



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

Εργαστήριο Ατμοπαραγωγών & Θερμικών Εγκαταστάσεων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*«Μελέτη υβριδικών ανανεώσιμων
συστημάτων παραγωγής ενέργειας με
Γεωθερμία»*

Του Φοιτητή

Σωτηρίου Κυριάκη

Επιβλέπων

Εμμανουήλ Κακαράς, Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων
Μηχανικών

Αντί προλόγου

Η περάτωση της παρούσας διπλωματικής σηματοδοτεί το πέρας των προπτυχιακών μου σπουδών στη σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π.

Θα ήθελα, πρωτίστως, να ευχαριστήσω θερμά τους γονείς μου Αναστάσιο και Μαρία για την αμέριστη βοήθεια τους, υλική και ηθική, που μου προσφέρουν όλα αυτά τα χρόνια και έχουν συνδράμει τα μέγιστα ώστε να βρίσκομαι σε αυτήν τη θέση, καθώς και για τις ηθικές αξίες που μου έχουν προσφέρει στη ζωή μου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Εμμανουήλ Κακαρά, καθηγητή της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., ο οποίος μου έδωσε τη δυνατότητα να ασχοληθώ με την παρούσα διπλωματική, που τόσο πολύ ήθελα. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω εκ καρδιάς τον κ. Σωτήριο Καρέλλα, επίκουρο καθηγητή της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., για τις πολύτιμες γνώσεις που μου προσέφερε κατά τη διάρκεια των σπουδών μου, καθώς και για την επίβλεψη της παρούσας διπλωματικής, βοηθώντας σημαντικά στην ολοκλήρωση της. Θα ήταν παράλειψη αν δεν ευχαριστούσα τον Μηχανολόγο Μηχανικό Γεώργιο Πανούση για την σημαντική βοήθεια που μου προσέφερε στο υπολογιστικό μέρος της διπλωματικής μου.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω αρκετούς συμφοιτητές μου, με τους οποίους συνεργάστηκα κατά τη διάρκεια των σπουδών μου, και ιδιαίτερα το Στέφανο Δεληκαράογλου για την αμέριστη βοήθεια που μου προσέφερε, και του προσέφερα, όλα αυτά τα χρόνια.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όλους τους φίλους μου, οι οποίοι ήταν δίπλα μου σε όλες τις εύκολες και δύσκολες στιγμές της ζωής μου, και έκαναν την καθημερινότητα μου πολύ πιο ευχάριστη.

Σωτήριος Κυριάκης

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η μελέτη διαφόρων υβριδικών ανανεώσιμων συστημάτων παραγωγής ενέργειας, βασισμένων στη γεωθερμία. Η μελέτη υβριδικών ανανεώσιμων συστημάτων παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς είναι γνωστή η παγκόσμια ανησυχία για τις κλιματικές αλλαγές και το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Τα συστήματα αυτά προέρχονται από τον υβριδισμό ανανεώσιμων συστημάτων, άρα συμβάλλουν στην προστασία του περιβάλλοντος λόγω μηδενικών εκπομπών ρυπαντών. Στην παρούσα διπλωματική θα μελετηθούν υβριδικά ανανεώσιμα συστήματα παραγωγής ενέργειας, τα οποία βασίζονται στη γεωθερμία, δηλαδή την ενέργεια που προέρχεται από το εσωτερικό της Γής.

Η παρούσα διπλωματική χωρίζεται σε δύο μέρη, το θεωρητικό μέρος (κεφάλαια 1 και 2) και το υπολογιστικό μέρος (κεφάλαια 3 και 4).

Στο 1^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται ορισμένα βασικά στοιχεία γύρω από τη γεωθερμική ενέργεια, η οποία αποτελεί τη βασική πηγή ενέργειας των εγκαταστάσεων που μελετάμε. Αναφέρονται τα βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της γεωθερμίας έναντι των άλλων μορφών ενέργειας, οι δυνατότητες χρήσεις της γεωθερμίας (άμεσες και έμμεσες), καθώς και οι κυριότεροι θερμοδυναμικοί κύκλοι ηλεκτροπαραγωγής από γεωθερμική ενέργεια. Τέλος, γίνεται μια αναφορά στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της γεωθερμίας, καθώς επίσης δίνονται και ορισμένα στοιχεία για το μέλλον της γεωθερμικής ενέργειας.

Στο 2^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται στοιχεία από διάφορες μελέτες που έχουν γίνει πάνω στα υβριδικά συστήματα γεωθερμίας. Παρουσιάζονται μελέτες συνδυασμού γεωθερμικών συστημάτων με συμβατικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, καθώς και με ηλιακή ενέργεια. Οι παραπάνω μελέτες αναφέρονται σε γεωθερμικά πεδία υψηλής ενθαλπίας. Επίσης, παρουσιάζεται μια μελέτη συνδυασμού ηλιακών συλλεκτών με αντλίες θερμότητας. Τέλος, παρουσιάζονται ενδεικτικά τα βασικά εξελιγμένα συστήματα ηλεκτροπαραγωγής από γεωθερμία.

Στο 3^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μελέτη συνδυασμού γεωθερμικής ενέργειας με θερμική ενέργεια προερχόμενη από καύση βιομάζας. Συγκεκριμένα, μελετάται η δυνατότητα παρεμβολής ενός λέβητα ζεστού νερού σε έναν απλό κύκλο ORC, με σκοπό την υπερθέρμανση του εργαζόμενου μέσου προ της εισόδου του στον ατμοστρόβιλο. Παρουσιάζονται οι επιδόσεις της υβριδικής εγκατάστασης, ενώ γίνονται σαφή τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της εγκατάστασης, μέσω ενεργειακής και εξεργειακής ανάλυσης της.

Στο 4^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μελέτη συνδυασμού γεωθερμικής ενέργειας με ηλιακή ενέργεια. Συγκεκριμένα, μελετάται η δυνατότητα παρεμβολής παραβολικών συλλεκτών σε έναν απλό κύκλο ORC, με σκοπό την υπερθέρμανση του εργαζόμενου μέσου προ της εισόδου του στον ατμοστρόβιλο. Αρχικά, γίνεται διαστασιολόγηση της εγκατάστασης με σκοπό τη μέγιστη δυνατή υπερθέρμανση του εργαζόμενου μέσου την ώρα της μέγιστης ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ στη συνέχεια παρουσιάζονται οι επιδόσεις της εγκατάστασης για την 21^η Ιουνίου και την 21^η Δεκεμβρίου. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε για το νησί της Μήλου. Τέλος, γίνεται εξεργειακή ανάλυση της παρούσας εγκατάστασης.

Abstract

The purpose of this diploma thesis is to study various hybrid renewable energy systems, based on geothermal energy. The study of hybrid renewable energy systems is very interesting due to worldwide concern about climate change and global warming. These systems come from the hybridization of renewable energy systems, thus contributing to environmental protection due to zero emissions of air pollutants. In this diploma thesis will be studied hybrid renewable energy systems, based on geothermal energy, ie energy from the Earth's interior.

This thesis is divided into two parts, the theoretical part (Chapters 1 and 2), and the computational part (Chapters 3 and 4).

The 1st Chapter presents some basics around geothermal energy, which is the main source of energy in the power plants studied. There are presented the main advantages and disadvantages of geothermal energy over other forms of energy, the potential uses of geothermal energy (direct and indirect), and the main thermodynamic cycles of power generation. Finally, there is given a report on the environmental impacts of geothermal energy, and there are also given some information about the future of geothermal energy.

The 2nd Chapter presents data from several studies done on hybrid geothermal systems. There are presented studies done on combination of geothermal systems with conventional power plants, and solar energy. These studies refer to high enthalpy geothermal fields. There is also presented a study of combining solar collectors with heat pumps. Finally, there are presented the main aspects of advanced geothermal systems for electricity production.

The 3rd Chapter presents the study of combination of geothermal energy with heat energy from biomass burning. Specifically, we study the possibility of inserting a hot water boiler in a typical ORC cycle in order to superheat the working fluid before entering the steam turbine. There is also presented the performance of the hybrid plant, and finally, the main advantages and disadvantages of the establishment are made clear through energy and exergy analysis.

The 4th Chapter presents the study of combining geothermal energy with solar energy. Specifically, we study the possibility of inserting parabolic collectors in a typical ORC cycle in order to superheat the working fluid before entering the steam turbine. First, the plant sizing is based on the maximization of working fluid's superheating at the time of maximum solar radiation. Then, there is shown the performance of the hybrid plant on the 21st June and 21st December. The study is done for Milos Island. Finally, an exergy analysis is made on this hybrid plant.

Περιεχόμενα

1) Γεωθερμική Ενέργεια.....	13
1.1) Εισαγωγικά.....	13
1.2) Γιατί Γεωθερμία? Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα Γεωθερμίας	14
1.3) Είναι η γεωθερμική ενέργεια ανανεώσιμη?.....	15
1.4) Διάκριση Γεωθερμικών πεδίων	17
1.5) Η γεωθερμία στην Ελλάδα	18
1.6) Η Γεωθερμία στον Κόσμο	20
1.6.1) Παραγωγή ηλεκτρισμού.....	20
1.6.2) Άμεσες χρήσεις.....	22
1.7) Χρήσεις Γεωθερμίας	22
1.8) Βασικοί θερμοδυναμικοί κύκλοι ηλεκτροπαραγωγής	27
1.8.1) Άμεσος κύκλος	27
1.8.2) Κύκλος ξηρού ατμού	29
1.8.3) Δυαδικός κύκλος	31
1.8.3.1) Οργανικός κύκλος Rankine(ORC)	32
1.8.3.2) Κύκλος Kalina	35
1.8.4) Περαιτέρω εκμετάλλευση γεωθερμικού ρευστού	37
1.9) Αντλίες θερμότητας(Αβαθής Γεωθερμία)	38
1.10) Περιβαλλοντικές επιπτώσεις γεωθερμικών σταθμών.....	40
1.11) Το μέλλον της Γεωθερμικής Ενέργειας	45
2)Υβριδικά γεωθερμικά συστήματα και εξελιγμένα συστήματα γεωθερμίας ..	47
2.1) Συνδυασμός γεωθερμικών συστημάτων με συμβατικούς σταθμούς	47
2.1.1) Υπερθέρμανση γεωθερμικού ρευστού με καύση καυσίμου	48
2.1.2) Γεωθερμική προθέρμανση τροφοδοτικού νερού συμβατικού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής.....	51
2.1.3) Συνδυασμός των δύο παραπάνω συστημάτων	55
2.1.4) Συνδυασμός με αεριοστρόβιλο	56
2.2) Συνδυασμός γεωθερμικών συστημάτων με ηλιακή ενέργεια.....	61
2.3) Συνδυασμός γεωθερμικών αντλιών θερμότητας με ηλιακούς συλλέκτες	70
2.4) Εξελιγμένα συστήματα γεωθερμίας	73
2.4.1) Δυαδικός κύκλος με δύο εργαζόμενα μέσα	73
2.4.2) Δυαδικός κύκλος δύο πιέσεων	75
2.4.3) Συνδυασμός άμεσου με δυαδικό κύκλο	76

3)	Συνδυασμός Γεωθερμικής Ενέργειας με Βιομάζα	81
3.1)	Βασικά στοιχεία	81
3.2)	Μελέτη θερμοκρασίας εξόδου από τον αναγεννητικό προθερμαντή ($T_{ph,ex}$)	87
3.2.1)	Μελέτη για σταθερή απορροφόμενη θερμότητα από το γεωθερμικό ρευστό ..	88
3.2.2)	Μελέτη για σταθερή διαφορά θερμοκρασίας στο ψυχρό άκρο του γεωθερμικού προθερμαντή.....	94
3.2.3)	Συγκριτική αξιολόγηση των δύο σεναρίων.....	99
3.3)	Μελέτη θερμοκρασίας υπερθέρμανσης οργανικού μέσου (T_{sh}).....	101
3.3.1)	Μελέτη για σταθερή απορροφόμενη θερμότητα από το γεωθερμικό ρευστό	101
3.3.2)	Συγκριτική αξιολόγηση των δύο σεναρίων για τα δύο εργαζόμενα μέσα	106
3.4)	Μελέτη ξεχωριστής λειτουργίας των εγκαταστάσεων	112
3.5)	Κατανάλωση διαφόρων ειδών βιομάζας.....	117
3.6)	Μελέτη θερμοκρασίας γεωθερμικού ρευστού (T_{geo})	124
3.7)	Μεταφερόμενη θερμότητα και ροή ενέργειας.....	130
3.8)	Εξεργειακή Ανάλυση	136
3.8.1)	Γενικά για την εξέργεια.....	136
3.8.2)	Εξέργεια συστήματος.....	137
3.8.3)	Φυσική εξέργεια	138
3.8.4)	Χημική εξέργεια	138
3.8.5)	Εξέργεια έργου και εξέργεια θερμότητας	140
3.8.6)	Εξεργειακή ανάλυση τμημάτων τις εγκατάστασης	141
3.8.7)	Τελικά αποτελέσματα	147
3.8.7.1)	Αναλυτικά αποτελέσματα για το πρώτο σενάριο.....	147
3.8.7.2)	Συνολικά αποτελέσματα για το δεύτερο σενάριο	150
3.8.7.3)	Μέσος όρος των δύο σεναρίων	150
3.8.8)	Διαγράμματα ροής εξέργειας	151
	Συμπεράσματα-Προτάσεις:.....	152
4)	Συνδυασμός Γεωθερμικής Ενέργειας με Ηλιακή Ενέργεια	153
4.1)	Βασικά Στοιχεία	153
4.2)	Διαστασιολόγηση της εγκατάστασης.....	159
4.3)	Μελέτη ξεχωριστής λειτουργίας των εγκαταστάσεων	169
4.4)	Εξεργειακή-Ενεργειακή Ανάλυση της υβριδικής εγκατάστασης	176
4.4.1)	Εξεργειακή Ανάλυση	176
4.4.1.1)	Αναλυτικά αποτελέσματα για N-S προσανατολισμό	178
4.4.1.2)	Αναλυτικά αποτελέσματα για W-E προσανατολισμό	180

4.4.1.3) Μέσος όρος των δύο περιπτώσεων	182
4.4.2) Διαγράμματα Q-T και διαγράμματα Sankey	185
Συμπεράσματα-Προτάσεις:.....	188
Βιβλιογραφία	189

Θεωρητικό Μέρος

1) Γεωθερμική Ενέργεια

1.1) Εισαγωγικά

Γεωθερμία (από τις ελληνικές ρίζες Γη-Θερμότητα) είναι η ενέργεια που εξάγεται από την αποθηκευμένη θερμότητα στη Γη, και μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τον άνθρωπο. Η Γεωθερμική Ενέργεια υφίσταται από τότε που υπάρχει ο πλανήτης Γη, και η προέλευση της οφείλεται κυρίως στις διασπάσεις των ραδιοϊσοτόπων του Ουρανίου και του Θορίου που υπάρχουν στο εσωτερικό της Γης και εκλύουν πολύ μεγάλα ποσά θερμότητας, καθώς επίσης και σε ένα μικρό ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που απορροφάται από το έδαφος. Η θερμοκρασία του πυρήνα της Γης εκτιμάται περίπου στους 6650°C. Τα τετηγμένα πετρώματα που ρέουν στο εσωτερικό της Γης (μάγμα) έχουν μια θερμοκρασία περίπου 2200°C. Έχει υπολογιστεί ότι αν κάνουμε μια επαρκώς βαθιά γεώτρηση στο φλοιό της Γης θα διαπιστώναμε ότι η θερμοβαθμίδα είναι περίπου 3°C/100m. Προφανώς, αυτή είναι μια μέση τυπική τιμή που αντικατοπτρίζει την μέση θερμοβαθμίδα του φλοιού της Γης. Σε κάποιες περιπτώσεις, κυρίως σε περιοχές με ηφαιστειακή-τεκτονική δραστηριότητα, όπου ο φλοιός της Γης είναι πιο λεπτός, η θερμοβαθμίδα μπορεί να είναι 10-30 φορές μεγαλύτερη της τυπικής. Για παράδειγμα, στο Larderello της Ιταλίας σε βάθος 1km η θερμοκρασία είναι 300°C, αρκετά υψηλή για γεωθερμικές εφαρμογές, και σε βάθος σχετικά μικρό για τις σημερινές τεχνικές γεωτρήσεων. Σε αυτές τις περιπτώσεις είναι δυνατή η εκμετάλλευση των υψηλών αυτών θερμοκρασιών για διάφορες χρήσεις όπως θα δούμε αναλυτικά παρακάτω. Οι τοπικές αυτές μεταβολές της θερμοβαθμίδας οφείλονται σε διάφορους λόγους όπως:

- Σε έντονη ηφαιστειακή και τεκτονική δραστηριότητα όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως. Αυτός είναι ο κύριος λόγος.
- Στην πετρολογική σύσταση της περιοχής, από την οποία εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό η τιμή της θερμικής αγωγιμότητας και επομένως η τιμή της θερμοβαθμίδας.
- Η επίδραση των κλιματικών παραγόντων. Η ηλιακή ενέργεια που φτάνει στην επιφάνεια της Γης είναι μεγαλύτερη από τη θερμότητα που προέρχεται από το εσωτερικό της. Επομένως, οι θερμοκρασιακές μεταβολές σε μικρό βάθος εξαρτώνται αρκετά από την περιοδικότητα και συχνότητα με την οποία δέχονται ηλιακή ακτινοβολία.
- Η μορφολογία του εδάφους. Η θερμοβαθμίδα κάτω από βουνά είναι μεγαλύτερη από ότι κάτω από πεδιάδες.
- Η επίδραση της κίνησης του νερού και η μεταφορά θερμότητας μέσω της κίνησης του στο υπέδαφος. Οι θερμές πηγές αποτελούν χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιου είδους μεταφοράς θερμότητας, η οποία πολύ συχνά προκαλεί σημαντικές τοπικές θερμοκρασιακές ανακατανομές.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η Γεωθερμία, ως μορφή ενέργειας, είναι γνωστή από τα αρχαία χρόνια. Στην Ελλάδα, για παράδειγμα, οι θερμές πηγές θεωρούνταν ιαματικές για αυτό και διάφοροι ιεροί χώροι βρίσκονταν κοντά σε αυτές. Σημαντικές είναι και οι αναφορές του Ιπποκράτη(460-375 π.Χ.) για τις ευεργετικές επιδράσεις των θερμών νερών.

Η χρήση των φυσικών θερμών ρευστών ήταν γνωστή και στους αρχαίους ανατολικούς λαούς, Κίνα-Ιαπωνία, με πληθώρα σχετικών μαρτυριών στην ιστορία τους καθώς και στους παλαιούς γηγενείς κατοίκους της Αμερικανικής ηπείρου. Οι Ετρούσκοι και οι Ρωμαίοι χρησιμοποιούσαν τα θερμά νερά όχι μόνο για ιαματικούς σκοπούς, αλλά και για την θέρμανση κτιρίων.

Εδώ αξίζει να σημειωθεί πως σύμφωνα με εκτιμήσεις το τεχνικά αξιοποιήσιμο γεωθερμικό δυναμικό είναι 1.400.000TWh, ενώ το οικονομικά αξιοποιήσιμο γεωθερμικό δυναμικό εκτιμάται 140.000TWh, όταν η παγκόσμια πρωτογενής κατανάλωση ενέργειας είναι περίπου 111.700TWh τον χρόνο. Αντιλαμβάνεται, λοιπόν, κανείς τα τεράστια περιθώρια διείσδυσης της γεωθερμίας στο ενεργειακό μίγμα του πλανήτη.

1.2) Γιατί Γεωθερμία: Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα Γεωθερμίας

Πλεονεκτήματα:

- Οικονομικά ελκυστική καθώς η τιμή της παραγόμενης KWh από ένα γεωθερμικό σταθμό είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με την τιμή της KWh ενός συμβατικού ΑΗΣ.
- Συνεχής παροχή γεωθερμικού ρευστού-συνεχής παραγωγή ενέργειας.
- Αξιόπιστη μορφή ενέργειας με ώριμη τεχνολογία (στροβίλους- εναλλάκτες κλπ).
- Ανανεώσιμη Μορφή Ενέργειας (Βλ. Επόμενη παράγραφο)
- Συνεισφέρει στην εξοικονόμηση στερεών καυσίμων.
- Συνεισφέρει στην περιφερειακή ανάπτυξη και στην αποκεντρωμένη παραγωγή ενέργειας.
- Εγχώρια πηγή ενέργειας-ενεργειακή απεξάρτηση.
- Φιλική προς το περιβάλλον καθώς οι εκπομπές ρυπαντών στο περιβάλλον είναι πρακτικά μηδενικές. Ιδίως οι μονάδες δυαδικού κύκλου έχουν όντως μηδενικές εκπομπές αφού έχουμε κλειστό κύκλωμα.
- Απαιτεί την μικρότερη έκταση Γης σε σχέση με οποιαδήποτε άλλη μορφή ενέργειας.

<u>Μορφή Ενέργειας</u>	<u>Απαιτούμενη έκταση ανά παραγόμενη GWhe(m²)</u>
Άνθρακας	3640
Βιοαέριο	3600
Ηλιακά θερμικά	3560
Αιολική	1335
Φωτοβολταϊκά	3237
Γεωθερμία	404

Πίνακας 1.1: Απαιτούμενη έκταση Γης για διάφορες μονάδες ηλεκτροπαραγωγής

Μειονεκτήματα:

- Λόγω των αιτιών προέλευσης της, που αναφέρθηκαν παραπάνω, η γεωθερμία περιορίζεται γεωγραφικά, ή ορθότερα είναι πολύ πιο ισχυρή, σε περιοχές με έντονη ηφαιστειακή δραστηριότητα, και όχι παντού. Με άλλα λόγια δεν μπορούμε να κατασκευάσουμε γεωθερμικό σταθμό οπουδήποτε εμείς επιθυμούμε. Βέβαια, η χρήση νέων τεχνολογιών, όπως οι δυαδικοί κύκλοι, τείνει να περιορίσει αυτό το πρόβλημα, καθώς αυξάνεται κατά πολύ το εύρος των θερμοκρασιών που χρησιμοποιούνται για ηλεκτροπαραγωγή.
- Το γεωθερμικό ρευστό δεν μπορεί να μεταφερθεί. Αυτό σημαίνει ότι η χρήση του και η παραγωγή ενέργειας πρέπει να γίνει εκεί όπου αυτό αντλείται. Αυτό είναι αρνητικό για τις μεγαλύτερες ηλεκτροπαραγωγικές μονάδες, επειδή πιθανότατα θα συνεπάγεται απαίτηση κτίσης ηλεκτρικού δικτύου ή και υποθαλάσσιου καλωδίου(περίπτωση Μήλου). Βέβαια, η γεωγραφική αυτή διασπορά ενισχύει τις τοπικές οικονομίες και φυσικά δημιουργεί και νέες θέσεις εργασίας στις κοινωνίες αυτές. Αυτό συμβάλλει στην ενεργειακή αυτονομία των περιοχών (ιδίως από θερμικής πλευράς) και στην απεξάρτησή τους από τα ορυκτά καύσιμα.

1.3) Είναι η γεωθερμική ενέργεια ανανεώσιμη:

Προκειμένου να πούμε αν η γεωθερμική ενέργεια είναι ανανεώσιμη θα πρέπει πρώτα να εξηγήσουμε την έννοια “ανανεωσιμότητα”. Η πιο σωστή και συχνή σύνδεση της έννοιας αυτής είναι με την έννοια “αιεφορία”. Ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας ορίζεται μία αιεφόρος πηγή ενέργειας, δηλαδή μία πηγή ενέργειας η οποία ανανεώνεται αφ’εαυτού.

Αξίζει εδώ να τονίσουμε την διαφορά των εννοιών ανανεώσιμη ενέργεια, με πράσινη ενέργεια καθώς συχνά συγχέονται και θεωρούνται ως ταυτόσημες έννοιες. Ως πράσινη ενέργεια ορίζεται εκείνη που δεν μολύνει το περιβάλλον με ρυπαντές, όπως αέρια του θερμοκηπίου, ενώ ως ανανεώσιμη ορίζεται η αιεφόρος πηγή ενέργειας. Βέβαια, πολλές φορές μια πράσινη μορφή ενέργειας είναι και ανανεώσιμη, αλλά υπάρχουν και περιπτώσεις όπου μια πηγή ενέργειας είναι ανανεώσιμη και δεν είναι πράσινη ή και αντίστροφα. Επίσης, όταν κατασκευάζεται η μονάδα παραγωγής της ενέργειας θα πρέπει να μην αλλοιώνει σε μεγάλο βαθμό το φυσικό περιβάλλον της τοποθεσίας για να θεωρηθεί πράσινη μορφή ενέργειας.

Για παράδειγμα, ένα μεγάλο υδροηλεκτρικό έργο εκπέμπει πρακτικά μηδενικούς ρυπαντές στο περιβάλλον, ενώ επίσης ανανεώνεται αφ’εαυτού το νερό. Αλλά, κατά το στάδιο της κατασκευής του, το περιβάλλον υφίσταται μεγάλη αλλοίωση (φράγματα, ταμιευτήρες), οπότε αποφεύγεται να θεωρηθεί πράσινη μορφή ενέργειας. Βέβαια, θεωρείται ανανεώσιμη πηγή ενέργειας.

Η γεωθερμική ενέργεια είναι αυτή που προέρχεται από την θερμότητα του εσωτερικού της Γης, και η οποία πρακτικά είναι απεριόριστη. Τα γεωθερμικά πεδία τροφοδοτούνται βασικά με μετεωρικά νερά (βροχή, χιόνι) ή άλλα επιφανειακής προέλευσης (ποταμιαία, λιμναία) τα οποία κατεισδύουν στο εσωτερικό της Γης, θερμαίνονται, εμπλουτίζονται σε αέρια και άλατα και μπαίνουν στον διαρκή κύκλο μεταφοράς θερμότητας. Μέσα στον ταμιευτήρα, όπου η κυκλοφορία είναι πιο γρήγορη και εύκολη, συγκεντρώνονται νερά κάτω από συνθήκες αυξημένης πίεσης και θερμοκρασίας, όπου θερμαίνονται δια αγωγής και συναγωγής. Ο ταμιευτήρας προστατεύεται από στεγανό γεωλογικό κάλυμμα, το οποίο εμποδίζει τη διάχυση της θερμικής ενέργειας στην επιφάνεια. Κάποιος βαθμός τοπικής εξάντλησης των πόρων στο συγκεκριμένο ταμιευτήρα μπορεί να συμβεί κατά την αξιοποίηση του πόρου, όταν ο ταμιευτήρας των γεωθερμικών ρευστών δεν ‘επικοινωνεί’ με την επιφάνεια του εδάφους, παρά μόνο σε πολύ μακρινή απόσταση και ο ρυθμός επανατροφοδοσίας και θέρμανσης των ρευστών δεν είναι ίσος με το ρυθμό άντλησης αυτών. Σε μερικούς μόνο θερμούς και εγκλωβισμένους ταμιευτήρες μέσα σε βαθιές ιζηματογενείς λεκάνες η επαναφόρτιση ελέγχεται από την αγωγή θερμότητας και είναι μια αργή, γενικά, διαδικασία. Υπάρχει, βέβαια, και η ακραία περίπτωση των εντελώς κλειστών ταμιευτήρων, οπότε η εκμετάλλευση με άντληση θα μπορούσε να οδηγήσει πρακτικά στην εκκένωση αυτών των ταμιευτήρων, όπως συμβαίνει για παράδειγμα στους ταμιευτήρες πετρελαίου.

Τα πιο συνηθισμένα συστήματα είναι τα υδροθερμικά, στα οποία τα φυσικά υπόγεια θερμά ρευστά, τα οποία συγκεντρώνονται σε έναν ή περισσότερους ταμιευτήρες, θερμαίνονται από μία εστία θερμότητας και με τη βοήθεια γεωτρήσεων έρχονται στην επιφάνεια και γίνονται αντικείμενο αξιοποίησης. Αυτά είναι τα κύρια συστήματα που αξιοποιούνται σήμερα. Κατά την εκμετάλλευση των υδροθερμικών συστημάτων, η επανατροφοδοσία της ενέργειας επιτυγχάνεται με τη φυσική αναπλήρωση του νερού στον ταμιευτήρα, στο ίδιο περίπου χρονικό διάστημα που γίνεται η παραγωγή των ρευστών.

Αυτό σημαίνει ότι το υπόγειο νερό ή ο ατμός που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή για την κάλυψη θερμικών αναγκών, με την κατάλληλη διαχείριση, δεν θα ελαττωθούν, εφόσον η κατείσδυση θα συνεχίσει να επανατροφοδοτεί τους ταμιευτήρες. Αρκεί βέβαια να μη γίνεται υπεράντληση. Η επαναδιοχέτευση των ρευστών, μετά τη χρήση τους, μέσω άλλων γεωτρήσεων και σε ικανοποιητικές αποστάσεις μπορεί να

αποκαταστήσει πλήρως την ποσότητα και την ποιότητα των ρευστών του ταμιευτήρα. Συνεπώς, οι γεωθερμικοί πόροι μπορούν να θεωρηθούν ανανεώσιμοι στην κλίμακα του χρόνου των τεχνολογικών και κοινωνικών συστημάτων και δε χρειάζονται μεγάλους γεωλογικούς χρόνους για αναγέννηση, όπως γίνεται με τα αποθέματα των ορυκτών καυσίμων.

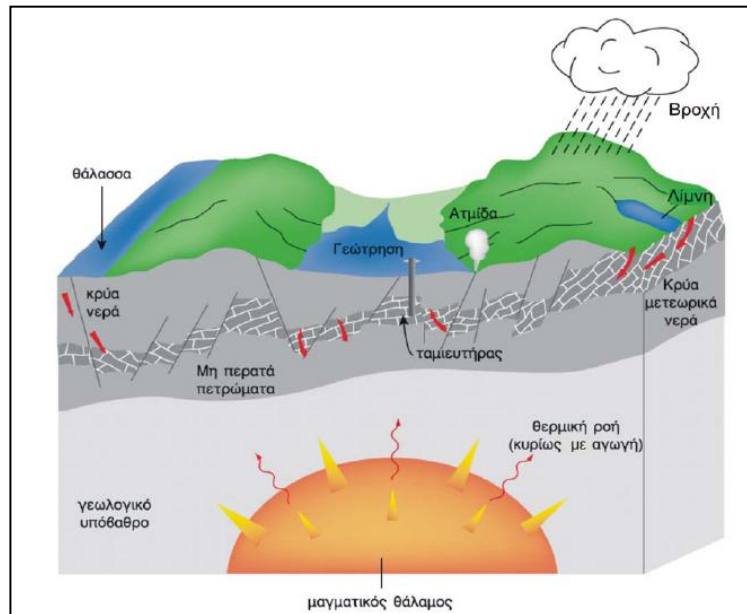
Γενικότερα, η γεωθερμική ενέργεια θεωρείται μία ανανεώσιμη μορφή ενέργειας γιατί ο ρυθμός εξαγωγής θερμότητας από την Γη για οποιαδήποτε χρήση είναι πολύ μικρός συγκριτικά με τη συνολική θερμότητα που υπάρχει στο εσωτερικό της Γης, οπότε πρακτικά έχουμε αφ'εαυτού ανανέωση του πόρου. Παρόλα αυτά, τα τρία γηραιότερα εν χρήσει γεωθερμικά πεδία της Γης, το Larderello στην Ιταλία, το Geysers στην Καλιφόρνια, και το Wairakei στη Νέα Ζηλανδία, έχουν με την πάροδο του χρόνου ελαττώσει την παραγωγή τους λόγω τοπικής εξάντλησης των ρεζερβουάρ.

Τέλος, στα γεωθερμικά πηγάδια έχουμε απελευθέρωση αερίων του θερμοκηπίου τα οποία ήταν παγιδευμένα στο εσωτερικό της Γης, αλλά προφανώς αυτές οι εκπομπές είναι αμελητέες μπροστά στις αντίστοιχες των σταθμών ορυκτών καυσίμων. Για αυτόν το λόγο η γεωθερμική ενέργεια πρακτικά θεωρείται πράσινη.

Στην εικόνα 1.1 φαίνεται το μοντέλο δημιουργίας ενός γεωθερμικού πεδίου, και τα κυριότερα γνωρίσματα του(από κάτω προς τα πάνω):

- Πηγή θερμότητας: πρόκειται για μαγματικό υλικό που βρίσκεται σε βάθος 5-15km και το οποίο, σχετικά πρόσφατα, έχει εισχωρήσει σε ανώτερα στρώματα του στερεού φλοιού της Γης, έτσι ώστε να διατηρεί αρκετά υψηλή θερμοκρασία της τάξης των 600-900°C.
- Ο γεωθερμικός ταμιευτήρας (ρεζερβουάρ), ο οποίος είναι ένας γεωλογικός σχηματισμός με μεγάλη διαπερατότητα και με μέγιστο βάθος 3km. Η μεγάλη διαπερατότητα αποτελεί βασική προϋπόθεση για την αξιοποίηση του γεωθερμικού πεδίου, διότι διαφορετικά δεν είναι δυνατό να λειτουργήσει παραγωγικά το πεδίο. Η διαπερατότητα του πεδίου είναι πιθανόν ένα χαρακτηριστικό που μεταβάλλεται με την πάροδο του χρόνου, εξ'αιτίας των αποθέσεων και εξαλλοιώσεων που προκαλεί η ροή θερμών ρευστών μέσα στη μάζα των πετρωμάτων, με αποτέλεσμα τη σταδιακή μείωση ή αύξηση της παροχής του γεωθερμικού πεδίου. Από γεωλογικής άποψης, τα υλικά των ταμιευτήρων διακρίνονται σε ιζηματογενή πετρώματα και σε ηφαιστειακά πετρώματα.
- Το κάλυμμα του ταμιευτήρα που το στεγανοποιεί: Πρόκειται για ένα γεωλογικό σχηματισμό που αποτελείται από πετρώματα χαμηλής διαπερατότητας, που υπέρκεινται του ταμιευτήρα και τα οποία διατηρούν το γεωθερμικό ρευστό μέσα στον ταμιευτήρα. Τα πετρώματα αυτά, είτε είναι αδιαπερατά, είτε έγιναν αδιαπερατά από αποθέσεις και καθιζήσεις αλάτων ή εξαλλοιώσεις των πετρωμάτων, τα οποία έφραξαν τις διόδους των γεωθερμικών ρευστών μέσα στη μάζα τους.
- Παροχή ρευστού για τη λειτουργία του γεωθερμικού πεδίου. Το γεωθερμικό ρευστό, το οποίο μεταφέρει θερμότητα από την πηγή θερμότητας προς την επιφάνεια της Γης για εκμετάλλευση, είναι σε μεγάλο ποσοστό νερό σε υγρή ή αέρια κατάσταση. Η προέλευση του γεωθερμικού νερού είναι τις περισσότερες φορές μετεωρική. Πρόκειται, δηλαδή, για ατμοσφαιρικό νερό, το οποίο κατέβηκε στο γεωθερμικό ταμιευτήρα και θερμάνθηκε. Μια μικρή ποσότητα νερού προκύπτει και από το μάγμα, όπως και από την ανακρυστάλλωση υδρομεταλλικών ενώσεων κατά τη μεταμόρφωση πετρωμάτων, αλλά αυτό έχει ελάχιστη συμμετοχή στο γεωθερμικό νερό. Η προέλευση του γεωθερμικού νερού είναι μερικές φορές και θαλασσινό νερό, το οποίο κατεισδύει στον ταμιευτήρα μέσω

ρηγμάτων και συνήθως αποτελεί το γεωθερμικό ρευστό των υποθαλάσσιων γεωθερμικών συστημάτων. Αξίζει εδώ να σημειωθεί, ότι το γεωθερμικό νερό σε καμία περίπτωση δεν είναι καθαρό, καθώς περιέχει διάφορα συστατικά σε αέρια μορφή καθώς και πολλά διαλυμένα και αιωρούμενα στερεά, κυρίως άλατα, τα οποία λαμβάνει καθώς διέρχεται από τα πετρώματα του ταμιευτήρα. Για αυτόν το λόγο από εδώ και στο εξής θα αναφερόμαστε σε γεωθερμικό ρευστό, και όχι νερό.



Εικόνα 1.1: Μοντέλο δημιουργίας ενός γεωθερμικού πεδίου (Πηγή: <http://www.ypan.gr/ape/files/mythoi-geothermia.pdf>,2008)

1.4) Διάκριση Γεωθερμικών πεδίων

Τα γεωθερμικά πεδία διακρίνονται συνήθως βάσει της θερμοκρασίας του γεωθερμικού ρευστού στον ταμιευτήρα ως εξής:

- 1) Πεδία χαμηλής ενθαλπίας: Πρόκειται για γεωθερμικά πεδία, στα οποία η θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού στον ταμιευτήρα δεν ξεπερνά τους 100°C . Αυτά τα πεδία βρίσκονται σε περιοχές, όπου η πηγή θερμότητας είναι σε μεγάλο βάθος και στην οποία η ροή θερμότητας είναι χαμηλή. Παλαιότερα, για να κριθεί ένα πεδίο οικονομικά εκμεταλλεύσιμο έπρεπε να έχει θερμοκρασία τουλάχιστον 60°C , αλλά με την πάροδο των χρόνων και τη βελτίωση της τεχνολογίας σήμερα πεδία με θερμοκρασία 30°C θεωρούνται ικανοποιητικά (βλ. Χρήσεις Γεωθερμίας).
- 2) Πεδία μέσης ενθαλπίας: Πρόκειται για γεωθερμικά πεδία, στα οποία η θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού είναι μεταξύ 100 και 150°C . Οι εφαρμογές των πεδίων αυτών (βλ. Χρήσεις Γεωθερμίας) είναι πάρα πολλές στη βιομηχανία, και στις καλλιέργειες, και επίσης με τη χρήση του λεγόμενου δυαδικού κύκλου(βλ. παράγραφο 1.8) μπορούν να αξιοποιηθούν και για ηλεκτροπαραγωγή.

- 3) Πεδία υψηλής ενθαλπίας: Πρόκειται για γεωθερμικά πεδία, στα οποία η θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού ξεπερνά τους 150°C. Αυτά τα πεδία βρίσκονται σε αρκετά μεγάλο βάθος και σε περιοχές του φλοιού της Γης, στις οποίες η θερμοκρασία είναι πολύ υψηλή εξ'αιτίας συνήθως πρόσφατης διείσδυσης σε αυτές μαγματικού υλικού. Στα πεδία αυτά το γεωθερμικό ρευστό βρίσκεται σε υψηλή θερμοκρασία και πίεση και επομένως η εμφάνιση του στην επιφάνεια γίνεται υπό τη μορφή ατμού ή μίγματος υγρού-ατμού. Η συχνότερη εμφάνιση του γεωθερμικού ρευστού είναι μέσα στα πετρώματα ως υπέρθερμο νερό, το οποίο καθώς ανεβαίνει στην επιφάνεια του εδάφους χάνει πίεση και μέρος του εκτονώνεται σε ατμό. Αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας, είναι να παράγεται κορεσμένο μίγμα νερού και ατμού, οι αναλογίες του οποίου διαφέρουν από πεδίο σε πεδίο.
- 4) Θερμά ξηρά πετρώματα: Πρόκειται για πεδία με θερμά ξηρά πετρώματα, τα οποία έχουν ελάχιστη ή μηδενική διαπερατότητα. Τα πετρώματα αυτά είναι θερμά λόγω της ύπαρξης σε μεγαλύτερα βάθη, υποκείμενα αυτών των πετρωμάτων, μαγματικών μαζών σε υψηλή θερμοκρασία, οι οποίες αποτελούν την πηγή θερμότητας των πετρωμάτων αυτών. Τα θερμά ξηρά πετρώματα είναι συνήθως γρανίτες, αν και σε ορισμένες περιπτώσεις παρατηρούνται ιζηματογενή πετρώματα, που παρουσιάζουν τις ιδιότητες των θερμών ξηρών πετρωμάτων. Για να γίνει μια έκταση θερμών ξηρών πετρωμάτων εκμεταλλεύσιμη θα πρέπει να αποκτήσει ικανοποιητική διαπερατότητα, ώστε να είναι δυνατή η εκμετάλλευση της θερμότητας τους. Για να συμβεί αυτό θα πρέπει να δημιουργηθούν κενά και ρωγμές στο πέτρωμα και η διαδικασία αυτή ονομάζεται διέγερση των πετρωμάτων. Για να θεωρηθεί επιτυχής θα πρέπει να πληροί κάποιες προϋποθέσεις, όπως είναι η μεγάλη διεπιφάνεια νερού-πετρώματος για την ικανοποιητική θέρμανση του νερού, μεγάλες διαρρήξεις στο πέτρωμα ώστε το νερό να διέρχεται με χαμηλή ταχύτητα από το πέτρωμα, και άρα μικρότερες αντιστάσεις, και μικρή περιεκτικότητα του νερού σε άλατα που μπορούν να προκαλέσουν τυχόν αποφράξεις στις σχισμές, στις οποίες κυκλοφορεί το νερό μέσα στο πέτρωμα.

1.5) Η γεωθερμία στην Ελλάδα

Η Ελλάδα, παρότι έχει πλούσιο γεωθερμικό δυναμικό, δεν έχει προσελκύσει ακόμα το ενδιαφέρον επενδυτών ιδίως για ηλεκτροπαραγωγή, η οποία είναι σε μηδενικά επίπεδα. Ο ελλαδικός χώρος διαθέτει γεωθερμικές πηγές διαφόρων δυναμικοτήτων σε αρκετά οικονομικά βάθη (~1km).

Η έρευνα για την αναζήτηση γεωθερμικής ενέργειας άρχισε ουσιαστικά το 1971 με βασικό φορέα το ΙΓΜΕ και μέχρι το 1979 αφορούσε μόνο τις περιοχές υψηλής ενθαλπίας. Κατά την εξέλιξη των εργασιών η ΔΕΗ ως άμεσα ενδιαφερόμενη για την ηλεκτροπαραγωγή, ανέλαβε τις παραγωγικές γεωτρήσεις υψηλής ενθαλπίας και την ανάπτυξη των πεδίων, χρηματοδοτώντας επιπλέον την έρευνα στις πιθανές για τέτοια ρευστά γεωθερμικές περιοχές. Συντάχθηκε ο προκαταρκτικός χάρτης γεωθερμικής ροής του ελληνικού χώρου, όπου φάνηκε ότι η γεωθερμική ροή είναι σε πολλές περιοχές εντονότερη από τη μέση γήινη. Από το 1971 ερευνήθηκαν οι εξής περιοχές: Μήλος, Νίσυρος, Λέσβος, Μέθανα, Σουσάκι Κορινθίας, Καμένα Βούρλα, Θερμοπύλες, Υπάτη, Αιδηψός, Κίμωλος, Πολυαίγος, Σαντορίνη, Κως, Νότια Θεσσαλία, Αλμωπία, περιοχή Στρυμόνα, περιοχή Ξάνθης, και άλλες.

Η αυξημένη ροή θερμότητας, λόγω της αυξημένης ηφαιστειακής και τεκτονικής δραστηριότητας, δημιουργήσε εκτεταμένες θερμικές ανωμαλίες, με μέγιστες τιμές θερμοβαθμίδας που ξεπερνούν τους $100^{\circ}\text{C}/\text{km}$. Σε κατάλληλες γεωλογικές συνθήκες, η ενέργεια αυτή θερμαίνει ρηχούς υπόγειους ταμειυτήρες ρευστών σε θερμοκρασίες μέχρι 100°C . Τα γεωθερμικά πεδία χαμηλής ενθαλπίας είναι διάσπαρτα σε όλη την ηπειρωτική και νησιωτική χώρα. Η συμβολή τους στο ενεργειακό ισοζύγιο μπορεί να γίνει σημαντική, αφού αποτελούν ενεργειακό πόρο φιλικό προς το περιβάλλον (βλ. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις Γεωθερμίας), κοινωνικά αποδεκτό και παρουσιάζουν σημαντικό οικονομικό και αναπτυξιακό ενδιαφέρον.

Στα βόρεια της Κόνιτσας, κοντά στο χωριό Αμάραντος υπάρχουν θερμές πηγές. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται στην οροσειρά της Πίνδου. Η θερμοκρασία του ατμού στην έξοδο του μετρήθηκε στους 32°C .

Στη Μήλο και στη Νίσυρο, λόγω του ηφαιστειακού τόξου, υπάρχουν σπουδαία γεωθερμικά πεδία και έχουν γίνει γεωτρήσεις παραγωγής (5 και 2 αντίστοιχα). Στη Μήλο μετρήθηκαν θερμοκρασίες μέχρι 325°C σε βάθος 1000m και στη Νίσυρο 350°C σε βάθος 1500m. Οι γεωτρήσεις αυτές θα μπορούσαν να στηρίξουν μονάδες ηλεκτροπαραγωγής 20 και 5 MWe αντίστοιχα, ενώ το πιθανό συνολικό δυναμικό υπολογίζεται περίπου στα 200 και 50 MWe αντίστοιχα.

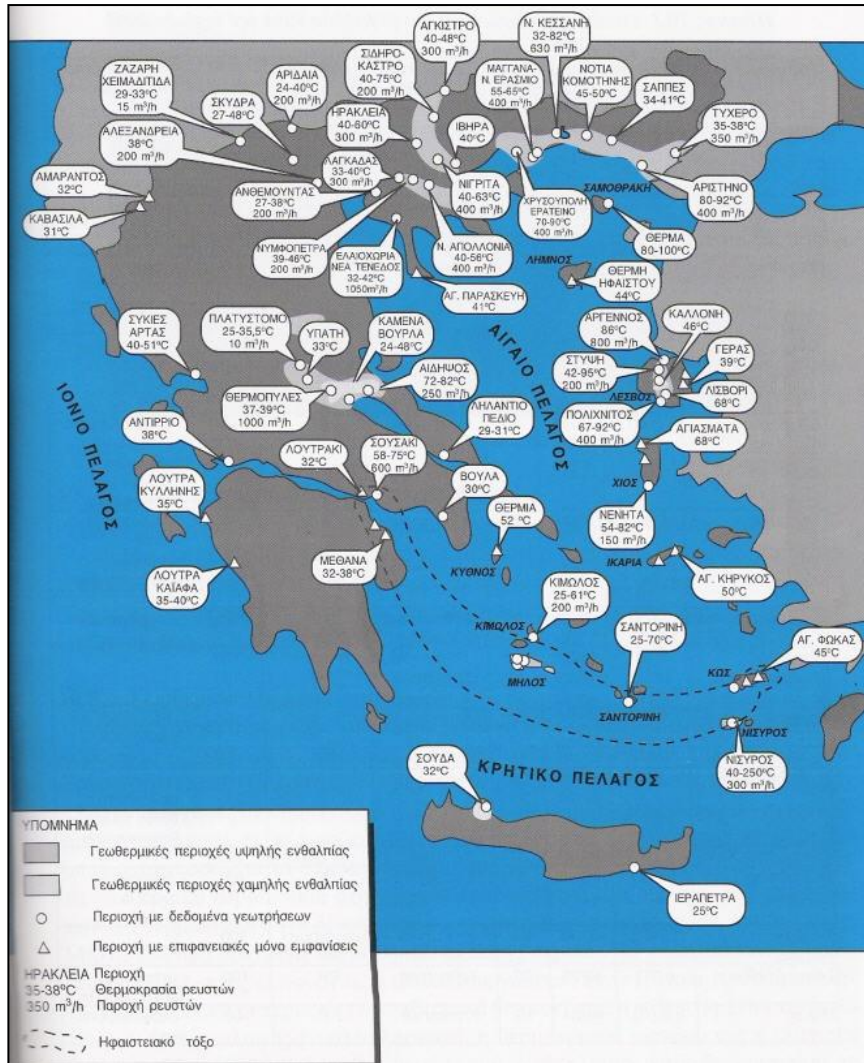
Στη βόρεια Ελλάδα, η γεωθερμία προσφέρεται για θέρμανση, χρήση σε θερμοκήπια, ιχθυοκαλλιέργειες κλπ. Στη λεκάνη του Στρυμόνα έχουν εντοπιστεί τα πολύ σημαντικά πεδία Θερμών-Νιγρίτας, Λιθότροπου-Ηράκλειας, Θερμοπηγής-Σιδηροκάστρου και Αγγίστρου. Πολλές γεωτρήσεις παράγουν νερά μέχρι 75°C , συνήθως αρτεσιανά και πολύ καλής ποιότητας και παροχής. Μεγάλα και μικρότερα γεωθερμικά θερμοκήπια λειτουργούν στη Νιγρίτα και το Σιδηρόκαστρο.

Στην πεδινή περιοχή του Δέλτα Νέστου έχουν εντοπιστεί δύο πολύ σημαντικά γεωθερμικά πεδία, στο Ερατεινό Χρυσούπολης και στο Νέο Εράσμιο Μαγγανών Ξάνθης. Νερά άριστης ποιότητας, θερμοκρασίας ως 70°C και σε πολύ οικονομικά βάθη παράγονται από γεωτρήσεις στις εύφορες αυτές πεδινές περιοχές. Στη Νέα Κεσσάνη και στο Πόρτο Λάγος Ξάνθης, σε μεγάλης έκτασης γεωθερμικά πεδία παράγονται νερά θερμοκρασίας ως 82°C .

Στη λεκάνη των λιμνών Βόλβης και Λαγκαδά έχουν εντοπιστεί τρία πολύ ρηχά πεδία με θερμοκρασίες μέχρι 56°C . Στη Σαμοθράκη υπάρχουν ενθαρρυντικά στοιχεία καθώς γεωτρήσεις βάθους 100m συνάντησαν νερά της τάξης των 100°C .

Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς σε άμεσες χρήσεις είναι 94MW_{th} , συμπεριλαμβανομένων και των αντλιών θερμότητας, που έχουν εγκατεστημένη ισχύ 20MW_{th} .

Στην εικόνα 1.2 βλέπουμε έναν αναλυτικό χάρτη του ελλαδικού χώρου με τα κυριότερα γεωθερμικά πεδία που έχουν ανακαλυφθεί και μελετηθεί.



Εικόνα 1.2: Γεωθερμικός χάρτης Ελλάδος (Πηγή: Διπλωματική Εργασία, Χαράλαμπος Δαμανιάδης, ΕΜΠ.2010)

1.6) Η Γεωθερμία στον Κόσμο

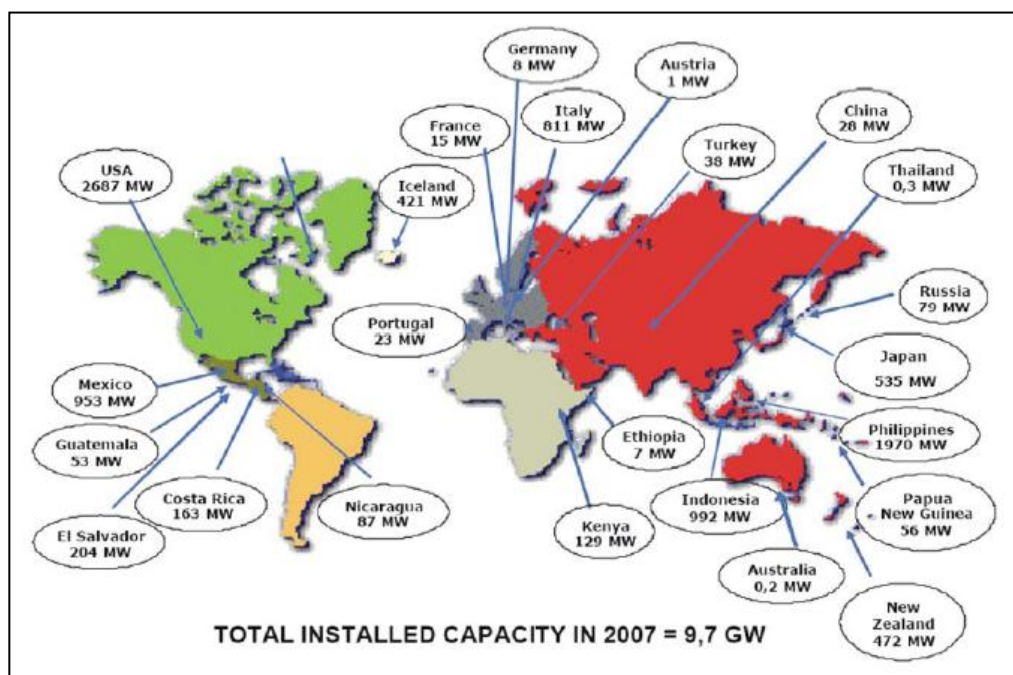
1.6.1) Παραγωγή ηλεκτρισμού

Η πρώτη βιομηχανική αξιοποίηση της Γεωθερμίας πραγματοποιήθηκε στο Larderello της Ιταλίας, όπου από τις αρχές του 19^{ου} αιώνα χρησιμοποιείτο υπέρθερμος ατμός για την παραγωγή βορικού οξέως και τη θέρμανση κτιρίων. Στην ίδια περιοχή το 1904 έγινε η πρώτη επιτυχημένη προσπάθεια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, με τη χρήση φυσικών ατμών που έβγαιναν υπό πίεση. Σήμερα σε αυτήν την περιοχή λειτουργούν μονάδες ηλεκτροπαραγωγής εγκατεστημένης ισχύος μεγαλύτερης των 540MWe.

Οι μεγαλύτερες εγκαταστάσεις γεωθερμικών σταθμών παραγωγής ενέργειας, όμως, είναι στην Καλιφόρνια, ΗΠΑ, στην περιοχή Geysers, όπου είναι εγκατεστημένα περίπου 1400MWe γεωθερμικής ισχύος. Το 2004 πέντε χώρες (Ελ Σαλβαδόρ, Κένυα, Φιλιππίνες, Ισλανδία και Κόστα Ρίκα) παρήγαγαν πάνω από το 15% της ηλεκτρικής τους ισχύος από Γεωθερμία.

Παγκοσμίως, 24 χώρες παρήγαγαν 56786 GWh το 2005, ένα ποσοστό της τάξης του 0,3% της παγκόσμιας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας. Η ισχύς αυτή έχει έναν ετήσιο ρυθμό αύξησης του 3,2% ποσοστό που συμβαδίζει και με την αύξηση της παγκόσμιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από όλες τις πηγές ενέργειας. Η αύξηση αυτή οφείλεται στην κτίση νέων σταθμών, καθώς και στην αύξηση των συντελεστών εκμεταλλευσιμότητας των παλαιών και νέων σταθμών. Η αύξηση αυτή οφείλεται, επίσης, στο γεγονός ότι η γεωθερμική ενέργεια, σε αντίθεση με τις περισσότερες ΑΠΕ, είναι μια σταθερή με τον χρόνο πηγή ενέργειας, δηλαδή μπορούμε να έχουμε μια σχεδόν σταθερή τροφοδοσία ισχύος, με αποτέλεσμα να έχουμε πολύ υψηλούς συντελεστές εκμεταλλευσιμότητας ως και 95%.

Συνολικά, η παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς, σε 24 χώρες, έφτασε τα 9732 MWe το 2007, από 3887MWe που ήταν το 1980, 5832 MWe το 1990 και 7972MWe το 2000. Στην Ευρώπη 6 χώρες (Ιταλία, Ισλανδία, Γαλλία, Πορτογαλία, Αυστρία, Γερμανία) έχουν εγκατεστημένη ισχύ 1045 MWe από γεωθερμία.



Εικόνα 1.3: Χάρτης παγκόσμιας εγκατεστημένης ηλεκτρικής γεωθερμικής ισχύος (Πηγή: Bertani R.,2007)

Year	Installed MWe	Interval	% Increase
1980	3887	1980–1985	22.6
1985	4764	1985–1990	22.4
1990	5832	1990–1995	17.2
1995	6833	1995–2000	16.7
2000	7974	2000–2005	42.9
2005	11,398		

Εικόνα 1.4: Συγκριτικός πίνακας παγκόσμιας αύξησης ηλεκτρικής γεωθερμικής ισχύος ανά 5ετία (Πηγή: Gerard W. Hutterer, 2000. The status of world geothermal power generation 1995-2000)

Rank	Country	No. units	MWe
1	United States	193	2555.5
2	Philippines	58	1979.91
3	Mexico	37	953.3
4	Italy	33	811.2
5	Indonesia	15	807
6	New Zealand	39	572.1
7	Japan	22	537.74
8	Iceland	24	422.4
9	El Salvador	7	204.3
10	Costa Rica	6	163
11	Kenya	9	130.2
12	Nicaragua	7	108.9
13	Russia	12	79
14	Papua-New Guinea	6	56
15	Guatemala	9	44.6
16	Turkey	2	27.8
17	China (Tibet)	13	27.6
18	Portugal (The Azores)	5	16
19	France (Guadeloupe)	2	14.7
20	Austria	2	1.25
21	Thailand	1	0.3
22	Germany	1	0.2
23	Australia	1	0.15
24	Argentina	0	0
25	Ethiopia	0	0
26	Greece	0	0
27	Zambia	0	0
Totals		504	9513.15
Average (MW/unit)			18.88

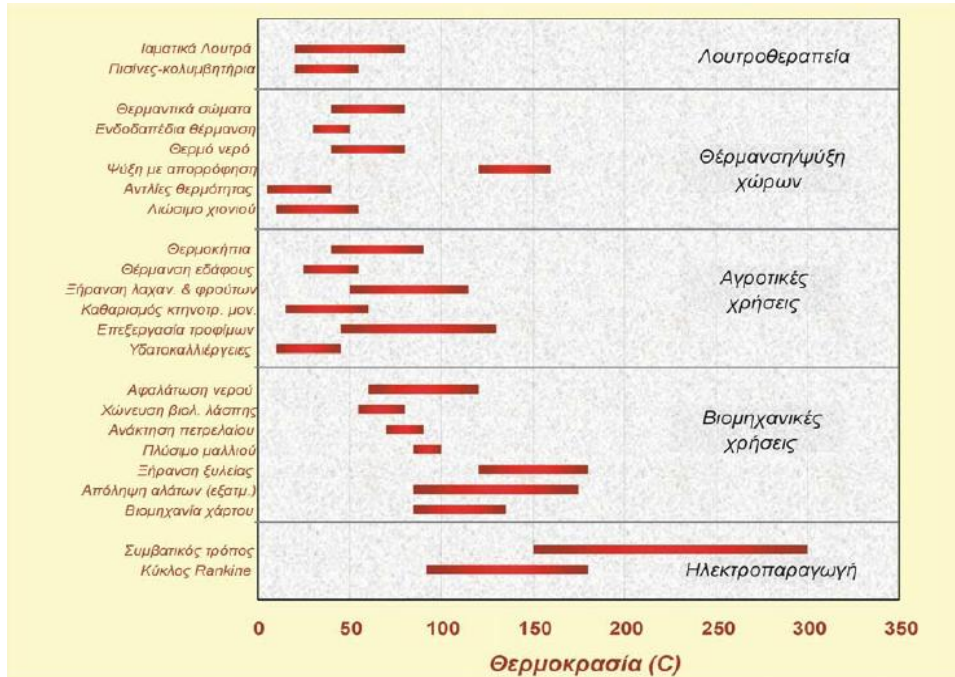
Εικόνα 1.5: Γεωθερμικοί σταθμοί ανά τον κόσμο (Πηγή:R.Di Pippo ,2007.Geothermal Power Plants)

1.6.2) Άμεσες χρήσεις

Η πρώτη συστηματική αξιοποίηση των γεωθερμικών ρευστών για θέρμανση χώρων, θερμοκηπίων και κτιρίων ξεκίνησε τη δεκαετία του 1920 στην Ισλανδία. Σήμερα, το μεγαλύτερο μέρος του πληθυσμού της χώρας, καθώς και ολόκληρη η πρωτεύουσα Reykjavík θερμαίνονται με γεωθερμικά ρευστά, ενώ υπάρχει και πλήθος άλλων εφαρμογών (θέρμανση θερμοκηπίων και πισινών, υδατοκαλλιέργειες, ξήρανση ορυκτών κ.α.). Το παράδειγμα της Ισλανδίας έχουν μιμηθεί πολλές χώρες της Ευρώπης, της Αμερικής αλλά και της Ασίας, με αποτέλεσμα πάνω από 60 χώρες να εμπλέκονται στην παραγωγή θερμότητας από γεωθερμία, οι 32 από τις οποίες είναι στην Ευρώπη. Η συνολική εγκατεστημένη θερμική ισχύς στην Ευρώπη εκτιμάται περί τα 12840 MW_{th} το 2007.

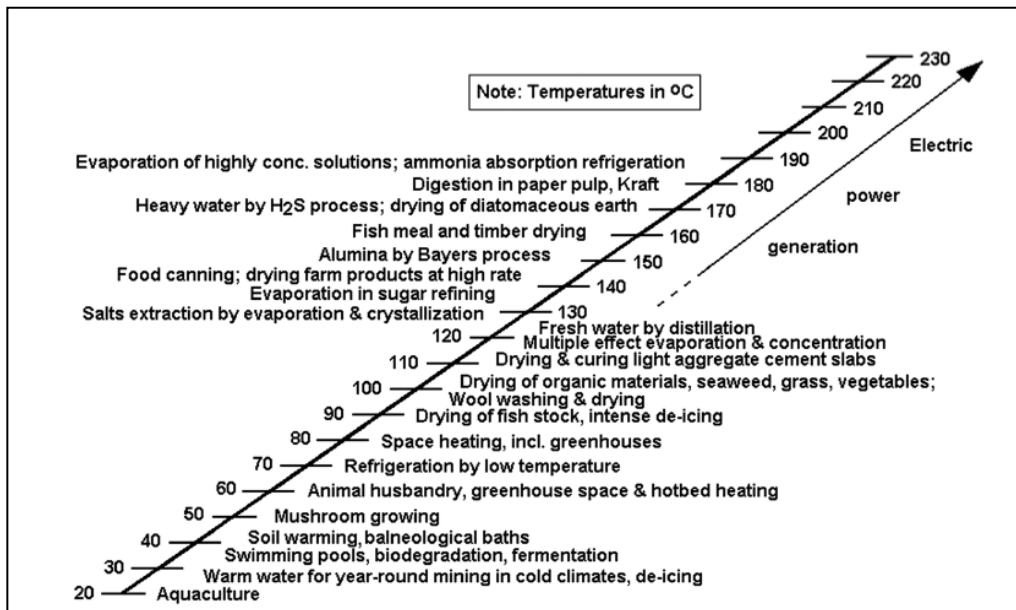
1.7) Χρήσεις Γεωθερμίας

Οι χρήσεις της γεωθερμίας καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα οικονομικών δραστηριοτήτων ανάλογα με τη θερμοκρασία και την ποιότητα του γεωθερμικού ρευστού. Μπορούν να διακριθούν σε άμεσες χρήσεις και σε χρήσεις ηλεκτροπαραγωγής. Στις άμεσες χρήσεις γίνεται απευθείας εκμετάλλευση της θερμότητας των ρευστών, χωρίς την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι κυριότερες χρήσεις της γεωθερμίας παρουσιάζονται συνοπτικά στις εικόνες 1.6 και 1.7 που απεικονίζουν το τροποποιημένο διάγραμμα Lindal. Το διάγραμμα αυτό προφανώς είναι ενδεικτικό, δηλαδή οι δυνατότητες χρήσεις είναι πολύ περισσότερες από αυτές που αναφέρονται στο διάγραμμα, και τα θερμοκρασιακά όρια μπορεί να είναι πιο ελαστικά.



Εικόνα 1.6: Τροποποιημένο διάγραμμα Lindal (Πηγή: <http://www.ypan.gr/ape/files/mythoi-geothermia.pdf>,2008)

Γεωθερμικά ρευστά υψηλής ενθαλπίας (θερμοκρασίας >150°C) χρησιμοποιούνται αποκλειστικά στην ηλεκτροπαραγωγή, συνήθως με άμεσο (flash) κύκλο, εφόσον βέβαια το γεωθερμικό ρευστό το επιτρέπει αυτό, ενώ με τον λεγόμενο ‘δυναμικό κύκλο’ (οργανικός κύκλος Rankine-ORC) υπάρχει η δυνατότητα ηλεκτροπαραγωγής και με ρευστά θερμοκρασιών 80-150°C.



Εικόνα 1.7: Τροποποιημένο διάγραμμα Lindal (Πηγή: R.Di Pippo,2007.Geothermal Power Plants)



Εικόνα 1.8: Μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην περιοχή Geysers, Καλιφόρνια (Πηγή: www.geothermal.marin.org)

Οι κυριότερες άμεσες εφαρμογές της γεωθερμίας, όπου γίνεται εκμετάλλευση της θερμότητας των γεωθερμικών ρευστών, μπορούν να ταξινομηθούν στις εξής κύριες κατηγορίες: θέρμανση χώρων, αγροτικές χρήσεις, υδατοκαλλιέργειες, βιομηχανικές χρήσεις, λουτροθεραπεία και αντλίες θερμότητας (αβαθής Γεωθερμία). Στις περισσότερες γεωθερμικές εφαρμογές απαιτείται η μεταφορά της θερμότητας των γεωθερμικών ρευστών σε ένα ρευστό λειτουργίας (κυρίως νερό ή αέρας) μέσω εναλλακτών θερμότητας και στη συνέχεια χρησιμοποιείται η ανακτημένη θερμότητα του ρευστού λειτουργίας. Παρακάτω παρουσιάζονται παραδείγματα για καθεμία από τις παραπάνω κατηγορίες. Οι αντλίες θερμότητας θα παρουσιαστούν ξεχωριστά σε παρακάτω παράγραφο.



Εικόνα 1.9: Σωλήνες γεωθερμικού ρευστού μπορούν να τοποθετηθούν κάτω από δρόμους-πεζοδρόμια για αντιπαγετική προστασία (Πηγή: Geothermal Education Office, www.geothermal.marin.org)

Θέρμανση χώρων:

- Θέρμανση κτιρίων με εναλλάκτες θερμότητας νερού-αέρος ή νερού-νερού.
- Θέρμανση χώρων κολυμβητηρίων και πισινών.
- Αντιπαγετική προστασία δρόμων, πεζοδρομίων, πλατειών, χώρων στάθμευσης κ.α.
- Θέρμανση εδάφους (θερμοκρασίες 25-40°C).
- Τηλεθέρμανση οικισμών ή και ολόκληρων πόλεων.

Αγροτικές χρήσεις:

- Θέρμανση θερμοκηπίων (απαιτούμενες θερμοκρασίες 40-130°C).
- Ξήρανση δημητριακών (θερμοκρασίες 40-80°C).
- Ξήρανση λαχανικών, φρούτων και καρπών (θερμοκρασίες 40-70°C).
- Ξήρανση αγροτικών προϊόντων, όπως καπνός και βαμβάκι.
- Υπεδάφια θέρμανση για πρωίμηση σπαραγγιών.
- Θέρμανση πτηνοτροφικών και κτηνοτροφικών μονάδων, καθώς και ποιμνιοστασίων.
- Επεξεργασία γάλακτος (θερμοκρασίες 70-120°C).
- Συντήρηση τροφίμων-παραγωγή ψύξης (θερμοκρασίες 90-150°C).
- Καλλιέργεια μανιταριών (θερμοκρασίες 20-60°C).
- Καθαρισμός πτηνοτροφικών και κτηνοτροφικών μονάδων.
- Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα άρδευσης με το απορριπτόμενο γεωθερμικό νερό όταν βέβαια αυτό είναι επαρκώς καλής ποιότητας.

Όσον αφορά τις υδατοκαλλιέργειες είναι δυνατή η καλλιέργεια και η ανάπτυξη διαφόρων ειδών ψαριών (χέλια, λαβράκια, τσιπούρες), θαλάσσιων μαλακόστρακων, μικροφύκων κ.α.(απαιτούμενες θερμοκρασίες 15-35°C).



Εικόνα 1.10: Καλλιέργεια του μικροφύκου *Spirulina* στη Νυγρίτα Σερρών (Πηγή: <http://www.ypan.gr/ape/files/mythoigeothermia.pdf>,2008)

Βιομηχανικές χρήσεις:

- Αφαλάτωση νερού, κυρίως σε νησιωτικές και παραθαλάσσιες περιοχές με έλλειψη πόσιμου νερού.
- Χώνευση βιολογικής λάσπης και λυμάτων.
- Ξήρανση γης διατόμων (στην Ισλανδία με ατμό θερμοκρασίας 170°C).
- Πλύσιμο και λεύκανση μαλλιών (Ν. Ζηλανδία).
- Παραγωγή αποσταγμένου νερού (Ν. Ζηλανδία).
- Ανάκτηση πετρελαίου (Καζακστάν).
- Εξόρυξη Ουρανίου (Τέξας, Η.Π.Α.), επεξεργασία χαλκού(Ν. Μέξικο, Η.Π.Α.), διαχωρισμός χρυσού (Νεβάδα, Η.Π.Α.), ορυχεία(Σιβηρία).
- Ξήρανση ξυλείας.
- Απόληψη και ανάκτηση διαφόρων αλάτων και στοιχείων.
- Ανάκτηση διοξειδίου του άνθρακα(CO₂).

Λουτροθεραπεία:

- Ιαματικά λουτρά και spa (λουτροθεραπεία, ποσιθεραπεία, εισπνοθεραπεία, θαλασσοθεραπεία).
- Πισίνες αναψυχής.

Εδώ, αξίζει να σημειωθεί, ότι σε ιδιαιτέρως σεισμογενείς χώρες, όπως η Ιαπωνία, η γεωθερμία χρησιμοποιείται για την πρόγνωση σεισμών.



Εικόνα 1.11: Μονάδα ανάκτηση CO₂ από γεωθερμικά ρευστά στο Haedarendi της Ισλανδίας (Πηγή: National Energy Authority and Ministries of Industry and Commerce,2006. Geothermal development and research in Iceland)

1.8) Βασικοί θερμοδυναμικοί κύκλοι ηλεκτροπαραγωγής

Στην παρούσα παράγραφο θα παρουσιαστούν συνοπτικά οι βασικές τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρισμού από ένα γεωθερμικό πεδίο. Θα γίνει μία συνοπτική παρουσίαση της κάθε τεχνολογίας, κυρίως σε θεωρητικό επίπεδο, ενώ δεν θα γίνει εμβάθυνση στα θερμοδυναμικά της χαρακτηριστικά. Όπως θα φανεί και από την παρουσίαση η απόφαση για την τελική τεχνολογία που θα χρησιμοποιήσουμε για την εκμετάλλευση ενός πεδίου, μας την επιβάλλει κυρίως η θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού και δευτερευόντως η σύσταση του γεωθερμικού ρευστού, η μορφή του ταμιευτήρα κ.α.

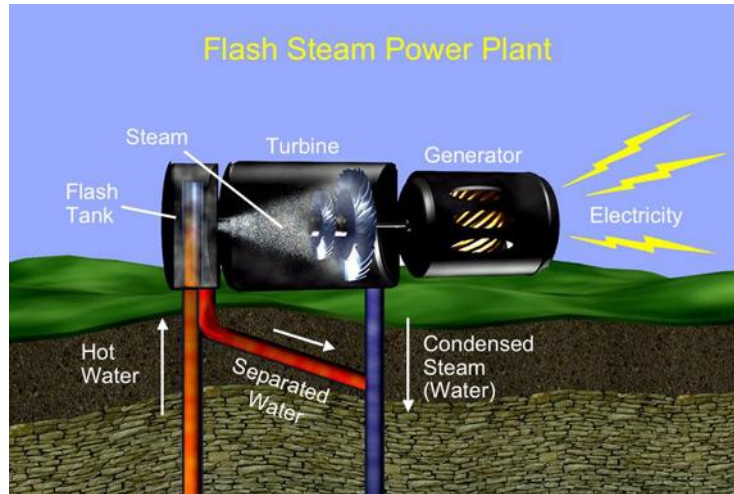
Οι κυριότερες τεχνολογίες για την παραγωγή ηλεκτρισμού από ένα γεωθερμικό πεδίο είναι οι εξής:

- Άμεσος κύκλος (flash plant).
- Κύκλος ξηρού ατμού (dry steam plant).
- Δυαδικός κύκλος (binary plant).

1.8.1) Άμεσος κύκλος

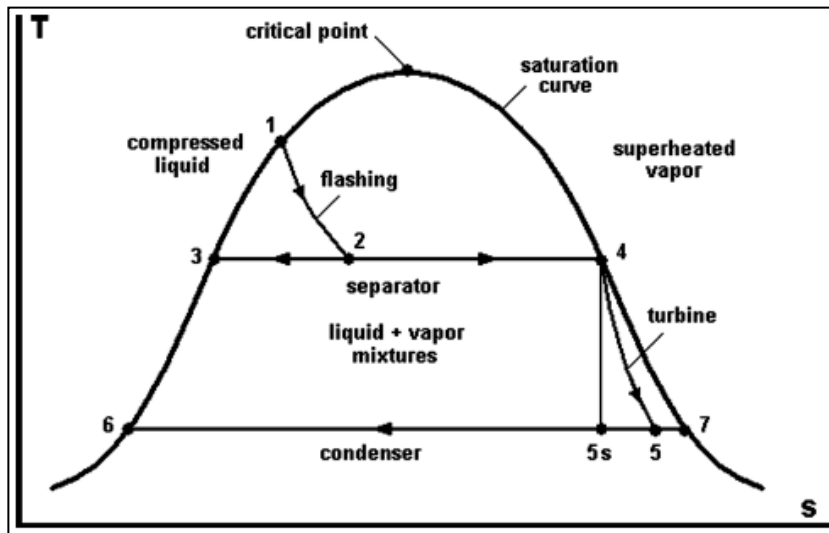
Οι γεωθερμικοί σταθμοί άμεσου κύκλου είναι οι “στυλοβάτες” των γεωθερμικών τεχνολογιών, καθώς είναι η αρχαιότερη τεχνολογία και πολλές φορές ο πρώτος σταθμός που χτίζεται σε ένα γεωθερμικό πεδίο είναι αυτής της τεχνολογίας. Συνήθως, λαμβάνουν χώρα σε πεδία θερμοκρασίας πάνω από 160°C, αν και η πρόοδος της τεχνολογίας έχει δώσει τη δυνατότητα εκμετάλλευσης πεδίων θερμοκρασίας ως και 120°C με την παρούσα τεχνολογία.

Η τεχνολογία αυτή εναπόκειται στο γεγονός ότι το γεωθερμικό ρευστό, πολλές φορές, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη παράγραφο, βρίσκεται στον ταμιευτήρα υπό την μορφή υπέρθερμου νερού και αναδύμενο στην επιφάνεια χάνει μέρος της πίεσης του, όποτε βγαίνει στην επιφάνεια με τη μορφή μίγματος υγρού-ατμού. Σε ένα σταθμό άμεσου κύκλου (είτε μονού είτε πολλαπλών flash) το μίγμα υγρού-ατμού διαχωρίζεται σε ένα διαχωριστή και η ατμώδης φάση οδηγείται στον ατμοστρόβιλο της εγκατάστασης για την παραγωγή έργου, ενώ η υγρή φάση μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε για θερμικούς σκοπούς (θέρμανση χώρων, πισινών, χρήση ως θερμικός φορέας σε δυαδικούς κύκλους) είτε να επανεισαχθεί στον ταμιευτήρα, είτε να υποστεί έναν επιπλέον τεχνητό στραγγαλισμό (double flash) ώστε να παραχθεί νέο μίγμα υγρού-ατμού ώστε να επαναληφθεί η προηγούμενη διαδικασία. Απαραίτητη προϋπόθεση όλων των παραπάνω είναι η ύπαρξη μιας μεγάλης πίεσης στον ταμιευτήρα, ώστε να έχει νόημα η εκτόνωση της ατμώδους φάσης σε ατμοστρόβιλο. Οι μονάδες άμεσου κύκλου έχουν ισχύ από 4-100MW, με μέση ισχύ μονάδας 25-30MW.



Εικόνα 1.12: Σχηματικό διάγραμμα άμεσου κύκλου (Πηγή: www.geothermal.marin.org)

Το θερμοδυναμικό διάγραμμα ενός άμεσου κύκλου είναι το εξής:



Εικόνα 1.13: Θερμοδυναμικό διάγραμμα T-s άμεσου κύκλου μονού στραγγαλισμού (Πηγή: R.Di Pippo, 2007. Geothermal Power Plants)

Ακολουθώντας τους συμβολισμούς της παραπάνω εικόνας, το σημείο 4 είναι η είσοδος της ατμώδους φάσης στον αμοστρόβιλο. Παρατηρούμε ότι η ατμώδης φάση εισέρχεται υπό τη μορφή κορεσμένου ατμού στον αμοστρόβιλο. Άρα, η ύπαρξη υγρασίας εντός του αμοστροβίλου είναι ιδιαίτερως έντονη από τις πρώτες κιόλας βαθμίδες του. Στις συγκεκριμένες εγκαταστάσεις χρησιμοποιούνται ειδικοί αμοστρόβιλοι, κατάλληλοι για την αντιμετώπιση αυτών των συνθηκών υγρασίας, οι λεγόμενοι αμοστρόβιλοι υγρού ατμού. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι συγκεκριμένοι αμοστρόβιλοι έχουν χαμηλότερο ισεντροπικό βαθμό απόδοσης σε σχέση με τους αμοστροβίλους υπερθέρμου ατμού, επειδή ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης ενός αμοστροβίλου είναι συνάρτηση της υγρασίας στην είσοδο του, και αυξανομένης της υγρασίας έχουμε μείωση του.

Ο θερμοκός βαθμός απόδοσης μιας τέτοιας μονάδας είναι περίπου 10-12%, δηλαδή για 1 μονάδα ωφέλιμης ηλεκτρικής ισχύος, προσδίδουμε 8.7 μονάδες θερμικής ισχύος, και απορρίπτουμε 7.7 περίπου μονάδες θερμικής ισχύος στο περιβάλλον. Για αυτόν τον λόγο οι μονάδες αυτού του τύπου έχουν περίπου 8 φορές μεγαλύτερη ψυκτική ισχύ του πύργου ψύξης από τις μονάδες συνδυασμένου κύκλου (50% βαθμός απόδοσης)

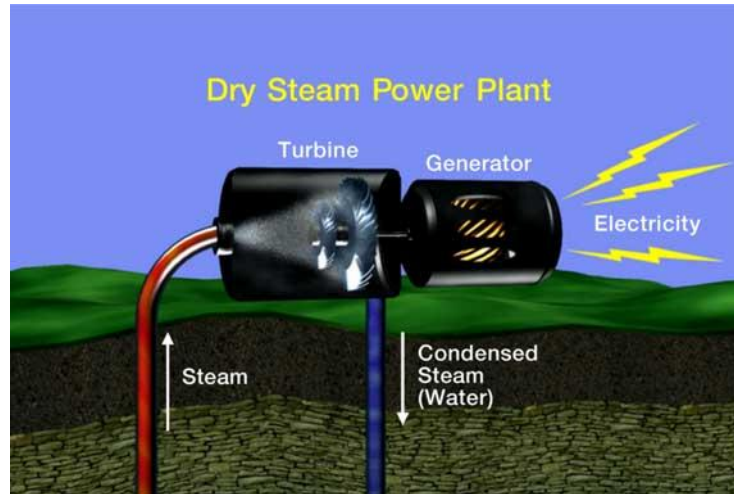
Σε γεωθερμικές εγκαταστάσεις, πολλές φορές για την αξιολόγηση τους, πέραν του θερμικού βαθμού απόδοσης, χρησιμοποιούμε το βαθμό χρησιμοποίησης του πεδίου. Ως βαθμός χρησιμοποίησης ενός πεδίου ορίζεται το πηλίκο της καθαρής ισχύος που αποκομίζουμε από αυτό (θερμική- ηλεκτρική) προς την εξέργεια του πεδίου. Η τιμή του είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με το θερμικό βαθμό απόδοσης της μονάδας. Ο βαθμός χρησιμοποίησης ενός πεδίου είναι πολύ χρήσιμος, επειδή μπορεί να μας δώσει μία πρώτη εικόνα της αποδοτικότητας της εγκατάστασης, ανεξαρτήτως του ποια είναι η πρωταρχική πηγή ενέργειας. Πολλά ενεργειακά έργα, σήμερα σχεδιάζονται ώστε να έχουμε μεγιστοποίηση του βαθμού χρησιμοποίησης.

Πολλές φορές σε τέτοιου είδους μονάδες πραγματοποιούμε τεχνητά επιπλέον πτώση πίεσης ώστε να έχουμε περισσότερη ποσότητα ατμού κατά το διαχωρισμό. Αυτό, όμως, έχει ως αποτέλεσμα να έχουμε μικρότερο λόγο πίεσης στον αμοστρόβιλο με αποτέλεσμα την μείωση του έργου αυτού. Με άλλα λόγια, πρόκειται για δύο παράγοντες που λειτουργούν ο ένας ενάντια του άλλου. Για αυτόν το λόγο θα πρέπει να γίνεται βελτιστοποίηση ως προς την πίεση στραγγαλισμού ώστε να έχουμε τη μέγιστη δυνατή παραγωγή ισχύος. Επιστημονικές μελέτες έχουν δείξει ότι για σύστημα άμεσου κύκλου ενός στραγγαλισμού η μεγιστοποίηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος γίνεται όταν η ενδιάμεση πίεση είναι ο αριθμητικός μέσος των δύο ακραίων πιέσεων, δηλαδή της πίεσης του ταμειυτήρα και της πίεσης εκτόνωσης της ατμώδους φάσεως στον αμοστρόβιλο.

Από την άλλη μεριά, όμως, έχει αποδειχθεί πειραματικά ότι η ενδιάμεση πίεση στην οποία έχουμε μεγιστοποίηση του συντελεστή χρησιμοποίησης του πεδίου είναι διαφορετική από αυτήν που έχουμε μεγιστοποίηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος. Άρα, εναπόκειται στον υπεύθυνο μηχανικό να επιλέξει την καταλληλότερη, ανάλογα με τις ανάγκες, ενδιάμεση πίεση του έργου.

1.8.2) Κύκλος ξηρού ατμού

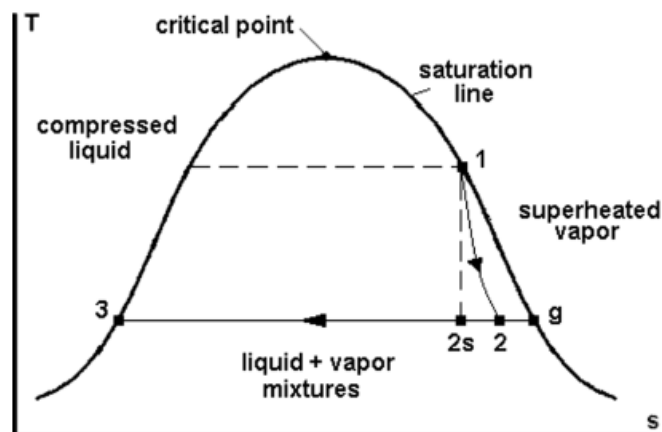
Η συγκεκριμένη τεχνολογία αναφέρεται σε ένα μικρό αριθμό ταμειυτήρων, οι οποίοι σε αντίθεση με την πλειονότητα των ταμειυτήρων δεν εξάγουν μίγμα υγρού-ατμού, αλλά κορεσμένο ή ακόμα και υπέρθερμο ατμό. Έχει εκτιμηθεί ότι οι συγκεκριμένοι ταμειυτήρες αποτελούν μόλις το 5% των ταμειυτήρων του κόσμου και βρίσκονται κυρίως στα ισχυρότερα γεωθερμικά πεδία του κόσμου (Larderello, Geysers), αλλά και μεμονωμένα σε διάφορα μέρη του κόσμου (Ιαπωνία, Ινδονησία, Νέα Ζηλανδία). Η μέση ισχύς αυτών των μονάδων είναι 40MW, και η πρώτη μονάδα αυτού του τύπου έλαβε χώρα στο Larderello της Ιταλίας, όπου το 1904 ο Prince Piero Ginori Conti κατασκεύασε μια μονάδα τέτοιου τύπου ισχύος 15KW ώστε να παράγει ηλεκτρική ισχύ για τις λάμπες του εργαστηρίου του.



Εικόνα 1.14: Σχηματικό διάγραμμα κύκλου ξηρού ατμού (Πηγή: www.geothermal.marin.org)

Το πλεονέκτημα αυτών των πεδίων είναι ότι το γεωθερμικό ρευστό προσβάλλει άμεσα τον ατμοστρόβιλο της εγκατάστασης χωρίς την παρεμβολή στραγγαλιστών και διαχωριστών, οπότε δεν έχουμε να ασχοληθούμε με υγρή φάση, όπως στις προηγούμενες εγκαταστάσεις. Άρα έχουμε και μικρότερη έκταση εγκαταστάσεων. Ο μηχανισμός δημιουργίας αυτών των ταμιευτήρων είναι ιδιαίτερος πολύπλοκος και δεν θα αναλυθεί στο παρόν. Ένα, επίσης, σημαντικό πλεονέκτημα αυτών των εγκαταστάσεων είναι η ιδιαίτερως απλή λειτουργία τους, και η μη απαίτηση πολύπλοκου εξοπλισμού.

Το θερμοδυναμικό διάγραμμα ενός κύκλου ξηρού ατμού παρουσιάζεται στην επόμενη εικόνα. Έχει υποτεθεί είσοδος κορεσμένου ατμού.



Εικόνα 1.15: Θερμοδυναμικό διάγραμμα κύκλου ξηρού ατμού (Πηγή: R.Di Pippo, 2007. Geothermal Power Plants)

Όπως αναφέραμε στην προηγούμενη παράγραφο, ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης ενός ατμοστρόβιλου είναι ανάλογος της υγρότητας του ατμού στην είσοδο του. Άρα, σε αυτές τις εγκαταστάσεις, οι ατμοστρόβιλοι έχουν γενικά υψηλότερους βαθμούς απόδοσης. Ένα άλλο πλεονέκτημα αυτών των εγκαταστάσεων προκύπτει από το γεγονός ότι όλη η ποσότητα ατμού που αντλούμε από τον ταμιευτήρα διέρχεται από τον ατμοστρόβιλο, και όχι μέρος αυτής, όπως στον άμεσο κύκλο. Με άλλα λόγια, για την ίδια αντλούμενη μάζα γεωθερμικού ρευστού, έχουμε μεγαλύτερη παραγωγή ισχύος στον κύκλο ξηρού ατμού, εφόσον βέβαια οι άλλες συνιστώσες του κύκλου παραμένουν σταθερές.

Έτσι, είναι προφανές πως ο θερμικός βαθμός απόδοσης ενός κύκλου ξηρού ατμού, αλλά και ο βαθμός χρησιμοποίησης του πεδίου του, είναι αρκετά μεγαλύτεροι από ενός σταθμού άμεσου κύκλου.

1.8.3) Δυαδικός κύκλος

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας τις τελευταίες δεκαετίες είχε σαν αποτέλεσμα την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών εκμετάλλευσης γεωθερμικών πεδίων, τους λεγόμενους δυαδικούς κύκλους. Αν παρατηρήσει κανείς προσεκτικά το χάρτη γεωθερμικού δυναμικού του πλανήτη θα δει ότι ως επί το πλείστον ο πλανήτης είναι γεμάτος από πεδία μέσης-χαμηλής ενθαλπίας. Με τους δυαδικούς κύκλους είναι δυνατή η εκμετάλλευση αυτών των πεδίων για ηλεκτροπαραγωγή. Επίσης, είναι δυνατή η εκμετάλλευση της αποβαλλόμενης θερμότητας από διάφορες μονάδες, καθώς η θερμοκρασία αυτή είναι πλέον εκμεταλλεύσιμη με την τεχνολογία των δυαδικών κύκλων. Στους δυαδικούς κύκλους το γεωθερμικό ρευστό μεταφέρει την θερμότητα του μέσω ενός εναλλάκτη σε ένα δεύτερο μέσο, το εργαζόμενο μέσο, το οποίο με την σειρά του μέσω ενός ξεχωριστού θερμοδυναμικού κύκλου μετατρέπει μέρος αυτής της θερμότητας σε έργο και το υπόλοιπο το απορρίπτει στο περιβάλλον.

Οι κυριότεροι λόγοι που χρησιμοποιούμε σήμερα δυαδικούς κύκλους είναι οι εξής:

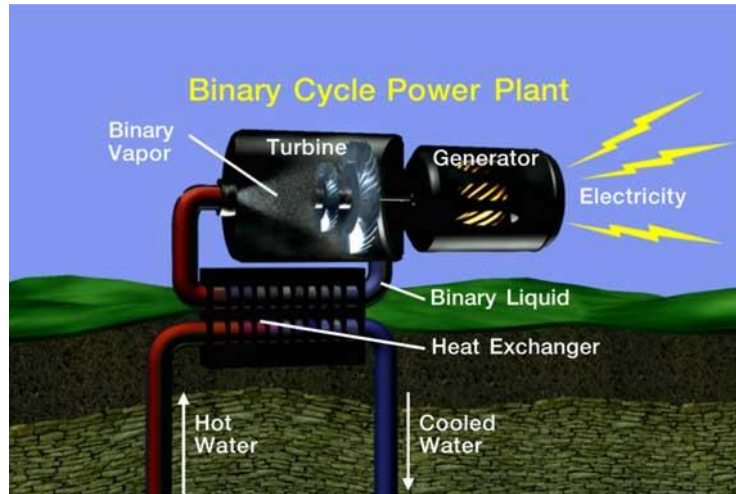
- Το γεωθερμικό ρευστό δεν έχει την απαραίτητη καθαρότητα ώστε να μπορεί να διέλθει από τον ατμοστρόβιλο.
- Η θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού είναι αρκετά χαμηλή ώστε καθίσταται μη οικονομική η λειτουργία άμεσου κύκλου.

Σε ορισμένες περιπτώσεις το εργαζόμενο μέσο είναι πάλι νερό, αλλά συνήθως οι θερμοκρασίες είναι αρκετά χαμηλές και η χρήση νερού ως εργαζόμενου μέσου καθίσταται μη οικονομική, οπότε καταφεύγουμε στην χρήση οργανικών μέσων, όπως το R134a, το R152a, η αμμωνία, το μίγμα νερού-αμμωνίας (κύκλος Kalina) κ.α.

Όπως αναφέραμε προηγουμένως, ο άμεσος κύκλος λειτουργεί κατά βάση με θερμοκρασίες ανώτερες των 150°C, και τα τελευταία χρόνια 120°C. Προφανώς, όσο χαμηλότερη είναι η θερμοκρασία στον ταμιευτήρα, τόσο δυσκολότερη είναι η εφαρμογή της τεχνολογίας του στραγγαλισμού, και προ πάντων πιο αντιοικονομική.

Ο δυαδικός κύκλος μας δίνει τη δυνατότητα να λειτουργούμε με θερμοκρασίες ως και 60°C, άρα πλέον πολλά περισσότερα γεωθερμικά πεδία είναι εκμεταλλεύσιμα για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης, μας δίνεται η δυνατότητα να ενσωματώσουμε κάποιον δυαδικό κύκλο, σε έναν υπάρχον σταθμό παραγωγής ενέργειας ώστε να εκμεταλλευόμαστε τη χαμηλού ενεργειακού περιεχομένου αποβαλλόμενη θερμότητα στον περιβάλλον, η οποία δεν δύναται να ανακτηθεί με άλλον τρόπο παρά μόνο με δυαδικούς κύκλους.

Οι δύο κυριότεροι δυαδικοί κύκλοι είναι ο οργανικός κύκλος Rankine (ORC), και ο κύκλος Kalina.



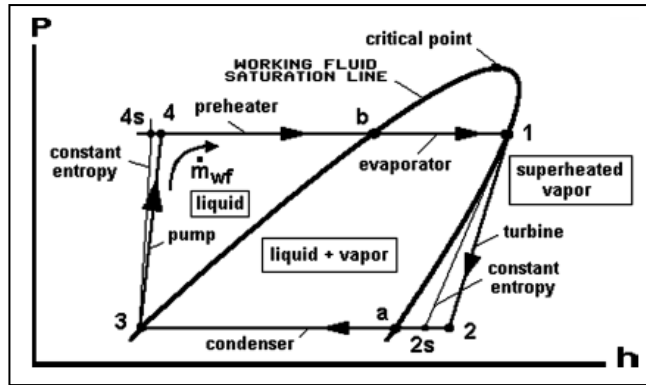
Εικόνα 1.16: Σχηματικό διάγραμμα δυαδικού κύκλου (Πηγή: www.geothermal.marin.org)

1.8.3.1) Οργανικός κύκλος Rankine(ORC)

Ο οργανικός κύκλος Rankine (ORC) αποτελεί τον βασικό δυαδικό κύκλο και είναι ο πλέον κοντινός στον συμβατικό κύκλο Rankine των ατμοηλεκτρικών σταθμών. Το οργανικό μέσο συμπιέζεται σε μία υψηλή πίεση, είτε μεγαλύτερη είτε μικρότερη της κρίσιμης πίεσης του εκάστοτε εργαζόμενου μέσου, λαμβάνει την θερμότητα του γεωθερμικού ρευστού μέσω ενός εναλλάκτη, εκτονώνεται στον ατμοστρόβιλο, και αφού ψυχθεί στον συμπυκνωτή επαναλαμβάνεται η διαδικασία. Αξίζει να σημειωθεί ότι δεν μπορούμε πάντα να δουλεύουμε σε υπερκρίσιμες πιέσεις επειδή πολλά οργανικά μέσα σε αυτές τις συνθήκες παρουσιάζουν μεγάλες αστάθειες στη ροή τους, αναφλεξιμότητα και έντονη διαβρωτική δράση. Βέβαια, η λειτουργία σε υπερκρίσιμες συνθήκες αυξάνει την παραγωγή έργου, οπότε θα πρέπει να γίνει μια εξισορρόπηση των δύο παραπάνω αντικρουόμενων παραγόντων.

