



---

**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

Εργαστήριο Ατμοκινητήρων & Λεβήτων

Τομέας Θερμότητας της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών

---

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

***ΜΕΛΕΤΗ ΟΡΓΑΝΙΚΟΥ ΚΥΚΛΟΥ ORC  
ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΗΛΙΑΚΗΣ  
ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΕΝΔΙΑΜΕΣΗ  
ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΣΕ ΥΛΙΚΟ ΑΛΛΑΓΗΣ  
ΦΑΣΗΣ***

**Του Φοιτητή**

Χαβενετίδη Χρήστου

**Επιβλέπων**

Καρέλλας Σωτήριος, Αναπληρωτής Καθηγητής,  
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ

---

Αθήνα, Φεβρουάριος 2016

Στους γονείς μου  
Λεωνίδα και Κωνσταντίνα  
και στον αδελφό μου  
Κωνσταντίνο

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Με αφορμή την εκπόνηση της διπλωματικής μου θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς ευχαριστίες μου σε όλους εκείνους τους ανθρώπους που συνέβαλαν στην ολοκλήρωση των σπουδών μου καθένας με τον δικό του τρόπο.

Ιδιαίτερα ευχαριστώ τον επιβλέποντα καθηγητή Κύριο Σωτήριο Καρέλλα για την ανάθεση της διπλωματικής και την σημαντική καθοδήγηση του καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της.

Ευχαριστώ τον κύριο Μπραϊμάκη Κωνσταντίνο και Ρουμπεδάκη Τρύφωνα για την παροχή πληροφοριών και συμβουλών απαραίτητων για την ολοκλήρωση του θέματος.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την διαρκή στήριξη και κάθε είδους βοήθεια που μου πρόσφεραν και μου προσφέρουν όλα αυτά τα χρόνια.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αυτή η διπλωματική έχει σκοπό την παρουσίαση της χρήσης μιας ανανεώσιμης πηγής ενέργειας και ενός διαφορετικού τρόπου διαχείρισης της ενέργειας προσαρμοσμένη στις ανάγκες ενός μη διασυνδεδεμένου δικτύου σε συνδυασμό με την αποθήκευση ενέργειας. Η ανανεώσιμη πηγή την οποία θα εξετάσουμε είναι η ηλιακή ενέργεια, όπως για παράδειγμα η θέρμανση νερού ή ελαίου με ηλιακούς συλλέκτες. Το νερό σε πιέσεις μεγαλύτερες της ατμοσφαιρικής μπορεί να φτάνει σε θερμοκρασίες άνω των 100°C με την χρησιμοποίηση κατοπτρικών ηλιακών συλλεκτών. Έπειτα η αποθήκευση της ενέργειας αυτής γίνεται με την χρήση υλικών αλλαγής φάσης (Phase Change Materials). Η χρησιμοποίηση των PCM για την αποθήκευση θερμότητας γίνεται διότι τα PCM εκμεταλλεύονται την λανθάνουσα θερμότητα για να αποθηκεύσουν ενέργεια σε σταθερή θερμοκρασία. Για την ανάκτηση αυτής της αποθηκευμένης θερμότητας θα χρησιμοποιηθεί ο οργανικός κύκλος Clausius-Rankine (Organic Rankine Cycle) ο οποίος είναι κατάλληλος για πηγές ενέργειας χαμηλής θερμοκρασίας. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να γίνει η κατάλληλη επιλογή οργανικού μέσου σύμφωνα με τους θερμοκρασιακούς περιορισμούς και πάντα ακολουθώντας τις διεθνείς οδηγίες της συνθήκης του Κγτο για τα επιτρεπόμενα οργανικά μέσα σε κύκλους ORC.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή για το θέμα με το οποίο πραγματεύεται η διπλωματική εργασία. Περιλαμβάνει μια γενική εισαγωγή του θέματος που θα εξεταστεί εκτενέστερα στην συνέχεια.

Στο δεύτερο κεφάλαιο θα ασχοληθούμε με την επιλογή του νησιού που θα εφαρμόσουμε την εγκατάσταση. Εν συνεχεία θα αναλυθούν όλα τα τμήματα του συστήματος τα οποία είναι απαραίτητα προκειμένου να κατανοηθεί πλήρως η συλλογιστική πορεία της διπλωματικής εργασίας.

Στο τρίτο κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε την υπάρχουσα ενεργειακή κατάσταση στο νησί της Καρπάθου με τις μονάδες βάσης και τις εγκατεστημένες ΑΠΕ που υπάρχουν στο νησί. Επιπλέον θα αναλυθούν και άλλες παράμετροι αναγκαίες για τους υπολογισμούς μας.

Στο τέταρτο κεφάλαιο θα αναλύσουμε εκτενέστερα όλα τα απαραίτητα στοιχεία της εγκατάστασης στα οποία αναφερθήκαμε στο κεφάλαιο 2, σημειώνοντας όλες τις απαραίτητες συνθήκες για τον αναλυτικό υπολογισμό τους. Τα στοιχεία που θα ασχοληθούμε είναι το αιολικό πάρκο του νησιού, το φωτοβολταϊκό πάρκο του νησιού, τα ηλιακά θερμικά συστήματα που θα χρησιμοποιηθούν, η αντλία

θερμότητας και ο κύκλος ORC που θα επιλέξουμε καθώς και το PCM στο οποίο θα γίνει η αποθήκευση θερμότητας.

Στο πέμπτο κεφάλαιο αφού περιγράψουμε τον τρόπο λειτουργίας όλων των στοιχείων ξεχωριστά θα αναλύσουμε και τον τρόπο λειτουργίας τους ως ενιαία μονάδα με σκοπό την βέλτιστη λειτουργία της. Επίσης σε αυτό το κεφάλαιο θα προσδιοριστεί κάθε μέγεθος της εγκατάστασης με βάση την βέλτιστη λειτουργία αλλά και την οικονομικότερη λειτουργία της εγκατάστασης.

Στο έκτο κεφάλαιο θα ασχοληθούμε με τα οικονομικά της εγκατάστασης. Έχοντας υπολογίσει όλα τα θερμοδυναμικά στοιχεία αλλά και τα ενεργειακά ζητήματα της εγκατάστασης θα αναλύσουμε το κατά πόσο βιώσιμη είναι στην υφιστάμενη οικονομική κατάσταση.

Στο έβδομο κεφάλαιο θα αναλύσουμε τον κώδικα που χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να υπολογιστούν όλα τα μεγέθη που χρειάζονται για την εύρεση των αποτελεσμάτων.

Στο όγδοο κεφάλαιο θα παρατεθούν γραφήματα πιο ειδικών μεγεθών που αφορούν τον τρόπο λειτουργίας της εγκατάστασης σε κάθε περίπτωση με την αντίστοιχη επεξήγηση για καλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων, ενώ κλείνοντας θα αναφέρουμε τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας.

Στο ένατο κεφάλαιο θα περιγραφεί ο εναλλακτικός τρόπος λειτουργίας της εγκατάστασης, ενώ το δέκατο κεφάλαιο περιλαμβάνει την βιβλιογραφία.

Τέλος ακολουθούν τα παραρτήματα στα οποία περιλαμβάνονται πιο αναλυτικά αποτελέσματα.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Ευχαριστίες.....	3
Περίληψη.....	4
1 Εισαγωγή.....	9
2. Γενικά στοιχεία.....	17
2.1 Γενικά στοιχεία για το νησί της Καρπάθου.....	17
2.2 Γενικά στοιχεία μελετώμενων μεγεθών.....	21
2.2.1 Ηλιακή ενέργεια.....	21
2.2.2 Αιολική ενέργεια.....	27
2.2.3 Τρόποι αποθήκευσης θερμικής ενέργειας.....	30
2.2.4 Εισαγωγικά στοιχεία για αντλίες θερμότητας.....	35
2.2.5 Εισαγωγικά στοιχεία οργανικού κύκλου Rankine (ORC).....	39
3. Υπάρχουσα κατάσταση στην Κάρπαθο.....	41
3.1 Ενεργειακή ζήτηση στην Κάρπαθο.....	41
3.2 Υφιστάμενες Μονάδες.....	45
3.2.1 ΑΣΠ Καρπάθου.....	45
3.2.2 Αιολικό πάρκο Καρπάθου.....	45
3.2.3 Φωτοβολταϊκό πάρκο.....	47
3.3 Κλιματικά και μετεωρολογικά δεδομένα.....	49
3.3.1 Υπολογισμός ωριαίας θερμοκρασίας αέρος.....	49
3.3.2 Υπολογισμός ωριαίας θερμοκρασίας νερού.....	54
4. Ανάλυση επιμέρους τμημάτων της εγκατάστασης.....	58
4.1 Αναλυτικός προσδιορισμός βασικών στοιχείων της εγκατάστασης.....	58
4.2 Αιολικό πάρκο.....	59
4.2.1 Ανεμογεννήτριες.....	59
4.2.2 Υπολογισμός παραγόμενης ενέργειας ανεμογεννητριών του αιολικού πάρκου.....	61

4.3 Φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις.....	64
4.3.1 Φωτοβολταϊκά πάνελ.....	64
4.3.2 Φωτοβολταϊκά συστήματα.....	66
4.3.3 Μέθοδος υπολογισμού ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας.....	69
4.3.4 Παραγόμενη ισχύς φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων.....	74
4.4 Ηλιοθερμικά συστήματα.....	77
4.4.1 Επιλογή ηλιοθερμικού συλλέκτη.....	77
4.4.2 Μέθοδος υπολογισμού ηλιακών συλλεκτών.....	79
4.5 Υλικά αλλαγής φάσης (PCM).....	84
4.5.1 Επιλογή υλικού αλλαγής φάσης (PCM).....	84
4.5.2 Υπολογιστική μέθοδος αποθήκευσης και απόδοσης θερμικής ενέργειας μέσω του υλικού αλλαγής φάσης (PCM).....	87
4.6 Επιλογή οργανικών μέσων (organic fluids).....	89
4.7 Αντλίες θερμότητας.....	91
4.7.1 Τρόπος λειτουργίας αντλίας θερμότητας.....	91
4.7.2 Απαραίτητες παραδοχές για την λειτουργία της αντλίας θερμότητας.....	97
4.8.1 Ανάλυση κύκλου ORC.....	99
4.8.2 Απαραίτητες παραδοχές για την λειτουργία του κύκλου ORC.....	104
5. Υλοποίηση της εγκατάστασης.....	106
5.1 Συνεργασία επιμέρους τμημάτων της εγκατάστασης.....	106
5.2 Συνεργασία της εγκατάστασης με τα δίκτυο του νησιού.....	109
5.3 Επιλογή τελικών παραμέτρων.....	112
6. Εκτίμηση οικονομικών μεγεθών της εγκατάστασης.....	114
6.1 Αρχικό κόστος εγκατάστασης.....	114
6.2 Ετήσια κέρδη εγκατάστασης.....	115
7. Κώδικας matlab.....	117

7.1 Σύντομη περιγραφή του κώδικα.....	117
8. Αποτελέσματα.....	124
8.1 Θερμοδυναμικά αποτελέσματα.....	124
8.1.1 Επιλογή βέλτιστου συνδυασμού ελεύθερων μεταβλητών.....	124
8.1.2 Παραμετρικές αναλύσεις ετήσιας λειτουργίας.....	124
8.1.3 Παρουσίαση θερμοδυναμικών παραμέτρων λειτουργίας.....	132
8.1.3.1 Παρουσίαση λόγου πίεσης της αντλίας θερμότητας.....	132
8.1.3.2 Παρουσίαση λόγου πίεσης κύκλου ORC.....	134
8.1.3.3 Παρουσίαση COP της αντλίας θερμότητας.....	137
8.1.3.4 Παρουσίαση βαθμού απόδοσης ORC.....	138
8.1.3.5 Παρουσίαση βαθμού απόδοσης εγκατάστασης.....	139
8.1.3.6 Παρουσίαση ωρών λειτουργίας ORC.....	141
8.2 Παρουσίαση οικονομικής ανάλυσης.....	142
8.2.1 Παρουσίαση Simple Payback Period.....	142
8.2.2 Αναλυτική οικονομική ανάλυση.....	144
9 Συμπεράσματα.....	148
9.1 Συμπεράσματα εγκατάστασης .....	148
9.2 Μελλοντική έρευνα.....	150
10. Βιβλιογραφία.....	153
Παράρτημα Α.....	157
Παράρτημα Β.....	164
Παράρτημα Γ.....	171
Παράρτημα Δ.....	178



## Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>:Εισαγωγή

Η ενέργεια επηρεάζει κάθε πτυχή της ανθρώπινης δραστηριότητας. Τις τελευταίες δεκαετίες μάλιστα η ενεργειακή ζήτηση όλο και μεγαλώνει, λόγω της συνεχούς αύξησης του πληθυσμού αλλά και του αυξανόμενου πλήθους των αναγκών που μας χαρακτηρίζουν σαν άτομα και σαν κοινωνία. Η κάλυψη αυτής της αυξανόμενης ζήτησης σε ενέργεια επιτάσσει, με την σειρά της, την κατανάλωση των φυσικών πηγών ενέργειας του πλανήτη. Το αποτέλεσμα αποτελεί η ελάττωση των ορυκτών καυσίμων και εμφάνιση πολλών περιβαλλοντικών προβλημάτων, όπως η όξινη βροχή, τα αστικά νέφη, η τρύπα του όζοντος και πάνω από όλα το φαινόμενο του θερμοκηπίου, υπεύθυνο για την αύξηση της θερμοκρασίας της γης.

Η αύξηση της θερμοκρασίας της γης ιδιαίτερα μετά την βιομηχανική επανάσταση και εξαιτίας του φαινομένου του θερμοκηπίου είναι μεγάλη. Το ενεργειακό σύστημα του πλανήτη μας βασίζεται κυρίως στα ορυκτά καύσιμα με αποτέλεσμα την επιδείνωση του φαινομένου του θερμοκηπίου. Με την αύξηση της παγκόσμιας ζήτησης αναπόφευκτα αυξάνονται και οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα.

Η συνειδητοποίηση της ενεργειακής κρίσης από πλευράς των κρατών οδήγησε σε συνδιασκέψεις μεταξύ τους, μια εκ των οποίων και η συνθήκη του Kyoto, σκοπός των οποίων είναι η θέσπιση μέτρων που σε βάθος χρόνου θα επιτύχουν μια βιώσιμη ενεργειακή ανάπτυξη, απαλλαγμένη από περιβαλλοντικές απειλές. Η ανάπτυξη αυτή θα πρέπει να παρέχει κατάλληλες ενεργειακές υπηρεσίες για την ικανοποίηση των βασικών ανθρωπίνων αναγκών, να βελτιώνει την κοινωνική ευημερία και να επιτυγχάνει καθολική οικονομική στήριξη. Επιπλέον δεν θα πρέπει να θέτει σε κίνδυνο την ποιότητα ζωής της παρούσας αλλά και των μελλοντικών γενεών και να απειλεί ευαίσθητα οικοσυστήματα.

Με την συνεχώς αυξανόμενη παγκόσμια ζήτηση ενέργειας έγιναν κατά καιρούς προσπάθειες εύρεσης εναλλακτικών πηγών ενέργειας. Η κυριότερη αποτελεί η πυρηνική ενέργεια που μετά το ατύχημα στο Τσερνομπιλ (1986) επανήλθε ως μια φιλική προς το περιβάλλον πηγή ενέργειας. Το κύριο πλεονέκτημα της οποίας είναι οι μηδενικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Το γεγονός αυτό έκανε πολλούς να πιστέψουν πως το μέλλον θα μπορούσε να επιφυλάσσει παραγωγή ενέργειας χωρίς καμία περιβαλλοντική επιβάρυνση, επιτρέποντας την επιστροφή των κλιματικών συνθηκών στις κανονικές τους. Η καταστροφή της Φουκοσίμα δεν άργησε να έρθει. Το ατύχημα στην Φουκοσίμα την άνοιξη του 2011 αποτελεί μια από τις μεγαλύτερες περιβαλλοντικές καταστροφές που έχει ποτέ συμβεί παγκοσμίως. Με δεδομένη την τεράστια καταστροφή που προκαλείται από ένα πιθανό ατύχημα σε ένα πυρηνικό εργοστάσιο μπορούμε εύκολα να κατανοήσουμε πως η πυρηνική ενέργεια δεν

μπορεί τουλάχιστον ακόμα να αποτελέσει εναλλακτική λύση για την ολική αντικατάσταση αλλά ούτε ενός μεγάλου μέρους της ενέργειας από τα ορυκτά καύσιμα.

Κρίνεται πλέον αναγκαίο να βρεθεί μια εναλλακτική πηγή ενέργειας η οποία να είναι ταυτόχρονα και φιλική προς το περιβάλλον αλλά και αξιόπιστη ως προς τον τρόπο λειτουργίας. Οι μόνες πηγές ενέργειας που μπορούν να μας διασφαλίσουν και τις δυο προϋποθέσεις υποσχόμενες ένα καλύτερα ενεργειακό μέλλον είναι οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ). Το βιώσιμο ενεργειακό μέλλον, που περιεγράφηκε παραπάνω, είναι δυνατό να γίνει πραγματικότητα, αν στηριχθεί στη χρήση νέων, ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και στην ορθολογική χρήση των ήδη υπάρχουσών. Κάτι τέτοιο θα μπορούσε να ελαττώσει την κατανάλωση ενέργειας, να μειώσει τις επενδυτικές απαιτήσεις και να βελτιώσει τις ενεργειακές υπηρεσίες στα φτωχότερα στρώματα του πληθυσμού και στα φτωχότερα κράτη.

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας συμβάλουν σημαντικά στην προσπάθεια αντιμετώπισης της ενεργειακής κρίσης και των περιβαλλοντικών προβλημάτων. Εφαρμογές όπως οι ηλιακοί συλλέκτες και τα φωτοβολταϊκά συστήματα, τα αιολικά πάρκα, τα συστήματα βιομάζας και γεωθερμίας θεωρούνται πλέον πρώτης προτεραιότητας ανάπτυξης. Έχουν σπουδαίες προοπτικές χρήσης σε πολλές εφαρμογές, αποτελούν καθαρές πηγές ενέργειας χωρίς εκπομπές ρύπων, και παράλληλα είναι δωρεάν, άφθονες και ανανεώσιμες, αφού βασίζονται στην ηλιακή την αιολική και την γεωθερμική ενέργεια αντίστοιχα. Παρ' όλα αυτά υπάρχουν ορισμένοι περιορισμοί ως προς τη χρήση τους, κυρίως όπως το γεγονός ότι είναι απρόβλεπτες ή ότι δεν είναι διαθέσιμες οποτεδήποτε αυτό είναι αναγκαίο.

Γίνεται, λοιπόν, προφανής η ανάγκη δημιουργίας συστημάτων ικανών να λειτουργήσουν με τέτοια χρονική καθυστέρηση, ώστε η παροχή ενέργειας να μπορεί να ικανοποιήσει τη ζήτηση ανά πάσα στιγμή. Τέτοια συστήματα είναι τα συστήματα αποθήκευσης θερμότητας, τα οποία παρέχουν ένα πρακτικό και φυσικό τρόπο χρονικής καθυστέρησης, επιτρέποντας τη χρήση της θερμότητας που αποθηκεύουν, όποτε αυτή χρειάζεται. Με αυτό τον τρόπο πετυχαίνουμε τόσο την εξοικονόμηση ενέργειας ώστε να περιοριστεί η περιβαλλοντική καταστροφή όσο και την διευκόλυνση χρησιμοποίησης περισσότερων σε μέγεθος ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) [1].

Οι κυριότερες μορφές ΑΠΕ είναι η ηλιακή ενέργεια, η αιολική ενέργεια, η γεωθερμική ενέργεια, η βιομάζα και η ενέργεια των κυμάτων.

Η γεωθερμική ενέργεια είναι η φυσική θερμική ενέργεια της γης που διαρρέει από το θερμό εσωτερικό του πλανήτη προς την ψυχρότερη επιφάνεια της. Η άντληση

της γεωθερμικής ενέργειας γίνεται κυρίως με αγωγή από το εσωτερικό της γης προς την επιφάνεια και σε δεύτερο λόγο με ρεύματα μεταφοράς.

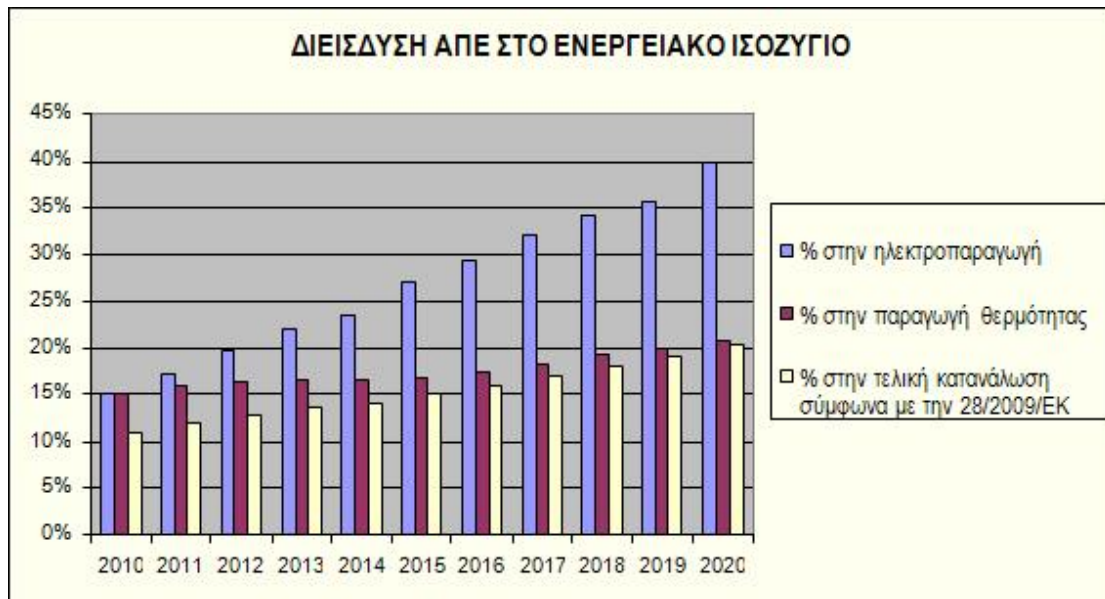
Από την άλλη πλευρά η βιομάζα που προέρχεται κυρίως από την εκμετάλλευση των φυτών παρ' όλο που την εκμεταλλευόμαστε μέσω της καύσης την συγκαταλέγουμε στις ΑΠΕ. Αυτό γίνεται γιατί αν και κατά την καύση της βιομάζας παράγεται διοξείδιο του άνθρακα, αυτό έχει δεσμευτεί από το φυτό, που χρησιμοποιούμε ως καύσιμο, απελευθερώνοντας οξυγόνο κατά την φωτοσύνθεση. Επομένως δεν επιβαρύνουμε την ατμόσφαιρα σε επιπρόσθετο διοξείδιο του άνθρακα με την προϋπόθεση πως τα φυτά που χρησιμοποιούνται ως βιομάζα συνεχώς να αντικαθίστανται. Στα πλαίσια της βιομάζας συγκαταλέγεται και το βιοντίζελ το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην κίνηση οχημάτων βοηθώντας στην μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα.

Αιολική ενέργεια ονομάζεται η κινητική ενέργεια του ανέμου και οφείλεται στην θέρμανση της Γης από τον ήλιο. Περίπου το 2% της ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει στην Γη, μετατρέπεται σε αιολική ενέργεια η οποία υπολογίζεται σε 3,6 δις MW. Η ενέργεια αυτή είναι τεράστια συγκρινόμενη με τις ανάγκες της ανθρωπότητας. Η αιολική ενέργεια είναι μεταβαλλόμενη καθώς ανάλογα με την ένταση του ανέμου αυξομειώνεται και η παραγόμενη ισχύς. Αλλάζει και κατά την διάρκεια της ημέρας αλλά και εποχιακά [1].

Η ηλιακή ενέργεια αποτελεί μια κυρίαρχη πηγή ενέργειας για τον πλανήτη μας. Τούτο εύκολα δικαιολογείται καθώς τα φυτά, η βάση της τροφικής αλυσίδας στον πλανήτη, χρησιμοποιούν την ηλιακή ενέργεια για να τραφούν μέσω της φωτοσύνθεσης. Από την άλλη πλευρά και ο άνθρωπος αξιοποιεί την ηλιακή ενέργεια από αρχαιοτάτων χρόνων για την επιβίωση του. Σήμερα εκμεταλλευόμαστε την ηλιακή ενέργεια με διάφορους τρόπους από ηλιακούς θερμοσίφωνες μέχρι παραβολικούς συλλέκτες και για διαφορετικούς σκοπούς από θέρμανση νερού μέχρι παραγωγή ισχύος.

Στην δύσκολη περίοδο στην οποία ζούμε λόγω οικονομικής κρίσης θα πρέπει να βρούμε τρόπους εξοικονόμησης ενέργειας τόσο για οικονομικούς λόγους όσο και για περιβαλλοντικούς σκοπούς. Σε αυτήν την κατεύθυνση θα συντελέσει η ανάπτυξη των ΑΠΕ. Οι πιο διαδεδομένες και οικονομικά συμφέρουσες είναι η Ηλιακή ενέργεια και η Αιολική ενέργεια. Η χώρα μας εξάλλου διαθέτει σε αφθονία όχι μόνο τις δύο αυτές πιο διαδεδομένες ΑΠΕ αλλά και όλες τις προαναφερθείσες. Ενώ περνώντας σε νομικό πλαίσιο, ως Εθνικό Σχέδιο Δράσης ορίζεται η επίτευξη της συμβολής των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας σε ποσοστό 20% στην τελική κατανάλωση ενέργειας, η μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά

20% και η εξοικονόμηση ενέργειας κατά 20% έως το 2020. Παρακάτω φαίνεται το διάγραμμα με τους αναλυτικούς στόχους μέχρι το 2020 για την διείσδυση των ΑΠΕ.



Σχήμα 1.1 Διείσδυση ΑΠΕ στο ενεργειακό ισοζύγιο [39]

Το κύριο μειονέκτημα των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας έναντι της παραγωγής ισχύος από συμβατικές μονάδες ορυκτών καυσίμων αποτελεί το γεγονός της διαθεσιμότητας. Με τα ορυκτά καύσιμα μπορούμε ανά πάσα στιγμή να καλύψουμε τις ανάγκες του δικτύου είτε αυτό είναι διασυνδεδεμένο είτε δεν είναι με την προϋπόθεση της εξόρυξης τους. Από την άλλη πλευρά οι ΑΠΕ δεν είναι πάντοτε διαθέσιμες και με την ίδια ισχύ κάθε φορά. Αυτό οφείλεται στην μεταβλητότητα που έχουν στον χρόνο οι πηγές ενέργειας. Η ηλιακή ενέργεια είναι αρκετά προβλέψιμη αφού ακολουθεί τον ήλιο μεγιστοποιούμενη το μεσημέρι. Το καλοκαίρι είναι περισσότερη και σε διάρκεια και σε ισχύ. Το γεγονός πως είναι σε μεγάλο βαθμό προβλέψιμη βοηθά στον σχεδιασμό συστημάτων για την εκμετάλλευση της καθώς μπορούμε μέχρι και ωριαία να προβλέψουμε την παραγόμενη ισχύς. Η αιολική ενέργεια από την άλλη πλευρά είναι αρκετά πιο απρόβλεπτη και επηρεάζεται πολύ από την μορφολογία του εδάφους. Δεν μπορούμε να προβλέψουμε την παραγόμενη ισχύς παρά μόνο εποχιακά ή ακόμη πιο συχνά σε ετήσια βάση. Η βιομάζα αν και φαίνεται να διαθέτει τις προϋποθέσεις για μια σταθερή τροφοδοσία ισχύος στο σύστημα παρουσιάζει αρκετά πρακτικά ζητήματα για τον σκοπό αυτό. Τα κυριότερα είναι πως για μεγάλη παραγωγή χρειαζόμαστε μεγάλη έκταση γης την οποία δεσμεύουμε για άλλα βρώσιμα φυτά και δεύτερον η παραγωγή φυτών με σκοπό την καύση τους ως βιομάζα δεν γίνεται όλο το χρόνο με αποτέλεσμα και πάλι την δέσμευση μεγαλύτερων εκτάσεων γης για την παραγωγή και μεγαλύτερων χώρων για την αποθήκευσή τους. Αναφορικά με

την γεωθερμία τα ποσά ενέργειας που μπορούμε να αντλήσουμε είναι ανάλογα με την έκταση και το βάθος της απαιτούμενης γης οπότε και σε αυτήν την ΑΠΕ έχουμε περιορισμούς. Παρ' όλα αυτά τα ποσά ενέργειας των ΑΠΕ είναι αρκετά μεγάλα σε μέγεθος.

Ο τρόπος με τον οποίο μπορούμε να αξιοποιήσουμε την ενέργεια αυτή αρκετά αποτελεσματικά αποτελεί μια ενδιάμεση αποθήκευση ενέργειας. Έχοντας μια διάταξη η οποία να αποθηκεύει την ενέργεια που παράγεται από τις ΑΠΕ και μετέπειτα να αποδίδει την αποθηκευμένη ενέργεια παράγοντας ηλεκτρισμό για τις καταναλώσεις του συστήματος, διασυνδεδεμένου ή μη διασυνδεδεμένου, μπορούμε να εκμεταλλευτούμε αποτελεσματικά τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας. Τόσο ο τρόπος αποθήκευσης όσο και ο τρόπος της μετέπειτα παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ποικίλουν, ωστόσο το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στον κατάλληλο συνδυασμό τους με σκοπό την μεγιστοποίηση της παραγόμενης ισχύος ανά μονάδα εκμεταλλεόμενης ισχύος.

Παρόμοιες εγκαταστάσεις έχουν ήδη μελετηθεί. Στην δημοσίευση του Constantin Luca, Daniel Dragomir-Stanciu μελετάται η αποθήκευση ηλιακής θερμικής ενέργειας σε υλικό αλλαγής φάσης (παραφίνη) και η μετέπειτα εκμετάλλευση της θερμικής αυτής ενέργειας μέσω ενός κύκλου ORC. Η μικρή θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στον ατμοποιητή (50°C) και στον συμπυκνωτή (22°C) οδηγούν σε μικρό θερμικό βαθμό απόδοσης του κύκλου ORC της τάξης του 6,55%. Το σύστημα μπορεί να παράγει ηλεκτρική ενέργεια 4-5 ώρες τις καλοκαιρινές ημέρες με επιλεγμένο οργανικό μέσο το R134a [47]. Η μελέτη των Kyoung Hoon Kim και Chul Ho Han εστιάζουν σε παρόμοια συστήματα με την διαφορά να έγκειται στο γεγονός πως το σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας δεν αποτελείται από υλικό αλλαγής φάσης αλλά από δεξαμενή νερού, δηλαδή η αποθήκευση ενέργειας γίνεται σε μεταβλητή και όχι σταθερή θερμοκρασία. Η λειτουργία του κύκλου ORC γίνεται μέσω των ηλιακών συλλεκτών και ως εργαζόμενο μέσο έχει επιλεγθεί το R245fa. Η μελέτη εστιάζει στην σύγκριση συγκεντρωτικών και μη συγκεντρωτικών ηλιακών συλλεκτών [48]. Και πάλι με αποθηκευτικό μέσο δεξαμενή νερού και οδηγούμενο από την ηλιακή ενέργεια μέσω ηλιακών συλλεκτών ο E. Bou Lawz Ksayer εστιάζει στον τρόπο λειτουργίας του κύκλου ORC κατά την διάρκεια της ηλιοφάνειας και κατά την διάρκεια της νύκτας. Κατά την διάρκεια της ηλιοφάνειας η θερμοκρασία του νερού είναι μεγαλύτερη και επομένως η θερμοκρασία του ατμοποιητή είναι υψηλότερη. Αυτό οδηγεί σε μεγαλύτερο θερμικό βαθμό απόδοσης (14,35%). Κατά την διάρκεια της νύκτας ο ατμοποιητής τροφοδοτείται από την δεξαμενή ζεστού νερού όπου έχει αποθηκευτεί θερμική ενέργεια. Σε αυτή την περίπτωση η θερμοκρασία του ατμοποιητή είναι χαμηλότερη με αποτέλεσμα ο θερμικός βαθμός

απόδοσης του ORC να μειώνεται στο 9,60%. Όλη η ανάλυση έχει γίνει με οργανικό μέσο το R245fa [49]. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη των D. Casartelli, M. Binotti, P. Silva, E. Macchi, E. Roccaro και T. Passera, καθώς γίνεται και οικονομική ανάλυση εγκατάστασης η οποία χρησιμοποιεί ηλιακή ενέργεια με ποικίλους τρόπους τροφοδοτώντας κύκλο ORC ονομαστικής ισχύος 5 MW. Το εργαζόμενο μέσο είναι το toluene, ενώ γίνεται ανάλυση για δύο τύπους ηλιακών συλλεκτών έναν με υψηλή και έναν με χαμηλότερη θερμοκρασία εξόδου νερού. Η οικονομική ανάλυση είναι λεπτομερής ενώ μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης εμφανίζει η περίπτωση με την υψηλότερη θερμοκρασία [50]. Η μελέτη των Villarini M., Bocci E., Moneti M., Di Carlo A., Micangeli A. έγινε με σκοπό την δημιουργία μονάδας παραγωγής ενέργειας με ανανεώσιμες πηγές με βαθμό απόδοσης παρεμφερή με τις συμβατικές μονάδες παραγωγής ενέργειας γιατί το κύριο μειονέκτημα του κύκλου ORC αποτελεί ο μικρός βαθμός απόδοσης. Η μελέτη γίνεται για μικρή εγκατεστημένη ισχύ δοκιμάζοντας διαφορετικά οργανικά μέσα πετυχαίνοντας βαθμούς απόδοσης περίπου ίσους με εκείνους των συμβατικών μονάδων. Εκτός από την παραγωγή ενέργειας γίνεται και παραγωγή ψυκτικής ισχύος. Χρησιμοποιώντας ηλιακούς θερμικούς συλλέκτες με βαθμό απόδοσης 12%, ψύκτη με COP 2 (ψυκτική ισχύς προς ηλεκτρική ενέργεια), θεωρώντας 65% βαθμό απόδοσης θερμικών ηλιακών συλλεκτών (θερμική ενέργεια προς ηλιακή ακτινοβολία) και 60% βαθμός απόδοσης του absorber (ψυκτική ισχύς προς θερμική ισχύς) επιτυγχάνεται συνολικός βαθμός απόδοσης κατά την λειτουργία της ψύξης ίσο με 39% [51]. Η έρευνα των K. BOGUCKA-BYKUC, W. WŁOSIŃSKI, and S. BYKUC εστιάζει στην συνεργασία υλικών αλλαγής φάσης (PCM) με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η ανάλυση είναι αρκετά λεπτομερείς και εστιάζει τόσο στο εύρος θερμοκρασίας που γίνεται η αλλαγής φάσης των υλικών αλλά και στις χαρακτηριστικές ιδιότητες τους όπως η αγωγιμότητα και άλλες χημικές ιδιότητες. Καταλήγει στο γεγονός πως τα υλικά αλλαγής φάσης μπορούν να συνδυαστούν με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αποτελεσματικά. Επίσης αναφέρεται πως πιο συχνά επιλέγονται οργανικά υλικά αλλαγής φάσης με μεταλλικά πρόσθετα για την βελτίωση της αγωγιμότητας του υλικού [52]. Παρόμοιο θέμα έχει και η μελέτη των S Halder, S Singh, S K Saha. Πιο συγκεκριμένα μελετάται η επίδραση μεταλλικού πλέγματος και αφρώδους υλικού με σκοπό την βελτίωση των ιδιοτήτων του υλικού αλλαγής φάσης και την καλύτερη εκμετάλλευση του με σκοπό την αποθήκευση θερμικής ενέργειας. Η μελέτη αυτή γίνεται τόσο κατά την αποθήκευση ενέργειας στο υλικό αλλαγής φάσης όσο και κατά την απόδοσης θερμικής ενέργειας στο οργανικό μέσο του κύκλου ORC που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ισχύος. Παρατηρείται πως με την προσθήκη ενισχυτών αγωγιμότητας το υλικό αλλαγής φάσης εμφανίζει καλύτερες ιδιότητες και επιπρόσθετα μειώνει τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας του οργανικού μέσου

στον ατμοποιητή του κύκλου ORC κατά την διάρκεια τόσο της αποθήκευσης ενέργειας όσο και κατά την διάρκεια απόδοσης ενέργειας [53]. Η μελέτη του M. Astolfi επικεντρώνεται στην τεχνοοικονομική βελτιστοποίηση χαμηλής θερμοκρασίας ηλιακών θερμικών συστημάτων συνδυασμένα με κύκλο ORC μικρής εγκατεστημένης ισχύς. Η μέγιστη θερμοκρασία των ηλιακών συλλεκτών είναι 160°C. Στα αποτελέσματα της μελέτης περιλαμβάνονται η αποτόνωση του ORC σε δύο εν σειρά στροβίλους, η λεπτομερής ανάλυση των πτώσεων πίεσης στο σύστημα και η ορθότητα των σχέσεων που δίνουν το κόστος της εγκατάστασης καθώς μικρές αλλαγές οδηγούν σε διαφορετικά αποτελέσματα. Στην μελέτη φαίνονται τα οικονομικά μεγέθη της εγκατάστασης που μελετάται με μεγάλη αναλυτικότητα. Τα οργανικά μέσα που χρησιμοποιούνται είναι το προπάνιο και το βουτάνιο [54]. Εν συνεχεία η έρευνα των F. Ferrara, A. Gimelli, A. Luongo ερευνά την σκοπιμότητα των μικρής ισχύος ORC τροφοδοτούμενα με ηλιακή ενέργεια. Τα οργανικά μέσα που εξετάζονται είναι το R134a, R245fa και ακετόνη. Η τελική επιλογή για την παραγωγή ισχύος είναι οι εμβολοφόροι εκτονωτές λόγω μικρής παροχής μάζας. Εξετάζονται 3 παραλλαγές του κλασικού κύκλου ORC. Η πρώτη είναι με υπερθέρμανση, η δεύτερη με υπερθέρμανση και αναγέννηση και η τρίτη με αναθέρμανση και αναγέννηση μόνο για την ακετόνη. Τα καλύτερα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην περίπτωση της ακετόνης για αναθέρμανση και αναγέννηση (19,9%), για την περίπτωση του R245fa και του R134a για υπερθέρμανση και αναγέννηση με βαθμούς απόδοσης 11,0% και 5,5% αντίστοιχα [55]. Την μελέτη ενός κύκλου ORC τροφοδοτούμενο από ηλιακούς θερμικούς συλλέκτες και λέβητα βιομάζας με ενδιάμεση αποθήκευση ενέργειας σε PCM εξετάζουν οι D. Krüger, A. Kenissi, S. Dieckmann, C. Bouden, A. Baba, A. Oliveira, J. Soares, E. Rojas Bravo, R. Ben Cheikh, F. Orioli, D. Gasperini, K. Hennecke, H. Schenk. Ο μέσος βαθμός απόδοσης του κύκλου ORC είναι 10,5% ενώ ο βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης που δείχνει την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς προς την ηλιακή ακτινοβολία υπολογίστηκε στα 3,9% [56]. Στην έρευνα των B. Kanimozhi, B. R. Ramesh Baru μελετάται η αποθήκευση θερμική ενέργειας ηλιακών συλλεκτών σε υλικό αλλαγής φάσης. Πιο συγκεκριμένα το νερό των ηλιακών συλλεκτών θερμαίνει το υλικό αλλαγής φάσης το οποίο βρίσκεται σε χάλκινους σωλήνες εντός της αποθηκευτικής δεξαμενής του νερού. Τα αποτελέσματα δείχνουν πως η παροχή του νερού των ηλιακών συλλεκτών αποτελεί σημαντικό παράγοντα για τον χρόνο φόρτισης του υλικού αλλαγής φάσης. Επίσης όσο μικρότερης διαμέτρου οι χάλκινοι σωλήνες που περιέχουν το υλικό αλλαγής φάσης τόσο πιο αποδοτική η μεταφορά θερμότητας [57]. Έχοντας αναλύσει μελέτες με παρόμοιο θέμα μπορούμε να συνεχίσουμε στην παρουσίαση θέματος της διπλωματικής.

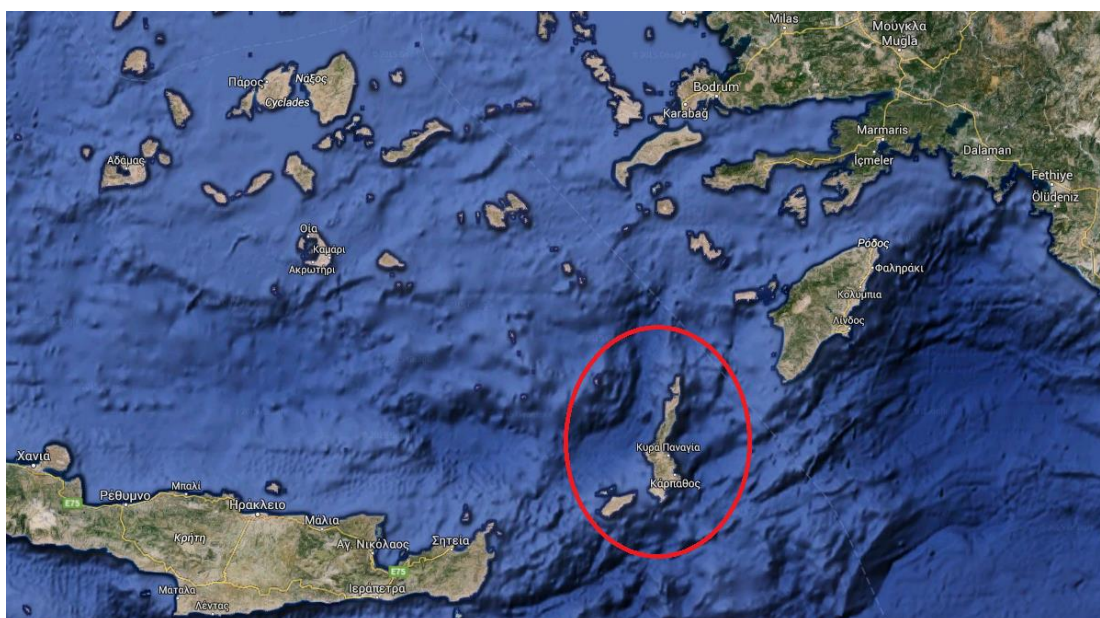
Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η εύρεση ενός συστήματος το οποίο να τροφοδοτείται από μια Ανανεώσιμη Πηγή Ενέργειας, να αποθηκεύει την ενέργεια αυτή και να παράγει ηλεκτρική ισχύς όταν την χρειαζόμαστε με τον πιο αποδοτικό τρόπο.



## Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>: Γενικά στοιχεία

### 2.1 Γενικά στοιχεία για το νησί της Καρπάθου

Η Κάρπαθος είναι το δεύτερο σε έκταση νησί του ελληνικού συμπλέγματος της Δωδεκανήσου (μετά την Ρόδο). Έχει έκταση 302,125 km<sup>2</sup>, 160 km μήκος ακτών και συνολικό πληθυσμό 7.113 κατοίκους σύμφωνα με την απογραφή του 2011. Βέβαια υπολογίζεται πως τους καλοκαιρινούς μήνες, λόγω των τουριστών και των Καρπάθιων που επισκέπτονται το νησί τους, ο πληθυσμός φτάνει τους 20.000 κατοίκους. Αποτελεί πλούσιο βιότοπο και για αυτό το λόγο διαθέτει προστατευόμενες περιοχές, όπου επιζούν πληθυσμοί προς εξαφάνιση. Βρίσκεται στην μέση του Καρπάθιου πελάγους μεταξύ Ρόδου και Κρήτης και έχει πρωτεύουσα τα Πηγάδια ή Κάρπαθος (2.280 κάτοικοι).



Χάρτης 2.1 Η Κάρπαθος [40]

Για την ονομασία του νησιού υπάρχουν πολλές εκδοχές. Ο θρύλος του νησιού αναφέρει ότι επειδή οι πρώτοι κάτοικοι αγαπούσαν υπερβολικά τον τόπο τους, έκλεψαν τους Ολύμπιους θεούς και τους έφεραν εδώ. Για την πράξη τους αυτή ονομάστηκαν Αρπάθιοι. Αργότερα μετατράπηκε σε Καρπάθιοι και τέλος σε Καρπάθιοι οπότε και η Κάρπαθος.

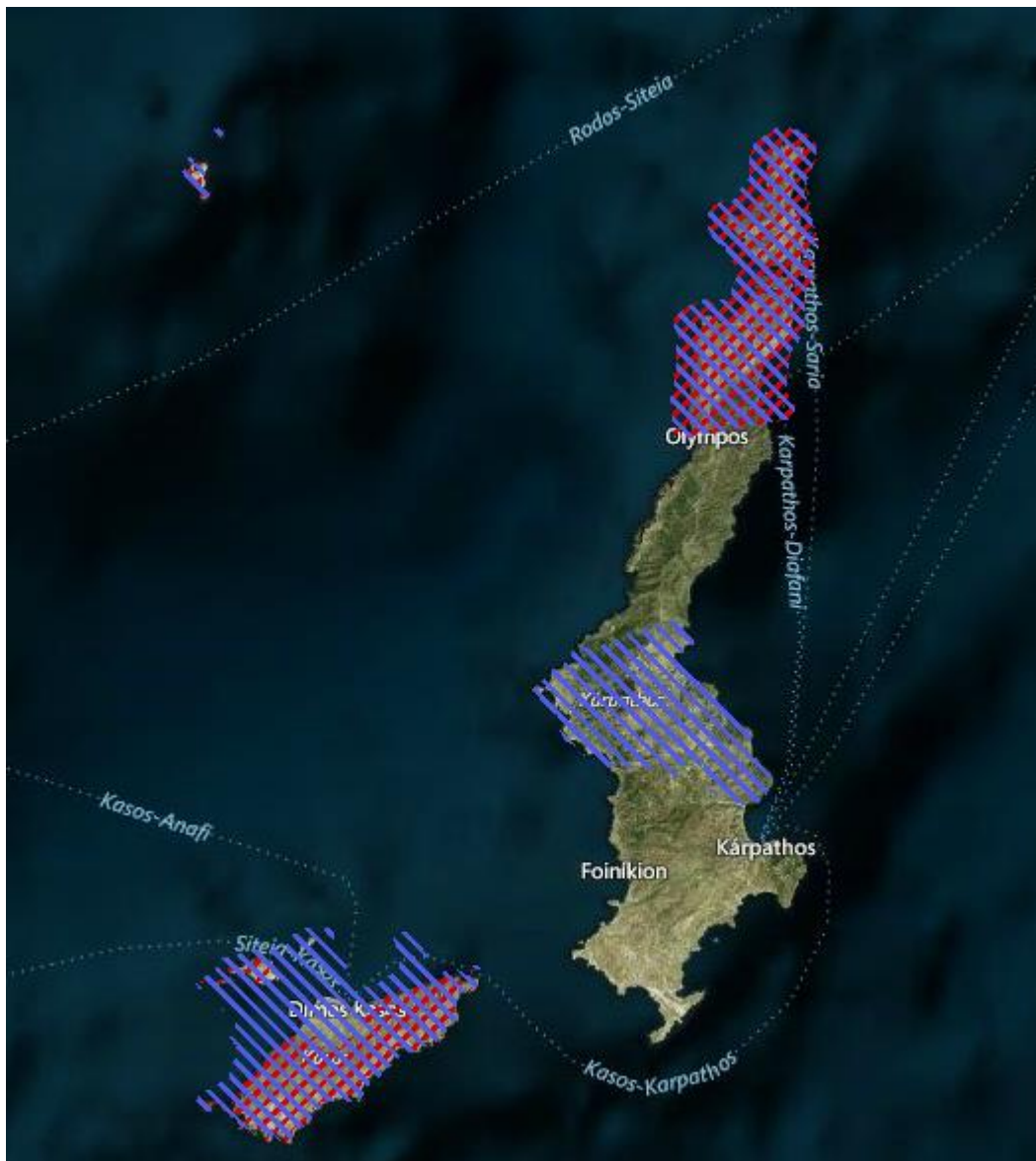
Το βραχώδες αλλά παλαιότερα καταπράσινο νησί, που όμως έχει πλέον καεί σε ένα μικρό μέρος του κυρίως στα νότια, χαρακτηρίζεται από τις ψηλές βουνοκορφές του, οι οποίες αγγίζουν τα 1.220 m. Βέβαια, διατηρεί ακόμα μέτριας έκτασης πυκνά και αραιότερα πευκοδάση στα βόρεια και στα κεντρονότια του νησιού. Συνδυάζει την ομορφιά του βουνού και της θάλασσας. Καθώς διαθέτει τόσο ψηλά βουνά και

απότομες χαράδρες, όσο και μικρούς κολπίσκους με κρυστάλλινα νερά. Μερικές από τις παραλίες της έχουν βραβευθεί με την τιμητική γαλάζια σημαία, λόγω της ασφάλειας, της οργάνωσης και της καθαριότητας τους. Στα βόρεια του νησιού εκτείνεται η ακατοίκητη νησίδα Σαρία, με την οποία η Κάρπαθος παλαιότερα ήταν ενωμένη.

Η Κάρπαθος διαθέτει 2 περιοχές που εντάσσονται στο δίκτυο NATURA λόγω των σπάνιων ενδημικών ειδών φυτών και ζώων. Η μία βρίσκεται στην κεντρική Κάρπαθο, ενώ η άλλη στην Βόρεια Κάρπαθο.

Η πρώτη περιοχή NATURA βρίσκεται στην κεντρική Κάρπαθο και οριοθετείται από τους κόλπους Λαρές, Αδείας, Βροντή και το ακρωτήριο Μάραθος. Πρόκειται για το πιο ορεινό και το πιο πράσινο τμήμα του νησιού. Το μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής καλύπτεται από το βουνό Καλή Λίμνη με μέγιστο υψόμετρο 1.215 m. Εδώ υπάρχουν εκτεταμένα δάση κωνοφόρων, γκρεμοί, σάρες, χάσματα, μικρά φαράγγια (που είναι χαρακτηριστικά του νησιού), καθώς και πηγές με τρεχούμενο νερό, οι οποίες περιβάλλονται από βλάστηση με υδροχαρή φυτά. Κατά μήκος των ακτών της περιοχής συναντώνται απότομοι γκρεμοί και περιορισμένης έκτασης αμμώδης παραλίες.

Η δεύτερη περιοχή NATURA περιλαμβάνει το βόρειο τμήμα της Καρπάθου (με όρια τα χωριά Όλυμπος και Διαφάνι προς το νότο) και το νησί Σαρία στο βορειότερο σημείο του νησιού. Τα 2 νησιά χωρίζονται από ένα κανάλι πλάτους 80 μέτρων. Η βόρεια Κάρπαθος στο μεγαλύτερο μέρος της είναι ορεινή (μέγιστο υψόμετρο 589 m) και χαρακτηρίζεται από απότομες βραχώδης πλαγιές. Στην ανατολική πλευρά συναντάμε πευκοδάση. Ο κόλπος του Τριστόμου στο νότιο τμήμα του νησιού θεωρείται η πιο σημαντική περιοχή θαλάσσιου οικοσυστήματος της Καρπάθου. Πρόκειται για ένα κλειστό κόλπο που σχηματίζει ένα φυσικό λιμάνι με την είσοδο του στην δυτική πλευρά. Αυτή η περιοχή είναι ο βιότοπος πολλών ειδών φυτών και ζώων που βρίσκονται υπό εξαφάνιση. Παρακάτω φαίνονται στο χάρτη οι δυο προστατευόμενες περιοχές.



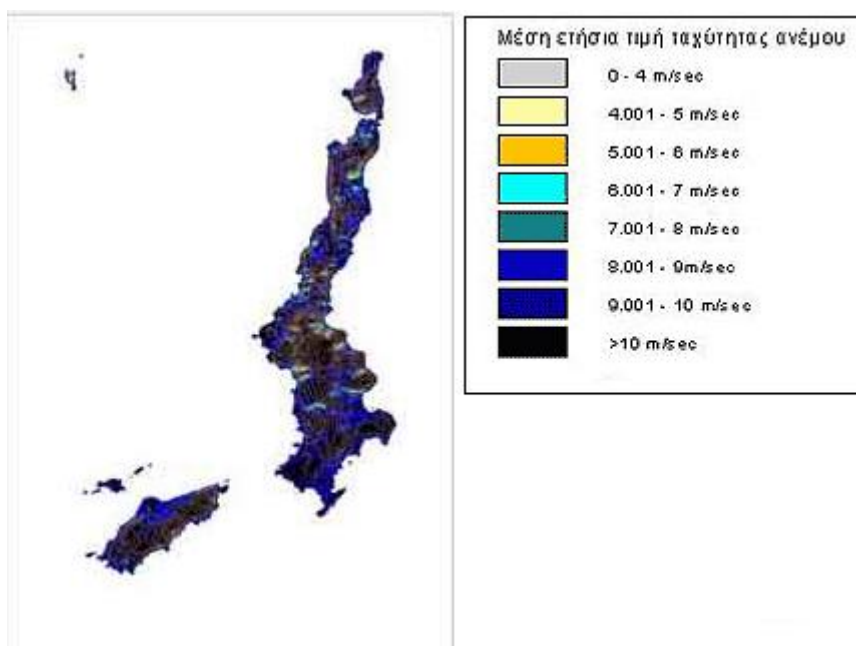
Χάρτης 2.2 Περιοχές NATURA στο νησί της Καρπάθου [40]

Παρ' όλο που βάσει νομοθεσίας δίνεται η δυνατότητα χωρομέτρησης ΑΠΕ στις περιοχές NATURA, αρκεί αυτές να μην έχουν κηρυχθεί αναδασωτέες εκτάσεις, στην διπλωματική εργασία θα τις θεωρήσουμε πιθανές θέσεις για την εγκατάσταση μας.

Οι κυρίαρχοι λόγοι επιλογής της Καρπάθου ως μέρος για την λειτουργία της εγκατάστασης μας είναι:

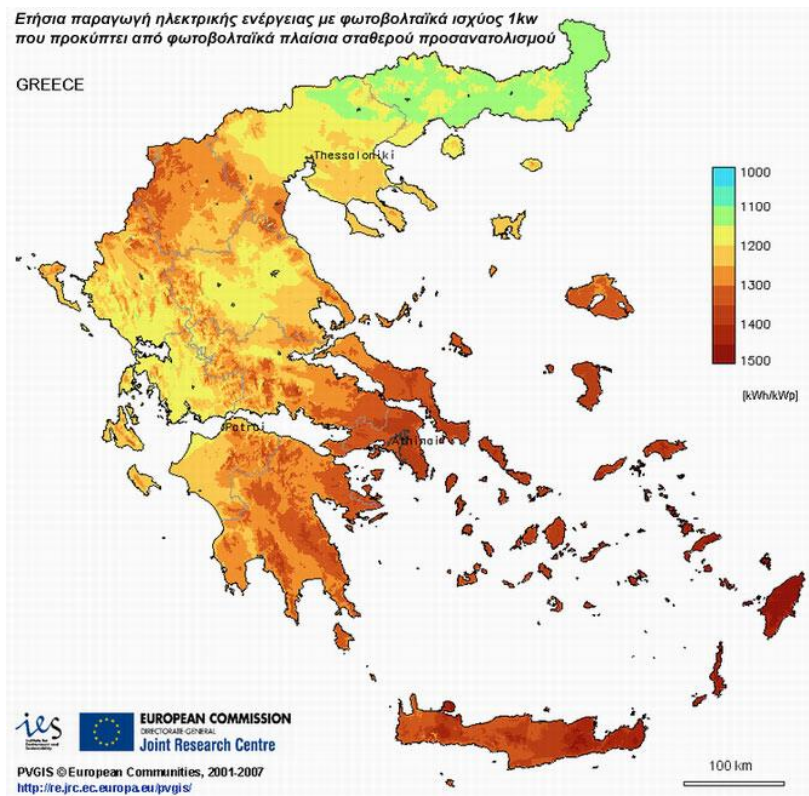
- Το γεγονός πως αποτελεί μη διασυνδεδεμένο δίκτυο
- Το πλούσιο αιολικό και ηλιακό δυναμικό του νησιού
- Οι ανάγκες του νησιού σε ηλεκτρική ενέργεια (όχι πολύ μεγάλες, όχι πολύ μικρές)

Το γεγονός ότι το δίκτυο του νησιού είναι μη διασυνδεδεμένο αποτελεί αναγκαία προϋπόθεση καθώς σε αυτήν την περίπτωση η αποθήκευση ενέργειας κρίνεται ακόμη μεγαλύτερης σημασίας από ότι στο διασυνδεδεμένο σύστημα. Παράλληλα οι ανάγκες του νησιού σε ηλεκτρική ενέργεια παρουσιάζονται κατάλληλες για την εγκατάσταση ενός συστήματος με ικανοποιητική εγκατεστημένη ισχύς. Το αιολικό δυναμικό της Καρπάθου μπορούμε να το δούμε στο παρακάτω σχήμα όπου φαίνεται η μέση ετήσια τιμή της ταχύτητας του ανέμου η οποία είναι αρκετά υψηλή. Επομένως καταλαβαίνουμε πως η ύπαρξη ενός αιολικού πάρκου στο νησί φαίνεται να είναι μια πολύ καλή επιλογή.



Χάρτης 2.3 Μέτρηση ετήσιας τιμής ταχύτητας ανέμου για την Κάρπαθο [41]

Όπως το αιολικό έτσι και το ηλιακό δυναμικό είναι αρκετά ικανοποιητικό στο νησί της Καρπάθου. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το ηλιακό δυναμικό της Ελλάδας. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε η Κάρπαθος βρίσκεται στην περιοχή όπου το ηλιακό δυναμικό είναι το μεγαλύτερο της χώρας. Επομένως κάθε είδους ηλιακή εγκατάσταση θα παρήγαγε τα μέγιστα σε σχέση με οπουδήποτε αλλού στην Ελλάδα.



Χάρτης 2.4 Ένδειξη του ηλιακού δυναμικού στην Ελλάδα [26]

## 2.2 Γενικά στοιχεία μελετώμενων μεγεθών

Σε αυτή την παράγραφο θα εξετάσουμε όλα τα απαραίτητα κομμάτια για την κατανόηση της εγκατάστασης που μελετάμε. Ξεκινώντας από τις πηγές ενέργειας με κυρίαρχη την ηλιακή ενέργεια αλλά και σε δεύτερο ρόλο την αιολική ενέργεια, μέχρι το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας, την χρήση αντλιών θερμότητας και τον κύκλο ORC (Organic Rankine Cycle).

### 2.2.1 Ηλιακή ενέργεια

Με τον όρο ηλιακή ενέργεια χαρακτηρίζουμε ένα σύνολο από μορφές ενέργειας προερχόμενες από τον ήλιο. Αυτές οι μορφές ενέργειας είναι η φωτεινή ενέργεια, η θερμική ενέργεια και η ενέργεια ακτινοβολίας. Η ηλιακή ενέργεια στο σύνολό της είναι πρακτικά ανεξάντλητη, καθώς προέρχεται από τον ήλιο, και ως εκ τούτου δεν υπάρχουν περιορισμοί χώρου και χρόνου για την εκμετάλλευσή της. Η ηλιακή ενέργεια αν και δεν είναι διαθέσιμη καθ' όλη την διάρκεια της ημέρας μπορούμε να εκτιμήσουμε τόσο τις ώρες που είναι διαθέσιμη για κάθε ημέρα όσο και την ισχύ της επίσης κάθε ώρα της ημέρας. Λόγω των γνώσεων μας για την σχετική κίνηση

Ήλιου-Γης είμαστε σε θέση να κάνουμε μια εκ των προτέρων πρόβλεψη σχετικά με την ένταση της ηλιακής διαθέσιμης ισχύος ανάλογα με την περιοχή που εξετάζουμε με ικανοποιητική ακρίβεια. Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να σχεδιάσουμε καλύτερα και πιο αποδοτικά τα ηλιακά συστήματα κάθε είδους με σκοπό την βέλτιστη λειτουργία τους. Όσον αφορά την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας, θα μπορούσαμε να πούμε ότι χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες εφαρμογών: τα παθητικά ηλιακά συστήματα, τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα και τα φωτοβολταϊκά συστήματα. Τα παθητικά και τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα εκμεταλλεύονται τη θερμότητα που εκπέμπεται μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ τα φωτοβολταϊκά συστήματα στηρίζονται στην μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρικό ρεύμα μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου.

Στην διπλωματική εργασία θα ασχοληθούμε με δυο από τις τρεις εφαρμογές, τα φωτοβολταϊκά που είναι ήδη εγκατεστημένα στο νησί της Καρπάθου και τα ενεργητικά ηλιακά που θα περιλαμβάνονται στην εγκατάσταση μας.

Τα **φωτοβολταϊκά συστήματα** εκμεταλλεόμενα το φωτοβολταϊκό φαινόμενο παράγουν ηλεκτρική ενέργεια από την ηλιακή ενέργεια. Ένα φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται από ένα ή περισσότερα πάνελ φωτοβολταϊκών στοιχείων, μαζί με τις απαραίτητες συσκευές και διατάξεις για την μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται στην επιθυμητή μορφή.

Το φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι συνήθως τετράγωνο με πλευρά 120-160 mm. Δύο τύποι πυριτίου χρησιμοποιούνται για την δημιουργία φωτοβολταϊκών στοιχείων: το άμορφο και το κρυσταλλικό πυρίτιο, ενώ το κρυσταλλικό πυρίτιο διακρίνεται σε μονοκρυσταλλικό ή πολυκρυσταλλικό. Το άμορφο και το κρυσταλλικό πυρίτιο παρουσιάζουν τόσο πλεονεκτήματα όσο και μειονεκτήματα και κατά την μελέτη του φωτοβολταϊκού συστήματος γίνεται η αξιολόγηση των ειδικών συνθηκών της εφαρμογής (κατεύθυνση και διάρκεια της ηλιοφάνειας, τυχόν σκιάσεις κλπ.) ώστε να επιλεγεί η κατάλληλη τεχνολογία.



Σχήμα 2.5 Φωτοβολταϊκή συστοιχία [4]

Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από μια Φ/Β συστοιχία είναι συνεχούς ρεύματος (DC), και για αυτό τον λόγο οι πρώτες χρήσεις των φωτοβολταϊκών αφορούσαν εφαρμογές DC τάσης: με κλασικά παραδείγματα να είναι ο υπολογιστής τσέπης και οι δορυφόροι. Με την προοδευτική αύξηση του βαθμού απόδοσης όμως, δημιουργήθηκαν ειδικές συσκευές, οι αναστροφείς (inverters), που σκοπό έχουν να μετατρέψουν την έξοδο συνεχούς τάσης της Φ/Β συστοιχίας σε εναλλασσόμενη τάση. Με αυτόν τον τρόπο, το Φ/Β σύστημα είναι σε θέση να τροφοδοτήσει μια σύγχρονη εγκατάσταση (κατοικία, θερμοκήπιο, μονάδα παραγωγής κλπ.) που χρησιμοποιεί κατά κανόνα συσκευές εναλλασσόμενου ρεύματος (AC).

Ο βαθμός απόδοσης εκφράζει το ποσοστό ηλιακής ακτινοβολίας που μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια στο φωτοβολταϊκό στοιχείο. Τα πρώτα φωτοβολταϊκά στοιχεία, που σχεδιάστηκαν τον 19ο αιώνα, δεν είχαν παρά 1-2% απόδοση, ενώ το 1954 τα εργαστήρια Bell Laboratories δημιούργησαν τα πρώτα Φ/Β στοιχεία πυριτίου με απόδοση 6%. Στην πορεία του χρόνου όλο και αυξάνεται ο βαθμός απόδοσης: η αύξηση της απόδοσης, έστω και κατά μια ποσοστιαία μονάδα, θεωρείται επίτευγμα στην τεχνολογία των φωτοβολταϊκών. Στην σημερινή εποχή ο τυπικός βαθμός απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου βρίσκεται στο 13-19%, ο οποίος συγκρινόμενος με την απόδοση άλλου συστήματος (συμβατικού, αιολικού, υδροηλεκτρικού κλπ.), παραμένει ακόμη αρκετά χαμηλός. Αυτό σημαίνει ότι το φωτοβολταϊκό σύστημα καταλαμβάνει μεγάλη επιφάνεια προκειμένου να αποδώσει την επιθυμητή ηλεκτρική ισχύ. Ωστόσο, η απόδοση ενός δεδομένου

συστήματος μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά με την τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών σε ηλιοστάτη. Οι προϋποθέσεις αξιοποίησης των Φ/Β συστημάτων στην Ελλάδα είναι από τις καλύτερες στην Ευρώπη, αφού η συνολική ενέργεια που δέχεται κάθε τετραγωνικό μέτρο επιφάνειας στην διάρκεια ενός έτους κυμαίνεται από 1400-1800 kWh. Ο βαθμός απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου επηρεάζεται και από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος με την απόδοση να μειώνεται όταν η θερμοκρασία αυξάνεται. Αυτό σημαίνει πως παρ' όλο την ηλιοφάνεια που επικρατεί αν η θερμοκρασία του περιβάλλοντος είναι υψηλή εν τέλει δεν θα έχουμε καλό βαθμό απόδοσης. Μια λύση για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος είναι η τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών συστημάτων σε περιοχές με ανέμους ώστε να ψύχεται φυσικά το φωτοβολταϊκό στοιχείο [4].

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα παρουσιάζουν τα εξής πλεονεκτήματα [4]:

- Τεχνολογία φιλική στο περιβάλλον: δεν προκαλούνται ρύποι από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
- Η ηλιακή ενέργεια είναι ανεξάντλητη ενεργειακή πηγή, διατίθεται παντού και δεν κοστίζει απολύτως τίποτα
- Με την κατάλληλη γεωγραφική κατανομή, κοντά στους αντίστοιχους καταναλωτές ενέργειας, τα Φ/Β συστήματα μπορούν να εγκατασταθούν χωρίς να απαιτείται ενίσχυση του δικτύου διανομής
- Η λειτουργία του συστήματος είναι ολοσχερώς αθόρυβη
- Έχουν σχεδόν μηδενικές απαιτήσεις συντήρησης
- Έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής: οι κατασκευαστές εγγυώνται τα «κρύσταλλα» για 20-30 χρόνια λειτουργίας
- Υπάρχει πάντα η δυνατότητα μελλοντικής επέκτασης, ώστε να ανταποκρίνονται στις αυξανόμενες ανάγκες των χρηστών
- Μπορούν να εγκατασταθούν πάνω σε ήδη υπάρχουσες κατασκευές, όπως π.χ. η στέγη ενός σπιτιού ή η πρόσοψη ενός κτιρίου
- Διαθέτουν ευελιξία στις εφαρμογές: τα Φ/Β συστήματα λειτουργούν άριστα τόσο ως αυτόνομα συστήματα, όσο και ως αυτόνομα υβριδικά συστήματα όταν συνδυάζονται με άλλες πηγές ενέργειας και συσσωρευτές για την αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας. Επιπλέον, ένα μεγάλο πλεονέκτημα του Φ/Β συστήματος είναι ότι μπορεί να διασυνδεθεί με το δίκτυο ηλεκτροδότησης (διασυνδεδεμένο σύστημα), καταργώντας με τον τρόπο αυτό την ανάγκη για εφεδρεία και δίνοντας επιπλέον τη δυνατότητα στον χρήστη να πουλήσει τυχόν πλεονάζουσα ενέργεια στον διαχειριστή του ηλεκτρικού δικτύου.



Ως μειονέκτημα θα μπορούσε να καταλογίσει κανείς στα φωτοβολταϊκά συστήματα το κόστος τους, το οποίο παρά τις τεχνολογικές εξελίξεις παραμένει ακόμη υψηλό σε σχέση με την απόδοσή τους.

Από την άλλη πλευρά τα **ηλιοθερμικά συστήματα** συλλέγουν ηλιακή ακτινοβολία και την μετατρέπουν σε θερμική ενέργεια που μετέπειτα μπορεί να παράξει ηλεκτρισμό. Υπάρχουν διάφορα είδη ηλιοθερμικών συστημάτων και η διαφορά τους έγκειται στο βαθμό θερμότητας που μπορούν να παράξουν δηλαδή ως χαμηλής, μέσης ή υψηλής θερμοκρασίας συλλέκτες. Τα ηλιοθερμικά συστήματα υψηλής θερμοκρασίας που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρισμού, είναι πιο αποδοτικά από τα φωτοβολταϊκά.

Η χαμηλή και μέσης θερμοκρασίας συλλέκτες είναι επίπεδες πλάκες που παγιδεύουν την ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιώντας το φαινόμενο του θερμοκηπίου για να ζεστάνουν νερό μέσα στο πλαίσιο. Αυτά τα συστήματα δεν παράγουν ηλεκτρισμό αλλά ζεστό νερό για οικιακή ή βιομηχανική χρήση.

Οι συλλέκτες με σωλήνες κενού (vacuum tubes) παγιδεύουν την ηλιακή ενέργεια στο εσωτερικό του γυαλοσωλήνα κενού (το κενό αέρος έχει τον μικρότερο συντελεστή θερμικής απώλειας), με αποτέλεσμα να έχουμε χαμηλές ως μηδαμινές θερμικές απώλειες στο περιβάλλον. Πετυχαίνοντας έτσι υψηλότερες θερμοκρασίες από τους συμβατικούς συλλέκτες σε συνθήκες κρύου καιρού αλλά η απόδοσή τους είναι πιο μικρή σε συνθήκες πλήρους ηλιοφάνειας. Επιπρόσθετα οι συλλέκτες με σωλήνες κενού, έχουν ωφέλιμη ζωή πάνω από 25 χρόνια, σε αντίθεση με τους συμβατικούς συλλέκτες που η απόδοσή τους μειώνεται σταδιακά με την πάροδο του χρόνου. Παγκόσμιες έρευνες έχουν αποδείξει ότι η απόδοσή τους σε σχέση με τους επίπεδους συλλέκτες είναι 30-40% μεγαλύτερη. Επίσης μετά από 10-15 χρόνια το μέγιστο που μπορούν να χάσουν σε απόδοση είναι 40% που σημαίνει ότι μετά από 15 χρόνια θα έχουν περίπου την ίδια απόδοση με τους επίπεδους συλλέκτες.

Αντίθετα, οι υψηλής θερμοκρασίας συλλέκτες συγκεντρώνουν την ηλιακή ενέργεια με κάτοπτρα ή φακούς σε ένα νεπόζιτο νερού μετατρέποντας το σε ατμό, ο οποίος στην συνέχεια κινεί ατμογεννήτρια παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια. Για να λειτουργήσουν αποδοτικά, τα ηλιοθερμικά συστήματα χρειάζονται άμεση πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας στους συλλέκτες ή τα κάτοπτρα. Εάν δεν υπάρχει ηλιοφάνεια η απόδοσή τους μειώνεται αισθητά.

Μια άλλη κατηγορία υψηλής θερμοκρασίας συλλεκτών είναι τα συστήματα παραβολικών κοίλων (PTC). Τα PTC είναι γραμμικές συγκεντρώσεις συσκευές κατάλληλες για λειτουργία σε θερμοκρασίες 150-400°C. Ένα PTC σύστημα αποτελείται από ένα παραβολικό κοίλο κάτοπτρο που ανακλά την απευθείας

ηλιακή ακτινοβολία και την συγκεντρώνει σε ένα δέκτη σωληνοειδή που βρίσκεται στην εστιακή γραμμή της παραβολής. Η συγκέντρωση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας μειώνει την επιφάνεια απορρόφησης σε σχέση με την περιοχή παραθύρου του συλλέκτη και συνεπώς μειώνει σημαντικά τις συνολικές θερμικές απώλειες. Η συμπυκνωμένη ακτινοβολία θερμαίνει το υγρό που κυκλοφορεί μέσω του σωληνοειδούς δέκτη, μετατρέποντας έτσι την ηλιακή ακτινοβολία σε θερμική ενέργεια με τη μορφή αισθητή θερμότητας του ρευστού [5].

Ως ρευστό λειτουργίας σε αυτούς τους συλλέκτες χρησιμοποιούνται συνήθως θερμικά έλαια για θερμοκρασίες πάνω από τους 200 °C, επειδή σε αυτές τις υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας, το κανονικό νερό θα παρουσίαζε υψηλή πίεση στο εσωτερικό του σωλήνα και τις σωληνώσεις του δέκτη. Αυτή η υψηλή πίεση θα απαιτούσε ισχυρότερες αρθρώσεις και σωληνώσεις και επομένως αυξημένη τιμή των συλλεκτών και ολόκληρου του ηλιακού πεδίου.

Ωστόσο, η χρήση ασφαλισμένου νερού για υψηλή θερμοκρασία/πίεση βρίσκεται υπό έρευνα στο PSA και τα συστήματα άμεσης παραγωγής ατμού (Direct Steam Generation (DSG)) στους 100 bar / 400°C μέσα στους σωλήνες του δέκτη PTC έχουν ήδη αποδειχθεί σε πειραματικό στάδιο. Για θερμοκρασίες κάτω των 200°C ένα μείγμα νερού/γλυκόλης, αιθυλενίου ή πεπιεσμένου νερού σε υγρή μορφή (liquid phase) μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υγρό επεξεργασίας γιατί η πίεση που απαιτείται στην υγρή μορφή είναι μέτρια.



Σχήμα 2.6 Ηλιακός παραβολικός συλλέκτης PTC-1000 [42]

Τέτοιου είδους συλλέκτες τύπου PTC-1000 θα χρησιμοποιηθούν για την εγκατάσταση μας με σκοπό την θέρμανση νερού όπως θα αναφέρουμε αναλυτικά σε επόμενο κεφάλαιο.

### **2.2.2 Αιολική ενέργεια**

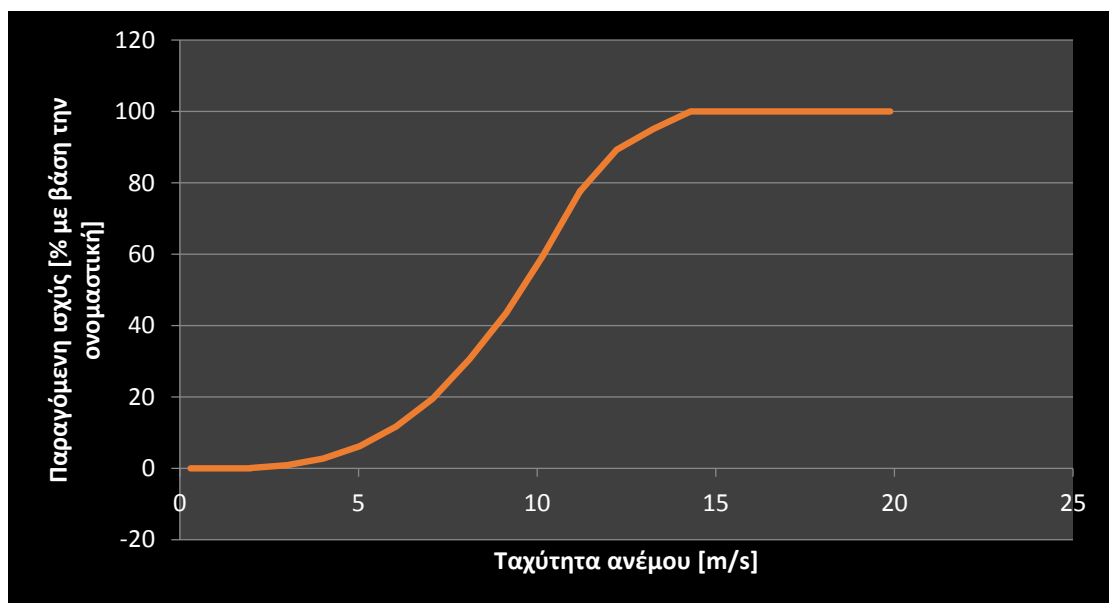
Αιολική ενέργεια όπως προαναφέραμε ονομάζεται η κινητική ενέργεια του ανέμου και οφείλεται κυρίως στην θέρμανση της Γης από τον Ήλιο. Περίπου το 2% της ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει στη Γη μετατρέπεται σε αιολική ενέργεια η οποία υπολογίζεται σε 3,6 δις MW. Η αιολική ενέργεια μας προσφέρει την δυνατότητα να παράγουμε ηλεκτρισμό χωρίς να επιβαρύνουμε το περιβάλλον. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις περιορίζονται κυρίως στην οπτική όχληση, σε αντίθεση με τις συμβατικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που ζημιώνουν το περιβάλλον με τα απόβλητα τους (στερεά, υγρά και αέρια) και τους πυρηνικούς σταθμούς. Ο άνεμος έχει χρησιμοποιηθεί ως πηγή ενέργειας από τα πανάρχαια χρόνια στη ναυτιλία για την κίνηση ιστιοφόρων πλοίων, αλλά και σε αγροτικές εφαρμογές για άντληση νερού ή άλεση σιτηρών. Οι σύγχρονες μηχανές εκμετάλλευσης του ανέμου για παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ονομάζονται Ανεμογεννήτριες. Η τεχνολογική ωριμότητα των ανεμογεννητριών δεν επιτυγχάνεται νωρίτερα από τα τέλη της δεκαετίας του 70. Η Ελλάδα διαθέτει αποδεδειγμένα πλέον πολύ καλό αιολικό δυναμικό. Έχουν γίνει κατά καιρούς μετρήσεις του αιολικού δυναμικού από διάφορους φορείς.

Παρ' όλα τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η αιολική ενέργεια υπάρχουν και μειονεκτήματα όπως η απρόβλεπτη και έντονη διακύμανση που παρουσιάζει η ισχύς των ανεμογεννητριών, ο εκπεμπόμενος θόρυβος και η οπτική όχληση. Ωστόσο με την εξέλιξη της τεχνολογίας τα δυο πρώτα μειονεκτήματα που αναφέρθηκαν έχουν βελτιωθεί αρκετά, γεγονός που συνεπάγεται φυσικά αύξηση του κόστους αγοράς. Όσον αφορά την οπτική όχληση, αποτελεί ένα καθαρά υποκειμενικό κριτήριο και εξαρτάται από την αισθητική του κάθε ανθρώπου.



Σχήμα 2.7 Ανεμογεννήτριες [7]

Προκειμένου να υπολογίσουμε την παραγόμενη ισχύς της ανεμογεννήτριας γνωρίζοντας την ταχύτητα του ανέμου χρειαζόμαστε την καμπύλη ισχύος της η οποία μας δίνει την σχέση της παραγόμενης ισχύος συναρτήσει την ταχύτητα του ανέμου. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται μια τυπική καμπύλη ισχύος με την παραγόμενη ισχύς να αναγράφεται σε ποσοστό την ονομαστική ισχύς της ανεμογεννήτριας.



Σχήμα 2.8 Καμπύλη ισχύος Ανεμογεννήτριας [61]

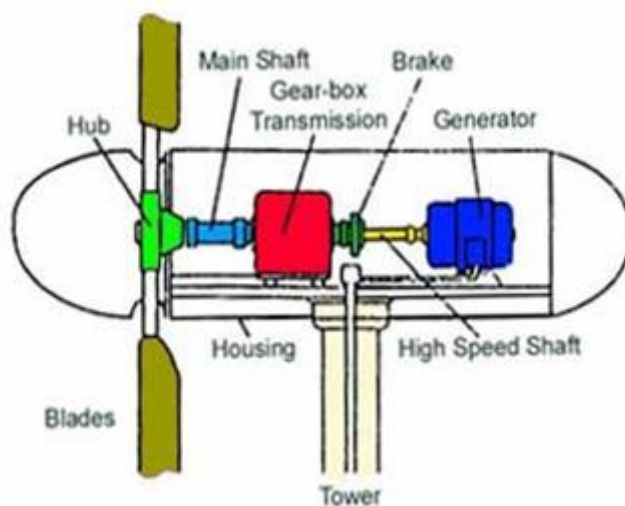
Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε τρία χαρακτηριστικά σημεία. Το πρώτο είναι η ταχύτητα έναρξης λειτουργίας ( $V_{cut-in}$ ) όπου η ανεμογεννήτρια ξεκινά να παράγει ισχύ. Το σημείο αυτό στο διάγραμμα μας φαίνεται για ταχύτητα περίπου

ίση με 3 m/s όπου ξεκινά να έχει θετικές τιμές η παραγόμενη ισχύς. Το δεύτερο σημείο είναι η ονομαστική ταχύτητα ( $V_R$ ) όπου είναι η μικρότερη ταχύτητα για την οποία η μηχανή παράγει την ονομαστική της ισχύς. Στο διάγραμμά μας αυτή η ταχύτητα αντιστοιχεί περίπου στα 15 m/s. Επιπλέον έχουμε και την ταχύτητα διακοπής λειτουργίας ( $V_F$ ) όπου η μηχανή τίθεται εκτός λειτουργίας για να προστατευτεί από τον πολύ δυνατό άνεμο.

