

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ



***«Μελέτη φωτοβολταϊκών συλλεκτών για παραγωγή
ηλεκτρισμού και ψύξης»***

***«Investigation of photovoltaic panels for electricity and
cooling production»***

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ του
ΔΗΜΗΤΡΗ ΕΓΓΛΕΖΟΥ

Επίβλεψη: Χρήστος Τζιβανίδης, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, 2020

Ευχαριστίες

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θέλω να εκφράσω στον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Χρήστο Τζιβανίδη για την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε σε όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της Διπλωματικής μου εργασίας. Μέσα από την συνεργασία μας μου πρόσφερε απαραίτητες γνώσεις και εφόδια για την μετέπειτα πορεία μου ως μηχανικός.

Οφείλω επίσης μεγάλο ευχαριστώ στο Δρ. Ευάγγελο Μπέλλο για την συνεχή βοήθεια και καθοδήγηση που μου πρόσφερε. Οι συμβουλές και οδηγίες του ήταν καθοριστικές για την επιτυχή ολοκλήρωση της εργασίας.

Τέλος θέλω να ευχαριστήσω την οικογένεια και τους φίλους μου για την στήριξη και την αγάπη που μου πρόσφεραν σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	3
Περίληψη.....	7
Abstract	8
Ονοματολογία.....	9
1. Ηλιακή Ενέργεια.....	11
1.1 Εισαγωγή - Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.....	11
1.2 Χρήση Ηλιακής Ενέργειας.....	14
1.3 Βασική θεωρεία Ηλιακής Ενέργειας - Ηλιακή ακτινοβολία	15
1.4 Ηλιακοί συλλέκτες.....	19
1.4.1 Επίπεδος ηλιακός συλλέκτης	19
1.4.2 Συγκεντρωτικοί συλλέκτες.....	21
1.4.3 Συλλέκτες κενού	22
2. Φωτοβολταϊκά - Ψύξη.....	23
2.1 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο.....	24
2.2 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των Φωτοβολταϊκών	25
2.2.1 Επίδραση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασία του ΦΒ στοιχείου.....	26
2.2.2 Τεχνικά στοιχεία των ΦΒ.....	28
2.3 Τεχνολογίες ΦΒ στοιχείων	29
2.3.1 Mono-Crystalline Silicon (Mono-c-Si)	29
2.3.2 Poly-Crystalline Silicon (Poly-c-Si).....	29
2.3.3 Thin Film Cells.....	30
2.4 Συστήματα φωτοβολταϊκών	31
2.5 Συμψηφισμός ενέργειας - Net metering	36
2.6 Σύστημα ψύξης με συμπίεση ατμού	37
3. Μεθοδολογία.....	39
3.1 Μοντέλο ΦΒ με χρήση του υπολογιστικού εργαλείο προσομοίωσης EES.....	39
3.2 Σύστημα κλιματισμού.....	47
3.3 Τελικό σύστημα και Οικονομοτεχνική Ανάλυση.....	49
4. Αποτελέσματα.....	51
4.1 Επαλήθευση ΦΒ μοντέλου με επικύρωση υπάρχων χαρακτηριστικών.....	51
4.1.1 Μονοκρυσταλλικό ΦΒ στοιχείο.....	51

4.1.2 Πολυκρυσταλλικό ΦΒ στοιχείο	52
4.1.3 ΦΒ στοιχείο λεπτού υμενίου - Άμορφου πυριτίου (a-Si)	54
4.2 Χρήση μοντέλου για πρόβλεψη χαρακτηριστικών καμπύλων για την περιοχή της Αθήνας των ΦΒ στοιχείων που παρουσιάστηκαν πιο πάνω.....	55
4.2.1 Μονοκρυσταλλικό ΦΒ στοιχείο για την περιοχή της Αθήνας για τους μήνες Απρίλιο με Οκτώβριο.....	57
4.2.2 ΦΒ στοιχείο άμορφου πυριτίου για την περιοχή της Αθήνας για τους μήνες Απρίλιο με Οκτώβριο.....	59
4.3 Χρήση μοντέλου για πρόβλεψη χαρακτηριστικών καμπύλων και παραγόμενης ενέργειας εμπορικού ΦΒ πάνελ (Panasonic 330W) για τις περιοχές Αθήνας, Παραλιμνίου και Σεβίλλης.....	63
4.4 COP και Ηλεκτρική Ισχύς συστήματος κλιματισμού	86
4.4.1 Ψυκτική ισχύς $Q=2,5$ kW και εσωτερική θερμοκρασία χώρου $T_e=25^{\circ}\text{C}$	86
4.4.2 Ψυκτική ισχύς $Q=2,5$ kW και εσωτερική θερμοκρασία χώρου $T_e=20^{\circ}\text{C}$	90
4.4.3 Ψυκτική ισχύς $Q=5$ kW και εσωτερική θερμοκρασία χώρου $T_e=25^{\circ}\text{C}$	91
4.4.4 Ψυκτική ισχύς $Q=5$ kW και εσωτερική θερμοκρασία χώρου $T_e=20^{\circ}\text{C}$	92
4.4.4 Απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια τον χρόνο για τις ανάγκες κλιματισμού για τις περιοχές Αθήνας, Παραλιμνίου και Σεβίλλης.....	93
4.5 Οικονομοτεχνική ανάλυση	97
4.5.1 Εγκατάσταση συστήματος ΦΒ με συμψηφισμό ενέργειας (Net Metering).....	97
4.5.2 Ταυτόχρονη εγκατάσταση συστήματος κλιματισμού με R152a και ΦΒ συστημάτων με συμψηφισμό ενέργειας για την περιοχή της Αθήνας.....	100
5. Ανακεφαλαίωση-Συμπεράσματα.....	102
6. Βιβλιογραφία	104

Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια στην Ευρώπη παρατηρείται μεγάλη αύξηση στην παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές και μικρότερη εξάρτηση από ορυκτά καύσιμα. Αυτό είναι το αποτέλεσμα της υιοθέτησης μιας βιώσιμης και πιο φιλικής προς το περιβάλλον προσέγγισης αλλά και του κανονισμού που έχει επιβάλει η Ευρωπαϊκή Ένωση. Αυτός προνοούσε, οι χώρες της Ε.Ε. να καλύπτουν τουλάχιστον το 12% της καταναλώσιμης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές μέχρι το 2009, 20% μέχρι το 2020 και 32% το 2030. Παρόλο που αρκετές από τις χώρες αυτές κατάφεραν να πετύχουν τους αρχικούς στόχους, υπάρχει ακόμα τεράστια προοπτική χρησιμοποίησης της Ηλιακής ενέργειας κυρίως από τις χώρες της Νότιας Ευρώπης. Η μεγάλη ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της γης στις χώρες αυτές εκτός από την παραγωγή μεγάλων ποσών ενέργειας, δημιουργεί μαζί με την υψηλή θερμοκρασία μεγάλη ανάγκη για ψύξη την ίδια περίοδο.

Το αντικείμενο της συγκεκριμένης διπλωματικής είναι η αξιοποίηση της Ηλιακής ενέργειας μέσω φωτοβολταϊκών συλλεκτών για την παραγωγή ηλεκτρισμού και ψύξης. Δημιουργήθηκε ένα αξιόπιστο μοντέλο που χρησιμοποιεί γεωγραφικά, ηλιακά, κλιματικά δεδομένα κάποιας τοποθεσίας καθώς και τις τεχνικές προδιαγραφές που παρέχουν οι κατασκευαστές των φωτοβολταϊκών για την πρόβλεψη και τον υπολογισμό της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Το μοντέλο αυτό εφαρμόστηκε για τρεις περιοχές της Ελλάδας, της Ισπανίας και της Κύπρου για την μέση μέρα κάθε μήνα για τον υπολογισμό διαφόρων ετήσιων μεγεθών. Στην συνέχεια έγινε η εύρεση της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας για την ψύξη κτηρίων των περιοχών αυτών για τρία ψυκτικά μέσα. Παρουσιάζεται επίσης οικονομοτεχνική ανάλυση για συγκεκριμένη εγκατεστημένη ισχύ φωτοβολταϊκών συστημάτων με τη μέθοδο συμψηφισμού ενέργειας (Net Metering) αλλά και ανάλυση για ταυτόχρονη εγκατάσταση ψυκτικών συστημάτων με φωτοβολταϊκά.

Στα πρώτα τρία κεφάλαια παρουσιάζεται η βασική θεωρία της παρούσας διπλωματικής και οι προαπαιτούμενες γνώσεις για την κατανόηση του τελικού μοντέλου και των αποτελεσμάτων. Συγκεκριμένα παρουσιάζεται στο πρώτο κεφάλαιο οι βασικές έννοιες και χρήσεις της ηλιακής ενέργειας. Στο δεύτερο κεφάλαιο εξηγούνται τα χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών και περιγράφονται διάφορες τεχνολογίες και συστήματα φωτοβολταϊκών όπως επίσης και μια σύντομη παρουσίαση ψυκτικού κύκλου. Στο τρίτο κεφάλαιο της διπλωματικής παρουσιάζεται το μοντέλο που δημιουργήθηκε με αναφορά στην μεθοδολογία και την διαδικασία που ακολουθήθηκε. Στο τέταρτο κεφάλαιο είναι τα αποτελέσματα της εφαρμογής του μοντέλου για διάφορες συνθήκες και τέλος παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν αλλά και προτεινόμενη μελλοντική έρευνα.

Abstract

Recently there is a tremendous increase in the production of energy from Renewable Resources and reliance on fossil fuels is reduced. This is because nowadays one more environmentally friendly and sustainable approach has been adopted. The regulations from the European Union play a significant role in this increase as well. The goal was initially to meet 12% of the energy consumed by E.U countries to be produced from renewable resources until 2010, 20% until 2020 and the future steps are to reach 32% by 2030. Even though many countries managed to achieve the first steps, there is still huge potential for usage of Solar Energy especially in Southern European countries. High intensity of Solar radiation that reaches earth's surface in these countries, alongside the high temperature create also the need for cooling the same period as the massive energy production from Solar Energy.

The objective of this study is the utilization of Solar Energy and the investigation of photovoltaic panels for electricity and cooling production. First a reliable model was created which uses geographical, solar, climate data of any location and the electrical parameters that are provided from photovoltaic panels manufacturers to forecast and calculate the produced electrical energy. Later this model implemented for three locations in Greece, Spain and Cyprus for the mean day of each month. Also the electrical needs for the cooling of the building were calculated for these locations for three refrigerants. In the end an economical and technical analysis is presented for a photovoltaic net metering system installation and for an installation of a cooling system with photovoltaics.

In the first three chapters the basic theory of the thesis is presented as well as the prerequisite knowledge for the understanding of the model and the results. Specifically the first chapter presents the theory and uses of Solar Energy. The second chapter explains the electrical characteristics of Photovoltaics and describes different technologies and systems of Photovoltaics. The Refrigeration cycle is also presented in the second chapter. The third chapter presents the model that is created alongside with the methodology and the steps followed. The results of the implementation of the model for different conditions is in the fourth chapter and then the conclusions that emerged and topics for future research.

Ονοματολογία

Μεγέθη:

α : απορροφητικότητα του απορροφητήρα

A_{α} : επιφάνεια από την οποία εισέρχεται η ηλιακή ακτινοβολία [m^2]

A_c : επιφάνεια συλλέκτη [m^2]

A_r : επιφάνεια του δέκτη που απορροφά την συγκεκριμένη ακτινοβολία [m^2]

C: Λόγος Συγκέντρωσης

FF: Συντελεστής πλήρωσης

F_R : συντελεστής θερμικής απολαβής του συλλέκτη

G: στιγμιαία ολική ακτινοβολία [W/m^2]

G_{sc} : ηλιακή σταθερά [W/m^2]

h: ενθαλπία [kJ/kg]

I: ένταση ρεύματος [A]

n: Αύξων αριθμός ημέρας [-]

N: διάρκεια της ημέρας [h]

N_s : αριθμός των ΦΒ στοιχείων κάθε στοιχείου σε σειρά

P: Ισχύς [W]

R: αντίσταση [Ω]

r: επιτόκιο [%]

S: απορροφημένη ηλιακή ακτινοβολία [W/m^2]

T: θερμοκρασία [$^{\circ}C$]

U_L : συντελεστής συνολικών θερμικών απωλειών του συλλέκτη [$W/(m^2 K)$]

V: τάση ρεύματος [V]

W: Έργο [W]

Ελληνικά σύμβολα:

β : κλίση των συλλεκτών [$^{\circ}$]

γ : Αζιμούθιο επιφάνειας [$^{\circ}$]

γ_s : Αζιμούθιο ήλιου [$^{\circ}$]

δ : Ηλιακή απόκλιση [$^{\circ}$]

θ : γωνιά πρόσπτωσης [$^{\circ}$]

θ_z : Γωνία ζενίθ [$^{\circ}$]

τ : διαπερατότητα του καλύμματος

ϕ : Γεωγραφικό πλάτος [$^{\circ}$]

ω : Ωριαία γωνία [$^{\circ}/min$]

Δείκτες:

am:περιβάλλον

b: άμεση ηλιακή ακτινοβολία

c: συμπυκνωτή (condenser)

e: ατμοποιητή (evaporator)

el: ηλεκτρική

f: ρευστό

i: εισόδου

o: εξόδου

MP: μέγιστη ισχύς

OC: ανοικτόκυκλωμα

ref: αναφοράς (reference)

SC: βραχυκύκλωμα

Ακρωνύμια:

ΑΠΕ: Ανανεώσιμες πηγές Ενέργειας

ΦΒ: Φωτοβολταϊκό

AC: Εναλλασσόμενο ρεύμα (Alternating Current)

CF: ταμειακή ροή (cash flow)

COP: Συντελεστής συμπεριφοράς (Coefficient of performance)

COP_{th}: Θεωρητικός Συντελεστής συμπεριφοράς

DC: Συνεχές ρεύμα (Direct Current)

EES: Engineering Equation Solver

GWP: δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη (global warming potential)

MPPT: Σημείο Μέγιστης Ισχύς (Maximum Power Point Tracker)

NIST: National Institute of Standards and Technology

NOCT : Κανονική θερμοκρασία λειτουργίας στοιχείου (Normal Operating Cell Temperature)

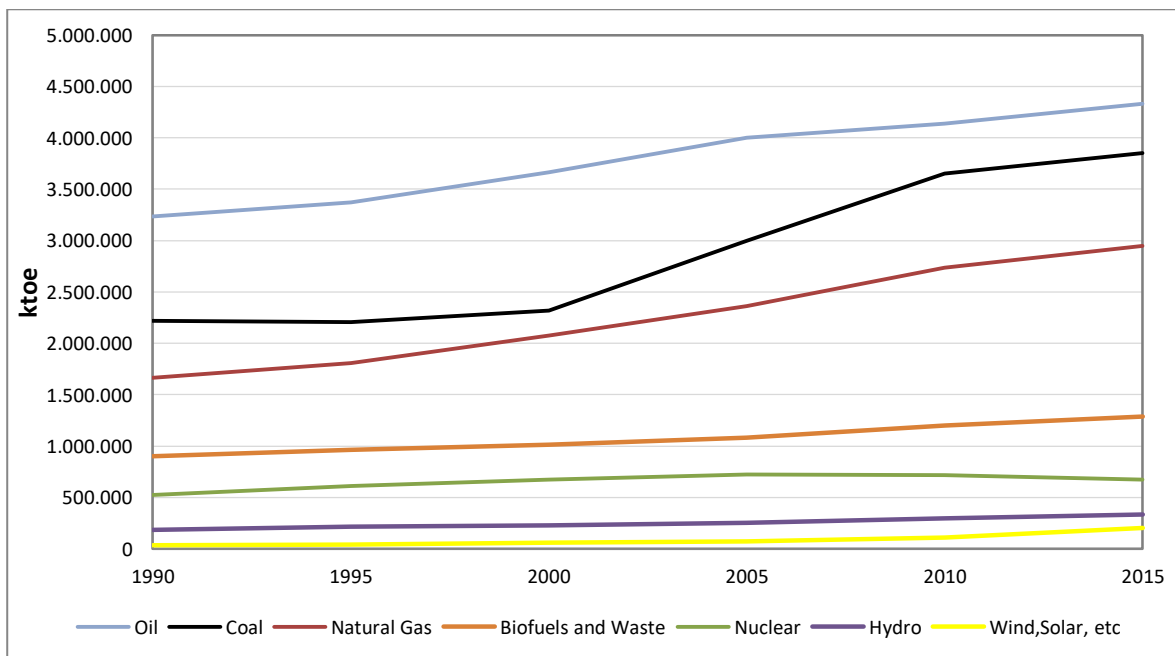
NPV: καθαρή παρούσα αξία (Net Present Value)

PP: έτος αποπληρωμής (Payback period)

1. Ηλιακή Ενέργεια

1.1 Εισαγωγή - Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Με την πρόοδο της τεχνολογίας και το γεγονός πως περισσότεροι άνθρωποι έχουν πρόσβαση σε ηλεκτρικό ρεύμα, οδηγεί σε διαχρονική αύξηση στην κατανάλωση ενέργειας. Το μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειας αυτής παράγεται από πετρέλαιο, κάρβουνο και φυσικό αέριο. Η μείωση των αποθεμάτων αυτών και οι μεγάλες εκπομπές CO₂ δημιούργησαν την ανάγκη για υιοθέτηση μιας πιο βιώσιμης πολιτικής. Αυτό φαίνεται και στο Σχήμα 1.1 όπου παρουσιάζεται η προμήθεια πρωτογενούς ενέργειας τα τελευταία χρόνια σε τόνους ισοδύναμου πετρελαίου (ktoe). Πρωτογενής ενέργεια είναι μια μορφή ενέργειας που βρίσκεται στη φύση και δεν έχει υποβληθεί σε κάποια μετατροπή από τον άνθρωπο σε αντίθεση με τη δευτερογενή που περιλαμβάνει πόρους που έχουν μετατραπεί ή αποθηκευτεί.



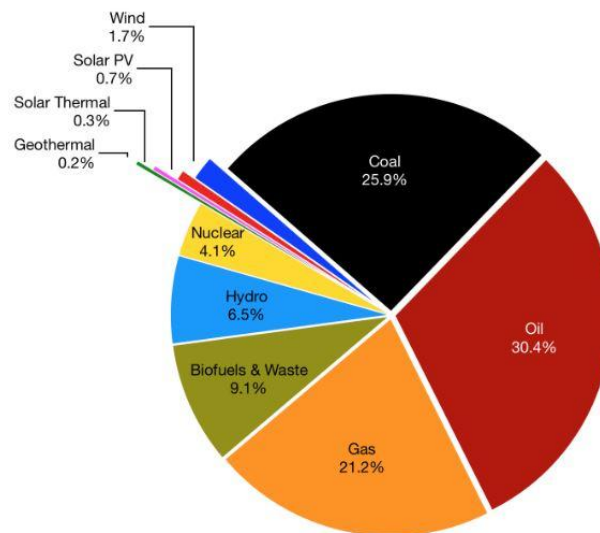
Σχήμα 1.1 Συνολική παροχή πρωτογενούς ενέργειας [1]

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στις μέρες μας και η στροφή στην παραγωγή ενέργειας από τέτοιες πηγές ηγείται της πολιτικής της ενεργειακής κοινότητας. Η αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι κομβική στην μείωση της τωρινής εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα και στη μείωση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Ανανεώσιμη ενέργεια είναι η ενέργεια που προέρχεται από φυσικές πηγές ή διαδικασίες που αναπληρώνεται συνεχώς. Οι κύριες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) είναι η αιολική, υδροηλεκτρική, ηλιακή, γεωθερμική, βιοενέργεια και τα τελευταία χρόνια αναπτύσσεται επίσης και η κυματική ή παλιρροιακή ενέργεια. Παρόλο που το ενδιαφέρον προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι έντονο τα τελευταία χρόνια, ο άνθρωπος εκμεταλλευόταν διαχρονικά τον ήλιο και τον αέρα για ανάγκες θέρμανσης, φωτισμού και μεταφοράς.

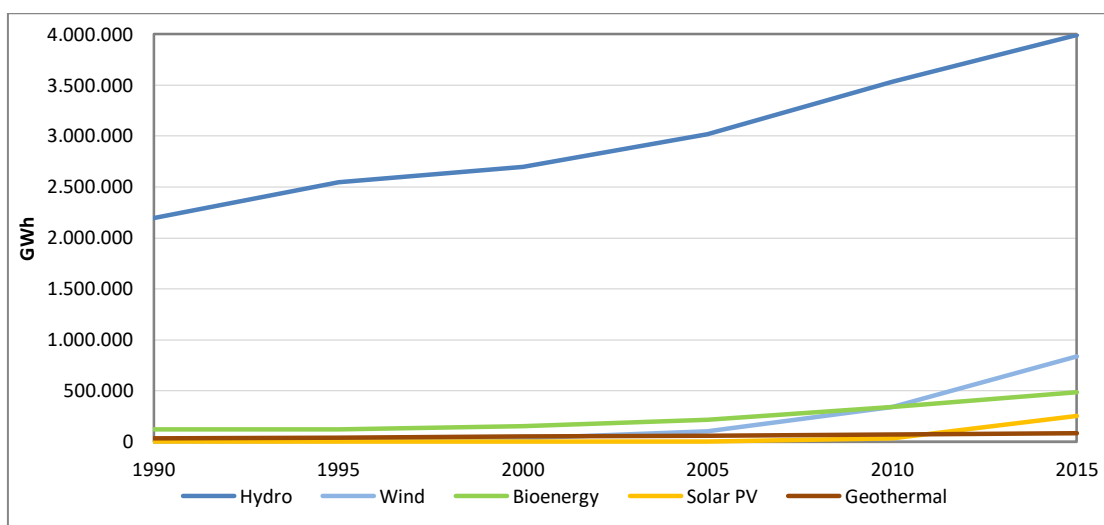
Τα κύρια πλεονεκτήματα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι:

- Ανεξάντλητες πηγές
- Μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης καθώς δεν παράγουν εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου
- Μείωση εξάρτησης από ορυκτά καύσιμα
- Χαμηλότερο λειτουργικό κόστος
- Δημιουργία θέσεων εργασίας

Το σχήμα 1.2 παρουσιάζει την συνεισφορά της κάθε πηγής ενέργειας για το 2017 και βλέποντας τα ποσοστά αυτά φαίνεται η ανάγκη για περαιτέρω αύξηση στην παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Το συνολικό ποσοστό των ΑΠΕ στη συνολική κατανάλωση ενέργειας για το 2019 εκτιμάται ότι ήταν 17,1%. Στο σχήμα 1.3 παρουσιάζεται η συνολική ηλεκτρική ενέργεια που παράχθηκε από τις πέντε κύριες ανανεώσιμες πηγές. Φαίνεται ότι η υδροηλεκτρική είναι μακράν ή μεγαλύτερη πηγή ενέργειας ενώ οι αιολική και ηλιακή αυξάνονται με γρήγορο ρυθμό ειδικά τα τελευταία χρόνια.

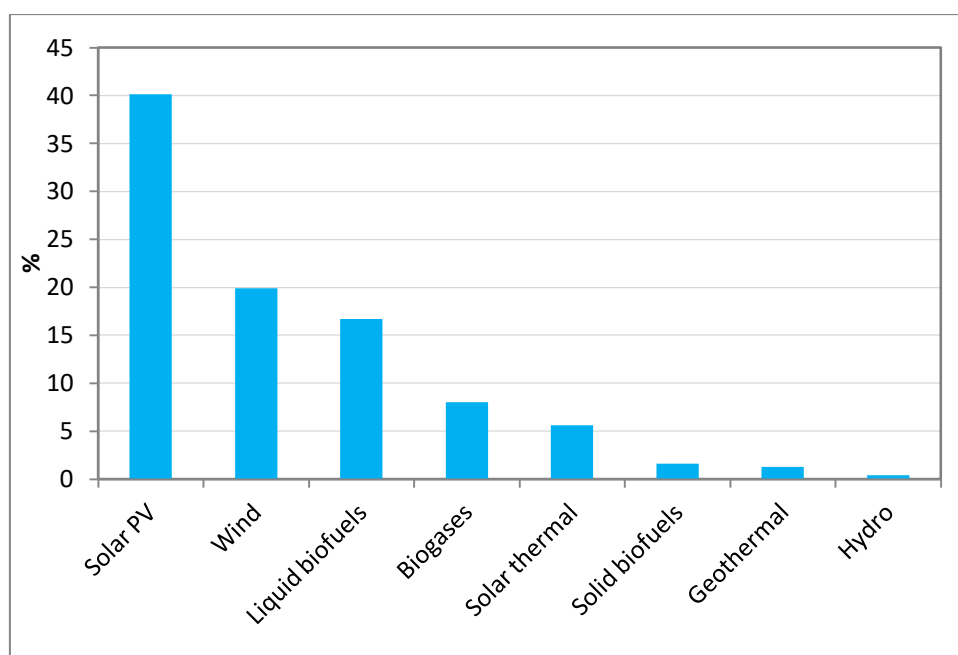


Σχήμα 1.2 Ποσοστά προμήθειας πρωτογενούς ενέργειας [2]

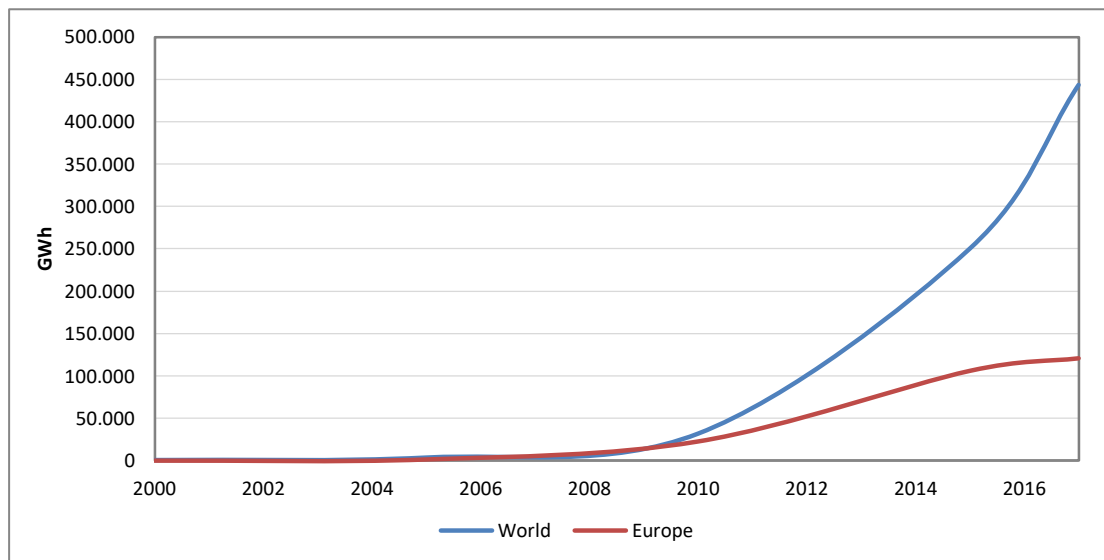


Σχήμα 1.3 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές [1]

Αρκετές χώρες πρωτοπορούν στην χρήση των ΑΠΕ και κάλυψη των αναγκών τους κατά μεγάλο ποσοστό από αυτές. Για παράδειγμα η Ισλανδία παράγει όλη την ενέργεια της από ΑΠΕ και συγκεκριμένα 72,6% από υδροηλεκτρική ενέργεια και 27,4% από γεωθερμική. Η Ελβετία καλύπτει περίπου το 60% των αναγκών της από υδροηλεκτρική ενέργεια ενώ η Σουηδία καλύπτει 57% από ΑΠΕ με 40% από Υδροηλεκτρική, 10% από Αιολική και 7,4% από βιομάζα. Η Δανία καλύπτει επίσης το 42% από Αιολική ενέργεια [3]. Αυτό βέβαια εκτός από την ευσυνείδητη πολιτική που ακολουθούν αυτές οι χώρες, έχει να κάνει επίσης με τη γεωγραφική τους θέση αλλά και την μορφολογία του εδάφους. Η Δανία για παράδειγμα βρίσκεται σε θέση όπου υπάρχουν αρκετοί άνεμοι ενώ οι άλλες χώρες που αναφέρθηκαν έχουν τέτοια μορφολογία εδάφους που προϋποθέτει η εγκατάσταση υδροηλεκτρικών σταθμών. Σε αντίθετη περίπτωση χώρες που βρίσκονται νότια της Ευρώπης μπορούν να εκμεταλλευτούν την Ηλιακή Ενέργεια για μεγαλύτερη διείσδυση των ΑΠΕ στην παραγωγή της ενέργειας που καταναλώνουν. Γίνεται ήδη χρήση της ενέργειας αυτής αλλά υπάρχει ακόμα μεγάλη προοπτική αύξησης της συνεισφοράς κυρίως από φωτοβολταϊκά. Γι' αυτό και η παραγωγή ηλεκτρισμού από φωτοβολταϊκά συστήματα έχει τον μεγαλύτερο ρυθμό αύξησης όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.4. Επίσης στο σχήμα 1.5 παριστά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά μέχρι το 2017 όπου φαίνεται η ραγδαία αύξηση τα τελευταία χρόνια.



Σχήμα 1.4 Ετήσιος ρυθμός αύξησης της προσφοράς ΑΠΕ για παραγωγή ηλεκτρισμού [1]



Σχήμα 1.5 Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από φωτοβολταϊκά [1]

1.2 Χρήση Ηλιακής Ενέργειας

Με τον όρο Ηλιακή Ενέργεια αναφερόμαστε στην οποιαδήποτε δέσμευση ενέργειας από τον ήλιο και μετατροπή της σε θερμότητα ή ηλεκτρισμό. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι οι περισσότερες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας προέρχονται άμεσα είτε έμμεσα από τον ήλιο. Η ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιούταν ανέκαθεν για θέρμανση χώρων και αργότερα αναπτύχθηκαν αρκετές τεχνολογίες για θέρμανση νερού μέσω ηλιακών συλλεκτών και απευθείας μετατροπή σε ηλεκτρισμό μέσω φωτοβολταϊκών συλλεκτών. Οι ηλιακοί συλλέκτες είναι κάποιας μορφής εναλλάκτες θερμότητας αφού μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε θερμότητα που μεταφέρεται σε κάποιο μέσο (υγρό ή αέρα). Σε περίπτωση που παράγεται ζεστός αέρας, χρησιμοποιείται για την θέρμανση χώρων ενώ το ζεστό νερό, χρησιμοποιείται για οικιακή χρήση, θέρμανση χώρων ή προσφέρεται σαν πηγή θερμότητας σε διάφορα συστήματα όπως σε σύστημα ηλιακής ψύξης.

Τα βασικά πλεονεκτήματα της Ηλιακής Ενέργειας είναι:

- Για το ευρύ κοινό είναι ο πιο εύκολα προσβάσιμος τύπος ΑΠΕ
- Τα συστήματα που χρησιμοποιούν ηλιακή ενέργεια δηλαδή ηλιακοί συλλέκτες και φωτοβολταϊκά έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής
- Τα συστήματα ηλιακής ενέργειας έχουν γρήγορη απόσβεση του αρχικού κόστους και το λειτουργικό κόστος είναι μηδαμινό
- Σχεδόν μηδενικό κόστος συντήρησης ειδικά στις περιπτώσεις συστημάτων χωρίς κινούμενα μέρη
- Η θερμότητα που παράγεται από τους ηλιακούς συλλέκτες μπορεί να αποθηκευτεί σε δεξαμενές αποθήκευσης
- Μπορεί να γίνει χρήση μπαταριών για αποθήκευση της επιπλέον παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας για φωτοβολταϊκά συστήματα όταν δεν μπορεί να ανατροφοδοτήσει το δίκτυο
- Αθόρυβα συστήματα σε σχέση με τις υπόλοιπες ΑΠΕ

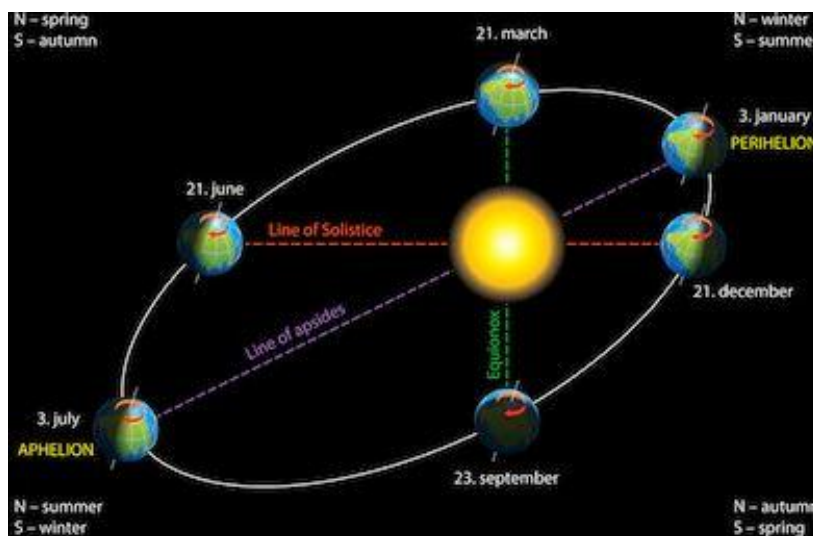
- Ιδανικά συστήματα για εγκατάσταση σε απομονωμένα μέρη που δεν συνδέονται με το δίκτυο ηλεκτρισμού

Υπάρχουν όμως και κάποια μειονεκτήματα στην χρήση της ηλιακής Ενέργειας και παρόλο που τα συστήματα εξελίσσονται διαρκώς τα προβλήματα αυτά θα υπάρχουν:

- Παραγωγή ενέργειας μόνο κατά περιόδους ηλιοφάνειας που δημιουργεί την ανάγκη αποθήκευσης για χρήση ενέργειας την νύχτα
- Εξαρτώνται από τις κλιματικές και γεωγραφικές συνθήκες με αποτέλεσμα να παράγεται λιγότερη ενέργεια κατά τις συννεφιασμένες μέρες και η τοποθέτηση των συστημάτων συστήνεται σε τοποθεσίες με μεγάλο ηλιακό δυναμικό
- Απαιτείται μεγάλη έκταση για την εγκατάσταση κυρίως των φωτοβολταϊκών διότι έχουν χαμηλή πυκνότητα ισχύος.
- Υψηλό αρχικό κόστος για την εγκατάσταση

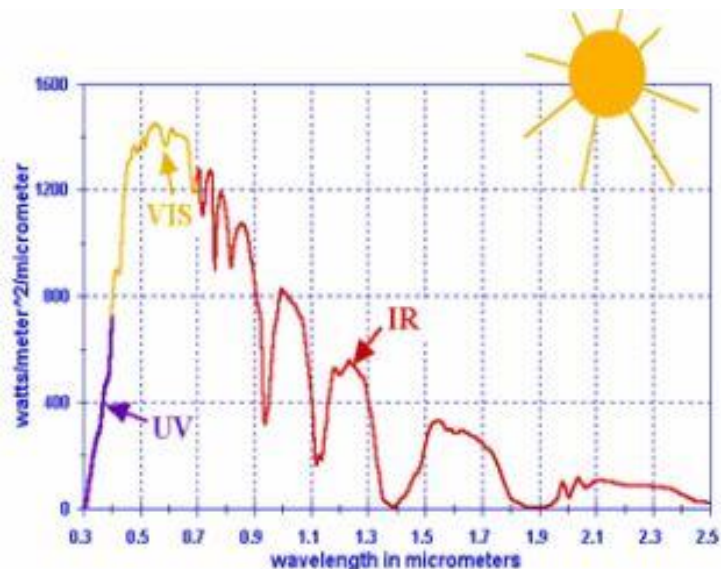
1.3 Βασική θεωρία Ηλιακής Ενέργειας - Ηλιακή ακτινοβολία

Πριν εμβαθύνουμε περισσότερο στην ενέργεια που παράγεται από τον Ήλιο καλό θα ήταν να αναφερθούν σε κάποια στοιχεία του Ήλιου γιατί αυτά είναι που επηρεάζουν την τελική παραγόμενη ενέργεια. Η γη όπως ξέρουμε κάνει δύο κινήσεις. Περιστροφή γύρω από τον άξονα της που είναι ημερήσια και στην ετήσια γύρω από τον ήλιο που ονομάζεται περιφορά. Το αποτέλεσμα της περιστροφής είναι εναλλαγή μεταξύ μέρας και νύχτας και η διαφορετική χρονική διάρκεια των δύο κατά τη διάρκεια του χρόνου, οφείλεται στη περιφορά. Η ετήσια περιφορά της γης γύρω από τον ήλιο, γίνεται σε ελλειπτική τροχιά και σε αυτή οφείλονται οι εποχές του χρόνου. Η απόσταση της γης από τον ήλιο μεταβάλλεται κατά την περιφορά της γης. Η απόσταση αυτή της γης από τον ήλιο επηρεάζει όπως θα δούμε στην συνέχεια την ηλιακή ακτινοβολία άρα την ενέργεια που φτάνει σε μια επιφάνεια και επομένως την ενέργεια που θα παραχθεί από ηλιακούς συλλέκτες ή φωτοβολταϊκά. Η κίνηση της γης σε σχέση με τον ήλιο φαίνεται και στο Σχήμα 1.6



Σχήμα 1.6 Περιφορά της γης γύρω από τον ήλιο [5]

Η ηλιακή ακτινοβολία καλύπτει ένα ευρύ φάσμα ενεργειακών επιπέδων. Η ορατή ακτινοβολία βρίσκεται στην περιοχή μήκους κύματος που κυμαίνεται από 380-780nm και καταλαμβάνει το 40% της συνολικής ενέργειας. Η ακτινοβολία με μήκος κύματος μικρότερο από 380nm ονομάζεται υπεριώδης, είναι αυτή που ευθύνεται για εγκαύματα και καταλαμβάνει το 3% της ενέργειας. Για μήκος κύματος μεγαλύτερο από 780nm είναι η υπέρυθρος ακτινοβολία που την αισθανόμαστε σαν θερμότητα και καταλαμβάνει το υπόλοιπο 57% της συνολικής ενέργειας.



Σχήμα 1.7 Φασματική κατανομή ηλιακής ακτινοβολίας εκτός ατμόσφαιρας[17]

Η ισχύς δηλαδή η ενέργεια ανά μονάδα χρόνου που προέρχεται από πηγή ακτινοβολίας προς μια μοναδιαία επιφάνεια ονομάζεται ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, μετράται σε W/m^2 και συμβολίζεται με το γράμμα G . Η μέση απόσταση γης-ήλιου είναι $1.495 \times 10^{11}m$ και η ενέργεια ανά μονάδα χρόνου που δέχεται από τον ήλιο μονάδα επιφάνειας κάθετη στις ηλιακές ακτίνες εκτός ατμόσφαιρας όταν η απόσταση είναι μέση ονομάζεται Ηλιακή σταθερά και έχει τιμή $G_{sc}=1353 W/m^2$. Όταν η απόσταση δεν είναι η μέση λόγω της περιφοράς τη γης, η ηλιακή ακτινοβολία υπολογίζεται από τη σχέση:

$$G_{on} = G_{sc} \left(1 + 0.033 \cos\left(\frac{360n}{365}\right) \right) \quad (1.1)$$

όπου $n(1 \div 365)$ είναι η μέρα του έτους.

Με το συμβολισμό G για την ηλιακή ακτινοβολία παριστάνεται η στιγμιαία ηλιακή ακτινοβολία σε κάποια επιφάνεια. Για χρονική περίοδο μια ώρας χρησιμοποιείται ο συμβολισμός I ενώ για χρονική περίοδο μια ημέρας είναι H . Όταν όμως η ηλιακή ακτινοβολία φτάνει στην ατμόσφαιρα της γης, ένα μέρος προσπίπτει απευθείας στις επιφάνειες, ένα μέρος διαχέεται στην ατμόσφαιρα και ένα μέρος απορροφάται από τα μόρια του αέρα.

Άμεσος ακτινοβολία είναι το μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στη γη (στις επιφάνειες) κατ' ευθείαν από τον ήλιο χωρίς διασκορπισμούς και συμβολίζεται με τον

δείκτη b . Δηλαδή θα είναι G_b η άμεσος ακτινοβολία που δέχεται ένα οριζόντιο επίπεδο και G_{bT} ένα κεκλιμένο επίπεδο. Ο δείκτης T συμβολίζει κεκλιμένο επίπεδο ενώ ο δείκτης n επίπεδο κάθετο στις ηλιακές ακτίνες.

Διάχυτος ακτινοβολία είναι το μέρος που διαχέεται στην ατμόσφαιρα και φτάνει στη γη με διασκορπισμό και αλλαγή κατεύθυνσης. Συμβολίζεται με τον δείκτη d δηλαδή η στιγμιαία διάχυτος ακτινοβολία είναι G_d . Το άθροισμα της αμέσου και της διάχυτης ακτινοβολίας είναι η ολική ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια. Όταν ο συλλέκτης ή επιφάνεια έχουν κλίση, προστίθεται ένα πόσο που ονομάζεται ανακλώμενη ακτινοβολία που προέρχεται από την ανάκλαση σε παρακείμενα αντικείμενα. Το μεγαλύτερο ποσό της ενέργειας προέρχεται από την άμεσο ακτινοβολία αλλά είναι σημαντική και η συμβολή της διάχυτης.

Η γωνία που δημιουργείται από την ευθεία των κέντρων γης και ήλιου με το επίπεδο του ισημερινού ονομάζεται ηλιακή απόκλιση και υπολογίζεται από την σχέση:

$$\delta = 23.45 \sin\left(\frac{360(284 + n)}{365}\right) \quad (1.2)$$

Η ηλιακή απόκλιση παίρνει τη τιμή $\delta=0^\circ$ στις 21 Μαρτίου (εαρινή ισημερία) και στις 21 Σεπτεμβρίου (φθινοπωρινή ισημερία). Στις 21 Ιουνίου παίρνει την τιμή $\delta=23.45^\circ$ ενώ στις 21 Δεκεμβρίου την τιμή $\delta=-23.45^\circ$. Για τον υπολογισμό της έντασης της ακτινοβολίας σε κάποιες επιφάνειες και της παραγόμενης ενέργειας κάποιων συστημάτων στη συνέχεια, απαιτείται η γνώση κάποιων επιπλέον γωνιών ή μεγεθών που θα αναφερθούν σε αυτό το κεφάλαιο.

Γωνία ζενίθ θ_z σχηματίζεται από την ευθεία γης-ήλιου με την κατακόρυφο στο συγκεκριμένο σημείο. Η γωνία αυτή φαίνεται στο Σχήμα 1.8

Αζιμούθιο επιφάνειας γ είναι η γωνία που σχηματίζεται από την προβολή της καθέτου της επιφάνειας πάνω στο οριζόντιο επίπεδο και τη νότια κατεύθυνση. Δηλαδή στο νότο έχει τιμή $\gamma=0^\circ$, στη δύση $\gamma=90^\circ$, στο βορρά $\gamma=180^\circ$ και στην ανατολή $\gamma=270^\circ$.

Κλίση επιπέδου είναι γωνία που σχηματίζει μια επιφάνεια με το οριζόντιο επίπεδο και συμβολίζεται με β . Προφανώς για οριζόντιο επίπεδο ισχύει $\beta=0$.

Ωριαία γωνία ω είναι η γωνία μεταξύ του μεσημβρινού που περνάει από τη θέση του παρατηρητή και του μεσημβρινού που περνάει από τον ήλιο. Ισχύει επίσης η σχέση:

$$\omega = 15 \times (\text{ώρες από ηλιακό μεσημέρι}) \quad (1.3)$$

Η γωνία πρόσπτωσης θ της αμέσου ακτινοβολίας σε μια επιφάνεια είναι η γωνία των ηλιακών ακτίνων με την κάθετο στην επιφάνεια. Είναι ένα κομβικό μέγεθος αφού στο τέλος είναι αυτή που καθορίζει την ακτινοβολία που δέχεται μια επιφάνεια ή καλύτερα το ποσοστό της ακτινοβολία από τη μέγιστη δυνατή. Υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\cos \theta = \sin \delta \sin \varphi \cos \beta - \sin \delta \cos \varphi \sin \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \varphi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \sin \varphi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \quad (1.4)$$

όπου φ είναι το γεωγραφικό πλάτος της τοποθεσίας ($-90^\circ < \varphi < 90^\circ$).

Στις εγκαταστάσεις σταθερών συλλεκτών ή φωτοβολταϊκών στο βόριο ημισφαίριο, ο βέλτιστος προσανατολισμός είναι να βλέπουν προς τον νότο γιατί έτσι μεγιστοποιείται η παραγόμενη ενέργεια. Δηλαδή μέγιστη πρόσδοση θερμότητας στην περίπτωση επίπεδων συλλεκτών ή συλλεκτών κενού και μέγιστη παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια για τα φωτοβολταϊκά. Αντίθετα για εγκαταστάσεις στο νότιο ημισφαίριο ο βέλτιστος προσανατολισμός είναι προς το βορρά. Στις περιπτώσεις εγκαταστάσεων στο βόριο ημισφαίριο έχουμε $\gamma=0^\circ$ και η σχέση (1.4) γίνεται τότε:

$$\cos \theta = \sin \delta \sin(\varphi - \beta) + \cos \delta \cos(\varphi - \beta) \cos \omega \quad (1.5)$$

Επίσης για οριζόντιες επιφάνειες ($\beta=0$) ισχύει ότι $\theta=\theta_z$ και η σχέση (1.4) γίνεται:

$$\cos \theta = \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega \quad (1.6)$$

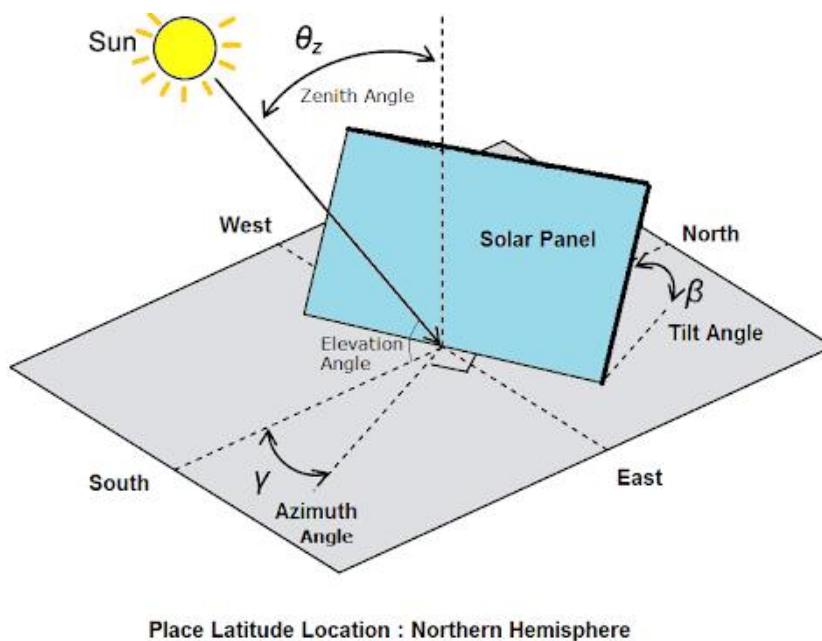
Ωριαία γωνία δύσης του ήλιου συμβολίζεται με ω_s και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\cos \omega_s = -\frac{\sin \varphi \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta} = -\tan \varphi \tan \delta \quad (1.7)$$

Για τον υπολογισμό της διάρκειας της μέρας N σε ώρες δηλαδή ο χρόνος από την ανατολή μέχρι τη δύση του ήλιου έχουμε:

$$N = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan \varphi \tan \delta) \quad (1.8)$$

που προκύπτει από τις σχέσεις (1.3) και (1.7) για $\omega=\omega_s$ και η διάρκεια της μέρας είναι δύο φορές οι ώρες από ηλιακό μεσημέρι στη σχέση (1.3)



Σχήμα 1.8 Γωνία Ζενίθ, αζιμούθιο επιφανείας και κλίση επιπέδου[6]

Όπως αναφέρθηκε προηγούμενος, η Ηλιακή Ενέργεια χρησιμοποιείται για θέρμανση νερού ή αέρα μέσω διαφόρων τύπων ηλιακών συλλεκτών. Αυτοί είναι:

- Επίπεδος συλλέκτης
- Συγκεντρωτικοί συλλέκτες
- Συλλέκτης κενού

Για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούνται φωτοβολταϊκά συστήματα. Στη συνέχεια θα γίνει μια σύντομη περιγραφή των τριών τύπων ηλιακών συλλεκτών και στο επόμενο κεφάλαιο θα αναλυθούν λεπτομερώς τα φωτοβολταϊκά που αποτελούν και το κύριο προϊόν μελέτης της παρούσας διπλωματικής.

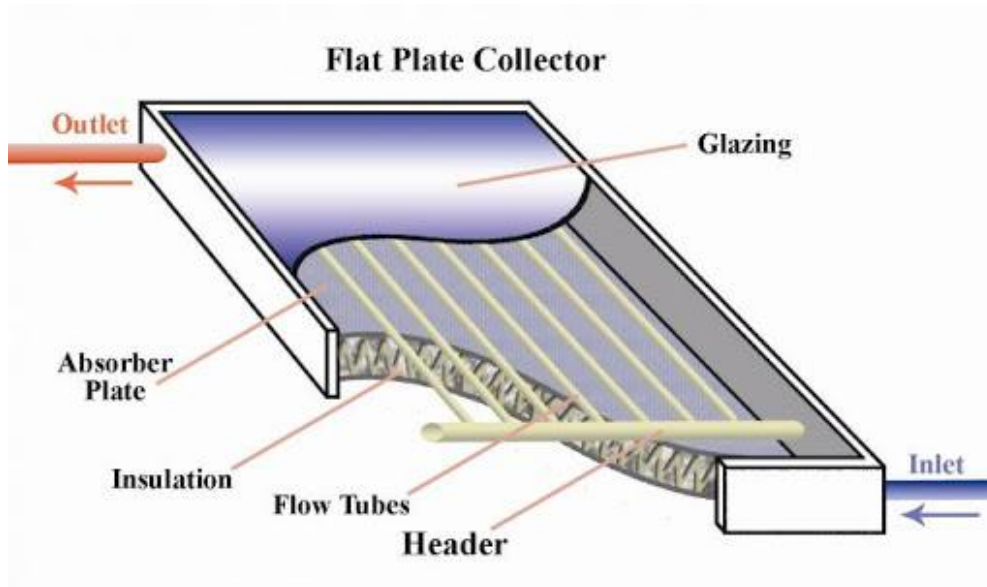
1.4 Ηλιακοί συλλέκτες

1.4.1 Επίπεδος ηλιακός συλλέκτης

Ο επίπεδος ηλιακός συλλέκτης είναι ο πιο διαδεδομένος τύπος συλλέκτη και κατέχει την πρωτιά στην επιλογή του για εγκαταστάσεις παροχής ζεστού νερού σε οικιακές χρήσεις. Αυτό οφείλεται στο χαμηλό κόστος που έχει, στην απλότητα του συστήματος αφού είναι σταθεροί και δεν απαιτούν μηχανισμό κίνησης αλλά και στην αποτελεσματικότητά του. Εκμεταλλεύεται και την άμεση αλλά και τη διάχυτη ακτινοβολία που είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για θερμοκρασίες μέχρι 100 °C πάνω από την θερμοκρασία περιβάλλοντος. Τα κύρια μέρη των επίπεδων ηλιακών συλλεκτών παρουσιάζονται πιο κάτω και φαίνονται και στο σχήμα 1.9.

