1 - u_{\mu_K}$ . Στη συνέχεια υπολογίζεται η Θερμογόνος Ικανότητα του μίγματος και έπειτα οι κατά μάζα περιεκτικότητες των δύο καυσίμων,  $\gamma_{\mu_K}, \gamma_{\mu_A}$ .

Επομένως, η νέα σύσταση του μίγματος θα προκύψει ως,

$$\gamma_{\mu_i} = \gamma_{\mu_K} \cdot \gamma_{K_i} + \gamma_{\mu_A} \cdot \gamma_{A_i}$$

όπου  $\gamma_{K_i}$  και  $\gamma_{A_i}$  οι κατά μάζα περιεκτικότητες των συστατικών  $i$  του βιοκαυσίμου και του λιγνίτη αντίστοιχα, και  $i=C, H, O, N, S, Ash$  και Moisture. Τα χαρακτηριστικά των νέων μιγμάτων που προκύπτουν για την περίπτωση της Αγριαγκινάρας παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.4.

Πίνακας 5.4: Χαρακτηριστικά νέου μίγματος με βάση τη συμμετοχή της Αγριαγκινάρας

Νέο μίγμα καυσίμου	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	S (%)	Ash (%)	Moisture (%)	LHV (kJ/kg)
Συμμετοχή κατά 5%	23,15	2,15	10,38	0,38	0,92	26,94	36,08	8131,37
Συμμετοχή κατά 10%	23,74	2,23	10,90	0,39	0,89	26,51	35,33	8315,74
Συμμετοχή κατά 15%	24,36	2,32	11,44	0,40	0,87	26,06	34,55	8508,67

Αντικαθιστώντας τα παραπάνω δεδομένα στο λογισμικό «GateCycle» επαναλαμβάνονται διαδοχικές επαναλήψεις, μεταβάλλοντας την παροχή του καυσίμου, έως ότου η ισχύς του σταθμού γίνει ίση με 302,5 MW<sub>e</sub>. Αφού βρεθεί η νέα συνολική κατανάλωση καυσίμου υπολογίζονται και οι επί μέρους καταναλώσεις των δύο καυσίμων. Επίσης καταγράφεται και ο νέος βαθμός απόδοσης της μονάδας.

Εάν γίνει η υπόθεση ότι η εγκατάσταση λειτουργεί 7500 ώρες ετησίως, τότε οι εκπομπές CO<sub>2</sub> θα προκύψουν ως,

$$M_{CO_2} \left( \frac{tCO_2}{year} \right) = \mu_{CO_2} \cdot \dot{m}_A \cdot \frac{3600 \frac{sec}{h} \cdot 7500 \frac{h}{year}}{1000 \frac{kg}{t}}$$

Στο σημείο αυτό επισημαίνεται ότι οι εκπομπές CO<sub>2</sub> μειώνονται λόγω της μείωσης της κατανάλωσης του λιγνίτη εξαιτίας της μερικής θερμικής υποκατάστασης του από τα βιοκαύσιμα. Τα αποτελέσματα με την νέα Θερμογόνος Ικανότητα των μιγμάτων, την νέα κατανάλωση λιγνίτη, το νέο βαθμό απόδοσης της μονάδας και τις καινούργιες εκπομπές CO<sub>2</sub> δίνονται συγκεντρωμένα για όλα τα βιοκαύσιμα σε επόμενη παράγραφο.



#### 5.4.2 Μίσχανθος



Εικόνα 5.3: Καλλιέργεια Μίσχανθου

Ο Μίσχανθος είναι ένα πολυετές, ξυλώδες και ριζοειδές φυτό το οποίο προέρχεται από την Νότιο – Ανατολική Ασία, ενώ στην Ευρώπη έφτασε περισσότερο ως διακοσμητικό φυτό. Χρησιμοποιείται συχνά ως πρώτη ύλη σε δομικά υλικά, γεωυφάσματα καθώς επίσης και στην βιομηχανία χάρτου και συσκευασίας. Φυτεύεται την άνοιξη μία φορά και παραμένει για 15 με 20 χρόνια.

Επιπλέον, αποτελεί μία εξαιρετική ενεργειακή καλλιέργεια με μεγάλη απόδοση σε λιγνοκυτταρινούχα βιομάζα σε ετήσια βάση, καθόλη τη διάρκεια της ζωής του. Η συλλεγόμενη βιομάζα έχει συνήθως χαμηλό περιεχόμενο σε υγρασία, γεγονός σημαντικό ώστε να μεγιστοποιείται το κατά βάρος ενεργειακό της περιεχόμενο. Η καλλιέργεια του δεν έχει υψηλές απαιτήσεις σε άρδευση και θρεπτικά συστατικά [74]. Ιδιαίτερα μετά τον δεύτερο χρόνο που τα ριζίδια έχουν αναπτυχθεί αρκετά είναι ικανά να συγκρατούν μεγαλύτερες ποσότητες θρεπτικών συστατικών [75, 76]. Η συγκομιδή του τον πρώτο χρόνο δεν είναι οικονομικά συμφέρουσα λόγω μη επαρκούς ανάπτυξης της καλλιέργειας. Το φυτό ανθίζει κάθε χρόνο τον Μάρτιο, αναπτύσσεται μεταξύ Ιουνίου – Ιουλίου και τον χειμώνα ή στις αρχές της άνοιξης γίνεται η συγκομιδή του. Μετά τη συγκομιδή του οδηγείται σε μία μονάδα προεπεξεργασίας (φρύξη, υδροθερμική ανθρακοποίηση, έκρηξη ατμού, πελλετοποίηση) προκειμένου να αναβαθμιστεί η ενεργειακή του πυκνότητα και να διατεθεί στην αγορά.

Στον παρακάτω Πίνακα 5.5 δίνεται η νέα σύσταση και η Κατώτερη Θερμογόνος Ικανότητα του μίγματος λιγνίτη και Μίσχανθου, με βάση τη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε προηγουμένως.

Πίνακας 5.5: Χαρακτηριστικά νέου μίγματος με βάση τη συμμετοχή του Μίσχανθου

Νέο μίγμα καυσίμου	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	S (%)	Ash (%)	Moisture (%)	LHV (kJ/kg)
Συμμετοχή κατά 5%	23,05	2,14	10,64	0,39	0,92	26,83	36,03	8161,19
Συμμετοχή κατά 10%	23,54	2,22	11,45	0,41	0,90	26,26	35,22	8378,34
Συμμετοχή κατά 15%	24,06	2,29	12,30	0,43	0,88	25,67	34,37	8607,74

#### 5.4.3 Παυλώνια



Εικόνα 5.4: Καλλιέργεια Παυλώνας

Η Παυλώνια ή Παουλώνια ή Παουλώβνια (*Paulownia*) είναι δέντρο ιθαγενές της Ασίας (κυρίως Κίνα, Βιετνάμ και Λάος) και σήμερα καλλιεργείται σε όλες τις ηπείρους, εκτός από την Ανταρκτική. Πρόκειται για δέντρα ταχέως αναπτυσσόμενα που έχουν μεγάλη εμπορική αξία, καθώς καλλιεργούνται για την παραγωγή ξυλείας (ξύλο σκληρού τύπου) και βιομάζας.

Η Παυλώνια είναι ένα ταχυαυξές είδος δέντρου με μικρό αρχικό κόστος εγκατάστασης το οποίο έχει την ικανότητα να πρεμνοβλαστάνει και συνεπώς είναι κατάλληλο για χρήση σε ενεργειακές καλλιέργειες [77]. Η φύτευση γίνεται συνήθως τέλη Φεβρουαρίου με αρχές Μαρτίου. Πριν την φύτευση συνίσταται μία καλή προπαρασκευή/κατεργασία του εδάφους για την βελτίωση της δομής του και την καλύτερη επαφή του με το ριζικό σύστημα του δέντρου. Τα δέντρα αυτά χρειάζονται αρκετό νερό κατά την θερινή και ξηρή περίοδο, τουλάχιστον τα 3 πρώτα έτη και ψέκασμα με εντομοκτόνα κατά τους μήνες Μάιο/Ιούνιο λόγω φυλλοφάγων εντόμων. Σύμφωνα με το Ινστιτούτο Δασικών Ερευνών, διαπιστώνεται ότι η παραγωγή βιομάζας από ενεργειακές φυτείες Παυλώνας παρουσιάζει θετικό ισολογισμό και μπορεί να αποτελέσει μια κερδοφόρα και σταθερή επένδυση.

Στον Πίνακα 5.6 δίνονται τα νέα χαρακτηριστικά του μίγματος καυσίμου λιγνίτη και Παυλώνας.

Πίνακας 5.6: Χαρακτηριστικά νέου μίγματος με βάση τη συμμετοχή της Παυλώνιας

Νέο μίγμα καυσίμου	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	S (%)	Ash (%)	Moisture (%)	LHV (kJ/kg)
Συμμετοχή κατά 5%	23,15	2,15	10,61	0,37	0,92	26,71	36,09	8167,76
Συμμετοχή κατά 10%	23,76	2,23	11,38	0,37	0,90	26,01	35,35	8390,76
Συμμετοχή κατά 15%	24,39	2,31	12,19	0,37	0,88	25,29	34,56	8627,05

#### 5.4.4 Ιτιά



Εικόνα 5.5: Καλλιέργεια και συγκομιδή Ιτιάς

Ένα ξυλώδες φυτό, το οποίο θεωρείται μια πολλά υποσχόμενη πηγή καυσίμου είναι η Ιτιά. Η Ιτιά αναπτύσσεται καλύτερα σε κρύες και υγρές περιοχές, κυρίως στο Βόρειο Ημισφαίριο, ενώ μόνο λίγα είδη μεγαλώνουν στο Νότιο Ημισφαίριο. Η συγκομιδή της μπορεί να γίνει πάνω από έξι φορές στη διάρκεια 3-5 ετών, αφού η βιομάζα της αυξάνεται σε μικρό χρονικό διάστημα. Επιπλέον, μπορεί να αναπτυχθεί με ελάχιστες απαιτήσεις σε λίπανση.

Μετά την συγκομιδή της, η Ιτιά μπορεί να αναβλαστανει και η ενέργεια που λαμβάνεται από τη χρήση της μπορεί να είναι 20 φορές υψηλότερη από αυτήν που απαιτείται για την ανάπτυξη της [78]. Ανάμεσα στα χαρακτηριστικά της ιτιάς είναι η ομοιόμορφη χημική σύνθεση και οι μικρές ποσότητες προσμείξεων και ανεπιθύμητων συστατικών που μπορεί να περιέχει [78]. Επιπλέον, μπορεί να έχει υψηλές ετήσιες

αποδόσεις και είναι κατάλληλη για καλλιέργεια σε χαμηλής ποιότητας έδαφος. Η γη που απαιτείται για να αναπτυχθούν οι πολυετείς καλλιέργειες δεν απαιτεί όργωμα κατά τη διάρκεια της καλλιέργειας (έως και 30 χρόνια για την Ιτιά). Έτσι λοιπόν, μπορεί να λειτουργήσει ως δεξαμενή άνθρακα κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, βελτιώνοντας την ποιότητα του εδάφους με την αύξηση της περιεκτικότητας του σε οργανική ύλη [79].

Στον παρακάτω Πίνακα 5.7 δίνεται η σύσταση και η Κατώτερη Θερμογόνος Ικανότητα του μίγματος λιγνίτη και Ιτιάς.

Πίνακας 5.7: Χαρακτηριστικά νέου μίγματος με βάση τη συμμετοχή της Ιτιάς

Νέο μίγμα καυσίμου	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	S (%)	Ash (%)	Moisture (%)	LHV (kJ/kg)
Συμμετοχή κατά 5%	23,10	2,15	10,53	0,38	0,93	26,79	36,12	8187,48
Συμμετοχή κατά 10%	23,66	2,23	11,22	0,38	0,91	26,19	35,40	843,96
Συμμετοχή κατά 15%	24,26	2,31	11,96	0,39	0,89	25,55	34,64	8695,74

#### 5.4.5 Λεύκη



Εικόνα 5.6: Καλλιέργεια Λεύκης

Οι φυτείες Λεύκης έχουν χρησιμοποιηθεί σε παγκόσμιο επίπεδο για την παραγωγή βιομάζας, αλλά και ξυλείας, δηλαδή προϊόντων ξύλου, εξαιτίας της ταχείας ανάπτυξης, της ικανότητας πρεμνοβλάστησης αλλά και της προσαρμογής που παρουσιάζουν τα είδη λεύκης στο περιβάλλον. Στην Ελλάδα οι πρώτοι κλώνοι Λεύκης εισήχθησαν στο τέλος της δεκαετίας του '40 από την Ιταλία. Οι κλώνοι αυτοί συνέβαλαν

στην ανάπτυξη της λευκοκαλλιέργειας για την παραγωγή ξύλου για διάφορες χρήσεις [80]. Η λεύκη αποτελεί αντικείμενο έρευνας ήδη από την δεκαετία του '70 στην Ελλάδα και ο αρχικός της στόχος ήταν ο εντοπισμός των κλώνων και η επιλογή τους για την εγκατάσταση φυτειών και την παραγωγή ξύλου και βιομάζας.