### Κύρια μέρη ανεμογεννητριών

Τα κύρια μέρη από τα οποία αποτελείται μια ανεμογεννήτρια είναι [8]:

- Ο πύργος στήριξης πάνω στον οποίο τοποθετείται η άτρακτος και ο ρότορας. Είναι κυλινδρικής μορφής και συνήθως αποτελείται από δυο ή τρία συνδεδεμένα τμήματα.
- Ο θάλαμος ή αλλιώς άτρακτος που περιέχει τα μηχανικά υποσυστήματα που είναι ο κύριος άξονας, το σύστημα πέδησης (δισκόφρενο), το κιβώτιο ταχυτήτων, η ηλεκτρογεννήτρια και η διάταξη προσανατολισμού.
- Τα ηλεκτρονικά συστήματα ελέγχου ασφαλούς λειτουργίας που εξασφαλίζουν την ασφαλή λειτουργία της ανεμογεννήτριας σε όλες τις συνθήκες.
- Τα πτερύγια τα οποία μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε μηχανική ενέργεια περιστρέφοντας την κυρία άτρακτο.



Σχήμα 2.9 Μηχανικά υποσυστήματα της άτρακτου ανεμογεννήτριας [43]

Η Ελλάδα είναι μια χώρα με μεγάλη ακτογραμμή και τεράστιο πλήθος νησιών. Ως εκ τούτου, οι ισχυροί άνεμοι που πνέουν κυρίως στις νησιωτικές και παράλιες περιοχές προσδίδουν ιδιαίτερη σημασία στην ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας

στην χώρα. Το εκμεταλλεύσιμο αιολικό δυναμικό εκτιμάται ότι αντιπροσωπεύει το 13,6% του συνόλου των ηλεκτρικών αναγκών της χώρας.

Ενέργειες για την ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας έχουν γίνει σε ολόκληρη την χώρα, ενώ στο γεγονός αυτό έχει συμβάλει και η πολιτική της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τις ΑΠΕ, η οποία ενθαρρύνει και επιδοτεί επενδύσεις στις Ήπιες μορφές ενέργειας. Αλλά και σε εθνική κλίμακα παρέχονται ισχυρά κίνητρα ακόμα και για επενδύσεις μικρής κλίμακας.

Η περιφέρεια της Δυτικής Ελλάδας αν και έχει μικρότερο αιολικό δυναμικό σε σχέση με άλλες περιοχές της Ελλάδας, διαθέτει ένα ισχυρό ηλεκτρικό δίκτυο και το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την ύπαρξη ανεμωδών «νησίδων» (λόφοι, υψώματα κλπ. με εκμεταλλεύσιμο αιολικό δυναμικό) την καθιστούν ενδιαφέρουσα για την ανάπτυξη αιολικών πάρκων.

### **2.2.3 Τρόποι αποθήκευσης θερμικής ενέργειας**

Ο πιο γνωστός τρόπος αποθήκευσης θερμικής ενέργειας είναι με την μορφή αισθητής θερμότητας. Πιο αναλυτικά η θερμότητα μεταφέρεται στο υλικό αποθήκευσης αυξάνοντας την θερμοκρασία του. Προτιμώνται τα υλικά αυτά τα οποία έχουν μεγαλύτερη θερμοχωρητικότητα ώστε η αύξηση της θερμοκρασίας να είναι μικρότερη για το ίδιο ποσό αποθηκευμένης θερμότητας. Για αυτό το λόγο αποφεύγονται όλα τα αέρια ενώ προτιμάται κυρίως το νερό για τις συνήθεις εφαρμογές όπως είναι δεξαμενές νερού.

Ένας δεύτερος τρόπος αποθήκευσης θερμότητας αποτελεί η υπόγεια αποθήκευση. Οι κύριες μέθοδοι αποθήκευσης είναι η αποθήκευση γεώτρησης (borehole storage), η αποθήκευση σε υδροφόρο ορίζοντα (aquifer storage), η αποθήκευση σε σπήλαιο (cavern storage) και η αποθήκευση σε κοίλωμα. Κύριες εφαρμογές των παραπάνω μεθόδων αποθήκευσης ενέργειας αποτελούν κυρίως μεγάλης χρονικής διάρκειας αποθήκευση μέχρι και εποχιακές όπως πρόσφατα εξετάζονται.

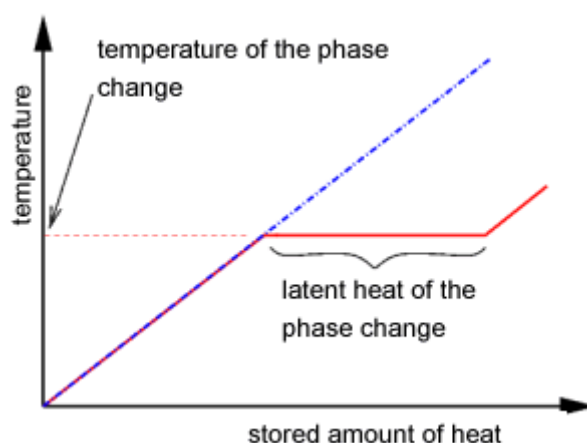
Επιπλέον μια τρίτη μέθοδος αποθήκευσης θερμότητας είναι η αποθήκευση μέσω θερμοχημικών αντιδράσεων. Τα θερμοχημικά συστήματα βασίζονται στην ενέργεια που απορροφάται ή απελευθερώνεται κατά την διάσπαση και τον σχηματισμό των μοριακών δεσμών σε μια πλήρως αντιστρεπτή χημική αντίδραση. Αποτελεί αποθήκευση ενέργειας υψηλής συγκέντρωσης (300kWh/m<sup>3</sup>). Επίσης με τέτοιου είδους συστήματα μπορούμε να ελέγχουμε και την υγρασία. Κύριες εφαρμογές της

σε κτίρια αποτελούν η θέρμανση ζεστού νερού χρήσης, η θέρμανση και ψύξη χώρων καθώς και ο κλιματισμός [9].

Τέλος ένας ακόμη τρόπος αποθήκευσης ενέργειας, που άρχισε να μελετάται πρόσφατα, είναι με την μορφή λανθάνουσας θερμότητας (latent heat). Τα πλεονεκτήματα σε σχέση με την αποθήκευση αισθητής θερμότητας είναι ότι έχει μεγαλύτερη πυκνότητα αποθηκευμένης ενέργειας και σταθερή θερμοκρασία φόρτισης και αποφόρτισης. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για αυτού του είδους την αποθήκευση λέγονται υλικά αλλαγής φάσης (phase change materials-PCM) . Τα υλικά αλλαγής φάσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για μικρής διάρκειας αποθήκευση (ημερήσια) και για μεγάλης διάρκειας αποθήκευση (εποχιακή) παρουσιάζοντας ποικιλία υλικών και τεχνολογιών για την επίτευξη των δυο περιπτώσεων καθώς και για ενδιάμεσες καταστάσεις.[9],[10],[11]

### **Απαιτήσεις κατά την αποθήκευση σε υλικά αλλαγής φάσης (PCM)**

Από τους τρόπους που αναπτύχθηκαν παραπάνω ελκυστικότερος φαίνεται να είναι η μέθοδος της αποθήκευσης μέσω υλικών αλλαγής φάσεως (PCM). Αυτό συμβαίνει διότι έχουν μεγάλη πυκνότητα ισχύος και στο γεγονός πως κατά την πρόσδοση και απόδοση της θερμότητας η θερμοκρασία παραμένει σταθερή. Η αλλαγή φάσης γίνεται από στερεό σε υγρό και αντιστρόφως (τήξη-πήξη). Ο λόγος για τον οποίο δεν προτιμούμε την διφασική περιοχή υγρού-αερίου είναι γιατί οδηγούμαστε σε άλλοτε μεγάλες διαφορές πίεσης και άλλοτε σε μεγάλες μεταβολές όγκου.



Σχήμα 2.10 Αποθήκευση ενέργεια ως λανθάνουσα θερμότητα κατά την τήξη [44]

Οι απαιτήσεις οι οποίες πρέπει να πληρούνται ώστε το υλικό αλλαγής φάσης να ταιριάζει στην εφαρμογή μας διαχωρίζονται σε φυσικές, σε τεχνικές και οικονομικές.

Ξεκινώντας με τις **φυσικές** οι οποίες αποτελούν χαρακτηριστικό κάθε υλικού αλλαγής φάσης έχουμε τα εξής [58]:

- Κατάλληλη θερμοκρασία αλλαγής φάσης. Αυτό είναι το σημαντικότερο χαρακτηριστικό για την επιλογή ενός υλικού αλλαγής φάσης αφού καθορίζεται από την εκάστοτε εφαρμογή.
- Μεγάλη λανθάνουσα θερμότητα. Η χρησιμότητα αυτής της απαίτησης είναι προφανής αφού όσο μεγαλύτερη η λανθάνουσα θερμότητα τόσο περισσότερη είναι η αποθηκευμένη-αποδιδόμενη θερμότητα του συστήματος.
- Υψηλή θερμική αγωγιμότητα για την εξασφάλιση ευκολότερης μετάδοσης θερμότητας τόσο κατά την αποθήκευση όσο και κατά την πρόσδοση θερμότητας
- Σταθερότητα στην κυκλική καταπόνηση ώστε οι ιδιότητες του υλικού αλλαγής φάσης να μην μειώνονται μετά από κάθε φόρτιση και αποφόρτισή του
- Ελαχιστοποίηση του φαινομένου της υπόψυξης (supercooling) δηλαδή η τήξη και η πήξη να γίνονται στην ίδια θερμοκρασία

Συνεχίζοντας οι **τεχνικές** απαιτήσεις τις οποίες θα πρέπει να ικανοποιεί το υλικό αλλαγής φάσης (PCM) είναι οι παρακάτω [58]:

- Συμβατότητα με τα περιβάλλοντα υλικά δηλαδή να εξασφαλίζεται η ασφάλεια του συστήματος ακόμη και σε περίπτωση διαρροής
- Μικρή τάση ατμών ώστε να μην υπάρχει πρόβλημα με την αλλαγή φάσης του υλικού
- Μικρές μεταβολές όγκου ώστε να μην υπάρχει πρόβλημα με την σταθερότητα του δοχείου που θα περιέχει το PCM
- Φυσική και χημική σταθερότητα ως προς την κυκλική καταπόνηση του υλικού εξασφαλίζοντας μεγάλη διάρκεια ζωής
- Μη τοξικότητα για περιβαλλοντικούς λόγους

Τέλος παρουσιάζονται οι **οικονομικές** απαιτήσεις που θα πρέπει να διαθέτει το υλικό αλλαγής φάσης [58]:

- Χαμηλή τιμή ώστε να είναι ανταγωνιστικό με άλλες μεθόδους αποθήκευσης
- Ανακυκλωσιμότητα για περιβαλλοντικούς και οικονομικούς λόγους

Τα κριτήρια με τα οποία επιλέγουμε ένα υλικό αλλαγής φάσης είναι καταρχάς η θερμοκρασία αλλαγής φάσης και κατά δεύτερον η μεγάλη λανθάνουσα θερμότητα.



Το να καλυφθούν όλες οι απαιτήσεις από ένα υλικό αλλαγής φάσης είναι δύσκολό αλλά υπάρχουν ειδικές τεχνικές για την αντιμετώπιση τέτοιων προβλημάτων [58].

### Κατηγορίες υλικών αλλαγής φάσης

Τα υλικά αλλαγής φάσης χωρίζονται σε δύο κατηγορίες στα οργανικά και στα ανόργανα.



Σχήμα 2.11 Οργανικά υλικά αλλαγής φάσης. Παραφίνες μη συσκευασμένες, παραφίνες σε μικροκάψουλες, παραφίνες σε κάψουλες [16]



Σχήμα 2.12 Ανόργανα υλικά αλλαγής φάσης. Ένυδρα άλατα μη συσκευασμένα, ένυδρα άλατα σε κάψουλες, ένυδρα άλατα σε σακούλες. [16]

### Οργανικά υλικά

Τα οργανικά υλικά όπως έχει προαναφερθεί εκπροσωπούνται κυρίως από τις παραφίνες. Τα εμπορικά προϊόντα των παραφινών είναι αρκετά φτηνότερα από τα ένυδρα άλατα (ανόργανα υλικά) με μέτριες τιμές λανθάνουσας θερμότητας (περίπου 150 kJ/Kg) και δυνατότητα παραγωγής τους σχεδόν σε όλο το εύρος των θερμοκρασιών. Η εμφάνιση supercooling είναι αμελητέα, είναι χημικά αδρανή και σταθερά χωρίς να παρουσιάζουν διαχωρισμό φάσεων και εκφυλισμό των ιδιοτήτων τους. Το φαινόμενο του supercooling εμφανίζεται όταν το υλικό αλλαγής φάσης αποδίδει την αποθηκευμένη θερμότητα με μεγάλο ρυθμό προκαλώντας μείωση της θερμοκρασίας αλλαγής φάσης, δηλαδή η αλλαγή φάσης ξεκινά σε μικρότερη θερμοκρασία. Δυστυχώς όμως παρουσιάζουν μικρή τιμή του συντελεστή αγωγιμότητας, ιδιότητα που περιορίζει τις εφαρμογές τους (περίπου 0,2 W/m\*°C [16]). Γι'αυτό το λόγο έχουν εξεταστεί πολλές περιπτώσεις εμπλουτισμού του υλικού με μεταλλικά αντικείμενα διαφόρων σχημάτων ή χρήση δοχείων και

σωλήνων με πτερύγια με σκοπό την αύξηση του ρεύματος θερμότητας μέσα στο υλικό.

Οι παραφίνες παρουσιάζουν άριστη συμπεριφορά στην κυκλική καταπόνηση χωρίς καμιά υποβάθμιση των ιδιοτήτων τους. Επιπλέον δεν παρουσιάζουν προβλήματα διάβρωσης με κανένα ευρέως χρησιμοποιούμενο μέταλλο. Θα πρέπει δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στο ότι οι παραφίνες πραγματοποιούν ολοκληρωμένα την αλλαγή φάσης τους σε θερμοκρασιακό εύρος περίπου 10 K (~ 9 K πριν το σημείο τήξης και ~ 1 K μετά το σημείο τήξης[16]). Ένα τέτοιο φαινόμενο αν δεν ληφθεί υπόψη μπορεί να οδηγήσει σε μη σωστή εκλογή υλικού με αποτέλεσμα μεγάλες αποκλίσεις σε σχέση με τις αναμενόμενες τιμές [16].

### Ανόργανα υλικά

Τα ένυδρα άλατα είναι ο κύριος εκπρόσωπος των ανόργανων αλάτων παρουσιάζουν αρκετά καλές ιδιότητες (τιμή λανθάνουσας θερμότητας ~ 250 kJ/Kg και αγωγιμότητας ~ 0,6W/mK [16]), μέτριο κόστος παραγωγής σε σχέση με τις παραφίνες αλλά υψηλό κόστος πώλησης (σε σχέση με τις τιμές των παραφινών) λόγω της επιβεβλημένης ενσωμάτωσής τους σε προστατευτικό κάλυμμα και χρήση πρόσθετων ουσιών σταθεροποίησης των ιδιοτήτων τους. Αν και είναι από τα φθηνότερα υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αποθήκευση ενέργειας, τα προβλήματα διαχωρισμού των φάσεων και ο σχηματισμός ιζήματος καθώς και η εμφάνιση του φαινομένου supercooling περιορίζουν τις εφαρμογές του. Ερευνητές προτείνουν την προσθήκη επιπλέον νερού για την αποφυγή σχηματισμού ιζήματος, μέθοδος όμως που μειώνει την πυκνότητα αποθήκευσης. Αντί αυτού έχουν χρησιμοποιηθεί πολλών ειδών ουσίες, ως πρόσθετα σταθεροποίησης με προσπάθεια ταυτόχρονης αύξησης του ρυθμού μετάδοσης θερμότητας [16].

Συμπερασματικά τα κυριότερα προβλήματα που παρουσιάζει η χρήση των ένυδρων αλάτων δημιουργούνται λόγω της ανεπάρκειας σταθερότητας της χημικής σύνθεσης του υλικού και του φαινομένου διάβρωσης μεταξύ του υλικού και του υλικού συσκευασίας. Βεβαίως το πλεονέκτημα των ένυδρων αλάτων έναντι των παραφινών, ιδιαίτερα για κτιριακή χρήση και ενσωμάτωση σε δομικά υλικά είναι η μη αναφλεξιμότητά τους.

Στο πλαίσιο αναφοράς των ιδιοτήτων δεν θα πρέπει να παραλειφθεί ο ρόλος της πυκνότητας των υλικών, σημαντικός παράγοντας όταν αυτά χρησιμοποιούνται σε εγκαταστάσεις που από τη φύση τους απαιτούν οικονομία χώρου. Τα ένυδρα άλατα είναι γενικότερα πυκνότερα υλικά από τις άλλες κατηγορίες των PCMs γι' αυτό και παρουσιάζουν ιδιαίτερα αυξημένες τιμές αποθήκευσης ενέργειας ανά μονάδα όγκου [16].

Συνοπτικά για τα οργανικά αλλά και ανόργανα υλικά μπορούν να σημειωθούν :

### **Οργανικά PCMs[16]**

#### **Πλεονεκτήματα :**

- μη διαβρωτικά με τα περισσότερα υλικά
- μικρός κίνδυνος ρύπανσης του νερού
- μικρής τάξης ή καθόλου εμφάνιση του φαινομένου supercooling
- χημική και θερμική σταθερότητα
- χαμηλό κόστος αγοράς σε σχέση με τις άλλες κατηγορίες των PCM
- παραγωγή των υλικών σε διάφορες εμπορικές εφαρμογές (σκόνη, κόκκοι, πλάκες)

#### **Μειονεκτήματα :**

- λανθάνουσα θερμότητα υγροποίησης χαμηλότερη από τα μη οργανικά
- συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας χαμηλότερο από τα μη οργανικά
- αναφλέξιμα σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες (~ 200 °C)
- πυκνότητα χαμηλότερη από τα μη οργανικά

### **Ανόργανα PCMs[16]**

#### **Πλεονεκτήματα :**

- μεγαλύτερη τιμή της λανθάνουσας θερμότητας υγροποίησης (σε σύγκριση με τα οργανικά)
- μη αναφλέξιμα
- πυκνότητα υψηλότερη από τα οργανικά

#### **Μειονεκτήματα :**

- διαβρωτικά (απαραίτητη αποθήκευση των υλικών σε ενισχυμένη συσκευασία)
- εμφάνιση supercooling
- διαχωρισμός των φάσεων (μεταβλητή τιμή της διαλυτότητας με τη θερμοκρασία), δυνατή δημιουργία ιζήματος
- αβέβαιη θερμική σταθερότητα σε κυκλική φόρτιση
- αρκετά μεγαλύτερο κόστος αγοράς από τα οργανικά
- υδροσκοπικά υλικά με αποτέλεσμα εκφυλισμό των ιδιοτήτων τους σε βάθος χρόνου αν μείνουν εκτεθειμένα σε περιβάλλον με υγρασία [16]

## **2.2.4 Εισαγωγικά στοιχεία για αντλίες θερμότητας**

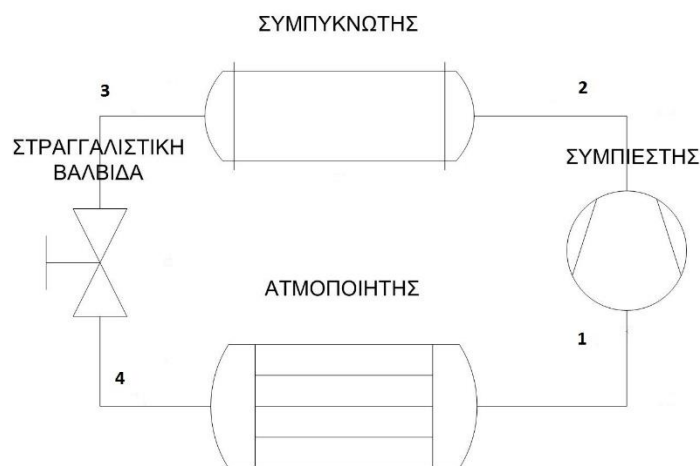
Αντλία θερμότητας (Heat pump) ονομάζουμε τη μηχανολογική διάταξη που μας επιτρέπει αν μεταφέρουμε ενέργεια από ένα χώρο χαμηλής θερμοκρασίας, σε ένα χώρο υψηλότερης θερμοκρασίας.

Ήδη από τον ορισμό γίνεται φανερό ότι οι αντλίες θερμότητας σχεδιάζονται για να μεταφέρουν θερμότητα (θερμική ενέργεια) με φορά αντίθετη από αυτήν που ορίζει η φυσική ροή. Για την μεταφορά αυτή απαιτείται κατανάλωση ενέργειας. Όπως ακριβώς στην υδραυλική, το νερό πηγαινει μόνο του (ρέει) από το ψηλό σημείο στο

χαμηλό (λόγω βαρύτητας) και χρειαζόμαστε μια αντλία νερού για να μεταφέρουμε το νερό αντίθετα με την φυσική του ροή (να το ανεβάσουμε ψηλότερα), έτσι και η θερμική ενέργεια «ρέει» από μόνη της από το σώμα υψηλής θερμοκρασίας στο σώμα χαμηλής θερμοκρασίας και χρειαζόμαστε μια «αντλία» θερμότητας) για να αντιστρέψουμε την κίνηση της ενέργειας και να την μεταφέρουμε από την χαμηλή θερμοκρασία στην υψηλή.

### Αρχή λειτουργίας των αντλιών θερμότητας

Οι αντλίες θερμότητας λειτουργούν με τον ίδιο τρόπο που λειτουργούν όλα τα ψυκτικά μηχανήματα και η λειτουργία τους βασίζεται στις ίδιες αρχές που εφαρμόζονται στα ψυγεία, καταψύκτες, κλιματιστικά μηχανήματα κλπ. Η λειτουργία τους βασίζεται στον ψυκτικό κύκλο, που είναι ένας αένας κύκλος εκτόνωσης και συμπίεσης του εργαζόμενου μέσου σύμφωνα με το παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2.13 Ψυκτικός κύκλος

Περιγράφοντας τον ιδανικό κύκλο μπορούμε να πούμε πως στο σημείο 1 ακριβώς μετά από τον ατμοποιητή το ψυκτικό μέσο είναι κορεσμένος ατμός στην χαμηλή πίεση του συστήματος. Σε πραγματικές συνθήκες έχει συνήθως 2-3°C υπερθέρμανση ώστε να εξασφαλιστεί η καλή λειτουργία του συμπιεστή χωρίς την ύπαρξη υγρότητας στο ψυκτικό μέσο. Έπειτα στον σημείο 2 και αφού έχει περάσει τον συμπιεστή έχει αυξηθεί η θερμοκρασία του και κυρίως η πίεση του. Στην συνέχεια το ψυκτικό μέσο εισέρχεται στον συμπυκνωτή όπου αποβάλλει θερμότητα και συμπυκνώνεται σε κορεσμένο υγρό (σημείο 3). Σε πραγματικές συνθήκες συνήθως υπάρχει μια μικρή υπόψυξη του ψυκτικού μέσου της τάξης των 2-3°C. Τέλος το ψυκτικό μέσο περνά από την στραγγαλιστική βαλβίδα όπου μειώνεται η πίεση του. Ιδανικά έχουμε ισενθαλπικό στραγγαλισμό, δηλαδή πτώση πίεσης με μηδενική μεταβολή της ενθαλπίας. Να σημειωθεί πως στο σημείο 4 βρισκόμαστε

στη διφασική περιοχή του ψυκτικού μέσου. Στην συνέχεια το ψυκτικό μέσο εισέρχεται στον ατμοποιητή όπου παραλαμβάνει θερμότητα και ατμοποιείται. Με αυτόν τον τρόπο επανερχόμαστε στο σημείο 1 με σκοπό να επιτελέσουμε ξανά τον ίδιο κύκλο.

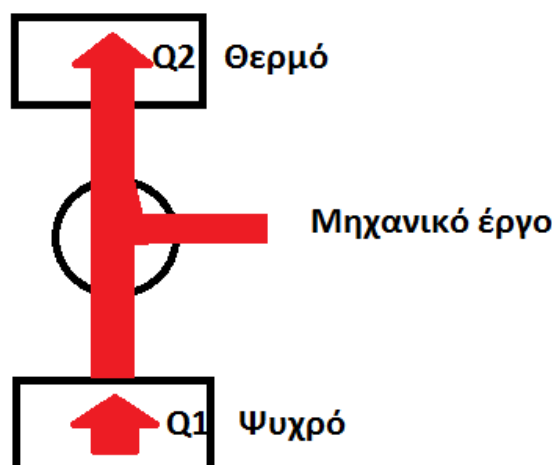
Το σημαντικό σε κάθε κύκλο είναι ότι αποβάλλεται θερμότητα (ενέργεια) στον συμπυκνωτή 2-3 και προσλαμβάνεται θερμότητα (ενέργεια) στον ατμοποιητή 4-1, άρα εφόσον ο κύκλος είναι διαρκής υπάρχει μια συνεχόμενη μεταφορά θερμότητας μεταξύ του ατμοποιητή (4-1) και του συμπυκνωτή (2-3) και συνεπώς με τον ψυκτικό κύκλο μπορούμε να μεταφέρουμε θερμότητα μεταξύ δυο σημείων.

Οι αντλίες θερμότητας διακρίνονται σε τρία είδη ανάλογα με το ρευστό στο οποίο αποβάλλει (ή από το οποίο προσλαμβάνει) την ενέργεια η αντλία στον ατμοποιητή και στον συμπυκνωτή.

- Αντλίες θερμότητας αέρος/αέρος: Είναι οι αντλίες που διαθέτουν και στον ατμοποιητή αλλά και στον συμπυκνωτή εναλλάκτη θερμότητας αέρα/ψυκτικού. Είναι τα γνωστά σε όλους μας κλιματιστικά μηχανήματα διαιρούμενου τύπου (split type). Ειδικά στον διαιρούμενο τύπο το ένα στοιχείο (εναλλάκτης του ατμοποιητή) βρίσκεται μέσα στο σπίτι μας και προσλαμβάνει ενέργεια (αφαιρεί θερμότητα / ψύχει τον χώρο), και ο συμπυκνωτής, ο οποίος είναι και αυτός εναλλάκτης ψυκτικού μέσου / αέρα, αποβάλλει θερμότητα έξω από το σπίτι μας.
- Αντλίες θερμότητας αέρος/νερού: Οι αντλίες αυτές από την μεριά του ατμοποιητή διαθέτουν εναλλάκτη ψυκτικού μέσου / νερού και αφαιρούν θερμότητα από το νερό. Με τις αντλίες αυτές δηλαδή, μπορούμε να αντλούμε θερμότητα (να ψύχουμε νερό) και να την αποβάλλουμε στο περιβάλλον ( όπως γίνεται και στα κλιματιστικά μηχανήματα της προηγούμενης κατηγορίας)
- Αντλίες θερμότητας νερού / νερού: Στις αντλίες αυτές και ο ατμοποιητή αλλά και ο συμπυκνωτής είναι εναλλάκτες νερού / ψυκτικού μέσου και το ψυκτικό μέσο μεταφέρει θερμότητα από την μία μάζα νερού στην άλλη. Τέτοιες αντλίες είναι οι υδρόψυκτες αντλίες θερμότητας με πύργο ψύξης και οι αντλίες νερού / νερού που χρησιμοποιούνται σε εγκαταστάσεις με γεωεναλλάκτη (γεωθερμικές).

### **Βαθμός απόδοσης αντλίας θερμότητας**

Η ροή ενέργειας σε μια αντλία θερμότητας που λειτουργεί σε κατάσταση θέρμανσης, έχει όπως στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.14 Σχηματική απεικόνιση ενεργειακής ροής αντλίας θερμότητας

Η αντλία αντλεί από το ψυχρό περιβάλλον μια ποσότητα θερμότητας (ενέργειας)  $Q_1$ , προσθέτει μηχανικό έργο  $W$  στο συμπιεστή, και αποδίδει ποσό ενέργειας  $Q_2$  στον ψυχρό χώρο.

Όταν η αντλία λειτουργεί σε κατάσταση θέρμανσης, το «θερμό» είναι ο χώρος, το «ψυχρό» το περιβάλλον και το ζητούμενο είναι το  $Q_2$ , ενώ όταν αυτή λειτουργεί σε κατάσταση ψύξης, το «ψυχρό» είναι ο χώρος, το «θερμό» είναι το περιβάλλον και το ζητούμενο είναι το  $Q_1$ .

Ο ενεργειακός ισολογισμός στο σχήμα απαιτεί:  $Q_2 = Q_1 + W$

#### Βαθμός απόδοσης σε λειτουργία θέρμανσης

Ο λόγος της μεταφερόμενης θερμότητας προς το καταναλισκόμενο έργο ( $Q_2 / W$  σε **θέρμανση**) ονομάζεται ειδικός βαθμός απόδοσης της αντλίας (**COP**, coefficient of performance).

#### Βαθμός απόδοσης σε λειτουργία ψύξης

Ο λόγος της μεταφερόμενης θερμότητας προς το καταναλισκόμενο έργο ( $Q_1 / W$  σε **ψύξη**) ονομάζεται βαθμός ενεργειακής απόδοσης της αντλίας (**EER**, energy efficiency ratio).

Τόσο ο ειδικός βαθμός απόδοσης COP όσο και ο βαθμός ενεργειακής απόδοσης EER εξαρτώνται:

- από την θερμοκρασία της «πηγής» ( $T_{Q1}$ )
- από τη θερμοκρασία του «αποδέκτη» ( $T_{Q2}$ )
- από τα μηχανικά χαρακτηριστικά της αντλίας θερμότητας
- από τις ιδιότητες του εργαζόμενου μέσου

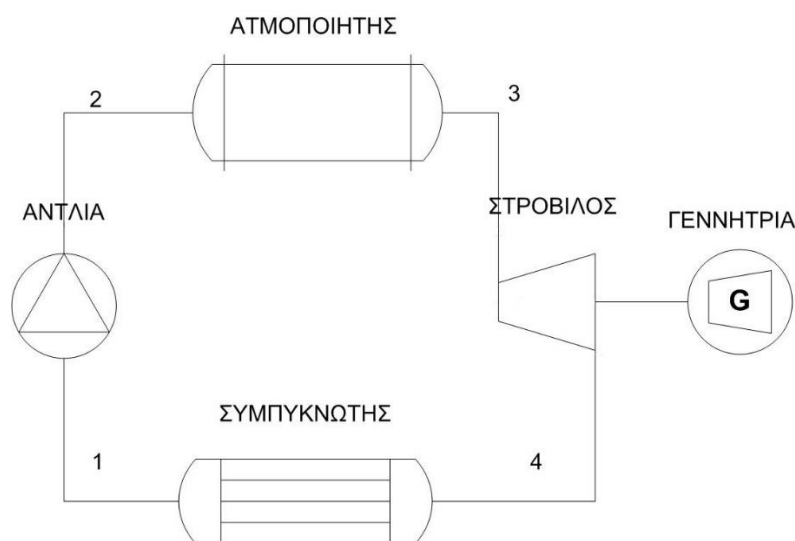
και μεταβάλλονται διαρκώς, αφού τόσο η θερμοκρασία του ψυχρού (περιβάλλοντος στη θέρμανση – χώρου στην ψύξη) όσο και η θερμοκρασία θερμού

(χώρου στη θέρμανση – περιβάλλοντος στην ψύξη) δεν είναι σταθερές, αλλά διαρκώς μεταβάλλονται.

Στις σύγχρονες αντλίες θερμότητας συναντάμε τιμές COP και EER μεγαλύτερες του 3,0, γεγονός που τις κατατάσσει στις συσκευές αξιοποίησης ανανεώσιμων πηγών. Τιμή COP (ή EER) ίση με 3,0 σημαίνει ότι για κάθε μονάδα ενέργεια που καταναλώνει μια αντλία θερμότητας, μεταφέρει (αποδίδει) τρεις (3) μονάδες ενέργειας.

### **2.2.5 Εισαγωγικά στοιχεία οργανικού κύκλου Rankine (Organic Rankine Cycle)**

Κατά την εκπόνηση της εν λόγω διπλωματικής χρειάστηκε η μελέτη δύο κύκλων. Ο πρώτος κύκλος είναι η αντλία θερμότητας που χρησιμοποιήθηκε για την αποθήκευση ενέργειας (φόρτιση) στο υλικό αλλαγής φάσης και αναπτύχθηκε νωρίτερα. Για την παραγωγή ισχύος χρησιμοποιείται ο οργανικός κύκλος Rankine. Ο οργανικός κύκλος Rankine είναι ο γνωστός κύκλος Rankine με την διαφορά πως αντί για νερό-ατμό έχουμε κάποιο οργανικό μέσο. Ο τρόπος λειτουργίας του κύκλου ORC φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

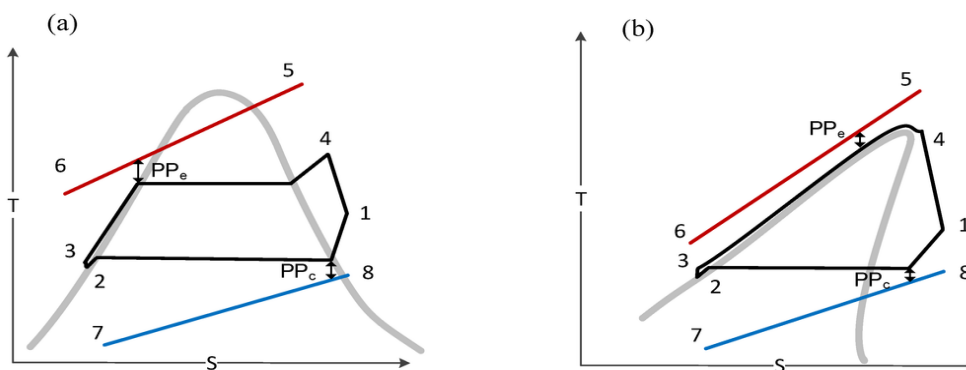


Σχήμα 2.15 Διάγραμμα οργανικού κύκλου ORC

Όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα το οργανικό μέσο στο σημείο 1 είναι ιδανικά σε κατάσταση κορεσμένου υγρού, ενώ σε πραγματικές συνθήκες βρίσκεται σε κατάσταση υπόψυκτου υγρού με σκοπό να εξασφαλίζεται η λειτουργία της αντλίας χωρίς την ύπαρξη ατμών. Η αντλία που ακολουθεί αυξάνει την πίεση του οργανικού μέσου το οποίο εν συνεχεία εισέρχεται στον ατμοποιητή στο σημείο 2. Στον ατμοποιητή η προδιδόμενη θερμότητα από κάποια πηγή θερμότητας προκαλεί ατμοποίηση του οργανικού μέσου φτάνοντας το σε κατάσταση κορεσμένου ατμού στην ιδανική λειτουργία του κύκλου στο σημείο 3. Σε πραγματικές συνθήκες έχουμε

μια μικρή υπερθέρμανση του οργανικού μέσου ώστε ο επερχόμενος στρόβιλος να μην λειτουργεί στην διφασική περιοχή. Έπειτα το οργανικό μέσο έχοντας υψηλή πίεση και θερμοκρασία αποτονώνεται στον στρόβιλο παράγοντας μηχανικό έργο. Στο σημείο 4 έχουμε ιδανικά κορεσμένο ατμό του οργανικού μέσου ενώ στην πραγματικότητα μπορεί να έχουμε είτε υπέρθερμο ατμό, το οποίο δεν βλάπτει τον στρόβιλο αλλά μας δείχνει πως δεν εκμεταλλευόμαστε επαρκώς το οργανικό μέσο, είτε υγρό-ατμό στη διφασική περιοχή, το οποίο είναι αρκετά διαβρωτικό για τα πτερύγια του στρόβιλου. Μετά από τον στρόβιλο ακολουθεί ο συμπυκνωτής όπου θα αποβάλλει θερμότητα το οργανικό μέσο με σκοπό να επανέλθει σε κατάσταση κορεσμένου υγρού στην ιδανική λειτουργία του κύκλου ή σε ελαφρώς υπόψυκτου υγρού σε πραγματικές συνθήκες όπως αναφέραμε. Επομένως χρειαζόμαστε μια πηγή θερμότητας για την παραγωγή του έργου και μια καταβόθρα θερμότητας η οποία θα φέρει τον οργανικό μέσο σε θέση να ξεκινήσει ξανά τον κύκλο.

Για τον οργανικό κύκλο ORC διακρίνουμε δυο ειδών κατηγορίες κύκλων τους υποκρίσιμους και τους υπερκρίσιμους. Στον υποκρίσιμο κύκλο η ατμοποίηση γίνεται σε χαμηλότερη πίεση και θερμοκρασία από τις αντίστοιχες κρίσιμες τιμές του οργανικού μέσου, σε αντίθεση με τον υπερκρίσιμο κύκλο ο οποίος διεκπεραιώνει την διαδικασία της ατμοποίησης σε πίεση και θερμοκρασία μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες κρίσιμες του οργανικού μέσου. Ο υπερκρίσιμος κύκλος είναι πιο εύκολα επιτεύξιμος στα οργανικά μέσα έναντι του νερού καθώς το κρίσιμο σημείο επιτυγχάνεται σε χαμηλότερες πιέσεις και θερμοκρασίες από τις αντίστοιχες του νερού. Το μειονέκτημα ενός υπερκρίσιμου κύκλου έναντι σε έναν υποκρίσιμο αποτελεί η μεγαλύτερη μέγιστη πίεση η οποία θα οδηγήσει σε αύξηση του κόστους του εναλλάκτη (ατμοποιητή). Από την άλλη πλευρά το κύριο πλεονέκτημα του υπερκρίσιμου κύκλου έναντι του υποκρίσιμου κύκλου αποτελεί το γεγονός πως στον υπερκρίσιμο κύκλο εκμεταλλευόμαστε καλύτερα την πηγή θερμότητας καθώς οι θερμοκρασίες των δυο ρευμάτων είναι πιο κοντά και γιατί μας επιτρέπει να φτάσουμε σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι δυο αυτές περιπτώσεις.



Σχήμα 2.16 Διάγραμμα T-S υποκρίσιμου (αριστερά) και υπερκρίσιμου (δεξιά) οργανικού κύκλου [45]



## Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>: Υπάρχουσα ενεργειακή κατάσταση στην Κάρπαθο

### 3.1 Ενεργειακή ζήτηση στη Κάρπαθο

Η ηλεκτροδότηση γίνεται από μικρού (μέχρι 1000 kW περίπου), μεσαίου (μέχρι 10000 kW) και μεγάλου (άνω των 10000 kW) μεγέθους Αυτόνομους Σταθμούς Παραγωγής (ΑΣΠ), που στηρίζονται στη λειτουργία μηχανών Diesel. Οι μηχανές Diesel οι οποίες είναι μηχανές εσωτερικής καύσης καταναλώνουν πετρέλαιο και μαζούτ. Αν και κατασκευαστικά έχουν καλό βαθμό απόδοσης (πάνω από 40%) εξαιτίας των διακυμάνσεων του φορτίου λειτουργούν με μικρό βαθμό απόδοσης με αποτέλεσμα να καταναλώνουν υψηλές ποσότητες καυσίμων.

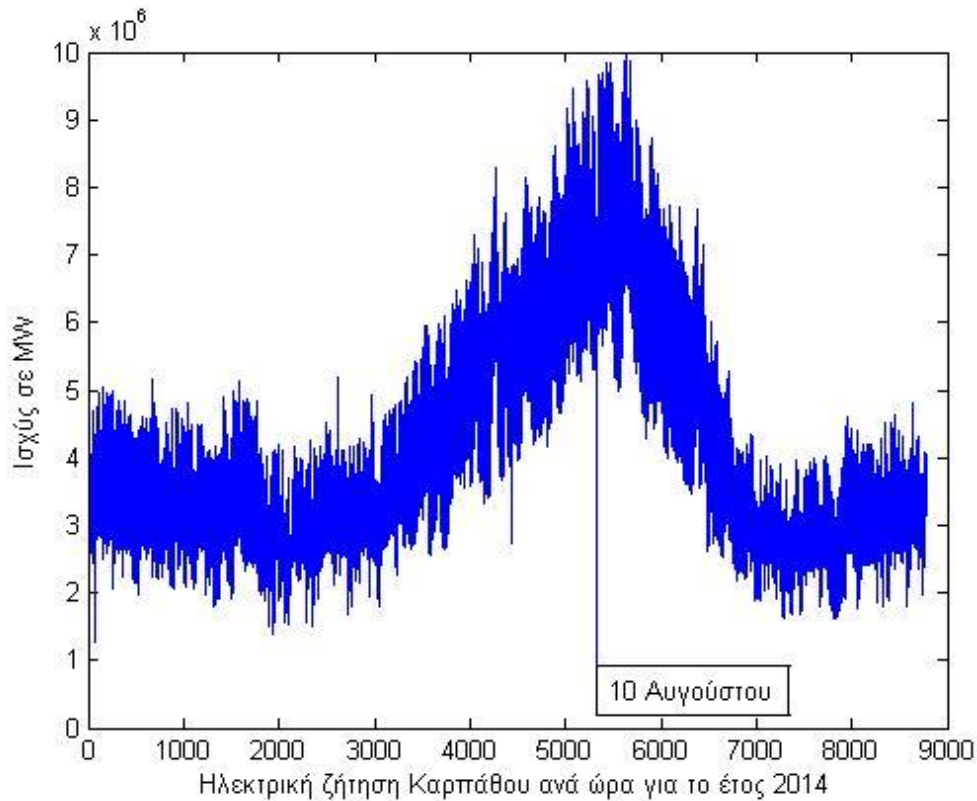
Ο συνδυασμός των υψηλών ποσοτήτων καυσίμων που απαιτούνται για την λειτουργία των σταθμών με τις δυσκολίες μεταφοράς των καυσίμων στα νησιά (ειδικά στα απομονωμένα), οδηγούν σε πολύ μεγάλο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στα νησιά. Πιο συγκεκριμένα το κόστος παραγωγής 1 kWh από τον ΑΣΠ Καρπάθου κοστίζει στη ΔΕΗ περίπου 0,2 ευρώ, ενώ η τιμή πώλησης της χρεώνεται ανάλογα με την κατανάλωση (βλέπε παρακάτω). Το ρεύμα ως γνωστόν είναι ένα από τα δημόσια αγαθά για αυτό η ΔΕΗ έχει καθιερώσει μια κοινή τιμή πώλησης τόσο στο ηπειρωτικό δίκτυο όσο και στα νησιά. Η ΔΕΗ κοστολογεί την Ηλεκτρική Ενέργεια κλιμακωτά σύμφωνα με την κατανάλωση. Αναλυτικά αν η κατανάλωση του τετράμηνου [34]:

- Δεν υπερβαίνει τις 800 kWh, η χρέωση είναι 0,06987 ευρώ/kWh
- Υπερβαίνει τις 800 kWh, αλλά δεν υπερβαίνει τις 2000 kWh, η χρέωση για τις πρώτες 800 kWh είναι 0,07197 ευρώ/ kWh, για τις επόμενες 800 kWh 0,09171 ευρώ / kWh και για τις επόμενες 400 kWh είναι 0,11257 ευρώ / kWh
- Είναι μεγαλύτερη των 2000 kWh και μικρότερη ή ίση των 3000 kWh, η χρέωση για τις 2000 kWh είναι η ίδια με αυτή που περιεγράφηκε παραπάνω, ενώ οι επόμενες 1000 kWh κοστολογούνται με 0,15059 ευρώ / kWh
- Είναι μεγαλύτερη των 3000 kWh και μικρότερη ή ίση των 4400 kWh. Η χρέωση για τις 3000 kWh γίνεται με τον τρόπο που περιεγράφηκε ήδη, ενώ οι υπόλοιπες 1440 kWh χρεώνονται με 0,15204 ευρώ / kWh
- Είναι μεγαλύτερη των 4400 kWh. Σε αυτή την περίπτωση αλλάζει η κλίμακα σε όλες τις χρεώσεις και γίνεται για τις πρώτες 800 kWh 0,07441 ευρώ /

kWh, για τις επόμενες 800 kWh 0,09483 ευρώ / kWh , για τις επόμενες 400 kWh 0,11639 ευρώ / kWh και για τις υπόλοιπες 0,15421 ευρώ / kWh. [34]

Επειδή στην Κάρπαθο έχουμε κυρίως οικιακούς καταναλωτές μπορούμε με ασφάλεια να πούμε πως η τιμή χρέωσης μιας kWh είναι περίπου 0,07 ευρώ. Με αυτό τον τρόπο προκύπτει πως το κόστος παραγωγής 1 kWh είναι σχεδόν τριπλάσιο από την τιμή πώλησης της και μπορούμε να καταλάβουμε πόσο ζημιογόνο είναι αυτό για την ΔΕΗ. Επομένως καταλαβαίνουμε πως αν και η ΔΕΗ έχει κέρδος από την πώληση ηλεκτρικής ενέργειας στην ηπειρωτική Ελλάδα ζημιώνεται από την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας στα νησιά. Τα τελευταία χρόνια είχαμε την εγκατάσταση αιολικής ισχύος στα περισσότερα νησιά του Αιγαίου και συμμετοχή των αιολικών στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι μεγάλες διακυμάνσεις όμως της ζήτησης μεταξύ χειμερινής και καλοκαιρινής περιόδου σε συνδυασμό με τα τεχνικά ελάχιστα των πετρελαϊκών μονάδων δεν επιτρέπουν σοβαρή αξιοποίηση της Αιολικής Ενέργειας, που θα είχε ως επακόλουθο τη μείωση του κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο από επίσημα στοιχεία του Κλιμάκιου Ήπιων Μορφών Ενέργειας, που εκμεταλλεύεται και συντηρεί τις εγκατεστημένες Α/Γ στα νησιά του Αιγαίου, προκύπτει ότι σημειώνονται σημαντικά κέρδη από την εκμετάλλευση της Αιολικής Ενέργειας. Η λύση για το ενεργειακό πρόβλημα των νησιών μας είναι η κατασκευή συστημάτων αποθήκευση ενέργειας με σκοπό την βέλτιστη λειτουργία των μηχανών Diesel καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρα και στις τέσσερις εποχές του χρόνου [34].

Για να γίνει η διαστασιολόγηση της εγκατάστασης μας θα πρέπει να γνωρίζουμε την Ηλεκτρική Ζήτηση του νησιού, τόσο για το σύστημα αποθήκευσης όσο και για το κύκλο ORC και την αντλία θερμότητας. Για αυτό το λόγο χρειαζόμαστε τα πιο πρόσφατα ωριαία δεδομένα ετήσιας ζήτησης με σκοπό η διαστασιολόγηση που θα γίνει να ανταποκρίνεται στην υπάρχουσα κατάσταση. Μετά από συνομιλίες με τον κύριο Καρανικόλαο Αντώνιο Διευθυντή του ΑΣΠ Καρπάθου έλαβα τα ωριαία ετήσια δεδομένα του 2014 όπως αυτά καταμετρήθηκαν στον ΑΣΠ Καρπάθου. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η ωριαία ετήσια ζήτηση του νησιού σε ηλεκτρική ενέργεια.



Σχήμα 3.1 Ηλεκτρική ζήτηση Καρπάθου ανά ώρα για το έτος 2014 [60]

Από το διάγραμμα της ζήτησης του φορτίου της Καρπάθου παρατηρούμε πως οι μέγιστες καταναλώσεις συμβαίνουν τους καλοκαιρινούς μήνες και ιδιαίτερα τον Ιούλιο και τον Αύγουστο. Αυτό φυσικά είναι αναμενόμενο καθώς είναι οι δυο μήνες κατά τους οποίους οι τουρίστες συρρέουν στο νησί και επίσης διοργανώνονται αρκετές εκδηλώσεις λόγω των ημερών στα περισσότερα χωριά της Καρπάθου. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός πως οι μέγιστη κατανάλωση παρατηρείται κατά την περίοδο των μελτεμιών. Από την άλλη πλευρά παρατηρούμε πως τα ελάχιστα φορτία βρίσκονται στην άνοιξη και στο φθινόπωρο, ενώ στα ίδια επίπεδα κυμαίνεται και η ζήτηση τους χειμερινούς μήνες. Το ελάχιστο φορτίο παρατηρήθηκε το βράδυ στις 10 Αυγούστου μόλις 414 kW λογικά λόγω μερικού black-out του νησιού. Αντίθετα το μέγιστο φορτίο παρατηρήθηκε το βράδυ στις 23 Αυγούστου με τιμή 9,988 MW.

Για την διαστασιολόγηση και την λειτουργία της εγκατάστασης μας κρίνεται αναγκαίο να κατανοήσουμε τον τρόπο με τον οποίο ο ΑΣΠ Καρπάθου λειτουργεί τις γεννήτριες Diesel που διαθέτει. Σύμφωνα με τον κύριο Καρανικόλαο Αντώνιο και μετά από συνομιλίες που είχα μαζί του μου εξήγησε πως χρησιμοποιούν τις γεννήτριες Diesel για να καλύψουν την ζήτηση του νησιού. Κατ' αρχάς θα πρέπει να σημειωθεί πως ο ΑΣΠ Καρπάθου διαθέτει εγκατεστημένη ισχύς 22,202 MW η οποία μεταφράζεται σε 19,900 MW διαθέσιμη ηλεκτρική ισχύς διότι τις Diesel γεννήτριες

τις λειτουργούν μέχρι το 80% της μέγιστης ισχύς για λόγους καλής χρήσης των μηχανών. Βάσει του νόμου όλη η παραγόμενη ενέργεια των ΑΠΕ θα πρέπει να απορροφάται από το δίκτυο, επομένως κατανοούμε πως οι Diesel γεννήτριες θα πρέπει να μεταβάλλουν συνεχώς το φορτίο τους ώστε να καλύπτουν την ζήτηση ανάλογα με τις απαιτήσεις του δικτύου και την παραγωγή των ΑΠΕ. Μετά από την συνομιλία μου με τον κύριο Καρανικόλαο Αντώνιο κατέληξα στα εξής συμπεράσματα.

- Ανάλογα με την ζήτηση του νησιού λειτουργούν αντίστοιχα οι Diesel γεννήτριες με σκοπό την κάλυψη της ζήτησης. Πάντα απορροφώντας το μέγιστο δυνατό από την παραγωγή των ΑΠΕ.
- Το ελάχιστο δυνατό ιδανικά φορτίο που μπορεί να λειτουργήσει η μονάδα είναι τα 800 kW. Αυτό συμβαίνει θέτοντας σε λειτουργία μια μονάδα βάσης του 1 MW λειτουργώντας την στο 80% του φορτίου της [60].

Επομένως στους υπολογισμούς που θα κάνουμε για την διαχείριση της ενέργειας στο νησί θα πρέπει να λάβουμε υπόψιν αυτόν τον περιορισμό.

### **Τρόπος διαχείρισης της ηλεκτρικής ενέργειας**

Εξαρχής θα πρέπει να διατυπώσουμε τον τρόπο διαχείρισης της παραγόμενης ενέργειας του νησιού. Θα υπολογίσουμε την παραγόμενη ωριαία ισχύ από τα αιολικά και τα φωτοβολταϊκά συστήματα που είναι εγκατεστημένα στο νησί. Με γνωστή την ωριαία ζήτηση του νησιού θα υπολογίσουμε την ισχύ που απαιτείται για να καλυφθούν οι ανάγκες του νησιού αφαιρώντας την συνολική παραγόμενη ισχύς των ΑΠΕ από την ζήτηση του νησιού για κάθε ώρα. Με αυτό τρόπο υπολογίζουμε την ισχύ που θα παρήγαγαν οι Diesel γεννήτριες του ΑΣΠ Καρπάθου, τηρώντας πάντα τον περιορισμό της κατώτατης παραγόμενης ισχύς από τον ΑΣΠ Καρπάθου (800 kW). Πάνω σε αυτήν την καινούργια ζήτηση θα εγκαταστήσουμε το υβριδικό μας σύστημα. Σκοπός του συστήματος αποθήκευσης θα είναι να αποθηκεύει ενέργεια τις πρωινές και μεσημεριανές ώρες όπου η ζήτηση είναι χαμηλή και να παράγει ηλεκτρική ενέργεια τις απογευματινές και βραδινές ώρες όπου η ζήτηση είναι αυξημένη. Με αυτό τον τρόπο θα μειωθούν κατά το δυνατόν οι αυξομειώσεις της παραγόμενης ισχύς των Diesel γεννητριών του ΑΣΠ Καρπάθου.

## **3.2 Υφιστάμενες Μονάδες**

### **3.2.1 ΑΣΠ Καρπάθου**

Όπως αναφέραμε και παραπάνω Ο ΑΣΠ Καρπάθου διαθέτει εγκατεστημένη ισχύ 22,202 MW, η οποία μεταφράζεται σε 19,900 MW διαθέσιμης ηλεκτρικής ισχύς διότι λόγω καλής λειτουργίας των Diesel γεννητριών επιλέγεται να μην ξεπερνούν το 80% του πλήρες φορτίου. Όταν οι γεννήτριες λειτουργούν στο βέλτιστο σημείο λειτουργίας τους και σε σταθερό φορτίο τότε καταπονούνται λιγότερο από κάθε άλλη περίπτωση και καταναλώνουν λιγότερο καύσιμο. Κάτι τέτοιο όμως είναι αρκετά σπάνιο καθώς η ζήτηση είναι χρονικά μεταβαλλόμενη εξαναγκάζοντας την λειτουργία των γεννητριών σε συνεχή αυξομείωση του φορτίου επιβαρύνοντας την καταπόνηση των γεννητριών και αυξάνοντας την κατανάλωσή τους.

Επιπρόσθετο πρόβλημα αποτελεί η εκκίνηση των γεννητριών και ιδιαίτερα εκείνων που χρησιμοποιούν ως καύσιμο μαζούτ. Η δυσκολία έγκειται στο γεγονός πως οι γεννήτριες χρειάζονται ένα χρόνο προετοιμασίας με σκοπό κυρίως την σταδιακή αύξηση των θερμοκρασιών των μηχανικών μερών της γεννήτριας, την θέρμανση του καυσίμου αλλά και την θέρμανση και σωστή κυκλοφορία του λαδιού λίπανσης. Η σταδιακή θέρμανση των μηχανικών μερών των γεννητριών έχει ως σκοπό την αποφυγή των θερμικών σοκ από την απότομη αύξηση της θερμοκρασίας. Αυτό μπορεί να προκαλέσει σοβαρά προβλήματα τόσο στα έμβολα και στα εμβολοχιτώνια όσο σε άλλα συστήματα της γεννήτριας. Η θέρμανση του καυσίμου από την άλλη πλευρά έχει ως στόχο την επίτευξη του σωστού ιξώδους για την ροή και την έγχυση του καυσίμου. Θυμίζουμε πως το ιξώδες ενός υγρού εξαρτάται άμεσα από την θερμοκρασία του. Τέλος η λίπανση και ιδιαίτερα η προλίπανση της γεννήτριας αποτελεί βασικό μέλημα της εκκίνησης αφού εξασφαλίζει την ελάχιστη δυνατή φθορά των τριβούμενων μηχανικών μερών του κινητήρα. Με αυτό τον τρόπο καταλαβαίνουμε πως οι συνεχείς μεταβολές του φορτίου και ιδιαίτερα οι μεγάλες οι οποίες επιβάλλουν εκκίνηση επιπρόσθετης γεννήτριας καταπονούν τις γεννήτριες με αποτέλεσμα την συχνότερη και ακριβότερη συντήρησή τους. Αυτά τα προβλήματα θα προσπαθήσουμε να επιλύσουμε με την χρήση ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας. Για να λειτουργήσει πιο αποδοτικά η εγκατάστασή μας θα πρέπει να γνωρίζουμε και τις άλλες εγκατεστημένες πηγές ενέργειας.

### **3.2.2 Αιολικό πάρκο Καρπάθου**

Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς αιολικής ενέργειας στην Κάρπαθο είναι 1,315 MW. Πιο αναλυτικά το αιολικό πάρκο αποτελείται από 2 ανεμογεννήτριες των 245 kW, 5

ανεμογεννήτριες των 65 kW και μια ανεμογεννήτρια 500 kW. Τις πληροφορίες αυτές μου τις διέθεσε ο Διευθυντής του ΑΣΠ Καρπάθου κύριος Καρανικόλαος Αντώνιος.

Στην περιοχή του Αγίου Ιωάννη βρίσκονται οι 5 ανεμογεννήτριες των 65 kW. Το αιολικό αυτό πάρκο ξεκίνησε να λειτουργεί το 1991 και αποτελείται από ανεμογεννήτριες της εταιρίας Windmatic, που στη συνέχεια αγοράστηκε από την Vestas. Παρότι οι συγκεκριμένες ανεμογεννήτριες είναι σταθερών στροφών χωρίς έλεγχο βήματος, δουλεύουν αποδοτικά και για χαμηλές ταχύτητες ανέμου, γιατί η ηλεκτρική ισχύς επάγεται από μια ασύγχρονη γεννήτρια διπλής περιέλιξης που λειτουργεί σε δυο σκάλες.

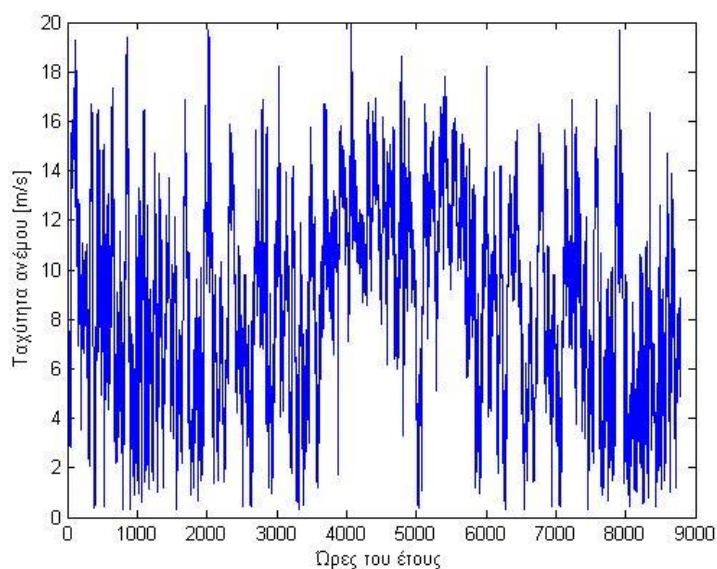


Φωτογραφία 3.2 Ανεμογεννήτριες στο αιολικό πάρκο του Αγίου Ιωάννη [29]



Φωτογραφία 3.3 Αιολικό πάρκο στην Κάρπαθο[46]

Για την εύρεση της παραγόμενης ισχύος του αιολικού πάρκου θα πρέπει να γνωρίζουμε κατ' αρχάς τα ωριαία ανεμολογικά δεδομένα της περιοχής και κατά δεύτερον να γνωρίζουμε την καμπύλη ισχύος των ανεμογεννητριών. Ειδικότερα για την καμπύλη ισχύος των ανεμογεννητριών θα ασχοληθούμε αργότερα σε επόμενο κεφάλαιο. Με σκοπό την εύρεση των πιο πρόσφατων ανεμολογικών δεδομένων για το νησί της Καρπάθου μέσω του κ. Ριζιώτη, λέκτορα στον Τομέα Ρευστών των Μηχανολόγων Μηχανικών, έλαβα τα δεδομένα από τον κύριο Στεφανάτο και τον κύριο Μουζάκη προϊστάμενο του τμήματος αιολικής ενέργειας του ΚΑΠΕ. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η ωριαία ταχύτητα του ανέμου για το έτος 1999-2000 το οποίο ήταν το πιο πρόσφατο διαθέσιμο έτος. Αξίζει να σημειωθεί πως οι μετρήσεις έγιναν σε ύψος 64 m [61].



Διάγραμμα 3.4 Ταχύτητα ανέμου του έτους 1999-2000 για την Κάρπαθο [61]

### 3.2.3 Φωτοβολταϊκό πάρκο

Η εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών συστημάτων στο νησί της Καρπάθου είναι 1,170 MW. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα δεν είναι συγκεντρωμένα σε ένα μέρος όπως το αιολικό πάρκο και οι Diesel γεννήτριες του ΑΣΠ Καρπάθου, αλλά διανεμημένα σε μεγάλο τμήμα του νησιού καθώς υπάρχουν και πολλοί ιδιώτες με εγκατεστημένα φωτοβολταϊκά σε σπίτια. Η απορρόφηση της παραγόμενης ενέργειας των φωτοβολταϊκών συστημάτων γίνεται με μεγαλύτερη ευκολία καθώς αποτελούν πιο προβλέψιμη πηγή ενέργειας από το αιολικό πάρκο. Παρακάτω φαίνονται οι ηλιακοί συλλέκτες ενός εγκατεστημένου φωτοβολταϊκού συστήματος.

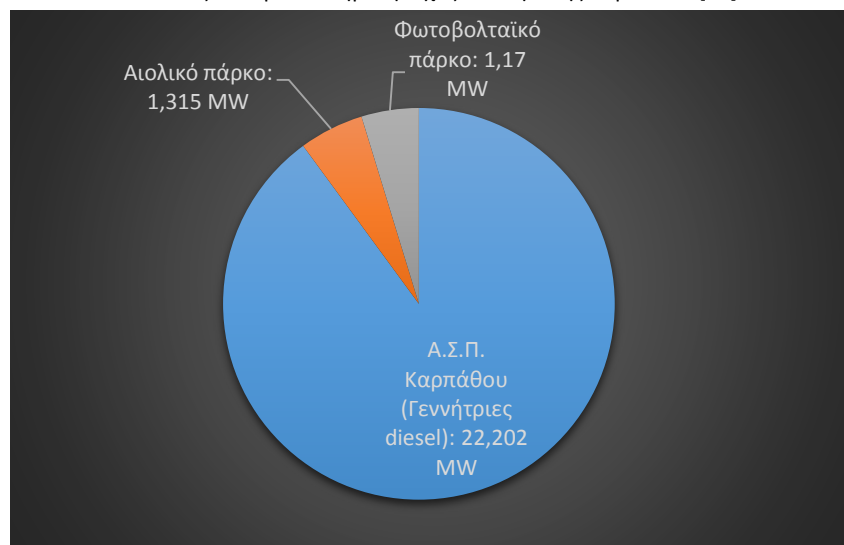


Φωτογραφία 3.5 Φωτοβολταϊκοί συλλέκτες [4]

Τα δεδομένα της αναλυτικής ωριαίας παραγόμενης ισχύς των φωτοβολταϊκών συστημάτων δεν είναι διαθέσιμα. Από την άλλη πλευρά είναι διαθέσιμα μέσα από τα δεδομένα της ΔΕΗ η μηνιαία παραγόμενη ενέργεια για κάθε μήνα του έτους των τελευταίων ετών. Στο επόμενο κεφάλαιο θα περιγραφεί ο αναλυτικός υπολογισμός που έγινε προκειμένου να έχουμε την παραγόμενη ισχύς των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Έπειτα μπορούμε να επαληθεύσουμε τα αποτελέσματα με τα δεδομένα της ΔΕΗ έτσι ώστε να εξακριβώσουμε την ορθότητα των αποτελεσμάτων. Συγκεντρωτικά ο παρακάτω πίνακας δείχνει την εγκατεστημένη ισχύ του νησιού.

Μονάδα παραγωγής	Εγκατεστημένη ισχύς (MW)
Α.Σ.Π. Καρπάθου (Γεννήτριες diesel)	22,202
Αιολικό πάρκο	1,315
Φωτοβολταϊκό πάρκο	1,170
Σύνολο	24,687

Πίνακας 3.1 Εγκατεστημένη ισχύς στο νησί της Καρπάθου [60]



Διάγραμμα 3.6 Εγκατεστημένη ισχύς στο νησί της Καρπάθου [60]



### 3.3 Κλιματικά και μετεωρολογικά δεδομένα

Για τους ωριαίους υπολογισμούς που θα κάνουμε θα χρειαστούμε τόσο την ωριαία θερμοκρασία του αέρα όσο και την ωριαία θερμοκρασία του νερού. Η ωριαία θερμοκρασία του αέρα χρειάζεται στον υπολογισμό του βαθμού απόδοσης τόσο των φωτοβολταϊκών συστημάτων, όσο και των ηλιακών θερμικών συστημάτων. Η απόδοση των φωτοβολταϊκών και των θερμικών ηλιακών συστημάτων επηρεάζονται από την θερμοκρασία του αέρα και μάλιστα η απόδοσή τους μειώνεται καθώς η θερμοκρασία του περιβάλλοντος αυξάνεται, επομένως είναι ένα στοιχείο που δεν θα μπορούσαμε να παραλείψουμε. Η θερμοκρασία του νερού χρειάζεται διότι ο συμπυκνωτής του κύκλου ORC θα ψύχεται με θαλασσινό νερό. Επομένως η γνώση της θερμοκρασίας του νερού κρίνεται αναγκαία σε ωριαίο χρόνο.

#### 3.3.1 Υπολογισμός ωριαίας θερμοκρασίας αέρος

Με σκοπό την εύρεση των ωριαίων θερμοκρασιών του αέρα και με δεδομένο πως δεν βρέθηκαν μετρήσεις της θερμοκρασίας ο υπολογισμός που έγινε βασίστηκε την μέθοδο που περιγράφεται στο βιβλίο του ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΥ του καθηγητή Ε.Μ. Πολυτεχνείου κυρίου Κίμωνος Αντωνόπουλου. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν οι τύποι Φ.6.4 σελίδα 69 και Δ.5.1 σελίδα 211. Αναλυτικά ο τύπος Φ.6.4 μας δίνει την ημερήσια μεταβολή της μέσης θερμοκρασίας ξηρής σφαίρας περιβάλλοντος στην περιοχή της Αθήνας όπως προέκυψε από την στατιστική επεξεργασία των σχετικών μετρήσεων της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας, στον Τομέα Θερμότητας Ε.Μ.Π.. Παρακάτω φαίνεται ο τύπος Φ.6.4:

$$t_o(H) = M + \sum_{i=1}^3 C_i \cos \left[ i \frac{360}{24} (H - 0.5) \right] + \sum_{i=1}^3 S_i \sin \left[ i \frac{360}{24} (H - 0.5) \right] \quad (1)$$

όπου **H** η ώρα της ημέρας 1:24

όπου **M, C<sub>i</sub>, S<sub>i</sub>** συντελεστές που δίνονται ανάλογα με τον μήνα του έτους

Μήνας	M	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>
Ιανουάριος	9,384	-1,673	0,711	0,0085	-1,723	0,524	-0,241
Φεβρουάριος	10,984	-2,15	0,785	-0,107	-1,75	0,578	-0,0724
Μάρτιος	11,955	-1,858	0,651	-0,0097	-1,084	0,255	-0,0093
Απρίλιος	15,072	-2,668	0,727	0,269	-1,763	0,243	0,212
Μάϊος	20,724	-2,795	0,759	0,0926	-1,344	0,119	0,308
Ιούνιος	26,192	-3,393	1,115	0,156	-2,196	-0,139	0,157
Ιούλιος	28,080	-3,359	0,811	0,272	-2,077	0,134	0,14
Αύγουστος	27,880	-3,113	0,884	0,067	-1,978	0,486	0,361
Σεπτέμβριος	23,236	-3,31	1,035	-0,0495	-1,696	0,477	0,221
Οκτώβριος	18,144	-2,63	1,085	-0,144	-1,427	0,6040	0,138
Νοέμβριος	11,968	-1,3	0,616	-0,252	-0,317	0,629	-0,049
Δεκέμβριος	9,264	-1,11	0,521	-0,152	-0,881	0,333	0,008

Πίνακας 3.2 Συντελεστές για την εύρεση της θερμοκρασίας του αέρα

Οι τιμές αυτές αναφέρονται στην 21<sup>η</sup> ημέρα του κάθε μήνα θεωρώντας την αντιπροσωπευτική του μήνα. Με αυτόν τον τρόπο έχουμε την ημερήσια κατανομή της θερμοκρασίας για κάθε αντιπροσωπευτική ημέρα κάθε μήνα του έτους για την Αθήνα. Για να υπολογίσουμε σε επόμενο βήμα την ωριαία τιμή της θερμοκρασίας για την Κάρπαθο θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε την σχέση Δ.5.1 σύμφωνα με την οποία γίνεται κατά προσέγγιση ο υπολογισμός της θερμοκρασίας. Ο σχέση είναι η εξής:

$$T_e^{KA} = T_e^{A\theta} + \bar{T}_o^{KA} - \bar{T}_o^{A\theta} \quad (2)$$

όπου

$T_e^{KA}$  η ισοδύναμη θερμοκρασία της Καρπάθου

$T_e^{A\theta}$  η ισοδύναμη θερμοκρασία Αθηνών

$\bar{T}_o^{KA}$  μέση θερμοκρασία 24ώρου εξωτερικού αέρος Καρπάθου

$\bar{T}_o^{A\theta}$  μέση θερμοκρασία 24ώρου εξωτερικού αέρα Αθηνών

Οι μέσες θερμοκρασίες 24ώρου κάθε ημέρας υπολογίζονται από τον τύπο:

$$\bar{T}'_o = a + b \sin \left[ \frac{360 * n}{365} - f \right] \quad (3)$$

όπου

$n$  η ημέρα του έτους

$a, b, f$  συντελεστές οι οποίοι δίνονται για κάθε πόλη

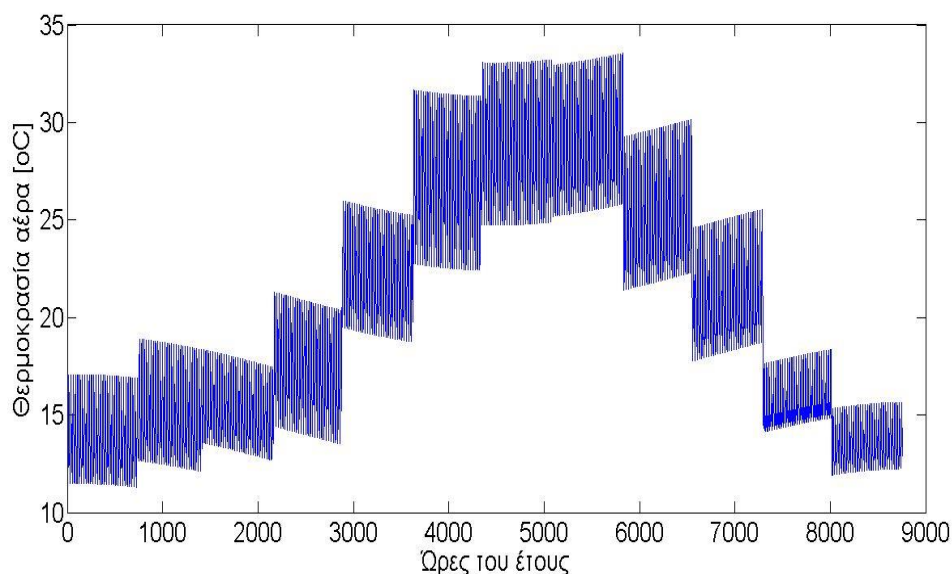
Ενδεικτικά παραθέτουμε τις τιμές για τις δυο πόλεις που χρειαζόμαστε:

Πόλη	a (°C)	b (°C)	f (μοίρες)
Αθήνα	17,521	-9,107	-63,611
Κάρπαθος	20,033	-7,395	-58,336

Πίνακας 3.3 Συντελεστές για την εύρεση της θερμοκρασίας στην Κάρπαθο

Για την αντικατάσταση  $T_e^{A\theta}$  θα χρησιμοποιήσουμε την κατανομή της θερμοκρασίας  $t_o(H)$  που υπολογίσαμε προηγουμένως. Επομένως για όλες τις ημέρες του μήνα η  $T_e^{A\theta}$  είναι κοινή αλλά διαφορετική για κάθε μήνα. Αντίθετα οι  $\bar{T}_o^{KA}, \bar{T}_o^{A\theta}$  αλλάζουν για κάθε ημέρα αλλά έχουν σταθερή τιμή καθ' όλη την διάρκεια της ημέρας. Συμπερασματικά έχουμε την  $T_e^{A\theta}$  ως συνάρτηση της ώρας της ημέρας, διαφορετική για κάθε μηνά και τις  $\bar{T}_o^{KA}, \bar{T}_o^{A\theta}$  ως συνάρτηση της ημέρας του χρόνου. Επομένως κατανοούμε πως το αποτέλεσμα που προκύπτει προσομοιάζει την πραγματικότητα αφού κάθε ημέρα έχει το δικό της μοναδικό προφίλ θερμοκρασίας. Στο παρακάτω

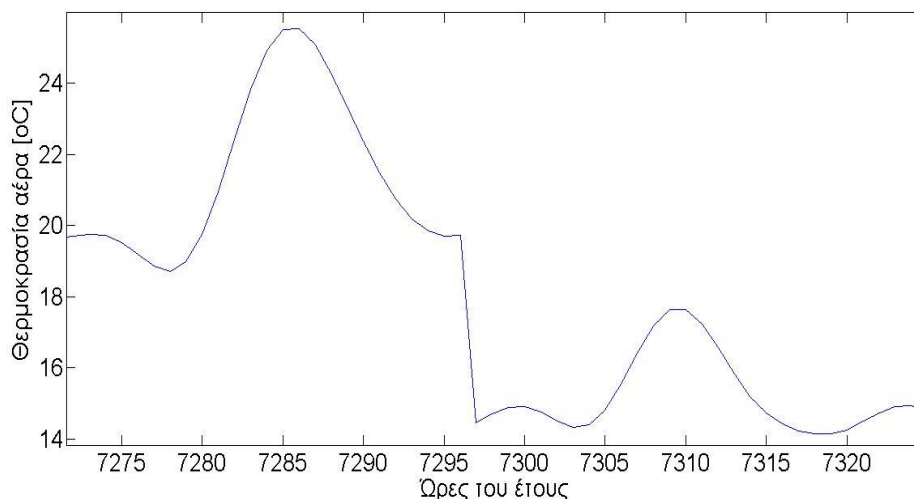
διάγραμμα φαίνεται η κατανομή της θερμοκρασίας του αέρα για όλες τις ώρες του έτους.



Σχήμα 3.7 Θερμοκρασία αέρα κατά τη διάρκεια του έτους

Στο διάγραμμα παρατηρούμε πως η κατανομές θερμοκρασιών κάθε μήνα ξεχωρίζουν αισθητά από τον επόμενο και το προηγούμενο μήνα και αυτό οφείλεται στο γεγονός πως οι σχέσεις προέρχονται από μέσους όρους πειραματικών δεδομένων με τέτοιο τρόπο ώστε να αντιπροσωπεύουν όλο τον μήνα ( $t_o(\mathbf{H}) = \mathbf{T}_e^{A\theta}$ ). Από την άλλη πλευρά κάθε ημέρα του μήνα έχει το δικό της προφίλ θερμοκρασίας που οφείλεται στην μεταβλητή, ως προς την ημέρα του χρόνου, τιμή της διαφοράς  $\bar{T}_o^{KA} - \bar{T}_o^{A\theta}$ . Επομένως κάθε μέρα έχει λίγο διαφορετικό προφίλ από την επόμενη και προηγούμενη. Εκεί όπου παρατηρείται μια μεγάλη διαφορά είναι στις αλλαγές του μήνα. Επειδή σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η  $t_o(\mathbf{H}) = \mathbf{T}_e^{A\theta}$ , η οποία αλλάζει κάθε μήνα παρατηρούνται αυτές οι απότομες αλλαγές. Ο λόγος για τον οποίο εμφανίζονται όπως αναφέραμε είναι πως οι σχέσεις αυτές προέκυψαν από μέσους όρους και προσαρμογές ώστε κάθε ημερήσιο προφίλ να αντιπροσωπεύει τον αντίστοιχο μήνα.

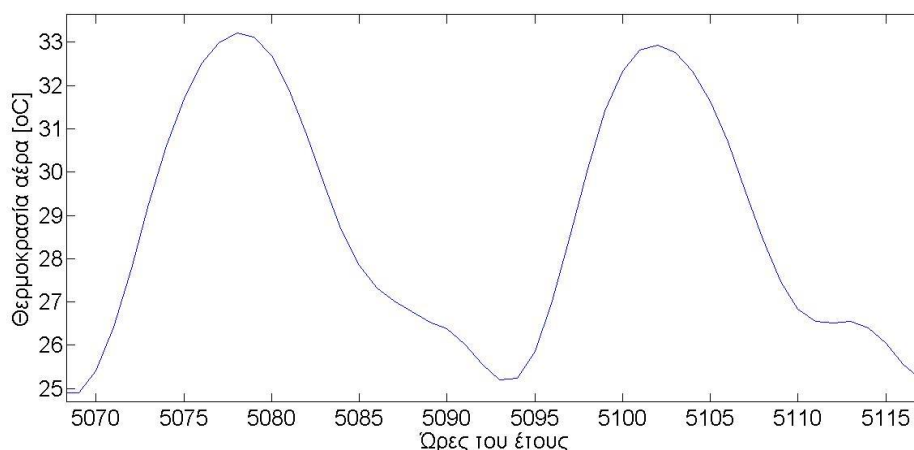
Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η απότομη αλλαγή στα προφίλ των θερμοκρασιών κατά την αλλαγή του μήνα. Να τονιστεί πως δεν είναι όλες οι εναλλαγές των μηνών με μεγάλη θερμοκρασιακή διαφορά.



Διάγραμμα 3.8 Μέγιστη θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στις 31 Οκτωβρίου και 1 Νοεμβρίου

Παρατηρούμε πως από τις 31 Οκτωβρίου με μέση θερμοκρασία περίπου 22 °C μεταπέφτουμε στους 16 °C την 1 Νοεμβρίου. Η μεγάλη αυτή διαφορά οφείλεται όπως αναφέραμε και πριν στην προσπάθεια εύρεσης μια αντιπροσωπευτικής κατανομής για κάθε μήνα και στο γεγονός πως συνήθως ο Νοέμβριος έχει αρκετά μικρότερες θερμοκρασίες από τον Οκτώβριο. Επιπλέον παρατηρούμε διαφορά στο εύρος των θερμοκρασιών των δύο μηνών με το «πλάτος» στις 31 Οκτωβρίου να είναι σαφώς μεγαλύτερο από το αντίστοιχο του Νοεμβρίου.

Αντιθέτως ανάμεσα στον Ιούλιο και τον Αύγουστο παρατηρείται η ελάχιστη διαφορά θερμοκρασίας στις εναλλαγές των μηνών.

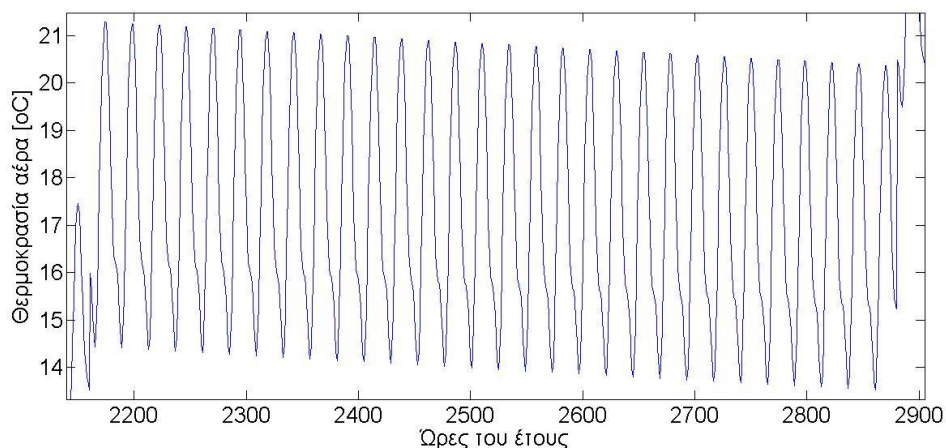


Διάγραμμα 3.9 Ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στις 31 Ιουλίου και 1 Αυγούστου

Στο διάγραμμα 3.9 βλέπουμε μεγάλη ομοιότητα στις δύο θερμοκρασιακές κατανομές τόσο στην μέση τιμή και στις μέγιστες και ελάχιστες τιμές όσο και στο εύρος των θερμοκρασιών πράγμα που δεν υπήρχε στις αντίστοιχες του

διαγράμματος 3.8. Επομένως η μετάβαση από τον μήνα Ιούλιο στον Αύγουστο γίνεται πολύ ομαλά.

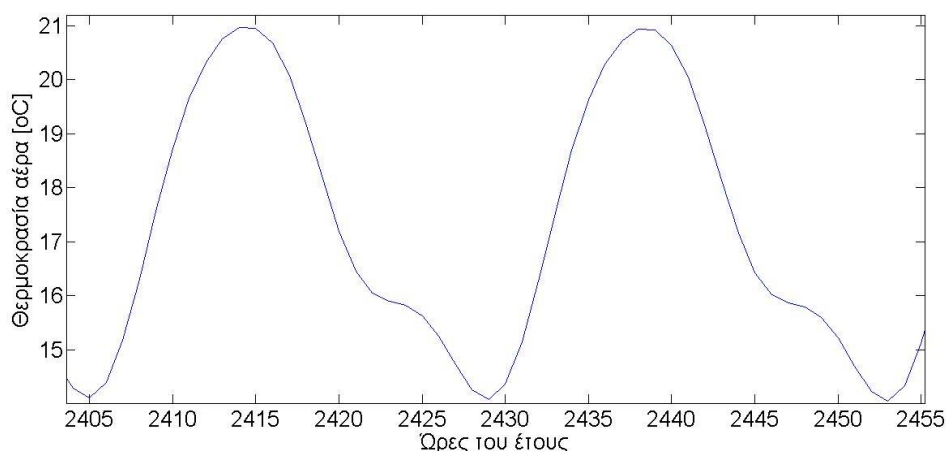
Για την πλήρη κατανόηση του διαγράμματος 3.7 παραθέτουμε το θερμοκρασιακό προφίλ του μήνα Απριλίου.