- πλάκα απορρόφησης ή απορροφητήρας που είναι μια συνήθως μαύρη επίπεδη επιφάνεια. Πρέπει να έχει μεγάλη απορροφητικότητα για να μπορεί να συγκρατεί όσο περισσότερη ακτινοβολία γίνεται από αυτή που δέχεται. Η πλάκα απορρόφησης μεταφέρει την ενέργεια που δέχεται από την ακτινοβολία στο ρευστό που βρίσκεται στους αγωγούς στο πίσω μέρος της πλάκας.
- Διαφανή καλύμματα που είναι συνήθως δύο και βρίσκονται πάνω από την πλάκα απορρόφησης και έχουν ως στόχο την μείωση των θερμικών απωλειών προς το περιβάλλον.
- Μόνωση όλων των υπόλοιπων επιφανειών πλην των καλυμμάτων στην κύρια πλευρά για μείωση των θερμικών απωλειών.
- Πλαίσιο που είναι απαραίτητο και περιβάλλει τον συλλέκτη. Πρέπει να έχει μεγάλη ανθεκτικότητα.

Η άμεσος και η διάχυτη ακτινοβολία που φτάνουν στην επιφάνεια του επίπεδου συλλέκτη, διαπερνούν τα διαφανή καλύμματα και φτάνουν στον απορροφητήρα. Μεγάλο ποσό της ακτινοβολίας αυτής συλλέγεται από τον απορροφητήρα και το υπόλοιπο ανακλάται πίσω. Από την ακτινοβολία που ανακλάται, ένα μέρος διαφεύγει από τον επίπεδο ηλιακό συλλέκτη ενώ το υπόλοιπο παραμένει στο χώρο μεταξύ του απορροφητήρα και των καλυμμάτων μετά από αντανάκλαση στο εσωτερικό των καλυμμάτων και τελικά συλλέγεται και αυτό από τον απορροφητήρα.



Σχήμα 1.9 Κύρια μέρη επίπεδου ηλιακού συλλέκτη [8]

Η σχέση που δίνει την ωφέλιμη ισχύ δηλαδή την αποδιδόμενη θερμική ισχύ είναι:

$$Q_u = A_c F_R (\tau\alpha)G_T - A_c F_R U_L(T_{f,i} - T_{am}) \quad (1.9)$$

όπου

A_c : επιφάνεια συλλέκτη [m^2]

F_R : συντελεστής θερμικής απολαβής του συλλέκτη

τ : διαπερατότητα του καλύμματος

α : απορροφητικότητα του απορροφητήρα

U_L : συντελεστής συνολικών θερμικών απωλειών του συλλέκτη [$W/(m^2 K)$]

$T_{f,i}$: θερμοκρασία εισόδου του ρευστού [$^{\circ}C$]

T_{am} : θερμοκρασία περιβάλλοντος [$^{\circ}C$]

Ο βαθμός απόδοσης του επίπεδου συλλέκτη είναι:

$$n_i = \frac{Q_u}{A_c G_T} \quad (1.10)$$

όπου Q_u μπορεί να χρησιμοποιηθεί η θερμική ισχύς από την σχέση (1.9) ή θερμική ισχύς που λαμβάνει το ρευστό δηλαδή η σχέση:

$$Q_u = \dot{m}C_p (T_o - T_i) \quad (1.11)$$

όπου

\dot{m} : παροχή ρευστού

T_o : θερμοκρασία εξόδου του ρευστού

1.4.2 Συγκεντρωτικοί συλλέκτες

Οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες χρησιμοποιούνται όταν είναι επιθυμητή η απόδοση ενέργειας σε ψιλότερες θερμοκρασίες από αυτές που επιτυγχάνονται με τους συνήθεις επίπεδους συλλέκτες. Για παράδειγμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ατμού σε ηλεκτροπαραγωγικές μονάδες. Έχουν επίσης μειωμένες θερμικές απώλειες σε σχέση με τον επίπεδο συλλέκτη, υψηλότερο βαθμό απόδοσης αλλά και αρκετά μεγαλύτερο κόστος. Στους συγκεντρωτικούς συλλέκτες η ηλιακή ακτινοβολία συγκεντρώνεται σε μια μικρή επιφάνεια απορρόφησης και έτσι αναπτύσσονται οι υψηλές θερμοκρασίες. Σε εγκαταστάσεις συγκεντρωτικών συλλεκτών, χρησιμοποιείται σύστημα παρακολούθησης του ήλιου για να αξιοποιείται βέλτιστα κάθε στιγμή η ηλιακή ακτινοβολία. Η παρακολούθηση αυτή μπορεί να είναι πλήρης δηλαδή και στις δύο κατευθύνσεις ή μόνο στη μια κατεύθυνση.

Τα κύρια μέρη των συγκεντρωτικών συλλεκτών είναι:

- Συγκεντρωτής (κάτοπτρο ή φακός)
- Δέκτης ο οποίος περιλαμβάνει τον απορροφητήρα
- Μόνωση
- Κάλυμμα

Η σχέση που χαρακτηρίζει τους συγκεντρωτικούς συλλέκτες είναι ο λόγος συγκέντρωσης:

$$C = \frac{A_a}{A_r} \quad (1.12)$$

όπου

A_a : επιφάνεια από την οποία εισέρχεται η ηλιακή ακτινοβολία [m^2]

A_r : επιφάνεια του δέκτη που απορροφά την συγκεκριμένη ακτινοβολία [m^2]

Ο λόγος συγκέντρωσης παίρνει τιμές από 1.5 έως 10 000.

Τύποι συγκεντρωτικών συλλεκτών είναι:

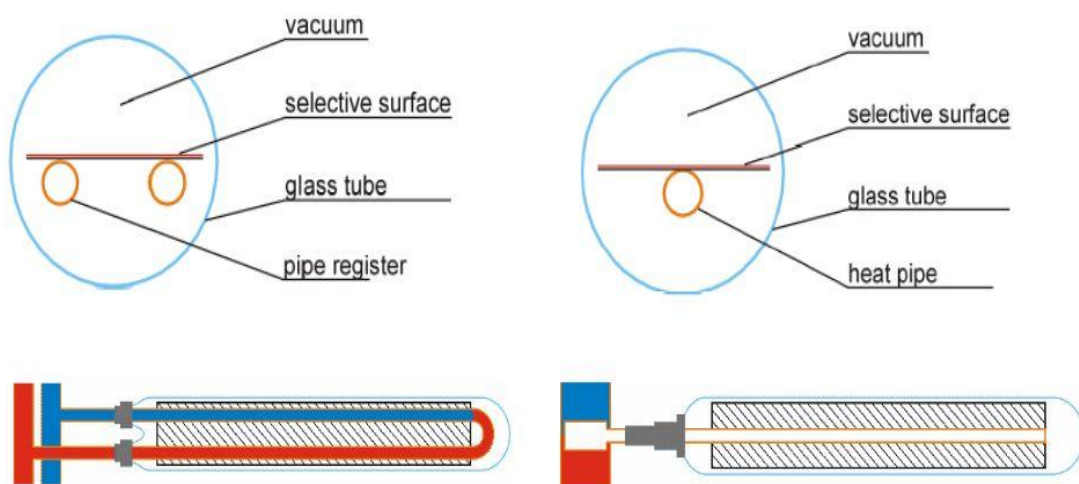
- Επιμήκης παραβολικός συλλέκτης (PTC)
- Σύνθετος παραβολικός συλλέκτης (CPC)
- Επιμήκης συλλέκτης Fresnel
- Συλλέκτης με παραβολοειδές κάτοπτρο (Dish)
- Ηλιακός πύργος (Solar Tower)



Σχήμα 1.10 Επιμήκης παραβολικός συλλέκτης (PTC) [11]

1.4.3 Συλλέκτες κενού

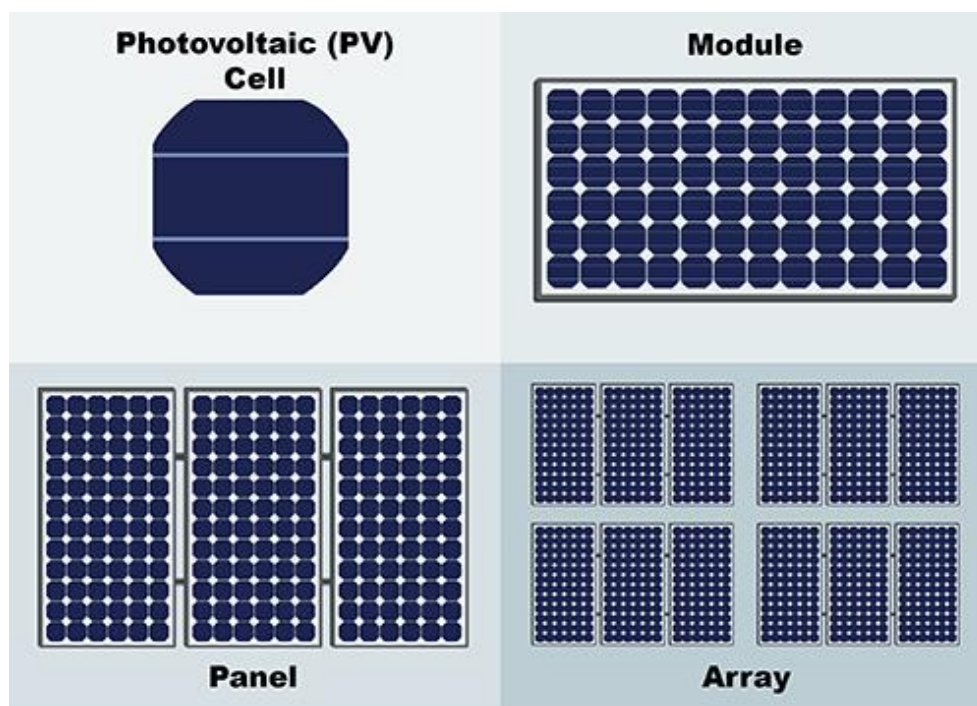
Οι συλλέκτες κενού έχουν μειωμένες θερμικές απώλειες και αυτό οφείλεται στην ύπαρξη ενός κενού ανάμεσα στο κάλυμμα και τον απορροφητήρα. Το τυπικό εύρος λειτουργίας των συλλεκτών κενού είναι 70-120°C για αυτό και δεν χρησιμοποιούνται ευρέως σε κατοικίες όπου δεν απαιτούνται τόσο υψηλές θερμοκρασίες καθώς έχουν και αυξημένο κόστος σε σχέση με τους επίπεδους συλλέκτες. Οι συλλέκτες κενού μπορεί να έχουν μόνο ένα αγωγό που περνάει μέσα το ρευστό ή να έχουν αγωγό τύπου U (Σχήμα 1.11). Οι συλλέκτες με αγωγό τύπου U έχουν πιο ψηλή αποδοτικότητα αλλά η αντικατάσταση των αγωγών αυτών είναι πιο δύσκολη. Σε μερικές περιπτώσεις, γίνεται χρήση διπλού σωλήνα κενού για να ελαχιστοποιηθούν περαιτέρω οι θερμικές απώλειες.



Σχήμα 1.11 Συλλέκτης κενού [12]

2. Φωτοβολταϊκά - Ψύξη

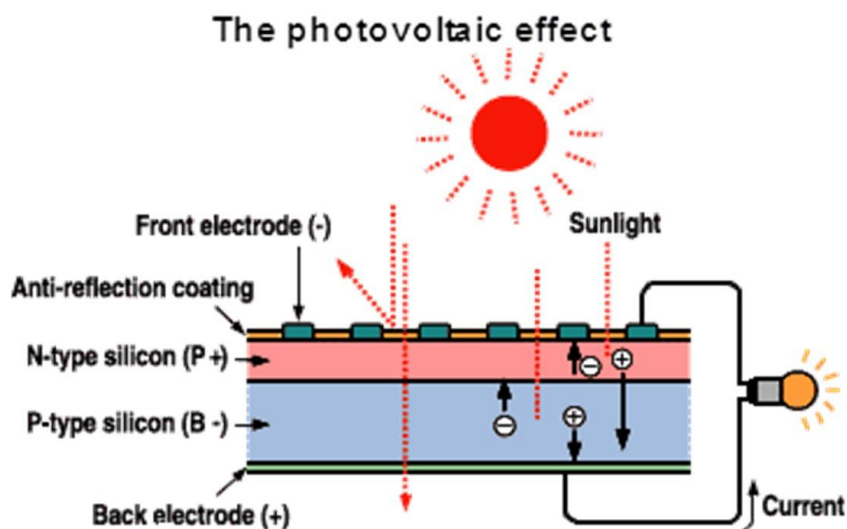
Με την χρήση των φωτοβολταϊκών (ΦΒ), γίνεται η μετατροπή του φωτός σε ηλεκτρισμό χρησιμοποιώντας ημιαγωγούς που απορροφούν φωτόνια από την ηλιακή ακτινοβολία και παράγουν ηλεκτρική τάση. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται Φωτοβολταϊκό φαινόμενο και θα αναλυθεί περισσότερο στη συνέχεια. Φωτοβολταϊκό στοιχείο (φωτοβολταϊκό κύτταρο ή φωτοβολταϊκή κυψέλη), είναι η μικρότερη ηλεκτρική συσκευή που μπορεί να κάνει την πιο πάνω διαδικασία. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, αποτελούνται από μια συνδεσμολογία φωτοβολταϊκών στοιχείων τα οποία είναι σφραγισμένα σε ένα προστατευτικό έλασμα και είναι τα δομικά στοιχεία των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Τα φωτοβολταϊκά πάνελ περιλαμβάνουν 1 ή περισσότερα πλαίσια και φωτοβολταϊκή συστοιχία αποτελείται από οποιοδήποτε αριθμό πάνελ και αποτελεί την πλήρη μονάδα παραγωγής ενέργειας. Αυτά φαίνονται και στο σχήμα 2.1



Σχήμα 2.1 ΦΒ κύτταρο, ΦΒ πλαίσιο, ΦΒ πάνελ και ΦΒ συστοιχία [14]

2.1 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το φωτοβολταϊκό φαινόμενο αποτελεί τη βάση για τη μετατροπή του φωτός σε ηλεκτρισμό. Αυτό συμβαίνει όταν μια ακτίνα φωτός εισέρχεται σε ΦΒ κύτταρο και μεταδίδει ενέργεια σε ορισμένα ηλεκτρόνια για να τα ελευθερώσει. Ένα ενσωματωμένο δυναμικό φράγμα στο ΦΒ κύτταρο ενεργεί στα ηλεκτρόνια αυτά για να παράγει τάση που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να δημιουργηθεί ηλεκτρικό ρεύμα σε ένα κύκλωμα. Ο αριθμός των ηλεκτρονίων που διαφεύγουν σε κάποιο χρόνο εξαρτάται από την ένταση της φωτεινής δέσμης αλλά η ελάχιστη ενέργεια που πρέπει να πάρουν τα ηλεκτρόνια για να ελευθερωθούν, δεν εξαρτάται από την ένταση της δέσμης αλλά από την συχνότητα του φωτός. Όταν τα ηλεκτρόνια στο ΦΒ κύτταρο δέχονται μικρότερη ενέργεια από την ελάχιστη δεν συμβαίνει το φωτοβολταϊκό φαινόμενο και απλά θερμαίνεται το ΦΒ κύτταρο. Όταν όμως δεχθούν την ελάχιστη ενέργεια, τα ηλεκτρόνια ξεφεύγουν από το άτομο αφήνοντας πίσω μια οπή και μπορούν να κινηθούν ελεύθερα καλύπτοντας άλλες οπές και έτσι υπάρχει διαρκώς σε ένα ΦΒ κύτταρο κίνηση ηλεκτρονίων και οπών. Το ΦΒ κύτταρο αποτελείται από ημιαγωγό που συνδυάζει κάποια χαρακτηριστικά των μετάλλων και κάποια χαρακτηριστικά των μονωτών. Ο ημιαγωγός χωρίζεται σε δύο μέρη με διαφορετικά υλικά. Το πρώτο μέρος που είναι τύπου-p (positive-carrier) έχει περίσσεια οπών και το δεύτερο μέρος που είναι τύπου-n (negative-carrier) έχει πλεονάσμα ηλεκτρονίων και έτσι δημιουργείται η ένωση p-n. Για να αποκατασταθεί η ισορροπία τα πλεονάζουσα ηλεκτρόνια από το υλικό τύπου-n ταξιδεύουν προς το υλικό τύπου p για να καλύψουν τις οπές. Έτσι δημιουργείται αρνητικό φορτίο στο υλικό τύπου-p και θετικό φορτίο στο υλικό τύπου-n. Τέλος όταν επιπλέον ηλεκτρόνια ελευθερωθούν όταν το ΦΒ κύτταρο θα είναι εκτεθειμένο σε ηλιακή ακτινοβολία εκδηλώνεται διαφορά δυναμικού. Το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργήθηκε αρχικά θα οδηγεί τα ηλεκτρόνια από το υλικό τύπου-p (αρνητικό φορτίο) προς το υλικό τύπου-n (θετικό φορτίο) και έτσι θα δημιουργείται ηλεκτρικό ρεύμα (όταν ενωθεί με εξωτερικό κύκλωμα-αντίσταση).

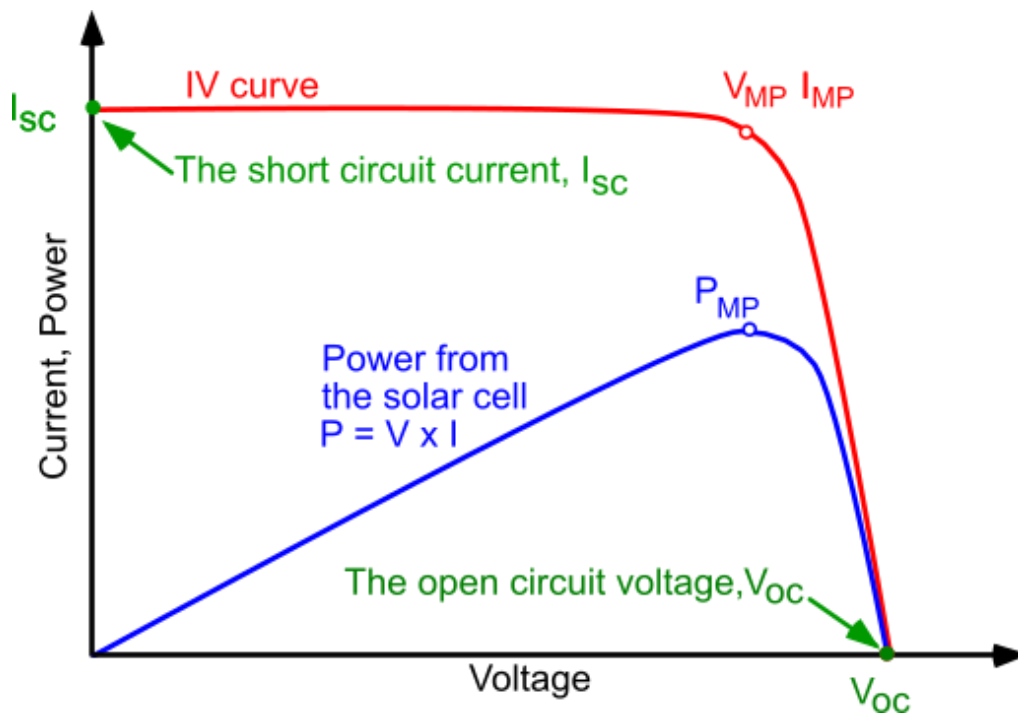


Σχήμα 2.2 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο [16]

2.2 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των Φωτοβολταϊκών

Όπως προαναφέρθηκε σε περίπτωση που ενώσουμε ένα φορτίο (αντίσταση) στα άκρα του ΦΒ, το δυναμικό δηλαδή η τάση που υπάρχει θα δημιουργήσει ένα ηλεκτρικό κύκλωμα. Έτσι κάθε ΦΒ στοιχείο έχει την δική του χαρακτηριστική Τάσης-Ένταση. Αυτή έχει την μορφή που φαίνεται στο σχήμα 2.3. I_{sc} είναι το ρεύμα βραχυκυκλώματος του ΦΒ στοιχείου ενώ V_{oc} είναι η τάση ανοιχτού κυκλώματος. Το ρεύμα βραχυκυκλώματος είναι το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να παρέχει το ΦΒ στοιχείο και συμβαίνει όταν μηδενίζεται η τάση ($V=0$) δηλαδή το στοιχείο βραχυκυκλώνεται. Αντίθετα τάση ανοιχτού κυκλώματος έχουμε για ένταση ρεύματος ίση με μηδέν ($I=0$) και συμβαίνει όταν δεν έχουμε φορτίο συνδεδεμένο. Σε ποιο σημείο αυτής της χαρακτηριστικής γραφικής θα λειτουργεί το ΦΒ στοιχείο εξαρτάται από την τιμή της αντίστασης του φορτίου (R_L). Προφανώς η παραγόμενη ισχύς υπολογίζεται με τον πολλαπλασιασμό της τάσης με την ένταση σε κάθε σημείο και έτσι δημιουργείται η χαρακτηριστική ισχύς-τάσης ($P-V$) για το ΦΒ στοιχείο που φαίνεται επίσης στο σχήμα 2.3. P_{MAX} ή P_{MP} είναι το σημείο όπου η παραγόμενη ισχύς είναι μέγιστη. Η τάση και η ένταση σε αυτό το σημείο συμβολίζονται με I_{MP} και V_{MP} αντίστοιχα.

Στις εγκαταστάσεις όμως ΦΒ στοιχείων χρησιμοποιούνται ιχνηλάτες Maximum Power Point Trackers (MPPT) που μεταβάλλουν την αντίσταση φορτίου R_L έτσι ώστε το ΦΒ στοιχείο να δουλεύει συνεχώς στο σημείο μέγιστης ισχύς. Εκτός από τους ιχνηλάτες, σε ένα σύστημα έχουμε επίσης τον αναστροφέα (inverter) και ασφάλεια ενδιάμεσα. Τα στοιχεία αυτά θα μελετηθούν σε επόμενο κεφάλαιο.



Σχήμα 2.3 Χαρακτηριστικές I-V και P-V φωτοβολταϊκού στοιχείου [18]

Συντελεστής πλήρωσης FF ενός ΦΒ στοιχείου είναι ο λόγος της μέγιστης παραγόμενης ισχύς προς το γινόμενο της τάσης ανοικτού κυκλώματος με την ένταση βραχυκυκλώματος δηλαδή της ισχύ που θα παραγόταν από V_{OC} και I_{SC} και φαίνεται στην πιο κάτω σχέση 2.1

$$FF = \frac{I_{MP}V_{MP}}{I_{SC}V_{OC}} \quad (2.1)$$

Ο βαθμός απόδοσης ενός ΦΒ στοιχείου φαίνεται στη σχέση 2.2. Ισούται με την ηλεκτρική ισχύ που παράχθηκε προς την ηλιακή ακτινοβολία που δέχθηκε το ΦΒ στοιχείο.

$$n = \frac{P_{MP}}{G_T A} \quad (2.2)$$

όπου

G_T : ένταση ηλιακής ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου (επίπεδο ΦΒ στοιχείου) (W/m^2)

A: εμβαδό ΦΒ στοιχείου (m^2)

2.2.1 Επίδραση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασία του ΦΒ στοιχείου

Καθώς μεταβάλλεται η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, η χαρακτηριστική τάσης-έντασης του ΦΒ στοιχείου αλλάζει επειδή παίρνουν άλλες τιμές τα I_{SC} και V_{OC} . Συγκεκριμένα αύξηση της έντασης ηλιακής ακτινοβολίας, προκαλεί γραμμική αύξηση της έντασης βραχυκυκλώματος και λογαριθμική αύξηση της τάσης ανοικτού κυκλώματος (μικρότερη αύξηση).

Η θερμοκρασία του ΦΒ στοιχείου επηρεάζεται από:

- Θερμοκρασία περιβάλλοντος
- Ηλιακή ακτινοβολία
- Ταχύτητα ανέμου
- Χαρακτηριστικά ΦΒ πλαισίου (π.χ. υλικό)

Η αύξηση της θερμοκρασίας του ΦΒ στοιχείου, προκαλεί γραμμική μείωση της τάσης ανοικτού κυκλώματος ενώ υπάρχει και μια ελάχιστη αύξηση του ρεύματος βραχυκυκλώματος. Έτσι τελικά υπάρχει μια μείωση της παραγόμενης ισχύς γι' αυτό και αυξημένη θερμοκρασία ΦΒ στοιχείου δεν είναι επιθυμητή στις εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών συστημάτων. Υπάρχουν διάφορες εγκαταστάσεις για την επίτευξη μείωσης της αυξημένης θερμοκρασίας ΦΒ στοιχείων. Για παράδειγμα με χρήση αγωγών στο πίσω μέρος των φωτοβολταϊκών για ταυτόχρονη θέρμανση νερού χρήση και μείωση της θερμοκρασία ΦΒ στοιχείου. Τέτοια συστήματα δεν συναντώνται συχνά λόγω αυξημένου κόστους που προκαλεί μικρή μόνο αύξηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας και η ανάλυση τους ξεφεύγει του θέματος της παρούσας διπλωματικής.

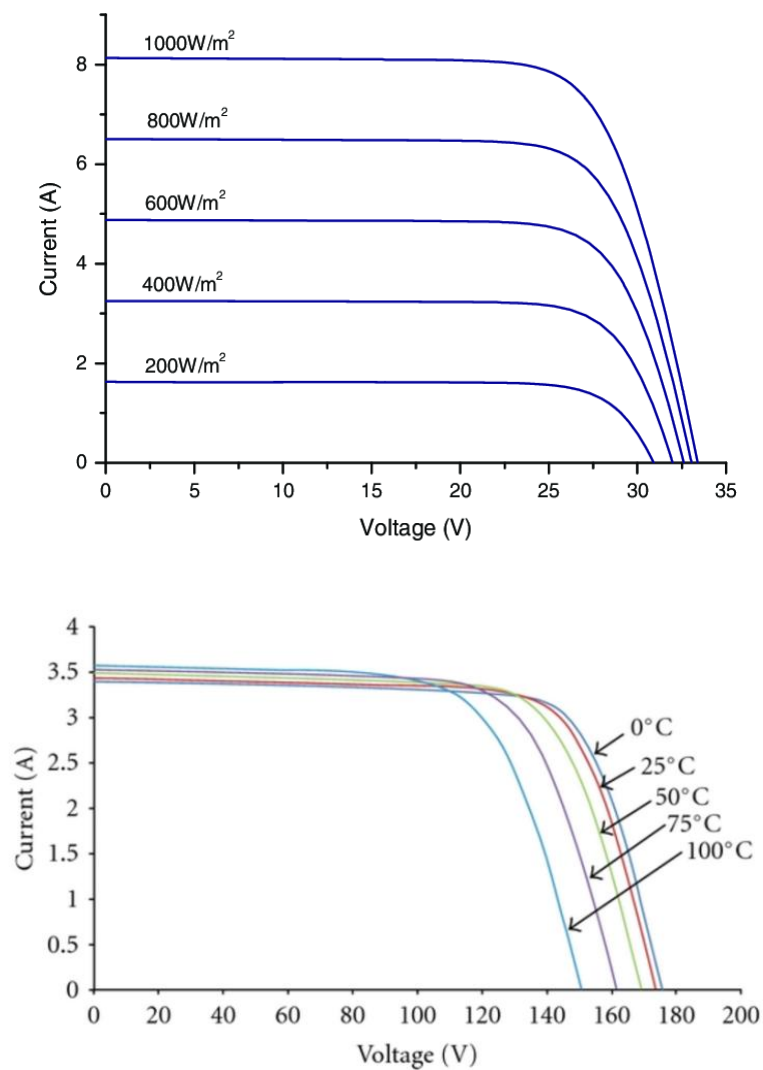
Για την επίδραση της θερμοκρασίας του ΦΒ στοιχείου στην χαρακτηριστική καμπύλη I-V και στην παραγόμενη ισχύ, υπάρχουν κάποιοι συντελεστές θερμοκρασίας ΦΒ στοιχείου που παρουσιάζονται πιο κάτω μαζί με τις τυπικές τους τιμές.

$$\alpha = \frac{d I_{SC}}{dT} \approx +0.05 \frac{\%}{^{\circ}\text{C}} \quad (2.3)$$

$$\beta = \frac{d V_{OC}}{dT} \approx -0.33 \frac{\%}{^{\circ}\text{C}} \quad (2.4)$$

$$\gamma = \frac{d P_{MP}}{dT} \approx -0.41 \frac{\%}{^{\circ}\text{C}} \quad (2.5)$$

Στο σχήμα 2.4 φαίνονται οι επιδράσεις της έντασης ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας.



Σχήμα 2.4 Επίδραση της μεταβολής της έντασης ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας. [19]

2.2.2 Τεχνικά στοιχεία των ΦΒ

Οι κατασκευαστές των ΦΒ πλαισίων, είναι υποχρεωμένοι από τους κανονισμούς να δίνουν τις διαστάσεις, τον αριθμό των ΦΒ στοιχείων το βάρος του πλαισίου και κάποια ηλεκτρικά χαρακτηριστικά. Αυτά είναι:

- Ονομαστική ισχύ αιχμής P_{MP} δηλαδή ισχύς στο σημείο μέγιστης απόδοσης μαζί με την τάση V_{MP} και ένταση I_{MP} στο σημείο αυτό.
- Τάση ανοικτού κυκλώματος V_{OC}
- Ένταση βραχυκυκλώματος I_{SC}
- Βαθμός απόδοσης ΦΒ πλαισίου
- Συντελεστές θερμοκρασίας βραχυκυκλώματος ανοικτού κυκλώματος και ισχύος δηλαδή α , β και γ αντίστοιχα
- Κανονική θερμοκρασία λειτουργίας στοιχείου (NOCT - Normal Operating Cell Temperature).

Όλα τα πιο πάνω δεδομένα αναφέρονται σε τυπικές συνθήκες (SRC - Standard rating conditions) που είναι ηλιακή ακτινοβολία $1000W/m^2$ και θερμοκρασία στοιχείου $20^\circ C$ εκτός από την NOCT που είναι για $800W/m^2$ και θερμοκρασία στοιχείου $25^\circ C$. Η τιμή της κανονικής θερμοκρασίας λειτουργίας είναι $42-46^\circ C$. Για τον προσδιορισμό των ηλεκτρικών αυτών χαρακτηριστικών, τα ΦΒ υπόκεινται κάποιων δοκιμών στο εργοστάσιο πριν διατεθούν στο εμπόριο. Κατά την διάρκεια των δοκιμών αυτών τα ΦΒ σε κάποιες δοκιμές μηχανικής, θερμικής αντοχής και καταπόνησης ώστε να επιτυγχάνεται μια διάρκεια ζωής γύρω στα 20 χρόνια.

Σε όλες τις περιπτώσεις εγκαταστάσεων, τα ΦΒ δεν δουλεύουν στις τυπικές συνθήκες αλλά γίνεται αναγωγή σε δεδομένες συνθήκες λειτουργίας. Η σχέση για τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας των ΦΒ στοιχείων είναι:

$$T_C = T_a + \frac{T_{NOCT} - 20}{800} G \quad (2.6)$$

όπου

T_a : θερμοκρασία περιβάλλοντος ($^\circ C$)

T_{NOCT} : ($^\circ C$)

G : Ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στο ΦΒ πλαίσιο (W/m^2)

2.3 Τεχνολογίες ΦΒ στοιχείων

Υπάρχουν διάφορες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών στοιχείων που αρχικά κατηγοριοποιούνται σε τρεις γενεές (generations): [21]

1. Στην πρώτη γενιά συγκαταλέγονται τα Crystalline Silicon Solar Cells ή ΦΒ στοιχεία κρυσταλλικού πυριτίου. Αυτά είναι:
 - i. Single or Mono Crystalline ή μονοκρυσταλλικά (Mono-c-Si)
 - ii. Polycrystalline ή πολυκρυσταλλικά (Poly-c-Si)
2. Στην δεύτερη γενιά είναι βρίσκονται οι τεχνολογίες Thin Film Cells ή ΦΒ στοιχεία λεπτού υμενίου που μπορεί να είναι
 - i. Amorphous Silicon ή άμορφου πυριτίου (a-Si)
 - ii. Cadmium Telluride ή τελουριούχου καδμίου (CdTe)
 - iii. Copper-Indium Gallium-Selenide ή Δισεληνοϊνδιούχος Χαλκός (GIGS)
 - iv. Gallium Arsenide ή Αρσενικούχο Γάλλιο (GaAS)
3. Στην τρίτη γενιά βρίσκονται τα συγκεντρωτικά ΦΒ

Όπως φαίνεται το υλικό που χρησιμοποιείται περισσότερο είναι το πυρίτιο εξαιτίας της αφθονίας του και της ευκολίας κατεργασίας του. Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι σήμερα περίπου 85% των φωτοβολταϊκών είναι κατασκευασμένα από πυρίτιο. Στην συνέχεια θα αναφερόμαστε στις τεχνολογίες ΦΒ στοιχείων χρησιμοποιώντας τους αγγλικούς όρους.

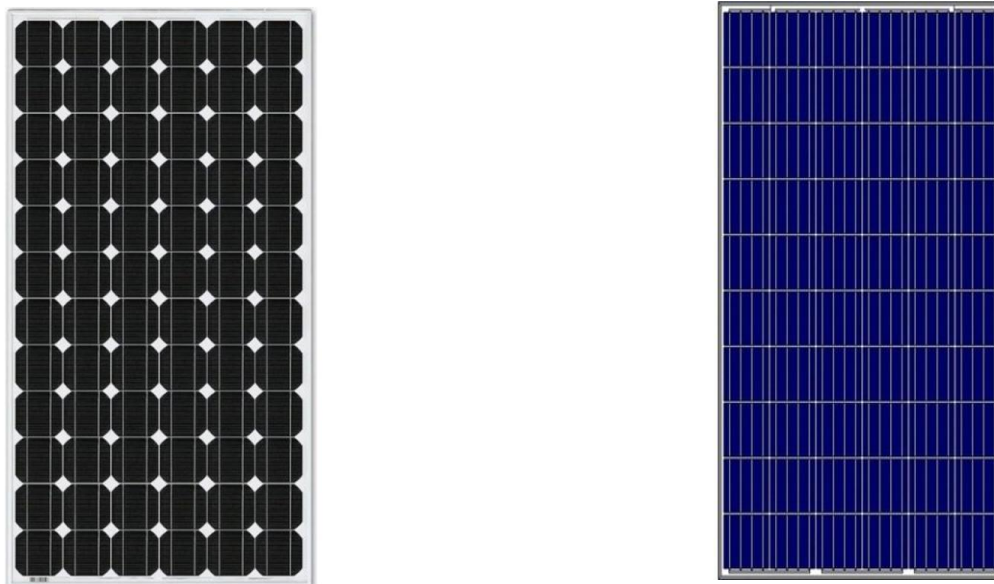
2.3.1 Mono-Crystalline Silicon (Mono-c-Si)

Τα φωτοβολταϊκά τέτοιου τύπου είναι εύκολα αναγνωρίσιμα αφού έχουν ένα ομοιόμορφο μαύρο χρώμα (Σχήμα 2.5). Τα μονοκρυσταλλικά ΦΒ στοιχεία είναι φτιαγμένα από καλής ποιότητας πυρίτιο και γι αυτό έχουν τον υψηλότερο βαθμό απόδοσης από τις κατηγορίες ΦΒ στοιχείων. Για τον ίδιο λόγο βέβαια είναι και τα πιο ακριβά. Τα μονοκρυσταλλικά ΦΒ στοιχεία που βρίσκονται στην αγορά σήμερα έχουν βαθμός απόδοσης που κυμαίνεται από 17-22% και κυρίως 18-20%. Σε εργαστηριακές δοκιμές, επιτυγχάνεται βαθμός απόδοσης γύρω στο 25%. Έτσι εξαιτίας του υψηλότερου βαθμού απόδοσης τα ΦΒ πάνελ με μονοκρυσταλλικό υλικό χρειάζονται λιγότερο χώρο σε εγκαταστάσεις. Σε σχέση με τις υπόλοιπες τεχνολογίες ΦΒ στοιχείων έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής που φτάνει πάνω από 30 έτη. Η μείωση της παραγόμενης ισχύς με την αύξηση της θερμοκρασία είναι μικρότερη σε σχέση με τα πολυκρυσταλλικά ΦΒ στοιχεία. Σε περιόδους συννεφιάς όπου τα ΦΒ παράγουν λιγότερη ηλεκτρική ισχύ, τα μονοκρυσταλλικά στοιχεία αποδίδουν καλύτερα από άλλες τεχνολογίες αφού έχουν την ικανότητα να φτάνουν ψιλούς βαθμούς απόδοσης ακόμα και σε χαμηλότερη ηλιακή ακτινοβολία.

2.3.2 Poly-Crystalline Silicon (Poly-c-Si)

Τα ΦΒ στοιχεία αυτού του τύπου έχουν πιο απλή και πιο φτηνή διαδικασία κατασκευής και η ποιότητα (καθαρότητα) του πυριτίου υλικού είναι λίγο κατώτερη σε σχέση με τα μονοκρυσταλλικά στοιχεία. Επίσης έχουν τέτοια διαδικασία κατασκευής που επιφέρει μικρότερη σπατάλη πυριτίου. Τα πολυκρυσταλλικά ΦΒ στοιχεία έχουν μη

ομοιόμορφο σκούρο μπλε χρώμα και τα πάνελ αυτής της τεχνολογίας είναι τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα (Σχήμα 2.5). Ο βαθμός απόδοσης του πολυκρυσταλλικού στοιχείου στην αγορά είναι μεταξύ 12-16% ενώ σε εργαστηριακούς ελέγχους επιτυγχάνεται απόδοση γύρω στο 20%. Λόγω της χαμηλότερης απόδοσης σε σχέση με τα μονοκρυσταλλικά, απαιτείται περισσότερος χώρος για ίδια εγκατεστημένη ισχύ.



Σχήμα 2.5 Μονοκρυσταλλικό ΦΒ πάνελ στα αριστερά το οποίο αποτελείται από 72 ΦΒ στοιχεία. Πολυκρυσταλλικό ΦΒ πάνελ στα δεξιά. [22][23]

2.3.3 Thin Film Cells

Η κατασκευή των ΦΒ στοιχείων λεπτού υμενίου γίνεται με εναπόθεση ενός ή περισσότερων λεπτών στρωμάτων φωτοβολταϊκού υλικού. Οι διάφορες κατηγορίες στοιχείων λεπτού υμενίου εξαρτώνται από το είδος του στρώματος που εναποτίθεται. Η μαζική παραγωγή των φωτοβολταϊκών αυτών είναι απλή και αυτό καθιστά την παραγωγή φτηνή. Επίσης ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά τους είναι το ότι μπορεί να κατασκευαστούν εύκαμπτα. Η σκίαση και η αύξηση της θερμοκρασίας των ΦΒ στοιχείων λεπτού υμενίου έχει μικρότερο αντίκτυπο στην παραγόμενη ενέργεια. Έχουν όμως συγκριτικά με τα στοιχεία κρυσταλλικού τύπου αισθητά χαμηλότερη απόδοση αλλά χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις που δεν ζητείται εγκατάσταση σε ελάχιστο χώρο. Έχουν επίσης μικρότερη διάρκεια ζωής και η απόδοση του επηρεάζεται γρηγορότερα και γι' αυτό η κατασκευαστές προσφέρουν μικρότερη εγγύηση. Τα ΦΒ στοιχεία άμορφου πυριτίου (amorphous silicon) είναι η παλιότερη τεχνολογία λεπτού υμενίου. Σε σχέση με τα κρυσταλλικά στοιχεία, έχουν αυξημένη απορροφητικότητα που είναι περίπου δεκαπλάσια και είναι λεπτότερα. Για την κατασκευή τους χρησιμοποιείται περίπου το 1% του πυριτίου που χρησιμοποιείται για την κατασκευή των κρυσταλλικών στοιχείων. Οι βαθμοί απόδοσης άμορφου πυριτίου στην αγορά κυμαίνονται σε 6-8%. Τα ΦΒ στοιχεία τελουριούχου

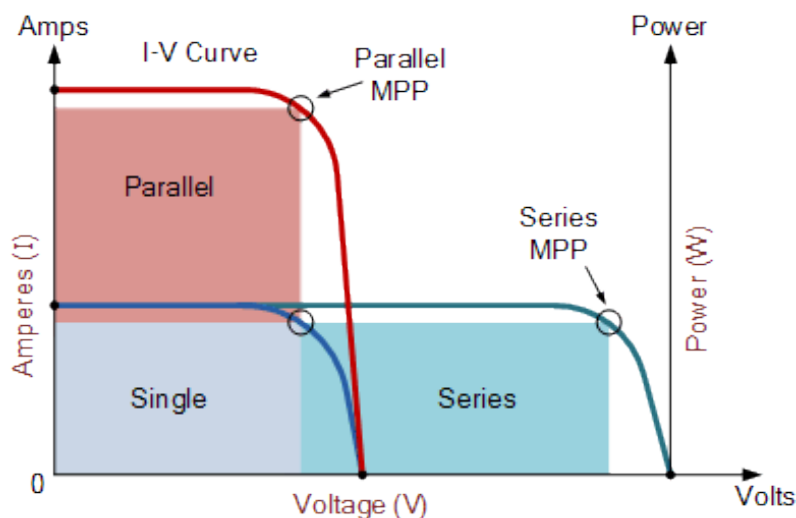
καδμίου (Cadmium Telluride) έχουν επίσης αυξημένη απορροφητικότητα και ο εμπορικός βαθμός απόδοσης τους είναι 9-12%. Λόγο του γεγονότος ότι μπορεί να παραχθεί σχετικά φτηνά και έχει αποδοτικότητα που έχει φτάσει το 14.4% κατέχει την πρωτιά στην τεχνολογία λεπτού υμενίου. Στα μειονεκτήματα είναι το ότι το τελλούριο δεν έχει την αφθονία του πυριτίου αλλά και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις του κάδμιου. Τα ΦΒ στοιχεία δισεληνοϊνδιούχου χαλκού (Copper-Indium Gallium-Selenide), έχουν βαθμό απόδοσης 9-12% που πλησιάζει αυτό των πολυκρυσταλλικών στοιχείων και έχουν μικρότερες θερμικές απώλειες. Σε σχέση με τις άλλες τεχνολογίες λεπτού υμενίου έχει αυξημένο κατασκευαστικό κόστος. Τα ΦΒ στοιχεία αρσενικούχου γάλλιου (Gallium Arsenide) δεν έχουν γίνει ακόμα εμπορικά. Οι τρεις τύποι που περιγράφηκαν φαίνονται στο σχήμα 2.6.



Σχήμα 2.6 Τεχνολογίες ΦΒ στοιχείων Thin Film. Από αριστερά προς δεξιά είναι Amorphous Silicon, Cadmium Telluride και Copper-Indium Gallium-Selenide. [17]

2.4 Συστήματα φωτοβολταϊκών

Σε ΦΒ συστήματα πάνελ συνδέονται μεταξύ τους για να δημιουργήσουν μια συστοιχία και μία ή περισσότερες συστοιχίες αποτελούν το σύστημα ΦΒ. Η σύνδεση των πάνελ μπορεί να είναι σε σειρά ή παράλληλα. Σε περίπτωση σύνδεσης των ΦΒ πάνελ σε σειρά, το ρεύμα προφανώς που θα διαρρέει τη συστοιχία θα είναι κοινό (ίδιο με αυτό που του κάθε επιμέρους πάνελ) ενώ η τάση της συστοιχίας θα είναι το άθροισμα των επιμέρους τάσεων των πάνελ. Αντίθετα αν συνδέονται παράλληλα, προφανώς η τάση θα είναι ίδια με των επιμέρους πάνελ ενώ το ρεύμα της συστοιχίας θα είναι το άθροισμα ρευμάτων των πάνελ που δημιουργούν τη συστοιχία. (Σχήμα 2.7)



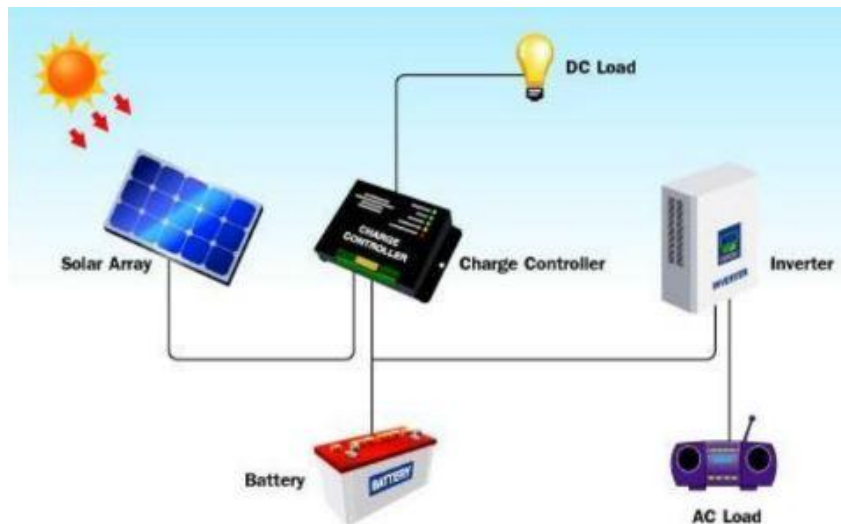
Σχήμα 2.7 Σύνδεση ΦΒ πάνελ σε σειρά ή παράλληλα [25]

Οι δύο τύπου φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι:

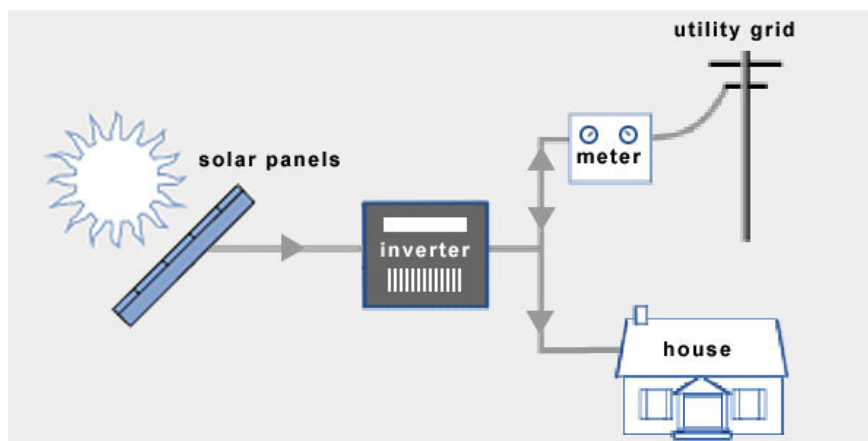
- Αυτόνομα ΦΒ συστήματα
- Συνδεδεμένα με το ηλεκτρικό δίκτυο.

Τα αυτόνομα συστήματα κατά πλειοψηφία έχουν μπαταρία για αποθήκευση πλεονάζουσας ενέργειας την μέρα και χρήση της την νύχτα. Μπορεί να είναι ισχύος από μερικά mW μέχρι εκατοντάδες kW και εγκαθίστανται συνήθως σε απομονωμένες περιοχές που δεν υπάρχει σύνδεση με το δίκτυο. Τα κύρια εξαρτήματα σε ένα αυτόνομο ΦΒ σύστημα είναι εκτός από τα φωτοβολταϊκά, η μπαταρία, ο ελεγκτής φόρτισης (charge controller/regulator) και ο αντιστροφέας (inverter) όπως στο σχήμα 2.8. Η μπαταρία φορτίζεται με DC (συνεχές ρεύμα) και ο αντιστροφέας μετατρέπει το DC σε AC (εναλλασσόμενο ρεύμα) γι αυτό και η σύνδεση με τα φορτία είναι όπως στο σχήμα 2.8 ανάλογα με το είδος ρεύματος που τροφοδοτείται κάθε φορτίο. Τα επιμέρους εξαρτήματα περιγράφονται στη συνέχεια.

Αντίθετα σε συνδεδεμένα με το δίκτυο συστήματα συνήθως δεν χρησιμοποιείται μπαταρία λόγω του ότι έχει ακόμα υψηλό κόστος. Αποτελούνται εκτός από τα φωτοβολταϊκά από αντιστροφέα και μετρητή της ενέργειας που στέλνεται σε περίπτωση παραγωγής παραπάνω ενέργειας από αυτή που χρειάζεται το σπίτι ή δέχεται από το δίκτυο σε αντίθετη περίπτωση (σχήμα 2.9).



Σχήμα 2.8 Αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα [17]



Σχήμα 2.9 Φωτοβολταϊκό σύστημα συνδεδεμένο με το δίκτυο [24]

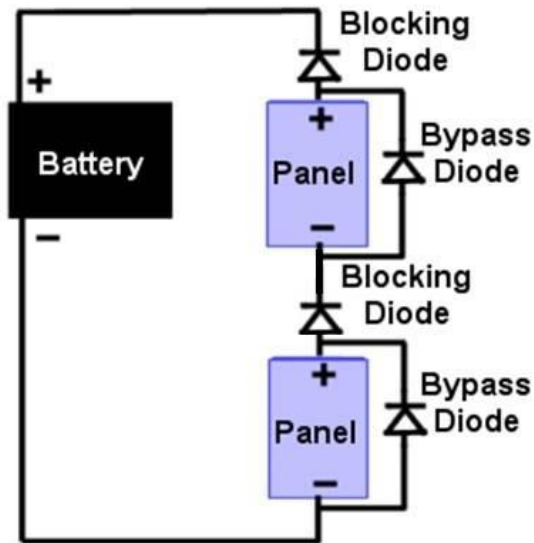
Γενικά είτε το σύστημα είναι αυτόνομο ή συνδεδεμένο με το δίκτυο υπάρχουν κάποια σταθερά μηχανικά ή ηλεκτρικά εξαρτήματα.