Πρόκειται για ένα φυτό ανθεκτικό στην ξηρασία και τον άνεμο και ευαίσθητο στην σκίαση (φιλόφωτο είδος). Αναπτύσσεται σε μέτρια έως βαριά εδάφη με καλή στράγγιση. Η καταπολέμηση των ζιζανίων αποτελεί την πιο σημαντική καλλιεργητική εργασία κατά την περίοδο εγκατάστασης της φυτείας. Συνήθως, 3-5 μέρες μετά την φύτευση πραγματοποιείται η εφαρμογή κατάλληλου ζιζανιοκτόνου. Η καταπολέμηση της σκωριάσης (*Melampsora*) αποτελεί επίσης απαραίτητη καλλιεργητική πρακτική. Τέλος, το κόψιμο των παραφυάδων που παράγονται το πρώτο έτος της καλλιέργειας πραγματοποιείται τον χειμώνα αμέσως μετά την φύτευση.

Στον παρακάτω Πίνακα 5.8 δίνεται η σύσταση και η Κατώτερη Θερμογόνος Ικανότητα του μίγματος καυσίμου λιγνίτη και Λεύκης.

Πίνακας 5.8: Χαρακτηριστικά νέου μίγματος με βάση τη συμμετοχή της Λεύκης

Νέο μίγμα καυσίμου	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	S (%)	Ash (%)	Moisture (%)	LHV (kJ/kg)
Συμμετοχή κατά 5%	23,13	2,15	10,67	0,38	0,92	26,76	35,99	8177,04
Συμμετοχή κατά 10%	23,71	2,24	11,50	0,39	0,90	26,11	35,15	8411,83
Συμμετοχή κατά 15%	24,32	2,34	12,38	0,40	0,87	25,44	34,25	8660,50

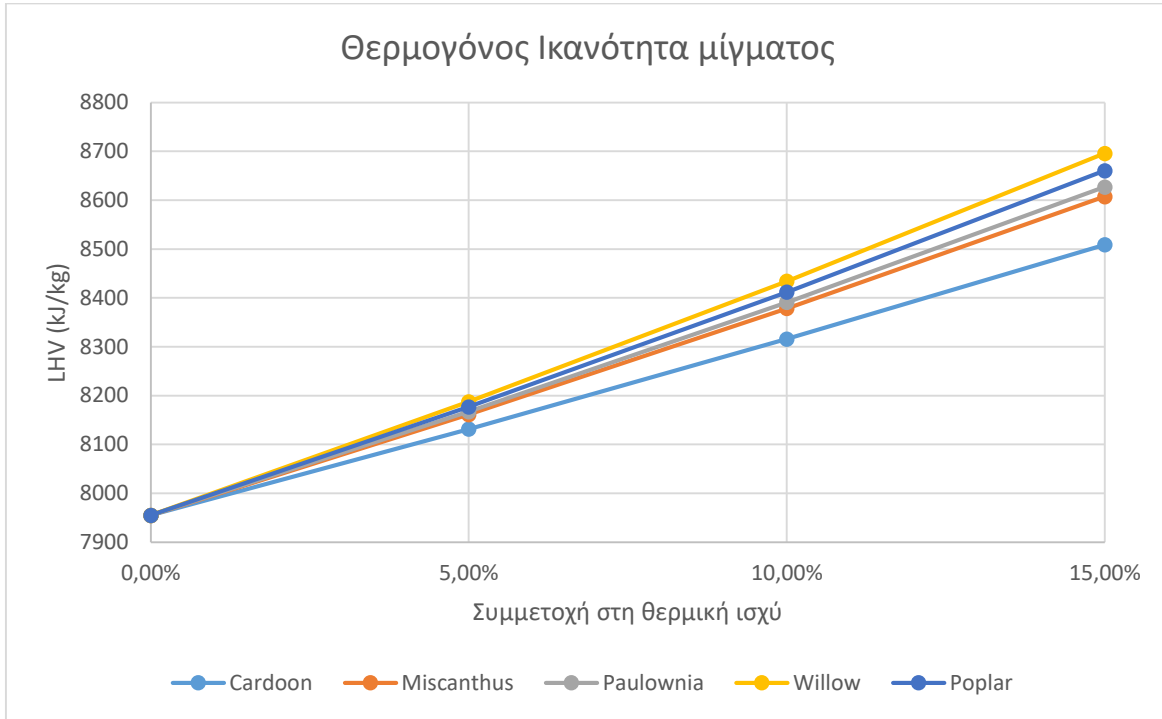
## 5.5 Αποτελέσματα μεικτής καύσης

Στο Σχήμα 5.7 φαίνεται η Κατώτερη Θερμογόνος Ικανότητα των νέων μιγμάτων ανάλογα με τη συμμετοχή του εκάστοτε βιοκαυσίμου στην θερμική ισχύ. Παρατηρείται η αύξηση της Θερμογόνου Ικανότητας των νέων μιγμάτων με την αύξηση του ποσοστού συμμετοχής των βιοκαυσίμων επειδή ακριβώς τα βιοκαύσιμα έχουν μεγαλύτερη LHV από τον λιγνίτη. Μάλιστα η Ιτιά, με τη μεγαλύτερη τιμή LHV παρουσιάζει και τις υψηλότερες τιμές, όπως αναμενόταν.

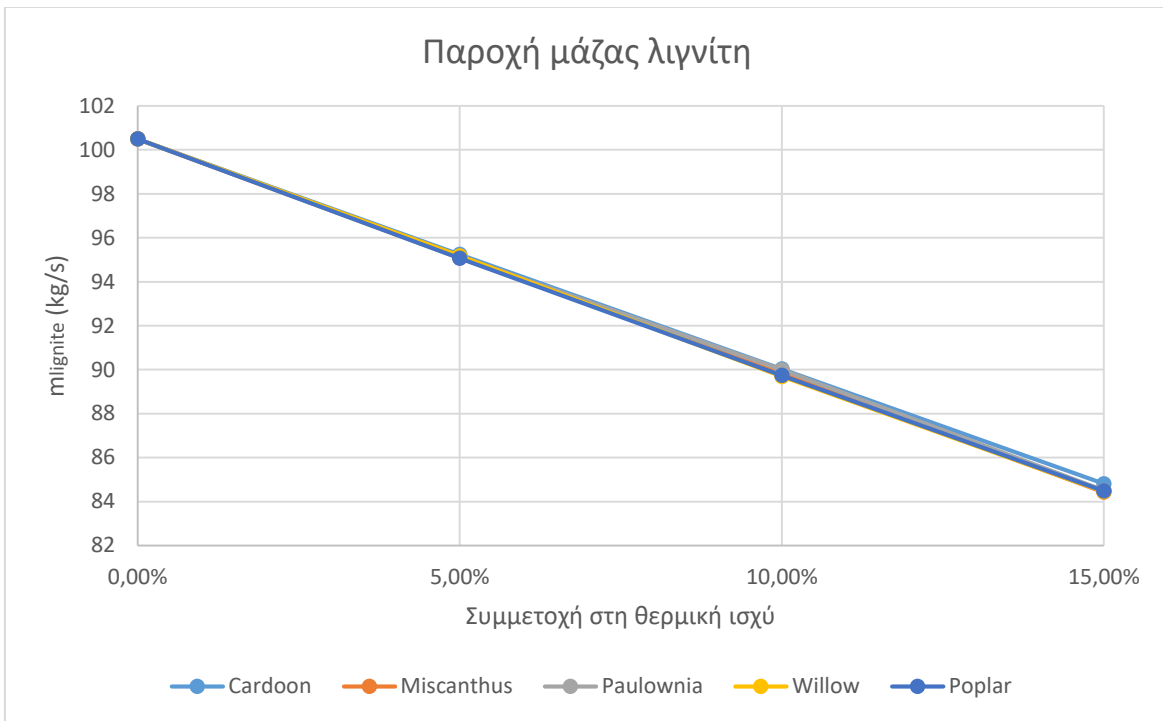
Επιπλέον, στο Σχήμα 5.8 φαίνεται η μεταβολή της παροχής μάζας του λιγνίτη σε συνάρτηση με το ποσοστό συμμετοχής του κάθε βιοκαυσίμου. Η μείωση είναι παρόμοια για όλα τα βιοκαύσιμα και δεν παρατηρείται κάποια ουσιαστική διαφορά. Αυτό οφείλεται στο ότι τα ποσοστά υποκατάστασης είναι μικρά. Όσο αυξάνεται το ποσοστό αυτό τόσο δείχνουν οι καμπύλες να ξεχωρίζουν μεταξύ τους και να φαίνεται ουσιαστικά η επίδραση της Θερμογόνου Ικανότητας του κάθε βιοκαυσίμου στην νέα μειωμένη κατανάλωση λιγνίτη.

Ο βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης συναρτηθεί της συμμετοχής των βιοκαυσίμων στη θερμική ισχύ του μίγματος φαίνεται στο Σχήμα 5.9. Οι μεταβολές είναι παρόμοιες με αυτές της Θερμογόνου Ικανότητας των μιγμάτων. Όσο μεγαλύτερη είναι η Θερμογόνος Ικανότητα του βιοκαυσίμου τόσο μεγαλύτερος είναι και ο νέος βαθμός απόδοσης του Σταθμού.

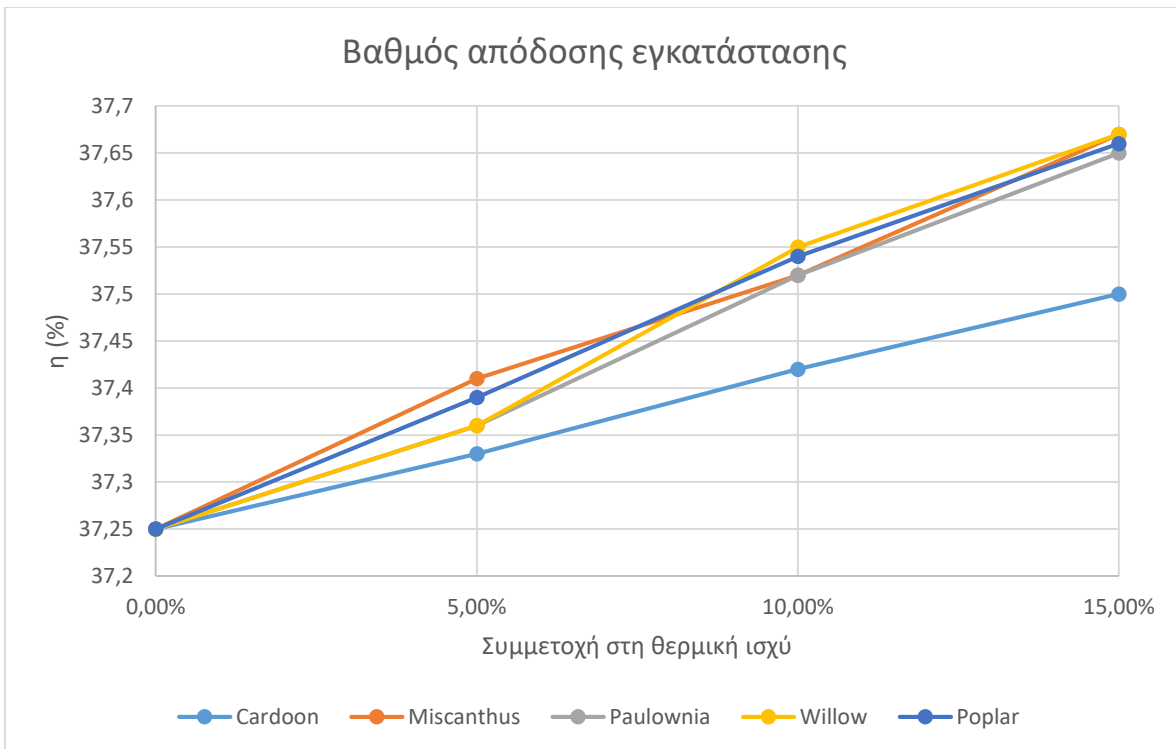
Επίσης, στο Σχήμα 5.10 φαίνεται η μεταβολή στις εκπομπές CO<sub>2</sub> σε σχέση με τη συμμετοχή των βιοκαυσίμων στο τελικό μίγμα. Όπως αναμενόταν και από το Σχήμα 5.8 δεν παρατηρείται κάποια ουσιαστική διαφορά στις εκπομπές CO<sub>2</sub>. Τέλος, στο Σχήμα 5.11 δίνονται οι αποφευχθείσες εκπομπές CO<sub>2</sub> που επιτυγχάνονται λόγω της μειωμένης κατανάλωσης λιγνίτη εξαιτίας της μερικής θερμικής του υποκατάστασης από τα εξεταζόμενα βιοκαύσιμα.