Διάγραμμα 3.10 Θερμοκρασιακό προφίλ του μήνα Απριλίου

Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται ξεκάθαρα η επίδραση του όρου  $\bar{T}_o^{KA} - \bar{T}_o^{A\theta}$  διότι αν και η μορφή της κατανομής παραμένει η ίδια, το θερμοκρασιακό προφίλ κάθε ημέρας έχει διαφορετική μέση τιμή με αποτέλεσμα κάθε θερμοκρασιακή κατανομή να είναι ξεχωριστή. Η διαφορά ανάμεσα σε δύο διαδοχικές ημέρες είναι πολύ μικρή αλλά αρκετή για την διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων. Εξάλλου ιδανικά κάθε μέρα θα ήταν ελαφρώς ψυχρότερη ή θερμότερη από την προηγούμενή της και αυτό αποτυπώνουν οι σχέσεις.

Στο παρακάτω διάγραμμα παραθέτουμε την θερμοκρασιακή κατανομή δυο διαδοχικών ημερών του ίδιου μήνα.



Σχήμα 3.11 Θερμοκρασιακό προφίλ δυο διαδοχικών ημερών του μήνα Απριλίου

Όπως μπορούμε να δούμε δύσκολα μπορεί να δει κανείς τις διαφορές που υπάρχουν μεταξύ των δύο θερμοκρασιακών κατανομών. Παρ' όλα αυτά στο διάγραμμα 3.10 δείξαμε τις διαφορές που υπάρχουν.

Επομένως έχοντας διαθέσιμες τις τιμές της θερμοκρασίας αέρος για κάθε ώρα του έτους μπορούμε να προχωρήσουμε στους υπολογισμούς που απαιτούν το μέγεθος αυτό.

### 3.3.2 Υπολογισμός ωριαίας θερμοκρασίας νερού

Το επόμενο μέγεθος που χρειάζεται να προσδιορίσουμε είναι η ωριαία τιμή της θερμοκρασίας του νερού θαλάσσης. Θυμίζουμε πως την θερμοκρασία του νερού την χρειαζόμαστε για το υπολογισμό της θερμοκρασίας στην οποία θα λειτουργεί ο συμπυκνωτής στον κύκλο ORC κατά την παραγωγή ενέργειας. Δυστυχώς δεν βρέθηκε κάποια κατανομή θερμοκρασίας του νερού θαλάσσης και για αυτό το λόγο χρησιμοποιήσαμε τις τιμές που μας δίνει το ΤΕΧΝΙΚΟ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟ ΕΛΛΑΔΑΣ ως η καλύτερη εναλλακτική προσέγγιση. Εξάλλου η θερμοκρασία του νερού του δικτύου δεν διαφέρει αρκετά από την θερμοκρασία του νερού της θάλασσας. Πιο συγκεκριμένα στην ΤΕΧΝΙΚΗ ΟΔΗΓΙΑ Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-3/2010 δίνονται οι μέσες θερμοκρασίες νερού δικτύου για κάθε μήνα του έτους για διαφορετικές περιοχές της Ελλάδας. Στις περιοχές που δίνονται στην ΤΕΧΝΙΚΗ ΟΔΗΓΙΑ δεν συμπεριλαμβάνεται η Κάρπαθος. Γεωγραφικά η Κάρπαθος βρίσκεται ανάμεσα στην Ρόδο και στην Ιεράπετρα της Κρήτης, επομένως μπορούμε με ικανοποιητική ακρίβεια να χρησιμοποιήσουμε την μέση τιμή των δυο αυτών περιοχών οι οποίες δεν απέχουν και μεγάλη απόσταση μεταξύ τους. Θα μπορούσαμε να λάβουμε υπόψιν τις τιμές μόνο της Ρόδου αλλά η μέση τιμή των δυο περιοχών θα προσδώσει μεγαλύτερη προσέγγιση των τιμών. Επομένως διαθέτουμε μια μέση τιμή για την θερμοκρασία του νερού για κάθε μήνα.

Μήνας	Ρόδος	Ιεράπετρα	Κάρπαθος
Ιανουάριος	13,5	15,4	14,45
Φεβρουάριος	12,9	14,7	13,80
Μάρτιος	13,4	15,3	14,35
Απρίλιος	16,0	17,5	16,75
Μάιος	19,3	21,2	20,25
Ιούνιος	22,7	25,1	23,90
Ιούλιος	25,4	27,7	26,55
Αύγουστος	26,0	28,7	27,35
Σεπτέμβριος	25,1	27,4	26,25
Οκτώβριος	22,4	24,8	23,60
Νοέμβριος	18,4	21,2	19,80
Δεκέμβριος	15,2	17,7	16,45

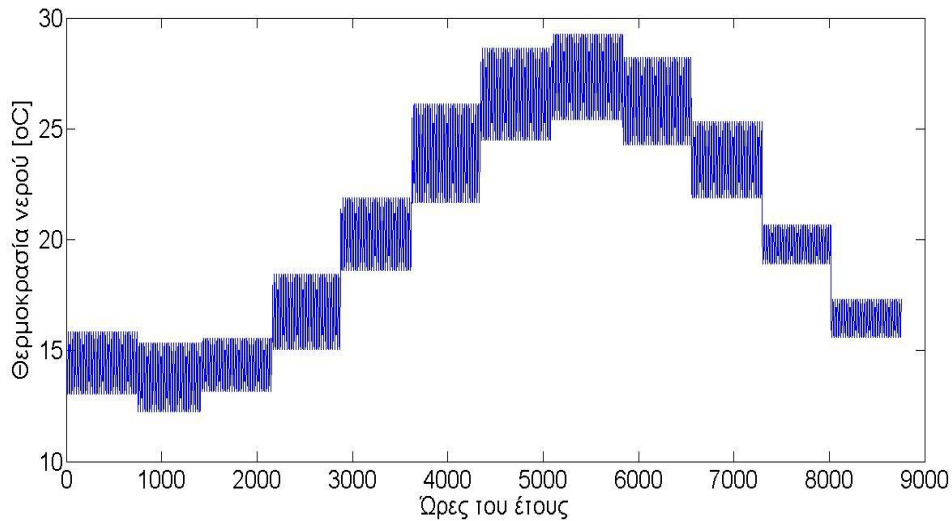
Πίνακας 3.4 Μέση θερμοκρασία θάλασσας για κάθε μήνα σύμφωνα με TOTEE [25]

Αυτό όμως που χρειαζόμαστε είναι η ωριαία κατανομή της θερμοκρασίας για όλες τις ώρες του έτους. Γνωρίζουμε πως η κατανομή της θερμοκρασίας του νερού ακολουθεί περίπου μια ημιτονοειδής καμπύλη, το μέγιστο της οποίας είναι κατά τις απογευματινές ώρες. Παρ' όλα αυτά δεν γνωρίζουμε ούτε το μέγιστο πότε εμφανίζεται ακριβώς ούτε το πλάτος της ημιτονοειδούς συνάρτησης που περιγράφει την κατανομή της θερμοκρασίας. Αυτό που γνωρίζουμε είναι η ωριαία κατανομή της θερμοκρασίας του αέρα και με βάση αυτή θα προσπαθήσουμε να προσδιορίσουμε και την ωριαία κατανομή της θερμοκρασίας του νερού. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να κάνουμε δυο παραδοχές.

Η πρώτη παραδοχή που θα κάνουμε αναφέρεται στο πλάτος της ημιτονοειδούς συνάρτησης. Με δεδομένη την μέση τιμή της θερμοκρασίας για κάθε μήνα μας λείπει το πλάτος της. Γνωρίζοντας πως η θερμοχωρητικότητα του νερού είναι 4 φορές περίπου μεγαλύτερη από αυτήν του αέρα μια πολύ καλή παραδοχή αντίστοιχα είναι πως το εύρος των θερμοκρασιών του αέρα θα είναι 4 φορές μεγαλύτερο από το αντίστοιχο του νερού. Αυτή η παραδοχή στηρίζεται στο γεγονός πως όσο μεγαλύτερη η θερμοχωρητικότητα τόσο μικρότερη η μεταβολή της θερμοκρασίας για δεδομένη προσδιδόμενη θερμότητα. Επομένως γνωρίζουμε το πλάτος της ημιτονοειδούς συνάρτησης που περιγράφει την θερμοκρασία για κάθε ημέρα.

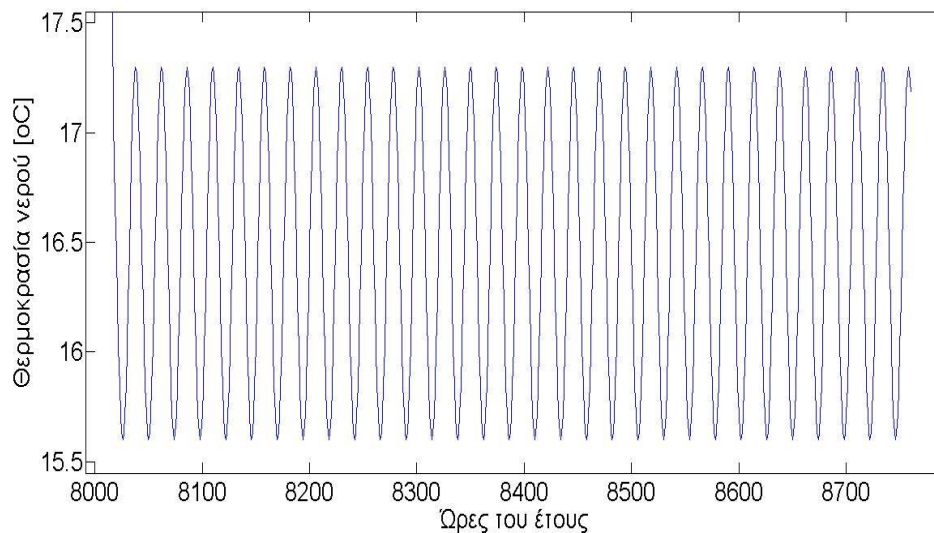
Η δεύτερη παραδοχή που θα κάνουμε αναφέρεται στην θέση της μέγιστης τιμής της θερμοκρασίας. Θεωρώντας πως κατά την διάρκεια της ημέρας ο ήλιος, έστω και κατά την δύση του, προσδίδει θερμότητα στη θάλασσα. Έτσι η μέγιστη θερμοκρασία θα εμφανίζεται λίγο αργότερα καθώς και ο αέρας, θερμότερος λίγο μετά την δύση του ηλίου, θα θερμαίνει για λίγο την θάλασσα. Για διευκόλυνση των υπολογισμών θεωρούμε πως στις 22:00 κάθε ημέρας η θερμοκρασία της θάλασσας θα είναι μέγιστη.

Τελικά γνωρίζοντας την μέση τιμή της θερμοκρασίας, το γεγονός πως περιγράφεται από ημιτονοειδής συνάρτηση, το πλάτος της ημιτονοειδούς συνάρτησης και την ώρα εμφάνισης της μέγιστης θερμοκρασίας μπορούμε να υπολογίσουμε την ωριαία κατανομή της θερμοκρασίας του νερού της θάλασσας. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η κατανομή της θερμοκρασίας του νερού κατά την διάρκεια το έτους.



Διάγραμμα 3.12 Θερμοκρασία νερού κατά την διάρκεια του έτους

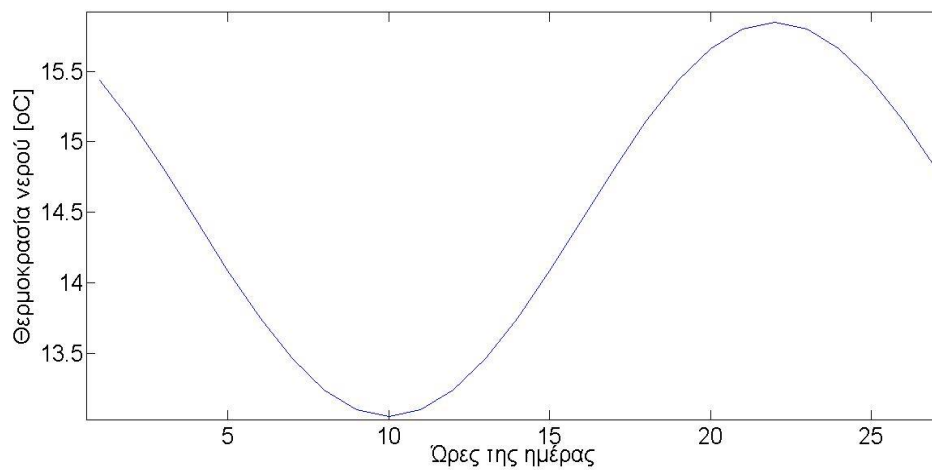
Παρατηρώντας το παραπάνω διάγραμμα βλέπουμε πως η κατανομή είναι παρόμοια με εκείνη της ωριαίας θερμοκρασίας του αέρα κάτι το οποίο αναμέναμε. Σε δεύτερη ανάλυση παρατηρούμε πως κάθε ημέρα του μήνα έχει ακριβώς το ίδιο προφίλ θερμοκρασίας και αυτό οφείλεται στο γεγονός πως το εύρος των θερμοκρασιών του αέρα είναι σταθερό για όλο το μήνα αφού καθορίζεται από την σχέση Φ.6.4 η οποία είναι ίδια για όλες τις ημέρες του μήνα. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται ακριβώς αυτή η παρατήρηση.



Διάγραμμα 3.13 Θερμοκρασία νερού κατά τον Δεκέμβριο

Το προφίλ της θερμοκρασίας του νερού είναι ίδιο για όλες τις ημέρες του μήνα. Αυτή η προσέγγιση προσομοιάζει την πραγματικότητα αφού η μεταβολή της θερμοκρασίας της θάλασσας κατά την διάρκεια του μήνα είναι πολύ μικρή.



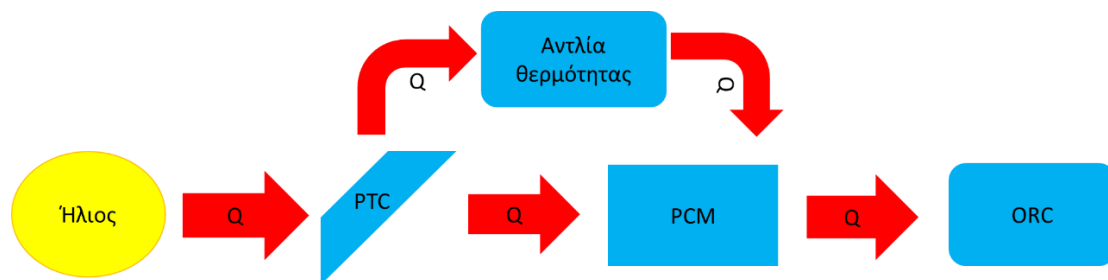


Διάγραμμα 3.14 Τυπικό Θερμοκρασιακό προφίλ νερού θαλάσσης

Με αυτόν τον τρόπο διαθέτουμε και τις ωριαίες θερμοκρασίες του νερού αλλά και του αέρα για το νησί της Καρπάθου. Επόμενο βήμα αποτελεί η ανάλυση των επιμέρους στοιχείων που θα συνθέσουν την εγκατάσταση.

## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>: Ανάλυση επιμέρους τμημάτων της εγκατάστασης

### 4.1 Αναλυτικός προσδιορισμός βασικών στοιχείων της εγκατάστασης



Σχήμα 4.1 Πλήρης διάγραμμα τμημάτων εγκατάστασης

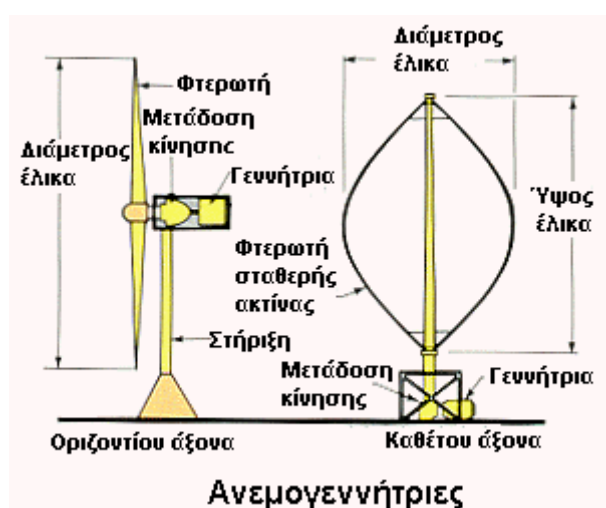
Αρχικά όπως προαναφέραμε η εγκατάσταση μας θα εκμεταλλεύεται την ηλιακή ενέργεια μέσω ηλιακών συλλεκτών με σκοπό την θέρμανση νερού. Έπειτα το υψηλής θερμοκρασίας νερό θα θερμαίνει το (PCM) αποθηκεύοντας θερμική ενέργεια. Αν το νερό δεν είναι αρκετά ζεστό τότε θα χρησιμοποιείται στον ατμοποιητή της αντλίας θερμότητας με σκοπό την θέρμανση κάποιου οργανικού μέσου. Μέσω της αντλίας θερμότητας το οργανικό μέσο θα θερμαίνει το PCM. Αυτό θα επιτυγχάνεται καθώς στον συμπυκνωτή της αντλίας θερμότητας, το οργανικό μέσο θα αποβάλει θερμότητα την οποία θα προσλαμβάνει το υλικό αλλαγής φάσης με κατάλληλο εναλλάκτη θερμότητας. Η «φόρτιση» του PCM θα γίνεται προφανώς τις πρωινές και μεσημεριανές ώρες όπου η ηλιακή ενέργεια είναι μέγιστη. Όλες τις υπόλοιπες ώρες η εγκατάσταση θα μπορεί να παράγει ηλεκτρική ενέργεια μέσω του οργανικού κύκλου ORC. Η θερμότητα θα προσδίδεται από το υλικό αλλαγής φάσης εφόσον διαθέτει αρκετή αποθηκευμένη θερμική ενέργεια. Ο συμπυκνωτής του κύκλου θα ψύχεται με νερό θαλάσσης όπως αναφέραμε προηγουμένως. Το σύστημα θα παράγει ενέργεια τις ώρες που επιθυμούμε με μόνο εσωτερικό περιορισμό την αποθηκευμένη ενέργεια στο PCM. Για πλήρη επίγνωση της κατάστασης και των συνθηκών όπου θα λειτουργήσει η εγκατάστασή μας θα πρέπει να εξετάσουμε και τις ήδη υπάρχουσες πηγές ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή το αιολικό πάρκο και τα φωτοβολταϊκά συστήματα.

## 4.2 Αιολικό πάρκο

### 4.2.1 Ανεμογεννήτριες

Οι παλιοί ανεμόμυλοι που υπάρχουν στις περισσότερες χώρες του κόσμου μαρτυρούν ότι εδώ και πολλά χρόνια οι άνθρωποι εκμεταλλεύονται την ενέργεια του αέρα. Σήμερα η εκμετάλλευση του αέρα γίνεται σχεδόν αποκλειστικά με ανεμογεννήτριες (Α/Γ). Οι ανεμογεννήτριες μετατρέπουν την ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική ενέργεια. Υπάρχουν πολλών ειδών Α/Γ, οι οποίες ταξινομούνται σε δύο βασικές κατηγορίες σύμφωνα με τον προσανατολισμό των αξόνων τους σε σχέση με τη ροή του ανέμου. Αυτές οι κατηγορίες είναι:

- Οριζοντίου άξονα
- Κατακόρυφου άξονα



Σχήμα 4.2 Ανεμογεννήτριες οριζοντίου και καθέτου άξονα [2]

Στις ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα ο δρομέας είναι τύπου έλικας και βρίσκεται συνεχώς κάθετος με την επιφάνεια του εδάφους και ακολουθεί την κατεύθυνση του αέρα. ενώ στις ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα ο δρομέας παραμένει σταθερός και είναι κάθετος στην επιφάνεια του εδάφους. Χωρίς να υπάρχει κάποιος ιδιαίτερος λόγος στην αγορά έχουν επικρατήσει σχεδόν αποκλειστικά οι ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα (περίπου το 90-95% των εγκατεστημένων Α/Γ παγκοσμίως είναι οριζοντίου άξονα). Μια ανεμογεννήτρια άξονα αποτελείται από τα ακόλουθα μέρη:

- Το δρομέα, ο οποίος αποτελείται από 2 ή 3 πτερύγια από ενισχυμένο πολυεστέρα. Υπάρχουν 2 τρόποι να προσδεθούν τα πτερύγια πάνω στην πλήμνη. Μπορούν να προσδεθούν είτε σταθερά ή έχοντας τη δυνατότητα να περιστρέφονται γύρω από το διαμήκη άξονα τους μεταβάλλοντας το βήμα.

- Το σύστημα μετάδοσης της κίνησης, που αποτελείται από τον κύριο άξονα, τα έδρανά του και το κιβώτιο πολλαπλασιασμού στροφών. Το κιβώτιο πολλαπλασιασμού στροφών, το οποίο τα τελευταία χρόνια αρχίζει να παραλείπεται με την ανάπτυξη ηλεκτρικών συστημάτων, προσαρμόζει την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα στη σύγχρονη ταχύτητα της ηλεκτρογεννήτριας.
- Το σύστημα προσανατολισμού, που αναγκάζει τον άξονα περιστροφής του δρομέα να βρίσκεται διαρκώς παράλληλα με τη διεύθυνση του ανέμου.
- Την ηλεκτρική γεννήτρια, η οποία μπορεί να είναι σύγχρονη ή επαγωγική με 4 ή 6 και περισσότερους στις Α/Γ χωρίς κιβώτιο, πόλους και συνδέεται με την έξοδο του πολλαπλασιαστή μέσω ενός ελαστικού ή υδραυλικού συνδέσμου. Μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική και βρίσκεται συνήθως πάνω στον πύργο της Α/Γ. Στον άξονα της Α/Γ ή στον κύριο άξονα τοποθετείται το σύστημα πέδης που είναι ένα συνηθισμένο δισκόφρενο.
- Τον πύργο. Ο πύργος είναι συνήθως σωληνωτός ή δικτυωτός ή σπανίως από οπλισμένο σκυρόδεμα και στηρίζει όλη την προαναφερθείσα ηλεκτρομηχανολογική εγκατάσταση.
- Τον ηλεκτρονικό πίνακα και τον πίνακα ελέγχου, που βρίσκονται τοποθετημένοι στη βάση του πύργου. Το σύστημα ελέγχου παρακολουθεί, συντονίζει και ελέγχει κάθε λειτουργία της ανεμογεννήτριας.

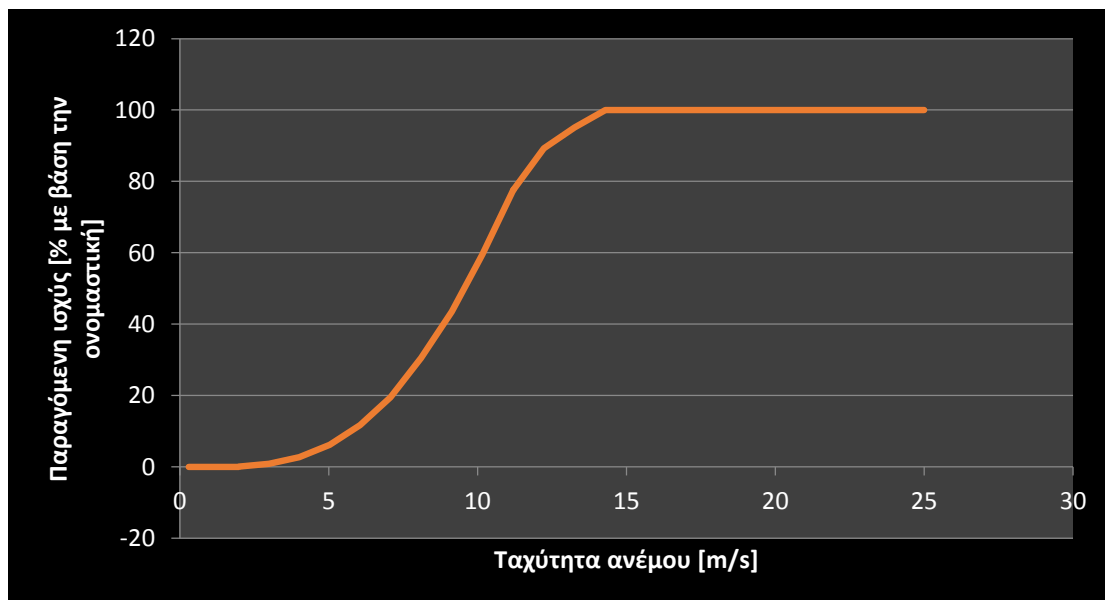
Η συνεχής εξέλιξη των σύγχρονων ανεμογεννητριών βασίζεται στον εντυπωσιακό συνδυασμό της τεχνολογικής και επιστημονικής δεξιότητας καθώς και του επιχειρηματικού πνεύματος. Κατά τη διάρκεια των τελευταίων 20 ετών έχει παρατηρηθεί αύξηση της ονομαστικής ισχύος κατά δύο τάξεις μεγέθους, ενώ το κόστος της παραγόμενης ενέργειας έχει μειωθεί δραστικά. Η τεχνολογική βάση και τα απαραίτητα υπολογιστικά εργαλεία έχουν εξελιχθεί ώστε να καλύπτουν κάθε φορά τις νέες ανάγκες. Το μεγαλύτερο ποσοστό της εγκατεστημένης αιολικής ισχύος σήμερα ανήκει σε ανεμογεννήτριες μεσαίου μεγέθους (800-3000 kW). Τεχνολογικά οι ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν:

1. Ως προς την πτερύγωση και χωρίζονται στις ακόλουθες κατηγορίες:
  - A. Σταθερού βήματος
  - B. Ελεγχόμενου βήματος
2. Ως προς το είδος της γεννήτριας και διακρίνονται σε:
  - A. Σύγχρονης γεννήτριας που λειτουργεί πάντα με μετατροπείς AC-DC-AC
  - B. Ασύγχρονης (επαγωγικής) γεννήτριας που μπορούν να λειτουργούν με ή χωρίς αντισταθμικούς πυκνωτές

3. Ως προς τον τρόπο μετάδοσης της κίνησης:
  - A. Χωρίς κιβώτιο κίνησης
  - B. Με κιβώτιο κίνησης (απλό ή πλανητικό)
4. Ως προς τα Ηλεκτρονικά Ισχύος διακρίνονται σε:
  - A. Ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών
  - B. Ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών

#### 4.2.2 Υπολογισμός παραγόμενης ενέργειας ανεμογεννητριών του αιολικού πάρκου

Προκειμένου να υπολογίσουμε την παραγόμενη ισχύ μιας ανεμογεννήτριας χρειαζόμαστε δυο βασικές παραμέτρους. Η πρώτη παράμετρος είναι τα ανεμολογικά δεδομένα τα οποία όπως προαναφέραμε ήδη διαθέτουμε. Το δεύτερο είναι η καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας. Η καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας μας δείχνει την παραγόμενη ισχύς της ανεμογεννήτριας συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου. Μαζί με τα ανεμολογικά δεδομένα που μου δόθηκαν υπήρχαν και δεδομένα σχετικά με την καμπύλη ισχύος ενός τύπου ανεμογεννήτριας εγκατεστημένης στην Κάρπαθο. Ανάγοντας την παραγόμενη ισχύς της καμπύλης ισχύος σε ποσοστό της ονομαστικής ισχύος έχουμε μια γενική καμπύλη ισχύος. Η καμπύλη αυτή φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Διάγραμμα 4.3 Καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας [61]

Στο διάγραμμα 4.3 φαίνεται η καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας που θα χρησιμοποιήσουμε η οποία έχει δοθεί μαζί με τα ανεμολογικά δεδομένα από τον

ΚΑΠΕ για το νησί της Καρπάθου. Θυμίζουμε πως στην Κάρπαθο έχουμε ανεμογεννήτριες τριών διαφορετικών ονομαστικών ισχύων. Οι ονομαστικές ισχύς είναι 65 MW, 245 MW και 500 MW. Επομένως μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την ίδια καμπύλη ισχύος με σκοπό τον υπολογισμό της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος και των τριών ειδών ανεμογεννητριών του νησιού. Ο πίνακας ταχυτήτων και παραγόμενης ισχύς φαίνεται στον παρακάτω πίνακα[61].

Ταχύτητα ανέμου [m/s]	Παραγόμενη ισχύς [% της ονομαστικής ισχύος]
0	0
1	0
2	0
3	0,88
4	2,71
5	6,08
6	11,42
7	18,93
8	29,43
9	41,82
10	57,00
11	74,13
12	86,68
13	93,65
14	98,61
15	100,00
16	100,00
17	100,00
18	100,00
19	100,00
20	100,00
21	100,00
22	100,00
23	100,00
24	100,00
25	100,00
>25	0

Πίνακας 4.1 Παραγόμενη ισχύς ανεμογεννητριών [61]

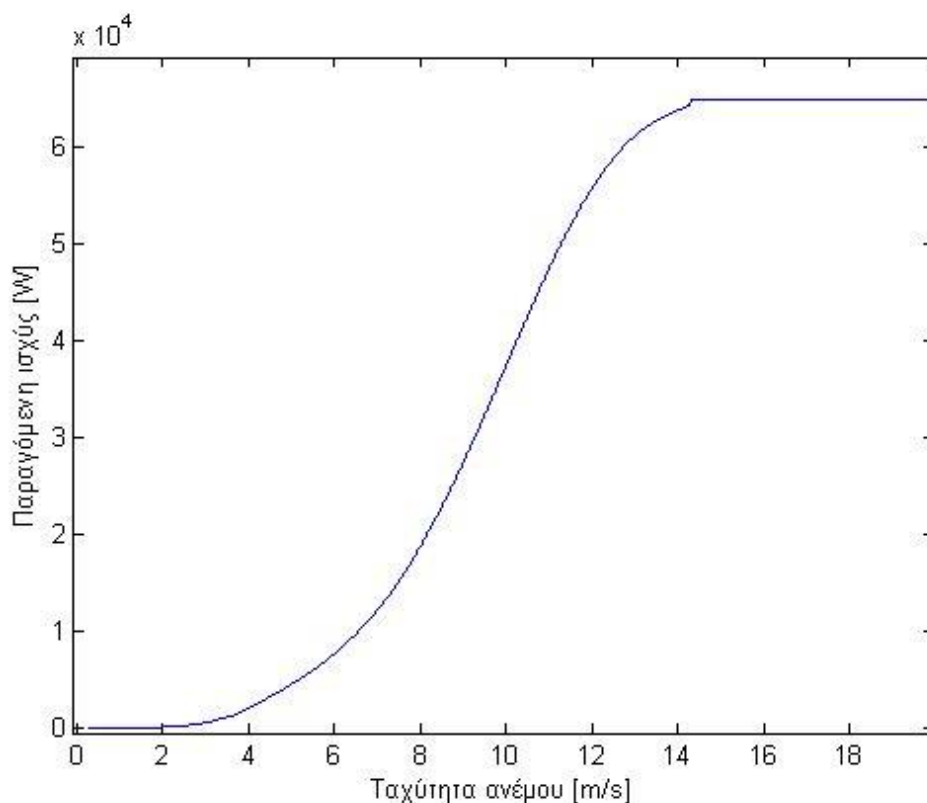
Στον παραπάνω πίνακα φαίνονται οι μετρούμενες τιμές που δόθηκαν για τον σχεδιασμό της καμπύλης ισχύος. Παρατηρούμε πως η ταχύτητα έναρξης λειτουργίας είναι 3 m/s, η ονομαστική ταχύτητα είναι 14,3 (η ακριβής τιμή βρέθηκε από τις αναλυτικές μετρήσεις που χάρη συντομίας δεν παραθέτονται) και η ταχύτητα διακοπής λειτουργίας είναι 25 m/s. Για την εισαγωγή των δεδομένων στο κώδικα χρησιμοποιήθηκε πολυώνυμο 6<sup>ου</sup> βαθμού με σκοπό την καλύτερη δυνατή

προσαρμογή των τιμών. Προφανώς η προσαρμογή έγινε για ταχύτητες ανέμου  **$2 < u_{wind} < 14,3$**  αφού για τις υπόλοιπες ταχύτητες η παραγόμενη ισχύς είναι σταθερή. Το πολυώνυμο που περιγράφει την καμπύλη ισχύος για τις τιμές ταχύτητας ανέμου που αναφέραμε είναι:

$$P_{wind} = 0.0006545 * u^6 - 0.0321 * u^5 + 0.6022 * u^4 - 5.5089 * u^3 + 26.779 * u^2 - 63.517 * u + 57.156$$

όπου  $u$  η ταχύτητα του ανέμου και  $P_{wind}$  το ποσοστό της παραγόμενης ισχύς σε σχέση με την ονομαστική ισχύς

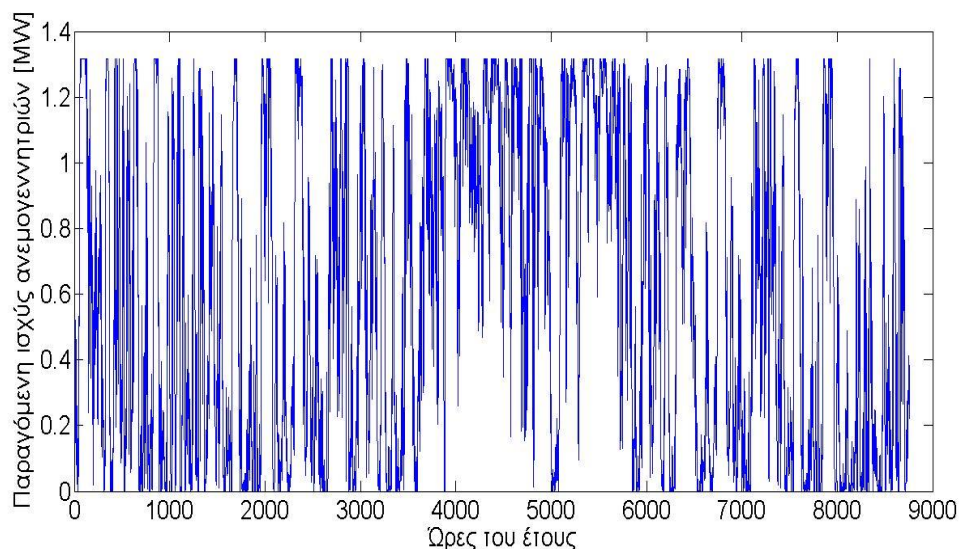
Να σημειωθεί πως ο συντελεστής συσχέτισης προκύπτει  $R^2 = 0,9997$ , γεγονός που μας δείχνει πως η προσέγγιση με αυτό το πολυώνυμο αποτυπώνει με μεγάλη ακρίβεια την μετρηθείσα από το ΚΑΠΕ καμπύλη ισχύος. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η καμπύλη ισχύος που προκύπτει από την μέθοδο που περιεγράφηκε παραπάνω και που εν τέλει χρησιμοποιήθηκε με σκοπό τον υπολογισμό της παραγόμενης ισχύος από το αιολικό πάρκο.



Διάγραμμα 4.4 Καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας με ονομαστική ισχύς 65 kW

Το διάγραμμα αποτυπώνει την καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας με ονομαστική ισχύς 65 kW. Με τον ίδιο τρόπο δημιουργούμε και τις καμπύλες ισχύος των δύο άλλων ανεμογεννητριών. Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να υπολογίσουμε την

ωριαία παραγόμενη ισχύς του αιολικού πάρκου. Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η παραγόμενη ισχύς των αιολικών πάρκων του νησιού, θυμίζοντας ότι στην Κάρπαθο είναι εγκατεστημένες 5 Α/Γ των 65 kW, 2 Α/Γ των 245 kW και μία Α/Γ των 500 kW [61].



Διάγραμμα 4.5 Παραγόμενη ισχύς των ανεμογεννητριών της Καρπάθου κατά την διάρκεια του έτους

### 4.3 Φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις

Γνωρίζοντας την εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών συστημάτων στην Κάρπαθο, το ζητούμενο μέγεθος που χρειαζόμαστε στους υπολογισμούς μας είναι η ωριαία παραγόμενη ισχύς. Αδυνατώντας να βρούμε τις ωριαίες μετρήσεις της παραγόμενης ισχύς των φωτοβολταϊκών στην Κάρπαθο θα πρέπει να υπολογίσουμε την ωριαία παραγόμενη ισχύ με άλλον ικανοποιητικά ακριβή τρόπο. Ο τρόπος με τον οποίο θα υπολογίσουμε την ωριαία ακτινοβολία είναι με βάση τις εξισώσεις του βιβλίου ΘΕΡΜΙΚΑ-ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ του κυρίου Αντωνόπουλου, καθηγητή του Ε.Μ.Πολυτεχνείου. Με γνωστή την ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να υπολογισθεί η παραγόμενη ισχύς των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων. Έπειτα θα επαληθεύσουμε τα αποτελέσματα με τα μηνιαία δεδομένα του ΔΕΔΗΕ.

#### 4.3.1 Φωτοβολταϊκά πάνελ

Φωτοβολταϊκό στοιχείο ονομάζεται η ηλεκτρονική διάταξη που παράγει Ηλεκτρική Ενέργεια όταν δέχεται ακτινοβολία. Ένα σύνολο φωτοβολταϊκών στοιχείων που είναι ηλεκτρονικά συνδεδεμένα χαρακτηρίζεται με τον όρο φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο (PV module) αποτελεί τη βασική δομική μονάδα της



φωτοβολταϊκής γεννήτριας. Ένα ή περισσότερα φωτοβολταϊκά πλαίσια που έχουν προκατασκευαστεί και συναρμολογηθεί σε ενιαία κατασκευή έτοιμα για να εγκατασταθούν ονομάζονται φωτοβολταϊκό πάνελ (PV panel). Φωτοβολταϊκή συστοιχία (PV array) ονομάζεται μια ομάδα από φωτοβολταϊκά πλαίσια ή πάνελ με ηλεκτρική αλληλοσύνδεση που βρίσκονται συνήθως τοποθετημένα σε κοινή κατασκευή στήριξης. Με τον όρο φωτοβολταϊκή γεννήτρια (PV generator) χαρακτηρίζουμε το τμήμα μιας εγκατάστασης που περιέχει φωτοβολταϊκά στοιχεία και παράγει συνεχές ρεύμα. Το επιθυμητό ρεύμα και η επιθυμητή τάση μπορούν να επιτευχθούν με τη σύνδεση φωτοβολταϊκών πλαισίων σε σειρά και παράλληλα.



Φωτογραφία 4.6 Φωτοβολταϊκό πάνελ AC-300P/156-72S [36]

### Φωτοβολταϊκά Στοιχεία

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι δίοδοι ημιαγωγών σε μορφή δίσκου, που καθώς δέχονται στην επιφάνεια τους την ηλιακή ακτινοβολία, εκδηλώνουν μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στην μπροστινή και την πίσω όψη τους. Ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο ανάλογα με το υλικό κατασκευής του και την ένταση της ακτινοβολίας που δέχεται, μπορεί να δώσει διαφορά δυναμικού 0,5-1 V και πυκνότητα ρεύματος 20-40 mA/cm<sup>3</sup> της επιφάνειας του. Ορίζουμε ως συντελεστή απόδοσης ή απόδοση του φωτοβολταϊκού στοιχείου το λόγο της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος που παράγει το στοιχείο προς την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται στην επιφάνεια του.

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία από τεχνολογικής άποψης μπορούν να χωριστούν σε δυο βασικές κατηγορίες:

#### A. Κρυσταλλικού πυριτίου

- Μονοκρυσταλλικού πυριτίου, με ονομαστικές αποδόσεις πλαισίων 14,5% έως 21%
- Πολυκρυσταλλικού πυριτίου, με ονομαστικές αποδόσεις πλαισίων 13% έως 14,5%

#### B. Λεπτών Μεμβρανών

- Άμορφου Πυριτίου, ονομαστικής απόδοσης 7%
- Χαλκοπυριτών CIS/COGS, ονομαστικής απόδοσης από 7% έως 11%

Το πυρίτιο (Si) είναι η βάση για το 90% περίπου της παγκόσμιας παραγωγής φωτοβολταϊκών. Η κυριαρχία αυτή οφείλεται αρχικά στην τεράστια παγκόσμια επιστημονική και τεχνική υποδομή για το υλικό αυτό, στα χαρακτηριστικά του και στην αφθονία του στη γη.

Η συνεχής αύξηση της παραγωγής ημιαγωγικών υλικών και η βελτίωση της τεχνολογίας πυριτίου οδηγούν στη συνεχή αύξηση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων, που πλησιάζει τη μέγιστη θεωρητική τιμή ενώ παράλληλα έχουμε ραγδαία μείωση στο κόστος τους [22].

### 4.3.2 Φωτοβολταϊκά συστήματα

Ένα τυπικό φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία και τα ηλεκτρονικά συστήματα που διαχειρίζονται την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία. Για αυτόνομα συστήματα υπάρχει επίσης το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας σε μπαταρίες. Μια τυπική φωτοβολταϊκή συστοιχία αποτελείται από ένα ή περισσότερα φωτοβολταϊκά στοιχεία ηλεκτρικά συνδεδεμένα μεταξύ τους. Όταν τα φωτοβολταϊκά στοιχεία εκτεθούν στην ηλιακή ακτινοβολία, μετατρέπουν το 14% περίπου της προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας γίνεται αθόρυβα αξιόπιστα και χωρίς περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Τα βασικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών συστημάτων, που τα διακρίνουν από τις άλλες μορφές ΑΠΕ είναι:

- Με τη χρήση τους μπορούμε να έχουμε απευθείας παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ακόμα και σε πολύ μικρή κλίμακα, π.χ. σε επίπεδο μερικών δεκάδων W ή mW.

- Είναι εύχρηστα. Σε μικρά συστήματα μπορούν να εγκατασταθούν από τους ίδιους τους χρήστες
- Μπορούν να εγκατασταθούν μέσα σε πόλεις, ενσωματωμένα σε κτίρια και δεν προσβάλλουν αισθητικά το περιβάλλον
- Μπορούν αν συνδυαστούν με άλλες πηγές ενέργειας (υβριδικά συστήματα)
- Μπορούν να επεκταθούν ανά πάσα στιγμή για να αντιμετωπίσουν τις αυξημένες ανάγκες των χρηστών
- Οι απαιτήσεις συντήρησης είναι σχεδόν μηδενικές
- Έχουν αθόρυβη λειτουργία και μηδενικές εκπομπές ρύπων
- Έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής και αξιοπιστία

#### Τα πλεονεκτήματα των φωτοβολταϊκών συστημάτων

- Έχουν μηδενικό κόστος λειτουργίας. Δεν καταναλώνουν πρώτες ύλες, καθώς χρειάζονται μόνο το φως του ήλιου για να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια
- Διακρίνονται για την υψηλή του αξιοπιστία και τη μεγάλη διάρκεια ζωής τους. Η αρχική τους κατασκευή ήταν για χρήση στο διάστημα όπου οι επισκευές είναι δαπανηρές έως ακατόρθωτες. Οι φωτοβολταϊκοί συλλέκτες σήμερα τροφοδοτούν με ρεύμα σχεδόν όλους τους δορυφόρους
- Δεν απαιτούν συντήρηση αφού δεν έχουν κινούμενα μέρη
- Δεν μολύνουν το περιβάλλον. Κατασκευάζονται από ανακυκλώσιμα υλικά (γυαλί, αλουμίνιο, πυρίτιο) και για αυτό είναι περιβαλλοντικά καθαρά. Δεν απαιτούν καύσιμα κατά την λειτουργία τους και δεν παράγουν βλαβερούς για το περιβάλλον ρύπους, ενώ ταυτόχρονα είναι και αθόρυβα.
- Είναι ευέλικτα συστήματα καθώς τοποθετούνται σύμφωνα με τις απαιτήσεις σε ενέργεια. σε περίπτωση αύξησης των αναγκών το σύστημα μπορεί εύκολα να αναβαθμιστεί και να καλύψει τις ανάγκες που προέκυψαν.
- Παρέχουν πλήρη ενεργειακή αυτονομία. Έτσι μπορούν να τοποθετηθούν σε δύσβατες περιοχές, σε πλωτές εξέδρες και γενικά όπου το δίκτυο της ΔΕΗ είναι οικονομικά ασύμφορο να φτάσει

Το κυριότερο μειονέκτημα μέχρι πριν από λίγο καιρό ήταν το σχετικά υψηλό κόστος αγοράς και η έλλειψη επιδοτήσεων. Το κλίμα αυτό όμως τώρα αλλάζει ριζικά. Πάρα πολλές χώρες έχουν ξεκινήσει τα τελευταία χρόνια σημαντικά προγράμματα ενίσχυσης των φωτοβολταϊκών, με υψηλές επιδοτήσεις της αγοράς και εγκατάσταση φωτοβολταϊκών αλλά και της παραγόμενης ηλιακής kWh [4].

### Βαθμός απόδοσης φωτοβολταϊκών συστημάτων

Ο βαθμός απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού συστήματος εκφράζει το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια στο φωτοβολταϊκό σύστημα. Ο βαθμός απόδοσης εξαρτάται από:

- Το κλίμα της περιοχής που έχει εγκατάστασή το φωτοβολταϊκό σύστημα. Όσο λιγότερες είναι οι μέρες της ηλιοφάνειας τόσο μικρότερος είναι ο βαθμός απόδοσης
- Το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής. Όσο πιο νότια είναι η περιοχή, τόσο πιο μεγάλη είναι η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας
- Την κλίση των φωτοβολταϊκών πάνελ ως προς το οριζόντιο επίπεδο. Βέλτιστη απόδοση σημειώνεται με νότιο προσανατολισμό και κλίση όσο το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής για μεγιστοποίηση της ετήσιας παραγόμενης ενέργειας
- Την ηλικία των φωτοβολταϊκών πάνελ. Υπολογίζεται ότι η απόδοση των πάνελ μειώνεται κατά μέσο όρο 0,5% έως 1% κάθε έτος
- Την τεχνολογία που χρησιμοποιείται. Τα συστήματα ανίχνευσης ηλίου μπορεί να βελτιώσουν την απόδοση έως και 35%
- Τη σωστή συντήρηση στο βάθος του χρόνου
- Τον προσανατολισμό των φωτοβολταϊκών. Τα φωτοβολταϊκά έχουν μέγιστη απόδοση όταν έχουν νότιο προσανατολισμό. Αποκλίσεις από το Νότο έως και 45° είναι επιτρεπτές, μειώνουν όμως την απόδοση
- Την ύπαρξη ανωμαλιών στην περιοχή εγκατάστασης των φωτοβολταϊκών. Μπορεί για παράδειγμα να υπάρχουν ρέματα, βράχια, εξογκώματα και άλλα στο οικόπεδο εγκατάστασης
- Την ύπαρξη στοιχείων στην περιοχή εγκατάστασης που δημιουργούν σκίαση. Σε αυτή την περίπτωση πρέπει να ξέρουμε ακριβώς σε πόση έκταση υπάρχει το πρόβλημα της σκίασης και για πόση ώρα

Για την διευκόλυνση των υπολογισμών θα θεωρήσουμε πως η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των φωτοβολταϊκών συστημάτων στην Κάρπαθο αποτελείται από ενός τύπου φωτοβολταϊκό πάνελ. Το επιλεγμένο φωτοβολταϊκό πάνελ είναι το AC-300P/156-72S με διαστάσεις 1965x990x50 mm και βάρος 23 kg με την βάση [36]. Με δεδομένη συνολική εγκατεστημένη ισχύς 1,17 MW [60] η συνολική επιφάνεια που χρειάζεται είναι 7586,9 m<sup>2</sup>.

### 4.3.3 Μέθοδος υπολογισμού ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας

Το πρώτο βήμα για τον υπολογισμό της ωριαίας παραγόμενης ενέργειας των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι ο υπολογισμός της ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία είναι η κινητήρια δύναμη των ηλιακών εγκαταστάσεων.

Ξεκινώντας τους υπολογισμούς θα πρέπει να γνωρίζουμε το γεωγραφικό πλάτος της Καρπάθου, το οποίο είναι  $\phi=35,50^\circ$ . Επιπλέον υποθέτουμε πως τα φωτοβολταϊκά πάνελ είναι στραμμένα προς το νότο ( $\gamma=0$ ) και με κλίση  $\beta=\phi$  ως προς το έδαφος για μεγιστοποίηση της ετήσιας παραγόμενης ισχύος. Έπειτα υπολογίζουμε την ηλιακή απόκλιση από τον τύπο:

$$\delta=23,45*\sin\left(\frac{360*(284+n)}{365}\right) \quad (4)$$

όπου n ο αριθμός της ημέρας του έτους 1:365

Επίσης υπολογίζουμε την ωριαία γωνία δύσης ηλίου  $\omega_s$  από την σχέση:

$$\cos \omega_s = -\tan \varphi * \tan \delta \quad (5)$$

Από την παραπάνω σχέση εύκολα υπολογίζουμε την διάρκεια της ημέρας από την σχέση:

$$N=\frac{2}{15} * \cos^{-1}(-\tan \varphi * \tan \delta) \quad (6)$$

Στην συνέχεια υπολογίζουμε τον λόγο της άμεσου ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου προς την άμεσο οριζοντίου επιπέδου από την σχέση:

$$R_b = \frac{\sin \delta * \sin(\varphi - \beta) + \cos \delta * \cos(\varphi - \beta) * \cos \omega}{\sin \delta * \sin \varphi + \cos \delta * \cos \varphi * \cos \omega} \quad (7)$$

όπου  $\omega$  η ωριαία γωνία, για την οποία ισχύουν: ...,  $\omega(11:00)=-15^\circ$   $\omega(12:00)=0$ ,  $\omega(13:00)=15^\circ$ ,... . Δηλαδή ορίζεται  $\omega=0$  για τις 12:00 προσθέτοντας 15 μοίρες για κάθε ώρα μετά τις 12:00 και αφαιρώντας 15 μοίρες για κάθε ώρα πριν τις 12:00. Επομένως γνωρίζουμε τις τιμές που έχει η ωριαία γωνία για κάθε ώρα της ημέρας. Δυο ακόμη μεγέθη που θα μας χρησιμεύσουν αργότερα είναι η στιγμιαία ακτινοβολία οριζόντιας επιφάνειας εκτός ατμόσφαιρας  $G_o$  και ημερήσια ακτινοβολία οριζόντιας επιφάνειας εκτός ατμόσφαιρας υπολογισμένη για την μέση ημέρα του μήνα  $H_o$ . Οι σχέσεις που μας δίνουν τα μεγέθη φαίνονται παρακάτω:

$$G_o = G_{sc} \left(1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365}\right) (\sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega) \quad (8)$$

όπου  $\omega$  η ωριαία γωνία όπως έχει οριστεί και  $G_{sc} = 1353 \frac{W}{m^2}$  σταθερά, επομένως μπορούμε να υπολογίσουμε την ημερήσια ακτινοβολία οριζόντιας επιφάνειας εκτός ατμόσφαιρας για κάθε ώρα του έτους.

$$H_o = \frac{24 * 3600}{\pi} G_{sc} \left( 1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365} \right) \left[ \cos \varphi * \cos \delta * \sin \omega_s + \frac{2\pi\omega_s}{360} \sin \varphi * \sin \delta \right] \quad (9)$$

Επομένως γνωρίζουμε την ανά ώρα στιγμιαία ακτινοβολία οριζόντιας επιφάνειας εκτός ατμόσφαιρας  $G_o$  και την ημερήσια ακτινοβολία οριζόντιας επιφάνειας εκτός ατμόσφαιρας υπολογισμένη για την μέση ημέρα του μήνα  $H_o$ .

Στην συνέχεια θα πρέπει να κάνουμε μια υπόθεση σχετικά με το μέσο υψόμετρο στο οποίο είναι τοποθετημένα τα φωτοβολταϊκά πάνελ με σκοπό την εύρεση της ακτινοβολίας αίθριας ατμόσφαιρας από την αντίστοιχη της εκτός ατμόσφαιρας. Επειδή τα περισσότερα από τα εγκατεστημένα πάνελ βρίσκονται σε σχετικά όχι μικρό υψόμετρο και λόγω της γεωμορφολογίας του εδάφους επιλέγουμε το μέσο αυτό υψόμετρο στα 0,1 km. Με αυτό τον τρόπο θα υπολογίσουμε την ατμοσφαιρική διαπερατότητα για άμεσο ακτινοβολία  $\tau_b$  σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$\tau_b = \frac{G_{cb}}{G_o} = \alpha_0 + \alpha_1 e^{\frac{-k}{\cos \theta_z}} \quad (10)$$

όπου

$G_{cb}$  η άμεσος ακτινοβολία οριζόντιας επιφάνειας αίθριας ατμόσφαιρας

$G_o$  η ακτινοβολία οριζόντιας επιφάνειας εκτός ατμόσφαιρας

$\cos \theta_z$  συνημίτονο της γωνίας ζενίθ που δίνεται από την σχέση:

$$\cos \theta_z = \sin \delta * \sin \varphi + \cos \delta * \cos \varphi * \cos \omega \quad (11)$$

$\alpha_0, \alpha_1, k$  συντελεστές υπολογιζόμενοι παρακάτω

$$\alpha_0 = r_0 * \acute{\alpha}_0, \quad \alpha_1 = r_1 * \acute{\alpha}_1, \quad k = r_k * \acute{k} \quad (12)$$

όπου

$$\acute{\alpha}_0 = 0,4237 - 0,00821 * (6 - A)^2 \quad (13)$$

$$\acute{\alpha}_1 = 0,5055 + 0,00595 * (6,5 - A)^2 \quad (14)$$

$$\dot{k} = 0,2711 + 0,01858 * (2,5 - A)^2 \quad (15)$$

όπου **A** το μέσο υψόμετρο τοποθέτησης των φωτοβολταϊκών πάνελ επιλεγμένο ίσο με 0,1 km στην συγκεκριμένη περίπτωση. Οι συντελεστές **r<sub>0</sub>**, **r<sub>1</sub>** και **r<sub>k</sub>** δίνονται σε πίνακα για διάφορες περιπτώσεις. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι τιμές που θα χρησιμοποιήσουμε ανάλογα με την εποχή του έτους.

Εποχή	r <sub>0</sub>	r <sub>1</sub>	r <sub>k</sub>
Καλοκαίρι-Άνοιξη	0,97	0,99	1,02
Χειμώνας-Φθινόπωρο	1,03	1,01	1,00

Πίνακας 4.2 Συντελεστές ανάλογα με την εποχή του χρόνου

Συνεπώς ξεκινώντας από τις τελευταίες σχέσεις και υπολογίζοντας όλα τα μεγέθη με αντικατάσταση των γνωστών μεγεθών καταλήγουμε στον υπολογισμό της άμεσου ακτινοβολίας οριζόντιας επιφάνειας αίθριας ατμόσφαιρας **G<sub>cb</sub>** από την σχέση της ατμοσφαιρικής διαπερατότητας για άμεσο ακτινοβολία **τ<sub>b</sub>**. Χρησιμοποιώντας το ίδιο μέγεθος **τ<sub>b</sub>** μπορούμε να υπολογίσουμε την διάχυτη ακτινοβολία αίθριας ατμόσφαιρας **G<sub>cd</sub>** σύμφωνα με την εμπειρική σχέση:

$$G_{cd} = (0,2710 - 0,2939 * \tau_b) * G_o \quad (16)$$

Γνωρίζοντας την στιγμιαία άμεση και διάχυτη ακτινοβολία για κάθε ώρα μπορούμε να υπολογίσουμε την ωριαία άμεση και διάχυτη ακτινοβολία για κάθε ώρα με τις ίδιες ακριβώς σχέσης αλλάζοντας την στιγμιαία ακτινοβολία **G<sub>o</sub>** με την ωριαία ακτινοβολία **I<sub>o</sub>** που δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$I_o = \frac{12 * 3600}{\pi} G_{sc} \left( 1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365} \right)$$

$$* \left[ \cos \varphi * \cos \delta * (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{2\pi(\omega_2 - \omega_1)}{360} * \sin \varphi * \sin \delta \right] \quad (17)$$

όπου  $\omega_2$  και  $\omega_1$  ορίζουν ένα χρονικό διάστημα και στην συγκεκριμένη περίπτωση ορίζουν το διάστημα 1 ώρας. Με την αντικατάσταση όπως προηγουμένως έχουμε την άμεση **I<sub>cb</sub>** και την διάχυτη **I<sub>cd</sub>** ωριαία ακτινοβολία αίθριας ατμόσφαιρας για κάθε ώρα και συνεπώς και την ολική ωριαία ακτινοβολία αίθριας ατμόσφαιρας **I<sub>c</sub>** ως άθροισμα των δυο συνιστωσών (**I<sub>c</sub> = I<sub>cb</sub> + I<sub>cd</sub>**). Τα ωριαία μεγέθη μας δείχνουν την ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει στο διάστημα μιας ώρας σε κάθε τετραγωνικό μέτρο και μετράται σε **J/m<sup>2</sup>**. Απαραίτητο μέγεθος για την συνέχεια των υπολογισμών αποτελεί μέση ακτινοβολία ημέρας **H<sub>m</sub>**, που εκφράζει το ποσό της ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει ανά τετραγωνικό μέτρο κατά την διάρκεια της ημέρας. Για τον υπολογισμό της χρησιμοποιούνται εμπειρικοί τύποι με πιο αξιόπιστη να θεωρείται η σχέση την οποία χρησιμοποιήσαμε και φαίνεται παρακάτω:

$$H_m = \left( a + b * \frac{\bar{n}}{\bar{N}} \right) * H_o \quad (18)$$

όπου

$H_o$  η μέση ακτινοβολία ημέρας οριζοντίου επιπέδου εκτός ατμόσφαιρας

$\bar{n}$  μηνιαίως μέσο πλήθος ωρών ημέρας πλήρους ηλιοφάνειας

$\bar{N}$  πλήθος ωρών της ημέρας (ανατολή μέχρι δύση)

Οι σταθερές  $a$ ,  $b$  εξαρτώνται από την περιοχή ή το γεωγραφικό πλάτος (Glover & McCulloch, 1958) και το κλίμα της περιοχής (Rietveld, 1978). Παρακάτω δίνονται μερικές αντιπροσωπευτικές τιμές:

Κρύες και εύκρατες ζώνες:  $a=0,18$   $b=0,55$

Ξηρές και τροπικές ζώνες:  $a=0,25$   $b=0,45$

Υγρές και τροπικές ζώνες:  $a=0,29$   $b=0,42$

Στην δική μας περίπτωση επιλέγουμε την πρώτη κατηγορία αφού βρισκόμαστε στην βόρεια εύκρατη ζώνη επομένως  $a=0,18$   $b=0,55$ . Την μέση ακτινοβολία ημέρας οριζοντίου επιπέδου εκτός ατμόσφαιρας  $H_o$  την έχουμε ήδη ορίσει και αναλύσει. Το μηνιαίο μέσο πλήθος ωρών ημέρας πλήρους ηλιοφάνειας  $\bar{n}$  είναι όπως περιγράφει και η ονομασία του η μέση τιμή των ωρών ηλιοφάνειας κάθε ημέρας του μήνα, ενώ το πλήθος ωρών της ημέρας  $\bar{N}$  είναι το πλήθος των ωρών από την ανατολή του ηλίου μέχρι την δύση του. Με αυτόν τον τρόπο υπολογίζουμε την μέση ακτινοβολία ημέρας  $H_m$  για κάθε ημέρα του έτους.

Με βάση την μέση ακτινοβολία ημέρας  $H_m$  υπολογίζουμε την ωριαία ολική ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου  $I_t$  από την σχέση:

$$I_t = \left( \frac{\pi}{24} * (\alpha + \beta * \cos \omega) * \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \left( \frac{2\pi * \omega_s}{360} \right) * \cos \omega_s} \right) * H_m \quad (19)$$

όπου το  $\omega$  ορίζει την ώρα για την οποία γίνεται ο υπολογισμός με τον τρόπο που έχουμε ήδη αναφέρει. Οι συντελεστές  $\alpha$ ,  $\beta$  εξαρτώνται από την ωριαία γωνία δύσης ηλίου σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

$$\alpha = 0,409 + 0,5016 * \sin(\omega_s - 60) \quad (20)$$



$$\beta = 0,6609 - 0,4767 * \sin(\omega_s - 60) \quad (21)$$

Συνεπώς βρισκόμαστε σε θέση να υπολογίσουμε την ωριαία ολική ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου  $I_t$  για κάθε ώρα του έτους. Για τον υπολογισμό της ισχύς που παράγουν τα φωτοβολταϊκά συστήματα αλλά και τα θερμικά ηλιακά συστήματα χρειαζόμαστε την άμεση ακτινοβολία. Επομένως με βάση την ωριαία ολική ακτινοβολία  $I_t$  και την ωριαία ολική ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου τυπικής διαυγούς ατμόσφαιρας  $I_c$  υπολογίζουμε την ωριαία διάχυτος ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου  $I_d$  από την παρακάτω συνάρτηση:

- Αν  $0 \leq \frac{I}{I_c} < 0,48$  τότε

$$I_d = \left( 1,00 - 0,1 * \left( \frac{I}{I_c} \right) \right) * I \quad (22)$$

- Αν  $0,48 \leq \frac{I}{I_c} < 1,10$  τότε

$$I_d = \left( 1,11 + 0,0396 * \left( \frac{I}{I_c} \right) - 0,789 * \left( \frac{I}{I_c} \right)^2 \right) * I \quad (23)$$

- Αν  $1,10 \leq \frac{I}{I_c}$  τότε

$$I_d = 0,20 * I \quad (24)$$

Συνεπώς γνωρίζοντας την ωριαία διάχυτος ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου  $I_d$  και την ωριαία ολική ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου  $I$  για κάθε ώρα του έτους μπορούμε εύκολα να υπολογίσουμε την ωριαία άμεση ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου  $I_b$  σύμφωνα με τον τύπο:

$$I_b = I - I_d \quad (25)$$

Τα φωτοβολταϊκά πάνελ βρίσκονται υπό κλίση και όχι σε οριζόντια θέση με σκοπό την μεγιστοποίηση της εκμεταλλευσόμενης ηλιακής ενέργειας. Η γωνία στην οποία είναι τοποθετημένα σε σχέση με το έδαφος είναι  $\beta = \phi$ , όπου  $\phi$  το γεωγραφικό πλάτος. Η σχέση με την οποία μεταβαίνουμε από την ωριαία άμεση ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου  $I_b$  και την ωριαία διάχυτος ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου

$I_d$  στην προσπίπτουσα ακτινοβολία κεκλιμένης επιφάνειας  $I_T$  δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$I_T = I_b * R_b + I_d * \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + (I_b + I_d) * \rho * \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (26)$$

όλα τα παραπάνω μεγέθη έχουν ήδη οριστεί και εξηγηθεί εκτός από το  $\rho$  το οποίο είναι η ανακλαστικότητα του εδάφους και λαμβάνει τιμή ίση με  $\rho=0,2$  για συνηθισμένο έδαφος. Επομένως με γνωστή την γωνία τοποθέτησης των φωτοβολταϊκών πάνελ μπορούμε να υπολογίσουμε την ωριαία προσπίπτουσα ακτινοβολία κεκλιμένης επιφάνειας  $I_T$  για κάθε ώρα του έτους. Για τον υπολογισμό της παραγόμενης ισχύος από τα φωτοβολταϊκά συστήματα θα χρησιμοποιήσουμε την ωριαία προσπίπτουσα ακτινοβολία κεκλιμένης επιφάνειας  $I_T$ . Αντίθετα για τον υπολογισμό της παραγόμενης ισχύος των ηλιακών θερμικών συστημάτων που θα αναλύσουμε σε επόμενο κεφάλαιο θα χρησιμοποιήσουμε την ωριαία άμεση ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου  $I_b$  διότι θα θερμικά ηλιακά συστήματα εκμεταλεύονται μόνο την άμεση ακτινοβολία και όχι την διάχυτη ακτινοβολία [24].

#### 4.3.4 Παραγόμενη ισχύς φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων

Γνωρίζοντας την ωριαία προσπίπτουσα ακτινοβολία κεκλιμένης επιφάνειας  $I_T$  μπορούμε να υπολογίσουμε την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Θεωρούμε πως μια τυπική τιμή βαθμού απόδοσης για όλες τα φωτοβολταϊκά πάνελ που είναι εγκατεστημένα στο νησί είναι **12,5%** [36][22]. Επιλέγουμε μια τέτοια μέση τιμή η οποία είναι αντιπροσωπευτική αφού φωτοβολταϊκά πάνελ που έχουν εγκατασταθεί στο νησί είναι αρκετά και κάποια είναι καινούργια ενώ κάποια άλλα παλαιότερα. Θυμίζουμε πως η απόδοση των φωτοβολταϊκών πάνελ μειώνεται περίπου 0,5% κάθε έτος. Επιπλέον θα πρέπει να λάβουμε υπόψιν την επίδραση της εξωτερικής θερμοκρασίας στην απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Γνωρίζοντας την ωριαία θερμοκρασία του αέρα για όλο το έτος και την σχέση που μας δείχνει την επιρροή της μπορούμε να ορίσουμε τον βαθμό απόδοσης των φωτοβολταϊκών πάνελ. Η σχέση που μας δίνει την μείωση του βαθμού απόδοσης ανάλογα με την θερμοκρασία του αέρα φαίνεται παρακάτω [22]:

$$\eta_{air} = 1 - 0,005 * (T_{env} + 5) \quad (27)$$

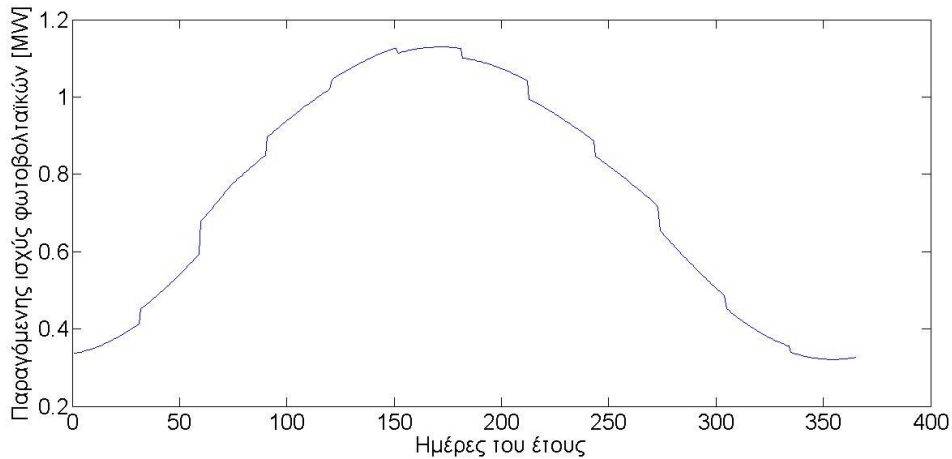
Ένας επιπλέον λόγος απώλειας ισχύος των φωτοβολταϊκών συστημάτων αποτελεί η μετατροπή του ρεύματος. Το ρεύμα που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά πάνελ είναι συνεχές, επομένως θα πρέπει να μετατραπεί σε εναλλασσόμενο προκειμένου να συνδεθεί με το δίκτυο. Αυτήν ακριβώς την διαδικασία επιτελεί ο μετατροπέας (inverter) έχοντας έναν βαθμό απόδοσης. Ο βαθμός απόδοσης του μετατροπέα εκφράζει την εξερχόμενη ισχύς στο δίκτυο προς την εισερχόμενη ισχύς από τα φωτοβολταϊκά πάνελ. Ο βαθμός απόδοσης του μετατροπέα εκτιμάται ίσος με **95%**. Ο τελευταίος βαθμός απόδοσης που θα πρέπει να λάβουμε υπόψιν είναι οι απώλειες των καλωδίων. Θεωρώντας πως τα φωτοβολταϊκά συστήματα είτε είναι οικιακά, είτε μεγαλύτερου μεγέθους συνδέονται σε σχετικά κοντινή απόσταση με το δίκτυο, συνεπώς μια καλή εκτίμηση του βαθμού απόδοσης είναι **99%** [22].

Επομένως ο ολικός βαθμός απόδοσης των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων είναι ο παρακάτω:

$$\eta_{PV} = \eta_{inv} * \eta_{cwp} * \eta_P \rightarrow$$

$$\eta_{PV} = 0,95 * 0,99 * 0,125 * (1 - 0,005) * (T_{env} + 5) \quad (28)$$

Ξεκινώντας το κεφάλαιο και μη έχοντας καμία μέτρηση ωριαία απόδοσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων και της ωριαία ηλιακής ενέργειας καταλήξαμε να έχουμε όλα τα απαραίτητα μεγέθη για τον υπολογισμό της παραγόμενης ισχύος από τα εγκατεστημένα φωτοβολταϊκά συστήματα του νησιού μέσα από διάφορες παραδοχές που έγιναν και την χρήση σχέσεων υπολογισμού των ενδιαφερόμενων μεγεθών. Ξεκινώντας από την ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας που εξαρτάται μόνο από την περιστροφή της Γης, συνεχίσαμε με τον υπολογισμό της ακτινοβολίας αίθριας ημέρας. Από εκεί υπολογίσαμε την ολική, άμεση και διάχυτη, ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου και με γνωστή την γωνία τοποθέτησης των φωτοβολταϊκών πάνελ υπολογίσαμε την προσπίπτουσα ακτινοβολία σε επίπεδο υπό κλίση. Από αυτήν την ακτινοβολία ένα μέρος της μετατρέπεται σε ηλεκτρική ισχύς. Οι βαθμοί απόδοσης που μας βοηθούν να βρούμε το ποσοστό μετατροπής είναι ο βαθμός απόδοσης του πάνελ, η επίδραση της θερμοκρασίας αέρα, οι απώλειες μετατροπής και τέλος οι απώλειες των καλωδιώσεων. Όλοι αυτοί οι υπολογισμοί αναλύθηκαν παραπάνω. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η μέγιστη ημερήσια παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς των φωτοβολταϊκών συστημάτων του νησιού για κάθε ημέρα του έτους.



Σχήμα 4.7 παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς φωτοβολταϊκών συστημάτων για όλες τις ημέρες του έτους

Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται πως το μέγιστο δεν είναι 1,17 MW όσο δηλαδή η εγκατεστημένη ισχύς αλλά λιγότερο. Αυτό το αναμέναμε καθώς υπάρχουν οι απώλειες καλωδίων και οι απώλειες του μετατροπέα. Όπως αναφέραμε νωρίτερα προκειμένου να ελέγξουμε τα αποτελέσματά μας θα πρέπει να τα συγκρίνουμε με τα δεδομένα που δίνει ο ΔΕΔΗΕ. Στα δεδομένα του ΔΕΔΗΕ για την Κάρπαθο υπάρχει μόνο ένα έτος κατά το οποίο η εγκατεστημένη ισχύς δεν μεταβάλλεται κατά την διάρκεια του έτος, δηλαδή δεν εγκαταστώνται επιπλέον φωτοβολταϊκά συστήματα, και κατά το οποίο έχουμε την παραγόμενη ισχύ για κάθε μήνα του έτους. Το έτος με το οποίο θα συγκρίνουμε τις τιμές μας είναι το 2013. Η σύγκριση αυτή δεν είναι αντιπροσωπευτική και θα πρέπει να λάβουμε υπόψη περισσότερα έτη για την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων, αλλά λόγω έλλειψης δεδομένων θα περιοριστούμε με μια σύγκριση ώστε να καταλήξουμε σε ένα πιο γενικό συμπέρασμα. Παρακάτω φαίνεται στον πίνακα οι παραγόμενες MWh από τα δεδομένα του ΔΕΔΗΕ και από τους υπολογισμούς που κάναμε.

Μήνας	Δεδομένα 2013 (MWh)	Υπολογισμοί (MWh)	Απόκλιση %
Ιανουάριος	98,29	72,447	-26,29%
Φεβρουάριος	115,42	95,218	-17,50%
Μάρτιος	148,46	161,45	8,75%
Απρίλιος	172,13	200,11	16,26%
Μάιος	188,18	239,81	27,44%
Ιούνιος	171,3	241,90	41,21%
Ιούλιος	193,17	237,66	23,03%
Αύγουστος	191,49	204,40	6,74%
Σεπτέμβριος	168,9	159,96	-5,29%
Οκτώβριος	163,13	115,77	-29,03%
Νοέμβριος	108,37	74,382	-31,36%
Δεκέμβριος	115,26	60,581	-47,44%

Πίνακας 4.3 Σύγκριση δεδομένων ΔΕΔΗΕ με τα αποτελέσματα των υπολογισμών

Παρατηρούμε πως για τους καλοκαιρινούς και ανοιξιάτικους μήνες η απόκλιση που παρουσιάζεται είναι αρκετά μικρή. Μεγαλύτερη απόκλιση εμφανίζουν οι μήνες του φθινοπώρου και του χειμώνα. Οι παραδοχές και οι υπολογισμοί μας οδήγησαν σε αποτελέσματα τα οποία φαίνονται αρκετά ικανοποιητικά τους καλοκαιρινούς και ανοιξιάτικους μήνες, αλλά δεν προσεγγίζουν με μεγάλη ακρίβεια τους χειμερινούς μήνες. Από την άλλη πλευρά ενδεχομένως οι συνθήκες αυτού του έτους να διαδραματίζουν τέτοιο ρόλο ώστε οι αποκλίσεις να οφείλονται σε άλλους παράγοντες όπως η νέφωση, η μη χρήση όλης της παραγόμενης ενέργειας των φωτοβολταϊκών συστημάτων ή κάποιες βλάβες των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Όπως εξάλλου φαίνεται και στην παραγόμενη ενέργεια του Ιουνίου η οποία είναι μικρότερη από τις αντίστοιχες του Μαΐου και του Ιουλίου υποδεικνύοντας πως κάποιο σφάλμα. Εν κατακλείδι η χρησιμοποίηση των αποτελεσμάτων που υπολογίσαμε θα γίνει εφόσον είναι ο μοναδικός τρόπος που διαθέτουμε για τον υπολογισμό των ενδιαφερόμενων μεγεθών και γιατί τα αποτελέσματα παρουσιάζουν συνολικά μια καλή προσέγγιση.

Παρακάτω παρουσιάζουμε τις παραδοχές που έχουν γίνει για τους υπολογισμούς των χρησιμοποιούμενων μεγεθών για τον υπολογισμό της παραγόμενης ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά συστήματα.

Περιγραφή μεγέθους	Τιμή
$\beta$ : κλίση τοποθέτησης πάνελ	35,5048088150°
$\gamma$ : γωνία αζιμούθιου	0°
A: μέσο υψόμετρο τοποθέτησης πάνελ	0,1 km
$\eta_{cup}$ : βαθμός απόδοσης καλωδίων	99%
$\eta_{inv}$ : βαθμός απόδοσης μετατροπέα	95%

Πίνακας 4.4 Παραδοχές για τους υπολογισμούς της ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας [22]

Επιπλέον παραδοχές αποτελούν πως θεωρούμε όλα τα φωτοβολταϊκά πάνελ ίδιου τύπου και απόδοσης.

## 4.4 Ηλιοθερμικά συστήματα

### 4.4.1 Επιλογή ηλιοθερμικού συλλέκτη

Ο ηλιακός συλλέκτης που χρησιμοποιείται στην εγκατάστασή μας είναι παραβολικού τύπου. Αυτός ο συνήθης τύπος συλλεκτών χρησιμοποιείται για εφαρμογές που σχετίζονται με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, σε αντίθεση με τις εφαρμογές παραγωγής ζεστού νερού χρήσης όπου οι απαιτούμενες θερμοκρασίες λειτουργίας (σχετικά χαμηλές, περίπου 80°C) επιτρέπουν την χρήση επίπεδων ηλιακών συλλεκτών. Το ηλιοθερμικό σύστημα αποτελεί μέρος της

εγκατάστασης μας και όχι προ υπάρχων σύστημα. Επιλέγουμε την χρήση του παραβολικού συλλέκτη τύπου PTC-1000. Ο συλλέκτης αυτός είναι μικρού μονού άξονα παρακολούθησης παραβολικός συλλέκτης με τον άξονα περιστροφής να είναι ίσος προς τον άξονα του σωλήνα απορρόφησης. Ο απορροφητής παραμένει σε μία θέση κατά την διάρκεια της διαδικασίας. Εύκαμπτοι σωλήνες σύνδεσης δεν είναι απαραίτητοι. Το εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας κυμαίνεται από 80-300°C, ενώ η απόδοσή του συλλέκτη μεγιστοποιείται για θερμοκρασιακό εύρος 120-200°C. Ο συλλέκτης διαθέτει επιφάνεια ανοίγματος με πλάτος 1m και μήκος 2m, με αποτέλεσμα να μπορεί εύκολα να χρησιμοποιηθεί σε εγκαταστάσεις σε οροφές. Σε τόσο υψηλές θερμοκρασίες, άνω των 200°C, χρησιμοποιείται κάποιο έλαιο έναντι του νερού λόγω αυξημένης πίεσης. Στην διπλωματική εργασία οι υπολογισμοί θα γίνουν με την υπόθεση χρησιμοποίησης νερού για απλοποίηση των υπολογισμών μέσω του matlab. Επιπλέον η επιλογή των παραβολικών ηλιακών συλλεκτών οφείλεται στην ανάγκη θέρμανσης του PCM ελαχιστοποιώντας τις ώρες λειτουργίας της αντλίας θερμότητας. Αυτό συμβαίνει γιατί οι παραβολικοί ηλιακοί συλλέκτες θερμαίνουν το νερό πιο αποτελεσματικά από τα άλλα είδη συλλεκτών. Ο λόγος για τον οποίο η χρήση αντλίας θερμότητας δεν προτιμάται είναι η ανάγκη απαιτούμενης ισχύος του συμπιεστή.