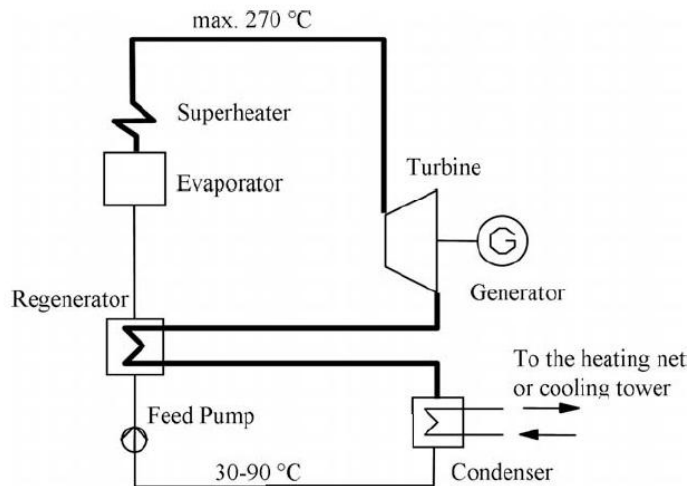
Τα βασικά πλεονεκτήματα ενός κύκλου ORC είναι τα εξής:

- Υψηλή αποδοτικότητα κύκλου.
- Υψηλός ισεντροπικός βαθμός απόδοσης στροβίλου, λόγω έλλειψης υγρασίας συνήθως σε αυτόν (βλ.εικ. 1.17).
- Χαμηλού βαθμού καταπονήσεις των μηχανικών μερών λόγω χαμηλής περιφερειακής ταχύτητας.
- Χαμηλή ταχύτητα περιστροφής του στροβίλου που επιτρέπει την άμεση επαφή με την γεννήτρια, χωρίς μεγάλες σχέσεις μεταδόσεων.
- Καμία διάβρωση των πτερυγίων του στροβίλου λόγω απουσίας υγρασίας, αφού συνήθως η εκτόνωση των οργανικών μέσων γίνεται στην υπέρθερμη περιοχή, επειδή η καμπύλη T-s έχει θετική κλίση. (βλ. εικόνα 1.17)
- Απλή διαδικασία εκκίνησης και διακοπής λειτουργίας.
- Αυτόματη και αθόρυβη λειτουργία.
- Μεγάλη διάρκεια ζωής και χαμηλό κόστος συντήρησης και λειτουργίας.



Εικόνα 1.17: Θερμοδυναμικό διάγραμμα P-h εργαζόμενου μέσου σε οργανικό κύκλο Rankine (Πηγή: R.Di Pippo, 2007. Geothermal Power Plants)

Το γεγονός ότι η έξοδος του ατμοστροβίλου είναι στην υπέρθερμη περιοχή, μας επιτρέπει να χρησιμοποιήσουμε τον ατμό αυτό, για προθέρμανση του συμπυκνώματος μετά την έξοδο του από το ψυγείο (αναγεννητικός προθερμαντής).



Εικόνα 1.18: Διάγραμμα οργανικού κύκλου Rankine με χρήση προθέρμανσης από την έξοδο του ατμοστροβίλου (Πηγή: A.Schuster, S.Karellas, E.Kakaras, H.Spliethoff, 2008. Energetic and economic investigation of Organic Rankine cycle applications)

Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι ένα σημαντικό μειονέκτημα των δυαδικών κύκλων είναι η ύπαρξη της αντλίας για συμπίεση του εργαζόμενου μέσου, με αποτέλεσμα να έχουμε ένα μεγάλο παρασιτικό φορτίο στην εγκατάσταση.

Ένα πολύ σημαντικό κομμάτι ενός δυαδικού κύκλου ORC, είναι η επιλογή του κατάλληλου (οργανικού συνήθως) εργαζόμενου μέσου. Το εργαζόμενο μέσο που θα επιλέξουμε θα πρέπει να έχει τα απαραίτητα χαρακτηριστικά, ώστε να μπορεί να λειτουργήσει στην εγκατάσταση που θέλουμε, έχοντας βέβαια την επιθυμητή απόδοση. Αυτό σημαίνει να μπορεί να λειτουργεί στις συγκεκριμένες συνθήκες πιέσεων-θερμοκρασίας χωρίς να έχουμε φαινόμενα αναφλεξιμότητας ή αποσύνθεσης, ενώ επίσης είναι πολύ σημαντικό να μπορεί να εκτελεστεί η επιθυμητή διαδικασία με την ελαχιστοποίηση της παροχής μάζας του εργαζόμενου μέσου, και κατ'επέκταση των διατομών σωλήνων-ατμοστροβίλων κλπ. Με άλλα λόγια θα πρέπει να προσεχτεί ιδιαίτερως η πυκνότητα του εργαζόμενου μέσου να μην πέφτει σε πολύ χαμηλά επίπεδα. Επίσης, θα πρέπει τα επίπεδα πιέσεων να είναι

ανεκτά για να μην απαιτούνται ιδιαίτερως στιβαρές κατασκευές, ενώ θα πρέπει η συνολική απόδοση της εγκατάστασης να είναι ικανοποιητική. Υπάρχουν εργαζόμενα μέσα που λειτουργούν πιο ικανοποιητικά σε χαμηλές πιέσεις-θερμοκρασίες παρά σε υψηλές. Γενικός κανόνας είναι ότι όσο υψηλότερο είναι το κρίσιμο σημείο τόσο μεγαλύτερο είναι το εύρος των θερμοκρασιών όπου μπορεί να λειτουργήσει αποδοτικά το οργανικό μέσο.

Επίσης, θα πρέπει να προσέξουμε ιδιαίτερως το οργανικό μέσο που θα χρησιμοποιήσουμε να είναι όσο το δυνατόν πιο φιλικό προς την υγεία του ανθρώπου και ως προς το περιβάλλον. Ορισμένα οργανικά μέσα, όπως το R12,R141b,R114, έχουν απαγορευτεί πλήρως λόγω των πολύ βλαβερών περιβαλλοντικών τους επιπτώσεων. Τέλος, θα πρέπει να προσεχτεί το εργαζόμενο μέσο να έχει χαμηλό κόστος και υψηλή διαθεσιμότητα, επειδή λόγω των χαμηλών ενθαλπικών πτώσεων των οργανικών μέσων γενικά απαιτούνται αρκετά μεγάλες ροές μάζας ώστε να παράγουμε κάποια αξιόλογη ηλεκτρική ισχύ.

Παρακάτω παρουσιάζονται ορισμένοι πίνακες γεωθερμικών ρευστών και ιδιοτήτων αυτών.

Fluid	Formula	T_c °C	T_c °F	P_c MPa	P_c lb/in ²	$P_s@$ 300K MPa	$P_s@$ 400K MPa
Propane	C ₃ H ₈	96.95	206.5	4.236	614.4	0.9935	n.a.
i-Butane	i-C ₄ H ₁₀	135.92	276.7	3.685	534.4	0.3727	3.204
n-Butane	C ₄ H ₁₀	150.8	303.4	3.718	539.2	0.2559	2.488
i-Pentane	i-C ₅ H ₁₂	187.8	370.1	3.409	494.4	0.09759	1.238
n-Pentane	C ₅ H ₁₂	193.9	380.9	3.240	469.9	0.07376	1.036
Ammonia	NH ₃	133.65	272.57	11.627	1686.3	1.061	10.3
Water	H ₂ O	374.14	705.45	22.089	3203.6	0.003536	0.24559

Εικόνα 1.19: Οργανικά μέσα και ιδιότητες τους (Πηγή: R.Di Pippo,2007. Geothermal Power Plants)

Παρατηρούμε ότι οι κρίσιμες συνθήκες των οργανικών μέσων είναι πολύ χαμηλότερες του νερού και για αυτόν το λόγο έχουμε αρκετά χαμηλότερες ενθαλπικές πτώσεις στις γεωθερμικές εφαρμογές.

Fluid	Formula	Molar mass	Relative exit area
Ammonia	NH ₃	17.03	1.0
Propane	C ₃ H ₈	44.09	2.3
i-Butane	i-C ₄ H ₁₀	58.12	4.1
n-Butane	C ₄ H ₁₀	58.12	5.5
i-Pentane	i-C ₅ H ₁₂	72.15	12.2
n-Pentane	C ₅ H ₁₂	72.15	14.6

Εικόνα 1.20: Σύγκριση οργανικών μέσων ως προς το μοριακό τους βάρος και ως προς την διατομή εξόδου του ατμοστρόβιλου (λαμβάνεται ως μονάδα η διατομή εξόδου με εργαζόμενο μέσο αμμωνία που είναι η ελάχιστη) (Πηγή: R.Di Pippo,2007. Geothermal Power Plants)

Σημείωση: ο παραπάνω πίνακας είναι για θερμοκρασία εισόδου στον ατμοστρόβιλο 400K και θερμοκρασία εξόδου 320K.

Fluid	Formula	Toxicity	Flammability	ODP	GWP
R-12	CCl ₂ F ₂	non-toxic	non-flam.	1.0	4,500
R-114	C ₂ Cl ₂ F ₄	non-toxic	non-flam.	0.7	5,850
Propane	C ₃ H ₈	low	very high	0	3
i-Butane	i-C ₄ H ₁₀	low	very high	0	3
n-Butane	C ₄ H ₁₀	low	very high	0	3
i-Pentane	i-C ₅ H ₁₂	low	very high	0	3
n-Pentane	C ₅ H ₁₂	low	very high	0	3
Ammonia	NH ₃	toxic	lower	0	0
Water	H ₂ O	non-toxic	non-flam.	0	-

Εικόνα 1.21: Σύγκριση οργανικών μέσων ως προς τις περιβαλλοντικές τους επιπτώσεις (Πηγή: R.Di Pippo, 2007. Geothermal Power Plants)

Παρατηρήσεις επί της εικόνας 1.21: ο παράγων ODP(ozone depletion potential) είναι κανονικοποιημένος ως προς την μονάδα για τα οργανικά μέσα R11,R12 που είναι τα πιο επιβλαβή ως προς αυτή την εκδοχή. Ο παράγων GWP (global warming potential) είναι κανονικοποιημένος ως προς τη μονάδα για το διοξείδιο του άνθρακα.

Συμπερασματικά, το κάθε οργανικό μέσο έχει ιδιότητες που ποικίλουν ανάλογα με την εφαρμογή. Για κάθε εφαρμογή θα πρέπει να γίνεται προσεκτικά η επιλογή του εργαζόμενου μέσου, ενώ δεν μπορεί να εξαχθεί κάποιος γενικός κανόνας για την επιλογή αυτή. Θα πρέπει να γίνεται προσεκτική συνεκτίμηση όλων των παραπάνω παραγόντων με τον βέλτιστο τρόπο ώστε να έχουμε την επιλογή του καταλληλότερου δυνατού εργαζόμενου μέσου, με ελαχιστοποίηση των οποιωνδήποτε αρνητικών συνεπάγεται η χρήση του.

1.8.3.2) Κύκλος Kalina

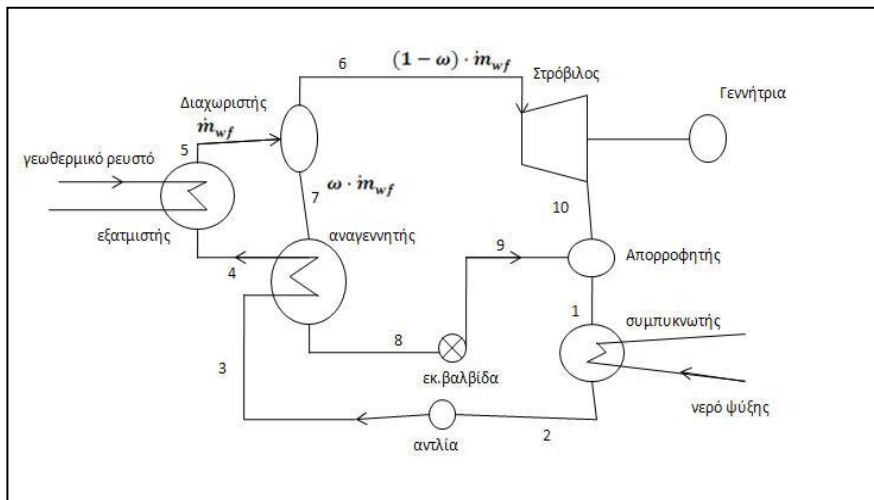
Το διμερές μίγμα νερού-αμμωνίας χρησιμοποιείται εδώ και πολλά χρόνια στις ψυκτικές διαδικασίες απορρόφησης, αλλά μόλις από το 1983, όταν ο A.Kalina πατεντάρισε τον ομώνυμο κύκλο που ο ίδιος εφηύρε, άρχισε να χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος από την εκμετάλλευση πηγών χαμηλής θερμότητας. Τα κύρια χαρακτηριστικά ενός κύκλου Kalina (ο οποίος υπάρχει σε διάφορες μορφές), τα οποία τον ξεχωρίζουν από τους υπόλοιπους δυαδικούς κύκλους είναι τα εξής:

- Το εργαζόμενο μέσο είναι μίγμα δύο συνιστωσών, συνήθως νερού-αμμωνίας.
- Η σύσταση του μίγματος δύναται να αλλάζει από σημείο σε σημείο ώστε να έχουμε την βέλτιστη δυνατή απόδοση του συστήματος.
- Η ατμοποίηση και η συμπύκνωση γίνονται σε μεταβλητές θερμοκρασίες. Το γεγονός αυτό μειώνει τις αντιστρεψιμότητες στην μεταφορά θερμότητας των παραπάνω περιπτώσεων, και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα καλύτερη θερμοδυναμική απόδοση του κύκλου Kalina.
- Έχουμε τη χρήση αναγεννητικού προθερμαντή στην έξοδο του αμοστροβίλου. Αυτό δύναται να υπάρχει και στον οργανικό κύκλο Rankine, αλλά όχι πάντα.
- Απαιτείται, συνήθως, η χρήση αναθερμαντή καθώς η καμπύλη T-s του μίγματος νερού-αμμωνίας στην περιοχή του υπερθέρμου ατμού έχει αρνητική κλίση, με αποτέλεσμα να υπάρχει ο κίνδυνος εμφάνισης υγρασίας στον αμοστροβίλο. Ως εκ τούτου, απαιτείται και η υπερθέρμανση του τροφοδοτικού μίγματος στην είσοδο του αμοστροβίλου, εκτός βέβαια αν χρησιμοποιείται αμοστροβίλος υγρού ατμού.

Ο κύκλος Kalina έχει ορισμένα βασικά πλεονεκτήματα, έναντι των άλλων δυαδικών κύκλων, τα οποία είναι τα εξής:

- Μειώνει το κόστος ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας αυξάνοντας έτσι την απόδοση των συστημάτων.
- Μειώνει κατά πολύ της εκπομπές ρύπων. Στην ουσία, όπως κάθε δυαδικός κύκλος έτσι και ο κύκλος Kalina έχει πρακτικά μηδενικές εκπομπές ρύπων.
- Έχει κάνει τη γεωθερμική ενέργεια πιο ανταγωνιστική από ποτέ απέναντι σε άλλες τεχνολογίες, συμβάλλοντας στην ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.
- Χαμηλό κόστος παραγωγής, χαμηλό κόστος συντήρησης και λειτουργίας.
- Το μίγμα νερού-αμμωνίας έχει μοριακό βάρος πολύ κοντινό σε σχέση με του νερού, οπότε οι βασικές συνιστώσες (ατμοστρόβιλος, εναλλάκτες) δεν απαιτούν ιδιαίτερη διαφοροποίηση από την τυπική τους τεχνολογία.
- Ελευθερία προσαρμογής σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας, αλλάζοντας τη σύσταση του μίγματος νερού-αμμωνίας και συνεπώς όλων των συνιστωσών του κύκλου.
- Αρχικό κόστος κατασκευής μικρότερο από του κύκλου ORC.
- Βέλτιστη μεταφορά θερμότητας κατά την ατμοποίηση και την συμπύκνωση καθώς αυτές δεν γίνονται υπό σταθερή θερμοκρασία. Αυτό συμβαίνει γιατί οι θερμοκρασιακές διαφορές των δύο μέσων δεν είναι τόσο μεγάλες, οπότε έχουμε καλύτερη εκμετάλλευση της θερμότητας του γεωθερμικού ρευστού.

Ο κύκλος Kalina έχει ένα σημαντικό μειονέκτημα, ότι απαιτείται σημαντικά μεγαλύτερη έκταση εγκαταστάσεων ειδικά στην περίπτωση όπου έχουμε μεταβλητή σύνθεση του μίγματος, οπότε θα απαιτείται ένας διαχωριστής και ένας απορροφητής.



Εικόνα 1.22: Σχηματικό διάγραμμα κύκλου Kalina (Πηγή: Χαράλαμπος Δαμιανίδης, 2010. Διπλωματική Εργασία ΕΜΠ)

Με εξαίρεση τη μεταβλητή σύσταση του μίγματος νερού-αμμωνίας, ο κύκλος Kalina δεν διαφέρει ιδιαίτερος από έναν απλό κύκλο ORC.

Στον κύκλο του σχήματος 1.22, το φτωχό σε αμμωνία μίγμα που εξέρχεται από τον διαχωριστή αφού προσδώσει μέρος της θερμότητας του στον αναγεννητικό προθερμαντή που ακολουθεί, αναμειγνύεται με το πλούσιο σε αμμωνία μίγμα το οποίο έχει εξέλθει από τον ατμοστρόβιλο της εγκατάστασης.

Αφού ψυχθεί το εργαζόμενο μέσο διέρχεται από την αντλία για ανύψωση της πίεσης του, στη συνέχεια από τον αναγεννητικό προθερμαντή ώστε να έχουμε μία μερική ανάκτηση

θερμότητας από το φτωχό μίγμα, και στη συνέχεια διέρχεται από τον ατμοποιητή όπου έχουμε την ατμοποίηση του μίγματος νερού-αμμωνίας με τη χρήση του γεωθερμικού ρευστού. Τέλος, το ατμοποιηθέν μίγμα διέρχεται από τον διαχωριστή της εγκατάστασης ώστε να επαναληφθεί η παραπάνω διαδικασία.

Όσον αφορά και τους δύο δυαδικούς κύκλους που αναφέραμε, ο θερμικός βαθμός απόδοσης τους είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με του άμεσου κύκλου, δηλαδή 10-13%. Στον κύκλο Kalina έχουμε μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης κατά 1-2% σε σχέση με τον κύκλο ORC, για ίδιες συνθήκες γεωθερμικού ρευστού.

1.8.4) Περαιτέρω εκμετάλλευση γεωθερμικού ρευστού

Όπως παρατηρήσαμε στις προηγούμενες παραγράφους, η απόδοση ενός γεωθερμικού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κυμαίνεται στο 10-13%, ενώ αν χρησιμοποιήσουμε πιο σύγχρονες τεχνολογίες (όπως χρήση δύο οργανικών ρευστών, χρήση διπλής πίεσης κυκλώματος) μπορούμε να φτάσουμε το 15%. Πάραυτα οι βαθμοί απόδοσης αυτοί είναι αρκετά χαμηλοί, κάτι που οφείλεται στις χαμηλές στάθμες θερμοκρασιών-πιέσεων. Υπάρχει, όμως, η δυνατότητα χρήσης του εξερχόμενου της εγκατάστασης γεωθερμικού ρευστού για άμεσες χρήσεις ανάλογα με τις ανάγκες της περιοχής, ώστε να εκμεταλλευτούμε κατά το δυνατόν την θερμότητα του γεωθερμικού ρευστού. Σε αυτήν την περίπτωση, οι βαθμοί απόδοσης όλου του συστήματος αυξάνονται κατακόρυφα. Αξίζει να σημειωθεί ότι κάθε παραπάνω βαθμός °C του γεωθερμικού ρευστού που εκμεταλλεύομαστε είναι συνολικά ένα τεράστιο ποσό ισχύος σε ένα βάθος χρόνου, το οποίο θα έμενε ανεκμετάλλευτο υπό διαφορετικές συνθήκες.

Ένα πολύ καλό παράδειγμα εκμετάλλευσης γεωθερμικού πεδίου λαμβάνουμε από το Husavik της Ισλανδίας. Το γεωθερμικό πεδίο του Husavik παράγει γεωθερμικό ρευστό σε θερμοκρασία 124°C και σε παροχή 60lt/s, και τέθηκε σε λειτουργία τον Ιούλιο του 2000. Σε αυτήν την περιοχή είναι εγκατεστημένο ένα εργοστάσιο ηλεκτροπαραγωγής το οποίο εκμεταλλεύεται τη θερμότητα του γεωθερμικού ρευστού μέσω ενός κύκλου Kalina. Στη συνέχεια, το γεωθερμικό ρευστό που εξέρχεται της εγκατάστασης χρησιμοποιείται για την τηλεθέρμανση της περιοχής, κάτι πολύ σημαντικό για τη συγκεκριμένη περιοχή όπως γίνεται εύκολα κατανοητό. Στη συνέχεια, το γεωθερμικό ρευστό εξέρχεται του κυκλώματος τηλεθέρμανσης με περίπου 35-36°C. Η συγκεκριμένη θερμοκρασία, όπως είδαμε και στο κεφάλαιο Χρήσεις Γεωθερμίας, ιδίως σε περιοχές ιδιαίτερως ψυχρού κλίματος όπως η Ισλανδία, μπορεί να εκμεταλλευτεί περαιτέρω. Έτσι, στη συνέχεια, χρησιμοποιείται σε ιχθυοκαλλιέργειες και για λιώσιμο χιονιού, ως μέσο αντιπαγετικής προστασίας σε δρόμους και πλατείες. Με αυτόν τον τρόπο η θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού πέφτει πολύ χαμηλά, και έχουμε πολύ καλή εκμετάλλευση του γεωθερμικού πεδίου, πετυχαίνοντας πολύ υψηλούς βαθμούς εκμετάλλευσης.

Βέβαια, μια τόσο υψηλή εκμετάλλευση του γεωθερμικού ρευστού μπορεί να μην είναι πάντα δυνατή, καθώς μπορεί να μην υπάρχουν στην περιοχή διαθέσιμες εφαρμογές που να μπορούν να χρησιμοποιηθούν χαμηλής θερμοκρασίας εργαζόμενα μέσα. Γενικότερα, ο σωστός σχεδιασμός εκμετάλλευσης ενός γεωθερμικού πεδίου είναι ένα αντικείμενο αρκετά πολύπλοκο, καθώς θα πρέπει να λάβει υπόψη του διάφορους παράγοντες, τεχνολογικούς (διαθέσιμο γεωθερμικό δυναμικό, διαθέσιμη παροχή κλπ), οικονομικούς, κοινωνικούς, περιβαλλοντικούς, καθώς επίσης θα πρέπει να λάβει υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε περιοχής και να προσαρμόσει την εκμετάλλευση του πεδίου πάνω στον βέλτιστο συγκερασμό όλων των παραπάνω.

1.9) Αντλίες θερμότητας(Αβαθής Γεωθερμία)

Έχει παρατηρηθεί ότι σε μικρά βάθη, πρακτικά κάτω των 5m, η θερμοκρασία του υπεδάφους είναι πρακτικά σταθερή γύρω στους 20-25°C, περίπου όση η μέση θερμοκρασία της περιοχής, ανεξαρτήτως εποχής του έτους. Αυτή τη σταθερή θερμοκρασία εκμεταλλεύονται οι αντλίες θερμότητας, προσδίδοντας είτε θερμότητα στο εσωτερικό των κτιρίων κατά τους χειμερινούς μήνες, όπου η θερμοκρασία είναι χαμηλότερη της σταθερής του υπεδάφους, είτε ψύξη-δροσισμό κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, όπου η θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη αυτής. Επίσης, μπορούν να εκμεταλλευτούν κατά τον ίδιο τρόπο πιθανά νερά σε μικρά βάθη. Με αυτόν τον τρόπο, λοιπόν, παρέχουν αποδοτική θέρμανση, ζεστό νερό και κλιματισμό.

Οι αντλίες θερμότητας, στην ουσία είναι ένας εναλλάκτης και ένα σύστημα σωληνώσεων στο οποίο διακινείται το ρευστό λειτουργίας, το οποίο θερμαίνεται από την θερμότητα του εδάφους μέσω του εναλλάκτη τον χειμώνα, και ψύχεται το καλοκαίρι, και στη συνέχεια μέσω του συστήματος σωληνώσεων μεταφέρεται αυτή η θερμική-ψυκτική ισχύς στο κτίριο.

Τα συστήματα των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας αποτελούνται από τρία μέρη:

- Το γεωεναλλάκτη, ο οποίος είναι σύστημα σωληνώσεων που τοποθετείται μέσα στο έδαφος, το οποίο λαμβάνει τόσο τη θερμότητα του εδάφους ή του νερού όσο και το νερό από την επιφάνεια ή κάποια υδρογεώτρηση.
- Την αντλία θερμότητας, η οποία αυξάνει ή μειώνει τη θερμοκρασία ανάλογα με τις ανάγκες.
- Το σύστημα της μεταφοράς και διανομής της θερμότητας μέσα στο κτίριο (σύστημα αεραγωγών-fan coils).

Στις αντλίες θερμότητας ο συντελεστής συμπεριφοράς COP ορίζεται ως εξής:

$$COP = \frac{Q_{\omega\phi}}{W_{net}}, \text{ όπου } Q_{\omega\phi}: \text{ η θερμική ισχύς που αποκομίζουμε}$$

W_{net} : το έργο που καταναλίσκουμε, έργο αντλίας.

Ο συντελεστής COP λαμβάνει τιμές από 1.5 ως 5, με συνηθέστερες τιμές 3-5. Προφανώς, όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του COP, τόσο πιο αποδοτική είναι η λειτουργία του συστήματος. Πρακτικά για συντελεστή COP=4, σημαίνει ότι για 1 ηλεκτρική μονάδα που καταναλίσκουμε κερδίζουμε 4 μονάδες θερμότητας. Συγκριτικά, μπορεί να αναφερθεί ότι ένας καυστήρας ορυκτών καυσίμων είναι 80-94% αποδοτικός, ενώ μια αντλία θερμότητας 150-500% αποδοτική.

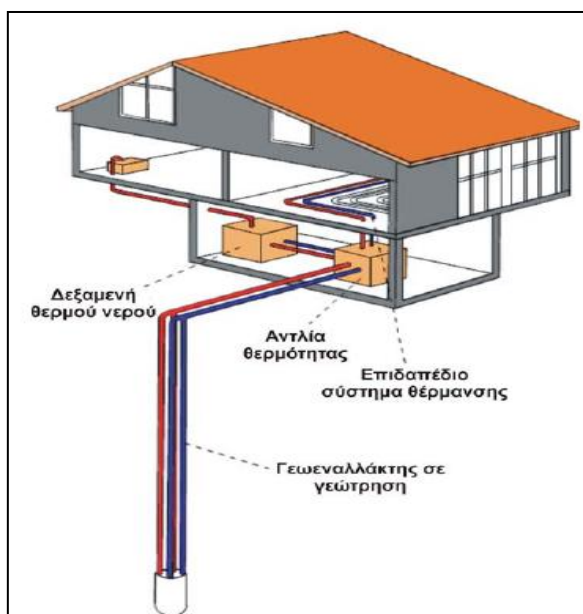
Οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας αποτελούν πλέον μια ώριμη και καθιερωμένη τεχνολογία, ελαττώνουν το κόστος ψύξης-θέρμανσης κατά 25-75%, ενώ μειώνουν σημαντικά τις εκπομπές CO₂, και κατά συνέπεια είναι πολύ φιλικές προς το περιβάλλον. Οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας γνωρίζουν, λόγω όλων των παραπάνω χαρακτηριστικών τους πραγματική άνθηση, με μία ετήσια αύξηση εγκατεστημένης ισχύος της τάξης του 10%.

Η μεγαλύτερη ανάπτυξη των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας σημειώθηκε στις Η.Π.Α., και στη Δυτική Ευρώπη, στην οποία έχουν εγκατασταθεί περισσότερες από 360.000 μονάδες με εγκατεστημένη ισχύ πάνω από 3280MWh.

Μέχρι το Νοέμβριο του 2007 είχαν καταγραφεί στην Ελλάδα πάνω από 200 εφαρμογές γεωθερμικών αντλιών θερμότητας, με συνολική εγκατεστημένη ισχύ 20MWth, και παρουσιάζουν μια γρήγορη ανάπτυξη, πιθανότατα και λόγω των διατάξεων της υφιστάμενης νομοθεσίας, δηλαδή της υπουργικής απόφασης Υπ. Αρ. Δ9Β, Δ/Φ.166/ΟΙΚ18508/5552/207 (Φ.Ε.Κ. 1595/τ.Β./25-10-2004).

Το κόστος εγκατάστασης των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας ανέρχεται σε 600-1100 $\frac{euro}{KW_{th}}$, για μονάδες που χρησιμοποιούν νερό από υδρογεώτρηση και σε 1000-1600 $\frac{euro}{KW_{th}}$ για μονάδες που χρησιμοποιούν γήινους εναλλάκτες θερμότητας(στοιχεία 2006). Το αντίστοιχο κόστος ανά μονάδα παρεχόμενης θερμικής ενέργειας είναι 0.037-0.049 $\frac{euro}{KWh_{th}}$ λαμβάνοντας υπόψη και την απόσβεση του αρχικού κεφαλαίου και ένα επιτόκιο της τάξης 6-8%.

Τέλος, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η χρήση γεωθερμικών αντλιών θερμότητας είναι εφικτή και οικονομική εκτός από τη θέρμανση κατοικιών, και σε θερμοκήπια, πτηνοτροφικές και κτηνοτροφικές μονάδες, υδατοκαλλιέργειες κ.α.



Εικόνα 1.23: Τυπική μορφή ενός συστήματος γεωεναλλάκτη σε γεώτρηση και αντλίας θερμότητας σε κατοικία (Πηγή: <http://www.ypan.gr/ape/files/mythoi-geothermia.pdf>,2008)

Τέλος, σημειώνεται ότι οι συντελεστές εκμεταλλευσιμότητας ποικίλουν από 10-100% περίπου ανάλογα με την εκάστοτε χρήση, με μέση περίπου τιμή το 40%. Οι χαμηλότερες τιμές αναφέρονται στη θέρμανση χώρων με αντλίες θερμότητας, ενώ οι υψηλότερες τιμές αναφέρονται σε εφαρμογές που έχουν συνεχή χρήση όλο το χρόνο, όπως η θέρμανση πισινών.

1.10) Περιβαλλοντικές επιπτώσεις γεωθερμικών σταθμών

Υπάρχει παγκόσμια ανησυχία για τις εκπομπές CO₂, από τη στιγμή που θεωρείται υπεύθυνο για την υπερθέρμανση του πλανήτη. Οι γεωθερμικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έχουν τις μικρότερες εκπομπές αερίων ρύπων ανά MWh σε σχέση με οποιονδήποτε άλλο σταθμό παραγωγής ενέργειας που εκπέμπει ρύπους. Οι σταθμοί δυαδικού κύκλου (binary plants) εκπέμπουν μηδενικούς ρύπους εφόσον η εκμετάλλευση του γεωθερμικού ρευστού γίνεται σε έναν κλειστό κύκλο και αυτό δεν έρχεται καθόλου σε επαφή με την ατμόσφαιρα. Στην ουσία, σε αυτήν την περίπτωση η μόνη περιβαλλοντική επιβάρυνση είναι η απόρριψη του θερμικού φορτίου του συμπυκνωτή στο περιβάλλον. Το ίδιο προφανώς ισχύει και για την πλειονότητα των άμεσων γεωθερμικών χρήσεων.

Εκπομπές ρύπων έχουμε κυρίως από τους σταθμούς άμεσου κύκλου. Τα γεωθερμικά ρευστά έχουν αέριους ρύπους διαλυμένους υπό αέρια μορφή και στερεά άλατα διαλυμένα στο υγρό. Κατά τον διαχωρισμό, οι αέριοι ρύποι διέρχονται με τον ατμό από τον ατμοστρόβιλο και στην συνέχεια από τον συμπυκνωτή της εγκατάστασης. Σε αυτήν την περίπτωση έχουμε ένα βασικό πρόβλημα. Η ύπαρξη αυτών των αερίων στο συμπύκνωμα αυξάνει την πίεση στον συμπυκνωτή με αποτέλεσμα να έχουμε μικρότερο λόγο πίεσης από ότι επιθυμούμε, με αποτέλεσμα την μείωση του παραγόμενου έργου. Για αυτόν το λόγο χρησιμοποιούμε διάφορες τεχνικές (πχ, αντλίες κενού) ώστε να αφαιρούμε αυτά τα αέρια από τον συμπυκνωτή. Προφανώς, οι τεχνικές αυτές προσθέτουν παρασιτικά φορτία στην εγκατάσταση, αλλά το καθαρό έργο που κερδίζουμε είναι πολύ μεγαλύτερο. Τα συνηθέστερα αέρια είναι το CO₂ και το H₂S, ενώ αέρια όπως το μεθάνιο, η αμμωνία, το υδρογόνο και το διοξείδιο του θείου βρίσκονται σε πολύ μικρές συγκεντρώσεις.

Ένας τρόπος μη εκπομπής των αερίων αυτών στην ατμόσφαιρα είναι, πέραν της χημικής τους επεξεργασίας, η συλλογή τους, συμπίεση τους, και επαναδιάλυση στο υγρό υπόλειμμα του γεωθερμικού ρευστού, ώστε να εναποτεθούν στο υπέδαφος μαζί με αυτό. Τα άλατα του γεωθερμικού ρευστού εξακολουθούν να υπάρχουν στο υγρό υπόλειμμα του γεωθερμικού ρευστού, με αποτέλεσμα να υπάρχει η δυνατότητα να έχουμε μόλυνση του περιβάλλοντος αν το υγρό υπόλειμμα ενός τέτοιου σταθμού δεν εναποτεθεί σωστά στο υπέδαφος. Τέλος, σε αυτούς τους σταθμούς θα πρέπει να προσεχθεί η συγκέντρωση αλάτων στο υγρό υπόλειμμα να μην πέσει κάτω από το όριο διαλυτότητας τους και έχουμε στερεοποίηση αυτών (silica precipitation). Αυτό βέβαια μπορεί να συμβεί και όταν η θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού μειωθεί αρκετά, δεδομένου ότι η διαλυτότητα είναι άμεση συνάρτηση της θερμοκρασίας. Όπως είναι εύκολα κατανοητό, το πρόβλημα αυτό είναι πολύ εντονότερο σε πηγές χαμηλής ενθαλπίας όπου τα θερμοκρασιακά επίπεδα είναι εξ'αρχής πολύ χαμηλά. Σε ορισμένες ακραίες περιπτώσεις γεωθερμικών ρευστών με υπερβολικά μεγάλες συγκεντρώσεις αλάτων, οι μονάδες είναι εξοπλισμένες με ειδικό εξοπλισμό κρυσταλλοποίησης και αποθήκευσης των αλάτων αυτών κατά τη διάρκεια της διαδικασίας.

Συνοπτικά, όλα τα παραπάνω προβλήματα μπορούν να ξεπεραστούν σε πολύ μεγάλο βαθμό με την προσεκτική ολική επανεισαγωγή του γεωθερμικού ρευστού στον ταμιευτήρα. Πάντως, οι εκπομπές αερίων ρύπων από τους γεωθερμικούς σταθμούς είναι πρακτικά μηδενικές και αμελητέες σε σχέση με συμβατικούς σταθμούς. Οι παρακάτω πίνακες αποδεικνύουν τα προαναφερθέντα.

Plant type	CO ₂ kg/MWh	SO ₂ kg/MWh	NO _x kg/MWh	Particulates kg/MWh
Coal-fired steam plant	994	4.71	1.955	1.012
Oil-fired steam plant	758	5.44	1.814	N.A.
Gas turbine	550	0.0998	1.343	0.0635
Hydrothermal				
Flash-steam	27.2	0.1588	0	0
The Geysers dry-steam	40.3	0.000098	0.000458	Negligible
Closed loop binary	0	0	0	Negligible
EPA average, all US plants	631.6	2.734	1.343	N.A.

Εικόνα 1.24: Σύγκριση εκπομπών γεωθερμικών σταθμών με άλλους σταθμούς παραγωγής (Πηγή: R.Di Pippo,2007. Geothermal Power Plants)

Μορφή Ενέργειας	CO ₂ (kg/MWh)	NO _x (kg/MWh)	SO _x (kg/MWh)
Άνθρακας	1042	4.4	11.8
Πετρέλαιο	839	12.4	1.6
Φυσικό αέριο	453	1.4	0
Γεωθερμία	95	0.3	0.1
Φωτοβολταϊκά	135	0.3	0.4
Βιομάζα	20	1.8	0.5

Πίνακας 1.2: Ειδικές εκπομπές ρύπων διαφόρων σταθμών ηλεκτροπαραγωγής

Όπως είχε αναφερθεί επιγραμματικά και πρωτύτερα, οι γεωθερμικές εγκαταστάσεις έχουν το σημαντικότερο πλεονέκτημα μικρής χρήσης Γης σε σχέση με οποιαδήποτε άλλη μορφή παραγωγής ενέργειας. Η έκταση αυτή εξαρτάται από τον τύπο και τον αριθμό των πηγαδιών άντλησης, των πηγαδιών εναπόθεσης, την κτίση υποσταθμού, την κτίση βοηθητικών δρόμων, το είδος του γεωθερμικού πεδίου, το είδος του συστήματος μετατροπής ενέργειας καθώς και την κτίση βοηθητικών κτιρίων. Την μεγαλύτερη έκταση λαμβάνουν οι σταθμοί που λειτουργούν με γεωθερμικό ρευστό πολύ μεγάλης συγκέντρωσης σε άλατα, και είναι περίπου 75% μεγαλύτεροι σε σχέση με έναν τυπικό γεωθερμικό σταθμό. Το γεγονός ότι η παραγωγή ενέργειας πρέπει να γίνεται κοντά στο γεωθερμικό πεδίο είναι ένας ενισχυτικός παράγοντας για την μείωση της έκτασης του σταθμού.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η έκταση που περικλείουν τα πηγάδια και οι σωληνώσεις τους μπορεί να είναι αρκετά μεγάλη, ιδίως για σταθμούς άμεσου κύκλου, αλλά η πραγματική έκταση που χρησιμοποιείται είναι στην ουσία το 2% αυτής με αποτέλεσμα η υπόλοιπη να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για άλλες χρήσεις.

Πάραυτα ένας γεωθερμικός σταθμός έχει απαιτούμενη έκταση ανά MW (παραπλήσιες τιμές ανά MWh), το 5% της αντίστοιχης έκτασης ενός ηλιακού θερμικού συστήματος και το 2% ενός ηλιακού φωτοβολταϊκού συστήματος. Επίσης, ένας λιγνιτικός σταθμός ηλεκτροπαραγωγής, συμπεριλαμβανομένων των απαιτούμενων εκτάσεων για εξόρυξη λιγνίτη για 30 χρόνια, απαιτεί 30 με 35 φορές μεγαλύτερη έκταση ανά MW ή MWh. Επίσης, ένας πυρηνοληκτρικός σταθμός απαιτεί περίπου 7 φορές μεγαλύτερη έκταση ανά MW ή MWh.

Στην εικόνα 1.25 παρατηρούμε ότι η ύπαρξη ενός γεωθερμικού σταθμού καθώς και των σωληνώσεων αυτού, δεν παρενοχλεί την άγρια πανίδα της περιοχής. Άλλωστε, παγκοσμίως έχουν χτιστεί γεωθερμικές μονάδες σε ερήμους, δασώδεις περιοχές, τροπικά δάση κ.α.



Εικόνα 1.25: Σωληνώσεις του γεωθερμικού σταθμού Miravalles, Costa Rica (Πηγή: R.Di Pippo, 2007. Geothermal Power Plants)



Εικόνα 1.26: Διάφοροι γεωθερμικοί σταθμοί ανά τον κόσμο (Πηγή: www.geothermal.marin.org)

Power plant technology	Land usage m ² /MW	Land usage m ² /GWh
110 MW geothermal flash plant (including wells)	1,260	160
20 MW geothermal binary plant (excluding wells)	1,415	170
49 MW geothermal FCRC plant (excluding wells) ⁽¹⁾	2,290	290
2258 MW coal plant (including strip mining)	40,000	5,700
670 MW nuclear plant (plant site only)	10,000	1,200
95 MW hydroelectric plant (reservoir only) ⁽²⁾	1,200,000	250,000
47 MW solar thermal plant (Mojave Desert, CA)	28,000	3,200
10 MW solar PV plant (Southwestern U.S.) ⁽³⁾	66,000	7,500
25 MW wind farm (10 × 2.5 MW) ⁽⁴⁾	3,140	1,305

⁽¹⁾ Typical Flash-Crystallizer/Reactor-Clarifier plant at Salton Sea, CA; see Sect. 9.9.
⁽²⁾ Average of 10 plants at the Cumberland River Basin, Tennessee Valley Authority system.
⁽³⁾ By deploying PV panels on rooftops of existing buildings, no additional land would be needed.
⁽⁴⁾ Assumes a clear area with a radius equal to the hub height.

Εικόνα 1.27: Συγκριτικός πίνακας απαιτούμενης έκτασης για διάφορες μορφές ηλεκτροπαραγωγής (Πηγή: R.Di Pippo, 2007. Geothermal Power Plants)

Ο θόρυβος στις γεωθερμικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας δεν είναι μεγαλύτερος από το θόρυβο που προκαλείται στις συμβατικές μονάδες. Στο στάδιο κατασκευής των γεωτρήσεων και της μονάδας ο θόρυβος είναι μια προσωρινή κατάσταση, που αντιμετωπίζεται με τη χρήση σιγαστήρων κρούσης η/και ωτοασπίδων, ενώ κατά τη διάρκεια λειτουργίας των γεωθερμικών εγκαταστάσεων ο θόρυβος μπορεί να προέρχεται από τις αντλητικές εγκαταστάσεις, τους ατμοστρόβιλους, και τους παροδικούς καθαρismus των σωλήνων, και αντιμετωπίζεται με την τοποθέτηση μονίμων εγκαταστάσεων σιγαστήρων και άλλων συσκευών μείωσης θορύβου.

Οι επιφανειακές οχλήσεις περιορίζονται στο στάδιο κατασκευής των γεωτρήσεων και των μονάδων και σταματούν μετά το πέρας των τεχνικών εργασιών, την απομάκρυνση των μηχανημάτων και την αποκατάσταση του χώρου. Οι οχλήσεις λόγω εκσκαφών ή διάνοιξης νέων δρόμων δεν αποτελούν προφανώς ιδιαιτερότητα της γεωθερμίας.

Η οπτική όχληση των εγκαταστάσεων είναι μικρή ως αμελητέα και αντιμετωπίζεται με την προσεκτική επιλογή της τοποθεσίας κατασκευής της μονάδας, την υιοθέτηση της βέλτιστης πρακτικής-τεχνολογίας με γνώμονα τη διατήρηση του τοπίου και το σεβασμό στην ιδιαίτερη φυσιογνωμία της εκάστοτε περιοχής και με αποκατάσταση του χώρου μετά το πέρας των γεωτρήσεων. Οι σωλήνες μεταφοράς των γεωθερμικών ρευστών είναι συνήθως υπόγειοι και, άρα, μη ορατοί. Επίσης, θα πρέπει να προσεχθεί ο σταθμός να μην χτιστεί κοντά σε περιοχές ιδιαίτερου φυσικού κάλλους ή περιοχές προστατευόμενες από διεθνείς οργανισμούς. Κατά την διάρκεια κτίσης του έργου είναι πιθανό να έχουμε την απομάκρυνση πολλών δέντρων από την περιοχή, για μεταφορά του εξοπλισμού κλπ, αλλά μετά το πέρας των εργασιών είναι δυνατή η αναδάσωση της περιοχής που δεν επηρεάζεται από το έργο ώστε να έχουμε κατά το δυνατόν αποκατάσταση του φυσικού πλούτου της περιοχής. Γενικότερα, οι γεωθερμικοί σταθμοί είναι από τους πλέον φιλικούς στο ανθρώπινο μάτι, καθώς δεν έχουν περίοπτες θέσεις, όπως οι ανεμογεννήτριες ή οι καμινάδες θερμικών συμβατικών σταθμών. Το μόνο που δεν μπορεί να αποφευχθεί στους γεωθερμικούς σταθμούς είναι η ύπαρξη ατμού από τους πύργους ψύξης, και η πιθανή δημιουργία νέφωσης, ιδίως από τις πιο μεγάλες μονάδες άμεσου κύκλου, όπου η ποσότητες ψυκτικού νερού είναι σημαντικά μεγάλες.



Εικόνα 1.28: Γεωθερμικός σταθμός Ahuachapán (LaGeo,2005)

Η αφαίρεση μεγάλων ποσοτήτων νερού ή ατμού από ένα γεωθερμικό πεδίο με πορώδεις ταμιευτήρες μπορεί να προκαλέσει κατά περίπτωση καθιζήσεις μερικών εκατοστών ως και μερικών μέτρων. Οι καθιζήσεις αυτές μπορούν να ελαχιστοποιηθούν με την ολική επανεισαγωγή των γεωθερμικών ρευστών στον ταμιευτήρα.

Με την επανεισαγωγή των ρευστών στον ταμιευτήρα, την υπερβολική άντληση, την εισπίεση ρευστών σε περιοχές ξηρών πετρωμάτων υπάρχει η πιθανότητα πρόκλησης τοπικών μικροσεισμών. Πρόκειται για σπάνια φαινόμενα που δεν εμπνέουν καμία ανησυχία γιατί δεν προκαλούνται σεισμοί μεγαλύτεροι των 3 βαθμών της κλίμακας Richter. Παράλληλα, όμως, συμβάλλουν στην 'ανακούφιση' της συσσωρευμένης σεισμικής ενέργειας σε μία περιοχή και στην αποτροπή ενός μεγαλύτερου σεισμού, επειδή τα περισσότερα γεωθερμικά πεδία συνδέονται με την παρουσία ενεργών ρηγμάτων και βρίσκονται σε σειсмоγενείς περιοχές. Ακραίο παράδειγμα αποτελεί το έργο στη Βασιλεία της Ελβετίας όπου μετρήθηκαν πάνω από 10.000 σεισμοί έντασης ως 3.4 Richter τις έξι πρώτες μέρες λόγω της επανεισαγωγής νερού.

Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι είναι απαραίτητη, όπως και σε κάθε θερμικό σταθμό, η ύπαρξη νερού στην περιοχή του σταθμού για αρκετούς λόγους. Κατά τη φάση της γεώτρησης είναι απαραίτητη η ύπαρξη νερού για λόγους ψύξης των πετρωμάτων και για απομάκρυνση των άχρηστων πετρωμάτων. Επίσης, επιφανειακά νερά απαιτούνται κατά τη φάση λειτουργίας του σταθμού, ώστε να έχουμε την απαραίτητη ανακυκλοφορία νερών στο ρεζερβουάρ για την εύρυθμη λειτουργία του έργου, καθώς πολλές φορές η ποσότητα των υπόγειων νερών στο ρεζερβουάρ είναι πολύ περιορισμένη.

Η ύπαρξη μεγάλων ποσοτήτων νερού, είναι επίσης απαραίτητη, για τη χρήση στον ψυκτικό πύργο της εγκατάστασης με σκοπό την απομάκρυνση του απορριπτόμενου θερμικού φορτίου στο περιβάλλον. Βέβαια σε αυτές τις περιπτώσεις, κυρίως στις πιο μικρές μονάδες, είναι δυνατή η χρήση αερόψυκτων εναλλακτών για την απόρριψη της θερμότητας στο περιβάλλον, αρκεί βέβαια τα μεγέθη να μην γίνονται απαγορευτικά.

Ατυχήματα μπορούν να συμβούν σε διάφορες φάσεις της κατασκευής ή της λειτουργίας ενός γεωθερμικού σταθμού, όπως και σε οποιαδήποτε άλλη εγκατάσταση παραγωγής ενέργειας. Τα πιο συνηθισμένα ατυχήματα σε ένα γεωθερμικό σταθμό είναι οι εκρήξεις πηγαδιών, η ρήξη σωληνώσεων καθώς και οι αστοχίες των ατμοστροβίλων. Βέβαια, με το πέρασμα των χρόνων και την εξέλιξη της τεχνολογίας η συχνότητα τέτοιων ατυχημάτων, και δη θανατηφόρων, έχει μειωθεί στο ελάχιστο.

Η θερμική μόλυνση του περιβάλλοντος, στους γεωθερμικούς σταθμούς είναι μη αποφευκτέα, από τη στιγμή που η πηγή ενέργειας είναι η θερμότητα, και βάσει του κύκλου Carnot, είμαστε αναγκασμένοι να απορρίψουμε ένα ποσό θερμότητας στο περιβάλλον.

Όπως είδαμε και προηγουμένως, αν έχουμε μια εγκατάσταση καθαρά ηλεκτροπαραγωγής, τότε η απορριπτόμενη θερμότητα ανά μονάδα παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας είναι περίπου 7πλάσια, σε αντίθεση με έναν συμβατικό σταθμό συνδυασμένου κύκλου όπου έχουμε σχεδόν ίσες τιμές των παραπάνω μεγεθών. Αυτό συμβαίνει λόγω του βαθμού απόδοσης μιας τέτοιας μονάδας που κυμαίνεται στο 10-13%. Βέβαια, τα μεγέθη παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος, και άρα απορριπτόμενης θερμικής ισχύος, είναι αισθητά μικρότερα σε σχέση με τους συμβατικούς σταθμούς οπότε έχουμε μια αντιστάθμιση και καταλήγουμε σε τυπικά μεγέθη ψυκτικών πύργων και απορριπτόμενης θερμικής ισχύος.

Η αβαθής γεωθερμία, η οποία στηρίζεται στην εκμετάλλευση, με τη χρήση γεωθερμικών αντλιών θερμότητας, της θερμικής κατάστασης που παρουσιάζεται σε μικρά βάθη έχει μηδενικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Στις περισσότερες περιπτώσεις, πρόκειται για κλειστό κύκλωμα κυκλοφορίας νερού-αέρα και δεν παράγονται κανενός είδους ρύποι. Υπάρχουν μόνο προσωρινές οχλήσεις κατά τη διάρκεια εκτέλεσης των τεχνικών εργασιών, ενώ στο τέλος υπάρχει πλήρης αποκατάσταση του τοπίου και απουσιάζει οποιαδήποτε εξωτερική μονάδα.

Συνοψίζοντας, διαπιστώνουμε ότι η περιβαλλοντική επιβάρυνση που προκύπτει από ένα γεωθερμικό έργο είναι αμελητέα σε σχέση με ένα συμβατικό σταθμό, και οι περισσότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις είναι αντιμετωπίσιμες. Η καλύτερη λύση για την αντιμετώπιση και την ελαχιστοποίηση αυτών των επιπτώσεων είναι η ολική προσεκτική επανεισαγωγή των γεωθερμικών ρευστών στον ταμειυτήρα.

1.11) Το μέλλον της Γεωθερμικής Ενέργειας

Η πρόβλεψη για το μέλλον της γεωθερμικής ενέργειας εξαρτάται κυρίως από τους εξής τρεις παράγοντες: την γενικότερη ζήτηση ενέργειας, την εύρεση νέων γεωθερμικών πεδίων καθώς και την ανταγωνιστική θέση της γεωθερμικής ενέργειας έναντι των άλλων μορφών ενέργειας.

Η ζήτηση ενέργειας θα συνεχίσει να αυξάνεται στο μέλλον. Οι οικονομίες επεκτείνονται, ο πληθυσμός της Γης αυξάνεται, ενώ προ πάντων αυξάνονται οι ανάγκες και το βιοτικό επίπεδο αυτού του πληθυσμού. Άρα, είναι προφανής η συνεχής αύξηση της ζήτησης ενέργειας. Ταυτόχρονα, αυξάνεται η καθολική αναγνώριση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της παραγωγής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα. Καθημερινά, αυξάνεται το ποσοστό των ανθρώπων που προτιμούν μια ενεργειακή πολιτική βασισμένη στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Η εύρεση νέων γεωθερμικών πεδίων είναι ένας παράγοντας που εξαρτάται αποκλειστικά από την έρευνα και την εμπειρία. Σήμερα, οι Η.Π.Α. μπορούν να καλύψουν το 10% των ενεργειακών τους αναγκών από τους ήδη υπάρχοντες γεωθερμικούς σταθμούς. Εκτιμάται, ότι αυτό το ποσοστό μπορεί να αυξηθεί κατά πολύ στο άμεσο μέλλον. Επίσης, έχει εκτιμηθεί ότι το παγκόσμιο γεωθερμικό δυναμικό είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο δυναμικό του άνθρακα, του πετρελαίου, του φυσικού αερίου και του ουρανίου αθροιστικά, αρκεί να ευρεθούν νέες τεχνολογίες ώστε να καταστεί αυτό το δυναμικό πιο οικονομικό ως προς εκμετάλλευση.

Η ανταγωνιστική θέση της γεωθερμίας έναντι των άλλων μορφών ενέργειας εξαρτάται κυρίως από το κόστος της γεωθερμικής ενέργειας. Βραχυπρόθεσμα, τα ορυκτά καύσιμα πλεονεκτούν σε κόστος έναντι των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, και της γεωθερμίας. Η γεωθερμία, όπως όλες οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, έχουν υψηλό αρχικό κόστος επένδυσης και εγκαταστάσεων. Το γεωθερμικό "καύσιμο", όμως, είναι σταθερό και προβλέψιμο και δεν μεταβάλλεται η "τιμή" του και η παραγωγή του, σε αντίθεση με τις υπόλοιπες ΑΠΕ, όπου η παραγωγή είναι στοχαστική, αλλά και από τα ορυκτά καύσιμα, όπου οι τιμές τους μακροπρόθεσμα εξαρτώνται από διάφορους γεωπολιτικούς παράγοντες. Με άλλα λόγια, η γεωθερμική ενέργεια υπερισχύει των ορυκτών καυσίμων μακροπρόθεσμα.

Επίσης, θα πρέπει να συνυπολογιστούν τα δευτερεύοντα κόστη κάθε μορφής ενέργειας. Για παράδειγμα, στην περίπτωση του φυσικού αερίου, το πρωτεύον κόστος είναι κυρίως το ποσό που πληρώνουμε στον παροχέα του φυσικού αερίου, αλλά και στον παραγωγό του ηλεκτρικού. Δεν έχουν συνυπολογιστεί, όμως, τα τεράστια κόστη από την παγκόσμια κλιματική αλλαγή, τις επιπτώσεις στην υγεία από τη μόλυνση του περιβάλλοντος, πιθανά στρατιωτικά έξοδα για την προστασία πετρελαϊκών κοιτασμάτων, καθώς επίσης και το κόστος εναπόθεσης των ραδιενεργών αποβλήτων. Στην περίπτωση της γεωθερμικής ενέργειας, μπορούμε να πούμε με μεγάλη ασφάλεια, ότι το κόστος της περιορίζεται μονάχα στα πρωτεύοντα κόστη, και δεν έχει πολιτικές προεκτάσεις.

Τέλος, η γεωθερμία είναι μια εγχώρια πηγή ενέργειας, με αποτέλεσμα να μην επιβαρύνεται από κόστος εισαγωγής καυσίμων από γειτονικές χώρες και να συμβάλλει στην ενεργειακή ανεξαρτησία της κάθε χώρας. Με άλλα λόγια, καθιστά το ενεργειακό μίγμα κάθε χώρας πιο σταθερό από πολιτικής άποψης.

2) Υβριδικά γεωθερμικά συστήματα και εξελιγμένα συστήματα γεωθερμίας

Στο παρόν κεφάλαιο θα ασχοληθούμε με θερμοδυναμικά συστήματα που συνδυάζουν γεωθερμικές πηγές ενέργειας με άλλες πηγές ενέργειας, δηλαδή διάφορα υβριδικά συστήματα, καθώς επίσης θα γίνει και αναφορά σε ορισμένα βασικά εξελιγμένα συστήματα παραγωγής ενέργειας καθαρά από γεωθερμική ενέργεια, όπου στην ουσία πρόκειται για συνδυασμό των θερμοδυναμικών συστημάτων που παρουσιάσαμε στην παράγραφο 1.8 μεταξύ τους, είτε βελτιώσεις αυτών. Επίσης, στο παρόν κεφάλαιο δεν θα εξετάσουμε αναλυτικά το κάθε σύστημα, παρά μόνο θα γίνει μια συνοπτική παρουσίαση του κάθε συστήματος και της λειτουργικότητας του μέσω ερευνών που έχουν γίνει τα παλαιότερα χρόνια.

2.1) Συνδυασμός γεωθερμικών συστημάτων με συμβατικούς σταθμούς

Στην παρούσα παράγραφο θα μελετηθεί ο συνδυασμός συστημάτων παραγωγής ενέργειας από γεωθερμία με συμβατικούς σταθμούς παραγωγής. Οι σταθμοί αυτοί, προφανώς, μπορεί να είναι είτε στερεού είτε υγρού είτε αερίου καυσίμου, ακόμα και βιομάζας όταν αυτή είναι διαθέσιμη στις απαραίτητες ποσότητες στην περιοχή.

Ένας πολύ σημαντικός παράγοντας που μας ωθεί στη χρήση γεωθερμίας για ηλεκτροπαραγωγή είναι ότι οι υπόλοιπες "πράσινες" μορφές ενέργειας (ήλιος, άνεμος, νερό) είναι στοχαστικής μορφής, δηλαδή έχουν απότομες αυξομειώσεις στην παραγωγή κατά τη διάρκεια της ημέρας, και κατά συνέπεια δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για σταθερή παραγωγή, ως μονάδες βάσης. Αντιθέτως, όμως, η γεωθερμία, όπως είδαμε και στο πρώτο κεφάλαιο, έχει το σημαντικότερο μειονέκτημα ότι τα ισχυρά πεδία υψηλής ενθαλπίας που προσφέρονται κατ'εξοχήν για ηλεκτροπαραγωγή είναι πολύ περιορισμένα και βρίσκονται κοντά σε περιοχές με έντονη ηφαιστειακή δραστηριότητα. Αναφερόμαστε, βέβαια, σε γεωθερμικά πεδία υψηλής ενθαλπίας, που είναι κατάλληλα για την ηλεκτροπαραγωγή μεγάλης κλίμακας (~50MW) με τη χρήση άμεσου κύκλου, και όχι για πεδία μέσης-χαμηλής ενθαλπίας που μπορούν μεν να χρησιμοποιηθούν στην ηλεκτροπαραγωγή με χρήση δυαδικών κύκλων, αλλά στα οποία η ηλεκτροπαραγωγή είναι της τάξης των λίγων MW (ίσως και KW), άρα δεν μπορούμε να κάνουμε λόγο για μεγάλης κλίμακας μονάδες. Οι μονάδες δυαδικού κύκλου είναι κατάλληλες είτε για την εκμετάλλευση της απορριπτόμενης θερμότητας από συμβατικούς σταθμούς, είτε για την αποκεντρωμένη ηλεκτροπαραγωγή μικρής ισχύος. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο συνδυασμός μονάδων δυαδικού κύκλου με καύση βιομάζας, όταν είναι διαθέσιμη στην ευρύτερη περιοχή. Η πρώτη από τις δύο περιπτώσεις βέβαια δεν διαφέρει σε τίποτα από την απλή περίπτωση δυαδικού κύκλου, όπου ως πηγή θερμότητας έχουμε την απορριπτόμενη θερμότητα του συμβατικού σταθμού αντί για το γεωθερμικό ρευστό.

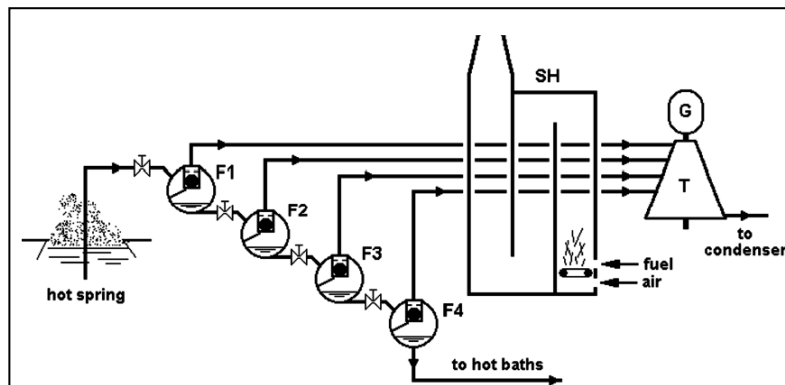
Συνοπτικά οι κύριες κατηγορίες συνδυασμού γεωθερμικής ενέργειας με συμβατικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, τις οποίες θα αναλύσουμε παρακάτω, είναι οι παρακάτω:

- Υπερθέρμανση γεωθερμικού ρευστού (ή εργαζόμενου μέσου σε δυαδικούς κύκλους) με καύση καυσίμου.
- Γεωθερμική προθέρμανση τροφοδοτικού νερού σε συμβατικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής.
- Συνδυασμός των δύο παραπάνω περιπτώσεων.
- Συνδυασμός με αεριοστρόβιλο.

Στην πρώτη περίπτωση, συνήθως, αναφερόμαστε σε συστήματα άμεσου κύκλου, δηλαδή υψηλής ενθαλπίας, όπου μας δίνεται η δυνατότητα μεγάλης υπερθέρμανσης, εν αντιθέσει με τους δυαδικούς κύκλους όπου το οργανικό ρευστό πολλές φορές μας θέτει ένα άνω όριο θερμοκρασίας για διάφορους λόγους (αναφλεξιμότητα, αποσύνθεση), χωρίς βέβαια αυτό να σημαίνει ότι δεν δύναται να υπάρξει αυτός ο συνδυασμός. Αυτό, άλλωστε, θα μελετήσουμε στο υπολογιστικό μέρος της παρούσας διπλωματικής. Η δεύτερη περίπτωση, μόνο, προσφέρεται για συστήματα μέσης-χαμηλής ενθαλπίας σε συνδυασμό, πιθανώς, με τη χρήση και δυαδικού κύκλου.

2.1.1) Υπερθέρμανση γεωθερμικού ρευστού με καύση καυσίμου

Η ιδέα χρήσης υπερθέρμανσης του γεωθερμικού ρευστού μέσω καύσης καυσίμων σε γεωθερμικούς σταθμούς δεν είναι μία νέα ιδέα. Το 1924 ο P.Caufourier πρότεινε ένα υβριδικό σύστημα στο οποίο το γεωθερμικό ρευστό υψηλής ενθαλπίας θα υφίστατο διαδοχικούς στραγγαλισμούς και διαχωρισμούς, και ο κορεσμένος ατμός τον οποίο θα λαμβάναμε από κάθε διαχωριστή θα εισερχόταν σε έναν υπερθερμαντή τροφοδοτούμενο από στερεό καύσιμο. Ο υπερθερμασμένος πλέον ατμός θα εισερχόταν σε έναν πολυβάθμιο ατμοστρόβιλο για παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος. Συγκεκριμένα, το σύστημα που προτάθηκε ήταν τεσσάρων στραγγαλισμών-διαχωρισμών. Μάλιστα, το υγρό υπόλειμμα των διαχωρισμών θα χρησιμοποιείτο για ιαματικούς σκοπούς.



Εικόνα 2.1: Το υβριδικό σύστημα που πρότεινε ο Caufourier το 1924 (R.Di Pippo,2007.Geothermal Power Plants)

Σε ένα τέτοιο σύστημα ο βαθμός απόδοσης του συστήματος στερεού καυσίμου μπορεί να δοθεί ως εξής:

$$\eta_{ff} = \frac{P_{el,hyb} - P_{el,geo}}{Q_{th,ff}}, \text{ όπου } P_{el,hyb} : \text{η ηλεκτρική ισχύς του υβριδικού συστήματος}$$

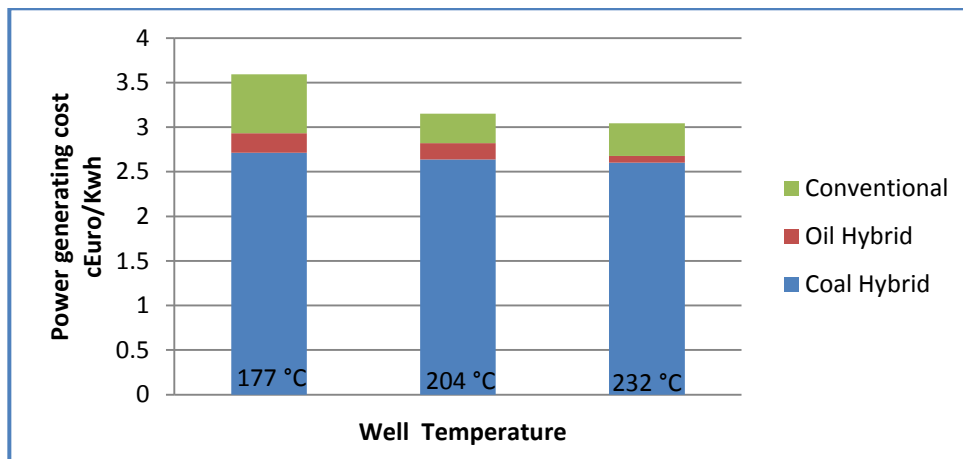
$$P_{el,geo} : \text{η ηλεκτρική ισχύς του αυτόνομου γεωθερμικού συστήματος}$$

$$Q_{th,ff} : \text{η θερμική ισχύς του καυσίμου}$$

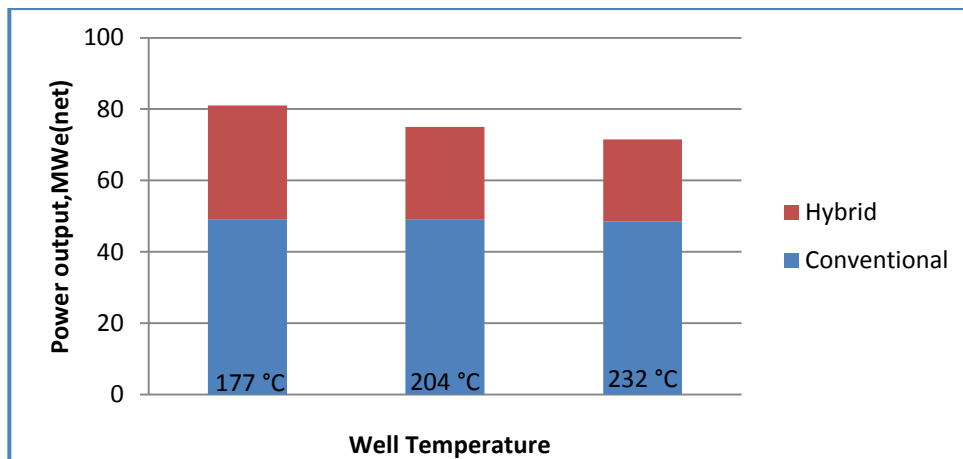
Στο σύστημα του Caufourier ο βαθμός απόδοσης αυτός ήταν $\eta_{ff} = 0.2$, πολύ χαμηλός ακόμα και για τα τότε δεδομένα, και για αυτόν το λόγο εγκαταλείφθηκε αυτή η ιδέα.

Μια νέα πρόταση υπερθέρμανσης του γεωθερμικού ρευστού έγινε το 1980 και αφορούσε την περιοχή Geysers της Καλιφόρνια. Συγκεκριμένα, η πρόταση αυτή είχε δυο εναλλακτικά σχήματα. Το πρώτο σχήμα πρότεινε την χρήση υπερθερμαντή φυσικού αερίου για υπερθέρμανση του γεωθερμικού ρευστού, ενώ το δεύτερο πρότεινε τη χρήση βιομηχανικού αεριοστρόβιλου με καύσιμο φυσικό αέριο, του οποίου τα θερμά καυσαέρια θα χρησιμοποιούνταν για την υπερθέρμανση του γεωθερμικού ρευστού. Η δεύτερη πρόταση, προφανώς, παρήγαγε πολύ περισσότερη ηλεκτρική ισχύ από την πρώτη και μάλιστα ο συνολικός βαθμός απόδοσης ήταν καλύτερος από τους επιμέρους των αυτοτελών συστημάτων αεριοστρόβιλου-γεωθερμικού σταθμού. Η πρώτη λύση αξιολογήθηκε ως αντιοικονομική παρότι η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς αυξανόταν κατά 57%.

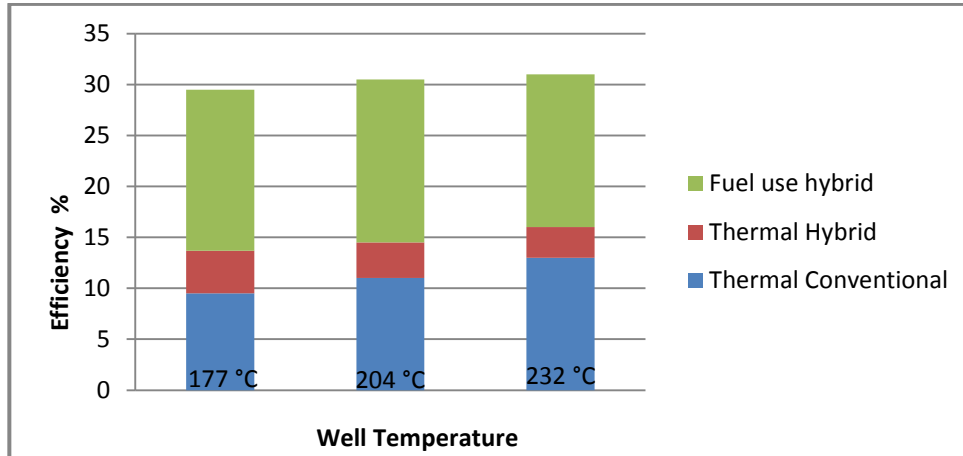
Μια πρώτη και πολύ σημαντική έρευνα πάνω στην οικονομικότητα μιας τέτοιας επένδυσης έγινε το 1978 από τους J.M.Hensler και R.C.Axtmann. Συγκεκριμένα, συνέκριναν την παραγωγή ισχύος αλλά και την οικονομικότητα, ενός απλού γεωθερμικού συστήματος και ενός υβριδικού συστήματος με υπερθέρμανση γεωθερμικού ρευστού. Το απλό γεωθερμικό σύστημα που μελετήθηκε ήταν σύστημα αμέσου κύκλου δύο στραγγαλισμών-διαχωρισμών, ενώ η υπερθέρμανση στο υβριδικό σύστημα θα γινόταν με καύση λιθάνθρακα, αλλά και πετρελαίου. Η μελέτη έγινε για διάφορες θερμοκρασίες γεωθερμικού ρευστού, καθώς και για διάφορες παροχές γεωθερμικού ρευστού. Τα κυριότερα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες.



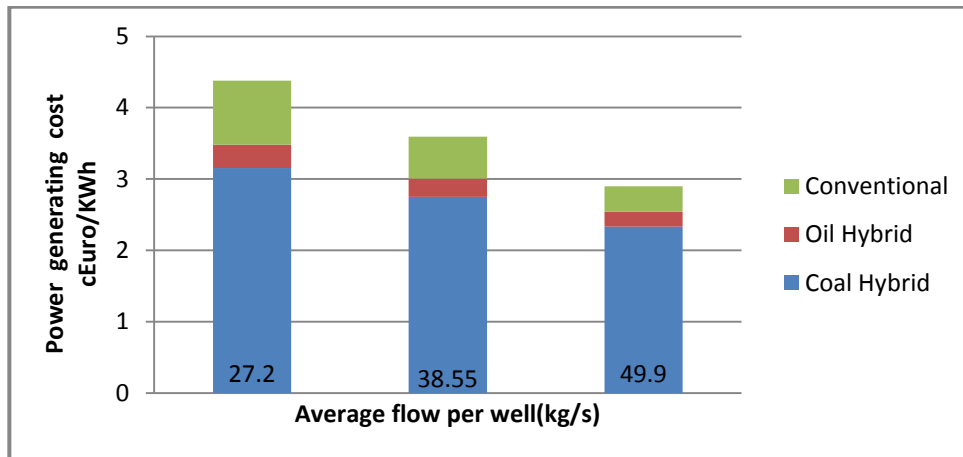
Εικόνα 2.2: Κόστος παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας για διάφορες θερμοκρασίες γεωθερμικού ρευστού (Πηγή: J.M. Hensler & R.C. Axtmann, 1978. Cost study of superheating geothermal steam)



Εικόνα 2.3: Καθαρή παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς για διάφορες θερμοκρασίες γεωθερμικού ρευστού (Πηγή: J.M. Hensler & R.C.Axtmann, 1978. Cost study of superheating geothermal steam)



Εικόνα 2.4: Βαθμός απόδοσης για κάθε περίπτωση και για διάφορες θερμοκρασίες γεωθερμικού ρευστού (Πηγή: J.M. Hensler & R.C.Axtmann,1978. Cost study of superheating geothermal steam)



Εικόνα 2.5: Κόστος παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας για κάθε περίπτωση και για διαφορετικές παροχές μάζας ανά πηγάδι (Πηγή: J.M. Hensler & R.C.Axtmann,1978. Cost study of superheating geothermal steam)

Από τις παραπάνω εικόνες μπορούμε να εξάγουμε ορισμένα πολύ χρήσιμα συμπεράσματα. Η εικόνα 2.2 μας δείχνει ότι οι υβριδικές μονάδες είναι τόσο πιο συμφέρουσες όσο πιο υψηλή είναι η θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού, αφού προφανώς απαιτείται μικρότερη πρόσδοση θερμότητας για την ίδια υπερθέρμανση του.

Επίσης, από την εικόνα 2.5, φαίνεται ότι όσο μεγαλύτερη είναι η παροχή μάζας τόσο μικρότερο κέρδος έχουμε με το υβριδικό σύστημα σε σχέση με το συμβατικό. Προφανώς, το κόστος του υβριδικού με λιθάνθρακα είναι χαμηλότερο από το υβριδικό με πετρέλαιο, λόγω της διαφοράς κόστους του καυσίμου.

Οι σχετικά μικρές διαφοροποιήσεις στις τιμές οφείλονται στο ότι το μεγαλύτερο κόστος σε μια γεωθερμική μονάδα είναι οι γεωτρήσεις, οι οποίες παραμένουν ως έχουν και στην υβριδική μονάδα, ενώ συνήθως οι έξτρα δαπάνες που προκύπτουν για τον υβριδισμό του έργου καλύπτονται από την αύξηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος. Ο υβριδισμός, πάντως, με υπερθέρμανση του γεωθερμικού ρευστού μπορεί να καταστήσει οικονομικά βιώσιμα γεωθερμικά πεδία σχετικά χαμηλής θερμοκρασίας, τα οποία χωρίς υπερθέρμανση θα ήταν μη βιώσιμα.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της υπερθέρμανσης είναι ότι αυξάνει την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ της εγκατάστασης. Η εικόνα 2.3 μας δείχνει ότι μπορούμε να έχουμε αύξηση ως και 70% της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος με χρήση υπερθέρμανσης.

Βέβαια, η αύξηση της παραγόμενης ισχύος μειώνεται ελαφρά όσο αυξάνεται η θερμοκρασία της πηγής, καθώς όσο θερμότερο το νερό τόσο μικρότερη υπερθέρμανση μπορεί να υποστεί.

Ένα μειονέκτημα των γεωθερμικών σταθμών, είναι οι αρκετά χαμηλοί βαθμοί απόδοσης οι οποίοι οφείλονται κυρίως, στις χαμηλές θερμοκρασίες γεωθερμικού ρευστού καθώς και στις σχετικά υψηλές πιέσεις συμπύκνωσης. Η εικόνα 2.4 μας δείχνει ότι το υβριδικό σύστημα, έχει βαθμό απόδοσης κατά 30-40% μεγαλύτερο σε σχέση με το απλό γεωθερμικό σύστημα. Επίσης, από την εικόνα 2.4 μπορεί να προκύψει ο βαθμός χρησιμοποίησης (αντίστοιχο με το η_{ff} που αναφέρθηκε πιο πάνω) του καυσίμου ως ο λόγος της αύξησης της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος λόγω υπερθέρμανσης προς τη θερμική ισχύ του καυσίμου. Ο βαθμός εκμετάλλευσης αυτός προκύπτει περίπου 29-30.7%, σχετικά μικρότερος από τους βαθμούς εκμετάλλευσης που έχουμε στους απλούς συμβατικούς σταθμούς σήμερα. Δηλαδή, μπορούμε να πούμε ότι το καύσιμο υποχρησιμοποιείται σε ένα τέτοιο υβριδικό σύστημα.

Ένα σημαντικό μειονέκτημα, όμως, των υβριδικών σταθμών είναι ότι έχουμε αύξηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης λόγω καύσης καυσίμου, κάτι το οποίο μας ενδιαφέρει πάρα πολύ τη σημερινή εποχή. Προκύπτει, όμως ένα σημαντικό πλεονέκτημα, όπως θα φανεί στον πίνακα 2.1, ότι η απορριπτόμενη θερμική ισχύς ανά παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ μειώνεται σημαντικότερα όταν έχουμε υβριδικό σταθμό.

Θερμοκρασία Πηγής ° C	KJ απορριπτόμενης θερμότητας/KJ παραγόμενης ενέργειας	
	Απλός Γεωθερμικός Σταθμός	Υβριδικός Σταθμός
177	10.81	6.64
204	9.5	6.23
232	8.13	5.58

Πίνακας 2.1: Απορριπτόμενη θερμική ισχύς προς παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ για απλό γεωθερμικό σταθμό και υβριδικό με υπερθέρμανση για διάφορες θερμοκρασίες γεωθερμικού ρευστού (Πηγή: J.M. Hensler & R.C.Axtmann,1978. Cost study of superheating geothermal steam)

Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι ως convectional plant (απλό γεωθερμικό σταθμό), εννοούμε ένα γεωθερμικό σταθμό ηλεκτροπαραγωγής με διπλό στραγγαλισμό-διαχωρισμό.

Συνοπτικά, οι υβριδικοί σταθμοί προκαλούν αύξηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος, σε σχέση με τους συμβατικούς γεωθερμικούς σταθμούς. Πάραυτα, έχουν οικονομικότερη λειτουργία σε περιπτώσεις γεωθερμικού ρευστού χαμηλής θερμοκρασίας. Με την προσθήκη υπερθέρμανσης μπορούμε να καταστήσουμε οικονομικά βιώσιμη μία επένδυση εκμετάλλευσης γεωθερμικού πεδίου που κανονικά θα ήταν μη βιώσιμη, χωρίς τη χρήση υπερθέρμανσης.

Σημείωση: Όλοι οι πίνακες και τα διαγράμματα έχουν προέλθει από μετατροπή από το αγγλοσαξονικό σύστημα, για αυτό η ακρίβεια των μονάδων είναι ασυνήθιστη.

2.1.2) Γεωθερμική προθέρμανση τροφοδοτικού νερού συμβατικού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής

Στην προηγούμενη παράγραφο μελετήσαμε πως μπορεί ένας υπερθερμαντής στερεού, κατά κύριο λόγο, καυσίμου και κατ'επέκταση ένας σταθμός στερεού καυσίμου να βοηθήσει στην λειτουργία και στις επιδόσεις ένα γεωθερμικό σταθμό.

Στην παρούσα παράγραφο, θα μελετήσουμε το αντίστροφο, δηλαδή κατά πόσο μπορεί το γεωθερμικό ρευστό να βοηθήσει έναν συμβατικό σταθμό ηλεκτροπαραγωγής με

προθέρμανση του τροφοδοτικού νερού. Αυτός ο τρόπος υβριδισμού παρουσιάζει ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα και ένα μειονέκτημα. Το πλεονέκτημα είναι ότι με τη συγκεκριμένη μορφή υβριδισμού μπορούμε να εκμεταλλευτούμε γεωθερμικές πηγές χαμηλότερης σχετικά θερμοκρασίας, στις οποίες δεν είναι δυνατή η εκμετάλλευση με χρήση άμεσου κύκλου, σε σχέση με της περίπτωσης 2.1. Άλλα το μεγάλο μειονέκτημα, είναι ότι ο συμβατικός σταθμός θα πρέπει να είναι κοντά στο γεωθερμικό πεδίο, κάτι το οποίο δεν είναι πάντα δυνατό. Στην προηγούμενη περίπτωση αυτό δεν ήταν μειονέκτημα, καθώς στην ουσία, κατασκευάζαμε το σταθμό στερεού καυσίμου “πάνω” στο γεωθερμικό σταθμό.

Η πρώτη πρόταση τέτοιου υβριδικού σταθμού έγινε το 1961 από τον Hansen. Η κύρια ιδέα είναι να χρησιμοποιήσουμε γεωθερμικό ρευστό για προθέρμανση του τροφοδοτικού νερού σε έναν ατμοπαραγωγό συμβατικής εγκατάστασης. Για την προθέρμανση αυτού του τροφοδοτικού νερού θα χρησιμοποιούνταν κανονικά απομαστεύσεις από τον ατμοστροβίλο. Χρησιμοποιώντας, όμως, το γεωθερμικό ρευστό για αυτές τις προθερμάνσεις δεν λαμβάνουν χώρα οι παραπάνω απομαστεύσεις με αποτέλεσμα να έχουμε αύξηση της παροχής μάζας των τελευταίων βαθμίδων του ατμοστροβίλου, άρα και αύξηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος.

Μέχρι πριν από λίγα χρόνια το μοναδικό έργο τέτοιου τύπου που είχε κατασκευαστεί παγκοσμίως ήταν μια μονάδα 35MW στο Honey Lake Valley των Η.Π.Α., η οποία είχε ως καύσιμο υπολείμματα ξυλείας. Προφανώς, ο κύριος λόγος που δεν έχει γνωρίσει την απαραίτητη εμπορική ανάπτυξη η συγκεκριμένη μορφή ηλεκτροπαραγωγής είναι η δυσκολία εύρεσης των κατάλληλων τοποθεσιών, στις οποίες θα είναι διαθέσιμες και οι δύο πρώτες ύλες παραγωγής ενέργειας.

Το 1999 ο M.Bruihn μελέτησε ένα υβριδικό σύστημα τέτοιου είδους με τη χρήση των προγραμμάτων προσομοίωσης Epsilon και CHP και το συνέκρινε με ένα αντίστοιχο σύστημα χωρίς γεωθερμική προθέρμανση. Παρακάτω θα παρουσιαστούν τα σημαντικότερα αποτελέσματα αυτής της μελέτης του.

Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιούνται οι παρακάτω συντελεστές:

$$\kappa' = \frac{P_{el,sol}}{Q_{sol}}, \quad \text{όπου} \quad P_{el,sol}: \text{ η αύξηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος λόγω γεωθερμικής προθέρμανσης}$$

Q_{sol} : η προστιθέμενη θερμότητα στο σύστημα από γεωθερμία

$$f = \frac{\dot{m}}{P_{el}}, \quad \text{όπου} \quad \dot{m}: \text{ η παροχή μάζας του γεωθερμικού ρευστού}$$

P_{el} : η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς της εγκατάστασης

$$\beta = \frac{P_{el}}{W}, \quad \text{όπου} \quad W: \text{ η θερμική ισχύς του καυσίμου}$$

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στα προγράμματα προσομοίωσης για την συμβατική και την υβριδική μονάδα είναι τα εξής:

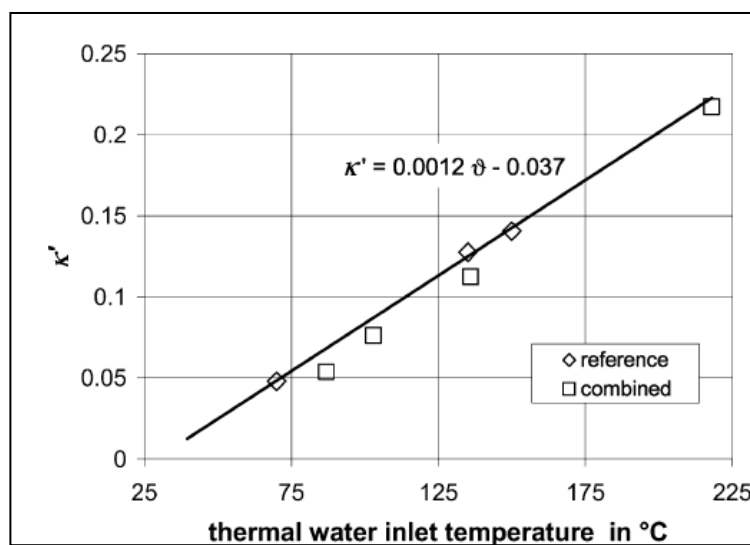
Parameter	Unit	Reference plant	Combined plant (condensing mode)
<i>Plant data</i>			
Fuel		hard coal	hard coal
P_{el} (design)	MW	550	277
P_{el} (simulation)	MW	520	277
Q_{FW} (design)	MW	300	386
Q_{FW} (simulation)	MW	100	–
Live steam parameters	bar/°C	250/540	190/535
ϑ_{ZT}	°C	560	538
Number of preheaters		7	8
P_{Kond}	bar	0,038/0,052	0,058
District heat: $\vartheta_{\psi}/\vartheta_{\beta}$	°C	135/60	–
η_{net} (design)		0,43	0,409
η_{DE} (design)		0,943	0,923
β° (simulation)		0,424	0,447
Turbine internal efficiency		constant	constant
<i>Geothermal heat exchanger</i>			
Feed water inlet temperature	°C	28	36
Min. temperature difference	K	5	5
Ratio of mass flows	–	1:1	1:1
<i>Simulation</i>			
Program used		Epsilon	CHP [26]

Εικόνα 2.6: Δεδομένα προσομοιώσεων συμβατικής και υβριδικής μονάδας (Πηγή: M.Bruhn, 1999. Hybrid geothermal-fossil electricity generation from low enthalpy geothermal resources: geothermal feedwater preheating in conventional power plants)

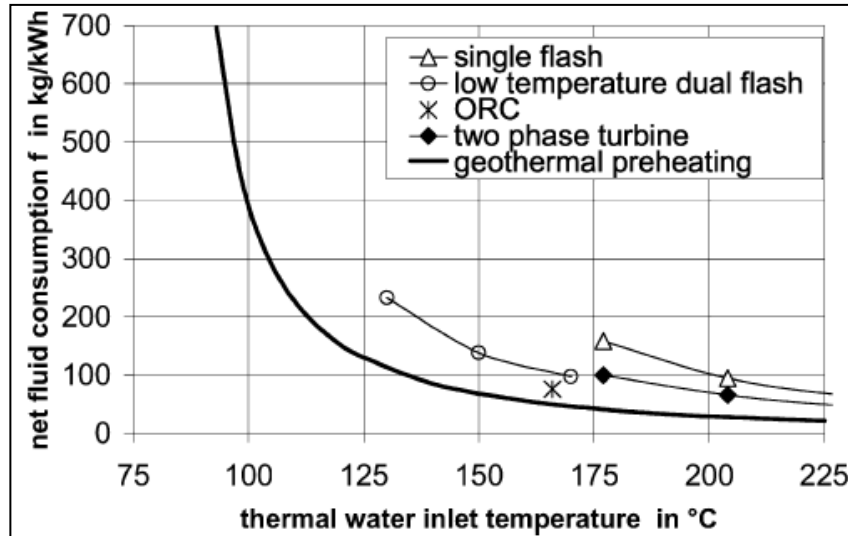
Τα κυριότερα αποτελέσματα των προσομοιώσεων φαίνονται στις παρακάτω εικόνες.

Θερμοκρασία γεωθερμικού ρευστού C	Ποσοστία αύξηση του βαθμού απόδοσης
70	0.05
135	0.3
150	0.4

Εικόνα 2.7: Αύξηση του δείκτη β με και χωρίς γεωθερμική προθέρμανση συναρτήσει της θερμοκρασίας γεωθερμικού ρευστού (Πηγή: M.Bruhn, 1999. Hybrid geothermal-fossil electricity generation from low enthalpy geothermal resources: geothermal feedwater preheating in conventional power plants)



Εικόνα 2.8: Εξάρτηση του συντελεστή κ' συναρτήσει της θερμοκρασίας του γεωθερμικού ρευστού (Πηγή: M.Bruhn, 1999. Hybrid geothermal-fossil electricity generation from low enthalpy geothermal resources: geothermal feedwater preheating in conventional power plants)



Εικόνα 2.9: Εξάρτηση του συντελεστή f συναρτήσει της θερμοκρασίας του γεωθερμικού ρευστού, για διάφορες τεχνολογίες (Πηγή: M.Bruhn, 1999. Hybrid geothermal-fossil electricity generation from low enthalpy geothermal resources: geothermal feedwater preheating in conventional power plants)

Από την εικόνα 2.7 εξάγουμε το προφανές συμπέρασμα ότι όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού τόσο μεγαλύτερη είναι η αύξηση του παράγοντα β , κάτι προφανές αφού τόσο περισσότερη θερμότητα θα προσδίνεται στο τροφοδοτικό νερό, άρα αντίστοιχα θα αυξάνεται και η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς λόγω μείωσης των απομαστεύσεων.

Αντιθέτως, όσο μειώνεται η θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού, όπως φαίνεται από την εικόνα 2.9 τόσο αυξάνεται η απαιτούμενη παροχή του γεωθερμικού ρευστού, και πρακτικά όταν φτάνουμε σε αρκετά χαμηλές θερμοκρασίες καθίσταται μη οικονομικά συμφέρουσα καθώς αντί να βοηθάει η γεωθερμική προθέρμανση προσθέτει παρασιτικά φορτία (λόγω αντλιών για άντληση από τα πηγάδια κλπ).

Τέλος, η εικόνα 2.8 μας δείχνει ότι ο συντελεστής k' πρακτικά είναι ευθέως ανάλογος της θερμοκρασίας του γεωθερμικού ρευστού. Με άλλα λόγια, όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού τόσο πιο συμφέρουσα καθίσταται η χρήση της γεωθερμικής προθέρμανσης.

Συνοπτικά, σε περιοχές όπου το καύσιμο είναι ευρέως διαθέσιμο μαζί με γεωθερμικό ρευστό κατάλληλης θερμοκρασίας, ένας υβριδικός σταθμός γεωθερμικής προθέρμανσης τροφοδοτικού νερού είναι μια πολύ καλή οικονομικά και οικολογικά λύση. Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού τόσο αποτελεσματικότερη γίνεται η λειτουργία μιας τέτοιας μονάδας. Αρκεί, βέβαια, αυτή η θερμοκρασία να μην είναι αρκετά υψηλή ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί το ρευστό σε μονάδα άμεσου κύκλου.

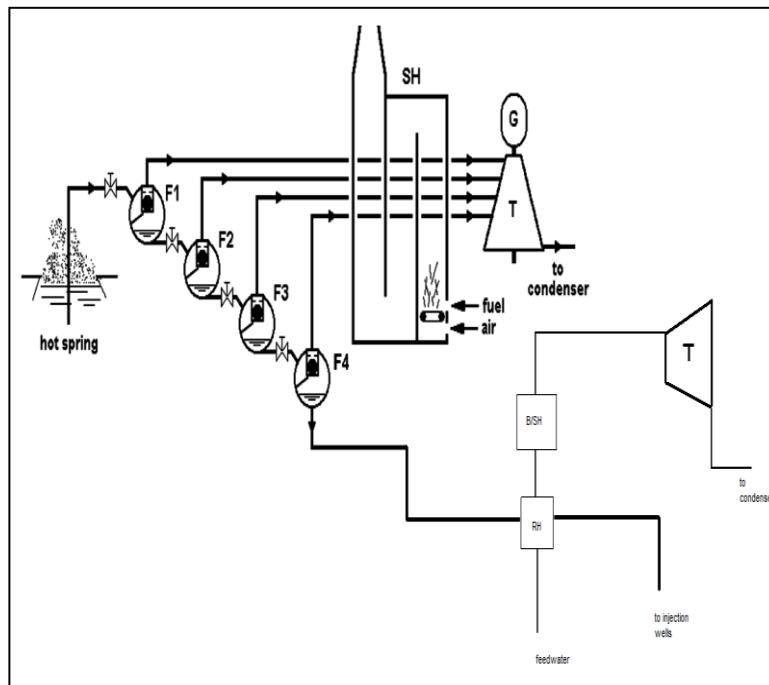
Επίσης, η διαθέσιμη παροχή γεωθερμικού ρευστού και η ζητούμενη παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς είναι πολύ σημαντικοί παράγοντες που θα καθορίσουν εν τέλει την ακριβή μορφή της εγκατάστασης που θα κατασκευάσουμε.