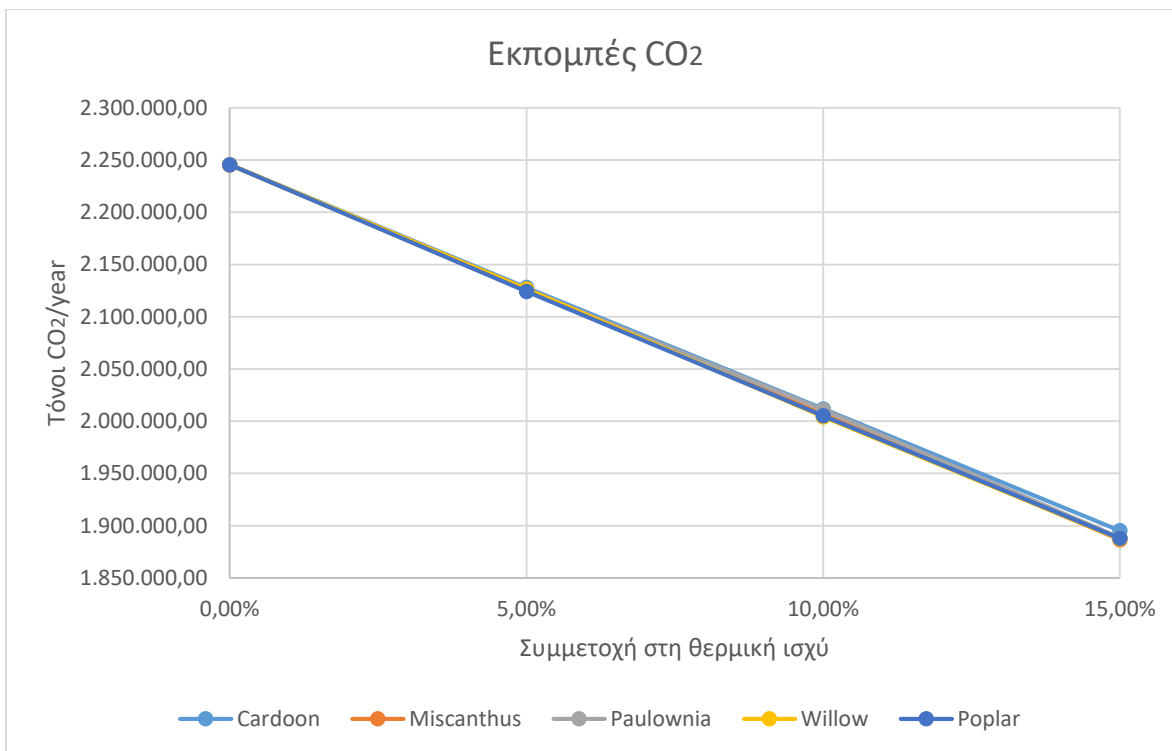
Σχήμα 5.7: Θερμογόνος Ικανότητα μιγμάτων συναρτήσει ποσοστού συμμετοχής στη θερμική ισχύ



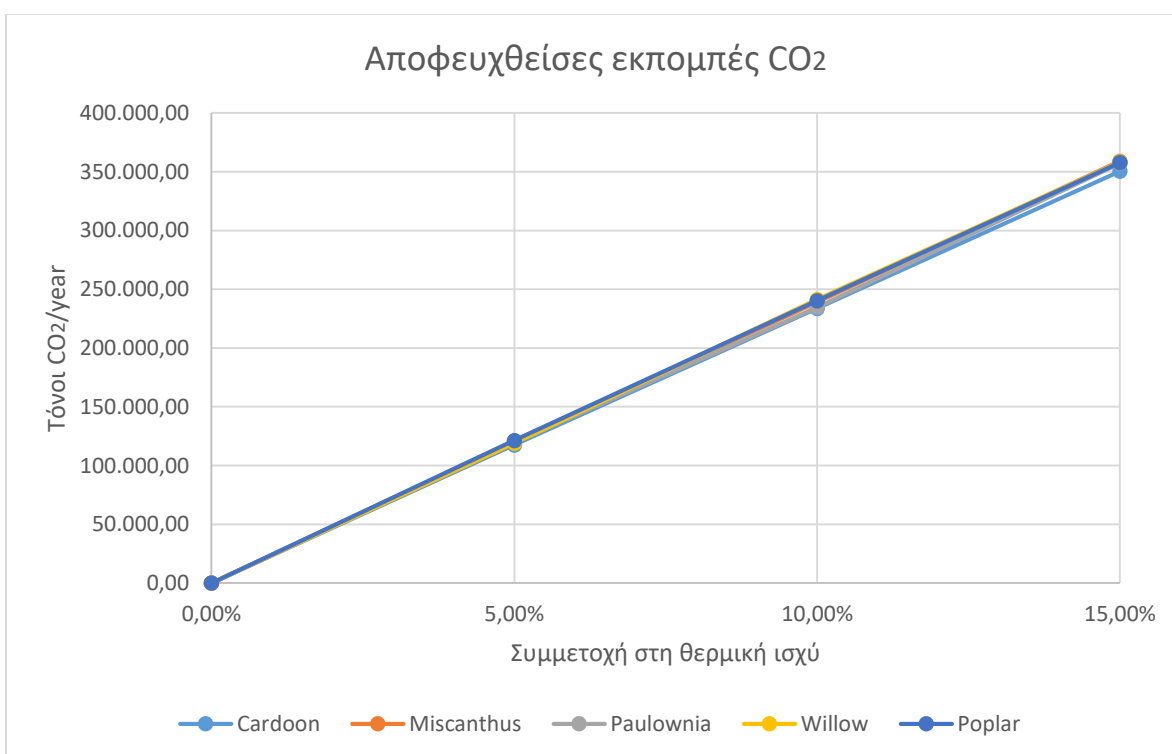
Σχήμα 5.8: Κατανάλωση λιγνίτη συναρτήσει ποσοστού συμμετοχής στη θερμική ισχύ



Σχήμα 5.9: Βαθμός απόδοσης εγκατάστασης συναρτήσει ποσοστού συμμετοχής στη θερμική ισχύ



Σχήμα 5.10: Εκπομπές CO<sub>2</sub> συναρτήσει ποσοστού συμμετοχής στη θερμική ισχύ



Σχήμα 5.11: Αποφευχθείσες εκπομπές CO<sub>2</sub> συναρτήσει ποσοστού συμμετοχής στη θερμική ισχύ



## 5.6 Οικονομική αξιολόγηση

Όπως και στην περίπτωση των Παραβολικών Κοίλων Συλλεκτών, οι οικονομικοί δείκτες που θα χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση των επενδύσεων είναι η Καθαρή Παρούσα Αξία (Net Present Value, NPV), ο Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (Internal Rate of Return, IRR) και ο Χρόνος Αποπληρωμής της επένδυσης με προεξόφληση (Discounted Payback Period, DPP).

### Ετήσια έσοδα

Τα Έσοδα προέρχονται από την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας (που αντιστοιχεί στην καύση της βιομάζας) στο δίκτυο και το κόστος αποφυγής των εκπομπών CO<sub>2</sub> λόγω χρήσης των βιοκαυσίμων. Από τον νέο βαθμό απόδοσης του σταθμού, με γνωστή την παροχή μάζας και την Θερμογόνο Ικανότητα του βιοκαυσίμου υπολογίζουμε την Ισχύ που αντιστοιχεί στην καύση του βιοκαυσίμου,  $P_{bio}$ . Έτσι, βρίσκουμε την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια που προέρχεται από την καύση της βιομάζας (η ανάλυση γίνεται για 7500h ετησίως). Επίσης, θεωρούμε ότι το κόστος εκπομπών CO<sub>2</sub> είναι ίσο με 25,15 €/tCO<sub>2</sub>. Η ανάλυση θα γίνει για τρεις τιμές πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας: 60 €/MWh<sub>el</sub>, 70 €/MWh<sub>el</sub> και 80 €/MWh<sub>el</sub>.

### Συνολικό Κόστος Επένδυσης

Το κόστος μεταποίησης του λέβητα του ΑΗΣ Μελίτη για την μεικτή καύση λιγνίτη και βιομάζας είναι ίσο με 330 €/kW<sub>e</sub> που αντιστοιχεί στην βιομάζα [81]. Η ισχύς που αντιστοιχεί στην καύση της βιομάζας,  $P_{bio}$ , υπολογίζεται όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Θεωρούμε ότι το ποσό αυτό θα καλυφθεί κατά 60% από ίδια κεφάλαια. Συνεπώς, το αρχικό κόστος της επένδυσης θα είναι,  $C_{inv} = 60\% \cdot C_{total} = 60\% \cdot 330 \text{ €/kW}_e \cdot P_{bio} (\text{kW}_e)$

### Διάρκεια ζωής έργου – Ετήσια έξοδα απόσβεσης

Η διάρκεια ζωής του έργου ορίζεται στα N=10 έτη. Ως ετήσια έξοδα απόσβεσης ορίζουμε το ηθικό του αρχικού κόστους της επένδυσης (από ίδια κεφάλαια) προς την διάρκεια ζωής του έργου.

### Επιτόκιο αναγωγής

Το επιτόκιο αναγωγής ή κόστος κεφαλαίου θεωρούμε ότι είναι ίσο με  $i=8\%$ .

### Ετήσια έξοδα

Ως ετήσια έξοδα θεωρούμε το κόστος του βιοκαυσίμου και το κόστος συντήρησης και λειτουργίας του λέβητα λόγω της καύσης της βιομάζας. Το ετήσιο κόστος συντήρησης και λειτουργίας αναφέρεται στην επεξεργασία και προσαγωγή του βιοκαυσίμου στο λέβητα και δίνεται στον Πίνακα 5.9 [82]. Επιπλέον, η ανάλυση θα γίνει για κόστος βιοκαυσίμου από 60 έως 120 €/tBiofuel (με βήμα 10 €/tBiofuel).

Πίνακας 5.9: Ετήσια έξοδα συντήρησης και λειτουργίας

Co-firing (as energy content)	5%	10%	15%
O%M cost (€)	2,5%·C <sub>total</sub>	3%·C <sub>total</sub>	3,5%·C <sub>total</sub>

### Δεδομένα Δανείου

Θεωρούμε δάνειο διάρκειας n=10 ετών με επιτόκιο δανεισμού j=8%. Το ποσό του δανείου είναι ίσο με το 40% του συνολικού κόστους της επένδυσης δηλαδή,  $C_{loan} = 40\% \cdot C_{total} = 40\% \cdot 330 \frac{\text{€}}{\text{kW}_e} \cdot P_{bio}(\text{kW}_e)$ . Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των δόσεων του δανείου είναι αυτή των ισόποσων τοκοχρεολυσίων.

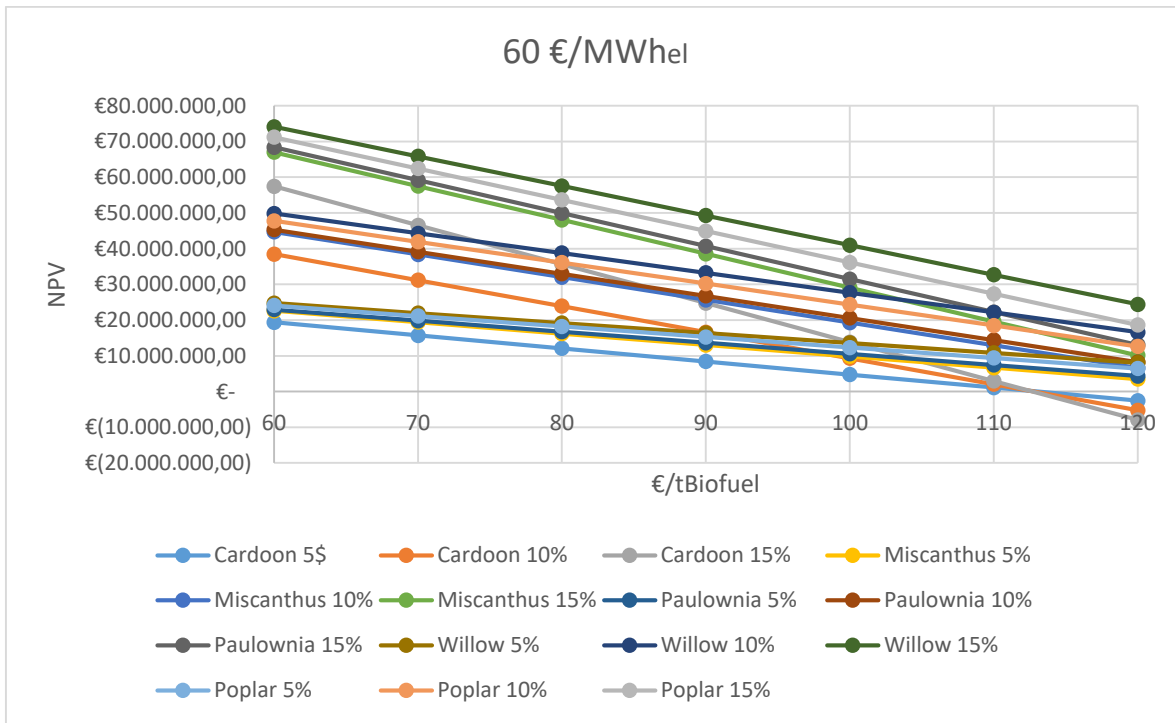
### Φορολογία

Ο συντελεστής Φορολογία που χρησιμοποιήθηκε είναι ίσος με 29%.