Τα μηχανικά εξαρτήματα δημιουργούν τη βάση της συστοιχίας των ΦΒ και εξαρτάται από το είδος της εγκατάστασης δηλαδή αν τα ΦΒ πάνελ είναι σταθερά (σταθερή κλίση επιπέδου) ή αν χρησιμοποιείται σύστημα παρακολούθησης του ήλιου σχήμα όπως στο σχήμα 2.10 (πάνελ συνεχώς κάθετα στις ακτίνες του ήλιου). Τα συστήματα παρακολούθησης του ήλιου μπορεί να είναι ενεργά όπου η παρακολούθηση του ήλιου γίνεται με αισθητήρες φωτός ή ανοιχτού βρόγχου όπου στο σύστημα είναι αποθηκευμένη η θέση του ήλιου σε κάθε στιγμή από τα ηλιακά και γεωγραφικά δεδομένα. Η παρακολούθηση μπορεί να είναι σε ένα άξονα ή και στους δύο άξονες. Τα συστήματα παρακολούθησης παράγουν περίπου 25% περισσότερη ενέργεια τον χρόνο από τα σταθερά αλλά δεν χρησιμοποιούνται ευρέως εξαιτίας του αυξημένου αρχικού κόστους και της ανάγκης συντήρησης λόγω των κινούμενων μερών. Τα σταθερά συστήματα μπορεί να είναι εγκατεστημένα σε επικλινή οροφές, σε επίπεδες οροφές ή στο έδαφος ή ενσωματωμένα σε κτήρια.



Σχήμα 2.10 Φωτοβολταϊκό σύστημα παρακολούθησης του ήλιου

Τα ηλεκτρικά εξαρτήματα τέτοιων συστημάτων είναι δίοδοι, ασφάλειες, μπαταρία, γείωση, ελεγκτής φόρτισης, και αντιστροφέας. Στα ΦΒ πάνελ και συστήματα χρησιμοποιούνται δύο ήδη διόδων, δίοδοι παράκαμψης (Bypass diodes) και σειριακές δίοδοι (Blocking diodes). Οι δίοδοι παράκαμψης τοποθετούνται στις άκρες των φωτοβολταϊκών στοιχείων και έχουν σκοπό να παρέχουν στο ρεύμα εναλλακτική διεύθυνση σε περίπτωση που το φωτοβολταϊκό πάνελ είναι ελαττωματικό ή σκιάζεται. Επίσης οι δίοδοι παράκαμψης κάποιες φορές τοποθετούνται και στις άκρες σειρών από ΦΒ στοιχεία σε ένα πάνελ. Για παράδειγμα σε ένα πάνελ που αποτελείται από 60 στοιχεία, όπου 20 στοιχεία είναι σε σειρά και αυτές 3 σειρές συνδέονται παράλληλα τοποθετούνται 3 δίοδοι παράκαμψης στα άκρα κάθε σειράς για την αποφυγή κάποιας σειράς στις περιπτώσεις που αναφέρθηκαν. Αξίζει εδώ να αναφερθεί το πρόβλημα που δημιουργείται σε ένα πάνελ όταν σκιάζεται κάποιο στοιχείο. Σε αυτή τη περίπτωση, πέφτει το ρεύμα του σκιασμένου στοιχείου και το στοιχείο αυτό από θετική τάση που είχε θα έχει αρνητική και θα λειτουργεί σαν φορτίο. Δηλαδή καταναλώνει ισχύ αντί να παράγει με αποτέλεσμα τα υπόλοιπα στοιχεία του πάνελ να τροφοδοτούν επίσης το σκιασμένο και έτσι αυξάνεται η θερμοκρασία του. Με την δίοδο παράκαμψης θα αποκόπτεται η σειρά με το σκιασμένο στοιχείο και στην περίπτωση του παραδείγματος του πάνελ με τα 60 στοιχεία θα αποκόπτονται τα 20 και το πάνελ θα παρέχει τα 2/3 της ισχύς του. Η άλλη λύση είναι να λειτουργούν και τα 60 στοιχεία με λιγότερο ρεύμα και άρα μικρότερη ισχύ. Ο αντιστροφέας (inverter) συγκρίνει αυτές τις δύο λύσεις και επιλέγει αυτή με την υψηλότερη ισχύ. Οι σειριακές δίοδοι τοποθετούνται στο τέλος μια σειράς από πάνελ που επιτρέπει την ροή ρεύματος από τα πάνελ στην μπαταρία και αποτρέπει την αντίθετη ροή από την μπαταρία στα πάνελ (σχήμα 2.11).



Σχήμα 2.11 Δίοδοι παράκαμψης στα άκρα των πάνελ και σειριακή δίοδος στο τέλος της σειράς πάνελ [26]

Οι ασφάλειες ή μικροδιακόπτες χρησιμοποιούνται για να απομονώνεται κάποια τμήματα του συστήματος σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης ή συντήρησης. Οι μπαταρίες όπως προαναφέρθηκε για την αποθήκευση της ισχύος. Η γείωση είναι ουσιαστικά η σύνδεση του αγωγικού πλαισίου (κατασκευασμένο από μέταλλο) των ΦΒ πάνελ με τη γη. Αυτό γίνεται για την προστασία σε περίπτωση κεραυνών ή κάποιας επαφής με γραμμές υψηλότερης τάσης. Ο ελεγκτής φόρτισης χρησιμοποιείται για την προστασία της μπαταρίας. Αυτό γίνεται με την αποσύνδεση της μπαταρίας από τα ΦΒ όταν είναι πλήρως φορτισμένη για την αποφυγή υπερβολικής φόρτισης αλλά και με την αποσύνδεση της μπαταρίας με τα φορτία του σπιτιού όταν η μπαταρία αποφορτίστηκε.

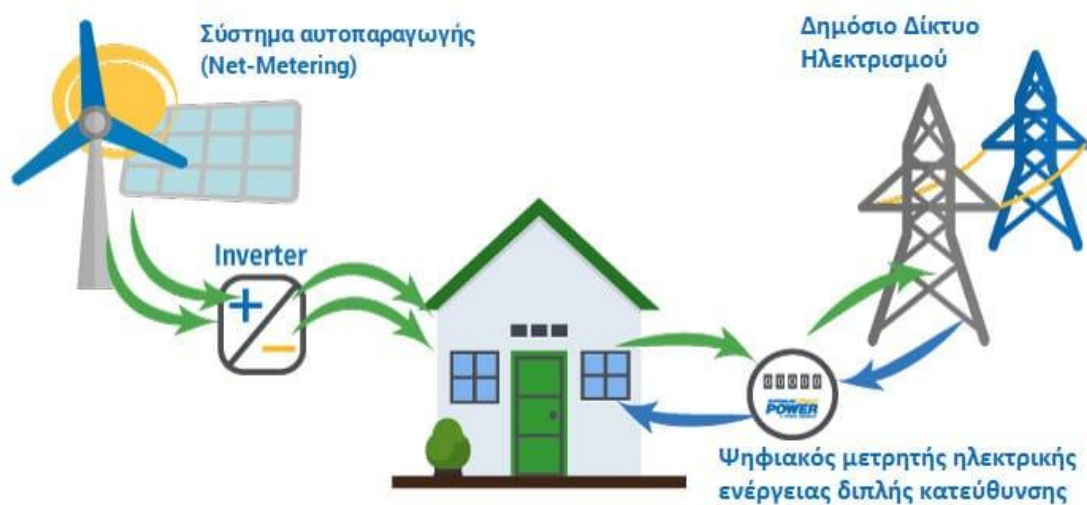
Ο αντιστροφέας είναι από τα πιο σημαντικά εξαρτήματα σε ένα ΦΒ στοιχείο. Ο αντιστροφέας που χρησιμοποιείται είναι ξεχωριστός σε περίπτωση που το σύστημα είναι αυτόνομο ή συνδεδεμένο με το δίκτυο ανάλογα με την τάση που χρησιμοποιείται. Και στις δύο περιπτώσεις η κύρια λειτουργία είναι η μετατροπή του DC ρεύματος που παράγουν τα ΦΒ συστήματα σε AC στο οποίο λειτουργούν οι οικιακές συσκευές και το δίκτυο. Επίσης κάνει τη δουλειά του ιχνηλάτη μέγιστης ισχύς (MPPT) που προαναφέρθηκε στην αρχή του κεφαλαίου ώστε τα φωτοβολταϊκά να παράγουν τη μέγιστη ισχύ. Ο αντιστροφέας εξασφαλίζει ελάχιστη διακύμανση της τάσης στο δίκτυο που συμβαίνει εξαιτίας των διακυμάνσεων της παραγόμενης ισχύς. Επιπλέον προσφέρουν στους ιδιοκτήτες του συστήματος να παρακολουθούν την απόδοση ισχύος των συστημάτων και ενημέρωση σε περίπτωση βλάβης.

2.5 Συμψηφισμός ενέργειας - Net metering

Η περιγραφή του συστήματος ΦΒ με συμψηφισμό ενέργειας θα γίνει γιατί τα συστήματα ΦΒ που μοντελοποιούνται στη παρούσα διπλωματική και η τεχνοοικονομική τους ανάλυση γίνεται με το πρόγραμμα ενεργειακού συμψηφισμού (Net metering).

Ο καταναλωτής που παράγει ηλεκτρικό ρεύμα μέσω του εγκατεστημένου ΦΒ συστήματος του (οικιακά ή επιχείρηση) έχει την δυνατότητα σε περίπτωση παραγωγής περισσότερης ενέργειας από αυτή που χρησιμοποιεί, να το δίνει στο δίκτυο και να το πάρει πίσω στην περίπτωση που χρειάζεται (π.χ. το βράδυ). Υπάρχει βέβαια ένας ψηφιακός μετρητής για την μέτρηση ηλεκτρικής ενέργειας από και προς το δίκτυο. Έτσι με το σύστημα συμψηφισμού γίνεται συμψηφισμός της ενέργειας που δόθηκε από το καταναλωτή στο δίκτυο με την ενέργεια που πήρε από το δίκτυο. Ο καταναλωτής επομένως πληρώνει μόνο τη διαφορά στην περίπτωση που πήρε περισσότερο ρεύμα από αυτό που έδωσε. Σε αντίθεση περίπτωση δεν πληρώνει το δίκτυο της χώρας τον καταναλωτή. Το σύστημα net metering είναι ξεκάθαρα προς όφελος του καταναλωτή αφού με το σύστημα ΦΒ θα παράγει περισσότερη ενέργεια κατά τη διάρκεια της μέρας και θα χρειάζεται ενέργεια το βράδυ. Επίσης το καλοκαίρι που έχει περισσότερη ηλιοφάνεια παράγει περισσότερο και θα μπορεί να το χρησιμοποιήσει το βράδυ. Συνήθως η εγκατεστημένη ισχύς του ΦΒ συστήματος αποφασίζεται από τον πάροχο ηλεκτρικής ενέργειας βλέποντας τους λογαριασμούς του καταναλωτή για ένα χρόνο. Με αυτό επιτυγχάνεται ελαχιστοποίηση της διαφοράς ενέργειας που δόθηκε και πάρθηκε από το δίκτυο για ένα χρόνο. Η προώθηση του συστήματος αυτού προς τους καταναλωτές γίνεται στα πλαίσια της προσπάθειας αύξησης του ποσοστού ενέργειας που παράγει η χώρα από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας με την εγκατάσταση περισσότερων φωτοβολταϊκών συστημάτων. Το σύστημα φαίνεται στο σχήμα 2.12

ΠΩΣ ΔΟΥΛΕΥΕΙ ΤΟ NET-METERING

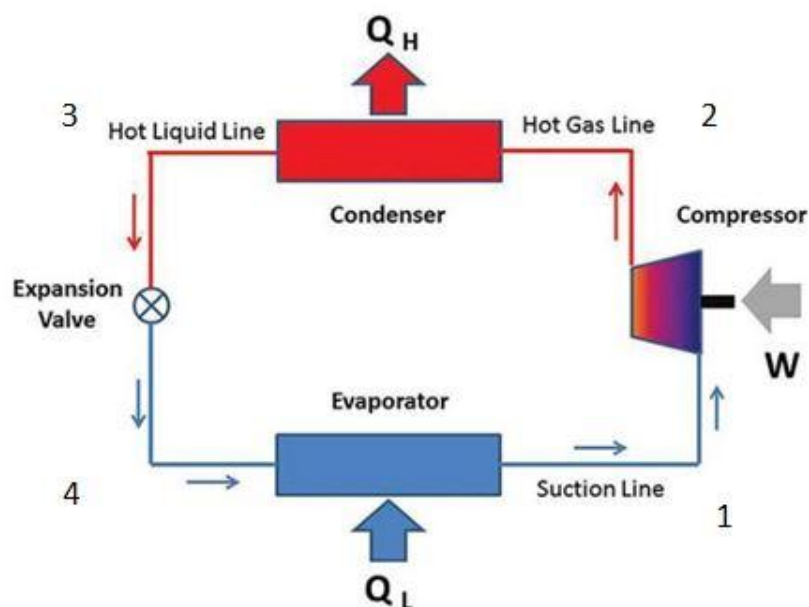


Σχήμα 2.12 Σύστημα συμψηφισμού ενέργειας - Net metering [27]

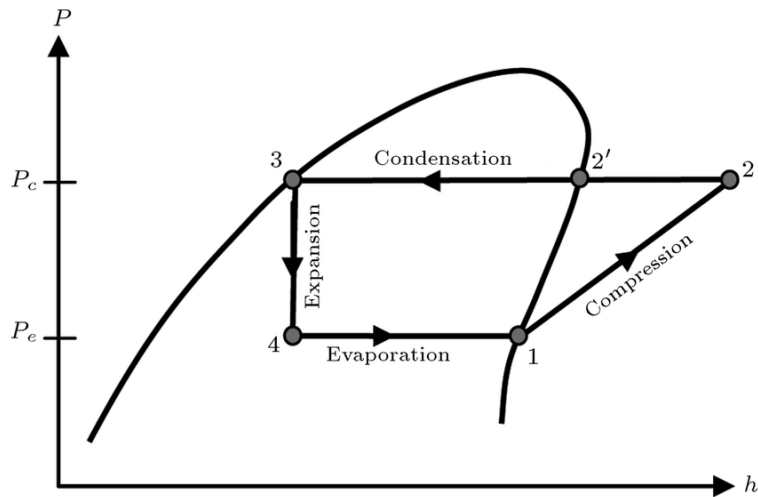
2.6 Σύστημα ψύξης με συμπίεση ατμού

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η βασική θεωρία συστήματος ψύξης με συμπίεση ατμού. Αυτό είναι το πιο συνηθισμένο σύστημα παραγωγής ψύξης που χρησιμοποιείται και στα οικιακά κλιματιστικά.

Τα βασικά μέρη που αποτελούν τον ψυκτικό κύκλο είναι ο ατμοποιητής (evaporator), συμπυκνωτής (condenser), συμπιεστής (compressor) και εκτονωτική βαλβίδα (expansion valve). Ο κύκλος που θα περιγραφεί στη συνέχεια φαίνεται στο σχήμα 2.13. Για την λειτουργία του ψυκτικού κύκλου χρησιμοποιείται ένα πτητικό ρευστό που είναι απαραίτητο ως εργαζόμενο μέσο το οποίο ανακυκλώνεται συνεχώς μέσα στον ψυκτικό κύκλο όπως δείχνουν τα βελάκια στο σχήμα 2.13 και ονομάζεται ψυκτικό μέσο. Με μπλε γραμμές παριστάνεται κατάσταση σε χαμηλή πίεση ενώ με κόκκινες σε υψηλή πίεση. Ξεκινώντας από τη θέση 4, το ψυκτικό μέσο βρίσκεται σε υγρή κατάσταση με χαμηλή πίεση και εισέρχεται στον ατμοποιητή που είναι μια συσκευή συναλλαγής θερμότητας για παραγωγή ψύξης. Στον ατμοποιητή, το ψυκτικό μέσο θερμαίνεται σε χαμηλή θερμοκρασία από τον περιβάλλοντα χώρο προκαλώντας έτσι ψύξη του χώρου αφού από αυτόν απορροφάται θερμότητα. Στην θέση 1 το ψυκτικό μέσο σε κατάσταση ατμού πλέον εισέρχεται στον συμπιεστή όπου αυξάνεται η πίεση και η θερμοκρασία του (θέση 2). Για την λειτουργία του συμπιεστή απαιτείται έργο δηλαδή ηλεκτρική ενέργεια. Στη συνέχεια το ψυκτικό μέσο εισέρχεται στο συμπυκνωτή και μετατρέπεται σε υγρό υψηλής πίεσης (θέση 3). Για να γίνει αυτό απορρίπτει θερμότητα προς το περιβάλλον. Τέλος για να μπορεί το ψυκτικό μέσο να ατμοποιηθεί ξανά πρέπει να βρίσκεται σε χαμηλή θερμοκρασία και πίεση και αυτό επιτυγχάνεται με πέρασμα μέσα από την εκτονωτική βαλβίδα. Οι θερμοδυναμικές αυτές μεταβολές φαίνονται στο σχήμα 2.14.



Σχήμα 2.13 Ψυκτικός κύκλος συμπίεσης ατμών [28]



Σχήμα 2.14 Ψυκτικός κύκλος συμπίεσης ατμών σε διάγραμμα πίεσης-ενθαλπίας [30]

Σε κάθε ψυκτική εγκατάσταση υπάρχουν πάντα δύο κύρια χαρακτηριστικά μεγέθη με τα οποία καθορίζεται το μέγεθος της εγκατάστασης. Αυτά είναι η ψυκτική ισχύς Q_ψ (Q_L στο σχήμα 2.13) και θερμοκρασία παραγωγής της ψυκτικής ισχύς.

Η ψυκτική ισχύς ενός ψυκτικού συστήματος (ισχύς ατμοποιητή Q_e), η ισχύς συμπυκνωτή (Q_c) και η θερμική ισχύς του συμπιεστή (W_{th}) υπολογίζονται από τις σχέσεις 2.7, 2.8 και 2.9 αντίστοιχα.

$$Q_e = \dot{m}(h_1 - h_4) \quad (2.7)$$

$$Q_c = \dot{m}(h_2 - h_3) \quad (2.8)$$

$$W_{th} = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (2.9)$$

όπου

\dot{m} : παροχή ψυκτικού μέσου

Για τη σύγκριση διαφόρων ψυκτικών μηχανών χρησιμοποιείται ο θεωρητικός συντελεστής συμπεριφοράς COP_{th} (Coefficient of Performance). Ο συντελεστής αυτός είναι ουσιαστικά το πόσο της παραγόμενης ισχύς που παράχθηκε προς την ισχύ που καταναλώθηκε και υπολογίζεται από τη σχέση 2.10

$$COP_{th} = \frac{Q_e}{W_{th}} = \frac{(h_1 - h_4)}{(h_2 - h_1)} \quad (2.10)$$

Για ηλεκτροκίνητους ερμητικά κλειστούς συμπιεστές χρησιμοποιείται συντελεστής συμπεριφοράς που χρησιμοποιεί την ηλεκτρική ισχύ που χρησιμοποιήθηκε (P_{el}). Η ηλεκτρική ισχύς ισούται με τη θερμική ισχύ του συμπιεστή συν τις απώλειες του συμπιεστή.

$$COP_{th} = \frac{Q_e}{P_{el}} \quad (2.11)$$

3. Μεθοδολογία

3.1 Μοντέλο ΦΒ με χρήση του υπολογιστικού εργαλείο προσομοίωσης EES.

Το μοντέλο που δημιουργήθηκε έχει σκοπό τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών καμπύλων των Φωτοβολταϊκών και την πρόβλεψη της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Οι κατασκευαστές των ΦΒ παρέχουν τις χαρακτηριστικές καμπύλες για διάφορες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας αλλά δεν μπορούμε να γνωρίζουμε τις χαρακτηριστικές αυτές καμπύλες ή την παραγόμενη ενέργεια για διαφορετικές συνθήκες. Υπάρχουν ήδη αρκετά μοντέλα που κάνουν αυτή τη δουλειά, όμως η ιδιαιτερότητα του συγκεκριμένου μοντέλου είναι ότι κάνει χρήση των χαρακτηριστικών μεγεθών και δεδομένων των ΦΒ που παρέχονται από τον κατασκευαστή.

Με την χρήση λοιπόν του συγκεκριμένου μοντέλου, θα μπορεί να υπολογιστεί η παραγόμενη ενέργεια για διαφορετικές περιοχές, για όλους τους μήνες και για διάφορες κλίσεις επιπέδου. Θα είναι επίσης δυνατός ο υπολογισμός κατά τη διάρκεια της ημέρας και για οποιεσδήποτε θερμοκρασίες. Για να είναι αυτό εφικτό θα πρέπει εκτός από τα δεδομένα που παρέχει ο κατασκευαστής που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο των ΦΒ, να εισέρχονται τα γεωγραφικά και κλιματικά δεδομένα της εκάστοτε περιοχής.

Το σύστημα εξισώσεων που αναπτύχθηκε στο EES (Engineering Equation Solver) κάνει χρήση των εξισώσεων του μοντέλου πέντε παραμέτρων των W. De Soto, S.A. Klein και W.A. Beckman [32]. Το ισοδύναμο κύκλωμα ΦΒ στοιχείου από το οποίο δημιουργούνται οι εξισώσεις φαίνεται στο σχήμα 3.1. Σε αυτό φαίνονται οι πέντε παράμετροι που είναι:

- I_L Φωτορεύμα
- I_0 Αντίστροφο ρεύμα κορεσμού διόδου
- R_s Αντίσταση σε σειρά
- R_{sh} Παράλληλη αντίσταση
- α = συντελεστής ιδανικότητας διόδου

Η παράλληλη αντίσταση έχει συνήθως αμελητέα τιμή ενώ ο συντελεστής ιδανικότητας της διόδου υπολογίζεται από τη πιο κάτω σχέση:

$$\alpha = \frac{N_s n_i k T_c}{q} \quad (3.1)$$

όπου

N_s : ο αριθμός των στοιχείων σε σειρά

n_i : συνήθης συντελεστής ιδανικότητας

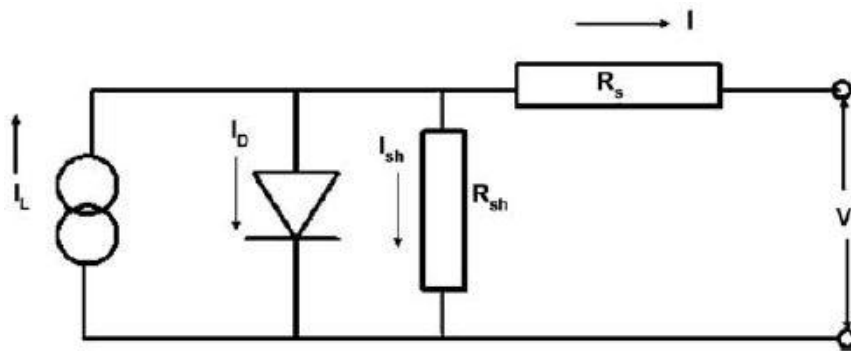
k : η σταθερά του Boltzman $k=1,38 \times 10^{-23}$ J/K

q : το φορτίο του ηλεκτρονίου $q=1,6 \times 10^{-19}$ C

T_c : Θερμοκρασία στοιχείου

Η εξίσωση με τη σχέση ρεύματος-τάσης του φωτοβολταϊκού από το σχήμα 3.1 είναι:

$$I = I_L - I_0 \left[e^{\frac{V+IR_s}{a}} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (3.2)$$



Σχήμα 3.1 Ισοδύναμο κύκλωμα ΦΒ στοιχείου [32]

Για τον υπολογισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης επομένως του ΦΒ πρέπει να βρεθούν οι πέντε παράμετροι που προαναφέρθηκαν και υπάρχουν στη σχέση 3.2. Η διαδικασία αυτή πρέπει να γίνει αρχικά για τυπικές συνθήκες ή συνθήκες αναφοράς (SRC) που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 2.2.2 αφού τα χαρακτηριστικά δεδομένα που δίνουν οι κατασκευαστές αναφέρονται σε αυτές τις συνθήκες. Έτσι θα βρούμε την χαρακτηριστική καμπύλη για ηλιακή ακτινοβολία 1000W/m^2 . Πρέπει δηλαδή να βρεθούν οι τιμές των πέντε παραμέτρων σε συνθήκες αναφοράς και μετά χρησιμοποιώντας αυτές τις τιμές θα μπορούν να βρεθούν οι παράμετροι αυτοί για άλλες συνθήκες. Η διαδικασία αυτή γίνεται από τους W. De Soto, S.A. Klein και W.A. Beckman στην αντίστοιχη δημοσίευση[32]. Για την επαλήθευση του μοντέλου, θα χρησιμοποιηθούν επίσης τα ΦΒ στοιχεία της ίδιας δημοσίευσης των οποίων οι τιμές παρέχονται από το NIST (National Institute of Standards and Technology). Παρόλο που τα ΦΒ στοιχεία αυτά δεν είναι τελευταίας τεχνολογίας (έχουν βαθμό απόδοσης που κυμαίνεται στο 13%) εξυπηρετούν τη διαδικασία επαλήθευσης. Η διαδικασία θα γίνει επομένως για τα ΦΒ στοιχεία Single-Crystalline, Poly-Crystalline και Silicon thin film των οποίων οι τιμές αυτές φαίνονται στον πίνακα 3.1.

	Single-crystalline	Poly-crystalline	Silicon thin film
$P_{MP,ref}$ (W)	133.40	125.78	103.96
$I_{sc,ref}$ (A)	4.37	4.25	5.11
$V_{oc,ref}$ (V)	42.93	41.50	29.61
$I_{MP,ref}$ (A)	3.96	3.82	4.49
$V_{MP,ref}$ (V)	33.68	32.94	23.17
NOCT (K)	316.85	316.45	316.15
α_{Isc}	0.00175	0.00238	0.00468
β_{Voc}	-0.15237	-0.15280	-0.12995
N_s	72	72	40
$E_{g,Tref}$	1.12	1.12	1.14

Πίνακας 3.1 Τιμές ΦΒ στοιχείων από NIST [32]

Οι τιμές που πρέπει να βρεθούν είναι: α_{ref} , $I_{o,ref}$, $I_{L,ref}$, $R_{s,ref}$, $R_{sh,ref}$. Ξεκινώντας από το α_{ref} από τη σχέση 3.1, ο αριθμός των ΦΒ στοιχείων κάθε στοιχείου σε σειρά N_s φαίνεται στον πίνακα 3.1 και η θερμοκρασία του στοιχείου για συνθήκες αναφοράς είναι 25°C. Ο συνήθης συντελεστής ιδανικότητας, παίρνει τιμές από 1 έως 2 για κανονικές διόδους και πάρθηκε ίση με 1 που είναι η τιμή για ιδανικές διόδους όπως αναφέρεται στο βιβλίο των John A. Duffie και William A. Beckman [33]. Οι υπόλοιπες τέσσερις παράμετροι βρίσκονται με ένα σύστημα τεσσάρων εξισώσεων με γνωστά μεγέθη αυτά του πίνακα 3.1. Οι εξισώσεις αυτές είναι:

$$I_{sc,ref} = I_{L,ref} - I_{o,ref} \left[e^{\frac{I_{sc,ref} R_{s,ref}}{\alpha_{ref}}} - 1 \right] - \frac{I_{sc,ref} R_{s,ref}}{R_{sh,ref}} \quad (3.3)$$

που προέρχεται από την εξίσωση 3.2 για βραχυκύκλωμα με $I=I_{sc,ref}$ και $V=0$.

$$0 = I_{L,ref} - I_{o,ref} \left[e^{\frac{V_{oc,ref}}{\alpha_{ref}}} - 1 \right] - \frac{V_{oc,ref}}{R_{sh,ref}} \quad (3.4)$$

που προέρχεται από την εξίσωση 4.2 για ανοικτό κύκλωμα με $I=0$ και $V=V_{oc,ref}$.

$$I_{MP,ref} = I_{L,ref} - I_{o,ref} \left[e^{\frac{V_{MP,ref} + I_{MP,ref} R_{s,ref}}{\alpha_{ref}}} - 1 \right] - \frac{V_{MP,ref} + I_{MP,ref} R_{s,ref}}{R_{sh,ref}} \quad (3.5)$$

που προέρχεται από την εξίσωση 3.2 για το σημείο μέγιστης ισχύς με $I=I_{MP,ref}$ και $V=V_{MP,ref}$.

$$I_{MP} = -V_{MP} \times \frac{\frac{I_{o,ref}}{\alpha_{ref}} e^{\frac{V_{MP,ref} + I_{MP,ref} R_{s,ref}}{\alpha_{ref}}} - \frac{1}{R_{sh,ref}}}{1 + \frac{I_{o,ref} R_{s,ref}}{\alpha_{ref}} e^{\frac{V_{MP,ref} + I_{MP,ref} R_{s,ref}}{\alpha_{ref}}} + \frac{R_{s,ref}}{R_{sh,ref}}} \quad (3.6)$$

Με αυτές βρίσκονται όλες οι παράμετροι αναφοράς και βάζοντας τις τιμές αυτές στη σχέση 3.2 βρίσκουμε την χαρακτηριστική καμπύλη (άρα και η καμπύλη ισχύς-τάσης) του κάθε ΦΒ για συνθήκες αναφοράς. Στη συνέχεια μπορεί να βρεθούν οι καμπύλες αυτές για διαφορετικές συνθήκες χρησιμοποιώντας τις τιμές για συνθήκες αναφοράς (reference) και κάποια γεωγραφικά και κλιματικά δεδομένα της κάθε περιοχής. Αυτά είναι:

- β κλίση επιπέδου
- θ γωνία πρόσπτωσης
- θ_z γωνία ζενίθ
- Τα θερμοκρασία περιβάλλοντος
- G_T : ένταση ηλιακής ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου

Οι εξισώσεις που συνδέουν τις παραμέτρους στις συνθήκες αναφοράς με τιμές για διαφορετικές συνθήκες είναι:

$$\frac{a}{\alpha_{ref}} = \frac{T_c}{T_{c,ref}} \quad (3.7)$$

όπου η θερμοκρασία του στοιχείου βρίσκεται από τη σχέση 2.1 του κεφαλαίου 2.

$$\frac{I_o}{I_{o,ref}} = \left[\frac{T_c}{T_{c,ref}} \right]^3 \times e^{\left[\frac{1}{k} \left(\frac{E_g}{T_{c,ref}} - \frac{E_g}{T_c} \right) \right]} \quad (3.8)$$

όπου

k: η σταθερά του Boltzman $k=1,38 \times 10^{-23}$ J/K

Eg: ενεργειακό χάσμα υλικού

$$\frac{E_g}{E_{g,Tref}} = 1 - 0.0002677 (T - T_{ref}) \quad (3.9)$$

$$I_L = \frac{S_{ref}}{S} \frac{M}{M_{ref}} [I_{L,ref} + a_{isc}(T_c - T_{c,ref})] \quad (3.10)$$

όπου

S: η απορροφημένη ηλιακή ακτινοβολία. Η απορροφημένη ακτινοβολία είναι λίγο μικρότερη από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει το επίπεδο εξαιτίας της διαθλαστικότητας του υλικού.

M: η μάζα αέρα την οποία διασχίζει μια δέσμη ακτινοβολίας μέχρι να φτάσει το επίπεδο.

$$S_{ref} = (\tau\alpha)_n \left[G_b R_b K_{\tau\alpha,b} + G_d K_{\tau\alpha,d} \frac{(1 + \cos\beta)}{2} + G_r K_{\tau\alpha,g} \frac{(1 - \cos\beta)}{2} \right] \quad (3.11)$$

όπου

$(\tau\alpha)_n$: το γινόμενο της διαπερατότητας επί την απορροφητικότητα

Rb: λόγος αμέσου ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου προς την άμεσο οριζόντιου επιπέδου

ρ : ανακλαστικότητα εδάφους ($\rho=0.2$)

$K_{\tau\alpha,b}$: συντελεστής γωνίας πρόσπτωσης

$K_{\tau\alpha,d}$: συντελεστής γωνίας πρόσπτωσης για διάχυτη ακτινοβολία

$K_{\tau\alpha,g}$: συντελεστής γωνίας πρόσπτωσης για ανάκλαση εδάφους

$$(\tau\alpha)_n = e^{-0.008} \left[1 - \left(\frac{1.526 - 1}{1.526 + 1} \right)^2 \right] = 0.949 \quad (3.12)$$

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (3.13)$$

$$K_{\tau\alpha} = \frac{\tau\alpha(\theta)}{(\tau\alpha)_n} \quad (3.14)$$

$$\tau\alpha(\theta) = e^{-\left(\frac{KL}{\cos \theta_1}\right)} \left[1 - 0.5 \left(\frac{\sin^2(\theta_1 - \theta_2)}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2)} + \frac{\tan^2(\theta_1 - \theta_2)}{\tan^2(\theta_1 + \theta_2)} \right) \right] \quad (3.15)$$

όπου

K: συντελεστής απόσβεσης υαλοπίνακα ($K=4m^{-1}$)

L: πάχος υαλοπίνακα ($L=2mm$)

για τις σχέσεις 3.11, 3.14, 3.15 όταν υπολογίζεται το $K_{\tau\alpha,b}$ τότε έχουμε:

$$\theta_1 = \sin^{-1} \left(\frac{\sin \theta}{1.526} \right) \quad (3.15.1)$$

$$\theta_2 = \theta \quad (3.15.2)$$

όταν υπολογίζεται το $K_{\tau\alpha,d}$ τότε έχουμε

$$\theta_{e,d} = 59.7 - 0.1388\beta + 0.001497\beta^2 \quad (3.15.3)$$

$$\theta_1 = \sin^{-1} \left(\frac{\sin \theta_{e,d}}{1.526} \right) \quad (3.15.4)$$

$$\theta_2 = \theta_d \quad (3.15.5)$$

και όταν υπολογίζεται το $K_{\tau\alpha,g}$ τότε έχουμε

$$\theta_{e,g} = 90 - 0.5788\beta + 0.002693\beta^2 \quad (3.15.6)$$

$$\theta_1 = \sin^{-1} \left(\frac{\sin \theta_{e,g}}{1.526} \right) \quad (3.15.7)$$

$$\theta_2 = \theta_g \quad (3.15.8)$$

Το S υπολογίζεται από τη σχέση 3.16

$$S = (\tau\alpha)_n G_T \quad (3.16)$$

$$\frac{M}{M_{ref}} = \sum_0^4 a_i (AM)^i \quad (3.17)$$

$$AM = \frac{1}{\cos(\theta_z) + 0.5057 (96.080 - \theta_z)^{-1.634}} \quad (3.18)$$

με τα $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ να είναι σταθερές για κάθε τύπο ΦΒ στοιχείου και φαίνονται στο πίνακα 3.2

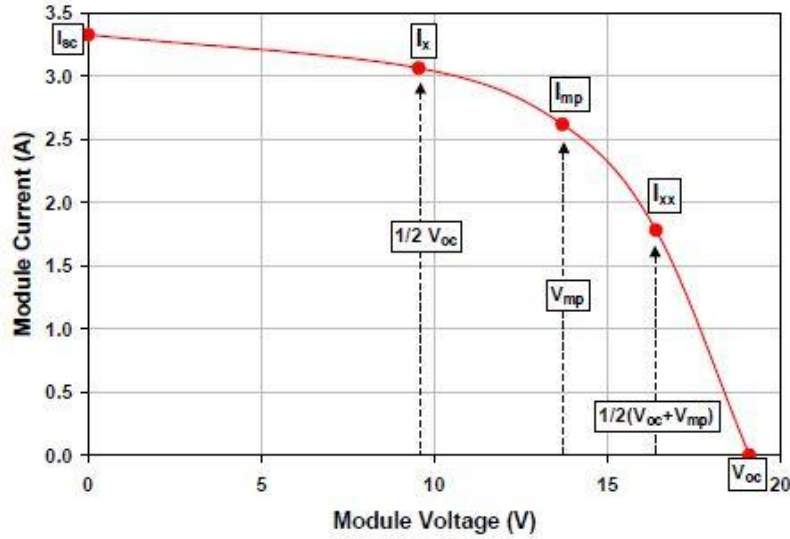
	Single-Crystalline	Poly-Crystalline	Silicon thin film
α_0	0.935823	0.918093	0.938110
α_1	0.054289	0.086257	0.062191
α_2	-0.008677	-0.024459	-0.015021
α_3	0.000527	0.002816	0.001217
α_4	-0.000011	-0.000126	-0.000034

Πίνακας 3.2 Τιμές ΦΒ στοιχείων από Sandia National Laboratories [32]

$$\frac{R_{sh}}{R_{sh,ref}} = \frac{S_{ref}}{S} \quad (3.19)$$

ενώ το R_s είναι ίδιο με το $R_{s,ref}$

Μετά τη δημιουργία του μοντέλου, για την επαλήθευση εκτός από τα αποτελέσματα που βρέθηκαν από το NIST, έγινε και επαλήθευση με τα αποτελέσματα από το King's model [32],[34]. Με αυτό γίνεται επίσης εύρεση της χαρακτηριστικής καμπύλης όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2. Οι εξισώσεις για την εύρεση των μεγεθών που αναγράφονται στο σχήμα, παρουσιάζονται μετά το σχήμα.



Σχήμα 3.2 Χαρακτηριστική καμπύλη ΦΒ με το King's model [34]

$$I_{sc} = I_{sc,ref} \left[\frac{M}{M_{ref}} \right] \left[1 + a_{Isc}(T_c - T_{c,ref}) \right] \left[\frac{G_b K_{\tau\alpha}(\theta) + G_d}{G_{ref}} \right] \quad (3.20)$$

$$I_{MP} = I_{MP,ref} [c_0 E_e + c_1 E_e^2] [1 + a_{IMP}(T_c - T_{c,ref})] \quad (3.21)$$

$$I_x = I_{x,ref} [c_4 E_e + c_5 E_e^2] \left[1 + \left(\frac{a_{Isc} + a_{IMP}}{2} \right) (T_c - T_{c,ref}) \right] \quad (3.22)$$

$$I_{xx} = I_{xx,ref} [c_6 E_e + c_7 E_e^2] [1 + a_{IMP}(T_c - T_{c,ref})] \quad (3.23)$$

$$V_{MP} = V_{MP,ref} + c_2 N_s \delta(T_c) \ln(E_e) + c_2 N_s [\delta(T_c) \ln(E_e)]^2 + \beta_{VMP} E_e (T_c - T_{c,ref}) \quad (3.24)$$

$$V_{oc} = V_{oc,ref} + N_s \delta(T_c) \ln(E_e) + \beta_{Voc} E_e (T_c - T_{c,ref}) \quad (3.25)$$

$$P_{MP} = I_{MP} V_{MP} \quad (3.26)$$

$$E_e = \frac{I_{sc}}{I_{sc,ref} [1 + a_{Isc}(T_c - T_{c,ref})]} \quad (3.27)$$

$$\delta(T_c) = \frac{n_D k T_c}{q} \quad (3.28)$$

Οι επιπλέον τιμές για κάθε ΦΒ στοιχείο που χρησιμοποιούνται για τις εξισώσεις αυτές δίνονται στον πίνακα 3.3.

	Single-Crystalline	Poly-Crystalline	Silicon thin film
C_0	0.9995	1.0144	0.9615
C_1	0.0026	-0.0055	0.0368
C_2	-0.5385	-0.3211	0.2322
C_3	-21.4078	-30.2010	-9.4295
C_4	0.9980	0.9931	0.967
C_5	0.0020	0.0069	0.033
C_6	1.159	1.104	1.12
C_7	-0.159	-0.104	-0.120
α_{IMP}	-0.00154	0.00018	0.00160
β_{VMP}	-0.15358	-0.15912	-0.13039
n_D	1.026	1.025	1.357

Πίνακας 3.3 Τιμές ΦΒ στοιχείων από Sandia National Laboratories [32]

Αρχικά με αυτή τη διαδικασία έγινε ο υπολογισμός για συνθήκες αναφοράς των τριών ΦΒ στοιχείων και μετά υπολογίστηκαν για την περιοχή της Αθήνας για την μέση μέρα κάθε μήνα, οι χαρακτηριστικές καμπύλες των ΦΒ αυτών στοιχείων και επιπλέον μεγέθη χρησιμοποιώντας τις καμπύλες αυτές. Συγκεκριμένα για το ΦΒ στοιχείο λεπτού υμενίου (silicon thin film) υπολογίστηκαν επίσης οι καμπύλες αυτές κατά τη διάρκεια της μέρας για να παρουσιαστεί η μεταβολή μεγεθών όπως παραγόμενη ενέργεια και βαθμός απόδοσης μέσα στη μέρα. Με τα αποτελέσματα αυτά που παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο γίνεται επαλήθευση του μοντέλου και έτσι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ΦΒ στοιχεία της αγοράς.

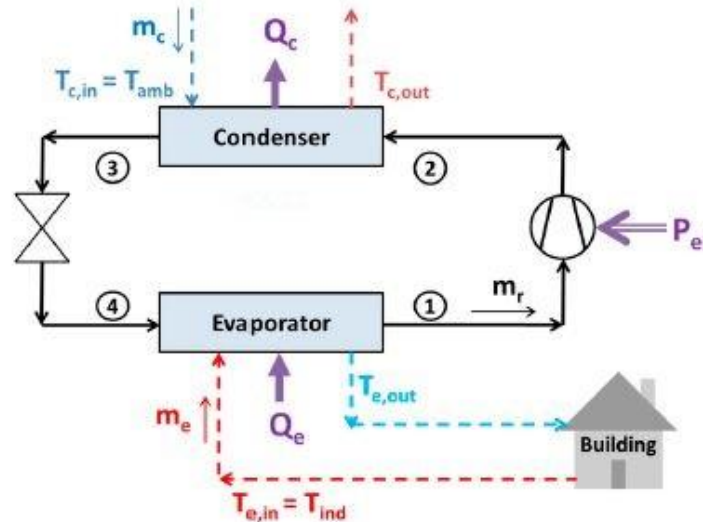
Στη συνέχεια βρέθηκε το μοντέλο υπολογισμού χαρακτηριστικών με την πιο πάνω διαδικασία για ένα σύγχρονο ΦΒ πάνελ της αγοράς. Έτσι έγιναν υπολογισμοί για το ΦΒ για τις περιοχές Αθήνας, Παραλιμνίου και Σεβίλλης για την μέση μέρα κάθε μήνα και βρέθηκαν ετήσια μεγέθη σε περίπτωση εγκατάστασης τέτοιου συστήματος. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο όπου φαίνονται επίσης τα γεωγραφικά και κλιματικά δεδομένα των περιοχών αυτών.

3.2 Σύστημα κλιματισμού.

Στη συνέχεια της εργασίας έγινε υπολογισμός της ηλεκτρικής ισχύς που απαιτούν ψυκτικοί κύκλοι που λειτουργούν στις ίδιες τρεις περιοχές. Βρέθηκε επίσης ο συντελεστής συμπεριφοράς COP για τα συστήματα αυτά. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν τα κλιματικά δεδομένα της κάθε περιοχής αφού τα μεγέθη αυτά εξαρτώνται επίσης από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Τα ψυκτικά συστήματα επιβαρύνουν το φαινόμενο της υπερθέρμανσης της γης και συμβάλλουν στην εξάντληση της στοιβάδας του όζοντος επομένως πρέπει να χρησιμοποιούνται πιο φιλικά προς το περιβάλλον ψυκτικά μέσα. Ένας δείκτης που δείχνει πόσο βλαβερό είναι κάποιο ψυκτικό μέσο είναι το δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη GWP (global warming potential). Προφανώς όσο ψιλότερος είναι ο δείκτης αυτός τόσο πιο επιβλαβή είναι το ψυκτικό μέσο. Οι υπολογισμοί για τα ψυκτικά συστήματα στην εργασία έγιναν για τρία διαφορετικά ψυκτικά μέσα. Αρχικά για το R152a το οποίο είναι υποσχόμενο μέσο ειδικά για οικιακά συστήματα ψύξης αφού έχει χαμηλό δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη αλλά αυξημένη αναφλεξιμότητα. Μετά έγιναν υπολογισμοί στο ευρέως χρησιμοποιούμενο ψυκτικό μέσο R134a και τέλος σύστημα ψύξης με διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) σαν μέσο. Το σύστημα που εξετάστηκε φαίνεται στο σχήμα 3.3 και για τους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκε το μοντέλου των E.Bellos, C.Tzivanidis [35].

	GWP	Περιορισμοί
R152a	138	Υψηλή αναφλεξιμότητα
R134a	1120	Υψηλό GWP
CO ₂	1	Χαμηλό COP

Πίνακας 3.4 Ψυκτικά μέσα που υπολογίστηκαν [35]



Σχήμα 3.3 Εξεταζόμενο σύστημα [35]

Οι σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι πιο κάτω:

$$Q_e = n_e m_e c_{p,air} (T_{e,in} - T_e) \quad (3.29)$$

$$n_e = 1 - e^{\left[\frac{(UA)_e}{m_e c_{p,air}}\right]} \quad (3.30)$$

$$Q_c = n_c m_c c_{p,air} (T_c - T_{c,in}) \quad (3.31)$$

$$n_c = 1 - e^{\left[\frac{(UA)_c}{m_c c_{p,air}}\right]} \quad (3.32)$$

$$P_{el} = \frac{W}{n_m} \quad (3.33)$$

$$W = m_r (h_2 - h_1) \quad (3.34)$$

$$COP = \frac{Q_e}{P_{el}} \quad (3.35)$$

όπου

Q_e : ψυκτικό φορτίο

Q_c : απορριπτόμενη θερμότητα προς το περιβάλλον από τον συμπυκνωτή

n_e, n_c : αποτελεσματικότητα εναλλακτών θερμότητας (ατμοποιητής και συμπυκνωτής αντίστοιχα)

P_{el} : Ηλεκτρική ισχύς συμπιεστή

W : θερμική ισχύς συμπιεστή

n_m : βαθμός απόδοσης συμπιεστή

UA : συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας

Παράμετρος	Τιμή	
	Q_e	2.5kW
$(UA)_c$	0.8W/K	1W/K
$(UA)_e$	0.8W/K	1W/K
m_c	0.8kg/s	1kg/s
m_e	0.8kg/s	1kg/s
n_m	0.80	

Πίνακας 3.5 Τιμές παραμέτρων συστήματος

Για το σύστημα κλιματισμού έγιναν υπολογισμοί για εγκατεστημένη ψυκτική ισχύ 2.5kW και 5kW και για εσωτερική θερμοκρασία χώρου 20°C και 25°C. Υπολογίστηκαν δηλαδή η ηλεκτρική ισχύς και ο COP για αυτά τα δεδομένα για θερμοκρασίες περιβάλλοντος από 25 °C έως 42 °C. Στη συνέχεια έχοντας σαν δεδομένα τα κλιματικά δεδομένα των τριών περιοχών υπολογίστηκε η ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνει ένα κλιματιστικό ψυκτικής ισχύς όπως πιο πάνω για ένα χρόνο στις τρεις περιοχές. Βρέθηκε δηλαδή πρώτα ο συνολικός αριθμός ωρών για κάθε θερμοκρασία πάνω από 27 °C (που θεωρήθηκε ότι απαιτείται χρήση κλιματιστικού) και υπολογίστηκε η ηλεκτρική ενέργεια για αυτές τις ώρες.

Συγκεκριμένα για ψυκτικό κύκλο με CO₂, υπάρχουν διάφορα συστήματα [36]. Στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε όμως χρησιμοποιήθηκε το σύστημα αναφοράς ενός σταδίου (με ένα συμπιεστή). Για τους υπολογισμούς αυτούς έγινε για κάθε περίπτωση βελτιστοποίηση του συντελεστή συμπεριφοράς COP χρησιμοποιώντας την παράμετρο:

$$\alpha = \frac{P_{high}}{P_{low}} \quad (3.36)$$

3.3 Τελικό σύστημα και Οικονομοτεχνική Ανάλυση.