2.1.3) Συνδυασμός των δύο παραπάνω συστημάτων

Πρόκειται για ιδιαίτερος πολύπλοκα συστήματα τα οποία συνδυάζουν τις δύο παραπάνω μεθόδους υβριδισμού και δεν έχουν μελετηθεί καθόλου ως σήμερα.

Στην ουσία σε αυτά τα συστήματα, έχουμε ένα γεωθερμικό πεδίο υψηλής ενθαλπίας στο οποίο εφαρμόζουμε την τεχνολογία άμεσου κύκλου με στραγγαλισμό και διαχωρισμό ατμών και υγρής φάσης. Η ατμώδης φάση διέρχεται από έναν υπερθερμαντή, στον οποίον πραγματοποιείται καύση καυσίμου, όπως είδαμε στην παράγραφο 2.1.1, ενώ η υγρή φάση η οποία είναι υψηλής σχετικά θερμοκρασίας χρησιμοποιείται για την προθέρμανση τροφοδοτικού νερού σε συμβατική μονάδα, η οποία προφανώς χρησιμοποιεί το ίδιο καύσιμο το οποίο χρησιμοποιείται στον υπερθερμαντή της εγκατάστασης άμεσου κύκλου. Έχουμε δηλαδή τη συνύπαρξη ενός συμβατικού σταθμού και ενός σταθμού άμεσου κύκλου.

Ενδεικτικά μια τέτοια εγκατάσταση παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 2.10: Εγκατάσταση συνδυασμού άμεσου κύκλου με υπερθέρμανση και γεωθερμικής προθέρμανσης τροφοδοτικού νερού παρακείμενου σταθμού

Εγκαταστάσεις τέτοιου τύπου δεν υπάρχουν παγκοσμίως, πιθανόν επειδή το υγρό υπόλειμμα δεν έχει την κατάλληλη θερμοκρασία για προθέρμανση τροφοδοτικού νερού, και όταν την έχει η παραγόμενη ισχύς από τον άμεσο κύκλο είναι αρκετή ώστε να μην χρειάζεται η κτίση συμβατικού σταθμού ή και αντίστροφα. Δεν θα ασχοληθούμε περαιτέρω με αυτές τις εγκαταστάσεις στο παρόν κεφάλαιο.

2.1.4) Συνδυασμός με αεριοστρόβιλο

Η δυνατότητα συνδυασμού γεωθερμικής μονάδας με αεριοστρόβιλο είναι μια ιδιαίτερως ελκυστική περίπτωση καθώς ανακομίζουμε θερμότητα από τα καυσαέρια του αεριοστρόβιλου για χρήση στο κύκλωμα της γεωθερμικής μονάδας. Τα καυσαέρια αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε για υπερθέρμανση γεωθερμικού ρευστού, ή εργαζόμενου μέσου σε μονάδες δυαδικού κύκλου, οι οποίες ενδέχεται να είναι και ανεξάρτητες από γεωθερμία.

Το σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της περίπτωσης είναι ότι έχουμε μια μεγάλη πηγή θερμότητας την οποία θα την είχαμε ούτως ή άλλως και θα έμενε ανεκμετάλλευτη. Εξάλλου, είναι γνωστή η μεγάλη προσπάθεια που γίνεται για την καλύτερη δυνατή θερμική εκμετάλλευση των καυσαερίων αεριοστρόβιλου, λόγω του πλούσιου θερμικού περιεχομένου τους (πχ. Μονάδες συνδυασμένου κύκλου). Πρόκειται στην ουσία για μια δωρεάν πηγή θερμότητας.

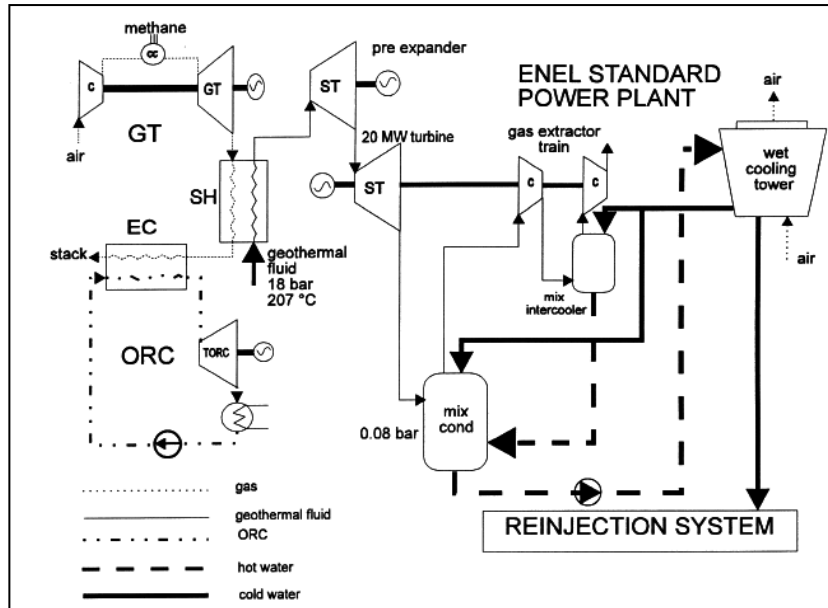
Το σημαντικότερο μειονέκτημα είναι αντίστοιχο με της περίπτωσης της γεωθερμικής προθέρμανσης τροφοδοτικού νερού ατμοπαραγωγού. Προφανώς, ο αεριοστρόβιλος της εγκατάστασης θα είναι η βασική μονάδα και από αυτόν εξαρτάται το που θα κατασκευαστεί όλη η εγκατάσταση. Είναι, λοιπόν, πολύ πιθανό εκεί να μην υπάρχει γεωθερμικό ρευστό κατάλληλο για χρήση. Προφανώς, δεν μπορεί να κατασκευαστεί μια μονάδα αεριοστρόβιλου όπου εμείς επιθυμούμε για να είμαστε κοντά σε γεωθερμικό πεδίο. Άρα, η ύπαρξη ή μη ενός γεωθερμικού πεδίου κοντά στην εγκατάσταση είναι ένας παράγοντας που δεν έχει επιτρέψει προς το παρόν τη μεγάλη ανάπτυξη αυτού του είδους των εγκαταστάσεων.

Βέβαια, όπως και στην περίπτωση 2.1.2, αυτό δημιουργεί και ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα. Με την εκμετάλλευση των θερμών καυσαερίων του αεριοστρόβιλου είναι δυνατόν να καταστούν βιώσιμες μονάδες και γεωθερμικά πεδία που υπό κανονικές συνθήκες δεν θα θεωρούνταν βιώσιμες, προφανώς λόγω χαμηλής θερμοκρασίας γεωθερμικού ρευστού.

Το 1998 έγινε μια έρευνα για μια εγκατάσταση συνδυασμένου κύκλου αεριοστρόβιλου και γεωθερμικής ενέργειας, από μία ομάδα Ιταλών επιστημόνων με επικεφαλή τον Gianni Bidini, του πανεπιστημίου της Περούτζια. Στην ερευνά τους μελετούσαν θερμοδυναμικά ένα σύστημα συνδυασμού αεριοστρόβιλου και γεωθερμίας, το οποίο θα μπορούσε να εφαρμοστεί στην Ιταλία, λόγω σημαντικών γεωθερμικών πεδίων που υπάρχουν εκεί (Larderello κλπ).

Το σύστημα που προσομοίωσαν στη μελέτη τους, και το οποίο μελετήθηκε μέσω ενός υπολογιστικού μοντέλου φαίνεται στην εικόνα 2.11. Το σύστημα αυτό περιλαμβάνει ένα βιομηχανικό αεριοστρόβιλο, το σύστημα υπερθέρμανσης του γεωθερμικού ρευστού μέσω των καυσαερίων του αεριοστρόβιλου, τα οποία στη συνέχεια χρησιμοποιούνται ως φορέας θερμότητας σε μία μονάδα ORC για επιπλέον παραγωγή ισχύος. Το γεωθερμικό ρευστό αφού υπερθερμανθεί μέσω των καυσαερίων του αεριοστρόβιλου εισέρχεται σε έναν πρώτο ατμοστρόβιλο και στη συνέχεια εισέρχεται στον ατμοστρόβιλο της μονάδας ηλεκτροπαραγωγής ισχύος 20MW. Στη συνέχεια, αφού αφαιρεθούν από το γεωθερμικό ρευστό πιθανά χρήσιμα αδιάλυτα αέρια, αυτό διέρχεται από τον συμπυκνωτή, και εν συνεχεία επιστρέφει στον ταμιευτήρα.

Το γεωθερμικό ρευστό που χρησιμοποιείται στην προσομοίωση θεωρείται ότι έχει πίεση 18bar και θερμοκρασία 207°C, μία κατάσταση η οποία είναι η καλύτερη δυνατή για γεωθερμικά πεδία στην Ιταλία.



Εικόνα 2.11: Ο κύκλος που μελετήθηκε από την ομάδα Ιταλών επιστημόνων το 1998, Περούτζια (Πηγή: G.Bidini, U.Desideri, F.Di Maria, A.Baldacci, R.Papale & F.Sabatelli, 1998. Optimization of an integrated Gas Turbine-Geothermal power plant)

Οι κυριότερες παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης είναι οι εξής:

- FFUF (fossil fuel utilization factor-συντελεστής χρησιμοποίησης καυσίμου)=

$$FFUF = \frac{P_{el,GT} + P_{el,ORC} + \Delta P_{el,ST}}{Q_{th,GT}}, \text{όπου } P_{el,GT}: \text{η ηλεκτρική ισχύς του A/Σ}$$

$P_{el,ORC}$: η ηλεκτρική ισχύς του ORC

$\Delta P_{el,ST}$: η αύξηση της ηλεκτρικής ισχύος του ατμοστροβίλου λόγω υπερθέρμανσης, συμπεριλαμβανομένης και της ηλεκτρικής ισχύος του expander.

$Q_{th,GT}$: η θερμική ισχύς του αεριοστροβίλου, άρα του καυσίμου.

Ο συντελεστής αυτός είναι αντίστοιχος του βαθμού απόδοσης λαμβάνοντας υπόψη μόνο το καταναλισκόμενο καύσιμο.

- Βαθμός απόδοσης υβριδικού κύκλου: $\eta_{HB} = \frac{P_{el,GT} + P_{el,ORC} + P_{el,EXP} + P_{el,ST}}{Q_{th,GT} + Q_{GEO}}$

όπου $P_{el,EXP}$: η ηλεκτρική ισχύς του expander

Q_{GEO} : η θερμική ισχύς του γεωθερμικού ρευστού

Τα σημαντικότερα αποτελέσματα της έρευνας παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες. Η μελέτη έγινε για τις κυριότερες παραμέτρους ενός τέτοιου συστήματος, όπως η συνολική ηλεκτρική ισχύς, ο παράγοντας FFUF, ο βαθμός απόδοσης του κύκλου με παραμέτρους την θερμοκρασία υπερθέρμανσης του γεωθερμικού ρευστού, την θερμοκρασία εισόδου του

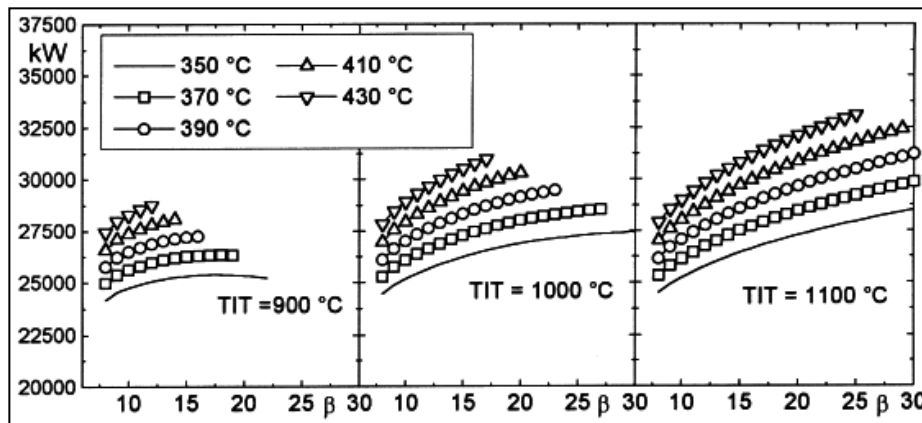
καυσαερίου στον στρόβιλο (TIT:turbine inlet temperature), καθώς επίσης και το λόγο πίεσης του αεριοστροβίλου.

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια των προσομοιώσεων είναι τα εξής:

T_{amb}	15°C	P_{amb}	1 bar	Φ_{amb}	60%
$\eta_{pol,c}$	85%	$\eta_{pol,GT}$	82%	η_m	98%
η_{CC}	98%	η_E	98%	$T_{bld,max}$	800°C
$\Delta T_{cool,SH,g}$	30°C	$\Delta T_{hot,SH,g}$	> = 20°C	T_{cond}	41°C
P_{cond}	0.08 bar	m_g	30.5 kg/s	NCG	8%
η_{ORC}	8%	T_g	207°C	P_g	18 bar
$\eta_{ST,is}$	76.5%	$\eta_{c,g,is}$	65%	T_{stk}	110°C

Εικόνα 2.12: Δεδομένα προσομοιώσεων (Πηγή: G.Bidini, U.Desideri, F.Di Maria, A.Baldacci, R.Papale & F.Sabatelli,1998. Optimization of an integrated Gas Turbine-Geothermal power plant)

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται η εξάρτηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος, του βαθμού απόδοσης, καθώς και του παράγοντα FFUF συναρτήσει των τριών κύριων παραμέτρων του συστήματος.

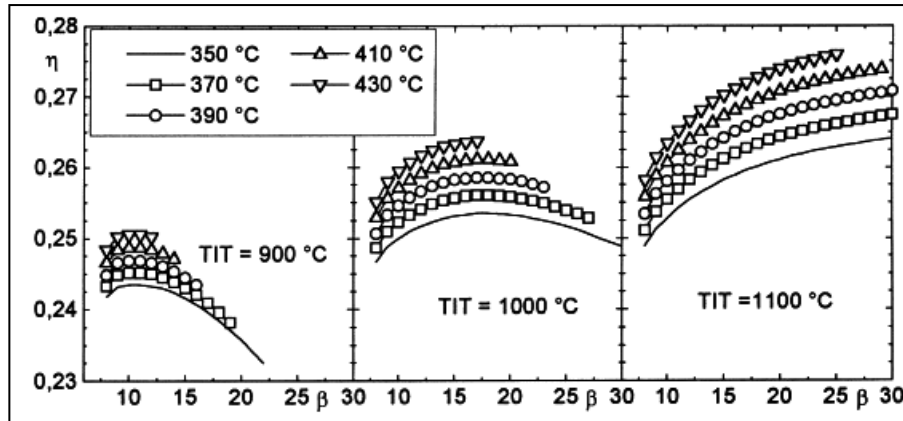


Εικόνα 2.13: Παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς συναρτήσει του λόγου πίεσης του Α/Σ για διάφορες θερμοκρασίες υπερθέρμανσης του γεωθερμικού ρευστού και διάφορες θερμοκρασίες εισόδου του καυσαερίου στο στρόβιλο (Πηγή: G.Bidini, U.Desideri, F.Di Maria, A.Baldacci, R.Papale & F.Sabatelli,1998. Optimization of an integrated Gas Turbine-Geothermal power plant)

***TIT=Turbine inlet temperature=Θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο

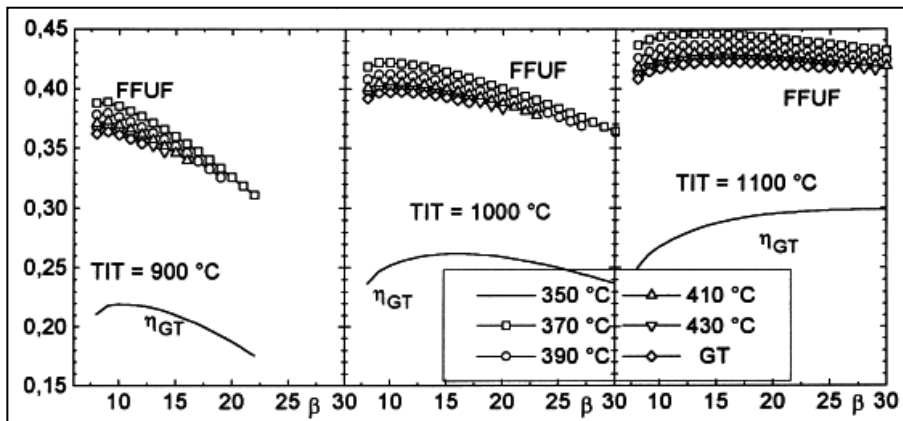
***β= Λόγος πίεσης αεριοστροβίλου

Από την παραπάνω εικόνα παρατηρούμε ότι έχουμε αύξηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος, για σταθερή θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο με αύξηση της υπερθέρμανσης του γεωθερμικού ρευστού. Προφανώς, σε μια τέτοια περίπτωση έχουμε κατά πολύ αύξηση της ηλεκτρικής ισχύος του ατμοστροβίλου της εγκατάστασης, αλλά επίσης έχουμε και αύξηση της παροχής μάζας καυσαερίου (λόγω μεγαλύτερης TIT), άρα και αύξηση της ηλεκτρικής ισχύος του αεριοστροβίλου. Επίσης, έχουμε αύξηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος με αύξηση του λόγου πίεσης του αεριοστροβίλου, κάτι αναμενόμενο αφού γνωρίζουμε ότι αυξανόμενου του λόγου πίεσης του αεριοστροβίλου έχουμε αύξηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος του.



Εικόνα 2.14: Συνολικός βαθμός απόδοσης του συνδυασμένου κύκλου για διάφορες συνθήκες (Πηγή: G.Bidini, U.Desideri, F.Di Maria, A.Baldacci, R.Papale & F.Sabatelli,1998. Optimization of an integrated Gas Turbine-Geothermal power plant)

Από την παραπάνω εικόνα παρατηρούμε ότι ο βαθμός απόδοσης γενικά αυξάνεται για αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου στο στρόβιλο, κάτι αναμενόμενο αφού έχουμε αύξηση των θερμικών ισχύων των μηχανών, και αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας της διεργασίας. Επίσης, για σταθερή θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο έχουμε αύξηση του βαθμού απόδοσης με αύξηση της θερμοκρασίας υπερθέρμανσης του γεωθερμικού ρευστού, εφόσον έτσι έχουμε καλύτερη θερμική εκμετάλλευση των καυσαερίων του αεριοστρόβιλου. Τέλος, παρατηρούμε ότι για χαμηλές θερμοκρασίες εισόδου στο στρόβιλο ο βαθμός απόδοσης παρουσιάζει κάποιο μέγιστο σε έναν ενδιάμεσο λόγο πίεσης, ενώ αυξανόμενης της θερμοκρασίας εισόδου στο στρόβιλο η αναλογία βαθμού απόδοσης-λόγου πίεσης τείνει να γίνει ευθέως ανάλογη. Άρα, όταν λειτουργούμε σε υψηλές θερμοκρασίες εισόδου στο στρόβιλο (1100°C είναι από τις πλέον συνηθισμένες), μας συμφέρει να λειτουργούμε σε υψηλούς λόγους πίεσης.



Εικόνα 2.15: Εξάρτηση του παράγοντα FFUF για διάφορες συνθήκες (Πηγή: G.Bidini, U.Desideri, F.Di Maria, A.Baldacci, R.Papale & F.Sabatelli,1998. Optimization of an integrated Gas Turbine-Geothermal power plant)

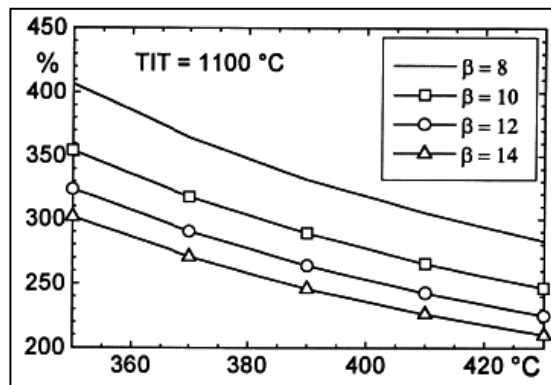
***FFUF=Συντελεστής χρησιμοποίησης καυσίμου.

Παρατηρούμε, ότι ο συντελεστής χρησιμοποίησης του καυσίμου αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου στο στρόβιλο, αφού έχουμε καλύτερη εκμετάλλευση της θερμικής ισχύος του καυσίμου, όπως επίσης το ίδιο συμβαίνει και με αύξηση της θερμοκρασίας υπερθέρμανσης του γεωθερμικού ρευστού. Επίσης, παρατηρούμε ότι ο βαθμός χρησιμοποίησης του καυσίμου, όπως και ο συνολικός βαθμός απόδοσης είναι κατά πολύ μεγαλύτερος στο συνδυασμένο κύκλο από ότι στον απλό αεριοστρόβιλο. Όμως, παρατηρούμε ότι για αύξηση του λόγου πίεσης έχουμε μείωση του συντελεστή εκμετάλλευσης του καυσίμου, ενώ στις προηγούμενες εικόνες παρατηρούσαμε ότι αύξηση

του λόγου πίεσης ήταν θετικός παράγοντας. Άρα, θα πρέπει να βρούμε έναν βέλτιστο λόγο πίεσης για να έχουμε βέλτιστο συγκερασμό όλων των παραπάνω παραγόντων.

Ο λόγος πίεσης στον οποίον έχουμε μεγιστοποίηση του συντελεστή χρησιμοποίησης καυσίμου είναι μικρότερος στον υβριδικό κύκλο από ότι στον απλό κύκλο αεριοστροβίλου. Αυτό συμβαίνει επειδή η κλίση της καμπύλης FFUF-λόγου πίεσης είναι πιο απότομη στην περίπτωση απλού κύκλου αεριοστροβίλου.

Η μελέτη, επιπρόσθετα, έδειξε ότι για σταθερή θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο ο συντελεστής χρησιμοποίησης καυσίμου μειώνεται καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία υπερθέρμανσης του γεωθερμικού ρευστού. Όπως φαίνεται και από την παρακάτω εικόνα, η ισχύς που παράγεται από τον αεριοστρόβιλο συγκριτικά με την ισχύ που παράγεται από τον ατμοστρόβιλο μειώνεται καθώς έχουμε αύξηση της θερμοκρασίας υπερθέρμανσης του γεωθερμικού ρευστού.

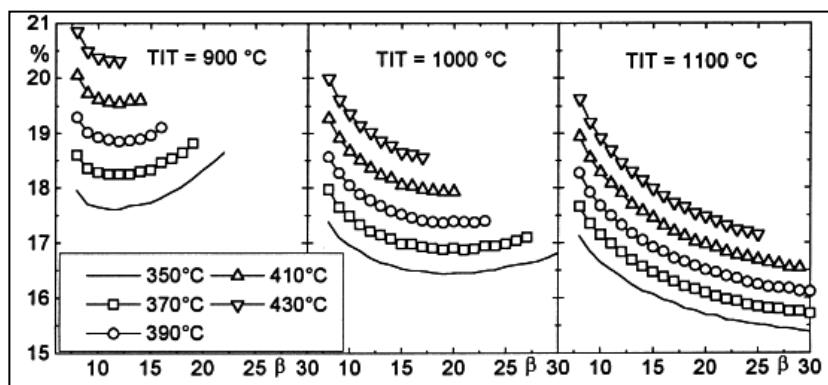


Εικόνα 2.16: Ισχύς αεριοστροβίλου προς ισχύ ατμοστροβίλου συναρτήσει της θερμοκρασίας υπερθέρμανσης του γεωθερμικού ρευστού (Πηγή: G.Bidini, U.Desideri, F.Di Maria, A.Baldacci, R.Papale & F.Sabatelli,1998. Optimization of an integrated Gas Turbine-Geothermal power plant)

***TIT=Θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο.

***β= Λόγος πίεσης αεριοστροβίλου

Επιπρόσθετα, αν συγκριθεί η απόδοση του υβριδικού κύκλου με τον απλό κύκλο αεριοστροβίλου ή με τον κύκλο του γεωθερμικού ρευστού στην περίπτωση μη υπερθέρμανσης, έχουμε αύξηση της συνολικής απόδοσης στην περίπτωση υβριδικού κύκλου. Συγκεκριμένα, όπως παρατηρούμε στην εικόνα 2.17, έχουμε μεγιστοποίηση της αύξησης του συνολικού βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης, σε μικρές θερμοκρασίες εισόδου στο στρόβιλο, σε σχετικά μικρούς λόγους πίεσης, αλλά και σε μεγάλες θερμοκρασίες υπερθέρμανσης του γεωθερμικού ρευστού. Η μέγιστη αύξηση του συνολικού βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης φτάνει ως και το 21%.



Εικόνα 2.17: Αύξηση του βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης σε σχέση με την απόδοση των επί μέρους συστημάτων συναρτήσει όλων των παραμέτρων (Πηγή: G.Bidini, U.Desideri, F.Di Maria, A.Baldacci, R.Papale & F.Sabatelli,1998. Optimization of an integrated Gas Turbine-Geothermal power plant)

Συνοψίζοντας, τα αποτελέσματα της έρευνας, τα οποία είναι πάρα πολύ σημαντικά για υβριδικές εγκατάστασης αεριοστροβίλου-γεωθερμίας, αξίζει να τονίσουμε ότι η αύξηση της απόδοσης της υβριδικής εγκατάστασης καθώς και η αύξηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος, σε σχέση με τις επιμέρους εγκαταστάσεις αν λειτουργούσαν χωριστά, κάνουν υβριδικές εγκαταστάσεις αυτού του τύπου αρκετά ελκυστικές για τους επενδυτές.

Υπολογίστηκε ότι υπάρχει δυνατότητα αύξησης της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος ως και 100% στο υβριδικό σύστημα, ενώ ο συντελεστής χρησιμοποίησης του καυσίμου μπορεί να φτάσει και τιμές ως και 40%. Η επιλογή μεγέθους αεριοστροβίλου σε εγκαταστάσεις αυτού του τύπου είναι ζωτικής σημασίας για την απόδοση του συστήματος, αλλά και για το συντελεστή χρησιμοποίησης καυσίμου. Όσο μεγαλύτερος είναι ο αεριοστροβίλος, τόσο μεγαλύτερη είναι η ισχύς που αυτός παράγει, άρα το κλάσμα της παραγόμενης από τον αεριοστροβίλο ισχύ σε σχέση με την συνολικά παραγόμενη ισχύ της εγκατάστασης, αυξάνεται. Τέλος, αυτού του είδους οι εγκαταστάσεις έχουν και ορισμένα άλλα βασικά πλεονεκτήματα, όπως χαμηλότερο κόστος εγκατάστασης (ανά KW), ενώ μπορεί ο αεριοστροβίλος να λειτουργεί αυτόνομα χωρίς το γεωθερμικό σύστημα και αντίστροφα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, να έχουμε αύξηση του συντελεστή εκμετάλλευσης της εγκατάστασης, καθώς επίσης και πιο ομαλή λειτουργία σε λειτουργία εκτός του σημείου σχεδίασης.

2.2) Συνδυασμός γεωθερμικών συστημάτων με ηλιακή ενέργεια

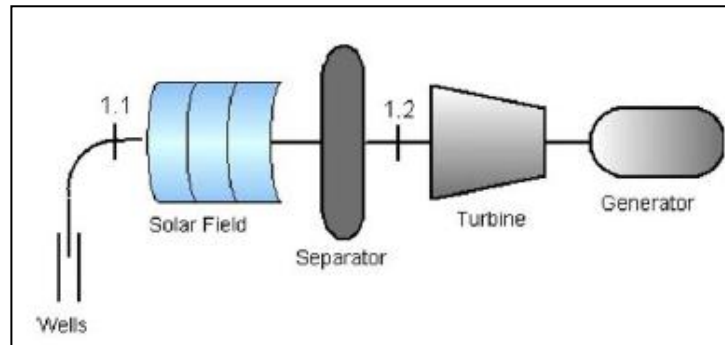
Ένας από τους πλέον ενδιαφέροντες, φιλικούς προς το περιβάλλον, και πολλά υποσχόμενος τρόπος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι ο συνδυασμός γεωθερμίας με ηλιακή ενέργεια. Η βασική ιδέα ενός τέτοιου συστήματος είναι η παρεμβολή ενός παραβολικού κατόπτρου σε ένα γεωθερμικό σύστημα με σκοπό την αύξηση της ενθαλπίας του γεωθερμικού ρευστού. Η λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος είναι παρόμοιας λογικής με την περίπτωση 2.1.1 (υπερθέρμανση γεωθερμικού ρευστού με καύση καυσίμων), απλά σε αυτήν την περίπτωση η πρόσδοση θερμότητας γίνεται από τον ήλιο, χωρίς ρύπανση της ατμόσφαιρας.

Οι Hiriart και Gutierrez περιέγραψαν την λειτουργία ενός συστήματος, το οποίο συνδυάζει γεωθερμικό κύκλωμα άμεσου ατμού και παραβολικά κάτοπτρα. Συγκεκριμένα, το γεωθερμικό ρευστό αφού στραγγαλιζόταν, και διαχωριζόταν, η ατμώδης φάση θα διερχόταν από ένα παραβολικό κάτοπτρο με σκοπό την υπερθέρμανση του γεωθερμικού ρευστού κατά 100°C. Αυτό θα είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της παραγόμενης ισχύος σε 24MW, από 20MW που ήταν αρχικά. Ένα τέτοιο σύστημα, πέραν των θερμοδυναμικών πλεονεκτημάτων που προσφέρει στο γεωθερμικό κύκλωμα εκτιμάται ότι έχει και οικονομική βιωσιμότητα.

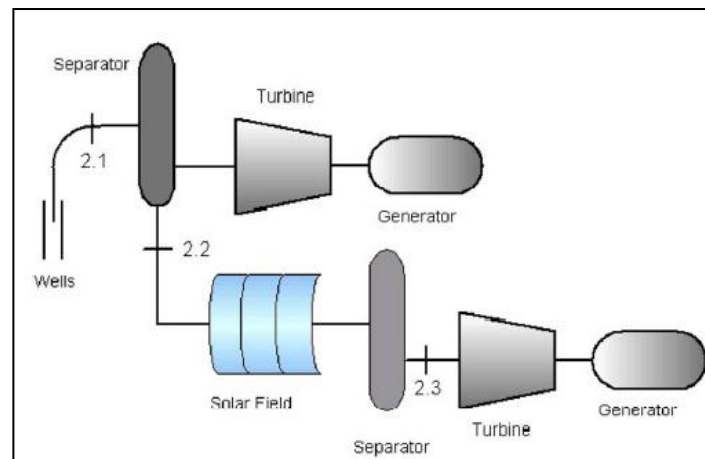
Το 2004 οι A.Lentz και R.Almanza μελέτησαν ένα υβριδικό σύστημα γεωθερμίας- ηλιακής ενέργειας. Η μελέτη έγινε για το γεωθερμικό πεδίο του Cerro Prieto του Μεξικό, ένα από τα ισχυρότερα γεωθερμικά πεδία παγκοσμίως. Στο Cerro Prieto το 2002 λειτουργούσαν 138 πηγάδια άντλησης γεωθερμικού ρευστού και 13 πηγάδια επανεισαγωγής του γεωθερμικού ρευστού στον ταμιευτήρα. Η δυναμικότητα του πεδίου είναι συνολικά περίπου 5420t/h γεωθερμικό ρευστό.

Στη συγκεκριμένη μελέτη υιοθετήθηκαν δύο βασικές εναλλακτικές ιδέες για την παρεμβολή των ηλιακών κάτοπτρων στο γεωθερμικό κύκλωμα. Η πρώτη εναλλακτική ιδέα ήταν να τοποθετηθεί το κάτοπτρο ανάμεσα στο πηγάδι άντλησης και τον διαχωριστή, ενώ η δεύτερη εναλλακτική ήταν να τοποθετηθεί το κάτοπτρο ανάμεσα στον πρώτο και το δεύτερο διαχωριστή. Στην πρώτη περίπτωση το κάτοπτρο θα θερμαίνει μίγμα υγρού-ατμού, ενώ στη δεύτερη κορεσμένο νερό. Σκοπός της τοποθέτησης του κατόπτρου, και στις

δύο περιπτώσεις, η αύξηση της ξηρότητας του μίγματος υγρού-ατμού κατά 10%. Η αύξηση είναι σχετικά μικρή ώστε να μην υπάρξει πρόβλημα με στερεοποίηση αλάτων, λόγω υψηλής συγκέντρωσης αυτών στο υγρό υπολείμμα. Με αυτόν τον τρόπο, θα αυξάνουμε τη μάζα του ατμού του διαχωριστή, άρα και τη μάζα του ατμού που θα διέρχεται από τον ατμοστρόβιλο. Συγκεκριμένα, δεν θα έχουμε μεταβολή της ενθαλπικής πτώσης, αλλά μόνο αύξηση της παροχής ατμού. Η μελέτη έγινε για ένα 'μέσο' πηγάδι άντλησης, το οποίο έχει πίεση πηγαδιού 50bar, πίεση πρώτου στραγγαλισμού 15 bar, πίεση δευτέρου στραγγαλισμού 4.3 bar και ενθαλπία πηγαδιού 1566,1KJ/kg.



Εικόνα 2.18: Πρώτη εναλλακτική μελέτη υβριδικού συστήματος Cerro Prieto (Πηγή: A.Lentz & R. Almanza,2006. Parabolic troughs to increase the geothermal wells flow enthalpy)



Εικόνα 2.19: Δεύτερη εναλλακτική μελέτη υβριδικού συστήματος Cerro Prieto (Πηγή: A.Lentz & R. Almanza, 2006. Parabolic troughs to increase the geothermal wells flow enthalpy)

Για την αξιολόγηση των εναλλακτικών προτάσεων χρησιμοποιούνται ορισμένες βασικές εξισώσεις οι οποίες παρουσιάζονται παρακάτω.

Η ενθαλπία του μίγματος νερού-ατμού συναρτήσει της ξηρότητας δίνεται ως εξής:

$h = x \cdot h_s + (1-x) \cdot h_w$, όπου με δείκτη s αναφερόμαστε στον ατμό και με δείκτη w στο νερό.

Η επιπλέον μάζα ατμού που παράγεται εξαιτίας του κατόπτρου δίνεται ως εξής:

$\Delta \dot{m}_s = (x' - x) \dot{m}_G$, όπου x', x η ξηρότητα του ατμού μετά και πριν το κάτοπτρο και \dot{m}_G η παροχή του γεωθερμικού ρευστού στην πρώτη εναλλακτική ή του υγρού υπολείμματος στη δεύτερη εναλλακτική.

Οπότε, η απαραίτητη ισχύς για την αύξηση ξηρότητας που απαιτούμε θα δίνεται από τη σχέση $\dot{Q} = \Delta \dot{h}_s \cdot (\Delta h)$.

Πρώτη εναλλακτική περίπτωση: Όπως αναφέραμε και προηγουμένως, η μέση πίεση πηγαδιού στο Cerro Prieto είναι 50bar (σημείο 1.1,εικόνα 2.18), ενώ η πίεση διαχωρισμού (σημείο 1.2,εικόνα 2.19) είναι 15 bar. Δεδομένου ότι η ενθαλπία πηγαδιού είναι 1566,1kJ/kg βρίσκουμε ότι η ξηρότητα του μίγματος υγρού-ατμού πριν τον διαχωριστή είναι 37,1%. Εμείς επιθυμούμε το ηλιακό κάτοπτρο να αυξήσει την ξηρότητα του μίγματος κατά 10%, άρα επιθυμούμε η ξηρότητα μετά το ηλιακό κάτοπτρο να είναι 47,1%.

$$X=37.1\%$$

$$X'=47.1\%$$

Η ενθαλπία του γεωθερμικού ρευστού μετά το κάτοπτρο θα είναι 1760.5kJ/kg, άρα απαιτείται αύξηση ενθαλπίας κατά $\Delta h=190,4\text{kJ/kg}$.

Επίσης, γνωρίζουμε ότι η παροχή γεωθερμικού ρευστού από κάθε πηγάδι είναι 44.92kg/s.

Άρα με βάση τις παραπάνω εξισώσεις, υπολογίζουμε πως η απαιτούμενη ισχύς για κάθε πηγάδι είναι $Q=8552,8\text{KW}$.

Για να ευρεθεί η απαραίτητη επιφάνεια κατόπτρων για την παραπάνω ισχύ απαιτείται να βρεθεί η μέγιστη προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία ανά m^2 .

Μελετάται η χρήση δύο προσανατολισμών των κατόπτρων. Η πρώτη περίπτωση είναι N-S (Βόρεια- Νότια) και η δεύτερη W-E(Ανατολική- Δυτική).

Η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας στην περίπτωση του N-S προσανατολισμού για παραβολικό κάτοπτρο δίνεται από τον τύπο:

$$\cos \theta = (\cos^2 \theta_z + \cos^2 \delta \cdot \sin^2 \omega)^{1/2}$$

$$\cos \theta_z = \sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \omega$$

Στην περίπτωση W-E προσανατολισμού θα έχουμε τους παρακάτω τύπους:

$$\cos \theta = (1 - \cos^2 \delta \cdot \sin^2 \omega)^{1/2}, \text{ενώ η γωνία } \theta_z \text{ δίνεται από τον ίδιο τύπο.}$$

Η προσπίπτουσα στα κάτοπτρα ηλιακή ακτινοβολία βρίσκεται αν πολλαπλασιαστεί η άμεσος ηλιακή ακτινοβολία με την παραπάνω γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας. Προφανώς, η γωνία αυτή αλλάζει από ώρα σε ώρα, και από μέρα σε μέρα, όπως επίσης και η άμεσος ηλιακή ακτινοβολία. Για τη διαστασιολόγηση της εγκατάστασης θα υπολογιστεί η μέγιστη προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, ενώ τις άλλες μέρες και ώρες θα έχουμε ελάττωση της παραγωγής ατμού.

Η μέγιστη προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, ανεξαρτήτως προσανατολισμού προκύπτει

$$G = 900 \frac{W}{m^2}.$$

Επίσης, θεωρούμε έναν θερμικό βαθμό απόδοσης των ηλιακών κατόπτρων ίσο με 70%.

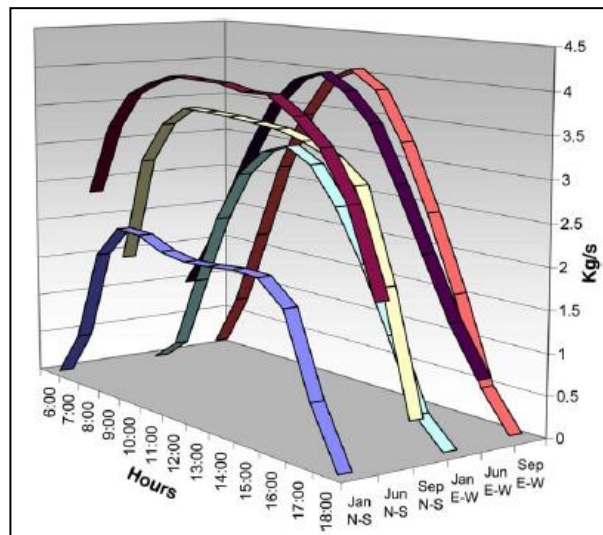
Άρα, η απαιτούμενη επιφάνεια κατόπτρων για την πρώτη εναλλακτική περίπτωση θα είναι:

$$A = \frac{8552.8 \cdot 10^3 W}{900 \frac{W}{m^2} \cdot 0.7} = 13863 m^2.$$

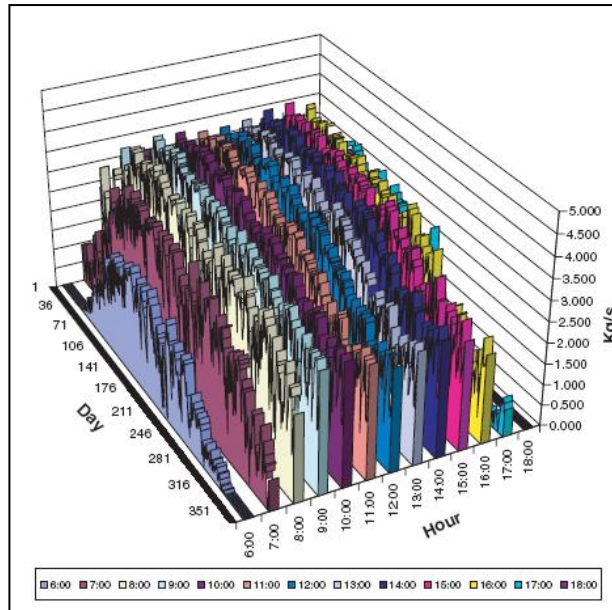
Στην παρούσα εγκατάσταση θα χρησιμοποιηθούν τυποποιημένα κάτοπτρα LS-3 επιφάνειας 545m² το καθένα. Άρα, θα χρησιμοποιηθούν συνολικά 26 τέτοια κάτοπτρα, δίνοντας συνολική συλλεκτική επιφάνεια 14170m².

Η παραπάνω συλλεκτική επιφάνεια δίνει την επιθυμητή αύξηση ενθαλπίας, άρα και την επιθυμητή παραγωγή επιπλέον ατμού, όταν έχουμε μεγιστοποίηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Προφανώς, όταν η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία δεν είναι ίση με την μέγιστη έχουμε μείωση της παραγωγής επιπλέον ατμού.

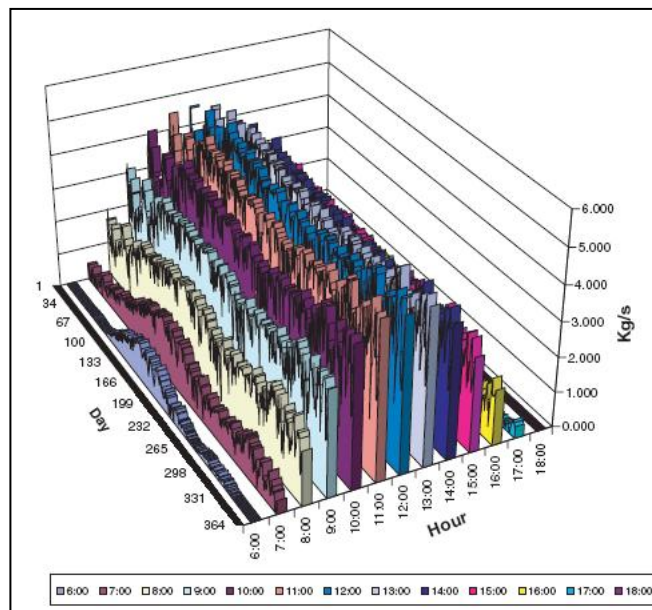
Υπολογίστηκε η παραγόμενη ποσότητα επιπλέον ατμού για τους δύο προσανατολισμούς για κάθε ώρα της ημέρας για τους μήνες Ιανουάριο-Ιούνιο-Σεπτέμβριο (εικόνα 2.20), αλλά και για κάθε ημέρα του χρόνου(εικόνες 2.21-2.22).



Εικόνα 2.20: Παραγωγή επιπλέον ατμού κατά τη διάρκεια της ημέρας για τους μήνες Ιανουάριο-Ιούνιο-Σεπτέμβριο για N-S, W-E προσανατολισμό (Πηγή: A.Lentz & R.Almanza,2006. Solar-geothermal hybrid system)



Εικόνα 2.21: Ετήσια επιπλέον παραγωγή ατμού κατά τη διάρκεια της ημέρας για N-S προσανατολισμό (Πηγή: A.Lentz & R.Almanza,2006. Solar-geothermal hybrid system)



Εικόνα 2.22: Ετήσια επιπλέον παραγωγή ατμού κατά τη διάρκεια της ημέρας για W-E προσανατολισμό (Πηγή: A.Lentz & R.Almanza,2006. Solar-geothermal hybrid system)

Παρατηρούμε, ότι οι παραπάνω υπολογισμοί έγιναν για τις ώρες τις ημέρας που έχουμε ηλιακή ακτινοβολία (6.00-18.00), αφού τα παραβολικά κάτοπτρα λειτουργούν μόνο με άμεση ακτινοβολία και όχι με διάχυτο, όπως οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες.

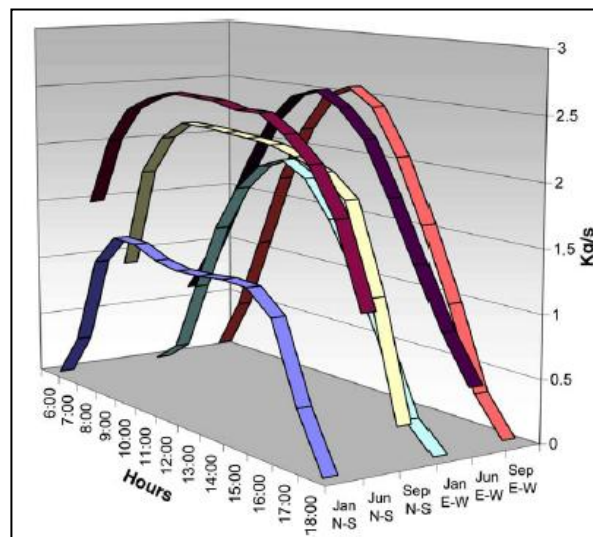
Παρατηρούμε ότι η παραγωγή ατμού μεγιστοποιείται κατά το μήνα Ιούνιο, ενώ ελαχιστοποιείται κατά τον Ιανουάριο. Η διαφορά στην παραγωγή ατμού ανάμεσα σε αυτούς τους μήνες είναι αρκετά μεγάλη. Επίσης, παρατηρείται ότι έχουμε μεγάλες διακυμάνσεις στην παραγωγή ατμού ακόμα και μέσα στην ίδια ημέρα. Μεγαλύτερες διακυμάνσεις έχουμε στον W-E προσανατολισμό, όπου μπορεί να έχουμε και διακυμάνσεις ως και 50% από την μέση παραγωγή.

Δεύτερη εναλλακτική περίπτωση: Σε αυτήν την περίπτωση τα παραβολικά κάτοπτρα τοποθετούνται ανάμεσα στον πρώτο και δεύτερο διαχωριστή. Η πίεση στον πρώτο διαχωριστή, όπως αναφέρθηκε είναι 15bar, ενώ η πίεση στο δεύτερο διαχωριστή είναι 4.3bar. Η παροχή νερού που προκύπτει από τον πρώτο διαχωριστή είναι 27.9kg/s, ενώ υπολογίζεται πως για αύξηση κατά 10% της ξηρότητας απαιτείται αύξηση της ενθαλπίας κατά 152.8kJ/kg. Άρα, η απαιτούμενη ισχύς των κατόπτρων θα είναι 4316.1KW.

Προφανώς, οι εξισώσεις για την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία που αναφέρθηκαν στην πρώτη εναλλακτική περίπτωση δεν αλλάζουν. Άρα, η μέγιστη προσπίπτουσα ακτινοβολία θα είναι πάλι 900W/m².

Οπότε, προκύπτει ότι η απαιτούμενη επιφάνεια κατόπτρων θα είναι 6851m². Άρα, θα χρησιμοποιηθούν 13 κάτοπτρα LS-3, τα οποία έχουν συνολική συλλεκτική επιφάνεια 7085m².

Η παραγωγή επιπλέον ατμού κατά τη διάρκεια της (μέσης) ημέρας για τους μήνες Ιανουάριο, Ιούνιο, Σεπτέμβριο φαίνεται στην εικόνα 2.23. Παρατηρούμε, ότι το διάγραμμα είναι παρόμοιο με το αντίστοιχο διάγραμμα της πρώτης εναλλακτικής περίπτωσης, με τη βασική διαφορά ότι η παραγωγή επιπλέον ατμού στη δεύτερη περίπτωση είναι αισθητά μικρότερη λόγω μικρότερης παροχής μάζας. Για λόγους συντομίας δεν παραθέτουμε τα διαγράμματα για κάθε ημέρα του έτους, καθώς είναι παρόμοια με της πρώτης εναλλακτικής περίπτωσης.



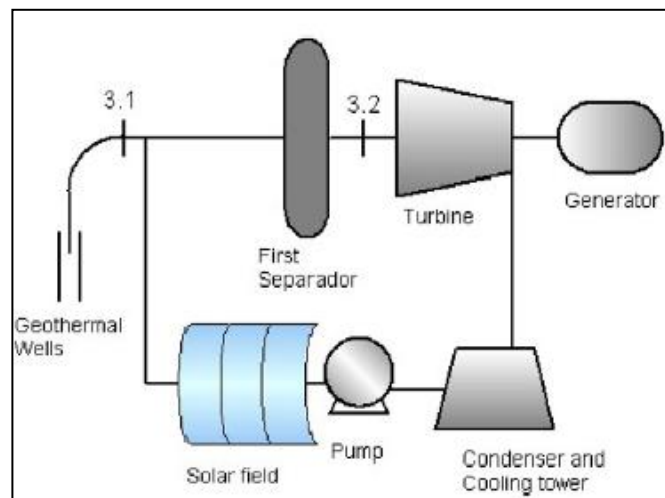
Εικόνα 2.23: Παραγωγή επιπλέον ατμού κατά τη διάρκεια της ημέρας για τους μήνες Ιανουάριο-Ιούνιο-Σεπτέμβριο για N-S,W-E προσανατολισμό (Πηγή: A.Lentz & R.Almanza,2006. Solar-geothermal hybrid system)

Το συμπέρασμα που εξάγεται και από τις δύο εναλλακτικές προτάσεις είναι ότι υπάρχει η δυνατότητα να αυξήσουμε την παροχή ατμού με τη χρήση ηλιακών συλλεκτών παρότι η ύπαρξη αλάτων στο γεωθερμικό ρευστό μας περιορίζει αυτήν την αύξηση. Η αύξηση της παραγωγής ατμού και στις δύο περιπτώσεις, έχει παρόμοιες τάσεις απλά στη δεύτερη περίπτωση είναι μικρότερη λόγω μικρότερης παροχής μάζας. Στην δεύτερη εναλλακτική περίπτωση, επειδή έχουμε μεγαλύτερη συγκέντρωση αλάτων, ενδέχεται να μην μπορούμε να αυξήσουμε την ξηρότητα του μίγματος όσο και στην πρώτη εναλλακτική περίπτωση. Ένας περιοδικός έλεγχος των σωληνώσεων, αλλά και η επεξεργασία του γεωθερμικού ρευστού, αν είναι δυνατή, θα βοηθούσαν πολύ τη λειτουργία του έργου. Επίσης, παρατηρούμε ότι η παραγωγή ατμού κατά το N-S προσανατολισμό είναι πολύ πιο σταθερή και ομαλή, ενώ έχει δύο peak, 4 ώρες πριν και μετά τις 12.00. Αντιθέτως, στον προσανατολισμό W-E έχουμε μεγαλύτερες μεταβολές στην παραγωγή ατμού κατά τη διάρκεια της ημέρας, ενώ έχουμε μεγιστοποίηση της παραγωγής στις 12.00.

Ένα μεγάλο θετικό στοιχείο, που προκύπτει από αυτές τις εγκαταστάσεις είναι ότι η μεγιστοποίηση της παραγωγής προκύπτει κατά τη μεγιστοποίηση της ζήτησης. Το καλοκαίρι που έχουμε αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικού ρεύματος, κυρίως λόγω της απαίτησης κλιματισμού χώρων, έχουμε και αύξηση του παραγόμενου ατμού με αποτέλεσμα την αύξηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος. Έτσι, μπορεί να καλυφθεί μέρος της αύξησης της ζήτησης ηλεκτρικού ρεύματος κατά το καλοκαίρι.

Η επιλογή της πρώτης ή της δεύτερης εναλλακτικής περίπτωσης εξαρτάται από την οικονομικότητα της επένδυσης, αλλά και το κατά πόσον είναι δυνατή η επιθυμητή αύξηση της ξηρότητας λόγω των περιορισμών από τα περιεχόμενα άλατα του γεωθερμικού ρευστού, ιδίως για την δεύτερη περίπτωση. Επίσης, εξαρτάται και από το κατά πόσο υπάρχει διαθέσιμη και η απαραίτητη επιφάνεια για τα κάτοπτρα στη περιοχή.

Αργότερα, προτάθηκε από τους ίδιους συγγραφείς ένα τρίτο υβριδικό σύστημα γεωθερμίας-ηλιακής ενέργειας το οποίο φαίνεται στην εικόνα 2.24. Το σύστημα αυτό είναι ένα ημί-κλειστό θερμοδυναμικό κύκλωμα, το οποίο εκτός του ότι αυξάνει την παραγωγή ατμού στην εγκατάσταση έχει και άλλο ένα μεγάλο πλεονέκτημα. Αναμειγνύει το χαμηλής συγκέντρωσης σε άλατα ρεύμα ατμού που διέρχεται από το κάτοπτρο, με το υψηλής συγκέντρωσης σε άλατα ρεύμα υγρού-ατμού που αντλείται από το πηγάδι. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, σε όλο το κύκλωμα οι συγκεντρώσεις αλάτων να είναι αισθητά χαμηλότερες, με αποτέλεσμα να έχουμε τη δυνατότητα περαιτέρω στραγγαλισμών και παραγωγή επιπλέον ατμού. Πιθανόν, να είχε νόημα ο συνδυασμός μίας εκ των δύο πρώτων εναλλακτικών με την τρίτη εναλλακτική, αν και σε αυτήν την περίπτωση η συλλεκτική επιφάνεια θα ήταν αρκετά μεγάλη, και η επένδυση πιθανότατα αντιοικονομική.



Εικόνα 2.24: Τρίτη εναλλακτική μελέτη υβριδικού συστήματος Cerro Prieto (Πηγή: A.Lentz & R.Almanza,2006. Parabolic troughs to increase the geothermal wells flow enthalpy)

Κλείνοντας την παράγραφο των υβριδικών συστημάτων γεωθερμίας-ηλιακής ενέργειας αναφέρουμε ότι οι κυριότερες εναλλακτικές συνδυασμού των δύο αυτών μορφών ενέργειας είναι οι εξής:

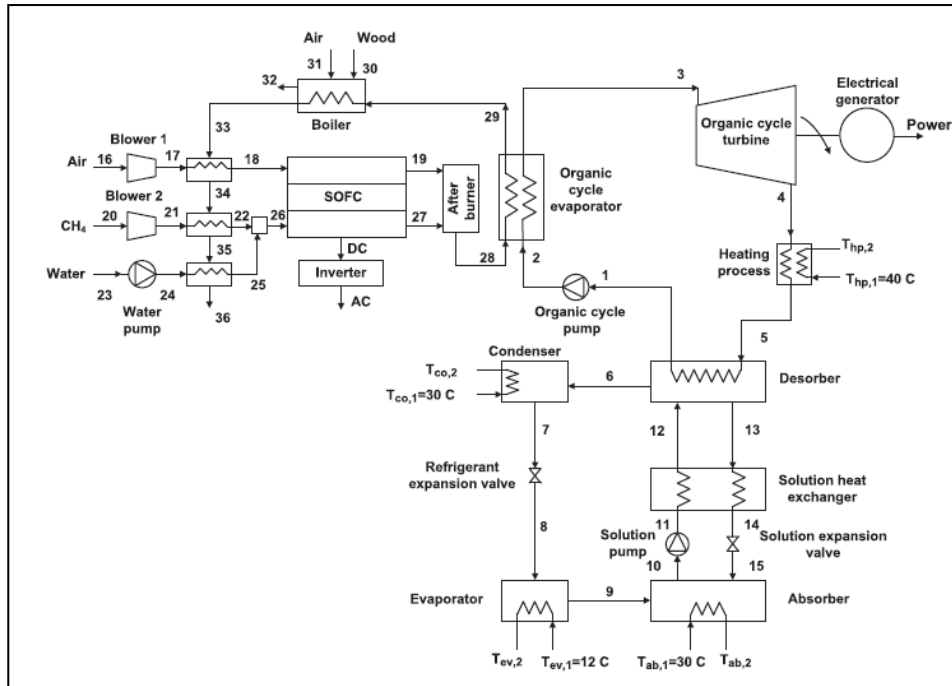
- Οι 3 εναλλακτικές περιπτώσεις των Lentz, Almanza(εικόνες 19,20,25). Σε αυτές τις περιπτώσεις έχουμε αύξηση της ξηρότητας του μίγματος υγρού-ατμού που εισέρχεται στο διαχωριστή με αποτέλεσμα της αύξησης της παροχής ατμού του ατμοστροβίλου. Έτσι αυξάνεται η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς. Αξίζει να τονιστεί, ότι δεν έχουμε μεταβολή της ενθαλπικής πτώσης του ατμοστροβίλου.

- Η πρόταση των Hiriart-Gutierrez για τοποθέτηση ηλιακών κατόπτρων μετά το διαχωρισμό για υπερθέρμανση του κορεσμένου ατμού προ της εισόδου του στον ατμοστρόβιλο. Με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η ενθαλπική πτώση στον ατμοστρόβιλο της εγκατάστασης, αλλά διατηρείται σταθερή η παροχή μάζας του ατμού.

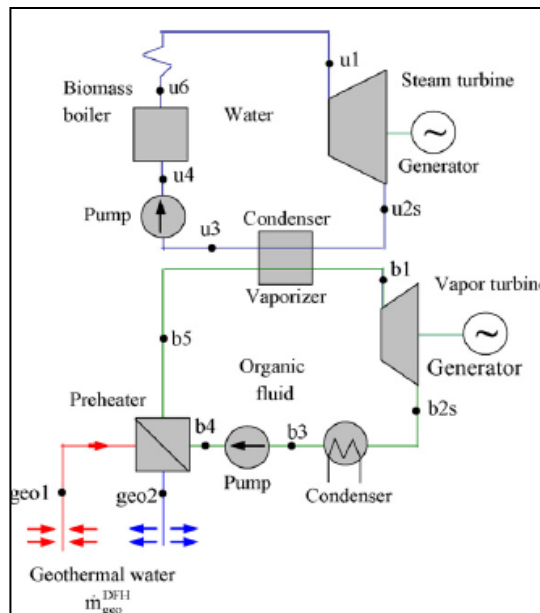
Σχόλια: Οι παραπάνω περιπτώσεις αφορούν σύστημα άμεσου κύκλου. Είναι δυνατή η τοποθέτηση κατόπτρων, όπως και οποιουδήποτε άλλου συστήματος υπερθέρμανσης, σε δυαδικό κύκλο με περιορισμό την μη δυνατότητα αύξησης της θερμοκρασίας όσο εμείς επιθυμούμε, για λόγους που έχουμε αναφέρει αναλυτικά προηγουμένως. Ο περιορισμός της αύξησης της θερμοκρασίας, πιθανόν καθιστά μη οικονομική την επένδυση, για αυτόν το λόγο οι περισσότερες μελέτες έχουν γίνει γύρω από συνδυασμό συστημάτων άμεσου κύκλου με κάποια άλλη μορφή ενέργειας, και όχι τόσο συστημάτων δυαδικού κύκλου. Ένα τέτοιο σύστημα θα μελετήσουμε στο υπολογιστικό μέρος της παρούσας διπλωματικής. Γενικότερα, τα δυαδικά συστήματα προτιμούνται για την ανάκτηση θερμότητας που σε διαφορετική περίπτωση θα απορριπτόταν στο περιβάλλον. Για παράδειγμα, ενδείκνυται η χρήση ORC κύκλου για ανάκτηση θερμότητας από τον συμπυκνωτή θερμικών σταθμών (εικόνα 2.26). Δεν μελετάται όμως στην παρούσα διπλωματική επειδή δεν έχει σχέση με τη γεωθερμία, αλλά μόνο με τον κύκλο ORC. Κατά τα άλλα, ο συνδυασμός κύκλου ORC με συμβατικές μονάδες για ανάκτηση θερμότητας είναι μια περίπτωση, ιδιαιτέρως ελκυστική, η οποία αυξάνει κατά πολύ τις επιδόσεις της εγκατάστασης.

Ένα σημαντικό πρόβλημα στη χρήση κύκλου ORC για ανάκτηση θερμότητας από συμβατικούς σταθμούς είναι η μεγάλη διαφορά κλίμακας των δύο σταθμών. Ένας κύκλος ORC είναι συνήθως της τάξης των λίγων MW. Αντιθέτως, σε ένα σταθμό 300MW η απορριπτόμενη θερμότητα είναι της τάξης των 500MW. Η αναντιστοιχία των μεγεθών είναι ολοφάνερη. Βέβαια, οποιοδήποτε κέρδος μπορούμε να έχουμε είναι επιθυμητό. Αρκεί βέβαια η επένδυση να είναι οικονομικά βιώσιμη.

Η χρήση, πάντως, κύκλου ORC προτιμάται σε μηχανές μικρότερης ισχύος. Το 2009 οι Al-Sulaiman, Dincer, Hamdullahpur μελέτησαν τη δυνατότητα ανάκτησης της απορριπτόμενης θερμότητας μιας κυψέλης υδρογόνου SOFC, με τη χρήση του κύκλου ORC. Το συγκεκριμένο σύστημα περιελάμβανε και ένα κύκλωμα ψύξης, αλλά και έναν εναλλάκτη θερμότητας για πρόσδοση είτε ψυκτικής είτε θερμικής ισχύος, με αποτέλεσμα την περαιτέρω βελτίωση του βαθμού απόδοσης. Οι μελέτες έδειξαν ότι έχουμε συνολικό βαθμό απόδοσης 74%, σε αντίθεση με την περίπτωση συμπαραγωγής ηλεκτρισμού θερμότητας όπου έχουμε βαθμό απόδοσης 71%, είτε την περίπτωση συμπαραγωγής ηλεκτρισμού-ψύξης όπου έχουμε βαθμό απόδοσης 57%, είτε την περίπτωση ηλεκτροπαραγωγής όπου έχουμε βαθμό απόδοσης 47%. Επίσης, βρέθηκε ότι η ετήσια κατανάλωση καυσίμου μειώνεται κατά 32-42% ανάλογα με το χώρο στον οποίον θα βρίσκεται το σύστημα. Βέβαια, για να έχουμε τη μέγιστη δυνατή ανάκτηση θερμικής ισχύος χρησιμοποιείται ως εργαζόμενο μέσο το n-Οκτάνιο, το οποίο έχει κρίσιμη θερμοκρασία αρκετά υψηλή για οργανικό μέσο ίση με 569K. Παρατηρούμε, ότι η χρήση κύκλου ORC για την ανάκτηση θερμότητας, ιδίως σε συστήματα ισχύος ίδιας τάξης μεγέθους λειτουργεί ευεργετικά στη συνολική λειτουργία του συστήματος, καθώς έστω και μία αύξηση του 3% είναι πολύ σημαντική. Όταν πρόκειται δε, αποκλειστικά για χρήση ηλεκτροπαραγωγής, η αύξηση του βαθμού απόδοσης του συστήματος είναι της τάξης του 22%, άρα είναι πολύ ελκυστική περίπτωση.



Εικόνα 2.25: Υβριδικό σύστημα τριπαραγωγής που μελέτησαν οι Al-Sulaiman, Dincer, Hamdullahpur (Πηγή: F.A.Al-Sulaiman, I.Dincer, F.Hamdullahpur, 2009. Energy analysis of a trigeneration plant based on solid oxide fuel cell and organic rankine cycle)

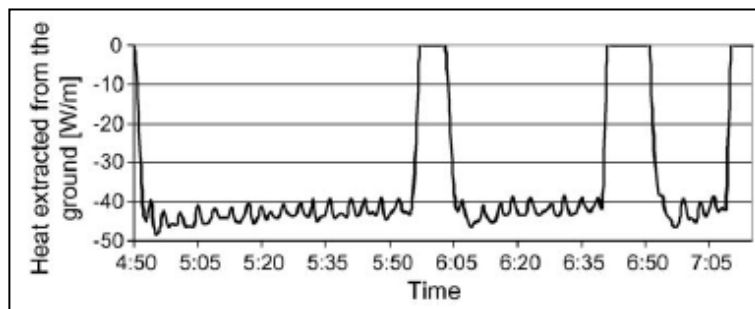


Εικόνα 2.26: Υβριδικό σύστημα για ανάκτηση θερμότητας από το συμπυκνωτή θερμικών σταθμών. Η ύπαρξη γεωθερμικού πεδίου δεν είναι απαραίτητη.

2.3) Συνδυασμός γεωθερμικών αντλιών θερμότητας με ηλιακούς συλλέκτες

Στην παρούσα παράγραφο θα παρουσιάσουμε συνοπτικά τα αποτελέσματα μιας έρευνας που πραγματοποίησε το εργαστήριο Βελτιστοποίησης Παραγωγής Ενέργειας και Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου του Savoie, χρηματοδοτούμενο από το υπουργείο περιβάλλοντος και ενέργειας της Γαλλίας. Το πρόγραμμα αυτό είχε την ονομασία GEOSOL και μελετούσε την λειτουργία μιας γεωθερμικής αντλίας θερμότητας μαζί με έναν ηλιακό θερμικό συλλέκτη, με σκοπό την βέλτιστη τους λειτουργία.

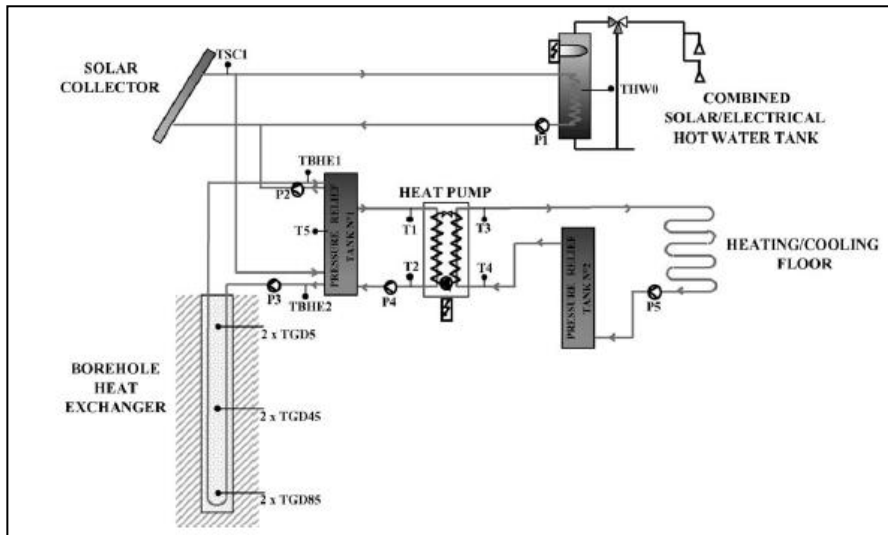
Όπως γνωρίζουμε, και αναφέρθηκε στο πρώτο κεφάλαιο, οι αντλίες θερμότητας εκμεταλλεύονται κατά κύριο λόγο τη σχεδόν σταθερή ετησίως θερμοκρασία του υπεδάφους καθ'όλη τη διάρκεια της χρονιάς, παράγοντας έτσι θέρμανση κατά τους χειμερινούς μήνες και ψύξη κατά τους θερινούς. Ένα σημαντικό πρόβλημα, όπως και σε όλες τις εφαρμογές της γεωθερμίας, είναι η εξάντληση του πεδίου, εδώ του εδάφους, κατά τη θερμαντική λειτουργία της εγκατάστασης. Έχει παρατηρηθεί πειραματικά, ότι η θερμοκρασία του εδάφους μειώνεται όσο αυξάνεται η συνεχόμενη χρήση της γεωθερμικής αντλίας. Αυτό είναι λογικό, αφού απορροφούμε θερμότητα από το υπέδαφος, η οποία δεν προλαβαίνει να αναπληρωθεί από το γειτονικό υπέδαφος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την πτώση των επιδόσεων της μηχανής, την μείωση της μεταφερόμενης θερμικής ισχύος, καθώς και τη μείωση του συντελεστή συμπεριφοράς της εγκατάστασης(COP). Όταν έχουμε μία αντλία θερμότητας, και όχι μεγάλες μονάδες, παραδείγματος χάριν για πολυκατοικίες, τότε θεωρητικά η θερμότητα που απορροφούμε από το έδαφος είναι ελάχιστη σε σχέση με τη θερμότητα της γειτονικής έκτασης γης. Προλαβαίνει, δηλαδή, να γίνει μια φυσική αναπλήρωση θερμότητας. Όταν, όμως, έχουμε μεγαλύτερες μονάδες, με την ταυτόχρονη λειτουργία πολλών αντλιών θερμότητας, τότε παρατηρείται κορεσμός του εδάφους και μείωση της θερμοκρασίας του με όλες τις προαναφερθείσες συνέπειες.



Εικόνα 2.27: Απορροφόμενη ενέργεια από το έδαφος, 14 Απριλίου 2005 (GEOSOL) (Πηγή: V.Trillat-Berdal, B.Souyri & G.Fraisse, 2006. Experimental study of a ground-coupled heat pump combined with thermal solar collectors)

Στο πρόγραμμα GEOSOL θα είχαμε την ταυτόχρονη λειτουργία αντλιών θερμότητας για θέρμανση ή ψύξη χώρου, και θερμικών ηλιακών συλλεκτών για θέρμανση νερού χρήσης. Η ιδιαιτερότητα, όμως, έγκειται στο γεγονός ότι οι συλλέκτες θα ήταν υπερδιαστασιοποιημένοι ώστε, αφενός μεν να είχαμε μεγάλη κάλυψη της ζήτησης ζεστού νερού, και αφετέρου δε όταν είχαμε περίσσεια θερμικής ισχύος από τους συλλέκτες αυτή να διοχετευόταν στο υπέδαφος για εξισορρόπηση των θερμικών απωλειών αυτού. Βέβαια, η διοχέτευση αυτή της θερμότητας, έχει νόημα μόνο όταν η εγκατάσταση της γεωθερμικής αντλίας λειτουργεί για την παραγωγή ψυκτικής ισχύος. Ένα τέτοιο σύστημα, θα είχε ως αποτέλεσμα την εξισορρόπηση της θερμοκρασίας του εδάφους, την αύξηση του χρόνου λειτουργίας των ηλιακών συλλεκτών (λειτουργία άνω του μέγιστου φορτίου νερού χρήσης), αποφυγή υπερθερμάνσεων του νερού χρήσης, καθώς και αύξηση του μέσου συντελεστή

συμπεριφοράς της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας. Στην εικόνα 2.28 παρουσιάζεται σχηματικά η εγκατάσταση του προγράμματος GEOSOL. Στο κύκλωμα της γεωθερμικής αντλίας το εργαζόμενο μέσο είναι υδατικό διάλυμα προπυλενίου σύστασης 35%. Το σπίτι στο οποίο έγινε η εγκατάσταση ήταν 180m², ενώ η συλλεκτική επιφάνεια ήταν 12m². Εκτιμάται, ότι για τη συγκεκριμένη κατοικία 6m² συλλέκτη ήταν αρκετά για την κάλυψη αναγκών σε ζεστό νερό, άρα έχουμε μια αρκετά μεγάλη υπερδιαστασιολόγηση. Βέβαια, η θέρμανση ζεστού νερού είναι δυνατή και μέσω ηλεκτρικού κυκλώματος. Τέλος, οι γεωτρήσεις ήταν δύο, βάθους 90 μέτρων και με εναλλάκτες τύπου U.

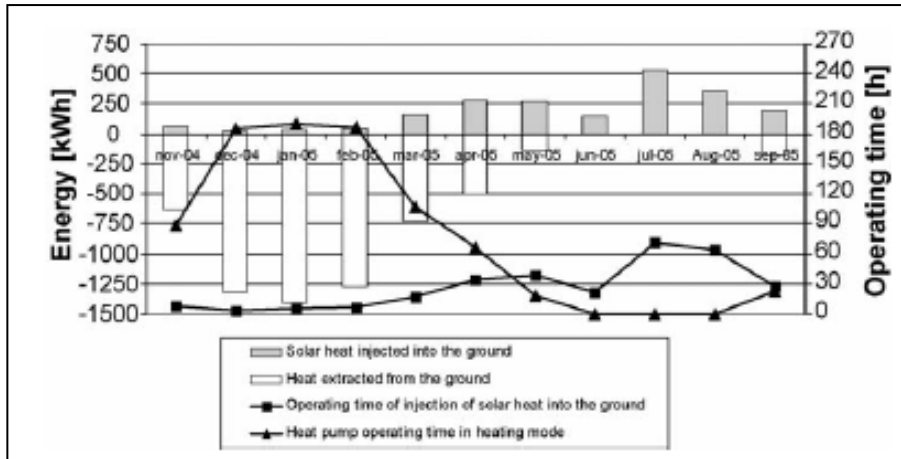


Εικόνα 2.28: Σχηματικό διάγραμμα εγκατάστασης προγράμματος GEOSOL (Πηγή: V.Trillat-Berdal, B.Souyri & G.Fraisse,2006. Experimental study of a ground-coupled heat pump combined with thermal solar collectors)

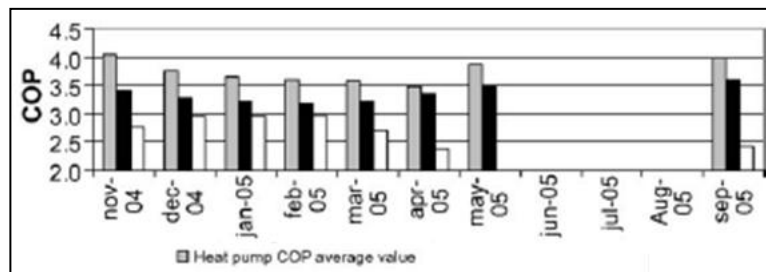
Η εικόνα 2.29 δείχνει τις θερμικές συναλλαγές με το έδαφος από τη στιγμή που ξεκίνησε η λειτουργία. Από το Νοέμβριο του 2004 έως το Μάιο του 2005, 5897 KWh εξάχθηκαν από το έδαφος, δηλαδή 33KWh/ημέρα, για λειτουργία 838 ωρών σε θερμαντική λειτουργία. Οι τιμές αυτές είναι σχετικά χαμηλές, άρα το δυναμικό του πεδίου δεν εκμεταλλευόταν σε ικανοποιητικό βαθμό.

Στα τέλη του Σεπτεμβρίου του 2005, όταν τελείωσε το καλοκαίρι, και τέθηκε ξανά σε θερμαντική λειτουργία η γεωθερμική αντλία, 6253 KWh εξάχθηκαν από το έδαφος ενώ 2121KWh εισήχθησαν στο έδαφος το καλοκαίρι, ως περίσσεια από τη θερμική παραγωγή ηλιακών συλλεκτών, δηλαδή το 34% της εξαγόμενης θερμικής ισχύος. Η καλοκαιρινή λειτουργία διήρκεσε 298 ώρες. Είναι εμφανής η αύξηση της παραγόμενης θερμικής ισχύος από τη γεωθερμική αντλία όταν λαμβάνει χώρα εισαγωγή στο έδαφος της περίσσειας της παραγόμενης από τους συλλέκτες θερμικής ισχύος.

Στην εικόνα 2.30 παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή COP για διάφορες εναλλακτικές περιπτώσεις κατά τη διάρκεια του ίδιου έτους. Παρατηρείται, ότι η τιμή του συντελεστή μειώνεται με την πάροδο του έτους, και έχει μέση τιμή 3,75 ενώ κατά το ξεκίνημα της λειτουργίας της εγκατάστασης (Σεπτέμβριος 2004) η τιμή του συντελεστή συμπεριφοράς ήταν περίπου 4,05. Ο κορεσμός του εδάφους είναι κάτι παραπάνω από εμφανής, αφού είχαμε πτώση του συντελεστή συμπεριφοράς κατά 14% στη διάρκεια ενός έτους. Επίσης, παρατηρείται τον Μάιο μια αύξηση του συντελεστή συμπεριφοράς. Αυτό συνέβη επειδή είχαμε εισαγωγή και ενός ποσού θερμότητας στο έδαφος, καθώς δεν είχαμε σταθερή λειτουργία της γεωθερμικής αντλίας, αφού προφανώς δεν ήταν απαραίτητη η σταθερή πρόσδοση θερμότητας.



Εικόνα 2.29: Θερμικές συναλλαγές με το έδαφος του υβριδικού συστήματος (Πηγή: V.Trillat-Berdal, B.Souyri & G.Fraisse,2006. Experimental study of a ground-coupled heat pump combined with thermal solar collectors)



Εικόνα 2.30: Συντελεστής συμπεριφοράς της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας κατά της διάρκεια του έτους (Πηγή: V.Trillat-Berdal, B.Souyri & G.Fraisse,2006. Experimental study of a ground-coupled heat pump combined with thermal solar collectors)

Η μελέτη που πραγματοποιήθηκε με το πρόγραμμα GEOSOL απέδειξε ότι ο συνδυασμός διαφορετικών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε ένα απλό σύστημα παραγωγής ενέργειας είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί και μάλιστα με πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα στις επιμέρους λειτουργίες των συστημάτων. Είδαμε αναλυτικά προηγουμένως, τη βελτίωση της λειτουργίας της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας, ενώ έχουμε 68% κάλυψη των αναγκών για θερμό νερό χρήσης από τους ηλιακούς συλλέκτες.

Η συγκεκριμένη μελέτη, βέβαια, έγινε για ένα σχετικά μικρό κτίριο, και είδαμε ότι ακόμα και για τέτοιας έκτασης κτίρια ο συνδυασμός δύο τέτοιων συστημάτων είναι αρκετά πλεονεκτικός. Είναι προφανές ότι σε μεγαλύτερης έκτασης κτίρια, με αρκετά μεγαλύτερα γεωθερμικά συστήματα, θα είναι ακόμα πλεονεκτικότερη η χρήση τέτοιων συστημάτων, αφού ο θερμοκρασιακός κορεσμός του εδάφους θα είναι κατά πολύ μεγαλύτερος, από ότι σε μια απλή οικία.

Σημείωση: Η εικόνα 2.30 περιέχει τις τιμές των συντελεστών συμπεριφοράς για 3 περιπτώσεις λειτουργίας της εγκατάστασης. Για χάρην απλότητας ασχοληθήκαμε μόνο με τις τιμές των “γκρι” στηλών, που είναι και η μέση τιμή του συντελεστή συμπεριφοράς.

2.4) Εξελιγμένα συστήματα γεωθερμίας

Στην παρούσα παράγραφο θα παρουσιαστούν ορισμένα εξελιγμένα συστήματα εκμετάλλευσης γεωθερμικών πεδίων. Η πλειοψηφία αυτών των συστημάτων αποτελεί συνδυασμό των βασικών συστημάτων με σκοπό τη βέλτιστη εκμετάλλευση του γεωθερμικού πεδίου. Στη συνέχεια θα γίνει μια συνοπτική παρουσίαση των κυριότερων εξελιγμένων συστημάτων γεωθερμίας και θα παρουσιαστούν τα κυριότερα χαρακτηριστικά που τα έχουν καταστήσει ελκυστικά για χρήση, ενώ δεν θα γίνει εμβάθυνση στα θερμοδυναμικά τους χαρακτηριστικά. Τα εξελιγμένα συστήματα γεωθερμίας που θα παρουσιαστούν στην παρούσα παράγραφο είναι τα εξής:

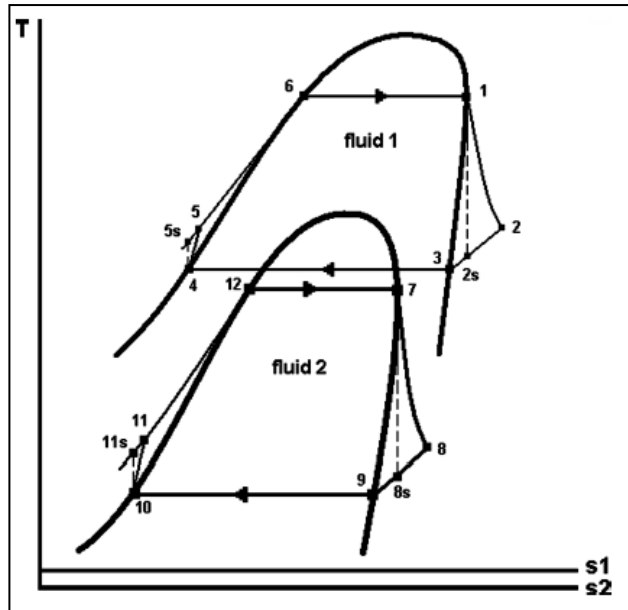
- Δυαδικός κύκλος με δύο εργαζόμενα μέσα.
- Δυαδικός κύκλος δύο πιέσεων.
- Συνδυασμός άμεσου κύκλου με δυαδικό κύκλο.

2.4.1) Δυαδικός κύκλος με δύο εργαζόμενα μέσα

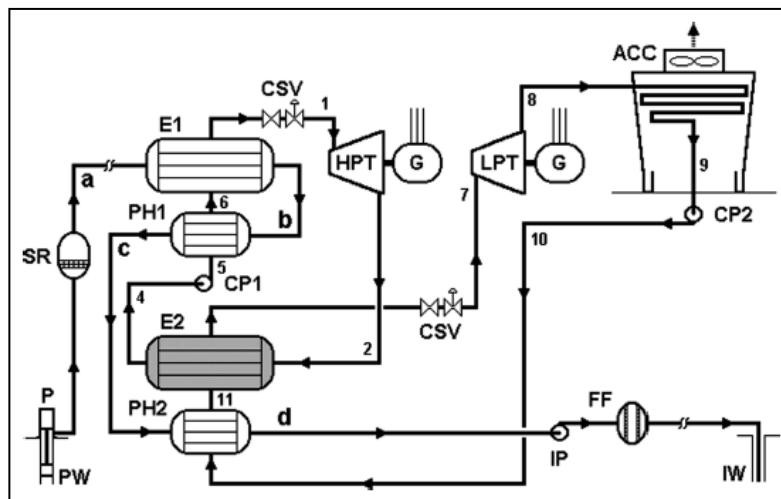
Ένα από τα πλέον εξελιγμένα συστήματα γεωθερμίας είναι ο δυαδικός κύκλος με χρήση δύο ή και παραπάνω εργαζόμενων μέσων, σε ξεχωριστούς οργανικούς κύκλους Rankine το καθένα. Η βασική λογική αυτών των συστημάτων είναι η χρήση δύο διαφορετικών εργαζόμενων μέσων με διαφορετικές ανώτερες και κατώτερες πιέσεις λειτουργίας ώστε να βελτιστοποιήσουμε κατά το δυνατόν την λειτουργία και την απόδοση του συστήματος. Μάλιστα, η πρώτη εγκατάσταση δυαδικού κύκλου στις Η.Π.Α. ήταν αυτού του τύπου, και ήταν μια μονάδα ισχύος 12.5 MW, η μονάδα Magmatrax στην Καλιφόρνια, η οποία χρησιμοποιούσε δύο οργανικά μέσα, το πρώτο σε υπερκρίσιμο και το δεύτερο σε υποκρίσιμο κύκλο.

Σε αυτά τα συστήματα το ένα εργαζόμενο μέσο λειτουργεί σε υψηλότερες στάθμες θερμοκρασιών και πιέσεων από το άλλο, με αποτέλεσμα η συμπύκνωση του πρώτου εργαζόμενου μέσου να χρησιμοποιείται ως ατμοποίηση του δεύτερου εργαζόμενου μέσου. Προφανώς, βασική προϋπόθεση ύπαρξης και λειτουργίας ενός τέτοιου συστήματος είναι η θερμοκρασία συμπύκνωσης του πρώτου εργαζόμενου μέσου να είναι υψηλότερη από τη θερμοκρασία ατμοποίησης του δεύτερου εργαζόμενου μέσου. Επίσης, είναι απαραίτητο, στο δεύτερο εργαζόμενο μέσο η στάθμη των θερμοκρασιών, και ιδίως της χαμηλής, να μην είναι αρκετά χαμηλά, ώστε να καθίσταται αντιοικονομική η λειτουργία του συστήματος.

Στην εικόνα 2.32 παρουσιάζεται το διάγραμμα ενός συστήματος δυαδικού κύκλου δύο εργαζόμενων μέσων. Παρατηρείται ότι η συμπύκνωση του πρώτου εργαζόμενου μέσου χρησιμοποιείται ως φορέας θερμότητας στον ατμοποιητή του δεύτερου εργαζόμενου μέσου. Επίσης, παρατηρούμε ότι το γεωθερμικό ρευστό χρησιμοποιείται και στον προθερμαντή του δεύτερου εργαζόμενου μέσου, παρότι αυτό ατμοποιείται από τη συμπύκνωση του πρώτου εργαζόμενου μέσου. Προφανώς, είναι δυνατόν το πρώτο εργαζόμενο μέσο να χρησιμοποιείται ως φορέας θερμότητας και στον ατμοποιητή, αλλά και στον προθερμαντή του δεύτερου εργαζόμενου μέσου.



Εικόνα 2.31: Θερμοδυναμικό διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας συστήματος δύο εργαζόμενων μέσων (Πηγή:R.Di Pippo,2007. Geothermal Power Plants)



Εικόνα 2.32: Διαδικαστικός κύκλος δύο εργαζόμενων μέσων (Πηγή:R.Di Pippo,2007. Geothermal Power Plants)

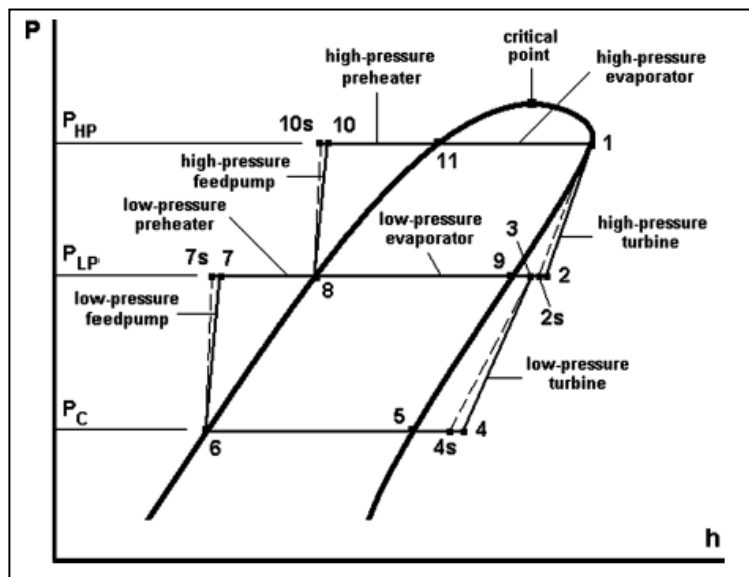
Βασική πρόκληση ενός τέτοιου θερμοδυναμικού συστήματος είναι η εύρεση των κατάλληλων εργαζόμενων μέσων στις κατάλληλες συνθήκες, ώστε να έχουμε τη βέλτιστη δυνατή “συνεργασία” μεταξύ των καμπυλών των δύο εργαζόμενων μέσων, με τελικό σκοπό βέβαια την μεγιστοποίηση της απόδοσης και εκμετάλλευσης του συστήματος.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η εφαρμογή ενός τέτοιου συστήματος, έχει μεγαλύτερη αξία όταν το πρώτο εργαζόμενο μέσο λειτουργεί σε υπερκρίσιμο κύκλο, άρα σε μεγαλύτερη στάθμη ανώτερης και κατώτερης θερμοκρασίας. Σε αυτήν την περίπτωση, παρουσιάζει ακόμα μεγαλύτερο ενδιαφέρον η ανακομιδή της θερμότητας συμπύκνωσης του πρώτου εργαζόμενου μέσου.

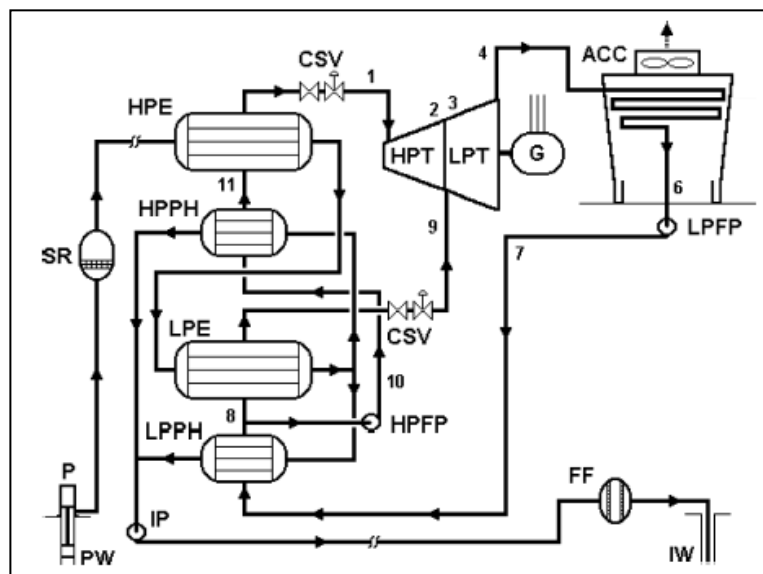
Τέλος, αξίζει να αναφέρουμε πως ένα τέτοιο σύστημα έχει νόημα να το εφαρμόσουμε όταν δεν είναι δυνατή η περαιτέρω πτώση της χαμηλής πίεσης-θερμοκρασίας του πρώτου εργαζόμενου μέσου. Με άλλα λόγια, δεν αξίζει να εφαρμόσουμε ένα τέτοιο σύστημα, όταν είναι δυνατή η λειτουργία του πρώτου εργαζόμενου μέσου σε ακόμα χαμηλότερες πιέσεις-θερμοκρασίες, οι οποίες βέβαια θα καθιστούν αντικοινωνικό το συνδυασμό του με ένα δεύτερο εργαζόμενο μέσο.

2.4.2) Διαδικός κύκλος δύο πιέσεων

Πρόκειται για έναν εξελιγμένο θερμοδυναμικό διαδικό κύκλο, στον οποίον η διαδικασία μετάδοσης της θερμότητας από το γεωθερμικό ρευστό στο εργαζόμενο μέσο γίνεται σε δύο ή και σε περισσότερες διαφορετικές υψηλές πιέσεις. Ο βασικός λόγος που γίνεται αυτό είναι για να έχουμε καλύτερο ταίριασμα μεταξύ των καμπυλών του γεωθερμικού ρευστού και του εργαζόμενου μέσου, αλλά και για να έχουμε σε καθέναν ατμοποιητή ή προθερμαντή χαμηλότερη διαφορά θερμοκρασιών μεταξύ των δύο ρευμάτων. Όσο χαμηλότερη είναι η διαφορά των θερμοκρασιών μεταξύ δύο ρευμάτων που συναλλάσσουν θερμότητα, τόσο μειώνονται οι ενεργειακές και εξεργειακές απώλειες, ελαττώνονται οι μη αναστρεψιμότητες του φαινομένου και έχουμε καλύτερη μετάδοση θερμότητας.



Εικόνα 2.33: Θερμοδυναμικό διάγραμμα οργανικού κύκλου δύο πιέσεων (Πηγή:R.Di Pippo,2007. Geothermal Power Plants)



Εικόνα 2.34: Σχηματικό διάγραμμα εγκατάστασης οργανικού κύκλου δύο πιέσεων (Πηγή:R.Di Pippo,2007. Geothermal Power Plants)

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, σε αυτόν τον κύκλο, έχουμε μείωση των θερμικών απωλειών κατά τη συναλλαγή θερμότητας, με αποτέλεσμα την αύξηση του βαθμού εκμετάλλευσης του γεωθερμικού πεδίου, και μάλιστα κατά σημαντικά μεγάλο ποσοστό.

Αντιθέτως, όμως, επειδή ένα μέρος του εργαζόμενου μέσου λειτουργεί σε μικρότερο λόγο πιέσεων από ότι θα λειτουργούσε σε έναν τυπικό σταθμό μίας υψηλής πίεσης, έχουμε μείωση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, με αποτέλεσμα τη μείωση του βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης (βλ. πιν. 2.2). Αυτό δικαιολογείται και από το γεγονός ότι μειώνεται η μέση θερμοκρασία πρόσδοσης της θερμότητας, οπότε έχουμε μείωση του βαθμού απόδοσης. Άρα, σε αυτού του είδους τις εγκαταστάσεις έχουμε μείωση του θερμικού βαθμού απόδοσης, αλλά αύξηση της εκμετάλλευσης του πεδίου. Προφανώς, η επιλογή κτίσης τέτοιου είδους σταθμού ή όχι εξαρτάται απ το αν επιθυμούμε μεγιστοποίηση του βαθμού απόδοσης ή της εκμετάλλευσης του πεδίου.