### Χρηματοροές – Καθαρό Κέρδος

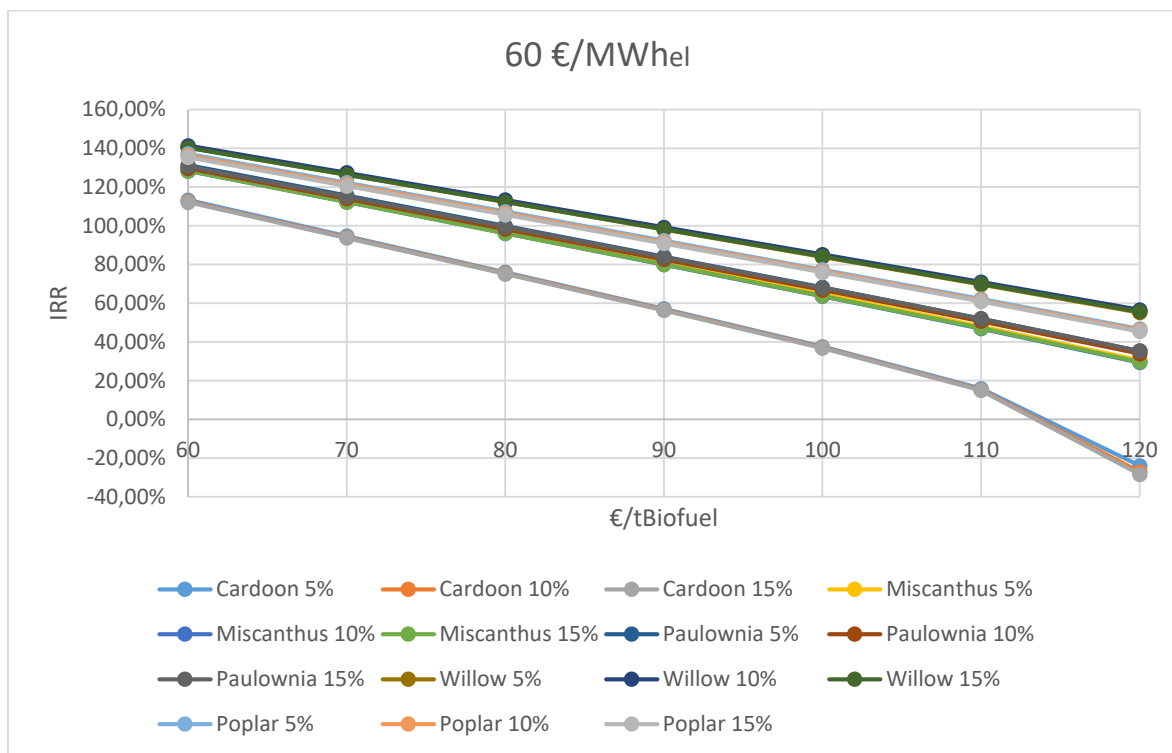
Αρχικά, για κάθε έτος αφαιρούνται από τα ετήσια έσοδα τα ετήσια κόστη συντήρησης και λειτουργίας, τα ετήσια έξοδα απόσβεσης και οι τόκοι του δανείου. Στο ποσό αυτό επιβάλλεται φορολογία για να προκύψουν τα καθαρά κέρδη. Στη συνέχεια στα καθαρά κέρδη προστίθενται τα ετήσια έξοδα απόσβεσης και αφαιρούνται τα χρεωλύσια του δανείου για να προκύψει το καθαρό αποτέλεσμα. Με βάση αυτό το καθαρό αποτέλεσμα υπολογίζεται η Καθαρή Παρούσα Αξία, ο Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης και η Έντοκη Περίοδος Αποπληρωμής.

### Αποτελέσματα για τιμή πώλησης 60 €/MWh<sub>el</sub>



Σχήμα 5.12: NPV συναρτήσει της τιμής βιοκαυσίμων

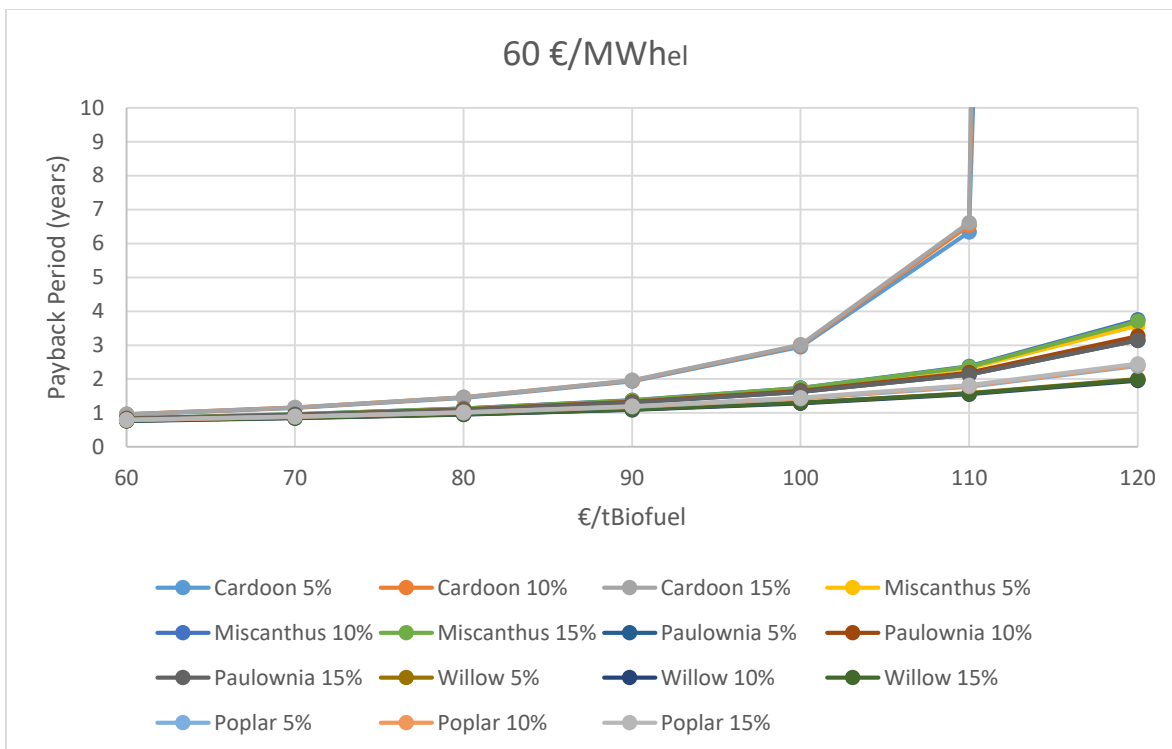
Από το Σχήμα 5.12 παρατηρούμε ότι όλες οι περιπτώσεις παρουσιάζουν θετική τιμή NPV εκτός από αυτή της Αγριαγκινάρας για τιμή απόκτησης της μεγαλύτερη των 110 €/tBiofuel. Επίσης, η τιμή της NPV είναι μεγαλύτερη όσο αυξάνεται το ποσοστό συμμετοχής του εκάστοτε βιοκαυσίμου στην θερμική ισχύ του μίγματος και μειώνεται με την αύξηση της τιμής του βιοκαυσίμου. Τις μεγαλύτερες τιμές παρουσιάζουν τα βιοκαύσιμα με την μεγαλύτερη Θερμογόνο Ικανότητα (Ιτιά και Λεύκη).



Σχήμα 5.13: IRR συναρτήσει της τιμής βιοκαυσίμων

Ανάλογα είναι τα αποτελέσματα για τον δείκτη IRR. Στο Σχήμα 5.13 παρατηρούμε και πάλι ότι η επένδυση στο βιοκαύσιμο της Αγριαγκινάρας δεν είναι βιώσιμη για τιμή μεγαλύτερη των 110 €/tBiofuel, καθώς ο IRR γίνεται μικρότερος του επιτοκίου αναγωγής της μελέτης ( $i=8\%$ ) και εν συνεχεία αρνητικός. Ο IRR μειώνεται με την αύξηση της τιμής του βιοκαυσίμου ενώ και πάλι τις μεγαλύτερες τιμές παρουσιάζουν η Ιτιά και η Λεύκη. Τονίζεται στο σημείο αυτό ότι για κάθε βιοκαύσιμο οι διαφορετικές καμπύλες για τα διαφορετικά ποσοστά συμμετοχής στη θερμική ισχύ του μίγματος είναι πολύ κοντά η μία στην άλλη. Αυτό οφείλεται στο ότι κατά την αύξηση του ποσοστού συμμετοχής, η αρχική δαπάνη, τα έσοδα και τα έξοδα αυξάνονται κατά σχεδόν ίδιο ποσοστό με αποτέλεσμα η συνάρτηση που επιλύεται κάθε φορά για την εύρεση του IRR να παραμένει σχεδόν αμετάβλητη.

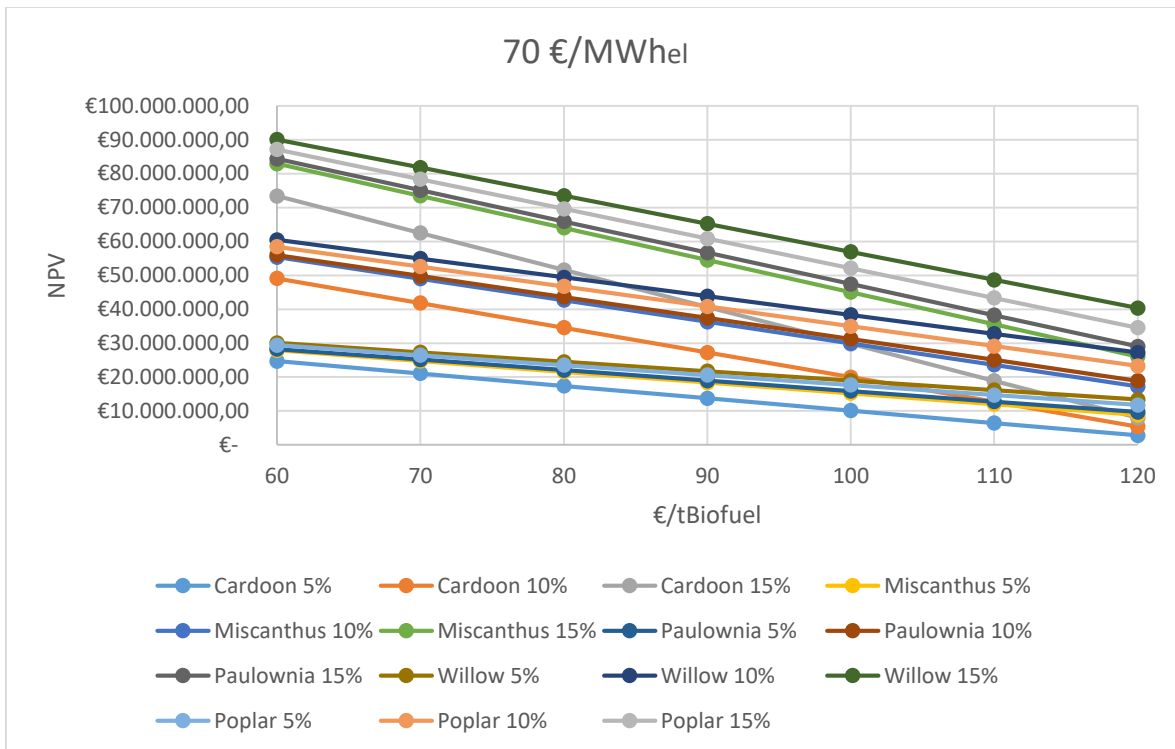
Στο Σχήμα 5.14 παρουσιάζεται η Έντοκη Περίοδος Αποπληρωμής της εκάστοτε επένδυσης. Διακρίνεται και πάλι η μη βιωσιμότητα της επένδυσης της Αγριαγκινάρας για τιμή μεγαλύτερη των 110 €/tBiofuel καθώς ο χρόνος αποπληρωμής αυξάνεται κατακόρυφα. Επίσης, ο χρόνος αποπληρωμής αυξάνεται με την αύξηση της τιμής των βιοκαυσίμων ενώ και για τιμή 120 €/tBiofuel κυμαίνεται για τα υπόλοιπα βιοκαύσιμα από 2 έως 4 έτη. Τον μικρότερο χρόνο αποπληρωμής παρουσιάζουν και πάλι η Ιτιά και η Λεύκη. Οι καμπύλες για διαφορετικά ποσοστά συμμετοχής του κάθε βιοκαυσίμου στη θερμική ισχύ του μίγματος δεν διαφέρουν σημαντικά για τους ίδιους λόγους που αναφέρθηκαν προηγουμένως.