Η απόδοση ενός ηλιοθερμικού συλλέκτη ορίζεται ως ο λόγος της ωφέλιμης θερμότητας προς την προσπίπτουσα ακτινοβολία στον συλλέκτη. Η ωφέλιμη θερμότητα στην περίπτωσή μας είναι η θέρμανση του νερού που κυκλοφορεί εσωτερικά των ηλιοθερμικών συλλεκτών. Η απόδοση εξαρτάται μεταξύ άλλων από τις συνθήκες λειτουργίας του συλλέκτη. Η μέθοδος του υπολογισμού του βαθμού απόδοσης είναι κοινός για όλους τους συλλέκτες. Μερική από την ακτινοβολία που προσπίπτει στο συλλέκτη χάνεται λόγω της αντανάκλασης, της απορρόφησης στο γυαλί του συλλέκτη και μέσω της αντανάκλασης στον απορροφητήρα. Η αναλογία μεταξύ της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στον συλλέκτη και της ακτινοβολίας, η οποία μετατρέπεται σε θερμότητα στον απορροφητήρα χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί ο οπτικός βαθμός απόδοσης  $\eta_0$ . Όταν ο συλλέκτης θερμαίνεται, μεταφέρει μερική από εκείνη την θερμότητα στο περιβάλλον μέσω της θερμικής αγωγιμότητας του υλικού του συλλέκτη, της θερμικής ακτινοβολίας και της συναγωγής. Αυτές οι απώλειες υπολογίζονται με τη βοήθεια των συντελεστών απωλειών θερμότητας  $\alpha_{1\alpha}$  και  $\alpha_{2\alpha}$  και της θερμοκρασιακής διαφοράς  $\Delta T$  μεταξύ του απορροφητή και του αέρα. Η σχέση που μας δίνει τον βαθμό απόδοσης του συλλέκτη φαίνεται παρακάτω [42]:

$$\eta = \eta_0 - \alpha_{1\alpha} * \frac{\Delta T}{G_b} - \alpha_{2\alpha} * \frac{\Delta T^2}{G_b} \quad (29)$$

όπου

$G_b$  η άμεσος ηλιακή ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου

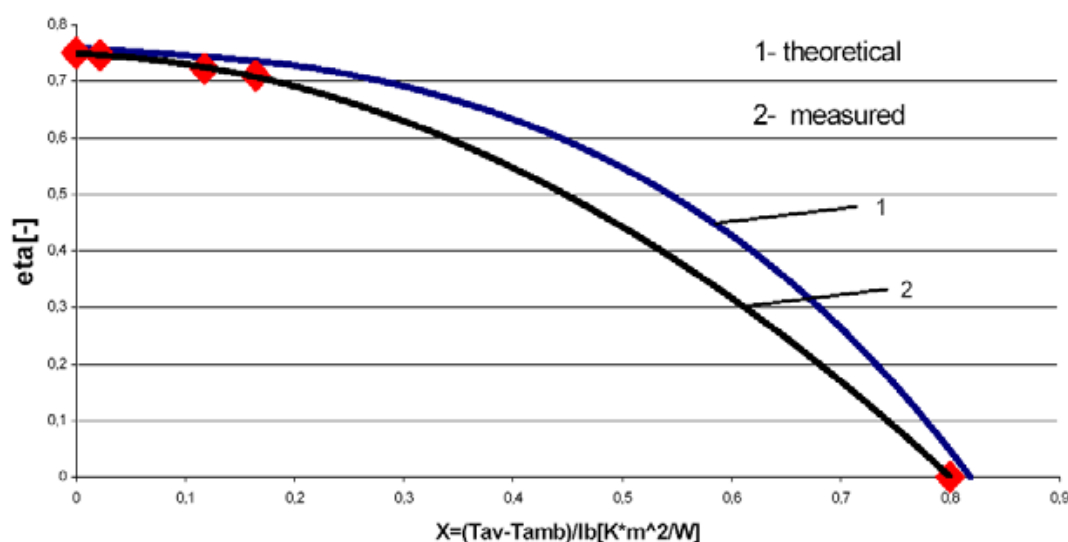
$\Delta T$  η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του απορροφητή και του αέρα

Οι σταθερές για την πραγματική μετρούμενη απόδοση του συλλέκτη PTC-1000 είναι [42]:

$$\eta_0 = 0,70$$

$$\alpha_{1\alpha} = 0,2044 \frac{W}{m^2 K}$$

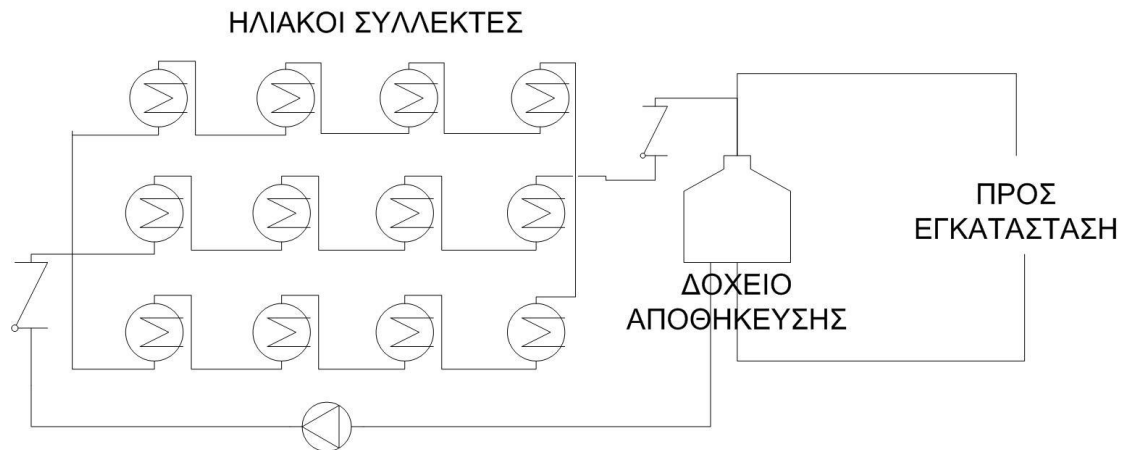
$$\alpha_{2\alpha} = 0,001545 \frac{W}{m^2 K^2}$$



Σχήμα 4.8 Καμπύλη βαθμού απόδοσης ηλιακού συλλέκτη τύπου PTC-1000 [42]

#### 4.4.2 Μέθοδος υπολογισμού ηλιακών συλλεκτών

Σκοπός των υπολογισμών είναι η εύρεση της θερμοκρασίας εξόδου του νερού από τους ηλιακούς συλλέκτες για κάθε ώρα του έτους. Όπως έχουμε ήδη αναφέρει η εγκατάστασή μας εκμεταλλεύεται την ηλιακή ενέργεια με σκοπό την αποθήκευση θερμικής ενέργειας. Οι ηλιακοί συλλέκτες επομένως αποτελούν την κινητήρια δύναμη αποθήκευσης ενέργειας. Η διάταξη των ηλιακών συλλεκτών είναι πολύ σημαντική. Η διάταξη θα είναι συνδυασμός παράλληλης και εν σειράς σύνδεσης. Αυτό επιτυγχάνεται τοποθετώντας παράλληλα σειρές ηλιακών συλλεκτών. Δηλαδή τοποθετούμε εν σειρά τους ηλιακούς συλλέκτες και έπειτα τοποθετούμε περισσότερες από μία τέτοιες σειρές παράλληλα.



Σχήμα 4.9 Διάταξη ηλιακών συλλεκτών

Το νερό θα εισέρχεται κρύο, στην χειρότερη περίπτωση ίσο με την θερμοκρασία που έχει το νερό του δικτύου και θα εξέρχεται σε μεγαλύτερη θερμοκρασία έπειτα από την θέρμανση του στους ηλιακούς συλλέκτες. Αυτό θα συμβαίνει την πρώτη ώρα λειτουργίας του συστήματος. Για την δεύτερη ώρα η θερμοκρασία εισόδου θα είναι ίση με την θερμοκρασία εξόδου της προηγούμενης ώρας. Τα δεδομένα που θα χρησιμοποιήσουμε για τους υπολογισμούς μας τα έχουμε ήδη υπολογίσει. Αρχικά χρειαζόμαστε την άμεση ωριαία ηλιακή ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου την οποία έχουμε ήδη υπολογίσει για την γωνία τοποθέτησης των ηλιακών συλλεκτών και την συμβολίσαμε ως  $I_b$  για ωριαία ηλιακή ενέργεια ή ως  $G_b$  για στιγμιαία ηλιακή ενέργεια (ισχύς). Έπειτα χρειαζόμαστε την θερμοκρασία του νερού του δικτύου για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας εισόδου του νερού στους συλλέκτες. Την θερμοκρασία του νερού του δικτύου την λαμβάνουμε ίση με την θερμοκρασία της θάλασσας επομένως αποτελεί γνωστό μέγεθος. Επιπλέον θα πρέπει να υπολογίσουμε την γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας στους συλλέκτες για κάθε ώρα του έτους, θεωρώντας πως ο άξονας του παραβολικού κατόπτρου έχει προσανατολισμό Βορρά-Νότου. Για τον υπολογισμό της γωνίας πρόσπτωσης χρησιμοποιούμε τον παρακάτω τύπο:

$$\cos \theta = \sin \delta * \sin \varphi + \cos \delta * \cos \varphi * \cos \omega \quad (30)$$

όπου όλα τα μεγέθη που εμπλέκονται στην σχέση έχουν ήδη αναλυθεί στην παράγραφο 4.3.3..

Για τον υπολογισμό των ηλιακών συλλεκτών εργαζόμαστε ως εξής. Κατ' αρχάς επειδή είναι επιθυμητή η επίτευξη μεγάλων θερμοκρασιών θεωρούμε πως οι ηλιακοί συλλέκτες είναι εν σειρά. Αυτό σημαίνει πως ο πρώτος συλλέκτης θερμαίνει το νερό στην θερμοκρασία που επιστρέφει από την εγκατάσταση (μικρότερης θερμοκρασίας) και αφού το θερμάνει το νερό εισέρχεται στον δεύτερο συλλέκτη ανεβάζοντας περαιτέρω την θερμοκρασία του και αυτή η διαδικασία



επαναλαμβάνεται μέχρι τον τελευταίο συλλέκτη. Στον τελευταίο συλλέκτη πλέον η θερμοκρασία του νερού είναι η μέγιστη. Η πίεση του νερού στο σύστημα είναι τέτοια ώστε το νερό να παραμένει υπόψυκτο και να μην δημιουργείται ατμός. Επιλέγουμε πίεση ίση με 8,7095 MPa την πίεση κορεσμού για τους 301°C . Ο τρόπος υπολογισμού φαίνεται από τις παρακάτω σχέσεις (31),(32) που χρησιμοποιήθηκαν για τους υπολογισμούς [62].

$$\eta = \eta_0 - \alpha_{1\alpha} * \frac{\Delta T}{G_b} - \alpha_{2\alpha} * \frac{\Delta T^2}{G_b} \quad (31)$$

όπου στη διαφορά  $\Delta T$  θεωρούμε πως η θερμοκρασία του απορροφητή είναι ίση με  $T_{απορ} = \frac{(T_{in}+T_{out})}{2}$  (32), ενώ η άμεση ακτινοβολία είναι ίση με την άμεση ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου εφόσον οι συλλέκτες είναι τοποθετημένη με την ίδια γωνία που είναι και τα φωτοβολταϊκά πάνελ ( $\beta=\phi$ ) [62].

$$T_{out} = T_{in} + \frac{G_b * \eta * \cos \theta * A_c}{\dot{m} * C_{p_w}} \quad (33)$$

όπου

$A_c$  η επιφάνεια του συλλέκτη (2m<sup>2</sup>)

$\dot{m}$  παροχή του νερού ίση και σταθερή με 0,2kg/s επιλεγμένη σύμφωνα με τον τύπο του συλλέκτη και το γεγονός ότι αποτελεί μικρό σε μέγεθος

$C_{p_w}$  η θερμοχωρητικότητα του νερού για την πίεση που έχουμε ορίσει ως συνάρτηση της θερμοκρασίας. Για την προσομοίωση του  $C_{p_w}$  γνωρίζουμε πως για την πίεση των 8,7095 MPa η θερμοχωρητικότητα μεταβάλλεται με την θερμοκρασία σύμφωνα με το παρακάτω πίνακα:

Θερμοκρασία (°C)	$C_{p_w}$ (kJ/kg*K) (Δεδομένα)	$C_{p_w}$ (kJ/kg*K) (Προσομοίωση)	Σφάλμα %
100	4,219	4,180907	-0,902893498%
150	4,320	4,319998	-5,11101E-05%
200	4,510	4,571008	1,352718524%
250	4,870	4,990219	2,46856182%
300	5,650	5,649995	-8,50094E-05%

Πίνακας 4.5 Αποτελέσματα προσομοίωσης για τον υπολογισμό της θερμοχωρητικότητας του νερού

Η πολυωνυμική σχέση που περιγράφει καλύτερα την καμπύλη που μας δίνουν τα παραπάνω σημεία φαίνεται παρακάτω:

$$C_{p_w} = (1,07205 * 10^{-10}) * T^4 + (7,64311 * 10^{-6}) * T^2 + 4,093755 \quad (34)$$

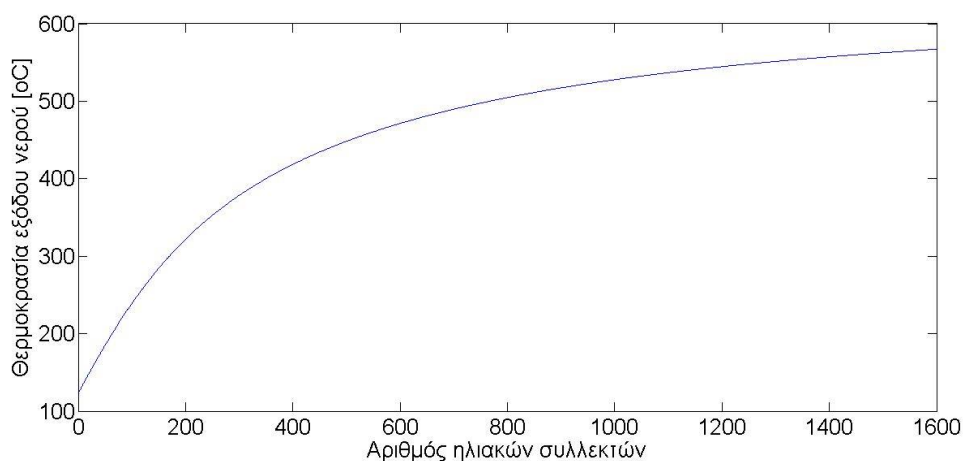
όπου

$T$  η θερμοκρασία του νερού σε βαθμούς κελσίου ( $^{\circ}\text{C}$ )

και  $C_{p_w}$  η θερμοχωρητικότητα του νερού σε ( $\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$ )

Με γνωστή την θερμοκρασία εισόδου έχουμε τρεις άγνωστους: την θερμοκρασία εξόδου του νερού  $T_{\text{out}}$ , τον βαθμό απόδοσης του συλλέκτη  $\eta$  και την θερμοκρασία του απορροφητή. Επειδή όμως έχουμε τρεις εξισώσεις μπορούμε να επιλύσουμε το σύστημα. Υποθέτουμε μια θερμοκρασία εξόδου και αυτομάτως υπολογίζουμε την θερμοκρασία του απορροφητή (Σχέση 32). Στην συνέχεια με γνωστή την θερμοκρασία του απορροφητή υπολογίζουμε τον βαθμό απόδοσης του συλλέκτη (σχέση 31) και τέλος από την σχέση 33 έχουμε τον υπολογισμό της θερμοκρασίας εξόδου. Λύνουμε επαναληπτικά ώσπου η τιμή της θερμοκρασίας εξόδου να συγκλίνει στην λύση. Για τον επόμενο συλλέκτη έχουμε και πάλι τους ίδιους γνωστούς και αγνώστους αφού η θερμοκρασία εξόδου του προηγούμενου συλλέκτη αποτελεί την θερμοκρασία εισόδου του επόμενου συλλέκτη. Με αυτόν τον τρόπο εργαζόμαστε σε όλους τους συλλέκτες, ο αριθμός των οποίων είναι γνωστός με γνωστή την συνολική επιφάνεια των συλλεκτών. Η συνολική επιφάνεια των συλλεκτών δεν έχει κάποιο περιορισμό. Η συνολική επιφάνεια των συλλεκτών θα επιλεγεί με τεχνοοικονομικά κριτήρια που θα περιγράψουμε στην συνέχεια.

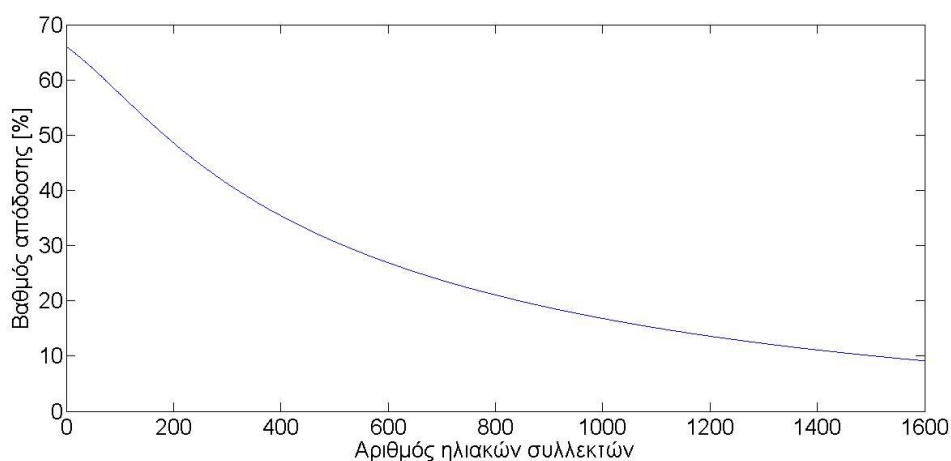
Όπως περιγράφεται και στο εγχειρίδιο του κατασκευαστή θεωρητικά οι συλλέκτες μπορούν να θερμάνουν το νερό μέχρι και τους  $590^{\circ}\text{C}$  [42]. Η μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία λειτουργίας των συλλεκτών είναι  $300^{\circ}\text{C}$  [42]. Επομένως κάνοντας τους υπολογισμούς των θερμοκρασιών εξόδου των συλλεκτών, εάν η θερμοκρασία εξόδου ξεπερνά τους  $300^{\circ}\text{C}$  την διορθώνουμε. Πρακτικά σε αυτήν την περίπτωση μπορούμε να υποθέσουμε πως λειτουργούν οι συλλέκτες μέχρι εκείνον που έχει θερμοκρασία εξόδου  $300^{\circ}\text{C}$  ενώ οι υπόλοιποι βγαίνουν εκτός λειτουργίας μέσω ενός σωλήνα παράκαμψης (by-pass). Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η θερμοκρασία του νερού καθώς θερμαίνεται διαδοχικά από τους ηλιακούς συλλέκτες. Στον οριζόντιο άξονα φαίνεται ο αριθμός των συλλεκτών.



Διάγραμμα 4.10 Θερμοκρασία νερού σε κάθε ηλιακό συλλέκτη

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε πως η θερμοκρασία του νερού ξεπερνά κατά πολύ την θερμοκρασία λειτουργίας επομένως σε αυτήν την περίπτωση το νερό θα εξέρχεται από τους συλλέκτες στην μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία, τους 300 °C. Να σημειωθεί πως το παραπάνω διάγραμμα αναφέρεται στις 10 Απριλίου στις 12:00 το μεσημέρι. Στο παραπάνω διάγραμμα επίσης βλέπουμε πως η θερμοκρασία του νερού τείνει να σταθεροποιηθεί σε μια τιμή. Αυτή η τιμή της θερμοκρασίας είναι εκείνη για την οποία μηδενίζει ο βαθμός απόδοσης για την συγκεκριμένη ηλιακή ακτινοβολία. Δηλαδή είναι η θερμοκρασία που προκαλεί απώλειες ίσες με την προσδιδόμενη από τον ήλιο θερμότητα.

Στο επόμενο διάγραμμα φαίνεται ο βαθμός απόδοσης κάθε συλλέκτη για την ίδια ώρα και ημέρα με το προηγούμενο διάγραμμα.



Διάγραμμα 4.11 Βαθμός απόδοσης ηλιακών συλλεκτών

Στο διάγραμμα του βαθμού απόδοσης παρατηρούμε πως κάθε επομένως συλλέκτης έχει όλο και μικρότερο βαθμό απόδοσης. Αυτό συμβαίνει γιατί καθώς το νερό περνά από τους συλλέκτες η θερμοκρασία του αυξάνεται και μαζί της αυξάνονται και οι απώλειες προς το περιβάλλον. Επομένως ο βαθμός απόδοσης μειώνεται. Τα δυο παραπάνω διαγράμματα δείχνουν ακραίες καταστάσεις τις οποίες δεν θα χρησιμοποιήσουμε εφόσον η επιλογή του αριθμού των συλλεκτών θα γίνει με οικονομοτεχνικά κριτήρια. Οι συλλέκτες θα λειτουργούν σε σαφώς μεγαλύτερους βαθμούς απόδοσης.

Στην αρχή κάθε ώρας η θερμοκρασία εισόδου του νερού δεν είναι ίση με την θερμοκρασία του νερού του δικτύου αλλά με την θερμοκρασία επιστροφής της προηγούμενης ώρας. Το νερό εισέρχεται σε θερμοκρασία δικτύου μόνο την πρώτη ώρα λειτουργίας της εγκατάστασης. Γενικά διακρίνουμε τρεις περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση η θερμοκρασία του νερού εισέρχεται με την θερμοκρασία του νερού του δικτύου εφόσον είναι η πρώτη ώρα λειτουργίας. Η δεύτερη περίπτωση είναι όταν το νερό μετά την πρώτη ώρα θερμανθεί αλλά όχι αρκετά προκειμένου να

το χρησιμοποιήσουμε για αποθήκευση ενέργειας. Σε αυτήν την περίπτωση η θερμοκρασία εισόδου της επόμενης ώρας θα είναι η θερμοκρασία εξόδου της προηγούμενης. Στην τρίτη περίπτωση η θερμοκρασία του νερού είναι αρκετά υψηλή ώστε να χρησιμοποιήσουμε το νερό των συλλεκτών. Η θερμοκρασία της επόμενης ώρας εξαρτάται από την χρήση της προηγούμενης ώρας. Αν το νερό θερμαίνει το PCM τότε η θερμοκρασία επιστροφής είναι 123°C, ενώ αν θερμαίνει τον ατμοποιητή της αντλίας θερμότητας τότε η θερμοκρασία επιστροφής είναι 100°C. Σε κάθε μια από τις δύο τελευταίες περιπτώσεις η θερμοκρασία επιστροφής είναι η θερμοκρασία εισόδου του νερού στους συλλέκτες της επόμενης ώρας. Για να αυξήσουμε την συνολική παροχή ισχύος μπορούμε να θεωρήσουμε πως έχουμε παράλληλα δύο ή περισσότερες «σειρές» συλλεκτών που περιγράψαμε παραπάνω. Τόσο ο αριθμός των «σειρών» αυτών (N) , όσο και ο αριθμός των ηλιακών συλλεκτών εν σειρά (A) θα καθοριστούν με οικονομοτεχνικά κριτήρια όπως θα δούμε σε επόμενο κεφάλαιο. Δηλαδή θα έχουμε N σειρές από A στον αριθμό συλλέκτες σε κάθε σειρά. Επομένως γνωρίζουμε την ισχύ που αποδίδουν το ηλιακό θερμικό σύστημα κάθε ώρα του έτους.

## **4.5 Υλικά αλλαγής φάσης (PCM)**

### **4.5.1 Επιλογή υλικού αλλαγής φάσης (PCM)**

Για την επιλογή του υλικού αλλαγής φάσης θα πρέπει να γνωρίζουμε την θερμοκρασία που θέλουμε να γίνεται η αποθήκευση. Το πρώτο κριτήριο επιλογής είναι η λανθάνουσα θερμότητα. Όσο μεγαλύτερη η λανθάνουσα θερμότητα τόσο μεγαλύτερο ποσό θερμότητας μπορούμε να αποθηκεύσουμε κατά την τήξη του υλικού αλλαγής φάσης και επομένως τόσο περισσότερη θερμότητα θα αποδώσει το υλικό αλλαγής φάσης κατά την λειτουργία της παραγωγής ισχύος. Το δεύτερο κριτήριο είναι η θερμοκρασία αλλαγής φάσης. Με σκοπό την αποδοτικότερη εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας η θερμοκρασία αλλαγής φάσης τείνει σε μικρές τιμές ώστε να εκμεταλλευόμαστε μεγαλύτερο εύρος θερμοκρασιών του νερού των ηλιακών συλλεκτών, ενώ για αποδοτικότερη λειτουργία του κύκλου ORC η θερμοκρασία του υλικού αλλαγής φάσης θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν υψηλότερη. Επομένως μια θερμοκρασία μεγαλύτερη από 110°C αποτελεί λύση και για τους δυο περιορισμούς [52]. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται μερικά υλικά φάσης παρμένα από πίνακα για θερμοκρασίες 110°C-180°C από τα οποία θα επιλέξουμε το καταλληλότερο με βάση τα προαναφερθέντα κριτήρια.[10]

ΥΛΙΚΟ	Κατηγορία	T <sub>m</sub> (°C)	ΔH(kJ/kg)	I	II	III	IV
Erythritol	Σακχαρο-αλκοόλες	118[64]	332-340	sc	Xi	3	+
Succinic anhydride	Δικαρβοξυλικά οξέα	116-119	177-203	sc	Xi	1	+
Polywax 2000	πολυμερείς υδρογονάνθρακες	112-122	182-227	---	-	3	+
Polywax 3000	πολυμερείς υδρογονάνθρακες	115-129	210-239	---	-	3	+
MgCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	Ένυδρα άλατα	117-118	165-172	sc ph	/	1	+
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> · ZnSO <sub>4</sub> · 6H <sub>2</sub> O	Ένυδρα άλατα	125	257	---	Xn	3 N	+
Mandelic acid	Αρωματικοί υδρογονάνθρακες	117-121	161	---	/	3	0
Benzoic Acid	Αρωματικοί υδρογονάνθρακες	121-123	114-147	---	Xn	1	+
Picric acid	Αρωματικοί υδρογονάνθρακες	121-122	75	---	T F	2	0
Xenontetrafluorid	(τετραφθοριούχο ξένο)	116-117	291	---	Xn	---	0
Technetium heptoxide	(τεχνητίο επτοξειδίο)	119	149-408	---	Ra	---	-

Πίνακας 4.6 Πίνακας ιδιοτήτων υλικά αλλαγής φάσης

Επιλέχθηκαν για παρουσίαση μόνο τα υλικά αλλαγής φάσης τα οποία είχαν θερμοκρασία τήξης κοντά στους 120°C ±5°C έτσι ώστε να εκμεταλλευόμαστε περισσότερη ηλιακή ενέργεια κατά την φάση της αποθήκευσης. Παρατηρούμε πως το υλικό αλλαγής φάσης με την μεγαλύτερη λανθάνουσα θερμότητα είναι το **Erythritol** επομένως αυτό το υλικό αλλαγής φάσης θα χρησιμοποιήσουμε ως μέσο αποθήκευσης ενέργειας. Όσο μεγαλύτερη λανθάνουσα θερμότητα τόσο μικρότερος ο απαιτούμενος χώρος το οποίο αποτελεί βασικό κριτήριο επιλογής.

Για την εξήγηση των κατηγοριών (I,II,III,IV) έχουμε τα εξής:

**Στήλη I:** Τεχνικά ζητήματα. Δείχνει τον τομέα που παρουσιάζει μεγαλύτερη δυσκολία το υλικό αλλαγής φάσης και χρίζει ιδιαίτερης προσοχής κατά την χρήση του. (sc supercooling, su αυξημένη εξάχνιση, rh πολλαπλών φάσεων, hy υγροσκοπικότητα, st μειωμένη θερμική σταθερότητα)

**Στήλη II:** Επικινδυνότητα έκθεσης σε ανθρώπους. Οι συμβολισμοί γίνονται με βάση την Οδηγία 67/548/EEC ( / - καμία παρενέργεια, T+ - πολύ τοξικό, T – τοξικό, O – οξειδωτικό, F – εύφλεκτο, E – κίνδυνος έκρηξης, C – διαβρωτικό, Xn επιβλαβές, Xi – ερεθιστικό, Ra – ραδιενεργό, - δεν έχει κατηγοριοποιηθεί ακόμα)

**Στήλη III:** Οι επιπτώσεις στην ποιότητα του νερού αποτελούν δείγμα περιβαλλοντικής επιβάρυνσης. Η κατηγοριοποίηση γίνεται σύμφωνα με τους γερμανικούς κανονισμούς για την ταξινόμηση των ουσιών ως προς την επικινδυνότητα για το νερό /V01/(1 – χαμηλής επικινδυνότητας νερού, 2 – επικίνδυνο για το νερό, 3 – αρκετά επιβλαβές για το νερό, N επιβλαβές ή τοξικό για τους υδρόβιους οργανισμούς, <sup>1</sup> – κατηγοριοποίηση από τον κατασκευαστή ή τον προμηθευτή)

**Στήλη IV:** Ταξινόμηση ανάλογα με την τιμή ( $\rho$ [€/kg]) για εργαστηριακές ποσότητες. («+» -  $\rho \leq 50$ , «0» -  $50 < \rho \leq 500$ , «-» -  $\rho > 500$ ). Τα υλικά που παράγονται για βιομηχανική χρήση είναι φθηνότερα κατά έναν συντελεστή από 2 μέχρι 200.

Έπειτα από την επεξήγηση όλων στηλών που το απαιτούσαν μπορούμε να περιγράψουμε τα χαρακτηριστικά του υλικού αλλαγής φάσης PCM και να το συγκρίνουμε πιο αποτελεσματικά με τα υπόλοιπα υλικά από τα οποία επιλέξαμε το **Erythritol** με σκοπό την αιτιολόγηση της απόφασής μας.

Αρχικά παρατηρούμε πως το Erythritol διαθέτει την μεγαλύτερη λανθάνουσα θερμότητα. Αυτό αποτελεί πλεονέκτημα αφού χρειαζόμαστε λιγότερη μάζα αυτού του υλικού για να αποθηκεύσουμε μια δεδομένη ποσότητα θερμότητας, εξασφαλίζοντας μικρότερο χώρο και ενδεχομένως μικρότερο κόστος. Η κατηγορία I μας δείχνει τα τεχνικά χαρακτηριστικά στα οποία χρειάζεται προσοχή κατά την χρήση του. Το επιλεγμένο υλικό αλλαγής φάσης Erythritol χρίζει ιδιαίτερης προσοχής κατά το supercooling κάτι το οποίο θα πρέπει να προσέχουμε. Στην πρώτη κατηγορία υστερεί το επιλεγμένο υλικό αλλαγής φάσης έναντι των υπολοίπων. Στην δεύτερη κατηγορία, η οποία αναφέρεται στην επικινδυνότητα έκθεσης σε ανθρώπους, παρατηρούμε πως σχεδόν όλα παρουσιάζουν ένα βαθμό επικινδυνότητας με το Erythritol να προκαλεί ερεθισμό. Η τρίτη κατηγορία δείχνει τον βαθμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που θα προκαλέσει η διαρροή του στο περιβάλλον. Το Erythritol εμφανίζει μεγάλη επιβάρυνση του περιβάλλοντος γεγονός που καθιστά την λήψη μέτρων αναγκαία, ώστε να μην υπάρχουν τυχόν διαρροές. Η τέταρτη κατηγορία αναφέρεται στο κόστος του Erythritol που φαίνεται να είναι αρκετά μικρό και αποτελεί ένα από τα πλεονεκτήματά του. Εν κατακλείδι μπορούμε να δούμε πως η επιλογή μας αποτελεί πολύ καλή επιλογή αναφορικά με τα θερμικά χαρακτηριστικά (θερμοκρασία αλλαγής φάσης, λανθάνουσα θερμότητα), υστερεί σε θέματα επιβάρυνσης του περιβάλλοντος και των ανθρώπων επομένως θα πρέπει να ληφθούν μέτρα ασφάλειας κατά την χρήση του και τέλος έχει αρκετά χαμηλό κόστος, πράγματα που το καθιστούν μια πολύ καλή λύση εκ των ανωτέρω επιλογών. Αναλύοντας την εγκατάσταση σε μεγαλύτερο βάθος ενδεχομένως κάποιο άλλο υλικό αλλαγής φάσης να παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα

προσαρμόζοντας κατάλληλα και άλλες παραμέτρους του συστήματος. Η επιλογή του PCM δεν θα αποτελέσει μέγεθος προς βελτιστοποίηση.

#### 4.5.2 Υπολογιστική μέθοδος αποθήκευσης και απόδοσης θερμικής ενέργειας μέσω του υλικού αλλαγής φάσης (PCM)

Το κύριο πλεονέκτημα των υλικών αλλαγής φάσης ως μέσα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας αποτελεί το γεγονός πως αποθηκεύουν θερμότητα σε σταθερή θερμοκρασία. Τα υλικά αλλαγής φάσης χρησιμοποιούνται για αποθήκευση θερμότητας κυρίως στην περιοχή όπου αλλάζουν φάση από στερεό σε υγρό. Θεωρούμε πως το PCM είναι μηδενική αποθηκευμένη ενέργεια όταν βρίσκεται στην θερμοκρασία αλλαγής φάσης αλλά παραμένει όλο στην στερεή φάση. Αντίθετα θεωρούμε πως το PCM είναι πλήρως φορτισμένο, δηλαδή έχει αποθηκεύσει την μέγιστη δυνατή θερμική ενέργεια όταν βρίσκεται στην θερμοκρασία αλλαγής φάσης και όλη η μάζα του PCM βρίσκεται σε υγρή κατάσταση. Περαιτέρω αποθήκευση ενέργειας θα οδηγούσε σε αύξηση της θερμοκρασίας του PCM κάτι το οποίο στην αποφόρτιση του PCM ενδεχομένως να οδηγούσε σε supercooling. Επιπρόσθετα τα PCM χρησιμοποιούνται κυρίως στην περιοχή αλλαγής φάσης και όχι στην περιοχή αισθητής θερμότητας.

Το υλικό αλλαγής φάσης υπόκειται σε δύο διαδικασίες, την «φόρτισή» του κατά την οποία αποθηκεύει την θερμική ενέργεια και την «αποφόρτισή» του κατά την οποία αποδίδει την θερμική ενέργεια του. Ο υπολογισμός της ποσότητας ενέργειας που αποθηκεύεται ή αποδίδεται από το PCM υπολογίζεται με ενεργειακές διαφορές. Με γνωστή την μάζα του υλικού αλλαγής φάσης και δεδομένη την λανθάνουσα θερμότητα του (την λαμβάνουμε ίση με 318,54kJ/kg [64], θερμοκρασία αλλαγής φάσης=118°C [64]) μπορούμε να βρούμε την μέγιστη αποθηκευμένη ενέργεια από την σχέση:

$$E_{max} = m_{PCM} * Q_{L,PCM} = m_{PCM} * 318,54 [kJ] \quad (35)$$

Η φόρτιση του PCM γίνεται είτε μέσω των ηλιακών συλλεκτών είτε μέσω της αντλίας θερμότητας με τρόπο τον οποίο θα εξηγήσουμε στο επόμενο κεφάλαιο. Σε κάθε περίπτωση έχουμε ένα ρευστό (νερό ή οργανικό μέσο) σε μεγαλύτερη θερμοκρασία από την θερμοκρασία αλλαγής φάσης του υλικού το οποίο αποδίδει θερμότητα στο PCM και αποθηκεύεται ως θερμική ενέργεια. Η μελέτη της εγκατάστασης γίνεται σε ωριαία βάση. Επομένως η ενθαλπική πτώση του ρευστού που θερμαίνει το PCM στο διάστημα μιας ώρας μας δίνει το ποσό ενέργειας που

αποθηκεύεται ως θερμική ενέργεια στο PCM. Η παρακάτω σχέση μας δείχνει αυτόν τον τρόπο υπολογισμού.

$$m_f * (H_{f,in} - H_{f,out}) * \Delta t = E_{PCM}(h + 1) - E_{PCM}(h) \quad (36)$$

όπου

$\Delta t = 3600 \text{ s/h}$  αφού η συναλλαγή θερμότητας με αυτές τις συνθήκες γίνεται για μία ώρα

$E_{PCM}(h + 1)$  η αποθηκευμένη ενέργεια στην αρχή της επόμενης ώρας

Οι παραδοχές που κάνουμε για το σύστημα είναι οι εξής:

- Η παραδοχή που έχουμε κάνει και φαίνεται στους υπολογισμούς είναι πως στην συναλλαγή θερμότητας δεν υπάρχουν απώλειες, δηλαδή όλη η θερμότητα που δίνει το ρευστό πηγαίνει στο υλικό αλλαγής φάσης πράγμα το οποίο προϋποθέτει έναν πολύ καλό εναλλάκτη θερμότητας, ενώ στην πραγματικότητα είναι πάρα πολύ δύσκολο.
- Μια επιπλέον παραδοχή είναι πως η αποθηκευμένη θερμότητα στο PCM δεν χάνεται στο περιβάλλον λόγω διαφοράς θερμοκρασίας πράγμα που απαιτεί πολύ καλά μονωμένο σύστημα, αν και δεν ανταποκρίνεται πλήρως στην πραγματικότητα.
- Η ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά που απαιτείται για την λειτουργία των εναλλακτών μεταξύ PCM και οργανικού μέσου ή νερού πρέπει να είναι  $5^\circ\text{C}$ .

Είναι προφανές πως όταν το PCM «γεμίσει» η αποθήκευση ενέργειας σταματά και αντίστοιχα όταν το PCM «αδειάσει» η απόδοση θερμότητας σταματά. Όταν όλη η μάζα του υλικού αλλαγής φάσης βρίσκεται σε υγρή φάση τότε θεωρείται πλήρως «φορτισμένο» και η αντλία που κυκλοφορεί το νερό σταματά και η αποθήκευση σταματά. Όταν όλη η μάζα του υλικού αλλαγής φάσης βρίσκεται σε στερεά κατάσταση τότε το υλικό αλλαγής φάσης θεωρείται πλήρως «άδειο» και σταματά η παραγωγή ισχύος από τον κύκλο ORC. Τα υλικά αλλαγής φάσης χρησιμοποιούνται κυρίως στην περιοχή αλλαγής φάσης (λανθάνουσα θερμότητα) και όχι τόσο στην περιοχή όπου λαμβάνουν αισθητή θερμότητα αυξάνοντας την θερμοκρασία τους περαιτέρω από την θερμοκρασία αλλαγής φάσης. Επομένως ακολουθώντας αυτήν την αρχή το PCM θα λειτουργήσει μόνο στην διφασική του περιοχή. Το μοναδικό μέγεθος του οποίου η τιμή δεν έχει καθοριστεί είναι η συνολική μάζα του υλικού αλλαγής φάσης, η οποία θα καθοριστεί με οικονομοτεχνικά κριτήρια. Με γνωστό το μέσο και τον τρόπο αποθήκευσης της ενέργειας μπορούμε να προχωρήσουμε σε άλλα στοιχεία της εγκατάστασης.



#### **4.6 Επιλογή οργανικών μέσων (organic fluids)**

Έχοντας υπόψιν τις παραμέτρους για την λειτουργία της εγκατάστασης γίνεται κατανοητό πως θα πρέπει να επιλέξουμε το κατάλληλο οργανικό μέσο το οποίο θα επιφέρει τα βέλτιστα θερμοδυναμικά αποτελέσματα κυρίως στον βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης τόσο κατά την αποθήκευση όσο και κατά την παραγωγή ισχύος. Επομένως θα πρέπει να δοκιμάσουμε διαφορετικά οργανικά μέσα με σκοπό την επιλογή του καταλληλότερου, έχοντας πάντα ως περιορισμό την επιτρεπόμενη χρήση του με βάση την συνθήκη του Kyoto. Τα οργανικά μέσα τα οποία επιλέχθηκαν τελικά είναι τα εξής:

- R245fa
- R123
- SO<sub>2</sub> (Διοξείδιο του θείου)
- Βουτάνιο (Butane)
- Αμμωνία (Ammonia)
- Προπάνιο (Propane)
- R134a
- R236fa
- Κυκλοπροπάνιο (Cyclopropane)
- R1234yf
- R152a
- R227ea
- CO<sub>2</sub> (Διοξείδιο του άνθρακα)

Παρακάτω παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά για κάθε ένα από τα οργανικά μέσα που επιλέχθηκαν. Το ODP είναι το δυναμικό καταστροφής του όζοντος και δείχνει πόσες φορές σε σχέση με το ψυκτικό αναφοράς R11 το συγκεκριμένο οργανικό μέσο καταστρέφει το όζον της ατμόσφαιρας. Το GWP είναι το δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη και μας δείχνει με πόσα κιλά διοξειδίου του άνθρακα ισοδυναμεί ένα κιλό του συγκεκριμένου οργανικού μέσου για την επιβάρυνση του πλανήτη λόγω της υπερθέρμανσης που προκαλεί. Η Διάρκεια Ζωής στην Ατμόσφαιρα μας δείχνει τα χρόνια τα οποία χρειάζονται στην ατμόσφαιρα ώστε το οργανικό μέσο να διασπαστεί σε μικρότερες ενώσεις. Τέλος το γκρουπ ασφαλείας (safety group) μας δείχνει την τοξικότητα και την αναφλεξιμότητά του οργανικού μέσου σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα.

### Safety Classification of Refrigerants<sup>[37]</sup>

Flammability in Air @ 60 °C & 101.3 kPa	ASHRAE 34 Safety group	
Higher Flammability LFL or ETFL <sub>60</sub> ≤ 100 g/m <sup>3</sup> OR HOC ≥ 19 MJ/kg <sup>[38]</sup>	A3	B3
Lower Flammability LFL or ETFL <sub>60</sub> > 100 g/m <sup>3</sup> & HOC < 19 MJ/kg <sup>[38]</sup>	A2	B2
Lower Flammability LFL or ETFL <sub>60</sub> > 100 g/m <sup>3</sup> & HOC < 19 MJ/kg <sup>[38]</sup> with a maximum burning velocity of ≤ 10 cm/s	A2L	B2L
No flame Propagation	A1	B1
Flammability in Air @ 60 °C & 101.3 kPa	Lower Toxicity OEL ≥ 400 ppm <sup>[22]</sup>	Higher Toxicity OEL < 400 ppm <sup>[22]</sup>

Πίνακας 4.7 Κατηγοριοποίηση ασφάλειας οργανικών μέσων [14]

Παρακάτω φαίνεται ο πίνακας με όλα τα απαραίτητα χαρακτηριστικά για τα οργανικά μέσα που θα εξετάσουμε.

Οργανικό μέσο	ODP	GWP	Διάρκεια Ζωής στην Ατμόσφαιρα	Safety group
R245fa	0	1030	7,6	B1
R123	0,02	77	1,3	B1
SO <sub>2</sub>	---	---	---	B1
Βουτάνιο	0	4	12±3	A3
Αμμωνία	0	0	0,019165	B2L
Προπάνιο	0	1,8	12±3	A3
R134a	0	1430	14	A1
R236fa	0	9810	240	A1
R227ea	0	3200	34,2	A1
Κυκλοπροπάνιο	0	1,8	12±3	A3
R1234yf	0	4	0,030116	A2
R152a	0	124	1,4	A2
CO <sub>2</sub>	0	1	29,3k-36,1k	A1

Πίνακας 4.8 Παρουσίαση των ιδιοτήτων των επιλεγμένων οργανικών μέσων

Όπως φαίνεται από τον παραπάνω πίνακα μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει το διοξείδιο του άνθρακα το οποίο έχει μηδενικό δυναμικό καταστροφής του όζοντος, μοναδιαίο δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη, εξ' ορισμού, και επιπλέον δεν είναι τοξικό αλλά ούτε και αναφλέξιμο εφόσον είναι προϊόν τέλειας καύσης (safety group A1). Το μοναδικό οργανικό μέσο που επιλέχθηκε με μη μηδενικό δυναμικό

καταστροφής του όζοντος είναι το R123 λόγω των πολύ καλών ιδιοτήτων του στο εύρος θερμοκρασιών που μας ενδιαφέρει και λόγω του γεγονότος πως μετά το 2020 θα σταματήσει η παραγωγή και επομένως η πώληση του R123 στις ανεπτυγμένες χώρες όπως η Ελλάδα.

Πολύ σημαντικά χαρακτηριστικά των οργανικών μέσων για τον τρόπο λειτουργίας της εγκατάστασης μας αποτελούν η κρίσιμη θερμοκρασία και η κρίσιμη πίεση. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι ιδιότητες αυτές για τα οργανικά μέσα που θα χρησιμοποιήσουμε.

Οργανικό μέσο	Κρίσιμη θερμοκρασία (°C)	Κρίσιμη πίεση (MPa)
R245fa	153,86	3,6510
R123	183,68	3,6605
SO <sub>2</sub>	157,49	7,8840
Βουτάνιο	151,975	3,7960
Αμμωνία	132,25	11,3330
Προπάνιο	96,74	4,2512
R134a	101,06	4,0280
R236fa	124,92	3,1910
R227ea	101,75	2,9250
Κυκλοπροπάνιο	125,14	5,5797
R1234yf	94,70	3,3822
R152a	113,261	4,5200
CO <sub>2</sub>	30,978	7,3780

Πίνακας 4.9 Παρουσίαση των ιδιοτήτων των επιλεγμένων οργανικών μέσων

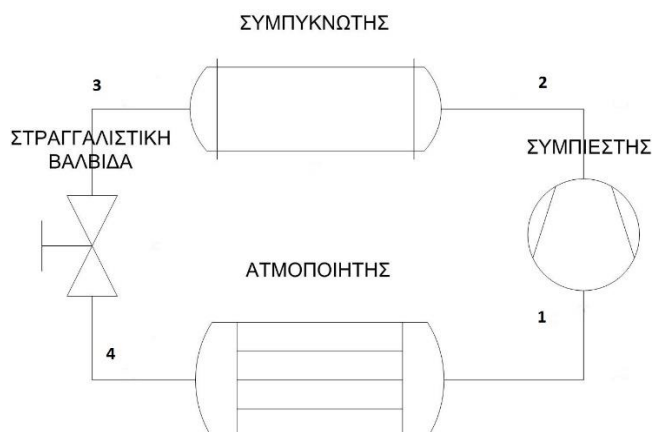
Η επιλογή του καταλληλότερου οργανικού μέσου για την εγκατάσταση που εξετάζουμε θα γίνει με βάση θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά και όχι με βάση των επιπτώσεων τους στο περιβάλλον σε πρώτη προσέγγιση. Έπειτα θα ληφθεί υπόψη και ο περιβαλλοντικός παράγοντας. Τα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά με βάσει τα οποία θα επιλέξουμε το οργανικό μέσο θα αναλυθούν σε επόμενο κεφάλαιο το οποίο θα αναφέρεται στην διαδικασία προσομοίωσης των κύκλων λειτουργίας.

## 4.7 Αντλίες θερμότητας

### 4.7.1 Τρόπος λειτουργίας αντλίας θερμότητας

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει η αντλία θερμότητας έχει σχεδιαστεί για να μεταφέρει θερμότητα (θερμική ενέργεια) με φορά αντίθετη από αυτήν που ορίζει η φυσική ροή. Δηλαδή από το ψυχρό στο θερμό. Για να το πετύχει αυτό η αντλία θερμότητας αποτελείται από τέσσερα επιμέρους στοιχεία. Τον ατμοποιητή, τον συμπιεστή, τον

συμπυκνωτή και την στραγγαλιστική βαλβίδα. Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται τα στοιχεία μιας αντλίας θερμότητας.



Σχήμα 4.12 Αντλία θερμότητας

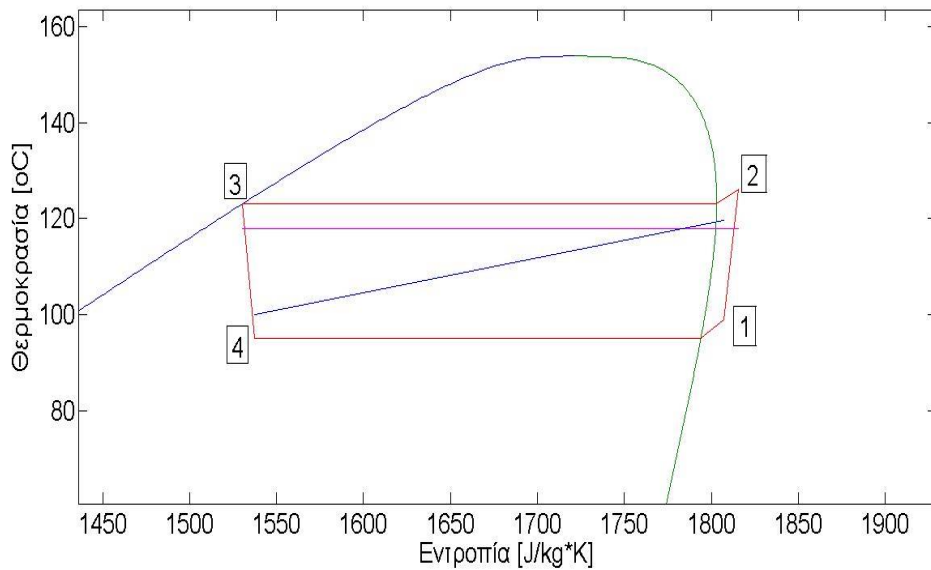
Το οργανικό μέσο το οποίο κυκλοφορεί στην αντλία θερμότητας εισέρχεται στον ατμοποιητή (4) σε διφασική κατάσταση (υγρό-ατμός) όπου λαμβάνει θερμότητα και εξέρχεται, στον ιδανικό κύκλο, κορεσμένος ατμός. Επειδή όμως θέλουμε να εξασφαλίσουμε πως ο συμπιεστής θα λειτουργήσει χωρίς τα προβλήματα που του προκαλεί η ύπαρξη υγρής φάσης το οργανικό μέσο εξέρχεται από τον ατμοποιητή 4°C παραπάνω από την κορεσμένη κατάσταση. Από εκεί εισέρχεται στον συμπιεστή (1) όπου αυξάνεται η πίεσή του με αποτέλεσμα το οργανικό μέσο να απομακρύνεται ακόμη περισσότερο από την καμπύλη κορεσμού. Στην συνέχεια εισέρχεται στον συμπυκνωτή (2) όπου αποβάλλει θερμότητα και εξέρχεται σε κατάσταση κορεσμένου υγρού, στον ιδανικό κύκλο. Σε πραγματική λειτουργία το οργανικό μέσο εξέρχεται με μια μικρή υπόψυξη κάτι το οποίο δεν θα θεωρήσουμε στην δική μας περίπτωση. Εν συνεχεία το οργανικό μέσο διέρχεται από την στραγγαλιστική βαλβίδα (3) όπου η πίεση πέφτει στην χαμηλή πίεση του ατμοποιητή ισενθαλπικά. Με αυτό τον τρόπο ο κύκλος επαναλαμβάνεται συνεχώς.

Όπως αναφέραμε προηγουμένως η εγκατάσταση μας αποθηκεύει ενέργεια μέσω του υλικού αλλαγής φάσης. Επομένως η αποθήκευση θερμικής ενέργειας γίνεται υπό σταθερή θερμοκρασία και συγκεκριμένα στους 118 °C [64]. Αν οι ηλιακοί συλλέκτες θερμαίνουν το νερό σε αρκετά μεγάλες θερμοκρασίες το υλικό αλλαγής φάσης μπορεί να θερμαίνεται από το νερό κατευθείαν. Αν όμως το νερό, για κάποιες ώρες τις ημέρας κυρίως κατά την ανατολή και την δύση του ηλίου όπου η ηλιακή ακτινοβολία είναι μικρότερη, βρίσκεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την αντλία θερμότητας για να αναβαθμίσουμε την ενέργεια των ηλιακών συλλεκτών. Ο τρόπος με τον οποίο θα χρησιμοποιήσουμε την αντλία θερμότητας είναι ο εξής. Το ζεστό νερό σε ένα εύρος θερμοκρασιών από

100-123°C θα εισέρχεται στον ατμοποιητή της αντλίας θερμότητας με σκοπό την ατμοποίηση του οργανικού μέσου. Η επιλογή του θερμοκρασιακού αυτού εύρους είναι προφανής αφού για μεγαλύτερες θερμοκρασίες το νερό μπορεί να θερμάνει το PCM κατευθείαν χωρίς την χρήση της αντλίας θερμότητας. Ο συμπυκνωτής της αντλίας θερμότητας θα είναι ένας εναλλάκτης μεταξύ του οργανικού μέσου και του υλικού αλλαγής φάσης. Με αυτόν τον τρόπο η αποδιδόμενη θερμότητα του οργανικού μέσου προσκομίζεται από το υλικό αλλαγής φάσης.

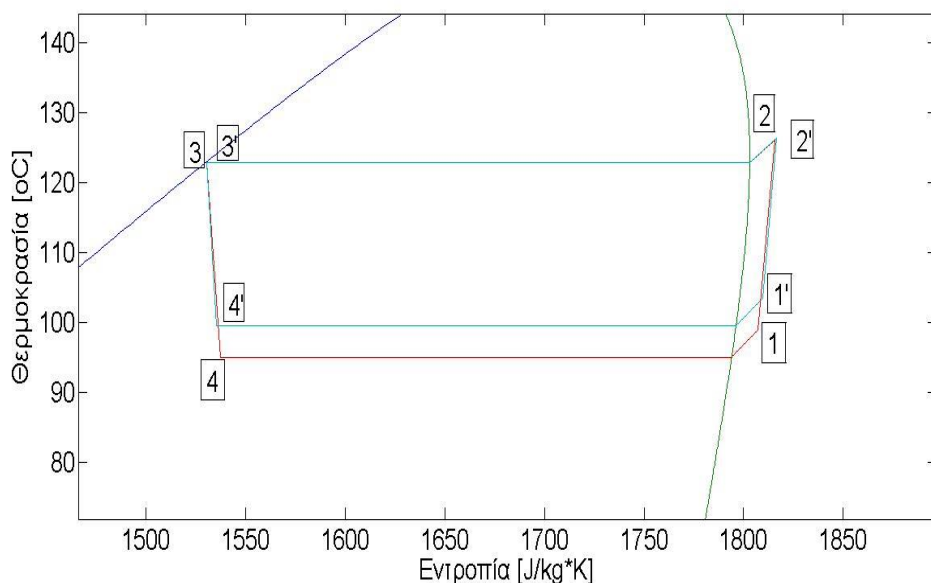
Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφέρουμε τις τρεις κατηγορίες τρόπου λειτουργίας της αντλίας θερμότητας ανάλογα με το οργανικό μέσο. Το μέγεθος που καθορίζει τον τρόπο λειτουργίας της αντλίας είναι η κρίσιμη θερμοκρασία του οργανικού μέσου και η σχέση της με την θερμοκρασία του συμπυκνωτή και του ατμοποιητή. Όπως έχουμε ήδη αναφέρει η θερμοκρασία στον συμπυκνωτή καθορίζεται από το υλικό αλλαγής φάσης επομένως η ελάχιστη θερμοκρασία του οργανικού μέσου δεν θα πρέπει να πέφτει κάτω από του 123 °C (118+5 °C). Αντίθετα η θερμοκρασία στον ατμοποιητή καθορίζεται από το εύρος των θερμοκρασιών του νερού (100-123 °C) και με δεδομένη την ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά που πρέπει να έχουν τα δυο ρεύματα στον εναλλάκτη (5 °C) το οργανικό μέσο θα έχει θερμοκρασίες από 95 °C έως 118 °C. Ανάλογα με την κρίσιμη θερμοκρασία διακρίνουμε τις εξής περιπτώσεις:

- **Υποκρίσιμος κύκλος:** Σε αυτή την περίπτωση η κρίσιμη θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη και από την θερμοκρασία του συμπυκνωτή αλλά και από την αντίστοιχη του ατμοποιητή. Επομένως ο κύκλος της αντλίας θερμότητας βρίσκεται ολόκληρος «μέσα» στην «καμπάνα» τους οργανικού μέσου. Εντός της διφασικής περιοχής του οργανικού μέσου (καμπάνα) οι καμπύλες της θερμοκρασία ταυτίζονται με τις καμπύλες της πίεσης γιατί η ατμοποίηση γίνεται υπό σταθερή θερμοκρασία. Επομένως και η υψηλή πίεσης αλλά και η χαμηλή πίεση είναι καθορισμένες από τις θερμοκρασίες που λειτουργεί ο κύκλος. Η θερμοκρασία του συμπυκνωτή καθορίζεται από της θερμοκρασία αλλαγής φάσης του PCM και η θερμοκρασία του ατμοποιητή από την θερμοκρασία του νερού των ηλιακών συλλεκτών. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται ο υποκρίσιμος κύκλος του οργανικού μέσου R245fa.



Διάγραμμα 4.13 Υποκρίσιμος κύκλος αντλίας

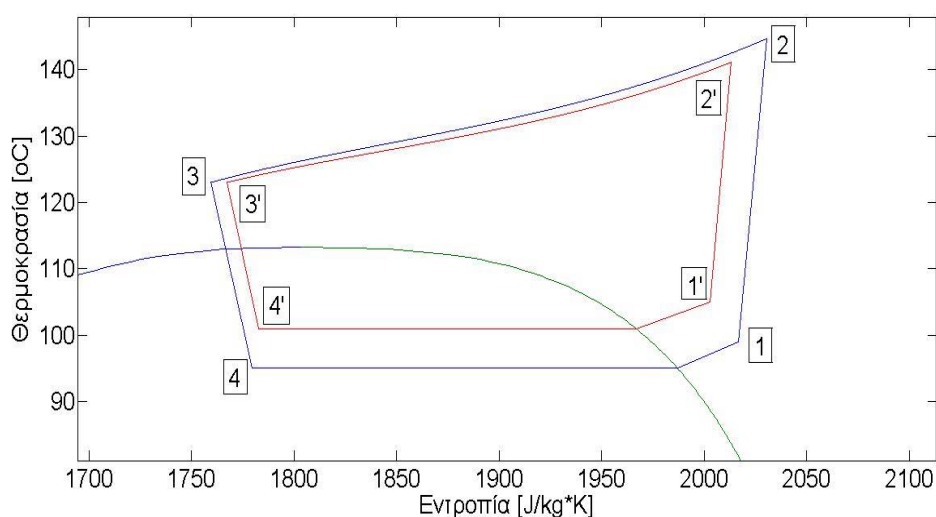
Με κόκκινη γραμμή φαίνεται ο υποκρίσιμος κύκλος της αντλίας θερμότητας. Παρατηρούμε την μικρή υπερθέρμανση στον ατμοποιητή (4 °C) και την απουσία υπόψυξης στον συμπυκνωτή. Με μωβ γραμμή φαίνεται η σταθερή θερμοκρασία του υλικού αλλαγής φάσης και με γαλάζια γραμμή φαίνεται η θερμοκρασία του νερού των ηλιακών συλλεκτών. Βλέπουμε πως και στους δυο εναλλάκτες η ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά τηρείται (5 °C). Επίσης φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο οι θερμοκρασίες καθορίζουν τις πιέσεις στην διφασική περιοχή όπου λειτουργεί ο υποκρίσιμος κύκλος. Για διαφορετική χαμηλή πίεση που καθορίζεται από την θερμοκρασία νερού των ηλιακών συλλεκτών έχουμε διαφορετικό κύκλο της αντλίας θερμότητας. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται ο κύκλος της αντλίας θερμότητας για διαφορετικές θερμοκρασίες νερού των συλλεκτών.



Διάγραμμα 4.14 Κύκλοι αντλίας θερμότητας για διαφορετική θερμοκρασία νερού ηλιακών συλλεκτών

Με γαλάζιο χρώμα φαίνεται η λειτουργία της αντλίας θερμότητας σε μεγαλύτερη θερμοκρασία ατμοποίησης με την ίδια υπερθέρμανση. Σε αυτήν την περίπτωση το έργο που απαιτεί ο συμπιεστής (1'-2') είναι μικρότερο από το αντίστοιχο για μικρότερη θερμοκρασία του ατμοποιητή (1-2).

- Υπερκρίσιμος κύκλος:** Στην δεύτερη περίπτωση η κρίσιμη θερμοκρασία του οργανικού μέσου είναι μικρότερη από την ελάχιστη θερμοκρασία που απαιτείται στον συμπυκνωτή και μεγαλύτερη από την θερμοκρασία που απαιτείται στον ατμοποιητή. Ο κύκλος της αντλίας θερμότητας είναι κατά το ήμισυ εντός της καμπάνας με την υψηλή πίεση να είναι μεγαλύτερη από την κρίσιμη. Επομένως με την θερμοκρασία πλέον να μην καθορίζει την πίεση, υπάρχουν πολλές πιέσεις για τις οποίες ο κύκλος να τηρεί το θερμοκρασιακό όριο του συμπυκνωτή. Το κριτήριο με τον οποίο επιλέγουμε την πίεση είναι θερμοδυναμικό. Σκοπός της αντλίας θερμότητας εν τέλει είναι η αποθήκευση ενέργειας στο PCM με το ελάχιστο καταναλισκόμενο έργο του συμπιεστή. Επομένως επιλέγουμε εκείνη την πίεση που μεγιστοποιεί το ποσό θερμότητας που αποβάλλεται στον συμπυκνωτή, και προσλαμβάνεται από το PCM, προς το έργο του συμπιεστή. Προφανώς η μεταβαλλόμενη ανά ώρα θερμοκρασία του ατμοποιητή έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή τόσο της βέλτιστης πίεσης όσο και του λόγου πίεσης της αντλίας θερμότητας. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνονται δυο περιπτώσεις με διαφορετική θερμοκρασία νερού από τους ηλιακούς συλλέκτες.

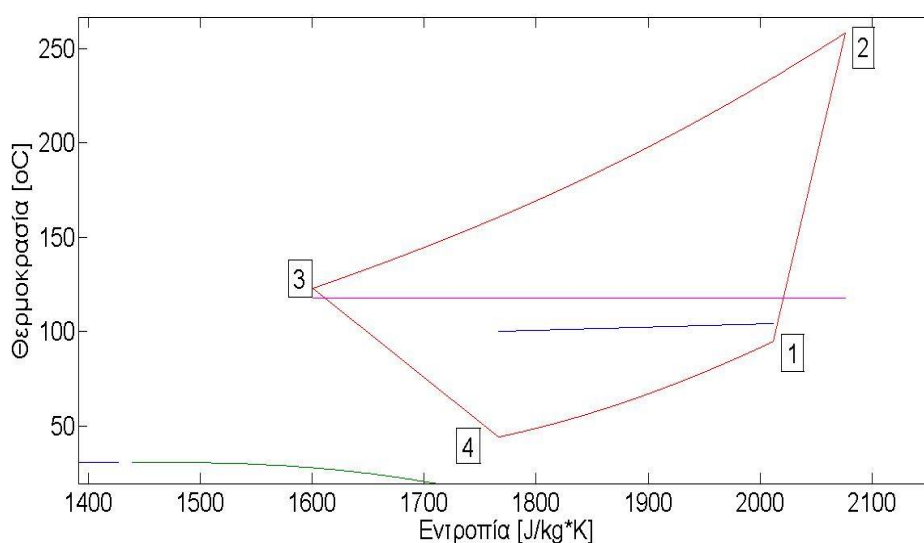


Διάγραμμα 4.15 Κύκλος αντλίας θερμότητας για οργανικό μέσο R152a

Την βέλτιστη πίεση την βρίσκουμε με επαναληπτική διαδικασία για κάθε ώρα που χρειάζεται να λειτουργήσει η αντλία με τα δεδομένα της κάθε ώρας. Το μέγεθος που βελτιστοποιούμε είναι ο COP.

$$COP = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1} \quad (37)$$

- Κύκλος CO<sub>2</sub>:** Στην περίπτωση του διοξειδίου του άνθρακα, όπου η κρίσιμη θερμοκρασία είναι αρκετά χαμηλή (30,978 °C), οι δύο πιέσεις του κύκλου της αντλίας θερμότητας θα πρέπει να είναι μεγαλύτερες από την υπερκρίσιμη. Επομένως καμία από τις δύο πιέσεις δεν καθορίζεται από την θερμοκρασία. Ο τρόπος με τον οποίο καθορίζουμε την υψηλή πίεση είναι ίδιος με την μέθοδο που ακολουθήσαμε στον υπερκρίσιμο κύκλο. Εφόσον ο σκοπός παραμένει ο ίδιος και πάλι επιθυμούμε την μεγιστοποίηση της αποθηκευόμενης ενέργειας με όσο το δυνατό μικρότερο έργο συμπίεσης. Για την πίεση του ατμοποιητή θα πρέπει να προσέχουμε την διαφορά θερμοκρασίας του θερμού (νερό ηλιακών συλλεκτών) με το ψυχρό ρεύμα (CO<sub>2</sub>) έτσι ώστε να τηρείται το θερμοκρασιακό ελάχιστο της θερμοκρασίας στους 5°C. Ξεκινώντας από την χαμηλή πίεση, η οποία προκύπτει έπειτα από δοκιμές ώστε να «ταιριάξει» με την θερμοκρασία του νερού των ηλιακών συλλεκτών, βρίσκουμε με επαναληπτικό τρόπο την υψηλή πίεση βελτιστοποιώντας τον ίδιο λόγο διαφοράς ενθαλπιών όπως και στον υπερκρίσιμο κύκλο. Όπως και προηγουμένως έτσι και τώρα η θερμοκρασία του νερού των ηλιακών συλλεκτών μεταβάλλει όλα τα μεγέθη του κύκλου, εφόσον η θερμοκρασία στην οποία θα πρέπει να εξέρχεται το CO<sub>2</sub> από τον συμπυκνωτή είναι δεδομένη και σταθερή στους 123 °C. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται ο κύκλος λειτουργίας της αντλίας θερμότητας με οργανικό μέσο το CO<sub>2</sub> (κόκκινο χρώμα). Με μωβ χρώμα διακρίνουμε την θερμοκρασία του υλικού αλλαγής φάσης, ενώ με μπλε χρώμα φαίνεται η θερμοκρασία του νερού των συλλεκτών.



Διάγραμμα 4.16 Κύκλος αντλίας θερμότητας για οργανικό μέσο CO<sub>2</sub>



Στα διαγράμματα 4.13 και 4.16 φαίνεται ξεκάθαρα τόσο η λειτουργία όσο και η χρησιμότητα της αντλίας θερμότητας. Την λειτουργία την έχουμε ήδη αναλύσει και για τις τρεις περιπτώσεις. Η χρησιμότητά της φαίνεται στο γεγονός πως έχοντας μια θερμοκρασία νερού η οποία δεν επαρκεί ώστε να φορτίσει το PCM με τη χρήση της αντλίας θερμότητας καταφέρουμε ακόμα και κάποιες ώρες με χαμηλή ηλιοφάνεια να αποθηκεύουμε ενέργεια με μοναδικό επιπλέον κόστος βέβαια την χρήση του συμπιεστή.

#### **4.7.2 Απαραίτητες παραδοχές για την λειτουργία της αντλίας θερμότητας**

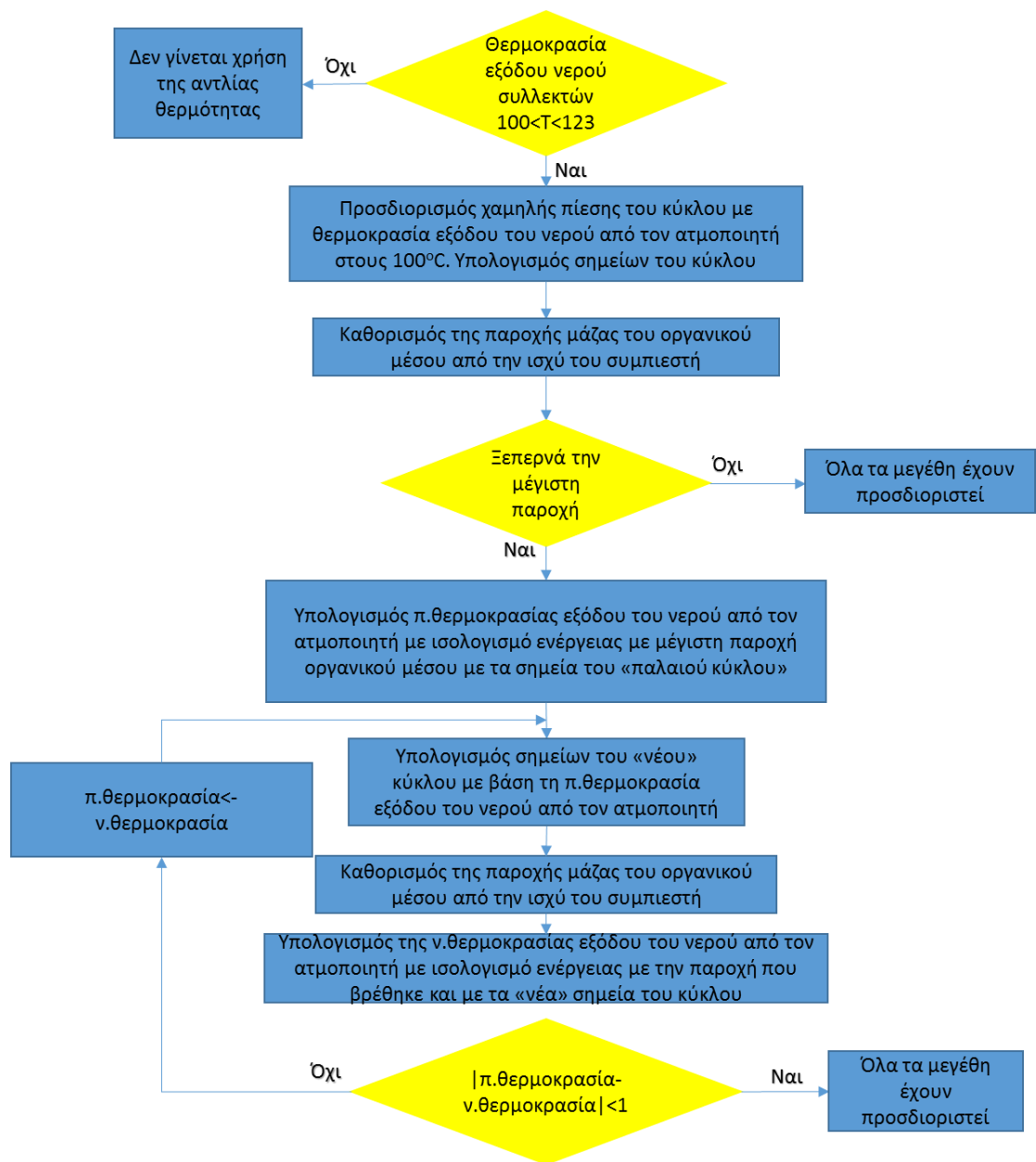
Για την υλοποίηση των υπολογισμών έπρεπε να γίνουν κάποιες παραδοχές σε τμήματα της αντλίας θερμότητας.

Η πρώτη παραδοχή που έχουμε ήδη αναφέρει είναι πως η ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ του θερμού και του ψυχρού ρεύματος και στους δύο εναλλάκτες θερμότητας (ατμοποιητή και συμπυκνωτής) είναι **5 °C**.

Η δεύτερη παραδοχή έχει να κάνει με τον βαθμό απόδοσης του συμπιεστή τον οποίο θεωρούμε σταθερό σε όλα τα φορτία και ίσο με **0,75** [63]. Επίσης θεωρούμε μέγιστο λόγο πίεσεων ίσο με **25**. Τέτοιους λόγους πίεσης αν χρειαστούν μπορούμε να επιτύχουμε με 3 εν σειρά συμπιεστές.

Η τρίτη παραδοχή αναφέρεται στον ισολογισμό ενέργειας στον ατμοποιητή. Όση ενέργεια αποδίδει το νερό των ηλιακών συλλεκτών, τόση έχει στην διάθεσή του το οργανικό μέσο ώστε να παραλάβει. Για λόγους που θα εξηγήσουμε παρακάτω ξεκινάμε την λειτουργία όλων των αντλιών θερμότητας με χαμηλή θερμοκρασία ίση με 95 °C (υποθέτοντας έξοδο νερού ηλιακών συλλεκτών ίσο με 100 °C). Λόγω του περιορισμού ισχύς που έχει ο συμπιεστής και θα αναλύσουμε σε επόμενο κεφάλαιο, η θερμοκρασία εξόδου του νερού των συλλεκτών μπορεί να εξέρχεται σε υψηλότερη θερμοκρασία από τους 100 °C. Έτσι όταν η θερμοκρασία εξόδου του νερού είναι υψηλότερη μπορούμε να μειώσουμε το απαιτούμενο έργο του συμπιεστή, το οποίο παρέχεται από το δίκτυο, ανεβάζοντας την θερμοκρασία ατμοποίησης, και επομένως την πίεση ατμοποίησης, όσο το δυνατόν υψηλότερα μέχρι να φτάσουμε την θερμοκρασιακή διαφορά στους 5 °C από την θερμοκρασία του νερού των ηλιακών συλλεκτών. Σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να τηρείται ο ισολογισμός ενέργειας στον ατμοποιητή, γιατί καθώς αυξάνουμε την θερμοκρασία ατμοποίησης αλλάζουμε την προσδιδόμενη ενέργεια και επομένως αλλάζει η θερμοκρασία εξόδου του νερού. Για να προσδιορίσουμε όλα τα μεγέθη υποθέτουμε

μια θερμοκρασία εξόδου του νερού και με δεδομένη την θερμοκρασία λειτουργίας του ατμοποιητή (-5 °C από την θερμοκρασία του νερού) υπολογίζουμε το κύκλο της αντλίας με όλα τα μεγέθη και τις θερμοκρασίες. Έπειτα κάνοντας τον ισολογισμό στον ατμοποιητή προκύπτει μια νέα θερμοκρασία εξόδου του νερού των ηλιακών συλλεκτών. Αν η επόμενη θερμοκρασία είναι κοντά με την προηγούμενη (μέγιστο 1 °C) τότε έχουμε την λύση, αλλιώς επαναλαμβάνουμε τον κύκλο με νέα θερμοκρασία εξόδου του νερού την μέση τιμή της υποθετικής και εκείνης που προέκυψε. Με αυτόν τον τρόπο υπολογίζουμε για όλες τις ώρες τους κύκλους λειτουργίας της αντλίας θερμότητας [50]. Στο παρακάτω διάγραμμα ροής φαίνεται η συλλογιστική πορεία που ακολουθείται για τους υπολογισμούς που μόλις περιεγράφηκαν όπως υπολογίζονται στον κώδικα που χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση του θέματος.



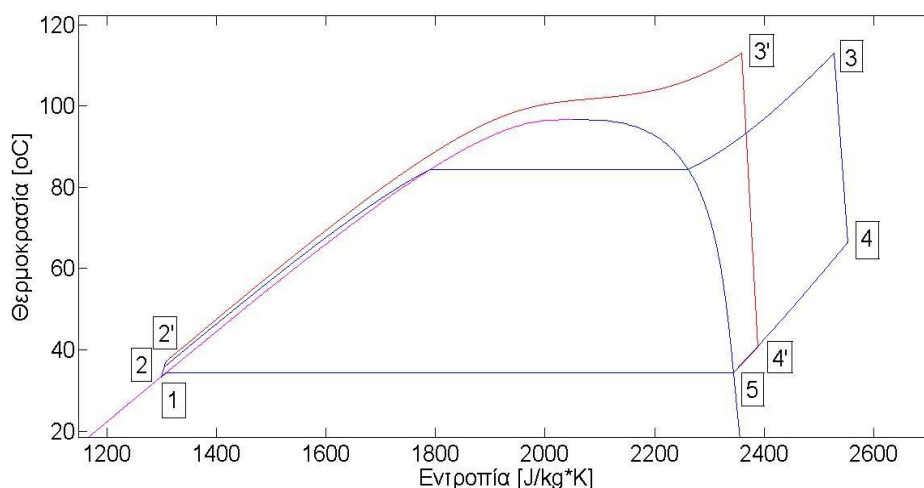
Διάγραμμα 4.17 Διάγραμμα ροής υπολογισμών των μεγεθών της αντλίας θερμότητας

Επιπλέον περιορισμοί, οι οποίοι θα καθορίζουν την παροχή μάζας στην αντλία θερμότητας, θα τεθούν σε επόμενο κεφάλαιο όπου θα αναλύσουμε τον τρόπο συνεργασίας της εγκατάστασης μας με το δίκτυο, την λειτουργία των ηλεκτρογεννητριών diesel και την ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας στο νησί. Αυτό κρίνεται αναγκαίο γιατί σκοπός της εγκατάστασης δεν είναι να λειτουργεί μόνη της αλλά σε συνεργασία με τις ήδη υπάρχουσες πηγές ενέργειας.

#### 4.8.1 Ανάλυση κύκλου ORC

Ως αυτό το σημείο έχουμε αναλύσει τον τρόπο που υπολογίζουμε όλα τα μεγέθη για την αποθήκευση ενέργειας της εγκατάστασης. Κύριο ρόλο στην εγκατάσταση έχει η παραγωγή ενέργειας από την αποθηκευμένη ενέργεια που διαθέτουμε. Ο βέλτιστος τρόπος για να το κάνουμε αυτό δεδομένης της θερμοκρασία του υλικού αλλαγής φάσης, που καθορίζει την μέγιστη θερμοκρασία για την παραγωγή ενέργειας, είναι ο κύκλος ORC (Organic Rankine Cycle). Έχουμε ήδη αναλύσει τις γενικές αρχές του κύκλου ORC και σε αυτό το σημείο θα αναλύσουμε περαιτέρω τον τρόπο λειτουργίας του.

Για την καλύτερη κατανόηση θα χρησιμοποιήσουμε ένα τυπικό διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας (T-S) όπως φαίνεται παρακάτω.



Διάγραμμα 4.18 Υπερκρίσιμος και υποκρίσιμος κύκλος

Η διάταξη του κύκλου αποτελείται από την αντλία (1-2), τον ατμοποιητή, και τον υπερθερμαντή αν υπάρχει, (2-3), τον στρόβιλο ισχύος (3-4) και τον συμπυκνωτή (4-1). Στον υπερκρίσιμο κύκλο η υψηλή πίεση είναι μεγαλύτερη από την κρίσιμη πίεση.

Ο θερμικός βαθμός απόδοσης ορίζεται ως το καθαρό έργο που παράγεται προς την προσδιδόμενη θερμότητα στον ατμοποιητή.

$$\eta_{th} = \frac{P_{el}}{Q_{th}} \quad (38)$$

όπου

$P_{el}$  το καθαρό παραγόμενο έργο που παράγεται στον άξονα του στροβίλου

$Q_{th}$  η θερμότητα που λαμβάνει το εργαζόμενο μέσο από την θερμική πηγή που στην περίπτωση μας είναι το υλικό αλλαγής φάσης

Το καθαρό παραγόμενο έργο είναι η διαφορά του έργου του στροβίλου με το έργο της αντλίας επί τους βαθμούς απόδοσης. Τα έργα αυτά δίνονται από τις παρακάτω ενθαλπικές διαφορές.

$$P_{el} = \eta_{mech} * \eta_{gen} * m_{ORC} * [(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)] \quad (39)$$

Η προσδιδόμενη θερμότητα στο οργανικό μέσο είναι ίση με:

$$Q_{th} = m_{ORC} * (h_3 - h_2) \quad (40)$$

Το ποσό αυτό θερμότητας παρέχεται από το υλικό αλλαγής φάσης το οποίο βρίσκεται σε σταθερή θερμοκρασία.

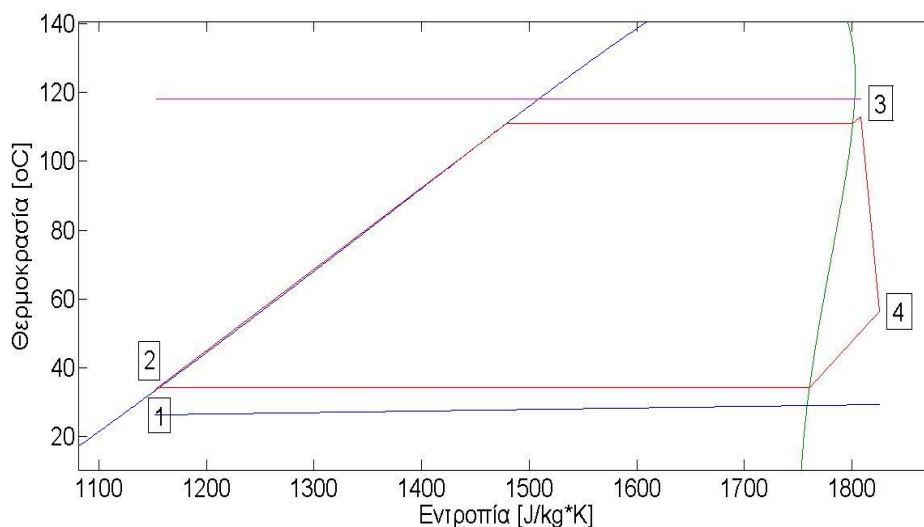
Όπως για την αντλία θερμότητας έτσι και ο ORC διαφοροποιεί την λειτουργία του ανάλογα με το οργανικό μέσο. Για τον κύκλο ORC διακρίνουμε δύο περιπτώσεις, τον υποκρίσιμο κύκλο και τον υπερκρίσιμο κύκλο. Η θερμοκρασία πρόσδοσης θερμότητας στον ατμοποιητή είναι σταθερή και ίση με 113°C αφού το υλικό αλλαγής φάσης βρίσκεται σε σταθερή θερμοκρασία (118 °C) και η ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά στον ατμοποιητή πρέπει να είναι 5 °C. Επομένως εξαρτάται από την κρίσιμη θερμοκρασία κάθε οργανικού μέσου για το αν θα δουλέψει σε υποκρίσιμο ή σε υπερκρίσιμο κύκλο.

**Υποκρίσιμος κύκλος ORC:** Για κρίσιμη θερμοκρασία μεγαλύτερη από τους 113 °C το οργανικό μέσο εργάζεται σε υποκρίσιμο κύκλο. Στον υποκρίσιμο κύκλο λειτουργίας οι θερμοκρασίες καθορίζουν τις πιέσεις λειτουργίας. Για όλα τα οργανικά μέσα θεωρούμε 2 °C υπερθέρμανση τουλάχιστον. Η υψηλή πίεση καθορίζεται από την σταθερή θερμοκρασία του PCM για όλα τα οργανικά μέσα εκτός από εκείνα που στην έξοδο του στροβίλου καταλήγουν σε υγρό ατμό. Τα οργανικά μέσα που καταλήγουν σε υγρό-ατμό μετά τον σρόβιλο θα πρέπει να έχουν υπερθέρμανση πάνω από 2°C ώστε στην έξοδο του στροβίλου να έχουν οριακά υπέρθερμο ατμό. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα οργανικά μέσα που λειτουργούν σε υποκρίσιμο κύκλο ORC με τις αντίστοιχες σταθερές για όλες τις ώρες του έτους υπερθερμάνσεις που χρησιμοποιούμε.