Εργαζόμενο Μέσο	Θερμοκρασία Γεωθερμικού ρευστού °C	Βαθμός Απόδοσης %		Βαθμός χρησιμοποίησης %	
		Απλός κύκλος	Κύκλος δύο πιέσεων	Απλός κύκλος	Κύκλος δύο πιέσεων
i-C ₄ H ₁₀	93	5.5	4.6	31.9	39.7
i-C ₅ H ₁₂	93	5.2	4.2	30.5	37.0
i-C ₄ H ₁₀	149	10.3	9.8	48.8	56.9
i-C ₅ H ₁₂	149	9.8	8.8	44.6	51.5
i-C ₅ H ₁₂	204	13.7	13.1	57.7	61.2

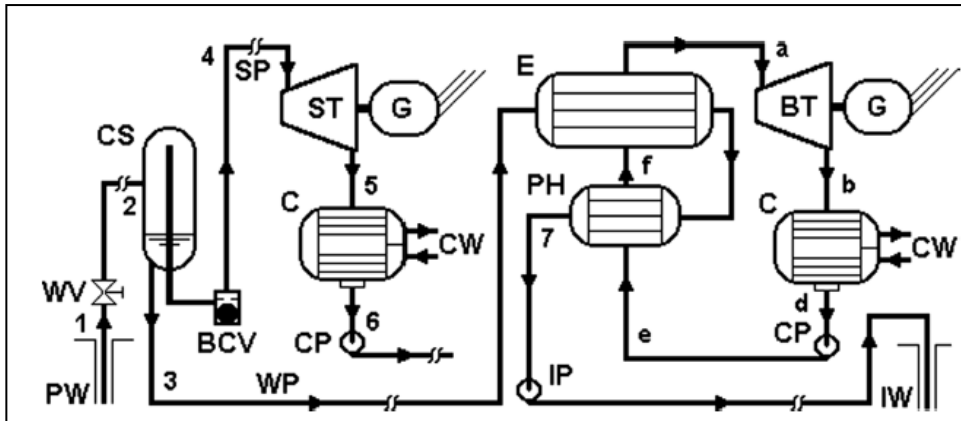
Πίνακας 2.2: Συγκριτικός Πίνακας Βαθμού απόδοσης και Βαθμού χρησιμοποίησης για απλό κύκλο και κύκλο δύο πιέσεων για διάφορα εργαζόμενα μέσα (Πηγή:R.Di Pippo,2007. Geothermal Power Plants)

2.4.3) Συνδυασμός άμεσου με δυαδικό κύκλο

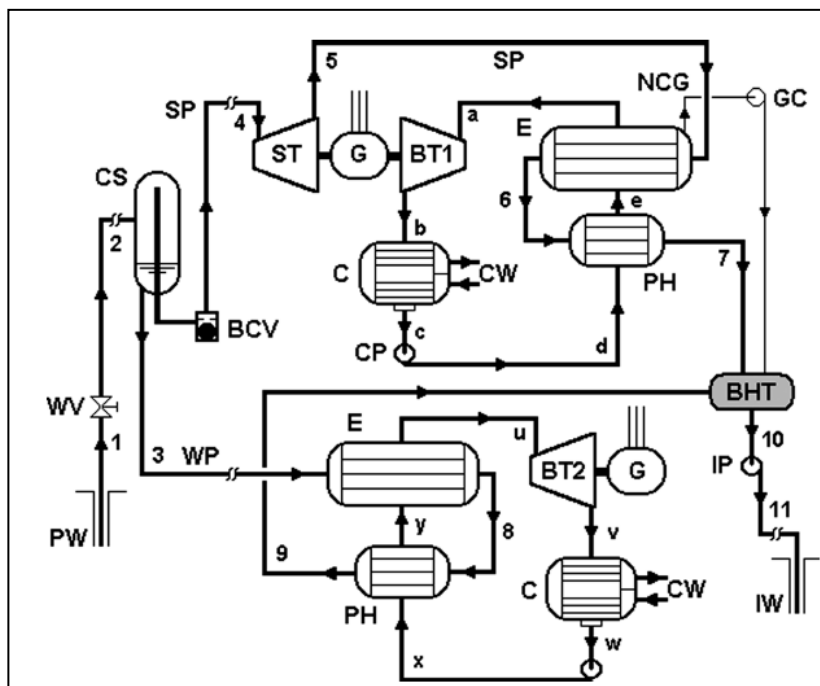
Μία από τις πλέον ελκυστικές περιπτώσεις, είναι ο συνδυασμός συστημάτων άμεσου με δυαδικού κύκλου. Η κύρια βασική προϋπόθεση είναι να υπάρχει το κατάλληλο γεωθερμικό δυναμικό για κτίση σταθμού άμεσου κύκλου. Εάν είναι δυνατό αυτό, τότε ο συνδυασμός του με δυαδικό κύκλο αυξάνει την εκμετάλλευση του πεδίου και την απόδοση του συστήματος.

Στις περισσότερες περιπτώσεις, στους σταθμούς άμεσου κύκλου, μετά το διαχωρισμό, το υγρό υπόλειμμα του γεωθερμικού ρευστού είναι σε αρκετά υψηλή θερμοκρασία, συνήθως άνω των 100°C, με αποτέλεσμα να είναι δυνατή η περαιτέρω θερμική εκμετάλλευση του. Εφόσον, δεν είναι απαραίτητη η χρήση του για άλλους θερμικούς σκοπούς, όπως τηλεθέρμανση-αγροτικές χρήσεις κλπ, τότε είναι αρκετά ενδιαφέρουσα η περίπτωση χρησιμοποίησης του ως φορέα θερμότητας σε ένα σταθμό δυαδικού κύκλου. Με άλλα λόγια, το υγρό υπόλειμμα του άμεσου κύκλου θα κάνει ακριβώς ότι θα έκανε το γεωθερμικό ρευστό σε ένα δυαδικό κύκλο. Απλά, η όλη διαδικασία θα πρέπει να γίνεται ιδιαίτερα προσεκτικά, ώστε να μην έχουμε πτώση της θερμοκρασίας του γεωθερμικού ρευστού, κάτω από το όριο που μας επιβάλλει η στερεοποίηση των διαλυμένων στερεών σε αυτό.

Υπάρχουν διάφορες παραλλαγές συστημάτων που συνδυάζουν άμεσο με δυαδικό κύκλο. Οι δύο κυριότερες παραλλαγές παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες. Συνήθως, η ποιότητα του γεωθερμικού ρευστού, αλλά και οι ανάγκες σε παραγωγή ισχύος είναι οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την απόφαση για το τι είδους σταθμό συνδυασμού άμεσου με δυαδικό κύκλο θα κατασκευάσουμε.



Εικόνα 2.35: Συνδυασμός άμεσου με δυαδικό κύκλο, όπου το υγρό υπόλειμμα χρησιμοποιείται ως φορέας θερμότητας σε δυαδικό κύκλο (Πηγή: R.Di Pippo,2007. Geothermal Power Plants)



Εικόνα 2.36: Συνδυασμός άμεσου με δυαδικό κύκλο, όπου το υγρό υπόλειμμα άλλα και η έξοδος του στροβίλου χρησιμοποιούνται ως φορέας θερμότητας σε ξεχωριστούς δυαδικούς κύκλους (Πηγή: R.Di Pippo,2007. Geothermal Power Plants)

Είναι προφανές πως με το συνδυασμό άμεσου με δυαδικό κύκλο έχουμε αύξηση της παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος, ενώ επίσης αυξάνεται και ο βαθμός εκμετάλλευσης του πεδίου. Έχει υπολογιστεί πως ο βαθμός απόδοσης ενός τέτοιου συστήματος είναι περίπου ίδιος, ίσως λίγο μεγαλύτερος, από το βαθμό απόδοσης του αντίστοιχου συστήματος άμεσου κύκλου.

Συνοψίζοντας, είναι προφανές, ότι εφόσον δεν απαιτείται η χρήση του υγρού υπολείμματος του άμεσου κύκλου σε άλλες χρήσεις, τότε είναι κατά πολύ υπέρ μας η κτίση ενός σταθμού δυαδικού κύκλου με σκοπό την εκμετάλλευση του υγρού υπολείμματος του σταθμού άμεσου κύκλου, με σεβασμό πάντα στη πιθανή στερεοποίηση του πυρίτη, και των άλλων διαλυμένων, στο γεωθερμικό ρευστό, στερεών.

Υπολογιστικό Μέρος

3) Συνδυασμός Γεωθερμικής Ενέργειας με Βιομάζα

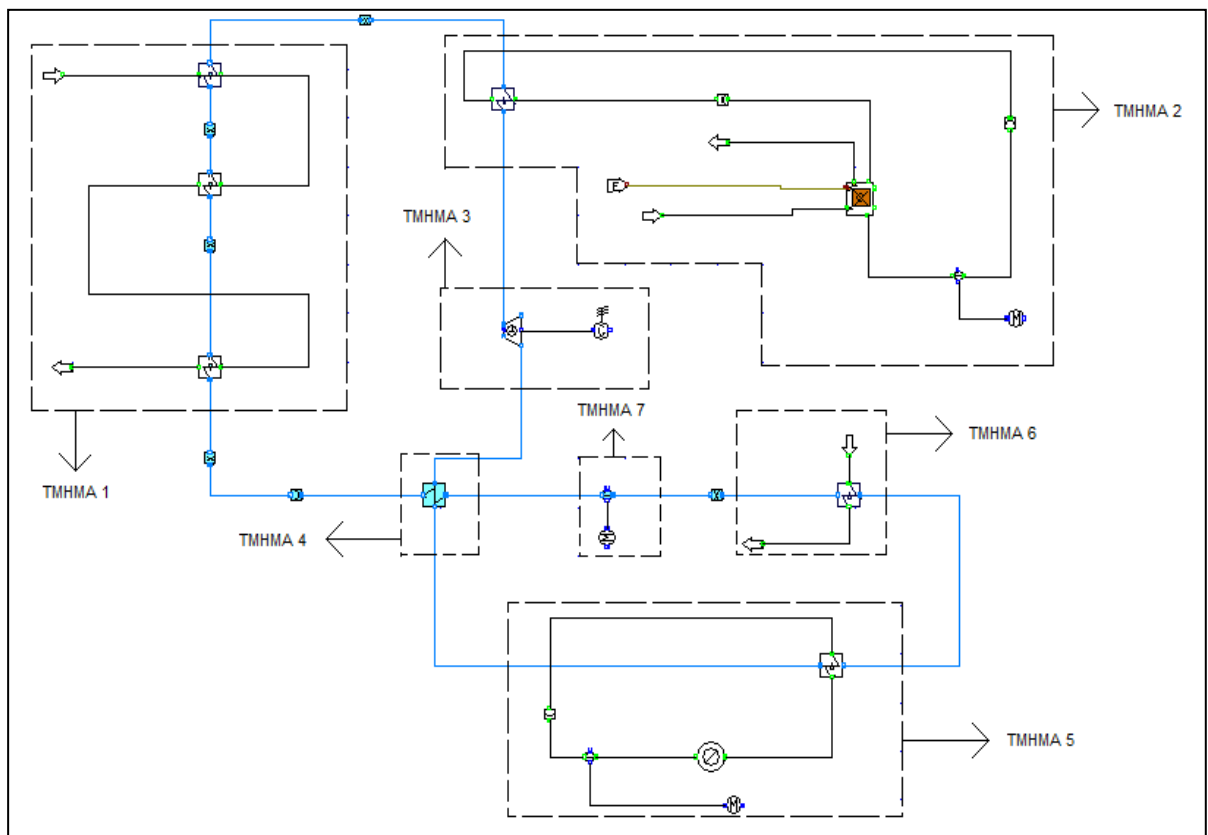
3.1) Βασικά στοιχεία

Στο παρόν κεφάλαιο θα μελετηθεί η δυνατότητα συνδυασμού δυο διαφορετικών μορφών ενέργειας, της γεωθερμικής ενέργειας και της θερμικής ενέργειας προερχόμενης από καύση βιομάζας. Συγκεκριμένα, θα μελετηθεί η δυνατότητα αύξησης της ηλεκτροπαραγωγής μίας μονάδας οργανικού κύκλου Rankine(ORC), η οποία έχει σαν κύρια πηγή θερμότητας τη Γεωθερμία. Θα γίνει η προσθήκη ενός λέβητα καύσης βιομάζας, η θερμική ενέργεια της οποίας θα υπερθερμαίνει το οργανικό μέσο με σκοπό την αύξηση της ηλεκτροπαραγωγής. Περισσότερες λεπτομέρειες για τη συγκεκριμένη εγκατάσταση αναφέρονται στη συνέχεια.

Η προσομοίωση της εγκατάστασης θα γίνει στο υπολογιστικό περιβάλλον IPSEpro. Το IPSEpro είναι ένα υπολογιστικό εργαλείο, το οποίο έχει καταχωρημένες τις βιβλιοθήκες πολλών εργαζόμενων μέσων σε θερμικές εγκαταστάσεις, όπως το νερό, ο αέρας, διάφορα οργανικά μέσα και πολλά άλλα. Επίσης, έχει καταχωρημένα μοντέλα διάφορων συνιστωσών θερμικών εγκαταστάσεων, όπως εναλλάκτες θερμότητας, στρόβιλοι, αντλίες κλπ.

Με το IPSEpro είναι δυνατή η κατασκευή μοντέλων, για διάφορες θερμικές εγκαταστάσεις, και μετέπειτα η ταχεία και εύκολη μελέτη των παραμέτρων των εγκαταστάσεων αυτών.

Στην εικόνα 3.1 παρουσιάζεται η βασική εγκατάσταση που θα μελετηθεί στο παρόν κεφάλαιο.



Εικόνα 3.1: Βασική εγκατάσταση προσομοίωσης στο IPSEpro

Όπως παρατηρούμε από την εικόνα 3.1, τα βασικά τμήματα της παραπάνω μελετώμενης εγκατάστασης είναι τα εξής:

- Τμήμα μεταφοράς θερμότητας από το γεωθερμικό ρευστό στο οργανικό μέσο (τμήμα 1). Συγκεκριμένα, η μεταφορά θερμότητας γίνεται σε 3 στάδια, την προθέρμανση, την ατμοποίηση και την υπερθέρμανση του οργανικού ρευστού. Σημειώνεται, πως η υπερθέρμανση του οργανικού μέσου είναι της τάξης των 10-20°C, επειδή η χαμηλή θερμοκρασία πηγής δεν μας επιτρέπει μεγαλύτερες υπερθερμάνσεις.
- Τμήμα υπερθέρμανσης οργανικού μέσου με καύση βιομάζας (τμήμα 2). Είναι το τμήμα που αφορά την καύση βιομάζας, καθώς και την μεταφορά της θερμικής ενέργειας της βιομάζας στο οργανικό μέσο. Πιο συγκεκριμένα, έχουμε καύση βιομάζας σε ένα λέβητα βιομάζας, ο οποίος θερμαίνει νερό, το οποίο με τη σειρά του, μεταφέρει τη θερμότητα αυτή στο οργανικό μέσο. Το νερό χρησιμοποιείται ως ενδιάμεσος φορέας θερμότητας, επειδή δεν είναι δυνατή η κυκλοφορία οργανικού μέσου εντός ενός λέβητα ο οποίος αναπτύσσει θερμοκρασίες της τάξης 1500-1700°C, λόγω της υψηλής αναφλεξιμότητας του. Επίσης, για αυτόν το λόγο δεν είναι δυνατή η υπερθέρμανση του οργανικού μέσου σε όσο υψηλή θερμοκρασία επιθυμούμε, όπως για παράδειγμα στο νερό, όπου το όριο τίθεται μόνο από τις αντοχές των υλικών. Στη συνέχεια, στην εργασία θα έχουμε ως μέγιστη θερμοκρασία υπερθέρμανσης του οργανικού μέσου R134a τους 180°C, ενώ για το R152a θα έχουμε τους 210°C. Όπως παρατηρούμε, οι θερμοκρασίες αυτές είναι σχετικά χαμηλές για ένα εργαζόμενο μέσο, όπως το νερό, για αυτόν το λόγο ο λέβητας που θα χρησιμοποιήσουμε θα είναι λέβητας θερμού νερού. Δεν θα έχουμε, δηλαδή, ατμοποίηση του νερού. Συγκεκριμένα, το νερό θα εισέρχεται ως υπόψυκτο στο λέβητα και θα εξέρχεται ως κορεσμένο, και στη συνέχεια θα ψύχεται στον εναλλάκτη υπερθέρμανσης του οργανικού μέσου και θα γίνεται και πάλι υπόψυκτο. Βέβαια, δεδομένου ότι η θερμοκρασία υπερθέρμανσης του οργανικού μέσου είναι της τάξης των 180-210°C, η έξοδος του νερού από το λέβητα θα είναι της τάξης των 190-220°C. Σε μια τέτοια θερμοκρασία για να είναι το νερό κορεσμένο απαιτείται να είναι σε πίεση 15-25 bar. Άρα, είναι απαραίτητη η ύπαρξη ανθεκτικών σωληνώσεων ώστε να έχουμε επάρκεια στην αντοχή των υλικών, γεγονός που αυξάνει το κόστος. Το μεγάλο κέρδος, όμως στην περίπτωση αυτή που δεν έχουμε ατμοποίηση, είναι ότι αποφεύγουμε τη χρήση πύργου ψύξης μετά τον εναλλάκτη υπερθέρμανσης ώστε να έχουμε συμπίκνωση του νερού για την είσοδο του στο λέβητα. Άρα, έχουμε ελαχιστοποίηση των θερμικών απωλειών του συστήματος.
- Σύστημα στροβίλου-γεννήτριας για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας (τμήμα 3).
- Αναγεννητικός προθερμαντής (τμήμα 4). Στα οργανικά μέσα η “καμπάνα” του διαγράμματος T-s έχει θετική κλίση στην ατμώδη περιοχή ή ελαφρώς αρνητική, με αποτέλεσμα η εκτόνωση του οργανικού μέσου στο στρόβιλο να οδηγεί σχεδόν πάντα στην υπέρθερμη περιοχή. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η θερμοκρασία στην έξοδο του στροβίλου να είναι αρκετά υψηλή, γεγονός το οποίο καθιστά χρήσιμη την πρόταξη αναγεννητικού προθερμαντή προ των γεωθερμικών εναλλακτών, με σκοπό την αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου του οργανικού μέσου στο γεωθερμικό προθερμαντή. Όπως θα δούμε αναλυτικά παρακάτω, η τοποθέτηση

του αναγεννητικού προθερμαντή αυξάνει αρκετά το βαθμό απόδοσης και σε ορισμένες περιπτώσεις και την ηλεκτροπαραγωγή της εγκατάστασης.

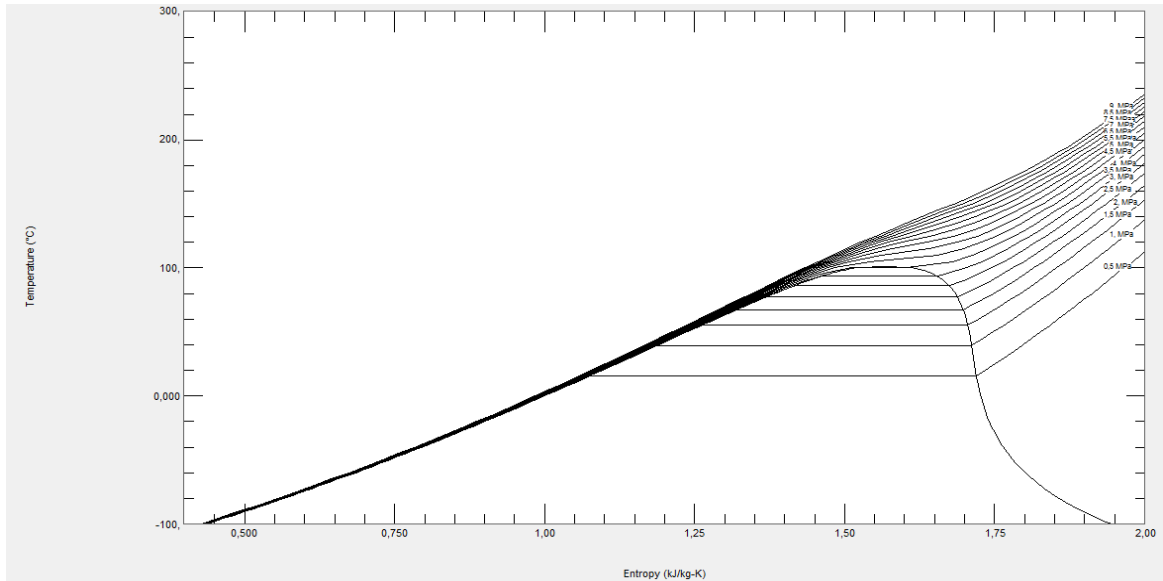
- Σύστημα παραγωγής θερμότητας για διάφορες χρήσεις, όπως τηλεθέρμανση, χρήση σε θερμοκήπια κλπ (τμήμα 5). Συγκεκριμένα, έχουμε ένα βοηθητικό εργαζόμενο μέσο, συνήθως νερό, το οποίο απορροφά θερμότητα από το εργαζόμενο μέσο και αυτό με τη σειρά του την αποδίδει εκεί όπου χρησιμοποιείται η θερμική ενέργεια. Οι δυνατότητες χρήσεις της θερμικής αυτής ενέργειας δεν θα μας απασχολήσουν περαιτέρω. Θα θεωρήσουμε απλοποιητικά ότι η θερμοκρασία εισόδου του νερού στις θερμικές χρήσεις είναι 80°C και η θερμοκρασία εξόδου του είναι 50°C.
- Σύστημα ψύξης, όπου έχουμε συμπύκνωση του εργαζόμενου οργανικού μέσου (τμήμα 6). Η ψύξη του οργανικού μέσου γίνεται με νερό θερμοκρασίας περιβάλλοντος 21°C.
- Τροφοδοτική αντλία, η οποία αυξάνει την πίεση του εργαζόμενου μέσου στα επιθυμητά επίπεδα (τμήμα 7).

Σημειώνεται σε αυτό το σημείο, ότι η δυνατότητα χρήσης του συστήματος παραγωγής θερμικής ενέργειας πρωτίστως, αλλά και του αναγεννητικού προθερμαντή μας δίνεται λόγω της υψηλής υπερθέρμανσης του οργανικού μέσου με την καύση βιομάζας. Στην περίπτωση απλού συστήματος ORC χωρίς πρόσθετη καύση βιομάζας, η θερμοκρασία εξόδου από το στρόβιλο είναι της τάξης των 60-70°C, με αποτέλεσμα να καθίσταται αδύνατη η τοποθέτηση και η λειτουργία των δύο παραπάνω συστημάτων.

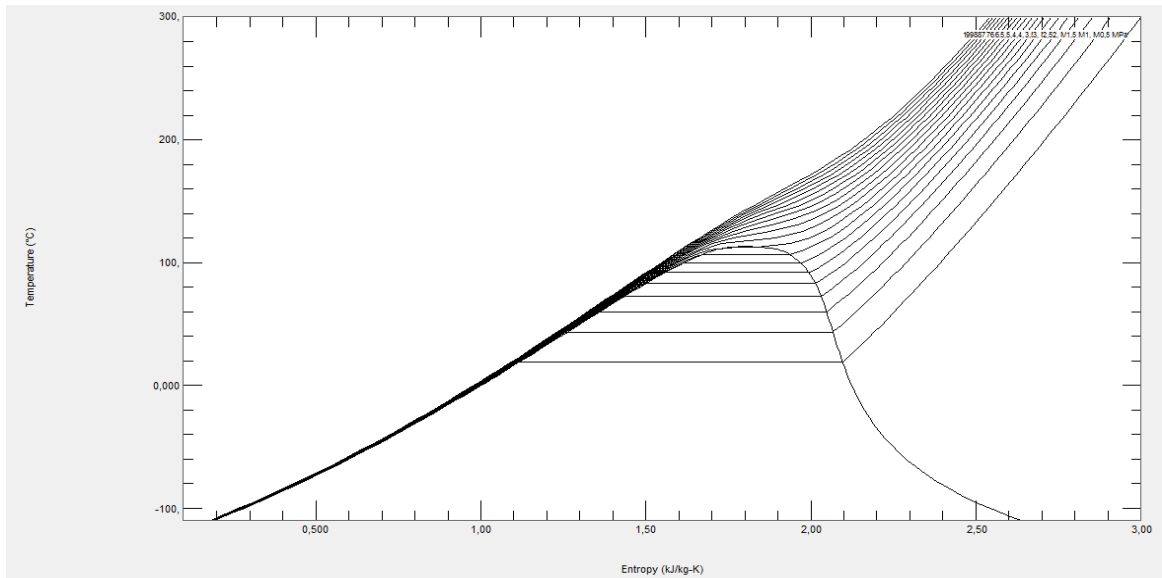
Η μελέτη της παραπάνω εγκατάστασης θα γίνει για δύο εργαζόμενα μέσα:

- το R134a (CH_2FCF_3 , 1-1-1-2-τετραφλοροαιθάνιο), το οποίο είναι το πλέον χρησιμοποιούμενο εργαζόμενο οργανικό μέσο σε εγκαταστάσεις γεωθερμίας, αλλά και σε ψυκτικές εγκαταστάσεις. Πρόκειται για το εργαζόμενο μέσο το οποίο αντικατέστησε το R12 όταν έγιναν γνωστές οι καταστροφικές του συνέπειες στο περιβάλλον. Το μοριακό του βάρος είναι 102.03, ενώ η κρίσιμη θερμοκρασία του είναι 101,01°C.
- το R152a (CH_3CHF_2 , 1-1-διφλοροαιθάνιο), το οποίο είναι ένα εργαζόμενο μέσο που έχει ανακαλυφθεί τα τελευταία χρόνια και θα αντικαταστήσει με τη σειρά του το R134a στο μέλλον. Θα φανεί και στη μελέτη μας, ότι το R152a είναι αρκετά καλύτερο του R134a. Το μοριακό του βάρος είναι 66.06 και η κρίσιμη θερμοκρασία του 113,3°C.

Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι το R152a προκαλεί 10 φορές λιγότερη επιβάρυνση στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, σε σχέση με το R134a, αλλά είναι πολύ πιο εύφλεκτο, και η χρήση του επιβάλλει ιδιαίτερους κανόνες ασφαλείας.



Εικόνα 3.2: Διάγραμμα T-s για εργαζόμενο μέσο R134a



Εικόνα 3.3: Διάγραμμα T-s για εργαζόμενο μέσο R152a

Οι κύριοι άξονες μελέτης της εγκατάστασης, και η σειρά με την οποία θα πραγματοποιηθούν είναι οι εξής:

- Μελέτη θερμοκρασίας εξόδου από τον αναγεννητικό προθερμαντή ($T_{ph,ex}$). Προφανώς, αναφερόμαστε στο κρύο ρεύμα του εναλλάκτη, το οποίο στη συνέχεια εισέρχεται στο προθερμαντή με γεωθερμικό ρευστό. Στην πρώτη αυτή φάση της μελέτης θα θεωρήσουμε ότι έχουμε τη μέγιστη υπερθέρμανση του οργανικού μέσου από τον υπερθερμαντή βιομάζας, καθώς η συμπεριφορά θα ήταν ανάλογη αν είχαμε και μικρότερη υπερθέρμανση. Αυτή η θερμοκρασία, όπως θα φανεί από τη μελέτη, είναι η πλέον σημαντική θερμοκρασία που πρέπει να προσέξουμε στην εγκατάσταση, καθώς μικρές μεταβολές της προκαλούν μεγάλες μεταβολές στην ηλεκτρική ισχύ και στο βαθμό απόδοσης.

- Μελέτη θερμοκρασίας υπερθέρμανσης από την καύση βιομάζας (T_{sh}). Πρώτα θα έχουμε σταθεροποιήσει τη θερμοκρασία εξόδου από τον αναγεννητικό προθερμαντή στις βέλτιστες δυνατές τιμές. Αυτή είναι η πλέον σημαντική μελέτη για την εύρεση της λειτουργικότητας μιας εγκατάστασης συνδυασμού βιομάζας-γεωθερμίας.
- Μελέτη ξεχωριστής λειτουργίας των εγκαταστάσεων. Εφόσον έχουμε σταθεροποιήσει τις δύο παραπάνω θερμοκρασίες, και πλέον η εγκατάσταση έχει σταθερή λειτουργία, θα μελετήσουμε κατά πόσον συμφέρει ενεργειακά μια τέτοια εγκατάσταση. Θα δημιουργήσουμε μοντέλα για τις δύο ξεχωριστές εγκαταστάσεις, ένα μοντέλο γεωθερμικού κύκλου ORC, και ένα μοντέλο για λέβητα θερμού νερού. Στη συνέχεια θα δούμε τις μας προσφέρουν από ενεργειακής άποψης και βαθμού απόδοσης, και θα τα συγκρίνουμε με την υβριδική εγκατάσταση, ώστε να δούμε κατά πόσο εν τέλει συμφέρει η συνδυασμένη εγκατάσταση τους. Αυτή θα έπρεπε να είναι η πρώτη και βασική μελέτη μιας τέτοιας εγκατάστασης, αλλά προτιμήσαμε να μελετήσουμε και να σταθεροποιήσουμε τις δύο παραπάνω θερμοκρασίες πρώτα, ώστε να έχουμε την τελική μορφή της συνδυασμένης εγκατάστασης για να γίνει η σύγκριση της με τις δύο ξεχωριστές.
- Κατανάλωση διαφόρων ειδών βιομάζας. Σε όλη την υπόλοιπη μελέτη θα θεωρούμε μια μέση σύσταση βιομάζας, ώστε να είναι σταθερό το καύσιμο μας. Αφού, λοιπόν, σταθεροποιήσουμε τις παραπάνω θερμοκρασίες της εγκατάστασης θα μελετήσουμε τις καταναλώσεις διαφόρων ειδών βιομάζας. Θα χρησιμοποιήσουμε τη μελέτη των Vassilev-Baxter-Andersen-Vassileva, όπου υπάρχουν οι συστάσεις πάνω από 85 μορφών βιομάζας. Βέβαια, εμείς θα χρησιμοποιήσουμε τις πλέον εύχρηστες και χρησιμοποιούμενες μορφές βιομάζας, ενώ θα παρατεθούν και για σύγκριση ορισμένα συμβατικά στερεά καύσιμα. Η σύσταση της μέσης βιομάζας που θα χρησιμοποιούμε στην υπόλοιπη μελέτη είναι η εξής:

C= 0.408348 H=0.050148 S=0.001592
N=0.009552 O=0.323600 W=0.144000
Ash=0.060000

Η παραπάνω σύσταση ευρέθη από την ίδια μελέτη. Να σημειωθεί πως πρόκειται για τη μέση σύσταση όλων των μορφών βιομάζας που μελετήθηκαν, και όχι μόνο αυτών που θα μελετήσουμε εμείς, στη συγκεκριμένη παράγραφο.

- Μελέτη θερμοκρασίας γεωθερμικού ρευστού T_{geo} . Συγκεκριμένα, θα έχουμε σταθεροποιήσει τις εσωτερικές θερμοκρασίες $T_{ph,ex}$ και T_{sh} και θα μελετήσουμε τη λειτουργικότητα της εγκατάστασης για μεταβαλλόμενη θερμοκρασία πηγής. Σε όλη την υπόλοιπη μελέτη θα θεωρήσουμε ότι έχουμε σταθερές συνθήκες πηγής οι οποίες θα είναι οι εξής (Στοιχεία από Husavik-Ισλανδία):

$P_{geo}=8 \text{ Bar}$ $T_{geo}=120^{\circ}\text{C}$ $M_{geo}=100\text{kg/s}$

- Διαγράμματα Q-T και T-s για τις τελικές εγκαταστάσεις, δηλαδή τις εγκαταστάσεις με θερμοκρασίες $T_{ph,ex}$ και T_{sh} που προέκυψαν από τη μελέτη μας και θερμοκρασία T_{geo} σαν αυτή του Husavik. Επίσης, θα παρουσιαστούν διαγράμματα ροής ενέργειας Sankey για τη μελετώμενη εγκατάσταση.
- Εξεργειακή ανάλυση των παραπάνω εγκαταστάσεων.

Αξίζει να σημειωθεί πως η μελέτη θα γίνει για δύο οργανικά μέσα, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα R134a-R152a, αλλά και για δύο διαφορετικά σενάρια:

- Σταθερή απορροφόμενη θερμότητα από το γεωθερμικό ρευστό. Στη συγκεκριμένη περίπτωση θεωρούμε ότι το γεωθερμικό ρευστό εισέρχεται στην εγκατάσταση με 120°C και εξέρχεται με 90°C, ανεξαρτήτως των υπολοίπων παραμέτρων του κύκλου, όπως η θερμοκρασία $T_{ph,ex}$.
- Σταθερή διαφορά θερμοκρασίας στο ψυχρό άκρο του προθερμαντή με γεωθερμικό ρευστό. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι ο εναλλάκτης αυτός είναι ο ίδιος για κάθε μελέτη και δεν επιδέχεται μεταβολών. Η σταθερή διαφορά θερμοκρασίας σημαίνει ότι ανάλογα με την $T_{ph,ex}$ θα αυξομειώνεται και η θερμοκρασία εξόδου του γεωθερμικού ρευστού από την εγκατάσταση, άρα και η απορροφόμενη θερμότητα από το γεωθερμικό ρευστό.

Όπως θα δούμε, η συγκριτική μελέτη των δύο αυτών σεναρίων παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, κυρίως στη μελέτη της θερμοκρασίας εξόδου από τον αναγεννητικό προθερμαντή $T_{ph,ex}$. Όπως θα αναφερθεί και στην παράγραφο 3.2, τα δύο αυτά σενάρια πρακτικά διαφοροποιούνται ως προς τα συμπεράσματα μόνο στη μελέτη της θερμοκρασίας εξόδου από τον αναγεννητικό προθερμαντή $T_{ph,ex}$. Βέβαια, και στην υπόλοιπη μελέτη τα αποτελέσματα είναι διαφορετικά για τα δύο σενάρια, αλλά τα συμπεράσματα που μας ενδιαφέρουν είναι παρόμοια. Για αυτόν το λόγο θα γίνει αναλυτική μελέτη των δύο σεναρίων μόνο στη μελέτη της θερμοκρασίας $T_{ph,ex}$, όπου υπάρχει ουσιαστική διαφορά. Στην υπόλοιπη μελέτη θα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μόνο του πρώτου σεναρίου, και μόνο όπου κρίνεται απαραίτητο θα γίνεται σύγκριση με το δεύτερο σενάριο.

Κλείνοντας την εισαγωγική παράγραφο, αναφέρουμε ότι καθ'όλη τη διάρκεια της μελέτης απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή, ώστε σε καμία περίπτωση να μην έχουμε ιδιαιτέρως χαμηλές διαφορές θερμοκρασίας στα άκρα των εναλλακτών. Κατώτατο όριο διαφοράς θερμοκρασίας θεωρούνται οι 5-6°C.

Βασικά στοιχεία της εγκατάστασης(κοινά για κάθε σενάριο και μελέτη):

- Απώλειες πίεσης στους διάφορους εναλλάκτες (εκτός του ψυγείου) 0.1 Bar και για το θερμό και για το ψυχρό ρεύμα.
- Απώλειες πίεσης στο ψυγείο 0.01 Bar για κάθε ρεύμα.
- Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του στροβίλου 0.85.
- Βαθμός απόδοσης αντλίας 0.6.
- Διάφοροι μηχανικοί βαθμοί απόδοσης 0.98 και διάφοροι ηλεκτρικοί 0.99.
- Διαφορά θερμοκρασίας στο ψυχρό άκρο του υπερθερμαντή βιομάζας 10°C.
- Πίεση περιβάλλοντος 1 Bar και θερμοκρασία περιβάλλοντος 21°C.
- Βαθμός απόδοσης λέβητα βιομάζας 0.9, λόγος αέρα καύσης 1.2 και απώλειες πίεσης εντός του λέβητα 0.1 Bar.
- Ο αέρας καύσης και η βιομάζα εισέρχονται στο λέβητα σε θερμοκρασία και πίεση περιβάλλοντος.
- Πίεση εισόδου του νερού στο λέβητα βιομάζας 15 Bar για το R134a και 25 Bar για το R152a.
- Έξοδος του νερού ψύξης από το ψυγείο στους 30°C.
- Έξοδος του γεωθερμικού ρευστού από το ψυγείο στους 40°C.
- Είσοδος του νερού παραγωγής θερμικής ενέργειας στους 80°C και έξοδος αυτού στους 50°C.

- Διαφορά θερμοκρασίας στο ψυχρό άκρο του εναλλάκτη παραγωγής θερμικής ενέργειας 10°C.
- Πίεση εισόδου γεωθερμικού ρευστού 8 Bar.
- Παροχή μάζας γεωθερμικού ρευστού 100kg/s.

Τα υπόλοιπα στοιχεία που αλλάζουν σε κάθε μελέτη και σενάριο θα αναφέρονται ξεχωριστά σε κάθε περίπτωση.

Τύποι βασικών επιδόσεων του συστήματος:

- $P_{el,net} = P_{el,generator} - P_{el,motor}$, όπου οι ηλεκτρικές ισχύεις των ανεμιστήρων του θερμικού κυκλώματος υπερθέρμανσης με βιομάζας και του θερμικού κυκλώματος παραγωγής θερμικής ενέργειας αμελούνται.

$$\eta_{el} = \frac{P_{el,net}}{\dot{Q}_B + \dot{Q}_{geo}} = \frac{P_{el,net}}{\dot{m}_B \cdot Hu + \dot{m}_{geo} \cdot (h_{geo,in} - h_{geo,out})}$$

$$\eta_{total} = \frac{P_{el,net} + \dot{Q}_{th}}{\dot{Q}_B + \dot{Q}_{geo}} = \frac{P_{el,net} + \dot{Q}_{th}}{\dot{m}_B \cdot Hu + \dot{m}_{geo} \cdot (h_{geo,in} - h_{geo,out})}$$

$$\eta_u = \frac{P_{el,net} + \dot{Q}_{th}}{Exergy_{input}} = \frac{P_{el,net} + \dot{Q}_{th}}{\dot{m}_B \cdot Hu + \dot{m}_{geo} \cdot (h_{geo,in} - h_{ref} - T_{ref} \cdot (s_{geo,in} - s_{ref}))}$$

Ο πρώτος όρος υποδηλώνει την καθαρή ηλεκτρική ισχύ της εγκατάστασης, ο δεύτερος όρος τον βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης λαμβάνοντας υπόψη την ηλεκτρική ισχύ μόνο, ο τρίτος τύπος εκφράζει το συνολικό βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης, ενώ ο τέταρτος τύπος εκφράζει το βαθμό χρησιμοποίησης της εισερχόμενης ενέργειας, δηλαδή του καυσίμου και του γεωθερμικού ρευστού.

Ο διαχωρισμός μεταξύ του 2^{ου} και του 3^{ου} όρου γίνεται γιατί πρωτίστως μας ενδιαφέρει η εγκατάσταση και οι επιδόσεις της από τη σκοπιά βελτιστοποίησης της ηλεκτροπαραγωγής και όχι από τη σκοπιά της θερμικής παραγωγής. Προφανώς το αν υπάρχει η θερμική παραγωγή ή όχι δεν επηρεάζει την ηλεκτροπαραγωγή της εγκατάστασης.

Τέλος, στον τελευταίο όρο στον παρανομαστή θεωρήθηκε ότι η εξέργεια του εισερχόμενου καυσίμου(βιομάζας) είναι ίσο με τη κατώτερη θερμογόνο ικανότητα αυτού, κάτι το οποίο είναι ελάχιστα λάθος, όπως θα δούμε στην παράγραφο της εξέργειας.

3.2) Μελέτη θερμοκρασίας εξόδου από τον αναγεννητικό προθερμαντή (T_{ph,ex})

Στην παρούσα παράγραφο θα πραγματοποιήσουμε τη μελέτη της θερμοκρασίας εξόδου του οργανικού ρευστού από τον αναγεννητικό προθερμαντή, και συγκεκριμένα θα μελετήσουμε τη θερμοκρασία εξόδου του ψυχρού ρεύματος, το οποίο στη συνέχεια εισέρχεται στους γεωθερμικούς εναλλάκτες. Όπως θα φανεί στη μελέτη, αυτή η θερμοκρασία αυτή είναι πολύ σημαντική για μια τέτοια εγκατάσταση, είτε για απλή εγκατάσταση ORC, καθώς παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στις επιδόσεις της εγκατάστασης.

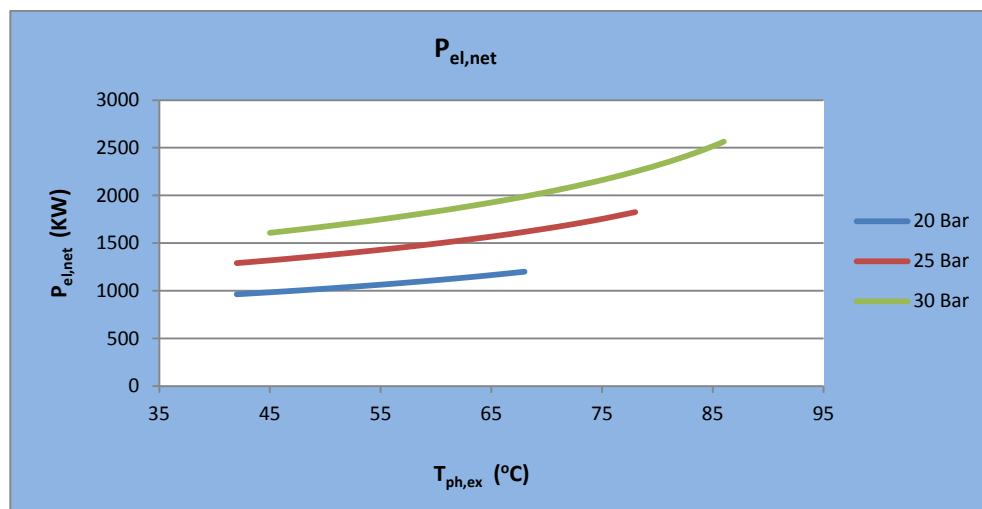
Σε αυτήν την παράγραφο θα κάνουμε ξεχωριστή μελέτη των δύο σεναρίων που αναφέρθηκαν παραπάνω, επειδή έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον η συγκριτική αξιολόγηση τους. Στις επόμενες παραγράφους, όμως, θα γίνεται αξιολόγηση μόνο του πρώτου σεναρίου, επειδή τα συμπεράσματα θα είναι παρόμοια και για το δεύτερο σενάριο. Απλά τα αποτελέσματα θα είναι διαφορετικά σαν απόλυτοι αριθμοί, αλλά τα συμπεράσματα θα είναι παρόμοια. Οπότε, θα κάνουμε σαφή τη διαφορά τους σε αυτήν την παράγραφο, όπου έγκειται η βασική τους διαφοροποίηση, και στη συνέχεια θα μελετάμε μόνο το πρώτο σενάριο. Η μοναδική διαφορά των δύο σεναρίων στα δεδομένα είναι ότι στο πρώτο σενάριο έχουμε σταθερή θερμοκρασία εξόδου του γεωθερμικού ρευστού στο περιβάλλον σε θερμοκρασία 90°C, ενώ στη δεύτερη έχουμε σταθερή διαφορά θερμοκρασίας 15°C στο ψυχρό άκρο του προθερμαντή με γεωθερμικό ρευστό. Αυτά είναι σταθερά σε όλες τις παρακάτω μελέτες.

3.2.1) Μελέτη για σταθερή απορροφόμενη θερμότητα από το γεωθερμικό ρευστό

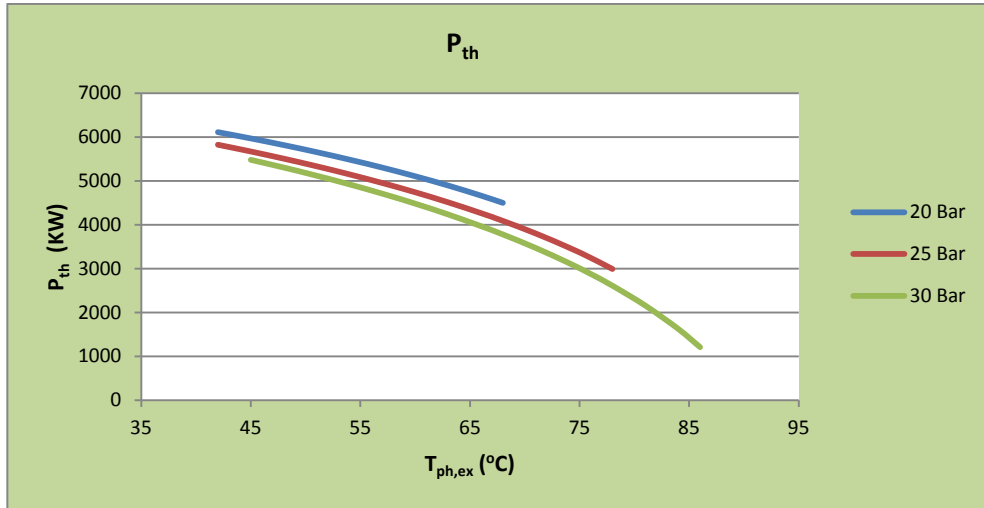
Τα κύρια στοιχεία της εγκατάστασης που θα χρησιμοποιήσουμε στη προσομοίωση είναι τα εξής:

- Συνθήκες εισόδου του γεωθερμικού ρευστού στην εγκατάσταση όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 3.1.
- Θερμοκρασία εξόδου του γεωθερμικού ρευστού στο περιβάλλον 90°C.
- Θερμοκρασία εξόδου του οργανικού μέσου από τον υπερθερμαντή με γεωθερμικό ρευστό 100°C.
- Θερμοκρασία υπερθέρμανσης για το R134a 180°C .
- Θερμοκρασία υπερθέρμανσης για το R152a 210°C.
- Μέση σύσταση βιομάζας.

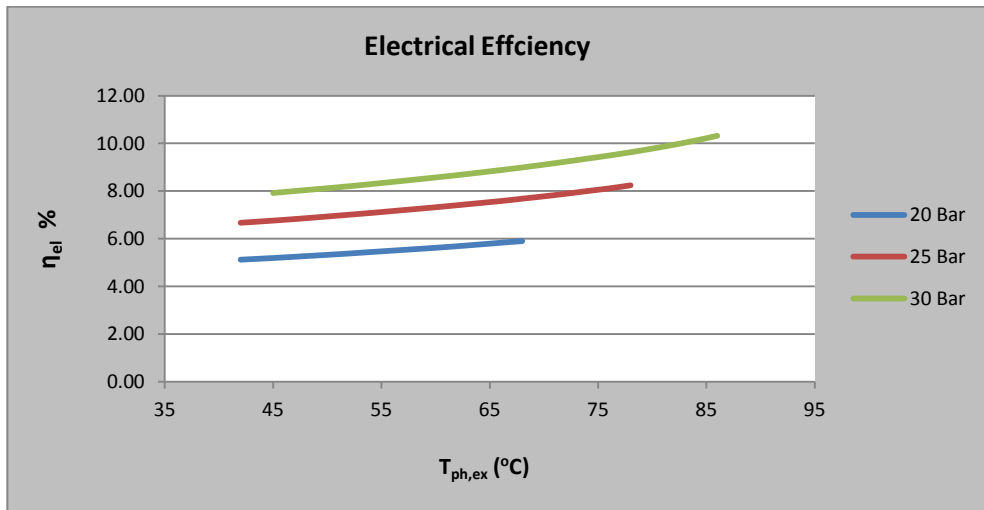
Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα των κύριων μεταβλητών του συστήματος συναρτήσει της θερμοκρασίας $T_{ph,ex}$ αρχικά για το R134a και στη συνέχεια τα σημαντικότερα διαγράμματα για το R152a.



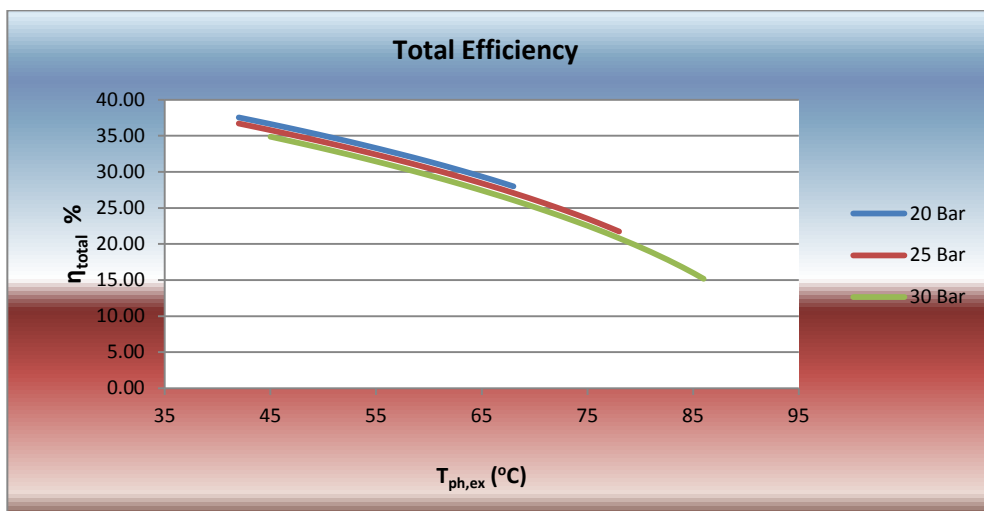
Εικόνα 3.4: Διάγραμμα καθαρής ηλεκτρικής ισχύος συναρτήσει της $T_{ph,ex}$ για διάφορες πιέσεις και εργαζόμενο μέσο R134a



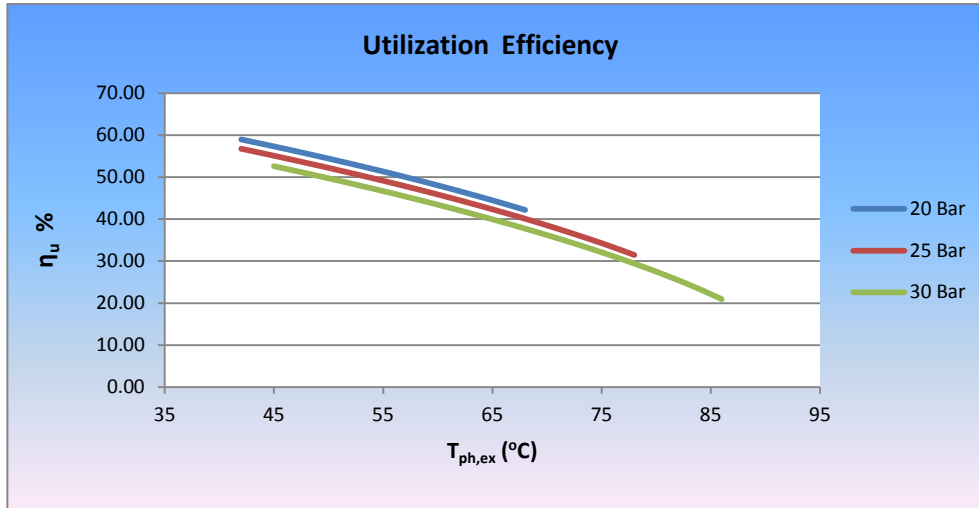
Εικόνα 3.5: Διάγραμμα θερμικής ισχύος συναρτήσει της θερμοκρασίας $T_{ph,ex}$ για διάφορες πιέσεις και εργαζόμενο μέσο R134a



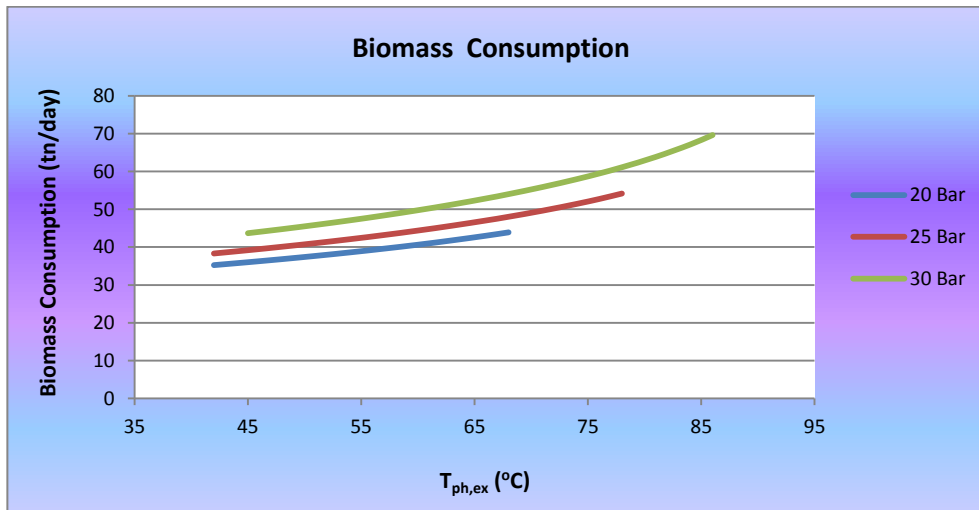
Εικόνα 3.6: Διάγραμμα ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης συναρτήσει της θερμοκρασίας $T_{ph,ex}$ για διάφορες πιέσεις και για εργαζόμενο μέσο R134a



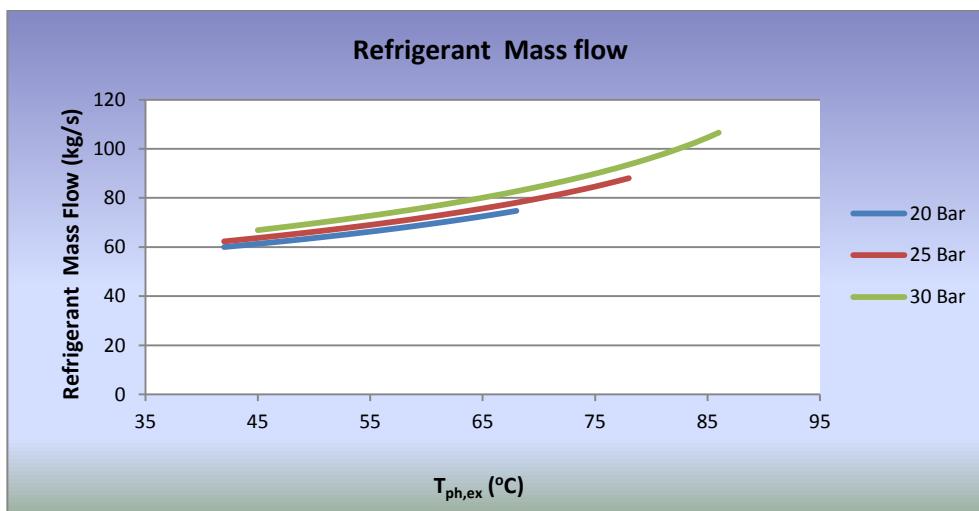
Εικόνα 3.7: Διάγραμμα ολικού βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης συναρτήσει της θερμοκρασίας $T_{ph,ex}$ για διάφορες πιέσεις και για εργαζόμενο μέσο R134a



Εικόνα 3.8: Διάγραμμα βαθμού χρησιμοποίησης συναρτήσει της θερμοκρασίας $T_{ph,ex}$ για διάφορες πιέσεις και για εργαζόμενο μέσο R134a



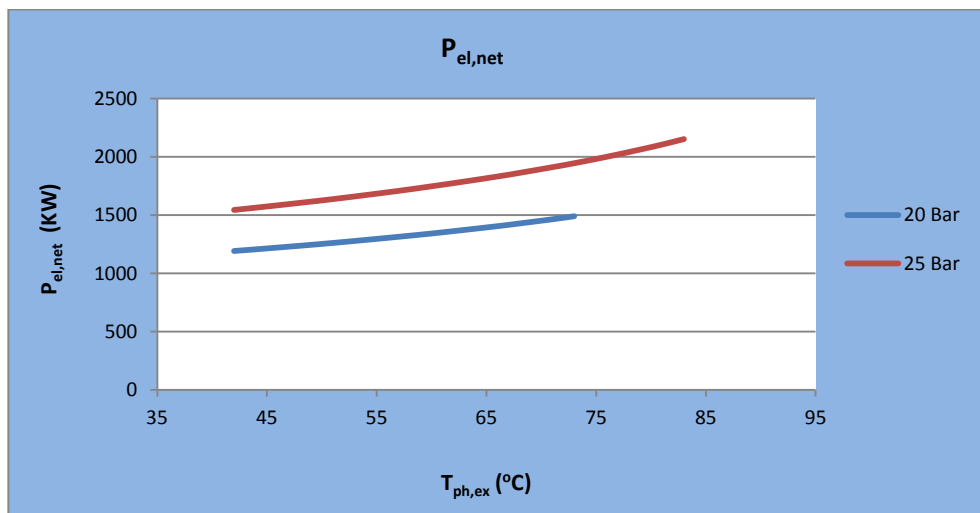
Εικόνα 3.9: Διάγραμμα κατανάλωσης βιομάζας συναρτήσει της θερμοκρασίας $T_{ph,ex}$ για διάφορες πιέσεις και εργαζόμενο μέσο R134a



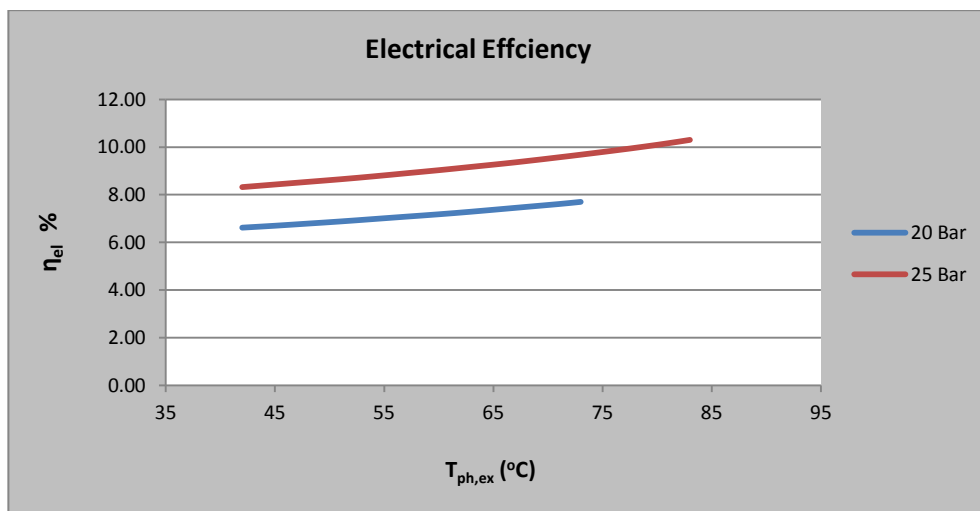
Εικόνα 3.10: Διάγραμμα παροχής εργαζόμενου μέσου R134a συναρτήσει της θερμοκρασίας $T_{ph,ex}$ για διάφορες πιέσεις

Τα διαγράμματα είναι παρόμοια για το R152a, και θα παρουσιάσουμε μόνο τα σημαντικότερα παρακάτω. Υπενθυμίζουμε πως πρωτίστως μας ενδιαφέρει η αύξηση της ηλεκτροπαραγωγής και δευτερευόντως ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης. Οι υπόλοιποι παράγοντες στους οποίους εμπλέκεται η θερμική ισχύς δεν μας ενδιαφέρουν αντίστοιχα, επειδή η παραγωγή θερμικής ισχύος είτε από γεωθερμία είτε από βιομάζα δύναται να γίνει ξεχωριστά, αν επιθυμούμε σε ξεχωριστή εγκατάσταση. Απλώς, επειδή έχουμε περίσσεια θερμικής ισχύος στο οργανικό μέσο στην έξοδο του στροβίλου πραγματοποιούμε και παραγωγή θερμικής ισχύος, η οποία όπως αναφέρθηκε δεν επηρεάζει τα “ηλεκτρικά” μεγέθη.

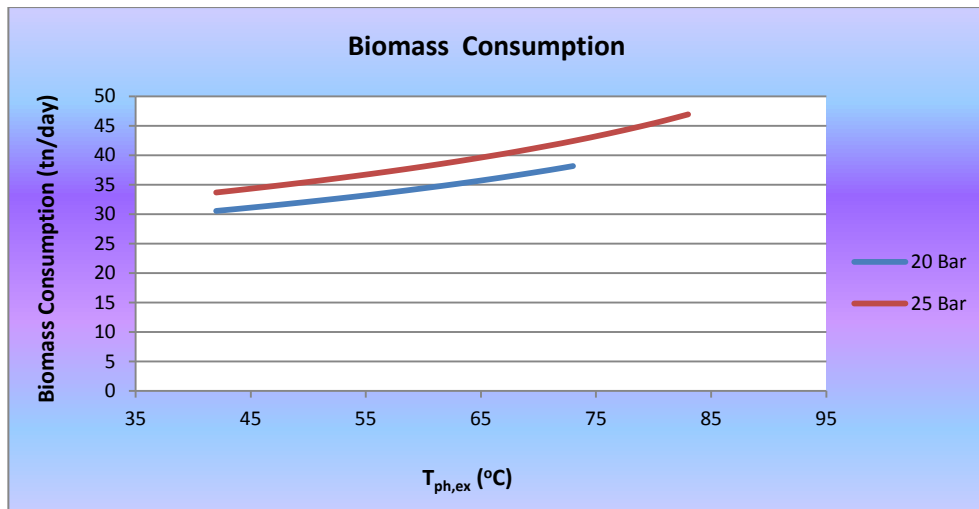
Επίσης, για λόγους συντομίας, παρουσιάζονται παρακάτω τα διαγράμματα των βασικότερων μεγεθών για εργαζόμενο μέσο R152a, δεδομένου ότι τα υπόλοιπα είναι αντίστοιχα με αυτά του R134a.



Εικόνα 3.11: Διάγραμμα καθαρής ηλεκτρικής ισχύος συναρτήσει της θερμοκρασίας $T_{ph,ex}$ για διάφορες πιέσεις και εργαζόμενο μέσο R152a



Εικόνα 3.12: Διάγραμμα ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης συναρτήσει της θερμοκρασίας $T_{ph,ex}$ για διάφορες πιέσεις και εργαζόμενο μέσο R152a



Εικόνα 3.13: Κατανάλωση βιομάζας συναρτήσει της θερμοκρασίας $T_{ph,ex}$ για διάφορες πιέσεις και εργαζόμενο μέσο R152a

Σημείωση: Λόγω των δεδομένων του προβλήματος στο πρώτο σενάριο είναι δυνατή η λειτουργία της εγκατάστασης σε πίεση έως 30 Bar, όταν έχουμε εργαζόμενο μέσο R134a, είτε έως 25 Bar αν έχουμε εργαζόμενο μέσο R152a. Στο δεύτερο σενάριο είναι δυνατή η λειτουργία της εγκατάστασης έως 35 και 30 Bar αντίστοιχα.

Παρατηρώντας τα διαγράμματα εξάγουμε ορισμένα πολύ χρήσιμα συμπεράσματα. Από την εικόνα 3.10 παρατηρούμε ότι αυξανόμενης της $T_{ph,ex}$ έχουμε αύξηση της παροχής εργαζόμενου μέσου. Αυτό συμβαίνει επειδή η απορροφόμενη θερμότητα από το γεωθερμικό ρευστό είναι σταθερή και αυξανόμενης της $T_{ph,ex}$ ελαττώνεται η ενέργεια ανά μονάδα μάζας που απαιτείται να απορροφήσει το οργανικό μέσο από το γεωθερμικό ρευστό, αφού η έξοδος από το γεωθερμικό υπερθερμαντή είναι σταθερή στους 100°C. Άρα, για να διατηρηθεί σταθερή η απορροφόμενη θερμότητα από το γεωθερμικό ρευστό αυξάνεται η παροχή μάζας του εργαζόμενου μέσου. Επίσης, το γεγονός ότι η παροχή εργαζόμενου μέσου αυξάνεται ελαφρά με την πίεση υποδηλώνει ότι αυξανόμενης της πίεσης απαιτείται μικρότερη πρόσδοση θερμότητας για ίδια αύξηση θερμοκρασίας.

Σαν άμεση συνέπεια των παραπάνω, προκύπτει η εικόνα 3.9 για R134a, και αντίστοιχα η εικόνα 3.13 για R152a, οι οποίες παρουσιάζουν την κατανάλωση βιομάζας συναρτήσει της θερμοκρασίας $T_{ph,ex}$. Δεδομένου ότι η θερμοκρασία εισόδου του οργανικού μέσου στον υπερθερμαντή βιομάζας είναι σταθερή στους 100°C και η θερμοκρασία εξόδου είναι επίσης σταθερή στους 180°C για R134a, και 210°C για R152a, άρα η απαιτούμενη πρόσδοση θερμότητας ανά μονάδα μάζας του οργανικού μέσου είναι σταθερή. Αυτό συνεπάγεται ότι η παροχή του εργαζόμενου μέσου είναι ανάλογη της προσδιδόμενης θερμότητας, άρα και της καταναλισκόμενης βιομάζας.

Από τις εικόνες 3.4 και 3.11 παρατηρούμε ότι η καθαρή ηλεκτρική ισχύς της εγκατάστασης αυξάνεται, αυξανόμενης της $T_{ph,ex}$. Αυτό εξηγείται εύκολα, αν λάβουμε υπόψη μας το γεγονός ότι η εκτόνωση στο στρόβιλο γίνεται πρακτικά μεταξύ των ιδίων πιέσεων, ανεξαρτήτως της $T_{ph,ex}$, άρα η απορροφόμενη από το στρόβιλο ενέργεια ανά μονάδα μάζας του εργαζόμενου μέσου είναι σταθερή. Εφόσον, όμως, είδαμε ότι αυξανόμενης της $T_{ph,ex}$ έχουμε αύξηση της παροχής εργαζόμενου μέσου, αντίστοιχα θα έχουμε και αύξηση της καθαρής ηλεκτρικής ισχύος.

Επίσης, παρατηρούμε ότι η καθαρή ηλεκτρική ισχύς της εγκατάστασης αυξάνεται κατά πολύ όσο αυξάνεται η υψηλή πίεση λειτουργίας, γεγονός απολύτως φυσιολογικό, αφού η χαμηλή πίεση λειτουργίας είναι σταθερή και καθορίζεται από τη θερμοκρασία συμπύκνωσης στο ψυγείο. Άρα, αυξανόμενης της υψηλής πίεσης λειτουργίας, έχουμε αύξηση του λόγου πίεσης του στρόβιλου, άρα αύξηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος του στρόβιλου. Προφανώς, το έργο της αντλίας για ανύψωση της πίεσης μεταξύ των ιδίων

πιέσεων, δεν είναι εξίσου υψηλό, άρα έχουμε αύξηση της καθαρής ηλεκτρικής ισχύος της εγκατάστασης.

Στη συνέχεια, από τις εικόνες 3.6 και 3.12 παρατηρούμε ότι αυξανόμενης της $T_{ph,ex}$ έχουμε μια μικρή αύξηση του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης. Λαμβάνοντας υπόψη μας τον τύπο του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης και τα όσα είπαμε στις προηγούμενες παραγράφους, παρατηρούμε ότι έχουμε αύξηση του αριθμητή(καθαρή ηλεκτρική ισχύς), αλλά και του παρανομαστή(αύξηση κατανάλωσης βιομάζας). Προφανώς, οι εικόνες αυτές μας υποδηλώνουν ότι η αύξηση της καθαρής ηλεκτρικής ισχύος υπερिशύει της αύξησης της προσδιδόμενης θερμότητας, λόγω κατανάλωσης βιομάζας. Βέβαια, σημαντικό ρόλο σε αυτό, παίζει και η απορροφόμενη θερμότητα από το γεωθερμικό ρευστό, μια ποσότητα η οποία επίσης είναι στον παρανομαστή, και η οποία διατηρείται σταθερή.

Από την εικόνα 5 παρατηρούμε ότι η θερμική ισχύς της εγκατάστασης για άλλες χρήσεις μειώνεται, ενώ αυξάνεται η $T_{ph,ex}$. Αυτό συμβαίνει, επειδή για την ίδια πίεση λειτουργίας, η εκτόνωση του στρόβιλου είναι στην ίδια θερμοκρασία ανεξαρτήτως της θερμοκρασίας $T_{ph,ex}$, επειδή γίνεται μεταξύ των ίδιων πιέσεων, και επειδή απορροφάται μεγαλύτερη θερμότητα στον αναγεννητικό προθερμαντή για αύξηση της $T_{ph,ex}$, το οργανικό μέσο έχει μικρότερη διαθέσιμη θερμότητα να προσδώσει για θερμικές χρήσεις. Επίσης, όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, αυξανόμενης της πίεσης λειτουργίας, δηλαδή αυξανόμενου του λόγου πίεσης της εγκατάστασης, έχουμε αύξηση της ηλεκτρικής ισχύος, άρα αυξάνεται η ενέργεια που απορροφάται από τον στρόβιλο. Άρα, η εκτόνωση του οργανικού μέσου είναι σε μικρότερη θερμοκρασία, και για σταθερή $T_{ph,ex}$ προκύπτει μικρότερη θερμοκρασία διαθέσιμη για θερμικές χρήσεις αυξανόμενης της πίεσης, άρα και μικρότερη διαθέσιμη θερμική ισχύς.

Αν παρατηρήσουμε πιο προσεκτικά τα διαγράμματα της καθαρής ηλεκτρικής ισχύος και της θερμικής ισχύος παρατηρούμε ότι η μείωση της θερμικής ισχύος είναι πολύ μεγαλύτερη της αύξησης της ηλεκτρικής ισχύος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, να υπερिशύει η μείωση της θερμικής ισχύος στα μεγέθη στα οποία εισέρχεται, όπως ο ολικός βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης και ο βαθμός χρησιμοποίησης. Έτσι προκύπτουν τα διαγράμματα των εικόνων 7 και 8, όπου παρατηρείται ραγδαία μείωση του ολικού βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης και του βαθμού χρησιμοποίησης αντίστοιχα. Όπως αναφέραμε, προηγουμένως, η θερμική ισχύς μειώνεται με αύξηση της πίεσης λειτουργίας, άρα αντίστοιχα έχουμε μείωση του ολικού βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης, αλλά και του βαθμού χρησιμοποίησης, αυξανόμενης της πίεσης λειτουργίας.

Βέβαια, όπως αναφέραμε προηγουμένως, αυτό που μας ενδιαφέρει πρωτίστως είναι η αύξηση της ηλεκτροπαραγωγής και δευτερευόντως ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης. Μεγέθη όπως η θερμική ισχύς, και όλα τα άλλα στα οποία εμπλέκεται, δεν μας ενδιαφέρουν τόσο, καθώς η παραγωγή θερμικής ισχύος είναι μια συμπληρωματική λειτουργία της εγκατάστασης, η οποία ενδέχεται να μην συμβαίνει καθόλου αν δεν απαιτείται, ή μπορεί απλά να συμβαίνει σε μία ξεχωριστή εγκατάσταση.

Άρα, από την παρούσα μελέτη εξάγουμε το συμπέρασμα ότι η θερμοκρασία εξόδου από τον αναγεννητικό προθερμαντή $T_{ph,ex}$, συμφέρει να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη έτσι ώστε να έχουμε όσο το δυνατόν μεγαλύτερη αύξηση της καθαρής ηλεκτρικής ισχύος, αλλά και του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης.

Βέβαια, η μελέτη έδειξε ότι στις μεγαλύτερες πιέσεις δεν είναι δυνατόν να έχουμε τις μέγιστες δυνατές τιμές της $T_{ph,ex}$ επειδή προκύπτουν πολύ χαμηλές διαφορές θερμοκρασίας στα άκρα των γεωθερμικών εναλλακτών.

Εν τέλει, οι τιμές που προκύπτουν για την θερμοκρασία εξόδου από τον αναγεννητικό προθερμαντή $T_{ph,ex}$ είναι οι εξής:

➤ **R134a:** 20Bar: 68°C 25Bar: 75°C 30Bar: 78°C

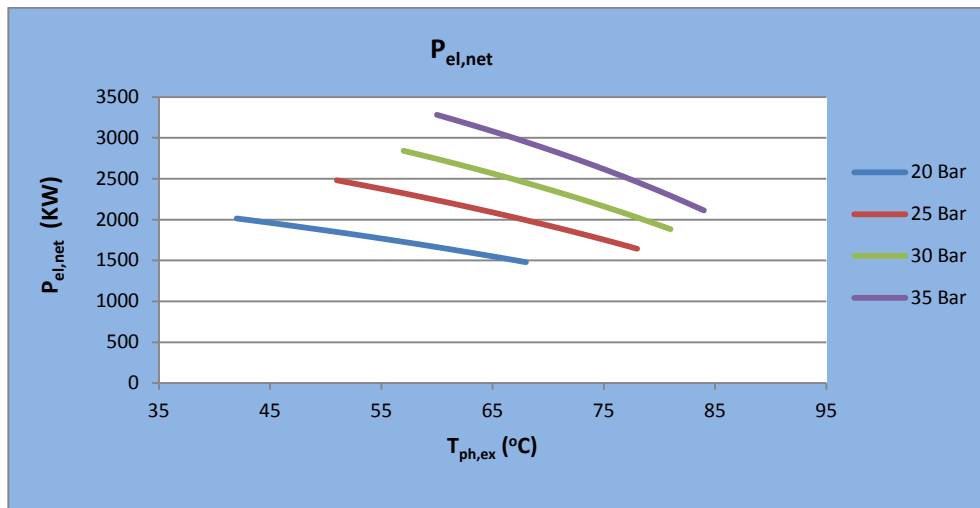
- **R152a:** 20Bar: 71°C 25Bar: 79°C

3.2.2) Μελέτη για σταθερή διαφορά θερμοκρασίας στο ψυχρό άκρο του γεωθερμικού προθερμαντή

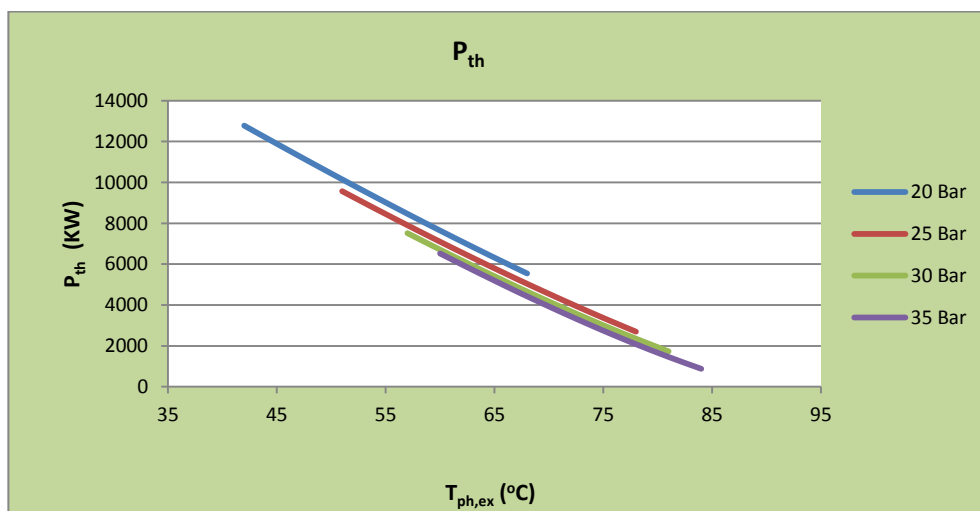
Τα κύρια στοιχεία της εγκατάστασης είναι τα εξής:

- Συνθήκες εισόδου του γεωθερμικού ρευστού στην εγκατάσταση όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 3.1.
- Διαφορά θερμοκρασίας στο ψυχρό άκρο του γεωθερμικού προθερμαντή
- Θερμοκρασία εξόδου του οργανικού μέσου από τον υπερθερμαντή με γεωθερμικό ρευστό 100°C.
- Θερμοκρασία υπερθέρμανσης για το R134a 180°C .
- Θερμοκρασία υπερθέρμανσης για το R152a 210°C.
- Μέση σύσταση βιομάζας.

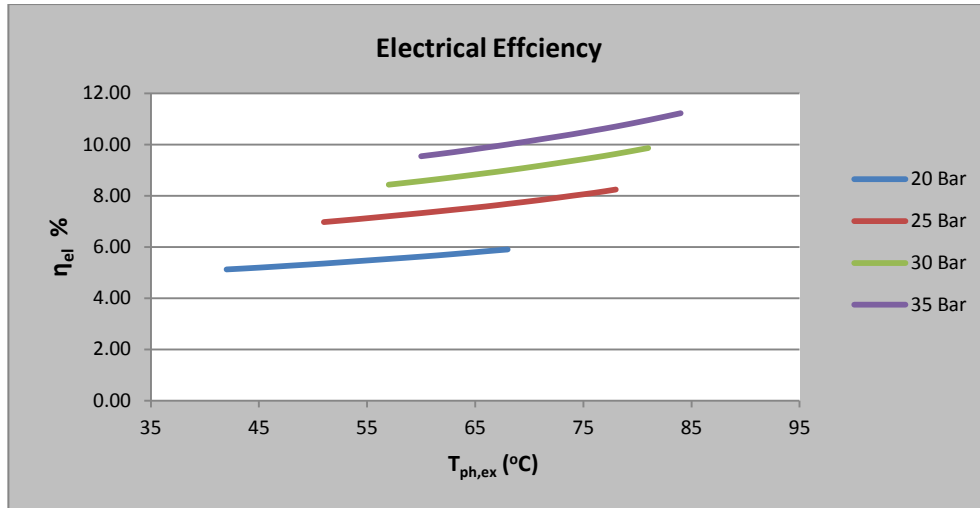
Παρακάτω παρουσιάζονται σε μορφή διαγραμμάτων τα αποτελέσματα της μελέτης για το R134a, όπως και στην παράγραφο 3.2.1.



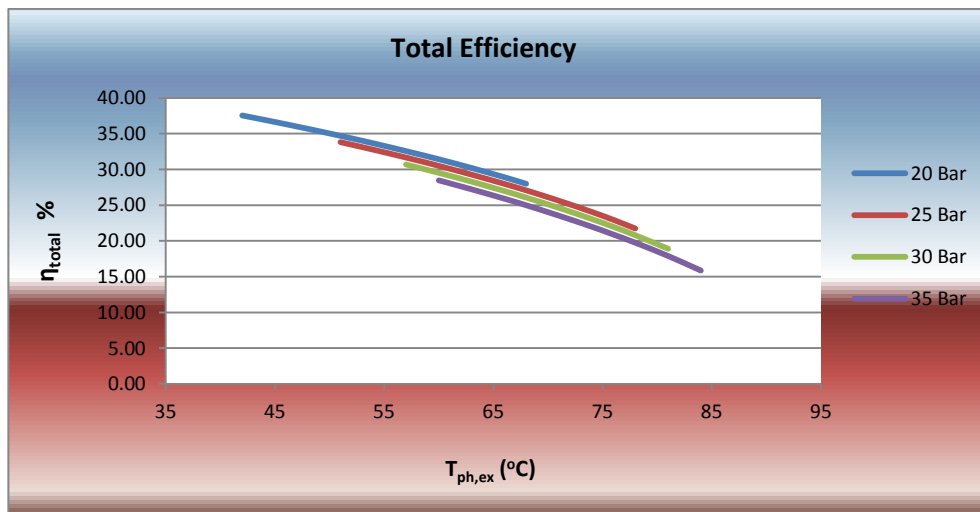
Εικόνα 3.14: Διάγραμμα καθαρής ηλεκτρικής ισχύος συναρτήσει της $T_{ph,ex}$ για διάφορες πιέσεις και εργαζόμενο μέσο R134a



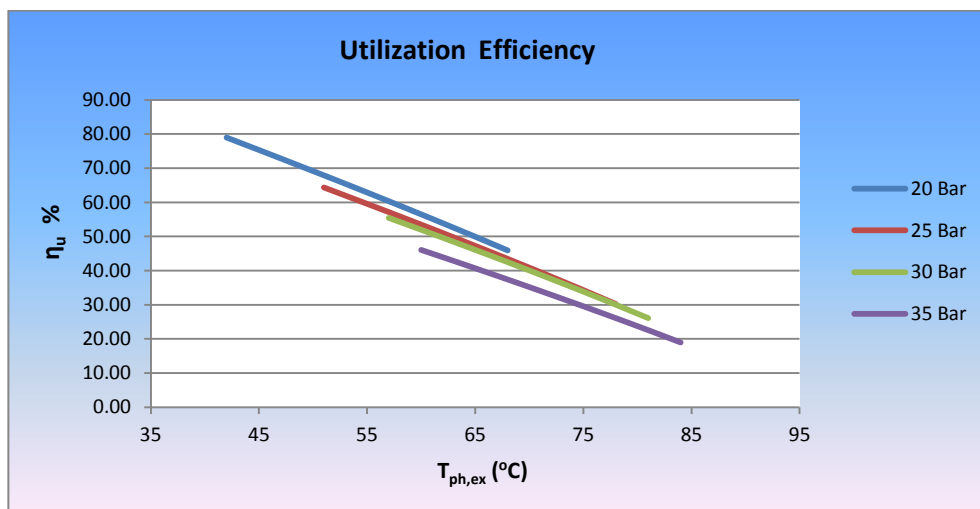
Εικόνα 3.15: Διάγραμμα θερμικής ισχύος συναρτήσει της θερμοκρασίας $T_{ph,ex}$ για διάφορες πιέσεις και εργαζόμενο μέσο R134a



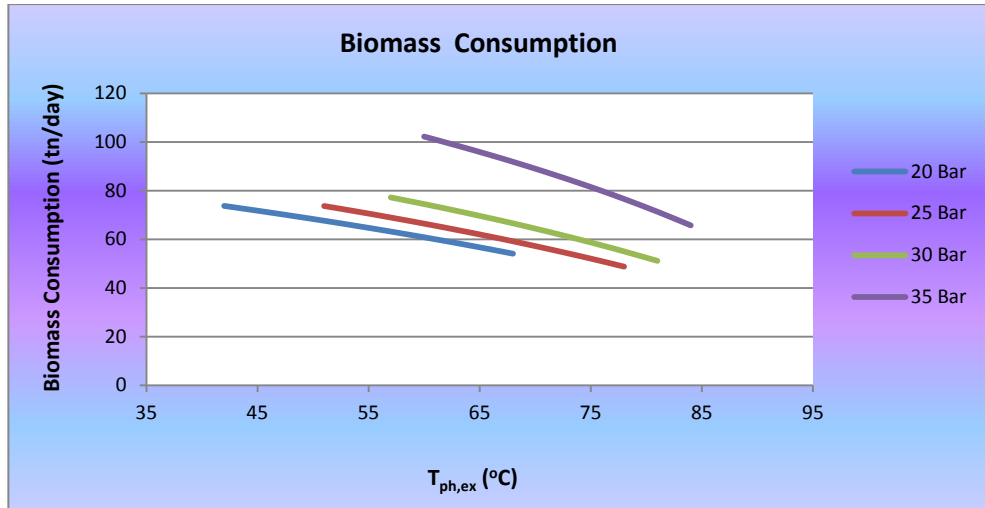
Εικόνα 3.16: Διάγραμμα ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης συναρτήσει της θερμοκρασίας $T_{ph,ex}$ για διάφορες πιέσεις και για εργαζόμενο μέσο R134a



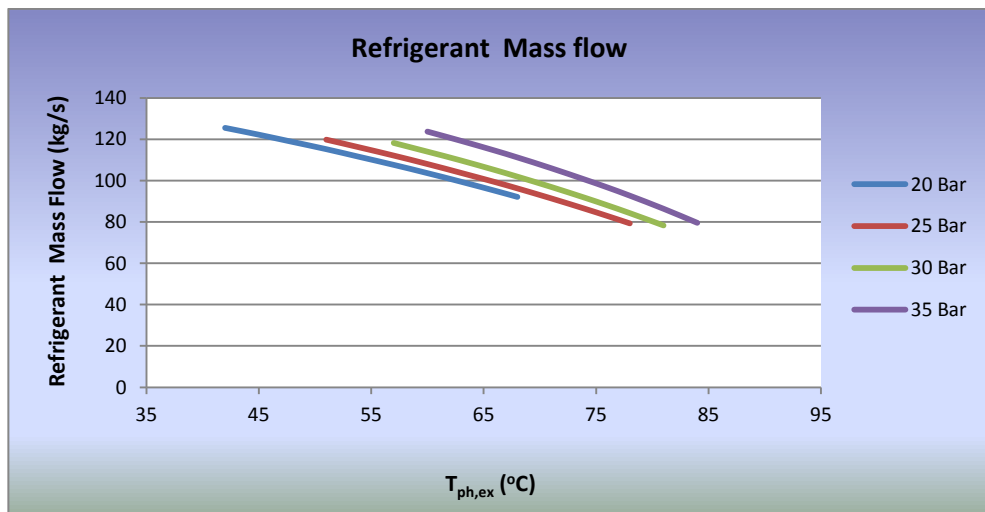
Εικόνα 3.17: Διάγραμμα ολικού βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης συναρτήσει της θερμοκρασίας $T_{ph,ex}$ για διάφορες πιέσεις και για εργαζόμενο μέσο R134a



Εικόνα 3.18: Διάγραμμα βαθμού χρησιμοποίησης συναρτήσει της θερμοκρασίας $T_{ph,ex}$ για διάφορες πιέσεις και για εργαζόμενο μέσο R134a

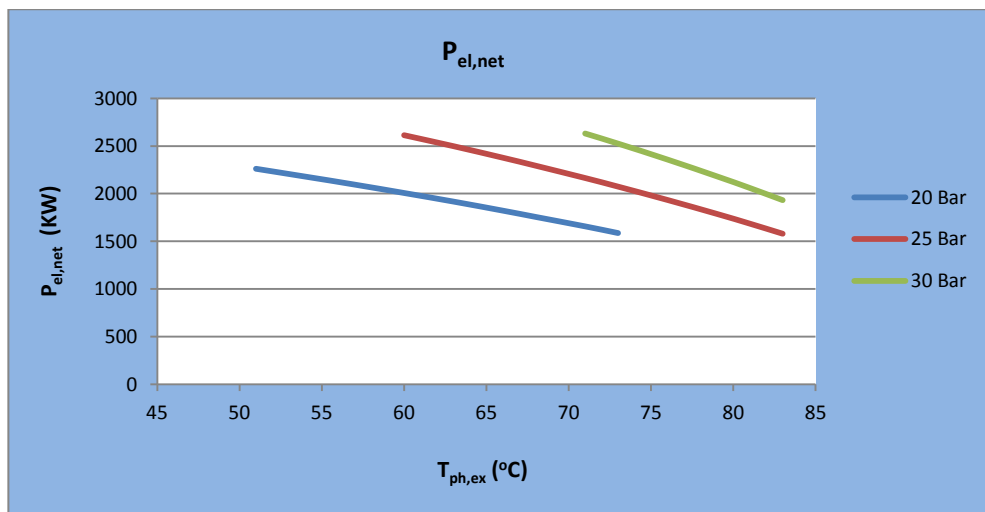


Εικόνα 3.19: Διάγραμμα κατανάλωσης βιομάζας συναρτήσει της θερμοκρασίας $T_{ph,ex}$ για διάφορες πιέσεις και εργαζόμενο μέσο R134a

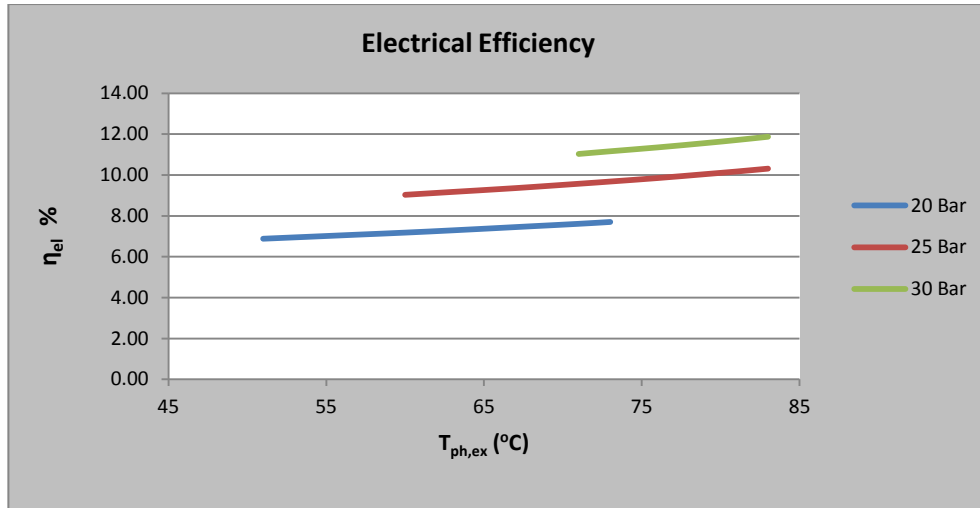


Εικόνα 3.20: Διάγραμμα παροχής εργαζόμενου μέσου R134a συναρτήσει της θερμοκρασίας $T_{ph,ex}$ για διάφορες πιέσεις

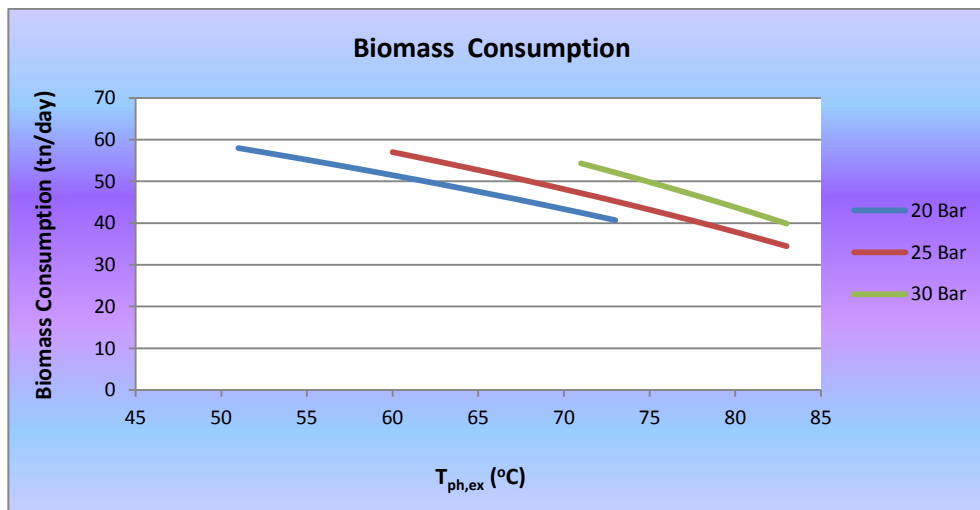
Τα αντίστοιχα κυριότερα διαγράμματα για εργαζόμενο μέσο R152a παρουσιάζονται παρακάτω.



Εικόνα 3.21: Διάγραμμα καθαρής ηλεκτρικής ισχύος συναρτήσει της $T_{ph,ex}$ για διάφορες πιέσεις και εργαζόμενο μέσο R152a



Εικόνα 3.22: Διάγραμμα ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης συναρτήσει της θερμοκρασίας $T_{ph,ex}$ για διάφορες πιέσεις και για εργαζόμενο μέσο R152a



Εικόνα 3.23: Διάγραμμα κατανάλωσης βιομάζας συναρτήσει της θερμοκρασίας $T_{ph,ex}$ για διάφορες πιέσεις και εργαζόμενο μέσο R152a

Σημείωση: Παρατηρούμε, όπως τονίστηκε και στην παράγραφο 3.2.1, ότι στο δεύτερο αυτό σενάριο είναι δυνατή η λειτουργία της εγκατάστασης μέχρι την πίεση των 35Bar για εργαζόμενο μέσο R134a, και μέχρι 30Bar για εργαζόμενο μέσο R152a.