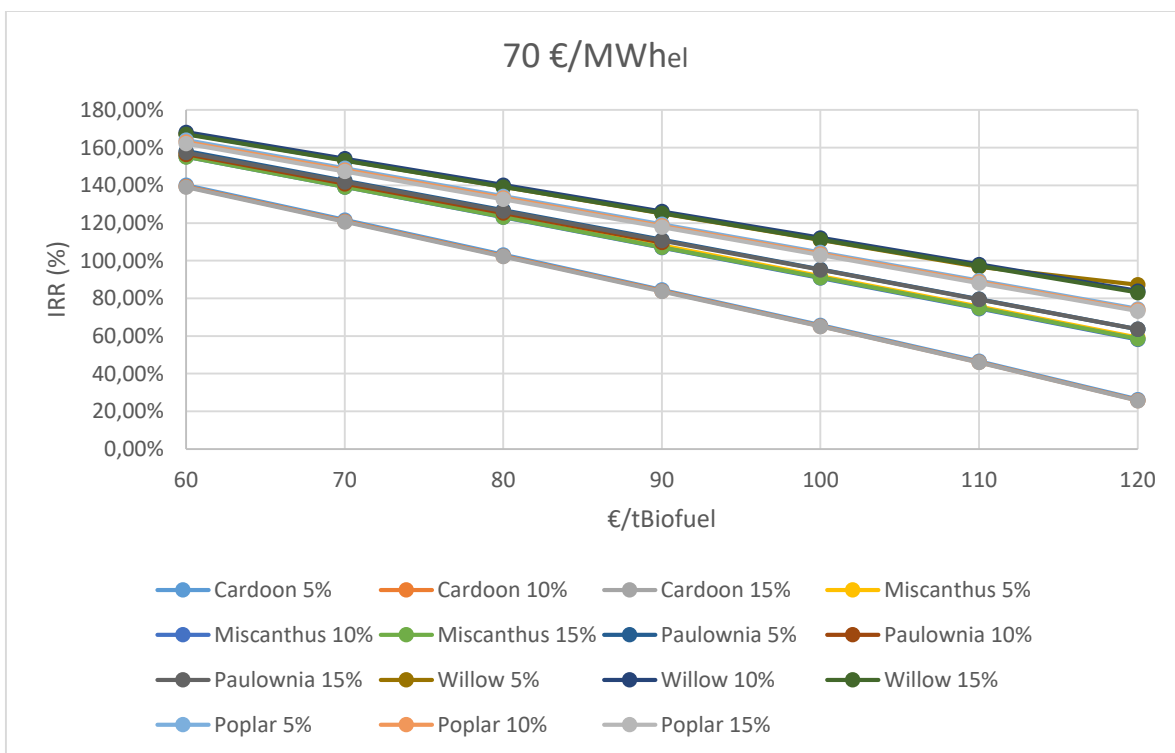
Σχήμα 5.14: Χρόνος αποπληρωμής συναρτήσει της τιμής βιοκαυσίμων

#### Αποτελέσματα για τιμή πώλησης 70 €/MWh<sub>el</sub>

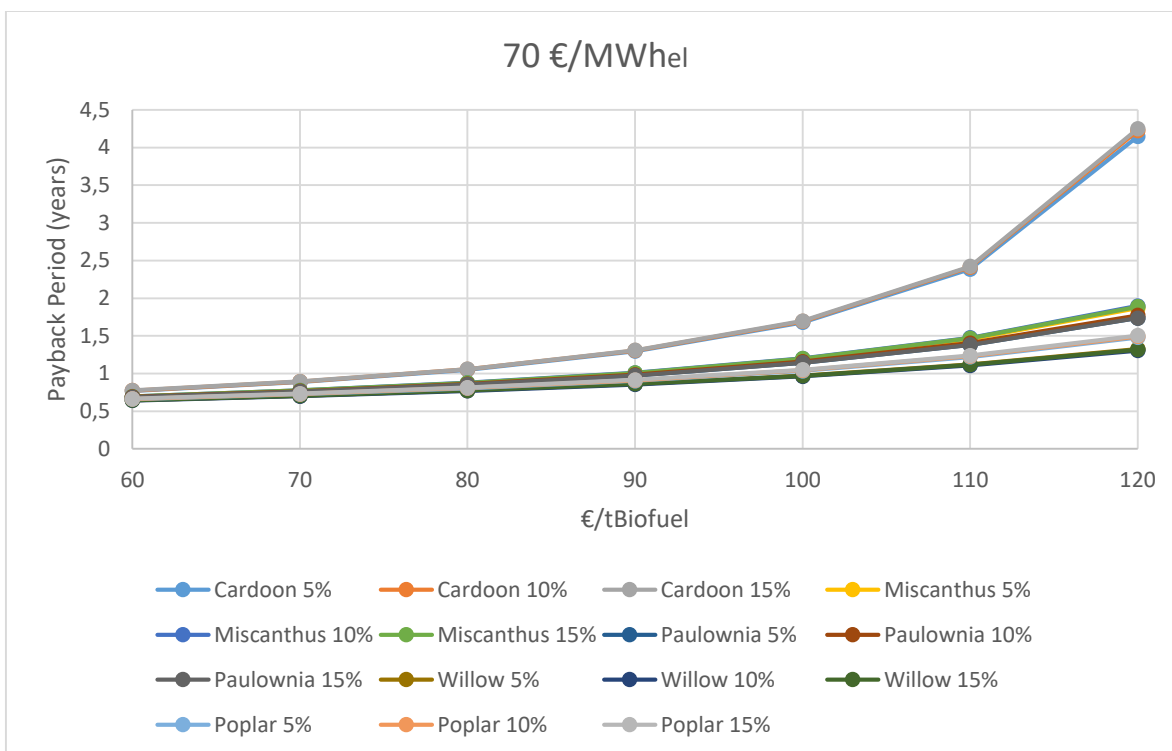
Στα Σχήματα 5.15, 5.16 και 5.17 δίνεται η NPV, ο IRR και ο χρόνος αποπληρωμής για τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας στην τιμή των 70 €/MWh<sub>el</sub>, αντίστοιχα. Όπως αναμενόταν οι τιμές των NPV και IRR είναι υψηλότερες από τις αντίστοιχες προηγούμενως ενώ η επένδυση φαίνεται να είναι συμφέρουσα για την Αγριαγκινάρα ακόμα και για τιμές μεγαλύτερες των 110 €/tBiofuel. Επίσης, ο χρόνος αποπληρωμής για την Αγριαγκινάρα φαίνεται να ξεπερνάει οριακά τα 4 έτη για τιμή 120 €/tBiofuel. Τα υπόλοιπα βιοκαύσιμα για την ίδια τιμή δείχνουν να έχουν χρόνο αποπληρωμής από περίπου 1,5 έως 2 έτη. Τα καλύτερα αποτελέσματα παρουσιάζουν και πάλι η Ιτιά με την Λεύκη λόγω της μεγαλύτερης Θερμογόνου Ικανότητας σε σχέση με τα άλλα βιοκαύσιμα.



Σχήμα 5.15: NPV συναρτήσει της τιμής βιοκαυσίμων



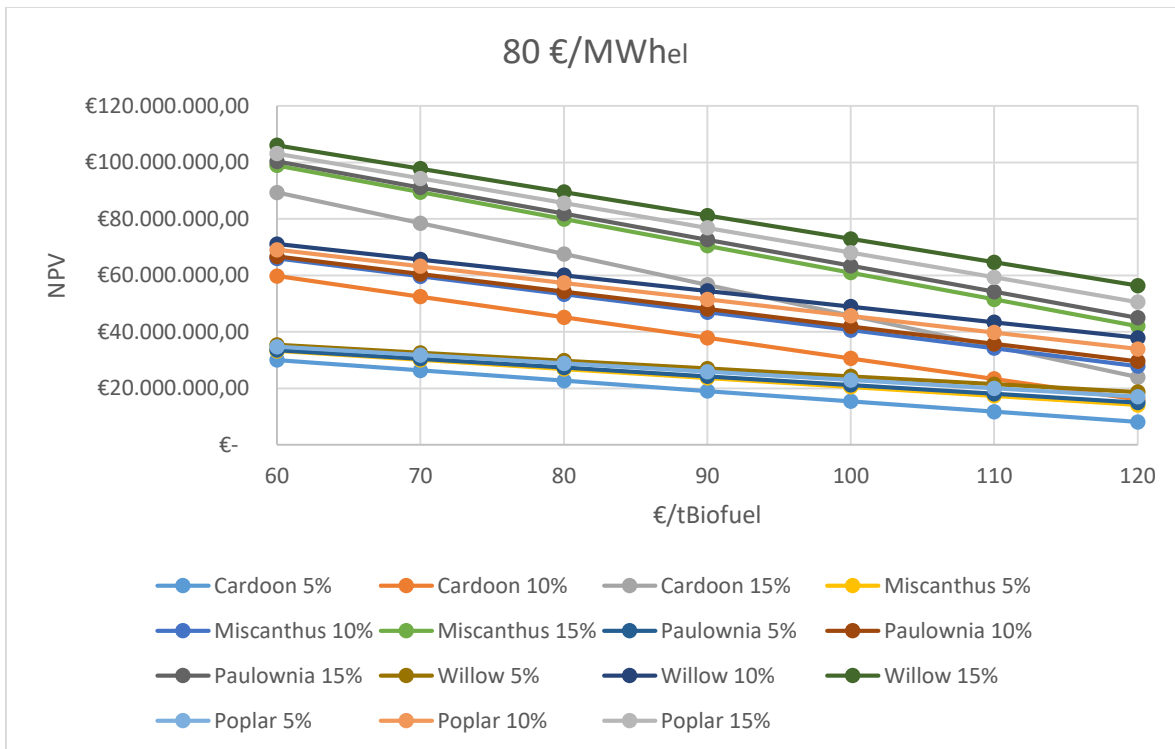
Σχήμα 5.16: IRR συναρτήσει της τιμής βιοκαυσίμων



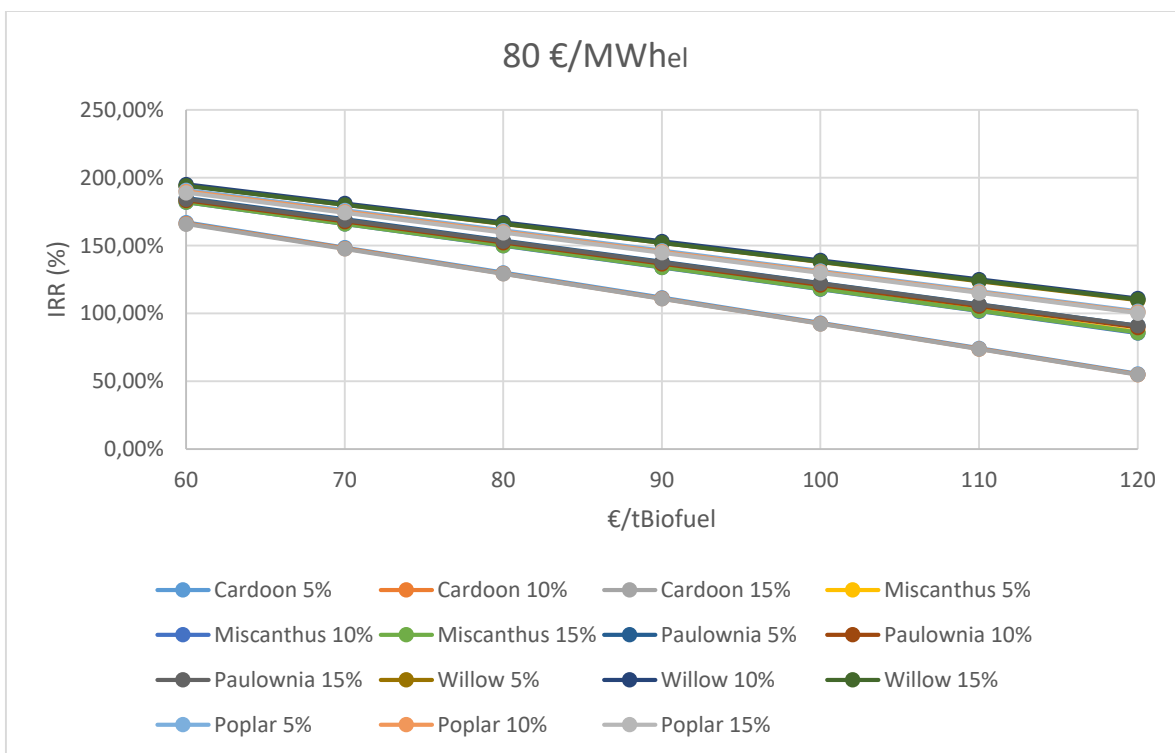
Σχήμα 5.17: Χρόνος αποπληρωμής συναρτήσει της τιμής βιοκαυσίμων