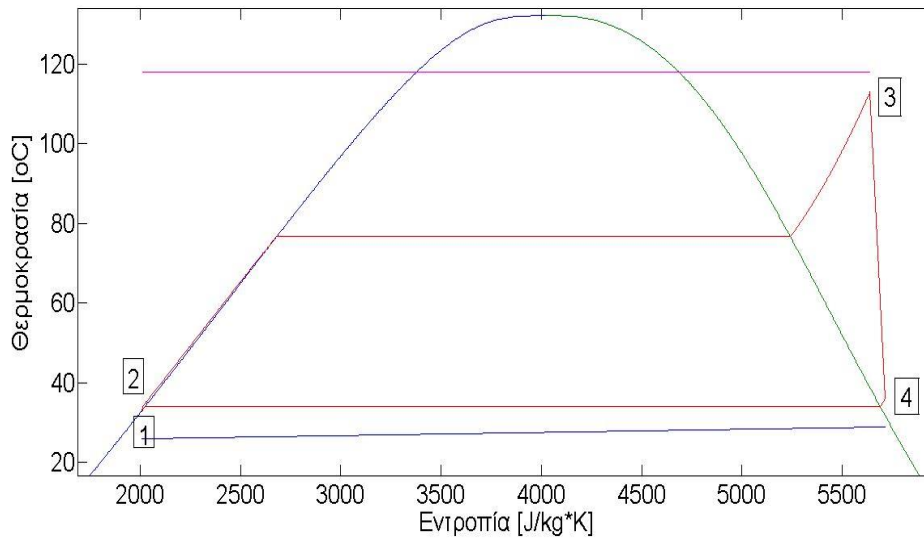
Οργανικό μέσο	Υπερθέρμανση (°C)
R245fa	2
R123	2
SO <sub>2</sub>	33
Βουτάνιο	2
Αμμωνία	40
R236fa	3
Κυκλοπροπάνιο	10
R125a	5

Πίνακας 4.10 Υπερθέρμανση για κάθε οργανικό μέσο

Για να τηρείται η μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου στους 113 °C θα πρέπει η υψηλή πίεση να μειωθεί έτσι ώστε κατά την υπερθέρμανση η θερμοκρασία να μην ξεπερνά την μέγιστη επιτρεπτή. Επομένως όσο μεγαλύτερη η υπερθέρμανση τόσο μικρότερη η υψηλή πίεση κάτι το οποίο επηρεάζει και το βαθμό απόδοσης. Η χαμηλή πίεση αντίθετα καθορίζεται από την θερμοκρασία του συμπυκνωτή. Εφόσον θεωρούμε πως το ψυχρό ρεύμα του συμπυκνωτή είναι θαλασσινό νερό η θερμοκρασία συμπύκνωσης θα είναι μεταβλητό μέγεθος. Έχουμε ήδη υπολογίσει την ωριαία θερμοκρασία της θάλασσας για όλο το έτος επομένως την θεωρούμε δεδομένη. Θεωρώντας πως η θερμοκρασιακή διαφορά στον συμπυκνωτή πρέπει να είναι το λιγότερο 5 °C καταλαβαίνουμε πως η χαμηλή πίεση είναι καθορισμένη για όλες τις ώρες που θα λειτουργήσει ο κύκλος και ίδια για όλα τα οργανικά μέσα που χρησιμοποιούμε. Για να προσομοιώσουμε την πραγματική λειτουργία με πιο ακριβή τρόπο θεωρούμε υπόψυξη στον συμπυκνωτή ίση με 1 °C. Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνονται δύο κύκλοι λειτουργίας ORC, ένας με μεγάλη υπερθέρμανση και ένας με μικρή.



Διάγραμμα 4.19 Υποκρίσιμος κύκλος ORC για το R245fa



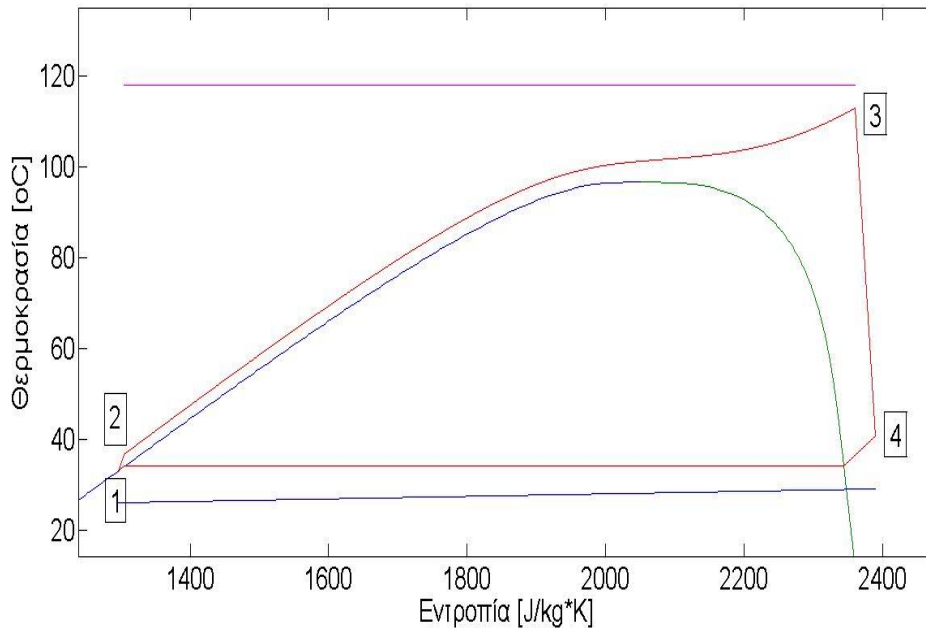
Διάγραμμα 4.20 Υποκρίσιμος κύκλος ORC για την αμμωνία

Στο διάγραμμα 4.19 φαίνεται ο υποκρίσιμος κύκλος ORC για το οργανικό μέσο R245fa που έχει υπερθέρμανση 2°C, ενώ στο διάγραμμα 4.20 φαίνεται ο υποκρίσιμος κύκλος ORC για την αμμωνία ως οργανικό μέσο με υπερθέρμανση 40°C. Αναμένουμε πως ο βαθμός απόδοσης για την αμμωνία θα είναι μικρότερος αφού δεν φαίνεται να εκμεταλλεύεται την πηγή θερμότητας τόσο καλά όσο το R245fa.

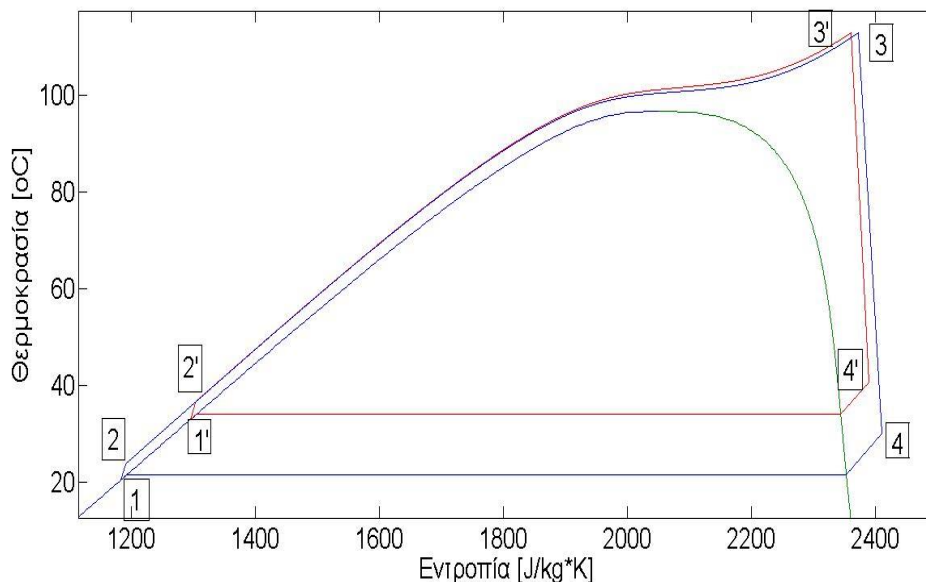
**Υπερκρίσιμος κύκλος ORC:** Στην περίπτωση όπου η κρίσιμη θερμοκρασία του οργανικού μέσου είναι μικρότερη από τους 113°C τότε λειτουργούμε σε υπερκρίσιμο κύκλο. Το κοινό σημείο που έχει ο υπερκρίσιμος κύκλος με τον υποκρίσιμο είναι ο τρόπος προσδιορισμού της χαμηλής πίεσης. Επειδή ο συμπυκνωτής λειτουργεί με τον ίδιο τρόπο η χαμηλή πίεση καθορίζεται εν τέλει από την θερμοκρασία της θάλασσας. Από την άλλη πλευρά, όπως και στην αντλία θερμότητας, στον υπερκρίσιμο κύκλο η υψηλή πίεση δεν καθορίζεται από την θερμοκρασία στην οποία προσδίδεται η θερμότητα στον ατμοποιητή. Υπάρχουν πολλές πιέσεις για στις οποίες ο κύκλος μπορεί να λειτουργήσει. Το κριτήριο επιλογής της πίεσης είναι η καλύτερη αξιοποίηση της αποθηκευμένης ενέργειας. Σκοπός μας είναι να παράξουμε την μέγιστη ηλεκτρική ενέργεια από την ήδη αποθηκευμένη θερμική ενέργεια. Επομένως αναζητούμε την πίεση εκείνη που μεγιστοποιεί τον θερμικό βαθμό απόδοσης όπως ορίστηκε προηγουμένως. Παρακάτω φαίνεται το μέγεθος προς μεγιστοποίηση χωρίς τους βαθμούς απόδοσης:

$$\eta_{th} = \frac{P_{el}}{Q_{th}} = \frac{m_{ORC} * [(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)]}{m_{ORC} * (h_3 - h_2)} = \frac{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)}{(h_3 - h_2)} \quad (41)$$

Την πίεση που μεγιστοποιεί το παραπάνω μέγεθος την βρίσκουμε με επαναληπτική διαδικασία. Κάθε φορά που χρειάζεται να λειτουργήσουμε τον υπερκρίσιμο κύκλο ORC βρίσκουμε την βέλτιστη αυτή πίεση ανάλογα με την μεταβαλλόμενη χαμηλή πίεση του κύκλου. Τόσο η υψηλή πίεση όσο και ο λόγος πιέσεων μεταβάλλεται κατά την διάρκεια του έτους.



Διάγραμμα 4.21 Υπερκρίσιμος κύκλος ORC για το προπάνιο



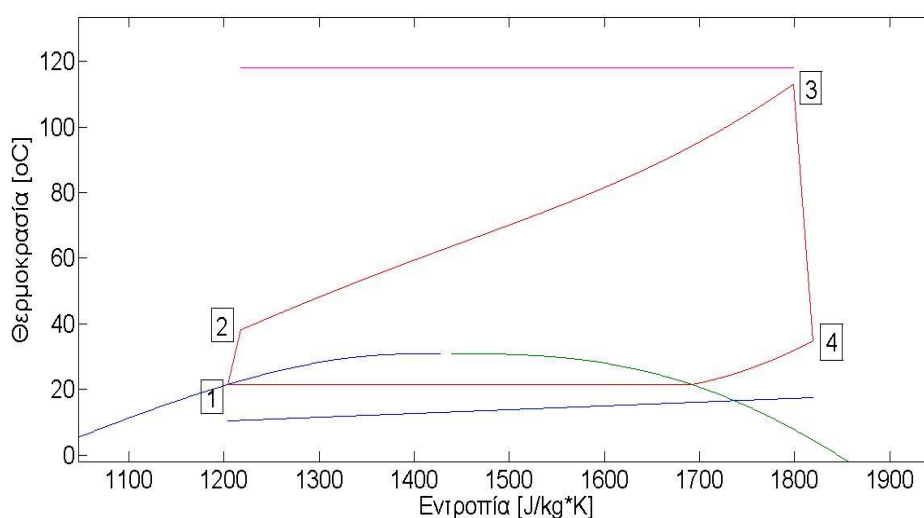
Διάγραμμα 4.22 Υπερκρίσιμος κύκλος προπάνιου για λειτουργία καλοκαιριού(κόκκινο)-χειμώνα(μπλε)

Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται η λειτουργία του υπερκρίσιμου κύκλου για καλοκαιρινές θερμοκρασίες (κόκκινο) και για χειμερινές (μπλε). Προφανώς τον χειμώνα όπου η θερμοκρασία του νερού είναι χαμηλότερη ο συμπυκνωτής

λειτουργεί σε χαμηλότερη θερμοκρασία και ο βαθμός απόδοσης είναι μεγαλύτερος όπως θα δούμε στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

Παρατήρηση: Τις καλοκαιρινές ημέρες όπου η θερμοκρασία της θάλασσας ανεβαίνει στην περίπτωση της χρήσης CO<sub>2</sub> θα πρέπει να θεωρήσουμε ένα ενδιάμεσο ψυγείο πριν τον συμπυκνωτή ώστε η θερμοκρασία του μέσου που απαιτείται στον συμπυκνωτή να είναι μικρότερη από την κρίσιμη θερμοκρασία του CO<sub>2</sub>.

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται ο υπερκρίσιμος κύκλος ORC.



Διάγραμμα 4.23 Κρίσιμος κύκλος με οργανικό μέσο CO<sub>2</sub>

Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται ο υπερκρίσιμος κύκλος ORC για οργανικό μέσο το CO<sub>2</sub>. Με μωβ γραμμή φαίνεται το υλικό αλλαγής φάσης, ενώ με μπλε φαίνεται η θερμοκρασία της θάλασσας. Στο διάγραμμα φαίνεται η τήρηση της ελάχιστης θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ του οργανικού μέσου και του υλικού αλλαγής φάσης ή του νερού της θάλασσας. Διακρίνουμε πως δεν γίνεται αρκετά καλή εκμετάλλευση της πηγής θερμότητας αφού στην είσοδο του ατμοποιητή η θερμοκρασιακή διαφορά είναι πολύ μεγάλη.

#### 4.8.2 Απαραίτητες παραδοχές για την λειτουργία του κύκλου ORC

Για την πραγματοποίηση των υπολογισμών έπρεπε να γίνουν συγκεκριμένες παραδοχές για τον προσδιορισμό κάποιων μεγεθών.

Αρχικά πρέπει να προσδιορίσουμε τόσο τον ισεντροπικό βαθμό της αντλίας, όσο και τον ισεντροπικό βαθμό του στροβίλου. Το μέγεθος του στροβίλου αποτελεί βασικό στοιχείο στον προσδιορισμό των ισεντροπικών βαθμών απόδοσης αφού όσο



μεγαλύτερος ο στρόβιλος τόσο μεγαλύτεροι και οι βαθμοί απόδοσης. Για λόγους τους οποίους θα εξετάσουμε αργότερα το μέγεθος του στροβίλου θεωρούμε πως είναι 1MW, επομένως ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του στροβίλου θεωρείται ίσος και σταθερός για όλα τα φορτία με **0,85** ενώ ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης της αντλίας ίσος και σταθερός για όλα τα φορτία με **0,75** [49][50]. Επιπλέον θεωρούμε μηχανικό βαθμό απόδοσης ίσο με **0,98** και βαθμό απόδοσης της γεννήτριας ίσο με **0,98** [49][50]. Επίσης θεωρούμε μέγιστο λόγο πίεσης ίσο με **25**. Αυτούς τους λόγους πίεσης μπορούμε να τους επιτύχουμε αν χρειαστεί με 3 εν σειρά αντλίες.

Όπως και στους εναλλάκτες της αντλίας θερμότητας έτσι και στους εναλλάκτες του κύκλου ORC (ατμοποιητή και συμπυκνωτή) θεωρούμε ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά τους 5 °C.

Στον συμπυκνωτή θεωρούμε, όπως αναφέραμε, μια μικρή υπόψυξη της τάξης του 1°C για να προσμοιάσουμε καλύτερα την πραγματική εγκατάσταση. Αντίθετα μόνο στους υποκρίσιμους κύκλους ορίζεται υπερθέρμανση στον ατμοποιητή με τα στοιχεία να έχουν αναλυθεί ήδη στην προηγούμενη παράγραφο.

Τέλος το μοναδικό μέγεθος που δεν έχουμε καθορίσει ακόμα είναι η παροχή μάζας του οργανικού μέσου. Η μάζα καθορίζεται από την παραγόμενη ισχύ. Έχοντας δηλαδή την ενθαλπική διαφορά του στροβίλου ( $h_3 - h_4$ ) υπολογισμένη και με δεδομένη την παραγόμενη ισχύ για κάθε ώρα όπως θα αναλυθεί στο επόμενο κεφάλαιο μπορούμε να υπολογίσουμε την παροχή μάζας  $m_{ORC}$  του κύκλου ORC σύμφωνα με την παρακάτω σχέση.

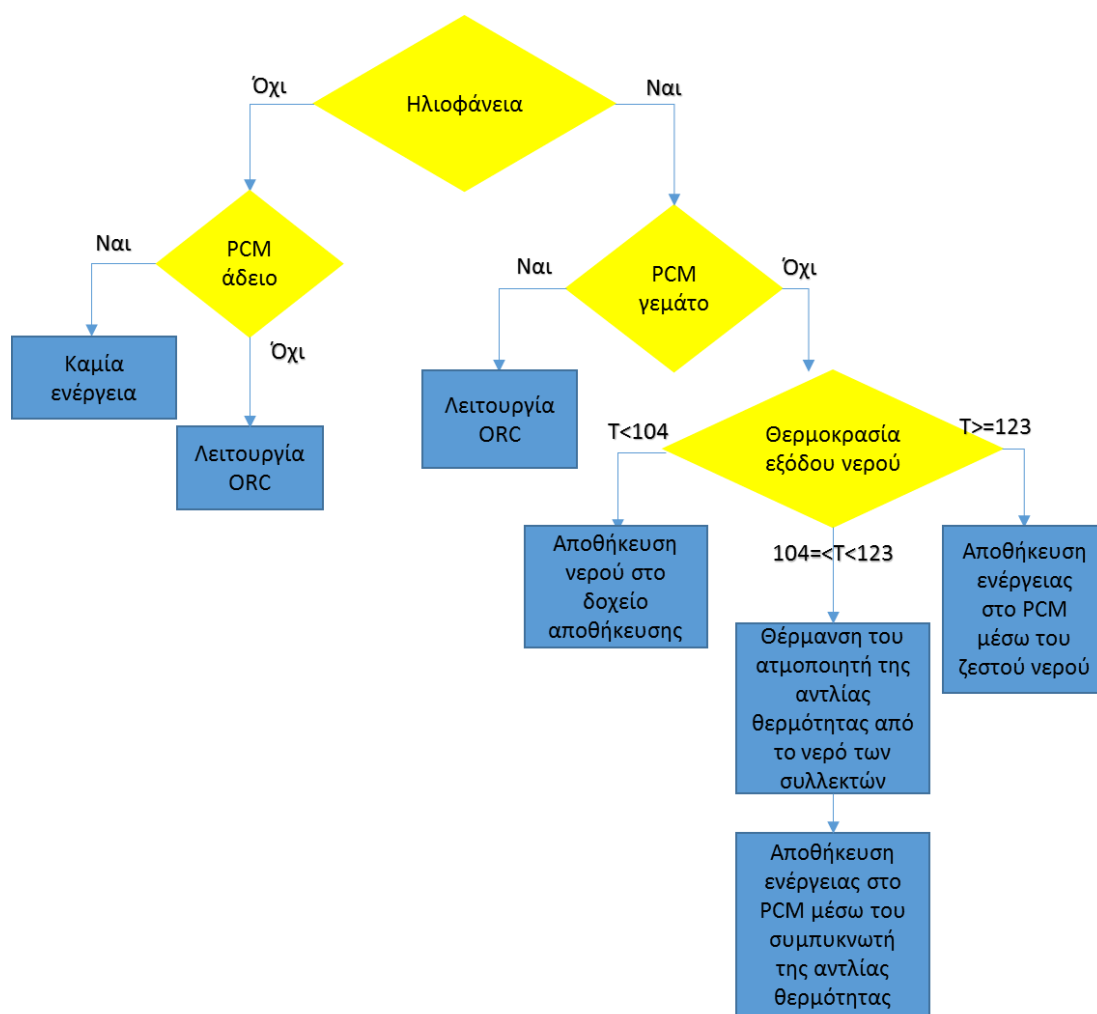
$$m_{ORC} = \frac{P_{el}}{(h_3 - h_4)} \quad (42)$$

Ως μέγιστη ισχύ έχουμε θεωρήσει το 1MW. Όπως όλες η μονάδες παραγωγής ενέργειας έτσι και ο κύκλος ORC έχει μια ελάχιστη δυνατή παραγόμενη ισχύ. Στην περίπτωση μας θεωρούμε πως το φορτίο μπορεί να πέσει μέχρι το 30% και όχι παρακάτω από αυτό.

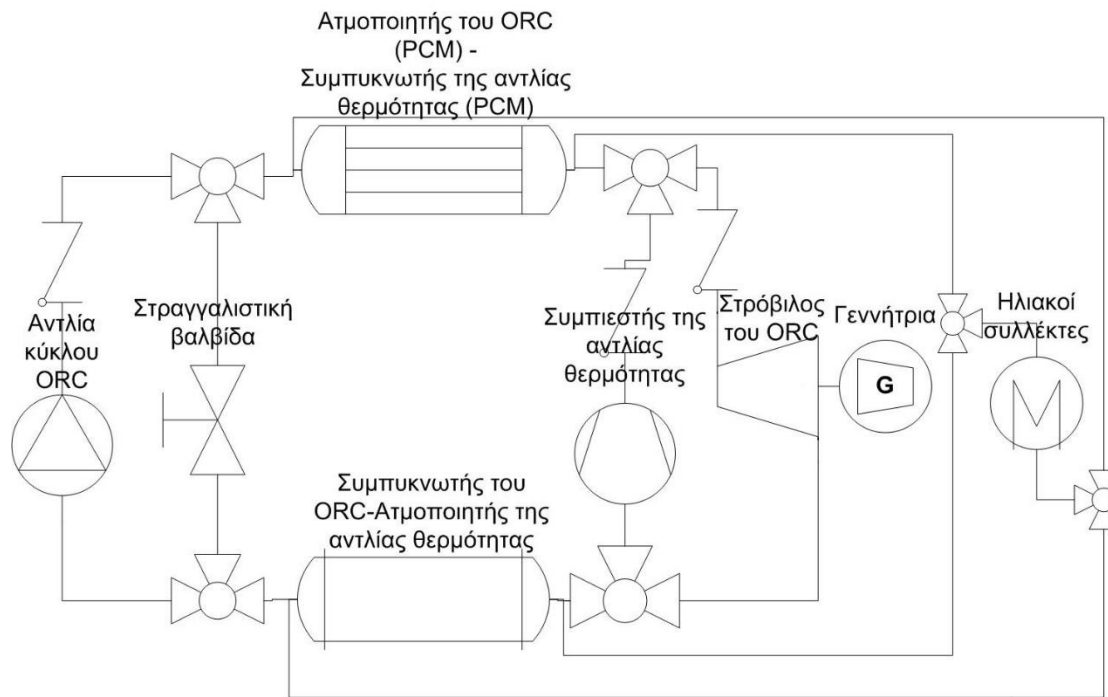
## Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>: Υλοποίηση της εγκατάστασης

### 5.1 Συνεργασία επιμέρους τμημάτων της εγκατάστασης

Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναλύσαμε τον τρόπο λειτουργία όλων των επιμέρους τμημάτων της εγκατάστασης. Αναλύσαμε δηλαδή τον τρόπο που δουλεύουν μεμονωμένα τα τμήματά της. Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι να συνδυάσουμε κατάλληλα τα επιμέρους τμήματα και στην συνέχεια να λειτουργήσουμε την εγκατάσταση στα δεδομένα του νησιού της Καρπάθου. Η ανάλυση θα γίνει με την χρονική ροή που επιβάλλεται για την καλύτερη κατανόηση. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνονται όλα τα απαραίτητα δομικά στοιχεία της εγκατάστασης και η συνδεσμολογία τους. Ο τρόπος λειτουργίας έχει θα αναλυθεί παρακάτω και τα διαγράμματα βοηθούν στην πλήρη κατανόηση της εγκατάστασης.



Διάγραμμα 5.1 Διάγραμμα ροής της εγκατάστασης



Διάγραμμα 5.2 Πλήρης μηχανολογική εγκατάσταση

Ξεκινάμε με την διαδικασία της αποθήκευσης. Η αποθήκευση ενέργειας γίνεται τις ώρες της ημέρας που έχουμε ηλιοφάνεια, επομένως τις πρωινές και μεσημεριανές ώρες. Η αποθήκευση γίνεται όταν το νερό των ηλιακών συλλεκτών είναι πάνω από τους 104 °C. Αν δεν υπάρχει αρκετή ηλιακή ενέργεια και η θερμοκρασία του νερού των ηλιακών συλλεκτών είναι μικρότερη από τους 104 °C το νερό αποθηκεύεται στο δοχείο αποθήκευσης. Έχουμε δύο τρόπους να αποθηκεύουμε ενέργεια στο υλικό αλλαγής φάσης. Όταν η θερμοκρασία του νερού είναι μεγαλύτερη από τους 123 °C τότε το νερό θερμαίνει το υλικό αλλαγής φάσης αποθηκεύοντας θερμική ενέργεια. Στην περίπτωση που νερό έχει θερμοκρασία εξόδου από τους συλλέκτες μικρότερο από 123 °C και μεγαλύτερη από 104 °C εισέρχεται στον ατμοποιητή της αντλίας θερμότητας όπου θερμαίνει το οργανικό μέσο. Η αντλία θερμότητας ανάλογα με το οργανικό μέσο που χρησιμοποιεί λειτουργεί σε υποκρίσιμο ή υπερκρίσιμο κύκλο με σκοπό η ενέργεια του συμπυκνωτή να αποθηκευτεί στο υλικό αλλαγής φάσης. Με αυτόν τον τρόπο εκμεταλλευόμαστε ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών (104-300°C) με σκοπό την αποθήκευση ενέργειας. Προφανώς προτιμούμε η αποθήκευση να γίνεται χωρίς την χρήση της αντλίας θερμότητας γιατί κάθε ώρα που την χρησιμοποιούμε θα πρέπει να πληρώνουμε την ενέργεια που καταναλώνει ο συμπιεστής την οποία παίρνει από το δίκτυο. Με αυτόν τον τρόπο αποθηκεύουμε θερμική ενέργεια στην εγκατάσταση. Με δεδομένη την αποθηκευμένη ενέργεια του συστήματος και αφού περάσουν οι ώρες τις οποίες μπορούμε να αποθηκεύσουμε ενέργεια, χρησιμοποιούμε τον κύκλο ORC με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Λαμβάνοντας υπόψιν την θερμοκρασία του συμπυκνωτή (θερμοκρασία

θάλασσας) καθώς και το είδος του κύκλου ανάλογα με το οργανικό μέσο επιλέγουμε τις συνθήκες για την λειτουργία του κύκλου.

Πιο αναλυτικά έχουμε τα εξής τμήματα:

- Ηλιοθερμικό σύστημα θέρμανσης νερού
- Αντλία θερμότητας
- Υλικό αλλαγής φάσης (Μέσο αποθήκευσης ενέργειας)
- Κύκλος ORC (Παραγωγή ενέργειας)

Έχουμε περιγράψει αναλυτικά τον τρόπο υπολογισμού της θερμοκρασίας εξόδου του νερού των ηλιακών συλλεκτών. Η συνεργασία των ηλιακών συλλεκτών τόσο με την αντλία θερμότητας, όσο και με το υλικό αλλαγής φάσης θα πρέπει να τηρεί μια συγκεκριμένη συνθήκη. Η συνθήκη αυτή είναι ο ισολογισμός ενέργειας. Δηλαδή θα πρέπει να προσέχουμε τα ποσά ενέργειας που συναλλάσσονται κάθε φορά. Όταν το νερό θερμαίνεται το υλικό αλλαγής φάσης θα πρέπει όση ενέργεια προσδίδει το νερό ακριβώς τόση ενέργεια να προσκομίζει το υλικό αλλαγής φάσης. Ομοίως το ίδιο θα πρέπει να συμβαίνει και στον ατμοποιητή της αντλίας θερμότητας. Ιδιαίτερη προσοχή χρειάζεται όταν βρίσκουμε το κύκλο λειτουργίας της αντλίας θερμότητας και την έξοδο της θερμοκρασίας του νερού των συλλεκτών με επαναληπτική διαδικασία. Έπειτα έχουμε το υλικό αλλαγής φάσης. Κατά την αποθήκευση ενέργειας το μέρος όπου το PCM μετατρέπεται σε υγρή φάση μεγαλώνει συνεχώς. Θα πρέπει να προσέξουμε στους υπολογισμούς μας πως όταν πλέον όλη η μάζα του PCM είναι σε υγρή φάση η αποθήκευση πρέπει να σταματά. Αντιστρόφως κατά την παραγωγή ενέργειας όταν όλη μάζα είναι σε στερεή μορφή, η λειτουργία του κύκλου ORC θα πρέπει να σταματά. Στην περίπτωση του κύκλου ORC την τελευταία ώρα που λειτουργεί λόγω έλλειψης αποθηκευμένης ενέργειας ρυθμίζουμε την παροχή μάζας του οργανικού μέσου με τέτοιο τρόπο ώστε να λειτουργήσει μια ώρα ακόμα και στο τέλος της ώρας η αποθηκευμένη ενέργεια να είναι ίση με το μηδέν όπως έχει οριστεί. Αντίστοιχα κατά την αποθήκευση ρυθμίζουμε την παροχή του οργανικού μέσου στην αντλία θερμότητας ώστε η πλήρης φόρτιση να επέλθει στο τέλος της ώρας. Στην περίπτωση θέρμανσης του PCM από το νερό των ηλιακών συλλεκτών η ρύθμιση αυτή γίνεται με την θερμοκρασία εξόδου του νερού των συλλεκτών από τον εναλλάκτη με το PCM. Το νερό εξέρχεται δηλαδή σε μεγαλύτερη θερμοκρασία ώστε το PCM στο τέλος της ώρας να έχει φορτίσει πλήρως. Κατά την διάρκεια παραγωγής ενέργειας με την χρήση του κύκλου ORC θα πρέπει να προσέχουμε τον ισολογισμό στον ατμοποιητή μεταξύ του οργανικού μέσου και του υλικού αλλαγής φάσης. Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειώσουμε πως όλα τα μεγέθη που χρησιμοποιούμε για τους υπολογισμούς εκφράζουν ισχύ ( $W=J/s$ ) με

μοναδική εξαίρεση την αποθηκευμένη ενέργεια στο PCM το οποίο εκφράζεται σε μονάδες ενέργειας (J). Επειδή η ανάλυση που κάνουμε γίνεται σε ωριαία βάση η σχέση που χρησιμοποιούμε για τους ισολογισμούς ενέργειας μεταξύ των χρησιμοποιούμενων ρευστών (οργανικά μέσα και νερό συλλεκτών) και του υλικού αλλαγής φάσης (PCM) φαίνεται παρακάτω:

$$M_{PCM} * (E_{h+1} - E_h) = m_f * (h_1 - h_2) * \Delta t \quad (43)$$

όπου

$M_{PCM}$  η συνολική μάζα του υλικού αλλαγής φάσης (PCM)

$E_{h+1}$  η αποθηκευμένη ενέργεια στο τέλος της τρέχουσας ώρα και στην αρχή της επόμενης ώρας

$E_h$  η αποθηκευμένη ενέργεια στην αρχή της τρέχουσας ώρας

$m_f$  η παροχή μάζας του ρευστού (οργανικό μέσο ή νερό ηλιακών συλλεκτών) της αντλίας θερμότητας του κύκλου ORC

$(h_1 - h_2)$  η ενθαλπική πτώση του ρευστού κατά την «φόρτιση» ή η ενθαλπική αύξηση του ρευστού κατά την «εκφόρτιση»

$\Delta t$  τα δευτερόλεπτα της ώρας εφόσον η ανάλυση γίνεται σε ωριαία βάση (3600s)

Με αυτόν τον τρόπο συνεργάζονται τα επιμέρους τμήματα της εγκατάστασης. Μένει να αναλύσουμε την διαδικασία που συνεργάζεται η εγκατάσταση με το δίκτυο του νησιού που επιλέχθηκε.

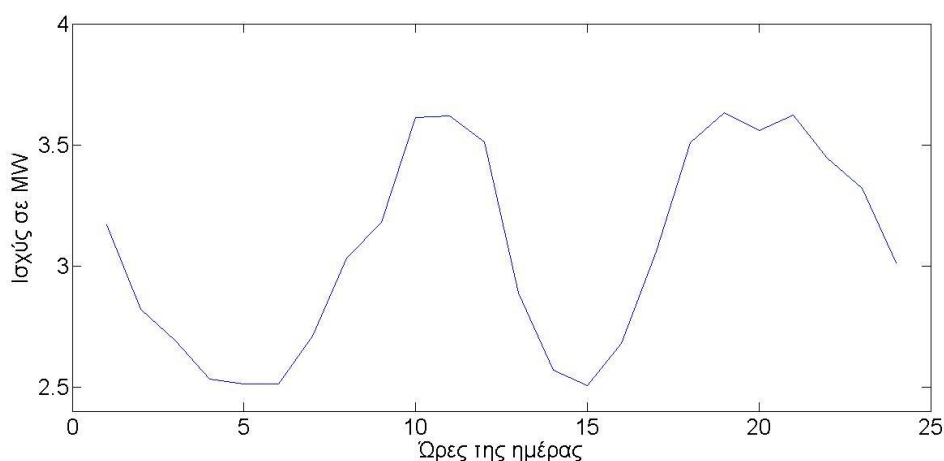
## 5.2 Συνεργασία της εγκατάστασης με το δίκτυο του νησιού

Η εγκατάσταση σχεδιάστηκε με σκοπό την λειτουργία της συμπληρωματικά με τις diesel γεννήτριες του νησιού. Σκοπός είναι η αποθήκευση της ενέργειας το μεσημέρι όπου η ζήτηση τους περισσότερους μήνες δεν είναι μεγάλη και η παραγωγή ενέργειας τις βραδινές ώρες, όπου κυρίως το καλοκαίρι, η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας μεγιστοποιείται. Κυρίως στόχος είναι η παραγωγή ενέργειας όπου η ζήτηση είναι μέγιστη. Με αυτόν τον τρόπο προστατεύουμε τις γεννήτριες diesel από μεγάλες αλλαγές φορτίων. Επίσης στόχος αποτελεί η όσο το δυνατόν ομαλοποίηση της παραγόμενης ισχύος από τις γεννήτριες diesel. Αυτό μπορούμε να το επιτύχουμε παράγοντας τις κατάλληλες ώρες ισχύ με τον κύκλο ORC. Από τους στόχους της εγκατάστασης δεν μπορεί να λείπει η μέγιστη δυνατή παραγωγή ενέργειας από την εγκατάσταση. Για να αποσβεστεί το κόστος της εγκατάστασής μας το συντομότερο δυνατόν θα πρέπει να παράγει όσο το δυνατόν περισσότερη

ενέργεια. Επομένως η επίτευξη όλων αυτών των στόχων αποτελεί μια λεπτομερή ανάλυση των περιορισμών που υπάρχουν ώστε να πετύχουμε το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα.

Πριν ορίσουμε τους περιορισμούς του τρόπου λειτουργίας της εγκατάστασης θα πρέπει να αναφέρουμε ένα σημαντικό στοιχείο. Επειδή όπως αναφέραμε η εγκατάστασή μας λειτουργεί συμπληρωματικά θεωρούμε πως τα φωτοβολταϊκά και τα αιολικά του νησιού έχουν προτεραιότητα έναντι στην παραγωγή ενέργειας της εγκατάστασής μας. Επομένως γνωρίζοντας την ωριαία ηλεκτρική ζήτηση του νησιού αλλά και την ωριαία παραγωγή των φωτοβολταϊκών και των αιολικών συστημάτων θεωρούμε πως η ζήτηση πάνω στην οποία θα λειτουργήσει η εγκατάσταση μας είναι η διαφορά τους. Δηλαδή από την ωριαία ζήτηση του νησιού αφαιρούμε την ωριαία παραγωγή των υπόλοιπων ΑΠΕ, με μόνο περιορισμό την τήρηση του ελάχιστου των 800kW, και θεωρούμε τη νέα αυτή ζήτηση ως βάση για τους υπολογισμούς μας.

Οι περιορισμοί που θα θέσουμε έχουν άμεση σχέση με τους παραπάνω στόχους και σκοπό έχουν την επίτευξή τους. Ξεκινώντας από το σύστημα αποθήκευσης ο πρώτος περιορισμός έχει να κάνει με την αντλία θερμότητας. Η λειτουργία της αντλίας θερμότητας προσθέτει επιπλέον φορτίο στην ηλεκτρική ζήτηση του νησιού, λόγω της λειτουργίας του συμπιεστή, με αποτέλεσμα οι diesel γεννήτριες να χρειάζεται να λειτουργούν σε υψηλότερα φορτία. Για να μην δημιουργούμε μεγάλα μέγιστα στην λειτουργία των diesel γεννητριών θέτουμε ένα άνω όριο μέχρι το οποίο μπορεί να λειτουργήσει η αντλία θερμότητας. Το όριο αυτό καθορίζεται από την ζήτηση της κάθε ημέρας. Αν η ζήτηση παρουσιάζει το μέγιστο το πρωί προς μεσημέρι, κάτι το οποίο συμβαίνει για λίγες ημέρες του χειμώνα, τότε η ισχύς που θα απαιτεί ο συμπιεστής θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε η ζήτηση την ώρα λειτουργίας της συν την ισχύ που απαιτεί ο συμπιεστής να μην υπερβαίνει το μέγιστο της ημέρας.



Διάγραμμα 5.3 Καμπύλη ωριαίας ζήτησης για την 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου

Για τις υπόλοιπες ημέρες του έτους, όπου η μέγιστη ζήτηση κάθε ημέρας εμφανίζεται τις βραδινές ώρες, η μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύς καθορίζεται με άλλον τρόπο. Το εύρος των φορτίων της ζήτησης ορίζεται από την διαφορά της μέγιστης και της ελάχιστης τιμής της ζήτησης κάθε ημέρας. Επομένως ορίζουμε μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύ του συμπιεστή την ισχύ εκείνη για την οποία η συνολική ισχύς (ισχύ ζήτησης του νησιού+ισχύ του συμπιεστή) δεν ξεπερνά την μέση τιμή της ισχύος της ημέρας συν το 20% του εύρους της ζήτησης. Το μέγεθος αυτό εξηγείται από την παρακάτω σχέση.

$$W_{comp,max} = Dem_{max} - Dem_h \quad (44)$$

$$W_{comp,max} = Dem_{mean} + 0,2 * (Dem_{max} - Dem_{min}) - Dem_h \quad (45)$$

όπου

$W_{comp,max}$  η μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύς του συμπιεστή

$Dem_{mean}$  η μέση τιμή της ωριαίας ζήτησης ισχύος κάθε ημέρα

$Dem_{max}$  η μέγιστη τιμή της ωριαίας ζήτησης της ημέρας

$Dem_{min}$  η ελάχιστη τιμή της ωριαίας ζήτησης της ημέρας

$Dem_h$  η ωριαία τιμή της ζήτησης του νησιού την ώρα λειτουργίας της αντλίας θερμότητας

Η σχέση 44 αναφέρεται στις περιπτώσεις όπου η μέγιστη ζήτηση εμφανίζεται τις πρωινές ώρες, ενώ η σχέση 45 για όλες τις υπόλοιπες. Η ανοχή που δείχνουμε στην πρώτη περίπτωση οφείλεται στο γεγονός πως η ζήτηση εκείνες τις ώρες είναι ήδη υψηλή επομένως απλά παρατείνουμε το χρόνο παραγωγής μεγάλης ισχύος βοηθώντας το σύστημα μειώνοντας την μεγάλη μεταβολή του φορτίου.

Με τον παραπάνω τρόπο καθορίζουμε την παροχή μάζας στην αντλία θερμότητας. Εφόσον γνωρίζουμε τις θερμοκρασίες και επομένως τις ενθαλπίες στις οποίες θα λειτουργήσει ο κύκλος, το μόνο που μένει για να προσδιορίσουμε είναι η παροχή μάζας. Με γνωστή την μέγιστη ισχύ του συμπιεστή υπολογίζουμε την μέγιστη παροχή μάζας από την σχέση:

$$m_{HP,max} = \frac{W_{comp,max}}{(h_2 - h_1)} \quad (46)$$

όπου

$m_{HP,max}$  η μέγιστη παροχή μάζας οργανικού μέσου στην αντλία θερμότητας

$W_{comp,max}$  η μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύς του συμπιεστή

$h_2 - h_1$  η ενθαλπική αύξηση στον συμπιεστή

Είναι σαφές πως για μικρότερες παροχές το σύστημα λειτουργεί κανονικά.

Τον δεύτερο περιορισμό τον έχουμε ήδη αναφέρει. Αφορά την λειτουργία των diesel γεννητριών και ειδικότερα την ελάχιστη ισχύ στην οποία πρέπει να λειτουργούν. Η ελάχιστη παραγόμενη ισχύ του ΑΣΠ Καρπάθου θα πρέπει να είναι 800kW με δεδομένο πως υπάρχει γεννήτρια ονομαστικής ισχύς 1MW που λειτουργεί στο 80% του ονομαστικού φορτίου της. Αυτός ο περιορισμός έχει ως στόχο την ομαλή λειτουργία των γεννητριών diesel του νησιού. Στην ανάλυση που κάνουμε θεωρούμε πως αυτός ο περιορισμός ισχύει ακόμα και για την παραγωγή ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά και τις ανεμογεννήτριες, αν και κάτι τέτοιο δεν ισχύει στην τρέχουσα λειτουργία των συστημάτων παραγωγής ενέργειας του νησιού.

Τέλος θα πρέπει να επιλέξουμε το μέγεθος της εγκατάστασης και πιο συγκεκριμένα την ονομαστική ισχύ του κύκλου ORC. Η ονομαστική ισχύς του κύκλου ORC καθορίζεται από την ισχύ εξόδου του στροβίλου. Παρατηρώντας την τάξη μεγέθους της ωριαίας ζήτησης του νησιού τόσο τους χειμερινούς μήνες όσο και τους καλοκαιρινούς και με την βοήθεια δοκιμών που έγιναν καταλήγουμε πως η διαστασιολόγηση του στροβίλου θα γίνει στο 1 MW. Επομένως έχουμε καθορίσει όλα τα μεγέθη της εγκατάστασης εκτός από την μάζα του υλικού αλλαγής φάσης (PCM), των αριθμό των σειρών των ηλιακών συλλεκτών (N) και τον αριθμό των ηλιακών συλλεκτών (A) κάθε σειράς.

### 5.3 Επιλογή τελικών παραμέτρων

Η επιλογή των τριών «ελεύθερων» μεταβλητών θα γίνει με οικονομοτεχνικά στοιχεία. Σκοπός κάθε επένδυσης είναι η γρήγορη απόσβεση του αρχικού κεφαλαίου. Για την απλοποίηση της διαδικασίας το κριτήριο μας θα είναι ο λόγος των εξόδων για την κατασκευή της εγκατάστασης προς τα ετήσια έσοδα. Ο συνδυασμός των τριών «ελεύθερων» μεγεθών που θα ελαχιστοποιεί το κλάσμα αυτό, θα επιλεγεί ως η βέλτιστη επιλογή. Αυτή η διαδικασία θα γίνει για κάθε ένα από τα 13 οργανικά μέσα που θα εξετάσουμε.

Η διαδικασία εύρεσης του βέλτιστου συνδυασμού έγινε με την μέθοδο που θα αναλύσουμε παρακάτω. Αρχικά θεωρούμε την μάζα του υλικού αλλαγής φάσης σταθερή ( $M_{PCM}$ ). Έπειτα βρίσκουμε για σταθερό αριθμό συλλεκτών ανά σειρά (A) τον αριθμό των σειρών (N) όπου ελαχιστοποιείται το κλάσμα κόστους-κερδών με διαδοχικά τρεξίματα του κώδικα matlab που κατασκευάστηκε. Όταν βρούμε τον



ελάχιστο αριθμό τότε αλλάζουμε τον αριθμό των συλλεκτών ανά σειρά (A) και βρίσκουμε το νέο ελάχιστο. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να βρούμε το ελάχιστο των ελαχίστων για δεδομένη μάζα του PCM. Για να βρούμε το ελάχιστο των ελαχίστων αρκεί να βρούμε τρία ελάχιστα για διαφορετικούς αριθμούς συλλεκτών ανά σειρά (A) και να ισχύει:

$$A_{i+step} > A_i \ \&\& \ A_i < A_{i-step}$$

όπου

i ο αριθμός των συλλεκτών κάθε σειράς

step το βήμα που χρησιμοποιούμε για τις επαναλήψεις

Με αυτόν τον τρόπο βρίσκουμε τον συνδυασμό (N,A) που ελαχιστοποιεί το κλάσμα κόστους-κερδών για δεδομένη τιμή της μάζας του υλικού αλλαγής φάσης. Επαναλαμβάνουμε την διαδικασία αυτή για διαφορετικές τιμές της μάζας του PCM μέχρι να βρούμε το τελικό ελάχιστο των ελαχίστων με το ίδιο κριτήριο με πριν αλλά για την μάζα του PCM.

$$M_{i+step} > M_i \ \&\& \ M_i < M_{i-step}$$

Με αυτήν την διαδικασία βρίσκουμε το συνδυασμό εκείνο που ελαχιστοποιεί το κλάσμα κόστους-κερδών. Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφέρουμε το βήμα των τριών μεταβλητών το οποίο προέκυψε από τα τελικά μεγέθη με δοκιμές προκειμένου το σφάλμα να είναι τουλάχιστον μικρότερο του 10%.

<b>Μέγεθος</b>	<b>Βήμα</b>
Μάζα υλικού αλλαγής φάσης (M)	100000 kg
Αριθμός συλλεκτών ανά σειρά (A)	10
Αριθμός σειρών συλλεκτών (N)	10

Πίνακας 5.1 Βήμα για κάθε ελεύθερη μεταβλητή

Για την εύρεση των ελαχίστων χρειάστηκε να τρέξουμε αρκετές φορές των κώδικα matlab και δεν κρίνεται σκόπιμη η παρουσίαση όλων των προσπαθειών παρά μόνο των τελικών αποτελεσμάτων. Σε αυτό το σημείο περιεγράφηκε η διαδικασία εύρεσης του βέλτιστου συνδυασμού και μόνο. Στο επόμενο κεφάλαιο θα οριστούν τα απαραίτητα μεγέθη για την εύρεση του κόστους της εγκατάστασης αλλά και των ετήσιων εσόδων. Τέλος στο κεφάλαιο 8 θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της παραπάνω διαδικασίας.

## Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup>: Εκτίμηση οικονομικών μεγεθών της εγκατάστασης

### 6.1 Αρχικό κόστος εγκατάστασης

Αρχικά πρέπει να υπολογίσουμε το κόστος της εγκατάστασης. Για να γίνει αυτό θα εκτιμήσουμε το κόστος καθενός από τα επιμέρους τμήματα της εγκατάστασης προκειμένου να καταλήξουμε στην τελική κοστολόγηση της. Τα τμήματα τα οποία θα κοστολογήσουμε φαίνονται παρακάτω:

- Ηλιακό θερμικό σύστημα
- Αντλία θερμότητας
- Υλικό αλλαγής φάσης (PCM)
- Εγκατάσταση ORC

Αναλυτικά έχουμε:

Ηλιακό θερμικό σύστημα: Σύμφωνα με τον κατασκευαστή το κόστος του πρωτότυπου εκτιμάται στα 400 €/m<sup>2</sup>. Στόχος όμως της κατασκευάστριας εταιρίας (Solitem GmbH Technologiezentrum am Europaplatz & Alanod Aluminium-Veredlung GmbH & Co.KG) αποτελεί η μείωση του κόστους στα 150 €/m<sup>2</sup>. Δεδομένου του μεγάλου αριθμού των ηλιακών συλλεκτών που χρειάζεται η εγκατάσταση θεωρούμε πως το κόστος τους θα ανέρχεται στα 150 €/m<sup>2</sup> μαζί με όλα τα απαραίτητα εξαρτήματα που χρειάζεται για την λειτουργία των ηλιακών συλλεκτών όπως σωληνώσεις, αντλίες και άλλα [42].

Αντλία θερμότητας: Το κόστος της αντλίας θερμότητας προκύπτει ανάλογα με την περίπτωση. Για κάθε οργανικό μέσο απαιτείται διαφορετική μέγιστη ισχύς της αντλίας θερμότητας επομένως θα ορίσουμε μια τιμή εξαρτώμενη από την κάθε φορά διαφορετική ονομαστική ισχύς. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία μια εκτίμηση του κόστους αναφέρει 350€/kW εγκατεστημένης ισχύος. Στην κοστολόγηση θεωρούμε το συνολικό κόστος με όλα τα απαραίτητα προκειμένου η αντλία θερμότητας να είναι σε θέση να λειτουργήσει στην εγκατάσταση. Αν και οι δυο εναλλάκτες (ατμοποιητής και συμπυκνωτής) είναι κοινοί με τους αντίστοιχους του κύκλου ORC θεωρούμε ξεχωριστό κόστος για τις αναγκαίες μετατροπές που χρειάζονται για να λειτουργήσει η εγκατάσταση καθώς αυτά τα κόστη αναφέρονται μόνο σαν κόστος κτίσης των τμημάτων της εγκατάστασης [59][30].

Υλικό αλλαγής φάσης (PCM): Το κόστος του υλικού αλλαγής φάσης εξαρτάται από το μέγεθος της αγοραζόμενης ποσότητας. Μια καλή εκτίμηση για το κόστος της ποσότητας που χρειαζόμαστε είναι, σύμφωνα με την βιβλιογραφία, 4064,4€/τόνο. Σύμφωνα με αυτήν την τιμή θα εκτιμήσουμε το κόστος αγοράς του υλικού αλλαγής φάσης [27].

Κόστος ORC: Για το κόστος του ORC δεν θα κοστολογήσουμε κάθε κομμάτι του ξεχωριστά, αλλά όλη τα μέρη του σαν ένα, όπως κάναμε και με την αντλία θερμότητας. Το κόστος του ORC εξαρτάται από τα εγκατεστημένα kW του στροβίλου που στην περίπτωση μας είναι σταθερά επομένως το κόστος του ORC είναι σταθερό για όλα τα οργανικά μέσα. Η εκτίμηση του κόστους του ORC είναι 2.621.654 €

Με αυτόν τον τρόπο υπολογίζουμε το συνολικό κόστος κτίσης της εγκατάστασης που για κάθε οργανικό μέσο είναι διαφορετικό αφού όλα τα κόστη μεταβάλλονται εκτός από το κόστος του ORC.

## 6.2 Ετήσια κέρδη εγκατάστασης

Για να υπολογίσουμε τα ετήσια κέρδη της εγκατάστασης με γνωστές τις ετήσιες παραγόμενες kWh πρέπει να γνωρίζουμε την τιμή πώλησης της kWh προς το δίκτυο. Για να μάθουμε την τιμή πώλησης kWh πρέπει να ανατρέξουμε στον Νόμο 4254 που έχει δημοσιευθεί στην ΕΦΗΜΕΡΙΣ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ (Αριθμός φύλλου 85, 7 Απριλίου 2014) στον πίνακα Α της σελίδας 1445. Θεωρώντας ότι δεν θα έχουμε κρατική επιχορήγηση (ΧΕ) και με δεδομένο πως η εγκατάστασή μας ανήκει στην κατηγορία 8 (Ηλιακή ενέργεια που αξιοποιείται από ηλιοθερμικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής με σύστημα αποθήκευσης το οποίο εξασφαλίζει τουλάχιστον 2 ώρες λειτουργίας στο ονομαστικό φορτίο) η τιμή πώλησης ανέρχεται στα 280€/MWh [65]. Αυτή η τιμή αναφέρεται στην καθαρή παραγόμενη ισχύς η οποία ισούται με την παραγόμενη ενέργεια του στροβίλου αν αφαιρέσουμε την ενέργεια που καταναλώνει η αντλία του κύκλου ORC.

$$P_{net} = P_{exp} * \eta_{mech} * \eta_{gen} - P_{pump} \quad (47)$$

Η παραπάνω σχέση δείχνει την ενέργεια που τελικά η εγκατάσταση προσφέρει στο δίκτυο και την ενέργεια από την οποία προκύπτουν τα έσοδα της εγκατάστασης.

Από την άλλη πλευρά στην ετήσια χρηματοροή της εγκατάστασης θα πρέπει να υπολογίσουμε και το κόστος λειτουργίας της αντλίας θερμότητας. Η λειτουργία της αντλίας θερμότητας απαιτεί την χρήση συμπιεστή το οποίο σημαίνει κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να υπολογιστεί και να αφαιρεθεί από τα έσοδα της εγκατάστασης. Έχουμε ήδη αναφέρει τον τρόπο τιμολόγησης της ΔΕΗ για τα μη διασυνδεδεμένα δίκτυα. Παρακάτω παραθέτουμε τον τρόπο κοστολόγησης ανάλογα με τις kWh κατανάλωσης [34].

- Δεν υπερβαίνει τις 800 kWh, η χρέωση είναι 0,06987 ευρώ/kWh
- Υπερβαίνει τις 800 kWh, αλλά δεν υπερβαίνει τις 2000 kWh, η χρέωση για τις πρώτες 800 kWh είναι 0,07197 ευρώ/ kWh, για τις επόμενες 800 kWh 0,09171 ευρώ / kWh και για τις επόμενες 400 kWh είναι 0,11257 ευρώ / kWh
- Είναι μεγαλύτερη των 2000 kWh και μικρότερη ή ίση των 3000 kWh, η χρέωση για τις 2000 kWh είναι η ίδια με αυτή που περιεγράφηκε παραπάνω, ενώ οι επόμενες 1000 kWh κοστολογούνται με 0,15059 ευρώ / kWh
- Είναι μεγαλύτερη των 3000 kWh και μικρότερη ή ίση των 4400 kWh. Η χρέωση για τις 3000 kWh γίνεται με τον τρόπο που περιεγράφηκε ήδη, ενώ οι υπόλοιπες 1440 kWh χρεώνονται με 0,15204 ευρώ / kWh
- Είναι μεγαλύτερη των 4400 kWh. Σε αυτή την περίπτωση αλλάζει η κλίμακα σε όλες τις χρεώσεις και γίνεται για τις πρώτες 800 kWh 0,07441 ευρώ / kWh, για τις επόμενες 800 kWh 0,09483 ευρώ / kWh , για τις επόμενες 400 kWh 0,11639 ευρώ / kWh και για τις υπόλοιπες 0,15421 ευρώ / kWh [34].

Σύμφωνα με τα παραπάνω υπολογίζουμε το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιούμε. Αφαιρώντας αυτό το κόστος από τα έσοδα της εγκατάστασης έχουμε τα ετήσια κέρδη.

$$\mathbf{Κέρδη = Έσοδα από ORC - Έξοδα από αντλία θερμότητας \quad (48)}$$

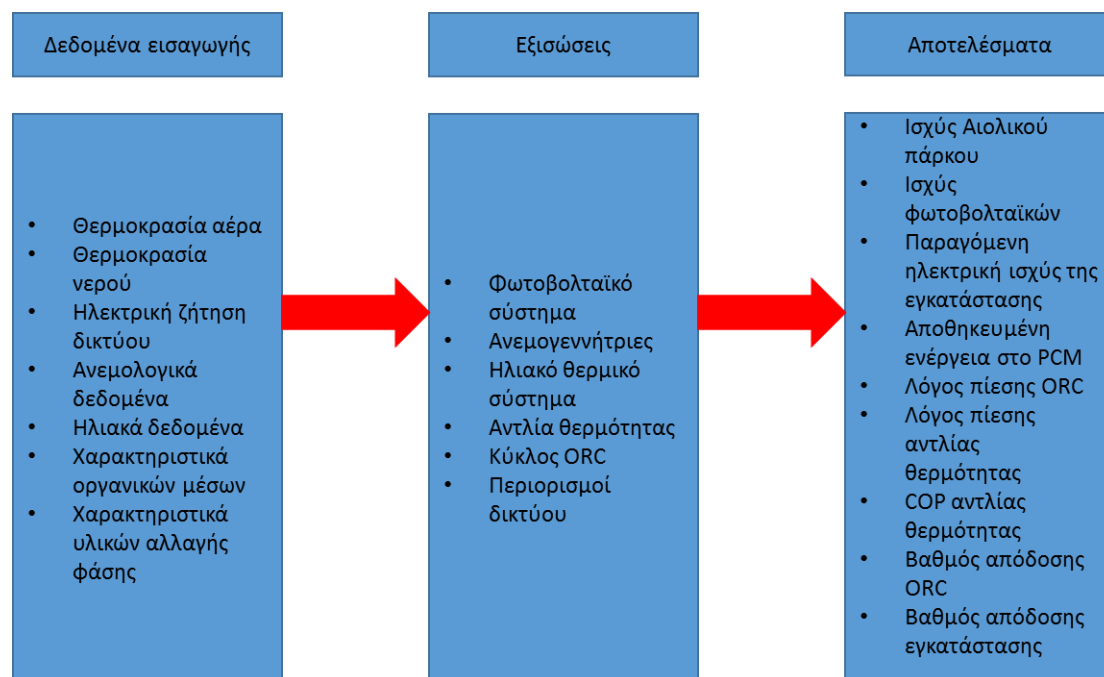
Σε κάθε περίπτωση έχουμε διαφορετικά μεγέθη εφόσον κάθε οργανικό μέσο έχει τον δικό του τρόπο λειτουργίας.

Επομένως έχουμε τον τρόπο να υπολογίσουμε τόσο το κόστος της εγκατάστασης όσο και τα ετήσια κέρδη της.

## Κεφάλαιο 7<sup>ο</sup>: Κώδικας matlab

### 7.1 Σύντομη περιγραφή του κώδικα

Έχουμε ήδη αναφέρει τον τρόπο συνεργασία των επιμέρους τμημάτων της εγκατάστασης και σε αυτό το κεφάλαιο θα περιγράψουμε τον κώδικα που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση της διπλωματικής εργασίας. Είναι προφανές πως δεν μπορούμε να περιγράψουμε αναλυτικότερα περίπου 3000 γραμμές κώδικα σε matlab αλλά σκοπός είναι να αποδοθεί όσο καλύτερα γίνεται η φιλοσοφία που ακολουθήθηκε για τον υπολογισμό όλων των αναγκαιών μεγεθών.



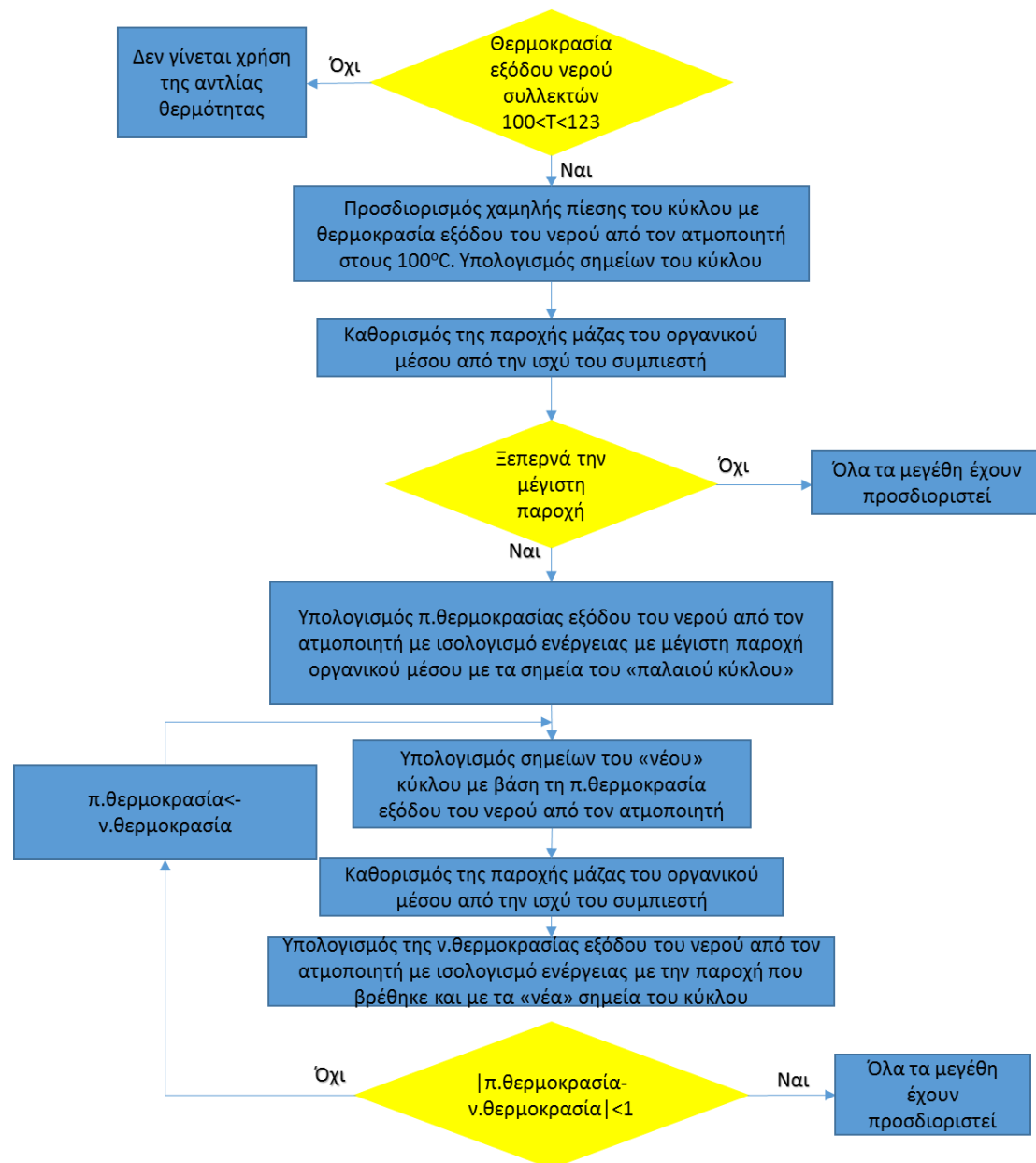
Διάγραμμα 7.1 Διάγραμμα ροής κώδικα matlab

Πριν από τις γραμμές του κυρίου κώδικα εισάγονται τα απαραίτητα δεδομένα της ωριαίας ηλεκτρικής ζήτησης και των ανεμολογικών δεδομένων για το νησί της Καρπάθου. Στην αρχή του κυρίως κώδικα γίνονται οι υπολογισμοί για την ωριαία παραγόμενη ισχύ από τις ανεμογεννήτριες με τον τρόπο που περιγράψαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Ακριβώς μετά γίνεται ο υπολογισμός για την ωριαία θερμοκρασία τόσο του αέρα, όσο και του νερού του δικτύου-θάλασσας σύμφωνα με τα δεδομένα που διαθέτουμε. Στην συνέχεια γίνονται οι απαραίτητοι υπολογισμοί για όλα τα ηλιακά μεγέθη που χρειαζόμαστε για τους μετέπειτα υπολογισμούς των φωτοβολταϊκών και των ηλιακών θερμικών συστημάτων. Τέτοια μεγέθη είναι η άμεση ηλιακή ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου  $G_b$  και άλλα που έχουμε ήδη αναφέρει. Ο υπολογισμός αυτός γίνεται σε ωριαία βάση. Ο τρόπος υπολογισμού έχει ήδη περιγραφεί μαζί με τις παραδοχές που έχουν γίνει. Στην

συνέχεια γίνεται ο υπολογισμός της ωριαίας παραγόμενης ισχύς των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Χρησιμοποιώντας πάλι τα ηλιακά δεδομένα υπολογίζουμε εν συνεχεία τα ωριαία μεγέθη που χρειαζόμαστε από τους ηλιακούς συλλέκτες, με κυριότερο την θερμοκρασία εξόδου του νερού των συλλεκτών. Έπειτα ορίζουμε τα οργανικά μέσα που θα χρησιμοποιηθούν μαζί με τα απαραίτητα χαρακτηριστικά τους όπως η κρίσιμη θερμοκρασία και πίεση. Ακολουθώντας και πριν την κύρια επαναληπτική διαδικασία ορίζουμε όλα τα απαραίτητα μεγέθη που έχουν να κάνουν με τις παραδοχές των οργανικών κύκλων όπως οι βαθμοί απόδοσης, αντλίας και στροβίλου, και οι βαθμοί υπερθέρμανσης κατά την λειτουργία υποκρίσιμου κύκλου ORC. Ακριβώς μετά ξεκινά η κυρίως επαναληπτική διαδικασία η οποία έχει ως μετρητή τις ημέρες του χρόνου, δηλαδή τρέχουμε κάθε ημέρα ξεχωριστά. Στην αρχή κάθε επανάληψης βρίσκουμε δυο σημαντικά μεγέθη. Το πρώτο μέγεθος είναι η πρώτη ώρα της ημέρας που έχει θερμοκρασία εξόδου του νερού των συλλεκτών  $>104^{\circ}\text{C}$ . Αυτή η ώρα είναι η πρώτη ώρα που το σύστημα μπορεί να αποθηκεύσει ενέργεια. Το δεύτερο μέγεθος είναι αντίστοιχα η τελευταία ώρα που έχει θερμοκρασία εξόδου νερού  $>104^{\circ}\text{C}$  και αντιστοιχεί στην τελευταία ώρα που μπορούμε να αποθηκεύσουμε ενέργεια. Για τις ώρες που το νερό θερμαίνεται αλλά δεν φτάνει τους  $104^{\circ}\text{C}$ , το νερό αποθηκεύεται στο δοχείο αποθήκευσης. Καθορίζοντας την τελευταία ώρα αποθήκευσης βρίσκουμε και την πρώτη ώρα που μπορούμε να λειτουργήσουμε το κύκλο ORC για παραγωγή ενέργειας. Μια τρίτη μεταβλητή που βρίσκουμε είναι η πρώτη ώρα της επόμενης ημέρας που μπορούμε να αποθηκεύσουμε ενέργεια βάσει της θερμοκρασίας εξόδου του νερού των συλλεκτών ( $>104^{\circ}\text{C}$ ). Αυτή την μεταβλητή την βρίσκουμε με σκοπό την χρήση του κύκλου ORC μέχρι τα ξημερώματα της επόμενης ημέρας αν το σύστημα διαθέτει αποθηκευμένη ενέργεια. Σε αυτήν την φάση του κώδικα προβλέπουμε την μέγιστη δυνατή ενέργεια που μπορεί να παράγει ο ORC με μοναδικό περιορισμό τους περιορισμούς του δικτύου. Αυτό γίνεται για να βρούμε πόση ενέργεια θα πρέπει να αποθηκεύσουμε έτσι ώστε να χρησιμοποιήσουμε την αντλία θερμότητας όσο το δυνατόν λιγότερο. Αν δηλαδή η απαιτούμενη ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί χωρίς την χρήση της αντλίας θερμότητας τότε δεν θα την χρησιμοποιήσουμε. Αν η ενέργεια από το θερμό νερό ( $>123^{\circ}\text{C}$ ) δεν επαρκεί τότε θα χρησιμοποιήσουμε και την αντλία θερμότητας με τους περιορισμούς που έχουμε αναλύσει. Στην συνέχεια του κώδικα υπολογίζουμε όλα τα απαραίτητα μεγέθη του κύκλου ORC ανάλογα με το οργανικό μέσο που χρησιμοποιούμε για τις ώρες που υπολογίσαμε προηγουμένως.

Στην συνέχεια περνάμε στο κομμάτι της αποθήκευσης. Αρχικά υπολογίζουμε ποιες ώρες από εκείνες που μπορούμε να αποθηκεύσουμε ενέργεια μπορούμε να το

κάνουμε χωρίς την χρήση της αντλίας θερμότητας αλλά μόνο θερμαίνοντας το νερό σε θερμοκρασία πάνω από του 123 °C. Το παρακάτω διάγραμμα ροής βοηθά στην κατανόηση του κώδικα.



Διάγραμμα 7.2 Διάγραμμα ροής αποθήκευσης ενέργειας

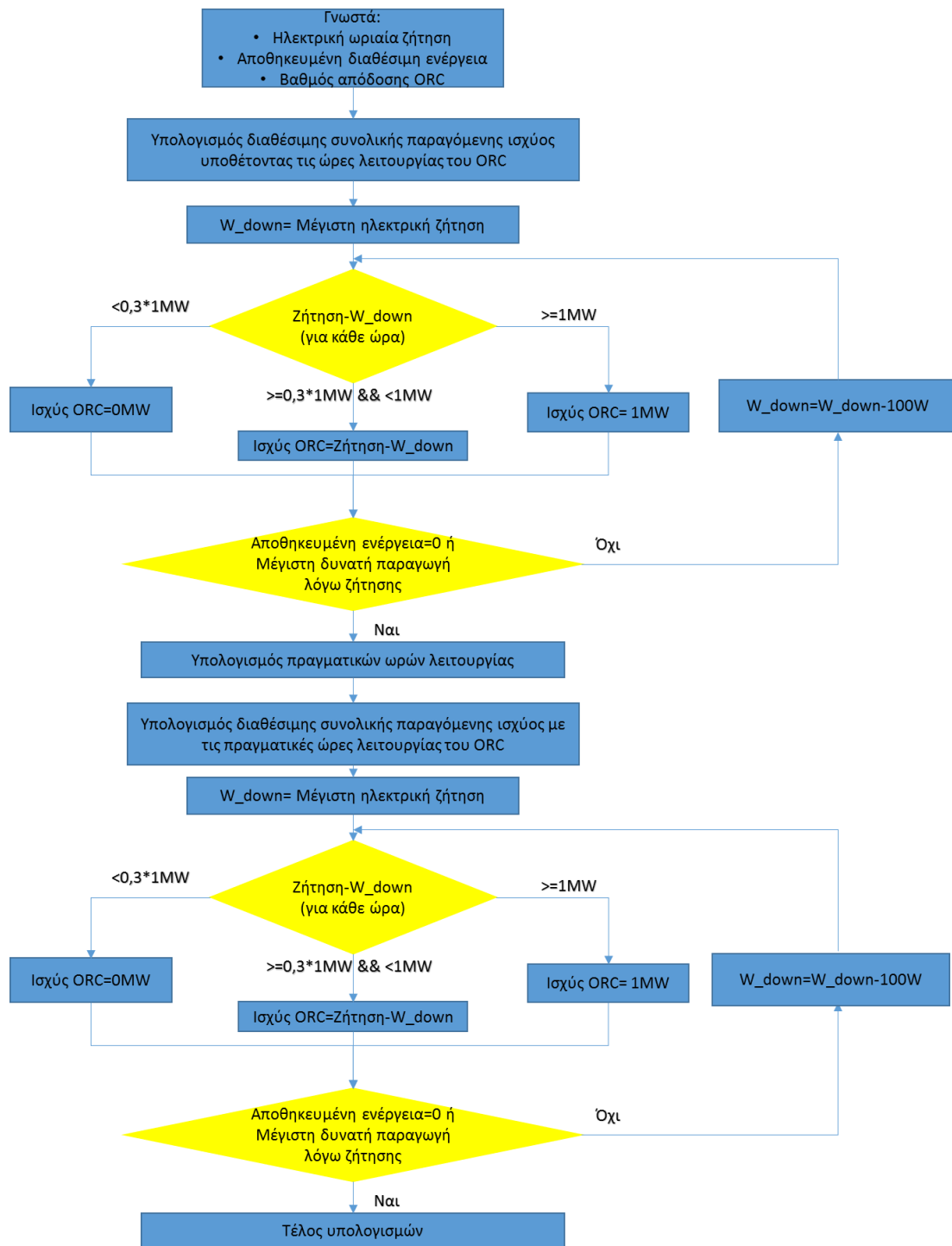
Έπειτα υπολογίζουμε την αποθηκευμένη ενέργεια με αυτόν τον τρόπο είτε μέχρι να «γεμίσει» το υλικό αλλαγής φάσης είτε μέχρι να τελειώσουν οι διαθέσιμες ώρες. Επομένως γνωρίζοντας τις ώρες που έχουν απομείνει γνωρίζουμε ποιες ώρες μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την αντλία θερμότητας με σκοπό την αναβάθμιση της θερμοκρασίας του νερού και την αποθήκευση θερμικής ενέργειας στο υλικό αλλαγής φάσης. Στη συνέχεια υποθέτουμε πως όλες τις ώρες που μπορεί να λειτουργήσει η αντλία θερμότητας, λειτουργεί και εκμεταλλεύεται το θερμό νερό πλήρως βγάζοντάς το στη θερμοκρασία των 100 °C, μη έχοντας εφαρμόσει τον

περιορισμό της ισχύος του συμπιεστή. Αμέσως μετά κάνουμε μια επαναληπτική διαδικασία στην οποία ελέγχουμε τον περιορισμό της μέγιστης επιτρεπόμενης ισχύος του συμπιεστή, υπολογίζοντας όπου χρειάζεται την νέα θερμοκρασία εξόδου του νερού των ηλιακών συλλεκτών. Σε αυτήν την επαναληπτική διαδικασία ελέγχουμε επίσης την πληρότητα της φόρτισης του υλικού αλλαγής φάσης ώστε να μην ξεπεράσει το μέγιστο και επιπλέον σύμφωνα με την πρόβλεψη που έχουμε κάνει για την παραγωγή ενέργειας χρησιμοποιούμε την αντλία θερμότητας είτε μέχρι να γεμίσει το PCM είτε μέχρι να έχουμε όση ενέργεια χρειαζόμαστε για την τρέχουσα ημέρα. Με αυτόν τον τρόπο ελαχιστοποιούμε την χρήση της αντλίας θερμότητας εξασφαλίζοντας όση ακριβώς αποθηκευμένη ενέργεια χρειαζόμαστε. Με σκοπό την περεταίρω μείωση της ισχύος που χρειάζεται ο συμπιεστής βρίσκουμε τις ώρες εκείνες τις οποίες η θερμοκρασία εξόδου του νερού των συλλεκτών είναι μεγαλύτερη από τους 100 °C που έχουμε υπολογίσει και θέτουμε ως ελάχιστη χρησιμοποιούμενη. Σε αυτήν την περίπτωση μπορούμε να αυξήσουμε την θερμοκρασία του ατμοποιητή της αντλίας θερμότητας μειώνοντας το απαιτούμενο έργο του συμπιεστή. Για να εξασφαλίσουμε την ορθότητα του ενεργειακού ισολογισμού στον ατμοποιητή θα πρέπει να διεξάγουμε μια επαναληπτική διαδικασία που θα ξεκινά με μια υποθετική θερμοκρασία εξόδου του νερού των συλλεκτών, θα υπολογίζει τα σημεία του κύκλου της αντλίας θερμότητας και από τον ισολογισμό στον ατμοποιητή θα μας δίνει την νέα θερμοκρασία εξόδου του νερού των συλλεκτών. Αν αυτή η θερμοκρασία είναι κοντά (<1 °C) σε σχέση με την προηγούμενη την δεχόμαστε ως λύση, αλλιώς συνεχίζουμε τις επαναλήψεις μέχρι να πετύχουμε την επιθυμητή ακρίβεια. Έπειτα ελέγχουμε ξανά την αποθηκευμένη ενέργεια στο υλικό αλλαγής φάσης για κάθε ώρα της αποθήκευσης. Τέλος υπολογίζουμε κάποια χαρακτηριστικά μεγέθη όπως ο COP και η ισχύς του συμπιεστή για κάθε ώρα λειτουργίας της αντλίας θερμότητας. Να επισημάνουμε πως ανάλογα τον κύκλο που χρειάζεται κάθε οργανικό μέσο υπάρχει ο αντίστοιχος κώδικα που τον επιλύει. Το R1234yf υπάγεται στην περίπτωση των υπερκρίσιμων κύκλων και όχι στο CO<sub>2</sub> θεωρώντας σταθερή, και 5 °C πιο κάτω από την κρίσιμη, την θερμοκρασία ατμοποίησης. Αξίζει να σημειωθεί πως για την κατασκευή του κώδικα για την αποθήκευση ενέργειας όταν το οργανικό μέσο είναι το CO<sub>2</sub> έχουν δημιουργηθεί ειδικές συναρτήσεις που υπολογίζουν τις συνθήκες λειτουργίας στον ατμοποιητή με σκοπό την καλύτερη δυνατή λειτουργία του υπολογίζοντας με τον ίδιο τρόπο όλα τα υπόλοιπα μεγέθη.

Συνεχίζοντας περνάμε στο κομμάτι της παραγωγής ενέργειας. Σε αυτό το κομμάτι υπολογίζουμε κυρίως τα στοιχεία που αφορούν την συνεργασία της εγκατάστασης



με το δίκτυο αφού τους κύκλους τα θερμοδυναμικά στοιχεία του ORC για όλες τις ώρες λειτουργίας του έχουν ήδη υπολογιστεί.



Διάγραμμα 7.3 Διάγραμμα ροής παραγωγής ενέργειας

Το πρώτο μέγεθος που υπολογίζουμε είναι η τελευταία ώρα που πραγματικά έγινε η αποθήκευση ενέργειας, γιατί δεν συμπίπτει πάντα με το μέγεθος που υπολογίσαμε αρχικά αφού ενδέχεται να φορτίσει το PCM πριν την δύση του ηλίου. Με αυτό τον τρόπο εκμεταλλευόμαστε όσο το δυνατό περισσότερες ώρες για την

παραγωγή ενέργειας. Έπειτα υπολογίζουμε πόση ενέργεια μπορούμε να παράγουμε τις διαθέσιμες ώρες λειτουργίας του ORC ανάλογα με τους περιορισμούς του δικτύου. Επιπλέον κάνουμε μια εκτίμηση για να βρούμε πόση ενέργεια μπορούμε να παράξουμε με την δεδομένη αποθηκευμένη ενέργεια που έχουμε μέσω ενός μέσου βαθμού απόδοσης που υπολογίζουμε με βάσει τις διαθέσιμες ώρες λειτουργίας. Με αυτόν τον τρόπο ξεκινάμε επαναληπτική διαδικασία που υπολογίζει την ωριαία ισχύ που μπορούμε να παράξουμε με τους περιορισμούς του δικτύου και τον περιορισμό της εκφόρτισης του PCM. Αν τελειώσει η αποθηκευμένη ενέργεια προφανώς τελειώνει και ο υπολογισμός. Όπως προαναφέραμε σκοπός μας είναι η ομαλή λειτουργία των diesel γεννητριών, επομένως η φιλοσοφία των υπολογισμών πρέπει να είναι αντίστοιχη. Ο τρόπος με τον οποίο μοιράζουμε την παραγωγή ενέργειας είναι ο εξής. Ξεκινάμε την ώρα με την μέγιστη ζήτηση φορτίου της κάθε ημέρας. Θεωρώντας μια μεταβλητή που έχει τιμή την τιμή της μέγιστης ζήτησης του φορτίου ξεκινάμε την επαναληπτική διαδικασία. Σε κάθε επανάληψη κατεβάζουμε λίγο την τιμή αυτής της μεταβλητής και θεωρούμε ότι ο κύκλος ORC θα παράγει ισχύ ανάλογα με την διαφορά αυτής της μεταβλητής, η οποία είναι σταθερή για όλες τις ώρες της ημέρας, και της ωριαίας ζήτησης. Αν η διαφορά αυτή είναι μικρότερη από 0,3MW τότε ο κύκλος δεν μπορεί να παράγει τίποτα. Αν η διαφορά αυτή είναι μεγαλύτερη από 1MW τότε ο κύκλος παράγει 1MW αφού είναι το ονομαστικό του φορτίο. Οποιαδήποτε ενδιάμεση τιμή είναι αποδεκτή. Η συνθήκη αυτή ισχύει για κάθε ώρα της ημέρας που παράγουμε ενέργεια. Σε κάθε επανάληψη η μεταβλητή που ελέγχει την παραγόμενη ισχύ μειώνεται μέχρι είτε να παράξουμε το μέγιστο δυνατό με βάση τους περιορισμούς του δικτύου, είτε να τελειώσει η αποθηκευμένη ενέργεια. Κάποιες φορές λόγω έλλειψης ενέργειας οι ώρες που είχαμε υποθέσει πως θα λειτουργεί ο κύκλος είναι τελικά περισσότερες από ότι πραγματικά λειτουργεί. Επομένως η υπόθεση που έχουμε κάνει για την διαθέσιμη παραγόμενη ενέργεια είναι ελαφρώς λανθασμένη. Αυτό συμβαίνει γιατί ο μέσος βαθμός απόδοσης αλλάζει αφού κάποιες ώρες από αυτές που χρησιμοποιήσαμε δεν ισχύουν. Με γνωστό πλέον ποιες ώρες ακριβώς θα λειτουργήσει ο κύκλος υπολογίζουμε την ενέργεια που μπορούμε να παράγουμε. Έτσι επαναλαμβάνουμε τους υπολογισμούς που αναφέραμε προηγουμένως με σωστή διαθέσιμη παραγόμενη ενέργεια και υπολογίζουμε την ωριαία παραγόμενη ισχύς της εγκατάστασης. Έπειτα γνωρίζοντας την ενθαλπική διαφορά του στροβίλου υπολογίζουμε την παροχή μάζας του οργανικού μέσου για κάθε ώρα λειτουργίας του κύκλου ORC. Στην συνέχεια υπολογίζουμε για κάθε ώρα την αποθηκευμένη ενέργεια στο PCM σύμφωνα με τους προηγούμενους υπολογισμούς, ρυθμίζοντας την παροχή μάζας του οργανικού μέσου την τελευταία ώρα αν χρειάζεται προκειμένου στο τέλος της ώρας η

αποθηκευμένη ενέργεια να φτάσει στο μηδέν. Παράλληλα υπολογίζουμε όλα τα ποσά θερμότητας που συναλλάσσονται κατά την διάρκεια λειτουργίας του κύκλου. Όπως και προηγουμένως ανάλογα με το οργανικό μέσο και τον τρόπο λειτουργίας του κύκλου έχουμε το αντίστοιχο τμήμα του κώδικα που υλοποιεί τους υπολογισμούς. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε ημέρα του χρόνου μέχρι το τέλος του έτους.