Το τελικό σύστημα που αναλύθηκε στην εργασία φαίνεται στο σχήμα 3.4 για το οποίο ισχύουν διάφορα σενάρια. Αρχικά αναλύθηκε εγκατάσταση φωτοβολταϊκού συστήματος στις περιοχές Αθήνας, Παραλιμνίου και Σεβίλλης με τη μέθοδο Net metering. Το δεύτερο σενάριο αφορούσε ταυτόχρονη εγκατάσταση φωτοβολταϊκού συστήματος και συστήματος κλιματισμού. Σε αυτήν την περίπτωση, όλη η εγκατεστημένη ισχύς του ΦΒ συστήματος είναι αυτή που απαιτείται για την κάλυψη των αναγκών ψύξης. Οι σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι πιο κάτω:

$$NPV = -C_0 + \sum_i^N \frac{CF_i}{(1+r)^i} \quad (3.37)$$

$$PP = \frac{\ln\left(\frac{CF}{CF - C_0 r}\right)}{\ln(1+r)} \quad (3.38)$$

όπου

NPV: καθαρή παρούσα αξία (Net Present Value)

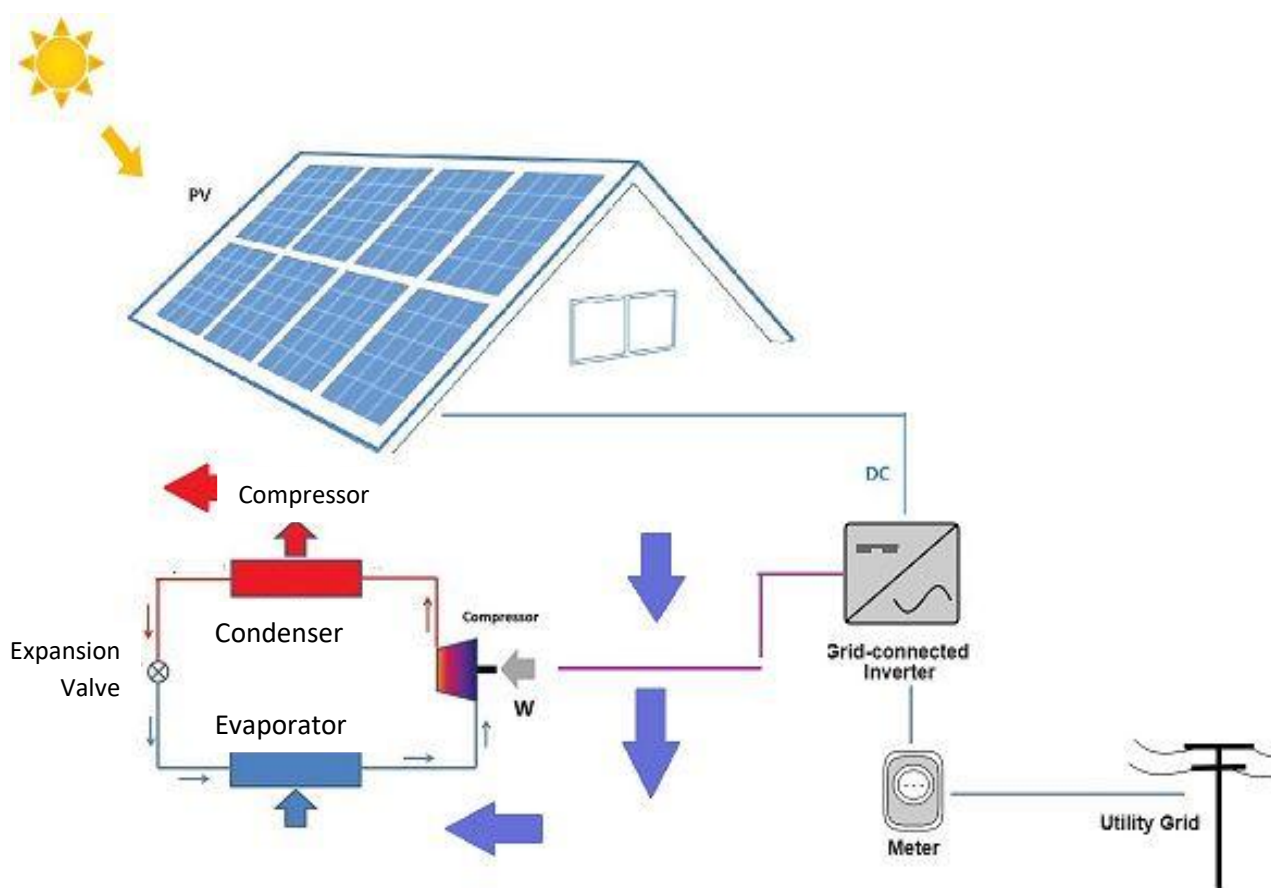
CF: ταμειακή ροή (cash flow)

i: έτη

r: επιτόκιο

C₀: αρχική επένδυση

PP: έτος αποπληρωμής (Payback period)



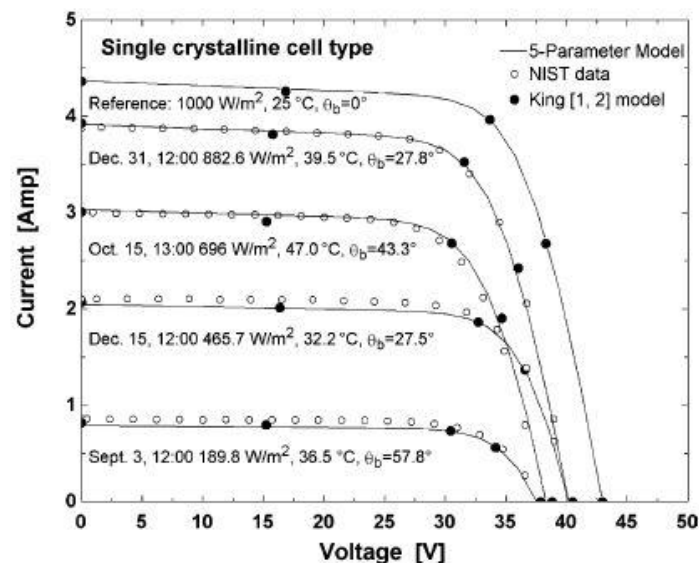
Σχήμα 3.4 Τελικό σύστημα που μελετήθηκε [31]

4. Αποτελέσματα

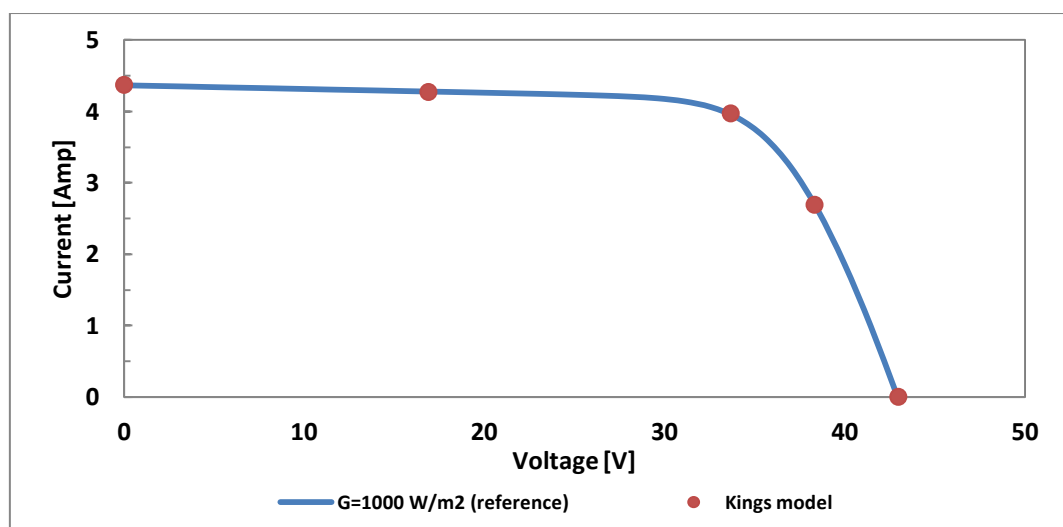
4.1 Επαλήθευση ΦΒ μοντέλου με επικύρωση υπάρχων χαρακτηριστικών

Όπως προαναφέρθηκε πριν από τη χρήση του μοντέλου γίνεται η επικύρωση υπάρχων χαρακτηριστικών ΦΒ. Τα φωτοβολταϊκά αυτά στοιχεία είναι από πειραματικά δεδομένα που έγιναν στον NIST για μονοκρυσταλλικό στοιχείο, πολυκρυσταλλικό και στοιχείο λεπτού υμενίου.

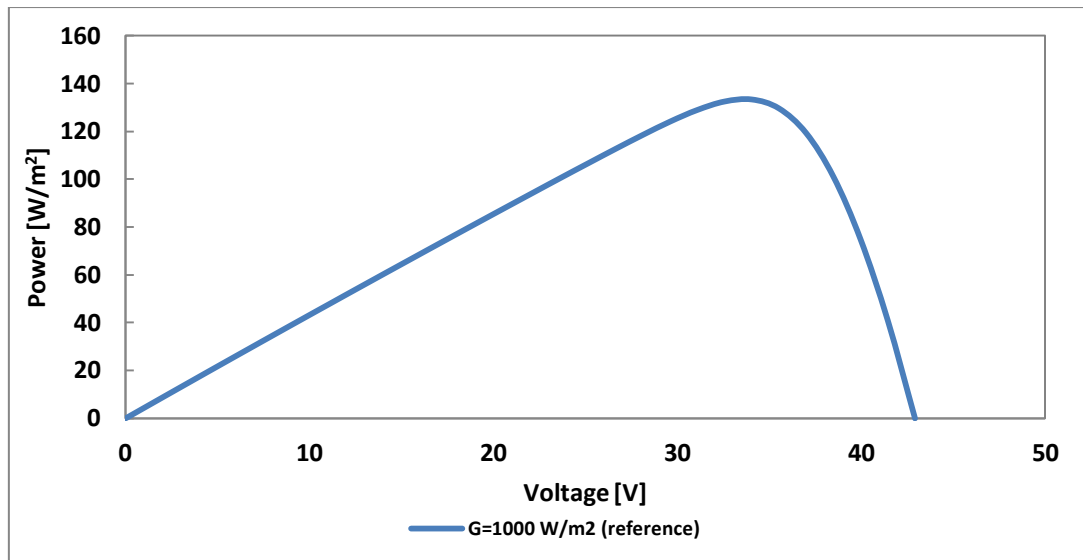
4.1.1 Μονοκρυσταλλικό ΦΒ στοιχείο



Διάγραμμα 4.1 Χαρακτηριστικές καμπύλες Έντασης-Τάσης για το μονοκρυσταλλικό στοιχείο με το μοντέλο των W. De Soto, S.A. Klein, W.A Beckman μαζί με την επιβεβαίωση από το μοντέλο Kings και τα πειραματικά δεδομένα που έγιναν στο National Institute of Standards and Technology (NIST) [32]

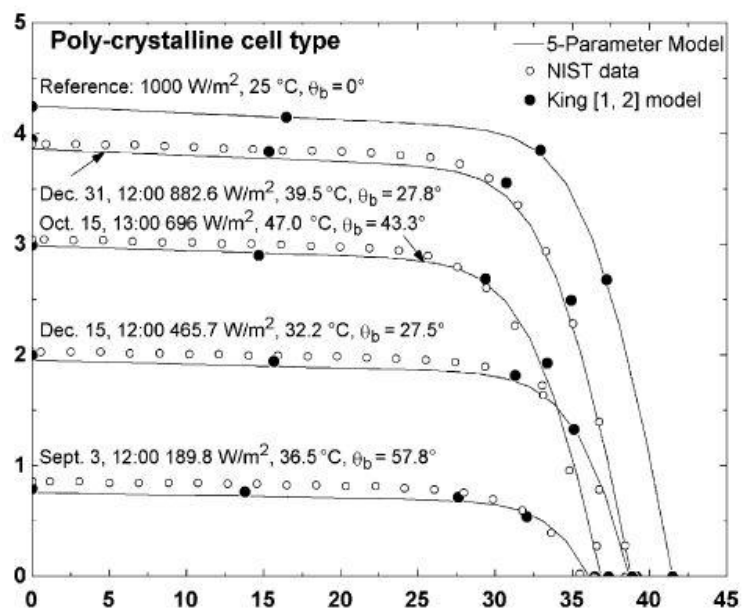


Διάγραμμα 4.2 Χαρακτηριστική καμπύλη I-V με το μοντέλο που δημιουργήθηκε μέσω το EES του μονοκρυσταλλικού στοιχείου του διαγράμματος 5.1 για συνθήκες αναφοράς και επαλήθευση αυτού με το μοντέλο του Kings που δημιουργήθηκε στο EES.

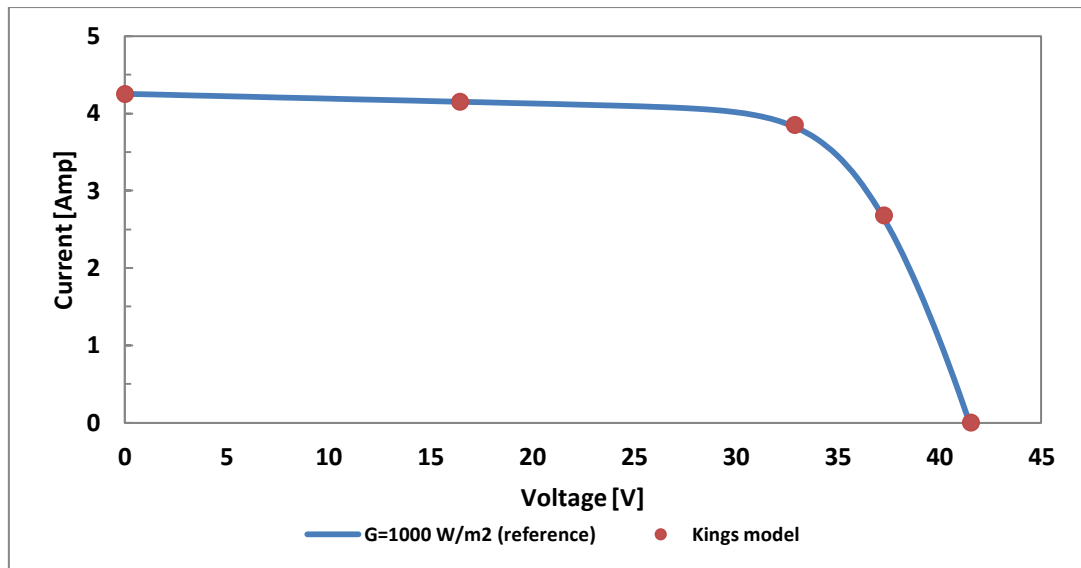


Διάγραμμα 4.3 Χαρακτηριστική καμπύλη P-V με το μοντέλο που δημιουργήθηκε μέσω το EES του μονοκρυσταλλικού στοιχείου του διαγράμματος 4.1 για συνθήκες αναφοράς

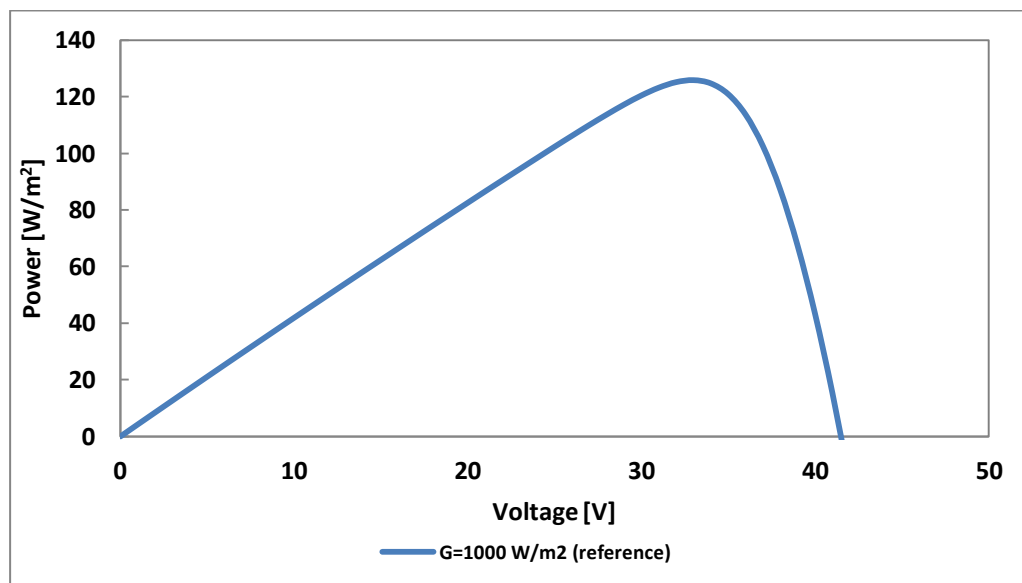
4.1.2 Πολυκρυσταλλικό ΦΒ στοιχείο



Διάγραμμα 4.4 Χαρακτηριστικές καμπύλες Έντασης-Τάσης για το πολυκρυσταλλικό στοιχείο με το μοντέλο των W. De Soto, S.A. Klein, W.A Beckman μαζί με την επιβεβαίωση από το μοντέλο Kings και τα πειραματικά δεδομένα που έγιναν στο National Institute of Standards and Technology (NIST) [32]

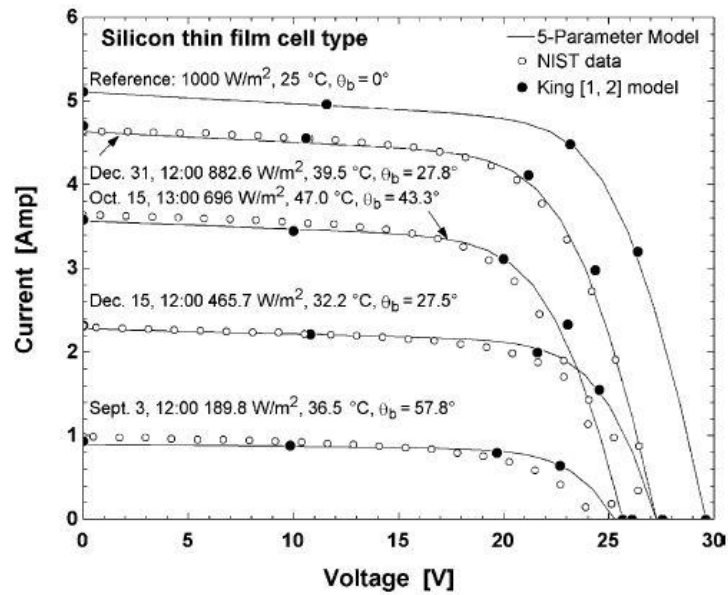


Διάγραμμα 4.5 Χαρακτηριστική καμπύλη I-V με το μοντέλο που δημιουργήθηκε μέσω το EES του πολυκρυσταλλικού στοιχείου του διαγράμματος 4.4 για συνθήκες αναφοράς και επαλήθευση αυτού με το μοντέλο του Kings που δημιουργήθηκε στο EES.

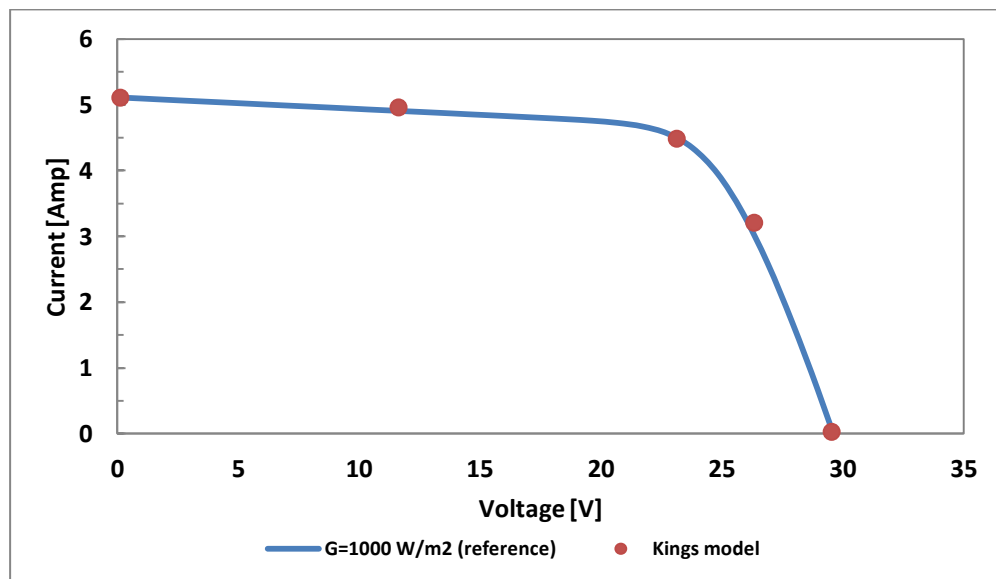


Διάγραμμα 4.6 Χαρακτηριστική καμπύλη P-V με το μοντέλο που δημιουργήθηκε μέσω το EES του πολυκρυσταλλικού στοιχείου του διαγράμματος 5.4 για συνθήκες αναφοράς

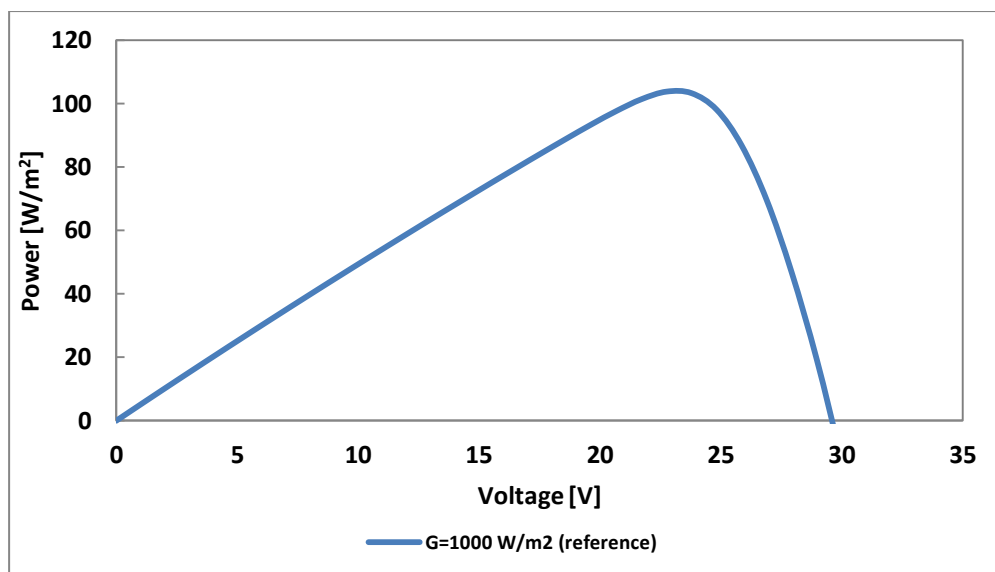
4.1.3 ΦΒ στοιχείο λεπτού υμενίου - Άμορφου πυριτίου (a-Si)



Διάγραμμα 4.7 Χαρακτηριστικές καμπύλες Έντασης-Τάσης για το στοιχείο άμορφου πυριτίου με το μοντέλο των W. De Soto, S.A. Klein, W.A Beckman μαζί με την επιβεβαίωση από το μοντέλο Kings και τα πειραματικά δεδομένα που έγιναν στο National Institute of Standards and Technology (NIST) [32]



Διάγραμμα 4.8 Χαρακτηριστική καμπύλη I-V με το μοντέλο που δημιουργήθηκε μέσω το EES του στοιχείου άμορφου πυριτίου του διαγράμματος 4.7 για συνθήκες αναφοράς και επαλήθευση αυτού με το μοντέλο του Kings που δημιουργήθηκε στο EES.



Διάγραμμα 4.9 Χαρακτηριστική καμπύλη P-V με το μοντέλο που δημιουργήθηκε μέσω το EES του στοιχείου άμορφου πυριτίου του διαγράμματος 4.7 για συνθήκες αναφοράς

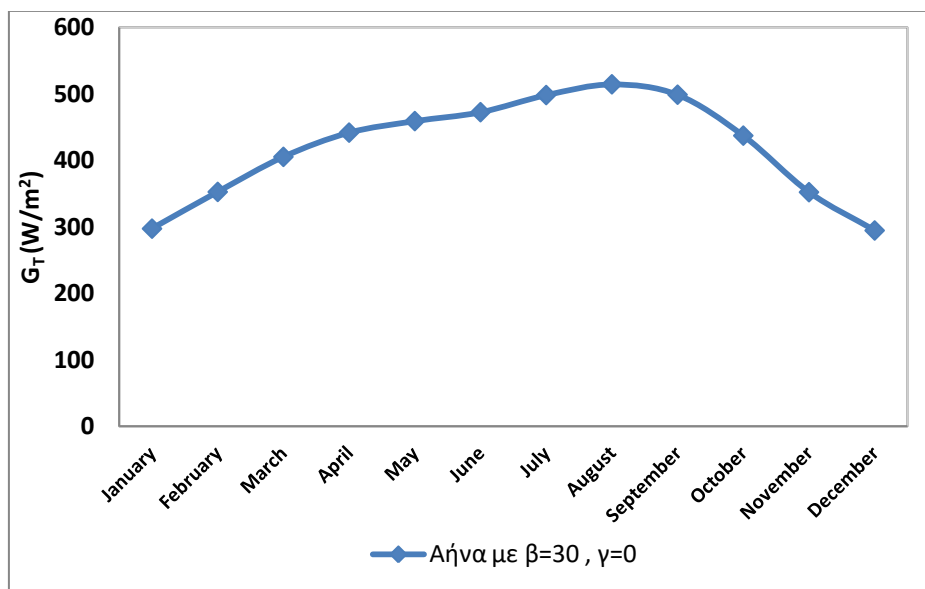
Φαίνεται και για τα τρία στοιχεία ότι η επικύρωση για τις συνθήκες αναφοράς μέσω των εξισώσεων στο EES δημιουργεί τις ίδιες καμπύλες με τα πειραματικά αποτελέσματα. Επίσης η επαλήθευση με το μοντέλο του Kings, δείχνει την ορθότητα της διαδικασίας. Έτσι στη συνέχεια γίνεται υπολογισμός για συνθήκες μη αναφοράς.

4.2 Χρήση μοντέλου για πρόβλεψη χαρακτηριστικών καμπύλων για την περιοχή της Αθήνας των ΦΒ στοιχείων που παρουσιάστηκαν πιο πάνω.

Μήνας	η μέση μέρα	δ (rad)	ω rad	θ (deg) ($\beta=30, \gamma=0$)	θ_z (deg)	ϕ rad	Διάρκεια ημέρας(h)
Ιαν	17	-0,36477	1,268401	28,85	58,85	0,662352	9,78
Φεβ	47	-0,22689	1,389759	20,95	50,95	0,662352	10,81
Μαρ	75	-0,04189	1,538104	10,35	40,35	0,662352	12
Απρ	105	0,164061	1,700266	1,45	28,55	0,662352	13,23
Μαί	135	0,328122	1,839512	10,85	19,15	0,662352	14,22
Ιουν	162	0,403171	1,909906	15,15	14,85	0,662352	14,64
Ιουλ	198	0,37001	1,878107	13,25	16,75	0,662352	14,26
Αυγ	228	0,235619	1,759141	5,55	24,45	0,662352	13,25
Σεπ	258	0,038397	1,600761	5,75	35,75	0,662352	11,98
Οκτ	288	-0,16755	1,438504	17,55	47,55	0,662352	10,75
Νοε	318	-0,32987	1,300504	26,85	56,85	0,662352	9,74
Δεκ	344	-0,40143	1,233391	30,95	60,95	0,662352	9,36

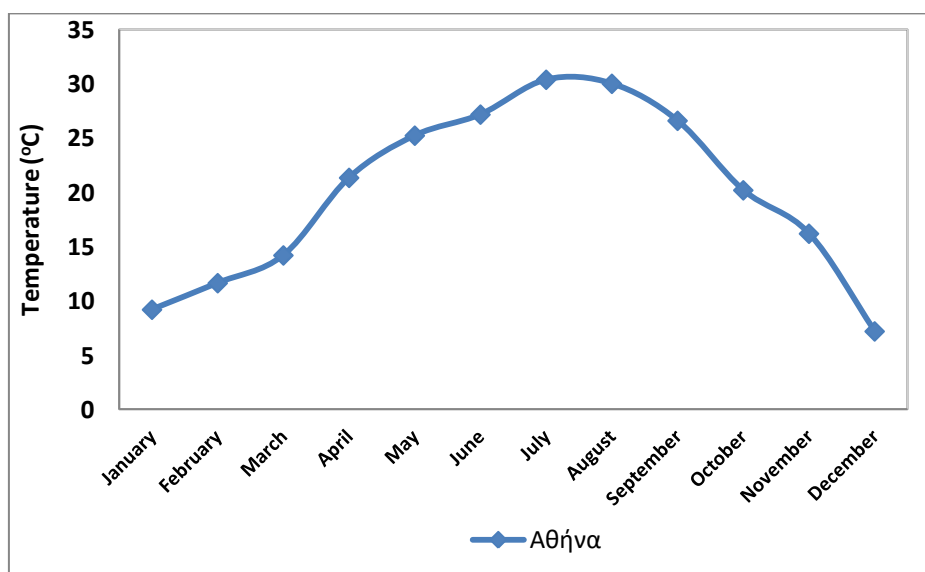
Πίνακας 4.1 Γεωγραφικά και ηλιακά δεδομένα για την περιοχή της Αθήνας.

Όπως δείχνει και ο πίνακας 4.1, οι υπολογισμοί στην Αθήνα θα γίνουν για τη μέση μέρα κάθε μήνα για ΦΒ πάνελ στραμμένα προς το νότο αφού $\gamma=0$ και κλίση 30° . Όπως είναι γνωστό η μέγιστη ετήσια παραγωγή ενέργειας έχουμε για κλίση των πάνελ ίση με το γεωγραφικό πλάτος ($\beta=\phi$). Η Αθήνα έχει γεωγραφικό πλάτος $\phi=37,97$ και η κλίση είναι λίγο μικρότερη. Με κλίση λίγο μικρότερη από το γεωγραφικό πλάτος έχουμε λίγο μεγαλύτερη παραγόμενη ενέργεια τους καλοκαιρινούς μήνες.



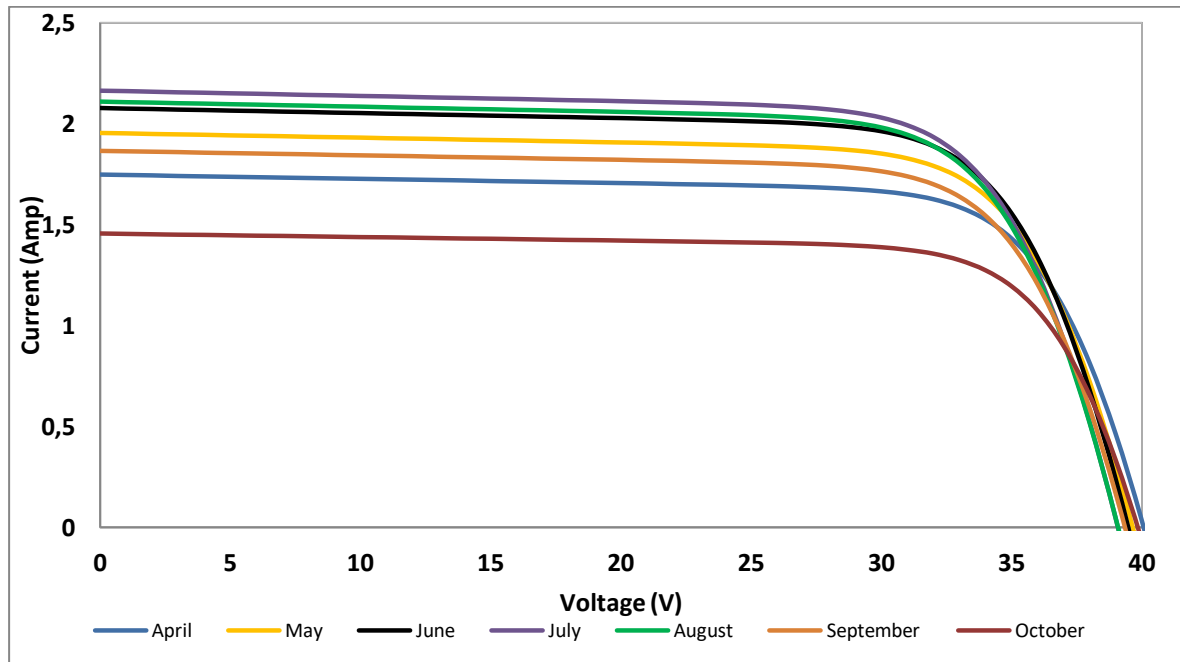
Διάγραμμα 4.10 Ημερήσια προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται επίπεδο με κλίση επιφανείας 30° και προσανατολισμό προς τον νότο στην Αθήνα [37]

Η θερμοκρασία χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών καμπύλων των ΦΒ. Για το λόγο αυτό η θερμοκρασίες που παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 4.11 είναι η μέση θερμοκρασία κάθε μήνα για τις ώρες που έχουμε ηλιοφάνεια

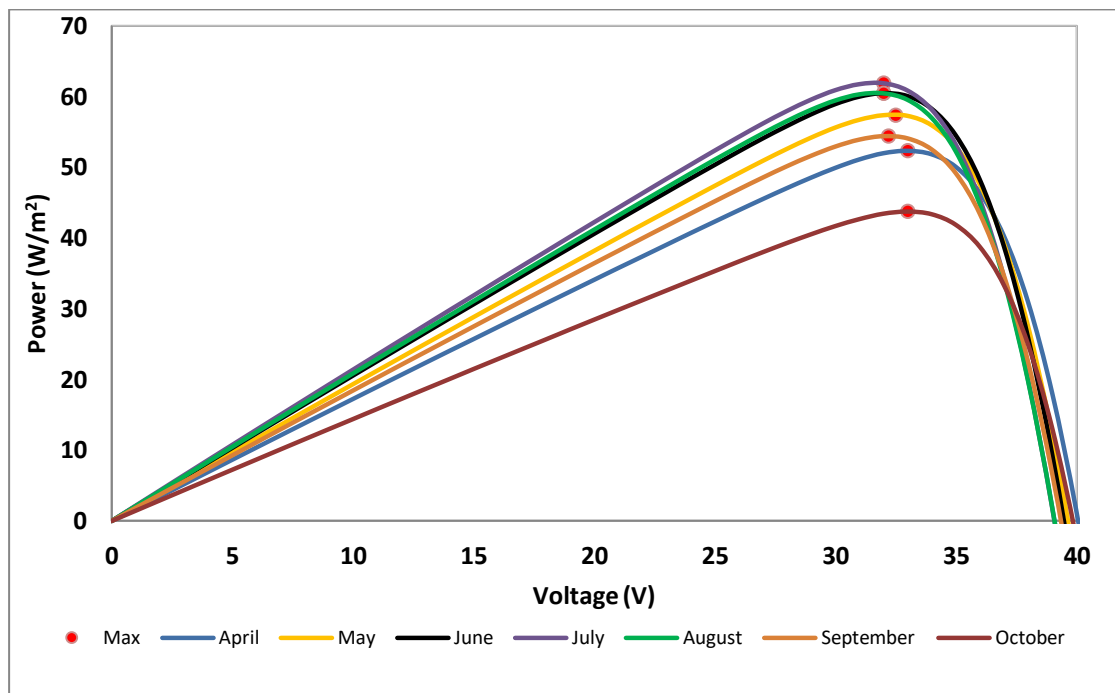


Διάγραμμα 4.11 Θερμοκρασία μέσης μέρας κάθε μήνα στην Αθήνα. [37]

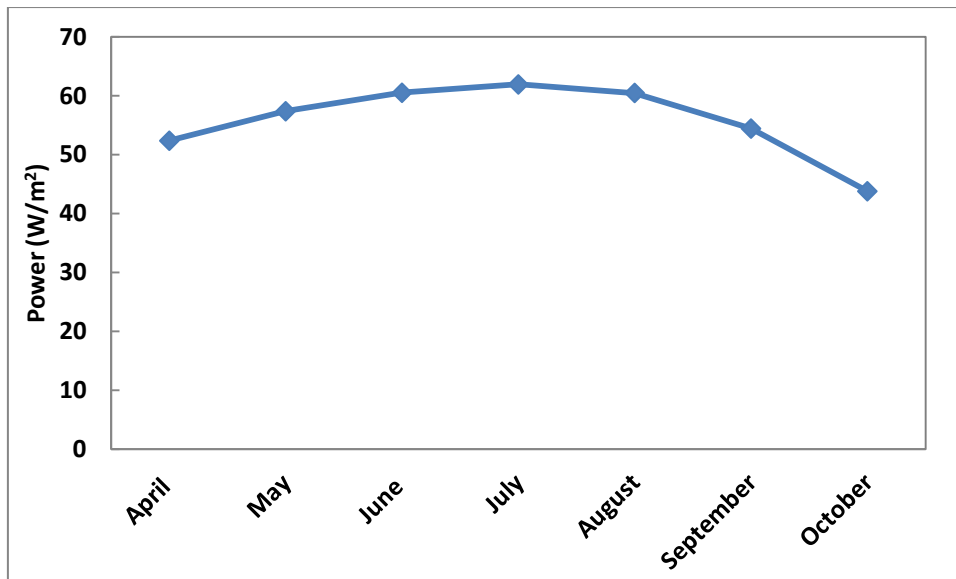
4.2.1 Μονοκρυσταλλικό ΦΒ στοιχείο για την περιοχή της Αθήνας για τους μήνες Απρίλιο με Οκτώβριο.



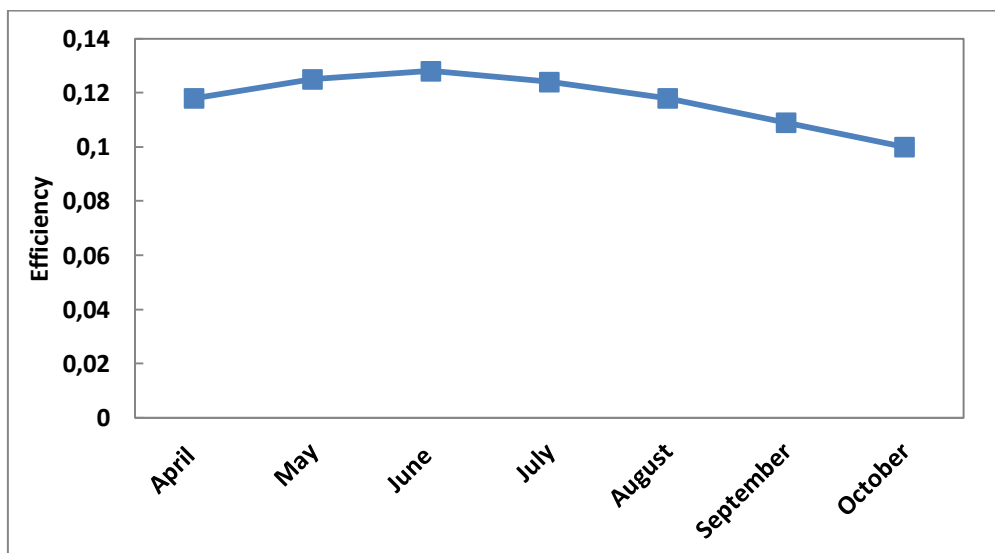
Διάγραμμα 4.12 Χαρακτηριστική καμπύλη I-V για τη μέση μέρα κάθε μήνα



Διάγραμμα 4.13 Χαρακτηριστική καμπύλη P-V για τη μέση μέρα κάθε μήνα



Διάγραμμα 4.14 Μέγιστη παραγόμενη ισχύς για τη μέση μέρα κάθε μήνα

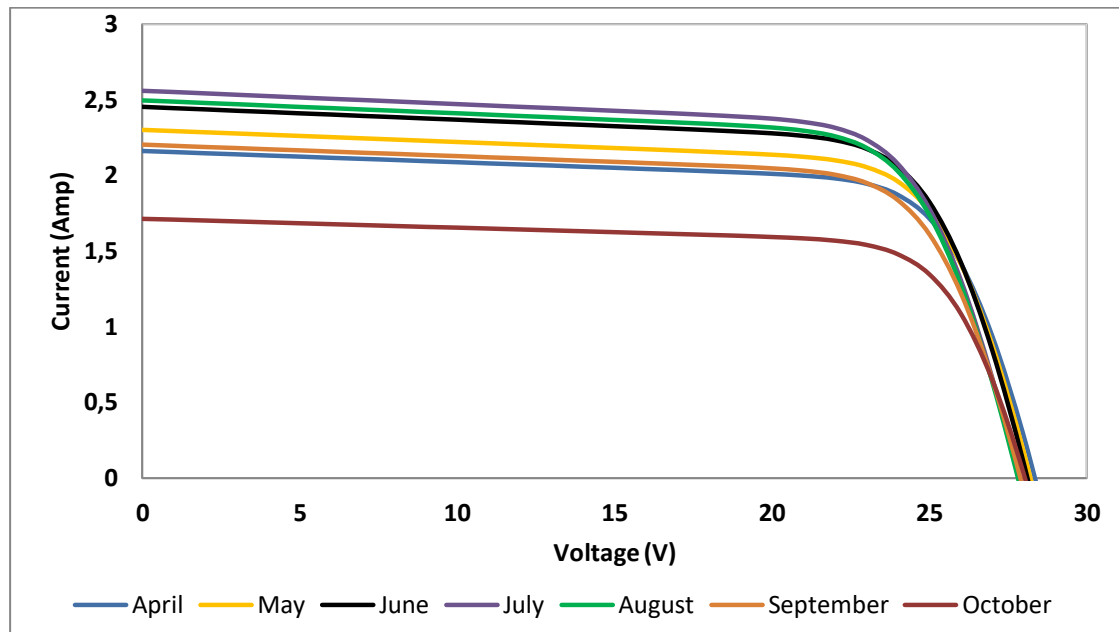


Διάγραμμα 4.15 Βαθμός απόδοσης του ΦΒ στοιχείου για τη μέση μέρα κάθε μήνα

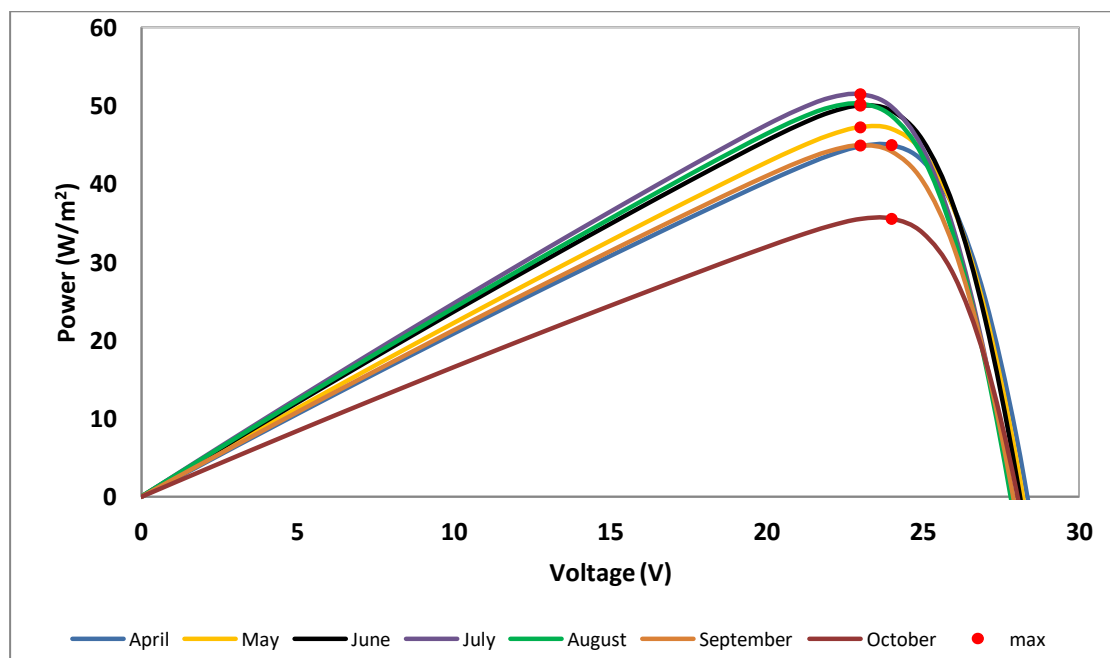
Στα πιο πάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι μέγιστη παραγόμενη ισχύ έχουμε τον μήνα Ιούλιο ενώ για Ιούνιο και Αύγουστο έχουμε λίγο μικρότερη ισχύ. Επίσης για τους υπόλοιπους μήνες όπου η παραγόμενη ισχύς είναι μικρότερη, παρόλο που η διαφορά στην ισχύ δεν είναι πολύ μεγάλη, η διαφορά στην παραγόμενη ενέργεια θα είναι μεγαλύτερη γιατί για την ενέργεια πολλαπλασιάζουμε την ισχύ της μέσης μέρας κάθε μήνα με την διάρκεια της μέρας αυτής (που είναι οι ώρες που έχω ηλιοφάνεια). Τέλος ο βαθμός απόδοσης παρουσιάζει μέγιστο για τον μήνα Ιούνιο.

4.2.2 ΦΒ στοιχείο άμορφου πυριτίου για την περιοχή της Αθήνας για τους μήνες Απρίλιο με Οκτώβριο.

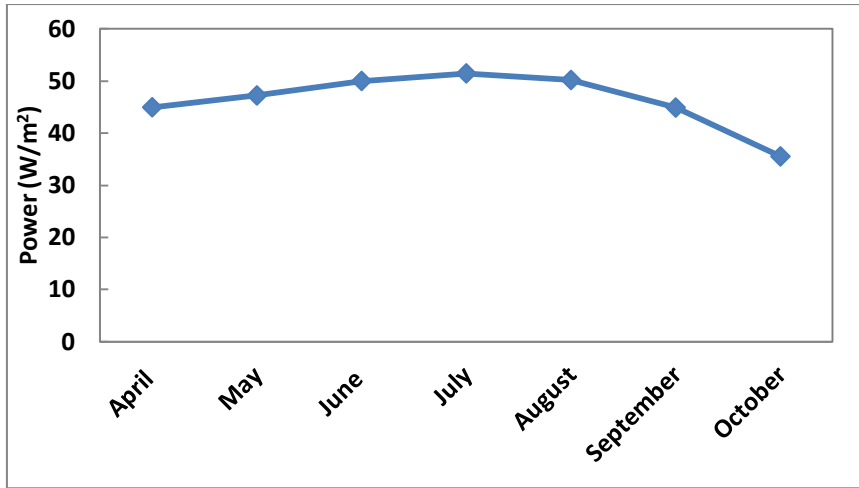
Για το ΦΒ στοιχείο λεπτού υμενίου εκτός από τις καμπύλες για την μέση μέρα κάθε μήνα, υπολογίστηκαν και για μέση μέρα Απριλίου για διάφορες ώρες με σκοπό να δειχθεί ότι μπορεί να γίνει και η πρόβλεψη της παραγόμενης ενέργειας και κατά τη διάρκεια της μέρας. Αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας τα θ, θ_z θερμοκρασία και GT για κάθε ώρα.



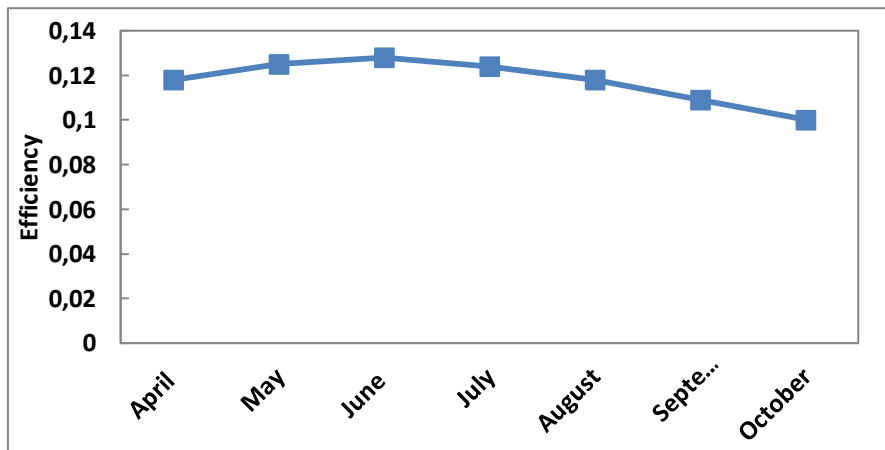
Διάγραμμα 4.16 Χαρακτηριστική καμπύλη I-V για τη μέση μέρα κάθε μήνα



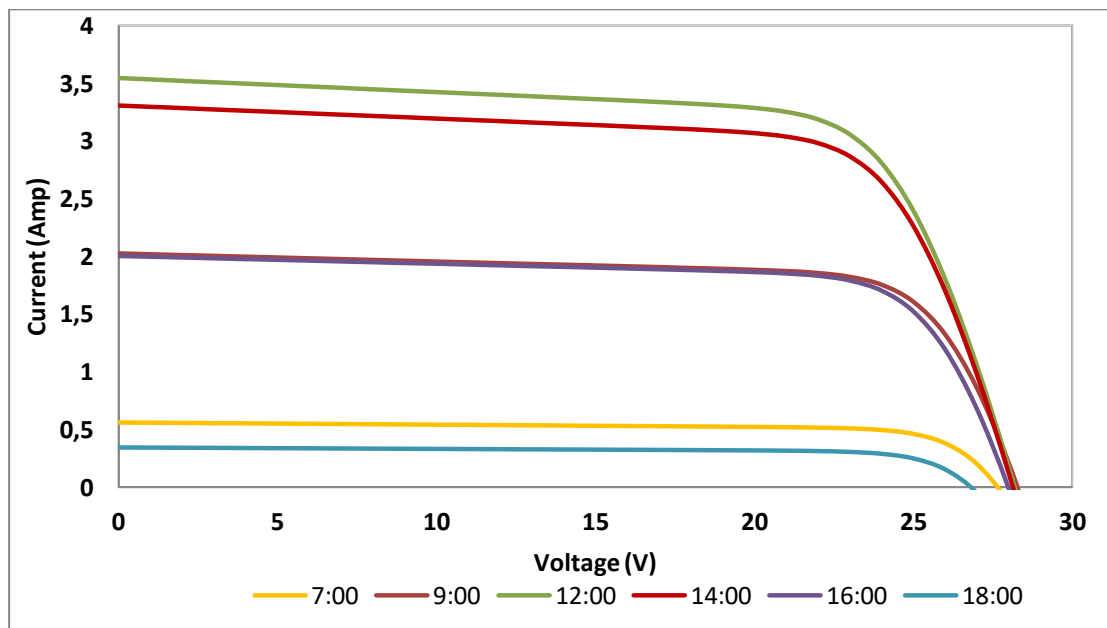
Διάγραμμα 4.17 Χαρακτηριστική καμπύλη P-V για τη μέση μέρα κάθε μήνα



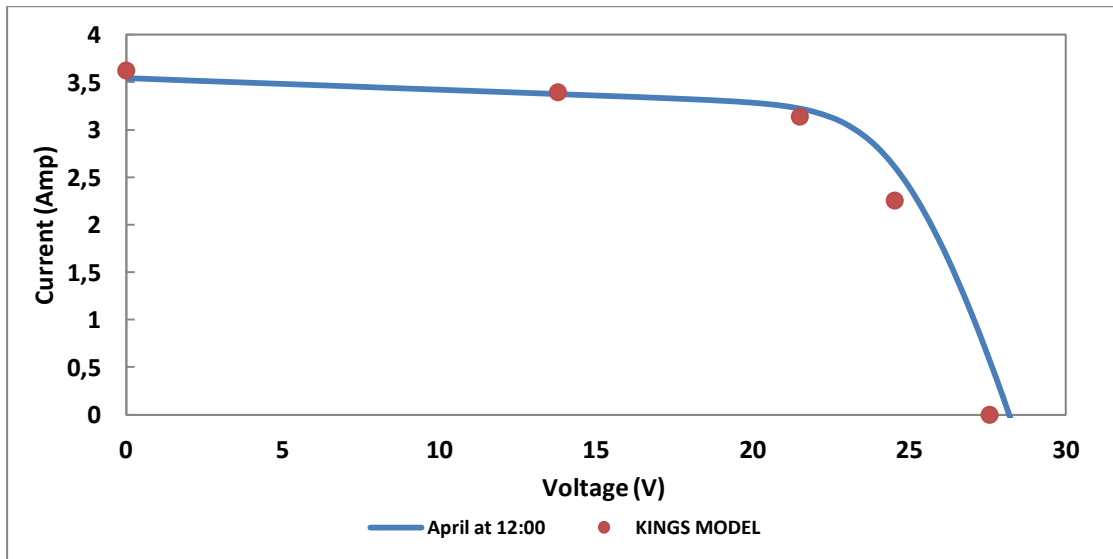
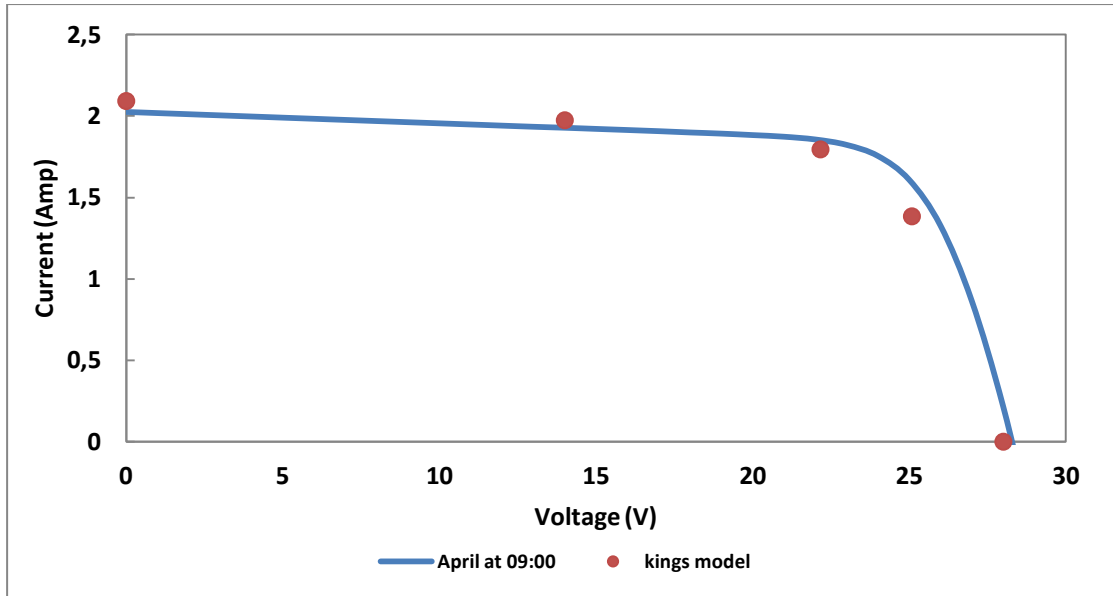
Διάγραμμα 4.18 Μέγιστη παραγόμενη ισχύς για τη μέση μέρα κάθε μήνα



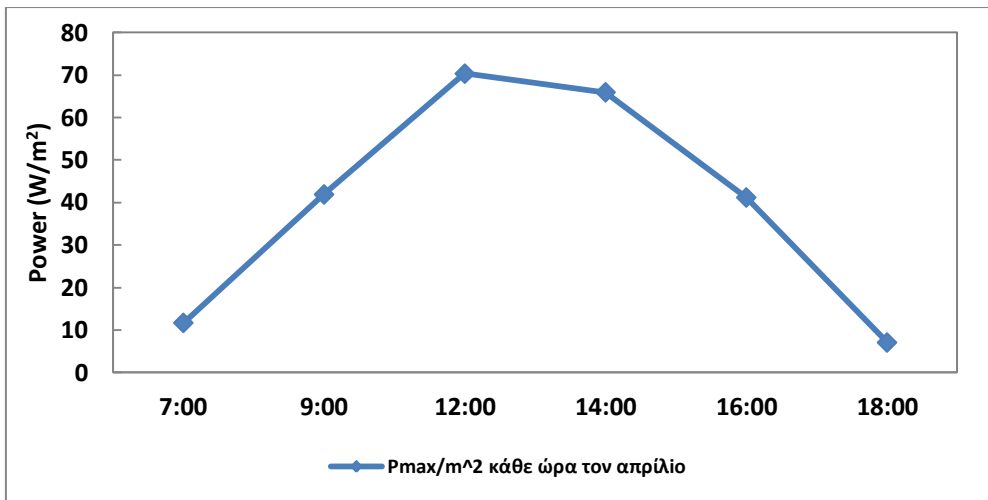
Διάγραμμα 4.19 Βαθμός απόδοσης του ΦΒ στοιχείου για τη μέση μέρα κάθε μήνα



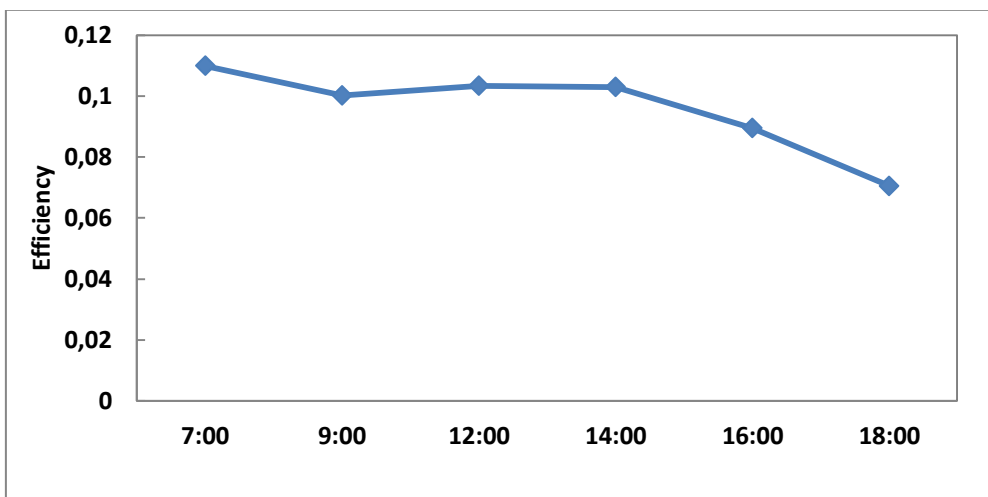
Διάγραμμα 4.20 Χαρακτηριστική καμπύλη I-V κατά την διάρκεια της μέσης μέρας Απριλίου



Διάγραμμα 4.21 Επαλήθευση της χρήσης του μοντέλου για πρόβλεψη χαρακτηριστικών κατά τη διάρκεια της μέρας μέσω του μοντέλου Kings.