#### Αποτελέσματα για τιμή πώλησης 80 €/MWh<sub>el</sub>

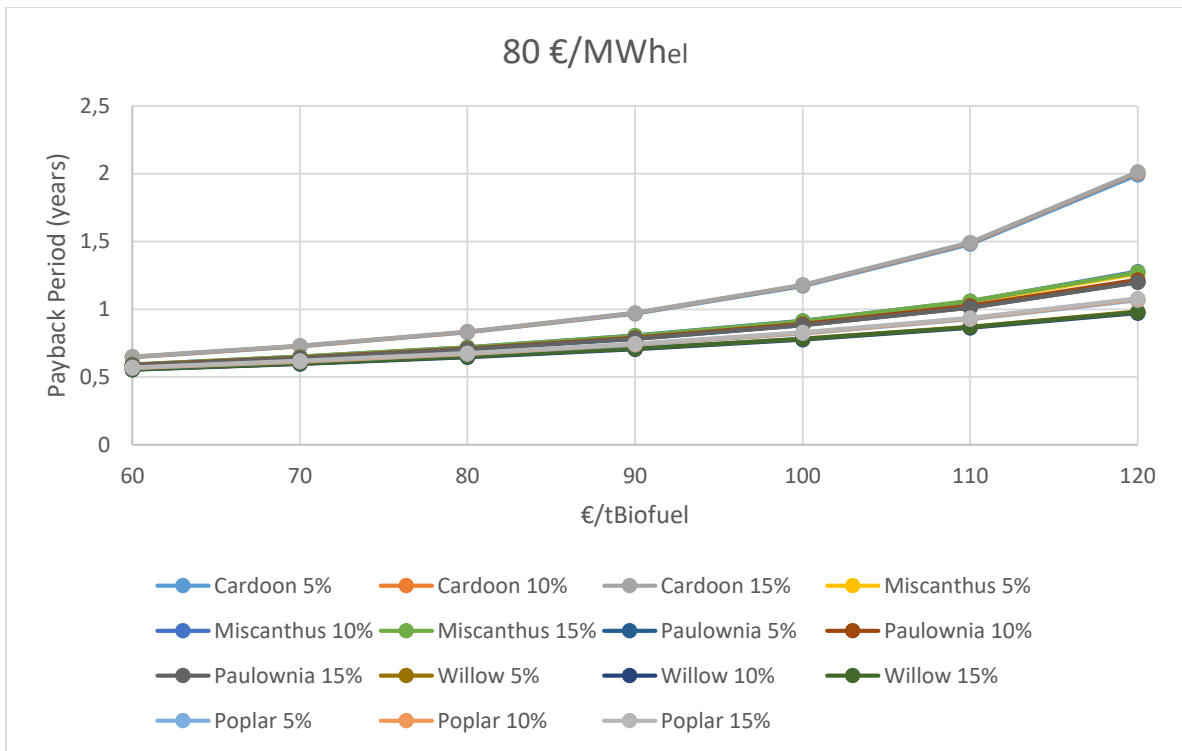
Τέλος, στα Σχήματα 5.18, 5.19 και 5.20 δίνονται οι τιμές των NPV, IRR και χρόνου αποπληρωμής για τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας στην τιμή των 80 €/MWh<sub>el</sub>. Τα αποτελέσματα όπως αναμενόταν είναι τα καλύτερα από όλα λόγω της σημαντικής αύξησης των εσόδων από την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας σε υψηλότερη τιμή. Ο δείκτης IRR για την Αγριαγκινάρα είναι μεγαλύτερος από 50% ακόμα και για τιμή 120 €/tBiofuel, ενώ στη ίδια τιμή η περίοδος αποπληρωμής την εν λόγω επένδυσης είναι στα 2 έτη. Τα υπόλοιπα βιοκαύσιμα παρουσιάζουν χρόνο αποπληρωμής κάτω από 1,5 έτη για όλες τις τιμές βιοκαυσίμων που εξετάζονται. Αυτό οφείλεται στην τουλάχιστον διπλάσια τιμή της Θερμογόνου Ικανότητάς τους σε σχέση με τον λιγνίτη καθώς και στα σημαντικά έσοδα από την υψηλή τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας που εξετάζεται.



Σχήμα 5.18: NPV συναρτήσει της τιμής βιοκαυσίμων



Σχήμα 5.19: IRR συναρτήσει της τιμής βιοκαυσίμων



Σχήμα 5.20: Χρόνος αποπληρωμής συναρτήσει της τιμής βιοκαυσίμων



## Κεφάλαιο 6° Συμπεράσματα – προτάσεις για μελλοντική έρευνα

### Γενικά

Στο Κεφάλαιο αυτό γίνεται μία σύνοψη των κυριότερων συμπερασμάτων από τη διεξαγωγή της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας. Σκοπός της εργασίας αυτής ήταν η αναβάθμιση του Ατμοηλεκτρικού Σταθμού Μελίτη, ισχύος 330 MW<sub>el</sub>, μέσω αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας και της βιομάζας και στόχο τη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) από το Σταθμό. Αρχικά, μελετήθηκε η εγκατάσταση Παραβολικών Κοίλων Συλλεκτών με στόχο την ολική υποκατάσταση του τελευταίου εν σειρά προθερμαντήρα του Σταθμού στο σημείο σχεδίασης του ηλιακού πεδίου. Επίσης, μελετήθηκε η μετασκευή του υπάρχοντος λέβητα για την πραγματοποίηση άμεσης μεικτής καύσης λιγνίτη και βιομάζας με στόχο την μερική υποκατάσταση του λιγνίτη. Σαν βιοκαύσιμα μελετήθηκαν ενεργειακές καλλιέργειες από Αγριαγκινάρα, Μίσχανθο, Παυλώνια, Ιτιά και Λεύκη, ενώ η συμμετοχή του εκάστοτε βιοκαυσίμου έγινε σε ποσοστά 5%, 10% και 15% της συνολικής θερμικής ισχύος. Επιπλέον, προτείνονται μερικά θέματα για μελλοντική μελέτη και έρευνα.

### Συμπεράσματα από την εγκατάσταση Παραβολικών Κοίλων Συλλεκτών

Η μελέτη έγινε για δύο διαφορετικούς τύπους Παραβολικών Κοίλων Συλλεκτών, τον LS-3 και τον ET-150. Σαν ρευστό μετάδοσης θερμότητας επιλέχθηκε το Therminol VP-1. Αρχικά σχεδιάστηκαν τα δύο διαφορετικά ηλιακά πεδία και υπολογίστηκε η παροχή μάζας που ρέει σε αυτά για κάθε ώρα του έτους. Στην συνέχεια, έγινε μοντελοποίηση των ηλιακών πεδίων στο λογισμικό «GateCycle» και βρέθηκε η σχέση της ισχύος του σταθμού συναρτήσει της παροχής μάζας του θερμικού ελαίου και κατά συνέπεια η ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια λόγω των ηλιακών συλλεκτών. Η αύξηση της ισχύος της γεννήτριας, από την εκτόνωση της παροχής απομάστευσης στον στρόβιλο, είναι μικρή και θεωρήθηκε ότι μπορεί να πραγματοποιηθεί χωρίς να δημιουργηθεί πρόβλημα σε αυτήν. Έπειτα, έγινε ένας προκαταρκτικός σχεδιασμός του ενδιάμεσου εναλλάκτη θερμότητας ώστε να εκτιμηθεί η πτώση πίεσης στην πλευρά του θερμικού ελαίου. Επίσης, βρέθηκε η πτώση πίεσης στο ηλιακό πεδίο και μετά την επιλογή των φυγοκεντρικών αντλιών, υπολογίστηκε η καθαρά παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από κάθε ηλιακό πεδίο.

Ακολούθησε οικονομική αξιολόγηση των επενδύσεων και υπολογίστηκαν οι δείκτες LCOE για κάθε ηλιακό πεδίο. Από την ανάλυση αυτή προέκυψε LCOE ίσο με 463,73 €/MWh<sub>el</sub> και 452,83 €/MWh<sub>el</sub> για τον LS-3 και ET-150 αντίστοιχα, τη στιγμή που από την νομοθεσία η πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας είναι 257 €/MWh<sub>el</sub>. Εύλογα διαπιστώθηκε η μη βιωσιμότητα των επενδύσεων με τη συγκεκριμένη τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας.

Εξετάστηκαν δύο σενάρια για να μελετηθεί η βιωσιμότητα των επενδύσεων. Αρχικά, θεωρήθηκε επιδότηση στην τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας και υπολογίστηκαν οι οικονομικοί δείκτες NPV, IRR και Discounted Payback Period συναρτήσει αυτής. Βρέθηκε ότι θα χρειαστεί επιδότηση κοντά στα 250 €/MWh<sub>el</sub> ώστε να θεωρηθούν οι επενδύσεις βιώσιμες. Ο Χρόνος Αποπληρωμής υπολογίστηκε στα 10 έτη για κάθε περίπτωση, ο οποίος κρίνεται αποδεκτός σε σχέση με τα 25 έτη της διάρκειας της κάθε επένδυσης.

Στο δεύτερο σενάριο θεωρήθηκε ότι γίνεται ταυτόχρονα επιδότηση στην τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας και επιχορήγηση στο αρχικό κόστος της επένδυσης και μελετήθηκε η μεταξύ τους

συσχέτιση. Παρατηρήθηκε η μείωση της επιδοτούμενης τιμής με την αύξηση του ποσοστού επιχορήγησης, όπως αναμενόταν, ενώ για επιχορήγηση κατά περίπου 50% βρέθηκε ότι δεν χρειάζεται επιδότηση για να καταστούν οι επενδύσεις βιώσιμες. Τέλος, στο σενάριο αυτό ο Χρόνος Αποπληρωμής βρέθηκε σταθερός κοντά στα 10,5 έτη και για τις δύο επενδύσεις και ανεξάρτητος του ποσοστού επιχορήγησης.

#### Συμπεράσματα από την μεικτή καύση λιγνίτη – βιομάζας

Τα βιοκαύσιμα που χρησιμοποιήθηκαν έχουν τουλάχιστον διπλάσια Κατώτερη Θερμογόνο Ικανότητα σε σύγκριση με τον λιγνίτη, εκτός από την Αγριαγκινάρα που έχει 1,7 φορές μεγαλύτερη τιμή. Αυτό οφείλεται και στο πολύ μικρότερο ποσοστό υγρασίας αυτών σε σχέση με το αντίστοιχο ποσοστό του λιγνίτη. Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το λογισμικό «GateCycle» δεν παρατηρείται κάποια ουσιαστική διαφορά στην νέα κατανάλωση του λιγνίτη για το ίδιο ποσοστό συμμετοχής των διαφορετικών βιοκαυσίμων, καθώς τα ποσοστά υποκατάστασης που επιλέχθηκαν είναι μικρά. Μάλιστα, όσο αυξάνεται το ποσοστό υποκατάστασης του λιγνίτη, τόσο οι καμπύλες δείχνουν να απομακρύνονται μεταξύ τους, αποδεικνύοντας την εξάρτηση από την Θερμογόνο Ικανότητα του νέου μίγματος καυσίμου (άρα και του εκάστοτε βιοκαυσίμου). Το ίδιο συμβαίνει και με τις εκπομπές CO<sub>2</sub>, οι οποίες όπως έχει ήδη αναφερθεί, είναι ανεξάρτητες από τις συνθήκες καύσης (λόγος αέρα καύσης) και εξαρτώνται αποκλειστικά από την νέα κατανάλωση λιγνίτη. Τέλος, ο βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης αυξάνεται με την αυξανόμενη συμμετοχή των βιοκαυσίμων και μάλιστα είναι τόσο μεγαλύτερος όσο μεγαλύτερη είναι η Θερμογόνο Ικανότητα του εκάστοτε βιοκαυσίμου. Αυτό φυσικά οφείλεται στην μεγαλύτερη Θερμογόνο Ικανότητα του νέου μίγματος καυσίμου, εξαιτίας της μεγαλύτερης Θερμογόνου Ικανότητας των βιοκαυσίμων σε σύγκριση με το λιγνίτη.