Στη συνέχεια υπολογίζουμε την ωριαία παραγόμενη ισχύ των diesel γεννητριών αφού γνωρίζουμε ήδη την ωριαία παραγόμενη ισχύς της εγκατάστασής μας, ελέγχοντας και πάλι την τήρηση της ελάχιστης παραγόμενης ισχύς των diesel γεννητριών (800kW).

Αμέσως μετά γίνονται οι υπολογισμοί που αφορούν το εκτιμώμενο κόστος της εγκατάστασης. Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα των υπολογισμών και ιδιαίτερα των μεγεθών που καθορίζουν τα επιμέρους κόστη, γίνονται οι απαραίτητοι υπολογισμοί. Στο ίδιο σημείο γίνεται οι υπολογισμοί για τα έσοδα της εγκατάστασης. Επομένως υπολογίζουμε και το Simple payback period ή όπως το έχουμε ήδη αναφέρει το λόγο του κόστους προς τα ετήσια κέρδη.

Στο τελευταίο σημείο του κώδικα γίνονται όλοι οι απαραίτητοι ισολογισμοί και υπολογισμοί έτσι ώστε να εξασφαλίσουμε πως οι περιορισμοί που έχουν τεθεί τηρούνται και πως τα αποτελέσματα είναι ορθά σύμφωνα με τα όρια των υπολογισμών.

## Κεφάλαιο 8<sup>ο</sup>: Αποτελέσματα

### 8.1 Θερμοδυναμικά αποτελέσματα

#### 8.1.1 Επιλογή βέλτιστου συνδυασμού ελεύθερων μεταβλητών

Η επιλογή του κατάλληλου οργανικού μέσου θα γίνει με βάση τεχνοικονομικά κριτήρια όπως έχουμε ήδη αναφέρει και θα αναλυθεί σε επόμενο υποκεφάλαιο. Το κριτήριο είναι ο λόγος του συνολικού κόστους προς τα ετήσια έσοδα. Παρακάτω φαίνεται ο πίνακας με τον συνδυασμό των τριών μεταβλητών με τον ελάχιστο λόγο συνολικού κόστους προς ετήσια έσοδα.

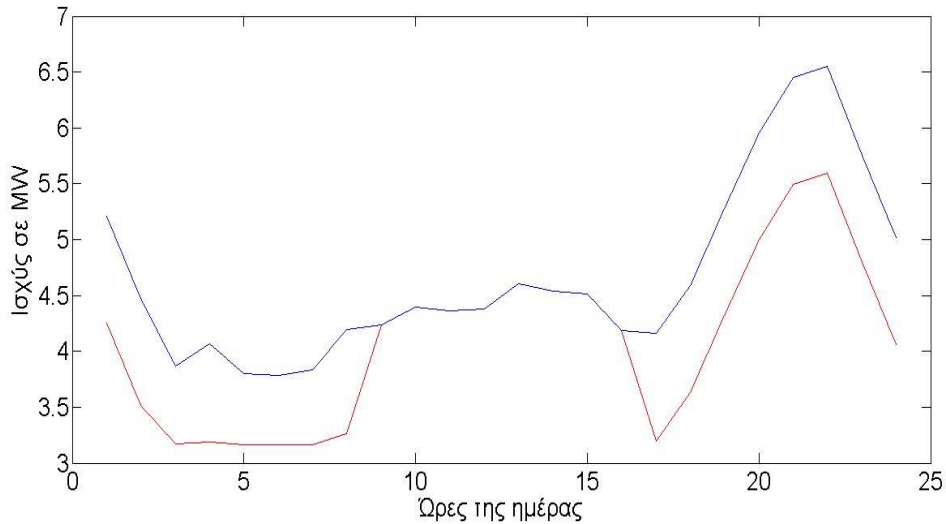
Οργανικό μέσο	Μάζα υλικού αλλαγής φάσης (kg)	Αριθμός συλλεκτών ανά σειρά (A)	Αριθμός σειρών ηλιακών συλλεκτών (N)
R245fa	1.200.000	160	100
R123	1.200.000	150	100
SO <sub>2</sub>	1.500.000	160	120
Βουτάνιο	1.200.000	160	100
Αμμωνία	1.600.000	170	120
R236fa	1.300.000	170	100
Κυκλοπροπάνιο	1.200.000	180	90
R152a	1.200.000	180	90
Προπάνιο	1.200.000	180	90
R1234yf	1.200.000	210	80
R227ea	1.400.000	200	100
R134a	1.300.000	170	100
CO <sub>2</sub>	1.000.000	210	80

Πίνακας 8.1 Βέλτιστος συνδυασμός ελευθέρων μεταβλητών

Στον παραπάνω πίνακα φαίνεται ο συνδυασμών της μάζας του υλικού αλλαγής φάσης, του αριθμού των συλλεκτών ανά σειρά και του αριθμού των σειρών των ηλιακών συλλεκτών που ελαχιστοποιούν τον λόγο του κόστους της εγκατάστασης προς τα ετήσια έσοδα για κάθε εργαζόμενο μέσο ή αλλιώς το Simple Payback Period (SPB). Ο SPB για κάθε οργανικό μέσο θα παρουσιαστεί σε επόμενο υποκεφάλαιο.

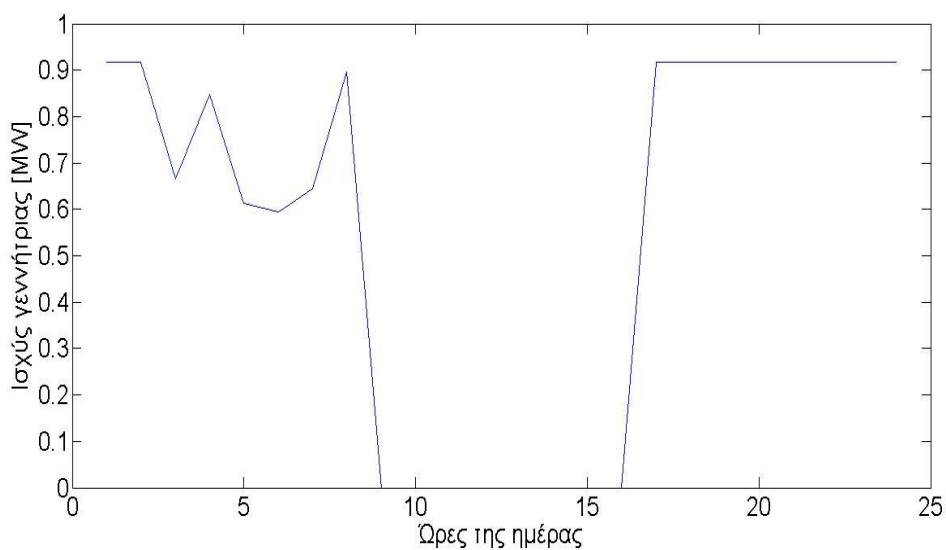
#### 8.1.2 Παραμετρικές αναλύσεις ετήσιας λειτουργίας

Σε αυτή την παράγραφο θα παρουσιαστούν διαγράμματα που έχουν σχέση με την παραγωγή ισχύος της εγκατάστασης και της συνεργασίας της με το δίκτυο. Στο πρώτο διάγραμμα φαίνεται η καμπύλη της ωριαίας ζήτησης της 21<sup>ης</sup> Ιουλίου για εργαζόμενο μέσο το R245fa.



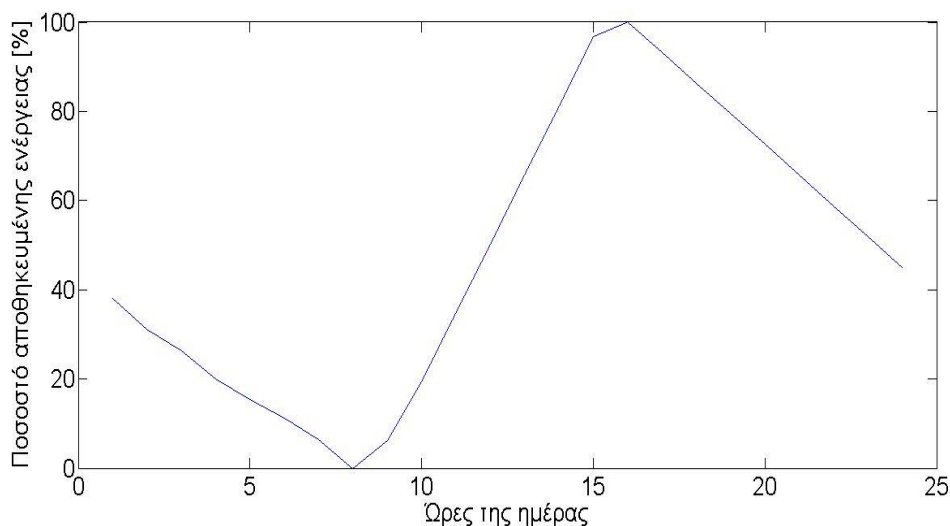
Διάγραμμα 8.1 Ζήτηση κατά την 21<sup>η</sup> Ιουλίου

Με μπλε χρώμα φαίνεται η ωριαία ζήτηση του νησιού αφού έχουμε αφαιρέσει την ισχύ των φωτοβολταϊκών και των αιολικών, ενώ με κόκκινο χρώμα φαίνεται η ωριαία παραγόμενη ισχύς από τις diesel γεννήτριες. Η διαφορά τους οφείλεται στην παραγόμενη ισχύ της εγκατάστασης μας μέσω του ORC. Παρατηρούμε πως το μέγιστο φορτίο που καλείται πλέον να καλύψουν οι γεννήτριες diesel είναι 5,5MW αντί για 6,5MW που ήταν χωρίς την χρήση του ORC. Τις πρώτες πρωινές ώρες παρατηρούμε πως η ισχύς που παράγουμε οδηγούν σε σταθερό φορτίο τις γεννήτριες diesel κάτι το οποίο δεν συμβαίνει τις απογευματινές λογο του περιορισμού την ισχύς του στροβίλου. Επιπλέον βλέπουμε πως δεν γίνεται χρήση της αντλίας θερμότητας αφού οι θερμοκρασίες του νερού των ηλιακών συλλεκτών το καλοκαίρι επαρκούν για την πλήρη φόρτιση του PCM. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η παραγόμενη ισχύς για την ίδια ημέρα.



Διάγραμμα 8.2 Παραγόμενη ισχύς του ORC για τις 21 Ιουλίου

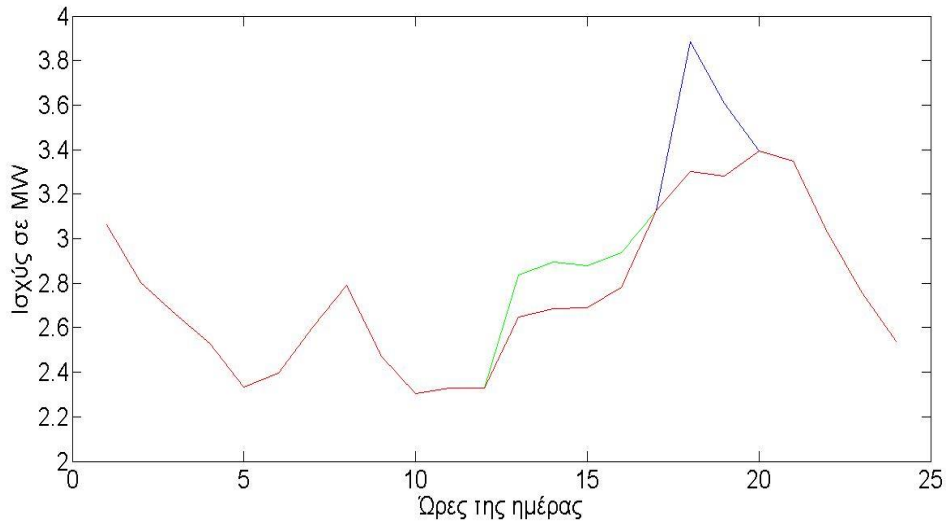
Σε αυτό το διάγραμμα βλέπουμε την παραγόμενη ωριαία ισχύς της γεννήτριας, δηλαδή η ισχύς του στροβίλου μείον τις απώλειες ισχύος σε μηχανικές τριβές και στην γεννήτρια. Παρατηρούμε πως γίνεται ρύθμιση της παραγόμενης ισχύς με σκοπό την σταθερή ισχύ των γεννητριών diesel κατά τις πρωινές ώρες. Το σύστημα δεν παράγει ενέργεια τις ώρες φόρτισης του PCM. Η φόρτιση του PCM γίνεται από το νερό των συλλεκτών χωρίς την χρήση αντλίας θερμότητας και φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 8.3 Ποσοστό φόρτισης PCM στις 21 Ιουλίου

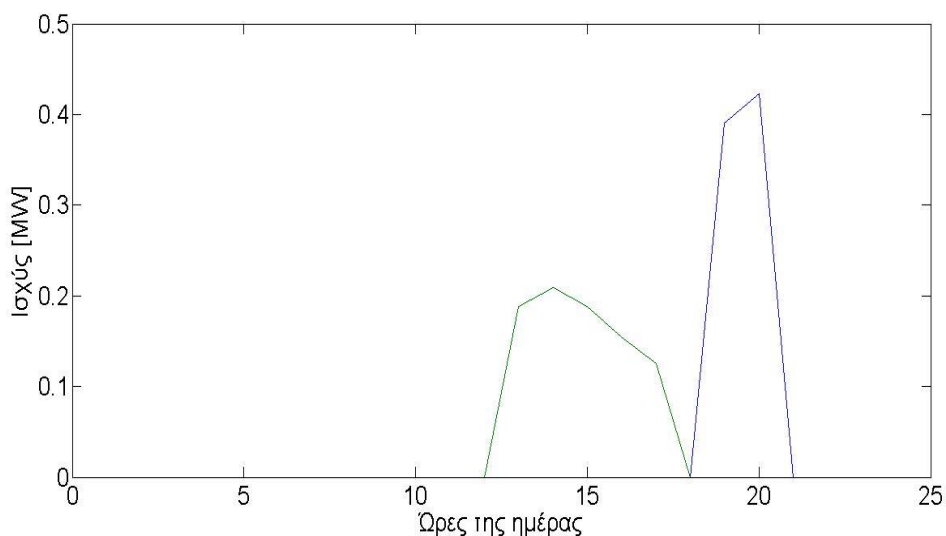
Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται το ποσοστό φόρτισης του PCM κατά την διάρκεια της 21<sup>ης</sup> Ιουλίου. Παρατηρούμε πως ο ORC παράγει και εξαντλεί την αποθηκευμένη ενέργεια μέχρι τις 8 το πρωί. Τότε ξεκινά η φόρτιση και διαρκεί μέχρι τις 16:00 όπου είναι πλήρως φορτισμένο για να ξαναρχίσει η αποφόρτιση και η παραγωγή ενέργειας.

Χαρακτηριστικά παραθέτουμε και την περίπτωση της 19<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου όπου η ηλιακή ακτινοβολία κυμαίνεται σε μικρές τιμές. Αναμένουμε την χρήση της αντλίας θερμότητας με σκοπό την αύξηση της αποθηκευόμενης ενέργειας.



Διάγραμμα 8.4 Ζήτηση κατά την 23<sup>η</sup> Δεκεμβρίου

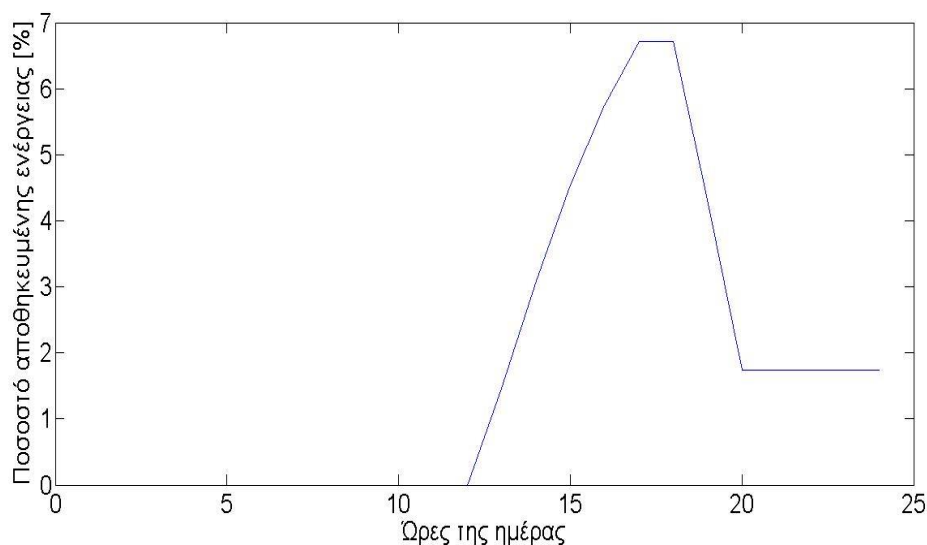
Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση έτσι και εδώ η κόκκινη καμπύλη δείχνει την παραγόμενη από τις diesel γεννήτριες ισχύ. Η μπλε γραμμή και πάλι μας δείχνει την απαιτούμενη ισχύ αν ο ORC δεν λειτουργούσε. Επομένως βλέπουμε πως σε αυτήν την περίπτωση η παραγόμενη ισχύς του ORC μειώνει την ημερήσια μέγιστη ζήτηση από τα 3,9 MW στα 3,4 MW περίπου. Το νέο στοιχείο αποτελεί η πράσινη καμπύλη. Η πράσινη καμπύλη δείχνει την ζήτηση του φορτίου των diesel γεννητριών αν δεν λειτουργούσε η αντλία θερμότητας. Επομένως η αύξηση του φορτίου οφείλεται στην χρήση της αντλίας θερμότητας. Παρατηρούμε πως η απαιτούμενη ισχύς μοιράζεται ισόποσα και δεν συγκεντρώνεται σε μία μόνο ώρα πράγμα που θα δημιουργούσε μεγάλη μεταβολή της ζήτησης. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η παραγόμενη από τον στρόβιλο και η απαιτούμενη από τον συμπιεστή ισχύς.



Διάγραμμα 8.5 Ισχύς στρόβιλου και συμπιεστή στις 23 Δεκεμβρίου

Παρατηρείται πως αμέσως μετά την αποθήκευσης ενέργειας μέχρι τις 18:00 ξεκινά η παραγωγή ενέργειας με τη χρήση του ORC μέχρι τις 21:00 λόγω έλλειψης

αποθηκευμένης ενέργειας. Ενδιαφέρον εμφανίζει το επόμενο διάγραμμα που μας δείχνει το ποσοστό φόρτισης του PCM για τις 23 Δεκεμβρίου.

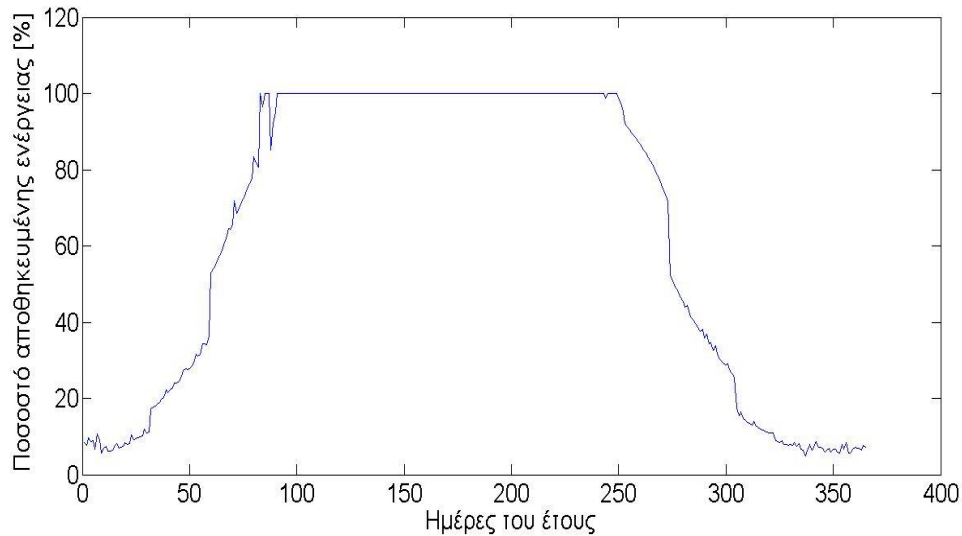


Διάγραμμα 8.6 Ποσοστό φόρτισης PCM για τις 23 Δεκεμβρίου

Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται το ποσοστό φόρτισης του PCM κατά την διάρκεια της 23<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου. Παρατηρούμε πως το μέγιστο ποσοστό φόρτισης φτάνει 7% της μέγιστης διαθέσιμης αποθηκευμένης ενέργειας. Αυτό συμβαίνει γιατί η διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία είναι μικρή για να φορτίσει το υλικό αλλαγής φάσης. Επίσης παρατηρούμε πως στο τέλος της ημέρας δεν έχουμε εκμεταλλευτεί πλήρως την αποθηκευμένη ενέργεια. Αυτό γίνεται σε δύο περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση εκμεταλλευόμαστε την αποθηκευμένη ενέργεια τις πρώτες πρωινές ώρες πριν την διαδικασία της αποθήκευσης εάν υπάρχει κάποιο μέγιστο στην ηλεκτρική ζήτηση. Στην δεύτερη περίπτωση συμβαίνει διότι η αποθηκευμένη ενέργεια δεν είναι αρκετή για την παραγωγή ισχύος μεγαλύτερη 0,3MW που είναι η ελάχιστη επιτρεπόμενη παραγόμενη ισχύς.

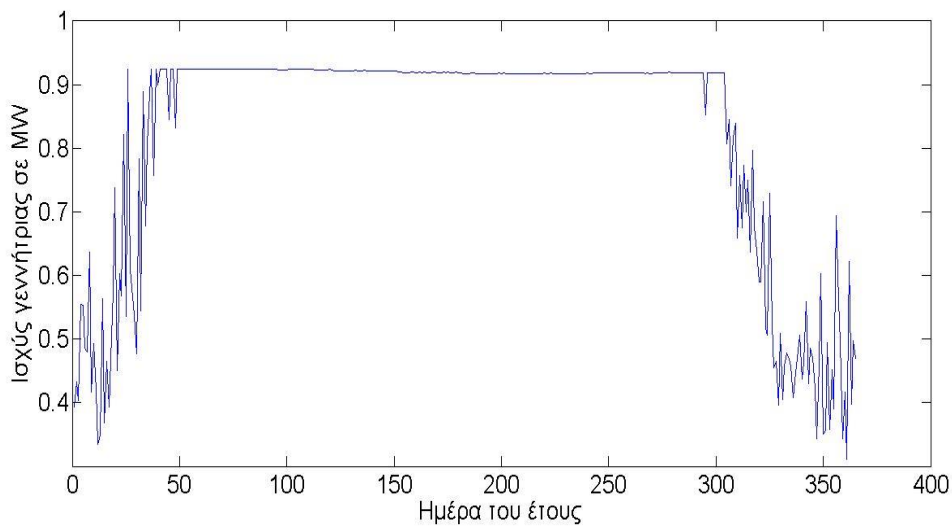
Όλα τα παραπάνω διαγράμματα έχουν ως εργαζόμενο μέσο το R245fa το οποίο αποτελεί την βέλτιστη επιλογή σύμφωνα με τεχνοοικονομικά και περιβαλλοντικά κριτήρια. Παρακάτω παραθέτονται κάποια συγκεντρωτικά διαγράμματα που χαρακτηρίζουν την λειτουργία της εγκατάστασης.





Διάγραμμα 8.7 Ποσοστό φόρτισης PCM κατά την διάρκεια του έτους

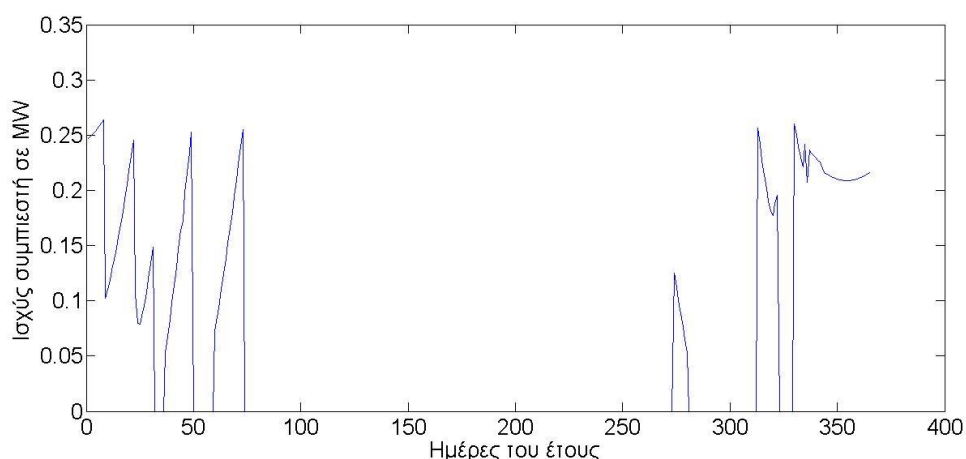
Στο διάγραμμα 8.7 φαίνεται το μέγιστο ημερήσιο ποσοστό φόρτισης του PCM για κάθε ημέρα του έτους. Παρατηρούμε πως έχει άμεση εξάρτηση από την ηλιακή ακτινοβολία καθώς αποτελεί την πηγή ενέργειας του. Τους χειμερινούς μήνες όπως αναμέναμε το ποσοστό φόρτισης είναι αρκετά μικρό ενώ αντίθετα τους καλοκαιρινούς μήνες φορτίζει πλήρως και γρήγορα. Μια μέση τιμή για την πλήρης φόρτιση του PCM για τους καλοκαιρινούς μήνες είναι οι 8 ώρες για το R245fa.



Διάγραμμα 8.8 Παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς κατά την διάρκεια του έτους

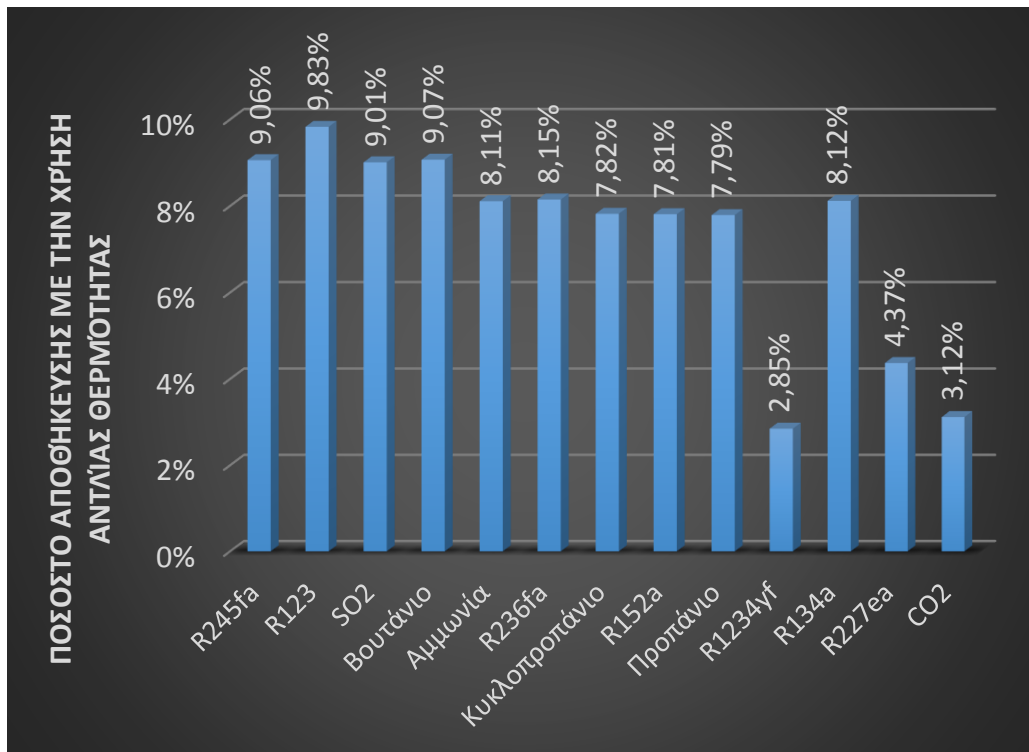
Παραθέτουμε στο διάγραμμα 8.8 την μέγιστη ημερήσια παραγόμενη ισχύς της γεννήτριας για όλες τις ημέρες του έτους. Παρατηρούμε όπως είναι φυσικό πως όσο περισσότερη αποθηκευμένη ενέργεια διαθέτουμε τόσο περισσότερες ώρες ο στρόβιλος λειτουργεί στο ονομαστικό του φορτίο. Τους χειμερινούς μήνες παρατηρούμε μείωση της παραγόμενης ενέργειας καθώς και λειτουργία σε μερικά φορτία μέχρι και 30% της ονομαστικής ισχύς που αποτελεί το ελάχιστο δυνατό. Από

τα δύο παραπάνω διαγράμματα προκύπτει πως το PCM συναλλάσσει ποσά θερμότητας καθ' όλη την διάρκεια της ημέρας. Είτε αποθηκεύει την θερμική ενέργεια του θερμού νερού ή του οργανικού μέσου είτε αποδίδει θερμική ενέργεια στον ατμοποιητή του ORC για την παραγωγή ενέργειας. Μόνο τους χειμερινούς μήνες δεν συμβαίνει κάτι τέτοιο καθ' όλη την διάρκεια της ημέρας λόγω μειωμένης ηλιακής ακτινοβολίας. Επομένως η υπόθεση πως την πρώτη ώρα αποθήκευσης ενέργειας στο PCM η θερμοκρασία του PCM είναι η θερμοκρασία αλλαγής φάσης και όχι μικρότερη αποτελεί καλή προσέγγιση της πραγματικότητας καθώς την προηγούμενη ώρα ή μια ώρα πριν το πολύ λειτουργούσε ο ORC λαμβάνοντας θερμότητα από το PCM. Από την άλλη πλευρά η υπόθεση για μηδενικές απώλειες κατά την διάρκεια της αποθήκευσης ενέργειας και την απόδοσης ενέργειας έγινε με σκοπό την απλούστευση των υπολογισμών καθώς οι υπολογισμοί απωλειών ενέργειας σε PCM αποτελεί από μόνο του ένα πολύπλοκο πρόβλημα υπολογισμού.



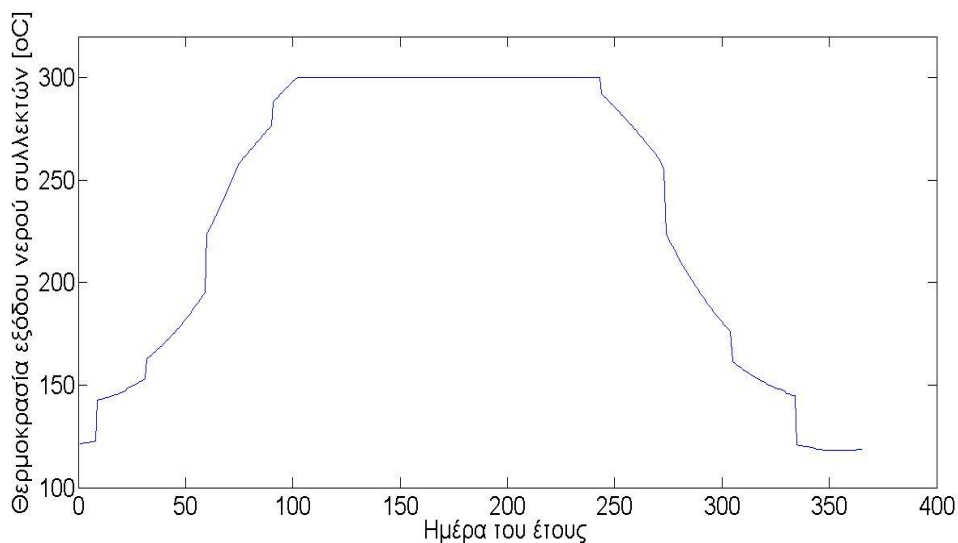
Διάγραμμα 8.9 Απαιτούμενη ισχύς συμπιεστή αντλίας θερμότητας κατά της διάρκεια του έτους

Στο διάγραμμα 8.9 φαίνεται η μέγιστη ημερήσια απαιτούμενη από τον συμπιεστή της αντλίας θερμότητας ισχύ κατά την διάρκεια του έτους. Φαίνεται ξεκάθαρα η ιεραρχία που έχουμε για την αποθήκευση ενέργειας. Η αντλία θερμότητας λειτουργεί μόνο όταν χρειάζεται να αποθηκεύσουμε ενέργεια και η θερμοκρασία του νερού των συλλεκτών δεν επαρκεί. Για αυτό το λόγο όπως φαίνεται και στο σχήμα η αντλία θερμότητας λειτουργεί κυρίως τους χειμερινούς μήνες και κάποιες ώρες του φθινοπώρου και της άνοιξης όπου η ζήτηση είναι μεγαλύτερη. Πιο αναλυτικά το παρακάτω διάγραμμα δείχνει το ποσοστό του χρόνου αποθήκευσης ενέργειας με την χρήση της αντλίας θερμότητας σε σχέση με τον συνολικό χρόνο αποθήκευσης ενέργειας για κάθε οργανικό μέσο.



Διάγραμμα 8.10 Ποσοστό αποθήκευσης ενέργειας με αντλία θερμότητας

Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα το ποσοστό του χρόνου που χρησιμοποιείται η αντλία θερμότητας είναι μικρό για όλα τα οργανικά μέσα δείχνοντας πως ο στόχος για την μείωση της χρήσης της επιτυγχάνεται σε μεγάλο βαθμό. Επίσης η μάζα του υλικού αλλαγής φάσης επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την χρήση της αντλίας θερμότητας αφού καθορίζει την μέγιστη αποθηκευόμενη ενέργεια και επομένως τις ώρες λειτουργίας της αντλίας θερμότητας.



Διάγραμμα 8.11 Θερμοκρασία εξόδου του νερού των ηλιακών συλλεκτών

Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται η μέγιστη θερμοκρασία εξόδου του νερού των συλλεκτών για κάθε ημέρα του έτους. Παρατηρούμε πως η θερμοκρασία

μεγιστοποιείται τους καλοκαιρινούς μήνες όπου φτάνουμε την μέγιστη δυνατή θερμοκρασία των 300°C. Αντίθετα τους χειμερινούς μήνες η μέγιστη θερμοκρασία φτάνει περίπου τους 120°C, κάνοντας την χρήση της αντλίας θερμότητας αναγκαία λύση για την αποθήκευση ενέργειας.

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάστηκαν διαγράμματα που δείχνουν χαρακτηριστικά μεγέθη για την λειτουργία της εγκατάστασης. Επιλέξαμε τα διαγράμματα να είναι όλα από την εγκατάσταση με εργαζόμενο μέσο το R245fa που αποτελεί την βέλτιστη λύση με οικονομοτεχνικά και περιβαλλοντικά κριτήρια. Επειδή τα αντίστοιχα διαγράμματα είναι παρόμοια για όλα τα οργανικά μέσα και οι αλλαγές εστιάζονται στα μεγέθη και όχι στις μορφές των διαγραμμάτων θα ακολουθήσει αναλυτική παρουσίαση των θερμοδυναμικών χαρακτηριστικών μεγεθών για κάθε εργαζόμενο μέσο.

### 8.1.3 Παρουσίαση θερμοδυναμικών παραμέτρων λειτουργίας

#### 8.1.3.1 Παρουσίαση λόγου πίεσης της αντλίας θερμότητας

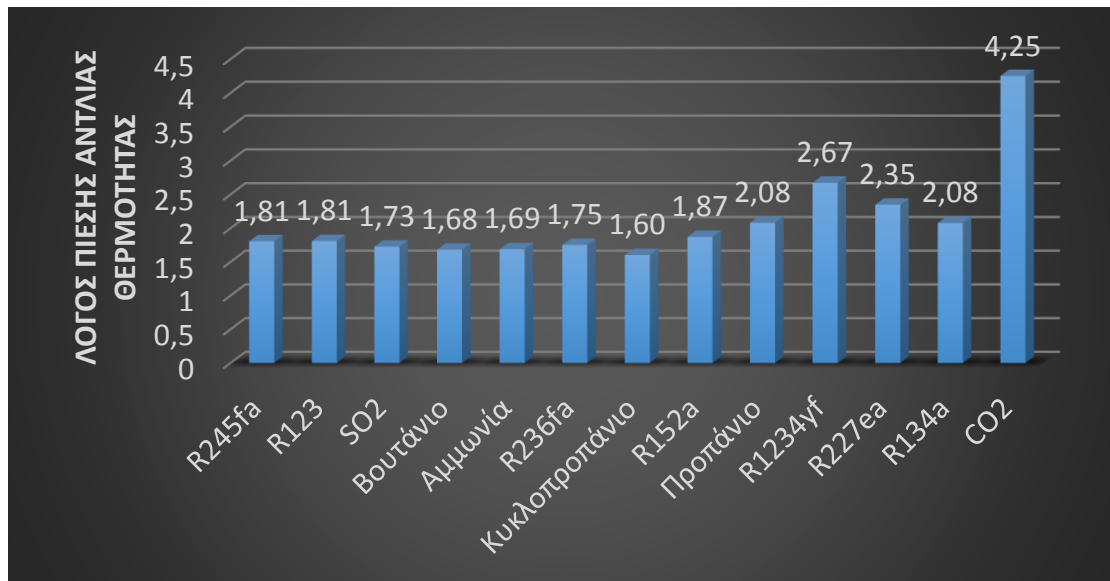
Υπενθυμίζουμε πως οι πιέσεις κατά την λειτουργία των αντλιών θερμότητας εξαρτώνται άμεσα από τις θερμοκρασίες λειτουργίας και την κρίσιμη θερμοκρασία κάθε οργανικού μέσου. Έχοντας ήδη αναλύσει με ποια κριτήρια επιλέγουμε τον τρόπο λειτουργίας της αντλίας θερμότητας για κάθε περίπτωση παραθέτουμε τον παρακάτω πίνακα με τους κύκλους λειτουργίας.

Οργανικό μέσο	Κύκλος λειτουργίας αντλίας θερμότητας
R245fa	Υποκρίσιμος κύκλος
R123	Υποκρίσιμος κύκλος
SO <sub>2</sub>	Υποκρίσιμος κύκλος
Βουτάνιο	Υποκρίσιμος κύκλος
Αμμωνία	Υποκρίσιμος κύκλος
R236fa	Υποκρίσιμος κύκλος
Κυκλοπροπάνιο	Υποκρίσιμος κύκλος
R152a	Υπερκρίσιμος κύκλος
Προπάνιο	Υπερκρίσιμος κύκλος
R1234yf	Υπερκρίσιμος κύκλος
R227ea	Υπερκρίσιμος κύκλος
R134a	Υπερκρίσιμος κύκλος
CO <sub>2</sub>	Κύκλος CO <sub>2</sub> (Υπερκρίσιμος κύκλος)

Πίνακας 8.2 Κύκλοι λειτουργίας κάθε οργανικού μέσου

Τον κύκλο CO<sub>2</sub> τον έχουμε ήδη αναλύσει και δεν τον υπάγουμε στους υπερκρίσιμους κύκλους γιατί ο ατμοποιητής λειτουργεί σε υπερκρίσιμη πίεση και γιατί χρησιμοποιούμε διαφορετικό κώδικα για την επίλυση του. Παρακάτω παρουσιάζουμε τους μέσους λόγους πίεσης στους οποίους λειτουργούν τα

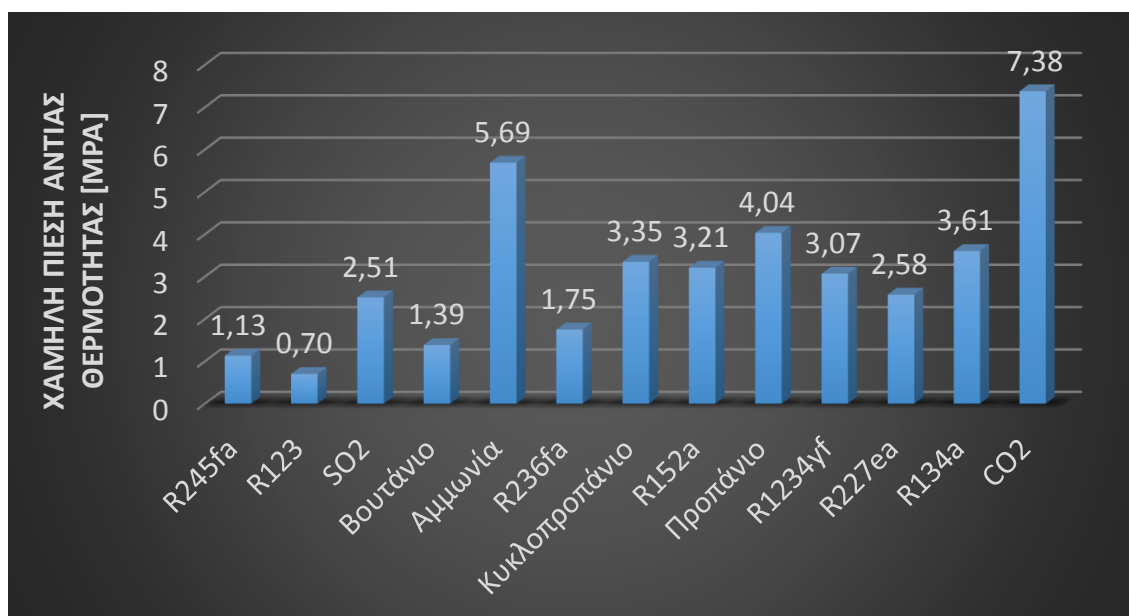
οργανικά μέσα. Θυμίζουμε πως ως μέγιστος επιτρεπτός λόγος πίεσης έχει οριστεί το 25. Τα αναλυτικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στο παράρτημα Α.



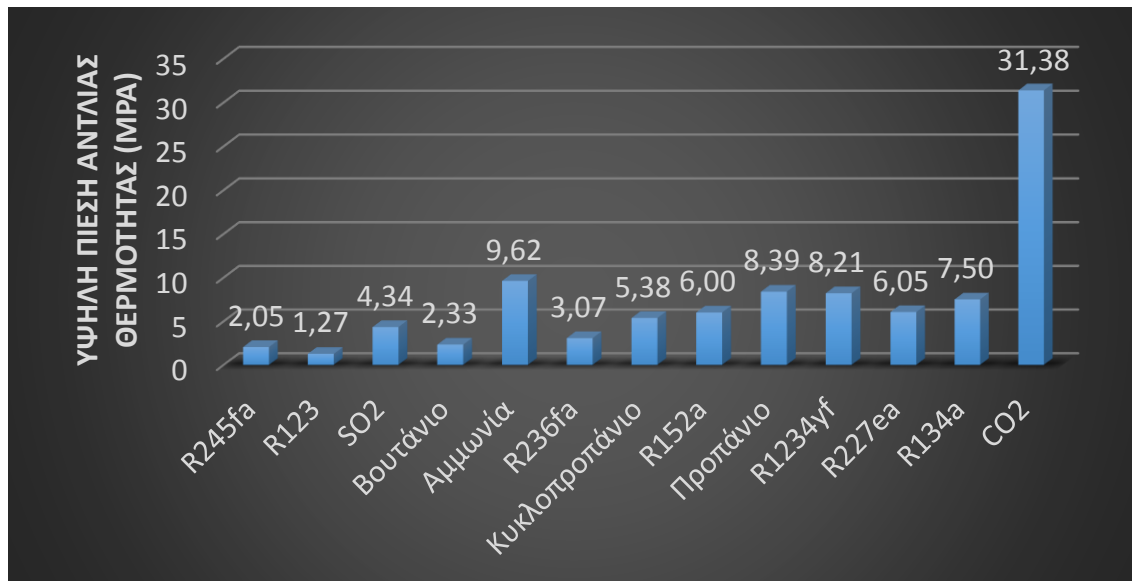
Διάγραμμα 8.12 Μέσοι λόγοι πίεσης αντλίας θερμότητας για κάθε οργανικό μέσο

Το πρώτο που παρατηρούμε είναι πως κάθε είδος κύκλου λειτουργεί σε δικά του όρια. Οι υποκρίσιμοι κύκλοι λειτουργούν σε λόγους πίεσης από 1,6-1,8. Οι υπερκρίσιμοι κύκλοι λειτουργούν αντίστοιχα σε λόγους πίεσης 1,9-2,7, ενώ το CO<sub>2</sub> λειτουργεί σε λόγους πίεσης περίπου στο 4,2. Επομένως οι υποκρίσιμοι κύκλοι λειτουργούν σε χαμηλότερους λόγους πίεσης.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα με τις μέσες τιμές τις υψηλής και χαμηλής πίεσης κάθε οργανικού μέσου για την ετήσια λειτουργία της αντλίας θερμότητας. Η πίεση δίνεται σε MPa.



Διάγραμμα 8.13 Μέση χαμηλή πίεση αντλίας θερμότητας για κάθε οργανικό μέσο



Διάγραμμα 8.14 Μέση υψήλη πίεση αντλίας θερμότητας για κάθε οργανικό μέσο

Παρατηρούμε την μεγάλη διαφορά της πίεσης του CO<sub>2</sub> σε σχέση με τα υπόλοιπα οργανικά μέσα. Αυτό δυσκολεύει ακόμα περισσότερο το κατασκευαστικό κομμάτι αφού όσο μεγαλύτερη η πίεση λειτουργίας τόσο πιο ανθεκτικό πρέπει να είναι το σύστημα. Σε αυτά τα διαγράμματα βλέπουμε μια ενδεικτική τιμή των πιέσεων λειτουργίας κάθε οργανικού μέσου.

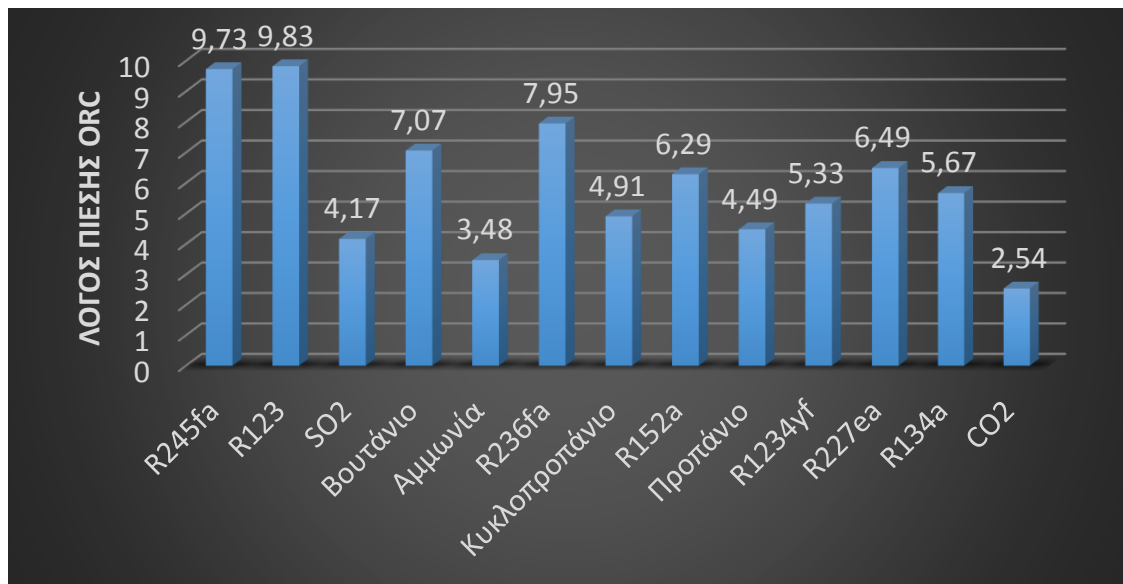
### 8.1.3.2 Παρουσίαση λόγου πίεσης κύκλου ORC

Οι πιέσεις όπως έχουμε ήδη αναφέρει για τον κύκλο ORC εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις θερμοκρασίες λειτουργίας του κύκλου. Εφόσον λειτουργούμε στην διφασική περιοχή η θερμοκρασία καθορίζει μονοσήμαντα την πίεση λειτουργίας. Σε διαφορετική περίπτωση, όπως ο υπερκρίσιμος κύκλος, η πίεση καθορίζεται με βάση την θερμοκρασία αλλά της βελτιστοποίησης του βαθμού απόδοσης. Στην περίπτωση του κύκλου ORC αναμένουμε η θερμοκρασία του συμπυκνωτή (θερμοκρασία θάλασσας), που μεταβάλλεται κατά την διάρκεια του έτους, να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο. Έχοντας αναφέρει τα κριτήρια με βάση τα οποία κάθε οργανικό μέσο λειτουργεί σε υποκρίσιμο ή υπερκρίσιμο κύκλο παραθέτουμε τον παρακάτω πίνακα για τον ακριβή προσδιορισμό του.

Οργανικό μέσο	Κύκλος λειτουργίας ORC
R245fa	Υποκρίσιμος
R123	Υποκρίσιμος
SO <sub>2</sub>	Υποκρίσιμος
Βουτάνιο (butane)	Υποκρίσιμος
Αμμωνία (ammonia)	Υποκρίσιμος
R236fa	Υποκρίσιμος
Κυκλοπροπάνιο (cyclopropane)	Υποκρίσιμος
R152a	Υποκρίσιμος
Προπάνιο (propane)	Υπερκρίσιμος
R1234yf	Υπερκρίσιμος
R227ea	Υπερκρίσιμος
R134a	Υπερκρίσιμος
CO <sub>2</sub>	Υπερκρίσιμος

Πίνακας 8.3 Κύκλος λειτουργίας ORC για κάθε εργαζόμενο μέσο

Παρακάτω φαίνονται συγκεντρωτικά οι μέσοι λόγοι πίεσης. Προφανώς για κάθε ώρα του έτους ο λόγος πίεσης του κύκλου ORC είναι διαφορετικός λόγω της διαφορετικής πίεσης του συμπυκνωτή που εξαρτάται από την μεταβαλλόμενη θερμοκρασία της θάλασσας. Για αυτό το λόγο παραθέτουμε τον μέσο λόγο πίεσης για κάθε εργαζόμενο μέσο. Αναλυτικά ο λόγος πίεσης για κάθε ώρα του έτους για όλα τα οργανικά μέσα παρουσιάζεται στο [Παράρτημα Β](#).

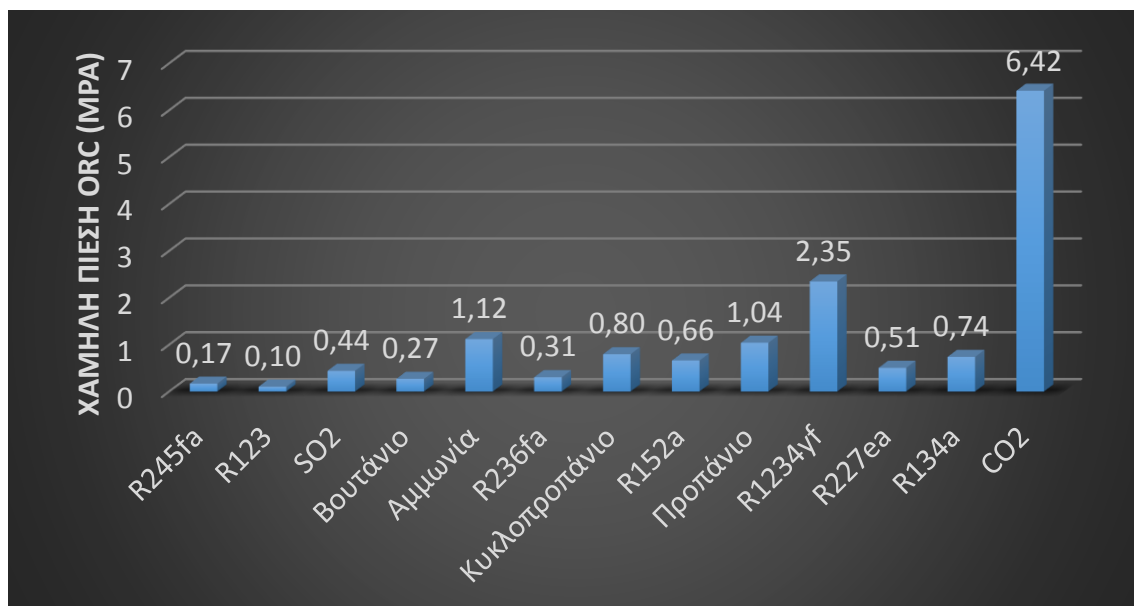


Διάγραμμα 8.15 Μέσοι λόγοι πίεσης κύκλου ORC

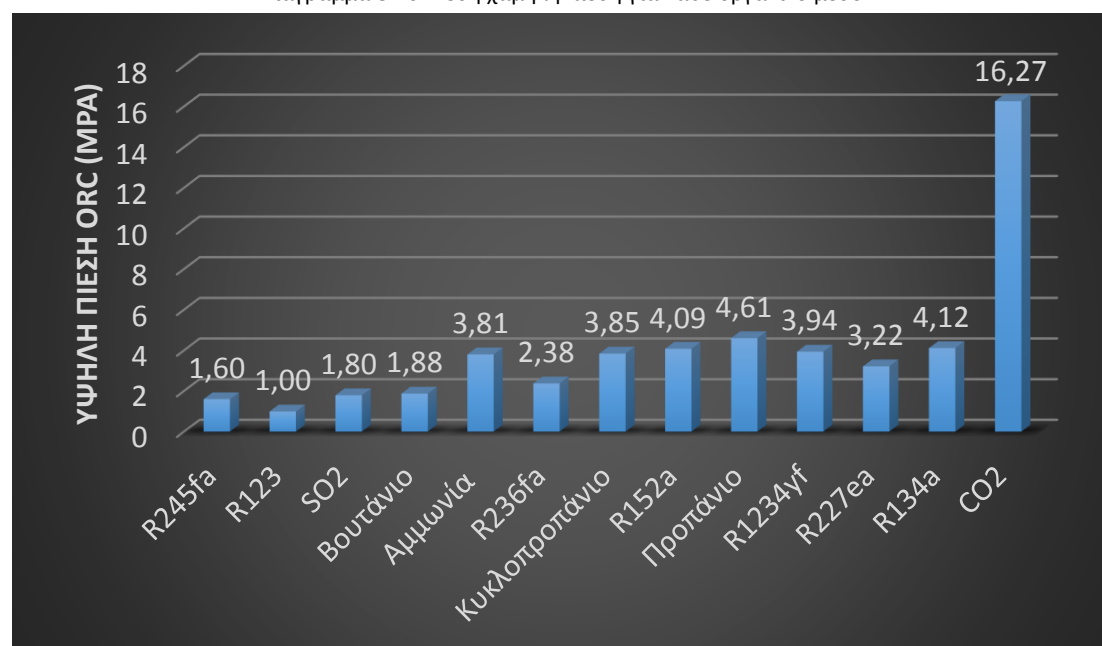
Παρατηρούμε πως δεν υπάρχει σαφής συσχέτιση του λόγου πίεσης και του είδους του κύκλου λειτουργίας. Αν κοιτάξουμε πιο προσεκτικά όμως παρατηρούμε πως τα οργανικά μέσα που λειτουργούν σε υποκρίσιμο κύκλο με μικρή υπερθέρμανση έχουν μεγαλύτερο λόγο πίεσης (9,83-7,07). Ακολουθούν τα οργανικά μέσα που λειτουργούν σε υπερκρίσιμο κύκλο λειτουργίας (6,29-4,49). Αμέσως μετά τα

οργανικά μέσα που λειτουργού σε υποκρίσιμο κύκλο με μεγάλη υπερθέρμανση (4,17-3,48). Το μικρότερο λόγο πίεσης εμφανίζει το CO<sub>2</sub> (2,54). Συμπεραίνουμε πως η μεγάλη υπερθέρμανση μειώνει τον λόγο πίεσης στον κύκλο ORC και αυτό οφείλεται στην καθορισμένη άνω πίεση του συστήματος που επιβάλλεται από την θερμοκρασία του υλικού αλλαγής φάσης. Σαν γενικό σχόλιο μπορούμε να αναφέρουμε πως η διαφορετικότητα των συνθηκών λειτουργίας αλλά και των ίδιων των εργαζόμενων μέσων οδηγούν σε μεγάλη διαφορετικότητα του λόγου πίεσης του ORC.

Ενδεικτικά παρουσιάζουμε και τα παρακάτω διαγράμματα όπου φαίνονται η μέση τιμές της υψηλής και της χαμηλής πίεσης αντίστοιχα. Οι πιέσεις είναι σε MPa.



Διάγραμμα 8.16 Μέση χαμηλή πίεση για κάθε οργανικό μέσο



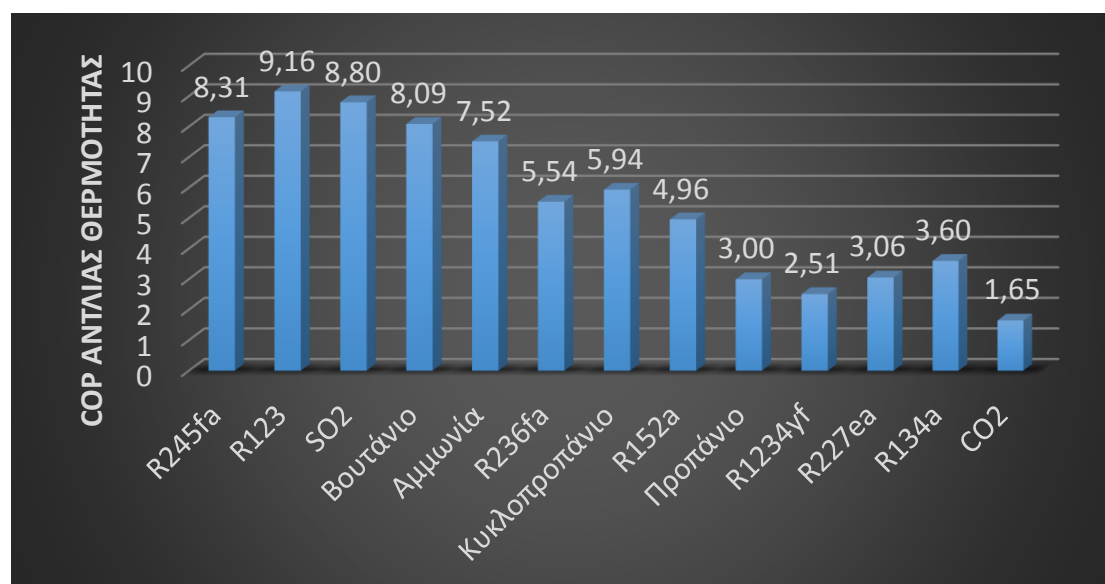
Διάγραμμα 8.17 Μέση υψηλή πίεση για κάθε οργανικό μέσο



Παρατηρούμε την μεγάλη διαφορά που παρουσιάζει το CO<sub>2</sub> σε σχέση με τις πιέσεις των υπόλοιπων οργανικών μέσων. Αυτό αποκαλύπτει το μεγάλο πρόβλημα του CO<sub>2</sub> το οποίο δεν είναι άλλο από τις μεγάλες απαιτούμενες πιέσεις. Οι μεγάλες πιέσεις δημιουργούν δυσκολίες στην κατασκευή, ακριβότερα υλικά και εξαρτήματα καθώς και προβλήματα διαρροών. Επιπλέον φαίνεται η μεγάλη ισχύς που απαιτεί η αντλία προκειμένου να επιτύχουμε τόσο μεγάλες πιέσεις. Τα διαγράμματα δίνονται για να έχουμε μια τάξη μεγέθους των πιέσεων για όλα τα εργαζόμενα μέσα. Οι πιέσεις δείχνουν κατά πόσο είναι εύκολα κατασκευάσιμος ο κύκλος ORC και τα επιμέρους εξαρτήματά του.

### 8.1.3.3 Παρουσίαση COP της αντλίας θερμότητας

Το βασικότερο μέγεθος κατά την λειτουργία της αντλίας θερμότητας είναι ο COP ο οποίος στην περίπτωσή μας ορίζεται ως η προσδιδόμενη θερμότητα στο υλικό αλλαγής φάσης προς την ισχύ του συμπιεστή. Στην εγκατάσταση μας ο COP διαδραματίζει μεγάλο ρόλο κατά την λειτουργία της αντλίας θερμότητας γιατί καθώς υπάρχει περιορισμός στην ισχύ του συμπιεστή μας, ο COP καθορίζει την ενέργεια που θα αποθηκευτεί επηρεάζοντας την παραγόμενη ισχύ. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται ο μέσος COP για κάθε εργαζόμενο μέσο. Αναλυτικά για κάθε ώρα του έτους στο [Παράρτημα Γ](#) παρουσιάζεται ο COP για κάθε οργανικό μέσο.



Διάγραμμα 8.18 Μέσος COP για όλα τα οργανικά μέσα

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε πως τα οργανικά μέσα που λειτουργούν σε υποκρίσιμο κύκλο παρουσιάζουν σαφώς μεγαλύτερο COP από τα αντίστοιχα μέσα που λειτουργούν σε υπερκρίσιμο κύκλο. Επομένως μπορούν να αποθηκεύουν ενέργεια πολύ πιο αποτελεσματικά. Τέλος το CO<sub>2</sub> παρουσιάζει τον μικρότερο COP

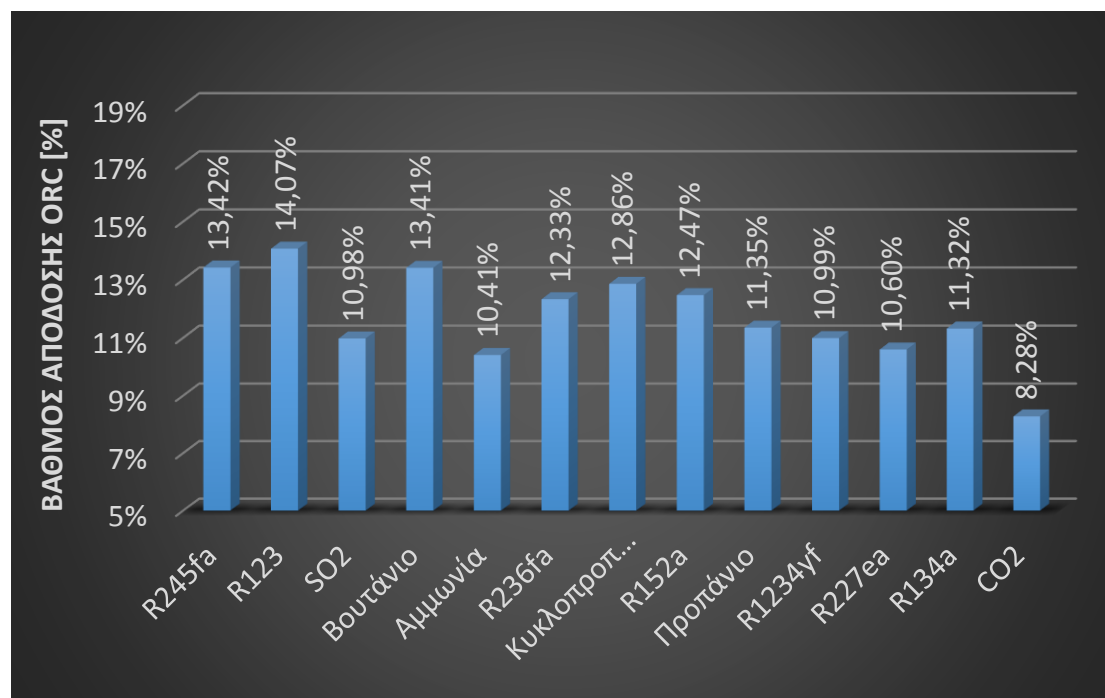
πράγμα που μειώνει κατά πολύ την ικανότητά του να αποθηκεύει ενέργεια στο PCM τις ώρες λειτουργία της αντλίας θερμότητας. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην μεγάλη απαιτούμενη ισχύς του συμπιεστή κατά την λειτουργία των υπερκρίσιμων κύκλων και κυρίως του κύκλου του CO<sub>2</sub> που μέχρι και ο ατμοποιητής λειτουργεί σε υπερκρίσιμη θερμοκρασία και πίεση. Επίσης παρατηρείται μεγάλη τιμή του COP, περίπου ίση με 9, αυτό οφείλεται στην μικρή θερμοκρασιακή διαφορά του ατμοποιητή από τον συμπυκνωτή. Συμπερασματικά τα οργανικά μέσα που λειτουργούν σε υποκρίσιμο κύκλο αποκτούν πλεονέκτημα κατά την λειτουργία της αντλίας θερμότητας.

#### 8.1.3.4 Παρουσίαση βαθμού απόδοσης ORC

Ο βαθμός απόδοσης του ORC ορίζεται ως η ηλεκτρική ισχύς που προσδίδει στο δίκτυο προς την ισχύ του ατμοποιητή που στην δική μας περίπτωση παρέχεται από το PCM. Παρακάτω φαίνεται ο ορισμός του θερμικού βαθμούς απόδοσης του ORC.

$$\eta_{th} = \frac{P_{turb} * \eta_{mech} * \eta_{gen} - P_{pump}}{Q_{evap}} \quad (49)$$

Αποτελεί μαζί με τον COP τον βασικότερο βαθμό απόδοσης αφού εκφράζει την ηλεκτρική ισχύς που παράγει προς την αποθηκευμένη ενέργεια που έχει η εγκατάσταση. Εκφράζει δηλαδή πόσο καλά μπορεί το εν λόγω οργανικό μέσο να εκμεταλλευτεί την αποθηκευμένη ενέργεια. Στο παράρτημα Δ παρουσιάζεται ο βαθμός απόδοσης του κύκλου ORC για κάθε ώρα του έτους για όλα τα εργαζόμενα μέσα. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται ο μέσος ετήσιος βαθμός απόδοσης για κάθε οργανικό μέσο.



Διάγραμμα 8.19 Μέσος βαθμός απόδοσης

Από το παραπάνω διάγραμμα συμπεραίνουμε πως τα οργανικά μέσα που λειτουργούν σε υποκρίσιμο κύκλο και δεν έχουν μεγάλη υπερθέρμανση παρουσιάζουν καλύτερους βαθμούς απόδοσης. Ακολουθούν τα οργανικά μέσα που λειτουργούν σε υπερκρίσιμους κύκλους και έπειτα η αμμωνία με το SO<sub>2</sub> που λειτουργούν μεν σε υποκρίσιμους κύκλους αλλά με μεγάλες υπερθερμάνσεις. Το CO<sub>2</sub> παρουσιάζει τον μικρότερο βαθμό απόδοσης. Αυτό οφείλεται κυρίως στην μεγάλη ισχύ που καταναλώνει η αντλία μειώνοντας την καθαρή ισχύ του κύκλου.

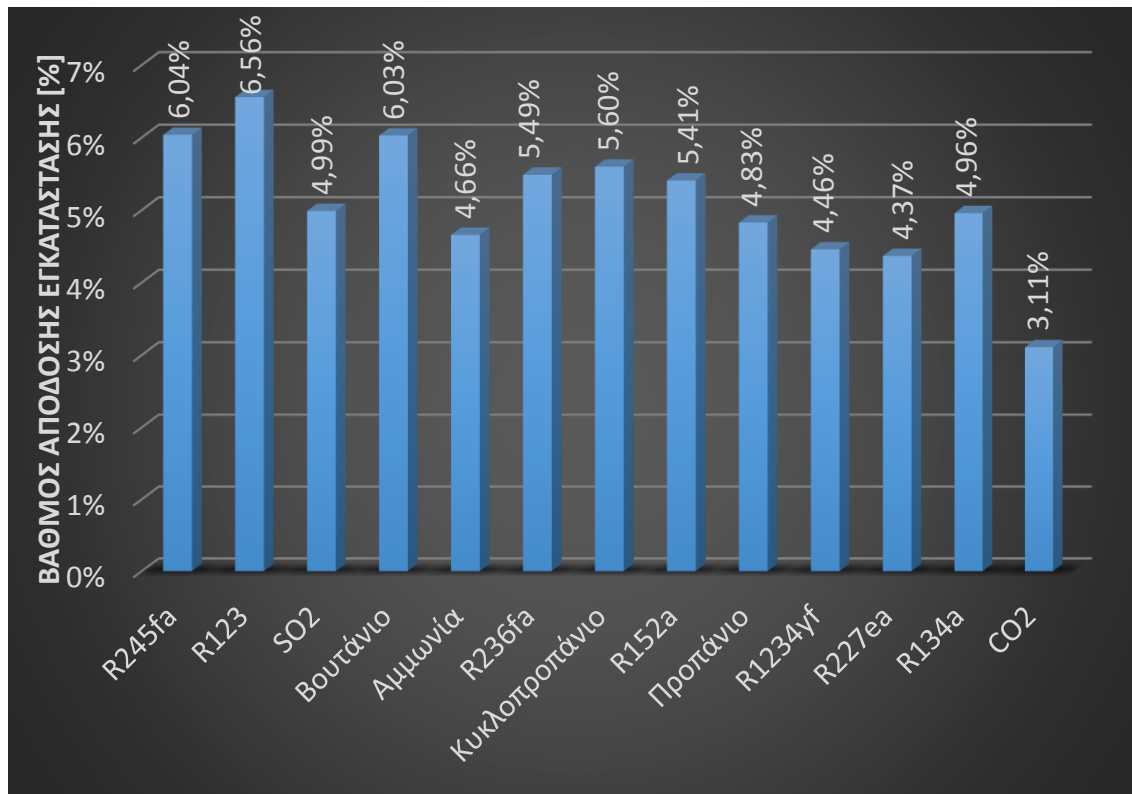
Υπάρχουν δυο λόγοι για τους οποίους τα οργανικά μέσα που λειτουργούν σε υποκρίσιμο κύκλο χωρίς μεγάλη υπερθέρμανση παρουσιάζουν μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης. Αρχικά απαιτούν πολύ μικρότερο έργο στην αντλία σε σχέση με το αντίστοιχο των υπερκρίσιμων κύκλων και ειδικά του CO<sub>2</sub>. Έπειτα «ταιριάζουν» περισσότερο θερμοκρασιακά με την πηγή θερμότητας (PCM). Το PCM έχει σταθερή θερμοκρασία. Τα οργανικά μέσα που λειτουργούν σε υποκρίσιμο κύκλο στον ατμοποιητή (εναλλάκτης PCM-οργανικού μέσου) επειδή βρίσκονται στην διφασική περιοχή έχουν σταθερή θερμοκρασία. Επομένως διατηρούν σταθερή θερμοκρασιακή διαφορά καθ' όλη την διάρκεια μετάδοσης θερμότητας. Ο συνδυασμός των δυο αυτών πλεονεκτημάτων καθιστούν τα εργαζόμενα μέσα που λειτουργούν σε υποκρίσιμες πιέσεις καταλληλότερα στην συγκεκριμένη εφαρμογή.

### 8.1.3.5 Παρουσίαση βαθμού απόδοσης εγκατάστασης

Θεωρώντας πως η εγκατάστασή μας εκμεταλλεύεται την ηλιακή ενέργεια προκειμένου να παράξει ηλεκτρική ενέργεια μπορούμε να ορίσουμε τον βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης ως τον λόγο της ετήσιας παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας προς την ηλιακή ακτινοβολία τις ώρες που αποθηκεύει ενέργεια.

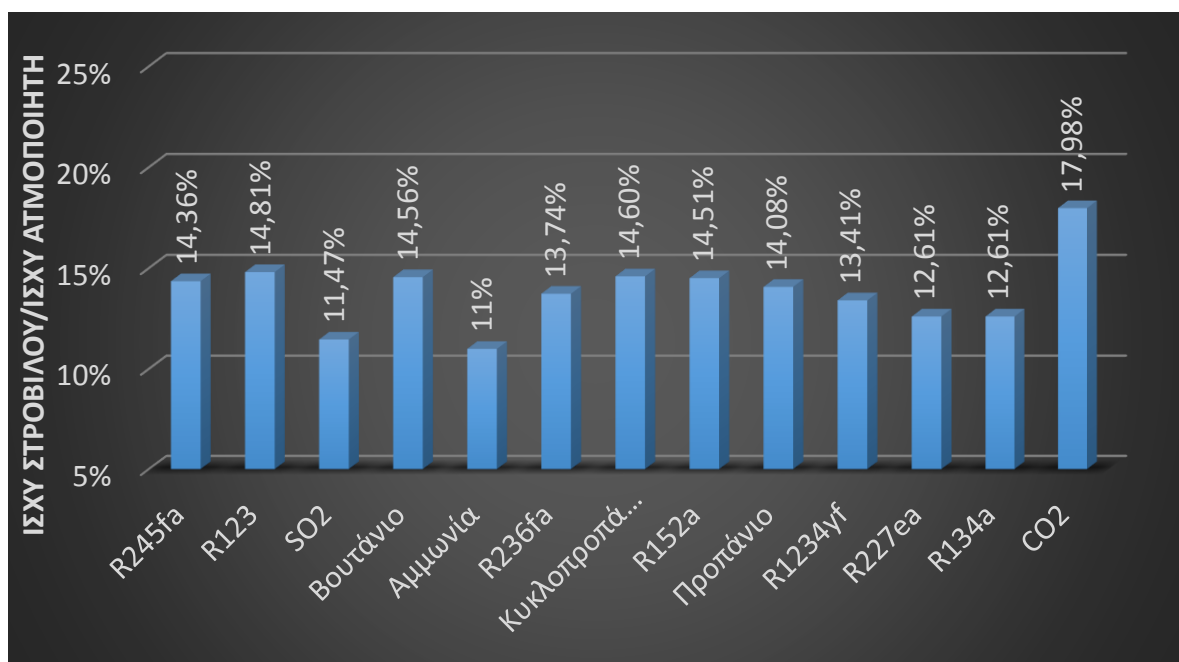
$$\eta_{εγκ} = \frac{\text{Συνολική παραγόμενη ενέργεια}}{\text{Συνολική εκμεταλλευσόμενη ηλιακή ενέργεια}} = \frac{\sum_1^{\text{ώρες λειτουργίας ORC}} P_{el} * 1h - \sum_1^{\text{ώρες λειτουργίας αντλίας θερμότητας}} P_{comp} * 1h}{\sum_1^{\text{ώρες αποθηκευσης}} I_b} \quad (50)$$

Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται είναι η ενέργεια που παράγει ετήσια ο στρόβιλος μείον την ετήσια ενέργεια της αντλίας και την ετήσια ενέργεια του συμπιεστή. Η ηλιακή ενέργεια κατά την διάρκεια της αποθήκευσης θεωρείται μόνο η άμεση ακτινοβολία καθώς μόνο εκείνη εκμεταλλεύεται ο θερμικός παραβολικός συλλέκτης. Τα αποτελέσματα για κάθε οργανικό μέσο φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 8.20 Βαθμός απόδοσης εγκατάστασης για κάθε οργανικό μέσο

Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο λόγος της ισχύος του στροβίλου προς την θερμότητα του ατμοποιητή στον κύκλο ORC. Ο λόγος αυτός δείχνει το πόση ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να παράξει ο στρόβιλος από αποθηκευμένη ενέργεια στο υλικό αλλαγής φάσης. Δηλαδή δείχνει το πόσο καλά μπορεί να εκμεταλλευτεί ο στρόβιλος την αποθηκευμένη ενέργεια. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται ο λόγος αυτός για όλα τα οργανικά μέσα.

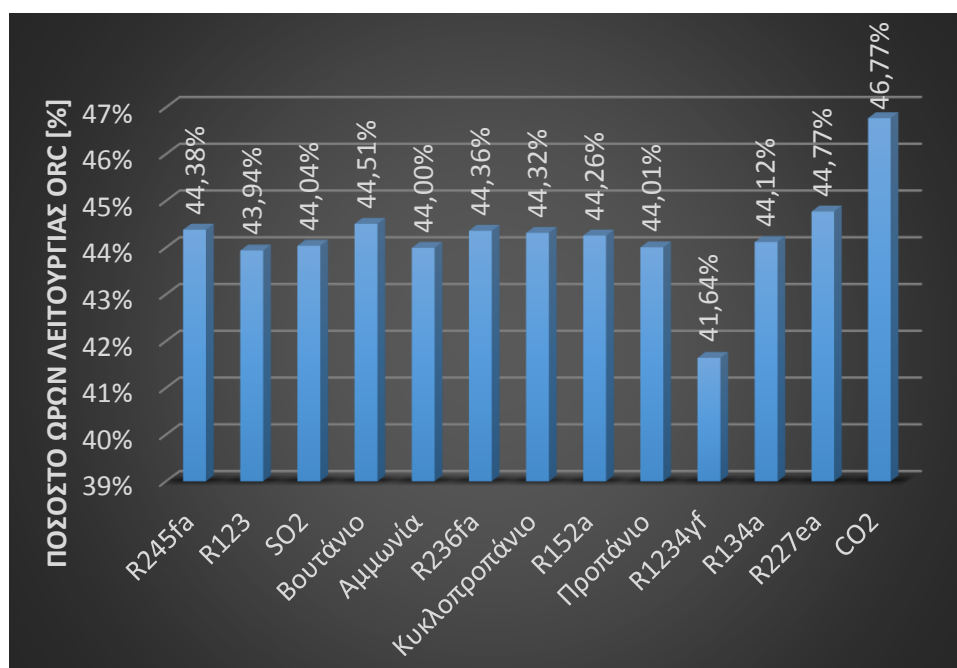


Διάγραμμα 8.21 Μέσος λόγος ισχύος στροβίλου προς θερμότητα του ατμοποιητή

Παρατηρούμε πως τον μεγαλύτερο λόγο ισχύος στροβίλου προς θερμότητα του ατμοποιητή τον παρουσιάζει το CO<sub>2</sub>. Αυτό δείχνει πως το CO<sub>2</sub> μπορεί να παράξει περισσότερη ενέργεια για δεδομένη αποθηκευμένη ενέργεια. Επομένως θα έπρεπε να είχε πιο μικρό SPB από τα άλλα οργανικά μέσα. Το μέγεθος που κάνει την διαφορά είναι η ισχύς της αντλίας. Αν και το CO<sub>2</sub> εκμεταλλεύεται πιο αποδοτικά την αποθηκευμένη ενέργεια, η ισχύς που τελικά προσδίδει στο δίκτυο είναι μικρότερη λόγω της μεγάλης ισχύς που απαιτεί η αντλία. Για αυτό τον λόγο το CO<sub>2</sub> φαίνεται να μην ταιριάζει στην συγκεκριμένη εγκατάσταση.

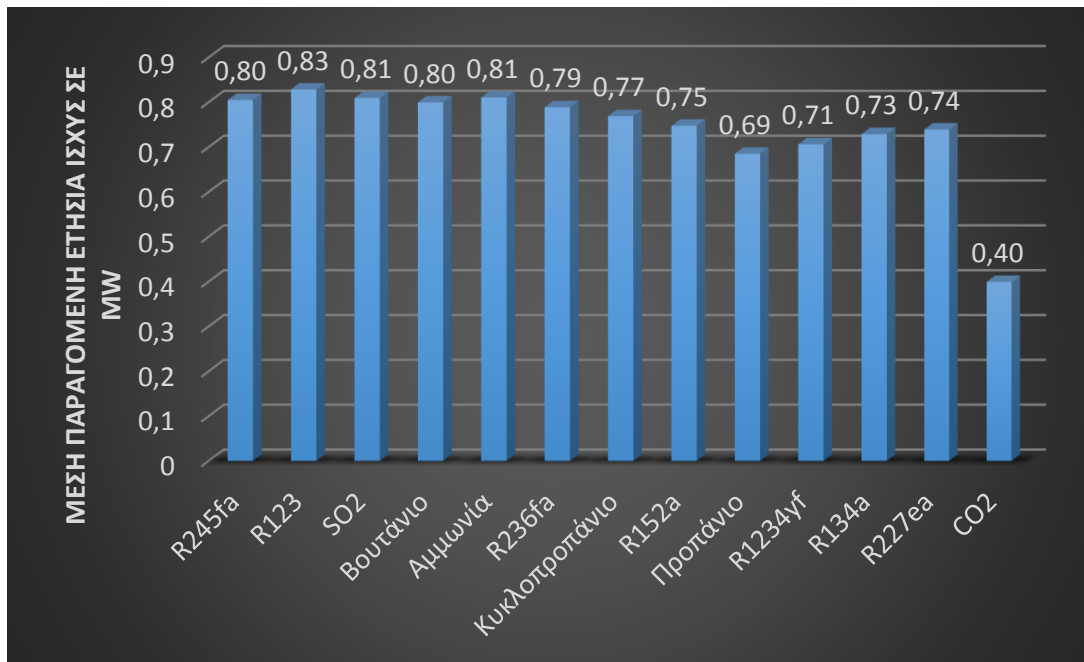
### 8.1.3.6 Παρουσίαση ωρών λειτουργίας του ORC

Σημαντικό μέγεθος αποτελούν οι ώρες λειτουργίας του ORC. Όσο περισσότερες ώρες λειτουργεί ο ORC τόσο περισσότερη η παραγόμενη ενέργεια και τόσο μεγαλύτερη η συνεισφορά της εγκατάστασης στο δίκτυο. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το ποσοστό ωρών λειτουργίας του ORC σε σχέση με τις ώρες του έτους.