Διάγραμμα 4.22 Μέγιστη παραγόμενη ισχύς κατά την διάρκεια της μέσης μέρας Απριλίου



Διάγραμμα 4.23 Βαθμός απόδοσης του στοιχείου κατά την διάρκεια της μέσης μέρας Απριλίου

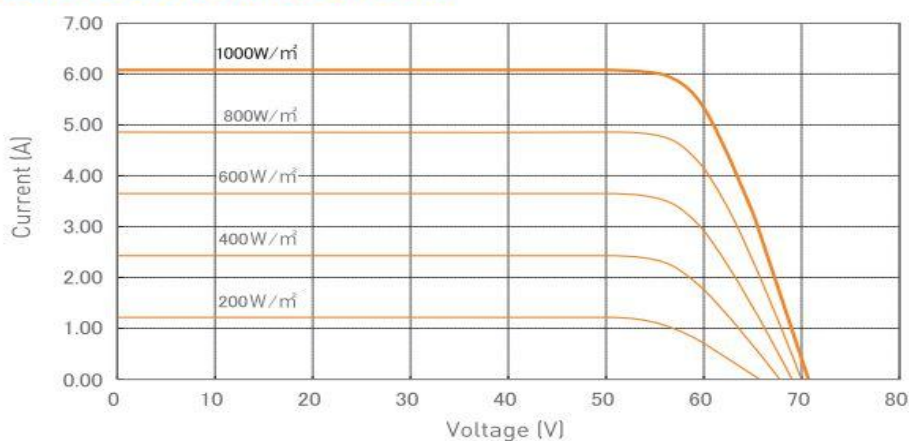
Τα αποτελέσματα για ΦΒ στοιχείο λεπτού υμενίου δείχνουν όπως και για το μονοκρυσταλλικό μέγιστη ισχύ τον Ιούλιο και υψηλότερο βαθμό απόδοσης τον Ιούνιο. Η ιδιαιτερότητα των υπολογισμών εδώ είναι κατά τη διάρκεια της μέρας. Για τον Απρίλιο έχουμε μέγιστη ισχύ στις 12:00 αλλά αυτό δεν σημαίνει πως για κάθε μήνα το μέγιστο θα είναι στις 12:00. Η επαλήθευση με το μοντέλο του Kings για τα αποτελέσματα κατά τη διάρκεια της μέρας δείχνουν πως είναι αρκετά αξιόπιστα.

4.3 Χρήση μοντέλου για πρόβλεψη χαρακτηριστικών καμπύλων και παραγόμενης ενέργειας εμπορικού ΦΒ πάνελ (Panasonic 330W) για τις περιοχές Αθήνας, Παραλιμνίου και Σεβίλλης.

Το φωτοβολταϊκό πάνελ που επιλέχθηκε είναι της Panasonic ισχύος 330W και τα χαρακτηριστικά του φαίνονται πιο κάτω:

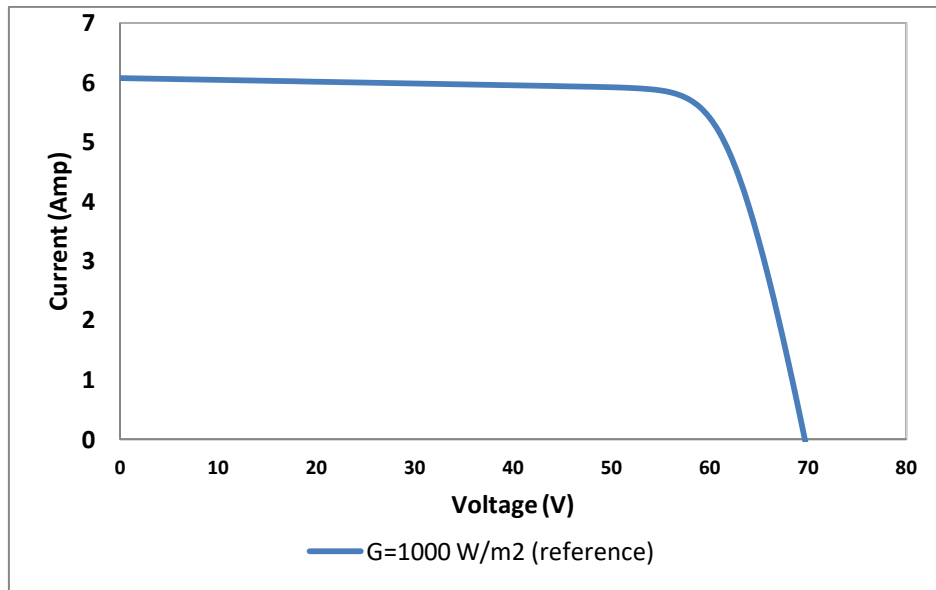
Model	VBHN330SA17
Rated Power [Pmax] ¹	330W
Maximum Power Voltage [Vpm]	58.0V
Maximum Power Current [Ipm]	5.70A
Open Circuit Voltage [Voc]	69.7V
Short Circuit Current [Isc]	6.07A
Temperature Coefficient [Pmax]	-0.258%/°C
Temperature Coefficient [Voc]	-0.16V/°C
Temperature Coefficient [Isc]	3.34mA/°C
NOCT	44.0°C
CEC PTC Rating	311.7W
Cell Efficiency	22.09%
Module Efficiency	19.7%
Watts per Ft. ²	18.3W
Maximum System Voltage	600V
Series Fuse Rating	15A
Warranted Tolerance [-/+]	+10%/-0%*

DEPENDENCE ON IRRADIANCE

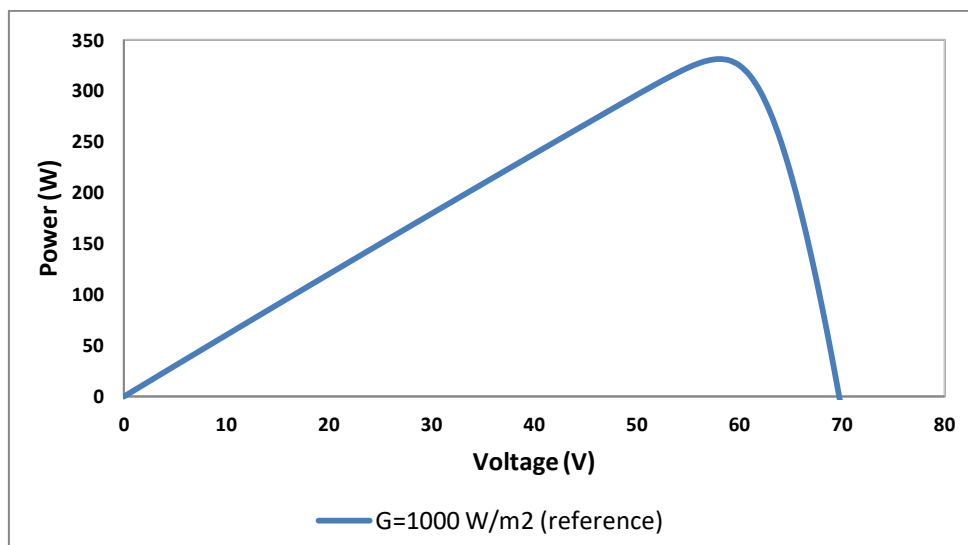


Διάγραμμα 4.24 Χαρακτηριστικά του εμπορικού ΦΒ πάνελ [39]

4.3.1 Επαλήθευση της χαρακτηριστικής καμπύλης για συνθήκες αναφοράς με το μοντέλο EES



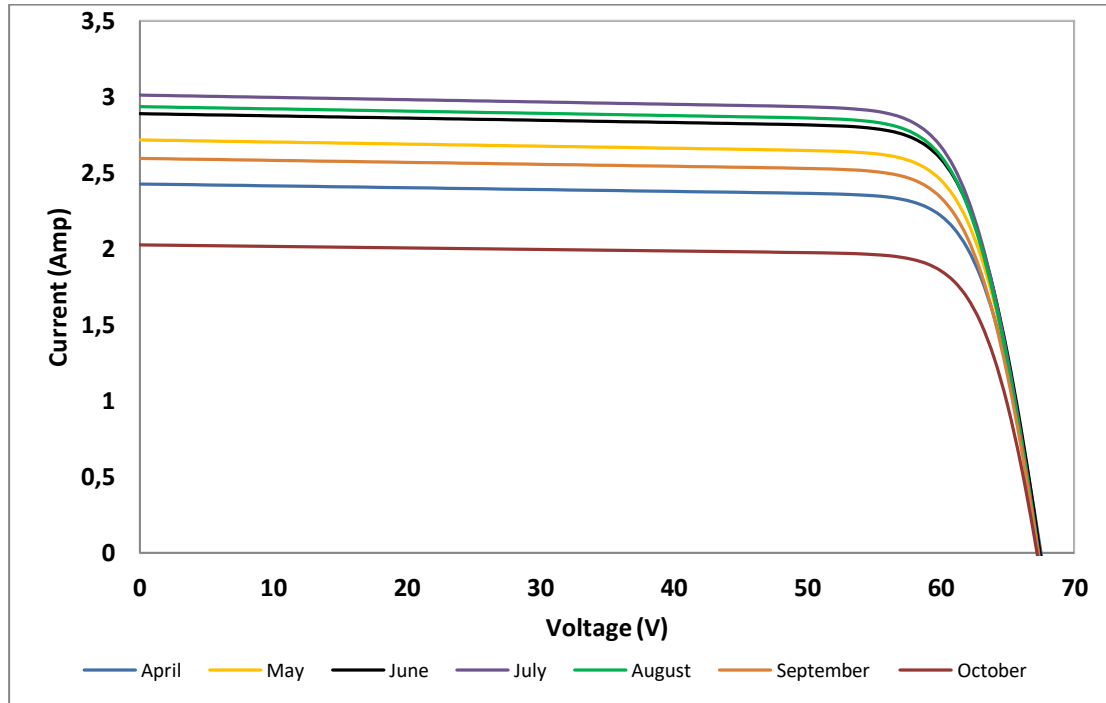
Διάγραμμα 4.25 Χαρακτηριστική καμπύλη I-V με το μοντέλο που δημιουργήθηκε μέσω το EES του ΦΒ πάνελ του διαγράμματος 4.24 για συνθήκες αναφοράς



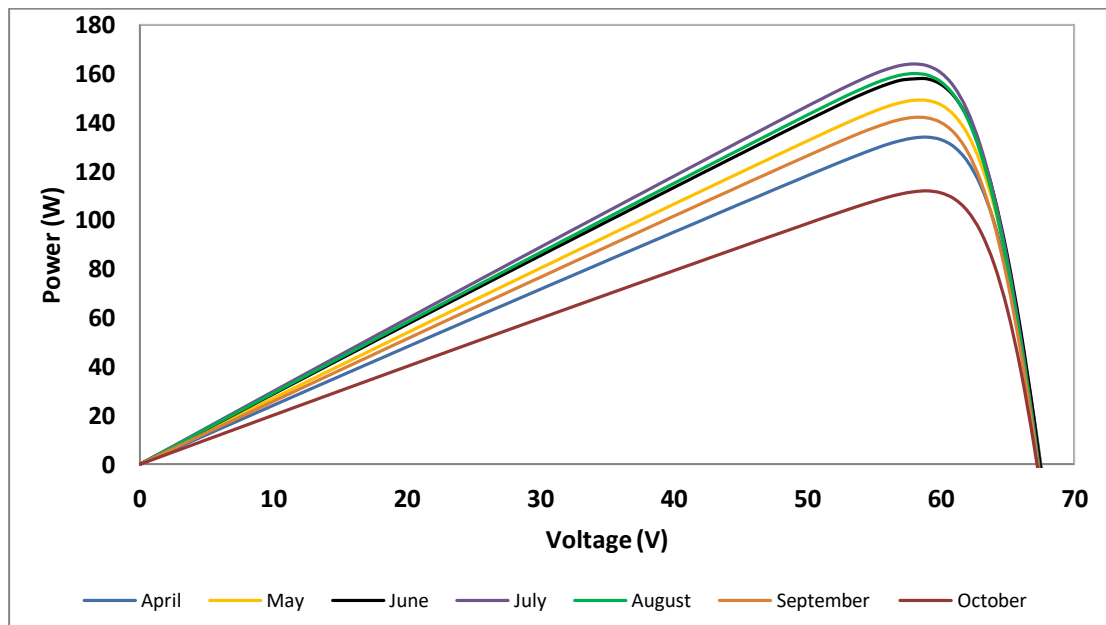
Διάγραμμα 4.26 Χαρακτηριστική καμπύλη P-V με το μοντέλο που δημιουργήθηκε μέσω το EES του ΦΒ πάνελ του διαγράμματος 4.24 για συνθήκες αναφοράς

4.3.2 Αποτελέσματα για την περιοχή της Αθήνας

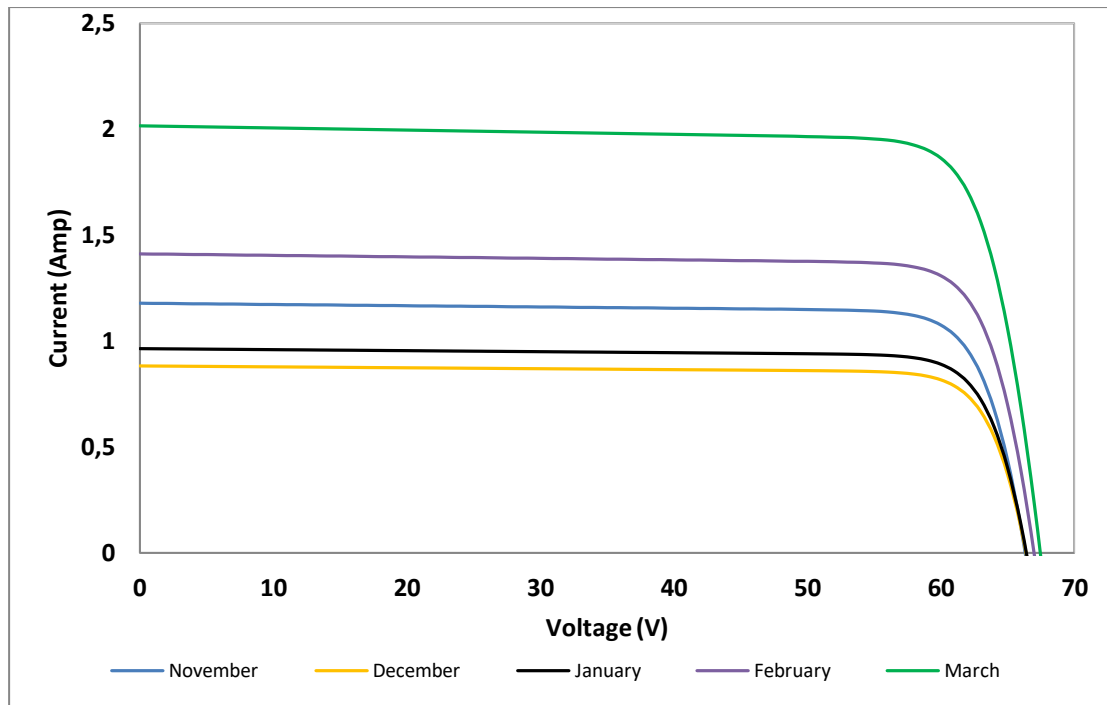
Για τα πιο κάτω αποτελέσματα γίνεται χρήση και του πίνακα 4.1 με τα γεωγραφικά και ηλιακά δεδομένα της Αθήνας. Οι υπολογισμοί αναφέρονται σε κλίση επιφανείας 30° και προσανατολισμός προς νότο.



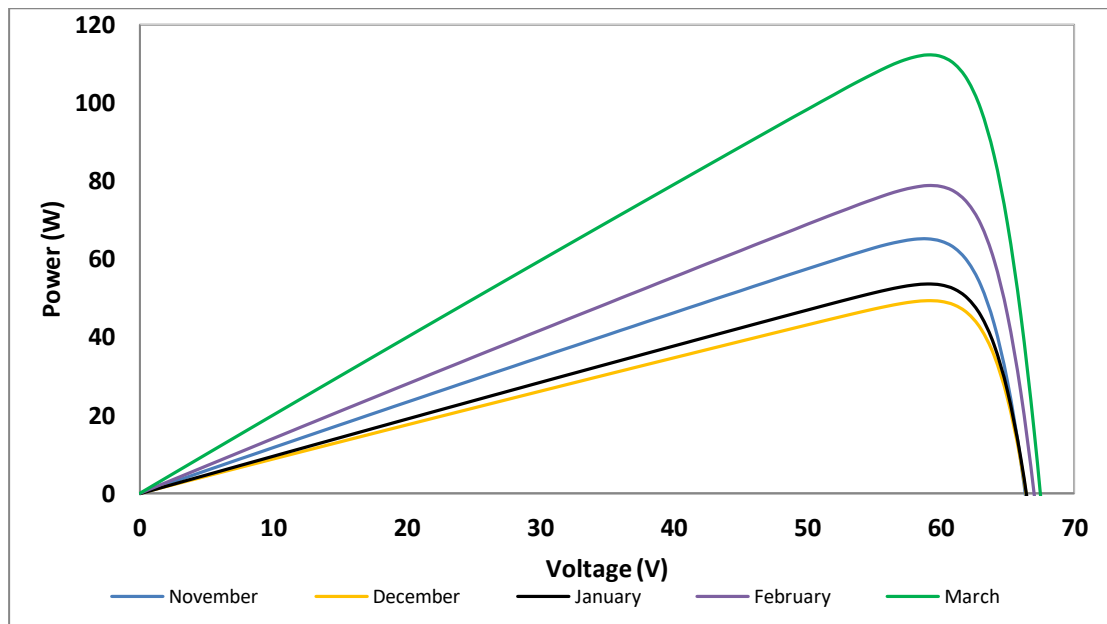
Διάγραμμα 4.27 Χαρακτηριστική καμπύλη I-V για τη μέση μέρα κάθε μήνα από Απρίλιο έως Οκτώβριο



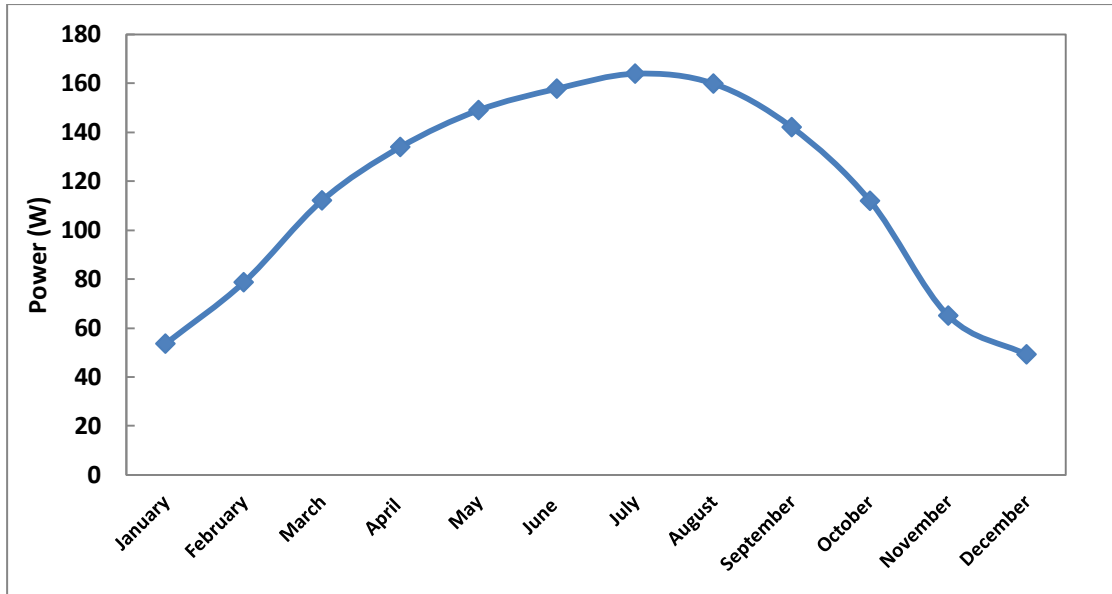
Διάγραμμα 4.28 Χαρακτηριστική καμπύλη P-V για τη μέση μέρα κάθε μήνα από Απρίλιο έως Οκτώβριο



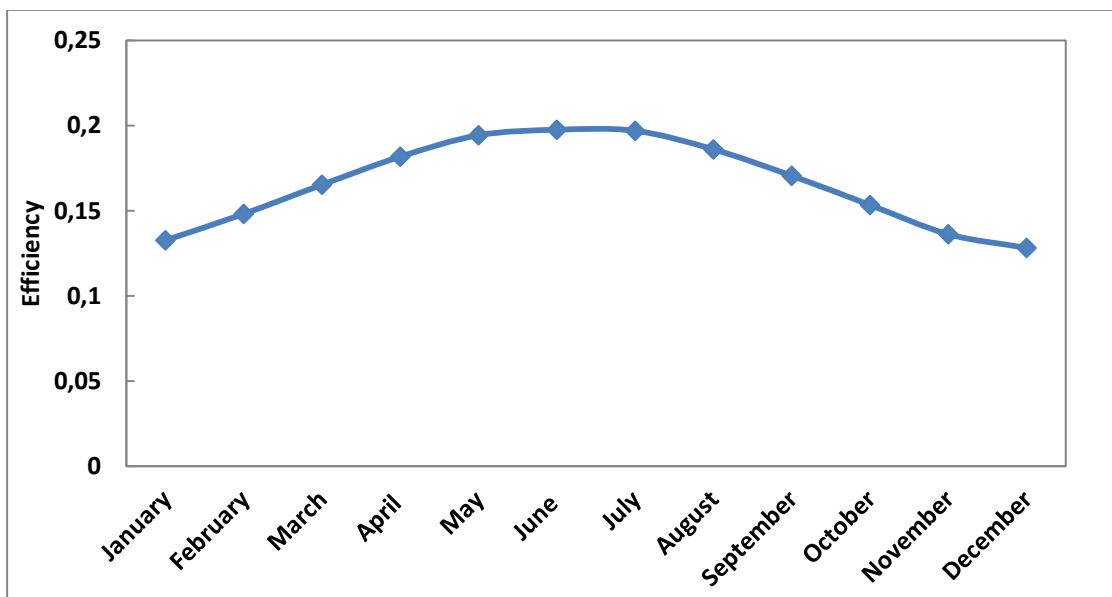
Διάγραμμα 4.29 Χαρακτηριστική καμπύλη I-V για τη μέση μέρα κάθε μήνα από Νοέμβριο έως Μάρτιο



Διάγραμμα 4.30 Χαρακτηριστική καμπύλη P-V για τη μέση μέρα κάθε μήνα από Νοέμβριο έως Μάρτιο



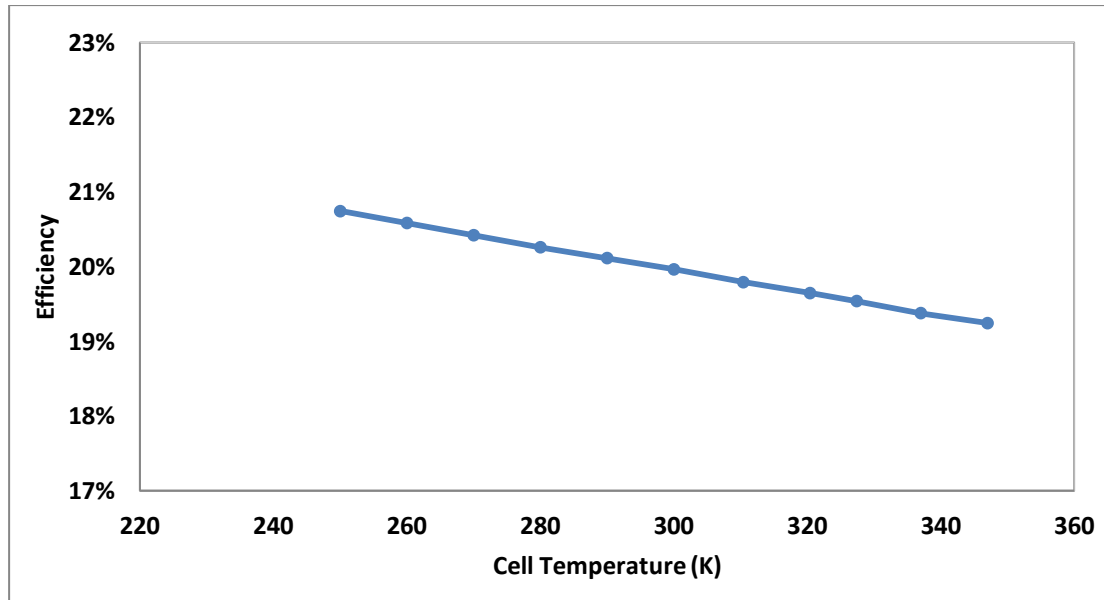
Διάγραμμα 4.31 Παραγόμενη ισχύς για τη μέση μέρα κάθε μήνα στην Αθήνα



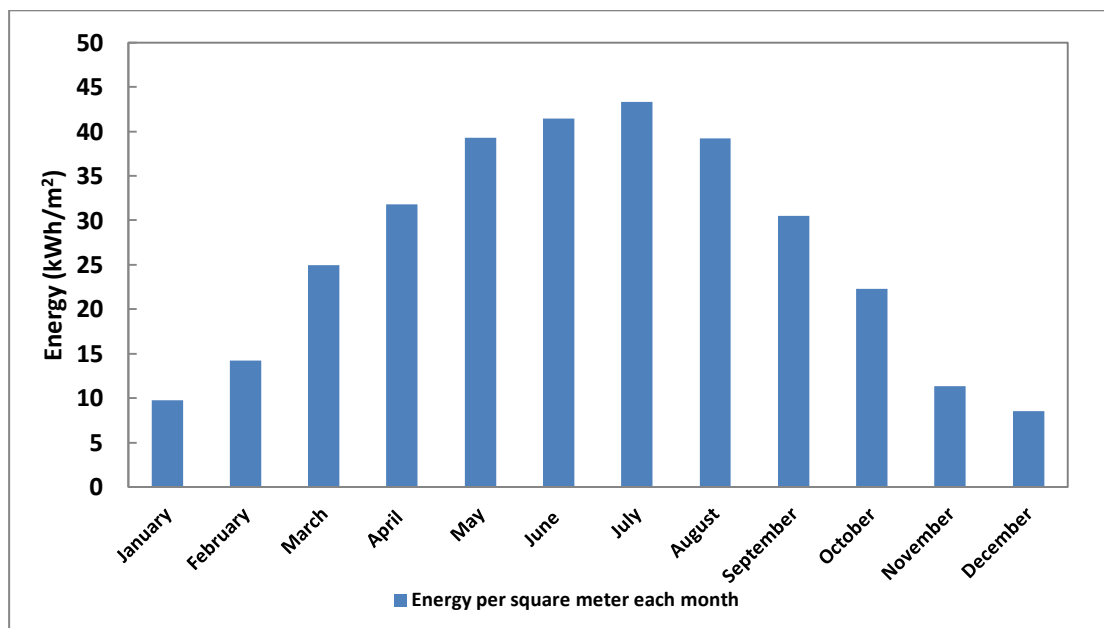
Διάγραμμα 4.32 Βαθμός απόδοσης ΦΒ για τη μέση μέρα κάθε μήνα στην Αθήνα

Όπως και στους υπολογισμούς για τα ΦΒ στοιχεία αρχικά, έτσι και για το ΦΒ πάνελ της αγοράς, βρίσκουμε μέγιστη ισχύ τον μήνα Ιούλιο. Αναφορικά με τον βαθμό απόδοσης έχουμε τον Ιούνιο και Ιούλιο τον υψηλότερο που είναι 19,7% όπως δηλαδή αναφέρεται στα χαρακτηριστικά του πάνελ από τον κατασκευαστή.

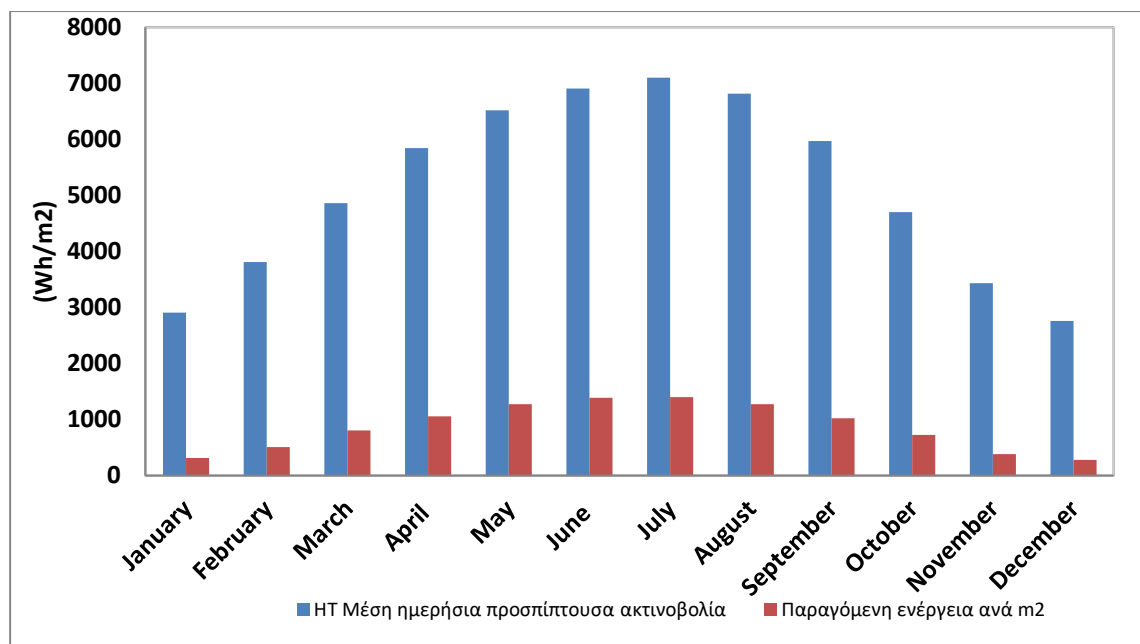
Ο βαθμός απόδοσης αυξάνεται όταν μειώνεται η θερμοκρασία του στοιχείου άρα θα αυξάνεται και η παραγόμενη ενέργεια. Για θερμοκρασία στοιχείου μικρότερη από 300K έχουμε βαθμό απόδοσης μεγαλύτερο από τον μέγιστο που δίνει ο κατασκευαστής πράγμα που είναι ανέφικτο χωρίς να γίνεται ψύξη με κάποιο τρόπο των ΦΒ στοιχείων. Ο σκοπός του διαγράμματος 4.33 είναι να δείξει την σχέση του βαθμού απόδοσης με την θερμοκρασία του στοιχείου και να δείξει ότι είναι εφικτό να φτάσουμε σε ψιλότερο βαθμό απόδοσης αν ψύχουμε το ΦΒ στοιχείο.



Διάγραμμα 4.33 Εξάρτηση βαθμού απόδοσης με θερμοκρασία ΦΒ στοιχείου του εμπορικού ΦΒ πάνελ για την περιοχή της Αθήνας το μήνα Ιούλιο.



Διάγραμμα 4.34 Παραγόμενη ενέργεια ανά μήνα σε Kwh ανά τετραγωνικό μέτρο εγκατεστημένου ΦΒ στην Αθήνα



Διάγραμμα 4.35 Σύγκριση παραγόμενης ενέργειας ανά ημέρα μέσης μέρας κάθε μήνα σε Wh ανά τετραγωνικό μέτρο εγκατεστημένου ΦΒ με την μέση ημερήσια προσπίπτουσα ακτινοβολία κάθε μήνα

Month	Pmax (W)	n	H _T (Wh/m2)	P (Wh/pv)	P(Wh/m2)	P(Wh/pv/month)	P(kWh/m2/month)	P(kWh/kWp/month)
January	53,66	13,25%	2905	524,85	313,53	16270,57	9,719	48,812
February	78,76	14,80%	3808	851,44	508,63	23840,59	14,241	71,522
March	112,21	16,51%	4860	1346,61	804,43	41745,09	24,937	125,235
April	134,04	18,16%	5840	1773,45	1059,41	53203,65	31,782	159,611
May	149,11	19,42%	6524	2120,45	1266,70	65734,19	39,267	197,203
June	157,89	19,77%	6913	2311,50	1380,83	69345,28	41,424	208,036
July	164,02	19,68%	7101	2338,98	1397,24	72508,44	43,314	217,525
August	159,96	18,59%	6812	2119,52	1266,14	65705,21	39,250	197,116
September	142,15	17,04%	5972	1703,05	1017,35	51091,58	30,520	153,275
October	112,04	15,32%	4697	1204,44	719,49	37337,663	22,304	112,013
November	65,13	13,61%	3427	634,42	378,98	19032,73	11,369	57,098
December	49,28	12,80%	2754	461,34	275,59	14301,58	8,543	42,905

Πίνακας 4.2 Αποτελέσματα για την παραγόμενη ενέργεια στην περιοχή της Αθήνας.

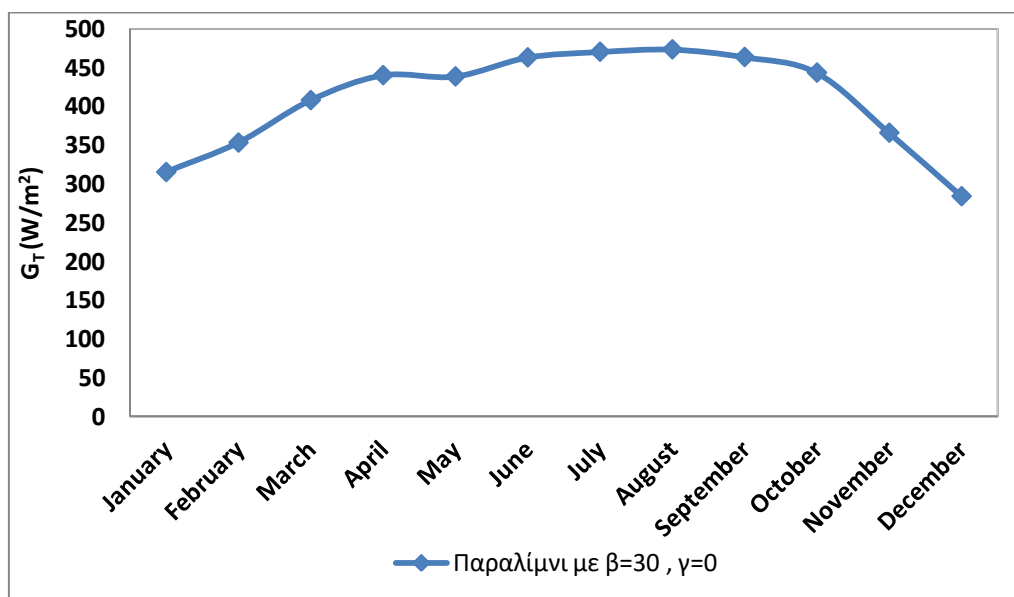
Οι τρεις τελευταίες στήλες αναφέρονται σε παραγωγή ανά μήνα. Η δεύτερη είναι η μέση παραγόμενη ισχύς για τη μέση μέρα κάθε μήνα. Η τρίτη στήλη είναι ο βαθμός απόδοσης και η τέταρτη στήλη η μέση ημερήσια προσπίπτουσα ακτινοβολία. Η πέμπτη και η έκτη στήλη αναφέρονται σε ενέργεια ανά μέρα για την μέση μέρα κάθε μήνα. Η παραγόμενη ενέργεια ανά μήνα και ανά τετραγωνικό μέτρο φαίνεται στο διάγραμμα 4.34 ενώ στο διάγραμμα 4.35 συγκρίνεται για κάθε μέρα η προσπίπτουσα ακτινοβολία με την παραγόμενη ενέργεια. **Άθροισμα τελευταίας στήλης για παραγόμενη ενέργεια σε ένα χρόνο ανά εγκατεστημένο kW ΦΒ: 1590,349 kWh**

4.3.3 Αποτελέσματα για την περιοχή του Παραλιμνίου

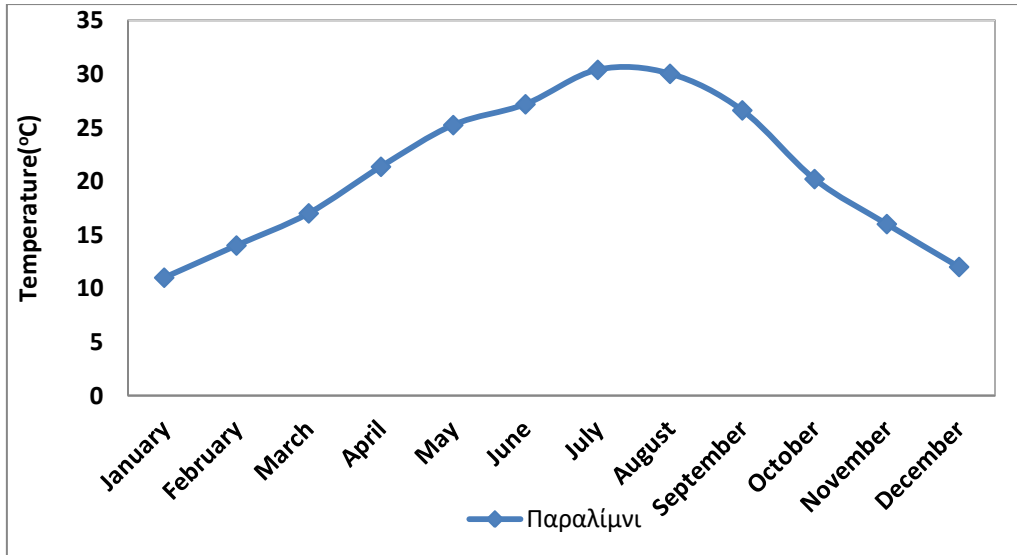
Μήνας	n μεση μέρα	δ (rad)	ω rad	θ (deg) ($\beta=30, \gamma=0$)	θ_z (deg)	ϕ rad	Διάρκεια ημέρας (h)
Ιαν	17	-0,36477	1,299707404	25,61	55,61	0,611563	9,929033
Φεβ	47	-0,22689	1,408184664	17,71	47,71	0,611563	10,75774
Μαρ	75	-0,04189	1,541401075	7,11	37,11	0,611563	11,77544
Απρ	105	0,164061	1,687149613	4,69	25,31	0,611563	12,88887
Μαϊ	135	0,328122	1,811848438	14,09	15,91	0,611563	13,8415
Ιουν	162	0,403171	1,874553858	18,39	11,61	0,611563	14,32054
Ιουλ	198	0,37001	1,846263321	16,49	13,51	0,611563	14,10441
Αυγ	228	0,235619	1,739956797	8,79	21,21	0,611563	13,29229
Σεπ	258	0,038397	1,597738835	2,51	32,51	0,611563	12,20583
Οκτ	288	-0,16755	1,451909163	14,31	44,31	0,611563	11,09177
Νοε	318	-0,32987	1,328336721	23,61	53,61	0,611563	10,14775
Δεκ	344	-0,40143	1,268553293	27,71	57,71	0,611563	9,691033

Πίνακας 4.3 Γεωγραφικά και ηλιακά δεδομένα για την περιοχή του Παραλιμνίου.

Όπως και για την Αθήνα, οι υπολογισμοί γίνονται για κλίση ΦΒ στις 30° παρόλο που το Παραλίμι έχει γεωγραφικό πλάτος 35° .

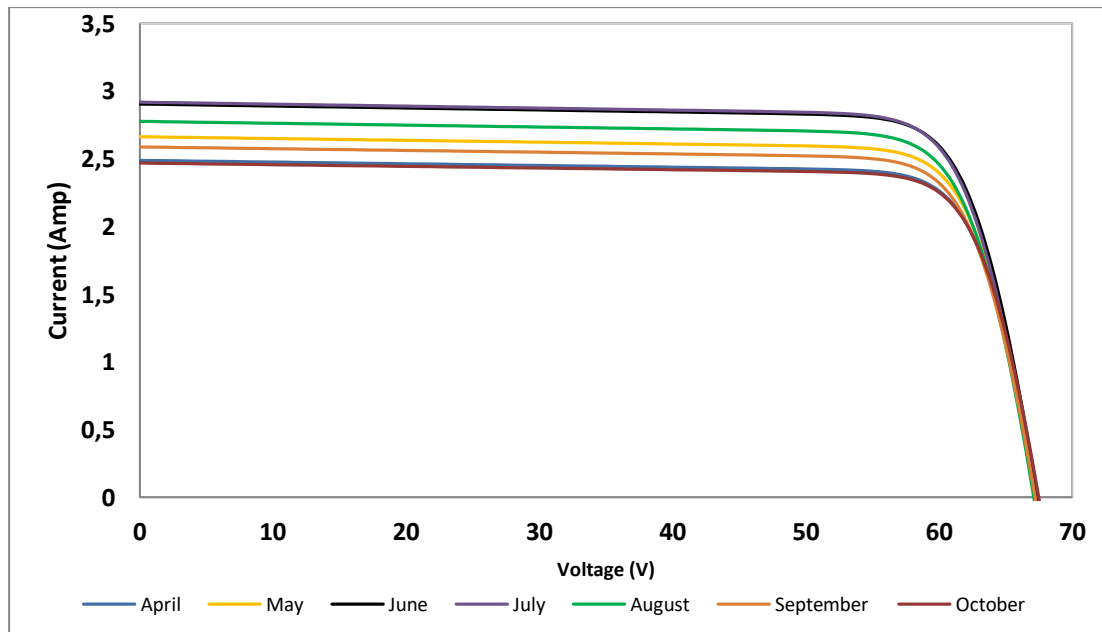


Διάγραμμα 4.36 Ημερήσια προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται επίπεδο με κλίση επιφανείας 30° και προσανατολισμό προς τον νότο στο Παραλίμι [40]

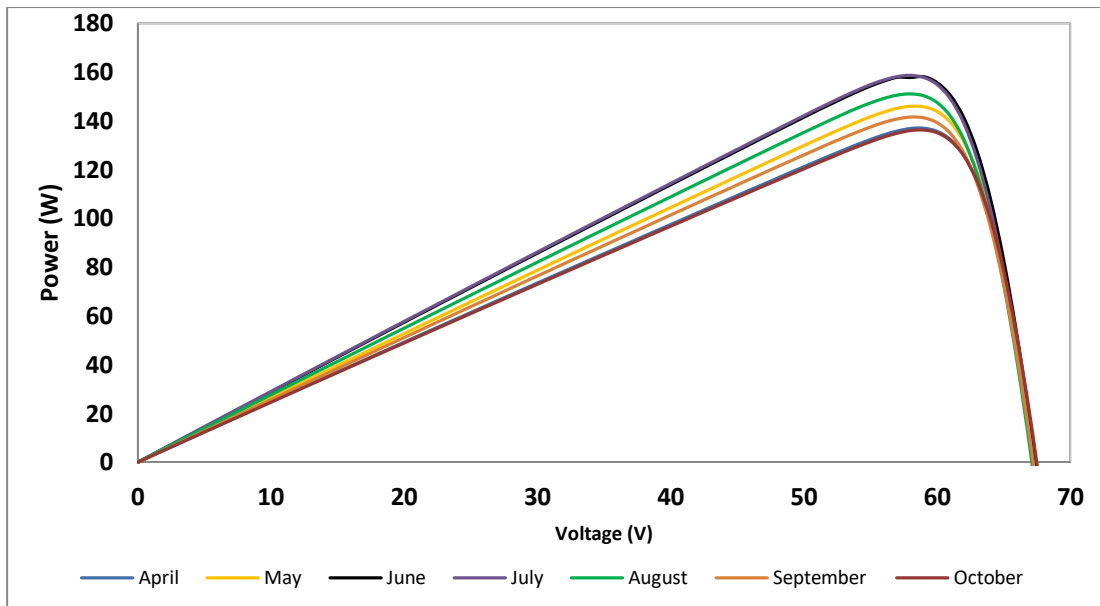


Διάγραμμα 4.37 Θερμοκρασία μέσης μέρας κάθε μήνα στο Παραλίμνι.