Η οικονομική αξιολόγηση που έγινε περιλαμβάνει τρεις τιμές πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας που προέρχεται από την καύση της βιομάζας, 60 €/MWh<sub>el</sub>, 70 €/MWh<sub>el</sub> και 80 €/MWh<sub>el</sub>. Το αρχικό κόστος μεταποίησης του λέβητα για την μεικτή καύση, δηλαδή το αρχικό κόστος της επένδυσης, θεωρήθηκε ίσο με 330 €/kW<sub>el</sub> που αντιστοιχεί στην βιομάζα. Το ποσό αυτό θεωρήθηκε ότι καλύπτεται κατά 60% από ίδια κεφάλαια και κατά 40% από δάνειο, χρησιμοποιώντας επιτόκιο δανεισμού 8%, διάρκεια δανείου 10 έτη και μέθοδος αποπληρωμής αυτή των ίσο-τοκοχρεολυσίων. Επίσης, η ανάλυση έγινε για τιμή απόκτησης της βιομάζας από 60 €/tBiofuel έως 120 €/tBiofuel. Οι οικονομικοί δείκτες που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση των επενδύσεων είναι η Καθαρή Παρούσα Αξία (Net Present Value), ο Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (Internal Rate of Return) και ο Χρόνος Αποπληρωμής της επένδυσης με προεξόφληση (Discounted Payback Period).

Από την οικονομική ανάλυση προέκυψε το συμπέρασμα ότι για τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας στην τιμή των 60 €/MWh<sub>el</sub> όλες οι περιπτώσεις φαίνονται να προκρίνονται εκτός αυτή της Αγριαγκινάρας για τιμή απόκτησης της μεγαλύτερη των 110 €/tBiofuel. Στην περίπτωση αυτή η Καθαρά Παρούσα Αξία γίνεται αρνητική, ο Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης γίνεται μικρότερος του επιτοκίου αναγωγής της μελέτης και ο Χρόνος Αποπληρωμής κρίνεται απαγορευτικός. Επιπλέον, παρατηρήθηκε η μείωση των τιμών NPV και IRR και η αύξηση του Χρόνου Αποπληρωμής με την αύξηση της τιμής των βιοκαυσίμων. Για όλα τα βιοκαύσιμα εκτός της Αγριαγκινάρας, η Χρόνος Αποπληρωμής για τη μεγαλύτερη τιμή απόκτησης των βιοκαυσίμων που μελετάται, κυμαίνεται από 2 έως 4 έτη. Τα καλύτερα αποτελέσματα παρουσίασαν τα βιοκαύσιμα Ιτιά και Λεύκη που έχουν και τη μεγαλύτερη Θερμογόνο Ικανότητα σε σχέση με τις υπόλοιπες ενεργειακές καλλιέργειες.

Για τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας 70 €/MWh<sub>el</sub>, τα αποτελέσματα είναι καλύτερα όπως αναμενόταν, λόγω μεγαλύτερων εσόδων. Για την περίπτωση αυτή όλες οι επενδύσεις προκρίνονται, ακόμα και αυτή της Αγριαγκινάρας για τιμή απόκτησης της μεγαλύτερη των 110 €/tBiofuel. Οι τιμές των NPV και IRR έχουν μεγαλύτερες τιμές από ότι στην προηγούμενη περίπτωση. Ο Χρόνος Αποπληρωμής για τιμή απόκτησης των βιοκαυσίμων 120 €/tBiofuel είναι λίγο μεγαλύτερος από 4 έτη για την Αγριαγκινάρα και κάτω από 2 έτη τα υπόλοιπα βιοκαύσιμα. Και πάλι τα καλύτερα αποτελέσματα παρουσιάζουν η Ιτιά και η Λεύκη.

Τέλος, τα οικονομικά αποτελέσματα είναι και τα βέλτιστα όλων για τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας στα 80 €/MWh<sub>el</sub>. Αυτό οφείλεται στη σημαντική αύξηση των εσόδων από την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας τη στιγμή που τα έξοδα παραμένουν ίδια με αυτά των προηγούμενων περιπτώσεων. Οι τιμές των NPV και IRR παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες τιμές σε σύγκριση με τις προηγούμενες δύο περιπτώσεις. Επιπλέον, για τιμή απόκτησης των βιοκαυσίμων 120 €/tBiofuel, η Αγριαγκινάρα παρουσιάζει Χρόνο Αποπληρωμής 2 έτη ενώ τα υπόλοιπα βιοκαύσιμα κάτω από 1,5 έτη. Τέλος, τα καλύτερα αποτελέσματα παρουσιάζουν η Ιτιά και η Λεύκη λόγω της μεγαλύτερης Θερμογόνου Ικανότητας, όπως έχει ήδη αναφερθεί.

#### Προτάσεις για τα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα

Λόγω του σχετικά χαμηλού ηλιακού δυναμικού στην περιοχή της Φλώρινας, ήταν αναμενόμενο να μην είναι πολύ ελκυστική η επένδυση. Αυτό προέκυψε κυρίως λόγω του υψηλού κόστους των Παραβολικών Κοίλων Συλλεκτών. Συνεπώς, εάν στο μέλλον μειωθεί σημαντικά το κόστος τους ίσως αξίζει να προχωρήσει μία τέτοια επένδυση. Επίσης θα μπορούσε να μελετηθεί η δυνατότητα υβριδοποίησης του Σταθμού με χρήση ηλιακή ενέργειας και βιομάζας ταυτόχρονα.

Ως μελλοντική μελέτη θα μπορούσε να εξεταστεί η εγκατάσταση συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων σε κάποιο Σταθμό στη Μεγαλόπολη στην Πελοπόννησο όπου επικρατεί καλύτερο ηλιακό δυναμικό, για την υποκατάσταση κάποιου προθερμαντήρα με θερμότητα από τον ήλιο.

Επίσης, θα μπορούσε να γίνει η εξ ολοκλήρου μοντελοποίηση ενός συγκεντρωτικού ηλιοθερμικού σταθμού στο λογισμικό «GateCycle» και να εξεταστεί η συμπεριφορά του για διάφορες περιοχές του Ελλαδικού χώρου.

#### Προτάσεις για τη βιομάζα

Όσον αφορά στη βιομάζα, θα μπορούσε να γίνει μία μελέτη σχετικά με την καλλιεργήσιμη έκταση Γης που θα απαιτείτο για κάθε εξεταζόμενο βιοκαύσιμο και ποσοστό υποκατάστασης λιγνίτη. Η ανάλυση θα περιλάμβανε την περιοχή όπου βρίσκονται οι εκτάσεις αυτές ώστε να υπολογιστεί το κόστος μεταφοράς αλλά και οι συνολικές εκπομπές CO<sub>2</sub> από την καλλιέργεια και τη συγκομιδή έως την μεταφορά στον ΑΗΣ και να ερευνηθεί η πραγματική εξοικονόμηση CO<sub>2</sub>. Επίσης, σε περίπτωση μη επαρκούς εξασφάλισης βιομάζας από την τοπική κοινωνία θα μπορούσε να μελετηθεί η δυνατότητα εισαγωγής από την Ευρώπη.

Επίσης, θα μπορούσε να μελετηθεί πιο εκτεταμένα η συμπεριφορά των συστημάτων αντιρρόπησης κατά την μεικτή καύση (εκπομπές NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, τέφρας). Λόγω της (αρκετά μικρής) περιεκτικότητας ορισμένων βιοκαυσίμων σε Κ, Cl θα μπορούσε να μελετηθούν πιθανά θέματα διάβρωσης στο λέβητα.

Τέλος, ιδιαίτερο ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια παρουσιάζει το Στερεό Ανακτηθέν Καύσιμο (Refused Derived Fuel RDF/ Solid Recovered Fuel SRF) το οποίο προέρχεται από τη μηχανική επεξεργασία

αστικών αποβλήτων ή/ και σε συνδυασμό με συστήματα βιολογικής επεξεργασίας. Το καύσιμο αυτό προορίζεται για την παραγωγή ενέργειας και συγκεκριμένα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μεικτή καύση σε εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας μεγάλης κλίμακας με στόχο την μείωση του κόστους του καυσίμου και των εκπομπών CO<sub>2</sub>. Βασικά θέματα που παρουσιάζονται κατά την μεικτή καύση σχετίζονται κυρίως με το σχεδιασμό του λέβητα, την παροχή και το σύστημα τροφοδοσίας του καυσίμου καθώς επίσης τη σκωρία και την πυροσυσσωμάτωση της κλίνης. Τέλος, ιδιαίτερη σημασία πρέπει να δοθεί στις εκπομπές διοξινών και φουρανίων από τους Σταθμούς. Επειδή οι διοξίνες και τα φουράνια σχηματίζονται από οργανικά συστατικά, είναι απαραίτητο για τον περιορισμό για τον περιορισμό του σχηματισμού τους η πλήρης καύση των οργανικών και η καταστροφή των πρόδρομων ουσιών (precursors) που αποτελούν ένα ενδιάμεσο στάδιο κατά το σχηματισμό των φουρανίων/διοξινών. Για το λόγο αυτό, ο έλεγχος των συνθηκών της καύσης (θερμοκρασία, χρόνος παραμονής κλπ) και της παρουσίας καταλυτών είναι πολύ σημαντικός [70].

## Βιβλιογραφία

- [1] Cnbc.com [Ηλεκτρονικό]  
<https://www.cnbc.com/2019/12/15/natural-gas-surges-climate-change-after-carbon-emissions-record-in-2019.html>
- [2] Climatepolicyinfohub.eu [Ηλεκτρονικό]  
<https://climatepolicyinfohub.eu/renewable-energy-support-policies-europe>
- [3] Europa.eu [Ηλεκτρονικό]  
[https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Share\\_of\\_energy\\_from\\_renewable\\_sources\\_2018\\_infograph.jpg](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Share_of_energy_from_renewable_sources_2018_infograph.jpg)
- [4] Kathimerini.gr [Ηλεκτρονικό]  
<https://www.kathimerini.gr/1042414/article/oikonomia/ellhnikh-oikonomia/magnhths-gia-toys-ependytes-oi-ananewsimes-phges-energeias-sthn-ellada>
- [5] Researchgate.net [Ηλεκτρονικό]  
[https://www.researchgate.net/publication/327837206\\_Exelixe\\_tes\\_Axiopoieses\\_tes\\_Geothermikes\\_Energeias\\_sten\\_Ellada\\_kai\\_ten\\_Europe\\_Geothermal\\_Development\\_in\\_Greece\\_and\\_Europe](https://www.researchgate.net/publication/327837206_Exelixe_tes_Axiopoieses_tes_Geothermikes_Energeias_sten_Ellada_kai_ten_Europe_Geothermal_Development_in_Greece_and_Europe)
- [6] Karonis, D., Zannikos, F. E., & Lois, E. (2013, October). Παραγωγή Βιοντίζελ 1ης και 2ης Γενιάς, Αναπτυξιακή και Τεχνολογική Προοπτική [Pdf]. Athens: ResearchGate.
- [7] Library.tee.gr [Ηλεκτρονικό]  
[http://library.tee.gr/digital/m2388/m2388\\_papagiannakos.pdf](http://library.tee.gr/digital/m2388/m2388_papagiannakos.pdf)
- [8] www.iea.org [Ηλεκτρονικό]
- [9] Worldbioenergy.org [Ηλεκτρονικό]  
[https://worldbioenergy.org/uploads/191129%20WBA%20GBS%202019\\_LQ.pdf](https://worldbioenergy.org/uploads/191129%20WBA%20GBS%202019_LQ.pdf)
- [10] Lagie.gr [Ηλεκτρονικό]  
[http://www.lagie.gr/fileadmin/groups/EDSHE/EggyisisProeleyisis/2018\\_YPOLEIPOMENO\\_ENERGEIAKO\\_MEIGMA.pdf](http://www.lagie.gr/fileadmin/groups/EDSHE/EggyisisProeleyisis/2018_YPOLEIPOMENO_ENERGEIAKO_MEIGMA.pdf)
- [11] M. Woolfson, "The origin and evolution of the solar system", Institute of Physics Publishing, 2000
- [12] S. Basu, H. M. Antia, "Helioseismology and Solar Abundances", Physics Reports, 457 (5-6): 217, March, 2008
- [13] Ελ. Σαατσάκης, «Μελέτη Ηλιοθερμικής Εγκατάστασης με Πύργο Ηλιακής Ισχύος στην Περιοχή του Αθερινόλακου», Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Μάρτιος 2012
- [14] Soteris, Kalogirou. Solar Energy Engineering: Processes and Systems. S.I. : Elsevier, 2009. ISBN 978-0-12-3745501-9
- [15] M. Günther, M. Joemann, S. Csambor, "Parabolic Through Technology", In: «Advanced CSP Teaching Material», Deutsches Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V., 2011