Σε αυτό το δεύτερο σενάριο παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα είναι πολύ διαφορετικά. Ανάλογα με την αυξομείωση της θερμοκρασίας $T_{ph,ex}$ που μελετάμε, έχουμε αυξομείωση της θερμοκρασίας εξόδου του γεωθερμικού ρευστού στο περιβάλλον, άρα έχουμε αντίστοιχα και αυξομείωση της απορροφόμενης θερμότητας από το γεωθερμικό ρευστό. Βέβαια, ενώ αυξάνεται η $T_{ph,ex}$, δηλαδή ενώ μειώνεται η απαιτούμενη θερμότητα ανά μονάδα μάζας που απαιτείται για αύξηση της θερμοκρασίας του εργαζόμενου μέσου στους 100°C, αντίστοιχα μειώνεται και η απορροφόμενη θερμότητα από το γεωθερμικό ρευστό. Άρα, έχουμε δύο αντικρουόμενους παράγοντες ως προς τον προσδιορισμό της παροχής οργανικού μέσου. Από την εικόνα 3.20 προκύπτει ότι έχουμε μείωση της παροχής του εργαζόμενου μέσου όταν αυξάνεται η $T_{ph,ex}$, δηλαδή υπερσχύει η μείωση της απορροφόμενης θερμότητας από το γεωθερμικό ρευστό. Η αύξηση της παροχής όταν έχουμε αύξηση της πίεσης λειτουργίας οφείλεται, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως στην παράγραφο 3.2.1, στο γεγονός ότι αυξανόμενη της πίεσης λειτουργίας απαιτείται λιγότερη θερμότητα ανά μονάδα μάζας εργαζόμενου μέσου για την ίδια αύξηση θερμοκρασίας.

Με ακριβώς τον ίδιο συλλογισμό όπως και στην παράγραφο 3.2.1., αιτιολογείται η μείωση της καταναλισκόμενης βιομάζας με αύξηση της θερμοκρασίας $T_{ph,ex}$, όπως φαίνεται και από τις εικόνες 3.19 και 3.23, λόγω της αντίστοιχης μείωσης της παροχής εργαζόμενου μέσου. Αντίστοιχα, έχουμε και αύξηση της καταναλισκόμενης βιομάζας με αύξηση της πίεσης λειτουργίας.

Λόγω της μείωσης της παροχής εργαζόμενου μέσου, και λόγω του ότι η εκτόνωση στο στρόβιλο είναι ανεξάρτητη της θερμοκρασίας $T_{ph,ex}$ και απορροφά ίδιο έργο ανά μονάδα μάζας από το ρευστό, προκύπτει ότι αυξανόμενης της θερμοκρασίας $T_{ph,ex}$ έχουμε μείωση της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος του στρόβιλου (εικόνα 3.21). Αντίστοιχα, όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 3.2.1, έχουμε αύξηση της καθαρής ηλεκτρικής ισχύος με αύξηση της πίεσης λειτουργίας.

Παρατηρούμε, ότι και στα δύο σενάρια υπάρχει άμεση και ανάλογη συσχέτιση της παροχής εργαζόμενου μέσου, με την κατανάλωση βιομάζας και με την καθαρή ηλεκτρική ισχύ της εγκατάστασης, γεγονός απολύτως φυσιολογικό.

Στη συνέχεια, όσον αφορά τον ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης παρατηρούμε από τον ορισμό του ότι αυξανόμενης της θερμοκρασίας $T_{ph,ex}$ έχουμε μείωση του αριθμητή(καθαρή ηλεκτρική ισχύς), αλλά και ταυτόχρονη μείωση και των δύο όρων του παρονομαστή (απορροφώμενη θερμότητα από το γεωθερμικό ρευστό-προσδιδόμενη θερμότητα από καύση βιομάζας). Όπως, παρατηρούμε από τις εικόνες 3.16 και 3.22, η μείωση του παρονομαστή υπερσχύει, άρα έχουμε αύξηση του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης, παρότι έχουμε μείωση της καθαρής ηλεκτρικής ισχύος. Αντίστοιχα με το πρώτο σενάριο, έχουμε αύξηση του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης με αύξηση της πίεσης λειτουργίας, κάτι απολύτως αναμενόμενο.

Επίσης, με τον ίδιο συλλογισμό όπως στην παράγραφο 3.2.1 και βάσει των εικόνων 3.15, 3.17, 3.18 συμπεραίνουμε ότι αυξανόμενης της θερμοκρασίας $T_{ph,ex}$ έχουμε μείωση της παραγόμενης θερμικής ισχύος της εγκατάστασης, άρα συνακόλουθα μείωση του ολικού βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης και μείωση του βαθμού χρησιμοποίησης.

Βέβαια, όπως αναφέραμε και προηγουμένως, στη μελέτη αυτή μας ενδιαφέρει η καθαρή ηλεκτρική ισχύς και ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης. Σε αυτό το σενάριο, όμως, παρατηρούμε ότι η καθαρή ηλεκτρική ισχύς και ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης, έχουν αντίστροφη συμπεριφορά αυξανόμενης της $T_{ph,ex}$ σε αντίθεση με το πρώτο σενάριο όπου παρουσίαζαν ταυτόχρονη αύξηση. Για αυτόν το λόγο σε αυτό το σενάριο οι τελικές τιμές των θερμοκρασιών στις εγκαταστάσεις θα σταθεροποιηθεί σε κάποιες ενδιάμεσες τιμές, ούτως ώστε να έχουμε στάθμιση της μείωσης της ηλεκτροπαραγωγής με την αύξηση του βαθμού απόδοσης.

Οι τελικές τιμές της θερμοκρασίας $T_{ph,ex}$ οι οποίες δεν προκαλούν προβλήματα στις διαφορές θερμοκρασίας στα άκρα των εναλλακτών, ύστερα από την αντίστοιχη μελέτη, είναι οι εξής:

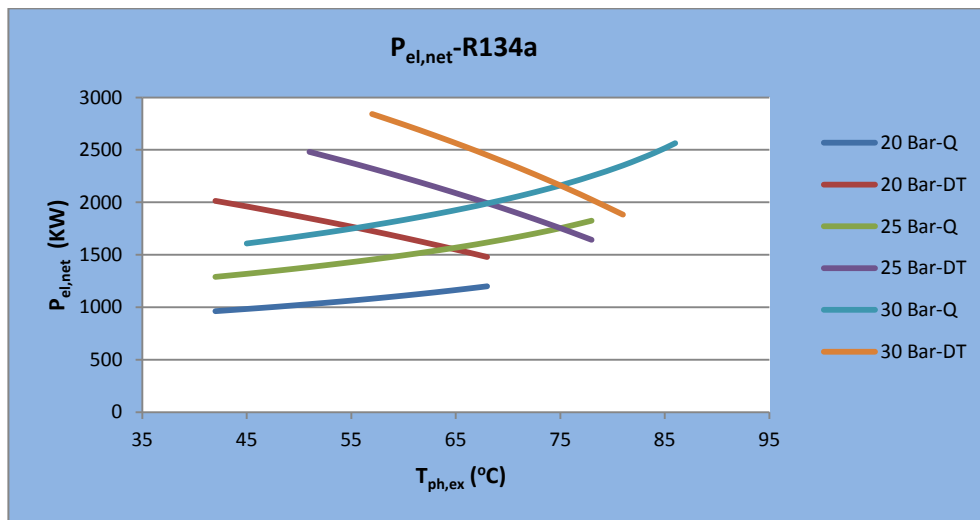
➤ R134a:	20Bar: 56°C	25Bar: 65°C	30Bar: 72°C	35Bar: 78°C
➤ R152a:	20Bar: 64°C	25Bar: 74°C	30Bar: 80°C	

Όπως παρατηρούμε, οι θερμοκρασίες αυτές είναι χαμηλότερες από τις αντίστοιχες θερμοκρασίες του πρώτου σεναρίου.

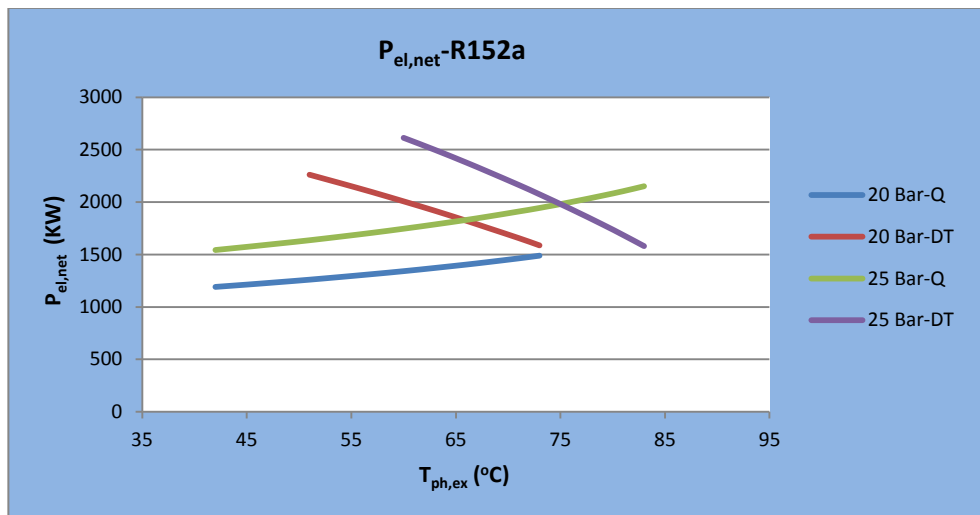
3.2.3) Συγκριτική αξιολόγηση των δύο σεναρίων

Σε αυτό το σημείο, και προτού συνεχίσουμε τη μελέτη μας, έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον να δούμε μια συγκριτική αξιολόγηση των δύο αυτών σεναρίων σε ορισμένα συγκεντρωτικά διαγράμματα των βασικών μεγεθών που μας ενδιαφέρουν. Με αυτή τη σύγκριση, αλλά και με ορισμένα στοιχεία που θα αναφερθούν στη συνέχεια θα γίνει άμεσα αντιληπτό για ποιόν λόγο εξετάζουμε και τα δύο αυτά σενάρια.

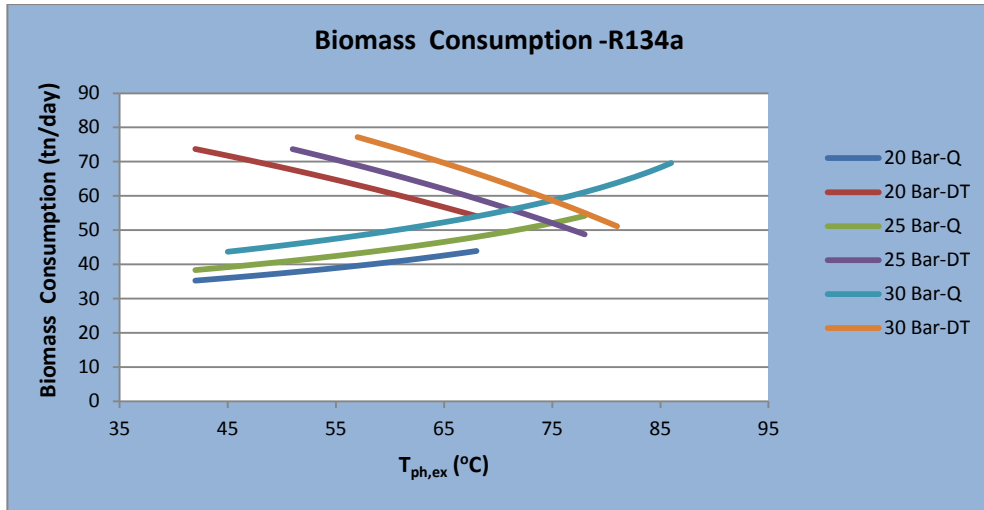
Σημειώνεται ότι στα παρακάτω διαγράμματα συμβολίζουμε με Q το πρώτο σενάριο, της σταθερής απορροφόμενης θερμότητας από το γεωθερμικό ρευστό, και με DT το δεύτερο σενάριο, της σταθερής διαφοράς θερμοκρασίας στο ψυχρό άκρο του γεωθερμικού προθερμαντή.



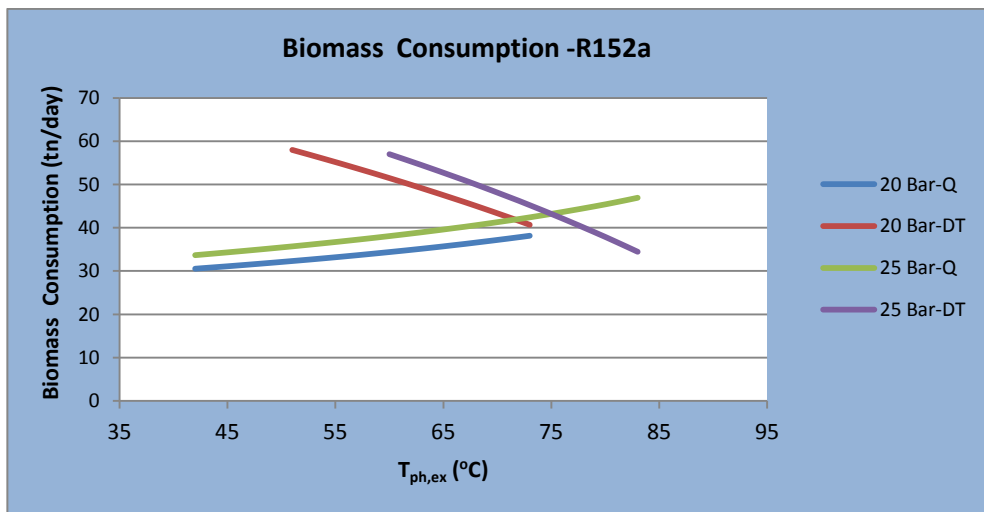
Εικόνα 3.24: Συγκριτικό διάγραμμα καθαρής ηλεκτρικής ισχύος για εργαζόμενο μέσο R134a για τα δύο σεναρία και για διάφορες πιέσεις



Εικόνα 3.25: Συγκριτικό διάγραμμα καθαρής ηλεκτρικής ισχύος για εργαζόμενο μέσο R152a για τα δύο σεναρία και για διάφορες πιέσεις



Εικόνα 3.26: Συγκριτικό διάγραμμα κατανάλωσης βιομάζας για εργαζόμενο μέσο R134a για τα δύο σενάρια και για διάφορες πιέσεις



Εικόνα 3.27: Συγκριτικό διάγραμμα κατανάλωσης βιομάζας για εργαζόμενο μέσο R134a για τα δύο σενάρια και για διάφορες πιέσεις

Όπως παρατηρούμε στις εικόνες 3.24 και 3.25 στις μικρές πιέσεις έχουμε μεγαλύτερη καθαρή ηλεκτρική ισχύ στο δεύτερο σενάριο, ενώ στις μεγαλύτερες πιέσεις έχουμε μεγαλύτερη καθαρή ηλεκτρική ισχύ στο πρώτο σενάριο. Επίσης, τονίζουμε πως ο βαθμός απόδοσης (ηλεκτρικός-ολικός) σε κάθε περίπτωση είναι ακριβώς ο ίδιος, παρότι δεν φαίνεται στις παραπάνω εικόνες, αλλά μπορεί πολύ εύκολα να διαπιστωθεί από τις εικόνες 3.6-3.7-3.12-3.16-3.17-3.22. Τέλος, από τις εικόνες 3.26 και 3.27 παρατηρούμε, ότι η κατανάλωση βιομάζας έχει την ίδια συμπεριφορά με την ηλεκτροπαραγωγή.

Άρα διαπιστώνουμε, ότι είναι πιο πρόσφορο το δεύτερο σενάριο στην περίπτωση λειτουργίας σε χαμηλότερες πιέσεις, και το πρώτο σενάριο στην περίπτωση λειτουργίας σε υψηλότερες πιέσεις. Βέβαια, συνήθως, αν μας το επιτρέπει το διαθέσιμο γεωθερμικό ρευστό, επιδιώκουμε να λειτουργούμε σε όσο το δυνατόν υψηλότερες πιέσεις, για να έχουμε όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ηλεκτροπαραγωγή.

Επίσης, κάτι που πρέπει να τονιστεί σε αυτό το σημείο, είναι ότι πιθανόν να μην είναι δυνατό να λειτουργήσουμε στο δεύτερο σενάριο, επειδή ενδέχεται να μην είναι δυνατό να ρίξουμε τη θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού τόσο χαμηλά όσο απαιτεί η εφαρμογή. Αυτό συμβαίνει επειδή μπορεί η σύσταση του γεωθερμικού ρευστού σε άλατα, κυρίως, να

μην μας επιτρέπει να ξεπεράσουμε κάποιο κατώτατο όριο θερμοκρασίας και να έχουμε στερεοποίηση αυτών των αλάτων.

Επίσης, στο πρώτο σενάριο οι διαφορές θερμοκρασίας στα άκρα των εναλλακτών είναι πάνω από 10°C, σε αντίθεση με το δεύτερο σενάριο, στο οποίο οι εναλλάκτες λειτουργούν σε πολύ χαμηλές διαφορές θερμοκρασιών, γεγονός που επιβάλλει τη χρήση εναλλακτών εξελιγμένης τεχνολογίας, αυξάνοντας κατά πολύ το κόστος της εγκατάστασης.

Όλα τα παραπάνω μας οδηγούν στο να λειτουργούμε συνήθως σύμφωνα με το πρώτο σενάριο, δηλαδή να έχουμε σταθερές θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου του γεωθερμικού ρευστού, άρα και σταθερή απορροφόμενη θερμότητα από αυτό. Βέβαια, η θερμοκρασία εξόδου του γεωθερμικού ρευστού, και κατ'επέκταση η απορροφόμενη από το γεωθερμικό ρευστό θερμότητα, αλλάζουν ανάλογα με τις ιδιότητες του γεωθερμικού ρευστού, αλλά προφανώς σε ένα συγκεκριμένο πεδίο οι ιδιότητες του γεωθερμικού ρευστού είναι σχεδόν σταθερές. Άρα, οι θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου του γεωθερμικού ρευστού θα είναι σταθερές.

Για τους παραπάνω λόγους από εδώ και στο εξής θα αναφέρουμε αναλυτικά το πρώτο σενάριο, και μόνο όπου κριθεί σκόπιμο θα αναφέρονται τα αποτελέσματα του δεύτερου σεναρίου. Σε κάθε περίπτωση, όμως, τα αποτελέσματα, άρα και τα συμπεράσματα είναι παρόμοια. Η μεταβολή μόνο της θερμοκρασίας $T_{ph,ex}$ προκαλεί διαφορετική μεταβολή στη λειτουργία των δύο σεναρίων. Η μεταβολή, όλων των υπολοίπων μεταβλητών που θα μελετήσουμε παρακάτω, θα προκαλεί ίδια μεταβολή στη λειτουργία και τις επιδόσεις της εγκατάστασης και των δύο σεναρίων. Άρα, δεν έχει κάποιο νόημα στις παρακάτω περιπτώσεις να αναφέρουμε το δεύτερο σενάριο, παρά μόνο αν έχει ενδιαφέρον η σύγκριση των δύο σεναρίων.

3.3) Μελέτη θερμοκρασίας υπερθέρμανσης οργανικού μέσου **(T_{sh})**

Σε αυτήν την παράγραφο θα μελετήσουμε τη λειτουργία και τις επιδόσεις της εγκατάστασης συναρτήσει της μεταβολής της θερμοκρασίας υπερθέρμανσης T_{sh} . Σε αυτό εδώ το σημείο να τονίσουμε, ότι αναφερόμαστε στη θερμοκρασία υπερθέρμανσης από τον υπερθερμαντή βιομάζας, και όχι από το γεωθερμικό υπερθερμαντή, ο οποίος όπως αναφέραμε προηγουμένως προκαλεί μια μικρή και γνωστή αύξηση της θερμοκρασίας. Αυτή η παράγραφος είναι η πλέον σημαντική σε αυτή τη μελέτη, καθώς συμπεραίνουμε το κατά πόσο βοηθάει η πρόσθετη καύση βιομάζας σε ένα σύστημα ORC, κυρίως ως προς την αύξηση της ηλεκτροπαραγωγής. Εξάλλου, αυτός είναι ο κύριος σκοπός της παρούσας εργασίας. Επίσης, από εδώ και στο εξής θα χρησιμοποιούμε στην εγκατάσταση τις θερμοκρασίες εξόδου από τον αναγεννητικό προθερμαντή, όπως ευρέθησαν στην παράγραφο 3.2.

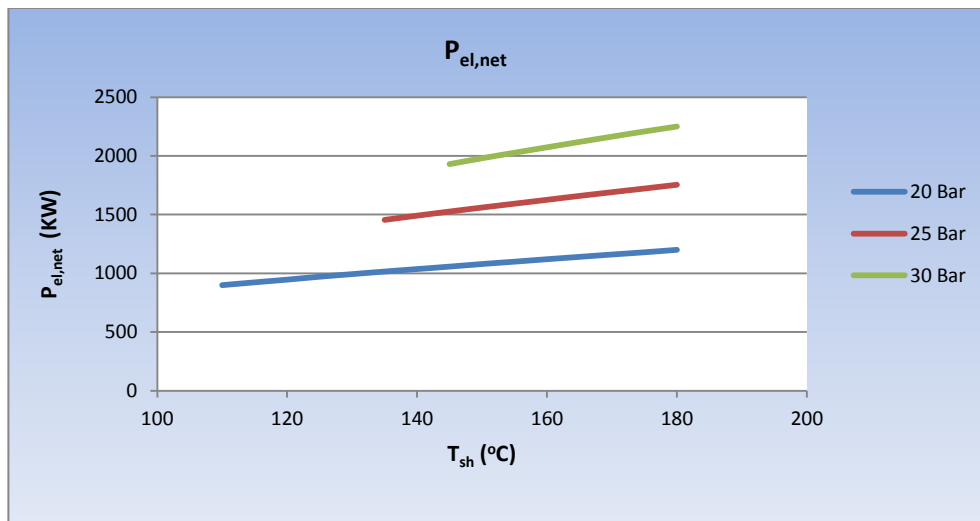
3.3.1) Μελέτη για σταθερή απορροφόμενη θερμότητα από το γεωθερμικό ρευστό

Τα κύρια στοιχεία της εγκατάστασης που θα χρησιμοποιήσουμε στη προσομοίωση είναι τα εξής:

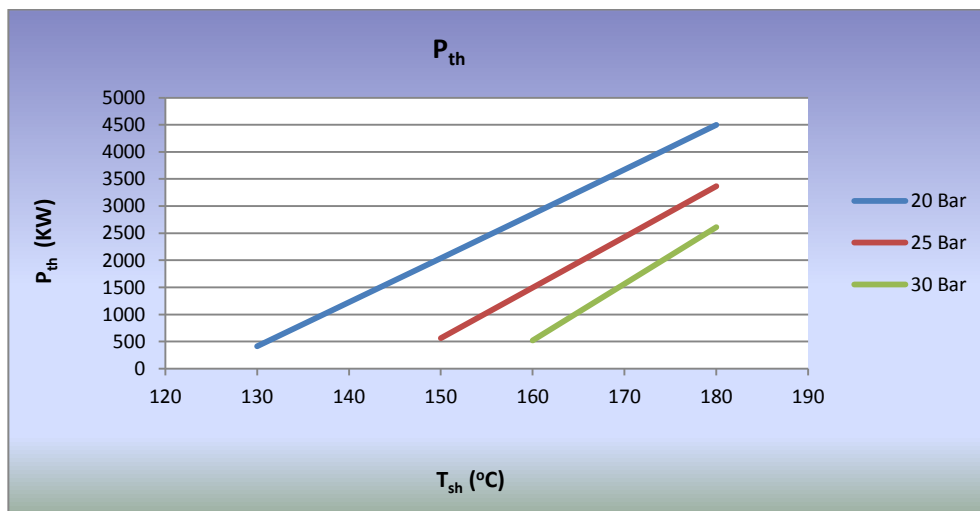
- Συνθήκες εισόδου του γεωθερμικού ρευστού στην εγκατάσταση όπως αναφέρθηκαν στην παράγραφο 3.1.
- Θερμοκρασία εξόδου του γεωθερμικού ρευστού στο περιβάλλον 90°C.

- Θερμοκρασία εξόδου του οργανικού μέσου από το γεωθερμικό υπερθερμαντή 100°C .
- Θερμοκρασία εξόδου από τον αναγεννητικό προθερμαντή $T_{\text{ph,ex}}$ όπως ευρέθη στην παράγραφο 3.2.
- Μέση σύσταση βιομάζας.

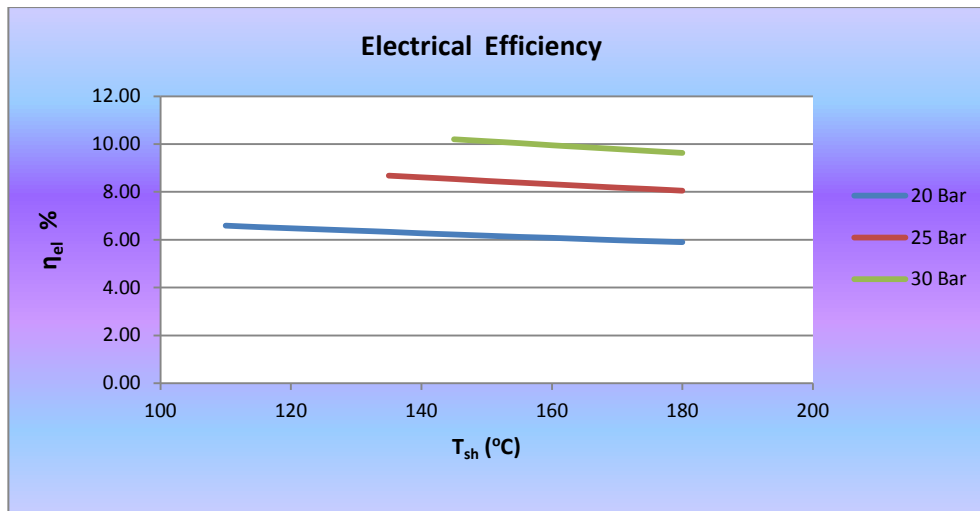
Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα των κύριων μεταβλητών του συστήματος συναρτήσει της θερμοκρασίας T_{sh} αρχικά για το R134a και στη συνέχεια τα σημαντικότερα διαγράμματα για το R152a.



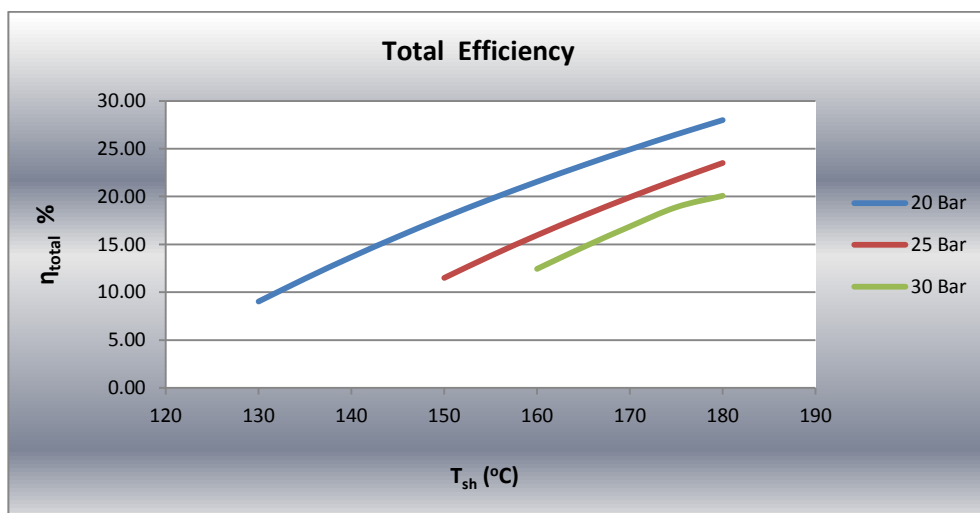
Εικόνα 3.28: Διάγραμμα καθαρής ηλεκτρικής ισχύος συναρτήσει της θερμοκρασίας T_{sh} για εργαζόμενο μέσο R134a και για διάφορες πιέσεις



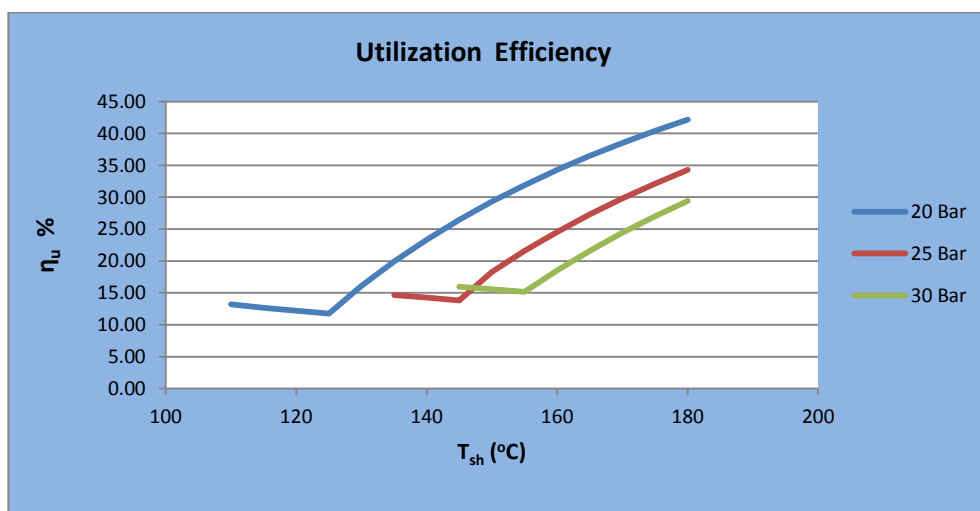
Εικόνα 3.29: Διάγραμμα παραγωγής θερμικής ισχύος συναρτήσει της θερμοκρασίας T_{sh} για εργαζόμενο μέσο R134a και για διάφορες πιέσεις



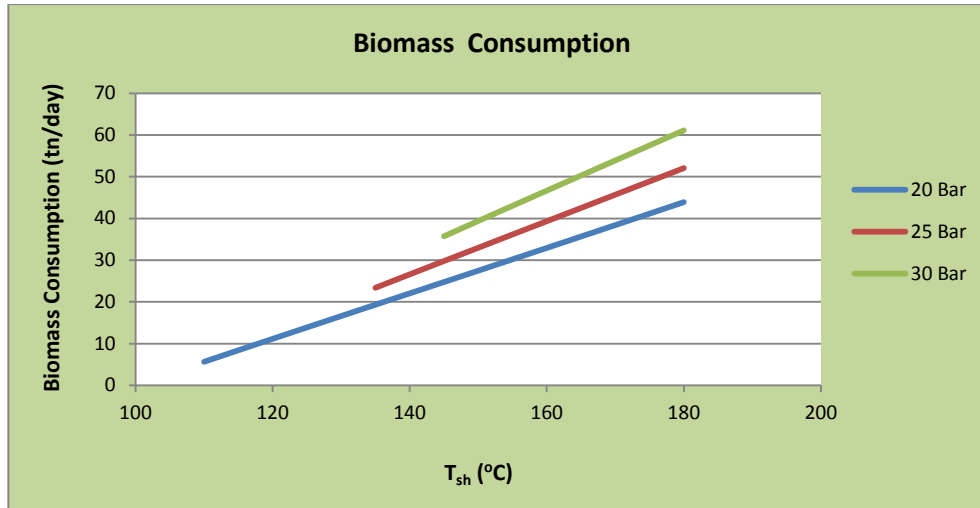
Εικόνα 3.30: Διάγραμμα ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης συναρτήσει της θερμοκρασίας T_{sh} για εργαζόμενο μέσο R134a και για διάφορες πιέσεις



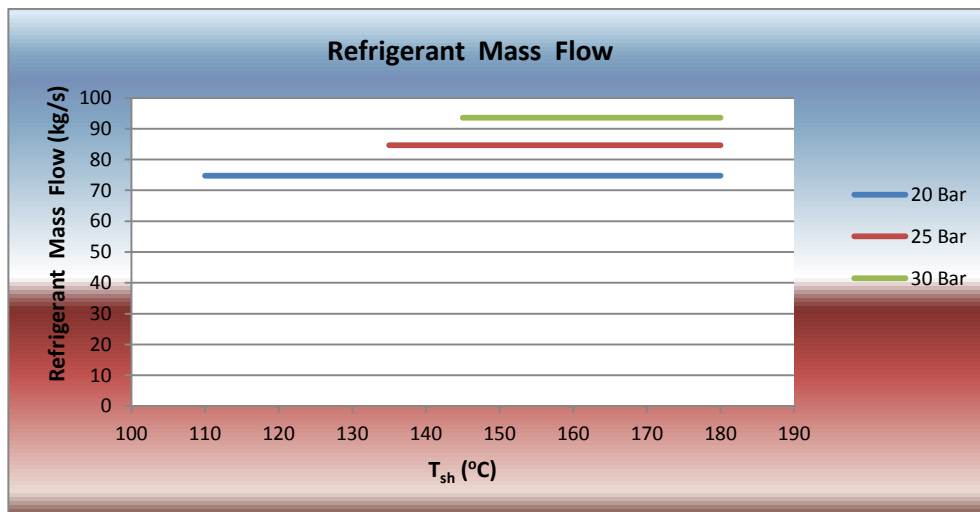
Εικόνα 3.31: Διάγραμμα ολικού βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης συναρτήσει της θερμοκρασίας T_{sh} για εργαζόμενο μέσο R134a και για διάφορες πιέσεις



Εικόνα 3.32: Διάγραμμα βαθμού χρησιμοποίησης συναρτήσει της θερμοκρασίας T_{sh} για εργαζόμενο μέσο R134a και για διάφορες πιέσεις



Εικόνα 3.33: Κατανάλωση βιομάζας συναρτήσει της θερμοκρασίας T_{sh} για εργαζόμενο μέσο R134a και για διάφορες πιέσεις



Εικόνα 3.34: Διάγραμμα παροχής εργαζόμενου μέσου R134a συναρτήσει της θερμοκρασίας T_{sh} και για διάφορες πιέσεις

Στην εικόνα 3.34 παρατηρούμε ότι η παροχή μάζας εργαζόμενου μέσου είναι σταθερή και ανεξάρτητη της θερμοκρασίας υπερθέρμανσης T_{sh} . Αυτό είναι απολύτως λογικό, καθώς η παροχή μάζας εργαζόμενου μέσου εξαρτάται αποκλειστικά και μόνο από το σύστημα μετάδοσης θερμότητας εργαζόμενου μέσου-γεωθερμικού ρευστού. Εφόσον σε αυτό το σύστημα έχουμε σταθερή απορροφόμενη θερμότητα από το γεωθερμικό ρευστό, και η θερμοκρασία εισόδου του εργαζόμενου μέσου στους γεωεναλλάκτες έχει πλέον σταθεροποιηθεί από την παράγραφο 3.2, και η θερμοκρασία εξόδου του εργαζόμενου μέσου είναι επίσης σταθερή στους 100°C, δηλαδή έχουμε σταθερή αύξηση ενθαλπίας εργαζόμενου μέσου, τότε θα είναι και η παροχή μάζας του εργαζόμενου μέσου σταθερή. Προφανώς, αυτό ισχύει από διατήρηση ενέργειας στο σύστημα εργαζόμενου μέσου-γεωθερμικού ρευστού και προφανώς, είναι ανεξάρτητο της θερμοκρασίας υπερθέρμανσης T_{sh} . Η αύξηση της παροχής εργαζόμενου μέσου με αύξηση της πίεσης οφείλεται στο γεγονός ότι αυξανόμενη της πίεσης λειτουργίας, αυξάνεται η θερμοκρασία εισόδου του εργαζόμενου μέσου στους γεωθερμικούς εναλλάκτες ($T_{ph,ex}$), άρα δεδομένου ότι είναι σταθερή η έξοδος από τους γεωθερμικούς εναλλάκτες, απαιτείται μικρότερη αύξηση ενθαλπίας αυξανόμενη της πίεσης. Άρα, από διατήρηση της ενέργειας προκύπτει αύξηση της παροχής εργαζόμενου μέσου με αύξηση της πίεσης λειτουργίας.

Σημείωση: Αυξανομένης της πίεσης παρατηρούμε ότι τα διαγράμματα αρχίζουν από μεγαλύτερες θερμοκρασίες T_{sh} . Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι δεν είναι δυνατόν να λειτουργήσει ο αναγεννητικός προθερμαντής σε τόσο χαμηλές θερμοκρασίες εισόδου στο στρόβιλο, άρα και εισόδου σε αυτόν. Επειδή, όμως, μελετάμε τη δυνατότητα υπερθέρμανσης με καύση βιομάζας δεν θα ασχοληθούμε, με τόσο χαμηλές θερμοκρασίες υπερθέρμανσης.

Από την εικόνα 3.33 παρατηρούμε ότι αυξανομένης της θερμοκρασίας υπερθέρμανσης T_{sh} έχουμε ανάλογη αύξηση της κατανάλωσης βιομάζας του λέβητα. Αυτό είναι απολύτως λογικό, καθώς αυξανομένης της θερμοκρασίας T_{sh} , έχουμε αύξηση της μεταφερόμενης θερμότητας στο εργαζόμενο μέσο, η οποία προφανώς προέρχεται από αύξηση της κατανάλωσης βιομάζας του λέβητα. Η αύξηση της κατανάλωσης αυξανομένης της πίεσης λειτουργίας, οφείλεται στο γεγονός ότι έχουμε αύξηση της παροχής εργαζόμενου μέσου αυξανόμενης της πίεσης λειτουργίας.

Η εικόνα 3.28 είναι ίσως η πλέον σημαντική της παρούσας εργασίας. Μας δείχνει ότι αυξανόμενης της θερμοκρασίας υπερθέρμανσης T_{sh} , έχουμε αύξηση της καθαρής ηλεκτροπαραγωγής της εγκατάστασης, που είναι και αυτό που μας ενδιαφέρει πρωτίστως. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι για αύξηση της θερμοκρασίας στην υψηλή πίεση λειτουργίας, και για σταθερό λόγο πίεσης του στρόβιλου, έχουμε αύξηση του παραγόμενου έργου του στρόβιλου. Με άλλα λόγια, όσο αυξάνεται η θερμοκρασία του εργαζόμενου μέσου, τόσο οι ισόθλιπτες υψηλής-χαμηλής πίεσης απομακρύνονται μεταξύ τους, και προσφέρουν μεγαλύτερο αποδιδόμενο έργο ανά μονάδα μάζας εργαζόμενου μέσου. Άρα, αυτό που μας ενδιαφέρει πρωτίστως, δηλαδή η αύξηση της ηλεκτροπαραγωγής, το επιτυγχάνουμε με πρόσθετη καύση βιομάζας. Επίσης, αυξανόμενης της πίεσης λειτουργίας έχουμε αύξηση της ηλεκτροπαραγωγής, επειδή έχουμε αύξηση του λόγου πίεσης του στρόβιλου, όπως εξηγήσαμε και στις προηγούμενες παραγράφους.

Σε αυτό το σημείο, όμως, αξίζει να δούμε τη συμπεριφορά του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης που μας ενδιαφέρει δευτερευόντως. Από την εικόνα 3.30 παρατηρούμε ότι αυξανόμενης της θερμοκρασίας T_{sh} έχουμε ελαφρά πτώση του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης. Όπως είδαμε ως τώρα σε αυτήν την παράγραφο, με αύξηση της θερμοκρασίας T_{sh} έχουμε αύξηση του αριθμητή του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης (καθαρή ηλεκτρική ισχύς), αλλά έχουμε αύξηση και του ενός όρου του παρονομαστή (κατανάλωση βιομάζας). Από το διάγραμμα συμπεραίνουμε ότι η αύξηση της κατανάλωσης βιομάζας υπερισχύει ελαφρά της αύξησης της ηλεκτροπαραγωγής, και έτσι έχουμε τη μείωση του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης.

Στην εικόνα 3.29 παρατηρούμε ότι αυξανόμενης της T_{sh} , δηλαδή της θερμοκρασίας εισόδου στο στρόβιλο, έχουμε αύξηση της παραγωγής θερμικής ισχύος. Αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία εισόδου του εργαζόμενου μέσου στο στρόβιλο και δεδομένου ότι λειτουργεί σε σταθερό λόγο πίεσης, τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η θερμοκρασία εξόδου από το στρόβιλο. Επίσης, δεδομένου ότι η θερμοκρασία $T_{ph,ex}$ είναι σταθερή και ανεξάρτητη της T_{sh} , όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία εξόδου από το στρόβιλο τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η θερμοκρασία που είναι διαθέσιμη για παραγωγή θερμικής ισχύος. Άρα, έχουμε αύξηση της παραγωγής θερμικής ισχύος. Επίσης, αυξανόμενης της πίεσης λειτουργίας, άρα και του λόγου πίεσης του στρόβιλου, έχουμε μείωση της θερμοκρασίας εξόδου του στρόβιλου, άρα και της διαθέσιμης θερμοκρασίας για παραγωγή θερμικής ισχύος. Για αυτόν τον λόγο παρατηρείται στην εικόνα 3.29 μείωση της παραγόμενης θερμικής ισχύος με αύξηση της πίεσης λειτουργίας.

Από τις εικόνες 3.31 και 3.32 παρατηρούμε ότι η αύξηση της θερμοκρασίας T_{sh} επιφέρει αύξηση του ολικού βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης αλλά και του βαθμού χρησιμοποίησης των πηγών ενέργειας.

Όσον αφορά τον ολικό βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης, είδαμε ήδη ότι η αύξηση της θερμοκρασίας T_{sh} επιφέρει αύξηση και των δύο όρων του αριθμητή (καθαρή ηλεκτρική ισχύς-θερμική ισχύς), αλλά και του ενός όρου του παρονομαστή (κατανάλωση βιομάζας). Προφανώς, η αύξηση της συνολικής ενέργειας υπερισχύει της αύξησης της κατανάλωσης βιομάζας. Το ίδιο ακριβώς συμβαίνει και με τον βαθμό χρησιμοποίησης, για αυτό και έχουμε αύξηση του αυξανόμενης της θερμοκρασίας T_{sh} . Η αύξηση της ηλεκτρικής ισχύος αυξανόμενης της πίεσης λειτουργίας είναι μικρότερη κατά απόλυτο νούμερο από τη μείωση της παραγόμενης θερμικής ισχύος με αντίστοιχη αύξηση της πίεσης λειτουργίας. Έτσι, προκύπτει η μορφή των εικόνων 3.31 και 3.32, όπου με αύξηση της πίεσης λειτουργίας έχουμε μείωση του ολικού βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης, αλλά και του βαθμού χρησιμοποίησης. Εδώ αξίζει να επισημάνουμε ότι η αλλαγή στην κλίση του διαγράμματος στο βαθμό χρησιμοποίησης οφείλεται στο ότι σε χαμηλές θερμοκρασίες δεν είναι δυνατή η λειτουργία του αναγεννητικού προθερμαντή. Η αλλαγή της κλίσης δηλώνει την έναρξη λειτουργίας του αναγεννητικού προθερμαντή.

Άρα, κλείνοντας επιλέγουμε τη μέγιστη δυνατή υπερθέρμανση του εργαζόμενου μέσου με καύση βιομάζας για μεγιστοποίηση της ηλεκτροπαραγωγής.

3.3.2) Συγκριτική αξιολόγηση των δύο σεναρίων για τα δύο εργαζόμενα μέσα

Σε αυτήν την παράγραφο θα παρατεθούν οι τιμές των βασικών επιδόσεων της εγκατάστασης για τα δύο σενάρια και για τα δύο εργαζόμενα μέσα, ώστε να είναι εύκολη η συγκριτική τους αξιολόγηση.

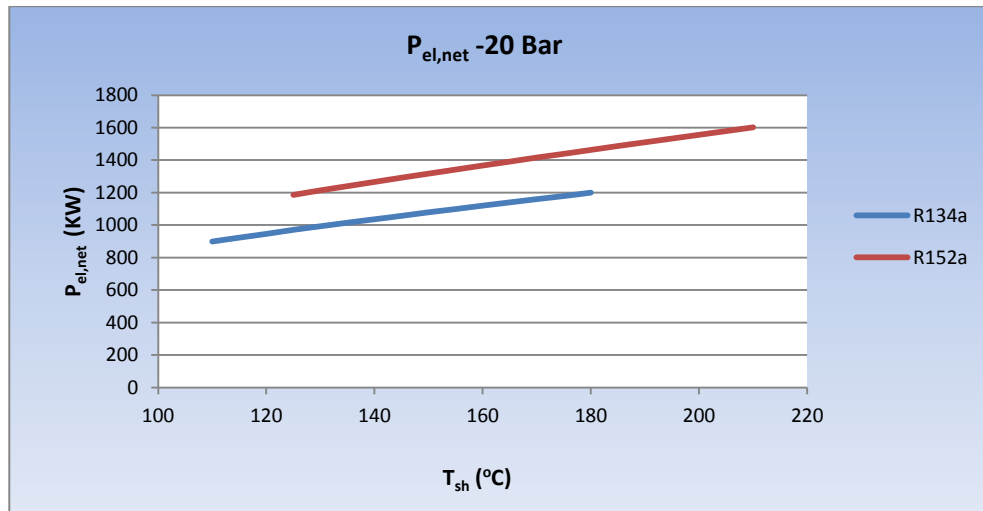
1^ο Σενάριο						
	20 Bar		25 Bar		30 Bar	
	R134a	R152a	R134a	R152a	R134a	R152a
Ηλεκτροπαραγωγή στη μέγιστη υπερθέρμανση (KW)	1201	1602	1754	2269	2250	-
Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης στη μέγιστη υπερθέρμανση %	5.9	7.38	8.05	9.7	9.64	-
Κατανάλωση βιομάζας στη μέγιστη υπερθέρμανση (tn/day)	43.9	51.7	52.1	61.3	61.1	-

Πίνακας 3.1: Βασικές επιδόσεις της εγκατάστασης για διάφορες πιέσεις, για το 1^ο σενάριο

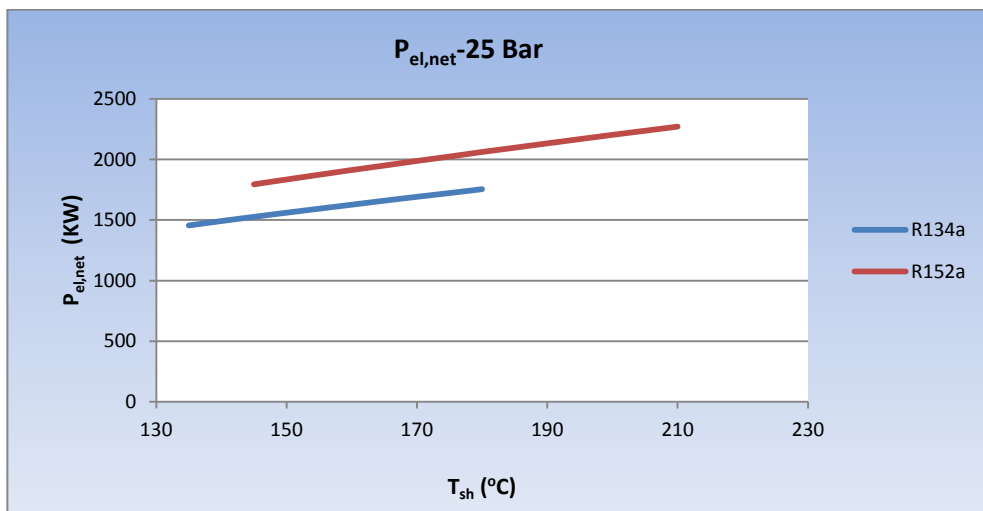
2^ο Σενάριο							
R134a/R152a	20 Bar		25 Bar		30 Bar		35 Bar
Ηλεκτροπαραγωγή στη μέγιστη υπερθέρμανση (KW)	1750	2065	2090	2234	2291	2356	2460
Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης στη μέγιστη υπερθέρμανση %	5.5	7.14	7.54	9.44	9.23	11.28	10.7
Κατανάλωση βιομάζας στη μέγιστη υπερθέρμανση (tn/day)	63.9	66.6	61.9	60.3	62.2	58.9	66.1

Πίνακας 3.2: Βασικές επιδόσεις της εγκατάστασης για διάφορες πιέσεις, για το 2^ο σενάριο

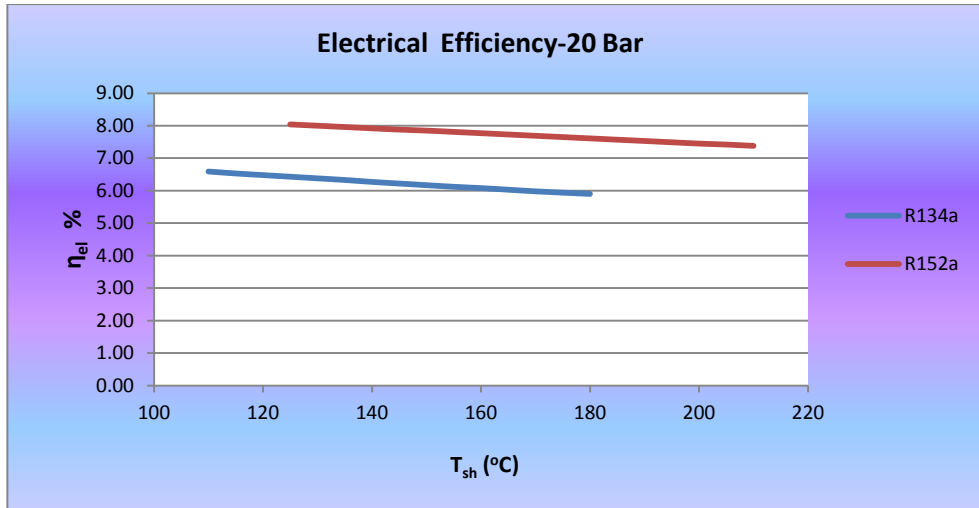
Στη συνέχεια, παρατίθενται διαγράμματα ηλεκτροπαραγωγής και βαθμού απόδοσης των δύο εργαζόμενων μέσων για το πρώτο σενάριο, ώστε να γίνει σαφής η διαφορά στην απόδοση των δύο εργαζόμενων μέσων.



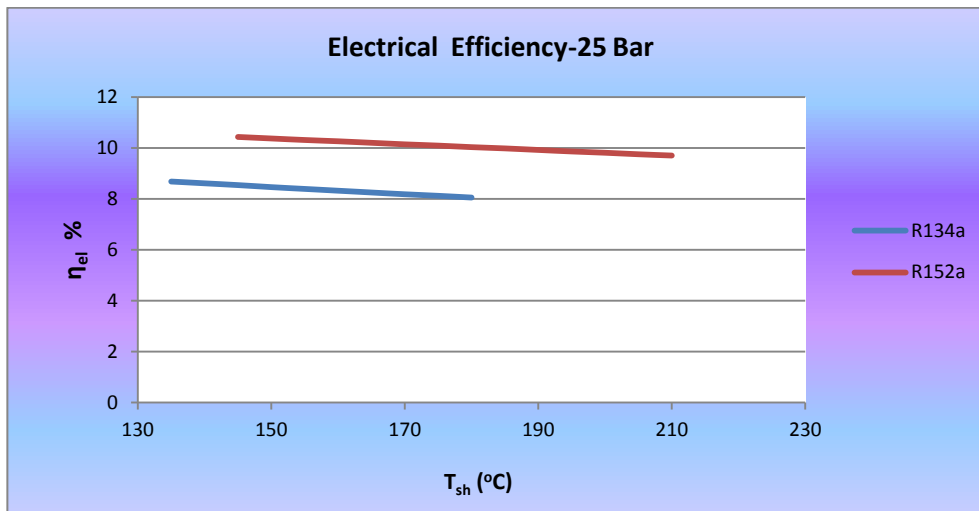
Εικόνα 3.35: Συγκριτικό διάγραμμα ηλεκτροπαραγωγής συναρτήσει της θερμοκρασίας T_{sh} για πίεση 20 Bar



Εικόνα 3.36: Συγκριτικό διάγραμμα ηλεκτροπαραγωγής συναρτήσει της θερμοκρασίας T_{sh} για πίεση 25 Bar



Εικόνα 3.37: Συγκριτικό διάγραμμα ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης συναρτήσει της θερμοκρασίας T_{sh} για πίεση 20 Bar



Εικόνα 3.38: Συγκριτικό διάγραμμα ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης συναρτήσει της θερμοκρασίας T_{sh} για πίεση 25 Bar

Είναι προφανής από τις τέσσερις παραπάνω εικόνες η σαφής ανωτερότητα του R152a έναντι του R134a. Ακόμα και στις θερμοκρασίες υπερθέρμανσης στις οποίες λειτουργούν και τα δύο εργαζόμενα μέσα (ως 180°C) είναι σαφής η ανωτερότητα του R152a. Επίσης, η δυνατότητα του R152a να λειτουργεί σε υψηλότερες θερμοκρασίες υπερθέρμανσης το κάνει πιο ελκυστικό για λειτουργία σε μια τέτοια εγκατάσταση.

Επίσης, οι πίνακες σύγκρισης των δύο σεναρίων μας δείχνουν σαφή υπεροχή του δεύτερου σεναρίου, η οποία όμως είναι πλαστή επειδή έχουμε πολύ μεγαλύτερη κατανάλωση βιομάζας, όπως βλέπουμε από τους ίδιους πίνακες. Στο δεύτερο σενάριο έχουμε ηλεκτροπαραγωγή κατά 50% μεγαλύτερη από ότι στο πρώτο σενάριο αλλά αυτό συμβαίνει με κατανάλωση 50% μεγαλύτερης ποσότητας βιομάζας. Βέβαια, κάτι που δεν φαίνεται στα παραπάνω είναι ότι στο δεύτερο σενάριο έχουμε περίπου 50% μεγαλύτερη παροχή μάζας από ότι στο πρώτο σενάριο. Άρα πρακτικά, από ενεργειακής άποψης τα δύο σεναρία είναι σχεδόν ίδια ως προς τη θερμοκρασία υπερθέρμανσης.

Άρα, εν τέλει επιλέγουμε ως σταθερή και τελική θερμοκρασία υπερθέρμανσης από τον υπερθερμαντή βιομάζας τις μέγιστες δυνατές τιμές για κάθε εργαζόμενο μέσο, δηλαδή τους 180°C για το R134a και τους 210°C για το R152a.

Συγκεντρωτικά αποτελέσματα:

Γράφουμε συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις παραγράφους 3.2 και 3.3 για τις σημαντικότερες εσωτερικές θερμοκρασίες του συστήματος $T_{ph,ex}$ και T_{sh} :

1° Σενάριο			
	20 Bar	25 Bar	30 Bar
<u>Εργαζόμενο Μέσο R134a</u>			
$T_{ph,ex}$ (°C)	68	75	78
T_{sh} (°C)	180	180	180
<u>Εργαζόμενο Μέσο R152a</u>			
$T_{ph,ex}$ (°C)	71	79	-
T_{sh} (°C)	210	210	-

Πίνακας 3.3: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα θερμοκρασιών $T_{ph,ex}$ και T_{sh} για το 1° σενάριο

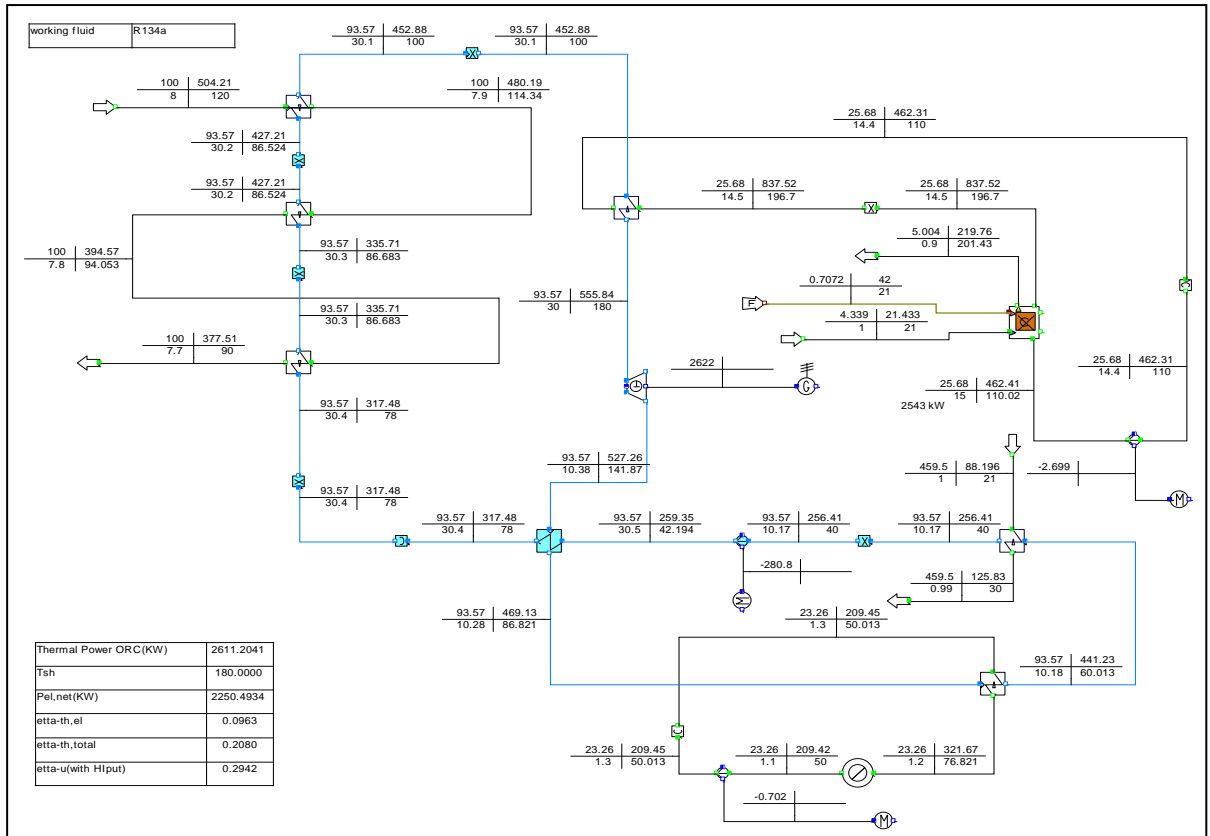
2° Σενάριο				
	20 Bar	25 Bar	30 Bar	35 Bar
<u>Εργαζόμενο Μέσο R134a</u>				
$T_{ph,ex}$ (°C)	54/64	65/74	72/80	78/-
T_{sh} (°C)	180/210	180/210	180/210	180/-
<u>Εργαζόμενο Μέσο R152a</u>				
$T_{ph,ex}$ (°C)	64	74	80	-
T_{sh} (°C)	210	210	210	-

Πίνακας 3.4: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα θερμοκρασιών $T_{ph,ex}$ και T_{sh} για το 2° σενάριο

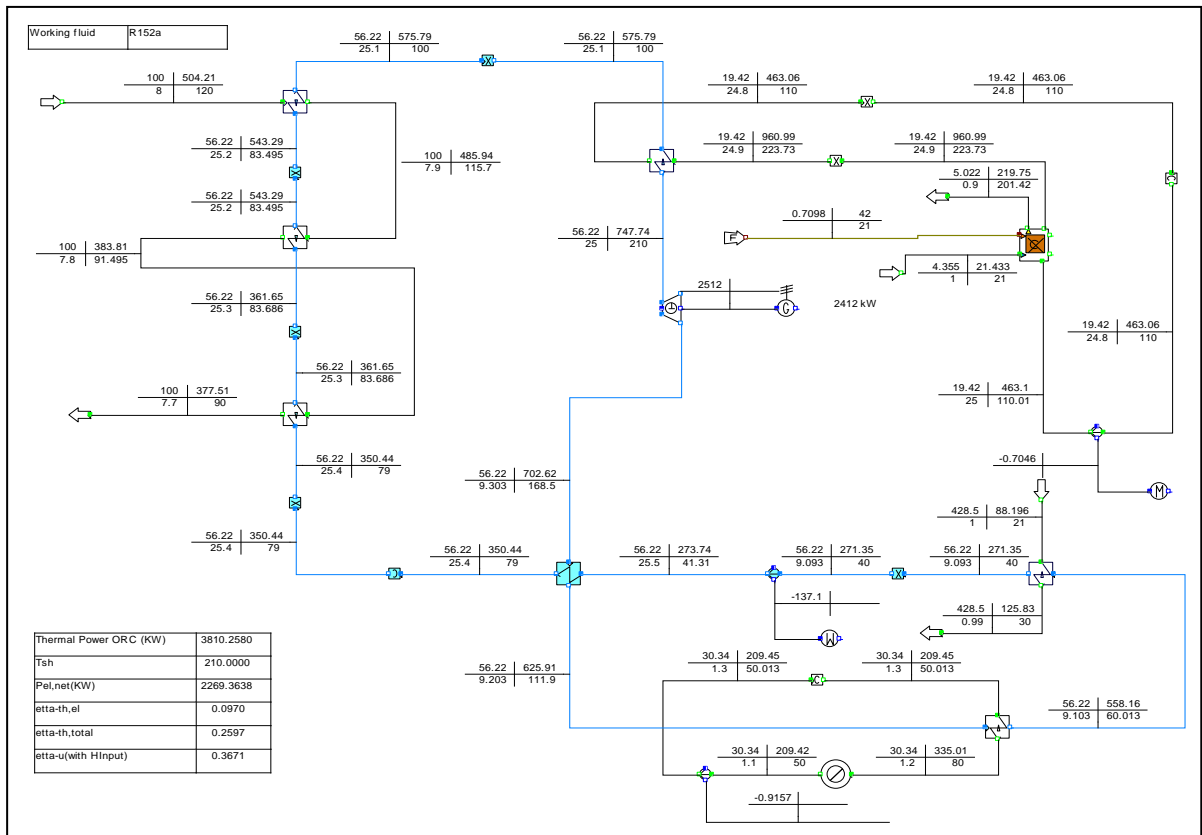
Στη συνέχεια της μελέτης μας οι θερμοκρασίες αυτές θα είναι γνωστές και σταθερές για κάθε περίπτωση (εργαζόμενο μέσο και σενάριο). Υπενθυμίζουμε πως θα αναφέρουμε τα αποτελέσματα του πρώτου σεναρίου μόνο, το οποίο είναι πιο πιθανό για εφαρμογή για τους λόγους που έχουμε ήδη αναφέρει. Μόνο εφόσον είναι απαραίτητο και χρήσιμο θα αναφέρονται τα αποτελέσματα του δεύτερου σεναρίου, κυρίως για να γίνει σύγκριση με το πρώτο.

Παρακάτω παρουσιάζονται ενδεικτικά τα πλήρη αποτελέσματα του IPSEpro για δύο από τις εγκαταστάσεις των παραπάνω σεναρίων, αφού πλέον τέθηκαν οι τιμές των δύο βασικών εσωτερικών θερμοκρασιών του συστήματος.

Μελέτη υβριδικών ανανεώσιμων συστημάτων παραγωγής ενέργειας με Γεωθερμία

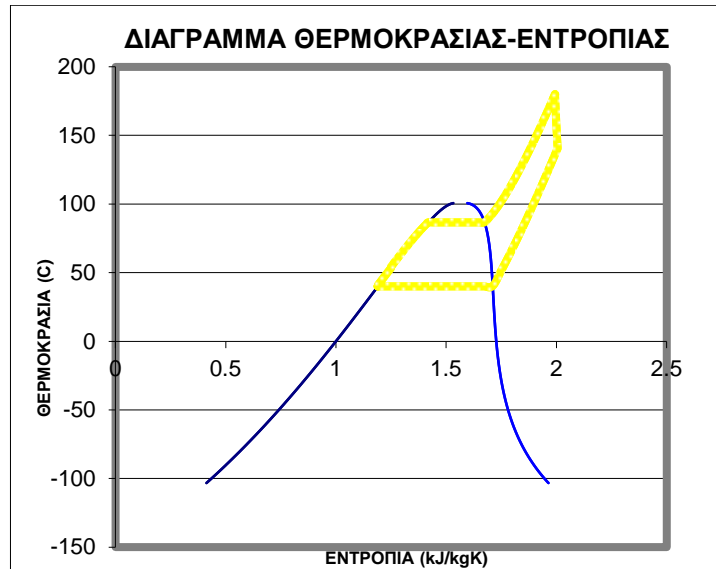


Εικόνα 3.39: Αποτελέσματα IPSErto για εργαζόμενο μέσο R134a σε πίεση 30Bar, πρώτο σενάριο.

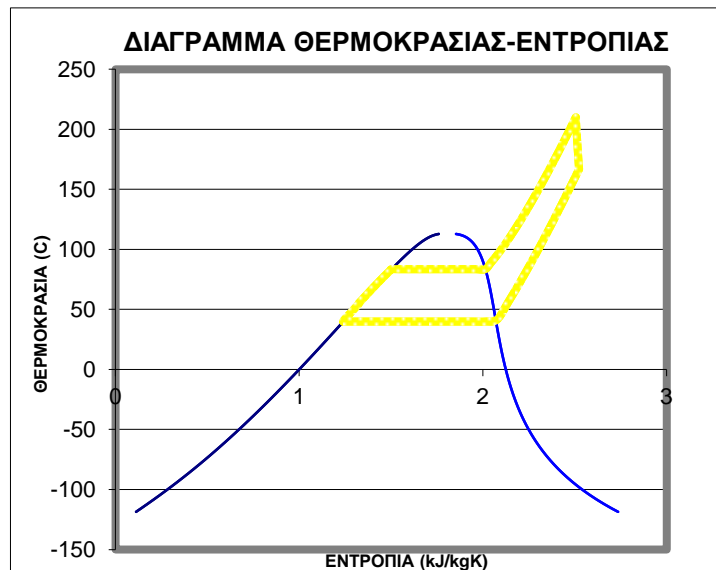


Εικόνα 3.40: Αποτελέσματα IPSErto για εργαζόμενο μέσο R152a σε πίεση 25Bar, πρώτο σενάριο.

Κλείνοντας την παρούσα παράγραφο, και αφού καθορίσαμε τις εσωτερικές θερμοκρασίες $T_{ph,ex}$ και T_{sh} , παρουσιάζουμε ενδεικτικά τα διαγράμματα θερμοκρασίας-εντροπίας T-s, για τα δύο εργαζόμενα μέσα, για τις υψηλότερες πιέσεις λειτουργίας του πρώτου σεναρίου. Τα διαγράμματα αυτά είναι κοινά για τα δύο σενάρια, αφού η μορφή τους καθορίζεται κυρίως από την υψηλή και τη χαμηλή πίεση της εγκατάστασης, καθώς και από τη θερμοκρασία υπερθέρμανσης T_{sh} . Οι παράμετροι αυτοί προφανώς δεν αλλάζουν ανάλογα το σενάριο. Θα παρουσιάσουμε το διάγραμμα T-s για εργαζόμενο μέσο R134a στα 30 Bar, και για εργαζόμενο μέσο R152a στα 25 Bar.



Εικόνα 3.41: Διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας για εργαζόμενο μέσο R134a στα 30 Bar



Εικόνα 3.42: Διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας για εργαζόμενο μέσο R152a στα 25 Bar

Από τα παραπάνω διαγράμματα μπορούμε να διαπιστώσουμε και οπτικά διάφορα συμπεράσματα που είχαμε κάνει στις προηγούμενες παραγράφους, όπως τα εξής:

- Η θερμοκρασία εξόδου από τον ατμοστρόβιλο είναι ιδιαίτερως υψηλή, ούτως ώστε καθίσταται δυνατή η λειτουργία τόσο του αναγεννητικού προθερμαντή, όσο και του κυκλώματος παραγωγής θερμικής ισχύος.
- Η θερμοκρασιακή, άρα και η ενθαλπική πτώση, στον ατμοστρόβιλο είναι μεγαλύτερη για εργαζόμενο μέσο R152a. Έτσι, έχουμε μεγαλύτερη παραγωγή ισχύος, παρότι η παροχή μάζας είναι μικρότερη για εργαζόμενο μέσο R152a.

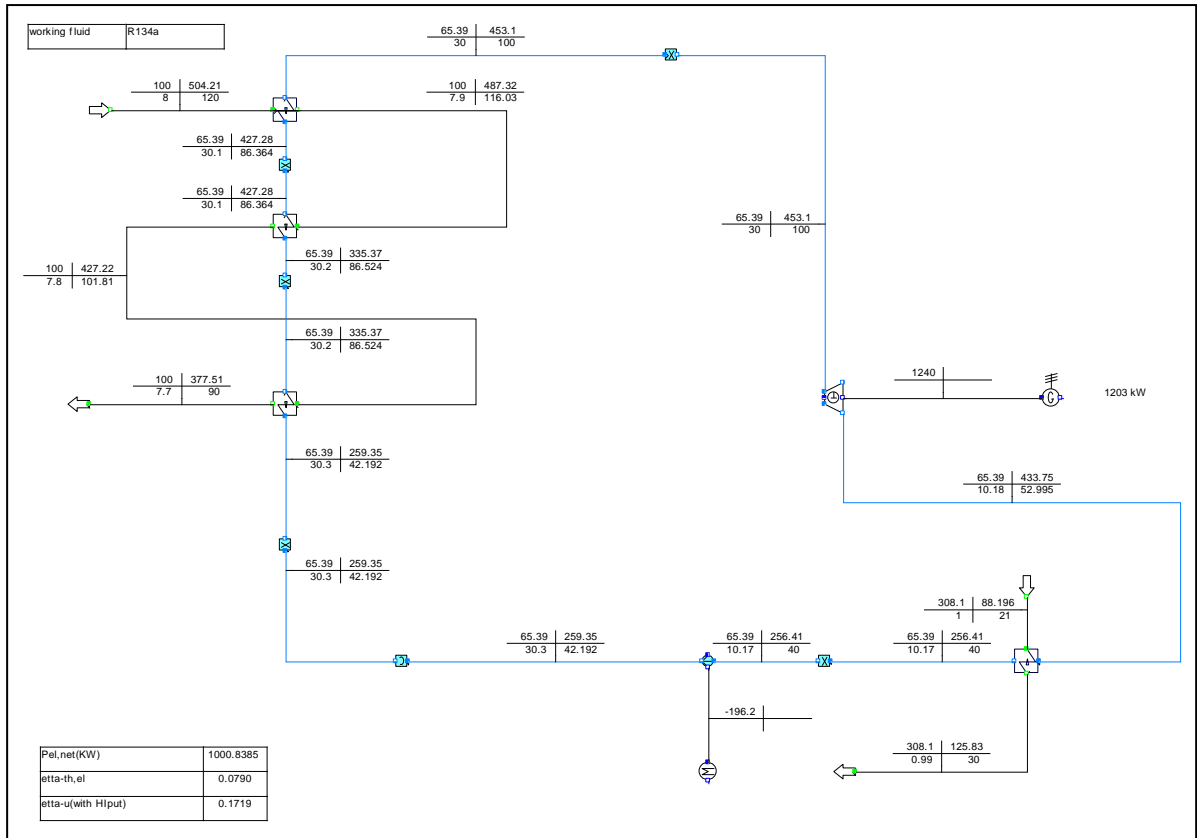
3.4) Μελέτη ξεχωριστής λειτουργίας των εγκαταστάσεων

Εφόσον, πλέον, έχουμε σταθεροποιήσει τις βασικές εσωτερικές θερμοκρασίες του συστήματος, τις $T_{ph,ex}-T_{sh}$, στις τιμές που αναφέρθηκαν στις παραγράφους 3.2-3.3, έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον να μελετήσουμε ξεχωριστά τις δύο εγκαταστάσεις από τις οποίες προήλθε το υβριδικό σύστημα γεωθερμίας-βιομάζας και να αποφανθούμε το κατά πόσο είναι συμφέρον ο συνδυασμός τους.

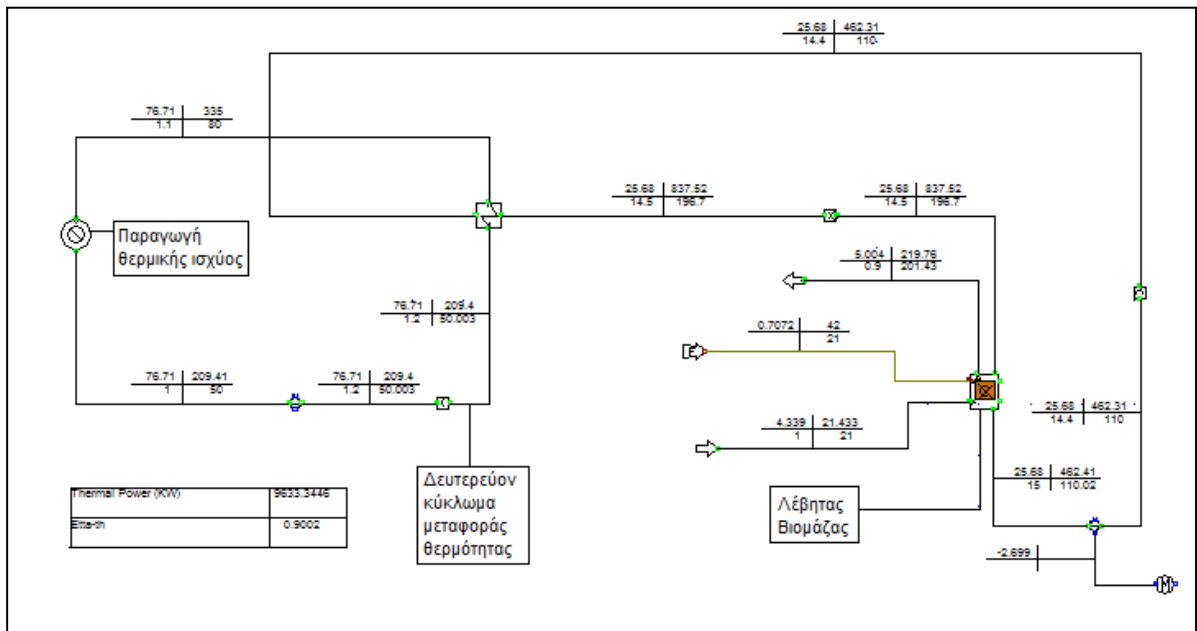
Για τον σκοπό αυτής της μελέτης θα θεωρήσουμε ότι τα δύο επιμέρους συστήματα είναι τα εξής:

- Απλός οργανικός κύκλος Rankine με μοναδική πηγή θερμότητας το γεωθερμικό ρευστό. Πρόκειται για τον κοινό κύκλο ORC που χρησιμοποιείται για εκμετάλλευση γεωθερμικών πηγών ενέργειας, χαμηλής-μέσης ενθαλπίας. Σχηματικό διάγραμμα αυτού του κύκλου φαίνεται στην εικόνα 3.43. Προφανώς, για να γίνει σύγκριση της ξεχωριστής με τη συνδυασμένη λειτουργία των δύο εγκαταστάσεων απαιτείται όλα τα στοιχεία να είναι κοινά. Θα έχουμε δηλαδή είσοδο του γεωθερμικού ρευστού στην εγκατάσταση στους 120°C και θερμοκρασία εισόδου του εργαζόμενου μέσου στο στρόβιλο 100°C . Σε αυτήν την περίπτωση, η θερμοκρασία που στη συνδυασμένη λειτουργία είναι η θερμοκρασία εισόδου στον υπερθερμαντή βιομάζας, είναι η θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο. Άρα, όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό η θερμοκρασία εξόδου από το στρόβιλο είναι αρκετά χαμηλή, έτσι ώστε δεν καθίσταται δυνατή ούτε η λειτουργία αναγεννητικού προθερμαντή, ούτε η λειτουργία παραγωγής θερμικής ισχύος. Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφέρουμε ότι στη λειτουργία του απλού κύκλου ORC δεν τίθεται θέμα πρώτου-δευτέρου σεναρίου, καθώς δεν υφίσταται αναγεννητικός προθερμαντής, άρα δεν υπάρχει διαφοροποίηση μεταξύ των θερμοκρασιών εισόδου στους γεωθερμικούς εναλλάκτες.
- Θερμικό σύστημα για παραγωγή θερμικής ισχύος. Πρόκειται για το ίδιο ακριβώς σύστημα που υπερθερμαίνει το οργανικό μέσο στη συνδυασμένη λειτουργία. Θα θεωρήσουμε ακριβώς ίδια κατανάλωση βιομάζας, αλλά και λειτουργία μεταξύ των ιδίων ακριβώς θερμοκρασιών, μόνο που σε αυτήν την περίπτωση αντί να μεταδίδει θερμότητα στο εργαζόμενο μέσο, θα τη χρησιμοποιεί για απ'ευθείας παραγωγή θερμικής ισχύος. Στην εικόνα 3.44 φαίνεται το σχηματικό διάγραμμα του θερμικού αυτού συστήματος. Εδώ φυσικά έγκειται διαφοροποίηση πρώτου-δευτέρου σεναρίου, καθώς όπως έχουμε ήδη δει στην παράγραφο 3.3, για ίδια πίεση λειτουργίας έχουμε διαφορετική κατανάλωση βιομάζας στα δύο σενάρια.

Μελέτη υβριδικών ανανεώσιμων συστημάτων παραγωγής ενέργειας με Γεωθερμία



Εικόνα 3.43: Σχηματικό διάγραμμα απλού κύκλου ORC με εργαζόμενο μέσο R134a για πίεση 30Bar



Εικόνα 3.44: Σχηματικό διάγραμμα θερμικού συστήματος για την περίπτωση εργαζομένου μέσου R134a σε πίεση 30Bar, πρώτο σενάριο

Σημείωση: Παρατηρούμε ότι ο βαθμός απόδοσης του θερμικού συστήματος είναι της τάξης του 90%, κάτι απολύτως φυσιολογικό, αφού έχουμε μετατροπή θερμικής ενέργειας σε θερμική. Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, δεν τίθεται θέμα σύγκρισης αυτού του βαθμού απόδοσης με του αντίστοιχου του υβριδικού κύκλου.

Συγκρίνοντας τις εικόνες 3.43 και 3.44 με την εικόνα 3.39 που είναι ο αντίστοιχος υβριδικός κύκλος των δύο συστημάτων, παρατηρούμε ότι έχουμε μια μεγάλη αύξηση της ηλεκτροπαραγωγής, αλλά και μία μεγάλη μείωση της παραγόμενης θερμικής ισχύος του συστήματος. Προφανώς, η μείωση της θερμικής ισχύος προκαλεί την αύξηση της ηλεκτροπαραγωγής. Για να αξιολογήσουμε το κατά πόσο γίνεται αποδοτικά αυτή η μετατροπή θεωρούμε τον παρακάτω συντελεστή μετατροπής θερμικής ενέργειας σε ηλεκτρική:

$$\sigma_h = \frac{P_{el,hybrid} - P_{el,ORC}}{|Q_{th,hybrid} - Q_{th}|},$$

Ο αριθμητής του παραπάνω όρου είναι η αύξηση της ηλεκτροπαραγωγής που επιτυγχάνεται με τη συνδυασμένη χρήση των παραπάνω εγκαταστάσεων, και ο παρανομαστής είναι η αντίστοιχη μείωση της θερμικής ισχύος. Λαμβάνοντας υπόψη ότι ο απλός κύκλος ORC στην ουσία μετατρέπει θερμική ισχύ (γεωθερμία) σε ηλεκτρική ισχύ και ότι ο βαθμός απόδοσης του κύκλου ORC είναι η καθαρή ηλεκτροπαραγωγή προς την εισερχόμενη θερμική ισχύ, διαπιστώνουμε ότι υπάρχει αντιστοιχία μεταξύ του βαθμού απόδοσης του κύκλου ORC και του συντελεστή σ_h . Αν ο συντελεστής σ είναι μεγαλύτερος του βαθμού απόδοσης του κύκλου ORC, αυτό θα σημαίνει πρακτικά ότι η ηλεκτρική ισχύς (στην ουσία η αύξηση της ηλεκτρικής ισχύος) θα έχει παραχθεί από θερμική ισχύ (μείωση της θερμικής ισχύος) αποδοτικότερα από ότι σε έναν απλό κύκλο ORC. Με άλλα λόγια αν ο συντελεστής σ_h είναι μεγαλύτερος του βαθμού απόδοσης του απλού κύκλου ORC, τότε έχουμε καλύτερη λειτουργία στη συνδυασμένη λειτουργία των δύο εγκαταστάσεων, από ότι στην ξεχωριστή λειτουργία, γιατί η αύξηση της ηλεκτροπαραγωγής γίνεται με αποδοτικότερο τρόπο από την ηλεκτροπαραγωγή ενός απλού κύκλου ORC.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μελέτης της ξεχωριστής, και της συνδυασμένης λειτουργίας των εγκαταστάσεων των εικόνων 3.43 και 3.44. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για μια τυχαία πίεση λειτουργίας ανά εργαζόμενο μέσο και σενάριο, έχουμε δηλαδή τα αποτελέσματα τεσσάρων περιπτώσεων. Σημειώνεται πως όλα τα υπόλοιπα στοιχεία των εγκαταστάσεων είναι όπως έχουν περιγραφεί στις προηγούμενες παραγράφους.

Ξεχωριστή λειτουργία				
Περίπτωση μελέτης	R134a-30 Bar 1^ο Σενάριο	R152a-25 Bar 1^ο Σενάριο	R134a-30 Bar 2^ο Σενάριο	R152a-25 Bar 2^ο Σενάριο
Ηλεκτροπαραγωγή κύκλου ORC (KW)	1001	1057	1591	1536
Θερμική παραγωγή (KW)	9633	9667	9802	9512
Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης κύκλου ORC %	7.90	8.34	7.90	8.34

Πίνακας 3.5: Τιμές βασικών επιδόσεων των ξεχωριστών εγκαταστάσεων

Ενιαία λειτουργία				
Περίπτωση μελέτης	R134a-30 Bar 1^ο Σενάριο	R152a-25 Bar 1^ο Σενάριο	R134a-30 Bar 2^ο Σενάριο	R152a-25 Bar 2^ο Σενάριο
Ηλεκτροπαραγωγή (KW)	2250	2269	2290	2234
Θερμική παραγωγή (KW)	2611	3810	3695	4372
Ηλεκτρικός Βαθμός Απόδοσης %	9.63	9.70	9.23	9.44

Πίνακας 3.6: Τιμές επιδόσεων υβριδικής εγκατάστασης

Σύγκριση ξεχωριστής-ενιαίας λειτουργίας				
Περίπτωση μελέτης	R134a-30 Bar 1^ο Σενάριο	R152a-25 Bar 1^ο Σενάριο	R134a-30 Bar 2^ο Σενάριο	R152a-25 Bar 2^ο Σενάριο
Αύξηση Ηλεκτροπαραγωγής (KW)	1249	1212	699	698
Αύξηση Ηλεκτροπαραγωγής %	124.8 %	114.7 %	43.9 %	45.4 %
Μείωση θερμικής ισχύος (KW)	7022	5857	6107	5140
Συντελεστής σ_h μετατροπής θερμικής σε ηλεκτρική	17.79 %	20.69 %	11.45 %	13.58 %
Αύξηση ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης ⁽¹⁾	1.73 %	1.36 %	1.33 %	1.10 %

Πίνακας 3.7: Σύγκριση ξεχωριστών-υβριδικής εγκατάστασης

(1): Υβριδική Εγκατάσταση σε σχέση με απλό κύκλο ORC

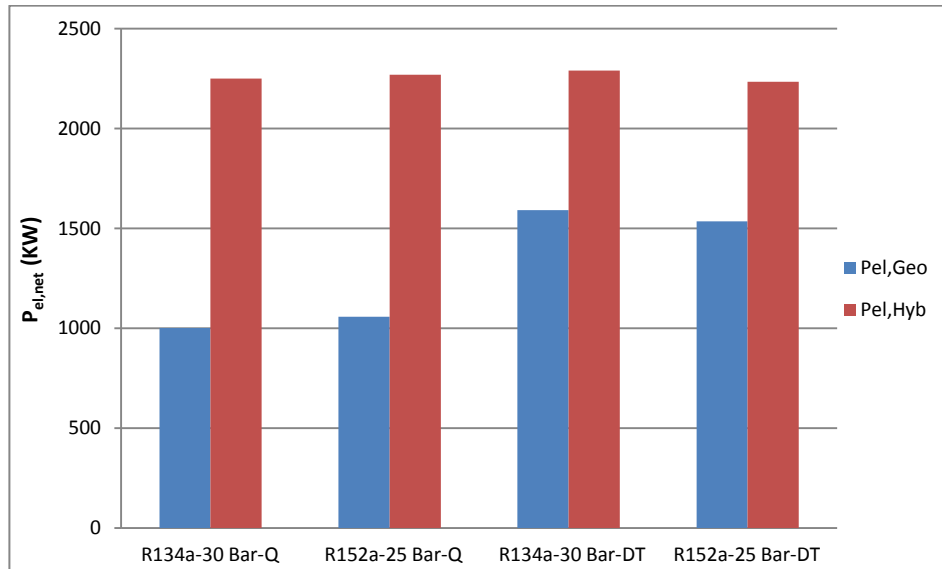
Παρατηρούμε ότι ο συνδυασμός των δύο εγκαταστάσεων προκαλεί αύξηση της ηλεκτροπαραγωγής κατά 120% περίπου για τα πρώτο σενάριο, και αύξηση 45% περίπου για το δεύτερο σενάριο. Βέβαια, η διαφορά αυτή υπέρ του πρώτου σεναρίου οφείλεται στο γεγονός ότι στο δεύτερο σενάριο έχουμε 50% περισσότερη ηλεκτροπαραγωγή στον απλό κύκλο ORC, ενώ οι τιμές της ηλεκτροπαραγωγής των συνδυασμένων εγκαταστάσεων είναι σχεδόν ίδιες.

Επίσης, παρατηρούμε ότι ο συντελεστής μετατροπής θερμικής ισχύος σε ηλεκτρική σ_h είναι της τάξης του 18-20% για το πρώτο σενάριο, και της τάξης του 12-13% για το δεύτερο σενάριο. Ο βαθμός απόδοσης των απλών εγκαταστάσεων ORC είναι της τάξης του 8% και για τις δύο περιπτώσεις, άρα με το συλλογισμό που αναφέραμε παραπάνω, ο συνδυασμός των δύο αυτών εγκαταστάσεων βοηθάει στην ηλεκτροπαραγωγή με αποδοτικότερο τρόπο από ότι ένας απλός κύκλος ORC.

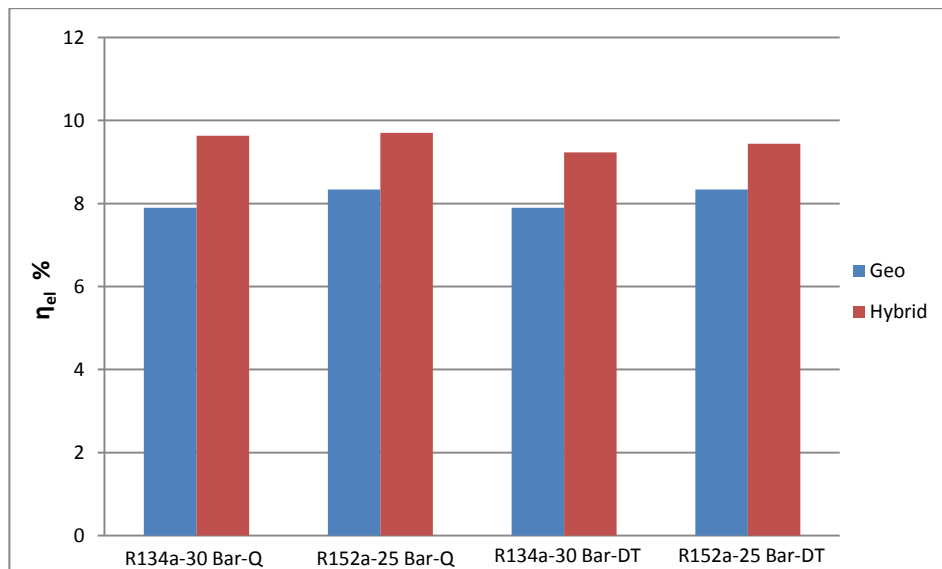
Άρα, καταλήγουμε στο συμπέρασμα, ότι είναι υπέρ μας, αν επιθυμούμε αύξηση της ηλεκτροπαραγωγής ενός απλού κύκλου ORC, να χρησιμοποιήσουμε ένα λέβητα βιομάζας για υπερθέρμανση του εργαζόμενου μέσου προ της εισόδου του στον ατμοστρόβιλο της εγκατάστασης. Εξάλλου, όπως παρατηρούμε από την παραπάνω σύγκριση έχουμε επιπρόσθετα αύξηση του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης κατά 1-1.5%. Βέβαια, είναι προφανές ότι η παραγωγή θερμικής ισχύος μειώνεται κατά πολύ, αλλά όπως έχουμε ήδη αναφέρει, μας ενδιαφέρει πρωτίστως η αύξηση της ηλεκτροπαραγωγής της εγκατάστασης. Εξάλλου, μπορούμε να παράγουμε όση θερμική ισχύ επιθυμούμε από γεωθερμία, εφόσον έχουμε διαθέσιμη την απαραίτητη παροχή πεδίου, κάνοντας παραπάνω γεωτρή-

σεις στην περιοχή, και χρησιμοποιώντας το συγκεκριμένο γεωθερμικό ρευστό αποκλειστικά για θερμική παραγωγή.

Στις εικόνες 3.45 και 3.46 βλέπουμε διαγραμματικά τη σύγκριση της ηλεκτροπαραγωγής και του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης για την απλή γεωθερμική εγκατάσταση και την υβριδική εγκατάσταση.



Εικόνα 3.45: Σύγκριση ηλεκτροπαραγωγής γεωθερμικού σταθμού με τον αντίστοιχο υβριδικό



Εικόνα 3.46: Σύγκριση ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης γεωθερμικού σταθμού με τον αντίστοιχο υβριδικό

*Geo: Αμιγώς Γεωθερμικό Σύστημα

*Hybrid: Υβριδικό Σύστημα

3.5) Κατανάλωση διαφόρων ειδών βιομάζας

Σε αυτήν την παράγραφο θα παρουσιάσουμε τις καταναλώσεις διαφόρων ειδών βιομάζας σε όλες τις εγκαταστάσεις που έχουμε μελετήσει ως τώρα, δηλαδή και για τα δύο σενάρια των δύο εργαζομένων μέσων. Η μελέτη θα γίνει για τις τιμές των θερμοκρασιών $T_{ph,ex}$ και T_{sh} , που καταλήξαμε στις παραγράφους 3.2 και 3.3, ενώ τα υπόλοιπα στοιχεία της εγκατάστασης θα είναι όπως έχουμε αναφέρει στην παράγραφο 3.1. Όπως αναφέραμε και στην παράγραφο 3.1 οι συστάσεις των διαφόρων βιομαζών πάρθηκαν από την έρευνα των Vassilev-Baxter-Andersen-Vassileva, οι οποίοι κατέγραψαν τη σύσταση πάνω από 85 ειδών βιομάζας. Βέβαια, εμείς θα παρουσιάσουμε την κατανάλωση των πιο συχνά εμφανιζόμενων μορφών βιομάζας. Ο επόμενος πίνακας παρουσιάζει τη σύσταση των ειδών βιομάζας που θα παρουσιάσουμε.

Βιομάζα	C	H	O	N	S	Water	Ash
Τσόφλια Αμυγδάλου (Almond Shells)	0.4512	0.0556	0.3812	0.0090	0.0000	0.0720	0.0310
Κοινό Γρασίδι (Bana Grass)	0.4314	0.0517	0.3694	0.0077	0.0009	0.0450	0.0940
Φλοιός Οξιός (Beech Bark)	0.5113	0.0601	0.3202	0.0045	0.0009	0.0840	0.0190
Πτηνοτροφικά Απορρίμματα (Chicken Litter)	0.3412	0.0384	0.1427	0.0349	0.0068	0.0930	0.3430
Φλοιός Βαμβακιού (Cotton Husk)	0.4531	0.0755	0.3578	0.0126	0.0000	0.0690	0.0320
Υπόλειμμα Ελάτου (Fir Mill Residue)	0.1897	0.0221	0.1568	0.0004	0.0000	0.6290	0.0020
Δασικό Υπόλειμμα (Forest Residue)	0.2203	0.0226	0.1718	0.0029	0.0004	0.5680	0.0140
Υπόλειμμα Επιπλοποιίας (Furniture Waste)	0.4387	0.0517	0.3540	0.0025	0.0000	0.1210	0.0320
Γρασίδι Μίσχανθου (Miscanthus Grass)	0.4226	0.0515	0.3797	0.0034	0.0017	0.1140	0.0270
Πιπεριά (Pepper Plant)	0.3376	0.0400	0.3920	0.0256	0.0048	0.0650	0.1350
Υπόλειμμα Πιπεριάς (Pepper Residue)	0.3789	0.0265	0.3905	0.0282	0.0050	0.0970	0.0740
Φλοιός Πεύκου (Pine Bark)	0.5030	0.0552	0.3731	0.0028	0.0009	0.0470	0.0180
Πριονίδι Πεύκου (Pine Sawdust)	0.4315	0.0508	0.3629	0.0008	0.0000	0.1530	0.0010
Τσόφλια Φιστικιού (Pistachio Shells)	0.4642	0.0584	0.3812	0.0064	0.0018	0.0750	0.0130
Πριονίδι (Sawdust)	0.3207	0.0386	0.2814	0.0032	0.0000	0.3490	0.0070
Αστικά Λύματα (Sewage Gludge)	0.2560	0.0367	0.1680	0.0307	0.0116	0.0640	0.4330
Φλοιός Σόγιας (Soya Husks)	0.4022	0.0594	0.4155	0.0080	0.0009	0.0630	0.0510
Άχυρο' Σίτου (Wheat Straw)	0.4125	0.0509	0.3641	0.0058	0.0017	0.1010	0.0640
Ξύλο (Wood)	0.4563	0.0561	0.4057	0.0009	0.0000	0.0780	0.0020
Υπόλειμμα Ξυλείας (Wood Residue)	0.3577	0.0424	0.2916	0.0035	0.0007	0.2640	0.0400
<u>Ασφαλτώδης Λιθάνθρακας (Bituminous Coal)</u>	0.6789	0.0409	0.0776	0.0106	0.0090	0.0310	0.1520
<u>Λιθάνθρακας (Coal)</u>	0.5842	0.0388	0.1016	0.0097	0.0127	0.0550	0.1980
<u>Λιγνίτης (Lignite)</u>	0.3744	0.0322	0.1386	0.0059	0.0339	0.1050	0.3100
<u>Ελληνικός Λιγνίτης 'Ός έχει' (Greek Lignite(As received))</u>	0.2001	0.0141	0.0777	0.0067	0.0044	0.5630	0.1340
<u>Ξηρός Ελληνικός Λιγνίτης (Pre Dried Greek Lignite)</u>	0.4163	0.0293	0.1617	0.0131	0.0102	0.1273	0.2422
Μέση Βιομάζα (Mean Biomass)	0.4083	0.0501	0.3236	0.0096	0.0016	0.1440	0.0600

Πίνακας 3.8: Σύσταση διαφόρων ειδών βιομάζας που θα μελετήσουμε

*Παρατηρούμε ότι στον παραπάνω πίνακα έχουν τοποθετηθεί και πέντε συμβατικά στερεά καύσιμα για σύγκριση, αλλά και η μέση βιομάζα που χρησιμοποιούμε σε όλους τους υπόλοιπους υπολογισμούς της παρούσας εργασίας.