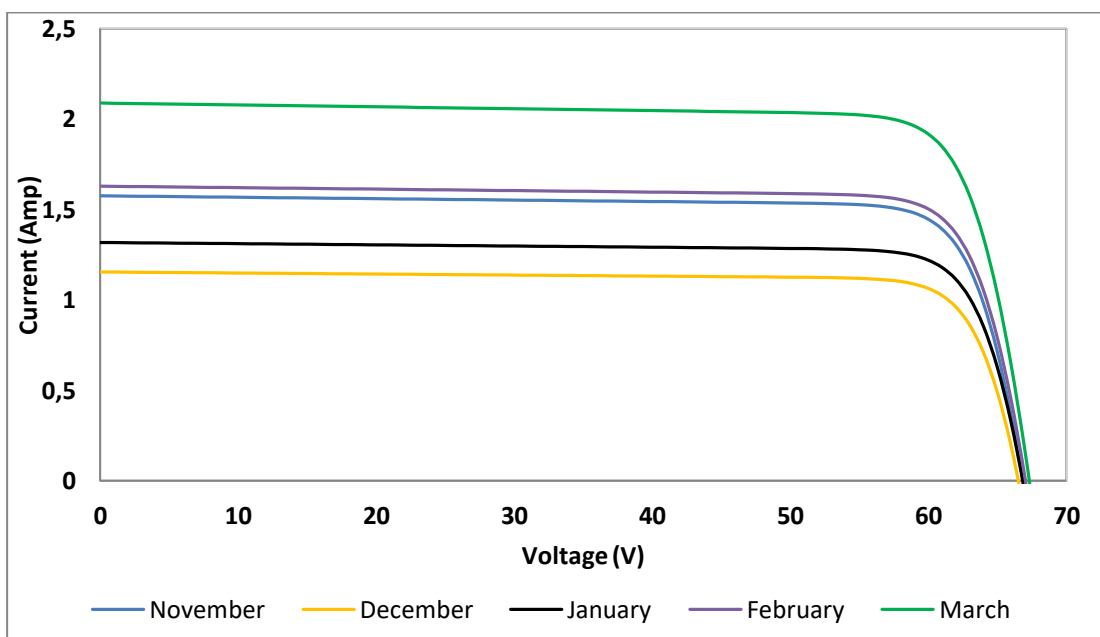
Η θερμοκρασία χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών καμπύλων των ΦΒ. Για το λόγο αυτό η θερμοκρασίες που παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 4.37 είναι η μέση θερμοκρασία κάθε μήνα για τις ώρες που έχουμε ηλιοφάνεια



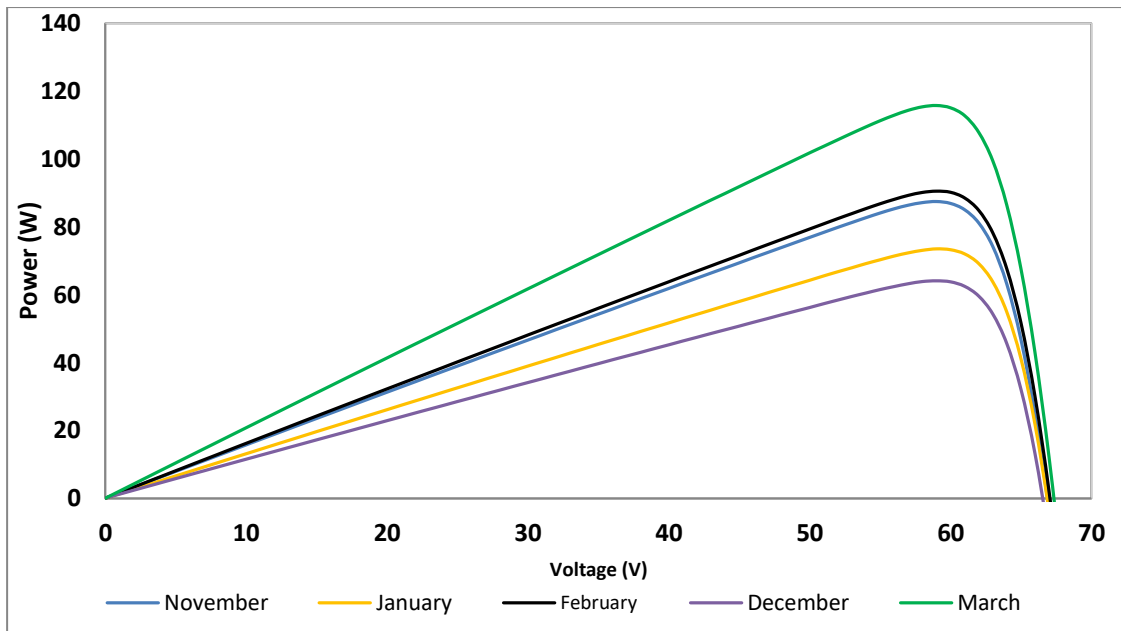
Διάγραμμα 4.38 Χαρακτηριστική καμπύλη I-V για τη μέση μέρα κάθε μήνα από Απρίλιο έως Οκτώβριο



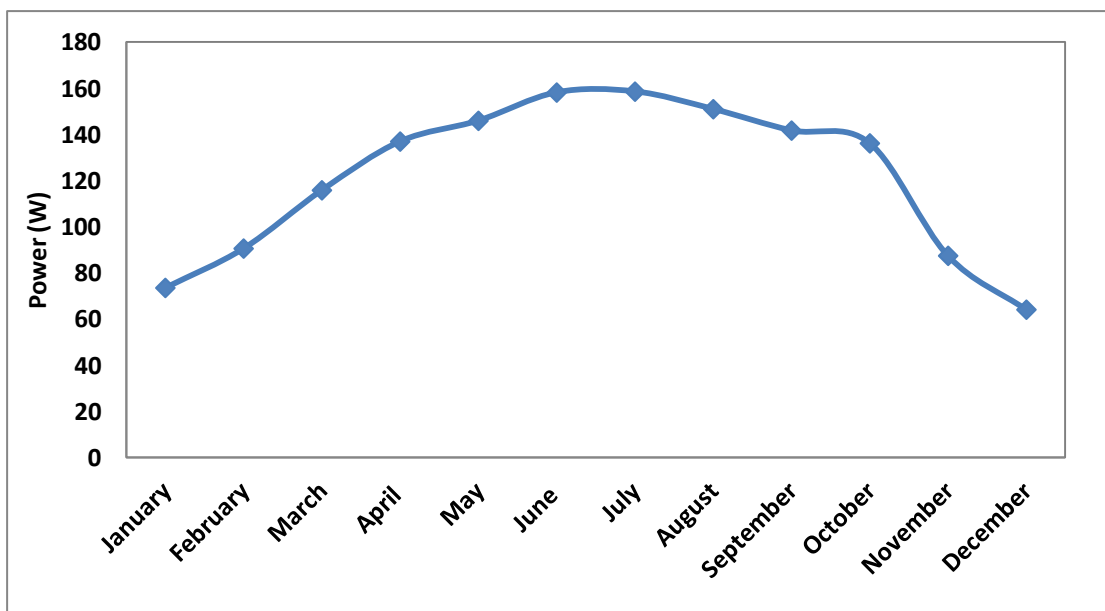
Διάγραμμα 4.39 Χαρακτηριστική καμπύλη P-V για τη μέση μέρα κάθε μήνα από Απρίλιο έως Οκτώβριο



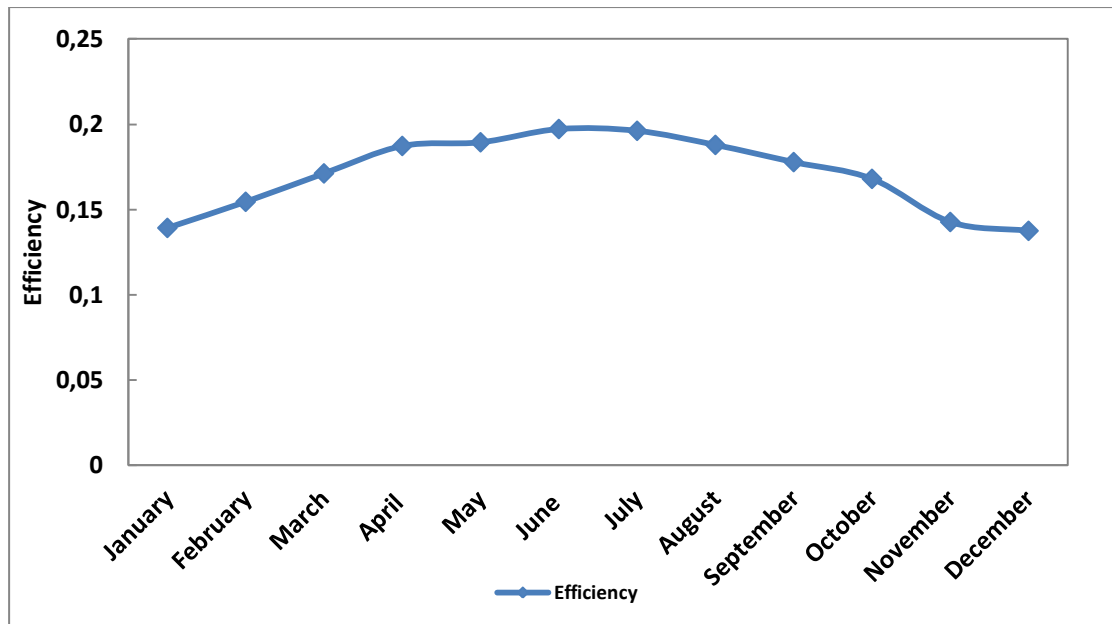
Διάγραμμα 4.40 Χαρακτηριστική καμπύλη I-V για τη μέση μέρα κάθε μήνα από Νοέμβριο έως Μάρτιο



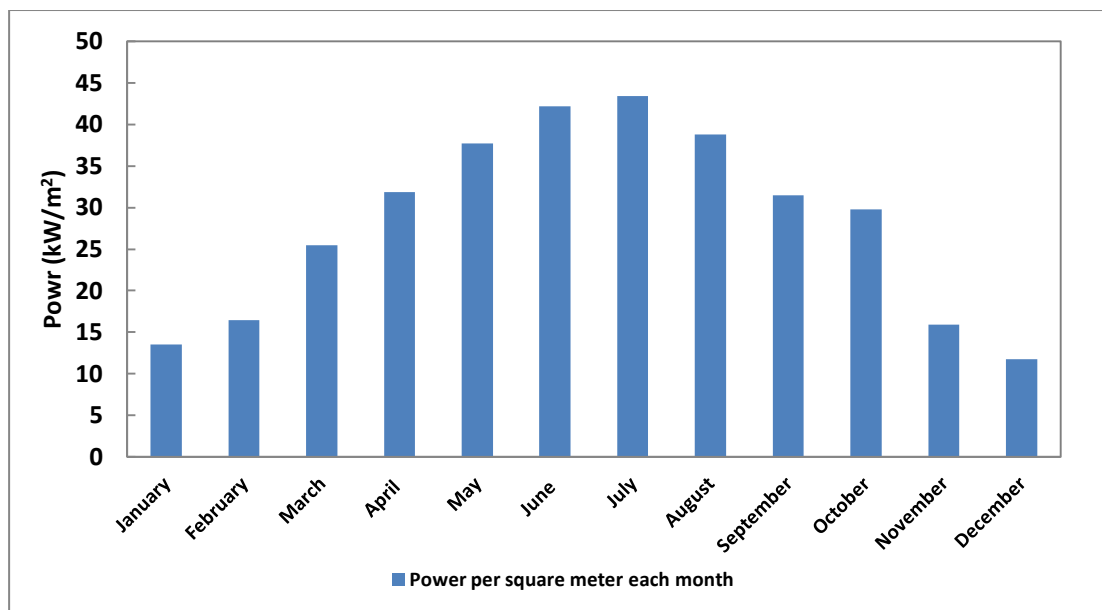
Διάγραμμα 4.41 Χαρακτηριστική καμπύλη P-V για τη μέση μέρα κάθε μήνα από Νοέμβριο έως Μάρτιο



Διάγραμμα 4.42 Παραγόμενη ισχύς για τη μέση μέρα κάθε μήνα στο Παραλίμνι

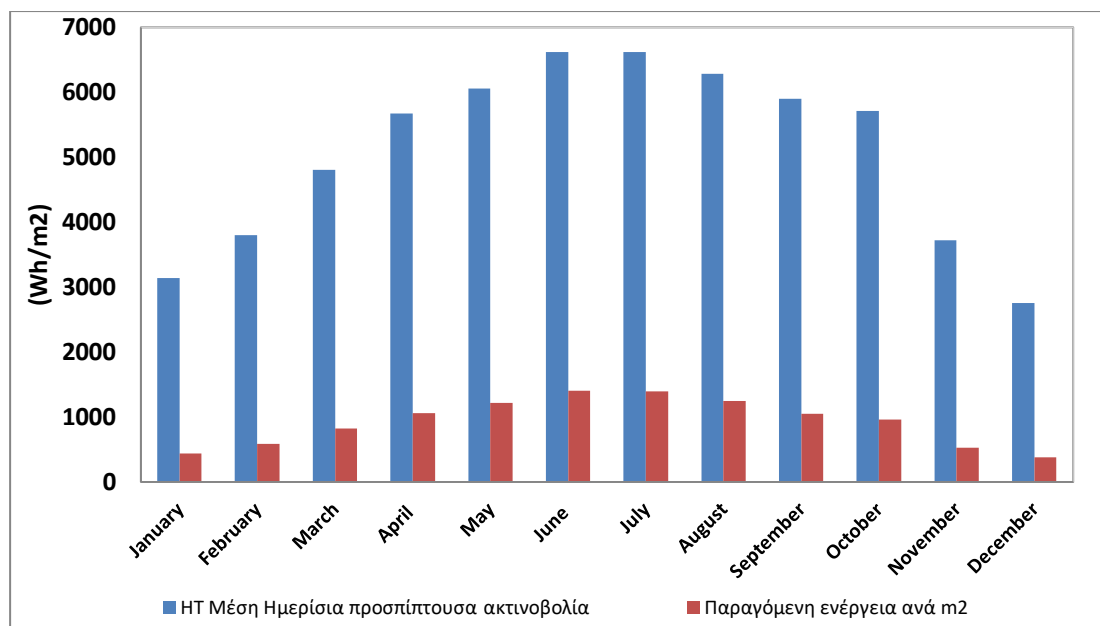


Διάγραμμα 4.43 Βαθμός απόδοσης ΦΒ για τη μέση μέρα κάθε μήνα στο Παραλίμνι



Διάγραμμα 4.44 Παραγόμενη ενέργεια ανά μήνα σε kWh ανά τετραγωνικό μέτρο εγκατεστημένου ΦΒ στο Παραλίμνι

Για το Παραλίμνι έχουμε ότι η μέγιστη ισχύς είναι για Ιούνιο και Ιούλιο σε αντίθεση με την Αθήνα που ήταν τον Ιούλιο και έχουμε τον μέγιστο βαθμό απόδοσης για τους ίδιους μήνες. Παρόλο που η ισχύς για τους δύο μήνες είναι ίδια έχουμε ελαφρώς περισσότερη παραγόμενη ενέργεια τον Ιούλιο για τον λόγο ότι στους υπολογισμούς πολλαπλασιάζουμε τα αποτελέσματα της μέσης μέρας κάθε μήνα με τον αριθμό των ημερών όπου για τον Ιούλιο έχουμε 31 μέρες έναντι 30 του Ιουνίου. Η επιπλέον ενέργεια που φαίνεται στο διάγραμμα 4.44 και στον πίνακα 4.4 οφείλεται σε αυτό.



Διάγραμμα 4.45 Σύγκριση παραγόμενης ενέργειας ανά ημέρα μέσης μέρας κάθε μήνα σε Wh ανά τετραγωνικό μέτρο εγκατεστημένου ΦΒ με την μέση ημερήσια προσπίπτουσα ακτινοβολία κάθε μήνα

Month	Pmax	n	HT (Wh/m2)	P (Wh/pv)	P(Wh/m2)	P(Wh/pv/ month)	P(kWh/m2/ month)	P(kWh/kWp/ month)
January	73,51	13,92%	3138	731,46	436,96	22675,39	13,546	68,706
February	90,57	15,46%	3805	984,44	588,08	27564,36	16,466	83,520
March	115,82	17,12%	4805	1377,06	822,62	42688,99	25,501	129,348
April	136,94	18,73%	5669	1777,47	1061,81	53324,05	31,854	161,572
May	145,93	18,95%	6061	2037,15	1216,94	63151,80	37,725	191,350
June	158,18	19,72%	6619	2355,29	1406,98	70658,56	42,209	214,095
July	158,57	19,62%	6622	2343,69	1400,06	72654,52	43,402	220,143
August	150,97	18,79%	6286	2095,52	1251,80	64961,09	38,806	196,832
September	141,69	17,78%	5902	1757,01	1049,59	52710,17	31,488	159,712
October	136,17	16,80%	5713	1606,83	959,87	49811,72	29,756	150,930
November	87,44	14,27%	3722	889,24	531,21	26677,33	15,936	80,832
December	64,07	13,75%	2761	635,61	379,70	19704,04	11,771	59,703

Πίνακας 4.4 Αποτελέσματα για την παραγόμενη ενέργεια στην περιοχή του Παραλιμνίου.

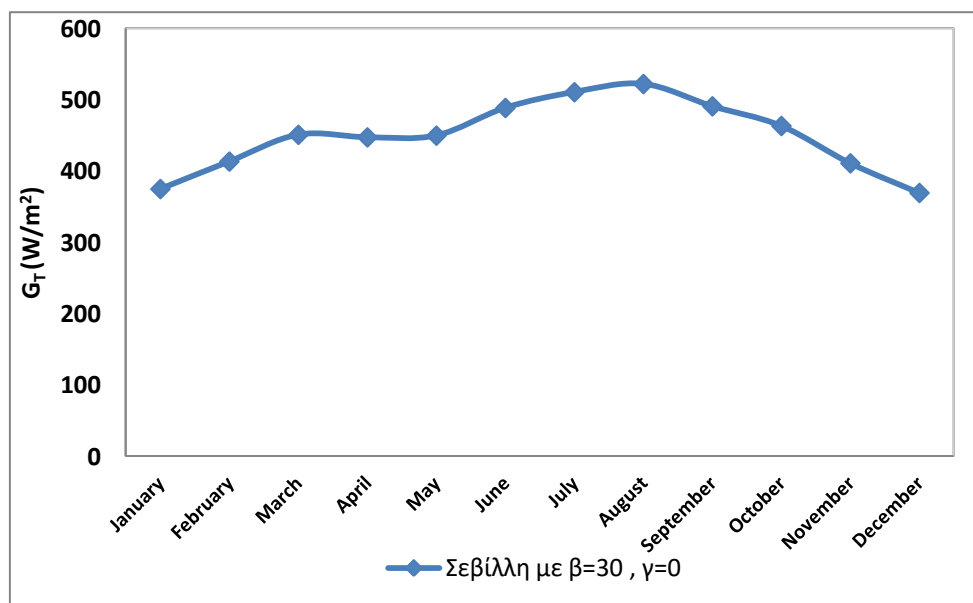
Οι τρεις τελευταίες στήλες αναφέρονται σε παραγωγή ανά μήνα. Η δεύτερη είναι η μέση παραγόμενη ισχύς για τη μέση μέρα κάθε μήνα. Η τρίτη στήλη είναι ο βαθμός απόδοσης και η τέταρτη στήλη η μέση ημερήσια προσπίπτουσα ακτινοβολία. Η πέμπτη και η έκτη στήλη αναφέρονται σε ενέργεια ανά μέρα για την μέση μέρα κάθε μήνα. **Άθροισμα τελευταίας στήλης για παραγόμενη ενέργεια σε ένα χρόνο ανά εγκατεστημένο kW ΦΒ: 1716,744 kWh**

4.3.4 Αποτελέσματα για την περιοχή της Σεβίλλης

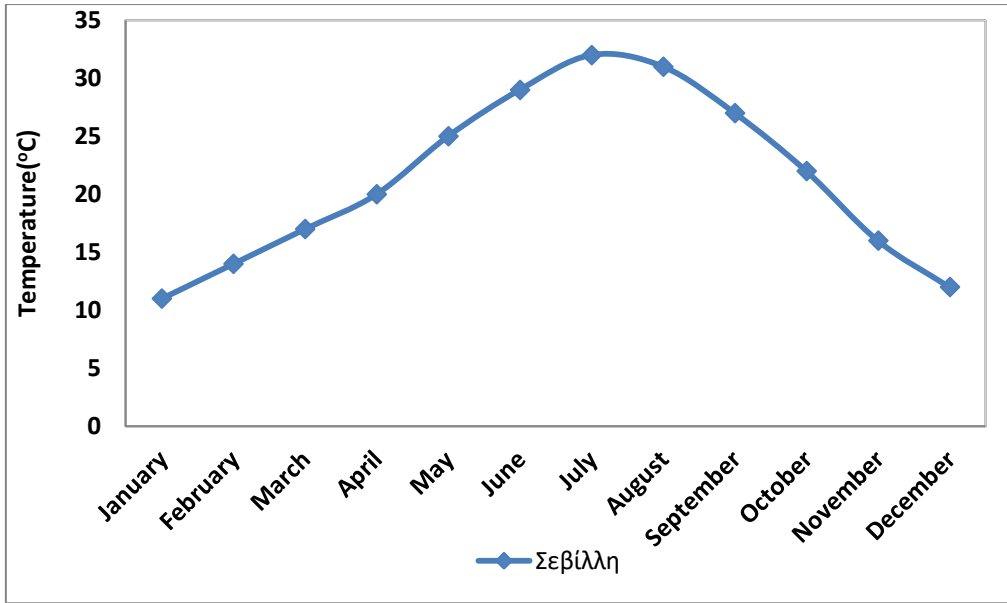
Μήνας	η μεση μέρα	δ (rad)	ω (rad)	θ (deg) ($\beta=30, \gamma=0$)	θ_z (deg)	Φ (rad)	Διάρκεια ημέρας (h)
Ιαν	17	-0,36477	1,274856	28,27	58,27	0,65223	9,739182
Φεβ	47	-0,22689	1,393549	20,37	50,37	0,65223	10,64593
Μαρ	75	-0,04189	1,538781	9,77	39,77	0,65223	11,75542
Απρ	105	0,164061	1,69757	2,03	27,97	0,65223	12,96848
Μαϊ	135	0,328122	1,833813	11,43	18,57	0,65223	14,0093
Ιουν	162	0,403171	1,902609	15,73	14,27	0,65223	14,53487
Ιουλ	198	0,37001	1,87154	13,83	16,17	0,65223	14,29751
Αυγ	228	0,235619	1,755195	6,13	23,87	0,65223	13,4087
Σεπ	258	0,038397	1,60014	5,17	35,17	0,65223	12,22417
Οκτ	288	-0,16755	1,441259	16,97	46,97	0,65223	11,01041
Νοε	318	-0,32987	1,306238	26,27	56,27	0,65223	9,978926
Δεκ	344	-0,40143	1,240648	30,37	60,37	0,65223	9,477852

Πίνακας 4.5 Γεωγραφικά και ηλιακά δεδομένα για την περιοχή της Σεβίλλης.

Το γεωγραφικό πλάτος για την περιοχή της Σεβίλλης είναι $37,39^\circ$.

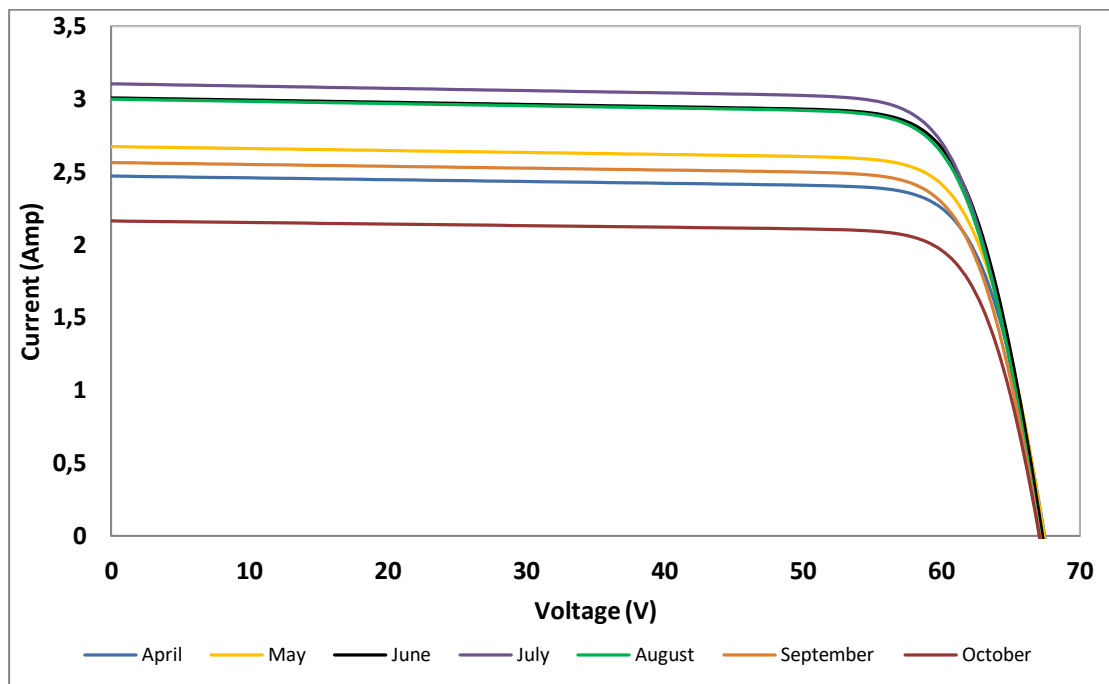


Διάγραμμα 4.46 Ημερήσια προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται επίπεδο με κλίση επιφανείας 30° και προσανατολισμό προς τον νότο στη Σεβίλλη [41]

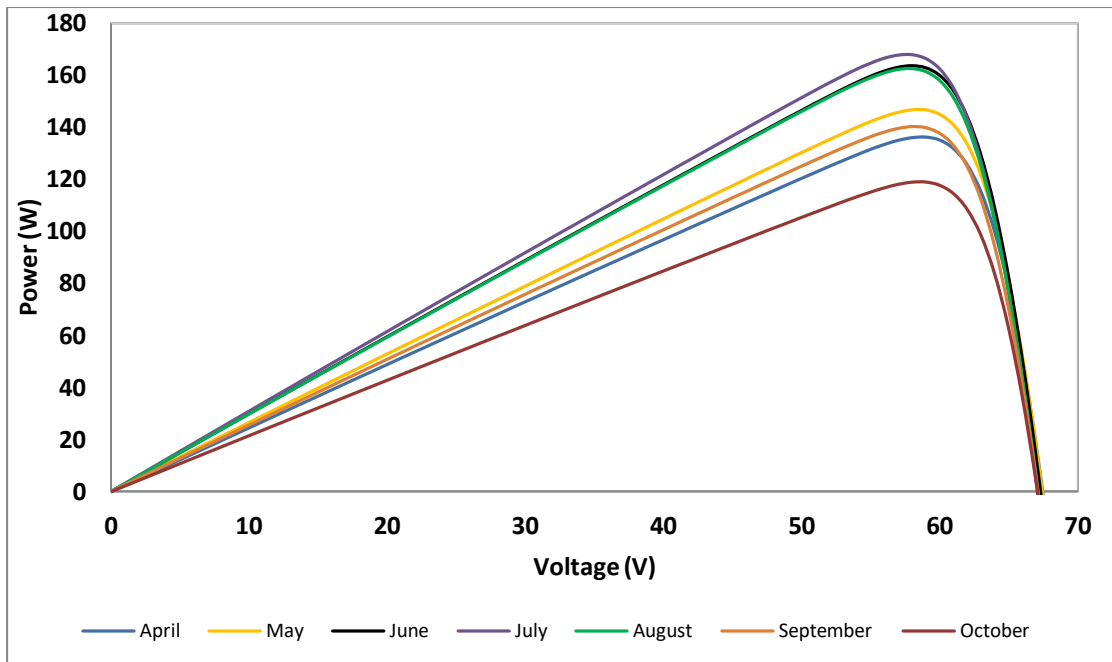


Διάγραμμα 4.47 Θερμοκρασία μέσης μέρας κάθε μήνα στη Σεβίλλη.

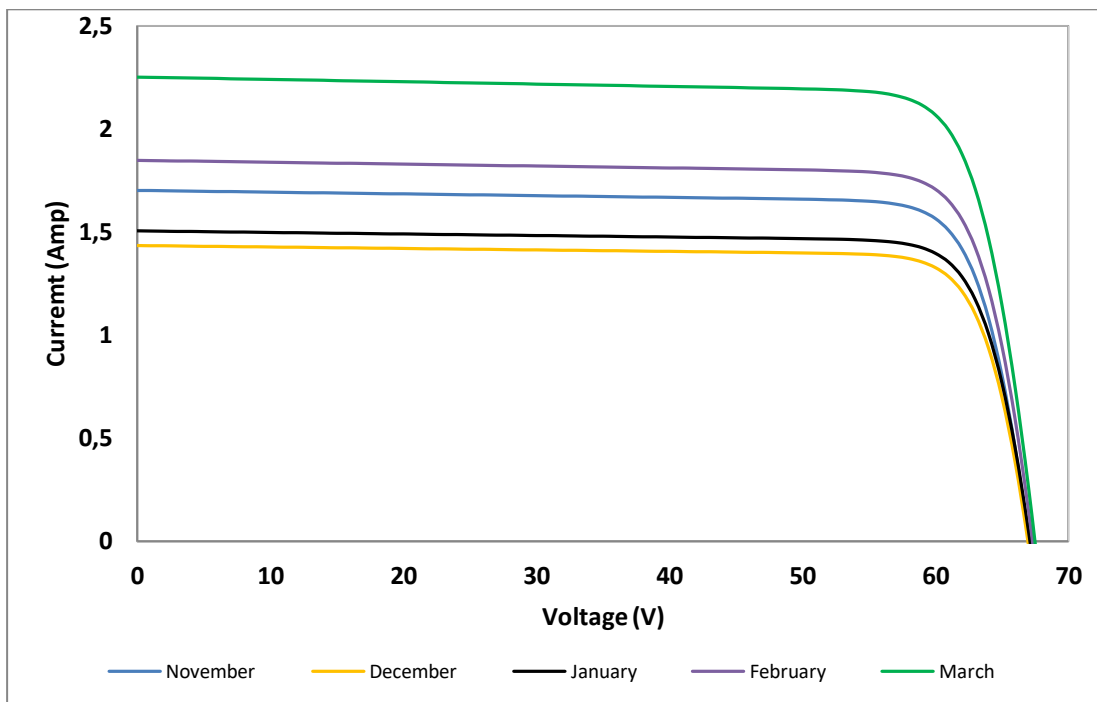
Η θερμοκρασία χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών καμπύλων των ΦΒ. Για το λόγο αυτό η θερμοκρασίες που παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 4.47 είναι η μέση θερμοκρασία κάθε μήνα για τις ώρες που έχουμε ηλιοφάνεια



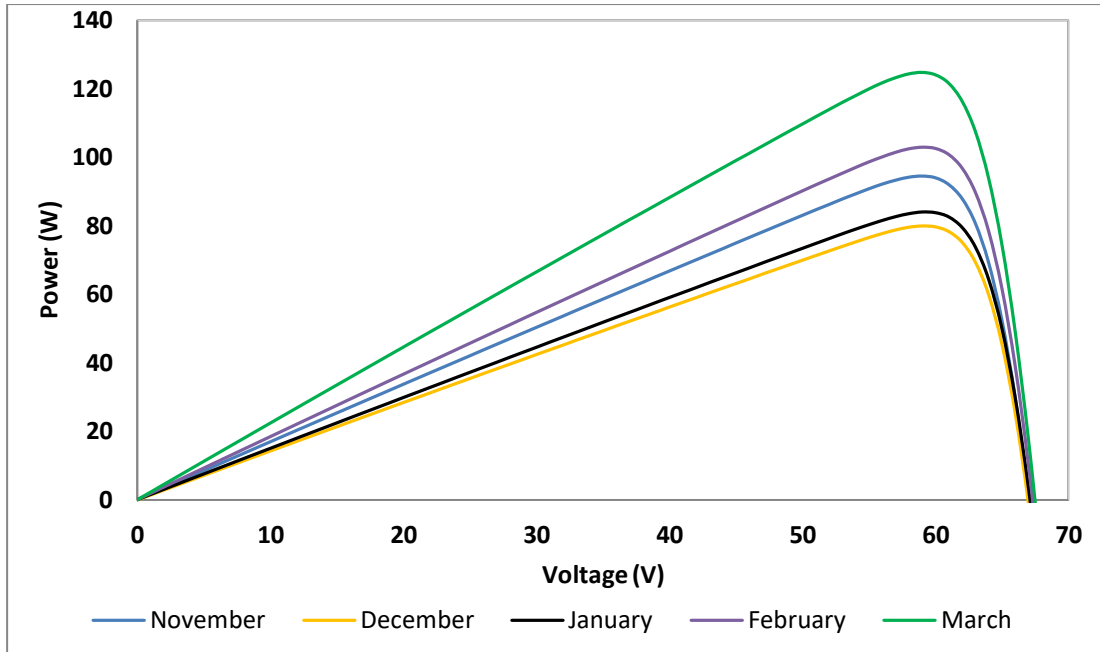
Διάγραμμα 4.48 Χαρακτηριστική καμπύλη I-V για τη μέση μέρα κάθε μήνα από Απρίλιο έως Οκτώβριο



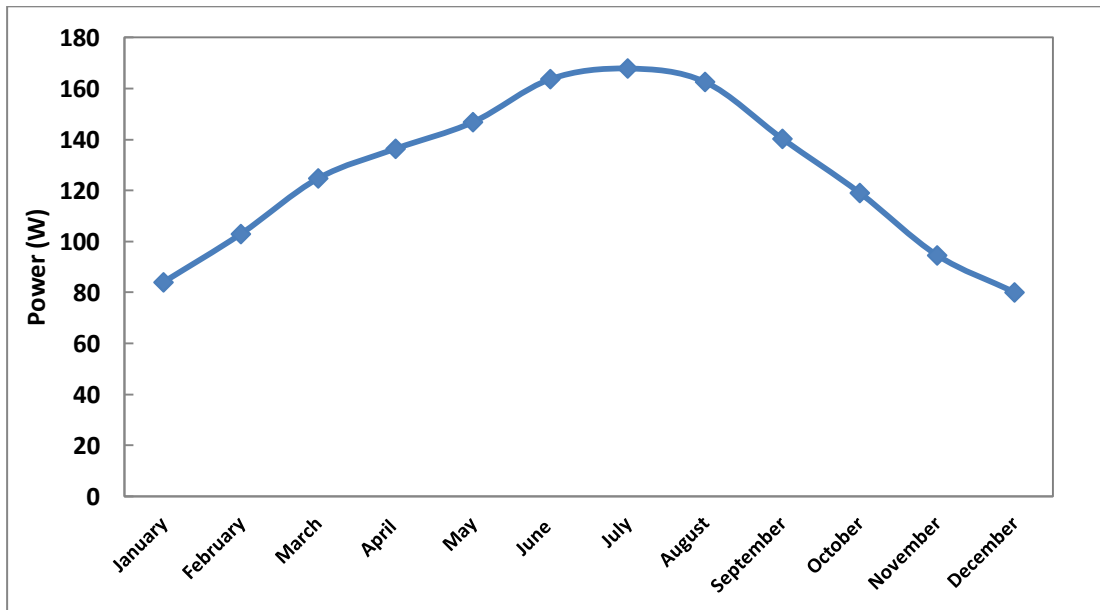
Διάγραμμα 4.49 Χαρακτηριστική καμπύλη P-V για τη μέση μέρα κάθε μήνα από Απρίλιο έως Οκτώβριο



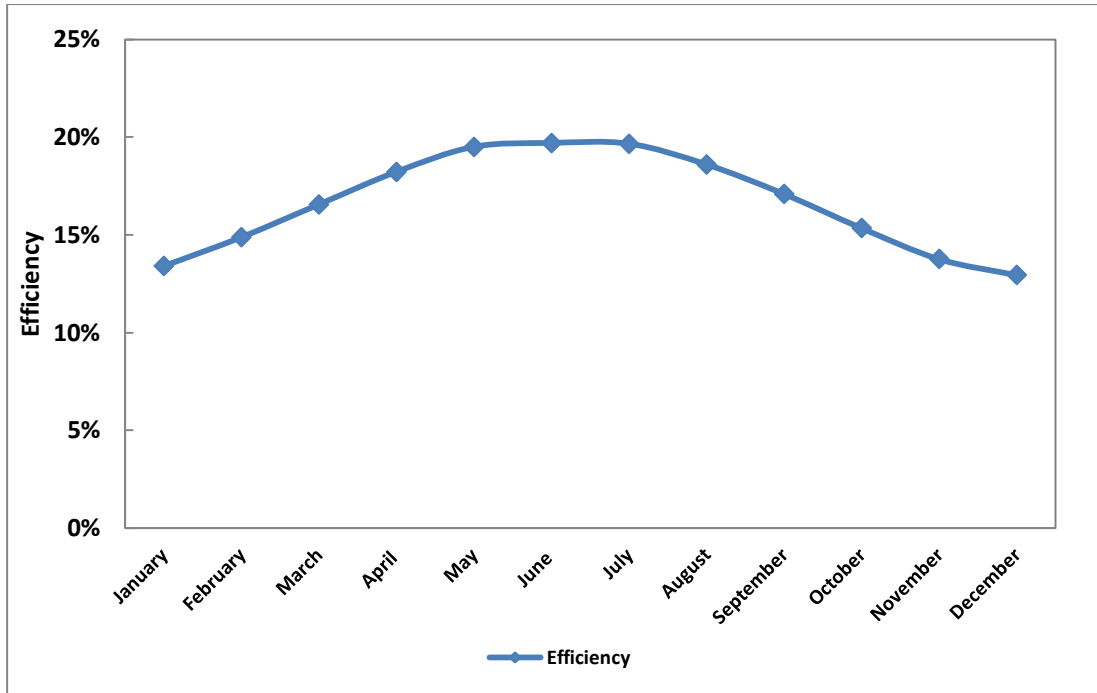
Διάγραμμα 4.50 Χαρακτηριστική καμπύλη I-V για τη μέση μέρα κάθε μήνα από Νοέμβριο έως Μάρτιο



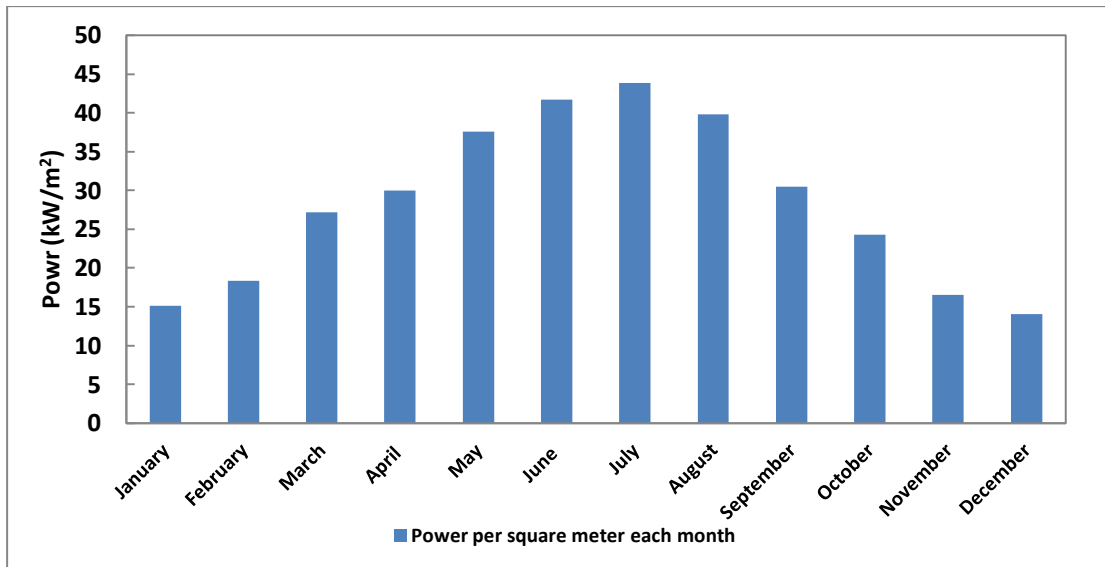
Διάγραμμα 4.51 Χαρακτηριστική καμπύλη P-V για τη μέση μέρα κάθε μήνα από Νοέμβριο έως Μάρτιο



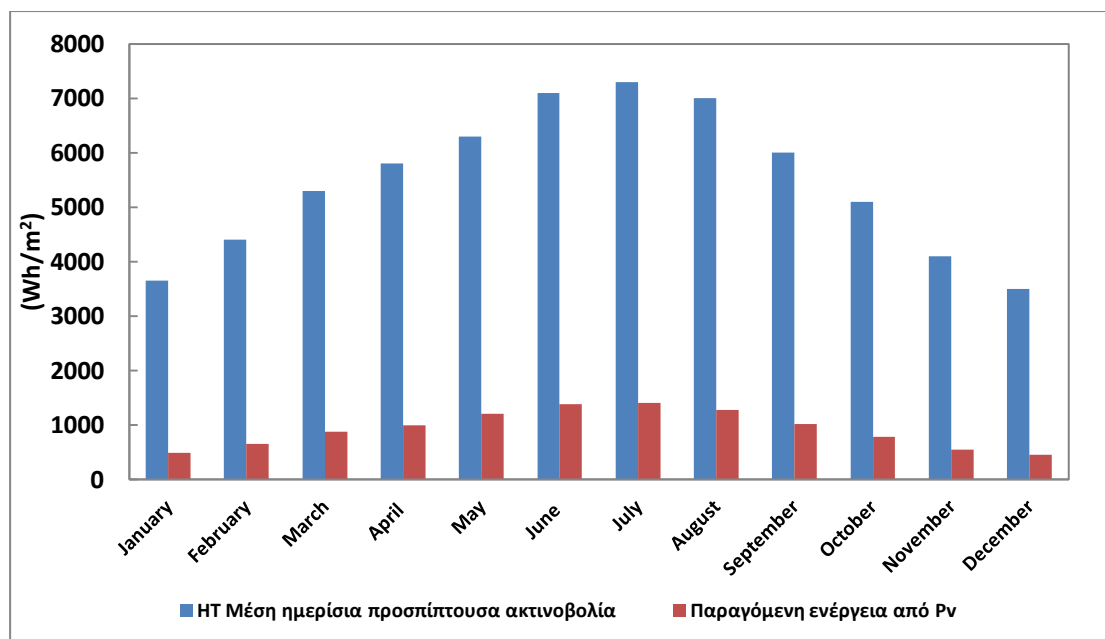
Διάγραμμα 4.52 Παραγόμενη ισχύς για τη μέση μέρα κάθε μήνα στη Σεβίλλη



Διάγραμμα 4.53 Βαθμός απόδοσης ΦΒ για τη μέση μέρα κάθε μήνα στη Σεβίλλη



Διάγραμμα 4.54 Παραγόμενη ενέργεια ανά μήνα σε kWh ανά τετραγωνικό μέτρο εγκατεστημένου ΦΒ στη Σεβίλλη



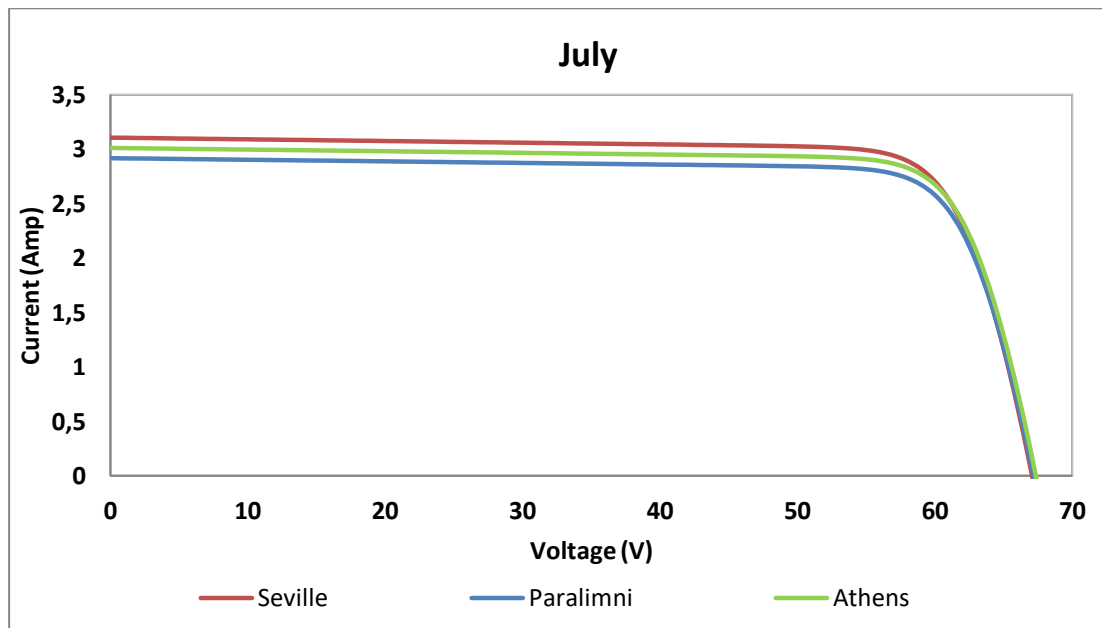
Διάγραμμα 4.55 Σύγκριση παραγόμενης ενέργειας ανά ημέρα μέσης μέρας κάθε μήνα σε Wh ανά τετραγωνικό μέτρο εγκατεστημένου ΦΒ με την μέση ημερήσια προσπίπτουσα ακτινοβολία κάθε μήνα

Month	P _{max}	n	HT (Wh/m ²)	P (Wh/pv)	P(Wh/m ²)	P(Wh/pv/month)	P(kWh/m ² /month)	P(kWh/kWp/month)
January	83,96	13,41%	3650	817,67	488,45	25347,85	15,142	76,044
February	102,90	14,88%	4400	1095,42	654,37	30671,86	18,322	92,016
March	124,73	16,56%	5300	1466,21	875,87	45452,41	27,152	136,357
April	136,35	18,22%	5800	1672,79	999,28	50183,85	29,978	150,552
May	146,80	19,50%	6300	2027,18	1210,98	62842,49	37,540	188,527
June	163,68	19,70%	7100	2326,63	1389,86	69798,97	41,696	209,397
July	167,85	19,66%	7300	2366,46	1413,66	73360,37	43,823	220,081
August	162,57	18,60%	7000	2147,39	1282,79	66569,12	39,766	199,707
September	140,24	17,10%	6000	1700,34	1015,74	51010,26	30,472	153,031
October	119,00	15,35%	5100	1310,27	782,72	40618,43	24,264	121,855
November	94,52	13,77%	4100	924,28	552,14	27728,54	16,564	83,186
December	80,00	12,95%	3500	758,27	452,97	23506,25	14,042	70,519

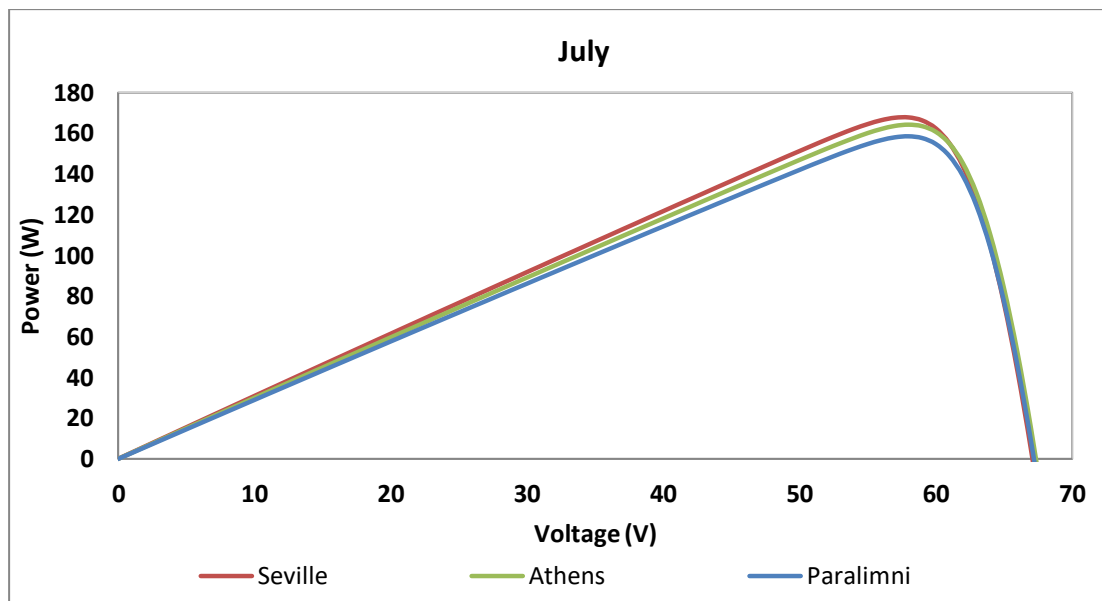
Πίνακας 4.6 Αποτελέσματα για την παραγόμενη ενέργεια στην περιοχή της Σεβίλλης

Οι τρεις τελευταίες στήλες αναφέρονται σε παραγωγή ανά μήνα. Η δεύτερη είναι η μέση παραγόμενη ισχύς για τη μέση μέρα κάθε μήνα. Η τρίτη στήλη είναι ο βαθμός απόδοσης και η τέταρτη στήλη η μέση ημερήσια προσπίπτουσα ακτινοβολία. Η πέμπτη και η έκτη στήλη αναφέρονται σε ενέργεια ανά μέρα για την μέση μέρα κάθε μήνα. **Άθροισμα τελευταίας στήλης για παραγόμενη ενέργεια σε ένα χρόνο ανά εγκατεστημένο kW ΦΒ: 1701,271 kWh/kWp.**

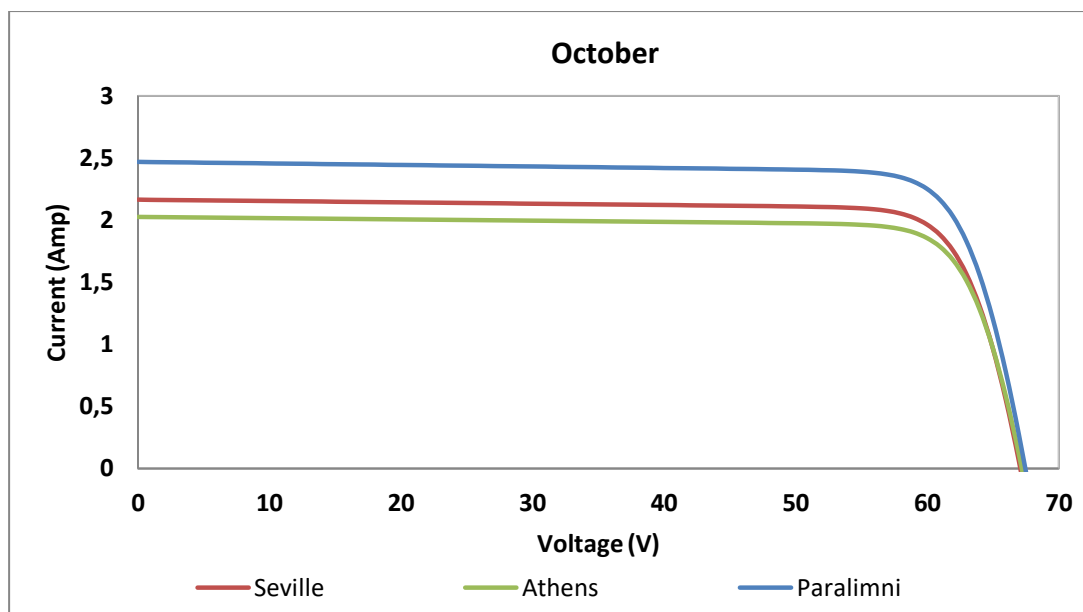
4.3.5 Σύγκριση των τριών περιοχών



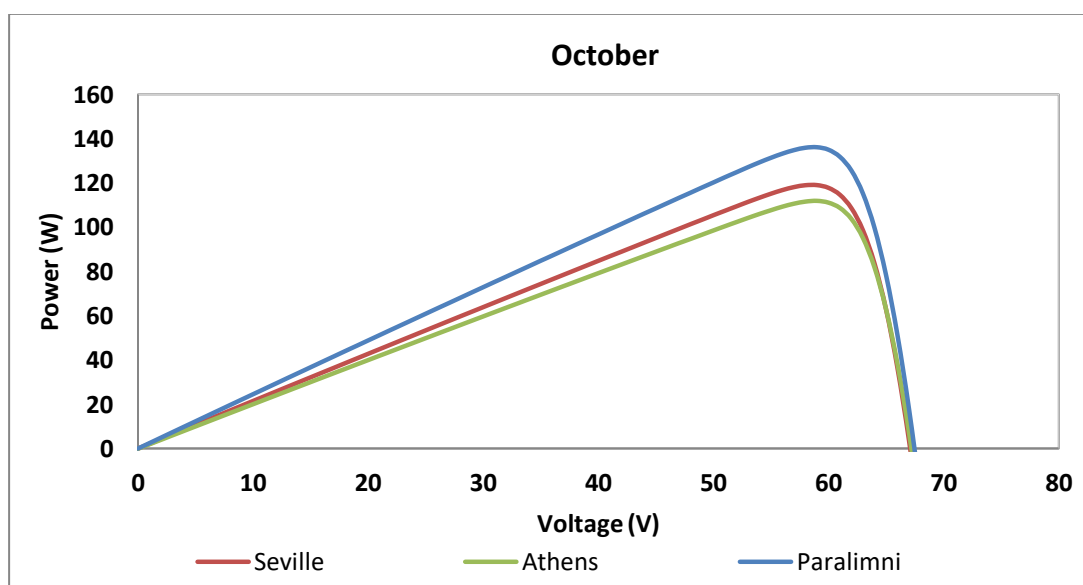
Διάγραμμα 4.56 Χαρακτηριστική καμπύλη I-V για την μέση μέρα Ιουλίου