- [16] Renewable-technology.com [Ηλεκτρονικό] <https://www.renewable-technology.com/projects/andasol-solar-power-station-andalusia/>
- [17] Solarplaces.org [Ηλεκτρονικό] <https://www.solarpaces.org/>
- [18] Zhang, H. L., Baeyens, J., Degreve, J., & Caceres, G. (2013, January 26). Concentrated solar power plants : Review and design methodology [Pdf]. Elsevier.
- [19] Ferchichi, S., Kessentini, H., Morales-Ruiz, S., Rigola, J., & Bouden, C. (2019, May 30). Thermal and fluid dynamic analysis of Direct Steam Generation Parabolic Trough Collectors [Pdf]. Elsevier.
- [20] Energy.gov [Ηλεκτρονικό] <https://www.energy.gov/eere/solar/downloads/skytrough-parabolic-solar-collector>
- [21] Maroccoworldnews.com [Ηλεκτρονικό] <https://www.maroccoworldnews.com/2019/05/274576/noor-iii-morocco-performance-solar-energy/>
- [22] Qazi, S. (2017). Solar Thermal Electricity and Solar Insolation. Standalone Photovoltaic (PV) Systems for Disaster Relief and Remote Areas, 203–237. doi:10.1016/b978-0-12-803022-6.00007-1
- [23] Lovegrove, K., & Csiro, W. S. (2012). Introduction to concentrating solar power (CSP) technology. Concentrating Solar Power Technology, 3–15. doi:10.1533/9780857096173.1.3
- [24] S. C. Bhatia, «Advanced Renewable Energy Systems», Woodhead Publishing India Pvt Ltd, 2014. ISBN 978-1-78242-269-3
- [25] Z. Wang, «Design of Solar Thermal Power Plants», Elsevier Science, 2019. ISBN 978-0-12-815613-1
- [26] D. Barlev, R. Vidu, P. Stroeve, «Innovation in concentrated solar power», Elsevier Science, 2011. ISBN 978-0-08-100516-3
- [27] En.wikipedia.org [Ηλεκτρονικό] [https://en.wikipedia.org/wiki/Puerto\\_Errado](https://en.wikipedia.org/wiki/Puerto_Errado)
- [28] P. Breeze, «Solar Power Generation», Elsevier, 2016. ISBN 978-0-12-804004-1
- [29] S. A. Kalogirou, «Solar Energy Engineering», Academic Press, 2013. ISBN 978-0-12-397270-5
- [30] Sbp.de [Ηλεκτρονικό] <https://www.sbp.de/solarenergie/>
- [31] P. Breeze, «Piston Engine – Based Power Plants», Elsevier, 2018. ISBN 978-0-12-812904-3
- [32] Ranieri, S., Prado, G., & MacDonald, B. (2018). «Efficiency Reduction in Stirling Engines Resulting from Sinusoidal Motion», Energies, 11(11), 2887. doi:10.3390/en11112887
- [33] Y. Li, S. Liao, G Liu, « Thermo-economic multi-objective optimization for a solar-dish Brayton system using NSGA-II and decision making », Elsevier, 2015, p.167-175
- [34] Le Roux, S. G., Bello-Ochende, T., & Meyer, J. (2011, August 6). Operating conditions of an open and direct solar thermal Brayton cycle with optimised cavity receiver and recuperator [Pdf]. Elsevier.

- [35] Juany M. Valenzuela, «Performance of a 50 MW Concentrating Solar Power Plant», Politecnico Di Bari, Diploma Theses, 2011
- [36] R. V. Padilla, «Simplified Methodology for Designing Parabolic Trough Solar Power Plants», University of South Florida, PhD Theses, 2001
- [37] Lippke, F., 1995. Simulation of the part-load behavior of a 30MWe SEGS plant. Tech. rep., SAND-95-1293, Sandia National Labs., Albuquerque, NM (United States).
- [38] M. J. Montes, A. Abanades, J. M. Martinez-Val., M. Valdes, «Solar multiple optimization for a solar-only thermal power plant», Solar Energy, 2009, 83.
- [39] M. Günther, M. Joemann, S. Csambor, “Parabolic Trough Technology”, In: «Advanced CSP Teaching Material», Deutsches Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V., 2011
- [40] J Liu, D Lei, Q Li, «Vacuum lifetime and residual gas analysis of parabolic trough receiver», Elsevier, 2016, p.949-954
- [41] D. Lei, Z. Wang, J. Li, «The calculation and analysis of glass-to-metal sealing stress in solar absorber tube», s.l. : Reneable and sustainable energy sources, 2010
- [42] D. Yogi Goswami, F. Kreith, «Energy Efficiency and Renewable Energy Handbook», CRC Press, 2015, ISBN 978-1-46-658509-6
- [43] Alvarez, Romero Manuel, «Concentrated Solar Thermal Power» [συγγρ. Βιβλίου], Frank Kreith, In: «Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy», s.l : SolarPaces, 2005
- [44] Geyer, M., Esteban, A., Osuna, R., Schiel, W., Lüpfert, E., Schweitzer, A., . . . Mandelberg, E. (2002, September 4-6). Eurotrough - Parabolic Trough Collector Developed for Cost Efficient Solar Power Generation [Pdf]. Zurich: 11th SolarPACES International Symposium on Concentrated Solar Power and Chemical Energy Technologies.
- [45] Lüpfert, E., Zarza-Moya, E., Geyer, M., Nava, P., Langenkamp, J., Schiel, W., . . . Mandelberg, E. (n.d.). EUROTROUGH COLLECTOR QUALIFICATION COMPLETE - PERFORMANCE TEST RESULTS FROM PSA
- [46] Andrea Giostri, «Transient effects in linear concentrating solar thermal power plant», Politecnico di Milano, PhD Theses, 2014
- [47] D. Kearney, B. Kelly, U. Herrmann, R. Cable, J. Pacheco, R. Mahoney, H. Price, D. Blake, P. Nava, N. Potrovitza, Engineering aspects of a molten salt heat transfer fluid in a trough solar field, Elsevier, 2004
- [48] D. Kearney, B. Kelly, U. Herrmann, R. Cable, J. Pacheco, R. Mahoney, H. Price, D. Blake, P. Nava, N. Potrovitza, «Assessment of a Molten Salt Heat Transfer Fluid in a Parabolic Trough Solar Field», Elsevier, 2003
- [49] Nrel.com [Ηλεκτρονικό]  
<https://www.nrel.gov/docs/fy07osti/41423.pdf>
- [50] S. K. Tyagi, N.L. Panwar, S. C. Kaushik, R. Vundela Siva, «An Approach to Analyse Energy and Exergy Analysis of Thermal Power Plants: A Review », Scientific Research, 2010

- [51] A. Gil, M. Medrano, I. Martorell, «State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010
- [52] N. Navarrete, R. Mondragon, D. Wen, M.E. Navarro, Y. Ding, J. Enrique Julia, «Thermal energy storage of molten salt –based nanofluid containing nano-encapsulated metal alloy phase change materials», *Elsevier*, 2019, p.912-920
- [53] Suntechnologiesindia.com [Ηλεκτρονικό]  
<http://www.suntechnologiesindia.com/solar/solar-thermal-power/index.html>
- [54] Β. Ν. Κρασσάς, «Συγκεντρωτικά Ηλιακά Συστήματα: Μια οικονομοτεχνική μελέτη για την Ελληνική επικράτεια», Διπλωματική εργασία, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Μάρτιος 2011
- [55] Climate.onebuilding.org [Ηλεκτρονικό] <http://climate.onebuilding.org/default.html>
- [56] I. Herrera, A. Rojas, F. L. Villardefrancos, «Analysis for the integration of solar energy to sugarcane bagasse cogeneration power plant in the Cuban context: A case study», *Institute of Thermal Technology*, 2019
- [57] E. Bellos, C. Tzivanidis, K.A. Antonopoulos, A detailed working fluid investigation for solar parabolic trough collectors, *Applied Thermal Engineering* (2016), doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.11.201>
- [58] www.schott.com [Ηλεκτρονικό] [https://www.schott.com/d/csp/370a8801-3271-4b2a-a3e6-c0b5c78b01ae/1.0/schott\\_ptr70\\_4th\\_generation\\_brochure.pdf](https://www.schott.com/d/csp/370a8801-3271-4b2a-a3e6-c0b5c78b01ae/1.0/schott_ptr70_4th_generation_brochure.pdf)
- [59] Academia.edu [Ηλεκτρονικό]  
[https://www.academia.edu/38029324/Chapter\\_5\\_Heat\\_Exchangers](https://www.academia.edu/38029324/Chapter_5_Heat_Exchangers)
- [60] Κ. Γ. Πασπαλάς, «Εναλλάκτες θερμότητας», Τζιόλα, 2014, ISBN 978-960-418-439-2
- [61] Vdocuments.mx [Ηλεκτρονικό] <https://vdocuments.mx/section-54-shell-and-tube-heat-exchangercorrected.html>
- [62] Turchi, C., 2010. Parabolic Trough Reference Plant for Cost Modeling with the Solar Advisor Model (SAM). Tech. rep., National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO
- [63] Logan, E., 1993. *Turbomachinery: Basic theory and applications*. CRC.
- [64] N. Caldes, M. Varela, M. Santamaria, R. Saez, «Economic impact of solar thermal electricity deployment in Spain», *Energy Policy*, 2009, 37
- [65] T. Roumpedakis, «Techo-economic investigations of a solar driven ORC-sorption system for combined cooling, heating and power», Master Thesis, NTUA, Athens, 2018
- [66] «Οδηγός αξιολόγησης έργων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με συγκέντρωση Ηλιακής ακτινοβολίας», P.A.E., 2010
- [67] Astolfi, M., An Innovative Approach for the Techno-Economic Optimization of Organic Rankine Cycles, in Dipartimento di Energia, Politecnico di Milano, 2014



- [68] NETL, Cost Estimation Methodology for NETL Assessments of Power Plant Performance, 2011.
- [69] Opengov.gr [Ηλεκτρονικό] [http://www.opengov.gr/minenv/wp-content/uploads/downloads/2016/06/2016\\_06\\_17\\_Sxedio\\_Nomou\\_APE.pdf](http://www.opengov.gr/minenv/wp-content/uploads/downloads/2016/06/2016_06_17_Sxedio_Nomou_APE.pdf)
- [70] Ε. Κακαράς, Σ. Καρέλλας, «Αντιρρυπαντική Τεχνολογία Θερμικών Σταθμών», Τσότρας, Αθήνα, 2013
- [71] Sdgresources.relx.com [Ηλεκτρονικό] [https://sdgresources.relx.com/sites/default/files/icis\\_white-paper\\_the-impact-of-higher-carbon-prices-on-utilities-and-industries.pdf](https://sdgresources.relx.com/sites/default/files/icis_white-paper_the-impact-of-higher-carbon-prices-on-utilities-and-industries.pdf)
- [72] Ε. Karampinis, D. Vamvuka, S. Sfakiotakis, P. Grammelis, G. Itskos, E. Kakaras, « Comparative Study of Combustion Properties of Five Energy Crops and Greek Lignite», Energy and Fuels, 2011
- [73] Kathimerini.gr [Ηλεκτρονικό] <https://www.kathimerini.gr/439653/article/politismos/arxeio-politismoy/hlektrikh-energeia-apo-agriagkinara>
- [74] Murphy, F., G. Devlin, and K. McDonnell, Miscanthus production and processing in Ireland: An analysis of energy requirements and environmental impacts. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013. 23: p. 412-420.
- [75] Nixon, P. and M. Bullard, Planting and growing Miscanthus, best practice guidelines. 2001, Defra Publications.
- [76] Parajuli, R., K. Sperling, and T. Dalgaard, Environmental performance of Miscanthus as a fuel alternative for district heat production. Biomass and bioenergy, 2015. 72: p. 104-116.
- [77] Docplayer.gr [Ηλεκτρονικό] <https://docplayer.gr/1570859-Dr-kon-nos-spanos-paylonia-paulownia-spp.html>
- [78] Rebelo de Mira,R., Kroeze, C., 2006. Greenhouse gas emissions from willow-based electricity: a scenario analysis for Portugal and The Netherlands. Energy Policy 34 , 1367–1377 Krzyzaniaka,M., Stolarski,M.,J., Waliszewska,B., Szczukowski,S., Tworkowski,J., Załuski, D.,Snieg, M., 2014. Willow biomass as feedstock for an integrated multi-product biorefinery. Industrial Crops and Products 58, 230–237
- [79] Κ. Θεοχάρης, «Προεπεξεργασία με μύκητες και εύρεση ενζύμων υπεύθυνων για την υδρόλυση και την σακχαροποίηση λιγνοκυτταρινούχου βιομάζας», Διπλωματική εργασία, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2016
- [80] Ikee.lib.auth.gr [Ηλεκτρονικό] <http://ikee.lib.auth.gr/record/134961/files/GRI-2014-12962.pdf>
- [81] Karampinis, E., Sissot, F., Grammelis, P., Rossi, F., Kakaras, E., Investigation of Wheat Straw Supply Chains for Co-Firing Power Plants in Northern Greece, 20th European Biomass Conference and Exhibition, Milan 18-22 June 2012, pp. 136 – 142
- [82] Irena.org [Ηλεκτρονικό] <https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2013/IRENA-ETSAP-Tech-Brief-E21-Biomass-Co-firing.pdf>