Διάγραμμα 8.22 Ποσοστό ωρών λειτουργίας του κύκλου ORC

Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται πως περίπου το 45% των ωρών του έτους ο κύκλος ORC παράγει ηλεκτρική ενέργεια για κάθε οργανικό μέσο. Παρατηρώντας μόνο αυτό το διάγραμμα μπορεί να οδηγηθούμε σε λάθος συμπεράσματα καθώς το διοξείδιο του άνθρακα φαίνεται να παράγει ενέργεια περισσότερες ώρες από κάθε άλλο εργαζόμενο μέσο. Για αυτό το λόγο παρουσιάζεται και το επόμενο διάγραμμα που δείχνει την μέση παραγόμενη ισχύ για τις ώρες λειτουργίας του ORC για όλα τα οργανικά μέσα.



Διάγραμμα 8.23 Μέση ετήσια ισχύς ORC

Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται η μέση ετήσια παραγόμενη ισχύς του ORC. Σε συνδυασμό με το διάγραμμα 8.23 μπορούμε να εκτιμήσουμε τον τρόπο λειτουργίας πιο σωστά. Το διοξείδιο του άνθρακα αν και λειτουργεί πολλές ώρες, λειτουργεί σε μικρή ισχύ. Αυτό οφείλεται στην θερμότητα που μπορεί να παραλάβει στον ατμοποιητή η οποία είναι μικρότερη από τα άλλα οργανικά μέσα οδηγώντας σε μικρότερη παραγόμενη ισχύ. Από την άλλη πλευρά τα οργανικά μέσα που λειτουργούν σε υποκρίσιμο κύκλο με πρώτο το R123 πετυχαίνουν μεγαλύτερη μέση ετήσια ισχύ όπως ήταν αναμενόμενο.

## 8.2 Παρουσίαση οικονομικής ανάλυσης

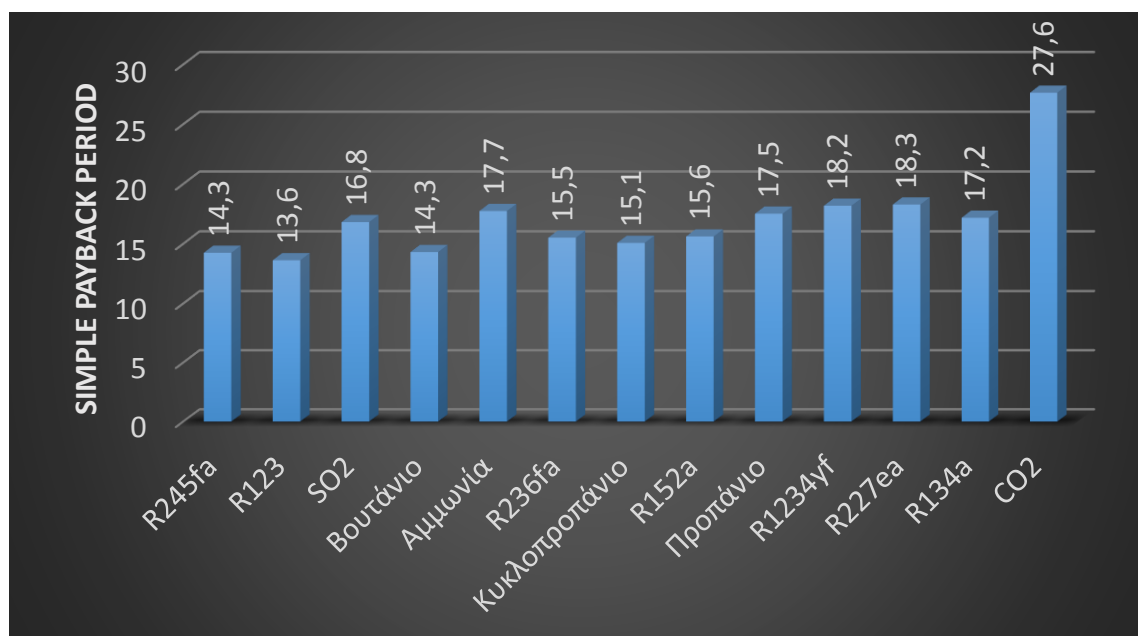
### 8.2.1 Παρουσίαση Simple Payback Period

Σύμφωνα με το κριτήριο που θέσαμε επιλέξαμε τον βέλτιστο συνδυασμό των τριών «ελεύθερων» μεταβλητών (μάζα υλικού αλλαγής φάσης (M), αριθμός ηλιακών συλλεκτών ανά σειρά (A), αριθμός σειρών ηλιακών συλλεκτών (N)) ο οποίος μας οδήγησε στον υπολογισμό του αρχικού κόστους της επιχείρησης αλλά και στα ετήσια έσοδα. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα βασικά οικονομικά μεγέθη της εγκατάστασης για κάθε εργαζόμενο μέσο.

Οργανικό μέσο	Αρχικό κόστος (εκατομ. €)	Ετήσιο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας €	Ετήσια έσοδα (χιλιάδες €)	Λόγος κόστους/ετήσιων εσόδων, SPB
R245fa	12,391	6881	869,400	14,3
R123	12,082	6400	886,600	13,6
SO <sub>2</sub>	14,582	7727	866,860	16,8
Βουτάνιο	12,394	7093	865,800	14,3
Αμμωνία	15,370	8672	866,140	17,7
R236fa	13,157	10357	847,990	15,5
Κυκλοπροπάνιο	12,482	8192	827,720	15,1
R152a	12,514	10232	801,390	15,6
Προπάνιο	12,651	17617	721,900	17,5
R1234yf	12,959	9117	712,300	18,2
R227ea	14,647	10933	800,900	18,3
R134a	13,267	26882	771,960	17,2
CO <sub>2</sub>	12,363	10860	447,200	27,6

Πίνακας 8.4 Αρχικό κόστος και έσοδα για κάθε οργανικό μέσο

Πιο αναλυτικά στον παραπάνω πίνακα φαίνεται το αρχικό κόστος της εγκατάστασης σε εκατομμύρια € στην πρώτη στήλη, το ετήσιο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας σε € του συμπιεστή στην δεύτερη στήλη και τα ετήσια έσοδα της εγκατάστασης σε χιλιάδες € στην τρίτη στήλη. Στην τέταρτη στήλη φαίνεται ο SPB. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται πιο αναλυτικά ο SPB για κάθε οργανικό μέσο.



Διάγραμμα 8.24 Simple Pay Back Period για κάθε οργανικό μέσο

Ο λόγος κόστους-ετήσια έσοδα μας δείχνει το Simple pay back, μια πρόχειρη εκτίμηση των ετών απόσβεσης της εγκατάστασης. Τον ελάχιστο SPB παρουσιάζει το οργανικό μέσο R123 με 13,6 και αμέσως μετά το R245fa με 14,3 δηλαδή σχεδόν ένα

χρόνο διαφορά. Το R123 όμως έχει μη μηδενικό δυναμικό καταστροφής του όζοντος και θα σταματήσει να πωλείται από το 2020 και μετά. Αμέσως καλύτερη επιλογή είναι το R245fa. Επομένως η επιλογής μας με καθαρά τεχνοοικονομικά κριτήρια είναι το R123, ενώ η επιλογή μας με τεχνοοικονομικά αλλά και περιβαλλοντικά κριτήρια είναι το R245fa.

Παρατηρούμε πως ενώ για όλα τα οργανικά μέσα το SPB είναι από 13,6 έως 18,3 το CO<sub>2</sub> παρουσιάζει SPB 27,7. Αν και περιβαλλοντικά φαίνεται πολλά υποσχόμενο οργανικό μέσο, οι θερμοδυναμικές του ιδιότητες δεν το κατατάσσουν ανάμεσα στις ελκυστικές περιπτώσεις αλλά μάλλον ως την χειρότερη επιλογή για την εγκατάστασής μας. Από την άλλη πλευρά τα οργανικά μέσα που χρησιμοποιούν το υποκρίσιμο κύκλο λειτουργίας τόσο για την αντλία θερμότητας όσο και για τον κύκλο ORC φαίνεται να έχουν τα καλύτερα αποτελέσματα. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός πως η υψηλή θερμοκρασία των δύο κύκλων (ατμοποιητή στον ORC και συμπυκνωτής στην αντλία θερμότητας) λειτουργούν λόγω του υλικού αλλαγής φάσης υπό σταθερή διαφορά θερμοκρασίας. Δηλαδή εφόσον το οργανικό μέσο λειτουργεί σε υποκρίσιμο κύκλο η θερμοκρασία του είναι σταθερή στον ατμοποιητή του ORC και στον συμπυκνωτή της αντλίας θερμότητας. Επίσης σταθερή είναι και η θερμοκρασία του υλικού αλλαγής φάσης. Επομένως τα θερμοκρασιακά προφίλ ταιριάζουν σε πολύ μεγάλο βαθμό σε σχέση με τους αντίστοιχους υπερκρίσιμους κύκλους. Αυτό θα φανεί στα διαγράμματα των επόμενων παραγράφων. Παράλληλα τα οργανικά μέσα που λειτουργούν σε υποκρίσιμους κύκλους αλλά χρειάζονται μεγάλους βαθμούς υπερθέρμανσης (SO<sub>2</sub> , αμμωνία) χάνουν αυτό το πλεονέκτημα παρουσιάζοντας μεγαλύτερο SPB.

Συμπερασματικά η εγκατάσταση είναι πιο αποδοτική με οργανικά μέσα που λειτουργούν σε υποκρίσιμους κύκλους τόσο στην αντλία θερμότητας, όσο και στον ORC, στις θερμοκρασίες του συστήματος διότι ταιριάζει με τις συνθήκες μεταφοράς θερμότητας της εγκατάστασης. Το οργανικό μέσο που παρουσιάζει βέλτιστα αποτελέσματα με θερμοδυναμικά κριτήρια είναι το R123, ενώ αν θεωρήσουμε και περιβαλλοντικά κριτήρια βέλτιστη επιλογή αποτελεί το R245fa.

## **8.2.2 Αναλυτική οικονομική ανάλυση**

Προκειμένου να γίνει αναλυτικά η οικονομική ανάλυση της εγκατάστασης θα πρέπει να γίνουν ορισμένες παραδοχές σε οικονομικά μεγέθη. Θα εξεταστούν δυο σενάρια για την λειτουργία της εγκατάστασης. Στο πρώτο σενάριο θα υποθέσουμε πως όλο το αρχικό κεφάλαιο θα δοθεί από ίδια κεφάλαια με μηδενική φορολόγηση



των κερδών ενώ στο δεύτερο σενάριο θα υποθέσουμε πως εγκρίνεται δάνειο ίσο με το 50% της αρχικής επένδυσης και φορολόγηση 35% επί των κερδών. Τα μεγέθη που θα εξετάσουμε είναι η Καθαρή Παρούσα Αξία (ΚΠΑ), και ο Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (EBA). Αρχικά θα πρέπει να περιγράψουμε όλα τα εμπλεκόμενα μεγέθη. Το επιτόκιο αναφέρεται στο επιτόκιο δανεισμού από την τράπεζα. Η υπολειμματική αξία δείχνει το ποσοστό της αξίας της εγκατάστασης επί της αρχικής αξίας στο τέλος των 25 χρόνων που γίνεται η ανάλυση. Το κόστος συντήρησης προσδιορίζει τα ετήσια έξοδα για την συντήρηση της εγκατάστασης επί της αρχικής αξίας. Ο ρυθμός απόσβεσης δείχνει τα έτη οικονομικής απόσβεσης του αρχικού κόστους. Τα ίδια κεφάλαια είναι το ποσοστό των χρημάτων του ιδιώτη που θα επενδύσει στην εγκατάσταση τα οποία υποβάλλονται πριν την λειτουργία της εγκατάστασης. Η επιχορήγηση είναι η συνεισφορά του κράτους ή άλλων φορέων στην κατασκευή της εγκατάστασης επί του αρχικού κόστους και το δάνειο είναι τα χρήματα που θα διατεθούν από τράπεζες με την μορφή δανείου. Τέλος ο φόρος είναι η ετήσια φορολόγηση επί των εσόδων που εμφανίζει ετησίως η εγκατάσταση. Αν δεν εμφανίζει κέρδος για κάποιο έτος τότε δεν υπάρχει και φορολόγηση για το συγκεκριμένο έτος. Οι παραδοχές που γίνονται φαίνονται στον επόμενο πίνακα.

Οικονομικό μέγεθος	Τιμή
Επιτόκιο i	8%
Υπολειμματική αξία	0%
Κόστος συντήρησης	2%
Ρυθμός απόσβεσης	10%
Ιδία κεφάλαια	100%
Επιχορήγηση	0%
Δάνειο	0%
Φόρος	0%

Πίνακας 8.5 Οικονομικά μεγέθη πρώτου σεναρίου

Με αυτά τα δεδομένα τα αποτελέσματα που προκύπτουν φαίνονται παρακάτω.

Οργανικό μέσο	ΚΠΑ (€)	EBA (%)
R245fa	-1.612.163 €	6,10%
R123	-1.417.810 €	6,32%
SO2	-2.516.788 €	5,31%
Βουτάνιο	-1.627.661 €	6,08%
Αμμωνία	-2.841.371 €	5,05%
R236fa	-2.009.794 €	5,69%
Κυκλοπροπάνιο	-1.814.566 €	5,83%
R152a	-1.932.021 €	5,66%
Προπάνιο	-2.303.110 €	5,11%
R1234yf	-2.466.796 €	4,93%
R227ea	-2.804.837 €	4,91%
R134a	-2.356.141 €	5,20%
CO2	-3.274.625 €	2,95%

Πίνακας 8.6 Αποτελέσματα οικονομικής ανάλυσης (ΚΠΑ, EBA)

Στον παραπάνω πίνακα φαίνονται τα αποτελέσματα από την οικονομική ανάλυση που έγινε. Όπως φαίνεται καμία από τις υπάρχουσες περιπτώσεις δεν φαίνεται οικονομικά ελκυστική καθώς εμφανίζουν ΚΠΑ<0 και ΕΒΑ<8%. Επομένως δεν συμφέρει η κατασκευή της εγκατάστασης με οικονομικά κριτήρια για αυτήν την περίπτωση. Μια πιο συμφέρουσα υπόθεση θα ήταν η εξασφάλιση δανείου με σκοπό την καταβολή των χρημάτων σταδιακά.

Στο δεύτερο σενάριο που θα εξετάσουμε γίνεται μια πιο πολύπλοκη οικονομική ανάλυση που περιλαμβάνει τις παρακάτω παραδοχές.

Οικονομικό μέγεθος	Τιμή
Επιτόκιο i	8,00%
Υπολειμματική αξία	25,00%
Κόστος συντήρησης	2,00%
Ρυθμός απόσβεσης	10,00%
Ιδία κεφάλαια	50,00%
Επιχορήγηση	0,00%
Δάνειο	50,00%
Φόρος	35,00%

Πίνακας 8.7 Οικονομικά μεγέθη πρώτου σεναρίου

Όπως φαίνεται στον παραπάνω πίνακα θεωρούμε την λήψη δανείου 50% του αρχικού κόστους και πάλι χωρίς επιχορήγηση αφού το έχουμε υποθέσει και για την τιμή πώλησης της παραγόμενης ενέργειας. Επιπλέον θεωρούμε πως η εγκατάσταση έχει υπολειμματική αξία 25% του αρχικού κόστους κάτι το οποίο καθιστά την ανάλυση πιο ρεαλιστική. Τέλος υποθέτουμε και φορολόγηση των κερδών 35% με σκοπό και πάλι την ορθότερη προσομοίωση των αποτελεσμάτων. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης φαίνονται παρακάτω.

Οργανικό μέσο	ΚΠΑ (€)	ΕΒΑ (%)
R245fa	213.204 €	8,42%
R123	308.085 €	8,61%
SO2	-151.809 €	7,73%
Βουτάνιο	203.436 €	8,40%
Αμμωνία	-282.588 €	7,52%
R236fa	32.705 €	8,06%
Κυκλοπροπάνιο	90.904 €	8,18%
R152a	17.815 €	8,04%
Προπάνιο	-209.448 €	7,57%
R1234yf	-284.529 €	7,42%
R227ea	-332.425 €	7,40%
R134a	-181.224 €	7,65%
CO <sub>2</sub>	-870.245 €	5,91%

Πίνακας 8.8 Αποτελέσματα οικονομικής ανάλυσης (ΚΠΑ, ΕΒΑ)

Τα αποτελέσματα αυτήν την φορά είναι αρκετά διαφορετικά. Οι επενδύσεις με οργανικά μέσα τα R123, R245fa, βουτάνιο, κυκλοπροπάνιο, R236fa και R152a

φαίνονται έστω και οριακά να συμφέρουν οικονομικά αφού εμφανίζουν ΚΠΑ>0 και EBA>8%. Και στο δεύτερο σενάριο παρατηρούμε πως η επένδυση για τα περισσότερα οργανικά μέσα δεν συμφέρει να κατασκευαστεί. Ακόμη και για τα οργανικά μέσα με EBA>8% βλέπουμε πως η εγκατάσταση οριακά περνά αυτήν την τιμή καθιστώντας την μια όχι και τόσο αποδοτική επένδυση. Ιδιαίτερα για την περίπτωση του CO<sub>2</sub> παρατηρούμε πως σε καμία από τις δυο περιπτώσεις η επένδυση δεν είναι αποδοτική. Ένας κύριος λόγος που τα αποτελέσματα δεν είναι ενθαρρυντικά αποτελεί η υψηλή φορολογία που δυστυχώς υπάρχει στην Ελλάδα. Με χαμηλότερη φορολογία τα αποτελέσματα θα ήταν αρκετά πιο θετικά αλλά στην Ελλάδα ακόμη και η υπόθεση του δανείου ύψους 50% του αρχικού κεφαλαίου που επιδρά θετικά στα αποτελέσματα φαίνεται αρκετά δύσκολα επιτεύξιμη.

## Κεφάλαιο 9<sup>ο</sup>: Συμπεράσματα

### 9.1 Συμπεράσματα εγκατάστασης

Στην διπλωματική αυτή εργασία πραγματοποιήθηκε μελέτη συστήματος εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος μέσω κύκλου ORC με ενδιάμεση αποθήκευση. Η μελέτη αυτή έγινε για 13 διαφορετικά εργαζόμενα μέσα και εφαρμόστηκε για τα δεδομένα του νησιού της Καρπάθου.

Η εγκατάσταση λειτούργησε σε συνθήκες που καθορίστηκαν από την τοποθεσία. Οι θερμοκρασίες νερού και αέρος καθώς και η ηλιακή ακτινοβολία εκτιμήθηκαν βάσει του νησιού που επιλέξαμε. Το σύστημα τροφοδοτείται με ενέργεια από ηλιακούς συλλέκτες αποθηκεύοντας θερμική ενέργεια σε υλικό αλλαγής φάσης. Την αποθηκευμένη ενέργεια την εκμεταλλευόμαστε χρησιμοποιώντας κύκλο ORC. Για την εγκατάσταση επιλέχθηκαν 13 οργανικά μέσα με σκοπό την ανεύρεση εκείνου που λειτουργεί αποδοτικότερα. Χρησιμοποιήθηκαν υποκρίσιμοι και υπερκρίσιμοι κύκλοι λειτουργίας τόσο για την λειτουργία του κύκλου ORC όσο και για την λειτουργία της αντλίας θερμότητας. Το οργανικό μέσο που παρουσίασε τα καλύτερα θερμοδυναμικά αποτελέσματα είναι το **R123**. Τα μεγέθη που μας δείχνουν την καλή λειτουργία του μέσου είναι ο μέσος ετήσιος βαθμός απόδοσης του ORC (14,07%) , ο μέσος ετήσιος COP (9,1601) και ο συνολικός βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης (6,56%). Πρόβλημα με το R123 αποτελεί το γεγονός πως έχει μη μηδενικό ODP. Επομένως επιλέγοντας οργανικό μέσο με μηδενικό ODP επιλέγουμε το **R245fa**. Το R245fa παρουσιάζει τον αμέσως καλύτερο συνδυασμό των τριών βασικών θερμοδυναμικών μεγεθών ( $\eta_{ORC}=13,42\%$ ,  $COP=8,31$   $\eta_{εγκ}=6,04\%$ ). Η επιλογή όμως του καταλληλότερους οργανικού μέσου δεν έγινε με θερμοδυναμικά κριτήρια μόνο. Η επιλογή έγινε κυρίως με οικονομικά και περιβαλλοντικά κριτήρια. Εκτιμώντας το αρχικό κόστος της εγκατάστασης αλλά και τα έσοδα από την λειτουργία της με βάση την ζήτηση του νησιού καταλήγουμε στον ορισμό του Simple Payback Period με βάση το οποίο επιλέγουμε το οργανικό μέσο και όχι μόνο. Έχοντας σαν ελεύθερες μεταβλητές την μάζα του υλικού αλλαγής φάσης, τις σειρές των ηλιακών συλλεκτών και τους ηλιακούς συλλέκτες ανά σειρά προσδιορίσαμε τον κατάλληλο συνδυασμό τους με σκοπό την εύρεση του ελάχιστου SPB για κάθε οργανικό μέσο. Με αυτόν τον τρόπο καταλήξαμε στην επιλογή του R123. Όμως λαμβάνοντας υπόψιν το μη μηδενικό ODP καταλήγουμε στο **R245fa**.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται ο βέλτιστος συνδυασμός των τριών ελεύθερων μεταβλητών και ο αντίστοιχος SPB για κάθε οργανικό μέσο όπως προέκυψε.

Οργανικό μέσο	Μάζα υλικού αλλαγής φάσης (kg)	Αριθμός συλλεκτών ανά σειρά (A)	Αριθμός σειρών ηλιακών συλλεκτών (N)	Λόγος κόστους/ετήσιων εσόδων, SPB
R245fa	1.200.000	160	100	14,3
R123	1.200.000	150	100	13,6
SO <sub>2</sub>	1.500.000	160	120	16,8
Βουτάνιο	1.200.000	160	100	14,3
Αμμωνία	1.600.000	170	120	17,7
R236fa	1.300.000	170	100	15,5
Κυκλοπροπάνιο	1.200.000	180	90	15,1
R152a	1.200.000	180	90	15,6
Προπάνιο	1.200.000	180	90	17,5
R1234yf	1.200.000	210	80	18,2
R227ea	1.400.000	200	100	18,3
R134a	1.300.000	170	100	17,2
CO <sub>2</sub>	1.000.000	210	80	27,6

Πίνακας 9.1 Προσδιορισμός ελεύθερων μεταβλητών με βάση το Simple Payback Period

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται συγκεντρωτικά τα θερμοδυναμικά αποτελέσματα του οργανικού μέσου που επιλέχθηκε το **R245fa**.

<b>Αντλία θερμότητας</b>	
Ονομαστική ισχύς συμπιεστή	263,6 kW
Μέγιστη ισχύς ατμοποιητή	1913,4 kW
Μέγιστη ισχύς συμπυκνωτή	2177 kW
Μέγιστη παροχή μάζας οργανικού μέσου	19,25 kg/s
Μέσος ετήσιος COP	8,31
Μέση ετήσια πίεση ατμοποιητή	1,1336 MPa
Πίεση συμπυκνωτή	2,0495 MPa
Μέση ετήσια θερμοκρασία ατμοποιητή	95,1 °C
Θερμοκρασία συμπυκνωτή	123 °C
<b>ORC</b>	
Ονομαστική ισχύς στροβίλου	1000 kW
Μέγιστη πίεση αντλίας	43,97 kW
Μέγιστη ισχύς ατμοποιητή	7411,7 kW
Μέγιστη ισχύς συμπυκνωτή	6455,7 kW
Μέγιστη παροχή μάζας οργανικού μέσου	31,17 kg/s
Μέσος βαθμός απόδοσης	13,42%
Πίεση ατμοποιητή	1,6045 MPa
Μέση ετήσια πίεση συμπυκνωτή	0,17021 MPa
Θερμοκρασία ατμοποιητή	111 °C
Μέση ετήσια θερμοκρασία συμπυκνωτή	28,4 °C
<b>Συνολικός βαθμός απόδοσης εγκατάστασης</b>	<b>6,04%</b>

Πίνακας 9.2 Συγκεντρωτικά θερμοδυναμικά αποτελέσματα για το R245fa

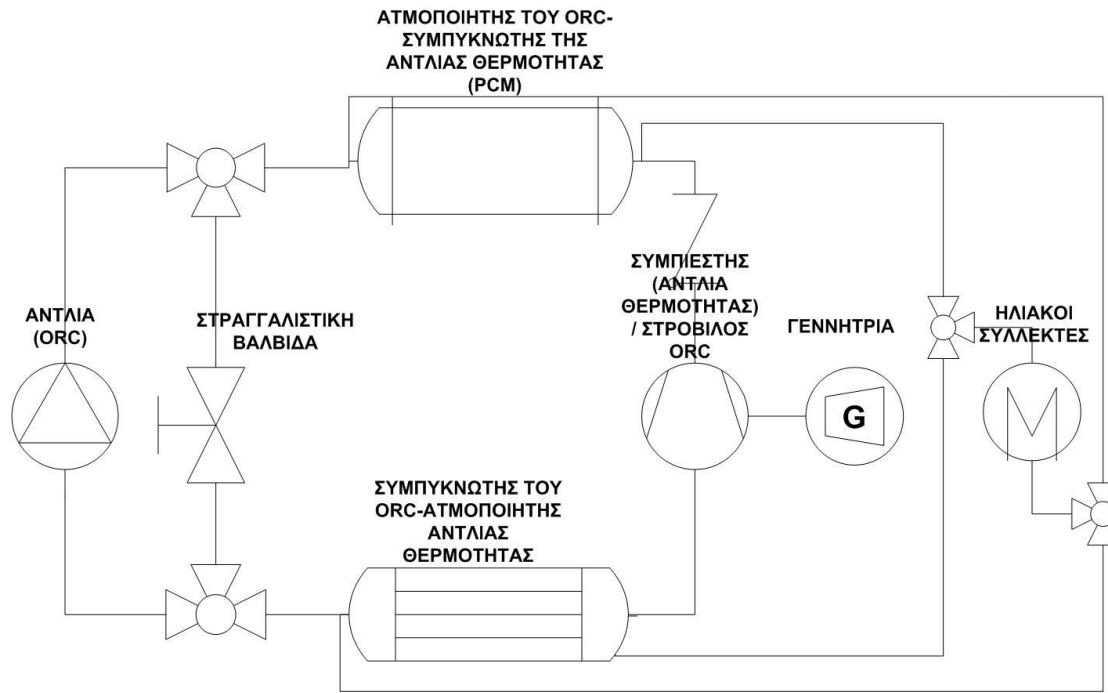
Η ανάλυση έγινε για ονομαστική ισχύς του στροβίλου ίση με 1MW. Επομένως ο βαθμός απόδοσης του ORC που προέκυψε φαίνεται μεγάλος σε σχέση με τους συνήθεις. Αυτό οφείλεται στο μέγεθος της εγκατάστασης αφού ο ισεντροπικός βαθμός του στροβίλου τέτοιας ονομαστικής ισχύς (0,85) επιτρέπει την αύξηση και του βαθμού απόδοσης του ORC. Επομένως οι βαθμοί απόδοσης αν και μεγαλύτεροι από τους συνήθεις είναι λογικοί.

Συμπερασματικά σε αυτήν την διπλωματική εργασία παρουσιάζεται μια πηγή θερμότητας, όπως το PCM, με σταθερή θερμοκρασία. Για αυτόν τον λόγο ο υποκρίσιμος κύκλος τόσο της αντλίας θερμότητας όσο και του ORC «ταιριάζουν» ομαλότερα θερμοκρασιακά με την σταθερή θερμοκρασία του PCM. Αυτός είναι και ο λόγος που εμφανίζουν καλύτερα θερμοδυναμικά και οικονομικά αποτελέσματα. Οι υπερκρίσιμοι κύκλοι επιπλέον καταναλώνουν μεγαλύτερη ισχύ στην αντλία απορροφώντας ισχύ από τον στρόβιλο με αποκορύφωση την περίπτωση του CO<sub>2</sub> που καταναλώνει ακόμη περισσότερη. Για αυτό το λόγο αν και η διαφορά του βαθμού απόδοσης υποκρίσιμου-υπερκρίσιμου κύκλου ORC είναι σχετικά μικρή, η διαφορά στο SPB είναι σαφώς μεγαλύτερη και εμφανής.

## 9.2 Μελλοντική έρευνα

Όπως αναφέραμε η μελέτη έγινε για παραγωγή ισχύος σε νησί με ονομαστική ισχύ στροβίλου 1 MW. Σαν μελλοντική συνέχιση αυτής της διπλωματικής θα μπορούσε να μελετηθεί μια παρόμοια εγκατάσταση με τριπαραγωγή με σκοπό την παραγωγή ψύξης. Επιπλέον σαν βελτίωση των υπολογισμών θα μπορούσε να μελετηθεί αναλυτικά η χρήση του τροφοδοτικού δοχείου ως μέσο αποθήκευσης θερμικής ενέργειας με σκοπό την θέρμανση του υλικού αλλαγής φάσης τις πρωινές ώρες τους χειμερινούς μήνες.

Ένας εναλλακτικός τρόπος λειτουργίας της εγκατάστασης και στόχος μελλοντικής έρευνας θα ήταν η χρήση ενός συμπιεστή ο οποίος θα μπορούσε να λειτουργήσει και σαν στρόβιλος μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο τα απαιτούμενα μέρη της εγκατάστασης. Σε αυτήν την περίπτωση ο συμπιεστής θα λειτουργεί κανονικά κατά την χρήση της αντλίας θερμότητας, ενώ κατά την χρησιμοποίηση του κύκλου ORC για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος θα αλλάζει την λειτουργία του λειτουργώντας σαν στρόβιλος. Αυτή η αλλαγή δεν επηρεάζει τον τρόπο λειτουργίας της εγκατάστασης αναφορικά με τις ώρες φόρτισης και παραγωγής ενέργειας αφού και πάλι μόνο μία από τις δύο διεργασίες γίνεται κάθε ώρα. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνονται τα μηχανολογικά τμήματα της εγκατάστασης αυτής της περίπτωσης.



Διάγραμμα 9.1 Πλήρης μηχανολογική εγκατάσταση

Για να μπορέσει να λειτουργήσει ομαλά η εγκατάσταση θα πρέπει ο συμπιεστής να έχει την ίδια ονομαστική ισχύς με τον στρόβιλο. Η εγκατάσταση που αναλύθηκε για την περίπτωση του R245fa έχει ονομαστική ισχύς του στρόβιλου 1 MW και ονομαστική ισχύς του συμπιεστή 0,264 MW. Επομένως θα πρέπει να περιορίσουμε την ονομαστική ισχύ του στρόβιλου αφού η ισχύς του συμπιεστή έχει άνω όριο με σκοπό να μην δημιουργεί μεγάλες μεταβολές στην ηλεκτρική ζήτηση του νησιού επιβαρύνοντας τις diesel γεννήτριες. Περιορίζοντας την ονομαστική ισχύ του στρόβιλου θα πρέπει να λάβουμε υπόψιν όλες τις αναγκαίες παραμέτρους που επηρεάζονται. Αρχικά θα πρέπει να καθοριστεί εκ νέου η μάζα του υλικού αλλαγής φάσης, ο αριθμός των ηλιακών συλλεκτών ανά σειρά και ο αριθμός των σειρών των ηλιακών συλλεκτών. Αυτήν την φορά θα έχουμε όχι μόνο να βρούμε τον βέλτιστο συνδυασμό των τριών αυτών ελεύθερων μεταβλητών αλλά και να ταιριάξουμε την ισχύ του συμπιεστή που θα προκύψει ανάλογα με τις ανάγκες του συστήματος με την ισχύ του στρόβιλου. Θα πρέπει να υπάρχει μια ανοχή ανάμεσα σε αυτές τις δυο τιμές αφού η ονομαστική ισχύς του συμπιεστή προκύπτει ανάλογα με τις ανάγκες της εγκατάστασης και δεν καθορίζεται εκ των προτέρων όπως η ισχύς του στρόβιλου. Το πρόβλημα στο ταίριασμα των τιμών είναι πως η ονομαστική ισχύς του συμπιεστή είναι πάντα μικρότερη από εκείνη του στρόβιλου και μειώνεται κάθε φορά που μειώνεται η μάζα του υλικού αλλαγής φάσης. Μειώνοντας την ισχύ του στρόβιλου, η βέλτιστη μάζα του υλικού αλλαγής φάσης μειώνεται και επομένως μειώνεται και η ονομαστική ισχύς του συμπιεστή. Θα πρέπει επομένως να βρεθεί ο κατάλληλος συνδυασμός των τριών ελεύθερων μεταβλητών και της ονομαστικής

ισχύς του στροβίλου που θα ελαχιστοποιεί το Simple Payback Period και δίνει ονομαστική ισχύς του συμπιεστή περίπου ίση με εκείνη του στροβίλου. Σαφέστατα θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν πως το κόστος της εγκατάστασης θα είναι μικρότερο αφού απαιτούνται λιγότερα μηχανολογικά μέρη. Συμπερασματικά η εναλλακτική αυτή μέθοδος λειτουργίας της εγκατάστασης περιορίζει την παραγόμενη ετήσια ισχύ της εγκατάστασης και την επίδρασή της στην ηλεκτρική ζήτηση του νησιού αλλά από την άλλη πλευρά την καθιστά πιο συμπαγή και ενδεχομένως πιο συμφέρουσα οικονομικά κάτι το οποίο χρειάζεται περαιτέρω ανάλυση για να διερευνηθεί.



## Κεφάλαιο 10<sup>ο</sup>: Βιβλιογραφία

1. Α. Ζερβός, *Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας*, Αθήνα 2007.
2. Πληροφορίες για την Κάρπαθο. Διαθέσιμες από: <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9A%CE%AC%CF%81%CF%80%CE%B1%CE%B8%CE%BF%CF%82>
3. <http://kpe-kastor.kas.sch.gr/energy1/alternative/technologia.htm>
4. Φωτοβολταϊκά συστήματα. Διαθέσιμες από: <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A6%CF%89%CF%84%CE%BF%CE%B2%CE%BF%CE%BB%CF%84%CE%B1%CF%8A%CE%BA%CF%8C%CF%83%CF%8D%CF%83%CF%84%CE%B7%CE%BC%CE%B1>
5. Ηλιακά θερμικά συστήματα. Διαθέσιμο από: <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%97%CE%BB%CE%B9%CE%BF%CE%B8%CE%B5%CF%81%CE%BC%CE%B9%CE%BA%CE%AC%CF%83%CF%85%CF%83%CF%84%CE%AE%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B1>
6. Δάρλας Αλέξανδρος, «Συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα», Ιούλιος 2012
7. Αιολική ενέργεια. Διαθέσιμο από: <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CE%B9%CE%BF%CE%BB%CE%B9%CE%BA%CE%AE%CE%B5%CE%BD%CE%AD%CF%81%CE%B3%CE%B5%CE%B9%CE%B1>
8. Ρίππη Αικατερίνη, «Μαθηματική προσομοίωση υβριδικών συστημάτων. Το σύστημα της Ικαρίας.», Ιούνιος 2013
9. «Thermal energy storage, Technology Brief», [www.etsap.org](http://www.etsap.org) [www.irena.org](http://www.irena.org) January 2013
10. Halime O. Paksoy, “Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption – Fundamentals, Case Studies and Design”, NATO Science Series, (2007).
11. A. Pasupathy, R. Velraj, R. V. Seeniraj, “Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments”, 2006.
12. Μαχαίρα Ελένη, «Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας με χρήση υλικών αλλαγής φάσης PCM», Ιούλιος 2010
13. Πληροφορίες για οργανικό μέσο R245fa. Διαθέσιμες από: [http://www.ecetoc.org/index.php?mact=MCSOap,cntnt01,details,0&cntnt01document\\_id=114&cntnt01returnid=91](http://www.ecetoc.org/index.php?mact=MCSOap,cntnt01,details,0&cntnt01document_id=114&cntnt01returnid=91)
14. Πληροφορίες για τα επιλεγμένα οργανικά μέσα. Διαθέσιμα από: [http://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_refrigerants](http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_refrigerants)
15. Mike Thompson, *The Future of Refrigerants: Where Do We Go From Here?*, (2012) <http://www.trane.com/commercial/uploads/pdf/cso/121/The%20Future%20of%20Refrigerants.pdf>
16. Χ.Τζιβανίδης, «Υλικά αλλαγής φάσης», Διαφάνειες για το μάθημα «Θερμική συμπεριφορά κτιρίων»

17. J. Waschull, R. Müller and S. Römer, Investigation of Phase Change Materials for Elevated Temperatures, (2009)
18. Υλικά αλλαγής φάσης (PCM). Διαθέσιμο από:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Phase-change\\_material](https://en.wikipedia.org/wiki/Phase-change_material)
19. Στοιχεία ενεργειακού συστήματος-Ηλεκτρισμός  
<http://www.rae.gr/old/SUB3/3B/3b3.htm>
20. Πληροφοριακό δελτίο παραγωγής στα μη διασυνδεδεμένα νησιά για το έτος 2011. Διαθέσιμα από:  
<https://www.dei.gr/Documents2/%CE%94%CE%95%CE%9B%CE%A4%CE%99%CE%91%20%CE%A4%CE%99%CE%9C%CE%A9%CE%9D/08.%CE%A0%CE%9B%CE%97%CE%A1%CE%9F%CE%A6%CE%9F%CE%A1%CE%99%CE%91%CE%9A%CE%9F%20%CE%94%CE%95%CE%9B%CE%A4%CE%99%CE%9F%20-%202011%20-%CE%91%CF%8D%CE%B3%CE%BF%CF%85%CF%83%CF%84%CE%BF%CF%82%20-%2021092011.pdf>
21. Σημειώσεις Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, «Δυναμική Εξατμισοδιαπνοή»
22. Γαγλία Αθηνά, «Απόδοση φωτοβολταϊκών συστημάτων σε πραγματικές συνθήκες – Δυνατότητα εφαρμογής στα ελληνικά κτίρια», Παρουσίαση για την Ημερίδα «Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας», (2009)
23. Κ. Α. Αντωνόπουλου, «Κλιματισμός», Μέρος πρώτο, Αθήνα 2011
24. Κ. Α. Αντωνόπουλου, «Θερμικά-Ηλιακά συστήματα», Μέρος πρώτο, Αθήνα 2011
25. «Κλιματικά δεδομένα ελληνικών περιοχών», ΤΟΤΕΕ-20701-3/2010, Α Έκδοση, Αθήνα, Ιούλιος 2010
26. «Τεχνολογία ηλιακών συστημάτων Logasol για την Παρασκευή ζεστού νερού χρήσης και την υποστήριξη θέρμανσης», Τεχνικό εγχειρίδιο, (2007)  
[http://www.buderus.gr/files/201106011342050.Buderus\\_Solar.pdf](http://www.buderus.gr/files/201106011342050.Buderus_Solar.pdf)
27. Πληροφορίες για Erythritol (PCM). Διαθέσιμες από:  
<http://www.molbase.com/en/149-32-6-moldata-40451.html>
28. Reza Rowshanzadeh, «Performance and cost evaluation of Organic Rankine Cycle at different technologies»
29. <http://renewablegreece.wikispaces.com/%CE%91%CE%B9%CE%BF%CE%BB%CE%B9%CE%BA%CE%AE+%CE%95%CE%BD%CE%AD%CF%81%CE%B3%CE%B5%CE%B9%CE%B1>
30. Κόστος αντλίας θερμότητας. Διαθέσιμο από:  
<http://info.cat.org.uk/questions/heatpumps/how-much-will-heat-pump-cost>
31. Πληροφορίες για παραβολικά θερμικά συστήματα. Διαθέσιμες από:  
<http://rackam.com/en/products/s10/>
32. Alexander Cohr Pachai, «Packaged ammonia heat pumps», (2010)
33. «Industrial heat pumps», Emerson climate technologies, (2011)
34. Λιαμπότη Α. Μαρία, «Μελέτη και διαστασιολόγηση υβριδικού συστήματος στην Κάρπαθο», Ιούλιος 2012
35. Αντλία θερμότητας. Διαθέσιμο από:  
<https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CE%BD%CF%84%CE%BB%CE%AF%CE>

[%B1 %CE%B8%CE%B5%CF%81%CE%BC%CF%8C%CF%84%CE%B7%CF%84%CE%B1%CF%82](#)

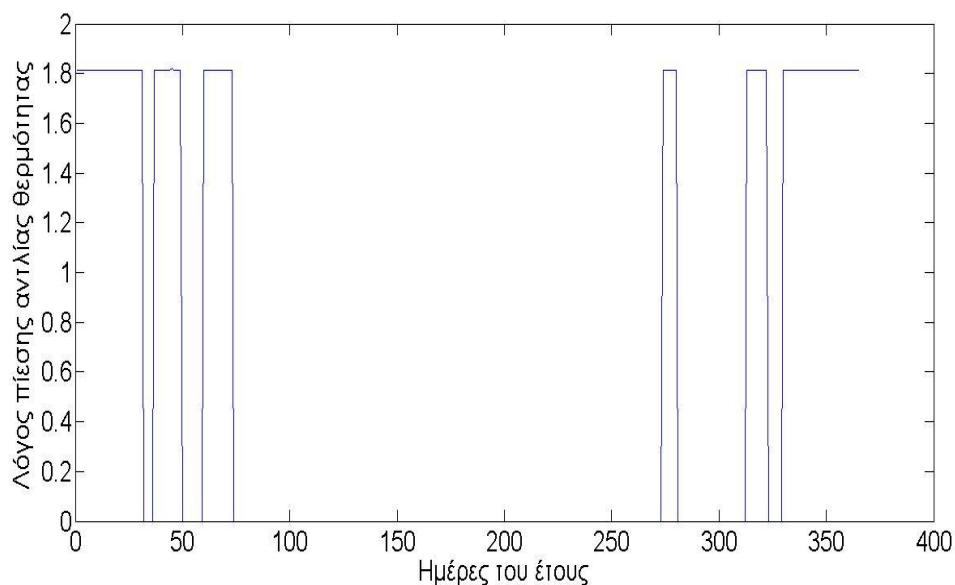
36. Φωτοβολταϊκά πάνελ. Διαθέσιμο από: <http://www.smart-cover.gr/images/AXITEC%20300W.pdf>
37. Μηνιαία Δελτία ΑΠΕ και Θερμικής Παραγωγής στα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά. Διαθέσιμα από: <http://www.deddie.gr/el/miniaia-deltia-ape-kai-thermikis-paragwgis-sta-mi-diasundedemena-nisia>
38. İbrahim Halil Yılmaz, Hakan Hayta, Recep Yumrutaş, Mehmet Sait Söylemez, «Performance Testing of A Parabolic Trough Collector Array»
39. ΥΠΕΚΑ, Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Διαθέσιμο από : <http://www.ypeka.gr/?tabid=285>
40. Χάρτης της Καρπάθου. Διαθέσιμος από: <https://www.google.gr/maps/@35.6888541,26.6071189,333961m/data=!3m1!1e3>
41. ΚΑΠΕ. Αιολικό δυναμικό Καρπάθου. Διαθέσιμο από: <http://aims.cres.gr/grwind150/viewer.htm>
42. Werner Weiss, Matthias Rommel, Solar Heat for Industrial Processes, Medium Temperature collectors (2005)
43. Teaching engineering, [https://www.teachengineering.org/view\\_activity.php?url=collection/cub/\\_activities/cub\\_earth/cub\\_earth\\_lesson04\\_activity2.xml](https://www.teachengineering.org/view_activity.php?url=collection/cub/_activities/cub_earth/cub_earth_lesson04_activity2.xml)
44. Phase change materials. Διαθέσιμο από: <http://195.20.235.12/en/>
45. Steven Lecompte, Sanne Lemmens , Henk Huisseune , Martijn van den Broek, Michel De Paepe, «Multi-Objective Thermo-Economic Optimization Strategy for ORCs Applied to Subcritical and Transcritical Cycles for Waste Heat Recovery», (2015)
46. <http://www.econews.gr/2011/07/26/anemogennitries-vraxonisides/>
47. Constantin LUCA1, Daniel DRAGOMIR-STANCIU, Organic Rankine Cycle with solar heat storage in paraffin wax, (2015)
48. Kyoung Hoon Kim and Chul Ho Han. A Review on Solar Collector and Solar Organic Rankine Cycle (ORC) Systems. (2015)
49. E. Bou Lawz Ksayera. Design of an ORC system operating with solar heat and producing sanitary hot water. France (2011)
50. D. Casartelli, M. Binotti, P. Silva, E. Macchi, E. Roccaro, T. Passera. Power block off-design control strategies for indirect solar ORC cycles. (2014)
51. Villarini M., Bocci E., Moneti M., Di Carlo A., Micangeli A. State of art of small scale solar powered ORC systems: a review of the different typologies and technology perspectives. (2013)

52. K. BOGUĆKA-BYKUĆ, W. WŁOSIŃSKI, and S. BYKUĆ. Towards development of a prototype high-temperature latent heat storage unit as an element of a RES-based energy system (part 1). (2014)
53. S Halder, S Singh, S K Saha. Effect of metal matrix and foam porosity on thermal performance of latent heat thermal storage for solar thermal power plant. (2015)
54. M. Astolfi. Techno-economic optimization of low temperature CSP systems based on ORC with screw expanders. (2014)
55. F. Ferrara, A. Gimelli, A. Luongo. Small-scale concentrated solar power (CSP) plant: ORCs comparison for different organic fluids. (2013)
56. D. Krüger, A. Kenissi, S. Dieckmann, C. Bouden, A. Baba, A. Oliveira, J. Soares, E. Rojas Bravo, R. Ben Cheikh, F. Orioli, D. Gasperini, K. Hennecke, H. Schenk. Pre-design of a mini CSP plant. (2014)
57. B. Kanimozhi, B. R. Ramesh Babu. Experimental Study of Thermal Energy Storage in Solar System Using PCM System. (2012)
58. Παπαμανώλης Νίκος, Εφαρμογές των υλικών αλλαγής φάσης στα κτίρια.
59. Dave Pearson, Philippe Nellissen, Application of industrial heat pumps Proven applications in 2012 for Megawatt+ Heatpumps within a technical, commercial and sustainable framework, 2012
60. Δεδομένα από τον κ. Καρανικόλαο, υπεύθυνο για τον ΑΣΠ. Καρπάθου
61. Δεδομένα από τον κ.Μουζάκη, προϊστάμενο του τμήματος αιολικής ενέργειας του ΚΑΠΕ και κ.Στεφανάτο, του τμήματος αιολικής ενέργειας του ΚΑΠΕ
62. Δημητρακόπουλος Παναγιώτης, «Συστήματα Συμπαγωγής και Τριπαγωγής με αξιοποίηση των πηγών βιομάζας και ηλιακής ενέργειας μέσω του συνδυασμού των κύκλων ORC-VCC», 2013
63. Una Camdali, Murat Bulut, Nedim Sozbir, Numerical modeling of a ground source heat pump: The Bolu case, 2015
64. A. J. Lopes Jesus, Luciana I. N. Tome, M. Ermelinda Eusebio, and J. S. Redinha, Enthalpy of Sublimation in the Study of the Solid State of Organic Compounds. Application to Erythritol and Threitol, 2005
65. ΕΦΗΜΕΡΙΣ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ ΤΗΣ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑΣ, ΤΕΥΧΟΣ ΠΡΩΤΟ, Αρ. Φύλλου 85 7 Απριλίου 2014, ΝΟΜΟΣ ΥΠ' ΑΡΙΘ. 4254

## Παράρτημα Α

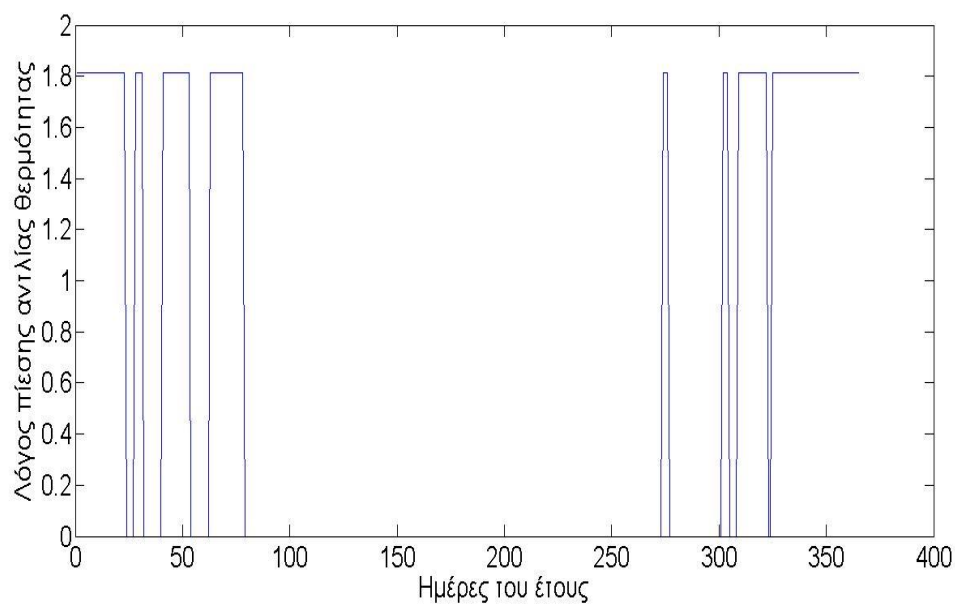
Παραθέτουμε τον μέγιστο ημερήσιο λόγο πίεσης της αντλίας θερμότητας για κάθε ημέρα του έτους για όλα τα εργαζόμενα μέσα. Αν και οι υπολογισμοί έχουν γίνει σε ωριαία βάση όλα τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε ημερήσια βάση για την καλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων.

### R245fa



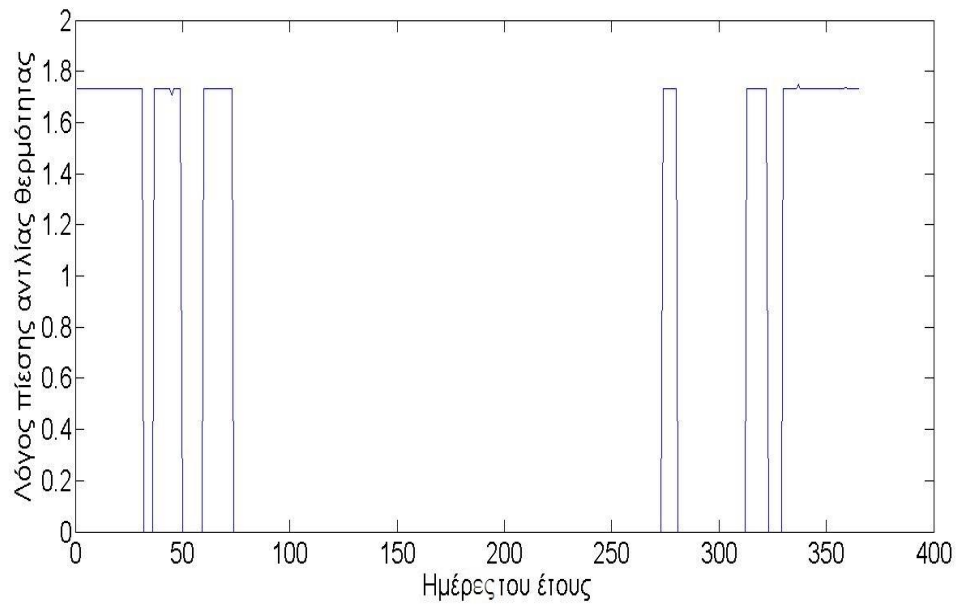
Διάγραμμα Α.1 Λόγος πίεσης κατά την διάρκεια του έτους για το R245fa

### R123



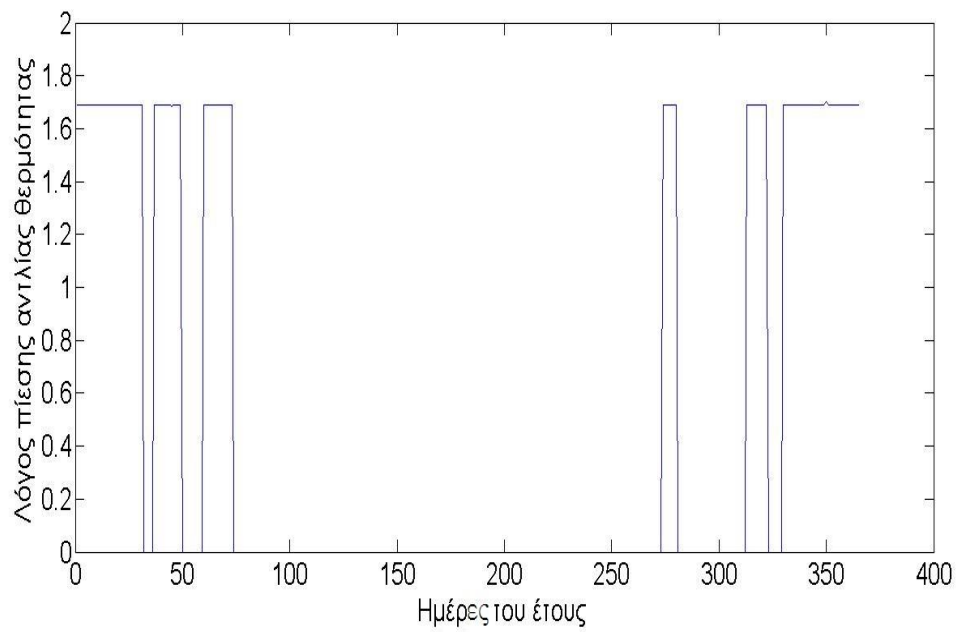
Διάγραμμα Α.2 Λόγος πίεσης κατά την διάρκεια του έτους για το R123

## SO<sub>2</sub>



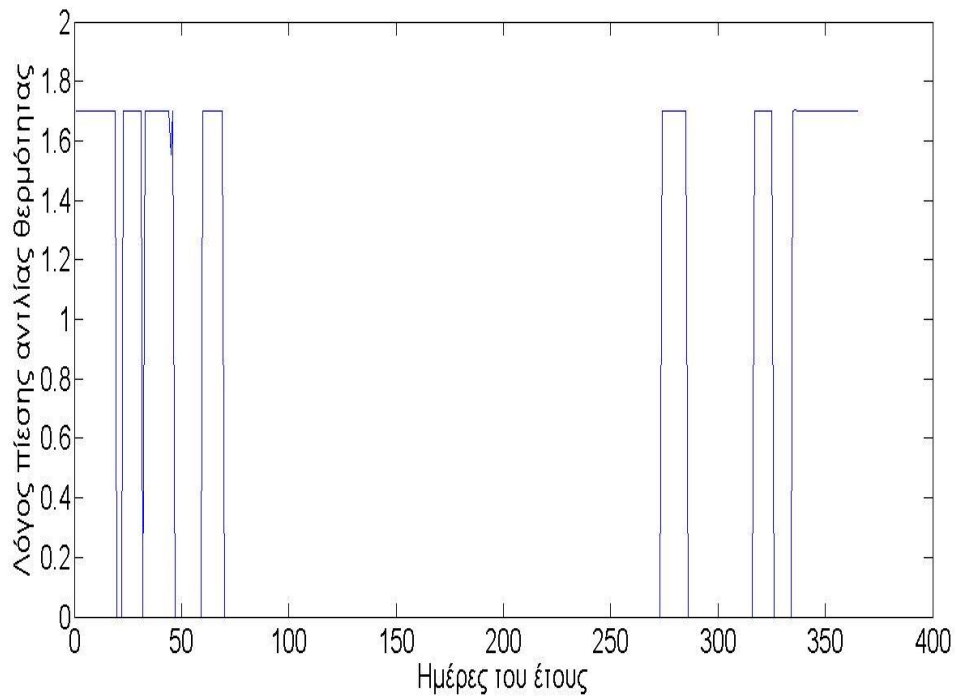
Διάγραμμα A.3 Λόγος πίεσης κατά την διάρκεια του έτους για το SO<sub>2</sub>

## Βουτάνιο



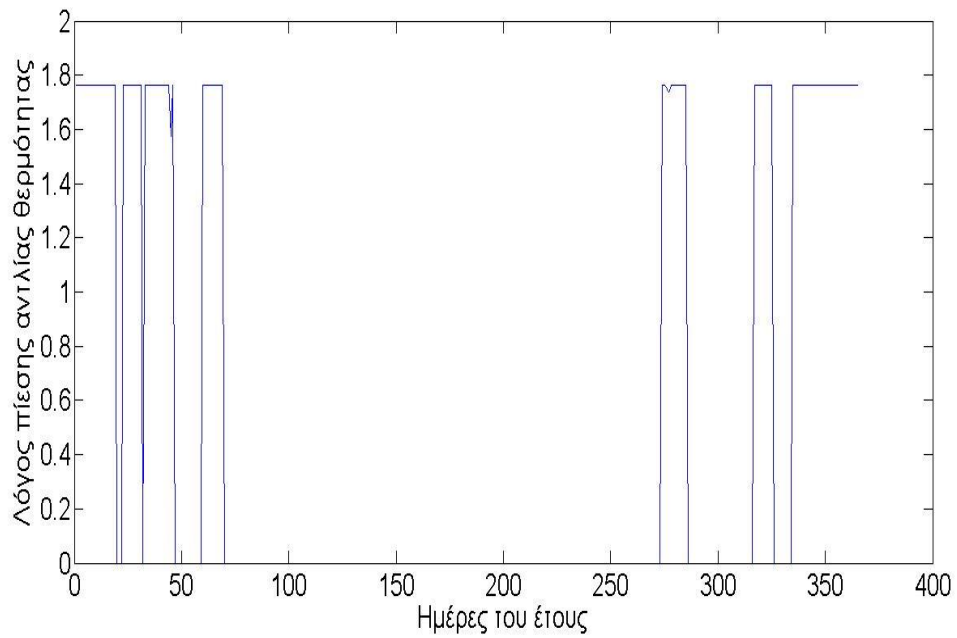
Διάγραμμα A.4 Λόγος πίεσης κατά την διάρκεια του έτους για το βουτάνιο

## Αμμωνία



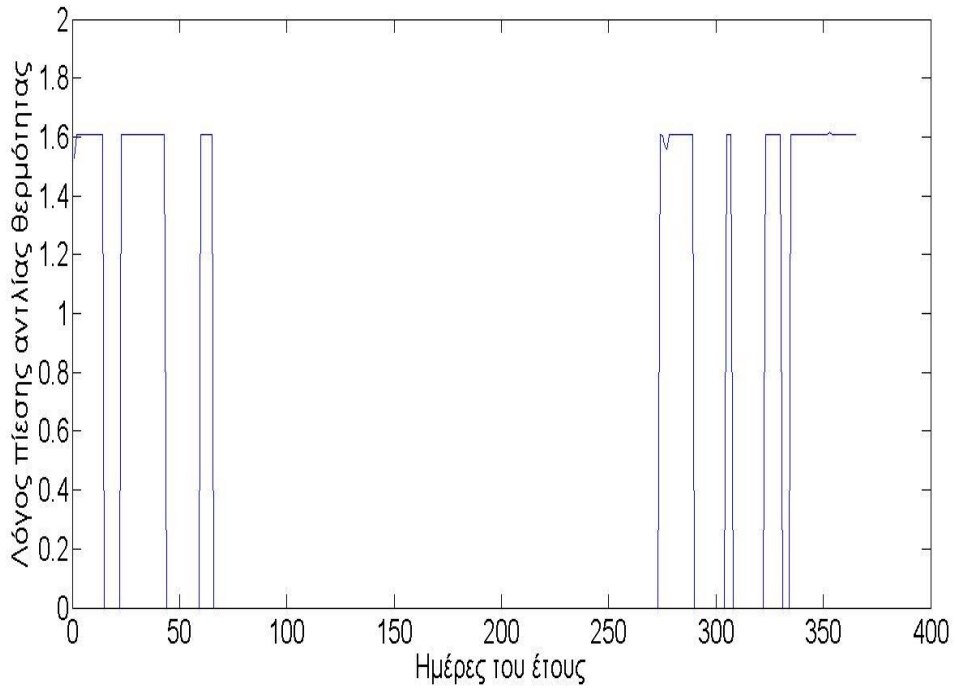
Διάγραμμα A.5 Λόγος πίεσης κατά την διάρκεια του έτους για την αμμωνία

## R236fa



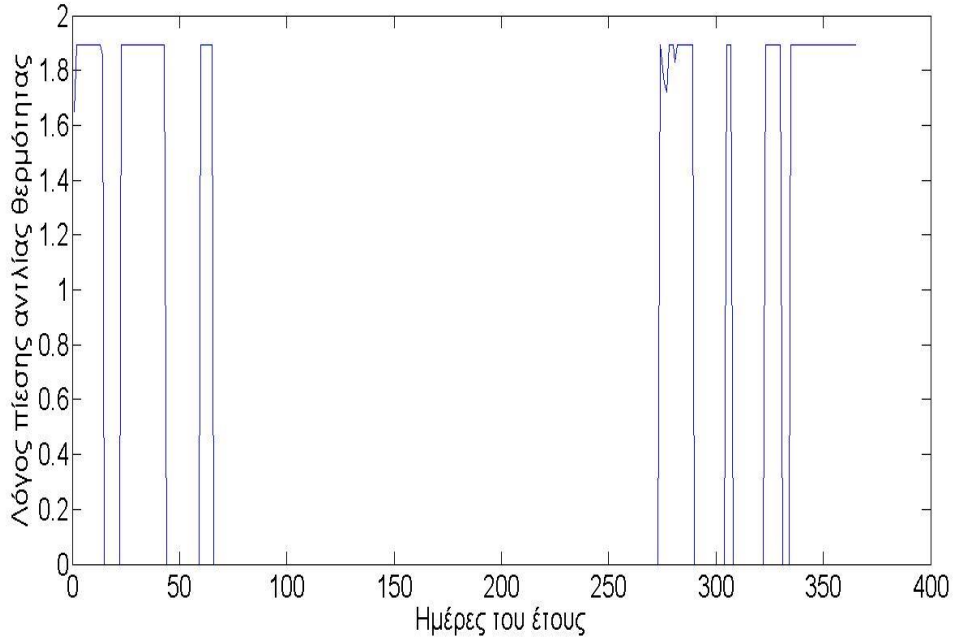
Διάγραμμα A.6 Λόγος πίεσης κατά την διάρκεια του έτους για το R236fa

## Κυκλοπροπάνιο



Διάγραμμα A.7 Λόγος πίεσης κατά την διάρκεια του έτους για το κυκλοπροπάνιο

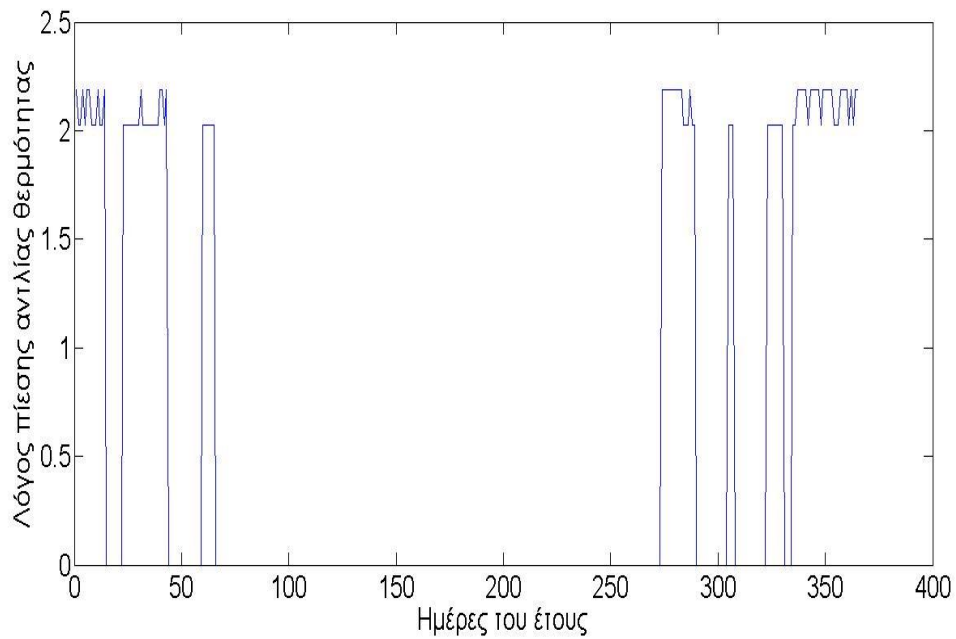
## R152a



Διάγραμμα A.8 Λόγος πίεσης κατά την διάρκεια του έτους για το R152a

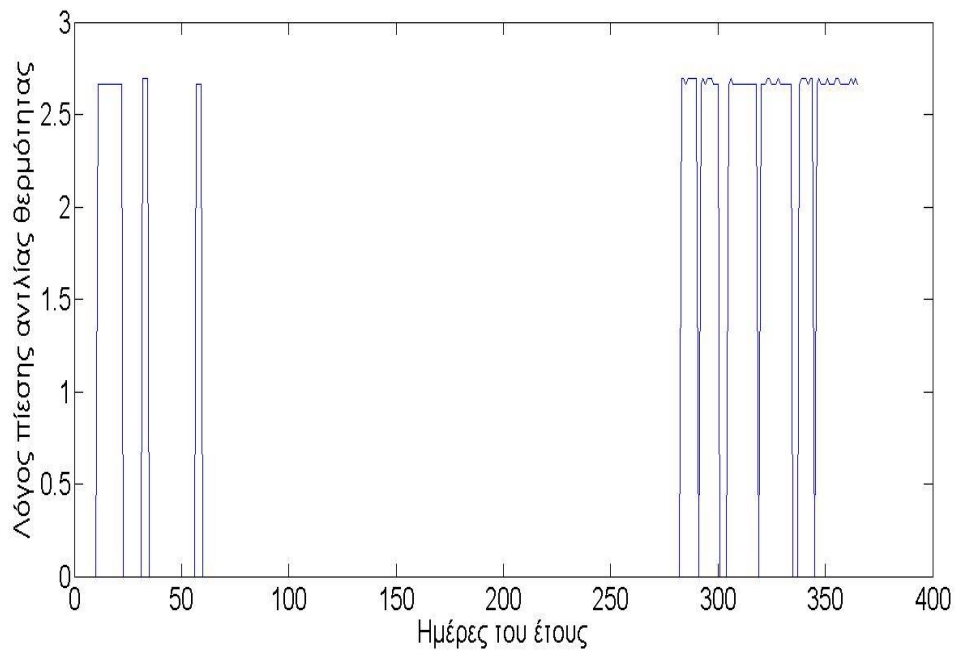


## Προπάνιο



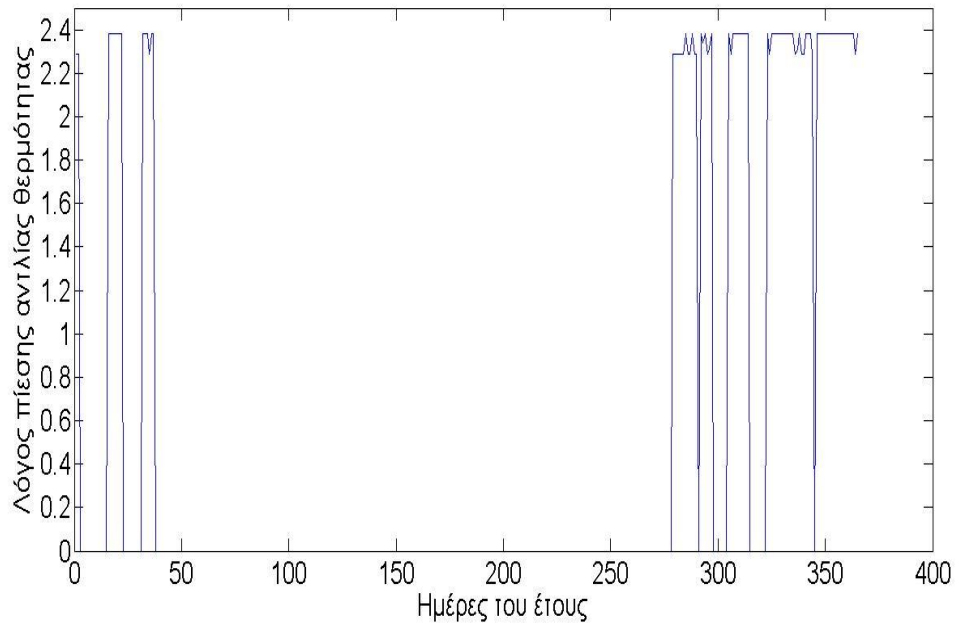
Διάγραμμα A.9 Λόγος πίεσης κατά την διάρκεια του έτους για το προπάνιο

## R1234yf



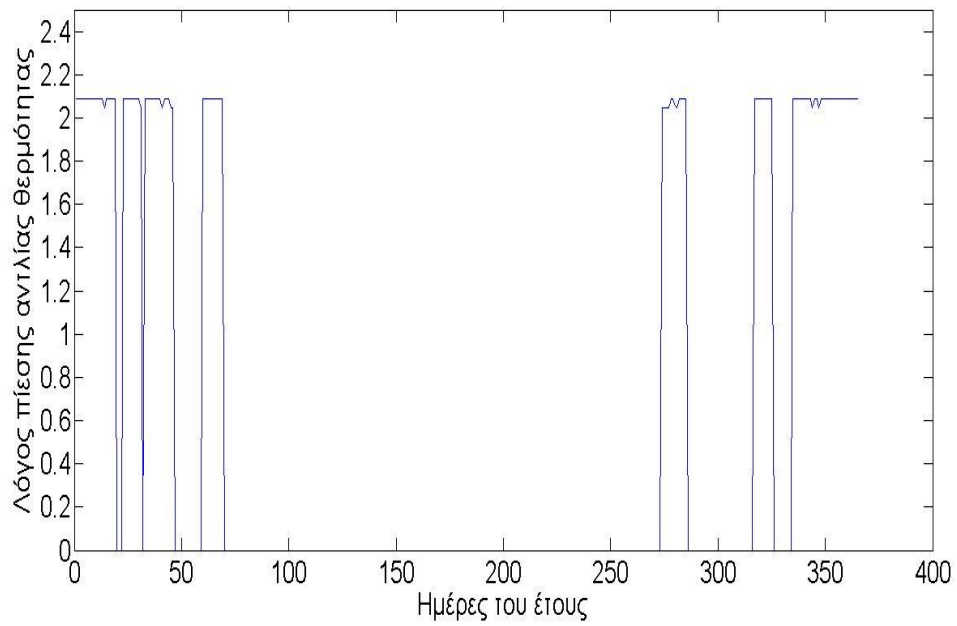
Διάγραμμα A.10 Λόγος πίεσης κατά την διάρκεια του έτους για το R1234yf

### R227ea



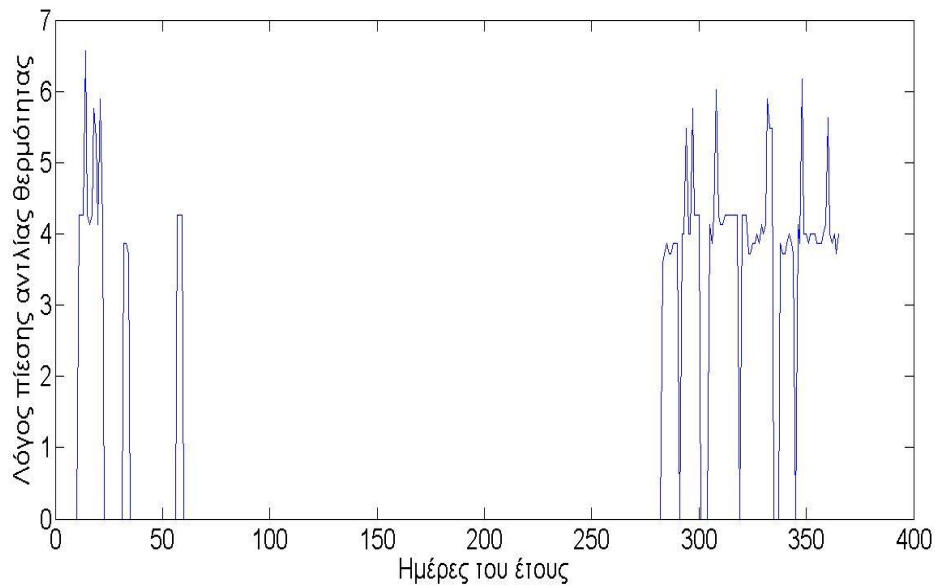
Διάγραμμα A.11 Λόγος πίεσης κατά την διάρκεια του έτους για το R227ea

### R134a



Διάγραμμα A.12 Λόγος πίεσης κατά την διάρκεια του έτους για το R134a

## CO<sub>2</sub>



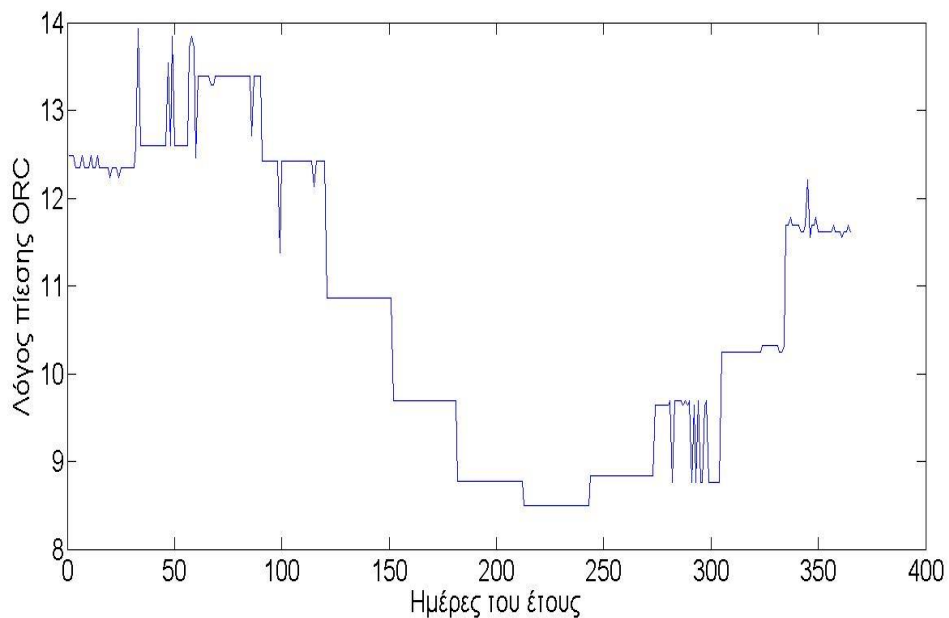
Διάγραμμα A.13 Λόγος πίεσης κατά την διάρκεια του έτους για το CO<sub>2</sub>

Οι μικρές διακυμάνσεις που φαίνονται και στο CO<sub>2</sub> είναι ακόμη μεγαλύτερες οφείλονται στην θερμοκρασία εξόδου του νερού. Επιπλέον παρατηρούμε πως κάποια εργαζόμενα μέσα φαίνονται να λειτουργούν περισσότερες ώρες τον χρόνο από ότι κάποια άλλα. Αυτό οφείλεται στην μάζα του υλικού αλλαγής φάσης που διαφέρει σε κάθε περίπτωση. Προφανώς όσο μεγαλύτερη η μάζα του υλικού αλλαγής φάσης τόσο περισσότερο λειτουργεί η αντλία θερμότητας. Γενικά μεγαλύτεροι λόγοι πίεσης οδηγούν σε μεγαλύτερες πιέσεις που από θέμα αντοχής και κόστους δεν είναι ευνοϊκές.

## Παράρτημα Β

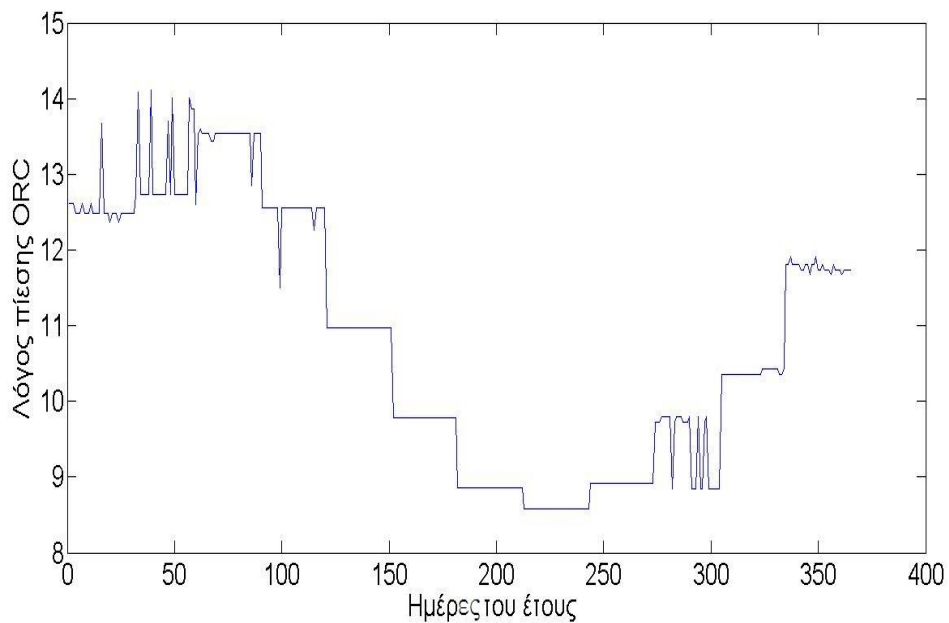
Στο παράρτημα Β παρουσιάζεται ο μέγιστος ημερήσιος λόγος πίεσης του κύκλου ORC για κάθε ημέρα του έτους για όλα τα εργαζόμενα μέσα.