Διάγραμμα 4.57 Χαρακτηριστική καμπύλη P-V για την μέση μέρα Ιουλίου

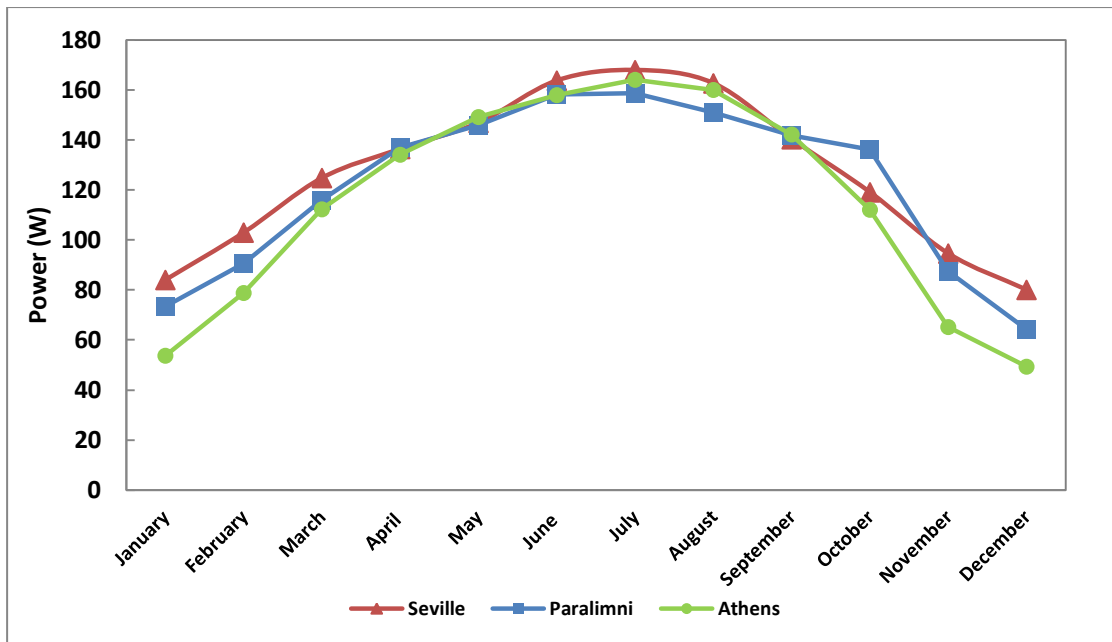


Διάγραμμα 4.58 Χαρακτηριστική καμπύλη I-V για την μέση μέρα Οκτωβρίου

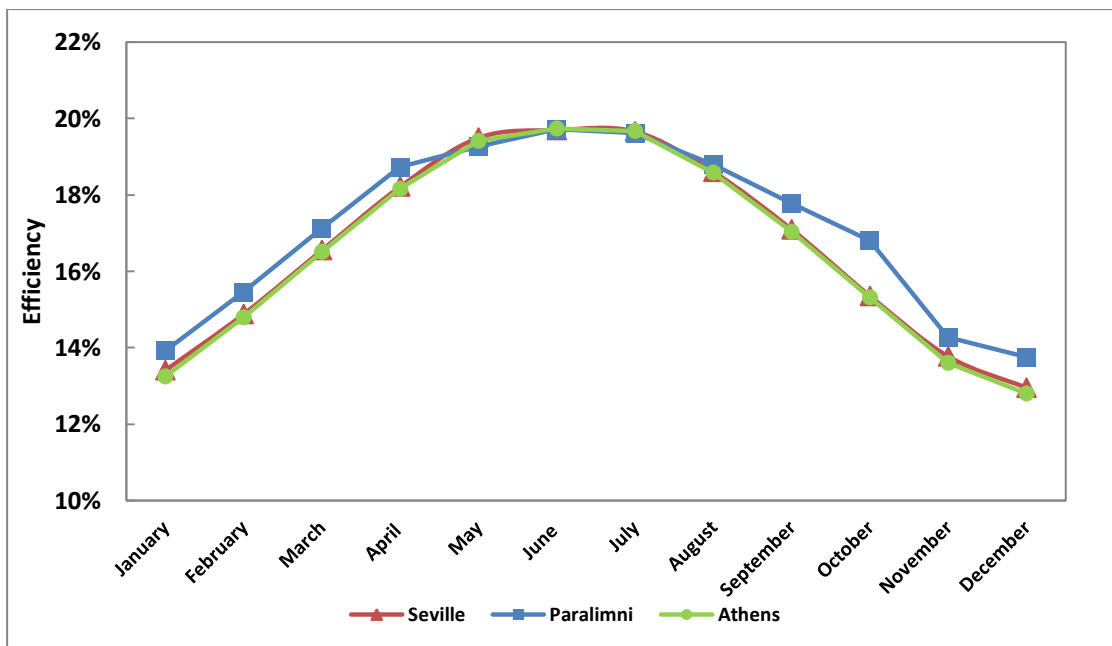


Διάγραμμα 4.59 Χαρακτηριστική καμπύλη P-V για την μέση μέρα Οκτωβρίου

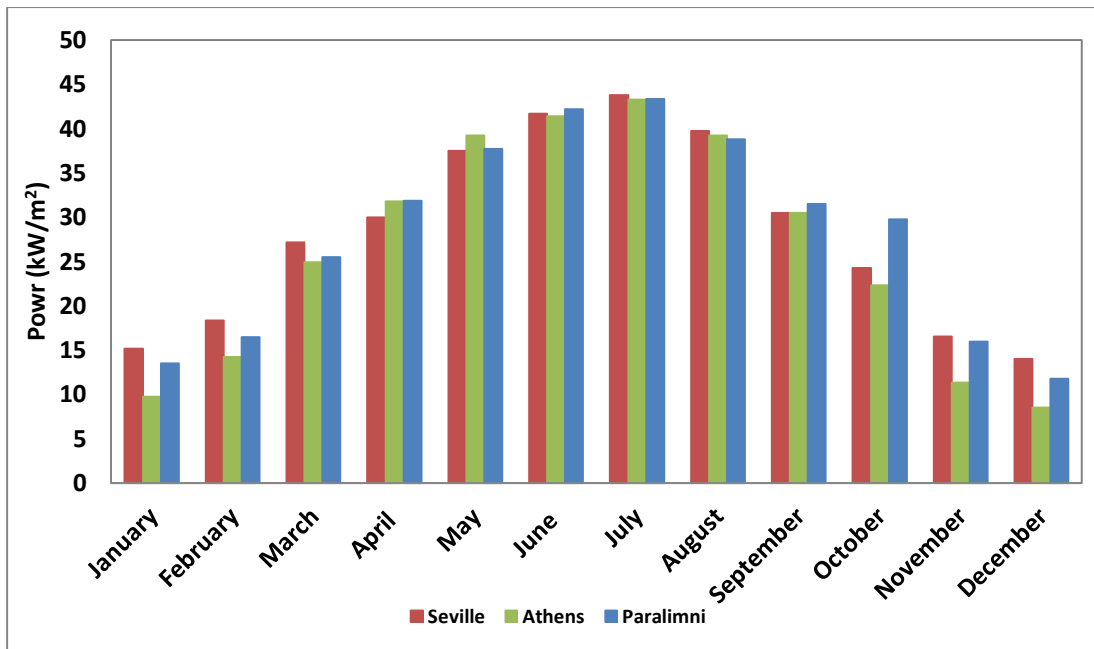
Για την σύγκριση των αποτελεσμάτων τον μήνα Ιούλιο τα αποτελέσματα είναι σχετικά κοντά (σχεδόν ίδια ισχύ). Αυτό είναι λογικό αφού οι τρεις αυτές περιοχές έχουν παρόμοιο ηλιακό δυναμικό. Η ελαφρώς μικρότερη ισχύς για το Παραλίμνι τον Ιούλιο ίσως οφείλεται στην κλίση σε σχέση με το γεωγραφικό πλάτος. Για το καλοκαίρι έχουμε μέγιστη ισχύς για κλίση $\beta = -15^\circ$ που για την Αθήνα και την Σεβίλλη το αποτέλεσμα αυτό είναι 22° που είναι πιο κοντά στο 30° σε σχέση με το Παραλίμνι που το αποτέλεσμα αυτό είναι 20° . Το αντίθετο συμβαίνει για τον Οκτώβριο όπου η ισχύς είναι μεγαλύτερη για το Παραλίμνι. Για τους χειμερινούς μήνες μέγιστη ισχύ έχουμε για κλίση $\beta = +15^\circ$. Αυτά φαίνονται και στο διάγραμμα 4.60.



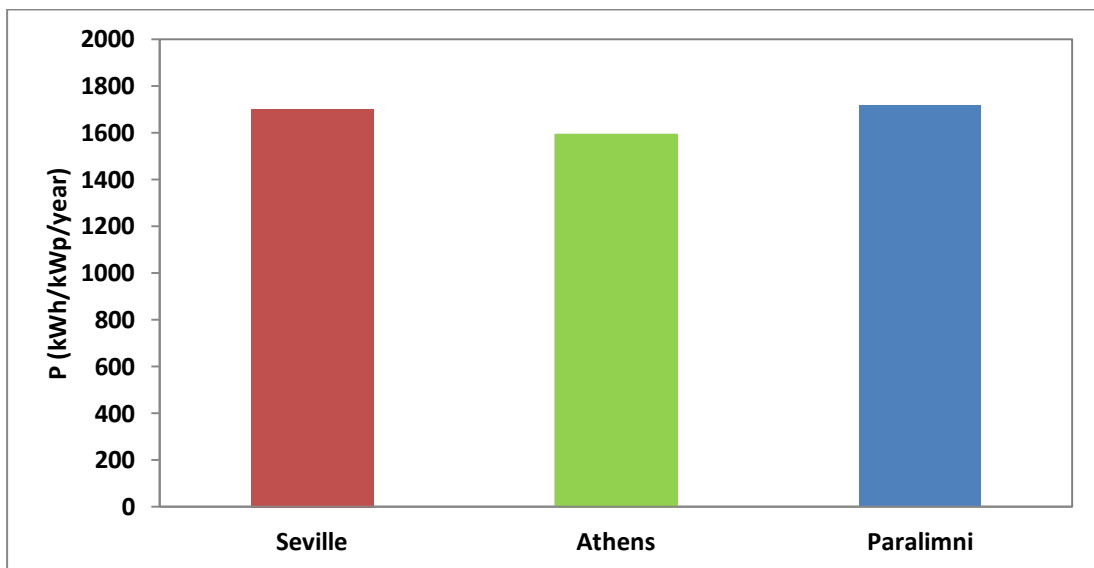
Διάγραμμα 4.60 Παραγόμενη ισχύς για τη μέση μέρα κάθε μήνα



Διάγραμμα 4.61 Βαθμός απόδοσης ΦΒ για τη μέση μέρα κάθε μήνα



Διάγραμμα 4.62 Παραγόμενη ενέργεια ανά μήνα σε kWh ανά τετραγωνικό μέτρο εγκατεστημένου ΦΒ



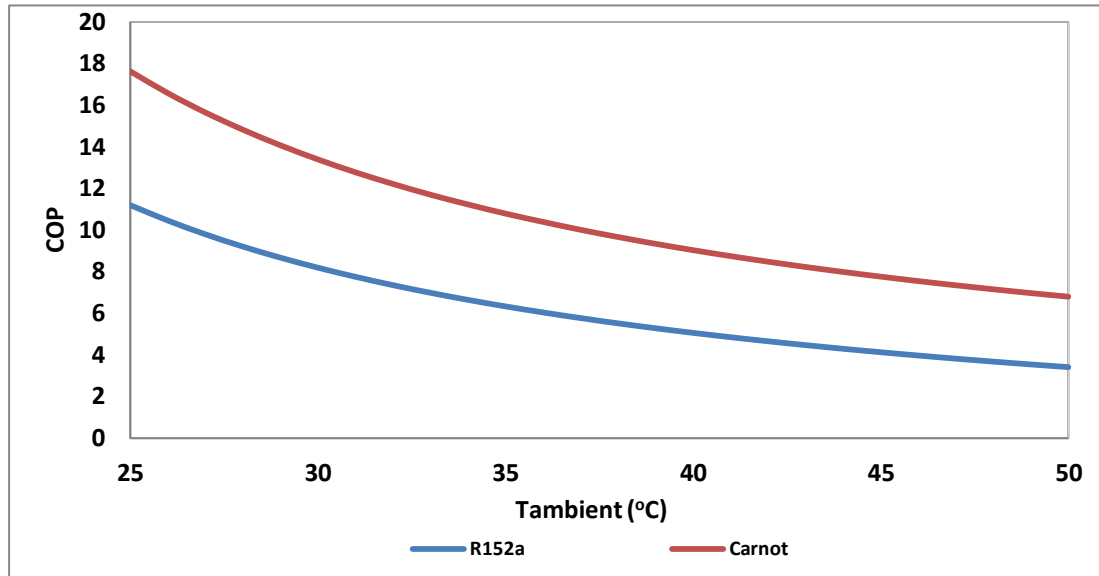
Διάγραμμα 4.63 Παραγόμενη ενέργεια ανά χρόνο σε kWh ανά εγκατεστημένη ισχύ

Στα διαγράμματα 4.62 γίνεται σύγκριση της παραγόμενης ενέργειας ανά τετραγωνικό μέτρο ανά μήνα των τριών περιοχών. Στο διάγραμμα 4.63 συγκρίνεται η παραγόμενη ενέργεια ανά εγκατεστημένο kW φωτοβολταϊκών. Για το Παραλίμνι έχουμε ελαφρώς περισσότερη παραγόμενη ενέργεια τον χρόνο γιατί η κλίση των ΦΒ πάνελ είναι πιο κοντά στο γεωγραφικό πλάτος της περιοχής.

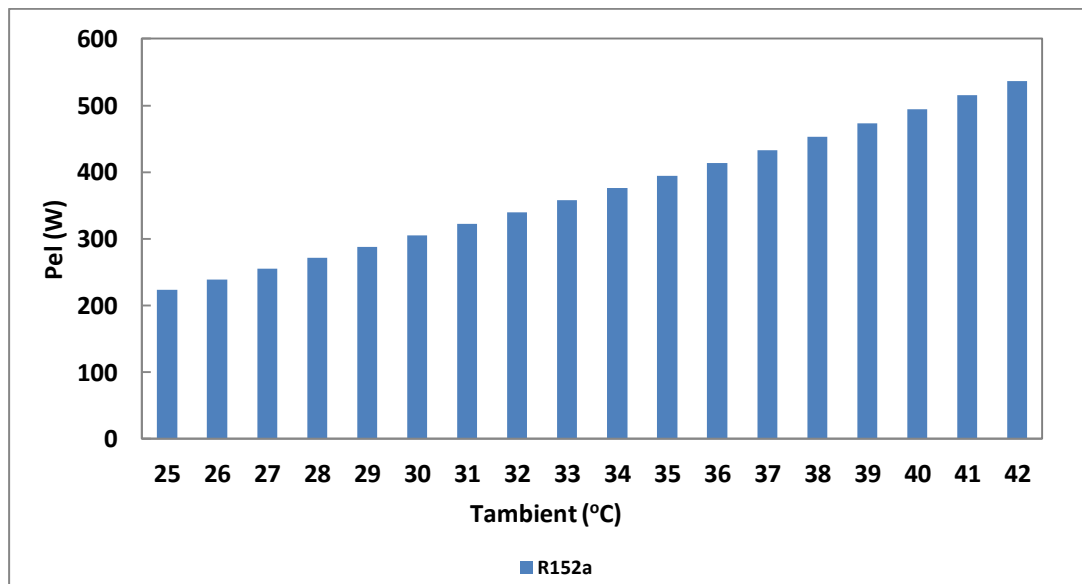
4.4 COP και Ηλεκτρική Ισχύς συστήματος κλιματισμού

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που αφορούν το σύστημα κλιματισμού. Παρουσιάζονται οι υπολογισμοί για συστήματα με τα τρία μέσα που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 3 για διαφορετική ψυκτική ισχύ και θερμοκρασία χώρου. Τα COP και ηλεκτρική ισχύς για διάφορες θερμοκρασίες περιβάλλοντος φαίνονται πιο κάτω.

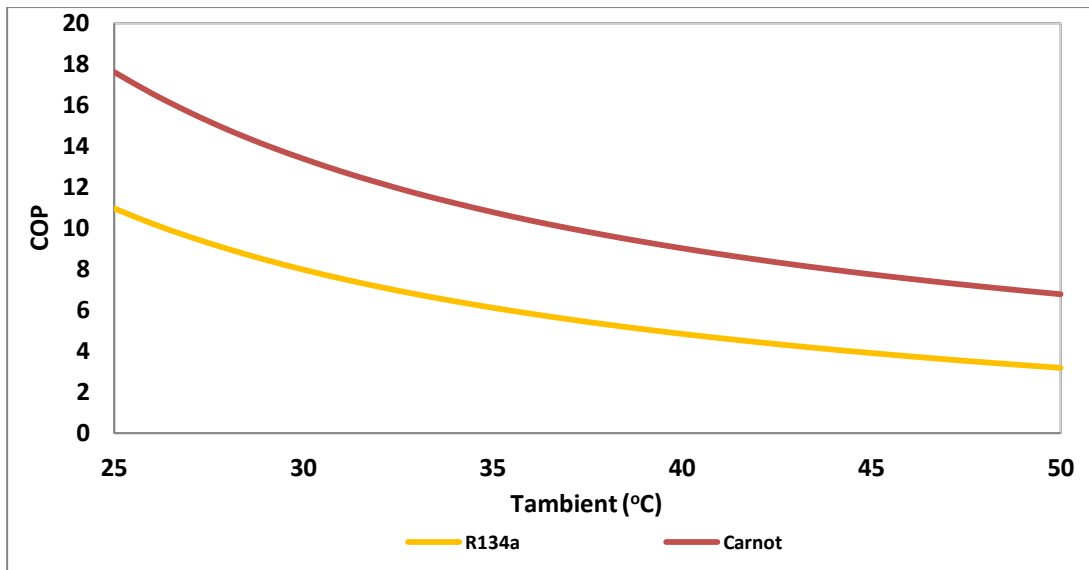
4.4.1 Ψυκτική ισχύς $Q=2,5 \text{ kW}$ και εσωτερική θερμοκρασία χώρου $T_e=25^\circ\text{C}$



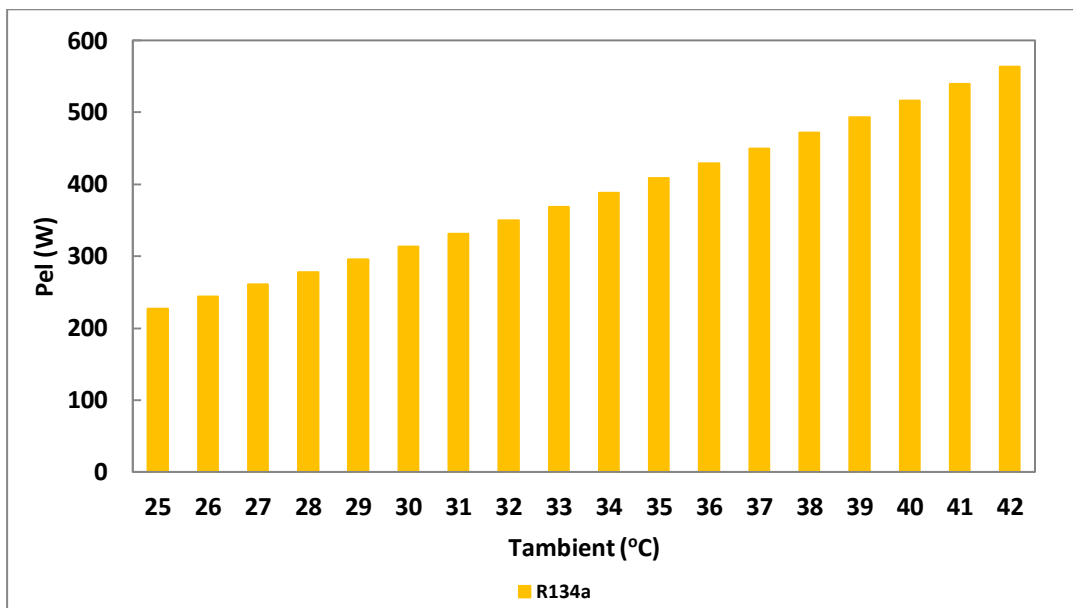
Διάγραμμα 4.64 Εξάρτηση COP ψυκτικού κύκλου με R152a με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος



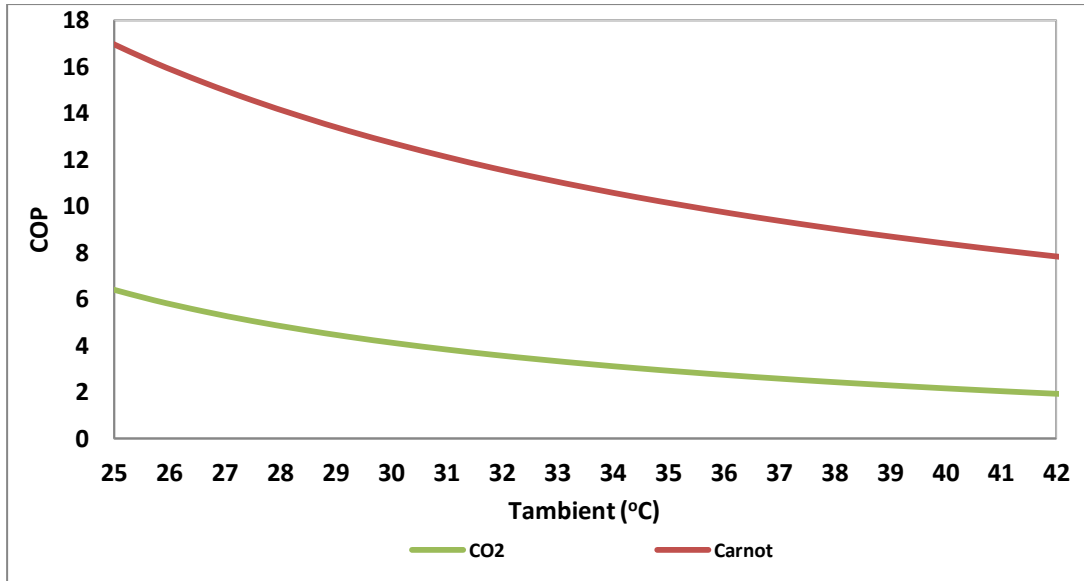
Διάγραμμα 4.65 Ηλεκτρικής ισχύς ψυκτικού κύκλου με R152a ανάλογα με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος



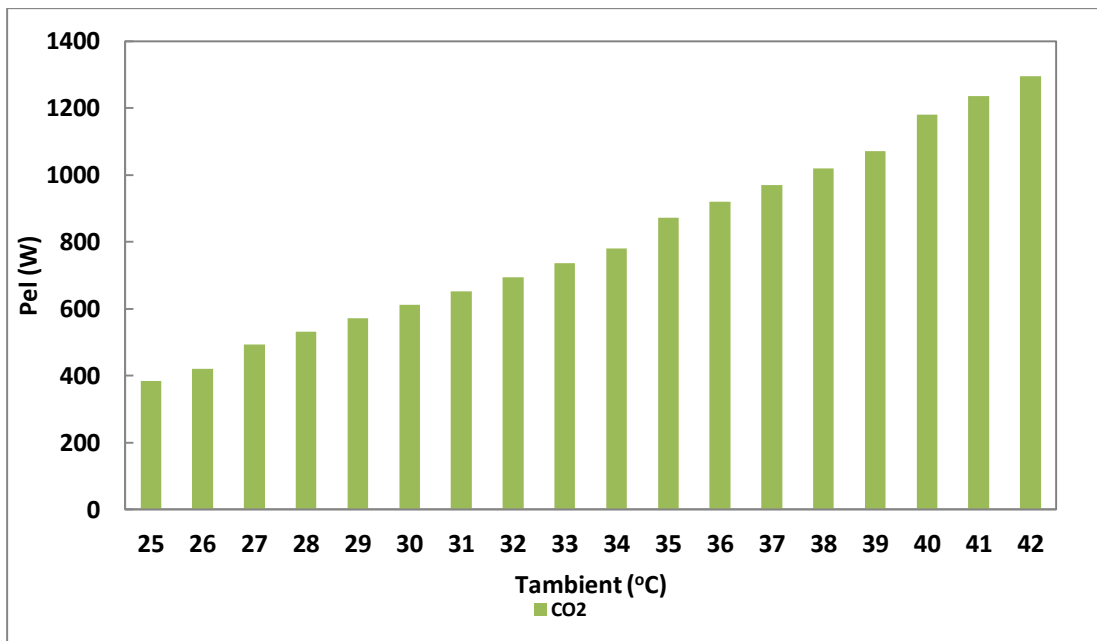
Διάγραμμα 4.66 Εξάρτηση COP ψυκτικού κύκλου με R134a με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος



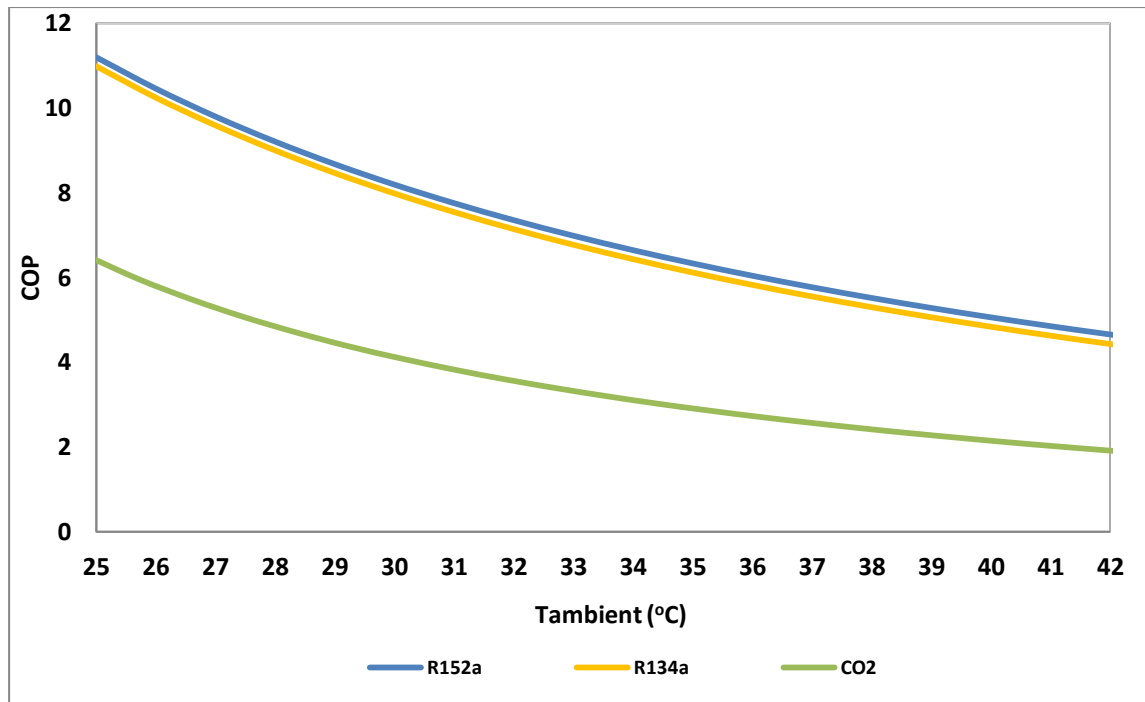
Διάγραμμα 4.67 Ηλεκτρικής ισχύς ψυκτικού κύκλου με R134a ανάλογα με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος



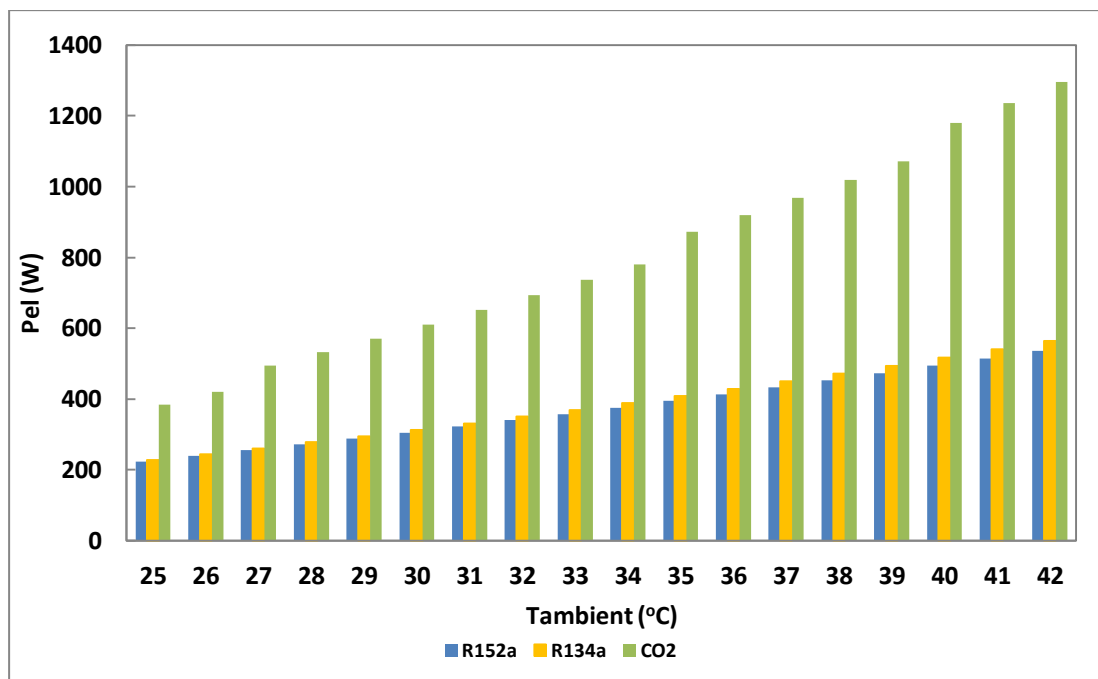
Διάγραμμα 4.68 Εξάρτηση COP ψυκτικού κύκλου με CO₂ με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος



Διάγραμμα 4.69 Ηλεκτρικής ισχύς ψυκτικού κύκλου με CO₂ ανάλογα με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος

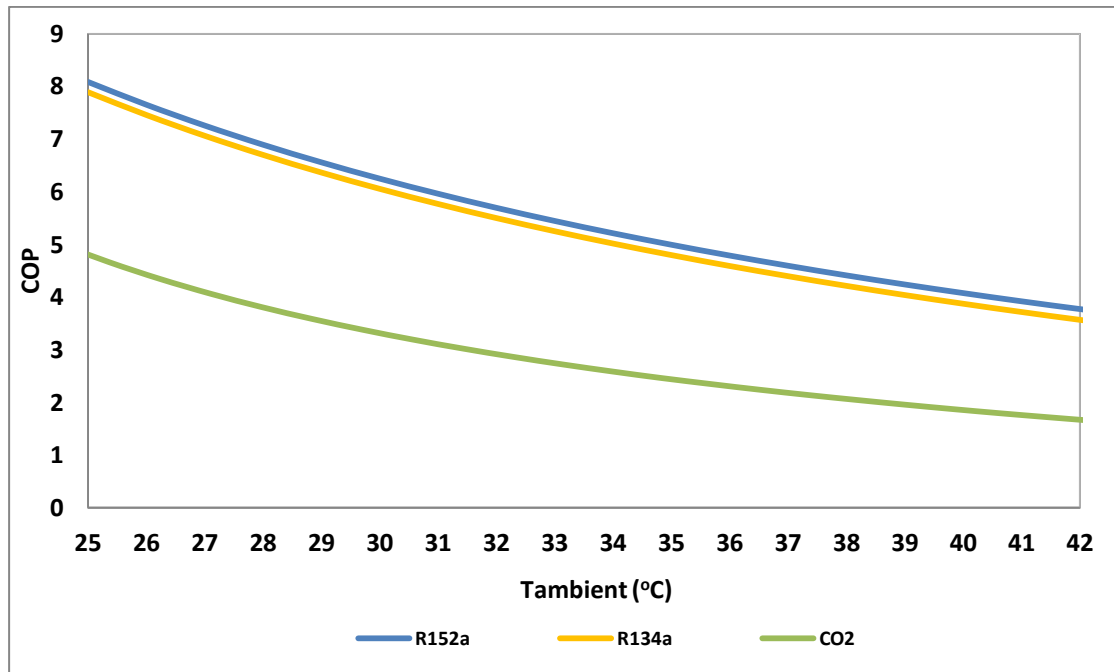


Διάγραμμα 4.70 Σύγκριση COP ψυκτικών κύκλων με τρία ψυκτικά μέσα

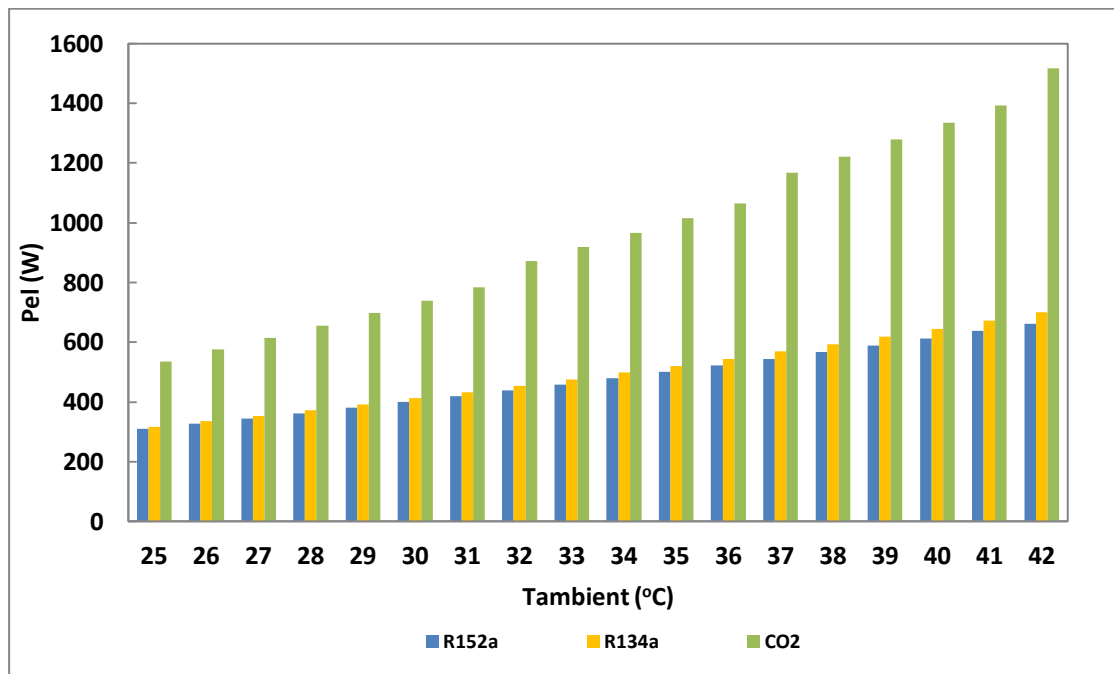


Διάγραμμα 4.71 Σύγκριση ηλεκτρικής ισχύς ψυκτικών κύκλων με τρία ψυκτικά μέσα

4.4.2 Ψυκτική ισχύς $Q=2,5$ kW και εσωτερική θερμοκρασία χώρου $T_e=20^\circ\text{C}$

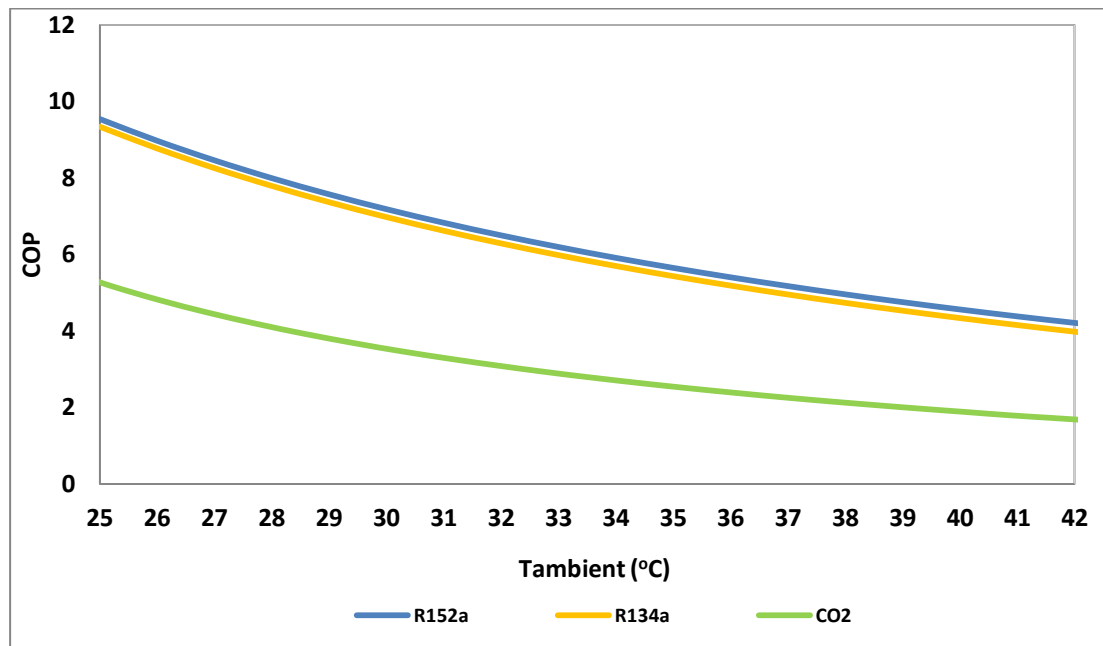


Διάγραμμα 4.72 Σύγκριση COP ψυκτικών κύκλων με τρία ψυκτικά μέσα

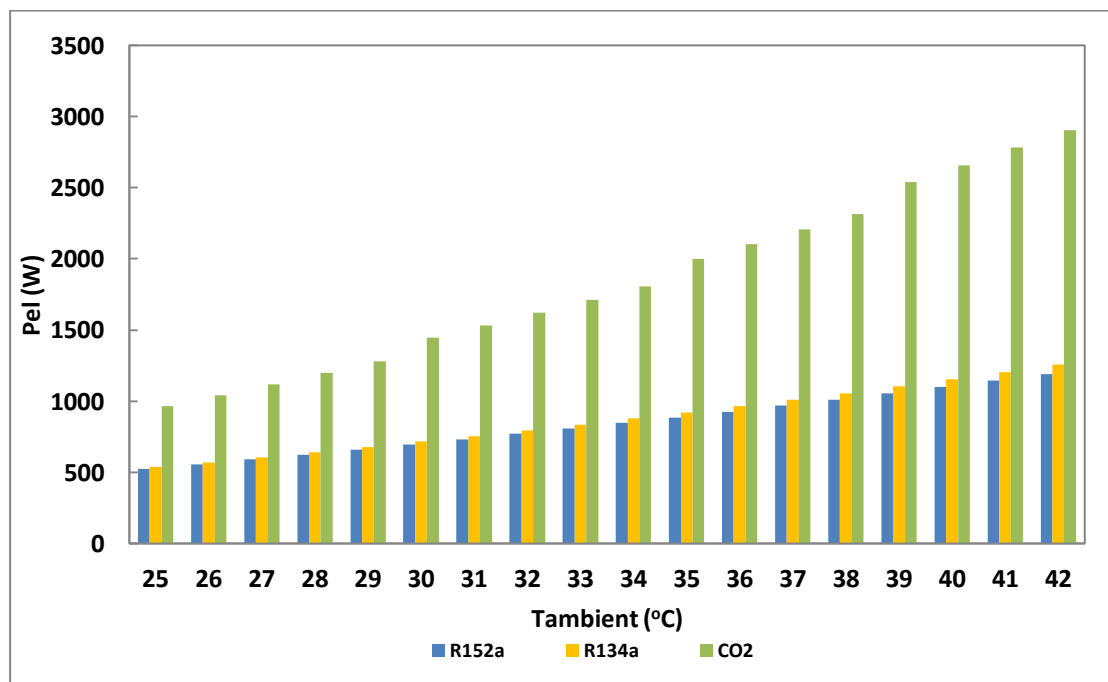


Διάγραμμα 4.73 Σύγκριση ηλεκτρικής ισχύς ψυκτικών κύκλων με τρία ψυκτικά μέσα

4.4.3 Ψυκτική ισχύς $Q=5$ kW και εσωτερική θερμοκρασία χώρου $T_e=25^\circ\text{C}$

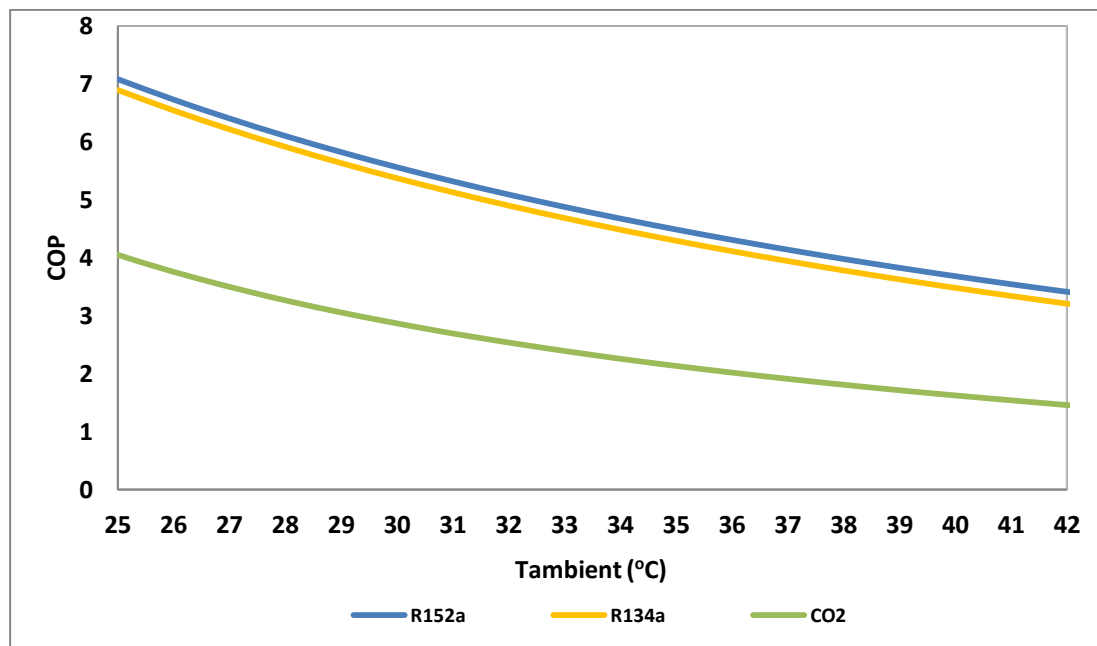


Διάγραμμα 4.74 Σύγκριση COP ψυκτικών κύκλων με τρία ψυκτικά μέσα

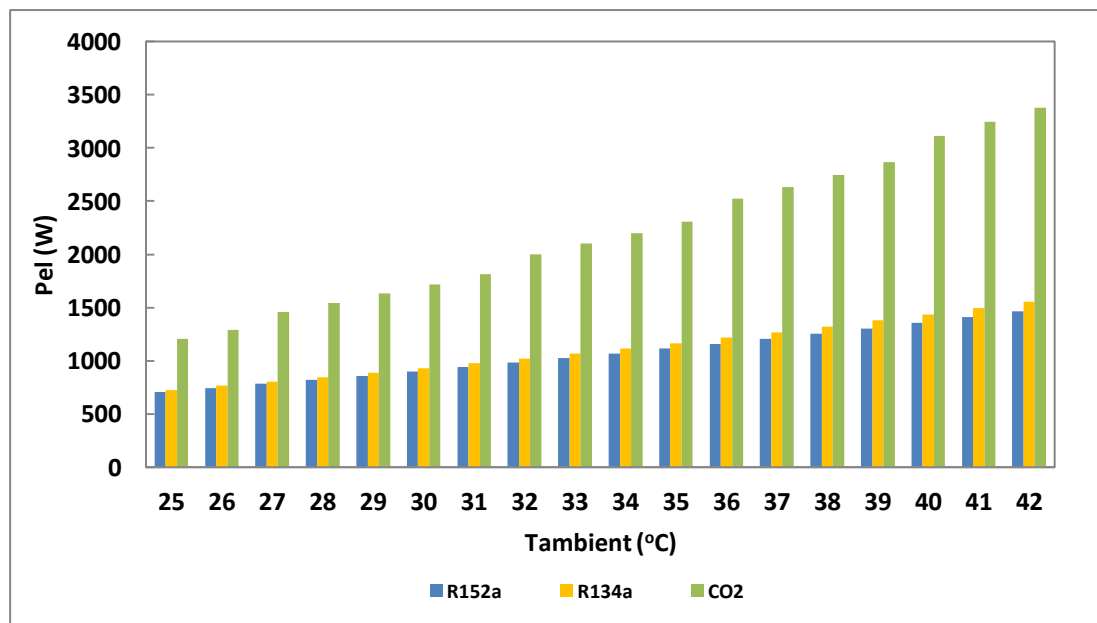


Διάγραμμα 4.75 Σύγκριση ηλεκτρικής ισχύς ψυκτικών κύκλων με τρία ψυκτικά μέσα

4.4.4 Ψυκτική ισχύς $Q=5\text{ kW}$ και εσωτερική θερμοκρασία χώρου $T_e=20^\circ\text{C}$



Διάγραμμα 4.76 Σύγκριση COP ψυκτικών κύκλων με τρία ψυκτικά μέσα

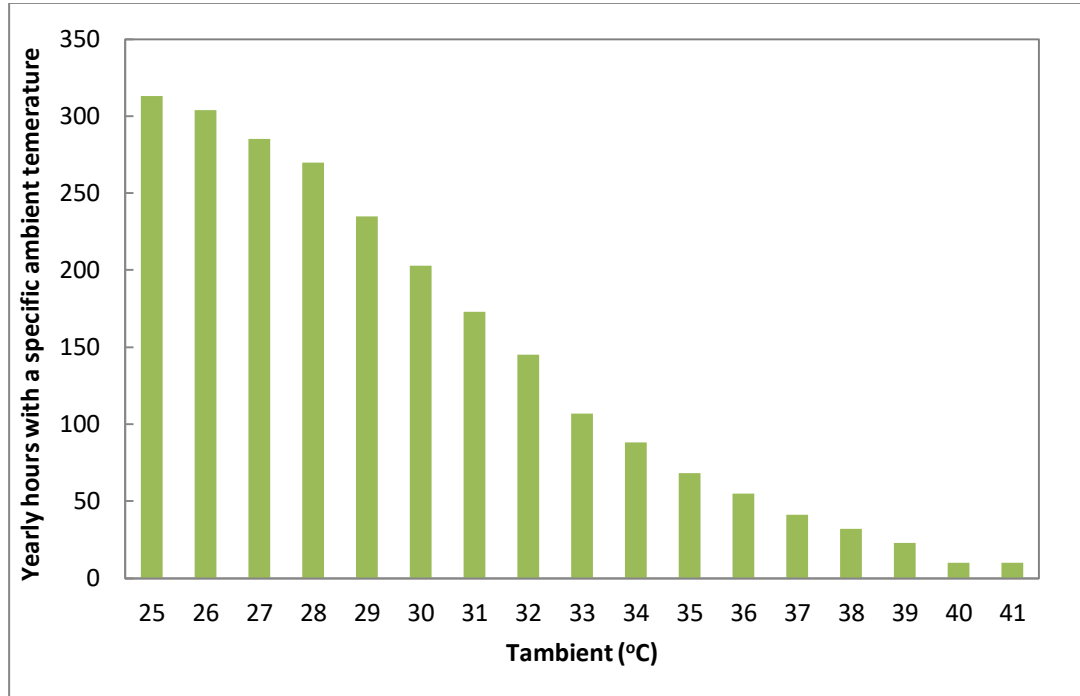


Διάγραμμα 4.77 Σύγκριση ηλεκτρικής ισχύς ψυκτικών κύκλων με τρία ψυκτικά μέσα

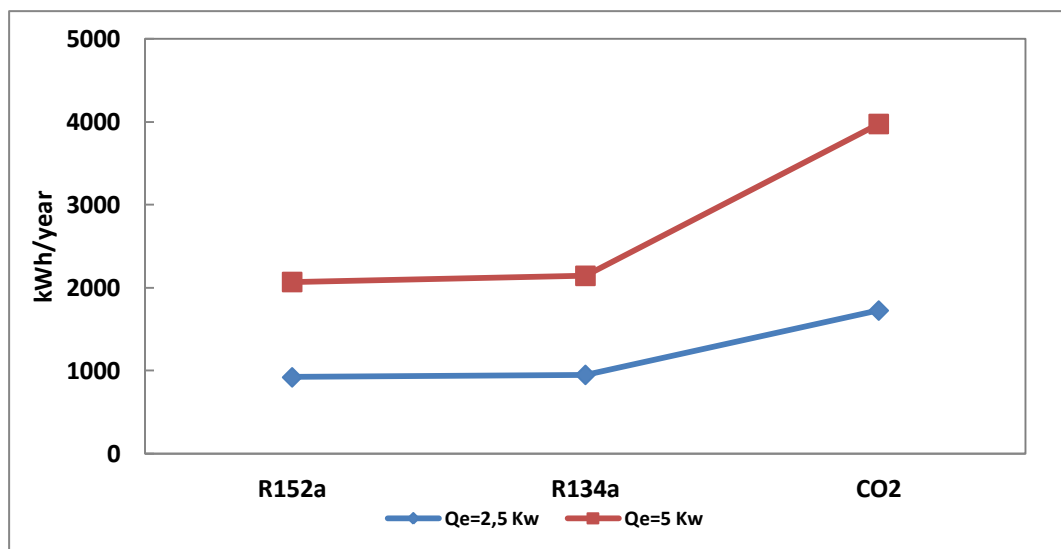
Σε όλες τις περιπτώσεις όπως είναι λογικό, τα ψυκτικά συστήματα με CO_2 έχουν πολύ χαμηλότερο COP και απαιτείται σχεδόν διπλάσια ηλεκτρική ισχύς από R152a και R134a. Για κλιματιστικά συστήματα με R152a έχουμε παρόμοιο COP με R134a και καταναλώνεται σχεδόν ίδια ηλεκτρική ισχύς για κάθε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Αυτό δείχνει και το πόσο υποσχόμενο είναι το R152a για κλιματιστικά στο μέλλον για αντικατάσταση του R134a που έχει ψηλό GWP. Το μοναδικό μειονέκτημα όπως προαναφέρθηκε είναι η αυξημένη αναφλεξιμότητα του.