**Υπενθυμίζεται πως η σύσταση της μέσης βιομάζας προέκυψε ως ο μέσος όρος όλων των ειδών βιομάζας που μελέτησαν οι Vassilev-Baxter-Andersen-Vassileva, και όχι ως ο μέσος όρος των ειδών που παρουσιάζουμε στην παρούσα παράγραφο.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές της κατώτερης θερμογόνου ικανότητας καθενός εκ των ειδών βιομάζας που μελετάμε, καθώς φυσικά και των συμβατικών στερεών καυσίμων, αλλά και της μέσης βιομάζας. Οι παρακάτω τιμές της κατώτερης θερμογόνου ικανότητας υπολογίστηκαν από το υπολογιστικό εργαλείο IPSErgo, σύμφωνα με το πρότυπο BOIE.

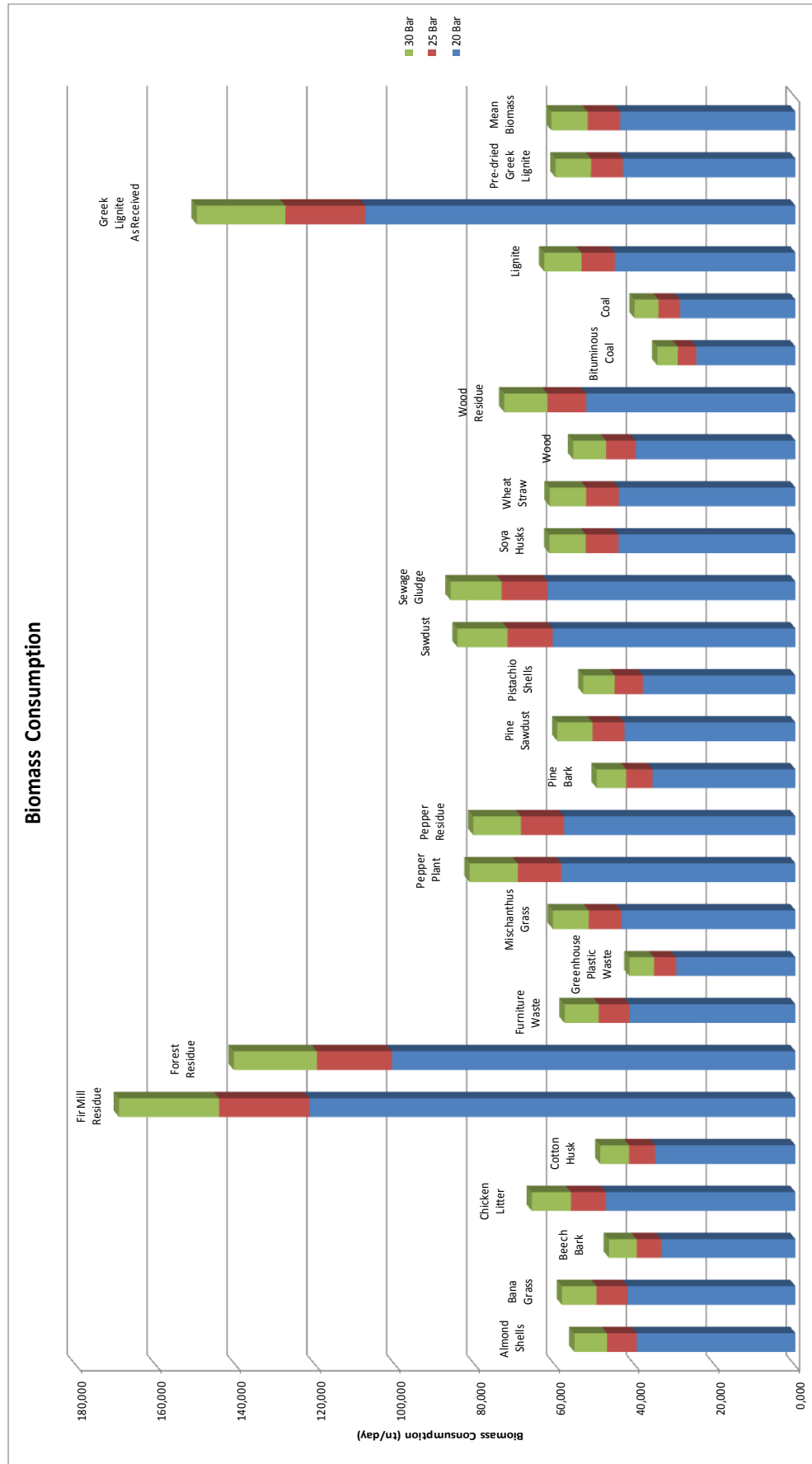
<u>Βιομάζα</u>	<u>Κατώτερη Θερμογόνος Ικανότητα (kJ/kg)</u>
Τσόφλια Αμυγδάλου (Almond Shells)	16701
Κοινό Γρασίδι (Bana Grass)	15816
Φλοιός Οξιάς (Beech Bark)	19807
Πτηνοτροφικά Απορρίμματα (Chicken Litter)	14009
Φλοιός Βαμβακιού (Cotton Husk)	18919
Υπόλειμμα Ελάτου (Fir Mill Residue)	5459
Δασικό Υπόλειμμα (Forest Residue)	6574
Υπόλειμμα Επιπλοποιίας (Furniture Waste)	15992
Γρασίδι Μίσχανθου (Miscanthus Grass)	15221
Υπόλειμμα Πιπεριάς (Pepper Residue)	11463
Φλοιός Πεύκου (Pine Bark)	18585
Πριονίδι Πεύκου (Pine Sawdust)	15507
Τσόφλια Φιστικιού (Pistachio Shells)	17409
Πριονίδι (Sawdust)	10928
Αστικά Λύματα (Sewage Gludge)	10709
Φλοιός Σόγιας (Soya Husks)	15002
Άχυρο΄ Σίτου (Wheat Straw)	15026
Ξύλο (Wood)	16607
Υπόλειμμα Ξυλείας (Wood Residue)	12683
<u>Ασφαλτώδης Λιθάνθρακας</u> (Bituminous Coal)	26732
<u>Λιθάνθρακας (Coal)</u>	22958
<u>Λιγνίτης (Lignite)</u>	14701
<u>Ελληνικός Λιγνίτης 'Ως έχει'</u> (Greek Lignite(As received))	6168
<u>Ξηρός Ελληνικός Λιγνίτης</u> (Pre Dried Greek Lignite)	15386
Μέση Βιομάζα (Mean Biomass)	15133

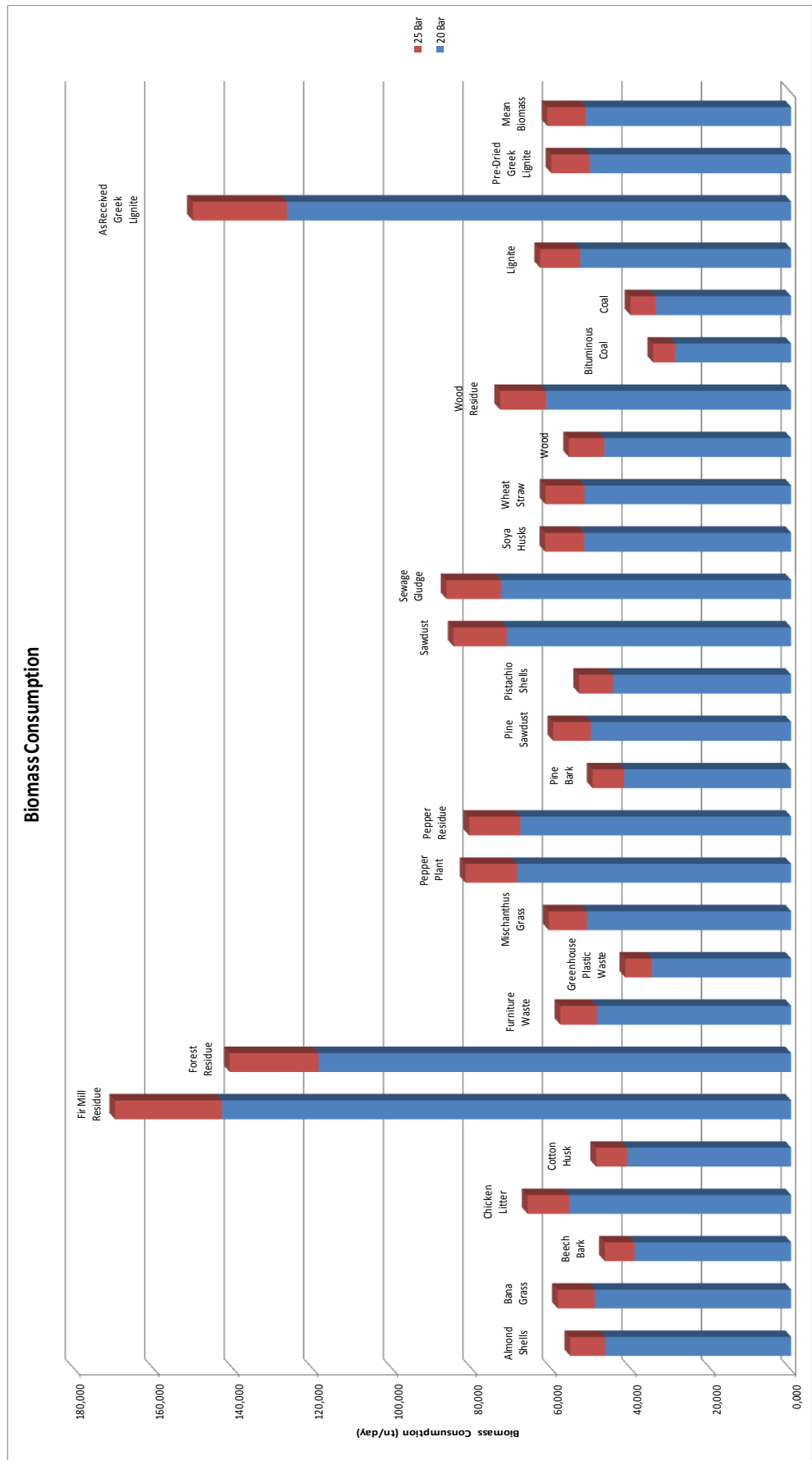
Πίνακας 3.9: Κατώτερη θερμογόνος ικανότητα των ειδών βιομάζας που θα μελετήσουμε

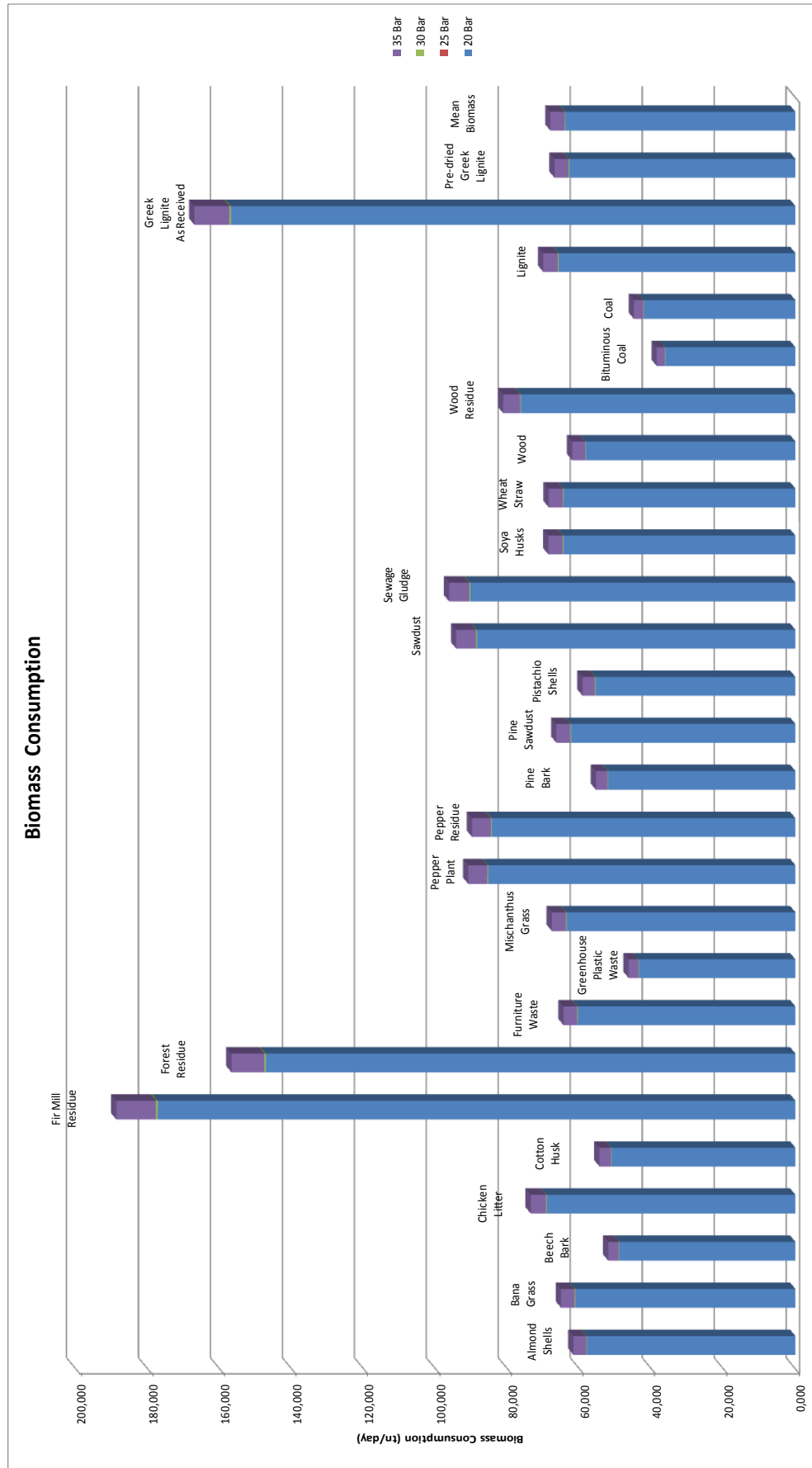
Όπως παρατηρούμε από τον παραπάνω πίνακα, από όλες τις μορφές βιομάζας την υψηλότερη θερμογόνο ικανότητα έχει ο φλοιός οξιάς (beech bark), ενώ τη χαμηλότερη θερμογόνο ικανότητα έχει το υπόλειμμα ελάτου (fir mill residue). Αξιοσημείωτη είναι η διαφορά στη θερμογόνο ικανότητα των δύο παραπάνω ειδών βιομάζας, αφού ο φλοιός οξιάς έχει πάνω από τρεις φορές μεγαλύτερη θερμογόνο ικανότητα από το υπόλειμμα ελάτου. Άρα, διαπιστώνουμε ότι η θερμογόνο ικανότητα της βιομάζας κυμαίνεται σε ένα πολύ μεγάλο εύρος. Βέβαια, παρατηρούμε ότι ο λιθάνθρακας και ο ασφαλτώδης λιθάνθρακας έχουν υψηλότερη θερμογόνο ικανότητα από όλα τα είδη βιομάζας που μελετώνται.

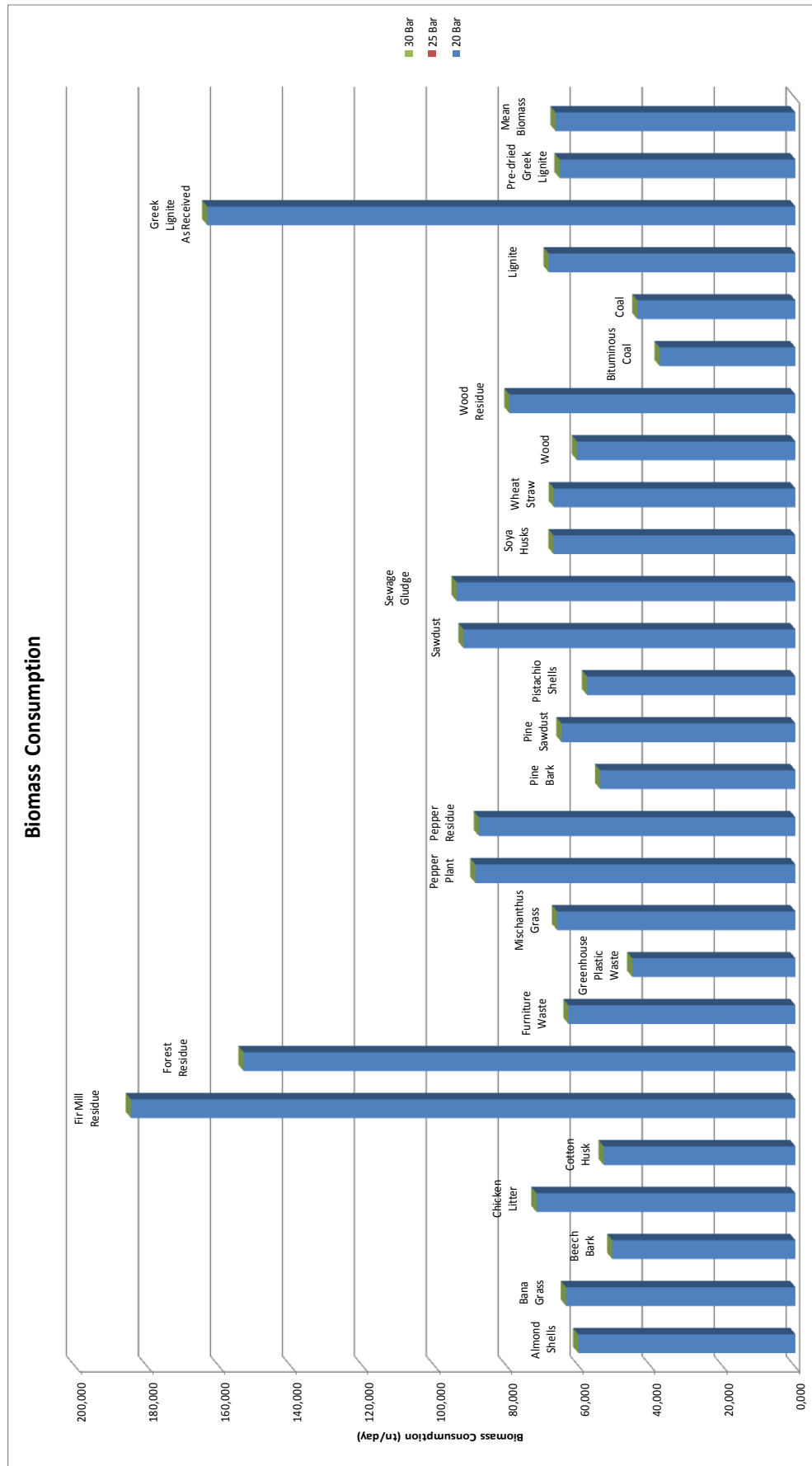
Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά οι καταναλώσεις όλων των παραπάνω ειδών βιομάζας κατά σειρά:

- Εργαζόμενο μέσο R134a, πρώτο σενάριο.
- Εργαζόμενο μέσο R152a, πρώτο σενάριο.
- Εργαζόμενο μέσο R134a, δεύτερο σενάριο.
- Εργαζόμενο μέσο R152a, δεύτερο σενάριο.









Παρατηρούμε ότι στα δύο τελευταία διαγράμματα που αφορούν το δεύτερο σενάριο υπάρχουν ορισμένες ιδιομορφίες, λόγω του ότι αυξανόμενης της πίεσης ενδέχεται να έχουμε μείωση της κατανάλωσης βιομάζας. Αυτό προφανώς, οφείλεται στη μείωση της παροχής εργαζόμενου μέσου. Σε αυτές τις περιπτώσεις που δεν φαίνονται στο διάγραμμα, η κατανάλωση βιομάζας είναι μικρότερη κατά το πολύ 10% από τη μέγιστη τιμή που φαίνεται στο διάγραμμα. Στις περισσότερες περιπτώσεις η κατανάλωση είναι περίπου ίδια.

Τέλος, παρατηρούμε ότι οι καταναλώσεις βιομάζας για το ίδιο σενάριο, είναι σχεδόν ίδιες για τα δύο εργαζόμενα μέσα, ενώ στο δεύτερο σενάριο παρουσιάζεται γενικά κατανάλωση βιομάζας κατά 10% περίπου μεγαλύτερη από το πρώτο σενάριο.

3.6) Μελέτη θερμοκρασίας γεωθερμικού ρευστού (T_{geo})

Σε αυτήν την παράγραφο θα μελετήσουμε τη λειτουργικότητα και τις επιδόσεις της εγκατάστασης για μεταβαλλόμενη θερμοκρασία γεωθερμικού ρευστού T_{geo} . Πρακτικά, η θερμοκρασία αυτή είναι η μοναδική εξωτερική παράμετρος του συστήματος, της οποίας η τιμή επηρεάζει κατά πολύ τις επιδόσεις του συστήματος. Σε αυτήν την παράγραφο, θα έχουμε σταθερές τις δύο εσωτερικές θερμοκρασίες του συστήματος $T_{ph,ex}$ και T_{sh} , όπως τις υπολογίσαμε στις παραγράφους 3.2 και 3.3 αντίστοιχα, και θα είναι μεταβλητή η T_{geo} . Δεν είναι τυχαία η σειρά που επιλέξαμε να μελετήσουμε αυτές τις κρίσιμες θερμοκρασίες του συστήματος καθώς το πλέον σημαντικό σε μια τέτοια εγκατάσταση είναι να βελτιστοποιήσουμε τις εσωτερικές θερμοκρασίες του συστήματος, ώστε η εγκατάσταση να λειτουργεί με βέλτιστο τρόπο, ανεξαρτήτως της θερμοκρασίας του γεωθερμικού ρευστού. Με άλλα λόγια, αν έχουμε ρυθμίσει τις θερμοκρασίες $T_{ph,ex}$ και T_{sh} στις βέλτιστες τιμές τους, όπως τις βρήκαμε στις παραγράφους 3.2-3.3, τότε το σύστημα θα λειτουργεί βέλτιστα υπό αυτές τις τιμές ανεξαρτήτως των μεταβολών της θερμοκρασίας T_{geo} . Μελετώντας πλέον αυτή τη θερμοκρασία, έχουμε ολοκληρώσει τη μελέτη γύρω από τις θερμοκρασίες που επηρεάζουν τις επιδόσεις και τη λειτουργία της εγκατάστασης. Βέβαια, σε αυτό το σημείο να τονίσουμε ότι οι θερμοκρασίες $T_{ph,ex}$ και T_{sh} είναι θερμοκρασίες τις οποίες τις ρυθμίζει ο χρήστης, ενώ η θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού T_{geo} είναι η θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού στον ταμιευτήρα την οποία προφανώς δεν μπορεί να ρυθμίσει ο χρήστης. Πρακτικά, η μελέτη αυτής της παραγράφου λειτουργεί σαν ένας χάρτης των επιδόσεων του συστήματος, αφού δεδομένης της θερμοκρασίας του γεωθερμικού ρευστού θα γνωρίζουμε τις επιδόσεις του συστήματος, αλλά βέβαια δεν μπορούμε με την παρούσα μελέτη να αποφανθούμε για την βέλτιστη θερμοκρασία γεωθερμικού ρευστού, καθώς, όπως αναφέραμε, δεν μπορούμε να την ρυθμίσουμε.

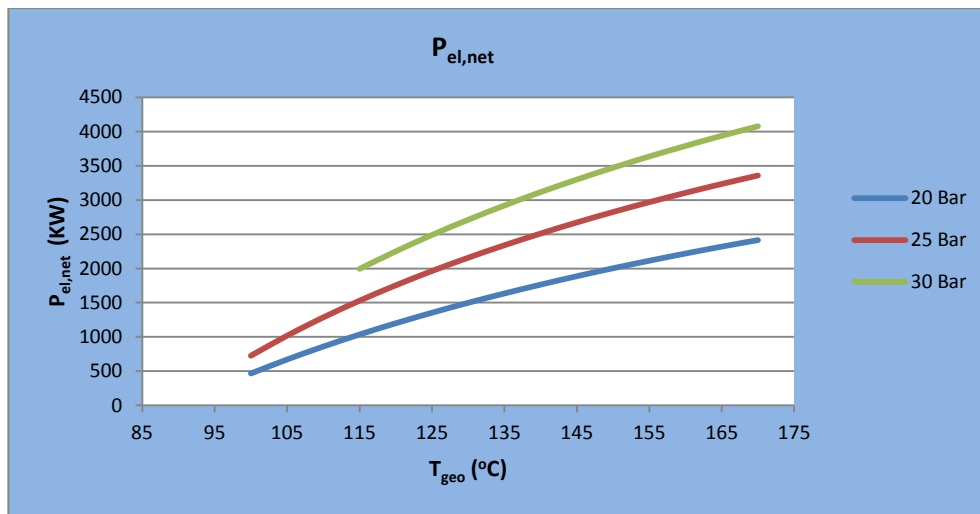
Προφανώς, η θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού επηρεάζει τις επιδόσεις του συστήματος κατά τον ίδιο τρόπο ανεξαρτήτως των εσωτερικών θερμοκρασιών και ρυθμίσεων του συστήματος (1° - 2° Σενάριο). Για αυτόν το λόγο η μελέτη θα γίνει μόνο για το πρώτο σενάριο και τα αποτελέσματα θα είναι αντίστοιχα για το δεύτερο σενάριο. Μια μόνο μικρή διαφοροποίηση στα αποτελέσματα των δύο σεναρίων υπάρχει, η οποία θα αναφερθεί στο τέλος της παραγράφου.

Βασικά στοιχεία της εγκατάστασης:

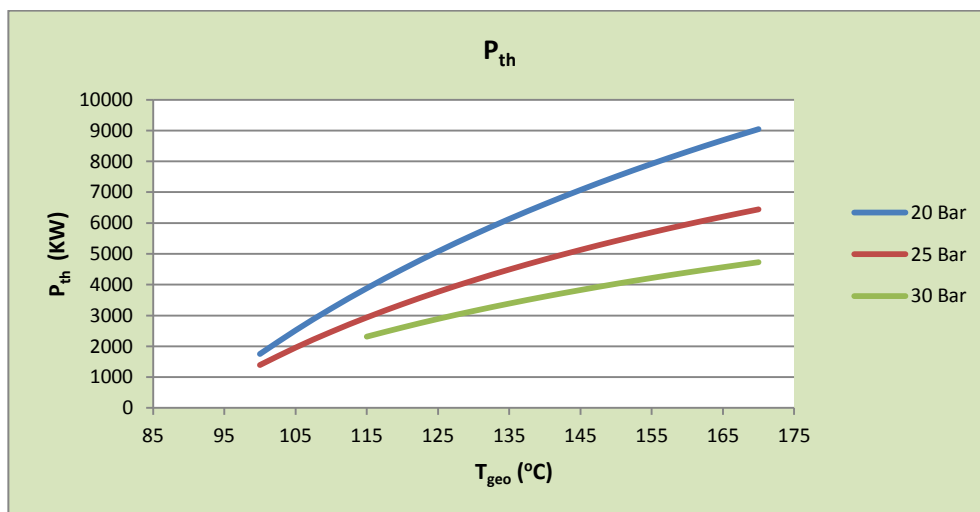
- Θερμοκρασία εξόδου του γεωθερμικού ρευστού στο περιβάλλον 90°C .
- Παροχή μάζας και πίεση εισόδου του γεωθερμικού ρευστού στην εγκατάσταση, όπως αναφέρθηκαν στην παράγραφο 3.1.
- Θερμοκρασία εξόδου από τον αναγεννητικό προθερμαντή $T_{ph,ex}$, όπως βρέθηκε στην παράγραφο 3.2 για κάθε περίπτωση.

- Θερμοκρασία υπερθέρμανσης του εργαζόμενου μέσου από τον υπερθερμαντή βιομάζας T_{sh} , όπως βρέθηκε στην παράγραφο 3.3 για κάθε περίπτωση.
- Διαφορά θερμοκρασίας στο θερμό άκρο του γεωθερμικού υπερθερμαντή 20°C . Με αυτήν τη σχέση πρακτικά βρίσκουμε τη θερμοκρασία εξόδου του εργαζόμενου μέσου από τους γεωθερμικούς εναλλάκτες.
- Μέση σύσταση βιομάζας, όπως αναφέρθηκε στις προηγούμενες παραγράφους.

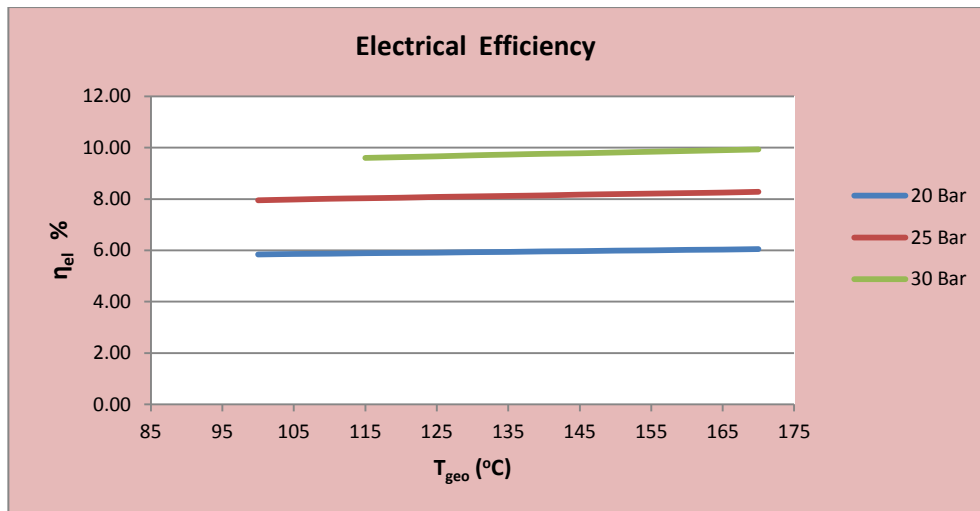
Παρακάτω παρουσιάζονται διαγραμματικά τα αποτελέσματα των κυριών μεταβλητών του συστήματος για εργαζόμενο μέσο R134a. Προφανώς, τα αποτελέσματα για εργαζόμενο μέσο R152a θα είναι ακριβώς της ίδιας μορφής, απλά θα είναι διαφορετικά σαν απόλυτοι αριθμοί, κάτι απολύτως αναμενόμενο. Θα αρκεστούμε στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων για R134a-1^ο σενάριο, και τα συμπεράσματα που θα εξάγουμε θα είναι κοινά για τα δύο σενάρια και κάθε εργαζόμενο μέσο.



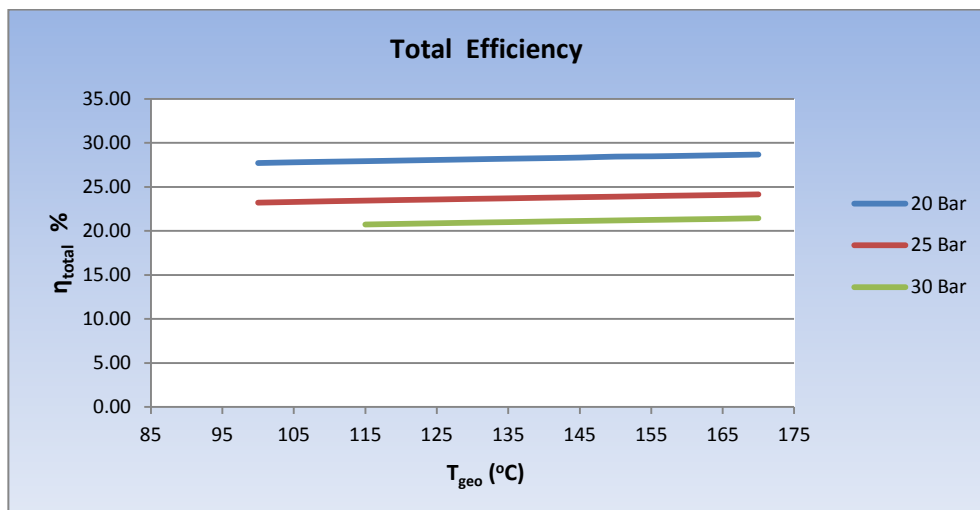
Εικόνα 3.47: Διάγραμμα καθαρής ηλεκτρικής ισχύος της εγκατάστασης συναρτήσει της θερμοκρασίας T_{geo} για διάφορες πιέσεις



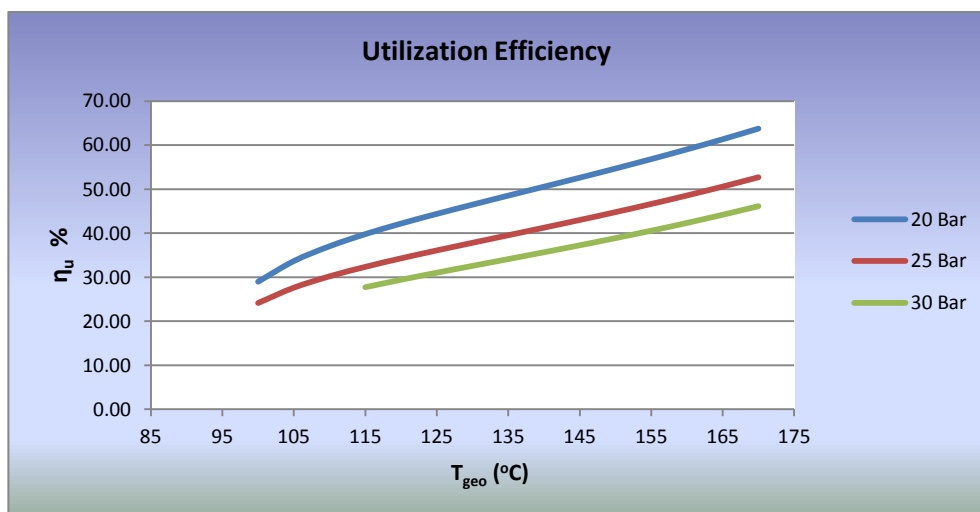
Εικόνα 3.48: Παραγόμενη θερμική ισχύς της εγκατάστασης συναρτήσει της θερμοκρασίας T_{geo} για διάφορες πιέσεις



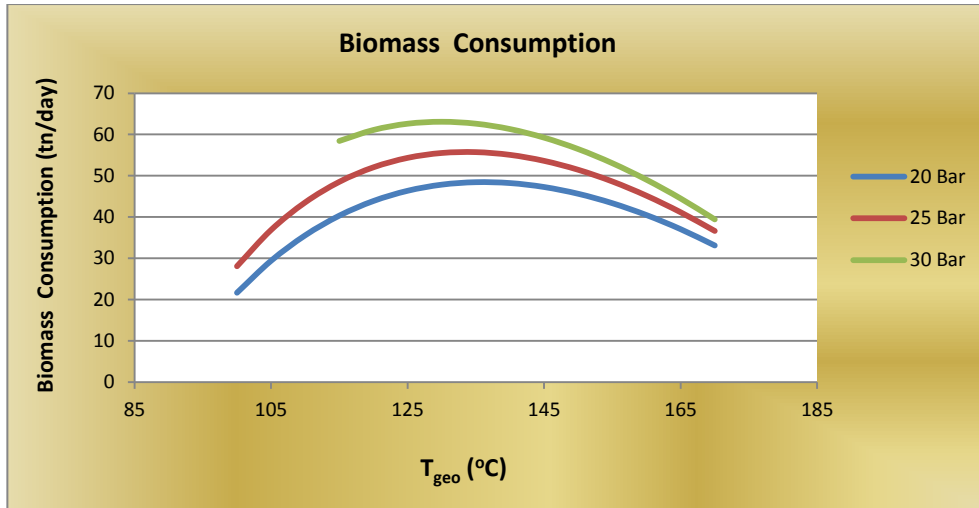
Εικόνα 3.49: Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης συναρτήσει της θερμοκρασίας T_{geo} για διάφορες πιέσεις



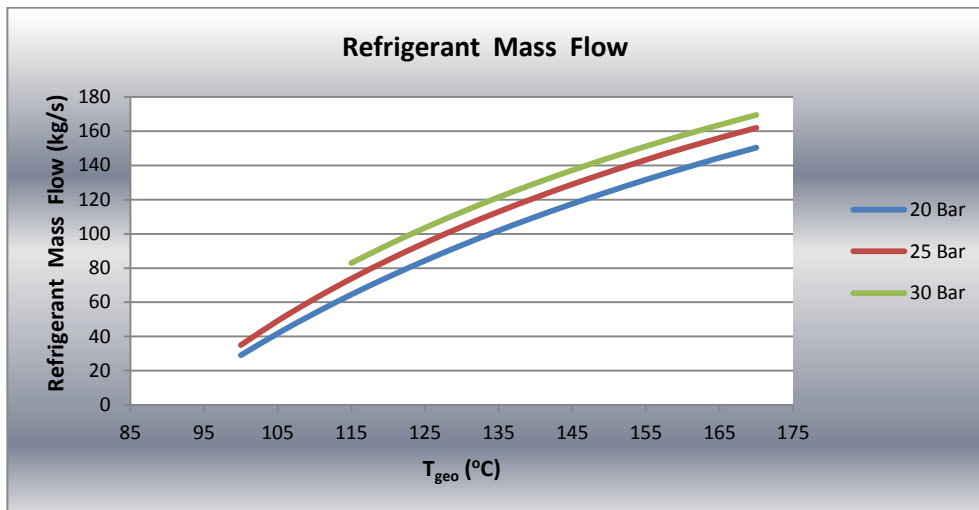
Εικόνα 3.50: Ολικός βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης συναρτήσει της θερμοκρασίας T_{geo} για διάφορες πιέσεις



Εικόνα 3.51: Βαθμός χρησιμοποίησης συναρτήσει της θερμοκρασίας T_{geo} για διάφορες πιέσεις



Εικόνα 3.52: Κατανάλωση βιομάζας συναρτήσει της θερμοκρασίας T_{geo} για διάφορες πιέσεις



Εικόνα 3.53: Παροχή μάζας εργαζόμενου μέσου συναρτήσει της θερμοκρασίας T_{geo} για διάφορες πιέσεις

Από την εικόνα 3.53 παρατηρούμε ότι αυξανόμενης της θερμοκρασίας T_{geo} έχουμε αύξηση της παροχής μάζας εργαζόμενου μέσου. Αυξανόμενης της θερμοκρασίας εισόδου του γεωθερμικού ρευστού T_{geo} και δεδομένης της σταθερής θερμοκρασίας εξόδου στο περιβάλλον, έχουμε αύξηση της προσδιδόμενης θερμότητας από το γεωθερμικό ρευστό στο εργαζόμενο μέσο. Ταυτόχρονα όμως, έχουμε ορίσει ότι η θερμοκρασιακή διαφορά στο θερμό άκρο του γεωθερμικού προθερμαντή είναι σταθερή και ίση με 20°C . Αυτό σημαίνει ότι αυξανόμενης της θερμοκρασίας T_{geo} έχουμε αύξηση της θερμοκρασίας εξόδου του εργαζόμενου μέσου από τους γεωθερμικούς εναλλάκτες, άρα αύξηση της απορροφόμενης θερμότητας ανά μονάδα μάζας του εργαζόμενου μέσου. Προφανώς, υπερισχύει η αύξηση της προσδιδόμενης θερμότητας από το γεωθερμικό ρευστό. Έτσι έχουμε αύξηση της παροχής μάζας εργαζόμενου μέσου, ώστε να έχουμε διατήρηση της μεταφερόμενης θερμότητας. Η παροχή μάζας εργαζόμενου μέσου για σταθερή θερμοκρασία T_{geo} αυξάνεται με την πίεση λειτουργίας, επειδή όπως έχουμε πει και στις προηγούμενες παραγράφους, αυξάνεται η θερμοκρασία εισόδου στους γεωθερμικούς εναλλάκτες ($T_{ph,ex}$) με αύξηση της πίεσης λειτουργίας, άρα έχουμε μείωση της απορροφόμενης θερμότητας ανά μονάδα μάζας του εργαζόμενου μέσου. Άρα, για διατήρηση της μεταφερόμενης θερμότητας έχουμε αύξηση της παροχής μάζας εργαζόμενου μέσου με αύξηση της πίεσης λειτουργίας.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η εικόνα 3.52 στην οποία παρατηρούμε ότι μέχρι κάποια θερμοκρασία έχουμε αύξηση της κατανάλωσης βιομάζας με αύξηση της θερμοκρασίας T_{geo} , ενώ μετά από αυτή τη θερμοκρασία έχουμε μείωση της κατανάλωσης βιομάζας με αύξηση της θερμοκρασίας T_{geo} . Η κατανάλωση βιομάζας εξαρτάται από δύο παράγοντες. Πρώτον, από την παροχή μάζας εργαζόμενου μέσου, και δεύτερον, από την απαιτούμενη αύξηση της θερμοκρασίας του εργαζόμενου μέσου, δηλαδή την απαιτούμενη πρόσδοση θερμότητας ανά μονάδα μάζας εργαζόμενου μέσου. Όσον αφορά τον πρώτο παράγοντα, είδαμε από την εικόνα 3.53 ότι αυξανόμενης της θερμοκρασίας T_{geo} έχουμε αύξηση της παροχής μάζας εργαζόμενου μέσου. Όσον αφορά το δεύτερο παράγοντα, αυξανόμενης της θερμοκρασίας T_{geo} και δεδομένου ότι η θερμοκρασία εξόδου από τον υπερθερμαντή βιομάζας είναι σταθερή ανάλογα το εργαζόμενο μέσο, έχουμε μείωση της απαιτούμενης μεταφερόμενης θερμότητας στο εργαζόμενο μέσο ανά μονάδα μάζας. Άρα, διαπιστώνουμε ότι έχουμε δυο παράγοντες που δρουν αντίστροφα ως προς τον προσδιορισμό της κατανάλωσης βιομάζας. Από την εικόνα 3.52 διαπιστώνουμε ότι στις χαμηλές θερμοκρασίες, όπου έχουμε αύξηση της κατανάλωσης βιομάζας, υπερισχύει η αύξηση της παροχής μάζας εργαζόμενου μέσου. Στις υψηλότερες θερμοκρασίες, όπου έχουμε μείωση της κατανάλωσης βιομάζας, υπερισχύει η μείωση της απαιτούμενης πρόσδοσης θερμότητας ανά μονάδα μάζας εργαζόμενου μέσου. Η αύξηση της κατανάλωσης βιομάζας με αύξηση της πίεσης λειτουργίας προκύπτει από την αύξηση της παροχής εργαζόμενου μέσου με αύξηση της πίεσης λειτουργίας, όπως είδαμε από την εικόνα 3.53. Έτσι, προκύπτει η μορφή της εικόνας 3.52.

Από την εικόνα 3.47 παρατηρούμε ότι αυξανόμενης της θερμοκρασίας του γεωθερμικού ρευστού T_{geo} έχουμε αύξηση της καθαρής ηλεκτροπαραγωγής της εγκατάστασης. Η θερμοκρασία υπερθέρμανσης του εργαζόμενου μέσου από τον υπερθερμαντή βιομάζας, άρα και η θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο, είναι ανεξάρτητη της θερμοκρασίας T_{geo} και σταθερή ανά περίπτωση. Άρα για τον ίδιο λόγο πίεσης του στρόβιλου, έχουμε σταθερή παραγωγή έργου από το στρόβιλο ανά μονάδα μάζας εργαζόμενου μέσου. Άρα, λόγω της αύξησης της παροχής εργαζόμενου μέσου αυξανόμενης της θερμοκρασίας T_{geo} , έχουμε αύξηση της καθαρής ηλεκτροπαραγωγής της εγκατάστασης. Προφανώς, η αύξηση της ηλεκτροπαραγωγής με αύξηση της πίεσης λειτουργίας, οφείλεται σε δύο παράγοντες. Ο πρώτος είναι η αύξηση της παροχής μάζας εργαζόμενου μέσου με αύξηση της πίεσης λειτουργίας, όπως είδαμε και από την εικόνα 3.53, ενώ ο δεύτερος παράγοντας είναι η αύξηση του λόγου πίεσης του στρόβιλου, άρα και η αύξηση του ειδικού έργου του στρόβιλου. Αυτοί οι δύο παράγοντες συνηγορούν στην αύξηση της ηλεκτροπαραγωγής με αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου στην εγκατάσταση του γεωθερμικού ρευστού T_{geo} .

Η εικόνα 3.48 μας δείχνει ότι αυξανόμενης της θερμοκρασίας T_{geo} έχουμε αύξηση της θερμικής παραγωγής της εγκατάστασης. Όπως ήδη αναφέραμε, η θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο είναι ανεξάρτητη της θερμοκρασίας T_{geo} και σταθερή ανά περίπτωση. Επίσης, δεδομένου του σταθερού λόγου πίεσης του στρόβιλου, σε συγκεκριμένη πίεση λειτουργίας, ο οποίος είναι επίσης ανεξάρτητος της θερμοκρασίας T_{geo} προκύπτει ότι η θερμοκρασία εξόδου του εργαζόμενου μέσου από το στρόβιλο είναι ανεξάρτητη της θερμοκρασίας T_{geo} . Επίσης, σταθερή και ανεξάρτητη της θερμοκρασίας T_{geo} είναι η θερμοκρασία εξόδου από τον αναγεννητικό προθερμαντή $T_{ph,ex}$. Άρα, για μια συγκεκριμένη πίεση λειτουργίας προκύπτει από διατήρηση της ενέργειας, ότι η διαθέσιμη θερμοκρασία για παραγωγή θερμικής ισχύος είναι σταθερή και ανεξάρτητη της T_{geo} . Άρα, η παραγόμενη θερμική ισχύς εξαρτάται αποκλειστικά και μόνο, από την παροχή μάζας εργαζόμενου μέσου. Βέβαια, από την εικόνα 3.53 είδαμε ότι έχουμε αύξηση της παροχής εργαζόμενου μέσου αυξανόμενης της θερμοκρασίας T_{geo} , άρα αντίστοιχα έχουμε αύξηση της παραγόμενης θερμικής ισχύος, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.48. Επίσης, η μείωση της παραγόμενης θερμικής ενέργειας αυξανόμενης της πίεσης λειτουργίας, οφείλεται όπως είχαμε αναφέρει, στο γεγονός ότι αυξανόμενης της πίεσης λειτουργίας αυξάνει ο λόγος πίεσης του στρόβιλου, άρα μειώνεται η

θερμοκρασία εξόδου από το στρόβιλο. Δεδομένης της σταθερής θερμοκρασίας εξόδου από τον αναγεννητικό προθερμαντή $T_{ph,ex}$ και δεδομένης της διατήρησης της ενέργειας, προκύπτει ότι έχουμε μείωση της διαθέσιμης για παραγωγή θερμικής ενέργειας θερμοκρασία εργαζόμενου μέσου. Βέβαια, με αύξηση της πίεσης λειτουργίας έχουμε αύξηση της παροχής μάζας εργαζόμενου μέσου, που συμβάλλει προφανώς στην αύξηση της παραγωγής θερμικής ενέργειας. Η μείωση, όμως, της διαθέσιμης θερμοκρασίας για παραγωγή θερμικής ενέργειας υπερσχύει της αύξησης της παροχής εργαζόμενου μέσου. Έτσι προκύπτει η μορφή της εικόνας 3.48 όπου έχουμε μείωση της παραγόμενης θερμικής ενέργειας αυξανόμενης της πίεσης λειτουργίας της εγκατάστασης.

Όσον αφορά τον ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης, έχουμε αύξηση του αριθμητή (καθαρή ηλεκτρική ισχύς), όπως είδαμε στην εικόνα 3.47 αυξανόμενης της θερμοκρασίας του γεωθερμικού ρευστού T_{geo} . Επίσης, έχουμε συνεχή αύξηση του ενός όρου του παρανομαστή (απορροφόμενη θερμότητα από το γεωθερμικό ρευστό), λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας T_{geo} , ενώ στο δεύτερο όρο του παρανομαστή (προσδιδόμενη θερμότητα από τη βιομάζα) έχουμε τη διακύμανση που φαίνεται στην εικόνα 3.53. Όλα αυτά οδηγούν στη μορφή της εικόνας 3.49, όπου βλέπουμε ότι έχουμε σχεδόν σταθερό ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου του γεωθερμικού ρευστού T_{geo} , με μια ελαφρά αυξητική τάση αυξανόμενης της θερμοκρασίας. Επίσης, αυξανόμενης της πίεσης λειτουργίας έχουμε αύξηση του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης για τους λόγους που έχουμε αναφέρει στις προηγούμενες παραγράφους 3.2-3.3. Έτσι, η εικόνα 3.49 αποκτά την μορφή που παρατηρούμε.

Στην εικόνα 3.50 παρατηρούμε ότι ο ολικός βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης έχει παρόμοια συμπεριφορά με τον ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης. Συγκεκριμένα, παρουσιάζει μία μικρή αύξηση αυξανόμενης της θερμοκρασίας εισόδου του γεωθερμικού ρευστού στην εγκατάσταση T_{geo} . Όπως και στην περίπτωση του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης, αυξανόμενης της θερμοκρασίας εισόδου του γεωθερμικού ρευστού έχουμε αύξηση των δύο όρων του αριθμητή (καθαρή ηλεκτρική ισχύς-παραγόμενη θερμική ισχύς), έχουμε αύξηση του ενός όρου του παρανομαστή (απορροφόμενη θερμότητα από το γεωθερμικό ρευστό), ενώ ο δεύτερος όρος του παρανομαστή (προσδιδόμενη θερμότητα από τη βιομάζα) παρουσιάζει τη διακύμανση της εικόνας 3.53. Όλα αυτά συντιθέμενα έχουν ως αποτέλεσμα το σχεδόν σταθερό ολικό βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.50. Η αύξηση της πίεσης λειτουργίας της εγκατάστασης έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του ενός όρου του αριθμητή (καθαρή ηλεκτρική ισχύς), μείωση του δεύτερου όρου του αριθμητή (παραγόμενη θερμική ισχύς), αύξηση του ενός όρου του αριθμητή (προσδιδόμενη θερμότητα από τη βιομάζα), ενώ ο δεύτερος όρος του παρανομαστή (απορροφόμενη θερμότητα από το γεωθερμικό ρευστό) παραμένει σταθερός. Προφανώς, η μείωση της παραγόμενης θερμικής ισχύος υπερσχύει των άλλων όρων, για αυτό έχουμε μείωση του ολικού βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης αυξανόμενης της πίεσης λειτουργίας.

Η εικόνα 3.51 μας δείχνει τη διακύμανση του βαθμού χρησιμοποίησης των πηγών ενέργειας συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου του γεωθερμικού ρευστού T_{geo} . Οι συλλογισμοί που αιτιολογούν τη μορφή της εικόνας 3.51 είναι παρόμοιοι με τους συλλογισμούς που αιτιολόγησαν τη μορφή των καμπυλών του ολικού βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης. Η μόνη διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι η αύξηση του αριθμητή σε αυτήν την περίπτωση υπερσχύει πολύ της διακύμανσης του παρανομαστή. Έτσι προκύπτει η μορφή της εικόνας 3.51 όπου έχουμε αύξηση του βαθμού χρησιμοποίησης των πηγών ενέργειας αυξανόμενης της θερμοκρασίας γεωθερμικού ρευστού T_{geo} . Τέλος, παρατηρούμε ότι αυξανόμενης της πίεσης λειτουργίας έχουμε μείωση του βαθμού χρησιμοποίησης των πηγών ενέργειας.

Κλείνοντας την παρούσα παράγραφο αξίζει να αναφέρουμε τη μοναδική διαφορά που παρουσιάζεται μεταξύ των δύο σεναρίων. Η μοναδική διαφορά είναι ως προς την παροχή

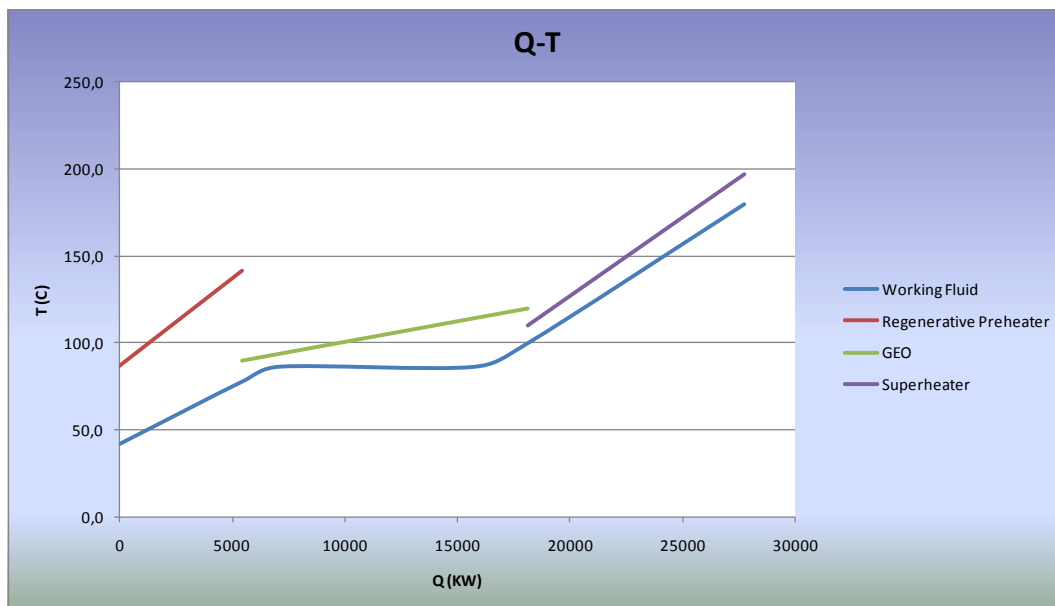
εργαζόμενου μέσου. Σε αντίθεση με το πρώτο σενάριο όπου έχουμε αύξηση της παροχής του εργαζόμενου μέσου με αύξηση της πίεσης λειτουργίας, στο δεύτερο σενάριο έχουμε μείωση της παροχής εργαζόμενου μέσου αυξανόμενης της πίεσης λειτουργίας. Στο δεύτερο σενάριο έχουμε αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου στους γεωθερμικούς εναλλάκτες, αυξανόμενης της πίεσης λειτουργίας, άρα έχουμε μείωση της απαιτούμενης μεταφερόμενης θερμότητας ανά μονάδα μάζας εργαζόμενου μέσου, όπως και στο πρώτο σενάριο. Η διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι ταυτόχρονα έχουμε αύξηση της θερμοκρασίας εξόδου του γεωθερμικού ρευστού, άρα μειώνεται η απορροφόμενη θερμότητα από το γεωθερμικό ρευστό. Άρα, οι δύο αυτοί παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η παροχή μάζας εργαζόμενου μέσου δρουν αντίστροφα. Προφανώς, υπερισχύει η μείωση της απορροφόμενης θερμότητας από το γεωθερμικό ρευστό. Έτσι έχουμε μείωση της παροχής μάζας εργαζόμενου μέσου αυξανόμενης της πίεσης λειτουργίας.

Τέλος, όλα τα υπόλοιπα μεγέθη έχουν ακριβώς ίδια συμπεριφορά συναρτήσεως της θερμοκρασίας γεωθερμικού ρευστού και της πίεσης λειτουργίας του συστήματος.

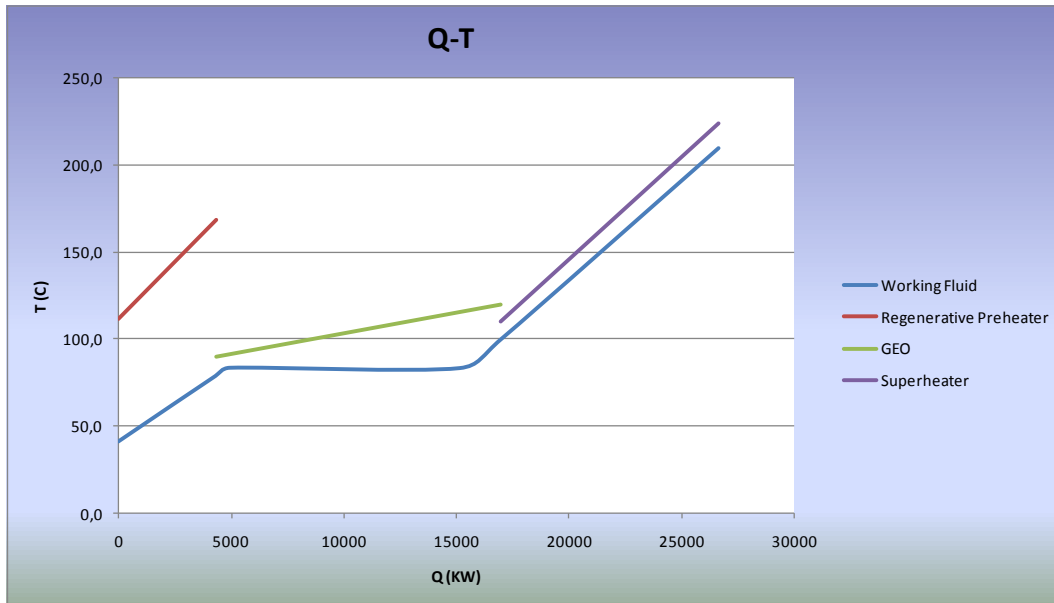
3.7) Μεταφερόμενη θερμότητα και ροή ενέργειας

Στην παρούσα παράγραφο θα μελετήσουμε τη μετάδοση θερμότητας και τη ροή ενέργειας στις μελετώμενες εγκαταστάσεις. Συγκεκριμένα, θα παρουσιαστούν διαγράμματα Q-T της εγκατάστασης, καθώς και συγκεντρωτικοί πίνακες μεταφερόμενης θερμότητας ανά τμήμα της εγκατάστασης, ανά εργαζόμενο μέσο και ανά σενάριο. Τέλος, θα παρουσιαστούν ενδεικτικά διαγράμματα Sankey ροής ενέργειας στην εγκατάσταση.

Παρακάτω παρουσιάζονται ενδεικτικά τα διαγράμματα Q-T ορισμένων αντιπροσωπευτικών περιπτώσεων που μελετήθηκαν. Συγκεκριμένα, θα παρουσιαστούν τα διαγράμματα Q-T που αφορούν τις περιπτώσεις μέγιστης πίεσης λειτουργίας για τα δύο εργαζόμενα μέσα στο πρώτο σενάριο.



Εικόνα 3.54: Διάγραμμα μεταφερόμενης θερμότητας συναρτήσεως της θερμοκρασίας για εργαζόμενο μέσο R134a, σε πίεση 30 Bar, πρώτο σενάριο



Εικόνα 3.55: Διάγραμμα μεταφερόμενης θερμότητας συναρτήσεις της θερμοκρασίας για εργαζόμενο μέσο R152a, σε πίεση 25 Bar, πρώτο σενάριο

Από τα δύο παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι, ανεξαρτήτως περίπτωσης, οι ελάχιστες θερμοκρασιακές διαφορές που λαμβάνουν χώρα στην εγκατάσταση είναι στα εξής δύο σημεία:

- Στο θερμό άκρο του γεωθερμικού προθερμαντή-ψυχρό άκρο γεωθερμικού ατμοποιητή.
- Στο ψυχρό άκρο του υπερθερμαντή βιομάζας.

Η διαφορά θερμοκρασίας και στα δύο σημεία είναι της τάξης των 10°C. Βέβαια, αξίζει να σημειωθεί ότι στο δεύτερο σημείο η θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στα δύο ρεύματα είχε οριστεί εξ'αρχής στους 10°C από εμάς. Στο πρώτο σημείο μόνο η διαφορά αυτή είναι ελεύθερη σε διακύμανση ανάλογα με τα δεδομένα της εγκατάστασης. Η θερμοκρασιακή διαφορά των 10°C είναι μια πολύ ανεκτή και συνηθισμένη θερμοκρασιακή διαφορά σε τέτοιες εγκαταστάσεις, οι οποίες λειτουργούν οριακά με θερμοκρασιακές διαφορές μέχρι και 5°C. Άρα, είμαστε ασφαλείς από αυτήν την άποψη.

Παρακάτω, παρατίθενται συγκεντρωτικά οι τιμές της μεταφερόμενης θερμότητας ανά τμήμα της εγκατάστασης, ανά εργαζόμενο μέσο και σενάριο. Επίσης, υπάρχουν οι ποσοστιαίες τιμές της μεταφερόμενης θερμότητας ανά τμήμα ως προς τη συνολική, καθώς και οι μέσοι όροι όλων των παραπάνω τιμών.

Μεταφερόμενη θερμότητα Q(KW)					
Περίπτωση	Τμήμα της εγκατάστασης				
	Αναγεννητικός Προθερμαντής	Γεωθερμικός Προθερμαντής	Γεωθερμικός Ατμοποιητής	Γεωθερμικός Υπερθερμαντής	Υπερθερμαντής Βιομάζας
1^ο Σενάριο- R134a					
20 Bar	3208	19	9515	3136	6921
25 Bar	4584	516	9320	2834	8207
30 Bar	5439	1706	8562	2402	9634
Μέσος όρος	4410	747	9132	2791	8254
1^ο Σενάριο- R152a					
20 Bar	2987	256	10158	2255	8147
25 Bar	4312	630	10213	1827	9668
Μέσος όρος	3650	443	10186	2041	8907
Μέσος όρος 1^{ου} Σεναρίου	4106	625	9554	2491	8515
2^ο Σενάριο- R134a					
20 Bar	2488	2213	13859	4568	10082
25 Bar	3678	2395	11099	3375	9773
30 Bar	4497	2774	8713	2444	9803
35 Bar	5238	3374	6391	1644	10429
Μέσος όρος	3975	2689	10015	3008	10022
2^ο Σενάριο- R152a					
20 Bar	2898	1284	13096	2908	10503
25 Bar	3620	1244	10048	1798	9512
30 Bar	3932	1597	8011	959	9285
Μέσος όρος	3483	1375	10385	1888	9767
Μέσος όρος 2^{ου} Σεναρίου	3764	2126	10174	2528	9912
Συνολικός Μέσος όρος	3935	1375	9864	2509	9214

Πίνακας 3.10: Ποσό μεταφερόμενης θερμότητας (KW) ανά τμήμα της εγκατάστασης

Ποσοστό μεταφερόμενης θερμότητας % ανά τμήμα της εγκατάστασης					
Περίπτωση	Τμήμα της εγκατάστασης				
	Αναγεννητικός Προθερμαντής	Γεωθερμικός Προθερμαντής	Γεωθερμικός Ατμοποιητής	Γεωθερμικός Υπερθερμαντής	Υπερθερμαντής Βιομάζας
1^ο Σενάριο- R134a					
20 Bar	14.07	0.08	41.73	13.76	30.36
25 Bar	18.00	2.06	36.61	11.13	32.23
30 Bar	19.61	6.15	30.86	8.66	34.73
<u>Μέσος όρος</u>	17.41	2.95	36.05	11.02	32.58
1^ο Σενάριο- R152a					
20 Bar	12.55	1.08	42.67	9.48	34.26
25 Bar	16.18	2.36	38.32	6.86	36.28
<u>Μέσος όρος</u>	14.47	1.76	40.38	8.09	35.31
Μέσος όρος 1^{ου} Σεναρίου	16.24	2.47	37.78	9.85	33.67
2^ο Σενάριο- R134a					
20 Bar	7.49	6.66	41.73	13.76	30.36
25 Bar	12.13	7.90	36.61	11.13	32.23
30 Bar	15.93	9.83	30.86	8.66	34.73
35 Bar	19.35	12.46	23.60	6.07	38.52
<u>Μέσος όρος</u>	13.38	9.05	33.71	10.12	33.73
2^ο Σενάριο- R152a					
20 Bar	9.44	4.18	42.67	9.48	34.23
25 Bar	13.80	4.74	38.32	6.86	36.28
30 Bar	16.53	6.72	33.68	4.03	39.04
<u>Μέσος όρος</u>	12.5	5.11	38.61	7.02	36.31
Μέσος όρος 2^{ου} Σεναρίου	13.21	7.46	35.69	8.87	34.78
<u>Συνολικός Μέσος όρος</u>	14.63	5.11	36.67	9.33	34.26

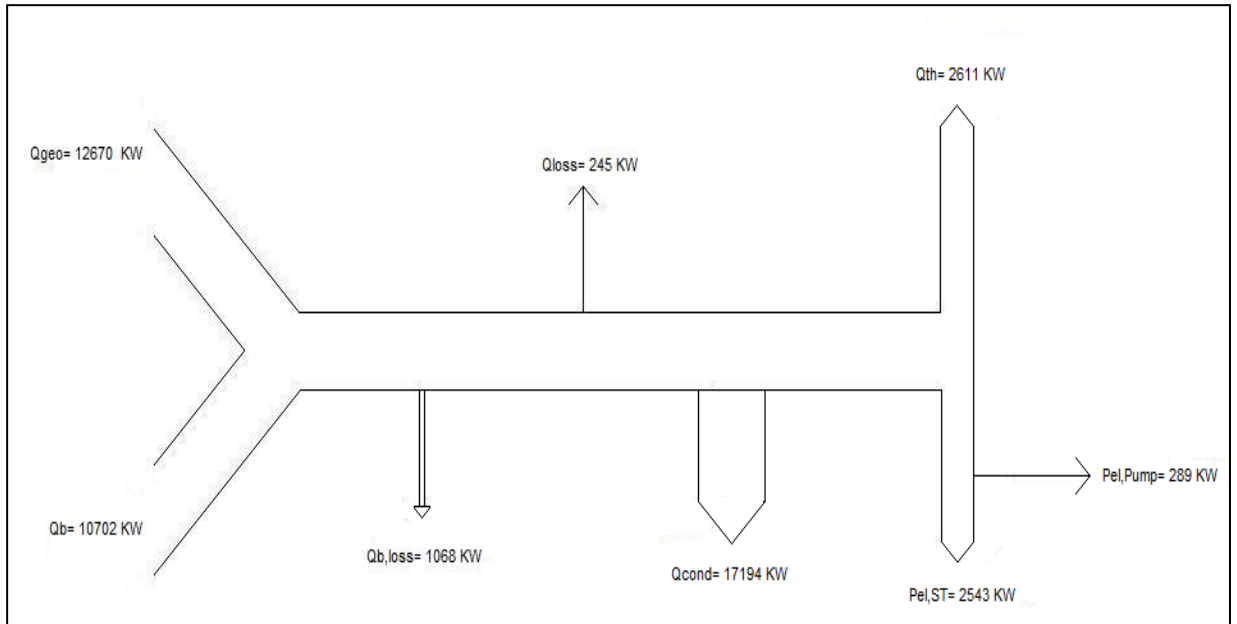
Πίνακας 3.11: Ποσοστό μεταφερόμενης θερμότητας ανά τμήμα της εγκατάστασης

Από τους παραπάνω πίνακες παρατηρούμε τα εξής:

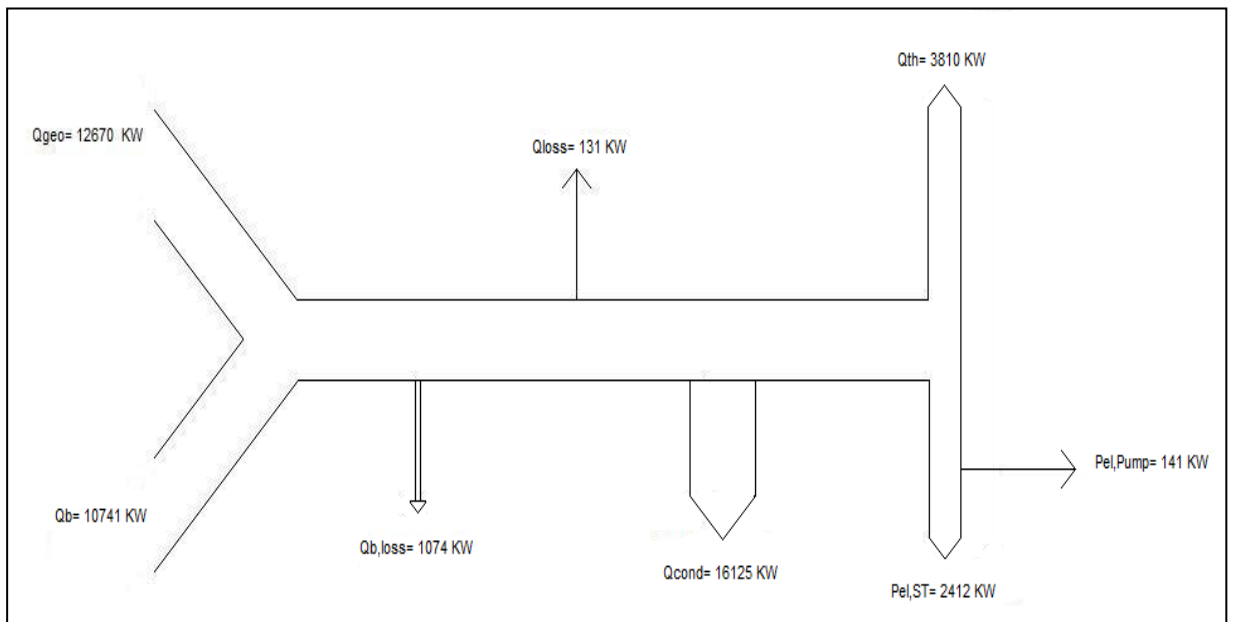
- Στον γεωθερμικό ατμοποιητή και στον υπερθερμαντή βιομάζας έχουμε μεταφορά αντίστοιχα περίπου του 1/3 της συνολικής συναλλασσόμενης θερμότητας. Άρα, είναι προφανές ότι αυτοί οι δύο εναλλάκτες θα είναι οι μεγαλύτεροι σε μέγεθος και κόστος της εγκατάστασης.

- Η συνεισφορά πρωτίστως του γεωθερμικού προθερμαντή και δευτερευόντως του γεωθερμικού υπερθερμαντή είναι αρκετά χαμηλές. Άρα, πιθανότατα δεν έχει νόημα η τοποθέτηση τους στην εγκατάσταση. Βέβαια, ο προθερμαντής είναι απαραίτητη συνιστώσα σε μια τέτοια εγκατάσταση, αλλά είναι εξαιρετικά πιθανό ο αναγεννητικός προθερμαντής να μπορεί να καλύψει τη λειτουργία του γεωθερμικού προθερμαντή, ενώ ο υπερθερμαντής βιομάζας μπορεί σίγουρα να καλύψει τη λειτουργία του γεωθερμικού υπερθερμαντή.
- Αυξανόμενη της πίεσης λειτουργίας έχουμε αύξηση της μεταφερόμενης θερμότητας από τον αναγεννητικό προθερμαντή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι αυξανόμενη της πίεσης λειτουργίας της εγκατάστασης, έχουμε αύξηση της θερμοκρασίας εξόδου από τον αναγεννητικό προθερμαντή, της θερμοκρασίας $T_{ph,ex}$, άρα έχουμε αύξηση της μεταφερόμενης θερμότητας σε αυτόν τον εναλλάκτη.
- Αυξανόμενη της πίεσης λειτουργίας έχουμε ελαφρά αύξηση της μεταφερόμενης θερμότητας από το γεωθερμικό προθερμαντή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι αυξανόμενη της πίεσης λειτουργίας, έχουμε αύξηση της διαφοράς της θερμοκρασίας ατμοποίησης στη συγκεκριμένη πίεση από τη θερμοκρασία εισόδου στο γεωθερμικό προθερμαντή. Άρα, απαιτείται μεγαλύτερο ποσό θερμότητας για την προθέρμανση του εργαζόμενου μέσου.
- Αυξανόμενη της πίεσης λειτουργίας έχουμε μείωση της μεταφερόμενης θερμότητας στον γεωθερμικό ατμοποιητή. Αυτό συμβαίνει επειδή αυξανόμενη της πίεσης έχουμε μείωση της λανθάνουσας θερμότητας ατμοποίησης του εργαζόμενου μέσου. Βέβαια, έχουμε ανάλογα την περίπτωση και ταυτόχρονη αυξομείωση της παροχής μάζας, άλλα ως επί το πλείστον υπερισχύει η μείωση της λανθάνουσας θερμότητας ατμοποίησης.
- Αυξανόμενη της πίεσης λειτουργίας έχουμε μείωση της μεταφερόμενης θερμότητας στον γεωθερμικό υπερθερμαντή. Αυτό οφείλεται αποκλειστικά στο γεγονός ότι αυξανόμενη της πίεσης λειτουργίας, έχουμε αύξηση της θερμοκρασίας ατμοποίησης του εργαζόμενου μέσου, άρα έχουμε μείωση της θερμοκρασιακής διαφοράς ανάμεσα στη θερμοκρασία ατμοποίησης και τη θερμοκρασία εξόδου από το γεωθερμικό υπερθερμαντή, η οποία είναι σταθερή στους 100°C. Άρα, μειώνεται η απαραίτητη αύξηση θερμοκρασίας του εργαζόμενου μέσου στο γεωθερμικό υπερθερμαντή και αντίστοιχα μειώνεται η μεταφερόμενη θερμότητα σε αυτόν.
- Αυξανόμενη της πίεσης λειτουργίας έχουμε συνήθως αύξηση της μεταφερόμενης θερμότητας στον υπερθερμαντή βιομάζας, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις έχουμε μείωση της μεταφερόμενης αυτής θερμότητας. Η αυξομείωση αυτή οφείλεται αποκλειστικά στην αντίστοιχη αυξομείωση της παροχής μάζας εργαζόμενου μέσου.
- Στο δεύτερο σενάριο η μεταφερόμενη θερμότητα είναι αρκετά μεγαλύτερη από ότι στο πρώτο. Αυτό οφείλεται στην μεγαλύτερη παροχή μάζας, περίπου 50% μεγαλύτερη, που έχουμε στο δεύτερο σενάριο. Άρα, όπως αναφέραμε και πρωτίτερα, και τα δύο σενάρια, είναι παρόμοια ενεργειακά.
- Μια τελευταία αξιοσημείωτη διαφορά στα δύο σενάρια έγκειται στο γεγονός της μεγαλύτερης συνεισφοράς του γεωθερμικού προθερμαντή στο δεύτερο σενάριο. Στο δεύτερο σενάριο, όπως έχουμε ήδη αναφέρει, η θερμοκρασία εισόδου στο γεωθερμικό προθερμαντή (=θερμοκρασία εξόδου από τον αναγεννητικό προθερμαντή, $T_{ph,ex}$) είναι γενικά χαμηλότερη από την αντίστοιχη του πρώτου σεναρίου. Άρα, έχουμε μεγαλύτερα ποσά μεταφερόμενης θερμότητας στο γεωθερμικό προθερμαντή στο δεύτερο σενάριο.

Παρακάτω παρουσιάζονται ενδεικτικά τα διαγράμματα ροής ενέργειας Sankey, για τις περιπτώσεις μέγιστης πίεσης των δύο εργαζόμενων μέσων του πρώτου σεναρίου.



Εικόνα 3.56: Διάγραμμα Sankey για εργαζόμενο μέσο R134a, 30 Bar, πρώτο σενάριο



Εικόνα 3.57: Διάγραμμα Sankey για εργαζόμενο μέσο R152a, 25 Bar, πρώτο σενάριο

Οι όροι στα δύο παραπάνω διαγράμματα είναι οι εξής:

\dot{Q}_{geo} : Απορροφόμενη ισχύς από το γεωθερμικό ρευστό

\dot{Q}_b : Θερμική ισχύς βιομάζας

$\dot{Q}_{b,loss}$: Θερμικές απώλειες του συστήματος του λέβητα

\dot{Q}_{cond} : Απορριπτόμενη θερμότητα στο περιβάλλον μέσω του συμπυκνωτή

\dot{Q}_{loss} : Λοιπές απώλειες της εγκατάστασης, οι οποίες δεν περιλαμβάνονται στις παραπάνω

\dot{Q}_{th} : Παραγόμενη θερμική ισχύς της εγκατάστασης

$P_{el,ST}$: Παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς στους ακροδέκτες της γεννήτριας του ατμοστροβίλου

$P_{el,Pump}$: Ηλεκτρική ισχύς του κινητήρα της τροφοδοτικής αντλίας

3.8) Εξεργειακή Ανάλυση

Στην παρούσα παράγραφο θα πραγματοποιήσουμε εξεργειακή ανάλυση των εγκαταστάσεων που έχουμε μελετήσει ως τώρα. Αρχικά, θα περιγράψουμε την βασικές αρχές της εξεργειακής ανάλυσης ενός θερμομηχανικού συστήματος, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στα ζητήματα που αφορούν γεωθερμικά συστήματα, αλλά και συστήματα καύσης, όπως το σύστημα υπερθέρμανσης με καύση βιομάζας. Στη συνέχεια, θα παρουσιάσουμε τα βασικά τμήματα που απαρτίζουν την εγκατάσταση που μελετάμε, καθώς και τον τρόπο υπολογισμού του εξεργειακού βαθμού απόδοσης τους. Τέλος, θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή της παραπάνω θεωρίας.

3.8.1) Γενικά για την εξέργεια

Ως εξέργεια μίας δεδομένης μορφής ενέργειας, ή ενός θερμομηχανικού συστήματος ορίζουμε το μέγιστο ωφέλιμο έργο που μπορεί να παραχθεί, δεδομένης της κατάστασης του περιβάλλοντος, ως κατάσταση αναφοράς.

Πρακτικά, η εξέργεια μας δείχνει το μέγιστο ποσό της ενέργειας που μπορούμε να παράγουμε από ένα σύστημα. Προφανώς, αυτή η μέγιστη ενέργεια παράγεται όταν το σύστημα έλθει στην κατάσταση περιβάλλοντος, την οποία ορίζουμε ως αναφορά. Όταν ένα σύστημα έχει έστω μια παράμετρο διαφορετική από το περιβάλλον, τότε είναι δυνατή η παραγωγή έργου από αυτό. Βέβαια, μεγαλύτερο ποσό ενέργειας δεν μπορεί να παραχθεί από το δεδομένο σύστημα, με το δεδομένο περιβάλλον, με κανέναν τρόπο.

Όπως παρατηρούμε, και θα γίνει ακόμα πιο εμφανές παρακάτω, η εξέργεια ενός συστήματος δεν εξαρτάται μόνο από την κατάσταση του συστήματος, αλλά και από την κατάσταση του περιβάλλοντος. Έτσι, συμπεραίνουμε ότι η εξέργεια δεν είναι μια ιδιότητα του συστήματος. Ως ιδιότητα ενός συστήματος, ορίζεται αυστηρά ένα μέγεθος το οποίο εξαρτάται αποκλειστικά από την κατάσταση του συστήματος. Η εξέργεια εφόσον εξαρτάται και από το περιβάλλον-αναφορά δεν είναι ιδιότητα του συστήματος.

Η εξέργεια ενός συστήματος παραμένει σταθερή μόνο σε αντιστρεπτές διαδικασίες. Στην πραγματικότητα, βέβαια, όλες οι διαδικασίες είναι μη αντιστρεπτές. Οι μη αντιστρεπτές διαδικασίες συνοδεύονται πάντα από καταστροφή εξέργειας. Για αυτόν το λόγο δεν είναι δυνατό να διατυπωθεί ένας νόμος διατήρησης της εξέργειας, όπως αντίστοιχα έχει διατυ-

πωθεί για την ενέργεια. Θεωρώντας, με άλλα λόγια, την εξέργεια ως ένα δείκτη της ποιότητας της ενέργειας του συστήματος, μπορούμε να πούμε ότι η ποσότητα της ενέργειας ενός συστήματος διατηρείται σταθερή, αλλά η ποιότητα της μειώνεται μέσα από κάποια διαδικασία.

3.8.2) Εξέργεια συστήματος

Αποδεικνύεται ότι η εξέργεια ενός συστήματος δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$E = E^{PH} + E^{CH} + E^{KN} + E^{\Delta} + \dots, \quad (3.8.2.1)$$

Φυσικά η ίδια σχέση ισχύει και για τα ειδικά μεγέθη:

$$e = e^{PH} + e^{CH} + e^{KN} + e^{\Delta} + \dots \quad (3.8.2.2)$$

Φυσικά εξέργεια E^{PH} : πρόκειται για την εξέργεια που προέρχεται από τις μεταβολές πίεσης και θερμοκρασίας του συστήματος. Δίνεται από τον εξής τύπο:

$$E^{PH} = (H - H_0) - T_0 \cdot (S - S_0), \quad (3.8.2.3) \text{ όπου } H, S: \text{ η ενθαλπία και η εντροπία του συστήματος.}$$

H_0, T_0, S_0 : η ενθαλπία, η θερμοκρασία και η εντροπία αναφοράς, δηλαδή σε πίεση και θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η θερμοκρασία T_0 τίθεται πάντα σε Kelvin.

*Τονίζεται ότι ως αναφορά για το εργαζόμενο μέσο λαμβάνεται η κατάσταση κορεσμού σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Χημική εξέργεια E^{CH} : πρόκειται για την εξέργεια που προέρχεται από συναλλαγή θερμότητας και μάζας του συστήματος με το περιβάλλον. Θα την αναλύσουμε σε επόμενη παράγραφο.

Κινητική εξέργεια E^{KN} : πρόκειται για την εξέργεια που προέρχεται από την διαφορά κινητικής ενέργειας του συστήματος από την κατάσταση αναφοράς. Στην παρούσα μελέτη την θεωρούμε μηδενική, εφόσον σε κάθε σημείο της εγκατάστασης έχουμε πρακτικά την ίδια κινητική ενέργεια, άρα οι όποιες διαφορές είναι πρακτικά μηδενικές.

Δυναμική εξέργεια E^{Δ} : πρόκειται για την εξέργεια που προέρχεται από τη διαφορά δυναμικής ενέργειας του συστήματος από την κατάσταση αναφοράς. Την θεωρούμε επίσης μηδενική, για τον ίδιο λόγο όπως την κινητική εξέργεια του συστήματος.

Με τον όρο στη σχέση (3.8.2.1) υποδηλώνουμε την εξέργεια άλλων μορφών ενέργειας, όπως η ηλεκτρομαγνητική εξέργεια, οι οποίες σε μια τέτοια εγκατάσταση είναι προφανώς μηδενικές.

Άρα, εν τέλει η σχέση (3.8.2.1) γίνεται για τα συστήματα που μας αφορούν:

$$E = E^{PH} + E^{CH} \quad (3.8.2.4)$$

Η σχέση αυτή μας υποδηλώνει ότι η εξέργεια ενός ρεύματος εργαζόμενου μέσου-γεωθερμικού ρευστού-καυσίμου κλπ, είναι το άθροισμα της φυσικής και της χημικής του εξέργειας. Προφανώς, ο παραπάνω τύπος είναι ίδιος και για τα αντίστοιχα ειδικά μεγέθη.

3.8.3) Φυσική εξέργεια

Όπως αναφέραμε και στην παράγραφο 3.8.2, η φυσική εξέργεια ενός συστήματος δίνεται από τον τύπο (3.8.2.3). Ο ορισμός είναι ίδιος για οποιοδήποτε ρεύμα μελετάμε (Εργαζόμενο μέσο-καύσιμο κλπ). Στην παρούσα παράγραφο θα θεωρήσουμε ότι η φυσική εξέργεια της βιομάζας είναι πρακτικά μηδενική συγκρινόμενη με την χημική της εξέργεια. Για όλα τα άλλα ρεύματα που υπάρχουν στην εγκατάσταση θα υπολογίζουμε κανονικά τη φυσική τους εξέργεια.

3.8.4) Χημική εξέργεια

Η χημική εξέργεια είναι ένας πολύ σημαντικός όρος στην εξεργειακή ανάλυση ενός συστήματος και αφορά κυρίως αέρια ρεύματα καυσαερίων, καθώς και ρεύματα καυσίμων. Μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η χημική εξέργεια του εργαζόμενου μέσου, του γεωθερμικού ρευστού αλλά και των βοηθητικών ρευστών (συνήθως νερό) στα συστήματα υπερθέρμανσης με βιομάζα και παραγωγής θερμικής ενέργειας, αλλά και ψυκτικού νερού, είναι μηδενική. Άρα, πρακτικά στο σύστημα που μελετάμε, χημική εξέργεια έχει μόνο το καύσιμο (βιομάζα), ο αέρας καύσης, και το καυσαέριο που προκύπτει από την καύση βιομάζας.

Για τον υπολογισμό της χημικής εξέργειας ενός μίγματος αερίων χρησιμοποιούμε τον εξής τύπο (kotas,1995) :

$$\bar{e}^{CH} = \sum x_i \cdot \bar{e}_i^{CH} + \bar{R} \cdot T_0 \cdot \sum x_i \cdot \ln x_i \quad (3.8.4.1)$$

Όπου x_i : η κατ'όγκον περιεκτικότητα του κάθε συστατικού

\bar{e}_i^{CH} : η ειδική γραμμομοριακή εξέργεια του κάθε συστατικού

Η ειδική γραμμομοριακή εξέργεια για τα κυριότερα αέρια συστατικά δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

<u>Συστατικό</u>	<u>\bar{e}_i^{CH} (KJ/Kmol)</u>
CO	269412
CO ₂	14176
H ₂	235429
H ₂ O(g)	8636
H ₂ O(l)	45
H ₂ S	799890
N ₂	639
O ₂	3951
SO ₂	301939
CH ₄	824348

Πίνακας 3.12: Ειδική γραμμομοριακή εξέργεια για αέρια συστατικά

Σημειώνεται, ότι οι παραπάνω ειδικές γραμμομοριακές εξέργειες υπολογίζονται έχοντας ως αναφορά πίεση περιβάλλοντος 1 Bar και θερμοκρασία περιβάλλοντος 25°C.

Για τον υπολογισμό της χημικής εξέργειας υγρού ή στερεού καυσίμου χρησιμοποιούμε τους παρακάτω τύπους:

$$\bar{e}^{CH} = (Hu^0 + 2442w) \cdot \varphi_{\xi} + 9417s, \quad (3.8.4.2)$$

όπου

Hu^0 : η κατώτερη θερμογόνος ικανότητα του καυσίμου (KJ/kg)

c,h,s,w,o,n: η κατά μάζα σύσταση του καυσίμου σε άνθρακα, υδρογόνο, θείο, νερό, οξυγόνο και άζωτο.

φ_{ξ} : ένας συντελεστής (αφορά ξηρό καύσιμο) που δίνεται από του εξής τύπους:

$$\bullet \quad \varphi_{\xi} = 1.0437 + 0.1882 \cdot \frac{h}{c} + 0.0610 \cdot \frac{o}{c} + 0.0404 \cdot \frac{n}{c} \quad \text{αν} \quad \frac{o}{c} < 0.667 \quad (3.8.4.3)$$

$$\bullet \quad \varphi_{\xi} = \frac{0.7929 + 0.00615 \cdot \frac{h}{c} + 0.0383 \cdot \frac{n}{c}}{1 - 0.3035 \cdot \frac{o}{c}} \quad \text{αν} \quad 0.667 < \frac{o}{c} < 2.67 \quad (3.8.4.4)$$

Γενικά, ο όρος φ_{ξ} είναι πολύ κοντά στη μονάδα, άρα η εξέργεια του καυσίμου προκύπτει σχεδόν ίση με τη θερμογόνος ικανότητα του. Οπότε, η προσέγγιση που είχαμε κάνει στην παράγραφο 3.1, στο βαθμό χρησιμοποίησης, εμπεριέχει ένα πολύ μικρό σφάλμα.

Άρα, με τη χρήση των παραπάνω τύπων μπορούμε να υπολογίσουμε τη χημική εξέργεια της βιομάζας, του αέρα καύσης, αλλά και των προκυπτόντων καυσαερίων.

Συνοψίζοντας τις παραγράφους 3.8.2-3.8.4 θα υπολογίζουμε την εξέργεια κάθε ρεύματος ως εξής:

- Εξέργεια ρεύματος εργαζόμενου μέσου: $E = E^{PH}$, όπου η φυσική εξέργεια E^{PH} δίνεται από τον τύπο (3.8.2.3). Υπενθυμίζεται ότι για το εργαζόμενο μέσο (οργανικό μέσο) ως h_0, T_0, s_0 θέτουμε την ενθαλπία, τη θερμοκρασία και την εντροπία του εργαζόμενου μέσου για κατάσταση κορεσμού (κορεσμένο υγρό) σε θερμοκρασία T_0 (θερμοκρασία περιβάλλοντος). Σε όλες τις άλλες περιπτώσεις θέτουμε τις αντίστοιχες τιμές σε πίεση και θερμοκρασία περιβάλλοντος (P_0, T_0).
- Εξέργεια γεωθερμικού ρευστού: $E = E^{PH}$, όπου η φυσική εξέργεια δίνεται από τον τύπο (3.8.2.3).
- Εξέργεια νερού υπερθερμαντή βιομάζας: $E = E^{PH}$, όπου αντίστοιχα η φυσική εξέργεια δίνεται από τον τύπο (3.8.2.3).
- Εξέργεια νερού παραγωγής θερμικής ισχύος, όπως προηγουμένως.
- Εξέργεια ψυκτικού νερού, όπως προηγουμένως.
- Εξέργεια αέρα καύσης: $E = E^{PH} + E^{CH}$. Στην περίπτωση όπου ο αέρας καύσης δεν προθερμαίνεται προ της εισόδου του στο λέβητα, τότε η φυσική εξέργεια του μηδενίζεται και προκύπτει ότι η εξέργεια του αέρα καύσης είναι ίση με τη χημική του εξέργεια, η οποία υπολογίζεται από τον τύπο (3.8.4.1), αφού το αποτέλεσμα πολλαπλασιαστεί με την παροχή μάζας του αέρα.

- Εξέργεια βιομάζας: $E = E^{CH}$, όπου η χημική εξέργεια της βιομάζας E^{CH} υπολογίζεται από τους τύπους (3.8.4.2)-(3.8.4.4) και στη συνέχεια πολλαπλασιάζεται με την παροχή μάζας της βιομάζας.
- Εξέργεια καυσαερίου: $E = E^{PH} + E^{CH}$, όπου η φυσική εξέργεια υπολογίζεται από τον τύπο (3.8.2.3) και η χημική εξέργεια από τον τύπο (3.8.4.1), αφού πρώτα πολλαπλασιαστεί το αποτέλεσμα με την παροχή μάζας των καυσαερίων.

Άρα, μπορούμε να υπολογίσουμε την εξέργεια οποιουδήποτε ρεύματος στην εγκατάσταση που μελετάμε.