### R245fa



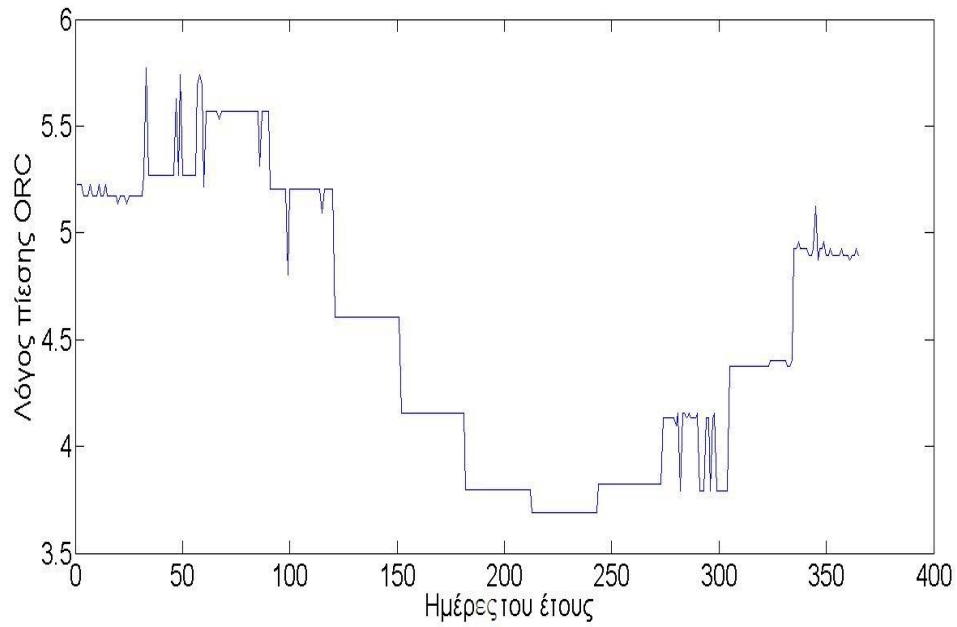
Διάγραμμα Β.1 Λόγοι πίεσης ORC κατά την διάρκεια του έτους για το R245fa

### R123



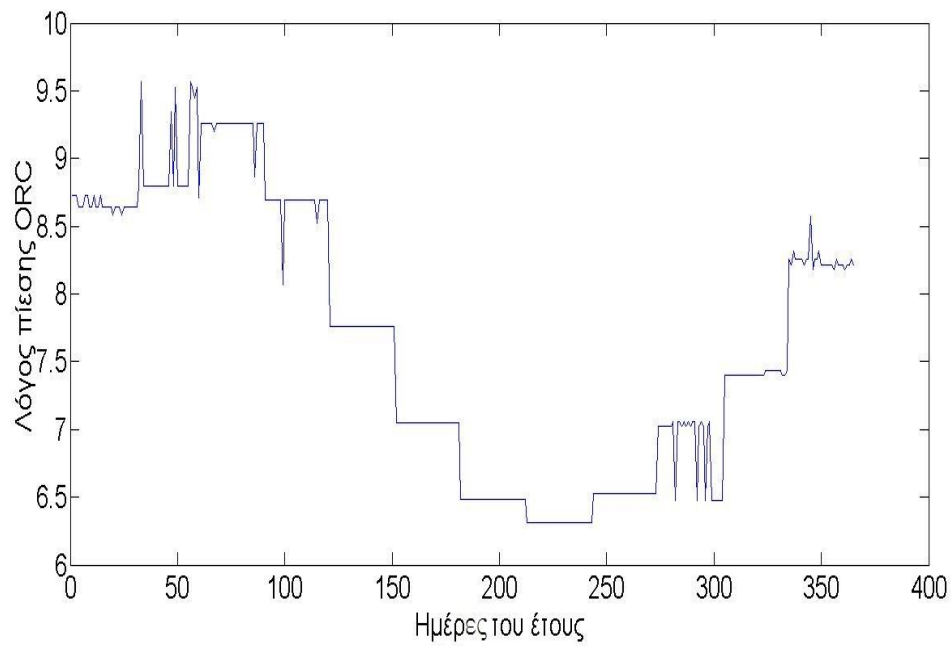
Διάγραμμα Β.2 Λόγοι πίεσης ORC κατά την διάρκεια του έτους για το R123

## SO<sub>2</sub>



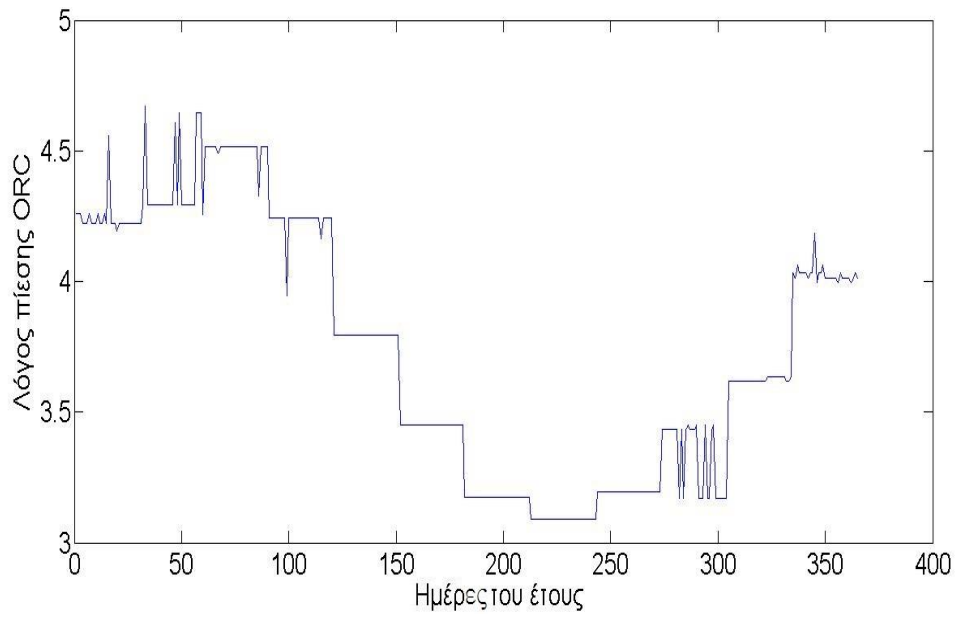
Διάγραμμα Β.3 Λόγοι πίεσης ORC κατά την διάρκεια του έτους για το SO<sub>2</sub>

## Βουτάνιο



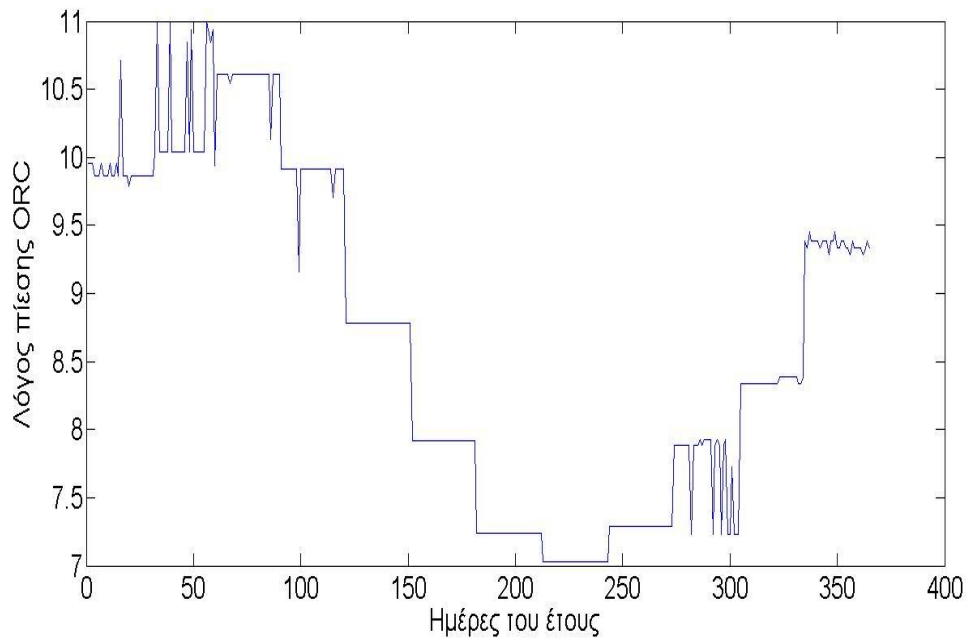
Διάγραμμα Β.4 Λόγοι πίεσης ORC κατά την διάρκεια του έτους για το βουτάνιο

## Αμμωνία



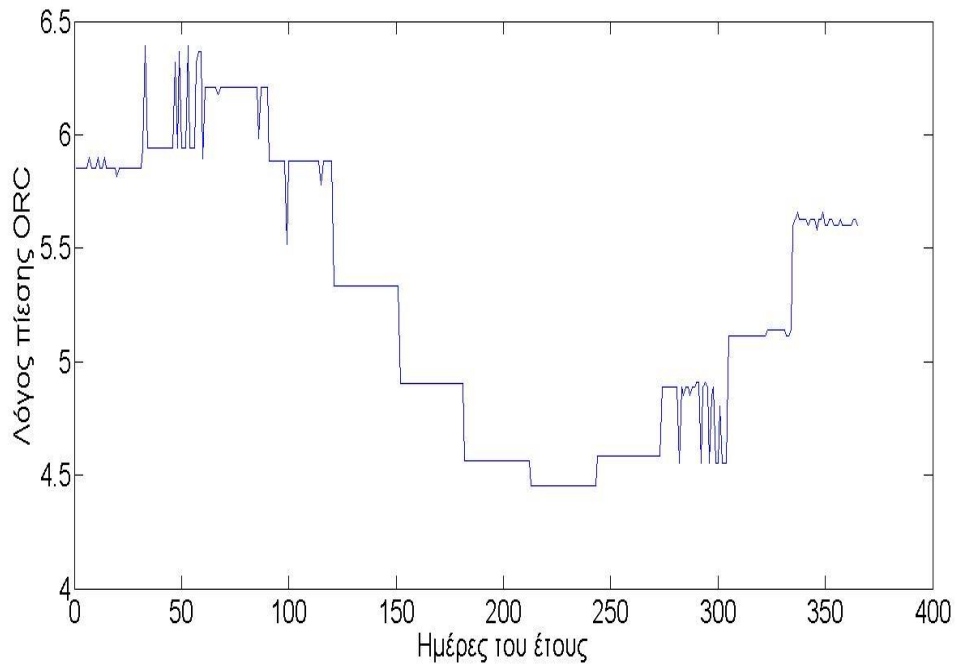
Διάγραμμα Β.5 Λόγοι πίεσης ORC κατά την διάρκεια του έτους για ην αμμωνία

## R236fa



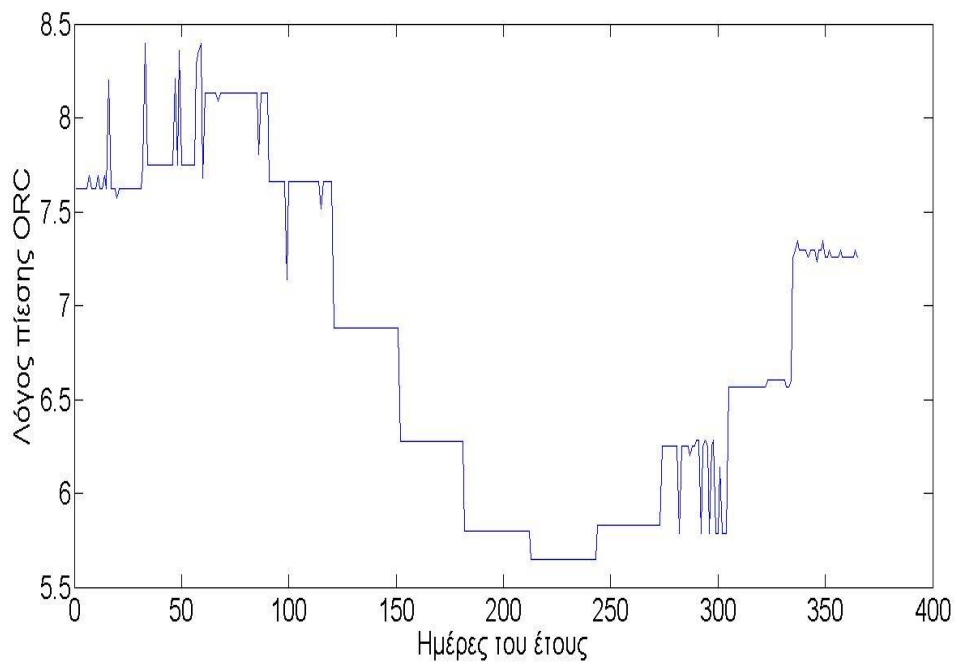
Διάγραμμα Β.6 Λόγοι πίεσης ORC κατά την διάρκεια του έτους για το R236fa

## Κυκλοπροπάνιο



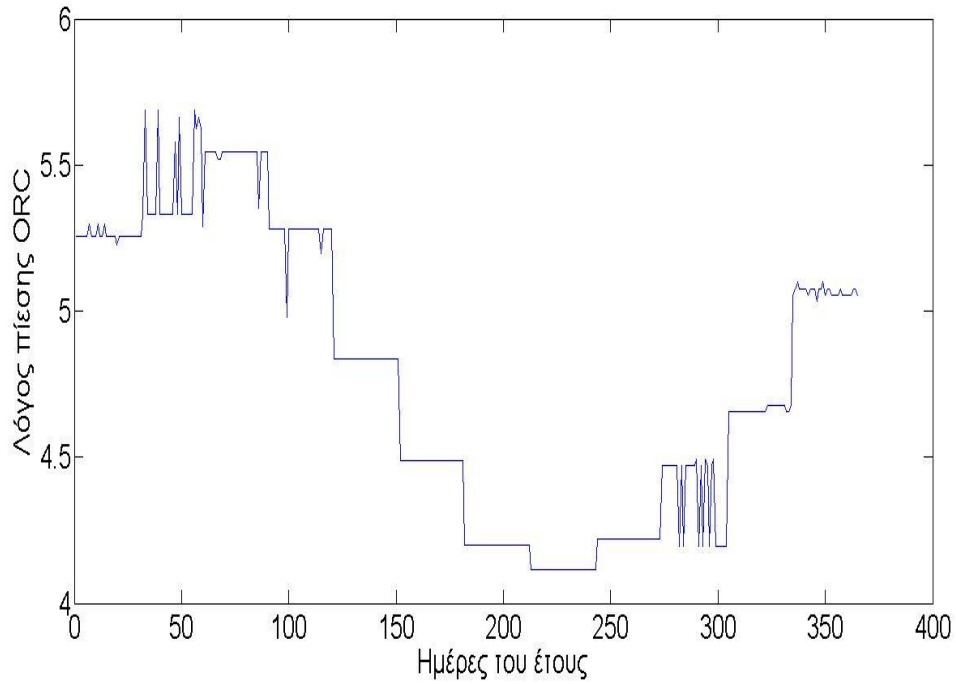
Διάγραμμα Β.7 Λόγοι πίεσης ORC κατά την διάρκεια του έτους για το κυκλοπροπάνιο

## R152a



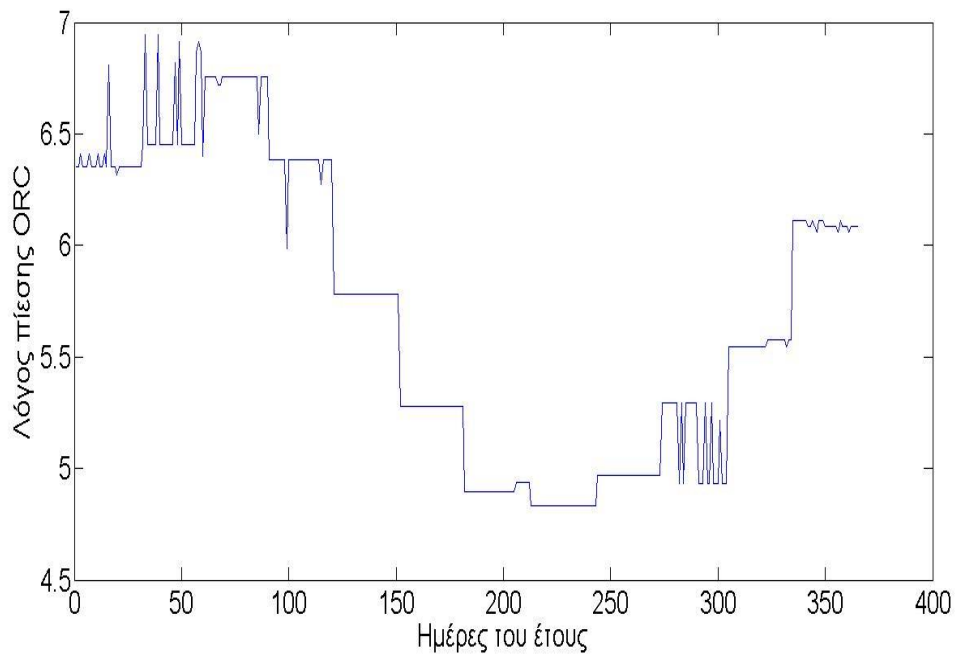
Διάγραμμα Β.8 Λόγοι πίεσης ORC κατά την διάρκεια του έτους για το R152a

## Προπάνιο



Διάγραμμα Β.9 Λόγοι πίεσης ORC κατά την διάρκεια του έτους για το προπάνιο

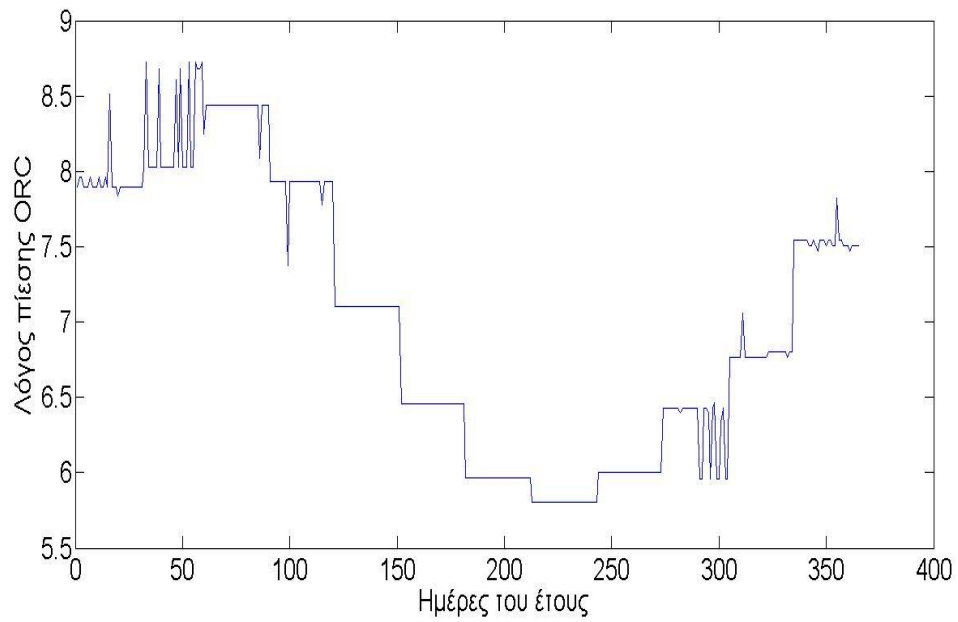
## R1234yf



Διάγραμμα Β.10 Λόγοι πίεσης ORC κατά την διάρκεια του έτους για το R1234yf

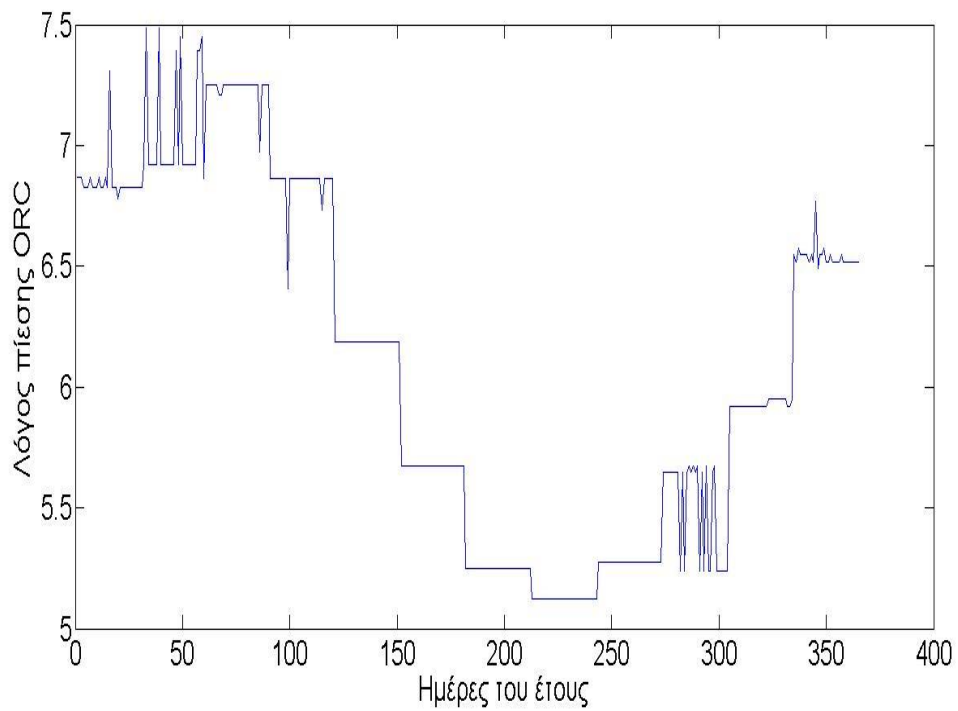


### R227ea



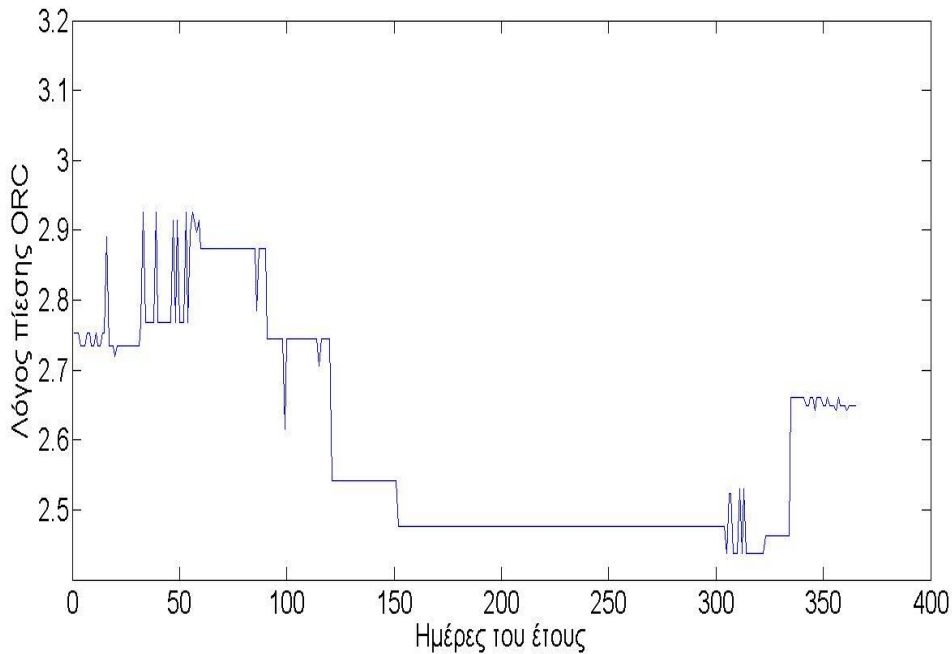
Διάγραμμα Β.11 Λόγοι πίεσης ORC κατά την διάρκεια του έτους για το R227ea

### R134a



Διάγραμμα Β.12 Λόγοι πίεσης ORC κατά την διάρκεια του έτους για το R134a

## CO<sub>2</sub>



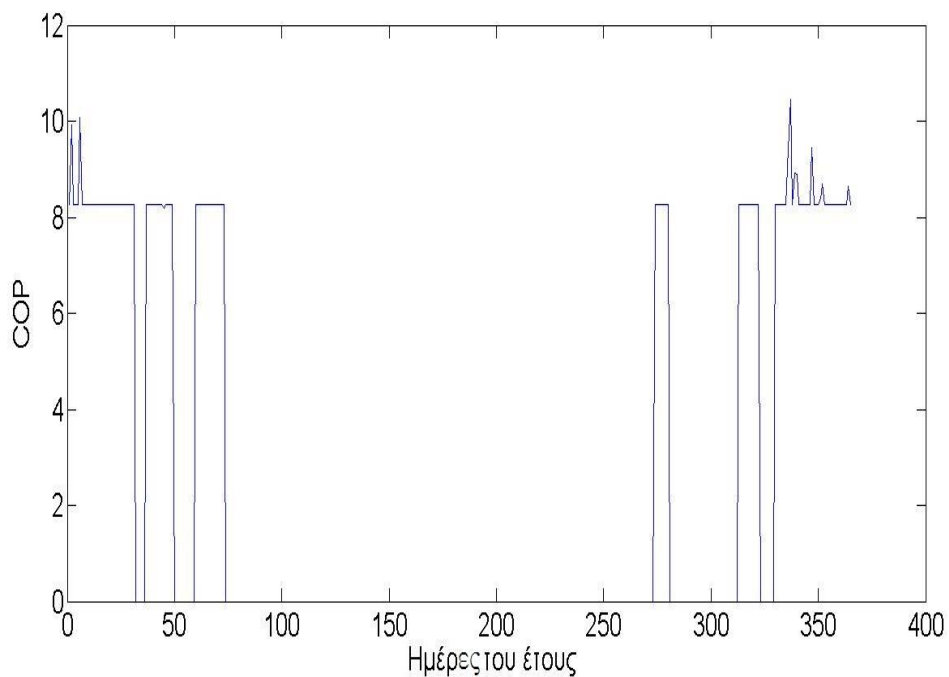
Διάγραμμα Β.13 Λόγοι πίεσης ORC κατά την διάρκεια του έτους για το CO<sub>2</sub>

Παρατηρούμε πως οι λόγοι πίεσης δεν εξαρτώνται τόσο από το είδος του κύκλου σε αντίθεση με την αντλία θερμότητας και παρουσιάζουν μεγάλο εύρος τιμών. Τους πιο χαμηλούς λόγους πίεσης τους παρουσιάζει το CO<sub>2</sub> ενώ τον μεγαλύτερο λόγο πίεσης τον παρουσιάζουν τα R123 και R245fa. Μελετώντας τα διαγράμματα παρατηρούμε πως για όλα εργαζόμενα μέσα ο λόγος πίεσης μειώνεται τους καλοκαιρινούς μήνες και αυξάνεται τους χειμερινούς. Αυτό συμβαίνει διότι η πίεση του συμπυκνωτή είναι υψηλότερη τους καλοκαιρινούς μήνες, λόγω της υψηλότερης θερμοκρασίας της θάλασσας, και γνωρίζοντας πως η υψηλή θερμοκρασία παραμένει περίπου σταθερή βάσει των αποτελεσμάτων κατανοούμε γιατί ο λόγος πίεσης ελαχιστοποιείται τους καλοκαιρινούς μήνες. Τέλος στο διάγραμμα του CO<sub>2</sub> βλέπουμε πως για τους καλοκαιρινούς μήνες ο λόγος πίεσης παραμένει σταθερός. Αυτό οφείλεται στην παραδοχή που έχουμε ήδη αναφέρει. Προκειμένου ο συμπυκνωτής να δουλεύει πάντα στην διφασική περιοχή θεωρούμε την ύπαρξη ενδιάμεσου ψυγείου μόνο κατά τους καλοκαιρινούς μήνες γιατί η θερμοκρασία είναι υψηλότερη από την κρίσιμη θερμοκρασία του CO<sub>2</sub> και θα οδηγούμασταν σε υπερκρίσιμη πίεση. Σαν γενικό σχόλιο μπορούμε να αναφέρουμε πως η διαφορετικότητα των συνθηκών λειτουργίας αλλά και των ίδιων των εργαζόμενων μέσων οδηγούν σε μεγάλη διαφορετικότητα του λόγου πίεσης του ORC.

## Παράρτημα Γ

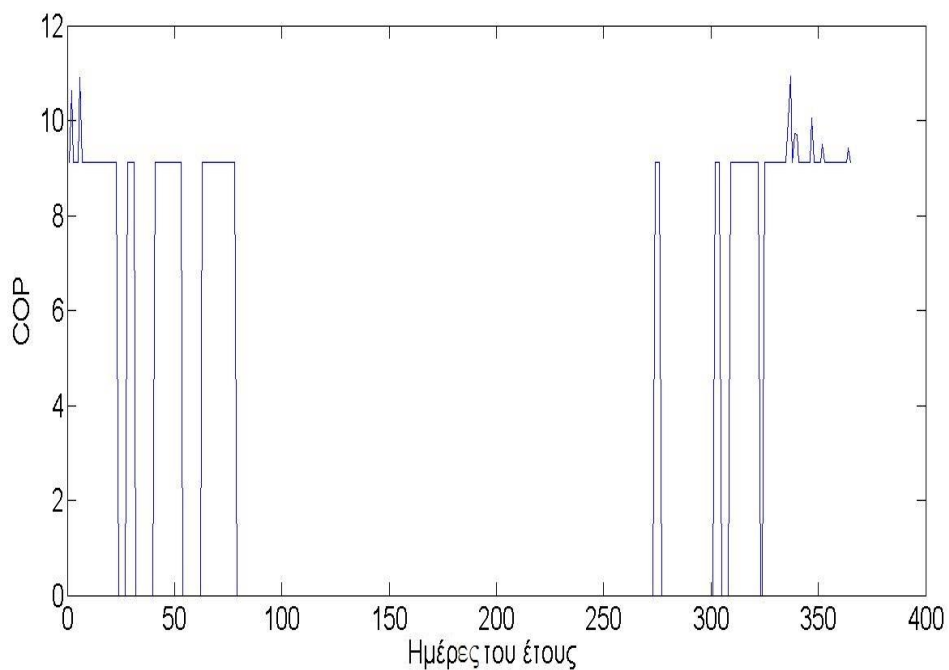
Στο παράρτημα Γ παρουσιάζεται ο μέγιστος ημερήσιος COP της αντλίας θερμότητας για κάθε ημέρα του έτους για όλα τα οργανικά μέσα.

### R245fa



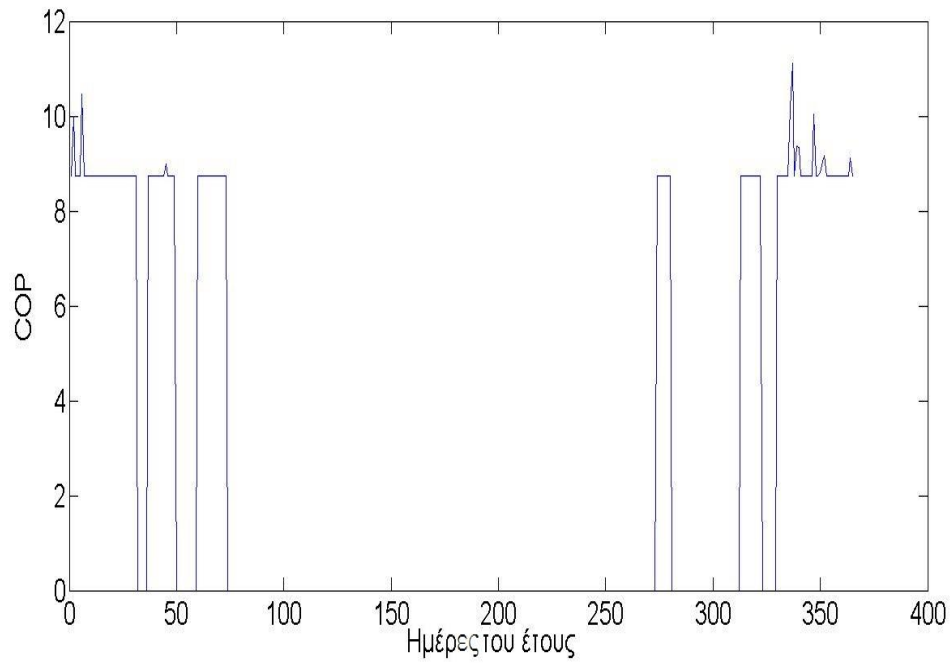
Διάγραμμα Γ.1 COP για το R245fa

### R123



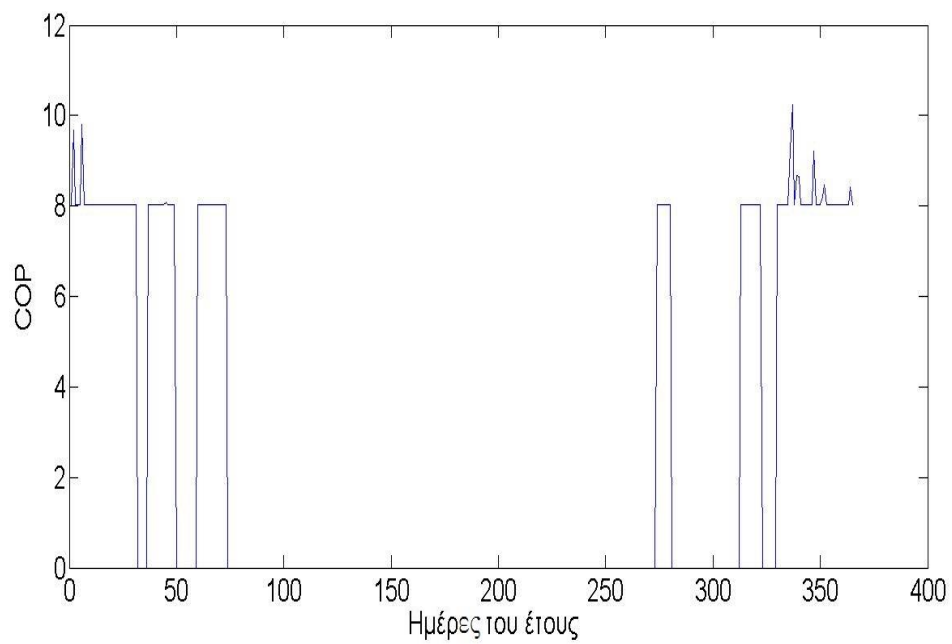
Διάγραμμα Γ.2 COP για το R123

## SO<sub>2</sub>



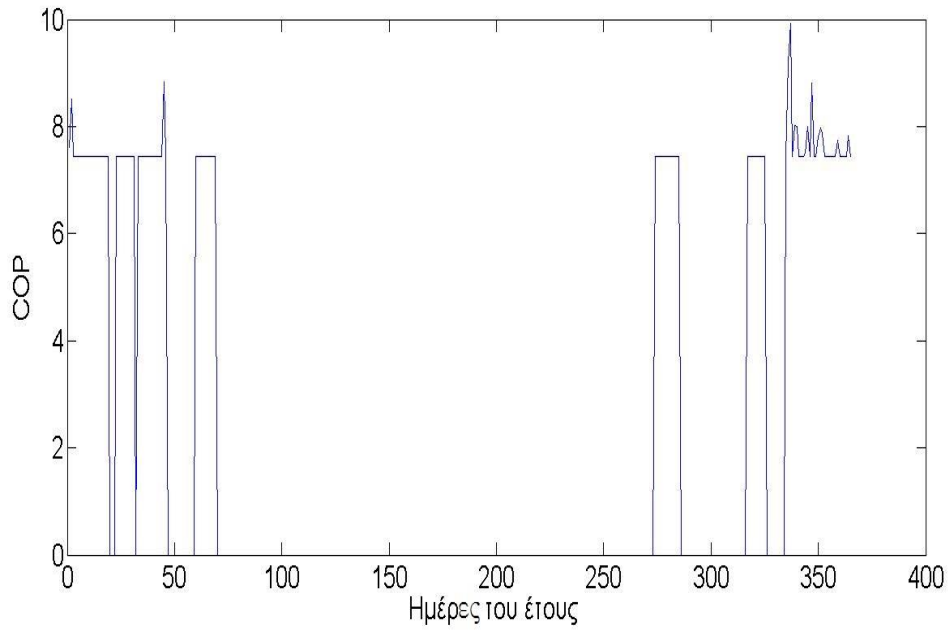
Διάγραμμα Γ.3 COP για το SO<sub>2</sub>

## Βουτάνιο

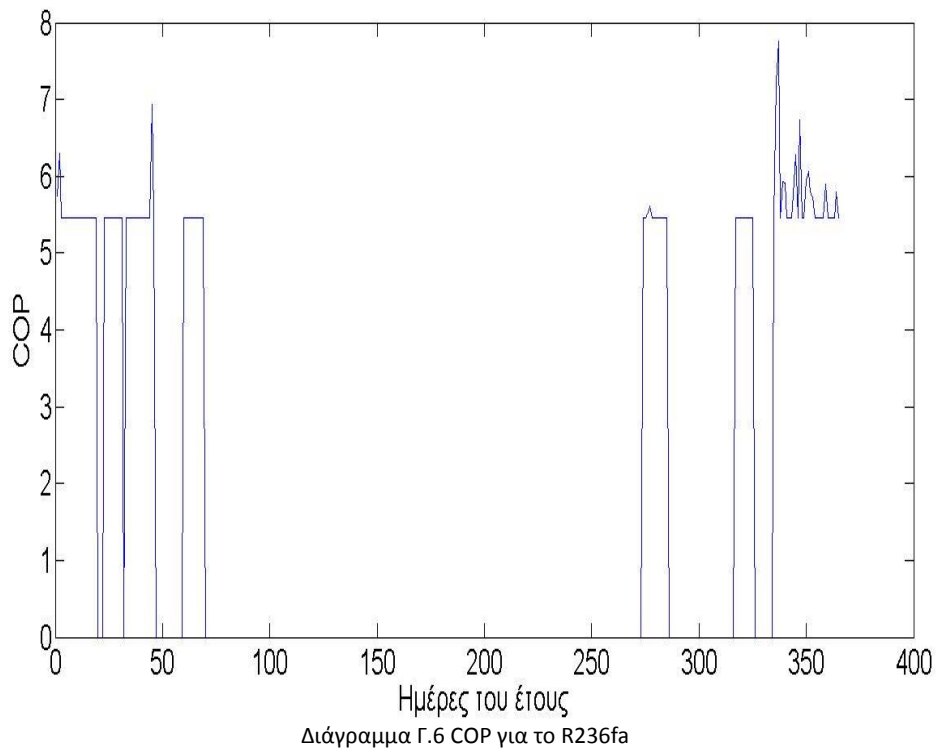


Διάγραμμα Γ.4 COP για το Βουτάνιο

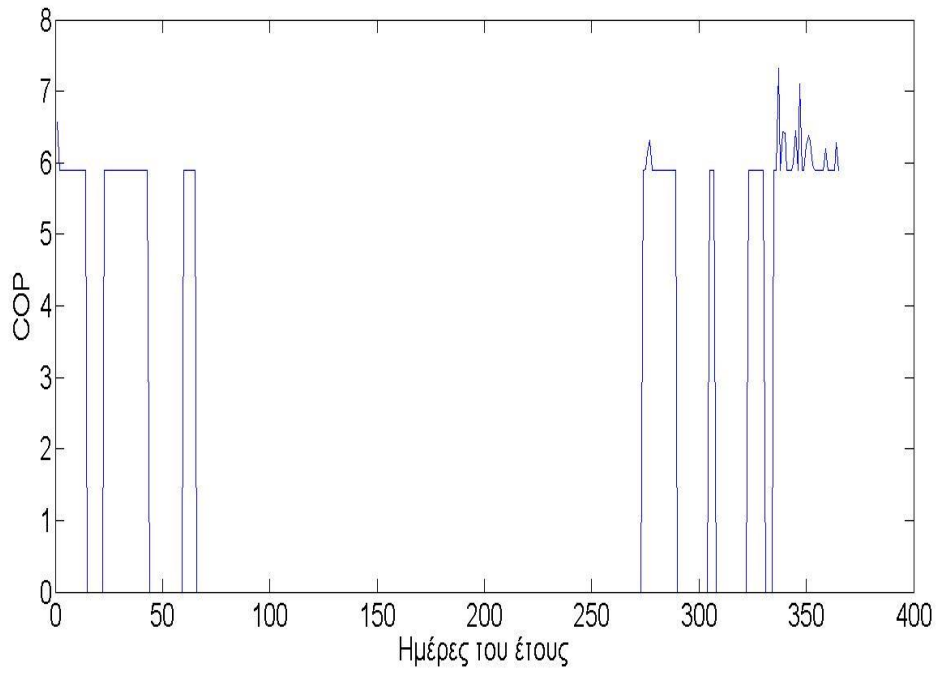
## Αμμωνία



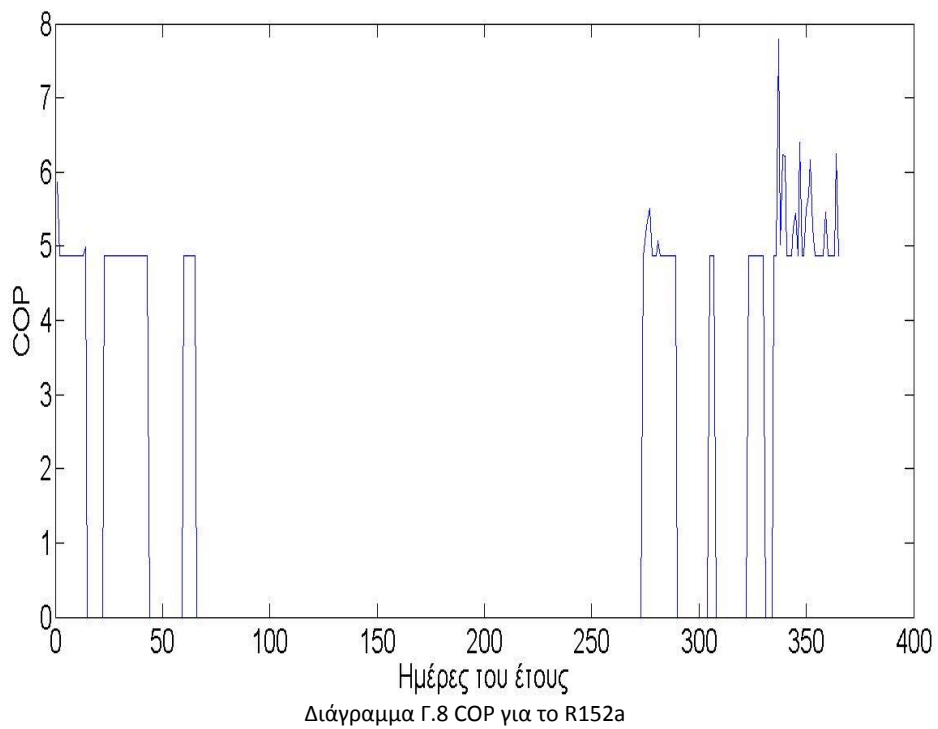
## R236fa



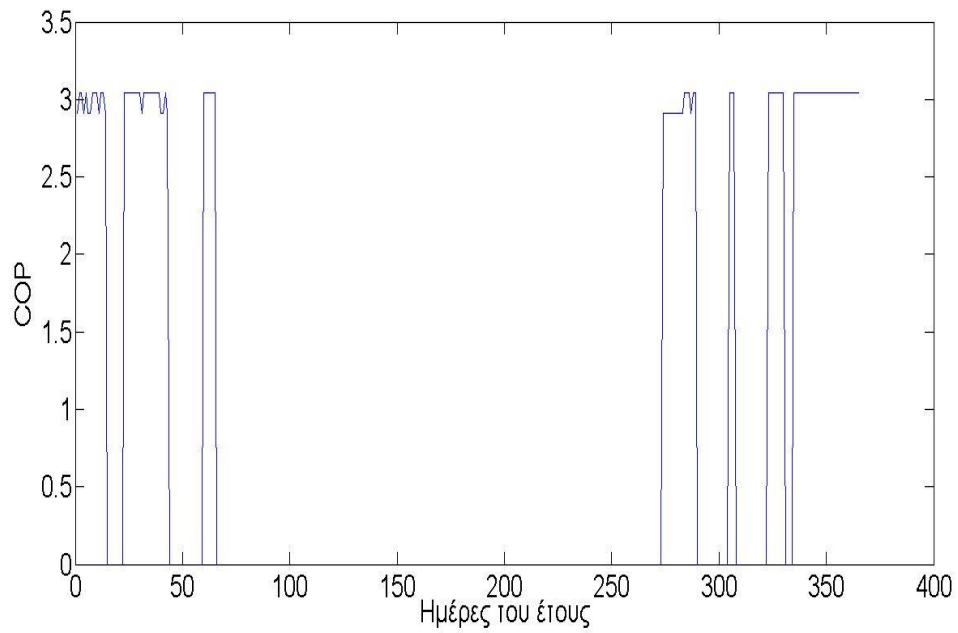
## Κυκλοπροπάνιο



## R152a

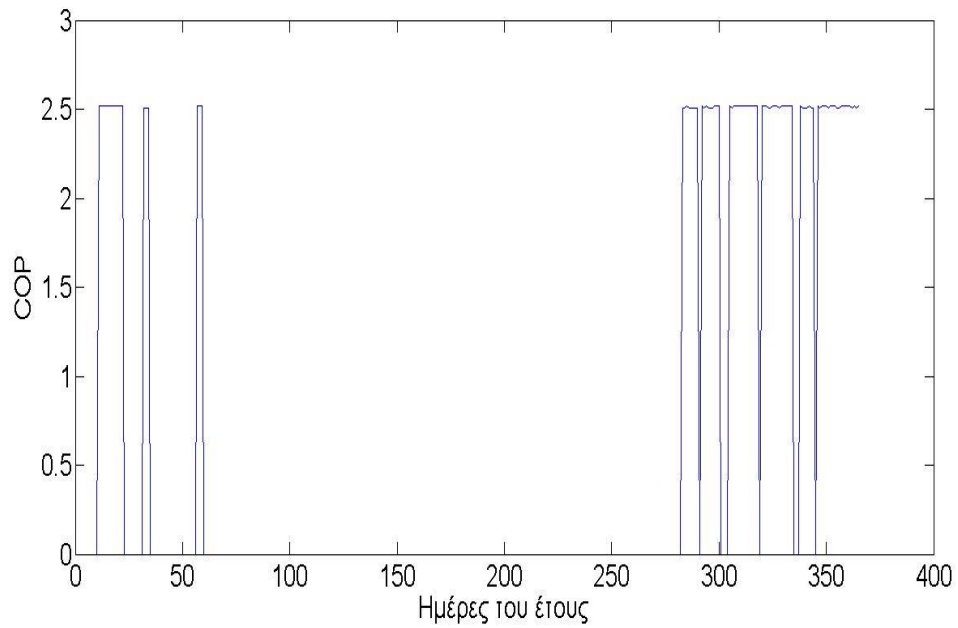


## Προπάνιο



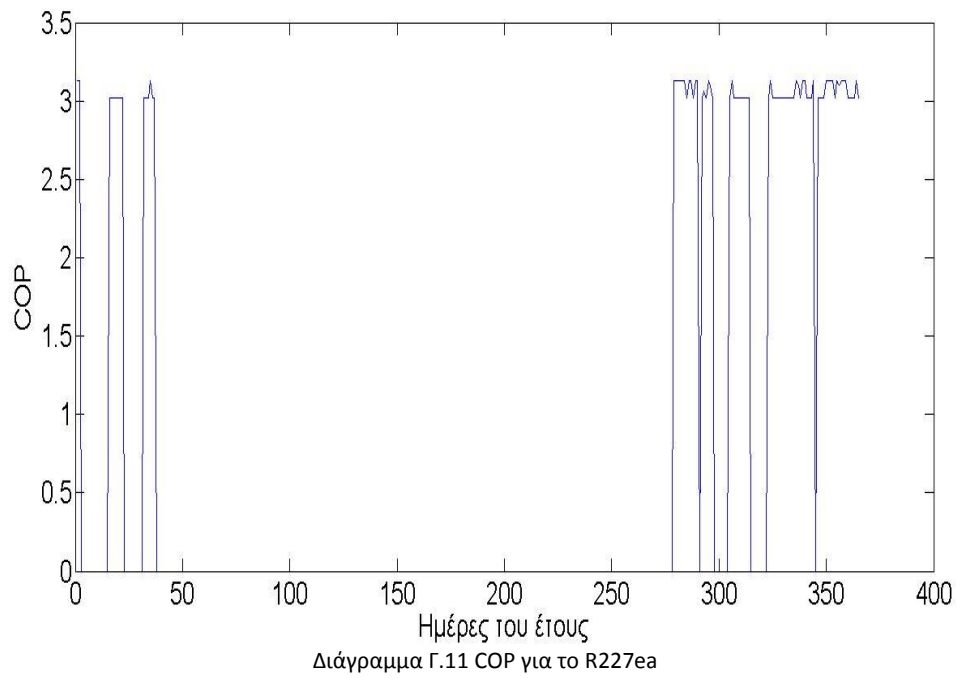
Διάγραμμα Γ.9 COP για το προπάνιο

## R1234yf

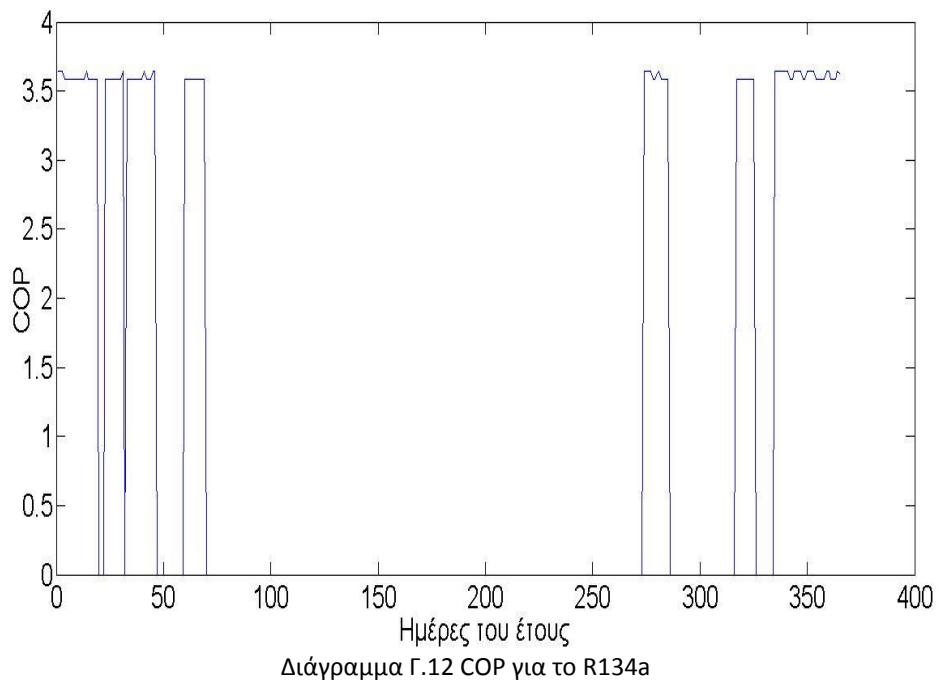


Διάγραμμα Γ.10 COP για το R1234yf

### R227ea

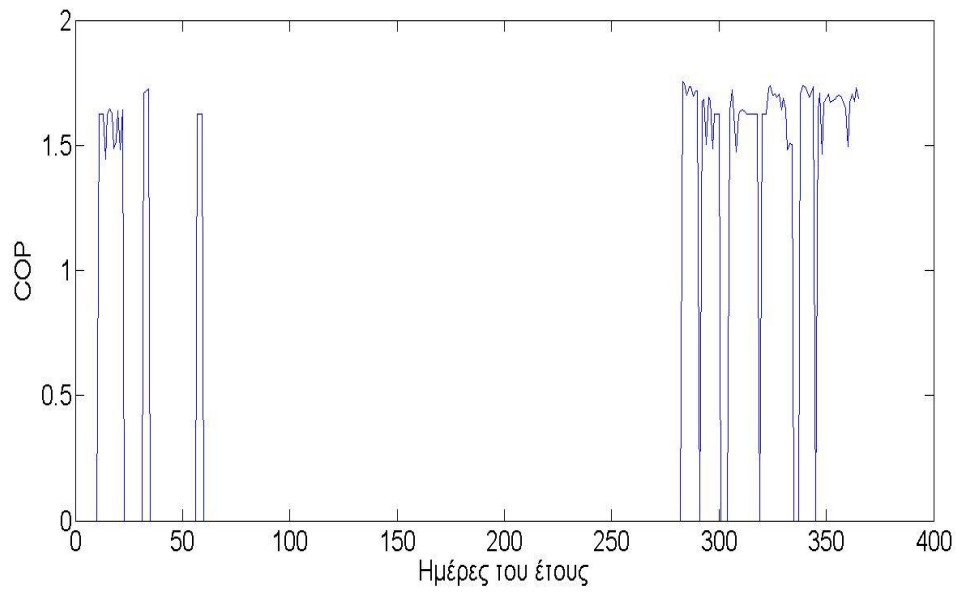


### R134a





## CO<sub>2</sub>



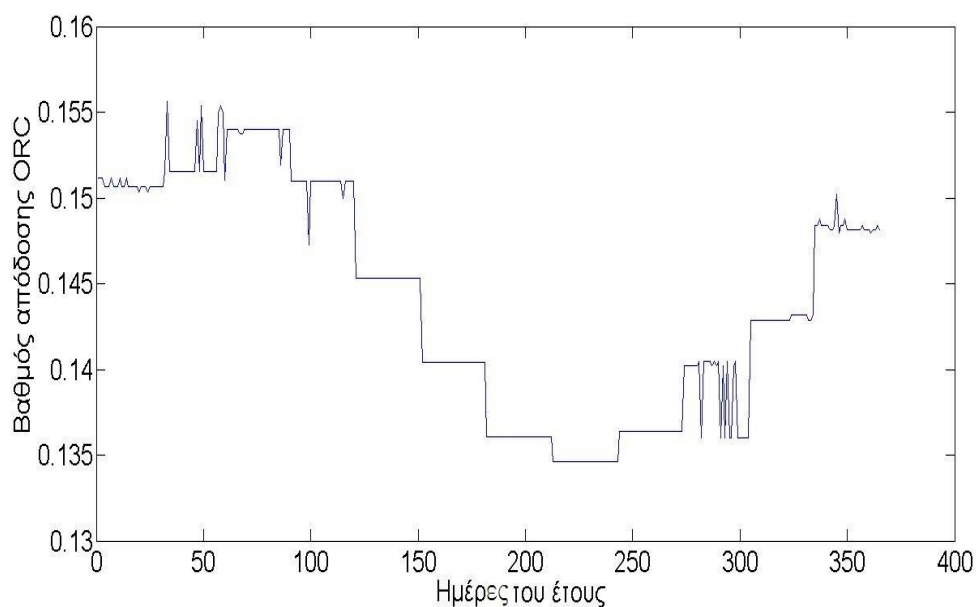
Διάγραμμα Γ.13 COP για το CO<sub>2</sub>

Τα μέγιστα που γίνονται οφείλονται στην θερμοκρασία του ατμοποιητή. Όταν ο συμπιεστής εξαντλεί το όριο ισχύς που διαθέτει, η θερμοκρασία εξόδου του νερού των συλλεκτών είναι μεγαλύτερο από τους 100°C και επομένως ο ατμοποιητής λειτουργεί σε μεγαλύτερη θερμοκρασία και πίεση. Το αποτέλεσμα είναι μικρότερο έργο του συμπιεστή που συνεπάγεται, για περίπου σταθερή αποθηκευόμενη ισχύς, μεγαλύτερο COP.

## Παράρτημα Δ

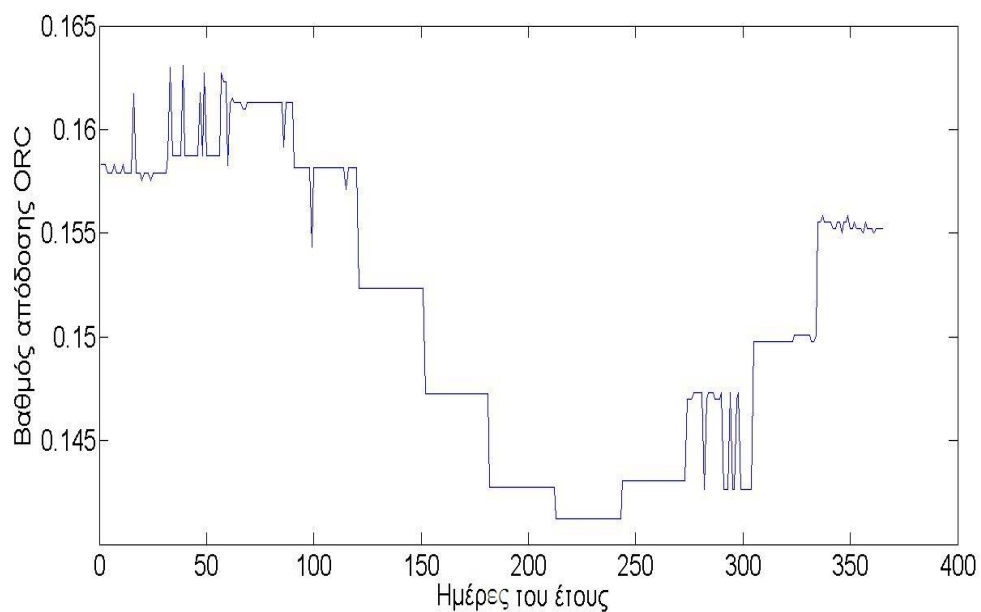
Στο παράρτημα Δ παρουσιάζεται ο μέγιστος ημερήσιος βαθμός απόδοσης του κύκλου ORC για κάθε ημέρα του έτους για όλα τα εργαζόμενα μέσα.

### R245fa



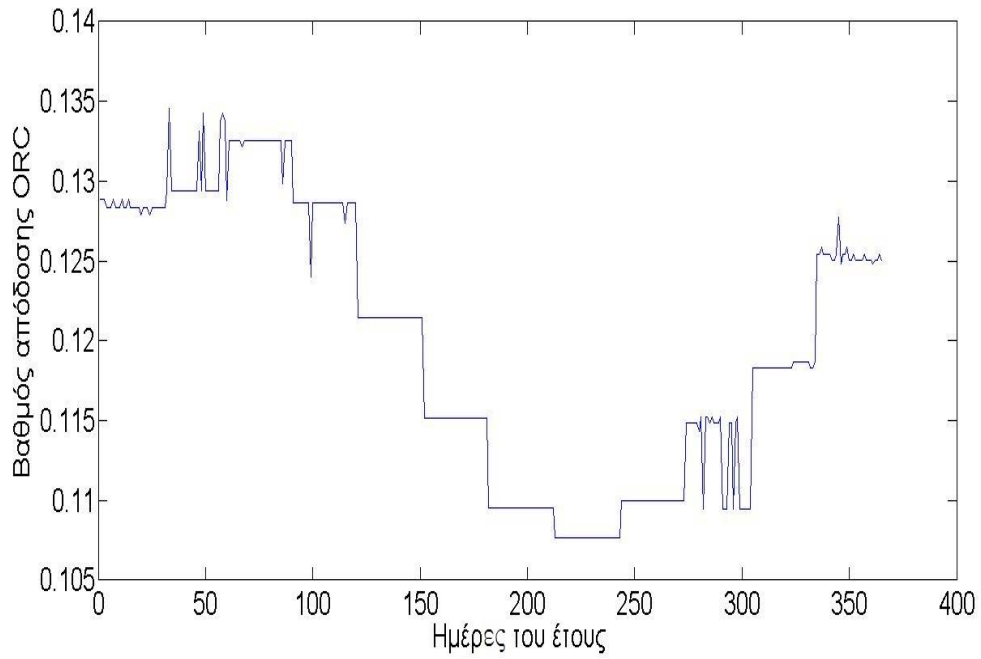
Διάγραμμα Δ.1 Βαθμός απόδοσης για το R245fa

### R123



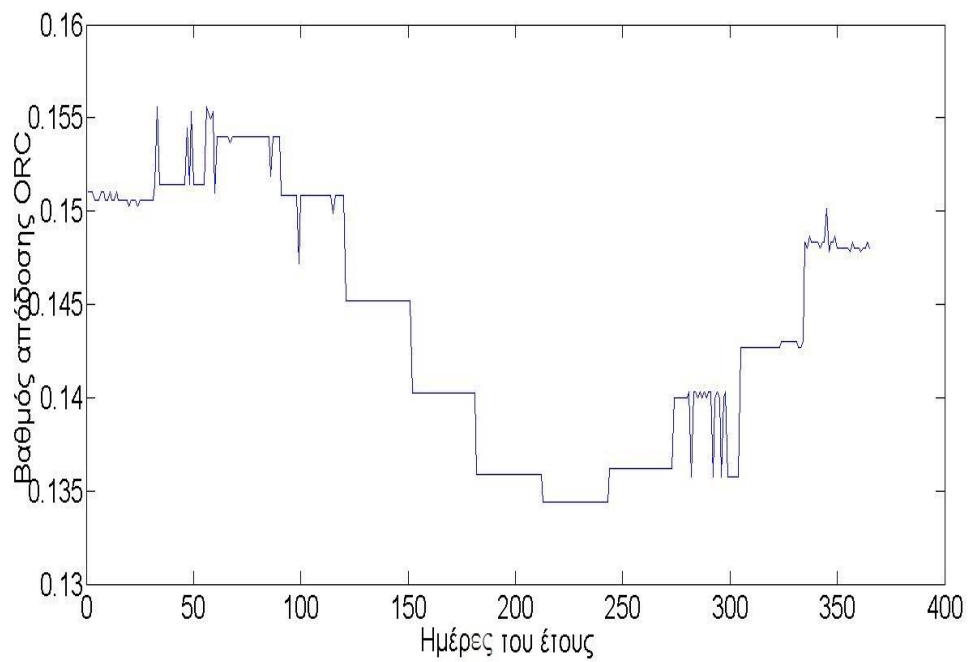
Διάγραμμα Δ.2 Βαθμός απόδοσης για το R123

## SO<sub>2</sub>



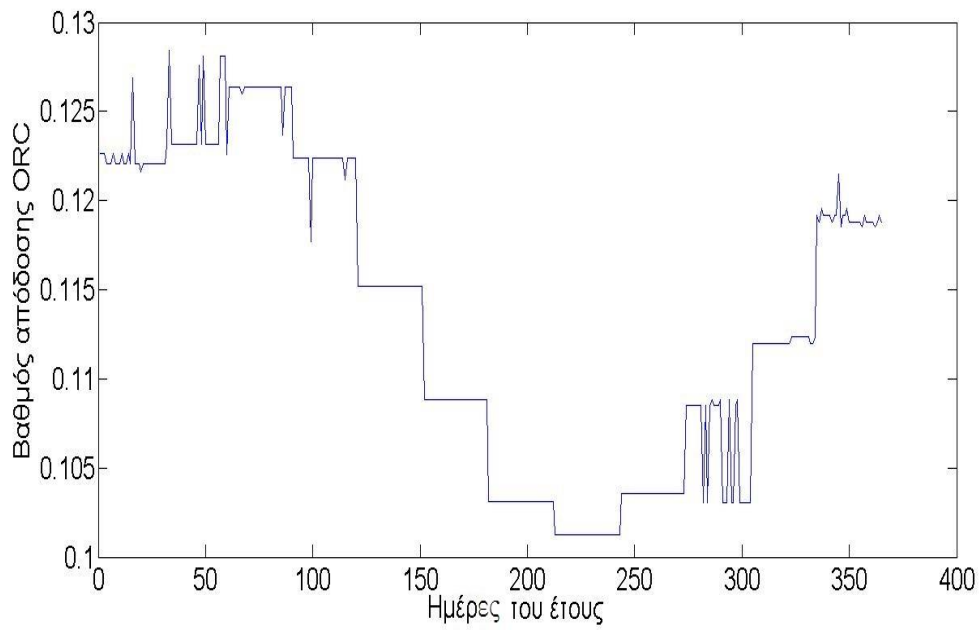
Διάγραμμα Δ.3 Βαθμός απόδοσης για το SO<sub>2</sub>

## Βουτάνιο



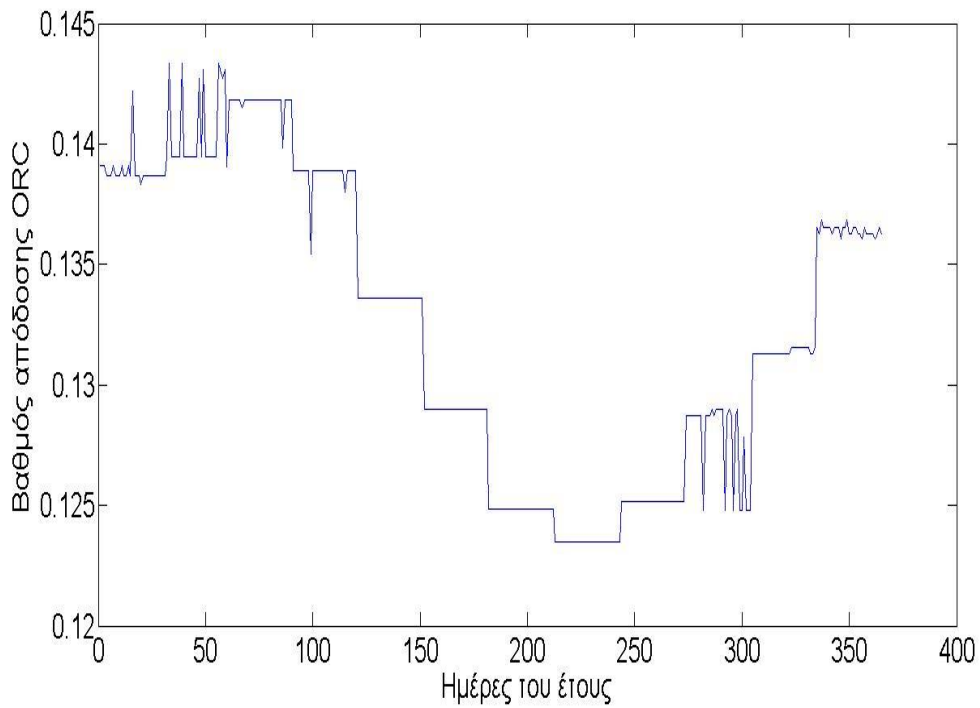
Διάγραμμα Δ.4 Βαθμός απόδοσης για το Βουτάνιο

## Αμμωνία



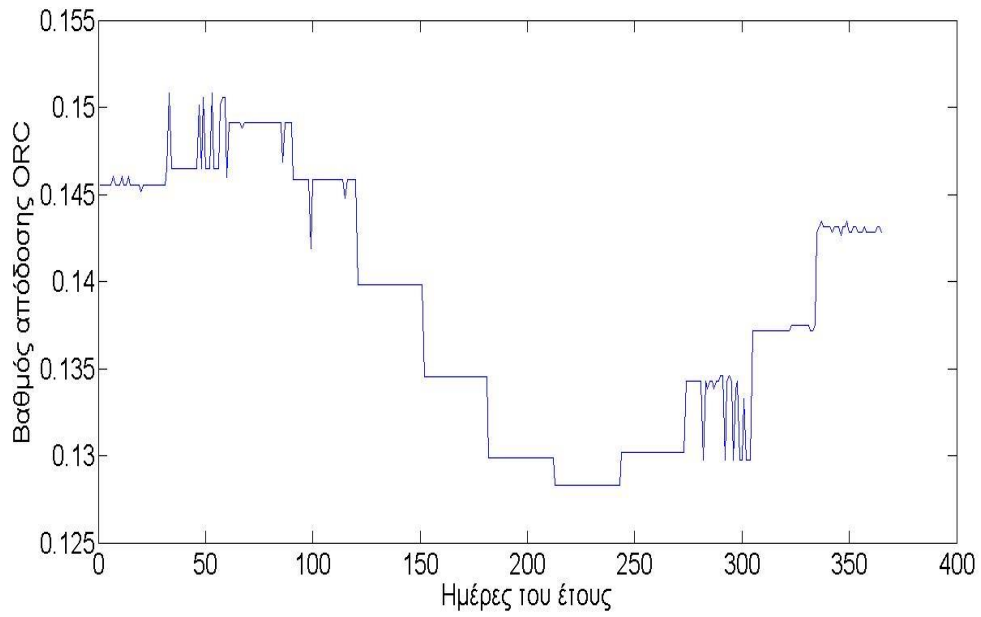
Διάγραμμα Δ.5 Βαθμός απόδοσης για την αμμωνία

## R236fa



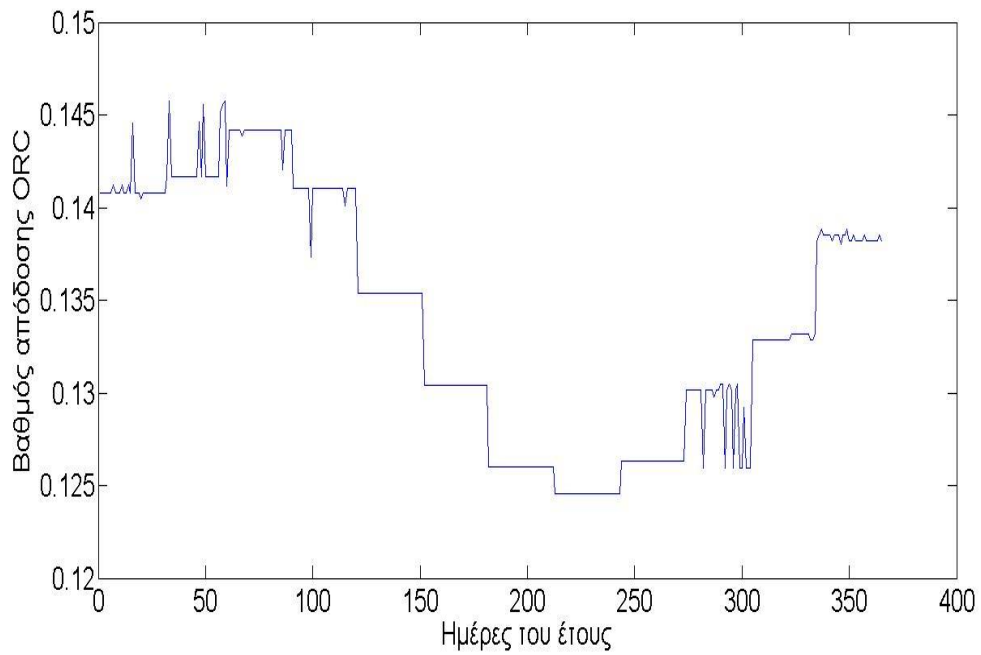
Διάγραμμα Δ.6 Βαθμός απόδοσης για το R236fa

## Κυκλοπροπάνιο



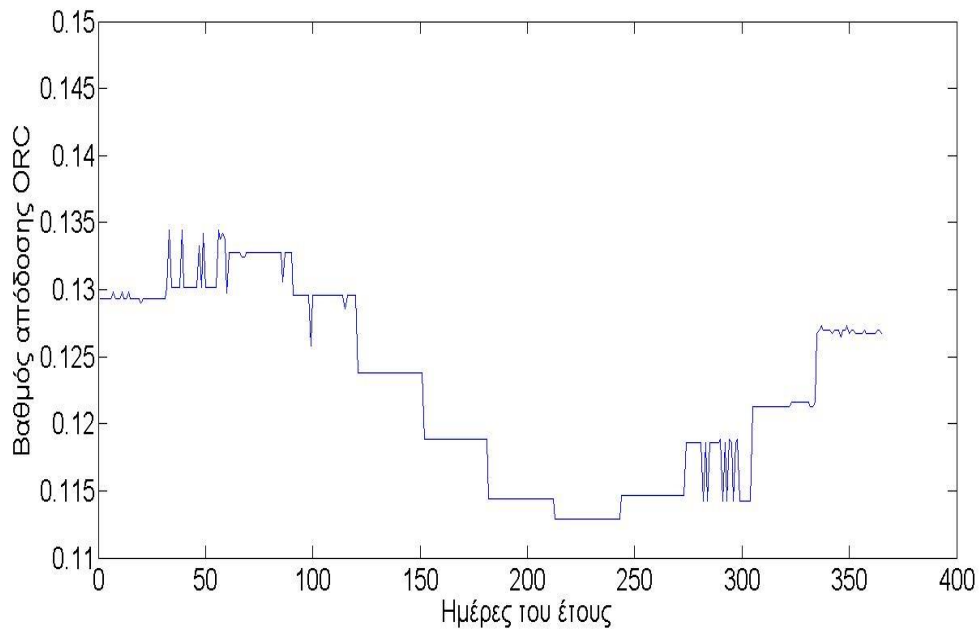
Διάγραμμα Δ.7 Βαθμός απόδοσης για το κυκλοπροπάνιο

## R152a



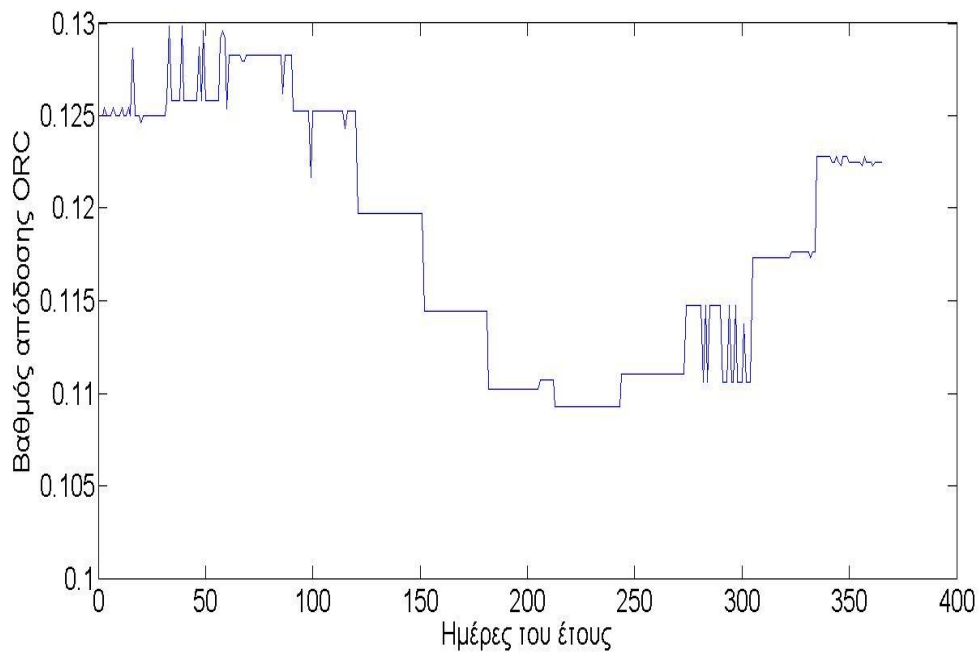
Διάγραμμα Δ.8 Βαθμός απόδοσης για το R152a

## Προπάνιο



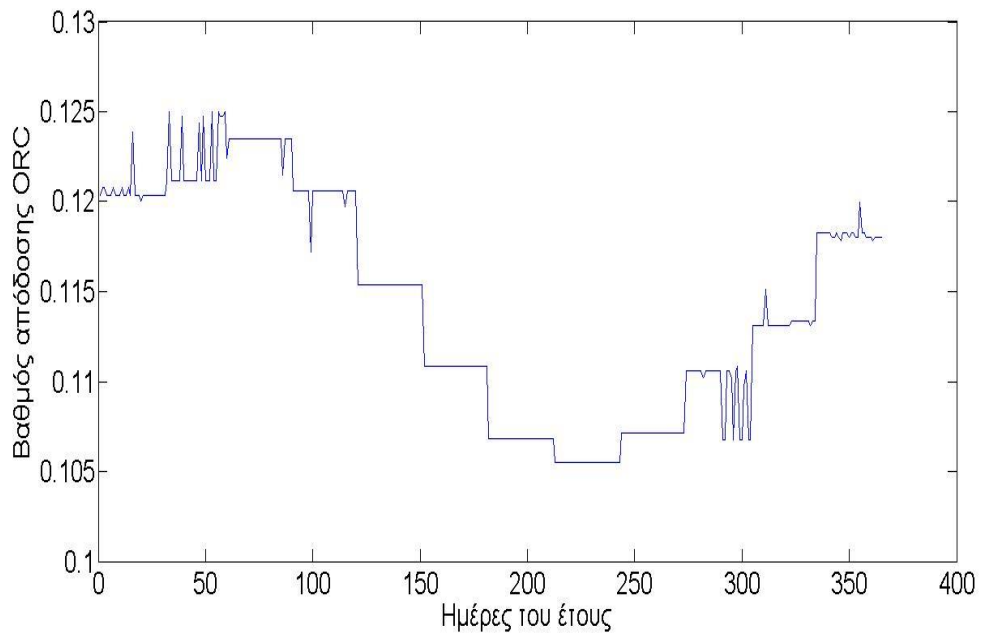
Διάγραμμα Δ.9 Βαθμός απόδοσης για το προπάνιο

## R1234yf



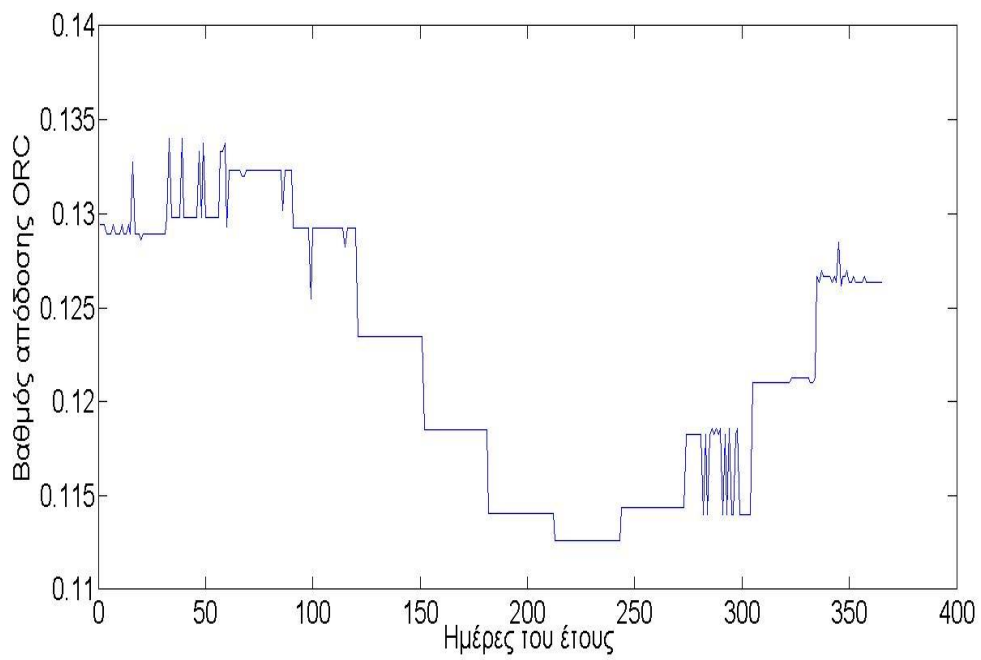
Διάγραμμα Δ.10 Βαθμός απόδοσης για το R1234yf

### R227ea



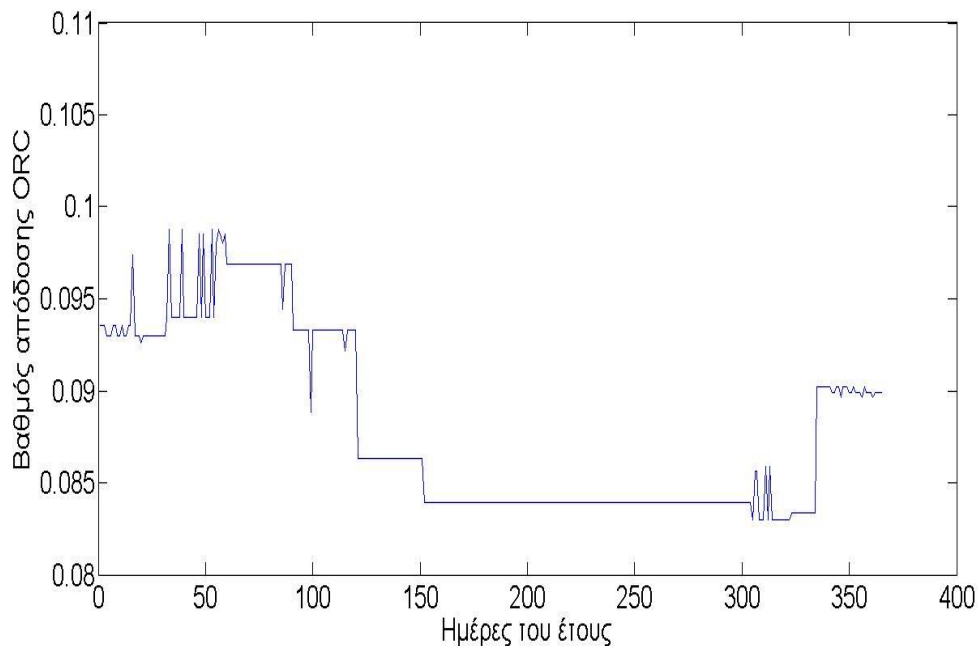
Διάγραμμα Δ.11 Βαθμός απόδοσης για το R227ea

### R134a



Διάγραμμα Δ.12 Βαθμός απόδοσης για το R134a

## CO<sub>2</sub>



Διάγραμμα Δ.13 Βαθμός απόδοσης για το CO<sub>2</sub>

Παρατηρείται πως για όλα τα εργαζόμενα μέσα ο βαθμός απόδοσης ελαχιστοποιείται το καλοκαίρι και μεγιστοποιείται τον χειμώνα. Αυτό συμβαίνει διότι η υψηλή θερμοκρασία του κύκλου είναι σταθερή για όλες τις ώρες του έτους λόγω του υλικού αλλαγής φάσης ενώ η θερμοκρασία του συμπυκνωτή μεταβάλλεται. Η θερμοκρασία του συμπυκνωτή εξαρτάται από την θερμοκρασία της θάλασσας η οποία είναι μεγαλύτερη το καλοκαίρι. Η υψηλή θερμοκρασία του συμπυκνωτή μειώνει τον βαθμό απόδοσης του κύκλου. Επομένως το καλοκαίρι θα έχουμε μικρότερους βαθμούς απόδοσης. Παράλληλα φαίνονται και οι ημερήσιες διακυμάνσεις καθώς η θερμοκρασία της θάλασσας μεταβάλλεται κατά την διάρκεια της ημέρας. Τα μέγιστα που εμφανίζονται οφείλονται σε αυτόν τον παράγοντα καθώς κάποια ημέρα η παραγωγή ισχύος μπορεί να μην γίνει τις βραδινές ώρες που η θερμοκρασία είναι χαμηλότερη αυξάνοντας τον βαθμό απόδοσης του ORC. Στην περίπτωση του CO<sub>2</sub> τους καλοκαιρινούς μήνες παρατηρείται μια σταθερότητα στον βαθμό απόδοσης του κύκλου που οφείλεται στην παραδοχή που έχουμε κάνει. Δηλαδή προκειμένου να ο συμπυκνωτής να λειτουργεί σε υποκρίσιμη πίεση όταν η θερμοκρασία της θάλασσας είναι αρκετά μεγάλη με αποτέλεσμα ο κύκλος να πρέπει να λειτουργήσει με τον συμπυκνωτή σε υπερκρίσιμη πίεση παρεμβάλλεται ενδιάμεσα ένα ψυγείο με σκοπό την μείωση της θερμοκρασίας. Το κόστος του ψυγείου δεν υπολογίζεται καθώς η περίπτωση του CO<sub>2</sub> δεν φαίνεται να είναι συμφέρουσα.