4.4.4 Απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια τον χρόνο για τις ανάγκες κλιματισμού για τις περιοχές Αθήνας, Παραλιμνίου και Σεβίλλης

Αθήνα:

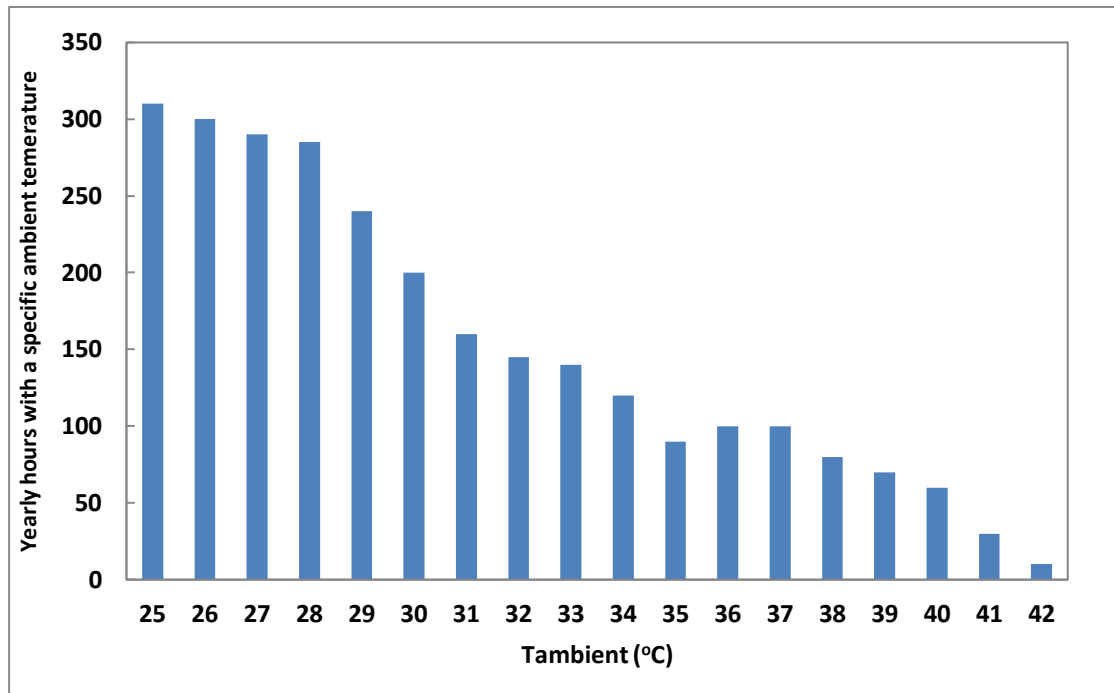


Διάγραμμα 4.78 Αριθμός ωρών με την συγκεκριμένη θερμοκρασία το χρόνο στην Αθήνα

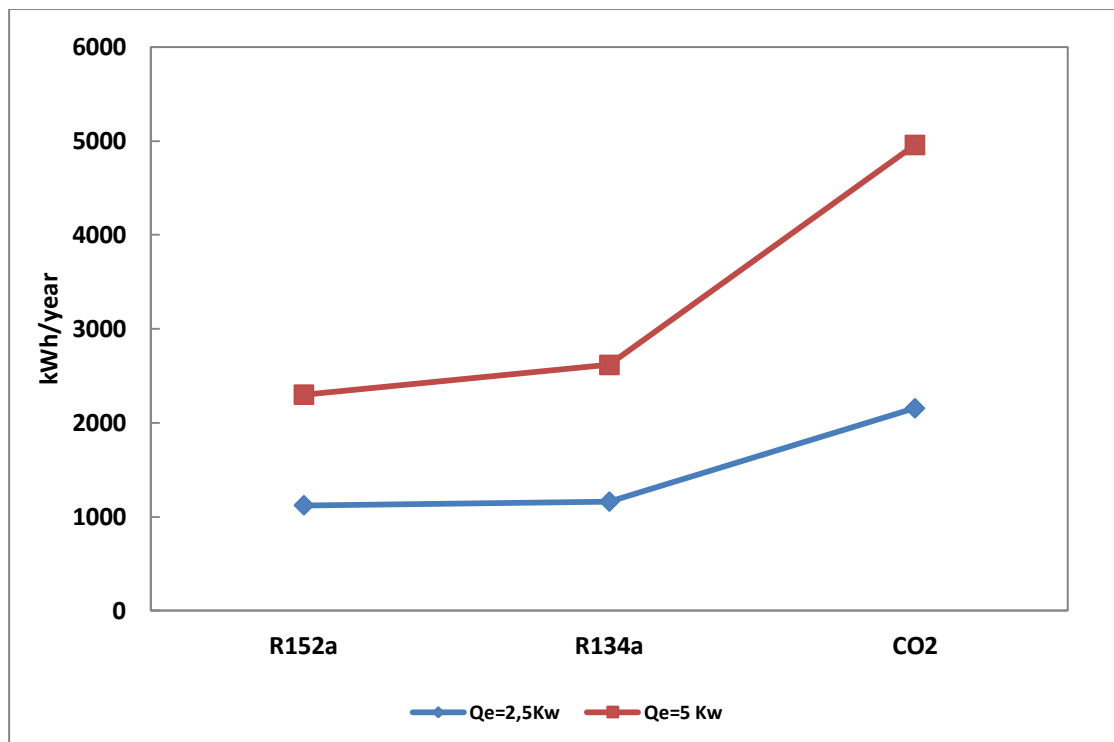


Διάγραμμα 4.79 Ηλεκτρική ενέργεια που απαιτούν ψυκτικοί κύκλοι για ένα χρόνο σε kWh με τα τρία μέσα για εσωτερική θερμοκρασία χώρου 20°C στην Αθήνα

Παραλίμνι:

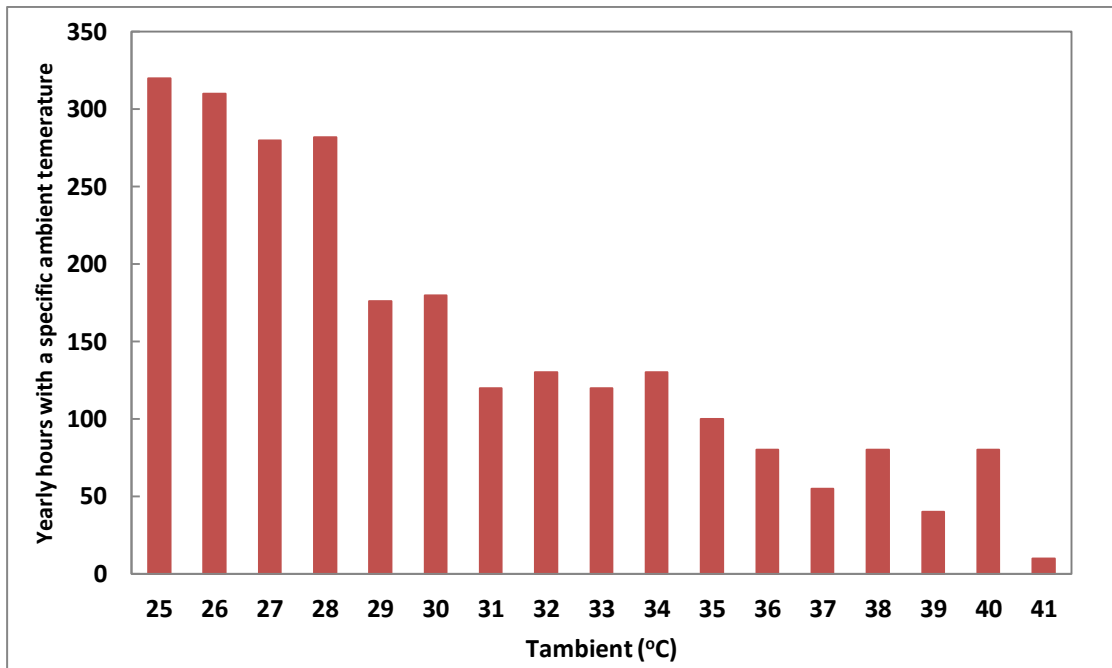


Διάγραμμα 4.80 Αριθμός ωρών με την συγκεκριμένη θερμοκρασία το χρόνο στο Παραλίμνι

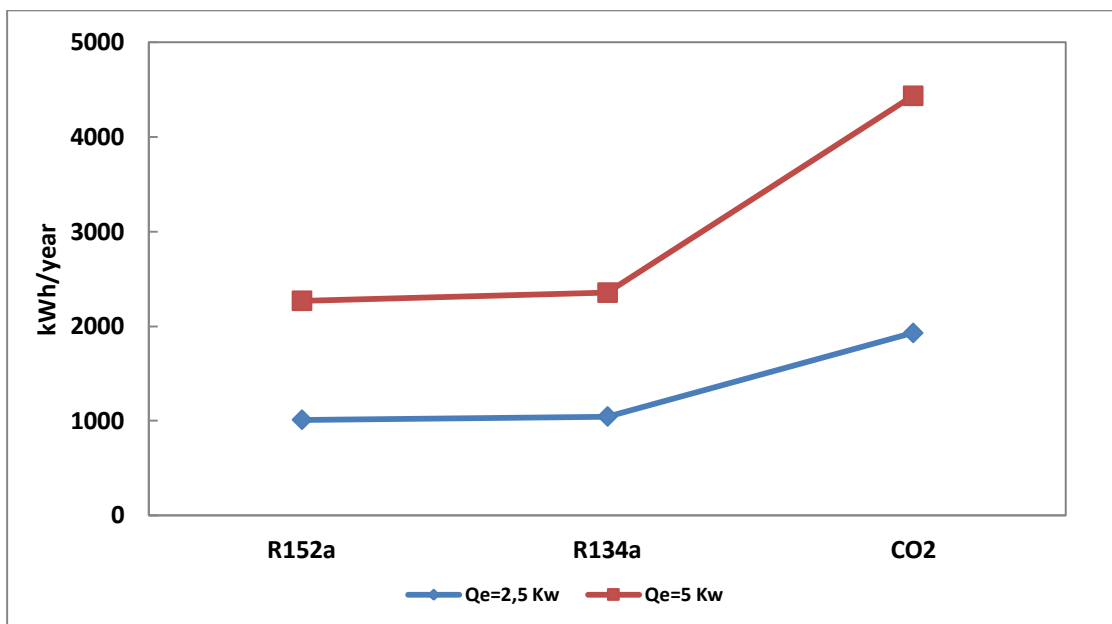


Διάγραμμα 4.81 Ηλεκτρική ενέργεια που απαιτούν ψυκτικοί κύκλοι για ένα χρόνο σε kWh με τα τρία μέσα για εσωτερική θερμοκρασία χώρου 20°C στο Παραλίμνι

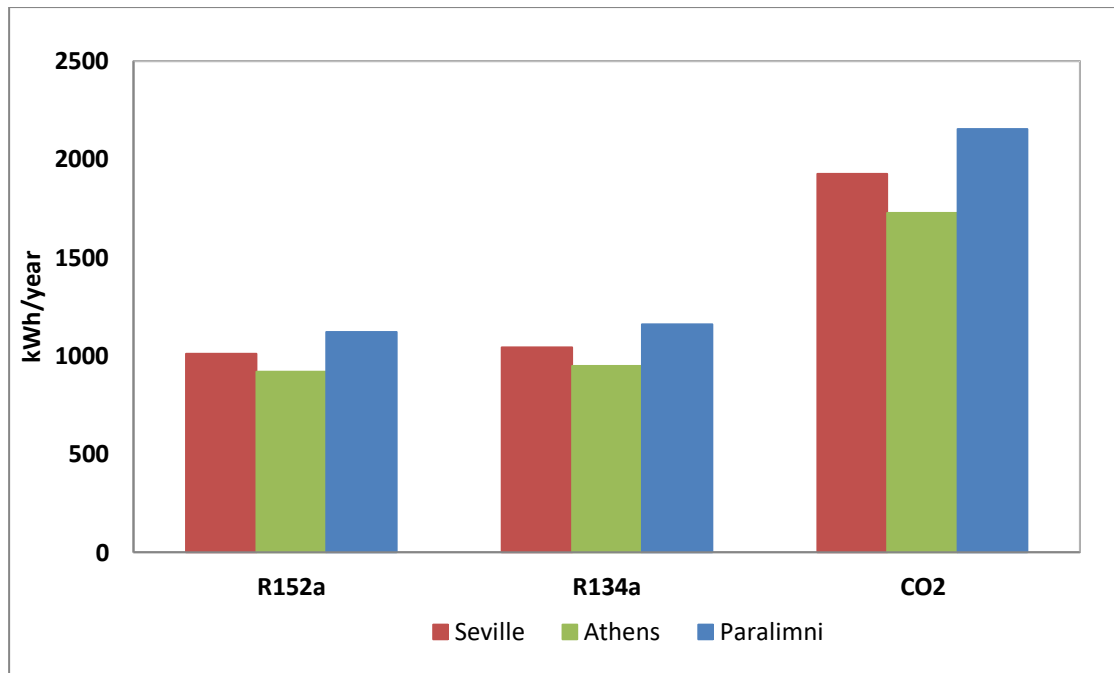
Σεβίλλη:



Διάγραμμα 4.82 Αριθμός ωρών με την συγκεκριμένη θερμοκρασία το χρόνο στη Σεβίλλη



Διάγραμμα 4.83 Ηλεκτρική ενέργεια που απαιτούν ψυκτικοί κύκλοι για ένα χρόνο σε kWh με τα τρία μέσα για εσωτερική θερμοκρασία χώρου 20°C στη Σεβίλλη



Διάγραμμα 4.84 Σύγκριση ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτούν ψυκτικοί κύκλοι για ένα χρόνο σε kWh με τα τρία μέσα για εσωτερική θερμοκρασία χώρου 20°C στις 3 περιοχές

Στα πιο πάνω διαγράμματα φαίνονται για κάθε περιοχή αρχικά οι ώρες με ορισμένη θερμοκρασία περιβάλλοντος έτσι ώστε να υπολογιστεί η ετήσια ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται σε κάθε περιοχή τον χρόνο για να καλυφθούν οι ανάγκες ψύξης. Τέλος στο διάγραμμα 4.84 γίνεται σύγκριση των τριών ψυκτικών μέσων και των τριών περιοχών. Το Παραλίμνι έχει μεγαλύτερες ανάγκες ψύξης ενώ η Αθήνα λίγο μικρότερες.

4.5 Οικονομοτεχνική ανάλυση

4.5.1 Εγκατάσταση συστήματος ΦΒ με συμψηφισμό ενέργειας (Net Metering)

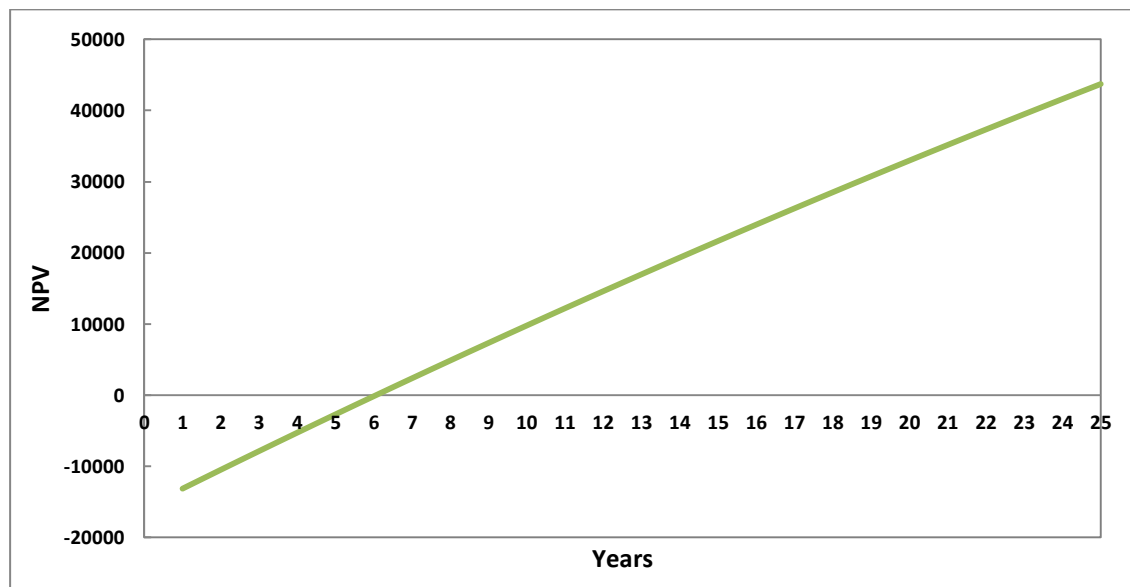
Για τις τρεις περιοχές υπολογίζεται η καθαρή παρούσα αξία για εγκατάσταση ΦΒ ισχύος 10kW για την τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος της κάθε χώρας. Επίσης παρουσιάζεται η περίοδος αποπληρωμής και πως θα άλλαζε για διάφορες τιμές του ηλεκτρικού ρεύματος αν αυξηθεί στο μέλλον.

Αθήνα:

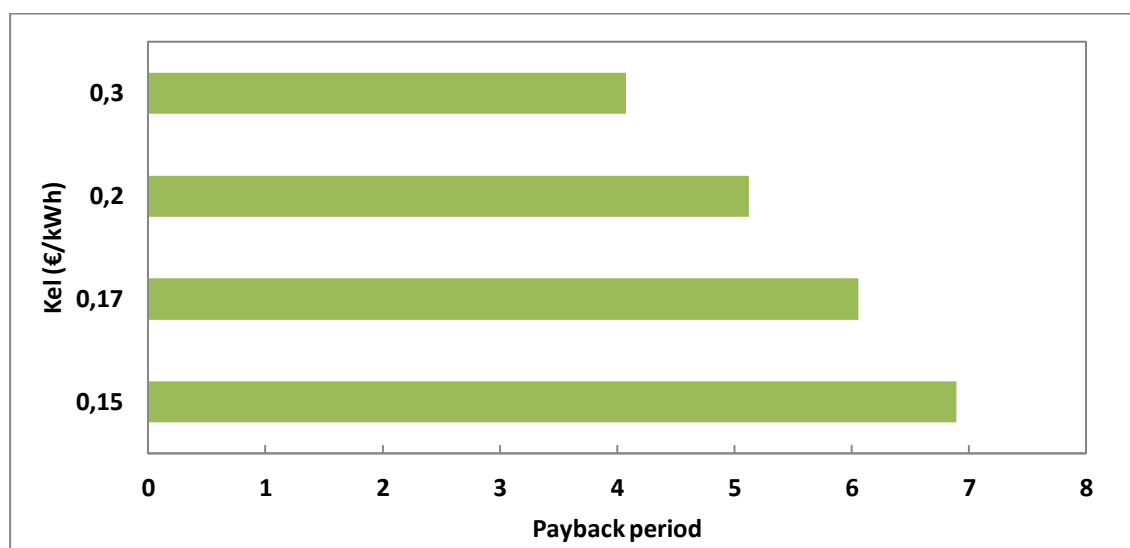
Εγκατεστημένη ισχύς: 10kW

Τιμή ηλεκτρικού ρεύματος 0,17€/kWh

$r=0,1\%$



Διάγραμμα 4.85 Καθαρή Παρούσα Αξία για εγκατάσταση ΦΒ με net metering στην Αθήνα



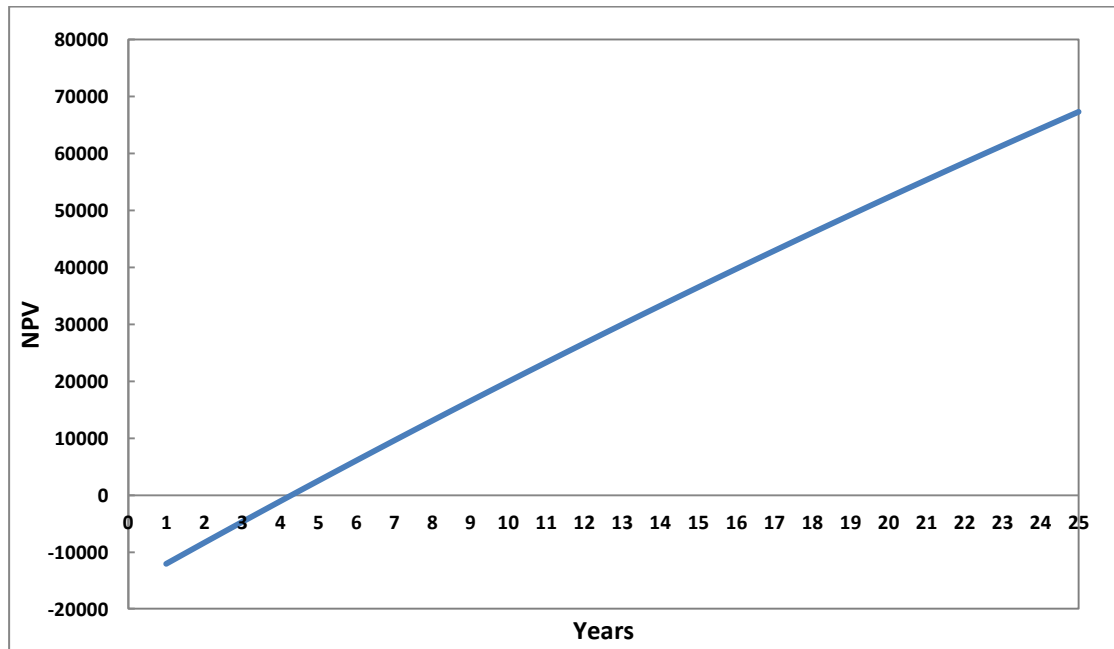
Διάγραμμα 4.86 Περίοδος αποπληρωμής για διάφορες τιμές ηλεκτρικής ενέργειας στην Αθήνα

Παραλίμνι:

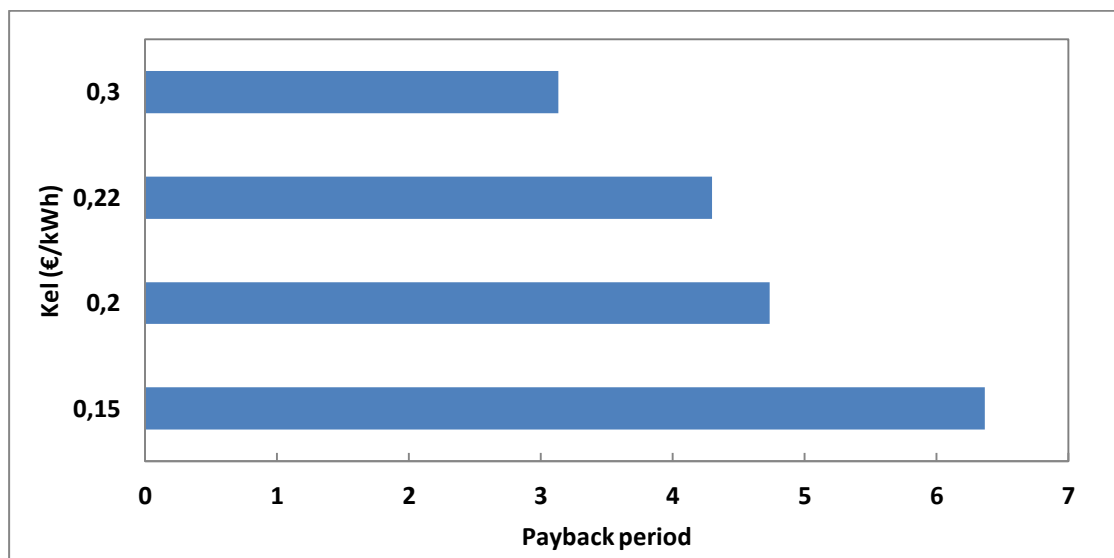
Εγκατεστημένη ισχύς: 10kW

Τιμή ηλεκτρικού ρεύματος 0,22€/kWh

r=0,1%



Διάγραμμα 4.87 Καθαρή Παρούσα Αξία για εγκατάσταση ΦΒ με net metering στο Παραλίμνι



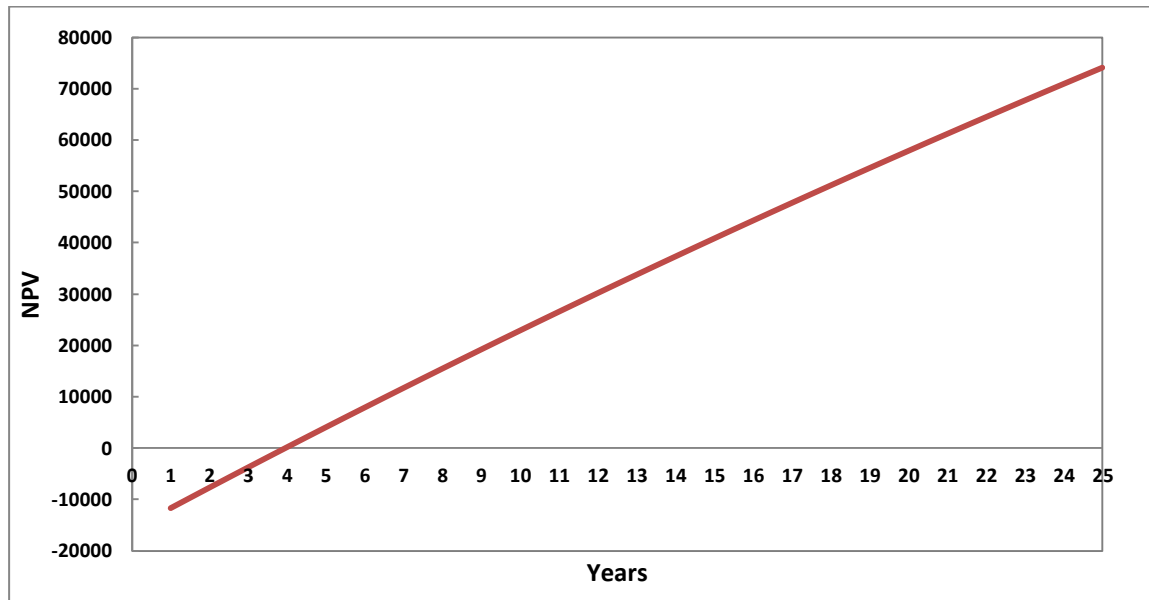
Διάγραμμα 4.88 Περίοδος αποπληρωμής για διάφορες τιμές ηλεκτρικής ενέργειας στο Παραλίμνι

Σεβίλλη:

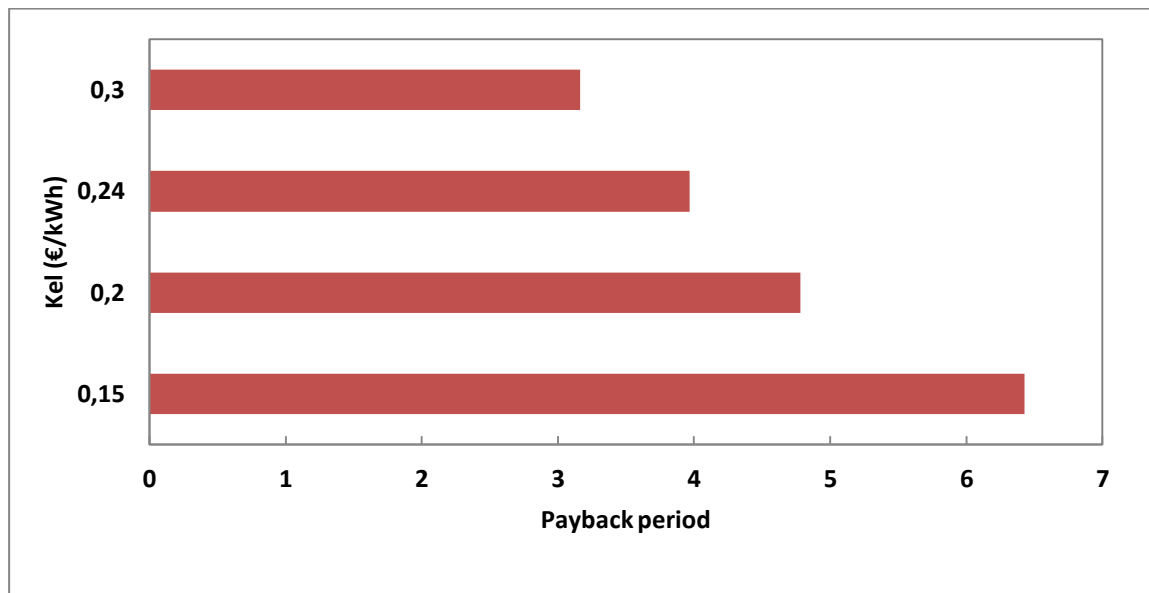
Εγκατεστημένη ισχύς: 10kW

Τιμή ηλεκτρικού ρεύματος 0,24€/kWh

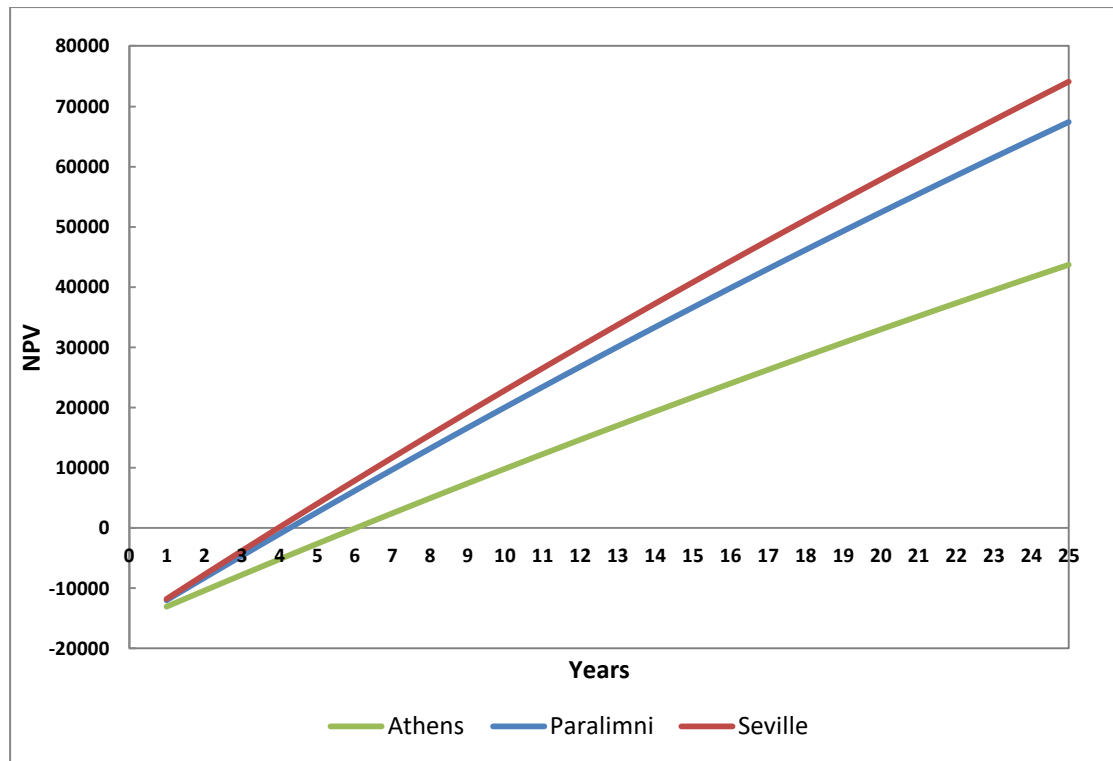
r=0,1%



Διάγραμμα 4.89 Καθαρή Παρούσα Αξία για εγκατάσταση ΦΒ με net metering στη Σεβίλλη



Διάγραμμα 4.90 Περίοδος αποπληρωμής για διάφορες τιμές ηλεκτρικής ενέργειας στη Σεβίλλη



Διάγραμμα 4.91 Σύγκριση Καθαρής Παρούσας Αξίας για εγκατάσταση ΦΒ με net metering στις τρεις περιοχές

Στο διάγραμμα 4.91 παρουσιάζεται για τις τρεις περιοχές η περίοδος αποπληρωμής της εγκατάστασης ΦΒ συστήματος 10kW με τη μέθοδο συμψηφισμού ενέργειας για τις τρεις περιοχές (όταν η καθαρή παρούσα αξία γίνεται 0). Για την περιοχή της Αθήνας, η περίοδος αποπληρωμής είναι μεγαλύτερη και αυτό δεν οφείλεται στην ελαφρώς λιγότερη παραγόμενη ενέργεια ανά εγκατεστημένη ισχύ συστήματος αλλά στο γεγονός ότι η τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος στην Ελλάδα είναι χαμηλότερη σε σύγκριση με Κύπρο και Ισπανία.

4.5.2 Ταυτόχρονη εγκατάσταση συστήματος κλιματισμού με R152a και ΦΒ συστημάτων με συμψηφισμό ενέργειας για την περιοχή της Αθήνας

Παράδειγμα εγκατάστασης συστήματος ΦΒ και κλιματισμού:

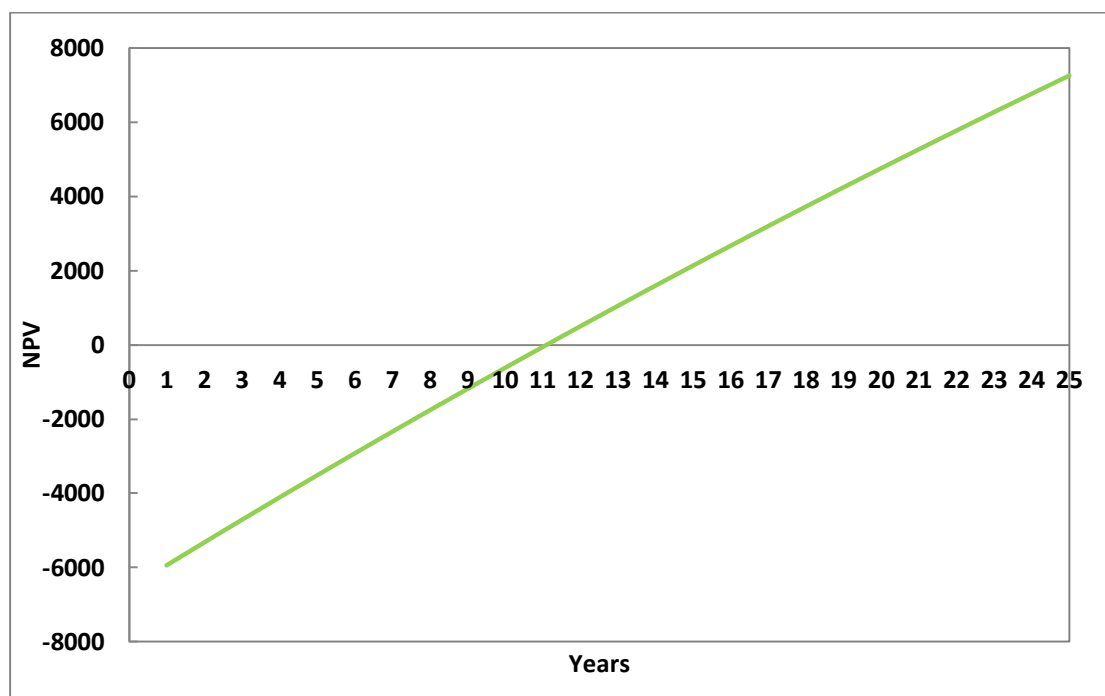
Ανάγκη εγκατάστασης τεσσάρων (4) κλιματιστικών με ψυκτικό μέσο R152a σε ένα κτήριο στην Αθήνα με ισχύ 2,5kW το καθένα. Το κόστος τέτοιων συστημάτων κλιματισμού είναι περίπου 300€ ανά εγκατεστημένο kW άρα συνολικά 3000€. Από το διάγραμμα 4.79 βλέπουμε ότι απαιτείται ηλεκτρική ενέργεια 920kWh τον χρόνο για κάθε ένα ψυκτικό των 2,5kW με R152a. Άρα για τα 4 κλιματιστικά απαιτούνται 3680kWh το χρόνο. Από τον πίνακα 4.2 βλέπουμε ότι για κάθε kW εγκατεστημένης ισχύς ΦΒ παράγονται 1590,349 kWh. Άρα για 3680kWh απαιτείται εγκατάσταση ΦΒ συστήματος με ισχύ 2,3kW.

Εγκατεστημένη ισχύς ΦΒ συστήματος: 2,3kW

Εγκατεστημένη ισχύς κλιματιστικών: 10kW

Τιμή ηλεκτρικού ρεύματος 0,17€/kWh

$r=0,1\%$



Διάγραμμα 4.92 Καθαρή Παρούσα Αξία για ταυτόχρονη εγκατάσταση συστήματος κλιματισμού και συστήματος ΦΒ με net metering στην Αθήνα

Για ένα τέτοιο σύστημα έχουμε περίοδο αποπληρωμής 11,1 έτη. Το πιο πάνω παράδειγμα γίνεται για να δείξει ότι με τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας και των μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν είναι εφικτός ένας αρχικός υπολογισμός της παραγόμενης ενέργειας από ΦΒ και της κατανάλωσης ηλεκτρικής ισχύς από κλιματιστικά για διάφορες περιοχές. Μπορεί να γίνει μια σύντομη οικονομοτεχνική ανάλυση για διάφορα συστήματα πριν την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών και κλιματιστικών για διάφορες ισχύς.

5. Ανακεφαλαίωση-Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία δημιουργήθηκε ένα μοντέλο στο EES για την πρόβλεψη των χαρακτηριστικών καμπύλων ΦΒ συστημάτων όταν είναι γνωστά τα γεωγραφικά και κλιματικά δεδομένα μιας περιοχής μαζί με τα τεχνικά χαρακτηριστικά που δίνει ο κατασκευαστής των φωτοβολταϊκών. Επίσης γίνεται χρήση ενός συστήματος ψυκτικού κύκλου με συμπίεση ατμού για τον υπολογισμό του συντελεστή συμπεριφοράς COP και της ηλεκτρικής ισχύς που απαιτείται για κάποιες περιοχές για διάφορα ψυκτικά μέσα. Τέλος γίνεται οικονομοτεχνική ανάλυση για εγκατάσταση συστήματος ΦΒ με Net Metering ή για ταυτόχρονη εγκατάσταση ΦΒ και κλιματιστικών. Για το σκοπό αυτό εξετάστηκαν οι περιοχές της Αθήνας, Παραλιμνίου και Σεβίλλης για ένα φωτοβολταϊκό της αγοράς για ψυκτικά μέσα R152a, R134a και CO₂.

Αρχικά το μοντέλο ΦΒ χρησιμοποιήθηκε για σύγκριση των χαρακτηριστικών καμπύλων από πειραματικά δεδομένα αλλά και καμπύλων που δίνονται από κατασκευαστές για συνθήκες αναφοράς. Η επιτυχής σύγκριση με υπάρχων καμπύλες επιτρέπει την χρήση του μοντέλου για εύρεση διαφόρων καμπύλων για διαφορετικές συνθήκες για τις τρεις περιοχές. Τα κυριότερα αποτελέσματα συνοψίζονται εδώ.

- Η μέγιστη ισχύς και παραγόμενη ενέργεια και για τις τρεις περιοχές είναι τους μήνες Ιούνιο και Ιούλιο με ελαφρώς χαμηλότερη τον Αύγουστο. Επίσης ο μέγιστος βαθμός απόδοσης παρατηρείται επίσης στους ίδιους μήνες.
- Καθώς μειώνεται η θερμοκρασία του ΦΒ στοιχείου αυξάνεται η παραγόμενη ισχύς για τις ίδιες συνθήκες. Αυτό επιβεβαιώνει το ότι σε ΦΒ στοιχεία στα οποία παρέχεται ψύξη για παράδειγμα με αγωγούς νερού στο πίσω μέρος του πάνελ, αυξάνεται ο βαθμός απόδοσης.
- Για τις περιοχές που εξετάστηκαν τα αποτελέσματα για την παραγόμενη ενέργεια σε kWh ανά kW εγκατεστημένης ισχύς συμφωνούν με τα δεδομένα που δίνονται από Global Solar Atlas [38]. Συγκεκριμένα έχουμε:

i.	Αθήνα:	1590,349 kWh/kWp
ii.	Παραλίμνι:	1716,744 kWh/kWp
iii.	Σεβίλλη:	1701,271 kWh/kWp
- Σχετικά με τον ψυκτικό κύκλο με συμπίεση ατμού, το ψυκτικό μέσο R152a έχει ίδιο συντελεστή συμπεριφοράς με το R134a (μερικές φορές λίγο μεγαλύτερο) γεγονός που δείχνει ότι το R152a είναι υποσχόμενο για το μέλλον αφού έχει αισθητά χαμηλότερο GWP από το R134a. Αντίθετα το CO₂ παρόλο που έχει GWP=1 έχει χαμηλό COP και καταναλώνει σχεδόν διπλάσια ηλεκτρική ενέργεια από τα άλλα δύο μέσα για τις ίδιες συνθήκες περιβάλλοντος. Αυτό βέβαια για σύστημα μονού σταδίου με ένα συμπιεστή.
- Σύμφωνα με τους υπολογισμούς για την απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύ για τις ανάγκες ψύξης για ένα χρόνο, το Παραλίμνι απαιτεί περισσότερη ενέργεια λόγω των πιο ψηλών θερμοκρασιών. Ακολουθεί η Σεβίλλη και τέλος η Αθήνα.

- Για εγκατάσταση ΦΒ συστήματος με συμψηφισμό ενέργειας (Net Metering) η περίοδος αποπληρωμής στην Αθήνα είναι μεγαλύτερη εξαιτίας της χαμηλότερης τιμής του ηλεκτρικού ρεύματος έναντι Κύπρου και Ισπανίας.
 - i. Αθήνα: 6,06 έτη
 - ii. Παραλίμνι: 4,3 έτη
 - iii. Σεβίλλη: 3,97 έτη
- Τα μοντέλα της παρούσας διπλωματικής, μπορούν να χρησιμοποιηθούν πριν την εγκατάσταση ΦΒ συστημάτων ή/και συστήματος κλιματισμού για τον υπολογισμό της παραγόμενης ενέργειας από τα ΦΒ και της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας.
- Τα αποτελέσματα της εργασίας παρουσιάζουν τις βασικές πληροφορίες που παρέχουν και διάφορα προγράμματα σχετικά με την παραγόμενη ενέργεια συστήματος ΦΒ. Το πλεονέκτημα αυτής της εργασίας έναντι αυτών είναι ότι παρέχει επιπλέον πληροφορίες που παρουσιάζονται στο κεφάλαιο των αποτελεσμάτων όπως τις χαρακτηριστικές καμπύλες έντασης-τάσης και ισχύς-τάσης για κάθε μήνα όταν είναι γνωστή η περιοχή που μας ενδιαφέρει αλλά και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του ΦΒ.

Χρησιμοποιώντας την θεωρία, τα μοντέλα και αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής μπορεί να δημιουργηθεί στα πλαίσια περαιτέρω μελέτης, ένα πρόγραμμα το οποίο να δέχεται σαν είσοδο το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής, την κλίση του συλλέκτη και τον τύπο των φωτοβολταϊκών και να παρουσιάζει αμέσως τις χαρακτηριστικές και στοιχεία αναφορικά με την παραγόμενη ενέργεια ανά μήνα και τον χρόνο. Επίσης μπορεί να γίνει περαιτέρω μελέτη της παραγόμενης ενέργειας κατά τη διάρκεια της μέρας. Στην εργασία αυτή έγινε επίδειξη για το πως αλλάζει η ισχύς και ο βαθμός απόδοσης κατά τη διάρκεια της μέρας για την μέση μέρα Απριλίου για το ΦΒ στοιχείο με το οποίο έγινε επαλήθευση. Μπορούν να βρεθούν τα μεγέθη αυτά κατά τη διάρκεια της μέρας για διαφορετικές συνθήκες και για άλλους μήνες. Ενδιαφέρον επίσης παρουσιάζει η μελέτη του συγκεκριμένου μοντέλου σε σύστημα ηλιακά υποβοηθούμενης αντλίας θερμότητας με φωτοβολταϊκά ή για ένα σύστημα αφαλάτωσης και καθαρισμού νερού σε απομονωμένη περιοχή που δεν είναι συνδεδεμένη με το δίκτυο. Τέλος για τον ψυκτικό κύκλο με CO₂ σαν ψυκτικό μέσο έγιναν υπολογισμοί μόνο για σύστημα ενός σταδίου. Μπορεί να γίνει επίσης μελέτη για διάφορα συστήματα με CO₂ σαν ψυκτικό μέσο [36]. Αυτό γιατί εκτός βέβαια από την οικονομοτεχνική μελέτη υπάρχει και η περιβαλλοντική.

6. Βιβλιογραφία

- [1] Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας (IEA), World Energy Balances, 2019
- [2] <https://www.worldenergydata.org/>
- [3] https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_countries_by_renewable_electricity_production
- [4] <https://www.sepco-solarlighting.com/blog/bid/115086/solar-power-advantages-and-disadvantages>
- [5] <https://www.shutterstock.com/image-vector/elliptical-earths-orbit-1110555845>
- [6] <http://www.metrotrainsimulation.com/solarload.html>
- [7] Κίμων Α. Αντωνόπουλος, Θερμικά ηλιακά συστήματα, Μέρος πρώτο, Αθήνα 2015
- [8] <http://www.thermalsolarwaterheater.com/>
- [9] Μπέλλος Ε. Αξιοποίηση και βελτιστοποίηση της χρήσης ηλιακών συστημάτων στα κτίρια, Διδακτωρική διατριβή, Αθήνα 2016
- [10] Σταύρος Παπαθανασίου, Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Αθήνα 2014
- [11] <http://www.bine.info/en/topics/>
- [12] Faculty of Mechanical Engineering CTU in Prague
- [13] Andrew Martin, Monica Arnaudo, Renewable Energy Technology, KTH Royal Institute of Technology, Sweden 2018
- [14] http://www.fsec.ucf.edu/en/consumer/solar_electricity/
- [15] Kenneth Zweibel , Hersch P, Basic Photovoltaic Principles and Methods, USA 1982
- [16] <https://sites.google.com/site/joshselectrical/home/photovoltaic>
- [17] HEBA Training Cyprus, University of Cyprus 2019
- [18] <https://www.pveducation.org/>
- [19] Tao Ma, H. Yang, L. Lu, J. Peng, Pumped storage-based standalone photovoltaic power generation system: Modeling and techno-economic optimization, Applied Energy 2015
- [20] M-H. Wang, M-J. Chen, Two-Stage Fault Diagnosis Method Based on the Extension Theory for PV Power Systems, International Journal of Photoenergy 2012
- [21] <https://energyinformative.org/>
- [22] <https://www.outbackmarine.com.au/>
- [23] <https://www.indiamart.com/proddetail/poly-crystalline-solar-panel-16118167433.html>
- [24] <http://pamasenergy.weebly.com/>
- [25] <https://www.alternative-energy-tutorials.com/>
- [26] <https://www.sunwize.com/>
- [27] <https://www.rodosair.gr/fotovoltaika-ape/net-metering-2/>
- [28] C. P. Crall, Understanding Thermal System, 2015
- [29] Σ. Χατζηδάκης, Σημειώσεις Ψύξης, Α' και Β' Μέρος, Αθήνα 2003

- [30] B.O. Bolaji, Z. Huan Thermodynamic Analysis of Performance of Vapour Compression Refrigeration System Working with R290 and R600a Mixtures, 2013
- [31] <https://www.forbes.com/sites/sherikoones/2020/01/26/creating-energy-independence-with-solar-panels--storage-battery-systems-in-the-home/#7ecb402f5ead>
- [32] W. De Soto, S.A. Klein, W.A. Beckman, Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance, Solar Energy, 2006
- [33] J.A. Duffie, William A. Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes, Fourth Edition, USA 2013
- [34] D.L. King, W.E. Boyson, J.A. Kratochvill, Photovoltaic Array performance Model, Sandia National Laboratories, USA 2004
- [35] E. Bellos, C. Tzivanidis, Investigation of the Environmentally-Friendly Refrigerant R152a for Air Conditioning Purposes, applied sciences, Athens 2018
- [36] E. Bellos, C. Tzivanidis, A comparative study of CO₂ refrigeration systems, Energy Conversion and Management: X, Athens 2018
- [37] E. Bellos, C. Tzivanidis, Yearly Performance of a hybrid PV operating with nanofluid, Athens 2017
- [38] <https://globalsolaratlas.info/>
- [39] <https://na.panasonic.com/>
- [40] C.P. Jacovides, N. Kaltsunides, L. Hachioannou, L. Stephanou, An assessment of the solar radiation climate of the Cyprus environment, Athens 1993
- [41] A.A. Vargas, A.G. Exposito, F.G. Garcia, Self-sufficient renewable energy supply in urban areas: Application to the city of Seville, Sustainable Cities and Society, Seville 2019