3.8.5) Εξέργεια έργου και εξέργεια θερμότητας

Όταν ένα σύστημα συναλλάσσει έργο με το περιβάλλον του, τότε συναλλάσσει και εξέργεια. Το ποσό της εξέργειας του έργου που συναλλάσσεται είναι εξ'ορισμού ίσο με την ίδια την εξέργεια. Οπότε ισχύει:

$$E_w = W \quad (3.8.5.1)$$

Επίσης, όταν ένα σύστημα συναλλάσσει θερμότητα με το περιβάλλον του, τότε συναλλάσσει και εξέργεια. Βέβαια, σε αυτή την περίπτωση η εξέργεια που αποδίδεται από το θερμό σύστημα είναι πάντα μεγαλύτερη από την εξέργεια που απορροφάται από το ψυχρό σύστημα. Για να υπολογίσουμε την εξέργεια της θερμότητας απαιτείται να χρησιμοποιήσουμε τον ορισμό της εξέργειας, η οποία είναι το μέγιστο έργο που μπορεί να παραχθεί από ένα σύστημα, δηλαδή στην περίπτωση της θερμότητας το μέγιστο έργο που μπορεί να παραχθεί από το συγκεκριμένο ποσό θερμότητας. Το μέγιστο έργο που μπορεί να παραχθεί από ένα ποσό θερμότητας Q δίνεται από το νόμο του Carnot και είναι το εξής:

$$E_Q = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \cdot Q \quad (3.8.5.2)$$

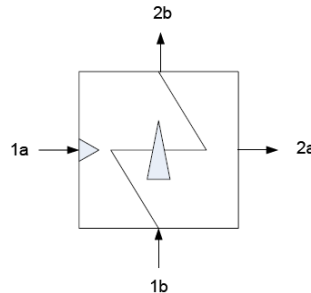
Βέβαια, στον τύπο (3.8.5.2) θέτουμε ως χαμηλή θερμοκρασία του κύκλου τη θερμοκρασία περιβάλλοντος T_0 ώστε να συμβαδίζουμε με την έννοια της εξέργειας.

3.8.6) Εξεργειακή ανάλυση τμημάτων της εγκατάστασης

Στην παρούσα παράγραφο θα παρουσιάσουμε τους τύπους που θα χρησιμοποιήσουμε για την εξεργειακή ανάλυση των επιμέρους τμημάτων που απαρτίζουν την εγκατάσταση που μελετάμε.

❖ Εναλλάκτες θερμότητας:

Στην παρούσα μελέτη θα ασχοληθούμε μόνο με εναλλάκτες επαφής, στους οποίους δεν έχουμε ανάμιξη των δύο ρευμάτων.



Εικόνα 3.58: Εναλλάκτης επαφής

Σύμφωνα με την εικόνα 3.58 το ψυχρό ρεύμα είναι το a και το θερμό ρεύμα είναι το b.

Η αύξηση της εξέργειας του ψυχρού ρεύματος είναι: $E_{2a} - E_{1a}$.

Η μείωση εξέργειας του θερμού ρεύματος είναι: $E_{1b} - E_{2b}$.

Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης του εναλλάκτη ορίζεται ως το πηλίκο της αύξησης εξέργειας του ψυχρού ρεύματος προς τη μείωση εξέργειας του θερμού ρεύματος.

$$\eta_E = \frac{E_{2a} - E_{1a}}{E_{1b} - E_{2b}} = \frac{\dot{m}_a \cdot (e_{2a} - e_{1a})}{\dot{m}_b \cdot (e_{1b} - e_{2b})} \quad (3.8.6.1)$$

Η παραπάνω διαδικασία μεταφοράς θερμότητας στον εναλλάκτη, προφανώς δεν είναι ιδανική, άρα έχουμε ένα ποσό εξέργειας το οποίο καταστρέφεται. Η καταστροφή εξέργειας δίνεται από τον εξής τύπο:

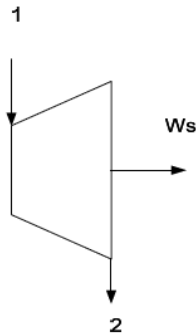
$$E_{loss} = (E_{1b} - E_{2b}) - (E_{2a} - E_{1a}) \quad (3.8.6.2)$$

Παρατηρούμε ότι η καταστροφή εξέργειας είναι η διαφορά της μείωσης εξέργειας του θερμού ρεύματος από την αύξηση εξέργειας του ψυχρού ρεύματος. Αυτό ισχύει στους εναλλάκτες που το ψυχρό ρεύμα έχει κάποια περαιτέρω χρήση. Στην περίπτωση, όμως, του συμπυκνωτή το ψυχρό ρεύμα δεν έχει κάποια περαιτέρω χρήση αφού η θερμότητα που απορροφάται απορρίπτεται στο περιβάλλον. Άρα, η όποια αύξηση εξέργειας καταστρέφεται εξίσου. Άρα, στην περίπτωση του συμπυκνωτή ο τύπος (3.8.6.2) γίνεται:

$$E_{loss} = (E_{1b} - E_{2b}) \quad (3.8.6.2a)$$

❖ Στρόβιλος παραγωγής ισχύος:

Ως γνωστόν, ο στρόβιλος της εγκατάστασης χρησιμοποιείται για αποτόνωση του εργαζόμενου μέσου από την υψηλή στη χαμηλή πίεση με απώτερο σκοπό την παραγωγή έργου.



Εικόνα 3.59: Στρόβιλος παραγωγής ισχύος

Σύμφωνα με την παράγραφο 3.8.5 θα ισχύει: $E_W = W_s$

Η μείωση εξέργειας του εργαζόμενου μέσου είναι: $E_1 - E_2$

Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης του στροβίλου ορίζεται ως το πηλίκο της εξέργειας του παραγόμενου έργου προς τη μείωση εξέργειας του εργαζόμενου μέσου.

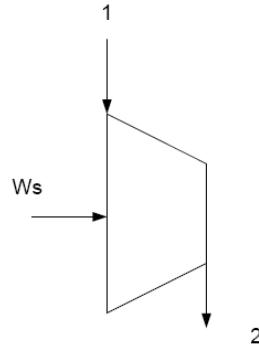
$$\eta_E = \frac{E_W}{E_1 - E_2} = \frac{E_W}{\dot{m} \cdot (e_1 - e_2)} \quad (3.8.6.3)$$

Η καταστροφή εξέργειας στο στρόβιλο ορίζεται ως εξής:

$$E_{loss} = (E_1 - E_2) - E_W \quad (3.8.6.4)$$

❖ Αντλία:

Ως γνωστόν, η αντλία χρησιμοποιείται για την αύξηση πίεσης του εργαζόμενου μέσου προ της εισόδου του στους διάφορους εναλλάκτες με σκοπό τη θέρμανση του. Προφανώς, η λογική της εξεργειακής ανάλυσης της αντλίας είναι αντίστροφη της εξεργειακής ανάλυσης του στρόβιλου.



Εικόνα 3.60: Αντλία

Η εξέργεια του έργου στον άξονα της αντλίας θα είναι: $E_w = W_s$

Η αύξηση της εξέργειας του εργαζόμενου μέσου από την αντλία είναι: $E_2 - E_1$

Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης της αντλίας ορίζεται ως το πηλίκο της αύξησης της εξέργειας του εργαζόμενου μέσου που επιτυγχάνεται προς την εξέργεια του προσδιδόμενου έργου της αντλίας.

$$\eta_E = \frac{E_2 - E_1}{E_w} = \frac{\dot{m} \cdot (e_1 - e_2)}{E_w} \quad (3.8.6.5)$$

Η καταστροφή εξέργειας στην αντλία δίνεται από τον τύπο:

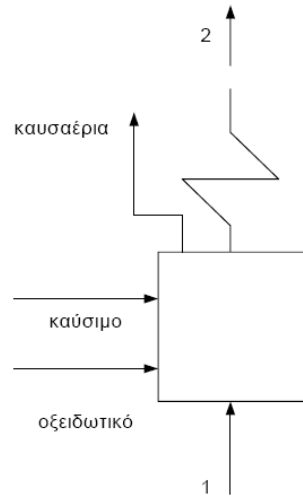
$$E_{loss} = E_w - (E_2 - E_1) \quad (3.8.6.6)$$

❖ Λέβητας:

Ο σκοπός του λέβητα είναι η αύξηση της θερμοκρασίας ενός ρευστού, συνήθως εργαζόμενου μέσου. Στην μελετώμενη εργασία, ο λέβητας θερμαίνει νερό το οποίο υπερθερμαίνει στη συνέχεια το εργαζόμενο μέσο προ της εισόδου του στο στρόβιλο. Επίσης, όπως έχουμε ήδη αναφέρει, ο συγκεκριμένος λέβητας δεν υπερθερμαίνει το νερό, αλλά το θερμαίνει ως την κατάσταση κορεσμού. Η θέρμανση του νερού επιτυγχάνεται με την καύση βιομάζας. Η βιομάζα καίγεται με τη παρουσία ενός οξειδωτικού, στη συγκεκριμένη περίπτωση αέρα, και τα καυσαέρια της καύσης εξέρχονται στην ατμόσφαιρα.

Η αύξηση της εξέργειας του νερού (εργαζόμενου μέσου) είναι: $(E_2 - E_1)$

Η προσφερόμενη εξέργεια είναι αυτή του καυσίμου και του αέρα αν αφαιρεθεί η εξέργεια των θερμών καυσαερίων, η οποία λογίζεται ως απώλεια. Άρα, η προσφερόμενη εξέργεια είναι: $E_{fuel} + E_{air} - E_{ex_gas}$



Εικόνα 3.61: Λέβητας

Άρα, ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης του λέβητα δίνεται από τον εξής τύπο:

$$\eta_E = \frac{E_2 - E_1}{E_{fuel} + E_{air} - E_{ex_gas}} = \frac{\dot{m} \cdot (e_2 - e_1)}{E_{fuel} + E_{air} - E_{ex_gas}} \quad (3.8.6.7)$$

Αν ο αέρας καύσης εισέρχεται στο λέβητα με θερμοκρασία περιβάλλοντος, δηλαδή δεν προθερμαίνεται, τότε ισχύει $E_{air} = 0$, οπότε ο παραπάνω τύπος γίνεται:

$$\eta_E = \frac{E_2 - E_1}{E_{fuel} - E_{ex_gas}} = \frac{\dot{m} \cdot (e_2 - e_1)}{E_{fuel} - E_{ex_gas}} \quad (3.8.6.7\alpha)$$

Οι απώλειες εξέργειας του λέβητα δίνονται από τον εξής τύπο:

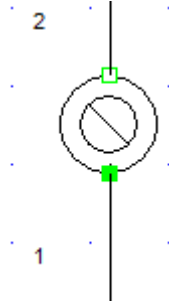
$$E_{loss} = (E_{fuel} + E_{air} - E_{ex_gas}) - (E_2 - E_1) \quad (3.8.6.8)$$

Αν ο αέρας καύσης δεν προθερμαίνεται τότε αντίστοιχα έχουμε:

$$E_{loss} = (E_{fuel} - E_{ex_gas}) - (E_2 - E_1) \quad (3.8.6.8\alpha)$$

❖ Εναλλάκτης παραγωγής θερμικής ισχύος:

Πρόκειται για τον εναλλάκτη στο κύκλωμα παραγωγής θερμικής ισχύος, ο οποίος απορροφά θερμική ισχύ από το βοηθητικό κύκλωμα νερού, το οποίο έχει απορροφήσει θερμική ισχύ από το οργανικό μέσο.



Εικόνα 3.62: Εναλλάκτης παραγωγής θερμικής ισχύος

Η μείωση της εξέργειας του νερού είναι: $E_2 - E_1$, 2: η είσοδος στον εναλλάκτη.

Αν η προσδιδόμενη θερμότητα είναι Q τότε η εξέργεια της θερμότητας, όπως είδαμε στην παράγραφο 3.8.5, θα είναι: $E_Q = (1 - \frac{T_0}{T}) \cdot Q$, όπου

T_0 (K): η θερμοκρασία περιβάλλοντος

T (K): η μέση θερμοκρασία πρόσδοσης θερμότητας. Στη συγκεκριμένη περίπτωση θα ισχύει: $T = \frac{T_1 + T_2}{2}$

Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης του εναλλάκτη παραγωγής θερμικής ισχύος θα είναι:

$$\eta_E = \frac{E_Q}{E_2 - E_1} \quad (3.8.6.9)$$

Η καταστροφή εξέργειας στον εναλλάκτη παραγωγής θερμικής ισχύος θα είναι:

$$E_{loss} = (E_2 - E_1) - E_Q \quad (3.8.6.10)$$

Άρα, με τους τύπους (3.8.6.1)-(3.8.6.10) μπορούμε να υπολογίσουμε τον εξεργειακό βαθμό απόδοσης καθώς και την καταστροφή εξέργειας σε καθένα από τα επιμέρους τμήματα της εγκατάστασης.

❖ Συνολική εγκατάσταση:

Η παραγωγή εξέργειας της συνολικής εγκατάστασης δίνεται ως εξής:

$$E_{prod} = E_{W,T} - E_{W,P} + E_Q, \quad (3.8.6.11) \quad \text{όπου}$$

$E_{W,T}$: η εξέργεια του έργου του στροβίλου

$E_{W,P}$: η εξέργεια του έργου της αντλίας

E_Q : η εξέργεια της παραγόμενης θερμικής ισχύος

Η συνολική καταστροφή εξέργειας στην εγκατάσταση δίνεται ως εξής:

$$E_{loss,tot} = \sum E_{loss,i} + E_{geo,out} \quad (3.8.6.12) \quad \text{όπου}$$

$E_{loss,i}$: η καταστροφή εξέργειας στα επιμέρους τμήματα της εγκατάστασης

$E_{geo,out}$: η καταστροφή εξέργειας λόγω απόρριψης του γεωθερμικού ρευστού στο περιβάλλον. Θεωρητικά, θα μπορούσαμε το γεωθερμικό ρευστό μετά τη χρήση του στην εγκατάσταση να το χρησιμοποιήσουμε για άλλες χρήσεις, μέχρι η θερμοκρασία του να εξισωθεί με του περιβάλλοντος. Έτσι, η εξέργεια του γεωθερμικού ρευστού στην έξοδο της εγκατάστασης λογίζεται ως καταστροφή εξέργειας.

Η συνολική εισερχόμενη εξέργεια, είναι το άθροισμα της εξέργειας του εισερχόμενου γεωθερμικού ρευστού και του καυσίμου, και του αέρα αν εισέρχεται προθερμασμένος στην εγκατάσταση.

$$E_{in,tot} = E_{geo,in} + E_{fuel} + (E_{air}) \quad (3.8.6.13)$$

Τέλος, ο συνολικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης ορίζεται ως εξής:

$$\eta_{E,tot} = \frac{E_{prod}}{E_{in,tot}} = \frac{E_{prod}}{E_{prod} + E_{loss,tot}} \quad (3.8.6.14)$$

3.8.7) Τελικά αποτελέσματα

Στην παρούσα παράγραφο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της εξεργειακής ανάλυσης της μελετώμενης εγκατάστασης χρησιμοποιώντας την ανάλυση που προηγήθηκε στις παραγράφους 3.8.1-3.8.6.

Συγκεκριμένα, θα παρουσιαστούν τα αναλυτικά αποτελέσματα για το πρώτο σενάριο, ενώ θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα για τη συνολική εγκατάσταση για το δεύτερο σενάριο.

3.8.7.1) Αναλυτικά αποτελέσματα για το πρώτο σενάριο

Η εξεργειακή ανάλυση ανά τμήματα της εγκατάστασης παρουσιάζεται παρακάτω:

❖ Γεωθερμικοί εναλλάκτες

		Καταστροφή Εξέργειας (KW)	Εξεργειακός Βαθμός Απόδοσης η_E %
<u>Εργαζόμενο Μέσο R134a</u>			
Γεωθερμικός Προθερμαντής	20 Bar	2.8	37.78
	25 Bar	18.0	81.56
	30 Bar	37.1	88.80
Γεωθερμικός Ατμοποιητής	20 Bar	729.0	64.22
	25 Bar	501.3	75.11
	30 Bar	325.9	82.71
Γεωθερμικός Υπερθερμαντής	20 Bar	223.8	70.75
	25 Bar	174.4	74.92
	30 Bar	124.6	78.91
Συνολική Διάταξη Γεωεναλλακτών	20 Bar	955.6	65.95
	25 Bar	693.7	75.29
	30 Bar	487.6	82.63
<u>Εργαζόμενο Μέσο R152a</u>			
Γεωθερμικός Προθερμαντής	20 Bar	11.1	77.11
	25 Bar	13.8	88.54
Γεωθερμικός Ατμοποιητής	20 Bar	674.7	69.37
	25 Bar	445.7	80.05
Γεωθερμικός Υπερθερμαντής	20 Bar	154.3	72.23
	25 Bar	104.6	76.85
Συνολική Διάταξη Γεωεναλλακτών	20 Bar	840.1	70.07
	25 Bar	564.1	79.00

❖ Σύστημα λέβητα βιομάζας

		<u>Καταστροφή Εξέργειας (KW)</u>	<u>Εξεργειακός Βαθμός Απόδοσης η_E %</u>
<u>Εργαζόμενο Μέσο R134a</u>			
Λέβητας Βιομάζας	20 Bar	6125.9	26.89
	25 Bar	7263.3	26.80
	30 Bar	8527.0	26.89
Εναλλάκτης Υπερθέρμανσης	20 Bar	166.1	92.22
	25 Bar	201.4	92.05
	30 Bar	248.2	91.65
<u>Εργαζόμενο Μέσο R152a</u>			
Λέβητας Βιομάζας	20 Bar	7048.4	28.64
	25 Bar	8363.7	28.64
Εναλλάκτης Υπερθέρμανσης	20 Bar	166.8	93.77
	25 Bar	209.7	93.40

*Θεωρούμε ότι ο φυσητήρας στο κύκλωμα του λέβητα βιομάζας δεν επηρεάζει εξεργειακά το κύκλωμα.

❖ Στρόβιλος-Αντλία

		<u>Καταστροφή Εξέργειας (KW)</u>	<u>Εξεργειακός Βαθμός Απόδοσης η_E %</u>
<u>Εργαζόμενο Μέσο R134a</u>			
Στρόβιλος Ισχύος	20 Bar	194.9	87.48
	25 Bar	294.8	87.23
	30 Bar	390.4	87.04
Αντλία	20 Bar	44.1	61.48
	25 Bar	73.6	61.81
	30 Bar	108.9	61.38
<u>Εργαζόμενο Μέσο R152a</u>			
Στρόβιλος Ισχύος	20 Bar	240.9	87.86
	25 Bar	351.2	87.63
Αντλία	20 Bar	17.1	79.65
	25 Bar	27.8	79.63

❖ Αναγεννητικός προθερμαντής-Συμπυκνωτής

		<u>Καταστροφή Εξέργειας (KW)</u>	<u>Εξεργειακός Βαθμός Απόδοσης η_E %</u>
<u>Εργαζόμενο Μέσο R134a</u>			
Αναγεννητικός Προθερμαντής	20 Bar	598.1	35.50
	25 Bar	682.2	43.24
	30 Bar	681.9	48.52
Συμπυκνωτής	20 Bar	886.5	23.70
	25 Bar	1003.7	23.70
	30 Bar	1109.6	23.70
<u>Εργαζόμενο Μέσο R152a</u>			
Αναγεννητικός Προθερμαντής	20 Bar	642.6	33.10
	25 Bar	752.6	40.36
Συμπυκνωτής	20 Bar	904.0	23.96
	25 Bar	1023.5	23.97

*Υπενθυμίζεται ότι για το συμπυκνωτή η καταστροφή εξέργειας είναι η μείωση της εξέργειας του εργαζόμενου μέσου.

❖ Σύστημα παραγωγής Θερμικής Ισχύος

		<u>Καταστροφή Εξέργειας (KW)</u>	<u>Εξεργειακός Βαθμός Απόδοσης η_E %</u>
<u>Εργαζόμενο Μέσο R134a</u>			
Εναλλάκτης Οργανικού Μέσου- Νερού	20 Bar	265.6	68.75
	25 Bar	131.8	76.84
	30 Bar	73.6	82.17
Εναλλάκτης Παραγωγής Θερμικής Ισχύος	20 Bar	$\cong 0$	$\cong 100$
	25 Bar	$\cong 0$	$\cong 100$
	30 Bar	$\cong 0$	$\cong 100$
<u>Εργαζόμενο Μέσο R152a</u>			
Εναλλάκτης Οργανικού Μέσου-Νερού	20 Bar	378.8	62.59
	25 Bar	209.2	70.28
Εναλλάκτης Παραγωγής Θερμικής Ισχύος	20 Bar	$\cong 0$	$\cong 100$
	25 Bar	$\cong 0$	$\cong 100$

* Θεωρούμε ότι ο φυσητήρας στο κύκλωμα παραγωγής θερμικής ισχύος δεν επηρεάζει εξεργειακά το κύκλωμα.

❖ Συνολική Εγκατάσταση

	<u>Συνολική Παραγωγή Εξέργειας (KW)</u>	<u>Συνολική Καταστροφή Εξέργειας (KW)</u>	<u>Εξεργειακός Βαθμός Απόδοσης η_E %</u>
<u>Εργαζόμενο Μέσο R134a</u>			
20 Bar	1832.6	12252.4	13.01
25 Bar	2258.6	13360.1	14.46
30 Bar	2679.8	14642.8	15.47
<u>Εργαζόμενο Μέσο R152a</u>			
20 Bar	2294.1	13254.3	14.76
25 Bar	2846.1	14517.4	16.39

3.8.7.2) Συνολικά αποτελέσματα για το δεύτερο σενάριο

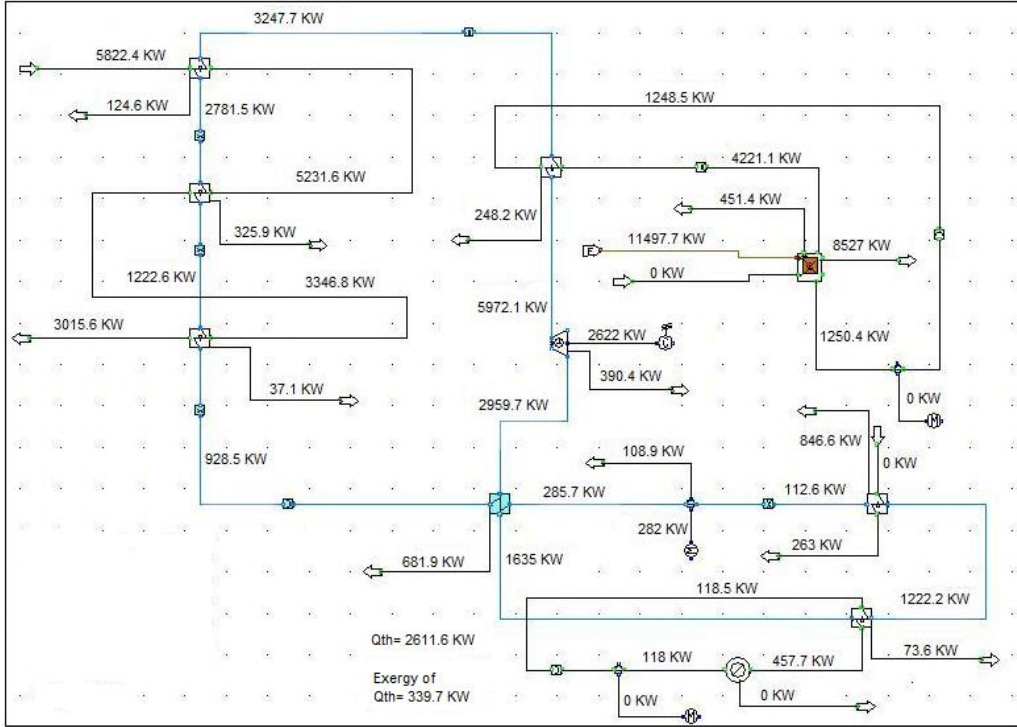
	<u>Συνολική Παραγωγή Εξέργειας (KW)</u>	<u>Συνολική Καταστροφή Εξέργειας (KW)</u>	<u>Εξεργειακός Βαθμός Απόδοσης η_E %</u>
<u>Εργαζόμενο Μέσο R134a</u>			
20 Bar	2954.3	14904.2	16.55
25 Bar	2921.1	14567.4	16.71
30 Bar	2862.0	14662.8	16.33
35 Bar	2806.8	15463.5	15.36
<u>Εργαζόμενο Μέσο R152a</u>			
20 Bar	3081.6	15279.8	16.79
25 Bar	2881.4	14296.0	16.78
30 Bar	2803.6	14102.0	16.59

3.8.7.3) Μέσος όρος των δύο σεναρίων

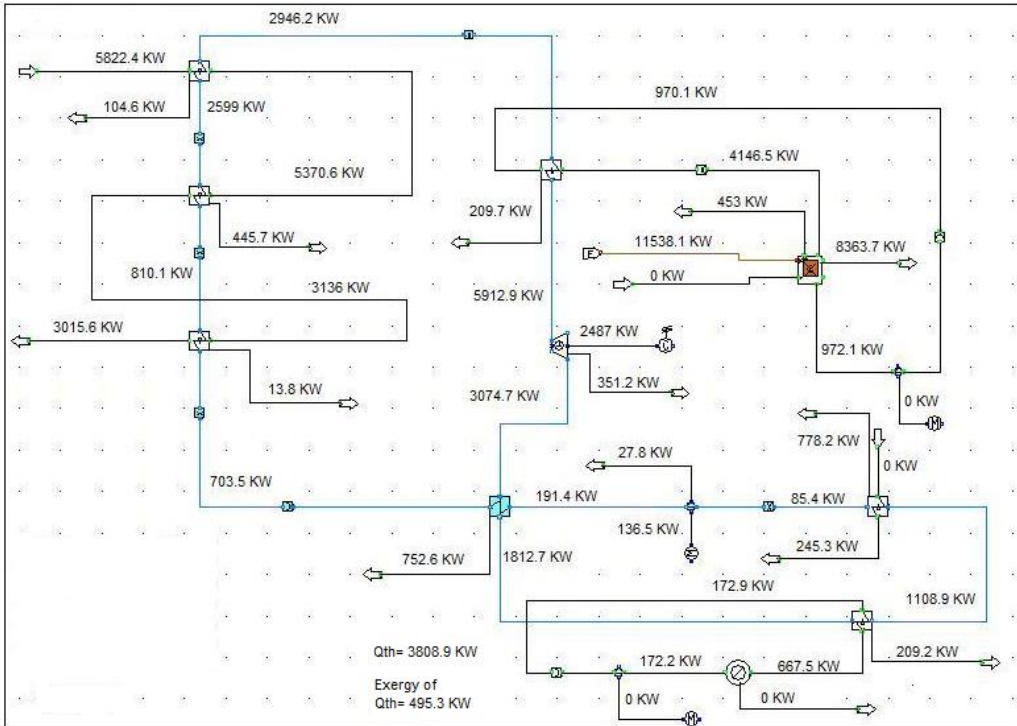
	<u>Συνολική Παραγωγή Εξέργειας (KW)</u>	<u>Συνολική Καταστροφή Εξέργειας (KW)</u>	<u>Εξεργειακός Βαθμός Απόδοσης η_E %</u>
Μέσος όρος 1^{ου} Σεναρίου	2382.2	13605.4	14.82
Μέσος όρος 2^{ου} Σεναρίου	2901.5	14753.7	16.44
<u>Γενικός μέσος όρος</u>	2641.9	14179.6	15.63

3.8.8) Διαγράμματα ροής εξέργειας

Αντίστοιχα με τα διαγράμματα Sankey, παρουσιάζονται τα διαγράμματα ροής εξέργειας της εγκατάστασης, για τις περιπτώσεις μέγιστης πίεσης των δύο εργαζόμενων μέσων, για το πρώτο σενάριο.



Εικόνα 3.63: Διάγραμμα ροής εξέργειας για εργαζόμενο μέσο R134a, 30 Bar, πρώτο σενάριο



Εικόνα 3.64: Διάγραμμα ροής εξέργειας για εργαζόμενο μέσο R152a, 25 Bar, πρώτο σενάριο

Από τις παραπάνω εικόνες παρατηρούμε ότι τα πιο καταστροφικά εξεργειακά τμήματα της εγκατάστασης είναι εκείνα τα τμήματα που έχουν τις μεγαλύτερες διαφορές θερμοκρασίας μεταξύ των δύο ρευμάτων (βλ. εικόνες 3.54-3.55). Αυτά τα τμήματα είναι ο λέβητας, ο αναγεννητικός προθερμαντής και ο συμπυκνωτής της εγκατάστασης.

Παρατηρούμε ότι στο λέβητα έχουμε καταστροφή περίπου του 72% της εισερχόμενης εξέργειας. Με άλλα λόγια ο λέβητας εξεργειακά έχει πολύ χαμηλό βαθμό απόδοσης. Αυτό συμβαίνει επειδή το ρεύμα των καυσαερίων έχει πολύ υψηλότερη θερμοκρασία από το ρεύμα του νερού, το οποίο είναι σε αρκετά χαμηλές θερμοκρασίες για εφαρμογές λεβήτων. Σε αυτό το σημείο γίνεται εμφανής η διαφορά της ενέργειας από την εξέργεια. Ο συγκεκριμένος λέβητας έχει ενεργειακό βαθμό απόδοσης της τάξης του 90%, ενώ εξεργειακό βαθμό απόδοσης της τάξης του 27%. Η συνολική εγκατάσταση, πάντως, έχει παραπλήσιο εξεργειακό με ενεργειακό βαθμό απόδοσης.

Επίσης, παρατηρώντας τα αποτελέσματα της προηγούμενης παραγράφου βλέπουμε ότι αυξανόμενη τις πίεσης λειτουργίας μειώνονται οι εξεργειακές απώλειες στους γεωεναλλάκτες. Αυτό είναι απολύτως λογικό, καθώς τα συναλλασσόμενα ρεύματα έχουν πιο κοντινές θερμοκρασίες, αυξανόμενη της πίεσης λειτουργίας. Βέβαια, όσον αφορά τη συνολική εγκατάσταση, αυξανόμενη της πίεσης λειτουργίας έχουμε αύξηση της παραγόμενης εξέργειας, αλλά και ταυτόχρονη αύξηση της καταστροφής εξέργειας, η οποία οφείλεται κυρίως στην απορριπτόμενη εξέργεια στο συμπυκνωτή. Η αύξηση της παραγόμενης εξέργειας υπερτερεί της αύξησης της καταστρεφόμενης εξέργειας, οπότε αυξανόμενη της πίεσης λειτουργίας έχουμε αύξηση του εξεργειακού βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης (σενάριο 1).

Συμπεράσματα-Προτάσεις:

Στο 3^ο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής μελετήσαμε τη δυνατότητα συνδυασμού γεωθερμικής ενέργειας και θερμικής ενέργειας προερχόμενης από καύση βιομάζας. Έγιναν σαφή τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα ενός τέτοιου υβριδικού συστήματος, καθώς επίσης αναλύθηκαν οι επιδόσεις, οι δυνατότητες και η λειτουργικότητα μιας τέτοιας εγκατάστασης. Συγκεκριμένα, συνδυάσαμε έναν απλό οργανικό κύκλο Rankine εκμετάλλευσης γεωθερμικού πεδίου, με έναν λέβητα ζεστού νερού για παραγωγή θερμικής ισχύος. Ο λέβητας ζεστού νερού θα προκαλούσε στο οργανικό μέσο του κύκλου ORC την επιθυμητή υπερθέρμανση.

Διαπιστώσαμε ότι είναι πιο συμφέρουσα η συνδυασμένη λειτουργία των δύο εγκαταστάσεων, από τη ξεχωριστή λειτουργία τους, ως προς τη δυνατότητα αύξησης της ηλεκτροπαραγωγής. Επίσης, διαπιστώσαμε ότι προκειμένου να μεγιστοποιήσουμε την ηλεκτροπαραγωγή, πρέπει να υπερθερμάνουμε το οργανικό μέσο στη μέγιστη δυνατή υπερθέρμανση του. Βέβαια, υπενθυμίζεται ότι για τα συνήθη οργανικά μέσα, η μέγιστη δυνατή υπερθέρμανση τους είναι της τάξης των 200°C. Η μελέτη έδειξε ότι μπορούμε να πετύχουμε αύξηση της ηλεκτροπαραγωγής της τάξης του 120% επί της ηλεκτροπαραγωγής της αμιγούς γεωθερμικής μονάδας (ισχύς γεωθερμικής μονάδας ~1MW). Για να πετύχουμε αυτήν την αύξηση της ηλεκτροπαραγωγής απαιτείται καύση βιομάζας της τάξης των 60 τόνων την ημέρα.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα παρουσίαζε η μελέτη του εφοδιασμού της μονάδας με τις απαραίτητες ποσότητες βιομάζας. Τονίζεται, ότι η παρούσα μελέτη στηρίχθηκε αποκλειστικά σε τεχνικά-θερμοδυναμικά κριτήρια, ενώ δεν ελήφθησαν καθόλου υπόψη οικονομικά στοιχεία. Προφανώς, η οικονομική μελέτη μιας τέτοιας εγκατάστασης, η οποία είναι σχετικά μικρής κλίμακας, θα παρουσίαζε ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Τέλος, ενδιαφέρον θα είχε και η μελέτη των ωφελειών (οικονομικών-κοινωνικών) της τοπικής κοινωνίας από την κατασκευή μιας τέτοιας μονάδας ηλεκτροπαραγωγής, η οποία όπως έχουμε αναφέρει λόγω της κλίμακας της (~λίγα MW) έχει τοπικό χαρακτήρα και ενισχύει τις τοπικές οικονομίες.

4) Συνδυασμός Γεωθερμικής Ενέργειας με Ηλιακή Ενέργεια

4.1) Βασικά Στοιχεία

Στο 3^ο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής μελετήσαμε τη δυνατότητα συνδυασμού δύο διαφορετικών μορφών (ανανεώσιμων) ενέργειας, της γεωθερμικής ενέργειας με τη θερμική ενέργεια προερχόμενη από καύση βιομάζας. Στο 4^ο κεφάλαιο θα μελετήσουμε αντίστοιχα τη δυνατότητα συνδυασμού γεωθερμικής ενέργειας με ηλιακή ενέργεια. Προφανώς, όταν αναφερόμαστε σε ηλιακή ενέργεια, αναφερόμαστε στα λεγόμενα ηλιακά θερμικά συστήματα τα οποία εκμεταλλεύονται τη θερμότητα του ηλίου και θερμαίνουν ένα εργαζόμενο μέσο, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε για την παραγωγή θερμότητας (ηλιακοί θερμοσίφωνες), είτε οδηγείται σε στροβίλους για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στην πρώτη περίπτωση οι απαιτούμενες θερμοκρασίες εργαζόμενου μέσου είναι σχετικά χαμηλές (~80°C), και συνήθως χρησιμοποιούνται επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες, οι οποίοι θερμαίνουν το εργαζόμενο μέσο στην επιθυμητή θερμοκρασία, και στη συνέχεια αυτό αποδίδει τη θερμική ενέργεια στους καταναλωτές. Η πιο συνήθης εφαρμογή αυτών των συστημάτων είναι οι ηλιακοί θερμοσίφωνες. Σε πολλές περιπτώσεις το εργαζόμενο μέσο μιας τέτοιας εγκατάστασης είναι το νερό, καθώς λόγω των σκοπών αυτών των εφαρμογών, συνήθως δεν απαιτείται η ατμοποίηση του εργαζόμενου μέσου, άρα είναι δυνατή η χρήση του νερού ως εργαζόμενο μέσο. Προφανώς, ανάλογα την επιθυμητή χρήση της θερμικής ενέργειας, μπορούμε να χρησιμοποιούμε διάφορα εργαζόμενα μέσα, εκτός του νερού. Στη δεύτερη περίπτωση, θερμαίνουμε ένα εργαζόμενο μέσο σε αρκετά υψηλές θερμοκρασίες (συνήθως άνω των 200°C), το οποίο ατμοποιείται, και πιθανόν υπερθερμαίνεται, και στη συνέχεια προσβάλλει έναν ατμοστρόβιλο με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Όπως αναφέρθηκε, οι θερμοκρασίες των συγκεκριμένων εφαρμογών είναι αρκετά μεγαλύτερες της πρώτης περίπτωσης, και συνήθως χρησιμοποιούνται συγκεντρωτικοί συλλέκτες, οι οποίοι συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία σε μια πολύ μικρή επιφάνεια, ούτως ώστε να καθίσταται δυνατή η ανάπτυξη των απαραίτητων θερμοκρασιών. Στις περισσότερες εφαρμογές αυτού του τύπου, το εργαζόμενο μέσο είναι ένα οργανικό ρευστό, αντίστοιχο με αυτό που χρησιμοποιείται στις εγκαταστάσεις γεωθερμίας, όπως το R134a, το οποίο είναι δυνατό να είναι στην ατμώδη κατάσταση σε αρκετά υψηλές πιέσεις, χωρίς απαραίτητα να είναι σε ιδιαίτερως υψηλές θερμοκρασίες, όπως είδαμε και στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Οι εγκαταστάσεις των κεφαλαίων 3 και 4 είναι οι βασικές δυνατές εγκαταστάσεις συνδυασμού γεωθερμίας με κάποια άλλη ανανεώσιμη μορφή ενέργειας. Το βασικό πλεονέκτημα της γεωθερμικής ενέργειας έναντι της ηλιακής, και γενικά όλων των άλλων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, είναι η σταθερή παραγωγή ανεξαρτήτως κλιματικών και άλλων παραγόντων. Επίσης, ένα άλλο βασικό πλεονέκτημα της γεωθερμικής ενέργειας είναι η μεγάλη συγκέντρωση ισχύος, καθώς όπως είδαμε και στο 1^ο κεφάλαιο, η γεωθερμική ενέργεια απαιτεί τη μικρότερη έκταση γης ανά εγκατεστημένο KW. Το σημαντικότερο μειονέκτημα της βιομάζας έναντι της ηλιακής ενέργειας είναι η διαθεσιμότητα της, καθώς είδαμε ότι απαιτούνται ποσότητες της τάξης των 60 τόνων την ημέρα για τη λειτουργία της εγκατάστασης βιομάζας-γεωθερμίας. Οι ποσότητες αυτές, βέβαια, δεν είναι απαγορευτικές, άλλα πιθανόν να υπάρχει πρόβλημα με τον επαρκή και συνεχή ανεφοδιασμό της εγκατάστασης. Αντιθέτως, η ηλιακή ενέργεια δεν εναπόκειται σε αντίστοιχα προβλήματα, αλλά όπως είπαμε και προηγουμένως είναι μια στοχαστική μορφή ενέργειας, και ενδέχεται να διακόπτει τη λειτουργία της σε πολύ μικρά χρονικά διαστήματα. Βέβαια, και οι δύο

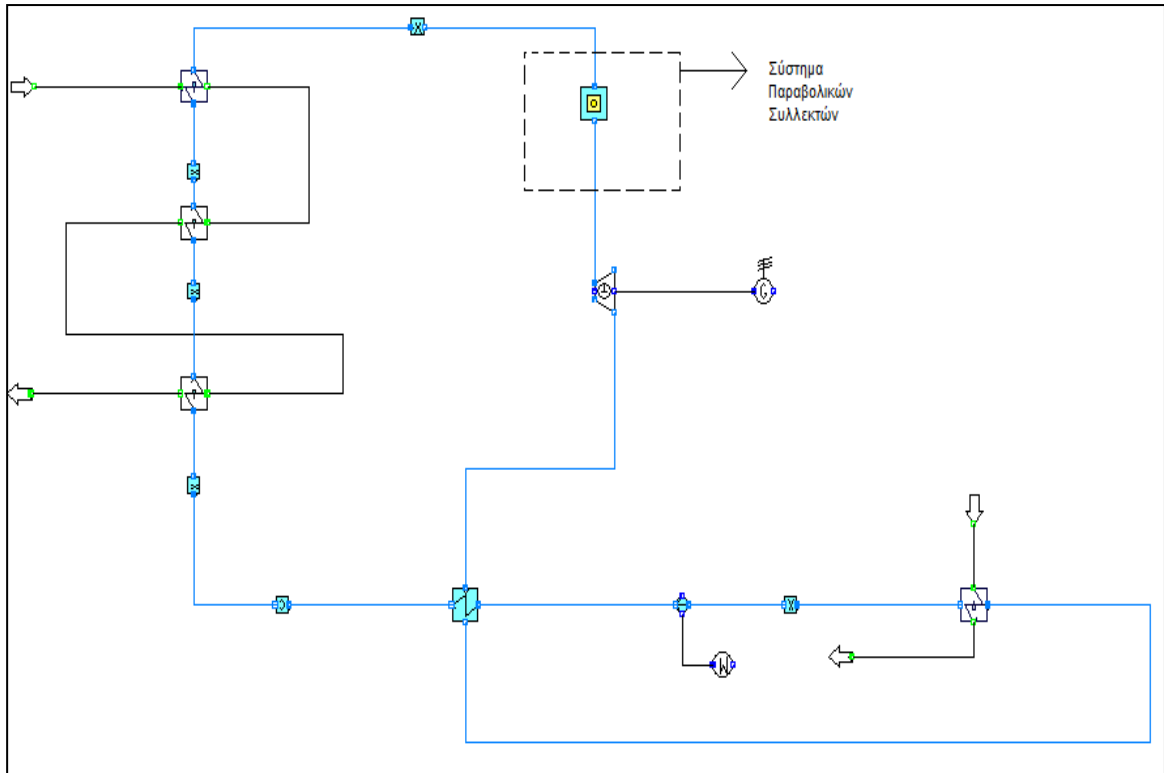
εγκαταστάσεις έχουν το πολύ σημαντικό πλεονέκτημα ότι μπορούν να λειτουργήσουν ως αμιγώς γεωθερμικές εγκαταστάσεις, όταν η δεύτερη μορφή ενέργειας δεν υπάρχει, ή για δευτερεύοντες λόγους (συντήρηση) δεν είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί. Άρα, δεν θα έχουμε ποτέ ολοκληρωτική απώλεια ισχύος. Τέλος, η εγκατάσταση της ηλιακής ενέργειας έχει αρκετά μεγαλύτερο αρχικό κόστος κεφαλαίου, σε σχέση με την εγκατάσταση βιομάζας, άλλα έχει αρκετά μικρότερο κόστος συντήρησης και λειτουργίας.

Στο παρόν κεφάλαιο θα μελετήσουμε τη δυνατότητα υπερθέρμανσης του εργαζόμενου μέσου από ηλιακούς συλλέκτες, το οποίο πρωτίτερα έχει διέλθει από τους γεωθερμικούς εναλλάκτες και έχει θερμανθεί. Πρακτικά, η μελέτη θα είναι παρόμοια με του 3^{ου} κεφαλαίου, αλλά σε αυτό το κεφάλαιο το σύστημα υπερθέρμανσης θα είναι ένα ηλιακό θερμικό σύστημα συγκεντρωτικών συλλεκτών, σε αντίθεση με το 3^ο κεφάλαιο που ήταν ένας λέβητας βιομάζας. Το σύστημα που θα μελετήσουμε σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται στην εικόνα 4.1. Παρατηρούμε ότι εξαιρουμένου του συστήματος υπερθέρμανσης, όλη η υπόλοιπη εγκατάσταση είναι ίδια με του προηγούμενου κεφαλαίου. Άρα, η ανάλυση της εγκατάστασης θα είναι αρκετά πιο περιορισμένη σε σχέση με του κεφαλαίου 3.

Η μελέτη του παρόντος κεφαλαίου θα γίνει στο υπολογιστικό περιβάλλον IPSEpro.

Ορισμένες βασικές παρατηρήσεις επί της συγκεκριμένης εγκατάστασης, οι οποίες μας κατευθύνουν στους βασικούς άξονες της μελέτης, οι οποίοι θα αναφερθούν αμέσως μετά:

- Η εγκατάσταση του προηγούμενου κεφαλαίου έχει σταθερή ημερήσια παραγωγή, η οποία είναι ανεξάρτητη από εξωτερικούς παράγοντες, αφού και η γεωθερμική ενέργεια, αλλά και η θερμική ενέργεια βιομάζας έχουν σταθερή ροή κατά τη διάρκεια της ημέρας. Επομένως, μπορεί να λειτουργήσει ως μονάδα βάσης. Αντιθέτως, η εγκατάσταση του παρόντος κεφαλαίου έχει παραγωγή, η οποία εξαρτάται από την ηλιακή ακτινοβολία, η οποία είναι μεταβλητή κατά τη διάρκεια της ημέρας. Συγκεκριμένα, η γεωθερμική εγκατάσταση θα λειτουργεί ημερησίως με σταθερή παραγωγή, και ανάλογα την ηλιακή ακτινοβολία θα αυξομειώνεται η υπερθέρμανση του εργαζόμενου μέσου. Το γεωθερμικό σύστημα θα είναι ίδιο με του πρώτου κεφαλαίου, θα έχουμε δηλαδή γεωθερμικό ρευστό της τάξης των 120°C, οπότε το εργαζόμενο μέσο στην έξοδο από τους γεωεναλλάκτες θα έχει θερμοκρασία της τάξης των 100°C. Η θερμοκρασία αυτή είναι επαρκώς υψηλή για ηλεκτροπαραγωγή με τη χρήση του κύκλου ORC, η οποία θα είναι σταθερή για όλη την ημέρα. Ανάλογα την ώρα της ημέρας, θα έχουμε διαφορετική προστίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στους συλλέκτες, άρα και διαφορετική απορροφόμενη θερμότητα. Ένα μέρος της θερμότητας αυτής, λαμβάνοντας υπόψη τις απώλειες του συλλέκτη, θα προσδίδεται στο εργαζόμενο μέσο και θα το υπερθερμαίνει. Προφανώς, η υπερθέρμανση του εργαζόμενου μέσου εξαρτάται από την απορροφόμενη ηλιακή ακτινοβολία, η οποία προφανώς είναι μεταβλητή κατά τη διάρκεια της ημέρας. Σημειώνεται, ότι οι συγκεντρωτικοί ηλιακοί συλλέκτες λειτουργούν με την άμεση ηλιακή ακτινοβολία. Επομένως, η συγκεκριμένη εγκατάσταση τις ώρες μηδενικής ηλιακής ακτινοβολίας θα λειτουργεί ως αμιγώς γεωθερμική εγκατάσταση οργανικού κύκλου Rankine.



Εικόνα 4.1: Μελετώμενη εγκατάσταση στο IPSEpro

- Η μελέτη της θερμοκρασίας εξόδου από τον αναγεννητικό προθερμαντή $T_{ph,ex}$ δεν διαφέρει από την αντίστοιχη μελέτη του πρώτου κεφαλαίου, καθώς η μελέτη αυτή είναι ανεξάρτητη της πηγής θερμότητας για υπερθέρμανση. Άρα, στο παρόν κεφάλαιο δεν θα κάνουμε τη συγκεκριμένη μελέτη, αλλά θα χρησιμοποιήσουμε τα αποτελέσματα της αντίστοιχης μελέτης του προηγούμενου κεφαλαίου. Υπενθυμίζουμε τις τελικές τιμές της θερμοκρασίας εξόδου από τον αναγεννητικό προθερμαντή $T_{ph,ex}$, όπως αυτές προέκυψαν από τη μελέτη του πρώτου κεφαλαίου, για το πρώτο σενάριο (όπως θα αναφερθούμε στη συνέχεια, θα ασχοληθούμε μόνο με το πρώτο σενάριο στο παρόν κεφάλαιο).

➤ R134a:	20Bar: 68°C	25Bar: 75°C	30Bar: 78°C
➤ R152a:	20Bar: 71°C	25Bar: 79°C	

- Η μελέτη της θερμοκρασίας του γεωθερμικού ρευστού T_{geo} ως προς τη λειτουργία της εγκατάστασης, επίσης δεν διαφέρει από την αντίστοιχη μελέτη του πρώτου κεφαλαίου. Πρακτικά, η θερμοκρασία αυτή είναι μια εξωτερική παράμετρος της εγκατάστασης και είναι εκ των προτέρων γνωστή για μια εγκατάσταση. Βέβαια, στην αντίστοιχη μελέτη του πρώτου κεφαλαίου είχαμε κάνει τη μελέτη της θερμοκρασίας αυτής θεωρώντας τη μέγιστη υπερθέρμανση του εργαζόμενου μέσου, και δεδομένου ότι η υπερθέρμανση αυτή είναι σταθερή όλο το χρόνο, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως. Στην εγκατάσταση αυτού του κεφαλαίου η υπερθέρμανση του εργαζόμενου μέσου δεν είναι σταθερή, άρα η μελέτη της εξωτερικής θερμοκρασίας T_{geo} είναι ιδιαίτερως πολύπλοκη. Πάντως, όταν έχουμε τη μέγιστη υπερθέρμανση του εργαζόμενου μέσου, η συμπεριφορά της εγκατάστασης συναρτήσει της θερμοκρασίας T_{geo} ταυτίζεται με την αντίστοιχη του πρώτου κεφαλαίου. Στο παρόν κεφάλαιο δεν θα ασχοληθούμε περαιτέρω με τη συγκεκριμένη μελέτη.

- Στη συγκεκριμένη εγκατάσταση θα θέσουμε εκτός λειτουργίας το κύκλωμα παραγωγής θερμικής ενέργειας, καθώς λόγω της μεταβαλλόμενης θερμοκρασίας υπερθέρμανσης του εργαζόμενου μέσου, έχουμε διαρκή μεταβολή της θερμοκρασίας εξόδου του εργαζόμενου μέσου από τον ατμοστρόβιλο, και εν συνεχεία διαρκή μεταβολή της θερμοκρασίας εξόδου του θερμού ρεύματος από τον αναγεννητικό προθερμαντή. Άρα, έχουμε μια διαρκή μεταβολή της διαθέσιμης θερμοκρασίας για παραγωγή θερμικής ενέργειας. Μάλιστα υπολογίζεται πως μόνο το 15-30% της ημέρας η θερμοκρασία αυτή είναι επαρκώς υψηλή για παραγωγή θερμικής ισχύος. Προφανώς, αυτό συμβαίνει τις ώρες της μέγιστης ηλιακής ακτινοβολίας, στις οποίες είναι εξαιρετικά πιθανό να μην χρειαζόμαστε θερμική ισχύ. Επίσης, είναι εξαιρετικά πιθανό, η λειτουργία της θερμικής παραγωγής για 15-30% του χρόνου να είναι αντιοικονομική. Για όλους αυτούς τους λόγους, στην παρούσα εγκατάσταση δεν θα έχουμε καθόλου παραγωγή θερμικής ισχύος.
- Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο, λόγω της μεταβαλλόμενης θερμοκρασίας υπερθέρμανσης του εργαζόμενου μέσου, έχουμε μια διαρκώς μεταβαλλόμενη θερμοκρασία στην έξοδο του ατμοστρόβιλου. Άρα, η διαθέσιμη θερμοκρασία για τον αναγεννητικό προθερμαντή είναι επίσης διαρκώς μεταβαλλόμενη. Η θερμοκρασία αυτή δεν είναι πάντοτε επαρκώς υψηλή ώστε να είναι δυνατή η λειτουργία του αναγεννητικού προθερμαντή. Όταν λειτουργεί μόνο η γεωθερμική εγκατάσταση η θερμοκρασία εισόδου του εργαζόμενου μέσου στον ατμοστρόβιλο είναι περίπου 100°C, άρα γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η θερμοκρασία εξόδου από τον ατμοστρόβιλο δεν είναι επαρκώς υψηλή για τη λειτουργία του αναγεννητικού προθερμαντή. Άρα, στην παρούσα μελέτη η λειτουργία του αναγεννητικού προθερμαντή δεν θα είναι μόνιμη, άλλα μόνο όταν η θερμοκρασία υπερθέρμανσης είναι αρκετά υψηλή.
- Στην παρούσα μελέτη, σε αντίθεση με το προηγούμενο κεφάλαιο, θα κάνουμε μελέτη μόνο του πρώτου σεναρίου, και όχι του δεύτερου. Λόγω της μεταβαλλόμενης θερμοκρασίας υπερθέρμανσης, η λειτουργία στο δεύτερο σενάριο καθίσταται ιδιαίτερος προβληματική και ασταθής. Έτσι, θα περιοριστούμε στη μελέτη μόνο του πρώτου σεναρίου.
- Τα δεδομένα του γεωθερμικού ρευστού θα είναι ίδια με του προηγούμενου κεφαλαίου, δηλαδή θα είναι ίδια με του γεωθερμικού πεδίου του Husavik. Τα δεδομένα της ηλιακής ενέργειας θα αναφέρονται στη Μήλο, για το έτος 2009. Η επιλογή της Μήλου γίνεται, προφανώς, λόγω του ιδιαίτερος υψηλού γεωθερμικού δυναμικού της, καθώς και του υψηλού ηλιακού δυναμικού της. Βέβαια, το γεωθερμικό πεδίο που χρησιμοποιούμε δεν είναι της Μήλου, αλλά της Ισλανδίας. Αυτό γίνεται για δύο λόγους. Πρώτον, για να υπάρχει μια συνοχή σε όλη την εργασία. Δεύτερον, δεδομένου ότι η θερμοκρασία των γεωθερμικών πεδίων της Μήλου είναι πάνω από 250-280°C σε αρκετά σημεία, συμπεραίνεται ότι θα είναι διαθέσιμα αρκετά πεδία παρόμοια με του Husavik, θερμοκρασίας δηλαδή της τάξης των 120°C. Άρα, ο παραπάνω συνδυασμός δεδομένων είναι πολύ κοντά στην πραγματικότητα για τη Μήλο.

Στην παρούσα μελέτη θα εξεταστούν, όπως και στο πρώτο κεφάλαιο, δυο εργαζόμενα μέσα, τα R134a και R152a. Επίσης, θα γίνει μελέτη με δύο διαφορετικούς προσανατολισμούς των συγκεντρωτικών ηλιακών συλλεκτών:

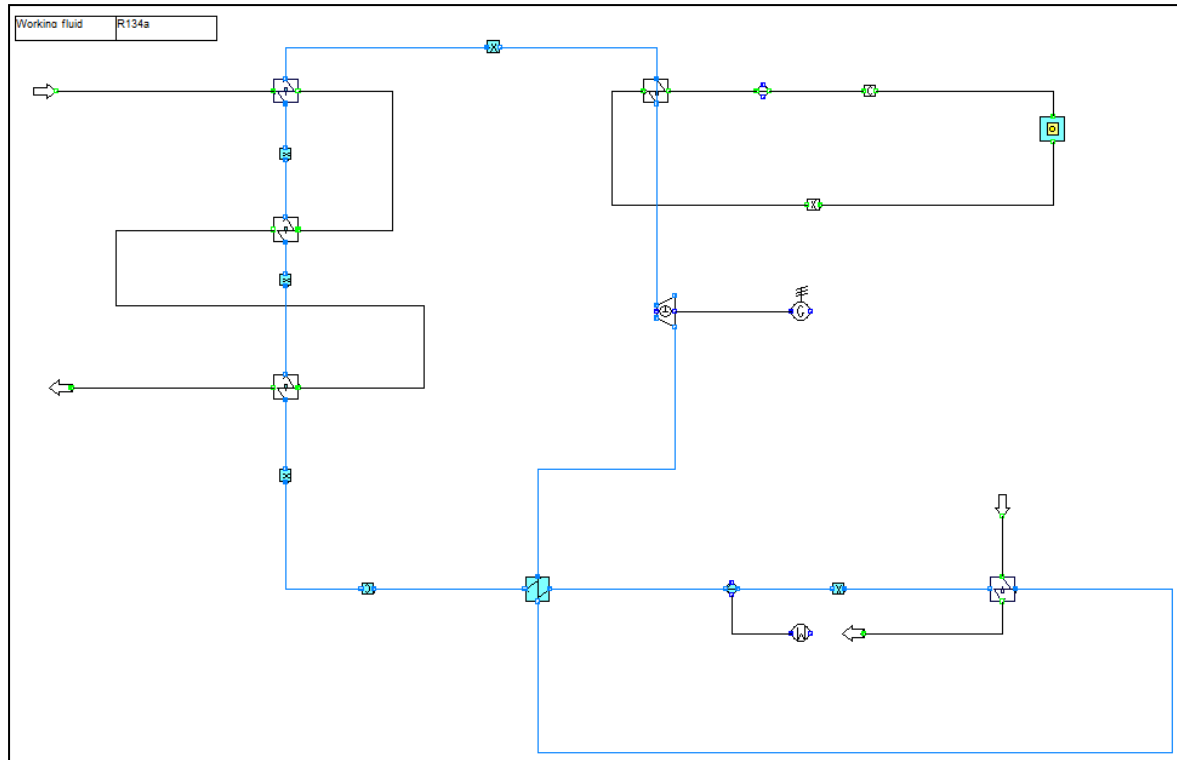
- Βόρειο-Νότιο προσανατολισμό (N-S)
- Ανατολικό-Δυτικό προσανατολισμό (W-E)

Οι βασικοί άξονες της μελέτης του παρόντος κεφαλαίου είναι οι εξής:

- Διαστασιολόγηση της εγκατάστασης. Η διαστασιολόγηση της εγκατάστασης θα γίνει με γνώμονα την επίτευξη της μέγιστης δυνατής υπερθέρμανσης του κάθε εργαζόμενου μέσου, την ώρα της μέγιστης ηλιακής ακτινοβολίας. Έτσι, θα επιτύχουμε τη μεγιστοποίηση της ηλεκτροπαραγωγής την ώρα της μέγιστης ηλιακής ακτινοβολίας. Αυτό είναι ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της ηλιακής ενέργειας, ότι η μεγιστοποίηση της παραγωγής συμπίπτει, συνήθως, με τη μεγιστοποίηση της ζήτησης. Σημειώνεται, ότι η διαστασιολόγηση θα γίνει για την 21^η Ιουνίου.
- Διαγράμματα επιδόσεων της εγκατάστασης. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η διαστασιολόγηση της εγκατάστασης θα γίνει με γνώμονα τη μέγιστη υπερθέρμανση του εργαζόμενου μέσου, την ώρα της μέγιστης ηλιακής ακτινοβολίας. Προφανώς, όλες τις υπόλοιπες ώρες η υπερθέρμανση του εργαζόμενου μέσου μειώνεται. Βέβαια, η εγκατάσταση παραμένει η ίδια, που έχει διαστασιολογηθεί στην προηγούμενη παράγραφο. Άρα, ανάλογα την ώρα της ημέρας αλλάζουν οι επιδόσεις της εγκατάστασης. Θα γίνει παρουσίαση των επιδόσεων της εγκατάστασης για την 21^η Ιουνίου, και για την 21^η Δεκεμβρίου.
- Μελέτη ξεχωριστής λειτουργίας των εγκαταστάσεων. Η μελέτη αυτή θα είναι παρόμοια της αντίστοιχης μελέτης του 3^{ου} κεφαλαίου. Η βασική διαφορά σε αυτήν την περίπτωση, είναι ότι οι δύο αρχικές εγκαταστάσεις από τις οποίες προήλθε η εγκατάσταση που μελετάμε, είναι ηλεκτροπαραγωγικές εγκαταστάσεις. Εν αντιθέσει, στο πρώτο κεφάλαιο είχαμε την ηλεκτροπαραγωγική εγκατάσταση ORC, και το λέβητα ζεστού νερού, ο οποίος προφανώς παρήγαγε θερμότητα. Επίσης, η μελέτη θα γίνει για την ώρα της μέγιστης υπερθέρμανσης του εργαζόμενου μέσου.
- Εξεργειακή ανάλυση των παραπάνω εγκαταστάσεων, στην περίπτωση της μέγιστης υπερθέρμανσης, όπου προφανώς έχουμε τις μέγιστες εξεργειακές απώλειες. Επίσης, θα παρουσιάσουμε ενδεικτικά ορισμένα διαγράμματα ροής ενέργειας Sankey της εγκατάστασης, καθώς αντίστοιχα και ορισμένα διαγράμματα Q-T.

**Στην πραγματικότητα οι ηλιακοί συλλέκτες δεν θερμαίνουν απευθείας το εργαζόμενο μέσο, άλλα ένα δευτερεύον μέσο, το οποίο μεταφέρει τη θερμότητα στο εργαζόμενο μέσο. Αυτό γίνεται για πρακτικούς λόγους, κυρίως για να μειώνουμε την απαιτούμενη ποσότητα εργαζόμενου μέσου στην εγκατάσταση. Οι απώλειες στο δευτερεύον κύκλωμα, είναι πρακτικά αμελητέες, οπότε στην παρούσα μελέτη δεν θα το λάβουμε υπόψη.

Στην πραγματικότητα, δηλαδή, η εγκατάσταση είναι αυτή που φαίνεται στην εικόνα 4.2.



Εικόνα 4.2: Πραγματική υβριδική εγκατάσταση γεωθερμίας-ηλιακής ενέργειας

Σημείωση: Το δευτερεύον κύκλωμα μεταφοράς θερμότητας στο εργαζόμενο μέσο είναι επ'ακριβώς το ίδιο με το αντίστοιχο της υβριδικής εγκατάστασης βιομάζας-γεωθερμίας. Σε αυτό το δευτερεύον μέσο είναι υπό υψηλή πίεση (15-20 Bar), έτσι ώστε να εξέρχεται των ηλιακών συλλεκτών ως κορεσμένο νερό και να εισέρχεται σε αυτούς ως υπόψυκτο νερό. Έτσι, αποφεύγουμε την ατμοποίηση του δευτερεύοντος μέσου. Παρατηρούμε ότι η παραπάνω εγκατάσταση, με εξαίρεση μόνο την εξωτερική πηγή θερμότητας, είναι ακριβώς η ίδια με την εγκατάσταση βιομάζας-γεωθερμίας. Τόσο το πρωτεύον, όσο και το δευτερεύον κύκλωμα, είναι ως προς όλες τις θερμοδυναμικές παραμέτρους τους ακριβώς ίδια (ίδιες θερμοκρασίες- πιέσεις). Επίσης, τα δεδομένα του γεωθερμικού ρευστού παραμένουν τα ίδια, και δεδομένου ότι λειτουργούμε με σταθερή απορρόφηση θερμότητας από το γεωθερμικό ρευστό, θα είναι σταθερή και η παροχή μάζας εργαζόμενου μέσου ανά περίπτωση για τις δύο εγκαταστάσεις. Άρα, θα είναι σταθερή η μεταφερόμενη θερμότητα σε κάθε τμήμα της εγκατάστασης σε σχέση με την εγκατάσταση βιομάζας-γεωθερμίας. Άρα, δεν έχει νόημα η αντίστοιχη μελέτη του προηγούμενου κεφαλαίου, καθώς τα αποτελέσματα είναι ακριβώς τα ίδια. Παρόλα αυτά, στο τέλος του κεφαλαίου θα παρουσιάσουμε ορισμένα ενδεικτικά διαγράμματα Q-T, μαζί με τα διαγράμματα ροής ενέργειας Sankey.

4.2) Διαστασιολόγηση της εγκατάστασης

Όπως αναφέραμε προηγουμένως, η διαστασιολόγηση της εγκατάστασης θα γίνει με γνώμονα τη μεγιστοποίηση της υπερθέρμανσης του εργαζόμενου μέσου την ώρα της μέγιστης προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας για την 21^η Ιουνίου. Η Μήλος έχει βόρειο γεωγραφικό πλάτος 36.41° και γεωγραφικό μήκος 24.28° ανατολικό. Οι συγκεντρωτικοί ηλιακοί συλλέκτες, όπως ήδη αναφέραμε, λειτουργούν με την άμεση ηλιακή ακτινοβολία (Direct Normal Irradiance-DNI), η οποία προφανώς είναι μεταβλητή κατά τη διάρκεια της ημέρας. Αξίζει να τονιστεί ότι η μέγιστη προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία ενδέχεται να μην ταυτίζεται με τη μέγιστη άμεση ηλιακή ακτινοβολία, καθώς στον υπολογισμό της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας λαμβάνεται υπόψη και η γωνία πρόσπτωσης των ηλιακών ακτινών στο συλλέκτη, η οποία επίσης μεταβάλλεται με το χρόνο. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές της DNI, για την 21^η Ιουνίου και την 21^η Δεκεμβρίου, που θα μελετήσουμε.

<u>Ωρα</u>	<u>DNI 21^{ης} Ιουνίου</u>	<u>DNI 21^{ης} Δεκεμβρίου</u>
0:00-4:00	0	0
5:00	1	0
6:00	36.2	0
7:00	203.9	0
8:00	517.6	62.6
9:00	703.6	361.4
10:00	793.3	502.6
11:00	843.1	566.1
12:00	862	467.2
13:00	864.2	260.4
14:00	844.2	240.7
15:00	791.3	235.4
16:00	703.7	16.9
17:00	515.5	3
18:00	198.9	0
19:00	24.1	0
20:00-23:00	0	0

Πίνακας 4.1: Άμεση ηλιακή ακτινοβολία (DNI) Μήλου για την 21^η Ιουνίου και 21^η Δεκεμβρίου

Ο υπολογισμός της γωνίας πρόσπτωσης θ της ηλιακής ακτινοβολίας στους συγκεντρωτικούς συλλέκτες γίνεται ως εξής (Σύμφωνα με την εργασία των Lentz-Almanza, κεφ. 2.2) :

$$\text{Για N-S προσανατολισμό: } \cos \theta = (\cos^2 \theta_z + \cos^2 \delta \cdot \sin^2 \omega)^{1/2}$$

$$\text{Για W-E προσανατολισμό: } \cos \theta = (1 - \cos^2 \delta \cdot \sin^2 \omega)^{1/2}$$

Στις παραπάνω εξισώσεις ο κάθε όρος υπολογίζεται ως εξής:

$$** \cos \theta_z = \sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \omega$$

$$* \delta = 23.45 \cdot \sin\left(\frac{360 \cdot (284 + n)}{365}\right), \text{ όπου } n: \text{ η μελετώμενη ημέρα του έτους. Είναι } n=172 \text{ για την } 21^{\text{η}} \text{ Ιουνίου, και } n=355 \text{ για την } 21^{\text{η}} \text{ Δεκεμβρίου.}$$

$$* \phi = +36.41^{\circ}, \text{ το γεωγραφικό πλάτος της Μήλου.}$$

* $\omega = 0.25 \cdot$ (λεπτά από το ηλιακό μεσημέρι). Είναι ο όρος που μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της ημέρας.

** Η αναγωγή της ηλιακής ώρας σε ωρολογιακή και αντίστροφα γίνεται με τον εξής τύπο:

$$t_{sol} = t_{\rho\lambda} - 4 \cdot (L_{st} - L_{loc}) + E, \text{ όπου}$$

L_{st} : το γεωγραφικό μήκος του μεσημβρινού στο οποίο βασίζεται η τοπική ώρα (=30° για την Ελλάδα).

L_{loc} : το γεωγραφικό μήκος που μελετάμε (=24.28° για τη Μήλο)

$$* E = 9.87 \cdot \sin 2B - 7.53 \cdot \cos B - 1.5 \sin B$$

$$* B = 360 \cdot \frac{n - 81}{364}, \text{ όπου } n: \text{ η ημέρα του έτους που μελετάμε.}$$

Άρα, με τους παραπάνω τύπους, ανάλογα την ημέρα του χρόνου, και την ώρα της ημέρας, μπορούμε να υπολογίσουμε τη γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας στους συλλέκτες για κάθε προσανατολισμό. Αν πολλαπλασιάσουμε αυτή τη γωνία πρόσπτωσης, και συγκεκριμένα το συνημίτονο της γωνίας πρόσπτωσης, με την άμεση ηλιακή ακτινοβολία της ίδιας στιγμής, θα υπολογίσουμε την προσπίπτουσα άμεση ηλιακή ακτινοβολία στους συλλέκτες, βάσει της οποίας λειτουργούν οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες. Εμάς μας ενδιαφέρει η μεγιστοποίηση της προσπίπτουσας άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας, και όχι της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας γενικά.

Η μέγιστη προσπίπτουσα άμεση ηλιακή ακτινοβολία για N-S προσανατολισμό προκύπτει περίπου 843.5 W/m², ενώ για W-E προσανατολισμό προκύπτει περίπου 855.2 W/m².

Προφανώς, οι παραπάνω τιμές είναι ανεξάρτητες του γεωθερμικού κυκλώματος, και είναι κοινές για κάθε εργαζόμενο μέσο και κάθε πίεση λειτουργίας.

Η μεταφερόμενη θερμότητα στο εργαζόμενο μέσο υπολογίζεται ως εξής:

$$Q_{trans} = DNI \cdot \cos \theta \cdot A \cdot \eta_{sc}, \text{ όπου } A: \text{ η επιφάνεια των συλλεκτών}$$

και η_{sc} : ο βαθμός απόδοσης των συλλεκτών.

Στην περίπτωση της μέγιστης υπερθέρμανσης του εργαζόμενου μέσου, γνωρίζουμε την απαραίτητη μεταφερόμενη θερμότητα στο εργαζόμενο μέσο σε κάθε περίπτωση, και δεδομένου ότι η προσπίπτουσα άμεση ηλιακή ακτινοβολία στους συλλέκτες λαμβάνει τις τιμές που αναφέραμε παραπάνω, προκύπτει η απαραίτητη συλλεκτική επιφάνεια για τη συγκεκριμένη υπερθέρμανση που επιθυμούμε, ως εξής:

$$A = \frac{Q_{trans}}{DNI \cdot \cos \theta \cdot \eta_{SC}}, \text{ όπου υποθέτουμε 70\% βαθμό απόδοσης του συλλέκτη.}$$

Έτσι προκύπτει η απαραίτητη συλλεκτική επιφάνεια για τη μέγιστη υπερθέρμανση του εργαζόμενου μέσου. Βέβαια, η προκύπτουσα συλλεκτική επιφάνεια είναι μη τυποποιημένη. Επιλέγουμε να καλύψουμε την επιφάνεια αυτή, με τυποποιημένους συγκεντρωτικούς συλλέκτες LS-3, συλλεκτικής επιφάνειας 545m² ο καθένας. Συνήθως, ο αριθμός των συλλεκτών που προκύπτει δεν θα είναι ακέραιος, οπότε θα επιλέγουμε τον αμέσως μεγαλύτερο ακέραιο αριθμό συλλεκτών LS-3. Με αυτόν τον τρόπο, η συλλεκτική επιφάνεια προκύπτει ελαφρώς μεγαλύτερη από την απαραίτητη συλλεκτική επιφάνεια για μέγιστη υπερθέρμανση του εργαζόμενου μέσου. Άρα, ενδέχεται να έχουμε κατά 1-2°C μεγαλύτερη υπερθέρμανση από τη μέγιστη ορισμένες φορές. Είναι προφανές, ότι τα όρια της μέγιστης υπερθέρμανσης του εργαζόμενου μέσου δεν είναι ιδιαίτερα αυστηρά.

Στους παρακάτω πίνακες καταγράφονται τα τελικά αποτελέσματα της απαραίτητης συλλεκτικής επιφάνειας, για κάθε εργαζόμενο μέσο, κάθε προσανατολισμό και κάθε πίεση λειτουργίας.

<u>N-S Προσανατολισμός</u>	<u>Τελική Συλλεκτική Επιφάνεια (m²)</u>	<u>Αριθμός Τυποποιημένων Συλλεκτών LS-3</u>
<u>Εργαζόμενο Μέσο R134a</u>		
20 Bar	11990	22
25 Bar	14170	26
30 Bar	16350	30
<u>Εργαζόμενο Μέσο R152a</u>		
20 Bar	14170	26
25 Bar	16350	30

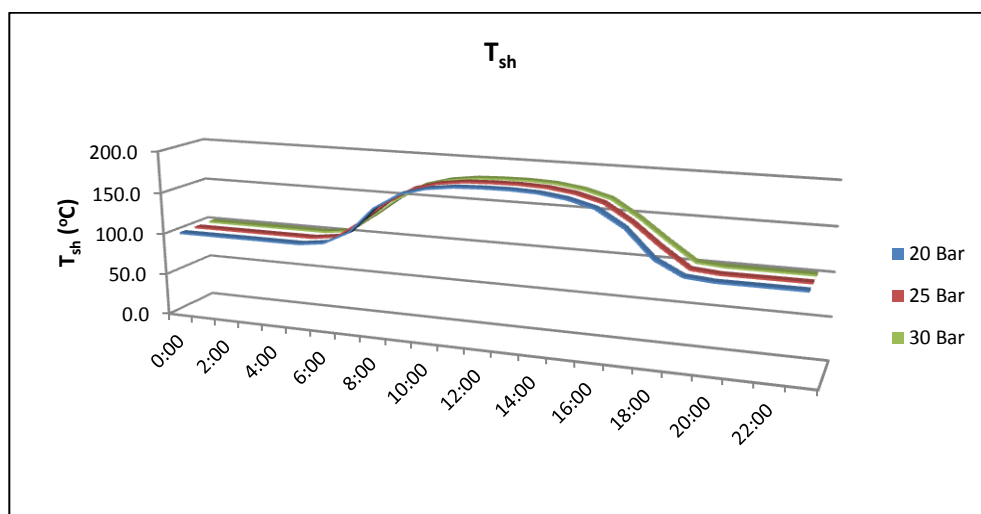
Πίνακας 4.2: Τελική συλλεκτική επιφάνεια και αριθμός τυποποιημένων συλλεκτών LS-3 για N-S προσανατολισμό

<u>W-E Προσανατολισμός</u>	<u>Τελική Συλλεκτική Επιφάνεια (m²)</u>	<u>Αριθμός Τυποποιημένων Συλλεκτών LS-3</u>
<u>Εργαζόμενο Μέσο R134a</u>		
20 Bar	11445	21
25 Bar	14170	26
30 Bar	16350	30
<u>Εργαζόμενο Μέσο R152a</u>		
20 Bar	13625	25
25 Bar	16350	30

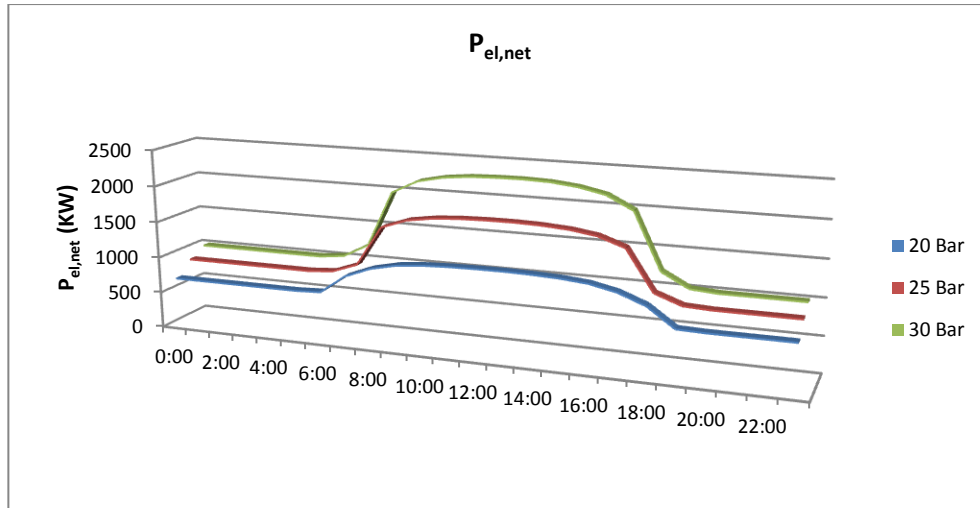
Πίνακας 4.3: Τελική συλλεκτική επιφάνεια και αριθμός τυποποιημένων συλλεκτών LS-3 για W-E προσανατολισμό

Οι παραπάνω τιμές είναι οι απαραίτητες συλλεκτικές επιφάνειες ανά περίπτωση ώστε να επιτυγχάνουμε μέγιστη υπερθέρμανση του εργαζόμενου μέσου όταν έχουμε μεγιστοποίηση της άμεσης προσπίπτουσας στο συλλέκτη ηλιακής ακτινοβολίας. Όπως αναφέραμε, τις υπόλοιπες ώρες που η προσπίπτουσα άμεση ηλιακή ακτινοβολία είναι μικρότερη της μέγιστης, τότε η υπερθέρμανση του εργαζόμενου μέσου δεν θα είναι η μέγιστη.

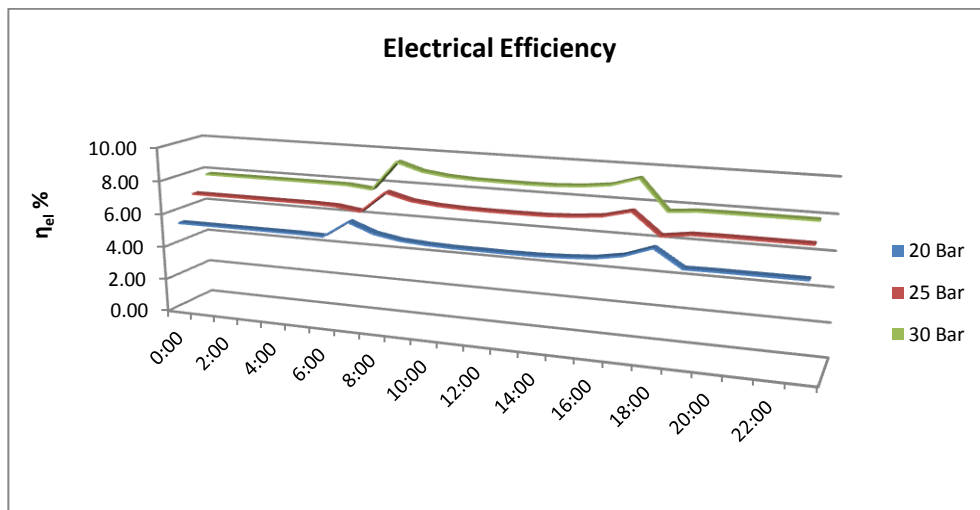
Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται η ημερήσια διακύμανση διαφόρων παραμέτρων της εγκατάστασης για την 21^η Ιουνίου. Τα διαγράμματα που παρουσιάζονται είναι για εργαζόμενο μέσο R134a. Προφανώς, τα διαγράμματα για εργαζόμενο μέσο R152a είναι παρόμοια, απλώς τα αποτελέσματα είναι διαφορετικά σαν απόλυτοι αριθμοί. Η συμπεριφορά της εγκατάστασης όμως, που μας ενδιαφέρει, παραμένει η ίδια. Έτσι θα παρουσιάσουμε μόνο τα διαγράμματα για εργαζόμενο μέσο R134a. Επίσης, δεν θα ασχοληθούμε με τη μελέτη του βαθμού χρησιμοποίησης, καθώς δεν παρουσιάζει ιδιαίτερο πρακτικό ενδιαφέρον σε μια τέτοια εγκατάσταση. Αρχικά θα παρουσιαστούν τα διαγράμματα για N-S προσανατολισμό, και έπειτα για W-E προσανατολισμό.



Εικόνα 4.3: Ημερήσια διακύμανση θερμοκρασίας υπερθέρμανσης εργαζόμενου μέσου R134a για N-S προσανατολισμό για την 21η Ιουνίου



Εικόνα 4.4: Ημερήσια διακύμανση παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας για εργαζόμενο μέσο R134a, για N-S προσανατολισμό, την 21η Ιουνίου

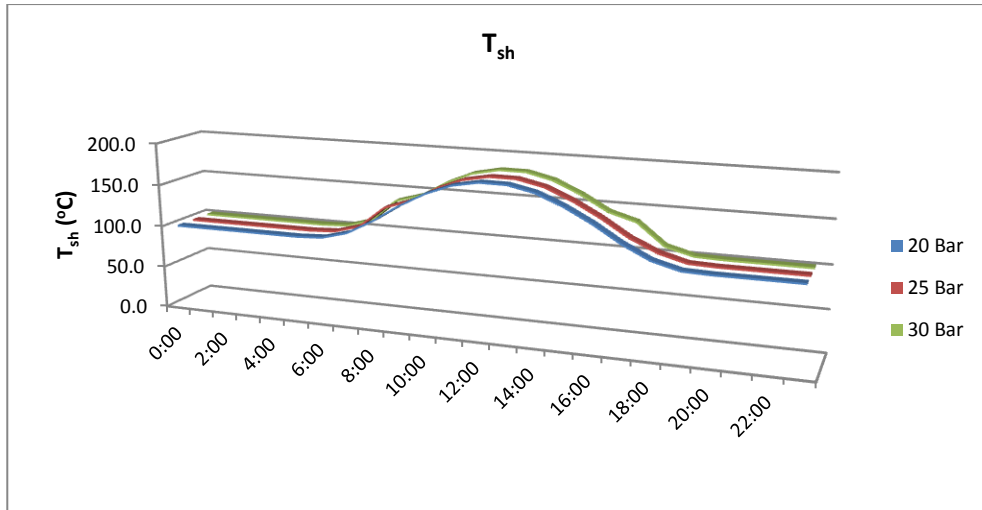


Εικόνα 4.5: Ημερήσια διακύμανση ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης για εργαζόμενο μέσο R134a, για N-S προσανατολισμό την 21η Ιουνίου

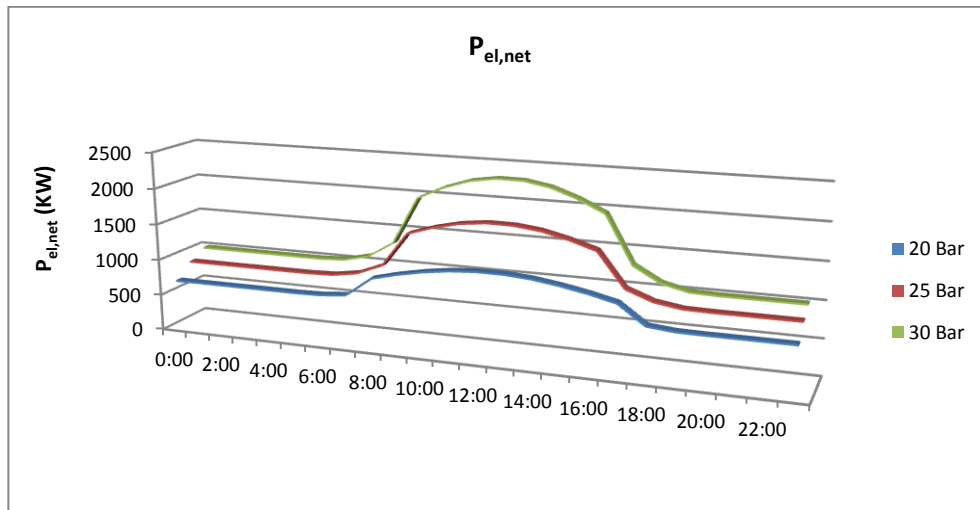
Σημειώνεται ότι ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης υπολογίζεται ως εξής:

$$\eta_{el} = \frac{P_{el,net}}{\dot{Q}_{geo} + \dot{Q}_{solar}} = \frac{P_{el,net}}{\dot{m}_{geo} \cdot (h_{geo,in} - h_{geo,out}) + \frac{\dot{Q}_{solar,trans}}{\eta_{sc}}}$$

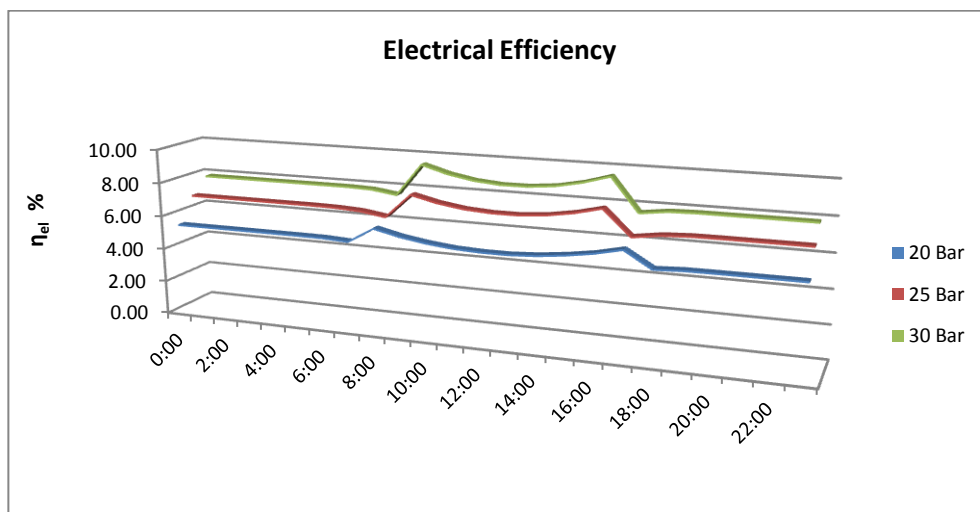
Όπου $\dot{Q}_{solar,trans}$: η μεταφερόμενη θερμότητα στο εργαζόμενο μέσο μέσω του συλλέκτη.
 η_{sc} : ο βαθμός απόδοσης του συλλέκτη (=70%).



Εικόνα 4.6: Ημερήσια διακύμανση θερμοκρασίας υπερθέρμανσης εργαζόμενου μέσου R134a για W-E προσανατολισμό για την 21η Ιουνίου



Εικόνα 4.7: Ημερήσια διακύμανση παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας για εργαζόμενο μέσο R134a, για W-E προσανατολισμό, την 21η Ιουνίου



Εικόνα 4.8: Ημερήσια διακύμανση ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης για εργαζόμενο μέσο R134a, για N-S προσανατολισμό την 21η Ιουνίου

Στις εικόνες 4.3 και 4.6 παρατηρούμε την ημερήσια διακύμανση της θερμοκρασίας υπερθέρμανσης του εργαζόμενου μέσου για N-S και W-E προσανατολισμό αντίστοιχα. Προφανώς, η μέγιστη υπερθέρμανση του εργαζόμενου μέσου είναι ίδια ανεξαρτήτως προσανατολισμού (~180°C) και επιτυγχάνεται την ώρα της μέγιστης ηλιακής ακτινοβολίας. Η σημαντικότερη διαφορά των δύο προσανατολισμών έγκειται στο ότι ο N-S προσανατολισμός επιτυγχάνει τιμές υπερθέρμανσης αρκετά κοντινές στη μέγιστη για αρκετά μεγαλύτερο χρονικό διάστημα σε σχέση με τον W-E προσανατολισμό. Συγκεκριμένα, στον N-S προσανατολισμό έχουμε για τουλάχιστον 7 ώρες (9.00-16.00) υπερθέρμανση εργαζόμενου μέσου της τάξης της μέγιστης υπερθέρμανσης ελαττωμένης κατά 10-12°C. Είμαστε, δηλαδή, πολύ κοντά στη μέγιστη υπερθέρμανση. Το αντίστοιχο διάστημα για τον W-E προσανατολισμό είναι το πολύ 3 ώρες (11.00-14.00). Άρα, ο N-S προσανατολισμός μας δίνει συνολικά μεγαλύτερη παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια.

Ένα μειονέκτημα του N-S προσανατολισμού είναι ότι η θερμοκρασία υπερθέρμανσης αυξάνεται πιο απότομα τις πρωινές και μειώνεται πιο απότομα τις βραδινές ώρες σε σχέση με τον W-E προσανατολισμό. Το μειονέκτημα έγκειται στο γεγονός, ότι η απότομη μεταβολή της θερμοκρασίας του εργαζόμενου μέσου επιδρά στην αντοχή του ατμοστροβίλου, και πιθανόν να χρειαστεί η κατασκευή του ατμοστροβίλου από ειδικά υλικά, τα οποία να αντέχουν στις απότομες αλλαγές της θερμοκρασίας. Άρα, ενδέχεται το κόστος στον N-S προσανατολισμό να είναι αυξημένο σε σχέση με τον W-E προσανατολισμό.

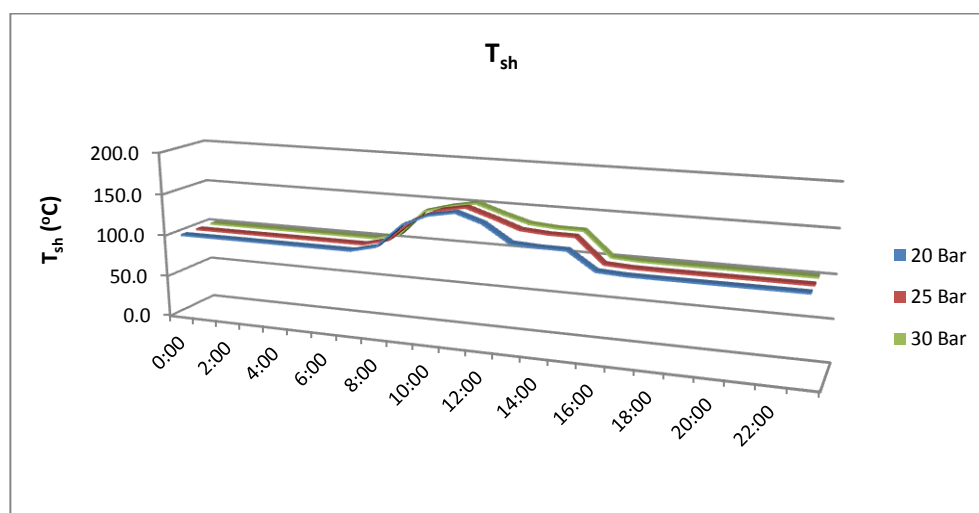
Η μορφή της διακύμανσης της υπερθέρμανσης του εργαζόμενου μέσου επηρεάζει άμεσα τη μορφή των εικόνων 4.4 και 4.7, όπου παρουσιάζεται η διακύμανση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας για την 21^η Ιουνίου. Αντίστοιχα, παρατηρούμε ότι στον N-S προσανατολισμό είμαστε για πολύ μεγαλύτερο χρονικό διάστημα κοντά στη μέγιστη παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια, σε σχέση με τον W-E προσανατολισμό. Αξίζει, να σημειωθεί ότι η μέγιστη παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια είναι περίπου διπλάσια της ελάχιστης παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, της αμιγώς γεωθερμικής εγκατάστασης. Ο συνδυασμός των δύο αυτών μορφών ενέργειας, με άλλα λόγια, αυξάνει ως και 100% την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια. Βέβαια, η αύξηση αυτή δεν είναι σταθερή, αλλά συμβαίνει μόνο τις ώρες κοντά στο μεσημέρι. Το θετικό είναι ότι εκείνες τις ώρες είναι εξίσου αυξημένη και η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας.

Όσον αφορά τον ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης, παρατηρώντας και τον ορισμό του, συμπεραίνουμε ότι εντός της διάρκειας της ημέρας μεταβάλλεται ο αριθμητής (παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς, όπως είδαμε και στις εικόνες 4.4-4.7), ενώ ταυτόχρονα μεταβάλλεται και ο όρος του παρανομαστή που αναφέρεται στην απορροφόμενη ηλιακή ενέργεια από το εργαζόμενο μέσο. Ο πρώτος όρος βέβαια είναι άμεσα εξαρτώμενος από το δεύτερο όρο. Η τελική διακύμανση του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης φαίνεται στις εικόνες 4.5 και 4.8. Η αλλαγή στην κλίση της καμπύλης γύρω στις 8.00 το πρωί οφείλεται στο γεγονός ότι η θερμοκρασία εξόδου από το στροβίλο είναι επαρκώς υψηλή για τη λειτουργία του αναγεννητικού προθερμαντή. Αντίστοιχα, γύρω στις 17.00 το απόγευμα έχουμε απενεργοποίηση του αναγεννητικού προθερμαντή, οπότε έχουμε αντίστροφη αλλαγή της κλίσης της καμπύλης. Παρατηρούμε, ότι η διακύμανση του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης είναι αντίστροφη όταν λειτουργεί ο αναγεννητικός προθερμαντής σε σχέση με όταν είναι απενεργοποιημένος. Για παράδειγμα, από την έναρξη λειτουργίας της ηλιακής εγκατάστασης ως την έναρξη λειτουργίας του αναγεννητικού προθερμαντή έχουμε αύξηση του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης, ενώ στη συνέχεια αμέσως μετά τη λειτουργία του αναγεννητικού προθερμαντή έχουμε ελαφρά μείωση του βαθμού απόδοσης. Πρακτικά, κατά τη λειτουργία του αναγεννητικού προθερμαντή ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης παραμένει σταθερός.

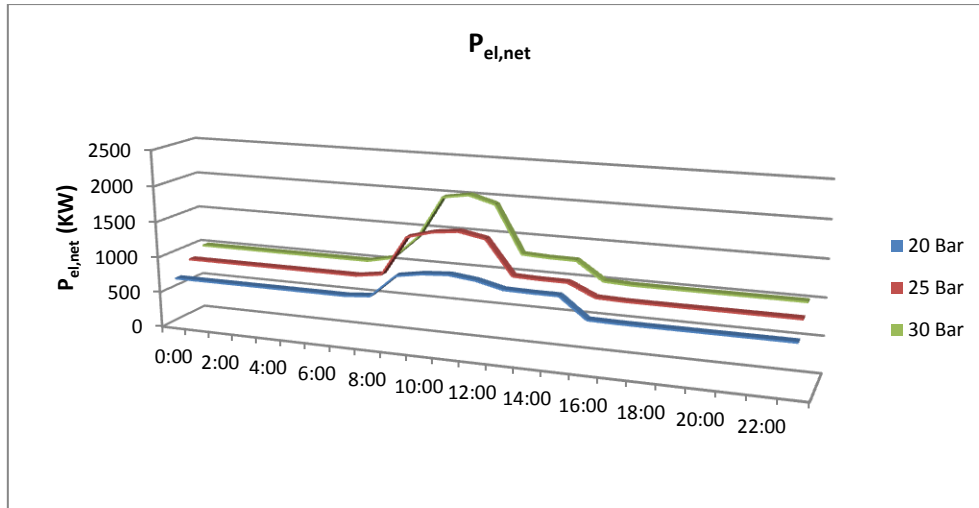
Αν παρατηρήσουμε προσεκτικά και τις εικόνες 4.3-4.4-4.6-4.7, θα δούμε ότι κατά την ενεργοποίηση και απενεργοποίηση του αναγεννητικού προθερμαντή έχουμε αλλαγή της κλίσης σε όλες τις καμπύλες. Με άλλα λόγια, η λειτουργία του αναγεννητικού προθερμαντή προκαλεί μια ασυνέχεια στην ομαλή λειτουργία της εγκατάστασης. Η λειτουργία του αναγεννητικού προθερμαντή, όπως είδαμε στις εικόνες 4.5 και 4.8, διατηρεί σχεδόν σταθερό τον ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης, αλλά αυξάνει την ηλεκτρική ισχύ της εγκατάστασης, η οποία πλησιάζει τη μέγιστη ηλεκτροπαραγωγή αρκετά πιο γρήγορα (αύξηση κλίσης καμπύλης ηλεκτροπαραγωγής).

Σημειώνεται ότι τις ώρες που έχουμε μηδενική προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, έχουμε τη λειτουργία του αμιγώς γεωθερμικού συστήματος. Άρα, όλες οι παράμετροι είναι σταθερές, όπως φαίνεται και από όλες τις εικόνες .

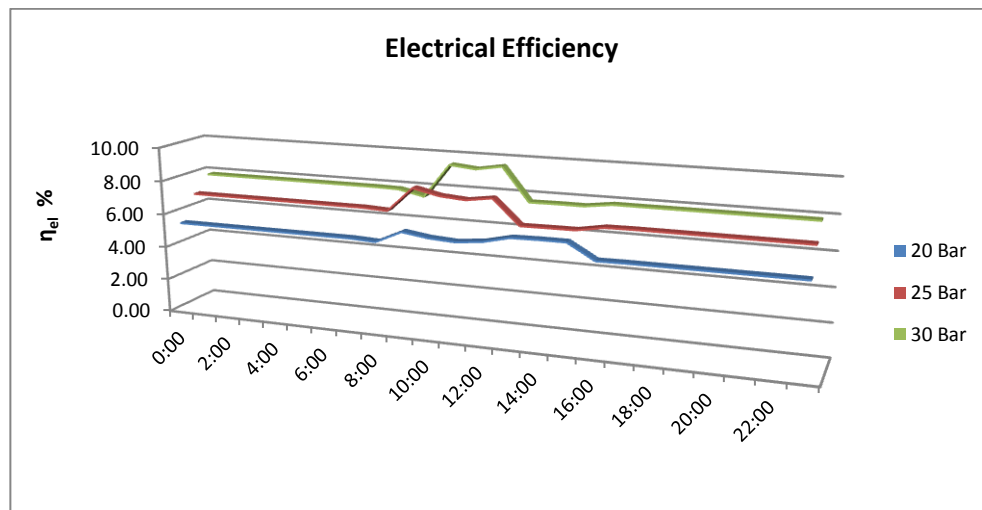
Στη συνέχεια με δεδομένη πλέον τη συλλεκτική επιφάνεια για κάθε περίπτωση, παρουσιάζουμε την ημερήσια διακύμανση των ιδίων μεγεθών για την 21^η Δεκεμβρίου. Οι δύο αυτές ημερομηνίες είχαν εξ'αρχής επιλεγεί ως η θερμότερη και η ψυχρότερη μέρα του χρόνου.



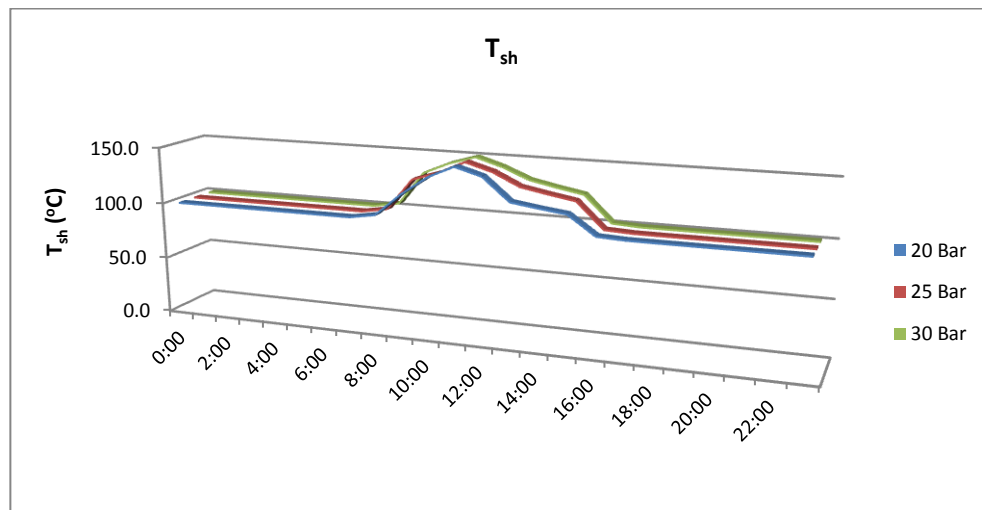
Εικόνα 4.9: Ημερήσια διακύμανση θερμοκρασίας υπερθέρμανσης εργαζόμενου μέσου R134a για N-5 προσαρμοσμένο για την 21η Δεκεμβρίου



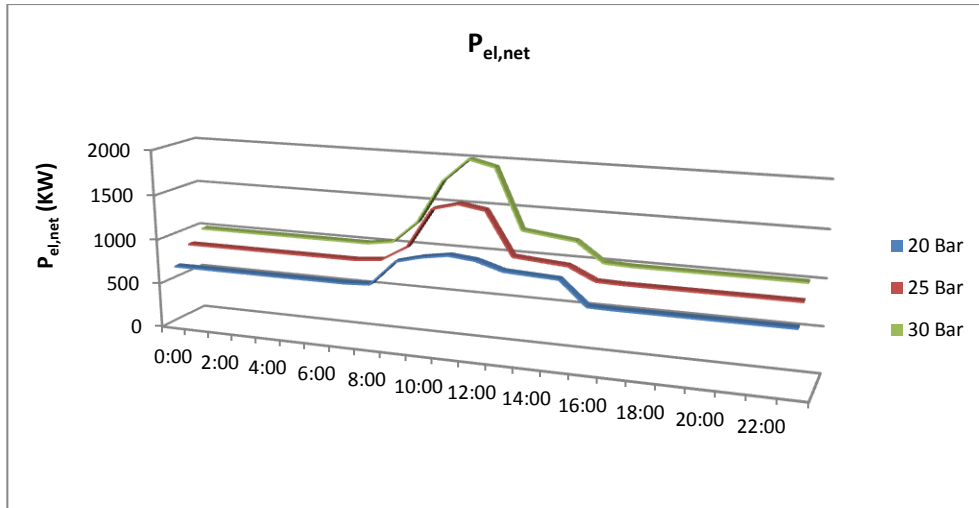
Εικόνα 4.10: Ημερήσια διακύμανση παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας για εργαζόμενο μέσο R134a, για N-S προσανατολισμό την 21η Δεκεμβρίου



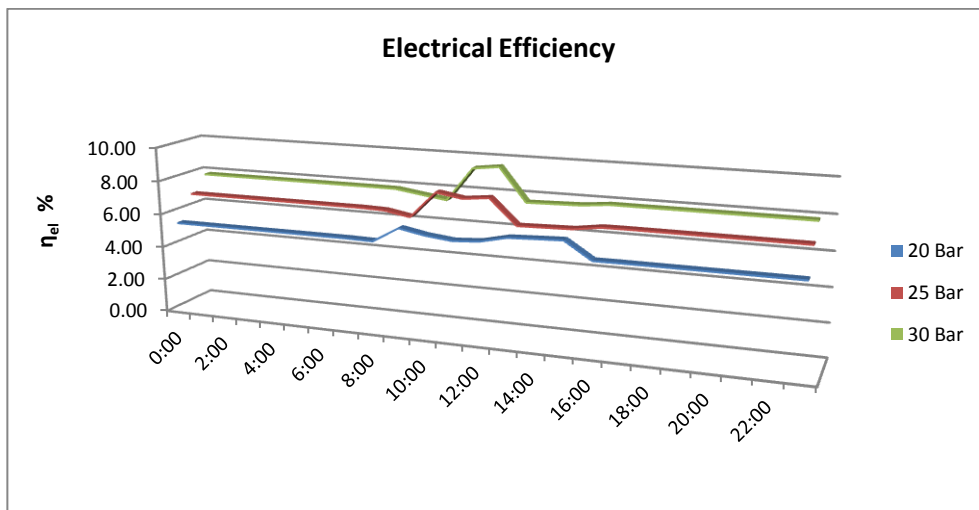
Εικόνα 4.11: Ημερήσια διακύμανση ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης για εργαζόμενο μέσο R134a, για N-S προσανατολισμό την 21η Δεκεμβρίου



Εικόνα 4.12: Ημερήσια διακύμανση θερμοκρασίας υπερθέρμανσης εργαζόμενου μέσου R134a για W-E προσανατολισμό για την 21η Δεκεμβρίου



Εικόνα 4.13: Ημερήσια διακύμανση παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας για εργαζόμενο μέσο R134a, για W-E προσανατολισμό την 21η Δεκεμβρίου



Εικόνα 4.14: Ημερήσια διακύμανση ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης για εργαζόμενο μέσο R134a, για N-S προσανατολισμό την 21η Δεκεμβρίου

Στις παραπάνω εικόνες φαίνεται η λειτουργία και οι επιδόσεις της εγκατάστασης που διαστασιολογήσαμε για τη μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία της 21^{ης} Ιουνίου, κατά την 21^η Δεκεμβρίου. Γενικά, παρατηρούμε ότι η λειτουργία της εγκατάστασης είναι παρόμοια με τη λειτουργία κατά την 21^η Ιουνίου. Βέβαια, από τη στιγμή που η άμεση ηλιακή ακτινοβολία είναι πολύ μικρότερη, εξίσου μικρότερες θα είναι και οι επιδόσεις της εγκατάστασης.

Στις εικόνες 4.9 και 4.12 παρατηρούμε την ημερήσια διακύμανση της θερμοκρασίας υπερθέρμανσης του εργαζόμενου μέσου. Παρατηρούμε ότι η μέγιστη υπερθέρμανση που επιτυγχάνεται είναι της τάξης των 150°C, δηλαδή κατά 30°C μικρότερη από τη μέγιστη υπερθέρμανση του R134a. Οι διαφορές των δύο προσανατολισμών είναι αντίστοιχες με την περίπτωση της 21^{ης} Ιουνίου. Στον N-S προσανατολισμό είμαστε περισσότερη ώρα κοντά στη μέγιστη υπερθέρμανση εργαζόμενου μέσου, σε αντίθεση με τον W-E προσανατολισμό στον οποίον είμαστε σε ένα πολύ μικρό χρονικό διάστημα (1-2 ώρες) κοντά στη μέγιστη υπερθέρμανση. Επίσης, παρατηρούμε ότι η λειτουργία του ηλιακού συστήματος αρχίζει πιο αργά και τελειώνει πιο νωρίς σε σχέση με την 21^η Ιουνίου, κάτι απολύτως λογικό, αφού την 21^η Δεκεμβρίου η ημέρα είναι μικρότερη. Οι απότομες αλλαγές στην κλίση των καμπυλών οφείλονται στην έναρξη και παύση της λειτουργίας του αναγεννητικού προθερμαντή.

Ως άμεση συνέπεια των παραπάνω προκύπτουν οι εικόνες 4.10 και 4.13 που παρουσιάζουν την ημερήσια διακύμανση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Παρατηρούμε, ότι και την 21^η Δεκεμβρίου η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια σε ορισμένες περιπτώσεις αυξάνεται ως και 100% επί της αντίστοιχης του απλού γεωθερμικού συστήματος, παρότι η υπερθέρμανση δεν φτάνει τη μέγιστη. Αυτό προφανώς οφείλεται στη λειτουργία του αναγεννητικού προθερμαντή, βάσει του οποίου γίνεται βέλτιστη εκμετάλλευση της απορροφόμενης ηλιακής ενέργειας. Βέβαια, το χρονικό διάστημα στο οποίο επιτυγχάνουμε τόσο υψηλή ηλεκτροπαραγωγή είναι αρκετά περιορισμένο, περίπου κατά τις ώρες 11.00-13.00. Η απότομη αύξηση, αρχικά, και μείωση μετέπειτα, της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας οφείλεται επίσης στην έναρξη και παύση της λειτουργίας του αναγεννητικού προθερμαντή. Η συνολική παραγόμενη ενέργεια είναι προφανώς μικρότερη σε σχέση με την αντίστοιχη της 21^{ης} Ιουνίου. Τέλος, όσον αφορά την πίεση λειτουργίας, προφανώς αυξανόμενη αυτής αυξάνεται η ηλεκτροπαραγωγή της εγκατάστασης, για τους λόγους που έχουμε αναλύσει στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Αντίστοιχα, όσον αφορά τον ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης, η συμπεριφορά της εγκατάστασης είναι παρόμοια με της 21^{ης} Ιουνίου, απλά τα χρονικά όρια στα οποία συμβαίνουν οι όποιες μεταβολές είναι αρκετά πιο περιορισμένα για τους λόγους που αναφέραμε παραπάνω. Έτσι προκύπτουν τα διαγράμματα των εικόνων 4.11 και 4.14, τα οποία δεν είναι ιδιαίτερος εύρηστα λόγω της μορφής τους. Πάντως, η αύξηση του βαθμού απόδοσης της υβριδικής μονάδας σε σχέση με την αμιγώς γεωθερμική μονάδα είναι της τάξης του 1-1.2%. Πρακτικά, οι εικόνες 4.11 και 4.14 δεν μας δίνουν κάποιο άλλο συμπέρασμα γύρω από τη λειτουργία της μονάδας.

Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι για εργαζόμενο μέσο R152a κατά την 21^η Ιουνίου η μέγιστη αύξηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας είναι της τάξης του 100-130%, ανεξαρτήτως προσανατολισμού, ενώ η συμπεριφορά του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης είναι ίδια με του R134a. Υπενθυμίζουμε ότι η μέγιστη υπερθέρμανση του R152a είναι 30°C πάνω από την αντίστοιχη του R134a, δηλαδή είναι 210°C. Εκεί οφείλεται η μεγαλύτερη ηλεκτροπαραγωγή για το συγκεκριμένο εργαζόμενο μέσο. Όσον αφορά τις επιδόσεις της εγκατάστασης την 21^η Δεκεμβρίου, η μέγιστη υπερθέρμανση του εργαζόμενου μέσου φτάνει τους 170°C, δηλαδή κατά 40°C μικρότερη της μέγιστης. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια αυξάνεται κατά 80-100%, όσο σχεδόν και στην εγκατάσταση με εργαζόμενο μέσο R134a. Τέλος, η διακύμανση του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης, είναι αντίστοιχη με τη διακύμανση με εργαζόμενο μέσο R134a. Βέβαια, όπως έχει αναλυθεί και στο πρώτο κεφάλαιο, για την ίδια πίεση λειτουργίας, ο βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης με εργαζόμενο μέσο R152a είναι κατά 1.5-2% μεγαλύτερος της αντίστοιχης με εργαζόμενο μέσο R134a.

4.3) Μελέτη ξεχωριστής λειτουργίας των εγκαταστάσεων

Στην παρούσα παράγραφο θα κάνουμε μελέτη της ξεχωριστής λειτουργίας των δύο βασικών εγκαταστάσεων που συντιθέμενες μας δίνουν την υβριδική εγκατάσταση που μελετάμε. Η μελέτη θα είναι ίδια με την αντίστοιχη μελέτη του προηγούμενου κεφαλαίου.

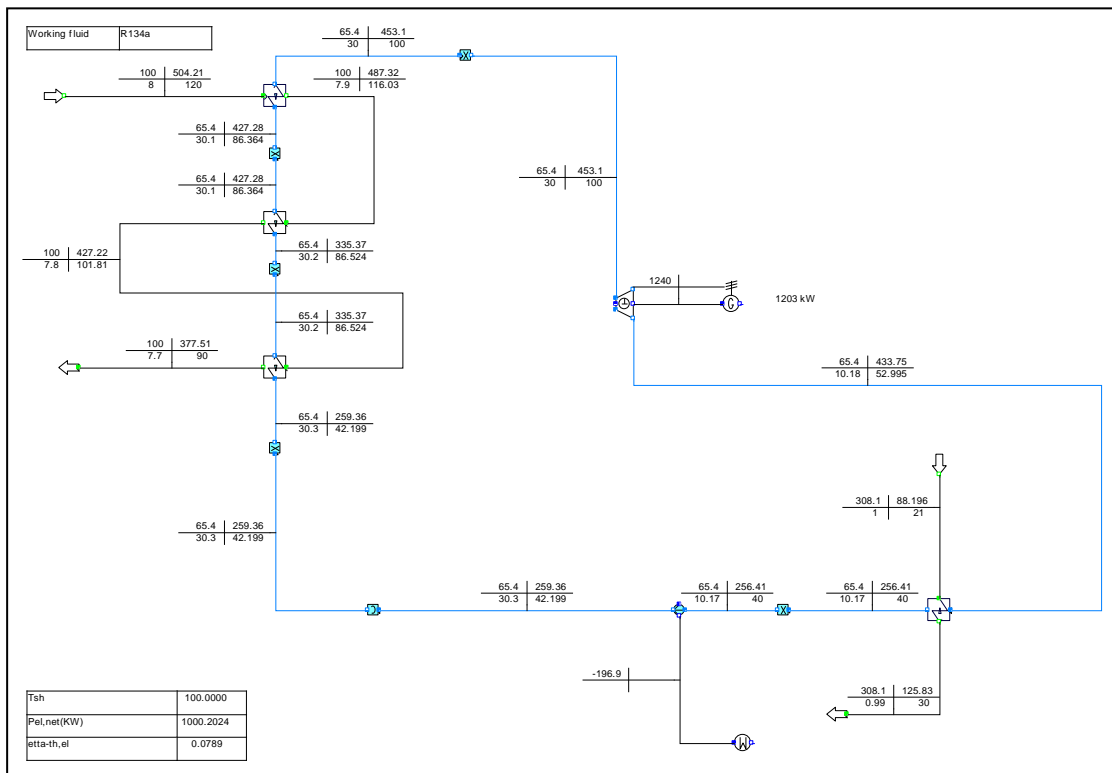
Τα δύο συστήματα που απαρτίζουν την υβριδική εγκατάσταση είναι τα εξής:

- Απλός οργανικός κύκλος Rankine με μοναδική πηγή θερμότητας το γεωθερμικό ρευστό. Πρόκειται για τον κοινό κύκλο ORC που χρησιμοποιείται για εκμετάλλευση γεωθερμικών πηγών ενέργειας. Σχηματικό διάγραμμα αυτού του κύκλου

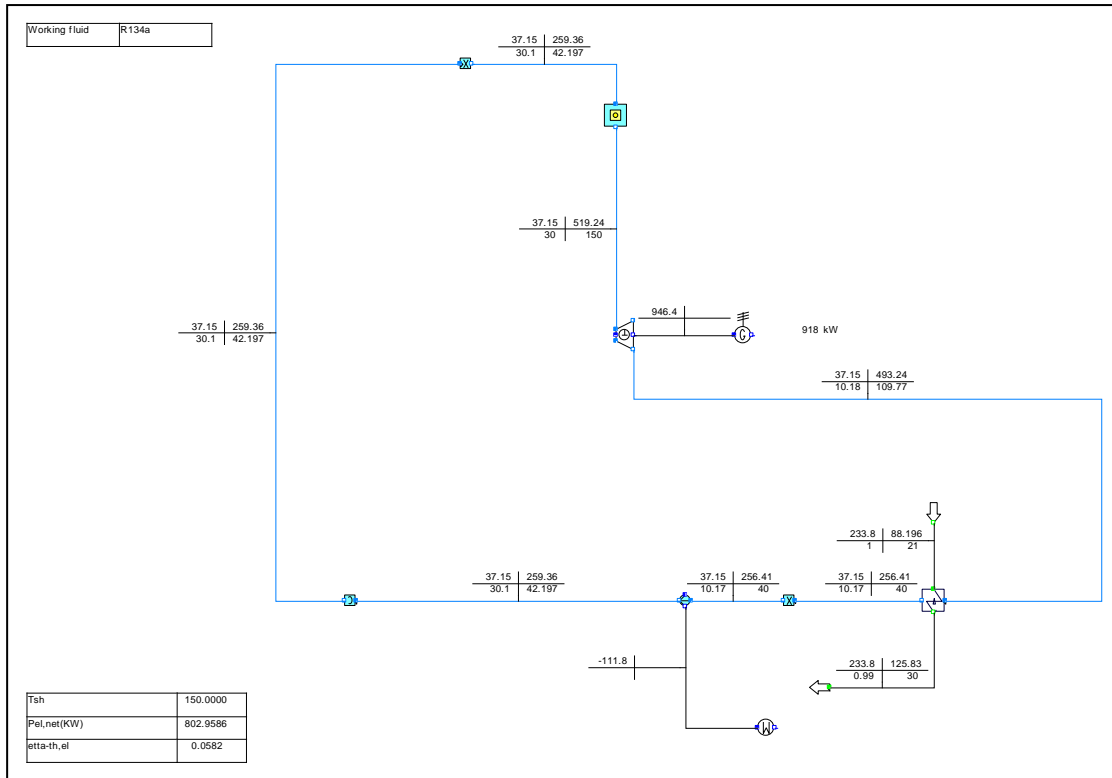
φαίνεται στην εικόνα 4.15. Προφανώς, για να γίνει σύγκριση της ξεχωριστής με τη συνδυασμένη λειτουργία των δύο εγκαταστάσεων απαιτείται όλα τα στοιχεία να είναι κοινά. Θα έχουμε δηλαδή είσοδο του γεωθερμικού ρευστού στην εγκατάσταση στους 120°C και θερμοκρασία εισόδου του εργαζόμενου μέσου στο στρόβιλο 100°C. Σε αυτήν την περίπτωση, η θερμοκρασία που στη συνδυασμένη λειτουργία είναι η θερμοκρασία εισόδου στους συγκεντρωτικούς συλλέκτες, είναι η θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο. Άρα, όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό η θερμοκρασία εξόδου από το στρόβιλο είναι αρκετά χαμηλή, έτσι ώστε δεν καθίσταται δυνατή η λειτουργία αναγεννητικού προθερμαντή.

- Οργανικός κύκλος Rankine, ο οποίος έχει σαν πηγή πρόσδοσης θερμότητας την ηλιακή ενέργεια, η οποία προσδίδεται στο σύστημα μέσω συγκεντρωτικών ηλιακών συλλεκτών (εικόνα 4.16). Στη συγκεκριμένη για να είναι δυνατή η σύγκριση και η αξιολόγηση της συνεργασίας των δύο εγκαταστάσεων, θα πρέπει οι παράμετροι του ηλιακού συστήματος να είναι σταθερές. Θα πρέπει, δηλαδή, η έκταση του ηλιακού συστήματος να είναι ίδια με του υβριδικού συστήματος, ανάλογα την περίπτωση.

Αξίζει να σημειωθεί ότι σε αντίθεση με την αντίστοιχη σύγκριση του πρώτου κεφαλαίου, όπου είχαμε ένα σύστημα ηλεκτροπαραγωγής και ένα σύστημα παραγωγής θερμικής ενέργειας, σε αυτήν την περίπτωση έχουμε δύο συστήματα ηλεκτροπαραγωγής. Άρα, η αξιολόγηση της υβριδικής εγκατάστασης θα είναι αρκετά πιο εύκολη και σαφής.



Εικόνα 4.15: Σχηματικό διάγραμμα απλού κύκλου ORC με εργαζόμενο μέσο R134a για πίεση 30Bar



Εικόνα 4.16: Σχηματικό διάγραμμα κύκλου ORC τροφοδοτούμενο από ηλιακή ενέργεια, για εργαζόμενο μέσο R134a σε πίεση 30Bar

Γίνεται σαφές ότι για να γίνει μια σωστή και αναλυτική μελέτη αυτού του τύπου, πρέπει να γίνει ξεχωριστή μελέτη για κάθε διαφορετική τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας, κάτι ιδιαίτερα δύσκολο και χρονοβόρο. Κρίνεται σκόπιμο, λοιπόν, να γίνει η σύγκριση για δύο περιπτώσεις ηλιακής ακτινοβολίας, τη μέγιστη τιμή της και μία μέση τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας. Επίσης, τονίζεται ότι η σύγκριση θα γίνει για την 21^η Ιουνίου, όπου έγινε και η διαστασιολόγηση της εγκατάστασης. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες.

*Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μόνο για τη μέγιστη λειτουργία πίεσης εργαζόμενου μέσου ανά περίπτωση, που είναι και η πιο ενδιαφέρουσα.

Ξεχωριστή λειτουργία-Μέγιστη Ακτινοβολία				
Περίπτωση Μελέτης	Προσανατολισμός N-S		Προσανατολισμός W-E	
	ORC R134a 30 Bar	ORC R152a 25 Bar	ORC R134a 30 Bar	ORC R152a 25 Bar
Ηλεκτροπαραγωγή Γεωθερμικής Μονάδας (KW)	1000	1055	1000	1055
Ηλεκτροπαραγωγή Ηλιακής Μονάδας (KW)	803	1036	814	1051
B.A. Γεωθερμικής Μονάδας %	7.89	8.33	7.89	8.33
B.A. Ηλιακής Μονάδας %	5.82	7.52	5.82	7.52

Πίνακας 4.4: Τιμές επιδόσεων ξεχωριστών εγκαταστάσεων για μέγιστη ακτινοβολία

Ξεχωριστή Λειτουργία- Μέση Ακτινοβολία				
	N-S Προσανατολισμός		W-E Προσανατολισμός	
<u>Περίπτωση Μελέτης</u>	ORC R134a 30 Bar	ORC R152a 25 Bar	ORC R134a 30 Bar	ORC R152a 25 Bar
Ηλεκτροπαραγωγή Γεωθερμικής Μονάδας (KW)	1000	1055	1000	1055
Ηλεκτροπαραγωγή Ηλιακής Μονάδας (KW)	670	864	470	606
B.A. Γεωθερμικής Μονάδας %	7.89	8.33	7.89	8.33
B.A. Ηλιακής Μονάδας %	5.82	7.52	5.82	7.52

Πίνακας 4.5: Τιμές επιδόσεων ξεχωριστών εγκαταστάσεων για μέση ακτινοβολία

Ενιαία Λειτουργία				
	N-S Προσανατολισμός		W-E Προσανατολισμός	
<u>Περίπτωση Μελέτης</u>	ORC R134a 30 Bar	ORC R152a 25 Bar	ORC R134a 30 Bar	ORC R152a 25 Bar
Μέγιστη Ακτινοβολία				
Ηλεκτροπαραγωγή Υβριδικής Μονάδας (KW)	2279	2297	2288	2307
B.A. Υβριδικής Μονάδας %	8.61	8.68	8.59	8.66
Μέση Ακτινοβολία				
Ηλεκτροπαραγωγή Υβριδικής Μονάδας (KW)	2152	2166	1955	1959
B.A. Υβριδικής Μονάδας %	8.91	8.96	9.43	9.45

Πίνακας 4.6: Τιμές επιδόσεων υβριδικής εγκατάστασης

Σύγκριση Ξεχωριστής-Ενιαίας Λειτουργίας				
	N-S Προσανατολισμός		W-E Προσανατολισμός	
<u>Περίπτωση Μελέτης</u>	ORC R134a 30 Bar	ORC R152a 25 Bar	ORC R134a 30 Bar	ORC R152a 25 Bar
Μέγιστη Ακτινοβολία				
Αύξηση Ηλεκτροπαραγωγής Υβριδικής Μονάδας ⁽¹⁾	476	206	474	201
Αύξηση B.A. Υβριδικής Μονάδας ως προς τη Γεωθερμική Μονάδα	0.72	0.35	0.70	0.33
Αύξηση B.A. Υβριδικής Μονάδας ως προς την Ηλιακή Μονάδα	2.79	1.16	2.77	1.14
Μέση Ακτινοβολία				
Αύξηση Ηλεκτροπαραγωγής Υβριδικής Μονάδας ⁽¹⁾	482	247	485	298
Αύξηση B.A. Υβριδικής Μονάδας ως προς τη Γεωθερμική Μονάδα	1.02	0.63	1.54	1.12
Αύξηση B.A. Υβριδικής Μονάδας ως προς την Ηλιακή Μονάδα	3.09	1.44	3.61	1.93

Πίνακας 4.7: Σύγκριση ξεχωριστής-ενιαίας λειτουργίας

⁽¹⁾: (Ηλεκτροπαραγωγή Υβριδικής Μονάδας)-(Αθροιστική Ηλεκτροπαραγωγή των δύο επιμέρους μονάδων)

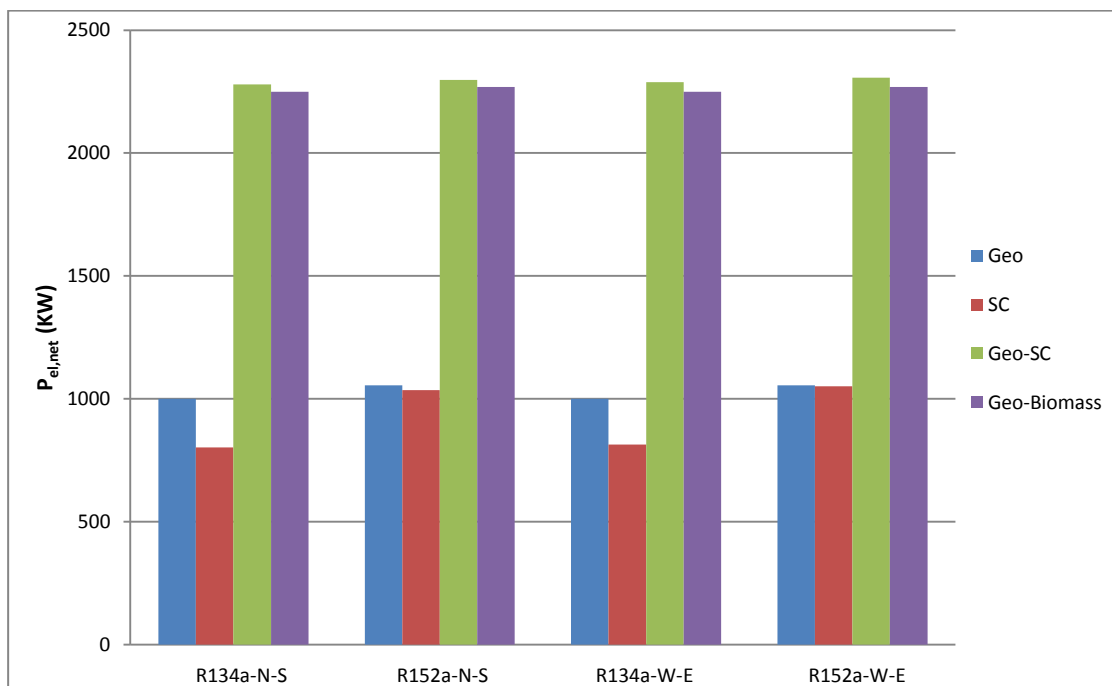
Παρατηρούμε ότι η συνδυασμένη λειτουργία των δύο εγκαταστάσεων βελτιώνει τη λειτουργία των επιμέρους εγκαταστάσεων. Συγκεκριμένα, η υβριδική εγκατάσταση έχει μεγαλύτερη ηλεκτροπαραγωγή από το άθροισμα των ηλεκτροπαραγωγών των επιμέρους εγκαταστάσεων. Μάλιστα, η αύξηση είναι της τάξης του 20% (περίπου 350 KW), ένα διόλου ευκαταφρόνητο νούμερο, αν αναλογιστεί κανείς το αντίστοιχο ποσό ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα βάθος χρόνου. Επίσης, παρατηρούμε ότι ο βαθμός απόδοσης της υβριδικής εγκατάστασης είναι μεγαλύτερος από τους βαθμούς απόδοσης των επιμέρους εγκαταστάσεων ως και 3%.

Η βελτίωση των επιδόσεων με εργαζόμενο μέσο R134a είναι αρκετά μεγαλύτερη από ότι με εργαζόμενο μέσο R152a. Βέβαια αυτό δεν είναι χρήσιμο σαν απόλυτο συμπέρασμα, επειδή οι επιδόσεις μιας εγκατάστασης που λειτουργεί με R152a είναι αρκετά μεγαλύτερες από μία εγκατάσταση που λειτουργεί με R134a.

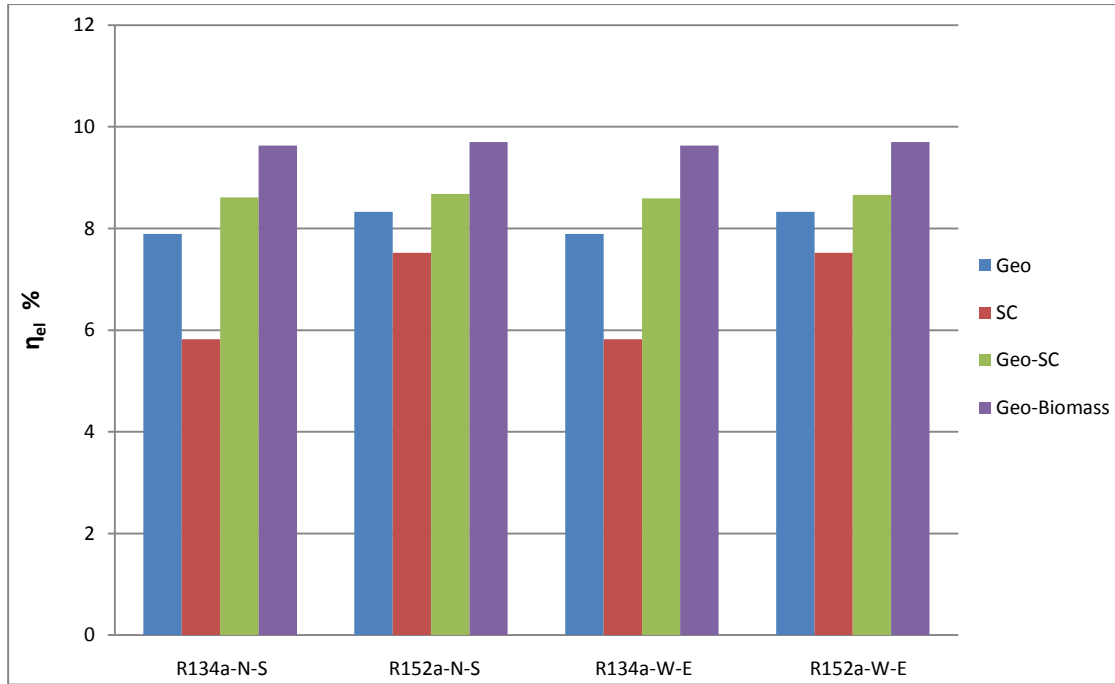
Εν κατακλείδι, διαπιστώνουμε ότι η συνδυασμένη χρήση των δύο εγκαταστάσεων μας συμφέρει επειδή έχουμε κατά κύριο λόγο αύξηση της συνολικής ηλεκτρικής ισχύος, άρα και της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο πρωτίστως μας ενδιαφέρει. Επίσης, έχουμε βελτίωση του βαθμού απόδοσης, άρα και της λειτουργικότητας της εγκατάστασης.

*Ως θερμοκρασία υπερθέρμανσης του εργαζόμενου μέσου στη απλή λειτουργία των ηλιακών κατόπτρων επιλέχθηκαν οι 160⁰C για κάθε εργαζόμενο μέσο και πίεση.

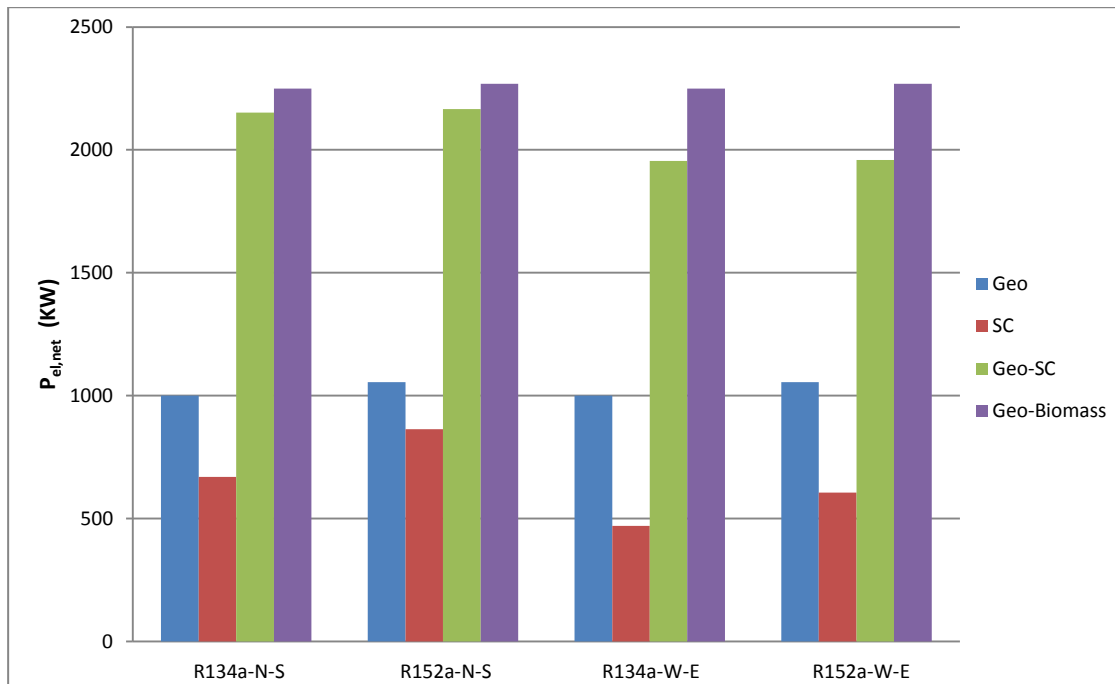
Τα παραπάνω φαίνονται διαγραμματικά και στις παρακάτω εικόνες, όπου γίνεται σύγκριση και με την υβριδική εγκατάσταση γεωθερμίας-βιομάζας του προηγούμενου κεφαλαίου.



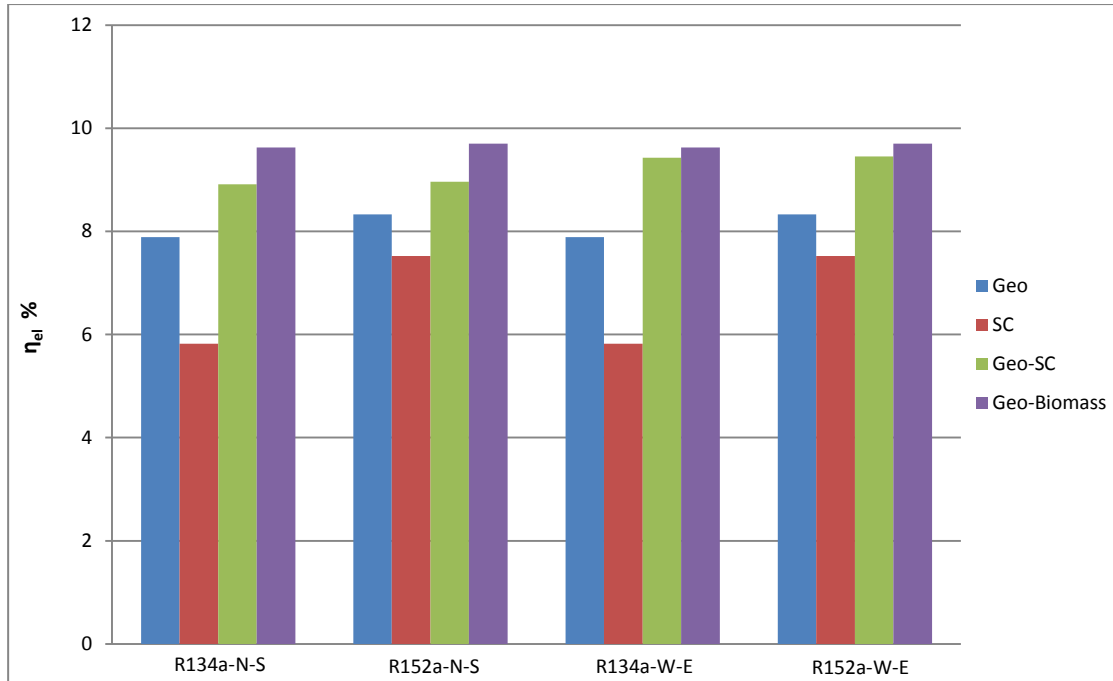
Εικόνα 4.17: Σύγκριση ηλεκτροπαραγωγής των διαφόρων εγκαταστάσεων που έχουμε μελετήσει, για μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία



Εικόνα 4.18: Σύγκριση βαθμού απόδοσης των διαφόρων εγκαταστάσεων που έχουμε μελετήσει, για μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία



Εικόνα 4.19: Σύγκριση ηλεκτροπαραγωγής των διαφόρων εγκαταστάσεων που έχουμε μελετήσει, για μέση ηλιακή ακτινοβολία



Εικόνα 4.20: Σύγκριση βαθμού απόδοσης των διαφόρων εγκαταστάσεων που έχουμε μελετήσει, για μέση ηλιακή ακτινοβολία

Στις παραπάνω εικόνες οι συντομογραφίες σημαίνουν τα εξής:

Geo: Συμβατικός γεωθερμικός σταθμός.

SC: Σταθμός ηλεκτροπαραγωγής με παραβολικούς συγκεντρωτικούς συλλέκτες

Geo-SC: Υβριδική εγκατάσταση γεωθερμίας-ηλιακής ενέργειας που μελετήθηκε στο παρόν κεφάλαιο

Geo-Biomass: Υβριδική εγκατάσταση γεωθερμίας-βιομάζας που μελετήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα του πρώτου σεναρίου που είχαμε μελετήσει.

*Ως πίεση λειτουργίας της εγκατάστασης για εργαζόμενο μέσο R134a θέτουμε τα 30 Bar, ενώ για εργαζόμενο μέσο R152a θέτουμε τα 25 Bar.

Παρατηρούμε ότι η ηλεκτροπαραγωγή των δύο υβριδικών εγκαταστάσεων, είναι περίπου της ίδιας τάξης μεγέθους (~2250 KW). Στην περίπτωση όπου έχουμε μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία, η υβριδική εγκατάσταση γεωθερμίας-ηλιακής ενέργειας έχει λίγο μεγαλύτερη ηλεκτροπαραγωγή σε σχέση με την υβριδική εγκατάσταση γεωθερμίας-βιομάζας. Το αντίθετο προφανώς συμβαίνει στην περίπτωση όπου έχουμε μέση ηλιακή ακτινοβολία, χωρίς ωστόσο να έχουμε μεγάλη μείωση της ηλεκτροπαραγωγής σε σχέση με όταν έχουμε μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία, παρότι η ηλεκτροπαραγωγή της αμιγώς ηλιακής εγκατάστασης μειώνεται κατά πολύ.

Επίσης, ο βαθμός απόδοσης των υβριδικών εγκαταστάσεων, όπως έχουμε ήδη αναφέρει είναι μεγαλύτερος των επιμέρους ξεχωριστών εγκαταστάσεων. Το αξιοσημείωτο είναι ότι στην υβριδική εγκατάσταση γεωθερμίας-ηλιακής ενέργειας ο βαθμός απόδοσης είναι μεγαλύτερος στην περίπτωση της μέσης ηλιακής ακτινοβολίας από ότι στην περίπτωση της μέγιστης ηλιακής ακτινοβολίας.

4.4) Εξεργειακή-Ενεργειακή Ανάλυση της υβριδικής εγκατάστασης

Στην παρούσα παράγραφο θα κάνουμε εξεργειακή ανάλυση των εγκαταστάσεων που μελετάμε σε αυτό το κεφάλαιο. Η εξεργειακή ανάλυση θα είναι αντίστοιχη με του προηγούμενου κεφαλαίου, στο οποίο έγινε εξεργειακή ανάλυση της υβριδικής εγκατάστασης βιομάζας-γεωθερμίας. Η έννοια της εξέργειας, καθώς και μια σχετική ανάλυση των μορφών εξέργειας που έχουμε σε εγκαταστάσεις σαν αυτές που μελετάμε, έγινε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στην παρούσα παράγραφο θα γίνει απλώς μια υπενθύμιση του τρόπου υπολογισμού της εξέργειας κάθε ρεύματος της εγκατάστασης, είτε αυτό είναι εργαζόμενο μέσου είτε γεωθερμικού ρευστού, καθώς και του τρόπου υπολογισμού της εξεργειακής ανάλυσης κάθε τμήματος της εγκατάστασης. Επίσης, στο τέλος της παραγράφου θα παρουσιαστούν ενδεικτικά τα διαγράμματα Q-T και ροής ενέργειας Sankey των βασικών εγκαταστάσεων που μελετήσαμε.

4.4.1) Εξεργειακή Ανάλυση

Όπως είχαμε αναφέρει στο πρώτο κεφάλαιο η εξέργεια ενός οποιουδήποτε ρεύματος για τα συστήματα που μας αφορούν σε αυτές τις εγκαταστάσεις δίνεται από τον εξής τύπο:

$$E = E^{PH} + E^{CH}$$

E^{PH} : η φυσική εξέργεια του ρεύματος.

E^{CH} : η χημική εξέργεια του ρεύματος.

Βέβαια, η χημική εξέργεια του ρεύματος αναφέρεται σε ρεύμα καυσίμου, αέρα καύσης και καυσαερίων. Στην εγκατάσταση που μελετάμε δεν υπάρχει κανένα από τα παραπάνω ρεύματα, σε αντίθεση με την εγκατάσταση βιομάζας-γεωθερμίας του 3^{ου} κεφαλαίου. Αντιθέτως, στην παρούσα εγκατάσταση έχουμε μόνο το ρεύμα του γεωθερμικού ρευστού, το ρεύμα του εργαζόμενου (οργανικού) μέσου, καθώς και το ρεύμα του νερού ψύξης. Άρα, στην εγκατάσταση που μελετάμε η εξέργεια κάθε ρεύματος θα ισούται με τη φυσική εξέργεια του.

$$E = E^{PH}$$

Η φυσική εξέργεια ενός ρεύματος δίνεται από τον εξής τύπο:

$$E^{PH} = (H - H_0) - T_0 \cdot (S - S_0)$$

H,S: η ενθαλπία και η εντροπία του συγκεκριμένου ρεύματος

H_0, T_0, S_0 : η ενθαλπία, η θερμοκρασία και η εντροπία αναφοράς, συνήθως σε πίεση και θερμοκρασία περιβάλλοντος.

*Υπενθυμίζεται ότι ως αναφορά για το εργαζόμενο μέσο λαμβάνουμε την κατάσταση κορεσμένου υγρού στη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Άρα, μπορούμε να υπολογίσουμε την εξέργεια οποιουδήποτε ρεύματος μας ενδιαφέρει στην εγκατάσταση που μελετάμε.

Όσον αφορά την εξεργειακή ανάλυση των διαφόρων τμημάτων της εγκατάστασης, στην παρούσα εγκατάσταση έχουμε εν γένει εναλλάκτες (γεωεναλλάκτες, αναγεννητικός προ-θερμαντής, συμπυκνωτής), ατμοστρόβιλο και αντλία. Άρα, η εξεργειακή τους ανάλυση θα πραγματοποιηθεί όπως αναφέρθηκε αναλυτικά στην παράγραφο 3.8.6.

Όσον αφορά τους ηλιακούς συλλέκτες, θα τους θεωρήσουμε ως έναν εναλλάκτη πρόσδοσης θερμικής ισχύος στο γεωθερμικό ρευστό.

Αν είναι Q_{trans} η μεταφερόμενη θερμότητα στο εργαζόμενο μέσο, τότε κατά τα γνωστά η εξέργεια αυτής της μεταφερόμενης θερμότητας θα είναι: $E_Q = (1 - \frac{T_o}{T}) \cdot Q$

T_o : η θερμοκρασία αναφοράς.

T : η μέση θερμοκρασία πρόσδοσης θερμότητας, δηλαδή στη συγκεκριμένη περίπτωση το ημίθροισμα των θερμοκρασιών του εργαζόμενου μέσου πριν και μετά τους συλλέκτες.

Βέβαια, η αύξηση της εξέργειας του εργαζόμενου μέσου θα είναι μικρότερη της μεταφερόμενης εξέργειας της θερμότητας. Άρα, θα ισχύει:

$$E_{loss} = E - \Delta E_{1 \rightarrow 2}$$

$$\eta_e = \frac{\Delta E_{1 \rightarrow 2}}{E_Q}$$

Άρα, πλέον μπορώ να υπολογίσω την εξέργεια κάθε ρεύματος της εγκατάστασης, καθώς να κάνω και εξεργειακή ανάλυση όλων των τμημάτων της εγκατάστασης.

Τέλος, όσον αφορά τη συνολική εγκατάσταση, η συνολική εισερχόμενη εξέργεια είναι το άθροισμα της εισερχόμενης εξέργειας του γεωθερμικού ρευστού και της εξέργειας της μεταφερόμενης θερμότητας από τους συγκεντρωτικούς συλλέκτες. Η συνολική καταστροφή εξέργειας της εγκατάστασης είναι το άθροισμα όλων των επιμέρους καταστροφών εξέργειας σε όλα τα τμήματα της εγκατάστασης και η εξέργεια του εξερχόμενου της εγκατάστασης γεωθερμικού ρευστού. Η συνολική παραγόμενη εξέργεια είναι η εξέργεια του έργου του στροβίλου, ως της μόνης εργοπαραγωγικής μηχανής της εγκατάστασης.

$$E_{in,tot} = E_Q + E_{geo,in}$$

$$E_{loss,tot} = \sum_i E_{loss,i} + E_{geo,out}$$

$$E_{prod} = E_{W,turbine} - E_{W,pump} = W_{turbine} - W_{pump}$$

$$\eta_{E,tot} = \frac{E_{prod}}{E_{in,tot}} = \frac{E_{prod}}{E_{prod} + E_{loss,tot}}$$

*Υπενθυμίζουμε ότι ως καταστροφή εξέργειας στον συμπυκνωτή ορίζουμε την πτώση εξέργειας του εργαζόμενου μέσου και όχι την τυπικά καταστρεφόμενη εξέργεια, δηλαδή τη διαφορά της πτώσης εξέργειας του εργαζόμενου μέσου, από την αύξηση εξέργειας του ψυκτικού νερού.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αναλυτικά αποτελέσματα της εξεργειακής ανάλυσης της εγκατάστασης, η οποία έχει γίνει για τη μέγιστη ηλιοφάνεια της 21^{ης} Ιουνίου.

4.4.1.1) Αναλυτικά αποτελέσματα για N-S προσανατολισμό

❖ Γεωθερμικοί Εναλλάκτες

		<u>Καταστροφή Εξέργειας (KW)</u>	<u>Εξεργειακός Βαθμός Απόδοσης %</u>
Εργαζόμενο Μέσο R134a			
Γεωθερμικός Προθερμαντής	20 Bar	2.8	37.78
	25 Bar	17.2	82.5
	30 Bar	37.1	88.8
Γεωθερμικός Ατμοποιητής	20 Bar	729	64.22
	25 Bar	503.1	75.02
	30 Bar	325.9	82.71
Γεωθερμικός Υπερθερμαντής	20 Bar	223.8	70.75
	25 Bar	172.6	75.14
	30 Bar	124.6	78.91
Συνολική Διάταξη Γεωεναλλακτών	20 Bar	955.6	65.95
	25 Bar	692.9	75.31
	30 Bar	487.6	82.63
Εργαζόμενο Μέσο R152a			
Γεωθερμικός Προθερμαντής	20 Bar	11.1	77.11
	25 Bar	13.8	88.54
Γεωθερμικός Ατμοποιητής	20 Bar	674.7	69.37
	25 Bar	445.7	80.05
Γεωθερμικός Υπερθερμαντής	20 Bar	154.3	72.23
	25 Bar	104.6	76.85
Συνολική Διάταξη Γεωεναλλακτών	20 Bar	840.1	70.07
	25 Bar	564.1	79.9

❖ Σύστημα ηλιακών συλλεκτών

		<u>Καταστροφή Εξέργειας (KW)</u>	<u>Εξεργειακός Βαθμός Απόδοσης %</u>
Εργαζόμενο Μέσο R134a	20 Bar	25.8	98.74
	25 Bar	34.8	98.56
	30 Bar	51	98.17
Εργαζόμενο Μέσο R152a	20 Bar	42.2	98.4
	25 Bar	58.6	98.06

❖ Στρόβιλος-Αντλία

		<u>Καταστροφή Εξέργειας (KW)</u>	<u>Εξεργειακός Βαθμός Απόδοσης %</u>
<u>Εργαζόμενο Μέσο R134a</u>			
Στρόβιλος Ισχύος	20 Bar	199.1	87.46
	25 Bar	298.7	87.26
	30 Bar	394.4	87.03
Αντλία	20 Bar	44.1	61.48
	25 Bar	74.5	61.36
	30 Bar	108.8	61.4
<u>Εργαζόμενο Μέσο R152a</u>			
Στρόβιλος Ισχύος	20 Bar	244.8	87.92
	25 Bar	429.4	85.02
Αντλία	20 Bar	17.1	79.62
	25 Bar	27.8	79.63

❖ Αναγεννητικός Προθερμαντής-Συμπυκνωτής

		<u>Καταστροφή Εξέργειας (KW)</u>	<u>Εξεργειακός Βαθμός Απόδοσης %</u>
<u>Εργαζόμενο Μέσο R134a</u>			
Αναγεννητικός Προθερμαντής	20 Bar	605	30.24
	25 Bar	692.4	42.88
	30 Bar	680.4	48.58
Συμπυκνωτής	20 Bar	1753.7	15.99
	25 Bar	1582.6	18.39
	30 Bar	1501.7	20.15
<u>Εργαζόμενο Μέσο R152a</u>			
Αναγεννητικός Προθερμαντής	20 Bar	654.9	32.69
	25 Bar	748.2	40.51
Συμπυκνωτής	20 Bar	1948.5	15.07
	25 Bar	1697	17.83

❖ Συνολική Εγκατάσταση

	<u>Συνολική Παραγωγή Εξέργειας (KW)</u>	<u>Συνολική Καταστροφή Εξέργειας (KW)</u>	<u>Εξεργειακός Βαθμός Απόδοσης %</u>
Εργαζόμενο Μέσο R134a			
20 Bar	1273.5	6599	16.18
25 Bar	1852.2	6391.5	22.47
30 Bar	2365.1	6239.5	27.49
Εργαζόμενο Μέσο R152a			
20 Bar	1697.1	6763.2	20.06
25 Bar	2301.5	6540.7	26.03

4.4.1.2) Αναλυτικά αποτελέσματα για W-E προσανατολισμό

❖ Γεωθερμικοί Εναλλάκτες

		<u>Καταστροφή Εξέργειας (KW)</u>	<u>Εξεργειακός Βαθμός Απόδοσης %</u>
Εργαζόμενο Μέσο R134a			
Γεωθερμικός Προθερμαντής	20 Bar	2.8	37.78
	25 Bar	17.2	82.5
	30 Bar	37.1	88.8
Γεωθερμικός Ατμοποιητής	20 Bar	729	64.22
	25 Bar	503.2	75.02
	30 Bar	325.9	82.71
Γεωθερμικός Υπερθερμαντής	20 Bar	223.8	70.75
	25 Bar	172.5	75.15
	30 Bar	124.6	78.91
Συνολική Διάταξη Γεωεναλλακτών	20 Bar	955.6	65.95
	25 Bar	692.9	75.31
	30 Bar	487.6	82.63
Εργαζόμενο Μέσο R152a			
Γεωθερμικός Προθερμαντής	20 Bar	11.1	77.11
	25 Bar	13.8	88.54
Γεωθερμικός Ατμοποιητής	20 Bar	674.7	69.37
	25 Bar	445.7	80.05

Γεωθερμικός Υπερθερμαντής	20 Bar	154.3	72.23
	25 Bar	104,6	76.85
Συνολική Διάταξη Γεωεναλλακτών	20 Bar	840.1	70.01
	25 Bar	564,1	79.9

❖ Σύστημα ηλιακών συλλεκτών

		<u>Καταστροφή Εξέργειας (KW)</u>	<u>Εξεργειακός Βαθμός Απόδοσης %</u>
Εργαζόμενο Μέσο R134a	20 Bar	25	98.73
	25 Bar	33.1	98.59
	30 Bar	52.1	98.16
Εργαζόμενο Μέσο R152a	20 Bar	40,4	98.42
	25 Bar	60,4	98.04

❖ Στρόβιλος-Αντλία

		<u>Καταστροφή Εξέργειας (KW)</u>	<u>Εξεργειακός Βαθμός Απόδοσης %</u>
<u>Εργαζόμενο Μέσο R134a</u>			
Στρόβιλος Ισχύος	20 Bar	197.6	87.45
	25 Bar	298.4	87.19
	30 Bar	394.6	87.07
Αντλία	20 Bar	44.1	61.48
	25 Bar	74.5	61.36
	30 Bar	108.8	61.4
<u>Εργαζόμενο Μέσο R152a</u>			
Στρόβιλος Ισχύος	20 Bar	244,2	87,86
	25 Bar	354.9	87.67
Αντλία	20 Bar	17,1	79,65
	25 Bar	27.8	79.63

❖ Αναγεννητικός Προθερμαντής-Συμπυκνωτής

		<u>Καταστροφή Εξέργειας (KW)</u>	<u>Εξεργειακός Βαθμός Απόδοσης %</u>
Εργαζόμενο Μέσο R134a			
Αναγεννητικός Προθερμαντής	20 Bar	591.5	35.76
	25 Bar	673.8	43.55
	30 Bar	693.8	48.09
Συμπυκνωτής	20 Bar	1699.3	16.32
	25 Bar	1541.8	18.69
	30 Bar	1524.5	19.97
Εργαζόμενο Μέσο R152a			
Αναγεννητικός Προθερμαντής	20 Bar	641.2	33.15
	25 Bar	760.3	40.12
Συμπυκνωτής	20 Bar	1893.5	15.35
	25 Bar	1726.2	17.64

❖ Συνολική Εγκατάσταση

	<u>Συνολική Παραγωγή Εξέργειας (KW)</u>	<u>Συνολική Καταστροφή Εξέργειας (KW)</u>	<u>Εξεργειακός Βαθμός Απόδοσης %</u>
Εργαζόμενο Μέσο R134a			
20 Bar	1262.5	6528.7	16.2
25 Bar	1838.2	6330.1	22.5
30 Bar	2376.1	6277	27.46
Εργαζόμενο Μέσο R152a			
20 Bar	1684.1	6692	20.11
25 Bar	2387.5	6509.3	26.84

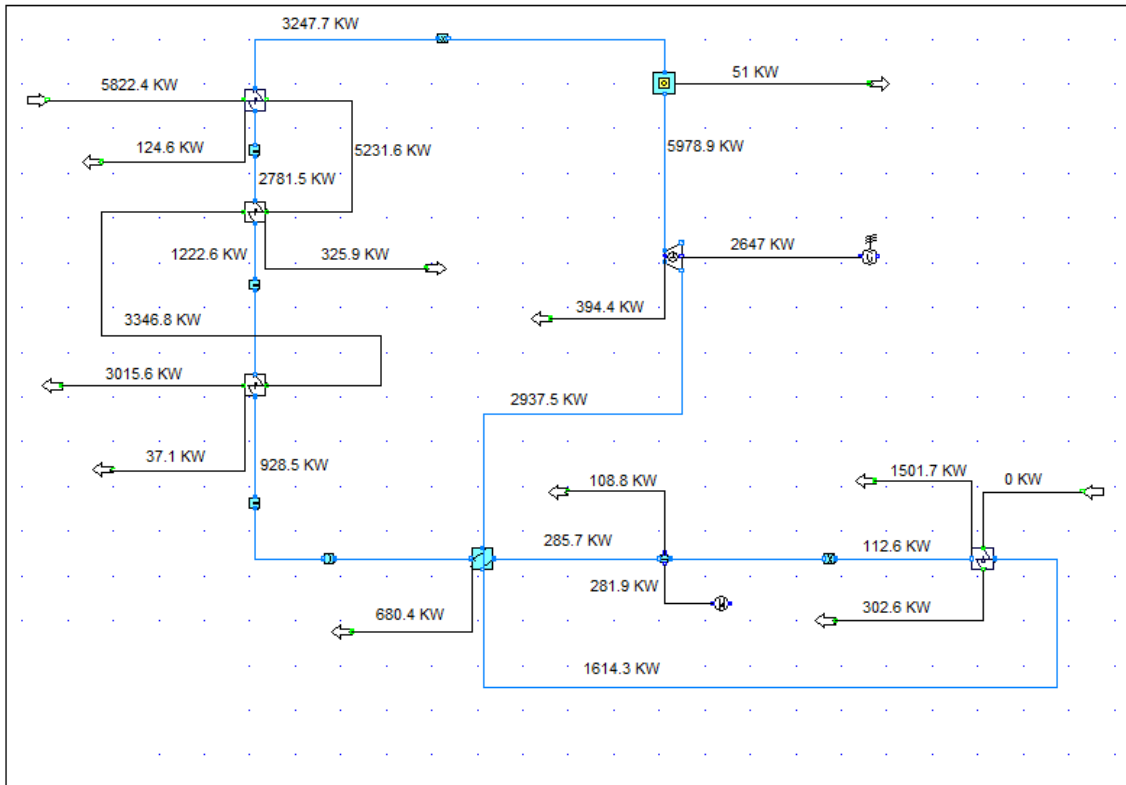
4.4.1.3) Μέσος όρος των δύο περιπτώσεων

	<u>Συνολική Παραγωγή Εξέργειας (KW)</u>	<u>Συνολική Καταστροφή Εξέργειας (KW)</u>	<u>Εξεργειακός Βαθμός Απόδοσης %</u>
Μέσος όρος N-S Προσανατολισμού	1897.9	6506.8	22.58
Μέσος όρος W-E Προσανατολισμού	1909.7	6467.4	22.80
Συνολικός μέσος όρος	1903.8	6487.1	22.69

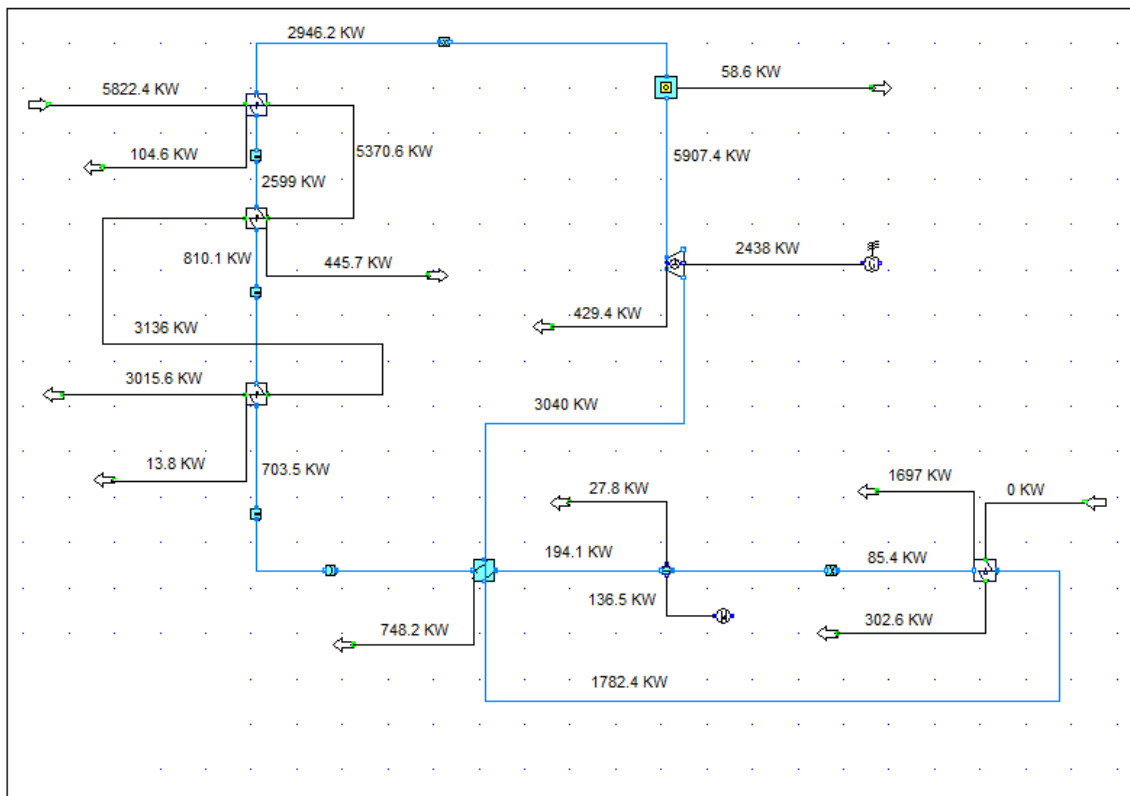
Ορισμένες βασικές παρατηρήσεις επί των αποτελεσμάτων:

- Η λειτουργία της εγκατάστασης, από τη στιγμή που μελετάμε τη μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία, είναι πρακτικά ίδια εξεργειακά ανεξαρτήτως προσανατολισμού των συλλεκτών.
- Αντίστοιχα με το πρώτο κεφάλαιο, οι εξεργειακές απώλειες στους γεωεναλλάκτες, αυξανόμενης της πίεσης λειτουργίας, μειώνονται κατά πολύ. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι αυξανόμενης της πίεσης λειτουργίας αυξάνεται η θερμοκρασία ατμοποίησης του εργαζόμενου μέσου, οπότε πλησιάζουν μεταξύ τους οι καμπύλες θερμοκρασίας των δύο ρευμάτων στους γεωεναλλάκτες. Άρα, έχουμε μείωση των εξεργειακών απωλειών.
- Το σύστημα των ηλιακών συλλεκτών πρακτικά έχει μηδενικές εξεργειακές απώλειες. Αυτό εν μέρει οφείλεται στην αδυναμία ορισμού της εξέργειας της ηλιακής ακτινοβολίας, και στην απλοποιητική θεώρηση ότι οι ηλιακές συλλέκτες είναι ένας απλός εναλλάκτης πρόσδοσης θερμότητας, οι οποίοι έχουν μικρές εξεργειακές απώλειες.
- Οι εξεργειακές απώλειες του συμπυκνωτή είναι αρκετά μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες απώλειες στην εγκατάσταση βιομάζας-γεωθερμίας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στην εγκατάσταση βιομάζας-γεωθερμίας είχαμε το σύστημα παραγωγής θερμικής ενέργειας, από το οποίο ανακτούσαμε ένα μέρος της εξέργειας του εργαζόμενου μέσου από την έξοδο του αναγεννητικού προθερμαντή. Στην παρούσα εγκατάσταση το εργαζόμενο μέσο αμέσως μετά την έξοδο του από τον αναγεννητικό προθερμαντή οδηγείται άμεσα στο συμπυκνωτή της εγκατάστασης, άρα με μεγαλύτερη εξέργεια. Δεδομένου ότι η κατάσταση εξόδου του εργαζόμενου μέσου από τον αναγεννητικό προθερμαντή είναι πρακτικά ίδια ανεξαρτήτου περιπτώσεως, διαπιστώνουμε το λόγο για τον οποίον οι εξεργειακές απώλειες του συμπυκνωτή είναι αυξημένες.
- Οι εξεργειακές απώλειες του αναγεννητικού προθερμαντή είναι σταθερές, της τάξης των 650-750 KW, ανεξαρτήτου περιπτώσεως.
- Σε αντιστοιχία με την εγκατάσταση βιομάζας-γεωθερμίας, η συνολική παραγωγή εξέργειας αυξάνει και στην παρούσα εγκατάσταση, αυξανόμενης της πίεσης λειτουργίας. Σε αυτήν την περίπτωση, όμως, έχουμε μια ελαφρά πτώση της συνολικής καταστροφής εξέργειας στην εγκατάσταση, αυξανόμενης της πίεσης λειτουργίας, σε αντίθεση με την εγκατάσταση βιομάζας-γεωθερμίας, όπου είχαμε αύξηση της συνολικής καταστροφής εξέργειας. Εκ των πραγμάτων, αυξανόμενης της πίεσης λειτουργίας, έχουμε μια αρκετά μεγάλη αύξηση του εξεργειακού βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης, της τάξης του 6% ανά 5 Bar αύξησης της πίεσης λειτουργίας.

Ολοκληρώνοντας την εξεργειακή μελέτη της εγκατάστασης, παρουσιάζουμε ενδεικτικά τα διαγράμματα ροής εξέργειας της εγκατάστασης, για την περίπτωση μέγιστης πίεσης λειτουργίας για κάθε εργαζόμενο μέσο, για την περίπτωση του N-S προσανατολισμού.



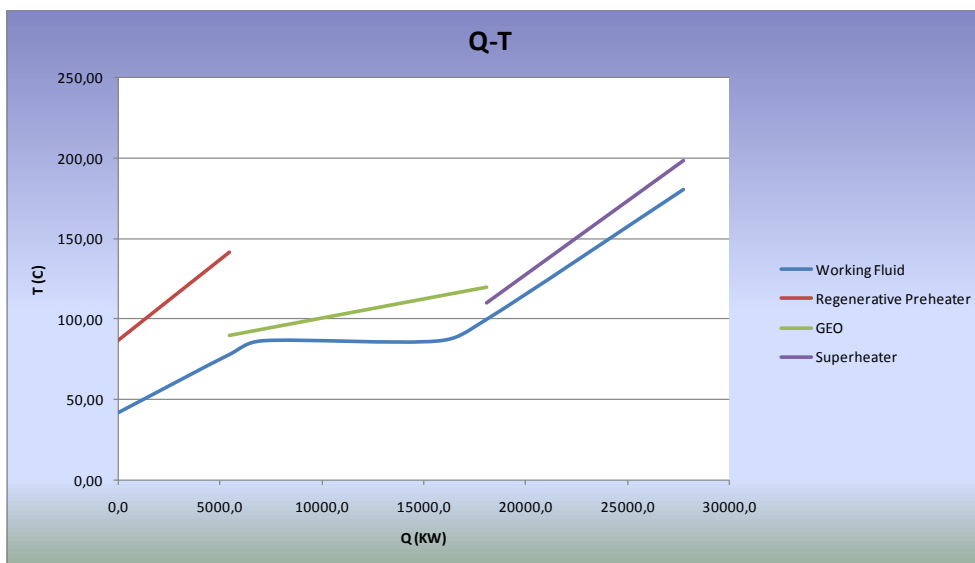
Εικόνα 4.21: Διάγραμμα ροής εξέργειας για εργαζόμενο μέσο R134a, σε πίεση 30 Bar, για N-S προσανατολισμό



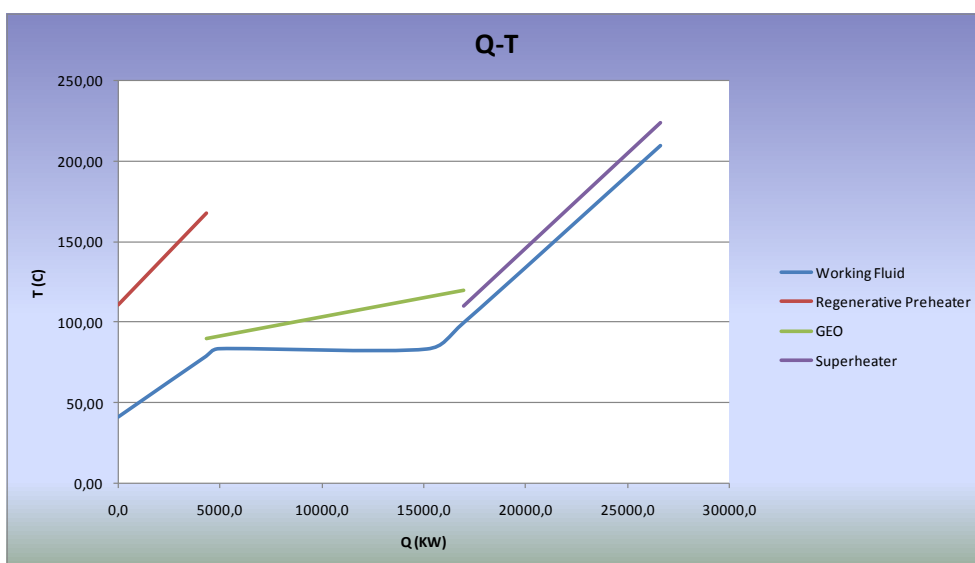
Εικόνα 4.22: Διάγραμμα ροής εξέργειας για εργαζόμενο μέσο R152a, σε πίεση 25 Bar, για N-S προσανατολισμό

4.4.2) Διαγράμματα Q-T και διαγράμματα Sankey

Όπως αναφέραμε στην αρχή του παρόντος κεφαλαίου, η υβριδική εγκατάσταση ηλιακής-γεωθερμίας δεν διαφέρει σε τίποτα, εκτός της εξωτερικής πηγής θερμότητας, από την υβριδική εγκατάσταση βιομάζας-γεωθερμίας. Άρα, όλα τα ποσά μεταφερόμενης θερμότητας ανά τμήμα της εγκατάστασης είναι ίδια με την αντίστοιχη (ως προς την πίεση λειτουργίας και το εργαζόμενο μέσο) εγκατάσταση βιομάζας-γεωθερμίας. Για του λόγου το αληθές, θα παρουσιαστούν ορισμένα ενδεικτικά διαγράμματα Q-T των βασικών εγκαταστάσεων που μελετήσαμε στο παρόν κεφάλαιο, στη μέγιστη πίεση λειτουργίας κάθε εργαζόμενου μέσου. Τα διαγράμματα που παρουσιάζονται είναι για την ώρα της μέγιστης ηλιακής ακτινοβολίας, άρα και της μέγιστης υπερθέρμανσης εργαζόμενου μέσου. Προφανώς, τα διαγράμματα θα είναι σχεδόν ίδια ανεξαρτήτως προσανατολισμού για την ίδια ηλιακή ακτινοβολία, οπότε θα παρουσιάσουμε μόνο τα διαγράμματα N-S προσανατολισμού.



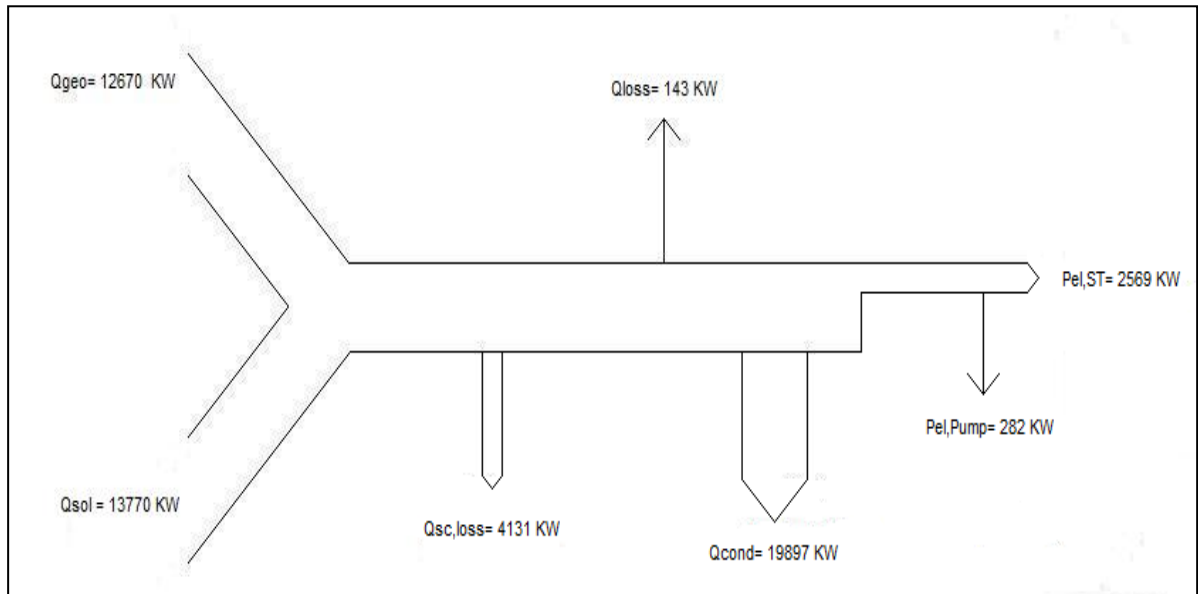
Εικόνα 4.23: Διάγραμμα Q-T της μελετώμενης εγκατάστασης για εργαζόμενο μέσο R134a, σε πίεση 30 Bar



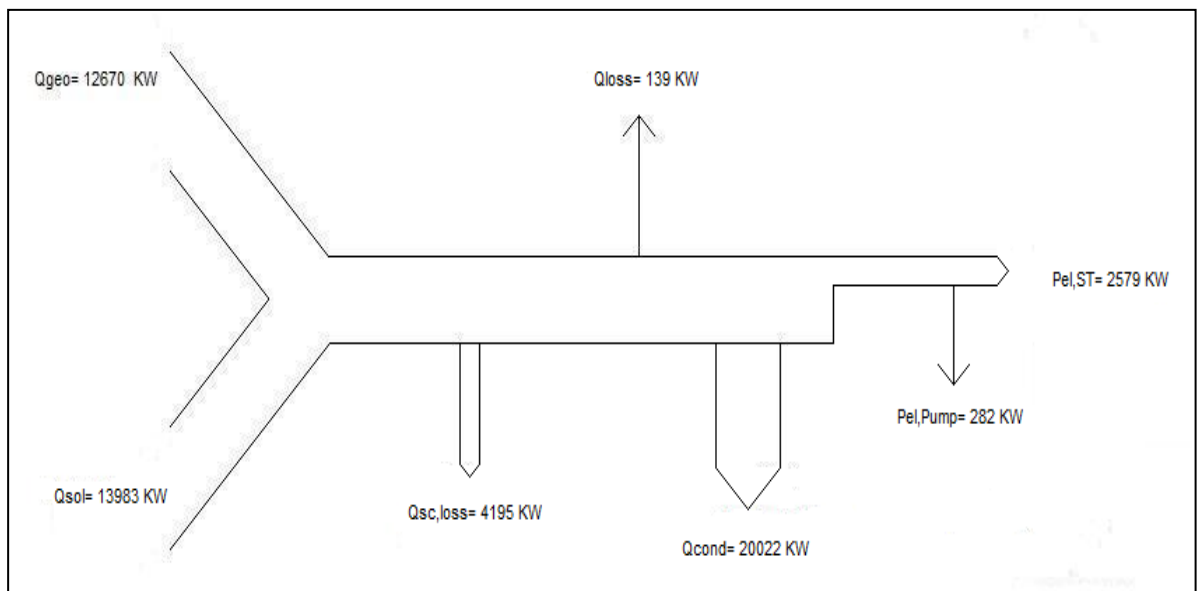
Εικόνα 4.24: Διάγραμμα Q-T της μελετώμενης εγκατάστασης για εργαζόμενο μέσο R152, σε πίεση 25 Bar

Παρατηρούμε ότι τα παραπάνω διαγράμματα είναι πανομοιότυπα με τα αντίστοιχα της υβριδικής εγκατάστασης βιομάζας-γεωθερμίας του προηγούμενου κεφαλαίου. Άρα, είναι πανομοιότυπες όλες οι θερμοκρασίες στα αντίστοιχα σημεία στις δύο εγκαταστάσεις, καθώς επίσης και τα αντίστοιχα μεταφερόμενα ποσά θερμότητας ανά τμήμα της εγκατάστασης. Γίνεται σαφές, λοιπόν, ο λόγος για τον οποίον δεν ήταν η συγκεκριμένη μελέτη αντίστοιχης έκτασης με τη μελέτη του κεφαλαίου βιομάζας γεωθερμίας.

Τέλος, παρουσιάζονται ενδεικτικά τα κυριότερα διαγράμματα ροής ενέργειας Sankey για τη μελετώμενη εγκατάσταση.

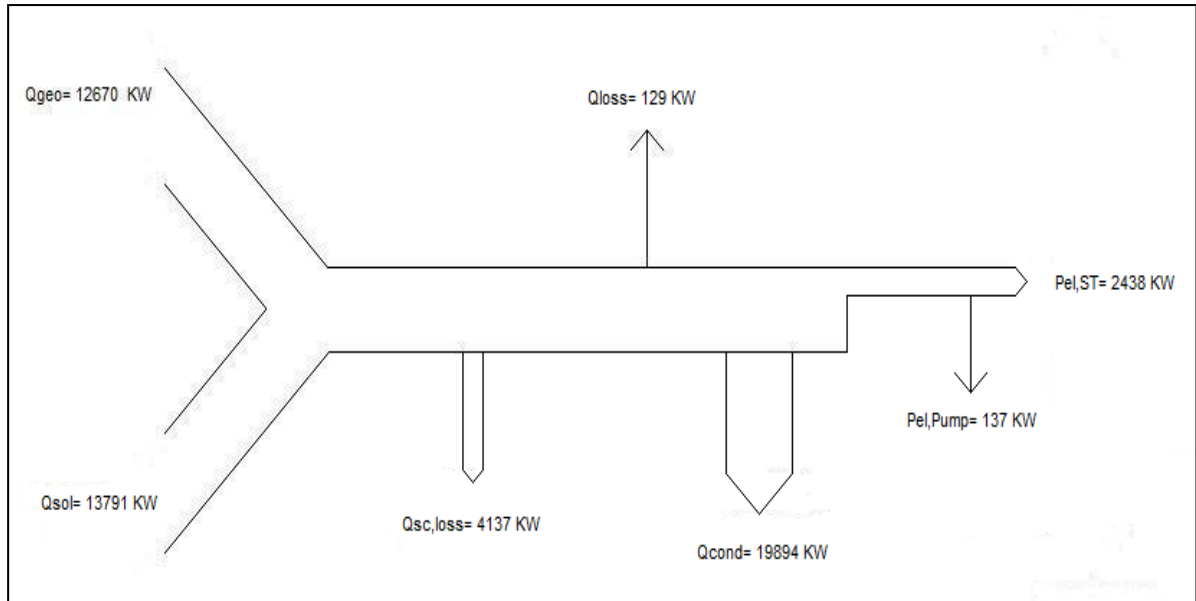


Εικόνα 4.25: Διάγραμμα Sankey για εργαζόμενο μέσο R134a, σε πίεση 30 Bar, N-S προσανατολισμό



Εικόνα 4.26: Διάγραμμα Sankey, για εργαζόμενο μέσο R134a, σε πίεση 30 Bar, W-E προσανατολισμό

Παρατηρούμε ότι τα παραπάνω διαγράμματα είναι σχεδόν πανομοιότυπα για το ίδιο εργαζόμενο μέσο ανεξαρτήτως προσανατολισμού. Άρα, δικαίως δεν παρουσιάσαμε διαγράμματα Q-T και για τους δύο προσανατολισμούς.



Εικόνα 4.27: Διάγραμμα Sankey για εργαζόμενο μέσο R152a, σε πίεση R152a, N-S προσανατολισμό

Οι όροι στα παραπάνω διαγράμματα είναι οι εξής:

\dot{Q}_{geo} : Απορροφόμενη ισχύς από το γεωθερμικό ρευστό

\dot{Q}_{sol} : Ισχύς προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας

$\dot{Q}_{SC,loss}$: Θερμικές απώλειες ηλιακών συλλεκτών

\dot{Q}_{cond} : Απορριπτόμενη θερμότητα στο περιβάλλον μέσω του συμπυκνωτή

\dot{Q}_{loss} : Λοιπές απώλειες της εγκατάστασης, οι οποίες δεν περιλαμβάνονται στις παραπάνω

$P_{el,ST}$: Παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς στους ακροδέκτες της γεννήτριας του ατμοστροβίλου

$P_{el,Pump}$: Ηλεκτρική ισχύς του κινητήρα της τροφοδοτικής αντλίας

Παρατηρούμε ότι η ροή θερμότητας για εργαζόμενο μέσο R134a είναι σχεδόν πανομοιότυπη με εργαζόμενο μέσο R152a.

Η βασική διαφορά των τριών παραπάνω διαγραμμάτων συγκρινόμενα με τα αντίστοιχα του κεφαλαίου βιομάζας-γεωθερμίας είναι ότι στην παρούσα εγκατάσταση δεν έχουμε την παραγωγή θερμικής ενέργειας, η οποία απουσιάζει από τα παραπάνω διαγράμματα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της απορριπτόμενης θερμικής ενέργειας του συμπυκνωτή, κυρίως τις ώρες που θα ήταν δυνατή η παραγωγή θερμικής ενέργειας λόγω υψηλής υπερθέρμανσης του εργαζόμενου μέσου. Από εκεί και πέρα οι υπόλοιπες τιμές της ροής ενέργειας στην εγκατάσταση παραμένουν σχεδόν σταθερές με την εγκατάσταση βιομάζας-γεωθερμίας. Η βασική διαφορά, λοιπόν, είναι η διαφοροποίηση της εξωτερικής πηγής πρόσδοσης θερμότητας, παρότι το ποσό θερμότητας που δίνουν οι δύο πηγές είναι σχεδόν ίδιο. Αυτό βέβαια είναι απολύτως λογικό, αφού η μάζα του εργαζόμενου μέσου είναι σταθερή και στις δύο περιπτώσεις, και άρα η απαραίτητη πρόσδοση θερμότητα θα εξαρτάται από την επιθυμητή υπερθέρμανση του εργαζόμενου μέσου, η οποία προφανώς είναι σταθερή και στις δύο περιπτώσεις εγκαταστάσεων που μελετήσαμε.

Συμπεράσματα-Προτάσεις:

Στο 4^ο Κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής μελετήσαμε τη δυνατότητα συνδυασμού δυο ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, της γεωθερμικής ενέργειας και της ηλιακής ενέργειας. Συγκεκριμένα, παρεμβάλαμε στο γεωθερμικό κύκλωμα ενός απλού κύκλου ORC παραβολικούς συλλέκτες με σκοπό την υπερθέρμανση του εργαζόμενου μέσου. Οι παραβολικοί συλλέκτες θα μπορούσαν να λειτουργήσουν αυτοτελώς σε έναν κύκλο ORC με πηγή θερμότητας την ηλιακή ενέργεια.

Διαπιστώσαμε ότι ο συνδυασμός των δύο αυτών εγκαταστάσεων είναι πιο συμφέρον από την ξεχωριστή λειτουργία των δύο κύκλων ORC. Συγκεκριμένα, η υβριδική εγκατάσταση παράγει περίπου 450-650 KW περισσότερα από ότι οι δύο εγκαταστάσεις ξεχωριστά, ανάλογα την ηλιακή ακτινοβολία. Άρα, είναι άκρως συμφέρον ο συνδυασμός των δύο εγκαταστάσεων. Επίσης, υπολογίστηκε ότι προκειμένου να γίνει η απαραίτητη υπερθέρμανση εργαζόμενου μέσου απαιτείται μια έκταση περίπου 14-15 στρεμμάτων ανάλογα την περίπτωση, μια έκταση αρκετά μεγάλη.

Το μεγάλο πλεονέκτημα μιας τέτοιας εγκατάστασης είναι ότι συνδυάζει δύο εντελώς πράσινες μορφές ενέργειας, ενώ επίσης έχει σχεδόν μηδενικό κόστος συντήρησης και λειτουργίας. Αντιθέτως, έχει το πολύ σημαντικό μειονέκτημα της μεταβαλλόμενης παραγωγής ενέργειας κατά τη διάρκεια της ημέρας. Βέβαια, η γεωθερμική μονάδα λειτουργεί συνεχώς οπότε δεν έχουμε 100% απώλεια ισχύος, αλλά περίπου 50-60%. Ένα εξίσου σημαντικό μειονέκτημα αυτής της εγκατάστασης είναι το αρκετά υψηλό αρχικό κόστος εγκατάστασης, συγκρινόμενο με το αντίστοιχο της μονάδας του 3^{ου} κεφαλαίου.

Μια οικονομική μελέτη της παρούσας εγκατάστασης, καθώς και μια αναλυτική μελέτη παραγωγής ενέργειας καθ'όλη τη διάρκεια του χρόνου, θα είχαν ιδιαίτερη αξία και ενδιαφέρον.

Βιβλιογραφία

1. Ronald Di Pippo, 2007. Geothermal Power Plants: Principles, applications, case studies and environmental impact.
2. H. Gupta & S.Roy, 2006. Geothermal Energy: An alternative resource for the 21st century.
3. D. Chandrasekharam & J. Bundschuh, 2008. Low enthalpy geothermal resources for power generation.
4. Χαράλαμπος Δαμιανίδης, 2010 ΕΜΠ. Διπλωματική Εργασία: Σύγκριση κύκλων Kalina και ORC για γεωθερμικές πηγές ενέργειας.
5. National Energy Authority and Ministries of industry and commerce, 2006. Geothermal development and research in Iceland.
6. Αρθούρος Ζερβός, ΕΜΠ 2008. Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.
7. J. W. Lund, 2003. Direct use of the geothermal energy in the U.S.A.
8. N.H. Afgan, D. Al Gobaisi, M.G. Carvalho & M.Cumo. Sustainable energy development.
9. G.W. Huttner, 2000. The status of world geothermal power generation 1995-2000.
10. R. Bertani, 2005. World geothermal power generation in the period 2001-2005.
11. J.W. Lund & D.H. Freeston, 2000. World-wide direct uses of geothermal energy 2000.
12. MIT-led interdisciplinary panel, 2006. The future of Geothermal Energy.
13. <http://www.ypan.gr/ape/files/mythoi-geothermia.pdf>
14. www.geothermal.marin.org
15. http://en.wikipedia.org/wiki/Geothermal_power
16. Ronald Di Pippo, 1999. Small geothermal power plants: Design, performance and economics.
17. James M. Hensler & Robert C. Axtmann, 1978. Cost study of superheating geothermal steam.
18. Matthias Bruhn, 1999. Hybrid geothermal-fossil electricity generation from low enthalpy geothermal resources: Geothermal feedwater preheating in conventional power plants.
19. D. Chandrasekharam & J. Bundschuh, 2007. Low enthalpy geothermal resources for power generation.
20. G. Bidini, U. Desideri, F. Di Maria, A. Baldacci, R. Papale & F. Sabatelli, 1998. Optimization of an integrated Gas turbine-geothermal power plant.
21. M. Thirugnanasambandam, S. Iniyan & R. Goic, 2009. A review of solar thermal technologies.
22. A. Thomas, 1995. Solar steam generating systems using parabolic trough concentrators.
23. A. Lentz & R. Almanza, 2006. Parabolic troughs to increase the geothermal wells flow enthalpy.
24. A. Lentz & R. Almanza, 2006. Solar-geothermal hybrid system.
25. F.A. Al-Sulaiman, I. Dincer & F. Hamdullahpur, 2009. Energy analysis of a trigeneration plant based on solid oxide fuel cell and organic Rankine cycle.
26. M. Karagiorgas, D. Mendrinou & C. Karytsas, 2003. Solar and Geothermal heating and cooling of the European centre for public law building in Greece.
27. E. Neal. Heat pumps-Applications for heating conservation and heating recovery.
28. D.A. Reay, 1984. The large scale applications of heat pumps.
29. V. Trillat-Berdal, B. Souyri & G. Achard, 2006. Coupling of geothermal heat pumps with thermal solar collectors.

30. V. Trillat-Berdal, B. Souyri & G. Achard, 2006. Experimental study of a ground coupled heat pump combined with thermal solar collectors.
31. A. Borsukiewicz-Gozdur, 2009. Dual-fluid-hybrid power plant co-powered by low-temperature geothermal water.
32. A. Schuster, S. Karellas, E. Kakaras, H Splithoff, 2008. Energetic and economic investigation of Organic Rankine cycle applications.
33. Γεώργιος Πανούσης, 2009 ΕΜΠ. Διπλωματική Εργασία: Συμπαγωγικά συστήματα αξιοποίησης παραγόμενου αερίου από στερεό δευτερογενές καύσιμο.
34. S. V. Vassilev, D. Baxter, L. K. Andersen & C. G. Vassileva, 2009. An overview of the chemical composition of biomass.
35. Δημήτριος Ζαρμπούτης, 2009 ΕΜΠ. Διπλωματική Εργασία.